摩擦・摩耗メカニズム理解ための摩擦界面その場観察

長谷 亜蘭　　埼玉工業大学　工学部　機械工学科

1　はじめに

二つの材料表面を接触させ相対運動させれば，その表面突起間で変形・破壊すなわち摩擦・摩耗が生じる。この摩擦界面で起こる現象は様々であり，硬い表面突起が軟らかい相手面を掘り起こしたり，塑性変形した表面突起間で凝着が生じて相手面へ移着したり，繰り返し応力によって表面下でき裂が生成したりする（図 1）。また，摩擦・摩耗現象は，二つの摩擦表面のみならず，摩擦界面に介在する粒子（外部からの混入物や移着粒子など），周囲の雰囲気物質（気体や潤滑剤など）が互いに作用し合い，各々のスケールも異なるため，とても複雑な多体問題となる。さらに，これらが摩擦条件だけでなく，摩擦表面の損傷が進行していくことで摩擦表面の様相が逐次変化する。これが，「摩耗は泥沼である」と言われる所以である。

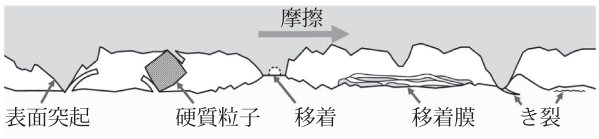


図 1　伏せられた摩擦界面で起こる摩擦・摩耗現象

2　可視化研究の重要性

「百聞は一見に如かず」や「One picture is worth a thousand words（一枚の絵は一千語に匹敵する）」というように，視覚的データから得られる情報量は多い。また，これが映像ともなれば，さらに有力な情報を得ることができる。トライボロジー分野においては，摩擦界面でどのような現象が起こっていたかが問題となる。しかしながら，摩擦面は伏せられた目に見えない状態にあるため，通常は何が起こっているかをリアルタイムで直接観察（その場観察，in situ 観察）することはできない。そのため，摩擦面（摩耗面）や摩耗粒子等の観察・分析に頼らざるを得ない。

摩擦・摩耗現象は複雑なため，摩擦係数や摩耗量の特定はとても困難であり，現状では実機の使用条件に合わせて摩擦・摩耗試験を実施し，その値を測定・比較することが行われる。それに加え，試験後の摩耗面や排出された摩耗粒子を観察･分析し，どのような摩耗形態であったかを判断する。図 2 に示す理想的な摩耗曲線のよう

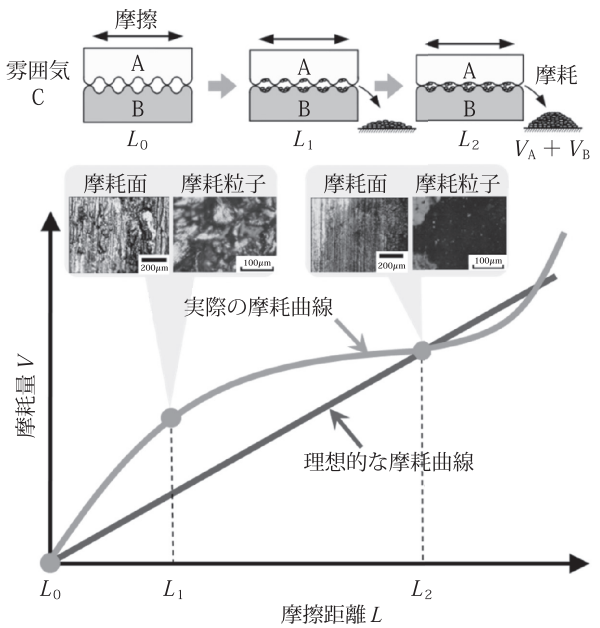


図 2　摩耗進行曲線の理想と現実

に，摩耗量が単調増加（摩擦距離に比例）することは稀である。これには，単一の変形・破壊現象が継続的に起こらなければならない。しかし，実際は初期なじみや摩耗形態の変化により，さらには予期しない異常状態の進行によって，摩耗曲線は大きく変化していく。試験を途中で中断して，両試験片の摩耗量測定（重量変化や摩耗面形状）や観察・分析を実施したとしても，それは事が終わってしまった後の状態でしかない。図２のL_1やL_2のように，実験で得られる情報の多くは，それぞれ「点」での情報であり，これら点と点の隙間を補完する事象は想像の域を超えることはできない。したがって，摩擦前後のみならず摩擦中の現象を連続的に観察，すなわち一連の現象を映像で追うことによって，はじめて真の現象を捉えたと言えるのである。

3　摩擦界面その場観察の手法と特徴[1)]

摩擦面は伏せられた状態にあるため，摩擦界面を可視化するためには工夫が必要となる。摩擦界面を可視化する手法として，(a) 上方，(b) 下方，(c) 側方からその場観察する方式があり，それぞれ可視化される情報は異なる(図3)。また,観察に用いる機器によって観察スケールと可視化できる現象も異なってくる（表1)。筆者は，光学顕微鏡により摩擦界面を側方から直接観察する摩擦面顕微鏡を用いて，様々な材料を対象とした摩耗現象の可視化実験を行っている[2,3)]。この手法は,摩擦面直下(材料内部）の変形・破壊現象および摩擦界面における摩耗粒子の挙動などを可視化できるという利点がある。

図４は，摩擦面顕微鏡 in situ 観察装置[4)]の概略図である。摩擦系はピン・オン・ブロック型であり，光学顕微鏡観察レンズ直下に設置している。ピン試験片固定部の板ばね側面に貼り付けたひずみゲージを用いて，摩擦力が計測できるようになっている。本実験装置は，ピンもしくはブロック試験片に AE センサを取り付けることで，変形・破壊時に生じる弾性波（アコースティックエミッション，AE）も計測・評価できる。垂直荷重は，リンク機構を介してピン試験片に与えられ，ピン試験片を電動ステージによって駆動させて，ブロック試験片上で摩擦させる構成である。これにより,摩擦界面の摩擦･摩耗現象を拡大観察すると同時に摩擦力および AE 信号を計測し，定量的データと関連付けて評価・検討することができる。最近では，上記に加えて顕微鏡の３次元計測機能を用いた摩耗量計測や高速度カメラを用いた高速度その場観察実験など，高度な可視化実験にも取り組んでいる。

本稿では，側方から摩擦界面をその場観察する手法を用いた摩擦・摩耗現象の可視化実験の研究事例をいくつか紹介する。

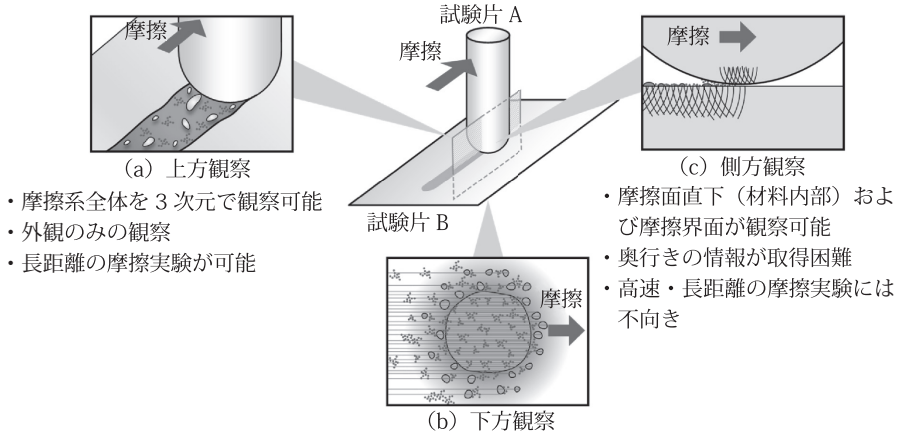
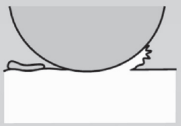
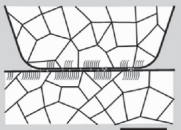
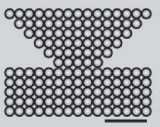


図３　摩擦系と観察系の配置による可視化情報の違い

表 1　観察手法による可視化スケールと可視化対象

観察手法	CCD カメラ	光学顕微鏡	走査型電子顕微鏡	透過型電子顕微鏡
一般的な観察方向	上方，側方，下方	側方，下方	上方	側方
観察環境	大気中	大気中	真空中	真空中
可視化スケール（最高倍率，分解能）	 （数百倍程度，数 μm 程度）	 （1500 倍程度，0.2 μm 程度）	（数万倍程度，0.5 ～ 4nm 程度）	 （100 万倍程度，0.1nm 程度）
可視化対象	巨視的な摩擦表面損傷状態および摩耗粒子形状（大まかな摩耗形状）	摩擦面直下材料内部の変形・破壊，摩擦界面の摩耗粒子生成過程など	微視的な表面損傷状態および摩耗粒子形態（詳細な摩耗形態）	原子スケールでの変形・破裂（結晶格子ひずみや原子拡散など）

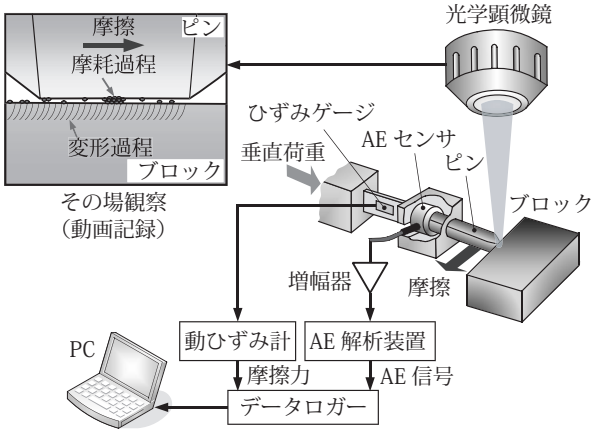


図 4　摩擦面顕微鏡 in situ 観察装置の概略

4　摩擦面顕微鏡を用いた摩擦界面その場観察事例

4.1　自己修復フィルムの耐はく離性評価

近年，傷が付きにくい自己修復性を持った高分子材料フィルムが開発され，タッチパネル等の保護フィルムとして使用されるようになってきた。保護フィルム表面には多機能な性質（感触・操作性，防汚・指紋防止など）が付加されるようになっており，材料開発するうえでトライボロジー特性を評価することが重要になる。

図 5 は，自己修復フィルムのはく離過程を可視化した結果である。ここでは，金属製のブロック試験片上にフィルム材料を貼り付け，ステンレス鋼製のピン試験片を摩擦させて，その場観察実験を実施した。供試したフィルム材料は，PET（polyethylenterephthalate）基材の上に自己修復フィルムが成膜されている。まず，摩擦に伴うピン試験片の接触部前方で作用する圧縮応力により，フィルム表層部で変形および微視的き裂が生じる。掘り起こし作用によって，図 5（ii）のように前方で大きな変形が生じる場合，接触部後方では引張り応力が作用し，表層部の微視的き裂を起点として破断が生じる〔図 5（ii）A 部分〕。その後，自己修復フィルムがめくり上げられ，はく離していく過程が観察される。

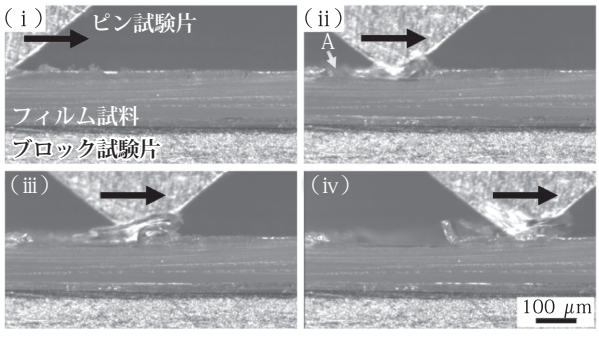


図 5　自己修復フィルムのはく離過程のその場観察

図 6 は，自己修復フィルムの損耗量（はく離量）を定量的に評価した例である。図 5 で示した一連のはく離過程において，自己修復フィルムの大きな変形やめくり上げが生じた際には，図 6（a）のようにフィルムとして機能しなくなった表層部が残存する。また，図 6（b）のように表層部の微視的き裂の生成によって自己修復性が失われ，損傷が残存しているのがわかる。この量が，自己修復フィルムの厚みを超えた際に使用限界に至ったとみることもできる。垂直荷重や摩擦速度によって，表層部の微視的き裂の生成やはく離の発生が変化するため，それぞれの耐摩耗性（使用限界）を評価することが可能となる。

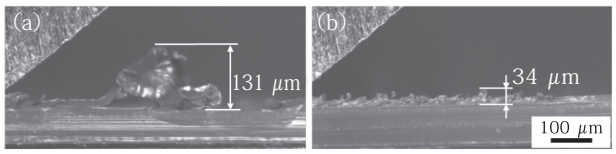


図 6　自己修復フィルム損耗部の可視化

図 7 は，フィルム表層部に損傷が生じない低荷重条件下でのその場観察結果の一例である。これにより，耐摩耗性のみならず自己修復性を定量的に評価することが可能となる。また，変形した量や回復に要する時間（速度など）も in situ 観察動画から定量的に評価可能である。この側方からの観察によって，損傷の量を可視化することができ，成膜条件や摩擦条件の違いによる損耗量（耐はく離性や耐摩耗性）や自己修復性を定量的に比較することが可能となる。

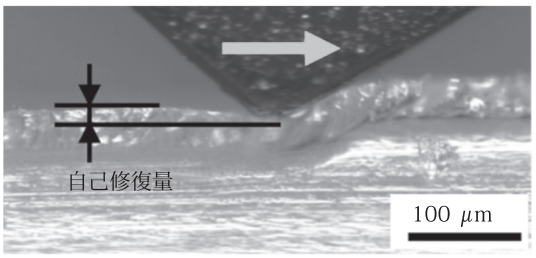


図 7　自己修復量の可視化による定量的評価

4.2　プラスチック基材上 DLC 薄膜の耐摩耗性評価

トライボロジー特性の向上の解決策として，高硬度，低摩擦かつ耐摩耗性，平滑性，化学的安定性などに優れた特性を有するダイヤモンドに類似した硬質膜の DLC（diamond-like carbon）コーティングが有効とされている。最近では，高分子材料に DLC コーティングを施す技術開発も進められており，その耐摩耗性や密着性などの評価に対する要求も高い。

図 8 および図 9 は，DLC 薄膜を成膜した PTFE（polytetrafluoroethylene）の摩擦・摩耗過程をその場観察した結果である。図 8 では，PTFE 摩擦表面の DLC 薄膜が部分的にはく離していく様子が観察できる。さらに，摩擦を繰り返すことにより，その小片が集合していく様子も観察されている。垂直荷重が大きくなると，図 9 のように摩擦表面直下の PTFE 表層部の塑性変形が進行し，陥没部に応力が集中することで DLC 薄膜が破壊していく様子を観察することができる。

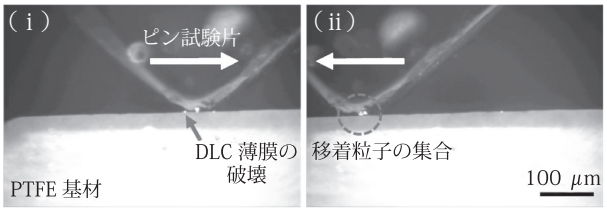


図 8　PTFE 基材上 DLC 薄膜の摩耗過程のその場観察

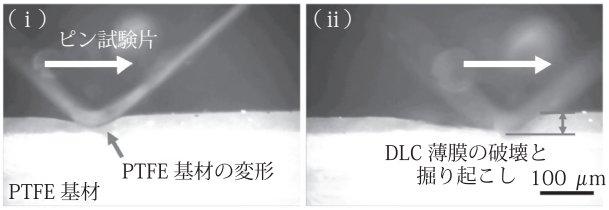


図 9　PTFE 基材の変形と DLC 薄膜の破壊過程のその場観察

図 10 は，図 8 で示したその場観察の際に計測された摩擦係数と AE 平均値電圧（AE 信号の振幅値に相当）の変化である。AE 平均値電圧は，変形・破壊の大きさを表すパラメータであり [5]，ここでは表面の損傷状態すなわち DLC 薄膜の破壊状態とみなすことができる。こ

のAE平均値電圧の変化をみると，摩擦係数には現れない変化を捉えていることがわかる。これは，AE計測が単なる力の抵抗の計測と比べて，微視的な摩擦界面の変形・破壊現象に対する検出感度が高いためである[6]。よって，PTFE表層部の塑性変形のみならずDLC薄膜の微視的なき裂進展およびはく離（摩耗）に起因する変化を捉えていると考えられる。このように，変形・破壊プロセスを可視化できるだけでなく，計測データとの紐づけを行うことによって，摩擦・摩耗メカニズムの理解にも役立てることができる。

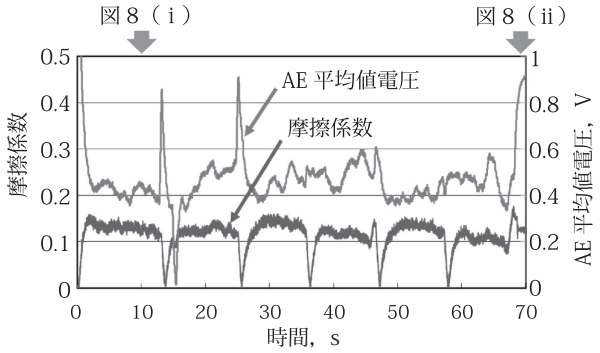
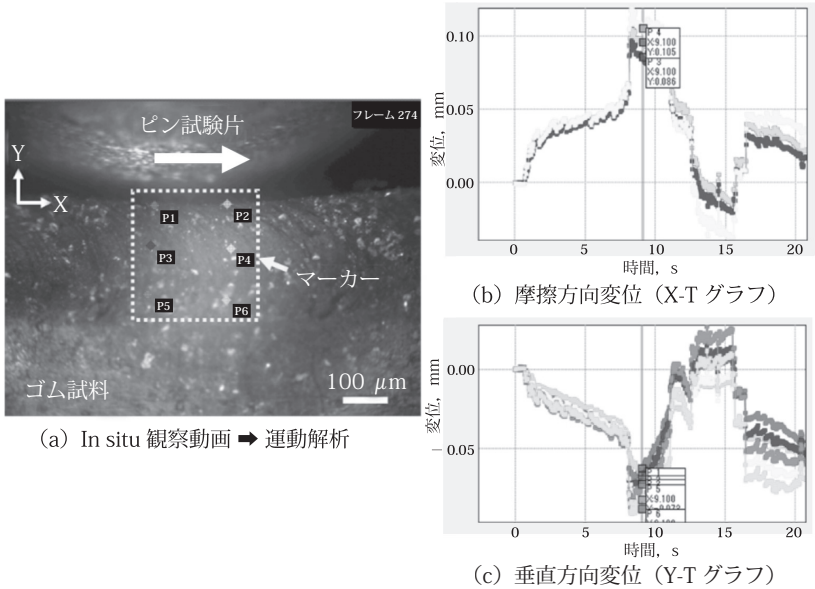


図10　その場観察と同時計測される摩擦係数とAE信号の変化

4.3　ゴム摩擦表面直下の変形状態の可視化・解析

摩擦面間における微視的な摩擦面の付着（stick）とすべり（slip）の繰り返しによって自励振動（外部から振動的入力を与えられることなく持続する振動）が発生する。この自励振動をスティック・スリップと呼び，静摩擦から動摩擦に移るときの不連続な摩擦低下が生じる場合などに発生し，機械システムの振動や騒音の原因になることも多い。そのため，摩擦面のスティック・スリップ挙動の解明は，摩擦材料開発には欠かすことができない。

スティック・スリップ挙動の可視化・解析の事例として，ゴム材料を用いたその場観察の結果を図11に示す。ここでは，アルミニウム製のピン試験片を合成ゴム上で摩擦させて得られたin situ観察動画の運動解析を行っている。ゴム材料の摩擦表面下にマーカーを設定し，その周囲の画像データを1フレーム毎に相関追尾させる〔図11（a)〕。追尾させた各マーカーと基準点の距離を数値化することによって，材料内部の変位量をグラフとして可視化できる〔図11（b）および（c)〕。この変位量の時間的変化から，スティック・スリップ挙動を定量的に評価することが可能となる。図12は，摩擦1往復



（a）In situ観察動画 ➡ 運動解析

（b）摩擦方向変位（X-Tグラフ）

（c）垂直方向変位（Y-Tグラフ）

図11　摩擦面のin situ観察動画の運動解析

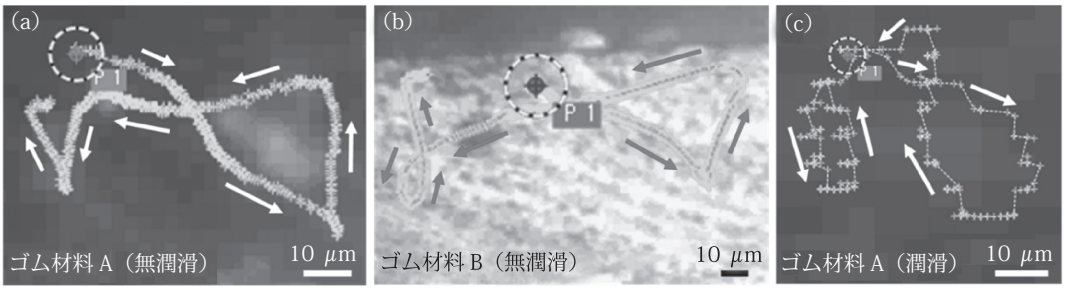


図 12　ゴム摩擦面直下のマーカーの軌跡

中のマーカーの軌跡を示している。図 12（a）と（b）は無潤滑下でのゴム材料の違いを示しており，ゴム材料 B における軌跡は摩擦方向への変化が大きく現れている。また，図 12（a）と（c）は同一ゴム材料で潤滑状態の違いを示しており，潤滑下の軌跡は摩擦方向の変化が小さく，安定したすべり状態であることがわかる。このように，異なる材質や摩擦条件，環境でその場観察実験を実施し，得られた in situ 観察動画から摩擦面直下や材料内部の挙動を可視化・解析することで，摩擦面で起こっている微視的な摩擦現象の解明や摩擦特性の評価・検討に繋げることができる。この他，粒子画像流速測定法（particle image velocimetry, PIV）を用いて，摩擦中の摩擦面直下の塑性流動を可視化し，摩耗メカニズムの立証に繋げた研究事例もある [7]。

5　おわりに

摩擦実験後の摩耗面や摩耗粒子，その他の表面分析結果いわゆる摩擦・摩耗現象の“死に様”だけを見るのではなく，摩耗面や摩耗粒子が時々刻々と生成・変化する過程すなわち“生き様”をその場観察によって可視化することの重要性を示した。摩擦界面の側方からの摩擦・摩耗現象の可視化実験は，摩擦表面直下で起こる変形・破壊過程を十分に観察することができ，摩擦・摩耗のメカニズムや問題点を調査するのに大変有用である。また，摩擦力の計測などから感覚的に認識していた現象も，実際の現象を可視化することによって確証を得ることができよう。

参考文献

1）長谷亜蘭，三科博司，摩耗現象の可視化技術，トライボロジスト，59 巻，5 号（2014）pp. 283-289

2）長谷亜蘭，摩擦界面 in situ 観察による鋳鉄のトライボロジー過程の可視化，埼玉工業大学工学部紀要，第 26 号（2016）pp. 13-18

3）A. Hase, K. Mizuta, Y. Nishizawa, K. Sugimoto, K. Okayama, Evaluation of Frictional Properties for Brake Pads Using High-speed In Situ Observation and Acoustic Emission Measurement Method, Proc. of EuroBrake 2016, Milan (2016) EB2016-SVM-060

4）長谷亜蘭，三科博司，トライボロジー現象可視化のための小型摩擦面顕微鏡の設計・製作，埼玉工業大学工学部紀要，第 22 号（2012）pp. 13-16

5）長谷亜蘭，アコースティックエミッション計測の基礎，精密工学会誌，78 巻，10 号（2012）pp. 856-861

6）A. Hase, M. Wada, H. Mishina, Acoustic Emission Signals and Wear Phenomena on Severe-Mild Wear Transition, Tribology Online, Vol. 3, No. 5 (2008) pp. 298-303

7）N. K. Sundaram, Y. Guo, S. Chandrasekar, Mesoscale Folding, Instability, and Disruption of Laminar Flow in Metal Surfaces, Phys Rev Lett, 109 (2012) 106001