

最近の自動車の軽量化動向

新倉 昭男*

Recent Trend of Automotive Lightweighting

Akio Niikura*

Keywords: aluminum, automobile, fuel consumption regulation, light-weighting, multi-material

1. はじめに

1880年代にガソリンを燃料としたエンジンを搭載した自動車が生誕して約130年がたち、1908年に初の量産自動車である「T型フォード」が発売されてから100年余が経過した。当時は、電気自動車、ハイブリット車などもあったが、長い歴史の中でガソリンエンジンが主流となり、自動車は大きく発展してきた¹⁾。現在の先進国では、自動車普及はほぼ完了したと考えられるが、人々の生活に密接関わる自動車の潜在的な改良ニーズは依然として強く、自動車産業は新たなイノベーションを生み出し続けている。近年では、資源価格の上昇や地球環境問題の対応が必要であり、「燃費」が自動車のイノベーションにおける重要なキーワードになっている²⁾。燃費改善のために、ハイブリッドや燃料電池などパワートレインの技術開発が進められているが、車両重量の軽量化も有効な手段の一つであり、100 kg 軽量化により1 km/Lの燃費向上の効果があるといわれている³⁾。一方、衝突安全基準の強化や搭載電子機器の増加などにより車両重量は年々増加する傾向にあり、車両の軽量化は自動車メーカーの重要なテーマである。自動車の軽量化において最も有効な手法は、アルミニウム、マグネシウム、ハイテン、CFRPなどの軽量化素材を用いることであり、年々軽量化素材の使用比率が増大している。アルミニウムは比重が鉄の約1/3 (2.7) で、実用構造用金属としてはMgに次いで小さく、軽量化に非常に有効な材料である。北米で発売された2015年モデルのFord F-150では、オールアルミニウム製のボディが採用され、アルミニウムボディの本格的な普及に向けた第一歩となった。Ford

F-150は、年間80万台程度を販売する全米トップセールのモデルであり、金属産業に与える影響も大きい²⁾。これまでエンジンなどにアルミニウム鋳物が使用されていたが、フードなどのパネル類、バンパービームなどのアルミニウム押出材、サスペンションなどのアルミニウム鍛造材に加え、構造部材においてもアルミニウム展伸材の適用が進展している^{4)~7)}。

本稿では、自動車の生産動向、軽量化へ駆動力となっている法的規制の概略について触れ、その後それぞれの軽量化素材の開発動向、軽量化素材使用に関する周辺技術動向について解説する。なお、アルミニウム材料の詳細な開発動向、周辺技術動向に関しては、本自動車特集号に個別の解説記事があるので、それを参照されたい。

2. 自動車生産

2.1 世界の自動車生産

乗用車と商用車をあわせた世界の生産台数は、Fig.1に示すように1970年代から1995年頃までは、約3千万台から約5千万台であったが、1995年頃より大きく増加傾向となり、2013年には約8,800万台に達した⁸⁾。2009年以降、世界最大の市場がアメリカから中国へと代わり、中国、インド、ASEANなどの新興国の市場が急速に拡大したためである。長い間、自動車需要の中心を担ってきた北米、西欧、日本などの先進国市場では、既に自動車が広く普及しているため、自動車の保有率は大きく変わらず、自動車販売は買い替え需要が中心である。一方で、新興国市場では自動車の保有率が低く、自動車販売は新規需要が中心となる。自動

* (株)UACJ 技術開発研究所 第六研究部
No. 6 Research Department, Research & Development Division, UACJ Corporation

車生産の伸張により、エネルギー消費の増加や、大気汚染、交通渋滞などの自動車保有台数増加による弊害が顕在化している。各国政府は、燃費規制、排ガス規制、安全規制などの規制強化を行い、このような弊害に対応している^{9),10)}。

2.2 日本の自動車生産

Fig.2に日本国内の自動車生産台数と自動車向けアルミニウムの生産量の推移を示す¹¹⁾。日本の自動車の国内生産数は1990年ごろから漸減傾向にあるが、自動車に用いられるアルミニウム材の需要は順調に伸びてき

ている。自動車用アルミニウム部品の採用は、80年代後半から急速に進み、バブル経済崩壊後にその伸びは鈍化したかのように見えるが、2000年以降アルミニウムの需要量は急速に伸びている。自動車向けアルミニウム生産量を自動車生産台数で除した値を、1台あたりのアルミニウム使用量としてFig.2中に示した。1台あたりのアルミニウム使用量は年々確実に増加しており、今後も自動車向けアルミニウム製品の需要は高まっていくと予想されている。

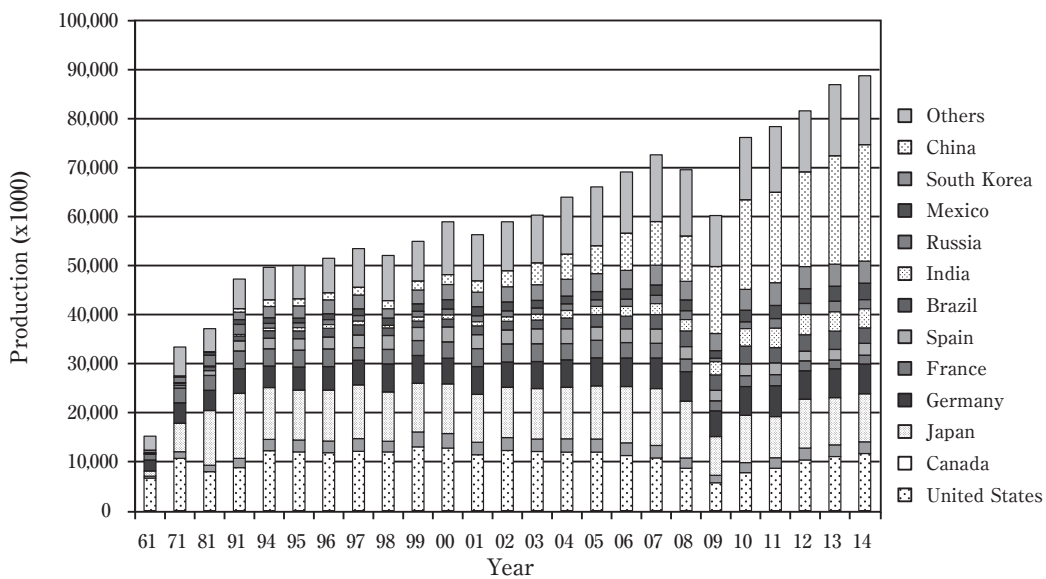


Fig. 1 World production of motor vehicles (passenger cars and commercial vehicles)⁸⁾.

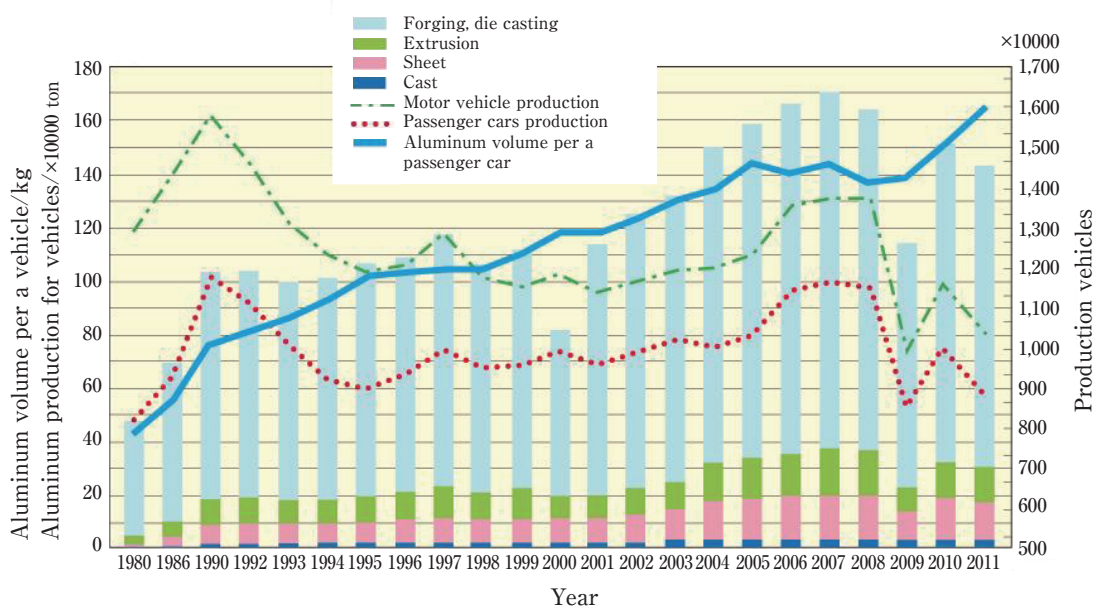


Fig. 2 Japanese production of passenger cars and aluminum production for vehicles¹¹⁾.

3. 自動車の規制

3.1 自動車の燃費規制

日欧米の各地域における燃費基準を、Fig.3に示す¹¹⁾。自動車の燃費規制は、1970年代のオイルショック期に端を発している。日米では、原油を中心とするエネルギー消費削減を目的として燃費規制が行われてきた。米国では1975年にエネルギー政策・保存法 (Energy Policy and Conservation Act) で乗用車と小型トラックは、企業別の平均燃費の改善目標「CAFE規制」が設定された。CAFE (Corporate Average Fuel Economy) 規制は、自動車メーカー別の平均値に規制をかける方式である。米国のCAFE方式では、2007年から車両を投影面積 (footprint: 左右両輪間の距離と前後軸の距離の積) で区分することが導入されている。重量を軽くすれば、車体が大きくても基準燃費が高くて済むため、大型車志向の米国自動車需要を反映した制度である。2025年までに平均燃費が23.2 km/L (乗用車および小型トラック) となる目標を設定している¹²⁾。一方、欧州においては、燃費規制ではなくCO₂排出規制を敷いている。自動車のCO₂排出量は燃費に反比例するため、2つの規制は同じ効果を持つ。EUとACEA (欧州自動車工業会) の間で、乗用車に対し2015年の130 g/km (17.8 km/L) と2020年の95 g/km (24.4 km/L) で2つのCAFE方式による規制を導入し、2015年時点で、世界で最も厳しい規制となっている。日本では改正省エネ法で、その時の最高の性能を持つ車両をベ

ンチマークとする燃費目標が設定され、2015年度16.8 km/L、2020年度20.3 km/Lである。2020年度基準においては、欧米同様のCAFE方式が採用された¹²⁾。中国では、中国で販売される乗用自動車の平均重量は年々増加しているが、重量の大きい車両にはより厳しい体系になっている。自動車の燃費規制の導入および強化で、CAFE方式によって車両群全体に規制の網をかけるようになり、自動車メーカーは電気自動車や燃料電池車などを開発するだけでなく、台数で大部分を占める内燃機関車での燃費底上げが求められている。

3.2 自動車の安全規制

国土交通省と自動車事故対策機構では、1995年度より「自動車アセスメント」を実施している¹³⁾。乗員保護性能評価として、フルラップ前面衝突試験、オフセット前面衝突試験および側面衝突試験の三つの衝突試験の実施があり、感電保護性能試験、後面衝突頸部保護性能試験などもある。また、歩行者保護性能試験として、頭部保護性能試験、脚部保護性能試験およびブレーキ性能試験などがある。これらは、年々試験項目が増えており、歩行者脚部保護性能試験および衝突後の感電保護性能評価は2011年度から採用され、2014年度からは予防安全性能評価も開始されている。衝突安全基準の厳しい北米では、米道路安全保険協会 (Insurance Institute for Highway Safety, IIHS) が、2012年からFig.4に示すような『スモールオーバーラップ』衝突の試験を始めた¹⁴⁾。ベンツCクラス、アウディ

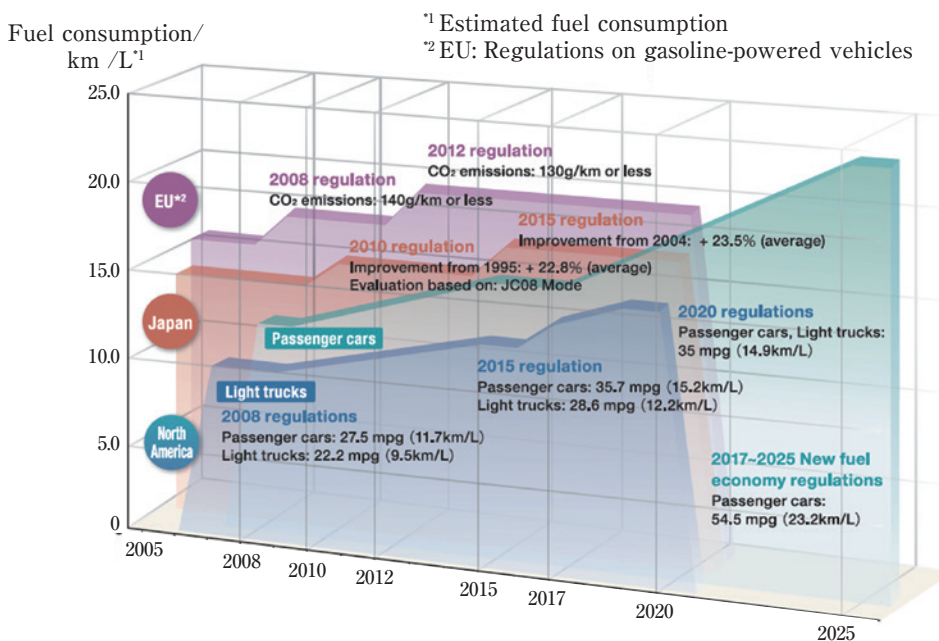


Fig. 3 Fuel consumption regulation of Japan, USA and Europe¹¹⁾.

A4などが低評価になるなど、衝突安全性はほぼ横並びだと思われていたものに差が出ている¹⁵⁾。このような衝突安全基準の強化に伴い、これらの試験に対する高い評価を得るためには、車両重量がさらに重くなる。これらの基準に対応した安全性の高い車両を設計し、かつ、車両重量を増加させないために、さらなる自動車の軽量化が求められている。

3.3 自動制御運転と安全規制

現在、2020年までの自動運転の実用化を目指して日本、米国および欧州において技術開発が進められている¹⁶⁾。自動運転には、緊急時にドライバーの運転を支援する技術と、完全な無人運転をする技術がある。前者は、安全上の問題も少ないのでより高度化しており、後者は、大きく進歩しているが事故時の責任問題などの法整備も課題である。将来、自動運転機能をもつ自動車が市場の多くを占めた場合、多くの自動車が衝突を回避できるようになる可能性がある。仮に自動車の安全基準が変更されるようになれば、自動車の安全設計も変更となるが、まだ将来のことである。安全確保のために追加された部品を減らし、車体の軽量化の可能性を秘めているため、動向には注目が必要である。

3.4 自動車の規制とパワートレインの動向

世界の自動車生産は2025年には1億台に到達する生産になるとみられているが⁸⁾、世界が環境配慮型シナリオを選択し、エンジン車の乗り入れ制限などの環境負荷低減策が強く推進されると、自動車の電動化が急速に進む可能性がある¹⁷⁾。エンジンと電気モーターを組み合わせたハイブリッド(HV)車は、多くのメーカーがその重要性を認識し、将来のプラグイン化によって燃費の大幅な向上を図ることができるという拡張性が魅力である。ハイブリッド車に充電機能を搭載したプラグイン・ハイブリッド(PHV)車は、電池価格の低下などが進めば、燃費の向上には有力な選択肢である。二次電池を搭載し、電気モーターのみを動力とする電気自動(EV)車は、現時点では電池の性能が足りず普

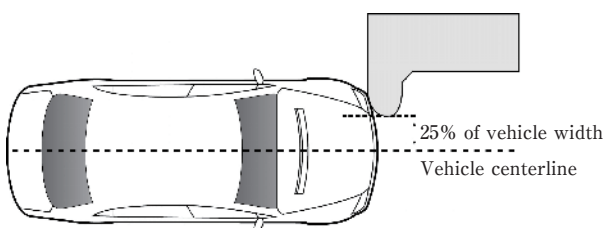


Fig. 4 Vehicle overlap with Flat 150 small overlap barrier (small overlap barrier crash test)¹⁴⁾.

及の妨げとなっている。燃料電池を搭載する電気自動車である燃料電池(FCV)車は価格の引き下げと水素インフラの普及が需要拡大の鍵である。エンジンの小排気量化と同時に、走行性能の低下を過給機で補うダウンサイジング車は、ハイブリッド車と比べると改善幅が少ないが、ディーゼル車などの内燃機関車の中では大部分を占めていく可能性がある。需要拡大の可能性として、2030年には、HV車：1,490万台程度、PHV車：740万台程度、FCV車：990万台程度、ダウンサイジング車：250万台程度の需要が予想されている¹⁸⁾。

4. 各種素材の技術動向

Fig.5に車両重量と燃費の関係を示す¹⁵⁾。車両重量を軽減させると、燃費は向上することがわかる。特にハイブリッド車(HV)は、軽量化による燃費向上効果が大きい。自動車の軽量化には軽量材料への置換が効果的であり、ボディおよび部品の鉄鋼からアルミニウムへの転換、さらに樹脂やCFRP(炭素繊維強化プラスチック)など軽量化素材への置換が検討されている。自動車用材料は、鉄鋼主体から、アルミニウム、マグネシウムや複合材などの軽量化素材の比率を増加させて多様化(マルチマテリアル化)に向かうと考えられる¹⁶⁾。国際自動車工業連合会(OICA: Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles)は欧州車を例に取り、Fig.6に示すように、マルチマテリアル化を予測している²⁰⁾。現状では鉄鋼が圧倒的に多いが、アルミニウムがその比率を増大させつつ、マグネシウムとCFRPが実用化を目指して開発中、という段階である。今後、各材料において高性能化やコスト低減などの開発が進められるとともに、これら材料の組み合わせによる最適化が図られることになる。まず、これらの材料ごとの個別の技術動向を示す。

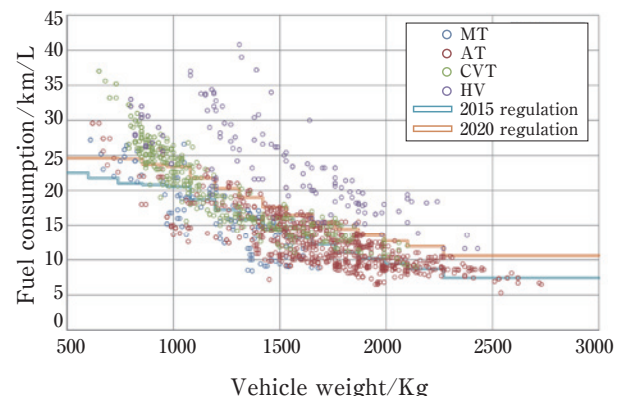


Fig. 5 Weight of passenger cars and fuel consumption¹⁹⁾.

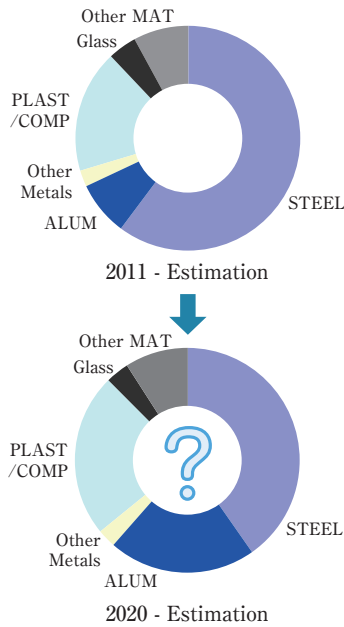


Fig. 6 Average European material weight distribution ²⁰⁾.

4.1 アルミニウム合金

Table 1にアルミニウムと他の素材と特性の比較を示す。アルミニウムは、比重2.7と鉄の7.8より軽く、表面にできる酸化被膜のため耐食性に優れ、熱伝導率が高く、铸造性がよいなどの特性がある。鉄鋼と比較すると、伸びや形状凍結性が悪く、成形性が劣っている面もある。しかし、アルミニウムは、他の軽量化材料と比較では、強度と延性のバランスに優れ、塑性加工用の材料として適している。たとえば、自動車の外板に使われるパネル類では、張り剛性が重要となる。この張り剛性は、ヤング率Eと板厚tの3乗をかけた Et^3 に比例する。したがって、引張強度によらない値であるので、鉄鋼を高強度化しても張り剛性は変化しないため、アルミニウム化による軽量化効果が大きい。これに対して、構造部材においては、部材剛性が重要となる。部材剛性は、 Et に比例するので、比重の小さいアルミニウムを使用しても、張り剛性と比較して軽量化効果は少なくなる。しかし、アルミニウムは押出や鍛造によって製造できるため、断面の形状を

様々に設定できる。リップをつけるなど断面形状を工夫することによって、部材剛性を向上できるメリットがある。耐久性は引張強度に比例するので、航空機に使われている7000系高強度合金などの高強度化の開発も進んでいる。多くの板厚決定要因において、アルミニウムは軟鋼と比較して、1/2～1/3の軽量化が可能と考えられている。

Fig.7にアルミニウム合金の自動車ボディの適用例を示す²¹⁾。アルミニウム板材の特性向上や成形加工方法の進歩により、フード(ボンネット)、トランクリッド、ドアなどのボディパネル類のほとんどにアルミニウム板材が適用されている。Fig.8にドライブトレイン・パワートレインの1例を示す²¹⁾。全体として铸造材が多く、エンジンブロック、サスペンションアーム、サブフレームなどにアルミニウムが使用されている。

自動車へのアルミニウム合金の適用は、エンジン部品、ホイールなどのコストパフォーマンスの大きい鋳物やダイキャスト品から始まった。板材としては、アルミニウムの持つ軽量性、熱伝導性、耐食性などの優れた諸特性により熱交換器(カーエアコン、ラジエーターなど)用途への歴史が長い。軽量化ニーズの高まりと共に、運動性能が向上するサスペンションアームなどの足回り部品に鍛造品が使われ、重心から遠いバンパーレインフォースに押出材が使われた。フード、トランクリッドなどでは板材がスポーツ車および高級車で採用されている。衝突エネルギー吸収性の必要なドアインパクトビームなどには、任意の断面形状を取れる利点のある押出材が多用されている。さらに、軽量化が主な利点のサブフレームやサイドドアのアルミニウム化が行われている。これらアルミニウム部品は、現有設備が活用できる後付け部品であり、鉄鋼用に構築された自動車生産ラインを大幅に変更せずに適用できるメリットがある。車体構造部材をアルミニウム化する場合、生産ラインを変更する設備投資が必要である点が課題である。近年では、構造部材へのアルミニウム板材適用の検討も活発化しており、さらなる用途拡大が期待される。

Table 1 Properties of aluminum alloy and other materials.

Materials		Tensile strength MPa	Yield strength MPa	Elongation %	Young's modulus (E) kN/mm ²	Specific gravity	Specific strength (T.S./p) × 10 ⁶ mm	Specific rigidity (E/p) × 10 ⁶ mm
Aluminum	5182-O	270	130	26	71	2.7	10.0	2600
Magnesium	MDC1A	234	159	3	44	1.7	13.3	2500
Resin	SMC	70	-	1.5	11	1.8	3.9	610
Steel	SPCC	310	180	42	210	7.8	4.2	2700

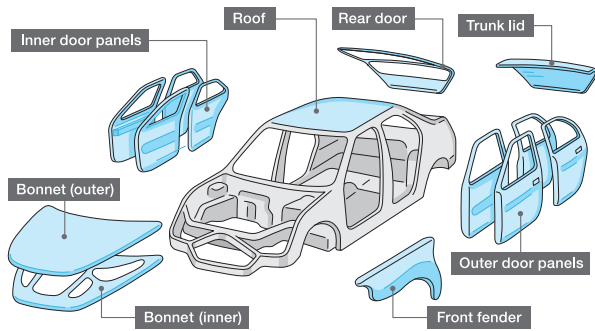


Fig. 7 Examples of aluminum upper body ²¹⁾.



Fig. 8 Examples of aluminum drivetrain and powertrain ²¹⁾.

4.2 鉄鋼

強度、耐食性、成形性、表面処理性など様々な要素が求められる自動車材では、主として鉄鋼が用いられてきた。2000年頃には8割といわれた比率は現在7割程度と推測され、今後も比率低下の傾向と考えられる¹⁷⁾。炭素などの元素を0.0001%単位で添加し、組織の制御などを行って高強度化したハイテンによって薄肉化および軽量化が進み、日本では車に使用される鉄鋼中のハイテン比率は2015年で6割近くまで高まっている²²⁾。欧米がホットスタンプを採用する一方、日本は、鉄鋼メーカーが成分制御と安定した生産を行える技術力により冷間プレスのハイテンを供給し、自動車メーカーもそれに対応する設備投資を行ってきたため、ホットスタンプを採用する方向になかった。ホットスタンプは、ハイテン材の課題である形状凍結性の低下を改善し、アルミニウムめっきによるスケール(酸化皮膜)発生の抑制、加熱炉と冷却方法の工夫などでコスト高も改善されてきて、日本でも採用が始まっている。ホットスタンプの課題は、材料面では、耐水素脆化特性や疲労特性の低下、製造面の課題としては、量ともに十分なホットスタンプ部品を供給できるサプライヤーが日本にないことなどがある。鉄鋼は自動車の主要材料であるが、徐々にその比率を下げている。

4.3 マグネシウム

マグネシウムは比重1.8と実用金属中最も軽く、比強度、比剛性および熱伝導率が高い、振動や衝撃を吸収しやすい、電磁波遮蔽能が高いなどの特徴を有している。実用に際しては、アルミニウムと亜鉛を基本添加元素とし、強度や耐熱性などの特性を高めた合金が用いられている。2005年時点での車1台当たりの使用量は、欧州で6 kg、日本では2 kgと、ごくわずかにとどまっている¹⁷⁾。燃えやすい、耐食性が低い、加工性がアルミニウムよりも劣る、高価であるなどが普及の進まなかった理由である。価格低減も達成すべき課題の一つであり、板材でまずは1 kg当たり2,000円以下、さらには1,000円以下が目標価格となるもようである¹⁷⁾。最近では、マグネシウムの鋳物が、Mercedes-AMG GTのフロントモジュールおよびJaguar XFのフロントモジュールに使用されている²³⁾。開発のハードルは多くまた高いが、マグネシウムの軽さは魅力の一つである。

4.4 CFRP

CFRP (carbon fiber reinforced plastics) は炭素繊維と樹脂を複合した炭素繊維強化プラスチックであり、鉄鋼と比較して比重が1/4、強度が10倍と優れた材料である¹⁷⁾。CFRPは、自動車よりも航空機や圧力タンクなどでの採用が多く、樹脂には熱硬化性樹脂を使用しオートクレープ工法で成形されている。オートクレープという加压可能な窯を利用し、炭素繊維と樹脂を予め馴染ませてある部材(プリプレグなど)をオートクレープで加熱し硬化し成型する工法である。熱硬化性樹脂によるオートクレープ工法は、コストが高く硬化時間が長いため、大量生産を必要とする自動車には適していない。自動車では、成形時間の短い熱可塑性樹脂を使用して短時間で成形を適用することで、成形コストを下げる開発が進んでいる。CFRPは自動車軽量化に大きく貢献する材料であることから、自動車ボディへの適用において大きなメリットがあり、今後数量が増加していくと考えられるが、コストが課題のため、自動車材料として一定比率を占めるまでにはまだ時間がかかると思われる。最近では、BMW 7シリーズにCFRPが採用されている²³⁾。CFRPをピラーなどのフレーム構造に多用して軽量化したことが特徴である。外板はアルミニウム、骨格は基本的にスチールで、補強材としてCFRPをパッチワーク的に使用して、前モデル比で130 kgの軽量化を実現した。CFRPは、これまでi3のように外板やキャビンフレームに使われたケースはあるが、BMWでは補強材としてCFRPを使い、

剛性確保と軽量化を両立させた。

4.5 接合技術

これまで述べてきたように、自動車材は鉄鋼主体から、アルミニウムをメインとして、マグネシウム、複合材などの軽量化素材の比率を増加させたマルチマテリアル化が検討されている。各材料において高性能化などの開発が進んでいるが、これら材料の組み合わせによる最適化および異種材料を接合する技術が重要な課題となっている。アルミニウムは熱、電気伝導度および線膨張率が高く、溶接はやや難しい面がある。また、同じ素材で特性の異なるものを複層化することや、異種材料を複合化やサンドイッチ化することによりおのおのの長所を兼ね備えさせることも検討されている。アルミニウム合金の接合においては、高速回転の摩擦熱で塑性流動を起こして接合する摩擦攪拌接合(FSW: friction stir welding)などの固相接合やFDS*¹⁾(flow drill screw)に代表される機械的接合などが使われ始めている。また、レーザー溶接、アーク溶接とレーザーを複合したハイブリッドレーザーなどさまざまな接合方法も開発されている。米国Fordが、アルミニウムボディとした、ピックアップトラックの代表的車種であるF-150では、従来7,000あったスポット溶接が4,000のリベット接合になった²³⁾。アルミニウムと鉄鋼、アルミニウムと樹脂の異材接合技術も多種多様である。詳細は、本誌の自動車用アルミニウム合金の接合技術を参照されたい。

5. 自動車におけるアルミニウムの現状と予想

アルミニウムボディの採用は、量産ベースでは1994年のAudi A8がエポックメイキングとなった。2015年モデルのFord F-150にアルミニウムボディが採用され、アルミニウムボディの本格的な普及に向けた第一歩となったと考えられる。ピックアップトラックの代表的車種であるF-150は、アルミニウムボディなどの採用によって320 kgの軽量化を図った^{17), 23)}。塗装・乾燥工程においては、従来のスチールボディ+アルミニウムフードが、新型ではアルミニウムに一本化されるため簡潔化された。Ford F-150は、年間80万台程度を販売する全米トップセールスモデルのため、材料供給面でも課題が出ている。

Table 2は、日本の自動車ボディへのアルミニウム

* 1) EJOT社の商標

化適用事例を示す¹¹⁾。日本の自動車メーカーはいずれも、ボディの一部にアルミニウムを使用している車種をもち、そのほとんどはフードである。国内でのアルミニウムパネルは、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。本田技研工業(株)は1990年、世界で初めてオールアルミニウムボディ車NSXを発表した。その後、トヨタ自動車(株)のレクサスやプリウス、日産自動車(株)のフーガやリーフ、富士重工業(株)のレガシーなど量産車へのアルミニウム採用も本格化している。適用部位もフード以外に、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。最近では、マツダ(株)の新型ロードスターで、フェンダーにアルミニウムを採用している。

Table 3は、欧州の自動車ボディパネルへのアルミニウム化適用事例を示す¹¹⁾。欧州は、フード以外の部位へ適用拡大しており、オールアルミニウム車も実用化されるなど自動車のアルミニウム化が最も進んでいる。AudiはR8などでスペースフレームを使ったオールアルミニウム車を、Jaguarはモノコック構造のオールアルミニウム車を採用している。欧州車では2割以上がアルミニウムのフードとなっている¹⁷⁾。**Fig.9**に2012年の欧州車の自動車メーカーごとのアルミニウムの平均使用量を示す²⁵⁾。JaguarやPorscheなど高級車にアルミニウムの使用量が多い。また、140 kgのアルミニウムを使う車の部品ごとの内訳を**Fig.10**に示す²⁵⁾。今後、ボディへのアルミニウム適用が増えて、その比率が増加すると考えられる。

Table 4は、米国の自動車ボディパネルへのアルミ

Table 2 Examples of aluminum closure panels in Japan¹¹⁾.

Models	Application parts	Models	Application parts
TOYOTA		NISSAN	
PRIUS	Hood, Back door	FUGA	Hood, Door
SAI	Hood	CIMA	Hood, Door
86	Hood	SKYLINE	Hood
LEXUS LS	Hood	SKYLINE Coupe	Hood
LEXUS GS	Hood	GT-R	Hood, Door, Trunk-lid
LEXUS IS	Hood	Fairlady Z	Hood, Door, Back door
LEXUS HS	Hood	LEAF	Hood, Door
LEXUS CT	Hood, Back door	MITSUBISHI	
LEXUS NX	Hood	LANCHER Evo.	Hood, Fender, Roof
SUBARU		AUTORUNDER	Roof
BRZ	Hood	HONDA	
FORESTA	Hood	LEGEND	Hood, Trunk-lid
LEVORG	Hood	ACCORD (HEV-PHV)	Hood
MAZDA			
ROADSTER	Hood, Trunk-lid, Fender		

ニウム化適用事例を示す¹¹⁾。北米は、日本と同様にフード、バックドアなどのアルミニウム化が主であった。Ford F-150のアルミニウムボディ車が発表され、今後は、フード以外の部位へ適用拡大していくものと考えられる。

ボディパネルはアウトパネル（外板）とインナパネル（内板）に大別される。アウトパネル用には、耐デント性確保のための高耐力、デザイン自由度向上のためのプレス成形性、ヘミング加工のための曲げ加工性、良好な表面品質、耐糸錆性などが求められる。インナパ

ネル用には、複雑形状を成形するための高いプレス成形性と良好な接合性が求められる²⁴⁾。アルミニウム合金は添加元素によって分類されるが、ボディパネル用としては、主に5000系（Al-Mg系）合金と6000系（Al-Mg-Si系）合金が使用されている。

構造部材へのアルミニウム材料の適用は、複雑な断面形状を容易に製造できる押出材に限定されてきた。しかし、板材のプレス成形に比べてコストが高くなる場合があることから、板材の検討が進められている。構造部材に求められる主な特性は、高強度、プレス成

Table 3 Examples of aluminum closure panels in Europe¹¹⁾.

Models	Application parts	Models	Application parts
Audi		Renault	
R8	All aluminum (Space frame)	Clio (Lutecia)	Hood
A8	All aluminum (Space frame)	Peugeot	
A5	Fender	3008	Hood, Fender
TT	All aluminum	307	Hood
S5	Hood, Fender	508	Hood
S7	Hood, Door fender, Trunk-lid	Citroen	
A6	Hood, Door fender, Trunk-lid	DS4	Hood
A3	Hood, Fender	DS5	Hood
Q7	Hood, Fender, Roof, Door	Volvo	
Q5	Hood, Back door	S80	Hood
Q3	Hood, Back door	C70 (cabriolet)	Hood, Trunk-lid, Roof
BMW		S70/V70	Hood, Back door
7series	Hood, Door, Fender, Trunk-lid, Roof	S60	Hood
6series	Hood, Door, Fender	V50	Hood
5series	Hood, Door, Fender	Saab	
4series	Hood, Door, Fender	9-5	Hood
3series	Hood	9-3 Station Wagon	Hood, Back door
M3	Hood, Fender	Jaguar	
M5	Hood, Door, Fender	XJ	All aluminum (Mono coque)
Z4	Hood, Fender	XK	All aluminum (Mono coque)
X5	Hood	F type	All aluminum (Mono coque)
Mercedes-Benz		XF	Hood, Fender, Trunk-lid
SLS (AMG)	All aluminum (Space frame)	VW	
SL	All aluminum (Monocoque)	Phaeton Exclusive	Fender, Door trunk-lid
SLK	Hood, Fender	Lamborghini	
CLS	Hood, Door, Fender, Trunk-lid	Aventador	Hood, Door fender
S-Class	Hood, Door, Fender, Trunk-lid	Gallardo	All aluminum (Space frame)
E-Class	Hood, Fender, Trunk-lid		
C-Class	Hood, Door, Fender, Trunk-lid, Roof		
B-Class	Hood		

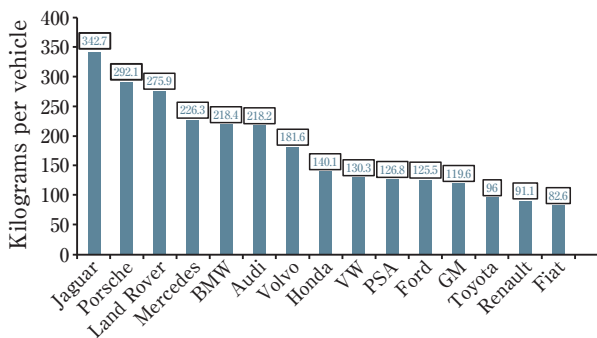


Fig. 9 Average weight of aluminum content for tentative European cars²⁵⁾.

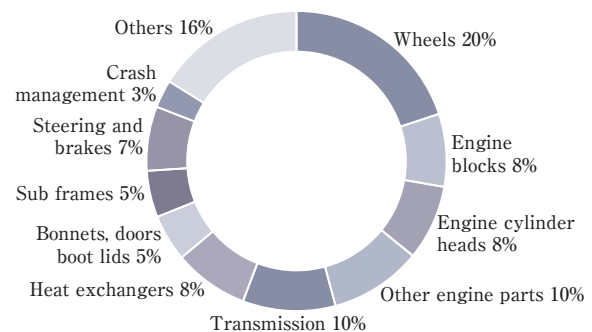


Fig. 10 Distribution of aluminum in European cars²⁵⁾.

Table 4 Examples of aluminum closure panels in USA ¹¹⁾.

Models			Application parts	Models			Application parts			
Ford	Ford	F-150 Fusion Mustang Explorer Expedition	All aluminum Hood Hood Hood Hood, Back door	GM	Chevrolet	Tahoe	Hood, Back door			
	Lincoln	LS MKZ MKS Town Car Navigator	Hood, Fender, Trunk-lid Hood Hood, Trunk-lid Hood Hood, Back door			Surburban	Hood, Back door			
Colorado						Hood				
Chrysler	Chrysler	300	Hood, Trunk-lid			Silverado LT	Hood			
						Impala	Hood			
					Malibu	Hood				
					Travers	Hood				
Honda	Acura	RLX PILOT Odyssey	Hood, Door (OTR) Hood Hood, Fender		Camaro	Hood				
					GMC	Yukon XL Acadia Siera Denari	Hood, Back door Hood Hood			
								Buick	Lacrosse Regal Enclave	Hood Hood Hood
				Caddilac	ATS CTS SRX Escalade CT6	Hood Hood, Door Hood Hood, Back door Hood, Fender, Door				
							Tesla			
							Mazda	Mazda	B2000	Hood
							Nissan	INFINITY	FX G37, EX	Hood, Door Hood
				Subaru	Subaru	Outback B9 Tribeca				
							Nissan	Altima Maxima	Hood Hood, Trunk-lid	

形性、接合性、耐応力腐食割れ性などである²⁴⁾。この中で、6000系合金は応力腐食割れが発生し難く、良好な成形性も兼ねているが強度が低い。2000系(Al-Cu-Mg系)合金は、強度は高いが耐食性の改善が必須である。7000系合金は、超高強度(耐力500 MPa以上)を目指したAl-Zn-Mg-Cu系合金と、溶接性と焼入性に重きを置いたAl-Zn-Mg系合金とに分けることができる。構造部材用としての大きな課題は、高強度と耐応力腐食割れ性の両立であり、研究開発が進められている。今後の開発の軸となっていくのは、最も強度が高い7000系合金の可能性が高く、北米・欧州では各アルミニウムメーカーから自動車用7000系板材が提案されており、車両への適用の検討が行なわれている。一方、2015年モデルの米国Cadillac CT6では、サイドシル(ロッカー)とフロントメンバーに7000系押出材を使用している²³⁾。

現状でのアルミニウム材料の使用比率は車両重量の約1割程度とみられているが、今後大きく伸びることが確実視されている。4.1で述べたように、鋼板をアルミニウムに置き換える場合、比重が鉄鋼の約3分の1と軽いアルミニウムは、剛性を考慮して鋼板の1.4倍の厚さとしても50%の軽量化が図れる。自動車向けアルミニウム需要は年間平均約5%以上の伸び率で増加、2025年には現在の約2倍の使用量になると予測されている¹⁷⁾。エンジンやホイールといった用途はほぼ開拓さ

れており、今後はバンパーやボディへの適用である。米Alcoaでは、Fig.11に示すようにボディを「フロント領域」と位置付け、2025年の自動車用アルミニウム需要2,480万トン、1台当たりのアルミニウム使用量250 kgを見込んでいる²⁶⁾。また欧州でも同様にFig.12に示すように1台当たりのアルミニウム使用量が増加することを見込んでいる²⁵⁾。

このような中、2015年モデルのAudi Q7では、アルミニウムとスチールのハイブリットボディを採用した²³⁾。アルミニウムはホワイトボディの52%、冷間鉄鋼は38%およびホットスタンプは10%である。フロアパンやセンタートンネルのアルミニウム化によって、前世代から300 kgの軽量化を実現した。また、ダイキャスト部品の多様により部品点数削減も成功し、サスペンションモジュールでは、60 kgの軽量化を実現した。米国のCadillacでは製品ラインのトップになるCT6に、ボディフレームにアルミニウムを多用し、38%がアルミニウムとなっている。キャビンのフレームをスチールにして、フロントとリアの主要構造部品をアルミニウムにしている。またダイキャスト部品も多用しており、部品点数削減と軽量化を実現している。構造部品の中では、アルミニウム製サスペンションタワーを採用が目立っている。鉄鋼で製造する場合は複数部品を組み立てていた部品を、アルミニウム鋳物で一体製造して、部品点数を減少する試みがなされてい

る。強度の必要な部位は、リブを立てるなど、形状で工夫している。また、バンパーリーンフォースのアルミニウム化は、プレミアムブランド車に限られるが、マツダ(株)が新ロードスターに7000系押出材を採用するなど²⁸⁾、採用車種が増加してきている。

EV車では、TeslaがModelSでオールアルミニウム車を採用している。アルミニウム製シャシーとして、ホイールベース間の床下にフラットに格納されるバッテリーパッケージを置き、丸型リチウムイオン電池を立てた状態で多数配置している。ボディはBピラー以外にアルミニウム板材・押出材を、フロント・サイドフレームとドアのクロスメンバーにアルミニウム押出材を採用し、軽量化をはかっている。

Table 5に自動車ボディのセグメントごとの2020年のアルミニウム採用率の予想を示す²⁷⁾。これからは、フードは、比較的小型車(セグメントAB)にも採用されるようになり、大型の商用車やライトトラックなどは、オールアルミニウム化していくと考えられる。一般的な乗用車(セグメントCD)は、オールアルミニウ

Table 5 Body in white of the next frontiers by aluminum²⁷⁾.

	2015			2020		
	AB segment	CD segment	EF segment	AB segment	CD segment	EF segment
Hood	48%	48%	73%	73%	73%	73%
Trunk	0%	7%	14%	0%	26%	52%
Door	0%	6%	12%	0%	28%	56%
Roof	0%	4%	8%	0%	24%	48%
Fender	0%	6%	12%	0%	19%	38%

ム化しても軽量化効果が少ないので、外板をアルミニウム化、骨格はマルチマテリアル化すると予想される。

6. おわりに

自動車の生産動向、軽量化へ駆動力となっている法的規制の概略について触れて、それぞれの軽量化素材の開発動向および軽量化素材使用に関する周辺技術動向について述べてきた。今後、アルミニウムの使用量は増加するとともに、特に構造部材では、アルミニウムを中心に、マグネシウム、ハイテン、CFRPなどの軽量化素材を用いることが増え、マルチマテリアル化していくと予想される。それぞれの素材について、さらなる実用レベルの材料が開発され、製品製造の工程においても、材料置換や部材の厚み変更はもちろん、部品の形状そのものの変更や新たな成形加工方法の導入などがなされていくと予想される。Ford F-150の影響を受けて、ピックアップトラックをはじめとする多くの自動車が進化するのか、2020年が楽しみである。

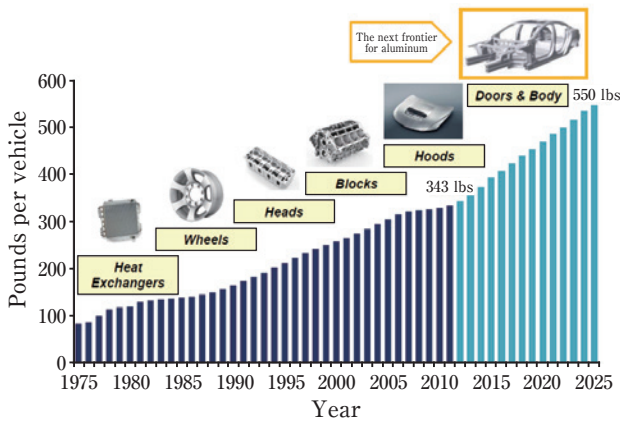


Fig. 11 Body in white of the next frontiers by aluminum²⁶⁾.

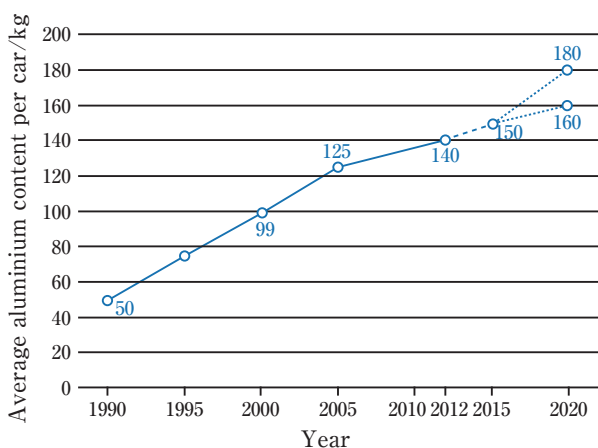


Fig. 12 Evolution of average aluminium content per car produced in Europe²⁵⁾.

参考文献

- 1) たとえば、荒井 久治: 中日本自動車短期大学論叢, **36** (2006) 17-41.
- 2) 安藤 裕康: エコカー及び自動車先進技術の開発動向と需要予測, Economic review, 丸紅経済研究所経済調査チーム, (2013)
- 3) 近藤敏弘: 自動車技術会, 材料フォーラム, **1** (2000)
- 4) 細見彌重: 住友軽金属技報, **32** (1991), 1-19.
- 5) 吉田英雄, 池田 洋, 渋谷和久, 西村嘉彦: 住友軽金属技報, **38** (1997), 53-71.
- 6) Y. Baba: Sumitomo Light Metal Technical Report, **38** (1997), 147-160.
- 7) 宇都秀之: 住友軽金属技報, **46** (2005), 84-92.
- 8) U.S. Department of Transportation, Bureau of Transportation Statistics: National Transportation Statistics, (2016) P49, table 1-23. http://www.bts.gov/publications/national_transportation_statistics/

- 9) みずほ銀行 産業調査部:みずほ産業調査, **42** (2013), 173-185.
- 10) 日本貿易振興機構海外調査部 海外調査計画課: 主要国の自動車生産・販売動向, (2014), 1-10.
- 11) Report of the automobile committee, the Japan Aluminum Association: 2015 homepage, <http://www.aluminum.or.jp/jidosya/japanese/index.ht>
- 12) 西野浩介: 世界で強化される自動車燃費規制とその影響, 三井物産戦略研究所産業調査第一室, (2015) http://mitsui.mgssi.com/issues/report/list_report16.php
- 13) 独立行政法人 自動車事故対策機構 自動車アセスメント部: 衝突安全性能評価詳細版, (2015), 2-21. http://www.nasva.go.jp/mamoru/car_search
- 14) Insurance institute for highway safety: Small overlap frontal crashworthiness evaluation crash test protocol (Version III), (2014), 3-10.
- 15) 日経テクノロジーオンライン: (2014) <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20140731/368301/>
- 16) 須田 義大, 青木 啓二: 情報管理, **57** (2015), 809-817.
- 17) 大榎恵美: 自動車構造材の軽量化と多様化, 三井物産戦略研究所戦略レポート, 自動車構造材の軽量化と多様化, (2014)
- 18) 安藤 裕康: エコカー及び自動車先進技術の開発動向と需要予測, Economic review, 丸紅経済研究所経済調査チーム, (2013)
- 19) 国土交通省: 自動車燃費一覧, 乗用車の燃費・CO₂排出量 (2016) http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_fr10_000027.html
- 20) Patrick Blain: Steel perspectives for the automotive industry, OICA (2012)
- 21) UACJ: UACJの自動車材料 (2015), 6-8.
- 22) 富士キメラ総研: 次世代自動車関連マテリアル総調査 (2016)
- 23) Proceeding of Euro Car Body 2015: Automobile circles (2015).
- 24) 稲葉 隆: アルトピア, **31** (2001), 25-31.
- 25) European Aluminum Association: Aluminum in cars, Unlocking the light-weighting potential (2012)
- 26) Mike Murphy: Aluminum Growth in Auto Body Today to 2020, Alcoa, (2012)
- 27) 鈴木諭也: NextStageVol7 デロイトトーマス (2015)
- 28) 内堀 佳, 橋本 学, 池田 敬, 山内 一樹: マツダ技報, **32** (2015), 145-149.



新倉 昭男 (Akio Niikura)
(株)UACJ 技術開発研究所 第六研究部