

氏名	ハンザワ シゲル 半澤 茂
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	論博第279号
学位授与の日付	平成24年9月5日
学位授与の条件	学位規則第4条第2項該当 論文博士
学位論文題目	シリコン含浸型炭素繊維強化複合材の合成と特性
論文審査委員	主査 教授 石澤伸夫 教授 藤正督 准教授 橋本忍 教授 田邊靖博（名古屋大学）

論文内容の要旨

炉材/窯道具に用いるシリコン含浸型 SiC(以下 Si-SiC と記す)と、高温構造部材に用いる炭素繊維強化炭素複合材(以下 C/C 複合材と記す)の特性を比較すると、耐酸化性と耐磨耗性では前者が優れ、強度と破壊靱性では後者が優れており、両者は対照的な性質を持つ。これに対し、両材料の優れた性質を兼ね備えた複合材を目的に Si-SiC と C/C 複合材からなる材料が開発され、炭素繊維の SiC 化反応抑制の研究が行われている。本論文では、炭素繊維の SiC 化反応を抑制したシリコン含浸型炭素繊維強化複合材(以下 Si-SiC マトリックス C/C 複合材と記す)の合成と特性について述べる。

第1章 序論：Si-SiC マトリックス C/C 複合材の研究背景とその機械的/熱的特性の一覧を示し、航空機などの高速移動体のブレーキ用摺動材料に本複合材が有望であることを指摘し、本研究の目的を述べた。

第2章 Si-SiC マトリックス C/C 複合材の合成機構：炭素繊維の束を原料にした二峰性(一方の峰が炭素繊維の径を越える)の気孔径分布を有する C/C 複合材を、Si 含浸の基材とした。この基材に対し、次の三つのプロセスステップを適用することで、緻密な本複合材を得ることに成功した。1) C/C 複合材の炭素繊維の束間の大径気孔の表面に Si 皮膜を作る第一ステップ、2) 大径気孔に Si が浸透し幹状 Si-SiC を作る第二ステップ、3) 幹状 Si-SiC から炭素繊維束内の小径気孔に繋がる枝状 Si-SiC を作る第三ステップのプロセス。このプ

プロセスでは炭素繊維の SiC 化量が 12 vol% に留まり、炭素繊維の SiC 化反応が抑制できた。

第 3 章 機械的特性: Si-SiC マトリックス C/C 複合材と C/C 複合材の機械的特性を測定した。その結果、本複合材では炭素繊維の SiC 化反応の抑制が行われているものの、C/C 複合材の特長である強度が十分に発現しないことが判った。これは、Si-SiC 部分と炭素繊維束との界面に発生するクラックに起因する現象と考えられた。また、複合則で計算した炭素繊維の損傷量は 60~90 vol% に達し、強度低下の回避は本複合材の製造プロセスでは困難と推定された。この強度低下を補う技術として、C/C 複合材の一部分を本複合材で構成する手法を考案した。この技術の効果は第 7 章に記す。

第 4 章 摺動特性: Si-SiC マトリックス C/C 複合材の摺動磨耗面は研削磨耗の様相を呈し、摩擦係数は摺動速度と面圧で大きく変動することが判った。また、本複合材と C/C 複合材の摺動磨耗量を無次元化解析した結果は、磨耗量が Si-SiC 部分と C/C 複合材部分のヤング率の差で決まると仮定したモデル計算結果と一致した。高速移動体のブレーキ部品候補材としての本複合材と C/C 複合材の優劣を考えると、制動力(高摩擦係数)と寿命(低磨耗)の点で、本複合材が優位であると推定された。

第 5 章 熱放射特性: 炉材と窯道具で構成する焼成炉では、炉内空間温度の不均一性に由来する窯詰効率低下の回避が必要であり、構造部品設計では部材内温度の不均一性に起因する歪(熱応力)低減が必要である。Si-SiC マトリックス C/C 複合材と C/C 複合材の熱的特性を比較すると、低熱膨張が歪の低減に有利である点、および高熱放射率が温度分布の均一化に有利である点などで本複合材が優位と考えられた。また、Si-SiC マトリックス C/C 複合材内の SiC に着目し、高温酸化と熱放射率の関係を調べた。

第 6 章 酸化特性: 炭素成分を 70 vol% 含む本複合材は酸化損耗することから、高温構造部材としての適用範囲が制限される。この酸化損耗を抑える手法に、第 1 層に B₄C 溶射層、第 2 層に Al₂O₃ 溶射層を本複合材表面に施す方法を考案した。この方法を用いると、大気中 800 °C で 100 hr 保持後でも溶射層にクラックや溶射層の流出は発生せず、本複合材の酸化重量変化は 0.2% 以内に留まることを確認した。

第 7 章 構造部材設計: 構造材料の内部構造を複合化させて機能分散を図ることを目的に、一部分のみに Si-SiC マトリックスを含む C/C 複合材で構成する材料設計技術を開発した。この材料における発生熱応力を航空機用ブレーキ形状モデルで計算すると、Si-SiC を含まない単一 C/C 複合材にくらべて約 20% 低減することが分かった。これに、第 3 章で述べた引張強度低下の抑制効果も考慮すると、この複合化の試みは材料設計上の重要な要素技術のひとつである「構造複合化による機能分散」を達成したものであるとの結論に至った。

第 8 章 総括: 本論文を総括した。軽量で高強度な Si-SiC マトリックス C/C 複合材は、高温構造部材や摺動部材の用途に有効であることを示し、本複合材で構造複合化を施した航空機用ブレーキ部材の材料設計コンセプトを提案した。

論文審査結果の要旨

本論文は「シリコン含浸型炭素繊維強化複合材の合成と特性」と題し、8章から構成されている。

第1章「序論」では、Si-SiC マトリックス C/C 複合材の研究背景を概括し、本研究の目的を述べている。

第2章「Si-SiC マトリックス C/C 複合材の合成機構」では、炭素繊維の束を原料にした二峰性の気孔径分布を有する C/C 複合材を Si 含浸の基材として用い、1) C/C 複合材の炭素繊維の束間の大径気孔の表面に Si 皮膜を作る第一ステップ、2) 大径気孔に Si が浸透し幹状 Si-SiC を作る第二ステップ、3) 幹状 Si-SiC から炭素繊維束内の小径気孔に繋がる枝状 Si-SiC を作る第三ステップ、の三つのプロセスステップを適用し、緻密な Si-SiC マトリックス C/C 複合材を作製したことについて述べている。

第3章「機械的特性」では、このようにして作製された Si-SiC マトリックス C/C 複合材および単一 C/C 複合材の機械的特性を測定し、前者における特性向上の理由について考察している。

第4章「摺動特性」では、Si-SiC マトリックス C/C 複合材の摺動特性を調べ、高速移動体のブレーキ部品候補材として本複合材および単一 C/C 複合材を考えた場合、制動力(高摩擦係数)と寿命(低磨耗)の点で前者が優位であると結論している。

第5章「熱放射特性」では、炉材と窯道具で構成する焼成炉の特性について検討し、Si-SiC マトリックス C/C 複合材および単一 C/C 複合材の熱的特性を比較すると、低熱膨張および高熱放射率の点などで前者が優れていると述べている。

第6章「酸化特性」では、複合材の酸化損耗を抑える手法として第1層に B₄C 溶射層、第2層に Al₂O₃ 溶射層を本複合材表面に施す方法を提案し、この手法を用いた場合、大気中 800 °C、100 時間保持後も溶射層の流出やクラックは発生せず、本複合材の酸化重量変化は 0.2%以内に留まることを明らかにしている。

第7章「構造部材設計」では、構造材料の内部構造を複合化させて機能分散を図ることを目的に、一部分のみに Si-SiC マトリックスを含む C/C 複合材で構成する材料設計技術の提案と開発をおこなっている。その結果、Si-SiC マトリックス C/C 複合材は単一 C/C 複合材よりも航空機用ブレーキ形状モデルにおいて発生熱応力が約 20%低減することを明らかにしている。

第8章「総括」では本論文を総括している。

以上をまとめるに、本研究において作製された軽量で高強度な Si-SiC マトリックス C/C 複合材は高温構造部材や摺動部材としての用途に有効であり、また、本論文で示された複合材料の材料設計に関する新しい考え方は単に航空機用ブレーキ部材開発にとどまるところなく、広範囲な応用につながる。よって本論文は工学の発展に寄与するところが大きく、博士(工学)の学位に値する。