

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 28 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420080

研究課題名(和文) 多元情報の客観的複合解析を応用したしゅう動初期不安定要因の解析

研究課題名(英文) Analysis on Instability in Initial Period of Sliding Using Objective
Combinational Analysis of Multiple Kinds of Information

研究代表者

福田 応夫 (Fukuda, Kanao)

九州大学・水素エネルギー国際研究センター・客員教授

研究者番号：90532333

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：潤滑下でのしゅう動において、ごく初期にしゅう動面に固着した凝着物とその後の現象を長期にわたって支配することに着目した。しゅう動初期において凝着物が固着する場所と凝着物の規模を支配する要因の解明を試みた。しゅう動前の影響因子である表面粗さと残留応力の分布、しゅう動中の影響因子である衝撃荷重を調査対象として取り上げた。金属表面への表面粗さの付与と残留応力付与は、いずれも常時摺動試験片上での凝着物の生成を助長する傾向と、相手試験片への凝着物の移着を妨げる傾向が確認された。また、衝撃荷重については凝着物の移着等への有意な影響は見られなかった。凝着物の発生・成長とその固着を制御できる可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：Adhesive substances which fixed on the sliding surface in very early stage of sliding are known to govern the phenomena of oil lubricated sliding for long-term. An attempt was made to elucidate influencing factors on the fixture location of the adhesive substances and the size of the substances at the time of the fixture. Surface roughness and residual stress as the pre-sliding influencing factors and impulse load as an in situ influencing factor were looked into. Surface roughness and residual stress on the metallic surface enhanced the growth of an adhesive substance on the surface of a constantly sliding body and prevented the substance to transfer to its counterpart. The impulse load while sliding did no influences on the adhesion and transfer of materials. Some possibility to control the generation, growth and fixture of adhesive substance was suggested.

研究分野：工学

キーワード：トライボロジー 慣らし運転 摩擦 摩耗 複合解析

1. 研究開始当初の背景

しゅう動現象は、物質界面における真実接触部と呼ばれる微小な領域で発生する。その現象は微小かつ動的であり、しかも光や電子などの入出が難しいため、特殊な場合を除いて直接観察が不可能である。そのため、現象解明にあたっては摩擦力などの間接的な情報の有効活用が重要である。1990年代以降、本研究の提案者などから、これら間接的な情報を摩擦面内分布とその変化の形で時空マップ (Triboscopy の名でも知られている) として視覚的に表現する手法が提案された[1~5]。Fig.1 にピン・オン・ディスク試験における結果の1例を示す。間接的な情報の一つであるピン試験片の摩擦面垂直方向変位が、ディスク摩擦面内分布 (横軸方向) と、その繰り返し摩擦による変化 (縦軸方向) として示され、しゅう動現象の摩擦面内の不均一さとその変化を視覚的に把握できるようになっている。後に、このしゅう動現象解析手法は、多元種類の情報を摩擦位置 (あるいは測定タイミング) で客観的に組み合わせ、複合解析する方法に発展している[6,7]。

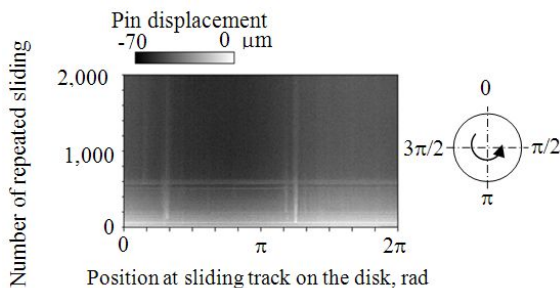


Fig. 1 ピン試験片変位の時空マップ

Fig.1 に示した結果は、本研究の提案者らによる慣らし運転に関わる研究において得られたものである[8]。ディスク位置 $15\pi/12$ 付近に観察される縦方向の白い筋は、ディスク上のこの位置が高くなっていること、つまり凝着物が付着していることを示している。また Fig.1 は、この凝着物が、しゅう動のごく初期にピンがディスク表面からかき集めて成長させた後ディスク表面に移着した物であること、および、数千回に及ぶ繰り返ししゅう動を経た後も現象に影響を及ぼし続けていることも示している。繰り返し調査の結果、この凝着物がどの程度発生するか、またどの程度成長するかが慣らし運転における分水嶺で現象がどちらに転ぶかの主たる支配要因となっていることが分かりつつある。また、一旦ピン試験片により持ち去られた凝着物 (繰り返ししゅう動回数 800 回付近の横方向の白い筋がそれを示している) は、ディスク上の同一位置に改めて移着し固定される傾向が強いことも明らかになってきた。詳細説明を割愛するが、上記の現象は、上で説明したピン試験片の摩擦面垂直方向変位に加え、摩擦力や接触電気抵抗など同時に測定された多元情報を摩擦位置により客観的に紐づけて解析した結果として推定さ

れたものである。

以上に述べた現象は以下の2仮説に要約される。1)しゅう動初期に現れる摩擦・摩耗現象の分水嶺における振る舞いは、ピンにより集められた後にディスクに固着する凝着物の大きさに支配される。2)ディスク上には凝着物を固着させ易い場所が存在し (あるいは形成され) 凝着物がその場所から脱落しても、再度同一場所に凝着物が固着する可能性が高い。従って、しゅう動初期において「凝着が発生する場所」と「凝着の規模」を決定している支配要因を明らかにすることが非常に重要な技術的ポイントとなっており、実用的には慣らし運転を良好に行うための条件設定の技術的根拠となることが期待される。

- [1] 福田 応夫 他、「摩擦力測定方法とその測定装置」、日本国特許、(1992)、平 4-208949.
- [2] 福田 応夫 他、「摺動試験における経時摩擦力マップの作成」、金属学会会報、32、6(1993)435-437.
- [3] M. Belin et. Al, "Triboscopy, a New Approach to Surface Degradations of Thin Films", Wear, 156 (1992) pp.151-160.
- [4] 福田 応夫、「繰り返し摩擦における摩擦力分布とその変化の追跡」、トライボロジスト、43、9 (1998) 788-795.
- [5] 福田 応夫、「繰り返し摩擦における試験片変位の解析」、トライボロジスト 49、9 (2004) 738-745.
- [6] Kanao Fukuda, "Combinational analysis of multi-data obtained in a repeated sliding system". Wear, 264(2008)499-504.
- [7] 福田 応夫、「摩擦・摩耗現象に関する測定・解析技術の高度化」、九州大学博士(工学)論文(工博乙第 1524 号)
- [8] 福田 応夫、森田 健敬、「境界潤滑摩擦面におけるトライボデータ分布の解析」トライボロジー会議 2013 秋福岡予稿集
- [9] 福田 応夫 他、「未来の産業とそのキーテクノロジーとしてのトライボロジー」、新エネルギー・産業技術総合開発機構 平成 8 年度調査報告書「スマート・トライボ・メカニクス」NEDO-IT 9601(1997)9-13.

2. 研究の目的

今回提案する研究の目的は、これまでに開発してきた摩擦・摩耗現象の解析方法を発展させ、しゅう動初期において発生する現象の解析に適用することである。従来は、しゅう動試験時に受動的に得られた情報のみを解析していたが、a)事前に取得する材質の摩擦面内分布と摩擦・摩耗データの分布の比較検討を可能にする、b)能動的にしゅう動試験中にその条件を変化させてその影響を位置データを元に摩擦・摩耗データと紐づけて複合解析する、点が技術面における新しいアプローチである。

本研究中 a)に関しては、多結晶体である金属材料（鋼を想定）の摩擦面内における残留応力と表面粗さを対象とした。b)に関しては、しゅう動試験中の急激な荷重変動（機械運転における外部要因による衝撃などを想定）をの影響を調査した。

3. 研究の方法

研究目的を達成するための準備として、まず、しゅう動試験時と試験片解析時の位置分解能およびマッチングの精度向上を実現する。しゅう動試験機と同様に、ディスク試験片を精度良く回転させ、位置を特定しながら観察・測定できる治具を開発する。対象とするディスク試験片の詳細は参考文献[8]を参照されたい。試験機における試験片位置決め精度と試験片解析位置分解能の向上について説明する。しゅう動試験における摩擦・摩擦データ取得の概念図を Fig.2 に示す。本研究で使用するピン・オン・ディスク試験機では、摩擦・摩擦データの取得間隔は約 $87\mu\text{m}$ （回転角にして 0.5° ）となっている。これまでの調査の結果、この測定間隔はしゅう動現象を捉えるために十分小さな値となっていることが確認されている。微小硬さなどのディスク材質特性の表面分布と摩擦・摩擦データを紐づけるためには、最低限データ取得間隔と同程度の精度で摩擦試験と材質特性の測定を行う必要がある。摩擦試験機においては、ディスク回転軸をロータリーエンコーダーで観測しつつ回転させ、ゼロ位置で精度良く停止させる機構を付加する。また、ディスク試験片の取り付けについては、ディスク上に付与するゼロ位置マーカをピン試験片と同一位置に設置した光学顕微鏡で拡大観察しつつ回転軸のゼロ位置と一致させて固定することができる治具を開発する。

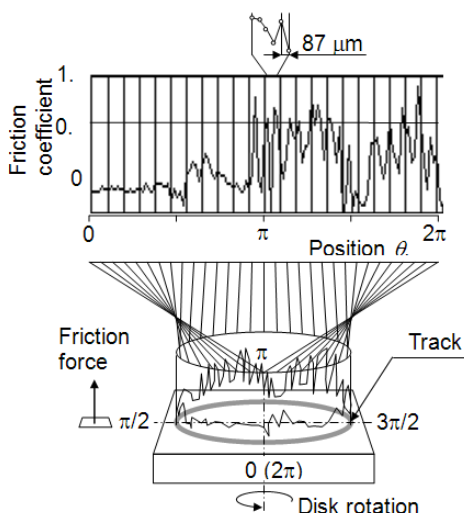


Fig.2 摩擦摩擦データ獲得の概念図

ディスク試験片の解析用位置決め装置については、摩擦試験機と同様にロータリーエンコーダーを回転軸に設置し、試験片マーカとエンコーダーのゼロ位置を一致させた

上で、ステッピングモーター等で精度良く回転させることにより、顕微鏡観察や形状測定データとディスク上の位置を必要な精度で紐づけることを可能とする。ディスク試験片の物性データと摩擦・摩擦データの位置情報による紐づけの妥当性検証は、ディスク表面に固着した凝着物のイメージ観察による位置特定と、測定された摩擦力やピン変位情報とのマッチングにより行う。

試験前の試験片表面状態の凝着物成長・移着への影響調査については、摩擦面表面粗さに分布を持たせた試験片、及びショットピーニングにより残留応力に変化を持たせた試験片を用いる。これらの特性分布が凝着物の発生・成長・移着に及ぼす影響を調査する。

また、しゅう動中の条件変化については、荷重アームに錘を衝突させることにより付与する。バネにより錘を加速し荷重アームに衝突させる機構を既存の摩擦試験機に付与する。錘を射出するタイミングは摩擦試験機の測定ソフトウェアから指示し圧空によりトリガーをかけることにより行う。収集された摩擦力及び試験片変位データの解析及びしゅう動面の観察により、凝着物の規模に影響を与えるか、あるいはディスク上の当該位置が凝着物の固着位置となるかを確認する。

以上の結果を総合的に解析し、しゅう動初期に生じる凝着物の規模とディスク上の固着位置を決定するパラメータとして、材料の物性分布と運転条件（主に荷重条件）を検討する。

4. 研究成果

3年間の研究を終え、予定していた成果を上回る結果を得ることができた。成果については「5. 主な発表論文等」に示すように、研究前半の凝着摩擦機構の解析を中心に予定数を大幅に上回る対外発表を行っている。

開発した試験片観察・測定用治具を Fig.3 に示す。光学顕微鏡など観察・測定機器のステージ上という限られたスペースでディスク試験片を精度良く回転させ、位置を特定しながらの観察・測定を実現している。凝着物を利用した摩擦試験機における位置情報との整合検証も満足のできる結果であった。

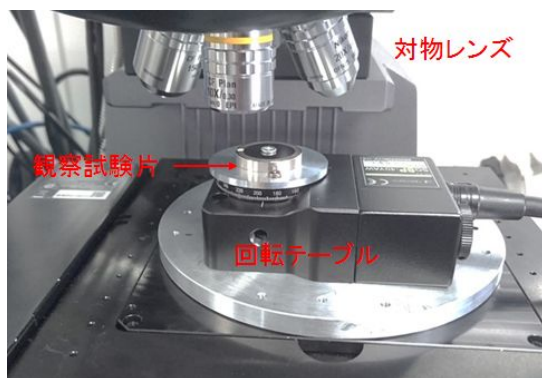


Fig.3 開発したディスク試験片観察・測定用治具

開発した治具を用いて試験後のディスク試験片を観察・測定した例を Fig.4 に示す。図中 No.1 位置におけるイメージと情報を精度良く獲得することができた。

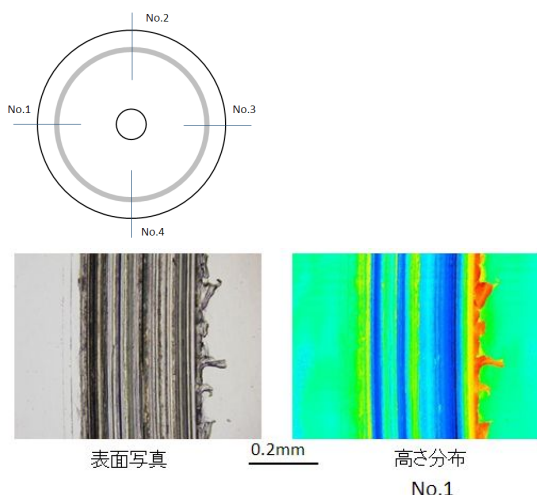


Fig.4 しゅう動位置を特定した観察・測定の例

摩擦試験機については、ディスク取り付け軸に位置目盛を設けると共に、USB タイプの光学顕微鏡を設置して、ディスク試験片のゼロ位置を正確に回転軸のゼロ位置に合わせることを可能とした。また回転を制御するモータをサーボタイプに変更するとともに、制御ソフトを改良してゼロ位置で正確に停止するように変更した。

次に、ディスクに物性の分布を付与した場合のしゅう動試験結果を示す。試験条件については参考文献[8]を参照されたい。試験は全て JIS VG32 ベースオイル潤滑下で行った。

代表例として表面粗さを変更した場合の摩擦力の時空マップを Fig.5 に、ピン変位の時空マップを Fig.6 に示す。ディスク表面は $0 \sim \pi$ を #2000 のエメリー紙仕上げ、 $\pi \sim 2\pi$ を鏡面仕上げしてある。実験開始、90 回転ほどまでは鏡面仕上げ部の摩擦係数に比べ #2000 仕上げ部の摩擦係数が有意に高い。その後、100 回転以降では両者に違いが見られなくなると同時に、変動が大きくなっていることが分かる。ピン変位のマップからは両仕上げ面での優位な差は見られないが、ピンの変位が上昇しては急落することが繰り返されていることが分かる。これはピン摩擦面に生じた凝着物がディスクから集められた(移着した)物質により急激に成長しては脱落していることを示している。このような現象は凝着摩擦において一般的である。しかしながら、全面鏡面仕上げしたディスク試験片との比較で、今回試験片における凝着物の成長速度は顕著に速いことが確認された。また今回の試験片での特筆すべき点として、ピンで成長した凝着物がディスクに移着・固着する傾向が見られない点があげられる。この移着が生じると、ピン変位の時空マップでは Fig.1 で見られたような縦の縞が発生するが、Fig.6 に

おいてはそれが観察されない。つまり、表面の特性分布により、凝着物の成長速度や固着頻度が制御できる可能性が示された。

以上の結果と同様の傾向は、ディスク試験片にショットピーニングにより部分的に残留応力を付与した試験片でも確認された。

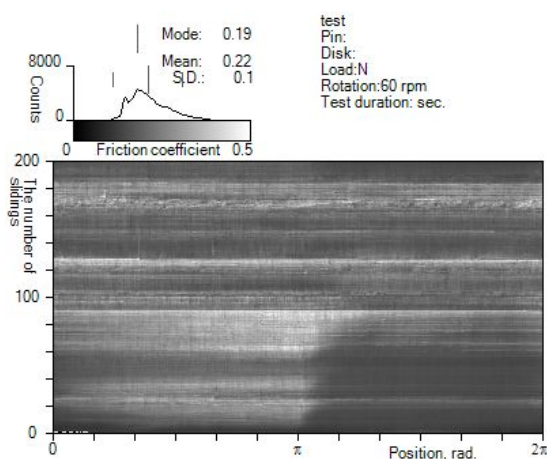


Fig.5 表面粗さ分布を持たせた試験片における摩擦係数時空マップ

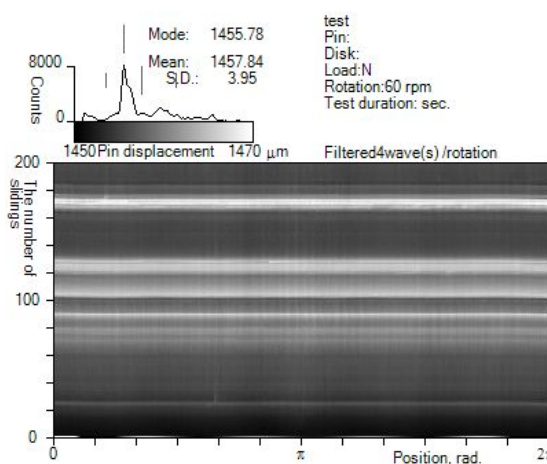


Fig.6 表面粗さ分布を持たせた試験片におけるピン変位時空マップ

次にしゅう動中に衝撃荷重を与えた場合の結果を説明する。Fig.7 に例としてディスク回転6回転目のゼロ点直後に衝撃荷重を与えた場合のピン変位の時空マップを示す。変位量をより詳細に示すため、当初の位置を変位0として相対変位を示した。ゼロ点直後の黒い縦筋は衝撃荷重により生じたディスク面塑性変形の影響である。Fig.6 との比較より明らかなように、衝撃荷重を付与した場合はピン試験片における凝着物の成長が全く見られない。従って、そのディスクへの移着も起きないため、マップには凝着に伴う縦、横どちらの筋も観察されない。この現象はピン表面の塑性変形による材質変化によってもたらされたと推察できるが、詳細説明にはさらなる調査を必要とする。

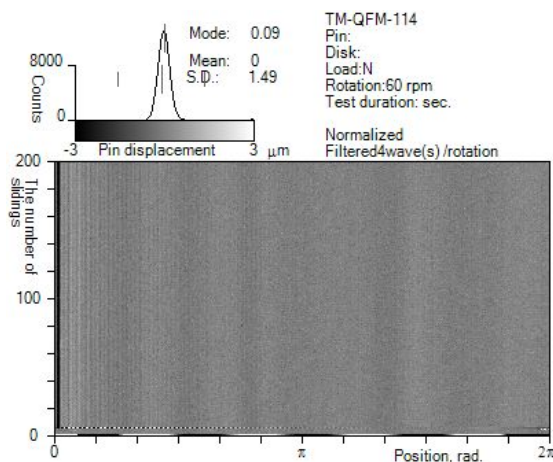


Fig.7 しゅう動中に衝撃荷重を与えた場合のピン変位時空マップ

本プロジェクトの成果を要約すると以下ようになる。

試験片観察・測定のための位置決め装置を開発し、より精密に位置に紐づけした観察・測定が可能となった。

により、しゅう動試験中に得られた摩擦・摩耗データと、しゅう動試験前後の観察・測定データを精度良く関連付けて解析することが可能となった。

試験片表面の粗さや残留応力を変化させることで、凝着物の成長速度が変化することが明らかとなった。

試験片表面の粗さや残留応力を変化させることで、発生した凝着物の相手材への移着・固着頻度が変化することが明らかとなった。

しゅう動中の衝撃荷重が凝着物の成長を抑制する現象が観察された。

以上の知見から、しゅう動部品の表面形状と残留応力を適切に付与することにより、凝着物の発生・成長・移着（固着）を制御することができる可能性が示された。このことは、しゅう動部品の表面性状の制御により、新規導入機器における慣らし運転を良好に推移させる、あるいは慣らし運転期間を短縮させる可能性を示していると考えられる。

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 6 件)

K. Fukuda and T. Morita, “Physical model of adhesive wear in early stage of sliding,” *Wear*, 376-377, Part B (2017) 1528-1533. DOI 10.1016/j.wear.2017.01.078 (査読あり)

Z. A. Subhi, K. Fukuda, T. Morita and J. Sugimura, “Analysis on the Mechanism of Humidity to Influence the Very Early Stage of Sliding under Different Load,” *Tribology Online*, 10,

6 (2015) 420-427. DOI 10.2474/troll.10.420 (査読あり)

Z. A. Subhi, K. Fukuda, T. Morita and J. Sugimura, “Quantitative Estimation of Adsorbed Water Layer on Austenitic Stainless Steel,” *Tribology Online*, 10, 5 (2015) 314-319. DOI 10.2474/troll.10.314 (査読あり)

K. Fukuda and T. Morita, “Objective and Combinational Analysis of Multiple Kinds of Data Obtained from Severe-Mild Wear Transition,” *Advanced Materials Research*, 1112 (2015) 345-348. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.1112.345 (査読あり)

K. Fukuda, Z. A. Subhi and T. Morita, “Analytical Study on the Growth and Transfer of Adhesive Substance Generated on the Surface in the Early Stage of Sliding,” *Wear*, 330-331 (2015) 64-69. DOI 10.1016/j.wear.2014.11.009 (査読あり)

福田 応夫, 「水素雰囲気における金属の摩擦・摩耗」、*トライボロジスト*, 60, 10 (2015) 632-637. (査読あり)

〔学会発表〕(計 8 件)

Z. A. Subhi and K. Fukuda, “Analysis on the early stage of contact adhesion in different relative humidity”, Malaysia-Japan Joint International Conference (MJJIC2016), Sep. 2016. Kuala Lumpur

N. D. Manaf, K. Fukuda, Z. A. Subhi and M. F. M. Radzi,, “Time dependent change of water adsorption on austenitic stainless steel”, Malaysia-Japan Tribology Symposium (MJTS 2016), Aug. 2016, Kuala Lumpur 41-42.

K. Fukuda and T. Morita, “Severe-mild wear transition at different relative humidity rates”, Malaysian International Tribology Conference 2015 (MITC 2015), Nov. 2015, Penang Malaysia

K. Fukuda, “The Influences of atmospheric gas environments on the tribological properties of materials”, 2015 Advancement on mechanical and manufacturing engineering technology (ADMMET2015, 招待講演), Nov. 2015, Indonesia

K. Fukuda and T. Morita, “Differences in Growth and Transfer of Adhesive Substances in Early Stage of Sliding between Austenitic Stainless Steel and Pure Cu,” International tribology Conference, TOKYO 2015, Sep. 16-20, 2015, Tokyo, Japan. 527-528.

K. Fukuda, Z. A. Subhi and T. Morita, “Analytical study on the growth and transfer of adhesive substances generated on the surface in the early stage of sliding”, 20th

International conference on wear of materials (WOM2015), Apr. 2015 Toronto
Z. A. Subhi, K. Fukuda and T. Morita,
“Interpretation of adhesive wear mechanism based on findings in the very early stage of sliding”, 20th International conference on wear of materials (WOM2015), Apr. 2015 Toronto
Z. A. Subhi, K. Fukuda, T. Morita and J. Sugimura, “Analysis on the mechanism of humidity to influence the very early stage of sliding under different load”, Malaysia-Japan Tribology Symposium 2014 (MJTS 2014, Kuala Lumpur)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

福田 応夫 (FUKUDA Kanao)
九州大学・水素エネルギー国際研究センター・客員教授
研究者番号： 9 0 5 3 2 3 3 3

(2)研究分担者

杉村 丈一 (SUGIMURA Joichi)
九州大学・工学研究院・教授
研究者番号： 2 0 1 8 7 6 6 0

森田 健敬 (MORITA Takehiro)
九州大学・工学研究院・助教
研究者番号： 7 0 1 7 5 6 3 6

田中 宏昌 (TANAKA Hiroyoshi)
九州大学・工学研究院・助教
研究者番号： 8 0 2 6 4 0 7 6