

氏 名	井 頭 賢 一 郎
学 位 の 種 類	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	論 工 博 第 3760 号
学位授与の日付	平成 15 年 11 月 25 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	Si-M-C-O 繊維強化 SiC 複合材料のガスタービン燃焼器ライナへの適用 に関する研究

論文調査委員 (主 査) 教 授 山 口 正 治 教 授 栗 倉 泰 弘 教 授 落 合 庄 治 郎

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、ガスタービンの高温部品に繊維強化セラミックス複合材料 (CMC) を適用するための材料設計指針および部品製造指針を得るため、素材である Si-M-C-O 繊維の評価、Si-M-C-O/SiC 複合材料の製造方法、特性評価試験による強度や耐久性を支配する要因の解明と、それを反映した耐久性向上化策およびその効果、部品化技術開発に関する研究の結果をまとめたものであり、8 章からなっている。

第 1 章は、序論であり、最近までのガスタービンエンジン用セラミック材料もしくはセラミックス複合材料に関する国内外の開発動向について概説し、高い耐熱性と損傷許容性が期待できる SiC/SiC 系 CMC (SiC/SiC-CMC) が、ガスタービン高温部品用セラミック材料として最も有望な候補であることを述べている。次に、SiC/SiC-CMC をガスタービン用無冷却燃焼器ライナに適用する際の効果とともに、本研究の意義、目的について述べている。

第 2 章は、SiC 繊維の 1 種である Si-M (Ti, Zr) -C-O 繊維単体の高温雰囲気における熱分解および酸化挙動の評価である。酸素含有率や微量添加金属種の異なる各繊維の熱分解特性の評価から、繊維の熱分解抵抗が、酸素含有率に大きく依存することを明らかにした。一方、繊維表面への酸化物層形成による熱分解抑制効果については、微量添加金属種の影響を示唆する結果を得ており、形成される酸化物層の性質の差によるものと考察している。さらに、高温酸化雰囲気に暴露された繊維の残存強度は、繊維表面に形成される酸化物層厚さに大きく依存することから、高温大気中で使用される CMC に適用する SiC 系繊維には、熱分解抵抗が高いことだけではなく、酸化物層の成長速度で代表される酸化抵抗の高さも要求されることを示している。

第 3 章は、Si-M-C-O 繊維を使用した CMC (Si-M-C-O/SiC) の作製および組織・機械的性質の評価である。繊維強化セラミックス複合材料の機械的特性と繊維/マトリックス界面構造との関連性を解明するために、Si-Ti-C-O 繊維に異なる表面処理を施して Si-Ti-C-O/SiC を製造し、その組織観察と機械的特性評価試験を行っている。その結果、繊維/マトリックス間に、相互拡散または反応を抑制する層を導入することにより、Si-M-C-O/SiC の強度特性および破壊特性が向上することを確認している。特に CVI 法により極く薄い C 層と高結晶性 SiC 層とが形成された Si-Ti-C-O/SiC は、強度、破壊特性だけでなく、耐酸化特性も優れている。

第 4 章は、CVI 法により C/SiC 界面を形成した Si-Ti-C-O/SiC の大気中および減圧雰囲気暴露後の組織および機械的特性評価であり、材料特性劣化と繊維および界面層の変化との関係から、Si-M-C-O/SiC の劣化メカニズムが、繊維の熱分解と界面 C 層の酸化消失およびシリケート層形成による脆化であることを明らかにしている。

第 5 章では、Si-M-C-O/SiC の高温酸化雰囲気下での劣化の原因である繊維表面近傍の C 層の酸化消失およびシリケート形成を抑制する目的で、高温で軟化シラックシールの役割が期待できるガラスをマトリックス中に添加した材料の耐久性評価を実施し、その効果を検証している。その結果、GT 部品使用環境に近い 1573 K 付近において、Si-M-C-O/SiC への $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-BaO}$ 添加が、界面 C 層の酸化消失およびシリケート形成を効果的に抑制し、界面酸化による脆化に対する抵抗

のみならず、クリープ特性や低サイクル疲労特性の向上に対しても有効であること、またそのメカニズムを明らかにしている。

第6章は、Si-M-C-O/SiCを用いたガスタービン燃焼器ライナの設計、解析、製造に関する研究結果である。燃焼器ライナが筒型形状であり、また強化繊維が連続繊維であるという特徴を生かした繊維プリフォーム成形方法を検討した結果、生産性、成形自由度、材料特性の点でブレイディング法が有利であると結論している。また、燃焼器ライナの使用環境を想定した熱伝導・熱応力解析を実施した結果、金属部品との取り付け部に、熱膨張率差に起因して発生する応力が問題となることが判明し、弾性支持構造による熱応力緩和が必要かつ有効であることを示すとともに、具体的な支持構造を提示している。

第7章では、金属部品との取り付け部に、熱膨張率差に起因して発生する熱応力を緩和するための材料側での対策として、マトリックスをSiCから弾性率の低いガラス系材料へと傾斜的に変化させたCMC/GMCハイブリッド複合材料(CMC/GMC)を発案し、その適用を提案している。CMC/GMCによる応力低減効果については解析による検討を行い、金属部品との取り付け部近傍の部分的な弾性率の低下により、発生する熱応力が低減できることを明らかにしている。さらに実際にCMC/GMCの試作・評価、CMC/GMC製燃焼器ライナの試作・燃焼評価試験を通して、材料特性、成形・製造性、部品としての成立性の点で、CMC/GMCが十分に適用可能であることを示している。

第8章は、総括であり、本論文で得られた成果の要約を述べ、さらにこの成果の波及効果とともに、CMCを無冷却燃焼器ライナとして実用化するために必要な課題を述べている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、ガスタービンの熱効率向上に直接影響を与える作動ガス的高温化、およびNO_x排出量の低減に有効とされる燃焼器ライナの無冷却化に対応可能な繊維強化セラミックス複合材料(CMC)の開発を目的として、強化繊維であるSi-M-C-O繊維の耐熱性評価、Si-M(Ti, Zr)-C-O繊維強化SiC複合材料(Si-M-C-O/SiC)の製造方法、特性評価試験による強度や耐久性を支配する要因の解明と、それを反映した耐久性向上法およびその効果、部品化技術開発に関する研究の結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1. Si-M-C-O繊維単体の高温雰囲気における熱分解および酸化挙動の研究では、熱分解と表面酸化が同時に生じる同繊維の熱分解挙動を定量化し、繊維の熱分解抵抗は酸素含有率に依存するが、繊維表面への酸化物層形成による熱分解抑制効果や、繊維の残存強度は、繊維表面に形成される酸化物層に大きく依存することを明らかにしている。

2. Si-M-C-O/SiCの作製および組織・機械的性質の研究では、化学気相蒸着法により繊維/マトリックス界面にC層とSiC層とを導入することにより、Si-M-C-O/SiCの強度と破壊特性の改善に成功している。

3. Si-M-C-O/SiCの耐久性に関する研究では、材料特性劣化と繊維および界面層の変化との関係から、Si-M-C-O/SiCの劣化メカニズムが、繊維の熱分解と界面C層の酸化消失およびシリケート層形成による脆化であることを明らかにし、耐熱性の高い繊維を適用することによりSi-M-C-O/SiCの耐久性が向上すること、クラックシールガラスの添加により界面C層の酸化防止およびシリケート生成が抑制され、界面酸化に対する抵抗のみならず、クリープ特性や低サイクル疲労特性が向上することを実証し、そのメカニズムを明らかにしている。

4. Si-M-C-O/SiCを用いたガスタービン燃焼器ライナの設計、解析、製造に関する研究では、燃焼試験用のライナ試作を通して、製造方法や金属部品との取り付け構造に関する検討を行っている。特に、金属部品との取り付けについては、金属との熱膨張率差に起因して発生する熱応力を低減するための具体的な弾性支持構造を提示している。

5. 金属部品との取り付け部に熱膨張率差に起因して発生する熱応力を緩和するための材料側での対策として、マトリックスをSiCから弾性率の低いガラス系材料へと傾斜的に変化させたCMC/GMCハイブリッド複合材料(CMC/GMC)を発案し、その応力低減効果を解析により明らかにしている。

以上、本論文は、Si-M-C-O/SiC複合材料をガスタービン用無冷却燃焼器ライナに適用することを目的として、材料製造および耐久性を論じたものであり、Si-M-C-O/SiCの材料および部材としての耐久性向上法を発見、発案し、それを検証するなど、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成15年9月30日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。