

(解説)

# 自動車パネル用アルミニウム合金板材の開発動向

## Technical Trends in Aluminum Alloy Sheets for Automotive Body Panels



太田陽介\*1  
Yosuke OTA



増田哲也\*1 (博士(工学))  
Dr. Tetsuya MASUDA



木村申平\*1  
Shinpei KIMURA

Aluminum alloy sheets are increasingly being used for automotive bodies to reduce their weights and are required to have excellent mechanical properties, joining surface and corrosion resistance. For outer panels, Kobe Steel has been working to improve the performance of 6000 series (Al-Mg-Si) alloys in bake hardenability, stamping formability, and post-forming surface quality. For inner panels and structural members, the application of Ti/Zr surface treatment is being promoted to meet the requirements for the durability of adhesive bonding, which are mainly used by overseas manufacturers. This paper introduces developments in the application of aluminum alloy sheets to automotive bodies and developments in overcoming technological issues.

まえがき = アルミニウム合金 (以下、アルミ合金という) の代表的な特性として、比重が小さいことに加えて、耐食性が良いことや、再生しやすい、電気伝導率が高い、熱伝導性が良い、非磁性である、などが挙げられる。アルミは、このような特長を生かして工業製品や部品としてさまざまな用途に使われている。

いっぽう、自動車の車体に対しては、CO<sub>2</sub>排出量低減、電気自動車の航続距離増加、および安全装備追加による重量増加への対応を目的とした軽量化が課題となっており<sup>1)</sup>、これまで主に用いられてきた鋼板から軽量素材への置換が検討されている。そうしたなか、とくにアルミ合金板は1980年代から車両外板パネルや構造部材、各種部品にいたるまで、国内外メーカーの車両の多くの部位に適用されており、輸送機分野でのアルミ合金需要は今後も増加するものと予想されている<sup>2)</sup>。

アルミ合金適用による車体軽量化メリットを最大化するためには、単なる材料置換にとどまらず、部品構造設計とそれを実現するための材料を組み合わせた総合的な技術提案が必要と考えられる。

本稿では、自動車車体へのアルミ合金板材の適用状況

や技術課題を克服するための当社における開発状況について紹介する。

### 1. 自動車車体へのアルミ合金板材の適用状況

北米や欧州では、2000~2002年にかけてアルミ合金板材の採用が急激に進み、現在では量産車種にも適用されている。また軽量化と衝突安全規制強化への対応のため、車体骨格では高強度鋼板とアルミ合金板材とを適材適所に配置したマルチマテリアル化の検討が進んでいる<sup>3)</sup>。

日本国内では1985年、マツダ株式会社によるRX-7に初めてアルミ合金製フードが適用されたのを皮切りに、1990年代前半にかけてスポーツ車や高級車を中心に外板パネルのアルミ化が進展した。近年は量産車種への採用も進み、トランクリッド、バックドア、ルーフなど適用部品も拡大してきている。また、自動車の生産台数世界第一位を誇る中国においても、燃費規制の強化を背景として車両の軽量化ニーズが高まっている。

当社グループでは、日本や中国をはじめとするアジアにおいて、引き続き大きく伸長する輸送機分野における

表1 代表的な自動車パネル用アルミ合金の化学成分  
Table 1 Chemical compositions of aluminum alloys for automotive body panel

Alloy	(mass%)						
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Al
AA6014	0.30-0.6	<0.35	<0.25	0.05-0.20	0.40-0.8	<0.20	Bal.
AA6016	1.0-1.5	<0.50	<0.20	<0.20	0.25-0.60	<0.10	Bal.
AA6022	0.8-1.5	0.05-0.20	0.01-0.11	0.02-0.10	0.45-0.70	<0.10	Bal.
AA6111	0.6-1.1	<0.40	0.50-0.9	0.10-0.45	0.50-1.0	<0.10	Bal.
AA5022	<0.25	<0.40	0.20-0.50	<0.20	3.5-4.9	<0.10	Bal.
AA5052	<0.25	<0.40	<0.10	<0.10	2.2-2.8	0.15-0.35	Bal.
AA5754	<0.40	<0.40	<0.10	<0.50	2.6-3.6	<0.30	Bal.
AA5182	<0.20	<0.35	<0.15	0.20-0.50	4.0-5.0	<0.10	Bal.

\*1 アルミ・銅事業部門 真岡製造所 アルミ板研究部

表2 自動車パネル用アルミ合金に要求される特性  
Table 2 Properties required as automotive aluminum body panel

Applications	Properties
Outer	Yield strength after paint bake
	Surface qualities after stamping (Roping/S-S mark free)
	Formability
	Hemming property
	Anti-filiform corrosion property
Inner	Deep drawing performance
	Joining property
	Adhesion property

アルミ合金材需要にお応えできる生産体制の構築を進めている（詳細は本号p.6の記事参照）。

自動車パネル用材料には機械的性質をはじめとして、接合性や耐食性などさまざまな材料性能が求められる。このため、適用部品に応じて化学成分および製造条件を適正化した材料が開発されてきている。代表的な自動車パネル用アルミ合金板材の化学成分および求められる特性をそれぞれ表1、表2に示す。高濃度にMgを添加した5000系合金は成形性に優れることから、インナパネルを中心としたさまざまな部位に適用されている。アウトパネルには優れたベークハード性<sup>注1)</sup>、プレス成形性および成形後の表面品質が求められ、これらの要求特性のバランスを考慮して、化学量論組成よりもSiを過剰に含む6000系（Al-Mg-Si系）合金が主に用いられている。またインナパネルや構造部材に対しては、海外メカを中心として接着剤を適用したときの耐久性が求められる。

## 2. 自動車車体用アルミ合金の要求特性と当社における開発状況

### 2.1 ベークハード性

アウトパネル材に対しては、プレス時の形状精度確保の観点からスプリングバックが小さいことが望ましく、低強度であることが求められる。そのいっぽうで最終製品に対しては、耐デント性<sup>注2)</sup>を維持したまま薄肉化を可能にするために高強度であることが求められる。そこで、自動車の製造工程における塗装焼き付け熱処理時に強度向上が図れることから、6000系合金板材が主に用いられている。比較的低温・短時間の熱処理における時効硬化性をベークハード性と呼ぶが、その向上策として予備時効処理<sup>4)</sup>や復元処理<sup>5)</sup>などが提案されている。これらの熱処理プロセスは、6000系合金の主要添加元素であるMg、Siにより形成されるナノスケールの材料組織を制御する目的で行われる。

当社では6000系合金のさらなるベークハード性向上のための新プロセスの開発<sup>6)</sup>に加えて、化学成分や製造条件の適正化<sup>7)</sup>のほか、メカニズム解明のための材料組織分析技術の確立に取り組んでいる。6000系合金中のMg原子とSi原子の集合体の3次元分布図と硬さ測定結果を図1に示す<sup>8)</sup>。図の3次元分布は、材料内部の原子

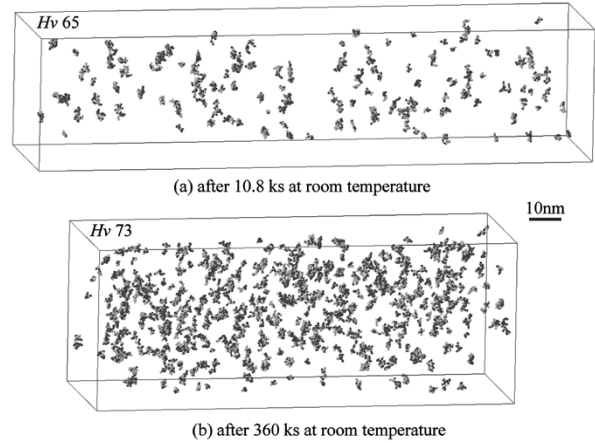


図1 6000系合金中のMg原子とSi原子の集合体の3次元分布図と硬さ測定結果<sup>8)</sup>

Fig. 1 3D distribution maps of aggregated Mg and Si atoms in Al-Mg-Si alloy and Vickers hardness<sup>8)</sup>

配置を3次元的にイメージングできる微細領域分析装置により得られた。図1を見ると、室温での保持時間の増加とともに硬さ、およびMg、Siを含む直径数nm程度の原子集合体の個数が増加していることが分かる。すなわち、この極めて微小な組織変化が室温保持中の硬さ変化の原因であることが明らかになった。

### 2.2 プレス成形性

一般的に、6000系合金板材の室温におけるプレス成形性は軟鋼板と比較して劣るとされる。その改善のため当社では、アルミ合金板に適したプレス技術開発による成形限界の向上とともに、プレス成形性に優れる材料開発を進めている。そうした取り組みにおいて、Mg、Si、Cuなどの主要元素添加量および製造条件を適正化した開発材が優れた伸びや加工硬化特性を示すことに加えて、そのメカニズムとして引張変形中の転位の増殖および動的回復挙動などの転位組織形態との関係を明らかにした<sup>9)</sup>。

このようなアルミ合金板材の成形性向上に向けた取り組みは、複雑形状部品のアルミ化、車両デザインニーズの実現による商品性向上のほか、部品点数削減によるトータルコスト低減に寄与できるものと考えている。

### 2.3 プレス成形後の表面品質の向上

6000系合金板材では、プレス後の材料表面にリジニングマークあるいはローピング（Roping）と呼ばれる圧延方向に平行な筋状の凹凸模様が現れることがある（図2）。車両外観品質の観点からその抑制を図っているが、近年のプレス部品形状の複雑化に伴って高ひずみ領域に

脚注1) 比較的低温・短時間の熱処理における時効硬化性

脚注2) 小石などがパネルに当たった際のへこみの生じにくさ

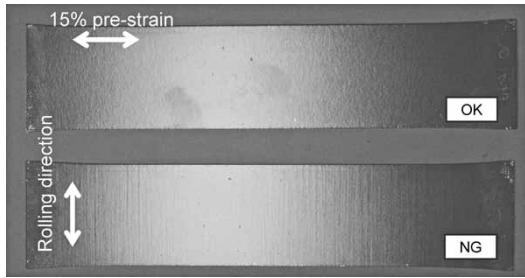


図2 リジングマーク評価試験片の外観写真(15%予ひずみ、スプレー塗装後)

Fig. 2 Roping test samples with 15% pre-strain and spray paint

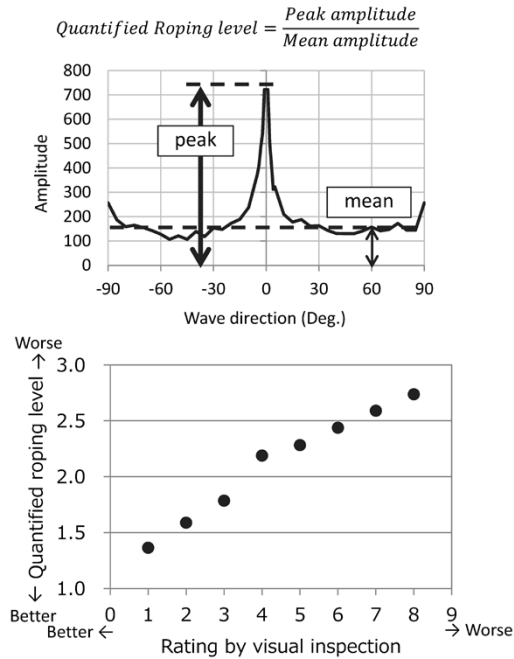


図3 リジングマーク指標値と目視評価結果との関係

Fig. 3 Relationship between quantified roping level and rating by visual inspection

においてもその抑制効果を維持することが求められている。当社では、6000系板材の実際の集合組織情報に基づいて結晶塑性理論を用いた変形解析を行い、引張変形に伴う板断面形状の変形挙動を詳細に調査した。その結果、板断面内に存在するGoss方位やCube方位などの特定の結晶方位の偏在により、断面内の応力分布が不均一となって湾曲変形が起きたことがリジングマークが生じた一因と考えられた<sup>10)</sup>。これらの解析結果を踏まえ、結晶方位分布の均一性をさらに向上させるための製造プロセスを確立し、難成形部品においてもリジングマークの抑制が可能な材料を開発している。

また、従来のリジングマーク評価法は、所定の引張変形を加えた後に砥石による研削や塗装を施すことによって現れる凹凸の程度を目視で評価するものであり、作業者の技能に依存することに問題があった。そこで当社では、変形後の板表面の3次元形状測定結果に周波数解析を行い、面内方向の波長を分離、解析することによってリジングマークの発生程度として定量化する手法を開発した<sup>11)</sup>。圧延方向の波長成分の強度と全方向の波長成分の平均強度の比であるリジングマーク指標値と、従来の目視評価結果との関係を図3に示す。両者には良好な相関関係が認められており、従来法に代わる新たなリジン

グマーク定量評価手法として材料開発の効率化に活用できるものと考えている。

## 2.4 接着耐久性

日本国内においては、自動車パネル用のアルミ合金板材は、塗装、接着、溶接性の向上のため、一般に酸洗などを施して熱処理工程で生成する酸化皮膜を除去した素材として出荷される<sup>12)</sup>。いっぽう、海外では、接着剤を適用したときの耐久性向上を目的とした表面処理が施される場合がある。これは、接着接合部が想定される過酷な市場環境の影響を受けて接着剤が界面で剥がれるのを抑制し、接着特性の信頼性を確保するためとされている<sup>13)</sup>。なお、接着剤を積極的に活用することで剛性・衝突時の安全性・制音・振動特性(NVH性)などが向上することが知られており、欧州ではそのような目的で接着剤が多用されている<sup>13)</sup>。

具体的な表面処理として、欧州系ではTi/Zr処理が、また北米系ではAlcoa951処理が素材段階で適用されている<sup>13)</sup>。このうち、Ti/Zr処理はドイツ系を中心に海外自動車メーカで広く採用されている技術である。図4に示すような工程において、酸化皮膜を除去したアルミ合金の表面にTiおよびZrの氧化物皮膜を形成させることを特徴とする<sup>14)</sup>。

接着耐久性評価(エポキシ系接着剤使用、塩水噴霧3,000時間)の後、せん断引張試験を行った接着破断面

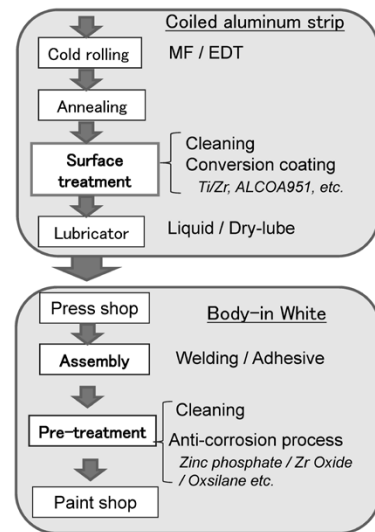


図4 自動車用アルミ板の製造・加工工程

Fig. 4 Manufacturing process of aluminum sheet for automotive (surface related technology)

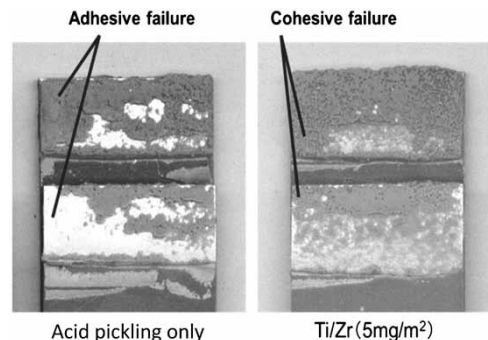


図5 接着試験片の耐久試験後の外観(せん断試験)

Fig. 5 Appearance of adhesive durability test (Lap shear test)



の外観例を図5に示す<sup>15)</sup>。酸洗のみの表面は界面破壊による金属光沢が認められるのに対し、Ti/Zr処理材は金属光沢がなく、凝集破壊となっている。Ti/Zr処理材表面のTiとZrの金属成分の合計値をTi/Zr皮膜量としたとき、Ti/Zr皮膜量に対する凝集破壊率の影響について調査した結果を図6に示す<sup>15)</sup>。凝集破壊率は酸洗材で約30%であったが、Ti/Zr皮膜量が増えると凝集破壊率は向上し、5~10 mg/m<sup>2</sup>で最大となった。さらにTi/Zr皮膜量が増加すると凝集破壊率は低下した。この原因として、皮膜量が増加するとTi/Zr皮膜内部でも破壊が発生しやすくなるためと考えられる<sup>13)</sup>。

接着剤適用時の界面破壊は、素材表面の水和(hydration)に起因するとされている<sup>13)</sup>。そこで、酸洗材の水和量を1としたときの酸洗材およびTi/Zr処理材の皮膜量による水和量への影響を図7に示す。なお、酸

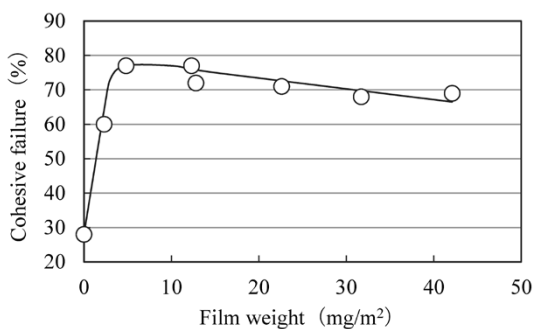


図6 皮膜量と凝集破壊率の関係

Fig. 6 Relationship between cohesive failure ratio and film weight

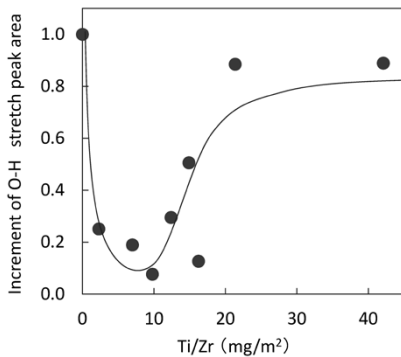


図7 Ti/Zr皮膜量による水和量の変化

Fig. 7 Hydration variation with Ti/Zr film weight

洗材およびTi/Zr処理材それぞれの水和量は、湿潤環境(50℃, 95%RH, 24時間)保持前後の表面をフーリエ変換赤外分光分析計(FT-IR)により分析し、3,400 cm<sup>-1</sup>付近に見られるO-H伸縮振動のピークの面積増加量から算出した。本結果より、水和量は皮膜量の増加により抑制されることが確認された。ただし、皮膜量が増加すると水和量も再び増加する傾向となっている<sup>15)</sup>。こうした挙動は、接着耐久性の評価結果と対応している。

なお、Ti/Zr処理材は、化成処理性や溶接性について、酸洗材と同等の特性を示すことが確認されている<sup>14), 15)</sup>。

**むすび** = 近年、自動車を取り巻く事業環境は大きく変わっている。技術革新に伴って新しい車両構造、部品が開発されると考えられ、軽量構造材料としてのアルミ合金板の役割の重要性もますます高まっていくものと考えられる。当社ではこれらのニーズにお応えすべくアルミ板材の研究開発を進めているが、そのためには顧客との強力なパートナーシップが従来以上に重要である。材料開発、材料の特性を生かした部品構造提案、アルミ同士および高強度鋼板との異種材料接合技術とを組み合わせた総合的な研究開発を推進し、自動車の軽量化および地球環境保護に大きな役割を果たしていきたい。

#### 参考文献

- 1) 坂上 弘ほか. 自動車技術. 2016, Vol.70, No.8, p.42.
- 2) 稲葉 隆. R&D神戸製鋼技報. 2002, Vol.52, No.3, p.79.
- 3) 内藤純也ほか. 自動車技術. 2018, Vol.72, No.11, p.17.
- 4) 櫻井健夫ほか. 第87回軽金属学会秋期大会講演概要. 1994, p.185.
- 5) 櫻井健夫ほか. 第91回軽金属学会秋期大会講演概要. 1996, p.175.
- 6) 増田哲也ほか. 軽金属. 2010, Vol.60, No.4, p.183.
- 7) 高木康夫ほか. 軽金属. 2013, Vol.63, No.7, p.245.
- 8) 有賀康博ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.42.
- 9) 越能悠貴ほか. 軽金属. 2018, Vol.68, No.4, p.201.
- 10) 小西晴之ほか. R&D神戸製鋼技報. 2012, Vol.62, No.2, p.39.
- 11) 市川武志. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.86.
- 12) 石井 均. 表面技術. 1997, Vol.48, No.10, p.691.
- 13) EAA Aluminium Automotive Manual-Joining 9. Adhesive bonding. [http://c.ymcdn.com/sites/www.aec.org/resource/resmgr/PDFs/9-Adhesive-Bonding\\_2015.pdf](http://c.ymcdn.com/sites/www.aec.org/resource/resmgr/PDFs/9-Adhesive-Bonding_2015.pdf), (参照2018-11-21).
- 14) 太田陽介ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.82.
- 15) 小島徹也ほか. 軽金属溶接. 2016, Vol.54, No.8, p.293.