

崇城大学大学院
工学研究科委員会
研究科長 小野 長門 殿

論文審査委員
主査 里永 憲昭



論文審査結果の報告 (甲)

論文提出者	竹田 雄祐 (1913D01)
論文題名	(和文) 電氣的接触抵抗法を用いた潤滑油の軸受接触面における流動状態の観測技術に関する基礎研究 (英文) Research on observation technology of the flow state of lubricating oil on bearing contact surfaces utilizing the Electrical Contact Resistance Method
審査委員	主査 教授 里永 憲昭 副査 教授 北田 良二 副査 教授 齊藤 弘順 副査 教授 陳山 鵬

(三重大学大学院生物資源学研究科共生環境学専攻)

論文審査結果の要旨

機械装置を安全安定に稼働させるためには摺動部分の接触状況に関するメカニズムの解明が不可欠になる。具体的には摺動部位の潤滑状態が2面間のトライボロジー特性を決定づけるものである。近年のSDGsでも注目されるように持続可能な目標として安定化と省エネルギー化の相反する追求が必須であり、産業として低粘度であり、且つ、油膜形成として高性能である合成油、また、粘度特性や耐摩耗性に優れた潤滑油ならびに潤滑油添加剤の研究、開発が進められている。

今回提出された論文は、第1章で、今回の研究の狙いと世界的動向を詳説し、低粘度化した潤滑油に対する新たな性能評価手法として、油膜を電氣的に観測する電氣的接触抵抗法 (Measurement for Electrical Contact Resistance, 以下 ECR と略す) を確立して、信頼性・再現性の概要を説明し、新たな評価手法を提案した。第2章で一般的に使用される鉱油系とメタロセン触媒を用いたポリ α オレフィン (mPAO) の性状比較を進めながら、mPAO の特徴的な成分と、機能などを詳説した。また、近年の貿易摩擦などもあり流通など安全保障の観点からも原料多様化は期待されている。加えて、低温流動性に強みがあり潤滑油の特性として低温粘度の安定が期待される石炭由来の液化炭素油 (CTL) の性状を詳説し、有効性を紹介した。近年では、市場における鉱油の高性能化の要求が高まってきたこともあり、精製グレードの上昇や合成油成分等の高品質化が要求されており、需要に併せた品質が供給されてい

る。そうすると、過去には比較的高価であった石炭原料である CTL との製造原価差も近年は拮抗しており、新たな市場として CTL への期待が拡大している。第 3 章では機械の摺動面や、転がり軸受の転動体と軌道面間の潤滑油膜形成に対応する新たな ECR の原理を詳説した。軸受の接触表面粗さより油膜が大きい場合は流体潤滑といい、電気抵抗は無大となる。一方で接触表面粗さよりも油膜が薄い場合は、軌道面と転動体が直接接触する境界潤滑となり導通が発生し電気抵抗は 0Ω となる。この電気抵抗の変化から軸受の印加電圧に対する観測電圧の比を、新たな評価方法とする「分離度」を定義した。第 4,5 章で基準油に mPAO を添加した潤滑油の性能評価と流動メカニズムを可視化、ECR の双方で検証し、信頼性と再現性の精度を評価し、状態監視技術に適用する可能性を提案した。特に有次元の加速度変化と ECR 挙動に整合性があり、細微な特徴を検出する期待が提案された。第 6 章では、機械要素である歯車や軸受の摺動部における接触面圧として実際の使用条件に該当する高压下における潤滑油の粘性について、粘度圧力係数 α の関係を検証した。今回の観測に用いた落球式高压粘度計は嵌めあいなど精度の観点から精密な加工を要する部分を、開発設計から観測原理までを解説し、自ら粘度計を製作して各試料油の粘度圧力係数 α の検定を実施した。近年の省エネルギー化を示すように分子構造の調整により α の低下が認められることを検証した。第 7 章で、従来の研究では軸受の接触摺動部をガラスに置き換えた可視化装置を用いて、直接観察することにより摺動部接触面における流動状態を考察することで成分の持つ特徴などを検証してきたが、世界の潮流である省エネルギー化となる極低粘度潤滑油は油膜厚さが極めて薄くなり、観測機の計測分解能の限界から縞次数の評価において限界に直面した。その問題提起に対する解決手法のひとつとして、接触部に ECR 観測回路を設置し、分離度を評価することで、精度の高い技術を提案した。また、鉱油と CTL の性能を油膜の形成状況から比較検討して石油由来の潤滑油に代替が可能となる評価を示した。第 8 章で ECR を用いた各試料油に対して、光学観測における無次元油膜厚さと分離度には一定の関係性があることを確認した。特に、Hamrock-Dowson らの無次元油膜厚さの変化と ECR の変化が $\pm 5\%$ 以内の精度で評価できるなど信頼性を定量化して示した。さらに、極低粘度潤滑油においては印加電圧を 50mV から下げて調節することにより油膜形成の差異を確認できるように感度の調整により精度が増すことのチューニング手法を明らかにした。それらの結果から基準油のみと mPAO を含有する潤滑油で、動粘度 ν と平均分離度 SR_{avg} の相関性について試料油の物性値をチューニングパラメータ I_v と仮定したとき $SR_{\text{avg}} = (\log_e(\nu/11.8))/I_v$ の一般式を提案した。加えて、分離度の結果は既知の診断技術として振動時間波形の分布を密度として評価する振幅確率密度関数法の挙動と類似しながら、相反する結果を示す可能性を示し、今後の評価診断方法として振動法と潤滑油診断法のカップリングにより信頼性の高い状態監視法の確立を示唆する方向性を示した。

以上、本論文は電氣的接触抵抗法を用いた潤滑油膜の軸受接触面における流動状態の観測技術と、その観測理論の仮説を検証し有効性を確認することができた。また、ECR 観測技術は今後も SDGs などを通して省エネルギー化が追及され、極低粘度化へ更に進むと予測される潤滑油において、そのトライボロジー性能の評価技術の新たな手法のひとつとして貢献できることが期待され、機械工学や化学工学の基礎分野から生産技術工学への実学的応用に寄与する。よって、本論文は学位論文に値すると認める。

最終試験結果の要旨

本論文は審査委員および専攻教員より、(1)疲労破壊と潤滑油の性能に関する取扱い、(2)計測機器であるレーザのスポット径と計測器の計測時間の安定性、(3)軸受損傷メカニズムから実験結果の信頼性、(4)実用性を考えた機構として汎用化を示す具体例の提案などについて種々の質問がなされたが、いずれも論文提出者の的確な説明により、質問者の理解が得られた。以上の結果により著者は最終試験に合格したものと認める。