

304 長繊維SiC強化SiC複合材料の曲げ強度特性

金属材料技術研究所

正 ○早川正夫

正 金澤健二

1. 緒言

エネルギー効率向上を目指す1500℃クラスの高温ガスタービンにおける動・静翼や燃焼器ライナーなどの高温部品には、冷却が必要な耐熱超合金に替えて、セラミックスの適用が期待されている。セラミックスとしては、機器の高信頼性確保のために損傷許容設計の可能性を有するセラミックス基複合材料が有望視されている。そのため、セラミックス基複合材料の強度特性の基礎として、破壊現象を解析・理解し、強度特性の発現モデルを構築することが重要となる。

そこで本研究では、セラミックス基複合材料(SiC/SiCコンポジット)に対して、常温で曲げ試験を行い、破壊機構との関連で曲げ強度特性を支配する因子を調べた。これまで、SiC/SiCコンポジットの曲げ強度特性に関しては、P.LAMICQ¹⁾により曲げ強度の温度依存性について報告されているが、破壊機構との関連では十分に議論されていない。

2. 供試材および実験方法

供試材として、長繊維SiCで強化したSiC複合材料を用いた。供試材の仕様を表1に示す。素材板表面及び素材板断面の写真を図1に示す。素材板断面には微小なボイドが観察された。

試験には電気油圧式サーボ試験機(容量50kN)を用いた。曲げ試験としては、三点曲げ及び四点曲げ試験を行った。曲げ試験の条件を表2に示す。外スパンの支点には共通して板バネを用い、内スパンの支点には、64mmでは板バネ、28mm及び三点曲げでは直径5mmのSK鋼みがき丸棒を用いた。また、せん断試験を行い、曲げ強度との関連を調べた。

試験は、曲げ、せん断共に変位制御で行い、荷重点変位速度は 2.5×10^{-3} mm/secである。

曲げ試験片の形状としては $10 \times 10 \times 100$ mmの直方体を用いた。また、せん断試験片の形状としては $5 \times 10 \times 10$ mmの直方体を用い、 5×10 mmの面をせん断面とした。

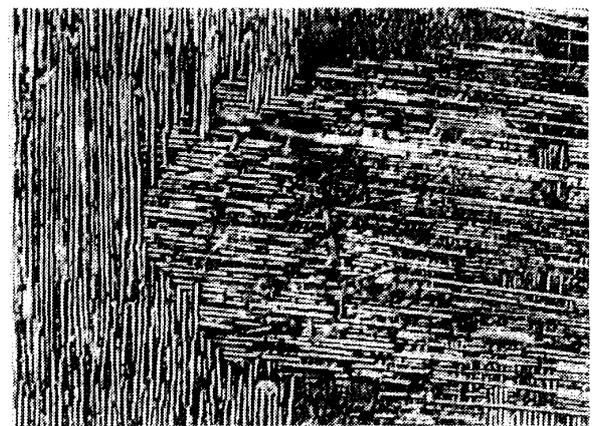
曲げ強度特性の異方性を調べるために、曲げ荷重の作用面が素材板表面となる場合(Aタイプ)と、曲げ荷重の作用面が素材板断面となる場合(Bタイプ)について試験した。曲げ試験の支点と試験片素材板方向

の関係を図2に示す。また、せん断試験においては、織物の層間面にせん断応力を作用させる試験と織物の層間に垂直な面にせん断応力を作用させる試験を行い、異方性を調べた。

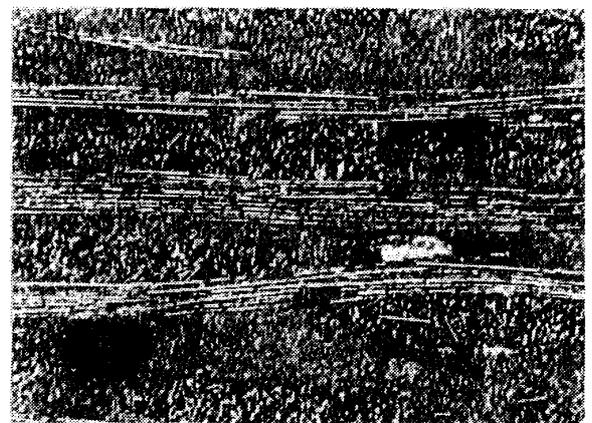
試験片の観察はCCDカメラによる顕微鏡を用いて行った。

表1 供試材

強化繊維	連続SiC繊維=カヨNL-607
マトリックス	SiC
繊維体積含有率	約35%
織物	
繊維	5007イラメット/ヤーン (モ/フィラメント=φ15μm)
クロス積層枚数	26枚/10mm厚
クロス製織法	8枚朱子織(0.35mm厚、380g/m ²)



素材板表面



素材板断面

図1 素材の顕微鏡写真

表2 曲げ条件 (mm)

曲げ様式	三点曲げ		四点曲げ	
外スパン	84			
内スパン	0	28	64	

- ・ 温度：室温 (19 ~ 25 °C)
- ・ 湿度：34 ~ 66 %

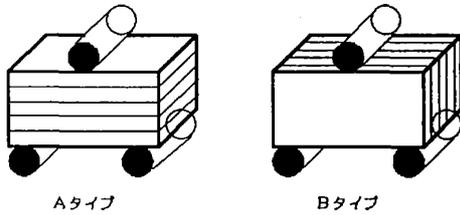


図2 曲げ試験の異方性

3. 実験結果および考察

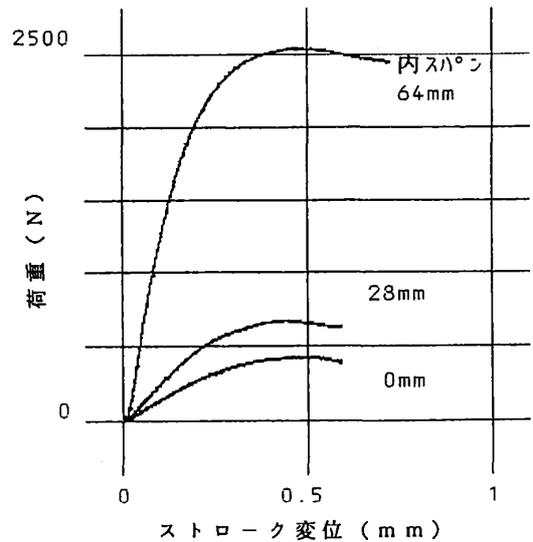
曲げ試験の荷重とストローク変位の関係を図3に示す。AタイプとBタイプとでは傾向が異なり、最大荷重に到達した後、Aタイプではなだらかに荷重が減少するのに対し、Bタイプでは急激に荷重が減少している。

図4は、曲げ強度を内スパン/外スパン比に対してプロットしたものである。図には測定した三点の平均値を示した。なお、曲げ強度としては、最大荷重に対する曲げモーメントから計算された見かけの値を用いている。

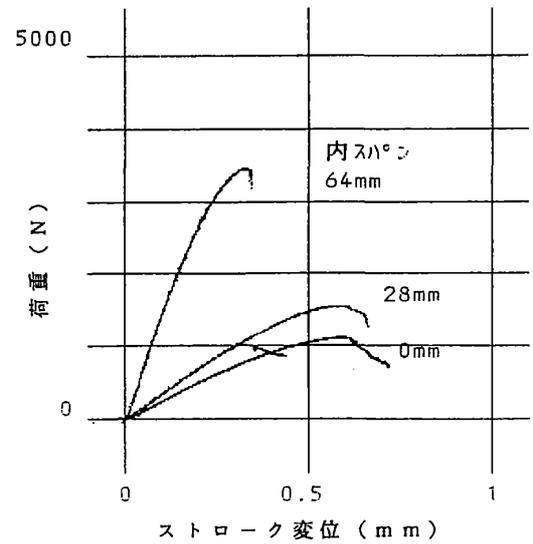
曲げ強度にはAタイプとBタイプの試験で顕著な相違が認められ、全体にBタイプの試験で曲げ強度は大きくなっている。また、曲げ強度は曲げ様式に依存して変化している。すなわち曲げ強度は、内スパン/外スパン比が大きくなるに従って、Aタイプでは増加し、Bタイプでは逆に減少している。

せん断試験による最大せん断応力は織物の層間面にせん断応力を作用させた場合が2.6 MPa、織物の層間に垂直な面にせん断応力を作用させた場合が2.4 MPaとなり、前者が後者に比べて約1/9程度と小さかった。織物の層間のせん断強度は織物自身のせん断強度に比べて非常に小さいことが分かる。

Aタイプ及びBタイプの曲げ試験による破壊の様相の代表例として、それぞれ四点曲げ(内スパン28mm)の結果を図5、図6に示す。Aタイプでは、最大引張面及び最大圧縮面の様相には処女材との顕著な相違は認められなかった。引張側側面においては、マトリックスの部分で織物の層間に平行な割れや垂直な割れが観察された。しかし、繊維の破断や引き抜きなどは観察されなかった。一方、Bタイプでは、マトリックスの割れを伴って繊維の破断や引き抜きが観察された。



Aタイプ



Bタイプ

図3 荷重-ストローク変位の関係

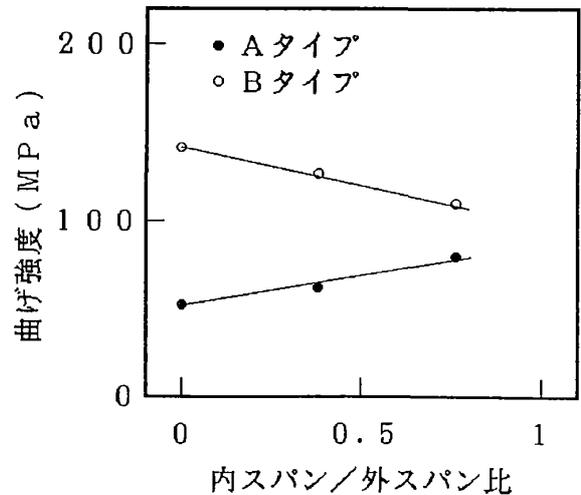
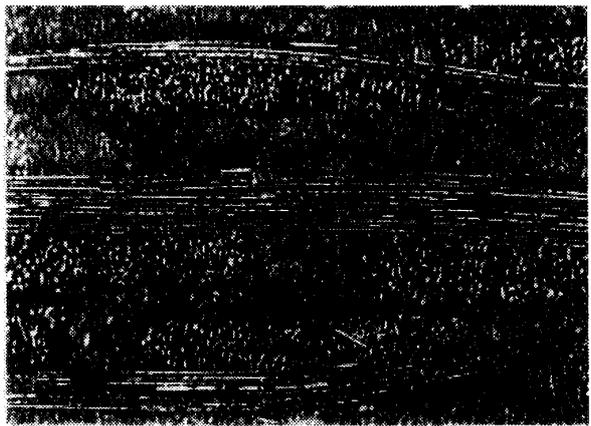
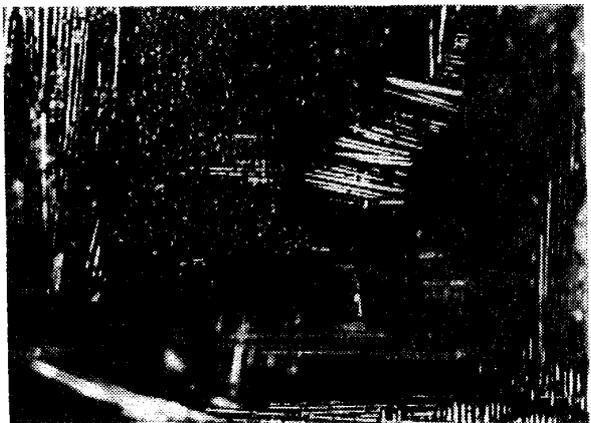


図4 曲げ強度の内スパン/外スパン比依存性



引張側側面

図5 Aタイプ顕微鏡写真



引張側側面

図6 Bタイプ顕微鏡写真

AタイプとBタイプとで曲げ強度に顕著な差が生じ、後者が前者より大きくなる原因として、破壊様式の相違が考えられる。Aタイプでは織物の層間に沿った割れが主要な破壊様式であり、曲げ強度にはせん断応力による織物間の層間剝離が関与しているものと考えられる。一方、Bタイプでは繊維の破断や引き抜きが主要な破壊様式であり、曲げ強度には引張応力による繊維破断や引き抜きが関与しているものと考えられる。

織物の層間のせん断強度が織物自身のせん断強度に比較して非常に小さいことが確認されており、層間剝離が支配的なAタイプの最大荷重が繊維破断や引き抜きが支配的なBタイプの最大荷重より小さく、見かけの曲げ強度に顕著な差が生じたものと考えられる。

次に、曲げ強度の内スパン／外スパン比依存性について考察する。曲げ強度は、内スパン／外スパン比が大きくなるに従って、Aタイプでは増加し、Bタイプでは逆に減少している。Aタイプにおいては、せん断

応力による層間剝離が曲げ強度に関与している。層間剝離がせん断応力の作用する部分で生じ易いと考えられるならば、内スパン／外スパン比が大きくなるに従い、せん断応力の作用する体積が小さくなり、層間剝離を起こす領域が少なくなり、見かけの曲げ強度は大きくなるものと考えられる。一方、Bタイプにおいては、引張応力による繊維破断や引き抜きが曲げ強度に関与している。繊維破断や引き抜きが最大曲げモーメントの作用する部分で生じ易いと考えられるので、内スパン／外スパン比が大きくなると、最大曲げモーメントの作用する体積が大きくなり、繊維の破断や引き抜きが生じる領域が増え、見かけの曲げ強度は小さくなるものと考えられる。

4. 結論

長繊維SiC強化SiC複合材料の曲げ強度特性を常温で調べた。得られた結果を以下にまとめる。

(1) 曲げ荷重の作用面が素材板表面となる場合(Aタイプ)と素材板断面となる場合(Bタイプ)とでは、見かけの曲げ強度は大きく異なり、後者は前者よりも大きくなる。前者の曲げ強度にはせん断応力による織物間の層間剝離が関与しており、後者の曲げ強度には引張応力による繊維破断が関与している。

(2) 曲げ強度は、内スパン／外スパン比が大きくなると、Aタイプでは大きくなり、Bタイプでは小さくなる。

(3) Aタイプでは層間剝離を生じ易くさせるせん断応力の作用する部分、Bタイプでは繊維破断や引き抜きを生じ易くさせる最大曲げモーメントの作用する部分が増えるに従い曲げ強度が低下すると考えるならば、曲げ強度の内スパン／外スパン比依存性を説明することができる。

本研究は科学技術振興調整費研究「特性発現モデルに基づく先端材料の特性解析技術開発に関する国際共同研究」の一環として行われたものである。

参考文献

- 1) P. J. LAMICQ et. al., Am. Ceram. Soc. Bull., 65, 336 (1986)