

審査の結果の要旨

氏名 福島 康之

航空機やロケットのエンジン等の高温部位で使用する部品において、軽量かつ高温でも機械的強度に優れる材料が常に求められている。特にこれまでのニッケル系材料に代わり、炭化珪素 (SiC) を用いたセラミックス基複合材料 (CMC, Ceramics Matrix Composite) はさらなる高温耐性を備え、かつ軽量であるため、次世代材料として注目を集め、数年後の量産開始が検討されている。SiC を使った CMC は、SiC フィラメント (強化材) を束ねたヤーン (繊維束) を織り込んだプリフォーム内に、SiC マトリックス (母材) を析出させる事で形成される。SiC(強化材)/SiC(母材)-CMC の製造では、プリフォーム内部で均一に SiC マトリックスを析出させる必要があり、気相からの反応を利用した化学気相含浸法 (Chemical Vapor Infiltration: CVI 法) によって作製されたものは優れた機械的特性を発揮するため、次世代材料として有望視されている。しかし、CVI 法は難易度の高いプロセスである。プロセス時間低減、SiC 析出状況均一性向上、SiC 生成収率向上、排気ガス中の副生成物の低減・無害化等の課題が未解決であり、さらなる発展が必要とされている。

本論文は「SiC 化学気相含浸法の最適化を目指したマルチスケール解析による反応モデル構築」と題し、上記課題に対し根本的解決を試みるため、原料に MTS (メチルトリクロロシラン, CH_3SiCl_3) と水素 (H_2) の混合ガスを用いた SiC 製膜の反応機構解明に取り組み、系統的な製膜実験やプロセスモデル化、シミュレーション等を行ったものであり、全部で8章からなる。

第1章は序論であり、本研究の背景、目標、CMC と CVI 法の概要、既往の研究などをまとめている。第2章では、用いた解析手法についてまとめており、円管型反応器の概念、マルチスケール解析、マイクロキャビティ法、素反応シミュレーション、モンテカルロシミュレーションについて解説している。

第3章では、プリフォーム中における反応と拡散について定式化し、CVI 法による SiC 析出均一化に必要な条件を検討している。SiC マトリックス析出の均一性を向上するためには、極めて遅い反応速度でプリフォーム内に原料拡散させながら製膜する必要がある。最適な反応速度を考えることで、最も高速

かつ均一な最適な製膜条件が求まることを示した。

第4章では、MTS/H₂混合ガスによるSiC製膜の反応機構解明を目的に、具体的にトレンチ構造を有する基板上に製膜実験を行い、ミクロスケールでの製膜速度分布を解析するとともに、反応器内のマクロスケールでの製膜速度分布を併せて検討するマルチスケール解析により、MTS/H₂混合ガスによるSiC製膜では反応を律速する付着確率の高い製膜種と付着確率の低い製膜種が2種共存することを見出した。素反応シミュレーションによる気相組成計算、モンテカルロシミュレーションなどとも組み合わせる事で反応機構の精緻化を試みている。

第5章では反応モデルの検証を目的に添加ガス実験を行い、第6章では第4～5章で得られた結果を総括反応モデルの形でまとめている。さらに第7章では新しい原料（ジメチルジクロロシラン、DDS）の採用にも取り組んで、新規高効率・高速成長プロセスの開発にも取り組んでいる。

第8章では、主に第3～6章までの結果を元に、MTS/H₂混合ガスによるSiC製膜反応機構をモデル化し、製膜結果をシミュレーションすることに成功している。また、CMC製造のためのCVI法最適化に関し、拡散と反応を考慮したモデルにより、高速かつ均一に製膜するには反応速度（付着確率）に最適値が存在すること、また、ヤーンの均一埋込が達成されるとプリフォーム全体の析出面積と体積の比が大きく減少することから、ヤーンを一体化してCMCを完成させる段階では、ヤーンを緻密化するのは条件が異なることなど、CVI法最適化に有用な知見を数多く供出している。これらを元に、従来は200時間程度の時間がかかる操業時間を20時間程度にまで短縮できる可能性を示している。

以上、本論文はCMC量産化に要求されるCVI法のマルチスケール解析を活用した最適化、およびプロセス設計を的確に行い、マテリアルプロセスの開発概念を構築したという意味においてマテリアル工学への貢献は大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。