

# 3次元 C/SiC ブリスク・ロータ模型の回転強度試験

橋本良作、小河昭紀、祖父江靖、北條正弘 (宇宙航空研究開発機構)

## Spin Test of 3D C/SiC Composite Blisk Rotor Model

Ryosaku HASHIMOTO, Akinori OGAWA, Yasushi SOFUE, Masahiro HOJO  
(Institute of Space Technology and Aeronautics, Japan Aerospace Exploration Agency)

7-44-1 Jindaiji-Higashi-Machi Chofu, Tokyo 182-8522 Japan  
hasimoto@chofu.jaxa.jp

Keywords: C/SiC Composites, Spin Test, Blisk Rotor

### Abstract

The three-dimensional woven fabric C/SiC composites blisk turbine rotor model was evaluated. The spin tests of the blisk model were performed to measure strain distributions at the room temperature. The rotational strength of the blisk model could be improved by the fiber addition. But, there are still more researches to be done.

### 1. はじめに

C/C 材(炭素繊維強化炭素複合材料)<sup>1)</sup>や SiC/SiC 材(炭化珪素繊維強化炭化珪素複合材料)<sup>2)</sup>等の先進材料は軽量で耐熱強度に優れていることから筆者らもガスタービン部材の回転部品に適した材料として、基礎的な研究を行っている。回転部品に円筒 3 軸織りの複合材を用いると、半径方向の繊維は外周に向けて繊維密度が低下し、外周部で十分な強度確保が出来ない場合がある。

本報告では、改善策として半径方向の繊維を途中から追加し補強した場合の影響について検討する。試験片として半径方向の繊維を途中から追加した実機翼に近いブリスク・ロータ模型を試作し、ディスクの繊維配分の影響を検討するため繊維配分の変化する前後にひずみゲージを貼り室温状態で回転試験を行い回転中のひずみ計測した結果及び、有限要素解析についても報告する。

### 2. 試験模型

C/SiC 複合材のブリスクタービン・ロータの適用性評価のため製作した、試験片の織り方は半径方向 ( $r$ )、円周方向 ( $\theta$ )、厚さ方向 ( $z$ ) の円筒 3 軸織りである。各方向の製織に用いた繊維は炭素繊維で HTA(東邦テナックス製: 高弾性繊維)である。 $r$  方向繊維は外周に向けて繊維密度が低下し、外周部で十分な強度確保が出来ないので、ディスクの中程及びブレード付け根近くの部分より  $r$  方向の繊維を増して、外径

219mm、内径 67mm、厚さ 31mm の円板形状に製織した。円板製織後のディスクの繊維体積含有率 ( $V_f$ ) は  $r$  方向: 13~22%、 $\theta$  方向: 22~32%、 $z$  方向: 6~10%、合計: 49~54%である。この円板をフェノール溶液含浸を行い 150°C で硬化させ、外径 213mm、内径 73mm、厚さ 15mm に加工し、2,400°C で焼成後、SiC の CVI (Chemical Vapor Infiltration) 処理を 4 回行う。その後、ケイ素ポリマー含浸と 1,200°C での焼成を 4 回繰り返し C/SiC 複合材を製作した。ブレード部は機械加工により行い、仕上げにケイ素ポリマー含浸と焼成をしてブリスク・ロータ模型を製作した。形状は図 1 に示すように高さ 15mm のブレードを 30 枚配置した。ディスク内径 80mm、外径 170mm、ロータ外径 200mm、厚さ 8mm に成形した物である。

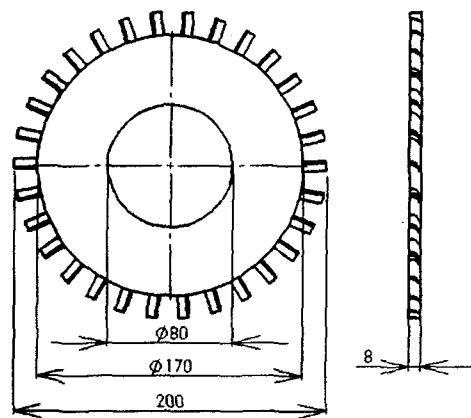


Fig. 1 3D-C/SiC blisk rotor model

### 3. 試験装置及び試験法

回転試験は空気タービン駆動の回転強度試験装置 (最高回転数 100,000rpm) を用いて室温状態でひずみ計測試験を実施した。回転ひずみ計測システムの構成図を図 2 に示す。空気抵抗による浮力や加熱の影響を除くため、試験槽の内部を排気減圧 (150Pa 程度) した後、圧縮空気によりタービンを駆動し一定割合で回転数を上げ試

験を実施した。ひずみは試験片に貼ったゲージからの信号をスリップリングを用いて計測した。スリップリングは28接点を持つブラシ式で、ブラシの接触部は約6℃の冷媒を循環して冷却した。スリップリングの接点は28点であるが、ゲージからのリード線をスピンドルシャフトの内部に通せる最大数が12本なので数回に分けて試験を実施した。

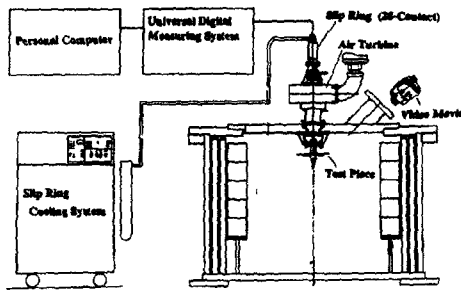


Fig. 2 Schematic diagram of the strain measurement system

計測項目は回転数、軸のふれ回り振動、試験槽の真空度、及び6カ所のひずみである。これらの信号値はデータロガー、パーソナル・コンピュータと接続し計測した。各データは1秒毎に計測した。

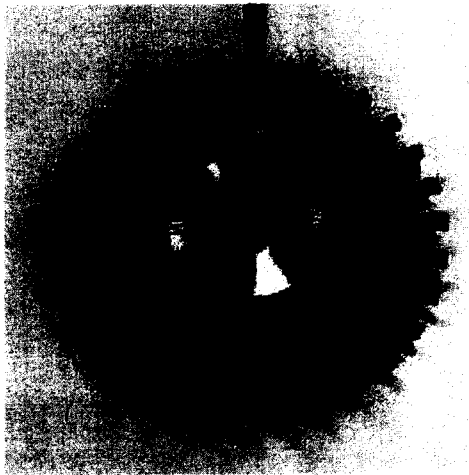


Fig. 3 C/SiC blisk rotor with wired strain gages

ひずみゲージは繊維配分の影響を考慮して任意の10ヶ所に3軸ロゼットゲージ(ゲージ長さ1mm)を貼った。 $r$ 及び $\theta$ 方向の繊維配分の大きく変わる半径位置は66mmと77mmである。図3にゲージを貼付した試験片を示す。また、各ゲージは回転バランスを考慮して軸対称の位置に貼った。計測場所は、ディスク内周部(Gauge2)、

中央部半径方向繊維を継ぎ足した前(Gauge5)、継ぎ足し後(Gauge4)、ディスク外周部(Gauge3)及びブレード付け根部(Gauge1)の5カ所である。これらの位置は回転中心よりそれぞれ順に44mm、59mm、70mm、82mm、82mmである。試験片のジグ取付方法として回転中に試験片に拘束荷重がかからないように考慮して、取付けた。

#### 4. 試験結果

試験は回転数を0から15,000rpmまで毎秒200回転の割合で上昇させ、1秒毎に計測した。

図4にひずみを計測した値を示す。実線は $\theta$ 方向ひずみ、破線は $r$ 方向ひずみである。

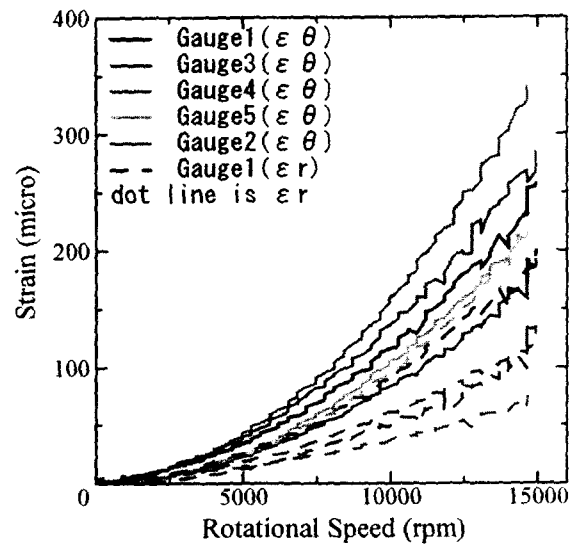


Fig. 4 Strain variations versus rotational speed (Solid Line: Tangential strain, Dot Line: Radial strain)

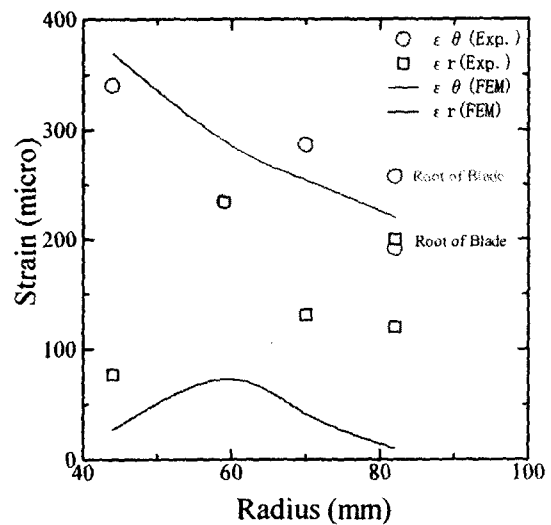


Fig. 5 Radial distributions of strains at 15000rpm

図5に、図4の結果から求めた 15,000rpm における計測点の  $r$  及び  $\theta$  方向ひずみを示す。 $\theta$  方向ひずみは○印で、 $r$  方向ひずみは□印で示した。通常、 $\theta$  方向ひずみは内周側で最も大きく外周に向かうに従い小さくなる。 $r$  方向ひずみは内周から外周に向かうにつれて大きくなり、ある点をすぎると小さくなる傾向を示している。この傾向が本試験結果でも見られる。繊維を補強した影響は、 $r$  方向に繊維を補強した後の Gauge4 で  $r$  方向ひずみが大きくなり、 $\theta$  方向ひずみは小さくなる傾向を示した。繊維を補強する前の Gauge5 では逆に、 $r$  方向のひずみが大きくなる傾向を示し、 $\theta$  方向ひずみは小さくなる傾向を示した。

また、Gauge5 では  $\theta$  と  $r$  方向ひずみが同程度の大きさを示している。 $r$  方向繊維の少ないところで  $r$  方向ひずみが大きくなっていることは強度上問題が発生することが考えられる。

参考にブリスモデルの繊維配分を考慮した引張試験結果をから求めた材料定数を用いてブリス・ロータ模型の有限要素法解析を行った。使用したソフトウェアは MSC/Nastran for Windows である。解析モデルにはブリス・ロータ模型の 1/30 カットモデルを用いた。負荷条件は 15,000rpm とした。

図6にブリス・ロータ模型の  $\theta$  と  $r$  方向のひずみの解析結果を示す。解析結果は繊維配分が急激に変化しているところを除いて、 $\theta$  方向ひずみは実験とほぼ一致した。しかし、 $r$  方向のひずみは大きく異なっている。これは、実モデルの複雑な繊維配分が解析モデルに十分反映されていないことなどが原因と考えられる。今後の検討事項としたい。

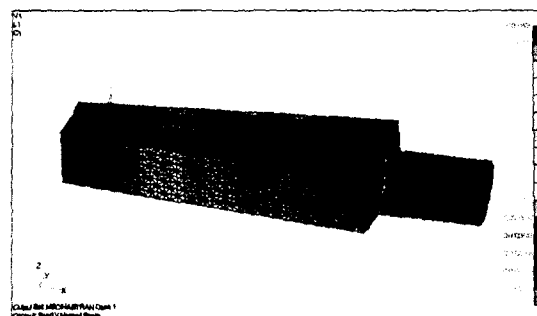
## 5. まとめ

半径方向の繊維配分を変えることで外周部の繊維密度低下を防ぐ C/SiC ブリス・ロータ模型を製作した。繊維配分の変化が回転ひずみにどのように影響するか検討した結果、下記の知見を得た。

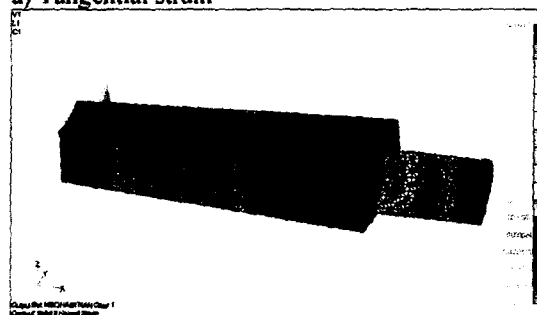
繊維配分の急激な変化のあるところはひずみの変化も大きく、複雑なひずみ分布になるので強度上注意する必要がある。また、半径方向繊維の少ないところで半径方向ひずみが大きくなっており、強度上問題が発生することが考えられる。

有限要素法解析と比較した結果、ひずみ分布の傾向は類似しているものの、定量的には異なっていた。これは、複雑な繊維配分を十分計算条件に反映できなかったこと等が原因と考えられるので、今後の検討課題としたい。

今後測定点を増やし詳細な計測を行うことにより、問題点を明確にしたい。



a) Tangential strain



b) Radial strain

Fig. 6 FEM analysis results on a divided model of C/SiC blisk rotor (15,000rpm)

## 6. 参考文献

- 1) 小河、他 3 名：3D-C/C 複合材ブリス・ロータ模型の回転試験、第 14 回ガスタービン秋季講演会講演集、1999、pp99-104
- 2) 小河、他 3 名：3D-CMC (SiC/SiC) ディスクの回転強度特性、第 13 回ガスタービン秋季講演会講演集、1998、pp207-210