

氏 名	赤 垣 友 治
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 4 年 2 月 12 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 56 年 3 月 東北大学大学院工学研究科機械工学専攻 博士課程前期 2 年の課程修了
学 位 論 文 題 目	フェログラフィーの基礎と応用に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 加藤 康司 東北大学教授 高橋 秀明 東北大学教授 庄子 哲雄 東北大学教授 加藤 正名

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

本章においては、近年、機械システムの大型化、高精度化、自動化に伴い、システムの長寿命、故障率低減、無人化、メンテナンスコスト低減化が強く求められていることを示し、それを実現するためには、システムの異常を正確に検出する異常予知技術の開発と診断ソフトの確立が必要不可欠であることを述べる。フェログラフィーは、潤滑油中から磁気的に分離した摩耗粒子の分析を通して摩耗面の状態をミクロな観点から解析しようとするもので、トライボロジーに基礎を置く異常予知法であり、多くの異常予知法の中で最も有望であることを示す。フェログラフィーが広く異常予知法として適用され、正確な診断結果を提供するために必要となる問題点を明らかにし、本論文の目的と意義を明確にしている。

すなわち、フェログラフィーを用いて、システムの異常予知を正確に行うためには、次の諸点を明らかにすることが求められている。

- (1) フェログラフィー用分析機器の分析精度を検討し、比較基準として重要な標準フェログラム集を作成すること。
- (2) 摩擦摩耗試験において、摩耗粒子特性（発生量、形状、寸法、組成等）、微視的摩耗形態及び巨視的摩擦摩耗データの相関関係を明らかにすること。
- (3) 摩擦摩耗試験で得られた結果を基に、実機潤滑システムにフェログラフィーを適用し、同一システムの正常運転から破損までの課程を詳細に解析し、発生した摩耗粒子と摩擦摩耗状態の関係を

明らかにすること。

(4) 異常予知のためのフローチャートを作成すること。

そこで、本論文では、これらの点を明らかにすることを目的とした。以上のような位置付けの研究を進めるにあたり、本研究では、潤滑すべり条件下の摩擦摩耗を取り上げ、更に診断対象の実機システムとして、すべり軸受を取り上げる。

第2章 フェログラフィー用分析機器の設計と基本特性

本章においては、フェログラフィーの基本特性として重要な分析精度及びそれに及ぼす影響因子、分析法の適用限界を調べた。そのために、従来の分析機器を改良し、新しく設計、製作したものを使用した。その結果、摩耗粒子の採取量と沈殿形態に及ぼす流量、希釈度、磁界強度の影響を明らかにした。また、摩耗粒子濃度1.2~120ppmの範囲で、比較基準として有用な標準フェログラム写真集を作成した。摩耗粒子濃度の違いは、フェログラム上で線密度、面積被覆度の違いとして明確に識別されることができるとを明らかにした。これらのパラメーターと摩耗粒子濃度との間には、共に折点を有する線形関係が成立し、その折点となる摩耗粒子濃度は、面積被覆度の場合30 ppm、綿密度の場合6 ppmであることを明らかにした。折点となる摩耗粒子濃度以下で、これらのパラメーターは摩耗粒子濃度の違いを敏感に検出することができることを示した。

第3章 フェログラフィーによる焼き付きの評価

本章においては、四球摩擦試験によって生ずる境界潤滑から焼き付き状態への遷移過程において発生する摩耗粒子の分析をフェログラフィーを用いて行なった。また、境界潤滑条件下の摩耗の進行過程の分析も行なった。その結果、フェログラフィーは、境界潤滑状態と焼き付き状態の違いを線密度、面積被覆度、最大粒径の違いとして明確に検出することができることを明らかにした。各々の状態において、特徴的に発生する摩耗粒子の形状及び寸法、更にそれらの発生機構を走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察によって明らかにした。また、面積被覆度は、境界潤滑条件下の定常的な摩耗の進行過程及び摩擦係数のわずかな変動とそれに対応した摩耗率の変化を明確に検出することができ、摩耗状態の診断に有効であることを示した。

第4章 炭素鋼の潤滑すべり摩擦における摩耗形態図

本章においては、炭素鋼の潤滑すべり摩擦において、支配的となる微視的摩耗形態をSEM観察によって明らかにした。その結果、古くから知ら

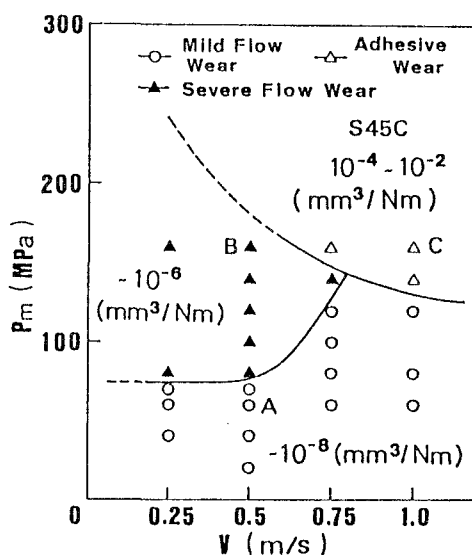


図1 炭素鋼の潤滑すべり摩擦における摩耗形態図

れている凝着摩耗に加えて、マイルド流動摩耗、シビア流動摩耗が新しく見出された。これらの可能な領域を示すために摩耗形態図を新しく導入した。図1に得られた摩耗形態図を示す。摩耗粒子の形状及び寸法（粒度分布）は、支配的な摩耗形態に強く依存して変化することを明らかにした。また、比摩耗量の値も、支配的な摩耗形態に強く依存して変化することを明らかにした。

このように、摩耗粒子の分析は、摩耗率と支配的な摩耗形態に関する情報を与え、異常予知において役立つことができることを示した。また、異常予知における摩耗形態図の重要性を示した。

第5章 潤滑すべり摩擦における摩耗形態図に及ぼす硬さと添加剤の影響

本章においては、摩耗形態図及び摩耗粒子形態に及ぼす摩擦材質の硬さ及び添加剤の種類の影響を調べた。その結果、摩耗形態図において、各々の摩耗形態の可能な領域は、摩擦材質の硬さや添加剤の種類に依存して変化することを明らかにした。したがって、摩耗形態図は、潤滑システムに使用されている摩擦材質の組合せ、潤滑油、添加剤を用いて作成されなければならないことを示した。

第6章 フェログラフィーによるすべり軸受の潤滑状態の評価

本章においては、実機ジャーナル軸受の診断ソフト確立の第1段階として、実機ジャーナル軸受の作動条件に準じた実験条件及び同じ摩擦材質の組合せ、同じ潤滑油を用いて、軸受材料のすべり摩擦過程における潤滑状態をフェログラフィーにて解析した。また、比較のために、発光オイル分析（SOAP）及び酸溶解 SOAP も行なった。また、発生した摩耗粒子と潤滑状態及び微視的摩耗形態との関係を明らかにした。図2に混合潤滑状態から焼き付き状態への遷移を分析した結果を示す。

図に示すように、フェログラフィー及び酸溶解 SOAP は、潤滑状態の変化を明確に検出できることを示した。しかし、通常の SOAP は、金属元素を全く検出できなかった。また、ジャーナルから発生する切削状摩耗粒子、球状摩耗粒子、プレート状摩耗粒子とパッドから発生するプレート状摩耗粒子は、局所的な金属接触を示す重要な粒子であることを明らかにした。これらの摩耗粒子の生成機構を SEM 観察及び WDX 分析によって明らかにし、ジャーナル軸受の摩耗モデルを示した。表1に、本章で観察された摩耗粒子を要約して示す。

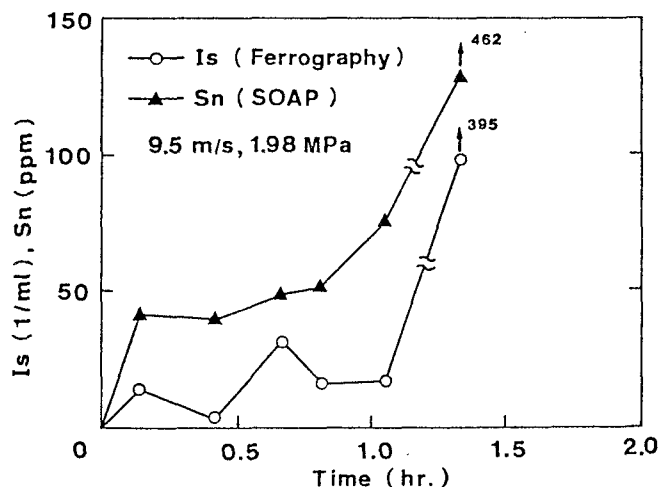


図2 フェログラフィー及び酸溶解 SOAP による分析結果

表1 摩耗粒子の分類

粒子のタイプ	形態及び概略寸法	微視的摩耗形態, 他
フィルム状 摩耗粒子	なめらかで薄く, エッジが折れたりカールしている。 (主成分 Fe, $d < 15-20 \mu\text{m}$)	突起及び表面層のマイルドな塑性流動に起因した摩耗 (マイルド流動摩耗) ジャーナルのなじみ過程, 混合潤滑状態 ($\mu < 0.01 \sim 0.02$) で発生
プレート状 摩耗粒子	層状, 割れが有り及び小粒子の集合体。 (主成分 Sn, $d < \text{数十} \mu\text{m}$)	混合及び低速での境界潤滑で特徴的。 硬い突起による軸受表面の激しい掘り起こしに起因したシビア流動摩耗 $\mu < 0.1$
	表面が粗く, 厚い大粒子 (主成分 Sn, $d < 100 \mu\text{m}$)	軸受の焼き付き時に特徴的。ウェッジ形成過程において, 大量発生。 $\mu > 0.16$ また, 棒状 (針状) 粒子も大量発生
	表面のなめらかな薄片状 (主成分 Fe, $d < \text{数十} \mu\text{m}$) (主成分 Sn, $d < \text{数十} \mu\text{m}$)	高速下のなじみ過程及び混合潤滑状態でジャーナル及び軸受から発生。突起の破壊やシビアな掘り起こしにより発生。
切削状 摩耗粒子	切り屑状 (スパイラル) (主成分 Fe, 大きさ色々)	軸受表面に埋め込まれ, 加工硬化したジャーナル粒子による切削。 高速下での混合潤滑で多数発生。 焼き付きの前兆を示す。 $\mu = 0.01 \sim 0.02$
球状摩耗粒子	デンドライト組織を有する小さな球 (主成分 Fe, $d < 6 \mu\text{m}$)	軸受表面に埋め込まれたジャーナル粒子の切削過程での溶融, 凝固。高速下の混合潤滑 ($\mu = 0.01 \sim 0.02$) で僅かに発生
	葡萄の房状の粒子 (中空) (主成分 Fe, $d < 10 \mu\text{m}$ の集合)	溶融, 凝固 (詳細不明), 高速下の混合潤滑 ($\mu = 0.01 \sim 0.02$) で僅かに発生
酸化物状 摩耗粒子	数十 μm 以下の黒色及び赤色酸化物。サブミクロンの微粒子から構成される。主成分 Fe	高速下の混合潤滑において僅かに発生。

Sn, Fe は各々軸受及びジャーナルの主成分である。d : 粒径, μ : 摩擦係数

第7章 フェログラフィーによる実機ジャーナル軸受の破損過程の解析

本章では, 第2章~第6章の摩擦摩耗試験で得られた結果を踏まえて, 稼働中の水車発電機用ジャーナル軸受を用いて, しゅう動面への不十分な潤滑油供給によって生じるジャーナル軸受の破損過程をフェログラフィーにより解析した。比較のために, SOAP による分析も行なった。また, ジャーナル軸受の運転挙動を監視する目的で振動, 軸変位及び軸受温度も測定した。図3及び図4にフェログラフィー及びSOAP分析結果を示す。図中のA, B, Cは, 各々軸変位, 軸受温度, 軸振

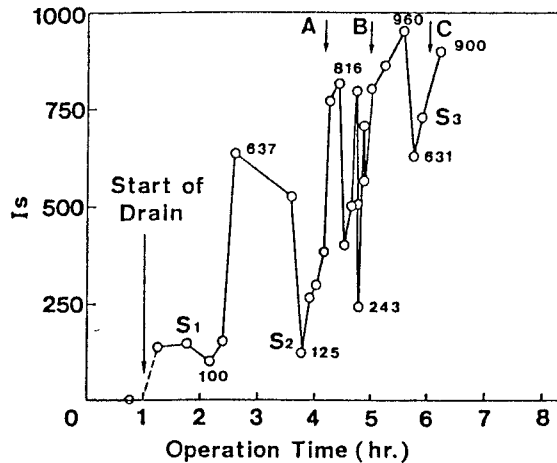


図3 フェログラフィーによる分析結果

れが異常を示した位置を示す。図に示すように、フェログラフィー及び SOAP は、他の分析手段に比較して、ジャーナル軸受の破損の兆候を迅速に検出できること、更にフェログラフィーは、その後の破損の進行過程をも検出することができるが、SOAP は明確に検出できないことを明らかにした。また、破損の進行に伴い、発生する摩耗粒子の形状、寸法、組成が変化することを明らかにした。実機試験で発生した摩耗粒子は、摩擦摩耗試験で発生した粒子と一致することを明らかにした。

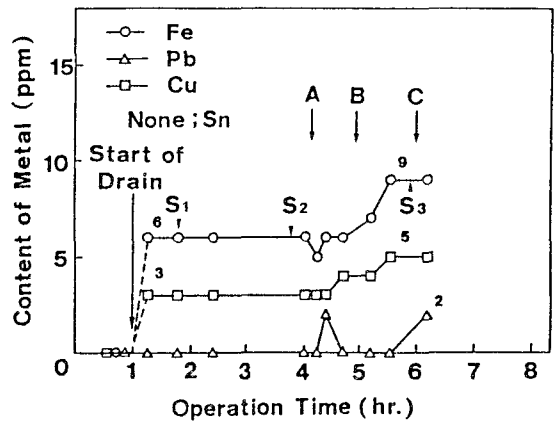


図4 SOAPによる分析結果

第8章 フェログラフィーによる実機潤滑システムの異常予知

本章では、稼働中の実機潤滑システムの異常予知に、実際にフェログラフィーを適用した結果を述べている。水車発電機主軸用案内軸受の焼き付きの開始、水力発電システムのドラフトゲートの異常摩耗が的確に診断され、その後の大規模な破損とシステムの停止が予知され、その結果、部品交換の処置がなされた。また、冷凍機用圧縮機のすべり軸受の焼き付き状態が的確に診断された。

第9章 フェログラフィーを主体とした潤滑システムの異常予知

本章では、第2章～第8章で得られた結果を基に、フェログラフィーによる異常予知のためのフローチャートを示した。

第10章 結 論

本章では、本研究で得られた結果を要約して述べている。

審査結果の要旨

機械システムの異常予知法の確立が、機械システムの安全運転と無人化のために強く求められている。本論文は、異常予知法として将来的に有望視されているフェログラフィーを取り上げ、摩耗粒子の持つ情報と摩擦面の微視的摩耗形態や巨視的な摩擦摩耗データとの関係を基礎実験によって明らかにし、更に実機潤滑システムへの適用の可能性を検討した一連の研究の成果をまとめたもので、全編10章より成る。

第1章は緒論である。

第2章では、フェログラフィー用分析機器を新しく設計製作しその基本的特性として重要な分析精度や分析法の適用限界等を明らかにし、摩耗粒子分析法における重要な知見を得ている。

第3章では、フェログラフィーが境界潤滑から焼き付き状態への遷移過程を的確に検出できることを定性及び定量的に明らかにし、フェログラフィーの有効性を実証している。

第4章では、炭素鋼の潤滑すべり摩擦において、支配的な摩耗形態を3つに新しく分類し、発生する摩耗粒子の形状や粒度分布及び巨視的摩耗率との関係を明確にしている。また、摩耗形態図を新しく導入し、摩耗粒子の持つ情報によって微視的摩耗形態、巨視的摩耗率をおおよそ予測できる等、重要な知見を得ている。

第5章では、摩耗形態図、摩耗粒子の形状や粒度分布に及ぼす摩擦材の硬さや添加剤の影響を明らかにし、摩耗形態図における各々の摩耗形態の領域がこれらによって変化する等、興味深い知見を得ている。

第6章では、実機ジャーナル軸受の作動条件と同じ条件の下で実験を行ない、フェログラフィーは、すべり軸受の潤滑状態の変化を的確に検出できることを明らかにしている。高速下の混合潤滑において、ジャーナルから切屑状や球状摩耗粒子が発生する等、重要な知見を得、ジャーナル軸受の摩耗モデルを示している。

第7章では、稼働中の水車発電機用ジャーナル軸受の損傷過程をフェログラフィーで解析している。その結果、フェログラフィーは、損傷の兆候やその進行過程を検出できること、損傷の進行に伴い発生する摩耗粒子のタイプが変化すること等の重要な知見を得ている。

第8章では、種々の実機潤滑システムの異常予知にフェログラフィーを実際に適用した結果を述べている。実用面において、フェログラフィーは、十分な分析精度で異常を検出できることを実証している。

第9章では、フェログラフィーを主体とした実機潤滑システムの異常予知のためのフローチャートを示している。

第10章は結論である。

以上要するに本論文は、機械システムにおける摩擦部分の異常予知のために、フェログラフィーが有効であることを示したもので、機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。