

自動車と材料（第2報、自動車の軽量化）

高 行男

1. はじめに

自動車の軽量化を材料の視点で見ると、軽量材料による鉄の代替はもちろんであるが、材料自身の改質による軽量化がある。具体的には材質の強化を図り、部品のスリム化と小型化による軽量化である。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概観した^{1)~9)}。

本報ではその要点も含め、自動車の軽量化と材料について、材料に対する私見も含め概観する。自動車材料の特徴について述べた後、いくつかの軽量化事例を挙げて3大材料の材料特性の一端を述べ、最後に構造用材料として代替時に必要となる材料の強度、中でも特に重要な疲労強度の概要について述べる。

2. 自動車を構成する材料

2.1 自動車材料

自動車は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が、主な材料を図1に示した⁷⁾。図中、非鉄金属のアルミニウム（アルミ）、マグネシウム、チタンが軽金属と称される。非金属のプラスチックが樹脂（合成樹脂）、複合材料のFRPが繊維強化プラスチックであるが、自動車の分野では両者を樹脂として

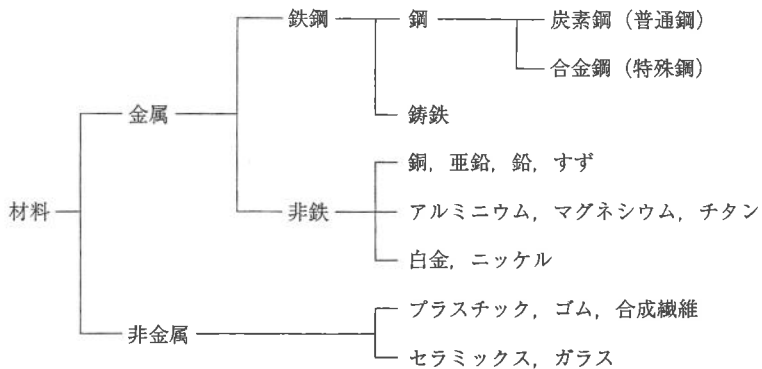


図1 自動車の主な材料

いる。本稿でも理解しやすいという視点から樹脂として取り扱う。なお、ターボチャージャーなどに使われるインコネルは、図中のニッケルに所属し、エンジンバルブの耐熱鋼とは分類上異なる。

自動車材料の要求項目を挙げると、①大量に安定供給されること、②しかも量産向きであること、③さらに環境保全であることが求められる。量産向きというとき、車は商品であるので、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も重視される。環境保全では環境負荷低減とリサイクルがある。前者では鉛フリーはんだや鉛フリー快削鋼などがあり、アスベストはかつてブレーキパッドやヘッドガスケットに使用されていた。後者のリサイクルについては多くの議論がなされているが、化石燃料と同様、材料の使用は資源の消失となる視点から、リサイクル再生材の品質向上が求められる。

2.2 軽量化と材料

自動車工業会が調査した1973年から2001年までの自動車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。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、最近のデータは報告されていないが、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大構成材料といえるが、構成割合の変化の大きな要因は軽量化である。つまり、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。構造部材には軽くて強靱な材料が理想であるが、人間と同様材料にも長所もあれば短所もある。つまり、材料の性質を列挙すれば、強度、剛性、軽量、韌性、耐熱性、耐食性、耐磨耗性などがある。したがって、適材適所の視点で材料は選択される。

車の軽量化は、車が移動体であることから特に必要となる。つまり、燃費や運動性能の向上のためであり、部品の軽量化は進んでいる。しかし、安全対策、快適性向上、そして排ガスなど環境対策のため搭載部品は増大し、乗用車の平均重量を見ると、2001年では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。搭載部品の一例を挙げると、エアバッグの重量は運転席1kg、助手席1-2kgであり、ディーゼル乗用車のDPF(Diesel Particulate Filter)装置一式は3-6kg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^{4) 6)}。

3. 軽量化事例

エンジン搭載車の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。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、EVにおいては走行距離の増大となる。表1に示した自動車（エンジン搭載車）の重量を見ると、2Lクラスの

表1 2Lクラスと軽クラス乗用車の重量分析（重量割合）

部 位	空車重量：1,214kg		空車重量：718kg	
	kg	%	kg	%
エンジン	141.4	11.6	71.8	10.0
オートマチックミッション	70.7	5.8	35.8	5.0
ドライブ軸シャフト	13.0	1.1	7.7	1.1
フロントサスペンション	59.6	4.9	31.7	4.4
リヤサスペンション	27.7	2.3	20.2	2.8
ブレーキ	15.8	1.3	9.7	1.4
ホイールハブ	57.9	4.8	22.3	3.1
ホイール	30.8	2.5	19.4	2.7
タイヤ	32.0	2.6	18.0	2.5
スペアタイヤ	10.5	0.9	7.1	1.0
ステアリング+パワステ機構	21.3	1.8	13.8	1.9
燃料タンク+燃料配管	19.4	1.6	10.8	1.5
排気管（含む触媒）	23.4	1.9	11.4	1.6
メインボディ	260.7	21.5	148.4	20.7
ドア+前後フード	81.9	6.7	57.7	8.0
窓ガラス	33.2	2.7	29.3	4.1
シート	45.0	3.7	38.7	5.4
シートベルト	5.3	0.4	5.2	0.7
内装樹脂部品	39.4	3.2	18.3	2.5
バンパー	13.6	1.1	6.4	0.9
エアコン	16.8	1.4	10.1	1.4
バッテリー	10.5	0.9	7.8	1.1
照明	6.5	0.5	4.1	0.6
配線	18.5	1.5	10.9	1.5
合 計	1,054.9	86.9	616.6	85.9

乗用車（空車重量1214kg）のスチールボディの重量は343kgである^{3) 6)}。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。つまり車全体の重さの3割近くをボディ（ホワイトボディ）が占めている。

以下、自動車の3大構成材料である鉄、アルミ、樹脂の概要とともにボディを中心に軽量化事例を概観する。

3.1 鉄

自動車における鉄（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4割程度である。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、2割弱を占め、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が減少している。

(1) 高張力鋼板

スチールボディ（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（2 mm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。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。

図2には、高張力鋼板と通常の鋼板（SPC、冷間圧延鋼板）の特性を比較したものを示した³⁾。焼付け硬化（BH, Bake Hardenability）タイプは、プレス成形時は軟質、つまり降伏強さが低いが、塗装焼付け時の170℃前後の熱によって降伏強さが上昇するもので、フロントフードやトランクリッドなどの外板パネルに利用されている。プレス成形性に優れたIF（Interstitial Free）鋼をベースにリンを添加し、深絞り性に優れたタイプもある。複合組織を作り出して強度と加工性を高めたものが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、マルテンサイト組織型のはドアインパクトビームやバンパラインフォースに採用されている。なお、図中には後述するボディに使用されているアルミのデータも併記した。

高張力鋼板は、1990年代ボディ重量の25-35%占めているが、最近では57%の採用例（トヨタ・アクワ、2012年）も認められ、その重要性は増している。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世界鉄鋼協会によるスチールの超軽量ボディULSAB（Ultra Light Steel

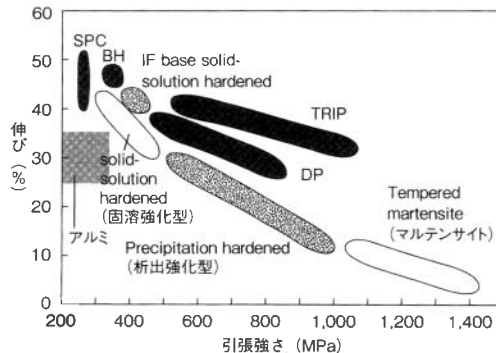


図2 冷間圧延鋼板（SPC）と各種高張力鋼板の機械的特性

注）アルミのデータも併記

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。世界鉄鋼協会では、ULSABに続き、EVやHEVのボディのハイテン化において、テーラードブランク、ハイドロフォーミングに加えホットスタンピングとロールフォーミングの加工法が挙げられ、ULSAB以上の軽量化が検討されている³⁾。

（2）特殊鋼

特殊鋼（合金鋼）とは、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、使用部品の要求される機能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、工具鋼、快削鋼など多種多様である。中でも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。

構造部材を代表する構造用合金鋼について見ると、強靱鋼とも称される構造用合金鋼は、パワートレインに重要な役割を果たしている。その代表的な部品の一つであるコンロッドが軽くなってきた推移を図3に示した⁸⁾。軽量化の手法は板厚を薄くし、余肉削減が基本であるが、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。コンロッドの軽量化の事例を見ると、コンロッドに浸炭処理をして表面を硬く強くし、スリム化することによって30%軽くしている事例（ホンダ・インサイト、1999年）がある。一方、鋼の代わりにチタン（ホンダ・NSX、1990年）や後述するFRM（ホンダ・シティ、1985年）を採用して軽量化を図っている事例もある。

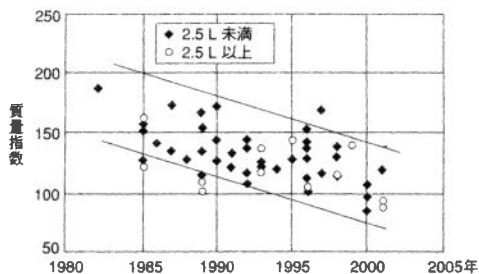


図3 コンロッド質量の変遷

注) 2000年を100としてコンロッドの質量を表している。すなわち、1985年頃のコンロッドは、1.5倍程度の重さのものを使っていたことを意味する。

（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。ピストンも当初は鋳鉄製で、アルミピストンの登場（1915年）がなければその座を守った材料である。耐熱性、耐摩耗性などアルミに比べ優れているので、用途により今日でも鋳鉄ピストン、鋳鉄ブロックは利用されている。

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といえる。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。鋳鉄自身も改良され使用されてきたが、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。つまり、黒鉛形状は鋳鉄の特性に大きな影響を与える。ねずみ鋳鉄

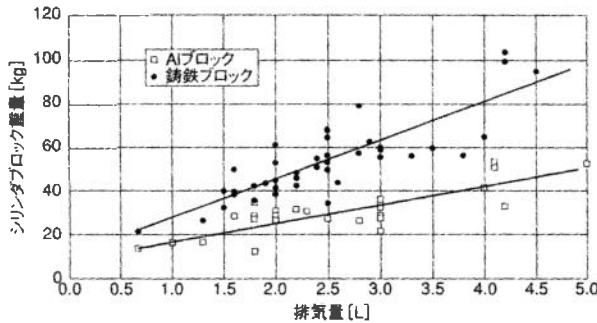


図4 シリンダブロックの材料置換の効果

に代わり芋虫状黒鉛のバーミキュラ鋳鉄をシリンダブロック（4.5Lディーゼルエンジン）に採用し軽量化を図った事例もある¹⁰⁾。

前述した重量分析の表からわかるように、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年頃始まり今日に至っているが、2Lクラスの乗用車の重量を分析すると、シリンダブロックは41kgから26kgと鋳鉄からアルミの置換により15kgの低減であった⁶⁾。いくつかの事例をまとめた図4は、材料置換による軽量効果を示している⁸⁾。なお、ブロック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。

3.2 アルミ

アルミ（Al）の比重は2.7、鉄の約1/3で、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り、バッテリーケーブルのアルミ化の事例もある¹¹⁾。

アルミ（アルミニウム合金）には鋳造用と展伸用がある。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、エンジンやトランスミッションに多用されている。代表的材料にAC8AやADC12などがある。

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。

アルミについて少し補足すると、ジュラルミンのように添加元素によりアルミ合金の強度は向上するが、剛性（弾性率）は変わらない。軟鋼と同程度の強さのアルミ合金であってもその剛性

表2 ボディパネル用アルミニウム合金の機械的性質（板厚1mm）

材質	引張強さ [MPa]	耐力 [MPa]	伸び [%]
5000系	275	140	30
6000系	240	130	30
鋼板 (SPCC)	305	160	46

は低く、剛性は合金では改善されない。また、アルミと鉄の特性の大きな違いは熱変形で、アルミの熱膨張率（線膨張係数）は鉄に比べ2倍程度大きい。表2には、ボディに使用されている5000系と6000系のアルミと冷間圧延鋼板（SPC）の特性の比較を示したが、伸びは鋼板の65%でプレス成形性が悪く、溶接性やコストの点も問題である⁷⁾。

(1) アルミボディ

アルミは従来から鋳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、旋回性能向上に効果があるためである。アルミルーフの車は、メーカーの技術者との会話では低重心のため旋回時、その良さが体感できるとのことである。

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。この軽量化割合は、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。

NSXはアルミを多用したスポーツカーで、軽量化を運動性能の向上に活用するのが当初の目的である。一般乗用車の7.2%に対し31.3%のアルミの活用によりボディだけで140kg、総重量で約200kgの軽量化を達成している。アルミは鉄（比重7.9）の1/3程度の軽さであるが、剛性（弾性率）を見ると、アルミ（70GPa）は鉄（206GPa）の1/3である。軽量化の一例としてルーフを考えると、べこつき感を示す張り剛性は弾性率が関係するので、同一形状ではアルミの厚さは鉄（スチール）の約1.4倍必要である。それでもアルミは軽い。NSXの事例では、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。

(2) FRM

自動車とアルミを考えると、アルミの複合材料であるFRMの活躍が期待される。マトリックス（母材）に軽量のアルミ合金などを用い、繊維強化したものが繊維強化金属（Fiber Reinforced Metal, FRM）である。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。ピストンのトップリング溝の耐摩耗性の強化を図るもので、その様子を一般に使用されるニレジスト鋳鉄とともに図5に示した⁸⁾。

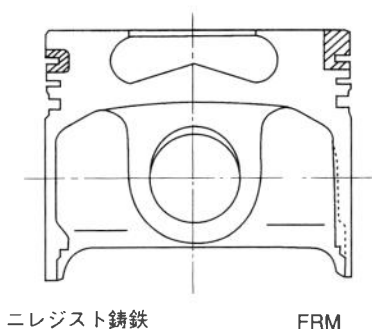


図5 ピストンの耐摩環

自動車におけるFRMの事例を見ると、鑄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）やコンロッドにFRM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。FRM製スリーブは、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。

3.3 樹脂

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，シートベルトやエアバック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。

自動車に使用されている樹脂は多種多様であるが，中でもポリプロピレン（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，PPにゴムを添加したものであるが，PPが日本で技術導入により生産されたのは1962年である。

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。材料の代替として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）などがあるが，大きな軽量化の対象がボディである。

(1) 樹脂ボディ

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。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（母材の樹脂）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。炭素繊維は1960年代に登場する。7ミクロン（7/1000mm）程度の細い繊維が、PAN（ポリ・アクリル・ニトリル）樹脂を炭化して作られる。ガラス繊維に比べ軽く、かつ強度と剛性に優れている。

昨今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倍程度高いとのことで、軽量化の効果は大きい。機体重量の2割の軽量化が可能と指摘されている。

このCFRPの製法はオートクレーブ工法であり、レーシングカーのオール樹脂ボディもこの工法で作られる。プリプレグ（エポキシ樹脂を炭素繊維に含浸させた素材）を型に合わせて積層し、オートクレーブ（圧力炉）で加圧・加熱して樹脂を硬化させて部材を作る方法である。この硬化行程に時間がかかることが生産性の問題となる。その工程時間の短縮方法とも関連するが、材料開発では成形性、含浸性、繊維との界面強度に優れる樹脂が求められる。

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の樹脂ボディである。前後フード、ルーフはCFRPである。車は商品であるという観点からは、スポーツカーなどいわゆる高級車の一部で採用されている樹脂ボディは、高級車という従来の範囲での広がりになると思われるが、新たな動きとしてEV（BMW・i3）やHEV（BMW・i8）にCFRPの採用がある。電池の積載重量の対処として軽量化のためCFRP製キャビンを採用しており、注目される。

従来、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）製フロントフードの事例（日産・GT-R V・SPEC II, 2000年）を見ると、約4kg軽くなっている。つまり、スチール製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。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。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ので鉄、アルミ、樹脂が競合することが期待される。なお、CFRP製フロントフードは雑誌などでカーボンボンネットと称される。類似の表現のカーボンブレーキはC/Cコンポジット（Carbon fiber reinforced Carbon Composite）で、複合材料の種類は異なる。

（2）樹脂ウインドウ

前述の2Lクラス乗用車の重量分析を見ると、ガラスの重量は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）への代替が検討されてきたが、昨今クローズアップされている。その背景には材料、射出成形そしてコーティングなどの品質を保証する生産技術の向上がある。軽量化の観点では、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。

ポリカーボネート（PC）は、1950年代に開発された樹脂である。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となる。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があるが、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ためである。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（MCC・スマートフォーター、2007年）に採用されている。目的は違うが、ボディの塗装と似ている。さらにワイパが付くりアウインドウ、昇降するサイドウインドウへの採用のため、耐傷付き性の向上を図るコーティング技術が検討されている。

PCとガラスの材料特性について比較すると、PCは脆性材料のガラスと異なり、金属材料のように延性であるが、破断伸びの割合（引張破壊伸び歪）は100%程度であり、大変大きい。強度（引張降伏応力）は65MPa程度でガラスと大差はないが、弾性率（ヤング率）は2.3GPa程度で、ガラスの70GPaに比べ大変小さいので、ガラスに比べ変形しやすい。また、熱膨張率（線膨張係数）は $70 \times 10^{-6} / \text{K}$ で、ガラスの $9 \times 10^{-6} / \text{K}$ に比べ大変大きいので、温度変化に対する伸縮量がガラスに比べ大変大きくなる。

軽量化の視点で見ると、樹脂ウインドウが大きな役割を果たすパーツが大型サンルーフと思われる。1.6m²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製はガラス製の約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割程度であるといえる^{2) 3)}。

4. 材料の変遷・代替

軽量化の視点で自動車材料を概観すると、主役の鉄、対抗するアルミと樹脂、そして挑戦するマグネシウムが大きな流れと思われる⁶⁾。アルミに競合するマグネシウムの比重は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。部品のマグネシウム化の対象は、シリンダヘッドカバー、ステアリングホイール、シートフレーム、タイヤホイール、オイルパン、マニュアルトランスミッションケース、吸気マニホールドなどである。以下、私見も含め、複合という視点から材料変遷の概要と材料の代替時の基本となる強度について述べる。

4.1 変遷

材料の改質において、金属は合金（アロイ）がキーワードである。前章でアルミ合金であるジュラルミンについて少し述べたが、アルミに銅、マグネシウム、マンガンなどを添加した合金である。ジュラルミンの登場から超々ジュラルミンの登場まで30年位の時を要している。私見であるが、金属の合金も材料の複合と見ることができる。

樹脂の改質では、プラスチックの弱点を克服する材料開発が活発に行われている。代表的なものがポリマーアロイと繊維強化プラスチックであるが、後者の繊維強化では、ケナフや麻などの天然繊維による複合材（グリーンコンポジット）が検討されている。

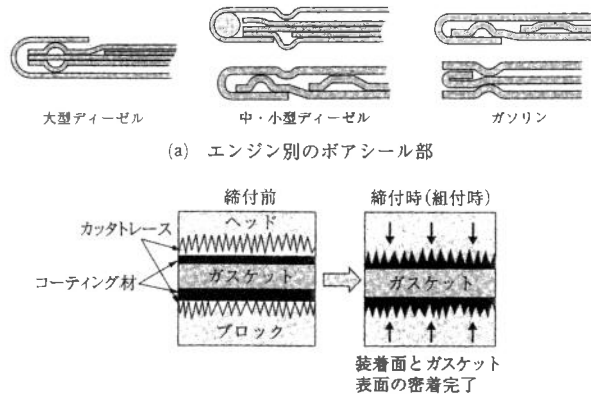


図6 金属積層形ガasketのガスシール部の構造

材料の改質で強度を高める視点で金属材料を見ると、合金以外に材料の欠陥と表面処理を挙げることができる。材料の欠陥は破壊源となるので、より少なく、より小さくという視点から見ると、アルミの鋳造欠陥や鋼の清浄度（介在物）の問題などがある。後者の最近の事例を見ると、ディーゼルエンジンのコモンレールシステム（サプライポンプ、コモンレールそしてインジェクタ）において、欠陥となる介在物のサイズをコントロールした鋼材が使用されている。つまり、使用部品の高圧に対処する際、切削加工と疲労強度の相反する要求に対応した鋼が開発され、耐圧材料と称される場合がある。

鋼の表面処理について見ると、高周波焼入れや浸炭焼入れなどの表面硬化処理やショットピーニング処理があり、多くの部品に活用されてきたが、浸炭処理後高周波焼入れ、浸炭焼入れ後ショットピーニングなどの複合処理も検討され、実用に供せられている。表面処理は強度以外にも、ボディの防錆のため亜鉛めっきを施した表面処理鋼板など、重要な役割を果たしている。

材料と同様に複合という視点で部品を見ると、エンジンの高性能化に寄与するシリンダヘッドガasketがある。金属積層形ガasketが主流であるが、その概要は、図6に示すように、鋼板の積層とコーティング材の複合によりその機能を果たしている^{8) 12)}。鋼板にはステンレス鋼(SUS)が使用されているが、材質の特性の違いにより、代表的なステンレス鋼であるSUS304とばね性に優れるSUS301が使用されている。特殊な事例では、アルミとマグネシウムを複合したシリンダブロック(BMW・630i, 2004年)がある。

4.2 代替

軽量化と強度について見ると、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り、軽くするため必要な寸法を減らすと破壊につながる。つまり、強度不足である。時間が経過して現れる疲労破壊など厄介な現象もある。使用環境におけ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と思われる。

設計応力（使用応力） σ_a は基準強度 σ_s と安全係数 S で、 $\sigma_a = \sigma_s / S$ と表される。重要なことは、 σ_s は実験で求められるが、 S は経験を含むことである。 S を小さくすると、軽量化となるが、当然 S が小さすぎると破壊に至る。つまり安全性が損なわれる。前述した材料改質により強度を向上させることは、 σ_a を高めることになるので、 S が小さくなることを意味する。

基準強度には、基本となる静的強度である引張強さや降伏強さがあるが、疲労強度が重要である場合が多い。金属材料の疲労は1830年代に認識されていたようであるが、最初の系統的な実験はウェーラによって1852年から1870年にかけて行われ、疲労現象の定量化としてS-N曲線が提示された^{13) 14)}。

図7(a)-(c)にいくつかの材料の回転曲げ疲労試験機によるS-N曲線を示す。回転曲げ疲労試験は棒状の試験片に曲げモーメントを与え試験片表面に引張と圧縮を繰返すもので、自動車を含む機械工学の分野で広く採用されている試験方法である。S-N曲線は、図示のように、縦軸に応力 S (Stress)、横軸に繰返し数 N を対数表示して、材料の疲労強度特性を示したものである。

図7(a)は鉄鋼の基本材料である炭素鋼とアルミ合金（超ジュラルミン）のデータである⁷⁾。図中の鉄鋼において、曲線の水平部は、これ以下の応力では疲労破壊しないことを意味し、縦軸のこの限界応力を疲労限度（耐久限度）という。疲労限度は設計の基準応力となるが、図中のア

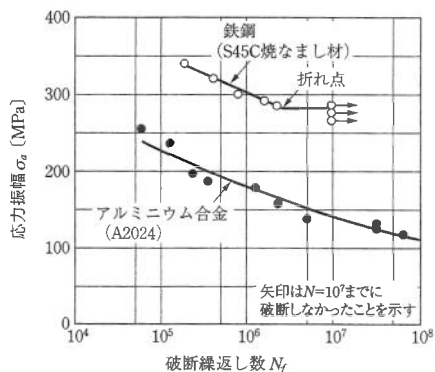


図7(a) 炭素鋼とアルミ合金のS-N曲線

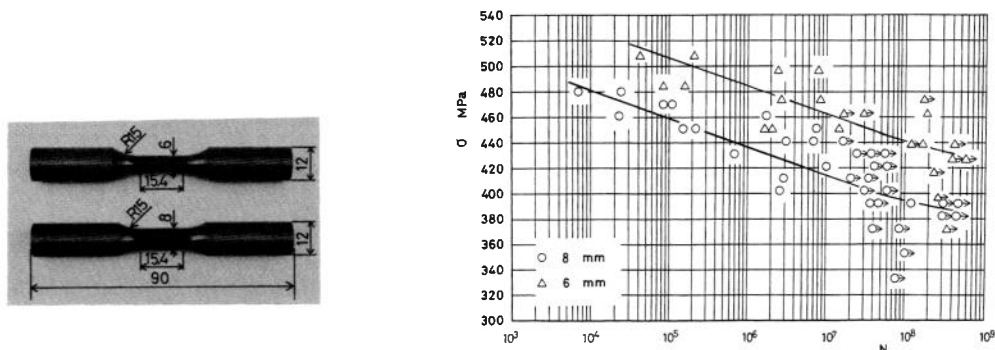


図7(b) 窒化ケイ素のS-N曲線

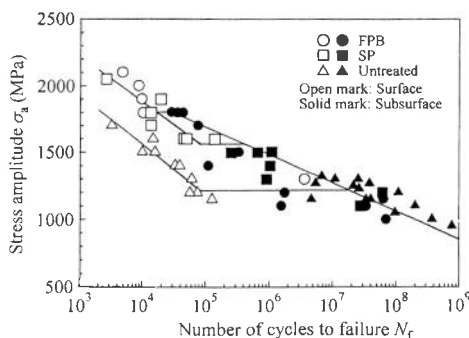


図7(c) 高強度鋼のS-N曲線

ルミ合金などではS-N曲線に明瞭な折れ点が現れない。このような場合には、 10^7 など特定の破断繰返し数に対する応力（時間強度）を基準応力とする。

図7(b)はセラミックスの代表的材料である窒化ケイ素のデータである¹⁵⁾¹⁶⁾。ターボチャージャのタービンホイールに採用するとき基礎データとして必要とされ、著者が実験を行ったものである。焼結のため初期欠陥の存在を考えると、試験片寸法の影響がある。疲労特性の確認のため長時間の試験データが示されている。つまり 10^7 のデータには2日の試験時間を要するので、 10^8 のデータを得るには20日、 10^9 のデータには200日が必要となる。

図7(c)は高強度鋼（高炭素クロム軸受鋼，引張強さ2316MPa）に対する著者らによるデータである¹⁷⁾。通常，鋼材の疲労は表面が破壊起点であるが，高強度鋼では負荷応力の低下に伴い内部起点の破壊が生じる例である。そのため，2段の折れ曲がりS-N曲線となる。この特異な現象の確認には長時間の試験が必要となる。図中SPはショットピーニング処理を行った試験片である。FPBは微粒子衝突処理と称され，通常のSP処理に用いる粒子より小さい粒子による処理である。両処理材と未処理材が比較されている。

最後に，ボディのスポット溶接に代わるレーザー溶接に関する基礎データの一環として検討した高張力鋼板のレーザー溶接重ね継手に対するデータを図8に示す^{18) 19)}。共振型軸荷重疲労試験機

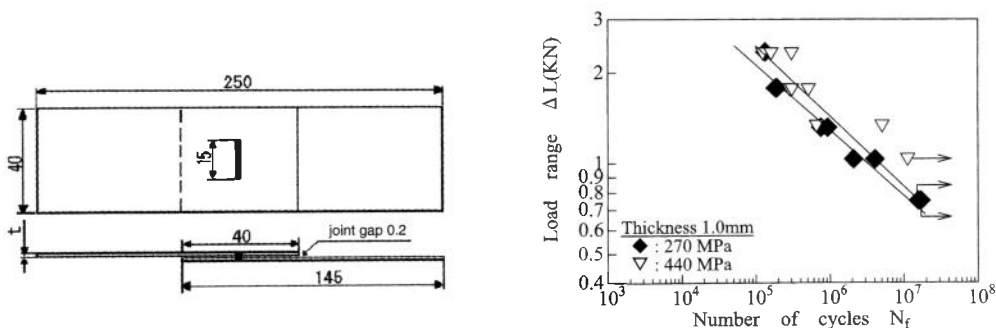


図8 薄鋼板レーザー溶接重ね継手の $\Delta L-N_f$ 線図

(荷重比0.1)によって薄鋼板レーザー溶接重ね継手試験片(板厚1.0mm,幅40mm,ビード長さ15mm)に対し,荷重範囲 ΔL と寿命 N_f の関係を求めたものである。270MPa級亜鉛めっき鋼板と440MPa級亜鉛めっき高張力鋼板の試験結果は,母材の引張強度が1.6倍であるが,継手の疲労強度は1割弱と大きくなく,スポット溶接継手と同様な傾向を示す。溶接継手の疲労強度には母材の強度はあまり影響しないことは実用上留意する必要がある。

上述のことからわかるように,材料の使用条件や新たな材料の使用にあたり,基本となる強度信頼性の検討は必要であり,歴史のある鉄には膨大なデータが蓄積されている。機体の主要な材料となったCFRPについて見ると,1970年代から機体への適用が検討されたとのことだが,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の採用は画期的であると思うと同時に驚嘆する。自動車において,ボディの骨格材料としての樹脂(CFRP)の登場は,新たなボディを構築する契機になり,安全対策の点からもボディは,その構造も含め材料と加工法そして接合法が検討され,進化していくものと思われる。

5. お わ り に

車社会といわれ約60年,地球上で10億台近く保有されている車がさらに生産され続けることを考えると,材料の資源問題がある。また,車の増加と環境問題を考えると,総量の増加は1台あたりの燃費・排ガス規制で解決できるのか,と自問する。グローバルの視点では交通事故の増加などの問題もある。一方,HEV, EV, FCVそして超小型車や車の自動運転など,新たな車社会の到来が期待される。自動車の進化に構造材料とともに機能材料の重要性がさらに増大し,技術革新に材料が果たす役割はさらに大きくなることを強調しておきたい。本稿では,自動車の軽量化と材料という視点から構造材料について概観したが,材料の重要性とともに複雑さの一端を認識していただければ幸いである。

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) 衣沢喜幸ほか, 自動車技術, 62巻, 9号, 2008年
- 11) 日本アルミニウム協会, アルミニウム, 工業調査会, 2007年
- 12) 宇田川恒和, 高 行男, 自動車技術会論文集, 38巻, 6号, 2007年
- 13) 高 行男, ファインセラミックス, 27号, 与野書房, 1986年

高 行男：自動車と材料（第2報、自動車の軽量化）

- 14) 高 行男, ファインセラミックス, 55号, 与野書房, 1991年
- 15) 高 行男, 内燃機関, 27巻, 2号, 山海堂, 1988年
- 16) 高 行男, Fracture Mechanics of Ceramics, 9巻, Plenum Press, New York, 1992年
- 17) 高 行男, 井藤賀久岳, 長谷川達也, 加賀谷忠治, 戸梶恵郎, 中島正貴, 機械学会論文集, 68巻, 667号, A編, 2002年
- 18) 田浦謙一, 高 行男, 藤本正男, 井藤賀久岳, 土屋 寛, 自動車技術会学術講演会前刷集, 20015081, 2001年
- 19) 高 行男, 藤本正男, 井藤賀久岳, 平野和也, 中日本自動車短期大学論叢, 第33号, 2003年