

# 化学経済

第四次産業革命に化学産業はどう備えるべきか ..... 茂木 正 2

<トップインタビュー>

環境を経営の主軸に事業規模を2020年代に倍増へ

高下 貞二 積水化学工業社長 ..... 8

## ■特集 トップ製品の理由

ADEKA ... 樹脂添加剤企画部/化学品企画部	18	出光興産 .....	増山 明年	20	
宇部興産 .....	編集部	22	クレハ .....	上山 隆久	24
昭和電工 .....	須崎 研二	26	信越化学工業 .....	有機合成事業部	28
新日鉄住金化学 .....	機能材料事業部	30	住友化学 .....	渡邊 尚	32
第一工業製薬 .....	小笠原 亜沙子	34	DIC .....	森 俊之	36
帝 人 .....	田中 謙吾	38	東亜合成 .....	機能化学品事業部	40
東 ソ ー .....	中谷 茂	42	東 洋 紡 .....	熊野 淳夫	44
日産化学工業 .....	齊藤 雅人	46	日本化薬 .....	大泉 優	48
日本ゼオン .....	編集部	50	三井化学 .....	入江 秀人	52
三菱化学 .....	編集部	54	三菱樹脂 .....	編集部	56

知財部門にみる分社マネジメント..... 池谷 光司 60

表紙写真/木村 藤夫


豊かな水にあふれた未来のために一滴の水から守り通す

ハイグレードサンラック      サンラックC

サンラックS      活性炭

サンラックP      重金属固定剤(UMLシリーズ)

サンラック5%

 **本町化学工業株式会社**  
<http://www.honchochem.jp>

本社営業本部 東京都港区芝大門1-3-5(ゲイブルビル) 電話 03-3434-5281(代) FAX 03-3434-5280  
 大阪支店 大阪市淀川区宮原4-3-12(新大阪明幸ビル) 電話 06-6150-5550 FAX 06-6150-5551  
 九州営業所 福岡市博多区御供所町1-1(西鉄祇園ビル4階) 電話 092-281-2510 FAX 092-281-2512

# 2016.1

(Vol.63 No.1)

異種材料接合技術：注目される要因と技術的突破への展望……………	中田 一博	66
コラーゲンの用途開発の現状……………	渡部 睦人, 野村 義宏	73
IoTの材料業界に対する影響とアライアンス戦略（後編） ……………	中川 隆之, 沓掛 毅	82

## ■連載

新局面迎えたグローバル化学再編①

コア事業の再定義迫られる大手化学……………	田口 定雄	98
-----------------------	-------	----

TOPICS JST, 濱口新理事長が会見……………	16
News Clip 三菱ケミカルホールディングスが新中計, 2020年度にROE12%へ……………	58
News Clip 昭和電工, 新中計で1300億円投資……………	80
News Clip 石油業界の再編が加速……………	88
海外は今 構造変化加速する製薬業界 技術革新と新興国市場にらむ……………	90
Report ダウ日本イノベーション・デー 東京……………	92
TOPICS スペシャルケム 第2回VIPセミナー……………	106

総合索引 2015年1月～12月……………	110
-----------------------	-----

化学工業日報ニュースダイジェスト……………	107	広告索引……………	119
次号予告……………	120	編集後記……………	120

広がる未来を見つめて

**Nisso Shoji 日曹商事株式会社**  
A Step Forward Together! <http://www.nissoshoji.com>

本社 東京都中央区日本橋本町3-3-6ツカホビル ☎03(3270)0701 大阪支店・名古屋支店 営業所 札幌・仙台・高岡・広島・福岡  
海外 台湾日曹商事・上海日曹貿易・香港日曹商事・日曹商事(タイランド)

# 異種材料接合技術： 注目される要因と技術的突破への展望

大阪大学 接合科学研究所 特任教授 なかた かずひろ  
**中田 一博**

## 1. 異種材料接合技術とは

異種材料接合技術は、文字どおり、異なる材料を接合する技術である。材料は、それを構成する元素の結合機構により、金属材料、高分子材料およびセラミックス材料に分類され、さらにそれぞれの材料が構成元素の組み合わせにより多種多様な材料に細分される。

これら金属材料、高分子材料およびセラミックス材料の異なる材料間の接合は、広い意味での異種材料接合となる。しかし、例えば同じ金属材料に属するものでも、アルミニウムと鉄の接合の組み合わせのように、金属元素が異なるものとの接合や、さらに、例えば同じ鉄鋼材料でも、炭素鋼とステンレス鋼との組み合わせのように主要構成元素（この場合は鉄）は同じでも、添加されている合金元素の種類や合金量が異なる材料の接合の組み合わせも、狭い意味での異種材料接合と呼ばれている。なお同種材料接合は、文字どおりに同一のものを接合することである。

自動車、鉄道車両、船舶などの輸送機器や各種化学プラントやエネルギープラント、ビ

ル・橋梁などの建築物、各種産業機械などの多くの構造物の強度部材には、構造用材料として金属材料が用いられ、中でも汎用性に優れた鉄鋼材料が主に用いられてきた。このため、鉄鋼材料同士の接合においては、同種材料のみならず異種鉄鋼材料間の接合技術もこれまでにほぼ確立されている<sup>1)</sup>。しかし、同じ金属材料間でも、鉄鋼材料とアルミニウム合金や、鉄鋼材料とチタン合金など、鉄鋼材料／非鉄金属材料、あるいは異なる非鉄金属材料間の異種材料接合は技術的に困難な組み合わせが多く、未だ開発途上の接合技術である。

ましてや、金属材料と高分子材料や金属材料とセラミックス材料との接合などはそもそも材料の結合機構が全く異なるために、原理的にみて、その接合は極めて困難である。しかし、このような、これまでほとんど接合が不可能とみなされてきた異種材料接合の組み合わせについても最近では実用化に向けた大きな進展が図られている<sup>2~5)</sup>。

## 2. 今、異種材料接合技術が注目されるのは

最近、「マルチマテリアル化」というキー

ワードが自動車などのものづくり技術においてよく用いられている。これは、一般的には、さまざまな材料をその機能と特徴を生かすように、部材としてあるいは部品として適材適所で用いて、構造物全体としての機能を高めようとする考え方であり、その目的機能は、軽量化以外にも、例えば、強度、耐熱性、耐食性、電気伝導性、熱伝導性など多方面に及ぶ。この「マルチマテリアル化」のためには、当然のことながら異なる機能を有する材料を接合する技術、すなわち異種材料接合技術が必要不可欠となる。

この「マルチマテリアル化」は、特に、自動車製造技術においては、燃費向上のための車体の軽量化技術のキーテクノロジーとみなされている。自動車車体の構造用材料は強度や成形性、またコストなどの観点から、これまでは主として鉄鋼材料が使用されてきており、強度の高い鋼材（高張力鋼、いわゆるハイテン鋼）を開発し、薄肉（薄板）化することにより、その軽量化が進められてきた。しかし、鉄鋼材料を使用する限りでは、加工性やコスト面での制約があり、高強度化にも限界がある。このために金属材料のなかでも軽量金属材料として知られているアルミニウム合金（鉄鋼材料の約3分の1の軽さ）を鉄鋼材料に置き換えることも検討されてきた。過去に、オールアルミニウム合金製車体が実用化されたが、当時はコスト面・価格面で普及しなかった。またアルミニウム合金よりもさらに軽いマグネシウム合金（鉄鋼材料の約5分の1の軽さ）の適用も検討されたが、同様に実用化には至っていないようである。

ここにきて、排ガス規制や燃費向上に一段と高い要求が求められてきており、車体の軽量化に対する要求もより厳しくなっている。しかしこれまでの技術的な努力にもかかわらず、単独材料では、もはやこのような厳しい要求に応えることができなくなってきたた

め、「マルチマテリアル化」という、新しい概念による挑戦が始まってきている。これにより、過去にかけて適用が検討されたアルミニウム合金やマグネシウム合金が再び注目されている。しかし、今度は、その適用方法はそれぞれの材料の特長を生かして、適材適所で組み合わせて使用する方法に転換している。

さらに、金属材料にこだわらず、すでに航空機等で使用実績のある炭素繊維強化プラスチック（CFRP、鉄鋼材料の約5分の1の軽さで、引張強度は約3～10倍）を組み合わせて使用し、一気に車体軽量化の壁を突破しようとする機運が盛り上がってきている。当然のことながら、金属材料のみならず、金属材料と樹脂・CFRP（高分子材料）との、全く新しいかたちの異種材料接合技術が「マルチマテリアル化」に不可欠な技術として要求されてきているのである。

### 3. 各種接合法の異種材料接合への適用の可能性

接合法は、おおむね「溶融溶接法」「固相接合法」「ろう接法」「接着法」「機械的締結法」に大別できる。ここでは接合法の詳細には触れないが、それぞれの接合法による異種材料接合の可能性は、筆者の判断では表1のようになる。このうち、最も適用対象範囲が広いのは接着法と機械的締結法である。よく知られているように、この二つの接合法は航空機の機体組み立てに使用されている接合法でもある。それでは、自動車にもそれらを使用すればよいのではないかとということになる。事実、自動車車体で既に実用化されているアルミニウム合金／ハイテン鋼およびハイテン鋼／樹脂・CFRPなどの異種材料接合法は、これらの二つの接合法である。しかし、自動車と航空機では、許容される製造コストと量産性（生産台数）に極めて大きな相違がある。

表1 各種接合法と異種材料接合への適用の可能性

接合プロセス	異種材料の組み合わせ				
	同種 金属基	異種 金属基	金属/樹脂 金属/CFRP	金属/セラミックス	
溶融溶接	アーク溶接	◎	△	×	×
	電子ビーム溶接	◎	○	×	×
	レーザー溶接	◎	○	◎*	×
ろう接	ろう付	◎	◎	×	◎
固相接合	拡散接合	◎	○	×	×
	圧接	◎	○	△	×
	FSW	◎	◎	◎*	×
接着	接着剤	◎	◎	◎	◎
機械的締結	リベット, ボルト, かしめ	◎	◎	◎	△

(注) 異材接合の可能性: ◎高い, ○材料に大きく依存, △低い, ×不可, \*特別な手法  
(出所) 筆者作成

また技術的にも、接着法では接着剤の取り扱いに細心の注意が必要であり、また強度を高めるための熱硬化処理の問題がある。リベットやボルトなどの締結材を使用する締結法では、専用の接合機器や締結材のコスト、さらに量産性に、やはり課題を抱えている。現状の自動車車体の組み立てでは、量産性に優れ、かつ生産コストも低い接合法である抵抗スポット溶接やアーク溶接が主体であり、また一部では、装置コストは高いが、レーザー溶接も用いられている。いずれも溶融溶接法である。

すなわち、異種材料接合においても、このような生産コストが低くて、かつ量産性に優れた接合法が求められている。したがって、異種材料接合に対しても、接着剤やリベットなどを使用せずに、直接的にかつ簡便に接合されることが望ましいのである。もちろん、接合部の強度などの性能は要求事項を満足する必要がある。「果たして、そのように便利な、都合のよい異種材料接合法はあるのだろうか?」というのが、昨今、異種材料接合技術が何かと話題になっている一つの理由であろうと思われる。

表1に示すように、このような期待される直接接合法としては、ろう接法、FSWのような固相接合法やレーザー溶接などの高エネルギー

レーザー溶接法にその可能性がみられる。

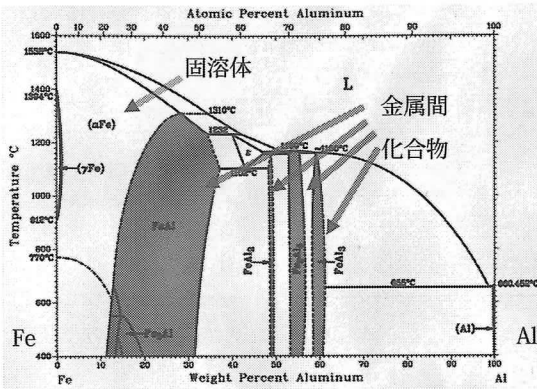
#### 4. 異種金属材料接合は難しい

まず一見簡単に思われる金属材料同士の異種材料接合として、車体軽量化のターゲットである鉄鋼とアルミニウム合金の組み合わせを取り上げてみよう。金属材料同士の異種材料接合の良し悪しは、図1に示す2元系状態図<sup>6)</sup>によって判断できる。状態図は金属材料屋にとっては、化学屋にとっての分子化学構造式と同じように必須の基礎である。図1(a)は鉄とアルミニウムの組み合わせであり、横軸が鉄FeとアルミニウムAlの混合割合(組成という)を示し、これらの混合したものを合金という。縦軸は温度である。高温では合金は溶融状態であるが、低温では固体となり、その構成相は金属の組み合わせと組成により異なる。構成相は大きく固溶体と金属間化合物に分けられる。

固溶体は、文字通りに固体状態で一方の金属中に片方の金属が一定の割合で、一様に完全に溶け込み、一体化したものである。基本的にその性質は組成が多い金属の性質を示す。

これに対して金属間化合物は、両金属が一定の整数比の割合で結合した化合物であり、

(a) 一部固溶体+金属間化合物 Fe-Al系



(b) 全率固溶体 Cu-Ni系

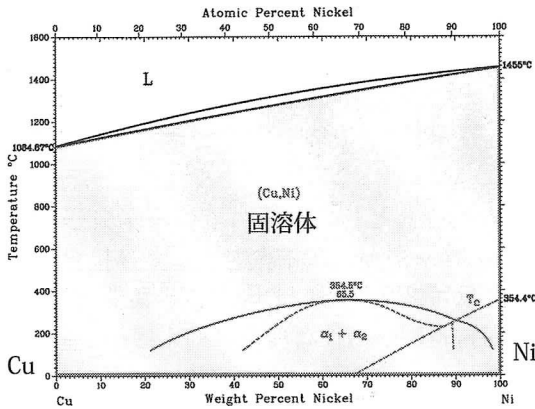


図1 代表的な2元系平衡状態図

硬くて、脆い性質を示す。図1 (a) 中の灰色部分が金属間化合物の領域であり、Fe-Al系では結合状態の異なる金属間化合物が4種類存在する。このように金属間化合物を形成する組み合わせでは、接合部が脆くなり、接合時に割れが発生したり、接合部の強度や靱性も低いものとなり、異種金属接合が難しくなる。一方、図1 (b) に示す鉄FeとニッケルNiの組み合わせでは、すべての組成において金属間化合物は形成されずに固溶体を形成する。このような組み合わせでは異種金属接合は極めて容易になる。

すなわち、脆い金属間化合物が接合部に形成されるかどうかで、金属材料における異種材料接合の可能性が判断される。残念ながら、

軽量化にとって重要な鉄鋼材料とアルミニウム合金の異種金属接合は、きわめて難しいことが分かる。

## 5. 鉄鋼材料とアルミニウム合金の直接異種金属接合への挑戦

以上のように、鉄鋼材料とアルミニウム合金の組み合わせは、原理的に接合が極めて難しいことは分かったが、それでも車体軽量化にとってはキーとなる技術であり、古くから内外の多くの研究者がこの課題に挑戦してきた。その結果、幾つかの良好な接合継手が得られたことが報告されている。すなわち、接合部に割れが発生することなく接合が可能であり、かつ接合継手の引張強度試験においてアルミニウム合金の母材（正確には熱影響部）で破断する、あるいは接合部破断ではあるがアルミニウム合金母材強度に近い接合強度を示すなどである。そのような報告結果を取りまとめてみると、その接合法と得られた接合界面構造との間には表2に示すように大きく二つの特徴的な関係があることが認められた。

接合法は高温反応型と低温反応型に分けられる。接合温度が金属の熔融温度以上の熔融溶接やそれに近い高温で反応させる拡散接合法では、接合部には金属間化合物が形成する。この場合に、良好な継手が得られた接合界面の構造は、金属間化合物層の厚さが数 $\mu\text{m}$ 以下の薄い場合であった。一方、接合温度が十分に低く、熔融することなく、金属の塑性流動現象を利用する固相接合法を用いた場合には、金属間化合物の形成を抑制することができ、代わって接合界面には酸化物を主体とする非晶質相が数十～数百nmの極薄い層として存在していた。これがいわばのりの役割を果たして接合されるのである。

困難とされてきた鉄鋼材料とアルミニウム合金の異種金属接合の組み合わせも、このよ

表2 鉄鋼とアルミニウム合金の異種材料接合プロセスと接合可能な接合界面構造

接合プロセス		接合界面構造
高温反応	溶融溶接 抵抗溶接 ろう付 拡散接合	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 高温反応のため金属間化合物層形成</li> <li>• 金属間化合物層の厚さが支配因子</li> <li>• 数<math>\mu\text{m}</math>(<math>1\mu\text{m}</math>)以下で良好な継手強度</li> </ul>
低温反応 塑性流動現象	圧接 摩擦圧接 超音波 爆接 FSW	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 金属間化合物層がSEM程度では認められない</li> <li>• 界面に非晶質層形成(数nm~数十nm厚さ, 酸化物層)</li> <li>• 化合物と非晶質層の複合層</li> </ul>

(出所) 過去の文献等を参考に筆者作成

うな多くの実験成果に基づく経験則により、突破できることが分かってきており、またこの経験則はその他の異種金属接合の組み合わせにも適用できることが明らかになってきている<sup>7)</sup>。

## 6. 金属と高分子材料・CFRPの直接接合は可能か

さらに自動車・鉄道車両の軽量化の観点からは、鉄鋼/アルミニウムの金属材料同士の組み合わせを飛び越えて、構造が全く異なる金属材料/高分子材料の組み合わせ、特にアルミニウム/樹脂・CFRPの異種材料接合が要求されてきている。原理的には、金属材料と高分子材料を直接反応させて接合することはできない。したがって、その接合には、接着剤を用いる接着法やリベットやボルトなどを用いる機械的締結法などの間接接合法が適用され、実用化されている。

しかし、生産技術の観点から、量産性やコストを考えると、両者を直接接合できる異種材料接合技術が求められている。最近の研究では、射出成型法や熱圧着法などを用いて、熱可塑性樹脂と最適化した表面状態を有する金属材料との間で、直接接合が可能な接合技術開発が進んできている<sup>5)</sup>。いずれも熱可塑性樹脂を適当な熱源(抵抗加熱, 摩擦加熱, 超音波振動加熱, レーザビーム加熱など)により、接合部で樹脂を局所的に溶融して接合

するものである。

筆者らのこれまでに得た知見などにより、金属と樹脂・CFRPとの直接接合の接合機構とそれに関係する材料特性をまとめると表3のようになる。すでに述べたように、金属と高分子材料は直接的に化学結合することはできないが、ファンデルワールス力、あるいは水素結合力として知られている①分子間力(主に静電力的な結合力)により接合することは可能である。この場合の条件として、樹脂材料には極性官能基(例えばOH基)と呼ばれる一定の割合で電気的に分極する(プラス極とマイナス極の性質を帯びる)構造を有することが必要であり、一方、金属もその表面が、やはり分極の性質を持つ酸化皮膜に覆われていることが必要である。しかし、その結合力は十分に大きなものではない。②化学結合力はこれよりもはるかに大きな接合力を示すが、本来反応しない両者を化学結合さ

表3 接着剤やリベットを使用しない金属材料と樹脂材料の直接接合機構

① 分子間力:水素結合力(ファンデルワールス力も含む) 樹脂の極性官能基と金属表面の酸化皮膜との間の静電的引力
② 化学結合力:化学反応(共有結合)による化合物形成 金属表面に金属と樹脂の両方に反応する特別な表面処理皮膜(シランカップリング処理など)が必要
③ アンカー効果:機械的締結力の一つ 金属表面の数十nm~数 $\mu\text{m}$ の微小凹凸や穴の中に溶融した樹脂を溶かし込んで固化して結合する

(出所) 筆者作成

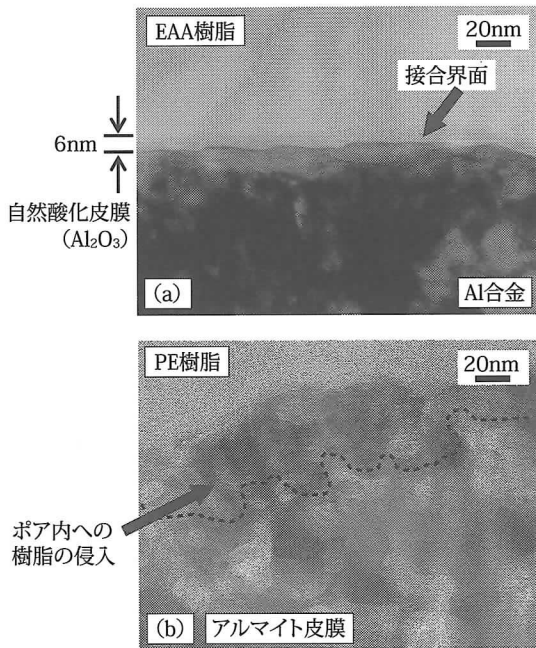


図2 摩擦重ね接合法により得られたアルミニウム合金A5052と樹脂とのナノレベル接合界面組織  
 (a) EAA樹脂/受入材のままのAl合金、  
 (b) PE樹脂/アルマイト皮膜処理Al合金

せるためには、工夫が必要である。すなわち、金属表面と反応し、かつ高分子材料とも化学的に反応して結合できる中間物質層を形成することにより、初めて可能となる。例えばシランカップリング反応層が代表的なものであり、あらかじめ金属表面にこの層を形成しておくことにより、金属/樹脂を化学結合による高い結合力で接合できることが明らかになっている<sup>8)</sup>。一方、機械的な締結の一種として、③アンカー効果と呼ばれる接合機構がある。これは、金属表面に好適な状態に微細な凹凸や穴を形成し、その部分に溶解した樹脂を流し込んで固化することにより、機械的に金属と樹脂を接合する方法である。したがって、直接接合としては①もしくは②と、これに③を組み合わせた接合機構が効果的ということになる。

筆者らが摩擦重ね接合 (FLJ) 法<sup>9)</sup> で作製

した、アルミニウム合金と樹脂の直接異種材料接合継手を、透過型電子顕微鏡で観察したナノレベルの接合界面構造の例を図2に示す<sup>10)</sup>。図2 (a) は、極性官能基 (COOH基) を有するエチレンアクリル酸コポリマー (EAA) とアルミニウム合金との組み合わせであり、EAA樹脂はアルミニウム合金表面のナノレベルの厚さの自然酸化皮膜を介して接合されており、分子間力による接合機構によると考えられる。一方、図2 (b) は、無極性のポリエチレン (PE) とアルマイト皮膜処理を行ったアルミニウム合金との接合界面であり、数十ナノレベルのポーラス構造を有するアルマイト皮膜層の表面部分で、皮膜のポア中に溶解した樹脂が含浸し、固化している状態が確認されており、接合機構としてアンカー効果の作用が考えられている。なおPEとアルマイト皮膜無しのアルミニウム合金では直接接合はできない<sup>10)</sup>。

極性官能基を有するナイロン6 (PA6) をマトリックスとした熱可塑性短繊維CFRPとアルミニウム合金では、図3に示すように摩擦重ね接合法により、両者の直接接合が可能

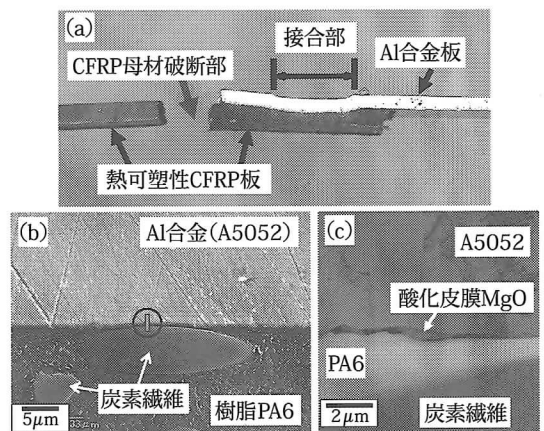


図3 摩擦重ね接合法により得られたアルミニウム合金/熱可塑性CFRPの直接接合継手  
 (a) 引張せん断試験によりCFRP母材部破断を呈した継手外観、(b) 接合界面組織、(c) (b)中の丸印部分の高倍率観察組織



であり<sup>11)</sup>、継手引張せん断試験ではCFRP母材破断を示す継手も得られている。なおこの場合は、マトリックスであるPA6樹脂とアルミニウム合金表面の酸化皮膜(MgO)が接合され、複合強化材である炭素繊維は接合には直接的には寄与していない。

実用的には、接合継手に求められる要求性能と、部材形状などの適用性、さらに量産性やコストなどを考慮して、①接着法、②リベットなどの機械的締結法、そして現在開発が進行中の③直接接合法の中から、適材適所で用いられると思われる。このため、適用可能な接合プロセスの多様化を図る必要がある。また金属/CFRPの直接接合においては、熱可塑性長繊維・連続繊維CFRPへの適用検討や、さらには熱硬化性CFRPへの挑戦が続けられると思われる。

## 7. 今後に向けて

本稿ではマルチマテリアル化における異種材料接合技術の重要性について触れたが、多様な金属材料をとってみても、技術的に確立するのはなかなか難しい課題である。ましてや、無機材料である金属材料と有機材料である樹脂材料を構造的に十分に高い接合強度で直接的に接合できるのか、ということになると、より敷居は高くなる。例えば、基本的な実験手法である、金属/樹脂接合界面を透過型電子顕微鏡を用いてナノレベルの高倍率で観察するための試料作りが、まだ確立されておらず、さらには、接合部・接合継手の各種性能評価法や接合継手の品質保証をどうするのか等、課題山積と言わざるを得ない。

金属材料屋には金属の表面状態は何か分かるが、樹脂に対しては基本分子構造はともかくとして、環境に敏感なその表面状態の把握に難儀し、ましてや樹脂に添加される鼻薬

的な微量添加物の効果になると、全くお手上げである。また、どうもそれが接合に大きく影響するようである。金属材料屋と化学材料屋の壁を取り払って、お互いの専門をオープンに教えあい、勉強しあって、開発課題に一緒になって挑戦できるような、柔軟な思考を共有したマルチ人材集団が必要とされてくるのであろう。

いずれにせよ、我が国が得意とする自動車や高速鉄道車両、さらに今後期待されるリニアモーターカー、航空機、宇宙ロケット機器など、幅広いものづくり産業において、異種材料接合技術は大きな役割を果たすものと期待される。

### <参考文献>

- 1) 溶接学会編:溶接・接合便覧第2版,丸善,(2003年)
- 2) 中田:溶接技術,50(2002)2,64-68
- 3) (株)技術情報協会:最新『異種材料』の接着・接合 トラブル対策事例集,(2006年)
- 4) サイエンス&テクノロジー(株):異種材料一体化のための最新技術,(2012年)
- 5) 日経BP社:異種材料接合「なんでもくっつける」技術が設計を変える(2014年)
- 6) T.B.Massalski: Binary Alloy Phase Diagram, 2nd ed., ASM (1990)
- 7) 青沼,中田:塑性と加工,53(2012)10,869-873
- 8) 永塚ら:溶接学会論文集,33(2015)317-325
- 9) 特許第5817140号「金属と樹脂の接合法」(2015年10月)
- 10) 岡田ら:軽金属溶接,53(2015)8,298-306
- 11) 永塚ら:溶接学会論文集,32(2014)235-241

☆ ☆

☆

☆ ☆