319 Ti 基複合材料ブレードの低コスト製造プロセス開発

Development of low cost manufacturing process for Titanium matrix composite blade

○正 山田 毅、 都筑隆之、 正 廣田 雅、 河内幸雄、 山本伸一

(先進材料利用ガスジェネレータ研究所)

Takeshi YAMADA, Takayuki TSUZUKU, Masashi HIROTA, Yukio KAWACHI,
and Shinichi YAMAMOTO, Research Institute of Advanced Material Gas-Generator,
1-13-4 Kitaotsuka, Toshima-ku, Tokyo, 170-0004, Japan

In development of continuous fiber reinforced titanium alloy matrix composites (TMCs), the enormous production cost resulting from preliminary forming and elaborate tooling for consolidation is the fatal difficulty for practical application. In order to reduce the production cost, superplastic-formable TMC sheets (SCS-6/Ti-4.5Al-3V-2Fe-2Mo) were developed, and deformation characteristics and cavitation behavior were investigated. In this study a new low-cost-manufacturing process for titanium matrix composite blade has been developed. This process consists of three steps: (i) consolidation of flat TMC panels of 20mm thickness, (ii) superplastic forming to twist the TMC panel and (iii) machining of the twisted TMC to a final blade configuration. Using this process, production cost of a TMC blade can be reduced to 1/5 of the cost for the TMC blade fabricated by the conventional manufacturing process.

Key words: Titanium Matrix Composite, Superplastic Forming, Blade, Production Cost

1. 緒言

長繊維強化 Ti 基複合材料 (TMC) は高比強度・高比剛性であることから航空宇宙用構造材料としての適用が期待されている¹⁾²⁾。しかし、TMC の部品製造には複雑な治具や多くの加工工程を必要とする為、TMC の部品製造コストは非常に高く、これが実用化への大きな妨げとなっている。そこで著者らは、TMC 板材を直接超塑性成形することにより治具費や工程数を削減する低コスト加工法の開発を進めてきた。これまでに超塑性成形可能な TMC として SCS-6/SP-700 材を新たに開発し、本材の超塑性変形特性及び欠陥発生挙動を調べ、欠陥発生を防止できる超塑性成形法としてダイヤフラム成形法 (DF 法) を選定した³⁾。DF 法は TMC 板材を成形金型上に置き、それより上側に配置した SP-700 板材を Ar ガス圧バルジ成形し、これに押された TMC が金型に押しつけられて成形されるという方法であり、比較的応力・低ひずみで成形可能な超塑性成形法である⁴⁾。この DF 法を用いて TMC ブレードを試作し、回転試験による破断強度評価を行ったところ、設計要求値を上回る破断強度を有することを確認した⁵⁾。試作したブレードの製造プロセスは、①8.5mm 板厚の TMC 板材の製作、②翼面板厚分布に対応した変肉機械加工、③DF 法による超塑性成形、④恒温鍛造による形状矯正、⑤成形後 TMC への Ti 合金ブロックの拡散接合、⑥最終形状への機械加工という 6 段階の工程で構成されていた。このうち⑤の拡散接合はブレード付け根部 (ルート部) の板厚確保のために上下一対の Ti 合金ブロックを拡散接合しているが、複雑な形状を有する TMC 板材との拡散接合は難しく、多くの未接合部が認められた。本報告では、拡散接合不良をなくす為に、製造プロセスから拡散接合工程を省き、

代わりに TMC 板材の板厚を厚肉化 (20mm) するなどの改良を行ったブレード製造プロセスについて報告する。

2. 実験方法

本試験で用いた TMC ブレードの製造プロセスは、①20mm 板厚の TMC 板材の製作、②DF 法による超塑性成形、③最終形状への機械加工という 3 段階の工程で構成されている。前回試作試験での製造プロセスが 6 段階の工程で構成されているのに対して、新たな製造プロセスでは工程数を半分にしている。素材の構成材料には Textron Systems 社製の CVD 系 SiC 繊維である SCS-6 を強化材とし、マトリックス材には NKK 社製の β rich $\alpha + \beta$ 型 Ti 合金の SP-700 (Ti-4.5Al-3V-2Fe-2Mo) を用いた。TMC 板材は Foil/Fiber/Foil プロセスで製作し、その層構成は Woven プリフォーム (一方向に並べた SCS-6 繊維を幅 100 μ m 程度の Ti-Nb 合金リボンを横糸として編んだもの) を 19 層、0.2mm 板厚の SP-700 箔 20 層を交互に積層し、その外側に上下一枚ずつの 0.5、1.5、6mm 板厚の SP-700 板を重ねたものとなっている。この積層体をステンレス製カプセル内に真空封止した後、熱間静水圧加圧処理 (HIP 処理) により複合化した。HIP 処理条件は温度 1048K、保持時間 2h、Ar ガス圧 120MPa とした。TMC 素材の超塑性成形は、Ar ガスを用いて 1048K において、ダイヤフラムとなる SP-700 板の最大ひずみ速度が $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ となる条件で行った。最後に成形後 TMC 素材を機械加工により最終形状とした。また試作した TMC ブレードの形状測定を行うとともに、強化繊維配置状況を調べるために X 線透過像撮影を行った。

3. 実験結果

Fig.1 に試作した TMC ブレードの外観を示す。本ブレードの加工公差要求は、翼面の加工公差は $\pm 0.1\text{mm}$ であり、ブレードのねじり角公差は ± 0.25 度である。試作品の形状測定からこれらの加工公差を満足していることが確認された。Fig.2 に試作したブレードの X 線透過像を示す。透過像のコントラストは主にブレードの板厚に対応しており、厚い部分は黒く、薄い部分は白くなっている。翼面中央部の白く見える部分には強化繊維が写し出されている。強化繊維を構成する Si 及び C 原子が、マトリックスを構成する Ti 等の金属元素に比べて軽い元素で構成されているために、強化繊維はマトリックスに比べて X 線の透過性が良い。そのため、X 線透過像撮影により内部の強化繊維配置状況が確認でき、その配置は図面要求形状に対して $\pm 1\text{mm}$ 程度の精度で配置していた。

Fig.1 Appearance of the TMC blade.

Fig.2 X-ray photograph of the TMC blade.

4. 製造コスト低減効果

本研究で新たに開発した TMC ブレード製造プロセスは、3 工程で構成された比較的シンプルなプロセスとな

っており、TMC ブレードの製造コストを大幅に削減できると考えられる。Fig.3 に三種類の製造プロセスによる TMC ブレードの製造コストを比較した結果を示す。著者らはこれまで三種類の製造プロセスにより TMC ブレードの試作を行ってきた。Fig.3 中の従来プロセスとは、箔を熱間予備成形後、積層し、ネットシェイプ複合化を行って素材を製作し、機械加工により最終形状とするものである。新プロセスとは、上述した 6 工程からなる超塑性加工を利用したプロセスである。Fig.3 のコスト比較は従来プロセスでの製造コストを 100%とした場合の割合で示し、TMC ブレードを 10 体製造した場合における 1 体当たりの製造コストを算出した。本研究で開発したプロセスは従来プロセスに比べて、製造コストを 1/5 程度に削減でき、新プロセスと比較しても 40%程度まで低コスト化できた。本研究で開発したプロセスにおけるコスト低減効果が最も大きかったのは機械加工費である。他のプロセスではルート部に Ti 合金ブロックを拡散接合している為に素材形状が複雑となり、機械加工工程も複雑で加工費が高くなっていた。本研究では素材がほぼ均一な板厚を有する板となったことで機械加工が容易となり、加工費を大幅に削減できた。また加工工程が少なくなったことで、治具費、複合化費及び成形・接合費が抑制できた。本研究で開発したプロセスを用いて数百体の TMC ブレードを製作した場合には、スケールメリットが出て治具費が殆どなくなり、さらに材料費も大幅に抑制できることから、従来プロセスの 1/10 程度まで製造コストを低減できると思われる。

Fig.3 Comparison of the fabrication costs among the conventional, the improved and the new fabrication process for the TMC blade model.

5. 結言

超塑性成形を利用した長繊維強化複合材料ブレードの製造プロセスを新たに開発し、設計要求を満足するモデル部品の試作に成功した。さらに本プロセスによりブレード製造コストを従来に比べて 1/5 程度に削減できることを確認した。

参考文献

- 1) S.Mall *et al.* : *Titanium Matrix Composites*, (1998), pp.1-22.
- 2) C.M.Ward-Close *et al.* : *Mater. Sci. Eng.*, **A263**, (1999), 314-318.
- 3) T.Yamada *et al.* : *Materials and Manufacturing Processes*, **15**, (2000), 347-358.
- 4) R.J.Stracey *et al.* : *Proc. of ICSAM-94*, (1994), pp.725-730.
- 5) 山田ほか : 日本金属学会誌, **64-10**, (2000).印刷中