

## 金属系繊維強化複合材料の現状

解説

大 蔵 明 光\*

## Present of Fiber Reinforced Metal Composites

Akimitsu ŌKURA

## 1. はじめに

金属系複合材料の中でも繊維強化(型)のもの(FRM)については、著者は1982年の本誌などに解説<sup>1)2)</sup>を寄せたが、その後1985年に開催された日本鉄鋼協会西山記念技術講座<sup>3)</sup>においても詳述した。本解説ではその後の進展について二つの動きを中心に概説してみる。

一つの動きは従来の繊維を使つて研究している、(財)次世代金属・複合材料研究開発協会の活動であり、既に4回にわたるシンポジウムを開催している。他の動きとしては、新しく金属系複合材料用繊維が開発され、その利用研究がおこなわれていることである。本稿では従来の繊維と新しい繊維との比較、および複合材料のいくつかについて解説する。

## 2. 強化用無機繊維

## 2.1 ボロン繊維

一口にボロン繊維と呼ばれているが、実際にはタングステン線(10~13 $\mu\text{m}$ )、炭素繊維(10~12 $\mu\text{m}$ )を芯材として、これらの表面にボロンを化学蒸着法(CVD)により析出させたもの、さらに複合材料用に表面にシリコンカーバイド(SiC)を化学析出させたもの(Borsic)、及び $\text{B}_4\text{C}$ を析出被覆した繊維を総称してボロン繊維と呼んでいる。

ボロンは原子番号5に位置し、原子量10.81で炭素の12.01に比較して少し軽い。純粋なボロン結晶の研究は1942年にGE社によつて研究されている<sup>4)</sup>。この場合も“Filament Method”によつている。ボロン繊維の歴史はこれらの研究からみて45年を経過していることになる。アメリカにおいては既に実用化されているが、日本では本格的商業生産に至っていないのが現状である。

このボロン繊維も、複合材料の急速な開発にもなつて注目された強化繊維の一つである。しかし高価な

素材のため特殊な機能を発現する材料以外にはいまだ使用されていない。

日本においてはボロン繊維の製造・研究も少なく、ボロン繊維を使つた実用材は皆無であつた。最近一部スポーツ用具に使用されているのみである。このボロン繊維もアメリカで1次加工されたものを輸入し日本で2次加工していたのが実状であつたが最近では国産品が使用され始めた。

ボロン繊維は日本においては東芝が最初で、その製造・応用研究も1970年代のはじめであり、アメリカに遅れること16年である。我々の研究室でも東芝の技術を発展させ複合材料用ボロン繊維の製造研究をおこなつてきた<sup>5)</sup>。

アメリカの資料によると複合材料の使用量の増加にともない可動構造物、たとえば航空機だと複合材の使用によつて総重量を1/5軽減することができ、それによる燃料費の軽減はきわめて大きく、1ポンドの軽量化が100ドルに値するといわれている。

また自動車への利用の場合、部品1ポンド軽くすると、スプリング、ブレーキ廻り、エンジン廻りその他の軽量化が可能になり、全体で1.3~1.5ポンド軽くすることができるといわれている<sup>6)7)</sup>。

このようにボロン繊維開発の動機は、軽くて強い材料への要求に端を発し、それが実現してきたわけである。

現在CVD法で製造されているボロン繊維はタングステン線、また炭素繊維を直接通電加熱し、塩化ボロン( $\text{BCl}_3$ )を水素で還元し( $2\text{BCl}_3 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{B} + 6\text{HCl}$ )、ボロン繊維を作る方法がとられている。

アメリカではAVCO<sup>8)</sup>がタングステン芯線、炭素芯線ボロン繊維、 $\text{B}_4\text{C}$ 被覆ボロン繊維、またCTT社ではBorsicを製造している。これら被覆繊維は金属マトリックスを対象として開発されたものであり、濡れ性、反応性を改善した繊維である。ボロン繊維は先端複合材料用強化素材として従来のガラス繊維を超える弾性率を

昭和62年6月3日受付 (Received June 3, 1987) (依頼解説)

\* 東京大学生産技術研究所 教授 工博 (Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 7-22-1, Roppongi Minato-ku, Tokyo 106)

Key words: fiber reinforced metal; composite material; carbon; boron; inorganic compound; wetting; elastic modulus; orientation; whisker; interface reaction.

持つのが目標で開発されたものであり弾性率は高く、他の繊維に比べ繊維径が太いため、取扱いが容易であるといった利点がある。

2.2 炭素繊維

炭素繊維は有機質繊維を焼成して得られる炭素質が90%以上の繊維である。従来からの炭素繊維はレーヨン系、PAN系（ポリアクリルニトル系）および現在注目され開発が進んでいるピッチ系に大別される。いずれも長繊維である。炭素繊維はUCC（ユニオンカーバイド社）が1959年にレーヨンを原料として開発されてから注目され航空機用構造材の素材として急速に発展した。

日本においてもPAN系炭素繊維が1969年に日本カーボン社によつて企業化され、HT（高強度繊維）、HM（高弾性繊維）の両品が販売されている。PAN系炭素繊維は、ポリアクリルニトルを原料として紡糸したアクリル繊維から作られる。この紡糸法にはポリマー溶液を水中に押し出して繊維にする湿式紡糸法と、空气中に押し出して繊維にする乾式紡糸法がある。多くのPAN系炭素繊維は乾式紡糸法によつているのが現状である<sup>9)</sup>（図1参照）。

このアクリル繊維を空气中で200~300°Cに加熱する耐炭化処理工程がある。この処理工程が重要で、ここでの分子配向によつて炭素繊維の性質が決まってくると言っても過言ではない。

この耐炭化処理した繊維は不活性ガス中で1000~1500°Cに加熱され炭化する。これが高強度炭素繊維（HT）である。またより高温（2000~3000°C）で処理し、黒鉛結晶が発達したものが高弾性炭素繊維（HM）である。いずれの繊維も特別な場合を除き樹脂による表面処理がされている。

最近特に注目されている炭素繊維にピッチを原料とし

たものがある。これは石油系、石炭系ピッチを溶融紡糸して得られるものである。ピッチは通常無定形で光学的等方性のものであり、この等方性ピッチを溶融紡糸して得られる炭素繊維で引張強度、弾性率ともに低いものを汎用グレードと呼んでいる。

高弾性率、高強度の炭素繊維を得るためには、ピッチを改質して異方性にする必要がある。前述のUCCの繊維はこの方法による。

一般には等方性ピッチを不活性気体中で400°C前後で処理するとメソフェーズ（Meso phase）と呼ばれる球状の液晶が生成する。これが約40%以上になったものが異方性ピッチと呼ばれ、溶融紡糸すると繊維方向によく配向されたピッチ繊維となる。ピッチ繊維は酸化性気体の中で250~400°Cの不融化和と呼ばれる熱処理がおこなわれる。その後の工程はPAN系と同様の処理によつて炭素繊維が得られる。

新しいピッチ系炭素繊維の製造法として注目されているプリメソフェーズ法がある。この方法は九州工業試験所

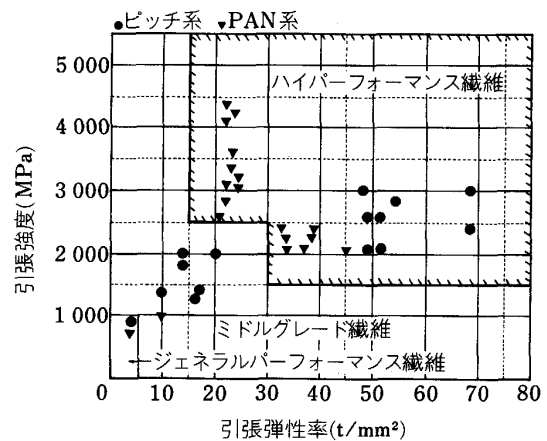


図 2 炭素繊維の引張強度と引張弾性率の関係

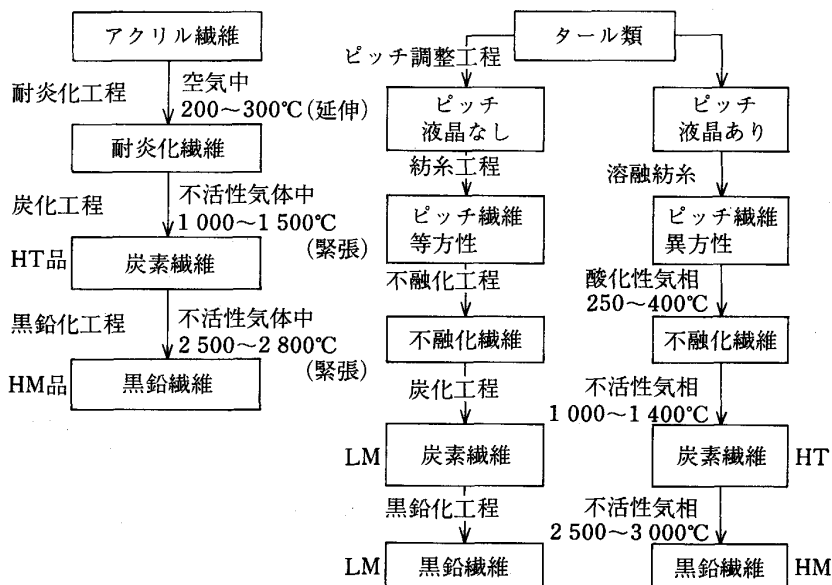


図 1 代表的炭素繊維製造プロセス

表 1 有望視されている繊維の主な性質

繊維名	繊維の形体	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\sigma_f$ (MPa)	$E$ (t/mm <sup>2</sup> )	備 考	
炭素繊維	HT	PAN	176	4 500	245	旭・日本カーボン
			180	4 600	250	トレカ×550
	Pitch	Pitch	180	5 600	270	トレカ×600
			182	5 500	290	日機装カーボンハイパー
				5 000	250	ハーキュレス
				3 000	20	日本カーボン
				3 000	24	三菱化成
				4 000	50	神 鋼
	HM	PAN	19	2 000	46	東レ M 46
			19	2 000	46	東邦レイヨン HM 45
Pitch			3 000	60	新 日 鉄	
			3 000	40	川 鉄	
炭化けい素	ニカロン SiC/W SiC/C	255	2 500~3 000	20	日本カーボン AVCO	
		30	3 500~4 550	43	AVCO	
チラノ	Si・Ti・C・O	23~24	2 800~3 000	21~22	宇部興産	
アルミナ	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> $\alpha$ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32	1 800	21	住友化学	
		39	2 000	39	Dupont	
ウイスカ	$\alpha$ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SiC SiC SiC SiN Grahight	37	1 520	15	Nextel	
		318	20 600	48	タテホ化学	
		319			東海カーボン	
		320	10 000		日本軽金属	
		318	13 700	38	タテホ化学	
		225	7 000~21 000	70~80	日機装	

が開発したもので従来のものに比べ高速紡糸が可能であると報告されている<sup>9)</sup>。

図 2 に炭素繊維の強度と弾性率の関係を示した<sup>10)</sup>。また特性を表 1 中に示した<sup>11)</sup>。

### 2.3 炭化けい素

AVCO ではタングステンや炭素繊維を芯材とした炭化けい素繊維の製造を 1970 年代の初めに発表している。この繊維の径は 100~120  $\mu\text{m}$  でボロン繊維同様非常に取り扱いやすい。また日本カーボン(株)によつて工業化されているニカロン繊維は、ジメチルクロロシランを原料としている。この繊維は 1975 年に矢島教授によつて開発されたものである。耐熱性に優れ、高い引張強度と弾性率を有しており、しかも金属との濡れ性が良いとされている。

この炭化けい素繊維は Al とのプリフォームワイヤーの型で供給されている。

AVCO の CVD 法による SiC 繊維との特性比較を表 1 中に示した。

### 2.4 チラノ繊維 (Si-Ti-C-O)<sup>12)</sup>

炭化けい素系の新しい繊維として最近宇部興産(株)によつて開発されたチラノ繊維 (Si-Ti-C-O) がある。この繊維は金属やセラミックスの補強用繊維素材として開発されたものであり、耐熱性、濡れ性、耐反応性に優れている。この繊維も有機金属重合体を熔融紡糸し、焼成して作った無機繊維である。

チラノ繊維は PTC (ポリチノカルボシラン) を熔融

紡糸し、得られた紡糸繊維を不融化处理後焼成して作られる。不融化处理とは、焼成の際に繊維形状が損われることを防ぐために空气中 200°C 以下の温度で加熱処理する工程である。焼成は窒素中 1 000°C 以上の温度で不融化糸を連続的に処理することによつておこなわれる。

チラノ繊維の特性をまとめてみると次のようになる。

- 1) Si, Ti, C, O からなる無機長繊維である。
- 2) 繊維径は 8  $\mu\text{m}$  以上のものを任意に制御でき、ばらつきを  $\pm 1.5 \mu\text{m}$  に抑えることができる。
- 3) 引張強度は 2.8~3.0 GPa, 引張弾性率 200~220 GPa (東で測定) であり、密度は 2.3~2.4 g/cm<sup>3</sup> である。
- 4) 従来の高い機械的性質を目標とした無機繊維のほとんどが結晶質のものであるのに対して、この繊維は 1 300°C まで非晶質構造を維持している。高い機械的性質を持ちながら非晶質であることは、種々の複合材料での優れた適合性と密接な関係がある。
- 5) 極細の繊維であるため、他の無機繊維に比べてしなやかであり、種々の複雑な織物とすることができる。
- 6) 線膨張率は  $3.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  (0~500°C), 比熱は 0.19 cal/deg. g (330 K), 0.28 cal/deg. g (760 K) である。特性を表 1 中に示した。

### 2.5 アルミナ繊維<sup>13)14)</sup>

アルミナ繊維は Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を主成分とし、SiO<sub>2</sub> を含有する結晶質の繊維である。アルミナは数種類の結晶構造を持つているが、現在製造されているアルミナ繊維は 1 000°C 以上に加熱して得られる安定な結晶構造の  $\alpha$  アルミナとスピネル構造の  $\gamma$  アルミナなどがある。アルミナ長繊維はアメリカのデュポン社によつて開発され製造されている。日本でも住友化学工業(株)が製造している。

構造用として使用されているアルミナ繊維の代表的な製造法としては、スラリー法 (デュボンプロセス), ゴル法 (3M 社), 前駆ポリマー法 (住友化学工業プロセス) などがある。

スラリー法は  $\alpha$  アルミナの微細な結晶粒子を乾式紡糸後焼結させた  $\alpha$  アルミナの繊維であるが、表面に SiO<sub>2</sub> を被覆して強度の向上を図っている。

ゴル法はアルミナのゾルにシリカゾルとほう酸を混合した液体から紡糸、焼成して  $\gamma$  アルミナの長繊維を得る方法で SiO<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を含む繊維である。

住友化学工業の開発した方法はポリアルミノキサンを溶媒に溶かして粘稠溶液を作り乾式紡糸し、焼成したアルミナ・シリカの連続繊維である。それぞれの繊維の性質を表 1 中に示す。

## 3. ウ イ ス カ

極めて細くて短いウイスカはそれなりに興味がある。これらは複合材フィラーとなり得る性質をもっている。一時アメリカでウイスカ強化複合材料の研究を盛んにお

こなつたが、ウイスカのマトリックス中の分散性の悪さと高い製造コストからしばらくの間研究の対象から遠のいた。しかし最近になつて、特に SiC や Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> などのウイスカの量産技術が開発され、将来大幅なコストダウンが見込めることになり、SiC ウイスカ強化複合材への関心が高まってきた。特に SiC ウイスカの量産技術の確立が発表されてから注目され、研究も盛んにおこなわれている。

その他アルミナ、グラファイト等のウイスカがある。これらの性質を表1中に示した<sup>15)</sup>。

#### 4. 繊維強化金属系複合材料

##### 4.1 炭素繊維-アルミニウム複合材料

炭素繊維の優れた性質を活かした金属系複合材料の研究が盛んにおこなわれ、特にアルミニウムマトリックスに関するものが多い。従来の炭素繊維は溶湯アルミニウムに濡れにくい。これは多くの場合炭素繊維の表面処理がされているからである。この表面を還元処理して溶湯アルミニウムに浸すと濡れ性もことなつてくる。実際に炭素繊維表面を Ar エッチングしてアルミニウムを被覆した複合材料界面では濡れ性も改善されるが反応も早く、550°C 4 h でアルミニウム・カーバイド (Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>) を生成する。この生成速度は放物線則に従う<sup>16)</sup>。

このような反応防止と濡れ性改善を目的に炭素繊維の表面被覆がおこなわれている。例えば塩化チタニウム、塩化ほう素を Zn で還元し、TiB を被覆する FMI (Fiber Materials In Co.) の方法がある<sup>17)</sup>。FMI ではこのような前処理後、溶湯アルミニウム中を通しプリホームワイヤーを製造している。このプリホーム材を素材として高温プレスか、溶湯鑄造で複合材料を製造する。

日本における次世代金属・複合材料研究協会でも同様の方法が試みられている。そしてプリホームワイヤーお

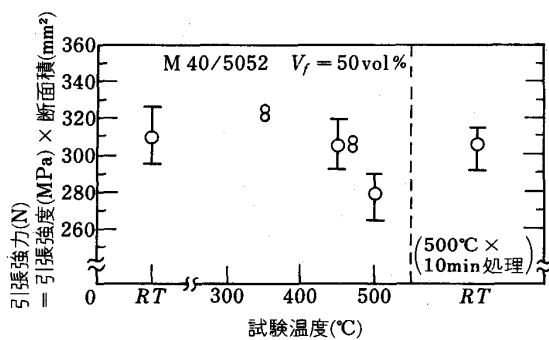


図3 M 40/Al 高温引張試験結果

表2 使用アルミニウム合金の特徴

名称	組成特徴
1080	純アルミニウム
6061	1% Mg, 0.5% Si
5052	~2.5% ~Mg
AC4C	7% Si

よび複合材の高温特性に研究の焦点があてられている。

まず高温引張試験の結果であるが、使用アルミニウム合金は4種類で炭素繊維はM40(東レの高弾性率炭素繊維)を使っている。おのおののプリホームワイヤーはV<sub>f</sub>(繊維の体積率)によつて断面積が異なる。例えばV<sub>f</sub>=45%のものは平均0.22 mm<sup>2</sup>, V<sub>f</sub>=50%のものは平均0.20 mm<sup>2</sup>である。使用アルミニウム合金の組成を表2に示し<sup>18)</sup>、複合材の高温試験結果を図3,4に示した<sup>19)</sup>。

この図によると高温強度はマトリックス合金の種類によつて異なる。純アルミニウムの場合には450°C 10 min で室温強度の90%程度となり、他の6061系, 5052系, AC4Cではそれぞれ1360 MPa, 1500 MPa, 1360 MPaで、室温強度の95%程度でこれらの合金による差はほとんど認められない。(図中の引張強さ(N)=引張強度(MPa)×断面積(mm<sup>2</sup>))

また450°C 100 h 真空中で処理した後の室温強度を調べてみると約1500 MPaでやはり強度変化がないことがわかり、高温における耐久性についてもかなり期待がもてることが明らかとなつた。

M40(6000フィラメント)の繊維とアルミニウム箔からグリーン・プリフォームを作製し、液相域でホットプレス法により複合化された高V<sub>f</sub>板状FRMの引張特性を表3に示した。この場合の加熱方式は赤外線による急速加熱でそのため繊維とマトリックス界面で反応も少なく、V<sub>f</sub>=67%のものは最大強度約1530 MPaを示し、最適製造条件によつてはCFRP(炭素繊維強化プラスチック)並の引張強度を示すことが示唆されている。

##### 4.2 ニカロン(SiC)-アルミニウム複合材料

日本カーボン(株)製ニカロンと1050Al(純アルミニウム)によるプリホームワイヤーについての結果を次に

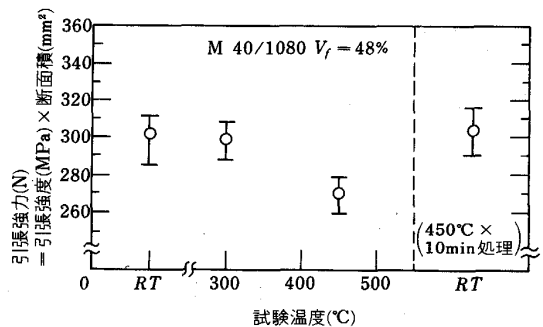


図4 M 40/Al 高温引張試験結果

表3 グリーン・プリフォームCFRMの引張性質 (M 40/6061)

V <sub>f</sub> (%)	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	引張強度 (GPa)			弾性率 (GPa)	試料数
		平均	最大	最小		
72	2.05	1.29	1.39	1.24	278	5
67	2.14	1.44	1.50	1.36	282	8

示す。\$V\_f\$ がことなると断面積もことなる。\$V\_f\$: 40% (断面積 0.20 mm<sup>2</sup>), \$V\_f\$: 45% (断面積 0.175 mm<sup>2</sup>) の試験結果を図 5, 6 に示した<sup>20)</sup>。

この結果によると 450°C 処理後では室温に比較して明らかに強度低下を示している。この原因については界面の問題で、マトリックスの応力伝播能力の低下に起因すると言われている。

このような素材を使って複合材を作る方法には種々の方法が試みられている。例えば炭素繊維プリホームワイヤーと同様にホットプレス、ロール拡散法、HIP 等である。本稿では長尺複合材料の製造が可能であるロール

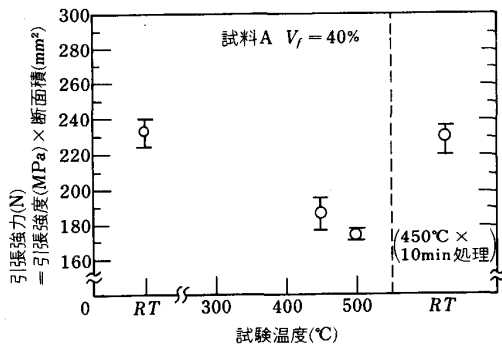


図 5 ニカロン/1050 の高温引張試験結果

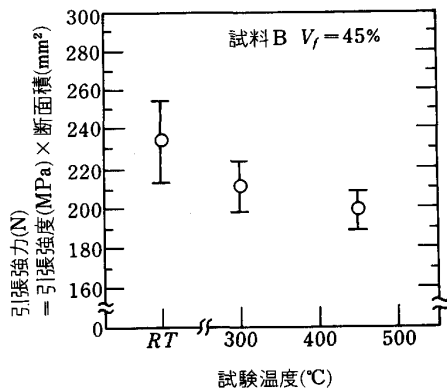


図 6 ニカロン/1050 の高温引張試験結果

表 4 各プリフォームのマトリックス金属の化学組成 (mass%)

成分	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Ni	Al
1050	—	—	—	—	—	—	0.01	0.02	—	残
2618	1.39	0.26	1.19	2.20	—	—	0.08	0.069	1.55	残

表 5 SiC/Al/Ti ハイブリッド材の成形条件と引張試験結果

プリフォーム	成形条件			\$V_f^*\$ (%)	\$\rho\$ (g/cm <sup>3</sup> )	引張強さ (GPa)			弾性率 (GPa)	資料数	
	方式	\$T_1/T_2\$ (K)	\$t_1/t_2\$ (min)			\$P\$ (MPa)	平均	最大			最小
SiC/6061/4343-Ti	温間	853/823	3/30	4.90	38	3.23	1.39	1.46	1.22	195	5
	プラテン	853/773	3/30	4.90	35	3.06	1.33	1.36	1.30	181	3
		873/823	3/30	1.96	35	3.09	1.29	1.57	1.04	186	7

\* : \$V\_{Ti} = 40\%\$ \$V\_{Al} = 25\%\$

成形法について述べる<sup>21)</sup>。

本系の FRM を作製するために用いられた材料の性質を表 4 に示す<sup>22)</sup>。2 種類のプリホームを使用し、一方は SiC を開織しプラズマ溶射したもので SiC/2618, 他方は溶湯の浸透法で作製した SiC/1050 である。

開織後溶射したプリホームを使って製作した複合材の強度は 458 MPa で単純複合則の 57% と低い値を示した。溶浸プリホームワイヤーを用いた場合は最高 1000 MPa のものも得られている。従ってニカロンプリホームワイヤーを使って SiC/Al 複合材料を製造するには、ロール拡散法は有効な製造法と言うことができる。

同系の SiC 繊維でも化学蒸着法によって作られた繊維がある。この繊維は ACVO (米国) のもので、Al をマトリックスとし、固相域また低圧成形が可能な固液相域でプレス成形をおこない引張特性を評価しているものもある。また同繊維による Al 箔, Ti 箔のハイブリッドの成形も検討されている<sup>23)</sup>。

この繊維は図 7 に示すように例えば Al(6061) では 650°C × 1 h, また 750°C × 15 min までは界面反応による劣化を示さず熱安定性を持つており、マトリックスの固液共存域での低圧成形の可能性を示唆したものとされている。

590°C の固液相成形では、1.96 MPa の低圧にもかかわらず複合化は十分におこなわれ、成形体は高い引張強度を示した。一方 550°C の固相成形では 29.4 MPa の高圧成形を必要とし、その成形体の強度は大きなばらつきを示した。この原因を超音波探傷法によって調べた結果同一ロッドであつても、試料の採取位置によって欠陥

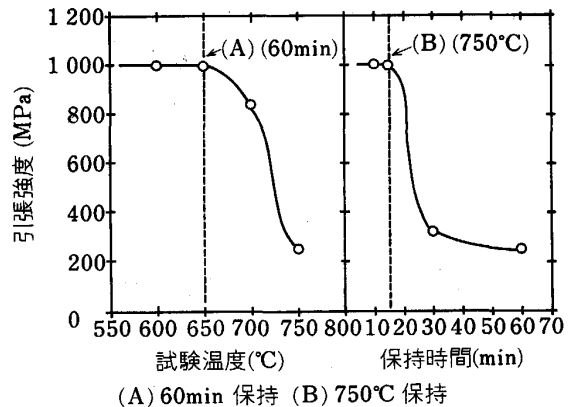


図 7 SiC 6061 の熱処理による強度劣化

量に差があることを明らかにしている。

SiC/6061/4343Ti では固液相域での熱間プレスおよび温間プラテン方式ともに高い引張強度を示した。その結果を表5に示す<sup>24)</sup>。

SiC/6061( $V_f$ : 43%) を  $515^\circ\text{C} \times 34.3 \text{ MPa} \times 30 \text{ min}$  の条件で、また SiC/Ti-6Al-4V( $V_f$ : 32%) は  $870^\circ\text{C} \times 39.2 \text{ MPa} \times 30 \text{ min}$  の条件でおのおの固相域熱間プレスにより成形した複合材料を使って  $450^\circ\text{C}$  までの高温下で引張試験をおこない、強度評価をしている。

このように CVD 系繊維、特に SiC は FRM の最大の問題点である繊維/マトリックス界面における反応に対して安定であり、複合材料も極めて高い強度特性を示すことが明らかにされている。

#### 4.3 チラノ繊維強化複合材料

FRM の開発で最も注意を必要とする点は、溶融金属による反応、固相拡散による繊維の劣化、金属と繊維の濡れ性であることは前述した。最近注目されているチラノ繊維強化複合材について紹介する。

チラノ繊維は Si-Ti-C-O で構成されている。この構成成分中の Ti 量の変化と溶湯法で作製したチラノ繊維強化アルミニウム合金複合材の相対強度の関係を調べた例がある。これによると、チラノ繊維中の Ti の量が増加するにしたがい、繊維強度の低下率が減少してくる。これは Ti の増加により界面に生成する  $\text{Al}_4\text{C}_3$  が抑制され、しかも Si-Ti-C-O の構成元素間の結合力が増大した結果と推定されている<sup>25)</sup>。

図8にチラノ繊維、SiC 繊維で強化した 6061 アルミニウム合金複合材料を空气中  $400^\circ\text{C}$ 、 $100 \sim 400 \text{ h}$  熱処理した後、複合材料から繊維を抽出し、その強度変化を調べたものを示す<sup>26)</sup>。

SiC 繊維は  $100 \text{ h}$  以上経過すると繊維強度が徐々に低下するが、チラノ繊維の場合には SiC と同様に初期に

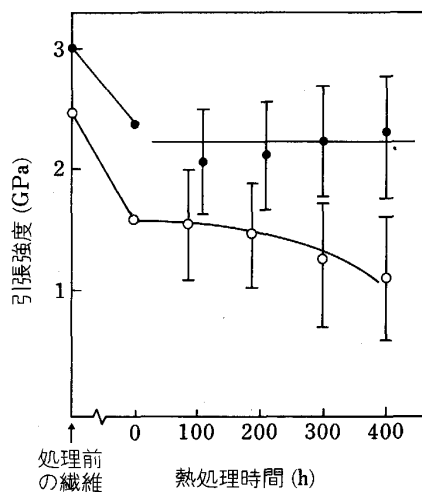


図8 Si-Ti-C-O 繊維アルミニウム合金 (6061) (●), SiC 繊維アルミニウム合金 (6061) (○) 複合材を  $400^\circ\text{C}$  の大気中で加熱した場合の強度変化

低下がみられるが  $400^\circ\text{C}$ 、 $400 \text{ h}$  経過しても強度はほとんど変化しない。この結果からチラノ繊維を用いたアルミニウム合金複合材料では、従来の無機繊維で強化したアルミニウム系複合材料に比べ耐熱性の向上が期待できる。

一方向チラノ繊維強化アルミニウム複合材料〔純アルミニウム (1070),  $V_f$ : 50%〕の引張強度は  $1.1 \text{ GPa}$ 、曲げ強度  $1.3 \text{ GPa}$  であり、特に強化方向と  $90^\circ$  の曲げ強度 (Transverse flexural) が  $0.35 \text{ GPa}$  の高い値を示す。これは従来の無機繊維を使用したアルミニウム系複合材の、 $0.1 \text{ GPa}$  に比べて大幅の高い値を示すことは、チラノ繊維が他の無機繊維に比べて濡れ性に優れていることを示唆しており、チラノ繊維強化アルミニウム複合材は、耐疲労特性、耐衝撃性、圧縮強度に優れた性質を発現する材料となることが期待できる。

#### 4.4 ウィスカ強化金属基複合材料

ウィスカ強化金属基複合材料は連続繊維とことなり、ウィスカを均一に分散させることによりほぼ等方向の強化が得られるとともに、加工も従来の技術が適用できるという利点がある。

マトリックス金属として考えられる金属に、アルミニウム、チタニウム、マグネシウム、ニッケルなどが挙げられるが、実際に多く試みられているのはアルミニウム系である。

製造法は例えばアルミニウム合金粉末とウィスカを混合して、ホットプレスで成形した後熱間押しや圧延で加工する方法、あるいはウィスカをあらかじめ成形してそれを予熱後、マトリックス溶湯を圧入する高圧鋳造法などが使われている。図9は押し出法による成形体によつ

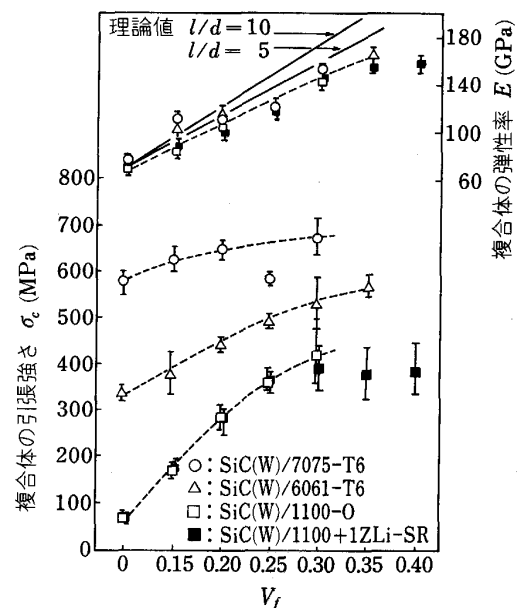


図9 押し出成形体の弾性率、引張強さと  $V_f$  の関係

て得られた複合材の特性を示す<sup>27)</sup>。

## 5. 金属基複合材はどこに使用されようとしているか

### 5.1 宇宙、航空

かつて米ソが先陣を争った宇宙開発も、宇宙船からスペースシャトルへ、そしてついに宇宙基地建設構想にまで発展した。日本でも1975年以来科学衛星の打上げに始まり、最近では放送、気象、通信等実用衛星をアメリカの協力のもとで打ち上げる力量を備えてきた。現在国際プロジェクトの形で開発が進められているNASAを中心とした宇宙基地建設のための諸実験にも、カナダ、ESAとともに日本も名を連ねている。FRMの開発はこの宇宙基地建設にとってどうしても必要なのである。その大きな理由は、耐宇宙環境であり、特に長寿命化の点ではFRPをしのぐ特性をFRMが発現する可能性があることで、それは①熱劣化、②紫外線劣化、③耐熱サイクル、④吸湿性の点で優れているからである。

特に宇宙構造物が大形化するに伴い、その耐久性が問題となる。すなわち次に示すような宇宙環境に耐える材料として期待される。

①無重力、②高真空 ( $10^{-5} \sim 10^{-13}$  Torr)、③温度差 ( $-160 \sim +160^{\circ}\text{C}$ )、④強い紫外線、⑤放射線、⑥原子状酸素の存在である。

航空機関係では具体的に使用箇所は公表されていないが、FRP、FRMを含めた複合材の使用予想がされている。例えば1984年においては、複合材料適用量は機体における重量比で、軍用機では3%、民間機では2%であるが、1995年には軍用機で40%、民間機では20%に増加することが予測されている。

このように航空機設計者は複合材料に対して大きな期待をよせている。従来の金属材料が均質等方性材料であるのに対して、複合材料は非均質異方性材料であつて、しかも部品の製造過程において繊維の配列が任意に選択可能で、強度特性に対する方向性を自由に選ぶことができる利点が設計者にとって魅力なわけである。

複合材料のエンジン部品への適用も大いに期待されている。特にターボファンエンジン部品には、ボロン繊維/アルミニウム合金、ボロン繊維/チタニウム合金複合材料、またタービン部分にはタンゲステン繊維/耐熱合金複合材料の適用研究が試みられている。しかしいまだ実用化してはいない。

川崎重工業ではラジアルコンプレッサー(インペラー)の軽量化を目的にFRMインペラーの試作研究などがおこなわれている<sup>28)29)</sup>。

このようにエンジン本体の主要部分は耐熱強度を重要視するため、金属系複合材料が対象となり、成形加工に高度な技術が要求される。

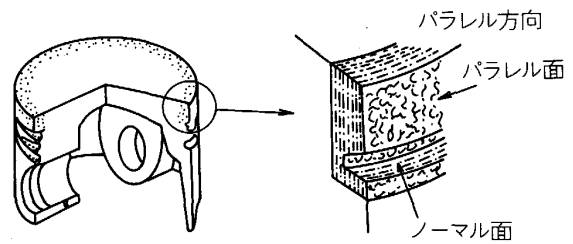


図10 セラミックファイバーによる部分強化ピストンの構成と繊維配向

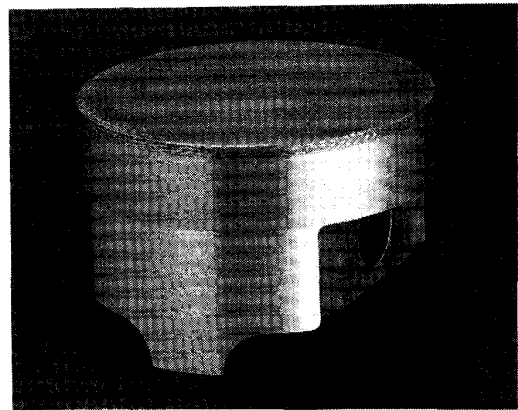


写真1 チラノ繊維強化アルミニウム合金部品

### 5.2 自動車

自動車を軽量化すると燃費、加速性、操縦性、乗り心地など車両の基本的性能が向上するため、複合材料の使用が拡大している。なかでもFRMは軽合金のアルミニウムやマグネシウムを繊維で強化することにより、強度、剛性、耐摩耗性、低熱膨張性などの特性が向上するのでエンジン部品への用途開発が研究されている。

現在実用化されているのは、トヨタ自工の耐摩環ピストンと、本田技研のコネクティングロッドである。

トヨタのディーゼルエンジン用耐摩環ピストンの概要を図10に示す<sup>30)</sup>。これは $\text{Al}_2\text{O}_3$ 繊維、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$ 繊維が使用され、熱負荷の大きなピストントップの外周部に上記繊維を鑄ぐるんだもので、リング溝部の耐摩耗性、耐焼付き性を高めて、エンジンの高出力化を果たしている。

チラノ繊維の高温特性を生かして、試作製造されたピストンヘッドの写真を写真1に示した<sup>31)</sup>。

本田技研のコネクティングロッドは、ステンレス繊維を鑄ぐるんだもので、このロッド使用により約30%の軽量化を実現したと言われている。またSiCウイスカで強化したコネクティングロッド、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 繊維で複合化したコネクティングロッド等の研究、開発がおこなわれている。

## 6. おわりに

以上強化繊維, FRM の製造そして使用ターゲットの幾つかについて述べてきたが, 実際に FRM を作つてみると理論どおりに作製できない. たとえば金属と C, B, SiC そして Si-Ti-C-O 等の繊維は高温において拡散・反応を起こし, 相間化合物を生成する. これは両物質間の界面は熱力学的に非平衡にあるため起こる現象で当然の結果である. なんとか付加価値の高い材料を低価格で製造しようとするため, もし高価格でもよいとなれば繊維の表面処理を十分に実施した後に複合化すれば理論に近い値を示す材料も作製できる.

FRM についても約 10 数年の研究経験から, 問題点はほぼ明らかになつてきていると思われる. それは, 1) 複合両物質間の界面挙動である, 2) 1) との関連において目的とする部品に適した製造技術を選ぶこと, 具体的に挙げるならば, 1) に関しては界面反応を肯定したうえで理論強度の 70~80% を認めるかどうかであり, 2) に関しては小形部品であれば溶湯鍛造法などの使用は有効であるし, また長大製品であればロール拡散法なども有効な製造手段であるといえる.

## 文 献

- 1) 大蔵明光: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 902
- 2) A. OKURA: Trans. JSCM, **11** (1985), p. 10
- 3) 大蔵明光: 第 108・109 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1985), p. 41
- 4) G. PIATTI: Advanced in composite materials (1978), p. 99 [Applied Science Publishers Ltd. London]
- 5) 大蔵明光: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 905
- 6) G. PIATTI: Advanced in composite materials (1978), p. 384 [Applied Science Publishers Ltd. London]

- 7) 梶谷 幸: 新しい複合材料と先端技術 (1986), p. 76
- 8) AVCO Systems Division の資料 (1979)
- 9) 炭素素原料の有効利用 II (CPC 研究会編) (1984)
- 10) 新日鉄カタログ (1986)
- 11) 日本カーボン, 東レ, 日機装, 三菱化成, 神鋼, 東邦レイオン, 新日鉄, 川鉄, Nextel, 宇部興産, 住友化学, Dupont, AVCO, タテホ化学, 東海カーボン, 日本軽金属, 各社のカタログ
- 12) 山村武民: 第 3 回先端技術セミナー (SAMPE), Japan (1986), p. 13
- 13) Dupont のカタログ
- 14) 住友化学のカタログ
- 15) 東海カーボン, タテホ化学カタログ
- 16) A. OKURA and K. MOTOKI: Composites Science and Technology, **24** (1985), p. 243
- 17) FMI の資料
- 18) 大西征一郎: 第 4 回次世代産業基盤技術シンポジウム—金属・複合材料技術—予稿集 (1986), p. 338
- 19) 大西征一郎: 同上, p. 339
- 20) 大西征一郎: 同上, p. 340
- 21) 浅沼 博, 大蔵明光: 日本金属学会誌, **48** (1984), p. 1119
- 22) 榊原俊夫: 第 4 回次世代産業基盤技術シンポジウム—金属・複合材料技術—予稿集 (1986), p. 358
- 23) 正木彰樹: 同上, p. 343
- 24) 正木彰樹: 第 3 回次世代産業基盤技術シンポジウム—金属・複合材料技術—予稿集 (1985), p. 84
- 25) 山村武民: 第 3 回先端材料技術セミナー (1986), p. 13
- 26) 山村武民: 同上, p. 17
- 27) 坂本 昭: 第 3 回次世代産業基盤技術シンポジウム (1985), p. 100
- 28) 中村敏則: 材料フォーラム (関西複合材料研究会資料) (1986)
- 29) 中村敏則, 西山幸夫: 鉄と鋼, **73** (1987), S662
- 30) 韋ノ本忠: 材料フォーラム (関西複合材料研究会資料) (1986)
- 31) 山村武民: 宇部興産(株)研究開発本部宇部研究所資料