

令和元年9月2日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02304

研究課題名(和文) 水素社会にむけた能動的熱応力活用による超高温高冷却能回転部材の『設計の窓』の探求

研究課題名(英文) Design Criteria of Ultra High Temperature Gas Turbine Components Based on Thermal Stresses: Towards the Future Hydrogen Societies.

研究代表者

岡崎 正和 (OKAZAKI, MASAKU)

長岡技術科学大学・工学研究科・教授

研究者番号：00134974

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 24,800,000円

研究成果の概要(和文)：持続可能な社会基盤構築という社会的要請に答えるため、水素利用ガスタービン発電システムなど、将来のエネルギーシステム構築のための材料強度学的設計指針を提示することを目的として一連の研究を実行した。関連する先取り型の工学的課題に関し、特に、超合金高温構造部材の熱疲労破損を最小限に抑え、かつ、寿命を延伸するための設計方針を提示することに成功した。本研究の知見をその他の近未来技術開拓にも資するため、化学蓄熱という新しい概念のエネルギー貯蔵・輸送システムに展開し、その基盤を構築するとともに、持続可能な社会基盤構築に資する機械工学的設計指針も提示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

次世代水素ガスタービンの開発のため、その近未来的破損防止の観点から、耐熱超合金と遮熱コーティング部材に係る低サイクル疲労/高サイクル熱疲労破損に対する破損を防止する方針をマップ化提示した。また、その際に想定される高サイクル熱応力誘起フレットング疲労破損を取り上げ、寿命因子を定量的に示した上で、材料学的な観点から従来のトラポロジー的損傷に対する新規解釈を与えた。さらに、化学蓄熱という新しいエネルギー貯蔵・輸送システムも設計・自作し、本研究を活かす材料強度学的新規知見を提示した。これら成果は、持続可能な社会基盤構築という大きな社会的要請に対する機械工学的指針の提示している。

研究成果の概要(英文)：Hydrogen is expected as future energy resource to reduce carbon emission in power generation via land-based gas turbine systems, as well as renewable energy systems. A critical issue concerned is how to manage the failure of gas turbine structures subjected to the high cycle thermo-mechanical fatigue (HC-TMF) loadings. This is also the case on introducing the renewable energies. In this work the following big topics have been studied in connection with HC-TMF failures: (1) Failures interacting with HC-TMF loadings in the advanced Ni-base superalloys; (2) Those of thermal barrier coatings (TBCs); (3) Fretting fatigue failures accelerated by HC-TMF loadings; and (4) A new chemical heat storage system to utilize wasted thermal energy. Through the work special attention was paid how to design the high temperature structure, previously preventing some potential failure modes. These findings can make contribution to achieve low carbon societies, as well as to get new academic knowledge.

研究分野：材料強度、耐熱材料、設計・信頼性、航空材料

キーワード：再生可能エネルギー 水素 構造信頼性 寿命予測と設計 高サイクル熱疲労 超高温耐熱材料 ガスタービン用コーティング 化学蓄熱

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

「持続可能な社会基盤構築」に向け、低炭素化社会の実現に対する学术界への要求は強い。そのための糸口として水素の利活用があげられ、水素を燃料としたガスタービン発電システムが期待されている。一方、従来の高効率ガスタービン発電の心臓部材である動翼材の開発にあたっては、単結晶超合金の採用、遮熱コーティングの採用と施工、インピンジメント冷却やフィルムクーリング等の複雑な冷却技術の採用により、耐熱構造材料の高温強度を支援する手法がとられてきた。水素利用ガスタービンシステムは将来技術であるが、金属材料をベースとし、水蒸気を介した強制冷却などの技術が最も有力と思われる。この工学手法による場合、構造部材内部にはこれまで以上に極めて大きな温度勾配が生ずることになる。大きな温度勾配とその高周波数での変動は、付加的な高サイクル熱応力を誘発するが、これに関連する破損は従前の設計では考慮されていなかった要素である。学術的には、構造、流体、燃焼場、力学場が連成する複合領域の課題となるため未解明な点が多く、高サイクル熱応力が連鎖的にもたらし得る破損を防止し、寿命を管理する方向の研究が求められていた。

### 2. 研究の目的

「研究当初の背景」欄で記載した「持続可能な社会基盤構築」という大きな社会的要請に答えるため、将来の水素利用ガスタービン発電システムで使用される高温構造体の材料強度学的設計指針を提示することを目的として一連の研究を実行した。すなわち、水素を燃焼させた際の火炎伝播速度がLNGを燃焼させたときに比べて遥かに高いことを念頭に入れると、材料強度的には、従来まで顕在化していなかった高周波数で変動する燃焼場に誘起された高サイクル熱応力への配慮と、その影響を前向きに考慮した高温部材設計指針が求められるようになるはずである。本研究では、この類の先取り型の工学的課題に対し、特に、高温構造金属材料そのものと遮熱コーティングを施した部材の熱疲労破損を最小限に抑え、かつ、寿命を予測するための基本設計方針を提示することを学術的目的とした。本研究の知見を、上記のような高サイクル熱疲労が顕在化する水素ガスタービン構造体以外の分野にも拡張展開するため、近未来的技術である「化学蓄熱」という新しい概念のエネルギー貯蔵・輸送システムに注目し、その新規分野においても高サイクル熱応力誘起破損を防止する策を事前に講じることによって、持続可能な社会基盤構築に資する機械工学的指針を提示することも目的とした。

### 3. 研究の方法

「研究の目的」欄で述べた目的に従い、次世代の水素ガスタービンに向けた耐熱構造体とコーティング部材、および、関連する近未来的構造要素を研究の主対象に取り上げ、それらが高温度勾配下で、かつ、熱源の温度変動と構造物の応答に関連する過渡的熱応力の繰返しを受ける際の破損と機構解明に注目して研究した。すなわち、(1)Ni基超合金、及び、(2)遮熱コーティング部材を対象として、低サイクル疲労/燃焼振動誘起高サイクル熱疲労の相互作用とそのときの寿命について、特に構造体の熱過渡応答とそれに対応して発生する熱応力の観点から定量的に調べ、それを工業会において使用しやすいように「設計の窓として図示化」する形で提示する方向を目指した。例えば、(2)の遮熱コーティング部材においては、CMASと呼ばれる燃焼生成物の堆積効果もあわせて、基材/セラミックトップコートの物性値（物理的及び機械的性質）からなる2次元マップとして提示することとした。これら研究と平行し、(3)燃焼振動誘起高サイクル熱応力が引き起こす現象としてフレット疲労破損を取り上げ、寿命特性に及ぼす単結晶合金の2次方位の影響、試験温度の影響、滑り方向の影響などを定量的に明らかにし、あわせて寿命推定法についても提案した。その際、従来トラバーボロジー的観点から単にフレット疲労と称されてきた損傷の実態が、材料学的な観点から見たときどのような実態の損傷であるかについての解釈を与えることに力点を置いた。さらに、以上の材料強度学的な知見を低炭素化社会に向けて社会展開するため、(4)「化学蓄熱」という新しい概念のエネルギー貯蔵・輸送システムについても研究し、そのための独自装置も設計・自作した。その際、「研究成果」の欄に記載するように、このシステムでは急速な熱エネルギー発生と貯蔵が可能となる一方で、構造的な観点からは熱過渡応答による熱サイクル熱応力への配慮が特に必要となると予見されたため、多孔体採用による熱応力緩和効果に注目し、破損防止をはかる方策とした。

### 4. 研究成果

「研究の方法」の欄で記載した研究項目(1)-(4)について得られた成果のあらましを、着眼点とともに記述する。

(1) Ni 基超合金の低サイクル疲労/燃焼振動誘起高サイクル熱疲労の相互作用について (雑誌論文①、②ほか雑誌論文 10 件による)

本研究では、はじめに、起動・停止を想定した定常的低サイクル熱機械的疲労 (LCF) 負荷の上に、冷却孔周りの温度勾配と熱変動により誘起される過渡的 (non-stationary) な高サイクル熱疲労 (HCF) 負荷が重畳された状態を模擬できる試験装置を試作した。これは対象課題をシミュレートできる世界で初めての試験装置と確信する。

つぎに、実環境模擬試験装置を用いて、LC-TMF の上にと高サイクル熱疲労負荷 (HCF) を重畳させた重畳負荷試験 (以下、LC/HCF-TMF) を実施した。実験により、過渡的な高サイクルの熱サイクルの重畳により、それが無い場合に比べ、定常的な TMF の微小き裂の進展速度は著しく加速することがあること (図 1(a))、ただし、その挙動には、準定常熱サイクル期間中に生ずる付加的な熱応力のレベルと、既に発生しているき裂の長さ強く依存することを実験的に示したうえで、その臨界基準を破壊力学的に提示した (図 1(b))。これらの知見をもとに、低サイクル熱機械的疲労負荷と高サイクル熱疲労負荷が重畳される条件の下で発生、伝ばする微小疲労き裂の成長速度について評価・予測する破壊力学的な方法を提示し、その妥当性を示した (図 1(b))。提示した方法によって予測されたき裂伝ば速度は実験結果とよく一致し、工業的に十部使用できるものと期待される。

注目している過渡的熱応力誘起破損は、それが燃焼ガスの温度変動と構造物の応答に関連するため、その応力レベルがそれほど高くなくとも高い周波数になるため、与えられた時間内での繰返し数が非常に多くなり、無視できない疲労損傷をもたらすと考えられる。この観点は、従来、積極的に考慮されてこなかった因子であるため、そこに特に注目しその効果を実証した点が本研究の特筆すべき成果である。

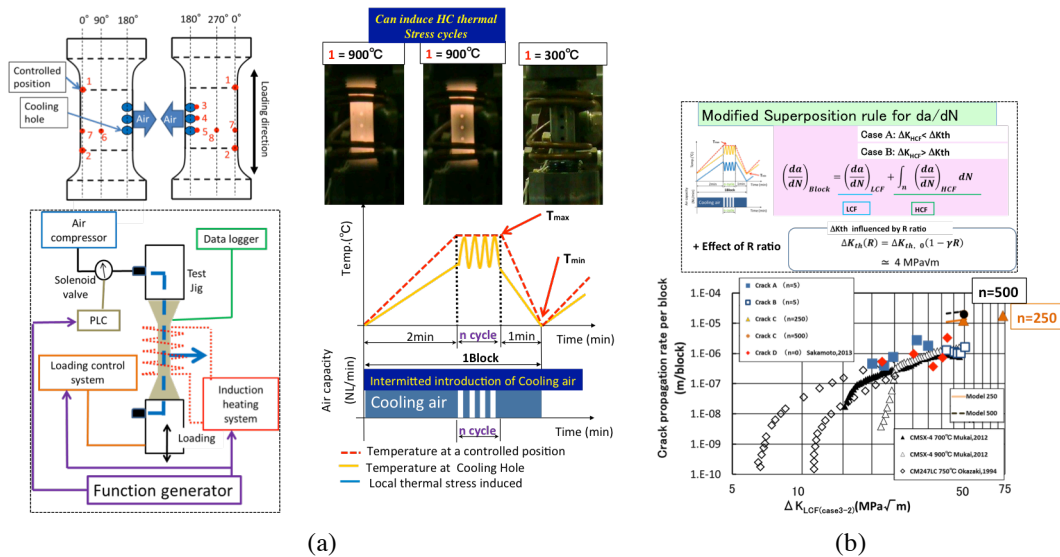


図 1 独自開発した高サイクル熱疲労負荷装置と LC/HCF-TMF の相互作用

(2) 遮熱コーティング部材の低サイクル疲労/燃焼振動誘起高熱サイクル疲労の相互作用について (雑誌論文③、④ほか雑誌論文 5 件による)

本研究では、まず、ガスタービンに頻繁で且つ急激な負荷変動が生じたとき、ガスタービン構造体、とりわけ、TBC 構造体の熱機械的疲労 (TMF) 寿命特性が負荷周波数によりどのように変化するかを調査・検討した。検討の際の負荷周波数は、金属基材/トップコート内部の温度がほぼ均一となって定常熱応力を考えれば十分な周波数と、金属基材/トップコート内部の温度こう配が時間とともに変化する準定常 (non-stationary) 状態となる周波数とした。その上で、後者の状態になった際、どのような熱的な構造応答と熱応力が生じているかを機械工学的に推定し、破損との関連性を調査した。さらに、これら知見を総合して、準定常状態での熱疲労破損を最小化するにはどのような対策を講じればよいかについての工学的提示を行った。

一連の研究により、定常熱サイクルによってセラミストップコートの密着強度は少なくとも熱サイクル数とともに増加したのに対し、熱過渡準定常熱サイクルの場合、残存密着強度は熱サイクル数とともに単調に減少した。この密着強度の違いは、加熱及び冷却過程の温度差に

起因する準定常熱応力の差によるものであることを示した。つぎに、TBC 試験片が熱サイクルに同期する形で力学的負荷も重畳して受ける場合、すなわち熱機械的疲労の寿命特性を調査・検討した。その結果を図 2(a)に示す。これより、定常 TMF 負荷下において、基材試験片とコーティング試験片の OP 条件に対する疲労寿命を比較すると同程度の寿命、コーティングによる TMF 寿命の低下はみられないのに対し、熱過渡準定常 TMF 負荷下で実施された試験片の破損寿命は定常 TMF 負荷下における破損寿命の約 1/2 から 1/3 程度と低下し、定常 TMF 負荷と準定常 TMF 負荷の重畳効果が有意となることを、破損モードの変化の観点からも定量的に示した。

さらに、熱過渡準定常 TMF に対する遮熱コーティング材の寿命を延伸させる方策について検討した。検討にあたっては、外部熱源の温度が  $\Delta T$  だけ変化したときに生じる過渡的熱応力に注目し、Bio 数 ( $Biot = hL/\lambda$ ,  $h$ : 熱伝達係数,  $\lambda$ : 熱伝導率,  $L$ : 層の厚さ) と無次元化時間 ( $F = \kappa t/r_2^2$ ;  $\kappa$ : 熱拡散率,  $t$ : 時間) の関数として計算結果の一般化をはかった(図 2(b))。これをベースに、コーティングを構成する各層の物性値をどのような方向で構造設計すれば良いかについて、トップコートの熱伝導率  $\lambda_c$  と熱膨張係数  $\alpha_c$  を変数とするマップとして提示した。

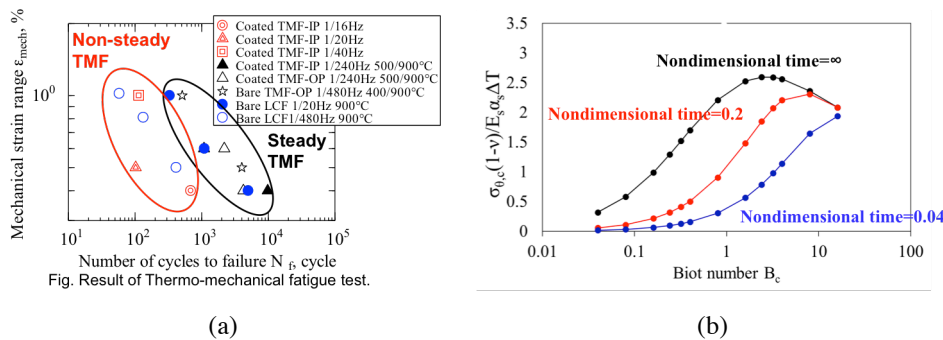


図 2 遮熱コーティング部材に於ける高サイクル熱疲労負荷による寿命の低下と熱過渡応答解析による寿命延伸方策

(3) 熱過渡応答に誘起された燃焼振動誘起フレットング疲労破損と寿命予測について (雑誌論文⑤、⑥、ほか 1 件、及び、学会発表⑦による)

外部熱源の温度変動と構造物の応答に関連した燃焼/熟工学/構造にまたがる複合領域の課題は燃焼振動を誘起する。燃焼振動は燃焼ガスの圧力変動そのものであることを鑑みると、燃焼ガスを受けて回転する動翼/ディスク咬み合い部もまたトラーボロジー的な接触状態の変化をもたらす。すなわち、フレットング疲労破損を加速させる。動翼/ディスク咬み合い部では、前節までに述べた準定常高サイクル熱応力も誘起されているから、これら部材間の接触面圧にも影響を与え、フレットング疲労破損に影響を及ぼすことが予見される。以上の背景に鑑み、本研究では、Ni 基超合金単結晶材の一次及び二次結晶方位、すべり方向、温度、相手側材料の組合せの影響などの因子がフレットング疲労寿命に及ぼす影響を実験的に調べた。

最初に、全面すべり状態下における Ni 基超合金単結晶材 CMSX-2、CMSX-4 の動摩擦係数 (COF) に及ぼす種々の因子 (表面結晶方位、すべり方向、接触/被接触材の組合わせ、試験温度) の影響を系統的に調べ、その要因と材料力学的因子との関連性を示した。特に、単結晶材のすべり方向に関連した COF の相違はこれまでの研究で見逃されてきた観点であり、その原因が力学的特性に関連する異方性とそれに依る接触部位周囲のバルジ変形の相違にあるとする解釈を提案できたことは意義深い。

つぎに、Ni 基超合金単結晶材のフレットング疲労破損に関し、その過程中的の接線力係数 (TFC) も実験的に測定しつつ、疲労強度に及ぼす種々の因子 (一次結晶方位、二次結晶方位、試験温度、相手側材料の組合わせ) の影響を系統的に調べた。それにより、特に、従来積極的に配慮されていなかった単結晶材の二次結晶方位の影響が無視できない程度に大きいことを示した(図 3(a))。これらの挙動に対し、結晶塑性を考慮した接触応力場の解析を行い、それらに基いて活動すべり系を予測した上で、き裂発生と伝ば過程における接触応力場の影響を予測する独自の手法も提案し、それが実験結果と合致する合理的な解釈を与えることを実証した。このモデルは TFC がフレットング疲労寿命と破損挙動に与える影響も定量的に予測できる手法となっている。さらに、EBSD 法と呼ばれる最近の結晶方位解析装置を用いて、接触応力場のナノレベルの材料解析を行い、



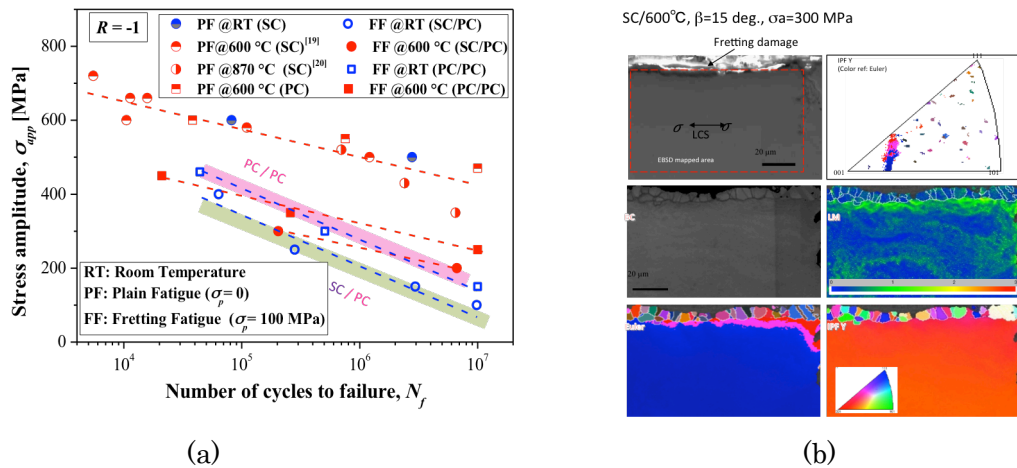


図3 単結晶超合金の高サイクル熱応力誘起フレット疲労破損と材料表面損傷

それにより、従来フレット損傷と漠然とよばれてきたトライボロジータ的な損傷は、材料学的には材料表面のナノ構造化を伴う損傷過程であることを示せたことは（図3）、今後の分野横断型の新学理構築に向けた重要な一歩になった。

(4) 「化学蓄熱」という新しいエネルギー貯蔵・輸送システムと熱応力の活用について（学会発表⑧、及び、雑誌論文1件、他による）

本研究で一貫して注目している工学的視点は、高速の熱負荷変動の際の准定常な熱応力が構造部品位与える影響を先取り型のテーマとして究明しておくことにある。この課題が顕在化する範囲はガスタービン構造体の分野に限らないため、研究の知見を「化学蓄熱」という新しい概念のエネルギー貯蔵・輸送システムの開発に向けて展開しておき、高周波数の熱サイクル誘起熱応力が連鎖的にもたらす破損を防止することによって、低炭素化社会実現という社会的責務を果たすための方針を機械工学的立場から提示することも目標とした。

最初に、化学反応を用いた蓄エネルギーシステムとして、本研究では、塩化カルシウム ( $\text{CaCl}_2$ ) - 水系可逆的化学反应を用いた化学蓄熱システムに注目し、その動作原理を模索した。この物質の潮解曲線、多種の水和物に変化する際の反応エンタルピーを調査した上で、反応を媒介する水の飽和蒸気のコントロールによって放熱と吸熱を起こさせ、これを排熱回収と放熱利用に応用する化学的蓄熱システムを設計・試作した。その上で、試作装置の性能を、(i) 発熱・吸熱速度、(ii) 単位体積当たりの熱出力、(iii) 蓄放と放熱における全熱量、(iv) それらの値を充填量から得られる理論発熱量で除すことによって計算される熱量基準反応率などの性能指標を介して評価した。その結果、特に、放熱サイクルにおける熱出力は反応開始直後（約20秒後）には最大値に達し、蓄熱サイクルにおいても反応速度は高く、本反応系の即応性（瞬時性）が示された。そしてまた、蓄熱・放熱サイクルが基本的に循環サイクルとして実現可能であることが示された。これを受け、熱出力と反応率に与える作動物質の充填重量の影響、実用使用可能な繰返しサイクル数と、繰返しに伴う性能の変化についても調査し、システムの最適設計の方向を模索した。その結果、システム性能に影響を及ぼす因子は、熱工学的には蓄熱材-充填容器-熱媒間の伝熱効率と蓄熱材充填層の蒸気移動抵抗であり、材料強度的には高サイクル熱疲労への配慮が最も重要であることも判明した。しかし、これら特性の両立は機械工学的にはトレードオフの関係にあるため、通常の反応器設計では実現が困難であるため、反応容器内に設置する熱交換器を多孔体とする構造とすることとした。この装置の変更による性能向上については、現在も研究途上である。

以上のように、本研究の(1)-(3)の研究項目に関連して得られた知見が化学蓄熱という新規分野にも広く適用展開できることを示せたことは大きな収穫であり、低炭素化社会の実現という社会的ニーズに答える今後の研究の新規展開にもつながった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計23件）

① [Aritra sarkar](#), [A.nagesha](#), [P.Parameswaran](#), [R.sandhya](#), [K.Laha](#), [M.Okazaki](#)  
Investigation of Cumulative Fatigue Damage Through Sequential Low Cycle Fatigue and High Cycle Fatigue Cycling at High Temperature for a Type 316LN Stainless

Steel:Life-Prediction Techniques and Associated Mechanisms, Metallurgical and Materials Transactions: Physical Metallurgy and Materials Science、査読有、48巻 3号、017、953-964

ISSN 1073-5623 doi:10.1007/s11661-016-3909-5

②與那国 優希、吉崎 伸、岡崎 正和、Ni 基超合金一方向凝固材の冷却孔周囲の微小き裂進展に及ぼす高サイクルと低サイクル疲労負荷の重畳効果、材料、査読有、68巻 2号、2019、p. 129-135

doi: <https://doi.org/10.2472/jsms.68.129>

③Yuki HAYASHI, Siddharth LOKACHARI, Satoshi YAMAGISHI, Masakazu OKAZAKI  
CMAS Damage in Thermal Barrier Coatings: An Exploration via Single Crystal Bulk YSZ Specimen, Mechanical Engineering Letters、査読有、2巻、16-00240号、2016、1-7.

④林 勇貴、Siddharth LOKACHARI, 山岸郷志、岡崎正和、深沼博隆  
大気プラズマ溶射遮熱コーティングの CMAS 損傷発達挙動に及ぼすトップコート溶射条件の影響、材料、査読有、2017、66巻 2号 80-85

⑤Balavenkatesh Rengaraj, Masakazu Okazaki, Masahiro Tosa, Seiji Kuroda,  
Crystallographic Aspects on Cyclic Sliding Friction Behavior of a Single Crystal Ni-base Superalloy, Mechanical Engineering Letters, 査読有、2巻 16-00552号、2016、1-7

⑥Balavenkatesh Rengaraj, Sotaro Baba, Masakazu Okazaki、Influence of Crystal Orientation on Cyclic Sliding Friction and Fretting Fatigue Behavior of Single Crystal Ni-base Superalloys、Superalloys2016、TMS、査読有、P395-404 20160912

他雑誌論文 15 件 (全て査読有)

[学会発表] (計 42 件)

⑦単結晶超合金の高温フレッティング疲労破損の局所解析と破損、Rengaraj Balavenkatesh、岡崎正和、山岸郷志、山崎泰広、日本材料学会 第 56 回高温強度シンポジウム、2018 年、P57-P61.

⑧化学反応を利用した廃熱利用システムの設計と視察、岡本剛秀、岡崎正和、日本機械学会講演論文集、No. 197-1、日本機械学会北陸信越支部 第 56 期総会・講演会、2019 年、P1-5.

ほか学会発表 40 件

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<https://souran.nagaokaut.ac.jp/view?l=ja&u=31&sm=&sl=&sp=>

<http://mcweb.Nagaokaut.ac.jp/~okazaki/>

<http://mcweb.nagaokaut.ac.jp/~okazaki/iamutHP/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：山岸郷志

ローマ字氏名：Yamagishi Satoshi

所属研究機関名：新潟工科大

部局名：工学部

職名：准教授

研究者番号 (8 桁) : 20452089

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。