ワインディング/溶射法による SiC 長繊維/Ti 基複合材料リングの製造プロセス*

河野 亮¹ 山田 毅¹ 藤原 力¹ 福島 明²
廣田 雅² 河内幸雄²

¹三菱重工株式会社名古屋航空宇宙システム製作所

²三菱重工名古屋誘導推進システム製作所

J. Japan Inst. Metals, Vol. 65, No. 12 (2001), pp. 1104-1107

© 2001 The Japan Institute of Metals

Manufacturing Process of Fiber Reinforced Titanium Matrix Composites by Winding and Spraying Method

Akira Kono¹, Takeshi Yamada¹, Chikara Fujiwara¹, Akira Fukushima², Masashi Hirota² and Yukio Kawachi²

¹Mitsubishi Heavy Industries Nagoya Aerospace Systems Works, Nagoya 455-8515

²Mitsubishi Heavy Industries Nagoya Guidance & Propulsion Systems Works

Continuous fiber reinforced titanium matrix composites (TMCs) are attractive for aerospace structures because of their high specific properties and a high temperature capability. Particularly, when a fan rotor ring is circumferentially reinforced with the unidirectional TMCs, much of weight saving is expected, because the ring is able to carry the high hoop stress. In this paper, manufacturing process and properties of TMC ring are investigated.

The TMC ring was produced by the following process: A fiber was wound onto a core ring, and then matrix metal was sprayed onto the fiber by low pressure plasma spraying. The surface of the sprayed preform was smoothed by grinding. The fiber winding, plasma spraying and machining were repeated to produce a five-layered TMC ring preform. The preform was consolidated to obtain a full dense ring by hot isostatic pressing. The ring was finished to the designated dimension by machining.

To examine the quality of TMC ring, the matrix of the TMC ring was dissolved chemically and fibers were extracted. A lot of fiber breakage was observed on the etched TMC ring surface, and a possible cause of this breakage is indicated.

(Received April 24, 2001; Accepted October 22, 2001)

Keywords: titanium matrix composite, silicon carbide, continuous fiber, titanium alloy, winding, spraying

1. 緒 言

長繊維強化 Ti 基複合材料(TMC)は、比強度、比剛性の性質に優れる耐熱材料として航空宇宙分野で適用が期待されている¹⁾。特に、エンジンのファンロータのディスク部位を、円周方向に強化した高比強度の TMC によりリング部品とすることで、大幅な軽量化が可能である²⁾。当社は ESPR (Environmentally compatible propulsion system for the next generation Supersonic transport research Program : 環境適合型次世代超音速推進システム技術研究開発) プロジェクトにおいて、TMC リングの試作研究を進めている。本報告では TMC リングをワインディング/溶射法³⁻⁵⁾を用いて試作し、その品質を評価した結果について報告する。

リングの作製手順は以下のようである。ステンレス製コアリング表面に繊維をワインディングしていき、マトリックスを低圧プラズマ溶射した。溶射後、マトリックス金属表面を

研磨し、マトリックス表面の凹凸を取り除いた。その表面に繊維をワインディングし、溶射を行った後、表面を研磨した。このようにワインディング/溶射/研削の工程を繰り返して 5 層のプリフォームを製作した。プリフォームをステンレスカプセル内に真空封入し、HIP 処理により空隙を消滅させた。その後、供試体を切削加工して内径 94 mm、外径 97 mm、リング軸長 45 mm のリングを試作した。

つぎに、試作したリング部品の品質評価を行った。TMC リング製造の課題は複合化時に生じる繊維破断であるため、試作したリングの繊維破断有無および繊維破断状態について調べた。試作したリングのマトリックスを溶解し、繊維を抽出した結果、多数の繊維破断が確認されたため、この繊維破断原因について詳しく調査した。

2. 試 験 方 法

2.1 材 料

マトリックス材は $\alpha + \beta$ 型チタン合金 SP-700 (Ti-4.5Al-3V-2Mo-2Fe)、強化繊維は SCS-6 を用いた。コアリング材

* 2001 年 3 月 29 日日本金属学会春期大会において発表

Table 1 Material properties.

	SP-700	SCS-6	Stainless alloy 304
Young modulus, E /GPa	110	400	207
Thermal expansion coefficient, $\alpha/10^{-6} \text{ K}^{-1}$	10.3	4.5	18.7

Fig. 1 A schematic illustration of spraying and winding technique.

Fig. 2 HIP can configuration of the TMC preform.

には SUS304 ステンレス合金を用いた。これらの物性値を Table 1⁶⁾ に示す。

2.2 TMC リングの試作試験

ワインディング/溶射法を用いてリングの試作試験を行い、その品質を評価した。プロセス概要を Fig. 1 に示す。外径 94 mm、高さ 80 mm の SUS304 製コアリング表面に SiC 繊維(SCS-6)を 0.3 mm のピッチ間隔で巻き、マトリックス金属(SP-700)を低圧プラズマ溶射した。溶射後、マトリックス皮膜表面を研磨し、マトリックス表面の凹凸を取り除いた。その表面に繊維を巻き、溶射を行った後、表面を研磨した。このようにワインディング/溶射/研削の工程を繰り返して 5 層のプリフォームを製作した。プリフォームを Fig. 2 に示すステンレスカプセルに真空封入し、Ar ガス圧 120 MPa、775°C、2 時間で HIP 処理した後、切削加工し内径 94 mm、外径 97 mm、リング軸長 45 mm のリングを試作した。成形後の複合化および繊維破断状態を調べるため、本試作リングを繊維垂直方向に切断し光学顕微鏡観察を行った。さらに、本試作リングを部分的に切り出し、マトリックスの一部を 10 vol%フッ酸により溶かして繊維の破断状態について詳しく調査した。

Fig. 3 Appearance of the TMC ring.

2.3 強化繊維の引張り試験

プリフォームの繊維強度を測定するために、溶射前、溶射後における強化繊維の引張り試験を行った。溶射プリフォームのマトリックスを 10 vol%フッ酸水溶液により溶かして全長 80 mm の強化繊維を抽出した。引張り試験はインストロン型試験機により、室温、大気中において歪速度 $2.5 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ の条件で行った。繊維のゲージ長は 20 mm とし、試験本数は溶射前、溶射後繊維各 20 本ずつとした。

2.4 HIP 処理前の加熱処理試験

HIP 処理前の加熱時に治具と繊維の熱膨張差が繊維に及ぼす影響を調べるため、リング試作に用いたものと同じ形状の SUS304 ステンレスコアリング上に繊維をワインディングし、マトリックスを溶射した。これらの供試体を真空熱処理炉に入れ、HIP 処理時と同様の 775°C、2 時間の温度履歴を与えた。その後、マトリックスの一部を 10 vol%フッ酸で溶かして繊維の破断状況を調べた。

3. 試験結果および考察

3.1 TMC リングの試作

Fig. 3 に試作した TMC リング外観、Fig. 4 に繊維垂直方向断面を示す。繊維分布はほぼ均一に保たれており、マトリックスの空隙は見られない。このことから、マトリックスは良好に充填されていることがわかる。

さらに、本試作リングの最内層マトリックスを 10 vol%フッ酸により溶かし、リング内面を撮影した結果を Fig. 5(a) に、拡大観察結果を Fig. 5(b)に示す。リング内面より Fig. 5(b)に示すような強化繊維破断が多数確認された。

この破断原因について以下に考察する。HIP 処理時の圧力が繊維破断に及ぼす影響であるが、Fig. 2 の HIP 治具形状より HIP 圧は内径側に向かってかかっており、最内径部に軟鋼を挿入しているため、HIP 圧が繊維に大きな引張り応力をかけたとは考えられない。内径側からかかる力としては SUS304 ドラムと繊維の熱膨張差により繊維が引っ張ら

Fig. 4 Cross section of the TMC ring.

Fig. 6 Weibull distribution of the fibers.

Table 2 Weibull constant and average strength of the fibers.

	Before sprayed	After sprayed
Weibull modulus	9.46	6.03
Mean strength, σ /GPa	4.64	4.10

Fig. 5 The inner side of the etched TMC ring.

れたことが推測される。

3.2 溶射後の強化繊維強度

Fig. 6 に溶射前、溶射後の抽出強化繊維引張り試験結果をワイブルプロットして示す。得られた平均強度およびワイブル係数 m を Table 2 に示す。ワイブル係数 m は溶射プリフ

ォームから抽出した繊維の方が小さくなっている。溶射プリフォームから抽出した繊維の平均強度は、受け入れままの繊維に比べてばらつきが大きくなっていることがわかる。また、溶射プリフォームから抽出した繊維の平均強度は、受け入れままの繊維に比べて約 10% 低下しており、溶射時に繊維が多少損傷していると思われる。

3.3 コアリングと強化繊維の熱膨張差が繊維破断に与える影響

溶射後の強化繊維強度とコアリングと繊維の熱膨張差に起因して繊維に発生する応力計算値の比較について以下に考察する。力のバランスを考えると、繊維とコアリングの長さが一致しているという条件をおけば、繊維が受ける力とコアリングが受ける力が等しくなったところで複合材料の長さが決まる。すなわち

$$E_f \cdot \left(\frac{\Delta L_f}{L_f} \right) \cdot A_f = E_c \cdot \left(\frac{\Delta L_c}{L_c} \right) \cdot A_c \quad (1)$$

ここで、 E_f は繊維弾性率、 ΔL_f はコアリングによって引き伸ばされた繊維の伸び、 L_f はコアリングの影響を受けないで熱膨張した場合の繊維全長、 A_f は繊維断面積の総和、 E_c はコアリング弾性率、 ΔL_c は繊維によって押し縮められたコアリングの長さ、 L_c は繊維の影響を受けないで熱膨張した場合のコアリングの全長、 A_c はコアリングの断面積である。本試作リングは強化繊維を 0.3 mm 間隔でワインディングしていることから、その要素部分に着目し、Fig. 7 のようにモデル化して考える。SCS-6 繊維の繊維半径は 0.07 mm であることから、繊維断面積の総和 A_f は

$$A_f = 0.07 \times 0.07 \times \pi = 0.015 \text{ mm}^2$$

コアリングの断面積は

$$A_c = (46.5 - 41.5) \times 0.3 = 1.5 \text{ mm}^2$$

上式で明らかのように繊維とコアリングの弾性率、熱膨張係数の差に比して $A_f \ll A_c$ の為、コアリングはほとんど縮ま

Fig. 7 A schematic illustration of analysis model of TMC ring.

ず、繊維のみがコアリングの長さまで引き伸ばされたと仮定する。すると以下の式が成り立つ。

$$\begin{aligned}\sigma_f &= E_f \cdot \left(\frac{\Delta L_f}{L_f} \right) \\ &= E_f \cdot \left(\frac{2\pi r_c \cdot \alpha_c \cdot \Delta T - 2\pi r_f \cdot \alpha_f \cdot \Delta T}{2\pi r_f \cdot (1 + \alpha_f \cdot \Delta T)} \right) \\ &= E_f \cdot \left(\frac{(r_c \cdot \alpha_c - r_f \cdot \alpha_f) \cdot \Delta T}{r_f \cdot (1 + \alpha_f \cdot \Delta T)} \right) \quad (2)\end{aligned}$$

$2r_c$ はコアリングの外径、 $2r_f$ はワインディングされた繊維のループ直径、 α_c はコアリングの熱膨張係数、 α_f は繊維の熱膨張係数、 T は温度である。上式より、室温 (20°C) から HIP 処理温度である 775°C まで加熱した時にリング最内径側の繊維に働く応力は、Fig. 4 の断面観察より最内径側のループ直径 ($2r_f$) を 93.8 mm と仮定すると 4.2 GPa となる。この値は Table 2 に示す溶射後の強化繊維の平均引張り強度とほぼ同じであり、上式からも熱膨張差により繊維破断に至る程の引張り応力が掛っていると推測される。

3.4 複合化成形前の加熱処理

Fig. 8 に複合化成形前の加熱処理後に繊維を抽出したリング内面観察を示す。Fig. 5(b)で試作リングに観察された破断と同様な破断が観察されており、強化繊維の熱膨張差が原因で繊維を破断させる程の過大な引張り応力が発生していることが明らかとなった。

4. 結 言

TMC リングの製造プロセスとしてワインディング/溶射プロセスを提案し、プロセス開発を行った。

(1) 本プロセスを用いて TMC リングの試作を行った。試作したリングの内面のマトリックスを溶かして繊維破断状態を調べた結果、繊維破断が多数確認された。

(2) 繊維破断は繊維と内径ドラムの熱膨張差によるものと思われるため、熱膨張差が強化繊維に及ぼす影響について調

Fig. 8 The inner side of etched TMC ring preform.

査した。繊維と内径ドラムの熱膨張差により強化繊維に負荷される応力を計算したところ、溶射後の強化繊維の平均強度とほぼ同じ応力が負荷されていることが明らかとなった。

(3) 試作リングと同様の供試体を製作し、HIP 処理と同じ温度履歴を与えた。その結果、試作リングと同様な破断が認められ、リング形状部品を製造する場合マトリックスの充填率の他に内径リング治具の熱膨張係数についても考慮が必要であることが明らかとなった。

本研究は、通商産業省工業技術院の産業科学技術研究開発制度による「超音速輸送機用推進システムの研究開発」の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から委託を受けて実施したものであることを付記し、謝意を表す。また三菱重工業㈱ 都筑隆之氏、千田 誠氏、中菱エンジニアリング㈱ 東 康行氏、寺澤聖次氏には本研究において多くの技術的援助を頂いたことを付記し、謝意を表す。

文 献

- 1) S. Mall, T. Fecke and M. A. Foringer: *Titanium Matrix Composites*, (Thecnomic Publishing Co. Inc., 1998) pp. 1-11.
- 2) C. M. Ward-Close and C. Loader: *Recent Advantage in Titanium Metal Matrix Composites*, (TMS, Warrendale, PA, 1995) pp. 19-32.
- 3) Z. Fan, P. S. Grant and B. Cantor: *Key Engineering Materials* **127-131** (1997) 225-342.
- 4) P. S. Grant: *Powder Metallurgy*, **40** No. 2 (1997) 114-115.
- 5) S. J. Veeck, G. Wolter and J. Jackson: *Powder Metall Part Mater* No. 5 (1994) 365-375.
- 6) W. F. Brown, Jr and C. Y. Ho: *Aerospace Structural Handbook*, (Metals And Celamics Information Center, 1998 edition).