

# PCS系SiC繊維/Al系プリフォームワイヤ を中間素材とするホットプレスによる コンポジット化

今井義一\*・田中義和\*<sup>2</sup>・市川 宏\*<sup>3</sup>・石川敏功\*<sup>4</sup>

## Fabrication of Composite by Hot Pressing of SiC<sub>PCS</sub> Fiber Reinforced Al Preform Wires

Yoshikazu IMAI, Yoshikazu TANAKA, Hiroshi ICHIKAWA and Toshikatsu ISHIKAWA

### Synopsis :

Polymer derived SiC fiber reinforced Al "preform wires" were used as semi-finished materials for fabricating composites by hot-pressing. The influence of combination of pressure, heating temperature and holding time during hot-pressing on strength, microstructure and fracture surface of fabricated composites was investigated.

Pressure below 30 MPa and pressing time shorter than 300 s were not enough to bond preform wires each other. Pressing time longer than 1.8 ks degraded fiber strength. The combination of pressure of 40 MPa or more and pressing time of 600 s through 1.2 ks resulted in high strength of composites. Under such conditions, pressing temperature below 788 K was too low to bond preform wires each other, while pressing temperature above 833 K lead to fiber damage due to interfacial reaction between SiC fibers and aluminum matrix.

Consequently, the pressing temperature from 803 K through 823 K was suitable to make high strength composites. The composites fabricated under the conditions described above showed very high tensile strength, which was about 95 pct of that of the preform wires.

It can be concluded that metal matrix composites can be easily fabricated using preform wires as semi-finished materials.

**Key words :** fiber reinforced metal matrix composites ; FRM ; MMC ; silicon carbide fiber ; SiC/Al preform wire ; hot-pressing ; diffusion bonding ; tensile strength.

## 1. 緒 言

比強度，比弾性率が高く，耐熱性，耐酸化性に優れる炭化けい素繊維は，繊維強化金属複合材料 (FRM) の強化基材として注目されている<sup>1)2)</sup>。なかでも，有機けい素化合物のポリカルボシラン (Polycarbosilane) を溶融紡糸-不融化-焼成して製造される炭化けい素連続繊維 (ニカロン<sup>®</sup>，以下 PCS 系 SiC 繊維と表記する。また図や表の中では SiC<sub>PCS</sub> として示した。) は，細径でしなやかである。それゆえ編織加工や小曲率の形状化ができるなどの形状の自由度が大きいことも加味されて有

望視されている<sup>3)~7)</sup>。この細径な繊維は多繊維束のヤーン状で供給されるため，液相のマトリックスを用いるのが均質的で効率がよく好ましい。しかし，細径ゆえに界面反応による影響を受けやすく，高強度 FRM が得にくいという問題がある。この問題を解決するために，適切にコントロールされた製造条件のもとで連続状の繊維束を液相の Al と複合化し，ワイヤ状にしたプリフォームワイヤと呼ばれる FRM 成形用中間素材が開発されている<sup>8)~10)</sup>。このプリフォームワイヤは既に複合化されているので，拡散接合を利用した各種の成形法が適用できると期待されている。このプリフォームワイヤ自体は優

平成元年 6 月 30 日受付 (Received June 30, 1989)

\* 日本カーボン(株)研究所 (Research Laboratory, Nippon Carbon Co. Ltd., 1-1 Shinurashima-cho Kanagawa-ku Yokohama 221)

\*<sup>2</sup> 日本カーボン(株)複合材料センター (Composite Materials Center, Nippon Carbon Co. Ltd.)

\*<sup>3</sup> 日本カーボン(株)研究所 工博 (Research Laboratory, Nippon Carbon Co. Ltd.)

\*<sup>4</sup> 日本カーボン(株) 工博 (Nippon Carbon Co. Ltd.)

れた機械的特性をもっているが、最終的な成形の過程でワイヤ自身の持つ特性をいかに保持できるかが大きな鍵になる。

プリフォームワイヤ自体の特性については比較的多くの報告がある<sup>11)~13)</sup>が、それを用いた複合材料の最終成形に関する報告は少ない。

本報告では、SiC<sub>P</sub>CS 繊維と純 Al のマトリックスのプリフォームワイヤを用い、拡散接合法としては基本的な成形方法であるホットプレス法で成形する際の技術的な問題点ならびに成形条件と強度の関連性を調べ、最適成形条件を検討した。そしてプリフォームワイヤの中間素材としての有用性を検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1 素材

複合材料を作製するために使用した素材は、SiC<sub>P</sub>CS 繊維で強化した純 Al マトリックスのプリフォームワイヤである。プリフォームワイヤは、平均繊維直径 14 μm の連続状の SiC<sub>P</sub>CS 繊維の 500 本の束を Al 溶湯のマトリックス中で熔融金属浸透法 (Liquid metal infiltration method) によって複合化したものである。プリフォームワイヤに用いられている SiC<sub>P</sub>CS 繊維の代表的な特性<sup>14)~16)</sup>を Table 1 に示す。また、マトリックスは純度 99.50% の工業用純アルミニウム (A 1050) である。

Table 1. Typical properties of continuous silicon carbide fiber.

Property	Value
Filament diameter	14 μm
Cross section	Round
Filament/Yarn	500
Tex	210 g/km
Density	$2.55 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Tensile strength	2.5~3.0 GPa
Young's modulus	180~200 GPa
Maximum useable temperature	1 500 K
Coefficient of thermal expansion	$3.1 \times 10^{-6}/\text{K}$

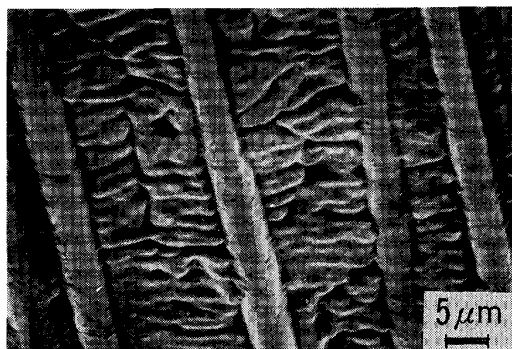


Photo. 1. SEM photograph of side surface of preform wire.

プリフォームワイヤの平均直径はおよそ 0.5 mmφ であり、ワイヤの側面は Photo. 1 に見られるように熔融マトリックスの凝固時の収縮による皺が見られる。使用したプリフォームワイヤは、繊維体積率 ( $V_f$ ) 0.38, 平均引張強度は 1.01 GPa のものである。なお、 $V_f$  は、試料ワイヤを 5N の塩酸溶液に約 5 ks 浸漬して、Al マトリックスを完全に溶出した抽出繊維および試料ワイヤの重量を測定して、繊維およびマトリックスの密度を用いて算出した。

### 2.2 プリフォームワイヤの加熱による強度変化の測定

本方法は、ホットプレスを用いたプリフォームワイヤどうしを加熱圧接して複合材料とするものである。適正成形条件を決めるためにも、プリフォームワイヤの加熱による強度の劣化を把握しておくことが重要である。そのため、本実験ではプリフォームワイヤを窒素ガス (1 atm) 雰囲気中で加熱した後に、プリフォームワイヤの引張試験を室温 (293 K) 大気中で行い強度を測定した。また、一部のワイヤについては繊維を抽出し、その単繊維の引張強度を測定した。

素材および加熱処理後のプリフォームワイヤの引張強度はインストロン型の引張試験機を用い、試料長さ 150 mm, ゲージ長さ 60 mm とし、歪み速度は  $2.78 \times 10^{-3}/\text{s}$  である。またワイヤ中の繊維の強度は、ワイヤから抽出した繊維をテンシロン引張試験機を用いて室温で測定した。試料長さ 50 mm, ゲージ長さ 25 mm, 歪み速度は  $1.32 \times 10^{-3}/\text{s}$  である。

### 2.3 複合材料の作製条件

本実験では、プリフォームワイヤを素材として SiC<sub>P</sub>CS 繊維強化 Al 複合材料をホットプレスによって作製する。Fig. 1 には、ホットプレスの成形スケジュールのパターンを示す。なお、その作製に用いた高周波真

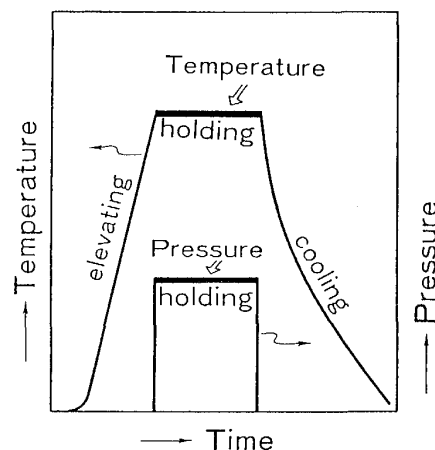


Fig. 1. Pattern of hot pressing in fabricating composites from SiC<sub>P</sub>CS/Al preform wires.

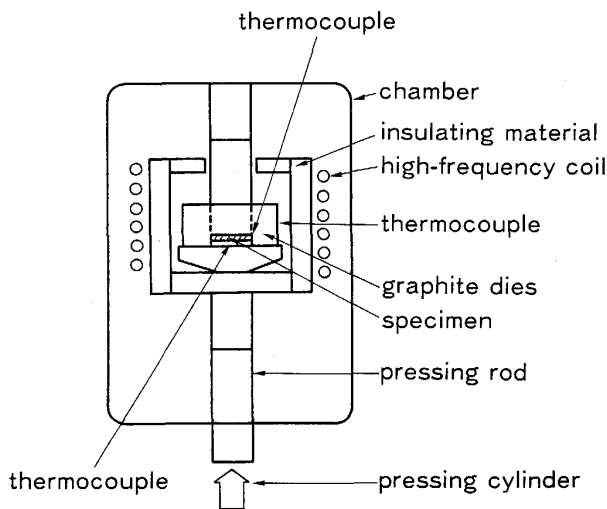


Fig. 2. Schematic diagram of hot pressing.

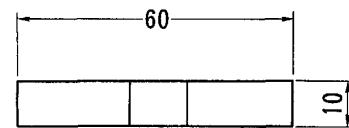
空ホットプレス装置の概念図を Fig. 2 に示した。Fig. 1 において、473 K から所定の温度までの昇温時間は約 0.6 ks である。各温度に達した時点で加圧保持し、一定時間後に成形圧力と温度の各スイッチを切った。窒素ガスを流入して復圧、冷却を行い、473 K まで冷却してダイスから成形体を取り出した。冷却に要した時間は 1.8~2.7 ks であった。なお、昇温と加圧は真空中 ( $10^{-3}$  torr 以下) で行った。

長尺の素材プリフォームワイヤから無作意に、長さ 100 mm ずつのものと 40 mm ずつのものと、さらに一部は長さ 150 mm のものとに切断した。前者の中から成形体 1 個あたり約 20 g ずつを無作意に採取して、100 mm 長のは繊維軸方向 ( $0^\circ$  方向) 用の、また 40 mm 長のは繊維軸と直角方向 ( $90^\circ$  方向) 用の特性用成形体の素材として後述のホットプレス成形実験に供した。さらに、後者の 150 mm 長のワイヤから無作意に抽出して、素材プリフォームワイヤの代表特性用に 20 本を、また加熱による強度の劣化を調べるために 10 本ずつを試料として採取した。

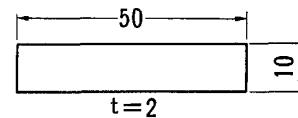
一方向強化の平板複合材料を作製するために、ワイヤをできるだけ引き揃えて、黒鉛製の割り型ダイスに充填した。得られた板材の寸法は、ワイヤ長 100 mm の場合は厚さ約 3 mm×幅 25 mm×長さ約 100 mm の、またワイヤ長は 40 mm の場合は、厚さ約 3 mm×幅約 60 mm×長さ約 40 mm である。

ホットプレスにより複合材料を作製する場合、そのパラメーターとして成形温度、加圧圧力および保持時間が考えられる。そこで、前項のプリフォームワイヤの加熱による強度の劣化を参考にして、温度、加圧圧力および

(a) Tensile Test Specimen



(b) Flexural Test Specimen

Fig. 3. Specimens of SiC<sub>PCS</sub>/Al composites.

保持時間の三つの作製条件についてそれぞれの影響を調べた。プリフォームワイヤの配列方法や繊維体積率  $V_f$  等に関しては前述したようにすべて一定とした。

成形体の強度は、繊維軸方向 ( $0^\circ$  方向) の引張試験と 3 点曲げ試験および繊維軸と直角方向 ( $90^\circ$  方向) の 3 点曲げ試験により評価した。また複合材料の密度をアルキメデス法により測定し、断面および破面を光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した。

#### 2.4 複合材料の機械的性質の測定

一方向強化複合材料においては、試験片を通常の金属材料の試験体の形状に加工しても、引張試験時にほとんどが平行部で破断せずに肩の部分で破断が起こる。そのため本実験は、Fig. 3(a) に示すように厚さ方向にダイヤモンド砥石の R 面加工機により半径 125 mm で両側を 0.5 mm ずつ加工した試験片を用いて引張試験を行った。引張試験には、インストロン型引張試験機を用いて、チャック間距離 60 mm、クロスヘッド速度  $1.67 \times 10^{-5}$  m/s で大気中室温にて行った。

曲げ強度は Fig. 3(b) に示すような形状に加工した試験片を用いて、スパン 40 mm、クロスヘッド速度は  $1.67 \times 10^{-5}$  m/s で大気中室温にて行った。なお、抽出繊維の引張強度の測定は、前述 2.2 項と同様にして行った。

#### 2.5 複合材料の組織と破面の観察

プリフォームワイヤおよび成形体の断面や破面等の観察、および成形体中の繊維配列やワイヤどうしの拡散接合状態などについての観察は、光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて行った。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 プリフォームワイヤ強度に与える加熱の影響

ホットプレスによるプリフォームワイヤの成形実験に先立ち、素材プリフォームワイヤの強度に与える成形条件の主要因子の影響について検討を行った。ホットプレス成形では、プリフォームワイヤ自体を変形させながら、ワイヤどうしを拡散接合させる。したがって、加圧圧力によってワイヤが塑性変形する必要があり、そのためにはある程度以上の加熱が必要である。加熱温度が高く塑性変形能が大きくなれば、加圧圧力が低くて済むので、実用上好都合である。しかし加熱しすぎるとプリフォームワイヤ中の繊維とマトリックスの Al の界面反応が進行して繊維の強度劣化を起こして複合材料強度が低下する恐れがある<sup>17)18)</sup>。すなわち、加熱温度には上限の制約がある。また、繊維強化金属のホットプレスには通常 15~30 MPa 程度の加圧圧力が用いられているが、プリフォームワイヤの場合はワイヤの塑性変形能に応じた圧力を選定する必要がある。次に、成形保持時間については、プリフォームワイヤどうしの接合はマトリックスの純 Al の機械的熱圧接合であって、いわゆる異種元素の拡散による接合とも若干趣旨を異にするので、要は熱圧接合が果たされればよい訳であり、必ずしも通常の拡散接合のような 3 ks 前後の時間を必要としない。

そこで素材プリフォームワイヤに温度と時間を変えた熱処理を施し、この熱処理がプリフォームワイヤの強度に与える影響を調べた。Fig. 4 は、窒素雰囲気中でプリフォームワイヤを加熱保持した後に、室温大気中で引張試験を行った結果である。Photo. 2 はプリフォームワイヤの引張破断面を示したものである。その熱処理条件としては、処理温度が 773 K から 50 K ごとに 923 K ま

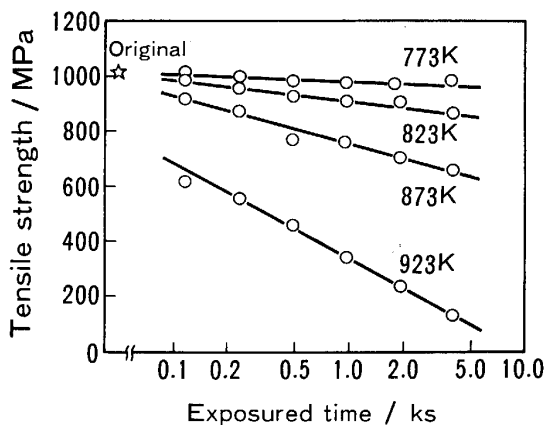


Fig. 4. Effect of heat treatment temperature and time on tensile strength of SiC<sub>PCS</sub>/Al preform wire.

で、処理時間は 0.12, 0.24, 0.48, 0.96, 1.92 および 3.84 ks にて行った。Fig. 4 からわかるように、処理温度が低く短時間の場合強度低下は小さいが、処理温度が高くなるに従って強度はしだいに低下する。たとえば 923 K, 330 s では加熱処理をしないプリフォームワイヤの引張強度の 50% に低下している。また本実験条件の範囲内では、処理時間の対数に関して直線的に強度が低下している。

Fig. 5 は、上記の熱処理を行った試料から抽出した単繊維の引張強度の測定結果である。Fig. 5 からわかるように、処理温度と時間の増加に伴い、抽出繊維の強度も低下する。Fig. 4 のワイヤ強度の低下と同様の傾向であることから、プリフォームワイヤの強度低下の一要因は加熱による繊維の強度低下によると考えられる。

以上の結果から、成形温度は低い方が好ましく、成形加圧保持時間はできるだけ短時間が好ましいとわかる。

#### 3.2 複合材料の作製

本実験では、ホットプレス時の加圧温度、加圧保持時間、加圧圧力をパラメーターとして試料を作製した。な

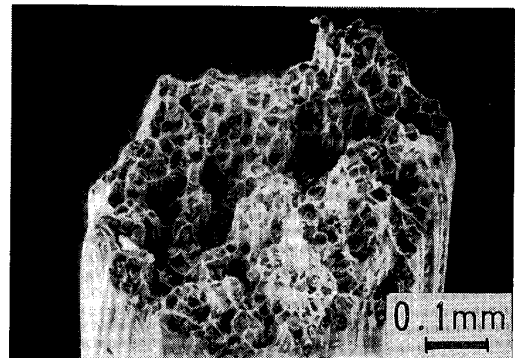


Photo. 2. SEM photograph of fracture surface of preform wire.

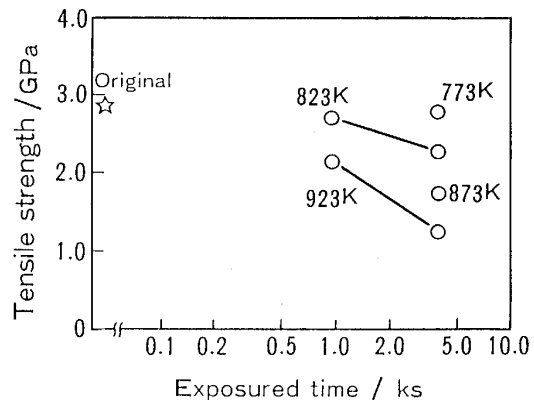


Fig. 5. Effect of heat treatment temperature and time on tensile strength of fibers extracted from preform wires.

お、Photo. 3 に素材ワイヤと成形体の一例を示す。

加圧圧力を20, 30, 40 および 50 MPa と変えて加圧圧力の影響を調べた。なお、加圧温度および保持時間は、前項のプリフォームワイヤの加熱による強度の劣化を考慮して、773 K および 600 s と一定とした。加圧圧力が20 MPa と低い場合と 50 MPa と高い場合のそれぞれの破面を Photo. 4 に、また断面を Photo. 5 に示す。Photo. 4 の破面に見られるように、低加圧圧力では素材に用いたプリフォームワイヤが1本1本剥離した状態になっており、プリフォームワイヤをつかみ部で束ねて

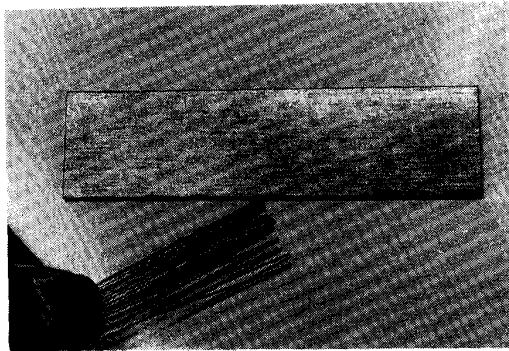
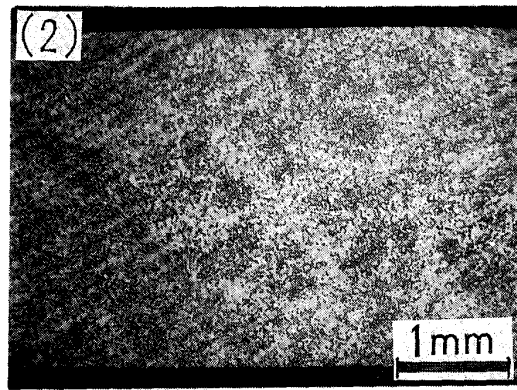
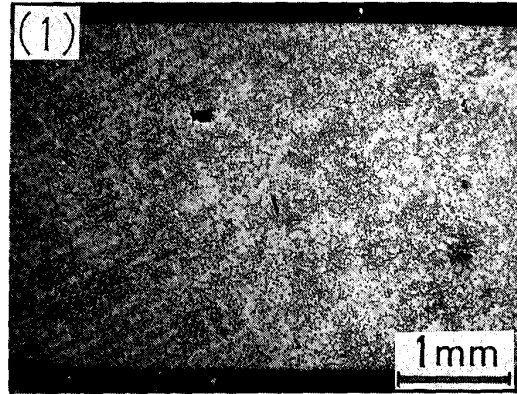


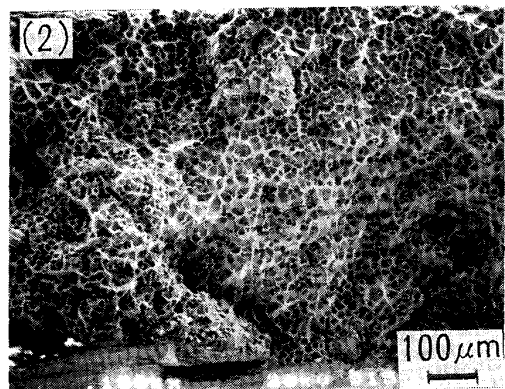
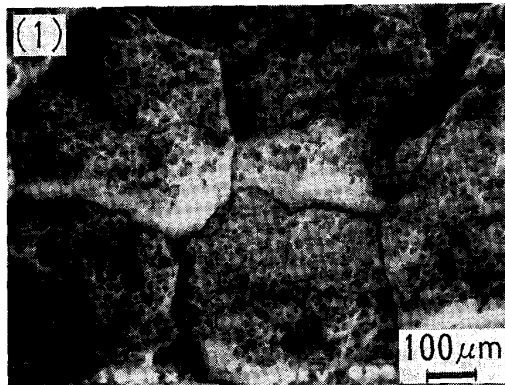
Photo. 3. Appearance of SiC<sub>PCS</sub>/Al preform wires and the hot-pressed composite coupon.

試験したように見える。Photo. 5 の断面観察からは、低加圧圧力では高加圧圧力の場合と異なりプリフォームワイヤどうしが接触している境界やボイドの存在も認められる。



(1) 20 MPa (2) 50 MPa

Photo. 5. SEM photographs of polished sections of composites fabricated under different pressures.



(1) 20 MPa (2) 50 MPa

Photo. 4. SEM photographs of fracture surfaces of composites fabricated under different pressures.

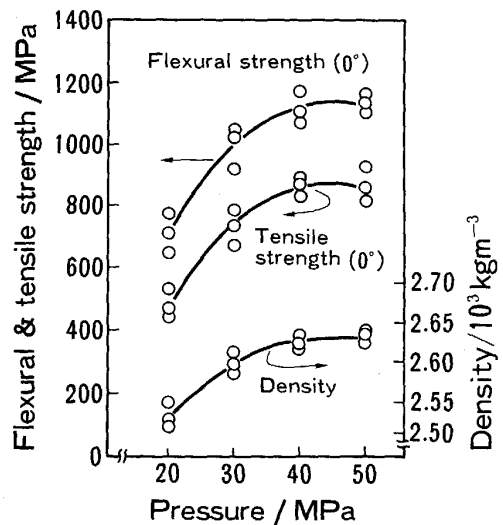


Fig. 6. Effect of pressure in hot pressing at 773 K for 0.6 ks on flexural strength, tensile strength and density of SiC<sub>PCS</sub>/Al composites.

Fig. 6 に加圧圧力が強度と密度に与える影響を示す。Fig. 6 に見られるように、複合材料の引張り、曲げ強度および密度は加圧圧力の増加とともに高くなり、40 MPa 以上ではいずれも一定値となる。

これらのことは、加圧圧力が不足したためにワイヤの塑性抵抗に抗し得ず、ワイヤどうしを十分に圧接しきれずに接合不十分の部分があったためと考えられる。一方、これに対し高加圧圧力では、Photo. 4(2) および Photo. 5(2) からわかるように、ワイヤ個々の識別はつかず一体ものの複合材料としての凹凸のある破面を示している。すなわち高加圧圧力では圧接も十分に達成されて強度が高かったものと考えられる。以上の結果から以後の成形条件を加圧圧力 50 MPa 一定とした。

次に、Fig. 7 に、加圧保持時間が複合材料の 0° 方向の引張り、曲げ強度および 90° 方向の曲げ強度に与える影響を示す。なお、加圧温度 813 K および加圧圧力 50 MPa 一定とした。Fig. 7 から、強度に対する加圧保持時間の影響は小さい。しかし、短時間では 90° 方向の曲げ強度において、50 MPa の加圧圧力では、強度はばらつきを示し、若干低下しているので接合不十分の部分が生じているものと思われる。一方、保持時間が 1.8 ks をこえる長時間側では密度が高く緻密化したにもかかわらず引張強度が若干低下しているのは、高温での長時間加熱による強度の低下であると考えられる。したがって加圧保持時間は 600 s から 1.2 ks がよいとわかる。以上の結果から以後の成形条件を加圧保持時間 600 s 一定とした。

つぎに、加圧圧力 50 MPa、加圧保持時間 600 s 一定

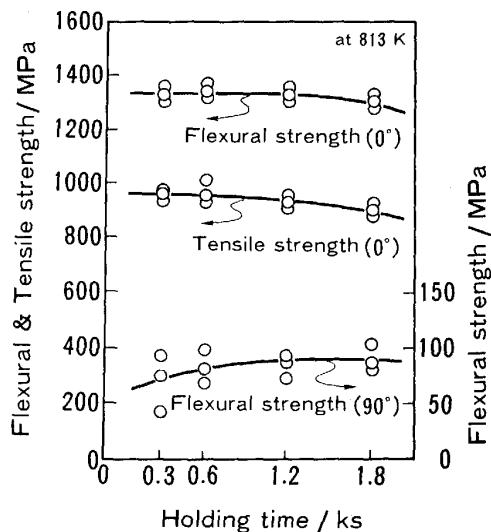


Fig. 7. Effect of holding time during hot pressing at 813 K under 50 MPa on SiCPCS/Al composite strength.

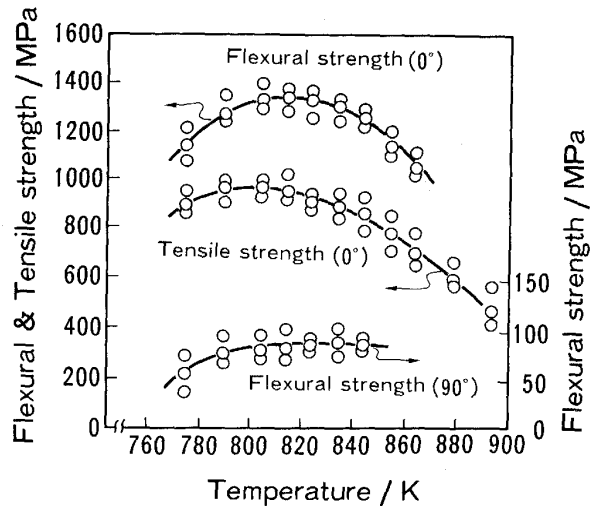
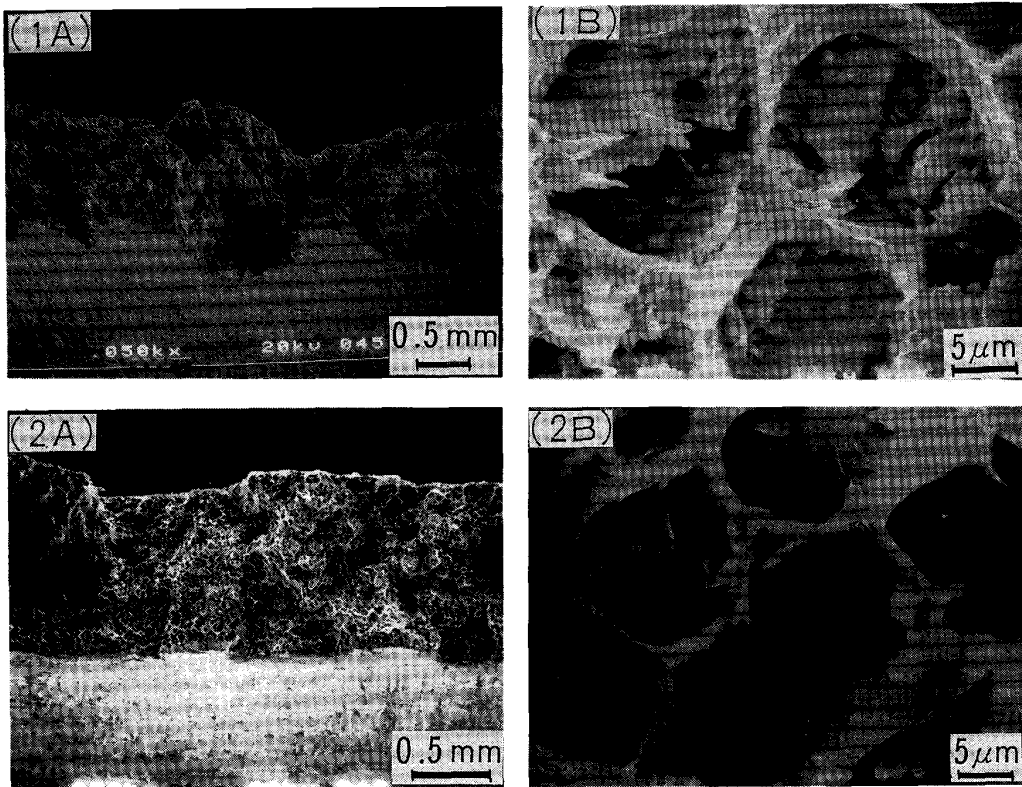


Fig. 8. Effects of hot pressing temperature under 50 MPa for 0.6 ks on composite strengths.

とし、加圧温度は 773 K から 893 K の範囲で変化させた場合の加圧温度に対する成形体の 0° 方向の引張り、曲げ強度および 90° 方向の曲げ強度を調べた。この加圧温度域の低温側は、繊維に損傷を与えないでワイヤ自体が容易に押し潰されて変形できる温度の 773 K から、一方、高温側は繊維強度低下によるワイヤ強度低下が加速しはじめる 893 K とした。その結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8 に見られるように、0° 方向の強度については引張り、曲げ強度とも 813 K 前後で最高強度を示した。この温度での引張強度は 970 MPa 前後の値であり、素材として用いたプリフォームワイヤの引張強さの約 95% に相当する。すなわちこの条件下ではプリフォームワイヤの持つ特性をほぼ保持した状態の複合材料が得られたものと考えられる。また、823 K 以上になると、強度は低下し始め、863 K ではおよそ 20% の低下を示した。

Photo. 6 には、高強度を示した 813 K の場合および低強度を示した 893 K の成形体の破面を示した。Photo. 6(1) の 813 K の成形体は、素材ワイヤ個々の区別は見分けにくく一体化した材料片の様相を呈している。またワイヤ（もしくは繊維）の破断位置の高低差が大きく、破面全体が鋭い凹凸に富み、一気に破断 (Catastrophic fracture) した様子がうかがえる。これに対し、Photo. 6(2) に見られる 893 K の成形体の破面は、ワイヤの破断位置の高低差は小さく、全体的に平坦な破面形態を呈している。また、繊維の引抜け (Pull-out) はほとんど認められない。前者はプリフォームワイヤが素材強度を保持したまま圧接一体化しており、応力を個々の繊維が分担して高い破断荷重を示したものであ

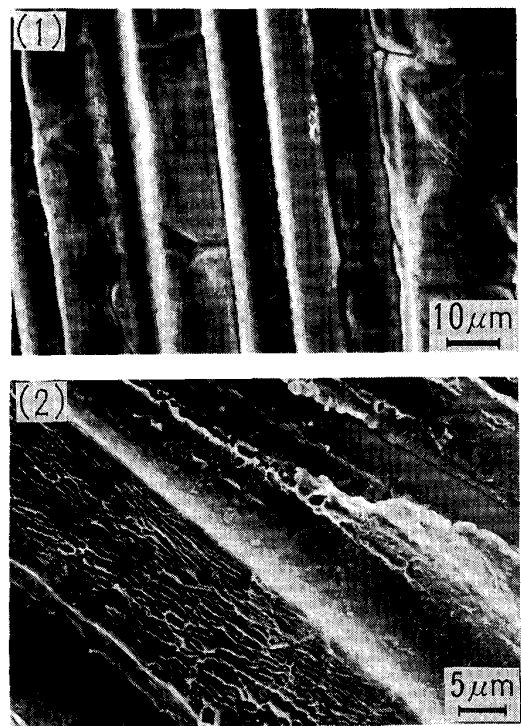


(1) 813 K (2) 893 K

Photo. 6. SEM photographs of fracture surfaces of composites fabricated under different temperatures.

る。一方、後者は繊維とマトリックスの界面反応が進みすぎて、繊維の強度を低下させ、低い破断荷重で脆性的に破断したと考えられる。つぎに、ワイヤどうしの接合性を直接的に表す  $90^\circ$  方向の曲げ強度は、成形温度の上昇にともない高くなるが、803 K 以上ではおよそ 90 MPa の一定値となった。これはマトリックス金属の純 Al の強度におおむね等しく、よい接合を示しているといえる。また、773 K では曲げ強度が 70 MPa 以下となる。Photo. 7 には、 $90^\circ$  方向の曲げ試験で高強度と低強度を示したものの破面の SEM 写真の一例を示す。これからわかるように 773 K で成形した Photo. 7(1) の低強度のものでは素材ワイヤの表面の皺が圧潰してやや変形しているが皺の形態を残しておりワイヤどうしの接合が不十分であったことを表している。一方、803 K 以上の高温になると、Photo. 7(2) に見られるようにマトリックスはディンプル状の延性的な破面を呈している。このことはマトリックスどうしの接合が十分に行われて強度も高くなったものと考えられる。

以上のことから、プリフォームワイヤどうしの接合が十分に行われるには 803 K 以上が必要であり、かつ界面反応によるワイヤ強度の劣化を極力抑えるには 823 K 以下が望ましいことが明らかになった。



(1) 773 K (2) 803 K

Photo. 7. SEM photographs of longitudinally fractured surface of composites fabricated at different temperatures.

#### 4. 結 論

SiC<sub>PCS</sub> 繊維強化 Al のプリフォームワイヤを成形用中間素材として用い、ホットプレス法により SiC<sub>PCS</sub> 繊維強化 Al 複合材料を作製した。その機械的特性を調べ、最適成形条件を検討した結果、次のような点を明らかにすることができた。

(1) 成形加圧圧力は 30 MPa 以下ではプリフォームワイヤどうしの熱圧接合が不十分である。また、成形時間は 300 s 以下ではプリフォームワイヤどうしの熱圧接合が不十分であり、1.8 ks 以上では繊維強度の低下が生じ好ましくない。40 MPa 以上の加圧圧力と 600 s から 1.2 ks の範囲の成形加圧保持時間が健全な複合材料を得るためには好ましい。

(2) (1) で求められた成形加圧圧力と成形加圧保持時間の条件下では、成形加圧温度が 788 K 以下ではプリフォームワイヤどうしの接合は不十分であり、833 K 以上では繊維劣化が大きくなる。したがって 803 K から 823 K の加圧温度が健全な複合材料を得るためには好ましい。

(3) 前記 (1), (2) の条件を満足する成形条件で作製した複合材料の室温での引張強度は、素材に用いたプリフォームワイヤの引張強度の約 95% を維持することができる。

以上の結果から、プリフォームワイヤを用いてホットプレス法により容易に繊維強化複合材料を製造し得ることを確認した。

#### 5. あとがき

この研究の一部は、通産省工業技術院の次世代産業基盤技術研究開発制度に基づき、(財)次世代金属・複合

材料研究開発協会が委託を受けた「複合材料の研究開発」の一環として行われたものである。

#### 文 献

- 1) S. YAJIMA, K. OKAMURA, J. HAYASHI and M. OMORI: *J. Am. Ceram. Soc.*, **59** (1976), p. 324
- 2) Y. MINODA: *Proc. Japan-U. S. CCM-III, Tokyo* (1986), p. 475
- 3) 葛西靖正, 斎藤 誠, 浅田千秋: *日本複合材料学会誌*, **5** (1979), p. 56
- 4) 小原嗣朗, 武藤範雄: *日本金属学会誌*, **45** (1981), p. 411
- 5) H. FUKUNAGA and T. OHDE: *Progress in Science and Engineering of Composites*, **2** (1982), p. 1443
- 6) E. NAKATA, Y. KAGAWA, H. TERAOKA and M. KOMORI: *Proc., Jpn. Congr. Mater. Res.*, **26** (1983), p. 19
- 7) 砥綿真一, 山田鉄一: *日本金属学会誌*, **47** (1983), p. 159
- 8) A. KOHYAMA, N. IGATA, Y. IMAI, H. TERANISHI and T. ISHIKAWA: *Proc. 5th Intl. Conf. on Compos. Mater. ICCM-V, San Diego, CA.* (1985), p. 609 [TMS-AIME]
- 9) 今井義一, 田中義和, 市川 宏, 石川敏功: *鉄と鋼*, **75** (1989), p. 1555
- 10) 今井義一, 田中義和, 市川 宏, 石川敏功: *鉄と鋼*, **76** (1990), p. 72
- 11) A. KOHYAMA, H. TEZUKA and S. SAITO: *J. Nucl. Mater.* **155-157** (1988), p. 334
- 12) G. SIMON and A. R. BUNSELL: *J. Mater. Sci.*, **19** (1984), p. 3649
- 13) A. KOHYAMA: *Proc. Intl. Symp. Basic Tech. for Future Industries* (1988), p. 66
- 14) S. YAJIMA, K. OKAMURA, T. MATSUZAWA, Y. HASEGAWA and T. SHISHIDO: *Nature*, **279** (1979), p. 706
- 15) T. ISHIKAWA and T. NAGAOKI: *Recent Carbon Technology Including Carbon and SiC Fibers* (1983), p. 348 [JEC Press Inc.]
- 16) 石川敏功, 佐々木英規: *炭化ケイ素材料* (岡村清人監修) (1985), p. 125 [CMC]
- 17) D. BECHET, 塩田一路, 渡辺 治, 小島重信, 城田 透, 田頭 扶: *日本複合材料学会誌*, **14** (1988), p. 188
- 18) J. C. VIALA, F. BOSSELET, P. FORTIER and J. BOUJX: *ICCM-VI & ECCM-II. Proc., UK* (1987), p. 2146