

令和元年5月21日現在

機関番号：37111

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06057

研究課題名(和文) マイクロ・ナノスケール繰り返し往復すべりの摩擦・磨耗特性

研究課題名(英文) fukuokadaigaku

研究代表者

遠藤 正浩 (Masahiro, Endo)

福岡大学・工学部・教授

研究者番号：30168835

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：「マイクロ・ナノスケール」のすべり量で「平方ミリスケール」の接触面が往復で繰り返しすべる現象の理解は、フレットング、せん断型疲労き裂のような多くの工学問題と密接に関係しており極めて重要である。この摩擦と磨耗の特性の特性を適切に研究するために、疲労試験機を利用して独創的なring-on-ring試験法の開発に成功した。この実験方法に基づいて、SUJ2軸受鋼とSCM435鋼の熱処理材についてマイクロスケールの乾燥条件における磨耗特性と表面損傷について系統的に研究した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

接触面における微小な往復すべりの繰り返しに関与する材料損傷の問題は工学上の重大な問題の一つである。しかし「マイクロ・ナノスケール」のすべり量で「平方ミリスケール」の接触面が往復で繰り返しすべる現象を研究する方法は手つかずの状態であった。本研究ではこの研究方法に確立に成功し、複数の材料について摩擦と磨耗の特性を明らかにできた。開発した手法は拡張が容易で、従来の往復すべり試験法に比較して試験条件の設定の自由度が格段に大きい。したがって、従来は困難であった実験が可能となるだけでなく、この方法を起点にさらなる研究の発展が見込まれるので将来性がある。

研究成果の概要(英文)：It is quite essential to understand the mechanism of friction and surface damage of cyclic, reciprocating sliding contact surface with milli-meter scale area under the condition of micro-nano scale sliding displacement, since this issue is intimately related to many engineering problems, such as the fretting fatigue, the rolling contact fatigue, the shear-mode fatigue crack propagation, etc. A unique ring-on-ring testing method that can estimate appropriately these properties was successfully developed by utilizing a fatigue testing machine. Based on this testing method, the microscopic frictional behavior and the contact surface damage of a heat-treated high carbon-chromium bearing steel (JIS SUJ2) and a Cr-Mo steel (SCM435) were systematically studied under dry condition.

研究分野：材料力学、破壊力学、トライボロジー

キーワード：繰り返し往復すべり 摩擦 磨耗 試験方法 試験装置

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

フレッティングによる摩耗・コロージョン・疲労は、結合部等の接触面の微動往復すべりによって生じる損傷で、工学上の重大な問題の一つである。また、せん断型疲労き裂の進展挙動や下限値には、き裂面間の相対すべりの繰り返しが影響することがよく知られている。いずれも接触面における微小な往復すべりの繰り返しが材料損傷に密接に関連する現象である。これらの問題において定量的な解析を行うためには、摩擦に関する材料特性(摩擦係数等)や摩耗に関する現象(表面性状の変化、組織変化、マイクロ/ナノレベルの破壊等)の基本メカニズムの解明が必要になる。特に相対すべり量が $10\ \mu\text{m}$ 以下のマイクロ・ナノレベル領域のすべりにおける摩擦・摩耗の現象の解明が重要である。しかし、旧来のトライボロジーも最新のナノトライボロジーのいずれのアプローチも「平方ミリスケール」の接触面が「マイクロ・ナノスケール」のすべり量で往復してすべる現象を研究するには不向きであったので、重要な工学問題の解決に不可欠な学問領域が手つかずのまま放置されてきた。

2. 研究の目的

平方ミリの工学的寸法の接触面について、相対すべり量： $100\ \text{nm}\sim 1000\ \mu\text{m}$ 、見掛けの接触圧力(面圧)： $10^{-3}\sim 10^3\ \text{MPa}$ 、試験周波数： $0.01\sim 50\ \text{Hz}$ の広い範囲で試験条件を高精度に自由に設定し、また各量を試験中に任意に可変する試験方法を確立することを主たる目的とした。さらにこの新方法によって、微小なすべり量で繰り返し往復すべりをする接触面の摩擦・摩耗特性に及ぼす面圧、相対すべり量、すべり速度、接触面積、繰返し数の影響を明らかにすることがもう一つの目標である。

3. 研究の方法

多軸疲労試験用の油圧式デジタル制御の軸ねじり試験機を用いて、図1のようなring-on-ring試験(二つの円筒断面を互いに接触させ、軸まわりに相対的に回転させる試験)によって、往復すべり接触試験を行う実験方法の開発を行った。

低合金鋼SCM435と軸受鋼SUJ2およびアルミニウム合金を用いて、摩擦係数に及ぼす面圧、相対すべり量、すべり速度、接触面積、繰返し数、環境の影響および接触面近傍の損傷メカニズムを明らかにした。

4. 研究成果

実験方法の確立 試験方法の開発には紆余曲折はあったものの、面圧： $10\ \text{MPa}$ 以上、相対すべり量： $10\ \mu\text{m}$ 以上までの実験はこの試験方法で到達できた[1-3]。より小さなすべり量と面圧のために単に小さい容量の試験機を採用することは、導入コストと角変位制御の精度の両面で正しい選択ではない。そこで図2(左)のように、試験部を大きな剛性の構造体で固定して変位と面圧を制御する全く新しい方法を採用した。すなわち荷重制御の試験機の中に変位制御の試験装置を2重構造で構築した。試験機が最も得意とする荷重領域で試験をしても構造体の変形は極めて小さく、構造体の弾性(極めて線形性が高い)を利用して、原理的にはすべりは $10\ \text{nm}$ 、平均面圧は $10^{-4}\ \text{MPa}$ で高精度に制御できる。そして実際に図2(右)の装置を開発して検証を行った。

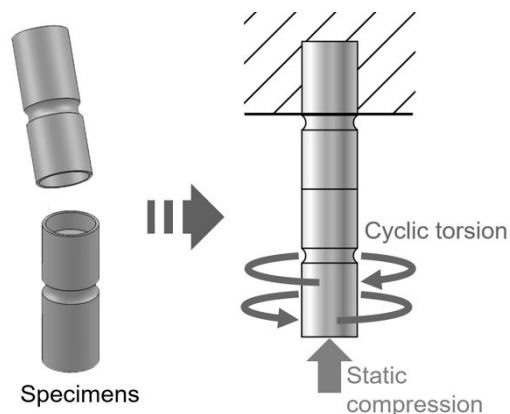


図1 Ring-on-ring にける試験片試験片の配置

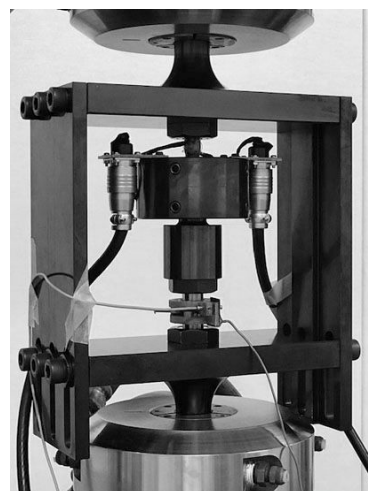
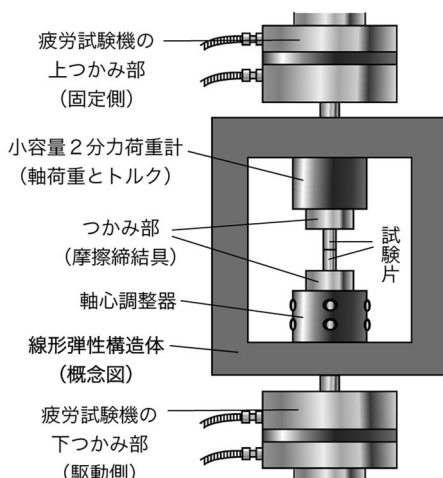


図2 ナノスケールすべり試験補助装置の構造(左)と開発途中の装置(右)

実験を行うために具体的に次のような検討を行った。

(1) 無損傷の初期状態からの均一接触の実現 実験では、2つの円筒の端面を面圧が均一になるように平行に接触させることが重要である。実験前に大きなすべり量で擦り合わせを行うことで片当りは解消できる。しかし、実験開始時に接触面はすでに損傷している欠点があった。そこで、試験片の軸ずれと傾きを精細に調整する軸心調整器を新たに試験片と試験機の間設置して、さらに感度が高い圧力センサーフィルムとひずみゲージを併用して視覚的・定量的にモニターすることにより、均等接触の状態を実験開始時に実現させた。

(2) 微小な相対すべり量および荷重の高精度な測定 接触面に作用する圧縮力と摩擦力は、2分力荷重計(軸荷重とトルク)で計測できた。相対すべり量の測定については、2つの接触面近傍にそれぞれターゲットを設け、2台のレーザー変位計で測定した変位の差で計測する技術をすでに確立した。しかし、レーザー変位計はすべり量が100 nm以下になると測定精度が不足するので、静電気容量変位計を用いる方法やレーザー光の干渉を利用した方法を今後検討すべきとの結論に至った。

(3) 損傷過程の微視的観察 接触面近傍の材料の損傷を直接観察することは現象の理解に不可欠である。本研究で使用する試験片は小型であるので、電子天秤で摩耗量を測定することや試験途中の接触面の表面損傷状態を観察することが可能である。さらに、接触した状態を保持したまま試験片全体を取り外して断面を切断することにより、試験途中において接触面間で何が起きているかを調査する方法も開発中で、ほぼ成功に近い段階まで来た。現在は切断面の研磨の影響が無視できないが、最終的にはイオンミリングやFIB(収束イオンビーム)技術によってこの問題は克服できると考えている。

(4) データ取得方法の改良 ナノスケールの実験により柔軟に対応できるように、制御と測定システムを見直し、高精度に実験データを獲得できるようにした。具体的には、実験の制御と測定はLabVIEWを基本に統一的に再構成して一元化し、高精度で大容量のデータを高速で取得できる装置を新しく購入してシステムに組み込むことにより、自由度が高い測定環境を整えた。

摩擦・摩耗特性の研究 SCM435鋼とSUJ2軸受鋼のマイクロスケールの乾燥すべりの摩擦係数、摩耗特性を圧縮力、トルク、相対すべり量の振幅、平均値、位相差、周波数、すべり速度と波形、繰返し数の関数として研究した。図3には一例として軸受鋼SUJ-2について得られた接線力と相対すべり量の関係の一例を示す。ring-on-ring試験では試験片に接触端面が存在しないので、すべり面が一樣な面圧で接触していると仮定できる。したがって、図3のループの水平部分の接線力と圧縮力の比として動摩擦係数 μ_k を測定することができる。図4には μ_k に及ぼす面圧、試験周波数、初期接触面粗さの影響を示しているが、これらの因子に無関係にほぼ $\mu_k = 0.8$ あることが明らかになった。

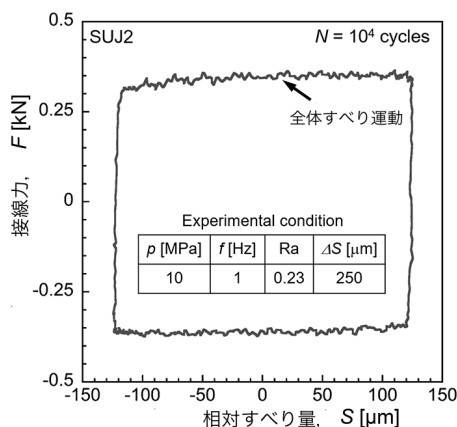


図3 接戦力と相対すべり量の関係 (SUJ2)

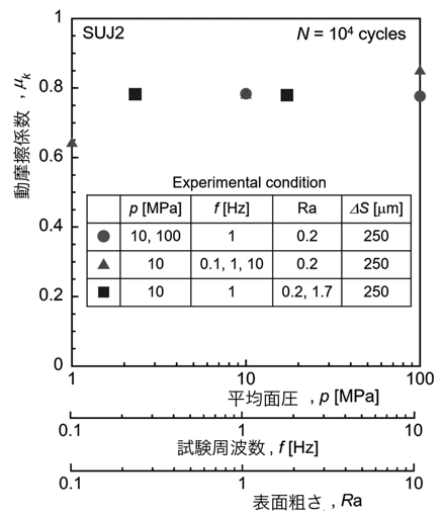


図4 平均面圧、試験周波数、表面粗さの関数で測定した動摩擦係数 (SUJ2)

5. 主な発表論文等

論文は全て国際誌に3編掲載済みである。本研究の手法に基づく新しい学問を啓蒙するためと情報収集のため国内外で精力的に学会発表を行った。

[雑誌論文](計3件)

1. Yuya Tanaka, Masahiro Endo and Shigeaki Moriyama, Investigation of Friction and Surface Damage of Bearing Steel in Cyclic Reciprocating Sliding Contact by Making

Use of Fatigue Testing Machine, Advanced Experimental Mechanics, 2, 2017, 82-86
(査読有)

2. Y. Tanaka, M. Endo and S. Moriyama, Effect of initial contact surface condition on the friction and wear properties of bearing steel in cyclic reciprocating sliding, Journal of Physics: Conf. Series, 843, 2017, 1-7 (査読有)
3. Y. Tanaka, M. Endo and S. Moriyama, Dry friction and wear properties in micro-scale reciprocating sliding contact of high carbon-chromium bearing steel, International Journal of Fracture Fatigue and Wear 4, 2016, 39-44 (査読有)

[学会発表] (計 8 件)

1. 田中佑弥、松永久生、森山茂章、遠藤正浩, 微小往復すべりにおける軸受鋼の動摩擦特性. 第 9 回マイクロナノ工学シンポジウム, 2018
2. Yuya TANATA, Masahiro ENDO, Shigeaki MORIYAMA and Keiji YANASE, Dry Friction and Wear Properties of Cr-Mo Steel in Reciprocating Sliding with Micro-Scale Displacement, The 12th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, 2017
3. 田中 佑弥、遠藤 正浩、森山 茂章、柳瀬 圭児, 疲労試験機を応用した繰り返し往復すべり接触試験法の開発, 第 3 回材料 WEEK 若手学生研究発表会, 2017
4. Y. Tanaka, M. Endo and S. Moriyama, Effect of initial contact surface condition on the friction and wear properties of bearing steel in cyclic reciprocating sliding contact, 6th International Conference on Fracture Fatigue and Wear (FFW 2017), 2017
5. Yuya Tanaka, Masahiro Endo and Shigeaki Moriyama, Friction and Surface Damage of Bearing Steel in Cyclic Ring-on-ring test by Making Use of Fatigue Testing Machine, 11th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, 2016
6. 田中佑弥, 遠藤正浩, 森山茂章, 軸受鋼の繰返し往復すべり接触における摩擦挙動と表面損傷, M&M2016 材料力学カンファレンス, 2016
7. Y. Tanaka, M. Endo and S. Moriyama, Fundamental Study on the Friction and Wear Properties in Cyclic Reciprocating Sliding Contact of Bearing Steel, Asia-Pacific Conference on Fracture and Strength 2016 (APCFS 2016), 2016
8. Y. Tanaka, M. Endo and S. Moriyama, Dry friction and wear properties in micro-scale reciprocating sliding contact of high carbon-chromium bearing steel, 5th International Conference on Fracture Fatigue and Wear, 2016

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年 :
国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年 :
国内外の別 :

[その他]

6 . 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：柳瀬圭児

ローマ字氏名：Keiji Yanase

所属研究機関名：福岡大学

部局名：工学部機械工学科

職名：教授

研究者番号（8桁）：20580187

(2)研究協力者

研究協力者氏名：松永久生

ローマ字氏名：Hisao Matsunaga

所属研究機関名：九州大学

部局名：大学院工学研究院

職名：教授

研究者番号（8桁）：80346816

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。