

の複合プロセスはそれぞれ技術的に複数の加工分野にまたがっているため、一種の学際的な技術協力が必要であることは言うまでもない。

粉末押出し、焼結鍛造、疑似 HIP および粉末圧延は塑性加工技術との複合であり、プロセス開発には塑性加工の専門家との協力が必要である。焼結接合は一般に複数の部材を接合により一つの部品に仕上げる技術であり、原則的には溶接・接合の専門知識が要求される。射出成形は、プラスチック成形技術と焼結技術の合体したものであり、さらにこの加工法においては、バイダー技術が成形の成否を握っており、技術開発にはバインダー化学の専門家の参画が必須である。スプレージョーミングは、半溶融の粒子を基板に衝突堆積させて材料化する技術であるが、これは鑄造凝固と粉体加工の両方の要素が入っている。技術的に成熟させるためには両加工分野の協力が必要である。

粉体加工をベースにした複合プロセスの特長は、成形体の大サイズ化および長尺化あるいは逆にミニチュア化、真密度化、強度や機能性の向上、新規機能の発現、複数機能化、形状付与の自由度の拡大、さらには工程の簡略化などをも包含しているところにあり、それぞれの材料加工分野の枠にとらわれない自由な発想がみられる。

現行技術に見られる複合プロセスに対する上記の考察から、粉体加工と他の複数の加工技術を組み合わせた新しい複合プロセスには、大きな可能性があるように思われる。この可能性を引き出すためには専門分野間の協力は取り敢えず必要であるが、もっと突っ込んで材料加工分野の再編成あるいは新しい専門分野の構築にまで立ち入る必要がある。

9.2.5 複合材料

(1) 十年間の進歩

種々の複合材料は従来材料に不足している特性を持ち得るという夢のもとに数多くの研究・開発が行われてきた。特に金属系複合材料（以後、MMC: Metal Matrix Composites とする）のここ十年間の複合材料の研究開発自体は従来の研究・開発を基礎とした延長上にあるものであり、新しい強化素材の出現とその素材の可能性の検証から複合材料系とプロセス技術の淘汰と工業化へのチャレンジの時代であったといえる。

このように、可能性のある材料の選択と何に重点を置いてプロセス開発を進めるべきかの決定が行われたことは 20～10 年前に MMC のプロセス技術の基本思想が確立されていたために成し遂げ得られたことは言うまでもない。以下、MMC について複合材料系と開発状況、プロセス技術の変遷、国内での応用、MMC の将来性について概略を述べる。

(2) 複合材料の進歩

MMC として過去十年の間に繊維強化系としては Al_2O_3 繊維 ($Al_2O_3-SiO_2$ 系を含む)、SiC 系繊維 (直径が 10～20 μm のもので無機ポリマーから作られるもの)、PAN 系あるいは

ピッチ系炭素繊維で強化したアルミニウムやマグネシウム系合金などの軽金属をマトリックスとする複合材料の開発が進められた。その結果、炭素繊維強化アルミニウムの低熱膨張特性を利用したチューブなどが宇宙用などの特殊な構造体として実用化されるに至った。また、エンジン用耐熱材料として SiC 繊維 (直径が 80～140 μm で CVD 法により作製されるもの) 強化チタン系複合材料などの研究開発が行われ、現在でもその研究が続くとともにさらなる耐熱性を求めて Ti_3Al や $TiAl$ などの金属間化合物系複合材料へと研究が展開されつつある。

粒子強化型では直径が 0.5～200 μm 程度の SiC 粒子、TiC 粒子、 B_4C 粒子強化アルミニウム系の材料が注目された。これらの材料は粉末冶金的手法あるいは溶融金属への攪拌混合法を利用して実用的な素材を提供できるようになっている。また、1970 年代の終わりに靱殻から SiC ウィスカーが得られることから安価な強化素材として注目された SiC ウィスカー強化型のアルミニウムも引き続き開発が行われた。しかし、材料の持つ最高性能がほぼ明らかになったことや 1980 年の後半にウィスカーの発癌性が指摘されたために開発のテンポは遅くなっている。粒子やウィスカー強化金属系では弾性率、熱膨張特性、減衰特性、強度、耐摩耗特性などが期待されている材料特性であり、後で述べるように種々の応用が試みられた。

(3) プロセスの進歩

複合材料の種類により、プロセス技術の選択が行われ、多くのプロセス技術が工業的なレベルまで高められた。工業的なプロセスとして用いられたものは (i) 粉末冶金、箔冶金的手法のようにマトリックス金属の拡散接合を利用するもの、(ii) 鑄造技術を利用するもの、(iii) 反応を利用した *in situ* 生成を利用する方法に大別される。

(i) のマトリックスの拡散接合を利用する方法ではアルミニウム系合金と SiC 粒子を混合してホットプレス (あるいは HIP が用いられる) で複合化し、押出し、圧延加工を経て棒材やチューブ材料を得る方法が粒子強化型複合材料の工業的な製造方法として開発され、大型の複合材料の製造に貢献している。また、連続繊維強化金属系では連続繊維とマトリックスのプリフォーム (予備成形体) をロールを通して拡散接合するような方法で大型の板材料を作り出すことに成功している。この際用いるプリフォームの製造方法として繊維束を連続して金属と複合化するプリフォームワイヤを製造する技術も開発された。このようにして得られたプリフォームワイヤは大型板状の複合材料を得るためのプリフォーム体として成型技術の進歩に貢献した。

プロセス技術の中で最も著しい進歩を遂げたものは (ii) の溶融状態の金属を利用したプロセスである。Fig. 9.22 は溶融状態の金属を利用した MMC の複合化プロセスを分類して示したものである。溶融金属を用いた MMC の製造方法は大きく分けて Fig. 9.22 中に示した A, B (B-1, B-2) の方法に分類

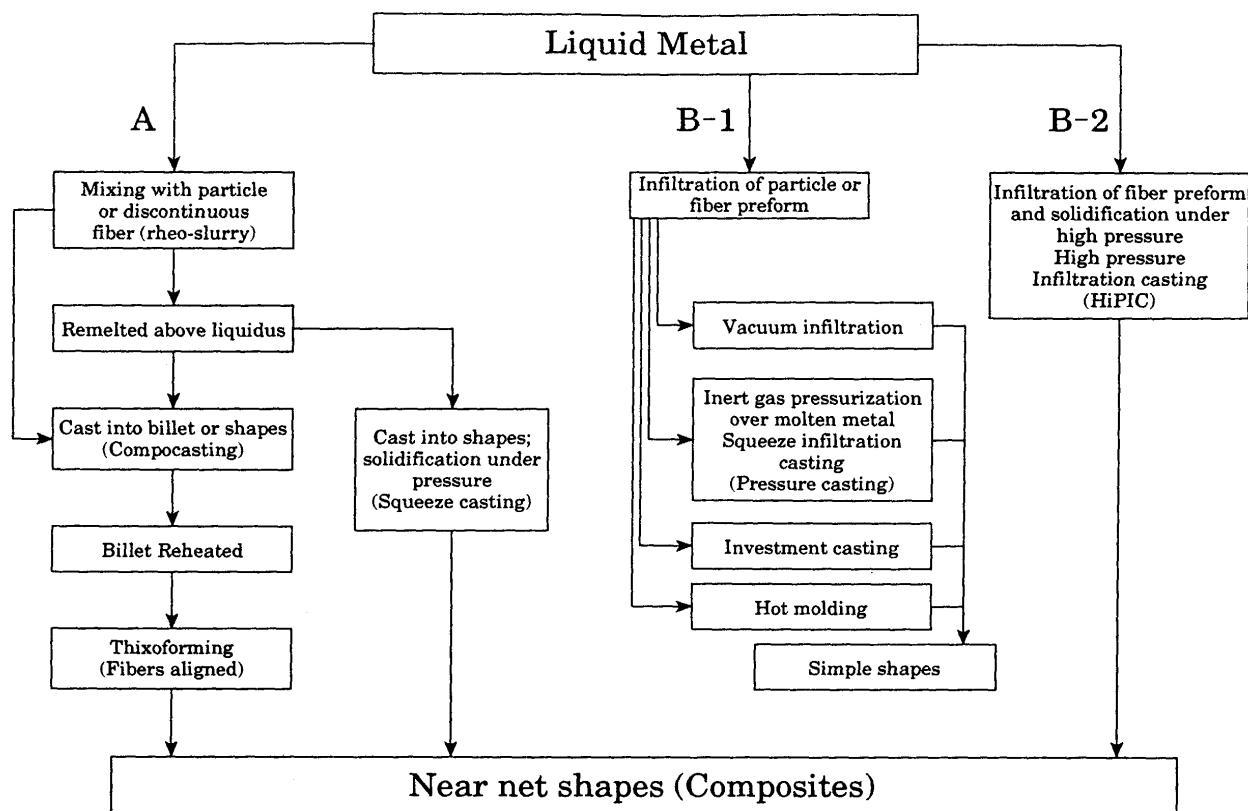
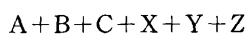


Fig. 9.22. Various casting methods for fabricating MMC. (R. B. Bhagat: Metal Matrix Composites: Processing and Interfaces, ed. by R. K. Everett and R. J. Arsenault, Academic Press, New York, (1991), p. 43)

される。Aの方法は強化素材と熔融状態にある金属を混合し、金型やニアネットシェイプ、ネットシェイプの金型などに鑄込むものであり圧力が加えられる場合もある。これに対してBの方法は強化素材をプリフォームにしたものに熔融状態の金属を含浸させ凝固させるものである。Bの方法では加圧圧力は含浸速度と凝固速度などの条件により決定される。このような従来プロセスの高度化とは別に最近開発された新しいプロセスには PRIMEX™ (Spontaneous (Pressureless) Infiltration of Filler Preforms with Molten Metals) という名称のセラミックス粒子中へのAlの含浸法が開発され、ニアネットシェイプ加工、ネットシェイプ加工ができるプロセスから得られる材料として期待されている。しかし、この方法で得られる材料では粒子の体積率が大きくなるという点にさらなる改良の余地が残されている。

人工的な複合化とは異なり *in situ* 反応を利用した複合材料も 1980 年代後半から研究が活発になり粒子強化金属やウイスキー強化金属を *in situ* 製造プロセスで製造しようとする試みも行われてるようになった。従来の共晶系合金の *in situ* 複合材料と異なる点は強化相の体積率を任意に変えられるという自由度が大きな点である。*In situ* 反応を利用した新しいプロセスとしては XD™ プロセスが開発された。このプロセスでは例えば A, B, C, X, Y, Z という種類の異なる素材を混合した後に加熱して



という MMC とするものである。この方法は基本的には反応を利用する点からは SPS や SHS (Self-Propagating Reaction) と呼ばれるものと同様の方法である。XD™ プロセスで作製された材料はそれ自体あるいは繊維強化などのマトリックスとしての応用が考えられている。また、XD™ プロセスで得られる MMC は従来の複合化により熱力学的に不安定な相を含むものではなく熱力学的に安定な相を含む新しい MMC として期待されている。

(4) 複合材料の応用分野

Table 9.1 は日本国内で行われた金属系複合材料の開発と応用状況を示したものである。国内の応用の特徴は軍事や航空宇宙の分野ではなく民生用としての応用が試みられた点である。この表に見られるように国内での応用可能性の検討例は公表されているものだけでも 60 件近くもある。この他にも公式に発表されない応用研究が数多くあることは疑う余地もない。Table 9.1 を見ると明らかなように、複合材料の開発に携わった機関も素材産業関連だけではなく自動車、重工、電機などの広範囲に及んでいる。このような応用展開を試みた例は世界的に見ても顕著であり国内の MMC が研究レベルに留まらずに応用まで発展させようと努力した点は国外からも高く評価されている。

(5) 複合材料の将来

最近の複合材料の歴史はシーズ指向型のもとに行われてい

Table 9.1. List of companies in Japan undertaking research and development work on MMC. (M. J. Koczak: private communication)

Company	Main Areas of Research
Art Metal Manufacturing Co. Fuji Heavy Industries Hitachi Ltd. Honda	<ul style="list-style-type: none"> • Manufacture of automotive components • Solid-state processing, including roll diffusion bonding for aerospace application • Copper-carbon composites for electrical applications • Pressure-cast aluminum engine block featuring alumina and carbon short fiber reinforced cylinder liners (mass produced for the Honda Prelude) • Powder metallurgy Al alloy/alumina-zirconia-silica particle retainer ring (limited production) • Pressure cast stainless steel filament reinforced aluminum connecting rod (limited production) • Various MMC prototypes: Al-MMC piston pin, Mg-MMC piston. • Squeeze-cast carbon fiber reinforced Mg
Ishikawajima-Harima Heavy Industries	<ul style="list-style-type: none"> • Manufacturing methods and forming/metal working techniques for fiber reinforced metals (W-fiber reinforced superalloy turbine blades by hot isostatic pressing, Ti-matrix composites), continuous B/Al matrix composites
Kawasaki Heavy Industries Kobe Steel	<ul style="list-style-type: none"> • Alumina fiber reinforced aluminum turbo jet engine impeller • SiC whisker and particle reinforced aluminum by powder forging, HIP or pressurecasting, and deformation processing, for parts including automotive engines, bicycle frames, and optical telescope supports • SiC filament reinforced Ti by P/M processing • Spray deposition of SiC/Al
Mitsubishi Aluminum	<ul style="list-style-type: none"> • Pressure infiltrated and extruded SiC whisker/Al • Particle reinforced aluminum rear shock absorber cylinder for a Yamaha motorcycle • Reinforced aluminum alloy for internal combustion engine part • Infiltration of fiber reinforced aluminum
Mitsubishi Chemical Industries Mitsubishi Electric	<ul style="list-style-type: none"> • Squeeze-cast SiC whisker-reinforced Al for space applications, short fiber C/Al composites
Mitsubishi Heavy Industries	<ul style="list-style-type: none"> • Laser melting/roll diffusion bonding of SiC fiber/Al • Pressure-infiltrated and extruded SiC whisker/Al alloys • Consolidation of C/Al and SiC/Al preform wires manufactured by Toray and Nippon Carbon, respectively • Ti matrix composites by HIPing • Wear, cutting tool applications, and aluminum PM composites • Alumina fiber reinforced aluminum parts for various applications
Mitsubishi Materials Mitsui Mining Co. Ltd. Nippon Carbon Co.	<ul style="list-style-type: none"> • Infiltrated SiC fiber reinforced aluminum tows (Preform Wire) • Face insert for golf clubs (commercial production)
Nippondenso NKK Nippon Light Metals Nippon Steel	<ul style="list-style-type: none"> • Whisker-reinforced Cu • Tribological material: SiC/WS₂/Al • Cast whisker and short fiber reinforced Al • Agglomerated fiber reinforced aluminum • Squeeze casting of fiber reinforced aluminum • Compocasting of particle reinforced aluminum • Micromechanics of fiber reinforced metals • Functionally graded NiCr/ZrO₂ composites by low-pressure plasma spraying • SiC/Al Connecting Rods, Directed Metal Oxidation • Al-B-O whisker reinforced Al
Nissan Shikoku Chemicals Corp. Showa Aluminum Showa Denko	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanical alloyed SiC/Al and alumina/Al with particle sizes < 1 μm • Alumina, graphite, or silicon nitride particle reinforced Al alloys by pressing and sintering, including hypereutectic Al-Si
Sumitomo Metals Industries Ltd.	<ul style="list-style-type: none"> • SiC whisker reinforced 2014 by squeeze casting or powder metallurgy • Ti-based MMC coatings • Ceramic particle reinforced superalloys • Stir-casting process for making hypereutectic Al-Si alloy matrix composites
Suzuki Motor Co. (in collaboration with Agency of Industrial Science and Technology of Tokyo)	
Toho Beslon Tokai Carbon Co. Toray	<ul style="list-style-type: none"> • Ion-plated C/Al tape (possibly discontinued) • P/M and squeeze cast SiC whisker/Al • C fiber-reinforced Al squeeze casting • C/Al preform wires by TiB process • C fiber-reinforced Cu and Sn • Casting of MMCs
Toshiba	<ul style="list-style-type: none"> • Fiber and whisker reinforced 6061 • Fabrication of a whisker reinforced aluminum bolt • W fiber reinforced FeCrAlY
Toshiba Machine Co., Ltd. Toyoda Loom Co.	<ul style="list-style-type: none"> • Stir casting composite materials using an electromagnetic stirring apparatus • Oriented fiber preform processing
Toyota Central R & D Laboratories	<ul style="list-style-type: none"> • Pressure-cast oriented short fiber and whisker reinforced aluminum • Squeeze-cast fiber reinforced aluminum • Invention and development of hybrid fiber reinforced metals • NDE of MMCs

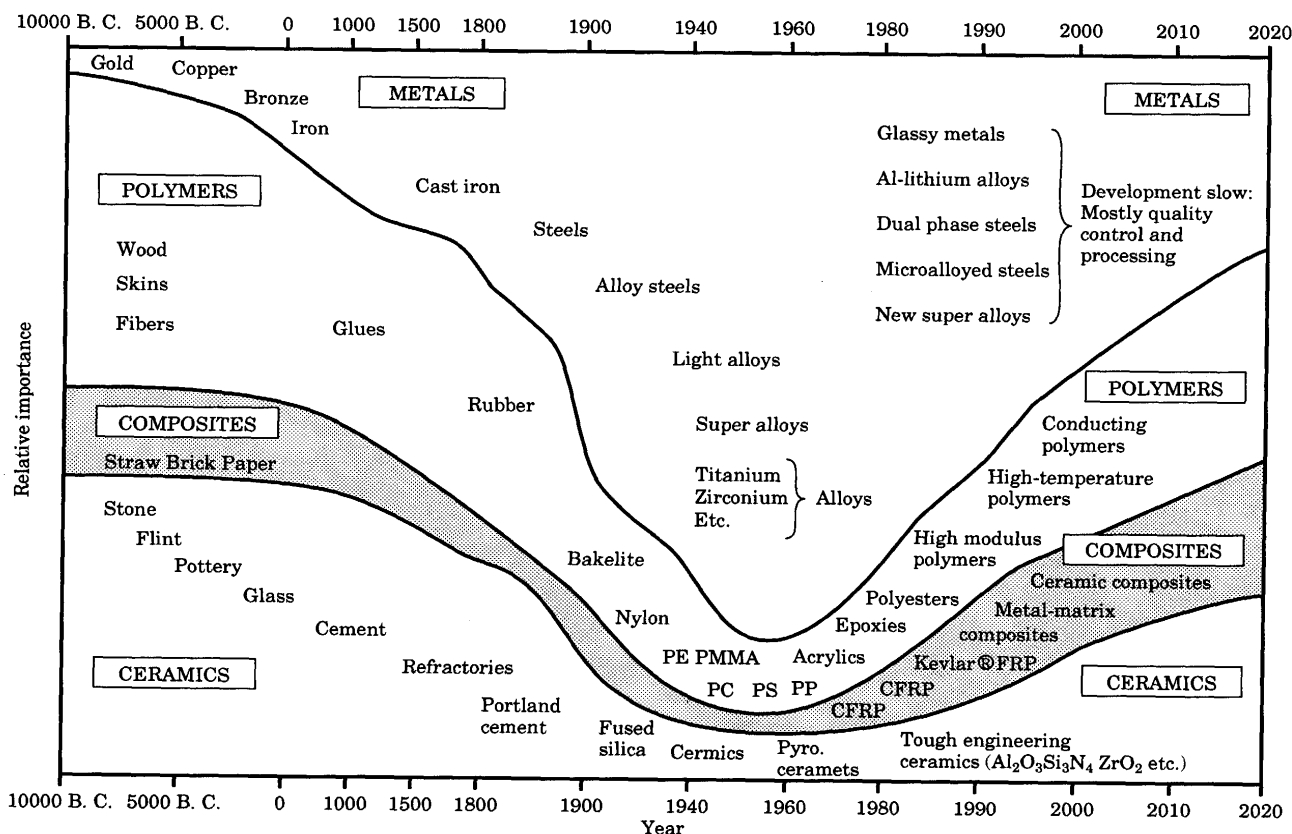


Fig. 9.23. The relative importance of metals, polymers, composites, and ceramics as a function of time. (M. F. Ashby: *Philosophical Trans. Royal Soc. London*, A322 (1987), p. 393)

たが、ここ十年間の間に単に新しい素材としての複合材料を作り特性を提示するという指向からニーズを指向した研究・開発に移りつつある。このようにニーズ指向の開発が可能になった背景には、ここ十年の間に材料が絞り込まれたということが大きく寄与している。Fig. 9.23は、過去から将来の工業材料に占める複合材料の重要性の割合を予測して示したものである。この図に見られるように複合材料の重要性に対するニーズは確実に増加する傾向を示すと考えられている。ここで述べてきた MMC が近い将来材料としての位置付けを確固たるものにするためには (i) 既存の金属材料の代替としての可能性、(ii) 新しい特性を持った金属材料としての可能性、のいずれかがどのくらいの可能性を持っているかは、材料の研究・開発者が単に新しい材料やプロセスを提案するのではなく、使用環境をも考慮した材料の研究・開発が期待される。

9.2.6 自動車用材料

複合材料やチタン合金のようないわゆる新素材と異なり、歴史も長く日常多量生産されている自動車用材料を境界領域委員会のテーマに加えるということは一見異質に思われるかもしれない。しかし、境界領域という言葉を受容的に受け取られている学際的という範囲に限定せず、業際的領域にまで拡大したいというこの試みは今後の学会活動の新しい行き方を示すものとして評価されてよい。それが鉄鋼と自動車という業際の場合には今日、特別意義深い選定とあってよいよう

に思われる。

バブル経済の崩壊による深刻な不況によって鉄鋼業と自動車産業は最も深刻な打撃を受けた。年間生産量が粗鋼で1億t、自動車で1,200万台という大台が今後回復し維持されていくか、という問題については円高による海外生産へのシフトも含めて悲観的な見方も根強くある。しかし日本経済を支えるこの二つの巨大基幹産業の将来を他人ごとのように論評だけして済むものではなく、我々として今何ができるかを真剣に考えねばならない時機にさしかかっている。

自動車は競争の烈しい商品であるから競争に打ち克つ商品力を身につけていなければならないのは当然である。それらはTable 9.2に示すように多数の項目から成って居り技術的にも問題をいろいろ抱えているのに、さらに近年は環境問題への関心の高まりから例えば排ガス対策、リサイクル対策、省エネルギー対策、騒音対策などのように多くの社会的規制がペナルティーを伴って課せられようとしている¹⁾。

さらなる駄目押しは不況による新車の売れ行き不振からくる生産コスト低減への強い圧力である。

このようながんじ絡めの難局を自動車の設計やメカニックの変更だけで乗り切るのは無理で、材料面との緊密な連繫をこれまで以上に発揮せねばならない局面になってきた。

日本はこれまで世界中から畏敬の念をもって見られるほど鉄鋼業と自動車産業は良きパートナーとして緊密に連繫し合いながらやってきた。しかし長い間の順風に恵まれた環境に馴れて、日常我々がやってきたことがすべてベストでありそ