

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製」
課題名「自己治癒機能を有する
革新的セラミックスタービン材料の開発」

終了報告書

研究開発期間 平成24年10月～平成31年3月

研究開発代表者:中尾 航
(横浜国立大学大学院工学研究院、
教授)

○報告書要約（和文）

研究開発代表研究者：横浜国立大学 教授 中尾 航

研究開発課題名：自己治癒性を有する革新的セラミックスタービン材料開発の研究

1.研究開発の目的

本研究で取り組む技術課題は、ジェットエンジンの燃費改善手法を燃焼ガス温度の高温化から部材の軽量化、無冷却化へのゲームチェンジを促し、極めて高効率なジェットエンジンを実現する実用的な革新的耐熱軽量材料を創出することである。この目的を達成する材料として、壊れにくくかつ自己治癒性を有する新たな長繊維強化セラミックスを提案する。提案した長繊維強化自己治癒セラミックスの自己治癒性、強度をジェットエンジンタービン翼に適した特性へと改善を行う。さらに、新たな力学機能として発現した自己治癒性による構造健全性を定量的に評価する技術の開発を行う。

2.研究開発の概要

(1)内容:

自己治癒機能を発現する物質である自己治癒エージェント、材料全体の耐久性を決定する母材、さらに、機械特性に直結する shFRC 内の微構造をマイクロ-マクロを通じたマルチスケールの視点から実験的に評価し、有限要素法による支援を受け解析を行った。

さらに、shFRC で生じるき裂進展と自己治癒の競合関係に着目し、自己治癒性を反映した新しい材料強度基準を提案し、その評価手法の確立を行った。同時に、shFRC の微視構造の不均一性決定因子と微視構造と各特性の決定因子の関連を解明するための有限要素法プロトコルを構築した。

(2)成果:

TiSi₂ を SiC 自己治癒エージェントの反応活性剤として複合した界面層を用いることで、中圧タービン翼用材料として要求される強度(>137MPa@1200°C)と自己治癒能力(10 分以内での完全強度回復@1000°C)を有するプロトタイプ長繊維強化自己治癒セラミックスを開発した。また、Ti 系炭化物が低温用自己治癒エージェントとして有望なことを見出し、この知見を利用することで、低圧タービン翼用材料として要求される強度(>137MPa@1000°C)と自己治癒能力(10 分以内での完全強度回復@600°C)を有するプロトタイプ長繊維強化自己治癒セラミックスを開発した。

shFRC で生じるき裂進展と自己治癒の競合関係を高温での単軸引張クリープ試験で再現し、その伸び速度の経時変化を低応力側、高応力側双方から解析することで、自己治癒限界応力と定義した新たな材料強度基準を決定した。セラミックス中の微視構造の不均一性と強度分布の相関を評価および自己治癒性を力学挙動特性として表現する有限要素法プロトコルを開発し、き裂進展と自己治癒の競合関係を有限要素法解析で解析することに成功した。

(3)今後の展開:

本研究から得られた成果は、自己治癒セラミックスを設計するための基礎技術を体系化することとなった。このため、自己治癒セラミックスをジェットエンジン以外の様々な用途への応用展開することにつながった。

さらに、本研究で世界に先駆けて導入した自己治癒材料中の微構造の偏在化とその最適化手法は、その他の材料系においても、重要な自己治癒材料設計指針となった。この材料設計指針を活用してその他高温構造用セラミックス、アスファルト、高強度鋼に自己治癒機能を付与した新素材開発を開始することとなった。

○Report summary (English)

Principal investigator: Wataru NAKAO University professor Yokohama National University

R & D title: Study of development of innovative ceramics turbine materials with self-healing property

1. Purpose of R & D

The technical issue to be addressed in this research is a practical innovation that realizes an extremely high-efficiency jet engine by promoting the game change of the fuel efficiency improvement method of the jet engine from the increase of the combustion gas temperature to the weight reduction of members and no cooling. As advanced ultra high heat resistant and lightweight material to achieve this purpose, a new continuous-fiber-reinforced ceramic with self-healing property will be proposed. We will improve the self-healing property and strength of the proposed continuous-fiber-reinforced self-healing ceramics (shFRC) to properties suitable for jet engine turbine blades. Furthermore, we will develop a technology to quantitatively evaluate the structural integrity due to self-healing, which has emerged as a new strength criteria.

2. Outline of R & D

(1) Contents:

The self-healing agent, which is a substance that expresses the self-healing function, the base material that determines the durability of the entire material, and the microstructure in shFRC that is directly linked to the mechanical properties were investigated with the aid of the finite element method from a multi-scale perspective.

Furthermore, focusing on the competitive relationship between crack growth and self-healing in shFRC, we proposed a new strength criteria that reflects self-healing property, and established the evaluation method. At the same time, we constructed a finite element method protocol to elucidate the relationship between the microstructure heterogeneity determinants of shFRC and the determinants of each structure and microstructure.

(2) Achievements:

By using an interfacial layer composed of TiSi_2 as a reaction activator of a SiC self-healing agent, we have developed a prototype shFRC which has the strength ($> 137\text{MPa @ } 1200^\circ\text{C}$), and self-healing ability (full strength recovery within 10 min. @ 1000°C) required as a material for medium-pressure turbine blades. By using our new finding that Ti-based carbide is promising as a self-healing agent for low temperature, the other type of prototype shFRC with enough refractoriness ($> 137\text{MPa @ } 1000^\circ\text{C}$) and self-healing ability (full strength recovery at 600°C within 10 min.) has been developed, where these required conditions are suitable for low-pressure turbine blades.

By reproducing the competitive relationship between crack growth and self-healing that occurs in shFRC in a uniaxial tensile creep test at high temperature, and analyzing the change over time in the elongation rate from both the low stress side and the high stress side, the threshold stress for self-healing was determined at high temperatures. We developed a finite element method protocol that evaluates the correlation between microstructure nonuniformity and strength distribution in ceramics and expresses self-healing as a mechanical hand property, and analyzes the competitive relationship between crack growth and self-healing by the finite element method.

(3) Future developments:

Using the obtained and systematized basic technologies to design self-healing ceramics from this study, we started new R&D of self-healing ceramics for various applications other than jet engines.

Furthermore, the uneven distribution of microstructures in self-healing materials and the optimization method introduced in this research for the first time in the world became an important self-healing material design guideline in other material systems. Utilizing this material design guide, we have begun to develop new materials that add self-healing function to other high temperature structural ceramics, asphalt, and high strength steel.