

特集 自動車の軽量化とマルチマテリアル技術の進展

材料編

車体の軽量化を実現するアルミニウム合金の自動車部材への適用

Hirosawa Shoichi
横浜国立大学 廣澤 渉一

大学院工学研究院 教授
〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5
e-mail hirosawa@ynu.ac.jp

はじめに

自動車のアルミニウム化で思い出されるのは、やはり1990年に販売されたホンダ初代NSXであろう。国産初のスーパーカーとのふれこみの元、世界初の量産オールアルミニウムボディ・シャシー（足回り）を実現し、車体全体でスチールボディ比200kgもの軽量化を図った¹⁾。当時の一般乗用車の材料構成比率でアルミニウムは7.2%に過ぎなかったものが、NSXのアルミニウム比率は33.9%にも達し、アルミニウムによる自動車軽量

化の一つの方向性を示していた。

図1に、80年から現在に至るまでの国産自動車1台当たりのアルミニウム使用量ならびに素材種別ごとの生産量の推移を示す²⁾。1970年代に入ってシリンダブロックやホイールがアルミニウム化されるとともに、鋳物・ダイカストの生産量が急増し、2000年以降も社会的な要請でもある車体軽量化の追い風を受けて、アルミニウムの使用量は順調に増加している。直近の16年には自動車1台当たり170kg超のアルミニウムが使用されており、調査会社Ducker社の推定では、米国の

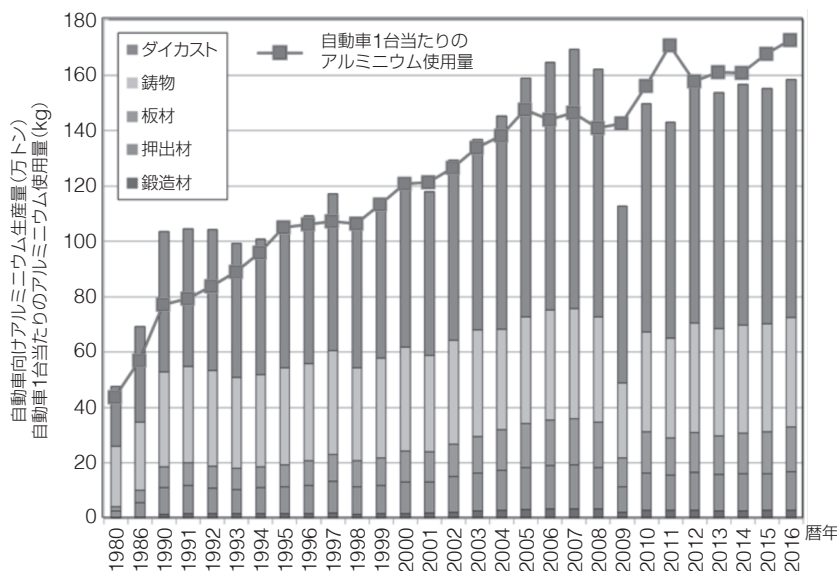


図1 国産自動車1台当たりのアルミニウム使用量と素材種別ごとの生産量²⁾

自動車1台当たりのアルミニウム使用量は、15年の179kgから25年には227kgへと増加するものと予測されている³⁾。

本稿では、自動車の軽量化において依然として第一候補素材であるアルミニウム合金の各種自動車部材への適用例ならびに今後の動向について概説し、採用車種ならびに採用部位をさらに拡大するための課題について言及する。なお、自動車のマルチマテリアル化に伴って生じる異材接合の問題に関しては、本特集企画に個別の解説記事があるので、そちらを参照されたい。

エンジンおよびシャシー部品

前述したように、自動車のアルミニウム化はシリンダブロックやホイールなどの鋳物・ダイカストが先行し、今でも多くの割合を占めている(図1)。これは、アルミニウムのもつ軽さや生産性のよさ、熱伝導性の高さなどが求められた結果であり、そのほかにもシリンダヘッドやトランスミッションケース、クラッチハウジング、インテークマニホールドなどが早くからアルミニウム化された。ダイカストに用いられるアルミニウム合金はADC12がほとんどであるが(図2)、鋳物の場合はAC2AやAC2B、AC4B、AC4D、AC4C、AC4CHなどを用途によって使い分けており、高温強度や耐摩耗

引張強さ	0.2%耐力	伸び	硬さ
310MPa	150MPa	3.5%	86HB

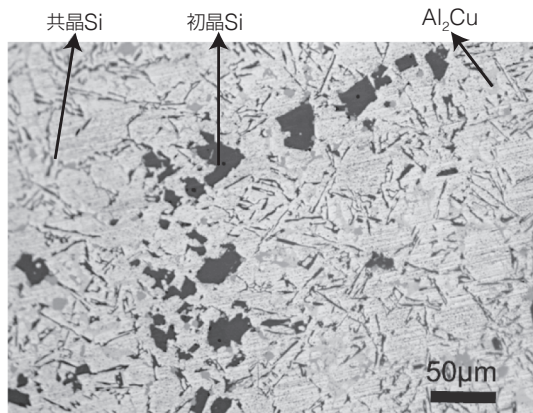


図2 ADC12ダイカスト材の機械的性質と微視的組織の例⁵⁾

性、低い熱膨張係数が要求されるピストンでは、Si量が多いAC8A、AC8Bが使用されている⁴⁾。

製造方法に関しても、鋳造欠陥がなく健全で信頼性が高く、強度や靱性、疲労特性などに優れた製品を得るために、種々の鋳造技術が開発されてきた。具体的には、スクイズキャスト(溶湯鍛造法)や高真空ダイカスト、セミソリッド(半凝固)ダイカストなどが挙げられ、ホイールやハウジング類、ナックル、ロアリンク、アクスル、サスペンションメンバー、サブフレーム、ロアアームなどの重要保安部品に適用されている^{5)~7)}。ただし、これらの中には電気自動車や燃料電池車などの次世代自動車が増えると消滅する運命にある部品も多く、今後は依然として鋳鉄が多く使われているディーゼルエンジンへの適用を進めながら、アルミニウムの「機能」を活かした新しい適用部品(例えば、リチウムイオン二次電池の電極やインバータ冷却器などの熱交換器、燃料電池車の高圧水素ガス圧力容器など)を開拓することが不可欠であろう。

ボディパネル

ボディパネルは、図3に示したエンジンフードやドア、トランクリッド、フェンダー、ルーフなどのいわゆる「蓋もの」と呼ばれ、従来の鋼板からアルミニウム板材に材料置換した場合、張り剛性が重要となるために最も軽量化ポテンシャル、すなわち適用効率が高い車体部品の1つである⁸⁾。要求特性としては、成形性や張り剛性、曲げ性、

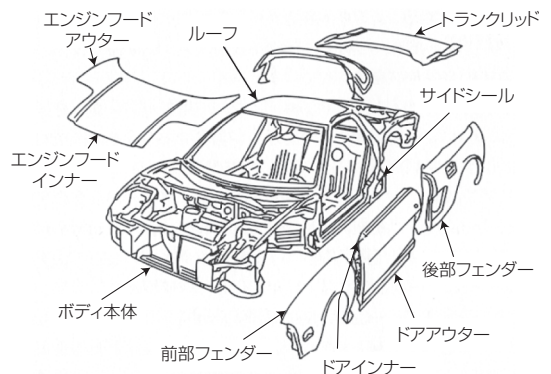
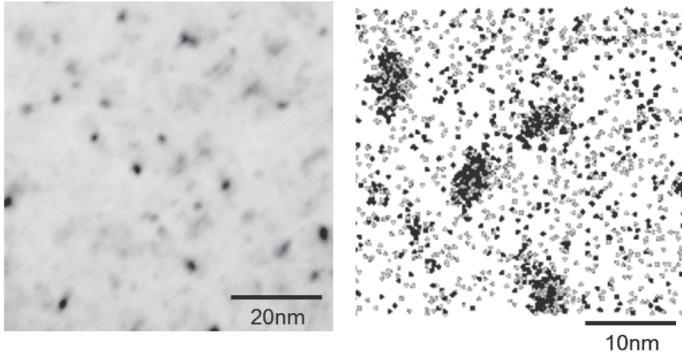


図3 自動車用ボディパネルの部位と名称¹⁾

合金	引張強さ	0.2%耐力	伸び	加工硬化係数	ランクフォード値
A6022	275MPa	155MPa	31%	0.25	0.60
A6061	235MPa	130MPa	28%	0.23	0.70
A6111	290MPa	160MPa	28%	0.26	0.60

図4 6000系Al-Mg-Si合金の機械的性質と微視的組織の例^{9), 10)}

右下図の3次元アトムプローブマップは、アルミニウム中のMg原子(黒色点)およびSi原子(灰色点)の分布を示す



耐デント性などであり、現在では主に6022や6061、6111などの6000系Al-Mg-Si合金が多く使用されている⁹⁾。これは、熱処理型合金である6000系合金が、塗装後の焼付け乾燥時(日本では170℃で20分程度が多い)に、時効析出によって耐力が増加する(ベークハード性を有する)ためであり(図4)^{9), 10)}、特に強度や耐デント性が求められるアウターパネルの素材として適したものとなっている。

表1 国内外におけるアルミニウム製ボディパネルの採用状況とモデルチェンジに伴う適用部位の変化の例(文献^{2), 10) ~12)}より作成)

Hはフード、Dはドア、Tはトランクリッド(バックドアを含む)、Fはフロントフェンダー、Rはルーフを示す

メーカー	採用車種	採用部位	モデルチェンジ年
ボルシェ	911	H → H, D, エンジンH, F	2011
アウディ	A6	H, F → H, D, T, F	2011
メルセデスベンツ	Cクラス	F → H, D, T, F, R	2014
日産	GT-R	H, D, T → H, D (Dインナーは高真空ダイカスト品, TはCFRP)	2014
トヨタ	初代ミライ	H	2014
マツダ	ロードスター	H, T → H, T, F	2015
ジャガー	XF	H, F → H, F, R	2015
BMW	7シリーズ	H, D, T, F, R → H, フロントD, T(リアDは鋼板, RはCFRP)	2015
トヨタ	プリウス	H, T → H, T (2017年発売のPHVのTはCFRP)	2015
ホンダ	2代目NSX	H, D	2016
BMW	5シリーズ	H, D, F → H, D, T, F, R	2017
メルセデスベンツ	Eクラス	H, F, T → H, F, T	2017
日産	リーフ	H, D → 採用なし(鋼板化)	2017

* なお、表2に示した車種でもアルミニウム製H, D, T, F, Rが多用されている。

一方、より複雑形状をもつインナーパネルに関しても、当初は成形性に優れる5182や5052などの5000系Al-Mg合金が使用されてきたが、現在では表面性状[ストレッチャ・ストレインマーク(SSマーク)フリー]や廃車後のリサイクル性などを勘案し、アウターパネルと同じ6000系合金に置き換わりつつある(モノグレード化・モノアロイ化)^{5), 9)}。

表1に、2011年以降に発売された国内外のアルミニウムパネル採用車種ならびにモデルチェンジに伴う適用部位の変化の例を示す^{2), 11)~13)}。高級車やSUV、スポーツカーを中心に各社からアルミニウムボディパネル車が販売されており、成形の難易度に対応してフード、トランクリッド(バックドアを含む)、ドアおよびフェンダーの順に適用が進んでいる。しかしながら、各社の戦略(車格や購買層、製造台数、コストなどに対する考え方)によって、順調にアルミニウムの採用が増えている場合もあれば(例えば、アウディの多くの車種やBMW5シリーズなど)、積極的にほかの軽量素材を採用した結果、アルミニウムが使われなくなった場合もあり(例えば、GT-RやプリウスPHVのトランクリッド、BMW7シリーズのルーフなど)、中には成形性やコストの関係で鋼板に逆戻りした例もみられる。今後さらにアルミニウムパネル採用車種、採用部位を拡大するためには、後述するコストの問題を解決しながら、アルミニウム合金の優位性、適合性をわかりやすく開示していくことが

求められる。

ボディ骨格

現在、乗用車の多くはモノコック構造を採用しており、板材を多く用いながら外板に強度や剛性をもたせることで、内部空間を広く、構造を簡素化かつ軽量化している。しかしながら、1994年にアウディ初代A8で初めて採用されたアルミニウム製スペースフレーム構造は、アルミニウム合金の利点でもある押出加工性ならびに铸造性のよさを活かして、各種押出材、ダイカスト製ジョイントならびに板材で骨格構造を形成しており、一般的なスチールモノコックボディよりも約40%もの軽量化を果たした¹⁴⁾。

表2に、国内外におけるアルミニウム製ボディ骨格の採用例を示す。高級車やSUVを中心に、ハイブリッド車や電気自動車、ピックアップトラックなどにも採用が広がっているが、近年はアルミニウム合金のみならず、高張力鋼(ハイテン)やホットプレス鋼、マグネシウム合金、炭素繊維強化樹脂(CFRP)などを併用する例が増えており(例えば、メルセデスベンツCクラスやBMW5シリーズ・7シリーズ、日産スカイラインなど)、車体のアルミニウム化の先鞭をつけたホンダNSXやアウディA8も、直近のモデルチェンジで「マルチマテリアルボディ」への変身を遂げている¹⁵⁾。自動車車体の軽量化は、次世代自動車であっても電費や航続距離を著しく改善するため、引き続き激しい素材間の競争、ならびに車種・部位に応じた適材適所の徹底がなされていくものと予想される。

ボルト

アルミニウムやマグネシウムなどの軽量部材を従来の鋼製ボルトで締め付けた場合、鉄との標準電極電位差が大きいために異種金属接触腐食を生じることが問題となっている⁴⁾。そのため、もしアルミニウム製ボルトで代替することができれば、この問題を改善しつつさらなる軽量化が可能となり、欧州ではすでに6056合金製ボルトがエンジン回りに採用されている(例えば、BMWのNG6エンジン¹⁶⁾。マグネシウム部材を締結するために400MPaの引張強さをもつボルトが15本使用され

表2 国内外におけるアルミニウム製ボディ骨格の採用状況の例(文献²⁾、¹¹⁾、¹²⁾から抜粋)

メーカー	採用車種	特徴	発売年
ホンダ	NSX	世界初の量産オールアルミニウム製モノコックボディ	1990
アウディ	A8	オールアルミニウム製スペースフレーム	1994
ホンダ	インサイト	モノコック構造とスペースフレーム構造の長所を組み合わせたアルミニウムハイブリッドボディ	1999
ロータス	エヴォーラ	オールアルミニウム製モノコックボディ	2009
メルセデスベンツ	SLS AMG	オールアルミニウム製スペースフレーム	2010
メルセデスベンツ	SLクラス	オールアルミニウム製モノコックボディ	2012
テスラ	モデルS	EV専用設計のオールアルミニウム製ボディ	2012
ランドローバー	レンジローバー	SUVとして世界初のオールアルミニウム製モノコックボディ	2013
フォード	F-150	アルミニウム製アッパーボディ(キャビン、デッキ)	2015

ている)。国内では、強度基準が厳格なために普及が遅れていたが、最近になって連続鋳造圧延法によって6056合金の鍛造加工性を改善し、引張強さ420MPa、伸び12%をもつボルト用素材を開発した例¹⁷⁾や、圧延技術の改良ならびに冷間圧接部の製品化技術の確立によってボルトの太径量産化を図った例¹⁸⁾などが報告されている。

著者らも、研究段階ではあるものの、巨大ひずみ加工法の一つであるEqual-Channel Angular Pressing(ECAP)法と予備時効熱処理を組み合わせることで、引張強さ514MPa、破断伸び16%の優れた強度-延性バランスをもつ6056合金の開発に成功しており¹⁹⁾、アルミニウム製高力ボルト素材として十分に期待できるものとなっている。今後は、衝撃強さや耐遅れ破壊特性、耐応力腐食割れ性などに加えて、使用環境として想定される百数十℃程度での強度やリラクセーション特性などを考慮しながら、最適な適用部位の選定を行うことが肝要となろう。

ワイヤハーネス

車両内の各種電装部品をつなぐワイヤハーネスは、自動車1台当たりおよそ15~20kg使われており、自動車の安全性や快適性の向上ならびに環境対応のために搭載されるシステム数の増加によっ

て、さらにその重量が増大することが懸念されている。そのため、特に全体の70%を占める電線導体を従来の銅製からアルミニウム製へと材料置換する動きが加速しており、すでに国産乗用車にも採用が始まっている。

例えば、2010年に発売されたトヨタラクティスのドアパネルには、引張強さ120MPa、導電率60% IACSをもつ細物Al-Fe-Mg合金電線を撚り合わせた世界初の低圧系アルミニウムハーネスが使用されており、銅製電線からの置き換えによっておよそ40%もの大幅な重量低減を果たした²⁰⁾。そのほかにも、マツダロードスターの減速エネルギー回生システムの太物電線に使用されるなど、さらに適用範囲を広げており²¹⁾、エンジン回りのハーネスとして使用可能な高強度・高耐熱性を有するAl-Mg-Si合金電線の開発も進んでいる²²⁾。アルミニウムにとって銅との材料置換は、部材の軽量化のみならず価格や資源供給の点でも有利であり、さらなる需要の拡大が期待されている。

おわりに

アルミニウムは、軽量化構造を実現する素材として欠くことができないものであり、市場のニーズに対しても常に高品質・高信頼性な製品として供給されてきた。ライフサイクルアセスメント(LCA)の観点からも、アルミニウムの製造時に排出されるCO₂量は、軽量化による走行時のCO₂排出削減量として相殺でき、その走行分岐点距離はリサイクル材の使用比率が上がるにつれて短くなる²⁾。今後は、上述したモノグレード化・モノアロイ化をさらに進めて同一合金化(ユニアロイ化)し、現在のカスケードリサイクルではなく、パネル材をパネル材に戻すようなクローズドループリサイクルを実現することで原料コスト面の劣勢を跳ね返すことが求められる。

最後に、本稿を執筆するに当たって資料の提供を頂いた神戸洋史氏(日産自動車)、渡邊博之氏(本田技術研究所)、櫻井健夫氏(神戸製鋼所)、塩田正彦氏(日本軽金属)、飯田康二氏(日本アルミニウム協会)に感謝の意を表します。

参考文献

- 1)小松泰典、伊東孝紳、新井彪雄、村岡康雄、阿部春樹、山下幸洋：オールアルミニウムボディ車“NSX”の開発と実用化、軽金属、41/4(1991、4)、pp.276~283。
- 2)日本アルミニウム協会：自動車の部屋ホームページ、(2017)。
- 3)Ducker worldwide ホームページ、(2017)。
- 4)日本アルミニウム協会：アルミニウムハンドブック(第7版)、(2007)。
- 5)板倉浩二：自動車の軽量化と軽金属材料の適用動向、アルミニウム、21/90(2014、5)、pp.6-11。
- 6)西直美：自動車用アルミニウム合金ダイカストの現状、まてりあ、53/12(2012、12)、pp.589~593。
- 7)神戸洋史：自動車の軽量化とアルミニウム合金鑄造部品の適用、アルミニウム、22/93(2015、5)、pp.10~16。
- 8)臼木秀樹：自動車が求める軽金属の材料特性、まてりあ、43/5(2004、5)、pp.388~391。
- 9)池田昌則、櫻井健夫：自動車のマルチマテリアル戦略～材料別戦略から異材接合、成形加工、表面処理技術まで～第1編第3章、(2017)、pp.51~59、エヌ・ティー・エス。
- 10)Y. Koshino, M. Kozuka, S. Hirosawa, Y. Aruga: Comparative and complementary characterization of precipitate microstructures in Al-Mg-Si-(Li) alloys by transmission microscopy, energy dispersive X-ray spectroscopy and atom probe tomography, J. Alloys and Compounds, 622(2015), pp.765~770。
- 11)新倉昭男：最近の自動車の軽量化動向、UACJ Technical Reports, 2(2015)、pp.96~106。
- 12)日本アルミニウム協会自動車アルミ化委員会：アルミニウム、15/71(2008、1)、pp.22~34。
- 13)日本アルミニウム協会自動車アルミ化委員会：アルミニウム、23/96(2016、5)、pp.31~41。
- 14)Motor Fan illustrated, 53(2011)、pp.66~67、三栄書房。
- 15)軽量材料活用術：日経ものづくり、(2017、2)、pp.59~66。
- 16)K. Westphal, T. Mulherkar, W. Scheiding: Joining of magnesium components using Al fasteners, Light Metal Age, (2005、4)、pp.2~3。
- 17)岩山功、桑原鉄也、中井由弘、高木義幸、北村真一、斉藤英敏：自動車用ボルト向け6056アルミニウム合金線、SEIテクニカルレビュー、183(2013、7)、pp.78~82。
- 18)日刊工業新聞ホームページ、2017年3月30日付。
- 19)小畑智靖、唐永鵬、岩岡秀明、廣澤渉一、毛利啓己、下田政彦：ECAP加工と各種時効処理によるAl-Mg-Si系合金製高力ボルト素材の開発、軽金属、68(2018)、印刷中。
- 20)山野能章、細川武広、平井宏樹、小野純一、大塚拓次、田端正明、大塚保之、西川太郎、北村真一、吉本潤：アルミハーネスの開発、SEIテクニカルレビュー、179(2011、7)、pp.81~88。
- 21)三好俊充、下河内次生：新型ロードスターの軽量ワイヤハーネス開発～電線導体のアルミ化～、マツダ技法、32(2015)、pp.167~172。
- 22)山口欣司、嶋田高信、吉本潤、桑原鉄也、赤祖父保広：エンジンの振動屈曲に耐える高強度アルミワイヤーハーネス、SEIテクニカルレビュー、190(2017、1)、pp.117~122。