

(解説)

自動車パネルのアルミ化動向

Aluminum Alloy Sheet Trends for Automotive Body Panels



櫻井健夫*
Takeo Sakurai

Automobiles tend to become heavier as the safety and comfort features are improved. At the same time, the demand for higher fuel efficiency and lower environmental impact is also rising and this has directly influenced the trend toward the weight reduction of automobiles and the increase in applications of light aluminum alloys in automotive body panels. This paper reports on developments and trends in aluminum alloy sheets for automotive body panels.

まえがき = 近年、自動車は、安全性の向上（衝突安全、歩行者保護性能）や走行性・快適性の向上など消費者ニーズに適合させるため、車体の大型化とともに重量が増加している。さらに、地球環境への対応から排ガス規制、つまりCO₂やNO_xなどの排出量の規制が今後さらに厳しくなろうとしている。例えば、欧州委員会では、2008年にCO₂排出量を140g/km以下とし、2012年にはさらに130g/km以下に削減することを義務付ける方針を発表した。日本国内でも、2012年までに前述した欧州の規制並みにCO₂排出量の制限が厳しくなる見込みとなっているため、自動車の低燃費化が必須となっている。低燃費化の実現には、ハイブリッド化、電気モーターあるいはディーゼルエンジンなどパワートレインの技術開発はもとより、車両重量の軽量化が有効な手段となっている。自動車の軽量化は、10・15モードの燃費測定において、車両重量を100kg軽くすることで1km/ℓもの燃費向上に効果があるといわれている¹⁾。軽量化対策は、従来使用していた鋼板を高強度化し板厚を減少するなどにより検討されてきたが、張り剛性の点で板厚減少にも限界があることから、より軽質な材料に代えることが有効な手段であり、種々の検討が行われている。なかでも、アルミニウム合金（以下、アルミ合金）は、鋼板に比べ比重が約1/3ということから注目されており、様々な部位に使用されるようになった。従来から、エンジンなどの鋳物部品にアルミ合金が使われていたが、近年では、フード、トランクリッド、ドアなどの外板パネルやヒートインシュレータなどのプロテクトカバー類にアルミ合金板材が使われるようになった^{2)~5)}。ここでは、自動車用アルミ合金板材の最新の動向と開発状況について解説する。

1. 自動車パネルのアルミ化状況

日本国内で自動車パネルにアルミ合金板材が実用化さ

れたのは、1985年にマツダ㈱のRX-7のフードが初めてである。その後、85~90年代前半にかけスポーツ車や高級セダンを中心にパネルのアルミ化が進展した。特に本田技研工業㈱は1990年、世界で初めてオールアルミボディ車NSXを発表した。以降、バブル経済崩壊とともに自動車ボディへのアルミ化が衰退するが、1999年頃から地球環境問題への対応から自動車の軽量化を目的に様々な部位へアルミ合金板が採用されるようになってきた。表1に、日本国内における2006年のアルミパネル採用状況を示す。最近では、トヨタ自動車㈱のクラウン(図1)、プリウスや富士重工業㈱(スバル)のレガシイ、日産自動車㈱のフーガ(図2)³⁾、スカイラインといった量産車種に採用されるようになった。採用部位としては、フードが多いものの、最近の傾向として、トランクリッド、

表1 アルミニウム合金パネル適用例
Table 1 Examples of aluminum closer panels for automobiles

Car maker	Model	Application parts
TOYOTA	CROWN	Hood
	CROWN MJ	Hood
TOYOTA(LEXUS)	PRIUS	Hood, Back-door
	LS	Hood
	GS	Hood
	SC	Hood, Roof
DAIHATSU	IS	Hood
	COPEN	Hood, Roof
NISSAN	FUGA	Hood, Door, Trunk-lid
	CIMA	Hood, Trunk-lid
	SKYLINE	Hood
	STAGEA	Hood
SUBARU	Fairlady Z	Hood
	LEGACY	Hood, Back-door
	INPRESSA	Hood
MAZDA	FORESTER	Hood
	RX-8	Hood, Rear-door
HONDA	ROADSTER	Hood, Trunk-lid
	LEGEND	Hood, Trunk-lid, fr-fender
MITSUBISHI	S2000	Hood
	LANCHER Evo.	Hood, Roof, Trunk-lid
	PAJERO	Hood
	AUTORUNDER	Roof

Source : Japan Aluminum Association

*アルミ・銅カンパニー 真岡製造所 アルミ板研究部



Source : Toyota Motor Corporation

図1 アルミフード採用車事例(トヨタ自動車㈱クラウン)
Fig. 1 Example of application of aluminum hood (TOYOTA CROWN)

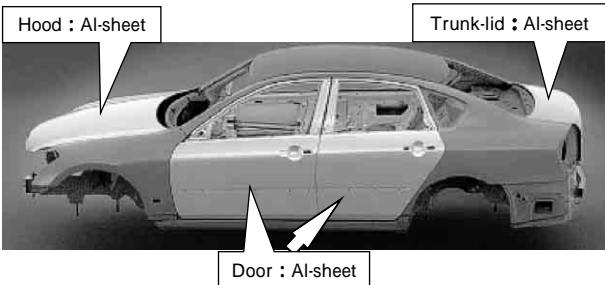


図2 日産自動車㈱フーガのアルミパネル採用部位⁶⁾
Fig. 2 Example of application of aluminum body panel (NISSAN FUGA)⁶⁾

バックドア、ルーフなどにも適用されるようになった⁷⁾⁸⁾。

欧州では、2000年から2002年にかけて急激にアルミ化が進み、年250万台以上の車にアルミ合金板が使用されている。ルノーでは、月約4万台生産される量産車クリオ(日本名ルーテシア)のフードにアルミ合金板を採用している。また、メルセデスベンツのEクラス、BMWの5シリーズなど月2万台以上生産される車にアルミ合金板が使われ、かつ、その適用部位が拡大している。例えば、BMWの5シリーズは、Aピラーより前方の骨格およびパネル全域をアルミ化している。アウディは、1992年よりオールアルミボディ車A8(スペースフレーム構造)を発表し、欧州でも自動車のアルミ化をいち早く進めている。その後、A2、新型A8などを発表し、2006年、TTのモデルチェンジの際、これらの技術を進化させ、アルミスペースフレームをベースに、部分的に鋼板を使用するという素材のハイブリッド化を行っている。欧州の自動車のこのようなアルミ化の拡大は、その背景に2012年に義務化される厳しいCO₂排出量(燃費)の規制が関わっているものと考えられる。

2. 自動車パネル用アルミ合金板材の開発状況

自動車パネル用アルミ合金板材の開発経緯を表2に示す⁹⁾。自動車パネル用アルミ合金板は、日本では1985年に実用化された当初はAl-Mg合金に若干のZnを添加した合金が使用されていた。一方、同時期の欧米では、2000系(Al-Cu系)合金や6000系(Al-Mg-Si系)にCuを添加した合金が主流となっていた。その後、自動車パネルに要求される材料特性は、強度、成形性のみでなく、耐食性、ヘム曲げ加工性、表面性状、接合性など多岐にわたるようになり、現在では、国内外を問わず、ほとんどが6000系(Al-Mg-Si系)合金となり、一部に5000

表2 自動車パネル用アルミニウム合金の開発経緯

Table 2 Development history of aluminum sheets for automotive panels

	1985 ~ 1990	1990 ~ 1998	1999 ~ 2005
JAPAN	Al-Mg Series alloy High strength & High formability	Al-Mg Series alloy AA5022, AA5023 Al-Mg-Si Series alloy High bakehardability High formability	Al-Mg-Si Series alloy High bakehardability High formability Hemming SS mark free Al-Mg Series alloy
US & EU	Al-Cu Series alloy AA2036, AA2008 Al-Mg-Si Series alloy AA6009, AA6010	Al-Mg-Si Series alloy AA6022, AA6016 Al-Mg-Si Series alloy AA6111	Al-Mg-Si Series alloy AA6022, AA6016

系(Al-Mg系)合金が使用されている。

表3は、代表的な自動車パネル用アルミ合金板材の化学成分と材料特性を示す⁸⁾。6000系合金は、熱処理で強度をコントロールすることができる。また、6000系合金は、自動車の製造工程にある塗装焼付の熱処理工程において強度が増加するバークハード性(以下、BH性)を付与できることから、耐デント性の向上、薄肉軽量化が可能である材料として国内外で自動車パネル用として主流となっている。BH性といっても、その塗装焼付工程における加熱条件が、各国で若干異なり、欧米では180~200と比較的高温で処理されているのに対し、日本は低温・短時間の処理(170×20分)となっている。アウターパネル用材は、このような加熱条件下でも高い強度(耐力)を要求されるが、従来の6000系合金では十分な強度(耐力)を得ることができなかった。しかし、低温・短時間で高いBH性を得るための研究開発が進み、図3に示すように、予備時効処理を行うことで従来不可能であった低温でのBH性を得ることが可能となった^{10)~12)}。さらに、復元処理も低温・短時間処理で高いBH性を得ることができると報告されている^{13)~15)}。

6000系合金の強度(耐力)は、図4に示すように時効処理において生成する微細析出物(中間相 γ' -Mg₂Si)の析出状態(サイズと密度)に依存する。その状態は、主添加元素であるMgとSiの添加量や熱処理条件(時効処理条件)に影響される。高強度(高耐力)を得るためには、図4の開発低温BH材のように析出物を微細かつ高密度にする必要がある。このような析出状態は、主添加元素であるSiを過剰に添加することにより得ることができる。したがって、実用化されている自動車パネル用アルミ合金板のA6022やAA6016などは過剰Si型の合金となっている。また、日本でも開発されている自動車パネル用アルミ合金板の6000系合金もほとんどが過剰Si型である。また、Cuの添加も析出物を緻密で微細にする効果がある¹⁶⁾。

6000系合金は、室温に長時間放置すると自然時効し、耐力が増加する。この耐力の増加は、プレス成形や曲げなど加工性の低下の要因となる。このような経時変化を抑制するための研究開発も進められ、復元処理や安定化処理を行うことで経時変化の抑制効果があり、図5に示すように熱処理後、数時間経過しても硬度変化は非常に小さい¹⁵⁾。

表3 自動車パネル用アルミニウム合金板の化学成分と機械的性質

Table 3 Chemical compositions and mechanical properties of aluminum alloys for automotive body sheet

Alloy	Chemical compositions (wt%)									Mechanical properties				
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	TS (MPa)	YS (MPa)	El. (%)	n-Value	r-Value	
5000 series	AA5022	0.25	0.40	0.20~0.50	0.20	3.5~4.9	0.10	0.25	0.10	275	135	30	0.30	0.67
	AA5023	0.25	0.40	0.20~0.50	0.20	5.0~6.2	0.10	0.25	0.10	285	135	33	-	-
	AA5182	0.25	0.35	0.15	0.20~0.50	4.0~5.0	0.10	0.25	0.10	265	125	28	0.33	0.80
	AA5052	0.25	0.25	0.10	0.10	2.2~2.8	0.15~0.35	0.10	-	190	90	26	0.26	0.66
6000 series	AA6022	0.8~1.5	0.05~0.20	0.01~0.11	0.02~0.10	0.45~0.7	0.10	0.25	0.15	275	155	31	0.25	0.60
	AA6016	1.0~1.5	0.50	0.20	0.20	0.25~0.6	0.10	0.20	0.15	235	130	28	0.23	0.70
	AA6111	0.7~1.1	0.40	0.5~0.9	0.15~0.45	0.50~1.0	0.10	0.15	0.10	290	160	28	0.26	0.60

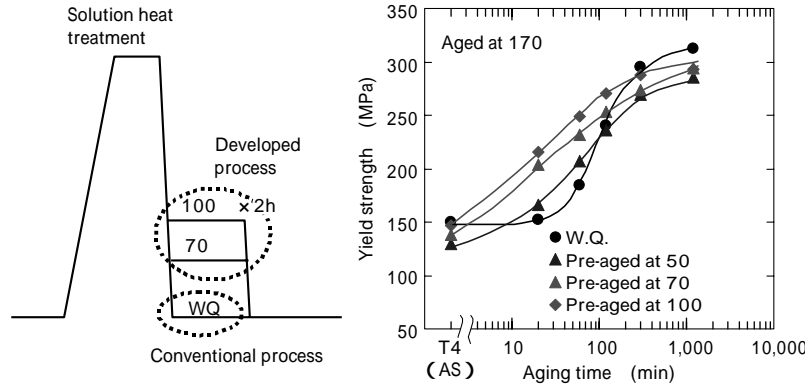


図3 6000系合金のバークハード性に及ぼす予備時効処理の影響
Fig. 3 Effects of pre-aging on bake hardenability in 6000 series alloys

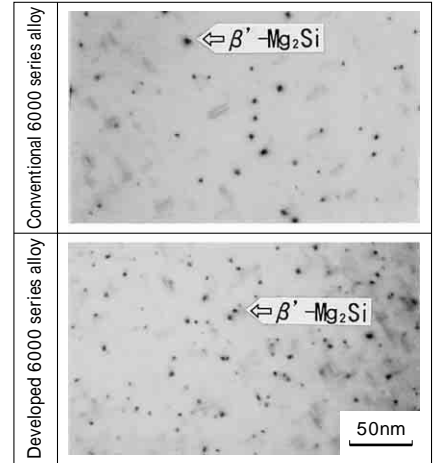


図4 6000系合金の時効後の組織観察結果(時効処理: 180 x 60分)
Fig. 4 TEM microstructures of aged 6000 series alloys (aged at 180 for 60min)

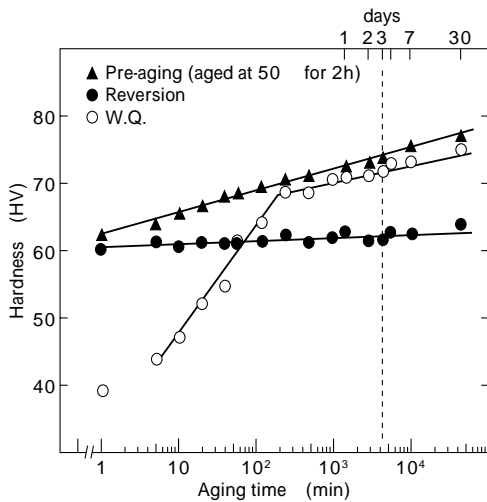


図5 6000系合金の経時変化に及ぼす復元処理の影響
Fig. 5 Effect of reversion process on natural aging in 6000 series alloy

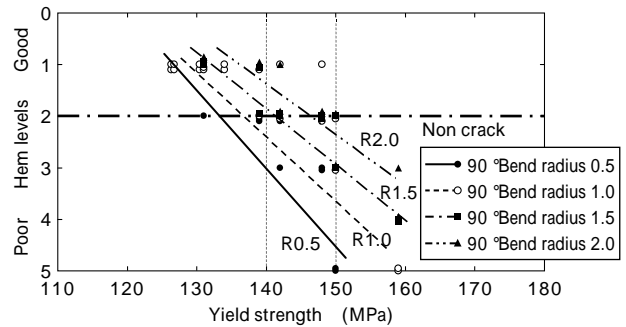


図6 6000系合金のヘム曲げ加工性に及ぼす素材耐力と加工法(ダウンフランジ: 90°曲げR)の影響
Fig. 6 Effects of yield strength and 90° bend radius on flat hemming formability in 6000 series alloys

さらに、6000系合金の課題として、ヘム曲げ加工性がある。自動車のフードやトランクリッドといった部位は、アウターとインナーとがヘム曲げ加工によって接合されている。一般にこの加工工程は、ダウンフランジ(90°曲げ)-プリヘム(135°曲げ)-ヘム曲げ(180°曲げ)となっている。このとき、曲げRが小さい、あるいはアウターの板厚が厚いなど加工条件が厳しい場合、割れが発生し問題となることがある。そのため、曲げ加工性向上のための研究開発も進められている。例えば、結晶粒界および粒内に比較的粗大な析出粒子が存在する場合において曲げ加工性が劣る¹⁷⁾ことや、せん断帯の形成とマトリックス中の第2相粒子が多い場合、もしくは、せん断帯と結晶粒界上の第2相粒子が多い場合に曲げ加工性

は劣る¹⁸⁾ことが報告されている。つまり、曲げ加工性の向上のためには、熱処理などにより析出する第2相粒子を制御するなど材料面からの改善が検討されている。また、加工方法からの改善も検討されており、図6に示すように曲げ加工の工程にあるダウンフランジ(90°曲げ)加工時の曲げRを大きくすることで、プリヘムからヘム曲げは従来工程でも6000系合金の曲げ加工性を改善することができる¹⁹⁾。

欧州では、曲げ加工は180°曲げを行わず、ダウンフランジ後、機械締結により接合し製品化されている部品もあるが、見栄えの点から日本と同様にフラットヘムが行われるようになってきている。

3. 自動車パネル用アルミ合金板材の成形加工技術

アルミ合金板材は、鋼板と比較し、材料の伸び、 n 値、 r 値、ヤング率が低いため、一般に成形性が劣る。従来の鋼板では成形可能な形状でも、アルミ合金板では、割れ、しわ、形状凍結性（スプリングバック）などの問題の発生する場合がある。よって、成形の自由度が鋼板に比べ小さいため、デザインが制約されてしまうというケースがある。

自動車パネル用の代表的アルミ合金板材と鋼板の機械的性質は、引張強さおよび耐力については軟鋼板とほぼ同等の値を有しているが、伸びは劣っている。図7は、代表的な自動車パネル用アルミ合金板材（5000系、6000系）と軟鋼板の応力 - ひずみ曲線を示す。アルミ合金は、最高荷重に到達するとその後の伸び（局部伸び）が軟鋼板に比べ著しく小さいことがわかる。これが、アルミ合金板と軟鋼板における成形性の違いの主な原因と考えられる。ここで、アルミ合金板の基礎成形特性および成形性の改善策について解説する。

3.1 張出成形

図8は、各アルミ合金板材および軟鋼板のLDH₀（LDH：Limited Drawing Height）と引張強さの関係を示す。LDH₀は、ブランク形状を長方形とし、球頭ポンチによる張出成形を行った際の破断までの成形高さを示し

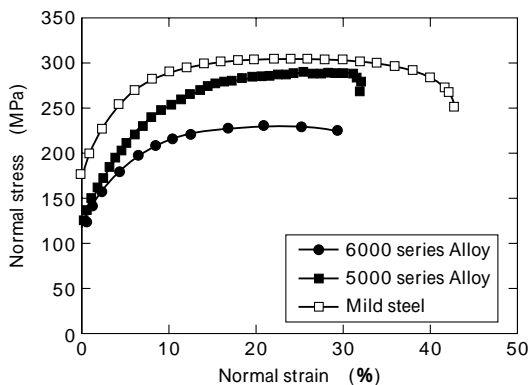


図7 アルミ合金板および軟鋼板の応力 - ひずみ曲線
Fig. 7 Stress-strain curves of aluminum alloys and mild steel

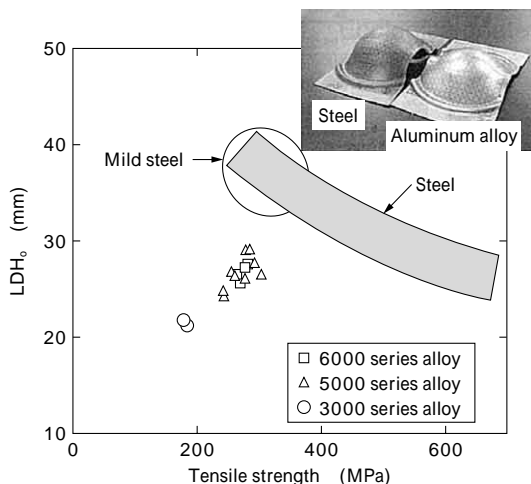


図8 アルミ合金板材および軟鋼板のLDH₀と引張強さの関係
Fig. 8 Relationship between LDH₀ and tensile strength of typical aluminum sheet and mild steel

た値である。この時の破断部近傍は平面ひずみ領域にある。これより、アルミ合金板材は、軟鋼板とほぼ同等の引張強さを有しているが、張出成形性は劣っている。

3.2 絞り成形

自動車パネル用アルミ合金板材および軟鋼板の円筒絞り試験による限界絞り比(LDR：Limited Drawing Ratio)と絞り成形高さを測定した結果を表4に示す。軟鋼板に比べ、アルミ合金板材は限界絞り比は低く、成形高さは約70%程度となる。

3.3 しわ感受性

図9は、アルミ合金板と軟鋼板の円錐台成形試験により、しわおよび割れ限界を調査した結果を示す。アルミ合金板は、低いしわ押え力(BHF:Blank Holding Force)領域であればしわ発生は軟鋼板とほぼ同等であるものの、軟鋼板並にしわ押え力を高くすると割れが発生する。よって、アルミ合金板は、成形限界が軟鋼板に比べ低い。また、アルミ合金板は、軟鋼板に比べヤング率が1/3と小さいため座屈しやすいこと、また、 r 値が低いため局所変形すると破断が生じやすくなるなどのことから、しわおよび割れへの対策が必要と考えられる²⁰⁾。

通常、アルミ合金板材の成形は、軟鋼板に比べ種々の問題があるため、鋼板の成形技術をそのまま適用することはほとんどできない。したがって、アルミ合金板の成形には、アルミに適した成形・加工技術などの周辺技術の開発が不可欠である。例えば、6000系合金のプレス成形技術として有効な方法は、金型設計をアルミに適した形状にすることが必要で、ダイフェイス面の接触部の

表4 アルミ合金板と鋼板の絞り成形比較
Table 4 Comparison of drawing formability of aluminum sheet and mild steel (die inner diameter : 100mm)

Alloy	Drawing ratio (LDR)	Drawing height H/D_d
5000 series alloy-1.0t	1.86	0.67
6000 series alloy-1.0t	1.81	0.65
Mild steel-0.8t	2.15	0.97

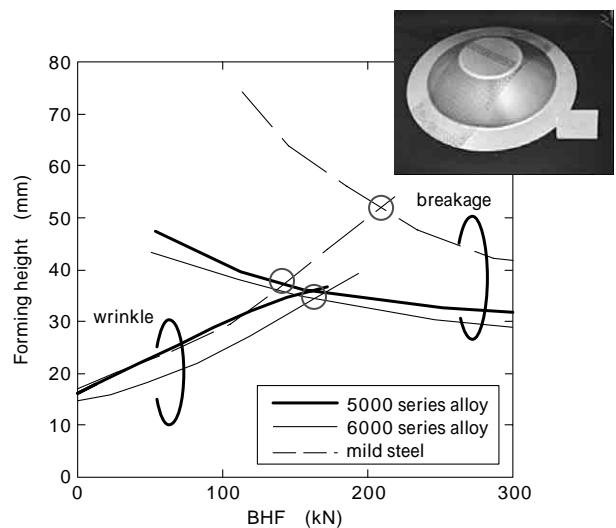


図9 アルミ合金板材の円錐台成形試験におけるしわおよび割れ限界
Fig. 9 Relationship between forming limit height and BHF of conical cup forming (punch diameter : 100mm, die inner diameter : 200mm)

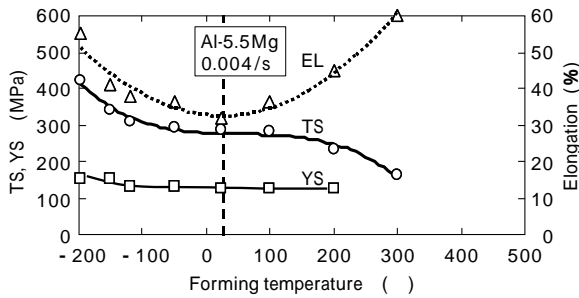


図10 5000系合金の機械的性質に及ぼす成形温度の影響
Fig.10 Effects of forming temperature on mechanical properties in 5000 series alloys

精度を高くすること、割れ周辺部のビード高さを低くすること(鋼板の約1/2)が効果的である。また、形状精度を向上させるための技術の一つとしてBHF制御法が効果的であることが報告されている²¹⁾。

アルミ合金板材での成形限界を向上させるための技術として、塑性変形の温度依存性を利用する方法も検討されている。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が著しく高くなるといったアルミ特有の特性を利用した手法がある。図10は、5000系合金(Al-Mg合金)の機械的性質におよぼす温度の影響を示す。アルミ合金板材の高温域での高い延性を利用した高温ブロー成形法は、鋼板を凌ぐ加工形状を得ることができる手法であることから実用化されているものの、加工時間が長いため、極少量生産の自動車パネルにおいて非常に形状が厳しい部位に適用されてきた。しかし、最近では、加工時間を短くし、生産性向上技術が進められたことにより、本田技研工業㈱のレジェンドにおいてフロントフェンダーとトランクリッドに高温ブロー成形法が採用されている²²⁾。一方、低温で延性が向上するアルミ特有の性質を利用した低温成形技術も開発されている。

鋼板に比較し、アルミ合金板は局部伸びが低いため、成形加工時に局部変形を生じた場合、破断しやすくなる。なお、高い潤滑性を持つ固形潤滑剤を適用することにより、アルミ合金板の張出しや絞り成形を向上させることができる。欧州では、自動車用アルミ合金板にワックスタイプや乾燥フィルムタイプの固形潤滑剤が塗布され実用化されている²³⁾。

4. 自動車構造用アルミ合金板材の開発状況

自動車構造用アルミ合金板材の種類と材料特性を表5に示す。構造用アルミ合金板に要求される特性は、強度

や成形性以外に溶接性、耐食性(耐応力腐食割れ性)などが必要であるため5000系合金が主となっており、かつ、これらの特性を満足するためパネル用合金と比べるとMgの添加量が平均的に少ない。そのため、強度や成形性が若干低下する傾向にあるが、Mn, Crなどの遷移元素を添加することで結晶粒径を微細化し、これらの特性低下を抑制している。最近では、これらの合金を用いて、自動車のサブフレームをアルミ化している²⁾⁻⁵⁾。

5. パネルおよび構造部材以外の部位へのアルミ板材の適用例

その他、軽量化を目的に自動車のパネルや構造部材以外の部位にアルミ合金板が使用されている。例えば、マフラとボディの間の熱、音、汚れなどのプロテクトを目的としたヒートインシュレータや燃料タンクプロテクタ、さらには、エンジンルーム内には、エグゾーストマニホールドカバーなどにアルミ合金板が採用されている。これらの部材には、1000系や3000系合金の汎用アルミ合金板が使用されており、軽量化効果は当然のことながら、コスト的に従来のめっき鋼板と遜色ないことから代替えされたものと考えられる²⁾⁻⁵⁾。

6. 今後の自動車パネル用アルミ合金板材の展望

自動車パネルのアルミ化は、今後、環境問題への対応や安全性・快適性の向上の技術が進めば進むほど軽量化ニーズが高くなり、継続し進展するものと考えられる。今後、さらにフード以外の他部位への拡大、量産大衆車への適用のため、生産技術を含めた材料開発とともに、成形加工技術の発展が必要であると考えられる。また、単純に鋼板からアルミ合金板への素材変更による軽量化メリットだけではなく、プラスの付加価値が求められるようになるであろう。例えば、トヨタ自動車㈱のクラウンで実用化されたインパクトアブソープションウェーブフードやマツダ㈱のRX-8のショックコーンフードなどは、アルミ化による軽量化だけでなく歩行者保護規制に適した構造として新規採用された技術である²⁴⁾。このように、アルミの軽量化以外の付加価値を生かした技術も発展途上にあり、さらに拡大していくことが期待できる。

むすび= パネル材を中心にアルミニウム合金板材の動向と新技術を紹介した。自動車の軽量化ニーズはますます高まり、軽量素材への変更の一つとしてアルミ化の検討

表5 自動車構造部材用アルミ合金板材の種類と材料特性

Table 5 Chemical compositions and mechanical properties of aluminum alloys for automotive structural parts

Alloy	Chemical compositions (wt%)									Mechanical properties			Weldability	Corrosion resistance (SCC)
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	TS (MPa)	YS (MPa)	El. (%)			
5000 series	AA5052	0.25	0.25	0.10	0.10	2.2~2.8	0.15~0.35	0.10	-	190	90	26	B	AA
	AA5182	0.25	0.35	0.15	0.20~0.50	4.0~5.0	0.10	0.25	0.10	275	125	28	AA	AA
	AA5454	0.25	0.40	0.10	0.50~1.0	2.4~3.0	0.05~0.20	0.25	0.20	240	110	24	B	AA
	AA5154	0.50	0.50	0.10	0.50	3.1~3.9	0.25	0.20	0.20	230	105	27	A	AA
	AA5754	0.40	0.40	0.10	0.50	2.6~3.6	0.30	0.20	-	-	-	-	-	-
6000	AA6061	0.4~0.8	0.7	0.15~0.40	0.15	0.8~1.2	0.04~0.35	0.25	0.15	315	275	12	C	B

AA > A > BB > B > CC > C
Good Poor

が継続的に実施されていくものと考えられる。アルミ合金に求められる特性は、今後、軽量化メリットということだけでなく、アルミ合金固有の特性や構造体としての機能なども要求されるようになって考えられる。

自動車のアルミ化をさらに拡大するためには、パネルについては、成形の自由度を高めるための材料、成形技術、解析技術の研究開発が必要であると考え。また、アルミ化拡大のための技術として、潤滑技術も重要となると思われる。固形潤滑剤などの摩擦係数が低い潤滑剤を使用することで材料の流入を容易にし、均一変形させ深絞り成形を可能とし、形状自由度を高めることができる。

さらに、アルミ化拡大の新技术として、異種金属接合技術の開発が注目されており、鋼とアルミ合金の接合を容易にすることでパネル以外の構造部材への適用などアルミ合金板の使用箇所拡大が期待されている。

様々な部位への拡大や量産車への適用を考慮するとやはり低コスト化への取組みも重要となるであろう。低コスト化は、材料の生産技術開発により、簡略化した工程で製品化しても現状と同等の性能を持つことができること、さらには、品種統一化やリサイクルの推進による取組みが必要となると考える。

参考文献

- 1) 近藤 : 自動車技術会, 材料フォーラム, 1 (2000).
- 2) 自動車アルミ化委員会: アルミニウム, Vol.9, No.4(2002) p.25.

- 3) 自動車アルミ化委員会: アルミニウム, Vol.10, No.54(2003) p.150.
- 4) 自動車アルミ化委員会: アルミニウム, Vol.11, No.58(2004) p.163.
- 5) 自動車アルミ化委員会: アルミニウム, Vol.13, No.63(2006) p.25.
- 6) 千葉 : アルミニウム, Vol.12, No.61 (2005) p.75.
- 7) 高木 ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.54, No.3(2004) p.42.
- 8) 林 : 軽金属, Vol.55, No.8 (2005) p.371.
- 9) 櫻井 : (社)軽金属学会編, 自動車軽量化のための生産技術, (2003) p.9.
- 10) 櫻井 ほか: 第 87 回軽金属学会秋期大会講演概要 (1994) p.185.
- 11) 佐賀 ほか: 第 87 回軽金属学会秋期大会講演概要 (1994) p.187.
- 12) 佐賀 ほか: 軽金属, Vol.53, No.11 (2003) p.516.
- 13) 斉藤 ほか: 第 83 回軽金属学会秋期大会講演概要 (1992) p.65.
- 14) 内田 ほか: 軽金属, Vol.46, No.9 (1996) p.427.
- 15) 櫻井 ほか: 第 91 回軽金属学会秋期大会講演概要 (1996) p.175.
- 16) 櫻井 ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.43, No.2 (1993) p.95.
- 17) 高木 ほか: 第 97 回軽金属学会秋期大会講演概要 (1999) p.177.
- 18) 浅野 ほか: 軽金属, Vol.52, No.10 (2002) p.448.
- 19) 野田 ほか: 第 99 回軽金属学会秋期大会講演概要 (2000) p.217.
- 20) 櫻井 ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.51, No.1 (2001) p.9.
- 21) 櫻井 ほか: 第 96 回軽金属学会春期大会講演概要 (1999) p.245.
- 22) 柴田 : アルトピア, Vol.35, No.4 (2005) .
- 23) W. Miller et al. : Wear, Vol.255 (2003) p.1455.
- 24) 日経ものづくり, 9 (2004) p.74.