

## 「複合材料」特集号に寄せて

村 上 陽 太 郎\*

新金属材料, ファインセラミックス, 新高分子材料の三大分野に分類される新素材の研究開発は, エネルギー, エレクトロニクス, 航空宇宙, 医療などの先端産業分野の革新的な技術開発の鍵を握るものとして積極的な研究開発が推進されてきたが, 最近のニーズの高度化と多様化のためにそれぞれの単一素材では十分な要求に応えられなくなってきた. 複合材料 (Composite materials) が注目を集めるゆえんである. 複合材料は, 壁土の中に稟をきざんで混ぜ固めた土壁がよく例に出されるように昔から利用されてきた考え方であり, 一定の目的のために2種類またはそれ以上の異なった素材を結合または混合して, 単一の素材では実現し得ないような性能をもった新しい材料に作り上げたものを指している. さらに最近では, 目標とする性能を得るためにその組織・構造を設計して, “Tailor made”的に製造された材料と定義されている. 複合の概念ではマトリックスとなる素材を基準にするので, 先端複合材料として, 金属複合材料, セラミックス複合材料及び高分子複合材料の3種類がある. 金属複合材料は, マクロ的・組合せ型とミクロ的・混合型に分けられる. 従来から利用されてきたバイメタル, クラッド材, 被覆材などの積層複合材料は前者に, 超硬合金, サーメットなどの粒子混合材料, SAPで代表される粒子分散強化複合材料は後者に属する. 最近では高強度耐熱材料として繊維強化複合材料が最も注目されている.

ウィスカー (Whisker) と呼ばれる直径  $1\ \mu\text{m}$  前後で長さが数  $10\sim$  数  $100\ \mu\text{m}$  の猫のひげのような結晶は理論値に近い強度を有し, 特に共有結合をもつ SiC のような化合物ウィスカーは,  $1\sim 2\times 10^3\ \text{kgf/mm}^2$  の引張破断強度 ( $\sigma_B$ ) と,  $4\sim 7\times 10^4\ \text{kgf/mm}^2$  のヤング率 ( $E$ ) を示すことが明らかになり, ウィスカー強化金属複合材料では, その整列方向の  $\sigma_B$  や  $E$  が複合則 (Rule Of Mixture, ROM と略称される) で計算される数値にほぼ等しいことが理論的にも実験的にも実証され, 夢の材料として喧伝されて華々しく登場した. ウィスカーを一方向に整列させる工業的方法が確立しないのでこのような複合材料は工業的には実現していないが, 一方複合材料に利用できる強化繊維の新規開発と企業化の急激な進展によって, コストダウンや特性向上が実現し, SiC,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , グラファイトのウィスカーを複合したランダム方位の複合材料, アルミナや六チタン酸カリ ( $\text{K}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$ ) 短繊維を用いた複合材料, B, SiC, FP アルミナなどの直径の太い連続繊維, 炭素, グラファイト, SiC, アルミナなどの  $7\sim 15\ \mu\text{m}$  直径の連続繊維を用い, アルミニウム, マグネシウム, チタンなどの金属マトリックスに一方向に複合した材料の研究開発は各国で盛んに推進されてきた. このように繊維で強化した複合材料は, 繊維強化金属複合材料 (Fiber-Reinforced Metal Composite) といわれ, 我が国では FRM と呼んでいるが, 米国などでは, 繊維はアスペクト比すなわち,  $l$  (長さ) /  $d$  (直径) の比が1より大きい, 粒子は,  $l/d=1$  の場合であるので, アスペクト比を基準にして1の粒子分散強化複合材料を含めて MMC (Metal Matrix Composite) と称している.

FRM では繊維配向方向の  $\sigma_c$  や  $E_c$  はマトリックスと繊維の界面に脆弱な反応生成層等が形成されていなければ前述のような ROM が当てはまる. 例えば複合材料の破断強度  $\sigma_c$  は,  $\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma'_M$

\* 京都大学名誉教授, (財)大阪科学技術センター附属ニューマテリアルセンター所長 工博

( $1 - V_f$ ) で示される。ここで  $\sigma_f$ : 繊維の引張破断強度,  $V_f$ : 繊維の容積率,  $\sigma'_M$ : 複合材の破断時のマトリックスの強度である。従って  $300 \text{ kgf/mm}^2$  の  $\sigma_f$  をもつ繊維をアルミニウム合金に  $V_f = 40\%$  複合した場合には、マトリックスの強度を無視しても、 $120 \text{ kgf/mm}^2$  の引張強度と  $10^4 \text{ kgf/mm}^2$  以上の弾性率をもつアルミニウム合金が得られることになり、特に複合材料の場合には、かなりの高温まで強度が低下しない特徴があるので、耐熱材料として利用できる大きなメリットがある。

現在 FRM のマトリックスとしてはアルミニウム合金が最も注目されているが、米国ではチタン合金やマグネシウム合金をマトリックスにした研究が行われている。連続繊維を用いる複合材料の製造法として、(イ)溶湯中に繊維を浸して複合する溶浸法 (Infiltration method)、(ロ)マトリックス合金箔と繊維間の高温での圧縮と拡散を利用する拡散接合法 (Diffusion bonding)、(ハ)プラズマ溶射、Ion plating 法によってマトリックス合金を繊維に被覆して、Preform を作り、これを拡散接合法で製品形状に緻密化する方法などが行われている。(イ)の溶浸法は最も簡単な冶金工業的な方法であるが、比較的安価な炭素繊維はアルミニウム溶湯に濡れないので、Ti-B 化合物の被覆などの前処理が必要であり、複合材料の価格の上昇を招くことが利用の最大の障害になっている。最近アルミニウム合金マトリックス複合材の開発方向は用途によって二つのカテゴリーに分別されている。宇宙・航空機材料のように価格よりも性能が要求される場合には、超急冷凝固合金粉末と SiC ウィスカー粉末と混合して、粉末冶金法で製造した損傷許容材料を志向する場合と、価格面が重視される場合には、Saffil (英国 ICI 社製、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  96% -  $\text{SiO}_2$  4%) 短繊維などの比較的安価な強化材を溶湯鍛造法でアルミニウム合金に複合する方法とがある。溶湯鍛造法の場合にはあらかじめ Preform を作るが、その場合繊維の配列を Tailor made 的に行うことが試みられている。またランダムに配向した複合材を高温押し出し法で、繊維を押し出し方向に整列させることも行われている。いずれの場合もこれらの MMC は 2 次加工として、押し出し、圧延、鍛造などの通常の高圧加工技術が利用できる利点があり、今後の発展が期待されている。

日本鉄鋼協会では従来の鉄鋼を中心とした部門に加え「萌芽・境界技術」部門が設けられ、数年前から講演大会や会誌に取り上げられ、多数の研究発表がなされてきているが、今回は「複合材料」特集号が第 75 巻 9 月号に企画刊行されることになった。ウィスカーの発見とそれを一方向に整列させた金属複合材料が夢の材料として喧伝されてから既に 20 年が経過した。昭和 56 年に発足した次世代産業基盤技術研究開発制度の研究開発テーマとして取り上げられた「複合材料」も平成元年度で 8 か年の研究期間を終えようとしている。初期の目標をほぼ達成しているが、今後はさらに実用化の促進と拡大が望まれる第 3 世代に入ろうとしている。このような時期に本特集号を企画されたことは誠に時宜にかなったものと言える。本特集号の内容は、炭素繊維、材料設計、界面挙動、Al 合金基複合材料、耐熱合金基複合材料、粒子強化複合材料、積層複合材料、複合材料の評価及び応用の 9 項目に分類され、ほぼ各項目には、我が国のそれぞれの分野の最高権威の方々による解説がつけられ、現状と問題点などが説明されている。また論文と技術報告は我が国の第一線の研究者、技術者の方々の最新の研究成果が発表されている。解説 8 編、論文 30 編、技術報告 13 編を数え、金属複合材料の現状と問題点、将来動向を把握するにこういう情報を提供するものと思われる。

米国においては、アポロ、スペースシャトル、スペースステーションなどの計画に代表される宇宙開発の必要性や軍事上の目的から、MMC の研究開発は国防総省、航空宇宙局などの膨大な研究開発費に支えられて推進されているが、それらの情報は完全に Closed の状況で、外部から知るすべもない。わずかにオービターの胴体の骨組みに B/Al のチューブが使用されていること、宇宙望遠鏡のアンテナマスト兼導波管に Gr/Al の角パイプが、また光学システムの鏡や水平保持装置に  $\text{SiC}_w/\text{Al}$  と  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  の鍛造品が実用化されていることなどが発表されているにすぎない。我が国における研究開発は実用化の時代を迎え、着実な歩みを続けているがいまだ実用化の事例は少ない。トヨタ自動車(株)がディーゼルエンジンのピストン頂部に溶湯鍛造法で製造したアルミナ短繊維強化複合材料を用いてよい成績を挙

げている例が顕著である。筆者は昭和 63 年 11 月 10 日、11 日の両日にわたって韓国科学技術院において大韓金属学会の主催で行われた韓日共同複合材料シンポジウムに日本金属学会より派遣された参加者の団長として出席する機会を得た。発表論文は 20 題で、日本側は参加者 9 名、論文数 9 であった。両国の発表論文と討論を通じて、MMC の研究開発動向の大筋が判断できるように思われたのであえて述べさせていただくことにした。米国や欧州における軍事的目的以外では、連続繊維強化複合材料の研究開発は先にも少しふれたように少し下火になってきている。アルミニウム合金をマトリックスにし、ウイスキー、短繊維、粒子を強化材とし、製造法として、溶湯鍛造法と粉末冶金法が我が国においても主流になっている。韓国でも例外でないことが感ぜられた。

金属複合材料に関して、今後さらに実用化の促進と拡大をはかるためには克服されねばならないいくつかの課題があると思われる。強化材とマトリックス合金との界面の挙動と機械的性質、特に疲労、破壊靱性などの動的性質との関係の解明が必要であり、複合材料の信頼性の確立が何よりも大切である。製造技術、特に強化材の配列・分散の制御技術、量産化のための設備の開発、非破壊検査を含む試験方法の確立と品質保証技術の開発、自動車・産業機器用には適正なコストが重要であるため強化材及びマトリックス合金のコストダウンをはかる必要があること、さらに各種複合材料に関するデータ・システムの構築などが考慮されねばならないだろう。

新金属、ファインセラミックス、新高分子材料の長所を組み合わせ、短所を排除し得る複合材料は先端材料としてその重要性がますます顕著になることは疑う余地はない。先端技術は先端材料によって支えられる。複合材料の研究開発がいつそう推進されることを祈念し、本特集号がその研究開発に大きく寄与することを期待したい。