# お詫びと訂正

2024年11月28日に発行いたしました本誌「Vol.73, No.2 特集:自動車用材料・技術」におきまして、記載に誤りがございましたので以下のように訂正いたします。

ご愛読いただいている皆さま、ならびに関係各位にご迷惑をお掛けしましたことをお詫び申し上げます。





-----



vol. 73, No. 2 / Nov. 2024 通巻251号

# 特集:自動車用材料・技術 ——

ページ	:	
1	(巻頭言)	自動車用材料・技術特集号の発刊にあたって 三宅義浩
2	(解説)	当社グループの自動車用製品、設備、技術 中島悟博・塚田拓哉・千原一則
8	(技術資料)	マルチマテリアルBEV車体コンセプトモデルの設計
		濱田和幸・渡辺憲一・吉田正敏・竹中 峻・大川陽子・内藤純也
15	(解説)	xEV車両の解体ベンチマークデータからのMBDモデル構築とエンジニアリング活用
		清水洋志・石原健一・板谷元宏・中山彰
21	(技術資料)	洛錘動力を利用したポール側面衝突試験設備の開発 船田健介・橋村 徹・渡辺憲一
27	(論文)	衝突解析における型性異方性と 並性破壊 挙動の影響 中島伸吾・幸重良平・井上功之
32	(解説)	車両電動化に資する分析・評価技術 坪田隆之・阿知波 敬・西村 学・高梨泰幸・常石英雅・小川 稜
38	(技術資料)	Back to Back型モータ評価ベンチ 山下俊郎・榊原健男
45	(論文)	交流ソレノイド部品への純鉄系軟磁性細線の適用効果検証 飯村奨太・森田晋也・笠井信吾
49	(技術資料)	純鉄系軟磁性線材および電磁純鉄鋼板の電磁部品への適用効果検証
		久开志紘・川鳴惧也・十葉政道・池田憲史・森田晋也 (1) 4 4 4 以下王氏(1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)
54	(技術資料)	宿谷金 - 半映貨 磁性 材料 池田憲史・十葉政道・笠井信吾・久井志紘・森田晋也
60	(技術資料)	局処性980/1,180 MPa 約合金化浴融 中鉛めっき 鋼板
64	(壮法次羽)	1700 MD。扱っルテンサイト網板 ウオ原常・中国営業
60	(1又111頁147)	1,700 MF a 報 マルノンリイト 調似 ロホタ見・中全道石・林原电可 古公 座 細 の 水 表 晩 ル 加 知 の み み 永 表 証 価 は な レ お 約 勃 計 は な
69	(丹牛百元)	同知及到の小糸旭山伊前のための小糸計画4X141と竹杵畝自4X141 河感 載・平松巧也・衣等潤一郎・安居尚志・高知琢哉・藤田陽介
77	(論文)	高強度鋼板のせん断端面の遅れ破壊性に及ぼす加丁条件の影響 泰原竜司・白木厚寛・中屋道治
83	(解説)	招高 命 度 綱 板 の 成 形 荷 重 低 減 コン ヤ プ ト 林田康宏・山本伸一・岩本翔太
88	(技術資料)	超ハイテン綱板向け電着涂装性向上溶接プロセス 古川尚英・井海和也
95	(解説)	自動車田アルミ合全板材に関する最近の動向と技術課題
100	(論文)	I CAを用いた自動車用アルミ部品のGHG排出量評価
		大久保安剛・内藤純也・江崎澄代・加嶋寛子・吉野初美
106	(論文)	自動車パネル用6000系アルミニウム合金の加工硬化特性に及ぼす組織因子の影響 越能態貴
112	(論文)	耐力500 MPa級高強度7000系合金押出材の開発 福田大晃・志鎌隆広・田畑広二・石飛秀樹・宇野木 諒
119	(技術資料)	自動車生産向け新アルミ接合技術(抵抗スポット溶接,摩擦撹拌接合,DASW)の開発
		後藤崇志・奥田真三樹・戸田要
124	(技術資料)	サーキュラーエコノミー実現に貢献する異種金属接合技術 -SP-ray <sup>TM</sup> - 前田恭兵
129	(解説)	アルミ鋳造品の鋳巣予測精度向上のための物性測定技術および湯流れ・
		凝固解析による鋳巣予測結果の紹介 山口真弘
135	(解説)	高耐久性燃料電池セパレータ材料NCチタンの構造と特徴 佐藤俊樹・鈴木 順
140	(技術資料)	金めっき代替可能な自動車端子用銅合金向けすずめっき 上田雄太郎・鶴 将嘉・三井俊幸
146		神戸製鋼技報掲載 自動車用材料・技術関連文献一覧表 (Vol.66, No. 2 ~ Vol.72, No. 1)
新	製品・新	技術 ————————————————————————————————————

150	電気自動車用大電流端子向け耐摩耗性に優れる粒子共析銀めっき	須田貴裕・山本慎太郎
151	1.0 GPa,1.5 GPa,1.8 GPa級ホットスタンプ用鋼板	荒木晴香・濱本紗江
152	CO <sub>2</sub> 削減に寄与するボルト用鋼(非調質ボルト用鋼KNCH <sup>TM</sup> シリーズ)	松本洋介・高知琢哉
153	軟化焼鈍が省略可能な冷間鍛造用鋼(KTCH <sup>TM</sup> ・KTCF <sup>TM</sup> シリーズ)	奥本剛史・高知琢哉

《FEA	TURE» Materials and Technologies for Automobiles
1	Progress of Materials and Technologies for Automobiles Yoshihiro MIYAKE
2	Kobelco Group's Products, Equipment and Technology for Automotive Norihiro NAKAJIMA · Takuya TSUKADA · Kazunori CHIHARA
8	Multi-material Body Concept Design of Battery Electric Vehicle Kazuyuki HAMADA · Dr. Kenichi WATANABE · Dr. Masatoshi YOSHIDA · Shun TAKENAKA · Yoko OKAWA · Dr. Junya NAITO
15	Construction of MBD Models from xEV Vehicle Disassembly Benchmark Data and their Engineering Utilization Hiroshi SHIMIZU · Dr. Kenichi ISHIHARA · Motohiro ITADANI · Akira NAKAYAMA
21	Development of Pole Side Collision Test Facility Powered by Falling Weight Kensuke FUNADA · Dr. Toru HASHIMURA · Dr. Kenichi WATANABE
27	Effect of Plastic Anisotropy and Ductile Fracture Behavior in Crush FEM Shingo NAKAJIMA · Ryohei YUKISHIGE · Katsuyuki INOUE
32	Analysis and Evaluation Technologies Contributing to Vehicle Electrification Dr. Takayuki TSUBOTA · Dr. Takashi ACHIHA · Manabu NISHIMURA · Yasuyuki TAKANASHI · Hidemasa TSUNEISHI · Ryo OGAWA
38	Back-to-back Type Motor Evaluation Bench System Toshiro YAMASHITA · Takeo SAKAKIBARA
45	Effect Verification of Pure Iron-based Soft Magnetic Thin Wire Applied to AC Solenoid Parts Shota IIMURA · Shinya MORITA · Shingo KASAI
49	Soft Magnetic Iron Wire Rod and Sheet: Estimation of Their Benefit for Electromagnetic Components Yukihiro HISAI · Shinya KAWASHIMA · Dr. Masamichi CHIBA · Kenshi IKEDA · Shinya MORITA
54	Low Alloy, Semi-hard Magnetic Material Kenshi IKEDA · Dr. Masamichi CHIBA · Shingo KASAI · Yukihiro HISAI · Shinya MORITA
60	Galvannealed Steel Sheets of 980 MPa Grade and 1, 180 MPa Grade with Excellent Formability Tadao MURATA · Yoshinori HATA · Muneaki IKEDA · Dr. Yuichi FUTAMURA · Keita NAKAYAMA
64	Martensitic Steel Sheets of 1,700 MPa Grade Atsuhiro SHIRAKI · Michiharu NAKAYA · Ryuji MORIHARA
69	Hydrogen Evaluation Technology and Material Design Technology for Suppressing Hydrogen Embrittlement of High-strength Steels Dr. Makoto Kawamori - Takuya Hiramatsu - Dr. Junichiro Kinugasa - Takayuki Yasui - Takuya Kochi - Yosuke Eujita
77	Effect of Shearing Condition on Hydrogen Embrittlement at Sheared Edge of High-Strength Steel Sheets Rvuii MORIHARA · Atsuhiro SHIRAKI · Michiharu NAKAYA
83	Reduction of Press Load for Ultra-High Strength Steel Sheet Yasuhiro HAYASHIDA · Shinichi YAMAMOTO · Shota IWAMOTO
88	Welding Process Enhancing Electrodeposition-coating Performance for Ultra High Tensile Strength Steel Sheet Naohide FURUKAWA · Kazuya IKAI
95	Recent Trends and Technical Challenges Regarding Aluminum Alloy Sheets for Automobiles Masahiro YAMAGUCHI · Takufumi KOBAYASHI · Takeshi ICHIKAWA
100	Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Automotive Aluminum Parts Yasutaka OKUBO · Dr. Junya NAITO · Sumiyo EZAKI · Hiroko KASHIMA · Hatsumi YOSHINO
106	Effects of Microstructures on Work Hardenability of 6000-series Aluminum Alloys for Automotive Body Panels Dr. Yuki KOSHINO
112	Development of High-strength 7000 Series Alloy Extrusion with 500 MPa Proof Strength Hiroaki FUKUDA · Dr. Takahiro SHIKAMA · Koji TABATA · Hideki ISHITOBI · Ryo UNOKI
119	Development of New Aluminum Joining Techniques for Automobile Manufacturing (Resistance Spot Welding, Friction Stir Welding, Dissimilar Metals Arc Spot Welding) Takashi GOTO · Masaki OKUDA · Kaname TODA
124	Dissimilar Metal Joining Technology, SP-ray <sup>™</sup> , for Realizing Circular Economy Dr. Kyohei MAEDA
129	Introduction of Physical Property Measurement Technology to Improve Accuracy of Shrinkage Porosity Prediction for Aluminum Castings and Prediction Results from Fluidity and Solidification Analysis Masahiro YAMAGUCHI
135	Structure and Characteristics of Highly Durable Fuel Cell Bipolar Plate Material, NC Titanium Toshiki SATO · Jun SUZUKI
140	Tin-plated Copper Alloys for Replacing Gold-plated Terminals Yutaro UEDA · Masahiro TSURU · Toshiyuki MITSUI
140	Denses on Advanced Technologies for Metericle and Technologies for Asternetiles in DSD Keter Oracle Design

146 Papers on Advanced Technologies for Materials and Technologies for Automobiles in R&D Kobe Steel Engineering Reports (Vol.66, No. 2 ~Vol.72, No. 1)

# (巻頭言)

# 自動車用材料・技術特集号の発刊にあたって

三宅義浩

執行役員 鉄鋼アルミ事業部門 鋼材・自動車アルミ板技術サービス 鋼材技術開発担当 **Progress of Materials and Technologies for Automobiles** Yoshihiro MIYAKE



2019年7月に,「自動車軽量化」特集号を刊行して, 5年が経過した。

この間に,自動車産業を取り巻く環境は,大きく変化 しており,まさに変革期に入っている。

各国・地域ではGHG排出削減の取り組みを加速して おり,先進国では2050年のカーボンニュートラル(以下, CNという)達成目標を打ち出している。これを達成す べく,自動車分野においては燃費規制,CO<sub>2</sub>排出規制が 年々厳格化され,この規制をクリアするための重要な役 割を果たす電動車の普及目標が設定されるようになって きている。

最近の注目すべき点は、電気自動車における中国の台 頭である。中国では新エネルギー基準に対応したNEV 車(PHEV含む電気自動車)が爆発的に売れており、新 車販売の30%をNEV車が占めている。また2030年には 70%を超える予測も出ている。この電気自動車において は、電池技術の革新とともに車の構造も大きく変化して おり、部品一体化トレンドの中、新しい製造技術も採用 されてきている。電気自動車の普及には、販売価格の低 減や充電インフラ整備、資源の確保など課題はまだ多 く、足元、販売が一部地域で鈍化している状況ではある が、将来的には増えていく見通しは変わっておらず、電 気自動車への取り組みの成否が今後の自動車ビジネスを 大きく左右する重要なカギとなっている。

当社グループは長年にわたる研究開発により,高品質 な製品,お客様に貢献するソリューション技術を提供し てきた。今回は変化していく自動車業界に特化し,軽量 化,電動化,CN化などに貢献する製品や技術を紹介さ せていただく内容としている。

これまでも,車の軽量化は燃費向上の重要なワードで あったが,電気自動車でも車の軽量化は航続距離に大き く寄与することは無論,使用材料を削減することによる 素材製造時のCO2低減にもつながるとして重要度が増し ている。我々はお客様での使用時の課題解決のため,軽 量化に貢献する超ハイテンやアルミ素材・製品の開発, 加工技術,鉄とアルミを組み合わせた構造提案,これら をつなぐ接合,部品や車両の評価技術などについて技術 開発を進めてきた。

これらに加えて,近年ではとくに電池や電装品の増加 に対応するために,ユニークな各種製品開発や試作,評 価についても取り組みを拡大しており,磁性材,チタン, 銅板などの新製品と関連するソリューション技術や全固 体電池の製造,評価に関わる装置,技術開発にもメニュ ーを持ち合わせている。

また、自動車業界では走行時のCO<sub>2</sub>削減のみならず、 クルマのライフサイクルにおける各段階(原料調達・製 造・使用・リサイクル・廃棄)でのCO<sub>2</sub>排出量削減が求 められている。とくに鉄鋼事業を有する当社にとって、 高炉で発生するCO<sub>2</sub>削減が重要な課題であり、これに対 して国内初の低CO<sub>2</sub>高炉鋼材「Kobenable Steel」を2022 年5月に販売を開始し、自動車分野をはじめ様々な用途 にご採用いただいている。また、アルミ製品は原料とな るアルミ地金を製造する際にCO<sub>2</sub>が発生するため、リサ イクルが重要であり、お客様と一緒になったクローズド ループリサイクルの取り組みや、リサイクル合金開発な どに取り組み、CO<sub>2</sub>削減に貢献している。加えて、鋼材 とアルミ、両方を有する当社らしい取り組みとして、マ ルチマテリアル構造車両の易解体性を高めたリサイクル しやすい接合技術も開発している。

これからも、当社は技術の革新と品質の向上に取り組 み、地球環境に配慮した製品づくりに努め、自動車業界 をはじめとする社会の発展に貢献していく。皆様からの ご支援をいただきながら、より良い未来を実現するため に全力を尽くしていくので、よろしくお願いしたい。

1

# (解説)

# 当社グループの自動車用製品、設備、技術

中島悟博\*1·塚田拓哉\*1·千原一則\*1

# Kobelco Group's Products, Equipment and Technology for Automotive

Norihiro NAKAJIMA · Takuya TSUKADA · Kazunori CHIHARA

# 要旨

パリ協定以降環境問題がクローズアップされ,自動車業界ではCNやCEに対する取り組みが急速に加速されてい る。とくに,電動車への移行によるGHG低減,燃費向上の動向は顕著であり,車体,電池,パワートレイン,シャ シに関してそれらに用いられる構造,材料,製造に大きく影響する。またCEの観点からもリサイクル技術や易解 体性などの課題が注目されている。当社グループでは従来から継続される車の燃費や安全性向上などの課題に加 えこれらの新たなニーズへも対応するべく独自の材料,設備,技術を開発し,世の中に提供している。それらの 例に加え多様な事業領域を有する利点を活かした取り組みで実用化した低CO<sub>2</sub>材料や再エネ供給システムなどに ついても紹介する。

# Abstract

Since the Paris Agreement, environmental issues have come into the spotlight, and in the automotive industry, efforts toward carbon neutrality (CN) and circular economy (CE) have been accelerating rapidly. In particular, the trend toward reducing greenhouse gas (GHG) emissions and improving fuel efficiency through the transition to electric vehicles is remarkable, and this will have a significant impact on the structure, materials, and manufacturing of the vehicle body, battery, powertrain, and chassis. From the perspective of CE, challenges such as recycling technology and ease of dismantling are attracting attention. To meet these new needs and the ongoing challenges of improving fuel efficiency and safety for automobiles, the Kobelco Group has been developing and providing unique materials, equipment, and technology to the world. In addition to these examples, this paper introduces low- $CO_2$  materials and renewable energy supply systems that have been put into practical use through initiatives exploiting experience in diverse business fields.

# 検索用キーワード

自動車用ハイテン,自動車用線材条鋼,自動車パネル用アルミ板,自動車用アルミ押出材,自動車シャシ用アルミ鍛造材, 自動車ハーネス用銅合金,自動車用鉄粉製品,燃料電池セパレータ用チタン,自動車用溶接ワイヤ,自動車電装部品用磁性材, 全固体電池用等方加圧装置,ハイテン用プレス金型,自動車解体機

まえがき=2015年12月, COP21 (第21回国連気候変動 枠組条約締約国会議)においてパリ協定が採択され、世 界の平均気温の上昇を産業革命以前に比べて1.5度に抑 える努力を追求する、という目標が国際的に合意され た<sup>1)</sup>。この目標を実現するためには,社会活動で排出さ れる温室効果ガス(主にCO<sub>2</sub>)を実質ゼロの状態にする 必要があり、2018年以降、欧州の発表を契機として世界 各国で「2050年カーボンニュートラル (Carbon Neutral,以下CN)達成」という目標が掲げられている。 各産業部門の中でもCO。排出量が多い運輸部門(自動車) はCO<sub>2</sub>排出量の削減が急務となっており、これが環境規 制の厳格化につながっている。主要国では,CAFE方式 (企業別平均燃費基準)やGHG(温室効果ガス)規制に よりその年ごとの燃費達成状況が判定されている。ま た,中国や米国では, 燃費規制に加えて, BEV (Battery Electric Vehicle), PHEV (Plug-in Hybrid Vehicle), FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle) などの販売・生産 を義務付けている。欧州では、走行中の燃費のみならず、 原材料の採掘から廃車のリサイクルまでのライフサイク ル 全 体 の 環 境 負 荷 を 評 価 す る LCA (Life cycle assessment) での規制を検討する動きもある<sup>2)</sup>。

CNにも関連する新たな変化として,サーキュラーエ コノミー(Circular Economy,以下CE)の実現に向け た取り組みも加速しており,自動車産業に多大な影響を およぼしている。CEは,製品や素材の価値を維持しな がら廃棄物の発生と資源消費を最小限化することで,環 境負荷を低減する経済システムを指す。欧州では,自動 車の設計から廃車のリサイクルにおける循環性の向上に 向けた廃自動車指令が見直され,2023年に規制案が発表 され<sup>3)</sup>,今後の他地域や自動車産業への影響が注視され る。

世界的にCN, CE実現に向けた取り組みが進展する中 で、主要な自動車メーカは、それぞれCN達成目標と電 動化目標を設定している。これまでは中国を中心として 急速にBEVの販売台数が伸長してきたが、電池などの 電動化コストに伴う車両価格の高さ、充電インフラの整 備、といった課題に起因し、その勢いが鈍化している。 CNの達成に向けて電動化は必須であるが、BEVの今後 の普及ペースは不透明な状況となっている<sup>4)</sup>。

こうした自動車を取り巻く環境から想定されるニー

<sup>\*1</sup>鉄鋼アルミ事業部門 自動車事業企画室

ズについて、当社内で整理した結果を図1に示す。 KOBELCOグループ(以下、当社グループ)では、自 動車業界の環境変化に対応すべくこれらのニーズに基づ き新製品や新技術を提供し続けている。

# 1. 当社グループの自動車用製品,設備,技術

当社グループは、自動車用の主要な素材、素形材とし て鉄と非鉄金属であるアルミ、銅、チタンなども生産す るユニークな製造メーカとして特徴づけされる。また、 自動車製造に必要な製品、設備を生産する溶接部門や機 械部門など多様な事業領域を有する企業としての側面も ある。いっぽう、これら多岐にわたる製品を自動車に有 効に活用いただくべく、高度なソリューション技術、評 価技術を提供し、お客様での課題解決を支援させていた だいている。また、廃棄自動車の解体において、高性能 の解体機を長年製造・販売しており、今後のCEの活動 にも大きく寄与できると考えている。

# 2. 自動車部品用の素材と素形材

当社では自動車部品用素材として, 薄鋼板, アルミ板, 線材条鋼, 銅板, 鉄粉, チタン, 溶接材料を製造してい る。最近では, 自動車電動化の新たなニーズに対応する ため素材区分をまたがる磁性材のメニューを拡大してい る。

いっぽう素形材としてはアルミ押出,アルミ鍛造,銅 合金(リードフレームなど)を製造している。これらの 自動車部品向けの製品メニューと適用例を**表**1に示す。 なお,下線付きで示されるアイテムについては,本特集 号にて別記事で取り上げられているので,そちらで詳細 を確認いただきたい(以下のほかの製品,技術について も同様である)。

以下に、それら製品の特長などを個別に紹介する。

# 2.1 低CO2材料

自動車製造時のScope3のCO<sub>2</sub>排出低減につなげるベ く,低CO<sub>2</sub>素材の提供を始めた。当社エンジニアリング 部門のMIDREX技術で製造した直接還元鉄を活用し, 高炉の還元プロセスでのCO<sub>2</sub>排出量を低減した Kobenable<sup>®</sup> Steelは、まずレース車にて実用化された<sup>5)</sup>。 その後、量産車へもKobenable<sup>®</sup> Steel が採用され、グ リーン地金を用いた低CO<sub>2</sub>アルミ合金も自動車部品で実 用化された<sup>6)</sup>。

#### 2.2 薄鋼板

主にボディ,シート,シャシの骨格部品に用いられる ハイテンに,特徴ある製品を有している。代表的なもの として,急速冷却(水焼入れ)設備を活用した,マルテ ンサイト単一組織型の高YSかつ曲げ性に優れるハイテ ン,残留 y 導入および組織微細化や均質化により,高強 度かつ延性や伸びフランジ性に優れるハイテン,高い焼 入れ性を有し金型内冷却時間短縮(生産性向上)が可能 なホットスタンプ用鋼板などが挙げられる。

# 2.3 アルミ板

パネル用材として、美麗な表面品質、高い焼付き硬化 性を有した外板用6000系や、高い加工性を持つ5000系 のパネル用材が主力製品である。クラッド材は、従来の 熱交換器に加え、近年BEV車載電池の冷却プレート用 として新たな用途が広がっている。従来のパネル用製品 に新たな特性を付与し、自動車部品としての機能(低強 度化による歩行者保護、高強度による軽量化、高曲げや 高成形性による高意匠性、複雑形状)を向上させる製品 もパネル、構造部材に用途拡大中である。

## 2.4 線材条鋼

自動車用として締結部品,各種ばね,歯車,エンジン 部品などに用いられる。

高強度ボルト用鋼KNDSシリーズは、合金元素の析 出硬化を活用した焼き戻し軟化抵抗増加により、耐遅れ 破壊特性に優れる。高強度懸架ばね用鋼UHSシリーズ は、強度・じん性・耐食性を改善し、ばねの設計応力を 高める。高強度弁ばね用鋼KHVシリーズは、非金属介 在物の清浄化技術とばねの表面改質技術の適用により、 ばねの疲労寿命を伸長する。高強度歯車用鋼KKGシリ ーズは、歯車の歯元疲労強度向上により、部品のダウン サイジングや歯車耐久性の向上につながる。

冷鍛歯車用鋼KSGシリーズは,鍛造前の軟化焼鈍省 略により,部品製造時のCO<sub>2</sub>排出や製造コストを低減す る。コンロッド用鋼KOCOSシリーズは,0.2%耐力500, 700,800,900 MPaの4水準を有し,調質の省略により, 部品製造時のCO<sub>2</sub>排出や製造コストを削減する。冷鍛用 焼鈍省略鋼KTCHシリーズは,鍛造前の球状化焼鈍を 省略することができる。また,非調質ボルト用鋼KNCH シリーズは焼鈍省略に加え,調質も省略することがで



図1 環境変化に伴う自動車業界のニーズの整理(出典:当社整理)

Fig.1 Automotive needs based on change in industry circumstance (Kobe Steel originally made)

#### 表1 当社グループの自動車部品向け素材および素形材製品 Table 1 Kobelco Group's material and advanced material for automotive

		(Under line items are introduced in this issue)
	Newly developed material/advanced material	Applicable automotive parts
Steel	Kobenable <sup>®</sup> Steel	Body structural, Chassis
Aluminum	Aluminum alloy made of green aluminum ingot	Panel, Chassis, Body structural
	Cold rolled 1470MPa MS	Center pillar outer
	Cold rolled 1700MPa MS	Under trial for Bamber reinforcement
	Electro galvanized 1500MPa MS	Side sill
<u>.</u>	High formability 980-1180MPa cold rolled	Center pillar outer
Steel sheet	High formability 980-1180MPa galvannealed	Side sill
	High λ 980MPa galvannealed	Under trial for Front side member
	High productive 1470MPa for hot stamping	Front pillar hinge
	1.0-1.8GPa for hot stamping	Under trial for Center pillar
	5000, 6000 series alloy for panel	Hood, Door
	Clad material	Battery cooling plate, Heat exchanger
Aluminum	Low strength material	Hood inner
sheet	High strength material	Body structural, Battery structural
	High bendability material	Hood outer
	High formability material	Door inner, Body side outer
	High strength steel : KNDS series	Fastener
	High strength steel : UHS series	Suspension spring
	High strength steel : KHV series	Valve spring
	High strength steel : KKG series	
Wire and Rod	Annealing-less cold forging steel : KSG series	Gear
	Microalloved steel: KOCOS series	Connecting rod
	Non-auenched steel : KNCH series	
	Annealing-less steel : KTCH series	Fastener
Titanium	Surface treated titanium strip: NC titanium	Separator for fuel cell battery
	Tin plated copper alloy for small terminals	Small and extra small terminals
	Tin plated copper alloy for low contact pressure terminal	Low contact pressure terminal
~ "	Particle composite silver plating with excellent wear resistance for	
Copper alloy	high current connector pins for electric vehicles	Charging plug
	Copper alloy for power semiconductor	Power conductor
	Copper alloy for semiconductor lead flame	Semiconductor lead flame
Charal an and an	High-compressibility SEGLESS™ KP series	Automatic transmission planetary carrier
Steel powder	High-machinability SEGLESS™ KS series	Variable valve timing parts
	High strength 7000 series alloy	Bumper reinforcement, Door guard bar
Aluminum	High strength 6000 series alloy	Side step, Body structurer
extrusion	7000 series 500MPa extrusion parts	Bumper reinforcement, Door guard bar
	Bumper reinforcement with sharply formed edges	Bumper reinforcement
Aluminum	High strength 6000 series alloy (KD610)	
forging	Large forged parts by 6300ton mechanical press	Suspension arm, Knuckle, Carrier
		Electromagnetic clutch
	KICF series	(Balanced grade with high strength and magnetic properties)
	ELCH2 series	High current relay, Linear solenoid (for DC applications)
	ELCH2S series	Ditto as above (Improved machinability steel)
	ELAC series	Under development for AC applications
Magnetic	ELSHM series	Under development for maintain attraction with residual magnetism
material	Magnetic fine wire	Under trial for Axial gap motor cores
		DC use: Under development (High current relay parts etc.)
	KELMOS series	AC use: Under consideration (Alternative to electrical steel sheets: Motor
		cores etc.)
	MAGMEI <sup>TM</sup> MI Series MH Series	Reactor for photovoltaic power conditioner
		Reactor for hybrid electric vehicles

き、それぞれ二次加工プロセスおよびボルト製造プロセスにおけるCO2の発生を低減することができる。

# 2.5 チタン

NCチタンは「Nano-Carbon composite coatチタン」 の略称であり、自動車用固体高分子型燃料電池のセパレ ータ材料として、開発、実用化された。(本号「高耐久 性燃料電池セパレータ材料NCチタンの構造と特徴」 p.135~139参照)。ナノサイズの導電性カーボン粒子を 耐食性の高い酸化チタン中に分散させた皮膜で、チタン を被覆することによって、セパレータに必要とされる表 面の導電性と耐食性を、両立したことが特徴である。

# 2.6 銅板

電動化により増加する電子部品の自動車端子・コネク タ用銅合金については,適正な合金設計により導電性, 耐応力緩和性に優れた製品や,接触信頼性を高めるため の表面処理技術を保有している。また、半導体用途、充 電プラグ用途向けにも製品を提供している。

#### 2.7 鉄粉

粉末冶金の特徴を活かし,低コストで高強度・大型・ 複雑形状の焼結部品を可能とする,黒鉛偏析防止鉄粉 は,ATプラネタリキャリアやVVT (Valuable Valve Timing)用部品などを中心に採用されている。

# 2.8 アルミ押出

高強度,耐圧壊割れ性,耐応力腐食割れ性(耐SCC性) に優れた7000系押出材を,バンパーレインフォースメ ント,ドアガードバー,ロッカーなどの自動車用部品に 適用している。自動車の限られたスペースへの部品配置 のため,端部から中央側に向けて大きなつぶし加工を施 したバンパーレインフォースは,常温での加工では割れ が生じるため,制御された温度域で潰し加工されて製造 されるのが特徴である。また、今後のBEV化に伴い、 車重軽減および側面衝突性能確保のために、電池パック フレームやボディ骨格用部材にアルミ押出形材が適用拡 大されつつある。

# 2.9 アルミ鍛造(サスペンション)

当社独自開発の合金設計と大型メカプレスにより,特 徴ある製品を供給している。合金開発として,材料成分 および鋳造棒製作から鍛造,熱処理工程までの条件を見 直すことにより,材料の高強度化およびサスペンション 部品の軽量化を実現した<sup>7)</sup>。また,大型6,300トンプレ スでの,多数型配置による1ヒート連続鍛造技術や,構 造解析による提案型製品開発体制により,中・大型部品 を中心に幅広いニーズに対応している<sup>8)</sup>。

## 2.10 磁性材

自動車電動化に伴うe-Axel関連部品や電子制御部品 などの拡大に対し,多様な用途に適用できるよう,線材 条鋼,薄板,鉄粉のそれぞれの製品で,磁性材のメニュ ーを開発している。線材条鋼・薄板については,純鉄系 材料の特長を最大活用し,電動化に伴う制御部品の性能 向上,小型化によるコスト低減,熱処理省略などに貢献 している。線材条鋼の商品化で得られた知見を薄板に展 開し,メニューを拡充中である。磁性材鉄粉については, 表面に絶縁被膜をコーティングした圧粉磁心用鉄粉があ る。低鉄損が特徴で高周波用 MH シリーズは,電力変換 回路のリアクトルに採用されている。低周波用 ML シリ ーズは,モータへの適用が期待される。

# 2.11 自動車用素材,素形材を支える製品化要素技術

当社が,多岐にわたる自動車用製品を創出し,お客様 に信頼いただける製品を提供するために,様々な要素技 術が下支えしている。いくつか代表例を表2で紹介す る。

線材条鋼のばね鋼,ボルト用鋼,薄板のハイテン,ア ルミのパネル材,アルミの押出材・アルミのサスペンシ ョン材,鋼合金は,いずれの製品でも軽量化のために高 強度化を進めているが,強度に背反する性能(成形性, 衝突性能,耐水素脆化特性など)を両立させるため金属 組織制御技術<sup>9)~11)</sup>が重要である。

また,組織制御以外の観点でも,疲労特性向上のための介在物制御技術<sup>12)</sup>,原子レベルまで金属組織を解析す

る物理分析解析技術<sup>13)</sup>,高強度材の信頼性を確保するため,腐食による材料への水素侵入の制御,水素脆化の適切な評価<sup>14),15)</sup>や金属表面制御技術<sup>16)</sup>などが開発され,製品の品質向上に寄与してきた。

近年では、これらの要素技術を構造材料だけでなく、 機能材料へも展開を進めている。微量な不純物を厳格に 制御することで、良好な磁気特性を確保するための電磁 純鉄鋼板や、2.5節で説明したNCチタンなどが代表例で ある。

また,磁性材については,当社の磁性材料(線材条鋼, 鉄粉,薄板)の用途提案をしていくため,モータ,電磁 弁,リレーなど電磁部品の,設計試作,解析技術の高度 化を進めている。

# 3. 自動車製造のための製品,設備

当社グループは,溶接,機械,エンジニアリング事業 部門など多様な事業領域を有しており,これらの事業部 門においては,自動車製造に欠かせない製品や製造設備 も提供している。代表的な製品,設備を表3に示す。 3.1 溶接

最近開発された自動車用溶接材料として,バンパなどの超ハイテンが用いられた部品の接合に適する溶接ワイヤ<sup>17)</sup> や,電着塗装を施す部品の,溶接部の防錆性能を向上する溶接ワイヤ<sup>18)</sup>を供給している。

#### 3.2 機械関連

機械事業部門では、ユニークな自動車部品製造設備を 提供している。Flexform<sup>™</sup>は、高液圧板金プレスで、 複雑成形が可能かつ上型不要なため、金型コストの低減 とリードタイムの短縮が可能で、部品試作や少量生産に 適している。WIP(図2)は、水などの液体圧力媒体を 加熱しながら、100 MPa以上の高い等方圧力を粉末に加 え、成形を行う。全固体電池の活物質/固体電解質の接 合界面形成などに活用する。

グループ会社であるカムスからは、プレス部品金型に 関し、各機能を向上した製品を提供している。高強度、 高耐熱性能を有し、超ハイテンの加工に適する金型(KS-G)、高密着性により、鋭利な刃先に適する被膜(KS-VF)、凝着核の微細化により、亜鉛めっきの耐凝着特性 を向上した金型(KS-Z)である。

(Under line items are introduced in this issue)

Material	Newly developed elemental technology	Applicable automotive parts		
	Microstructure control to improve contradictory properties to high strengthening	Panel		
	Cluster control to strengthening aluminum sheets	Body structural		
	Transition carbide control to improve anti-hydrogen embrittlement property of MS steels	Seat structural		
	Microstructure control to improve work hardening property for 6000 series Al alloy	Engine parts (Gear, Shaft, Fastener etc.)		
High strength steel	Inclusion control technique to improve fatigue property of high strength valve spring	e-Axle parts (Gear, Linear solenoid, Fastener etc.)		
Aliminum sheet	Atomic-scale physical analysis for microstructure	Chassis (Suspension spring, Arm, Knuckle etc.)		
Aluminum extrusion	Hydrogen embrittlement evaluation simulating actual vehicle environment	Battery parts (Flame, Separator, Fastener etc.)		
etc.	Hydrogen visualization technique in materials	]		
	Material design for hydrogen embrittlement suppression	1		
	Effect of shearing condition on hydrogen embrittlement at sheared edge of high strength	]		
	steel sheets			
	NC coating with high conductivity and corrosion resistance for fuel cell bipolar plate			
	Benefit estimation of soft magnetic pure Iron by magnetic field analysis	Solenoid valve, Relay etc.		
Magnetic material	Axial gap motor using thin wire of soft magnetic pure iron	Motor		
	Axial gap motor with soft magnetic powder composites	Relay		

**表2** 当社グループの自動車部品用素材,素形材を支える製品化要素技術

Table 2 Kobelco Group's fundamental technologies for development of material and advanced material

5

**表3** 当社グループの自動車製造のための製品・設備 **Table 3** Kobelco Group's product, equipment and facility for automotive production

Division/Company	Product, equipment, and facility	Applicable automotive part or process
Wolding	Welding wire for ultra high strength steel sheet	Ultra high strength steel sheet (under 1.2GPa) for bumper
weiding	MAG welding wire to improve rust prevention	Chassis
	Flexform <sup>™</sup> (Sheet metal hydraulic press)	Steel sheet: mild steel to ultra high strength steel
Machinery		Aluminum sheet, Titanium sheet
	WIP (Warm Isostatic Pressing)	All solid state battery
	KS-G series (Press die)	Foprming cold and hot rolled high strength steel sheet
service Co Ltd	KS-VF series (Press die)	Trimming high strength and zinc coated steel sheet
Service CO.Ltd.	KS-Z series (Press die)	Forming zinc coated steel sheet
Machinery and engineering	Hybrid-type hydrogen gas supply system	Clean energy supply for heating process





(Under line items are introduced in this issue)

図2 温間等方圧加圧装置 Fig.2 Warm isostatic pressing, WIP

図3 ハイブリッド型水素ガス供給システム Fig.3 Hybrid-type hydrogen gas supply system configuration diagram

機械事業部門だけでなく,神鋼環境ソリューション, エンジニアリング事業部門といった関連部門と連携し, ハイブリッド型水素ガス供給システム(図3)を開発, 試運転中である。このシステムは,ボイラ,加熱炉など, 熱エネルギーの脱炭素化に寄与する水素利活用に向けた ものである。液化水素気化プロセスと,再生可能エネル ギーを活用した水電解式水素発生装置を,パラレル配置 したハイブリッド型としている。これにより,コストミ ニマイズと,再生可能エネルギー特有の供給不安定性の 解消を目指している。

# 4. 自動車の設計, 評価, リサイクル課題解決 のためのソリューション技術, 製品

当社グループでは,自動車部品の設計,加工,接合に 関する高度な試作,評価を含めたソリューション技術を 有する。また,コベルコ建機では自動車解体機生産にお いて長い歴史を誇る。これらを**表4**にまとめる。

4.1 構造,成形,接合などのソリューション提案技術 お客様での設計,製造課題解決に,構造,成形,接合

技術面から様々なご提案を行う。 構造に関しては、従来の重量、コスト、性能という観 点に加え、近年環境面から重要視されるLCAも考慮し た、部品の最適化提案も実施している。また、BEV化の 拡大に対応するため、電池パックへのマルチマテリアル 提案や、電池保護と重量増を考慮したBEVの構造提案 に加え、BEVのポール衝突などの車両衝突試験も実施し ている。 成形に関しては,当社ハイテン材やアルミ板材を使用 するお客様向けのソリューションとして,寸法精度対策 技術,割れしわ予測およびこれらの対策技術を提案して いる。

接合に関しては,鉄,アルミなどの多様な素材を有す る当社の特徴を活かした異種金属接合技術を,多く開発 している。CN,リサイクルの観点から,易解体性を考 慮した異種金属接合技術の開発にも注力している。

# 4.2 受託分析・試験,解析によるお客様課題解決への ソリューション提案

当社グループのコベルコ科研の保有する評価技術は, 電動車開発の効率化や,より環境負荷を低減する車両の 設計・開発を支援している。

衝突解析における破断挙動モデルの高精度化や,鋳造 CAE解析の精度向上のための物性値取得と要素技術評 価は,次世代車体構造に採用されるキャスト材の開発に 必須の技術となっている。異種材の溶接や機械的締結に 加え,腐食対策で併用される接着接合の長期信頼性評価 も提案している。また,LCAの観点から,実スクラップ でのラボ溶解,発生ガス分析やリサイクル模擬材の少量 試作にも対応する。

さらに、電動車の分野ではBEVの分解ベンチマーク 調査や、電池パックMBD(モデルベース開発)による 車両レベルでのエンジニアリングを行う。また、全固体 電池をはじめとする次世代革新電池の評価、試作、安全 性試験や、モータ、ギヤなどの回転系試験など、主要機 器やEVシステム全体の性能評価技術でのソリューショ

		(Under line items are introduced in this issue)
Division/Company	Newly developed solution technology and product	Applicable automotive parts
	LCA evaluation (Steel and Aluminum)	Panel
	Multi material battery case	Body structural
Application technology center	Multi material BEV body structure concept	Seat structural
	Pole crash test	e-Axel(Motor, Gear etc.)
(Solution technologies of vehicle	Stamping technology for ultra high strength steel and aluminum sheet	Chassis (suspension spring, arm, knuckle etc.)
structure, stamping and joining)	(Stamping load reduction technology)	Chassis (suspension spring, and, knuckle etc.)
	Dissimilar metal joining ( <u>SP-Ray<sup>™</sup></u> , Rubulge etc.)	Battery parts (Flame, separator, fastener etc.)
	New joining technologies for aluminum	
	Aluminum extrusion, PHS fracture prediction	Car battery
	Getting parameters for aluminum casting flow solidification analysis	Battery case
	and collision analysis	
Kobelco Research Institute, Inc.	Dynamic evaluation of aluminum castings for vehicle bodies	Body structural
	Evaluation technology for recycled aluminum material	e-Axel(Motor, Gear etc.)
(Solution services through	Bonding evaluation technology between dissimilar materials	Panel
analysis, testing, and	Teardown of the most state of the art BEV	Seat structural
measurement for customer needs)	Model-Based Design assistance for battery pack design	Chassis
	Evaluation of solid-state batteries	
	Reliability testing and safety of Li batteries prototyping	
	Characterization using a rotary dynamometer for e-motors and its	
	components	
Kobelco Construction Machinery	Automotive dismantling machines	ELV (End of life vehicle)
Co., Ltd.	(SK135SRD-7、SK235SRD-5、SK210D-10)	



図4 自動車解体機 SK135SRD Fig.4 Automotive dismantling machine SK135SRD

# ン提案が可能である。

# 4.3 使用済み自動車解体機

自動車解体機のパイオニアとして,長年改良を積み重 ね,生産性や精度の点で業界をリードする。図4に最 も小型のSK135SRDを示す。本機は使用済み自動車を しっかり押さえ込めるクランプアーム(非開閉式)を装 備し,先端アタッチメントには自動車解体専用のニブラ を装備している。切断,もぎ取り,仕分けといった解体 分別作業を短時間に安全に行え,1日の処理量も飛躍的 に増加できる。さらに大型のSK235SRD,SK210Dもあ り作業環境,負荷に応じ選択可能である。

**むすび**=自動車業界を取り巻く環境は,昨今のCN,CE の規制動向や地政学的な問題により,大きく変動してい る。当社グループでは材料のみならず,機械・設備やソ リューション技術も保有している。今後は,それら個々 の製品・サービスの向上を図るとともに,当社の多様な 製品・技術・設備・サービスを有する特徴を活かして, 今回ご紹介した低CO<sub>2</sub>材料や再エネの供給など,新たな ニーズに応える事業横断型のビジネス開発を重点的に進 めていきたい。

# 参考文献

- 外務省、2020年以降の枠組み:パリ協定,外務省WEBサイト、 2022年2月24日、 https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page1w\_000119.html, (参照2024-06-07).
- 日本自動車工業会、「自動車業界におけるLCAの取組と課題」、経済産業省WEBサイト、2024年2月9日. https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\_environment/gx\_product/pdf/003\_04\_00.pdf, (参照2024-06-07).
- 3) 欧州委員会.「自動車の循環設計とELV管理規則」(案). 2023年7 月13日.

https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM% 3 A2023% 3 A451% 3 AFIN&qid=1689318552193, (参照2024-06-07).

時事ドットコム. EV失速,自動車市場で何が起きているのか.
 2024年4月18日.
 https://www.jiji.com/jc/v8?id=202404ev-018),

(参照2024-06-07).

- 5) 神戸製鋼所. プレスリリース. "低CO<sub>2</sub>高炉鋼材 (Kobenable Steel) の国内初の実用化について". 2022年6月3日. https://www.kobelco.co.jp/releases/1210345\_15541.html, (参照2024-06-07).
- 神戸製鋼所. プレスリリース. "日産車への神戸製鋼所の低CO<sub>2</sub>高 炉鋼材及びグリーンアルミニウム原料を用いたアルミ板材の適 用について". 2022年12月19日. https://www.kobelco.co.jp/releases/1211309\_15541.html, (参照2024-06-07).
- 7) 稲垣佳也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.2, p.22-26.
- 8) 中村 元ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.99-102.
- 9) 村上俊夫. R&D神戸製鋼技報. 2024, Vol.72, No.2, p.28.
- 10) 増田哲也ほか: 軽金属, 2010, Vol.60, p.183-189.
- 11) K.Shibata et al. Mat. Sci. Forum, 2021, Vol.1016, p.1331-1336.
- 12) 足立毅郎. R&D神戸製鋼技報. 2024, Vol.72, No.2, p.23.
- 13) 田内裕基ほか. R&D神戸製鋼技報. 2024, Vol.72, No.2, p.43.
- 14) M. Kawamori et al. ISIJ Int. 2022, Vol.62, No.8, p.1731-1740.
- 15) J. Kinugasa et al. ISIJ Int. 2021, Vol.61, No.4, p.1071-1078.
- 16) 武田実佳子ほか. R&D神戸製鋼技報. 2024, Vol.72, No.2, p.33.
- 17) 鈴木励一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.63-68.
- 18) 木梨 光ほか. R&D神戸製鋼技報. 2023, Vol.72, No.1, p.79-84.

7

# (技術資料)

# マルチマテリアル BEV 車体コンセプトモデルの設計

濱田和幸\*1・渡辺憲一\*1(博士(エ学))・吉田正敏\*1(博士(エ学))・竹中 峻\*1・大川陽子\*1・内藤純也\*1(博士(エ学))

# Multi-material Body Concept Design of Battery Electric Vehicle

Kazuyuki HAMADA · Dr. Kenichi WATANABE · Dr. Masatoshi YOSHIDA · Shun TAKENAKA · Yoko OKAWA · Dr. Junya NAITO

# 要旨

現在, CO<sub>2</sub>排出の削減要請の高まりを背景として, バッテリー式電気自動車(BEV)の普及が進展している。BEV では, 重量物であるバッテリーが搭載されるため, 従来の内燃機関車(ICEV)に対して車両重量が大幅に増加す ることとなる。航続距離を向上させるためには車両重量低減, すなわち軽量化が不可欠である。この状況を踏ま えて, 当社の特長製品である超ハイテン, アルミ板, アルミ押出材といった軽量化素材を適材適所に配置した独 自のマルチマテリアルBEV車体コンセプトモデルの設計を検討している。衝突時に乗員とバッテリーを保護する ための車体構造およびバッテリーケース構造について, 軽量化と衝突安全性を両立する設計を実現した。

#### Abstract

Battery electric vehicles (BEVs) are becoming increasingly popular against the background of increasing requirements for reducing  $CO_2$  emissions. BEVs are equipped with heavy batteries, and the vehicle weight increases significantly compared with that of conventional internal combustion engine vehicles (ICEVs). Increasing the cruising distance of BEVs inevitably requires vehicle weight reduction. In light of this situation, Kobe Steel has been considering the design of a unique multi-material BEV body concept model, in which weight-reduction materials such as ultra high-tensile strength steel, aluminum plates, aluminum extrusions, which are the company's specialty products, are used in their proper locations. The vehicle body and battery case structures have been designed to combine weight reduction and collision safety, protecting occupants and batteries in the event of a crash.

#### 検索用キーワード

電気自動車, BEV, バッテリー, 軽量化, 衝突安全, 超ハイテン, ホットスタンプ, アルミ板, アルミ押出材

まえがき = 自動車業界では CASE (Connected/Autonomous/ Shared& Service/Electric)と呼ばれる新しい領域での技 術革新に加え、気候変動への対応としてカーボンニュー トラルやサーキュラーエコノミーといったグリーン社会 の実現に向けた取組みが喫緊の課題となっている。その 中で、世界的に自動車の電動化が加速しており、将来的 にバッテリー式電気自動車(以下, BEV という)の普及 が進んでいくと見込まれている<sup>1)</sup>。BEVでは、重量物で あるバッテリーが搭載されるため、従来の内燃機関車 (以下, ICEVという) に対して車両重量が大幅に増加す ることとなる。したがって、航続距離を向上させるため には車両重量低減、すなわち軽量化が不可欠である。い っぽう、衝突に対するバッテリーの保護や車両重量増加 による衝突エネルギー吸収性能の向上など, ICEVより も衝突安全性能を向上させる必要がある。以上より, BEVでは軽量化と衝突安全性能の両立が大きな課題と なる。

当社は、「グリーン社会への貢献」をマテリアリティ の一つとして掲げており、「生産プロセスにおけるCO<sub>2</sub> 削減」を行うことに加え、独自の「技術・製品・サービ スによるCO<sub>2</sub>排出削減」に貢献する取組みを進めている。 自動車の車体軽量化に対しては、超高張力鋼板(超ハイ テン)、アルミ板、アルミ押出材、アルミ鍛造材といっ た軽量化に寄与する特長ある多様な素材のニーズに対応 した技術開発やソリューション提案を行っている。その 特長として,車両のニーズに合わせた最適な軽量素材の 選択を提示することに加え,軽量素材を適材適所に組み 合わせたマルチマテリアル化,およびそれを実現するた めの異種材接合技術があり,素材,構造,工法を組み合 わせた総合的なソリューション技術の開発および提案を 行っている<sup>2)</sup>。

上記の状況を踏まえて、当社は、今後のBEVに対す る当社ソリューションの基盤作成を目的として、マルチ マテリアルBEV車体コンセプトモデルの設計を検討し ている。本稿では、軽量化と衝突安全性を両立する素材 適用や構造設計の考え方を概説するとともに、衝突安全 設計の検討事例を紹介する。

# 1. BEV車体コンセプトモデルの検討条件

# 1.1 車体の設計要件

ICEVでは主に衝突時の乗員保護が求められているが, BEVでは衝突によりバッテリーから火災が発生するリ スクがあることから,乗員に加えてバッテリーを保護す る必要がある。本検討では,世界の主要な自動車アセス メントの中から,BEV車体の設計において厳しい基準と なる衝突安全試験を選定して設計検討を行った。

<sup>\*1</sup>技術開発本部 ソリューション技術センター

表1に対象とした衝突安全基準の一覧を示す。まず、 側面衝突では IIHS側面衝突(2023年より採用された新 基準),ポール側面衝突の2種のモードを選定した。ポ ール側面衝突において,バッテリーを保護するためにシ ョートストロークで運動エネルギーを吸収する必要があ る。本検討では,ポール側面衝突におけるバッテリー保 護のロバスト性を確保するために,図1のとおり車両 長手方向に沿ってポール衝突位置を10か所選定した評 価も行った。つぎに,前面衝突ではフルラップ前面衝突, オフセット前面衝突,スモールオーバーラップ前面衝突 の3種のモードを選定した。BEVでは,ICEVに対して 車両重量が増加することから、車体で大きな運動エネル ギーを吸収する必要がある。最後に,後面衝突ではオフ セット後面衝突モードを選定した。

設計要件として、衝突解析により(a)ボデー骨格の 各部位の侵入量を評価し、上記衝突安全基準で"Good" 評価(侵入量が設定した基準値未満)となること、(b)

表1 対象とした衝突安全基準 Table 1 List of crash safety standards

Category	Test method	
Side crash	Euro-NCAP - pole crash 75° (32 km/h)	
	IIHS - MDB barrier 90° (1,900 kg, 60 km/h)	
Front crash	US-NCAP - full width rigid wall (56 km/h)	
	J-NCAP - offset crash ODB 40% (64 km/h)	
	IIHS - small overlap 25% offset (64 km/h)	
Rear crash	FMVSS301R - rear crash 70% offset with deformable barrier (1,368 kg, 80 km/h)	



10 pole positions in total 図 1 ポール衝突位置の追加条件 Fig.1 Variation of pole position



バッテリーモジュールの変形量を評価し,バッテリーへ のダメージが安全上問題ないレベル(設定した基準値未 満の変形量)であることとした。

# 1.2 車両の諸元

当社では、過去にICEVの車体コンセプトモデルの設 計を行っており<sup>2)</sup>、車体の衝突安全性能と剛性の要件を 満足する構造を検討した。本BEV車体モデルは、その ICEVモデルをベースとして設計検討を行った。**図2**に その外観および仕様を示す。車体はEセグメントSUV とした。駆動方式は、フロントのみに電動ドライブユニ ットを搭載したFWDと、フロントとリアにそれぞれ電 動ドライブユニットを搭載した4WDの両方式でそれぞ れ設計した。容量119 kWh(バッテリーモジュールの体 積より試算)のバッテリーを収納したバッテリーケース は車両のフロア下で車体に搭載されている。なお、今回 設計した車体にはシートなどの内装部品は含まれていな いが、衝突解析にはその重量を模擬して性能を評価して いる。

# 2. 軽量素材の適用コンセプト

車体軽量化のためには,部品ごとの形状や要求性能に 応じて適切な素材を選定する必要がある。表2に,BEV 車体を構成するボデー骨格,バッテリーケース,外板パ ネル(クロージャパネルを含む)ごとの軽量素材適用方 針を示す。

ボデー骨格の中で、衝突時の変形抑制が必要な部品に 対しては、軽量化を図るために素材の高強度化が有効で あるため、基本的にはアルミに対して比強度に優れた超 ハイテン(引張強度が980 MPa以上)が適している。難 成形部品に対しては、加工性に優れた超ハイテンやPHS (ホットスタンプ用鋼板)との使い分けが考慮される。 逆に、衝突時に大変形を伴い衝突エネルギーを吸収する 性能が求められる部品においては、圧壊時に早期に破断 が生じてしまうとエネルギー吸収性能が低下してしまう ため、耐圧壊割れ性に優れた超ハイテンが適している。

いっぽう,ボデー骨格の中で長尺かつ一定断面の形状 的な特徴を有する部品に対しては,アルミ押出材も軽量 化の観点で有効である。さらに,該部品に対しては,超 ハイテンでロール成形を適用すると,冷間プレスに比べ て断面形状の自由度が高くなるため,さらなる軽量設計

Specification	Detai I
Car type	SUV (E segment)
Drive system	FWD or 4WD
Length [mm]	4, 826
Width [mm]	1, 885
Height [mm]	1, 710
Wheelbase [mm]	2, 785
Curb weight [kg]	2, 450-2, 650
Battery capacity [kWh]	119 (estimate)

図2 BEV 車両の外観および仕様 Fig.2 Vehicle specifications

# 表2 軽量素材適用の考え方 Table 2 Concept of applying lightweight materials

	Required characteristics of part		Features of part shape		
Category		Material option	Common	Difficult to mold	Long and constant cross section
	Strength	Ultra high strength steel sheet	0	0	0*
		Press hardened steel sheet		0	
Body frame		Aluminum extrusion			0
structure		Aluminum sheet	0	0	
	Energy absorption	Ultra high strength steel sheet	0	N/A	0*
		Aluminum extrusion		N/A	0
Battery frame	Strength	Ultra high strength steel sheet	0	N/A	0*
structure		Aluminum extrusion		N/A	0
Outer panel / Closure	Tension stiffness, dent resistance	Aluminum sheet	0	0	N/A

(\*) Suitable for roll form

Category	Classification	Characteristic feature	Tensile strength	
	DP steel/ Martensitic steel	High strength	Up to 1,470 MPa class for cold press Up to 1,700 MPa class for roll form	
	TBF steel/ TRIP steel	High strength and formability	Up to 1,470 MPa class for cold press	
Steel sheet	CP steel	High strength and crash-cracking resistance	Up to 980 MPa class for cold press or roll form	
	PHS	High strength and formability	Up to 1.8 GPa class for hot stamp	
	6000 series (Al-Mg-Si)	Common	Тур. 295 МРа (6061-Т6)	
	7000 series (Al-Zn-Mg)	High strength	Typ. 480 MPa (Z6W-T5)	
Aluminum extrusion		High strength and crash-cracking resistance	Тур. 365 МРа (Z35B-T7)	
		High strength and stress- corrosion-cracking resistance	Typ. 450 MPa (7K55-T7)	
	6000 series (Al-Mg-Si)	Common	Typ. 275 MPa (6022-T4,after paint baking*)	
Aluminum sheet		High formability	Typ. 265 MPa (6016-T4,after paint baking*)	
		High strength	Typ. 345 MPa (6011-T4,after paint baking*)	

表 3	主要	な軽量化素材	のメニュ	-
Table 3	Major	lightweight	material	menu

が可能となる<sup>3)</sup>。また、ボデー骨格の中で、超ハイテン ほどの強度が求められないリア周りの部品などに対して は、ハイテン(引張強度が340 MPa以上)が適してい るが、必要とされる強度や周辺部品に適用される素材と の組合せにおいてアルミ板との使い分けも考慮される。

バッテリーケースも,バッテリー保護の観点で衝突時 の変形抑制が必要な部品として位置付けられる。そのた め、ケースを構成するフレームに対してはボデー骨格と 同様に超ハイテン、アルミ押出材が適している。バッテ リーケースの構造に応じて両者の使い分けが考慮され る。

外板パネルは、衝突性能への影響が小さく、張り剛性 や耐デント性などが求められるため、鋼板に対して比剛 性が優れるアルミ板が適している。ただし、難成形部品 においては鋼板や樹脂との使い分けも考慮される。

上記を踏まえて,当社では多様な軽量素材の開発,量 産を行っている。**表3**に主要なメニューを示すが,成 形性,接合性,さらにコストも考慮したうえで,適切な 素材を選定することが肝要である。とくに鋼とアルミの (\*) 2% stretch + 170°C×20min

異種材接合においては,要件に応じた適切な工法選択, 電食への対策を考慮する必要がある。

# 3. マルチマテリアル車体構造の設計コンセプト

本車体モデルの設計コンセプトをボデー骨格, バッテ リーケース, 外板およびクロージャごとに概説する。

# 3.1 ボデー骨格

BEVでは、衝突荷重をボデー骨格とバッテリーケー スの両方で分担して負担することとなる。バッテリーケ ースの荷重分担を大きくすると、バッテリーケース内に 補強部材を多く配置する必要があり、バッテリーを搭載 可能な容積、ひいては、バッテリー容量の低下が問題と なる。そのため、バッテリーケースへの荷重分担を低減 する、すなわちボデー骨格側の分担を大きくする設計が 近年のトレンドとして見られる。本モデルにおいてもそ の設計を志向することとした。

図3にボデー骨格(外板,クロージャを除く)の構造および適用素材を示す。以下で,主要部位ごとに設計の考え方を概説する。フロア構造に関しては,ICEVで



図3 ボデー骨格の構造および適用材料 Fig.3 Body frame structure and applied materials

必要であったトンネルを排除し、フラットな形状とした。また、フロア下にバッテリーケースを搭載するため、 一般的なICEVに対してフロアを高く配置している。また、ポール側面衝突に対応するため、1,470 MPa級超ハ イテンを適用したフロアクロスメンバを追加配置した。

サイドシル構造の断面図を図4に示す。BEVでは一 般的にポール側面衝突に対応するため、サイドシル内部 にエネルギー吸収部材が追加されることが多い。現状、 この部材には軽量化の観点でアルミ押出材が適用される ことが多いため、本モデルでも耐圧壊割れに優れた 7000系アルミ押出材を適用し軽量化を図った。6000系を 適用した場合に比べて3~5 kg/台の軽量化が可能とな る見込みである。また、長手方向に連続的に配置してい ることで、衝突位置によらず、バッテリー保護性能を確 保しやすい。アルミ押出材はボデー側への荷重伝達を大 きくするため、サイドシル内の上部に配置した。また、 その断面形状は、比較的要件が緩い打撃位置に併せて設 計し、ポール側面衝突対応で最も厳しい部位に鋼製補強 材を追加することで、構造の最適化を図った。

ピラーに関しては、ICEVに対して構造面の大きな変 化はない。Aピラーに関しては、スモールオーバーラッ プ衝突時の強度を高めるため、PHSの適用や補強材の追 加などで対応している例が見られる。本モデルでは 1,470 MPa級超ハイテンを適用するとともに、内部に補 強材を追加した。Bピラーに関しては、難成形かつIIHS 側面衝突対応のため1.8 GPa級PHS(本号「1.0 GPa, 1.5 GPa, 1.8 GPa級ホットスタンプ用鋼板」p.151参照) を適用したが、加工性に優れた超ハイテン<sup>4)</sup>も選択肢と なる。

フロントエンドに関しては、エネルギー吸収性能を高 めるため、材料面ではフロントサイドメンバーに耐圧壊 割れ性に優れた980 MPa級超ハイテン<sup>5)</sup>を適用するこ とで対応した。構造面では左右のフロントサイドメンバ ーをつなぐクロスメンバーを追加するなどの対応によ り、フロントサイドメンバーの変形時の座屈挙動を制御 することでエネルギー吸収性能を向上させた。

リアエンドに関しては、フロントと同様にエネルギー 吸収性能を高めるため、リアサイドメンバーに耐圧壊割 れ性に優れた980 MPa級超ハイテンを適用することで



対応した。また、リア周りのその他部品に対しては、主 にハイテンを適用したが、高強度型6000系アルミ板も 選択肢となり得る。

ダッシュ部に関しては、前面衝突時にフロントサイド メンバーから伝達される荷重に対して変形させないよ う、1,180 MPa級超ハイテンを適用するとともに補強部 材を追加することで対応した。また、フロントサイドメ ンバーからサイドシルに荷重を伝達するトルクボックス の構造強化を図り、バッテリーケースに伝達される荷重 を低減した。トルクボックスなどの難成形部品に対して は、加工性に優れた超ハイテンを適用した(本号「高延 性980/1,180 MPa級合金化溶融亜鉛めっき鋼板」p.60~63 参照)。

バンパーレインフォースメント (ハングオン) に関し ては、ICEVから大きな構造変化はなく、高強度が必要 とされるため、フロント、リアともに7000系アルミ押 出材を適用したが、ロール成形を適用した1,300~ 1,700 MPa級超ハイテン<sup>6)</sup> (本号「1,700 MPa級マルテン サイト鋼板」p.64~68参照) も選択肢となる。

#### 3.2 バッテリーケース

バッテリーケースは、構造として大きくフレームタイ プとトレイタイプに分類される。同様に、適用材料もア ルミ製、鋼板製に分類される。本モデルでは、軽量化に 主眼を置き、現在主流となっているアルミ製のフレーム タイプを採用した。図5にバッテリーケースの構造と 適用材料を示す。バッテリーケースへの荷重分担を低減 する方針の下,内部の補強部材は縦方向,横方向に1本 ずつと最小限に設定した。腐食環境ではない内部の補強 部材には最高強度の7000系アルミ押出材を,腐食環境 にある外周フレームには耐応力腐食割れ性に優れた 7000系アルミ押出材<sup>7)</sup>を適用した。底板およびアンダ ーカバーには6000系アルミ板を適用したが,強度も求 められることからT6調質材とした。いっぽう,該部品 が成形を必要とする形状の場合は,T4調質で加工した 後,熱処理を行うことで強度を確保しても良い。その場 合は,高強度6000系アルミ板の適用も選択肢となる。 また,未表示となっている蓋には軟鋼板を適用した。前 述のとおり,バッテリー容量は約119 kWhと試算して おり,効率的なバッテリー搭載を実現している。

# 3.3 外板およびクロージャ

図6に外板およびクロージャの構造と適用材料を示 す。フード、フェンダ、サイドドアのパネルには6000 系アルミ板<sup>8)</sup>を適用した。いっぽう、サイドパネル、 ルーフ、バックドアサイドの難成形部品に関しては、素 材の加工性やコストのバランスを考慮し、軟鋼板を適用 しているが、加工性に優れた6000系アルミ板も選択肢 となる。サイドドア内のドアビームに関しては、ICEV から大きな構造変化はなく高強度が必要とされるため、 1,470 MPa級超ハイテンを適用したが、7000系アルミ押 出材も選択肢となる。





Classification	Color
LSS, HSS (TS<590)	
AHSS (590≦TS<980)	
UHSS (TS≧980)	
Aluminum sheet 6000 series	

図6 外板およびクロージャの構造および適用材料 Fig.6 Outer panel and closure structure and applied materials





# 3.4 材料ポートフォリオ

図7に、ボデー全体(ボデー骨格,外板,クロージャ) とバッテリーケースそれぞれの材料ポートフォリオを示 す。当社が有する軽量素材を幅広く適用しているが、車 両形状、要求性能、コストの観点から最適なポートフォ リオは変化すると考えられる。現在、提案バリエーショ ンを拡充するための代替案の検討も行っており、本章で 紹介した設計内容はその一例とご理解いただきたい。

# 4. 衝突安全設計の検討事例

本章では、衝突安全設計の一例として、乗員やバッテ リー保護の観点でクリティカルとなる側面衝突に関する 検討事例を示す。

# 4.1 ポール側面衝突

ポール側面衝突試験を模擬した解析結果を示す。本解 析では、破断予測モデルとしてGISSMO(Generalized Incremental Stress State dependent damage Model)<sup>9)</sup> を用いて、超ハイテンやアルミ押出材の母材破断を考慮 した解析を実施している。図8に、衝突中の車体変形 状態を示す。また、図9に、ポール衝突位置における サイドシル,フロア,バッテリーケースの変形状態を示 す断面図を示す。サイドシル内のアルミ押出製エネルギ ー吸収部材は良好な圧壊変形を示しているとともに、超 ハイテン製フロアクロスメンバの座屈変形も抑制できて いる。図10に、ポールの反力に加えて、ボデー側とバ ッテリーケース側の荷重推移をそれぞれに示す。平均荷 重で見ると、およそ75%の荷重をボデー側で、残り25 %をバッテリーケースで負担する割合となっており、狙 いとしていた荷重分担を実現できている。また、サイド シルの侵入量およびバッテリーモジュールのダメージの 指標となる変形量は、いずれも設定した基準値以下とな



図8 ポール側面衝突における車体変形 Fig.8 Body deformation in pole side crash



図9 ポール側面衝突時の断面変形 Fig.9 Cross sectional deformation in pole side crash

っている。なお、本解析では、サイドシル内部のエネル ギー吸収部材には7000系アルミ押出材を適用している が、同押出形状で6000系アルミ押出材を適用した場合、 バッテリーモジュールの変形量が基準値を超過してしま うことを確認している。

上記条件に加えて、車両前後方向にポール衝突位置を 10か所変化させた条件においても、サイドシルの侵入 量、バッテリーモジュールの変形量が問題ないことを確 認しており、ロバスト性が高い設計を実現できている。

# 4.2 IIHS側面衝突

IIHS側面衝突試験を模擬した解析結果を示す。図11 に、衝突中の車体変形状態を示す。また、図12に、Bピ ラー、ドア、サイドシルの変形状態を示す断面図を示す。 バリアがサイドシルに衝突するが、ポール側面衝突対応 で強化されたサイドシルに大きな回転は見られず、バリ アが潰れる様子が確認できる。その結果、Bピラーの侵入 量を十分抑制することができ、"GOOD"評価を実現した。





図11 IIHS側面衝突中の車体変形 Fig.11 Body deformation in IIHS side crash



図12 IIHS側面衝突中の断面変形 Fig.12 Cross-Sectional deformation in IIHS side crash

むすび=以上, 独自のマルチマテリアル BEV 車体コン セプトモデルの設計の考え方や結果を報告した。現在, 本モデルを基盤としたソリューション技術の開発や提案 を進めている。例えば、コストと軽量化を両立するニー ズに対応すべく、鋼板、アルミ、あるいはこれらを組み 合わせたマルチマテリアルの条件で最も効率の良いバッ テリーケースやサイドシルなど構成部品の構造を検討し ている。とくにマルチマテリアル構造の異種材接合部に は,汎用接合法に加え,独自技術の適用も検討している。 また、各種構造に対してライフサイクルアセスメント (LCA)の観点で、軽量化による走行時のCO<sub>2</sub>排出量削 減効果だけでなく、素材製造から廃棄に至るまでのCO<sub>2</sub> 排出削減効果を定量的に評価(本号「LCAを用いた自 動車用アルミ部品のGHG排出量評価」p.100~105参照) し、低CO2鋼材やリサイクルアルミの適用も含めた最適 な素材提案につなげていく予定である。 いっぽう, 近年,

BEV車体のアンダーボデーに実用化されている大型ア ルミダイキャストに代表されるように,部品の一体化/ 大型化により車体製造工程を革新するトレンドがある。 今後,本モデルを活用しながらそのトレンドに対応した 技術開発も進めていき,継続して自動車のCO<sub>2</sub>排出削減 に貢献していく所存である。

# 参考文献

- 1) IEA. Global EV Outlook 2024
- 2) 内藤純也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.1, p.60-64.
- 3) 橘 美枝ほか. R&D神戸製鋼技報. 2007, Vol.57, No.2, p.31-36.
- 4) 村田忠夫ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.17-20.
- 5) 中屋道治ほか. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.1, p.25-28.
- 6) 内海幸博ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.3-7.
- 志鎌隆広ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.90-93.
   櫻井健夫. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.1, p.121-126.
- 9) 鎮西将太ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.76-81.

## (解説)

# xEV車両の解体ベンチマークデータからのMBDモデル 構築とエンジニアリング活用

清水洋志\*1·石原健一\*1(博士(工学))·板谷元宏\*1·中山 彰\*1

# Construction of MBD Models from xEV Vehicle Disassembly Benchmark Data and their Engineering Utilization

Hiroshi SHIMIZU · Dr. Kenichi ISHIHARA · Motohiro ITADANI · Akira NAKAYAMA

# 要旨

多くの自動車メーカが電気自動車(EV)開発に注力している。その中で、競合他社や先進企業の車両を対象 としたベンチマーク調査は、最新技術や市場の動向を知るための重要なプロセスである。ベンチマーク調査に Computer Aided Engineering (CAE)を活用することで、調査対象を損壊することなく、さまざまな調査が可能と なる。CAEの活用例として、EV車のバッテリーパックの3次元形状測定データからCAEモデルを作成し、各種評 価(衝撃圧壊、熱暴走、耐久性)を実施した。そこで確認された耐久性の問題点について、トポロジー最適化の 結果を参考に部材断面形状の改良を実施した。結果として、耐久性および衝撃安全性を向上させることができた。

# Abstract

Many automakers are focusing on developing electric vehicles (EVs). In this effort, benchmarking research, which focuses on the automobiles of competitors and leading companies, is an important process for understanding the latest technology and market trends. Utilizing computer-aided engineering (CAE) in benchmark research allows for various investigations without compromising the research subject. An exemplary CAE model has been created from 3D-shape measurement data of an EV battery pack to perform several evaluations (e.g., impact crushing, thermal runaway, and durability.) The durability issue, herein identified, has been addressed by improving the cross-sectional shape of the components on the basis of the results of topology optimization. As a result, both durability and impact safety have been enhanced.

# 検索用キーワード

電気自動車, バッテリーパック, リチウムイオンバッテリー, 衝突安全性, 熱暴走, トポロジー最適化, 衝突変形, ランダム応答解析, PSD, RMS

**まえがき**=多くの自動車メーカが電気自動車(EV)開発に注力している中で,競合他社や先進企業の車両を対象としたベンチマーク調査は,他社製品との比較による自社製品の優位性や改善点を把握し,競争力を向上させることを可能とする。また,他社の最新技術や製品に対する理解度を高めて,市場動向やお客様の要望に適合した製品開発を行うために非常に重要なプロセスであると考える。

いっぽう問題点としては、耐久性試験や圧壊試験な ど、部品の消耗を伴う場合、調査車両における調達コス トの増大により、調査項目が限られてしまうことが挙げ られる。しかし、リバースエンジニアリングによる Computer Aided Engineering (CAE)を活用すること で、部品を消耗することなく、さまざまな調査が可能と なる。

2021年より、(株)コベルコ科研では最新の海外製EV車 両を対象に解体ベンチマーク調査を実施し、車両から各 コンポーネントにおける性能・構造・物性データをレポ ートにまとめ、販売を開始している。その中で、各調査 データに基づく Model Based Development (MBD) モ デル、CAD、有限要素解析 (FEA) データの構築も実 施している。本稿では、バッテリーパックを対象として、 解体ベンチマークデータをもとにした3Dモデルを例に、 エンジニアリング設計への活用事例として、バッテリー パックの耐久性評価、衝突安全性および熱暴走評価、バ ッテリーケース内部構造のトポロジー最適化設計を紹介 する。

# 1. バッテリーパックのモデル化

衝突安全性評価の対象となるバッテリーパックの数値 解析用モデルを構築するには対象物の3次元形状データ (CADデータ)が必要となる。ここでは海外製EV車両 のバッテリーパックを対象として実機を解体しながら3 次元形状測定を行い,得られた形状データを基にサーフ ェス化を行ってCADデータを作成した。3次元形状測 定にはハンディタイプの非接触式3Dスキャナー(精度: 最大0.050 mm)を使用した。図1に対象とした実機バ ッテリーパック,そのスキャン形状およびサーフェス化 したCADデータを示す。なお、CADデータ化の範囲は、 衝突安全性能に寄与する構造部材のみを対象とした。こ のCADデータをもちいて、図2に示すCAE用のメッシ ュモデルを作成し、安全性および耐久性評価を目的とし

<sup>\*1(</sup>株)コベルコ科研 技術本部 計算科学センター



Actual battery pack <u>3D shape measurement data</u> <u>Surfaced CAD data</u> 図1 実機バッテリーパックからのCADデータ作成 Fig.1 Creating CAD data for the actual battery pack



図2 CAE用メッシュモデル Fig.2 Mesh model for the numerical simulation

た数値解析を実施した。モデル規模は、節点数:約130 万,要素数:約150万である。

# 2. CAEによる耐久性能評価

バッテリーパックの耐久性評価は、標準試験法として ISO 12405が発行されており<sup>1),2)</sup>, 信頼性試験のひとつ の項目に振動試験がある。この振動試験は、車両の走行 時の振動や駆動系の振動によるランダム波によって電池 が破損を起こしたり、電気的接触の不備が生じたりしな いかを確認する試験法である。ISO 12405で規定された パワースペクトル密度 (Power Spectral Density, 以下, PSD) を図3に示す。ISO 12405の振動試験法はドイツ での走行時の振動データを基にしているが、日本の道路 環境下においても妥当であることが検証されている<sup>3)</sup>。 いっぽう、ランダム波による振動試験を比較的短時間で 効率的にシミュレーションする方法にランダム応答解析 がある<sup>4)</sup>。実用的な計算コスト,設計への活用の観点か らバッテリーパックの耐久性能評価はランダム応答解析 をもちいた。解析ソルバーは、振動・構造解析の汎用コ ードMSC.Nastranを使用した。図4にランダム応答解 析の解析条件を示す。バッテリーパックはサイドシルお よびフロアとボルト締結されるため、その伝達経路で振 動が入力される。そのため,ボルト締結部を1Dの剛体 要素で剛体結合し、全てのボルト締結部を同時に加振し た。加振方向は「前後」「左右」「上下」の3軸同時, PSDは図3の値を使用した。図5にランダム応答解析 の応力 RMS 値 (Root Mean Square 値) コンタ図を示す。 応力RMS値<sup>5)</sup>はランダムな荷重に対する構造物の応答 を統計的に評価するための指標であり、ランダム応答に 対する平均的な応力変動レベルを示す。結果としてはボ







図5 ランダム応答解析の応力RMS値コンタ図 Fig.5 Stress RMS value contour for random response analysis

ルト締結部で応力が最大となり応力 RMS 値は 133 MPa であった。これは、6N01-T5の押出材の疲れ強さσ<sub>w</sub>(10<sup>7</sup> 回) 108 MPa<sup>6)</sup>よりも大きい。応力 PSD は43 Hz で明確 なピークを示している。応力 PSD<sup>7)</sup>とは構造物に作用 するランダムな応力のパワー分布を周波数ごとに示した 指標である。具体的には、応力の時刻歴データをフーリ エ変換して得られるスペクトル密度を表す。43 Hz の振 動モードを把握するため固有振動数解析を行った結果を 図6に示す。43 Hz にバッテリーパックの曲げ 1 次の振 動モードが存在し、応力 PSD のピーク値を示す周波数 と一致する。この振動モードはバッテリーパック全体が 曲げ変形するモードであるが、とくにボルト締結部近傍



図6 1次曲げの固有振動モード Fig.6 Natural vibration modes of first-order bending

の局所変形が大きい。したがって,ボルト締結面の面剛 性を高くすれば効率的に応力低減を図ることができると 考えられる。

# 3. CAEによる衝突安全性評価

自動車の衝突安全性評価の基準は国や地域によって異 なる。一般的には、前面、側面および後面などの代表的 な3方向に対する衝突試験があり、自動車事故の際に乗 員や歩行者などの被害を最小限に抑えるための性能が要 求される。しかしながら、EV車においては、車両に搭 載されたリチウムイオンバッテリーの熱暴走による火災 のリスクもあり、バッテリーパック自体の衝突安全性も 考慮することが望まれる。そこで、バッテリーパックの みに着目した衝突変形性能を数値解析により確認した。 ここでは代表的な3方向のうち、バッテリーパックに波 及する衝突変形が最も懸念される側面衝突試験について 確認した。図7にバッテリーパック側面へのポール衝 突を模擬した衝突条件を示す。

本来は車体全体に対する衝突安全性評価であるが,バ ッテリーパックの耐衝突性能に関する設計思想を理解す るため,バッテリーパック単体の衝突現象を解析するこ ととした。ここでは,バッテリーパックの質量によって 生じる運動エネルギーを吸収して安全性が保てるか否か を確認した。

衝突速度はポール側面衝突試験(UN-R135)を参考に した32 km/hと,過大な条件として約2倍の60 km/hと した。解析ソルバーは汎用コードのAnsys LS-DYNA(以 下, LS-DYNA)を使用した。

図8に衝突速度32 km/hにおけるバッテリーパック の変形状況を示す。ポールとの衝突部においてバッテリ ーパックの側面フレームが内部にまで湾曲していること が確認できる。なお、この変形は側面フレームとバッテ リーモジュール間に設けられた空間内で留まっており、 バッテリーモジュールには影響しないと判断される。こ のことから、この空間はクラッシャブルゾーンとして意 図的に設けられており、側突によるフレームの変形がバ ッテリーセルに到達しないようにすることで安全性を確 保した設計と推測される。

つぎに、UN-R135よりも過大な条件で衝突した場合の 確認を行った。図9に衝突速度60 km/hにおけるバッ テリーパックの変形状況を示す。60 km/h衝突では、側 面フレームの変形がバッテリーモジュールに到達し、端 部のセルに圧縮変形が生じていることが確認できる。よ ってクラッシャブルゾーン内では変形を吸収しきれてい







図8 衝突速度32 km/hにおける変形状況







ない。衝突速度60 km/h は運動エネルギーが32 km/h 衝突の約4倍となり、この圧縮変形によりバッテリーセ ルが短絡して熱暴走を引き起こす懸念がある。本バッテ リーパックの構造としては、車体左右方向に分散配置さ れている各モジュール間(パック中央)にも側面と同様 な空間が設けられている。よって、側面からモジュール に到達した変形もモジュール自身の剛体運動(スライド 運動,図9右下図参照)で吸収され、セルが受ける荷 重が少なくなるよう工夫された構造と推測される。

# 4. CAEによる短絡熱暴走評価

つぎに、LS-DYNAの構造・熱・電磁場(Electromagnetic, EM) 連成解析ソルバーを使用して短絡熱暴走のシミュ レーションを行った。バッテリーの短絡は,正極と負極 が直接接触する現象で,絶縁体の損傷や衝撃により生じ る。これによりバッテリー内部に電流が急激に流れ,温 度が上昇する。また,熱暴走はバッテリー内部の温度が 急上昇し,制御不能になる現象で,過充電,内部短絡, 外部からの過度な熱により生じる。これが進行すると, 蓄積されたエネルギーが一気に放出され,バッテリーが 過熱し,火災や爆発を引き起こす可能性がある。

バッテリーの性能や安全性を評価するため、従来のシ ミュレーションでは、セルの各層を詳細にモデル化する 必要があり、大規模なモデルと解析コストを要した。い っぽうで、多くのセルやバッテリー全体を扱う際に有効 な、少ないメッシュでバッテリーセルを表現する Battery macroモデル(以下、Batmacモデル<sup>8)</sup>)という 方法がある。Batmacモデルでは、各節点にRandles型 等価回路<sup>9)</sup>(図10)が考慮されている。これにより内部 の短絡や熱暴走などの現象を効率的に表現することが可 能となるため、ここではBatmacモデルを使用すること とした。

上述のように短絡や熱暴走はセル内の反応によって生 じる複雑な現象である。熱・EM解析で要求される時間 刻みは,一般的な短時間の衝突解析に比べて長い現象の ため,一連の連成解析には多大なコストを要する。そこ で,今回のシミュレーションでは,衝突解析の変形およ びひずみの状態を熱・EM解析の初期条件として設定し, 短絡は初期ひずみ分布,熱暴走は短絡後の温度変化をも とにモデル化することで,実用的な時間でのシミュレー ションを可能とした。

## 4.1 単セルを対象とした解析

最初に、単セルを対象にBatmacモデルをもちいた短 絡熱暴走シミュレーションを行った。シミュレーション にもちいた機械的特性は衝突解析と同じとし、伝熱特性 および電気特性は各部材の材料に応じた一般的な物性値 を使用した。セルの容量(=57 Ah)、電圧とSOC (State of charge)の関係(図11)は測定値を使用した。Randles 型等価回路のパラメータは、充放電曲線の測定結果を参 考に、R<sub>0</sub>=R<sub>10</sub>=0.001、C<sub>10</sub>=1,000とした。短絡の発生条件 は、試験などで具体的な閾値(いきち)を確認できなか ったため、衝突解析から得られたひずみ分布を基に、こ こでは、セルの10%のひずみを短絡の閾値と仮定した。 また、熱暴走については、一般的なリチウムイオン電池 が熱暴走する温度<sup>10)</sup>を参考に、温度が200℃を超えたと きに発生すると仮定した。

図12に初期ひずみ分布,ジュール熱分布を示す。図 を見比べると、ひずみが10%を超えた領域で短絡が生 じて、セル全体に大きな電流が流れた結果、短絡してい ない領域を含めてセル全体のジュール熱が大きくなって いることがわかる。

図13にセル上部タブ間の温度履歴を示す。変形直後 40秒手前までは短絡による温度上昇が生じ、200℃を超 えたあたりの急激な温度上昇は熱暴走によるものであ る。その後,所定の熱量に達したところで温度上昇がと まり熱暴走が終了している。このように,Batmacモデ









Fig.13 Temperature history between cell top tabs

ルをもちいると, 短絡熱暴走の現象がシミュレートでき ることが確認された。

### 4.2 バッテリーパックを対象とした解析

つぎに、3章の衝突速度60 km/hの解析結果をもとに、 バッテリーパックを対象として4.1節で設定したパラメ ータをもちいて短絡熱暴走シミュレーションを行った。 セル間や各部材間には接触熱伝達を考慮し、バッテリー パックの周囲には空気との熱伝達を考慮した。

図14に初期ひずみ分布,電流分布を示す。図に示す ように衝突によるひずみは衝突部(図左側)から2番目 のセル②にもおよんでおり,単セルでの解析と同様,短 絡領域に大きな電流が流れていることがわかる。



図14 モジュールのひずみ分布, 電流分布 Fig.14 Initial strain distribution and current distribution of module



図15 代表セル上部タブ間の温度履歴 Fig.15 Temperature history between top tabs of representative cells



図16 代表時刻の温度コンター図 Fig.16 Temperature contour of the module at representative time

図15に代表セル①, ⑤, ⑩, ⑮, ⑳の上部タブ間の 温度履歴を示す。衝突部から1番目のセル①は短絡開始 直後から温度が上昇し, 200℃を超えたあたりで熱暴走 が生じている。5番目のセル⑤(二点鎖線)では衝突後 約120秒で温度が上昇し始め,約150~160秒で急激に温 度が上昇している。このように衝突部のセルで短絡熱暴 走が起きた場合,熱伝導によって衝突部から離れたセル へ熱暴走が連鎖し,480秒後には1モジュール分の熱暴 走が生じた。

図16に短絡開始からの所定の経過時間に対する温度 分布を示す。短絡開始50秒後では温度上昇がみられた のは衝突部から1番目,2番目のセルであったが,473秒 後には温度上昇がほぼモジュール全体に及んでいること がわかる。なお,温度が高くなったのは1モジュール分 であることから,今回対象としたバッテリーパックはモ ジュール間で温度拡散が生じ難い構造と推測される。

以上のように,Batmacモデルを使用することで,バ ッテリーパック全体を対象とした短絡熱暴走現象が実用 的な解析コストで可能となった。

# 5. CAEによる最適設計

# 5.1 押出し材形状の最適化

2章の耐久性評価で述べた,構成材の疲れ強さを超え る応力が発生していることに対して,トポロジー最適化 解析により対策案の検討を行った。トポロジー最適化と は,構造的な制約,荷重,拘束条件の下で設計領域から 材料を削減しながら最適な材料の配置を導き出す構造最



図17 トポロジー最適化のための部分構造モデル Fig.17 Substructure model for topology optimization



図18 設計領域と境界条件,および最適化結果 Fig.18 Design region, boundary conditions, and optimization results

適化手法である。本検討では、最適化解析の汎用ソルバーである Altair OptiStruct を使用した。

最適化領域として、サイドフレームとクロスメンバー に着目した。これらは、バッテリーパックの曲げ1次振 動モードの変形に影響が大きい主要構造部材である。 図17にトポロジー最適化のための部分構造モデルを示 す。解析モデルは、サイドフレームとクロスメンバーを 部分的に取り出し、幾何学的対称性から1/4対称モデ ルとした。図18に設計領域(水色部)と境界条件、お よびトポロジー最適化結果を示す。設計領域は元構造の 外表面より内部の領域として、当初のリブの配置を維 持、機能上必要な部位以外は最低残存板厚を1 mmとし て設定した。拘束条件はボルト締結部の近傍を固定し、 曲げ1次の変形モードを表現する目的でクロスメンバー 上面に面圧を負荷した。サイドフレームとクロスメンバー 上面に面圧を負荷した。サイドフレームとクロスメンバ

トポロジー最適化結果として、サイドフレームはボル ト締結部において上下面の板をつなぐようなリブが追加 されており、上面のみのボルト締結を下面も含めた締結 にすること、クロスメンバーは下側の2枚のリブの板厚 を厚くすることが示唆された。この結果を基に、図19 に示す構造変更を行った。なお、構造変更後のバッテリ ーケースの質量変化はわずか120gの増加にとどまり、 元構造からの顕著な変化はない。



図19 トポロジー最適化結果に基づく構造変更案

Fig.19 Structural modification proposal based on topology optimization results



# 5.2 耐久性能評価

図20に5.1節で検討した最適化形状にてランダム応答 解析を行った結果を示す。ボルト締結部の発生応力が最 大となり応力RMS値は87 MPaとなって、元の形状から 35%応力を低減した。これは、6N01-T5の押出材の疲れ 強さσ<sub>w</sub>(10<sup>7</sup>回) 108 MPa<sup>5)</sup> 以下である。最適化形状に変 更することで応力PSDのピーク値の周波数は高周波側 ヘシフトし最適化形状に変更することで減少した。図 21に最適化形状の固有振動数解析の結果を示す。バッ テリーパックの曲げ1次の固有振動数は43.0 Hzから 47.3 Hzへ10% 増加した。最適化形状は2枚のプレート で締結したことで局所的な変形を抑制している。これら のことから最適化形状が応力RMS値を低減させたのは 二つの要因が考えられる。一つ目は2枚のプレートでボ ルト締結することによるボルト締結面の剛性アップであ り、二つ目は固有振動数が増加したことによる入力加振 PSDの減少である。図3のPSDは20Hz以上では周波数 が大きいほど減少するため、固有振動数の増加が入力加 振PSDを減少させ応力を低減させる効果がある。

以上のように、断面形状の最適化により、耐久性の観 点での最適な設計断面を,個人の力量に依存することな く効率的に求めることができる。

# 5.3 衝突安全性評価

図22に5.1節で検討した最適化形状にて3章と同様の 衝突解析(衝突速度32 km/h)を行った結果を示す。衝



shape)

図21 最適化後の1次曲げの固有振動モード

Fig.21 Natural vibration modes of first-order bending after optimization





Before optimization shape 図22 最適化後の衝突速度32 km/hにおける変形状況

After optimization shape

Fig.22 The deformation condition at an impact speed of 32 km/h after optimization

突の影響が大きいボルト締結部下面の板厚を3.1 mmか ら4.2 mmに増加させたことで衝撃吸収能が増加し、サ イドフレームの変形量は減少した。このように、構造変 更による衝突安全性の向上まで確認することができた。

むすび=本稿では、バッテリーパックを対象としたエン ジニアリング設計として、耐久性能評価、衝突安全性評 価、短絡熱暴走評価およびCAEによる最適設計技術に ついて述べた。解体ベンチマーク調査におけるCAEの 活用は、他社製品との性能比較や設計傾向の把握に非常 に有効な手段である。これにより、短時間で設計フェー ズにフィードバックでき,開発プロセスの効率化が図れ ると考える。

# 参考文献

- 1) Electrically propelled road vehicles -Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems- Partl:High power applications, ISO 12405-1 (2011).
- 2) Electrically propelled road vehicles -Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems- Part2:High energy applications, ISO 12405-2 (2012).
- 3) 前田清隆ほか. 自動車技術会予稿集. 2015, Vol.46, No.1, p.109-114.
- 4) 板谷元宏ほか. こべるにくす. 2023, Vol.31, No.57, p.23-29.
- 藤田真治ほか. 富士通テン技報. 2016, Vol.33, No.1, p45. 5)
- 6) 日本アルミニウム協会. アルミニウムハンドブック. 第7版, 昭栄 社印刷所, 2007, P57.
- 7) 竹田憲生ほか. 材料. 2012, Vol.61, No.10, p.853.
- 8) LST, an Ansys company. LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL VOLUME III. Multi-Physics Solvers. LS-DYNA R13.
- 9) P.L'Eplattenier et al. 12th European LS-DYNA Conference. 2019.
- 10) 向井ほか. 表面技術. 2019, Vol.70, No.6, p.301-307.

# (技術資料)

# 落錘動力を利用したポール側面衝突試験設備の開発

船田健介\*1・橋村 徹\*1 (博士 (工学))・渡辺憲一\*1 (博士 (工学))

# Development of Pole Side Collision Test Facility Powered by Falling Weight

Kensuke FUNADA · Dr. Toru HASHIMURA · Dr. Kenichi WATANABE

# 要旨

カーボンニュートラル社会の実現のため、ハイブリッド車や電気自動車(EV)の開発が活発となっている。長距 離走行を実現するために床下一面にバッテリーが満載されることの多いEVの場合、バッテリーが損傷しやすい側 面衝突に対する設計評価として、ポール側面衝突試験の重要性が高まっている。当社では自動車産業に対するソ リューション活動の一環として、大型落錘(らくすい)設備を動力源とした衝突試験設備を構築し、その結果と してポール側面衝突試験を実施可能にした。本稿ではEVによる試験実施例を題材に、設備概要、各種計測データ を用いた考察などを紹介する。

### Abstract

The development of hybrid cars and electric vehicles (EVs) is being more actively pursued to realize a carbonneutral society. In particular, for EVs with a whole load of batteries installed under the floor to enable longdistance driving, pole side collision testing is becoming increasingly important as a design evaluation for side collisions, which are likely to damage the batteries. Kobe Steel has constructed a collision test facility powered by large falling weight equipment, which enables the implementation of pole side collision tests, as part of its solution-finding activities for the automotive industry. This paper presents an example of an EV test, an overview of the facility, and considerations based on various measuring data.

#### 検索用キーワード

パッシブセーフティ,衝突試験,側面衝突,車体構造,エネルギー吸収,試験/評価, CAE

まえがき=カーボンニュートラル社会の実現のため, 自動車分野では各国の燃費法規やアセスメント規制が 年々強化されつつある。ハイブリッド車(HV)やプラ グインハイブリッド車(PHV)など,内燃機関車(以下, ICE車という)に比べて省燃費化された車が増え,さら に電気自動車(以下,EVという)の開発も増加している。 HV,PHVの燃費改善やEVの長距離走行のためには車 体軽量化が求められるが,いっぽうで自動車の衝突安全 基準の強化傾向は変わらず,車両骨格を強化するニーズ は依然として強い<sup>1)</sup>。とくにEVでは,航続距離を長く するため,床下一面に大容量二次電池を設置する構造が 多い。そのため車両側面より荷重入力される衝突形態に 対し,電池を保護できる車体設計が求められる。ポール 側面衝突試験はそのような車体設計の評価に対応してお り,近年需要が高まっている。

これらの需要に対応すべく,当社では大型落錘(らく すい)設備を動力として,ワイヤロープに接続した試験 車両や試験用台車を水平牽引し,コンクリート製の大型 バリア壁に取付けたアタッチメントに衝突させる独自の 汎用衝突試験設備を立ち上げてきた<sup>2)</sup>。さらに同設備 を拡張し,ポール側面衝突試験も実施できるようにし た。本稿では,Euro NCAP (EUROPEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME)やNHTSA (NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION) といった衝突アセスメントに準拠したポール側面衝突試 験が実施可能な設備の概要と,構築した計測手法を紹介 し,さらに得られた計測データ(衝突荷重や撮影動画な ど)から,車両の衝突形態を分析した結果を紹介する。

# 1. 開発した衝突試験設備の原理

# 1.1 落錘動力による台車水平牽引方式

当社の衝突試験設備は、図1に示す様に、台車走行 路設備と大型の落錘設備で構成されている。落錘設備は 動力源であり、台車走行路設備に設置された試験車両ま たは台車には、落錘設備から伸ばしたワイヤロープが接 続される。落錘設備は動滑車およびワイヤロープを介し



<sup>\*1</sup>技術開発本部 ソリューション技術センター

て吊り上げられた重錘(じゅうすい)と, 重錘下部のア ブソーバで構成される。またタワー上部から吊り下げら れたワイヤロープと重錘の間には切り離し装置があり, 任意の高さで重錘を切り離すことができる。ここで重錘 の落下速度に対する被牽引物の走行速度は, 動滑車の原 理に従って, 滑車使用数を変更することで2倍速または 4倍速の設定に変更できる。

重錘が落下することにより試験車両または台車が牽引 されて走行し,走行路端に設置された大型バリア壁に取 付けられたアタッチメントに衝突する。ポール側面衝突 試験の場合は,衝突部がポール型のアタッチメントを大 型バリア壁に取付ける。

# 1.2 速度制御手法

ポール側面衝突試験では**図2**に示すように4倍速設定 で大型落錘設備を使用しており,式(1)(2)を解くこ とで,試験条件として設定した衝突速度v<sub>1</sub>に対応した重 錘落下高さ*H*を求めることができる。

$$m_2gH = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 + m_2gh + \mu m_1g \times 4(H - h) \quad \cdots \quad (1)$$
  
$$v_1 = 4v_2 \qquad (2)$$

式(1)は重錘の落下開始時と切り離し後のエネルギー 保存式であり、被牽引物の重さを $m_1$ ,落下させる重錘 の重さを $m_2$ ,重錘落下高さをH,台車切離し時の落錘 高さをh,走行路面や滑車部を含めたシステム全体の等 価摩擦係数を $\mu$ としている。等価摩擦係数 $\mu$ のみが未知 のパラメータであったため、実験データを蓄積すること で、試験設備の状態、台車質量等に応じて変化する $\mu$ を、 設備特性として把握した。これにより試験車両の設定す る速度に応じた台車牽引距離4(H-h)と、落錘の落下 高さが決定可能となった。

#### 2. ポール側突試験方法

# 2.1 衝突アセスメントに従った試験方法の概要

今回開発したポール側面衝突試験設備は,Euro NCAPやNHTSAといった衝突アセスメントに準拠した 試験が実施できるように構築した<sup>3),4)</sup>。アセスメントに 記載されたポール側面衝突試験では,低床台車に搭載し た試験車両を,32 km/hでポールに側面衝突させる。こ のとき,通常ダミー人形を搭載し,内部センサにより計 測した荷重や加速度等で損傷を計測する<sup>5),6)</sup>。本設備で はダミー人形による評価までは行わず,試験車両に付与 される加速度や荷重,変形を計測し,構造体としての車 体評価を目的とした。いっぽうで,同アセスメントによ ると,試験車両とポール先端の衝突位置については,ダ ミー人形頭部の重心を基準とする必要がある。そこで 図3に示すように,CAD上でダミー人形を車体側面図 (諸元表の図) に仮想的に座らせ,頭部重心から衝突位 置を決定した。

#### 2.2 ポール側面衝突試験の設備詳細

ポール衝突試験設備を図4に示す。ポール部分には 十四個の荷重計を内蔵することで衝突荷重を計測できる ようにした。また高速度カメラをポール上部,左右側面 に設置し,車両衝突を様々な角度から撮影している。さ



図2 速度制御手法の計算式条件 Fig.2 Conditions of formulas for test speed control



\Center of gravity (CoG) of the dummy's head

- 図3 プロトコルで定義された衝突条件およびCADによる衝突試 験条件の検討
- Fig.3 Protocol-defined collision conditions and CAD consideration of our test collision condition



図4 ポール側面衝突試験の試験前状況 Fig.4 Pre-test condition of our EV pole side collision test

らに車両下面の衝突変形を撮影する地下ピットを走行路 地面に設置した。

大型落錘設備を動力とする本設備のポール側面衝突試 験では、台車の牽引開始~走行時に比較的大きめの慣性 力が試験車両に発生する。そしてその慣性力により試験 車両が台車上で移動するリスクがあるため、試験車両を 台車に固定するための装置(以下、車両固定装置 (Vehicle fixing device)という)を開発した。台車が牽 引開始位置まで走行すると、大型落錘が着地するととも に、ワイヤロープが台車から切り離されるため慣性力が 消失する。そこからさらに走行すると、センサが反応し て車両固定装置が解除される仕組みとしている。その 後、試験車両は一定速度、かつ固定無しの状態でポール に衝突する。

# 3. ポール側突衝突試験の計測結果

# 3.1 速度と荷重の計測

今回,ポール側面衝突試験の試験車両として,Cセグ メントのEVである車両A、およびICE車である車両B を選定し試験を行った。その際、先述の衝突速度の制御 手法を用いて、落錘落下高さを設定した。このとき車両 Aの衝突速度の予測範囲は32.3±0.5 km/hであったが、 試験結果は32.31 km/hとなり、ほぼ予測中央値となっ た。この予測範囲は各衝突アセスメント(Euro NCAP やNHTSA)が規定する衝突速度の設定速度と、その許 容誤差範囲(32.0±0.5 km/h or 32.2±0.8 km/h)を満足 している。いっぽう、車両Bの衝突速度は30.55 km/h であり、規定から少し外れるが、ほぼ同等と考えて、本 稿では比較対象として示すこととした。

本設備では十四個の荷重計を内蔵したポールを導入し たことにより衝突荷重およびその分布を計測でき、車両 変形量など、他の計測結果と組み合わせることで衝突現 象をより深く理解することができる。車両A (EV),お よびB(ICE車)によるポール側面衝突試験にて、計測 された衝突荷重の時刻歴波形を図5に示す。図中,右 側はポール前面の上下方向に複数設置した荷重計と支持 具の側面図を示し、LC1~LC14は各荷重計の記号を示す。

さらに各荷重計が計測時間中に検出した最大値を. 高 さ別にプロットしたグラフを図6に示す。

車両Aのポール衝突では、図5より、LC4→ LC2 → LC1の時系列順で最大値を計測している様子が確認でき る。ここで図6に示すように、各荷重計と車両の対応高 さを確認すると、一番先に荷重が立ち上がるLC4はBピ ラー下部の高さに位置し、LC2はサイドシルの高さに位 置する。またLC1に対応する高さ位置の車体骨格部材 は、衝突前の時点には無い。よって現象としては、まず ドアパネルやドアインパクトビームを介して, Bピラー 下部が荷重を強く受け持つようにポールと衝突した結 果,LC4の荷重が増加した。つぎにサイドシルがポール



により押し込まれた結果, LC4に少し遅れてLC2の荷重 が増加したものと考える。そのほか、各荷重計の計測値 と時刻歴、各部の変形状態について撮影動画も参照して 次節4.1で詳述する。なお、各荷重計の荷重データを合 算した波形 (Sum) の最大値は239 kN であり、同車格 の車両B(ICE車)の荷重最大値134 kNに対し,2倍近 くなった。これはサイドシルおよびその周辺部材が、バ ッテリーケースを保護するために強化されていることを 示していると考える。

# 3.2 車両変位の計測

ポール側面衝突試験では、車両の変位量(移動量)を 計測することも衝突現象を理解する上で重要である。図 7で示すように、車両Aの試験では動画上でターゲット マークなどを追跡することで変位抽出した(フロア底面 の撮影は四個のカメラで行い、試験後に動画を合成して いる。)。Euro NCAPのアセスメント規定に従い、ター ゲットマークを車体各部に300mm間隔で貼付けている。 変位抽出の結果、衝突序盤はルーフパネル上面とフロア 底面の変位は同等だが、30msを境にルーフパネル上面 の変位増加量がフロア底面を上回り始めた。これは図8 に示す様に,車両重心位置付近を回転軸として,車両全



図6 ポール高さ方向の最大荷重分布 Fig.6 Maximum load distribution toward pole height



Bottom of floor panel Roof panel top 500 Max 453 mm 400 Max 363 mm





図8 ポール衝突時のローリング角度の時刻歴変化 Fig.8 Vehicle rolling angle results during pole side collision

体がローリングしながらポールと衝突しているためと考 える。

# 4. 考察

## 4.1 EVのポール計測荷重ー撮影動画の検証

本章では、衝突荷重が高くなる車両A(EV)について、 ポール計測荷重と撮影動画の比較を行い、時系列にどの ような変形が生じているか分析した。

図5で示した車両A(EV)のポール計測荷重波形では, とくにLC1, LC2, LC4に注目し, この三つの波形およ び合計波形 (Sum)の変化を, 高速度カメラで撮影した フロア変形と比較した。その結果を図9(ポール荷重の 時刻歴波形)と図10(衝突時の観察写真, (左)車両前 面視, (右)床下面視)に示す。

まず図9,図10の時間(a)は車両Aがポールに衝突し、 荷重計測および動画撮影の開始する時間(0 ms)である。 続く時間(b)はLC4が最大になる時間(23 ms)であり, ドアパネルがポールによって押し込まれている様子が確 認できるため、ドアインパクトビームを介してBピラー 下部が押し込まれ、座屈が生じていると考えられる。ま た床下動画(複数カメラの合成)により、この時点でサ イドシルアウタの座屈も始まっていると考えられるが. サイドシルインナまでは変形が及んでいない様子も確認 できる。続いて時間(c)はLC2が最大になる時間(33 ms) であり、床下動画の変化から、サイドシルとバッテリー ケースの間にある部材が座屈した時間と考える。続いて 時間(d)は荷重計測値の合計(Sum)が最大になる時 間(42ms)である。Sumの内訳としてはLC2が最大と なり、床下動画より、サイドシルインナまでポール先端 が達している様子が確認されるため、バッテリーケース 領域に達する前に、サイドシル周辺構造でポール衝突荷 重を受け止める設計思想と推定される。また車両Aの ローリング(図8参照)が始まっている時間でもあり, ルーフサイドレールがポールに衝突している様子も確認 できる。最後に時間(e)はLC1が最大になる時間(65 ms) である。LC1はフロア底面よりも下に位置しているが (図6参照), ローリングの進行に伴い, 車体のポールサ







(a) Time point of collision starts (0ms)



(b) Time point of B-pillar and side sill buckling occurs (23 ms)



(c) Time point of beam member buckling occurs (33 ms)



(d) Sum of load curves becomes maximum (42 ms)



(e) Side sill deformation progress downward (65 ms) 図10 車両Aの動画観察の結果 Fig.10 Results of camera observation (vehicle A)

イドが沈み込んだ結果,サイドシルとポールの衝突位置 が下方へ移動し,荷重が発生したと考えられる。

また全ての時間を通して,バッテリーケースの領域に は変形が及ばない様子が動画確認できた。試験後の車両 観察でも,バッテリーケースに大きな損傷は無く,バッ テリーケース周辺部材がケース保護のため強化されてい ることがわかる。

# 4.2 衝突エネルギーの検証

今回のポール側面衝突試験では、衝突荷重および車両 変位量を計測しており、車両衝突によって生じるエネル ギー量の算出を試みた。

図7は高速度カメラ撮影動画から、ルーフパネル上面 と、フロア底面の移動を追跡して抽出した衝突方向の車 両変位であり、両位置に対応する衝突荷重計はLC12お よびLC2である。両荷重計で得られた荷重値に変位を 乗じると、それぞれの高さ位置における車両の吸収エネ ルギー量の概値を得ることが出来る。同様にLC1~ LC12(LC13,LC14は車両衝突無しのため除外)までの 各荷重計に対応した車両高さ位置の変形量が、ルーフパ ネル上面と、フロア底面まで直線的に分布するものと仮 定し、各高さ位置の変形量の変化を図11に示す様に直 線補間して求めた。図中の各点線が直線補間して求めた 各荷重計位置の変形量の推定値を示す。得られた各位置

500 LC12 400 Displacement (mm) MIMIN 300 LC2 LC1 (Corresponding Load Cell) 200 -Roof panel top 100 - -Bottom of floor panel 0 20 40 0 60 80 Measurement time (ms)

図11 直線補間した車体変形量(車両A) Fig.11 Linear Complementary Displacement Curve (vehicle A)

の変形量に、同じ高さ位置に設置した荷重計の荷重値 (図5,9)を乗じれば、LC12、LC2と同様に、各高さ位 置のエネルギー吸収量の概値が図12に示すように算出 される。またここでは、弾性回復エネルギー量や、車両 の回転運動、跳ね返り運動や、摩擦などで消費されるエ ネルギー量は、車両各部の塑性変形によって消費される エネルギー量に比べて小さいものと仮定している。

車両Aが吸収するエネルギー量の最大値は時間累積 で51 kJとなった(図12)。これは衝突速度結果(32.31 km/ h)から算出した運動エネルギー69 kJの74%である。上 述した様に、残り26%はポールを回転軸とした車両A のヨーイング運動や、タイヤ-台車間の摩擦損失などで 消費されるエネルギーなどが内訳として推定される。

図12で得られた吸収エネルギー量を、ポール高さ方 向に分布させて描画し、車両の骨格部材と対比させたグ ラフを図13に示す。図13では、車両Aと車両Bの比較 も示している。その結果、EVである車両Aについては、 サイドシルやフロアクロスに相当する高さの吸収エネル ギー量が最も高い。また図10において、バッテリー領 域まで衝突変形が及んでいなかったことから、サイドシ ルやフロアクロスが高強度・高剛性で設計されているこ とが推測される。対してICE車である車両Bは、吸収す るエネルギーの総量も51 kJに対し、相対的に低く







Fig.13 Comparison of energy absorption and corresponding parts to collision

24.7 kJ (運動エネルギーの51%) である。

このように衝突対応部品ごとの吸収エネルギー量を考 察することで、車両に組み込んだ状態の部品性能評価 や、次世代車両の部品設計に活用可能なデータとするこ とができる。

**むすび**=落錘を動力として利用し、台車や自動車車両を 水平牽引することができる衝突試験設備を立ち上げ、ポ ール側面衝突試験を実施可能にした。以下に結果概要を まとめる。

- (1)衝突アセスメント規定を満足する精度で衝突速度, 衝突挙動を制御した試験が,落錘を動力源とする 当社独自の衝突試験設備で遂行可能であることを 確認した。
- (2)荷重波形データと動画観察を連携させて、衝突現 象についてより詳細な検討を実施した結果、試験 車両の各部が、どのような順番で変形し、反力荷 重の上昇、減少に関与しているかを推定した。
- (3) 車両高さごとに計測した衝突荷重,および動画から抽出した車両変位量を用いて,ポール衝突による車両の吸収エネルギー量を試算した。

このように各部材の荷重・変形・吸収エネルギー量を 詳細に分析することで,お客様の車両に組み込んだ状態 の部材性能評価や次世代車両の設計などに活用されるこ とが期待される。

# 参考文献

- 1) 細川成之ほか. 交通安全環境研究所フォーラム. 2007, No.13.
- 2) 船田健介ほか. 自動車技術会論文集. 2022, Vol.53,No.3, p.535-540.
- EUROPEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME (Euro NCAP). OBLIQUE POLE SIDE IMPACT TESTING PROTOCOL. Ver 7. 1. 1, 2019.
- 4) U. S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION. LABORATORY TEST PROCEDURE FOR THE NEW CAR ASSESSMENT PROGRAM SIDE IMPACT RIGID POLE TEST. 2013.
- 5) 中嶋太一ほか. 自動車技術会論文集. 2020, Vol.51, No.3, p.537-542.
- 6) 高木俊介ほか. 自動車技術会論文集. 2013, Vol.44, No.3, p.851-856.

本稿は「船田健介ほか『自動車技術会大会学術講演会議予稿集(秋). 2021』」で発表した内容に、一部の図と考察を加えて編集したもので ある。

#### (論文)

# 衝突解析における塑性異方性と延性破壊挙動の影響

中島伸吾<sup>\*1</sup>·幸重良平<sup>\*1</sup>·井上功之<sup>\*2</sup>

# Effect of Plastic Anisotropy and Ductile Fracture Behavior in Crush FEM

Shingo NAKAJIMA · Ryohei YUKISHIGE · Katsuyuki INOUE

# 要旨

近年の自動車ボデーではアルミ材やホットスタンプ材の利用が進んでいる。アルミ圧延材には塑性異方性があり、 プレス成形CAEでは塑性異方性降伏関数の適用が広まっている。そこでハット型試験体による軸圧壊試験と塑性 異方性を考慮した軸圧壊解析を行い、その影響について調べた。その結果、塑性異方性を考慮した降伏関数を用 いることで軸圧壊の荷重挙動の予測精度が向上することを確認した。また炭素量の異なる三種類のホットスタン プ材を用いたハット型試験体の軸圧壊試験を行い、炭素量が高くなるとエネルギー吸収性能が低下することを確 認した。さらに破断モデルを用いた軸圧壊解析から炭素量が高いケースでは座屈変形により試験体が大きく割れ、 エネルギー吸収性能が低下することが分かった。

# Abstract

Recently, aluminum and hot-stamped materials are increasingly being used in automotive bodies. Rolled aluminum has plastic anisotropy, and the plastic-anisotropy yield function is widely applied in press-forming CAE. Hence, axial crush tests and analyses have been performed using hat-shaped specimens to investigate the effect of plastic anisotropy. The results have confirmed that using a yield function considering plastic anisotropy has improved the accuracy of predicting the load behavior of axial crushing. In addition, axial crush tests of hat-shaped specimens using three types of hot-stamped materials with different carbon contents have confirmed that the energy absorption performance deteriorates with increasing carbon content. Furthermore, axial crushing analysis using a fracture model has revealed that, with high carbon content, the specimens have been significantly cracked due to buckling deformation, resulting in a decline in energy absorption performance.

#### 検索用キーワード

アルミ材,ホットスタンプ材,衝突解析,塑性異方性,降伏関数,破断モデル

**まえがき**=近年の自動車ボデーでは電動化対応のため軽 量化が図られており,アルミ材やホットスタンプ材の利 用が進んでいる。アルミ材ではパネル系のほかに骨格系 部材への採用が広がると思われ<sup>1)</sup>,ホットスタンプ材は その強度を活用して骨格系部材に採用が広がってい る<sup>2)</sup>。

アルミ圧延材などでは塑性異方性があることが知られ ており、プレス成形CAE (Computer Aided Engineering) の分野では塑性異方性を考慮した降伏関数の適用が広が っている<sup>3)</sup>。また近年では衝突解析においても適用事例 が報告されている<sup>4)</sup>。そこでアルミ材の塑性異方性が衝 突変形挙動に及ぼす影響を調べるために、軸圧壊試験と 塑 性 異 方 性 を 考慮 した 有 限 要素 法 (FEM:Finite Element Method) による軸圧壊解析を実施した。

ホットスタンプ材においては、曲げ圧壊時の耐割れ性 が炭素量と相関があり、炭素量が増加すると耐割れ性は 低下することが示されている<sup>5)</sup>。ここでは炭素量の異な るホットスタンプ材を用いて軸圧壊試験を行い、エネル ギー吸収性能への影響を調査するとともに、破断特性や 破壊状況を検討するためFEMによる軸圧壊解析を実施 した。

# 1. アルミ材の軸圧壊挙動の調査

アルミ圧延材のプレス成形においては塑性異方性の影響が確認されており、プレス成形解析では塑性異方性降 伏関数を用いることで予測精度の向上が図られてい る<sup>6)</sup>。そこで軸圧壊に対して塑性異方性の影響を確認す るため、6000系アルミ圧延材でハット型試験体を作製 し、軸圧壊試験を実施した。またFEMによる軸圧壊解 析を行い、塑性異方性降伏関数の影響について調べた。

# 1.1 軸圧壊試験

6000系アルミ圧延材(板厚2.0 mm)を用いて軸圧壊 試験用のハット型試験体を作製した。試験体は断面 50 mm×50 mm,長さ200 mm,曲げR5 mmであり, 上下板をFSWで接合し,天板地板を試験体端部に溶接 接合した。また試験体軸方向を圧延方向0度(試験体L) および90度(試験体T)とした二種類を作製した。軸 圧壊試験状況を図1に示す。軸圧壊試験では試験速度 1 mm/secとして準静的な試験を実施し,荷重とストロ ークを取得した。

試験により得られた荷重ストローク線図を図2に示 す。最大荷重は試験体Lで119kN,試験体Tで109kN とほぼ同等であるが,破断後の荷重挙動がやや異なって

<sup>\*1(㈱</sup>コベルコ科研 技術本部 計算科学センター \*2(㈱コベルコ科研 技術本部 材料ソリューションセンター



図1ハット型試験体と軸圧壊試験状況 Fig.1 HAT specimen and axial crushing test condition





いることが確認できる。これは試験途中でハット部の上 下板間が剥離したタイミングの違いによる差が表れたも のと考えられる。試験後(ストローク約100 mm)の外 観写真を図3に示す。試験体Lと試験体Tともに破断箇 所は蛇腹変形部であり,破壊の様子には大きな差は見ら れなかった。これらのことから、今回作製した試験体に おいては塑性異方性による最大荷重や破断部位などへの 大きな影響は確認されなかった。

# 1.2 軸圧壊解析

軸圧壊解析で用いるFEMモデルはハット部にはシェ ル要素を用い、メッシュ寸法は1mm,弾塑性体でモデ ル化した。天板地板はソリッド要素を用いて弾性体でモ デル化した。また試験機の治具は剛体でモデル化した。 使用したソフトはAnsys LS-DYNAであり、解析手法と しては動的陽解法を用いた。アルミ板の材料モデルは、 等方モデルとしてミーゼスの降伏関数,塑性異方性モデ ルとして高次降伏関数である吉田6次<sup>7)</sup>を用いた。吉田 6次では軸方向を圧延方向0度,90度の2ケースとした。 吉田6次降伏関数のパラメータについては、単軸引張試 験結果と2軸引張試験結果で得られた降伏曲面<sup>6)</sup>を用 いて、CEM研究所のMATYLDを用いて求めた。2軸引 張試験で得られた降伏曲面とミーゼスおよび吉田6次の 降伏関数の比較を図4に示す。吉田6次はミーゼスより も実際の降伏曲面を再現できていることがわかる。

解析により得られた荷重ストローク線図を図5に示



(a) Specimen L
 (b) Specimen T
 図 3 軸圧壊試験後の変形破壊状況の比較
 Fig.3 Comparison of deformation and fracture after axial crushing test



図4 測定した降伏曲面と降伏関数の比較 Fig.4 Comparison of measured stress points and yield function loci



図5 軸圧壊試験とFEMの荷重ストローク線図の比較 Fig.5 Comparison of load-stroke diagrams between axial crushing test and FEM



図6 相当塑性ひずみ分布図(ミーゼス) ストローク100 mm Fig.6 Plastic strain contour at stroke 100 mm (Mises)

す。また圧壊後(ストローク100 mm)の変形状態とし てミーゼスの結果を図6に示す。なおコンターは相当 塑性ひずみを表している。おおよその荷重挙動はミーゼ スでも吉田6次でもほぼ同じであり、最大荷重は実験値 よりも高めとなっている。その後ストローク40 mm付 近から再度荷重が立ち上がる。これはハット部の蛇腹変 形部が重なる時に発生する荷重であり,立ち上がりのタ イミングは試験では30 mm,ミーゼスでは50 mm,吉 田6次では40 mmであり,吉田6次の方が試験結果に 近い。またミーゼスでは70 mm付近で極大値をもつが, 吉田6次では60 mmと75 mmで極大値があり,試験の 荷重挙動に近い結果となっている。

変形初期(ストローク10 mm)での相当塑性ひずみ 分布の比較を図7に示す。ミーゼスでは中央で座屈開 始しているが,吉田6次では圧延方向0度,90度のいず れも試験体下側で座屈開始しており,軸圧壊試験の圧壊 状況と類似している。塑性ひずみ量はミーゼスでは吉田 6次よりも稜線(りょうせん)部で高くなっているが, 応力三軸度(=-静水圧応力/ミーゼス相当応力)分布 を確認したところ稜線部の座屈変形は等二軸応力状態で あった。図4から等二軸応力状態(応力比1:1)にお いてミーゼスは実測および吉田6次と比較して降伏応力 が低いため塑性ひずみが高くなったと考えられる。

変形中期(ストローク50 mm)での変形状態と相当 塑性ひずみ分布の比較を図8に示す。吉田6次では座屈 変形部が中央より下側であるため、ハット部の下板が折 りたたまれて蛇腹変形の二段目ができつつある。いっぽ うでミーゼスでは下板が折りたたまれている状態であり 蛇腹変形の一段目途中となっている。この変形状態の差 が荷重極大値が表れるストローク量の違いとなったと考 えられる。

以上のことから、塑性異方性を考慮すること(吉田6

次) で変形状態が実際に近づいており,アルミ材による 軸圧壊挙動の予測精度を向上させるためには,実際の降 伏曲面を精度よく再現できる塑性異方性降伏関数を用い ることが一つの方法であることが示された。

# 2. ホットスタンプ材の軸圧壊挙動の調査

一般的にホットスタンプ材では炭素量が増加するほど 強度は上がるが、靭性(じんせい)が低下することが知 られており、自動車の骨格系部材に採用する場合にはエ ネルギー吸収性能の確認が重要である。そこで、ホット スタンプ模擬材でハット型試験体を作製し、そのエネル ギー吸収性能が炭素量によってどの程度影響を受ける か、軸圧壊試験で確認を行った。また破断特性を考慮し た軸圧壊解析を行い、破壊挙動の違いについて比較した。 2.1 ホットスタンプ材の作製

ホットスタンプ材をVIF(真空誘導炉(Vacuum Induction Furnace))溶製し,板厚1.2 mmの冷延鋼板 を作製した。炭素量は0.2,0.3,0.4%Cの三種類とした。 化学成分を表1に示す。ホットスタンプ工法の模擬と して,加熱炉により930℃で300秒加熱後にダイクエン チによる冷却を行った。母材組織がほぼマルテンサイト 組織となっていることを組織観察により確認している。 試作板の機械的特性を表2に示す。単軸引張試験にお ける破断伸びはいずれも同等である。また破断特性を取 得するために三種類(せん断,切欠き付き単軸引張,球 頭張り出し)の破断特性試験を実施した。



図8 相当塑性ひずみ分布の比較 ストローク50 mm Fig.8 Comparison of plastic strain contour at stroke 50 mm

表1 ホットスタンプ材の化学成分 Table 1 Chemical composition of hot stamped steel

Matavial			Com	oosition (	wt%)		
Material	С	Si	Mn	Cr	AI	Ti	В
0.2%C	0.192	0.20	1.21	0.16	0.036	0.020	0.0018
0.3%C	0.290	0.19	1.25	0.17	0.041	0.022	0.0015
0.4%C	0.400	0.20	1.18	0.16	0.036	0.020	0.0017

表2 熱処理後の機械的特性 Table 2 Mechanical properties after heat treatment

	Material	0.2%YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	
0.2%C		957	1,349	6.8	
	0.3%C 1,148		1,698	6.6	
	0.4%C	1,317	2,087	6.7	

# 2.2 軸圧壊試験

炭素量の異なる三体の軸圧壊試験用ハット型試験体を作 製した。ハット部は断面50 mm×50 mm, 長さ200 mm, 曲げR5mmとして、上下板をスポット溶接で接合した (図9)。またハット部端部に天板・地板をアーク溶接し た。軸圧壊試験では試験速度1 mm/secとして準静的な 試験を実施し、荷重とストロークを取得した。

得られた荷重ストロークとエネルギー吸収量の推移を 図10に示す。0.2, 0.3%Cではほぼ同等の吸収エネルギー 量となるが、0.4%Cでは最大荷重発生後に荷重は低下し たままとなり、エネルギー吸収量はほとんど増加してい ない。ストローク90mmでの変形状態の比較(図11) からは0.4%Cではハット部が大きく割れていることが確 認される。0.2%Cではハット部が蛇腹変形し、0.3%Cで は蛇腹変形の途中でハット上下板の接合部付近で破断し ている。

蛇腹変形となる部位では平面ひずみ状態と考えられる ことから、破断特性取得のために実施した切欠き付き単 軸引張試験(平面ひずみ状態)における破断伸びと軸圧 壊試験でのエネルギー吸収量の炭素量による変化を 図12で比較した。エネルギー吸収量は0.4%Cで急激に 低下しているが、破断伸びはほぼ直線的に低下してお



図9 ハット部の形状 Fig.9 Dimension of hat shaped specimen





り、切欠き付き単軸引張試験で得られた破断伸びとエネ ルギー吸収量の相関が弱いことが分かる。

# 2.3 軸圧壊解析

軸圧壊解析のFEMモデルはハット部にはシェル要素 を用い、メッシュ寸法は1mm, 弾塑性体でモデル化し た。天板地板はソリッド要素を用いて弾性体でモデル化 した。また試験機の治具は剛体要素でモデル化した。使 用したソフトはSIMULIA Abaqus/Explicitであり, 解 析手法としては動的陽解法を用いた。三種類のホットス タンプ材の材料モデルは等方弾塑性体を仮定してミーゼ スの降伏関数を用いた。延性金属の破断モデルは様々な モデルが提案されており、衝突解析においてはH. Hooputrara ら<sup>8)</sup> や Y.Bai ら<sup>9)</sup> の事例が知られている。こ こでは応力三軸度を基準とした Y.Bai らのモデルを用い た。破断モデルのパラメータは四種類(せん断、単軸引 張, 切欠き付き単軸引張, 球頭張り出し)の破断特性試 験から求めた。軸圧壊解析の結果得られた荷重ストロー ク線図とエネルギー吸収量の推移を図13に、ストロー ク90mmでの変形状態の比較を図14に示す。いずれも ほぼ実験での荷重挙動の推移を再現できている。変形破 壊状況については、0.2%Cでは蛇腹変形し、0.3%Cでは 蛇腹変形の途中でハット部が部分的に破壊し,0.4%Cで は蛇腹変形せずにハット部が大きく破壊し、およそ試験 結果と同様となった。

ストローク50mm付近の変形状態の比較を図15に示 す。0.3%Cでは割れは一部にとどまっているが、0.4%C では座屈した部位が大きく割れている。そのため0.4%C では蛇腹変形せずにエネルギー吸収量が増加しなかった と考えられる。

以上の結果から, 軸圧壊でのエネルギー吸収性能を予



図12 エネルギー吸収量と平面ひずみ状態での破断伸びの炭素量 との相関

Fig.12 Absorbed energy and total extension at fracture in plane strain vs carbon contents



(a) 0.2%C

(c) 0.4%C

図11 軸圧壊試験後の変形破壊状況の比較 ストローク90 mm Fig.11 Comparison of deformation and fracture after axial crushing test at stroke 90 mm







図14 変形状態の比較 ストローク90 mm Fig.14 Comparison of deformation at stroke 90 mm



図15 変形状態の比較 ストローク50 mm Fig.15 Comparison of deformation at stroke 50 mm

測するには、様々な試験片形状による破断特性試験結果 から構築される破断モデルを用いた解析検討が必要と考 えられる。またこの解析技術の活用として、必要な性能 を満たす機械的特性や破断モデルパラメータをパラメー タスタディにより推定し、ホットスタンプ材の炭素量な どを試作前に検討することなどが想定される。

**むすび**=ハット型試験体を用いた軸圧壊試験をアルミ材 とホットスタンプ材で実施し,合わせて軸圧壊解析との 比較検討を行った。その結果,アルミ材に対しては塑性 異方性を考慮することで最大荷重後の荷重挙動の予測精 度が向上した。またホットスタンプ材に対しては破断モ デルを用いることで,実際の割れ挙動を再現し炭素量が 増加したときのエネルギー吸収量の変化を予測できた。 今後も衝突解析における変形破壊挙動の予測精度向上の ため,材料モデルや破断モデルの精度向上の取り組みを 継続していく考えである。なお本稿は著者らが発表した 文献[10,11]を基に追加検討したものである。

# 参考文献

- 1) 櫻井健夫. 軽金属. 2021, 第71卷, 第7号, p.283.
- 2) 齋藤和也. まてりあ. 2014, 第53巻, 第12号, p.584.
- 3) 濱崎洋. 軽金属. 2015, 第65巻, 第11号, p.536.
- C.P. Kohar et al. Int. J. Solids and Structures. 2017, Vol.128, p.174-198.
- 5) 内藤純也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.69.
- 6) 桑原利彦ほか. 軽金属. 2015, 第65巻, 第5号, p.164.
- 7) F. Yoshida et al. Int. J. Plasticity. 2013, Vol.45, p.119.
- H. Hooputra et al. Int. J. Crashworthiness. 2004, Vol.9, No.5, p.449-464.
- 9) Y. Bai et al. Int. J. Fracture. 2010, Vol. 161, No.1, p.1-20.
- 10) 幸重良平ほか. 自動車技術会秋季大会学術講演会予稿集. 2023, No.90-23.
- 井上功之ほか. 自動車技術会秋季大会学術講演会予稿集. 2023, No.89-23.

# (解説)

# 車両電動化に資する分析・評価技術

坪田隆之<sup>\*1</sup>(博士(理学))・阿知波 敬<sup>\*1</sup>(博士(工学))・西村 学<sup>\*1</sup>・高梨泰幸<sup>\*1</sup>・常石英雅<sup>\*2</sup>・小川 稜<sup>\*2</sup>

# Analysis and Evaluation Technologies Contributing to Vehicle Electrification

Dr. Takayuki TSUBOTA · Dr. Takashi ACHIHA · Manabu NISHIMURA · Yasuyuki TAKANASHI · Hidemasa TSUNEISHI · Ryo OGAWA

# 要旨

走行中CO<sub>2</sub>削減のために,自動車の電動化が世界的に進行している。電動パワートレインは電池パック,インバー タ,モータで構成されるが,環境負荷低減に加えて航続距離の延長や急速充電対応,エネルギー効率の向上など の観点で開発が進められており,これらの開発には分析・評価技術が不可欠である。本稿では車両電動化を支援し, 脱炭素社会の実現に貢献するためのリチウムイオン電池,全固体電池の試作・評価技術,Cs-STEMによる原子分 解能観察やSEMによるデバイス動作中の動的挙動観察などの先端観察分析技術,電池リサイクル支援技術,パワー 半導体の評価技術を概説する。

# Abstract

Vehicle electrification is progressing worldwide to reduce  $CO_2$  emissions while driving. An electric powertrain comprises a battery pack, an inverter, and a motor, and this development aims at reducing the environmental burden, extending the cruising distance, enabling rapid charging, and improving energy efficiency. For this development, analysis and evaluation technologies are essential. This paper provides an overview of prototyping and evaluation technologies for lithium-ion batteries and all-solid-state batteries, which support vehicle electrification and contribute to the realization of a carbon-free society, advanced observation and analysis technologies. These steps include atomic resolution observation by Cs-STEM and dynamic behavior observation during device operation by SEM, battery-recycling support technologies, and evaluation technologies for power semiconductors.

# 検索用キーワード

脱炭素,カーボンニュートラル,電気自動車(BEV),電動パワートレイン,リチウムイオン電池,全固体電池,モータ, インバータ,Cs-STEM, in situ SEM,パワー半導体,パワーサイクル試験,リサイクル

まえがき=地球温暖化・気候変動は国境を越えた共通課 題である。脱炭素に向けて各国で環境規制強化が進んで おり,我が国においては、「2050年カーボンニュートラ ル,脱炭素社会の実現」が宣言され、2021年4月には温 室効果ガス削減目標について、「2030年度の排出量を、 13年度比で46%削減」と大幅に引き上げられている。

脱炭素の世界的な潮流は日本経済を支える重要な基幹 産業である自動車産業に大きな影響を与える。国土交通 省の「2020年度温室効果ガス排出量(確報値)概要」 によると,我が国における運輸部門からのCO<sub>2</sub>排出量は 18%と産業部門に次ぐ多さであり,さらに運輸部門にお ける自家用車貨物車からの排出量は80%を超えている ことから車両の電動化が急務となっている。

電動車両は、ハイブリッド車(HEV:Hybrid Electric Vehicle), プラグインハイブリッド車(PHEV:Plug in Hybrid Electric Vehicle), 電気自動車(BEV:Battery Electric Vehicle), 燃料電池車(FCV:Fuel Cell Vehicle)の4種類に分類される。このうち,電池パックの電力のみで走行するBEV,水素と酸素を反応させて発電する 電力で走行するFCVは走行中のCO<sub>2</sub>排出が無く,環境 負荷が低い。 BEVには従来のICE車(Internal Combustion Engine: 内燃機関)には無かった,強電の電池パック,インバー タ,モータから構成される電動パワートレインが搭載さ れている<sup>1)</sup>。電池パックを構成する二次電池は,航続距 離や加速などの走行性能に大きく影響を与える基幹部品 である。航続距離の延長には高エネルギー密度化,急速 充電対応や加速など車両運動性能向上に必要な高入出力 化,さらなる安全性向上など,研究開発が盛んに行われ ている。

インバータはモータを回転させるために電池パックか らの直流電流を交流に変換する電力変換装置である。こ の電力変換回路にはSi半導体が搭載されたパワーMOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor) や IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor: 絶縁ゲート型 バイポーラトランジスタ)が用いられているが、エネル ギー損失の低減に向けて、近年ではワイドギャップ半導 体である炭化ケイ素 (SiC), 窒化ガリウム (GaN)の実 用化が進められている。

モータはインバータを介した電池パックの電気エネル ギーを運動エネルギーに変換する。加えて、制御回路や ギアでのエネルギー損失を抑え、モータの発熱を制御す

\*1株式会社コベルコ科研 技術本部 EV・電池ソリューションセンター \*2株式会社コベルコ科研 技術本部 物理解析センター

る熱マネジメントが必要となる<sup>2)</sup>。従来はモータ, ギア, インバータが独立して構成されていたが, 近年では小型 化・軽量化のために, これらを一体化した「e-Axle(イ ーアクスル)」の搭載が進められている。

コベルコ科研ではこれら電動パワートレインの各コン ポーネントについて評価解析を行っている。二次電池に 対しては、電池試作・電池特性評価、電池解体調査・分 析、計算科学、安全性試験のトータルソリューションを 展開している<sup>3)</sup>。またインバータについてはパワー半導 体の評価や、コンタクタ、ヒューズなどのジャンクショ ンボックス搭載部品の通電試験,モータやギア, e-Axle の回転試験を行っている。加えて海外製のBEVを中心 に,走行性能試験,解体・構造調査を行っている。車両 には種々の電流センサや熱電対、冷却流路への圧力セン サなどを取り付け、テストコースやシャシーダイナモメ ータ上で走行試験を行い、取り付けたセンサとCANデ ータの取得と解析から、走行中の電動パワートレインの 制御機構、熱マネジメント制御機構を明らかにしてい る。また、車両を解体し、電動パワートレインや電池パ ック、ボデーの構造調査を行っている。

電動パワートレインのうち,最新のモータ評価技術に ついては本号に掲載されている別稿(本号 p.38~44, 「Back to Back型モータ評価ベンチ」参照)に譲り,本 稿では,電池パックに搭載されるリチウムイオン電池や 次世代電池として期待される全固体電池の試作評価技 術,最新の分析技術,電池リサイクル支援技術,インバ ータに搭載されるパワー半導体モジュールの評価技術に ついて述べる。

1. 二次電池の試作・評価技術

# 1.1 液系リチウムイオン電池の試作技術

リチウムイオン電池は従来の水系電池と比較して高い エネルギー密度が特徴であり,BEVをはじめとする電動 車両へ搭載されている。現在は、有機溶媒の電解液を用 いた液系リチウムイオン電池が主流である。当社では電 池試作評価を行っており、開発品を含む種々の材料を用いた電極試作、電池試作が可能である。図1に示す円筒電池、ラミネート型電池、角型電池の試作を行っており、繰り返し充放電によるサイクル劣化、充電状態のまま長時間保持することによる保存劣化のデータを取得するとともに、新たな評価・解析手法の開発を行っている。

# 1.2 全固体電池の試作評価技術

さらなる高エネルギー密度、高入出力特性となる次世 代電池が検討されている中で、近年は有機電解液を固体 電解質に置き換えた全固体電池の開発が盛んに行われて いる<sup>4),5)</sup>。とくに硫化物系固体電解質はイオン伝導率の 高さ,活物質/固体電解質界面形成の容易さから,有力 な固体電解質として着目されている。現在、大型全固体 電池の製造は、従来の液系リチウムイオン電池の製造プ ロセスをベースに開発が進められているが確立した製造 プロセスは無く、全固体電池に最適化された製造プロセ スの検討が行われている。いっぽうで、硫化物系固体電 解質は大気中の水分と反応し容易に変質することから. 塗工機やロールプレスといった大型試作設備の露点制御 が必要である。当社の塗工型全固体電池試作プロセスを 図2に示す。室内露点が-50℃以下に調整されたスーパ ードライルームにて、露点-80℃以下に管理したAr雰 囲気のグローブボックス内で、合材スラリーを混練し集 電箔に塗工することで大面積の全固体電極シートの作製 を行う。その後、作製した電極シートは低露点環境を維



図1 評価用試作電池 Fig.1 Battery cell for testing



図2 塗工型全固体電池の試作プロセス Fig.2 Coating all solid-state battery prototyping process


図3 塗工型全固体ラミネートセルの電池特性 Fig.3 Battery characteristics of coating all solid-state battery

持したまま,ロールプレスによる密度調整や積層・パッ キングを行う。活物質/固体電解質の接合界面形成にお いては,等方圧加圧装置(CIP: Cold Isostatic Pressing, WIP: Warm Isostatic Pressing)を使用することで,高 圧かつ加熱下での処理が可能となり,良好な接合界面を 有した塗工型全固体電池を作製する。

電池試作事例として,正極活物質にLiNbO<sub>3</sub>コーティ ングを施したLiNi<sub>1/3</sub>Mn<sub>1/3</sub>Co<sub>1/3</sub>O<sub>2</sub>,負極活物質にグラフ ァイト,固体電解質にアルジェロダイト型Li<sub>6</sub>PS<sub>5</sub>Cl,導 電助剤にアセチレンブラックを用いて作製した塗工型全 固体ラミネートセルの外観および電池特性評価結果を 図3に示す。0.1C,25℃の充放電において1.2 mAh程度 の放電容量を示す塗工型全固体電池の作製が可能であ る。塗工型全固体ラミネートセルにより材料特性の評価 や電極構造の最適化,劣化メカニズム調査を行ってい る。

#### 2. 最新の二次電池分析技術

## 2.1 低ダメージ原子分解能観察・分析技術

車載用電池では長期使用が想定されることから,長寿 命化に向けた電池の劣化機構解明に関する多くの報告が ある。高エネルギー密度となる電池では,正極活物質に LiNi<sub>x</sub>Co<sub>y</sub>Mn<sub>1-xy</sub>O<sub>2</sub>など層状岩塩構造を用いることが多い が,近年ではさらなるエネルギー密度向上のためNi比 率を高めた材料が使用されている。いっぽうで,Ni比率 を高めるとサイクル特性が低下する問題がある。

正極の劣化機構解明のためには、サイクル劣化による 正極活物質の結晶構造変化の解析が重要となる<sup>6).7)</sup>。一 般的な結晶構造の解析方法としてX線回折や電子回折な どがあるが、結晶構造を直接観察することが可能な、球 面収差補正機能付き走査透過電子顕微鏡(Cs-STEM: Cs-corrected Scanning Transmission Electron Microscope)を用いた原子分解能観察を紹介する。観 察はFEI社製の最新鋭のCs-STEMであるSpectra Ultra を用いた。本装置の特徴は、高い空間分解能と高検出効 率のエネルギー分散型X線分光(EDS:Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)に加え、加速電圧可変 時の高いビーム安定性であり、短時間で最適な条件の観 察・分析が可能となる。試料はハイニッケルタイプの正 極活物質であるLiNi<sub>0.8</sub>Co<sub>0.05</sub>Al<sub>0.15</sub>O<sub>2</sub>(NCA)を用いた。

正極活物質の断面STEM観察結果とその結晶構造モ デルを図4(a)に示す。正極活物質の結晶構造は六方



図4 (a) HAADF像 (200 kV) とNCAの結晶構造 (b) 原子分解能EDSマップ (60 kV) Fig.4 (a) HAADF image (200 kV) and layered rocksalt structure of

(a) INTEDT image (200 kV) and layered rocksaft structure of NCA compound
 (b) Atomic-resolution EDS maps (60 kV) of Ni (red), O (blue) and Overlay

晶系の層状岩塩構造であり、<100>結晶方位から観察を 行うことで、Ni, Coおよび Al 周囲の酸素分布状況を確 認できる。加速電圧 60 kV での原子分解能 EDS マッピ ング分析結果を図4(b)に示す。STEM像で確認され た層状岩塩構造がEDSマッピングの結果からも確認で きており、とくに注目すべき点は、加速電圧60kVの分 析結果においてNiやCoの遷移金属の周囲に配位してい る酸素が明瞭に分離して可視化できている点である。従 来の装置では、低加速電圧時の空間分解能、EDSの検出 効率から、軽元素の原子分解能EDSマッピングは困難 であったが、本装置の特徴である高分解能、高検出効率 のEDSにより分析可能である。また、通常のEDSマッ ピングでは、長時間の電子線照射により試料の構造が破 壊されてしまうことがあり、今回のNCAもまた、電子 線照射によるカチオンミキシングを起こしやすい材料の 一つである。このような電子線にセンシティブな材料の 分析には、低加速、低電流での観察・分析が必要となる。 今回の加速電圧60kVでのEDSマッピングでは、照射 電流量も10pAと低電流であり、結晶構造の損傷が無い 状態でEDSマッピングを得ることができる。この低ダ メージ観察は、液系の電池材料のみならず、さらに電子 線にセンシティブとなる全固体電池材料の観察・分析に も有効である。とくに全固体電池の正極活物質と固体電 解質の界面反応は原子分解能レベルでの観察および分析 は高難度である。今回報告した低ダメージ観察に加え, 大気非暴露かつクライオ冷却加工・観察を組み合わせ, 現在解明できていない界面反応に伴う結晶構造変化を可 視化していく。

#### 2.2 マイクロプローブ SEM による in-situ 観察技術

全固体電池では高エネルギー密度化のために,金属Li を負極として用いることが検討されている。しかしなが ら金属Liは充放電中にリチウムデンドライトが析出し 短絡する課題がある。そのため,金属Li析出の挙動を 可視化し,その抑制のための対策が必要となる<sup>8)</sup>。走査 電子顕微鏡(SEM: Scanning Electron Microscope)の 試料室で充放電を行いながらその場観察を行う「in-situ SEM」による高分解能観察が望まれるが、リチウム析 出は電極面上のごく一部にスポット的に発生する傾向に あり、その観察が困難とされてきた。これらの問題を解 決するためSEMに可動式のマイクロプローブを組み込 み、プローブ先端から局所的に電圧を印加することによ ってSEM観察領域にリチウム析出させ、その析出形態 や破壊挙動の詳細調査を行った。

固体電解質にはLi<sub>6</sub>PS<sub>5</sub>Clを用いた。CIPにより高密度 化し、さらに対極として金属リチウム箔を圧着してその 場観察用の試料とした。大気非暴露のまま固体電解質露 出面を観察面としてSEMに導入し、任意の位置にタン グステン製プローブで触れ、プローブ-固体電解質-対 極間に負方向の電圧掃引することによってプローブ直下 に金属リチウムを析出させ、その様子をSEMによって in-situ観察した。観察は試料の温度を制御して行い、室 温と80℃の2種で比較した。

室温および80℃での電圧掃引時のin-situ SEM観察結 果を図5に示す。室温では-0.13 V付近よりプローブ直 下での金属リチウムの析出が見られた。-0.17 V付近で は固体電解質に亀裂が生じて内部から析出が見られ,同 時に生じた電流値の急増により設定した上限電流 (0.2 mA) に達し停止した。80℃では-0.05 V付近より プローブ直下での金属Li析出が見られ,-0.18 V付近よ り析出が周囲の領域に拡大,電流値30 µA以下のまま設 定した上限電圧(-0.5 V)に達し停止した。昇温によ り明確な析出開始電圧の低下が見られ,室温では亀裂進 展し深部からの析出が急増したいっぽうで,80℃では表 面近傍の欠陥より析出しているものと予想される。固体 電解質の特性を評価した結果を**表1**に示す。機械特性



Crack initiation site marked by arrows

図5 リチウム析出のIn-situ SEM 観察 Fig.5 In-situ SEM observation of Li deposition の違いに加え,電気伝導率およびイオン伝導率に顕著な 差が確認された。低温であるほど電子伝導性が高く,よ り深部に電子が到達することによって深部からの析出が 増加しているものと考えられる。これらの技術により全 固体電池の動作中の動的挙動を把握することが可能とな る。

#### 3. 二次電池のリサイクル支援技術

近年,需要が拡大する電池材料に対して,鉱物資源は 産出国が限定しており,特定国へ依存するリスクの低 減,鉱山開発による環境破壊の抑制のため,電池のリサ イクルによる資源の確保が進められている<sup>9)</sup>。欧州では 2023年に発効された欧州電池規則においてリサイクル 材の一定量以上の使用を求めており,我が国では経済産 業省の蓄電池戦略においてリサイクルシステムの確立を 目標とする計画が示されている。NEDO(新エネルギー・ 産業技術総合開発機構)においてはグリーンイノベーシ ョン基金が設立され,蓄電池のリサイクル関連としてプ ロセスの検証・高度化から,操業を目指した開発が進め られている。

ここで、リチウムイオン電池における資源の循環を原 料から電池の製造・利用・リサイクルの観点で示した概 略図を図6に示す。この資源循環において、破砕・選 別後の材料を原料に戻すプロセスの最適化と、正極板よ り正極活物質を破壊せずに取り出し、活物質として電池 の製造に使用する「ダイレクトリサイクル」と呼ばれる プロセスの実現が、クローズドループを成立させるうえ で重要となる<sup>10)</sup>。

当社では化学分析・物理解析技術を活用した状態評価 と計算科学を活用したシミュレーション評価を駆使し, リサイクルプロセスの検証・最適化の支援を行っている。

評価事例として、電気炉での電池失活処理後に破砕選 別された、活物質を含む「ブラックマス」の断面SEM 観察,EDSマッピング分析結果を図7に示す。加熱処理 条件により元素分布や活物質の変質状態が異なるため、 金属抽出処理前に状態を把握しておくことは重要であ る。ダイレクトリサイクルにおいては電極の合材層から 活物質を分離・選別する必要がある。粒子の選別方法と しては、浮遊選別や比重選別などがあるが、今回、比重 選別法の一つであるハイドロサイクロンにおける活物質 の分離についてシミュレーションにより検討を行っ た<sup>11)</sup>。ハイドロサイクロンは、粒子を含む溶液を円周方 向に高速で供給することにより、比重の重い粒子は下部 へ、比重の軽い粒子はサイクロン内の上昇流により上部 に排出されることにより分離される。粒子径による分離

表1 実験に用いた電解質の各種物性値の評価結果 Table 1 Results of evaluation of various properties of electrolytes used in experiments

Measurement method	Properties	Unit	RT	80°C	
AC impedance	Ionic conductivity	S/cm	2.42×10 <sup>-3</sup>	2.22×10 <sup>-2</sup> *	
High-resistance measurement	Electrical conductivity	S/cm	1.86×10 <sup>-7</sup>	6.07×10 <sup>-8</sup>	
Nanoindentation	Indentation hardness	GPa	6.0×10 <sup>-1</sup>	4.1×10 <sup>-1</sup>	
	Young's modulus	GPa	1.3×10	1.1×10	

\*The values at 80°C are extrapolated from the values at 0, 25, 50 and 70°C.



図6 資源循環とリサイクル処理の流れ Fig.6 Resource circulation and recycling process flow



図7 リサイクル材料であるブラックマスの断面 SEM 観察と EDS による成分分析

Fig.7 Example of evaluation of recycled materials: Cross-sectional SEM observation and EDS analysis of black mass



図8 ハイドロサイクロンにおける活物質の軌跡 Fig.8 Path followed by the active materal particles inside the hydrocyclone

状況の違いを図8に示す。粒径10µmでは上下に分離 されるが、大粒径50µmでは下部の容器に全量が集ま っている。シミュレーションを活用することで、実機試 験が難しい条件での検討を行うことができる。実測とシ ミュレーションを組み合わせ、リサイクルプロセス開発 支援を行っている。

# 4. パワー半導体モジュールの技術動向と評価技術

BEV の電力変換を担うパワーモジュールは,電費向上のため小型化,高密度化や急速充電に対応した高出力 化が進んでおり,電流を制御しているスイッチング素子 の発熱密度が増大している<sup>12)</sup>。そのため素子周辺部材へ 与える熱の影響も大きくなり,熱的な観点からの信頼性 試験が重要となっている。

パワーサイクル試験(P/C試験)は、素子への通電 On/Offを繰り返し、素子の発熱と冷却によって周辺部 材との線膨張係数差に起因するせん断ひずみを発生さ せ、接合部の劣化を加速させて寿命を評価することを目 的とした試験である。1 サイクルの通電時間が数秒~数 十秒と短い場合、素子上面や底面の接合部の寿命評価が 主となる $\Delta T_j$ -P/C試験、通電On時間が数分と長い場合 は素子下に配置された絶縁基板周囲の接合部の寿命評価 が主となる $\Delta T_c$ -P/C試験といった分類がされている。ま た通電時の制御パラメータとして $T_j$ (ジャンクション温 度)、 $T_c$ (ケース温度)や電流値、電力などを一定に制御 する条件が存在する。

当社にて設計・製作したP/C試験機を用いた $\Delta T_j$ -P/C試験と、劣化解析として電気特性測定と超音波顕微鏡観 察(SAT: Scanning Acoustic Tomography)により劣 化状態を評価した事例を紹介する。

試験体は市販の定格150 AのSi MOS-FETを用い,20 ℃の冷却水を通水したCu製プレート上に伝熱グリスを 介して設置した。通電電流値は定格の150 Aに加え,定 格を超える180 A,185 Aとした。試験中は電流値一定 条件にてOn/Off=1 sec/9 secで繰り返し通電し,ドレ イン・ソース間電EV<sub>ds</sub>が初期安定値±10%となった際 に試験停止とした。

P/C試験結果を図9に示す。定格の150Aの条件では 30万サイクル程度で試験停止したが、定格を超える 180A,185Aでは1,000サイクル以下で試験停止となっ た。電気特性評価結果を図10に示す。ゲート特性を表 す $I_d$ - $V_{gs}$ 特性は試験前後で変化はみられなかった。いっ ぼうで出力特性を表す $I_d$ - $V_{ds}$ 特性は試験後にドレイン電







図10 I<sub>d</sub>-V<sub>ss</sub>特性(a), I<sub>d</sub>-V<sub>ds</sub>特性(b) のP/C試験電流との関係 Fig.10 Relationship between P/C test current and both the I<sub>d</sub>-V<sub>gs</sub> characteristics (a) and I<sub>d</sub>-V<sub>ds</sub> characteristics (b)



図11 ワイヤボンディング接合界面のSAT評価結果 Fig.11 SAT evaluation of wire bonding interface

流が30A以上でV<sub>ds</sub>が増加する挙動がみられた。接合部 の剥離状況を,SATにより評価した結果を図11に示す。 未試験品と比較して,試験後は通電電流が大きくなるに つれて,ワイヤボンディング接合部の剥離領域が大きく なっており,185Aでは樹脂部の剥離も見られた。これ らの結果より,P/C試験で生じた繰り返し熱応力によ り,ワイヤボンディング接合部の剥離が進行したため抵 抗が増加し、 $I_d$ - $V_{ds}$ 特性における $V_{ds}$ の増大として確認されたと考えられる。

当社では今回紹介した評価手法以外にも断面SEM による剥離状況の観察,EBSD (Electron Backscatter Diffraction)を用いたはんだ組織の評価など多様な解析 が可能である。今後,電力効率向上や小型・軽量化に向 けてSiCやGaNを使用したデバイスの適用が進むと発熱 密度が上がり,周辺部材との線膨張率の違いによる剥離 が進行する懸念がある。今回紹介した評価技術と手法を 用いてパワーモジュールの課題解決に貢献していく。

**むすび**=国際社会における脱炭素の取り組みは急務であ る。加えて国際情勢が不安定化する中,エネルギーの多 様化や資源の確保は重要度を増しており,従来のガソリ ンに加えて水素の利用や電動化,合成燃料などの新燃料 の検討が進められている。

二次電池は電動化にとって重要な技術であり,現行の 液系リチウムイオン電池の高エネルギー密度化や高安全 化の取り組みが進められるとともに,全固体電池などの 新型電池に大きな期待が寄せられている。また電力効率 の向上のためにSiCやGaNなどの次世代パワー半導体へ の期待も高まっている。

当社はBEVの評価に関する電池パック開発支援とし て,熱マネジメント試験や振動・衝突など構造体の試験 を行っている。これらの分析評価・解析技術を駆使した 総合評価技術により電動化を支援し,脱炭素社会の実現 に貢献していく。

#### 参考文献

- 1) B. Wang et al. Energy Conv. Manag., 2014, Vol.86, p.916-926.
- S. Madhavan et al. Sci. Rep. 2023, Vol.13, 10125. https://doi.org/10.1038/s41598-023-36989-2.
- 3) 坪田隆之ほか. R&D神戸製鋼技報. 2022, Vol.71, No.2, p.64-69.
- 4) N. Kamaya et al. Nature Mater. 2011, Vol.10, p.682-686.
- A. Hayashi et al. Electrochem. Commun. 2003, Vol.5, No.8, p.701-705.
- 6) C. R. Birkl et al. J. Power Sources. 2017, Vol.341, p.373-386.
- 7) 坪田隆之ほか. R&D神戸製鋼技報. 2015, Vol.65, No.2, p.92-97.
- C. Hogrefe et al. J. Power Sources. 2023, Vol.556, p.232391. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232391.
- G. Harper et al. Nature. 2019, Vol.575, p.75-86. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5.
- 10) G. Wei et al. iScience. 2023, Vol.26, p.1-12.
- 竹田陽亮ほか. 日本船舶海洋工学会講演会論文集. 2015, Vol.20, p.549-552.
- 12) 岩室憲幸. 表面技術. 2023, Vol.74, No.6, p.296-300.

#### (技術資料)

# Back to Back型モータ評価ベンチ

山下俊郎<sup>\*1</sup>·榊原健男<sup>\*2</sup>

# Back-to-back Type Motor Evaluation Bench System

Toshiro YAMASHITA · Takeo SAKAKIBARA

#### 要旨

カーボンニュートラル社会につながる環境問題への取り組みとして,当社は電動化に着目している。とくに,自 動車の電動化の進展は目まぐるしく,当社グループの材料・制御・モノづくり・評価といった様々な技術を利用 できる可能性を感じている。電気自動車における主要部品であるモータにおいても,いくつかの提案を行ってき たが,ここで培ったモータ評価技術と,コベルコ科研の試験評価技術を合わせて,高速モータの評価手法を試験 手法として提案している。本稿では,一つの適応例として,小規模システムで高速かつ大出力モータが如何に評 価できるかを示した。

#### Abstract

To address environmental issues, Kobe Steel focuses on electrification with a view to reaching a carbonneutral society. The electrification of automobiles, in particular, has been progressing at a dizzying pace, providing opportunities to utilize KOBELCO Group's various technologies in areas such as materials, control, manufacturing, and evaluation. Several proposals have been made for motors, major components in electric vehicles. A high-speed motor evaluation method has been proposed as a test method combining the motor evaluation technology herein developed and the testing evaluation technology of Kobelco Research Institute, Inc. This paper describes the example of an application in which a high-speed, high-output motor is evaluated in a small-scale system.

**検索用キーワード** 電動化, EV, モータ, 制御, 評価

まえがき=当社グループは、社会課題の解決に挑戦する ことを企業理念の一つとしている。また、2024年度から はじまった新中期経営計画では、「カーボンニュートラ ルへの挑戦」を最重要課題に掲げている。この環境問題 に貢献する一つの項目として、当社は電動化に着目して いる。

とくに、今般の自動車の電動化(EV: Electric Vehicle) の進展は目まぐるしく、当社グループの材料・制御・モ ノづくり・評価といった様々な技術を利用できる可能性 を感じている。

電動化の一つの要素であるモータ技術の進展への取り 組みとして、当社ではこれまで様々な活動を行ってき た。たとえば、当社の細線材をコアに利用したモータ<sup>1)</sup>、 圧粉コアを用いたモータ<sup>2)</sup>を提案した。また、3次元磁 極構造といった特徴的な構造のモータ<sup>3)</sup>の開発も行って きた。これらのモータを試作評価する過程において、同 期機・誘導機、ラジアルギャップ型モータ、アキシャル ギャップ型モータなど種々の特徴的なモータ駆動に対応 する必要があった。このため、制御システムを独自に構 築することで評価を行った。また、ハイブリッド建機<sup>4)</sup> に代表される電動化システムに関わる過程で、リチウム イオン電池システムの試作あるいは評価を行ってきた。ここ でも特徴的な機能を評価するべく,必要に応じて内作し つつ性能評価システムを構築してきた。

いっぽう,当社グループであるコベルコ科研では,自 動車ソリューション事業として自動車の動力性能調査や MBD (Model Based Development)を進めるためのモ デル作成,解体調査レポート,構造調査や使用部材の材 料調査,電気自動車用2次電池の劣化解析や安全性も含 めた充放電試験などの評価・分析・CAEによる解析を 多面的に行っている。

両社の要素技術を活かしつつ,自動車電動化に対する 貢献として,高回転域での動力性能試験が行えるモータ 評価システムの開発に取り組んだ。

以下では、その評価システムについて解説する。

### 1. モータ耐久ベンチのコンセプト

モータ評価システムの構成要素を示すため、図1の システム構成例を使って説明する。まず、供試モータに 対して、負荷となる対向モータが必要である。また、こ の対向モータを制御するためのインバータが必要であ る。いっぽう、供試モータを駆動するためにもインバー タが必要となる。供試モータ特有のインバータとなる か、評価システムでのインバータを利用するかは測定目 的によって選択されることになる。この例でインバータ

\*1技術開発本部 応用物理研究所 \*2(株)コベルコ科研 EV・電池ソリューションセンター



図1 モータ評価システムの例 Fig.1 Example of a motor test system

は、DC電圧を入力とし、モータを駆動する三相交流を 生成する。PWMと呼ばれる変調方式を使って、モータ の3相の各端子に対して所望の電圧を生成する。半導体 による高速スイッチ切り替えで、各相間へのDC電圧印 加時間を調整して等価的な3相正弦波電圧を印加する手 法である。この印加電圧により、モータの各相に電流が 流れ、モータが駆動される。各インバータは、モータの 電流・電気角といった情報をフィードバックすることで、 速度もしくはトルク(電流)の指令に対しモータを追従 させるよう制御する。

二つのインバータはDCラインが共通化され、ここに DC電源から電力が供給される。ただし片側の電圧を他 方と変えたい場合、DC母線とインバータの間にDCDC コンバータを挿入することで電圧を調整する。

このDC母線に接続されるDC電源は、二つのモータ に対応して最大容量が見積もられ, DC 母線の電圧安定 化を図れるようにする。二つのモータの力行・回生のエ ネルギー循環に対して、モータ制御動作の不均衡で生じ る不足電力あるいは余剰電力は、この電源によって調整 される。とくに余剰電力が発生すると、回生抵抗による 電力消費か、回生インバータを介して系統電力に余剰電 力を戻すなどの動作が発生する。余剰エネルギーを系統 電力へ回生する場合、その影響検討が必須となる。 試験 システムの置かれた事業所の電力消費が大きく、回生さ れる電力が無視できる場合は、その事業所で試験時の変 動で発生する余剰電力が全て消費される。しかし、電力 消費のむらがある場合、あるいは消費の少ない事業所で は、事業所内で全ての電力を消費しきれない。そうする と、さらに事業所外の系統電力への還元が発生し、系統 電力における契約条件の変更が必要になる。こういった 試験場の事情を勘案しつつ評価システムは設置される。 テスト設備としての採算性の観点から、なるべく多くの 試験対象に対応できるよう、余裕のあるシステム容量の 設置が検討される。システム容量の検討結果による系統 電力の増強や、テスト設備としての汎用性の追求で、設 備は高額になる傾向にある。

このような評価設備は、安定したデータを取得する観 点では重要な役割を果たす。しかし、EVモータの開発 が活発化し,品質・性能評価に多数の項目に目を向ける ことが多くなると,これら高価なシステムだけでは不十 分になると考えられる。極限的な試験を試したいという 要望に対し,前述のような電力系統に強く制約されたシ ステムでは,余裕度を大きく取った設備の選択を余儀な くされるため,コストの上昇や,試験場の確保などの問 題が発生する。

そこで,当社グループでは,システムを簡素化しつつ, 実験場の設備制約を緩和した高速回転・大容量のモータ システムでの耐久評価方法を提案している。このコンセ プトを実現するモデルベンチとして,以下に示すモータ 評価システムを構築したので紹介する。

#### 2. 提案するモータ耐久評価システム

1章で説明したモータ評価システムの構成において, 設備の電源容量を決める際,エネルギー循環をうまく実 現することが重要である。今般,試験システムがブラッ クボックスとなりがちで,この見積もりができないた め,不要マージンの多いシステムの利用が余儀なくされ ることもある。そこで,試験の最小化を狙って,設備に 必要な系統電力(余裕度)を低減できるモータ試験シス テムを構築した。

以下であげるモータ試験システムは、モータの特性の そろった2台の供試モータを対抗させるBack to Back 型の評価方法(以降BTB方式)とした。今回は最大出 力80kW,最大回転数10,500 rpmの同型の供試モータ を対向させる構成とした。

図2にシステム構成図を,表1に主要装置の諸元を 示す。

Motor0とMotor1が供試モータと負荷モータに相当す る。それぞれ、インバータ0とインバータ1(三相 IGBT ブリッジ回路)につながっており、U,V,Wの各 線が接続されている。各系統において、電流センサを設 け、 $i_{xu}$ ,  $i_{xw}$  (x=0,1)を検出・フィードバックしている。

リチウムイオンバッテリーは、DCDCコンバータで昇 圧され、インバータのDC母線に接続されている。同様 に、外部からの電源供給としては、汎用DC電源からダ イオードを通じて、DC母線に接続されている。



**Fig.2** System construction diagram

表1 本システムで使用した構成装置一覧 Table 1 The main components used in the system

device	manufacturer	Specification / Type No.
Motor	-	Max: 80kW / 10500rpm
DC power supply	KIKUSUI ELECTRONICS CORPORATION	PAT850-9.4T
Inverter	Semikron	IGD-4-424-PIF7-BH-FA
Real time controller	Myway Plus Corporation	Expert IV+MWPE4-PEV
Li battery	GS Yuasa International Ltd.	LIM30HL
DCDC Converter	KOBE STEEL,LTD.	Max 200kW /300A

これら全体を制御するコントローラは一つに集約され ており、力行・回生・DCDC昇圧を一つのコントローラ が担当する。

コントローラの出力には、各インバータに送る IGBT のON/OFF 信号がある。U, V, W相の上アーム、下ア ーム計6 信号が S<sub>xuP</sub>, S<sub>xuP</sub>, S<sub>xvP</sub>, S<sub>xvP</sub>, S<sub>xvP</sub>, S<sub>xvP</sub>, (x=0, 1) で ある。各モータのレゾルバからは、 $\theta_0$ ,  $\theta_1$ がフィード バックされる。PC は上位のシーケンス制御(指令)を 担い、電源の出力設定と、統括コントローラへの指令を 行う。

試験時の典型的な制御方法は,片側のモータを速度制 御し,他方のモータを電流制御する。回転数上昇時は, 速度制御側が力行,電流制御側が回生動作する。モータ の伝達軸にトルク×回転数の動力が伝わり,力行側から 回生側に動力が伝搬する。図中では,トルクメータで, この値を検出することになる。

このとき、それぞれのインバータは、力行側が電力を モータに供給し、回生側が電力を回収している。同型の モータが対称なシステムであることを利用すると、理想 的には力行・回生での必要電力収支を近くすることがで きる。インバータのDC母線を各インバータで共通化し て、エネルギーの循環が期待される。外部からの平均的 なエネルギーは、通電による発熱ロスや機械損などで消 費したもののみの供給となる。変化分のエネルギー調整 で、モータの伝達軸の出力受け渡しというモータ評価の 基本機能を実現することができる。ただし実際には、シ ステムのモータロータ、伝達軸といった回転体が回転エ ネルギーを蓄積するため、加速の際は追加のエネルギー を要し、減速時は回転エネルギーを抜き取るため、回生 電力過多の状態になる。こういったエネルギーの授受の 変動が系統電力に影響を与えないように、本システム は、リチウムイオン電池をシステムに組み入れている。 これら構成により、系統電源との結合度を下げるように した。要求されるDC母線電圧と電池との電圧差を埋め るため、DCDCコンバータを挿入した。DCDCコンバー タは、バッテリー側を低電圧、DC母線側を高電圧とす る双方向性昇降圧チョッパ方式のDCDCコンバータを 製作し組み入れた。このDCDCコンバータは180度位相 をシフトした2系統制御のインターリーブ方式を採用し ており、電流の脈動抑制を図っている。これらの安定化 配慮のうえ、DC母線に対して、小規模な汎用DC電源で 電力供給を行うようにしている。

# 3. システム実現のための設計着目点

この循環システムは、概念的には単純であるが,いく つか問題があり,通常大きめの電源容量の設備を利用し て実現することになる。それに対して,コンパクトなシ ステムでの実験を実現するよう余裕度削減に配慮したシ ステム検討を行った。そのなかで効果のあった例を三つ 紹介する。

- (1) 複数のスイッチングデバイスを使用することによっ て発生するデバイス間の相互ノイズの影響削減。
- (2) システムのコンパクト化のため突極型IPMSM
   (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)
   を利用する場合の、即応性向上のための電流制御手法。
- (3) 力行・回生の制御方法の違いに対しての応答性改善。

#### 3.1 スイッチングノイズの影響低減

まず、インバータノイズの問題について述べる。

高回転時には,誘起起電力に抗するための高電圧が必要になり,そのスイッチングノイズによって誤動作が発生しやすくなる。システム配置や放射ノイズ・電源から 電圧するスパイクノイズの抑制に悩まされ,ノイズ削減 のために多大な労力を強いられることになる。とくに二 つのモータに対応するインバータをDCで結合させてい るため,電源ラインからのノイズ伝搬は避けられない。 このノイズの問題は,互いのインバータ間での制御に影響を与える。また,最悪の場合,ノイズレベルが過大で 実験が成立しなくなってしまう可能性がある。

制御への影響を回避する解決方法のひとつとして、ス パイクノイズが発生するタイミングを避けて、制御フィ ードバック用のデータ取り込みを行うことが考えられ る。モータ用インバータはスイッチ回路で構成されてお り、PWMという変調方式が使われている。このため、 キャリア周波数の周期で、各インバータはスイッチ切り 替えを実行する。この変調方式には、有効スイッチ範囲 があるため、スイッチングが発生しないタイミングを予 測することができる。しかし、力行・回生2系統のモー タ用インバータが非同期であると、無相関にスイッチノ イズが発生する。力行側・回生側のそれぞれのインバー タがお互いのスイッチングで、他方の制御系に影響を与 えないためにはPWMタイミングを合わせ、かつ制御用 のデータ取り込みタイミングを高精度で適切に合わせる ことが重要になる。今回は、2系統の三相インバータ回 路を一つのコントローラで統合制御するようシステム構 築した。両インバータのPWM信号生成用のリファレン ス信号は、共通の山形波信号を使用することで実現して おり、コントローラ間のクロック位相の不一致などによ る問題は発生しない機構となっている。両インバータ用 信号を一つのPWM生成ユニットを元に生成すること で,両インバータのスイッチノイズが互いに悪影響を与 えることが無くなり、安定した電流・電圧の測定を実現 できる。結果として、制御の安定化を図ることができる。 先述したバッテリーと DC 母線電圧の調整用 DCDC コ

ンバータにおいてもスイッチングノイズが発生する。変換には二相のチョッパ方式を採用しているが、使用する 信号生成にはインバータと統合されたPWM信号生成機構を利用する。これは、先ほどと同様に、DC母線につ ながるDCDCコンバータによるノイズが、各インバー タの制御取り込みに影響を与えないようにするためであ る。また逆の観点で、インバータからの影響もDCDC コンバータに伝搬しないために必要な処置となる。コン トローラは汎用的なコントローラユニットで各UVWス イッチ信号を光ファイバーで絶縁して出力する。

以上の理由から、本システムでは、力行・回生の両モ ータ制御インバータおよび昇降圧用DCDCに対して PWM生成機構を含む機能を一つのコントローラシステ ムにまとめ上げた。これにより、スイッチングによる電 流・電圧情報取得時のノイズ混入を最小化し、安定した モータ評価が可能になっている。また、両モータと電池 につながるDCDCを統合監視し、出力信号の生成も同 時に行っているため、それぞれの制御に異常要因が発生 した場合、一斉に停止動作に入ることができる利点もあ る。今回試作したシステムは、モータ評価試験に対して 小規模コントローラで十分実現できることを示してい る。

#### 3.2 電流制御性の改善

つぎに, 突極型IPMSMを利用する場合の電流制御の 遅れによる電力収支不均衡の影響について説明した後, 改善方法について述べる。

図3に使用している電流制御のブロック図を示す。

三相インバータに流れる電流は、電流センサを用いて u相、w相の電流をフィードバックする。三相電流の和 がゼロであることを使ってv相は補う。Clarke変換、 Park変換を通してdq変換された電流*i<sub>d</sub>*,*i<sub>q</sub>*を得る。

電流ベクトルの振幅を $I_a$ ,位相角を $\beta$ として,

$i_d = -I_a sin \beta$		1)
$i_q = I_a \cos \beta$		2)
として計算し	これらを dq 軸電流の目標値 id*, iq*と	す
る。		

先述の電流フィードバック値i, i, と差分をとり, d軸,



Fig.3 The block diagram of current control

q軸のそれぞれのPIコントローラの入力とする。

各PIコントローラの出力に,非干渉制御補正をした 出力電圧 $v_d$ ,  $v_q$ を逆Park変換で $v_u$ ,  $v_v$ ,  $v_w$ へ変換する。こ の後, PWMによりインバータのスイッチ信号を生成す ることになる。

レゾルバによって、モータの電気角情報を得て、Park 変換、逆Park変換に入力する。また、電気角情報を1 階微分して角速度ωを計算し、非線形制御演算に使用す る。

三相モータシステムをdq軸の座標変換することで、 制御を容易にする計算方法は広く使われている。

 $\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + \rho L_d & 0 \\ 0 & R_a + \rho L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_q \\ \omega L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi_a \end{bmatrix} \cdots (3)$ 上記(3)式は、モータ回路方程式をdq軸変換して整 理したものになる。右辺の第2項はi, i,がお互いに影響 を与える項であり、第3項が誘起起電力による発電項で ある。この2項を電圧出力で補償すれば、d軸、q軸の独 立した1次遅れ系の方程式ととらえることができるよう になる。この式の $L_d$ ,  $L_a$ ,  $\Psi_a$ は, 定数項の扱いで計算する とき,多少の変化量であれば、モデル誤差として制御に 大きな影響を与えない。しかし,磁束量の変化により磁 気回路が変化することでL<sub>d</sub>, L<sub>a</sub>, Ψ<sub>a</sub>を一定とみることがで きない場合がある。今般の突極型 IPMSM に代表される 同期機では、特徴的なロータ側磁路により、磁束量の変 化に対して,局部的な磁気飽和が発生するため,各パラ メータが変化することになる。こういったモータへのト ルク制御性の改善手法として、以下の非干渉化制御方法 を採用する。

非干渉演算では、dq軸電流 $i_a$ , $i_q$ にローパスフィルタを 掛けて安定化させる。このフィルタ後のdq軸電流 $i_a$ , $i_q$ の二乗和の平方根計算をして、現在の電流ベクトル振幅  $I_a$ を予測する。 $L_a$ ,  $L_q$ ,  $\Psi_a$ は後述する方法で取得した $I_a$ に 対する関数であり、予測した $I_a$ から各値が決まる。これ らそれぞれに $\omega$ を掛け合わせる。 $\omega L_q$ はd軸電流と掛け 合わせて、d軸電流のPIコントローラ出力から差し引く。  $\omega L_d$ はフィルタを通した $i_q$ 電流と掛け合わせて、誘起起 電力項 $\omega \Psi_a$ と足し合わせたうえで、q軸電流のPIコン トローラ出力と足し合わせて、q軸電圧出力を計算す る。

 $L_{a}, L_{q}, \Psi_{a}$ は、磁束量により変化し、 $I_{a}$ に依存する関数 となる。これらの値は非線形量であり、刻一刻変化する が推定可能である。制御に対して有効となる推定手段の 例を下記に示す。

いま,応答性は悪いものの*i*<sub>d</sub>=0 制御<sup>5)</sup> で予備試験で き,電流変動が小さい範囲で測定ができたとする。その 時,負荷側のトルクは,下記の式で表現される。

ここで、 $P_n$ はモータの極対数である。図2の図中にあっ たトルク計で伝達トルク $T_{measure}$ を測定できるが、この値 には機械損 $T_{loss}$ を含んでいる。この両者の関係は、モー タの出力トルクを $T_{motor}$ とすると、 である。ある速度条件で $i_d = 0$  制御が実現でき, q軸電 流も併せてゼロと設定できればモータの出力トルクはゼ ロとなるので,  $T_{measure} \ge T_{loss}$ が等しくなり,速度に対す る機械損を知ることができる。ここから,(4)式と合 わせて,以下を得る。

$$\Psi_a(i_a) = \frac{T_{measure}(I_a) - T_{loss}}{P_{ni_a}} \dots \tag{6}$$

この式により、 $\beta$ 一定条件下での $I_a$ に対する $\Psi_a$ の特性を取得することができる。

IPMSMの回路方程式は、(3)式の右辺第1項を分解 して表現すると以下の式で表される。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 \\ 0 & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \rho \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_q \\ \omega L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi_a \end{bmatrix}$$
(7)

 $\beta$ 一定条件下で、各電流制御が安定化し、変化が無視 できると仮定すると、(7)式の右辺第2項は無視する ことができ、 $v_a$ ,  $R_a$ ,  $i_a$ ,  $\omega$ を既知とできるので、下記の $L_a$ ,  $L_a$ に関する計算式を得ることができる。

$$L_{d} = \frac{v_{q} - R_{a}i_{q} - \omega \Psi_{a}}{\omega i_{d}}$$
(8)  
$$L_{q} = \frac{v_{d} - R_{a}i_{d}}{\omega i_{a}}$$
(9)

このアルゴリズムに基づいて、対象モータの $I_a$ に対す る変動を測定した実験により、 $L_d$ ,  $L_q$ ,  $\Psi_a$ を推定した結果 を図4に示す。最上段は発電係数、中段はq軸インダ クタンス成分、最下段はd軸インダクタンス成分を示し ている。

こうして得られた結果をモータ制御に使用する。グラ フから得られる*I*<sub>a</sub>に対する*L*<sub>d</sub>, *L*<sub>q</sub>を用いることで,(3) 式右辺2項目の干渉項を除去する計算において,適切な 値を算出できる。同様に右辺第3項も*I*<sub>a</sub>に対する*Ψ*<sub>a</sub>を 用いることで適切な起電圧を算出できる。この結果,PI 制御は安定点に早々に達することができるため,電流制 御の制御性が改善される。





#### 3.3 モータ制御方法の違いに起因する制御性悪化の改善

最後に,各モータ制御方法の違いで発生する制御遅れ の影響による制御性の悪化について説明する。また,改 善方法について述べる。

提案するモータ評価システムの問題点として、イナー シャが非常に小さいということがある。このため、トル ク変動による速度制御の悪化が顕著に表れてしまう。ゆ えに、片側が速度制御,他方が電流制御というシステム 構成では、双方の制御静定時間の違いにより、制御に乱 れが発生する。

回生側の電流制御は力行側の速度制御にくらべ高応答 で制御されるため早急に静定するが、それでも、速度制 御側の影響を受ける。速度制御は、目標速度との偏差か らトルク指令(電流指令)を計算する。この指令は、計 算により刻一刻と変わるため力行側モータ軸から回生側 モータに伝わるトルクもこれに応じて変化する。その変 化に対して、回生側モータの電流制御は行われるため、 速度のふらつきを生じることになる。これらが過渡的に 発生する制御系は、安定するまでの時間が掛かってしま うことが容易に想像される。

この問題を回避するため,図5に示す制御構成を採 用している。

先に説明したように、電流制御は、力行側、回生側で 同一なものを使用する。しかし、速度制御側は、速度フ ィードバックを受け取り、目標値との偏差をPI制御器 に入力するため、当然、目標電流*I*aは異なる。力行・回 生の特性のそろったBTB方式でも、このわずかな影響 で回転速度の乱れが発生する。

トルク負荷のステップ印加といった試験条件を考え る。一定速度制御で回転している力行側モータは,負荷 のステップ印加で一旦速度が低下する。この低下偏差を 速度のPI制御により,ゼロに回復させるようトルクの 上昇が発生する。この発生を受けて、トルク印加側が引 きずられないように制御を加えることになる。この一連 の制御過程により速度偏差が発生する。

これを軽減するため,図5に示すように,負荷変化を 行う動作においては,位置制御の内部電流制御のオフセ ットとして,トルク変動分を重畳するようにする。これ は,速度制御からすると,後段の電流制御に対して,負 荷上昇を予測して、上昇分を補償することに相当するため、速度制御の静定時間が短くなることが期待される。

図6は、2,000 rpmまで速度上昇させた状態で、台形 状のトルク負荷を印加した条件での実験結果である。上 段は速度制御をおこなっているモータの回転数であり. 下段はq軸電流を示している。電流制御は*i<sub>d</sub>*=0 制御(β) =0)を使っており、q軸電流がトルクと比例関係にあ り、トルクの状態を表している。FFSW=ON(フィード フォワードスイッチを有効化)が先述の制御を行った場 合, OFF が制御を行わなかった場合である。速度制御に おいては、上段で示すように目標値に対する速度の振れ 幅に違いがでることが分かる。いっぽう、下段のグラフ は電流制御への目標値入力の状況を示している。ここで  $i_{a0}$ \*は駆動側, $i_{a1}$ \*は負荷を発生させる側のq軸電流の目 標値である。i<sub>a1</sub>\*はトルクパターンに相当するので台形 形状となっており、i<sub>q0</sub>\*は速度PI制御器からの出力であ るため、そこから少しずれた形状となる。この結果で、 制御のON/OFFに対して、入力目標値に大きな違いは 出ていない。本制御方法を採用することにより、速度制 御における目標値からの最大偏差は1/3以下に抑えら れており, 大幅な制御性悪化の改善が図れたことが分か る。

この制御系は、測定対象のモータを対称にして、速度 とトルクを指令値としてインプットしている。各モータ がそれに応じて振舞うことで、目的の速度、トルクを得



図6 q軸電流および速度の制御結果 Fig.6 The result of q-axis current and speed control



図5 トルク制御,速度制御の制御ブロック図 Fig.5 The block diagram of torque and speed control

ようとする制御系として捉えることができる。この系は 電気自動車における実際の制御の振る舞いとは異なる。 しかし、モータ試験という観点において、一つのコント ローラで全体最適化を狙うことで設備制約を緩和しつ つ、試験を成立させる一つの方法として考えることがで きる。

本システムでは、力行・回生の各モータにおける電力 収支をなるべく一致させる。このような統合的な制御を おこなうことにより、電力的な平衡を取る。その結果、 システム外からの電源供給量の小さいシステムを構築す ることができる。また、系統電力からの電力入力量を最 小限とするシステムを実現することで、設置場所の自由 度を高められるメリットもある。

**むすび**=当社の試験敷地内のみならず,高温設備や振動 設備といった場所に持ち込んで試験するような試験を提 案できるシステムを構築し,動作することを示した。

今後広がるEVマーケットにおいて、CO2削減のため

の高効率モータなどに対するパワートレインの回転系試 験は,エンジンで使用する回転域以上の高回転での性能 試験や品質確認など重要な役割を占めると考えられる。

当社グループでは、今回開発したモータ試験装置をベ ースに試験目的・条件に合わせた回転系試験装置を柔軟 に構築し、従来からの温度、ひずみ、振動などの各種計 測や、しゅう動・摩擦や疲労などの材料調査の観察知見 を生かして、試験の実施から試験後の解析に至る一連の 試験工程を実施するサービスを提供することで、カーボ ンニュートラルにつながる電動化社会の実現に貢献して いく。

#### 参考文献

- 1) 森田晋也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2022, Vol.71, No.2, p.7-11.
- 2) 加藤弘樹ほか. R&D神戸製鋼技報. 2022, Vol.71, No.2, p.12-17.
- 3) 林 俊平ほか. 電気学会論文誌 D. 2019, Vol.139, No.7, p.645-651.
- 4) 山﨑洋一郎ほか. R&D神戸製鋼技報. 2018, Vol.68, No.1, p.43-47.
- 5) 武田洋次ほか. 埋込磁石同期モータの設計と制御. オーム社, 2018, p.22.

#### (論文)

# 交流ソレノイド部品への純鉄系軟磁性細線の適用効果検証

飯村奨太\*1·森田晋也\*1·笠井信吾\*2

# Effect Verification of Pure Iron-based Soft Magnetic Thin Wire Applied to AC Solenoid Parts

Shota IIMURA · Shinya MORITA · Shingo KASAI

### 要旨

当社の純鉄系軟磁性材料は、自動車のリニアソレノイドや電磁リレーなど、直流駆動の電磁部品に多く使用され ているが、近年の電動化に伴い、交流駆動に適した磁性材料の開発が求められている。交流磁界下で応答性を向 上させるには、材料内部に発生する渦電流を抑制する必要がある。今回、線径を細くすることで渦電流の抑制を 狙った純鉄系軟磁性細線を開発し、交流ソレノイド部品を用いて効果を検証した結果、線径1mm程度の細線を束 ねた可動鉄心の方が、従来のバルク製鉄心よりストローク量が向上することを確認した。また、周波数を2倍とし 応答性良く駆動させることで、単位時間当たりの鉄心移動量が3倍となる結果を得た。今後需要の増加が想定され る交流駆動の電磁部品へ、軟磁性細線の適用による応答性向上が期待できると考えられる。

#### Abstract

Kobe Steel's pure-iron-based soft magnetic materials are widely used in direct-current-driven electromagnetic components, such as linear solenoids and electromagnetic relays in automobiles. With the recent trend toward electrification, there is a demand for the development of magnetic materials suitable for alternating current drive. To improve the responsiveness under alternating magnetic fields, the eddy current generated inside the material must be suppressed. Hence, a pure-iron-based soft magnetic thin wire has been developed to suppress eddy currents by reducing the wire diameter. The results of effectiveness verification using an alternating current solenoid component show that a movable iron core made of bundled thin wires with a wire diameter of approximately 1 mm demonstrates greater stroke volume than the conventional bulk iron core. In addition, the iron core movement per unit time has been tripled by doubling the frequency and driving with improved responsiveness. Demand for alternating-current-driven electromagnetic components is expected to increase in the future, and the application of soft magnetic thin wire will improve their responsiveness.

**検索用キーワード** 軟磁性材料, 軟磁性細線, ソレノイド, 電磁ポンプ, モータ

まえがき=近年,環境問題が盛んに議論されるようにな り、気候変動対策としてCO2排出量削減を目的とした電 動化の流れが自動車分野においても進展している<sup>1)</sup>。電 動化により、自動車に搭載される電磁部品の高性能化や 多様化が進む中、当社は鉄本来の磁気特性を最大限に活 用した純鉄系軟磁性材料を,駆動周波数や部品形状に適 した形態で提案可能な体制を構築中である。駆動周波数 域と磁東密度域のイメージならびに想定される電磁部品 を図1に示す。当社では、リニアソレノイドや電磁リ レーなど直流駆動の電磁部品に実績のある「ELCH2シ リーズ」(線材・棒鋼)<sup>2),3)</sup>や、電装系など高周波数域で の駆動に適した「マグメル」(鉄粉)4)に加え、線径や板 厚を小さくすることで渦電流を抑制し、モータなどの駆 動周波数域への適用を可能とした「純鉄系軟磁性細線(以 降,純鉄細線という)」5)や「純鉄系軟磁性鋼板」6)を開 発している。

筆者らは従前,純鉄細線を束ねたコアを有するアキシ ャルギャップモータを開発し,小型軽量化が期待できる ことを報告した<sup>5)</sup>。いっぽう,純鉄細線は,交流ソレノ



イドなど交流駆動の電磁部品の応答性向上にも寄与でき ると考えられ、本稿では、純鉄細線を束ねた可動鉄心を 有する交流ソレノイドの解析ならびに実機評価により検 証した結果について述べる。

\*1技術開発本部 応用物理研究所 \*2鉄鋼アルミ事業部門 線材条鋼ユニット

# 1. 純鉄系軟磁性細線

純鉄細線は当社製品群の中でも、合金添加元素を極力 排除し、強磁性の起源となる磁気モーメントを最大限活 用したELCH2を冷間伸線により細線化した材料である。 式(1)は交流磁界下において材料内部に発生する渦電 流の大きさを示した式である。

 $P_V \propto (\pi f B_m d)^2 / \rho \cdots (1)$ 

ここに, Pv は渦電流損, f は周波数, B<sub>m</sub> は磁東密度振幅, d は磁性体直径, ρ は磁性体の電気抵抗率である。

式(1)より、材料内部に発生する渦電流は磁性体直 径の2乗に比例, 電気抵抗率に反比例する。したがって, 図2のように細線化し束ねることで、 高磁束密度を維 持しながら、線間の接触抵抗あるいは絶縁被膜により渦 電流を抑制できるのが純鉄細線のコンセプトである。表 1に純鉄細線とJIS C 2552で定める無方向性電磁鋼板 35A300と50A600の磁気特性ならびに鉄損を示す。電磁 鋼板と比較した際、鉄損はやや高い傾向にあるが、純鉄 系の特徴を活かし磁束密度は高い値を示す。線径をφ 0.4 mmまで細くすれば、高磁東密度を維持しながら、 対辺1.2 mmの約1/3まで鉄損が低減できる。また、純 鉄細線の特徴として、曲げ加工や異形線による形状自由 度の高さがあり、 例えば細線を曲げて配置を工夫するこ とで三次元的な磁路形成が可能である点や,純鉄系の優 れた冷間加工性を活かして正六角形状にすることで東成 形の占積率向上やせん断力に対して束が位置ずれしにく いなどの効果も得られる。また、細線を束ねてコアを成 形するため、板形状の材料と比較し打ち抜きなどの加工



Cutting off eddy currents between the wire

図2 材料内部で生じる渦電流の模式図 Fig.2 Schematic diagram of eddy currents occurring within the material が不要で,材料歩留まりを高められるという特徴があ る。

#### 2. 交流ソレノイドへの細線適用効果解析

交流ソレノイドへ細線を適用した際の効果を,市販の 電磁界解析ソフトJMAG (ver21.1,株式会社JSOLの登 録商標)を用いて検証した。図3に示すヨーク,コイル, 可動鉄心ならびに可動鉄心ガイドからなる交流ソレノイ ドモデルを作製し,可動鉄心はバルク製と細線製をそれ ぞれ用意した。本稿では,解析検証やものづくりのしや すさを優先し,可動鉄心には対辺1.2 mmの六角細線を 採用した。

表2に示す形状および解析条件で, コイル通電時に 可動鉄心に働く電磁力を過渡解析し, 電磁力の時間変化 や, 可動鉄心内部で発生する渦電流を検証した。図4は 計算された可動鉄心に働く電磁力の時間変化である。コ イル通電開始から細線製鉄心の方が電磁力の立ち上がり が早く, 0.01 s後にはバルク製鉄心に対しておよそ10% 高くなることが確認された。0.01 sにおける可動鉄心内



Movable iron core guide 図3 交流ソレノイドの電磁界解析モデル Fig.3 Electromagnetic field analysis model of AC solenoid

表 2 電磁界解析条件 Table 2 Electromagnetic field analysis conditions

Movable iron core shape	D=16.4 mm
Coil turn	364 T
Coil resistance	2.53 Ω
Yoke material	S45C
Movable iron core guide material	SUS304
Movable iron core material	ELCH2(opposite side=1.2mm)

e 1 Magnetic prop	perties and iron lo	ss examples of pu	ire iron-based soft	magnetic ma	
	Ma	gnetic flux density	(T)	Iron loss	
Material	B <sub>25</sub> 2,500A/m	B <sub>50</sub> 5,000A/m	B <sub>100</sub> 10,000A/m	(W/kg) W <sub>1550</sub>	
Hexagonal thin wire(d=1.2mm)	1.65	1.75	1.87	11	
Hexagonal thin wire(d=0.7mm)	1.63	1.71	1.84	5.4	
Circle thin wire (d=0.4mm)	1.62	1.73	-	3.6	
35A300(JIS)	>1.49	>1.60	>1.70	<3.0	
50A600(JIS)	>1.57	>1.66	>1.76	<6.0	

表 1	純鉄系軟磁性材料の磁気特性と鉄損例	
表 1	純鉄糸軟磁性材料の磁気特性と鉄損例	



図4 可動鉄心に働く電磁力の時間変化

Fig.4 Time variation of electromagnetic force acting on the movable iron core



図5 励磁0.01 s後の可動鉄心内部の渦電流密度分布 Fig.5 Distribution of eddy current density inside the movable iron core after 0.01 s of excitation

部の渦電流密度を,バルク製鉄心と細線製鉄心で比較し た結果を図5に示す。バルク製鉄心内部では表層を主 として渦電流が発生し,渦電流がつくる磁界がコイルに よる磁界を一部打ち消すことで,電磁力の応答性が悪化 したと考えられる。いっぽう,細線製鉄心内部では渦電 流が大幅に抑制され,バルク製鉄心に対し渦電流損を 90%以上低減することが確認された。そのため,0.01 s 時点での電磁力がバルク製鉄心に比べ10%高くなった と考えられる。以上より,交流ソレノイドの可動鉄心へ 純鉄細線を適用することで,鉄心内部の渦電流抑制およ び鉄心応答性向上が期待できることを確認した。

#### 3. 細線製鉄心の作製および実機評価試験

細線製鉄心の応答性向上効果を実機検証するために、 細線製の可動鉄心を作製した。鉄心の外観写真ならびに 純鉄細線が束ねられた様子を図6に示す。用意した純 鉄細線はφ5mmのELCH2線材を対辺1.2mmの六角形 状まで冷間伸線加工したものであり、矯正加工後、可動 鉄心の長さ41mmに切断した。冷間加工による組織劣 化の改善ならびに磁気特性向上のために850℃×3hの 磁気焼鈍を施し、厚さ0.2mmのSUS製の薄肉パイプ内 で約130本束ねた後、接着剤により固定した。細線束の みでの占積率は本来95%以上となるが、パイプと細線 の間に隙間が生じ、重量から見積もった占積率は88% に留まった。こちらは外周に該当する細線を細くするな ど、隙間を小さくする工夫により占積率の改善は可能で ある。また、比較検証用にELCH2棒鋼から切削加工し たバルク製鉄心も用意した。











図8 15 Hz 駆動時の可動鉄心の変位 Fig.8 Displacement of the movable iron core at 15 Hz drive

実機検証に用いた交流ソレノイドの模式図を図7に 示す。図に示すとおり、ヨーク、コイル、可動鉄心、可 動鉄心ガイド、ばねから構成される。コイルに電流が印 加されれば、可動鉄心には図中下向きに電磁力が働き、 鉄心下部のばね方向へ吸引される。コイルへの通電がな くなれば鉄心の電磁力は消失し、ばねにより上部へ反発 される。矩形(くけい)波などの交流電流を印加すれば、 可動鉄心は上下に往復運動を繰り返す。本稿では、往復 運動する可動鉄心位置をその上部に設置したレーザ変位 計で読み取り、鉄心位置の時間変化ならびにストローク 量により細線適用効果を検証した。

図8にDuty比(電圧ON期間/全期間)0.6. 駆動周波 数15 Hzでコイルに12 V印加した際の可動鉄心位置の時 間変化を示す。電圧ONと同時にバルク製鉄心も細線製 鉄心もばね方向に吸引されるが,バルク製鉄心の速度が 0.9 m/sに対して,細線製鉄心は1.3 m/sであり40%以上 速度が高い。その結果,ばねを強く押し込み,吸引時の 鉄心移動量が距離にして1.6 mm伸びている。その後, 吸引力とばねによる反発力とのつり合い位置にて電圧が OFFになれば,細線製鉄心はバルク製鉄心よりも早く 応答し,結果として往路ならびに復路の両方で移動量が 増え,ストローク量が80%大きくなった。図9に駆動



Fig.9 Displacement of the movable iron core at 30 Hz drive

周波数を15 Hzから30Hzと倍にした際の可動鉄心位置 の時間変化を示す。駆動周波数を倍にすることでバルク 製鉄心のストローク量はおよそ10%まで大きく低減す るが、細線製鉄心は僅かに低減するのみである。駆動周 波数が高くなることでバルク製鉄心では、その内部に生 じる渦電流が大きくなり、鉄心に働く電磁力が低減し追 従性を失ったと考えられるが、細線製鉄心は線間で渦電 流を抑制できるため、倍の周波数にも対応できたと考え られる。単位時間当たりの鉄心移動量(ストローク量× 駆動周波数)をまとめたものが図10であり、バルク製 鉄心の15 Hzと比較し、細線製鉄心の30 Hzは鉄心の移 動量が約3倍となる結果を得た。これは、例えば電磁ポ ンプに細線製可動鉄心を適用することで、液体送給量が 増大できることを示している。

**むすび**=純鉄系軟磁性細線を束ねることにより渦電流を 抑制した可動鉄心を交流ソレノイドに用いることで,鉄 心の応答性が向上しストローク量が増加する結果を示し



図10 単位時間当たりの可動鉄心移動量 Fig.10 Movement amount of the movable iron core per unit time

た。さらには, 駆動周波数を高めることにより, 単位時 間当たりの鉄心の移動量が約3倍となる結果が得られ た。また, 電磁部品の高性能化を示すいっぽうで, 本結 果は小型・軽量化や省電力にも寄与できる。本稿で紹介 した交流ソレノイドへの適用や, 従前の取り組みである モータへの適用などは純鉄細線の活用の一例であり, 今 後も材料開発や新たな活用方法を考案することで, 自動 車の性能向上ならびに環境負荷低減へ貢献していく。

#### 参考文献

- 経済産業省.自動車新時代戦略会議(第1回)資料.2018.
- 2) 千葉政道ほか. R&D神戸製鋼技報. 2002, Vol.52, No3, p.66-69.
- 3) 坂田昌之ほか. R&D神戸製鋼技報. 2015, Vol.65, No2, p.6-11.
- 4) 加藤弘樹ほか. R&D神戸製鋼技報. 2022, Vol.71, No2, p.12-17.
- 5) 森田晋也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2022, Vol.71, No2, p.7-11.
- 6) 土田武広ほか. R&D神戸製鋼技報. 2022, Vol.71, No2, p.18-21.

#### (技術資料)

# 純鉄系軟磁性線材および電磁純鉄鋼板の電磁部品への適用 効果検証

久井志紘\*1・川嶋慎也\*2・千葉政道\*1(博士(理学))・池田憲史\*1・森田晋也\*3

# Soft Magnetic Iron Wire Rod and Sheet: Estimation of Their Benefit for Electromagnetic Components

Yukihiro HISAI · Shinya KAWASHIMA · Dr. Masamichi CHIBA · Kenshi IKEDA · Shinya MORITA

#### 要旨

自動車分野における電動化や脱炭素化が進む中で、電磁部品の高性能化が求められている。高い磁束密度と冷間 鍛造性を特長とする純鉄系軟磁性線材(ELCH2シリーズ)は、電磁部品の小型化や省電力化に貢献してきた開発 鋼であり、さらに、多様化する需要に応えるため、応答性や交流特性を向上させた純鉄系軟磁性線材(ELACシリー ズ)および薄板化した電磁純鉄鋼板(KELMOS)の開発を進めている。本稿では、純鉄系軟磁性材料の磁気特性 や加工性について紹介する。また、電磁リレー部品の磁場解析から、一般的な低炭素鋼の代わりに純鉄系軟磁性 線材および電磁純鉄鋼板を電磁部品に適用することで、吸引力や応答性の向上を確認した結果を紹介する。

#### Abstract

Electrification and decarbonization in the automotive field are raising the demand for higher-performance electromagnetic components. The pure iron-based soft magnetic wire rod (ELCH2 series), which features high magnetic flux density and cold forgeability, is a newly developed material that has contributed to the downsizing of electromagnetic components and energy saving. Furthermore, development is underway on pure iron-based soft magnetic wire rod (ELAC series) with improved responsiveness and alternating current properties to meet diversifying demands. An electromagnetic pure iron steel sheet (KELMOS) is also being developed. This paper introduces the magnetic properties and processability of pure iron-based soft magnetic force and responsiveness have been improved by using pure iron-based soft magnetic force and responsiveness have been improved by using pure iron-based soft magnetic material and electromagnetic pure steel sheets instead of typical low-carbon steel in electromagnetic components.

#### 検索用キーワード

純鉄, 軟磁性, 線材, 鋼板, 磁束密度, 応答性, 冷間鍛造性, ELCH2, ELAC, KELMOS

まえがき=自動車分野のEV電動化やカーボンニュート ラルへの取り組みが進展するに伴い,車載電子機器の需 要が増加している<sup>11</sup>。EVはバッテリを中心とした複雑 なシステムであり,車載電子機器に組み込まれるモータ やソレノイド,リレーなどの電磁部品に対する要求も多 様化,高度化している。電磁部品には迅速な操作を行う ための応答性向上,軽量化および省スペース化のための 小型化,バッテリ負荷を軽減するための省電力化などが 求められている。また,インバータが搭載されることに より,交流磁界が重畳する部品が増えており,渦電流損 失を低減することが求められている。従来,これらの電 磁部品にはC量が0.1%程度の低炭素鋼が多く使用され てきた。しかし,高度化した部品要求に応えるには材料 の高性能化が不可欠である。

当社の純鉄系軟磁性線材 ELCH2<sup>注)</sup>(Extra Low carbon

Cold Heading wire rod) は高い磁気特性を発揮し,電 子制御トランスミッションのバルブ部品(ソレノイド) などに採用され,電磁部品の高性能化に貢献してきた。 また当社では,多様化する要望それぞれに適した純鉄系 軟磁性材料を提案するべく,さらなる開発に取り組んで きた。図1に当社の純鉄系軟磁性材料における適用周





\*1 鉄鋼アルミ事業部門 線材条鋼ユニット \*2 技術開発本部 材料研究所 \*3 技術開発本部 応用物理研究所

脚注) ELCH, ELAC, KELMOS, MAGMELはそれぞれ当社の 登録商標(第4812504号,第6788096号,第6668543号,第 4669506号)である。

波数領域と磁束密度の例を示す。直流部品に適した ELCH2シリーズのほか,元素添加により応答性向上と 渦電流抑制を図ったELAC<sup>注)</sup>シリーズや,ELCH2の知 見を活用した電磁純鉄鋼板KELMOS<sup>注)</sup>,低鉄損・高効 率を特長とし3次元磁気回路設計にも適した磁性鉄粉 MAGMEL<sup>注)</sup>などを開発しており,磁場解析技術や二次 加工技術と合わせて磁性材ソリューションを展開してい る。本稿では,当社が開発した純鉄系軟磁性線材 ELCH2シリーズ,ELACシリーズおよび電磁純鉄鋼板 KELMOSの主要特性とその用途を紹介する。

# 1. ELCH2シリーズおよびELACシリーズ

#### 1.1 化学成分と磁気特性

当社の開発鋼はそれぞれ狙いの特性に応じた化学成分 および材料組織の設計によって高い特性を発揮する。電 磁部品に用いる軟磁性材料では吸引力や出力制御の観点 から磁束密度が高く,保磁力が低いことが求められる。 また,時間応答性や交流特性を得るためには同時に電気 抵抗率を高めることが望ましい。ELCH2シリーズ (ELCH2およびELCH2S),ELACシリーズ(ELAC20お よびELAC30),代表的な汎用鋼であるS10Cの化学成分 例を表1に示す。また,表2に各鋼材の磁気特性およ び電気抵抗率を示す。ELCH2シリーズおよびELACシ リーズの特長は高磁束密度と低保磁力であり,ELCH2 シリーズはとくに最大磁束密度に優れ,ELACは高磁束 密度と高電気抵抗率を両立している。

ELCH2シリーズは軟磁性材料の磁気特性に悪影響を 及ぼす因子を排除することにより,高い飽和磁束密度を 発揮する。軟磁性材料の磁気特性は材料中の磁気モーメ ントの大きさや材料組織によって左右される。ELCH2 シリーズは極低炭素化によって材料組織を高純度のフェ ライト単相組織とすることで磁気モーメントを増大さ せ,飽和磁束密度(電磁部品の吸引力に対応する)を高 めている。また,磁壁の移動を妨げる結晶粒界の面積を 低減するため, 粒成長のピンニング源となる Al, Nを低 減させ, 低保磁力化を実現している(電流制御の容易さ に対応する)<sup>2)</sup>。

ELAC (ELectromagnetic wire rod for AC application) シリーズは磁気特性や鍛造性を確保できる範囲で ELCH2に元素を添加することで、電気抵抗率を上昇さ せている。これにより、材料の磁化を妨げる渦電流の発 生が抑制され、外部磁場変化に対する時間応答性が高め られている。また交流用途においては渦電流損失(消費 電力)を低減できる。ELACシリーズではその電気抵抗 率によってELAC20(電気抵抗率:約20 $\mu$ Ω cm), ELAC30(電気抵抗率:約30 $\mu$ Ω cm)などの鋼材を用意 しており、要求特性に応じた材料提案が可能である。 ELACシリーズは元素添加とのトレードオフとして ELCH2シリーズに比べて飽和磁束密度がわずかに低く なるいっぽうで表2のB1で示されているように低磁界 領域での磁気特性が高く、応答速度を求める部品や交流 用途に適する。

#### 1.2 冷間鍛造性

ELCH2は添加元素を極力低減したことにより冷間鍛造性が向上しており、圧延ままであっても球状化焼鈍した汎用炭素鋼S10Cより変形抵抗が低く、割れが発生するまでの限界圧縮率が高い<sup>3)</sup>。図2に、ELCH2、ELAC20、 ELAC30の冷間据込み試験で得られた変形抵抗をそれぞ



表1 鋼材の特徴と化学成分の例 Table 1 Characteristics and example of chemical composition of steels

<b>a</b>	Steel	Elements (mass%)					
	Steel	С	Si	Mn	Р	S	
Magnetic properties and forgeability	ELCH2	0.005	0.004	0.25	0.009	0.008	
Cutting workability	ELCH2S	0.005	0.004	0.26	0.010	0.025	
Responsivity	ELAC20	0.006	Added a little	0.27	0.005	0.005	
for AC use	ELAC30	0.008	Added	0.26	0.005	0.005	
Conventional steel	\$10C	0.08 / 0.13	0.15 / 0.35	0.30 / 0.60	$\leq$ 0.030	$\leq$ 0.035	

表2 鋼材の磁気特性および電気抵抗率の例

Table 2 Example of magnetic properties and electrical resistivity of steels

Steel		Magnetic flu	Coercive	Electrical		
	B1	B5	B10	B50	force (A/m)	resistivity (μΩcm)
ELCH2	1.35	1.60	1.65	1.90	37	12
ELCH2S	1.33	1.46	1.64	1.89	47	12
ELAC20	1.46	1.57	1.62	1.80	35	22
ELAC30	1.40	1.51	1.55	1.72	31	30
S10C	0.45	1.40	1.54	1.74	86	16

れ示す。 φ10 mm × 15 mmの円柱試験片を用意し,ひ ずみ速度10/s,加工率60%で圧縮した。ELCH2は変形 抵抗が小さく,金型寿命の観点で優位である。ELACシ リーズは電気抵抗率を上げるための元素添加を行ってい るため,ELCH2シリーズに比べて変形抵抗が高くなる。 しかし,その値は600 MPa未満と低く,ELACシリーズ の冷間鍛造性は球状化焼鈍したS30CやS45C(いずれも 600 MPa以上)と比べて優れている<sup>4)</sup>。以上のように, ELCH2シリーズおよびELACシリーズは高い磁気特性 とともに冷間鍛造性を兼ね備え,例えば部品加工を一体 鍛造化することで製造コストや部品コストの低減が期待 される。

いっぽうで、高い冷間鍛造性は高い延性の裏返しでも あり、切削加工においては工具刃先への凝着が発生しや すく、切り粉が伸びやすい。純鉄系軟磁性材料の被削性 を高めるには、Sを添加しMnSを適量分散させることが 有効である<sup>5)</sup>。そこで当社では、被削性を改善した ELCH2SやELAC20Sを開発しており、電磁部品の磁気 特性面の要求だけでなく、製造工程も考慮した材料・ソ リューション提案が可能である<sup>6)</sup>。

## 2. KELMOS

#### 2.1 化学成分および機械的特性

電磁部品では、部品ごとに適した形状・加工特性を持 つ軟磁性材料を用いることで、磁気特性と製造コストを 両立することができる。そこで当社では、ELCH2線材 で培った知見を鋼板に適用し、ELCH2と同等の磁気特 性を発揮できる電磁純鉄鋼板KELMOS(Kobe Extra Low carbon Electro-Magnetic Of Steel)の開発を行っ ている。

軟磁性材料には①高い飽和磁束密度と②低い保磁力が 求められる。表3にKELMOSと一般の軟鋼板の成分例 を示す。KELMOSの磁気特性向上コンセプトはELCH2 に準じており、極低炭素化により材料中の磁気モーメン トを増加させることで、高い飽和磁束密度を実現してい る。また、磁気応答性を阻害する結晶粒界および、結晶 粒成長の均一性を低下させる窒化アルミの生成を抑制す るためにAl,Nを低減することで低保磁力を実現してい る<sup>2)</sup>。これらの特徴から, KELMOSを電磁部品に適用す ることで,小型軽量化や省エネルギー化,制御機能の向 上が期待される。

また,優れた磁気特性と合わせて,良好な部品加工性 を有することも特徴である。表4にKELMOSと一般の 軟鋼板SPCCの機械特性例を示す。SPCCは成分規格が 広いため機械特性もばらつきが出やすいが,KELMOS は上述のように合金成分,不純物成分をできる限り減ら したことで硬さが低く,伸びが高く加工性に優れる。

#### 2.2 直流磁気特性

図3および図4にKELMOSと一般の軟鋼板の直流磁 気特性例を示す。板厚1.0 mm, 60 mm角の単板を用い, 850℃×3時間の水素中磁気焼鈍後に, JIS C 2556に準じ て,初磁化曲線とヒステリシス曲線を測定し,各磁場強 度における磁束密度,保磁力を求めた。図3で示すよう に,KELMOSは低磁界側から急速に磁束が立ち上がり, また高磁界側においては飽和磁束密度も高いことがわか



表3 KELMOSの化学成分例 Table 3 Example of chemical composition of KELMOS

Steel	Elements (mass%)						
	С	Si	Mn	Р	S		
KELMOS	$\leq 0.02$	$\leq$ 0.03	0.20 / 0.30	$\leq$ 0.030	$\leq$ 0.030		
JIS SUY-0	$\leq$ 0.030	$\leq 0.20$	$\leq$ 0.50	$\leq$ 0.030	$\leq$ 0.030		

表4 鋼材の機械的特性の例 Table 4 Example of mechanical properties of steels

'	Steel	YS (MPa)	TS (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HV)	
	KELMOS	236	332	44	98	
	SPCC #1	215	340	42	103	
	SPCC #2	262	350	41	109	



Fig. 5 AC magnetic properties of KELMOS (thickness 0.8 mm)





る。図4において、SPCCは機械特性同様、成分ばらつ きにより、JIS SUY-0 (SUY: Steel Use for Yoke)の保 磁力上限60 A/mを満たすものと満たさないものがある。 いっぽうで、KELMOSは保磁力が十分小さく、SUY-0と 同等以上の磁気特性を示す。そのため、リレーやリニア ソレノイドなどの電磁部品へ適用することで、性能の向 上が期待できる。

#### 2.3 交流磁気特性

図5にKELMOSの交流磁気特性の例を示す。板厚 0.8 mm, 30 mm × 300 mm のサンプル12枚を用い, 850 ℃×3時間の水素中磁気焼鈍後に, JIS C 2550に準じて, エプスタイン試験を行った。周波数50~1,000 Hzでの各 磁界での鉄損値を評価した。この値から以下の式(1) から各周波数においてデータフィッティングを行い,板 厚 0.5 mm の場合の交流磁気特性へ換算した結果を図6 に示す。

 $P = K_h f B_m^{16} + K_e \frac{(t f B_m)^2}{\rho} \quad \dots \quad (1)$ 

なお、fは周波数、 $B_m$ は最大磁束密度、tは鉄板の厚さ、  $\rho$ は磁性材の電気抵抗率、 $K_h$ および $K_e$ は比例定数を表 す。例えば、無方向電磁鋼板のJIS規格: C 2552の 50A700(板厚0.5 mm)の1.5 T,50 Hzの鉄損は7 W/kg であり、KELMOSは同条件で約7 W/kgと同程度であ ることから、交流用途に対しても低周波(50~60 Hz程 度)用途などではKELMOSが適用できると考えられる。

#### 3. 電磁部品への適用検討

純鉄系軟磁性材料の電磁部品への適用効果やその使い 分けを検討するため、磁場解析を実施した。磁場解析に は、(株)JSOL社製の電磁界解析ソフトJMAG (Ver.22.3)



図7 磁場解析に用いた電磁リレーの計算モデル Fig.7 Calculation model of electromagnetic relay for electromagnetic field analysis

を使用した。本検証で用いたリレー部品のモデルを図7 に示す。励磁コイル、コア、鉄片(アーマチュア)およ びヨークからなる電磁部品であり、励磁電流をコイルに 流すことで磁気回路を形成し、吸引力が発生する。本検 証ではコアの材質をS10C, ELCH2またはELAC20とし、 鉄片およびヨークの材質をSPCCまたはKELMOSとし た場合の電磁力,応答時間を解析して比較した。コイル 巻数は5,400 turns、励磁電圧はDC 24 Vとした。鉄片 の角度θが5°から0°に移動するまでの時間を応答時間 とした。鉄片が0°の状態、すなわち鉄心と鉄片が接触 し、リレーが保持されている状態での電磁力を解析し、 最大トルク(リレー部品の吸引力に対応する)を算出した。

表5に解析結果を示す。コアの材質をS10Cから ELCH2とした場合(Case 2),高い磁束密度を反映し て最大トルクが大きくなった。また、コアの材質を ELCH2とし、鉄片およびヨークの材質をKELMOSとし た場合(Case 3)にトルクは最も大きくなり、汎用鋼 (S10CやSPCC)で構成された場合(Case 1)に比べて トルクが12.4%大きくなった。Case 2およびCase 3の 応答時間は、Case 1とほぼ同じであった。純鉄系軟磁 性材料では電気抵抗が低いため渦電流が磁化の妨げとな るが、高い磁束密度が鉄片を強く吸引し応答時間を補っ たと考えられる。このように、トルクを重視する場合は ELCH2の適用が有効である。トルクが大きくなること は、より小さな励磁電流で同等のトルクを得られること を意味しており、省電力化や発熱の抑制、または銅線量 の低減および小型化を図ることができる。

コアの材質をELAC20にした場合(Case 4 および Case 5)も、汎用鋼で構成された場合(Case 1)より 高いトルクを得られた。さらに、応答時間はコア材質を S10CやELCH2とした場合(Case 1~Case 3)より約 2%短くなった。図8にコアの材質をELCH2および ELAC20にした場合(Case 2およびCase 4)で、電流 ONから4 ms後での渦電流分布を示す。ELAC20の電 気抵抗率はELCH2に比べて高いため、ELAC20コアの 表層では電流密度が低くなった。このため、材料の磁化 を妨げる渦電流の発生が抑制され、応答時間が短くなっ たと考えられる。また、励磁コイルの巻数がより少なく、

	Cara	Ammotuno	Varlı	Maximum torque	Response time (ms)
	Core	Annature	TOLK	(mN·m)	ON
Case 1	S10C	SPCC	SPCC	90.7	5.094
Case 2	ELCH2	SPCC	SPCC	98.1 (+8.1%)	5.088 (-0.1%)
Case 3	ELCH2	KELMOS	KELMOS	101.9 (+12.4%)	5.088 (-0.1%)
Case 4	ELAC20	SPCC	SPCC	95.8 (+5.6%)	4.998 (-1.9%)
Case 5	ELAC20	KELMOS	KELMOS	99.3 (+9.5%)	5.000 (-1.8%)

**表 5** 電磁リレーの電磁力および応答時間の解析結果 **Table 5** Estimated torque and response time of electromagnetic relay



**Fig.8** Eddy current distribution in electromagnetic relays

インダクタンスが小さい場合には、応答時間に対する渦 電流の影響が相対的に大きくなるため、ELAC20の適用 効果はさらに大きくなると推測される。

以上のように,要求性能に応じて適切な材質を選択す ることで,リレー部品の性能向上や省電力化を効果的に 図ることができる。 **むすび** = EV 化の進展につれ,電磁部品の需要は小型化, 省電力化,交流用途などいっそう拡大・多様化すると予 想される。本稿では,高い磁東密度と冷間鍛造性を特長 とする ELCH2 シリーズ,応答時間や渦電流の低減に優 れる ELAC シリーズ,および ELCH2 の知見を薄板に適 用した KELMOS の主要特性を紹介した。これらの純鉄 系軟磁性材料は,それぞれが電磁部品の要求特性に応え る材料であるだけでなく,組み合わせて用いることによ って,さらに高性能化を図ることもできる。当社は今後 も種々の要求に適した純鉄系軟磁性材料を開発,提案す ることで,電磁部品の高性能化やコスト低減を実現し, 社会課題の解決に貢献していく。

#### 参考文献

- 1) 経済産業省ほか. モビリティDX戦略. 2024.
- 2) 千葉政道ほか. R&D神戸製鋼技報. 2002, Vol.52, No.3, p.66-69.
- 3) 坂田昌之ほか. R&D神戸製鋼技報. 2015, Vol.65, No.2, p.6-11.
- 4) 星野俊幸ほか. 川崎製鉄技報. 1991, Vol.23, No.2, p.21-27.
- 5) 千葉政道. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.1, p.57-61.
- 6) 笠井信吾ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.1, p.3-6.

#### (技術資料)

# 省合金-半硬質磁性材料

池田憲史\*1・千葉政道\*1(博士(理学))・笠井信吾\*1・久井志紘\*1・森田晋也\*2

# Low Alloy, Semi-hard Magnetic Material

Kenshi IKEDA · Dr. Masamichi CHIBA · Shingo KASAI · Yukihiro HISAI · Shinya MORITA

#### 要旨

カーボンニュートラルや安全な自動運転システム構築を目指す動きが世界的に加速する中,自動車制御の電動化 が拡大しており,車載電装部品の省電力化が大きな課題となっている。近年では,電動車(BEV, PHV など)の航 続距離伸長などを目的に,電力消費が少ない周辺機器でも省電力化が切望されており,新たな磁性材料への期待 が高まっていることから,部品加工性に優れかつ無通電で磁気吸着力を維持できる新着想の磁性材料(省合金-半 硬質磁性材料:ELSHM)を開発した。本稿では,本開発鋼の設計指針と主な特長,および想定される適用例と期 待効果について紹介する。

#### Abstract

As the movement toward carbon neutrality and the creation of safe autonomous driving systems accelerates worldwide, the electrification of automotive control is expanding, making energy saving in on-board electrical components a major challenge. In recent years, energy saving has been highly desired even for peripheral equipment with low power consumption in order to extend the cruising distance of electric vehicles (BEVs, PHVs, etc.), and expectations for new magnetic materials are rising. For this reason, a new-concept magnetic material (low alloy, semi-hard magnetic material) has been developed that has excellent part-processability and can maintain magnetic attraction even when de-energized. This paper introduces the design guidelines, the main features of the developed material, and examples of anticipated applications with their expected effects.

#### 検索用キーワード

半硬質磁性材料, ELSHM, 省電力, 電磁クラッチ, カーボンニュートラル

**まえがき**=地球温暖化に伴う世界的な環境規制の強化を 受け,自動車制御の電動化が急速に進みつつあり<sup>1)</sup>,車 載電装部品の省電力化が重要課題となっている。当社は これまで,磁気特性と冷間鍛造性に優れた純鉄系軟質磁 性材料(ELCH2シリーズ)を開発し<sup>2)~4)</sup>,精緻制御を 要する電磁部品の高性能化,小型軽量化および省電力化 に大きく貢献してきた。

近年,バッテリーからの電力を主な駆動源とする電動 車(BEV, PHVなど)において,航続距離伸長や車載 コンピュータへの電力供給増を背景に,駆動系以外の周 辺機器(主にON-OFF制御)に対しても消費電力のさ らなる低減要望が高まっている。直接的な電力消費なし に磁力活用する従来技術として,永久磁石(硬質磁性材 料)が挙げられるが,軟質磁性材料のような励磁と減磁 の制御柔軟性がなく,かつ高コストで難加工材料のた め,車載の周辺機器においては汎用性が乏しい。

上記課題の解決にあたり,当社は軟質磁性と硬質磁性 の中間特性を有する半硬質磁性に着眼し,軟質磁性材料 で培ってきた鋼材設計力・製造ノウハウを最大限に反映 することで,部品加工性に優れかつ大幅な省電力化が可 能な省合金-半硬質磁性材料(ELSHM,ELectromagnetic & Semi-Hard Magnetic steel)を開発した。

本稿では、本開発鋼の設計指針と主な特長、および想

定される適用例と期待効果について述べる。

## 1. 半硬質磁性材料 ELSHM の位置づけ

図1に,主な磁性材料について,保磁力と残留磁束 密度の関係<sup>5),6)</sup>を示す。電磁部品の省電力化の観点で, 当社が着眼した半硬質磁性材料は,保磁力・残留磁束密 度が軟質磁性材料と硬質磁性材料の中間に位置する材料 である。

図2に、各磁性材料を電磁部品に適用する場合の、電 流と吸着力の関係例を示す。軟質磁性材料は、小電流で 大きな電磁力が得られるが、保磁力が低いため、材料の 残留磁束で電磁力を安定維持することは難しい。すなわ ち、電磁力の維持に通電(励磁)が必須である。いっぽ う、硬質磁性材料は、磁力を直接的な電力消費するため、 制御柔軟性が乏しい。また、希土類元素を含有する焼結 材料が多く、高コストで難加工材料である。これらに対 し、半硬質磁性材料は、瞬間励磁後、残留磁束により磁 気吸着力を無通電で維持することができ、大幅な省電力 化が実現できる。これまでラッチングリレーなどでの小 型部品での活用例が挙げられる<sup>7)</sup>。

半硬質磁性材料には、炭素鋼、高クロム鋼、コバルト クロム鋼、高マンガン鋼などが用いられているが<sup>6).7)</sup>、





Soft magnetic

tic Sem

Semi-hard magnetic

Hard magnetic



Fig.2 Relationship between current and magnetic force

炭素鋼は保磁力が1,200 A/m以下と比較的低く<sup>6)</sup>,省電 力化を重視する近年の部品には適用困難な可能性が高 い。また,保磁力の高い高クロム鋼,コバルトクロム鋼, 高マンガン鋼は,永久磁石と同様,高合金のため高コス ト・難加工性に課題が残っている。

上記した従来材料の課題を克服すべく,半硬質磁性が 発現する組織因子を調査し,実用的な磁気特性と部品加 工性を低コストで両立できる省合金-半硬質磁性材料 ELSHMを開発した。

# 2. 省合金-半硬質磁性材料 ELSHM の設計指針

半硬質磁性材料の性能指標の一つである保磁力は,磁 化過程における磁壁移動に対する抵抗力が大きいほど高 くなる。また,吸着力を左右する磁束密度は,主に材料 が有する磁気モーメントが大きいほど,増加する。磁壁 移動に対する抵抗力と磁気モーメントは,材料の化学成 分とミクロ組織の複合的な影響を受ける<sup>2)</sup>。図3に,磁



phase

図3 磁壁移動に対する抵抗機構 Fig.3 Resistance mechanism against magnetic domain wall movement

壁移動に対する抵抗機構の模式図を示す。図3に示すと おり,結晶粒界や析出物,ひずみなど磁気エネルギーの 低い箇所は磁壁移動の妨げとなり,保磁力に大きく影響 をおよぼす。いっぽう,材料の磁束密度は,強磁性を示 すフェライト相やマルテンサイト相を含有する際に大き くなり,非磁性相の存在や強磁性相への固溶元素の増加 は悪化を招く。すなわち,一般に保磁力と磁束密度はト レードオフの関係にある。

従来の半硬質磁性材料<sup>6).7)</sup>は、磁気モーメントをフ ェライト相またはマルテンサイト相が担い、磁壁移動に 対する抵抗力を非磁性相(残留オーステナイト(y)ま たは非磁性化合物)によって担保している。しかし、残 留 y は一般に不安定であり、温度上昇により分解し<sup>8)</sup>、 磁気特性の変化を招く懸念があり、非磁性化合物を活用 したコバルトクロム鋼などは、高合金のため、合金コス トと部品加工性に課題が残る。

このため開発鋼ELSHMでは、磁気特性の安定化に加 え、合金コスト、部品加工性などの実用面を考慮し、下 記①~③の観点から鋼材最適化を図った。

①省合金の強磁性析出物(鉄系の炭化物)の分散で磁壁 移動を抑制⇒磁気モーメントの減少を抑制しつつ,+ 分な磁壁移動の抵抗力を確保

②磁壁移動の抵抗に結晶粒界を積極活用(焼入れ焼戻し)
 ③固溶元素・残留y・非磁性化合物を低減し、磁気モーメントを最大化・安定化

**表1**に, ELSHMのミクロ組織例を示す。ELSHMは, 従来材料と違い,残留γを有さず,結晶粒径が約0.5μm の微細組織である。さらに鉄系の炭化物が多数分散して おり,磁壁移動の抵抗因子を多く含む組織となってい る。

ELSHMは上記①~③の設計指針に基づき,化学成分と加工工程の最適化を図った。ELSHMは鉄系の炭化物 を積極活用するため,従来の炭素鋼ベースの半硬質磁性 材料よりも炭素量を高位とし,そのほかの元素は最小限 の添加としている。

図4に、炭素量を変化させた焼入れ焼戻し鋼の保磁 力測定結果を示す。炭素量の増加に伴い、保磁力増大効 果が増加するが、過剰添加では炭化物が粗大化して数密 度が減少し、磁壁移動に対する抵抗力が低下するため、



表1 ELSHMのミクロ組織と特長 Table1 Microstructure and feature of developed steel 保磁力増大の効果は飽和する。また,粗大な炭化物は応 力集中源として作用し,部品加工性の悪化も招くため, 磁気特性とのバランスを加味して炭素量を選定した。

図5に, ELSHMの適用工程例を示す。従来の高合金-半硬質磁性材料<sup>6).7)</sup>に比べて,クロム,コバルト,ニ ッケルなどの合金元素の含有が少ないため,伸線加工, 鍛造加工など塑性加工や切削加工が可能である。ただ し,加工ひずみは磁気特性の低下を招くため<sup>9)</sup>,組織制 御(ひずみ除去,結晶粒微細化,炭化物分散など)によ る材料特性最大化の観点から,粗加工後に適切な条件で 焼入れ焼戻しを施す必要がある。

#### 3. 省合金-半硬質磁性材料 ELSHM の主要特性

本章では,開発鋼ELSHMの主要特性について述べる。 3.1 磁気特性

**表2**に, ELSHMの磁気特性例を示す。なお, 半硬質 磁性材料の文献情報<sup>6)</sup>を模擬した中炭素鋼S45Cと軟質 磁性材料の代表例(低炭素鋼S10C)を比較として示す。

保磁力と残留磁束密度のバランス指標として,最大エ ネルギー積([BH]<sub>max</sub>)がある。[BH]<sub>max</sub>は,磁気ヒス テリシス曲線(B-H曲線)上の第2象現における磁界の 強さ(H)と磁束密度(B)の積の最大値であり,磁石エ ネルギーの大きさに相当する。

ELSHMの [BH]<sub>max</sub>は、中炭素鋼の半硬質磁性材料や 低炭素鋼の軟質磁性材料よりも良好な値を有する (表2)。永久磁石のような硬質磁性材料と比較しても保 磁力が過大でなく、最大比透磁率(µ<sub>max</sub>)が高いこと も特長である。

硬質磁性材料は保磁力が大きくかつ比透磁率が低いた め<sup>5)</sup>,着磁や減磁に電力を多く消費し,省電力効果が不 十分である。ELSHMは省電力化の実現において,適度 な磁気特性バランスを有しているため,4章で詳述する ように電磁部品の省電力化を実現できる。







図5 開発鋼を適用した部品製造工程例

#### 3.2 磁気特性の温度依存性

励磁電流(銅線)のジュール損失や磁性材料の鉄損に よる発熱が部品の冷却能を上回った場合,磁性材料を含 む部品の温度上昇を招く。温度による磁気特性変化が大 きいと,使用環境により部品性能の悪化が顕在化するた め,温度影響の少ない安定した磁気特性が重要となる。

図6に, ELSHMの残留磁束密度の温度依存性を示す。 ELSHMは残留 y を含有していないため(表1),残留 y 分解起因の組織変化が生じず,磁気特性の温度安定性 が高いことが分かる。

#### 3.3 機械的性質

磁気回路を形成する電磁部品の部品形状・寸法精度は, 部品性能に大きく影響をおよぼす。部品形状の複雑化, 高寸法精度に対応するため, 焼入れ焼戻し後の仕上げ加 工性に寄与する機械的性質は重要である。

表3に、ELSHMの機械的性質(焼入れ焼戻し後)の 一例を示す。引張強度は1,111 MPa,伸びは15.4%であ り、構造材料としても適用可能な良好な機械的性質を有 する。対して、硬質磁性材料である永久磁石の引張強度 は100 MPa以下であり、延性がない<sup>10)</sup>。また、クロム、 コバルト、ニッケルなどを多く含有した従来の半硬質磁 性材料は、高合金の析出物が多く分散するため、延性が 乏しいと考えられる。ELSHMは硬質磁性材料や高合金 -半硬質磁性材料とは異なり、部品加工性が良好であり、 複雑部品形状・高寸法精度に対応できる。

# 4. 電磁部品への適用検討例

ELSHMは保磁力と残留磁束密度のバランスが良好という特長を有し、図2に示すような残留磁束を活用した部品設計・省電力化が可能である。本章では、電磁界解析を用いてELSHMの期待効果を定量的に検討した事例を報告する。

#### 4.1 対象部品と解析方法

電磁部品の特性解析にあたってここでは、市販の電磁 シミュレーションソフトJMAG (Ver22.3)を使用した。 また解析対象とした電磁部品は、自動車分野で省電力要 望の大きい部品の一つである電磁クラッチとした。図7 に、電磁クラッチを模擬した構造を示す。

電磁クラッチは,磁束を通過させるための可動子,固 定子といった磁性部品と,励磁コイルなどの部品から構 成される。コイルに電流を流すことで発生する吸着力を 利用して,動力を伝達・遮断する部品である。

コイルに電流を流すと,図中の矢印のように磁束がコ イル周囲を流れ,吸着力によって可動子が下部へ引きつ けられ,動力を伝達する。本検討では,可動子寸法φ 38 mm × 4 mm,固定子寸法φ38 mm × 16 mm, コイ ル巻き数250 ターンとした。

磁性材料(可動子,固定子)の材質は表2に示した ELSHM,S45C(半硬質磁性材料),S10C(軟質磁性材料) の3通りとした。S45Cは,従来文献<sup>6)</sup>の焼入れ焼戻し 型の炭素鋼を模擬した材料である。解析に用いた磁気特 性データは表2のデータとした。高精度な残留磁束を考

Steel	Magnetic field density (T)				Hc	Br	[BH] <sub>max</sub>	11	Typical	01	
	100 A/m	400 A/m	1,000 A/m	5,000 A/m	10,000 A/m	(A/m)	(T)	(kJ/m <sup>3</sup> )	I-max	process	Class
ELSHM	0.010	0.038	0.130	1.431	1.544	1,655	1.35	1.68	429	Quenching and tempering	Developed steel
S45C	0.000	0.011	0.666	1.567	1.727	910	1.45	0.72	1,208	Quenching and tempering	Conventional Semi-hard magnetic steel
S10C	0.097	0.960	1.368	1.667	1.785	191	0. <b>99</b>	0.07	2,955	Magnetic annealing	Soft magnetic steel

表2 磁気特性例 ( $H_m$ =10,000A/m, RT) Table 2 Example of magnetic properties ( $H_m$ =10,000A/m, RT)



Fig. 6 Temperature dependence of residual magnetic flux density  $(H_{\rm m}$ =10,000A/m)

表3 ELSHM(焼入れ焼戻し後)の機械的性質

 Table 3 Mechanical properties of ELSHM as quenching and tempering

Steel	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction area (%)	
ELSHM	SHM 1,111 1,035		15.4	49.5	

慮した解析のため、JMAGが推奨する複数のヒステリシ スカーブを用いて解析した。

#### 4.2 ELSHMの適用効果

各材料を使用した際の無通電時の吸着力(F<sub>m</sub>)を比 較するため, 励磁電流を流した後に, 電流を止めて, Fm を解析した。図8に, 励磁電流とF<sub>m</sub>の関係を示す。 ELSHMは励磁電流が0.6 A以上の条件で、S45Cや軟質 磁性材料(S10C)と比較し、高いFmを得ることができる。

**図9**に, 保磁力と残留磁束密度のバランスの指標と して用いられる  $[BH]_{max} \ge F_m の関係を示す。 <math>[BH]_{max}$ が大きいほど、Fmは大きく、ELSHMの高い残留磁束密 度を反映して、高吸着力を得られることを示唆してい る。なお厳密には、電磁部品の形状などによって最適な 磁気特性パラメータは変わりうるため、磁気特性と磁気 回路設計の相互考慮が必要である。

つぎに、ELSHM 適用での省電力効果を算出するため、 電磁クラッチ部品の吸着力に300Nが必要と仮定し、適 用効果を算出した。図8に示す通り、ELSHMは励磁電 流を0.9 A から0 A (無通電) にすることで300 N の吸着 力を得ることが可能である。いっぽう, S45CとS10Cは, 通電なしの無励磁状態で300Nの吸着力を得ることがで きない。

S45CとS10Cの300Nの吸着力を得るために必要な励 磁電流を算出するため、電磁界解析にて、励磁電流と吸 着力(f)の関係を整理した。図10に, 励磁電流とfの



Fig.7 Schematic illustration of electromagnetic clutch structure



Fig.8 Relationship between excitation current and magnetic attractive force without current

関係を示す。図10に示す通り、300Nの吸着力を得るた めには、S45C, S10Cの場合、それぞれ0.49 A, 0.3 A流 す必要がある。軟質磁性材料であるS10Cは比透磁率が 高いため、S45Cと比べて小電流で高吸着力を得ること ができる。

図11に、300Nの吸着力を得るために必要な励磁電流 の解析結果を示す。ELSHMは、外乱に対する吸着力の 安定性を高めるために、60sに一度励磁が必要と仮定を した。S45CとS10Cは電流を常時流す必要があるのに対 し、ELSHM はある一定時間に一度励磁電流を流せば、 必要な吸着力を安定維持することができる。

図11を元に消費電力を算出した結果, ELSHMはS45C やS10Cと比較し、95%以上の大幅な消費電力低減効果 を示した(図12)。

上述したように開発鋼 ELSHM は、電磁部品の省電力 化に非常に有効な材料である。さらに従来の同種の磁性 材料と比較し、省合金であるため、低コストかつ優れた 部品加工性を有すると考えられる。当社は軟質磁性材料 を主に電磁部品の磁場解析によるソリューション技術を 構築・強化してきた<sup>2),4)</sup>。軟質磁性材料で培ってきた部 品設計ソリューション技術を最大限反映して, ELSHM の商品化により、カーボンニュートラルの実現などの課 題解決に貢献していく。



図9 [BH]<sub>max</sub>と無通電時の吸着力の関係 Fig.9 Relationship between [BH]<sub>max</sub> and magnetic attractive force without current







**Fig.11** Analysis results of excitation current required to maintain holding force (*F*=300 N)

**むすび**=省合金-半硬質磁性材料ELSHMの特長を紹介 するとともに、電磁クラッチを一例として、ELSHM 適用による省電力効果を検証した。省電力化ニーズの拡大 に伴い、本稿で紹介した残留磁束を活用した半硬質磁性 材料の適用拡大が想定される。今後は、さらなる好適部 品の抽出・検証と成長部品に適した材料開発を推進し、 カーボンニュートラルの実現などの課題解決に貢献して いく。



図12 開発鋼適用による省電力効果(FEM解析)



#### 参考文献

- 1) 経済産業省.自動車新時代戦略会議(第1回)資料.
- 2) 坂田昌之ほか. R&D神戸製鋼技報. 2015, Vol.65, No.2, p.6-11.
- 3) 千葉政道ほか. R&D神戸製鋼技報. 2005, Vol.55, No.2, p18-21.
- 4) 笠井信吾ほか. R&D神戸製鋼技報. 2022, Vol.71, No.2, p.3-6.
- 5) 徳永雅亮. 特殊鋼. 2019, Vol.68, No.6, p.4-7.
- 6) 川口寅之輔ほか. 電気製鋼. 1974, Vol.45, No.3, p.175-187.
- 7) 木村康夫ほか. 日本金属学会会報. 1970, Vol.9, No.11, p.703-707.
- 8) 笹栗信也ほか. 鋳造工学. 2004, Vol.76, No.3, p.198-204.
- 9) 馬越佑吉. 日本金属学会会報. 1980, Vol.19, No.9, p.645-p654.
- Characteristics of NdFeB Magnets. https://www.stanfordmagnets.com/characteristics-of-ndfebmagnets.html, (参照 2024-06-07).

#### (技術資料)

# 高延性980/1,180 MPa級合金化溶融亜鉛めっき鋼板

村田忠夫\*1·羽田佳哲\*2·池田宗朗\*3·二村裕一\*1(工学博士)·中山啓太\*4

# Galvannealed Steel Sheets of 980 MPa Grade and 1,180 MPa Grade with Excellent Formability

Tadao MURATA · Yoshinori HATA · Muneaki IKEDA · Dr. Yuichi FUTAMURA · Keita NAKAYAMA

## 要旨

近年厳しさを増す温室効果ガス排出量規制と衝突安全性規制に対応するため、自動車では高強度鋼板への部材置 換えによるボデー骨格の軽量化が進められている。中でも、自動車アンダーボデーでは複雑形状部品の部材置換 えにあたり、防錆(ぼうせい)能と高強度、高成形性を兼備する材料が望まれている。当社ではこの要望に対応 するため、新焼鈍設備を活用し、優れた成形性、防錆能およびスポット溶接における継手品質を兼備する980 MPa 級/1,180 MPa級合金化溶融亜鉛めっき鋼板を開発した。本稿では、開発材の組織制御指針と代表的な特性につい て紹介する。

#### Abstract

In response to increasingly stringent greenhouse gas emission regulations and concerns about crashworthiness in recent years, progress has been made in reducing the weight of automotive body skeletons by replacing their components with ones made of high tensile strength steel sheets. In particular, the replacement of components in complex shaped parts of automotive underbodies requires steel sheets that combine corrosion resistance with high tensile strength and high formability. To meet this demand, Kobe Steel has utilized a new annealing facility to develop 980 MPa grade/1,180 MPa grade galvannealed steel sheets that combine excellent formability, corrosion resistance, and spot-welding joint quality. This paper introduces the microstructural control guidelines and typical properties of the newly developed steel sheets.

#### 検索用キーワード

ハイテン,合金化溶融亜鉛めっき,残留オーステナイト,高成形性,スポット溶接,溶融金属脆化,新焼鈍設備,3CGL

まえがき=近年, 厳しさを増す温室効果ガス排出量規 制<sup>1)</sup>と衝突安全性規制<sup>2)</sup>に対応するため,自動車のボ デー骨格.シートのレール・骨格への高強度鋼板の適用 が推進されている<sup>3)~5)</sup>。とくに温室効果ガスの排出に関 しては、最近、自動車メーカではBEVでの開発促進の 指向ではあるが、依然、軽量化部品の適用は求められて いる。したがって,「車体の軽量化のための高強度化」 に対する要望は根強く, 高強度鋼板に対する強度 (Tensile Strength:以下, TSと表記) および成形性の 向上ニーズはさらに高まっていくと想定される。なかで も,ボデー骨格のアンダーボデーには,防錆(ぼうせい) 能に優れためっき鋼板が適用され、従来より、Dual phase 鋼板(以下, DP鋼板と表記)が使用されてい る<sup>6),7)</sup>。しかしながら,適用材料の高強度化に伴い,複 雑形状部品において,従来のDP 鋼板では成形性の不足 が懸念され、より高い成形性を有する高強度鋼板が要望 されている。

この状況を踏まえ,当社では,自動車向け高強度鋼板 の需要拡大を見据えた生産能力の拡大と,将来的なさら なる高強度化・高機能化(成形性や圧壊性能の向上など) ニーズへの対応を目的として,新焼鈍設備を建造し た<sup>8),9)</sup>。当社新焼鈍設備は最新鋭の熱処理機能を備え, 冷延鋼板・めっき鋼板双方の焼鈍設備を併せ持つ。当社 では,新焼鈍設備を活用し,高成形性冷延・めっき鋼板 の製品メニュー拡充および既存鋼板の機能性向上による 高付加価値鋼板の開発を進めている。

本稿では, 高成形性を特徴とする980 MPa級および 1,180 MPa級の合金化溶融亜鉛めっき鋼板(以下, GA鋼 板と表記)について, 製品設計の考え方と主要特性を紹 介する。

#### 1. 開発材の製品設計の考え方

#### 1.1 成分設計

開発材は、主に自動車アンダーボデーの複雑形状部品 への適用を目的とした高成形性GA鋼板であり、TSと優 れた成形性および合金化溶融亜鉛めっきにより担保され る優れた防錆能を兼備する。プレス成形における割れを 抑制するためには延性(Elongation:以下, El.と表記) に加え、伸びフランジ性の指標である穴広げ率(λ)も 重要である。

TSと成形性のバランス向上には、C, Siに代表される 合金元素添加量の増大が有効であることが知られてい る。しかし、GA鋼板では合金元素添加量の増大により、 鋼板 – 亜鉛の界面における亜鉛めっきに対するぬれ性低 下<sup>10)</sup> や合金化処理におけるめっき層の反応性が低下 し<sup>11)</sup>、均質なめっき層の確保が困難となる。また、鋼板

<sup>\*1</sup>鉄鋼アルミ事業部門 技術開発センター 鋼板開発部 \*2鉄鋼アルミ事業部門 企画管理部付 \*3鉄鋼アルミ事業部門 加古川製鉄所 鋼板技術部 \*4技術開発本部 材料研究所



 $Fig. 1 \ \ {\rm Tensile\ strength\ and\ elongation\ of\ galvannealed\ steel\ sheets}$ 

中の合金元素添加量の増大は、自動車部品の接合に広く 適用されているスポット溶接において、適正溶接条件範 囲の縮小や継手強度の低下<sup>12)</sup>,溶融金属ぜい化(Liquid Metal Embrittlement:以下,LMEと表記)割れによる 溶接継手強度の低下<sup>13)</sup>を招く。

このため,開発材では,以下の合金元素の添加量は必要最小限に抑え,組織制御の適正化による特性向上を図った。

- 1) C添加量増加による残留オーステナイト量の増大 (TSと成形性のバランス向上)
- 2) Si添加による鉄炭化物の形成阻害効果を活用した Cによる特性向上効果の最大活用

#### 1.2 組織設計

図1に、当社GA鋼板の代表的なTSとELの特性バラ ンスを示す。従来より、TSと優れた成形性および実用 特性を兼ね備えた鋼板を実現するために、様々な組織制 御方策が開発されてきた。開発材では、DP鋼板におけ る『①硬質組織・軟質組織の複合組織』や高成形性冷延 鋼板における『②残留オーステナイト活用』に代表され る組織制御技術に加え、さらなる特性向上方策として新 焼鈍設備を活用する『③上部ベイナイト・下部ベイナイ トの複合組織』を検討し、以下の組織制御を見出した。

- ①硬質組織(マルテンサイト)によるTS向上と軟質 組織(フェライト)による均一変形能向上の両立
- ②残留オーステナイトによる均一変形能向上と組織微細制御による局所変形能の低下抑制
- ③上部ベイナイト・下部ベイナイトの複合組織による, さらなる軟質組織の活用拡大と組織間の硬度差低減 (均一変形能・局所変形能の向上)

開発材では、残留オーステナイトの加工誘起塑性 (TRansformation Induced Plasticity:以下,TRIPと表 記)効果<sup>14)</sup>と軟質組織により、優れた均一変形能を発 揮する。しかしながら、硬質組織と軟質組織には硬度差 が存在するため、成形時の変形量が不均質となり、局所 変形能の低下を招く。とくに残留オーステナイトは TRIP効果を発現した際、非常に硬質なマルテンサイト 組織に変態するため、比較的軟質で成形時に優先的に変 形される隣接組織との界面がボイド発生起点となる。開 発材では、λに代表される局所変形能の劣化を回避する



図2 代表組織写真(a)980 MPa級開発材,(b)1,180 MPa級開発材, (c)980 MPa級従来材,(d)1,180 MPa級従来材

Fig.2 Microstructure of (a) developed steel (980 MPa grade), (b) developed steel (1,180 MPa grade), (c) conventional steel (980 MPa grade), (d) conventional steel (1,180 MPa grade)

ため,残留オーステナイトを微細分散させることで,隣 接組織への変形集中を緩和し,ボイド生成を抑制してい る<sup>15)</sup>。

980 MPa級, 1,180 MPa級の開発材および従来DP鋼板<sup>6).7)</sup>のミクロ組織の一例を図2に示す。980 MPa級の 開発材では、軟質組織であるフェライト・ベイニティッ クフェライト・上部ベイナイトと硬質組織であるマルテ ンサイト・下部ベイナイトより構成される複合組織中に、 残留オーステナイトを微細分散させている。いっぽう, 1,180 MPa級の開発材では、より高強度を確保するため にフェライトは含有させず、ベイニティックフェライ ト・上部ベイナイトと下部ベイナイト・マルテンサイト より構成される母相中に、残留オーステナイトを微細分 散させている。

### 2. 開発材の主要な特性

#### 2.1 成形性

#### 〔基本特性〕

**表1**に,980 MPa級,1,180 MPa級の開発材および比較として,同等強度の従来DP鋼板の代表的な機械的特性を示す。開発材では,前述の組織制御にて非常に優れたTS,EL,λの特性バランスを達成している。開発材は同等強度の従来材に比して1.5倍近いELを示しており,例えば,1,180 MPa級開発材では強度グレードが低い980 MPa級従来材と同等のELを確保しており,均一変形能に優れていると推察される。また,焼鈍条件を適切に制御することにより,めっき品質に関しても耐パウダリング性,耐食性ともに良好,かつ均質なめっき性状を実現している。

〔成形性〕

伸びフランジ性はJIS Z 2256に規定される穴広げ試験 にて評価した。図3は、980 MPa級、1,180 MPa級の開 発材および比較として従来材についてλを示す。開発材 は従来材と同等のλを有しており、前述の組織制御によ る局所変形能の劣化回避が伸びフランジ性の維持に寄与

表1 開発材と従来材の代表的な機械的特性(980/1,180 MPa級) Table 1 Mechanical property of developed steels and conventional steels (980 MPa/1,180 MPa grade)

							_
Ctool	TS grado	Thickness	YP	TS	EI.		
Steel		is grade	(mm)	(MPa)	(MPa)	(%)	
	Developed start	980MPa	1.4	625	1,022	22	
Developed steel	1,180MPa	1.4	957	1,241	16		
	Conventional steel	980MPa	1.4	677	1,026	15	
Conventional steel	1,180MPa	1.4	864	1,189	10		



図3 開発材と従来材の穴広げ率(980/1,180 MPa級) Fig.3 Hole expansion ratio of developed steels and conventional steels (980 MPa/1,180 MPa grade)





#### したことを示唆している。

曲げ性はJIS Z 2248に規定される曲げ試験にて,金型 に試料を曲げ稜線(りょうせん)が圧延方向に並行とな るように配置し,先端曲げ半径(R)が0.0~5.0 mmの 90度パンチにて圧下した際に鋼板表面に亀裂が生じな い最小曲げ半径(R)を評価した。図4は,980 MPa級, 1,180 MPa級の開発材および比較として従来材について, 曲げ性の指標である90度V曲げ試験における最小曲げ 半径(R)を板厚(t)で除した値を示す。開発材では, 980 MPa級,1,180 MPa級ともに,従来材より小さい曲 げ半径(R)まで割れが発生せず,優れた曲げ性を有し ていることが分かる。これは,軟質組織および残留オー ステナイトの活用により均一変形能が上昇したことに加 え,残留オーステナイトを微細分散させたことで,亀裂 の起点となるボイドの形成を抑制できたためと推察され る。

図5は、開発材および比較として980 MPa級の従来 DP鋼板の成形限界線図(Forming Limit Diagram)を 示す。開発材では潤滑材を使用せずに破断限界歪を測定

● 980MPa Developed (no lubrication) ■ 1,180MPa Developed (no lubrication) ○ 980MPa Conventional (with lubrication)



- 図5 開発材 (980/1,180 MPa 級) と従来材 (980 MPa 級) の成形限 界線図
- Fig.5 Forming limit diagram of developed steels (980 MPa/1,180 MPa grade) and conventional steel (980 MPa grade)



- 図6 (a) 980 MPa級開発材, (b) 980 MPa級従来材の部品成形模 擬試験
- Fig. 6 Forming trial of (a) developed steel and (b) conventional steel (980 MPa grade)

しているのに対し,従来材では潤滑材としてポリシート を2枚使用して破断限界歪を測定している。一般に潤滑 材の使用により成形時の歪分布が均一化され,成形限界 は向上することが知られている<sup>16)</sup>が,980 MPa級開発材 の破断限界歪は980 MPa級従来材を上回っている。 1,180 MPa級開発材においても,破断限界歪は980 MPa 級 従来材 と同等であり,開発材は980 MPa級, 1,180 MPa級ともに優れたプレス成形能を有している。

開発材は、従来材より高い成形限界を有することか ら,例えば,980 MPa級従来材から1.180 MPa級開発材 への置換えを活用した衝突安全性と部品薄肉化による軽 量化の両立やさらなる複雑形状部品の実現に貢献でき る。また、開発材は優れた曲げ性により、部品曲げ肩部 の形状をより小さな曲げ半径(R)とすることで,部品 剛性改善による衝突安全性の向上や部品の省スペース化 に貢献し、車体構造設計におけるフレキシビリティ創出 にも寄与するものと考える。前述の特徴から、開発材の 適用部位として,例えば,複雑形状成形および部品一体 化が望まれる各種ピラー(ロア部)や乗客保護の観点で 剛性確保が重要となるサイドメンバー、サイドシルが挙 げられる。図6に、試作段階における980 MPa級の開 発材および従来材にて、フロントサイドメンバーリアを 模擬した形状の成形試験結果を示す。従来材では張出し 部にて割れが発生しているが、開発材では割れずに成形 できており、厳しい張出し成形性が要求される部品への 適用に好適である。

#### 2.2 スポット溶接性

近年,自動車用鋼板では,合金元素添加量の増大に伴い,スポット溶接における溶融金属侵入起因のLME割 れが問題視されている。鋼板のLME割れに対する感受 性は,Siに代表される合金元素添加量の増大により高ま ることが知られている。当社では,成形性とLEM割れ 感受性を両立するため,合金元素がLME割れ感受性に およぼす影響を調査し<sup>17)</sup>,成分設計に織り込んだ検討を 行っている。また,開発材では,高強度と優れた成形性 を両立するために合金元素添加量の増大が不可欠であ る。このとき,溶接ナゲットが硬質となるため,ナゲッ ト内での破断による溶接継手強度の低下が懸念される。 溶接継手強度の向上にはナゲット径の拡大が有効だが, 高電流通電時には急速に昇温・膨張することで溶融金属 が爆飛(チリ)することにより溶融部が流出するため, ナゲット径の安定確保は困難である。開発材の適用に際 しては,溶接継手強度の安定確保を指向し,以下の溶接 条件での改善を適用した。

- ナゲット形成後の後通電によるナゲット品質の改善(ナゲット内破断の抑制)
- 低電流の予通電によるチリ発生の抑制(急速昇温の抑制)

溶接継手強度として、板厚1.6 mmの開発材を溶接し、 せん断引張強度(Tensile Shear Strength:以下, TSS と表記)と十字引張強度(Cross Tension Strength:以下, CTSと表記)を評価した。図7,8に開発材の溶接継手 特性について、溶接電流とTSSの関係およびCTSの関







図8 開発材 (980/1,180 MPa級)の溶接電流と十字引張強度の関係 Fig.8 Welding current and cross tension strength of developed

steels (980 MPa/1,180 MPa grade)

係を示す。開発材では、980 MPa級, 1,180 MPa級とも にJIS Z 3140 A級の規定ナゲット径(5.4 mm)を満足 する溶接電流からチリ発生電流まで、2.0 kA程度の適正 溶接条件を確保した。適正溶接条件において、開発材の 溶接継手のTSS、CTSはともにJIS-A級の基準強度を満 足しており、良好な溶接継手を安定的に形成できること を確認した。また、開発材溶接継手の外観観察および断 面観察にて、LME割れが発生しないことも確認してい る。

**むすび**=今回,新たに開発した優れた成形性を有する 980 MPa級および1,180 MPa級の高成形性GA鋼板につ いて,組織制御の考え方と主要な特性を紹介した。開発 材は成分設計および残留オーステナイトに代表される組 織制御により,良好なTSと成形性を有することに加え て,めっき品質,溶接性も兼備することが特徴であり, 当社では開発材を高強度GA鋼板の中で高成形性品種と 位置付けている。

今後,自動車業界を取り巻く環境として,CO<sub>2</sub>排出量 低減,リサイクル性確保,さらには原価低減などが推進 され,材料に要求される課題は一段と厳しさを増す見込 みである。当社では,本稿にて紹介した高成形性 980 MPa級,1,180 MPa級GA鋼板をはじめとして,こ れまでに蓄積した技術および最新鋭の新焼鈍設備を活用 した材料開発に取り組んでいく。とくに鋼板のさらなる 成形性や溶接性などの特性向上に取り組むとともに,前 述の環境変化に対応して材料特性の第三軸を考え,社会 貢献に寄与できる材料開発を推進していく所存である。

#### 参考文献

- 国土交通省HP. https://www.mlit.go.jp/report/press/jidoshal0\_ hh\_000228.html, (参照2024-06-07).
- 独立行政法人 自動車事故対策機構HP. https://www.nasva. go.jp/mamoru/assessment\_car/newtest.html, (参照2024-08-29).
- 3) 福井孝之. 日産技報. 2019, No85, p.3-7.
- 4) 瀬戸洋一. ふぇらむ. 2013, Vol.18, No.12, p.48-53.
- 5) 大宮良信ほか. R&D神戸製鋼技報. 2000, Vol.50, No.3, p.20-23.
- 6) 二村裕一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.2, p.41-44.
- 7) 池田宗明ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.8-11.
- 神戸製鋼所HP. https://www.kobelco.co.jp/releases/1199218\_15541. html,(参照2024-06-07).
- 9) 神戸製鋼所HP. https://www.kobelco.co.jp/releases/1208049\_15541. html,(参照2024-06-07).
- 10) 鈴木善継ほか. 鉄と鋼. 2002, Vol.88, No.11, p.61-68.
- 11) 宮田麻衣ほか. 鉄と鋼. 2019, Vol.105, No.7, p.9-18.
- 12) 溶接学会軽構造接合加工研究委員会. 薄鋼板及びアルミニウム合 金板の抵抗スポット溶接. 2008.
- 13) 前田恭兵ほか. R&D神戸製鋼技報. 2023, Vol.72, No.1, p.107-114.
- 14) 田村今男. 鉄と鋼. 1970, Vol.56, No.3, p.429-445.
- 15) 鹿島高広ほか. R&D神戸製鋼技報. 2002, Vol.52, No.3, p.15-18.
- 16) 薄鋼板成形技術研究会編. プレス成形難易ハンドブック. 第3版, 2007.
- 17) 中田啓亮ほか. 溶接学会講演概要集. 第114集. 2024, p.90-91.

#### (技術資料)

# 1,700 MPa級マルテンサイト鋼板

白木厚寬<sup>\*1</sup>·中屋道治<sup>\*1</sup>·森原竜司<sup>\*2</sup>

# Martensitic Steel Sheets of 1,700 MPa Grade

Atsuhiro SHIRAKI · Michiharu NAKAYA · Ryuji MORIHARA

## 要旨

自動車の衝突安全性向上,軽量化によるCO<sub>2</sub>削減のため,自動車部品への高強度鋼板の適用が検討されており, 既に1,470 MPa級鋼板が適用されている部品では、さらなる高強度化が期待されている。当社が開発した1,700 MPa 級鋼板は,水焼入れ方式の連続焼鈍設備を活用することで低合金でありながらマルテンサイト単相組織を有して おり,高強度化に伴う適用課題である曲げ性,溶接性,耐遅れ破壊性などを解決した。なお,水焼入れでは急速 冷却時の熱ひずみによる平坦度の悪化が課題だが,強力テンションレベラーによる矯正で改善を図り,1,470 MPa 級と同等以上の平坦度を実現した。本稿では,材料設計の考え方と鋼板の特徴を紹介する。

#### Abstract

The application of high-strength steel sheets to automotive parts is being considered to improve the collision safety of automobiles and reduce  $CO_2$  emissions through weight reduction, and further strengthening is expected in parts that already use 1,470 MPa grade steel sheets. The 1,700 MPa grade steel sheet developed by Kobe Steel utilizes continuous annealing equipment with water quenching and has a martensite single-phase structure despite being a low alloy. This solves the application challenges associated with strengthening, such as bending workability, weldability, and delayed fracture resistance. One issue with water quenching is the deterioration of flatness due to thermal distortion during rapid cooling. This, however, has been improved by straightening with a powerful tension leveler, achieving flatness equal to or better than that of the 1,470 MPa grade. This report introduces the concept of material design and the characteristics of steel sheets.

#### 検索用キーワード

マルテンサイト,曲げ性,溶接性,遅れ破壊性,平坦度,1,700 MPa級

**まえがき**=自動車の衝突安全性向上,排出ガス削減のた めの軽量化を目的として,自動車部品への高強度鋼板の 適用が進んでいる。高強度鋼板を用いた自動車部品の成 形法としては,ホットスタンプに代表される熱間成形と プレス成形やロールフォーミングなどの冷間成形があ る。例えば,バンパーレインフォースメント(以下,バ ンパーR/Fという)やクロスメンバー,ルーフレールと いった部品にはロールフォーミングで加工した1,470 MPa 級の高強度鋼板が適用されている。また,フロントピラ ーやより複雑で寸法精度要求が厳しいボデー骨格部品な どのプレス成形部品への1,470 MPa級鋼板の適用が進展 している。直近では1,470 MPa級鋼板よりもさらに高強 度の鋼板の適用が期待されている。

当社では、今後ますますの部材高強度化に備え、1,700 MPa 級のマルテンサイト組織鋼を開発した。この開発材は、 高速冷却が可能な水焼入れ装置を有する連続焼鈍ライン を活用しており、高強度化における主要課題である加工 性、溶接性および耐遅れ破壊性において必要特性を有す る特長がある。本稿では、開発材の設計の考え方、主要 特性を紹介するとともにボデー用途での適用も見据え、 部品の寸法精度に影響を及ぼす平坦度の改善についても 紹介する。

# 1. 開発鋼の設計の考え方

バンパーR/Fやルーフレールといったロールフォーミ ングで成形される部品では、鋼板を複数のロールに通板 することで逐次曲げ加工を行い、部品の断面形状を成形 するため、鋼板には曲げ性が必要となる。また成形時に 部品に生じる残留応力による遅れ破壊も懸念される。よ って単に強度を上昇させるのではなく、これらの特性を 兼備できるように材料設計を行う必要がある。

上記特性を達成するためには、低合金で高強度を達成 可能なマルテンサイト単相組織とすることが効果的と考 えた。マルテンサイト組織は、均熱処理によりオーステ ナイト化したのち、急速冷却することで生成される。当 社では、水焼入れ設備を有する連続焼鈍炉を活用するこ とで急速冷却を可能とし、多量の合金を添加せずに急冷 中のフェライトやベイナイトなどの軟質組織の混入を抑 制できる。そのため、溶接性や遅れ破壊性に悪影響を及 ぼす元素を削減でき、特性改善に有利な成分設計とする ことが可能である。以下に特性達成の考え方の詳細を述 べる。

#### 1.1 強度

バンパーR/Fのような部品では、衝突時の乗員保護の 観点で塑性変形しないことが求められるため、1,700 MPa 以上の引張強度に加えて,高い降伏強度が必要となる。 マルテンサイト組織は,炭素が侵入型位置に過飽和に固 溶しているため非常に硬い<sup>1)</sup>が,焼入れままでは靭性(じ んせい)および降伏比が低い<sup>2)</sup>という特徴がある。開発 鋼では,靭性の確保と高い降伏強度を実現するため,比 較的低温で焼戻し処理を行い,焼戻しマルテンサイト単 相組織とした。

#### 1.2 曲げ加工性

焼戻しに伴う組織変化は、曲げ加工性に大きく影響を 及ぼすため、適切な処理が必要となる。焼戻し温度の上 昇に伴い、針状に成長したセメンタイトの個数密度が増 加すると曲げ加工性が劣化するため<sup>3)</sup>、加工性の劣化の 生じない温度域で焼戻し処理を行い、曲げ性を確保する 設計とした。また、曲げ加工時の応力集中源となる鋼板 表層の介在物が割れの起点となり、曲げ性を悪化させ る<sup>4)</sup>ため、鋼板成分の適正化により改善を図った。

#### 1.3 遅れ破壊性

遅れ破壊は、一定の引張応力を受けている材料がある 時間経過した後、突然破壊する現象で水素脆化によるも のであることが知られている。その破壊の過程は、①水 素侵入、②水素拡散、③亀裂発生、④亀裂伝播の過程を とるといわれている<sup>5)</sup>。したがって、①~④の各過程へ の対策をとることが遅れ破壊の抑制に対して有効と考え られる。

開発鋼においては,1,470 MPa級鋼板でも適用してい る耐食性を向上させる元素<sup>6)</sup>の添加による①水素侵入 の抑制に加え,焼戻し温度の高温化により生成する炭化 物の水素トラップサイトを活用した②水素拡散の抑制, 合金炭化物形成による粒成長の抑制により結晶粒を微細 化することで,③亀裂発生の抑制と④亀裂伝播の抑制を 図る方針とした。これらの耐遅れ破壊性改善効果を確認 するため、ラボ検討を行った。

合金元素の添加および製造条件の調整により,表1に 記載の焼戻し炭化物を増加させた鋼種A,Bおよび旧y 粒径を微細化させた鋼種B, Cについて, 図1に示すU 曲げー塩酸浸漬法により、遅れ破壊性を評価した。端面 を機械加工仕上げとした150mm(圧延方向に垂直な方 向) × 30 mm (圧延方向)の短冊状の鋼板について、曲 げ稜線(りょうせん)が圧延方向となるように曲げ半径 10mmでU曲げ加工を行い、ボルト締結により応力を 負荷して試験片を作製した。応力は、ひずみゲージで測 定したひずみ量にヤング率を乗算した値が所定の応力と なるようにボルト締結により負荷した。作製した試験片 を0.1N-HClに200時間浸漬し、割れの有無を評価した。 その結果を表1に示す。負荷応力は.1.500 MPaおよび 2,000 MPaで実施し、各条件につきN=3の評価を行い、 割れの発生しなかったものは○,発生したものを×と表 記している。鋼種Bは鋼種Aより旧 y 粒径が微細であり、 鋼種Cより炭化物が多い。いっぽう、遅れ破壊性の評価 において、鋼種Bは割れが発生せず、鋼種AおよびCで は割れが発生しており、鋼種Bの遅れ破壊性が優れる結 果となっている。したがって、焼戻し炭化物の増加、旧 y 粒径の微細化により,遅れ破壊性の改善を確認できた ため、これらを開発鋼の設計に反映させた。

# 2. 開発鋼の主要特性

#### 2.1 機械的特性および適正溶接電流範囲

開発鋼および従来鋼の代表組織を図2に示す。開発 鋼は微細な針状の組織を呈しており,均一なマルテンサ イト単相組織になっていることがわかる。また,従来鋼 と比較して微細な組織になっており,耐遅れ破壊性の観 点で意図した組織になっていることが確認できた。

表2に機械的特性の評価結果を示す。なお,引張特 性はJIS5号試験片を作製し,JIS Z 2241に規定される引 張試験にて評価を行った。また,伸びフランジ性を調査 する目的でJIS Z 2256に規定されている穴広げ試験にて 評価を行った。曲げ性の評価はJIS Z 2248にて規定され る90度V曲げ試験にて実施した。曲げ稜線が圧延方向

表1 焼戻し炭化物および結晶粒微細化の耐遅れ破壊性への影響 Table 1 Effects of tempered carbide and grain refinement on delayed fracture resistance

	Corrosion		Prior			evaluation results	
Steel	rocistanco	Tempered	gamma	Thickness	ΤS	Bending radius:10R	Bending radius: 10R
type	alamant	carbide	particle	(mm)	(MPa)	Applied stress	Applied stress
	element		size			: 1,500 MPa	: 2,000 MPa
А	addition	increase	-	1.0	1,785	$\bigcirc \times \bigcirc$	$\times \times \times$
В	addition	increase	fine	1.0	1,757	000	000
С	addition	-	fine	1.0	1,744	× × O	-

 $\bigcirc$  : No fracture  $\times$  : Fracture



図1 U曲げ試験片を用いた遅れ破壊評価方法 Fig.1 Delayed fracture evaluation method using U-bending test pieces



図2 開発鋼(1,700 MPa級)および従来鋼(1,470 MPa級)の代表組織 Fig.2 Microstructure of developed steel and conventional steel

表2 機械的特性 Table 2 Mechanical properties of developed and conventional steels

	YS(MPa)	TS(MPa)	EI.(%)	λ (%)	R/t
1,700 MPa Grade (Developed steel)	1,503	1,768	6	39	3.6
1,470 MPa Grade (Conventional steel)	1,332	1,544	6	47	3.5



図3 溶接電流とナゲット径の関係 Fig.3 Relationship between welding current and nugget diameter

となるように曲げ加工を行い、曲げ表面にクラックが生じない最小曲げ半径を板厚で除したR/tを指標とした。

開発鋼は1,470 MPa級と同様に高YR特性を有してお り,1,700 MPa以上の引張強度に加えてYSも高く,高強 度部品に好適である。また全伸び(EL),穴拡げ性(λ), 曲げ性(R/t)は1,470 MPa級とほぼ同等レベルを維持 しており,1,470 MPa級が適用されている部品であれば, 成形性の観点では問題ないと考えられる。

図3に適正溶接電流範囲を示す。ボデー用途ではス ポット溶接性も必要なため、板厚1.4 mmの供試材を用 いて、表3に示す条件でスポット溶接を行い、ナゲッ ト径が4 $\sqrt{t}$ (t:板厚)の電流値からチリが発生するま での電流値範囲を評価した。高強度化によりチリ限界電 流は低下する場合もあるが、開発鋼は7 kA~10 kAと 広い電流範囲を有している。これは1.470 MPa級と同等 であり、同じ溶接条件で所定のナゲット径を確保できる ことを確認できた。

表3 スポット溶接条件 Table 3 Spot welding condition

Electrode tip	1%Cr-Cu dome radius type
Tip diameter	6 mm
Electrode force	5.0 kN
Welding time	18 cycles/60Hz
Squeeze time	60 cycles/60Hz
Hold time	1 cycle/60Hz
Welding current	5-12 kA
Electrode force Welding time Squeeze time Hold time Welding current	5.0 kN 18 cycles/60Hz 60 cycles/60Hz 1 cycle/60Hz 5-12 kA

#### 2.2 遅れ破壊性

遅れ破壊は塑性ひずみや残留応力により助長されるた め、自動車部品では大きな塑性ひずみが導入される成形 加工部およびブランキングの際に加工された切断端部に おいて発生の懸念がある。これらの懸念箇所における開 発鋼の耐遅れ破壊性を確認するため、自動車部品の成形 加工部を模擬したU曲げ加工部とせん断加工端部につい て評価を実施した。 U曲げ加工部は、端面を機械加工仕上げとした 150 mm (圧延方向に垂直な方向) × 30 mm (圧延方向) の短冊状の鋼板について、曲げ稜線が圧延方向となるよ うに曲げ半径5 mmでU曲げ加工を行い、ボルト締結に より応力を負荷して試験片を作製した。応力はひずみゲ ージで測定したひずみ量にヤング率を乗算した値が所定 の応力となるようにボルト締結により負荷した。作製し た試験片を0.1N-HClに300時間浸漬し、割れの有無を評 価した。評価結果を**表4**に示す。1,700 MPaの応力で割 れが発生せず、弾性限を超えてさらに高いひずみを付与 しても割れが発生しないことを確認できた。

せん断加工端部の耐遅れ破壊性は、長手が圧延方向に 垂直な方向となるように15 mm × 30 mm にせん断加工 した試験片について、0.1Nの塩酸に24時間浸漬後、端 面の割れ有無を目視または顕微鏡にて確認して評価し た。せん断加工の模式図を図4に示す。評価する端面 は圧延方向に垂直な端面とし、切断後に下刃とブランク ホルダーに挟まれた鋼板の端部を評価した。せん断加工 はシャー角を0°、クリアランスを5、10、15、20、25% の条件で実施した。評価結果を表5に示す。各条件に ついて, N=3 実施したがいずれの条件でも割れが発生 せず,良好な遅れ破壊性であることが確認できた。

#### 3. 鋼板の平坦度改善への取組み

水焼入れで製造したマルテンサイト鋼は,急速冷却に 伴う熱ひずみにより,鋼板の平坦度が悪化する。ピラー などのボデー部品では高い寸法精度が要求されるため, 平坦度が問題になる場合がある。そのため,最後に当社 での平坦度矯正に関しても言及する。

当社では焼鈍後に高強度鋼板の平坦度不良を矯正可能 とする矯正能力の高いテンションレベラーを導入してい る。これまでに、寸法精度が厳しいボデー部品へ適用で きるよう1,470 MPa級マルテンサイト鋼板において、材 料特性と良好な平坦度を両立可能な矯正技術を確立して いる。1,700 MPa級鋼板も、今後、ボデー部品への適用 が想定されるため、1,470 MPa級材にて培った矯正技術 を1,700 MPa級材にも適用し、平坦度の改善を行った。 図5,6に、テンションレベラー矯正による平坦度の変 化および矯正後の外観を示す。平坦度の指標としては、 圧延方向の長さが500 mmとなるように切断した鋼板に

				81		
Stool	Grada	TS	Thickness	Applied stress	Evaluation	
Steer	Grade	(MPa)	(mm) (MPa)		results	
Developed steel	1,700 MPa	1,798	1.2	1,700	000	
Conventional steel	1,470 MPa	1,488	1.4	1,500	000	

表4 U曲げ加工部の遅れ破壊試験結果 Table 4 Delayed fracture test results for U-bending part

 $\bigcirc$  : No fracture  $\times$  : Fracture



図4 せん断加工の模式図 Fig.4 Schematic diagram of shear processing

表5 せん断加工端部の遅れ破壊試験結果 Table 5 Delayed fracture evaluation results for sheared ends

Steel	Grade	TS	Thickness	Evaluation results					
		(MPa)	(mm)	CL=5%	CL=10%	CL=15%	CL=20%	CL=25%	
Developed steel	1,700 MPa	1,755	1.0	000	000	000	000	000	

 $\bigcirc$  : No fracture  $\times$  : Fracture



5.4

図6 形状矯正後の鋼板の外観 Fig.6 Appearance of steel sheet after shape correction

ついて、定盤上に置いたときの反りの最大高さを使用した。テンションレベラーによる形状矯正を行うことで反り高さが低減され、良好な平坦度が得られることを確認できた。なお、当該開発材および1,470 MPa級材の平坦度は、長手方向におおよそ一定形状となる。また、水焼

入れ時には形状不良とともに板面内に大きな残留応力が 形成される。この残留応力により、コイルからブランク 材を切り出したときに大きな変形が生じる。この残留応 力についても、テンションレベラーによる矯正で十分低 減できることを確認し、開発した1,700 MPa鋼は切断時 の変形が少ないことが特徴である。

**むすび**=さらなる高強度化ニーズに対応するため,新た に開発した1,700 MPa級マルテンサイト鋼の成分,組織 制御の考え方と主要特性,平坦度改善への取組みについ て紹介した。本鋼は曲げ加工性,遅れ破壊性が良好であ ることに加えて,矯正により優れた平坦度を有すること が特徴である。

当社は自動車用におけるボデー用途での適用拡大や, さらなる高強度化などのニーズに応えるべく,材料開発 を進めていく所存である。

#### 参考文献

- 1) 牧 正志. まてりあ. 2015, 第54巻, 第11号, p.557-563.
- 2) 和泉 修ほか. 講座・現代の金属学材料編 第4巻 鉄鋼材料. 公益 社団法人日本金属学会, 1985, p.99.
- 3) 長滝康伸ほか. 鉄と鋼. 2013, Vol.99, No.3, p.245-253.
- 4) 森永孝三ほか. 鉄と鋼. 1966, Vol.52, No.4, p.304-306.
- 5) 白神哲夫. 材料と環境. 2011, 第60巻, 第5号, p.236-240.
- 6) 小若正倫. 日本金属学会会報. 1973, 第12巻, 第8号, p.533-545.

#### (解説)

# 高強度鋼の水素脆化抑制のための水素評価技術と材料設計 技術

河盛 誠\*1 (博士 (工学))·平松巧也\*1·衣笠潤一郎\*2 (博士 (工学))·安居尚志\*3·高知琢哉\*3·藤田陽介\*4

# Hydrogen Evaluation Technology and Material Design Technology for Suppressing Hydrogen Embrittlement of High-strength Steels

Dr. Makoto Kawamori · Takuya Hiramatsu · Dr. Junichiro Kinugasa · Takayuki Yasui · Takuya Kochi · Yosuke Fujita

#### 要旨

環境負荷の低減に向けて,鋼の高強度化は自動車の軽量化に有効な手段であり,当社ではこれまでに高強度のボ ルト用鋼やばね用鋼,薄鋼板などを開発し,社会に提供してきた。さらなる高強度化あるいは過酷な腐食・水素 環境適用への要望に応えるためには,高強度鋼の課題となりうる水素脆化(ぜいか)の影響因子を把握し,材料 設計技術を創出することが重要である。本稿では,水素脆化におよぼす環境,材料,応力・ひずみの影響を明ら かにするための水素評価技術として,水素透過試験法を用いた水素侵入モニタリング,昇温脱離分析法と低ひず み速度引張試験法を用いた材料中水素評価技術,二次イオン質量分析法を用いた水素可視化技術を紹介する。ま た,材料設計技術として,元素添加による水素侵入抑制,組織制御および圧縮残留応力を活用した水素脆化抑制 の事例を解説する。

#### Abstract

Increasing the strength of steel is an effective means of reducing the weight of automobiles and the environmental burden. Kobe Steel has developed high-strength steel for bolts, springs, thin steel sheets, and other products and provided them to society. To meet the demands for even higher strength and applications in severe corrosion and hydrogen environments, it is important to understand the factors influencing hydrogen embrittlement, which may be a challenge for high-strength steels, and to create material design technology. This paper introduces hydrogen evaluation technologies to clarify the effects of the environment, material, stress, and strain on hydrogen embrittlement, including hydrogen entry monitoring using hydrogen permeation technique, hydrogen evaluation technology in materials using thermal desorption spectrometry, and slow strain rate tensile technique, as well as hydrogen visualization technology using secondary ion mass spectrometry. In addition, examples of material design technology, such as hydrogen entry suppression by elemental addition and hydrogen embrittlement suppression utilizing microstructure control and compressive residual stress, are explained.

### 検索用キーワード

高強度鋼,水素侵入,水素分布,水素脆化,腐食,水素透過試験法,昇温脱離分析法,水素可視化,二次イオン質量分析法, 低ひずみ速度引張試験法

まえがき=鋼の高強度化は、自動車をはじめとする輸送 機器の軽量化によるCO<sub>2</sub>排出量削減や材料使用量削減に 貢献し、環境負荷の低減に有効な手段の一つである。い っぽう、高強度化によって一般的に鋼の水素脆化(ぜい か) 感受性は高くなるため、水素脆化の抑制が実用上の 課題となる。水素脆化の機構として, hydrogenenhanced localized plasticity (HELP)<sup>1), 2)</sup>, hydrogenenhanced decohesion (HEDE)<sup>3)</sup>, hydrogen-enhanced strain-induced vacancies (HESIV)<sup>4),5)</sup> やその複合機構 など<sup>6)</sup>がこれまでに提案されている。水素脆化による 割れの発生に至るプロセスの模式図を図1に示す。環 境から材料に侵入した水素が、材料組織や応力・ひずみ の影響を受けてトラップ・拡散・集積し、き裂が発生し て進展することで破断に至る。このとき、環境から材料 に侵入する水素量(侵入水素量:H<sub>e</sub>)が,各鋼材固有の 破断しない水素量の上限値(限界水素量:H<sub>c</sub>)より高く なることで、水素脆化による割れが発生することが報告 されている<sup>7),8),9)</sup>。すなわち,環境,材料,応力の各因 子が相互に影響し,さらに高張力鋼板をプレス加工した 自動車部品(骨格部品)や,冷間圧造した非調質ボルト のように塑性ひずみを有する部品として使用される場合 には,ひずみの影響も考慮する必要がある。**図2**に水 素脆化におよぼす影響因子と,それらを評価するための 技術および材料設計技術の模式図を示す。水素脆化を抑 制し,耐水素脆化特性に優れる材料を開発するために は,材料,環境,応力・ひずみの各影響因子を把握する ための水素評価技術と,それらを用いた機構解明に基づ く材料設計技術の開発が重要となる。

水素の評価技術を空間分解能および時間分解能で整理 した模式図を図3に示す。本稿では、高強度鋼の水素 脆化抑制を目的として開発された「環境からの水素侵入 評価技術」「材料中水素の評価技術」「応力・ひずみの影 響評価技術」とそれらに基づく材料設計技術の事例につ いて解説する。

(1) 2日初 民前平市 初日ノノエ ション こシノ 病長防長前面印

<sup>\*1</sup> 技術開発本部 材料研究所 \*2 技術開発本部 ソリューション技術センター \*3 鉄鋼アルミ事業部門 技術開発センター 線材条鋼開発部 \*4 株式会社コベルコ科研 技術本部 材料ソリューションセンター腐食防食評価部


図1 水素侵入および水素脆化による割れの発生プロセスの模式図 Fig.1 Schematic illustration of process of hydrogen entry and crack initiation due to hydrogen embrittlement



図2 水素脆化におよぼす影響因子と水素評価技術および材料設計技術の模式図 Fig.2 Schematic illustration of factors affecting hydrogen embrittlement, hydrogen evaluation technology, and material design technology



図3 各種の水素評価技術の空間分解能および時間分解能の模式図 Fig.3 Schematic illustration of spatial and temporal resolution of various hydrogen evaluation technology

# 1. 環境からの水素侵入評価技術と水素侵入抑 制技術

自動車用材料において高強度鋼の使用を考えるうえで は、実環境からの侵入水素量と材料の限界水素量を把握 し、適用性を検討することが重要である。水素侵入に影 響する環境因子は、図2に示すように、電着塗装・溶接 などの製造工程,自動車走行時の使用環境など多岐にわ たるが、本章では実態把握がとくに難しい使用環境(腐 食環境)での水素侵入について述べる。腐食環境での侵 入水素量の把握を困難にしている原因として,水素は室 温でも動きやすく鋼中水素量が複雑に経時変化すること が挙げられる。従来実施されてきたような、水素脆化に よって割れが発生した材料の回収とその後の調査では、 割れの発生時期やそのときの水素量などの情報が失われ てしまう問題がある。したがって実環境の把握に向けて は、水素侵入と腐食環境および水素脆化による割れの経 時変化を詳細に把握することが重要であり、当社では各 種モニタリング技術の開発に取り組んでいる。図3で示 すように、水素の長期モニタリングに向けては、他の手 法と比べて広範囲の時間分解能を有し、かつ簡易にinsitu測定可能な水素透過試験法 (Hydrogen permeation technique)が有効である。水素透過試験法では、鋼材 に侵入した水素を酸化させて電流値として検出する。水 素環境の評価技術と適用例を図4に示す。当社では過 酷な腐食環境でも長時間使用できるように水素透過試験 法の改良を重ねている。また、腐食環境での温度と湿度 およびACM (Atmospheric Corrosion Monitoring) セ ンサなどを用いた環境および腐食挙動のその場測定を行 い、水素侵入との関係性を把握できる。さらに、自動車 部品を想定した水素脆化評価用の試験片(例えば曲げ加 工を想定したU曲げ試験片)に、ひずみゲージ法を適用 して,水素脆化の発生時期をモニタリングすることが可 能である。適用例として自動車の実車走行環境、大気腐 食環境などが挙げられるが、ここでは大気腐食環境にお ける鋼への水素侵入と水素脆化挙動について紹介す 3<sup>9),10)</sup>。

日本は南北に長く、北の北海道は亜寒帯、南の沖縄は 亜熱帯と様々な気候区分に属している。そのため、水素 脆化におよぼす大気腐食環境の影響を幅広く把握する目 的に適している。寒冷地、温帯、亜熱帯での高強度鋼の 水素脆化挙動を調査するため、図4に示すように、北海 道函館市,千葉県銚子市,沖縄県宮古島市で大気暴露試 験を行った。水素脆化評価には,引張強度1,500 MPa級, 板厚1.6 mmのSCM435 薄鋼板を使用し、曲げ半径を 10mmとしたU曲げ試験片を作製した。応力を付与し た場合の水素脆化挙動を把握するため、試験片に通した ボルトをナットで締め付け、曲げの頭頂部に貼り付けた ひずみゲージで計測されるひずみ量が4.9%となるよう にした。鋼への侵入水素量H<sub>e</sub>の経時変化と限界水素量 H.との比較による水素脆化挙動解析を図5に示す。な お、ここで示した侵入水素量は、水素透過試験法で得ら れた電流値を鋼の水素拡散係数を用いてFickの法則か

ら求めた換算量である<sup>9)</sup>。また、U曲げ試験片をpHの異 なる水溶液に浸漬して水素脆化による割れ発生の有無を 調査し、割れが発生しない最大の水素量(限界水素量 H。)を求めて図5に併せて記載した<sup>9)</sup>。高温多湿,日射 量,海塩粒子などの劣化因子が豊かな暴露場に位置する 宮古島市では、試験開始後の腐食初期の段階で水素脆化 による割れが確認された。ひずみゲージ法による水素脆 化モニタリングと、水素透過試験法による水素侵入モニ タリング, さらに ACM センサによる環境モニタリング を組み合わせることにより、割れが発生した時刻とその 際の水素侵入量と腐食環境を正確に把握することができ る。腐食初期で水素脆化による割れが発生した時間帯で は、降雨が原因と考えられる ACM 電流値が高く計測さ れており、腐食反応が促進された結果、水素侵入量が高 くなり、U曲げ試験片の割れが発生することがわかっ た。また、腐食初期だけでなく、強風による飛来塩分の 付着や大雨をもたらす台風接近時に腐食反応が促進さ れ、水素侵入が増加することを明らかにした。温暖湿潤 気候であり日本を代表する標準的な暴露場である銚子市 では、定常状態では割れが発生する水素侵入量ではない が、台風接近時に腐食反応が促進して水素侵入量が増加 し、水素脆化による割れが発生した。いっぽう、飛来塩 分量が少なく比較的に温度と湿度が低い函館市では、腐 食量が少ないため水素侵入量が低く、水素脆化による割 れは発生しなかった。このように、飛来塩分量の増加や 降雨および高温多湿による腐食反応の促進に伴い、大気 腐食環境から侵入する水素量H。が増加し、限界水素量 H<sub>c</sub>を上回ったときに水素脆化による割れが発生するこ とが、本モニタリング評価技術により実証された。本技 術は、実環境での水素侵入と水素脆化挙動を精緻に評価 でき、今回示した大気腐食環境だけでなく例えば自動車 などほかの実環境にも適用可能である。

実環境の情報に基づかない水素侵入の抑制対策では, 実環境において想定する効果が得られない懸念がある。 上記で示した水素環境の評価技術を構築して活用するこ とにより,実環境での水素侵入を抑制する材料設計技術 の開発が可能になる。

鋼材への元素添加による水素侵入抑制技術の事例とし て、大気腐食環境での水素透過電流におよぼすCu添加 の影響を図6に示す。Cu非添加のSCM440鋼に対して Cuを0.5%添加したCu添加鋼の水素侵入挙動を調査し た。長期間にわたる水素量モニタリング結果から、Cu 添加によって実環境で侵入水素量が低減でき、水素侵入 抑制効果があることがわかる。ほかにもNi添加などに よる侵入水素量低減効果<sup>11)</sup>. CuやNi添加による水素脆 化の抑制効果についても報告している<sup>12)</sup>。これら元素添 加による水素侵入抑制機構として、母材自体の耐食性向 上<sup>13)</sup> や腐食により形成するさびの緻密化などによる腐 食反応の抑制<sup>12)</sup> での水素発生量の低減,電位の上昇に よる水素侵入駆動力の低下などが挙げられる。得られた 水素侵入抑制技術は高強度ボルト用鋼や薄鋼板など各種 の高強度鋼の開発に適用されており14).15),実環境に即し た水素脆化への対策の高度化を今後も進めていく。



図4 環境からの水素侵入評価技術と環境および水素脆化のモニタリング技術 Fig.4 Evaluation technology of hydrogen entry from the environment and monitoring technology of the environment and hydrogen embrittlement







Fig. 6 Effect of Cu addition on hydrogen entry into steel in atmospheric corrosion environment

# 2. 材料中水素の評価技術と制御技術

環境から材料内部に侵入した水素は,空孔や転位,結 晶粒界や析出物などがそのトラップサイトとなることが 知られており,水素の存在状態は材料組織や応力,ひず みなどによって変化する。水素脆化の抑制に向けては, 材料中の水素存在状態を評価して制御することが重要で ある。

材料中水素の評価技術の中でも,近年広く用いられる 手法として昇温脱離分析法(Thermal Desorption Spectroscopy: TDS) が挙げられる。TDSでは 0.01 ppm オーダーの定量的な水素量測定が可能であり、さらに水 素放出曲線から水素存在状態を把握できる。鋼材の組織 制御により水素存在状態を変化させた場合のTDS測定 事例を図7に示す。陰極チャージ法を用いて鋼に水素 を添加した。実線で示す水素放出曲線は同じ条件で水素 チャージしたときの鋼種間の比較を行った結果である。 点線で示す水素放出曲線は、実線の条件よりも高い電流 密度で多くの水素をチャージしたときの結果である。異 なる水素量(0.36 ppm, 0.60 ppm)を導入したSCM440 鋼の水素放出曲線から、水素は高温側に放出される比較 的安定なサイトからトラップされ、水素量を増加させる と低温側の放出サイトが占有されていくことがわかる。 水素量を増加させると低温側の放出サイトに相当し室温 でも拡散しやすい水素(拡散性水素)が増加するため、 水素脆化が促進される。

VとMoを添加し600℃程度の高温焼戻しを行うこと で微細なV,Mo系炭化物を分散させた高強度開発鋼の 水素放出曲線を図7に示す。SCM440鋼と比較してピー クが高温側にシフトしており、安定的な強い水素トラッ プサイトが増えていることがわかる。硬度を変化させた 各鋼種の環状切欠試験片(Kt=3.5)に対して陰極チャー ジ法で水素を添加し、その後に低ひずみ速度引張試験法 (Slow Strain Rate Technique:SSRT)<sup>16)</sup>で評価した最 大応力値を図8に示す。SCM440鋼は硬度の増加に伴い、 水素チャージ後の最大応力値が低下しており、高強度ほ



図7 従来のSCM440鋼,開発したV,Mo添加鋼,B添加鋼の水素 放出曲線

Fig.7 Hydrogen desorption profile of conventional SCM440 steel, developed V, Mo-added steel, and developed B-added steel ど水素脆化しやすくなる。また、破面観察では、破壊起 点近傍に粒界破面が観察されており、粒界への水素集積 によって粒界破壊が発生したと考えられる。いっぽう、 V、Mo添加鋼は同硬度のSCM440鋼より最大応力値が 高く、耐水素脆化特性が向上することがわかる。これは 図7の水素放出曲線に示したように微細なV、Mo炭化 物によって水素がトラップ<sup>17)</sup>され、粒界への水素集積 が抑制されたことが原因の一つと考えられる。水素トラ ップ効果のほかに、高温焼戻しによる転位量の減少と転 位易動度の低下により転位による粒界への水素輸送が抑 制されたことや、粒界炭化物の球状化などが耐水素脆化 特性の向上に寄与したことが挙げられる<sup>18)</sup>。耐水素脆化 特性に優れるV、Mo添加の高強度ボルト用鋼は、自動 車部品のサイズダウンや設計自由度向上に寄与し、自動 車軽量化および環境負荷低減に貢献できる。

また,開発したB添加鋼の水素放出曲線も図7に示す。 B添加鋼は比較的高価なCrやMoに替えてB添加で焼入 れ性向上と粒界強化などの材料設計を行った鋼種であ る。SCM440鋼と比較してピーク位置は高温側にはない ことから、水素トラップの強さとしては従来鋼と同等か それ以下と考えられる。いっぽう, B添加鋼の水素量は 0.15 ppmとSCM440鋼(0.36 ppm)より水素量が低下し ていることがわかる。図8の水素脆化試験結果に示すよ うに、B添加鋼は同硬度のSCM440鋼より最大応力が高 く、耐水素脆化特性に優れている。B添加鋼の耐水素脆 化特性の向上機構の一因として, CrやMoといった元素 添加量の低減により炭化物など水素トラップサイト(水 素侵入量)が低減したことや、粒界へのBの偏析によっ て、応力負荷時の水素の粒界への集積が抑制されたこと が挙げられる。B添加鋼はSCM440鋼より低成分系であ ることから冷間圧造性が向上し、例えばボルト用鋼とし て使用する場合は、成形前の軟化工程(球状化焼鈍)を 省略することができ、CO2量の削減およびコスト低減に 貢献できる。



- 図8 陰極チャージ後のSSRTで評価した,従来のSCM440鋼, 開発したV, Mo添加鋼, B添加鋼の最大応力におよぼす硬度の影響
- Fig.8 Effect of hardness on the maximum nominal stress of conventional SCM440 steel, developed V, Mo-added steel, and B-added steel evaluated by SSRT after cathodic hydrogen charging method

このようにTDSを用いた水素存在状態の把握は,水 素脆化機構の解明と水素脆化抑制の材料設計指針獲得に 有効である。今後,TDSを用いた水素定量技術のさらな る精度向上や,得られた水素放出曲線をシミュレーショ ン可能な計算的手法などを取り入れ,材料中水素評価技 術の高度化とそれらに基づく材料設計技術の創出に取り 組んでいく。

# 3. 応力・ひずみの影響評価技術と制御技術

水素脆化は上記した環境因子・材料因子だけでなく, 応力とひずみが強く影響する。環境から材料に侵入した 水素は応力集中部に集積して水素脆化を促す。また、ひ ずみによって導入された転位や空孔が水素のトラップサ イトとして作用し、水素と相互作用することで脆化に影 響する<sup>19)</sup>。例えば成形加工した鋼材においては、応力や ひずみが局所的に高くなる場合があるため、水素脆化の 発生を理解するうえでは、応力・ひずみの分布状態に伴 って変化する局所の水素分布を把握することが重要にな る。TDSは材料中の水素存在状態を推定することがで きる有効な手法であるが、図3に示すように空間分解能 を有さないことから、材料中の水素の存在位置を直接的 に観察することは困難である。水素可視化手法として, 原子レベルの高い空間分解能を有するアトムプローブ (Atom Probe Tomography: APT)<sup>20)</sup> や,感度・分解 能に優れる水素マイクロプリント法(Hydrogen Microprint Technique: HMT)<sup>21)</sup> などが挙げられる (図3)。また、空間分解能に加えて時間分解能を有する 水素可視化手法として、走査型ケルビンプローブ (Scanning Kelvin Probe: SKP)<sup>22)</sup>, 走査型ケルビンプ ローブフォース顕微鏡 (Scanning Kelvin Probe Force Microscopy:SKPFM)<sup>23)</sup>, Agデコレーション法<sup>24)</sup> など が挙げられる。当社の研究グループでは、水素可視化手 法の中でもサブμmからサブmmまでの広い空間分解能 を有し、さらにppm~ppbオーダーの高感度で質量分析 が可能な二次イオン質量分析法(Secondary Ion Mass Spectrometry: SIMS)を用いた水素可視化技術の高度 化に取り組んでいる。

応力とひずみの影響を評価するための水素可視化技術 の事例として,U曲げ試験片の水素脆化機構について調 査した結果を紹介する<sup>8).25)</sup>。図5で示した大気腐食環境 (宮古島)で水素脆化したU曲げ試験片の破面観察結果 を図9に示す。曲げの表層近くは擬へき開破面であり, 表層からやや離れた内部では粒界破面であった。破面形 成機構を把握するため,SIMSを用いてU曲げ試験片の 水素分布を調査した結果を図10に示す<sup>8).25)</sup>。ここで水 素トラップサイトのトレーサーとして,軽水素(H)の 代わりに重水素(D)を用いた。希少同位体である重水



図9 沖縄県宮古島市での大気腐食環境で水素脆化したU曲げ試 験片の(a)外観写真と(b-d)SEM写真

Fig.9 (a) Photographic image and (b-d) SEM images of hydrogen embrittled U-bend specimens in atmospheric corrosion environment at Okinawa Miyakojima



図10 SIMSで評価したU曲げ試験片の重水素の可視化結果 Fig.10 Deuterium visualization images of the U-bend specimen evaluated by SIMS

素をトレーサーとする同位体標識法により、鋼中に初期 から存在する軽水素と環境から侵入した重水素を分離し て存在箇所を評価することができる。さらに、測定上の バックグラウンド由来の水素と区別することが可能であ るため、バックグラウンド由来の水素を低減するための 排気時間を短縮化することができる。これにより、試験 片に含まれる水素が逃散する前に,水素可視化評価を開 始することが可能である。U曲げ試験片の非曲げ部(図 10(c))と比較して曲げ部(図10(b))では水素が多く 検出された。これは曲げ加工によるひずみで導入された 転位や空孔によって水素トラップサイトが増えたためで ある。また、曲げ部においては、引張応力が存在する表 側では水素量が高く, 圧縮応力が存在する裏側では水素 量が低く分布し、最表層より0.1-0.2 mm 程度の内部で水 素量が最も高かった。これは曲げ加工後のスプリングバ ックままでは最表層に最も高い圧縮応力が付与され、そ の後にボルト締めで応力を付与しても最表層では圧縮応 力によって負荷応力が低減し、最表層より内部の箇所が 最も高い応力となるためである。

図9で示したようにU曲げ試験片では粒界破面と擬へ き開破面が確認されたが,粒界破壊は応力集中部を有す る試験片において,局所の応力と水素量が高い場合に生 じることが報告されている<sup>26)</sup>。また,擬へき開破壊は塑 性変形を伴う条件下で生じやすい<sup>27)</sup>。水素脆化が確認さ れたU曲げ試験片において,表層からやや離れた内部で 局所応力が高くなり,局所の水素量が増加した結果,粒 界破壊が発生したと考えられる。いっぽう,表層付近に おいては塑性変形が生じており,導入された転位と空孔 が水素と相互作用を引き起こすことで,擬へき開破壊が 発生したと考えられる。

U曲げ試験片では,引張応力によって局所的に水素が 集積し,水素脆化が促されることを示した。逆に圧縮応 力を用いて水素分布を制御し,水素脆化の抑制を図った

事例について紹介する<sup>28)</sup>。圧縮応力の付与方法としてシ ョットピーニング (Shot Peening: SP) に着目した。 SPは一種の塑性加工であり, SP後の状態では鋼材表面 にひずみが残存し、導入された転位や空孔などのトラッ プにより水素量が増加する懸念がある。そこで、 圧縮残 留応力が低下しない範囲でSP後の低温焼なましを実施 し、炭素とのコットレル相互作用による転位の安定化あ るいは空孔性欠陥の消滅に起因する水素量低減を狙いと した。すなわち、ひずみによる水素トラップ量を低減し つつ鋼表面に圧縮残留応力を付与することで水素脆化を 抑制する手法を考案するとともに、鋼表面での水素可視 化を行った。引張強度2,000 MPa級の焼戻しマルテンサ イト鋼の丸棒試験片に対して、SP処理を施した表面側 から陰極チャージ法による水素チャージを行った後、試 験片断面の水素分布をSIMSで調査した結果を図11に 示す。図11(a) は水素のSIMSマッピング像であり, 図11(b)はマッピング像の中央50µm幅での水素のラ インプロファイルである。SP未処理材では、鋼の表層 と中央の水素強度は同程度であり、材料内部に比較的均 ーに水素がトラップされている。いっぽう, SP処理材 では鋼の表層における水素強度は中央と比較して低く, SPで導入された塑性ひずみによる水素トラップの増加 は確認されなかった。SP処理材の水素は、 圧縮残留応 力分布の変化に伴い、中央から表層に近づくにつれて低 下することが確認された。

SIMSを用いた水素分布への応力・ひずみの影響評価 技術に基づき、水素脆化抑制技術を検討した。丸棒引張 試験片を水素チャージし、SSRTで評価した水素脆化挙 動におよぼすSPの影響を図12に示す。陰極チャージ法 で比較的多くの水素をチャージした場合(図12(a))と、 複合サイクル腐食試験(Cyclic Corrosion Test:CCT) で比較的少ない水素をチャージした場合(図12(b))の 両方法において、SP処理により最大応力は増加し、耐



- 図11 鋼材の表層および内部における(a)重水素の分布と(b)重水素のラインプロファイルにおよぼすショットピーニングおよびその後の低温焼きなましの影響
- Fig.11 Effects of shot peening and subsequent low-temperature annealing on (a) deuterium distribution and (b) deuterium line profile in the surface and interior of steel



**図12**(a) 陰極チャージ法および(b) 複合サイクル腐食試験で水素チャージした鋼材における,SSRTで評価した最大応力におよぼす水素 量の影響

Fig.12 Effect of hydrogen concentration on the maximum nominal stress evaluated by SSRT of steels hydrogen-charged by (a) cathodic charging test and (b) combined cyclic corrosion test

水素脆化特性が向上することが確認された。これは表面 に付与された残留圧縮応力による引張応力の緩和だけで なく、表面水素濃度の低減効果も影響していると考えら れる。すなわち、SPによって圧縮残留応力を付与し、 鋼材表面の水素分布を低く制御することで、耐水素脆化 特性が向上することを明らかにした。

今後の環境負荷低減やプロセス省略に向けては, CO<sub>2</sub> を排出する熱処理の軽減や, 冷間加工で成形した高強度 鋼の使用がますます重要になる。本技術は, 強加工後に 使用され, 応力・ひずみ分布を有する高強度材料の水素 脆化の評価に活用可能であり, 水素脆化抑制のための材 料設計あるいは工法の指針獲得に適用していく。

むすび=本稿では高強度鋼の水素脆化抑制のための水素 評価技術と材料設計技術について解説した。安心安全か つ低炭素、循環型といったグリーン社会の実現に向けて は、自動車に適用可能な省資源・環境負荷低減に資する 材料が求められる。その際に課題となる水素脆化を克服 するためには、複雑な自動車部品形状での水素侵入挙動 や水素の存在状態と分布におよぼす微細組織および残留 応力と加工ひずみの影響などの未解明点の現象解明がい っそう重要となる。実環境を把握し再現するための環境 評価技術、空間分解能および時間分解能に優れる材料中 の水素評価技術、応力・ひずみの実測技術と制御技術の 高度化に加え、<br />
今後は計算科学による予測技術の活用も 視野に要素基盤技術を開発し、材料の耐水素設計技術を 進展させていく。これらを活用し、環境負荷低減に寄与 する自動車向けボルト用鋼や超ハイテンなどの各種高強 度鋼さらには水素社会対応の材料開発を進め、グリーン 社会および安心・安全なまちづくりものづくりに貢献し ていく。

#### 参考文献

- 1) C.D. Beachem. Metall. Trans. 1972, Vol.3, p.441-455.
- H.K. Birnbaum et al. Mater. Sci. Eng. A. 1994, Vol.176, p.191-202.
- 3) R.A. Oriani et al. Acta Metall. 1974, Vol.22, p.1065-1074.
- 4) M. Nagumo. Mater. Sci. Tech. 2004, Vol.20, p.940-950.
- 5) K. Takai et al. Acta Mater. 2008, Vol.56, p.5158-5167.
- 6) T. Neeraj et al. Acta Mater. 2012, Vol.60, p.5160-5171.
- 7) 鈴木信一ほか. 鉄と鋼. 1993, Vol.79, No.2, p.227-232.
- 8) 山崎真吾ほか. 鉄と鋼. 1997, Vol.83, No.7, p.454-459.
- 9) M. Kawamori et al. Corrosion Science, 2023, Vol.219, 111212.
- 10) M. Kawamori et al. ISIJ Int. 2022, Vol.62, No.8, p.1731-1740.
- 高舘詩得はか.第70回材料と環境討論会予稿集. 2023-10-30/11-1. 腐食防食学会. 2023, C-307.
- 12) J. Kinugasa et al. ISIJ Int. 2016, Vol.56, No.3, p.459-464.
- 13) 瀧本俊之ほか.日本金属学会2023年秋期(第173回)講演大会予稿
   集. 2023-9-19/26.日本金属学会. 2023, p.61.
- 14) 安居尚志ほか. まてりあ. 2024, Vol.63, No.1, p.63-65.
- 15) 武田実佳子ほか. R&D神戸製鋼技報. 2024, Vol.72, No.2, p.33-37.
- 16) 漆原 亘ほか. R&D神戸製鋼技報. 2002, Vol.52, No.3, p.57-61.
- 17) K. Hokazono et al. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2019, Vol.461, 012024.
- 18) 鍵谷昂佑ほか. CAMP-ISIJ. 2024, Vol.37, p.157.
- 19) J. Kinugasa et al. ISIJ Int. 2021, Vol.61, No.4, p.1071-1078.
- 20) J. Takahashi et al. Scripta Materialia. 2010, Vol.63, p.261-264.
- 21) T.E. Pérez et al. Scripta Metallurgica. 1982, Vol.16, p.161-164.
- 22) S. Evers et al. Sci. Technol. Adv. Mater. 2013, Vol.14, 014201.
- 23) W. Krieger et al. Acta Materialia. 2018, Vol.144, p.235-244.
- 24) M. Koyama et al. Scripta Materialia. 2017, Vol.129, p.48-51.
- 25) J. Kinugasa et al. ISIJ Int. 2021, Vol.61, No.4, p.1091-1098.
- 26) M. Wang et al. Corrosion Science. 2007, Vol.49, p.4081-4097.
- 27) A. Shibata et al. Acta Mater. 2021, Vol.210, 116828.
- 28) M. Kawamori et al. ISIJ Int. 2021, Vol.61, p.1159-1169.

#### (論文)

# 高強度鋼板のせん断端面の遅れ破壊性に及ぼす加工条件 の影響

森原竜司<sup>\*1</sup>·白木厚寬<sup>\*2</sup>·中屋道治<sup>\*2</sup>

# Effect of Shearing Condition on Hydrogen Embrittlement at Sheared Edge of High-Strength Steel Sheets

Ryuji MORIHARA · Atsuhiro SHIRAKI · Michiharu NAKAYA

#### 要旨

引張強さが1,180 MPaを超える高強度鋼板の適用に当たっては、遅れ破壊の懸念があるため残留応力の抑制を図っ た適切な加工条件の選定が必要である。本研究では、遅れ破壊が発生しやすい部位の一つであるせん断端面の遅 れ破壊性に及ぼすクリアランスおよび工具摩耗の影響を調査した。1,470 MPa級鋼板を用い、クリアランスを種々 変更し、摩耗の程度が異なるパンチを用いてせん断加工した試験片を作製し塩酸に浸漬した。その結果、遅れ破 壊による割れの数はクリアランス10~15%で多く、10%未満や20%を超える場合は少ないこと、摩耗したパンチを 用いると割れ数が増加することが分かった。以上の傾向はせん断端面の残留応力の変化と一致することを示した。

#### Abstract

Delayed fracture is a concern in the application of high-strength steel sheets with a tensile strength exceeding 1,180 MPa, and it is necessary to select appropriate processing conditions to suppress residual stress. In this study research has been conducted to clarify the effect of clearance and tool wear on the delayed fracture of a sheared edge, one of the areas susceptible to delayed fracture. Test pieces were made by shearing a 1,470 MPa grade steel sheet with various clearances and punches with different wear levels and were immersed in hydrochloric acid. The results show that the number of cracks caused by delayed fractures becomes high when the clearance is 10-15%, and low when the clearance is less than 10% or greater than 20%, and that the number of cracks increases when a worn punch is used. These trends are consistent with the changes in the residual stress of the sheared edge.

#### 検索用キーワード

せん断加工,打抜き加工,穴抜き加工,遅れ破壊,高強度鋼板,残留応力,自動車

**まえがき**=燃費向上を目的とした自動車の車体軽量化お よび衝突安全性向上のため,高強度鋼板の適用が拡大し ている。とくに引張強度が1,180 MPa級以上の鋼板では 水素により引き起こされる遅れ破壊の感受性が高まるこ とが知られており,適用に当たっては考慮が必要であ る<sup>1),2)</sup>。自動車部品は主にブランキング,穴抜き加工を 経た後,プレス加工などにより成形され,その後,トリ ムやピアス穴抜き加工が実施される場合もある。とくに ブランキング,打抜き加工などのせん断加工によって生 じる端面(せん断端面)は,局所的に高い引張残留応力 が生じ遅れ破壊の発生リスクが高い<sup>3)~7)</sup>部位であるこ とが知られており,それに着目した材料評価や遅れ破壊 抑制のための工法開発がなされている<sup>7)~9)</sup>。

せん断加工の条件にはクリアランス,工具摩耗,材料の傾斜角度,材料の拘束条件,打抜き速度などが挙げられ,主にかえりや2次せん断面などの欠陥を抑制する観点において適正条件の検討が行われている<sup>10)~14)</sup>。これらの条件のうち,工具の摩耗は実際の量産プレスにおいて不可避的な現象であることに加え,とくに高強度鋼板では摩耗の進行が早く<sup>15)</sup>,その影響を明らかにすることは重要である。これまでに穴広げ性に代表されるせん断

端面の加工性への影響に関しては複数の報告がなされて いるが<sup>16)~19)</sup>,遅れ破壊に関しての検討は少ない。そこ で本検討では、せん断加工の基本的条件であるクリアラ ンスとともに遅れ破壊に及ぼす工具摩耗の影響について 検討を行った。なお、せん断端面の遅れ破壊にはせん断 加工により生じる残留応力の影響が大きいことが報告さ れており<sup>6),9),20),21)</sup>,本検討においても残留応力に着目 し遅れ破壊への影響を検討した。

## 1. 実験方法

#### 1.1 せん断端面の遅れ破壊試験方法

供試材には,板厚1.2 mmおよび1.4 mmの1,470 MPa 級冷延鋼板を用いた。**表1**に機械的特性を示す。

せん断加工には直径10mmの丸穴の打抜き加工を用

表1 供試材の機械的特性 Table 1 Mechanical properties of sample steels

Sampla	Thickness	YS	TS	EL
Sample	(mm)	(MPa)	(MPa)	(%)
Х	1.2	1,321	1,537	6
Ŷ	1.4	1,427	1,578	5

<sup>\*1</sup> 技術開発本部 材料研究所 \*2 鉄鋼アルミ事業部門 技術開発センター鋼板開発部

いた。打抜き工具の模式図を図1に示す。打抜き工具 はパンチとダイにより構成されるが、パンチの方が摩耗 が顕著であることが報告されており<sup>15)</sup>、本研究ではパン チの摩耗を検討対象とし、以下の二種のパンチを用い た。いずれもダイス鋼製(HV730)であり、一種は新品 のパンチ、もう一種は多数の打抜きに使用し先端に摩耗 が生じたパンチである。新品パンチは実験中に摩耗が進 行する可能性があるため、1本あたりの打抜き回数が20 回以内となるように管理し、摩耗の影響を排除した。実 験に用いたパンチ先端の断面形状を図2に示す。摩耗 パンチは周方向に均一に摩耗しておらずA部にて顕著 に摩耗が生じていた。これらのパンチを用い、ダイ径を 変化させて以下の式で示される打抜き時のクリアランス を種々変更して打抜き加工を実施した。クリアランス条 件を表2に示す。

本検討ではダイ径を0.1 mm刻みで変更したため、ク リアランスは板厚によって若干異なるが、以降は便宜的



図1 打抜き試験方法 Fig.1 Set up for punching test

にクリアランスが小さい順に7,10,15,20,25%と称す る。なお、端部の断面観察から見かけのクリアランスを 確認したが、値のバラつきはあるものの、クリアランス の序列が逆転することがないことは確認した。

 $CL = (D_d - D_p) / t \times 100$ 

られなかった。

- ここに、CL:クリアランス
  - D<sub>d</sub>:ダイの直径
  - D<sub>p</sub>:パンチの直径 t:板厚
- 図3に摩耗パンチを用いた場合のせん断端面の外観 を示す。パンチ摩耗部に相当するA部ではB, Cに比べ てせん断面比率が高く周方向でばらつきが認められる。 新品パンチを用いた場合についてはせん断端面のせん断 面比率はおおむね周方向で均一になっていることを確認 した。新品パンチ, 摩耗パンチともかえりの発生は認め

打抜き後の試験片は、水素導入のため塩酸に浸漬した。浸漬条件については予備試験で割れが発生する条件を確認し、塩酸濃度5%かつ浸漬時間48時間とした。 塩酸浸漬後は、マイクロスコープを用いてせん断端面を 全周観察し、割れの数と発生した位置を記録した。遅れ 破壊による割れの例を図4に示す。端面における割れ は板厚方向のかえり側(写真上部)では周方向に進展し ており、板厚中央からせん断面付近では板厚に対して



図2 新品および摩耗パンチの矢印で示した面における断面形状 Fig.2 Cross-sectional observations of new punch and worn punch pointed by arrows

表2 打抜きクリアランス条件 Table 2 Punching clearance condition

sample	Nominal clearance	7	10	15	20	25
Х	Dd (mm)	10.2	10.3	10.4	10.5	10.6
1.2mm	Calculated clearance (%)	8.3	12.5	16.7	20.8	25.0
Y	Dd (mm)	10.2	10.3	10.4	10.6	10.7
1.4mm	Calculated clearance(%)	7.1	10.7	14.3	21.4	25.0



A	В	С
		1 mm

図3 摩耗パンチを使用した打ち抜き後の端面(材料Y, クリアランス15%) Fig.3 Appearance of edges sheard by the worn punch (sample: Y, clearance 15%)







図5 残留応力の測定位置 Fig.5 Measurement position of residual stress

45°方向に徐々に向きを変えている。このような形状を 持つ割れを遅れ破壊による割れと判定し,偏析を起点と する溝状の腐食や介在物などによる点状のピットとは区 別した。

#### 1.2 せん断端面の残留応力測定

端面に生じた残留応力はX線解析法により測定した。 測定には(㈱リガク製微小部応力測定装置 AutoMATE II を用いた。測定はsin<sup>2</sup> φ法により行い,線源にはCr管球 を用いた。回折面はα-Fe(211),X線照射領域直径は 0.3 mm,応力定数は-318 MPa/degとした。また,測 定位置および方向を図5に示す。打抜き後のサンプル を対角線に沿って4分割に切断した後,A,B,C方向の 面の破断面内の破断面側,中央,せん断面側の3カ所で 周方向および板厚方向の残留応力を測定した。

# 2. 実験結果

## 2.1 遅れ破壊試験結果

図6に塩酸浸漬後のせん断端面の割れ数とクリアラ ンスの関係を示す。低クリアランス(7%)領域では、 割れ数は少ないが、クリアランスが増加すると割れの数 は増加し10~15%にて最大となり20%以上では再び低 下している。材料を比較すると板厚が厚く強度が高いY 材にて割れ数が多い傾向が見られる。また、いずれの材 料においても摩耗したパンチで打抜くと新品パンチと比 較して割れが増加することが分かる。なお、図7に示 す通り割れが生じた部位は、パンチの摩耗が大きい部位 (A) とその反対側(C)に集中していた。

### 2.2 せん断端面の残留応力測定結果

クリアランス約10%, 15%, 20%における破断面内3 か所において測定した板厚方向残留応力について図8 (材料X)および図9(材料Y)に示す。両供試材ともに 板厚方向の残留応力はかえり側が大きくせん断面側が小 さいことが分かる。また摩耗したパンチを使用した場合 はいずれにおいてもかえり側および中央部の残留応力が 増加した。いっぽうでせん断面に近い位置では明確な傾 向は認められず,摩耗によりむしろ低下しているものも 認められる。さらに遅れ破壊試験で割れが多く発生した クリアランス10,15%は割れの少なかった20%と比較し てかえり側~中央部の残留応力が高かった。材料X,Y の残留応力の差はこれらのクリアランスおよびパンチの 摩耗による差と比較して軽微であった。

図10は同様に円周方向の残留応力を測定した結果で ある。かえり側からせん断面側まで残留応力に大きな変 化は認められない。また,摩耗したパンチと新品パンチ との差異は小さかった。

以上より,摩耗したパンチの使用により割れの数が増加する要因として端面のかえり側の板厚方向残留応力の 増加が挙げられる。図11,図12に塩酸浸漬後の端面の 割れの数とかえり側の板厚残留応力の関係を示す。両者 には相関関係が認められ,パンチ摩耗による板厚方向残 留応力の増加が遅れ破壊を促進していると考えられる。

本検討で用いたパンチは周方向の特定の箇所で摩耗し ていた。しかし遅れ破壊による割れは摩耗部位に加えて その反対側の端面においても発生が認められた。図13 に摩耗パンチで打抜きした端面における板厚方向の残留 応力を打抜き穴周りで測定した結果を示す。残留応力 は、摩耗部(A)とその反対側(C)で高い値を示し、 その間の(B部)では低位であった。この結果は、遅れ 破壊による割れ発生位置と傾向が一致しており、周方向 の割れ分布に関しても残留応力が影響していることがわ かった。







図8 板厚方向残留応力の板厚方向分布(材料X) Fig.8 Distribution of residual stress in thickness direction along thickness (sample : X)











図7 打ち抜き穴周りの各位置のせん断端面に発生した割れの発生数 Fig.7 Number of cracks observed in sheared edge around the hole







図11 破断面側の板厚方向の残留応力と割れ数の関係(材料X) Fig.11 Relationship between residual stress in thickness direction on burr side and number of crack (sample : X)





# 3. 考察

#### 3.1 せん断端面の遅れ破壊と残留応力

図4に示したように本検討で見られたせん断端面の遅 れ破壊による割れはかえり側では板厚方向に対して垂直 (打抜き穴周方向) に近い向きに発生しており、せん断 面側に向かうにつれて向きを変えて中央部からせん断面 側では45°の向きに変化している。このような変化を示 す原因については以下のように考えられる。図8,9に て示した端面に生じる板厚方向の残留応力はかえり側で 大きく、せん断面側に向かうにつれて減少している。ま た周方向の残留応力(図10)は板厚方向と比較して小 さく,かえり側、中央部、せん断面側にかけて同程度で ある。この残留応力と割れの向きの関係を図14に模式 的に示す。せん断端面の遅れ破壊は板厚方向の残留応力 が支配的なかえり側では周方向に沿って進展し、板厚方 向および周方向の残留応力が同程度となる破断面中央~ せん断面側では両方向の残留応力の影響を受け、約45° 方向に進展すると考えられる。

#### 3.2 パンチ摩耗による残留応力増加メカニズム

せん断端面はだれ、せん断面、破断面およびかえりに より構成される<sup>14)</sup>。図15にパンチ摩耗およびクリアラ ンスの変化によるせん断端面の構成比率の変化を示す。 かえりは本検討では見られなかったため省略した。摩耗 パンチで打抜いた場合には新品パンチに比べてせん断面 およびだれが増加していた。これは摩耗によりなだらか になったパンチ先端部の応力集中が低下し、き裂が発生 せずにパンチ押し込みが進行したため、と考えられる。

図16に破断直前の圧縮応力に及ぼすパンチ摩耗の影 響を模式的に示す。パンチの押し込み量増大に伴いダイ



図14 せん断端面の遅れ破壊による割れと残留応力の模式図 Fig.14 Schematic illustration of crack of delayed fracture and residual stress on sheared edge







図16 破断直前と破断後の材料変形状態の模式図 Fig.16 Schematic illustration of material deformation just before cracking からの反力およびダイ直上の圧縮応力は増加すると考え られ、せん断面比率が高い摩耗パンチの方がより高い圧 縮応力が生じていたことが示唆される。せん断後の端面 に生じる板厚方向の引張残留応力は、破断直前のダイ直 上の圧縮応力が大きいほど大きくなることが報告されて おり<sup>4)</sup>、摩耗したパンチにて、端面の残留応力が増加し た要因の一つとして考えられる。

#### 3.3 割れ発生位置の周方向分布

前述のように,遅れ破壊による割れはパンチの摩耗部 位に加えてその反対側の端面においても発生していた。 これには図13に示した周方向の残留応力の分布が影響 していることを示した。図3に示したようにパンチ摩耗 部の反対側の端面ではせん断面比率は摩耗部に比べて低 いため,残留応力が高い理由については,図16に示し たメカニズムとは別の要因が存在すると考えられる。周 方向で打抜き時の亀裂の発生タイミングが異なること や,局部的な摩耗によりパンチの軌道が不安定になるこ となどが影響する可能性があるが,詳細は不明であり, 今後の検討課題である。

**むすび**=本研究では, 1,470 MPa級鋼板を用いてせん断 加工部での遅れ破壊に及ぼすクリアランスおよび工具摩 耗の影響を調査した。クリアランスは今回調査した7~ 25%の範囲では10~15%において, 10%未満や20%以上 に比べて遅れ破壊が発生しやすいこと, パンチの摩耗に より遅れ破壊が発生しやすくなることが明らかになっ た。またその傾向は残留応力の変化と一致することが確 認された。

本結果によると、せん断端面の遅れ破壊の適切な評価 のためにはクリアランスと共に工具の摩耗状況を管理す ることが重要である。またクリアランスの選択によって 工具摩耗の影響を低減できる可能性があることが示唆さ れた。 なおクリアランスによって残留応力に変化が生じた理 由としては打抜き時の破断タイミングや応力状態の違 い<sup>5)</sup>などが考えられるが,詳細は明らかでない。また 本検討では上記の変化を残留応力に着目して検討した が,せん断加工時の大規模な塑性変形に伴い材料には加 工硬化,格子欠陥,ボイド発生などの残留応力以外の変 化も生じている。これらについてもせん断端面の遅れ破 壊に影響を及ぼしている可能性があり,今後の検討が期 待される。

#### 参考文献

- 松山晋作. 遅れ破壊. 日刊工業新聞社, 1989, p.203.
- 2) T. Chiba et al. Scripta Materialia. 2023, Vol.223, No.15, p.115072.
- 3) 吉野正崇ほか. 鉄と鋼. 2013, Vol.99, No.4, p.302-306.
- 4) 森謙一郎ほか. 塑性加工連合講演会講演論文集. 2020, Vol.71, p.395-396.
- 5) 安富 隆ほか. 塑性加工連合講演会講演論文集. 2020, Vol.71, p.179-180.
- 6) 崎山裕嗣ほか. 鉄と鋼. 2022, Vol.108, No.10, p.784-794.
- K. Mori, et al. Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2020, Vol.4, No.2, p.54.
- 8) 内海幸博ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.3.
- 9) 安富 隆. ぷらすとす. 2022, Vol.5, No.60, p.815-816.
- 10) 増田雪也ほか. 品質工学. 2004, Vol.12, No.1, p.97-104.
- 11) 安部洋平ほか. 塑性と加工. 2013, Vol.54, No.627, p.348-352.
- 12) 岩谷二郎ほか. R&D神戸製鋼技報. 1997, Vol.47, No.2, p.33.
- 13) 戸畑潤也ほか. 自動車技術会論文集. 2024, Vol.55, No.1, p.193-198.
- 14) 日本塑性加工学会. せん断加工. コロナ社, 1992, p.231.
- 15) 古閑伸裕ほか. 塑性と加工. 2014, Vol.55, No.646, p.1024-1028.
- 16) 松野 崇. 素形材. 2012, Vol.53, No.10, p.2-7.
- P. Larour, et al. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2022, Vol.1238, No.1, p.012041.
- 18) 安部洋平ほか. 塑性と加工. 2009, Vol.50, No.580, p.414-418.
- 19) 湯川伸樹ほか. 塑性と加工. 1998, Vol.39, No.454, p.35-39.
- 20) 北條智彦ほか. 日本機械学会M&M材料力学カンファレンス.
   2021, GS18.
- 21) 松野 崇ほか. 塑性加工連合講演会講演論文集. 2022, Vol.73, p.331-332.

#### (解説)

# 超高強度鋼板の成形荷重低減コンセプト

林田康宏\*1・山本伸一\*1・岩本翔太\*2

# Reduction of Press Load for Ultra-High Strength Steel Sheet

Yasuhiro HAYASHIDA · Shinichi YAMAMOTO · Shota IWAMOTO

### 要旨

自動車の車体骨格部品の高強度化に伴い,成形荷重増加が問題となりつつある。今般,センターピラーアウター を想定し,下死点近傍での成形荷重増加を抑制する工法を検討した。

センターピラーアウター上部を模擬した小型金型を用い,実験と数値解析による上記工法の効果検証を行った。 上下金型の間隙を適切に制御すれば,成形荷重を低減でき,しわや寸法精度への影響も軽減できることが判った。

#### Abstract

The increase in the strength of automotive body frame parts has been raising concerns about increased press load. A recent study, assuming a center-pillar outer panel, includes a method for suppressing the increase in press load near the bottom dead center. Experimental and numerical verifications have been conducted using small dies simulating the upper part of a center-pillar outer panel to clarify the effectiveness of the above method. It has been found that appropriate control of the clearance between the upper and lower dies can reduce the press load and also mitigate the issues concerning wrinkles and dimensional accuracy.

検索用キーワード 超高強度鋼板,プレス成形,荷重,クリアランス,しわ,寸法精度

**まえがき**=近年の環境や安心・安全な社会への意識の高 まりにより,自動車車体にはさらなる軽量化と安全性が 求められている<sup>1),2)</sup>。車体骨格部品への引張強さ 980 MPaを越える超高強度鋼板,いわゆる超ハイテン鋼 板の適用拡大はその有力な対策のひとつである<sup>3),4)</sup>。

いっぽう,自動車骨格向け超ハイテン鋼板の実用化に おいて,割れ・しわ・寸法精度悪化など成形不良が課題 となるだけでなく,高い素板強度により成形荷重が増加 するため,成形中の金型損傷や金型変形も無視できなく なる<sup>5).6)</sup>。また,成形荷重増加はプレス機械に負担をか けるため,プレス機のサイズや設置面積の拡大,高剛性 機種への変更を招くこともあり得る<sup>7)</sup>。

プレス中の成形荷重は,素板強度および成形にともな い発生する副次的な力(摩擦力など)に依存する。これ までに,成形性向上効果だけでなく,温間・熱間成形に よる変形抵抗低下<sup>8)</sup>やプレスモーション制御による潤 滑油再流入<sup>9)</sup>などに起因する荷重低減効果も報告され ているが.それぞれ専用の設備導入が必要となる。

本報告では,超ハイテン鋼板の車体骨格部品へ典型的 な適用部品である,センターピラーアウターの上部を対 象に,上下金型の適切なクリアランス制御により下死点 近傍での成形荷重増加を抑制可能な工法コンセプトを見 出し,小型模擬金型を用いた実験や数値解析で効果を検 証した結果を述べる。

# 超ハイテン鋼板成形の荷重増加メカニズム と低減コンセプト

#### 1.1 荷重増加のメカニズム

センターピラーアウターは自動車車体の側面衝突安全 性に対して要となる部品であり,冷延超ハイテン鋼板や ホットスタンピング用鋼板が広く適用されている。超ハ イテン鋼板のプレス成形荷重の特徴を調査するため,セ ンターピラーアウターの典型的なモデル形状を対象に, ドロー(絞り)工程の成形荷重の数値解析を行った。超 ハイテン鋼板の成形では寸法精度確保を目的に,下死点 近傍で素板に張力や決め押しを追加する事例<sup>10)</sup>もある が,上記解析は加工力を追加しない前提で実施した。

センターピラー上部に1180 MPa級超ハイテン鋼板を 適用した成形解析の結果,図1に示すように,下死点 まで残り1mmの時点から成形荷重が指数関数的に急増 することが確認された。ここで,図2に示すように成 形品を複数の領域に分割して荷重分布を調査すると,荷 重急増期にはセンターピラーアウターのT字部(とくに 上部A)に顕著なしわが発生するとともに,分担荷重が 大きく増加していた。一般に,図中A領域のようなT 字成形の天板部には,材料余りに起因した成形しわが発 生しやすい。下死点近傍で上下型間の間隙が小さくなる ほど,上記しわを形成する材料が受ける面内圧縮力は大

\*1 技術開発本部 ソリューション技術センター \*2 技術開発本部 ソリューション技術センター (現 人事労政部)

きくなり、この力はしわ高さを増す方向に働く<sup>11)</sup>。した がって、しわを潰しながら下死点まで成形するには、こ の面内圧縮力の影響を上回る大きな面圧が必要になる。

# 1.2 成形荷重低減のコンセプト

通常,プレス成形において所望の部品形状を得るため には,下死点まで成形する必要がある。いっぽう,下死 点近傍における上記成形荷重の急増は,プレスに過大負 荷をかけるとともに,場合によってはプレス能力を超過 する可能性もある。そこで,成形領域をT字領域とその 他の領域に分割し,ドロー工程では荷重急増の主領域で ある前者を下死点まで成形し,その後のフォーム(曲げ) 工程では後者を下死点までリストライク成形し,大きな 荷重発生タイミングを分散する2工程成形法を考案し た。

図3に概要を示す。下型が分割され,各工程で特定 の領域のみ完全に押下される。それ以外の領域では,下



[1<sup>st</sup> process :Draw] 【 2<sup>nd</sup> process :Form 】 図 3 荷重低減工程の概略図 Fig.3 Schematic illustration of load reduction process

死点で対向する上下型がプレス方向に一定量の間隙(図 中でVC: Vertical clearanceと表記)を保ち,完全に押 下されない。図1が示唆するように,下死点近傍で上下 型間隙を設けてプレス押下量を減少させると,T字部の しわ成長を促進させる面内圧縮力も減少する<sup>11)</sup>ので, 押下に必要な面圧は間隙なしのときより減少する。いっ ぼう,上下型間の間隙が過剰になると,金型面による素 板拘束が働かず,完全押下領域から間隙設定領域への材 料流入などにより,成形しわが成長し,寸法精度が悪化 するおそれがある。したがって,全体成形荷重の低減と 成形不良の極小化を両立できる最適な上下型間隙の抽出 が課題となる。

そこで,上下型間隙が荷重低減やしわ,寸法精度に及 ぼす影響とメカニズムを,小型模擬金型を用いた実験や 数値解析で調査した。

## 2. 実験方法および数値解析方法

図4に示すように、センターピラーアウターの上部T 字構造を模擬した小型(270 mm×210 mm)の試験金型 を作製し、部分的に上下型間隙を設定することによる荷 重低減効果および、しわ・寸法精度への影響を調査した。 図中の破線位置で下型を①~④領域に分割し、金型底部 に敷いたシムにより、特定金型を相対的に上昇/下降さ せて上下型間隙を調整した。このとき、間隙の影響を明 確にするため、②領域の形状は下死点近傍で材料余りに よる成形しわが発生しやすい形状とした。なお、④領域 はブランクを保持するために常に押下した。

上記の小型試験金型を300トン級メカニカルプレスに 組み込み、板厚1.4 mmの1180 MPa級鋼板を用いて、ド ロー(1工程目,しわ押さえ力82kN),同じ金型でし わ押さえを外したフォーム(2工程目)の成形試験を行 った。1-2工程間でトリミングは実施していない。図 5に分割型の上下型間隙の設定領域と設定値を示す。1 工程目でしわが発生しやすい②領域を先行して押下し, ①,③領域に間隙を設けた。2工程目では領域を反転さ せ、①、③領域を完全に押下し、製品稜線を成形するい っぽうで、②領域には間隙を設けた。図中の表に示すよ うに、各工程の間隙量を0.0 mm(最小、従来成形まま) から0.8mmまで変化させた4ケースを実施した。条件 の単純化を狙い、各ケースでの間隙量は両工程で同一と した。ダイセットとスライドの間に設置した4個のロー ドセルで金型全領域の荷重を測定し、成形品は3次元形 状測定機でしわ形状および寸法精度を測定した。

上記実験と並行して,成形荷重低減のメカニズム調査



Upper T-shaped area

Nested structure of die Cer 図4 小型試験金型 Fig.4 Small test die set

Center pillar outer <sup></sup> 登型 のため、有限要素法による数値解析(FEA)を行った。 小型試験金型を図6に示すように解析モデル化し、メ カニズム検討用に比較的大きな間隙量(両工程とも 1.0 mm)を設定したケースを追加した。



【1<sup>st</sup> process :Draw】

【 2<sup>nd</sup> process :Form 】

Die clearance in each process (mm)			
Test No.	Draw(1 <sup>st</sup> ) Region①③	Form(2 <sup>nd</sup> ) Region②	
1	0.0	0.0	
2	0.2	0.2	
3	0.5	0.5	
4	0.8	0.8	

図5 上下型間隙の設定条件 Fig.5 Conditions for upper-lower die clearance



図6 小型金型の有限要素解析モデル Fig.6 FE-analysis model for small test die set

# 3. 実験結果および数値解析結果

図7に各工程で上下型間隙を設けたときの成形荷重 の低減効果を,実験および数値解析で比較した結果を示 す。荷重は間隙なしの条件に対する相対的な値で示し た。各工程とも、上下型間隙が大きくなるほど、しわ潰 し反力が弱まり、例えば0.8 mmの間隙設定で1工程目 の成形荷重実験値が18%、2工程目が同じく9%低減し ている。

いっぽう,上下型間隙付与により懸念された成形しわ や寸法精度への影響を実験および数値解析結果をもとに 調査した。

しわ高さの評価は成形荷重の主要発生域であり,2工 程目で上下型間隙を設ける領域を対象とした。図8(a) に,小型試験の2工程目除荷後の当該領域を横断する線 分上の成形品プロファイルの比較結果を示す。間隙を設 定すると,中央部には大きな形状変化はないが,評価域 両端で間隙なしとの乖離量が大きくなり,しわが高くな る傾向を示している。今回評価したすべてのケースで同 様の傾向が得られた。図8(b)に,上記の乖離量が大 きくなる評価域両端の平均と間隙量との関係を示す。上 下型間隙が大きくなると,2工程目除荷後のしわ高さは 徐々に大きくなるが,例えば0.5 mmの間隙量でしわ高 さ実測値が0.11 mm,08 mmの間隙量で同じく0.25 mm と,比較的低位のしわ高さ増加にとどまっていることが わかる。

小型試験において、上下型間隙量0.5mmおよび 0.8mmの条件で成形した2工程目除荷後の成形品の3 次元形状測定結果を図9に示す。間隙なしの成形品の





Fig.9 Comparison of part dimensional accuracy

それにベストフィットし, 乖離量の大小を寸法精度の指標として比較した結果である。図中で面の外側法線方向を正の値として表示している。実験において, 図示しなかった間隙量0.2 mmのケースも含め, 乖離量は間隙の増加とともに拡大傾向にあるが概ね±0.3 mm以下であり, 乖離量の極端な悪化は見られなかった。また, 図示しないが数値解析においても実験と同様の傾向を示した。ただし, 乖離量の絶対値は若干増加した。

# 4. 考察

前章で述べた実験と数値解析により、1工程目で成形 しわの発生領域を中心に押下し、2工程目で当該領域に 上下型間隙を設け、その他の領域を押下加工する工法 に、最大成形荷重を低減する一定の効果があることがわ かった。これは図2で示したように、成形荷重は金型稜 線だけでなく平面が分担する割合も大きいためと考えら れる。また、実験結果と数値解析結果を比較すると、同 じ上下型間隙での荷重低減効果は実験結果のほうが小さ くなった反面、評価領域のしわ高さは低くなった。この ことから、数値解析結果には実験結果と比べて定量的な 差異が残るが、定性的には傾向を良く表しており、現象 解明や考察に活用できる。

本章では、本検討工法の1工程目で成形した領域(T 字部)が、2工程目において上下型間隙を設けても、周 辺領域の成形から大きく影響を受けない理由について、 数値解析結果をもとに考察する。図8(b)に示すように、 仮に上下型間隙量を0.0~1.0 mmの範囲で変化させたと き、2工程目除荷後においてしわ評価領域(図9の破線 で囲った領域)のしわ高さは間隙量とともに増加し、 1.0 mmの皮形品全体でみると(図10参照)、本来しわ が出やすいT字部(評価領域)内の乖離量は上下型間隙 に比べて比較的小さい。

この現象を詳細に検討するため,当該部の1-2工程間 の形状を比較した。1章で述べたように,過剰な間隙は 金型面による素板拘束を弱め,間隙設定領域に成形しわ を促進する材料流入や面内圧縮力の増加をもたらす可能 性がある。図11に間隙量1.0 mmのときの,評価領域近



図10 間隙1.0 mmのときの寸法精度解析結果 Fig.10 Results of dimensional accuracy analysis with 1.0 mm die clearance

傍を含む各工程除荷後の形状計算値を比較した結果を示 す。図から2工程目において,評価領域周辺は1-2工程 間の上下型間隙の差に応じて変形しているが,評価領域 では1.0 mmの上下型間隙量により成形タイミングが遅 れ,先行する評価領域周辺の材料余りを吸収しているに もかかわらず,評価領域両端を除いて面外への大きな形 状変化は発生していない。

そこで、2工程目における、評価領域端部~周辺部の 成形品幅方向メタルフローを調査した。間隙量なしおよ び1.0 mmのときの解析結果を図12に示す。成形品中央 へ向かうメタルフローを負の値で表示した。図から上下 型間隙がある場合、2工程目の成形にともない、評価領 域周辺部ではT字部方向にメタルフローが発生するが、 T字部は金型面による材料拘束が強く、1.0 mmの間隙量 でも評価領域内部に向かうメタルフローがほぼ発生せ ず、周辺部の成形の影響をほとんど受けていないことが わかる。したがって、図8に示すように、この領域では 2工程目で間隙を設定してもしわ高さの増加がおきにく く、あらたなしわ潰し荷重や寸法精度の悪化も発生しに くい。

すなわち,本検討の条件では図7,図8に示すように 0.5~0.8 mmの上下型間隙量を設定すれば,成形荷重の 低減と成形不良の極小化の両立が可能と考えられる。



図12 評価領域周辺部の幅方向メタルフロー Fig.12 Metal flow analysis in width direction around evaluation area

むすび=本報告では、センターピラーアウターの上部を 対象に、成形荷重急増の主要因を分析した結果にもとづ き荷重発生タイミングを分散させることで、成形荷重を 低減可能な2工程成形法のコンセプトを提案した。さら に、小型金型試験と数値解析で上記検討工法の効果を検 証した。その結果、各工程で適切な上下型間隙を設定し つつ、1工程目で金型面による材料拘束が強く、荷重急 増の主要因となるしわ潰し領域を下死点まで成形し、2 工程目でその他の領域を下死点まで交互に成形すること で、成形荷重抑制と成形不良極小化の両立が可能と結論 づけた。本検討の実験条件において、通常成形品(間隙 量ゼロ)からのしわ高さ・形状乖離量を0.3 mm以内に するには、上下型間隙量を0.8 mm以下にすることで達 成でき、このときの荷重低減効果は1工程目が18%、2 工程目が9%であった。 住みよい環境や安心・安全な社会を目指し,自動車車 体の軽量化と安全性への要求は引き続き高いレベルにあ る。その有力な対策である超ハイテン鋼板を使いこなす ために,本報告が工法検討の一助になれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 梶原 桂. R&D神戸製鋼技報. 2024, Vol.72, No.2, p.13-16.
- 2) 内藤純也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2024, Vol.72, No.2, p.53-57.
- 3) 村上俊夫. R&D神戸製鋼技報. 2024, Vol.72, No.2, p.28-32.
- 4) 内海幸博ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.3-7.
- 5) 赤澤浩一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2024, Vol72, No.2, p.68-73.
- 6) 黒瀬雅詞. ぷらすとす. 2020, Vol.3, No.27, p.146-150.
- 7) 鈴木利彦. プレス技術. 2015, Vol.53, No.5. p.48-51.
- 8) 小嶋啓達. 塑性と加工. 2005, Vol.46, No.534, p.595-599.
- 9) 玉井良清ほか. 塑性と加工. 2010, Vol.51, No.592, p.450-454.
- 10) 吉田 亨ほか. 新日鉄技報. 2003, No.378, p.25-29.
- 11) 中川威雄ほか. 薄板のプレス加工. 実教出版, 1977, p.109-110.

#### (技術資料)

# 超ハイテン鋼板向け電着塗装性向上溶接プロセス

古川尚英\*1・井海和也\*1

# Welding Process Enhancing Electrodeposition-coating Performance for Ultra High Tensile Strength Steel Sheet

Naohide FURUKAWA · Kazuya IKAI

# 要旨

超ハイテン鋼板のガスシールドアーク溶接継手で、スラグが増加し電着塗装性を阻害する課題に対し、スラグ発生 量を低減し電着塗装後の耐食性能を向上させる溶接技術を開発した。シールドガスのアルゴンガス比率を95%ま で増加させた溶接プロセス(ハイアルゴン溶接プロセス)を採用し、さらに溶接材料は、酸素との親和性の低い 合金元素添加によって溶接継手の強度を上昇させる成分設計とした。さらに、溶接材料の生産性にも配慮し、自 動車分野で一般的に採用されているソリッドワイヤではなく、複合ワイヤによる実用化を図った。本稿では、溶 接プロセスと溶接材料の組み合わせで実現した、電着塗装性と疲労強度を両立する溶接技術について解説する。

#### Abstract

In gas-shield arc-welded joints of ultra-high tensile-strength steel sheets, there is an issue of increased slag generation, which inhibits electrodeposition coatability. To address this issue, a welding technology has been developed to reduce the amount of slag generated and improve corrosion resistance after electrodeposition coating. A welding process has been adopted in which the argon gas ratio in the shielding gas has been increased to 95% (high-argon welding process). The welding consumable has been designed to increase the strength of the welding joint by adding alloying elements that have low affinity with oxygen. In addition, the productivity of welding consumables has also been taken into consideration, and practical application has been sought using composite wires rather than the solid wires that are generally used in the automotive field. This paper describes a welding technology that combines electrodeposition coatability and fatigue strength, realized by a combination of the welding process and welding consumables.

#### 検索用キーワード

超ハイテン鋼板、ハイアルゴン溶接プロセス、低スラグ、複合ワイヤ、疲労強度、電着塗装、耐食性能

まえがき=近年,自動車分野では,環境規制強化と衝突 安全基準の厳格化に伴い,使用する材料の高強度化と軽 量化のニーズが高まっている。車体重量を支える足回り 部品には,一般的に鉄鋼材料が使用されており,高い疲 労強度や剛性,耐食性を同時に満足することが求められ る。複雑な形状を有する部品の疲労強度と剛性の向上に は,鋼板強度だけでなく,溶接金属部の強度増加が必要 となる。また,鋼板の高強度化により薄板化は可能であ るが,耐食性が現状と同じであれば,板厚の減少分だけ 腐食の進行により早期に耐久限界を迎えることになる。 さらに走行中の飛び石などに起因する物理的損傷,沿岸 地域での潮風,寒冷地での融雪剤などを考慮すると,よ り一層の耐食性能向上が求められる。

自動車用足回り部品の接合には、一般的にソリッドワ イヤを使用したガスシールドアーク溶接が用いられてい る。超ハイテン鋼板用の溶接材料をソリッドワイヤで製 造する場合、ワイヤ強度が高くなる傾向にある。これは、 合金添加による線材の硬さ上昇に加え、伸線時の加工硬 化によるものである。溶接材料としては、溶接時の良好 なワイヤ送給性や作業性を得るために、製品径で適正な ワイヤ強度となっている必要がある。しかし、合金添加 の多いワイヤでは、適正なワイヤ強度にするために、伸 線途中の焼鈍軟化処理が必須となる。さらに,途中一度 の焼鈍だけで十分に低い適正なワイヤ強度とならない場 合,複数回の焼鈍が余儀なくされることがある。その結 果,ワイヤの生産性が大幅に低下し,溶接ワイヤのコス トアップとなる。そこで当社では,980 MPa級鋼板用溶 接材料の開発に向けて,複合ワイヤでの材料設計を試み た。その材料設計は,ワイヤ製造時の成型性を考慮し, 軟鋼の帯鋼材を外皮に,合金添加元素を混合したフラッ クスをコア部とするものである。複合ワイヤの長所と短 所をソリッドワイヤと比較し**表1**に示す。加工が難し くなる高強度材では,複合ワイヤの方が経済的であるだ

表1 ソリッドワイヤと比較した複合ワイヤの長所と短所 Table 1 Merits and demerits of composite wire against solid wire

		Solid wire	Composite wire
Typical cross section		Metal	Metal Flux
Formability	Mild steel	0	0
FOITHADIILY	High tensile steel	0	0
Production	Mild steel	0	Δ
cost	High tensile steel	0	0
Depo	osition rate	0	0
Wire stiffness		0	Δ
[Judge standard] ●: Better - O:Standard - △:Poor - ×:Bad			

\*1 溶接事業部門 技術センター 溶接開発部

けでなく,溶着速度が速くなるという利点がある。複合 ワイヤの短所としては,ワイヤの剛性が低下することが 挙げられ,直進性がやや損なわれる傾向となる。この点 については,実部品メーカで溶接性の確認も行って評価 した。本稿では,上記複合ワイヤと溶接プロセスにより, 超ハイテン鋼の溶接においても,優れた耐食性能と疲労 強度を有する溶接継手を提供する溶接技術について紹介 する。

# 1. 要素技術

# 1.1 耐食性向上のコンセプト

耐食性向上に向けた基本的な考え方を,溶接工程とその後の電着塗装工程に分けて,図1に示す。ガスシールドアーク溶接では,溶融金属中への大気混入を防止すべく100%CO<sub>2</sub>や,80%Ar-20%CO<sub>2</sub>のシールドガスが一般的に用いられる。CO<sub>2</sub>はアーク直下では,COとOに解離する。酸素はアークを安定にするいっぽうで活性ガスであり,Si,Mnをはじめとする合金添加元素と結合し,スラグの生成を助長する。Siを主体とする酸化物のスラグは絶縁性が高く,このようなスラグがビード表面に存在すると,溶接後の電着塗装工程で塗膜が形成されない。そのため電着塗装性の向上には,溶接ビード上のス

ラグを極力減らすことが望ましい。この課題に対し, 95%Ar-5%CO<sub>2</sub>のシールドガスを採用し,溶接時のアー クを安定にしつつ,活性ガス含有量の低減でスラグの発 生量を抑制したハイアルゴン溶接プロセスが実用化され ている<sup>1)</sup>。その後の電着塗装工程では,電着塗膜の焼き 付け時に塗膜の粘性が低下し流動性が向上する性質を利 用して,絶縁物を被覆する手法が知られている<sup>2)</sup>。

ハイアルゴン溶接プロセスにてスラグを極小化したう えで、電着塗膜を厚くし、流動する塗膜の量を増やすこ とで未電着部のスラグを被覆するという考え方である。

#### 1.2 溶接材料

不活性ガス比率を高めたハイアルゴン溶接プロセスの 適用により低スラグ化は可能である。いっぽう,溶接材 料においても低スラグ化と電着塗装性能の向上のため に,種々取り組みがなされている<sup>3).4).5)</sup>。

ハイアルゴン溶接プロセスと組み合わせる溶接材料に は、低スラグ化という課題に対し、二つのアプローチが 提案されている。またそれぞれの考え方に合わせ、最適 な施工条件が見出されている。ハイアルゴン溶接プロセ スにおいて、溶接材料面と施工条件面の組み合わせで低 スラグ化を図るためのアプローチを**表2**に示す。

低スラグ化の一つ目の考え方は、不活性ガス比率の増



図1 耐食性向上の基本的な考え方 Fig.1 Basic idea to improve corrosion resistance

表 2	低スラグ化に向けた 2 つのアプローチ
Table 2	Two approaches for slag reduction method

Welding process	High-Ar process			
Shielding gas	95%Ar	-5%CO <sub>2</sub>		
Wire type	Slag concentrating	Slag deconcentrating		
Unique chemical composition in wire	S add.	Ti add.		
Gas flow rate	20 ( l	/min.)		
Size of nozzle	Φ19 (mm)	Φ13(mm)		
Welding speed	Normal	Faster		
Schematic drawing	Residual slag (Nozzle dia.: p19) Arc plasma Concentrate slag Minimize residual slag by slag concentration	Active oxidizing area Gas shield area (Nozzle dia.: $\phi$ 13) Arc plasma Harmless slag(Oxide fitm) Creating harmless slag by active oxidizing in the rear molten pool		
Observation by HSV	180 A-21.5 V-60 cm/min Hething clifetha Concentrate slag	235 A-22.5 V-90 cm/min Residual slag Helping direction Deconcentrate slag		

表3 重ね溶接継手の耐食性評価結果 Table 3 Corrosion resistance performance of rap weld joint



\* [Judge standard] 5(Good) - 4(better) - 3(Standard) - 2(poor) - 1(Bad)

加でスラグの発生量を抑制したうえで、スラグを凝集・ 回収(concentrate)し、溶接終端部まで輸送すること である。凝集したスラグは、容易に剥離させることが可 能である。スラグを凝集させるメカニズムとして、溶接 材料面では、ワイヤ中の硫黄を0.020%程度含有した設 計としている。硫黄を添加することで溶融池の対流が変 化し、微小なスラグが溶接時のクレータ部に凝集し、ア ークに追従して輸送されるような挙動を示す。スラグの 挙動に影響を与える因子として、溶融池対流のほかにシ ールドガスのガス流速がある。スラグを凝集させ安定し て溶接終端部に輸送するためには、ガス流速を小さくす ることが有用である<sup>5)</sup>。そのため、適用するノズル径を 通常サイズよりも大きくすることが推奨される。スラグ に上述のような特徴を付与するガスシールドアーク溶接 用ワイヤを本稿では、「スラグ凝集ワイヤ」と呼称する。

低スラグ化のための二つ目の考え方は、スラグを溶融 池後方へ輸送し分散(deconcentrate)した状態で積極 的にFe系酸化被膜内に取り込むことである。溶接材料 面では、SiやMnの酸化物よりも液相線温度が高い酸化 物を形成するTiを添加した設計としている。TiはSiや Mnと比較し、より高温領域で溶融スラグを形成するた め、プラズマ気流の影響をより強く受け、溶融池後方へ 移動する駆動力を得ることが可能である。溶融池後方へ 輸送したスラグをFe系酸化被膜に取り込むためには、 溶融池後方の固液界面付近から大気にさらされるのが良 いとされる。山﨑ほかの報告5)によると、溶接速度が 高速となる、あるいはノズル径が一定以下になると溶接 後のビード外観にスラグが存在しなくなる領域があると している。溶接速度の増加とノズル径を小さくすること で、大気にさらされる溶融池サイズが増加し、より積極 的にFe系酸化被膜による被覆が促進される。大気巻き 込みによる気孔欠陥の発生や機械性能に影響を与えない 範囲で、溶接速度の向上を図ることができるため、より 合理的な施工とも言える。上述のようにスラグを分散さ せるような特徴を付与するガスシールドアーク溶接用ワ イヤを本稿では、「スラグ分散ワイヤ」と呼称する。

440 MPa級鋼板を用いて作製した溶接継手の電着塗装 後および後述する腐食試験後の外観写真を**表3**に示す。 従来のマグ溶接に比べて,ハイアルゴン溶接プロセスを 採用した溶接継手は、大幅に電着塗装性が向上している ことが確認できる。また、低スラグ化の二つのアプロー チを比較すると、スラグ凝集ワイヤでは、凝集しきれな かった残留スラグ部分からの発錆(はっせい)が見られ ている。これに対し、スラグ分散ワイヤでは、スラグが 適切に分散・無害化されていれば、良好な耐食性能を有 することが確認できる。

超ハイテン鋼板用の溶接ワイヤでは、スラグの増加が 想定されるため、より耐食性能の向上が認められたスラ グ分散ワイヤを基本に設計することとした。

# 2. 超ハイテン鋼板用溶接技術

#### 2.1 溶接材料

超ハイテン鋼板用溶接ワイヤとして、成型性に優れる 軟鋼の帯鋼材を外皮とし、合金を添加・混合したフラッ クスの組み合わせで複合ワイヤの検討を行った。試作ワ イヤを全溶解した場合の狙い化学成分値を表4に示す。 980 MPa級鋼板には所定の強度を得るために合金が添加 されており, 溶接金属はワイヤ由来の合金成分に加え母 材成分の影響も受ける。合金添加が多いため、超ハイテ ン鋼板の溶接では、必然的にスラグが増加する傾向にあ る。溶接ワイヤとしては、極力スラグの発生を抑えるべ く、酸素との親和性が高いSiの代わりに、炭素やCrで 溶接金属の強度向上を検討した。炭素は酸素と結合して もCO<sub>2</sub>として気化するためスラグ量への影響は小さいと 判断した。Crは比較的酸素との親和性が低く, ほかに 親和性の高い合金元素が多く含まれる場合,スラグメタ ル間反応において、酸化消耗されにくい。そのため、酸 素との結合は限定的で、ほぼ溶接金属に歩留まることが 期待できる。

#### 2.2 実験条件

#### 2.2.1 溶接および電着塗装

マツダ株式会社から提供いただいた980 MPa級鋼板 を用いて,水平溶接姿勢による重ねすみ肉継手で実験を 行った。溶接条件を表5および図2に示す。溶接ビー ド上のスラグを画像処理にて二値化し,撮影画像に占め るスラグ面積率を算出した。また,作製した溶接継手に 対し,洗浄,脱脂,表面調整,化成処理(リン酸亜鉛), 洗浄を施し,最終的に黒色カチオン電着塗装を施した

表4 980 MPa級鋼板溶接用複合ワイヤの成分設計値(mass%) Table 4 Typical chemical composition of trial wires for 980 MPa grade steel

Wire	С	Si	Mn	Cr	Ti	Ni, Mo	Ceq.
Wire A	0.08	0.29		0.10			0.54
Wire B	0.09	0.14		0.13	0.14		0.55
Wire C	0.09	0.04	1.45	0.13	1		0.54
Wire D	0.08	0.29	1.45	0.10		Add.	0.54
Wire E	0.09	0.14		0.13	0.10		0.55
Wire F	0.09	0.04		0.13			0.54

[JIS/WES] Ceq.: C+Mn/6+Si/24+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/4

#### 表5 重ねすみ肉溶接時の溶接条件 Table 5 Welding condition for rap weld joint

Welding robot	DAIHEN Almega AX-V6	
Power source	DAIHEN Digital Pulse DP400R	
Shielding gas	95%Ar-5%CO₂, 20 ℓ/min	
CTWD	15 mm	
Nozzle inner dia.	13 mm <sup>φ</sup>	
Torch angle	45°	
Base metal	980MPa grade steel, thickness : 2 mm	
Current (Voltage)	240 A (24.5 V)	
Welding speed	110 cm/min	



図2 重ねすみ肉溶接時のワイヤ狙い位置 Fig.2 Wire aiming position when rap weld joint done

表6 曲げ疲労試験条件 Table 6 Plate bending fatigue test condition

Test temperature	RT	
Stress ratio	R≑0 (pulsating fatigue test)	
Frequency	25 Hz	90
Number of cycles to failure	2×10 <sup>6</sup> cycles or 10% less than initial torque	45 45 Shape of test piece

#### 表7 溶接後および電着塗装後のビード外観 Table 7 Bead appearance after welding and after e-coating



(狙い膜厚:20 μm)。塗装不良となった領域を画像処 理にて二値化し,面積を算出した。

#### 2.2.2 複合サイクル腐食試験(CCT)

CCTは、試験槽内で塩水噴霧と乾燥、湿潤などの腐 食サイクルを繰り返し、金属材料や塗装、めっきなどの 耐食性能を加速評価する手法である。本実験において、 重ねすみ肉溶接継手部の耐食性能を評価した。供試材に は、試作ワイヤA~Fを用いた継手から、スラグ量が少 なく電着塗装性が良好であったものを選定した。試験 は、JASO M609(日本自動車技術会規格)を基本条件と し、防錆(ぼうせい)性能の差が明確に表れる50サイ クルまで実施した。決められたサイクル数で試験槽から 試験体を取り出し、写真撮影により腐食状況を記録し た。

# 2.2.3 溶接継手の疲労試験

表5に示す溶接条件にて作製した溶接後の試験体より

放電加工を用いて疲労試験用の試験片を採取し、応力比 R=0の片振りによる平面曲げ疲労試験を実施した。比 較材として、440~780 MPa級鋼板用溶接材料として汎 用的に使用されるワイヤ(JIS Z3312 G43A2M 16)を供 試した。疲労試験条件を**表6**に示す。

#### 2.2.4 溶接継手部の硬さ試験

疲労試験用サンプルを採取した同一の試験体より溶接 継手の断面マクロ試験片を採取し、ビッカース硬さ試験 を実施した。硬さ測定位置は、溶接継手のうち疲労強度 に影響を与えうる溶接ビード下側止端箇所とし、溶接金 属部、溶接熱影響部、母材部にまたがる領域にて測定し た。硬さ測定時の荷重は3Nとした。

#### 2.3 実験結果と考察

# 2.3.1 スラグ生成量と電着塗装性の評価結果

重ねすみ肉溶接後および電着塗装後のビード外観を表 7に示す。また、画像処理解析にて算出したスラグ面積 率および電着未塗装領域の定量評価結果を図3,図4に 示す。強脱酸元素であるTiおよびSiの低減でビード上 の残留スラグ量が低減していることが分かる。電着塗装 後のビード外観比較では,残留スラグを含めビード上の 大部分が電着塗装されることを確認した。ワイヤA~C (Ti:0.14%添加)では,上板側残留スラグ部分も良好 な電着塗装性を示した。これに対し,相対的にスラグの 少ないワイヤD~F(Ti:0.10%添加)では電着塗装不良 となる領域が散見された。つまり,スラグ残留量が多く ても塗装性が良好となる場合があるいっぽうで,スラグ 量が少なくても十分な電着塗装性能が得られない場合が ある結果となった。

#### 2.3.2 スラグの解析結果

電着塗装性に差異が見られた上板側残留スラグに着目



し、スラグの断面観察を行った。観察は、電子線マイク ロアナライザ (EPMA)による元素マッピングを行った。 さらに、サーモフィッシャーサイエンティフィック株式 会社製の多変量イメージ解析ソフトウェア COMPASS を用いて、相分離解析を実施した。

元素マッピングにより同定された元素と質量比を元 に、スラグを構成する主要酸化物の比を算出した結果を 図5に示す。ワイヤ中Si量の低減にともないスラグ中 SiO<sub>2</sub>が低減している傾向は確認できるものの、TiO<sub>2</sub>や MnOなどの構成比に有意な差は認められなかった。

つぎに、COMPASSを用いて、酸化物相の分布形態を 観察した結果を表8に示す。スラグ中の占有率が20% 以上の相を抽出した。さらに、相を構成する成分で10% 以上となるものを特定し、相を代表する成分として呼称 することにした。いずれにおいても、Mn-Ti-Si酸化物相 およびMn-Ti酸化物相がスラグを構成する主たる相であ ることが分かる。ワイヤ中Siの低減にともない、Mn-Ti 酸化物相が、スラグ下部(鉄接地側)から上部(電着塗 膜接地側)にかけ、デンドライド状に析出する傾向が確 認された。また、相の境界が明瞭となる傾向が観察され た。電着塗装性が良好であったワイヤA~C(Ti:0.14% 添加)のスラグでは、その傾向がより強いものとなった。

これらは、Mn-Ti酸化物相がMn-Ti-Si酸化物相と比べ、 より導電性が高い相であると仮定することで説明ができ る。導電性を担う経路が三次元的に入り組んでスラグ下





Fig.5 Percentage of slag elements taken from upper side in the welding bead



#### 表8 スラグ断面のスラグ相解析結果 Table 8 Phase analyzed results at cross sectional slag

部から上部に形成された結果,スラグ面積率の増加に反 して電着塗装性が良好になったと示唆される。各酸化物 相の導電性の定量的解析は今後の課題とし,電着塗装性 が向上するメカニズムの解明に取り組んでいく。

#### 2.3.3 複合サイクル腐食試験(CCT)結果

980 MPa級鋼板に対して,ワイヤBを用いた重ねすみ 肉溶接継手にカチオン電着塗装を施し,複合サイクル腐 食試験を実施した結果を**表9**に示す。従来の440 MPa 級鋼板に対して,汎用ワイヤを用いた継手と比較した結 果,優れた電着塗装性が確認できた。また複合サイクル 腐食試験50サイクル後のビード外観を観察しても,溶 接ビード上の残留スラグ起点となる発錆が無く,良好な 腐食性能を有することを確認できた。

# 2.3.4 溶接継手の疲労特性評価結果

重ねすみ肉溶接継手の疲労試験結果を図6に示す。ここでは、980 MPa級鋼板の溶接において電着塗装性と溶接金属強度をバランスしたワイヤBの疲労特性について紹介する。

汎用ワイヤを用いた溶接継手では,440 MPa級鋼板と 比べ980 MPa級鋼板と組み合わせたときのほうが,疲 労特性が向上することが確認された。

ワイヤBと980 MPa級鋼板との組み合わせでは,同一 振幅応力では,汎用ワイヤに比べ,より長寿命側にシフ トすることが確認された。また200万回における疲労強 度が1.5倍程度向上していることも確認された。

重ねすみ肉溶接継手の断面マクロ観察結果および止端

半径とフランク角の測定結果を表10に示す。重ねすみ 肉溶接継手では,溶接止端部の形状が疲労特性に大きく 影響するが,今回実施した試作ワイヤの溶接継手では, 止端形状に大きな差異はなかった。そのため,鋼板およ び溶接金属の強度増加で溶接継手自体の耐荷重性が高ま り,疲労強度の増加に寄与したものと考えられる。

## 2.3.5 溶接金属部の硬さ測定結果

溶接継手の下板側止端部付近のビッカース硬さ試験の 結果を図7に示す。汎用ワイヤを用いた溶接継手の溶 接金属では、440 MPa級鋼板と比較し、980 MPa級鋼板 との組み合わせでより硬くなっていることが分かる。こ れは、980 MPa級鋼板に添加されている合金成分による 母材希釈の影響と考えられる。平面曲げ疲労試験にて最 も良好な結果を示したワイヤBを用いた溶接継手の溶接



#### 表9 ワイヤBにおける溶接継手部のCCT評価結果 Table 9 CCT results of weld joint prepared with WireB



\*Conventional wire: G43A2M 16

表10 重ねすみ肉溶接継手の断面マクロ観察 Table 10 Cross section of rap fillet weld joint

	Conventional wire × 440 MPa grade steel	Conventional wire × 980 MPa grade steel	WireB $\times$ 980 MPa grade steel
	1 <u>mm</u>	1 <u>m</u> m	1 <u>mm</u>
Frank angle (deg.)	150	149	152
Toe radius (mm)	2.0	1.6	2.1

\*Conventional wire: G43A2M 16



図7 溶接金属下側止端部のビッカース硬さ Fig.7 Vickers hardness around lower side weld toe



図8 試作ロアアームと各溶接姿勢における溶接ビード外観 Fig.8 Trial Lower Control Arm and bead appearance at unique welding position

金属部の硬さはHV300程度であることを確認した。つ まり、応力集中を受ける止端部近傍の溶接金属の硬さを 増加させることは、重ねすみ肉溶接継手の疲労特性の向 上を図るうえで有効な手段のひとつであると考えられ る。

# 3. 実部品への適用

テストピースに対するワイヤBを用いた実験室評価 で、優れた耐食性能と疲労強度の向上を確認できたた め、実部品での溶接性評価と電着塗装性を評価した。対 象部材には、マツダ株式会社が軽量化アイテムとして取 り組む980 MPa級鋼板(板厚2 mm<sup>t</sup>)を適用したロア アームにて評価した。980 MPa級鋼板の適用により、従 来780 MPa級鋼板で作製した部品と比較し、約25%の 軽量化を実現している。

ワイヤBを用いて溶接工程が完了した部品の外観と主 要溶接部の外観写真を図8(上)に示す。同部品の製作 には、突合せ溶接部、重ねすみ肉溶接部、T字すみ肉溶 接部が存在するが、いずれの継手においても良好な溶接 性を確認した。複合ワイヤの短所であるワイヤ剛性の低 下については、ロボット溶接時の狙いズレが懸念された が、良好な溶接ビードが得られ実用上問題無い評価を得 た。また、部品をカチオン電着塗装した後の外観写真を 図8(下)に示す。良好な電着塗装性を有しており、実 部品においても、スラグ分散ワイヤとハイアルゴン溶接 プロセスの組み合わせに期待される効果を確認すること ができた。 むすび=自動車用足回り部品の軽量化に向け、超ハイテ ン鋼板の適用による薄肉化が進められている。高強度化 に伴い、鋼板には合金添加がなされ、電着塗装性を阻害 するスラグが増加する。また薄鋼板の採用は、穴あき錆 (さび)発生までの期間を短くする。このような課題に 対し、ハイアルゴン溶接プロセスをベースとし、スラグ 発生量を抑制しつつ高強度化を図るとともに、スラグ改 質による耐食性能の向上が可能な溶接技術を開発した。 また、高強度鋼用溶接材料の生産性と調達コストにも配 慮し, 溶接材料は複合ワイヤとした。自動車分野では, これまで排気系統の部品においてステンレス鋼用複合ワ イヤの適用実績があるが、足回り部品への採用はほぼ皆 無であった。複合ワイヤの適用には、部品製作メーカの ご協力もいただき,溶接性や施工能率面で高い評価を受 けることができた。本プロセスが、自動車分野における 車体重量軽量化へのソリューション技術として認知さ れ、採用の幅が広がることを期待したい。さらに、今後 も接合技術を通じて、グリーン社会の実現に貢献してい きたい。

最後に,本プロセスの共同開発にあたり,防錆性評価 や実部品での溶接性と耐久性試験など各種評価に協力を いただいた,マツダ株式会社,株式会社ヨロズに深く御 礼申し上げる。

#### 参考文献

- 1) 田中正顕ほか. マツダ技報. 2017, No.34, p123-124.
- 2) 田中正顕ほか. マツダ技報. 2018, No.35, p27-28.
- 3) 鈴木励一ほか. 神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p64-66.
- 4) 木梨 光ほか. 神戸製鋼技報. 2023, Vol.72, No.1, p81-82.
- 5) 山﨑亮太ほか. 神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.1, p98-104.

#### (解説)

# 自動車用アルミ合金板材に関する最近の動向と技術課題

山口正浩\*1·小林拓史\*1·市川武志\*2

# Recent Trends and Technical Challenges Regarding Aluminum Alloy Sheets for Automobiles

Masahiro YAMAGUCHI · Takufumi KOBAYASHI · Takeshi ICHIKAWA

## 要旨

アルミ合金板材は、自動車の軽量化に寄与する材料としてパネル部品を中心に採用が進んでいる。近年、カーボ ンニュートラルに向けて、自動車のBEVへの転換や材料製造時のCO<sub>2</sub>排出量低減の動きが活発化している。BEV 特有の部品の登場や、さらなる軽量化、意匠性の追求など、アルミ合金板材においてもニーズに変化が生じており、 それぞれに対応する技術開発が求められる。また、CO<sub>2</sub>排出量低減に対しては、リサイクルの促進が必要であり、 不純物による特性低下の抑制や部品構成部材のモノアロイ化が課題である。本稿では、このような昨今の自動車 用アルミ合金板材に対するニーズと課題、当社の取り組み事例について紹介する。

#### Abstract

Aluminum alloy sheets are increasingly being adopted, primarily for panels, as a material that contributes to the weight reduction of automobiles. In recent years, efforts toward carbon neutrality have been accelerated, including the shift to BEVs in automobiles and the reduction of  $CO_2$  emissions during material manufacturing. The needs for aluminum alloy sheets are also changing, due to the emergence of new parts, specific to BEVs, that necessitate further weight reduction and the pursuit of design flexibility. Now technological development is required to respond to these changes. Furthermore, to reduce  $CO_2$  emissions, it is necessary to promote recycling, which involves technical challenges in suppressing the deterioration of properties due to impurities and in unifying the alloys for each component of parts. This paper introduces the current needs and challenges for automotive aluminum alloy sheets and provides examples of Kobe Steel's efforts to address them.

#### 検索用キーワード

アルミニウム合金板,自動車,リサイクル,キャラクタライン,CO<sub>2</sub>,6000系合金,Al-Mg-Si,プレス

**まえがき**=アルミニウム合金(以下,アルミ合金という) は、比重が鉄鋼材料のおよそ1/3と小さく,自動車の 外板パネルに使用される軟鋼板より比強度も高いため, 使用素材を鉄鋼材料からアルミ合金材へ置換することに より軽量化が可能である。この特徴により,自動車の車 体軽量化による燃費向上や走行性能向上を目的に,外板 パネルなどへのアルミ合金材の採用が進められてきた。

近年では、世界的なカーボンニュートラル(以下、 CNという)に向けた取り組みが本格化しており、欧米、 中国などでは走行時にCO<sub>2</sub>を排出しないBEV(Battery Electric Vehicle)への転換が急速に進展している。 BEVはガソリン車に比べて航続距離が短い場合が多い ため、その延伸が重要な課題となっており、軽量化によ る電費改善のためアルミ合金材の適用が拡大している。 また、LCA(Life Cycle Assessment)の観点から、走行 時だけではなく、自動車製造時も含め、原料調達から廃 棄までを考慮したCO<sub>2</sub>排出量低減が必要であるとの考え 方が一般化してきており、アルミ合金材でも製造時の CO<sub>2</sub>排出量低減が重要課題となっている。

さらに, BEV の急速な普及にともない, 新興メーカを 含めた自動車メーカ各社より様々な車種が上市されてお り,車体のデザインが多様化している。車体表面の凹凸 を極力排除したシンプルなデザインがあるいっぽう,複 雑な凹凸で加飾したデザインの車種も出てきており,外 板パネルの形状によって成形課題が生じる場合がある。 本稿では,このような変化に対するアルミ合金板材の

本稿では、このような変化に対する / ルミ音玉板材の 課題や当社の取り組み事例について紹介する。

# BEVの普及によるアルミ合金板材へのニーズ変化

BEVは航続距離が重視されるため、車体軽量化の重 要性はますます高まると考えられる。とくに大型・高級 車では走行用バッテリー重量も大きくなり、軽量化は大 きな課題である。軽量化を目的としたアルミ合金板材の 採用事例としては、フードやドアといった外板部品が一 般的であるが、骨格や補強部材など高強度が求められる 部品への採用も想定される。

また, BEV 固有の部品として, 走行用バッテリーを搭 載する電池パック部品が挙げられる。電池パック構造の 一例(当社検討例)を図1に示す。例示した構造の場合, 部品側面および内部の補強材は高強度鋼板もしくはアル ミ押出形材, 蓋および底板は鋼板もしくはアルミ合金板 でそれぞれ構成される。電池パックは, 内部のバッテリ ーの損傷を防ぐため, 車両前後, 側面からの衝突だけで

<sup>\*1</sup>鉄鋼アルミ事業部門 真岡製造所 アルミ板開発部 \*2技術開発本部 ソリューション技術センター



図1 電池パック構造(当社検討例) Fig.1 Our study of battery pack structure

なく、車両下面からの衝撃に対する強度も求められる。 例えば、走行時に縁石や落下物のような小さい物体を巻 き込み、電池パック下面を突き上げる恐れがあるため、 底板を高強度化する必要がある。一部のBEVでは、厚 肉かつ高強度のアルミ合金板材を追加配置し、下面衝突 強度を確保する構造が採用されている。

一例として示した電池パックに限らず,BEV化による 新たな部品や構造変化,および重量バランス変化などに より,新たなアルミ合金材の採用ニーズや要求特性の変 化が予想される。当社では,高強度材含め,様々なニー ズに対応するアルミ合金材の開発を進めている。

# 2. カーボンニュートラルに向けた取り組み

## 2.1 アルミ合金板材適用部品製造時のCO<sub>2</sub>排出量

アルミは新地金製造時の製錬での消費電力が多く,ア ルミ合金材製造時のCO<sub>2</sub>排出量のうち大半が新地金製造 時に排出される。すなわち,アルミ合金材のCO<sub>2</sub>排出量 低減については,新地金使用量の低減や製錬使用電力の 再生可能エネルギーへの転換が非常に有効である。その ため,国内外のアルミメーカでは新地金の代わりにスク ラップを使用するリサイクルの促進や,製錬時に再生可 能エネルギーを使用した低CO<sub>2</sub>排出量地金(グリーンア ルミ)の利用が検討されている。こうした取り組みによ るCO<sub>2</sub>排出量低減効果を評価するためには,再生塊を製 造する際やスクラップを輸送する際のCO<sub>2</sub>排出量も考慮 する必要がある。

図2に当社で実施したリサイクル材やグリーンアル ミを使用した場合のアルミ合金板材適用部品(部品重 量:10 kg)製造時のGHG(Greenhouse Gas)排出量試 算結果を示す<sup>1)</sup>。部品製造時のプレススクラップ(プレ ス歩留り60%,スクラップ回収率98%と仮定)をリサ イクルする場合,新地金にグリーンアルミ(地金製造時 CO<sub>2</sub>を70%削減と仮定)を適用した場合,およびそれら を組み合わせた場合について試算した。ここで,材料製 造時や部品製造時のCO<sub>2</sub>排出量原単位はLCIデータベー スIDEA<sup>2)</sup>,および日本アルミニウム協会のデータ<sup>3)</sup>を 参照した。リサイクルの場合,スクラップから再生塊を 製造するまでのCO<sub>2</sub>排出量も加算しているが,おおむね 新地金が置換された分に応じて部品製造にかかるCO<sub>2</sub>排 出量が低減されている。また,グリーンアルミ使用の場 合,地金製造時のCO<sub>2</sub>排出量低減がそのまま反映されて





おり,リサイクルと組み合わせることで大幅なCO<sub>2</sub>排出 量低減が期待できることがわかる。本試算では,プレス スクラップのリサイクルのみを考慮したが,市中スクラ ップも加味することで,さらなるCO<sub>2</sub>排出量低減効果が 期待される。いっぽうで,自動車でのクローズドリサイ クルを考慮した場合,市中スクラップを活用するために は不純物の除去や回収スキームの確立など,様々な解決 すべき課題がある。

#### 2.2 外板パネル用アルミ合金板材リサイクルの課題

使用済み自動車(End of Life Vehicle:以下ELVとい う)は一般的に、回収され再利用可能な部品や大型部品 などが取り外されたのち、残ったボディはシュレッダで 破砕されシュレッダダスト (Automobile Shredder Residue:以下ASRという)となる<sup>4)</sup>。アルミ部品のうち、 鋳物・ダイカスト製品 (Al-Si系合金) であるエンジン やトランスミッション、ホイールなどの部品は取り外さ れ,二次合金メーカにより鋳物・ダイカスト用二次合金 地金として再生される。いっぽう, アルミ合金板材が使 用される外板パネルはASRに含まれ,鉄(Fe)や銅(Cu) などと混在した状態となるが,磁力選別や渦電流選別, X線選別などによりアルミスクラップとして回収され る<sup>5)</sup>。ただし,不純物として鉄や銅などの異種金属が一 定量混入するうえ、外板パネル以外に使用されている品 種の異なるアルミ合金材も混入しており、鋳物やダイカ スト用二次合金へカスケードリサイクルされるのが一般 的である。このようなアルミスクラップを外板パネル用 アルミ合金板材として再利用する場合、FeやCuといっ た不純物含有量の上昇による性能への影響が問題とな る。

Cu含有量上昇による性能変化として、耐食性の低下 が知られている。図3にA6022合金をベースにCu含有 量を変化させた際の糸錆長さの変化を示す。製品板相当 材に化成処理と電着塗装を施した後、クロスカットを付 与し、塩水噴霧を24サイクル(塩水噴霧→水洗→湿潤 保持→乾燥)実施し、最大糸錆長さを測定した。図3よ り、Cu含有量上昇にともなって最大糸錆長さが増大し ており、経年によって外板パネル表面に糸状の外観不具 合が発生するリスクが高まることを示している。小澤ら は、溶体化処理後に空冷処理を行った場合に比べ、冷却 速度の速い水冷処理を行った場合の方が糸錆の成長が抑 制されることを示し、水冷処理によりCu含有析出物の 発生抑制にともなうカソード起点減少に起因すると推定 している<sup>6)</sup>。

また、Feに関しては、含有量上昇にともなって粗大 な金属間化合物が増加し、曲げ性が低下することが報告 されている。徳田らは、A6022合金をベースにFe含有 量と凝固時の冷却速度を変化させた場合の曲げ性への影 響を調査している。図4に曲げ試験後の割れ程度を示 すサンプル写真を示す。凝固時の冷却速度を高めること で、Fe含有量増加にともなう曲げ性の低下は抑制傾向 となるが、その効果は限定的であると報告している<sup>7)</sup>。

以上のように, ELV 由来のスクラップを外板パネル材 へ再利用するうえでの代表的な課題を例示したが, スク ラップ使用率を向上させていくためには, 不純物の無害 化や他の因子による特性改善, あるいは不純物を混入さ



図3 最大糸錆長さに対するCu含有量の影響 Fig.3 Effect of Cu content on maximum filiform corrosion length



**図4** 曲げサンプルの外観(上段)と断面(下段)<sup>7)</sup>

Fig.4 Appearances of specimen surface (upper) and cross section (lower) after bending test  $^{7)}$ 

HSTRC (high-speed twin-roll cast) : cooling rate 1200 k/s, t5 mold cast : cooling rate 93 k/s, cooling rate 3.0 k/s





せないための, 例えばLIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) ソータ<sup>8)</sup> などの高度分別技術が必要であり, 産学官にて様々な取り組みが進められている。

また,外板パネルは主にアウタパネルとインナパネル で構成され,アウタパネルはAl-Mg-Si合金である6000 系合金の適用が一般的であるが,ドアインナなどの高い 成形性が要求される部材については,Al-Mg合金である 5000系合金が適用される場合がある。この場合,アル ミスクラップのMg含有量が6000系合金に比べ高い水準 となってしまうこと,また,自動車メーカで発生するプ レススクラップを,外板パネル用アルミ合金板材として 制限なく再利用する場合には,合金品種別管理や分別が 必要になる。そのため,アウタとインナを6000系合金 へ統一するモノアロイ化が進められている。

当社では、インナパネルに使用される代表的な5000 系合金であるA5182合金と同等の延性を狙った高成形性 6000系合金材を開発した。図5にA5182材と開発材の 伸びと塗装焼き付け模擬処理後(ベークハード後)耐力 を示す。開発材は、合金成分と溶体化処理時の温度制御 によりA5182合金同等の延性と高いベークハード後耐力 を実現している。現在5000系合金を適用している部品 や、高い成形性が要求される部材などへの適用が期待さ れる。

# 3. キャラクタラインによる意匠性向上

#### 3.1 キャラクタラインとその課題

近年,自動車車体の付加価値を高めるため,複雑な意 匠の外板形状が求められている。その中でも、ドアやフ ェンダなどの意匠面に設定される曲率半径(R)の小さ い凸部(キャラクタライン)の先鋭化は,意匠自由度を 高める手段としてニーズが高い技術である。

しかしながらキャラクタラインを先鋭化,すなわち凸 部の曲率半径を小さくすると,材料の割れや線ずれと呼 ばれる外観不良が発生しやすくなる。割れの抑制や線ず れの対策には金型やしわ押さえの微妙な調整が必要とな り,大きな課題となっている。

#### 3.2 キャラクタラインの成形性

キャラクタラインのR部では、プレス成形時の下死点 付近で張力を受けながら金型の凸Rに沿って曲率が付与 される、曲げと引っ張りの複合変形が生じている。この R部の複合変形を模擬した試験方法として、図6に示す ブランクホルダにて張力を付与しつつ先端にRの付いた パンチで突き上げる方法を試行した。図7に当社開発 の延性の高い高成形性材と高曲げ性材、およびアウタパ ネル用汎用材について破断発生までの限界成形高さ(H)



図6 キャラクタライン模擬成形試験方法(左)と試験後サンプル (右)

Fig.6 Test method simulating character line forming (left), and post-test samples (right)

を測定した結果を示す。高成形性材と高曲げ性材のいず れも汎用材に比べ高い破断限界成形高さを示し、パンチ 先端 R ( $R_p$ ) が 3 mm の場合は高成形性材の方が、パン チ先端 R ( $R_p$ ) が 1 mm の場合は高曲げ性材の方がより 高い破断限界成形高さを示した。この結果より、キャラ クタライン成形時の張力とパンチ先端 R 部の曲げのバラ ンスが変化し、成形に適した材料特性が変化すると考え られる。キャラクタラインの先鋭化による成形不具合が 生じた場合、R 部の変形状態に合わせて材料を選択する ことも対策の一つとして有効であると考えられる。

# 3.3 線ずれ発生メカニズムと評価方法

線ずれとは図8に示すように、キャラクタラインな どの金型凸部で板が初期に成形されたあと、張力のバラ ンス変化により凸部と直交方向に板がずれることで、初 期当たり部に形状が残ってしまう成形不良現象とされて いる<sup>9)</sup>。

評価は主に官能検査で行われ、ゼブラパターンのライ トを当てた際に光の線が歪んだ場合,線ずれが発生した とみなされる。線ずれ発生時の板表面の形状変化は数 µmから数十µm程度と微小量であることが多く,有限 要素解析 (Finite Element Analysis : FEA)などで変形 を直接予測する事は難しい。これを補うため、市販のプ レス成形解析ソルバには、金型の凸部に接触した板要 素、あるいは一定の面圧が発生した板要素を記録し、線 ずれとして表示する機能を備えたものもある。また、一 定の測定幅における板表面の曲率変化、高低差といった 様々な評価手法が提案されている<sup>100,11)</sup>。

#### 3.4 線ずれ抑制手法

成形不良として扱われる線ずれに対し、板をずらさな いという観点から様々な抑制手法・工法が考案されてい る。基本的には、板押さえ荷重を調整する、あるいは、 製品部外に余肉を盛るなどして、凸部近傍の張力バラン スを調整する手法が一般的である。だが、キャラクタラ インは外板の中央付近を通ることもあり、金型外周部の 調整では解決できず、凸部Rを拡大して意匠性と引き換 えに線ずれを目立たなくすることも多い。

キャラクタラインの位置によらない工法として,二工 程成形が挙げられる。一工程目では本来の製品形状より も緩やかな形状を成形し,二工程目で製品形状を成形す る。

例として、**図9**に線ずれ抑制工法の一例を示す<sup>12</sup>。こ の例で示したキャラクタライン先端Rが2 mmの金型は, 一工程で成形した場合,10 mm以上板のずれが発生する 形状である。このずれを抑制するために,まず一工程目 でキャラクタラインRを,板が成形中にずれても痕が残 らない形状(R100 mm)に設定し,さらに二工程目で キャラクタライン部に張力を付与するため,製品形状よ り10 mm程度浅く成形した。その後二工程目で製品形 状を成形するが,キャラクタライン部にさらに張力をか け,かつ板ずれを最小限にするため,大きな凸R部を先 行パッドで押さえてから成形した。

図10に線ズレ抑制工法の実機試験結果を示す。供試 材には板厚1.0 mmのA6022相当合金板材を使用し,キ ャラクタライン先端Rは2 mmとした。一工程成形では 板ずれ方向に線ずれと思われる痕がキャラクタラインと 平行に入っているのに対し,二工程成形では多少Rが拡 大したものの目立った線ずれは観測されなかった。この ことから二工程成形は線ずれ抑制に有効な手法であると 言える。

今後も複雑な意匠面を持つ外板の成形需要は高まって







図8 線ずれ発生メカニズム Fig.8 The mechanism of generating skid line



図10 線ずれ抑制工法の実機試験結果 Fig.10 The effect of the improved method for skid line

いくと予想される。とくにキャラクタライン先鋭化により,線ずれのみならず,R部での割れも課題になるため, 当社の材料開発とも歩調を合わせた工法技術の開発を進めていく。

**むすび**=CNに対する社会的ニーズの高まりに端を発し, 自動車を取り巻く環境は大きく,かつ急速に変化してい る。本稿でも一部触れたようにアルミ合金板材に対する ニーズも変化しており,当社ではこの変化に対応するた め,材料開発にくわえ,成形技術や接合技術,部品構造 の開発にも取り組んでおり,それらを組み合わせた提案 も検討している。このような技術を実用化するために は,自動車メーカや部品メーカといったお客様との協働 が重要となる。また,リサイクルにおいても,材料や成 形方法といった技術開発のほか,資源循環の仕組みづく りも重要と考えられる。このように,大きな変化に対応 していくためには一企業の枠を超えた取り組みが必要で ある。今後も取引先との関係を強化し,サプライチェー ンを通じて社会ニーズに応えていきたい。

#### 参考文献

- 加嶋寛子ほか.自動車技術会 2024年春季大会 学術講演会予稿集 (春). 公益社団法人自動車技術会講演番号293.
- LCIデータベース IDEA Ver.3.3 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 IDEA ラボ
- 一般社団法人日本アルミニウム協会. 各種アルミニウム圧延製品のLCIデータの概要~アルミニウム板材~. 2006-02-10. https:// www.aluminum.or.jp/environment/pdf/1-2-2.pdf, (参照2024-05-29).
- 公益財団法人自動車リサイクル促進センター.自動車リサイクル の紹介.
- https://www.jarc.or.jp/automobile/index/, (参照2024-5-22)
- 5) 大瀧光弘. 軽金属. 2009, Vol.59, No.11, p.612-619.
- 6) 小澤敬祐ほか. 材料と環境. 2018, Vol.67, No.5, p.208-210.
- 7) 徳田健二ほか. 軽金属. 2007, Vol.57, No.10, p.444-449.
- 8) 古屋仲茂樹ほか. 軽金属. 2022, Vol.72, No.9, p.561-568.
- 9) 中野伸哉ほか. マツダ技報. 2013, No.31, p.38-43.
- 日産自動車株式会社、山口信幸. 線ズレ評価方法. 特許第6447247 号. 2019-1-9.
- 11) 岸上靖廣ほか. 塑性と加工. 2023, Vol.64, No.745, p.34-40.
- 12) 株式会社神戸製鋼所.小林拓史ほか.プレス成形品の製造方法,プレス成形型,およびプレス成型品.特開2022-163527.2022-10-26.

#### (論文)

# LCAを用いた自動車用アルミ部品のGHG排出量評価

大久保安剛\*1・内藤純也\*1(博士(工学))・江崎澄代\*1・加嶋寛子\*2・吉野初美\*3

# Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Automotive Aluminum Parts

Yasutaka OKUBO · Dr. Junya NAITO · Sumiyo EZAKI · Hiroko KASHIMA · Hatsumi YOSHINO

# 要旨

2050年のCN(Carbon Neutral)の実現に向け、自動車の電動化(BEV化)が急速に拡大すると見込まれており、 車体の軽量化ニーズはますます高まるものと考えられる。車体軽量化の手段の一つとして鉄鋼材からアルミ材へ の材料の置換があるが、アルミ材は新地金とスクラップの原料構成が製造時の環境負荷に非常に大きく影響する ことが知られている。そこで本稿では、自動車部品に鉄鋼材とアルミ材をそれぞれ適用したときのライフサイク ルにおけるGHG(Greenhouse Gas)排出量を算出し、環境負荷への影響を評価した。その結果、アルミ材を適用 した場合に、プレススクラップを活用することでGHG排出量を大幅に低減することができ、さらに低CO2地金や 市中スクラップを適用することで、GHG排出量を鉄鋼材以下にすることが可能となる結果が得られた。

#### Abstract

To achieve carbon neutrality by 2050, the electrification of automobiles (e.g., BEVs) is expected to expand rapidly, further increasing the need for weight reduction of vehicle bodies. One of the methods for vehicle body weight reduction is to replace steel with aluminum. Meanwhile, the raw material composition of aluminum (new ingot and scrap) is known to significantly impact the environmental load during manufacturing. Hence, this study has calculated greenhouse gas (GHG) emissions over the life cycle of automotive parts made of steel and aluminum to evaluate their impact on that load. The results indicate that, when aluminum is used, GHG emissions can be significantly reduced by utilizing stamping scraps. Utilizing low-CO<sub>2</sub> ingot or commercial-scrap aluminum enables further reduction of GHG emissions to below those of steel.

# 検索用キーワード

LCA自動車, アルミ,環境負荷低減,低CO2,軽量化,スクラップ,クローズドループリサイクル

**まえがき** = 2050年のCNの実現に向け,自動車の電動化 (BEV化)が急速に拡大すると見込まれている<sup>1)</sup>。従来 のICEV(内燃機関自動車)と比較して,BEVでは走行 中のGHG排出量を低減することが可能<sup>2)</sup>となるいっぽ うで,電池を搭載することにより車両重量が大きくなる 傾向にある<sup>3)</sup>。車両重量が大きくなると,電費や航続距 離,運動性能の低下などの様々なデメリットがあるた め,これまで以上に車体の軽量化のニーズが高まってい る。

車体の軽量化の手段の一つとして,材料の置換が考え られる。一般的に車体に使われている材料の鉄鋼材に対 し,軽量化を目的に使われる代表的な材料のひとつにア ルミ材がある。適用する部品にもよるが,鉄鋼材からア ルミ材に材料を置換することで,約40%の軽量化効果 が見込めるため,車体へのアルミ材の適用は増加傾向<sup>4)</sup> となっている。

アルミはボーキサイトから製造したアルミナを電気分 解することで得られ、これを塊状としたものを新地金と 呼ぶ。アルミ新地金を製錬する際の電力消費量が非常に 大きいため、エネルギーミックスを前提とした電力によ り製錬した通常地金を用いたアルミ材の材料製造時の GHG排出量は鉄鋼材よりも大きいことで知られている。 しかし、製錬時に再生可能エネルギーを使用した低CO<sub>2</sub> 地金, プレススクラップや市中スクラップなどのリサイ クル材を適用することにより, 材料製造時のGHG排出 量低減が可能である。また, 軽量化による走行時の環境 負荷低減効果も期待できるため, 自動車のライフサイク ルで考えたときに, 従来の鉄鋼材と比較して, どちらの 環境負荷が小さいかを定量的に評価したうえで, 材料を 選択する必要がある。

そこで、本稿では、LCAの観点で、自動車部品に鉄鋼 材およびアルミ材を適用したときのGHG排出量を算出 し、さらに、アルミ材に低CO2地金や各種スクラップ材 を適用したときの環境負荷低減効果を定量的に評価し、 鉄鋼材を適用した条件と比較した結果について報告す る。

## 1. 部品製造時のGHG排出量評価

#### 1.1 部品製造時のGHG排出量評価の対象

自動車部品の材料にアルミ材を適用したときの材料製造から車両組み立てまでのフローを図1<sup>5)</sup>に示す。ここでは、アルミ材に①プレススクラップを活用しない条件、②プレススクラップを活用する条件、③市中スクラップを活用する条件における部品製造時のGHG排出量を算出した。

<sup>\*1</sup> 技術開発本部 ソリューション技術センター \*2 人事労政部 \*3 コベルコビジネスパートナーズ(株) 産業情報部



図1 材料製造から車両組み立てまでのフロー Fig.1 Flow from material production to vehicle assembly

## 1.2 部品製造時のGHG排出量の評価手法

#### 1.2.1 新地金のみを使用した場合のGHG排出量評価方法

ここでは、エネルギーミックスを前提とした電力によ り製錬した通常地金および再生可能エネルギーで製錬し た低CO<sub>2</sub>地金を原料とし、材料メーカで製造したアルミ 板を部品メーカでプレス加工し、部品製造に至るまでの GHG排出量の算出を行った。その際、プレス工程で発 生したスクラップのリサイクルは考慮しないこととし た。GHG排出量X<sub>GHG</sub>は、式(1)<sup>5)</sup>で表すことができ、 プレスの加工歩留りβは60%一定とし、プレス加工で 製造する部品の重量は10 kgとしたときのGHG排出量を 算出した。材料製造やプレス加工におけるGHG排出原 単位はIDEA<sup>6)</sup>を参照した。

 $X_{GHG} = 10 \times \left[ GWP_{\tilde{m}\underline{w}\underline{a}\underline{w}\underline{a}\underline{c}} \cdot (1-\varepsilon) / \alpha \beta + GWP_{\tilde{\omega}\underline{m}\underline{c}\underline{\omega}\underline{w}\underline{a}} \cdot \varepsilon / \alpha \beta + GWP_{\tilde{w}\underline{m}\underline{c}\underline{w}\underline{c}} \cdot \frac{1}{\beta} + GWP_{\tilde{w}\underline{n}\underline{m}\underline{w}\underline{a}} \right] \quad \dots \qquad (1)$ 

- ここに,
- α:溶解・圧延歩留り
- $\beta$ : プレス歩留り
- *ε*:アルミ材における添加元素の含有割合
- GWP:GHG排出原单位
- 1.2.2 新地金およびプレススクラップを使用した場合のGHG排出量評価方法

ここでは、新地金および低CO<sub>2</sub>地金を原料とし、材料 メーカで製造したアルミ材を部品メーカでプレス加工 し、発生したプレススクラップを再溶解して二次地金と して材料メーカに戻し、アルミ材の製造に再利用すると いう、クローズドループリサイクルが成立すると仮定し た。そのときの、部品製造に至るまでのGHG排出量 *X<sub>GHG</sub>*は、式(2)<sup>5)</sup>で表すことができる。

α:溶解・圧延歩留り

β:プレス歩留り

y:二次地金製造歩留り

 $\delta$ : プレス屑回収率

ε:アルミ材における添加元素の含有割合

GWP:GHG排出原单位

# 1.2.3 新地金および市中スクラップを使用した場合の GHG排出量評価方法

ここでは、新地金の代替として、市中スクラップを投入して製造したアルミ材を部品メーカでプレス加工し、 部品製造に至るまでのGHG排出量 $X_{GHG}$ は、式(3)で 表すことができる。その際、Cut-off approach<sup>7)</sup>を適用 し、投入する市中スクラップのGHG排出量は考慮しな いこととした。また、成分調整のためのアルミ新地金や 添加元素の投入は不要と仮定し、プレス工程で発生した スクラップのリサイクルは考慮しないこととした。 GHG排出量 $X_{GHG}$ は、以下の式で表すことができる。

 $+GWP_{\#\# \# \pm}]$ (3)

- ここに,
- α:溶解・圧延歩留り
- $\beta$ :プレス歩留り
- ε:アルミ材中添加合金比率
- ζ:市中スクラップ配合率

GWP:GHG排出原単位

#### 1.3 評価結果

ここでは、アルミ材の原料配合を変化させたときの部 品製造時のGHG排出量算出結果を示す。算出に用いた 式(1) ~式(3)における各変数の値を**表1**に示す。 溶解・圧延に関する歩留り、GHG排出原単位の値は、 6000系自動車パネル材を想定した日本アルミニウム協 会のLCIデータ<sup>8)</sup>を参考に決定した。また、プレス歩留 り $\beta$ は、フードを製造したときの歩留りの値<sup>9)</sup>を参考 に決定した。 表1 変数一覧 Table 1 Parameter list

 Parameter

  $\alpha$  (%)
  $\beta$  (%)
  $\gamma$  (%)
  $\delta$  (%)
  $\varepsilon$  (%)
  $\zeta$  (%)
 *GWP* 

 97
 60
 95
 98
 6
 0~100
 IDEA<sup>6</sup>





#### 1.3.1 新地金のみを使用した場合のGHG排出量評価結果

GHG排出量評価結果を図2に示す。通常地金を適用 した場合のGHG排出量は、259 kg-CO<sub>2</sub>eqとなった。い っぽう,低CO<sub>2</sub>地金を適用した場合は、109 kg-CO<sub>2</sub>eqと なり、約59%と大幅な環境負荷の低減が可能となる結 果が得られた。本結果から、アルミ新地金製錬時の GHG排出量を低減することが、部品製造全体で見ても、 環境負荷低減効果が大きいということが示された。

# 1.3.2 新地金およびプレススクラップを使用した場合のGHG排出量評価結果

GHG排出量評価結果を図3に示す。新地金およびプレススクラップを活用したときのGHG排出量は, 177kg-CO<sub>2</sub>eqとなり,低CO<sub>2</sub>地金を適用した場合は, 80kg-CO<sub>2</sub>eqとなった。それぞれ,プレススクラップを 活用しない場合と比較すると,GHG排出量は小さくなっ ているので,環境負荷低減に効果的であることがわかった。

# 1.3.3 新地金および市中スクラップを使用した場合の GHG排出量評価結果

GHG排出量評価結果を図4に示す。市中スクラップ の配合率の増加にともなって、GHG排出量はほぼ線形に 減少する結果が得られた。市中スクラップの配合率を 100%とした場合,配合率0%に対して約89%のGHG排 出量低減が可能となる。スクラップ配合率を大きくし、 新地金の配合率を小さくすることが、環境負荷低減に効 果的であることが明らかとなった。ただし実際には、新 地金や合金元素添加による成分調整が必要となるため、 アルミ材の要求仕様に合わせた配合率を考える必要があ る。

#### 1.3.4 各条件におけるGHG排出量評価結果比較

それぞれの条件における自動車の部品製造時のGHG









排出量評価結果を図5に示す。新地金を適用し、かつ、 プレススクラップを活用しない条件を基準としたとき に、新地金適用時にプレススクラップを活用すると、プ レス歩留り60%のときに、GHG排出量を32%低減可能 となる結果を得た。また、低CO2地金を適用すると、プ レススクラップ活用しない場合で59%、プレススクラ ップを活用する場合で69%GHG排出量を低減可能とい う結果を得た。低CO<sub>2</sub>地金を適用した場合,製錬時の GHG排出量の低減効果が大きくなることで,相対的に プレススクラップ活用によるGHG排出量の低減効果は 小さくなっている。

# 2. 自動車部品に適用する材料ごとのLCA分析

### 2.1 部品製造時のGHG排出量評価の対象

自動車のライフサイクルにおけるGHG排出量の評価 範囲を図6<sup>5)</sup>に示す。本稿では、「材料製造」、「部品製 造」、「車両製造」、「電池製造」、「走行」までを考慮した。 ただし、車両製造については、材料を変えることによる 影響は無いものと仮定した。

#### 2.2 評価に使用した車両モデル

本評価には、Cセグメントの車両を想定した独自モデ ルを使用した。諸元を**表2**<sup>5)</sup>に、車両モデルを図7に示 す。フード、フェンダ、サイドドア、ルーフ、バックド アの外板部品を鉄鋼材からアルミ材に置換するものとし た。合計の重量は、鉄鋼材適用時は114.3 kg、アルミ材 適用時は73.1 kgとなり、アルミ材適用により車両全体 で36%軽量化できるものと仮定して評価を行った。

#### 2.3 各フェーズにおけるGHG排出量の評価手法

#### 2.3.1 材料製造および部品製造

材料製造および部品製造時のGHG排出量の計算には,



図6 自動車のライフサイクルにおける評価範囲 Fig.6 Scope of evaluation during the life cycle of a vehicle

表2 評価対象とした車両の諸元 Table 2 Specifications of the vehicle evaluated

Vehicle type	BEV
Vehicle weight	2,020 kg
Segment	С
Battery capacity	66 kWh



図7 評価した車両モデルと材料変更した部品

Fig.7 Evaluated vehicle models and material-change parts

IDEA<sup>6)</sup> および日本アルミニウム協会<sup>8)</sup>の排出原単位の 値を用いた。プレス加工は、いずれも冷間プレスとし、 部品製造時のプレス歩留りは60%一定とした。GHG排 出量の差分△*S*<sub>材料と認品</sub>は式(4)で表すことができる。

$$\Delta S_{\started Bhar} = \left(\frac{C_{Al} W_{Al}}{\beta} - \frac{C_{st} W_{st}}{\beta}\right) + (TW_{Al} - TW_{st}) \cdots (4)$$

ここに,

*C<sub>st</sub>*:鋼板のGHG排出原単位

C<sub>Al</sub>:アルミ板のGHG排出原単位

W<sub>st</sub>:鉄鋼部品の重量

W<sub>Al</sub>:アルミ部品の重量

T:冷間プレスのGHG排出原単位

# 2.3.2 電池製造

電池製造時のGHG排出量は、UCSB Model<sup>10)</sup>を用い て算出した。このとき、GHG排出量を算出する各条件に おける車両の航続距離は一定とし、部品の材料にアルミ パネルを適用したときの軽量化効果は、図 $8^{11}$ に示す ように、電池容量の削減に寄与すると仮定した。電池製 造におけるGHG排出量の差分 $\Delta S_{\pi\lambda \otimes \pi}$ は、式(5)で表 すことができる。

P: 電池製造のGHG 排出原単位

- PE<sub>st</sub>: 鉄鋼部品適用を想定した車両の搭載電池製造時の GHG 排出量
- *PE<sub>AI</sub>*: アルミ部品適用を想定した車両の搭載電池製造時のGHG 排出量

# 2.3.3 走行

走行時のGHG排出量は、UCSB Modelを走行部分に のみ適用し、評価した。UCSB Modelにおける車両重量 とエネルギー消費量の関係が線形であることを前提条件 に、評価対象の車両が日本国内において、10万kmおよ び20万km走行したときのGHG排出量を算出した。GHG 排出量の材料間の差分 $\Delta S_{zfr}$ は、式(6)で表すことが できる。

- GS<sub>st</sub>: 鉄鋼部品適用を想定した車両の走行時における GHG排出量
- GS<sub>AI</sub>:アルミ部品適用を想定した車両の走行時における

   GHG 排出量



**Fig.8** Relationship between vehicle weight and battery capacity

表3 変数一覧 Table 3 Parameter list

Parameter			
$C_{St}$ , $C_{Al}$ , $T$	W <sub>St</sub> (kg)	$W_{Al}$ (kg)	$P$ , $PE_{St}$ , $PE_{Al}$ , $GS_{St}$ , $GS_{Al}$
IDEA <sup>6)</sup>	114.3	73.1	UCSB Model <sup>10)</sup>



- 図9 材料製造および部品製造時のGHG排出量の差
- Fig.9 Difference of GHG emissions in material production and parts production

#### 2.4 ライフサイクル全体のGHG排出量評価結果

ここでは、各工程におけるGHG排出量を算出した結 果を示す。算出の際に用いた式(4)~式(6)におけ る各変数の値を**表3**に示す。 $W_{SI}$ ,  $W_{AI}$ は、図7の評価車 両モデルの値とした。また、 $E_{SI}$ ,  $E_{AI}$ は、Malen-Geyer Powertrain Model<sup>12)</sup>を用いて、各材料適用時に、同じ 航続距離となるときの電池容量を算出した。

# 2.4.1 リサイクルを含む材料製造および部品製造

GHG排出量評価結果を図9に示す。グラフの縦軸は, 鉄鋼部品からアルミ部品に置換したときのGHG排出量 の差分を示す。低CO<sub>2</sub>地金を適用し,プレススクラップ を活用することで,鋼板部品と同等のGHG排出量とな る。また,市中スクラップを100%配合した場合は,材 料製造および部品製造の段階で,鋼板部品以下のGHG 排出量となる結果が得られた。以上のことから,材料お よび部品製造の段階では,鉄鋼部品に対し,環境負荷が 高いとされているアルミ部品においても,適用する地金 や各種スクラップの活用によって,鉄鋼部品と同等以下 の環境負荷にできる可能性があることが示された。

#### 2.4.2 電池製造

GHG排出量評価結果を図10に示す。グラフの縦軸は、 図9と同様に、鉄鋼部品からアルミ部品に置換したとき のGHG排出量の差分を示す。式(5)からもわかるよ うに、電池製造時のGHG排出量の差分において、材料 製造時のGHG排出量は影響せず、搭載電池容量、つま り、材料置換時の車両重量に比例するので、アルミ材を 適用した各条件における電池製造時のGHG排出量は同 じ値となる。また、航続距離が一定という条件で、鋼板 部品に対し、軽量化した分の電池容量を削減しているの で、GHG排出量としては、171 kg-CO<sub>2</sub>eq小さくなるとい う結果が得られた。







# 2.4.3 走行

GHG排出量評価結果を図11に示す。グラフの縦軸は, 図9と同様に,鉄鋼部品からアルミ部品に置換したとき のGHG排出量の差分を示す。式(6)からもわかるよ うに,前項2.4.2と同様,走行時のGHG排出量の差分に おいて,材料製造時のGHG排出量は影響せず,アルミ 材を適用した各条件における走行時のGHG排出量は同 じ値となる。

#### 2.4.4 ライフサイクルにおけるGHG排出量評価結果比較

これまで試算してきたリサイクルを含む材料製造,部 品製造,電池製造,走行までのGHG排出量について, 鋼板部品を基準としたときの各工程における差を図12, 図13に示す。グラフの縦軸は,図9と同様に,鉄鋼部 品からアルミ部品に置換したときのGHG排出量の差分 を示す。ライフサイクル全体で考えた場合に,プレスス クラップを活用しない条件においては,新地金を適用す ると,鋼板に対し,GHG排出量が733 kg-CO<sub>2</sub>eqと大幅 に大きくなるが,低CO<sub>2</sub>地金を適用すると,-384 kg-CO<sub>2</sub>eqと小さくなり,市中スクラップを適用すると, -961 kg-CO<sub>2</sub>eqと,大幅に小さくなる結果が得られた。 また,プレススクラップを活用する条件においても,新 地金を適用すると,鋼板に対し,GHG排出量が126 kg-CO<sub>2</sub>eq大きくなり,低CO<sub>2</sub>地金を適用すると,-581 kg-CO<sub>2</sub>eqと大幅に小さくなる結果が得られた。









**むすび**=本稿では,LCAの観点で,自動車部品に鉄鋼材 およびアルミ材を適用したときのGHG排出量を算出し, 各材料の環境負荷に関する評価を行った。アルミ材を適 用した自動車部品において,プレススクラップを活用す ることで,大幅にGHG排出量を低減することが可能と なる結果が得られた。さらに,低CO<sub>2</sub>地金や市中スクラ ップを適用することにより,GHG排出量を鋼板部品以下 にすることが可能となる結果も得られた。

いっぽう,今回の評価では,鋼板のリサイクル,低 CO<sub>2</sub>鉄鋼材<sup>13</sup>,および,自動車の解体は考慮せず,また, 市中スクラップ活用時の成分調整も不要という,実工程 とは異なる条件としている。今後は,より実工程に近い 評価や廃車スクラップの活用などを考慮した検討を行 い,環境負荷低減につながる材料選択に貢献していきた い。

#### 参考文献

- 日本自動車工業会、2050年カーボンニュートラルに向けた自動車 業界の課題と取組み、2022-12-15. https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\_environment/ transition\_finance\_suishin/pdf/009\_05\_00.pdf, (参照2024-05-29).
- 一般財団法人中央電力研究所 社会経済研究所,電力中央研究所 研究資料. 2021, No.Y21503, p.4.

- a
   溝端幹雄.あまり語られない電気自動車の普及を阻む盲点. https://www.dir.co.jp/report/column/20230113\_010985.html, (参照2024-05-29).
- 4) 廣澤渉一. 工業材料. 2017, Vol.65, No.12, p.26-30.
- 5) 加嶋寛子ほか. 自動車技術会 2024年春季大会学術講演会予稿集 (春). 公益社団法人自動車技術会. 講演番号293.
- LCIデータベース IDEA version 3.3 国立研究開発法人 産業技術 総合研究所 安全科学研究部門 IDEAラボ.
- 7) 醍醐市朗. 鉄と鋼. 2022, Vol.108, No.11, p.811-822.
- 一般社団法人日本アルミニウム協会. 各種アルミニウム圧延製品のLCIデータの概要~アルミニウム板材~. 2006-02-10. https://www.aluminum.or.jp/environment/pdf/1-2-2.pdf, (参照2024-05-29).
- 経済産業省.アルミニウム産業の現状と課題. https://www.meti.go.jp/policy/nonferrous\_metal/strategy/ aluminium02.pdf,(参照2024-06-05).
- Geyer R. User Guide for Version 5 of the UCSB Automotive Energy and GHG Model, 2017-03-06.
- 江崎澄代ほか.自動車部品の材料選択・構造設計への環境負荷評価の適用.第18回日本LCA学会研究発表会 要旨. 2023年3月, No.2-B3-02.
- Geyer R. User Guide for the 30NOV2017 Version of the PHEV-BEV Power Train Model, 2018-06.
- 神戸製鋼所. プレスリリース. 2022-05-17. https://www.kobelco.co.jp/releases/1210184\_15541.html,(参照 2024-06-07).
# (論文)

# 自動車パネル用6000系アルミニウム合金の加工硬化特性 に及ぼす組織因子の影響

越能悠貴\*1(博士(工学))

# Effects of Microstructures on Work Hardenability of 6000-series Aluminum Alloys for Automotive Body Panels

Dr. Yuki KOSHINO

# 要旨

加工硬化特性に及ぼす組織因子の影響を明らかにするため、合金成分および熱処理条件と機械的特性の関係なら びに引張変形中の転位組織に着目した種々の調査を行った。アルミニウム母相中に固溶するMgおよびSiが加工硬 化特性に大きく影響を及ぼすことを明らかにし、自動車ボデーパネル用6000系アルミニウム合金のプレス成形性 を向上するためには、合金成分のMg/Si比を低くすることが一つの有効手段と推定した。

#### Abstract

To clarify the effect of microstructures on work hardenability, the relationship between alloy compositions, heat treatment and the mechanical properties were investigated. Dislocation structures during tensile deformation were also evaluated. It has been revealed that solute Mg and Si have a great effect on the work hardenability, leading to the conclusion that lowering the Mg/Si ratio of the alloy compositions is an effective means of improving the press formability of 6000 series aluminum alloys for automotive body panels.

#### 検索用キーワード

自動車ボデーパネル,アルミニウム合金,6000系,Al-Mg-Si系,プレス成形性,加工硬化特性,均一伸び,転位,TEM

**まえがき**=自動車の車体は, CO<sub>2</sub>排出量低減, 航続距離 増加を目的とした軽量化が課題であり, 軽量素材である アルミニウム合金の適用が進んでいる。Al-Mg-Si合金 は焼付け塗装硬化性があり耐食性に優れることから, 自 動車用のボデーパネル材として実用化されている。いっ ぼう, 鋼板と比べて劣るプレス成形性を向上することが 課題であり, 引張特性の均一伸びに代表されるような加 工硬化特性を向上するため材料設計指針の明確化が重要 と考えられる。

Al-Mg-Si合金の主成分すなわちマグネシウム (Mg) およびけい素 (Si) が加工硬化特性に及ぼす影響は、こ れまで数多く調査されている。たとえば内田ら<sup>1)</sup> や Hirthら<sup>2)</sup>は、Mg濃度を約0.4~0.5 mass%と一定として、 Si濃度を1.5 mass%以下の範囲で変化させることにより、 Si濃度の増加に伴い伸びや加工硬化指数 (n值) が増加 することを明らかにしている。いっぽうで、特性変化の 要因となる組織因子は十分に明らかになっていない。と くに、Al-Mg-Si合金では溶体化処理直後からクラスタが 形成するため<sup>3)</sup>、実用上のプレス加工を想定したT4調 質においても、クラスタのような析出組織、また母相中 に固溶するMgおよびSi原子が転位と複雑に相互作用し、 加工硬化特性に影響を及ぼすと考えられる<sup>4)~6)</sup>。しかし ながら、自動車ボデーパネルに用いられるAl-Mg-Si合 金のような希薄濃度(1.5 mass%以下) での固溶Mgお

\*1 技術開発本部 材料研究所

よびSi量が特性に及ぼす影響とそのメカニズムを系統 的に調査した例は無い。そこで本研究では、アルミニウ ム母相中に固溶するMgおよびSiに着目し、引張変形途 中の転位組織に及ぼす影響の観点から加工硬化特性と合 金成分の関係を考察した。ここで、本研究では均一伸び を加工硬化特性の指標として、合金間での比較を行っ た。

# 1. 供試材および実験方法

本稿本研究に使用したアルミニウム合金の成分を表1 に示す。なお、いずれの合金も不可避的不純物として約

Chanten	Alla	<b>A</b> ll	Concentration (mass%)				
Chapter	Chapter Alloy series		Al	Mg	Si	Cu	
		3M	Bal.	0.32	0.00	-	
	AL 84-	6M	Bal.	0.63	0.00	-	
	AI-IVIg	10M	Bal.	1.10	0.00	-	
2		16M	Bal.	1.50	0.00	-	
2	Al-Si	35	Bal.	0.00	0.28	-	
		6S	Bal.	0.00	0.60	-	
		105	Bal.	0.00	1.03	-	
		165	Bal.	0.00	1.63	-	
2		6016	Bal.	0.40	0.99	0.18	
3	AI-IVIg-SI	6014	Bal.	0.63	0.61	0.12	

表1 供試材の化学組成 Table 1 Chemical composition of the investigated alloys

0.15 mass%の鉄(Fe)を含有する。第2章ではアルミ ニウム母相中に固溶する MgおよびSiの影響を調査する ため、Al-Mg合金およびAl-Si合金を用いた。また、第3 章では、自動車ボデーパネル材として実用されるAl-Mg-Si合金の成分と加工硬化特性の関係を検証するた め、6016合金ならびに6014合金を用いた。いずれの合 金も、溶解鋳造、均質化処理、熱間圧延、冷間圧延の工 程を経て作製されており、最終板厚は1.0 mmである。 Al-Mg合金では723 Kで1.8 ks、Al-Si合金では823 Kで 0.3 ks、6016 および6014合金は823 Kで1.8 ksの条件で 溶体化処理を行ったのち、室温の水中に焼入れた。Al-Mg-Si合金では、自動車ボデーパネル材としての実用を 想定した状態における比較を行うため、溶体化処理後に 恒温水槽を用いて363 Kで18 ksの時効処理を施した。

引張試験は、圧延平行方向が長手となるようJIS13B 号試験片に加工したサンプルを溶体化処理(Al-Mg-Si 合金はさらに時効処理)後、室温にて初期ひずみ速度  $1.67 \times 10^{-3}$ sおよびサンプリングレート0.1 sで実施した。 公称応力が最大となるひずみを均一伸びとした。また、 引張変形中のひずみ増加に伴うn値の変化は、真応力– 真ひずみ曲線を4次式で近似してセレーションの影響を 排除した後に、2点法により各ひずみ量に対するn値を 算出することで求めた<sup>7)</sup>。固溶Mg、Si量の分析は、熱 フェノールによる残渣抽出(フィルターメッシュサイ ズ:0.1  $\mu$ m)およびICP発光分析法により求めた。均一 変形過程での転位組織観察として、引張変形途中止めの サンプルを対象に,透過型電子顕微鏡(TEM)観察を 行った。TEM観察は日本電子㈱製収差補正透過電子顕 微鏡JEM-ARM200Fを用い,加速電圧200kVにて観察 を行った。電子線回折像から{111}面を定義するために, 入射方位<110>から観察を行った。

# アルミニウムに固溶する Mg および Si が加工 硬化特性に及ぼす影響

Al-Mg合金およびAl-Si合金の応力ひずみ曲線を図1 に,引張特性を表2に示す。また,固溶量と耐力なら びに均一伸びの関係を図2に図示する。固溶量の増加 に伴う特性の変化として,均一伸びはAl-Mg合金では 低下するのに対し,Al-Si合金では増加するという逆の傾 向を示した。真応力-真ひずみ曲線から算出したひずみ

表2 Al-Mg合金およびAl-Si合金の引張特性 Table 2 Tensile properties of the Al-Mg and Al-Si alloys

		Yield	Tensile	Uniform
Series	Alloy	stress	strength	elongation
		(MPa)	(MPa)	(%)
	3M	33	95	23.4
	6M	36	105	21.3
AI-IVIg	10M	42	124	19.7
	16M	51	144	19.9
	3S	29	83	25.1
ALC:	6S	30	93	27.4
AI-SI	10S	36	112	29.0
	16S	40	132	31.1



図1 (a) Al-Mg合金および (b) Al-Si合金の応力-ひずみ曲線 Fig.1 Stress-strain curves of the (a) Al-Mg and (b) Al-Si alloys



図2 Al-Mg合金および Al-Si 合金の固溶溶質濃度と(a) 耐力および(b) 均一伸びの関係 Fig.2 Relationship between solute concentration and (a) yield stress and (b) uniform elongation of the Al-Mg and Al-Si alloys



図3 引張変形中のn値の変化 Fig.3 n-value variation during tensile deformation in the (a) Al-Mg and (b) Al-Si alloys



Fig.4 Uniform elongation and n-value of the alloys at true strain of 0.15

量とn値変化の関係を図3に示す。いずれの合金も,真 ひずみ0.05程度でn値が最大値を示し,その後減少する 挙動を示した。そこで,各合金の均一伸びと変形後期(真 ひずみ0.15)でのn値を比較すると,図4のようになり, 真ひずみ0.15でのn値が高いほど均一伸びが大きい傾向 であった。

各合金に真ひずみ0.15の引張変形を付与した試料の代表的なTEM明視野像を図5および図6に示す。各図の右下部に記載された白線が {111} 面を示す。引張変形による転位の分散状態の変化に着目すると,Mg濃度0.6 mass%以上のAl-Mg合金(図5)では,転位線の存在しない領域と図中矢印で示す転位の集積した領域に分離する様子が観察された。Al-Mg合金では局所的な転位の集積を示すバンド状の構造が観察されたのに対し,図6のAl-Si合金では,Si濃度によらず全面的に均一な転位の分布が観察された。

# 3. AI-Mg-Si系合金の成分と加工硬化特性の関係

6016合金および6014合金の応力 - ひずみ線図を図7 および表3に示す。耐力は同等ながら、均一伸びは 6016合金の方が約4%高かった。また、真応力 - 真ひず み曲線から算出したひずみ量とn値の関係を図8に示す。 両合金とも、n値は引張変形開始から真ひずみ約0.05ま で増加し、最大値を示した後に減少する傾向を示した。 引張変形初期のn値は同程度ながらも、最大値は6014 合金の0.33に対して6016合金は0.34とやや高かった。ま た、均一変形後期(真ひずみ0.18)におけるn値は、 6014合金が0.25に対して6016合金が0.27であった。す なわち、6014合金よりも6016合金の方がn値が最大値を 示した後の減少が緩やかであった。

図 9 および図10に,6016 合金と6014 合金に真ひずみ 0.02,0.05,0.10 および0.18の引張変形を付与した試料の



図5 真ひずみ0.15の引張変形を付与した (a) 3M, (b) 6M, (c) 10M および (d) 16M 合金のTEM 明視野像 Fig.5 TEM bright field images of the (a) 3M, (b) 6M, (c) 10M and (d) 16M alloys at the true strain of 0.15



図6 真ひずみ0.15の引張変形を付与した (a) 3S, (b) 6S, (c) 10Sおよび (d) 16S合金のTEM明視野像 Fig.6 TEM bright field images of the (a) 3S, (b) 6S, (c) 10S and (d) 16S alloys at the true strain of 0.15

TEM 明視野像を示す。電子線の入射方位は<110>で, 各 TEM 像の右下に記した白線は,電子回折像から同定 した {111} 面を示す。6016 合金は真ひずみ0.02~0.05の 引張変形時には {111} 面に沿った直線状の転位線が多 く観察され,真ひずみ0.10以上では,図中に矢印で示す {111} 面に沿った転位組織が観察された。いっぽう, 6014 合金は真ひずみ0.02の引張変形時点から交差すべり



図7 6016および6014合金の応力ひずみ曲線 Fig.7 Stress-strain curves of 6016 and 6014 aluminum alloys

表3 6016 合金および 6014 合金の引張特性 Table 3 Tensile property of 6016 and 6014 aluminum alloys

Alloy	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Uniform elongation (%)
6016	98	220	24.9
6014	97	211	20.5



図8 6016および6014合金における引張変形中のn値の変化 Fig.8 n-value variation during the tensile deformation in 6016 and 6014 aluminum alloys



図9 真ひずみ0.02, 0.05, 0.10および0.18の引張変形を付与した6016合金における TEM 明視野像((a) 低倍, (b) 高倍) Fig.9 TEM bright field images of the 6016 aluminum alloys at the true strain of 0.02, 0.05, 0.10 and 0.15 ((a) Low and (b) high magnification)



図10 真ひずみ0.02, 0.05, 0.10および0.18の引張変形を付与した6014合金におけるTEM明視野像((a)低倍,(b)高倍) Fig.10 TEM bright field images of the 6014 aluminum alloys at the true strain of 0.02, 0.05, 0.10 and 0.15 ((a) Low and (b) high magnification)

と考えられる転位線の湾曲が観察され、交差すべりに起 因する転位同士の絡み合いが高頻度で観察された。ま た、真ひずみ0.10以上では、図中点線で囲われた転位セ ル構造が観察された。

# 4. 考察

# 4.1 加工硬化特性と転位組織の関係

本研究では、加工硬化特性(均一伸び)におよぼす組 織因子の影響を考察するため、種々の合金を用いて、均 一伸びと加工硬化挙動(n値変化)の関係ならびに引張 変形時の転位組織との対応を調査した。図4に示すよう に、Al-Mg合金とAl-Si合金の均一伸びは、変形後期(真 ひずみ0.15)のn値とある程度相関することが分かった。 また、6016合金と6014合金の比較においても、引張変 形中のn値の変化に着目すると、均一伸びが高い6016 合金の方が真ひずみ約0.05でのn値が高く、真ひずみ 0.18にかけての減少量が小さかった(図8)。これらの 結果から、引張変形の高ひずみ域にかけて高いn値を維 持することが、高い均一伸びを示す要件であると考えら れる。

また、図5および図6に示す真ひずみ0.15での転位組 織から、Al-Mg合金では固溶量の増加に伴い転位の局所 的な集積が顕著になった。いっぽう、Al-Si合金では固溶 量を増加しても均一な転位の分布が確認された。また、 図9および図10に示すTEM観察結果から、6016合金は 6014合金と比べ引張変形初期に転位の交差すべりが起 こりにくく、均一変形の終了近傍(真ひずみ0.18)まで 均一に転位が増殖する傾向が確認された。したがって、 本研究で調査したAl-Mg合金、Al-Si合金およびAl-Mg-Si合金ともに、引張変形中の均一な転位の増殖が変形後 期の高いn値の維持に対応し、結果的に優れた加工硬化 特性(均一伸び)につながったものと推察する。

# 4.2 固溶元素が引張変形時の転位組織に及ぼす影響

4.1節で示した引張変形時の転位組織に影響をおよぼ す因子の一つには、積層欠陥エネルギー (SFE) が考え られる。一般に、SFEが低下することで拡張転位の幅が 増大し, 部分転位から完全転位への収縮が困難となるた め、らせん転位の交差すべりが起こり難くなる<sup>8)</sup>。すな わち、転位の動的回復が遅延され、加工硬化が変形後期 まで維持されると考えられる。アルミニウム中にMgお よびSiが固溶すると、純アルミニウムと比べてSFEが 低下することが知られている。また、アルミニウム中へ の同量の固溶では、MgよりもSiの方がSFEの低下量が 若干大きいことが明らかにされている<sup>9),10)</sup>。たとえば, Muzvkら<sup>9)</sup> によれば、純アルミニウムのSFEが 146 mJ/m<sup>2</sup>であるのに対し、Al-2.08%Mgでは145 mJ/m<sup>2</sup>、 Al-2.08%Siでは139 mJ/m<sup>2</sup>である。この結果から、Al-Si 合金において固溶Si量の増加による均一伸び増加は、 SFE低下に伴う高ひずみ域での高い加工硬化の維持に よるものと推察される。

向井ら<sup>11)</sup>は本研究と同様に、Al-Mg合金を対象として、 溶質濃度0%から2%の増加に伴って均一伸びが約25% から20%に減少することを明らかにし、その一因とし て,溶質原子と転位の相互作用に起因した変形の不均一 化を挙げている。本研究では巨視的な変形組織の調査が できていないものの,溶質元素の固溶による均一伸びの 低下は,溶質原子と転位の相互作用による変形の不均一 化が一因と推察される。この観点でMgとSiの影響度の 違いを示す直接的な証拠はないが,Al-Mg合金において 固溶Mg量の増加に伴い局所的な転位の集積(図5)が 顕在化した傾向は,アルミニウム中に固溶するMgが変 形の不均一化を促進したことを示唆している可能性があ る。

# 4.3 合金成分と加工硬化特性の関係

ここまでの実験結果および考察をふまえて、合金成分 と加工硬化特性の関係を整理する。Al-Mg合金は固溶量 が0.3~1.4 mass%, Al-Si合金は0.2~1.2 mass%の範囲に おいて、固溶量の増加に伴う均一伸びの変化は、Al-Mg 合金で減少したのに対し、Al-Si合金では増加した。従来 知見<sup>13)</sup>よりAl-Mg合金は、溶質濃度3%以上の高濃度 化で均一伸びが増加することが知られている。そのた め、アルミニウム中に溶質元素が固溶することで、均一 伸びを増加する機構と減少する機構が同時に作用すると 推察される。このうち、SFE低下による転位の動的回復 の抑制が均一伸びの増加に、また、溶質原子と転位の相 互作用による変形の不均一化(転位の局所的な集積)が 均一伸びの減少を引き起こす一因と推察される。これら 機構のバランスにより,結果的に本研究で調査した濃度 範囲では固溶Siが均一伸び増加、固溶Mgが均一伸び減 少と異なる傾向を示したものと推察される。

本研究で調査した6016合金および6014合金ともに. 溶体化処理後に363 Kで18 ksの時効処理を施している ため, クラスタが存在すると推定される<sup>3)</sup>。いっぽうで, Al-0.6%Mg-1.0%Si合金を溶体化処理後に363Kで18ks の時効処理を施した際の3次元アトムプローブによる解 析結果<sup>12)</sup>からは、添加溶質元素量のうち、クラスタの 形成に消費される割合はSiが14%, Mgが21%と報告さ れている。したがって、本研究で比較した6016合金と 6014合金も、添加した Mg および Si のうち 80% 程度が固 溶状態にあると推測される。合金組成のMg/Si比は 6014合金の1.03に対して6016合金は0.40と低い。その ため6016合金はMg固溶量が少ないことによる局所的な 転位集積の抑制ならびにSi固溶量が多いことによる転 位組織の均一化が、6014合金と比べて約4%高い均一伸 びの発現に寄与したと推察される。したがって,6000系 合金においては、合金組成のMg/Si比がT4調質での固 溶MgおよびSi量を左右し、引張変形時の転位組織ひい ては加工硬化特性に影響をおよぼすと考えられる。

なお、溶質元素の種類(MgまたはSi)および固溶量 によって転位組織におよぼす影響が異なる要因につい て、本研究ではTEM観察と引張試験からの間接的な類 推にとどまっているのが現状である。近年は、放射光を 活用した引張変形途中の転位組織の評価<sup>14),15)</sup>や、ライ ンプロファイル解析により転位密度だけでなく配列状態 を定量的に評価する研究<sup>15)</sup>も行われている。今後、実 験的にはこのような技術を駆使して、機械的特性に及ぼ す各種組織因子の影響を定量的に考察することが重要と 考える。

**むすび**=本研究では、加工硬化特性に及ぼす各種因子の 影響を明らかにするため、合金成分と機械的特性の関係 ならびに引張変形中の転位組織に着目した種々の調査を 行った。その結果、アルミニウム母相中に固溶するMg およびSiが引張変形中の転位組織に大きく影響を及ぼ し、加工硬化特性を変化させることを推定した。そのた め自動車ボデーパネル用6000系アルミニウム合金のプ レス成形性を向上するためには、合金組成のMg/Si比 を低くすることが一つの有効手段と考えられる。実用に あたっては、本研究で調査した均一伸びだけでなく、曲 げや絞りといった様々なモードで良好な成形性を兼備す ることが求められる。今後は各種成形モードにおける組 織因子の影響を明らかにし、自動車パネルひいては他構 造材向けの材料設計に貢献していく所存である。

最後に本研究の遂行にあたり,多大なご指導を賜った 九州大学工学研究院 材料工学部門 金子賢治先生に深 謝を表する。 なお、本論文は、主に筆者が軽金属に投稿した論文2 件(索引番号16,17)を再構成したものである。

#### 参考文献

- 1) 内田秀俊ほか. 軽金属. 2008, Vol.58, No.7, p.290-294.
- S. M. Hirth et al. Mater. Sci. and Eng. A. 2001, Vol.319-321, p.452-456.
- 3) 有賀康博ほか. 軽金属. 2017, Vol. 67, No.5, p.144-150.
- 4) K. Takata et al. Mater. Trans. 2017, Vol. 58, No.5, p.728-733.
- 5) 秋吉竜太郎ほか. 日本金属学会誌. 2015, Vol.79, No.5, p.273-279.
- 6) 高田 健ほか. 日本金属学会誌. 2018, Vol.82, No.8, p.314-318.
- 7) 内田秀俊ほか. 軽金属. 1995, Vol. 45, No.4, p.193-197.
- 8) 吉永日出男ほか. 軽金属. 1981, Vol.31, No.5, p.359-368.
- 9) M. Muzyk et al. Scr. Mater. 2011, Vol.64, No.9, p.916-918.
- 10) Y. Qi and R. K. Mishra. Phys. Rev. 2007, B 75, p.224105.
- 11) 向井敏司ほか. 日本機械学会論文集A. 1993, Vol.59, No.566, p.2356-2361.
- 12) B. H. Lee et al. Mater. Sci. and Eng. A. 2016, Vol. 657, p.115-122.
- 13) 高木康夫ほか. 軽金属学会第125回講演概要集. 2013, p.19-20.
- 14) 足立大樹ほか. まてりあ. 2022, Vol. 61, No.12, p.864-869.
- 15) 佐藤成男ほか. 鉄と鋼. 2018, Vol.104, No.4, p.201-207.
- 16) 越能悠貴ほか. 軽金属. 2018, Vol.68, No.4, p.201-205.
- 17) 越能悠貴ほか. 軽金属. 2019, Vol.69, No.3, p.180-185.

# (論文)

# 耐力500MPa級高強度7000系合金押出材の開発

福田大晃<sup>\*1</sup>·志鎌隆広<sup>\*1</sup>(博士(工学))·田畑広二<sup>\*1</sup>·石飛秀樹<sup>\*2</sup>·宇野木 諒<sup>\*3</sup>

# Development of High-strength 7000 Series Alloy Extrusion with 500 MPa Proof Strength

Hiroaki FUKUDA · Dr. Takahiro SHIKAMA · Koji TABATA · Hideki ISHITOBI · Ryo UNOKI

# 要旨

自動車に対する近年のさらなる軽量化ニーズから,耐力500 MPa級の高強度7000系アルミニウム合金を開発した。 通常,7000系合金では高強度化に伴って耐SCC性が低下する。本合金では,従来の耐SCC性改善手法に加え,高 温均質化処理による手法を取り入れ,強度と耐SCC性の相反する二つの特性をバランスさせた。高温均質化処理 により,晶出物に含有するCuがAlマトリクス中へ拡散し,晶出物とマトリクス間の電位差が減少するため,SCC の発生起点となる孔食の発生が抑制される。また本合金を自動車部品へ適用検討した事例を紹介する。バンパー レインフォースおよびドアビームでの断面最適化設計を行い,本合金を適用することで従来合金と比べてバンパー で7%,ドアビームで10%の軽量化を見込んだ。

# Abstract

A high-strength 7000 series aluminum alloy with a proof strength of 500 MPa class has been developed to meet the recent need for the further weight reduction of automobiles. Generally, in 7000 series alloys, stress corrosion cracking (SCC) resistance decreases as the strength increases. In the present alloy, high-temperature homogenization has been incorporated, in addition to the conventional methods for improving SCC resistance, to balance the opposing properties of strength and SCC resistance. The high-temperature homogenization diffuses Cu in the crystallized phase into the Al matrix, reducing the potential difference between the crystallized phase and the matrix, thereby suppressing the occurrence of pitting corrosion, which becomes the initiation site of SCC. This paper also presents examples of applying the present alloy to automotive parts. Cross-sectional optimization has been performed in the designs of the bumper reinforcement and door beam, and the application of this alloy has resulted in a weight reduction of 7% for the bumper and 10% for the door beam compared with the conventional alloy.

# 検索用キーワード

高強度, 7000系, 押出材, バンパーレインフォース, ドアビーム, SCC, 高温均質化処理, 断面設計, マスチック接着性

**まえがき**=近年の脱炭素社会の実現へ向けた世界の動向 を背景に,北米や欧州を始め国内でも,自動車における 厳しい燃費基準が設けられている<sup>1)</sup>。これに伴い,自動 車メーカでは,電動化の推進とともに電費および燃費向 上のために自動車車体の軽量化が進められている<sup>2)</sup>。こ こで車体軽量化のために,比強度の高い高張力鋼板 (High tensile steel:以下,ハイテンという)やアルミ ニウム(以下,アルミという)合金が使用される。とく にアルミ押出材は断面形状の自由度が高く,閉断面化や 中リブの設置および部位ごとの肉厚変化などが可能であ り,鋼板成形品にはない特徴がある。自動車の衝突時に 車体および乗員を保護するためのエネルギー吸収部材で あるバンパーレインフォース(以下,バンパーという) およびドアビームは,比較的先行して高強度アルミ合金 の適用が進んでいる部品である(図1)。日本国内のバ ンパーには高強度な7000系合金が高級車を中心に採用 されている。7000系合金の中でも,より高強度な合金の 開発が各社で進められてきた結果,現代ではバンパーに は耐力400 MPa級7000系合金が主流となっている<sup>3)</sup>。い っぽう近年では,ハイテンの高強度化も進み,アルミ押 出材との競争が激しくなっている。例えば,シミュレー ションを用いた性能比較によって,小型断面のバンパー



図1 バンパーレインフォースおよびドアビーム Fig.1 Bumper reinforcement and door beam

\*<sup>1</sup> 素形材事業部門 アルミ押出・サスペンションユニット アルミ押出・加工品工場 <sup>\*2</sup> 素形材事業部門 アルミ押出・サスペンションユニット \*<sup>3</sup> 技術開発本部 材料研究所 の場合にはハイテン、大型断面の場合にはアルミが軽量 化に対して有利であることが報告されている<sup>4)</sup>。そこで, 近年のさらなる軽量化ニーズと衝突安全基準の高まりに も応えるため、耐力500 MPa級7000系合金の開発に取 り組んだ。

7000系合金の応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking: 以下, SCCという) 感受性は, 一般的に高強度化に伴っ て高くなる<sup>5)</sup>。腐食環境下で高強度7000系合金の使用が 想定される場合, SCCへの対策が必須である<sup>6)</sup>。そして, 耐力500 MPa級の高い強度と耐SCC性を両立させるこ とは, 化学成分の調整を中心とした従来の手法<sup>7)</sup>だけ では困難であった。そこで本合金の開発にあたっては, 従来の耐SCC性改善手法に加え、製造工程ではビレッ トの均質化処理の高温化を取り入れ、強度と耐SCC性 の相反する二つの特性をバランスさせることにした。い っぽうで、開発合金をバンパーやドアビームなどの実部 品への適用を検討する中で、いくつかの課題も抽出され た。本稿では、高強度化と耐SCC性を両立するための 合金設計手法に関して述べるとともに,後半では実部品 への適用に際しての技術課題への取り組みについて紹介 する。

1. 合金コンセプト

# 1.1 成分検討

# 1.1.1 主成分(Zn, Mg)

表1に開発合金押出材の引張特性を示す。一般的な 押出用合金である7204の耐力は290 MPaであるのに対 し、現在当社では高強度7000系合金として耐力430 MPa 級の従来合金(Conventional alloy)を保有している。 開発合金 (New alloy) の耐力は500 MPa級であり、従 来材に対して約70 MPaの高強度化を達成した。ここで、 バンパーやドアビームのように中空部を有する断面に押 出加工する場合、ホローダイスを用いる(図2)。ホロ ーダイスでは中空部を形成する過程で、一度メタルが分 割されダイスチャンバー内で再度固相接合(溶着)され る。中実断面と比べて大きな塑性変形が加わるため、中

表1 開発合金押出材の引張特性(代表値) Table 1 Tensile properties of new alloy extrusion (typical)

Alloy	Temper	Yield Stress (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
New alloy	T5	500	540	13
Conventional alloy	T5	430	470	14
7204	Т5	290	345	15



Fig.2 Schematic of hollow die

空断面には押出加工性の良い合金を用いるのが通例であ る。とくにMg添加量の多い高強度合金を用いると、変 形抵抗が高く、溶着面における圧力が不足するため、溶 着が不十分となり中空断面の形成が困難となる。加え て、プレスの圧力限界やテアリング(割れ)などの表面 欠陥の発生も懸念されるため, 高強度合金の中空押出は 本来工業的には困難であった<sup>8)</sup>。開発合金の主成分であ るZn, Mg添加量を検討するにあたり、押出加工性の悪 化を最小限に抑えつつ高強度化を図ることを開発のコン セプトとした。図3に押出荷重に及ぼす各種添加元素 の添加量の影響を示す<sup>9)</sup>。ZnはMgやCuに比べて押出力, すなわち変形抵抗の増加をほとんど示さない。したがっ て、開発合金では変形抵抗増加への影響が大きいMg添 加量の増加を最小限とし、主にZn添加量を増やすこと で高強度化を図った。これにより、後述するバンパーや ドアビームなどのホロー断面を押出可能な加工性を維持 しつつ, 高強度化を達成した。いっぽうで, Zn添加量 の増大は耐SCC性の低下を招く<sup>10)</sup>ことから、従来7000 系合金と同等の耐SCC性を達成することを目標とし, 以下に述べる改善法を検討した。

# 1.1.2 微量添加元素(Zr, Cu)

図4にSCC発生の模式的機構を,また図5に結晶粒 界周辺の電位関係の模式図を示す<sup>6)</sup>。SCC発生メカニズ ムに関しては、陽極溶解説、水素ぜい化説、メカノケミ カル説など諸説<sup>11),12)</sup>あるが、当社では粒界析出物の陽 極溶解説に着目して開発を行っている<sup>7)</sup>。図4に示すよ うに、陽極溶解説では腐食環境において結晶粒界上の析 出物 (7000 系合金では η相 (MgZn<sub>2</sub>)) が優先的に溶解し, さらに継続的に引張応力が負荷されることでき裂が粒界 を伝ぱするとされる。図5に示すように、粒界に連続的 に析出した MgZn<sub>2</sub>は, PFZ (Precipitate Free Zone: 無 析出帯)を含む粒内に比べ電位が卑であるため、腐食環 境ではMgZn<sub>2</sub>が優先溶解する。このような陽極溶解説 に基づくき裂の発生・伝ばを抑制するものとして、Zrや Cuの微量元素添加による改善が過去からよく知られて いる<sup>6),7)</sup>。



一つ目の遷移元素Zrの微量添加では、表面再結晶を 抑制し、繊維状の微細組織を得ることを目的とする。 7000系合金にZrを添加した場合,分散粒子(Al<sub>3</sub>Zr)が 結晶粒界移動をピン止めすることで、表面再結晶の抑制 ならびに結晶粒の微細化に効果がある<sup>7)</sup>。図6に7000系 合金のSCC寿命におよぼす微量添加元素の影響<sup>13)</sup>を示 す。Zrは分散粒子によるピン止め効果が大きいため, SCCの長寿命化効果が比較的大きいことが分かる。押 出材でよく観察される、結晶粒が押出方向に伸長した繊 維状組織は, SCC に対して有効であることが知られてい る。例えば、表面再結晶粒の結晶粒界からSCCき裂が 発生した場合でも、内部の繊維組織部分でき裂進展が停 止している様子が観察されている<sup>12)</sup>。また,従来7000 系合金には結晶粒微細化を目的として Mn, Cr, Zr など が添加されてきたが、その中でも焼き入れ感受性の劣化 が小さいことからZrを選択した。

二つ目のCu添加の目的は、結晶粒界近傍の電位差を 小さくすることである。従来7000系合金のCu添加量は 0.15 wt% であるのに対し, 開発合金には0.3 wt% のCu を添加した。図7は開発合金押出材の結晶粒界ならび に粒界近傍のTEM-EDX分析結果である。結晶粒界上 にはMgZn<sub>2</sub>と推定される析出物が観察され,析出物に はCuが分析される。CuはMgやZnと比較して電位的 に貴な元素であるため、図8に示すように元々卑な MgZn<sub>2</sub>の電位を貴側に上げることができる。その結果, MgZn<sub>2</sub>とPFZおよび粒内との電位差は小さくなり、粒 界析出物の優先溶解を抑制することが期待される。ま た,結晶粒内にもCuが存在するため,粒内の電位も同 時に上昇することが考えられる。図7(d)のコントラ ストから、Cu濃度は粒内よりもMgZn2内の方が高いと 考えられるため、相対的にMgZn。の電位上昇の方が大 きいと推定される。MgZn2と粒内との電位差はさらに 小さくなることが期待される。









図6 7000系合金のSCC寿命に及ぼす微量添加元素の影響<sup>13)</sup> Fig.6 Effect of additional elements on SCC life of 7000 series alloy<sup>13)</sup>



図7 開発合金押出材の粒界のTEM-EDX分析結果 Fig.7 TEM-EDX analysis results of grain boundaries in new alloy extrusion



図8 Cuを添加した7000系合金の結晶粒界近傍の電位差変化の模式図

Fig.8 Schematic of potential difference change in vicinity of grain boundaries in Cu added 7000 series alloy

# 1.2 高温均質化処理による耐SCC性改善

図9に従来7000系合金,開発合金(従来均質化処理) ならびに開発合金(高温均質化処理)の3種類の合金の SCC発生臨界応力を示す。1.1.2項において、粒界析出物 の陽極溶解説に基づいた耐SCC性の改善法を述べた。 しかしながら耐力500 MPa級の開発合金においては、図 9に示すように、開発合金(従来均質化処理)のSCC 発生臨界応力は、従来7000系合金よりむしろ低くなり、 これらの手法だけでは、高強度化に伴う耐 SCC 性の低 下を阻止することはできなかった。そこで開発合金で は、新たなアプローチとして、均質化処理の高温化によ る組織制御を用いて、従来合金と同等の耐SCC性を達 成した。図10に開発合金押出材に発生した孔食から生 じたSCCの観察例(腐食試験法:クロム酸溶液による 促進試験)を示す。これは腐食環境において、晶出物 (Al<sub>3</sub>Fe) に対して電位の低い晶出物周辺のマトリック スが、優先的に溶解して生じた孔食を起点にSCCが発 生する場合があることを示す<sup>14)</sup>。この事実から著者らは 均質化処理の高温化は、SCCの発生起点となる孔食(= 孔食部が応力集中源となる)の数を減少させ、耐SCC 性の向上をもたらす効果があることを明らかにした。

図11に均質化処理の高温化によって増大する晶出物 からのCu原子の拡散を模式化した図を示す。また図12 に晶出物中のCu含有量と孔食電位との関係を示す。Cu が添加された7000系合金ではAl<sub>3</sub>Fe晶出物内に電位的に 貴なCuの濃度が高い。そこへ均質化処理の高温化を施 すと、 晶出物からマトリックス中へ拡散する Cu 原子が 増大し, 晶出物のCuの濃度が低下する。これにより晶 出物とマトリックス間の電位差が小さくなるため、孔食 の発生が抑制される。図12では均質化処理の高温化に よって晶出物中のCu濃度が低下すると、孔食電位が高 くなることを示している。ただし、均質化処理の過度な 高温化は、後述するように、結晶粒微細化を目的として 添加するZrの分散粒子を粗大化させる。再結晶抑制効 果の低下に伴って、耐SCC性を低下させる場合がある。 さらに、均質化処理の過度な高温化は、押出材の結晶粒 の伸長度を小さくすることが知られている。とくに押出 方向に対して平行に応力を負荷した場合に, 粒界に掛か る応力が高くなり、耐SCC性を低下させる恐れがあ







図10 開発合金押出材の孔食から発生したSCC(押出材表面から 観察)

Fig.10 SCC caused by pitting corrosion in new alloy extrusion (observed from surface of extrusion)



図11 高温均質化処理による晶出物変化の模式図 Fig.11 Schematic of crystallized phase change caused by high temperature homogenization treatment



る<sup>15)</sup>。したがって均質化処理には,最適な熱処理温度を 選ぶ必要がある。

最適な温度にまで高温化した均質化処理を含め,ここ までに紹介した複数の改善法を組み合わせることで,図 9に示すように,開発合金は従来7000系合金と同等の 耐SCC性を達成した。

# 1.3 粗大再結晶による製品3点曲げ時の破断抑制

ここでは均質化処理を過度に高温化した場合に、製品 性能が低下した事例を示す。エネルギー吸収部材ドアビ ームの製品性能評価法である3点曲げ試験を,模式図と して図13に示す。均質化処理を過度に高温化した初期 試作品では,3点曲げ試験において目標のストローク長 (300 mm) に達する前に早期にドアビームは分断した。 図14に、早期に破断したドアビームの断面マクロ組織 および破断部周辺の観察写真を示す。断面マクロ組織写 真では、フランジの端部に粗大な再結晶粒が観察され、 このような粗大再結晶粒の領域が,3点曲げ試験におい てき裂の発生起点になっていた。これは1.2節で述べた ように均質化処理を過度に高温化したことで、結晶粒の 微細化を目的として添加した Zr の分散粒子が粗大化し たのに伴って、結晶粒界移動のピン止め効果が低下した ことによるものと推察される。対策として過度に高温化 していた均質化処理を約20℃程度低温側に戻すことで、 再結晶の発生ならびに結晶粒界の移動を抑制した。その 結果、エネルギー吸収部材ドアビームの製品性能評価法 である3点曲げ試験において、目標特性を達成すること ができた。

# 2. 部品への適用

ここからは自動車部品のバンパーおよびドアビームへ の適用検討例を紹介する。

# 2.1 バンパー

#### 2.1.1 断面設計

自動車正面および後方衝突時のエネルギー吸収部材で あるバンパーには、部品性能として曲げ強度が求められ る。従来のバンパーには衝突時の座屈変形を抑制するた め、中リブを有する「日」の字断面をベースにした形状 が多く採用されている。しかしながら、中リブは押出中 の過酷な塑性加工によって発熱が大きいことに加え、押 出ダイスとの摩擦により焼付きやテアリングが生じやす い<sup>16)</sup>。そのため高強度の開発合金を適用した押出品にお いて、従来の「日」の字断面形状を適用した場合、押出 速度が制限され、生産性を低下させる恐れがあった。そ こで、開発合金では押出性を考慮して、衝突側フランジ にビードを設けた「口」型断面とした。

つぎに当社で開発した断面最適化設計手法<sup>4)</sup>を用い て,合金種による軽量化効果を比較した。表2に比較 に用いた超ハイテン鋼板2種(MS1500,MS1700)とア ルミ押出材3種(6000系合金,7000系従来合金,開発合 金)の引張特性を示す。バンパーの曲げ崩壊モーメント M<sub>cr</sub>が15kN・m以上という条件で,それぞれのバンパー が最軽量となる断面形状(鋼板は板厚変更のみ)を求め た。なお,外形寸法はH:125 mm×L:80 mmとして, 鋼板の板厚t,押出材の衝突側フランジ肉厚t<sub>1</sub>,取付側





表2 鋼板およびアルミ押出材の引張特性 Table 2 Tensile properties of steel sheet and aluminum extrusion

Material	Yield Stress (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
MS1500	1,280	1,570	6
MS1700	1,540	1,780	5
6000 series alloy	240	260	13
Conventional alloy	430	470	14
New alloy	500	540	13



High temperature homogenization

図14 初期試作品の断面マクロ写真および破断部周辺の観察 Fig.14 Photograph of cross section and observation of the area around the fracture of early prototype

フランジ肉厚 $t_2$ ,上下面ウエブ肉厚 $t_3$ ,中リブ肉厚 $t_4$ ,取付側フランジ高さh,衝突側ビード高さ $H_b$ を最適化 パラメータとして変化させた。

図15にそれぞれの最軽量断面ならびにバンパー長さ を1.2 mとした場合の重量(kg)を示す。多くの採用実 績のある7000系従来合金は,超ハイテン鋼や6000系合 金と比較して30%以上の軽量化が見込める。開発合金 では、さらに7%程度軽量化でき、トータルで40%以上 の軽量化が期待できる。なお、まえがきで述べたように、 アルミ押出材の軽量化効果は断面サイズによって変化す る<sup>4)</sup>。本検討のように、外形寸法がH:125 mm×L: 80 mmと比較的大きい場合、軽量化に対してアルミ押 出材が有利であるといえる。

# 2.2 ドアビーム

#### 2.2.1 断面設計

ドア内部のエネルギー吸収部材であるドアビームへの 開発合金の適用を検討した。ドアビームの性能は,前述 した3点曲げ試験(図13)において,所定の曲げ荷重 を有し,かつ150mmのストロークで従来材に比べ,荷 重低下をしないこと,および300mmストロークで分断 しないことが求められていた。図16に開発合金専用に 設計したドアビームの断面形状を示す。7000系従来合金 の耐力430MPa合金の製品と同じ外形寸法内で,従来 材と同等の曲げ強度となるように薄肉化した断面形状を 設計した。初期の設計段階において,目標の押し込みス トローク150mmに到達する前に,断面の座屈が確認さ れ,早期の荷重低下が懸念された。この要因として軽量



図15 断面を最適化設計した各合金種による軽量化効果の比較 Fig.15 Comparison of weight reduction effects of various alloys with optimized cross-sectional designs



図16 開発合金専用に設計したドアビーム断面形状 Fig.16 Optimized door beam cross-sectional shape for new alloy



Fig.17 Load-displacement curve of three-point bending test

化のために断面肉厚を薄肉化したこと、また従来7000 系合金と比べて加工硬化指数(n値)が小さく局所変形 を生じやすいことが考えられた。対策として衝突側の内 側コーナーRを拡大することで、断面の座屈変形を遅ら せ、薄肉化による軽量化効果を損なうことなく、早期座 屈による荷重低下を低減した。ただし、内側コーナーR を拡大することで,300mmストロークでの車体側から の分断リスクは増加するが、車体側の塑性ひずみを衝突 側よりも小さくすることで、車体側からの分断割れは発 生しない設計とした。図17に、開発合金で、ドアビー ム断面形状の改良後の3点曲げ試験荷重-変位曲線を示 す。改良後の断面で、開発合金は、150mmストローク まで荷重低下なく、かつ300mmストロークまで分断す ることなく曲がることを可能にした。開発合金を採用す ることで、4ドアを想定したドアビームで、従来7000系 合金と比較して約10%の軽量化が図れる。

# 2.2.2 マスチック接着性の改善

ドアビームは、自動車のドア内部に組み付けられる。 接合方法にはブラケットを用いた機械締結が主に用いら れる。これに加えてドア外板の張り剛性向上や防振を目 的に、マスチック接着剤による外板との接着も施され る。したがってマスチック接着性も評価項目の一つであ る。マスチック接着性の評価は、図18に示すマスチッ ク接着試験によって行う。材料表面同士を接着しせん断 応力を加えた場合、材料表面と接着剤の界面で剥離が起 こるか否かを評価する。図19に試験例を示すように、 一部でも界面剥離が起こるとNG判定となる。従来7000 系合金では接着性が問題視されることはなかった。しか しながら開発合金は、湿潤暴露後の試験において界面剥 離が発生しNG判定となった。接着性が低下した原因は、 押出材表面の酸化被膜へのMgの濃縮であった。図20 に従来7000系合金ならびに開発合金のGD-OESによる



Fig.18 Schematic of mastic adhesion test



図19 接着剤の界面剥離の例 Fig.19 Example of adhesive interfacial peeling



Fig.20 GD-OES analysis results of Mg concentration on the surface

押出材表面から深さ方向に測定したMg濃度分布を示 す。熱間押出加工中に材料表面にMgが拡散し,とくに 熱間で生成した表面酸化被膜にはMgが濃縮する。開発 合金は,1.1.1項に既述したように従来合金と比べてMg 添加量が多いため,表面のMg濃度も高くなることが分 かった。そして湿潤環境ではMgの加水分解が起こるこ とで接着性を劣化させているものと推定した<sup>17)</sup>。Mg濃 縮層は表面から深さ100 nm 程度である。したがって機 械研磨や酸洗などにより表層をわずかに除去すること で,開発合金のマスチック接着性は改善可能である。

**むすび** = 本稿では,耐力500 MPa級の高強度7000 系開 発合金に関する要素技術と自動車部品への適用検討事例 について紹介した。開発合金は強度と耐SCC性の高次 元での両立を可能にし,かつ中空断面を押出可能な加工 性を兼ね備えた押出用合金として,おおむね技術的な目 途付けが完了した。現在バンパーおよびドアビームへの 採用に向けた拡販活動を行っている。本合金が今後さら なる自動車の軽量化に貢献し,将来のカーボンニュート ラル実現への一助となることを期待する。

# 参考文献

- 1) 大須賀竜治. 自動車交通研究 環境と政策. 2021, p.76-78.
- 2) 中沢 靖. 軽金属. 2017, Vol.67, No.4, p.118-124.
- 4) 史棟 勇ほか. 自動車技術会論文集. 2022, Vol.53, No.4, p.796-801.
- 5) 平野正和. 軽金属. 1991, Vol.41, No.7, p.477-484.
- 6) 志鎌隆広ほか. アルトピア. 2024, Vol.54, No.7, p.9-14.
- 7) 志鎌隆広ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.90-93.
- 8) 日本塑性加工学会編. 押出し加工. コロナ社, 1992, p.70-80.
- 9) A. F. Castel et al. Aluminum, 1977, Vol.53, p.535-539.
- 10) 馬場義雄. 軽金属. 1974, Vol.24, No.5, p.227-238.
- 11) 平野正和ほか. 材料. 2000, Vol.49, No.1, p.86-91.
- 12) 村上陽太郎. 軽金属. 1981, Vol.31, No.11, p.748-757.
- 13) 平松剛毅ほか. 軽金属. 1973, Vol.23, No.5, p.210-217.
- 14) 村上陽太郎ほか. アルミニウム材料の基礎と工業技術. 日本アル ミニウム協会, 1985, p.197-200.
- 15) 平野正和. 博士論文. 熊本大学, 2000, p.17-28.
- 16) S. Ngernbamrungほか. 軽金属. 2018, Vol.68, No.12, p.660-666.
- 17) 氷室雄也ほか. 自動車技術会論文集. 2012, Vol.43, No.2, p.543-548.

# (技術資料)

# 自動車生産向け新アルミ接合技術(抵抗スポット溶接, 摩擦撹拌接合,DASW)の開発

後藤崇志\*1·奥田真三樹\*2·戸田 要\*3

# Development of New Aluminum Joining Techniques for Automobile Manufacturing (Resistance Spot Welding, Friction Stir Welding, Dissimilar Metals Arc Spot Welding)

Takashi GOTO · Masaki OKUDA · Kaname TODA

# 要旨

本稿では、当社が取り組むアルミニウム(以下、アルミと記載)向け接合技術の開発例として、抵抗スポット溶接、 摩擦撹拌(かくはん)接合、および異種金属アークスポット溶接(DASW: Dissimilar metals Arc Spot Welding) に関する技術の概要と改良例を解説する。抵抗スポット溶接では通電時間が接合強度の安定化に影響することが わかり、これによりアルミ抵抗スポット溶接部の信頼性向上が期待できる。摩擦撹拌接合では不可避的に発生す るバリを"一工程で除去"しつつ接合できる新設計のツールを見出した。また、DASWは異種金属接合の新たな アプローチとして既存のアーク溶接機を活用しながら高強度の接合を可能にする技術であり、接合部の継手強度 は、アルミ抵抗スポット溶接のJIS規定強度を上回った。

# Abstract

This paper gives an overview and examples of the improvement of aluminum joining technologies developed by Kobe Steel in such areas as resistance spot welding (RSW), friction stir welding (FSW), and dissimilar metals arc spot welding (DASW). It has been found that in resistance spot welding, the weld time affects the stability of the joining strength, which is expected to improve the reliability of the aluminum resistance spot weld. For friction stir welding, a newly designed tool has been confirmed to remove burrs, which inevitably occur, in one step while joining. Additionally, DASW is a new approach to dissimilar metals joining, a technology that enables high-strength joining while utilizing existing arc welding machines. The DASW joint strength exceeds the strength specified by JIS for aluminum resistance spot welding.

#### 検索用キーワード

アルミ合金,抵抗スポット溶接,摩擦撹拌接合,異種金属接合,アーク溶接,継手強度

まえがき=現代社会において、地球環境への配慮は避け ては通れない課題であり、とくに自動車産業における温 室効果ガス(CO<sub>2</sub>)を含む環境負荷物質の削減は重要視 されている<sup>1)</sup>。自動車の燃費向上は、この課題に対処す るための主要なアプローチとされている。自動車の燃費 向上には、素材を鋼材から軽量なアルミ材へ置換するこ とが有効である<sup>2)</sup>。しかしながら、この素材置換は、自 動車組み立ての接合工程に影響を与える。とくに、アル ミ材の熱軟化、および鋼材との異種金属接合時に形成さ れる硬くもろい金属間化合物に起因する接合強度の低下 など、多くの課題が存在する。例えば、アルミ材の抵抗 スポット溶接では、鋼材の抵抗スポット溶接と比較して 接合強度が不安定になりやすいことが課題である<sup>3)</sup>。摩 擦攪拌(かくはん)接合では、外観に悪影響を及ぼす接 合時のバリ発生が課題の一つとして挙げられる<sup>4)</sup>。いっ ぽう, アルミ材と鋼材の異種金属接合では, Self Piercing Rivet (SPR) やFlow Drill Screw (FDS) とい った機械的締結法が用いられる。しかしながら、これら の技術は専用設備を必要とし、コストが高くなることが 課題である5)。

本稿では,これらアルミ材接合技術の課題に対処する ための技術開発について紹介する。

# 1. 抵抗スポット溶接

# 1.1 抵抗スポット溶接の基本原理と課題

抵抗スポット溶接は、被溶接材料を水冷銅電極で挟ん で加圧し、ここに数kA~数+kAの大電流を瞬間的に 流すことで溶接部に発生するジュール発熱を熱源とする 溶接方法である<sup>6)</sup>。この技術の主要な特徴として、高い 生産性、リベットといった副資材が不要であることなど が挙げられる。これらの特徴を活かし、自動車の車体組 み立てにおいて広く利用されている。鋼材と比較しアル ミ材は熱伝導率が高く、低い電気抵抗率を有するため、 短い通電時間と高い溶接電流が必要となる。

ここで、鋼材同士とアルミ材同士の抵抗スポット溶接 の比較から、アルミ材の接合強度の安定性が劣ることが 明らかにされている<sup>3)</sup>。とくに、接合面に対して垂直方 向に剥離する場合の強度の安定性が劣ることが示されて おり、溶接径と強度の関係は必ずしも一致しないことが 確認されている<sup>7).8)</sup>。この現象は、溶接径以外の未解明

<sup>\*1</sup> 技術開発本部 ソリューション技術センター \*2 事業開発部 \*3 溶接事業部門 技術センター 溶接開発部

の因子が強度に影響していることを示唆しており,この 因子の同定と強度の安定化が求められていた。

# 1.2 通電時間の適正化による十字引張強さの安定化と そのメカニズム

供 試材 に は, AA6022 相 当 ア ル ミ 合 金 板材(板厚2 mm)を用いた。溶接には, R形(電極径 19 mm, 先 端曲率半径 100 mm, クロム銅製)の電極を用いて, JIS Z 3137 に準拠し十字引張強さ(Cross tension strength, 以下 CTS と記載)を評価した。

図1に、溶接中の電極加圧力は5kN,溶接後の電極 加圧力(鍛圧)を8kNとした条件で通電時間の変化が CTSに与える影響を示す。通電時間が75~100msecの 範囲でCTSが高い水準で安定した。通電時間がこの範 囲より短くなるとCTSが低下した。これは、通電時間 を過度に短くしたことで溶融が安定せず溶接径が低下し たためと考えられる。また、通電時間が過度に長い場合 も同様にCTSが低下することが確認された。これらの ことから、通電時間には適正範囲が存在すると考えられ る。

筆者らは、CTSに与える通電時間の影響として,通電時間を200 msecに設定し,その後に400 msecにわたり 溶接電流値を直線的に低下させるダウンスロープを適用 した「過剰通電」と,通電時間を100 msecに設定した「適 正通電」という条件下でビッカース硬さをナゲット内部, 端部において比較した<sup>9</sup>。過剰通電の場合,同一の溶接 条件で作成された試験体において、ナゲット内部のビッ カース硬さのばらつきが,適正通電と比較し相対的に大



Fig.1 Relationship between weld time and cross tension strength



上記の過剰通電でナゲット端の熱影響部のビッカース 硬さが低下した要因について、結晶粒径、および析出物 の観点から調査した。図2にナゲット端近傍の断面マ クロ写真を示す。ナゲット端の熱影響部の結晶粒径に有 意な差は見受けられなかった。ナゲット端の熱影響部の 結晶粒径に着目した理由は、十字引張試験時の破断進展 経路がナゲット端部を通過するプラグ破断であったため である。次に、ナゲット端部のEPMA 観察結果を図3 に示す。 Si,およびMgマッピングの結果から、析出物 はMg<sub>2</sub>Siだと考えられ、ナゲット端部,および縁のビッ カース硬さの変化はMg<sub>2</sub>Siの分散状態に起因するものだ と推定した。

過剰通電では,長い通電時間とダウンスロープの適用 により冷却速度が低下し,それに伴い強度に寄与しない 粗大な析出物がナゲット端,および縁部で多く析出し た。この結果,これら部位における溶質元素の固溶量が 低下し,過剰通電では適正通電と比較してビッカース硬



図3 ナゲット端部のEPMA画像 Fig.3 EPMA images of nugget edge



図2 ナゲット端部の断面マクロ写真 Fig.2 Cross section photos near nugget edge

さが低下したと考えられる。したがって、この硬さ低下 により、低い荷重で破断が発生したものと推察された。

過剰な通電時間がCTSの低下を引き起こすことを明 らかにし、そのメカニズムを調査した。これらの知見が、 自動車生産の抵抗スポット溶接における条件適正化に活 用されることを期待する。

# 2. 摩擦攪拌接合

## 2.1 摩擦攪拌接合の基本原理と課題

図4に摩擦攪拌接合の概略図を示す。摩擦攪拌接合 は回転させた摩擦攪拌接合ツールを下げつつ、力を加え ることで材料に挿入し、ツールから材料に圧力をかけた まま材料内を移動することで二つ以上の材料を塑性流動 させながら攪拌し、接合させる方法である。材料を溶融 させずに攪拌するため、接合に要するエネルギーが少な い。摩擦攪拌接合は、この特徴を活かし、CO<sub>2</sub>排出量削 減の観点からも適用の増加が期待される。とくにアルミ 材の摩擦攪拌接合においては、安価な工具鋼を用いたツ ールが使用できるため、近年適用が拡大している。

図5に摩擦攪拌接合を適用し、アルミ材を突合せ接 合したサンプルの外観写真を示す。摩擦攪拌接合では、 材料を塑性流動により攪拌させるために、ツールを材料 に押し付ける。ツールには攪拌された材料があふれない ように保持する機構(ショルダ)を有しているが、加圧 力などの施工条件が適正でないと攪拌された材料の一部 は攪拌部からあふれ、バリとして接合部端部に残留す る。バリは製品の外観や安全性などに悪影響を与えるた め、一般的には接合後に切削もしくはブラシなどにより 除去される。



図4 摩擦攪拌接合の模式図 Fig.4 Schematic view of friction stir welding



**Fig.5** Appearance photo after friction stir welding

#### 2.2 摩擦攪拌接合におけるバリの発生傾向

摩擦攪拌接合におけるバリはツールの形状、材料への 押込み量や荷重, また施工における接合速度や回転数な どの接合条件などが発生要因であるが、とくに材料への ツールの押込み量はバリの発生量に大きな影響を与え る。図6に、ツール進行方向と回転方向が同じ方向に なる Advancing Side (以下, ASと記載) における押し 込み量とバリの高さの関係を示す。押し込み量が増える につれてバリの高さが大きくなることがわかる。 ツー ル進行方向と回転方向が逆方向になる Retreating Side (以下, RSと記載)においても、押込み量はバリの高さ に影響するが、ASよりもその傾向は小さい。また、一 般的に摩擦攪拌接合した接合体を観察すると、ツールの 投影形状に比べて、実際の接合部の減肉は小さい。これ は、RSでは流動した材料がツールの外側でバリになる が、材料の一部は回転するツールへの凝着などにより、 攪拌部後方の接合部内に引き込まれるためと推定され る。ある程度の傾向はあるものの、バリの発生は複合的 な要因による複雑な材料流動によるため、完全に抑制す ることは難しい。

#### 2.3 切削チップ付き摩擦攪拌接合ツール

バリは後工程での切削などで除去できるものの,その ぶん工程数は増加する。この後工程を省略するために, 切削チップを摩擦攪拌接合ツール内部の適切な位置に配 置し,接合とバリの除去を同時に実施できる切削チップ 付き摩擦攪拌接合ツールを開発した。図7に概要図を 示す。切削チップ付き摩擦攪拌接合ツールは,ショルダ ー部が二段になっている。プローブ側から二段目のショ ルダー部に平らに削られた部位があり,そこに切削チッ プを取り付けている。回転すると一段目,二段目にて材 料を摩擦攪拌させ,さらに二段目ではあふれ出た材料を 切削して除去することができる。図8に一般的なツー ルと開発ツールを用いた接合体の外観と断面マクロ画像 の例を示す。一般的な摩擦攪拌接合ツールではバリの残



図6 バリ高さに及ぼすツール押し込み深さの影響 Fig.6 Relationship between plunge depth and burr height



図7 切削チップ付き摩擦攪拌接合ツール Fig.7 Friction stir welding tool capable of cutting

存が認められるが,開発ツールではバリの除去が確認された。本ツールを用いることで,工程数を増やさずにバ リのない接合体を得ることが可能となる。

# 3. DASW (Dissimilar metals Arc Spot Welding)

# 3.1 DASWのメカニズム

図9にDASWのメカニズムを示す。上に予備加工穴 を設けた鋼材、下にアルミ材を重ねて配置する。つづい て、上の予備穴部を介して下のアルミ材を狙い、アルミ 溶接ワイヤを用いたアークスポット溶接によって下板の アルミ材を溶かしながら、アルミ溶接ワイヤから溶融ア ルミを予備穴内部に供給する。さらに予備穴を覆うよう に溶融アルミを鋼材表面にぬれ広がらせ、傘状の溶接金 属とアルミ材が鋼材を嵌合(かんごう)することで接合 が達成される。アーク溶接時間(アークタイム)はおお むね1.0~2.0秒程度である。本手法では接合時に鋼材よ りも融点の低いアルミ材を溶融させるため、鋼材の溶融 量は少なく、脆性(ぜいせい)的な金属間化合物の生成 は抑制される。また、嵌合の接合機構をとるため継手強 度には溶接金属の形状が主に影響しており、鋼材とアル ミ材の界面に生じる金属間化合物の継手強度への影響は 小さいと考えられる。

DASWの適用を想定する材料組合せの例として、上 には超ハイテン鋼材や亜鉛めっき鋼材、ステンレス鋼材 といった予備穴加工が可能な鋼系の材料、下には圧延板 材、押出材、ダイキャストといった溶融溶接可能な種々 のアルミ系の材料が挙げられる。接合原理上、アルミ材 の溶接金属が接合強度の主な支配因子となるため、アル ミの母材および溶接ワイヤの機械的特性が継手強度に与 える影響が大きい。また、鋼材の変形能が低い場合、接 合部にかかる曲げモーメントが小さくなり、継手強度が 高くなる傾向がある。溶接時は、アルミ溶接ワイヤから 供給される溶融アルミとアルミ母材間、および溶融アル ミと鋼材表面間の濡れ性の違いから、形成される溶接金 属の形状(余盛形状)が異なるため、材料の組合せに応 じた溶接条件の調整が必要である。

DASWの接合上の利点として、片側アクセスがあげ られる。上向き、立向きを含む全溶接姿勢にも対応して いることから、設計や生産における自由度が高い。また、





(b) General friction stir welding tool

図8 接合体の断面マクロと外観写真 Fig.8 Cross-Sectional and surface photographs of aluminum specimens after friction stir welding

一般的なアルミ材の施工が可能なアーク溶接機とアルミ 溶接ワイヤを使用できる。 接合前プロセスは鋼材への 予備穴加工のみであることから,既存の装置や技術を活 用した安価でシンプルな異種金属接合法であるといえ る。

## 3.2 継手強度特性

DASWの継手強度は, JIS Z 3136に準拠した引張せん 断試験, JIS Z 3137に準拠した十字引張試験により評価 した。引張せん断強さ (Tensile shear strength, 以下 TSSと記載)の基準には, JIS Z 3140:2017アルミ合金 のスポット溶接部の引張せん断強さ B級 平均値, CTS の基準にはTSSの基準の0.5倍の値を用いた。

供試材には270 MPa級鋼板(板厚1.4 mm), AA6022 相当アルミ合金板(板厚2.0 mm)を用いた。 **表1**に示 すA~Dの四種類の継手を作製し,溶接金属の形状が継 手強度に及ぼす影響を調査した。溶接金属の形状のう ち,溶接径は予備穴径を変えることで,表裏余盛高さ  $h_1, h_2$ はそれぞれ溶融亜鉛めっき鋼板(継手D),鋼製の バックプレート(継手B)を使用することで調整した。 なお,溶接径と予備穴径はおおむね一致することを確認 している。溶接条件は,いずれもアルミ溶接ワイヤJIS Z 3232 A5356-WY(ワイヤ径 $\phi$ 1.2 mm)を用い,溶接電 流156 A,アークタイム2.0 sec,シールドガス100%Ar のパルスミグ溶接とし,溶接中のワイヤ狙い位置は予備 穴中心で固定した。

図10に試験結果を示す。継手Aと継手Bを比較した 結果,継手Aよりも予備穴径が大きく溶接径が大きい 継手Bの方が,TSSが約50%高くなり,CTSは数%高く なった。これは同一の負荷荷重において溶接断面にかか る応力が小さくなったためと考えられる。つぎに,継手 Cと継手Dを比較した結果,表余盛が高い継手Cが, TSS,CTSともに高くなった。破断形態の違いから,表 余盛高さh<sub>1</sub>が高い場合,表余盛に負荷される応力が小さ くなり,表余盛方向へのき裂進展が抑制されることで継 手強度が向上したと考えられる。また,継手BとCを比 較した結果,裏余盛高さh<sub>2</sub>が高いと,TSS,CTSともに 高くなった。これは,裏余盛がアルミ板を補強する効果 をもたらしたためと考えられる。

以上から、DASWの継手強度には溶接金属形状が影響



図 9 DASWのメカニズム Fig.9 Joining mechanism of DASW

表1 継手特性 Table 1 Joint characteristics

		able i John Characterik	5005	(Unit : mm)
	Joint A	Joint B	Joint C	Joint D
Pre-hole dia.	5.0	7.0	7.0	7.0
$h_1$	2.9	2.8	2.4	0.8
$h_2$	0.0	0.0	1.8	2.7
Note	-	With Backplate	-	GI Steel



を与えており,継手強度向上には溶接径および表裏の各 余盛高さの増大が効果的であることが示された。また, 予備穴径φ7.0 mmとした場合,いずれの条件において もアルミ材の抵抗スポット溶接のJIS基準強度以上の継 手強度を得ることができた。実際の適用にあたっては, 余盛の大きさの制約や継手強度などの要件に応じて溶接 条件を選定するのが好ましい。また,レーザ変位計など を用いて余盛形状を測定し分析することで,おおよその 継手強度を非破壊で予測することも可能である。

**むすび**=自動車製造における新たなアルミ接合技術について,抵抗スポット溶接,摩擦撹拌接合,および異種金属接合法DASWの三つの方法を解説した。

抵抗スポット溶接では、通電時間の適正化が継手強度 向上に寄与することを把握できた。摩擦撹拌接合では、 新開発ツールによるバリ除去工程省略の可能性を見出す ことができた。異種金属接合であるDASWでは新たな アプローチとして、既存の設備を活用しつつ、簡便で強 度の高い接合を実現する方法を提案できた。 本稿で紹介した接合技術の改良が,自動車車体および 関連部材の軽量化に寄与し,環境負荷物質の削減に貢献 できることを期待する。

- 参考文献
- 西野浩介.三井物産戦略研究所.世界で強化される自動車燃費規 制とその影響.https://www.mitsui.com/mgssi/ja/report/detail/ \_\_icsFiles/afieldfile/2016/10/20/150706i\_nishino.pdf,(参照2022-12-14).
- 2) 櫻井健夫. 軽金属. 2018, Vol.68, No.9, p.487-493.
- 3) 今村美速ほか. 溶接学会論文集. 1995, Vol.13, No.1, p.54-64.
- 4) 下田陽一朗ほか. R&D神戸製鋼技報. 2023, Vol.72, No.1, p.123-129.
- 5) 鈴木励一. 溶接学会誌. 2019, Vol.88, No.4, p.240-246.
- 6) 溶接学会軽構造接合加工研究委員会. 薄鋼板及びアルミニウム合 金板の抵抗スポット溶接. 産報出版, 2008, p.7.
- 7) 佐橋賢治ほか. 溶接技術.2018, Vol.66, No.3, p.59-64.
- 8) 青木拓朗ほか. R&D神戸製鋼技報.2019, Vol.69, No.1, p.88-91.
- 9) 後藤崇志ほか. 溶接学会誌.2023, Vol.92, No.6, p.387-391.
- 後藤崇志ほか.第133回軽構造接合加工研究委員会講演資料.
   2021-6-2,溶接学会軽構造接合加工研究委員会,2021,MP-696-2021.

(技術資料)

# サーキュラーエコノミー実現に貢献する異種金属接合技術 - SP-ray<sup>™</sup>-

前田恭兵\*1(博士(工学))

# Dissimilar Metal Joining Technology, SP-ray<sup>™</sup>, for Realizing Circular Economy

Dr. Kyohei MAEDA

## 要旨

近年,サーキュラーエコノミー実現のため,産業界において材料のリサイクルが一層重要視されている。自動車 における異種金属の接合法としては,機械締結法が主流である。これらは高い継手強度が得られる反面,接合部 を解体する作業が煩雑であり,リサイクルに必要となる材料分別の観点では最適な接合法とは言えない。このよ うな背景から,高い継手強度を実現しつつ,易解体性を有する異種金属接合法として,コールドスプレー皮膜を 中間層として利用したレーザ接合技術SP-ray<sup>™</sup>を開発した。本稿では,SP-ray<sup>™</sup>継手において機械締結法と同等 の継手強度が得られること,熱処理により鋼部とアルミニウム部とを分離可能であることを明らかにしたので, その結果を紹介する。

#### Abstract

The industrial sector has recently placed increasing importance on material recycling to realize a circular economy. Mechanical fastening is the mainstream jointing method for dissimilar metals in automobiles. Although this method assures high joint strength, disassembly of these joints is complicated. It is not the optimal jointing method from the viewpoint of the material separation required for recycling. Against this backdrop, a laser joining technology, SP-ray<sup>TM</sup>, which uses cold spray coating as an intermediate layer, has been developed as a dissimilar metal joining method that achieves high joint strength together with assuring ease of disassembly. This paper presents the results which show that SP-ray<sup>TM</sup> joints can achieve joint strength equivalent to that achieved by mechanical fastening, and that heat treatment renders the steel and aluminum parts separable.

# **検索用キーワード** 高張力鋼,アルミニウム合金,異種金属接合,レーザ,コールドスプレー,解体性,サーキュラーエコノミー,リサイクル

まえがき=世界的に脱炭素社会の実現に向けた取り組み が推進されており、欧米や日本では2050年カーボンニ ユートラル(以下CNと記載する)を目指すとされてい る<sup>1)</sup>。自動車は鉄道や船舶と比較して,単位輸送量あた りのCO<sub>2</sub>排出量が多く、日本における総排出量の約15% を占める<sup>2)</sup>。ゆえに,自動車が地球温暖化に与える影響 は大きく、より一層のCO2排出量低減が求められている。 そのような背景から、近年自動車の電動化が進んでお り、モータのみで走行する電気自動車(以下EVと記載 する)が急速に普及しつつある。EVは走行時の環境負 荷低減が小さいいっぽうで、従来の内燃機関自動車と同 等の航続距離を確保するためには,60~100 kWh レベル の大容量電池を搭載する必要がある<sup>3)</sup>。大容量電池は高 重量であるため、動力性能を低下させることから、バッ テリーを含む車体全体での軽量化がEVにおける課題の ひとつとなっている<sup>3),4)</sup>。

自動車の大半は鋼製部品で構成されていることから, 鋼板を高強度化し,部品板厚を低減することによる軽量 化が図られている。最近では,とくに欧米の高級車を中 心にアルミニウム合金などの軽量な材料を高強度鋼板と 併用するマルチマテリアル構造が普及している。例え ば、アルミニウム合金の板材はフードやドアなどの蓋物 部品、押出材はバンパーレインフォースやドアビームな どの補強部品、ダイキャスト材はサスペンションタワー やサブフレームなど複雑な形状を有する部品へそれぞれ 適用されている<sup>5).6)</sup>。EVでは、バッテリーケースにア ルミ押出材やダイキャスト材が積極的に活用されてい る<sup>7).8)</sup>。

マルチマテリアル車体の製造における課題の一つが異 種金属接合である。従来,鋼製車体の組み立てでは抵抗 スポット溶接やレーザ溶接が使用されてきたが,鋼とア ルミニウム合金を溶接すると,FeAl<sub>3</sub>やFe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>などの脆 弱(ぜいじゃく)な金属間化合物(IMC)が生じ,高い 継手強度を得ることが困難である。そのため,現在では 接合部を溶融させない機械締結を用いるのが一般的であ る。最も普及している接合法は,図1に示すSPR(Self-Piercing Rivet)とFDS<sup>®</sup>(Flow Drill Screw, EJOT GmbH & Co. KGの登録商標)である。車種によって異なるが, 車体1台の製造につき,SPRは数千点,FDS<sup>®</sup>は数百点 用いられている。SPRはパンチとダイを使用してリベッ トを被接合体へ打ち込む接合法であり,近年では高強度 鋼板を含む板組に対しても対応可能となっている。いっ

\*1技術開発本部 ソリューション技術センター (現 技術戦略企画部)



図 1 (a) SPR, (b) FDS<sup>®</sup>のプロセス模式図 Fig.1 Schematic illustrations of (a) SPR, (b) FDS<sup>®</sup>

ぼうで、アルミ押出材のような中空部品に対しては、パ ンチやダイを空間内部に挿入するのが困難となり、適用 できない場合がある。このような材料に対しては、片側 アクセスの接合法であるFDS<sup>®</sup>が用いられる。FDS<sup>®</sup>は ロバスト性が高く、強度が安定するメリットを有する反 面<sup>3)</sup>,接合時間が2~3秒程度と比較的長いこと<sup>9)</sup>,高 強度鋼板に対しては下穴を設ける必要があること、接合 部でネジの頭部と軸部がともに飛び出すためフラットな 面が得られないことなどの課題がある。しかしながら、 自動化可能な片側アクセスの接合法は限られ、現状高強 度鋼板とアルミニウム合金中空部品の接合ではFDS<sup>®</sup>を 使用するのが主流となっている。

材料のリユース、リサイクルもマルチマテリアル構造 における大きな課題である。自動車におけるCO2排出量 を評価する際,走行時の排出量のみに注目する"Tankto-Wheel"や燃料製造時の排出量も含めた "Well-to-Wheel"といった考え方が広く用いられている。さらに 近年では,原料の調達,部品や車体の製造,車体の解体・ 廃棄に至る全過程で生じるCO。排出量を評価するLCA (Life Cycle Assessment)の考え方も一般化しつつある。 アルミニウム合金と鋼の新塊製造時のCO2排出量を比較 すると,発電方法により異なるが,アルミニウム合金の ほうが鋼と比較して4~5倍となる場合がある。また、 アルミニウム合金のリサイクル材製造時のCO2排出量は 新塊製造時と比較して90%以上少ない<sup>10)</sup>。このように, LCA 視点で考えると、アルミニウム合金のリユース、 リサイクルは極めて重要であることが分かる。既に一部 車種において、リサイクルアルミの適用が開始されてい  $3^{6)}$ 

ここで,マルチマテリアル車体からアルミニウム合金 を取り出すためには,異種金属接合部の解体が必須とな る。先述した機械締結が用いられている場合,1点ずつ

脚注1)SP-rayは当社の登録商標(第6738793号)である。

接合部を解体する必要があるため、大変な労力を要する と想定される。あるいは、解体性接着剤<sup>11)</sup>を利用して 異種金属同士を接合する手法も考えられるが、自動車製 造では通常、部品表面に防錆油やプレス潤滑油が付着し ており、接着に適した表面状態の確保は困難である。ま た、接着剤の性能維持のため低温保持しなければなら ず、保管や管理が煩雑になるなどの課題がある<sup>12)</sup>。

上述した様々な課題を解決するため、強度と解体性に 優れ、さらには片側アクセスかつ高速施工、高強度鋼板 に対応可能な異種金属接合法として、コールドスプレー 皮膜を中間層として利用し、鋼とアルミニウム合金を間 接的にレーザ接合するSP-ray<sup>TM 注1)</sup>を開発した。本稿 では、SP-ray<sup>TM</sup>の基本コンセプトおよび継手強度、解体 性について説明する。

# 1. SP-ray<sup>™</sup>の基本コンセプト

図2(a)はSP-ray<sup>™</sup>のプロセスを模式的に示した図 である。はじめにアルミニウム合金表面に対して溶射法 の一種であるコールドスプレーにより鋼皮膜を形成し、 その上から鋼板を重ね、皮膜とレーザ溶接する。つまり、 本手法では図2(b)に示すように、皮膜を鋼板、アル ミニウム合金それぞれに対して別個の機構で強固に接合 することで、レーザ溶接におけるアルミニウム合金の過 度な溶融を不要としつつ、高い継手性能の実現を図って いる。コールドスプレーではほかの溶射法と異なり、粉 末が溶融しない温度で施工するため、酸化のほとんどな い溶接に適した皮膜を得られる。材料や施工条件にもよ るが、50~100 MPa程度の密着強度が得られ、これは従 来の代表的な溶射法であるプラズマ溶射と比較して高い 値である<sup>13)</sup>。コールドスプレーにおける皮膜の密着機構

SP-ray™



(a) schematic illustration of whole process



(b) joining mechanism



に関しては統一的見解が得られていないが,界面で何ら かの固相接合やメカニカルインタロック(アンカー効果) が生じているとされている<sup>14)</sup>。なお,SP-ray<sup>TM</sup>と同様に 溶接を利用する異種金属接合技術としては,溶接と接着 剤を併用するウェルドボンドが挙げられるが,先述の通 り接着剤は管理が煩雑なことに加え,接着剤の接合強度 は30 MPa程度<sup>15)</sup>とコールドスプレーの密着強度と比較 して低いことから,当社では SP-ray<sup>TM</sup>を優先して検討 している。

# 2. SP-ray<sup>™</sup>の継手特性およびコールドスプレー 皮膜中間層の効果

図3は1.5 GPa級鋼板(板厚1.4 mm)とコールドスプ レーサンプルをレーザ溶接し作製したSP-ray<sup>TM</sup>継手の 断面写真を示す。比較として、コールドスプレー皮膜を 用いない直接接合の断面写真もあわせて図中に示す。コ ールドスプレーサンプルは、AA7204-T6 (板厚3 mm) の表面に純鉄粉を用いて膜厚2mmの鋼皮膜を形成した ものである。コールドスプレーの作動ガスには窒素を使 用し、作動ガス温度および圧力はそれぞれ1,273K,5 MPaとした。直接接合については、SP-rav<sup>TM</sup>継手と総 板厚を合わせるため、板厚5mmのAA7204-T6を用い た。レーザ発振機には波長1,070 nmのファイバーレー ザを使用し、表1に示す条件で溶接をおこなった。直 接接合継手ではピットや割れが溶接金属に散見されるの に対し、SP-rav<sup>™</sup>継手では溶接欠陥のほとんどない健全 な溶接部が得られていることが分かる。SP-ray<sup>™</sup>およ び直接接合の継手強度を図4に示す。SP-rav<sup>TM</sup>では直 接接合と比較して、せん断引張強度(TSS)が約2倍、 十字引張強度(CTS)に至っては約4.5倍となっており、



**図3** (a) SP-ray<sup>TM</sup>, (b) レーザ直接接合継手の断面写真

Fig.3 Cross-section image of (a) SP-ray<sup>™</sup>, (b) direct laser welded joints

表	1	ν-	ザ溶接	条件
Table 1	Las	ser v	velding	conditions

Spot s	330	
Power density (×10 <sup>6</sup> W/cm <sup>2</sup> )	Without coating	2.6
	With coating	4.4
Scanning s	67	
Bead	Circle	
Weld dia	φ12	



図4 SP-ray<sup>™</sup>とレーザ直接接合の継手強度比較 Fig.4 Comparison of joint strengths between SP-ray<sup>™</sup> and direct laser welding

大幅に継手強度を向上することが可能である。先行研究 において、板厚1.0~1.6 mm、母材強度0.6~1.5 GPa 級 の高張力鋼と板厚3.0 mmのアルミニウム合金の板組に おける FDS<sup>®</sup>継手のせん断引張強度は6~10 kNと報告 されている<sup>16)</sup>。SP-ray<sup>TM</sup>ではFDS<sup>®</sup>同等のせん断引張強 度が得られることが分かる。

# 3. SP-ray<sup>™</sup>の解体性

# 3.1 大気炉を用いた加熱による解体

SP-ray<sup>TM</sup>で用いるコールドスプレーサンプルは基材 がアルミニウム合金、皮膜が鋼であるため、高温加熱す ると、図5に示すように界面で数十umオーダーの厚い IMCが生成する。この特性を利用することで、接合し た鋼とアルミニウム合金を分離することが可能となる。 図6は2章と同一の板組で作製したSP-rav<sup>TM</sup>継手に対 して、大気炉を用いて600℃で15~60分の熱処理を実施 した後の外観写真および断面写真である。30分以上の加 熱で鋼皮膜とアルミニウム合金界面で剥離が生じ、継手 を鋼とアルミニウム合金に分離することが可能である。 図7は皮膜側の剥離界面を電子線マイクロアナライザ (EMPA) によりマッピング分析した結果である。広範 囲においてAlが検出されており、IMC内で破壊が生じ ていることを示唆している。また, EPMA による点分析 の結果, このIMCは FeAl<sub>3</sub>やFe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>などに代表される Feに比べて Alの組成比が大きい脆弱な IMC 層であると 推定された。なお、Alは約400℃以上においてFe中へ拡 散することが知られており<sup>17)</sup>,自動車の製造工程で想定 される170℃×数十分程度の塗装焼付け処理では皮膜と アルミニウム合金の界面でIMCは生成しないと考えら れる。

以上のことから,SP-ray<sup>™</sup>継手を高温で熱処理する と,時間経過にともない脆弱なIMCが成長し,さらに 鋼皮膜-アルミニウム合金界面で線膨張係数の差に起因 する熱応力が働くことで,IMC内で破壊が生じ,鋼とア ルミニウム合金を分離できると推察される。図8に示 すような多点溶接したサンプルに対しても本手法は有効 であり,一度の熱処理で多数の接合部をまとめて解体可 能である。

# 3.2 高周波加熱を用いた解体

前節にて,熱処理にてSP-ray<sup>™</sup>接合部を解体可能で あることを示したが、コストや環境負荷低減の観点か





After heat treatment

- 図5 熱処理前後でのコールドスプレー皮膜-アルミニウム界面の SEM写真
- Fig.5 SEM images of interface between cold-spray coating and aluminum before and after heat treatment



(a) surface



(b) cross-section images

図6 熱処理後のSP-ray<sup>™</sup>継手の(a)外観,(b)断面写真 Fig.6 (a) surface, (b) cross-section images of SP-ray<sup>™</sup> joint after heat treatment



- 図7 アルミニウムから剥離したコールドスプレー皮膜表面のマ ッピング分析結果
- Fig.7 Result of mapping analysis at surface of cold-spray coating, peeled from aluminum

ら,熱処理時間は極力短縮できることが望ましい。そこ で,大気炉と比較して急速加熱が可能な高周波加熱の適 用を検討した。図9に高周波加熱装置の外観を示す。 SP-ray<sup>™</sup>継手の板組は2章と同一とし,試験片サイズ はいずれも100 mm×20 mmとした。継手長手方向中央 部35 mmの範囲をコイル内に挿入し,高周波加熱を施 した。温度制御用の熱電対は,1.5 GPa級鋼板の表面に 取り付けた。熱電対の設置箇所は長手方向中央部とし た。固定のため,継手の片方の端部は銅製ジグで把持し ており,当該箇所付近に関してはジグによる抜熱のため 所定の温度まで上昇していないと推察される。図10は



- 図8 レーザ溶接を24点でおこなったSP-ray<sup>™</sup>接合体の分解:
   (a) 模式図, (b) 熱処理後外観
- Fig.8 Decomposition of SP-ray<sup>TM</sup> joint with 24 laser welded areas:
  (a) schematic illustration,
  (b) surface view after heat treatment



図9 高周波加熱装置の外観 Fig.9 Appearance of high-frequency induction heating machine



図10 高周波加熱試験後のSP-ray<sup>™</sup>継手外観: (a)表面, (b)側面 Fig.10 Surface view of SP-ray<sup>™</sup> joint after high-frequency induction heating: (a) surface, (b) side

600℃で15分の熱処理を実施した後の外観写真であるが, ジグから十分離れた箇所では皮膜がアルミニウム合金か ら剥離しており,高周波加熱を用いることで炉加熱より も短時間での解体が実現できる可能性を示している。

むすび = 1990年代以降,地球温暖化を防止するため世 界中の自動車メーカがエンジンの高効率化や車体軽量 化、さらには電動化や燃料電池車の実用化に取り組んで きた。今後カーボンニュートラルを実現するにあたり, これら取り組みはより一層強化されていくであろう。衝 突安全性を確保しつつさらなる軽量化を図っていくうえ で、マルチマテリアル化はキー技術の一つになると考え られ、鋼とアルミニウム合金それぞれの長所・短所を理 解し、適材適所で使いこなしていくことが求められる。 その中で、当社は数少ない鋼、アルミニウム合金両方を 提供するメーカとして、材料のみならず自動車に関連す る様々なソリューションの提案を進め、CO2削減に貢献 していきたいと考えている。本稿で紹介したSP-ray<sup>™</sup> は、高信頼性と易解体性を兼ね備えた異種金属接合法で あり,本技術が自動車の安全・軽量化を支援し, さらに サーキュラーエコノミー,ひいてはカーボンニュートラ ル社会実現の一助になれば幸いである。

# 参考文献

- 環境省HP. https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon\_neutral/ about/, (参照2023-04-21).
- 国土交通省HP. https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/ sosei\_environment\_tk\_000007.html,(参照2023-04-21).
- 樽井大志. 自動車に適用されるマルチマテリアル技術. 軽金属.
   2022, Vol.72, No.3, p.99-106.
- 4) 櫻井健夫. 自動車の電動化とアルミ化技術の変貌. 軽金属. 2022, Vo.72, No.12, p.713-716.
- 5) 内藤純也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.1, p.60-64.
- 6) 嬉野欣成. 表面技術. 2022, Vol.73, No.8, p.380-383.
- 7) S. Enderle et al. Audi e-tron. Euro Car Body, 2019.
- 8) M. Rössinger et al. Volkswagen ID.4, Euro Car Body, 2020.
- 9) J.D. Skovron et al. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2015, Vol.137, No.5, 051019.
- 10) 青木昇二. 軽金属. 2013, Vol.63, No.7, p.260-270.
- 11) 佐藤千明. 日本接着学会誌. 2008, Vol.44, No.4, p.136-141.
- 12) 氷室雄也ほか. 日本接着学会誌. 2017, Vol.53, No.8, p.283-289.
- 13) 清水保雄. 表面技術. 1990, Vol.41, No.10, p.968-973.
- 14) 榊 和彦. 表面技術. 2008, Vol.59, No.8, p.490-494.
- 15) 佐藤千明. ネットワークポリマー論文集. 2018, Vol.39, No.2, p.91-96.
- L. Kim et al. Journal of Manufacturing Processes. 2020, Vol.57, p.400-408.
- 17) 沓名宗春ほか. 溶接学会論文集. 2003, Vol.21, No.2, p.282-294.

本稿の一部は2023年7月発行の自動車技術Vol.77, No.7 No.20234354 (公益社団法人自動車技術会)に掲載され,同誌の許可を 得て転載(一部修正・追記)したものである。

### (解説)

# アルミ鋳造品の鋳巣予測精度向上のための物性測定技術および湯流れ・凝固解析による鋳巣予測結果の紹介

山口真弘\*1

# Introduction of Physical Property Measurement Technology to Improve Accuracy of Shrinkage Porosity Prediction for Aluminum Castings and Prediction Results from Fluidity and Solidification Analysis

Masahiro YAMAGUCHI

# 要旨

近年、アルミ鋳物品はエンジンブロックなどの内燃機関から電池ケースや車体など適用部品に変化が生じており、 これらのアルミ鋳物品では鋳巣が強度低下に大きく影響をおよぼすため、鋳造CAEによる鋳巣の予測精度の向上 が重要である。当社では鋳造CAE用の物性値を取得するための装置を所有しており、今回砂型アルミ鋳造品の試 作と、鋳造CAEによる鋳巣の予測を行った。また、鋳造CAEでは、熱力学計算ソフトをもとにしたデフォルトデー タと、当社で取得したデータの2ケースで解析を行い、予測精度の比較も行った。これら結果を紹介する。

# Abstract

In recent years, the applications of aluminum castings have changed from internal combustion engine parts, such as engine blocks, to components such as battery cases and vehicle bodies. Shrinkage porosity causes a significant loss of strength in these aluminum castings, and it is important to improve the accuracy of shrinkage porosity prediction using casting CAE. Kobelco Research Institute, Inc. owns the equipment to acquire physical property values via casting CAE. In this study, sand mold aluminum castings have been prototyped, and shrinkage porosity has been predicted by the casting CAE. To compare the prediction accuracy, analyses have been performed using casting CAE on two cases; default data based on thermodynamics calculation and data acquired by Kobelco Research Institute, Inc. The results are presented in this paper.

# 検索用キーワード

アルミ鋳物,鋳造CAE,鋳巣予測精度向上,湯流れ解析,凝固解析,ホットディスク法,流動限界固相率

**まえがき**=モビリティ分野では,エンジンブロックなど の主に内燃機関に適用されていたアルミダイキャスト製 品が,電動化に伴いサスタワーなど車体の一部へ適用さ れるケースが増えている。さらに,近年では複数部品を 一体成形するギガキャスト製法が着目されている。いっ ぼうで,ギガキャスト製法は,金型を含む設備に多大な コストがかかることから,大型アルミ鋳物部品を砂型鋳 造で試作および評価している報告例もあり,ダイキャス トを含むアルミ鋳物品に対する注目度はますます高まっ ている。

アルミ鋳物品には凝固割れや鋳巣(ちゅうす)などの 鋳造欠陥が発生するため、鋳造CAEを用いて事前に部 品形状や製造条件の検討が行なわれている。鋳造CAE の解析ソフトウェアには、J-Mat-Proなどの熱力学計算 ソフトにもとづく各物性値が入っており<sup>1)</sup>、その値をも とにシミュレーションを行っている。さらに、解析精度 向上のために解析モデルや基礎方程式の見直しなどによ る改善が進められている<sup>2)</sup>。しかしながら、JIS規格の合 金でも添加元素によっては成分範囲が広く、物性値にず れが生じることもあり、解析の予測精度にも影響をおよ ぼす。 そのため、当社では鋳造CAEの精度向上を目的とした、解析へ入力するさまざまな物性値を取得する評価手法の技術確立を行ってきた。例えば、固体の熱伝導率はレーザフラッシュ法による測定が一般的に行なわれているが、当社では溶融金属の熱伝導率も測定できるホットディスク法の開発を行った<sup>3)</sup>。

本稿では、鋳造CAEによる鋳巣の予測精度に着目し、 砂型アルミ鋳物品の試作と、鋳造CAEの物性値を熱力 学計算ソフトにもとづく値と、当社で鋳造用合金の物性 値を測定した値とで比較した結果を紹介する。

## 1. 砂型アルミ鋳物品の試作と鋳巣調査

試作用合金はエンジンブロックやバッテリーケースに 使われている ADC12とし,砂型アルミ鋳物品の試作を 行った。ADC12の化学成分を表1に,試作用の砂型の 図面と外観を図1~図3に示す。試作型は左右2個取り

表1 ADC12の化学成分(wt%) Table 1 Chemical composition of ADC12 (wt%)

ADC12	Si	Fe	Cu	Ti	Mn	Ni	Zn	Mg	Al
ADC12	10.7	0.13	2.2	0.16	0.19	0.07	0.53	0.26	Bal.

\*1(㈱コベルコ科研 材料ソリューションセンター 技術部



図1 試作用砂型図面 Fig.1 Sand mold drawing for prototype



図2 試作用砂型 Fig.2 Sand mold of the prototype



図3 試作用砂型(上型) Fig.3 Sand mold of the prototype (Upper mold)



図4 温度測定位置 Fig.4 Location of temperature measurement

とし、1 個は流路や製品部の鋳造〜凝固過程の温度測定 を行った。温度測定位置を図4に示す。また、鋳巣は 最終凝固部に発生するため、板厚15 mmの単純厚板製 品に高さが異なるボス(高さ:6 mm,9 mm,15 mm) をつけ、ボス直下を溶湯補給のない最終凝固部となる形 状とした。

砂型アルミ鋳物試作品を図5に、試作品のX線透過 撮影画像を図6、図7に、浸透探傷試験結果を図8に示 す。鋳巣は9mmボス部(Boss2)の位置に集中しており、 6mmボス部(Boss1)と15mmボス部(Boss3)の位 置では確認されなかった。



図5 砂型アルミ鋳物試作品 Fig.5 Prototype of sand mold aluminum casting



図 6 X線透過撮影画像 Fig.6 X-ray radiography image



図7 X線透過撮影拡大画像 Fig.7 X-ray radiography expansion image



図8 浸透探傷試験結果 Fig.8 Results of penetrant test

# 2. 鋳造CAEによる鋳巣予測

鋳造CAEで1章の砂型鋳造を模擬した解析を行い,鋳 巣の発生位置を予測した。解析に用いたソフトウェアは MAGMASOFT(Ver.5.4.2.0),物性値はMAGMASOFT のデフォルトデータと当社で取得したデータの2ケース で解析を行い,鋳巣の予測精度を比較した。

# 2.1 物性値の取得とデフォルトデータとの比較

当社で取得した物性値は,試作に用いたADC12の室 温~750℃における温度依存性を含む比熱,熱伝導率, 密度である。比熱はDSC法とし,測定結果から温度と 固相率の関係も算出した。熱伝導率は室温~480℃の固 相域をレーザフラッシュ法,600~750℃の液相域をホッ トディスク法で測定した。また密度は室温と600~750 ℃の液相域を液中置換法で測定し,100~480℃の高温の 固相域は試料の体積をTMA法で測定した熱膨張率より 補正して算出した。

MAGMASOFTのデフォルトデータと当社で取得し た各物性値の比較を図9に示す。当社で取得したデー タの方がいずれの物性値も低い傾向を示した。固相率 は,液相線温度で約10℃,固相率0.3~0.8では約20℃の 差がみられた。また比熱は約300~400℃,650~750℃に おいて当社で取得したデータの方が低い結果であった。 いっぽうで,熱伝導率と密度には大きな差異は認められ なかった。

# 2.2 物性値の違いによる解析結果の比較

# 2.2.1 湯流れ解析結果

MAGMASOETのデフォルトデータをCasel,当社で 取得したデータをCase2として湯流れ解析を行った。注 湯開始から0.5秒,1.0秒,2.0秒,3.0秒における湯流れの 状況と溶湯温度を示した結果を図10に示す。Case1では, 0.5秒で溶湯がGate3に衝突するほか,主にGate1から溶 湯が流入していた。いっぽうで,Case2はCase1に比べ て粘性が高く1.0秒でも溶湯はGate3に到達しておらず Gate1から順に流入しており,Case1とは異なる傾向を 示した。鋳造時に溶湯が流入する際の温度測定結果を図 11に,また各温度計測部位の最大温度および検知時間 を表2に示す。Case1は湯流れ解析結果と同様に,各堰 (せき),各ボス部の検知順序は実測と一致していた。(堰 3→堰2→堰1,15 mmボス→9 mmボス→6 mmボス) いっぽうで,Case2の検知順序は実測とは逆転した結果 であった。



図9 谷物性値の比較 Fig.9 Comparison of physical properties



図10 湯流れ解析結果 Fig.10 The analysis result of the flow of liquid metal

Case2は、Case1に比べて650℃以上の比熱が低いため、 注湯開始後に溶湯温度が早期に低下して粘性が高くなっ た結果、溶湯の流入速度が遅くなり実測とは異なったと 考えられる。

# 2.2.2 凝固解析結果

凝固解析による流動限界固相率到達時間の解析結果を 図12に示す。Caselでは湯口から遠い15mmボス部付 近で、またCase2では9mmボス部付近で到達時間が最 も遅くなる傾向を示し、Case2のほうがX線画像と近い 結果であった。つぎに,鋳造時の温度測定結果および解 析による冷却曲線を図13に示す。Caselに比べてCase2 のほうが、冷却曲線が実測に近い傾向を示した。図9に 示した温度と固相率の関係がCaselとCase2で異なって おり、凝固発熱が起こる温度、また流動限界固相率に到 達する時間に違いがあるため,冷却曲線や解析精度にも 影響をおよぼした結果,Case2のほうが凝固解析結果の 精度が高くなったと考えられる。

また, 健全度を比較した結果を図14に示す。図12で 示した流動限界固相率の到達時間が長い部位で健全度が 低くなる傾向を示した。Caselでは各ボス部とも健全度 が低い結果であるのに対して, Case2では9 mmボス部 付近で集中して健全度が低い結果となり, 試作品に近い 結果が得られた。

このように鋳造CAE用のデータを変えた解析結果から、同じADC12でもデータの違いで解析結果が変わる こと、また当社で取得したデータを用いることにより、 鋳巣の予測精度が向上することがわかった。



	表 2	各部位における最大温度および検知時間
Table 2	Maximu	m temperature and detection time at each location

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Pouring hole	Gate 1	Gate 2	Gate3	Boss1	Boss2	Boss3	Plate 1	Plate 2	Sand mole
1	Maximum Temperature(℃)	684.0	654.0	665.9	670.3	658.5	662.2	665.9	671.0	670.1	352.2
case1	Detection Time(sec)	0.0	2.8	2.6	0.8	2.8	2.0	1.7	0.7	1.3	-
	Maximum Temperature(℃)	684.0	675.0	670.8	659.1	662.7	663.1	645.3	671.5	658.8	340.3
case2	Detection Time(sec)	0.0	0.7	1.2	2.0	1.9	1.9	3.6	1.0	2.1	-
Actual	Maximum Temperature(°C)	684.0	652.5	666.9	668.2	642.5	656.0	661.3	619.3	654.7	491.2
measurement	Detection Time(sec)	0.0	3.5	1.0	0.8	2.4	1.6	0.9	2.9	2.1	-



図12 流動限界固相率到達時間解析結果 Fig.12 The analysis result of the time required to reach the flow limit solid fraction





図13 鋳造時の温度測定結果および解析による冷却曲線 Fig.13 Temperature measurement results during casting and cooling curves based on analysis



図14 健全度解析結果 Fig.14 The analysis result of the soundness

**むすび**=今回の鋳造CAEではCasel, Case2ともに砂型 の各物性値や砂型とアルミ溶湯の熱伝達係数などは MAGMASOFTのデフォルトデータを用いている。そ のため、今回取得した物性値以外のデータも実験により 求めた結果を入力すると、今回実測と合わなかった湯流 れ解析も含めてさらに予測精度を向上できる可能性はあ る。また、今回取得した物性値は、砂型だけではなくダ イキャスト製品における鋳造CAEの予測精度向上にも 寄与すると考えられることから、現在その試作と解析も 進めている。

砂型やダイキャストなどアルミ鋳物品の車体への適用

にあたり、衝突解析などの強度解析を行う上で、強度へ 影響をおよぼす鋳巣発生位置の正確な予測も重要であ る。そのため、鋳造CAEによる予測精度の向上に対す るニーズもますます高まることが予想される。

今後も,さらにお客様の要求に応えられるよう,新た な測定技術を確立し,お客様へ提案できるよう精進した い。

# 参考文献

- 1) 木島秀弥. 鋳造工学. 2014, Vol.86, No.12, p.951-956.
- 2) 三中西信治. 鋳造工学. 2023, Vol.95, No.1, p.34-40.
- 3) 足立渉ほか. こべるにくす. 2022, No.55, p.19-20.

#### (解説)

# 高耐久性燃料電池セパレータ材料NCチタンの構造と特徴

佐藤俊樹\*1·鈴木 順\*2

# Structure and Characteristics of Highly Durable Fuel Cell Bipolar Plate Material, NC Titanium

Toshiki SATO · Jun SUZUKI

# 要旨

CO<sub>2</sub>排出削減のキー技術として期待されている燃料電池自動車の重要部品であるセパレータには、燃料ガスの流路、集電板、耐食性、小型軽量化のための薄肉化などの多くの機能や特性が求められる。燃料電池自動車1台当たり数百枚以上ものセパレータが搭載されるため、生産性や低コスト化も必要となる。そこで当社は、以上の要求に応える世界初のプレコート型セパレータ材料であるNCチタン(ナノカーボンコンポジットコートチタン)を開発した。NCチタンはトヨタ自動車株式会社にて2020年に発売を開始した燃料電池自動車MIRAIなどに搭載されている。本稿では、NCチタンの開発の考え方、構造および特徴などについて解説する。

# Abstract

Bipolar plates are vital elements of fuel cell vehicles which are expected to be a key technology for reducing  $CO_2$  emissions. They are required to have many functions and properties, such as acting as flow channels for fuel gas and acting as current collectors, also resisting corrosion, and possessing thinness for downsizing and lightening. Since several hundred bipolar plates are installed in each fuel cell vehicle, their productivity and cost reduction are also essential. Hence, Kobe Steel has developed nano-carbon composite-coated titanium (NC titanium), the world's first pre-coated bipolar plate material that meets the above requirements. NC titanium is installed in vehicles such as the fuel cell vehicle MIRAI, which Toyota Motor Corporation launched in 2020. This paper explains the development concept, structure, and characteristics of NC titanium.

## 検索用キーワード

セパレータ、NCチタン、燃料電池自動車、耐久性、耐食性、接触抵抗、プレス成形性、プレコート

**まえがき**=地球温暖化の主要因であるCO<sub>2</sub>放出の20%~25%を占めている運輸部門<sup>1)</sup>では、CO<sub>2</sub>排出削減が重要な課題の一つとなっている。このため、内燃機関自動車から電気自動車への転換が進められているが、燃料電池自動車もその一つである。燃料電池自動車は水素と酸素を反応させて得られる電力によって走行する。走行中に排出するのは水のみのため、CO<sub>2</sub>を排出しないクリーンカーである。燃料電池にはいくつかの種類があるが、低温動作、小型軽量化およびクイックスタートなどの特徴をもつ固体高分子型燃料電池(PEMFC)が自動車に適用されている。

このPEMFCの重要部品の一つがセパレータである。 A4用紙程度の面積のセパレータを数百枚以上も必要と する自動車用燃料電池では、小型軽量化のための薄肉化 と走行中の衝撃に耐える材料強度が必要であることから 金属セパレータが主流となっている。セパレータは水 素、酸素、生成水の流路のほかに反応で発生した電子を 表面から通して集めて流す集電板の役割を果たす。さら に、耐食性も必要とされるため、金属セパレータには導 電性と耐食性を兼備した表面処理がなされている。加え て、セパレータは高生産性・低コスト化も重要な課題で ある。この観点に対しては、金属箔コイルを連続表面処 理した後にセパレータ形状に加工するプレコート方式が 有利である<sup>2),3)</sup>が,表面処理層の加工ダメージによる 性能劣化のために,プレコート型のセパレータは実用化 されていなかった。

これに対して,当社は世界で初めて表面導電性と耐食 性を兼備したプレコート型のセパレータ用チタン材料, NC (Nano-Carbon composite coat) チタンを開発・実 用化し<sup>4)</sup>,トヨタ自動車株式会社が2020年に発売を開始 した燃料電池自動車 MIRAI などに採用されている<sup>5)</sup>。 本稿では,NCチタンの開発の考え方,構造,特徴につ いて解説する。

# PEMFCの構造と金属セパレータに求められ る特性

自動車用のPEMFCでは、高出力を出すために燃料電 池の最小単位であるセルが数百層積み重ねられている。 図1にセルの概略図を示す。セルは両側にPt触媒が塗 布されたプロトン導電体である固体高分子膜(PEM)、 その両側のカーボン繊維からなるガス拡散層(GDL)、 およびその両側を挟んでいる2枚のセパレータ(Bipolar plate)から構成されている。このように1セル当たり に2枚のセパレータが必要となるため、燃料電池自動車 では1台当たり数百枚以上ものセパレータが必要とな る。したがって、セパレータは軽量であることが求めら



れ、かつ自動車の限られたスペースに搭載する必要があ るため、薄肉化が求められる。いっぽうで、走行中の衝 撃に耐えなければならないため高強度も必要となる。ま た,図1に示すようにセパレータは燃料ガスや生成水の 流路の役割を果たすため、流路を形成するためのプレス 成形性が必要とされる。さらに、水素ガス側の触媒上で 水素の分解反応によって生成した電子をその表面から通 して集めて流す集電板の役割を果たすため. 高い表面導 電性, すなわち低い表面の抵抗(これを接触抵抗と呼ぶ) も求められる。加えて、燃料電池内部は固体高分子膜を 構成するフッ素やスルホン酸イオンが溶出する酸性腐食 環境となるため、セパレータには耐食性も必要となる。 セパレータが腐食すると表面導電性の低下につながるだ けでなく,腐食によって金属イオンが溶出すると,触媒 の被毒や固体高分子膜中の水素イオン伝導の阻害を引き 起こす<sup>6)</sup>。とくに鉄イオンの場合は、副生成物の過酸化 水素を分解して水酸化ラジカルを生成する触媒として作 用する。水酸化ラジカルは固体高分子膜を破壊するため 燃料電池性能の劣化を引き起こす<sup>7)</sup>。このため, 金属セ パレータにはステンレスやチタンの耐食性金属が用いら れる<sup>4),8)</sup>。耐食性金属は表面に数nmから十数nmの厚 さの自然酸化膜である不働態皮膜を形成することによっ て耐食性を発現する。しかし,不働態皮膜の導電性は酸 性腐食環境中で低下していくため、表面導電性と耐食性 の両立ができない。このため、耐食性金属であっても導 電性と耐食性が高い表面処理が必要となる。

加えて、燃料電池を普及させるためには、自動車1台 に数百枚以上使用されるセパレータの生産性向上やコス トダウンも必要とされている。図2に示すように、金 属セパレータの製造方法は流路をプレス成形した後に表 面処理を行うポストコート方式と金属箔コイルに連続表 面処理を行った後に流路をプレス成形するプレコート方 式に二分される<sup>9)</sup>。ポストコート方式が主流であるが、 セパレータ形状の金属箔を表面処理装置に1枚ずつ取り 付けて表面処理を行っては1枚ずつ取り外す手間がかか るため、生産性が低下する。他方、プレコート方式では、



図2 金属セパレータの二つの代表的な製造プロセス<sup>9)</sup> Fig.2 Two typical production processes for metal bipolar plates<sup>9)</sup>

表面処理工程においてセパレータを取り付け取り外しす る手間がなくなるため生産性が向上し,コストダウンに つながる利点がある。しかし,プレス成形によって表面 処理層がダメージを受けて剥離などを引き起こし,導電 性や耐食性の劣化につながる欠点があるため,プレコー ト方式が実用化された例はこれまでなかった。

# 2. セパレータ用表面処理チタン材の開発の考え方

チタンの特徴は、ステンレスに比べて高コストである が、高電位の印加環境下でも溶出しにくい高耐食性にあ る。W. Liら<sup>10)</sup>は、チタンを中間膜として導電性アモル ファスカーボン膜をコーティングしたSUS316Lと、同 コーティングを施したGrade2のチタンの耐食性を評価 するために、燃料電池自動車で最も厳しい腐食環境とな るスタートアップとシャットダウンを模擬した試験、すな わち,70℃の2 ppmのフッ素イオンを含む0.5 kmol/m<sup>3</sup> 硫酸水溶液中で1.4Vvs.SCEの電位を1時間印可する試 験を行った。その結果, SUS316Lではコーティングのピ ンホール部で食孔が認められたが、チタンでは食孔は認 められなかったと報告している。つまり、チタンではコ ーティングのピンホールなどの欠陥が許容されることを 示している。このことは、ピンホールを無くすための厚 膜形成の必要がないため表面処理時間を短くでき、流路 成形によって表面処理層にクラックが発生して基材が露 出しても許容されるためプレコート適用の可能性がある ことを示唆している。すなわち、チタンでは基材コスト は高いものの表面処理時間の短縮とプレコートの適用に よってセパレータの生産性を向上し. 基材から生産まで 含めたトータルでセパレータコストを下げられる可能性 がある。

しかし、プレコートを実現するためにはプレス成形に 耐える密着性を有する表面処理層が必要となる。したが って、高耐食、高導電性に加えてプレス成形に耐える密 着性を有する皮膜を開発してプレコートを実現すること がセパレータ用表面処理チタン材料の開発の考え方とな る。このような考え方に沿って開発された表面処理チタ ン材料がNCチタンである。次の章ではNCチタンの構 造と特徴について説明する。

# 3. NCチタンの構造と形成工程および特徴

# 3.1 NCチタンの構造

図3にNCチタンの断面SEM像を示す<sup>11)</sup>。NC層は 40 nm~50 nmの厚さの酸化チタン膜(灰色の部分)と その中に分散しているカーボンナノ粒子(黒い部分)か ら構成されている。カーボンナノ粒子は導電パスとして 作用し,酸化チタン膜はチタン基材との密着性を確保す る。さらに,カーボン粒子も酸化チタン膜も高耐食性な ので,NC層も高耐食性となる。

# 3.2 NCチタンの形成工程

図4にNC層の形成工程と各工程後のチタン基材表面 の断面SEM像を示す<sup>9)</sup>。NC層の形成工程は、チタン基 材表面にカーボンナノ粒子を塗工する塗工工程、低酸素 分圧下で高温酸化を行うNC層形成工程、および余剰カ ーボンナノ粒子の除去などの後工程から構成されてい る。低酸素分圧下で高温酸化した後の断面SEM像から、 カーボン粒子が酸化チタンに取り込まれていることが分 かる。一般に、大気圧下でのチタンの高温酸化では、酸 素がチタン表面から内部に拡散することによってチタン





表面から内部へと酸化チタンが成長する内方酸化が知ら れている<sup>12)</sup>。いっぽう,筆者らは,以前にTi-Pd合金を 酸洗することによって表面にまばらにPdナノ粒子を析 出させたTi-Pd合金を低酸素分圧から大気圧まで酸化す る検討を行った<sup>13)</sup>。その結果,大気圧では従来知見どお り内方酸化によりPdナノ粒子とTi-Pd合金の間に酸化 チタン層が形成されたのに対して,低酸素分圧下では Ti-Pd合金の表面からPdナノ粒子側に酸化チタンが成 長する外方酸化が起こり,Pdナノ粒子が酸化チタン層 に取り込まれる現象を発見した。NC層の構造は,それ まで報告例が無かったチタンの外方酸化現象を活用し, かつPdナノ粒子を安価なカーボンナノ粒子に変更する ことによって実現された。

### 3.3 NCチタンの特徴

#### 3.3.1 NCチタンの密着性

図5にプレス成形後のNCチタンの断面のTEM像を 示す<sup>11)</sup>。プレス成形によるチタンの塑性変形によって生 じた表面の段差の近くでもNC層は剥離せずに密着して いることがわかる。このように、NCチタンはプレス成 形に耐える密着性を有することがわかる。



図5 プレス成形後のNCチタンの断面TEM像<sup>11)</sup> Fig.5 Cross-sectional TEM image of NC titanium after press forming<sup>11)</sup>



(d) SEM image after 1st process

(e) SEM image after 2nd process

(f) SEM image after 3rd process

図4 NCチタンの形成工程(a), (b), (c) と各工程後の断面 SEM 像(d), (e), (f)<sup>9)</sup> Fig.4 NC titanium formation process (a), (b), (c) and cross-sectional SEM images after each process (d), (e), (f)<sup>9)</sup>



Corrosion test ( potentiostatic test ) conditions							
	Coatings in the literature	NC titanium					
Solution	$0.5M~H_2SO_4~\pm2\text{-}5ppm~F^-$ with air or oxygen bubbling	$0.5M H_2SO_4$ +5ppm F <sup>-</sup> with air bubbling					
Temperature	70-80°C	80°C					
Potential	0.6Vvs.SCE	0.6Vvs.SCE					
Immersion time	4-5h	5h					

図 6 文献のコーティングとNCチタンの腐食試験前の界面接触抵抗(初期ICR)(a)とICRの増加速度(ΔICR)(b)の比較<sup>14~20)</sup>

Fig. 6 Comparison of interfacial contact resistance before corrosion test (initial ICR) (a) and average increase rate of ICR ( $\Delta$  ICR) (b) of coatings studied in the literature and NC titanium<sup>14/ $\sim$ 20)</sup>

# 3.3.2 NCチタンの接触抵抗と耐久性

図6には、2017年から2022年の6年間に発表された 燃料電池セパレータ用のコーティングステンレスとチタ ンの耐食性に関する論文に掲載された接触抵抗とNCチ タンの接触抵抗の比較を示す<sup>14)~20)</sup>。比較したのは、論 文で最も多くみられた耐食試験条件で評価された皮膜, すなわち, 0.5M 硫酸水溶液に 2~5 ppm のフッ素イオン を加えた温度70℃~80℃の溶液中で0.6Vvs.SCEの電位 を印可しながら4~5時間浸漬する定電位試験がなされ た皮膜で、かつ定電位試験前後の接触抵抗を測定し、試 験前の接触抵抗がアメリカのエネルギー省(DOE)が 目標として定めている 10 m Ω · cm<sup>2</sup>以下の皮膜に限定し た。多数の皮膜の耐食性や導電性の評価結果が論文発表 されているが、論文ごとに耐食試験条件が異なっている こと、耐食試験前の接触抵抗は測定しているものの耐食 試験後の接触抵抗を測定している論文が少ないことか ら、比較可能な皮膜は限られたが、検討されている膜種 は炭素膜,窒化膜,炭化膜,金属膜に大別されるため, 膜種としてはほぼ網羅することができた。選定した論文 の皮膜とNCチタンを比較するために、NCチタンについ ても論文と同様に、温度80℃の5 ppmのフッ素イオン を加えた0.5M硫酸水溶液中で0.6Vvs.SCEの電位を印可 しながら5時間浸漬した後の接触抵抗を測定した。また、 プレス成形後のNCチタンの耐久性も評価するために, プレス成形を模擬した25%の一軸引張変形を加えたNC チタンについても同じ評価を行った。なお、耐久性を比 較するために、定電位試験前後の接触抵抗の差を定電位 試験時間で割った平均の接触抵抗増加速度を算出した。 この値が低いほど耐久性が高いことになる。図6から. 引張変形無しのNCチタンも25%の引張変形を付与した NCチタンもほかの皮膜に比べて初期接触抵抗は最も低



図7 NCチタン箔コイルの外観<sup>4)</sup> Fig.7 Appearance of NC titanium foil coil<sup>4)</sup>

い部類となっており、DOEが定める接触抵抗の指標の 約1/5以下と低いことがわかる。また、接触抵抗増加 速度についても炭素膜と同様に最も低いことが分かる。

このようにNCチタンはプレス成形を模擬した一軸引 張変形後もほかの皮膜と比べて低い接触抵抗と高耐久性 を示すことが分かる。

# 3.3.3 NCチタンによるセパレータ生産性向上

図7にNCチタンコイルの外観を示す<sup>4)</sup>。NC層の形成に必要な時間は短く,NCチタンの製造工程はすべて チタン箔コイルの連続処理で行われるため,NCチタン の生産性は非常に高い。また,燃料電池メーカでは生産 性を阻害していた表面処理工程が省略され,NCチタン コイルをプレス成形するだけでセパレータが製造できる ため,燃料電池メーカ生産性向上とそれに伴うコストダ ウンに貢献できることも特徴である。 **むすび**=チタンの外方酸化現象を発見し,この現象を活 用することによって形成される皮膜をコーティングした NCチタンは,高耐食性,高表面導電性および高密着性 を兼備したことによって,世界初のプレコート型セパレ ータ材料として実用化された。その結果,NCチタンは 現在トヨタ自動車株式会社の2020年に発売を開始した 燃料電池自動車MIRAIやクラウンFCEVに搭載されて いる。

NCチタンは耐久性が高く、ステンレスに比べて軽い という特徴があることから、今後は乗用車だけでなく、 より耐久性が要求される大型トラック、バス、鉄道、船 舶に加えて、航空機やドローンなどの軽量化が必要とさ れる用途への活用が期待される。

# 参考文献

- 1)  $CO_2$  Emissions in 2022 Analysis IEA.
- J.M. Huya-Kouadio et al. Electrochem. Soc. 2018, Vol.83, No.1, p.93-109. DOI 10.1149/08301.0093ecst.
- S. Porstmann et al. J. Manufac. Proc., 2020, Vol.60, p.366-383. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.10.041.
- 4) 長田 卓. R&D神戸製鋼所技報. 2022, Vol.71, No.2, p.78.
- 5) 水野誠司ほか. TOYOTA Technical Review. 2021, Vol.66, Feb. p.22-27.
- 6) T. Bohackova et al. Materials. 2021, Vol.4, p.2682.

- H. Li et al. J. Power Sources. Vol.195, 2010, p.8089-8093. doi:10.1016/j.jpowsour.2010.07.003.
- [e Autopos Unboxing] #4 World's first application of uncoated separator material, stainless Poss470FC! - Official POSCO Newsroom. (参照2024-06-19).
- 9) 佐藤俊樹ほか.自動車技術会フォーラム2023年度冬季燃料電池部 門委員会講演配布資料.
- W. Li et al. Diamond and Related Mater. 2021, Vol.118. https:// doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108503.
- T. Yamasaki et al. E&L (2023 Powertrains, Energy and Lubricants International Meeting), 2023, Proceeding.
- 12) K.Hauffe. Oxidation of metals. Plenum Press. 1965, p.214-217.
- 13) T. Sato et al. Ti-2007 Sci. and Technol. Japan Inst. of Met. 2007, p.1679-1682.
- 14) T. Sato, 15th World Conference on Titanium (Ti-2023), Proceeding.
- 15) W. Li et al. Int. J. Hydrogen energy. 2021, Vol.46, p.22983-22997. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.132.
- 16) J. Wang et al. Int. J. Hydrogen energy. 2019, Vol.44, p.16909-16917. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.245.
- 17) S.P. Mani et al. J. Mater. Sci. 2021, Vol.56, p.10575-10596. https://doi.org/10.1007/s10853-020-05682-4.
- 18) J. Jin et al. Mater. Chem. and Phys. 2020, Vol.245. https://doi. org/10.1016/j.matchemphys.2020.122739.
- J. Shi et al. Int. J. Hydrogen energy. 2020, Vol.45, p.10050-10058. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.203.
- 20) Z. Dong et al. Inter. J. Hydrogen energy. 2019, Vol.44, p.22110-22121. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.099.

# (技術資料)

# 金めっき代替可能な自動車端子用銅合金向けすずめっき

上田雄太郎\*1・鶴 将嘉\*1・三井俊幸\*1

# Tin-plated Copper Alloys for Replacing Gold-plated Terminals

Yutaro UEDA · Masahiro TSURU · Toshiyuki MITSUI

# 要旨

自動車用の端子にはめっき付き銅合金が用いられる。低圧回路で用いられる端子用めっきには、すずめっきと金 めっきがある。コストと電気的な信頼性のバランスが良く汎用的なすずめっきに対して、低荷重で電気的な信頼 性の必要な部位には金めっきが使用される。しかしながら、金めっきは製造コストが高いため、安価なすずめっ きによる代替ニーズがある。そこで、すずめっき表面の酸化皮膜の破壊機構に着目して、表面に微細なすずの凸 形状を付与することで、低荷重でも低い接触抵抗が得られた。本稿では、金めっきの一部を代替可能と考える低 接圧対応すずめっきの性能について紹介する。

#### Abstract

Plated copper alloys are used for automotive terminals. The terminal plating used in low-voltage circuits includes tin plating and gold plating. Tin is a general-purpose plating material that offers an excellent balance between cost and electrical reliability, while gold plating is used in areas where electrical reliability is critical at low contact loads. Gold plating, however, is subject to high manufacturing costs, and there is a need for tin plating as a low-cost alternative. Therefore, attention has been focused on the fracture mechanism of the oxide film on a tin-plated surface, and by providing the surface with fine convex shapes of tin, low contact resistance has been obtained even under low contact loads. This paper introduces the performance of tin plating for low contact pressure, which can partially replace gold plating.

## 検索用キーワード

コネクタ,端子,金めっき代替,すずめっき,低接圧,接触信頼性,接触抵抗,耐熱性,摩擦係数, 耐微摺動(しゅうどう)摩耗性

**まえがき**=自動車の電動化,自動化を背景に電装品が増 え,それらを電気的に接続する電線,端子も増加してい る。

端子には,自動車が製造されてから寿命を迎えるまで 電気信号や電力を伝達し続ける接触信頼性が求められ る。

接触信頼性を確保するため、端子にはめっき付き銅合 金が用いられる。電圧30V以下、電流10A以下の電気 回路(以下、低圧回路という)で用いられる端子用めっ きには、主にすずめっきと金めっきがある<sup>1)、2)</sup>。

すずめっきは,製造コストと接触信頼性のバランスが 良く,幅広い用途で使用されているが,接触信頼性で金 めっきに劣る。金は耐食性が良好な金属で,金めっきは 接触信頼性の要求が高い部位に使用される<sup>1).2)</sup>。しかし ながら,金めっきは非常に高価なため,金より安価なめ っきの代替により製造コストを低減したいというニーズ がある。したがって,当社は金より製造コストが安価で, すずめっきよりも接触信頼性に優れるめっきの開発に取 り組んだ。

本稿では,金めっきの代替として開発した低接圧対応 すずめっきの性能について紹介する。

# 1. 端子用めっきとめっきへの要求特性について

# 1.1 めっき構成

一般に自動車電装系の端子接点に使用されるリフロー すずめっきと金めっきの比較により,金めっきを代替す る接点用めっきへの要求特性について述べる。めっき付 き銅合金の断面構造の概略図を図1に示す。リフロー すずめっきとは,銅合金に電気めっきによりすずを成膜 した後,すずの融点以上に加熱,溶融させる処理(以下, リフロー処理という)を施しためっきのことである。リ フローすずめっきは,銅合金とすず成膜の間にすずと銅 の金属間化合物(以下,銅すず系金属間化合物という, Intermetallic compound layer of Tin & Copper)を有





\*1素形材事業部門 銅板ユニット 銅板工場

し、表面はすずで覆われている。

金めっきは、ニッケルの下地層の上に金をめっきした 2層で構成される。金は軟らかく摩耗し易いため、金め っきには耐摩耗性の観点からコバルトやニッケルなどを 少量添加した硬質な合金めっきが一般的に用いられ る<sup>1)</sup>。

# 1.2 接触信頼性

金めっきを代替する上で,接触信頼性は最も重要な特 性の一つである。接触信頼性を確保するためには,端子 接点の接触電気抵抗(以下,接触抵抗という)を低く維 持することが必要である。接触抵抗とは,接触する二つ の表面間に発生する電気抵抗のことであり,皮膜そのも のの電気抵抗である皮膜抵抗と電流が集中することによ る集中抵抗の和として式(1)で示される<sup>2).3)</sup>。

 $R = R_f + R_c \quad (1)$ 

ここに、Rは接触抵抗 (m $\Omega$ )、 $R_f$ は皮膜抵抗 (m $\Omega$ )、 $R_c$ は集中抵抗 (m $\Omega$ ) である。

同種金属が接触した場合の皮膜抵抗と集中抵抗は,式 (2)で示される。

$$R_f = \frac{\rho_f d}{\pi a^2}, \ R_c = \frac{\rho}{2a} \quad \dots \qquad (2)$$

ここに,  $\rho_f$ は皮膜の固有抵抗 ( $\Omega$ ·m), dは皮膜の厚 さ(m),  $\rho$ は金属の固有抵抗( $\Omega$ ·m), aは接触面半径(m) である。

式(2)より,皮膜抵抗は,皮膜の固有抵抗が小さい ほど低減し,集中抵抗は,接触面の半径が大きいほど, すなわち接触面積が大きいほど低減する。

図2にリフローすずめっき,および金めっきの荷重 と接触抵抗の関係を示す。接触抵抗は,四端子法により 測定した電圧降下をもとに算出した。測定には,板状の めっき材試験片と,金線をU字に曲げたプローブを使用 した。プローブを試験片に押し当て,垂直荷重を徐々に 増加させながら,0.5~5 Nの範囲で各荷重における電圧 降下を測定した。試験中にプローブを摺動(しゅうどう) させる場合もあるが<sup>4).5)</sup>,本試験では接触抵抗に及ぼす 酸化膜破壊の影響を確認するため,酸化膜の破壊が緩や かになるように摺動は行わずに試験を行った。図2より, リフローすずめっきは,荷重の増加に伴い接触抵抗が大 幅に減少し,2.0 N以上では接触抵抗の減少が緩やかに なった。いっぽうで,金めっきは,0.5~5 Nでリフロー





すずめっきより低い接触抵抗を維持していた。

一般的に,金属の酸化皮膜は金属に比べて固有抵抗が 高いため,酸化皮膜が形成された部位は絶縁状態とな る。その結果,導通する接触面積が小さくなり,集中抵 抗が増加して接触抵抗が増加すると考えられる<sup>2).3)</sup>。

リフローすずめっきの表面は保護性の酸化皮膜で覆わ れており,絶縁破壊を利用できない低圧回路では接圧だ けで酸化皮膜を機械的に破壊できず,接触抵抗が金めっ きよりも高くなったと考えられる。金めっきは,表面に 単分子程度のごく薄い酸化皮膜で表面を覆われているだ けで,トンネル効果による導通が確保される<sup>2),6)</sup>。

リフローすずめっきの場合,軟らかいすず(ビッカー ス硬さ:50~70 MPa)の上に硬い酸化皮膜(ビッカース 硬さ:16.5 GPa)が薄く形成されるという報告がある。<sup>7)</sup> 酸化皮膜を表面に有するすずめっきは,荷重を負荷する とすずめっきが変形するが,荷重の増加に伴うすずめっ きの変形に対しては,酸化皮膜が追従できずに破壊さ れ,すずと金の接触が得られやすい<sup>4)</sup>。酸化皮膜の破壊 により接触面積が増加,集中抵抗が減少したことで,接 触抵抗が減少したと考える。したがって,すずめっきは, 接触荷重を大きくとれ,酸化皮膜を十分に破壊可能な部 位に,金めっきは,接触信頼性の要求が高く接触荷重が 小さい部位に一般的に使用される<sup>2)</sup>。

すずめっきは,低い接触荷重での接触信頼性が金めっ きに及ばない。そこで低圧回路用の低接圧端子でも接触 信頼性が維持可能なすずめっきを開発した。ここでは, すずめっきの接触抵抗が金めっきに及ばない荷重領域を 低接圧と定義する。

# 2. 低接圧におけるすずめっきの接触信頼性向上

# 2.1 すずめっきの酸化皮膜破壊機構について

先述のように、すずめっきは、表面に固有抵抗の高い 酸化皮膜を形成し、酸化皮膜に覆われた部位が絶縁状態 となり、集中抵抗の増加により接触抵抗が増加する。ま た、表層の硬い酸化皮膜を破壊できる接触荷重をかける ことで、接触抵抗を低減している。したがって、すずめ っきの接触抵抗を低減するためには、すずの酸化を抑制 するか、もしくはすずの酸化皮膜を破壊しやすくするこ とが有効と考えられる。

すずの酸化を抑制することについては,酸化しにくい 金や銀などの貴金属や酸化を抑制する有機物との組合せ が有効と考えられるが,めっきの製造にかかるコストの 増加や省資源の観点から望ましくない。そこで低い接触 荷重でもすずの酸化皮膜を効率よく機械的に破壊する手 法を検討した。

また,酸化皮膜を効率的に破壊することについては, 接触荷重を局所的に集中させ,単位面積当たりの接触荷 重(面圧)を高くすることが有効と考えた。面圧を高く するために,すずめっき表面に微細な凸形状を付与する 開発コンセプトを考案した。

# 2.2 表面への凸形状付与による接触抵抗の改善

コンセプト検証のために,リフローすずめっきの表面 に微細な凸形状を付与した開発すずめっき(以下,粗化
すずめっきという)を作製した。図3に、レーザ顕微 鏡によるすずめっきの表面観察結果、および算術平均高 さSa (ISO25178)を示す。比較としてリフローすずめ っき材についても示す。粗化すずめっきは、Saがリフロ ーすずめっきより高く、粗い表面であった。Saは、表 面の平均面からの高さの絶対値の算術平均のことで、二 次元の粗さパラメータRaを三次元に拡張したパラメー タである<sup>8)</sup>。

図4に接触抵抗試験の概略図を示す。端子接点用め っきは、異種金属接触による腐食や熱起電力発生を防止 するためにオス端子とメス端子に同種金属のめっきを使 用するのが一般的であり<sup>9)</sup>、端子の接点はすずめっき同 士の接触が想定される。したがって、本試験では半球形 状に加工したリフローすずめっきの先端を評価用のすず



図3 表面形状を変更したすずめっきの表面観察結果 Fig.3 Laser microscope images and surface roughness of tin plating with different surface roughness



図4 接触抵抗試験の概略図 Fig.4 Schematic image of contact resistance test

めっき板材料に接触させて、接触抵抗を測定した。

図5にすずめっきの荷重と接触抵抗の関係を示す。荷 重0.2~0.8 Nにおいて、粗化すずめっきは、リフローす ずめっきよりも接触抵抗が低く、荷重0.5 Nにおける粗 化すずめっきの接触抵抗は4 mΩ、リフローすずめっき は7 mΩであった。

図6に荷重0.5N負荷後のめっきサンプルの接触痕観 察結果を示す。レーザ顕微鏡による観察結果から、変形 が認められたエリアを白実線で示す。接触痕中央付近の 断面プロファイル(観察位置を白点線で示す)より、リ フローすずめっきは接触痕付近が全体的に窪んでいるこ とに対し、粗化すずめっきはすずの凸形状部の先端が周 囲よりも低かった。

図7にめっきサンプルの接触痕中央付近と非接触部のSEM観察結果(反射電子像)を示す。反射電子像の 白色部分がすず,灰色部がすずの酸化物であり,すず部 を白色,それ以外を黒色にする画像処理を行った。粗化 すずめっきの非接触部は,全面がすずの酸化物で覆われ ていたのに対し,粗化すずめっきとリフローすずめっき の接触痕中央付近は,表面にすずとすずの酸化物が確認 され,すずの面積率は粗化すずめっきの方が大きかっ







図6 接触痕の形状観察結果

Fig.6 LASER microscope images of contact marks on the surface of test samples after applying 0.5N load

Comolo.	Rough tin plating		Reflow tin plating
Sample	Out of contact area	Center of contact area	Center of contact area
BSE images	Sn, O	Sn, O Sn	<u>Sn</u> <u>Sn</u> , Ο —1 μm
Images after binarization			Black : Tin oxide White : Tin
White area ratio (%)	0	17	5
		出身	。 &:参考文献10)のFig.6を一部修正

図7 非接触部および接触部の表面観察結果 Fig.7 SEM images of contact and out of contact area



図8 接点の概略図 Fig.8 Schematic models of contact area

た。そのため,接触部分において,負荷荷重によりすず の酸化皮膜の一部が破壊されて,すずが表面に露出した ものと考えられる。接触痕の観察結果から,リフローす ずめっきに対して,粗化すずめっきは島状のすずが多く 分散していた。

図8に接点の概略図を示す。図6,7によるめっき表面の観察結果から、粗化すずめっきは、凸部に荷重が集中することで、表層のすずの酸化皮膜の破壊が促進され、接触抵抗が低減したと推定する。

## 3. 耐熱性, 耐微摺動摩耗性, 端子挿抜性を兼 備させた低接圧対応すずめっき

自動車に搭載された端子は、熱や振動にさらされるた め、高温、振動環境下でも接触抵抗を低く維持すること が要求される。リフローすずめっきは、高温、振動環境 下ですずの酸化物の影響を受けやすくなり、接触抵抗が 増加する懸念がある。したがって、金めっきを代替する には高温環境に対応できる耐熱性、および振動や温度変 化に対応できる耐微摺動摩耗性が求められる<sup>1).2)</sup>。

#### 3.1 耐熱性

自動車のエンジンルームは車内より高温になりやす く<sup>11)</sup>,加速寿命試験では耐熱温度150~160℃が要求され る。

リフローすずめっきは、高温環境中で素材の銅とすず

の相互拡散が促進され、銅すず系金属間化合物が形成される<sup>3)</sup>。結果として、すずが少なくなり、表層に固有抵抗の高い銅の酸化皮膜が形成されることで抵抗増加につながる懸念がある<sup>3)~5)</sup>。

耐熱性の向上には、銅とすずの拡散を抑制するため に、リフローすずめっきの銅すず系金属間化合物層の下 層にニッケル層を導入した3層構成が有効であることが 分かっている<sup>3)~5)</sup>。

### 3.2 耐微摺動摩耗性

エンジン駆動や自動車走行時の振動,周辺環境の温度 変化や通電時の発熱などによる熱伸縮に起因して,接点 は微小なずれを生じる<sup>3)~5)</sup>。この接点のずれにより,め っきが摩耗する現象を微摺動摩耗と呼ぶ。軟らかいすず は摺動によって容易に削れるため,微摺動摩耗の影響を 受けやすく,接触抵抗が増加する懸念がある。したがっ て,微摺動摩耗による抵抗増加の抑制が要求される。耐 微摺動摩耗特性の向上には,表面に銅すず系金属間化合 物を露出させることが有効であることが分かってい る<sup>3)~5)</sup>。

#### 3.3 摩擦係数

自動車の組み立て作業において、ワイヤーハーネスの コネクタ嵌合(かんごう)は手作業で行われることから、 作業者の負荷軽減を目的に、コネクタ嵌合時の挿入力上 限の規格を引き下げる動きがあり、コネクタの挿入力低

減が要求される<sup>3)~5)</sup>。コネクタの挿入力には、めっきの 摩擦係数が影響するため、めっきの摩擦係数低減が求め られる<sup>3)~5)</sup>。いっぽうで、リフローすずめっきは、すず が軟らかいため摩耗しやすい。すずの摩耗は、摺動時に 抵抗力となり、摩擦係数の増加を引き起こす懸念があ る。

摩擦係数の低減には、表層に銅すず系金属間化合物を 露出させることが有効であることが分かっている<sup>3)~5)</sup>。 3.4 低接圧対応すずめっきの性能

図9に低接圧対応すずめっきの表面および断面構造 の概略図を示す。低接圧対応すずめっきは、耐熱性の向 上を目的として, すず/銅すず系金属間化合物/ニッケ ルの3層で構成した。さらに、耐微摺動摩耗性、低摩擦 係数を付与するため、銅すず系金属間化合物を表面に露 出させた表面構造とした。加えて、2章で述べたように、 最表層のすずの表面には,接触信頼性の向上のため凸形 状を付与した。

図10に加熱試験前後のめっきの荷重および接触抵抗 の関係を示す。酸化膜の接触抵抗への影響を確認するた め、試験荷重2.0 N以下での接触抵抗を調査した。リフ ローすずめっきは、加熱後に接触抵抗が大幅に増加した ことに対して、低接圧対応すずめっきと金めっきは、低 い接触抵抗を維持した。

リフローすずめっきは、高温環境にさらされることに より銅すず系金属間化合物の形成が促進され、すずが少 なくなった結果,表層に固有抵抗の高い銅の酸化皮膜が 形成されたことで接触抵抗が増加したと考える<sup>3)~5)</sup>。2 章で述べたように、低接圧対応すずめっきは、すずの凸





Fig.10 Relationship between contact load and contact resistance before and after  $160 \text{ }^{\circ}\text{C} \times 120 \text{ h}$ , annealing

形状により初期の接触抵抗を低減したと推察される。ま た、低接圧対応すずめっきと金めっきは、素材の銅成分 がめっき表層へ拡散するのを下地のニッケル層が抑制し た結果,接触抵抗を低く維持したと考察される<sup>1),3)</sup>。

図11に微摺動摩耗試験の概略図および試験条件を示 す。板状の試験片(Flat)と曲率半径1mmの半球形状 に加工した試験片(Emboss)を接触させ、荷重1Nを 負荷して保持した。その後,板状の試験片を摺動距離 50 µmで繰り返し摺動させ、摺動時の接触抵抗を四端子 法で測定した。

図12にめっきの荷重1Nにおける微摺動摩耗試験中 の接触抵抗挙動を示す。すずめっきは、10~100サイク ル付近に接触抵抗のピークが認められ、低接圧対応すず



Fig.11 Schematic image of fretting test system



図12 めっきの微摺動摩耗試験中の接触抵抗の挙動 Fig.12 Changes of contact resistance of plating on fretting test

2.0

めっきの方が接触抵抗のピークは低かった。いっぽう で,金めっきはピークが認められず,抵抗を低く維持し ていた。

すずめっきの微摺動摩耗では,摺動により軟らかいす ずの摩耗粉が発生し,摩耗粉の一部は外部へ排出される ものの,残りは接点間に堆積する。堆積したすずの摩耗 粉が酸化することにより接触抵抗が増加する<sup>4).5)</sup>。その 後,銅すず系金属間化合物まで摩耗すると,すずが枯渇 することで摩耗粉の発生よりも排出が多くなり,接点部 に堆積した摩耗粉が減少し,接触抵抗が減少する。した がって,接触抵抗のピークの低減にはすずの摩耗を抑制 することが重要である。低接圧対応すずめっきは,銅す ず系金属間化合物を表面に露出させたことで,すずの摩 耗を抑制した結果,接触抵抗のピーク高さが低減したと 推察される<sup>3)</sup>。

金めっきは、めっきが硬いため摩耗が抑制されたこと と、金の摩耗粉が酸化しにくいため、摩耗粉が発生しに くくなり、接触抵抗のピークが抑制されたと考えられ る<sup>12)</sup>。

図13に摩擦係数の測定方法の概略図,および試験条件を示す。摩擦係数の測定は、日本伸銅協会技術標準 JCBA T311:2002を参考にして実施した。板状の試験 片(Flat)と曲率半径1mmの半球形状の試験片 (Emboss)を接触させ、板面の法線方向に1Nの荷重を 負荷させた。荷重を保持したまま、板状の試験片を摺動 させたときの摩擦力から摩擦係数を算出した。



Fig.13 Schematic image of measuring apparatus of friction coefficient



図14にめっきの動摩擦係数を示す。低接圧対応すず めっきは、リフローすずめっきおよび金めっきに対して 同等以下の動摩擦係数を示した。すず同士の摩擦では、 すずの凝着摩耗が主体となり、見かけ上の硬さを高める ことで摩擦係数が低減すると言われている<sup>3)~5)</sup>。すずよ りも硬い銅すず系金属間化合物を表面に露出させたこと ですずの摩耗を抑制したと考察される<sup>3)~5)</sup>。

**むすび**=従来のリフローすずめっきに対して,低い接触 荷重での接触信頼性,耐熱性,耐微摺動摩耗性に優れる 低接圧対応すずめっきを開発した。耐微摺動摩耗性は, 金めっきには及ばないため,耐微摺動摩耗性の懸念が少 ない用途において,貴重な金を用いためっきの一部を代 替することができると考える。ラボ試作で良好な性能が 得られたため,今後量産化に向けて取り組んでいく。

#### 参考文献

- 1) 古藤田哲哉. 貴金属めっき. 第1版, 槇書店, 2001, p.119-121.
- コネクタ最新技術'99 編集委員会. コネクタ最新技術'99. 初版, (株)日本アドバンストテクノロジー, 1999, p.1-12.
- 3) 鶴 将嘉ほか. R&D神戸製鋼技報. 2012, Vol.62, No.2, p.59-62.
- 4) 上田雄太郎ほか. R&D神戸製鋼技報. 2022, Vol.71, No.2, p.22-28.
- 5) 坂本 浩. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.1, p.19-24.
- 6) 玉井輝雄. 表面技術. 2004, Vol.55, No.12, p.102-107.
- (1) 玉井輝雄ほか. 信学技報 IEICE Technical Report. EMD2008-2, p.7-12.
- 8) 株式会社キーエンス. 表面粗さ測定入門 面粗さ編, p.9-18.
- 9) 安東泰博ほか. 電子通信学論文誌C. 1983, Vol.61, p.11.
- 10) 上田雄太郎ほか. 銅と銅合金. 2024, Vol.63, No.1, p.221-225.
- 11) 泉 重郎. ESPEC技術情報誌. 1997, No.9, p.5-11.
- 12) 山中拓哉ほか. 信学技報 IEICE Technical Report. EMD2012-104, p.7-11.

## **R**∗D 神戸製鋼技報掲載 自動車用材料・技術関連文献一覧表

(Vol.66, No.2~Vol.72, No.1)

# Papers on Advanced Technologies for Materials and Technologies for Automobiles in R&D Kobe Steel Engineering Reports (Vol.66, No.2~Vol.72, No.1)

		卷/号
●溶接部の電着塗装性を向上させるスラグ制御技術	木梨光ほか	72/1
Slag Control Technology to Improve the Electrodeposition Coating Properties of Arc Weld Joints	Hikaru KINASHI e	et al.
●亜鉛めっき超高張力鋼板の抵抗スポット溶接で発生するLME割れが継手強度に 及ぼす影響・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	前田恭兵ほか	72/1
Influence of LME Cracks in Resistance Spot Welds of Zinc-coated Ultra-high Strength Steel Sheets on Joint Strength	Kyohei MAEDA e	et al.
<ul> <li>●異種金属接合法「エレメントアークスポット溶接法」の継手強度に及ぼす鋼板強度特性 および溶接金属組織の影響・</li> <li>Influence of Steel Sheet Mechanical Properties and Weld Metal Microstructure on Joint Strength</li> </ul>	: ・大志田達郎ほか	72/1
of the Dissimilar-Metal Joining Method "Element Arc Spot Welding"	Tatsuro OSHIDA e	et al.
<ul> <li>●純鉄系軟磁性材料の鍛造加工ひずみの影響を考慮した磁場解析による効果検証</li> <li>Benefit Estimation of Soft-magnetic Pure Iron by Magnetic Field Analysis Considering Effect of Forging State</li> </ul>	・・・・ 笠井信吾ほか train Shingo KASAI e	71/2 et al.
●純鉄系軟磁性鋼板····· Soft Magnetic Iron Sheets	… 土田武広ほか Takehiro TSUCHIDA e	71/2 et al.
●車載端子用すずめっきの性能向上技術 Technology for Improving Performance of Tin Plating for Automotive Terminals	・上田雄太郎ほか Yutaro UEDA 。	71/2 et al.
●二次電池の技術動向と分析・評価技術 Technical Trends in and Analysis / Evaluation Technologies of Secondary Batteries Dr.	… 坪田隆之ほか . Takayuki TSUBOTA e	71/2 et al.
● 固体高分子型燃料電池セパレータ用材料の最近の開発動向と当社の取り組み Recent Development Trends in Materials for Bipolar Plates of Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs) and Kobe Steel's Activities	······ 佐藤俊樹 Toshiki SA	71/2 Ato
●均質化弾塑性FEMによるDual-phase鋼のマルチスケール強度解析	······ 黒澤瑛介 Dr. Eisuke KUROSA	71/1 .WA
<ul> <li>●機械学習・深層学習を用いたデータ駆動型バッテリー劣化予測技術</li> <li>Battery Degradation Modeling Based on FIB-SEM Image Features Extracted</li> </ul>	… 高岸洋一ほか	71/1
by Deep Neural Network D	r. Yoichi TAKAGISHI e	et al.
●高強度鋼のスケールおよびめっき層の高温反応挙動のその場測定 In-situ Measurement of High-temperature Reaction Behavior of Scale and Zinc Coating Layer	… 大友亮介ほか	71/1
on High-strength Steel	Ryosuke OTOMO e	et al.
●2000系新耐熱アルミニウム押出合金 New Aluminum Alloy of 2000 Series for Extruded Materials with Excellent Heat Resistance	···· 貝田一浩ほか Kazuhiro KAIDA e	70/2 et al.
● 自動車用サスペンション向けアルミニウム合金鍛造材の二段時効による高強度化 Strengthening of Aluminum Alloy Forgings for Automotive Suspension by Two-step Aging	···· 堀 雅是ほか Masayuki HORI e	70/2 et al.
●低鉄損圧粉磁心用新鉄粉「マグメル <sup>TM</sup> ML25D」	···· 北条啓文ほか Hirofumi HOJO e	70/2 et al.
●焼結転造歯車の高強度化メカニズムおよび適用メリット	… 谷口祐司ほか	70/2
of Its Application in Automotive Field	Yuji TANIGUCHI e	et al.

●高密度化潤滑剤「KP-300A」を添加した混合鉄粉の特性	佐藤充洋ほか 70/2 plication Mitsuhiro SATO et al.
●燃料電池自動車向け再エネ由来水素ステーションの実証・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	藤澤彰利ほか 70/1 Dr. Akitoshi FUJISAWA et al.
●水素充填シミュレーションを用いた水素ステーション設計技術	山下和宏ほか 70/1 Kazuhiro YAMASHITA et al.
●自動車分野における当社の成長戦略 Kobe Steel's Growth Strategy in Automobile Field	······ 水口 誠 69/1 Makoto MIZUGUCHI
●線材および薄鋼板分野での海外展開 Overseas Expansion of Wire Rod and Sheet Business	南田高明ほか 69/1 Takaaki MINAMIDA et al.
● 自動車用アルミ板,押出材,鍛造サスペンション事業のグローバル展開 Global Marketing Strategies for Automotive Aluminum Sheet, Extrusion and Forged Suspension Businesses	高木康夫ほか 69/1 Dr. Yasuo TAKAKLet al
● 車載端子・コネクタ用銅板圧延事業のグローバル展開	······ 三輪洋介 69/1 Yosuke MIWA
●自動車パネル用アルミニウム合金板材の開発動向	太田陽介ほか 69/1 Yosuke OTA et al.
●車載端子用銅合金およびめっきの開発動向 Technical Trends in Copper Alloys and Plating for Automobile Terminals	······ 坂本 浩 69/1 Hiroshi SAKAMOTO
●軸圧壊時の変形能に優れるGA980MPa級合金化溶融亜鉛めっき鋼板 Hot-dip Galvannealed Steel Sheet of 980MPa Grade Having Excellent Deformability in Axial Crush	中屋道治ほか   69/1 Michiharu NAKAYA et al.
● 自動車用高強度鋼板の延性に及ぼす残留オーステナイト存在状態の影響 Effects of Retained Austenite Conditions on Ductility of Advanced High Strength Steels for Automobiles	村上俊夫ほか 69/1 Dr. Toshio MURAKAMI et al.
●加工硬化を考慮した終局曲げ耐荷力の簡便算定法	吉岡典恭ほか 69/1 Noriyasu YOSHIOKA et al.
●ハイテン成形用金型向け高耐久性表面処理	山本兼司ほか 69/1 Dr. Kenji YAMAMOTO et al.
●切削シミュレーションを活用した棒鋼材料の切削条件設計技術	山本雄也ほか 69/1 Yuya YAMAMOTO et al.
● 自動車車体へのアルミ合金板適用に向けたソリューション技術 Solution Technology for Applying Aluminum Alloy Sheet to Automobile Bodies	······ 赤崎圭輔 69/1 Keisuke AKASAKI
●自動車部材の剛性設計指針に関する考察	細井寛哲ほか   69/1 Hiroaki HOSOI et al.
● 自動車車体のマルチマテリアル化とそれを支える異材接合技術	内藤純也ほか 69/1 Dr. Junya NAITO et al.
●曲げ負荷を受けるマルチマテリアル (MM) 車体ビームの多目的最適化設計 Multi-objective Optimization Design of Multi-material (MM) Vehicle Beam under Bending Load	史棟勇ほか 69/1 Dongyong SHI et al.
<ul> <li>超ハイテン鋼板のレーザ溶接における割れ発生機構および防止手段</li> <li>Crack Generation Mechanism and Prevention Means in Laser Welding of Ultra high-Strength Steel Sh</li> </ul>	前田恭兵ほか 69/1 neets Kyohei MAEDA et al.
●バンパシステムへのゴムバルジ接合技術の適用	山川大貴ほか 69/1 Taiki YAMAKAWA et al.

●接着接合部のCAEモデリングの基礎検討と精度検証 ······ CAE Modeling of Adhesive Bonding and Accuracy Validation	・・・・・・伊原涼平ほか 69/1 Dr. Ryohei IHARA et al.
● 自動車構造部材向けアルミニウム合金パネル材の抵抗スポット溶接 Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy Sheets for Automotive Structural Members	青木拓朗ほか 69/1 Takuro AOKI et al.
●ワイヤ送給制御アーク溶接専用ソリッドワイヤ「Fシリーズ」	井海和也ほか 69/1 Kazuya IKAI et al.
●自動車薄鋼板用溶接スラグ低減技術 Low-Slag Welding Process for Automotive Steel Sheets	山﨑亮太ほか 69/1 Ryota YAMASAKI et al.
● 自動車用アルミサスペンション部品の製造データの収集と解析	小林明ほか   68/2 Akira KOBAYASHI et al.
●重ねすみ肉溶接継手の残留応力特性に及ぼす諸因子の影響	永井卓也ほか 67/1 Dr. Takuya NAGAI et al.
●一般的な異種金属接合法の種類と比較	小橋泰三ほか 67/1 Taizo KOBASHI et al.
●異種金属接合法「エレメントアークスポット溶接法」 Dissimilar Metal Joining Process-Element Arc Spot Welding	陳 亮ほか 67/1 Liang CHEN et al.
●鋼板とアルミ合金の異種金属接合法=ダボスポット溶接法=	······ 橋村 徹ほか 67/1
● 自動車向け当社アルミ・銅製品の普及拡大に向けて	Dr. Toru HASHIMURA et al. 藤井拓己 66/2 Takumi FUJII
●1300MPa, 1500MPa級マルテンサイト鋼板	内海幸博ほか 66/2 Yukihiro UTSUMI et al.
●1180MPa級合金化溶融亜鉛めっき鋼板 Hot-dip Galvannealed Steel Sheet of 1180MPa Grade	池田宗朗ほか 66/2 Muneaki IKEDA et al.
●高生産性ホットスタンプ用鋼板 Steel Sheets for Highly Productive Hot Stamping	濵本紗江ほか 66/2 Sae HAMAMOTO et al.
●超高加工性1180MPa級冷延鋼板の特性	村田忠夫ほか 66/2 Tadao MURATA et al.
●高加工性ハイテン材を活用した自動車用シート部品の軽量化 Weight Reduction of Automotive Seat Components using High-strength Steel with High Formability	吉岡典恭ほか 66/2 Noriyasu YOSHIOKA et al.
●軟化焼鈍省略線材	千葉政道ほか 66/2 Dr. Masamichi Chiba et al.
●純鉄系軟磁性材料······ Soft Magnetic Iron Wire	······ 坂田昌之   66/2 Masayuki SAKATA
●冷間鍛造歯車用鋼····· Gear Steel for Cold Forging	······ 貝塚正樹 66/2 Masaki KAIZUKA
● 自動車パネル用6000系アルミニウム合金のクラスタ形態と時効硬化性	有賀康博ほか 66/2 Dr. Yasuhiro ARUGA et al.
●高強度鋼の超高サイクル疲労破壊挙動に与える荷重形式の影響	······· 三大寺悠介   66/2 e    Yusuke SANDAIJI
●大気腐食環境下における鋼材の耐食性とさび性状が吸蔵水素量に与える影響 Effect of Corrosion Resistance and Rust Characteristics on Hydrogen Absorption into Steel under Atmospheric Corrosion Conditions	・・・・ 衣笠潤一郎ほか   66/2 Junichiro KINUGASA et al.

●車体軽量化に貢献するアーク溶接法と溶接材料	鈴木励一ほか 66/2 Dr. Reiichi SUZUKI et al.
●ホットスタンプ部品の曲げ圧壊挙動と鋼材の機械的特性との相関 Correlation between Side Impact Crash Behavior of Hot-stamping Parts and Mechanical Properties	・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
●高強度薄板金属材料の破断予測シミュレーション	鎮西将太ほか 66/2 Shota CHINZEI et al.
●アルミニウム合金の自動車用表面処理技術 Surface Treatment Technologies of Aluminum Alloy for Automobiles	太田陽介ほか 66/2 Yosuke OTA et al.
●リジングマークの定量評価技術	······ 市川武志   66/2 Takeshi ICHIKAWA
●耐SCC性に優れる高強度7000系アルミニウム合金押出材	志鎌隆広ほか   66/2 Dr. Takahiro SHIKAMA et al.
●自動車部品へのアルミ押出材の適用	······ 橋本成一   66/2 Narukazu HASHIMOTO
●自動車用アルミ鍛造サスペンション事業~日・米・中 3 極体制の確立~ Globalization of Aluminum Forging Automotive Suspension Business-Establishment of Production E in Japan, USA and China-	・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
●耐応力緩和特性に優れる高導電率銅合金CAC <sup>®</sup> 18	隅野裕也 66/2 Dr. Yuya SUMINO
●硬さ測定による車載端子用銅合金の応力緩和特性の評価	······ 野村幸矢 66/2 als Dr. Koya NOMURA
●自動車用中強度Al-Mg系合金のミグ溶接継手特性	······ 江間光弘 66/2 embers Mitsuhiro EMA
●アルミニウム合金製鍛造サスペンション部材のひずみ状態の評価 Evaluation of Strain Distribution in Forged Suspensions of Aluminum Alloy	細井寛哲ほか 66/2 Hiroaki HOSOI et al.
●リチウムイオン二次電池向けシミュレーション技術	山上達也ほか 66/2 Dr. Tatsuya YAMAUE et al.

## 電気自動車用大電流端子向け耐摩耗性に優れる粒子共析銀めっき

須田貴裕\*1·山本慎太郎\*2

カーボンニュートラル推進のため、電気自動車(EV) の普及が進むと予想される。EVにおいて、大きな電流 が流れる充電器や内部回路を接続する端子には、電気的 な接続信頼性を担保するために導電性の高い銀めっきが 使用される<sup>1)</sup>。しかし、これらは非常に多くの回数の挿 抜や振動にさらされるため、軟らかい銀同士の組合せの 場合、凝着による摩耗が起こりやすい。耐摩耗性改善の ため、銀被膜の硬度を上げた硬質銀めっきが使用されて いる<sup>1)</sup>が、要求性能に達していない。

当社は,共析により有機系粒子を銀被膜中に分散させ た耐摩耗性の高い粒子共析銀めっきを開発し,電気的な 接続信頼性を担保しつつ,摩耗の課題解決を試みた。

粒子共析銀めっきの構成を図1に示す。このめっきは、 銅基材上に下地のニッケルめっき、粒子共析銀めっきの 順に電気めっきを行うことで得られる。

耐摩耗性の評価として,荷重を負荷した状態で往復の 繰返し摺動(しゅうどう)試験を行った。摺動試験前後 の断面SEM写真を図2に示す。この試験では、粒子共 析銀めっきに加え、比較として硬質銀めっきについても 評価した。なお、摺動の相手材には硬質銀めっきを使用 した。図2a),b)より、試験後の硬質銀めっきは、早 い段階で銀被膜が消失したものと推定され、銅基材が露 出するほど摩耗していた。いっぽうで、粒子共析銀めっ きは摺動の前後でめっき厚さが変わらなかったことから、 ほとんど摩耗していないことが確認できる(図2c),d))。

以上のように, 銀めっき被膜中に有機系粒子を共析さ せることによって, 硬質銀めっきよりも耐摩耗性に優れ る銀めっきを開発することに成功した。耐摩耗性が向上 した理由は, 銀被膜に分散させた有機系粒子の作用によ って, 銀の凝着による摩耗を低減させたためと考える。

#### 参考文献

1) 秦 朋美. 表面技術. 2019, Vol.70, No.9, p.441-445.



図1 粒子共析銀めっきのめっき構成



図2 摺動試験前後の断面SEM写真,

\*1素形材事業部門 銅板ユニット 銅板工場 \*2技術開発本部 材料研究所

硬質銀めっき a) 摺動前, b) 摺動後および粒子共析銀めっきc) 摺動前, d) 摺動後

## 1.0 GPa, 1.5 GPa, 1.8 GPa級ホットスタンプ用鋼板

荒木晴香\*1·濱本紗江\*1

自動車の衝突安全性向上,排出ガス削減のため,自動 車用ハイテンの高強度化が進んでいる。さらに部品の高 剛性化,軽量化,製造コスト低減を目的とした板厚や材 質の異なる部品の一体化ニーズ<sup>1)</sup>も高まっている。ホ ットスタンプは,冷間プレスにて課題となる高強度材で の寸法精度確保や部品の大型化に伴う成形荷重増大を同 時に解決できる技術として,幅広い強度クラスでの適用 提案がされている<sup>2)</sup>。当社では,製品化済みの1.5 GPa 級<sup>3)</sup>に続いて,1.0 GPa級および1.8 GPa級のホットスタ ンプ用鋼板を新たに開発した(**表**1)。

#### 1. 開発鋼に共通する特徴

開発鋼は、30℃/s以下の臨界冷却速度を有し、焼入 れ性に優れるとともに、Ms点近傍温度以下の冷却速度 (二次冷却速度)の影響を受けにくく、硬度安定性にも 優れる(図1)。開発鋼の活用によりテーラードブラン クなどの一体成形における差厚部近傍のようなブランク と金型が接触しにくい場合や、多段成形プロセスのよう な緩冷却条件を伴う場合であっても、安定して強度を確 保しやすくなる。

#### 2. 1.0 GPa級開発鋼の特徴

1.0 GPa級開発鋼は,衝突時に変形するエネルギー吸 収部位への適用に有効である。軸圧壊変形において,開 発鋼適用のホットスタンプ部材(図2,a)は従来部材 (図2,b)と比較して割れを大幅に抑制可能である。こ れは,開発鋼が単一組織でありミクロなひずみ集中を緩 和していることに起因する。

#### 3. 1.8 GPa 級開発鋼の特徴

1.8 GPa級開発鋼は, 亀裂発生起点となる炭化物を微 細分散させる成分設計により, 低温環境下でも高いシャ ルピー衝撃値(靭性)を示す(図3)。このため, 車両 衝突時にキャビン空間を保護する変形抑制部位への適用 に有効である。

#### 参考文献

- 1) 内田正人. 塑性と加工. 2013, Vol.54, No.627, p.307-308.
- Steels for hot stamping Usibor<sup>®</sup> and Ductibor<sup>®</sup>. https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/PHS/ usibor\_ductibor, (参照2024-08-09).
- 3) 濱本紗江ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.12-16.

焼入れ後 代表特性 焼入れ前 代表特性 強度 適用提案 ステータス 下限規格 部位 YS тs ΕI YS ТS El (MPa) (MPa) (%) (MPa) (MPa) (%) 衝撃吸収 1.0GPa 開発完了 420<sup>\*\*</sup> 580<sup>\*</sup> 27\* 810 1,120 9 部位 変形抑制 製品化済み 4\*2 1.5GPa 970<sup>\*</sup> 1.080\* 1.140 8 1.620 部位 変形抑制 5\*2 開発完了 410<sup>\*</sup> 1.310 7 1.8GPa 1,0603 1,860 部位

表1 開発鋼代表特性

※1 熱延鋼板 ※2 冷延鋼板



a: 1.0GPa級開発鋼のホットスタンプ部材 b: 1.0GPa級DP鋼板の冷間プレス部材 図2 1.0 GPa級開発鋼の軸圧壊試験結果





## CO<sub>2</sub>削減に寄与するボルト用鋼(非調質ボルト用鋼KNCH<sup>™</sup>シリーズ) <sup>松本洋介\*1・高知琢哉\*1</sup>

カーボンニュートラル達成に向け鉄鋼材料や部品の製 造工程で発生するCO<sub>2</sub>の削減が求められている。自動車 部品などの締結に用いられるボルトは,鉄鋼メーカで製 造したボルト用線材を用いて,ワイヤメーカ,ボルトメ ーカで軟化焼鈍や焼入れ焼戻しを経て製造されている (図)。当社ではこれらの熱処理を省略できる非調質ボル ト用鋼KNCH<sup>TM達1)</sup>シリーズ<sup>1)</sup>を開発・商品化している。

軟化焼鈍の省略にはボルト圧造が可能な塑性変形能の 確保と、工業的に量産可能な金型寿命を得るための変形 抵抗の低減が必要となる。ボルト圧造時の塑性変形を担 う転位は鋼中の固溶Nによって移動が阻害され、変形能 の低下や変形抵抗の増加を招くことが知られている<sup>2)</sup>。 KNCH<sup>™</sup>シリーズはJIS炭素鋼と比べAlを増量添加し, Nを AINとして析出させることで転位の易動度を向上さ せている。また、ボルトのフランジ部は圧縮変形で成形 されるため、圧縮方向の変形抵抗低減、変形能向上が重 要となる。そこで、あらかじめ引張方向のひずみを付与 することで圧縮方向の変形を容易にする効果(バウシン ガー効果<sup>1),3)</sup>)を活用している。減面率の増加に伴う引 張方向のひずみ増加によりバウシンガー効果が顕著とな るが、同時に加工硬化でワイヤ強度が上昇するため、変 形抵抗は減面率に対して極小値を持つ。変形抵抗の極小 値が得られる減面率でワイヤを製造することで優れた冷 間鍛造性を得ることができる。これらの成分適正化とバ ウシンガー効果の活用により変形能の確保と変形抵抗の 低減を達成し、軟化焼鈍材と同等の冷間鍛造性を実現で きる。

いっぽう, 焼入れ焼戻しを省略するには線材圧延後の 引張強度と, 伸線加工およびボルト圧造での加工硬化量 を制御する必要がある。そのために最終のボルト強度区 分ごとに鋼材の引張強度への影響が大きいC, Si, Mn, Cr添加量を調整した。また, 線材圧延温度の低温化に よりオーステナイト粒を微細化し, 冷却時の相変態を促 進させることで, 均一なフェライト・パーライト組織と して, ボルト圧造後の強度の安定化や硬質組織に起因し た割れ発生の防止を図っている。

KNCH<sup>™</sup>シリーズはボルト引張強度で700~1,000 MPa

級まで実用化している。ただし、ボルト頭部の加工が厳 しく、高い変形能が求められるフランジボルト用途とし ては800 MPa級までにとどまっている。ボリュームゾー ンである1,000 MPa級ボルトの非調質化が進めばCO<sub>2</sub>排 出量の大きな削減が期待できる。1,000 MPa級非調質ボル トの適用拡大には、変形能の向上に加えて、耐遅れ破壊 特性の確保も課題となる。非調質ボルトでは、遅れ破壊 において特徴的な粒界破壊が生じないため、調質ボルト より耐遅れ破壊特性では有利であることが知られている。 しかし、先行知見は限定的であり、安全性、信頼性を担 保する鋼材設計や評価技術の確立が不可欠である。高強 度調質ボルトの開発、実用化で培ってきた技術を活用し、 非調質ボルトの高強度化の早期実現に取り組んでいる。

そのほか,KNCH<sup>™</sup>シリーズを含め実用化されてい る非調質ボルト用鋼は永久伸び<sup>4)</sup>に課題がある。JISで はボルトに一定荷重を一定時間負荷し,除荷した際に荷 重負荷前後でボルトに伸びが発生してはならないとされ ている。非調質ボルトは,塑性加工による転位強化を利 用しているため可動転位密度が高く,圧造ままでは永久 伸びを生じる。そのため,ボルト圧造後に300℃程度で 均熱保持し,固溶Cや固溶Nを転位に固着させるブルー イング処理が必須となっており,熱処理工程の完全省略 には至っていない。当社ではボルトの永久伸びが金属組 織の特定領域で生じていることを突き止め,ブルーイン グ省略可能な800 MPa級非調質ボルト用鋼を開発して いる。これによりボルト製造における熱処理工程を完全 省略でき,さらなるCO<sub>2</sub>排出量の低減,工程省略が可能 となる。

今後,非調質ボルトのさらなる高強度化や変形能向上 による適用アイテムの拡大,変形抵抗の低減に伴う金型 寿命の向上,熱処理の完全省略を通してCO<sub>2</sub>の削減,カ ーボンニュートラルの達成に貢献していきたい。

#### 参考文献

- 1) 鹿磯正人ほか. R&D神戸製鋼技報. 2002, Vol.52, No.3, p.52-56.
- 2) 増田智一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.1, p.52-56.
- 3) 蟹澤秀雄ほか. 日本金属学会会報. 1991, Vol.30, No.6, p.557.
- 4) JIS B 1051, 炭素鋼及び合金鋼製締結用部品の機械的特性. 2019.



脚注1)KNCHは当社の登録商標(第1644338号)である。

\*1鉄鋼アルミ事業部門 技術開発センター 線材条鋼開発部

## 軟化焼鈍が省略可能な冷間鍛造用鋼(KTCH™・KTCF™シリーズ)

奥本剛史\*1・高知琢哉\*1

#### 1. 背景

近年、カーボンニュートラル実現に向けた脱炭素化の 動きが世界的に加速している。自動車分野においては, 車両走行時のCO<sub>2</sub>排出量削減に加えて、製造工程での CO<sub>2</sub>排出量削減の動きが活発化している。自動車部品の 製造工程では、熱間鍛造から冷間鍛造への置換や、軟化 焼鈍や焼準などの熱処理工程の省略や簡略化が可能な鋼 材のニーズが拡大している。当社では,軟化焼鈍省略鋼  $KTCH^{TM \pm 1}$  (線材)・ $KTCF^{TM \pm 2}$  (棒鋼) シリーズ<sup>1)</sup> を開発・商品化している (図1)。

### 2. 材料設計

KTCH<sup>™</sup>・KTCF<sup>™</sup>シリーズは、冷間鍛造前に行う軟 化焼鈍を省略可能な開発鋼である。冷間鍛造は、熱間鍛 造に比べて,高精度に大量生産できることに加え,ワー クを加熱せずに鍛造加工するため、CO<sub>2</sub>排出量が少なく、 環境負荷が低い利点を有する。いっぽう、冷間鍛造用鋼 には、厳しい加工でも不具合が生じないように低い変形 抵抗と高い変形能が要求される。必要に応じて軟化焼鈍 が施されるが、CO。削減・コスト低減のため軟化焼鈍省 略ニーズは以前から根強い。また、冷間鍛造時には、加 工発熱により鍛造部品の温度は200~300℃程度まで上 昇する。この温度域では、鋼中の固溶Nによる動的ひず み時効が生じる(図2)。そのため、軟化焼鈍の省略には、 室温での変形抵抗低減・高い変形能に加えて、固溶N低 減による加工発熱温度域での.動的ひずみ時効の抑制が 必要となる。

JIS炭素鋼をBase鋼として、窒化物形成元素である Nb, V, Ti, Bを添加した材料を試作し, 室温および加

線材/棒鋼圧延→軟化焼鈍→伸線加工→冷間圧造 <u>JIS 規格鋼</u> **KTCH™/KTCF™** 線材/棒鋼圧延──省略─→伸線加工→冷間圧造 シリーズ 図1 冷間鍛造用鋼の製造工程 750 10 Base  $(N/mm^2)$ 固溶Nによる 700 0 動的ひずみ時効に伴う 変形抵抗の増加 圧延材 動的ひずみ時効の 650 -10抑制効果 大 -20 <u>援</u> 550 軟化焼鈍材 -30 桜 500

工発熱を模擬した230℃で圧縮試験を行った結果を図3 に示す。230℃と室温での変形抵抗差がマイナス方向に 大きいほど、すなわち、室温に対して230℃での変形抵 抗低下が大きいほど、動的ひずみ時効の抑制効果が大き い。窒化物形成元素を添加した材料はいずれも, Base 鋼に比べて230℃での変形抵抗低下が大きく、加工発熱 温度域での固溶Nによる動的ひずみ時効の抑制効果が認 められる。しかしながら、Nb, V, Tiを添加した材料 はBase 鋼と比べて、炭窒化物の析出強化に起因して室 温での変形抵抗が上昇している。いっぽう, Bを添加し た材料は、室温から加工発熱温度域において低い変形抵 抗を維持しており、目標性能の実現に有効であることが 判明した。

#### 3. 特性例

上述の材料設計に基づいて、Bを添加した開発鋼 KTCH25Kを試作し、冷間鍛造性を評価した結果を図4 に示す。KTCH25Kは軟化焼鈍を行わずとも、比較鋼 KCH25K (HS S25C相当) 圧延材より変形抵抗が大幅 に低下しており、KCH25K 焼鈍材と同等の変形能が得 られた。また、両材料を用いて、フランジボルトを成型 した結果, KTCH25Kでは, KCH25Kで認められた加工 発熱の影響による鍛造荷重増加が解消されており、実部 品成型においても有効性が確認できた<sup>2)</sup>。

#### 4. 実用化状況および今後

KTCH<sup>™</sup>・KTCF<sup>™</sup>シリーズは、自動車用途を中心に 様々な部品に採用いただいている。近年、引き合いも多 数いただいており、今後も熱処理省略鋼のニーズはさら に拡大すると予想される。お客様のニーズに合わせて, 最適な鋼種をご提案し,実用化までをサポートすること で、カーボンニュートラル実現に貢献していきたい。

#### 参考文献

1) 百崎 寛ほか. R&D 神戸製鋼技報. 2000, Vol.50, No.1, p.45-48.

千葉政道ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.26-30. 2)



\*1鉄鋼アルミ事業部門 技術開発センター 線材条鋼開発部

# Business Field

## Steel & Aluminum

- Steel Sheets
- Aluminum Plate
- Wire Rods and Bars
- Steel Plates

## Advanced Materials

- Steel Castings and Forgings
- Titanium
- Copper Sheet and Strip
- Steel Powder

## Welding

- Robots and Electric Power Sources
- Welding Materials

## Machinery

- Standard Compressors
- Rotating Machinery
- Tire and Rubber Machinery
- Plastic Processing Machinery
- Advanced Technology Equipment
- Rolling Mill Press Machine
- Ultra High Pressure Equipment
- Energy & Chemical Field

## Engineering

- Iron Unit Field
- Advanced Urban Transit System
- Construction Machinery
- Electric Power

URL : Kobe Steel, Ltd Website, "Products" https://www.kobelco.co.jp/english/products/

QR code :



"QR Code" is a registered trademark of DENSO WAVE INCORPORATED.



 URL:
 神戸製鋼ホームページ 技術・製品情報

 <a href="https://www.kobelco.co.jp/products/">https://www.kobelco.co.jp/products/</a>



QRコードはデンソーウェーブの登録商標です。

#### 編集後記

<特集:自動車用材料・技術> \*自動車産業は当社グループにとっては とすることができたのではないかと自負 最もビジネス規模が大きく,かつ技術変 化が激しいお客様です。それゆえ、時世 に合致した最新技術をお伝えすることを 意図して, 数年おきに自動車特集号を発 刊してきました。最近では2017年と2019 年に発刊しています。これらの号を振り 返りますと、2017年号(Vol.66, No.2) で はギガクラス高張力鋼板の記事の割合が 多いのが特徴です。そのわずか2年後に 発刊された2019年号(Vol.69, No.1)で は鋼やアルミといった素材に加え、マル チマテリアルというワードとそれを達成 するための異種材接合技術の記事が複数 件登場するのが特徴となっています。 2017年号には早くもリチウムイオン電池 に関する論文が一件掲載されています が、2020年以前にはまだ世界的規模での 電動化推進の機運はほとんどなかったこ とが伺えます。そして2024年の本号にな りますと、EVに関連する車体構造やモ ータの評価,磁性材料といった記事が急 増しました。多彩な事業を有することを 特徴とする当社グループの力を結集する

ことで、 電動化時代の到来に沿った内容 しております。いっぽう、電動化が進ん だとしても、車体の骨格やパネルに求め られる,軽く,強く,長寿命といった安 全にかかわる基本性能が優れた素材のニ ーズ、さらにその素材を精度よく曲げた り、接合したりという製造技術ニーズは 不変です。これらの不変ニーズに対する 技術進展もまた本号には掲載しておりま す。本号で紹介できた技術はごく一部で あり, 掲載しきれなかった技術がたくさ んあります。本号の記事をお読みいただ き,興味を抱かれた場合は,ぜひ当社グ ループ社員に直接お声がけくださればと 存じます。変化するニーズと変化しない ニーズ、どちらの要求に対しても最適な ソリューションをタイムリーに提供でき るように当社グループは努力し続けま す。次の自動車特集号がいつになるかは 未定ですが、きっとまたこれまでとは異 なる内容と構成になっているのではない かと思います。ご期待ください。 (鈴木励一)

《編集委員》 西 野 都 委員長 副委員長 男 杵 渕 雅 委 員 池 田 英 生 藤 官 佐 統 佐 成 弘 毅 杉 立 宏 志 鈴 木 励 高久真 也 高 田 武 之 平 中久保 昌 睦 久 永 浜 本 家 浩 山本兼 司 渡辺憲 \_\_\_\_ <五十音順> 本号特集編集委員 鈴木励

#### 次号予告

<特集:お客様の「つくる」に寄 や水素社会の実現に向けた取り組みを紹 り添うKOBELCOの機械装置> \*当社の機械事業は、1915年に往復動圧 縮機の製造を開始して以来, 110年以上 の歴史を誇ります。この長い歴史の中 で、私たちはお客様の多様な「つくる」 という本質的な課題に寄り添い、独自の 機械装置を通じて解決策を提供してきま した。これにより、産業や社会インフラ を支え、より良い日常の実現に貢献して います。

\*次号の特集では、「お客様の『つくる』 に寄り添うKOBELCOの機械装置」と題 し、「お客様の製品をつくる」、「よりよ い環境をつくる」、「新しい価値をつく る」の三つのテーマに沿った当社の機械 装置とその技術や取り組みについて詳し く紹介します。

\*「お客様の製品をつくる」に寄り添う 機械装置として,長年にわたりお客様と ともに社会課題の解決に向けて歩んでき たゴムおよび樹脂の混練機、製鉄機械や 圧延機, スクリュやターボなどの各種圧 縮機とそれらを支える技術を紹介しま す。これらの機械装置は、お客様の製品 製造プロセスを支え、品質向上と効率化 に寄与しています。

\*「よりよい環境をつくる」に寄り添う 機械装置として, カーボンニュートラル

介します。具体的には、ボイラや工業炉 での利用を想定したハイブリッド型水素 ガス供給システム,新たな水電解水素ガ ス製造装置(HHOG),水素利用用途で 用いられる気化器・熱交換器、様々な環 境用途で用いられる圧縮機やヒートポン プに関する記事を掲載する予定です。こ れらの技術は、持続可能な社会の実現に 向けた重要な役割を果たしています。 \*「新しい価値をつくる」に寄り添う機 械装置としては, 全固体電池の製造プロ セスへの適用を目指したWIP(温間静水 圧プレス)装置の要素技術開発や新型 PVD(物理蒸着)装置による平滑性に 優れた硬質皮膜の応用事例, 船舶向けの 低速大推力の直動電動機などを紹介しま す。また、新しい価値の創造に向けたボ トムアップ型の新事業創出活動について も解説します。これらの取り組みは、よ り幅広いお客様に新しい価値を提供し, ともに未来を切り拓くことを目指してい ます。

\*お客様の「つくる」に寄り添うこれら の機械装置とその技術を通じて、お客様 とともにより良い日常を確かなものにす るために歩み続ける当社の取り組みを紹 介する次号の特集にご期待ください。 (佐成弘毅)

### **R**<sup>a</sup>**D** 神戸製鋼技報

第73巻・第2号(通巻第251号)

2024年11月28日発行 年2回発行 非売品 <禁無断転載> 発行人 西野 都

発行所 株式会社 神戸製鋼所 技術開発本部 企画管理部 〒651-2271 神戸市西区高塚台1丁目5-5

印刷所 福田印刷工業株式会社  $\mp 658-0026$ 神戸市東灘区魚崎西町4丁目 6番3号

お問合 コベルコビジネスパートナーズ(株) わせ先 R&D神戸製鋼技報事務局  $\pm 651-0073$ 神戸市中央区脇浜海岸通2丁目-2-4 (株)神戸製鋼所 神戸本社ビル FAX(078)261-7843 rd-office@kobelco.com

(株)神戸製鋼所 技術開発本部

### 「R&D神戸製鋼技報 Vol.73, No.2」お届けの件

拝啓、時下ますますご清栄のこととお慶び申し上げます。

また平素は、格別のご高配を賜り厚くお礼申し上げます。

このたび、「R&D神戸製鋼技報 Vol.73, No.2」を発行しましたのでお届け致します。 ご笑納のうえご高覧いただきましたら幸甚です。

なお、ご住所・宛先名称などの訂正・変更がございましたら、下の変更届に必要事項を ご記入のうえ、FAXあるいはE-mailにてご連絡いただきますようお願い申し上げます。

敬 具

コベルコビジネスパートナーズ(株) R&D神戸製鋼技報事務局 行 FAX (078)261-7843 rd-office@kobelco.com

	変更	<b>〔</b> 前〕	変更後
貴社名			
ご所属			
ご住所	⊤		₸
宛名シール 番号	No	←(封筒の宛	名シール右下の番号をご記入下さい)
備考			
本紙記入者	お名前:	E T	C-mail: `EL:

### 本誌お送り先変更届

November 28, 2024 Kobe Steel, Ltd. Technical Development Group

## RE: Delivery of R&D Kobe Steel Engineering Reports, Vol.73, No.2

Dear Sir or Madam,

We would like to express our sincere gratitude for your continued support and cooperation.

Attached please find Vol.73, No. 2 of the R&D Kobe Steel Engineering Reports.

If there is any correction or change of address, contact name, etc., please fill in the required information in the change notification below and contact us by fax or by e-mail.

Best wishes for your continued success,

Attention: R&D Office, Kobe Steel Engineering Reports Kobelco Business Partners Co., Ltd. FAX: +81-78-261-7843 E-mail: rd-office@kobelco.com

## Change Notification

	Before change	After change
Company name		
Department		
Address		
Address sticker number	No ←(Please fill i	n the right lower number on the address sticker)
Remarks		
Person making this entry	Name : E-	-mail: