

(技術資料)

自動車の耐衝撃吸収部材用アルミニウム合金押出材

Anti-collision Extrusion Parts Made of Aluminum Alloy for Automobiles



相浦 直(工博)
Dr. Tadashi Aiura



山下浩之
Hiroyuki Yamashita



岡 貴志
Takashi Oka



橋本成一
Narikazu Hashimoto

Recently aluminum alloy extrusion has met with high interest as an effective material for sophisticated cross section profiles having well-controlled thickness allocations. Such parts can not be made with steel. In this paper, newly developed aluminum alloy extrusion parts for anti-collision parts in automotive structures are introduced. Such parts, which include bumper beams, door beams, crash-boxes, sub frames, etc., all require highly controlled energy-absorption characteristics for collision situations.

まえばき = アルミニウム押出材は、軽量なことに加えて、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。本稿では、実用化が進みつつある自動車向けのアルミニウム押出材(バンパビーム、ドアビーム、エネルギー吸収部材、サブフレームなど)の開発の現状を紹介する。

1. バンパビーム

1.1 バンパビーム用 7000 系 (Al-Zn-Mg 系) 合金の開発
一般に、アルミニウム合金の押出性は、強度が高くなるに従って低下する。バンパ材に使用される代表的な合金の押出性と機械的性質の関係を表 1 に示す¹⁾。

7003 は 7000 系合金の中では押出性に優れる。より強度が必要な場合は 7N01 を選択するが、押出性が劣るため薄肉押出は難しい。一方 6000 系 (Al-Mg-Si 系) 合金は、強度は 7000 系合金に比べて低いものの押出性が優れる利点があり、6N01 の使用実績が多い。軽量化と生産性向上の両立を図るには、高強度で押出性に優れる合金の開発が必要である。

7000 系合金で強度向上に寄与する元素は、析出物 $MgZn_2$ を形成する Mg, Zn である。押出性低下の原因は、変形抵抗の増加である。変形抵抗は Mg 添加量の増加に伴い変形抵抗が著しく大きくなるが、Zn の添加は変形抵抗にほとんど影響しない²⁾。従って、変形抵抗を増加させずに強度を向上させるには、Mg 量を抑えて Zn 量を増やすことが有効である。

良好な押出性と高強度を達成するために Mg, Zn の添加量を検討した結果、図 1 に示すような耐力が 350MPa と高強度で変形抵抗を 7003 と同等に抑制した新合金を得た。現在、主にバンパ材への適用を進めている。

またこれまででは、バンパ材に求められる性能が軽衝突

時の車体保護(例えば米国 PART581 の 4km/h ペンデュラム打撃試験)であったため、強度を向上させることが大きな課題であった。しかしながら、米国高速安全保険協会規格(IIHS)に代表される 8km/h ボール、バリア衝突試験時の車体損傷性や、国内 JNCAP 規格に代表される 55km/h フルラップ衝突試験時の乗員保護を主目的とし

表 1 アルミニウム合金の押出性と機械的性質

Table 1 Extrusion performance and mechanical properties of aluminium alloy

Alloys	Extrudability		Mechanical properties			
	Extrusion index*	Hollow extrusion	Heat treatment	TS (MPa)	YS (MPa)	El. (%)
6063	100	Excellent	T5	185	147	12
6N01	90	Excellent	T5	270	225	12
7003	80	Excellent	T5	315	255	15
7N01	60	Excellent	T5	345	294	15
7075	10	Poor	T6	525	460	11

* Extrudability is given that of 6063 alloys as 100.

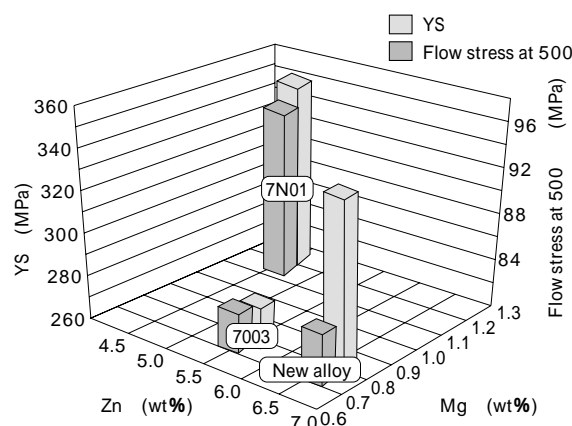


図 1 Al-Zn-Mg 系合金の Mg, Zn 添加量と耐力及び変形抵抗の関係

Fig. 1 Relation among Zn and Mg contents, yield stress, and flow stress at 500 in Al-Zn-Mg alloys

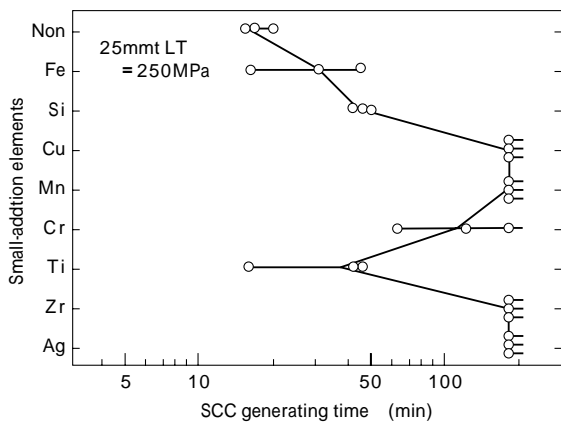


図2 7N01 板材の LT 方向の SCC に及ぼす微量添加元素の影響
Fig. 2 Effect of the small addition elements on the SCC in the LT direction of 7N01 sheets

たものに近年変化してきており、このような法規的背景から、強度だけでなく圧壊特性に優れた材料が求められている。

1.2 SCC 感受性の改善

7000 系合金は、使用条件によっては応力腐食割れ（以下 SCC と記す）の発生が懸念される。SCC は引張応力と腐食雰囲気存在下で発生する結晶粒界の脆性破壊であり、その感受性は化学成分のほか熱処理、組織などが影響する。化学成分では、強度向上に寄与する Mg, Zn いずれの添加量を増しても SCC 感受性が低下する²⁾。

SCC 感受性に及ぼす微量添加元素の影響を図 2 に示す³⁾。Cu, Mn, Zr, Ag などの添加元素が SCC 感受性を鈍くする。これらの元素のうち、工業的な面から Cu, Zr を添加することにより、開発合金では 7N01 合金よりも耐 SCC 性が向上した。

パンパ設計技術には、上述の材料に関する部分と衝突基準や取付けレイアウトから形状を最適設計する部分がある。後者に関しては、本特集号の『自動車用アルミ押出パンパ補強材の衝突強度評価』（本号 p.98）を参照いただきたい。

2. ドアビーム

2.1 ドアビームの要求性能

ドアビームは自動車の側面衝突から乗員を保護するための最も重要な安全部材の一つであり、現在ではほとんどの自動車のドアに装着されている。

ドアビームには、衝突時のエネルギーを吸収する能力とドアの大変形を防止することが要求される。最終的な側面衝突に対する性能は FMVSS（北米安全規格）などに基づく実車テストで評価されるが、ドアビーム単体は、通常両端を単純支持した梁の 3 点曲げ試験で評価されている。ドアビームは、ドア内部の狭い限られた空間に装着される部品であるため、断面形状が任意に設計できる押出材が優れている。そこで、3 点曲げ試験における最大曲げ荷重とエネルギー吸収量を要求特性として、高張力鋼板製ドアビームと同等の性能を有するアルミニウム押出製ドアビームの開発を目標とした。またパンパに比べて、ドアビームには大きな変形能が要求される。軽量化のために高強度材を用いかつ薄肉化すると、十分変形す

る前に、乗員側に位置する部位が破断することがある。従って、この変形可能な変位を 300mm 以上確保することを併せて要求特性とした。本稿では、これまで取組んできたドアビームの実用化技術に関して概要を報告する。

2.2 材料開発

曲げ荷重を確保しつつ軽量化をはかるためには、基本的に高強度合金の適用が望ましい。しかしながら、一般的に高強度合金は押出加工しにくいいため、押出材の特長の一つである断面形状の自由度が制約される。欧州では 1980 年代後半から一部カーメーカで 6000 系合金製で剛性の高い中空形状のアルミドアビームが採用されている⁴⁾が、6000 系合金は一般に耐食性、押出性には優れたものの、材料の強度は 7000 系高強度合金には劣る。従って、高強度であり、かつ中空形状が押出可能である合金が必要である。

外径 31.8mm、肉厚 2mm の 1470MPa 級の高張力鋼板パイプ製ドアビームと同等性能のアルミドアビームを開発することを目標とし、最大曲げ荷重と材料強度の関係を検討した結果、同一の曲げ荷重を確保しつつ軽量化を達成するためには、少なくとも引張強さが 400MPa 以上必要であるとの結論に達し、合金としては上述のパンパビームと同様 7000 系（Al-Zn-Mg 系）をベースに合金開発を行った。

また、曲げ特性及び耐 SCC 性を考慮し、Mn や Zr などの遷移元素を適度に添加するとともに、押出時の製造条件を検討することにより、マイクロ組織の繊維状化を図った。表 2 に、開発合金と併せて代表的なドアビーム用合金の機械的性質及び中空押出の可否を示す。

2.3 形状設計

材料強度を比較すると、高強度アルミニウム合金でも、高張力鋼に対して耐力で 1/2 以下であるため、断面形状の工夫が不可欠である。基本となる形状として中空の箱形形状を選定し、フランジ、ウェブの肉厚、ウェブの位置、コナ R の大きさを検討した⁵⁾⁶⁾。

2.4 アルミドアビームの曲げ特性

上記検討の結果、一例として設計した断面形状及び 3 点曲げ試験で得られた曲げ荷重 - 変位曲線を、高張力鋼板製ドアビームと比較して図 3 に示す。高張力鋼板とほぼ同等の最大曲げ荷重を有し、22%の軽量化を達成した。このほか、部品として実用化されたものには、約 50%の軽量化例もある。また、6000 系合金製アルミドアビームに比べても、15%以上の軽量化が可能である。

さらに、ドアビームは車種によって適用されるものが異なるが、アルミ押出材の場合断面形状の自由度が大きいため車種に応じた設計を行うことができる。図 4 はド

表 2 ドアビーム用材料の機械的性質代表値

Table 2 Typical mechanical properties and possibility of hollow extrusion

	TS (MPa)	YS (MPa)	El. (%)	Hollow extrudability
New alloy	480	420	14	Excellent
7075-T6	525	460	11	Poor
6082-T6	330	281	14	Excellent
1470MPa steel	1 529	1 068	10	-

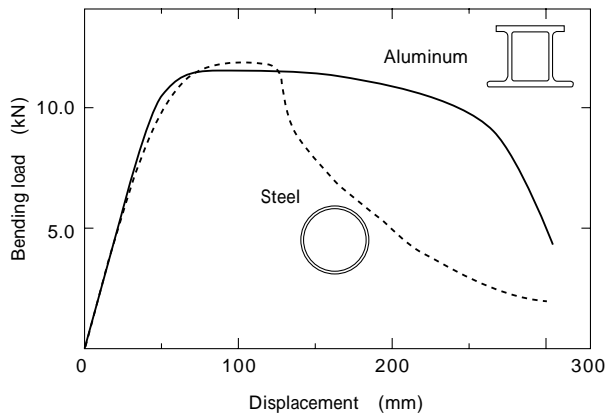


図3 高張力鋼板製ドアビームとアルミドアビームの曲げ荷重 - 変位図
Fig. 3 Bending load - displacement diagrams for steel and aluminum door beam

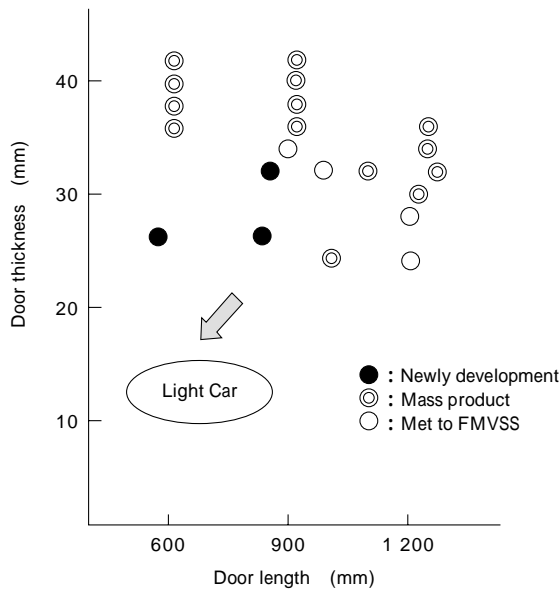


図4 アルミドアビームの開発状況
Fig. 4 Development of aluminum door beams

ア長を横軸にとり、ドア深さ（ドア内でドアビームが許容される幅）を縦軸にとり、その中でこれまで開発してきたドアビームをプロットした、いわば車種に対する適用マップである。本マップを完成させることにより、あらゆる車種のドアビームを提供できると考えている。

3. エネルギー吸収部材

3.1 エネルギー吸収部材要求性能

自動車の前面衝突は乗員に対して重大な影響を与えるため、衝撃を緩和させるエネルギー吸収部材が注目されている。前面衝突時に対しては、自動車のボディ前方を变形させ衝撃を吸収するクラッシュブル構造が採用されているが、パンパとフレーム本体をつなぐフロントサイドメンバが重要なエネルギー吸収部材の役割を果たす。

フロントサイドメンバを図5に示す⁷⁾が、衝撃吸収時は長手軸方向に蛇腹状の圧壊変形を起こす。この軸方向圧壊変形には、鋼板に比べアルミ合金押出材の方が安定して変形するとされており、軽量化効果と相まってアルミ化の要求の強い部材である。

フロントサイドメンバには、安定した変形モードで、

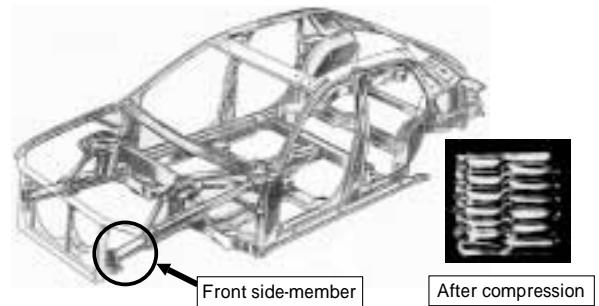


図5 フロントサイドメンバ
Fig. 5 Front side member

変形時の荷重変動が小さいことが求められており、そのためには、圧壊時に割れが発生しないアルミニウム合金が求められる。

3.2 耐圧壊割れ性と材料組織

上述したように、アルミニウム合金素材に対し最も求められる特性は耐圧壊割れ性である。我々はこれまで、耐圧壊割れ性には、結晶粒径と粒内析出物が大きく関与していることを明らかにした⁸⁾。

図6は結晶粒径の異なる6000系合金の引張破断面を比較したものである。結晶粒径の微細な合金は破断面に無数のデンプルが存在しているのに対し、結晶粒径の粗大な合金はところどころ脆性的な粒界破断が見られる。耐圧壊割れ性は結晶粒径が微細なものほど優れており、粒界破断性が耐圧壊割れ性に影響を与えていることが分かる。

また図7は、上述の微細結晶粒合金にて析出状態を変化させ、耐圧壊割れ性を比較したものである。析出物の分布が粗大なものが耐圧壊割れ性に優れており、粒内に発生する転移の伝播が圧壊割れに影響を及ぼしているものと考えられる。

3.3 速度依存性（静動比）

衝撃吸収時の変形は非常に高速であり、素材は高い歪み速度で変形していく。金属材料には一般に歪み速度依存性があり、高速変形下では通常の静的な変形時に比べ強度が著しく上昇する場合があります、この比率を静動比という。このように歪み速度により素材の特性が変化しては、安定した衝撃吸収性能は望めない。しかし我々の研究では、アルミニウム合金の歪み速度依存性は静動比で1 ~ 1.2⁹⁾と鋼板のそれに比べ非常に小さく、この点でも

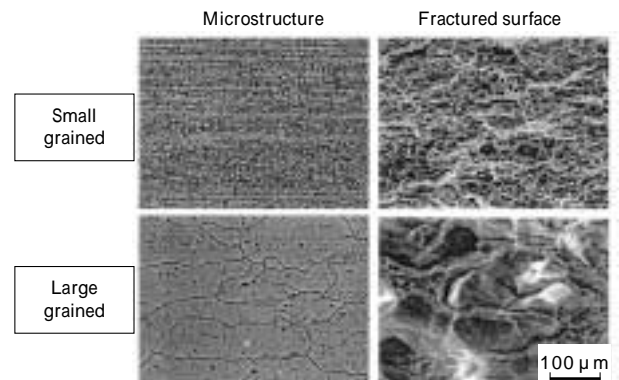


図6 破面形態に及ぼす結晶粒径の影響
Fig. 6 Effect of grain size for type of fractured surface

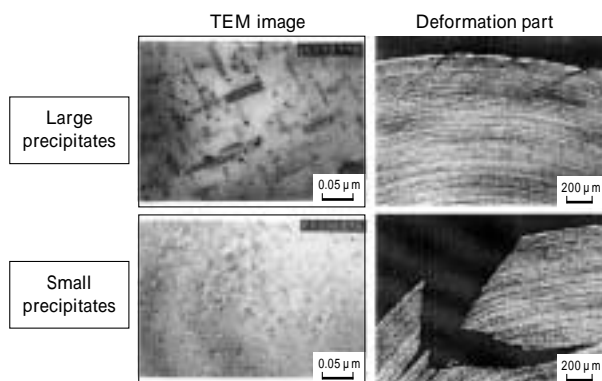


図7 耐割れ性に及ぼす析出物の影響

Fig. 7 Effect of precipitation for resistance of cracking

アルミニウム合金は衝撃吸収部材に最適な素材であると言える。

4. サブフレーム

4.1 サブフレームのアルミ化

サブフレームはサスペンションメンバとも呼ばれ、サスペンションやパワートレインを組付けてボディに取付ける、車の部分的な骨格をなす部品である。

図8にアルミ製サブフレームの一例を示す¹⁰⁾が、軽量化効果だけでなく、次に挙げるハイドロフォーム加工の導入によりアルミ化は一層加速されるものと考えられる。

4.2 ハイドロフォーム加工

ハイドロフォームと呼ばれる静水圧による加工法が、注目を浴びている。この工法の特徴は、直管のような長手方向に一樣な断面を金型と静水圧により部分的に潰す又は膨らませることにより、複雑形状を成形できることである。板をプレスし、溶接で組上げるというこれまでの工法に比べ、部品点数が少なくなるため、軽量化、コストダウン、剛性向上につながる。すでに、サブフレームの加工に採用され、多くの車種に搭載されている。

4.3 サブフレームに適した素材

前述したように、アルミ製サブフレームはハイドロフォーミングによって加工されており、取付け用のブラケットが溶接される。そのため、素材は加工性、溶接性、強度の点から Al-Mg 系(5000系)合金の採用がほとんどであり、5154, 5454, 5086 などの採用例が見られる。今後、素材の特性としては、ハイドロフォーミング時の円周方向の加工性向上が最も強く望まれている。そのた



図8 アルミ製サブフレームの例¹⁰⁾

Fig. 8 Sub-frame made of aluminum

めには、化学成分の適正化はもとより、組織コントロールが重要な要素となる。

むすび=本稿で紹介した自動車用のアルミ押出材は、軽量化の有効な手段として実用化されつつある。しかしながら、さらなる適用拡大のために最も求められている点は、コストダウンである。今後は素材だけではなく、部材の構造まで含めたコストダウンに主眼を置き開発を行っていきたい。

参考文献

- 1) KAISER ALUMINUM : Al Extrusion Process (1965) p.53.
- 2) A.F. Castle et al : Aluminum Vol.53 (1977) p.535.
- 3) 平松剛毅ほか : 軽金属, Vol.23, No.5 (1973) p.210.
- 4) Wehner et al. : Aluminum Vol.65 (1989) p.874.
- 5) H.Yamashita et al. : SAE Paper 980454 (1998).
- 6) H.Yamashita et al. : KOBELCO TECHNOLOGY REVIEW No.23 (2000) p.28.
- 7) Paefgen F-J et al. : VDI Ber (Ver Dtsch Ing) No.1099 (1993) p.359.
- 8) 川井 仁ほか : 軽金属学会第100会春期大会講演概要集, (2001) p.19.
- 9) 川井 仁ほか : 軽金属学会第97秋期大会講演概要集, (1999) p.47.
- 10) 中村篤志ほか : 日産技報, No.49 (2001) p.24.