

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 22 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2011

課題番号：21246022

研究課題名（和文） 応力場誘起拡散現象の新規展開による耐熱超合金のき裂・損傷補修

研究課題名（英文） Crack Repair in Heat Resisting Superalloys applying Stress Field Assisted Diffusion Phenomenon.

研究代表者

岡崎 正和 (OKAZAKI MASAKAZU)

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号：00134974

研究成果の概要（和文）：

本研究では、高付加価値で難補修材料であるNi 基超合金製の高温構造部材中に発生したき裂あるいは損傷を補修する手法開発のため、応力場に誘起された拡散現象（摩擦攪拌現象）と表面改質技術の応用によりそれが可能となることを実験的に示した上で、疲労き裂を実験室レベルで実際に補修し、提案手法が有効であること、及び最も効果を発揮する適用使条件を破壊力学的に検討し、これをマップとして提示した。

研究成果の概要（英文）：

This work has explored a new engineering method and process to repair the fatigue cracks in heat resisting Ni-based superalloys, combining the stress field assisted diffusion phenomenon and a micro-spark coatings. A series of the experimental works showed that the proposed method was very successful for the repair of the fatigue cracks which were artificially reproduced under the laboratory conditions. These results were summarized into a new damage map showing what in-service condition(s) is(are) more effective to which the proposed repair method is applied.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	12500000	3750000	16250000
2010 年度	7500000	2250000	9750000
2011 年度	5600000	1680000	7280000
年度			
年度			
総計	25600000	7680000	33280000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械材料・材料力学

キーワード：信頼性, 高温強度, 超合金, 疲労, き裂, コーティング, 損傷修復, 表面改質

1. 研究開始当初の背景

起動性能, 熱効率などの観点から, 産業用ガスタービンが次世代の主エネルギー機器になることは世界的動向である. ここで使用される結晶制御 Ni 基超合金部材は, 高価かつ高付加価値材料である一方で, それら材料を補修およびリコーティングする技術は現在も未だ途上にある. 一方, 申請の当時, 応力場誘起拡散を応用した接合手法が材料の接合技術と

して注目され始めていた. ただし, これを Ni 基超合金の接合や保守に適用した例は皆無に等しかった.

2. 研究の目的

前述の工学的・工業的背景を鑑み, 本研究では, 申請者らがこれまで行ってきた高温における材料強度学的知見をベースとして, 高付加価値で, かつ, 補修が困難であった Ni 基耐熱

超合金部材中のき裂あるいは損傷の補修に対して、応力場誘起拡散現象と表面改質技術を積極的に新規応用展開し、これを可能とする工学技術を開発することを目的とした。

3. 研究の方法

研究の大項目として、(1) 応力場誘起拡散原理にもとづく耐熱超合金用の本補修技術開発のための工具開発、及び、これによる補修技術開発、(2) 応力場誘起拡散現象と関連周辺技術とを組み合わせた新規き裂補修技術の開発、(3) それら開発手法による被補修部の信頼性確保・余寿命推定管理に向けた知見を工業的に使用しやすい形の検討・提示を行った。

項目(1)、(2)の実施にあたっては、応力場誘起拡散接合の一つである摩擦攪拌接合(FSW)技術に注目・適用した。その際、ツール素材を被補修材料に拡散しても良いような元素系として超合金を工具の材質として選択し、実際の摩擦攪拌接合用の工具を新規に試作した。これによりNi基超合金と鉄あるいはアルミニウム合金との異材接合体を創成し、その性能を接合の際の工具回転速度、送り速度、工具材質をパラメータとする接合体強度として実験的に評価した。

項目(2)の項目の実施にあたっては、摩擦攪拌接合法の欠点を補う手法として局所放電コーティング法に注目し、これとの組み合わせによるき裂補修技術に特化して検討を進めた。その際、局所放電コーティング法の特徴を最大限に生かして、無負荷電圧、放電電流、放電パルス幅、極間距離、極間電圧を変数とする放電コーティング法を適用し、バルト合金によって超合金部品中のき裂の表面をオーバーレイコートする手法を開発した。

項目(3)の実施にあたっては、耐熱Ni基超合金中の損傷、とりわけ、き裂を実際に補修し、提案手法の有効性を高温疲労強度およびき裂進展抵抗の観点から探求した。その際、補修き裂が構造部材内部にある場合も想定して、内部を進展する形態のき裂にも対応できるように、新規のき裂進展抵抗の評価手法も開発した。

4. 研究成果

(1) 応力場誘起拡散原理にもとづく耐熱超合金用の本補修技術開発のための工具開発、及び、これによる補修技術開発の成果：

応力誘起拡散接合の一つである摩擦攪拌接合法(FSW)を援用してアルミニウム合金AA6053と耐熱Ni基超合金IN758からなる異種間材料接合体、および、AA6053アルミニウム合金同士の同種間材料接合体の製作に成功した。FSWのための装置は自作した。接合に際しては、工業的応用を意図して、攪拌工具の回転速度、送り速度、押込み深さ等を線形計

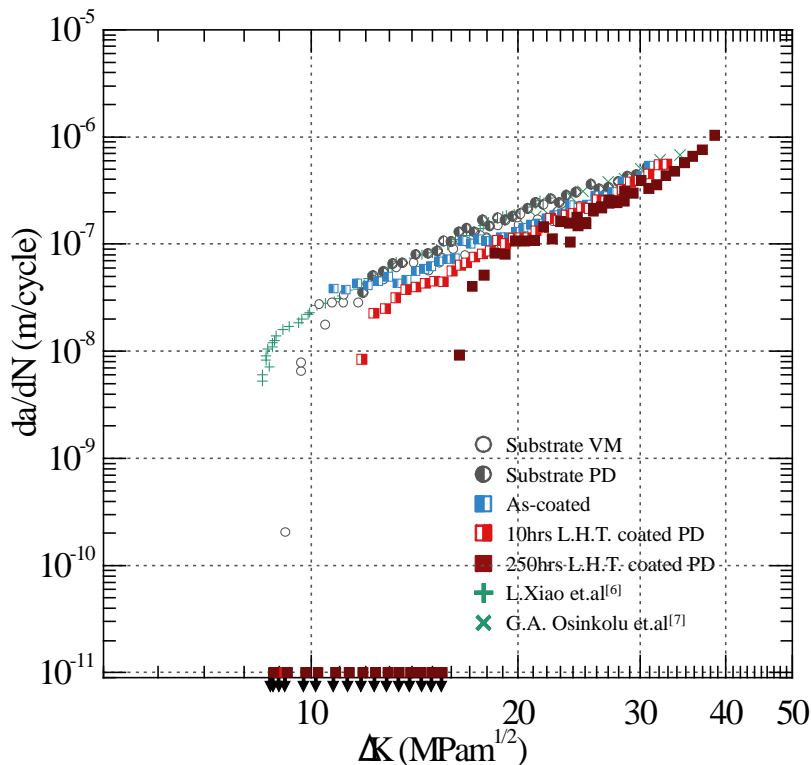
画法に基づいて変化させて最適条件を決定した。最適条件の普遍化と工学的背景の解明のため、接合時の物理的パラメータも提案し、最適条件となる材料学的も要因も調査した。加えて、製作した接合体の機械構造部材としての応用も考慮し、それらの引張強度や疲労強度も定量的に評価した。一例として、最適製作した接合体のせん断強度は母材単体のその約80%程度あり、従来の接合法に比べ150%程度性能が向上すること、溶融を伴う接合法では得られない機械的特性がFSW法により得られることなどを示した。さらに、異種接合体の性能評価の際には不可欠な接合特性-すなわち、密着接合強度-を界面破壊力学に基づき評価する新手法を提案し、その評価手法を遮熱コーティングのトップコート皮膜密着強度を評価する手法に拡張した。一連の検討を通じて開発した手法は、次世代ガスタービンなど、耐熱超合金を基本とする超高温部材の開発や高付加価値部材のき裂補修に大きく寄与するものと期待される。

(2) 応力場誘起拡散現象と関連周辺技術とを組み合わせた新規き裂補修技術の開発の成果：

摩擦攪拌接合法の欠点、すなわち、超合金表面における変質域の形成とそれによる強度低下を補う手法として、局所放電コーティング法に注目し、これとの組み合わせによるき裂補修技術を新規展開した。局所放電コーティング法の適用にあたっては無負荷電圧、放電電流、放電パルス幅、極間距離、極間電圧を変化させれば、高密度の皮膜、あるいはポーラスな皮膜など、目的に応じた表面コーティングが可能となることを示した上で、膜自身の機械的性質も評価した。

(3) 開発手法による被補修部の信頼性確保・余寿命推定管理に向けた検討と提示：

本研究で検討したき裂補修技術の有効性を探求するため、高温疲労強度の観点からその有効性を探求した。手法の有効性の検証にあたっては、補修き裂が構造部材内部にある場合も想定して、電位差法による評価手法も開発した。一連の研究により、提案手法が高温疲労強度の観点から、特にき裂の補修に関しては有効であることを示すとともに(参考のため、この手法によって補修したモデル補修試験片のき裂進展抵抗を未補修材と比較した図を添付した)、この有効性が効能を発揮する材料強度学的機構を、高温長期間使用によるコーティング皮膜施行部の膜の荷重分担能の変化、試験片中の残留応力変化、き裂進展特性、き裂閉口、施行によって生じる材料学的変化などの観点から総合的に検討し、今後の放電コーティング皮膜開発の方向について考察した。以上の検討の総括として、提案手法が最もその効果を発揮する使用条件や適用範囲をマップとして示した。



本手法によって疲労き裂を補修した Ni 基超合金モデル補修試験片のき裂進展抵抗と未補修材との比較(これによれば、特に高温長時間時効を施すことにより、補修材のき裂進展に対する下限界特性が向上することが示されている)

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 18 件)

• M. Sakaguchi and M. Okazaki, “Microstructural Changes in A Single Crystal Ni-base Superalloy Induced by Plastic Straining”, Mater. Sci. Engg.-A, 査読有, Vol. 534, pp. 253-259 (2012).

• M. Okazaki, S. Yamagishi, Y. Yamazaki, K. Ogawa, H. Waki, M. Arai, “Adhesion Strength of Ceramic Top Coat in Thermal Barrier Coatings Subjected to Thermal Cycles:-Effects of Thermal Cycle Testing Method and Environment”, International Journal of Fatigue, 査読有, Vol. 34, (2012),
ODI: [10.1016/j.ijfatigue.2012.02.014](http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.02.014).

• Tran Hung Tra, Masakazu Okazaki, Kenji Suzuki, “Fatigue crack propagation behavior in friction stir welding of AA6063-T5: Roles of residual stress and microstructure”, International Journal of Fatigue, 査読有, Vol. 34, (2012),
ODI: [10.1016/j.ijfatigue.2012.02.003](http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.02.003).

• Kamma Ryohta, Sakaguchi Motoki, Okazaki Masakazu, Shimoda Yukihiro, Uchiyama Takehiko, Ochiai Hiroyuki, Watanabe Mitsutoshi., “Fatigue properties of alloy 718 overlay-coated with a Co-based X40 alloy by the Micro Spark Coating”, JSME Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 査読有, Vol. 6, pp. 201-214, (2012),
DOI: <http://dx.doi.org/10.1299/jmmp.6.227>.

• M. Okazaki, S. Yamagushi, M. Sakaguchi,

“Fatigue Crack Propagation in Thin-Wall Superalloys Components; Experimental Investigation via Miniature CT Specimens”, *Superalloys 2012*, (2012) in press.

・阪口基己, 多田正人, 岡崎正和, “摩擦攪拌接合によるNi基超合金とAl合金の異材接合”, *日本機械学会論文集*, 査読有, Vol. 77, pp. 708-712, (2012).

・菅間良太, 山岸郷志, 阪口基己, 岡崎正和, 深沼博隆, “WC-12Co をHVOF 溶射したNi基超合金Alloy718 の高温疲労特性”, *日本機械学会論文集 A編*, 査読有, Vol. 77, pp. 2041-2045, (2011).

・菅間良太, 阪口基己, 岡崎正和, “放電コーティングしたNi基超合金の高温疲労強度特性”, *日本機械学会論文集 A編*, 査読有, Vol. 77, pp. 364-366, (2011).

・Masakazu Okazaki, Motoki Sakaguchi, “Assessment of Fatigue Crack Propagation Behavior near Crystallographic Orientation Boundaries in Polycrystalline Ni-base Superalloys”, *International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011*, 査読有, (ATEM' 11).

・Masakazu Okazaki, Motoki Sakaguchi, “Fatigue Crack Propagation Behavior Significantly Interacting with Microstructural Units in Thin Wall Ni-base Superalloy Structures”, *Gas Turbine Conference 2011*, 査読有, IGTC2011-ABS-0061, (2011).

・菱田, 藤田, 岡崎, 阪口, “コールドスプレーにより作製した準結晶粒子分散アルミ合金コーティング材の熱疲労挙動”, *日本機械学会論文集*, *日本機械学会論文集 A 編*, 査読有, Vol. 76, No. 764, pp. 370-371, (2010)

・Tran Hung Tra, Masahiro Seino, Motoki Sakaguchi, Masakazu Okazaki, “Fatigue Crack Propagation Behavior Relevant to Microstructural Inhomogeneity in A Friction Stir Weldment”, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol. 4, No. 6, pp. 840-848, (2010).

・Motoki Sakaguchi, Yosuke Sasaki, Masakazu Okazaki and Koichi Namba,

“Evaluation of Fatigue Crack Propagation in The Post-Service Gas Turbine Vane”, *JSMME, Special Issue: on: TBC for Gas Turbines*, *JSMME*, 査読有, Vol. 4, No. 2, pp. 131-142 (2009).

・Masakazu Okazaki, Satoshi Yamagishi, Masakazu Osakabe and Hiroataka Fukunuma, “A New Testing Method to Evaluate Adhesion Strength of Ceramic Top Coat in TBCs”, *JSMME, Special Issue: on: TBC for Gas Turbines*, *JSMME*, 査読有, Vol. 4, No. 2, pp. 345-354 (2009).

・山下正英, 北村朋生, 山下健, 福澤康, “形彫り放電加工の加工速度に及ぼす材料物性の影響”, *電気加工学会誌*, Vol. 45, No. 109, pp. 971-979, (2011).

[学会発表] (計 29 件)

・田巻翼, 岡崎正和, 阪口基己, “Ni 基超合金コーティング試験片の内部疲労き裂発生と進展挙動”, *日本機械学会北陸信越支部第49期総会・講演会*, 金沢工業大学 GS07614, (2012年3月10日).

・津留武志, 阪口基己, 岡崎正和, “Ni基超合金小型サンプル中の疲労き裂進展に対する結晶方位と結晶粒界の影響”, *日本機械学会北陸信越支部第49期総会・講演会* 金沢工業大学 GS07616, (2012年3月10日).

・池田創一, 山岸郷志, 岡崎正和, “交流インピーダンス法を援用したしゃ熱コーティング膜のはく離検出”, *日本機械学会北陸信越支部第49期総会・講演会* 金沢工業大学 GS07620, (2012年3月10日).

・Masakazu Okazaki, Tran Hung Tra, Motoki Sakaguchi, “Fatigue crack propagation behavior in friction stir welded specimen of AA6063-T5: -Roles of residual stress and microstructure”, *Int. Conf. Friction 2011*, Karlsruhe(Germany), (2011年10月25日)

・Masakazu Okazaki, “Assessment of Fatigue Crack Propagation Behavior near Crystallographic Orientation Boundaries in Some Polycrystalline Ni-base Superalloys”, *SUPERALLOYS, Engineering*

Conferences International, (Awaji, Japan)
(2010年7月15日)

・ M. Okazaki, “Effect of Plastic Pre-St raining on Microstructural Changes in Ni-base Single Crystal Superalloy Induced by Creep Stress”, 2010 M&M International Symposium, 査読有, Pasadena, CA, USA, (2010年3月3日).

・ 岡崎正和, 石井峻信, “遮熱コーティング皮膜の新密着強度評価手法の提案と最適化”, 日本学術振興会第 123 委員会報告, Vol.51, pp.121-131, (2010).

・ 岡崎正和, “摩擦攪拌接合によるNi基超合金とアルミニウム合金の異材接合体創製”, 日本機械学会北陸信越支部講演会, 2010. 10. 10, pp. 291-292, (2010年3月10日)

・ Ryohta Kamma, Motoki Sakaguchi, Masakazu Okazaki, “High Temperature Fatigue Properties of Electro Discharge Coated Ni-Base Superalloy”, Asian Pacific Conference for Materials and Mechanics 2009 APCMM(2009), Yokohama, JAPAN, (2009年11月15日).

・ Tran Hung Tra, Seino, Sakaguchi, Okazaki, “FATIGUE CRACK PROPAGATION BEHAVIOR RELEVANT TO INHOMOGENEITY IN THE FRICTION STIR WELD”, Asian Pacific Conference for Materials and Mechanics 2009, APCMM(2009), Yokohama, JAPAN, November 15, (2009年11月14日).

[図書] (計 2 件)

・ “高温繰返し負荷下での寿命/余寿命推定法-き裂を媒介とした取扱い-”, 機械の研究, 養賢堂 (2010), 62 巻, pp. 937-948, (2010年6月).

・ “遮熱コーティングの弾性係数”, 「ナノコーティング」吉田豊信編集, 第 4 章 遮熱コーティングの弾性係数, (2010) 2010. 2 月, 技報堂出版, (2010) 2010. 2 月.

[産業財産権]

○取得状況 (計 1 件)

名称: High temperature Strength member

発明者: M. Okazaki, Y. Harada

権利者: Y. Harada

種類: European Patent

番号: #EP 1 308 535 B1

取得年月日: 2010. 5

国内外の別: 欧州

[その他]

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡崎 正和 (OKAZAKI MASAKAZU)

長岡技術科学大学工学部・教授

研究者番号: 00134974

(2) 研究分担者

福澤 康 (FUKUZAWA YASUSHI)

長岡技術科学大学工学部・教授

研究者番号: 10126477

阪口 基己 (SAKAGUCHI MOTOKI)

長岡技術科学大学工学部・助教

研究者番号: 60452083

山岸 郷志 (YAMAGISHI SATOSHI)

長岡技術科学大学工学部・技術職員

研究者番号: 20452089