

氏 名	やま だ たけし 山 田 毅
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)
学位記番号	論 エ ネ 博 第 17 号
学位授与の日付	平成 12 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題目	長繊維強化 Ti 基複合材料の超塑性成形に関する研究

論文調査委員	(主 査) 教授 香 山 晃 教授 小 野 勝 敏 教授 木 村 晃 彦
--------	---

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、航空機エンジンの大幅な軽量化を可能とする長繊維強化 Ti 基複合材料（以下 TMC）を実用化する上での最大の課題である部品製造コストの低減を図る為に、炭化珪素（SiC）を強化繊維とすることから従来困難と考えられてきた TMC の塑性加工技術、特に前例のない超塑性成形技術の開発に取り組み、新材料の開発及び加工プロセス開発、さらにモデル部品の試作・評価までを行った成果をまとめたもので、8章からなる。

第1章は概論である。TMC を航空機エンジンに適用する上で必要不可欠な部品製造コストの低減について、従来の TMC ブレード試作研究の特徴を概観し、塑性加工を利用した製造プロセスの有用性を示し、難加工材料である TMC が潜在的に塑性加工可能であることを示している。TMC に対して超塑性特性を付与し、超塑性成形を利用した TMC ブレードの低コスト製造プロセスを新規開発することが本研究の目的であることを示している。

第2章は、超塑性加工可能な TMC として、800℃以下の低温で優れた超塑性特性を示す Ti 合金である SP-700 (Ti-4.5Al-3V-2Fe-2Mo mass%) をマトリックス材に、代表的な TMC 用の SiC 強化繊維である SCS-6 を強化材とした新たな TMC を提案し、引張試験や曲げ成形試験から SCS-6 / SP-700材が SP-700と同等の優れた超塑性特性を有することを明らかにした。また変形に伴い繊維／マトリックス界面において三種の剝離欠陥が発生することを明らかにし、その一つは界面強度を越える応力集中により発生する欠陥（以下、type-1 欠陥）であり、後の二つは変形条件に依存しない欠陥であり、繊維を固定する為の TiNb リボンに起因するもの（以下、type-2 欠陥）と隣り合う二本の繊維の間隔が非常に狭い為に部分的にマトリックス不足となって発生するもの（以下、type-3 欠陥）に分類できることを示した。

第3章は、剝離欠陥の発生を防止する観点から、繊維を固定する為の TiNb リボンを用いず、且つ繊維間隔が均一に保たれている SCS-6 / SP-700材を製作する為に、新たに溶射プリフォームを開発し、これを用いた SCS-6 / SP-700材（以下、溶射材）は、TiNb リボンで繊維を固定したプリフォームを用いた SCS-6 / SP-700材（以下、Woven 材）と同等の超塑性特性を有し、type-2 及び type-3 欠陥の発生を防止できることを示した。また、溶射材の変形条件と欠陥発生率の相関を明らかにして、変形応力が18MPa 以下の変形では type-1 欠陥も激減することを示した。

第4章では、溶射材の引張強度特性に及ぼすミクロ組織の影響について調べ、溶射皮膜部と箔部で構成されるマトリックスにおいて溶射皮膜部中に含まれる水素が溶射材の引張強度をマトリックスの引張強度以下に低下させることを明らかにした。溶射プリフォームに真空加熱処理（以下、脱水素処理）を施すことで、溶射材の引張強度は Woven 材と同等に改善し、この強度回復は脱水素処理によって繊維／マトリックス界面強度の低下と溶射皮膜部の延性化が起り、溶射材の破壊モードが脆性型から擬累積破壊型に変化したことに起因するとの考察を示した。

第5章では、超塑性成形プロセスの開発を目的に、溶射材及び Woven 材を用いてストリンガー形状及び翼面形状モデルを試作し、超塑性成形を利用して TMC モデル部品が製作可能であることを示した。翼面形状モデルの断面観察から、Woven 材では発生した剝離欠陥が溶射材では認められず、溶射材の欠陥発生に対する耐性が Woven 材と比べて高いことを示した。一方で、ストリンガー形状モデルでは溶射材における繊維分布の均一性にバラツキがある為に type-3 欠陥が多

く認められたものもあり、溶射材の品質安定性に問題があることを示した。

第6章では、小型ブレードの試作を通じて、溶射材の問題点を材料面からでなく超塑性成形方法の改善で解決することを目的に、TMCの拘束を極力無くし、逐次成形可能な超塑性成形法であるダイヤフラム成形法を新たにTMCの超塑性成形に応用し、Woven材を用いても剝離欠陥のない翼面形状モデルの試作に成功した。またこの翼面形状モデルにSP-700ブロックを拡散接合する工程も開発し、低コストなTMCブレード製造の為の基本プロセスを確立した。さらに新たに開発した製造プロセスは従来法に比べ、30%以上製造コストを削減可能であることを示した。

第7章では、他の報告例が皆無に等しい実部品相当のTMCブレードの設計・試作と回転試験による破断強度評価を行い、超塑性成形を利用した低コスト製造プロセスにより、従来のTi合金製ブレードより25%軽量のTMCブレードの試作に成功し、回転試験から設計要求強度を20%上回る破断強度を有することを示した。

第8章は結論である。本研究で新たに開発したSCS-6/SP-700複合材料及びその超塑性成形技術は、従来材及び従来の部品製造技術を総合的に凌ぐ優れた材料・加工技術であることを示しており、今後の応用について展望している。

論文審査の結果の要旨

先進耐熱材料を実用化する上でその二次加工技術の開発は大変重要な技術であると共に、エネルギー効率の高い動力エンジン等の実現・普及に不可欠な技術である。長繊維強化Ti基複合材料（以下、TMC）に超塑性加工性を付与して二次加工を利用する低コストなTMCブレード製造プロセスの開発を目標として、材料開発からモデル部品による実証までを行った成果をまとめたもので、得られた成果は以下の通りである。

1) 超塑性変形特性に優れたTi合金SP-700 (Ti-4.5Al-3V-2Fe-2Mo mass%) をマトリックスに、代表的なTMC用のSiC強化繊維であるSCS-6を強化材に選定し、超塑性加工可能なTMCとしてSCS-6/SP-700複合材料を新規に開発し、800°C前後の温度における引張試験や曲げ成形試験などから、木材が優れた超塑性変形能を有することを示すと共に、変形に伴って繊維/マトリックス界面に三種の剝離欠陥が発生することを示した。

2) 剝離欠陥を防止する観点から、SCS-6をTiNbリボンで編んで固定した従来のプリフォームを用いたSCS-6/SP-700材（以下、Woven材）に変えて、溶射プリフォームを用いたSCS-6/SP-700材（以下、溶射材）を新たに開発し、溶射材がWoven材と同等の超塑性変形特性を有し、剝離欠陥の発生を大幅に抑制可能であることを示した。

3) 溶射材の常温引張強度がマトリックスのSP-700よりも低いという問題は、溶射皮膜部中の水素に起因することを明らかにし、溶射プリフォームに真空加熱処理（600°C-1h）を施すことで脱水素処理が可能で、溶射材の常温引張強度がWoven材と同等に回復することを示した。

4) 溶射材及びWoven材を用いて、ストリンガー形状及び翼面形状モデルを試作し、溶射材を用いた翼面形状モデルでは剝離欠陥が生じないことを示すと共に、ストリンガー形状モデルの中には溶射材を用いても剝離欠陥が多く発生するものもあり、溶射材の品質安定性に課題が残ることを示した。

5) 小型ブレードモデルの試作を通じて、低ひずみ・低応力で超塑性成形可能なダイヤフラム成形法を用いることで、Woven材を用いても剝離欠陥のない翼面形状モデルが製作できることを示すと共に、TMCブレードの基本製造プロセスを確立し、本方法によれば従来法より製造コストを30%以上低減できることを示した。

6) 新たに開発した低コスト製造プロセスにより、25%軽量化した実部品相当のTMCブレードを設計・試作して、その破断強度を回転試験により評価・検証し、設計要求強度を20%越える破断強度を有することを示した。

以上要するに、本論文は超塑性成形を利用する低コストなTMCブレードの製造プロセスを提案して、これに必要な新規材料及び加工プロセスを確立し、25%軽量化した実部品相当のTMCブレードを設計・試作して、その破断強度を回転試験により評価・検証し、優れた強度特性を示すことを明らかとしており、今後の先進耐熱材料の研究・開発に展開・応用が大いに期待される。よって、本論文は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成13年2月20日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。