

フレットング疲労過程解析に関する研究

白石知久*¹ 篠崎誠*¹ 矢澤貞春*²

The research about the Fretting fatigue process

SHIRAISHI Tomohisa*¹, SHINOZAKI Makoto*¹, YAZAWA Sadaharu*²,

抄録

近年、疲労と摩耗、腐食が関係する破壊として、フレットング疲労が注目されてきている。この部品同士の擦れ合いが原因で生じた疲労は、シミュレーションが困難で設計においては経験に頼ることも少なくなかった。

このフレットング疲労に影響を与える様々な要素について、実際にフレットング疲労試験を行いながら検証を進めた。また動的電子スペckル干渉法による変位計測から、フレットング疲労過程における変形集中箇所とき裂発生位置を可視化した。

キーワード：フレットング疲労、表面粗さ、ひずみ、動的電子スペckル干渉法

1 はじめに

疲労と磨耗、腐食が関係する破壊として、近年フレットング疲労が注目されてきている¹⁾。機械の多くは回転運動や往復運動をしており、直接大きな力がかかる部分でなくとも部品同士の接触による擦れ合いに起因する摩耗などは普通に起きている。そのため設計段階でのフレットングに対する配慮は不可欠である。特に部品間の締結部で生じる応力集中と磨耗によるフレットングの影響については細心の注意を払う必要がある。

従来手法では、このような疲労進展過程はシミュレーションソフトでも計算することは不可能であり、設計に当たっては経験に頼ることも少なくなかった。この数年間、我々は、上下の単純な繰り返し荷重によるものであるが、動的電子スペckル干渉法を用いた金属疲労の進展過程を相関縞によって可視化し、スペckルパターンを時系列的に解析することで、変形量の定量解析に関する

研究を行ってきた。

そこで、動的電子スペckル干渉法での動的に変形を続ける対象物を連続的に観察できる特性を生かし、今までシミュレーションですら不可能であった金属間接触部において発生する磨耗・腐食を原因とした疲労過程の計測を試みた。さらに、接触金属の材質、粗さ、形状など様々な条件下で試験を実施することでフレットング疲労がどのような状況で生じやすいかを検証した。

2 実験方法

2.1 フレットング疲労試験用治具の製作

フレットング疲労を生じさせるには、疲労試験片に対し、その平行部でコの字型をした接触片を接触させ磨耗させることが必要である。この接触片と疲労試験片を試験実施中に接触させておくためには、疲労試験片に対し接触片を介してある一定以上の圧縮荷重を与えることが必要である。この圧縮荷重により接触片が疲労試験片と摩擦し合うこととなる。そこである一定の圧縮荷重をか

*¹ 電子情報技術部

*² 材料技術部

けるため、以下の図1のように押付け用ボルトを疲労試験片の左右両方向から用いることで、圧縮荷重を調整できる治具を製作した。

疲労試験片や接触片については、特に粗さに関する条件がない限り、試験前に以下のような処理を施した。

- (1) 疲労試験片は切削・研削による条痕を除去するために、順次細かい粒度の研磨布紙を使用し、最後に320番より細かいものを使用して試験片軸方向に研磨。
- (2) 疲労試験片の接触片との接触面については、最後に600番より細かいものを使用し研磨。
- (3) 接触片の接触面についても同様に、最後に600番より細かいものを使用して、相対すべりを生じる方向に研磨。

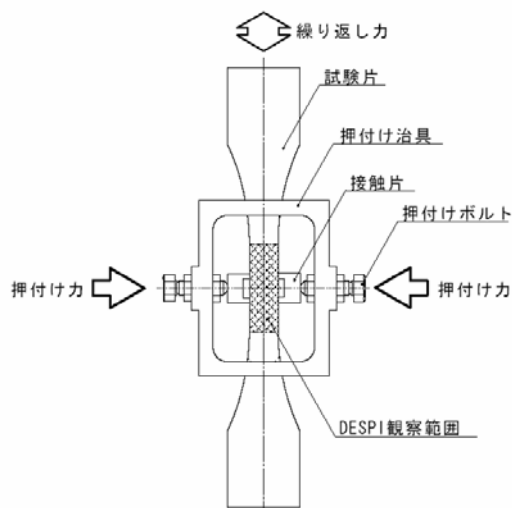


図1 フレッシング疲労試験治具・接触片

2.2 疲労試験

上記のようなフレッシング疲労試験用治具を用い、フレッシング疲労を実際に生じさせ耐久性の評価を行った。また材質、粗さ、接触圧など様々な条件下でフレッシング疲労試験を実施することでフレッシング疲労がどのような状況で生じやすいかを検証した。

疲労試験片の試験材としては機械構造鋼として多く用いられる炭素鋼S45C、及びステンレス鋼SUS304を使用した。ここで炭素鋼S45Cは810

℃で加熱したのち炉冷した焼きなまし処理を施したものでロックウェル硬さHRC32~34のものを使用した。またステンレス鋼SUS304は、市販の熱間圧延、固溶体化処理、酸洗された表面仕上げNo.1のもので、ロックウェル硬さHRC2~4のものを使用した。

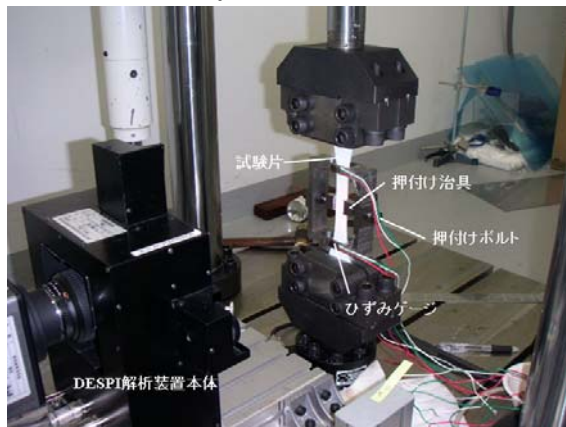


図2 実際の試験状況

2.2.1 接触片・試験片の材質の相違によるフレッシング疲労試験

炭素鋼S45C接触片及びステンレス鋼SUS304試験片に対し、それぞれ通常の疲労試験及びフレッシング疲労試験を行い、破壊までの繰り返し数を計測し、破断した回数により耐久性を比較した。特にフレッシング疲労試験においては、試験片・接触片の材質がそれぞれ同種・異種の場合についても試験を行った。

通常の疲労試験及びフレッシング疲労試験の双方とも応力による荷重制御試験で、繰り返し荷重を正弦波形によって与えた。荷重の最大値及び最小値は、両疲労試験を通して等しい値とした。また、フレッシング疲労試験において治具の締め付け力は、上端下端ともほぼ同じ値となるようにした。

2.2.2 接触片の締め付け強度の相違によるフレッシング疲労試験

疲労試験片に対し、押付け用ボルトの締め付け強度の相違により、フレッシング疲労への影響を調べた。ひずみゲージを押付け治具の上端と下端

に貼付けることにより、左右双方からの押付けボルトの締付け強度の計測を行った。締付け強度の計測後、締付け強度大小それぞれの場合についてフレッティング疲労試験を行った。

試験後、破壊が生じた時点での繰り返し回数から、締付け強度の相違によるフレッティング疲労試験結果への影響を論じた。

2.2.3 試験片及び接触片の表面粗さとフレッティング疲労の進行状況との相関について

表面粗さの相違により、フレッティング疲労試験結果への影響を調べた。

表面粗さの値により、以下のような3つの条件について場合分けを行い、疲労試験を実施した。鏡面とされる表面粗さ値 $Rz=1.0\mu\text{m}$ を基準とし、その値の前後の表面粗さをもった試験片・接触片について試験を行った。

- (1) 試験片、接触片双方が研磨され、表面粗さが $Rz<1.0\mu\text{m}$ を満たすもの
- (2) 試験片、接触片のどちらか一方が鏡面仕上げされ、他の一方の表面粗さが、 $1.0\mu\text{m}<Rz<5.0\mu\text{m}$ となる粗さをもった場合
- (3) 試験片、接触片双方の表面粗さの値が $1.0\mu\text{m}<Rz<5.0\mu\text{m}$ であった場合

2.2.4 動的電子スペckル干渉法による疲労進展課程観察

動的電子スペckル干渉法を用いてフレッティング疲労の進行過程における変形・ひずみ集中の様子を相関縞により可視化した。また相関縞の解析を行うことにより、変形量を計算した。

3 実験結果および考察

3.1 試験結果

3.1.1 接触片・試験片の材質の相違によるフレッティング疲労試験の比較

炭素鋼試験片S45C及びステンレス鋼SUS304試験片に対し、接触片の材質の相違によるフレッティング疲労試験を実施した。ここでは、炭素鋼

S45C試験片に対し同種の炭素鋼S45C接触片を用いた場合と、異種のステンレス鋼SUS304接触片を用いた場合について破断までの繰り返し数を比較した。その結果を図3に示す。同様にステンレス鋼SUS304試験片に対して同種・異種の接触片を用いた場合について破断までの繰り返し数の比較を行った。この結果を図4に示す。

ここでフレッティング疲労における試験治具の締め付けひずみは治具上端で80.6、治具下端で79.8であった。計測時の繰り返し荷重の最大応力を縦軸に取り、破壊までの繰り返し数を計測した。

図3に示した結果より、試験片が炭素鋼S45C接触片がステンレス鋼SUS304の異種材によるフレッティング疲労試験は、試験片・接触片ともに炭素鋼S45Cの同種材による試験よりも破断までの繰り返し数が大きく疲労の進展が遅い。一方、図4に示した結果では、試験片がステンレス鋼SUS304、接触片が炭素鋼S45Cの異種材によるフレッティング疲労試験は、試験片・接触片ともにステンレス鋼SUS304の同種材による試験よりも破断までの繰り返し数が小さく疲労の進展が早い。

これらの結果よりフレッティング疲労の耐久性には、接触片、試験片の硬さが大きく影響することがわかる。すなわち試験片の硬度が接触片の硬度よりも大きい場合、試験片・接触片が同材質で実施した試験よりも疲労の進展は遅く、耐久性がある。逆に試験片の硬度が接触片の硬度よりも小さい場合、試験片・接触片が同材質で実施した試験よりも疲労の進展は早く、早期に破断に至る。

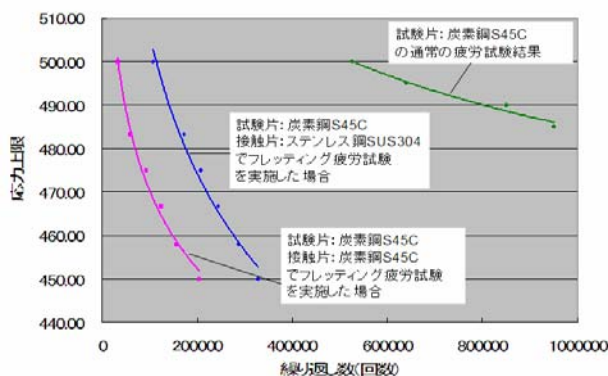


図3 炭素鋼S45C試験片における接触片の材質の相違による疲労破断回数比較

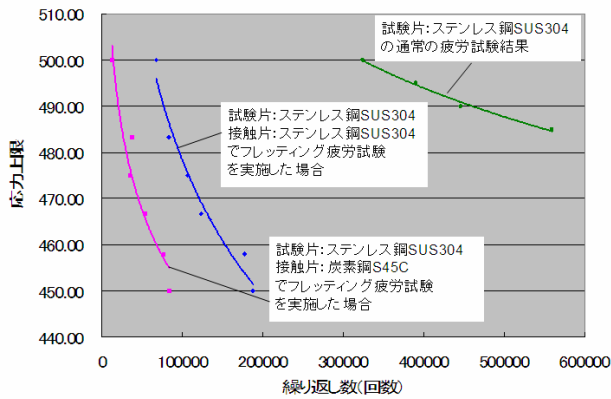


図4 ステンレス鋼SUS304試験片における接触片の材質の相違による疲労破断回数比較

いずれの場合においてもフレットング疲労が生じた試験は、通常の疲労試験に比べ疲労の進展が格段に早くなっており、フレットング疲労による材質の端寿命化が示せた。

3.1.2 接触片の圧縮強度の相違によるフレットング疲労試験結果

炭素鋼試験片S45Cに対し、締め付け強度の相違によるフレットング疲労試験結果の比較を行った。一方は、治具締め付け時の圧縮によるひずみを80程度（治具上端で80.6、治具下端で79.8）とし、もう一方は、治具締め付け時の圧縮によるひずみを96程度（治具上端で96.5、治具下端で96.0）とした。結果を図5に示す。

この結果から、締め付けによる圧縮強度が小さいほど、長期的な疲労耐久性を維持できるということが分かる。

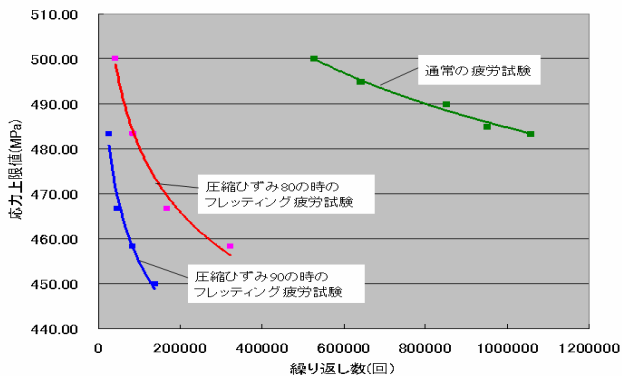


図5 圧縮ひずみの相違によるフレットング疲労試験の破断回数

3.1.3 試験片及び接触片の表面粗さとフレットング疲労の進行状況との相関

表面粗さとフレットング疲労試験の試験結果について、その相関及び影響を調べた。この場合、前述した3つのパターンについて場合分けを行い、疲労試験を実施した(図6)。

- (1) 試験片、接触片双方が研磨され、表面粗さが $Rz < 1.0\mu\text{m}$ を満たすもの
 試験片粗さ：0.981 μm 、
 接触片粗さ：0.902 μm
- (2) 試験片、接触片のどちらか一方の表面粗さが $Rz < 1.0\mu\text{m}$ を満たし、他の一方の表面粗さが、 $1.0\mu\text{m} < Rz < 5.0\mu\text{m}$ となる粗さをもった場合
 試験片粗さ：3.862 μm
 接触片粗さ：0.984 μm
- (3) 試験片、接触片双方の表面粗さの値が $1.0\mu\text{m} < Rz < 5.0\mu\text{m}$ であった場合
 試験片粗さ：4.025 μm
 接触片粗さ：3.912 μm

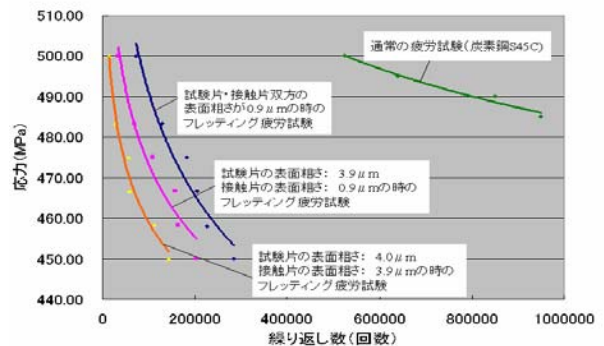


図6 表面粗さとフレットング疲労進展との相関関係

試験片・接触片双方の表面粗さが0.9 μm である場合と、試験片・接触片双方の表面粗さがそれぞれ4.0 μm 、3.9 μm である場合を、試験結果により比較すると、試験片、接触片双方の表面粗さの値が小さい場合ほど、フレットング疲労による劣化の進行は遅い。つまり表面粗さの値が小さいほど長期的な疲労耐久性が維持できることが分かる。

3.1.4 動的電子スペckル干渉法による疲労進展課程観察

フレットング疲労過程における変形・歪み集中の様子を動的電子スペckル干渉法による相関縞で可視化した。変形前後のスペckルパターン画像を差分することで、変形の等しい位置に相関縞が現れる。フレットング疲労が進展すると、試験片・接触片双方の接触面で磨耗・腐食が生じる。磨耗・腐食が生じた時点での相関縞の様子を図7に示す。左図は縦方向の変形量を、右図は横方向の変形量を示す。

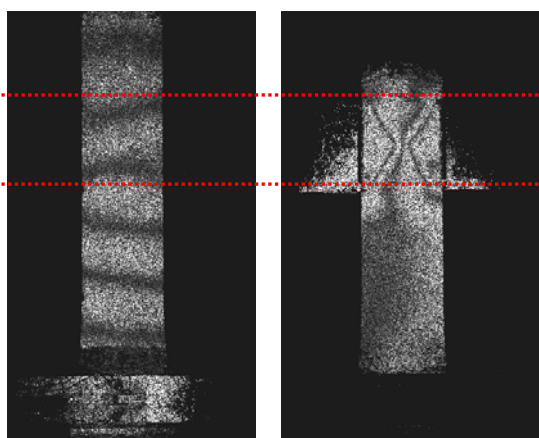


図7 磨耗・腐食発生時の動的電子スペckル干渉法相関縞（点線は接触片位置）

今回のフレットング疲労試験においては磨耗・腐食が始まった段階で横軸方向の変形による相関縞はX字型の縞を描いた。

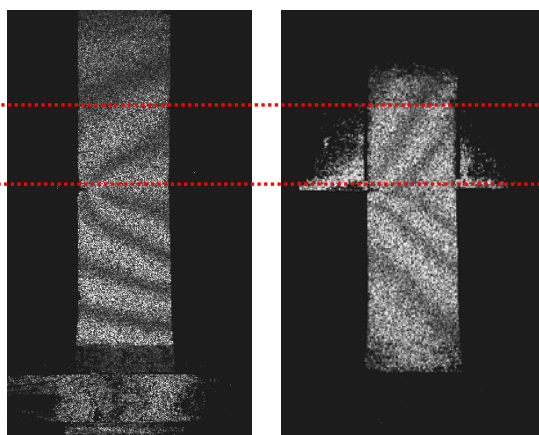


図8 き裂発生時の動的電子スペckル干渉法相関縞（点線は接触片位置）

フレットング疲労が進むにつれ、接触面近傍では、磨耗・腐食が生じ、さらにき裂が発生する。図8には、接触面近傍でき裂発生した直後の相関縞の様子を示す。この段階になると各接触位置を繋ぐX字型の相関縞は消え、き裂の発生箇所を中心に相関縞が集中する。この様子からき裂発生箇所で大きなひずみが生じていることが分かる。

4 まとめ

フレットング疲労過程解析を行い、以下の事が分かった。

- (1) フレットング疲労において、試験片材質・接触片材質が同一である場合、両材質が互いに異なる場合よりも長期的な疲労耐久性を維持できることが分かった。
- (2) 試験片及び接触片が粗面同士である場合のフレットング疲労では、破壊の進展が早いことが分かった。また試験片・接触片の双方の表面粗さが小さい場合、疲労耐久性が向上する事が分かった。
- (3) 圧縮ひずみが大きいほど、フレットング疲労の進展が早くなることがわかった。
- (4) 動的電子スペckル干渉法を用いた、相関縞の解析を行った。接触位置よりき裂が発生し破壊に至るのだが、き裂発生時に相関縞の複雑な集中が見られた。また、試験片内で接触位置を繋ぐような斜めの横断縞が見られるなど、接触位置を基点とした縞が観察された。今後は変形解析を行い、実際にどのような変形が起こっているのか解明したい。

参考文献

- 1) フレットング疲労試験方法, 日本機械学会
- 2) K.Nishioka, K.Hirakawa : Fundamental Investigations of fretting fatigue, Bulletin of JSME Vol.12, No.50, pp.180-187
- 3) T.Hattori, M.Nakamura, H.Sakata, T.Watanabe : Fretting Fatigue Analysis Using Fracture Mechanics, JSME international journal. Ser.1 Solid mechanics, Strength of materials Vol.31, No.50, pp.100-107