

## マルチマテリアルに対応する技術

山田 豊\*

### Technology which Corresponds to Multi-material Structures for Automobile

Yutaka Yamada\*

**Keywords:** automotive body, automotive material, automotive structure

#### 1. 緒言

自動車はその部品総点数が3万点余りと言われており、それぞれの部位において最適な材料=マテリアルの選択がなされてきている。本報では、このうちのボデー構成におけるマルチマテリアル化の現状とトレンドについて解説する。また、各論である個々の分野(材料、成形、接合など)についてすでに詳しい議論がなされていることから、自動車を構成する上での課題トレンドを中心に扱うものとする。

#### 2. マルチマテリアル化の現状と背景

##### 2.1 これまでの軽量化の手法

自動車の起源まで遡れば、そのボデーは木工製品と鋳鉄製品で組み立てられていた。時代の変遷と、材料技術の進歩およびマーケットの拡大による大量生産の要請により、スチール(展伸材)へと置き換わってきた。

この過程においては、さまざまな材料と工法の組合せが試行されてきたが、スチール材に集約することで高品質化と高生産性を獲得してきた。

高品質化においては、より複雑な意匠に対応可能な高成形材と加工方法の開発、塗装品質の向上、耐食性の向上などがはかられてきた。高生産性については、非常に短い生産タクトタイムに対応する冷間プレス工法を基準に、スポット溶接による組立を多用しモノコックボデーとすることで、高い生産性を獲得してきた。また、この高い生産性を武器に低価格化が進み、マーケットを拡大してきた。

上記のように自動車はスチールモノコック構造の車

が標準となり、生産ラインもこれに合わせて発展してきた。従って、燃費改善のための軽量化が望まれるようになってくると、まずはスチールの高強度化、薄肉化が主流となり、従来の軟鋼板からハイテンへの置き換えが始まった。しかし、フード、ドア、トランクなどのパネル類は強度より剛性が重要であり、強度は高いものの、ヤング率は軟鋼板と同等のハイテンでは軽量化効果が十分得られず、アルミニウムなどの軽量素材が部分的に使われる、いわゆるマルチマテリアル化が始まった。しかしながらスチール用に発展してきた製造ラインへの適合が、他の材料へ置換する際の高いハードルとして存在することとなった。

近年における軽量化の為のアルミニウム材の採用事例として、アルミニウム製ボンネットフードおよびドアなどのクロージャー部品が挙げられる。クロージャーとは「蓋物」と言う意味で、モノコック構造を持つボデー本体に後で取り付ける後付け部材である。

これらは、スチール同様の冷間プレス工程での生産が可能であり、アセンブリラインでの組立とし、メインのボデー組み付けラインでのボルト締結(絶縁または犠牲防食措置を実施の上)とすることで、自動車製造メーカーにおける多額の設備投資を必要とせず、またボンネットフードにおいては、歩行者保護性能の確保とフロント軸重の低減に寄与することから、早くから採用が進められてきた。ドアにおいては、アルミニウムの成形性の制約が固定側のドア開口部形状へ影響し、結果として自動車としての商品性に直結する。従って、アルミニウムをドアに採用した場合、各自動車メーカーの苦闘の跡が見て取れる。あるメーカーでは、商品性を優先しドアインナーを分割組み立てとして対応する

\* (株)UACJ 技術開発研究所 第六研究部  
No. 6 Research Department, Research & Development Division, UACJ Corporation

一方、他方では部品点数の増加を嫌い形状を妥協するなど、商品性とコストのバランスにおいて、各自動車メーカーの対応方針が示される部品となっている。

サブフレームは、ボデー骨格部品ではあるが、サスペンションやエンジンを搭載する部品であるため、シャシー系部品でもある。このサブフレームもアルミニウム用ダイキャスト材が採用され比較的早期にアルミニウム化された部品である。これは、自動車メーカーにおいてエンジンなどで既にアルミニウムダイキャスト部品の製造を行っており、設備投資が抑制できたこと、複雑なサスペンションやエンジンマウントの取り付けに対応した一体化により部品点数の削減と質量低減ができたことなどが原因である。アルミサブフレームは比較的大型の高級車で採用事例が広がり、近年では単純にダイキャストのみの構成から、部位別の特性に合わせたダイキャストとアルミニウム展伸材やスチール部材と組み合わせた構成へ進化している。ここで重要なことは、フードなどのクロージャー部品と同様ボデーへボルトで後付けされる部品として成立していることである。

## 2.2 マルチマテリアル化の現状

前出のような後付け部品のアルミニウム化手法に対し、近年では本体のモノコック部分において、部分的に異なる材料を用いる軽量化や(いわゆるボデーマルチマテリアル化)、一足飛びにオールアルミニウム車体や樹脂化(CFRP)の事例も出てきている。

興味深いのは、ボデーマルチマテリアル化へ進んだ自動車メーカーは過去にオールアルミニウムやCFRPでの量産実績を有するメーカーであり、それぞれ材料における製造ノウハウを有した上での最適化手法とも取れる点にある。

つまり、経験としてオールアルミニウム化の場合の課題と設備投資およびCFRP化の場合の課題と設備投資がどこにどの程度あるのかを把握するステップを経て、最適な組み合わせと手法を模索した上で、マルチマテリアル技術の採用となっている。

ボデーのマルチマテリアル化へのアプローチは、自動車メーカー毎に異なるが、その素材の組み合わせで発生する課題に対応できるよう製造工程設計がなされている。

スチールを基軸にマルチマテリアル化した事例をFig. 1<sup>1)</sup>に示す。

ここで、製造工程の中でマルチマテリアル化の課題の解決を図っている事例を考察する。

自動車ボデーの製造工程は概略次の構成となってい

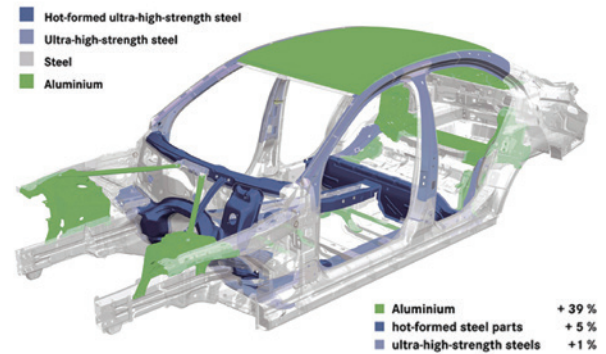


Fig. 1 Multi-material case Mercedes-Benz C-Class<sup>1)</sup>

る。まず洗浄、塗油、ブランクングなどの素材の準備工程、素材を用いた成形工程、成形品を接合しての組み立て工程、組み立て品(および次の組み付け工程で組み付ける部品)を塗装する工程、そして出来上がったボデーへの各部品(ボデーを構成する部品、および自動車としての走行機能系を含む各部品)の組み付けの工程を経て自動車としての製品となる。

自動車ボデーを構成する各部品を大まかに分類すると以下となると考えられる(Fig. 2)。

- ①ボデー骨格を構成し、ボデー組み立て工程で組み立てられ、塗装工程を経て組み付け工程へ至る部品。
- ②ルーフなどの外板を構成する準ボデー骨格構成の部品であり、①同様の工程を経る部品。
- ③ドアなどのクロージャー系の部品で、骨格系ボデーと同時に塗装処理し、最終の組み付け工程で組み付けられる部品。
- ④ボデー骨格を構成するが、組み付け工程で組み付けられる部品。
- ⑤ボデー骨格とならない、組み付け部品

まず、自動車を構成する部品であることから、上記のいずれの分類の部品においても、各部品ごとに必要とされる性能(強度、剛性、耐食性など)質量、成形性およびその経済性(製造コスト)によって材料選択および製造方法の採否がなされている。

最近のボデーマルチマテリアル化の注目は、①および②に分類されるものである。

①は強度および剛性が必要な部品であることから、各素材における高強度材が使用される傾向にあり、その成形性がポイントとなることが多い。また、これに加えて耐久性、耐食性およびその生産性が課題となり、それらを構造的に解決する手段を、車体設計時に折込むことが求められてくる。例えば、レインフォースメ

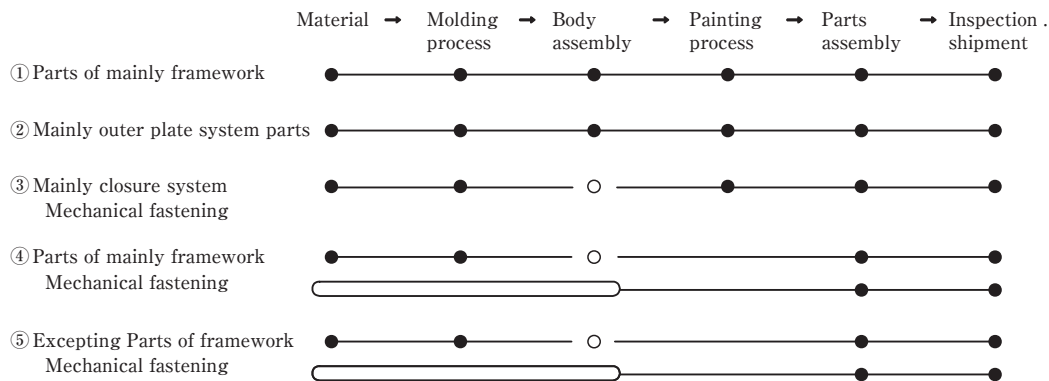


Fig. 2 Automobile classification of the manufacturing process outline and multi-material.

ント系の部品のように、成形性に劣る高強度材の使用に伴って設計空間に制限が発生し、近接する部品とのレイアウト変更を余儀なくされる場合がある。また、衝突荷重対応の部品などでは、低荷重の繰り返し入力と環境因子による疲労、SCCなどの割れの発生を防止する構造を採用する必要が生じ、これも設計空間への制限となる。

またマルチマテリアルの場合、各材料のメリットが最も得られる加工法がそれぞれ異なっており、この異なった加工法の部品を組み合わせることで技術的課題が発生している。例えば、アルミニウムダイキャストで製作されたサスタワー（サスペンション部品であるショックアブソーバーのボデー側取り付けとなる部品）がボデー骨格へ取り付けられる部位がその典型的な例である。アルミニウムダイキャスト製のサスタワーは、剛性確保に最適な肉厚配置を自由に設計することができ、さらに、従来の鋼板製では複数の部品を組み合わせる必要があったものを1部品に集約できるなどのメリットがあるため、採用が広がり始めている。このアルミニウムダイキャストサスタワーと鋼板製骨格との接合に際しては、SPR（セルフピアシングリベット）などの機械的接合が用いられている。この接合部にシーラーを塗工し、次工程である塗装工程で一括塗装することでガルバニック腐食の対策としている。また近年ではこれに加え、接合面にエポキシ系熱硬化型接着剤などの高剛性接着剤を塗布し、塗装後の焼き付け乾燥の工程で硬化させて、機械的接合のみの部品に比べての剛性の向上が図られている。ただしこの工程での接合は、塗装焼き付け時の材質間の線膨張係数差による熱ひずみの影響が大きいため、それを無視できるだけの部品剛性を有する設計が必要とされる。

②は、自動車の外観を構成する部位であり、意匠性や質感に直結することに加えて、薄板で構成されるた

め、ボデーマルチマテリアル化において最も難度の高いものとなる。具体的には自動車としての商品性を左右するデザインとプレス成形性との兼ね合いや、薄板で顕在化する熱ひずみ対策など技術的な課題が多く存在している。(Fig. 3<sup>2)~4)</sup>)

ここで留意すべき点は、熱ひずみが発生する要因は、材料が組み合わせられることで発生する線膨張差だけでなく、この時にさらされる温度域における材料強度（座屈強度）、さらに接着剤の硬化特性など複合的なものになることである。

自動車が置かれる温度環境は、大きく二種類に区分される。一つは実際の使用環境における温度域、もう一つは製造工程における温度域である。一つ目の実際の使用環境では一般に $-30^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$ となっており、自動車としての商品評価でも再現試験や現地での耐環境試験において当該温度範囲での評価が実施されている。ただし、これは先の温度域全般における変化を想定したものではなく、設定温度下での保温による各部機能が正常に機能するかを評価するものとなっている。他方の製造工程における温度域は、塗装時の焼き付け、乾燥における温度変化が最も大きい。この温度変化は 室温 (RT)  $\rightarrow$  焼き付け乾燥 約 $170 \sim 200^{\circ}\text{C}$   $\rightarrow$  室温 (RT) となり、室温が $20^{\circ}\text{C}$ とすれば、 $150 \sim 180^{\circ}\text{C}$ の変化となる。 $150^{\circ}\text{C}$ の温度変化の場合、鋼板であれば、1 mの部品長さが $1.65 \text{ mm}$ 、同じくアルミニウム材では $3.45 \text{ mm}$ の寸法変化となり、両者の差は $1.8 \text{ mm}$ となり、2%近い熱ひずみが発生することになる。この熱ひずみによる変形は接合法にも依存し、例えばリベットなどの機械的接合の場合、室温で接合された時点が基準となり、高温時には線膨張率が大きい材料に圧縮応力が発生し、アルミニウムのように高温強度が低い材料が座屈などの塑性変形が発生しやすくなる。この場合、室温への冷却後もこの座屈部が外観上判別で

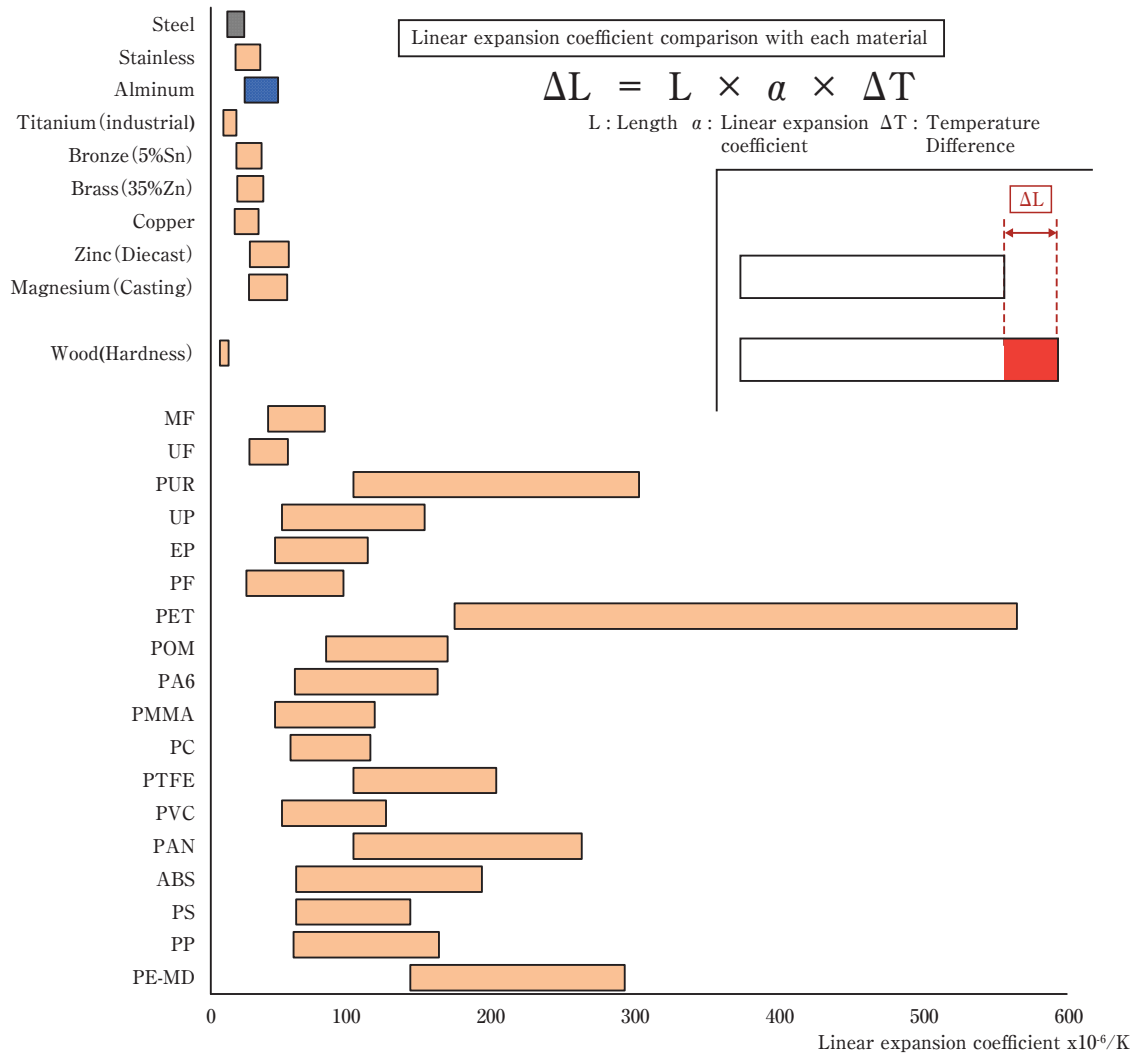


Fig. 3 Influence of linear expansion coefficient.<sup>2)~4)</sup>

き、面品質として問題となる。一方、熱硬化型接着剤の場合、逆に高温で硬化した時点が基準となり、冷却されると線膨張係数が高い材料が大きく縮むため、引張り応力が発生し、これが面ひずみの原因となる。さらに、当該部位ではアウターパネルとインナーパネルまたはレインフォース材などの内部構造物との間で、部品間の隙間保持や走行中の外部音の減衰・吸音を目的に樹脂充填がなされる場合がある。この樹脂は一般に室温状態で塗布され、焼き付け乾燥時に発泡およびそれに伴う体積膨張することで、部品間を充填し、性能を得ることができるよう設定されている。この反応は高温時に完了し、冷却工程以後も維持されることから、この樹脂の体積膨張に伴うひずみが発生する場合がある。このように塗装焼付け時には様々な原因で熱ひずみが発生するため、これらの現象に対しての対策が必要となる。対策としては、パネルにひずみの伝播を抑制する形状を付加する事例や、組み立て工程そのものを変更する事例がある。アルミニウムルーフにお

ける両者の対策事例を以下に示す。前者の例として、以前三菱自動車のアウトランダーおよびランサーエボリューションのルーフを波板形状として、ハイテンのピラーとの間で発生する熱ひずみを吸収する手法が挙げられる。しかし、現在この手法を使った事例はないことから、意匠上の制約が採用への障害となっていることがうかがえる。後者は、近年欧州で広がり始めている方式で、個別に塗装した後に、常温で接合することを特徴としている。自動車の商品性として、ルーフにはノーマルルーフ、サンルーフ、パノラマルーフなどの様々なバリエーションを持つことが求められており、これらの作りわけのためにルーフを後付けとしている場合がある。これには、常温硬化型の接着剤を使用しており、高強度接着剤の開発に加えてロボット使用による塗布条件の安定化や塗布面状態の管理条件の厳密化など、高度な生産技術面での進歩が支えている。接着剤はウレタン系の接着剤が採用される傾向にあり、適度な弾性により自動車の使用環境下における線膨張



差の吸収、面間隙の確保(による金属間の接触による打音発生防止)、その絶縁性により材料間の電位差における腐食の抑制と多岐にわたる機能を有している。ただし、接着剤単体では部品の信頼性の全てを担保することはできていないことから、締結などの機械的接合が併用されているが、将来的にはウインドシールドガラスの様に、接着剤単独での成立が見込まれる部位でもある。

もう一つの課題として、組み立て後に塗装工程での脱脂や化成処理のような化学的処理がある。ボデーマルチマテリアルの場合には、異材が近接して存在することとなる。これを化学的処理で薬液中に浸漬することから、この時に局部的に電気回路が形成され、電位的に卑な材料側が優先的に溶解する、いわゆるガルバニック腐食が発生する(Fig. 4<sup>5)</sup>)。これは一時的な処理ではあるが、特に微小な隙間においては、侵入した薬液の除去が困難であり、その後の耐食性に悪影響を及ぼす可能性がある。

③はサブラインでの組立ての後、塗装工程を骨格系と同時処理し、次いで組み付け工程で再度組み付けと

なることで成立していることから、製造工程での工程追加が最小限となる。また塗装工程を同時処理することにより、高い外観品質が得られるメリットは大きく、採用の可否は成形性とそれに伴う空間的な制限の改善であることから、成形方法を含めた成形性の改善により、採用の拡大が見込まれる。

④前出の②と同様な課題を有しているが、今後、前出のルーフパネルの様な工程変更で成立することが見込めることから、④に該当する部品は、ボデーマルチマテリアル化において増加してくることが予想される。

⑤は自動車に組み付ける機能部品が増加しており、それぞれの機能部品の特性に応じたブラケットなどの取り付け用の部品が必要である。これらの取り付け用の部品にも軽量化が求められ、様々な軽量素材の適用事例が増加しつつある。性能および経済性の観点から、機能をできるだけ統合して部品点数を減らす努力がなされている。

### 3. マルチマテリアル化の課題と対応法

前章で述べたマルチマテリアル化の課題である熱ひずみについての対策と、異材間の電位差による腐食(ガルバニック腐食)対策は、構造変更を初め、接合方法、工程変更などを伴うものとなり、様々な技術的革新が図られていくと予想される。

熱ひずみについての対策は、その接合方法や接着剤の物性、緩衝材などの多くの要因があり、その影響予測は難しいものとなっているが、CAE技術の進展により、その予想精度は向上を見せている。CAEの精度を上げるためには個々の材料の実使用時と製造時の温度条件下における物性を明確にすることが重要であり、翻って、このような予測計算を実施する際にどのような物性が必要かの明確化、またその測定手法の確立などが望まれる。これまでそれぞれの素材で分割されていた物性データや測定手段が分野を超えて示され、相互に活用できることになったことが、大きく進歩に至った原因と考えられる。またガルバニック腐食問題に対しては、シール材や接着剤を用いての絶縁や、犠牲材となる材質を部品間に配するなど、構造上や施工上の配慮が進みつつある。また水分などが長期にこのような部品間に存在し電気回路を形成することのない様に配慮がなされており、これらの細かい対策の実績が今後のマルチマテリアルボデー車の開発に欠かせないものになると思われる。

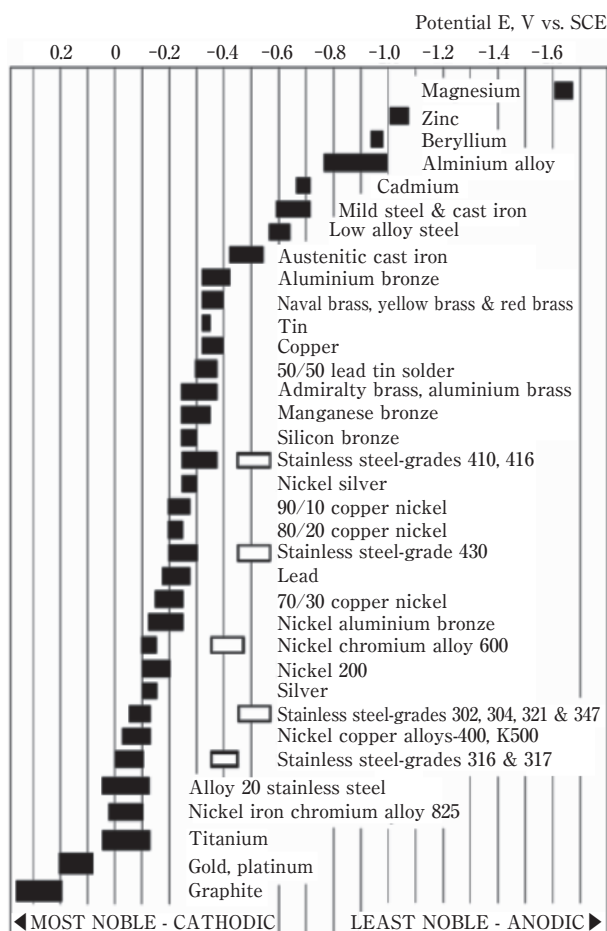


Fig. 4 Corrosion potential of various metals in seawater.<sup>5)</sup>

## 4. 結 言

自動車の軽量化を目的として、従来の蓋物のアルミニウム化に加えてボデー構造の一部をアルミニウム化するボデーマルチ材料化が始まり、マテリアルミックスは現在大きな転換点を迎えている。各自動車メーカーとも、多大な開発および設備投資を伴う変換点であり、まだその本命と思われる素材および構造が確定するに至っていないことから、今後も紆余曲折があることが予想される。また日本においては、自動車メーカーを頂点とした産業ピラミッド構造が形成されているが、マルチ材料化は、これをも変革しうる可能性がある。EV車の様に、従来とは異なる技術を用いる自動車を手がける新興メーカーは、既存の設備投資がなく、最初からマルチ材料化に対応した製造設備の導入が可能であり、既存メーカーに代わって自動車軽量化のトップランナーとなることも予想される。

当社は、各自動車メーカーおよび部品メーカーの実情に即したアルミニウムによる軽量化の提案を今後も積極的に実施していき、引き続き各社の自動車軽量化促進に貢献していきたい。

## 参考文献

- 1) Mercocles Benz プレスリリース
- 2) 実用プラスチック事典 材料編 (株)産業調査会 事典出版センター
- 3) アルミニウムハンドブック 一般社団法人 日本アルミニウム協会
- 4) プラスチックス 日本プラスチック工業連盟 vol.51, No.12.
- 5) Specialty Steel Industry of North America (SSINA) HP



山田 豊 (Yutaka Yamada)  
(株)UACJ 技術開発研究所 第六研究部