

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 29日現在

機関番号：34315

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22860066

研究課題名（和文） 硬質皮膜を利用した高疲労強度部材の創製とその疲労寿命予測法の開発

研究課題名（英文） Creation of high fatigue strength material using high hardness layer and development of the prediction method of its fatigue life

研究代表者

菊池 将一（KIKUCHI SHOICHI）

立命館大学・理工学部・助教

研究者番号：80581579

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、硬質皮膜創製手法の提案とその形成メカニズムの解明、および金属材料の超高サイクル疲労特性に及ぼす硬質皮膜被覆処理の影響評価である。硬質被覆材に対して疲労試験を行った結果、表面皮膜の種類により疲労強度は変化した。これは、皮膜の組成や厚さによって疲労破壊モードが変化したためである。この要因について基材に負荷される曲げ応力分布に注目して検討を加え、表面皮膜被覆材の疲労破壊メカニズムを明らかとした。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this study is to propose a new surface coating method and investigate its formation mechanism, and to investigate the effect of surface hardened layer on the very high cycle fatigue properties of metallic materials. As results of fatigue tests, the fatigue strength of surface hardened material changed depending on the surface layer. This was because the fatigue fracture mode changed depending on the mechanical property and thickness of the surface layer. The fatigue fracture mechanism was clarified from view points of the local bending stress distribution applied to the surface hardened material.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	920,000	276,000	1,196,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,920,000	576,000	2,496,000

研究分野：材料強度学

科研費の分科・細目：機械工学、機械材料・材料力学

キーワード：疲労，表面処理，ギガサイクル疲労

1. 研究開始当初の背景

工業分野において強度部材としての役割を担っている金属材料は、その疲労特性向上を目的として表面改質が施された後に使用されることが多い。そのため、表面改質に関する研究は、国内外を問わず盛んに行われており、近年ではさらなる高強度表面の創製を

目的として、複数の表面改質プロセスを組み合わせるハイブリッド表面改質の開発も進められている。

しかしながら、これまでの研究成果の大半は、応力繰返し数 10^7 回における疲労強度を対象としたものであり、それ以上のいわゆる「超高サイクル域」での疲労特性改善は達成

されていない。これは、超高サイクル域において材料内部でも疲労破壊が生じるため、材料表面を強化することが効果的に作用しないことに起因していると考えられている。現在、金属材料の疲労特性については「二重 $S-N$ 曲線」モデルが提唱されている。2つの破壊モードが存在する以上、本質的に疲労破壊を防ぐためには従来の応力繰返し数 10^7 回を対象とするのではなく、超高サイクル域まで視野に入れた疲労特性改善手法の確立が必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究は、機械構造物の長期信頼性を確保するため、これまで達成が困難であった超高サイクル域における金属材料の疲労特性改善を目指したものである。具体的には、基材と組成の異なる表面硬質皮膜を導入し、負荷応力上昇効果を利用して基材の負担する応力を軽減することにより内部疲労寿命を増加させることを目指す。そのため、まずは(1)表面硬質皮膜の創製およびその各種特性評価を行った。次に、(2)種々の表面硬質皮膜が金属材料の超高サイクル疲労特性に及ぼす影響について検討を加えた。以上の結果を統括し、超高サイクル域まで考慮した金属材料の高疲労強度化に関する指針を示すことを目指す。

3. 研究の方法

(1) 表面硬質皮膜の創製およびその各種特性評価

高疲労強度部材の作製を目的とし、表面改質層の創製手法の開発およびその特性評価を行った。具体的には、通常のアルマイト処理やめっき処理に加え、ピーニングと窒化処理を組み合わせた複合表面処理や、不活性ガス雰囲気下における高温加熱ピーニングを施した際に形成される表面層について、各種分析を行った。

(2) 表面硬質皮膜被覆材料の超高サイクル疲労特性

硬質皮膜を被覆した金属材料の疲労特性を検討するため、回転曲げ疲労試験を実施した。その際、材料内部の負荷応力軽減を目的として、高ヤング率の硬質皮膜（無電解めっき、溶射、アルマイト）を被覆したアルミニウム合金（PA405）を準備し、とくに内部き裂の進展抑制効果について検討を加えた。

4. 研究成果

(1) 窒化処理および不活性ガス雰囲気下における高温加熱処理とピーニングを組み合わせることにより、金属材料の表面に高硬度な硬質皮膜を形成させることに成功した。図1に、ピーニングと窒化処理を組み合わせた

複合表面処理により形成された表面皮膜の観察結果を示す。硬さ試験を行った結果、この表面層は、単独の窒化処理と比較して高硬度であることが明らかとなった。また、本手法の効果発現メカニズムを明らかにするため、一段目のピーニングによって生じる被処理材の微視組織変化についても検討を加え、微細な投射粒子を用いた場合に結晶粒微細化効果が高いことを明らかとした。

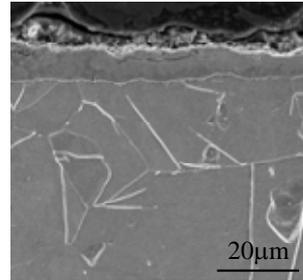


図1 複合表面処理により形成された硬質皮膜（基材：純鉄、投射粒子：クロム、熱処理：500 24時間プラズマ窒化）

(2) 図2に、めっきを施したアルミニウム合金の回転曲げ疲労試験結果を示す。同図より、Feめっき材（印）は未処理材（印）の $S-N$ 曲線と比較して、低い疲労強度を示していることがわかる。これに対して、Ni-Pめっき材（印）は長寿命域においても高い疲労強度を示していることがわかる。また、短寿命域では表面起点型破壊と界面起点型破壊が混在し、長寿命域では内部起点型破壊を呈しており、寿命域により破壊形態が異なることがわかる。

次に、溶射材の回転曲げ疲労試験結果を図3に示す。まず、Fe-Cr溶射材に着目すると、長寿命域において破壊形態が界面起点型破壊から内部起点型破壊に遷移していることがわかる。また、未処理材の $S-N$ 曲線と比較すると、寿命域の増加に伴いFe-Cr溶射による疲労強度改善効果は顕著となる傾向を示している。このことから、Fe-Cr溶射処理は長寿命域において疲労強度を改善する効果を有し、とくに 10^8 を超える寿命域においては、内部起点型破壊の疲労強度を改善する効果が確認された。

またFe-C-Mo溶射材に着目すると、全寿命域において未処理材と比較して約50MPa高い値を示した。破壊形態は、すべて界面剥離型破壊であり、 10^8 を超える長寿命域において内部起点型破壊は確認されなかった。このことから、Fe-C-Mo溶射処理はギガサイクル領域まで内部き裂の発生を抑制する効果を有することが確認された。

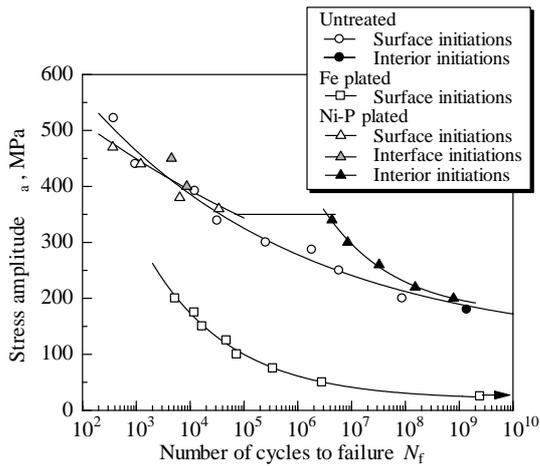


図2 めっき材の疲労試験結果

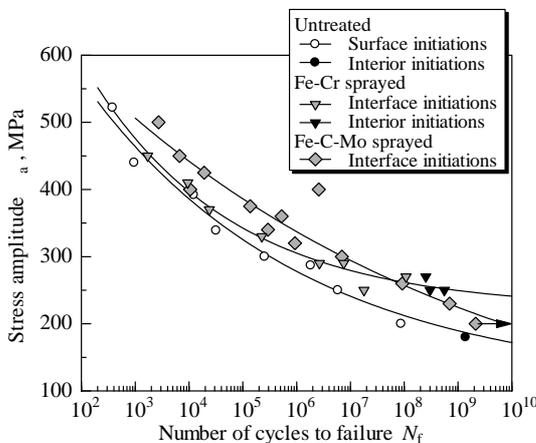


図3 溶射材の疲労試験結果

これまで述べた各種表面処理による疲労特性改善効果について、本研究では表面皮膜と基材のヤング率の差による応力分布の変化に注目して一連の検討を加えた。

図4は、表面処理により硬質皮膜を被覆した試験片の断面上に生じる曲げ応力分布を模式的に表したものである。図中の破線は未処理材の曲げ応力分布を示し、実線は基材と皮膜のヤング率の差を考慮した表面処理材の曲げ応力分布を示している。

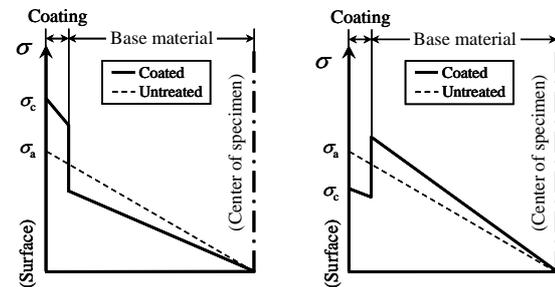
基材 PA405 のヤング率 (101GPa) と比較して高い値を有する鉄系皮膜を被覆した試験片 (Feめっき材, Fe-Cr 溶射材, Fe-C-Mo 溶射材) の場合、硬質皮膜表面において高応力が生じる (図4(a))。そのため、低強度な純鉄を被覆した Feめっき材は、表面起点型破壊を呈する。一方で、高硬度な溶射皮膜を被覆した場合には、表面き裂の発生が抑制され、界面起点型あるいは界面剥離型の疲労破壊が生じることとなる。また、Fe-Cr, Fe-C-Mo 溶射材の場合には、皮膜厚さが異なるため両者の疲労特性改善効果は異なる。具体的には、

皮膜厚さの増加に伴い皮膜が分担する荷重が増加するため、界面近傍の基材に生じる応力値は低下する。すなわち、Fe-Cr 溶射材と比較して厚い皮膜を有する Fe-C-Mo 溶射材においては、界面近傍の基材に作用する応力が低下する。

これに対して、Ni-Pめっき材のヤング率は基材 PA405 のヤング率よりも低いため、めっき層表面に生じる応力は低下し、その応力分布は図4(b)のように表すことができる。そのため、高硬度な Ni-Pめっき層を表面に被覆すると表面起点型破壊に対する疲労強度は上昇することが期待される。しかし、実際にはめっき層表面に存在するピンホールによって応力集中が生じることにより疲労強度は低下するため、前述の疲労強度の上昇効果が相殺されて、偶然に未処理材と同程度の疲労強度を示したと考えられる。

一方で、界面近傍の基材に生じる応力は上昇するが、めっき層は 20 μ m と極めて薄いため、その応力上昇効果も僅かと考えられる。したがって、基材部の応力状態は未処理材とほぼ同程度であると考えられる。このことは、界面破壊の疲労強度が未処理材の疲労強度とほぼ一致した事実と矛盾しない。

以上より、本研究では硬質皮膜被覆法によるアルミニウム合金の疲労特性改善に関する指針を見出した。



(a) Type 1 (b) Type 2
図4 表面硬質皮膜被覆材の曲げ応力分布

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)

著者名: 原田翼, 菊池将一, 小茂鳥潤, 深沢剣吾, 三阪佳孝, 川崎一博, 論題: IH-FPP処理システムを利用した微細結晶粒・高硬さ表面の創製と鋼の疲労特性に及ぼすその効果, 雑誌名: 材料, 査読: 有, 巻: 60, 発行年: 2011, ページ: 1091-1096

著者名: 中村裕紀, 酒井達雄, 菊池将一, 平野秀夫, 戸本隆道, 論題: アルミニウム合金の超高サイクル域回転曲げ疲労特

性に及ぼすめっきおよび溶射の影響, 雑誌名: 設計工学, 査読: 有, 巻: 8, 発行年: 2011, ページ: 60-67

著者名: 菊池将一, 福岡隆弘, 小茂鳥潤, 論題: 微粒子ピーニングを施した純鉄のプラズマ窒化挙動, 雑誌名: 日本機械学会論文集 A 編, 査読: 有, 巻: 77, 発行年: 2011, ページ: 1367-1377

著者名: 菊池将一, 廣田遥, 小茂鳥潤, 論題: 微粒子ピーニングを施したSCM435H鋼の残留応力と疲労特性に及ぼす基材および投射粒子硬さの影響, 雑誌名: 材料, 査読: 有, 巻: 60, 発行年: 2011, ページ: 547-553

著者名: 中村裕紀, 井上裕介, 望田修也, 山本泰三, 國分昭雄, 菊池将一, 酒井達雄, 論題: 機械構造用炭素鋼 S45C の表面性状と疲労特性に及ぼす旋削切込み量の影響, 雑誌名: 材料試験技術, 査読: 有, 巻: 56, 発行年: 2011, ページ: 81-86

著者名: 菊池将一, 廣田遥, 小茂鳥潤, 論題: ピーニングにおける鋼の微視組織変化に及ぼす粒子寸法の影響, 雑誌名: 砥粒加工学会誌, 査読: 有, 巻: 54, 発行年: 2010, ページ: 720-724

著者名: M. Omiya, S. Kikuchi, Y. Hirota and J. Komotori, 論題: Effect of hardness ratio on plastic dissipation in fine particle peening, 雑誌名: Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 査読: 有, 巻: 4, 発行年: 2010, ページ: 1585-1594

[学会発表](計 24 件)

発表者名: S. Kikuchi, 発表標題: Creation of high fatigue strength steel by hybrid surface modification using a fine particle peening, 学会名等: 5th German-Japanese Symposium on Nanostructures and 5th International Symposium on Nanostructures (OZ-12), 発表年月日: 2012 年 3 月 5 日, 発表場所: ウェンデン (ドイツ)

発表者名: S. Kikuchi, Y. Yasutake, J. Komotori, 発表標題: Effect of Fine Particle Peening on Oxidation Resistance of Austenitic Stainless Steel, 学会名等: International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011, 発表年月日: 2011 年 9 月 21 日, 発表場所: 神戸国際コンベンションセンター (兵庫県)

発表者名: 中村裕紀, 望田修也, 菊池将一, 酒井達雄, 発表標題: アルミニウム合金の超高サイクル域回転曲げ疲労特性に及ぼすアルマイト皮膜厚さの影響, 学会名等: 日本機械学会 M&M2011 材料力学

カンファレンス, 発表年月日: 2011 年 7 月 18 日, 発表場所: 九州工業大学 (福岡県)

発表者名: S. Kikuchi, 発表標題: Improvement of Fatigue Strength of Steel by Hybrid Surface Modification Using a Fine Particle Peening, 学会名等: 4th German-Japanese Symposium on Nanostructures and 5th International Symposium on Nanostructures (OZ-11), 発表年月日: 2011 年 3 月 7 日, 発表場所: 立命館大学 (滋賀県)

発表者名: 中原康仁, 土橋孝治, 菊池将一, 小茂鳥潤, 発表標題: SUS316 鋼の疲労特性に及ぼす微粒子ピーニング/低温ガス窒化複合表面改質の効果, 学会名等: 第 30 回疲労シンポジウム, 発表年月日: 2010 年 10 月 29 日, 発表場所: 高知城ホール (高知県)

発表者名: 安武祐次郎, 菊池将一, 小茂鳥潤, 発表標題: オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS316) の耐酸化性に及ぼす微粒子ピーニングの効果, 学会名等: 日本機械学会 2010 年度年次大会, 発表年月日: 2010 年 9 月 6 日, 発表場所: 名古屋工業大学 (愛知県)

発表者名: 菊池将一, 小茂鳥潤, 発表標題: 微粒子ピーニングを施した純鉄および SCM435H 鋼の窒化挙動, 学会名等: 日本機械学会 2010 年度年次大会, 発表年月日: 2010 年 9 月 6 日, 発表場所: 名古屋工業大学 (愛知県)

発表者名: 菊池将一, 廣田遥, 小茂鳥潤, 発表標題: 鋼の微視組織変化に及ぼすピーニング投射粒子寸法の影響, 学会名等: 2010 年度砥粒加工学会学術講演会, 発表年月日: 2010 年 8 月 26 日, 発表場所: 岡山大学 (岡山県)

[その他]

<http://research-db.ritsumeai.ac.jp/Profiles/76/0007521/profile.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊池 将一 (KIKUCHI SHOICHI)

立命館大学・理工学部・助教

研究者番号: 80581579