

# 自動車と材料（第3報，材料技術）

高 行男

## 1. はじめに

人類は火を扱って以来技術とともに歩んできたといわれるが、歩みから走り出しているように感じられる昨今である。IT（情報技術）、AI（人工知能）技術など、技術という用語を新聞やTVで多く見聞すると、自動運転車やロボットなど機械の自動化が急速に進展する時代になったと思われる。自動化技術の進化は社会を変えるが、どのように社会が変わるのか興味を持たれる。

技術という言葉を使うとき、自動車技術は馴染みがあるが、材料技術というと比較的馴染みがない。そこで本稿では、材料技術について考えてみたい。これまで、自動車の3大材料である鉄、アルミ、樹脂について軽量化の視点で検討した<sup>1-11)</sup>。その要点を整理し、機械工学の視点から材料技術の一端について私見も含め概観する。自動車技術の一つとして材料技術があることを述べた後、材料技術の視点から自動車材料の概要を述べ、最後に材料技術の一つが軽量化技術との視点から材料競合の概要とボディの軽量化について述べる。

## 2. 自動車技術

自動車産業の成長を支えてきた基本技術の一つとして材料技術の進化があるといわれる<sup>12)</sup>。つまり自動車技術の一つが材料技術である。自動車技術と言ってもその内容は多岐に渡る。その概要の一例を表1に示した<sup>13)</sup>。エンジン搭載車について基本技術が示されている。これをベースにEV（電気自動車）の場合は、EV技術としてモータ技術、バッテリー技術、インバータ技術などが列挙されると思われる。

HVやEVとともに自動運転の話題が多く見聞される。技術は社会を変化させるといわれるが、どのような車社会になるのかと思う昨今である。車を所有するか利用するか、75歳以上の運転免許保有者が540万人程度いる高齢化社会における車の在りようも含め、より良い車社会の到来が期待される。ここに新たな自動車技術が開発される。

表1 自動車技術

- |                     |
|---------------------|
| 1. 自動車原動機の環境対応技術    |
| 2. 自動車の制御技術         |
| 3. 自動車開発のシミュレーション技術 |
| 4. 自動車の運動性能向上技術     |
| 5. 自動車の材料技術         |
| 6. 自動車の安全技術         |
| 7. 自動車の計測解析技術       |
| 8. 自動車の人間工学技術       |
| 9. 自動車の生産技術         |
| 10. 自動車のデザインと空力技術   |
| 11. 自動車の振動騒音低減技術    |
| 12. 自動車の交通環境調和技術    |

20世紀を石油の世紀とすれば、21世紀はデータの世紀との指摘がある。理解不足かもしれないが、石油資源と同様にデータ（情報）を資源（経済資源）と考える時代ということかと思う。石油資源を活用した自動車がデータの世紀にどのような変貌を遂げ、後世にどのような自動車技術として整理されるのか、興味を持たれる。

### 3. 材 料 技 術

自動車をはじめとするものづくりにおいて、材料は重要である。その重要性についてトヨタ自動車創始者の豊田喜一郎氏の言葉を引用しておきたい。「自動車の製作に当たって何が一番大切であるかと申しますと、材料問題であります。材料問題を解決せずして自動車の製造に取り掛かることは、土台を作らずして家を建てるようなものです。(1937年発行トヨタ自動車躍進譜)」と述べている。1933年に自動車の試作が始まったが、当時の日本には総合工業としての自動車産業を確立するのに必要な技術的基盤がなかった。そこで工作機械をはじめ、電装品やゴム部品など未経験の技術分野の技術開発にも取り組み、基礎から自動車技術を確立していったとのことである<sup>6)</sup>。

材料（素材）があり、それを加工して初めて製品になるので、材料、材料加工はものづくりの基礎である。私見では、この基礎技術を材料技術と考えている。

材料の特性を理解していないと、形だけ作られたとしても使用中に破壊、破壊しなくても腐食により使用に耐えられない場合がある。一方、材料としては良いのだが、加工が容易でない加工コストが高くなり、特に量産車には使用されることにならない。

量産車においては、商品の視点から材料のコストや生産性（加工性）が重要となるが、同時に材料の均一性（信頼性）も重視される。材料の信頼性があるからこそ量産品の品質（性能）は保証される。低コストで性能を保証するものづくり力が、メーカーの優劣を決めてきたのではと思っている。

材料の信頼性の基本が強度信頼性といえる。引張強さや降伏強さが基礎となるが、耐久性を考えると、疲労強度が重要である場合が多い。疲労とは繰り返し荷重が作用すると材料の強さが低下する現象である。時間が経過して現れる疲労破壊は厄介な現象で、今日でもリコール問題の根底にある。

材料の使用条件や新たな材料の使用にあたり、強度信頼性の検討には膨大なデータが必要となる。つまり材料技術の成果を示すには時間がかかることを強調しておきたい。最近の材料技術の成果を示している事例は、機体の主要な材料となったCFRPであると思われる。軍用機や自動車にもCFRPが使用されてきたが、耐久性、信頼性、メンテナンスを含む品質の確保などを考えると、CFRPの航空機への採用は画期的であると思う。風車のブレードに使用され、鉄道車両のCFRP化の開発も進んでいるが、自動車においてはボディの骨格材料としてのCFRPの動向が注視される。

#### 4. 自動車の構成材料

材料技術の基礎となる材料について私見も含め概観する。

##### 4.1 自動車の3大材料

自動車（エンジン搭載車）は2-3万点の部品から構成されている。部品は材料の加工によって作られるので、当然多種多様な材料が使われている。材料に馴染みがないとイメージがわからないので、自動車工業会が調査した材料の構成比データから自動車で多く使われている材料を3大材料とする<sup>1)</sup>。

この視点から見ると、自動車の3大材料とは、鉄（鉄鋼）、アルミ（アルミニウム合金）、樹脂（合成樹脂、プラスチック）である。構造材料の視点からは、鉄とアルミをまとめ金属、樹脂、そしてセラミックスが3大材料と考えるとわかりやすいと思われる。3大材料というとき、繊維強化プラスチック（FRP）は樹脂として取り扱っている。FRPをはじめとする複合材料が期待される時代になったので、複合材料を加え4大材料として考えるほうが理解しやすいかもしれない。

複合材料の幕開けともいわれるFRPは、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ことにより登場した。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。Gはガラスを意味し、Gに代わりCがつくとカーボン（炭素）を意味する。つまり、マトリックス（母材のプラスチック）にガラスやカーボンの強化繊維を入れ、強度や剛性を高めた材料がFRPである。

強度や剛性を高めることは、構造材料の開発・改良にとって重要度が高い。鉄やアルミなど金属においては、合金（アロイ）化により強度を高めてきたが、剛性（弾性率）はあまり変わらない。アルミ合金であるジュラルミンは、超ジュラルミン、超々ジュラルミンと強度を高めた名称がある。鉄のハイテン（高張力鋼板）もジュラルミンのように、強度が高い980MPa級ハイテンは超ハイテンと称される。

複合材料の代表といえるCFRP（炭素繊維強化プラスチック）は、レース車やスポーツカーなどの高級車で使われてきたが、広く知られるようになったのは比較的最近である。話題となったボーイング787（2011年）では、機体の半分をアルミからCFRPに代替している。この材料の比重は1.6でアルミ（比重2.7）より軽く、その強度は機体に用いられるアルミ（500MPa）に比べ5倍程度高いといわれる。

炭素繊維は1960年代に登場した材料（素材）である。表2には、炭素繊維複合材料の概要を示した<sup>7)</sup>。雑誌でカーボンボンネット、カーボンブレーキなどの表現がある。カーボン（炭素）繊維の意味で使われているが、両者の材料特性は異なる。前者の母材は樹脂であるのでCFRP製ボンネット、後者の母材は炭素であるのでC/Cコンポジット製ブレーキとなる。C/Cコンポジットをブレーキとして最初に導入されたのは、超音速機のコンコルド（1969年）であったが、その

表2 炭素繊維複合材料

種類	マトリックス材	用途例
CFRP	エポキシ, 不飽和ポリエステル, ポリイミドなどの熱硬化性樹脂	航空・宇宙関係部材, スポーツ用品
CFRTP	ナイロン, ポリカーボネート, ポリアセタールなどの熱可塑性樹脂	OA 機器, 紡績部品
C/C	炭素	ロケット用部材, 航空機・レーシングカーブレーキ材
CFRM	金属	航空・宇宙用部材

後レース車や高級車の一部に使われている。C/C コンポジットの疲労特性や摩擦特性について調査する機会があったが、繊維（繊維を束ねたヤーン）は肉眼で識別できる。

カーボンと言っても多様である。炭素材料としてカーボンというとき、カーボン繊維、カーボンナノチューブ、タイヤのゴム強化に使うカーボンブラックなどがある。タイヤが黒いのはこのカーボンブラックによる。微小な機械（マシン）をマイクロマシン<sup>14)</sup>というが、さらに小さい意味でナノマシンと称される。同様な意味でナノ材料といわれるのが、カーボンナノチューブやセルロースナノファイバである。

#### 4.2 材料の概要

前節で述べた材料の概要を述べ、材料のイメージを図りたい。まず鉄についてであるが、一般に鉄というのは鉄鋼を意味する。つまり鉄（鑄鉄）と鋼（スチール）である。両者の特性は異なるので、鋼鉄というときスチールを指して使用される。

かつて鉄は国家なりと称され、鉄則などの用語があることから、鉄は社会と密接な材料である。レースの世界では鉄の心臓がドライバーに求められるという。エッフェル塔や重機を見たとき、頑丈で強靱な鉄のすごさを再認識し、鉄は材料の王と称して良いと思った。

金属材料は多岐多様であるが、鉄と非鉄に大別されるので、鉄は金属の代表とか、材料の主役とネーミングをつけた。アルミについては、鉄が材料の王なら女王と称して良いと思われるが、非鉄金属の代表、軽金属の主役などのネーミングをつけている<sup>1, 6)</sup>。

樹脂については、非金属の代表（主役）とのネーミングである。CFRP を重視する視点では、CFRP は複合材料の代表（主役）が良いと思っている。時代の要請により CFRP とともに軽金属に対する期待が高くなっている。軽金属とは、文字通り軽い（比重が小さい）金属で、アルミ、マグネ（マグネシウム）、チタンを指す。

馴染みのある貴金属は金、銀、白金などである。白金は自動車（エンジン搭載車）において排ガス浄化の触媒として用いられるが、これを構造材料に対比して機能材料という。つまり材料は構造材料と機能材料に大別される。

構造材料にとって、強度、剛性、軽量、靱性、耐熱性、耐食性、耐摩耗性などの特性が重要である。セラミックスは耐熱性の点から大変優れた材料である。一方樹脂は、耐熱性の点から劣る。

表3 エンジンバルブの材料

材料		比重 (密度 g/cm <sup>3</sup> )	引張強さ (MPa)				縦弾性 係数 GPa	熱膨張係数 10 <sup>-6</sup> /°C	熱伝導率 W/m°C
			RT 室温	400°C	500°C	800°C			
耐熱鋼	SUH3	7.75	1100	—	780	100	205	11.9	23.8
	SUH35	7.73	1150	—	870	350	206	18.5	20.9
チタン合金	Ti-6Al-4V	4.43	850	510	370	—	110	8.8	7.11
金属間化合物	TiAl	3.80	410	—	350	360	170	10.3	14.2
チタン基複合材料 (MMC)		4.55	1300	940	850	520	140	9.6	11.6
セラミックス	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3.26	800	—	800	800	310	3.2	20.9

したがって、FRPは母材が樹脂（プラスチック）なので耐熱性が弱点となる。

ディーゼル車の環境問題で、DPF（Diesel Particulate Filter）が時々報道されるが、その材料がセラミックス（炭化ケイ素）である。セラミックスは、鉄やアルミなど金属、樹脂に次ぐ第3の素材として1980年代大変話題になった材料で、セラミックス製ターボチャージャーの自動車への搭載（日産フェアレディZ，1985年）は画期的であったと思っている<sup>3)</sup>。

タービン翼にセラミックスの代表といえる窒化ケイ素（比重3.2）が使われているが、翼材のインコネル（比重8.5）に比べ軽い。インコネルは非鉄金属のニッケル合金で、耐熱合金（超合金）である。窒化ケイ素の強度特性を調査する機会があったが、一定荷重下でも時間の経過に伴い破壊する現象（静疲労）があり、鉄やアルミなど金属とは異なる強度特性を持っている<sup>15)</sup>。

耐熱性の視点から、エンジンバルブの材料を表3に示した<sup>6)</sup>。量産車のバルブは鉄（耐熱鋼，SUH）であるが、吸気バルブ（SUH3）と排気バルブ（SUH35）の材質は異なる。表には実車搭載試験段階にあった窒化ケイ素も参考に示した。この事例は材料技術のすごさを示していると思うが、市販車への搭載に至っていない<sup>3)</sup>。材料技術の成果を示す機会に恵まれない事例もある。

そのほかの事例の材料は、軽く耐熱性が良いチタンである。チタンにも複合材料があり、表中の吸・排気バルブに採用（トヨタ・アルテッツァ，1998年）されたチタン基複合材料は、チタンにTiB粒子を分散させたものである。

## 5. 軽量化技術

材料技術の一つが軽量化技術と考えられる。一般にもものづくりにおいて軽量であることは重要であるが、特に自動車は移動体であるので、軽量化は大変重要である。軽いと移動し易く、移動に要するエネルギーが小さいためである。エンジン搭載車の場合燃費が良くなり、EVにおいては走行距離の増大となる。

自動車の軽量化を材料の面から大きくとらえると、鉄からアルミ、アルミから樹脂の使用という流れである。視点を変えれば、鉄、アルミ、樹脂は競合し、自動車の進化に寄与してきたといえる。身近な飲料容器の場合も鉄（スチール缶）、アルミ（アルミ缶）、樹脂（ペットボトル）が

競合している。

自動車における材料の競合を概観するため、表4には、2Lクラスの乗用車（エンジン搭載FF車、空車重量1214kg）の重量分析の結果を示した<sup>2)</sup>。ボディを見ると、スチールボディの骨格であるメインボディが261kg、ドアと前後フードで82kgである。つまり車重の3割近くをボディ（ホワイトボディ）が占めている。ボディの骨格材料として鉄、アルミ、CFRPの競合がある。

このクラスの量産車で、ボディ外板のフェンダに樹脂（PPE/PAなどのポリマーアロイ）が採用された事例では2kg（左右で計4kg）程度軽くなる。剛性を確保すると厚くなりコストアップとなる。コストを下げようと薄くするとぺらぺら感がでる。ちょうどその分かれ目あたりに軽量化効果との兼ね合いで採用するとのことである。特殊な事例では、オール樹脂製外板の採用車（マツダAZ-1、1992年）がある。

ボディのキャビン（客室）を構成するガラスについて見ると、重量は33kgで、結構重い。そのため、1980年代よりガラス（比重2.5）から樹脂（ポリカーボネート、比重1.2）への代替が検

表4 2LクラスのFF車（ガソリンエンジン搭載車）の重量分析

空車重量 1214kg

部位	kg	%
エンジン	141.4	11.6
オートマチックミッション	70.7	5.8
ドライブ軸シャフト	13.0	1.1
フロントサスペンション	59.6	4.9
リアサスペンション	27.7	2.3
ブレーキ	15.8	1.3
ホイールハブ	57.9	4.8
ホイール	30.8	2.5
タイヤ	32.0	2.6
スペアタイヤ	10.5	0.9
ステアリング+パワステ機構	21.3	1.8
燃料タンク+燃料配管	19.4	1.6
排気管（含む触媒）	23.4	1.9
メインボディ	260.7	21.5
ドア+前後フード	81.9	6.7
窓ガラス	33.2	2.7
シート	45.0	3.7
シートベルト	5.3	0.4
内装樹脂部品	39.4	3.2
バンパー	13.6	1.1
エアコン	16.8	1.4
バッテリー	10.5	0.9
照明	6.5	0.5
配線	18.5	1.5
合計	1054.9	86.9

討されてきたが、昨今クローズアップされ、樹脂ウインドウとも称される。その背景には材料、射出成形そして耐傷付き性のコーティングなどの品質を保証する材料技術の進歩がある<sup>2)</sup>。

エンジンにおいて、鉄とアルミの競合の代表的事例がエンジンプロックである。2Lクラスのシリンダブロックの事例では、41kgから26kgと鋳鉄（比重7.1）からアルミの置換により15kgの低減であった<sup>6)</sup>。このアルミ化において、ライナには摺動特性からねずみ鋳鉄が使用されている。つまり材料の複合化により機能を果たしている。特殊な事例では、アルミとマグネを複合したシリンダブロック（BMW・630i、2004年）がある。

アルミの複合材である繊維強化金属（FRM）の事例を見ると、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（アルミナ繊維と

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。この事例は、鉄の代替としてアルミを考えると、既存のアルミでは代替できないため材料開発が行われたものである。最近、自動車部品へのアルミ使用拡大のため、CNT（カーボンナノチューブ）を分散させたアルミの複合材が検討されているとのことで、その動向が注視される。

このように、軽量化のため鉄の代替材料を使用するとき、使用環境における機能保持の視点から代替が難しい場合がある。見方を変えると、優れた材料である鉄の代替は容易でない場合が多い。トランスミッションにおける歯車について見ると、鉄であり、強靱鋼とも称される構造用合金鋼が使用される。一般にクロムモリブデン鋼が使用されるが、レース車にはグレードアップしたニッケルクロムモリブデン鋼が使用される。また排気管など排気システムにはステンレス鋼が多用される。比較的馴染みのあるこれらの鉄は特殊鋼とも称され、自動車におけるその地位は不動である<sup>1)</sup>。

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、耐食性や耐熱性など使用部品の要求される機能に対応するように改良されてきた材料である。サスペンションにおける特殊鋼（ばね鋼）の代替も難しいが、特殊な事例として、板ばねにGFRPの採用例（日産バネット、1985年）がある<sup>16)</sup>。ばね鋼（SUP9）の板ばねに比べ、重さが2割程度と大幅な軽量化を達成している。

樹脂による軽量化の代表的な事例には、ポリアミド（ナイロン）製吸気マニホールド（富士重工業・サンバーディアス、1992年）や高密度ポリエチレン製燃料タンク（日産・プリメーラ、1990年）がある。樹脂の弱点である耐熱性から、樹脂の吸気マニホールドはあるが、排気マニホールドはない。同様に、燃料タンクには樹脂の採用例があるが、オイルパンにはない。

オイルパンのマグネの採用例（ホンダ・インサイト、1999年）では、改良されたマグネが使用されている。つまり既存のマグネ（AZ91）より耐熱性を高めたものが開発され、使用されている<sup>6)</sup>。マグネの比重は1.74なので、軽さはアルミの2/3と実用金属中最も軽く、比強度も高い。鉄、アルミ、マグネの競合の視点からマグネの材料開発・改良が進むことを期待している。

ステアリングについて見ると、電動パワーステアリングの採用で油圧式に比べ1kg程度軽くなるが、ハンドル（ステアリングホイール）の骨格（芯金）がアルミからマグネに代替されるきっかけは、エアバッグ搭載による重量増の対処であると聞いている。エアバッグの重量は運転席1kgである。軽量化の程度は大幅に異なるが、EVのボディ開発において、CFRP製キャビン（BMW・i3、2013年）の採用は、電池の積載重量の対処としてなされている<sup>17)</sup>。

タイヤの材料であるゴムについて見ると、タイヤの骨格であるカーカスは、ゴムを繊維で強化した繊維強化ゴム（FRR）である。つまりゴムの複合材料で、ナイロンやポリエステルなどの合成繊維（樹脂）が使用されている。ナイロンはエアバッグに、ポリエステルはシートベルトに使用され、衝突時の乗員保護に重要な役割を果たしている。

タイヤにはSBR（スチレンブタジエンゴム）などいくつかの種類が使われているが、ゴムの代替材料は見当たらない。したがって、タイヤの軽量化は鉄のハイテンと同様、ゴムの強度を上げてゴムの使用量を減らす方向となる。

軽量化と言えばタイヤホイールではないかと思っている。レース車の場合はアルミに比べ軽いマグネホイールが主流であるが、加工の難しさや腐食の問題のため量産車には用いられていない。最近、アルミスポークとCFRPリムのタイヤホイールが登場し、アルミホイールより2割程度軽量化したと報告されている<sup>18)</sup>。アルミ、マグネ、CFRPの競合の視点から今後の動向が注視される。

表中の配線に使われている材料は、導電性が高い銅（非鉄金属）である。搭載部品の増大とともに配線回路は増加し、銅電線の重さも軽視できない。EVにおける銅の使用量はガソリン車の3-4倍といわれるので、今後重要性が増す材料と思われる。しかし、銅（比重8.9）は鉄（比重7.9）より重い。そのため、導電性は銅に比べ若干低い軽いアルミによる代替が検討されている。その一例が、バッテリーケーブルのアルミ化の事例である<sup>19)</sup>。つまり銅はアルミと競合する。

一般に使用されている樹脂バンパは、ポリプロピレン（PP）にゴムを添加したものである。PP（比重0.91）が日本で技術導入により生産されたのは1962年であるが、今日多用されている樹脂である。材料の改良により部品の薄肉化（スリム化）が図られ、内装樹脂部品の軽量化に寄与している。バンパとして必要な剛性と耐衝撃性を確保しながら、バンパの肉厚を薄くして軽量化を図った事例（マツダCX-5、2012年）など、地道な軽量化が継続してなされている。

自動車は部品の集合体なので、各部品に対し1gでも軽くする努力が必要との言葉を聞いたことがある。この言葉が自動車における軽量化技術の原点と思われる。

## 6. ボディの軽量化技術

ボディが一番重いので、その軽量化は車の在りように関係なく重要である。軽量化には設計分野の構造最適化をベースに、高強度化した材料の使用による軽量化とアルミやCFRPなどの材料置換による軽量化がある。

### 6.1 鉄の高強度化

量産車のスチール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（SPC）が使われてきたが、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。ハイテンの剛性（弾性率）は通常の鋼板（SPC）と同じであるので、ハイテン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。

ハイテンにもいろいろなものがある。合金元素の添加や熱処理などにより高強度化が図られてきたハイテンと通常の鋼板（SPC、冷間圧延鋼板）の特性を比較したデータを図1に示した<sup>3)</sup>。SPCより引張強度が高い固溶強化型、析出強化型そして焼もどしマルテンサイトのハイテンを



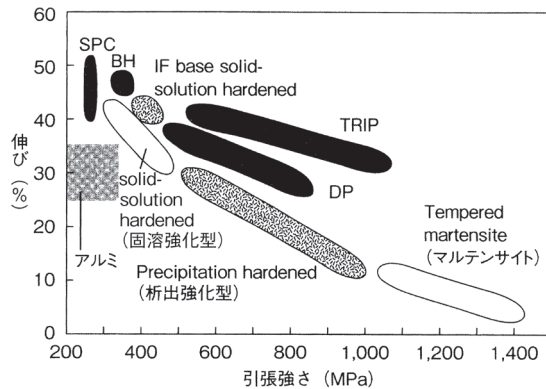


図1 冷間圧延鋼板（SPC）と各種高張力鋼板の機械的特性

見ると、強さが上昇するに従い伸び（破断伸び）が低下することがわかる。つまり材料が強くなると延性は低下し、プレス加工が難しくなる。アルミボディに使用されているアルミのデータも図中に併記したが、アルミの成形性はSPCより劣る。

複合組織を作り出して強度と加工性を高めたハイテンが、図中の複合組織型高張力鋼板（DP、TRIP）である。このタイプは、同じ高強度であっても従来の析出強化タイプに比べ延性が高い。DP鋼やTRIP鋼は衝突エネルギーの吸収部材であるサイドメンバに採用されている。図には示していないが、新たな複合組織型高張力鋼板（引張強度1200MPa、最小伸び14%）が開発され、センタピラーに採用されている<sup>20)</sup>。このハイテンは、ドアインパクトビームなどに採用されている焼もどしマルテンサイトのものより延性が高い。このように、軽量化のため鉄を高強度にする流れからその加工を考えた材料開発が行われている。ハイテンの開発・改良のすごさは、材料技術の成果を示していると思われる。

世界鉄鋼協会によるスチールの超軽量ボディULSAB（Ultra Light Steel Auto Body, 1998年）は、ハイテンを多用してボディの軽量化を図った事例である。25%程度の軽量化となっているが、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<sup>6)</sup>。つまり軽量化には材料とともに加工技術も重要である。

## 6.2 材料置換による軽量化

アルミと樹脂（CFRP、PC）による軽量化の事例としてボディのルーフを取り上げ、その概要を述べる。

### 1. アルミ

オールアルミボディは1990年（ホンダNSX）に登場し、大変話題となった。その後アウディA8（1994年）やアウディA2（1999年）、テスラ・モデルS（2012年）などが続いている。

NSXは構成材料重量の3割がアルミという画期的な車である。普通のスチール車に比べ、ア

ルミの活用によりボディだけで140 kg, 総重量で約200kgの軽量化を達成している<sup>6)</sup>。軽量化の一例としてルーフを見ると, アルミルーフ(厚さ1.2mm, 重さ2.6kg)は, スチールルーフ(厚さ0.85mm, 重さ5.4kg)の半分くらいの重さである。

アルミルーフの厚さがスチールルーフの厚さより約1.4倍大きいのは, べこつき感のためである。薄いとべこべこする。べこつき感を示す張り剛性は, 弾性率(ヤング率) $E$ と板厚 $t$ が関係し,  $Et^3$ がパラメータとなる。

アルミの $E$ は69GPa, 鉄(スチール)の $E$ は206GPaなので,  $Et^3$ の値が両ルーフで等しくなるためには,  $t_A = 1.44 t_S$ となる。つまりアルミの厚さ $t_A$ は, スチールの厚さ $t_S$ の1.44倍となる。同じ材料ならルーフの厚さ(体積)が増すと重くなる。しかし, アルミの比重2.7(密度 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ )に対し, 鉄(スチール)の比重7.9(密度 $7.9\text{g}/\text{cm}^3$ )のため, アルミの厚さが増してもアルミルーフの質量(重量)は, スチールルーフに比べ小さくなる。

## 2. 樹脂

### (1) CFRP ルーフ

CFRPの材料特性は, CF自体の性質や母材に含有させるCF量により異なる。また, CFRPの強度・剛性には異方性がある。つまり繊維方向とそうでない方向では強度・剛性が異なる。そのため, 一般に繊維方向( $0^\circ$ )のものに, 繊維に直角方向( $90^\circ$ )そして繊維に $45^\circ$ 方向のものを積層して部材を構成するといわれるが, その内容は明らかでない。

その前提で, CFRPルーフ(スバルWRX STI tS, 2010年)の事例を見ると, 厚さ0.7mmで重さ10kgのスチールルーフに対し, CFRP製では厚さ1.6mmで重さが5kgである。一般に鉄からCFRPの代替で重さは半分くらいになるといわれるが, そのことと合致している。アルミルーフにしたらどの程度の重さになるかと考え, 前述した計算を行うと, アルミルーフでは5kg程度となる。軽量化の視点から見ると, CFRPルーフとアルミルーフは同等かと思われる。

一方, CFRPフロントフードの事例(日産GT-R V・SPEC II, 2000年)を見ると, スチール製20kg, アルミ製12kg, CFRP製8kgと材料置換による軽量化の効果が大きい。このフードは, オートクレーブを必要としないRTM成形法で生産されている。今日では当時のエポキシ硬化時間の短縮など大幅な成形法の改善がなされている。なお, CFRPの母材はエポキシ樹脂が一般的である。他の樹脂に比べ, 耐食性が良く, 硬化中の収縮が少なく, 強度が高いことなどのためである<sup>21)</sup>。

CFRPに関する報告データが限られているので, 採用部位によるものか使用しているCFRPの違いによるものか, 今後検討する必要があると考えている。NSXが登場したころのスチールボディは, アルミ代替により4割程度の軽量化となっているが, CFRPの代替によりどの程度の軽量化が達成されるのか注視される。

### (2) PC サンプルーフ

軽量化の視点では, 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。PC(ポ

リカーボネート、比重1.2）は、1950年代に開発された樹脂で、ガラス（比重2.5）の代替が検討されている。

1.6m<sup>2</sup>のサンルーフの事例（トヨタ・プリウス α, 2011年）を見ると、ガラス製の20kgからPC製では12kgということで、PC製はガラス製の6割程度の重さとなっている。使用上軽くすることが求められるリムーバブルルーフの事例（GM・コルベット, 2005年）を見ると、ガラス部分が6kgからPCにして3.6kgとなっているので、PCのルーフへの採用により重さはガラスの6割程度になるといえる<sup>2)</sup>。

スチールルーフを考え、スチール（比重7.9）の厚さを0.7mmとして1.6m<sup>2</sup>ルーフの重さを求めると、9kg程度である。つまりPCルーフの12kgより軽い。したがって、PCによる軽量化はガラスの重さに対するものである。当然、ガラスの面積を小さくすれば軽量化となる。しかし開放感や視界の確保のためガラス面積の縮小は制限される。そこで軽量化のため、樹脂ウィンドウが必要とされる。

以上、ボディの軽量化の一端を述べたが、ボディは、その構造も含め材料とその加工法、そして加工部品の接合法などが今後も検討され、進化していくものと思われる。空飛ぶ車も話題になっている昨今、軽量化技術の進化が求められるが、そこに樹脂（CFRP, PC）と軽金属（アルミ、マグネ）の果たす役割が大きいと考えられる。

## 7. お わ り に

技術という言葉をよく見聞するようになったので、自動車の材料技術について考え、その一端を述べた。私見では、ものづくりの対象は広範囲であるが、ものづくりの基礎技術が材料技術と考えれば理解しやすいと思っている。

材料技術の一つが軽量化技術であるとの視点から、材料競合の概要とボディの軽量化の一端を述べた。軽量化の視点で自動車材料を見ると、主役の鉄、対抗するアルミと樹脂、そして挑戦するマグネと考えれば理解しやすいと思われる。

本稿が材料に興味を持つ一助になれば幸いである。

## 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, JAMAGAZINE, 日本自動車工業会, 44巻, 2010年
- 3) 高 行男, JAMAGAZINE, 日本自動車工業会, 47巻, 2013年
- 4) 高 行男, アルミニウム, 日本アルミニウム協会, 13巻, 2006年
- 5) 高 行男, 工業材料, 55巻, 6号, 2007年
- 6) 高 行男, アルミ VS 鉄ボディ, 山海堂, 2002年
- 7) 高 行男, 自動車材料入門, 東京電機大学出版局, 2009年
- 8) 高 行男, ポリファイル, 47巻, 551号-554号, 大成社, 2010年
- 9) 高 行男, 中日本自動車短期大学論叢, 第40号, 2010年

- 10) 高 行男, 中日本自動車短期大学論叢, 第44号, 2014年
- 11) 高 行男, 浅野 威, 中日本自動車短期大学論叢, 第48号, 2018年
- 12) 藤森義次監修, これからの自動車材料・技術, プラスチック材料編, 大成社, 1998年
- 13) 自動車技術会編集, 自動車技術シリーズ5・自動車の材料技術, 朝倉書店, 2008年
- 14) 高 行男, 機構学入門, 東京電機大学出版局, 2008年
- 15) 高 行男, ファインセラミックス, 55号, 与野書房, 1991年
- 16) 日経マテリアル&テクノロジー, 設計技術者のためのやさしい自動車材料, 日経BP社, 1993年
- 17) 山根 健, ポリファイル, 51巻, 599号, 大成社, 2014年
- 18) 次世代自動車技術最前線2017, 自動車技術会, 2017年
- 19) 日本アルミニウム協会, アルミニウム, 工業調査会, 2007年
- 20) オートテクノロジー2015, 自動車技術会, 2015年
- 21) A.KELLY 著・村上訳, 複合材料, 丸善, 1971年