

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

加速フェーズ期間：2023 年 4 月～2024 年 3 月

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。

加速フェーズでは、従来の摩擦係数推定技術において課題であった、透明材料(ガラス、サファイア材料)を用いなければ摩擦界面の光学情報を取得することができないという課題を解決することを目的として、これまでにない新しい摩擦試験機の開発に挑戦する。また、加速フェーズでは同じ摩擦試験条件であっても、摩擦係数が大きく変化してしまう際の摩擦面画像の差異を機械学習により学習させることで、界面で生じる物理現象の解明に挑戦する。

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。

加速フェーズでは、従来の摩擦係数推定技術において課題であった、透明材料(ガラス、サファイア材料)を用いなければ摩擦界面の光学情報を取得することができないという課題を解決することを目的として、これまでにない新しい摩擦試験機の開発に挑戦した。その結果カメラで撮影した面が接触していた際の摩擦係数を機械学習で扱えるデータとして取得することに成功した。この摩擦試験機を用いて取得した光学画像および摩擦係数のデータを用いて深層学習により摩擦係数推定を実施した。その結果、同条件試験において相関係数 0.9 以上の高い推定精度を示す結果を得ることに成功した。また加速フェーズでは、同じ条件で実験を行っているにもかかわらず、摩擦係数がなぜ安定した挙動をとらずに特異的な挙動(例えば、摩擦係数の短期的な急上昇)が生じるのかの解明に挑戦した。LIME を用いた摩擦推定における重要部分の抽出結果より、摩擦係数が比較的低く安定している状態では摩擦面の情報が重要である一方で、摩擦係数が急上昇する状況では摩擦面前縁部の摩耗粉の様子が重要であることが明らかとなった。これにより、摩耗粉の堆積やそれを誘引する摩耗の急激な増加が摩擦面の不安定性を上昇させるということを明らかにするという成果につながった。

(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。

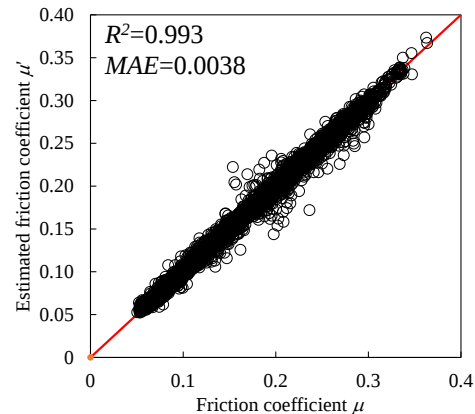
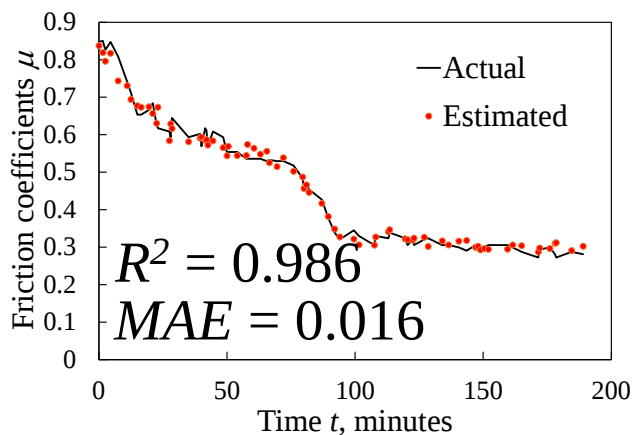


図1 CNN による摩擦面画像からの摩擦係数推定結果

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。

加速フェーズでは、従来の摩擦係数推定技術において課題であった、透明材料(ガラス、サファイア材料)を用いなければ摩擦界面の光学情報を取得することができないという課題を解決することを目的として、これまでにない新しい摩擦試験機の開発に挑戦した。その結果カメラで撮影した面が接触していた際の摩擦係数を機械学習で扱えるデータとして取得することに成功した。この摩擦試験機を用いて取得した光学画像および摩擦係数のデータを用いて深層学習により摩擦係数推定を実施した。その結果、同条件試験において相関係数 90 以上の高い推定精度を示す結果を得ることに成功した(追加図1)。



追加図1 開発した摩擦試験装置により取得された摩擦係数(黒線)と推定摩擦係数(赤点)

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。

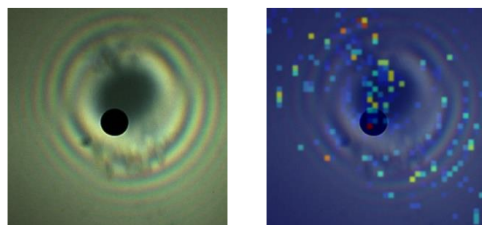


図2 摩擦面画像とそれに対する Grad-CAM の解析画像。左:摩擦面画像。右: Grad-CAM により CNN が重要と判断したピクセルに輝点が上書きされている。

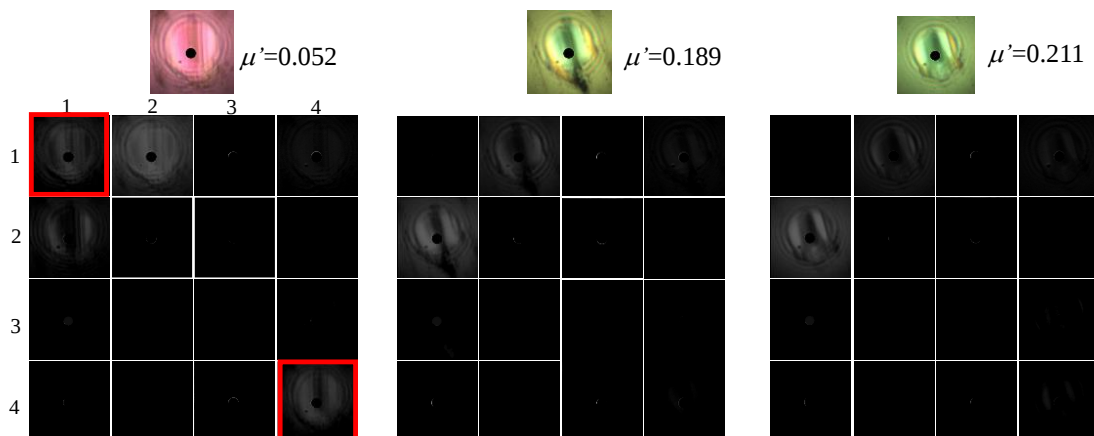
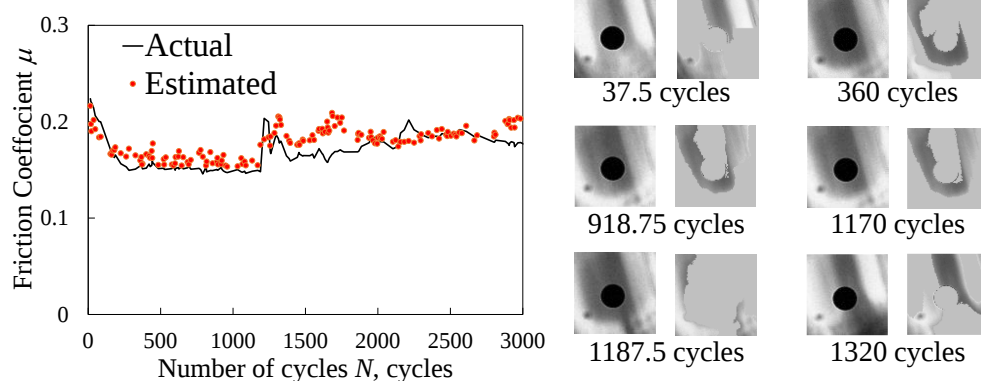


図3 CNN の中間層における特徴マップ。低摩擦画像を入力とした左図の場合にのみ赤枠で囲んだ特徴マップに反応が見られることが明らかとなった。

加速フェーズでは、同じ条件で実験を行っているにもかかわらず、摩擦係数がなぜ安定した挙動をとらずに特異的な挙動(例えば、摩擦係数の短期的な急上昇)が生じるのかの解明に挑戦した。そこで、急激な摩擦係数の変化が生じた摩擦試験結果を用いた摩擦推定実験を実施した。結果として、追加図2左のような急激な摩擦のピークを有する摩擦試験結果を得ることができた。また、別の摩擦試験結果を用いて学習させたニューラルネットワークを用いて摩擦係数推定を実施したところ、MAE=0.013 の精度で摩擦係数を推定することが可能であることを示した。特に、1180 サイクル付近に見られる急激な摩擦係数の上昇の挙動を CNN は高い精度で推定できていることが明らかになった。次に、摩擦係数の推定に重要である画像部分の

LIME による解析を実施した。これにより、摩擦係数が急激に上昇する時には CNN が重要視する画像の位置が大きく変化していることが明らかになった。具体的には、比較的安定的な低摩擦を示す 1187.5 サイクル以外においては接触面の情報を重要視している一方で、1187.5 サイクルにおいては接触面の前縁部を重要視していることが明らかになった。これは摩耗粉の急激な堆積などの状況を CNN が捉えていることを示唆していると考えられる。一方で、急激な上昇がみられた以降の摩擦係数の推定精度は、それ以前と比較して低下していることも明らかになった（追加図2左）。これにより、一度摩擦が不安定になると摩擦面の状態も不安定になり、その推定には同じような不安定な状態における摩擦面画像を多く収集することによる学習が必要であることが示唆された。



追加図2 摩擦係数の急上昇が見られる摩擦試験（左：実際の摩擦係数と、CNN による推定結果。右：摩擦係数推定に重要である位置の LIME による抽出）

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。

加速フェーズでは、不透明材料を用いることによる摩擦試験装置において両面の光学画像を取得可能であれば機械学習により摩擦係数を推定可能であることが示された。これは、従来のしゅう動面における摩擦係数推定技術の制約であった、透明材料という実際の産業用途で広く使用されない材料を用いなければならないという欠点を解決した重要な開発である。そのため、これよりこの新規開発装置を用いた摩擦試験結果およびそれを用いた AI による摩擦推定結果を積極的に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とを今後さらに加速させる。これにより世界中のトライボロジー実験におけるデータ収集における表面画像の重要性および可能性を醸成し、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に向けた研究の流れを加速させる。

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勘案し、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、本研究結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。

加速フェーズでは、これまで世界に存在しない「両面しゅう動型表面観察摩擦試験装置」の開発に挑戦したが、この開発は困難の連続であった。回転数の精確な同期、モータの振動による摩擦係数の測定精度の低下など解決すべき問題が次々と現れた。これらの問題に対して、マイコンを用いたタイミング制御、減速機やフライホイール機構を組み込むことによるモータの振動の抑制などにより摩擦係数と両面の摩擦面画像を測定可能な装置として開発することができた。また、摩擦係数の急激な変化を引き起こす原因を機械学習により解

析する試みにおいては、摩擦係数が急上昇をみせるときには摩擦面前縁の摩耗粉の状態を CNN が重要視していることが LIME 解析により明らかにした。この結果は、摩耗粉の堆積そのものや摩耗粉の堆積を促進する摩耗の急上昇が原因であるという、重要な要因の候補を特定することに繋がっている。これらの成果を総合的に勘案すると、本加速フェーズにおける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. 180, 2023, 108280.

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. 新聞報道2件: 建設通信新聞(2023 年 2 月 14 日), 日刊工業新聞(2023 年 2 月 15 日)

加速フェーズ後に得られた成果



1. 国内招待講演:村島基之, 摩擦の能動的制御とトライボロジーにおけるAI活用, 第309回九州トライボロジー懇談会, 2023年6月.
2. 国際会議発表: Motoyuki Murashima, Development of Active Friction Control Methods and Imparting New Functionalities in Tribosystem –Morphing Surfaces, Electric Fields, and Machine-learning/AI Applications–, 9th International Tribology Conference, 27-D-01, 2023.
3. 国際会議発表: Tadahito Echizen, Motoyuki Murashima, Takayuki Tokoroyama, Noritsugu Umehara, Estimating the Friction Coefficients of DLC Films and Elucidation of Important Features of DLC Sliding Surface Images in Friction Coefficient Determination Using Neural Networks, 9th International Tribology Conference, 28-G-04, 2023.
4. 国内招待講演:変形表面を用いた能動的な摩擦制御とAIによる変形制御, 第31回テクスチャリング表面のトライボロジー研究会, 2023年10月.
5. 解説記事:村島基之:トライボロジーにおける機械学習・AI活用への導入, トライボロジスト, 68, 8, 2023, pp. 552–554.