

© 1989 ISIJ

//////////

論文

//////////

連続溶融金属浸透法による PCS 系 SiC 繊維/Al 系プリフォームワイヤの製造

今井義一*・田中義和*²・市川 宏*³・石川敏功*⁴

Development of advanced SiC/Al Composite Materials : Manufacturing of Preform Wires by Liquid Metal Infiltration

Yoshikazu IMAI, Yoshikazu TANAKA, Hiroshi ICHIKAWA and Toshikatsu ISHIKAWA

Synopsis :

The continuous SiC fiber produced from polycarbosilane, an organosilicone compound, possesses outstanding characteristics and is expected to be an excellent reinforcement for MMC. This study concerned the research and development of the manufacturing process of "preform wires" which are composites with an aluminum matrix and are also semi-finished materials used for the fabrication of SiC/Al.

SiC/Al (A1050) preform wires were produced continuously by the liquid metal infiltration method. The process basically consisted of desizing, dipping for spreading and infiltrating, passing through a nozzle hole and taking up for winding. Each processing condition was tested and improved on.

As an improved condition, after SiC fiber yarn was heated at 1373K for desizing, it was dipped into a molten aluminum bath at 953K for infiltration and then passed through a ceramic nozzle hole (diameter 0.25 mm). As the results, preform wire with a tensile strength of 1560 MPa at fiber volume fraction 0.53 was obtained. This strength was about 95 % of rule of mixture, and it is considered that the fiber strength was highly utilized. Consequently, we consider that preform wires may become promising materials for the fabrication of MMC.

Key words : silicon carbide fiber ; SiC/Al ; preform wire ; composite material ; fiber reinforced metal ; liquid metal infiltration ; fiber volume fraction ; tensile strength of composite.

1. 緒 言

有機けい素重合体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繊維¹⁾²⁾ (NICALON[®], 以下 PCS 系 SiC 繊維と表記する。また図や表の中では SiC_{PCS} として示した。) は、比強度、比剛性が高く、高温安定性に優れ³⁾、また金属との適合性も比較的良い⁴⁾ ことから金属を強化するための強化繊維として期待されている。

ところで、FRM 製造の主要な要素技術は複合化と賦形化であり、この両者を同時に満足させ得る成形方法はごく一部の限られた方法とならざるを得ず、また成形品の形状・寸法も制約されることになる。そこで複合化と賦形化を分けて考え、既に複合された中間素材 (プリフォーム) が実現すれば、後加工として賦形化だけすればよく、その結果適用できる成形方法の選択や成形品の

形状・寸法の自由度は一段と大きくなる。それゆえ、既に複合化されたワイヤ状のプリフォームが志向されるようになった⁵⁾。

プリフォームワイヤの製造法としては、液相の状態では複合化すれば連続的に長いワイヤ状のプリフォームワイヤが得られる⁶⁾。しかしながら、PCS 系 SiC 繊維のプリフォームワイヤの製造方法に関する報告はない。

そこで、本研究では、PCS 系 SiC 繊維とアルミニウム (Al) をマトリックス金属とするプリフォームワイヤの製造方法を検討することにした。繊維表面の前処理は行わず、連続的なプロセスの溶融金属浸透法とした。

2. プリフォームワイヤの製造工程

本研究で採用したプリフォームワイヤの製造プロセスは、Fig. 1 にそのフローチャートを示す。

① SiC 繊維

平成元年 4 月日本金属学会横浜大会にて発表 平成元年 2 月 16 日受付 (Received Feb. 16, 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)

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

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

*⁴ 日本カーボン(株) 工博 (Nippon Carbon Co., Ltd.)

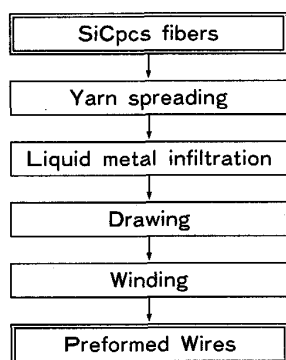


Fig. 1. Schematic diagram of fabrication process for SiC_{PCS}/Al preform wires.

原料繊維として試作に用いた PCS 系 SiC 繊維は、通常 500 m 長さで紙管に巻かれたヤーン状のものである。紙管をクリールスタンドに装着し、連続的に引き出して工程に導入する。

②サイジング剤除去

本研究で用いた繊維には繊維の保護や取扱い性のために、熱分解タイプのアクリル系サイジング剤（集束剤）が付着している。複合化時には開繊している必要があるため、まずこのサイジング剤を熱分解により取り除くために、ヤーン状の繊維を高温雰囲気中を連続的に通過させる。

③溶湯浸透

繊維を Al 溶湯中に連続的に浸漬し通過させながら、液相のマトリックス金属を十分に開繊した繊維間に浸透させ複合化を行う。

④引上げ

繊維を単に引き上げただけでは、溶湯の付着量、言い換えれば繊維体積率が変動するので、小孔を通すことによって余剰の溶湯を絞り出す。

⑤凝固および巻取り

円形断面を保持しながらマトリックスの Al を凝固させ、回転ドラム上に連続的に巻き取って、プリフォームワイヤとなす。

以上が製造過程の概要である。

製造過程の問題点は、

- (1) 繊維前処理過程でのサイジング剤の除去
- (2) 複合化過程での繊維劣化と浸透性
- (3) 引上げ・凝固過程での整形および Vf の安定と増加である。その内容は、

(1) サイジング剤除去

熱分解のための加熱条件が不足すると、サイジング剤は取り切れずに残存し、開繊性が不十分となり、マトリックスの浸透を妨げて未含浸部を生じるなどの悪影響を与

える。逆に加熱条件が過度になると繊維は表面酸化などの熱的变化を起こし、繊維強度を低下させる³⁾恐れがある。

(2) 溶湯浸透

複合化時には繊維とマトリックス金属が高温下で接触しあうので、界面での反応を起こしかねない。この界面反応による繊維劣化などの悪影響が問題となる。

良好な複合化状態のプリフォームワイヤを作製するためには、複合化時の溶湯温度などの熱的条件の適否が重要となる。

(3) 引上げ・凝固

余剰の溶湯の絞りすなわち繊維体積率 Vf と、ワイヤとしては長尺にわたって、断面形状が安定的に円形であることが必要である。さらに、ワイヤの強度向上には高 Vf が有効と考えられるが、このためには溶湯の絞りを強くするなどが必要となり、新たに繊維の摩擦損傷などが問題となる。

本論文では、これらの項目について、最終的に得られるプリフォームワイヤの強度との関連性で特に詳しく検討を行うことにした。

3. 実験方法

3.1 繊維の開繊

プリフォームワイヤをつくる強化繊維素材として本研究で用いた PCS 系 SiC 繊維⁷⁾は、平均繊維直径が 12 μm または 14 μm で、250 本または 500 本の単繊維を集束した細径・多繊維タイプのヤーンである⁸⁾。繊維の代表的特性を Table 1 に示す。

加熱炉でサイジング剤を熱分解によって除去する条件を適正化するために、高温管状炉中を通糸し、その温度を 873~1473 K の範囲で変化させたサイジング剤除去テストを実施した。用いた炉芯管は 60 mmφ×2000 mm で、炉芯管の両端は開放したままの空気雰囲気である。処理時間は 20 s、すなわち繊維の走行速度を 0.1 m/s

Table 1. Typical properties of continuous silicon carbide fiber.

Property	Value	
	Grade	
	600D	1800D
Filament diameter	12 μm	14 μm
Filament/Yarn	250	500
Tex	70g/km	210g/km
Cross section	Round	
Density	2.55×10 ³ kg/m ³	
Tensile strength	2.5~3.0 GPa	
Tensile modulus	180~200 GPa	
Maximum useable temperature	1500 K	
Coefficient of thermal expansion	3.1×10 ⁻⁶ /K	

とした。なお、ワイヤ含浸条件の変化による影響を除くために、あらかじめ上述のような繊維の前処理を行ったのち、マトリックスとして純 Al (A 1050) の溶湯を用い一定の条件でプリフォームワイヤの試作を行った。除去の効果を見るために繊維表面の SEM 観察を行い、また繊維 (単繊維) およびワイヤの引張強度を測定した。

測定条件は、他の実験も共通するが、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て室温で測定した。試料長さは 150 mm, ゲージ長さは 60 mm として, クロスヘッド速度は 1.67×10^{-4} m/s とした。したがって歪み速度は 2.78×10^{-6} /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型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 とし, クロスヘッド速度は 3.3×10^{-5} m/s とした。したがって歪み速度は 8.25×10^{-7} /s である。

プリフォームワイヤの繊維の抽出は 5 NHCl に約 5 Ks 浸漬後, 十分洗浄して行った。

3.2 溶融金属の浸透

サイジング剤除去後の繊維を溶湯に浸漬して複合化する工程では, 繊維の反応劣化に与える Al 溶湯の温度を 1073 K からその融点直上 (953 K) までの間で変化させた。なお, 繊維と液相マトリックスとの接触時間は, 複合化開始時点とマトリックスの凝固時点とが正確に把握できないために明確でないので, 通糸速度を 0.1 m/s 一定として行った。得られたワイヤの引張強度を測定して, 繊維のもつ特性が最大に発揮される条件を検討した。また, プリフォームワイヤの強度と Vf との相関を調べ, 強度向上のために繊維間に接触が生じない範囲で Vf の増加を図った。

3.3 引上げ

(1) 黒鉛ノズルによる断面制御実験

繊維の引上げの際に, 溶湯表面に張っている酸化被膜の付着や含浸された溶湯 Al の余剰な付着を防いだり, ワイヤ断面の円形化のためにノズル孔を通して引き上げる方法を採用し, ノズル孔径を細化していき, その効用を確認した。ノズル材質としては, Al 溶湯に濡れにくく, 熱衝撃にも強く, かつ孔あけ加工のしやすい黒鉛材を用いた。

(2) セラミックノズルによる Vf の安定化実験

また, ワイヤの長さ方向における繊維体積率 Vf の安定化のために, すなわちノズル孔径が摩擦により拡大しないようにノズル材質を検討した。ノズル材質としてはより硬質な半黒鉛化炭素やアルミナなどのセラミック材を検討した。

(3) 引張り強さの Vf 依存性試験

次に, Vf の増加による引張強度の向上を図り, ノズルの孔径をさらに細化したり, ノズル孔との摩擦による繊維損傷の低減を図って繊維性状の改良検討を行い, ワイヤの引張強度に対する Vf の依存性とワイヤの強度向上を調べた。繊維性状を規格化するために下記のような方法で繊維の捲縮度を測定評価することにより, 捲縮度の小さいすなわち真直性の高い繊維を用いて, 引張強度の向上のためにプリフォームワイヤの高 Vf 化を図った。捲縮度の測定方法は, サイジング剤を除去しヤーンをテンシロン型引張試験機を用いて引張荷重 20 g と 200 g の時の伸びを測定し, この伸びの差を試料長 1 m 当たり換算して捲縮度とした。その結果, これまで用いていた繊維 (平均繊維直径 14 μ m, 500 フィラメント/ヤーン, 1800 デニール, 以後 1800D と表記する [1 Denier = 1 g/9000 m]) は捲縮度 0.8 前後であり, 一方改良された真直性の高い繊維 (平均繊維直径 12 μ m, 250 フィラメント/ヤーン, 600 デニール, 以後 600D と表記する) は捲縮度は約 0.7 であった。

4. 実験結果および考察

4.1 サイジング剤の除去

サイジング剤を熱分解除去したのちにプリフォームワイヤを試作した。Fig. 2 には, 各処理温度でサイジング剤を除去した繊維 (単繊維) の平均引張強度およびそれを用いて作製したプリフォームワイヤの平均引張強度を示す。Fig. 2 にみられるように, 1373 K の処理が最も高いワイヤ強度を示した。Photo. 1 には熱処理した繊維の, また Photo. 2 にはその繊維を用いて作製したプリフォームワイヤから抽出した繊維の表面 SEM 写真を示す。Photo. 1 から, 処理温度 1273 K 以上では複合化前と同様な繊維表面が得られており, サイジング剤

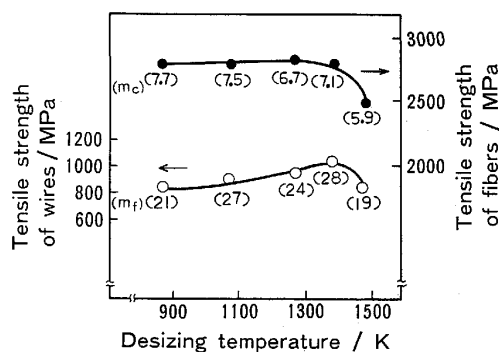
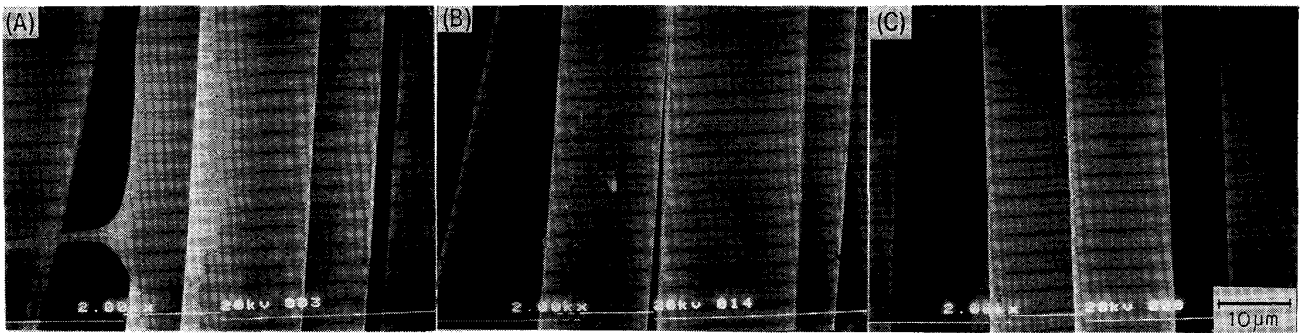
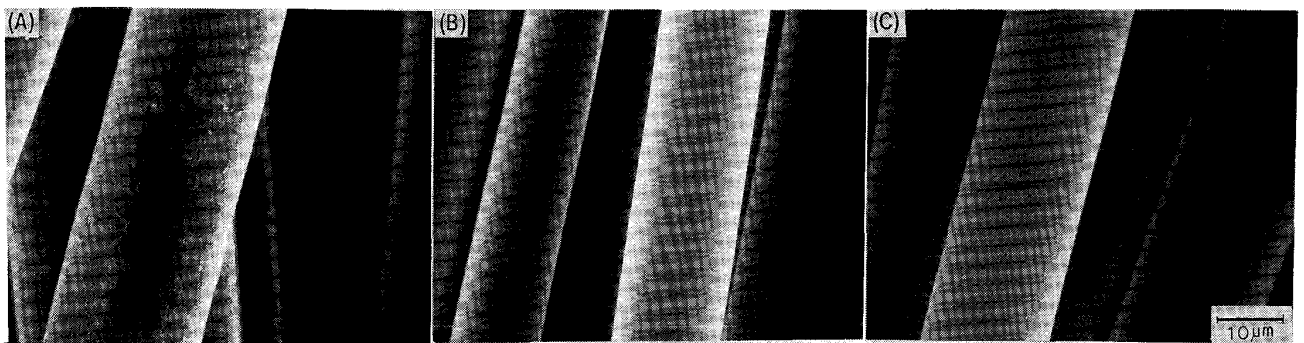


Fig. 2. Effects of desizing temperature on the tensile strength of preform wire, and extracted SiC_{PCS} fiber. The obtained weibull module for the preform wire (m_e) and fiber (m_f) are shown.



(A) Non-treated (B) 873 K (C) 1273 K

Photo. 1. Change of surface appearance of the SiC_PCS fibers with desizing temperatures.

(A) Non-treated (B) 873 K (C) 1273 K

Photo. 2. Effect of desizing temperature on the surface appearance of extracted fibers from preform wire.

が完全に除去されているのがわかる。これに対し、低温側では Photo. 1 および 2 からサイジング剤除去の不十分さとその悪影響が見てとれる。低温側で高特性が出ないのは、Photo. 1 および 2 に見られるように、サイジング剤が完全に取り除かれていないために、繊維の開繊性が阻害され溶湯の含浸性を低下させたり、繊維とマトリックスの密な接触を妨げたりしたためによるものと考えられる。一方、高温側の 1473 K では繊維の表面が酸化され α -クリストバライト (SiO_2) が生成し始め⁹⁾、これにより繊維の引張強度が低下してプリフォームワイヤの引張強度も低下をきたしたものと考えられる。

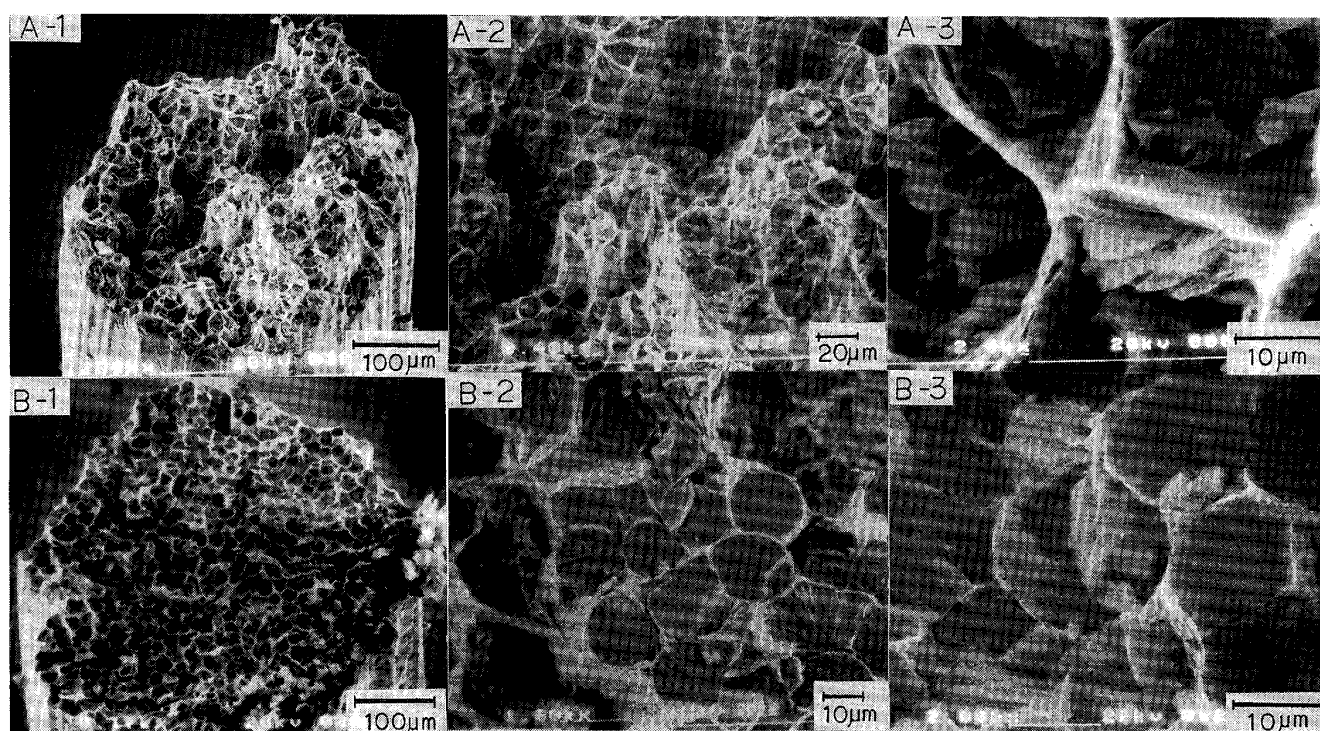
4.2 溶湯温度の影響

次に、サイジング剤を十分に除去した繊維を溶湯に浸漬して複合化を行った。溶湯温度を上げれば、界面反応を促進することになり、繊維の反応劣化を生じてしまい¹⁰⁾¹¹⁾、高強度の複合材料を得ることができない。プリフォームワイヤの引張強度に与える溶湯温度の影響を Fig. 3 に示す。Fig. 3 から、1073 K の高温溶湯では、繊維とマトリックスの反応による繊維劣化のために、プリフォームワイヤの引張強度は大きく低下している。溶湯温度は低温になるほど良く、953 K が好結果であった。

このことは、Photo. 3 のプリフォームワイヤの破断面の観察からも認められる。すなわち低温側の 953 K の破面では Pull-out (引抜け) も見られ、凹凸の激しい破面を示す。これに対し、1073 K のそれは低強度 FRM に見られる平坦な破面を示しており、繊維とマトリックスとの界面反応による接着力の強固さを表している。

このプリフォームワイヤの引張強度の低下の原因を調べるために、このワイヤをさらに高温に長時間曝して界面反応を拡大したのち行った X 線回折では Al_4C_3 が検出されている。そこで、Fig. 3 で示した高温溶湯で複合化して得られたワイヤについて反応生成物の Al_4C_3 の定量分析を行った結果を Fig. 4 に示す。なお、分析方法は試料ワイヤを粉末にし加水分解して CH_4 ガスと成し、これをガスクロマトグラフィ法で定量した。溶湯温度が高温になるほど Al_4C_3 量は増えている。このことから、マトリックスの Al と繊維中の C との界面反応があると、繊維強化が低下し、複合材料であるワイヤの強度も低下するのがわかる。

以上は、界面反応を進行させた場合、すなわち強度劣化を生じた場合であるが、本実験で 953~993 K で製造した健全なプリフォームワイヤにおいては強度に影響を



A : 953 K B : 1073 K

Photo. 3. SEM photographs of the fracture surfaces of the preform wire showing effects of processing temperature.

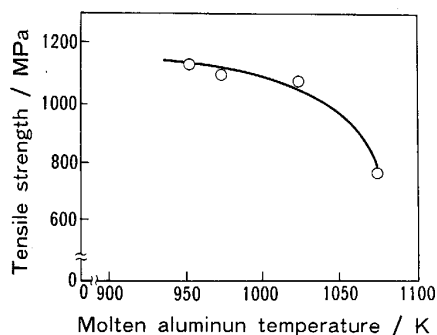


Fig. 3. Effect of molten aluminum temperature on tensile strength of preform wire.

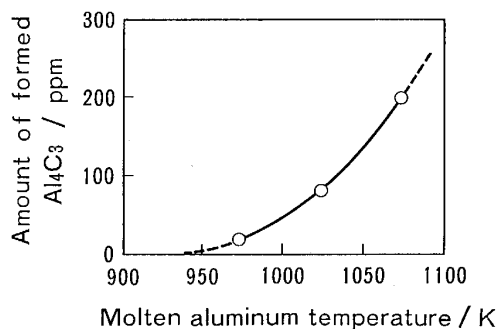


Fig. 4. Relationship between molten aluminum temperature and amount of formed total Al₄C₃.

与えて問題となるような界面生成物は存在しないことを確認している¹²⁾。

4.3 Vfの安定化

整形用のノズルを用いなくて、単に引き上げただけのプリフォームワイヤ材の断面の一例を Photo. 4 に示す。これは得られたワイヤを 1 m 間隔で採取したワイヤの断面である。Photo. 4 からわかるように、いずれも断面形状は円形ではなく著しく不整な異形である。わずか 1 m ほどの間隔でこれほど断面形状が異なっているのは、たとえば後工程の成形に用いる時の繊維配向性や繊維体積率をコントロールするのがむずかしく不都合である。

そこで、断面形状と断面積を規定するために、1.0～0.6 mmφ の範囲で種々孔径を変えた黒鉛製のノズルを用いてプリフォームワイヤを作製した。0.8 mmφ 以上では Vf のばらつきが大きかった。これは、PCS 系 SiC 繊維ヤーンが溶湯 Al を含んでもなおノズル孔の断面積以下になり、ノズル孔径よりも細いワイヤとして引き出されるためである。Photo. 5 に、孔径 0.6 mmφ の場合のワイヤ断面を示したが、断面形状もほぼ円形に近く、ワイヤ状と呼べる形態であった。ノズルを使用することにより断面形状を円形にすることが確認できたので次に、断面積の制御のためにすなわち Vf の安定化と増加の可否の確認のために孔径 0.5 mmφ (設定 Vf0.39)

のノズルを用いて、長尺ワイヤの作製を試みた。その結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 からわかるように、走行長さにつれて Vf の変動がみられる。ノズル孔口の使用前後の写真の一例を Photo. 6 に示すが、明らかに通糸後には孔径が拡大しているのがわかる。これは硬質な PCS 系 SiC 繊維が通過する時に、軟質な黒鉛ノズルの孔壁を擦って損耗させて孔径を拡大したことによるものである。

そこで、黒鉛よりも硬質で耐摩耗性がよい半黒鉛化炭素質の材料から加工したノズルを使用したところで、Fig. 6 および 7 に示すように、Vf および引張強度の低下は凝縮した。したがって、整形絞り用のノズル孔径が、直接的に Vf に影響しているとわかったので、耐摩耗性のよい Al₂O₃ などのセラミックス製ノズルを用いて試作したところ、Vf の変動が少なく、断面がより円形のプリフォームワイヤが作製できた。

4.4 Vf 増加による引張強度の向上 (その1)

Vf の安定化にノズルの有効性を確認したので、さらに Vf の増加による引張強度の向上を図った。単純複合則からもわかるように、強化繊維の強度がマトリックスの強度に比較してはるかに大きい場合、複合材料の強度は強化繊維の強度に大きく依存する。したがって、Vf の増減が、その引張強度の高低に直接的に、かつ効果的

に効いてくる。

Fig. 8 は、プリフォームワイヤの引張強度の Vf の依存性の結果である。なお、ワイヤの Vf は 0.36 から 0.49 の範囲である。Fig. 8 からわかるように、Vf が増加するにつれて、すなわちプリフォームワイヤの直径が減少するにつれて、プリフォームワイヤの引張強度は増加している。たとえば、Vf が 0.36 では引張強度は 1100 MPa だが、Vf 0.44 では 1300 MPa に強度が向上している。しかし、Vf が 0.45 以上になると引張強度は頭打ちの傾向を示し、複合則による強度よりも低下が大きくなる。言い換えれば、繊維強度利用率がしだいに

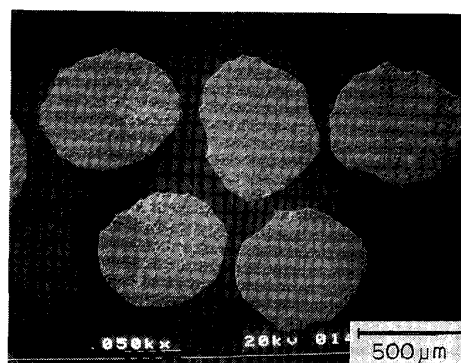


Photo. 5. Polished sections of preform wires fabricated with nozzle.

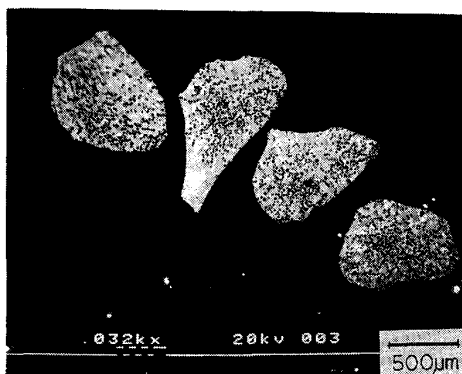


Photo. 4. Polished sections of preform wires fabricated without nozzle.

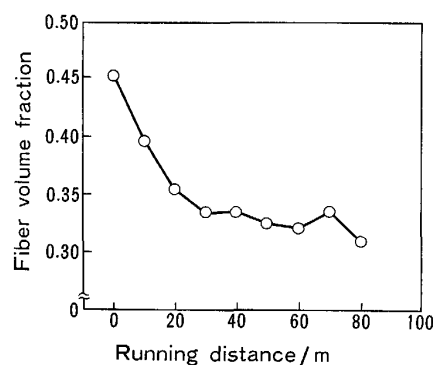
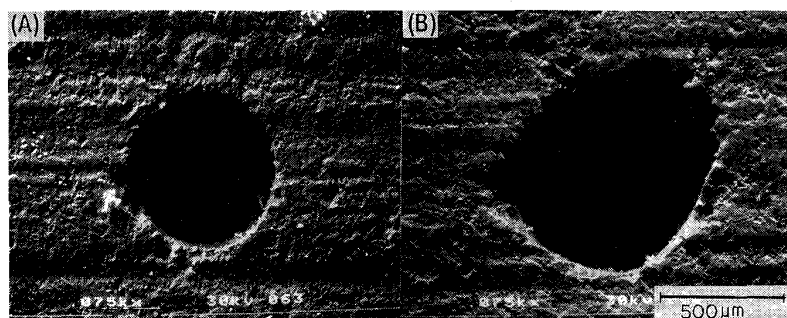


Fig. 5. Change of fiber volume fraction of preform wire with running distance.



(A) Before use (B) After use
Photo. 6. Change of shape in graphite nozzle before and after wire drawing.

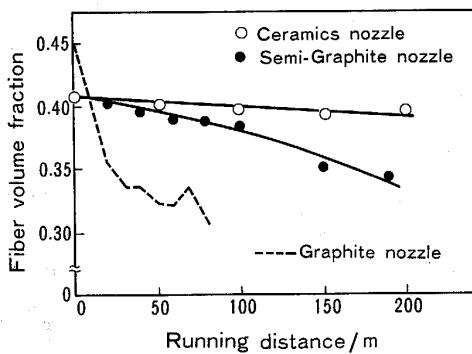


Fig. 6. Change of fiber volume fraction of preform wire with running distance for ceramics nozzle and semi-graphite nozzle. Broken line denotes the relation for graphite nozzle.

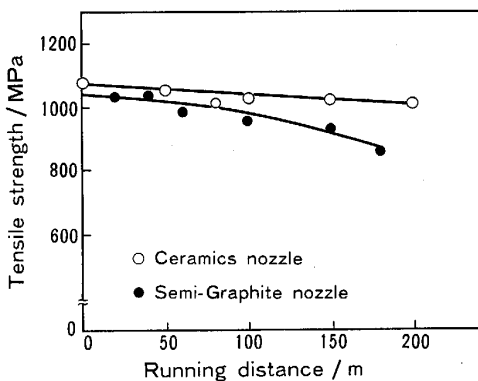


Fig. 7. Change of tensile strength of preform wire with running distance for ceramics nozzle and semi-graphite nozzle.

低下する傾向を示した。なお、プリフォームワイヤの Vf を高くするに伴いノズル孔でワイヤが切れる頻度が高くなり、長尺のワイヤが得られにくくなる傾向が見受けられた。また、Vf0.49 以上の高 Vf 化を図りノズル孔径をさらに細化して試作してみたが、いずれも短時間で繊維が切れてしまい、長尺のワイヤが得られなかった。このことから、ノズルの孔口および孔内におけるノズル材と繊維の擦れによる繊維の損傷・切断が高 Vf 化を妨げる原因と考えられた。また、高 Vf 化によって繊維は密集化し、ワイヤ内部での繊維同志の擦れによる繊維損傷も同様に考えられる。セラミックス繊維は一般に、伸びが極めて小さく、また繊維軸方向には高強度だが繊維軸と直角方向のせん断とか摩擦には極端に弱いので、ノズルとの摩擦損傷は十分考えられる。

4.5 Vf 増加による引張強度の向上 (その 2)

単純複合則にしたがい、Vf の増加につれてプリフォームワイヤの引張強度は増大したが、高 Vf 域になると繊維強度の利用率が低下する傾向が認められた。ノズルとの摩擦による繊維損傷がその原因と考え、この摩擦を小

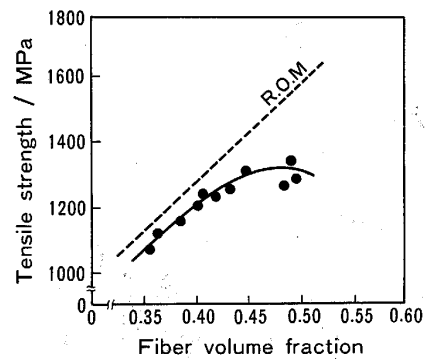


Fig. 8. Relationship between tensile strength and fiber volume fraction for 1800D SiC_{PCS} fiber reinforced wire. Dotted line shows the tensile strength of the preform wire obtained from rule of mixtures.

さくして繊維損傷を防ぐことを検討した。

ノズル孔との摩擦に係わる繊維性状要素としては、繊維の縮れ (Kinkiness) などの形態的性状に着目して検討した。これらは、細径・多繊維の繊維特有のもので、繊維製法上避けられない点もある。しかし、その程度を小さくすることによって、上記の摩擦による繊維損傷を軽減できると考えた。また、この繊維の真直性の向上は繊維損傷の防止に役立つだけでなく、ミクロ的にみた繊維配向性の向上や高 Vf 化の点からも良いと考えられる。

前項の 3.3 (3) で記述したように、規格化した捲縮度を用いて測定した結果、これまで使用していた原料繊維 (1800D) の捲縮度は 0.8 前後であり、改良された繊維 (600D) の捲縮度は約 0.7 であった。捲縮度の小さい、すなわち真直性の向上した繊維 (600D) を用いて作製したプリフォームワイヤの引張強度の Vf 依存性を Fig. 9 に示した。なお、600D は繊維束のフィラメント数が少なく細いので、使用したノズル孔径もそれに応じて孔径を小さくし、最小孔径が 0.25 mmφ までのノズルを使用して作製した。

Fig. 9 からわかるように、600D の PCS 系 SiC 繊維においては Vf の最大値が 0.55 になり、これまで 1800D でのそれが 0.50 であったことと比較すると一段の高 Vf 化を実現することができた。また、プリフォームワイヤの引張強度も、これまでは最高 1320 MPa (Vf 0.49) であったが、1560 MPa (Vf 0.53, ノズル孔径 0.25 mmφ) にまで強度の向上がみられた。すなわち繊維の真直性の向上は、プリフォームワイヤにおける引張強度の向上に有効であった。

高特性のプリフォームワイヤの複合化状態については、引張試験後の破面および断面の SEM 写真を

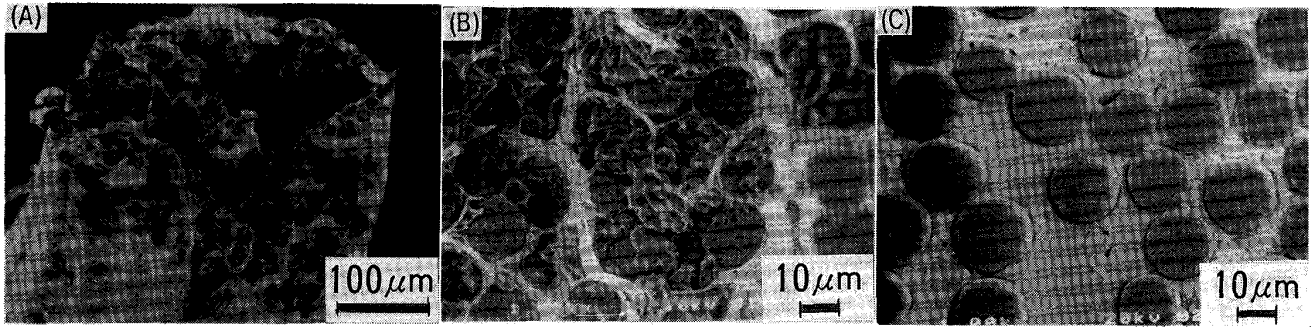


Photo. 7. Tensile fracture surfaces (A), (B) and typical polished section of preform wire.

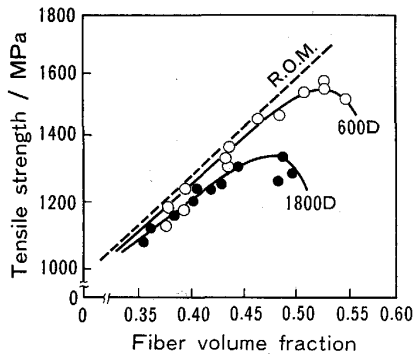


Fig. 9. Relationship between tensile strength and fiber volume fraction for preform wires for 600D and 1800D SiC_{PCS} fiber reinforced preform wire. Dotted line shows the tensile strength of the preform wire obtained from rule of mixtures.

Photo. 7 に示す。繊維間隙へのマトリックスの浸透は良好であり、繊維密集部にも未含浸部分はみられない。また凝固収縮によるポイドも観察されず良好な複合化が達成されているものと考えられる。なお、Fig. 9 にみられるように、600D の場合においても、Vf 0.45 前後から複合則からの逸脱が始まり、Vf の増大につれてその隔たりが拡大していく傾向が認められる。

5. 結 論

(1) 本研究では、PCS 系 SiC 繊維でマトリックスの Al を強化したプリフォームワイヤ (中間素材) の材料開発を行い、その製造を可能ならしめ、最適条件下では Vf 0.53 のとき室温引張強度 1560 MPa を得た。また、この強度は単純複合則の約 95% であり、繊維強度を高度に利用し得たものである。

(2) PCS 系 SiC 繊維は、濡れ性付与や界面反応抑制のために CVD コーティングなどの複雑で特殊な繊維前

処理を施さなくても、適切な製造条件で行えば優れた複合化状態を形成し得る適合性をもつことが確認された。

(3) 細径・多繊維の長繊維タイプの複合化法としては液相金属をマトリックスとすることが適し、また本研究で採用した熔融金属含浸法は連続プロセスが可能であることを確認した。

本研究は、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) T. ISHIKAWA and T. NAGAOKI: Recent Carbon Technology including Carbon and SiC Fibers (1983), p. 348 [JEC Press Inc.]
- 3) T. MATH, N. L. HECHT, D. E. MCCULLUM, J. R. HOENIGMAN, H. M. KIM, A. P. KATZ and H. A. LIPSITT: J. Mater. Sci., **19** (1984), p. 1191
- 4) 葛西靖正, 斎藤 誠, 浅田千秋: 日本複合材料学会誌, **5** (1979), p. 56
- 5) Y. MINODA: Proc. Japan-U. S. CCM-III, Tokyo (1986), p. 475
- 6) M. F. AMATEAU: J. Compos. Mater., **10** (1976), p. 279
- 7) G. SIMON and A. R. BUNSELL: J. Mater. Sci., **19** (1984), p. 3649
- 8) 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]
- 9) 市川 宏, 早瀬登久治, 永田陽一, 寺西春夫, 石川敏功: 材料, **36** (1987), p. 840
- 10) 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
- 11) 小原嗣朗, 武藤範雄: 日本金属学会誌, **45** (1981), p. 411
- 12) A. KOHYAMA, N. IGATA, Y. IMAI, H. TERANISHI and T. ISHIKAWA: Proc. ICCM-V, 5th Intl. Conf. on Compos. Mater., (1985), p. 609