

畳み込みニューラルネットワークを用いた POM 摩擦界面その場観察像からの摩擦力推定

Friction force estimation from in-situ observations of POM friction interfaces
using convolutional neural networks

兵庫県大・工（正）○木之下 博, 兵庫県大・理（非）池田 修悟

兵庫県大・理, ダイセル（正）須貝 幸廉, 兵庫県大・工（正）松本 直浩

Hiroshi Kinoshita^{1,*}, Shugo Ikeda¹, Yoshiyuki Sugai^{1,2}, Matsumoto Naohiro¹

¹University of Hyogo, ²Daiセル Corporation

1. はじめに

近年、樹脂の軽量・自己潤滑性を生かしてトライボマテリアルへ適応する試みが急速に広がっている。しかしながら、樹脂のトライボロジーに関しては、十分に理解されていない。摩擦の研究は金属を中心に進められ、樹脂はそのアナロジーで語られることが多い。しかし樹脂の場合、摩擦力は荷重に比例しないことが多く、摩擦力の推定が非常に困難である。樹脂の摩擦では、相手面への移着や摩耗粉の発生が顕著であるが、これらは摩擦力への寄与が非常に大きいと思われる。その解明には、摩擦界面のその場観察が非常に有効と思われるが、摩擦界面ではサブミクロンサイズの現象が生じており、光学顕微鏡観察では分解能が十分でない。本研究グループでは、摩擦界面を真上から SEM で観察する方法を世界で初めて開発した[1,2]。そしてポリアセタール(POM)と電子透過膜を摩擦させて、POM 摩擦界面の変化、電子透過膜への POM の移着、摩耗粉・遊離層の発生のその場 SEM 観察に成功した。摩擦の凝着論によればせん断応力が摩擦界面で一定であれば、摩擦力は接触面積に比例する。しかし POM の摩擦では移着層や摩耗粉・遊離層が存在し、これらを介しての摩擦になっており、摩擦力の推定は非常に困難である。

近年、村島らは畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を用いて DLC の摩擦面のその場観察から摩擦力を一義的に推定できることを示した。さらに画像内のどの箇所が推測の根拠となったのかを可視化する手法(Grad-CAM)を用いて解析し、画像中の摩擦力への寄与度を示した。

そこで本研究では、これまでの光学顕微鏡よりも圧倒的に分解の高い POM 摩擦界面の SEM 像から CNN を用いて摩擦力を推定し、さらに Grad-CAM を用いて摩擦力の推定根拠となった画像部位の特定を試みたので報告する。

2. 方法

摩擦界面 SEM 像は、電子透過膜として Si₃N₄ を用い、それに対して POM ピンを摩擦したときのものを用いた。荷重は 5.3mN、しゅう動幅は約 420 μm である。SEM の電子ビーム加速電圧は 20kV であり、POM は電子線照射の影響を受けて表面温度が上昇している可能性がある。200 回の摩擦を約 1 時間かけて行い、その間の動画を 0.5 秒に 1 枚取得したので、画像データはおおよそ 6000 枚となる。今回は 1 回のみの実験データで、摩擦の最初から終わりまでの SEM 像を用いた。画像データの画素は 256×256 とし、取得した画像データのうち 5000 枚を CNN の学習データとして用い（内挿データ）、1000 枚を検証データ（外挿データ）として学習には用いなかった。今回用いた CNN は畳み込み層を 4 層、ニューロ層を 2 層とした。学習回数は 4000 回である。

3. 結果

今回の摩擦実験では、摩擦初期は非常に摩擦力が大きく、徐々に減少して最小値に至り、そこから徐々に摩擦力が増加していった（後述の Fig.3 の青線）。摩擦が減少するときの SEM 像を Fig.1(a)から(c)、摩擦力が増加しているときの SEM 像を(d)から(f)に示している。像の上に示している数字は m が測定した摩擦力で、e が CNN で推定し

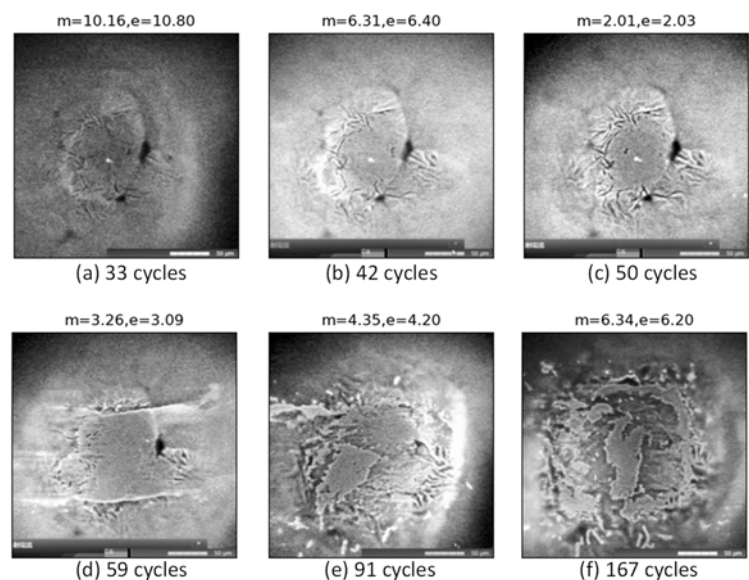


Fig. 1 SEM images and measured/estimated friction forces of the POM pin and electron transparent film.

た摩擦力を示し、単位は mN である。これらの SEM 像は外挿データである。これらの SEM 像では POM ピン先端が変形して電子透過膜に接触して摩擦している様子が結像されているが、これらの像の相違を人間の目ではほとんど気づけない。しかし、測定した摩擦力は(a)では 10.16mN で(c)では 2.01mN と大きく異なっている。SEM 像はほとんど変化がないが、SEM 像から CNN で推定した摩擦力はほぼ測定した値となっており、正しく推定できていることがわかる。また Fig.1(d)では移着が生じ、(e)と(f)ではロール状のものを含む多量の摩耗粉が摩擦界面に生じている。さらにピンにも電子透過膜にも吸着していない遊離層が存在しており、非常に複雑な摩擦界面となっている。これらの摩擦力も CNN でほぼ正しく推定できている。

Fig.2 は横軸を測定した摩擦力、縦軸を推定した摩擦力としたグラフであり(a)は内挿データ、(b)は外挿データのグラフを示している。(a)の内挿データを用いたときは近似直線の R^2 が 0.9994 と非常によく推定できている。ただこのようによく推定できているが、摩擦力が大きいときは SEM 像が非常に似通っており推定値に若干の幅がある。(b)の外挿データの場合では、(a)の内挿データと比べて摩擦力の幅が大きくなっているが R^2 は 0.9804 でありかなり推定できている。Fig.3 は横軸を摩擦回数、縦軸を摩擦力としたグラフで青が測定値、オレンジが CNN で推定した摩擦力で外挿データを用いている。このように外挿データを用いても、初期の非常に良く似た SEM 像から、相手面への吸着がある場合の SEM 像、摩耗粉が摩擦界面に多量にある状態での SEM 像と、同じモデルを用いても非常に良く推定できている。

つぎに CNN が SEM 像のどこを注目して摩擦力を推定しているかを明らかにするために、我々も Grad-CAM を用いて推定箇所の根拠を明らかにすることを試みた。Fig.4 はその時の結果で(a)は摩擦力が増加し摩耗粉と遊離層が存在するとき、(b)が摩擦減少時の SEM 像の相違が明確でないときのもので、それぞれ左図が元 SEM 像で、右図が根拠となったところをヒートマップで示している。ヒートマップでは赤いほど注目した箇所と反対に青はしていない箇所である。(a)では遊離層を介して接触している全ての部分ではなくその一部のみを注目している。さらに(b)では接触部の中心は注目箇所ではなく、その周りを注目している。これまでの摩擦理論では接触部の、例えば面積などに注目していたが、CNN ではそれとは異なる箇所に注目している。

4. おわりに

本研究では CNN による推定、および Grad-CAM による推定箇所の特定を試みた。AI の進歩は非常に急速であり、数年前の技術は古いと言われる。CNN は現在でも用いられているが技術であるが、Grad-CAM は開発されてから 6 年以上経過し、それ以降に新たな技術も生まれている。講演では他の CAM による注目箇所の可視化も行う予定である。

- [1] Kinoshita, H., and Matsumoto, N., Tribology Online, 14, 5, 2019, 382–387.
- [2] 木之下博, 松本直浩, “摩擦界面その場 SEM 観察による POM の摩擦・摩耗メカニズムの解明 -摩耗粉の生成-,” トライボロジー会議 2023 春 東京, 2023, B20.
- [3] 村島ら, トライボロジスト, 67巻, 830 (2022)

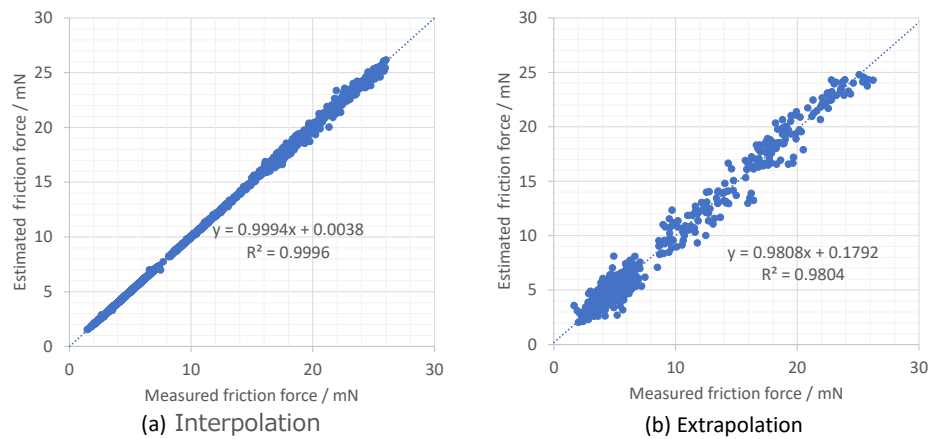


Fig. 2 The relationships of the estimated and measured friction forces.

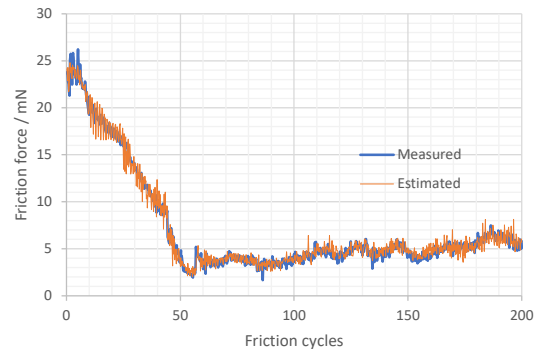


Fig. 3 The estimated and measured friction forces as a function of friction cycles

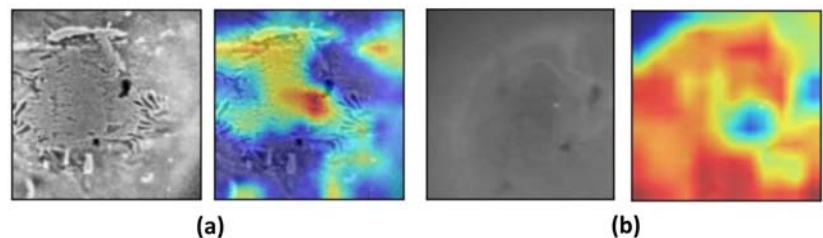


Fig. 4 SEM images and heat maps of the Grad-CAM analyses