

自動車と材料（第1報、自動車の3大構成材料）

高 行男

1. はじめに

文明は石器時代から銅器時代を経て鉄器時代に進化してきたといわれる。そして今日では、金属、プラスチック（樹脂）、セラミックスが担っている。このように物を作るもとである材料は、社会生活に大変重要な役割を果たすが、自動車の製造というものづくりにおいても材料とその加工が基礎となっている。

今日の大量生産車の原点といえるアメリカフォード社のT型フォード（2.9L, 20馬力、車重544kg）の登場は1908年である。エンジンの始動は手回し式のクランクで、映画のシーンを見ると、人と車の一体感が感じられる。その後スタータモータを搭載したT型フォードは、1927年まで生産され、累積生産数は1500万台であった。生産の打ち切りはGMのシボレーの登場である。車は商品であることを再認識させられる。割れても破片が飛び散らない安全ガラス、ワイパも手動から自動になり、今日の人を運ぶ自動車の基本が出来上がる。

1950年代、自動車は特定の人の乗り物でなく大衆化の動きとなる。日本では、国民車育成要綱案が1955年に発表され、いわゆるモータリゼーションが1960年代始まり、馴染みのあるサニーやカローラが1966年に登場する。自動車はその台数の急増と高速化に伴う交通事故という社会的問題、地球環境という世界的問題を抱えながら今日に至っている。安全、環境、燃費、リサイクルそして情報化と自動車に求められるキーワードは多いが、その一端を述べる機会があった¹⁻³⁾。自動車の在りようが問われる時代になったと思われるので、自動車と材料をいろいろな視点から見つめる必要があると考えられる。そこで、本稿では自動車の軽量化という視点から、自動車を構成する3大材料の鉄（鉄鋼）、アルミ、そして樹脂（プラスチック）について概観する。

2. 自動車を構成する材料と軽量化

自動車工業会が調査した2001年までの材料の構成比の推移を見ると、オイルショック以降、鋼板、構造用鋼、ステンレス鋼、鋳鉄などの鉄系材料は80%から70%程度と少し低下してきた。しかし依然として、鉄鋼、いわゆる鉄が主となる材料である⁴⁾。一方、アルミ、樹脂は増大し、アルミを含めた非鉄金属は約8%、樹脂も8%程度の割合である。自動車工業会の資料は2001年までのデータであり、その後のデータはないが、樹脂の割合は1割程度になっていると指摘されてい

る。

鉄、アルミ、樹脂は自動車の3大材料といえるが、構造用材料の3大材料を意味している。つまり、自動車の材料を見ると、タイヤのゴム、フロントガラスの安全ガラスをはじめ自動車センサに使われているセラミックス、触媒の白金など重要な材料も多い。

セラミックスは鉄、樹脂に次ぐ第3の素材として1980年代大いに注目を集めた。ターボチャージャーの窒化ケイ素セラミックス製ロータの搭載（日産・フェアレディZ, 1985年）は、画期的であったと思われる。この素材（比重3.2）は、タービン翼材のインコネル（比重8.5）に比べ軽い。1970年代、排気ガス規制に対してO₂センサによる空燃比制御と三元触媒を組み合わせた排気ガス浄化方法がガソリン車に普及するが、O₂センサのジルコニア、触媒担体のコーディエライト、つまりセラミックスが重要な役割を果たしている。ディーゼルエンジンの黒煙などを捕集するDPFでは炭化ケイ素というセラミックスがフィルタとして重要な役割を果たしている。

車の軽量化の目的は燃費と運動性能の向上であるが、環境問題を背景に低燃費化が強調されている。燃費の向上は、二酸化炭素などの温室効果ガスの削減になるという考えである。車1台あたりではガスの削減ができて、台数が増えれば総体としては排出量の増加につながるの、車の在りようが問われている。低燃費化の方法には、エンジンの燃焼の改善、摩擦損失の低減、動力伝達効率の向上、空気抵抗や転がり抵抗の低減、車両の軽量化などがあるが、中でも軽量化は大変重要である⁵⁾。軽量化は車の在りように関係なく重要である。

3. 鉄 鋼

自動車を構成する主な材料である鉄鋼は、自動車材料に一番に求められた強度信頼性、耐久性、コストなどに応えてきた材料である。現在、市販車は通常の使用状態において、3年または6万kmの品質保証がなされ、パワートレインについては5年10万kmに延長されている。

自動車における鉄鋼材料を見ると、ボディなどに使われる鋼板、エンジン部品などに使われる特殊鋼や鋳鉄などがある。鋼板は自動車において最も使用量が多く、重量比は40%程度である。特殊鋼は高い強度信頼性を有することから、エンジン、駆動、シャシなど各ユニットの主要構成部品に使われ、17%弱を占め、この比率はあまり変化していない。一方鋳鉄は、シリンダブロックのアルミ化など軽量化の流れで使用量は減少している。

(1) 高張力鋼板

モノコックボディは、全体で350点ほどの部品をスポット溶接で組み立てたものであり、各部品は薄鋼板（0.6mm～1mm）をプレス成形したものであるが、補強のため、一部の部品は厚めの鋼板（2mm程度）も使われる。ボディに使われる薄鋼板は、表面精度の高い冷間圧延鋼板が使われるが、軽量化および強度向上のため、高張力鋼板（High Tensile Strength Steel, ハイテン）が各所に採用されている。当初の鋼板はプレス成形性そのものが課題であった。その課題を解決し、さらに高強度化と高成形という本来矛盾する課題を克服したことは特筆される。ただし、

剛性（弾性率）は通常の鋼板も高張力鋼板も同じであるので、高張力鋼板の採用が有効な箇所は、疲労強度や変形強度が要求されるフレーム、ピラー、メンバー類、耐デント性が要求されるフロントフード、トランクリッドなどの外板パネルなどである。

高張力鋼板は、オイルショックによる自動車の燃費向上のニーズが引き金となり、ボディ軽量化の必要性から採用され始めた。通常の鋼板（引張強度は300MPa程度）より板厚を薄くすることができるため軽くなる。1990年代には440MPa、2000年には590MPa級が一般的となり、超高張力鋼板ともいわれる980MPa、さらに1180MPa、1470MPa級も登場している。高張力鋼板は、1990年代、ボディ重量の25～35%占めているが、45%の事例（トヨタ・プリウス、2003年）も認められる。

高張力鋼板によりどれくらいボディの軽量化が図れるかを ULSAB（Ultra Light Steel Auto Body, 1998年）について見ると、25%程度である。ULSAB では高張力鋼板が、定義によるが64～91%と多用されている。この軽量化の達成において、剛性を確保するボディ構造の最適化や、テーラードブランク、ハイドロフォーミング、レーザ溶接などの加工技術による寄与も大きいことが指摘されている⁵⁾。

（2）特殊鋼

特殊鋼（合金鋼）は、炭素鋼にクロムやニッケルなどいろいろな元素を加えたもので、耐食性や耐熱性など特殊な性質を示す鋼である。つまり、使用部品の要求特性に対応するように改良されてきた材料であり、クロムモリブデン鋼などの構造用合金鋼、ステンレス鋼、耐熱鋼、ばね鋼、軸受鋼、快削鋼など多種多様である。歴史を持っており、鉛フリーの快削鋼や清浄度を高めた軸受鋼など、改良され続けられている材料のため、特殊鋼の自動車における地位は今後も変わらないと考えられる。

軽量化の手法は板厚を薄くし、余肉削減が基本であるが、その前提は当然であるが安全性の確保である。軽くするため必要な寸法を減らすと破壊につながる。時間が経過して現れる疲労破壊など厄介な現象もあり、軽量化と安全性のバランスの適正化は大きな課題である。強度信頼性の確認の不十分さがリコール問題の根底にある。

構造部材は一般的にどの部分であっても軽量化が必要であるが、その重要度は使用部位によってかなり異なる。これは、ある部分（部品）の軽量化は、それ自体の重量軽減に留まらず、その部分を支えているほかの部分の負担を軽減するからである。例えばコンロッドの軽量化はそれが往復運動部分であるため、エンジン性能の向上ばかりでなくシリンダブロックやクランクシャフトの負担を軽減し、エンジン全体の軽量化に貢献している。

鋼における軽量化には、素材自体の強度を上げることと部材表面に表面処理を施して強くし小型化を図る方向がある。ホンダ・インサイト（1999年）のコンロッドを見ると、浸炭処理をして表面を硬く強くし、小型化することによって30%軽くなっている。鋼の代わりにチタン（ホンダ・NSX、1990年）やFRM（繊維強化金属）を採用（ホンダ・シティ、1985年）して軽量化を図っ

ている事例もある。

一方、Fe-Cu-C系合金製の粉末鍛造コンロッドの採用例（トヨタ・カムリ，1981年）がある。粉末鍛造とは、焼結体に気孔が在ると強度は低下するので、焼結体を緻密にする処理方法である。自動車焼結部品の端緒は1920年代に開発された焼結含油軸受であるが、この場合は焼結体内部の気孔を利用している。焼結材料（焼結金属）は鋼と競合する材料として期待される。

エンジンバルブには耐熱鋼が使用されている。吸気側で500℃、排気側で900℃ くらいであり、排気バルブの耐熱強度と軽量化を図ったナトリウム封入中空バルブの採用（日産・スカイラインGT-R，1989年）がある。過酷な使用条件にあるバルブの軽量化にはチタンやセラミックスが検討され、チタン基複合材（トヨタ・アルテッツァ，1998年）の採用例がある。セラミックスバルブ（窒化ケイ素，比重3.2）は搭載には至っていないが、実車搭載試験の段階にあったことは強調しておきたい。

（3） 鋳鉄

鋳鉄は複雑な形状も鋳込むことができ、耐摩耗性や振動吸収性に優れている。ピストン材も当初は鋳鉄で、アルミピストンが登場（1915年）しなければその座を守った材料である。耐熱性、耐摩耗性などの点から、今日でも鋳鉄ピストン、鋳鉄ブロックは存在している。

軽量化の視点で見ると、鋳鉄はアルミばかりでなく鉄という同じ仲間の鋼と競合している。その対象は、クランクシャフト、カムシャフト、排気マニホールドなどである。排気マニホールドは、エンジン部品の中では複雑でしかも高温にさらされる部品の一つである。かつてねずみ鋳鉄が使用され、その後球状黒鉛鋳鉄そして今日では耐酸化性を改良した高ケイ素球状黒鉛鋳鉄が主流になっている。このように鋳鉄自身も改良され使用されている。その中で黒鉛の球状化により片状黒鉛を持つねずみ鋳鉄のもろさを改善した点は特筆される。

しかし、軽量化や排気ガス対策の暖機特性を向上する必要性から、薄肉でも高温特性に優れた材料としてステンレス鋼が鋳鉄と競合材料となっている。特殊鋼の一つに分類されるステンレス鋼は、騒音低減や排気ガス規制に対処する自動車の排気システムにおいて重視され、排気系の部品に使われるステンレス鋼は、1980年以降1台あたりの使用量が増加している。対象部品は排気マニホールド、触媒コンバータ、排気管、マフラーである。

4. アルミニウム

アルミ（Al）の比重は2.7で、鉄の約1/3である。アルミ系材料には、ジュラルミンなど強度の高い合金が多いので、比強度（強度／比重）の高いことが大きな特徴である。金属は鉄と非鉄に大別されるが、非鉄金属材料の代表がアルミであるといえる。軽量化の要求により、鉄鋼や銅系の材料に置き換わってアルミが使用されている。後者の一例がラジエータである。

アルミには展伸用と鋳造用がある。鋳造用アルミには普通鋳造用とダイカスト用があるが、鋳鉄（比重7.1）に比較して軽量であること、鋳造性が良好なことから、軽量化が要求される自動車

部品への使用量が増大し、重量比率で約7%弱である。エンジンやトランスミッション部位では、80%近くが鋳物やダイカスト合金が使われている。

一方展伸用アルミには、加工用 Al 合金（圧延、鍛造、押出し、引抜きなどで加工される材料）と高力 Al 合金、あるいは非熱処理型合金（3000,4000,5000系）と熱処理型合金（2000,6000,7000系）とに分類されるが、5000系と6000系がボディに使われている。2000系と7000系のアルミが高力 Al 合金であるジュラルミンである。7000系のジュラルミンは超々ジュラルミンとも称され日本で開発された。またアルミの表面処理であるアルマイト処理も日本で開発され、アルミは日本と関係が深い材料である。軽量化の視点で事例を見ると、新幹線車両（1982年、200系車両）がスチールのアルミ化で9トンから7.5トンになることを考えると、材料置換の効果がイメージしやすい。

（1）エンジン

エンジンはボディに次いで重量割合が大きい。エンジン重量の1/4程度を占めるシリンダブロックのアルミ化が1980年代に始まり今日に至っている。2Lクラスの普通車に対し重量を分析すると、シリンダブロックは41kgから26kgと鋳鉄からのアルミ化により15kgの低減であった。シリンダヘッドカバーや吸気マニホールドなどは樹脂に置換されてきている。つまり、鉄からアルミ、そして樹脂の流れである。

ブロックのアルミ化においてライナは一般に鋳鉄である。部品の複合化といえる。アルミとマグネシウムを複合したシリンダブロックが登場（BMW・630i, 2004年）している。この事例では、シリンダ周辺部のアルミ部品をマグネシウムに鋳込んでいる。

鋳鉄ライナの代わりにFRM製スリーブの採用例（ホンダ・プレリユード, 1991年）がある。アルミと繊維（ Al_2O_3 繊維と炭素繊維）を複合することによってアルミの弱点である耐摩耗性を強化し、ボア間の肉厚の薄肉化を図ることによりエンジンのコンパクト化、軽量化に貢献している。一方ライナレスアルミシリンダも登場している。

（2）サスペンション

サスペンションの重量割合もエンジンに次いで大きい。アルミサスペンションパーツの軽量化事例（トヨタ・セルシオ, 2000年）を見ると、鋼材からアルミ鍛造で、ナックルは4.8kgから2.8kg、アップアームは2kgから1kgとなり、鋳鉄のキャリアをアルミ鋳物にすると5kgから3kgとなっている。オールアルミサスペンションに向けて進んでいる。

（3）アルミホイール

1980年頃、アフターパーツとして登場したアルミホイールは標準装備となり、バスやトラックなどにも普及している。ホイールは、ばね下重量を手軽に軽量化できる部品で、鋼板製と比べ、40-50%の軽減が図れる。マグネホイールは、製造が難しく腐食しやすいことから一般に普及するには課題が多い。軽合金製ホイールといえばアルミとマグネを指している。

(4) アルミボディ

アルミは従来から铸造や鍛造品がエンジンや足回りに使われているが、1986年からボディ（マツダ・RX-7、フロントフード）にも利用され始め、ボディの一部、例えばフロントフード、ルーフ、フェンダ、トランクリッドにアルミを採用する傾向が増加している。軽量化ばかりでなく、運動性能の向上に効果があるためである。

軽量化の事例（トヨタ・プリウス、2003年）を見ると、フロントフードで3.2kg、バックドアで6kg程度である。他のルーフの事例（三菱・ランサーエボリューション、2005年）では4kgくらい軽量になる。

アルミによりどれくらいボディの軽量化が図れるかをオールアルミボディのホンダ・NSX（1990年）について見ると、同サイズのスチールボディに比べ40%程度の軽量化である。この軽量割合は、Audi・A8（1994年）では約40%、Audi・A2（1999年）では約43%なので、アルミボディの重さはスチールボディの6割くらいになるといえる。

アルミの拡大に寄与する接合方法としてFSW（Friction Stir Welding、摩擦攪拌接合）が注目される。溶接でなく塑性流動によって接合するこのユニークな方法は、1991年に誕生し、新幹線の車両に採用されたが、自動車にも適用されている。

5. 樹 脂

非金属材料の代表といえるプラスチックは合成樹脂、あるいは単に樹脂といわれる。自動車分野では、複合材料の代表といえる繊維強化プラスチックも樹脂として取り扱っている。つまり、樹脂は、プラスチック単体、ポリマーアロイ、繊維強化プラスチックの使用形態がある。

自動車に使用されている主な樹脂は、ポリプロピレン（PP）、ポリ塩化ビニル（塩化ビニル樹脂、PVC）、ポリウレタン（PUR）、ABS樹脂、ポリエチレン（PE）、フェノール樹脂（PF）である。中でもPPは様々な改良や関連技術が開発された結果、適度な耐熱性、剛性、そして成形加工性を有し、自動車で使用される樹脂材料の約6割を占めるに至っている。国産車のほとんどに使用されている樹脂バンパは、樹脂（ポリプロピレン）にゴムを添加したものであるが、ポリプロピレンが日本で技術導入により生産されたのは1962年である。

樹脂はオイルショックの頃から軽量化目的で使用が増えてきた。その理由は、形状の出しやすさとコストダウンである。内外装部品はもちろんのこと、エンジンルーム内の機能部品をはじめとして、エレクトロニクスシステム、燃料システム、エアバックやシートベルトなどの安全システム、さらには駆動・シャシ系の一部にまで使用されている。樹脂は軽い材料（比重は0.9～2.5）だが、車両重量の1割程度を占めている。つまり樹脂なくしては自動車を製造し得ないといえる。

1940年代初め、アメリカでガラス繊維を不飽和ポリエステルで固める技術が開発された。複合材料の幕開けともいわれる繊維強化プラスチック（FRP）の登場である。1953年にはスチールのフレームに外板全部がGFRP製の車（GM、コルベット）が登場している。軽量化の視点で馴染

みのある代表的な樹脂部品を見てみる。

（1）ボディパネル

ボディ外板のすべてに樹脂を採用した車（マツダ・AZ-1，1992年）では，樹脂製外板は鋼板製に比べて剛性が低いので，ボディに必要な剛性は内板と構造部位で構成された構造体（スケルトンモノコックと呼んでいる）で受け持っている。樹脂のボディへの採用は，アルミに比べその後の広がりを見せていないが，ポリマーアロイのフェンダへの採用例（ホンダ・インサイト，1999年，ABS/PA）は認められる。

樹脂のボディへの適用箇所は，フロントフード，フェンダ，ドアなどであるが，アルミから樹脂（CFRP）製のフロントフードとなることで，約4 kg 軽くなっている事例（日産・GT-R V・SPEC II，2000年）が注目される。鋼板製20kg，アルミ製12kg，CFRP製8kgと材料の置換による軽量化の効果が大きい。フロントフードは交通事故時の歩行者保護の点からも重要な部位である。鉄，アルミ，樹脂が競合する過程でボディ形態の在りようも変化していくと思われる。

植物性プラスチック（バイオマスプラスチック）は，資源枯渇の視点から重視されるが，パネルに使用することが検討されている⁶⁾。植物のケナフから樹脂（リグニン）をつくり，リグニン樹脂とケナフ繊維，リグニン樹脂とマオ繊維の複合材料として使用する試みである。

樹脂（ポリマーアロイ）による軽量化事例を見ると，フェンダの事例（三菱・デリカD：5，2007年）では，鋼板製に比べ2kgの軽量化（左右2つで合計4kg）である。開閉時軽いことが求められるバックドアの事例（マツダ・プレマシー，2005年）では4.5kgの軽量化となっている。

（2）CFRP製プロペラシャフト

今日航空機の機体材料の代表となっているCFRPは，プロペラシャフトに採用（トヨタ・マークII，チェイサー，クレスタの最高級グレード，1992年）され，STKM（機械構造用炭素鋼管）製シャフトに比べ大幅に軽くなっている。三菱・パジェロ（1999年）のリヤプロペラシャフトの採用では，軽量化に加えて衝突時のプロペラシャフトの破損形態をコントロールする目的も兼ねている。

（3）燃料タンク

高密度ポリエチレン製燃料タンクがある。日産（プリメーラ，1990年）の採用例では，重さは9kgで，鋼板製の12kgに比べて約3kg軽くなっている。2000年以降，樹脂製タンクの採用は拡大している。

（4）吸気マニホールド

ポリアミド（ナイロン）製吸気マニホールドがある。富士重工業（サンバーディアス，1992年）の採用例では，重さは1kg，一方アルミ製では1.7kgである。排気マニホールドは高温にさらされるため樹脂は採用されていない。

(5) 樹脂ウインドウ

樹脂は鉄やアルミなどの金属ばかりでなくガラスとも競合している。1980年代よりガラス（比重2.5）から樹脂（ポリカーボネイト PC, 比重1.2）への動きである。2 Lクラスの乗用車に対し、ガラスウインドウの重量を分析すると33kgであり、軽量化の視点ではこれが大きな課題である。

PCの機械的性質において大きな特徴は耐衝撃性であるが、強靱な樹脂製ドアをアピールした事例（GM・サターン、1990年）が印象に残っている。この樹脂はポリマーアロイ（PC / ABS）である。

PCをガラスの代替として利用する場合、PCにハードコートの表面処理が必須である。PCはガラスに比べ軽量で成形性のよさからデザインの自由度はあるが、傷が付きやすいことと、紫外線により黄変など耐候性の問題がある。この大きな二つの弱点をカバーするためにPC表面にコーティングをして、車のルーフに実用（MCC・スマートフォーター、2007年）されている。

6. お わ り に

軽量化の視点で自動車材料を概観したが、主役の鉄、対抗するアルミと樹脂、という大きな流れを述べた。この流れに挑戦するマグネシウムについては機会を見て述べたいと思っている。

部品の軽量化は進んでいるが、利便性、排気ガスや安全対策のため搭載部品は増大し、2001年の乗用車の平均重量を見ると、1980年の1.38倍、1990年の1.13倍となっている。皮肉なことに商品としての車は重くなっているのが、地道に軽量化を進める必要がある。そこに材料が果たす役割は大きい。

車社会といわれ約50年、地球上7億台を超えている車がさらに生産され続けることを考えると、以前から話題に上っている石油枯渇と同様、鉱物資源についても考える必要がある。ワイヤハーネスの銅、めっきの亜鉛、バッテリーの鉛などの金属資源は鉄に比べかなり少ない。鉄鉱石さえも中国において数珠繋ぎのダンプに積まれていく映像を見ると、消えていくイメージが浮かぶ。化石燃料と同様、材料を使用するということは資源を無くしていることになる。その意味で、リサイクル再生材とその品質向上が求められるとともに植物材料などの新たな材料の開発が期待される。

参 考 文 献

- 1) 高 行男, JAMAGAZINE, 日本自動車工業会, 40巻, 2006年
- 2) 高 行男, アルミニウム, 日本アルミニウム協会, 13巻, 2006年
- 3) 高 行男, 工業材料, 55巻, 6号, 2007年
- 4) 高 行男, 自動車材料入門, 東京電機大学出版局, 2009年
- 5) 高 行男, アルミ VS 鉄ボディ, 山海堂, 2002年
- 6) 自動車技術会, 自動車技術, 62巻, 4号, 2008年