

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560163

研究課題名(和文) 摩擦摩耗における多元情報の客観的複合解析技術の開発

研究課題名(英文) Development of Objective Combinational Analysis Method on Multiple Information of Friction and Wear Phenomena

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) 4,400,000円、(間接経費) 1,320,000円

研究成果の概要(和文)：慣らし運転条件の技術的根拠を明らかにすることを最終目標とし、凝着摩耗の原理に立ち返り実験・解析を行った。試験から得られる多元情報を客観的に組み合わせる新手法により、基本的な凝着摩耗メカニズムについて多くの知見を得ることができた。また、慣らし運転にとって重要な新知見として、境界潤滑下のしゅう動では、ごく初期に生成する凝着物の大きさと発生頻度が、その後のしゅう動状態に決定的な影響を及ぼすことがデータをもって示された。

研究成果の概要(英文)：Experiments and analysis have been conducted to clarify the theoretical background of the operational conditions of running-in of new machines. Objective combinational analysis of multiple data obtained in the experiment clarified many new phenomena for the fundamental mechanisms of adhesive wear. Important new findings about running-in phenomena under boundary-lubrication were also obtained. The sizes and generation frequency of adhesive substances on the sliding surface in very early stage of sliding gave decisive influences on the subsequent long-term condition of the lubrication.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：トライボロジー 摩耗粉成長 慣らし運転 摩擦 摩耗 複合解析

1. 研究開始当初の背景

機械などの導入時に「慣らし運転」をして良好な状態を作り込むと、その機械を安定して長期にわたり使用できることが知られている。これは、摩擦・摩耗現象がごく初期において不安定であり、どのような状態で定常状態になるかによってその後の経過が大きく変わる(摩擦・摩耗現象の分水嶺)ためである。しかしながら、摩擦・摩耗のごく初期に生じる現象とそのコントロール方法については良く分かっていなく、慣らし運転の条件は経験的に設定されることが慣例となっている。

すべり摩擦は界面における微小な領域で発生する微小な現象に起因するため直接観察が難しい。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年代に本研究の提案者など[1~4]から、これら間接的な情報を有効活用する方法が提案された。その方法を摩擦係数の解析に適用した例を図1に示す。繰り返し摩擦における摩擦係数が、摩擦位置における分布として表現され、摩擦回数による変化を知ることができる。同様の試みは試験片の摩擦面法線方向変位の解析[5]においても成功している。この手法により、摩擦面内の特定の位置における現象の変化を追跡し、解析することができる。さらに、本研究の提案者は多元種類の情報を摩擦位置(あるいは測定のタイミング)で客観的に組み合わせ、複合解析する方法を提案してきた[6]。図2に従来の情報獲得・利用方法と提案された解析技術の違い概念的に示す。上図が従来行われてきた現象に関する情報収集方法である。A,B,C...といった情報は、個別に観察者に提供され、異なったタイミングで発生している現象の情報を組み合わせて解析してしまうという曖昧さが存在する。それに対して本研究が提案する下図では、時系列に得ることができる情報 A, B, C については同一タイミング(同一摩擦位置)のデータセットとして測定・解析することができるため、上で述べた曖昧さが排除される。

これら筆者らが開発してきた現象解析方法によりしゅう動初期の不安定さの原因を明らかにし、経験的に決められている慣らし運転の条件設定に理論的根拠を与えることができるのではないかと期待が提案する研究の背景である。

摩擦面における摩擦位置(あるいはタイミング)を基軸として多元種類の情報を客観的に複合解析する点が、本研究の特色であり、かつ独創的な点である。また、摩擦・摩耗抑制のために早期に安定状態に導入する(マイルド摩耗に推移させる、あるいは表面に酸化膜を形成させるなど)ことを目的とした研究は数多くあるが、初期現象に着目して良好な状態になるか劣悪な状態になるかの分水嶺を明らかにしようとする試みはあまり見られない。本研究によって得られる成果により

摩擦・摩耗初期段階の現象の客観的な理解が可能となり、良好な「慣らし運転」のための必要十分条件を明らかにすることが期待される。また本研究は、摩擦・摩耗現象全般の解明に寄与するとともに、摩擦面の自動診断、あるいは摩擦のアクティブ・コントロール[7](単に摩擦・摩耗を増やしたり減らしたりというベクトルを示すのではなく、ある特定の値に落ち着かせる)の要素技術の一つとして資することができるかと期待される。

[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

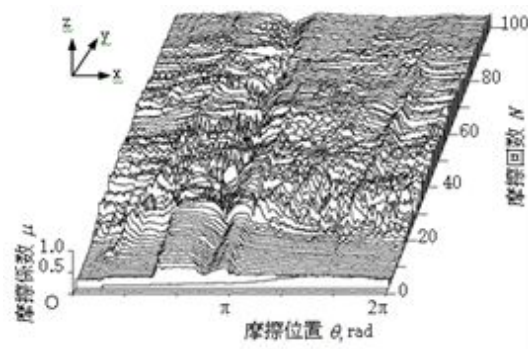


図1 ピン・オン・ディスク摩擦試験によって部分的に DLC をコーティングしたディスクを試験した場合の摩擦力分布とその変化 [4]

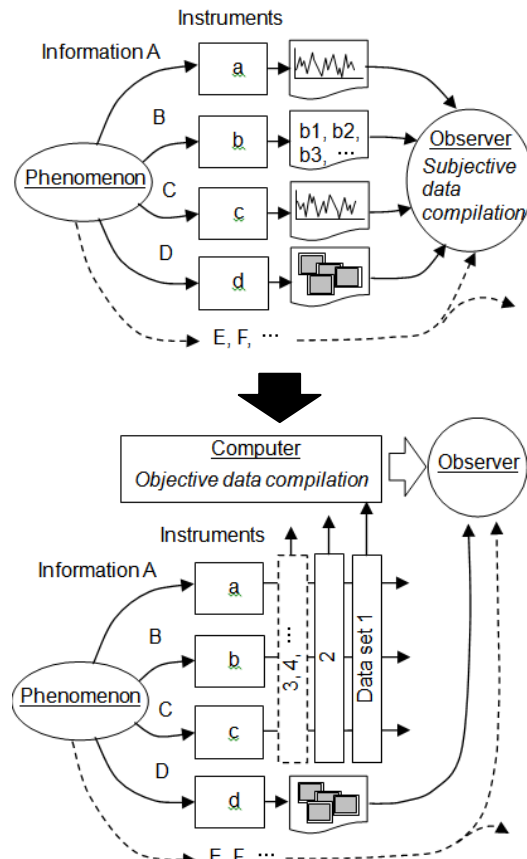


図2 現象解析における情報獲得と利用方法の高度化に関する概念図 [6]

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 聡夫, 「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 聡夫, 「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 聡夫 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

今回提案する研究においては、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に適用する。その際、新たな情報として、そこで発生する摩耗粉あるいはその元となる摩擦面凝着物の形状や寸法、さらにはその成長の過程(寸法成長の微分値など)を用い、摩擦力、試験片変移、接触電気抵抗など他の情報と摩擦位置により紐付けて複合解析することを試みる。

研究期間内に、上記を可能とする摩擦・摩耗試験機の開発、各種情報を得るための摩擦・摩耗計測装置の開発、およびそれらの情報を複合解析する手法の開発を行うことが最初の目的である。

ついで、上記注目点(摩耗粉の成長具合と脱落頻度の組み合わせ)が、摩擦する材料の物性と組み合わせ、潤滑方法、荷重や速度など、諸条件によりどのような影響を受けるかを明らかにする。上記注目点を指標化し、良好な慣らし運転を終了するための条件を明示することが最終的な目的である。

## 3. 研究の方法

具体的には、摩擦面における凝着物の成長具合とその脱落頻度の組み合わせが、先に述べた摩擦・摩耗現象の分水嶺をコントロールする一つの支配要因となっていると考えられるため、その影響の検証を行う。

最初の1年間で摩擦試験機と摩擦・摩耗計測装置の試作・検証を行う。研究全体の総括と摩擦試験機と摩擦・摩耗計測装置の開発をその分野の有識者である分担者が担当する。1年目最終四半期より2年目にかけて測定データの解析手法を開発し、無潤滑状態での摩耗粉とその元の情

報との関連を解析する。3年目は潤滑状態での解析に発展させ、慣らし運転での必要条件を明らかにする。

本研究では、情報として摩擦力、試験片の摩擦面垂直方向変移、試験片間の接触電気抵抗、表面凝着物(摩耗粉の元)あるいは脱落した摩耗粉の大きさ・成長を取り扱う。そのため、摩耗粉の時系列回収機構を新たに工夫する(摩耗粉については、残念ながら発生した摩擦位置の特定まではできないが、試験片変移の情報と摩耗粉の大きさから脱落位置の推定が可能であると期待される)。試験機の基本構造、潤滑油供給機構、摩耗粉の回収機構などの概念設計を代表者が行い、機器メーカーへの指導を通して作成する。摩擦・摩耗計測装置の開発を分担者が行い、試運転を通じて解析原理の原案を代表者が作成する。

慣らし運転の状態を左右すると考えられる摩擦面凝着物の生成とその状態について、まず無潤滑状態で、ついで潤滑状態で解析する。無潤滑状態では、軸受鋼など一般的な鋼材を対象とし、摩擦初期段階が良好に推移した場合とそうではなかった場合の違いを詳細に把握することができるようにアルゴリズムを最適化する。次の段階として、荷重や速度などのしゅう動条件の違いが摩擦面状態に与える影響を観測できることを確認する。最終的に長時間の摩擦試験を行い、良好な慣らし運転が行われた場合とそうでなかった場合の違いを、開発した評価方法で明確に区別できることを確認する。

上記無潤滑状態での試みが予定通りに進まなかった場合には、鋼材の相手材をより軟質な材料など別な材料に変更することで摩擦面状態の違いを創出し、上に計画したような解析アルゴリズムの最適化とパラメータの選定を行う。

次に潤滑状態における調査では、影響因子を減らすため、まずベースオイルを用いて無潤滑状態と同様の評価を行い、開発した評価方法の有用性を確認する。潤滑状態に合わせた評価項目の修正を行った後添加剤を付加して、それらが慣らし運転に与える影響を調査する。

なお、試験機における測定情報収集方法は既に実績があり、試験機自体の開発に不都合が生じる可能性は極めて低い。解析方法の開発においては、これまでの摩耗メカニズムの解析報告を参考にし、必要に応じて有力な研究者との情報交換などを通じて開発遅延の危険を極力排除するようにしたい。

平成24年度以降は、年に1度程度の頻度で成果の国内学会での発表と、投稿費用の発生しないオンライン国際誌での論文発表を行う。

## 4. 研究成果

予定していた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」

に示すように予定数を大幅に上回る対外発表を行っている。雑誌論文についてはさらに2報を準備中である。

研究1年目は、予定通り、試験装置及び測定・解析ソフトウェアの開発を行った。開発した装置の概略図を図3に示す。開発した装置により、試験片変位のデータと発生する摩耗粉の大きさに関する関連を示すことができた(学会発表、 )。

研究2年目には、開発した装置による調査を進め、摩耗粉の元となる凝着物の成長と移着が、図4に示すようにピン変位と摩擦力の独特な変化を伴うことを示すことができ、さらに、それらの結果から凝着摩耗をいくつかの基本的な過程に分類することに成功した(学会発表、 )。またしゅう動のごく初期では雰囲気湿度の影響で安定期間(ISP: Initial Steady Period)が存在すること、その期間が湿度の影響を大きく受けることも明らかにした(図5: 雑誌論文、 学会発表、 )。また湿度の影響で凝着物の成長速度や発生頻度が変化することも確認された(学会発表 )。

研究3年目には開発してきた技術を油による境界潤滑条件に応用し、しゅう動のごく初期に発生する凝着物とその後の現象に長く影響を及ぼすことを明らかにした(学会発表 )。また、荷重条件を厳しくするとこれらの凝着物発生頻度が増えて安定した境界潤滑状態となりにくいこと、しゅう動初期のば

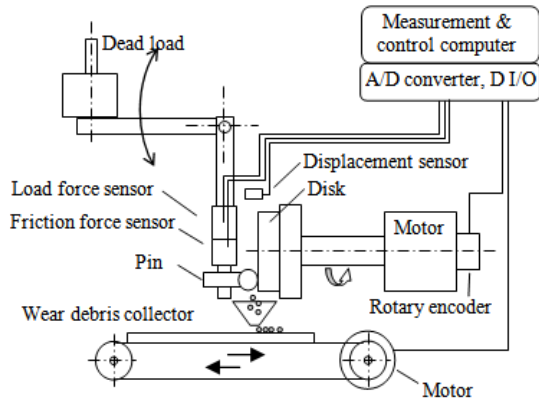


図3 開発したピン・オン・ディスク型摩耗試験機概念図 [雑誌論文 より]

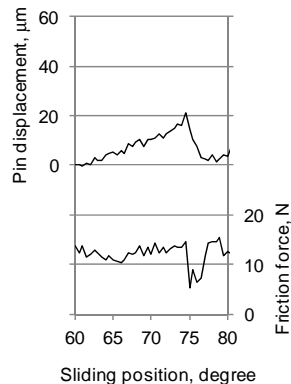


図4 ピンの摩擦面垂直方向変位と摩擦力の変動の例 [学会発表 より]

らつきがこれらの凝着物の発生頻度や大きさに大きく影響されていることも明らかとなった。潤滑油添加剤の影響についても調査し、凝着物の成長を妨げることによって過大な荷重条件でも定常の境界潤滑を実現する効果があることを示すことができた(本件は未発表である)。

油による境界潤滑中にこのような凝着物が発生することは広く知られているが、それがどのようなタイミングで形成されるかについての詳しい知見はこれまで得られていなかった。筆者らが開発してきた解析技術を適用することによって、これらの凝着物がしゅう動開始直後に形成されていることが確認された。また、本解析技術は、凝着物の発生した場所は凝着物が固着しやすい性質を持っており、一旦凝着物が脱落しても、再度凝着物が付着しやすい傾向も明らかにし

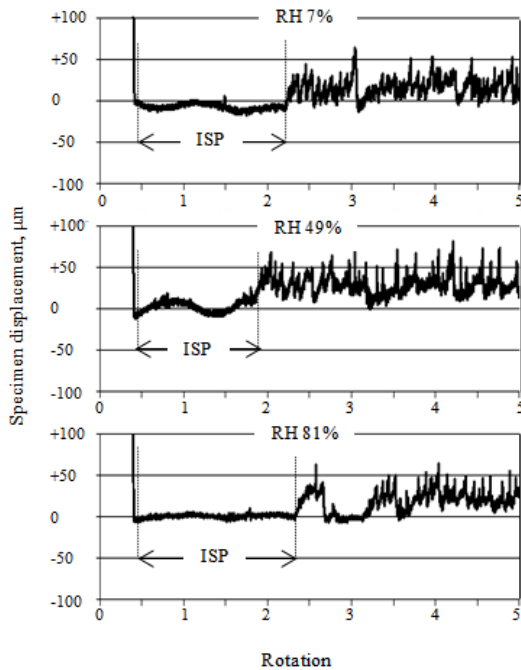


図5 雰囲気湿度が極初期定常状態に及ぼす影響 [雑誌論文 より]

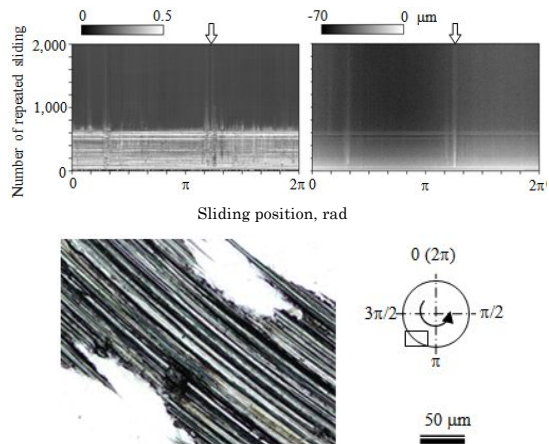


図6 しゅう動最初期に形成された凝着物が後々まで影響を及ぼす [学会発表 より]

た。

この発見は慣らし運転において大きな意味を持っており、しゅう動のごく初期に発生する凝着物の大きさと、その固着位置が何によって決まるのかが、慣らし運転における分水嶺を決める技術的課題であることが分かった。

本研究の成果は、当初目的であった『「摩擦粉の成長具合と脱落頻度の組み合わせ」が「摩擦する材料の物性と組み合わせ、潤滑方法、荷重や速度など、諸条件によりどのような影響を受けるか」を「指標化」する』という形態にまとめることはできなかった。しかし

凝着摩擦の基本となるいくつかの素過程を示すことができた

しゅう動試験中の測定データと生み出される摩擦粉の大きさの一定の関連付けに成功した

凝着物生成への雰囲気湿度の影響の理解を深めた

慣らし運転にとって重要な境界潤滑下の凝着現象に関して、しゅう動の最初期における凝着物の生成規模と頻度がその後の経過にとって極めて重要であることを具体的なデータで示した

の凝着物が固着しやすい特定の場所が存在することを見出した

などの重要な知見が得られた。良好な慣らし運転条件を決定するための指針を得るという観点からは、凝着物の大きさを決めている要因、凝着物が固着する場所を決める要因を明らかにすることが重要な課題であることを示すことができた。

#### 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 2件)

Kanao Fukuda and Takehiro Morita, "Analytical method for temporal changes in repeated sliding phenomena," *Procedia Engineering*, 68 (2013) 213-218. (査読あり)

Zaid Ali Subhi, Takehiro Morita and Kanao Fukuda, "Analysis of Humidity Effects on Early Stage of Sliding," *Procedia Engineering*, 68 (2013) 199-204. (査読あり)

〔学会発表〕(計 9件)

福田 応夫, 森田 健敬, 「凝着摩擦における経時変化解析の試み その3」, 日本トライボロジー学会、トライボロジー会議予稿集(東京 2014-5)

Zaid Ali Subhi, Kanao Fukuda, Takehiro Morita and Joichi Sugimura, "Tribological Behaviours of Austenitic Stainless Steel and OFHC Cu in the Earliest Stage of Sliding,"

MJJIS 2013 Proceedings, 2013 November, Tokai University Shonan Campus.

Zaid Ali Subhi, 福田 応夫, 森田 健敬, 杉村 丈一, 「A Study on the mechanism of humidity to influence sliding phenomena」, 日本トライボロジー学会、トライボロジー会議予稿集(福岡 2013-10)

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」, 日本トライボロジー学会、トライボロジー会議予稿集(福岡 2013-10)

福田 応夫, 森田 健敬, 「材料の特性が凝着摩擦機構に及ぼす影響」, 日本トライボロジー学会、トライボロジー会議予稿集(東京 2013-5)

Zaid Ali Subhi, 福田 応夫, 森田 健敬, 「Influences of humidity on the early stage of sliding contact」, 日本トライボロジー学会、トライボロジー会議予稿集(東京 2013-5)

森田 健敬, 澤江 義則, 福田 応夫, 「ピン・オン・ディスク試験における摩擦粉経時変化解析の試み」, 日本機械学会九州支部福岡講演会、平成 24 年 9 月 28-29 日

福田 応夫, 森田 健敬, 「凝着摩擦における経時変化解析の試み その2」, 日本トライボロジー学会、トライボロジー会議予稿集(室蘭 2012-9)

福田 応夫, 森田 健敬, 「凝着摩擦における経時変化解析の試み」, 日本トライボロジー学会、トライボロジー会議予稿集(東京 2012-5)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

#### 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

研究者番号：90532333

(2) 研究分担者

森田 健敬 (MORITA Takehiro)

九州大学・工学府

研究者番号：70175636