

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25249003

研究課題名(和文) 熱流体/構造/材料が連成する熱疲労破損現象解明と工業的展開

研究課題名(英文) Mechanics and Mechanisms of Thermo-Mechanical Fatigue Failure Relevant to Materials, Structures and Thermal Field.

研究代表者

岡崎 正和 (OKAZAKI, Masakazu)

長岡技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00134974

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 26,000,000円

研究成果の概要(和文)：熱源温度変動誘起高サイクル熱疲労負荷と低サイクル熱疲労負荷とが重畳する際の高温構造物の強度を評価できる新試験装置を独自開発した上で、そこで起こり得る幾つかの特殊な破損現象を抽出し、現象に係る事故を防止する手法を力学的観点から探求した。研究に際しては高温勾配下に曝されるが故に上記現象の顕在化が想定される部材(超高温で稼働するガスタービン用動静翼用遮熱コーティング材)と部位(冷却孔周囲)に特に注目し、事故防止のための手法を既存のクリアエリアを含めて三次元マップとして提示した。

研究成果の概要(英文)：A new testing system has been developed which enables us to apply mechanical loadings superimposed with thermal loadings to the superalloy specimens with cooling systems and thermal barrier coatings (TBCs) in a simulated combustion gas environment. Some specific thermo-mechanical fatigue (TMF) and creep tests were carried out to understand the failure features under the significant thermal gradient (TG) conditions. Special focus was also put on an interaction between low-cycle and high-cycle fatigue (LCF/HCF) loadings. The experimental works clearly demonstrated that some specific behaviors were got pronounced in the superalloy substrate and the TBCs under a significant TG. The additional damages were accounted when the TG was coupled with the influence of the DBTT of the bond coat. Mechanistic discussion was also made to condense these knowledge into engineering damage map for life assessment of advanced gas turbine blades subjected to more significant TG conditions.

研究分野：高熱材料強度学

キーワード：熱機械的疲労 熱/温度場/力学場の連成 熱源温度場変動誘起熱応力 ガスタービン 超高温部材 遮熱コーティング 分散エネルギーと負荷変動 損傷と損傷マップ

1. 研究開始当初の背景

ガスタービン発電や核融合炉など極限エネルギー機器開発の分野では、高温化と冷却という物理的に矛盾する機能を両立させ、しかも長時間の寿命を保証する工学・技術が求められている。ここで使用される構造部材は工業的に大別して二種類の熱疲労損傷を受ける。一つは起動・停止時の系統機器全体の温度変化に誘起された長周期熱応力の繰返しによる熱疲労損傷であり（通称、低サイクル熱疲労損傷）、他方は熱源そのものの温度変動、あるいは、高温/低温媒体の混相に誘起された短周期の熱疲労損傷である（ここでは、「高サイクル熱疲労破損」と呼ぶ）。研究開始当初、前者に対する設計上の基準は年々整備されている一方で、後者の因子は近未来的に潜在的な要注意因子になると思われる、実際、顕在化している工業製品もみられた。例えば、ガスタービン動静翼や燃焼器、自動車エンジン部の排気管集合部（マニホールド）、宇宙産業のロケットエンジン燃焼部の構造材料などが典型的な例である一方で、それを防ぐ評価指針は整備途上であった。

例えば、発電プラントあるいは航空機の推進装置として広く利用されているガスタービンにおいて、その性能を特徴づける部材がガスタービン動静翼材であるが、内部に精密な冷却構造を持ち、かつ高度に微視的構造が制御されたNi基超合金が使用され、さらにその表面を合金層とセラミック層からなる遮熱コーティングによって被覆されたTBC部材が使用される。TBC部材の損傷は、それら部材が特殊な材料系であることに加えて、その損傷が機械的負荷、熱、流体、など多くの環境的の因子により支配され、部材の破損に係る適切なリスクマネジメントが極めて重要で、ここでは、燃焼ガスの高温化と冷却による構造体の低温化という矛盾する技術の両立が求められる。この状況は現段階でも変わらない。

2. 研究の目的

熱源温度変動誘起高サイクル熱疲労負荷と低サイクル熱疲労負荷とが重畳する際の高温構造物の強度を評価できる新試験装置を独自開発した上で、そこで起こり得る幾つかの特殊な破損現象を抽出し、現象に係る事故を防止する手法を力学的観点から探求し、事故防止のための手法を既存のクリアテリアを含めて三次元マップとして提示することを目的とした。

3. 研究の方法

本課題は、学術的な方法論や情報を提示するのみならず、本課題に関連する工業的応用を含めることを大方針とし、以下の項目を実験的、解析的に遂行した。対象はガスタービン用超高温部材とした。

(1) 高サイクル熱疲労負荷と低サイクル熱疲労負荷とが重畳する重要部位として超合金製部材中の冷却孔周囲の特殊な破損現象

を解明すること、

(2) 遮熱コーティングという超高温下で機能する複合構造体の各要素の力学的特性を評価した上で、低サイクル熱疲労に対する構造信頼的特性の知見を得ること、

(3) 熱源温度変動誘起高サイクル熱疲労負荷と低サイクル熱疲労負荷とが重畳する際の高温構造物の強度を評価できる新試験装置を開発すること、

(4) 開発装置により上記環境下でのみ起こりえる特殊な破損事象を再現した上で、その防止手段と手法、及び、損傷の検出手法を示すこと、

(5) 温度勾配という共通の工学的因子を構造体の信頼性確保に取り込む新規手法をシミュレーション技術を介して提示すること。

(6) 近年の工業的関連課題に対する本研究の適用性と応用についても提示すること。

これらの具体的手法は、各項目の成果とともに、「4. 研究成果」の章にて記述する。

4. 研究成果

(1) 高サイクル熱疲労負荷と低サイクル熱疲労負荷とが重畳する重要部位として超合金製部材中の冷却孔周囲の特殊な破損現象を解明することに対して得られた知見の概要（発表論文①②④⑤⑥⑧⑩⑫による）：

①冷却構造をモデル化した形状の試験片を用い、試験片内に温度勾配をもたせようえて、稼働時の遠心力負荷を重畳させることができる試験システムを独自開発した(図1(a))。

②この試験システムを用いて、Ni基超合金製冷却孔模擬試験片に対してクリープ実験を実施し、冷却孔周辺の破損挙動を力学的観点から調査した。それにより、模擬冷却孔から発生する微小き裂の初期成長過程においては、従来の実験室レベルで評価されてきた巨視き裂の挙動とは大きく異なる挙動を示しながら成長すること、それには、小規模クリープ条件から大規模クリープ条件に遷移する際の非線形破壊力学量の変化特性と、材料微細構造的因子が深く関与していることを示した。また、温度勾配を有する場合のクリープき裂進展速度は、それが無いときに比べて、有意な加速現象を示すことを実験的に示した(図1(b))。

③試験システムを用いて、Ni基超合金製冷却孔模擬試験片に対してクリープ疲労実験も実施し、冷却孔周辺ではクリープと同様、従来の実験室レベルで評価されてきた巨視き裂の挙動とは大きく異なる挙動を示し、ここでも局所熱応力、ならびに、小規模クリープ条件から大規模クリープ条件に遷移する際の非線形破壊力学量の変化特性、材料微細構造的因子が深く関与していることを示した。(図1(b),(c))。

(2) 「遮熱コーティングという超高温下で機能する複合構造体の各要素の力学的特性を評価した上で、低サイクル熱疲労(TMF)に対

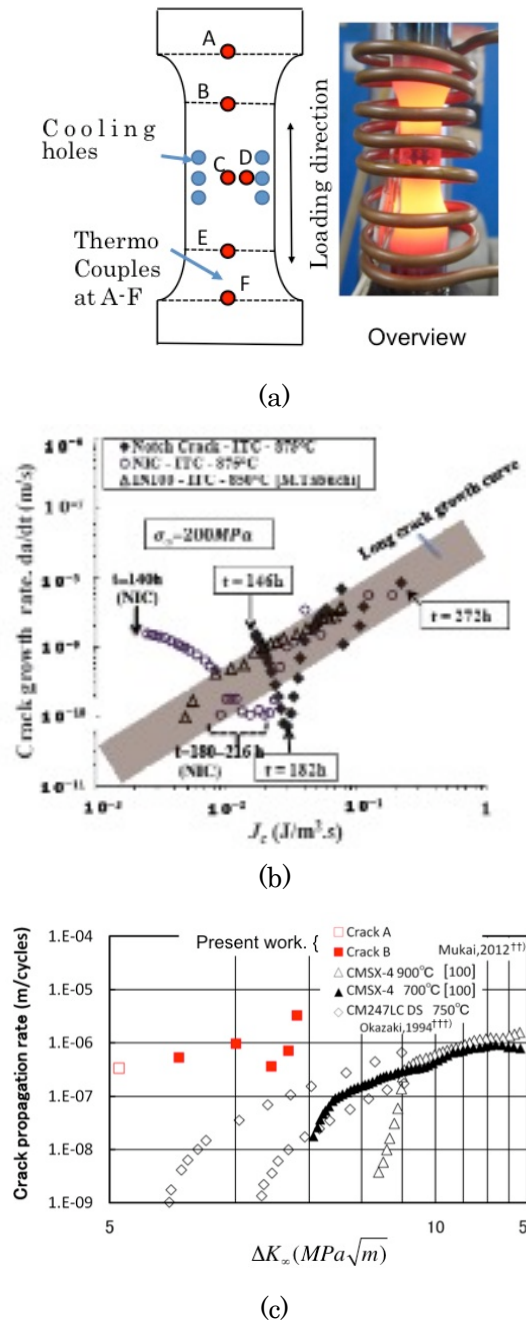


図1 温度勾配のある冷却孔周囲で留意すべき破損挙動

する構造信頼的特性の知見を得ること」に対して得られた知見の概要（発表論文②③⑦による）：
 ①Ni 基超合金を基材とした TBCs 試験片を対象とし、温度/機械的ひずみ波形の位相を変数とした熱機械的疲労試験(TMF)を行い、位相条件が破損挙動に及ぼす影響を調査した。その結果、本研究における TBC 試験片の LCF, TMF 破損過程においては種々の形態のき裂が発生する一方で、CoNiCrAlY ボンドコートに入るき裂の密度には試験条件依存性が特に強いことを実験的に示した。例えば、500°C の LCF, 及び、out-of-phase 下の TMF では、ボンドコートに入るき裂の密度が特に高く、

これが基材中へと伝ばする確率も特に高かった。

②in-phase と out-of-phase 下の TBC 試験片の TMF 寿命はほぼ同等である。従来、基材における TMF と LCF の寿命の相関性は、[TMF の寿命]=[TMF の最高温度条件における LCF の LCF 試験から熱疲労寿命を予測するには限界があることを示すものである。一方、引張負荷が加わるときの温度条件の下における寿命]とする知見が多い中であって、この特徴はコーティング材の TMF 寿命を一定温度下の基材単体との相対的関連性に注目すると、in-phase 下の TBC 試験片の寿命は 900°C における基材単体のそれよりも長くなっているのに対し、out-of-phase 下の場合には 500°C における基材単体のそれよりも明らかに短くなっていた。このことは TMF 寿命に与える影響は、引張負荷が加わる際の温度条件に強く依存すること、ひいては、ボンドコートの機械的性質である延性/脆性遷移挙動（温度）が一連の挙動に深く関与していることを強く示唆するものであった。

③さらに、TMF 寿命特性に及ぼす負荷周波数の影響を調査した。それにより、非定常熱サイクルを受けるセラミックストップコートの残存密着強度は定常熱サイクルの時と比べて有意に低下し、残存密着強度の熱サイクル数に対する変化挙動も定常/非定常熱サイクルの場合と異なること、定常 TMF 負荷下における遮熱コーティング試験片の TMF

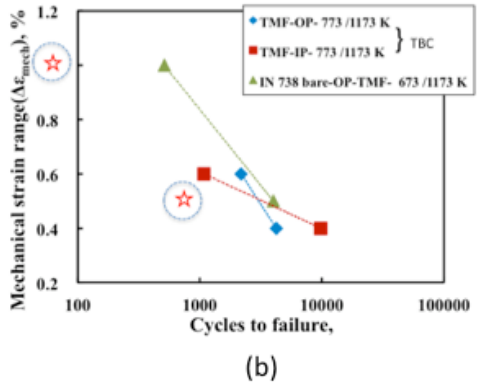
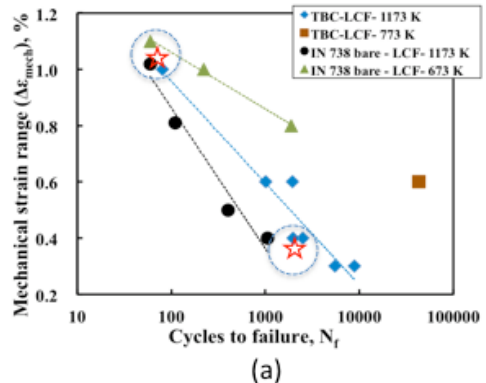


図2 TBC の TMF 寿命と高サイクル熱疲労負荷の重畳効果

低下することはない一方で、非定常 TMF 負荷下の寿命は定常 TMF 負荷に比べて短くな寿命は、基材単体のそれと比較して、概してり、また試験片内部でみられる損傷（き裂）の形態も定常 TMF 負荷と非定常 TMF 負荷とで相違がみられること、故に、高サイクル熱破損の挙動は、今後大いに留意すべき破損事象になることを明らかにした。

(3) 「熱源温度変動誘起高サイクル熱疲労負荷と低サイクル熱疲労負荷とが重畳する際の高温構造物の強度を評価できる新試験装置を開発すること」に対して得られた知見の概要（発表論文⑪⑭による）：

①熱源温度変動誘起高サイクル熱疲労負荷と低サイクル熱疲労負荷とが重畳する際の高温構造物の強度を評価できる新試験装置を開発した。その模式図を図3に示した。この装置はかん型燃焼器、燃焼ガスを利用するためのテストセクション配管系および電気油圧サーボ式疲労試験機を組み合わせたものである。本装置は燃焼器によって作り出された燃焼ガス雰囲気中で、疲労試験機にセットされた試験片に対して力学的負荷試験が実施できるように設計したものであり、燃焼ガス雰囲気と力学的負荷形態を目的に応じて制御できる。

燃焼雰囲気を再現するために用いた燃焼器は都市ガスを燃料とするかん型燃焼器（丸和電機（株）製、最高温度：1500℃、最大燃焼ガス流速：50 m/s 以上）で、試験部入口において 400～1500℃の燃焼ガスを安定的に供給し、流れ場に応じた加熱状態の再現が可能となる。また、試験部入口温度（Test Section Inlet Temperature：TSIT）を制御対象として、一定温度の運転のほかプログラムによる任意温度波形の再現も可能である。

燃焼ガスを燃焼器出口から試験片まで導くため、図3に示すように試験部配管を三段階の配管で構成した。これらは全てステンレス鋼製の配管で流路内壁にはセラミックファイバー製の断熱材を施工している。燃焼器出口に接続される第一段目は計測機器の設置などのために設けた配管である。第二段目の配管は疲労試験機を用いて力学的負荷試験を行うため部分であり試験片を取付けるために、流路の隔壁が一部脱着式の構造とした。試験片取付け部の流路は40×40 mmの正方形断面となっている。第三段目は試験部を流れた燃焼ガスを排気チャンバへと導くための配管である。全ての試験部配管を燃焼ガス流れ方向に自在に可動する支持機構を介して架台に取付けることで、試験中に生じる配管の熱変形を吸収する構造とした。

力学的負荷試験装置として、小型の電気油圧サーボ式疲労試験機（MTS systems corporation 製、容量 10 kN）を第二段目の配管の位置に設置した。この試験機のアクチュエータは試験片治具と配管シール部を介して試験片と接続させており、静的あるいは

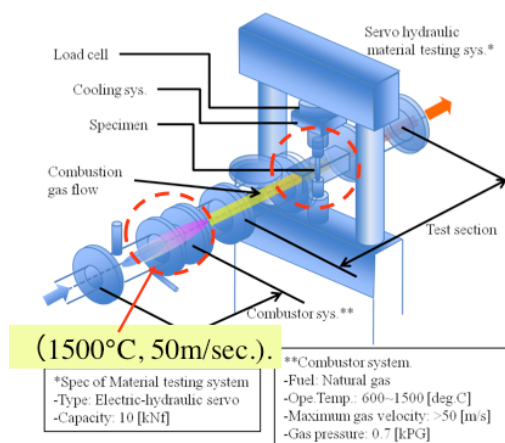


図3 独自開発した実燃焼場下での低サイクル熱疲労負荷と高サイクル熱疲労負荷の再現装置

繰返し負荷を加えられる構造としている。

(4) 「開発装置により上記環境下でのみ起こりえる特殊な破損事象を再現した上で、その防止手段と手法、及び、損傷の検出手法を示すこと」に対して得られた知見の概要（発表論文④⑥⑦⑪⑬⑭による）：

ガスタービン高温部材を模擬した超合金基材 TBC 試験片に対して、再現燃焼雰囲気におけるクリープ試験（TGC 試験）を実施した結果について述べてきた。その結果の特徴は次のように整理した。

① TGC 試験を実施した試験片のうち、クリープ試験応力が高いもの（100, 170 MPa）では、TBC 表面にき裂が観察された。き裂は主として、負荷軸方向に開口する（負荷軸と垂直方向に伸びる）き裂であり、試験サイクル数の増加にともない、き裂開口量はより大きく、き裂長さはより長く成長するとともに、新たなき裂の発生も認められる。

② 試験片の負荷軸方向の非弾性変形量を測定したところ、クリープ試験応力が高いものほど、変形の時間変化が大きい（変形速度が高い）ことがわかった。また通常のクリープ試験と比較すると、TGC 試験の方が2～3倍高い変形速度を示した。

③各試験片の断面観察を行なったところ、表面からは損傷が観察されない試験片であっても、TBC 皮膜内部のき裂や、皮膜の界面はく離といった損傷が生じているものがあつ

た。また超合金基材には、顕著な損傷は認められなかった。

④TBC 皮膜内部で負荷軸に対して垂直方向に伸びるき裂の密度を測定したところ、燃焼ガスの下流側（低温側）に面していた TBC 皮膜の方が上流側（高温側）に面していた TBC 皮膜よりもき裂密度が高い。

(5) 「温度勾配という共通の工学的因子を構造体の信頼性確保に取り込む新規手法をシミュレーション技術を紹介して提示すること」に対して得られた知見の概要（発表論文②④⑧⑨⑩による）：

①大きな温度勾配を有する高温環境下で外負荷を受ける場合の部材の稼働状況をシミュレートしたクリープ変形解析モデルを開発した。このモデルにより、有意な温度勾配を有する部材の変形において、

②高温部位では弾性的緩和を起こしつつクリープ変形が進行するのに対し、低温部位では応力の割り増し現象が生じ、それが時間とともに顕著になること、

③各部位の累積クリープひずみは時間とともに増加していくが、低温側でその増加率が高いこと、および、高温側と低温側の累積クリープひずみの相対的な大小関係は、実稼働時間に依存して異なること

④これらの効果には、温度勾配に依存して発生する熱応力が本質的な役割を果たし、温度分布形状にも大きく影響されること、

⑤部材の損傷が高温側と低温側のいずれの部位からも起こり得るかは、温度勾配とそれによって生じる熱応力のレベルと外力による応力のレベルとの相対比により変わること、

⑥これらの知見は既述の(2)-(4)によって得られた知見と合致する。

(6) 「近年の工業的関連課題に対する本研究の適用性と応用についても提示すること。」に対して得られた知見の概要（発表論文⑧⑨⑩⑬による）：

極く最近では、遮熱コーティングに関連した燃料由来の無機質燃焼生成物（CMAS と呼ばれている）に起因した環境強度的熱疲労破損も顕在化しつつある背景に鑑み、CMAS が遮熱コーティングの高温強度に与える熱的・構造的・材料的影響を実験・解析の両面から個別に抽出した。それによれば、

①TBC 試験片に選択 CMAS モデル材を物理的に付着させて高温曝露を施すことにより、トップコート内部への CMAS の浸入という物理的な現象に加えて、CMAS 中へのトップコート成分の溶出とそれによるトップコートの形態変化という化学的な反応の再現が可能であった。これらは、実機において実際に問題視されている損傷に近いものであったこと。

②トップコート内部へ CMAS が浸入する下限温度と CMAS モデルパウダーの熔融開始温度はほぼ一致したことから、CMAS 損傷の物理

的的第一要因は CMAS の熔融によるものであること、および、CMAS 中へのトップコートの溶出およびトップコートの形態変化と相変態もみられたことから、材料学的側面からみて CMAS 損傷は CMAS 材とトップコート材の反応が関与していること、

③CMAS 損傷は、トップコート内部への CMAS の物理的浸入、CMAS 中へのトップコートの溶出、さらにはトップコートの形態変化と相変態を引き起こす。また力学的には、トップコート自身のじん性の低下、さらには層間密着性の低下を引き起こし、最終的に相変態誘起の内部応力の助長によってトップコートをはく離を促進させることが示され、

④本研究で一貫して注目している高サイクルと低サイクルが重畳する下では、CMAS により特徴的な形態の材料強度学的破損（相変態、トップコート自身のじん性低下、層間密着性の低下など）などが特に顕在化する可能性が高いことを明らかにした（図 4）。

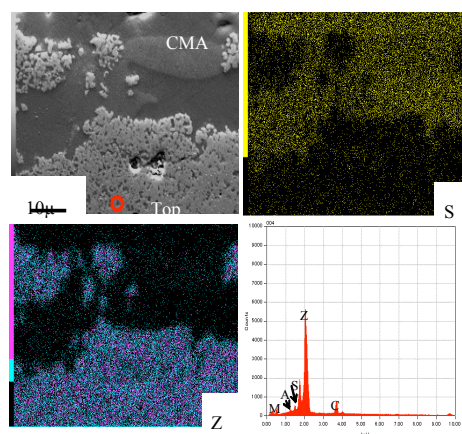


図 4 遮熱コーティング CMAS 損傷と熱サイクル

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 14 件）

①Rajivgandhi Subramanian, S. Yamagishi, M. Okazaki, Small Creep Crack Growth Interacting with Microstructural and Mechanical Factors in a Polycrystalline Ni-Based Superalloy, Transactions of the Indian Institute of Metals, 査読有, 2016, pp 1-7

DOI: 10.1007/s12666-015-0802-7

②Subramanian Rajivgandhi, Alejandro, Yamagishi, Okazaki, “Small Crack Growth Behaviors of A polycrystalline Ni- based Superalloy under Temperature Gradient Creep Condition” Mechanical Engineering Letters, 査読有, Vol.1 ,2015, DOI: 10.1299/mel.15-00461

③Subramanian Rajivgandhi, Yuzuru Mori, S. Yamagishi and M. Okazaki, “Thermo-mechanical Fatigue Failure of Thermal Barrier

Coated Superalloy Specimen”, Metallurgical and Materials Transactions A ; 査読有, 46(9): 2015, pp.3999-4012, DOI:10.1007/s11661-015-2996-z

④M. Okazaki, S. Yamagishi, Muzvidziwa Milton, Masaru Sekihara “Small Crack Propagation Behavior during A Thermo-Mechanical Creep-Fatigue Loading of Ni-Based Superalloy Specimen under A Non-Uniformly Distributed Temperature Condition.” Materials at High Temperatures, 査読有, Vol. 32, 2015, pp. 293-297, DOI:http://dx.doi.org/10.1179/0960340914Z.00000000071

⑤Yasuhiro Mukai, Hiroyuki Kagawa and M. Okazaki “Finite Element Analysis on Crack Tip Deformation Behavior under Mode-II Loading in Single Crystal Superalloy” Key Engineering Materials, 査読有, vol.665, 2015, pp.281-284 DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.665.281

⑥山岸郷志, S. Rajivgandhi, 岡崎正和, 温度こう配を有する高温構造部材の熱応力緩和とクリープ変形に関する一検討, 日本機械学会論文集, 査読有, Vol.81, No.823, 2015

⑦S. YAMAGISHI, S. Rajivgandhi and M. OKAZAKI, “Approach on creep deformation and thermal stress state of a uniformly deformed high temperature component under a graded temperature condition”, Mech. Engg. Journal, 査読有, 2015, DOI: 10.1299/transjsme.2014smm

⑧向井康博, 香川裕之, 阪口基己, 岡崎正和 「Ni基単結晶超合金のき裂先端変形挙動に及ぼす γ/γ' 複合組織の影響」材料, 査読有, 第64巻 第2号, 2014, pp. 120-127.

⑨林勇貴・山岸郷志・岡崎正和, 無機質燃焼生成物による遮熱コーティングの損傷発達挙動、材料, 査読有, 第64巻, 2014, pp.134-139

⑩向井康博, 香川裕之, 阪口基己, 岡崎正和 「Ni 基単結晶超合金 CMSX-4 の熱機械疲労き裂進展挙動の評価」日本機械学会論文集, 査読有, 第80巻, 第818号, 2014 DOI: 10.1299/transjsme.2014smm0294

⑪山岸郷志, Subramanian Rajivgandhi, 岡崎正和 「温度勾配を有する高温構造材料のクリープ変形およびそれに伴う損傷の基礎的検討」平成26年5月 日本機械学会論文集, 査読有, 第80巻 第813号, 2014, DOI:10.1299/transjsme.2014smm0110

⑫Milton MUZVIDZIWA, M. Okazaki, S. YAMAGISHI and Masahiro SEINO, “Local fatigue crack propagation behavior of a two-pass friction stir welded 6063-T5 aluminum alloy”, Mechanical Engineering Journal, 査読有, Vol.1 No.62014, pp.1.-9

⑬山岸郷志, 岡崎正和, 池田創一, 深沼博隆 「静電容量の変化を援用した遮熱コーティング膜のはく離成長検出手法の検討」日本機

械学会論文集 A 編, 査読有, 第79巻 第801, 2014, pp.527-535.

⑭山岸郷志・岡崎正和・Subramanian Rajivgandhi・野村亮平・深沼博隆 ガスタービン燃焼再現雰囲気中での新材料試験システムの開発, 「材料」, 査読有, 第62巻, 2013, pp.143-148

〔学会発表〕 (計79件)

①M. OKAZAKI, Subramanian Rajivgandhi, S. YAMAGISHI “Small Creep Crack Growth Behavior Interacting with Microstructures in A Polycrystalline Ni-Based Superalloy” 7th International Conference on Creep, Fatigue and Creep-Fatigue Interaction (CF-7) 2016/01/ インド
ほか78件

〔図書〕 (計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://mcweb.nagaokaut.ac.jp/%7Eokazaki/>
<http://souran.nagaokaut.ac.jp/view?l=ja&u=31&i=j4&sm=name&sl=ja&sp=1>

(1) 研究代表者

岡崎 正和 (OKAZAKI, Masakazu)
長岡技術科学大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 00134974

(2) 研究分担者

阪口 基己 (SAKAGUCHI, Motoki)
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 60452083

山岸 郷志 (SYAMAGISHI, Satoshi)
長岡技術科学大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 20452089

(3) 連携研究者

なし

(4) 協力研究者

なし