

トライボロジー界面計測・解析のコンセプトと課題

Concept and issues to be solved for measurement and analysis on tribological interface

早稲田大学（正）*柳沢 雅広

Masahiro Yanagisawa*

*Waseda University

1. はじめに

トライボロジー現象の解明には、摺動界面における計測および解析技術が欠かせない。しかしトライボロジー界面はきわめて複雑で、そこで起きている現象を明らかにすることは容易ではない。本シンポジウムでは最新のさまざまな計測・解析技術を紹介していただき、少しでもトライボロジーにおけるメカニズムを明らかにして、高信頼性・省エネ・脱炭素の社会的ニーズに対応する材料・機械システムの設計・開発に役立つ一助となることを期待する。

2. トライボロジー界面計測のコンセプト

2.1 トライボロジー界面と計測ツール

トライボロジー界面はFig.1に示すように2次元の真実接触面だけでは無く、応力やひずみの範囲や粗さなどの幾何学的構造を入れると3次元構造からなっている。また2体の摺動体以外に潤滑膜や摩耗粉など多体が絡むことで複雑さが増す。また酸素や水蒸気などの雰囲気ガスの影響も受けることが多い。さらに摺動による化学的、機械的、および物理的な性質が時間とともに変化し、焼き付きのようなトランジエントな現象が生じることもある。スケール的には原子レベルからナノメートル、マイクロメートルあるいはそれ以上のスケールにわたるマルチスケールであり、時間分解的には化学反応が関係するフェムト秒からミリ秒あるいは数十時間にわたって観察する必要がある場合もある。

このような埋もれた界面を計測する手法は、プローブ顕微鏡やSEM、XPS、SIMS、TOF-SIMSなど多くの表面分析法が知られているのに比べ、まだ少ないのが現状である。Table 1に埋もれた界面測定に使えるプローブの種類を示す。この中でナノメートルスケールの空間分解能に優れているのは表面増強ラマン分光法(SERS)、表面増強赤外分光法(SEIRAS)、和周波発生分光法(SFG)などの振動分光法やエリプソメトリ、蛍光法、表面力測定装置(SFA)、Fiber wobbling法、中性子反射法などであるが、詳細な化学構造を測定するにはSERS、SEIRAS、SFGなどに限られる。NMRもサブナノメートル厚のスペクトルが測定できるが、粒子に吸着させて表面積を増やす必要がある¹⁾。最近は放射光で強い光源が利用できるようになり、XPSなども界面計測ツールとして用いられるようになった²⁾。

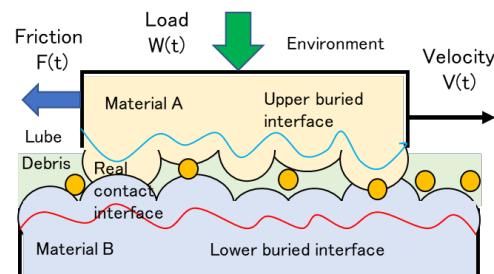


Fig. 1 Tribological buried interface

Table. 1 Measurement probes for buried interface

Optical method	Magnetic method	Electric method	Acoustic method	Mechanical method	Elementary particles
Vibrational spectroscopy (SERS, SEIRAS, SFG) Interference, Reflection Ellipsometry Fluorescence Light emission EXAFS, XPS	Magnetic resonance (NMR, ESR) Moessbauer spectroscopy Magnetic resistance	Electric resistance Electric current	Acoustic emission Acoustic resonance Brillouin spectroscopy	Surface force apparatus (SFA) Fiber wobbling	Neutron reflection

2.2 オペランド測定

筆者らが蓄電池界面のSERS測定を行っていたときの計測解析コンセプトであるオペランド測定は、実働下観察とも称されるように実際のデバイスやシステムと同じ条件でエミュレーション測定をするもので、トライボロジー界面測定に適用する場合³⁾、機械システムによってはかなり難しい測定となる。しかしそれによって得られる結果は実用的であり、有用なデータとして期待できる。Figure 2にそのフローを示す。対象となる摺動システムに荷重、速度、場合によっては熱や環境パラメータを摺動として加えその動的応答を観察す

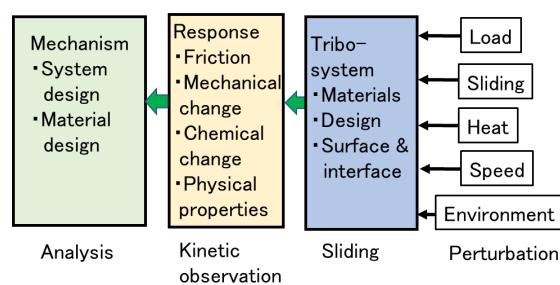


Fig. 2 Operando measurement

る。そのデータを解析してメカニズム解明を通じてシステム設計や材料設計を行うことになるが、動的測定に際し空間分解能と時間分解能が重要となり、Table 1 に示す計測法はそれぞれ可能な適用範囲が異なってくる。現状ではそれらの計測法を用いて、例えばエンジンのような機械システムでオペラント観察することは難しいが、荷重（応力）と相対速度だけでも実機と同じ条件にすることが重要である。またオペラント観察では、焼き付きやヘッドクラッシュ（ハードディスク）のような過渡現象の観察も期待される。しかしその現象の詳細な観察にはミリ秒程度の時間分解能が要求され、さらにその前段階からの長時間の観察も必要なので膨大なデータ量が必要になる。さらにその予兆現象の解析が最も重要であるが、非常に多くのパラメータが関係することから、これを人間がすべて行うのは非常に困難であり AI による解析補助が期待される。さらに Fig.1 に示すようにトライボロジー界面は空間的に 3 次元の広がりを有しており、そのような計測が可能となった場合、さらにデータ量は増大することから新しい計測技術と解析技術の開発がますます重要になると思われる。

2.3 マルチメッセンジャー観察

トライボロジー界面はきわめて複雑で、さまざまな因子が相互作用している可能性がある。そのため複数の計測プローブで観察することが理想であるが、特に Fig.3 に示すように化学構造、機械物性、および物理的性質を同時かつ同じ場所で観察することがメカニズム解明のために非常に有効である⁴⁾。マルチメッセンジャー観察は、最近天文学で注目されており、さまざまな波長の電磁波や重力波、素粒子などを用いて同一場所を同時観察することにより大きな成果を挙げている。しかしこの手法をナノテクノロジー、特にトライボロジー界面に応用するには空間分解能や時間分解能においても十分とはいえず、新技術の開発が待たれている。

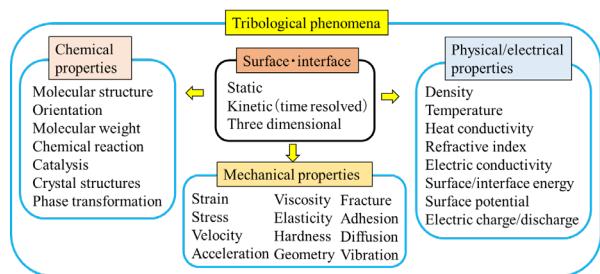


Fig. 3 Concept of multi-messenger observation

3. 課題

トライボロジー界面の計測には、下記に示すようなさまざまな課題がある。

- (1) トライボロジー界面のオペラント測定には、実際の機械システムに測定プローブを設置する必要があるが、まだ制限が多い。特に金属摺動界面の観察では、化学構造測定に優れた振動分光法の適用が難しい。薄い金属膜で測定することも可能であるが、実際の機械システムで用いられる荷重や速度の大きい条件では難しい。音波による界面計測は期待できるが化学構造の分析は難しい。放射光や素粒子を用いる手法も期待できるが、高エネルギープローブによる材料への影響も注意が必要である。
- (2) 摩擦面と計測領域を一致させることも課題である。計測プローブは通常小さいので、摩擦面で生じている現象を必ずしも反映していない。プローブを大きくすると面分解能が悪くなるので、マルチプローブなどの対策が必要となる。蛍光法など動画像で観察できる手法も注目できるが、精密な化学構造の測定には課題が残る。
- (3) 3 次元観察や動的現象の観察において、空間分解能や時間分解能を高くして精密測定を行うとデータ量が膨大となり、人間による解析が困難となることから AI の活用が期待される。
- (4) トライボロジー界面は極めて複雑で、材料系や機械システムによっても異なることから 1 つの計測プローブでわかる範囲は限られてくる。個々の機関が有している技術をサロンで終わらせず、ラウンドロビン・テストなどでデータの共有化を図ることが重要と思われる。

4. おわりに

最近さまざまな界面計測技術が実用化されてきており、従来試行錯誤で進められてきた新技術の開発が加速されることが期待される。

文献

- 1) M.Yanagisawa: Molecular Dynamics of Thin Lubricant Films on Sol-Gel SiO₂ Surfaces for Thin Film Magnetic Disks, Tribology Trans., 37 (1994) 629.
- 2) 量子科学技術研究開発機構パンフレット
- 3) 柳沢・齋藤・國本・本間：ラマン分光法を用いたトライボロジーのオペラント観察、トライボロジー会議予稿集 2017 年春（東京）(2017).
- 4) 柳沢・國本・本間・森平・河村ら：マルチメッセンジャープローブによるトライボロジー界面の解析、トライボロジー会議予稿集、2020 秋別府 (2020) 292.