技術資料

新素材の接合シリーズ

FRM の製造および接合プロセスと 継手の性能評価*

坂 本

昭**

Fabrication and Joining of Fiber Reinforced Metals*

by Akira Sakamoto**

キーワード：FRM, 強化繊維, 複合材料, 成形, 接合, 継手

1. はじめに

無機繊維をプラスチックで接合、複合化した、繊維強化プラスチック (FRP) は、生まれて半世紀近くになり、ボロンや炭素繊維などの高強度、高弾性率の繊維の出現と相まって、航空・宇宙の先端技術分野からスポーツ・レジャー用品に至るまで広く使われている。

これに対して、金属と複合化した繊維強化金属 (fiber reinforced metals, 以下 FRM と略す) の歴史は、四半世紀を越えようとしているものの、FRP に比べ、依然として若い材料であり、工業材料として成長するためには、多くの解決すべき課題も残されている。しかし、高温強度、圧縮強度 (座屈) が優れており、材料系によっては力学的特性のみでなく電磁気的特性、熱的特性、耐摩耗性などの機能の付加も期待されるなど、FRP がない長所を有しており、目下、内外で活発な研究開発が進められている。

本講では、この次世代の複合材料として期待されている FRM の製造、つまり複合化・成形と二次加工としての接合を中心に解説し、本系材料の応用について展望したい。

FRM は、図 1 (一方向強化材の繊維方向に直角断面のマイクロ組織) に示すように、強化相である繊維とマトリックス金属から成り、強化相をマトリックス相で結合することが基本である。FRM の複合化は、これら両相の界面の接合にほかならない。

図 1 FRM(一方向強化材)のマイクロ組織

2. FRM の製造

FRM, 特に連続繊維による強化においては、適用部品の設計要求に合致した繊維の配向、積層を行い、いわゆる tailor-made の材料を作ることが要点であるが、FRM の成形 (繊維とマトリックス金属との複合化及び形状化を成形と称す) に際しては、繊維とマトリックスの界面問題に最大限の考慮が必要となる。成形性の観点からは濡れ性、接合性の向上が、力学的特性上は、反応または相互溶解の抑止が要求される。

FRM 用の代表的な強化繊維 (連続繊維) を表 1 に示す。短繊維としては、炭化珪素や窒化珪素のウィスカー、アルミナやアルミナ・シリカ短繊維がある。

これらの繊維とマトリックス金属の組合せは、ボロン系に対しては Al, Mg, 炭化珪素系には Al, Ti, 炭素系には Al, Mg, Cu, アルミナ系には Al, Mg など、Al を主する軽合金マトリックス材となっている。これは、比剛性、比強度の高い軽量高強度材料に対するニーズが高いことのほかに、成形にそれほど高温を必要とせず、成形時の繊維/マトリックスの界面反応の抑私が比較的容易であり、繊維の劣化や界面での脆弱相の生成による FRM の力学的特性の劣化を起さないこと、つまり繊維とマトリックス金属の適合性に因るところが大きい。

*原稿受付 昭和61年10月4日

**正 員 三菱重工業(株)名古屋航空機製作所
Member, Mitsubishi Heavy
Industries Ltd. Nagoya Aircraft
Works

表 1 金属マトリックス複合材料の代表的強化繊維¹⁾

織 維 (メーカ)	引張り強さ (kg/mm ²)	弾 性 率 (10 ³ kg/mm ²)	密 度 (g/cm ³)	直 径 (μm)	備 考
ボロン系 (CVD 法)					
B on W (AVCO, CTI)	350	40	2.46	100, 140, 200	monofilament
B on C (AVCO)	330	37	2.23	100, 140	"
Borsic(SiC coated B/W) (CTI)	300	40	2.58	100, 145	"
B ₄ C coated B/W (AVCO)	400	37	2.27	145,	"
炭化ケイ素系					
SiC on W(CVD 法)(AVCO, SNPE)	315	43	3.16	100, 140	monofilament
SiC on C(")(AVCO)	330	40	3.07	100	"
SiC(ポリマー焼成法)(日本カーボン)	250	18	2.55	10~15	multifilament
炭 素 系					
PAN 系 高強度タイプ (※)	350~500	24~30	1.70~1.77	7~9	multifilament
高弾性率タイプ (※)	230~300	35~45	1.82~1.87	7~9	"
ピッチ系 P 55 (U.C.C)	210	39	2.02	5~10	"
P 75 (U.C.C)	210	53	2.06	5~10	"
P 100 (U.C.C)	210	70	2.10	11	"
アルミナ系					
Fiber FP (Du Pont)	150	39	3.90	20	multifilament
住化アルミナ (住友化学)	260	25	3.20	9	" 開発中

※ 東レ, 日本カーボン, 東邦ベスロン, 三菱レイヨン他

短繊維は専ら, アルミニウム合金との複合化が行なわれている。

強化繊維は, 一般に脆性材料で, それ自体, 塑性変形を生じないので, 一旦複合化された材料の塑性加工は極度に制限を受け, 機械加工性も悪い。したがって, テープあるいはワイヤ状の中間素材(プリフォーム)を使用して複合化と形状化を同時に行ない, near net shape とするのが合理的手法といえる。

FRM の製造過程を工程の流れとして見ると図 2 のようになる。最も一般的な工程は, 図中央の太矢印のラインである。必要に応じて, 繊維にマトリックス金属との濡れ性, 接合性の改善や異面反応による劣化防止のためにコーティングなどの前処理を施し, プリフォームの製

造に移る。次いで, プリフォームを所要の寸法, 形状に裁断, 部品の設計要求に応じた配向, 積層を行ない, 成形工程(一次加工)に移り複合化と形状化を行なう。次いで切断トレミング, 接合などの二次加工を経て部品として完成する。

以下に主要な工程でありプリフォームの製造および成形工程について述べる。

2.1 プリフォームの製造

鑄造法や粉末冶金法により, プリフォームを経ず直接に成形を行なう場合もあるが, 異方性材料である FRM を有効にこなすためには, tailor-made の成形が必要であり, この点からプリフォームの製造は重要な工程となる。

(1) グリーンテープ

ドラムの上にマトリックス金属の箔を敷き, その上に繊維を等ピッチで巻き付けて, これをアクリルやスチレン系の接着剤を塗布し, 金属箔上に一方配列した連続繊維を固定したものである。これをそのまま成形(一次加工)の素材とする場合と, このプリフォームの繊維側にマトリックス金属の箔をもう一枚置き, ホットプレスやホットロールにより繊維が一層だけ複合化された単層テープまで持って行く場合がある。

グリーンテープの接着剤は, 成形時の真空加熱により蒸発除去される。このタイプのプリフォームは, CVD

図 2 FRM の主要製造工程図¹⁾

法で製造されるボロンや炭化珪素系の繊維と Al, Ti などと組合せに主として適用されている。

(2) 溶射テープ

前述の接着剤の代りに、マトリックス金属をプラズマスプレーなどで溶射し、金属箔上に繊維を固定したものである。この方法は、Al マトリックス系に適用されているが、溶射の Al 合金またはマトリックス箔を Al ろう材（例えば Al-12% Si 合金）として、成形をろう接的に行えるようにしたものもある。

(3) イオンプレATINGグリフォーム

これは、炭素繊維を対象に開発されたプリフォームである。繊維の表面をプラズマエッチングした後、Al 合金をイオンプレATINGにより繊維の全周に被覆したものである²⁾。繊維束を開織して、マトリックス金属が各単繊維の囲りに蒸着しやすい状態にしてから処理されるので、得られたプリフォームはシート状でまとまりがあり薄くしなやかである。

(4) 溶浸プリフォーム

繊維の束を熔融金属の中を通して引き上げ、ノズルやロールにより絞り、形状および繊維の含有率を制御して、ワイヤ状やプレート状のプリフォームを連続的に製造することができる。

しかし、一般にセラミックス系の強化繊維の束を熔融金属の中に浸漬しても、熔融金属は繊維の束には浸透して行かない。つまり、熔融金属に濡れずに、付着しないで繊維のまま出てきてしまう。したがって、これを複合化するには、図3の(b)のように圧力をかけたり、(c)のように真空吸引して、強制的に繊維束の中に熔融金属を浸透させるか、あるいは(d)のようにコーティングなどにより表面を改質して、熔融金属に対する濡れ性を向上させなければならない。

また、濡れのよい組合せでは、溶浸による複合化は容易に達成されるが、界面反応が起り、繊維の劣化や脆弱相の生成により、得られた FRM の力学的特性が不十分なものとなるケースが多い。ボロン繊維と Al の組合せがそれであり、界面反応を抑制するために、SiC や

B₄C がコーティングされる。

炭素繊維と Al の組合せは、濡れない系である。これに対しては、CVD (chemical vapor deposition) により、TiB および TiB₂ を繊維表面にコーティングした後、Al 合金の溶湯中に導き、繊維束の中に熔融金属を浸透させてワイヤ状のプリフォームを得る方法がよく知られている⁴⁾。TiCl₄ および BCl₃ を反応炉の中に導き、そこで Zn の蒸気によってこれらを還元し、生成した Ti, B の化合物を繊維表面に析出させるのであるが、100~200 Å のコーティングにより熔融 Al や Mg との十分な濡れ性が得られる。

しかし、この Ti-B 化合物のコーティングでは、Al との反応を防止することはできない。つまり、濡れ性は改善され複合化は可能となるが、一旦、濡れた後の異面反応 (Al₄C₃ の生成) に対してはバリヤになってくれないのである。このため、濡れ性を改善し、しかも反応も抑制できるようなコーティングの研究が行われている⁵⁾。

ポリマー焼成法により炭化珪素繊維を用いて加圧含浸法によりワイヤ状のプリフォームが製造されている⁶⁾。

2.2 成 形

プリフォームを複合化成形する基本的プロセスは、加熱と加圧であり、以下に述べるように種々の方法があるが、高温プロセスであるため、繊維/マトリックスの界面反応の抑制と複合化の達成を両立し得るプロセスパラメータの設定が要点となる。

(1) 固相成形

マトリックス金属同士の拡散接合により複合化する。繊維とマトリックス金属間の接合は、単なる機械的接合から金属結合まで材料系およびプロセス条件によって変る。

(a) 固相ホットプレス法

図4に示すように、プリフォームの積層体を真空または不活性ガス雰囲気中で加熱、一軸加圧して複合化する

図3 繊維と熔融金属の濡れ³⁾

図4 固相ホットプレス法工程図

方法であり、広く用いられている。この方法は平板状の部材の成形に適しているが、プリフォームの積層方法、型を工夫することにより、ジェットエンジンのファンブレードなど板厚が変化し、かつ曲面を有する部品の成形にも適用される⁷⁾。

複合化の機構は拡散接合であるから、高温ほど加圧力、保持時間を小さくできるが、界面反応抑制の点から温度には限界がある。図 5 はその一例で、加圧力 60 MPa、保持時間 30 min という条件でホットプレス成形した各種 FRM の強度（複合則による理論強度に対する比）と成形温度の関係を示す。成形温度が高くなるにつれ、FRM の強度は低下するが、その度合、つまり熱安定性は繊維により差があり、 B_{140} （表 1 の B or W に相当）に対し、BSiC（同じく Borsic）、 BB_4C （同じく B_4C coated B/W）、 SiC_c （同じく SiC or C）の優位性が明らかである。

図 5 CVD 繊維/Al FRM の強度と成形温度の関係⁸⁾
(注) R.O.M.: 複合則による理論強度

(b) HIP 法 (Hot Iso-static Pressing)

この方法では、圧力は静水圧として加わるので比較的簡単なツーリングで複雑形状部品の成形が可能である。

スペースシャトルに実用されているボロン繊維/Al 系の管状トラスはこの方法で作られている。その製造法を図 6, 7 に示す。内側マンドリル（薄肉鋼管）の外周に B/Al の単層テープを巻きつけ、これを外側マンドリル（厚肉鋼管）に挿入し、HIP することにより、FRM の管を成形する。内外のマンドリルは機械加工とエッチングにより除去し、FRM の管を取り出す。管の両端には Ti-6 Al-4 V 製のカラーを挿入しておき、HIP 時に B/Al の複合化と同時にカラーと拡散接合する。最終的にこのカラーと Ti-6 Al-4 V 製のフィッティングを電子ビーム溶接することにより、FRM 部品の端部の結合の問題を解決している。

HIP 法は、粉末冶金の手法を用いて、ウィスカやセ

図 6 HIP による B/Al のチューブの製造法⁹⁾

図 7 B/Al チューブの端部¹⁰⁾

ラミック粒子と金属粉末を複合化する場合の加熱、加圧手段としても有効である¹¹⁾。

(c) ホットロール法

テープ状のプリフォームを用いて板状の長尺物を成形するのに生産性の高い有効な方法である¹²⁾。ロールの接触下の高応力によるマトリックス金属の塑性流動を利用するので、複合化は、ホットプレス法に比べて短時間で達成される。

(d) 熱間押出、引抜法

ウィスカ強化金属の製造に熱間押出が適用される。まず、粉末冶金法や加圧鑄造法で、ウィスカがランダムに分散した FRM の予備成形体を造り、次いで押出により棒、型材等を成形する。この際に繊維の配向、マトリックス組織の改善が行なわれる¹³⁾。

ワイヤ状のプリフォームを用いて引抜により棒や管を作る方法が開発されている¹⁴⁾。プリフォームをステンレス鋼製のカプセルに真空封入し、所要の温度に加熱し、

型を通して引抜くことにより、複合化する。

(2) 液相成形

マトリックス金属の固相線以上の温度に加熱して液相を生成させて複合化する方法を液相成形法と呼ぶ。この方法では、前述の固相成形より当然、成形温度は高くなるので、繊維と金属の適合性、つまり濡れ性と界面反応の抑制の両立性が一属問題となる。

(a) 溶湯成形法（溶融金属浸透法）

基本的には、先に述べた溶浸プリフォームの製法と同じである。濡れ性の悪い組合せでも溶湯を加圧含浸すれば複合化が可能となる。ウィスカ強化アルミニウムの製造に用いられている¹³⁾。この場合、まずウィスカ（炭化珪素）だけの予備成形体を作り、これを鋳型中に置き、マトリックス金属の溶湯を加圧含浸し、ウィスカの体積含有率、40%程度までのものが得られる。

この加圧鋳造法は、鋳造品の部分的な FRM 化にも有効であり、自動車部品で実用化されている。ディーゼルエンジンのピストン・リング溝部のアルミナ系短繊維による FRM 化で耐摩耗性、高温特性の向上と軽量化を図っている¹⁵⁾。コンロッドへの適用においては、機能上、強度が最も要求される桿部をステンレス鋼繊維で強化することによって軽量アルミコンロッドを実現させている¹⁶⁾。

(b) 液相ホットプレス法

この方法は、前述の固相ホットプレス法が高圧を要し、設備費の点で高コストになることに対処するために、主として CVD 系のボロンや炭化珪素繊維と Al との複合化の際の加圧の低圧化として発達してきた¹⁷⁾。

マトリックス金属の固相線以上の固液共存域あるいは液相域でプレスする。液相が生成するので型のシールあるいはプリフォームをカプセルに真空封入などの工夫は必要となるが、材料系によっては、加圧力は数十気圧以下でよく（固相ホットプレスの場合は数百気圧）、油圧プレスによらず、ガス圧を利用して簡素なツーリングにより成形が可能となる。

本法は、炭素繊維やポリマー焼成タイプの炭化珪素繊維のグリーンプリフォームやワイヤプリフォームの成形にも有効である¹⁸⁾。

3. FRM の接合

FRM の二次加工としての接合は、他の金属部材との接合や構造の FRM による部分的補強のように異材接合が重要な役割を演じる。

表 2 に適用の可能性のある接合方法を示した。冶金的接合においては、接合時の加熱による材料劣化、つまり

表 2 FRM の接合方法

・拡散溶接	・抵抗溶接	・機械的結合
・ろう付	・電子ビーム溶接	・接着
・はんだ付		

繊維/マトリックスの界面反応の進行を、如何に防ぐかが要点であり、この点から接合方法、条件等が制限される。

拡散溶接、ろう付・はんだ付、抵抗溶接のようにマトリックス金属を溶かさないう、溶かしたとしても局部的にとどめる方法をとらざるをえない。電子ビーム溶接は、溶融および熱影響の範囲を狭く絞ることができるので、材料系によっては、例えばウィスカ強化アルミニウムには、摩擦溶接とともに適用の可能性がある。

また、継手形式としては、突合せ継手では、繊維強化が絶たれてしまうので、一般には、図 8 に示すように剪断型か、突合せではダブル付きとなる。FRM はセラミック系繊維を複合化しているので熱膨張係数が、マトリックス金属のそれよりは小さい。これも継手設計上考慮すべき要点である。Al マトリックス FRM の相手材としては、熱膨張係数の小さい Ti 合金が選ばれる。Ti 合金は比強度が高い点でも有利である。

拡散溶接、ろう付などの接合法は、FRM の複合化の手段そのものである。複合化と同時に接合一体化して二次加工としての接合を極力さけるとともに、図 7 に示した例のように、金属部材との異材接合も同時に行ない、機械的結合や融接のための端処理をも施すといった合理的な方法を採用したい。

FRM の適用には、力学的性質の異方性を利用した構造設計とそれと連繫した成形が必要であるが、この端処理の問題もこの中に組込むのが肝要であろう。

3.1 拡散溶接

拡散溶接は、FRM の一次加工、つまり成形の主要な手段であるが二次加工としての接合においては必ずしも良好な継手が得られるとはいえない。

特に Al マトリックス FRM 同士または Al 合金と

図 8 各種継手形状

の接合においては、満足すべき結果は得られていない¹⁹⁾。Al 合金の拡散溶接では、100% の継手効率を得ようとすれば、融点に近い温度で、融合面にかなりの塑性変形が加わるような条件が必要となるが、FRM にこのような条件を与えると脆い繊維は破損してしまう。

成形加工の場合には、プリフォームの積層体を加熱、加圧することにより、グリーンプリフォームであれ、溶射プリフォームであれ、繊維のまわりにマトリックス金属が塑性流動し、稠密、複合化するという過程をたどるので、拡散溶接に十分な塑性流動が得られる。

接合性を改善するために、Ag めっきを施して接合した例が報告されている¹⁹⁾。FRM の材料系は、B/7039 Al, V_f (繊維の体積含有率) 20% で、溶接条件は 482°C, 28 MPa である。継手形式は、共材のバット/ダブル (図 8(b)) であり、ダブルの重ね代 7.6 mm で、母材の引張応力 240 MPa で、剪断破壊した。継手効率は約 50% であったが、これは、FRM の層間剪断強度が低いことであつたとされている。

航空機の翼への適用計画の一環として、B/Al (V_f 50%) と Ti-6 Al-6 V-2 Sn のシングルラップ試験片 (図 8(c)) の拡散溶接試験が行われている²⁰⁾。継手は、FRM の成形 (510~566°C, 34 MPa, 30 min 以上) と同時に接合し、接合後熱処理は施されていない。

幅 25.4 mm, 重ね代 7.6 mm で、Al-8%Si または Al-12%Si の箔をはさんだもので、剪断強度は平均 48 MPa, 最高 62 MPa, 箔をはさまないもので平均 44 MPa が得られている。

前述の拡散溶接プロセスを部品形状に適用した場合の継手形状を図 9 に示す。20 および 177°C で引張試験の結果、継手効率 74~100%, 平均値 88% が得られている。

図 9 B/Al と Ti 合金の拡散溶接継手²⁰⁾

C/5052 Al (V_f 35%, 0°/90° 直交配向) と Ti-6 Al-4 V の板を成形時に拡散溶接した継手のマイクロ組織を図 10 に示す。この重ね継手の引張試験では、FRM の層間で剪断破壊し、接合界面では破壊しなかった。

Ti マトリックス FRM の拡散溶接について公表されている例は少ないが、Ti 合金の拡散溶接の例から予想されるように、マトリックス同士の接合となる重ね継手

図 10 C/Al と Ti 合金の拡散溶接部のマイクロ組織²¹⁾

では良好な接合が得られるはずである。しかし、接合熱履歴による材料劣化の問題は残る。

Ti-6 Al-4 V のファンブレードに B/Ti-6 Al-4 V (V_f 50%) を接合し部分補強した例²²⁾では、HIP により、815°C, 103 MPa, 3 h の条件で接合された、エンジンテストを含む各種の動的試験を何の損傷もなしにクリヤーしている。

3.2 ろう付およびはんだ付

Al マトリックス FRM の共材および Ti 合金とのろう付は、通常の Al ろう付と同様に Al-Si 系ろう材を用いて行なうことができる。ろう付では加熱が短時間とは言うものの 600°C 付近まで加熱されるので、図 5 から予想されるように、材料系によっては母材の劣化が問題となる。BSiC, BB_4C や SiC 系ではろう付加熱による劣化は殆ど起きないが、B/Al では 10~20% の強度低下がみられる。

B/6061 Al (V_f 50%) のろう付継手の例をまとめて表 3 に示す。シングルラップやスカーフでは継手効率は低いですが、バット/ダブル、バット/フォークダブル継手ではかなり改良されている。Zn-Al-Cu 系のはんだ付継手もろう付継手に遜色ない強度が得られている。

図 11 は航空機のハニカムパネルの試作例である。画板に Borsic/Al の板が、ハニカムコアおよびフレームに Ti 合金が用いられ、これらの構成部材がろう付されている。

B/Al のストリング (ハットセクション) と平板の共材接合で、Al-Si 系のろう箔をはさみ、ろう材の融点以下の温度 (516°C) で、加圧 (23 MPa) し接合するといった拡散溶接方式を採用した例²⁴⁾もある。この場合、接合部が拡散により均質化し、ろう付継手より強くなっている。

B/6061 Al (V_f 50%) と Ti-6 Al-6 V-2 Sn のろう付継手の例を表 4 に示す。ろう材は Al-12% Si を用い、585°C, 5 min でろう付されている。

Ti-6 Al-4 V 製のハット材を B-Al (V_f 46%) でろ

表3 B/Al ろう付およびはんだ付継手の特性¹⁹⁾

Joint Form	Filler Metal	Tensile ^a Stress, MPa	Joint ^b Efficiency
Single-lap shear	Al 8 Si or Al 12 Si	510	49
	Zn 5 Al 5 Cu	590	57
Butt with doublers	Al 8 Si or Al 12 Si	820	79
	Zn 5 Al 5 Cu	790	77
Scarf, 2 deg	Al 8 Si or Al 12 Si	640	62
Scarf, 5 deg	Al 8 Si or Al 12 Si	320	31
Butt with forked doublers	Al 8 Si or Al 12 Si	910	88

^a Average tensile stress in base material at specimen failure.^b Approximate value.表4 B/Al と Ti のろう付継手*の特性¹⁹⁾

Test Temp., °C	Lap, mm	Spec. Quant.	Shear Strength, MPa	Tensile ^a Stress MPa	Joint ^b Efficiency, %
20	9.5	1	77.1	414	27
20	12.7	3	39.0	276	19
20	25.4	3	34.6	496	33
177	9.5	3	41.4	207	15
177	12.7	3	27.2	193	14
177	25.4	3	30.4	427	31
288	6.2	3	19.6	70	7
288	12.7	3	28.3	200	19
288	25.4	3	27.1	386	36

*Double-shear joints between Al/B and Ti 6 Al 6 V 2 Sn sheet.

^aAverage tensile stress at specimen failure.^bBased on Al/B composite. 図11 Borsic/Al-Ti 製ハニカムサンドイッチパネル²³⁾

う付 (Al-12% Si, 610°C, 172 kPa) により補強した例 (図12) がある。補強しないものに比べ 427°C までの範囲で 25% の強度増 (等重量ベース) を得、315°C で 1000 h, または -54°C と 315°C 間の 400 回くり返し後の室温強度は変らなかったと報告されている。

B-6061 Al と 6061 Al 板のはんだ付継手の例を表5に示す、FRM, Al 合金とも前処理として無電解 Ni めっきを施し、はんだに対する濡れの問題を解決している。

3.3 抵抗溶接

Al マトリックス FRM の抵抗溶接では、マトリック

図12 Ti 部材の B/Al による補強¹⁹⁾

スは溶けるが、ボロンや炭化珪素繊維は殆ど損傷を受けない溶接ナゲットは繊維をとり囲んで凝固し、繊維とマトリックスの分離は起きないので、比較的高い継手効率を得られる。

B/Al の試験結果をまとめて表6に示す。

B/Al の FRM 共材あるいは Al 合金との接合で健全な溶接品質が得られるが、Al 合金との接合では熱伝導および熱膨張に差があるため施行条件は共材の場合とは違ったものが必要となる。

B/Al と Ti 合金との接合では、界面での温度勾配が急激になるように電極形状および溶接条件を設定すれば、

表5 B/Al と Al 板のはんだ付継手の特性¹⁹⁾

Joint Form	Group	Filler Metal	Lap, mm	Spec. Quant.	Shear Strength, MPa	Tensile ^a Stress, MPa	Joint ^b Eff., %
Single-lap shear	1	Cd 5 Ag	3	3	81	240	20
	2	Cd 17 Zn	3	3	74	220	18
	3	Zn 5 Al	3	3	80	240	20
Double-lap shear	4	Cd 5 Ag	3	2	50	200	14
	5	Cd 5 Ag	6	5	54	430	30
	6	Cd 17 Zn	6	8	71	590	41

All joints failed in tensile shear.

^aAverage tensile stress in B/Al member at joint failure.

^bBased on B/Al composite.

表6 B/Al の抵投溶接継手の特性¹⁹⁾

Joint No.	Member	Specimen Material			Specimen				At Failure		
		Base Material	t, mm	T.S., MPa	Type ^a	W, mm	Lap, mm	Quantity	Load, ^b kN	Stress in Comp., MPa	Joint ^c Eff., %
1	A	Al/50 B	0.51	1170	I	19	...	5	2.79	294	25
	B	← Same →							2.67-2.92		
2	A	Al/50 B	0.51	1170	II	19	...	3	0.29	...	...
	B	← Same →							0.28-0.32		
3	A	Al/50 B	0.89	1124	III	13	25	5 ^d	5.89	505	45
	B	← Same →							5.38-6.32		
4	A	Al/50 B	0.64	848	IV	19	...	4	5.51	453	53
	B	← Same →							5.07-6.00		
5	A	Al/50 B ^e	0.76	1240	I	25	...	7	3.35	174	14
	B	← Same →							2.49-3.93		
6	A	Al/50 B	0.51	1170	I	19	...	6	2.15	222	19
	B	2024-T 3 Al	0.51	480					1.27-2.49		
7	A	Al/50 B	0.51	1170	II	19	...	6	0.19	...	...
	B	2024-T 3 Al	0.51	480					0.16-0.21		
8	A	Al/50 B	0.51	1170	IV	19	...	4	3.60	372	32
	B	2024-T 3 Al	0.51	480					3.43-4.00		
9	A	Al/47 B	1.02	1207	I	25	25	3	11.78	462	38
	B	Al/43 B ^f	1.52	1170					9.79-13.94		
10	A	Al/47 B	1.02	1207	IV	25	...	2	11.97	469	39
	B	Al/43 B ^f	1.52	1170					9.30-14.66		
11	A	Al/47 B	1.02	1207	II	25	...	2	1.26	...	...
	B	Al/43 B ^f	1.52	1170					1.12-1.41		
12	A	Al/47 B	1.02	1207	V	38	...	1	29.67	763	63
	B	Al/43 B ^f	1.52	1170							
13	A	Al/47 B	1.02	1207	VI	46	19	2	17.90	384	32
	B	Al/43 B ^f	1.52	1170					16.30-18.90		
14	A	Al/43 B	1.02	1207	VII	38	25	2	17.41	448	37
	B	Al/43 B ^f	1.52	1170					17.13-17.70		
15	A	6061-T 6 Al	3.18	310	VIII	13	25	6	10.16	526	36
	B	Al/50 B	1.52	1434				3	8.50-10.93		
16	A	Al/50 B	1.52	1490	I	25	38	3	15.80	409	27
	B	Al/50 B	5.08	1490					12.90-18.68		

* All joints tested in tensile shear, except cross-tension joints.

^a Specimen type: I—Single spot weld. II—Single spot weld joint tested in cross tension. III—Seam weld cut into 13 mm wide strips for testing. IV—Two spot welds on longitudinal axis of specimen. V—Four spot welds in a square pattern. VI—Four spot welds on a common line perpendicular to longitudinal axis of specimen. VII—Four spot welds in a diamond-shape Pattern. VIII—Single spot weld in double lap joint.

^b Numerator is average value; denominator is minimum and maximum value.

^c Based on Al/B composite.

^d Five test specimens were cut from one seam weld.

^e Boron filaments coated with vapor-deposited silicon carbide.

^f Material also contained 6 v/o stainless steel filaments in the two outer layers 90 deg to the boron fibers.

ナゲットは Ti 側のみに形成し、繊維には損傷を与えないようにすることができる⁹⁾。この場合、接合界面は溶けず拡散溶接される。

3.4 機械的結合

リベット、ボルト等による機械的結合は、結合用の穴で繊維が切られてしまうので、繊維強化複合材料にとっては不利な結合方法である。これに対しては、共材や Ti 合金を接合して補強するとか、前述のスペースシャトルの管状トラスのような端末処理が必要となろう。

3.5 接 着

FRM の接合に接着も用いられる。接着と機械的結合や抵抗溶接との併用も考えられる。

一般に、FRM の表面には繊維は露出していないので、接合面の処理、施行方法は、例えば Al マトリックス FRM では、Al 合金と同様でよい。

スペースシャトルの電子機器取付用のパネルとして、B/Al の面板と Al コアのハニカムサンドイッチパネルが試作されているが、接合はすべて接着である。

4. FRM の特徴と適用性

FRM の比強度の温度依存性を FRP、金属材料のそれと比較して、図13に示す。FRM の値は、複合側による理論値であるが、各材料系とも、成形技術の進歩により、最近これらの値をばくりゃーしているといえよう。

図14は、FRM の比強度—比弾性率関係としての位置付けを他の材料と比較したものである。この場合、FRM のプロットは最近公表されている最高レベルの値を用いている。

FRM の疲労強度のデータは、B/Al 系を除き、多く

図13 代表的 FRM の比強度の温度依存性¹⁾

図14 繊維強化複合材料と代表的構造用金属材料の比強度と比弾性率の関係

は報告されていないが、C/Al 系、 Al_2O_3/Al 系等を含め、いずれも疲労強度比は 10^7 サイクルで 0.6 以上はあり^{24,25)}、疲労強度比が高いという特徴がある。

同じ強化繊維を使用するかぎり、いうまでもなく、常温付近での比強度、比弾性の点では FRP に劣るが、高温で優位となるとともに、次に示すような特徴を持っている。

(i) 力学的性質としては、一般に層間強度が大きく、繊維間の応力の伝達に優れ、多軸、複雑応力に耐える。衝撃に対して強い。極低温特性が優れている。

(ii) 耐環境性としては、水分の浸透を受けない。雨によるエロージョンを受け難い。雷撃保護、帯電防止対策、電磁遮蔽被覆等が不要である。アウトガスを生じない。紫外線による劣化がない。

なお、接合方法として、金属材料と同様な冶金の接合を採用できることも、FRP にない特徴である。

表 7 に、各種工業分野における FRM の有望な用途と材料系を示す。

5. お わ り に

FRM は次世代の複合材料として期待されているが、連続繊維系では B/Al 以外はまだ開発段階であり、工業材料として完成されていない。しかし、内外ともに研究開発が活発に推進されており、SiC/Al や C/Al 等も完成に近づきつつあるといえる。

一方、短繊維系については、自動車工業を中心に、アルミナ繊維やウイスカ強化系の FRM の適用研究が行われており、すでにエンジン部品で実用化例がある。

FRM の特徴の一つは、冶金の接合が適用できることである。部品をつなぎ合せたり、慣用金属と接合して構造物をつくるのが可能である。また、FRM については、

表 7 FRM の有望な用途例

用 途	要 求 性 能	有 望 な 材 料 系
宇宙機器 宇宙構造 アンテナ 衛星構体など	比剛性 熱的寸法安定性	B/Al, B/Mg, C/Al, C/Mg
飛行機 パイロン ストラット, ウィングボックス アクセスドア フェアリング フレーム, スティフナ, ビーム ファン, コンプレッサブレード	比剛性, 耐熱性 比剛性, 比強度 比剛性 比剛性, 比強度 比強度, 比剛性, 耐熱性 耐衝撃性 比強度, 比剛性, 耐熱性 耐衝撃性, 耐エロージン性	B/Al, SiC/Al B/Al, SiC/Al B/Al, SiC/Al, C/Al B/Al, SiC/Al, C/Al B/Al, SiC/Al, SiC/Ti 耐火金属繊維強化超合金 一方向凝固共晶
タービンブレード		
ヘリコプタ トランスミッションケース トラス構造	比剛性, 比強度 比剛性, 比強度	Al ₂ O ₃ /Mg, C/Al, C/Mg, Al ₂ O ₃ /Al B/Al, SiC/Al, Al ₂ O ₃ /Al
自動車 エンジンブロック ピストンロッド	耐熱性, 比強度, 比剛性 比強度, 比剛性	SiC/Al, Al ₂ O ₃ /Al SiC/Al, Al ₂ O ₃ /Al
電気部品 モータブラシ ケーブル, 接点 軸受, しゅう動材 スポーツ用品 テニスラケット ゴルフクラブ スキー 自転車フレーム	導電性, 耐摩耗性 導電性, 強度 耐摩耗性 比強度	C/Cu C/Cu C/Cu, SiC/Al B/Al, C/Al, SiC/Al, Al ₂ O ₃ /Al

(注) B, C は連続繊維, Al₂O₃ は連続または短繊維, SiC は連続繊維またはウスカ

上流工程の成形時に接合も複合化して部分強化や端末処理を同時に行なうといった手法も有効である。

これまでの, FRM の接合研究は開発が先行している B/Al を対象とするものが殆どであり, 他の材料系については今後の研究が待たれる。

参 考 文 献

- 坂本昭: 機能材料 3, 9 (1983), 1
- M. Yoshida, S. Ikegami, T. Ohsaki, T. Ohkita: SAMPE, 24 (1974), 1417
- 日本複合材料学会編, 金属基複合材料を知る事典, アグネ, p.50 (1984)
- W. Meyener, D. Kizer, S. Paprocki, H. Paul: ICCM-II (1978), 141
- 進藤昭男, 本城国明: 第 2 回次世代産業基盤技術シンポジウム—金属・複合材料—予稿集, p.107 (1984)
- 今井義一: 同上, p.121 (1984)
- I. J. Toth: SAMPE, 19 (1974), 406
- E. Fitzer, G. Jacobson: ICCM-IV (1982), 1315
- J. L. Christian: ICCM-I (1975), 706
- M. D. Wesinger: Metal Progress, (May 1978), 60
- 渡辺治: 第 1 回次世代産業基盤技術シンポジウム—金属・複合材料—予稿集, p.119 (1983)
- G. S. Doble, I. J. Toth: ICCM-I (1975), 775
- 坂本昭: 第 3 回次世代産業基盤技術シンポジウム—金属・複合材料—予稿集, p.91 (1985)
- R. T. Pepper, H. Gigerenzer, T. A. Zack: SAMPE National Symposium, 8 (1976), 338
- T. Donomoto, N. Miura, K. Funatani, N. Miyake: SAE Technical Paper No.830252 (1983)
- (株) 本田技研: 日本複合材料学会誌, 12, 2 (1986), 91
- R. Suplinskas, J. Cornie, A. Hanze: SAMPE National Symposium, 11 (1979), 1036
- 坂本昭: 第 2 回次世代産業基盤技術シンポジウム—金属・複合材料—予稿集, p.131 (1984)
- G. E. Metzger: WRC Bulletin No.207 (1975)
- P. J. Donahup et al: AFML-TR-74-105 (1974)
- 坂本昭: 未発表資料
- G. R. Sipple, K. Swain: AFAPL-TR-73-125 (1973)
- D. M. Royster, H. R. Wiant, T. T. Bales: NASA TMX-3282 (1975)
- M. F. Amatea, W. D. Hanna: ICCM-I (1975), 556
- A. K. Dhingra: Composite Materials; Mechanics, Mechanical Properties and Fabrication, Japan Society for Composite Materials, p.239 (1981)