

戦略研レポート

2014.7.28

自動車構造材の軽量化と多様化

CONTENTS

はじめに—自動車軽量化への要請—

1. 鉄鋼
2. アルミニウム合金
3. マグネシウム
4. CFRP (炭素繊維強化プラスチック)

おわりに—軽量化がもたらすもの—

自動車構造材の軽量化と多様化

マテリアル&ライフイノベーション室 大楠恵美

はじめに—自動車軽量化への要請—

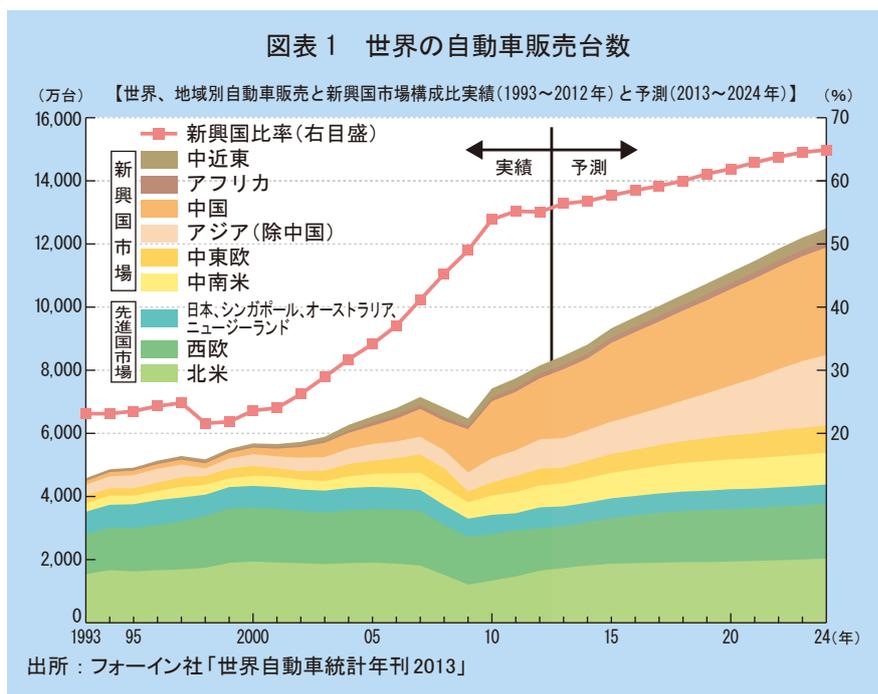
現在、世界の自動車生産は年間約 8,000 万台。10 年後には 1 億台、もしくはそれを上回る数になるとみられている（図表 1）。保有台数は既に 10 億台を超え、日本エネルギー経済研究所では 2035 年には現在の倍近い 19 億台、2050 年には 23 億台を見込んでいる。自動車には安全性、環境性、利便性などが求められ、インテリジェント化や電動化は今後の明らかな方向性であるが、世界的には 2040 年頃まで、エンジン車が伸び率こそ低下するものの主流であり続けるとみられている。しかし、世界が環境配慮型シナリオを選択し、エンジン車の乗り入れ制限などの環境負荷低減策が強く推進されると、自動車の電動化が急速に進む可能性もある。変化のスピードについては幅を持たせて見ざるを得ないが、環境性能向上の強い意識は製品化の形で表される段階に入っており、既に先進国にあってはそれが実感できる状況となっている。

2020 年代前半の燃費目標が、日・米・欧・中ともに 20～23km/ℓとなることに向け燃費競争は厳しさを増しており、自動車メーカー各社にはエンジン効率向上や車両軽量化が求められている。中でも電動化の採用はエネルギー利用効率向上やエネルギー源多様化にも寄与する方策だが、搭載する電池による重量増分を相殺するために部材の軽量化が志向されるようになってきている。軽量化はいずれの駆動系においても有意義であるが、エンジン車や HEV では燃費削減において、PHEV、EV、FCV では電池容量やモータ容量の低減による車両コスト低減において、特に大きな効果を示すといわ

れている。安全性を確保した上での燃費や走行性の向上が車づくりの最終目的であるとすれば、それをかなえるためのさまざまな局面において軽量化は有効で、その追求が弱まることはなさそうだ。

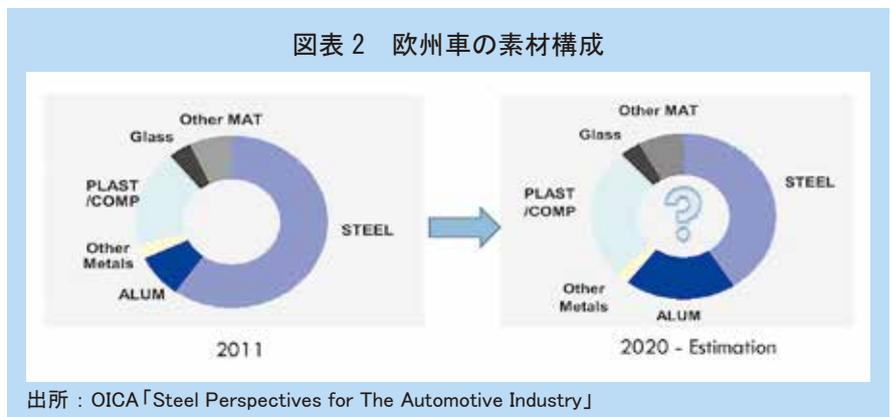
自動車構造材は、これまでの鉄鋼主体から、アルミニウムやマグネシウム、複合材等の軽量化素材の比率を増加させ多様化（マルチマテリアル化）に向かうとみられる。マッキンゼーでは、高張力鋼（以下、ハイテン）を含む軽量化材の占める割合が今後 20 年間で 2 倍に増えると予測しており、国際自動車工業連合会（OICA：Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles）は欧州車を例に取り、アルミニウムや樹脂を多様するマルチマテリアル化を予測している（図表 2）。

図表 1 世界の自動車販売台数



ただし現状では鉄鋼が圧倒的な主流で、アルミニウムが拡大を狙い、マグネシウムとCFRPが実用化を目指して開発中、という段階にある。今後、各材料において高性能化やコスト低減等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。異種材料を接合する技術の必要性は既にうたわれているが、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・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。単一材料の進化だけでなく、異種材併用を前提とした開発へと動き始めている。

図表 2 欧州車の素材構成



以下では、それぞれの素材について現状と今後の展望を概観する。

1. 鉄鋼

選択肢としてのホットスタンプ

強度、耐食性、成形性、表面処理性、そして価格、とさまざまな要素が求められる自動車構造材には主として鉄鋼が用いられている。中でも炭素、ニッケル、シリコン、マンガンなどの元素を0.0001%単位で添加、組織の制御などを行って強度を向上させたハイテンによる薄肉化・軽量化は他の軽量化素材に比べてコスト面で優位なこともあって急速に伸びており、日本では車に使用される鉄鋼中のハイテン比率は6割近くまで高まっている。しかも採用されるハイテンの最高強度は引き上げられる方向にあり、980MPa（メガパスカル）以上の超高張力鋼（ウルトラハイテン）がセンター/フロントピラー、サイドルーフレール、フロントルーフレール、サイドシルなどに用いられている。

この高張力化が強まるなかでの最近の動きは、少しずつではあるが、日系自動車メーカーがホットスタンプ（熱間プレス）の採用を始めていることだ。ホットスタンプとは、500MPa級の鋼板を約900℃に加熱して柔らかくした状態でプレス加工し、同時に金型との接触に伴う冷却効果で焼き入れすることにより1.5GPa（1,500MPa）以上という非常に強度の高い超高張力鋼を得るもので、欧米自動車メーカーが既にキャビンの骨格部材等に積極的に採用している。フォルクスワーゲン（VW）のゴルフVIIではボディの28%がホットスタンプで、先代のゴルフVIのアルミから

ホットスタンプに戻した箇所さえあり、VWでは高強度であることと、コストがアルミの3分の1であることをその理由として挙げている。

欧米がホットスタンプを採用する一方、日本はこれまで、鉄鋼メーカーがナノレベルの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、ハイテン材の最大の課題ともいえる形状凍結性の低下（高強度化するほど成形後のスプリングバックが大きくなり、計画どおりの形状を得ることが難しくなる）を大きく改善し、成形荷重（プレスに要する力）を抑制できるなどの利点がある一方、加工中に表面が酸化する、熱するためのエネルギーが必要、冷却に時間がかかり生産効率が悪い、成形後に不要部をレーザーで切り取る処理が必要、等々により、結局コスト高になるともいわれてきた。しかし、アルミめっきによるスケール（酸化皮膜）発生の抑制、加熱炉の改良、水冷却など冷却方法の工夫、プレス時の余肉切断によるレーザー加工不要化などにより、生産性、ひいてはコスト高が改善されてきている。ホンダの軽自動車N-BOX（Bピラー/1,500MPa）、フィット（フロントピラー、Bピラー、サイドシル）、マツダのCX-5（バンパー/1,800MPa）等で採用されており、日本の鉄鋼メーカーもホットスタンプ用鋼板に取り組み始めた。ホンダ

図表3 冷間プレスとホットスタンプにおける成形品の形状精度の比較



冷間プレス（従来品） TS = 980MPa



ホットスタンプ品（開発品） TS = 1,470MPa

©新日鐵住金株式会社

N-BOX のホットスタンプ材は新日鐵住金によるものである（図表3）。

ホットスタンプの課題としては、材料面では、耐水素脆化特性や疲労特性の低下が挙げられる。鋼材は一般に高強度化に伴い耐水素脆化特性の低下が見られるが、自動車の足回り部品など、鋼中への水素侵入が促進される腐食環境下においても特性を保持することが要求されるため、鋼中に Mn 含有物や Mn 酸化物を生成させて脆化を抑える開発や、鋼板表面の工夫により疲労特性を向上させる研究が始まっている。製造面の課題としては質・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存在しないことが挙げられる。世界的には、スペインの Gestamp、カナダの Magna Cosma、ドイツの Benteler 等のメガサプライヤーがあり、日系自動車メーカーがこれらメガサプライヤーを活用してホットスタンプの経験値を上げられるかどうかは今後の注目点だ。

米国が 2012 年から導入したスモール・オーバーラップ衝突試験（フロント部分の運転席側 25%を衝突させる実験）も、より高強度の部材要求につながると考えられ、ホットスタンプへの流れは続きそうだ。Volvo ではホットスタンプの使用比率を 20%から 45%へ高めるとしている。ホットスタンプによらない 1,000MPa 超の高強度化が容易でないとする、日本の自動車メーカーもゆっくりではあるが、ホットスタンプ採用を広げていこう。

進化を続ける鉄鋼

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のもまた事実である。15 年前には 8 割といわれた比率は現在 7 割程度と推測され、今後も比率低下傾向は避けられないだろう。厳しい軽量化要求において鉄鋼には限界がある、との表現を最近耳にする。自動車に使われる鉄鋼の 4 割はドアやフードなどの外板と呼ばれる箇所に使われており、そこでは剛性も要求される。剛性は、両端から引っ張ってちぎれるまでの強さを表す引張強度とは別の特性で、折り曲げようとする力に対しどれだけ抵抗できるかを表すもので、基本的には材料によってその値が決まり、強度のように加工方法でその値を大幅に変えることはできない。剛性は厚みの 3 乗に比例するため、強度を高められたからといって材料の厚みを薄くしてしまうと如実に剛性を下げってしまうことになるので、剛性が求められる部品ほどハイテンのメリットを活かせないことになる。形状加工によって剛性の低下を多少は抑えられるものの本質的な解決ではなく、こうしたハイテン化だけでは軽量化に対応しきれないところが鉄鋼の限界といわれるゆえんであると思われる。

しかし、鉄鋼の歴史、研究者の層の厚さは他の素材を圧倒する。一口に 980MPa のハイテンといっても曲げ型、伸び型、穴広げ型などいくつものタイプが用意されており、顧客ニーズに応える力を既に持っている。冒頭に述べたように自動車生産はまだ増加するため、自動車素材に占める鉄鋼の割合が減少しても絶対値としての需要量が大きく減少するとは考えられない。OICA では、当面現状レベル、長期的に見て微減と予想している。将来、自動車の環境性能が、走行時の燃費だけでなく、製造・走行・廃棄/リサイクルを含めた LCA (Life Cycle Assessment) 的な評価となることも予想される。素材特性、加工性、環境性能、コスト、等々から見て総合点の高い鉄鋼は、幅広い開発を進めていくことで有用な素材であり続けるだろう。

2. アルミニウム合金

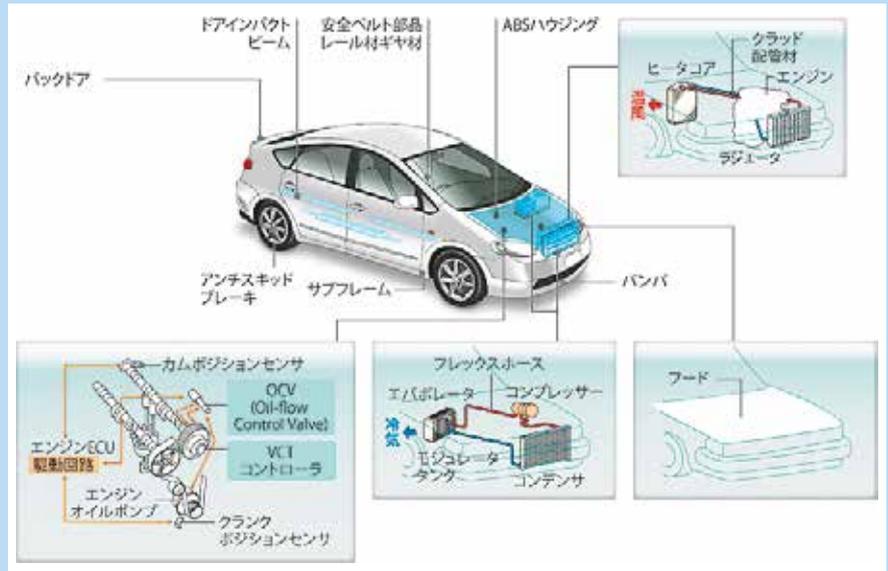
特徴と現状

アルミニウムは、比重2.7と軽く(鉄は7.8)、表面にできる酸化被膜のため耐食性に優れるほか、熱伝導率が高い、鋳造性がよいなどの特性がある。一般にアルミと呼ばれるのは、マグネシウム、銅、亜鉛などを添加して熱処理を施すことで強度を高めたアルミニウム合金のことだ(本稿でも以下同様)。自動車においてはかねてからエンジンやトランスミッション、またホイールなどがアルミ鋳造であるほか、鍛造によるサスペンション、押し出しによるバンパービーム、サイドフレームなどが用いられている。近年の傾向はフード、ドア、フェンダー、トランクリッド、ルーフ等の外板での採用も進んでいることで、欧州車では2割以上がアルミのフードとなっている(図表4)。

自動車ボディには主に6000系(Al-Mg-Si)と呼ばれるアルミが使われている。6000系は、それ以前のアルミと比べ、成形後、SSマーク(Stretcher Strain Mark)と呼ばれるひずみ模様が発生しないこと、製造工程中の塗装焼き付け時の熱処理により硬化するバークハード性を持つことなどに特長があるが、さらに最近の動きとして7000系(Al-Zn-Mg)の採用が挙げられる。7000系は航空機等に使われる高強度のアルミであるが、車の重心から離れた箇所の軽量化は走行性を大きく向上させるため、バンパービームなどで採用されている。

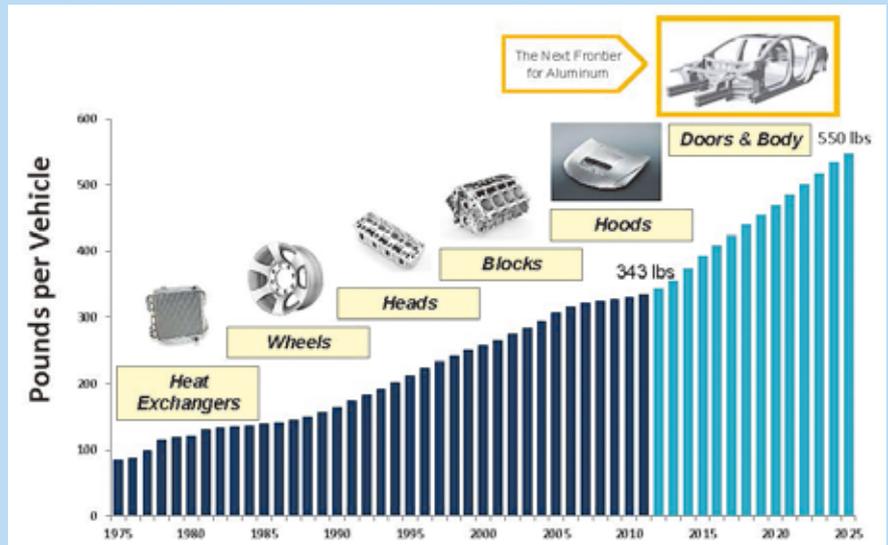
現状でのアルミ使用比率は車両重量の約1割程度とみられているが、今後大きく伸びることが確実視されている。鋼板を置き換える場合、比重が鉄鋼の約3分の1と軽いアルミは、剛性を考慮して鋼板の1.4倍の厚さとしても50%の軽量化が図れるため、自動車向けアルミ需要は年間平均約5%以上の伸び率で増加、2025年には現在の約2倍の使用量になると予測される。エンジンやホイールといった用途はほぼ開拓されており、伸びしろはバン

図表4 アルミニウム合金の適用例



出所: UACJ社HP

図表5 1台当たりのアルミ使用量の推移



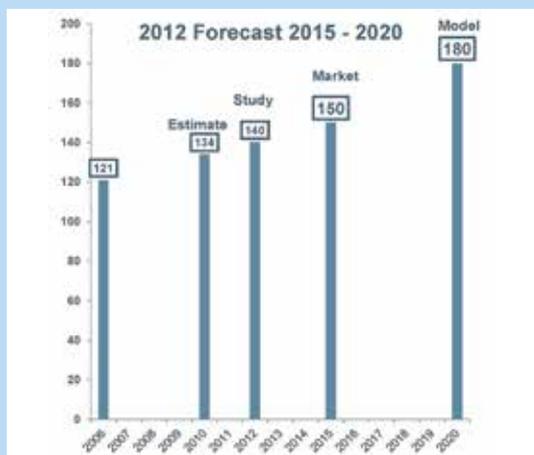
出所: Alcoa社「Aluminum Growth in Auto Body Today to 2020」

パーやボディにある。米 Alcoa ではボディを「フロンティア領域」と位置付け、2025年の自動車用アルミ需要2,480万トン、1台当たりのアルミ使用量250kgを見込んでいる(図表5)。

課題とその対応

現時点で、ハイテンに次ぐ現実的な軽量化素材となっているアルミだが、重量当たり鉄鋼の3倍程度といわれる価格に加え、板材においては成形性と接合という二つの技術的課題がある。合金にするとアルミは鉄に比べ伸びが小さくなり、加工が難しくシワや割れが発生しやすい、スプリングバックが大きいなどの傾向があり、鉄鋼と同じようにプレスすることが難しい。このため成形限界の向上を図るべく、素材特性についての研究とプレス工程の見直しが行われており、合金に添加する元素については、銅

図表6 欧州車のアルミ使用量予測 (kg/台)



出所：EAA「Aluminium penetration in cars Final Report」
(March 2012)

図表7 Ford F-150 のアルミボディとハイテンフレーム



出所：Ford社HP

は成形性を向上させる一方で耐食性を低下させる、ケイ素は伸びや成形性を向上させる一方で曲げ性を低下させるなどのメリット・デメリットが分かっている。

接合においては鉄鋼で多用されるスポット溶接に不向きなことが難点だ。アルミは熱伝導率や電気伝導率が高いため、溶接時の電気や溶融させる熱が逃げてしまい、溶接するには鉄鋼の2倍の加圧力、2～3倍の電流と、多くのエネルギーを必要とする。このため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やレーザー溶接、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が開発されており、摩擦攪拌点接合ではマツダがRX-8で採用するなど適用例が出ている。また、接合技術そのものではないが、ホンダが3D シームロックという、洋裁でいう三つ折りのような技術によりアルミと鉄鋼を組み合わせることに成功しており、アルミ使用拡大に向けて加工技術が次々と開発されている。

アルミ採用の時間差

アルミ志向は世界的傾向であるものの、日本と欧米で差が見られる。欧米はこれまで、またこれからも採用に積極的で、1台当たりのアルミ使用量は、欧州車で2009年の140kgが2020年に180kgへ(欧州アルミニウム協会：EAA) (図表6)、米車で2009年の148kgが2012年に155.6kg、2025年には249.5kgへ(米国アルミニウム協会)と増加することが期待されている。前述のとおり、増加の主な牽引役として見込まれるのは外板パネル等の板材である。

最近の話題は米 Ford がピックアップトラックの代表的車種である F-150 の新型をアルミボディとし(図表7)、ハイテンのフレーム等の採用も含めて 320kg、14% 相等の軽量化を図ると発表したことで、燃費もガロン当たり 30 マイル(12.6km/ℓ相当)が期待される。生産設備は既存もしくは若干の変更で使えるものが多い、塗装・乾燥工程においては、従来のスチールボディ+アルミフードが新型ではアルミに一本化されるため簡潔化される、従来 7,000 あったスポット溶接は 4,000 のリベット接合になる、といった製造工程に関わる変更や、顧客向けの修理時間・コスト抑制策の採用等が伝えられており、Ford が有するアルミの経験が活かされるという。材料のアルミは Alcoa が供給するが、コンサルティング会社ではアルミ採用による F-150 のコスト増を少なくとも 1 台当たり 1,000 ドルと見積もっており、この北米一の人気車種における大きな変更に対する消費者の反応等と併せ、今後、ほかのピックアップトラックがそれに続くかどうか注目されている。供給余力のあるアルミ業界にとっては、自動車部門の伸びだけで過剰分が解消されるものではないものの、これを端緒としての自動車ボディへの適用に大いに期待したいところであろう。

一方、日本は欧米に比べるとアルミ採用に慎重だ。価格、成形性や接合、鉄鋼と組み合わせた場合の電食対策などを考えると、あえて生産ラインを変更してまでアルミ化するには至らないのかもしれないが、現時点でハイテン以外で使える軽量化素材はまだアルミしかなく、いずれ日系自動車メーカーでも採用の動きが出るものと思われる。

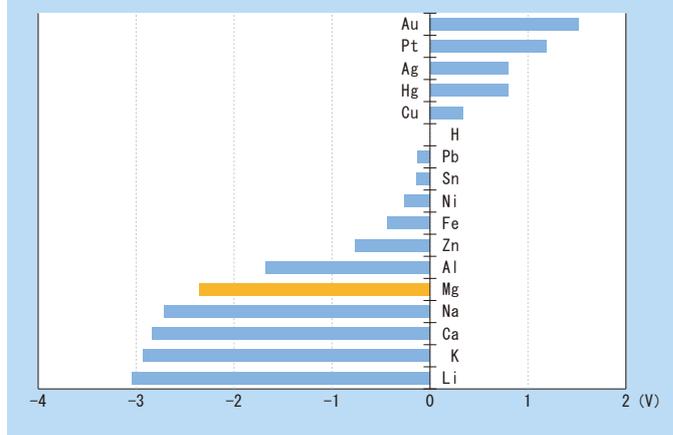
3. マグネシウム

三つの課題

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（重量当たりの強度や剛性）や熱伝導率が高い、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する。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（以下、マグネシウム合金をマグネシウムと記す）。大幅な軽量化を可能にする次世代の構造材料として期待されているが、2005 年時点での車 1 台当たりの使用量は、欧州で 6kg、日本では 2kg と、ごくわずかにとどまっている。燃えやすい、耐食性が低い、加工性がアルミよりも劣る、高価である、など、モノづくりに向かない点が多いことが普及の進まなかった理由である。

マグネシウムの最大の問題は大気中で燃えることにある。従来のマグネシウムは 400℃を超えたあたりから発火が始まる。特に加工現場等で発生する切りくずは引火しやすく、しかも酸素と結合しやすいマグネシウムが高温となって水と接触すると水を分解して水素爆発を起こす危険があり水での消火が行えないため、まずマグネシウムの難燃化が求められた。1990 年代後半に、カルシウムを添加すると極めて薄く緻密な酸化カルシウムの被膜ができ、それが酸素を遮断するため難燃化に有効であることが分かり、以来研究が進み、現在のカルシウム 2% 添加による発火温度約 800℃の難燃性マグネシウム開発に至っている。最近の話題は、熊本大学が開発した亜鉛やイットリウムを添加した「KUMADAI マグネ」であろう。発火温度 940℃程度の難燃性（Mg97Zn1Y2、Mg96Zn2Y2 など）と、マグネシウムの融点 1,091℃を超える 1,117℃まで発火しない不燃性とがある。難燃性には鋳造耐熱と急冷耐熱の 2 種類があり、前者は製造が容易であること、後者は強度や耐食性が高いことに特徴があるが、難燃性、不燃性ともに加工性が悪く、さらなる改良が待たれている。しかし、発火しやすいという第一の課題はクリアされたといっただろう。米国連邦航空局（FAA : Federal Aviation Administration）は、これまで安全性の観点からマグネシウムの航空機への使用を禁止していたが、KUMADAI マグネは難燃性・不燃性とも燃焼試験の基準を満たしたとの結果を得ており、マグネシウムの使用拡大に向け大きく前進したことを示している。

図表 8 標準電極電位

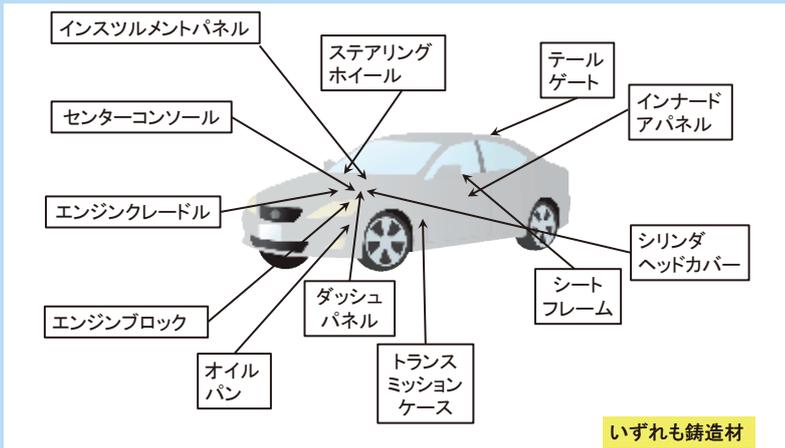


耐食性の低さも実用に際しての大きな課題である。マグネシウムはその地金に、鉄、ニッケル、銅、コバルトなどが微量に含まれると著しく腐食しやすくなるため、まず、これらを除く必要がある。耐食性の向上にはアルミニウム添加が有効であることも分かっており、アルミニウム 9%、亜鉛 1% を添加して耐食性を高めた AZ91 が開発、既に汎用されている。また、他の金属との接触においても注意が必要である。一般に、異なる金属が水や海水等の電解質溶液で接触すると金属間に電位差を生じ、電位の低い金属が選択的に電荷を失って金属イオンとなり溶液中に溶け出して腐食（電食）を起こすが、マグネシウムは -2.36V と実用金属中で最も低い標準電極電位であるため（図表 8）相手の金属によらず腐食する側となる。電位差が大きいほど腐食の程度も大きくなるが、いずれにせよ、化成処理、陽極酸化処理、めっき処理などの表面処理による保護が必要となっている。表面処理技術は実用レベルであるものの、自動車への採用にあたってはより一層の耐食性が求められると考えられ、新たな表面処理技術が開発中である。

マグネシウムは酸素との親和性も高く、酸化物として存在する不純物酸素が強度や疲労寿命などに悪影響を及ぼすといわれている。大気中にあると容易に酸化されて表面に酸化被膜を作るが、アルミニウムのように内部を保護するほどの被膜でないため、表面処理が必要となっている。

三つ目の課題は加工の難しさだ。そもそもマグネシウムは、その六方最密充填構造と呼ばれる結晶構造に起因して延性が低く、常温での塑性加工が困難となっている。圧延材を得ることからして難しく、特に上述の AZ91 は、

図表 9 自動車用マグネシウム部品の使用例



出所：日本マグネシウム協会HP

図表 10 各種軽金属の価格比較 (円 /kg)

材料	原材料	圧延板
Mg合金板	Mg合金地金 260	6,000
Al合金板	Al地金 230	800
純Ti板	Tiスポンジ 1000	3,500
Ti合金		5,000

出所：経済産業省「マグネシウム産業の現状と課題」

難燃化のためのカルシウムと耐食性のためのアルミニウムによる化合物が延性に悪影響を及ぼしたり、10%にもなる添加元素のために圧延材が割れやすくなったりしているため、現在の製品のほとんどは鋳造によっている（図表 9）。圧延材としては AZ31 というアルミニウム含量の少ない合金が用いられることが多いが、圧延工程はコストがかかり、原材料価格が最近ではほとんどアルミニウムと同程度であるにもかかわらず、マグネシウム圧延材はアルミ圧延材の 5 倍以上の価格となっている（図表 10）。成形加工においても 250℃ 以上の加熱が必要となり、さらなるコスト上昇を招いているが、最近では常温成形性の高い圧延材の開発など改善が進められている。

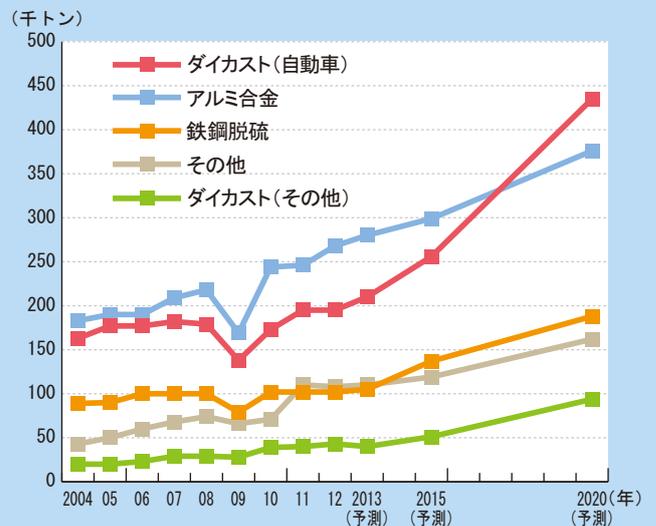
期待のかかるマグネシウム開発

大きな軽量効果が期待されるマグネシウムは、特に自動車での採用が期待されており（図表 11）、米国 USAMP（U.S. Automotive Materials Partnership）では 2005 年の使用量 4.5kg が 2020 年には鉄鋼およびアルミを代替して 159kg に増加するとする「Magnesium Vision 2020」を発表している。マッキンゼーによる 2030 年の自動車素材に占めるマグネシウムの割合予測は 5% だ。また、航空機での採用も見込まれており、英 Magnesium Elektron のマグネシウムが、これまでのアルミに代わって椅子の構造部材に使われることが認められた。これは不燃性マグネシウムではないが、要求特性を満たす適用先を選ぶことで軽量化への寄与が可能であることを示している。

開発動向としては、日本に比べ既に採用傾向にある欧米で研究開発プロジェクトが盛んで、欧州の EUCAR、米国の USCAR、ドイツの SFB390 などがあり、また、韓国が公的研究機関や POSCO を中心にマグネシウム関連の開発に力を入れていることが特筆される。

マグネシウムの採用拡大はまずはダイカスト材からとなるだろう。しかし、アルミ同様、その次に求められるのが板材であるのは明らかだ。そうしたなか、住友電工が

図表 11 世界のマグネシウム需要



出所：日本マグネシウム協会「世界の用途別マグネシウム需要推移」をもとに作成

AZ91 の板材の量産化に世界で初めて成功した。加工には 200℃ 以上の高温とする必要があるが、鋳造がほとんどである現状から大きく一歩踏み出したといえるだろう。ほかにも、溶湯から薄板を直接作製するスリップキャスト法など、圧延コストを下げる研究が行われており、今後、板材の製造およびその成形加工がユーザーの要求に応えられるレベルとなることが期待される。価格低減も達成すべき課題の一つであり、板材でまずは 1kg 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ようである。開発のハードルは多く、また高いといわざるを得ないが、マグネシウムの軽さは大きな魅力である。

4. CFRP（炭素繊維強化プラスチック）

量産車を目指す CFRP

CFRP（Carbon Fiber Reinforced Plastics：炭素繊維強化プラスチック）採用車の最初のベンチマークとなりそうなのが2013年11月に欧州を皮切りに発売されたBMWの電気自動車i3である(図表12)。CFRPの“強くて軽い”（比強度が高い）特性は既に認知されているものの、鉄鋼に比べて重量当たりのコストが数～10倍と高価なため、これまではF1カー・超高級車、もしくは一部の部品に使われるにとどまっていた。また、電気自動車は、電池の重く高価格である点がネックの一つとなっていた。しかし、i3では100kgのCFRPを使ったキャビンとアルミニウム製シャーシの採用により車両重量を1,195kgに抑え、販売価格は499万円からとしている。年間生産台数は数万台が見込まれ、CFRP利用車としては世界初の“万”台規模となり、CFRP採用が本格化することを予感させる。

i3では、プレカーサーと呼ばれるポリアクリロニトリル系炭素繊維原糸を三菱レイヨンの関連会社が供給する。それを炭素繊維にするには大量の電力が必要となるため、水力発電により3セント/kWhともいわれる安価な電力の利用が可能。米国ワシントン州のSGL Automotive Carbon Fibers（BMWと独SGLの合弁会社）で炭素繊維に焼成し、さらにドイツに運んで織物化、RTM（Resin Transfer Molding）成形を経て完成車へと加工が進められる（図表13）。

ここで使われる炭素繊維はラージトウという種類のものだ。炭素繊維は、フィラメントと呼ばれる直径5～7μmの極細の糸が一千～数万本束ねられたもので、一般に1,000～24,000本束ねたものをレギュラートウまたはスモールトウ、40,000本以上のものをラージトウと呼んでいる。高品質・高価格のレギュラートウは航空機等に、比較的低価格のラージトウは産業分野に使用される、と大まかに分類して考えることができ、コスト意識の高い量産車においてはラージトウが用いられることになる（次ページ図表14）。ラージトウは、若干劣る繊維の強度を、束ねるフィラメントの数を多くすることで補い、その分安価であると考えられてきたが、近年ではレギュラートウに匹敵する強度を持つものも開発されており、炭素繊維のバリエーションはますます広がっている。

注目の熱可塑開発

今後はさらに安価で加工しやすいCFRPの開発が期待される。その一つが熱可塑性樹脂を用いたCFRTP（Carbon Fiber Reinforced Thermo Plastics）である。現在、CFRPの大半を占めるエポキシ樹脂等を用いた熱硬化性

図表12 BMW i3のCFRP製パッセンジャーセル(上部)とアルミ製シャーシ(下部)



出所：ビー・エム・ダブリュー社「BMW iと持続可能なモビリティ」

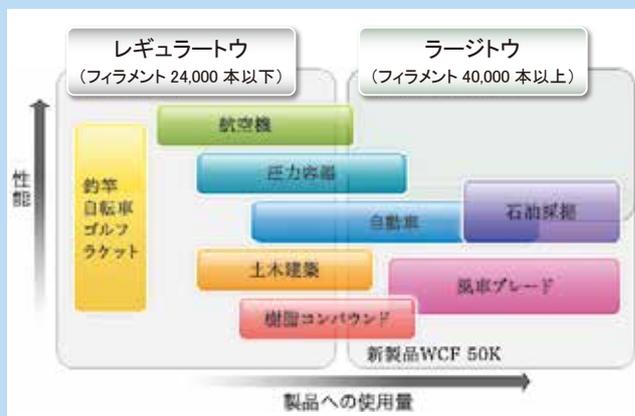
図表13 BMW i3に使われるCFRPの流れ

会社	概要	場所
MRC-SGL プレカーサー(三菱レイヨンと独SGLの合弁)	プレカーサー(原糸)であるポリアクリロニトリルを生産	広島県大竹市
SGL Automotive Carbon Fibers (BMWとSGLの合弁)	焼成して炭素繊維(ラージトウ)を生産	米ワシントン州モーゼスレイク工場(電力は全て非化石化)
同上	織物の形に加工	独バイエルン州バックースドルフ工場
BMW	RTM方式でCFRPに加工、成形	独バイエルン州ランツフート工場
同上	完成車に	独ザクセン州ライプチヒ工場(電力は全て風力等のRE利用)

CFRPは、優れた特性ではあるものの、生産に時間がかかり、高価で、リサイクルしづらいなどの難点がある。今後、量産車での大量採用を目指すにあたっては、炭素繊維の生産性向上と生産量の拡大、複合材の成形時間の短縮、接合性の向上、リサイクルの実現などを満たし、価格も含めて使いやすい材料となることが必要で、その目標に向かって炭素繊維と樹脂の両面での研究開発が行われている。可塑性樹脂としてはポリプロピレンやナイロン等が候補に挙がっているが、実用レベルとなるまでには改善すべき点も多く、どの樹脂が採用されるかはまだ見えていない。しかし、2013年9月には東京大学、東レ、三菱レイヨン等が参加するNEDOプロジェクトがCFRTPの開発に成功、同10月には既にGM等との共同開発を明らかにしていた帝人がCFRTPの市場展開を発表したほか、欧州での開発も非常に盛んで、炭素繊維強化熱可塑性樹脂の実用化レースは始まっているといっていよう。

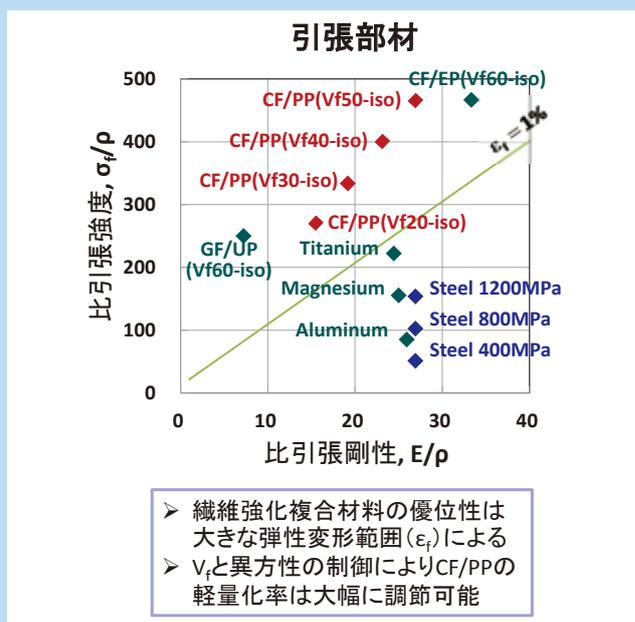
CFRTP採用により自動車は現行と比べ3割程度の軽量化が期待できる。大量採用となれば、技術面のみならず、十分な供給力やリサイクル体制といった社会システムの確立も必要となるが、現時点の炭素繊維の生産量は自動車に限らない全用途を合わせても年間4万トン程度にすぎない非常に小規模なものである（対する鉄の生産量は15億トン、アルミ4,500万トン、マグネシウム80万トン）。であるにもかかわらず、CFRPが金属材料と並び有望素材と見なされるのは、そのポテンシャルにあると思われる。2020～2025年より先の排出規制がどうなるかは分からないが、より厳しい制約が待ち受けていると考えるべきであろう。より一層の軽量化要求となれば、それは樹脂化を意味するかもしれず、強くて軽い上に広い範囲の特性をカバーできるCFRPは将来、重用される材料となる可能性を秘めていると考えられる（図表15、16）。今は高価で生産量も少なく加工に手間がかかるが、それだけ発展の余地があると言い換えることもできよう。現状、CFRPの自動車での実績はほとんどなく、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であろうが、遠い先ではないのかもしれない。

図表 14 炭素繊維とターゲット市場



出所：三菱レイヨンHP掲載資料を一部改編

図表 15 各種構造用材料の軽量化指標 (比強度・比剛性) 比較



出所：東京大学 高橋淳教授、私信 2014

図表 16 板材の軽量化試算

	剛性 (Gpa)	同じ剛性となる板材の厚さ (鉄鋼を1とする)	比重	板材の重さ (面積一定×厚さ×比重)	軽量化
鉄鋼	205	—	7.8	7.8	—
アルミニウム合金	71	1.4	2.7	3.8	約50%
マグネシウム合金	45	1.7	1.8	3.1	約60%
CFRP	25～300	0.9～2.0	1.8	1.6～3.6	約55～80%

注：剛性からみた軽量化。軽量化材は板材が厚くなっても軽くなる

おわりに—軽量化がもたらすもの—

2013年度、国は文科省、経産省による未来開拓研究の一つとして革新的新構造材等技術開発プロジェクトを開始した。10年にわたり研究開発を支援するこのプロジェクトには、素材メーカーを中心とする38の機関が参加し、新構造材料技術研究組合を組成している（図表17）。鋼板、アルミニウム、マグネシウム、チタン、CFRPについて、高強度、高延性、不燃性、耐食性、耐衝撃性などを有する軽量化素材を開発、またそれら軽量化素材を用いるための接合技術や接合部の性能評価技術の開発を行い、将来、輸送機器重量の半減を可能にすることを目指しており、マルチマテリアル化が進む車両素材において日本の技術の優位性を保つものとなることが期待される。

輸送機器においては、それが何であれ、軽量化は追求すべき項目だ。軽量化材への移行が最も進んでいるのはもちろん航空機で、アルミが主流となっているが、より軽いアルミチタムの採用や、ボーイング787、エアバス350XWBに見るCFRPの大量採用などで一層の軽量化を図っている。地上の輸送機器においても、鉄道では高速性が求められる新幹線などで既にアルミが使われている。そしてまさにこれから軽量化材への置き換えが進むとみられているのが自動車だ。コスト意識の高い量産車では、1kgの軽量化にいくらの追加費用を払えるかが問われることになるが、マッキンゼーでは、市場の3分の2を占める中・小型車で3ユーロ、市場の3分の1を占める高級車や電気自動車で4ユーロ、市場の1%程度の超高級車で8～10ユーロ、と推測している。しかし、自動車会社の規模、車のタイプ等々により許容範囲にかなり幅が出るとも考えており、最大20ユーロまであり得るとみている。現時点で軽量化材料として実用にかない、かつ妥当な価格のものとなるとハイテンとアルミに絞られるが、高級車等においては差別化やブランド戦略の意味合いも加わり、高価格の素材であっても選択肢となり得るだろう。これまでどおり、新たな素材や技術がまず高級車から導入され、徐々に低廉化と普及が進む流れは変わらないであろうが、将来、今よりはるかに厳しい条件が自動車に突き付けられるとすると、開発のかなり初期の段階から垂直方向および異業種間で連携する傾向が強まるものと想像される。構造材の多様化は、各社の経営資源の配分やアライアンス等、開発戦略の違いを明瞭にしていくことだろう。

図表 17 新構造材料技術研究組合

開発項目	参加団体
①接合技術	東レ、神戸製鋼所、新日鐵住金、JFEスチール、マツダ、UACJ、川崎重工業、住友電気工業、IHI、日立製作所、日立パワーソリューションズ、日立金属、日立メタルプレジジョン、田中貴金属
②チタン材	神戸製鋼所、新日鐵住金、東邦チタニウム
③アルミニウム材	UACJ、産業技術総合研究所、神戸製鋼所
④マグネシウム材	産業技術総合研究所、三協立山、住友電気工業、不二ライトメタル、大日本塗料、総合車両製作所
⑤鋼板	神戸製鋼所、新日鐵住金、JFEスチール
⑥CFRP	名古屋大学、三菱レイヨン、カドコーポレーション、東洋紡、スズキ、タカギセイコー、IHI、本田技術研究所、三菱自動車工業、東レ、日産自動車、アイシン精機、福井ファイバートック、産業技術総合研究所、住友重機械工業、共和工業、島津製作所、小松製作所、トヨタ自動車、東邦テナックス、富士重工業

構造材にはまだまだ開発の余地があるといわれている。今後、それぞれの素材について実用に適するレベルの材料が開発され、製品製造の工程において、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等がなされるようになるかもしれない。また、リサイクルの場において、マグネシウム等の現状ほとんど使われていないものが一定量を超えるようになり、新たな処理方法の検討が必要になるかもしれない。素材開発は、改良と新たな課題発生を繰り返しながら進歩して行くエンドレスな作業のように思われる。その過程において生み出される、その時代その時代の革新的素材こそが、より効率的な輸送機器の開発に貢献するものとなるのであろう。