

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)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

## 論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	野間 央	
論文審査 審査員		氏名	職名	氏名	職名
	主査	青木 才子	准教授	水谷 義弘	教授
	審査員	下山 裕介	教授	大川原 真一	特定教授
		松本 秀行	准教授		
森 伸介		准教授			

### 論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は、「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」と題し、以下の5章より構成されている。

第1章「序論」では、CO<sub>2</sub>排出量削減に向けた自動車産業の取り組みとして自動車の燃費向上において潤滑油の低粘度化が有効であり、境界潤滑領域における不要な摩擦損失の低減が課題となっている現状を示し、極圧剤や清浄剤など各種添加剤の併用下で形成される摩擦化学反応被膜（トライボフィルム）による摩擦制御の必要性を概説している。トライボフィルムの深さ方向とせん断方向の両方から3次元的にトライボフィルムの情報を捉え摩擦特性を調査する必要性を述べ、機械学習を導入することで摩擦を制御する因子を特定するという本研究の目的を明らかにするとともに、本論文の構成を述べている。

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、自己相関係数を用いて、摩擦試験で得られた摩擦係数と摩擦試験後試験片に形成した摩耗痕の高さ分布およびトライボフィルムの元素分布との関係を検討している。リン、硫黄、カルシウム(Ca)系の各種添加剤併用下では、Ca系添加剤の濃度増加に伴い摩擦係数は増加し、摩耗痕表面がしゅう動方向と平行に筋目上の平坦な構造へと変化することを示し、トライボフィルムの元素分布から自己相関係数によりアスペクト比を算出した結果、Ca濃度増加に伴いトライボフィルムは異方性の分布を示すことを見出している。さらに、摩耗痕の高さ分布から算出したアスペクト比(Str)と摩擦係数との相関を評価し、StrよりもCaの元素強度最頻値とアスペクト比の方が摩擦係数に大きく影響することを明らかにしている。

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、添加剤濃度、摩耗痕の高さ分布、トライボフィルムの元素分布から算出した元素強度、元素分布のアスペクト比を入力値として、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ている。複数のアルゴリズムを使用して機械学習モデルを構築しモデル性能評価を行った結果、決定木系の機械学習モデルは摩擦係数の予測に適していることを実証している。さらに、Ca系添加剤濃度やCa強度は重要度が高く、摩擦係数はこれら複数の特徴量と非線形な相関を示すことを明らかにしている。

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、前章では摩耗痕の高さ分布およびトライボフィルムの元素分布が一つの代表値として情報が圧縮されていたことを踏まえ、摩耗痕の高さ分布やトライボフィルムの元素分布である画像データを入力値として用いることで、高さ分布および元素分布における一つ一つのピクセル情報から特徴を捉え、摩擦係数を予測する畳み込みニューラルネットワーク(CNN)モデルの構築と次元削減を行っている。さらに、Gradient-weighted class activation mapping (Grad-CAM)を用いることで、出力値予測に重要な画像内の箇所を可視化することができ、摩擦係数予測に重要な元素分布の特徴について検討している。CNNおよび次元削減の結果から、しゅう動方向と平行に延びた高強度な元素分布と摩耗痕端部における元素分布が摩擦係数のクラス分類に寄与することを明らかにしている。この特徴が現れた摩耗痕表面ではしゅう動方向と平行に平坦に延びた構造を有するCa系添加剤由来のトライボフィルムの形成が確認されていることから、CNNおよび次元削減で示された摩擦係数予測に重要とされるトライボフィルムの元素分布は実際の摩擦現象を適切に説明することが可能であり、CNNおよび次元削減を用いることで摩擦係数に影響する主な因子を抽出することが可能であることを明らかにしている。

第5章「総括的結論」では、本研究を総括して、本研究における成果と今後の展望を述べている。

これを要するに、本論文は、複数の添加剤併用下で形成されたトライボフィルムの摩擦制御因子の解明に係る研究として、機械学習を導入し、摩耗痕の高さ分布やトライボフィルムの元素分布を入力値として摩擦係数を予測する機械学習モデルを構築することで、トライボフィルムの元素強度だけでなく元素分布が摩擦係数に大きく寄与することを明らかにしたものであり、工学上、工業上貢献するところが大きい。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として十分に価値あるものと認められる。