

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6月4日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360052

研究課題名（和文） フレッシング摩耗・疲労過程その場観察に基づく摩耗を考慮した疲労寿命予測法の開発

研究課題名（英文） Development of a Method for Fretting Fatigue Life Prediction with Taking Account of Wear based on in-situ Observation of Fretting Wear and Fatigue Processes

研究代表者

武藤 睦治 (MUTOH YOSHIHARU)

長岡技術科学大学・技術経営研究科・教授

研究者番号：00107137

研究成果の概要（和文）：レーザ顕微鏡と疲労試験装置を組合せ、大気中や各種環境下で試験可能なその場観察フレッシング疲労試験装置とそれを用いた実験法を開発した。開発した装置・手法により大気中フレッシング疲労試験を行い、摩耗粉やき裂進展挙動を観察し、その有効性を示した。環境の異なる真空中でもその場観察試験を行い、接触状態やき裂伝ば挙動などを詳細に示した。摩耗を考慮した解析手法を新たに提案し、解析による摩耗局面形状と実測形状とはほぼ類似していることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In order to conduct the test under different environmental conditions including air, an in-situ observation fretting fatigue testing machine combined with a laser micro scope was developed and the testing method for it was also established. According to the results of in-situ observation test, the testing method developed was effective to study wear process and crack propagation behavior observation during fretting fatigue. Contact phenomena and crack propagation behavior were also observed in vacuum condition. A new analysis method with taking account of wear process was proposed. Wear profile obtained by the analysis showed good agreement with that observed by the experiment.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	9,100,000	2,730,000	11,830,000
2010年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2011年度	2,600,000	780,000	3,380,000
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：機械材料・材料力学

キーワード：フレッシング、疲労、その場観察、き裂、摩耗、摩耗解析、寿命予測

1. 研究開始当初の背景

機械部材の接触部では、変動する接触面圧や微小な相対すべりを伴う摩擦・摩耗現象を主要因とするフレッシング疲労損傷が生じる。フレッシング疲労強度は通常疲労強

度と比べて著しく低いため、機械部材の信頼性確保のためには、その疲労強度/寿命を設計段階において予測することが重要である。相対すべり量は構造物の寸法に比例して増大するため、大型構造物ほど疲労損傷に及ぼす

摩擦・摩耗現象の影響が顕著となる。フレッティング疲労寿命評価に関する研究は、ここ25年にわたり破壊力学的取り扱いが主流であり、摩耗は考慮されていなかった。近年、摩耗による接触曲面形状の変化を疲労寿命評価に取り入れようとする研究も行われるようになってきたが、それらの寿命評価では、適当な仮定が導入されるため、十分とは言い難い。研究代表者らのこれまでの研究では、疲労過程において接触面の平均的な形状は繰返しと共に変化し、それに伴って疲労き裂発生部位の応力状態も逐次変化することが明らかになっている。このことは、繰返し数に伴う摩耗過程の詳細ならびに接触面形状の変化、およびこれらの摩耗挙動と疲労寿命との関係について明らかにすることの重要性を示している。また、これまでの摩耗解析の研究は単純な摩耗粉の排出過程のみを対象としているに留まっている。すなわち、これまでのフレッティング疲労寿命予測に関する研究は、主として摩擦挙動のみを考慮した破壊力学的アプローチがとられ、摩耗現象は二次的要因という認識が強く、ほとんど考慮されてこなかった。

2. 研究の目的

上記の背景に鑑み、本研究では、フレッティング疲労過程における摩耗現象に注目して、その場観察により摩耗過程を詳細に把握するとともに、フレッティング摩耗現象と接触部応力状態の関係を実験解析的に明らかにし、摩耗解析手法を開発する。さらにこの手法を取り込むことにより、摩耗特性を考慮した新しいフレッティング疲労寿命評価法の開発を目指す。

3. 研究の方法

以下、主な3項目に分けて示す。

(1) 大気中その場観察フレッティング疲労試験法の開発； フレッティング疲労試験の際のフレッティング摩耗状況のその場観察を行うための装置を試作する。観察装置としては、現有のレーザー顕微鏡を利用し、それと組み合わせが可能なフレッティング疲労試験装置とする。類似の装置としては、走査電子顕微鏡付疲労試験機を有しているが、この装置では真空中での試験しかできないので、大気あるいはその他の環境下でのフレッティング疲労試験が可能なレーザー顕微鏡との組み合わせが、本研究にとっては必須である。フレッティング疲労における接触端部近傍での摩耗現象や、き裂の発生は、拘束のきつい試験片中央部で生じる。その場観察のためには、観察が可能な端部で同様の現象を生じるように接触片・試験片の形状に工夫が必要で、そのための予備実験も平行して行う。試作したレーザー顕微鏡下その場観察フレッティング疲労試験装置を用い、実際にフレッティング疲労試験下での接触端部近傍のその

場観察を行い、基本的なフレッティング摩耗挙動およびき裂発生挙動について検討する。

(2) 真空中その場観察フレッティング疲労試験； 環境の影響として、真空下でフレッティング疲労試験を行い、接触端部近傍の摩耗挙動およびき裂発生挙動をその場観察し、摩耗挙動、き裂発生挙動を明らかにする。また、摩耗挙動およびフレッティング疲労特性に大きな影響を及ぼすと考えられる、表面処理の影響について、異なる表面処理を施した試験片を用いてその場観察フレッティング疲労試験を行い、その影響を明らかにする。

(3) フレッティング摩耗プロセスの解析； 各種解析形状モデルの摩耗と応力解析に対応できる摩耗解析ツールを整備し、摩耗評価点（解析接点）の形状変化のトレンドや移動平均処理を活用した効率的な摩耗プロセス解析手法の開発と摩耗モデルの妥当性を確認する解析を行う。開発した摩耗プロセス解析ツールを用いて、実験結果を参考にし、摩耗プロセス解析を実施する。累積散逸エネルギーと摩耗特性および摩耗形状の関係を整理し、新しい摩耗プロセス解析手法を開発する。これまでに提案されている疲労き裂発生部（危険断面）の評価パラメータ値と摩耗形状変化との関係について分析・検討し、摩耗形状を考慮した場合の疲労き裂発生評価パラメータの有効性を検討する。

4. 研究成果

(1) 大気中その場観察フレッティング疲労試験法の開発； 図1に試験片および接触片の形状を示す。試験片は後述する試験片・接触片同時加工に適した厚さ2mmの平板を用いた。接触片は4つ足形状とした。き裂が内部から発生することを防ぐため、できるだけ接触部の厚みが少なくなるように1つの足の厚さを0.5mmとした。き裂発生箇所を限定するために、1つの足を残して、その他の部分に四フッ化エチレン樹脂(PTFE)乾燥皮被膜潤滑剤をスプレーし、磨耗の抑制を図った。実験には、5kN油圧サーボ式疲労試験機とレーザー顕微鏡を組合せた、疲労試験中にその場観察できる装置を試作して用いた。試作したその場観察フレッティング疲労試験装置を図2に示す。なお、ここで示す実験では、低合金鋼JIS SNCM439を870°C焼入れ処理後、580°Cで焼戻し処理した材料を供試材として用いた。試験片と接触片をブルーピングリングに取り付ける際に、ずれが生じ、レーザー顕微鏡で観察する際に焦点が維持できなくなる。このずれを改善するために試験片と接触片を同時に研削加工する方法を考案した。図3に、試験片・接触片同時研削用治具の概略図を示す。この治具で試験片と接触片の固定後に、研削盤により、試験片と接触片の段差がなくなるまで加工した。治具はブルーピングリング径内に収まる大きさにしてあるため、研削

加工後に治具から取り外すことなく、ブルーピングリングに取り付けることが可能となっている。

試験片・接触片同時研削加工前後での試験片と接触片間に生じた段差をレーザ顕微鏡観察し、比較した結果を図4に示す。(a)は研削前に治具に取り付けた状態(対物レンズ: 10x), (b)は研削後ブルーピングリングに取り付けた状態(対物レンズ: 5x)のそれぞれの段差の状態を示している。レンズ倍率がちがうことに注意を要する。研削前は約200 μm と大きかった段差が、同時研削後ブルーピングリングに取り付けた時の段差は10 μm 程度となった。本開発手法および装置による、き裂発生挙動および摩耗プロセスの観察例を図5に示す。本開発手法が、フレットング中の摩耗粉の挙動やき裂発生・進展挙動を解明するために有効であることが分かる。

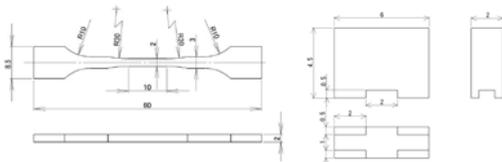


図1 大気中その場観察フレットング疲労試験用試験片と接触片。



図2 本研究で開発した大気中その場観察フレットング疲労試験装置。

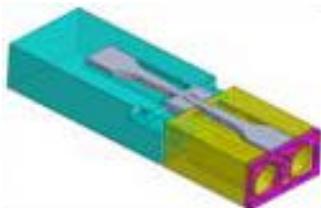


図3 本研究で開発した試験片・接触片同時加工用治具。

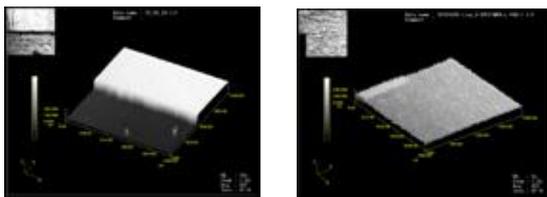


図4 試験片と接触片の段差(a)研削加工前, (b) 同時研削加工後(本提案手法)。

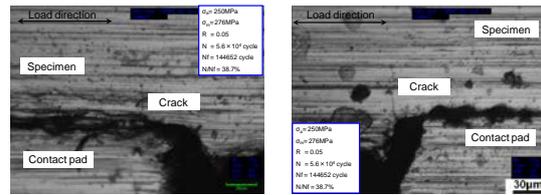


図5 大気中フレットング疲労試験での接触端部の観察例。

(2)真空中その場観察フレットング疲労試験; 走査電子顕微鏡付疲労試験装置を用いて、SEMチャンバー内環境で、その場観察フレットング疲労試験を行った。フレットング疲労その場観察試験の際、試験片と接触片の焦点ができるだけ合うようにするため、試験片形状は図6に示すような厚さ2mmの平板を用い、試験片と接触片の板厚をそろえて加工した。試験片平行部に接触片一对をブルーピングリングにより面圧50MPa一定で押付けた。荷重負荷条件は、応力比 $R=0.05$ の片振り、繰返し速度10Hzとした。なお、ここでは、供試材として、アルミニウム合金(JIS A7N01-T6)を用いた。熱処理条件は、溶体化処理を $400^{\circ}\text{C} \times 3\text{hr}$ 、時効処理を $110^{\circ}\text{C} \times 6\text{hr}$ の後に $165^{\circ}\text{C} \times 8\text{hr}$ の条件で行った。接触片には、自動車構造用熱間圧延鋼材(SAPH440)を用いた。また、試験片表面処理の影響について検討するため、直径6mmのボールバニシングツールを用いて加工液圧4MPaの条件で試験片表面にバニシング加工を施した試験片を準備した。以下、表面処理を施していないものを未処理材、バニシング加工を施したものをバニシ材と呼ぶ。

未処理材のフレットング疲労き裂の発生および進展状況のその場観察例を図7に示す。図7(a), (b), (c)は繰返し数の増加とともにき裂が進展する様子で、いずれの試験においても疲労き裂は接触片外端部から約100 μm の範囲で発生し、き裂長さは繰返し数 10^3 回では約2 μm 、繰返し数 1.5×10^3 回では約10 μm で、表面に対してある傾斜を有して進展する傾向を示した。その後、き裂長さが50 μm 程度に達すると進展方向をやや変え、試験片表面に対して垂直に近い方向に進展した。なお、バニシ材の場合、き裂の発生および進展の状況は未処理材と同様であった。

図8にフレットング疲労き裂長さ L と繰返し数 N の関係を示す。同図より、未処理材およびバニシ材のき裂が発生した繰返し数は、未処理材が約 10^3 回であるのに対してバニシ材は約 5×10^3 回であり、バニシ材の方がき裂の発生が遅かった。き裂進展速度 da/dN と応力拡大係数 ΔK の関係を図9に示す。同図より未処理材は、き裂進展速度は、発生初期では高く、その後のき裂進展とともに減速し、ある応力拡大係数を超えると徐々に増加

する傾向を示した。これは、き裂発生初期ではフレッティングの影響が大きく、き裂が進展するとともにその影響が小さくなるためと考えられる。また、バニシ材においても、き裂進展速度と応力拡大係数の関係は未処理材と同様の傾向を示した。しかし、バニシ材のき裂進展速度は応力拡大係数の小さい領域では未処理材に比べて低くなった。この原因は、バニシング加工を施すことにより試験片表面近傍の硬化および圧縮残留応力が付与され、き裂の発生および進展が抑制されたためと考えられる。

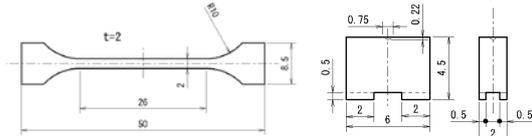


図 6 真空中その場観察フレッティング疲労試験用試験片と接触片。

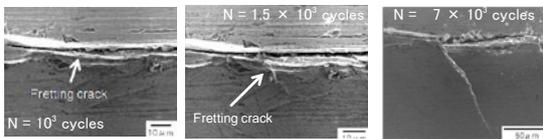


図 7 真空中その場観察フレッティング疲労試験中のき裂観察例。

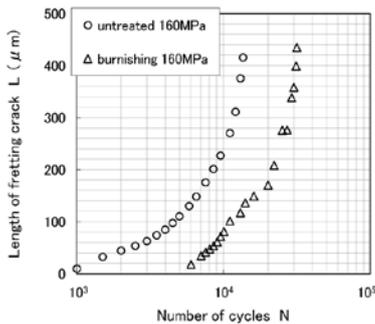


図 8 き裂進展挙動に及ぼす表面処理の影響。

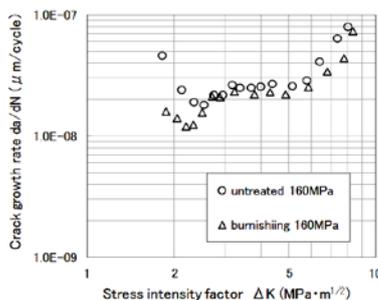


図 9 き裂伝ば曲線（未処理材とバニシ材）。

(3) フレッティング摩耗プロセスの解析；フレッティング部の摩耗プロセスは、局部せん断応力と接触面圧および相対滑り量、摩擦係数等に依存する。そのフレッティング面の増分摩耗量は、

$$\Delta V(N) = \phi D_0(\mu) \Delta N \quad \dots (1)$$

で表わされる。ここで、 ϕ は比摩耗率(=7.45 × 10⁻⁸ mm³/N·mm)、 $D_0(\mu)$ は摩擦散逸エネルギー

一、 ΔN は繰返し数 N からの摩耗増分繰返し数である。これまでに、FEM を用いて式(1)に従うフレッティング摩耗プロセスを安定的且つ効率的に数値計算できる、摩耗残差判定法を提案し、その有効性を確認している。ここでの解析条件は、JSME 基準の試験方法として推奨されているブリッジパッド型試験法で、押付け片の長さは 20mm、接触面長さは 3mm、摩擦係数 $\mu=0.75$ 、負荷応力は SNCM439 鋼材同士の疲労限度を基準とした。摩耗増分計算では、平均負荷応力を加えた後、 $\mu=0.75$ の条件で公称面圧を負荷した。また、2 サイクル目の安定状態における計算結果を摩耗解析と疲労寿命判定に用いた。

累積摩耗と増分摩耗曲線の変化を図 10 に示す。計算条件は、 $P_n=100\text{MPa}$ 、 $\sigma_a=150\text{MPa}$ 、 $R=-1$ の疲労限度である。摩耗初期では増分摩耗曲線の最外端部が最も著しく摩耗するが、摩耗の進行に伴い最大摩耗位置は内側に移動し、摩耗が進行すると増分摩耗曲線の先端域は平坦化される。この増分摩耗曲線の形状が変化する回数を摩耗遷移回数 N_{tran} と呼ぶ。同図の条件では遷移回数は 350~400 回である。摩耗遷移回数と散逸エネルギー D_0 の関係を図 11 に示す。負荷応力と接触面圧との比が減少するとフレッティング面は部分滑り状態となり、 D_0 が減少し N_{tran} が急増する。

摩耗遷移回数での遷移摩耗曲線と摩耗を考慮しない弾塑性解析によって得られた塑性変形曲線を図 12 に示す。種々の計算条件下でも遷移摩耗曲線はほぼ同じ形状である。この接触端部の摩耗形状は遷移回数の約 10 倍以上の疲労回数 ($N=4450$) での摩耗曲線にも類似している。一方、塑性変形量は接触面圧に依存して増加するが、先端部の変形形状は遷移摩耗曲線とほぼ同等である。

図 13 に示すように、接触端部での摩耗量が増大すると接触面圧が低下し、最大負荷時の接触開口点は接触内部へ移動する。最大負荷時の接線応力は遷移回数の 1250 回まで増加し、その最大応力位置は内側へ移動するが、2000 回以降では逆にその応力は減少する。一方、最小負荷時についても 2000 回以降では外端部での最大応力も急速に減少するが、繰返し耐力以下に減少することはない。

多軸応力下の疲労寿命評価パラメータとして用いられている SWT (= $\sigma_{\text{max}} \Delta \epsilon / 2$) (Smith-Watson-Topper) の危険断面における最大値を図 14 に示す。同図中には、押付け片を弾性体 (○)、弾塑性体 (●) として摩耗解析した結果を示す。いずれの場合も SWTp は繰返し数に伴って減少するが、約 2000 回以降では摩耗変形が支配的になり殆んど両者は同じ値となる。この繰返し数よりも若干少ない回数が図 11 に示す摩耗遷移回数に相当する。約 1 万回以降において、 SWTp 値が一定になる傾向が認められる。本解析で

は生成摩耗粉が接触面内に停留することなく、生成と同時にその面内から外部へ排出されるという、理想的な摩耗プロセスであるため、今後は、摩耗粉の排出過程と力学条件との関連性について検討する必要がある。SWTp 値の最大位置は常に最外端部から内側 0.01mm 以内であり、内端部側へ移動する最大応力の位置とは無関係であった。従って、疲労寿命を支配する応力は、図 13 に示す最外端部近傍の σ_{max} とその位置における σ_{min} である。疲労き裂の発生位置は一般には更に内端部側であることが多い。そこで、押付け片のみが弾塑性変形するという解析条件下で摩耗解析を実施したが、図 14 に示す SWTp のピーク位置は殆んど同じであった。図 15 に、接触面圧が 100MPa の場合について、負荷応力比 (R) に対する疲労限度の SWTp 値と公称最大負荷応力の関係を整理した。同図中における SWTelast は初回の弾性解析、SWTplast は押付け片のみを弾塑性変形扱い

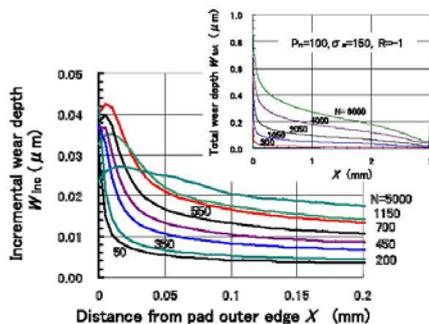


図 10 累積摩耗と増分摩耗曲線の変化。

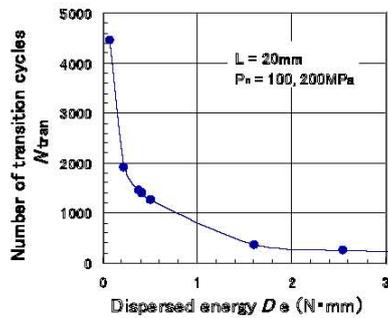


図 11 摩耗遷移回数と散逸エネルギーの関係。

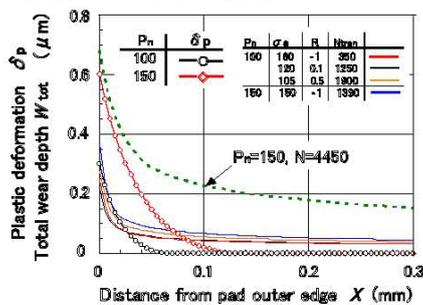


図 12 遷移摩耗曲線と塑性変形曲線。

した初回の弾塑性解析, SWTarns は摩耗変形を考慮した弾性解析で、図 11 の摩耗遷移回数における SWTp 値, 等である。SWTplast 値と SWTtrans 値とほぼ同等であることは、疲労評価パラメータに及ぼす摩耗進行の影響を初回の弾塑性変形解析で代用できる可能性がある。また、いずれの SWTp 値も公称最大応力と比例関係にある。この結果は、疲労限度における疲労評価パラメータは一定値になる、という予測とは明らかに矛盾する。その原因は、図 13 に示す最小応力値が弾性接触解析であるため繰返し耐力値の 1.5~2 倍に達しているためである。

以上のように、大気中その場観察フレティング疲労試験装置と手法を開発し、その有効性を示した。また、真空中でもその場観察試験を行い、接触状態やき裂伝ば挙動などを詳細に明らかにした。さらに、摩耗を考慮した解析手法を新たに提案した。

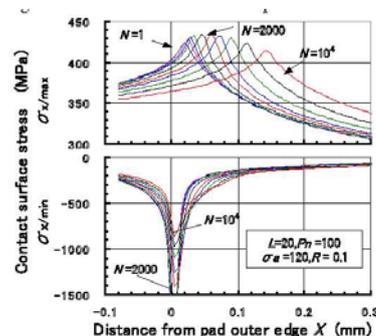


図 13 接触面圧の変化。

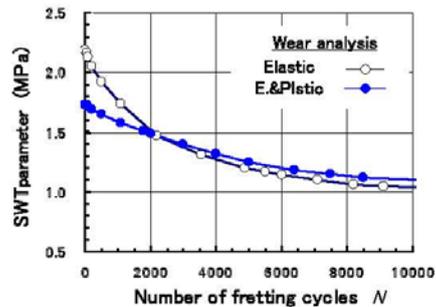


図 14 SWT 値とサイクル数の関係。

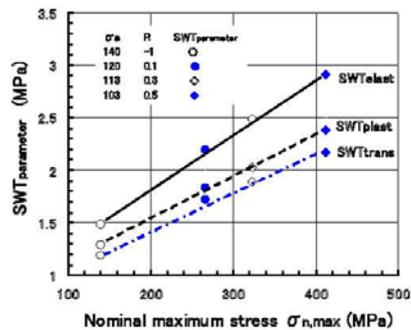


図 15 SWT 値と公称最大負荷応力の関係。

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)

[学会発表] (計 9 件)

- (1) 勝俣悠樹, 武藤睦治, 宮下幸雄, 大塚雄市, 永田晃則, 西田友久, フレッシング摩耗とフレッシング疲労き裂発生の関係について, 日本機械学会北陸信越支部第 47 期講演会, 2010 年 3 月 10 日, 新潟大学.
- (2) 永田晃則, 覚地武夫, 小谷和也, 西田友久, 宮下幸雄, 武藤睦治, フレッシング疲労における実用的な摩耗解析手法の開発とその適用, 日本機械学会 2010 年度年次大会, 2010 年 9 月 5 日, 名古屋工業大学.
- (3) 永田晃則, 覚地武夫, 殿城賢三, 西田友久, 宮下幸雄, 武藤睦治, フレッシング疲労・摩耗解析における疲労寿命評価パラメータの有効性の確認, 日本機械学会材料力学カンファレンス, 2010 年 10 月 10 日, 長岡技術科学大学.
- (4) 永田晃則, 覚地武夫, 小谷和也, 若松建吾, 武藤睦治, フレッシング疲労寿命評価に及ぼす摩耗減肉の影響, 日本機械学会第 18 回機械材料・材料加工技術講演会, 平 2010 年 11 月 27 日, 東京大学.
- (5) 西田友久, 川口瑞樹, 鈴木貴弘, 電子顕微鏡付き疲労試験機を用いたフレッシング疲労挙動のその場観察, 第 16 回高専シンポジウム, 2011 年 1 月 22 日, 米子コンベンションセンター.
- (6) 柄澤 宗紀, 武藤睦治, 宮下 幸雄, 永田晃則, 細貝 寧長, 大塚 雄市, レーザ顕微鏡によるフレッシング疲労過程における摩耗挙動の観察法の改良, 日本機械学会北陸信越支部第 48 期講演会, 2011 年 3 月 5 日, 信州大学.
- (7) 永田晃則, フレッシング疲労・摩耗プロセス解析の現状, 日本材料学会東海支部第 5 回学術講演会, 2011 年 3 月 7 日, 名城大学.
- (8) 西田友久, 鈴木貴弘, 武藤睦治, 水谷淳之介, 川邑正広, 二村 優, アルミニウム合金の長寿命フレッシング疲労特性に及ぼす表面処理の影響, 日本材料学会高温強度・破壊力学合同シンポジウム(第 49 回高温強度シンポジウム, 第 15 回破壊力学シンポジウム), 2011 年 11 月 26 日, 石垣市民会館.
- (9) 鈴木貴弘, 西田友久, 武藤睦治, フレッシング疲労挙動のその場観察, 日本機械学会東海支部第 58 期総会講演会, 2012 年 3 月 16 日, 名古屋工業大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武藤 睦治 (MUTOH YOSHIHARU)
長岡技術科学大学・技術経営研究科・教授
研究者番号: 00107137

(1) 研究分担者

永田 晃則 (NAGATA KOHSOKU)
長岡技術科学大学・技術経営研究科・教授
研究者番号: 80432102
西田 友久 (NISHIDA TOMOHISA)
沼津工業高等専門学校・機械工学科・教授
研究者番号: 60156081
宮下 幸雄 (MIYASHITA YUKIO)
長岡技術科学大学・工学部・准教授
研究者番号: 00303181