

(解説)

自動車用アルミニウム材料とその周辺技術

Aluminum Product Application Technologies for Automobiles



稲葉 隆*
Takashi Inaba



山下浩之**
Hiroyuki Yamashita



武林慶樹***
Yoshihiko Takebayashi



箕浦忠行****(工博)
Dr. Tadayuki Minoura



笹部誠二****
Seiji Sasabe

With the ever increasing pressure to produce fuel efficient, environmentally friendly vehicles, the use of aluminum products used in automobiles is increasing. As a result new technologies are being developed for aluminum products. In this paper, the current situation in aluminum product technologies is introduced. In particular, sheet, extrusion, and forging, and related technologies are described.

まえがき = 1997年に京都議定書が採択され、世界的に環境問題に対する関心が高まっている。日本における二酸化炭素総排出量の約2割が自動車からの排気ガスであることから、自動車の燃費改善が強く求められており、国内では2010年度にガソリン乗用車について、1995年比22.8%改善の燃費目標が設定されている¹⁾。燃費改善のために、ハイブリッド車や燃料電池車などの開発が進められているが、車両の軽量化も一つの有効な手段であり、100kg軽量化により1km/lの燃費向上の効果があるといわれている²⁾。一方で、衝突安全性の向上や情報機器の搭載などにより車両重量は年々増加する傾向にあり、自動車メーカーでは積極的に車両の軽量化に取り組んでいる³⁾。

このような背景のもと、アルミニウム材(以下アルミ材と記す)は比重が鉄の約1/3(2.7)で、剛性を考慮しても1/2程度の重量となるため、軽量化に非常に有効な材料であり、その適用が拡大している(図1;日本アルミニウム協会資料)。従来はエンジンなどのアルミ鋳物が中心であったが、最近ではフードなどの外板パネル類およびヒートインシュレータなどのカバー類へのアルミ板材、パンパシムなどへのアルミ押出材、およびサスペンションなどの足回り部材へのアルミ鍛造材など、アルミ展伸材の適用が進展している。

当社はあらゆる形態のアルミ材の総合サプライヤーであり、アルミ材の材料特性向上のための開発はもとより、鋼材とは異なる特性を持つアルミ材に適した成形・接合などの周辺技術の開発にも取り組んでいる。本稿では、アルミ板材、アルミ押出材、アルミ鍛造材のそれぞれの分野での技術動向、また、数値解析および接合技術などの周辺技術について解説する。

1. 自動車向けアルミ板材の技術動向

自動車用アルミ板材の年間需要は約13万トン(2003

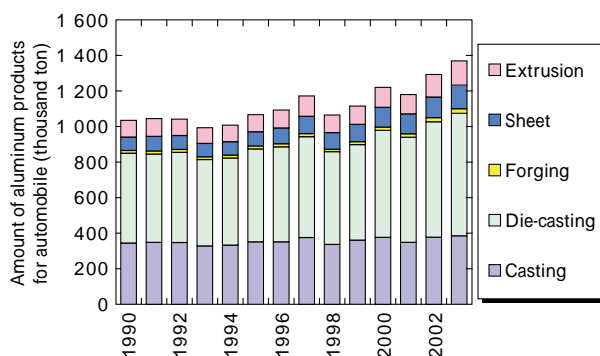


図1 自動車向けアルミニウム材の需要量推移

Fig. 1 Trend of amount of aluminum products used for automobile

年度)であるが、内訳としてはラジエータなどの熱交換器向けが半分以上を占めており、自動車ボディ向けは3万トン弱である。熱交換器では既にアルミ化率がほぼ100%であるが、自動車ボディのアルミ化は近年本格化し始めたばかりであり、今後急速に拡大することが予想されている。本章では、自動車パネルのアルミ化状況、パネル用アルミ合金およびその適用技術の動向について解説する。詳細については文献4)を参照いただきたい。

1.1 自動車パネルのアルミ化状況

国内でのアルミパネルは、1985年にマツダ(株)RX-7のフードに初めて採用されて以降、スポーツカーや高級車を中心に適用が進展した。最近ではトヨタ自動車(株)のクラウン(図2)やプリウス、日産自動車(株)のスカイラインやフェアレディZ、富士重工業(株)のレガシーなど量産車への採用も本格化している。また、適用部位も従来主流であったフード以外に、バックドア、トランクリッド、ルーフ、ドアなどにも拡大している。図3に自動車へのアルミパネル採用率の推移を示す。アルミ化は北米・欧州で先行してきたが、この数年でその差は急速に縮小している。ただし、北米・欧州ともに20%程度で頭打ちの傾向

*アルミ・鋼カンパニー 真岡製造所 アルミ板研究部 **アルミ・鋼カンパニー 長府製造所 ***アルミ・鋼カンパニー 大安工場 ****アルミ・鋼カンパニー 技術部



図2 アルミフード採用車例(トヨタ自動車クラウン)
Fig. 2 Example of application of aluminum hood (TOYOTA CROWN)

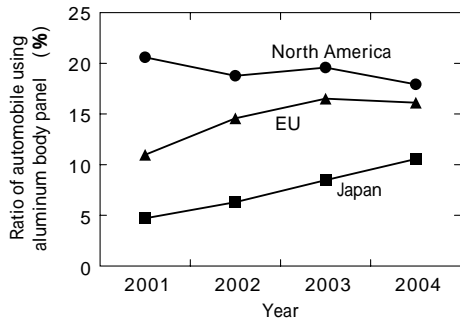


図3 アルミパネル採用車割合
Fig. 3 Ratio of automobile using aluminum body panel

がみられており、更なるアルミ化拡大のためには、材料特性や加工方法、コスト面などでのブレイクスルーが必要であると思われる。

1.2 自動車パネル用アルミ合金板材の特徴

パネル用アルミ合金板には、強度、成形性、表面性状、接合性など多岐にわたる特性が要求される。初期には2000系(Al-Cu-Mg系)や7000系(Al-Mg-Zn系)のアルミ合金の採用もみられたが、現在ではほとんど5000系(Al-Mg系)と6000系(Al-Mg-Si系)のアルミ合金が用いられている。表1に代表的なパネル用アルミ合金のAA成分規格、表2に当社の代表的な自動車パネル用アルミ合金とその特性を示す。

5000系合金は非熱処理型アルミ合金であり、パネル用としては、特殊な5000系合金であるAA5022(KS5J30)やAA5023(KS5J32)が使用されている。これらの合金

は、汎用5000系合金であるAA5182よりも伸び値、引張強さが高く、成形性に優れる。5000系合金の最大の課題は、成形時のストレッチストレインマーク(SSマーク)発生抑制であり、特にアウトパネル用では熱処理と加工(圧延・矯正)の組み合わせによって、SSマークの発生を抑制している。

一方6000系アルミ合金は熱処理型合金であり、その特徴は塗装焼付時の加熱により強度が増加するバークハード性(以下BH性と記す)を有すること、および成形時にSSマークが発生しないことである。そのため、「耐デント性」と「見映え」が重要となるアウトパネルでは6000系合金を中心に適用が進んでいる。日本では、欧米と比較すると塗装焼付けの加熱が低温(170程度)かつ短時間(20分程度)であり、当社では低温でも高いBH性を有する合金および製造方法(図4⁵⁾)を開発してきている。BH性は6000系合金の最大の特徴であり、今後も更なる改善のための材料開発が必要となると予想される。

自動車パネル用6000系合金は、Cu添加合金AA6111(KS6K31)と、実質的にCuを微量しか含まない合金

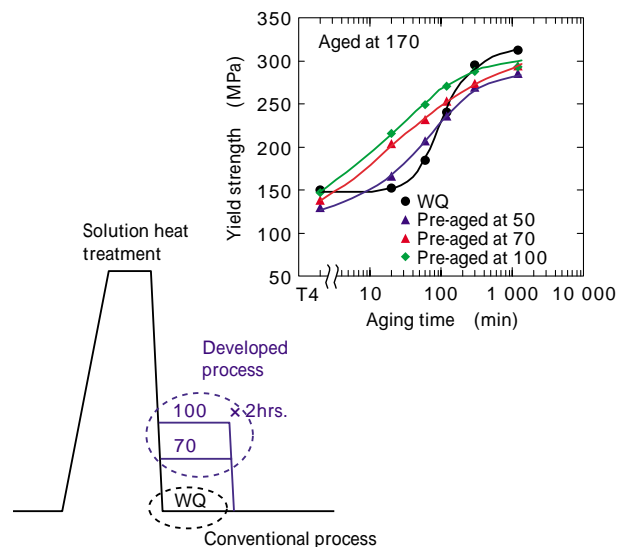


図4 6000系パネル材における予備時効処理によるBH性向上
Fig. 4 Effect of pre-aging on bake hardenability in 6000 series alloys

表1 自動車パネル用アルミ合金の成分規格

Table 1 Chemical compositions of aluminum alloys for auto body panels

Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Alloy code of Kobe Steel
AA6016	1.0-1.5	<0.50	<0.20	<0.20	0.25-0.60	KS6K21
AA6022	0.8-1.5	0.05-0.20	0.01-0.11	0.02-0.10	0.45-0.70	
AA6111	0.7-1.1	<0.40	0.50-0.90	0.15-0.45	0.50-1.0	KS6K31
AA5022	<0.25	<0.40	0.20-0.50	<0.10	3.5-4.9	KS5J30
AA5023	<0.25	<0.40	0.20-0.50	<0.10	5.0-6.2	KS5K32
AA5182	<0.20	<0.35	<0.15	0.20-0.50	4.0-5.0	5182

表2 当社自動車パネル用アルミ合金の機械的性質

Table 2 Mechanical properties of automotive aluminum sheets produced by Kobe Steel

Alloy code (Kobe Steel)	TS (MPa)	YS (MPa)	El. (%)	After baking YS (MPa)	Application parts
KS6K21	240	125	29	200	Outer
KS6K31	275	130	32	165	Inner
KS5J30	275	135	30	155	Outer/Inner
KS5J32	285	135	33	155	Outer/Inner
5182	270	125	29	140	Inner

AA6022 (KS6K21) に大別され、日本国内では耐食性（耐食錆性）から Cu 無添加合金が多く用いられているが、成形性（絞り性）で優位にある Cu 添加合金も採用されている。

6000 系合金の最大の課題は、5000 系合金や鋼板と比較して成形性が劣る点である。特にアウトパネルではインナとの接合にヘム（曲げ）加工が行われ、曲げ条件が厳しい場合には割れを発生し問題となることがある。国内では見映えの点からフラットヘムが一般的に用いられており、今後とも曲げ性を向上するための材料開発がますます必要になると考えられる。また、熱処理型合金であるために、室温保持で強度や成形性が経時変化する特性（室温時効特性）を有しており、経時変化の小さい材料開発も今後の課題となっている。

1.3 アルミ合金板材の自動車パネルへの適用技術

アルミ合金板材は、鋼板と比較して材料の伸び値、 r 値、ヤング率が低く、一般的に成形性が劣る。鋼板では成形加工できる形状でも、アルミ板では割れやしわ、スプリングバックなどの不良が発生する場合があります、成形可能な形状すなわち自動車ボディのデザインが制限されてしまう点が大きな問題である。この改善には、アルミ材の性能向上と併せて、アルミ材に適した成形・加工技術が不可欠である。

アルミ材での成形限界を向上する加工技術として、塑性変形の温度依存性、すなわち常温での変形と比較して高温あるいは低温で伸び値が高くなる特性を利用した手法が挙げられる。アルミ材の高温での高い延性を利用した高温ブロー成形法は、従来からごく少量生産の自動車パネルに適用されてきたが、最近その生産性を向上する開発がなされ、本田技研工業㈱のレジェンド（2004 年モデル）ではフロントフェンダとトランクリッドで採用されている⁶⁾。高温ブロー成形法では鋼板を凌ぐ成形性が得られており、アルミ材料と成形方法との組み合わせによる新たな可能性を示す好例である。一方、低温で延性が増加するアルミ材特有の性質を利用した低温成形技術も開発されている⁷⁾。

さらに、鋼板と比較して特に局部伸びが低いアルミ材においては、成形加工時に均一変形領域で成形を行うことが重要であり、この点から高い潤滑性を持つ固形潤滑剤の適用や液圧成形の適用もアルミ材の成形限界向上に有効な手法である。

1.4 今後の自動車パネルのアルミ化展望

自動車ボディの軽量化ニーズから、自動車パネル材のアルミ化の動きは継続するものと考えられる。自動車パネルへのアルミ板材の適用開始から約 20 年が経過するが、アルミ材料と材料を使いこなす適用技術はまだまだ発展途上であると考えられ、今後の更なる発展が期待される。

2. 自動車向けアルミ押出材の技術動向

アルミ押出材は、鉄では困難な任意の肉厚配分をもつ複雑な断面形状を得ることができるため、近年の自動車軽量化の有効な手段として着目されている。自動車向け

のアルミ押出材は、カーエアコンの熱交換器用材料からはじまり、足回り、エンジン関係部品へと拡大してきたが、近年特にバンパビーム、ドアビーム、サブフレームといった、構造材関係部材への適用増加が顕著である。本章では、自動車向けアルミ押出材のうち、近年拡大が著しいこれらの部品に関して、当社事業における現状および今後の取組み方針などを紹介する。技術動向に関しては、文献 8)~10) を参照いただきたい。

2.1 自動車向けアルミ押出材の使用状況

図 5 に日本国内のアルミ押出類の需要部門別出荷量推移（日本アルミニウム協会資料）を示す。本統計によると、ここ数年来、国内の押出材の全出荷量は、約 100 万トンでほぼ横這いの状況にあるが、自動車向けのアルミ押出材は着実に伸びてきている。ちなみに 1995 年度との比で見ると、2003 年度では約 50% 増加している（1995 年度 94 千トンから 2003 年度 139 千トン）。

当社においても、2003 年度実績で全出荷量（鋳造棒含む）に対して、自動車分野向け材料の比率は 50% を越えている。以下バンパビームを主な事例として、当社の自動車部材への取組みを紹介する。

2.2 安全部材への取組み

当社では、1990 年代初頭にバンパビームやドアビームといった安全部材の初量産化を実現した。従来、これらは高張力鋼板製が一般的であったが、その特性やビーム状の構造からアルミ押出材に好適な部材であると考え、研究開発に着手したものである。図 6、7 に当社の押出材を用いたバンパビーム、ドアビーム部品を示す。

特にバンパビームは、車体重心から離れた端部に位置する部品であり、軽量化により走行性向上が期待できるため、そのアルミ化は近年高い成長率を示している。

当初、当社ではバンパビーム用合金として 6000 系合金を多く用いていたが、更なる軽量化と安全性の確保を両立させる要求が一段と強まっていることから、近年では高強度の 7000 系開発合金の適用を指向している。

2.3 押出材の素材面からのアプローチ

7000 系押出材を想定した際、素材面での課題としては、材料特性を決定する組織制御とその生産技術であり、その両面からのアプローチが必要である。

一般的に、中強度 6000 系合金に比べ、7000 系合金は押出生産性が劣ると言われている。従って、7000 系合金製

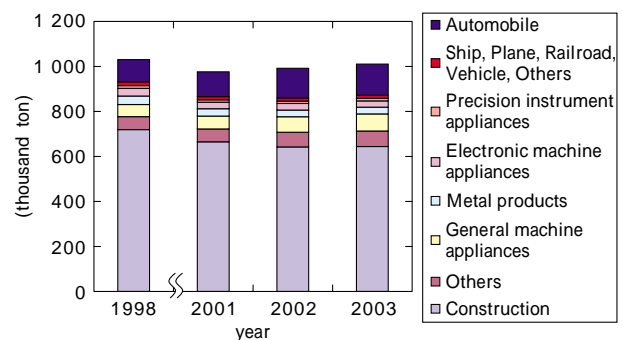


図 5 アルミ押出類の需要部門別出荷量（国内）
Fig. 5 Volume of shipment according to demand section of aluminum extrusion (domestic)



図6 アルミ押出材を用いたバンパビーム例
Fig. 6 Example of aluminum bumper beam



図7 アルミ押出材を用いたドアビーム例
Fig. 7 Example of aluminum door beam

の安全部材が採用されるためには、生産性の向上によるコストダウンが不可欠であった。

当社では、添加元素の最適化による合金の開発を行うとともに、組織制御の観点から

- ・ピレットの均質化処理
- ・組織制御と生産性両立のための等温押出プロセス
- ・工具設計技術

を主体とした生産技術への継続的な取組みにより、7000系合金の生産性を改善してきた。その結果、6000系合金に比べて、条件にもよるが、15%程度軽量化しうるバンパ材を提供することを可能とした。

しかし一方で、7000系合金は使用条件によっては応力腐食割れの発生が懸念される。それに対しては、前述したように、合金成分、押出プロセスおよび熱処理などの最適化による組織制御によってその感受性を低下させるとともに、使用環境を想定した様々な確認試験をユーザとともに行ってきており、最初に量産化した7000系バンパ材はすでに約12年間の使用実績がある。当社としては、合金の組織制御をキーワードと捉え、継続的な取組みを行っていく。

2.4 安全部材の設計技術

バンパビジネスを展開していくに際し、素材メーカに求められる役割も変貌しつつある。これは、アルミ押出材が極めて多彩な断面自由度を有する素形材であることにも起因していると考えられるが、従来、素材メーカの役割は、ユーザが決定する性能・品質の素材を合理的な価格で安定的に供給することであった。それは不変的な取組み事項ではあるが、近年の流れとして、自動車メー



図8 オフセットバリア衝突FEM解析結果例
Fig. 8 Deformation behavior of offset barrier impact analysis

カの要請に応え、部品性能へより踏込んで逆提案を行うことを求められるケースが増えてきた。

具体的には、必要な要件（衝突基準に基づく性能要件やレイアウト上の条件）をCADデータで受取り、構造の最適化を提案することである。その際、アルミ押出材であるバンパビームの断面形状を検討するだけでなく、バンパ先端の緩衝材や車体メンバとの取付け部材であるステイなども考慮して、部品としての構造を設計することとなる。

特に、バンパ、ドアビームは安全部材として、各々自動車の正面衝突や側面衝突に深く関わる部材であるため、これらの開発には、安全法規の動向が大きく左右する。例えば、従来バンパビームは米国PART581などの低速度衝突時(2.5 ~ 5mph)の車体損傷性を評価する法規への対応を目的としたものが主であった。

しかし、近年のIIHS(米国高速安全保険協会)などに代表される安全アセスメントにおいては、より基準が厳しくなっており、法規での低速度衝突特性を満足した上で、さらに中速度でのエネルギー衝突特性が求められてきている。法規は遵守しなければならない項目であるが、アセスメントは、その評価が自動車の商品性に直結するという意味で、法規と同等の対応が求められることになる。図8にIIHS基準における15km/hのオフセットバリア衝突における衝撃解析の例を示す。

その意味で、素材メーカ側に求められる設計能力もますます高度なものが要求されるが、逆に設計提案を行うことができるため、供給側としても、押出生産性やバンパビームへの加工性を高める断面形状を設定し、部品組付けを考慮した構造を提案できる。これにより、ユーザに対してもトータルでのコスト、軽量化のメリットを提供できると考えている。

以上バンパを例に述べてきたが、自動車構造材のアルミ化は今後も高い成長率が続くと思われている。当社では、ますます高まる軽量化およびコストダウンの要求に応えるべく、部材にもよるが、保有する合金の組織制御技術だけでなく加工技術をも活用し、付加価値を高めた1.5次加工製品の開発にも力を入れていく。

3. 自動車向けアルミ鍛造材の技術動向

アルミ熱間鍛造品の国内生産量は約3万トンと素形材としては少ない方であるが、自動車分野が約8割を占めており、この3年で6割以上増加している(図9; 経済

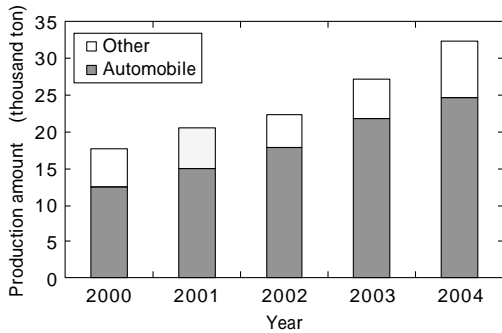


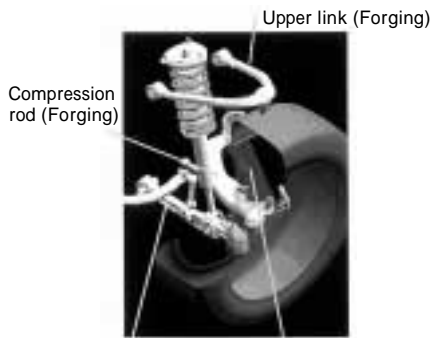
図9 アルミ熱間鍛造品生産量推移

Fig.9 Production amount of aluminum hot forging

産業省統計)。増加の一因としては、乗用車用サスペンションが急増していることが挙げられる。これら足回り部品は軽量化により燃費が改善するのみならず、乗心地や操縦安定性、運動性能が向上するため¹¹⁾、高級車やスポーツカーを主体にアルミ化が一段と進展している。本章ではこれらサスペンション部品の動向と当社における軽量化設計、材料開発、製造技術およびグローバル展開の取組みについて紹介する。

3.1 サスペンションの動向

サスペンションは車体重量を車輪に伝達し、走る、曲がる、止まるの基本機能を担っており、駆動力、制動力、横力などの種々の荷重が作用する状況で常にタイヤに安定した接地荷重を維持する働きをしている。車両運動性能を高めるためには、剛性の高いサスペンションが要求されるが、反面乗心地が悪化するため、車種に応じて様々な構造のサスペンションが使用されている。サスペンション形式の一種であるダブルウィッシュボーン式や



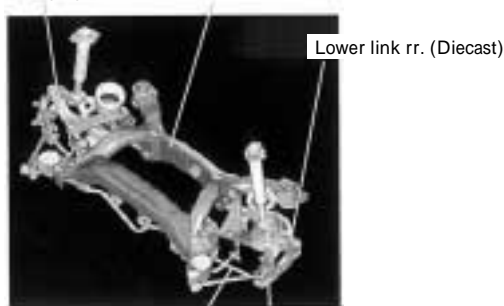
Upper link (Forging) Compression rod (Forging)

Transverse link (Forging) Knuckle arm (SDC)

図10 マルチリンク式フロントサスペンション¹²⁾

Fig.10 Multilink type front suspension¹²⁾

A arm (Forging) Suspension member (Press/Hydroform)



Lower link fr. (Extrusion) Rr. housing (SDC)

図11 マルチリンク式リアサスペンション¹²⁾

Fig.11 Multilink type rear suspension¹²⁾

表3 アルミサスペンション部品と製造法の例

Table 3 Aluminum suspension parts and their production

Car	F/R	Type	Parts	Method
A	Front	Double wish bone	Knuckle	Squeeze casting
			Lower arm	Forging
			Upper arm	Forging
	Rear	Multi link	Carrier	Squeeze casting
			Lower link	Vacuum die-casting
			Upper arm	Forging
B	Front	Double wish bone	Knuckle	Forging
			Lower link	Forging
			Upper arm	Forging
	Rear	Multi link	Carrier	Gravity casting
			Lower link	Vacuum die-casting
			Upper arm	Forging
			Link lower front	Extrusion
			Control arm	Forging

マルチリンク式は、アライメントを制御する自由度が高く剛性も確保できるため、高級車においてはアルミ化とともに採用されている。サスペンション構造の一例を図10, 11¹²⁾に、また2004年に発売された高級車に採用されたアルミサスペンション部品と製法の一例を、表3に示す。

サスペンションは主にナックル、アッパアーム、ロアアーム、ロアリンクなどから構成されており、ナックルやアッパアームについては剛性が支配的であり、靱性を向上させた鋳造品が採用される場合がある。また高真空ダイカストの技術進歩により、薄肉一体構造のリアロアリンクが開発されている¹³⁾。一方ロアアームについては、入力荷重も高くまた周辺部品の干渉制約も厳しいため、強度および靱性に優れた鍛造品が採用されている。2004年レジェンドフロントサスペンションにおいては、強度や靱性を重視して、全てのアーム類にアルミ鍛造材を採用している。

近年サスペンションにおいては、乗心地の向上、振動・騒音低減の面から液体封入ゴムの採用やダンパの性能向上などが図られており、4輪操舵などの走行性能の向上と合わせて複雑高機能化している。今後とも材料と設計面からの軽量化技術の進展が強く求められている。

3.2 サスペンション部品の解析設計

サスペンションのアルミ化に際しては、一般に弾塑性による構造解析を行い、強度仕様に対して最軽量の製品形状を設計している。解析精度の向上が重要なポイントであり、当社では材料特性の把握と境界条件の最適化を図っている。サスペンションアームはゴムブッシュや液封防振ゴムにより取付けられるため、これらブッシュによるバネ特性を把握し、境界条件として設定する必要がある。このためにはブッシュの単体特性のみならずサスペンションアーム完成品による台上試験により、荷重-変位特性を評価しデータベースを構築することにより、解析精度の向上を図っている。ロアアーム後向き荷重における台上試験と解析の比較を図12に示す。ゴム特性などの境界条件の把握により、試験結果と合致させることが可能である。

また形状最適化の例として、リアアッパアーム重量に及ぼすアーム断面のウェブ厚、隅R、角Rの影響を表4に

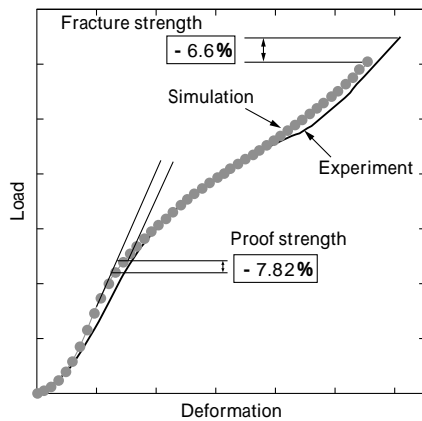


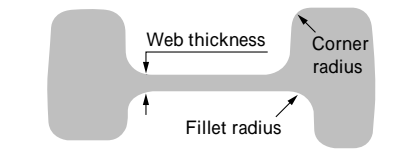
図12 サスペンション荷重試験における解析と実験の比較

Fig.12 Comparison between simulation and experiment of suspension load test

表4 アーム部断面形状と製品重量

Table 4 Weight vs. arm-section shape

	Conventional	Improved
Web thickness (mm)	8	4
Fillet radius (mm)	15	5
Corner radius (mm)	5	4
Weight ratio	100	87



示す。断面形状の最適化により同一強度仕様において13%の軽量化が可能となる。形状最適化においては、当然のことながら鍛造時の荷重、成形性、金型寿命を考慮しなければならず、現状は試作や経験に基づいて決めているが、今後は鍛造解析も活用した最軽量化設計が重要と考える。

3.3 6000系高強度合金の開発

サスペンション部品に要求される材料特性は、剛性、強度、疲労強度、伸び、衝撃値、耐食性に優れることである。強度については要求仕様により、疲労強度か耐力のいずれかが律速となる。また安全面からは衝突時の衝撃緩和性が求められ、サスペンションアームは破断せずに大変形することが望ましい。従って材質、製法としては強度、靱性に優れ信頼性の高い6000系鍛造材が圧倒的に有利である。

当社は、コスト高となる押出材ではなく、鑄造ビレットによる高強度合金KS651を開発し1991年から量産しているが、今回新たに6061よりも強度を40%向上させたKD610合金を開発した。この合金は、化学組成の最適化のみならず、ソーキング条件、鍛造条件および熱処理条件を最適化することにより、析出強化相を微細化し、再結晶粒の粗大化を防止し、さらに亜結晶粒の比率を向上させることにより高強度化したものである。強度特性を6061、KS651と比較して図13に示す。KD610を採用した場合、変形強度が律速の場合は6061に対して約20%の軽量化が可能となる。また、KD610合金では、組成と加工熱処理の最適化により粗大な晶出物を低減し、腐食減量はKS651より改善している。

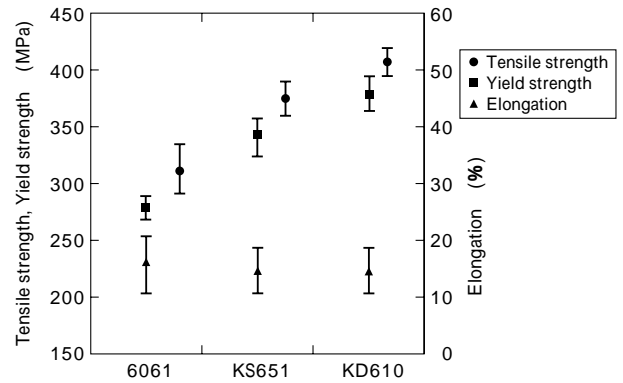


図13 6000系開発合金の機械的性質

Fig.13 Mechanical properties of developed 6000-series

3.4 サスペンション製造技術

当社は1991年に6300tonメカニカルプレスによるサスペンションの鍛造を開始し、2000年以降の需要増加に対応して鍛造ラインの改造と増強を図り、現在では4台のプレスラインまで設置している。鍛造工程は、加熱-プリ成形-荒型打-仕上げ打-トリミングの4工程をロボットにより搬送し連続的に成形している。

コスト低減の取組みとしては、製造コストの約5割を占める材料費の低減を主として、鑄造棒コストの低減、鍛造材料歩留の向上を図っている。前者については2001年に横型連続鑄造技術を確立し、スクラップの所内リサイクルを実施するとともに、メタルモールドを用いて素材径60~100mmにおいて世界トップレベルの鑄造速度を達成している。後者については、大型プレスを活かして、I型リンクや小型のL型アッパアームについては形状に応じて2個取り方を確立するとともに、素材プリフォーム形状の最適化として、連続鍛造工程内へ曲げ工程やロール成形工程を追加することにより、同一タクトタイム内で材料歩留まりの向上を達成している。

3.5 グローバル展開

グローバル供給の一貫として、当社は米国ケンタッキー州ボーリンググリーンに鍛造工場を建設し、2005年6月より生産を開始した。若干の設備改善を加えて大安工場のプロセスをそのまま移管しており、ビレット鑄造-鍛造-熱処理-検査の一貫工場としては北米でも初めてと思われる。これまで北米においては、アルミ鑄造品によるサスペンション例は多いもののアルミ鍛造品の採用例は少なく、鍛造化による軽量化効果は日本以上に注目されており、将来は大安工場以上の生産規模にすべく注力している。

4. 数値解析および接合技術

当社では、材料開発およびその生産技術の開発を進める一方、アルミ材の自動車部材への適用拡大に不可欠である数値解析および接合技術などの周辺技術の開発に積極的に取り組んでいる。成形加工に関する課題の解決には数値解析の利用が有効であり、2章と3章でも解析例を示したが、ここでは構造解析も含めた数値解析技術の適用動向とその一例を紹介する。また、接合技術に関しては、自動車分野での技術開発の流れと、最近注目されて

いる技術の一部を紹介する。

4.1 数値解析技術

アルミ材成形加工の数値解析は、近年特に広く行われるようになった。自動車パネル材（フード、トランク、フェンダ、ドア）に関しては、アウト、インパネルともにその成形限界の向上が最大の課題であり、しわ、割れを回避し、金型への材料の流れ込みを制御する金型形状、プレス条件、潤滑条件などを数値解析により求め、結果の活用を図っている¹⁴⁾。

最近では、欧州などを中心に自動車の排気まわりの遮蔽板に、エンボス加工を施したアルミ板の適用が進められているが、その特性は平板と大きく異なる。こうしたエンボス板の活用に関しても、成形解析技術を活用している¹⁵⁾。図14にアルミエンボス板の曲げ剛性と板の単位面積あたり重量の関係を、アルミ平板、鋼板と比較して示す。同一重量で比較した場合、アルミエンボス板は高い曲げ剛性値を有することがわかる。図15にはこうしたエンボス板の成形プロセスの解析結果を示す。エンボスパターンの付与による絞り成形性の向上効果が、こうした数値解析で評価でき、具体的形状設計に応用できる。

またフードアウトなどでは、ヘム加工時の割れが問題となるが、ここでは対策例として、6000系パネル材のフラットヘム加工プロセス適正化の検討結果を紹介する。ヘム加工時の割れ防止に関しては、素材耐力の管理やプレス加工での加工硬化量低減など広く行われているが、

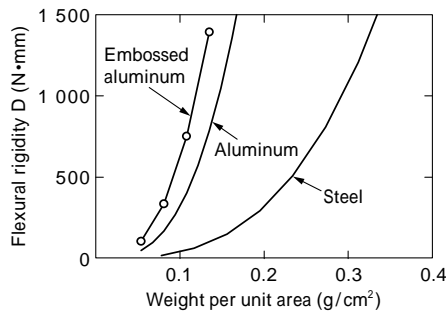


図14 アルミエンボス板の曲げ剛性と単位面積あたり重量の関係
Fig.14 Flexural rigidity vs. weight per unit area

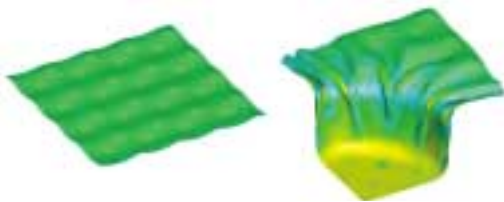


図15 アルミエンボス板の成形過程の解析結果
Fig.15 Numerical analysis results of forming process of embossed sheet

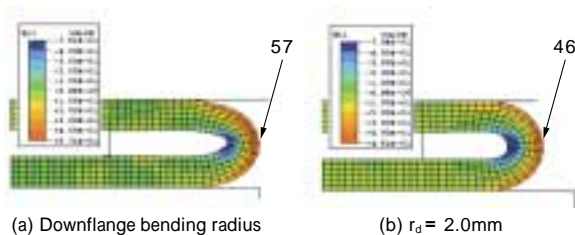


図16 フラットヘム工程のFEM解析結果の例
Fig.16 Numerical analysis results of flat hemming process

曲げ工程の改良も有効な方法である。図16はヘム加工の第1工程での曲げ半径 r_d の影響を解析で検討した結果¹⁶⁾であり、 r_d をやや大き目の値に設定することで発生歪が低減され、フラットヘムでの加工不良の危険性が低減できることがわかる。アルミルフでは、鋼製のフレーム部材に接合される構造が一般的であり、塗装工程時に鋼とアルミとの熱膨張差による歪が問題となる場合があり、数値解析による回避策も検討されている¹⁷⁾。

押出型材の曲げ加工では、しわの発生が問題となることが多い。中空型材を、コーナ部および支持部を端部とする板要素の集合体と仮定し、各板要素の塑性座屈限界を求めることで、多様な断面形状を持つ押出型材に適用可能なしわ発生限界曲げ半径の予測が可能となる¹⁸⁾。一例として、6063-T1材のしわ発生限界曲げ半径予測線図を図17に示す。図中のプロット点は、FEM解析によるしわ発生有無の評価結果であり、黒塗りはしわの発生、白抜きはしわの無い製品が得られたことを示している。中立軸から対象板材までの距離 h を用いて無次元化したしわ発生限界曲げ半径 R_{cr}/h は、断面形状によらず、板要素の弾性座屈係数 k とその幅厚比 b/t の逆数の二乗との積 $k(t/b)^2$ に対して一義的に定まり、本線図を用いることで、曲げ加工しわを抑制可能な断面あるいは曲げ半径条件を簡便に求めることができる。このような数値解析から求めた加工限界線図を用いることにより、短時間で加工条件あるいは断面形状の選定が可能となる。

また最近では、衝突安全性の観点から、正面、側面衝突に対する各種法規基準を満足する構造の検討が行われている。パンパ、ドアビームに関しては、2章でも述べたとおりである。更に、歩行者対策も重要な課題となっており、特にフードでは事故時の歩行者保護対応構造に関する検討がなされている¹⁹⁾。

4.2 接合技術

アルミパネルの接合としては、鋼板と同じく抵抗スポット溶接(RSW)が主として用いられているが、最近ではアルミ材料の塑性変形によるカシメ力を利用した

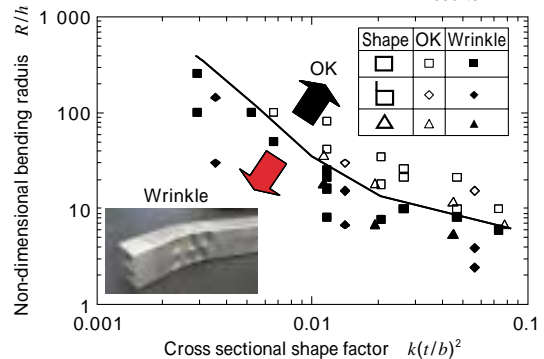
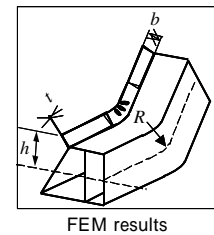


図17 6063-T1材のしわ発生限界曲げ半径予想線図
Fig.17 Wrinkle limit diagram for aluminum 6063-T1

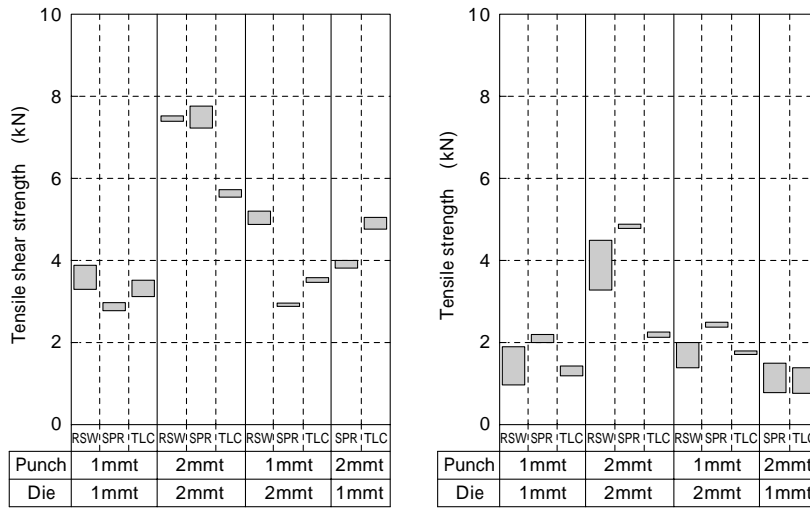


図18 抵抗スポット溶接(RSW),セルフピアシングリベット(SPR),TOG-L-LOC 継手の継手強度特性
Fig.18 Comparison of joint strength between RSW, SPR and clinching (TOG-L-LOC)

TOX, TOG-L-LOC やリベットを用いたセルフピアシングリベット(SPR)などの機械的接合の適用もみられる。図18にはそれら継手の引張せん断ならびに十字引張強度例を示すが, SPRはRSWと同等以上の特性を有するものの, 差厚組合せの場合は, 継手強度特性の点から打込み方向あるいは材料の重ね方に留意が必要となる。つまり, 引張せん断強度は上材側を厚く, 十字引張強度は下材側を厚くする方が高くなる傾向がある²⁰⁾。

摩擦攪拌接合(FSW)に関しては, 近年スポットタイプも開発され, マツダのRX8に初めて適用された。従来のRSWに比較して接合エネルギーが大幅に削減されることなどから, RSW代替法として採用されたものである。

一方, レーザは, その高出力化とビーム品質の改善の両立を目標に開発されてきており, 数年前には高出力・高集光性の連続発振のランプ励起によるYAGレーザが出現し, 片面施工が可能なこと, 入熱低減による局部変形が少ないことなどから, フードパネルのフランジ重ね溶接などに適用され始めた。しかし, 発振効率が高いという欠点があり, それを克服すべく半導体(LD)励起による固体レーザやファイバレーザが開発されるに至り注目を集めている。

さらに, 構造部材までアルミ化するには, より一層の

溶着量の確保が可能な連続溶接法が必要となり, 以下のような各種溶接方法が開発され, 適用されてきている。

レーザとミグ溶接を併用するハイブリッド溶接は, 古くはレーザ出力向上の補助手段としてとらえられていたが, その複合化メリットそのものが認識されるに至り, アルミへの適用においても図19に示すように施工時の耐ギャップ補完性と高速溶接のメリット²¹⁾を有し, たとえばVWのPhaetonのドアなどに適用されるなど, 今後の適用拡大が期待されている。

また, 十分な溶着量の確保と比較的低コストな設備投資とが満足できる接合方法としてミグ溶接が考えられるが, さらなる生産性向上ならびにアルミ素材への熱影響低減を目的に, 高速度溶接が可能なタンデムミグ溶接が開発されている。この方法は, 1本のトーチに2本のワイヤをもたせ2電源にて制御する方式であるが, 1本のワイヤを用いる従来ミグ法に比較して溶接速度が約2倍の3.0m/minが可能で, かつ入熱は90%程度で済むというメリットがある。また, 熱影響部の温度分布幅が狭く, その結果マイクロ割れも減少するという効果も得られている²²⁾。この方法は, サブフレームなど中厚(3mm前後)材での溶接構造用部品などへの適用が期待できる。

一方, ミグ溶接時のトラブルの大半はワイヤ送給系に

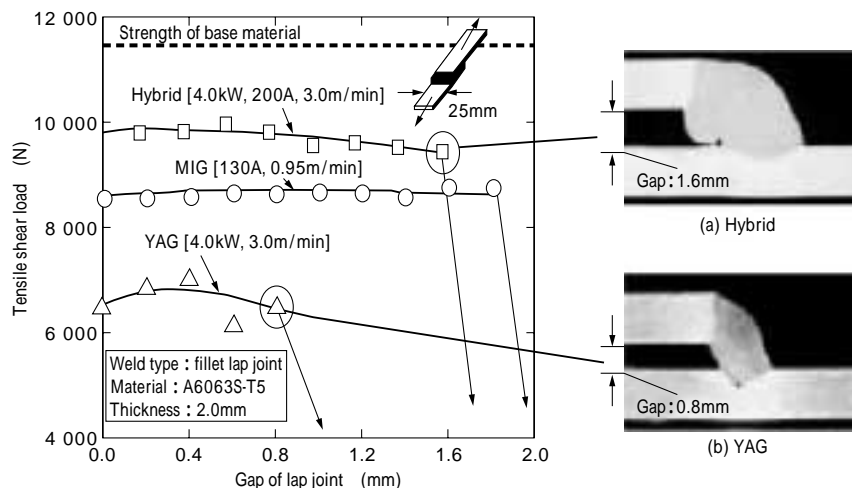


図19 重ねずみ肉継手におけるギャップ量と継手強度との関係(YAG + MIGハイブリッド, YAG, MIG)
Fig.19 Relationships between tensile load and gap tolerances on fillet lap joints

あることから、サーボ式プルトーチの適用が普及しつつあり、これらを後付けで鋼の溶接電源・ロボットであってもアルミの溶接ができるという低コストミグ溶接ロボットシステムも開発している²³⁾。

むすび=本稿では、近年の自動車へのアルミ材適用技術を紹介した。自動車のアルミ化は今後とも進展が期待されるが、やはりコストが最大の課題となると考えられる。アルミメーカでのコストダウンへの取組みが重要であることはもちろんであるが、トータルコストダウンの観点から、アルミ材料適用による効果(例えばリサイクル性や軽量化に伴う周辺部品のコストダウン、部品数の削減など)を最大限に引出すためのアルミ材料適用方法が不可欠となる。そのために当社は、アルミ素材の供給のみではなく、総合的に自動車アルミ化技術を開発・協力できるメーカとして、より一層自動車メーカと部品メーカとの連携を強め、アルミ化の促進を進めていきたい。

参 考 文 献

- 1) 小竹 忠:自動車技術, Vol.58 (2004) p.14.
- 2) 近藤敏弘:自動車技術会, 材料フォーラム, 1(2000).
- 3) 岩下智伸ほか:アルトピア, Vol.34, No.1 (2004) p.9.
- 4) 高木康夫ほか:R&D 神戸製鋼技報, Vol.54, No.3(2004) p.42.

- 5) 櫻井健夫ほか:軽金属学会第87回講演概要集,(1994) p.185.
- 6) 柴田勝弘:アルトピア, Vol.35, No.4 (2005) p.9.
- 7) 野田研二:軽金属セミナー予稿(2000) p.50.
- 8) 相浦 直ほか:R&D 神戸製鋼技報, Vol.52, No.3 (2002) p.83.
- 9) 橋村 徹ほか:R&D 神戸製鋼技報, Vol.52, No.3 (2002) p.98.
- 10) 梅本俊一:アルトピア, Vol.33, No.7 (2003) p.24.
- 11) 兵藤陽一:軽金属学会第58回シンポジウム,(2000) p.18.
- 12) 高木 潔ほか:軽金属, Vol.54, No.3 (2004) p.117.
- 13) 森田 司ほか:自動車技術, Vol.57, No.6 (2003) p.57.
- 14) 小西晴之ほか:第30回塑性加工春季講演会論文集(1999) p.347.
- 15) 小西晴之ほか:第99回軽金属学会秋期講演会講演論文集(2000) p.215.
- 16) 野田研二ほか:第99回軽金属学会秋期講演会講演論文集(2000) p.217.
- 17) 松村吉修ほか:三菱自動車テクニカルレビュー No.16 (2004) p.82.
- 18) 吉田正敏ほか:塑性と加工, Vol.41, No.468 (2000) p.74.
- 19) K. Ikeda et al. : IBEC2003 (2003) p.537.
- 20) 岩瀬 哲ほか:機械学会講演論文集, [No.96-39] (1996) p.87.
- 21) 江口法孝ほか:R&D 神戸製鋼技報, Vol.54, No.2(2004) p.57.
- 22) 松本 剛ほか:R&D 神戸製鋼技報, Vol.54, No.2(2004) p.66.
- 23) 米澤和男ほか:R&D 神戸製鋼技報, Vol.54, No.2(2004) p.70.