

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	機械学習を利用した複数の潤滑油添加剤共存下における摩擦制御因子の予測
Title(English)	
著者(和文)	野間央
Author(English)	Hiroshi Noma
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12814号, 授与年月日:2024年6月30日, 学位の種別:課程博士, 審査員:青木 才子,下山 裕介,松本 秀行,水谷 義弘,森 伸介,大川原 真一
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12814号, Conferred date:2024/6/30, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

論文要約

- 系・コース：応用化学系・応用化学コース
- 申請学位（専門分野）：博士（工学）
- 学生氏名：野間 央
- 審査員主査：青木 才子 准教授

要約

本研究では、リン、硫黄、カルシウム系添加剤共存下における鋼表面の摩擦メカニズムの解明に向けて、統計的手法、機械学習および CNN を用いた摩耗痕の形状特性およびトライボフィルムの元素分布と摩擦係数との関係について調査し、統計的手法、機械学習および CNN が捉えた摩耗痕の形状特性およびトライボフィルムの元素分布と摩擦因子との関連について調査した。

第 1 章「序論」では、本研究の背景および目的について述べた。自動車産業やトライボロジー分野における二酸化炭素排出量削減の取り組みについて述べ、潤滑油添加剤の摩擦メカニズムの解明の重要性について言及した。潤滑油添加剤における摩擦メカニズムの解明のために、これまで様々な研究が行われており、摩耗痕の形状特性や潤滑油添加剤によって形成されたトライボフィルムの化学特性が重要であることがわかった。これまでの研究は、せん断方向であるしゅう動方向と平行方向における摩擦特性について調査されている。しかし、不均一なトライボフィルム形成のため、摩耗痕を面として捉えた摩擦特性への影響について調査する必要がある。よって、本研究では、しゅう動方向の平行方向と垂直方向を考慮することで、摩耗痕を面として捉えた際の摩耗痕の形状特性とトライボフィルムの元素分布特性が摩擦特性に及ぼす影響について調査した。

第 2 章「自己相関係数による統計解析を利用した複数の添加剤共存下で形成されるトライボフィルムの元素分布と摩擦特性との相関性評価」では、リン、硫黄、カルシウム系添加剤共存下において、摩耗痕の形状特性およびトライボフィルムの元素分布特性を統計的手法により算出し、摩擦特性との関係について調査した。リン系添加剤にカルシウム系添加剤を併用させることによって、カルシウム系添加剤由来によるトライボフィルムが形成され、高摩擦効果が発現した。そして、摩耗痕の高さ分布より、しゅう動方向と平行に延びた筋目上の構造が確認された。さらに、摩耗痕に形成されたトライボフィルムの元素分布より、しゅう動方向と平行に延びた高強度な分布が確認された。よって、これらの摩耗痕の形状特性およびトライボフィルムの元素分布が摩擦特性に影響していると考え、粗さパラメータである Str 、トライボフィルムの元素強度および元素分布のアスペクト比を算出した。 Ca 元素

強度と摩擦係数との関係において、カルシウム系添加剤由来のトライボフィルムを形成することで、摩擦係数が増加傾向を示した。そして、 Str と摩擦係数との関係において、異方性に近づくことで、摩擦係数の増加傾向を示した。さらに、カルシウム元素分布のアスペクト比と摩擦係数との関係において、カルシウム系添加剤由来のトライボフィルムの元素分布が異方性になることで、摩擦係数が増加傾向を示した。従って、カルシウム系添加剤によって形成されたトライボフィルムが摩擦特性に影響していることが明らかになった。しかし、これらの一対一の関係を見るうえでの二つの課題として、他の要因について考慮されていないことと代表値による情報の圧縮が発生することが挙げられ、これらの課題を解決するために機械学習の利用を考えた。

第3章「複数添加剤併用下における鋼の摩擦係数予測に向けた機械学習の応用」では、機械学習を利用し、複数添加剤共存下における摩擦特性に関連する因子を特徴量として、トライボフィルムの元素分布や摩耗痕の粗さ形状などの各種特徴量と摩擦特性との相関性を複合的に解析することを目的とした。第2章において、摩耗痕の形状と摩擦係数との関係や、複数添加剤共存下で形成されたトライボフィルムの元素分布と摩擦係数との関係について評価を行った。しかし、各種特徴量と摩擦係数の相関性について一対一の評価でのみ検討したため、複数の特徴量と摩擦係数との相関性について理解に限りがある。そこで、機械学習を応用し、複数の特徴量と摩擦係数の相関性を評価することに着想した。機械学習は、複数の特徴量から出力値を予測するだけでなく、決定木が用いられる機械学習モデルにより特徴量重要度を算出することができる。さらに、出力値予測におけるそれぞれの特徴量の重要度を数値化することも可能である。そこで本章では、リン、硫黄、カルシウム系添加剤濃度、摩耗痕表面の粗さパラメータ、トライボフィルムの化学元素分布より元素強度と元素分布のアスペクト比を用いて、摩擦係数を予測する機械学習モデルを構築し、摩擦係数予測における各特徴量の重要度を算出し、複数の特徴量と摩擦係数との相関性について評価した。得られた結果から、複数の特徴量と摩擦係数との関係は複雑に絡み合った非線形な関係であることがわかった。さらに、機械学習モデルがカルシウム系添加剤由来のトライボフィルム形成やそれに伴う摩耗痕の形状を示す特徴量から摩擦係数を予測していたことから、カルシウム系添加剤によって形成されたトライボフィルムが摩擦特性に重要であることが明らかになった。

第4章「トライボフィルムの元素分布より構築した畳み込みニューラルネットワークモデルによる摩擦関連因子の検討」では、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) および次元削減を用いて、摩耗痕の高さ分布およびトライボフィルムの元素分布の画像データから摩擦係数クラスのカテゴリ予測と解析を行った。第3章より、他の特徴量と比べ、トライボフィルムの元素分布特性が摩擦特性に大きく影響することが明らかになった。しかし、形状特性および元素分布特性は一つの代表値として情報が圧縮されており、一つ一つのピクセル情

報と摩擦特性との関係について調査する必要がある。よって、CNN および次元削減を用いることで、摩耗痕の高さ分布およびトライボフィルムの元素分布を一つ一つのピクセル情報を保持した画像データとして用い、摩擦特性との関係について調査した。CNN はニューラルネットワークの一つで、画像認識に用いられ、画像中の特徴を学習し、出力値を予測することができ、さらに、Grad-CAM を用いることで、画像内の出力値予測に重要な特徴を可視化することで、画像と出力値との関係性を調査した。そして次元削減によって、画像データの分布を可視化し、画像データの分類を行った。得られた結果より、トライボフィルムの元素分布から摩擦係数クラスを分類予測できたが、摩耗痕の高さ分布から摩擦係数クラスを分類予測することができなかった。これは、摩耗痕の高さ像の前処理方法が、元素分布の画像と異なり、画像内の摩耗痕位置もそろっていなかったため、CNN モデルが画像の特徴を捉えることができなかったためと考えられる。さらに、Grad-CAM により、摩擦係数予測における元素分布の画像内で特徴として、第 2, 3 章でも摩擦特性と関係性を示したトライボフィルムの元素強度と元素分布のアスペクト比であることがわかり、摩擦係数に大きく影響を及ぼすことが明らかになった。さらに、これまで調査されていなかった摩耗痕端部のトライボフィルムも CNN モデルが着目したことがわかり、新たなトライボフィルムの元素分布特性が摩擦係数に影響していることが明らかになった。また、次元削減において、トライボフィルムの元素分布から摩擦係数クラスを分類することができたが、摩耗痕の形状特性から摩擦係数クラスを分類することができなかった。このことは、CNN モデルと同様に、次元削減も摩耗痕の高さ像から摩擦係数クラスを分類する画像の特徴を捉えることができなかったと考えられる。そして、次元削減が捉えたトライボフィルムの元素分布特性は、CNN モデルが着目した特徴と同様にしゅう動方向と平行に延びた高強度分布と摩耗痕端部の元素分布であることがわかった。CNN や次元削減が捉えた元素分布と同じ位置の摩耗痕の形状を見ると、OBCS を併用することで形成されたトライボフィルムが高さ分布としても表れていることが確認された。実際、しゅう動方向と平行に延びた筋目上の構造による潤滑油の荷重支持効果の低減と摩耗痕端部のかさ高いカルシウムリッチなトライボフィルム形成が摩擦特性に影響を及ぼしていることが考えられる。従って、CNN や次元削減が捉えた摩擦係数予測に重要なトライボフィルムの元素分布特性結果によって、摩擦特性に関連する因子の特定を行うことができ、摩擦メカニズムの解明に向けた調査において、CNN および次元削減が摩擦増大の要因である高さ分布および元素分布の特徴を捉えることができたことが明らかになった。

第 5 章「統括的結論」では、本研究で得られた結果と今後の研究の期待について述べた。本論文で実施した研究により、摩擦メカニズムの解明に向けた調査において、摩擦特性に重要な摩擦表面の形状や複数添加剤共存下で形成されたトライボフィルムの元素分布特性を統計的手法、機械学習および CNN により捉えることができ、統計的手法、機械学習および CNN の有用性を示すことができた。一般的に、摩擦現象には、摩擦表面形状、潤滑油添加

剤、添加剤により形成されるトライボフィルム、潤滑状態や鋼材の種類、摩擦試験条件など様々な因子が関連することが考えられる。したがって、摩擦現象に影響を及ぼす各種因子との相関性の評価において、多面的な視点から一括評価することができる新規手法としての機械学習の利用は有用であったことが明確になった。

また、新たな統計的手法、機械学習、CNN は、今後の研究でも役に立つツールであると考えられる。本論文では、リン、硫黄、カルシウム系添加剤の3種類の添加剤の摩擦メカニズムの解明にこれら解析手法を応用した。しかし、本研究で使用した3種類の添加剤の他に多種多様な潤滑油添加剤が存在するので、本研究以外の添加剤の摩擦特性の評価において、これら統計的手法や機械学習、CNN が利用されることが期待できる。多種多様の潤滑油添加剤における摩擦メカニズムの解明が進むことによって、様々な機械要素における適材適所の潤滑油添加剤の組み合わせを見つけることができる。結果として、これは各機械要素における不要な摩擦損失を低減し、総じて二酸化炭素排出量を削減することが可能となり、地球温暖化の抑制に貢献することができる。

本論文では、教師あり学習である機械学習およびCNN だけでなく、教師なし学習である次元削減を用いている。これは、元素分布の画像データの分布を可視化するために用いられたツールであるが、他の研究対象への応用にも期待できる。しかし、機械学習のもう一つのツールである強化学習は本論文では使用していない。強化学習は人間が与えた情報を元に機械自らが学習することができるツールであるため、強化学習を用いることで、将来的には、各機械要素に対して適切な添加剤を機械自体が選ぶことも可能になると考えられる。したがって、今後も、トライボロジーへの機械学習の応用がますます進んでいくことが期待できる。