

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

潤滑下のフレッチングにおける交差溝表面微細加工の初期なじみへ及ぼす効果に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2016-06-23 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 岡本, 実樹 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1275

修士学位論文

潤滑下のフレッチングにおける交差溝表面微細加工の初期なじみへ及ぼす効果に関する研究

平成 27 年度
(2016 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
海洋システム工学専攻

岡本 実樹

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景および目的	1
1.2 本論文の構成	1
第2章 表面微細加工装置	3
2.1 表面微細加工装置の概要	3
2.2 平面試験片加工手順	3
2.3 平面試験片パターン	3
第3章 フレッチング試験装置及び軸受鋼 SUJ2 同士のフレッチング試験	10
3.1 フレッチング試験装置の概要	10
3.2 試験条件	10
3.3 試験結果	11
3.3.1 基本条件下の結果	11
3.3.2 高荷重条件下の結果	11
3.3.3 低速度条件下の結果	12
3.4 考察	12
3.5 小結	13
第4章 接触圧力解析	24
4.1 接触圧力解析の概要	24
4.2 解析結果	26
4.2.1 計算で得られた接触形状と摩耗痕との比較	26
4.2.2 接触圧力分布	27
4.3 考察	28
4.4 小結	29

第 5 章 フレッチング面の直接観察	41
5.1 フレッチング面の直接観察方法	41
5.2 試験条件	41
5.3 試験結果	41
5.4 考察	42
5.5 小結	42
第 6 章 初期なじみの機構とそれに及ぼす表面微細加工効果に関する考察	47
6.1 初期なじみの機構に関する考察	47
6.2 初期なじみに及ぼす表面微細加工の効果に関する考察	47
第 7 章 結論	48
参考文献	49
謝辞	50

第1章 序論

1.1 研究背景および目的

フレッチングとは、「接触する 2 面間に微小な相対運動が周期的に繰り返されるときに生じる表面損傷」⁽¹⁾のことをいう。例えば、軸受の輸送時の振動で転動体と内輪間に発生する。フレッチングは材料の疲労を促し機械の寿命を縮める、焼き付けを起こす等の問題がある。その軽減に関する種々の研究がされており、その中に接触面に潤滑剤を供給する方法⁽¹⁾がある。確かに潤滑剤を供給すると、フレッチングは軽減される。しかし、フレッチングは微小振動であるため、真の接触面において潤滑剤が介在しにくい。

また、表面微細加工も潤滑油の通り道や油だまりの付与、それによる摩耗痕の排出、負荷容量の増加等、潤滑状態を改善する表面技術として活発に研究がおこなわれている。しかし、一方方向摺動や大振幅の往復動に対する研究⁽²⁻⁵⁾が多く、微小振動であるフレッチングに対して焦点を当てた研究⁽⁶⁻⁸⁾は少ない。

これらの点を踏まえ、本研究は潤滑剤のうち、特に潤滑油をフレッチング面に介在しやすくするために、表面微細加工の技術を用いた。

フレッチング試験を行い、潤滑状態の評価基準として「”初期なじみ”の起きやすさ（初期なじみ性）」を用いた。”初期なじみ”は、摩擦係数の急下降現象であり、より少ない摺動回数で初期なじみが起きれば、潤滑状態が早期に改善したと判断できる。地引らの研究⁽⁹⁾で、くぼみ型表面微細加工に対し初期なじみ性の向上が見られた。本研究では、くぼみに加え、交差溝表面微細加工を対象とし、表面微細加工のない鏡面仕上げの試験片を用いて種々の表面が及ぼす初期なじみへの効果を考察した。考察の材料として、フレッチング試験だけではなく、接触圧力解析とフレッチング面の直接観察を用いて、なじみ現象そのものの考察も行った。

1.2 本論文の構成

本論文は 7 章で構成されている。第 1 章では序論として本研究の背景と目的を述べている。

第 2 章では、表面微細加工を施す装置の説明と種々の試験に用いた平面試験片の解説を行った。

第 3 章では軸受鋼 SUJ2 同士でのフレッチング試験を通して表面微細加工の初期なじみ性の評価を行った。また、荷重と速度の影響についても評価を行った。

第 4 章では第 3 章の実験の接触面の圧力解析を行い、接触形状や圧力分布

から表面微細加工の初期なじみ性への影響を考察した。

第5章ではフレッチング面の直接観察を行い、初期なじみ前後で表面がどのように変化していくかを確認し、初期なじみそのものの考察へ活かした。

第6章では、3つの実験と解析を総合して、初期なじみの機構と表面微細加工の効果に関して考察を行い、第7章に結論を記した。

第2章 表面微細加工装置

2.1 表面微細加工装置の概要

本研究で表面微細加工に用いた装置の外観を図 2.1 に示す。装置は主として X-Y-Z 自動ステージ、ダイヤモンド圧子、軸受、重錘、除振台から構成されている。ステージ上に円筒試験片をセットし、ステージを動かしてダイヤモンド圧子に押し付けることによって表面微細加工を行う。位置決め精度は X-Y 方向が $2\mu\text{m}$ 、Z 方向が $1\mu\text{m}$ である。ステージの制御はデジタル制御のコントローラと PC を使って行う。

圧子の種類を変えることによってくぼみや溝を形成させることができる。また重錘の重さを変えることによって、様々な大きさのくぼみや溝を形成させることができる。図 2.2 は重錘による荷重と表面微細加工の大きさの関係を示している。

2.2 平面試験片加工手順

直径 20mm の SUJ2 円筒試験片の平面部をエメリー紙と馬布により研磨し、鏡面仕上げを行う ($R_z=0.23\pm 0.04\mu\text{m}$)。研磨後はヘキサソで洗浄する。

次に、押し付けのための高さ (Z 軸) 計測を行う。表面に潤滑油を塗布し表面微細加工装置のステージにセットする。加工範囲 4 隅の 4 点において、制御コントローラを手動で操作しステージを Z 方向に上げ、圧子上部に設置してある荷重センサが反応した座標を記録する。また、この時加工を均一にするため、4 点の内の最大高さと最小高さの差が $50\mu\text{m}$ 以下であることを確認する。

図 2.2 を参考にして、作製したいテクスチャの大きさにあわせた重さの重錘を軸受上部に置き、専用プログラムの加工設定をする。プログラムを走らせれば以後は加工完了まで自動で行う。

加工されたテクスチャの端部には圧子の押し込みによって盛り上がり (パイルアップ) が生じる。これを研磨によって取り除く。

2.3 平面試験片パターン

本研究で使用した平面試験片は「鏡面仕上げ」と表面微細加工である「交差溝形状」と「くぼみ形状」の 3 種類である。平面試験片の外観を図 2.3 で示す。

「交差溝形状」は荷重 1kgf で作成し、溝幅 $32\mu\text{m}$ 、ピッチ $82\mu\text{m}$ である。(図 2.4、2.5)

「くぼみ形状」は荷重 2kgf で作成し、くぼみの大きさ $82\mu\text{m}$ 、ピッチ $82\mu\text{m}$ である。(図 2.6、 2.7)

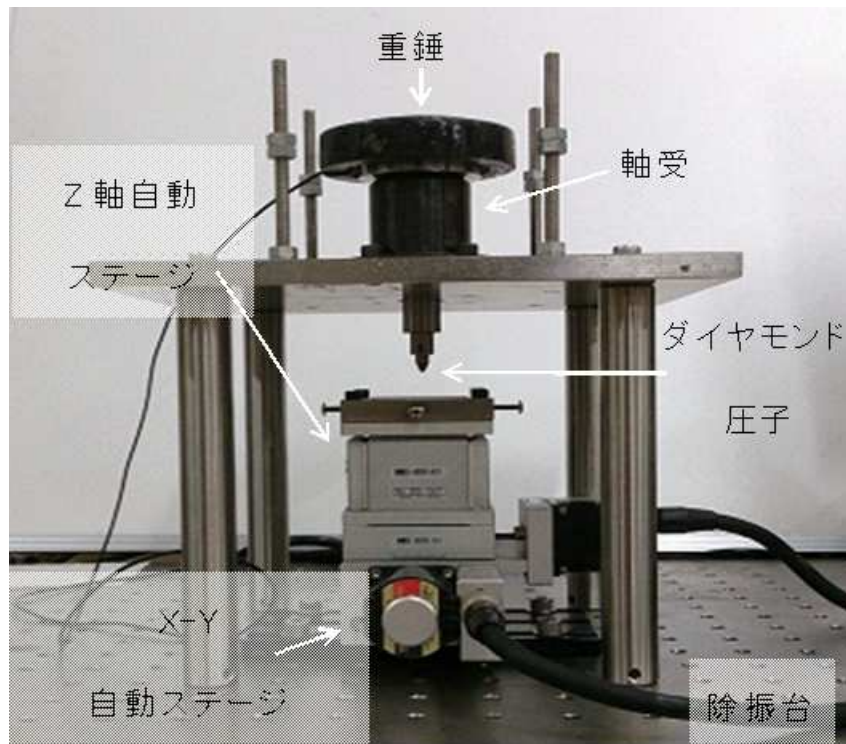


図 2.1 微細加工装置外観

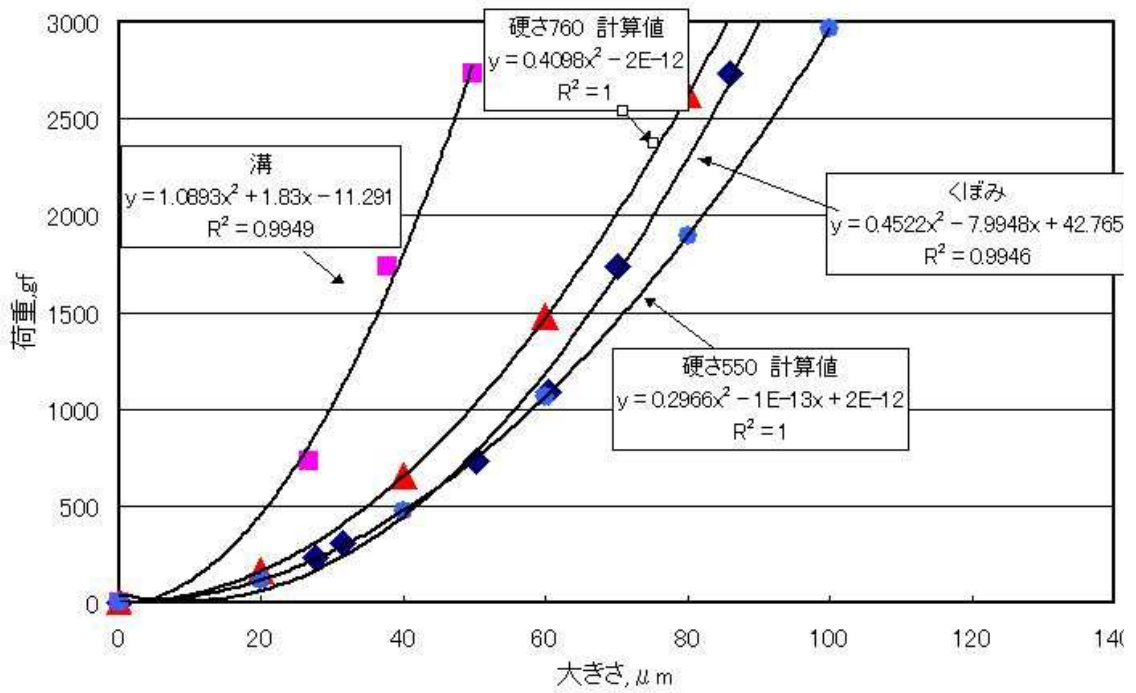


図 2.2 荷重と表面微細加工の大きさの関係

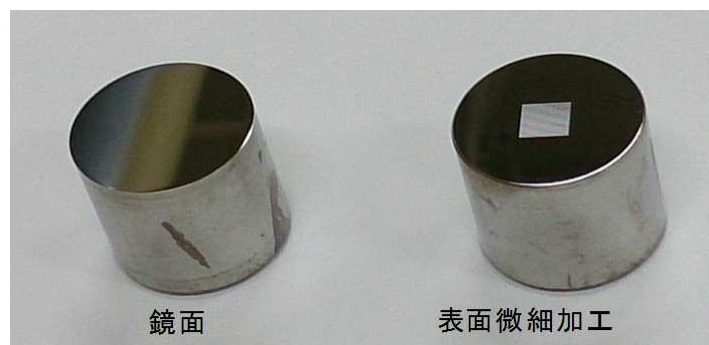


图 2.3 平面試驗片

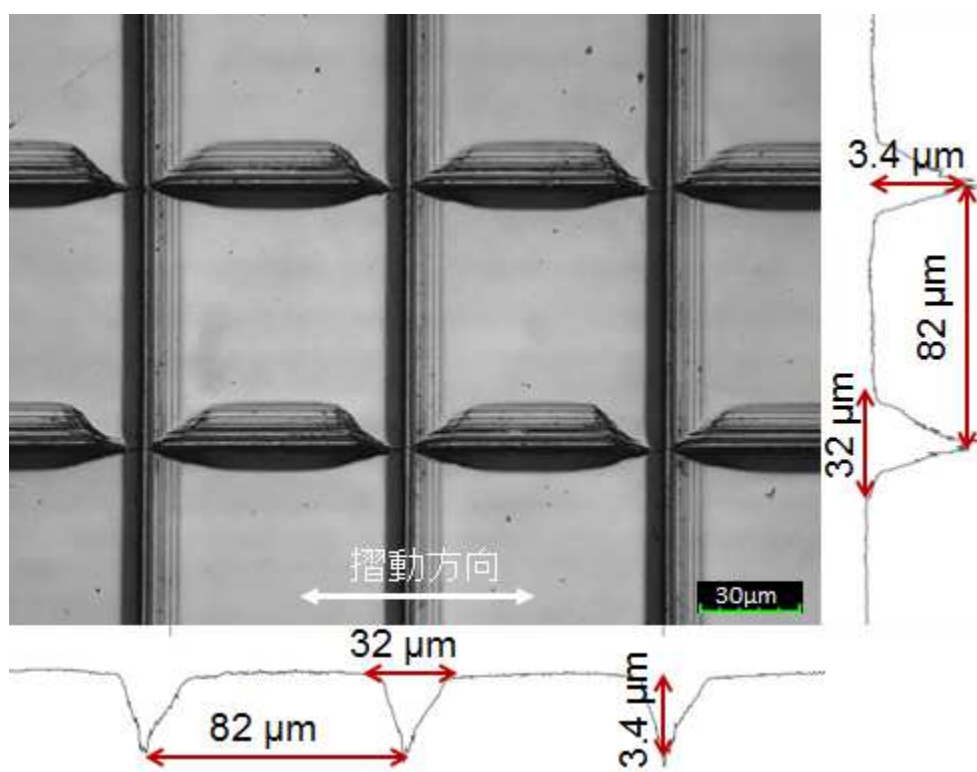


图 2.4 交差溝試驗片 (断面形状)

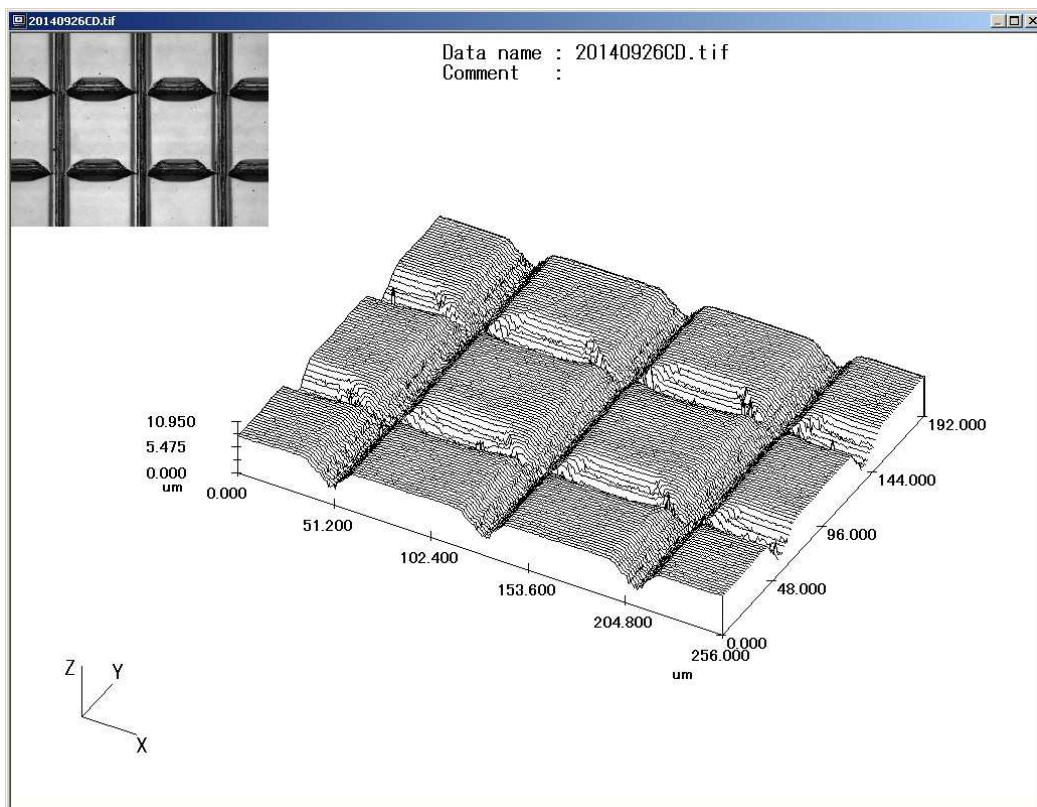


图 2.5 交差溝試驗片（鳥瞰圖）

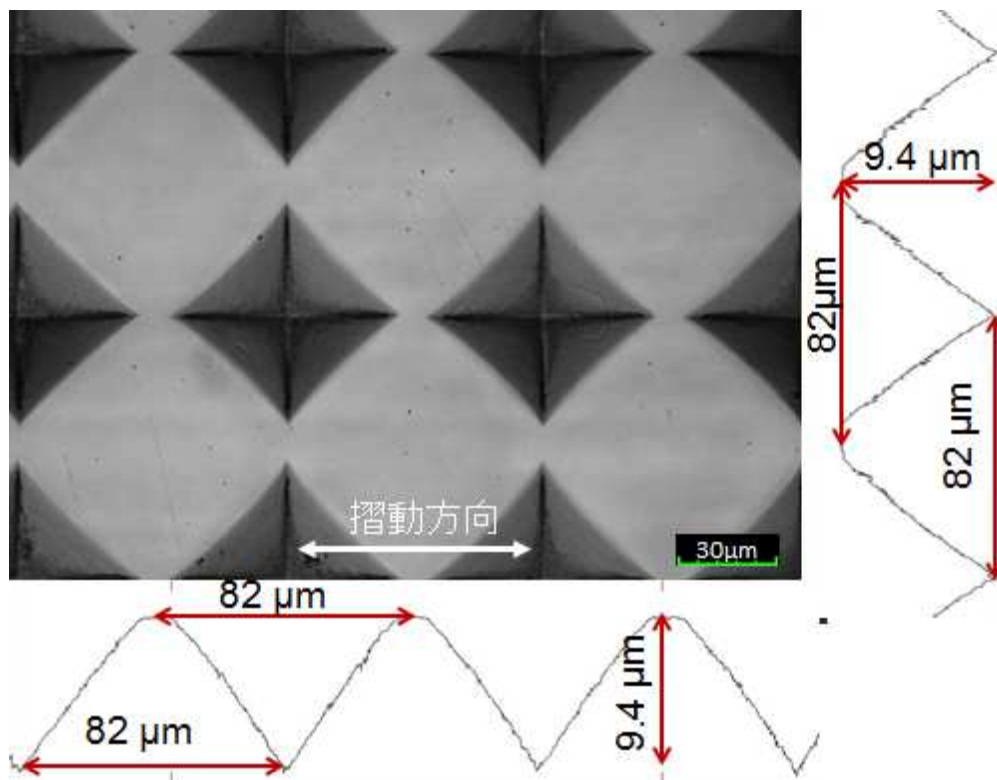


図 2.6 くぼみ試験片（断面形状）

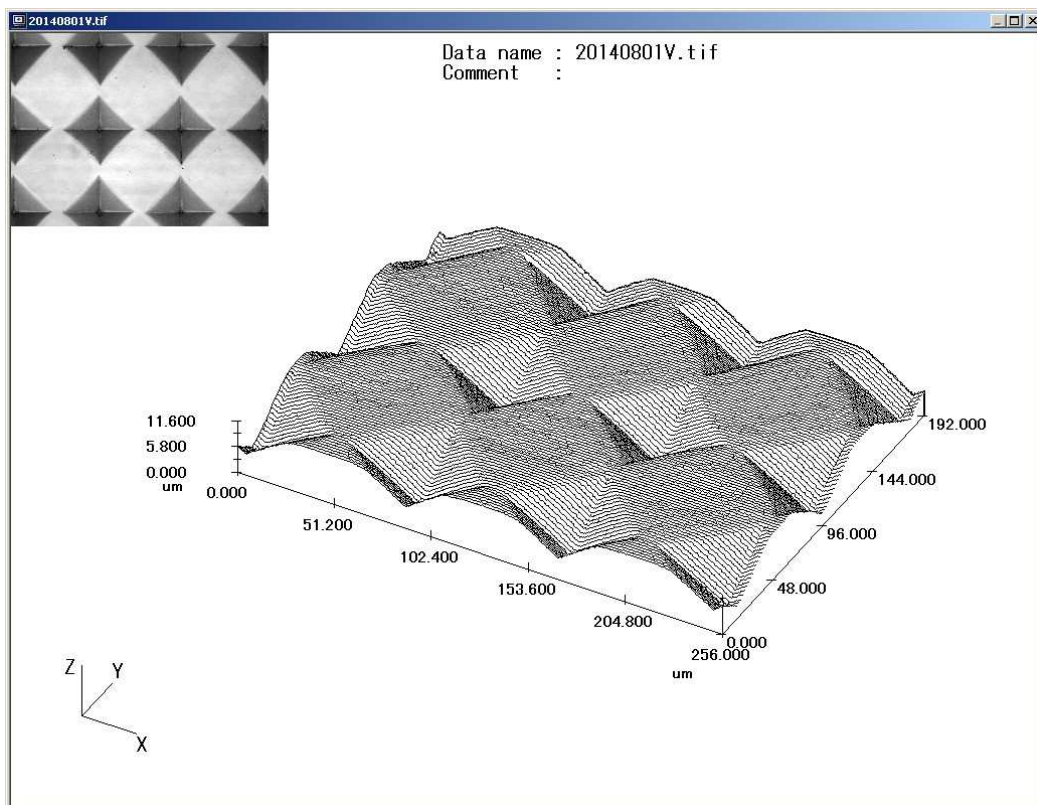


図 2.7 くぼみ試験片（鳥瞰図）

第3章 フレッチング試験装置及び SUJ2 同士のフレッチング試験

フレッチング試験を各試験片に対して行い、表面微細加工による潤滑状態の向上効果を初期なじみ現象から評価した。

3.1 フレッチング試験装置の概要

図 3.1 にフレッチング試験装置の概略を示す。加振はモーターの回転運動をクランク機構により並進運動に変換することで行う。並進運動は片持ち梁となっているバーに伝えられ、微小往復運動を再現する。摩擦力の測定にはひずみゲージを使用し、上下試験片の相対変位の測定には非接触の変位計を使用している。

固定側試験片には SUJ2 (HV760) $\phi 9.525\text{mm}$ の球試験片を、駆動側試験片には第 2 章で示した各種加工を施した SUJ2 (HV760) の円筒試験片を使用した。

潤滑油は一般的に用いられる合成油であるポリアルファオレフィン (PAO) を使用した。添加剤の影響を排除するため、この PAO は添加剤が使われていない基油である。潤滑油の供給方法は摩擦面に塗布する方法を用いた。このとき潤滑油はメニスカスを形成する。

3.2 試験条件

表 3.1 に実験条件を示す。また、荷重と摺動周波数の組み合わせに関しては図 3.2 に示す。本実験は荷重を 9.8N、摺動周波数（モータの回転数）を 7Hz に固定し、設定振幅を変えて実験を行う。以下、この荷重と摺動周波数を基本条件と呼称する。荷重と摺動面速度の影響をそれぞれ見るために、基本条件から荷重を 19.6N にした高荷重条件と、摺動周波数を 3Hz にした低速度条件で試験を行った。

試験片には交差溝形状、くぼみ形状、鏡面仕上げの 3 種類を使用した。

評価の方法は摩擦係数の急降下現象である「初期なじみ」を使用した。計測装置でひずみゲージの摩擦力の経時変化を紙出力させ、このデータから摩擦係数を読み取り、初期なじみが実験中のどの時点で生じたのかを計測した。紙出力上の初期なじみの例を図 3.3 に示す。摩擦係数が 0.5 程度だったものが摺動回数 840 の地点にて約 0.15 まで急減少している。この 840 を「初期なじみに要する摺動回数 N_r 」とする。また、レーザー顕微鏡を用いて摩耗痕を撮影し、その摩耗痕幅を計測した。摩耗痕幅の測定例を図 3.4 に示す。摺動方向に対して直角方向の最大部を測定した。

3.3 試験結果

3.3.1 基本条件下の結果

図 3.5 に設定振幅 $A=70\ \mu\text{m}$ 時の摩擦係数の経時変化を示す。交差溝形状において、初期なじみまでの摺動回数が最も少ないことがわかる。次にくぼみ形状が少なく、最も摺動回数が必要なのは鏡面仕上げである。

図 3.6 に初期なじみに要する摺動回数 N_r と設定振幅 A の関係を示す。図中の矢印は、20 万回の摺動試験の間に初期なじみが起きなかったことを示している。一方、 $N_r=1$ 回は試験開始から摩擦係数が低かったことを表している。設定振幅 A が増えるほど、 N_r は小さくなる傾向が全ての試験片において見られる。また、 N_r は同一設定振幅上で比べると、交差溝形状、くぼみ形状、鏡面仕上げの順に小さいことがわかる。

図 3.7 に摩耗痕幅と設定振幅 A の関係を示す。得られる摩耗痕幅は平面と球面でほとんど変わらないため、球面のみの結果である。第 2 軸には、2 種の表面微細加工試験片の摩耗痕と鏡面仕上げの摩耗痕との比を示している（破線）。摩耗痕幅は概ね、交差溝形状、くぼみ形状、鏡面仕上げの順で大きいことがわかる。実線で表記された実測値に注目すると、設定振幅 A が大きくなるほど摩耗痕幅が大きくなる傾向が見られる。表面微細加工の摩耗痕幅は、設定振幅 $A=100\ \mu\text{m}$ 以降変動が少ない。また、摩耗痕に関しては第 4 章において、接触圧力解析の結果と共に詳しい観察を行う。

3.3.2 高荷重条件下の結果

基本条件の荷重 9.8N を 2 倍の 19.6N にして荷重の影響を見る。

図 3.8 は初期なじみに要する摺動回数 N_r と設定振幅 A の関係を示す。基本条件と同様に、同一設定振幅上で、交差溝形状、くぼみ形状、鏡面仕上げの順で N_r が小さいことが明らかである。全ての試験片で、設定振幅 A が増えるほど、 N_r は小さくなる傾向も基本条件同様に見られた。

図 3.9~3.11 にそれぞれの試験片における、なじみに要する摺動回数 N_r と設定振幅 A の関係を条件別に示す。全ての試験片において、高荷重条件のほうが、初期なじみを得るのに、より多い摺動回数もしくは大きい設定振幅が必要であることがわかる。

図 3.12 に摩耗痕幅と設定振幅 A の関係を示した。基本条件での実験よりサンプル数が少ないため、明言はできないが、設定振幅 A が大きいほど摩耗痕幅が大きくなる傾向は基本条件の結果と一致する。しかし、交差溝形状とくぼみ形状の摩耗痕幅の差は基本条件と異なりほとんど無い。鏡面仕上げにおいて摩耗痕幅が最も小さいのは基本条件と同様である。

3.3.3 低速度条件下の結果

基本条件の摺動周波数 7Hz を 3Hz にして速度の影響を見る。

図 3.13 は初期なじみに要する摺動回数 N_r と設定振幅 A の関係を示す。基本条件と同様に、全ての試験片で、設定振幅 A が増えるほど、 N_r は小さくなる傾向が見られた。また、同一振幅上で、交差溝形状、くぼみ形状、鏡面仕上げの順で N_r が小さい。

図 3.14~3.16 にそれぞれの試験片における、なじみに要する摺動回数 N_r と設定振幅 A の関係を条件別に示す。図 3.14 の交差溝形状において、速度の影響は小設定振幅時にはほとんど見られない。設定振幅 $A=80\mu\text{m}$ 以降に N_r に明確な差が見られる。この傾向はくぼみ形状と鏡面仕上げでも見られる。 N_r の変化の境目は図 3.15 のくぼみ形状においては $A=80\mu\text{m}$ 、図 3.16 の鏡面仕上げは $A=100\mu\text{m}$ である。

図 3.17 に摩耗痕幅と設定振幅 A の関係を示した。設定振幅が大きくなると、摩耗痕幅が大きくなる傾向は見られない上に、基本条件に比べ摩耗痕幅(図 3.7)が小さい。摩耗痕幅の大きさは概ね交差溝形状、くぼみ形状、鏡面仕上げの順に大きく、この傾向は基本条件と一致する。

3.4 考察

なじみ現象にはさまざまな要因があるとされている。赤岡⁽¹⁰⁾はその主要因を下記のように挙げている。

1. 軸受面の凹凸が塑性変形もしくは摩耗によって形を変えていくことにより、ジャーナル面とのよいあたりを導く conformability
2. 潤滑を妨害してかじりや焼き付の因となるところの、摩耗粉末や固形異物を軸受面に完全に埋め入れる embeddability
3. 潤滑剤軸受面とすきまなく強固に結合して十分に面をおおう wettability

他にも、日本トライボロジー学会編 摩擦・摩耗試験機とその活用⁽¹¹⁾の中に、「摩擦の繰返しによる”なじみ”は摩耗による初期表面粗さの変化と、凝着移着の繰返しによる材料成分の混合層の形成および酸化を中心にした反応生成物の付加によってもたらされる。」とある。

このように、表面のなじみには一程度の摩耗によりもたらされると考えられる。よって設定振幅を大きくし、すべり距離を増やしたことで摩耗が促進され N_r が小さくなると言える。これは3試験片と3条件の全てに当てはまる。(図 3.6, 3.8, 3.13)

次に3条件の摩耗痕幅の計測(図 3.7, 3.12, 3.17)において、表面微細加工2種が鏡面仕上げより大きかった理由として、接触剛性の低下が挙げられる。地引ら⁽⁹⁾はくぼみ型表面微細加工により無加工に比べ剛性が低下する

と述べており、剛性の低下が接触幅の増加を招き、結果摩耗痕幅が広がったものと考えられる。摩耗痕幅が広がることは一定の摩耗を得ることにも繋がるので、表面微細加工のほうが早期に初期なじみを得られたと考察できる(図 3.6, 3.8, 3.13)。また、表面微細加工と摩耗痕幅の関係については第 4 章においても接触圧力解析の結果と交えて考察を行う。

荷重の変化が及ぼす影響について考察をする。高荷重条件において、付加する荷重が増えたことで、凝着力が強くなる。そのため、すべり出しに必要なせん断力は基本条件よりも大きい。よって、高荷重条件においては、基本条件よりも設定振幅を大きくすることで、すべり出しと一定度の摩耗を得て初期なじみが完了したと考えられる。

速度の変化が及ぼす影響について考察をする。

まず、試験装置の特性による摺動面の速度の変化について考える。フレッチング試験装置は微小往復動を与えるものである。よって、速度 v は $v = A\omega \sin \omega t$ で与えられる。 A は設定振幅、 ω は摺動周波数である。摺動周波数を減らすことで、摺動面の摺動速度が遅くなる。また、設定振幅を大きくすることで、摺動面の速度が速くなる。

図 3.14~3.16 を見ると、一定の設定振幅までは N_r の差は見られず、以降は速度が速い基本条件のほうが N_r は小さくなる。一定の摺動面速度があることで潤滑油が接触面に巻き込まれやすくなり、なじみやすいのだとすると、その速度に達するのは基本条件のほうが低振幅で済む。よって、大振幅で摺動周波数による差が出ると考えられるが、考察の域を出ない。摩耗痕幅が基本条件よりも小さい理由としては、フレッチング装置自体の振動が挙げられる。第 5 章の直接観察実験でも触れるが、摺動周波数 7Hz(基本条件)において、3Hz(低速度条件)より大きな振動が装置自体に発生することがわかっている。

基本条件と高荷重条件においては設定振幅 A の増加につれて摩耗痕幅が増える傾向にあるが(図 3.7, 3.12)、一部は低速度条件(図 3.17)に見られるように一定の摩耗痕幅に安定しており、さらに大きい振幅での結果がないと考察ができない。

3.5 小結

潤滑油中におけるフレッチング試験の結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 設定振幅が大きいと初期なじみは早期に起きる傾向がある。
- 2) 表面微細加工には表面剛性の低下により、接触幅を増大させる効果がある。
- 3) 荷重を増やした場合は、初期なじみを得るために大振幅を要する。
- 4) 摺動周波数の影響は大振幅時に現れる。

表 3.1 実験条件

平面試験片	軸受鋼 (SUJ2/HV760)
球試験片	軸受鋼 (SUJ2/HV760)
接触形態	球と平面の点接触
摺動周波数	3 Hz (速度変化条件), 7 Hz
設定振幅 A	30 - 200 μ m
摺動回数 N	20 万回
荷重	9.8 N, 18.6 N (荷重変化条件)
潤滑油	ポリアルファオレフィン (PAO) (74mm ² /s@313K)
温度、湿度	24 \pm 2 $^{\circ}$ C、44 \pm 27%RH

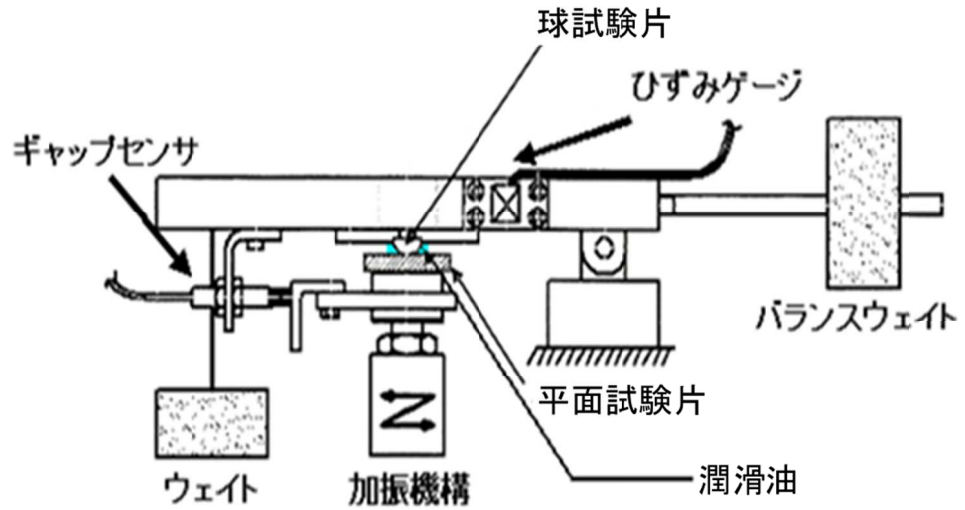


図 3.1 フレッチング試験装置概略図

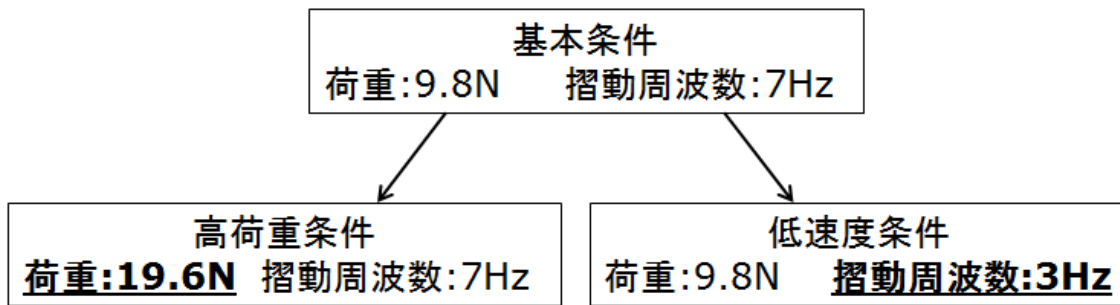


図 3.2 荷重と撓動周波数の組み合わせ

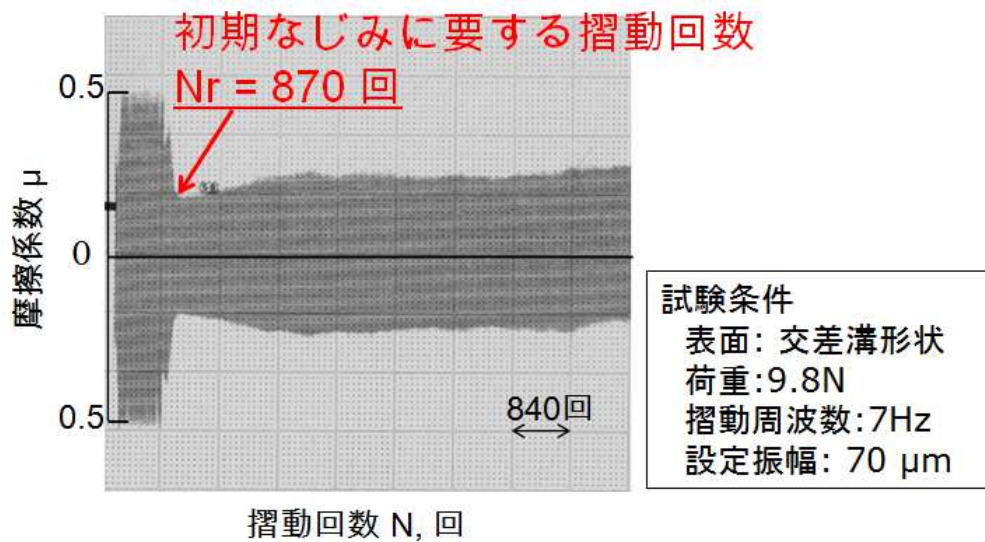


図 3.3 初期なじみの例

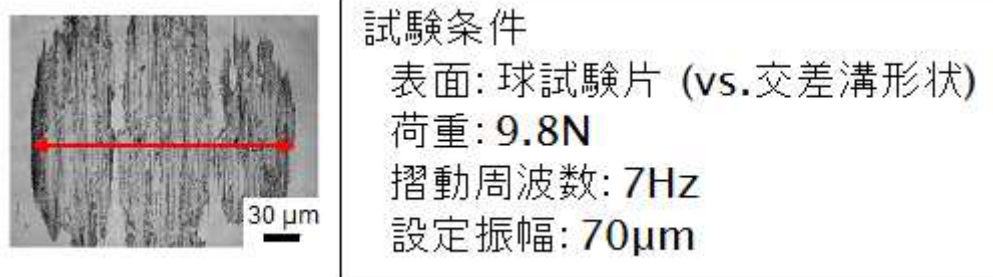


図 3.4 摩耗幅計測箇所

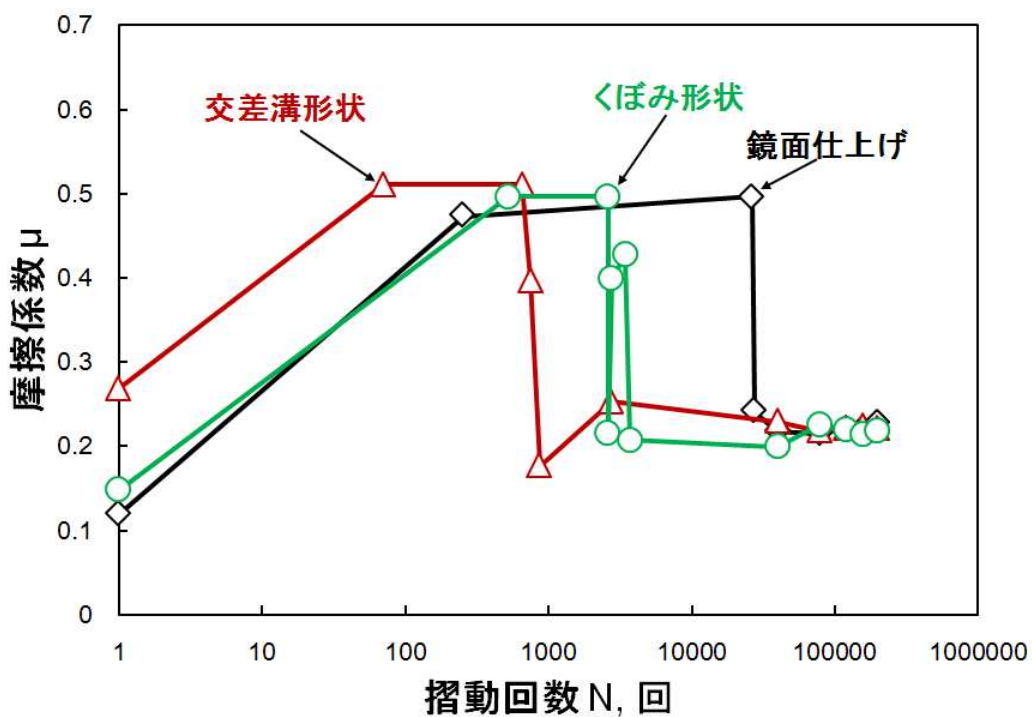


図 3.5 摩擦係数の経時変化 (基本条件、設定振幅 $A=70\mu\text{m}$)

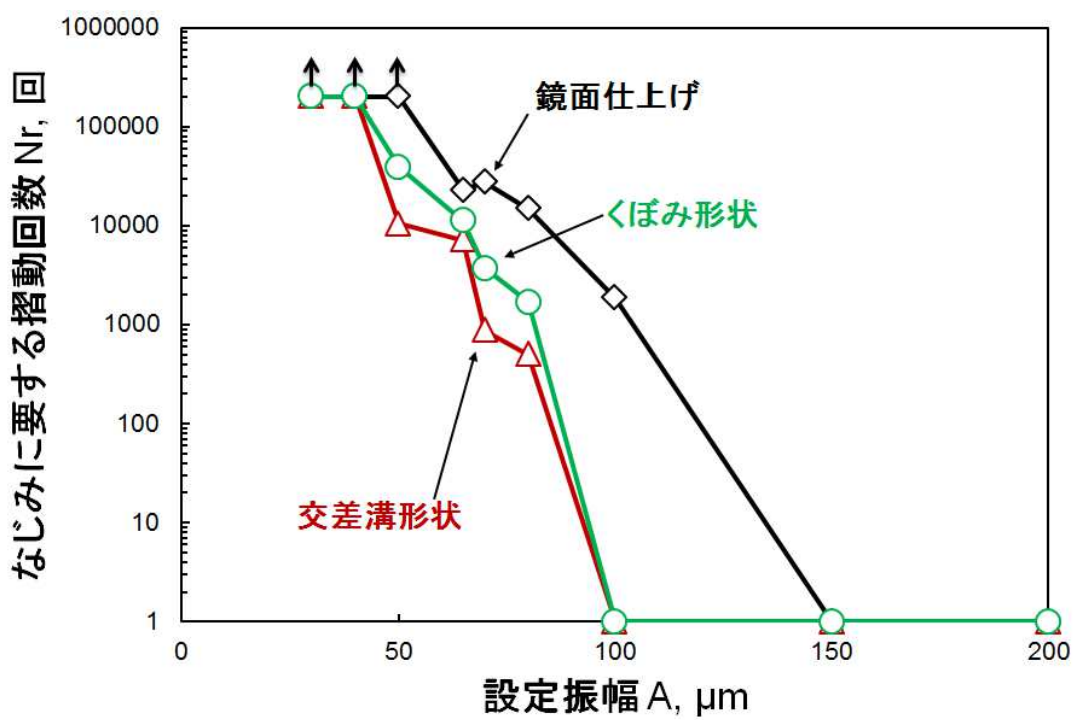


図 3.6 設定振幅 A が及ぼすなじみやすさへの影響 (基本条件)

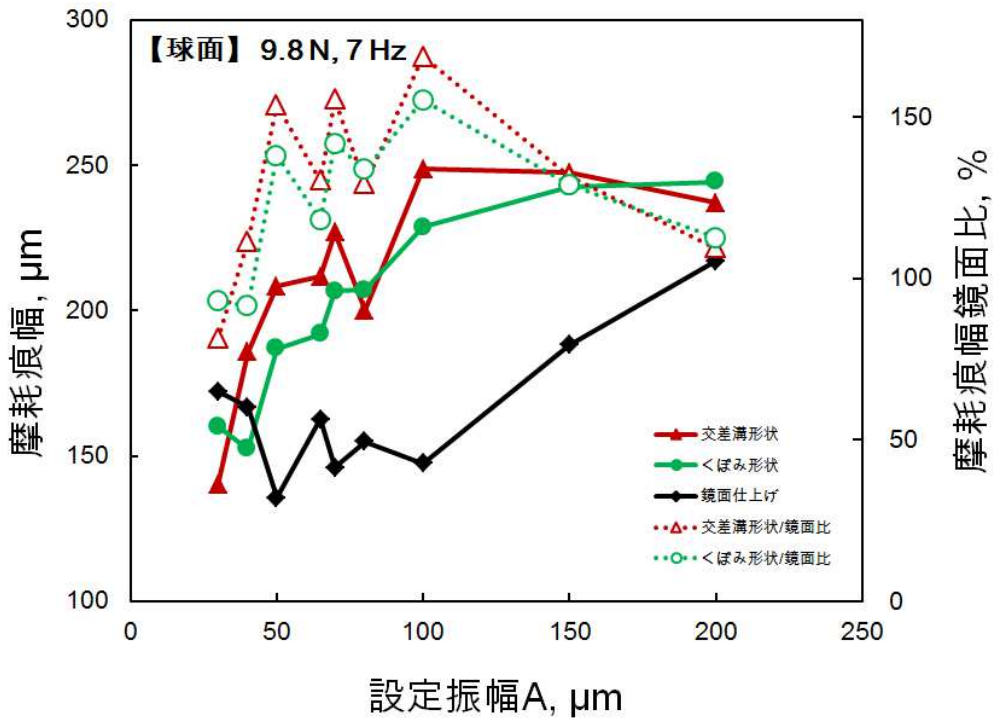


図 3.7 摩耗痕幅と設定振幅 A の関係 (基本条件)

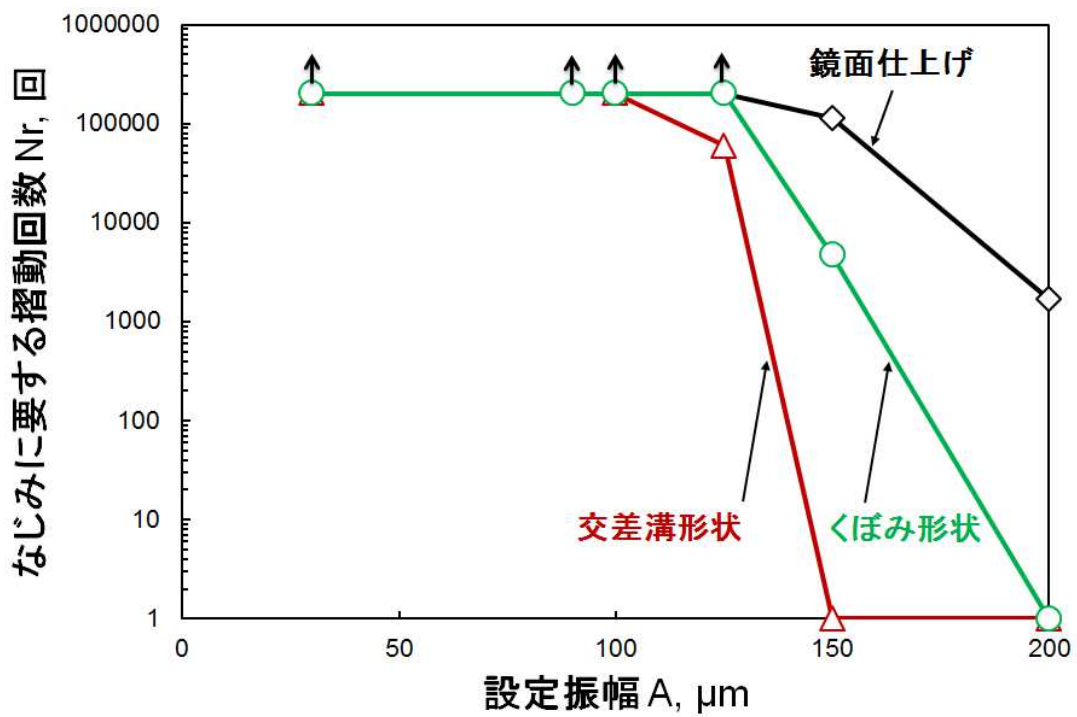


図 3.8 設定振幅 A が及ぼすなじみやすさへの影響 (高荷重条件)

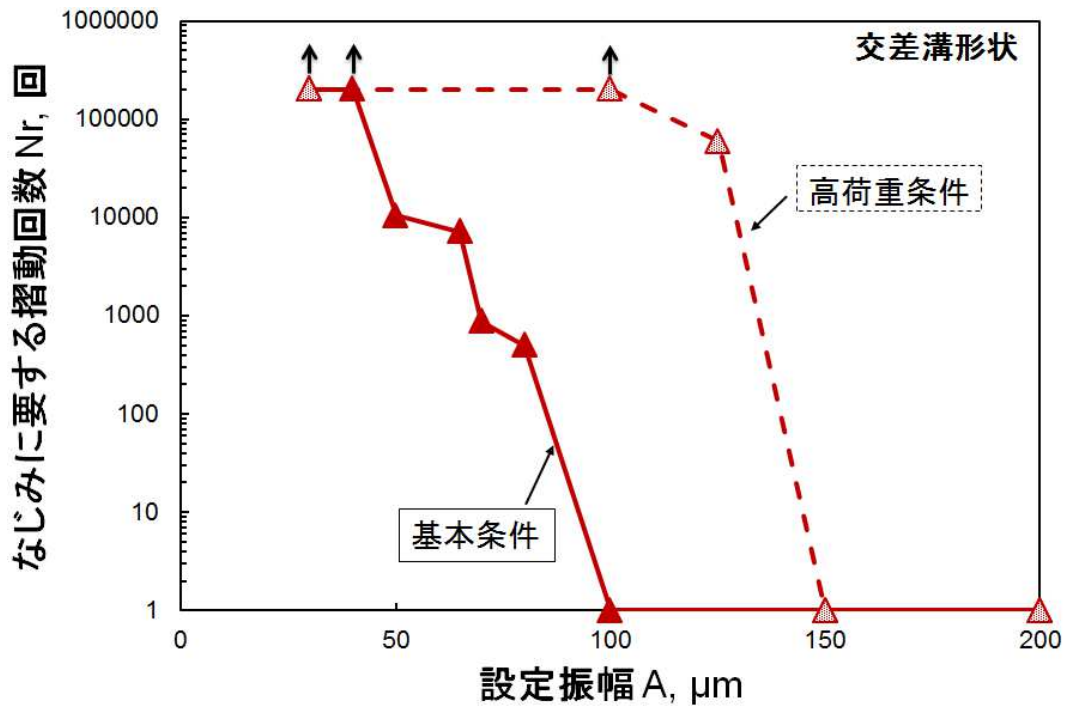


図 3.9 荷重の影響 (交差溝形状)

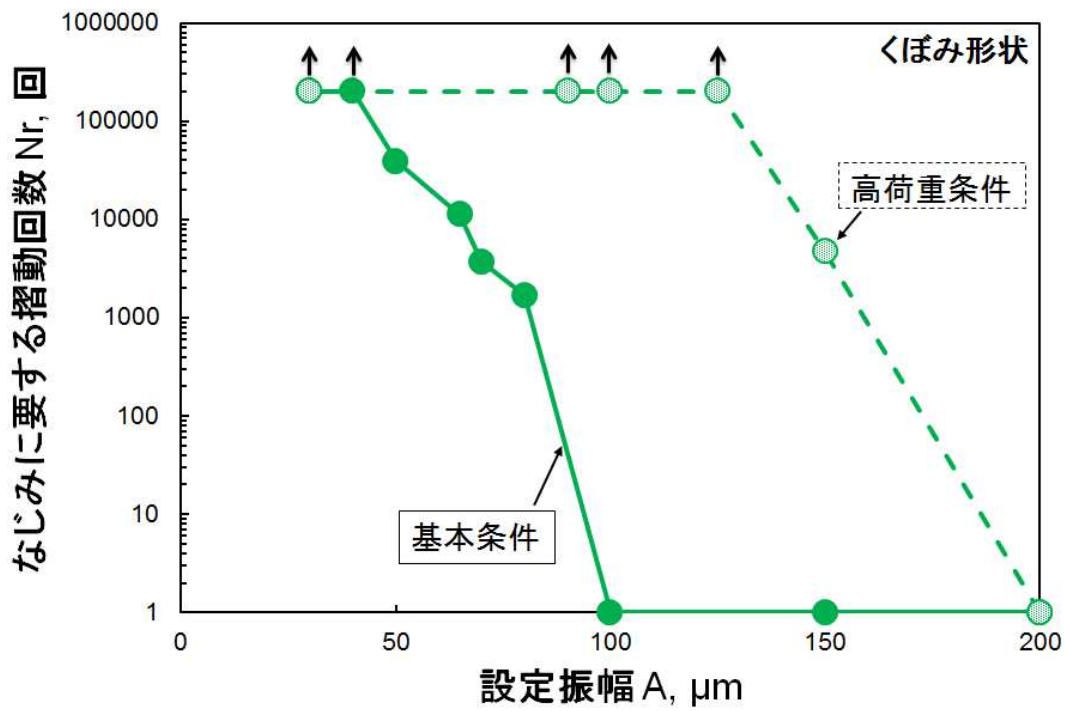


図 3.10 荷重の影響 (くぼみ形状)

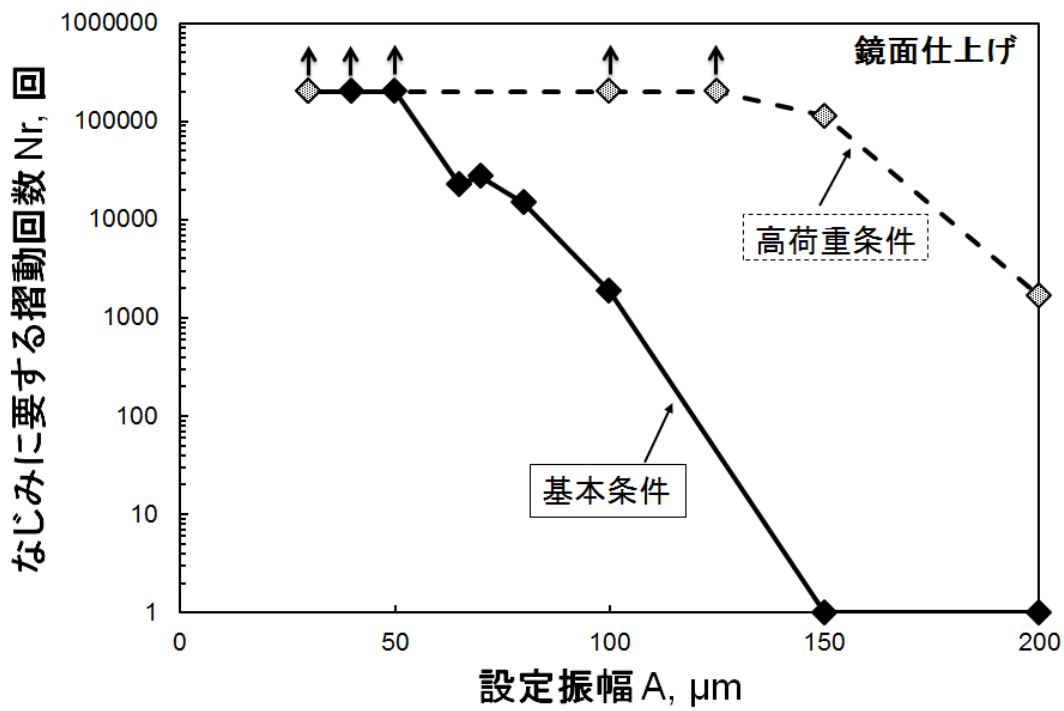


図 3.11 荷重の影響（鏡面仕上げ）

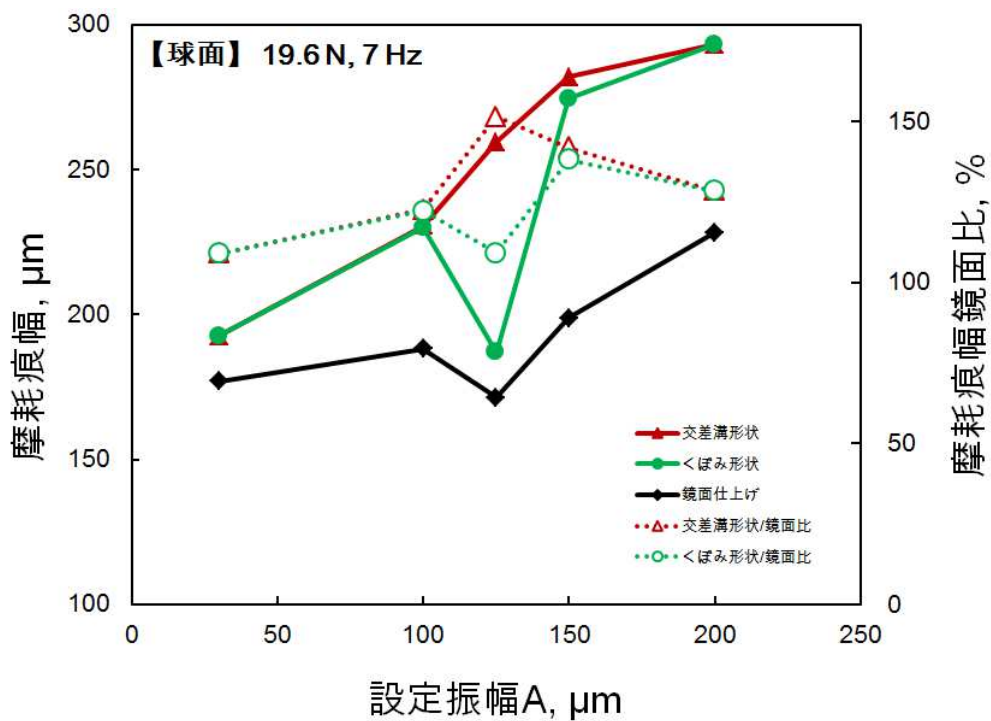


図 3.12 摩耗痕幅と設定振幅 A の関係（高荷重条件）

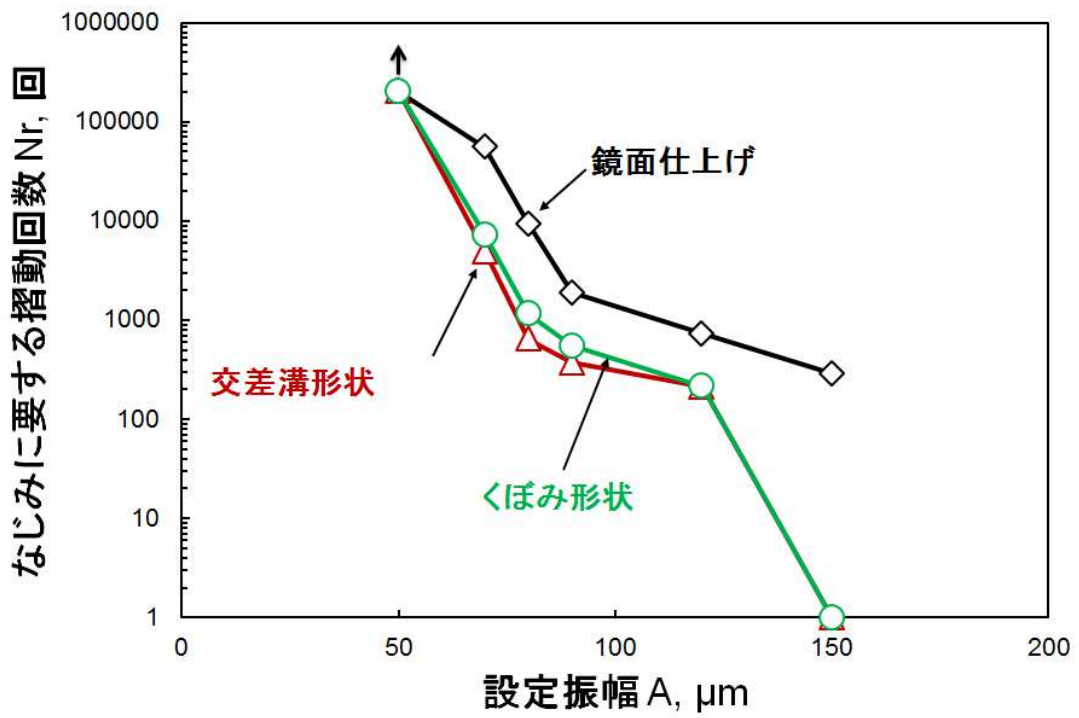


図 3.13 設定振幅 A が及ぼすなじみやすさへの影響（低速度条件）

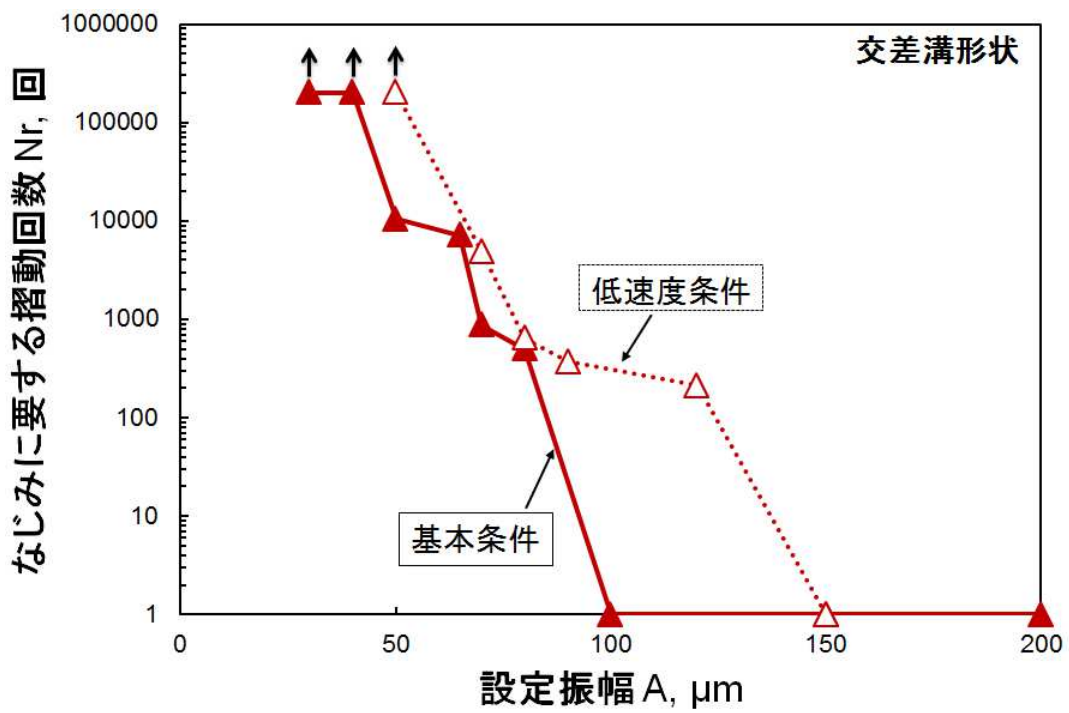


図 3.14 速度の影響（交差溝形状）

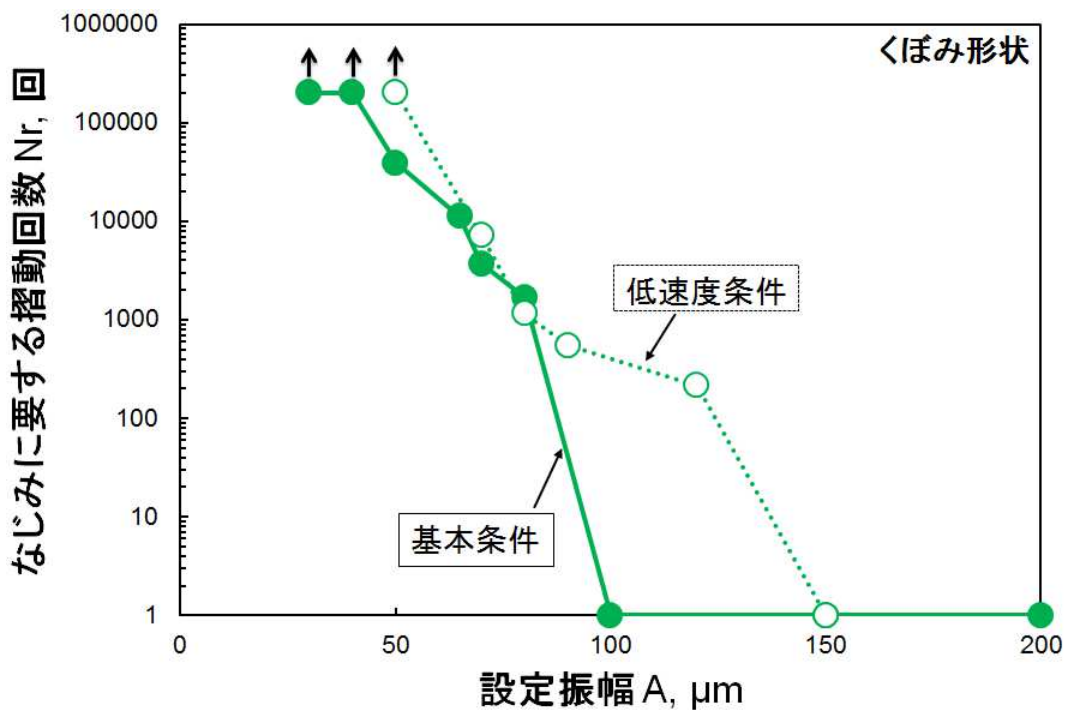


図 3.15 速度の影響（くぼみ形状）

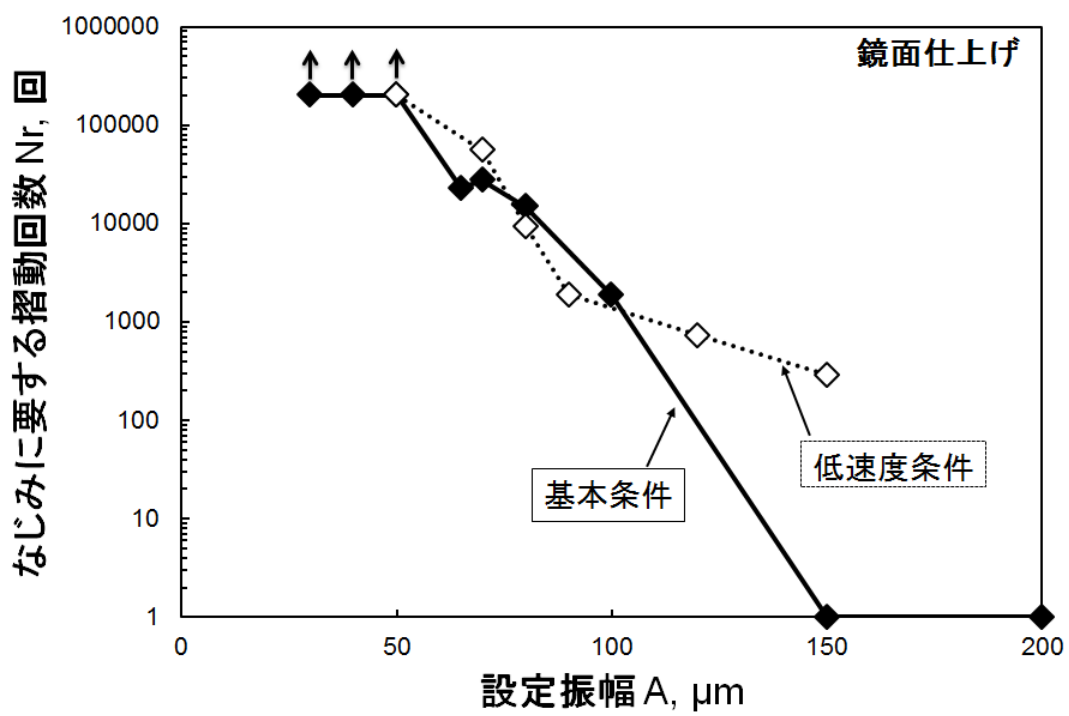


図 3.16 速度の影響（鏡面仕上げ）

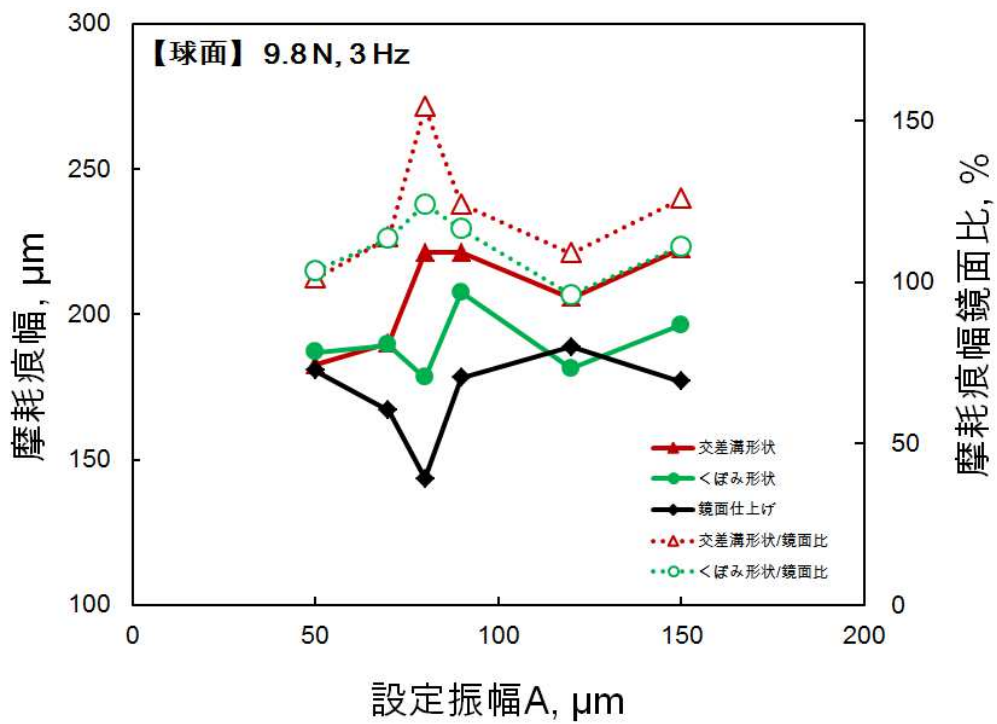


図 3.17 摩耗痕幅と設定振幅 A の関係 (低速度条件)

第4章 接触圧力解析

表面微細加工の効果や初期なじみのメカニズム解明のため、第3章の実験条件を用いて、荷重9.8Nと19.6N時の静的な接触圧力解析を行った。数値解析の結果を基本条件(9.8N)と高荷重条件(19.6N)時の摩耗痕と比較した。

4.1 接触圧力解析の概要

弾性接触理論を用いており、計算方法は地引⁽⁹⁾、元田⁽¹²⁾らの研究による。その概要を下記に示す。

図4.1のように滑らかな球と平面が接触している状態を考える。荷重 P が作用すると材料は弾性変形をし、見かけの接触面内では次式が成立する。

$$\delta - (w_1 + w_2) = z_1 + z_2 \quad (4.1)$$

ここで、

δ : 2 固体間の相対接近量

$z_1 + z_2$: 2 固体間の初期隙間

であり、 w_i ($i = 1, 2$) は固体 1, 2 の表面の弾性変形量であり、次式で表わされる。

$$w_i = \frac{1-\nu_i^2}{\pi E_i} \int_S \frac{p dX' dY'}{\sqrt{(X-X')^2+(Y-Y')^2}} \quad (i = 1, 2) \quad (4.2)$$

ここで、

ν_i : 固体 1, 2 のポアソン比

E_i : 固体 1, 2 のヤング率

S : 見かけの接触面積

p : 接触圧力

である。式(4.2)を(4.1)に代入すると(4.3)式を得られる。

$$\delta - C \int_S \frac{p dX' dY'}{\sqrt{(X-X')^2+(Y-Y')^2}} = z_1 + z_2 \quad (4.3)$$

ここで、

$$C = \frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{\pi E_2} \quad (4.4)$$

である。式(4.3)を解く条件に、力のつり合いの次式

$$\int_S p dS = P \quad (4.5)$$

と、接触面積 S 内で成り立つ式(4.6)

$$p \geq 0 \quad (4.6)$$

を加えることで、相対接近量 δ 、接触圧力 p 、接触面積 S を求めることができる。

しかし、これを解析的に解くことは一般的に困難であるため、ポイントマッチング法を用いて数値的に解く。

まず、予想される接触面積より大きな領域を有限個の微小領域に分割する。各微小領域内で接触圧力は一定とし、それぞれの図心位置で式(4.3)が満足されるものとするれば、式(4.3)は次式のようなになる。

$$\delta - C \sum_{j=1}^r p_j D_{ij} = z_{1,i} + z_{2,i} \quad (i = 1, 2, \dots, r) \quad (4.7)$$

図 4.2 にあるように、 i と j は各微小領域を示す添え字であり、その分割数は r である。 p_j は微小領域 j における接触圧力であり、 D_{ij} は p_j により微小領域 i に生じる Z 方向への変形の影響係数である。 D_{ij} は下記に示される。

$$D_{ij} = \int_{-a_j}^{a_j} \int_{-b_j}^{b_j} \frac{dx' dy'}{\sqrt{(x_i - x_j - x')^2 + (y_i - y_j - y')^2}} \quad (4.8)$$

式(4.5)及び(4.6)は以下のように表わされる。

$$\sum_{j=1}^r A_j p_j = P \quad (4.9)$$

$$p_i \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, r) \quad (4.10)$$

A_j は微小領域の面積、 P は荷重である。以上の式(4.7)、(4.9)、(4.10)を連立して数値的に、相対接近量 δ 、接触圧力 p 、接触面積 S を求める。

また、数値計算に用いた数値は、第 3 章の実験条件に即しており、その内容を表 4.1 に示す。計算範囲は $100 \times 100 [\mu\text{m}^2]$ であるが、接触位置を点对称にとることで、 $200 \times 200 [\mu\text{m}^2]$ の範囲の接触を求めることができる。計算に用いたモデルは図 4.3、4.4 である。表面微細加工が施されている箇所が黒色で示されており、ここでは接触圧力が発生しないものとして計算を行った。

4.2 解析結果

4.2.1 計算で得られた接触形状と摩耗痕の比較

図 4.5～4.9 に実験後の摩耗痕と算出された接触面形状を比較した図を示し、表 4.2 に摩耗痕幅と接触幅の計測結果を示す。図 4.10 は接触幅の計測例である。また、算出された接触面積を表 4.3 にまとめた。

【基本条件】

図 4.5 は基本条件下にて設定振幅 $A=30 \mu\text{m}$ 、図 4.6 は $A=70 \mu\text{m}$ の実験後の摩耗痕と算出された接触面形状を比較した図である。まず、両図に共通する数値解析の結果を見る。黒色部が接触をしていない（接触圧力を 0）と仮定した表面微細加工部であり、青色部が接触部である。交差溝形状を見ると、ヘルツ円よりも接触域が広がっていることが明らかである。接触形状も摩耗痕と似ている。くぼみ形状も同様に、ヘルツ円よりも接触域が広がっており、接触形状の摩耗痕との相似が見られる。接触幅の大きさの傾向は表 4.2 から交差溝形状、くぼみ形状、鏡面仕上げの順である。

次に図 4.5 の摩耗痕を見る。この条件では初期なじみは観察されていない。摩耗痕の断面に注目すると、表面微細加工は十分に残存していることがわかる。続いて、摩耗痕の大きさに着目する。白い円は鏡面と球面の接触によるヘルツ接触円である。鏡面仕上げでは、概ねヘルツ接触円と同等の大きさの摩耗痕が見られ、その形状は固着域とすべり域を持つミンドリンスリップの摩耗痕である。交差溝形状においては、摩耗痕がヘルツ円より若干大きくなっている。くぼみ形状においても、ヘルツ接触円より大きな摩耗痕が観察されている。表 4.2 からも摩耗痕の大きさが比較できるが、微細加工 2 種の差が小さい。

図 4.6 の設定振幅 $A=70 \mu\text{m}$ の実験では初期なじみが観察されている。摩耗痕断面を見ると、図 4.5 よりは損傷は激しいものの、表面微細加工は残存している。摩耗痕は小振幅時の図 4.5 より広がっており、表 4.2 からも摩耗痕の大きさが交差溝形状、くぼみ形状、鏡面仕上げの順に大きいことがわかる。表面微細加工 2 種の間には 12% の差がある。

このように、基本条件下においては摩耗痕と接触幅が共に交差溝形状、く

ぼみ形状、鏡面仕上げの順に大きく、実験と計算の結果の傾向が一致することがわかる。一方、接触面積に関しては、表 4.3 より、交差溝形状、くぼみ形状、鏡面仕上げの順に小さい。

【高荷重条件】

図 4.7 は高荷重条件下にて設定振幅 $A=30\mu\text{m}$ 、図 4.8 は $A=100\mu\text{m}$ 、図 4.9 は $A=150\mu\text{m}$ の実験後の摩耗痕と算出された接触面形状を比較した図である。まず、全ての図に共通する数値解析の結果を見る。

表面微細加工により、ヘルツ円より接触域が広がっているが、表 4.2 から分かる通り、表面微細加工 2 種の間には大きさの差がない。

図 4.7 は設定振幅 $A=30\mu\text{m}$ の実験で、初期なじみは観察されていない。同振幅の図 4.5 に比べ、摩耗痕が薄い。表 4.2 と合せて摩耗痕の大きさと接触幅の大きさを見ると、表面微細加工の摩耗痕はヘルツ円よりも大きく、2 種に差がない傾向は数値解析と一致する。

図 4.8 の設定振幅 $A=100\mu\text{m}$ の条件では初期なじみが観察されていない。図 4.7 よりも摩耗痕が濃くついているが、設定振幅が大きいにもかかわらず、摺動痕が付いておらず、表面微細加工間の大きさはわずかにくぼみ形状のほうが大きい(7%差)。

図 4.9 の設定振幅 $A=150\mu\text{m}$ の条件では初期なじみが観察されている。断面形状から明らかであるが、交差溝形状の表面微細加工の摩滅が激しい。摩耗痕幅は交差溝形状のほうがくぼみ形状よりもわずかに大きい結果(4%差)となった。

高荷重条件において、摩耗痕幅と接触幅の大きさの傾向は、表 4.2 から交差溝形状とくぼみ形状が同程度で、鏡面仕上げが最も小さく、実験と計算の傾向が一致することがわかる。接触面積は 9.8N の結果と同様に、交差溝形状、くぼみ形状、鏡面仕上げの順に小さい。

4.2.2 接触圧力分布

計算の精度の確認のため、鏡面仕上げの数値解析とヘルツ理論による鏡面と球面のヘルツ最大圧と平均圧の比較を行った。その結果を表 4.4 に示す。鏡面においては、解析的な結果と非常に近い結果となった。

次に、全体的な圧力状態を見る。図 4.11 は基本条件における接触圧力の分布を出したものである。表面微細加工 2 種の中央部に 5GPa の局所的な高圧が生じているのがわかる。この局所的な高圧部を見る。図 4.12 にて各表面の最高圧部の圧力分布を示す。ただし、交差溝形状に関しては 2 番目に高い圧力部も示した。交差溝形状では 7GPa、20GPa を超える非常に高い局所的な圧力が発生している。くぼみ形状では 5GPa の局所的高圧が発生している。これらは

エッジ圧である。 $y=35\sim 60$ の中腹部の圧力は交差溝形状では1~2GPaであり、くぼみ形状では1~1.5GPa、鏡面仕上げでは1GPa弱である。このように、エッジ部中腹部共に圧力は交差溝形状、くぼみ形状、鏡面仕上げの順に高い。

荷重変化条件の等高線表示と最高圧部圧力分布を図 4.13、4.14 に示す。基本条件との時とは異なり、交差溝形状において中央部以外にも 3GPa の高圧部が見られ、最高圧が 28GPa とさらに高くなっている。この圧力は 3 表面上で最も高い。くぼみ形状のエッジ部の高圧もさらに高くなっている。中腹部に着目すると、表面微細加工により圧力が鏡面仕上げより高くなっており、差は小さいが、交差溝形状のほうがくぼみ形状より高い圧力が発生している。

4.3 考察

表面微細加工において、摩耗痕と接触幅が広がった理由は第 3 章の考察でも述べた接触剛性の低下によるものである。摺動痕の付いていない、基本条件 $A=30\ \mu\text{m}$ 、高荷重条件 $A=30, 70\ \mu\text{m}$ (図 4.5、4.7、4.8) では計算モデル通りの点対称の接触をしないため、摩耗痕幅の大きさの傾向は必ずとも解析結果一致するものではないと思われる。

また、接触幅が広がるが、面積は表 4.3 の通り交差溝形状、くぼみ形状、鏡面仕上げの順で小さい。小さい面積で同じ荷重を支えるために、交差溝、くぼみ形状、鏡面仕上げの順で圧力は高くなる (図 4.12, 4.14)。

注意したいのは、あくまでこの解析は静的な接触に対し、弾性変形理論から行ったものであるということである。軸受鋼 SUJ2 の降伏点は 1.37GPa 程度である⁽¹³⁾ため、接触によりエッジ部の圧力で十分に塑性変形が起きる。塑性変形により圧力分布は再び変化する。ただ、この初期の圧力分布から、初期なじみについて以下のように考察ができる。高い圧力があるということは、凝着力も強く、摺動により凝着部をせん断することで凝着摩耗が起き、摩耗が表面のなじみを引き起こす。実際に初期なじみが観察されない図 4.5, 4.7, 4.8 では接触痕はついているが、摺動の痕はほとんど見られず、初期なじみが起きた図 4.6, 4.9 では摺動痕がしっかりついている。同様に、式(4.1)の Archard の凝着摩耗モデル⁽¹⁴⁾からも説明ができる。

$$V = \frac{k}{3} \cdot \frac{WL}{H} \quad (4.1)$$

V は摩耗量、 k は凝着摩耗の発生確率、 W 荷重、 L はすべり距離、 H は柔らかいほうの材料の硬度である。表面微細加工により局部的に受け持つ荷重は高くなり、設定振幅が増えればすべり距離は長くなる。よって表面微細加工のほうが摩耗しやすく、設定振幅が伸びるほど摩耗しやすくなり、結果として初期

なじみを早期に促す。

また、初期なじみが起きた摩耗痕（図 4.6, 4.9）を見ると、アブレシブ摩耗をしているとわかる。これは、摩耗粉で接触面が切削されたものと思われる。

4.4 小結

第 3 章の実験条件を用いて、荷重 9.8N と 19.6N 時の静的な接触圧力解析を行い、数値解析の結果を摩耗痕と比較したことで以下のことが明らかになった。

- 1) 表面微細加工により接触幅が広がるが、面積は小さく、その分圧力が高くなる。圧力はエッジ部を含み、交差溝形状のほうがくぼみ形状よりも高い。
- 2) 接触面の非常に高い圧力により凝着が起き、摺動による凝着部のせん断による凝着摩耗と摩耗粉によるアブレシブ摩耗が起き、これらの摩耗により初期なじみは促進されると考えられる。

表 4.1 数値計算で用いた物理量と数値

物理量	記号	値
ポアソン比	$\nu_{1,2}$	0.30 [-]
ヤング率	$E_{1,2}$	212 [GPa]
荷重	P	9.8, 19.6 [N]
分割数	r	10000 [-]
計算範囲	-	100 × 100 [μm^2]
分割ピッチ	-	1 [μm]

表 4.2 摩耗痕幅と数値解析の接触幅

条件	設定振幅 A [μm] or 数値計算	摩耗痕幅 or 数値解析の接触幅 [μm], (鏡面との比 [%])		
		交差溝形状	くぼみ形状	鏡面仕上げ
基本条件	A = 30	161 (106)	159 (105)	152
	A = 70	220 (150)	203 (138)	147
	数値計算	156 (116)	146 (109)	135
高荷重条件	A = 30	193 (110)	194 (110)	176
	A = 100	196 (104)	208 (111)	188
	A = 150	282 (142)	274 (138)	199
	数値計算	209 (123)	209 (123)	170

表 4.3 接触面積の比較

	条件	交差溝形状	くぼみ形状	鏡面仕上げ
接触面積 [μm^2] (鏡面との面積比 [%])	基本条件	7648 (53.1)	9392 (65.1)	14416
	高荷重条件	10468 (45.8)	13520 (59.1)	22872

表 4.4 ヘルツ理論と数値解析の接触圧力比較

条件	基本条件		高荷重条件	
	数値計算	ヘルツ理論	数値計算	ヘルツ理論
-				
最大圧力 [GPa]	1.02	1.02	1.29	1.29
平均圧力 [GPa]	0.680	0.682	0.857	0.859

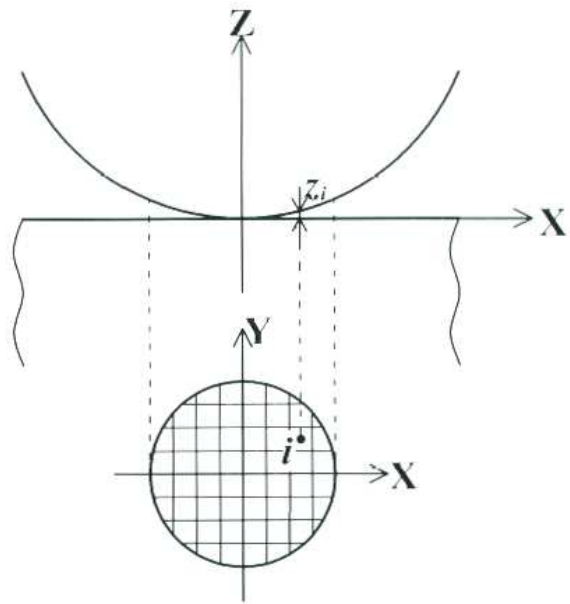


図 4.1 弾性接触変形の解析モデル⁽¹²⁾

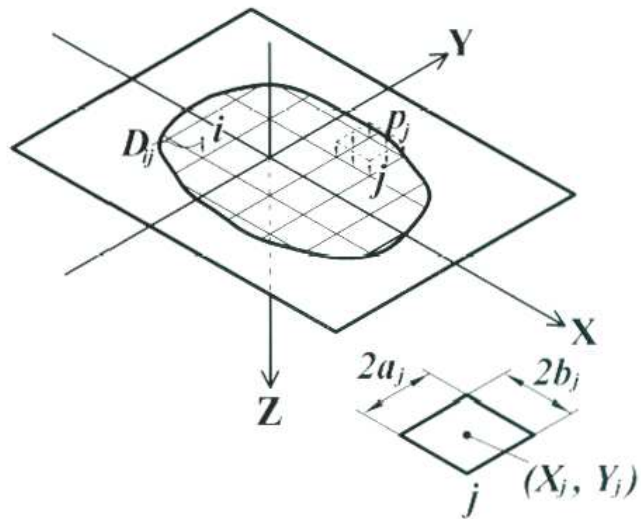


図 4.2 接触領域の分割方法と影響係数⁽¹²⁾

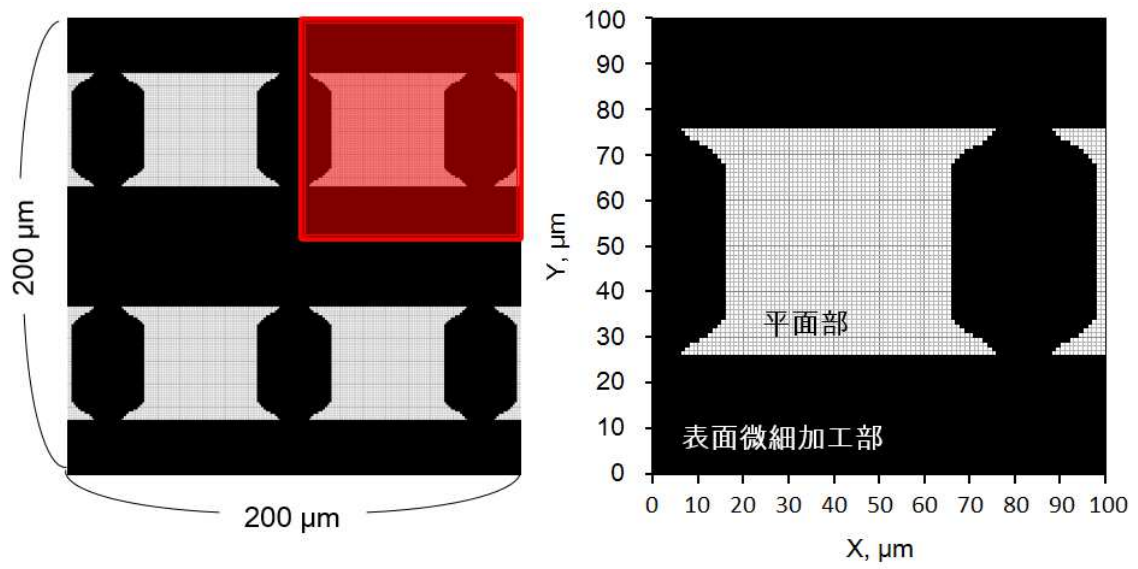


図 4.3 表面形状計算モデル（交差溝形状）

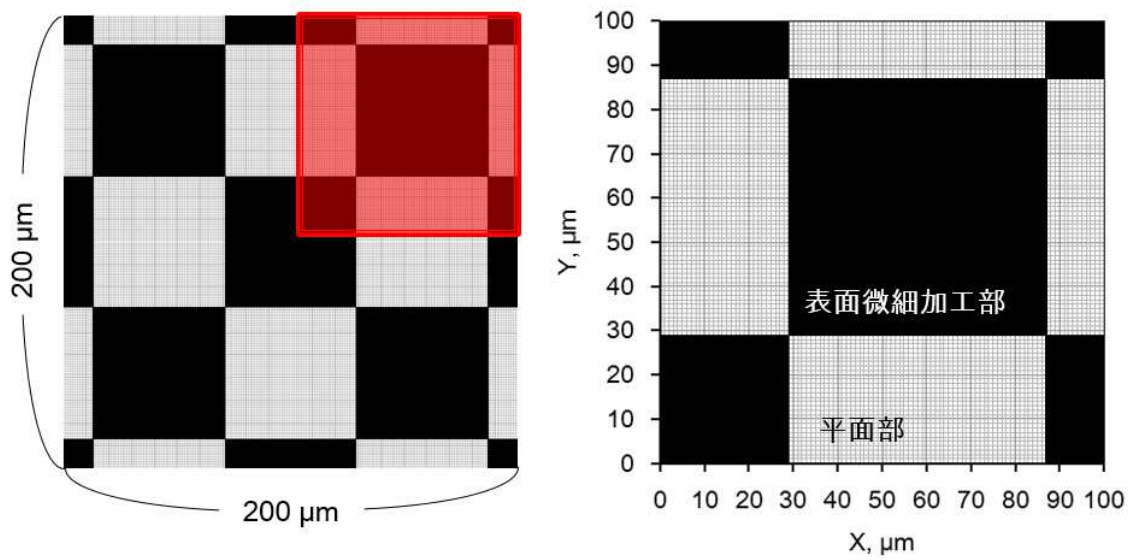


図 4.4 表面形状計算モデル（くぼみ形状）

【9.8 N】

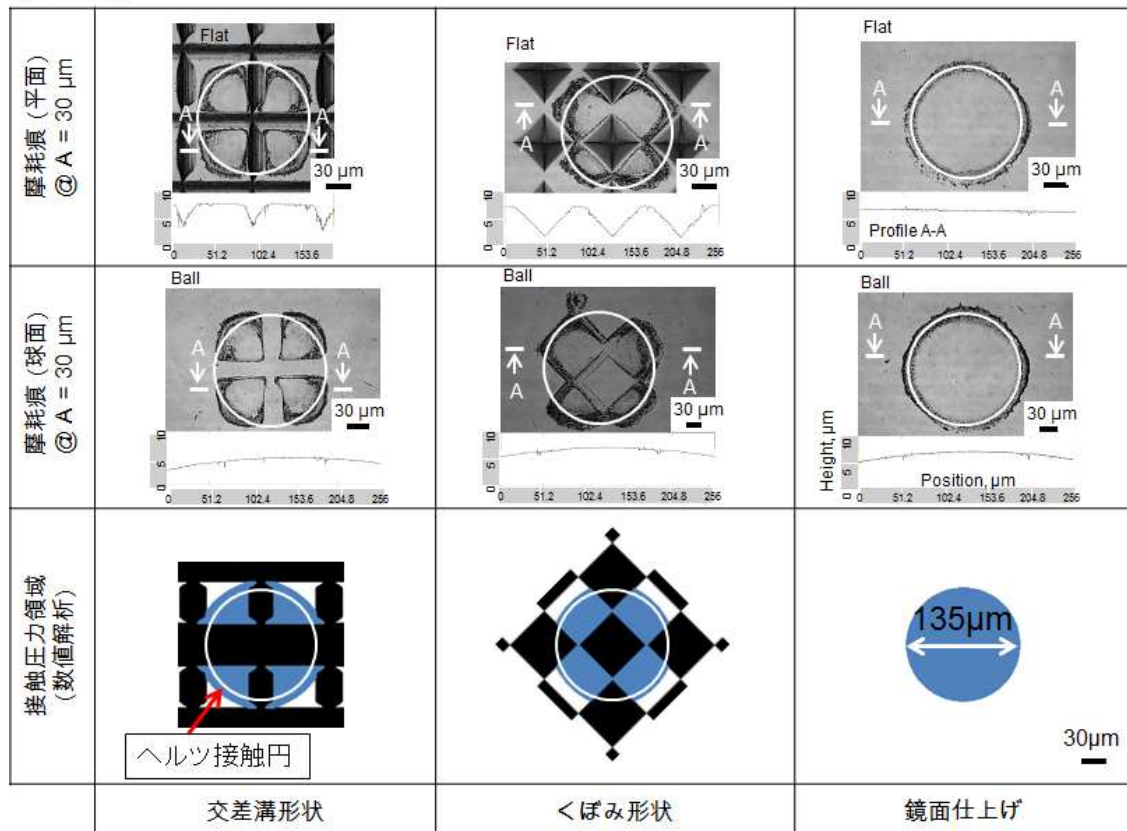


図 4.5 摩耗痕 (A=30 μm) と算出された接触面形状 (基本条件・初期なじみ無)

[9.8 N]

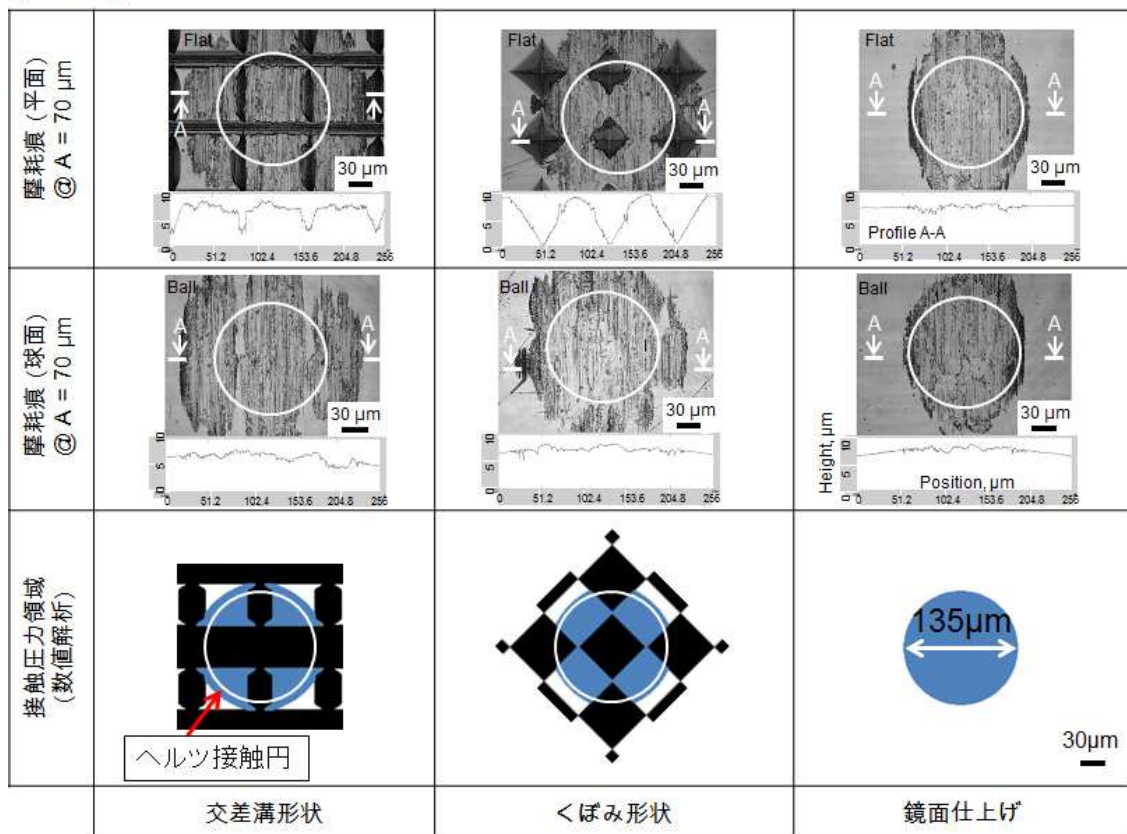


図 4.6 摩耗痕 ($A=70\mu\text{m}$) と算出された接触面形状 (基本条件・初期なじみ有)

【19.6 N】

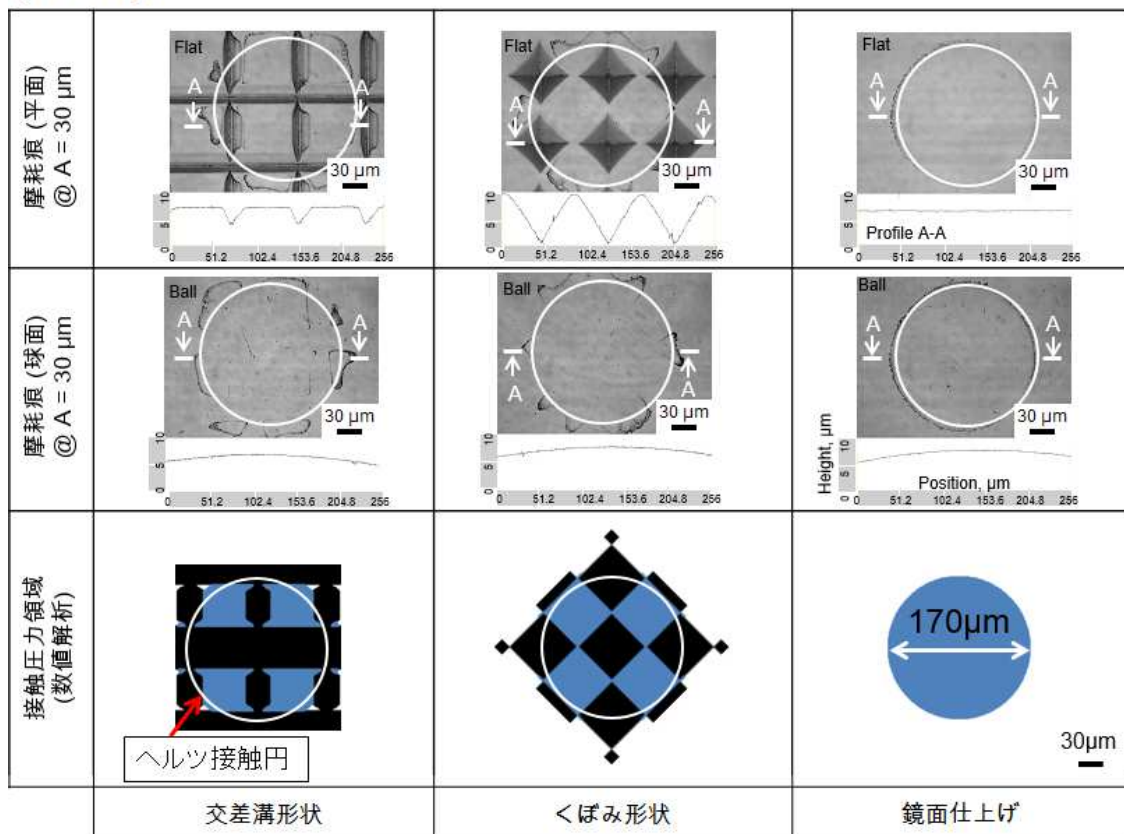


図 4.7 摩耗痕 ($A=30 \mu\text{m}$) と算出された接触面形状 (荷重変化条件・初期なじみ無)

【19.6 N】

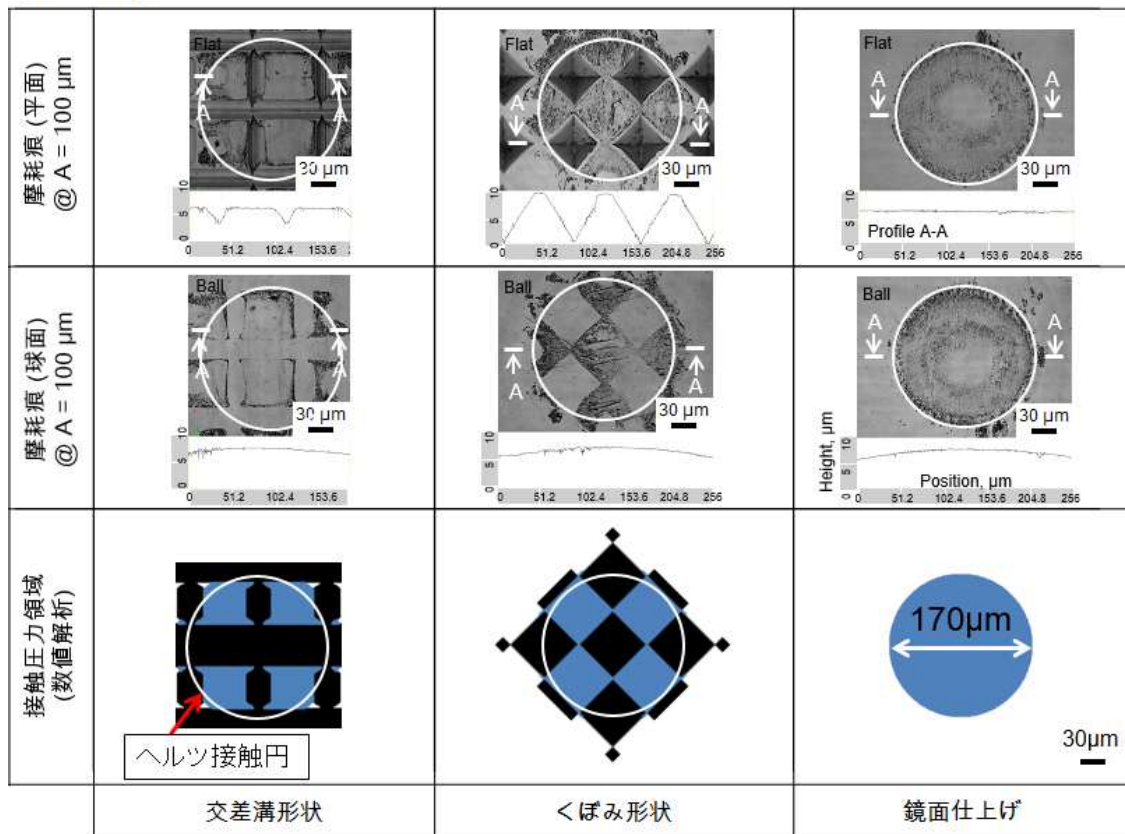


図 4.8 摩耗痕 (A=100 μm) と算出された接触面形状 (荷重変化条件・初期なじみ無)

【19.6 N】

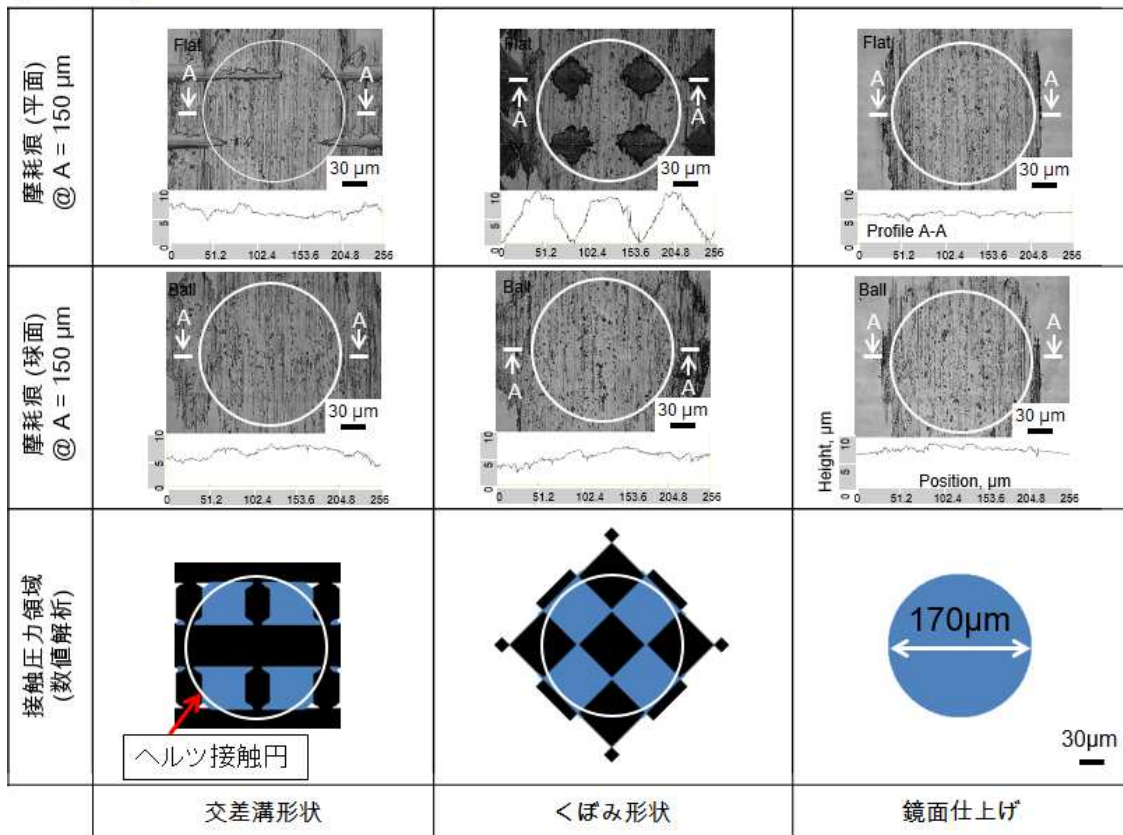


図 4.9 摩耗痕 ($A=150 \mu\text{m}$) と算出された接触面形状 (荷重変化条件)

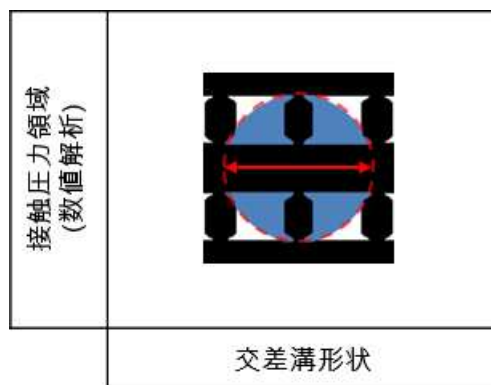


図 4.10 接触幅の計測例

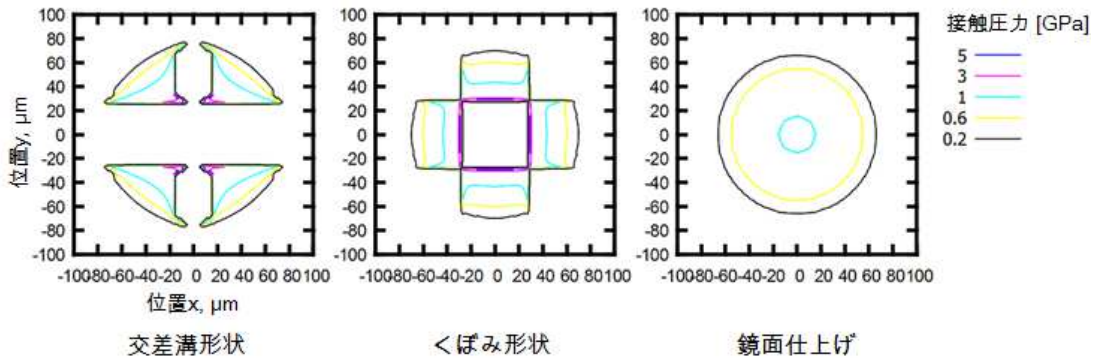


図 4.11 接触圧力の等高線表示 (基本条件)

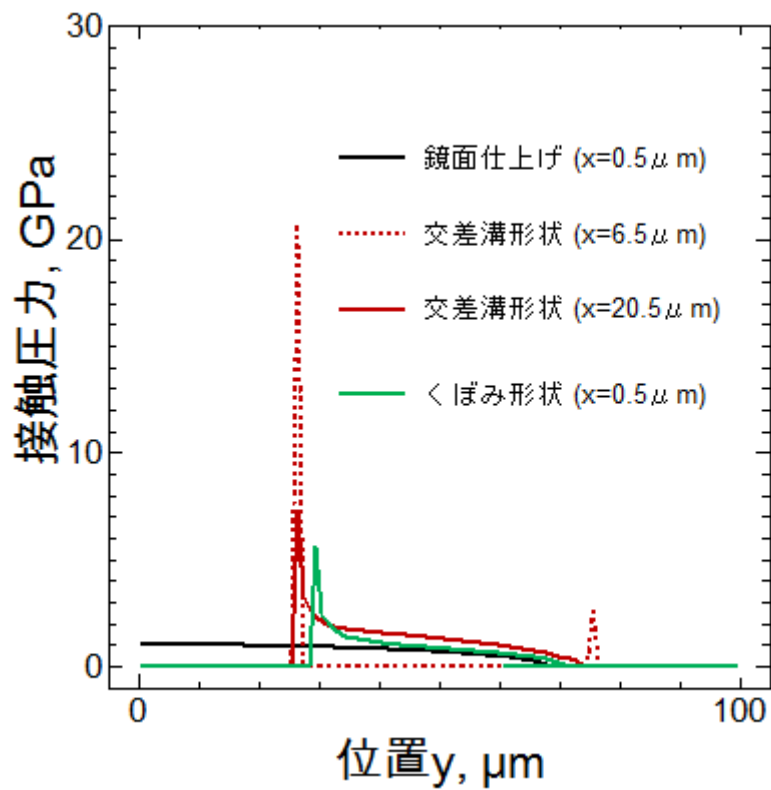


図 4.12 最高圧部の圧力分布 (基本条件)

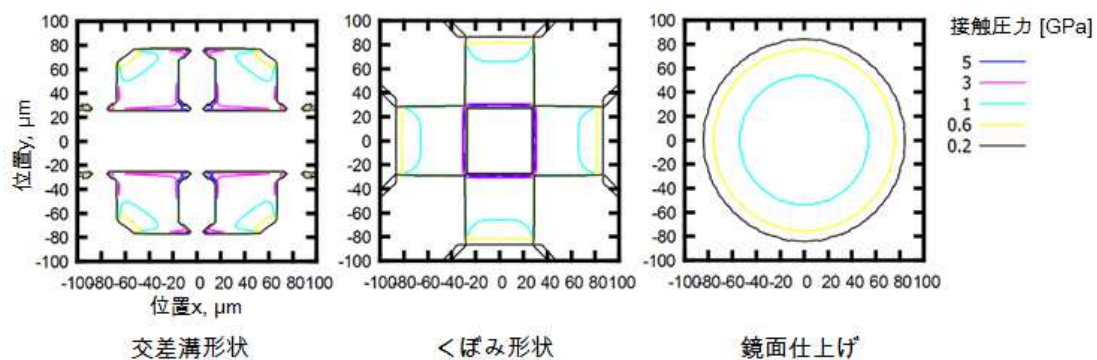


図 4.13 接触圧力の等高線表示 (荷重変化条件)

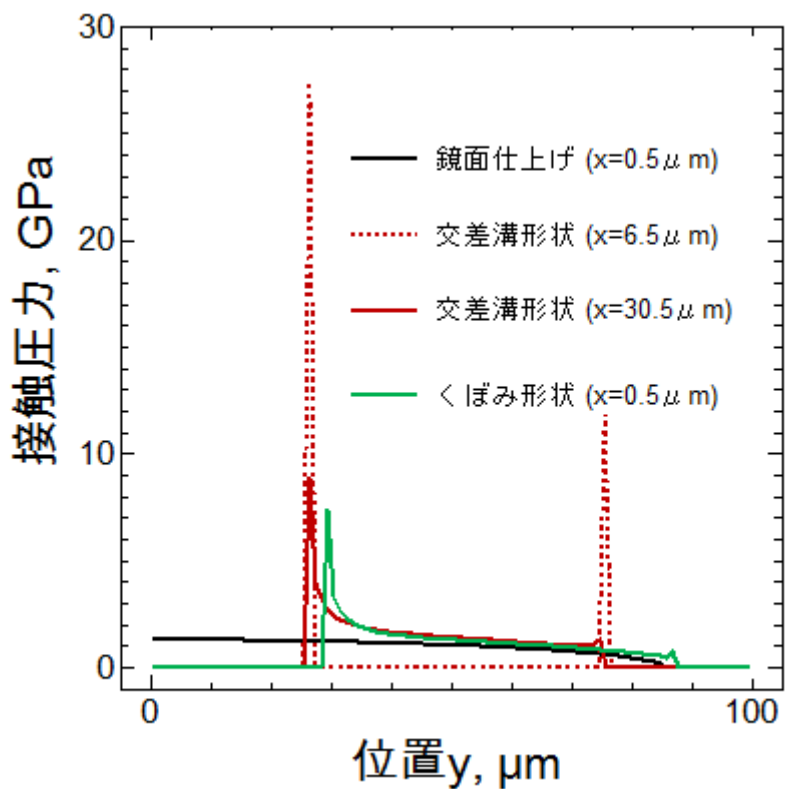


図 4.14 最高圧部の圧力分布 (荷重変化条件)

第5章 フレッチング面の直接観察

初期なじみが起きるときの接触面状態の観察を試みた。

5.1 フレッチング面の直接観察法

図 5.1 は直接観察実験の試験装置概略図である。第 3 章で用いたフレッチング試験装置 (図 3.1) を改良している。変更点を下記に示す。

1. 球試験片を軸受鋼 SUJ2 球 ($\phi 9.525\text{mm}$) からサファイアガラス半球 ($\phi 9.525\text{mm}$) に変更
2. 観察のための光学顕微鏡とビデオカメラの追加

その他試験装置の機能は第 3 章と共通であり、摩擦力と相対変位の計測を行える。

5.2 試験条件

観察のために球試験片をサファイアガラス半球にしたことで、材料の相性が変わり、第 3 章の実験条件では初期なじみが得られなかった。それを受けて鏡面仕上げ試験片を用いた予備実験を行い、再度実験条件を定めた。その内容を表 5.1 にまとめ、第 3 章の実験との変更点を太字で示した。摺動周波数 7Hz 下でのフレッチング試験装置は装置自体の振動で映像のブレが激しくなるため、3Hz とした。初期なじみの観察を目的としていることとビデオカメラの録画時間との兼ね合いで摺動回数は 3 万回とした。荷重と潤滑油の変更は、予備実験で得られた傾向を基に行った。

5.3 実験結果

結果として、鏡面仕上げにおいては初期なじみが得られたが、交差溝形状、くぼみ形状においては、初期なじみ現象の観察に至らなかった。実験は設定振幅を変更して繰り返し行ったが、設定振幅 $2\mu\text{m}$ の差で初期なじみの有無がはっきり分かれた (3 万回ではなじまない、もしくは試験開始直後から低摩擦力の二通り)。

図 5.2 に鏡面仕上げの初期なじみを含む経時変化を示す。摺動回数 338 回において、接触面内に見える黒い塊は摩耗粉と思われる。611 回では黒い塊はあるが、相対ストローク値も 338 回時より増えており、摺動により面外に拡散されつつある。1441 回まで摩擦係数は上昇しており、摩耗粉はより拡散された。この時、表面に目立った傷は見られない。しかし、以降は摩擦係数が減少していき、3383 回では摺動端において摩耗粉と傷の発生が見られる。5516 回では

摩擦係数の低下が落ち着き、初期なじみが完了した。摩耗粉と傷の量は多くなっている。17600 回では摺動面内に摩耗粉と明確な傷が付きはじめ、実験終了時の 30000 回では摺動面全域に摩耗粉と傷が見える。ただし、3383 回以降の傷の発生と摩耗粉の明確な区別がつきにくい。

また、試験後洗浄して表面をレーザー顕微鏡で撮影した写真を図 5.3 に示す。摺動面全域に切削痕、即ちアブレシブ摩耗痕が見える。

5.4 考察

今回の観察法では摩耗粉と傷の区別が付きにくい、アブレシブ摩耗が摺動面全域に行き渡るのは初期なじみ以降であることは見て取れる。よって、初期なじみに関する摩耗は凝着摩耗に因るところが多いと思われる。また、表面微細加工による油の補油効果の有無を確かめたかったが、油の動きは見えず、見するためには油に色を付けるなどの工夫が必要である。

表面微細加工において、初期なじみの観察に至らなかったため、現象の有無の境界の振幅で 20 万回摺動の追加実験を行ったが、こちらでも初期なじみが得られなかった。よって、表面微細加工にて初期なじみ現象を観察するには、再度の予備実験が必要である。

5.5 小結

摺動面の直接観察を行い、以下のことが明らかになった。

- 1) 初期なじみには凝着摩耗を主とした摩耗に因り起きていると考えられる。
- 2) アブレシブ摩耗は初期なじみ完了後に主力なると考えられる。
- 3) 油の動きを見るためには、油への色の添加などの工夫が必要である。
- 4) 材料の変化により、表面微細加工において初期なじみ現象の前後の観察ができなかったため、荷重や油の変更が必要である。

表 5.1 実験条件

平面試験片	軸受鋼 SUJ2
球試験片	軸受鋼 SUJ2 → <u>サファイアガラス半球</u>
接触形態	球と平面の点接触
摺動周波数	3 Hz (速度変化条件), 7 Hz → <u>3 Hz</u>
設定振幅 A	30 - 200 μm
摺動回数 N	10 万回 → <u>3 万回</u>
荷重	9.8 N, 19.6 N (荷重変化条件) → <u>29.4 N</u>
潤滑油	ポリアルファオレフィン (PAO) (74mm ² /s@313K) → <u>無添加鉍物油</u> (<u>動粘度 70 mm²/s @ 313K</u>)
温度、湿度	24±2°C、44±27%RH

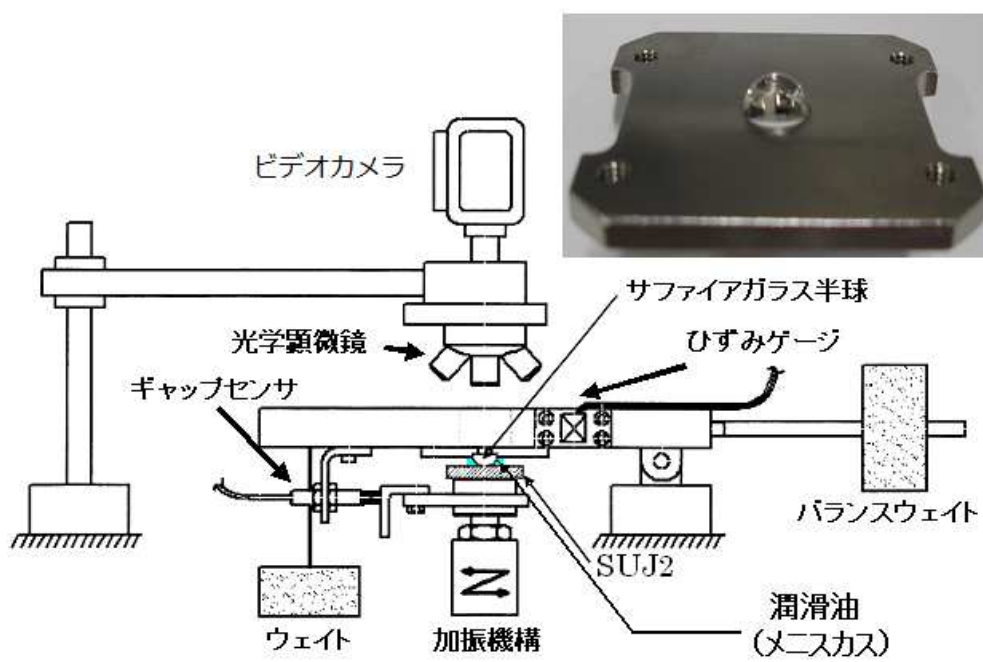


図 5.1 直接観察方法

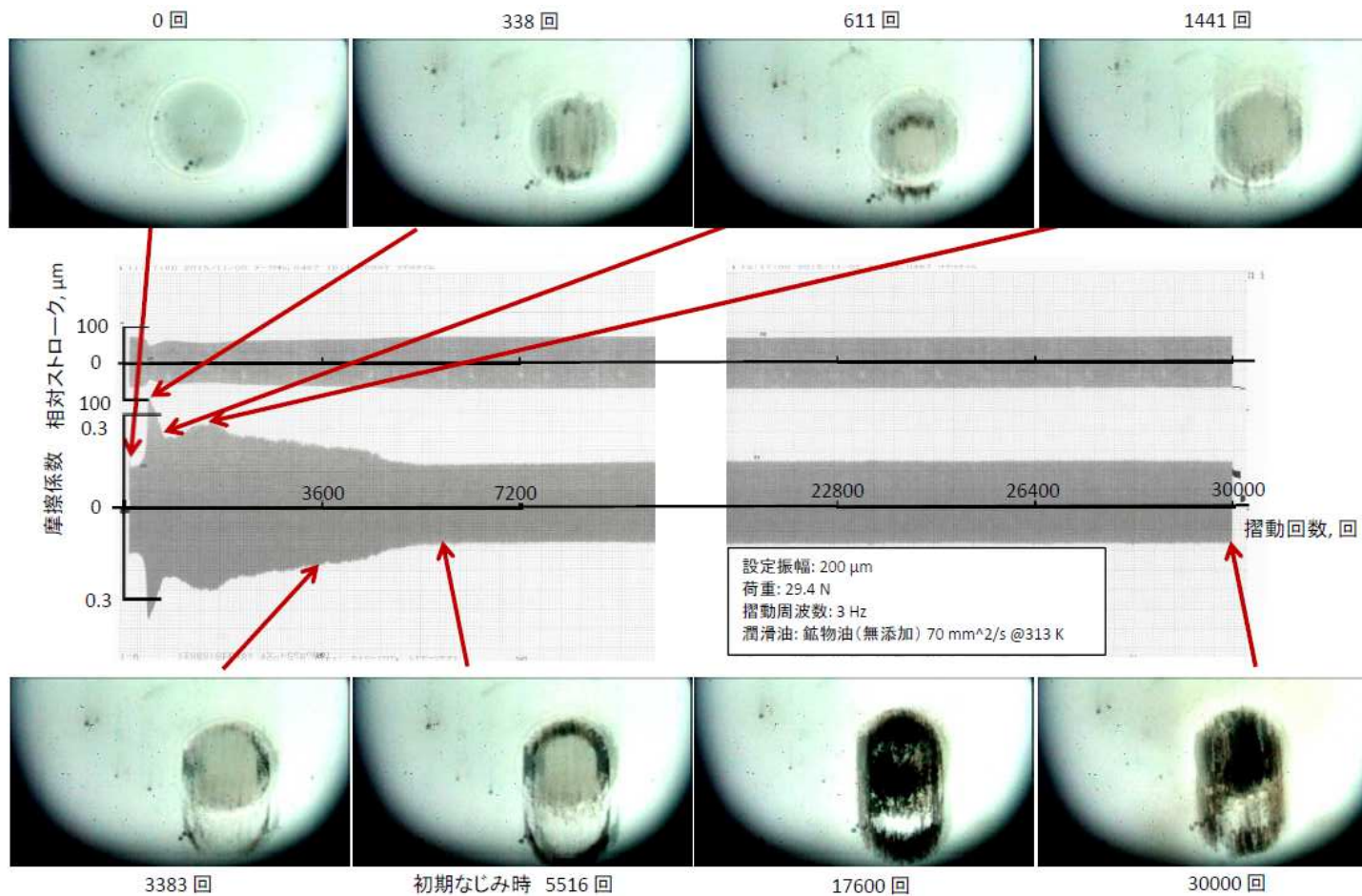


図 5.2 表面の経時変化 (鏡面仕上げ)

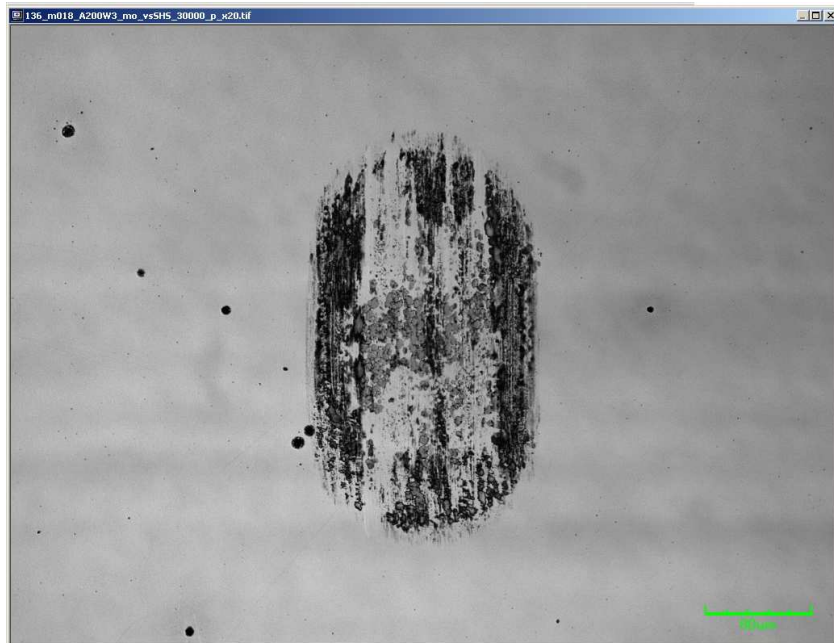


図 5.3 試験後の表面状態（鏡面仕上げ）

初期なじみの機構とそれに及ぼす表面微細加工効果に関する考察

これまでの実験と解析から初期なじみの機構について考察を行う。

6.1 初期なじみの機構に関する考察

初期なじみには一程度の摩耗が必要であることは先にも述べた。第3章の軸受鋼 SUJ2 同士のフレッチング試験において、設定振幅が大きいほど初期なじみは早期に起きることがわかり、第4章において Archard の凝着摩耗式からも設定振幅が大きいことでより凝着摩耗量が増えると言える。第5章の表面の直接観察からは、初期なじみが完了するまでに摩耗粉の存在が確認できた。このとき、初期なじみの完了後の試験終了付近に比べ表面が目立った切削痕が見受けられないため、初期なじみ現象には凝着摩耗が主な摩耗として関係していると考えられる。

6.2 初期なじみの機構に関する考察

表面微細加工により、接触域が広がるが、接触面積は小さく、荷重を支えるために、圧力が増える。特にエッジ部の圧力が高く、摺動によるせん断時の摩耗が激しくなるものと考えられる。圧力の高さから摩耗が激しいのは交差溝形状、くぼみ形状、鏡面仕上げの順と想定できる。実際の摩耗痕や断面からもこの順番で摩耗が激しく、初期なじみもこの順で早く起きる。

第6章 結論

フレッチング試験の初期なじみ性のよさから潤滑状態の評価を行い、潤滑下のフレッチングにおける交差溝形状をはじめとする表面微細加工の初期なじみへ及ぼす効果について種々の実験と解析を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) フレッチングにおいても表面微細加工の効果がある。
- 2) 交差溝形状において最も早期に初期なじみが起き、次点はくぼみ形状であり、表面微細加工には初期なじみ性をよくする効果がある。
- 3) 表面微細加工には接触圧力を高める効果があり、交差溝形状が 3 試験片中最も圧力が高かった。この高い圧力により初期なじみに必要な摩耗が早期に得られたため、初期なじみ性が最もよくなったと考えられる。
- 4) 初期なじみにかかる摩耗形態は凝着摩耗が主であり、初期なじみ完了後にアブレシブ摩耗が主体となると考えられる。

参考文献

1. 佐藤準一. フレッチング損傷とその防止法. 養賢堂, 1984, 251p.
2. Hamilton DB, Walowit JA, Allen CM. A theory of lubrication by micro-irregularities. Trans. ASME, J. Basic. Eng, 1966; 88(1): 177-185.
3. Hubertus U, et al. Investigation of microstructured cylinder liner surfaces for friction reduction. International council on combustion engines 2013 Shanghai.
4. Etsion I, Halperin G, Brizmer V, Kligerman Y. Experimental investigation of laser surface textured parallel thrust bearings. Tribology Letters 2004; 17(2): 295-300.
5. Umehara N. Improvement of friction Property with surface texture. Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers 2009; 112 (1086): 406-09.
6. Vázquez J, Navarro C, and Domínguez J. Analysis of the effect of a textured surface on fretting fatigue. Wear 2014; 305: 23-35.
7. Volchok A, Halperin G, and Etsion I. The effect of surface regular microtopography on fretting fatigue life. Wear 2002; 253: 509-15.
8. Varenberg M, Halperin G, and Etsion I. : Different aspects of the role of wear debris in fretting wear. Wear 2002; 252: 902-10.
9. Jibiki T, Shima M, and Motoda T, Shipway P. Role of surface micro-texturing in acceleration of initial running-in during fretting. Tribology Online 2010; 5(1):33-39.
10. 赤岡純. 軸受の損耗と対策. 日刊工業新聞社, 1961, 379p.
11. 日本トライボロジー学会. 摩擦・摩耗試験機とその活用. 養賢堂, 2007, 309p.
12. Motoda T, Jibiki T, and Shima M. Effect of surface Roughness on hertzian contact deformation. Japanese Journal of Tribology 2004; 49(2): 163-175.
13. 日本精工株式会社. “軸受及び軸・ハウジング材料の性質.” NSK テクニカルレポート.
<http://www.jp.nsk.com/services/basicknowledge/technicalreport/10materials.html>, (2015-08-25)
14. Archard JF. Contact and rubbing of flat surfaces. J. of Appl. Phys. 1953; 24(8): 981-988.

謝辞

本修士学位論文は、東京海洋大学大学院 海洋科学技術研究科 海洋システム工学専攻 機械応用力学研究室において、地引達弘教授のご指導のもと研究を行い、まとめたものです。研究にあたり、地引達弘教授をはじめ多くの方々のご指導、ご協力を賜りました。

はじめに、本研究のあらゆる面においてご指導をしていただきました、地引達弘教授に改めてお礼申し上げます。先生には常に丁寧なご指導を頂き、本研究をここに完遂することができました。また、研究の遂行に関するアドバイスを、研究発表に関するご指導を頂いた志摩政幸名誉教授に深く感謝いたします。本論文の審査を引き受けてくださった、本学 岩本勝美教授、元田慎一教授にも厚く御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、惜しみないご協力をいただきました本研究室の菅原隆志技術職員、大久保ユリ子教務補佐官に対しまして深く感謝いたします。皆様には試験片の作製や機器の取り扱いの補助、事務処理など各所お世話していただき、円滑に研究を進めることができました。

微細加工装置の新機能追加に関する丁寧なアドバイスを都立産業技術高等専門学校の伊藤聡史准教授に頂き、接触圧力解析のプログラムの改良に関する丁寧なアドバイスを日本精工株式会社基盤技術研究所の元田智弘様より頂きました。研究室 OB の両氏にも厚く御礼申し上げます。

平成 27 年の 9 月に単身でフランスのリーズリヨンシンポジウムに参加した折に、世話をしてくださった本学 田中健太郎准教授にも感謝の意を表します。

研究室メンバーでは、先輩として良い刺激をいただけた陳函氏、田中祐一氏と二村健治氏、後輩として共に研究を進めた福崎学氏と鶴澤知輝氏、修士時代に同期がいない私の話し相手になってくれた院生の土屋佑介氏、中村研人氏には特にお世話になりました。エネルギー変換研究室、機械設計研究室の学生の皆様にも機材の貸し借りや合同合宿等、研究関連のみに留まらない交流があり、学生生活をより良いものとすることができました。最後に、私の進路に理解を示し、金銭的、精神的にあらゆる面で援助をしてくれた両親や弟、親族に深く感謝いたします。

平成 28 年 3 月
岡本 実樹