

(解説)

自動車パネル用アルミニウム合金板材の開発状況とその成形技術

櫻井健夫*・小西晴之(工博)**

*神鋼アルコア輸送機材株式会社 **アルミ・銅カンパニー・技術部

Trends and Formability Issues related to Aluminum Sheet Alloy used for Automotive Body Panels

Takeo Sakurai・Dr. Haruyuki Konishi

Trends in aluminum sheet alloys for automotive body panel are reviewed in this article. The properties of aluminum sheet alloys commonly used for automotive panels are compared in some aspects. Recent topics related to the development of 6000 series alloy are also reported on. In the second half of the article, aluminum sheet alloy formability issues are discussed. Formability comparisons between aluminum and steel, and typical forming guidelines for aluminum body panels are also discussed.

まえがき = アルミニウム (以下アルミと略す) 合金板材は軽量化で強度が高く耐食性にも優れた特長を有しており、自動車軽量化ニーズが高まるなか、自動車パネルへの利用拡大が期待されている。パネル材に求められる諸特性を高い次元で満足させるべく、現在も素材開発が続けられている。

以下に自動車パネル用アルミ合金の世界的な動向や、近年主流となりつつある 6000 系合金の開発の状況などについて述べる。またこれらの素材利用の局面において、しばしばプレス成形性が問題になることを考慮し、代表的な合金の成形特性や、プレス加工をおこなう上での留意点などについても解説する。

1. 自動車パネル用アルミ合金板材の開発状況

1.1 自動車パネル用アルミ合金の種類と特性

第 1 表に主な自動車パネル用板材の成分と材料特性を示す。表中の記号 σ_B は引張強さ、 $\sigma_{0.2}$ は 0.2% 耐力、 ϵ は伸び、 n は加工硬化指数、 r は歪み比 (r 値) である。従来、欧米では 2000 系、6000 系合金、国内では 5000 系合金がパネル用として適用されていた。最近では、国

内外を問わず、SS マークフリー、高強度化により薄肉軽量化が可能である、リサイクル性が良いなどのことから 6000 系合金が主流になってきた。現状、実用化されているパネル用アルミ合金は、欧米では強度と成形性に優れるため、Cu 添加量が多い 6111 合金、また、Cu 添加量が少ない 6016 や 6022 合金である。将来的には、耐食性の問題から 6022 や 6016 合金が主流となると考えられている。

1.2 自動車パネル材の開発状況

6000 系 (Al-Mg-Si 系) 合金は、成形後に SS マークが発生しないこと、自動車の製造工程にある焼付塗装処理時の熱処理を利用することで、強度の増加が可能であることなどの特徴があるため自動車パネル用の材料として実用化され、また、様々な研究が国内外でおこなわれている。

ベークハード型アルミ合金の開発

自動車パネル用アルミ合金板材の開発は、欧米、日本とも 6000 系合金を主に開発が進められている。とくに、ベークハード性については、合金成分や熱処理方法により、現状の自動車製造ラインにおける焼付塗装時の熱処

第 1 表 自動車パネル用アルミ合金板材の組成と材料特性

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of typical aluminum alloys

Alloy	Chemical Compositions wt%					Mechanical Properties				
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	σ_B MPa	$\sigma_{0.2}$ MPa	%	n Value	r Value
5023	<0.25	<0.40	0.20 - 0.50	<0.20	3.5 - 4.9	285	135	33	0.33	0.7
5052	<0.25	<0.40	<0.10	<0.10	2.2 - 2.8	190	90	26	0.26	0.66
5182	<0.20	<0.35	<0.15	0.20 - 0.50	4.0 - 5.0	265	125	28	0.33	0.80
6111	0.7 - 1.1	<0.40	0.5 - 0.9	0.15 - 0.45	0.5 - 1.0	290	160	28	0.26	0.60
6016	1.0 - 1.5	<0.50	<0.20	<0.20	0.25 - 0.6	235	130	28	0.23	0.70
6022	0.8 - 1.5	0.05 - 0.20	0.01 - 0.11	0.02 - 0.10	0.45 - 0.7	275	155	31	0.25	0.60
Mild Steel	—	—	—	—	—	310	186	45	0.22	1.6

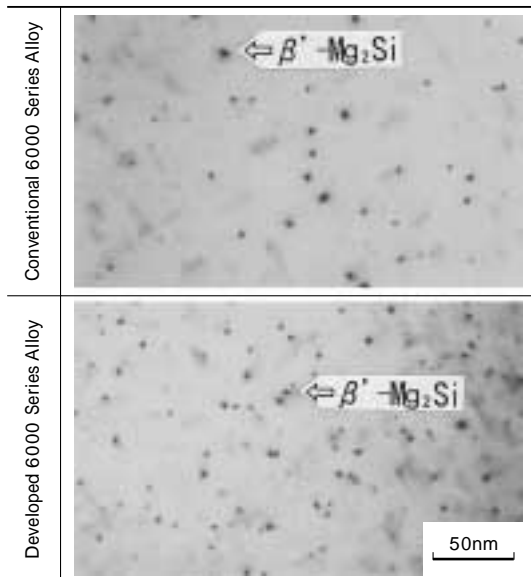


写真1 6000系合金の時効後の組織観察結果（時効処理：180 × 60分）
Photo 1 TEM microstructures of aged 6000 series alloy (aged at 180 × 60min)

理条件で高い強度をえるための研究が盛んにおこなわれている。

6000系合金の強度は、写真1に示すように微細析出物（中間相 β' - Mg_2Si ）の状態（サイズと密度）に依存する。析出物の状態は、主添加元素（Mg, Si）量や時効処理条件により異なる。高強度をえるには、析出物を微細でかつ高密度にする必要がある。

合金成分は、過剰Siにすることで微細析出物の微細・高密度化が可能であることが知られており、自動車パネル用に開発された米国の6022, 6111や欧州の6016は過剰Si組成で、日本でもほとんどの6000系合金は過剰Siである。また、近年、自動車の焼付塗装時の熱処理条件が低温・短時間化する傾向があることから、このような処理条件でも高強度をえるための熱処理方法の研究も進められている。たとえば、第1図に示すように、溶体化、焼入れ処理の際に予備時効処理¹⁾²⁾を施したり、あるいは復元処理^{3)~5)}をおこなうことで、低温・短時間の処理条件でも高い強度をえられることが報告されている。

経時変化抑制技術

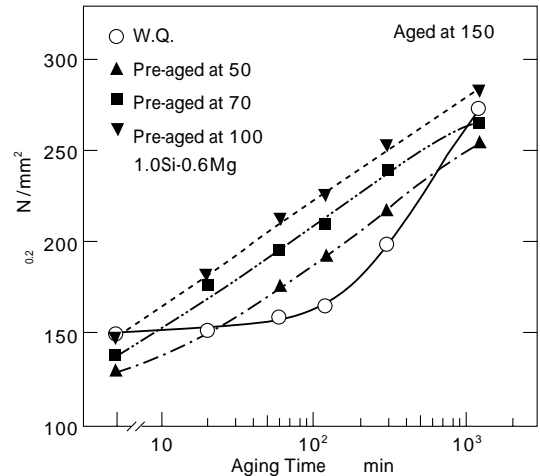
6000系合金は、室温に放置すると自然時効（室温時効）により、強度（耐力）が増加し、成形性やへム曲げ加工性が低下する。このような経時変化による性能低下を抑制するための材料開発も進められている。第2図に示すような復元処理やあるいは安定化処理⁶⁾をおこなうことが効果的であることが知られている。

2. 自動車パネル材の成形特性

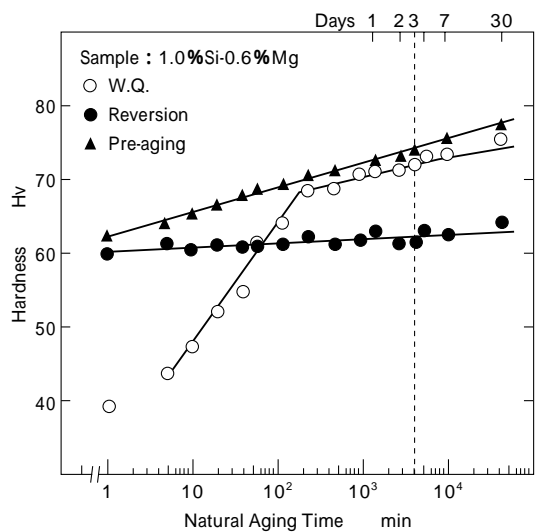
広くもちいられる軟鋼とアルミ材ではプレス挙動に大きな差異があり、注意が必要となる。以下では素材特性レベル、ラボ成形試験レベルでのアルミ材の特性を鋼板と比較し、それらをふまえアルミ成形における指針について述べる。

2.1 素材の機械的特性

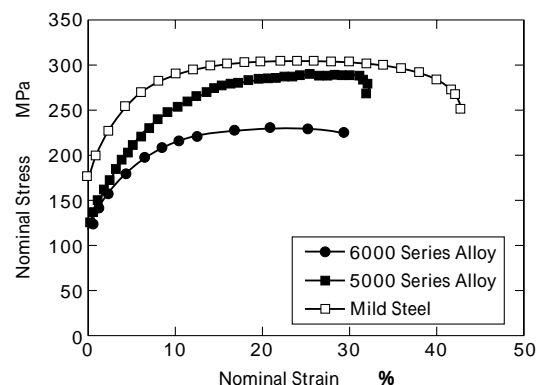
自動車用にもちいられる代表的なアルミ板材と軟鋼の



第1図 6000系合金の時効硬化特性に及ぼす予備時効処理の効果（150°C）
Fig. 1 Effect of aging curve for 6000 series alloy on pre-aging (aged at 150°C)



第2図 6000系合金の経時変化に及ぼす復元処理の影響
Fig. 2 Effect of natural aging for 6000 series alloy on reversion



第3図 アルミ板および軟鋼の応力 - 歪み関係
Fig. 3 Stress-strain relations of typical aluminum sheet alloy and mild steel sheet

機械的特性は第1表に示したとおりである。アルミ材は耐力と引張強さに関しては軟鋼と同程度の値を有しているが、伸びに関しては軟鋼より劣る。第3図には代表的なアルミ材の応力 - 歪み曲線を示す。アルミ材は最高荷重点後の伸び（局部伸び）において軟鋼より劣っており、これが成形性の違いの主原因と考えられる。r値の

影響については、アルミ材の場合変化幅が小さいこともあって成形性との相関は明確でない⁷⁾。

2.2 基礎成形特性

ラボ試験で評価した成形特性を成形因子ごとに概説する。

張出成形性

各素材のLDH₀を強度と対比して第4図に示す。LDH₀は板幅を変えて球頭張出をおこなった際の成形高さの最小値で、この際破断部近傍は平面歪み状態となる。アルミ材は軟鋼と同程度の強度を有するが、張出成形性に関しては軟鋼より劣る。このためアルミ材の成形では、鋼板の場合よりも加工歪みを低減する必要がある。

絞り成形性

アルミ材の円筒絞り試験結果を第2表に示す。鋼板と比較すると限界絞り比は小さく、成形限界高さで鋼板の7割程度となる。

しわ感受性

円錐台成形によりしわ、割れ限界を調査した結果を第5図に示す。軟鋼はアルミ材にくらべて破断限界が高く、高BHFでの成形が可能となるため、割れやしわを生じることなく深い成形品がえられる。またアルミではヤング率が鋼板より小さいため座屈しやすいこと、 r 値が低いこと引張変形によりしわが吸収されにくいことなどもあり、鋼板よりしわ対策が難しい。

曲げ加工性（ヘム加工性）

アルミ材の曲げ加工性は軟鋼より低く、条件によっては曲げ部の肌荒れや割れが生じる場合もある。一般に曲げ加工性は、素材の耐力あるいはベークハード特性と相反する性質を持っているが⁸⁾、これらのバランスを考慮した合金が開発されている。

スプリングバック特性

アルミ材のヤング率は鋼板の1/3と小さく、プレス加工後のスプリングバックが大きくなるため注意が必要である。

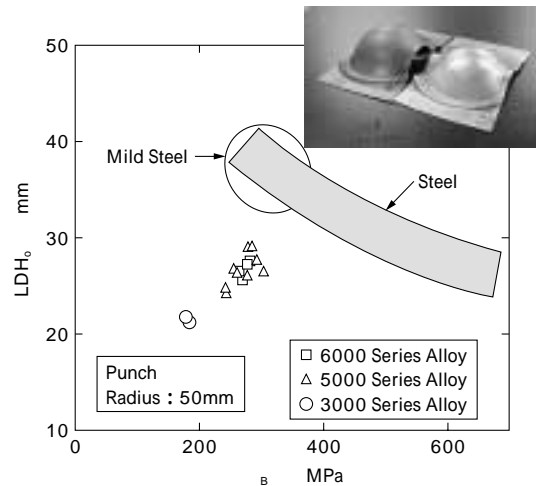
2.3 自動車パネル材の成形における金型設計の指針

アルミ部品を成形する場合の金型形状あるいは製品形状に関する指針を述べる。

アルミ材の破断歪みは軟鋼より小さいため、発生歪みが低減されるよう金型形状を選ぶ必要がある。第6図はフードインナなどの部材に配される補強リブ形状に関するAluminum Association（以下A.A.）の推奨形状⁹⁾である。鋼板との延性の違いを考慮して断面での線長変化などを制限しており、同じ考え方は他の成形部位にも適用可能である。

またアルミ材の場合、破断限界の低さを補うため材料の流れ込みを利用して成形することもなされる。A.A.ではアルミ用のドロビード形状のガイドライン⁹⁾を示しているが、適度な材料流入が確保できるとともに、ドロビード部での材料破断が防止できる丸型形状のものが推奨されている。ただし流入量の増加はしわ発生をまねくため、ダイフェースの面あたりや余肉の配置には配慮が必要である。

ヘム加工時の割れ防止に関しては、素材耐力の管理や



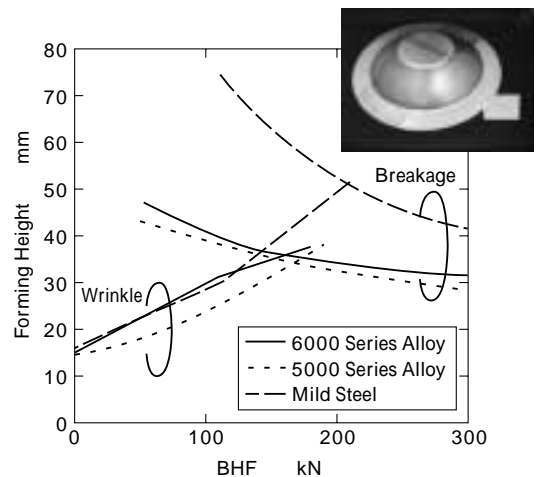
第4図 アルミ板および軟鋼のLDH₀と引張強さの関係

Fig. 4 Relationship between LDH₀ and tensile strength of typical aluminum sheet alloy and mild steel sheet

第2表 アルミ合金板と鋼板の絞り成形性比較

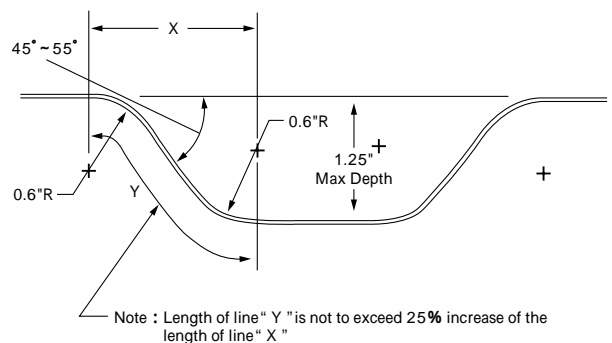
Table 2 Comparison of drawing formability of aluminum sheet and mild steel (die inner diameter : 100mm)

Alloy	Drawing Ratio	Drawing Height H/D _d
5000 - 1.0t	1.86	0.67
6000 - 1.0t	1.81	0.65
Mild Steel - 0.8t	2.15	0.97



第5図 円錐台成形試験における破断限界、しわ限界

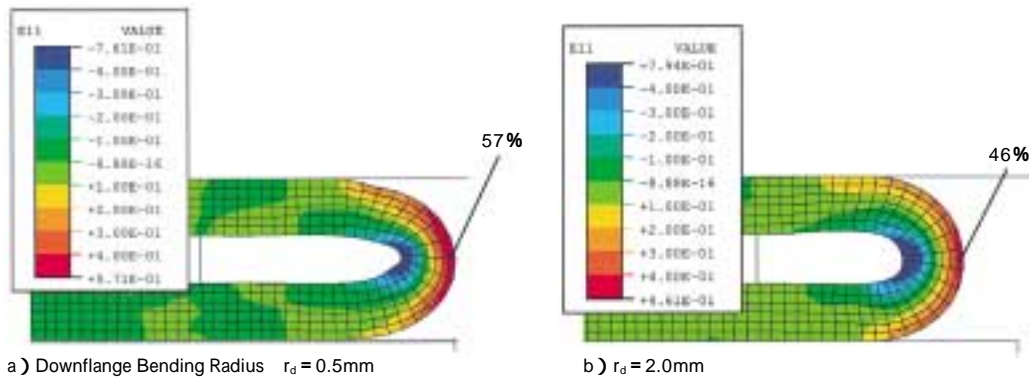
Fig. 5 Relationship between forming limit height and BHF of conical cup forming (punch diameter : 100mm, die inner diameter : 200mm)



第6図 インナパネルの補強リブ、エンボス断面の推奨形状⁹⁾

Fig. 6 Interior ribs or emboss design recommendations

プレス加工での加工硬化量低減のほか、曲げ工程の改良などがおこなわれている。第7図はヘム加工の第1工程（90度曲げ）での曲げ半径 r_d の影響を解析で検討し



第7図 フラットヘム工程のFEM解析結果¹⁰⁾、各部の歪み分布(6000系パネル材, インナ0.8t, アウタ1.0t)
 Fig. 7 Bending strain distribution during flat hemming obtained by FEM analysis (6000-alloy, inner panel thickness : 0.8mm, outer panel thickness : 1.0mm)

た結果¹⁰⁾であり, r_d を大きくすることで発生歪みが低減される。

アルミ材でのパネル成形例として, 6000系材でのフェンダ成形の例を写真2に示す。本部品は鋼板用の設計で成形深さが深く, 当初アルミで成形困難であった。ブランク形状の適正化とドロブリードの調整により材料の流れ込みを確保して割れを防止するとともに, ダイフェース調整によりしわ抑制をはかり, 鋼板並みの形状精度がえられた。

ここではアルミの成形性を事前の設計に織り込むための指針を紹介したが, 成形シミュレーションなどで事前に問題を把握し, 対策を講じることも重要と思われる。

むすび=今後の利用増加が期待される自動車パネル材について, 近年の開発動向, プレス成形挙動などについて紹介した。今後主流となると考えられる6000系合金に対しては, 世界調達の容易さ, あるいはリサイクル性などの要求が高まるものと考えられる。なお本文中で述べたように, アルミ材と鋼板では特性が大きく異なるため同じ条件でのプレス加工は困難で, その特性を考慮した成形方法をもちいることが重要である。内外の実用化例に見られるように, 適切な加工条件を選択することにより高品位のパネル部材の製作が可能である。

参 考 文 献

1) 櫻井健夫ほか: 第87回軽金属学会秋期大会講演会概要, (1994) p.185.
 2) 佐賀 誠ほか: 第87回軽金属学会秋期大会講演会概要, (1994) p.187.



写真2 アルミ板によるフェンダパネルの成形例
 Photo 2 Forming sample of aluminum fender panel

3) 斉藤 洋ほか: 第83回軽金属学会秋期大会講演会概要, (1992) p.65.
 4) 内田秀俊ほか: 軽金属, Vol.46, No.9 (1996) p.427.
 5) 櫻井健夫ほか: 第91回軽金属学会秋期大会講演会概要, (1992) p.175.
 6) 特開昭 62 - 278256.
 7) 軽金属学会: 金属成形部会報告書, No.12 (1985) p.30.
 8) 高木康夫ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.47, No.2 (1997) p.7.
 9) The Aluminum Association: Aluminum for Automotive Body Sheet Panels (1998).
 10) 野田研二ほか: 第99回軽金属学会秋期大会講演論文集, (2000) p.217.