

戦略的創造研究推進事業(ALCA)
技術領域(プロジェクト名)「省エネルギー社会に向
けた革新的軽量材料の創生」
課題名「輻射熱反射コーティングによる革新的遮熱
技術」

終了報告書

研究開発期間 平成23年10月～平成31年3月

研究開発代表者:香川 豊
(東京工科大学片柳研究所・所長・教授)

○報告書要約（和文）

研究開発代表研究者：東京工科大学 教授 香川 豊

研究開発課題名：「輻射熱反射コーティングによる革新的遮熱技術」の研究

1. 研究開発の目的

航空機からの CO₂削減には、ジェットエンジン燃費を向上させる“部材の軽量化・耐熱性向上”及び“部材への燃焼ガスからの入熱低減”が有効である。前者としては SiC 繊維強化 SiC マトリックス複合材料(以後、SiC/SiC と記述)等の CMC のが注目され、近年実エンジンに適用されると共に現在その適用が拡大しつつある。本研究では、後者を目的とし、従来になかった輻射による入熱を低減する革新的な遮熱技術開発を目指し、熱輻射エネルギー反射機能と優れた耐環境性能を合わせ持つコーティングを開発する。なお、本技術は輻射熱エネルギーが温度 T の 4 乗 (T^4) に比例して大きくなることから、タービン入り口温度をより高くすることができる CMC 適用拡大を一層促進すると考えられ CO₂削減への効果がさらに増大する。

2. 研究開発の概要

(1)内容:

2000℃級の高温物体やガスから放射される輻射熱エネルギーを電磁波(光)と考え、赤外光領域で透明な耐熱性酸化物の積層構造コーティングと電磁波の相互作用を利用すれば高効率で輻射熱エネルギーを反射でき、熱エネルギーを高温部に戻す機構を新たに付与できる。そこで、高い反射機能を有するコーティング構造の設計及びその構造設計要求を満足するコーティング材料の設計を行い、それら輻射熱反射コーティングを形成する膜の作製プロセスを開発する。作製したコーティングにて反射率を評価し輻射熱反射効果を確認する。また、コーティング材の力学的特性等の評価技術を開発する。

(2)成果:

高屈折率イットリウムチタネート($Y_2Ti_2O_7$)と低屈折率アルミナ(Al_2O_3)を交互に積層した多層輻射熱反射コーティング材料を用いて、反射率の波長依存性を理論と実験で評価し 50%以上の反射が可能であることを示した。すなわち輻射熱反射を可能とする屈折率の差が大きい二種類の酸化物を交互に積層した積層構成の設計技術を確立した。本技術は実積層膜の厚さ変化、欠陥形状・分布にも対応できる。これらコーティング構造安定性は、高温ガス透過法や原子ナノレベル構造解析に基づき、酸化物中の物質移動機構を解明し、高温において優れた構造安定性と酸素・水蒸気遮蔽性を有する積層構造を示した。輻射反射層と結合層(ムライト)の作製プロセスにおいては、エアロゾルデポジション(AD)、化学気相蒸着(CVD)、前駆体水溶液合成を開発した。コーティング層の機能特性は、サブミクロンの多層膜構造の薄膜の弾性率、硬さ、残留応力などを計測する手法の提案・新たなコーティング信頼性評価技術を開発・それらの特性や応力が微視損傷の発生・進展挙動に及ぼす影響を検討し熱輻射反射機能と耐環境性能を兼ね備えた耐熱コーティング組織設計や材料選択に必要な力学特性の測定、評価に関する基盤を構築した。また本開発コーティングの適用拡大に寄与するとして国内での酸化物系 CMC 材料を開発した。

(3)今後の展開:

国内重工メーカーと実用化研究を開始しており、早期の社会実装を目指す。

○Report summary (English)

Principal investigator: Tokyo University of Technology professor Yutaka KAGAWA
R & D title: Study of thermal radiation control coating on reflection of thermal radiation energy

1. Purpose of R & D

The fuel efficiency of aeroengine has been improved by weight reduction and thermal resistant increment of the components so as to reduce CO₂ emissions of airplanes. Therefore, the light and high temperature tolerance CMCs such as SiC/SiC were recently implemented and the implementation has been expanding. This project is towards development of thermal radiation managing coatings of the CMCs so that heat flux onto the components could be cut with contributing low CO₂ emissions and energy savings.

2. Outline of R & D

(1) Contents:

Periodic layered films that are composed of two kinds of heat-resistant oxides with greatly different refractive indices are expected to have the electromagnetic wave reflection properties so as to reduce the heat flux onto the films. The suitable laminate structure has been designed and the electromagnetic wave reflection properties of the films are precisely evaluated and analyzed by calculations and experiments. The new oxide ceramics that have excellent durability at high temperature are explored. And the coating processes are also developed.

(2) Achievements:

For developing a multilayer coating with high reflectance of radiant heat as well as the environmental durability, the performance evaluation of the multilayer was carried out. For the evaluation of reflectance, a simulation method based on the Maxwell's equations was developed by taking account of interaction between the radiation and the coating materials. The method of the simulation will provide a key tool for evaluation of multilayer coating. It can be applied to an actual multilayer with non-flat surface or interfaces, with pores or crystal grains in the layer.

Periodic layered films composed of Y₂Ti₂O₇ (high-refractive index) and Al₂O₃ (low-refractive index) was developed mainly by aero-sol deposition techniques. The electromagnetic wave reflection properties of the films were precisely evaluated and analyzed by calculations and experiments. As a result, the process of the films that can be used below 1000 °C was established and the radiation reflection of electromagnetic waves due to the periodic layered structure was demonstrated. In addition, the new material combination and process guideline were presented for stabilizing the periodic layered structure in the usage environments over 1000 °C.

The aqueous TiO₂, Y₂O₃, Al₂O₃, SiO₂, and mullite precursor solutions were developed. And the solutions are very valuable as starting materials and coating materials, because they have higher metal content and lower carbon dioxide emission on firing to metal oxide.

The manufacturing conditions of oxide CMC (Ceramics matrix composites) using commercially available alumina fibers were established. The matrix was formed by a slurry infiltration method using a water solvent and alumina-based powders. By optimizing the viscosity of the slurry and the infiltration conditions, the matrix packing between the fibers was improved and a matrix with few voids was formed.

Evaluation techniques to measure mechanical properties and strain/stress distribution were developed for coatings with a thickness of several tens to hundreds nanometers. Nanoindentation method was applied to the measurement of mechanical properties and evaluation of coating fracture.

(3) Future developments:

Implementation activity of the thermal radiation control coating on reflection of thermal radiation energy has been started.