

自動車と材料（第4報，複合材料）

高 行男

1. はじめに

社会の進化は多様化といわれるが，自動車も多様化している。従来のエンジン車に加え EV，HV，PHV，FCV さらには自動運転車や空飛ぶ車などが話題になっている昨今，どのような車社会になるか興味が持たれる。

車社会は環境問題と交通事故を念頭に置く必要があると考えられるので，環境問題と同様に，交通事故の件数や死傷者数に対する問題意識が深まればと思っている。昨年（2018年）の交通事故は43万件程度で，死者数は3532人である。人生100年時代といわれる昨今，75歳以上の運転免許保有者が500万人を超える高齢化社会における車の在りようも含め，より良い車社会の構築が求められる。

社会が多様な人々から構成されるように，自動車も多様な材料から構成されている。時代の要請により材料は開発・改良そして改質されてきたが，構造材料の視点から見ると，軽量性，強度と剛性そして耐熱性が重視され，今日に至っている。自動車は商品であるので，コストも加味され材料は選定され使用される。

材料開発の事例の一つが複合材料であるが，比較的馴染みがない。そこで本稿では，複合材料について考えてみたい。比較的馴染みのあるカーボン（カーボン繊維）というとき，CFRP（炭素繊維強化プラスチック）を指している場合が多く，CFRP は複合材料の代表といえる材料である。

これまで，自動車の3大材料である鉄（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）について軽量化の視点で検討した¹⁻¹²⁾。その要点も整理し，複合材料について私見も含め概観した後，CFRP の概要を述べ，最後にボディを構成する材料の多様化の一端を述べる。

2. 複 合 材 料

材料の性質には，長所があれば短所もある。長所は伸ばし短所は小さくするには，つまり軽くて強くてもろくない理想的な材料の追求の一つが，材料の複合化である。複合材料（composite materials）とは，いくつかの素材を組み合わせで作った材料のことで，単一の材料にはない優

れた特性が得られる。

複合材料は、主体となる素地（母材、マトリックス）の中に、分散材あるいは強化材とよばれる微小形状の素材を分散させたものであるが、母材と強化材の組み合わせの種類が多い。つまり複合材料といっても、その内容は多岐にわたる。自動車では繊維強化の複合材料が主なものであるので、その概要を述べる。

2.1 繊維強化プラスチック

軽量であるプラスチック（樹脂）を母材とし、内部に強化繊維を含有させることで、比強度が著しく高い複合材料が得られる。これが、繊維強化プラスチック（Fiber Reinforced Plastics, FRP）である。樹脂は自動車の軽量化のために優れた材料であるが、強度や剛性が低い。そこで繊維を強化材として樹脂に複合する。

FRP といっても繊維と樹脂の組み合わせで多くの種類があるが、代表的な FRP の特性値を表 1 に示す⁷⁾。ガラス繊維を使用した FRP が GFRP (Glass-FRP), 炭素繊維で強化したものが CFRP (Carbon-FRP) である。アラミド繊維（ケブラー）の場合 AFRP (KFRP) と称される。CFRP は、強度、剛性（弾性率、ヤング率）ともに優れていることがわかる。留意する点は、樹脂は耐熱性に劣る。したがって、FRP は母材が樹脂なので耐熱性が弱点となる。

表 1 FRP の特性値

項目 \ FRP	GFRP	CFRP	AFRP (KFRP)	(参考) Al 合金
密度 [g/cm ³]	2.0	1.6	1.4	2.8
引張強さ [MPa]	1180	1760	1470	470
ヤング率 [GPa]	41	125	78	72
比強度 (引張強さ / 密度)	590	1100	1050	168
比弾性率 (ヤング率 / 密度)	21	78	56	26
熱伝導率 [W/m・K]	58	50	—	134
線膨張係数 [10 ⁻⁶ /K]	8	0.7	—	23

GFRP・CFRP・AFRP のマトリックスはエポキシ樹脂、繊維含有率60Vol.%の一方積層板の繊維方向の特性である

2.1.1 ガラス繊維

溶かしたガラスを細いノズルから引き出し、伸ばしながら急冷して、数ミクロンから数十ミクロンの直径に繊維化したものである。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。

(1) ボディ外板

表 2 に鉄（鋼板）から代替されている樹脂（プラスチック）とその複合材（GFRP, CFRP）の採用事例の一端を示す⁶⁾。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

表2 ボディ外板への樹脂とその複合材の採用例

メーカー	車名	部 位	材 料
日産	PAO	フロントフード フェンダー	GFRP PA/PPE
	X-TRAIL	フェンダー	PA/PPO
	スカイライン GT-R V・SPEC II	フロントフード	CFRP
ホンダ	インサイト	フェンダー	ABS/PA
マツダ	AZ-1	フロントフード、ドア、トランクリッド フェンダー クォーター	GFRP PA/PPE PUR

採用される事例は、比較的多く認められる。ポリマーアロイという用語は、金属のアロイ（合金）にならっている。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。

（2）リーフスプリング

サスペンションにおける鉄（ばね鋼）の代替は難しいが、特殊な事例として、板ばね（リーフスプリング）にGFRPの採用例（日産バネット, 1985年）がある。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。

（3）吸気マニホールド

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。材料について厳密に言えば、前者の吸気マニホールドはガラス繊維で強化されたナイロンである¹⁴⁾。

この樹脂製吸気マニホールドの重さは1kg, 一方アルミ製では1.7kgである。その後の事例（富士重工業・レガシー, 2009年）を見ても、樹脂製の重さはアルミ製の約6割である。なお、樹脂の弱点である耐熱性が問題となるため、樹脂製排気マニホールドはない。

2.1.2 炭素繊維

炭素繊維はガラス繊維に比べ軽く、かつ強度と剛性に優れている。ポリアクリルニトリル（PAN）の繊維を焼いて作るPAN系が主流となっている。PAN繊維に酸素を吹き込みながら200-300℃の高温炉に通した後、1200-1500℃の高温で熱すると炭素同士が結合した繊維ができる。この炭素化した繊維を引き続き2200-3000℃で引張りながら熱すると、黒鉛化した繊維（Graphite Fiber）が得られる。

自動車で使用されるCFRPは、車メーカーと炭素繊維の素材メーカーの提携で利用されているので、CFRPといってもその特性は異なる。つまり炭素繊維やエポキシ樹脂、成形方法の改良が進められ、CFRP部品として採用されている。

少し余談になるが、CFRPの強靭さは競技用義足の映像を見ると感じられる。CFRP製義足は1980年代に開発されたようであるが、トラックや跳躍用義足の進化は著しい。どのスポーツ競技

であれ、用具を工夫して競技に出る選手にとって、その性能は勝敗を決める大きな要因である。パラリンピックでは、人馬一体のように選手と義足の一体化の勝負かもしれない。選手の能力を最大限発揮させる義足（用具）の形状は、CFRP シートの積層により作られる。自動車の CFRP 部品と同様に、繊維方向の配向積層など材料技術が果たす役割が大きいと思われる。

軽くて、強いというキーワードが特に求められる航空機において、CFRP は機体材料として注目されているが、自動車でもボディの外板ばかりでなく骨格材としての役割が期待される。その概要については後述（4章）する。

2.1.3 アラミド繊維

1960年代に登場したアラミド繊維は、ケブラー（商品名）とも称される。ガラス繊維の強さと石綿（アスベスト）の耐熱性を有する繊維を目指して開発された合成繊維である。アラミド繊維の比重は1.4程度で、ガラス繊維（比重2.5）や炭素繊維（比重1.8）に比べ軽く、耐衝撃性に優れている。アラミド繊維は、高強力で耐熱性にも優れたパラ系と、難燃性、耐熱性の高いメタ系に分けられる。後者のメタ系はレーサー服などに使われている。

パラ系アラミド繊維は、樹脂、ゴム、コンクリートなどの補強に使われている。自動車では、2.3節で述べるタイヤ用補強材、つまりゴムの補強繊維として使われる。また、3章で述べるブレーキパッドなどの摩擦材に使われている。

2.1.4 セルロースナノファイバ

最近話題となっている繊維が、セルロースナノファイバ（CNF）である。雑誌で鉄より強い木繊維といわれる。植物由来の原料から作ったこのファイバを用いたドアやフロントフード（ボンネット）の試作事例では、5割程度の軽量化を達成している。

2.1.1項で述べた樹脂製吸気マニホールドでは、ガラス繊維の代替にCNFを使用し、1割強の軽量化を達成している。コストが炭素繊維より高い現状であるが、新たな複合材料の登場として注視される。

2.2 繊維強化金属

母材（マトリックス）にアルミなどの軽合金を用い、繊維強化したものを繊維強化金属（Fiber Reinforced Metal, FRM）と称する。軽合金のみでは強度や耐摩耗性を満足できない部品にFRMを用いる。製造温度が最低でも300-400℃になるため、強化繊維には熱に強い金属繊維（タングステンやスチール）やセラミックス繊維（炭化ケイ素やアルミナ）が用いられる。

(1) ディーゼルエンジンのピストン耐摩環

FRM が初めて自動車材料として使用されたのは1980年代で、ディーゼルエンジンのピストン耐摩環である。ディーゼルエンジン用ピストンのトップリング構造は高温高負荷環境下での耐摩耗性が

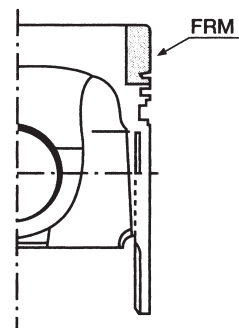


図1 ピストン耐摩環

必要である。そこで、ニレジスト鋳鉄の代替として使用された。図1に示すように、リング溝にアルミナ繊維などを鑄くるみ、リング溝の耐摩耗性や耐焼付き性の向上が図られている⁶⁾。

(2) コンロッド

コンロッド（コネクティングロッド）の軽量化は、エンジン性能の向上だけ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する。鉄の代わりにチタンを採用して軽量化を図った事例（ホンダ・NSX、1990年）があるが、アルミ製コンロッドをスチール（ステンレス）ファイバで強化したFRMコンロッドの採用例（ホンダ・シティ、1985年）がある。その概要を図2に示す¹³⁾。このFRMコンロッドは、必要な強度を確保しながらも、鋼製に比べ3割の軽量化となっている。

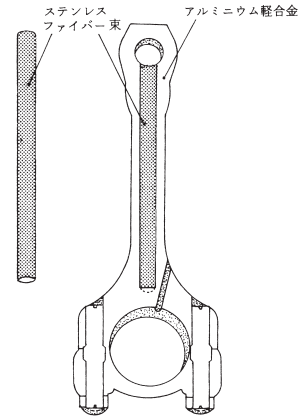


図2 FRMコンロッド

(3) シリンダライナ

一般に用いられる鋳鉄ライナの代わりにFRM製スリーブの採用例（ホンダ・プレリウド、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。

2.3 繊維強化ゴム

繊維強化ゴム（Fiber Reinforced Rubber, FRR）の自動車における用途例を見ると、タイヤやタイミングベルトなどがある。

(1) タイヤ

タイヤはいろいろな種類のゴムで構成されている。天然ゴムと合成ゴム（スチレンブタジエンゴムなど）であるが、タイヤの骨格であるカーカスと路面からの衝撃を吸収してカーカスを守るベルトにFRRが用いられている。

表3にタイヤコード、つまりカーカスやベルトに用いられるゴムの補強繊維の概要を示す⁷⁾。補強繊維には、ナイロン、ポリエステル、スチール、アラミドなどがある。アラミド繊維はスチール繊維の代替として用いられる。

量産乗用車では、ナイロン繊維やポリエステル繊維がカーカスに、スチール繊維がベルトに使用されている。なお、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。

ゴムの加硫（1839年）やカーボンブラックによるゴム補強（1912年）など、ゴムは改良されてきた。ゴム補強のレーヨンコードの登場は1933年である。タイヤを構成するゴムの代替材料はないことを指摘しておきたい。

表3 タイヤコード

コード材	特 徴
レーヨン	木綿より強度があり、耐熱性に優れている。ヨーロッパのラジアルタイヤのベルト材に使われている
ナイロン	レーヨンの2倍の強度をもち、軽くて耐湿性に優れている。バイアスタイヤの主材料である。乗用車用ラジアルタイヤのカーカスにも使われている
ポリエステル	ナイロンと同等の強度があり耐熱性も高く、乗用車用ラジアル・バイアスタイヤに多用されている
スチール	弾性が高く強度があり、熱にも強い。ラジアルタイヤのベルト材に、またトラック・バス用タイヤのカーカス材に多用されている
アラミド繊維	スチールの5分の1の重さでスチールと同等の強度をもつ。軽くて丈夫だが、高価である

(2) タイミングベルト

カムシャフトを駆動するタイミングベルト（歯付きベルト、コグベルト）の構造を図3に示す¹⁵⁾。ゴム（クロロプレンゴムなど）を母材とし、ガラス繊維あるいはアラミド繊維の芯線そして耐摩耗性を持つ歯布（ナイロン織布）で構成されている。

ベルト駆動方式はチェーン駆動方式の代用として1970年ごろ実用化された。潤滑の必要がなく駆動音も小さいが、ベルトの耐久性を考え、走行距離が10万kmで交換される。両駆動方式の競合は継続され今日に至っている。

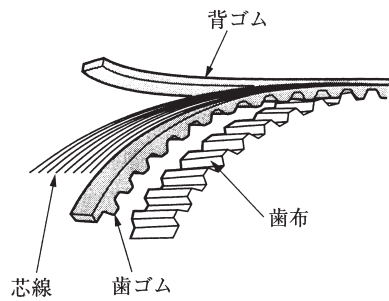


図3 タイミングベルト

3. 複合材料と複合体

私見も含め、複合材料に関連する事項について思うことを記したい。前章では自動車部品における複合材料の事例を述べたが、異なる材料の構成によって部品としての機能を果たしている場合もある。後者の部品を複合体と称し、組み合わせ（複合）という視点から材料と部品について概観する。

前章で述べた繊維強化複合材において、繊維は材料形態の一つである。つまり太さ（断面積）に対し長さが大きい材料の形態を表す。繊維の材料は当然多岐多様である。鉄（スチール）の場合、スチール繊維と同様に、材料形態の一つとして鋼板がある。

(1) 積層鋼板

ボディに使用される鋼板を見ると、広義の複合材料として積層鋼板がある。フロアパネルやダッシュパネルに使われ、ボディの振動・騒音を低減させる積層鋼板（制振鋼板）の構造を図4に示

す¹⁴⁾。鋼板と鋼板の間に粘弾性樹脂を挟んだ構造で、鋼板と樹脂の組み合わせである。

類似の事例にボディ（キャビン）のフロントガラスがある。フロントガラスは合わせガラスと称され、ガラスとガラスの間に樹脂（中間膜）を挟んだ構造である。挟まれている樹脂の種類は異なるが、図4の鋼板がガラス（板ガラス）に相当する構造である。

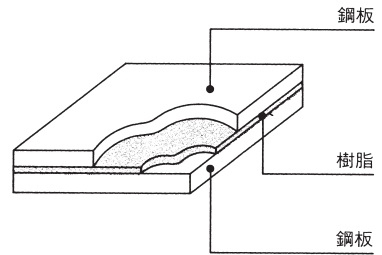


図4 制振鋼板の構造

車に使用されるガラスは安全ガラスと称され、合わせガラス、強化ガラス、そして有機ガラスがある。有機ガラスの一つが、樹脂ウインドウとして注目されているPC（ポリカーボネート）である。PCの大きな特徴は耐衝撃性であり、強靱な樹脂（PC/ABS）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。

（2）表面処理鋼板

亜鉛めっき鋼板など、防錆のため鋼板に表面処理が施された鋼板がボディに使われている。鋼板がコーティングされていると見れば、材料の組み合わせの事例といえる。

表面処理というのは、材料（素材）の強さ、耐摩耗性や耐食性を向上させる処理で、その種類は大変多い。材料の改質をもたらす処理といえるが、材料・部品の機能保持のため不可欠な事例もある。上述したPCをガラスの代替として利用する場合、耐傷付き性と耐候性のため表面処理（コーティング）が必須である。

材料の改質という視点から歯車について見ると、一般にクロムモリブデン鋼（SCM）が使用されるが、疲労強度や耐摩耗性を向上させる表面処理が行われる。浸炭処理が施されるが、この処理後、ショットピーニングという処理を施す、いわゆる複合表面処理がある。

ボディの加工について複合という視点から見ると、テーラードブランクがある。強度や厚さが異なる鋼板をレーザ溶接などにより接合し、この一体化したものをプレス成形する技術である⁶⁾。ブランク（プレス加工前の鋼板）をオーダーメイドする意味の表現で、ユニークなネーミングである。

（3）シリンダヘッドガスケット

鋼板を利用したエンジン部品を見ると、シール機能を果たすヘッドガスケットがある。軟鋼板やステンレス鋼板を数枚積層した金属積層形（スチールラミネイトタイプ）ガスケットと称されるものが主流である。あまり馴染みがない部品であるが、エンジンの高性能化を支える重要な役割を果たしている¹⁶⁾。

ヘッドガスケットはエンジンのヘッドとブロックの間に挟んで用いられ、エンジンの作動によって生じる高温・高圧の燃焼ガスや潤滑オイルおよび冷却水を同時にシールする部品である。ボルトで所要の締付け荷重を負荷した時、発生するシール面圧が適正でないと、ガス漏れなどシーリングに不具合が生じる。ガスケット表面はヘッドやブロックの装着面と密着し、さらにガスケット

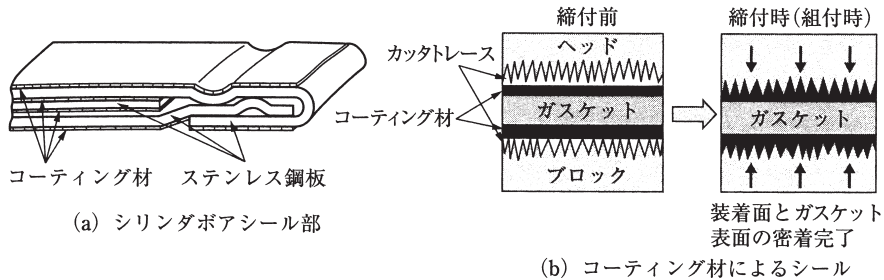


図5 金属積層形ガスケットのシリンダボア部の積層構造とマイクロシールの概要

トの各シール部には適正な面圧の領域が発生していなければならない。

図5には、シール条件が一番厳しいシリンダボア部の積層構造の一例とマイクロシールの概要を示した⁷⁾。鋼板の積層によりシール面圧を発生させ、コーティング材（フッ素ゴムなど）によりマイクロシールを達成する。つまり材料の複合によりその機能を果たす。かつて金属積層形ガスケットの開発者からいろいろご教示を受ける機会があった。シール条件に対応して、ばね性の高いステンレス鋼板を組み合わせるなど、積層構造に対し多くの工夫がなされている。

シリンダブロックについて見ると、2Lクラス乗用車の鋳鉄ブロック（41kg）は、アルミの置換により15kgの低減であった⁶⁾。このアルミ化において、ライナには摺動特性から鋳鉄が使用されている。つまり材料の組み合わせによる複合体により機能を果たしている。特殊な事例では、アルミ単体のブロックでなく、アルミとマグネを複合したブロック（BMW・630i, 2004年）がある。

(4) 燃料タンク

高密度ポリエチレン製燃料タンク（日産・プリメーラ, 1990年）を見ると、重さは9kgで、鋼板製の12kgに比べて約3kg軽く、樹脂の軽量化事例の一つである。高密度ポリエチレン（HDPE）単体のタンクでは、ガソリンが蒸発して排出するので、HDPEの内外層の間にバリヤとなる樹脂が使用されている。つまりタンクが多層化した構造で、材料の複合によってその機能を果たしている。なお、問題視されているレジ袋（ポリ袋）は低密度ポリエチレンである。

(5) ブレーキパッド

乗用車に使われるブレーキパッドの外観を図6に示す⁷⁾。裏金である厚鋼板に摩擦材を貼り付けたものである。パッドの材料（摩擦材）は、①骨格となる基材、②摩擦係数を適切にする摩擦調整剤、そして③これらを接着成形する結合剤から構成されるが、複雑な複合材料といえる。アラミド繊維やスチール繊維などを基材とし、添加物（摩擦調整剤）とともにフェノール系樹脂を結合剤として加え、加熱成型し

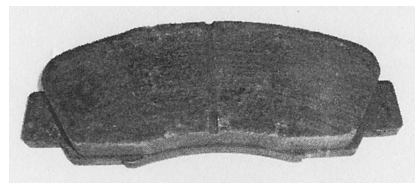


図6 ブレーキパッド

たものであるが、特に、添加物が多種多様で複雑である。

車の制動のため、鋳鉄のディスクにブレーキパッドを押し付ける。両者の摩擦係数は車種など必要に応じ変えるが、摩耗のことも考える必要がある。かつてパッド担当の技術者と会話したとき、摩擦係数の調整はノウハウがたくさんあり、試行錯誤により添加物が混合されるとのことであった。その複雑さは、料理における食材と調味料の組み合わせのように思われる。

4. C F R P

炭素繊維は1960年代に登場した材料（素材）である。直径7ミクロンの繊維を数千本あるいはそれ以上の本数を束ねて成形に用いられる。CFRPは比強度が大きく、疲労や腐食にも強いが、線膨張係数が金属に比べ大変低く、異方性がある。異方性とは、繊維方向とそうでない方向の強度が異なることをいう。鉄やアルミなどの金属は等方性という。金属の強度は負荷方向に関係しない。

複合材料の代表といえるCFRPは、レース車やスポーツカーなど的高级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。

航空機の分野でも環境問題を背景に、燃費向上のため軽量化が重要視されるとともにバイオ燃料の採用、さらには航空機の電動化が検討されている。環境問題の対応は自動車に比べかなり遅れているとの指摘があるが、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。

自動車において機体と同様な試みがなされている事例（トヨタ・LEXUS LFA、2010年）がある。35%がアルミで、65%がCFRPのボディである。同様に、ボディの骨格にCFRPを採用したEVの事例（BMW・i3、2013年）を見ると、アルミとCFRPキャビンのボディである。EVのボディ開発において、電池の積載重量が大きいことの対処としてなされている¹⁷⁾。ボディの軽量化は、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。

BMW・i3の諸元を見ると、全長4010×全幅1775×全高1550mmで車重は1260kgである。類似のサイズのEV（日産・リーフ、2010年）を見ると、車重は1450kg（全長4445×全幅1770×全高1550mm）である。積載電池重量の違いなどを考慮しても車重の違いにはボディ軽量化の寄与が大きい。

ボディ外板のCFRPを見ると、フロントフード、ルーフ、トランクリッドなどに採用事例がある。

（1）フロントフード

CFRPフロントフードの事例（日産・スカイライン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。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⁵⁾。この視点も加味され、軽量化が検討されることを期待している。

(2) ルーフ

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5 kg 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。この事例において、アルミルーフでは5 kg 程度になると思われる¹²⁾。

ボディ以外のCFRP 部品について見ると、プロペラシャフトや水素タンクがある。CFRP 製プロペラシャフトの採用例(トヨタ・マークII, 1992年;三菱パジェロ, 1999年)では、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。FCVにおける水素タンクは、鉄タンクからアルミとCFRP で構成されるタンクとなったが、アルミに代わって耐水素透過性樹脂とCFRP などから構成されるタンクが登場している。材料の組み合わせの変遷を示す典型的事例の一つである。

以上、自動車に関するCFRP の概要を述べた。CFRP は風車のブレード(羽根)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。

5. ボディ材料の動向

ボディ材料の多様化の一端を述べ、その動向を概観する。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¹⁾。ボディについて見ると、樹脂の複合材であるCFRP の登場は、ボディの骨格材料として鉄とアルミに競合する点から重要と思われる。つまりボディやその材料が多様化する。

ボディ材料を概観するため、その特性値(自動車技術会資料, 2006年)を表4に示す。主流である鉄ボディ(スチールボディ)に使用される冷間圧延鋼板(SPC)と強度を高めた高張力鋼板(High Tensile Strength Steel, ハイテン)の一例が示されている。ハイテンの剛性(弾性率, ヤング率)はSPCと同じで、強くなっても剛性は変わらない。

鉄(比重7.9)は重いので、軽くするため鉄の代替材料を使用する。その候補が、アルミと樹脂(CFRP を含む)と考えると理解しやすいと思われる。アルミとともに軽金属(軽合金)であるマグネ(マグネシウム合金)が表に示されている。

(1) スチールボディ

身近なアルミ缶の材料はアルミだが、材質が異なるアルミを組み合わせている。同様に、鉄ボディの材料はスチールであるが、SPCやハイテンなど材質が異なる鋼板の組み合わせでボディは構成されている。表面精度の高いSPCが使われてきたが、軽量化および強度向上のため、ハイテンが各所に採用されている。

表4 ボディ材料の特性値

材料（規格）	密度 (g/cm ³)	引張強度 (MPa)	降伏応力 (MPa)	全伸び (%)	ヤング率 (GPa)
スチール					
(SPCD)	7.9	270	160	48	210
(SPFC980Y)		980	700	17	
アルミニウム					
(5182-O)	2.7	280	130	28	70
(6016-T4)		240	120	28	
(ADC12)		290	190	2	
マグネシウム					
(AZ91D)	1.8	250	160	7	45
CFRP					
(疑似等方)	1.6	800	—	1.9	50
(一方向)		2550	—	1.9	135
いずれも130℃硬化エポキシ樹脂、体積配合率60%					

ハイテンにもいろいろなものがある¹²⁾。アルミの超ジュラルミンのように、強度が高い980 MPa級ハイテンは超ハイテンと称される。軽量化のため鉄を高強度にすると延性が低下し成形性は悪くなる。そのため、高強度と高成形性を目指した材料開発が行われている。開発事例の一つであるハイテン（引張強度1200MPa、最小伸び14%）は、センタピラーに採用されている¹⁸⁾。ハイテンの開発・改良のすごさを強調しておきたい。

スチールボディを軽量化の視点で見ると、ハイテンが大きな役割を果たしているが、ボディの外板に2.1.1項で述べた樹脂やアルミの採用がある。樹脂（PPE/PAなどのポリマーアロイ）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、銅板製に比べ2kgの軽量化（左右2つで合計4kg）である。樹脂フェンダの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。

アルミについて見ると、展伸用アルミの分類における5000系と6000系の材料がボディに使用される⁶⁾。フロントフード（マツダ・RX-7、1986年）に利用され始めたが、ルーフやトランクリッドなどに採用事例が見られる。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、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。

スチールボディにアルミルーフを採用したメーカーの技術者の話では、低重心化により車の乗り味が変わるとのことである。スチールボディにアルミルーフなど、アルミとスチールの異材接合には、電食が発生しないように、リベット（三菱・アウトランダー、2005年）や接着剤（BMW 7シリーズ、2009年）が採用される³⁾。接着の場合、ボディの鉄とアルミの熱膨張率（線膨張係数）は異なるので、温度による変形の違いを接着剤が吸収する必要がある。長期の実走行において、

接着機能を果たす接着剤のすごさを再認識させられる。

(2) アルミボディ

オールアルミボディは1990年に登場（ホンダ NSX）し、大変話題となった。その後アウディ A 8（1994年）やアウディ A 2（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200 kg の軽量化を達成している⁶⁾。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。

この事例においてマグネルーフを考えてみると、採用例は見当たらないが、2 kg 程度になると思われる。ボディにおけるマグネの採用は、ドアインナなどに限定され、広がりを見せていない⁶⁾。マグネの材料開発・改良が進むことを期待している。

アルミボディの外板について見ると、アルミに代わり樹脂フェンダの採用事例（ホンダ・インサイト、1999年）がある。また、上述の NSX ではフロントフードに CFRP の採用事例（ホンダ NSX-R、2002年）がある。その後の NSX（2016年）では、フロントフードはアルミだが、ルーフに CFRP が採用されている¹⁹⁾。スチールボディと同様に、樹脂やその複合材である CFRP がアルミボディにも認められる。1990年代登場したオールアルミボディは、外板を CFRP などの複合材で構成する流れになるかも知れない。各メーカーの動向が注視される。

(3) CFRP ボディ

前章で述べたアルミと CFRP から構成されるボディを CFRP ボディと称する。CFRP を強調する意図である。CFRP キャビンのガラスが PC(樹脂)になったボディが登場すれば、樹脂ボディと称したいと思っている³⁾。

ボディの骨格材料として鉄、アルミ、CFRP を競合という視点から見ると、主役の鉄、対抗するアルミ、そして挑戦する CFRP と思われる。昨今話題が多い EV のボディを見ると、テスラ・モデル 3 はスチールボディ、テスラ・モデル S はアルミボディ、そして BMW・i 3 が CFRP ボディである。

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。鉄、アルミとともに CFRP が候補になることは画期的であり、新たなボディを構築する契機になると思われる。

材料の複合体としてボディを見ると、ボディの骨格材として鉄、アルミ、そして CFRP の競合があり、ボディ外板では鉄、アルミ、そして樹脂とその複合材（CFRP を含む）の競合がある。コストと品質の両立という難しい課題はあるが、ボディ各部に最適な材料を配置する視点から、ボディの構成材料の多様化が進み、樹脂とその複合材の果たす役割が大きくなると考えられる。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。

6. お わ り に

材料（素材）があり、それを加工して初めて製品になるので、材料とその加工は自動車というものづくりの基礎である。自動車部品を材料の視点から考えることは、部品の役割の理解となり、結果として自動車をより深く理解することになると思われる。

本稿では、自動車における複合材料について概観し、ボディの構成材料の多様化の一端を述べた。私見であるが、材料に馴染みがない場合、複合材料をハイブリッド材料と考えるとイメージしやすいと思われる。つまり構造材料の視点では鉄、アルミ、樹脂、そしてそれらのハイブリッド材が互いに競合し、軽量化など求められる要求に対応していると考えれば理解しやすいと思われる。自動車の多様化を考えるとき、構造材料ばかりでなく機能材料に対する知見も必要であることを付言しておきたい。

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) 高 行男, 中日本自動車短期大学論叢, 第49号, 2019年
- 13) 最新複合材料・技術総覧編集委員会, 最新複合材料・技術総覧, 産業技術サービスセンター, 1990年
- 14) 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
- 15) 高 行男, 機構学入門, 東京電機大学出版局, 2008年
- 16) 宇田川恒和, 高 行男, ポリファイル, 51巻, 608号, 大成社, 2014年; 日本陸用内燃機関協会, LEMA, 514号, 2014年; 自動車技術会論文集, 39巻, 2号, 2008年
- 17) 山根 健, ポリファイル, 51巻, 599号, 大成社, 2014年
- 18) オートテクノロジー2015, 自動車技術会, 2015年
- 19) Nikkei Automotive, 2017年1月

