

研究終了報告書

「AI 技術活用によるトライボフォーキャスト学問分野の創成」

研究期間：2020年12月～2023年3月

研究者：村島基之

1. 研究のねらい

摩擦現象は二つの摩擦面間の相互作用により生じるが、影響する因子は材料のヤング率や表面形状などの機械的特性、ナノオーダー接触点における高温・高圧力状態が引き起こす化学反応やその生成物および生成量、表面エネルギーが影響する表面科学的作用など多岐にわたる。加えて摩擦現象は、これらの因子が複雑に相互作用するという創発性と相互作用が次々に新しい相互作用を生み出すという強いヒステリシスを有する。これらの理由により摩擦の定量的予測は困難であり、理想的な潤滑状態を除いた実用的な摩擦シミュレーションは確立されていない。構造解析・流体解析・熱解析が既に産業界で利用されている点を考慮すると、摩擦シミュレーションが存在しないという事実は摩擦・摩耗現象の複雑さを示していると言える一方で、これがトライボロジー分野(摩擦摩耗に関する学術分野)の越えるべき課題である。従来のトライボロジー研究では、摩擦試験中に得られる大量のデータはほとんど活用されず、試験終了時の摩擦係数を試験後の表面性状の測定・分析により説明・考察するアプローチが採用されてきた。本研究では、連続撮影した摩擦面の光学画像と深層学習の融合によるトライボフォーキャスト(摩擦係数の光学画像からの予測)という新しい学問の創成に挑戦する。

表面の光学画像は色相やその分布の情報から構成されるが、それらの情報は表面の材質、粗さ、形状、生成される化学物質種やその量や厚みなどの物理的情報を内包するものである。従って、ニューラルネットワークが重要と判断する情報や経時変化は、摩擦モデルの構築において非常に重要な指針となる。AI 技術との融合により誕生するこのトライボフォーキャスト学問分野がもたらす新しい価値は、従来検討できなかった複数の物理現象の相互作用により生じる創発性やヒステリシス性まで組込んだ高精度摩擦モデルの構築を可能とする点にあり、本研究は従来のトライボロジー研究とは一線を画すものである。

光学画像を用いた汎用的な摩擦予測に成功した例は存在しないが、深層学習の活用により初めて可能となるトライボフォーキャストの実現により、世界中で AI 活用を前提とした摩擦試験が実施され、そのデータが共有されることでデータドリブンなトライボロジー研究の課題解決が実現されると期待される。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、従来トライボロジー分野において存在しなかった、**摩擦面画像とそれに対応する摩擦面画像の連続撮影**を実施した。このために、透明なサファイア半球を透過した光学顕微鏡による摩擦面その場連続撮影技術を構築した。最終的には、3種類の異なる炭素系硬質薄膜(DLC: Diamond-like Carbon)を用いた、15種類の試験条件における30回分の摩擦試験を実施し、それに対応する摩擦面画像の取得に成功した。得られたデータには、DLC 膜特有の**低い摩擦係数 $\mu=0.05$ から、比較的大きな摩擦係数である $\mu=0.35$ までの幅広い摩擦係数とそれに対応する摩擦面画像**が含まれており、低摩擦メカニズムを解明する上での重要なデータベース構築となった。次に、これを CNN(畳み込みニューラルネットワーク)に学習させ、未学習の摩擦試験結果を推定させたところ、 $R^2=0.993$ 、 $MAE=0.0038$ という**非常に高い精度での摩擦推定結果**が得られた。この成果は、摩擦面画像からであっても、摩擦係数を高い精度で推定可能であるということを示す、**トライボロジー分野における革新的な結果**である。

CNN が摩擦係数を推定している根拠を分析するために、Grad-CAM による摩擦面画像の解析を実施し、**ニュートンリングが摩擦係数推定に重要**であることが示された。また、Grad-CAM による解析からは、摩擦面に形成される**移着膜**や**摩耗粉**も摩擦係数推定に重要であることを示唆する結果が得られた。より詳細な摩擦推定根拠の解明のために、異なる摩擦係数を示す光学画像を CNN に入力した際の CNN 中間層における特徴マップの解析を実施した。これより、**低摩擦係数を示す場合にのみ、大きく反応する中間層**が存在することが明らかとなった。この結果は、**人には見分けることのできない特徴を CNN が読み取り**、その特徴をある関数により増幅した結果であると考えられる。

トライボロジー分野におけるこれらの革新的な成果を受け、トライボロジー学会「**トライボロジー技術への AI の活用を考える研究会**」での講演、日本トライボロジー学会誌「**トライボロジスト**」における **AI とトライボロジー分野の融合に関する解説記事の執筆**の成果へとつながった。

(2) 詳細

研究テーマ A「摩擦面画像と深層学習の融合による高精度摩擦係数予測技術の確立」

本研究では、透過することで摩擦面の観察を可能とする透明サファイア半球と、3種類の異なる DLC 膜を用いた。この3種類の DLC 膜は、炭素骨格構造を大きく変化させることが知られている窒素原子を成膜中にイオンビーム照射することによりドーピングすることで準備した(ta-C、ta-C₁₀、ta-C₂₀: 各添え字は成膜中の窒素流量 sccm を示す)。荷重、温度、DLC 種類が異なる15種類の試験条件を用いた**計30回分の摩擦試験結果**を得ることに成功した。これらの試験結果には、**DLC 膜特有の非常に小さい摩擦係**

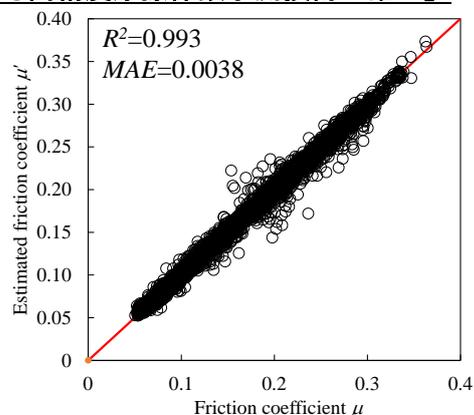


図1 CNN による摩擦面画像からの摩擦係数推定結果

数 $\mu=0.05$ から、比較的大きな摩擦係数である $\mu=0.35$ までの幅広い摩擦係数とそれに対応する様々な摩擦面画像が含まれており、低摩擦メカニズムを解明する上での重要なデータベース構築が達成された。

次に、得られた摩擦面画像と摩擦係数を CNN に学習させ、未学習の摩擦試験結果を推定させたところ、 $R^2=0.993$ 、 $MAE=0.0038$ という非常に高い精度での摩擦推定が達成された(図1)。この成果は、表面の組成・原子結合状態などの詳細な分析が摩擦面分析には必要であると考えられていたトライボロジー分野において、汎用的な摩擦面画像から摩擦係数を高い精度で推定可能であるということを示す革新的な結果である。

研究テーマ B「創発性・ヒステリシスまで考慮した革新的摩擦モデルの AI 支援による構築」

CNN が摩擦係数を推定している根拠を分析するために、Grad-CAM による摩擦面画像の解析を実施した。その結果ニュートンリングが摩擦係数推定に重要であることが示された(図2)。加えて、Grad-CAM では摩擦面中心部に形成される移着膜や摩耗粉も摩擦係数推定に重要であることが示唆された(図2)。より詳細に摩擦推定根拠を明らかにするため、光学画像を CNN に入力した際の中間層における特徴マップを解析した。これより、低摩擦係数を示す場合(図3左)にのみ、大きく反応する中間層が存在することが明らかとなった(図3赤枠部)。この結果は、人には見分けることのできない特徴を CNN が読み取り、その特徴が関数により増幅された結果であると考えられる。トライボロジー分野におけるこれらの革新的な成果を受け、トライボロジー学会「トライボロジー技術への AI の活用を考える研究会」での講演、日本トライボロジー学会誌「トライボロジスト」における AI とトライボロジー分野の融合に関する解説記事の執筆の成果へとつながっている。

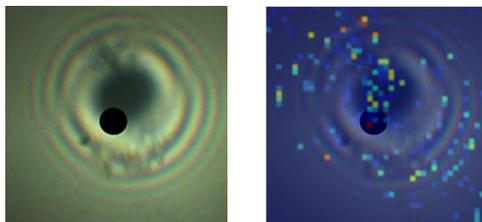


図2 摩擦面画像とそれに対する Grad-CAM の解析画像。左：摩擦面画像。右：Grad-CAM により CNN が重要と判断したピクセルに輝点が上書きされている。

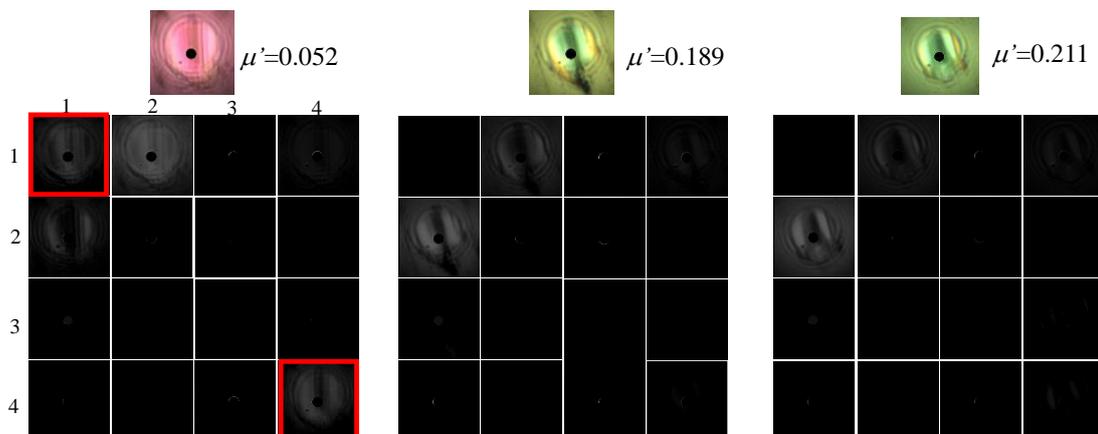


図3 CNN の中間層における特徴マップ。低摩擦画像を入力とした左図の場合にのみ赤枠で囲んだ特徴マップに反応が見られることが明らかとなった。

3. 今後の展開

【トライボロジー分野における AI 活用の有用性認知と本研究のデファクトスタンダード化】

本研究は、「摩擦面画像からのトライボフォーキャスト(摩擦係数推定)」技術の開発を目的として実施されている。これは単に、従来にない新技術を提案するだけでなく、経験的側面が非常に強いトライボロジー分野においてデータドリブンな課題解決・メカニズム提案という大きな変革をもたらす試みとして実施されている。これまでトライボロジー分野における AI 活用の範囲は、機械油の交換タイミング診断のような機器メンテナンスに限られていたが、最近では表面設計や材料開発への展開が期待されている。

今後1-2年のフェーズにおいては、より多くのトライボロジー研究者に対して AI 活用の可能性を実感してもらうために、まず汎用材料を使用した摩擦試験装置の開発に挑戦する。ここにおいては、AI の活用を前提としたトライボ試験装置の提案・開発を実施し、汎用材料を用いた摩擦試験と AI の融合が困難という課題が解決可能であると示す。

今後4年後を見据えて、新開発装置を用いた汎用材料に対する摩擦試験結果を AI により推定可能という研究成果を世界に発信することで、AI 技術とトライボロジー試験が融合可能であるという認識を醸成する。これを受け世界中で AI 活用を前提とした摩擦試験が実施され、そのデータが共有されることで、トライボロジー分野におけるデータドリブンな課題解決が実現可能になると期待される。特に、トライボロジー現象は、わずかな環境湿度の変化にさえ大きな影響を受ける創発的な現象である。そのため、その本質的解明には各研究室だけでは取得不能な膨大なデータが必要となる

今後8年後を目途に、世界中の AI 活用を前提とした摩擦試験装置による大量のデータが収集・活用される環境を整え、さらに情報科学を専門とする研究者集団がトライボロジー分野へ参入する大きな流れを構築したい。

4. 自己評価

本研究課題の根幹を担う「摩擦面画像からのトライボフォーキャスト(摩擦係数推定)」技術開発は、 $R^2=0.993$ 、 $MAE=0.0038$ という非常に高精度で達成されており、摩擦面画像と深層学習を融合させるという研究の着想と、大量の摩擦試験データの取得という努力が結実した成果として高く評価できる。また、摩擦面の温度を変化させるという工夫により、乾燥状態としては非常に低い $\mu=0.05$ から、比較的大きな摩擦係数である $\mu=0.35$ という幅広い範囲での情報が取得されている。これは、様々な現象を扱う必要のあるトライボロジー分野において本研究の普及の加速を考慮したための工夫であり、高い評価が可能である。研究の進め方においても、研究経費を CCD ハイスピードカメラや DLC 成膜用基板など着実に成果が得られる物に適切に使用しているなど、高く評価できる。トライボロジー分野においては、高い摩擦推定精度が達成されたとしてもその推定メカニズムがブラックボックス化されていれば提案技術の普及が見込めないことを勧告し、CNN 中間層の特徴マップの解析を実施するなど推定根拠の解明に力を注ぎ、本研究成果がトライボロジー分野で受け入れられるものになるよう最大限の努力をしている。こういった努力と工夫の結果、国内外での学会発表が高く評価され、トライボロジー学会「トライボロジー技術への AI の活用を考える研究会」での講演、日本トライボロジー学会が発行する学会誌「トライボロジスト」において本研究を

含めたAIとトライボロジー分野の融合に関する解説記事の執筆という成果に波及しており、総合的に本研究は高い評価が可能であると考えられる。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 1件

1. **Motoyuki Murashima**, Takazumi Yamada, Noritsugu Umehara, Takayuki Tokoroyama, Woo-Young Lee. Novel friction stabilization technology for surface damage conditions using machine learning. Tribology International. under review.

本研究論文では、機械しゅう動部において摩擦力が増大する表面部があったとしても通常はその表面を使用し続けなければならないという点を課題とした。そこで、AIを用いて摩擦力の面分布を解析し、しゅう動面のどこが高摩擦や摩擦振動を生じさせているかを判断するアルゴリズムを構築した。最終的に、AIにより導かれた高摩擦部との接触を表面変形制御により回避することによる安定的な摩擦発現に成功した。

(2) 特許出願

該当なし

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. 解説記事: **村島基之**. 深層学習を用いた摩擦・摩耗推定技術と AI を用いた変形表面制御による新しい機能性の創発. トライボロジスト, 67, 12, 2022, pp. 1-8.
2. 国内招待講演: **村島基之**, AI による摩擦の安定化手法の提案と深層学習を用いた摩擦面画像からの摩擦推定, トライボロジー技術への AI の活用を考える研究会 講演会, 2021.
3. 国際学会講演: **Motoyuki Murashima**, Takazumi Yamada, Noritsugu Umehara, Takayuki Tokoroyama. The novel active friction control method using machine learning for realizing long-life of solid lubricants. 7th World Tribology Congress, TUE-T11-S5-R10, 2022.
4. 国内学会講演: **村島基之**, 松田陽司, 梅原徳次, 野老山貴行. DLC 膜の摩擦面その場観察画像を用いた深層学習による摩擦推定と CNN 構造解析による摩擦決定因子の推定. トライボロジー会議春 2022, 東京, C20, 2022.
5. プレスリリース, 新聞報道: 東北大学「見えない機械のしゅう動面損傷部位を AI で特定する新技術を開発 - 発電タービンなどの重大インシデント回避技術で実用化に期待」, 建設通信新聞, 日刊工業新聞