摩耗メカニズムの研究事例と動向

長 谷 亜 蘭

埼玉工業大学 工学部 機械工学科(〒 369-0293 埼玉県深谷市普濟寺 1690)

Research Cases and Trends of Wear Mechanism

Alan HASE

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Saitama Institute of Technology(1690 Fusaiji, Fukaya, Saitama 369-0293)

Keywords : Tribology, Friction, Adhesive Wear, Transfer, Wear Element, Wear Theory, Wear Equation

1. はじめに

機械システムの寿命を決める原因の多くは、摩耗が関係するといわれている。機械運転時に起こる騒音や振動、そして機械システムを破壊に至らせる致命的損傷である焼け付きも摩耗現象から派生する。機械システムの寿命予測や最適設計のためにも、“摩耗”という現象がいかなるものかを知っておく必要がある。

摩耗は“摩擦による固体表面部分の逐次減量現象”と定義されており、摩擦によって表面材料が除去されていく現象といえる。工業的に用いられる表面は、加工法に依存するサブミクロンからマイクロメートルオーダーの表面粗さをもっており、摩擦・摩耗はその表面粗さ(表面突起)の接触、変形・破壊から生じる。その際、二固体のみならず摩擦面間の雰囲気物質や異物粒子等の作用が加わり、摩耗の形態は大きく変化する。このように、「マイクロ・ナノスケール」の微視的な変形・破壊現象を伴い、機械的な因子のみならず物理化学的な因子が作用する複雑な多体問題を扱うところに、摩耗メ

カニズム研究の難しさがある。さらに、摩耗現象は二つの固体表面が互いに接触して伏せられた摩擦界面で起こるため、表面材料が実際どのように除去されていくのかを追究する摩耗メカニズム研究には大きな労力と長い年月が費やされてきた。

これまでの摩耗メカニズム研究から、摩耗現象をメカニズムで大別すると図1のようになる。アブレシブ摩耗は表面突起によって相手表面を削り取る摩耗であり、凝着摩耗は表面突起同士の接触部(ジャンクションと呼ばれる)がくっ付いて千切り取られる摩耗である。疲労摩耗(表面疲労)は、アブレシブ摩耗も凝着摩耗も起きない場合に発生する表面の疲労破壊により進行していく摩耗である。アブレシブ摩耗においては、硬い表面突起が相手表面を削り取る二元アブレシブ摩耗と摩擦界面に存在する硬質粒子が表面を削り取る三元アブレシブ摩耗に区別される。アブレシブ摩耗の摩耗面は線条痕が形成され、切りくず状の摩耗粒子が生成するのが特徴である。一方、凝着摩耗においては、摩耗率(摩耗速度)が高いシビア摩耗と摩耗率が低いマイルド摩耗に摩耗形態が分けられる。このシビア摩耗(初期摩耗)とマイルド摩耗(定常摩耗)では、

図1 摩耗メカニズム(摩耗機構)の分類

摩耗率が2桁以上変化し、その様相は一変する。シビア摩耗では、摩耗面は大きく荒れ、摩耗粒子は10 μm 以上の大型の粒子が生成する。マイルド摩耗では、摩耗面はなめらかであり、数 μm 以下の微細な摩耗粒子が生成する。凝着摩耗では、シビア摩耗からマイルド摩耗へと摩耗形態が変化するシビア・マイルド摩耗遷移が生じることがある。本稿では、複雑とされる凝着摩耗を中心に摩耗メカニズムの研究事例とその動向について解説する。

2. 摩擦研究から摩耗研究への変遷

摩耗研究を遡ると、トライボロジー研究の根源である15世紀末のLeonardo da Vinciによる摩擦実験に始まる。その後、17世紀末に様々な摩擦の実証実験が行われ、AmontonsやCoulombによる摩擦法則(摩擦力は加えられた荷重に比例し、見掛けの接触面積に依存しない)が一般に認められることとなる。これらは表面突起の嵌合が摩擦のメカニズムとする凹凸説である。ここで、表面突起の嵌合を考えると、平坦な表面同士の摩擦は小さくなるはずである。しかしながら、実際は平坦な面になっても摩擦は変わらないどころか、汚れをぬぐい去った清浄表面の摩擦ははるかに大きな値となる。このように、凹凸説で摩擦理論を解釈するには無理が生じてしまう。一方で同時期に、Desaguliersは表面を磨くと摩擦が増大することや鉛の球の表面同士をくっ付けると凝着する実験事実から、摩擦のメカニズムが表面同士の凝着による凝着説を打ち出す。表面の凝着を考えると、凝着力は接触面積に比例するはずであるが、実際は摩擦の法則では見かけの接触面積に無関係であることが凹凸説と凝着説の二大仮説の争点となった。

20世紀に入ると量子力学、表面物理、界面化学の学問的発展が進むとともにHardyによって境界潤滑の概念が導入され、Holmによる固体接触の基礎となる真実接触面積の概念が確立していった。その後、BowdenとTaborらによって凝着摩擦の本質的な解明がなされ、急速に摩擦の研究が発展することとなる。最も厄介な摩耗に関しては、多くの研究者によって様々な摩耗メカニズムが考案され論議がなされてきた。摩耗メカニズム研究初期における摩耗モデルを図2に示す。図2(a)は、真実接触部(abcd部分)が摩擦に伴うせん断破壊によって破断し、その破断したabcdの部分がそのまま摩耗粒子となるというモデルである^{1),2)}。しかし、真実接触部abもしくはcdの部分で破断が起こったとしても、それはabcd部分が一方の面にくっつく(移着と呼ばれる)だけの意味しているに過ぎない。摩擦面からabcd部分が摩耗粒子として排出されないため、減量現象を伴わない単純な凝着摩擦のモデルともいえる。

摩耗に関する最初の理論式といわれるHolmの摩耗式は、図2(b)に示す摩耗モデルによって次式で表される³⁾。

$$V = Z \cdot l \cdot A_r \quad (\text{あるいは } V = Z \cdot P \cdot l / p_m) \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

ここで、 V : 摩耗体積、 P : 荷重、 l : 摩擦距離、 A_r : 真実接触面積(= P/p_m)、 p_m : 摩擦する二面の軟らかい方の押込み硬さであり、 Z は摩耗係数と呼ばれる摩耗粒子として脱落する確率である。すなわち、摩耗量が真実接触面積 A_r と摩擦距離 l に比例し、その他の因子をすべて摩耗係数 Z に含めている。図2(c)に示すように、Rabinowiczは半球状粒子として、Archardは円板状粒子としてジャンクションから脱落するとして摩耗式を考えているが、その摩耗式は最終的にHolmの式(2.1)と同じ形となる。アブレシブ摩耗の場合、表面突起形状により削り取られる量が決まるため、確率を導入せずに実験事実を表現することができる。凝着摩耗の場合は、摩耗粒子がどのように摩擦面から脱落するか解明されていないため、確率に頼らざるを得なかったであろう。

3. 摩耗理論確立のための摩耗メカニズム究明

3.1 巨視的な摩耗メカニズムの把握と移着成長理論

摩擦界面の摩耗現象を直接観察して可視化する実験研究も摩耗メカニズムの解明に大いに役立つ⁴⁾。笹田らは、摩擦界面における移着粒子(摩擦面から摩耗粒子として脱落する前の粒子)の成長・脱落過程を図3に示すように直接観察し、凝着摩耗時の摩擦力の変動などとの関係性について説明している⁵⁾。この観察結果から、摩擦中に移着粒子が摩擦界面に滞在しながら大きく成長していく事実が確認されている。また、移着粒子や摩耗粒子の元素分析結果から、摩擦させた相互の材料の微細な混合物であることが確認されている⁶⁾。さ

図2 摩耗メカニズム研究初期における摩耗モデル

図3 移着粒子の成長過程の直接観察⁵⁾

図4 笹田の凝着摩耗における移着成長モデル

らに、摩耗面上にも相手材料の存在が確認されていることから相互移着が生じていることが示されている⁷⁾。

図4は、笹田の凝着摩耗における移着成長モデルである⁸⁾。この移着成長モデルには、上述した凝着摩耗でみられる実験事実がすべて組み込まれている。まず、摩擦に伴う表面突起の接触・変形により、ジャンクションを形成する〔図4(i)〕。このジャンクションがせん断される際に材料内部で破断が生じ〔図4(ii)〕、相手面にくっついて移着素子(摩耗粒子を構成する素粒子)が生成する〔図4(iii)〕。これらが相互の摩擦面に生じ、摩擦界面で集合・合体して大きく成長し、移着粒子を形成する〔図4(iv)→(vi)〕。最終的に、移着粒子が摩擦面から摩耗粒子として脱落・排出されることで摩耗が生じる。三科らは摩擦界面を側方から直接観察する手法を用いて、図5に示すように移着成長過程の可視化に成功している⁹⁾。これより、同一方向の繰り返し摩擦中に結晶粒内から破壊して生成した小片(ピン側:a, d, f, g, h, i; ブロック側:b, c, e)が、摩擦界面で集合・合体することで大きな移着粒子(a +

b + d + f + g + h)に成長し、最終的に摩耗粒子として摩擦系外に排出される。成長した移着粒子は、摩擦界面で荷重を支えながら、摩擦によって押し延べられていく。Rabinowiczは、移着粒子に蓄えられる弾性ひずみエネルギーが摩擦面と移着粒子間の凝着仕事よりも大きくなった際に、摩耗粒子として脱落するモデルを考案している¹⁰⁾。摩耗粒子の形状も様々であり、球状、鱗片状、ころ状などがある。これは、脱落時に移着粒子が転動したり巻き上げられたりすることによって起こり、移着粒子に作用するモーメントや摩擦軌道の曲率などが関係している¹¹⁾。

シビア摩耗とマイルド摩耗の変化については、三科らによって金属の組合せによる移着成長の規模が表1のように調べられている¹²⁾。純金属の化学吸着活性はTrapnellによって調査されているが¹³⁾、表1より気体分子の化学吸着活性の高い遷移金属を摩擦するとマイルド摩耗が発生する傾向にあることを示している。これに加え、金属の相互溶解度も移着粒子の成長に関係すると考えられている。また、マイルド摩耗の遷移には、非摩擦時間の効果があることと摩擦界面に移着粒子が存在しなければならないことなどが平塚らによって確認されている^{14),15)}。マイルド摩耗遷移後の摩擦面には、

表1 金属の組合せによる移着成長過程の諸相¹²⁾

(摩擦速度 104mm/s, 荷重 4.9N, 乾燥摩擦)

ピン 円板	Mo	Fe	Ni	Cu	Ag	Zn	Al
Mo	△	▲	▲	×	×	△	△
Fe	▲	▲	△	●	×	△	△
Ni	▲	△	△	●	×	●	△
Cu	×	△	△	○	○	○	△
Ag	×	×	×	△	△	●	●
Zn	○	○	○	○	○	○	○
Al	△	△	△	△	●	○	○

○ 大規模な移着成長・脱落過程を示す
 ● 中規模な移着成長・脱落過程を示す
 △ 小規模な移着成長・脱落過程を示す
 ▲ 小規模な移着成長過程から定常マイルド摩耗へ移行する
 × 移着成長・脱落過程を示さない(マイルド摩耗)

シビア摩耗

図5 三科らによる摩擦界面で生じる移着成長過程の直接観察⁹⁾

無数の微細化された移着粒子が滞留していることが確認されており、一つ一つの移着粒子が負担する垂直応力が減少することで摩耗が軽減するとも考えられている¹⁶⁾。以上のように、巨視的な摩耗メカニズムの把握とその実験事実から導出された移着成長過程が実験的に証明されたことによって、摩耗メカニズム研究が大きく前進したといえる。

3. 2 微視的な摩耗メカニズムの把握と摩耗素子生成過程

移着成長が確かに起こっていることは認められたが、移着素子(以下、摩耗素子と呼ぶ)がどのように発生するか疑問とされてきた。三科と長谷らは、走査型プローブ顕微鏡(SPM)を用いて摩擦面上に生成する摩耗素子の観察を行っており^{17),18)}、図6はその原子間力顕微鏡(AFM)観察の一例である(図中の数値は高さ)。これより、(a)摩擦前の研磨痕のみの状態に対し、(b)摩擦後では摩擦により生成した摩耗素子(図中▷印)とその集合体である移着粒子(▶印)が確認できる。異なる材料を用いた場合や潤滑下においても、同様にして摩耗素子および移着粒子が確認されている。分子動力学(MD)を用いた金属の凝着シミュレーションにおいても原子レベルの移着現象が確認されている^{19),20)}。また、木塚ら²¹⁾やMerkleら²²⁾による透過型電子顕微鏡(TEM)を用いた直接観察の実験研究においても、金属同士の接触、引き離しによって、微視的なスケールの移着現象が観察されている。図7は、純鉄同士を大気中・無潤滑で1回のみ摩擦させ、摩擦距離30 μm ほどの摩擦面のAFM観察を行った結果である²³⁾。この結果から、摩擦距離の増加とともに移着粒子の数・大きさが増大していくことが確認されている。このように微視的な

図6 摩擦面上に生成した摩耗素子の観察結果〔Fe/Fe, (a) 摩擦前, (b) 摩擦後, 図中の数値は粒子の高さを示す〕⁹⁾

AFM 観察からも移着成長過程の妥当性が裏づけられる。

長谷らは、様々な純金属の組合せで微小すべり摩擦実験を行い、その摩擦面のAFM観察・分析から生成した摩耗素子および移着粒子の粒径分布や生成量を定量的に調査している。粒径分布の調査結果から、分布に多少ばらつきはあるものの、金属の種類に関わらず材料固有の摩耗素子径がそれぞれ10～30 nmに存在することを明らかにしている。図8(a)は、摩耗素子の生成量(単位面積あたり)と凝着力の関係である²⁴⁾。これより、摩耗素子の生成量が組み合わせた材料間

(a) 摩耗素子生成量と凝着力の関係

(b) 移着粒子生成量と相互溶解度の関係

図8 金属の組合せによる摩耗素過程と諸因子の関係

図7 AFMによる微小摩擦距離ごとの摩耗素子および移着粒子の生成状態観察〔Fe/Fe, (a) $l = 30 \mu\text{m}$, (b) $60 \mu\text{m}$, (c) $90 \mu\text{m}$ 〕

図9 摩耗素過程からマイルド摩耗およびシビア摩耗への移着成長過程モデル

の凝着力と比例関係を示すことがわかっている。また図8(b)は、移着粒子の生成量(単位面積あたり)と相互溶解度の関係を示したものである²⁵⁾。移着粒子は、摩擦させた相互の材料の混合物であることから、このような相関が得られると考えられている。

ここで、直径10～30 nmの摩耗素子がどのように生成するか、そのメカニズムを掘り下げてみよう。摩擦時の表面直下で生じる変形過程の直接観察により、塑性変形に伴ってすべり線が生成し、交錯していく様子が観察されている²⁶⁾。それに加え、塑性変形時の表面近傍において、数十nm間隔で微視的なすべり系(エレメンタリスリップと呼ばれる)が発生するといわれている²⁷⁾。これらの実験事実から、長谷らにより図9に示す摩耗素子生成モデルが考案されている²⁴⁾。まず、(i)表面突起が互いに接触し、ジャンクションを形成する。つぎに、(ii)垂直応力および摩擦応力の作用に伴う塑性変形により、エレメンタリスリップが生成・交錯する。このすべり線によって囲まれた領域は、バルク内部に比べエネルギー的に低くなっていると推測される。よって、(iii)微小なすべり線によって囲まれた微細領域がジャンクション破断時に凝着力によって取り去られることで、摩耗素子が生成する。これが、凝着力と摩耗素子生成量が比例関係にある理由とされている。その後、(iv)摩耗素子が合体・集合し移着粒子を形成する移着成長過程へと繋がっていく。このように、ナノスケールの微視的な摩耗メカニズム研究も摩耗素過程の解明に貢献している。

3.3 現在の摩耗メカニズム研究から導かれる摩耗式

摩耗理論の確立に向けて、摩耗メカニズム研究から明らかになった事象を摩耗式へ導入しなければならない。見かけの接触面内に N 個のジャンクション(平均半径 a)が存在し、

ジャンクションが摩擦によって破断する際に半球体(平均半径 b)の摩耗素子(体積 ΔV)が生成すると考えると、摩耗量は $V = N \cdot \Delta V \cdot l / 2a$ と表すことができる。このとき、 $\Delta V = (2/3) \pi \cdot b^3$ 、 $A_r = \pi N \cdot a^2 = P/p_m$ を用いれば、摩耗式は以下になる。

$$V = (1/3) (b/a)^3 \cdot P \cdot l / p_m \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

これより、摩耗係数は $Z = (1/3) (b/a)^3$ と表され、そこに確率の概念は入っておらず、ジャンクションと摩耗素子の大きさの比となる。笹田は移着成長過程における真実接触部 $2a$ と粒子離脱部 $2b$ (摩耗素子直径)の比 b/a を用いて論議しており、シビア摩耗($b/a = 1/2 \sim 1/5$)とマイルド摩耗($b/a = 1/20 \sim 1/50$)では、摩耗素子の大きさが変化すると考えている²⁸⁾。これは、摩耗素子の大きさが異なることで、移着成長の速度に差が生じてシビア摩耗とマイルド摩耗が起こると解釈できる。しかしながら、実験的に摩耗素子の大きさは多少のばらつきはあるが一定値と考えることができる。そのため、摩耗素子の大きさが変化するのではなく、生成量が変化すると考えることができよう。

そこで、三科と長谷は摩耗の素過程における摩耗素子生成量の概念を取り入れ、以下のように新たな摩耗式を導出している²⁹⁾。まず、半球体(平均半径 r)の摩耗素子(体積 $\Delta V = (2/3) \pi \cdot r^3$)が摩擦距離 l の間に N 個のジャンクション(平均半径 a)において生成する摩耗素子数を n 個とすると、摩耗量は $V = n \cdot \Delta V \cdot N \cdot l / 2a$ で表される。

表面の化学吸着活性がシビア摩耗とマイルド摩耗を左右する大きな因子であることは先に述べたが、このメカニズムは図9に示すように雰囲気物質が摩擦面や摩耗素子に吸着することによって、移着成長過程に差が生じると考えられてい

る³⁰⁾。すなわち、雰囲気物質が真実接触面積の大きさ(摩耗素子の生成および移着粒子の脱落に関係)と摩耗素子が集合・成長する際の速度を決めるのである。雰囲気物質は、無潤滑下(乾燥摩擦下)であれば表面に化学吸着する気体分子であり、潤滑下であれば潤滑剤である。ここで、摩擦材料の吸着活性が高く、雰囲気物質の表面への作用が大きいほど摩耗は少なくなるため、係数 λ を導入した摩耗量 V は、 $V = (n/\lambda) \Delta V \cdot N \cdot l/2a$ と表される。ここで式(3.1)と同様に、

$$V = (1/3) (n/\lambda) \cdot (r/a)^3 \cdot P \cdot l/p_m \dots\dots\dots (3.2)$$

の摩耗式を得ることができる。潤滑下では摩耗素子の生成が抑えられることが実験的にも確認されており²⁴⁾、境界潤滑では $\lambda = 10 \sim 10^2$ 、流体潤滑では $\lambda = 10^3$ 以上と考えられている²⁹⁾。以上のように、凝着摩耗の摩耗式は凝着に関する因子 n と雰囲気物質との化学的因子 λ によって表される。

4. おわりに

基本的な摩耗メカニズムの把握と対策は、機械システムにおける技術的問題解決のみならず経済効果の向上を図ることができる。さらには、摩耗メカニズム研究から導かれる摩耗理論の確立から、低摩擦・低摩耗となる最適なトライボ設計が可能となり、大きな省エネルギー・省資源すなわちグリーンイノベーションへと繋がっていく。現在の多岐にわたる摩擦材料やその表面処理技術に対して、実用時にいかなる摩耗現象が発生し、どのような問題に繋がるか、その予測は困難とされている。その摩耗メカニズムの研究には大きな労力と時間を費やすことは事実ではあるが、基本的な摩耗メカニズムの解明と理解こそが表面技術のさらなる発展へのプレイクスルーに繋がると信じている。

(Received October 10, 2014)

文 献

1) E. Rabinowicz ; *J. Appl. Phys.*, **22**, 1371 (1951).

- 2) J.F. Archard ; *J. Appl. Phys.*, **24**, 981 (1953).
- 3) R. Holm ; *Electric Contacts*, Stockholm, p. 214 (1946).
- 4) 長谷亜蘭, 三科博司 ; トライボロジスト, **59**, (5), 283 (2014).
- 5) 笹田 直, 野呂瀬 進, 外丸雅美, 三科博司 ; 潤滑, **23**, 519 (1978).
- 6) 三科博司, 笹田 直, 野呂瀬 進, 蒔田裕之 ; 潤滑, **24**, 585 (1979).
- 7) 笹田 直, 野呂瀬 進, 三科博司 ; 潤滑, **22**, 169 (1977).
- 8) T. Sasada, S. Norose ; *Proc. JSLE-ASLE Int. Lubrication Conf.*, 1975, Elsevier, Amsterdam, p. 82 (1976).
- 9) 三科博司, 河野彰夫, 赤松良信 ; トライボロジスト, **48**, (4), 307 (2003).
- 10) E. Rabinowicz ; *Friction and Wear of Materials*, John Wiley & Sons. Inc., p. 151 (1965).
- 11) 笹田 直 ; 千葉工業大学研究報告 理工編, **46**, 49 (1999).
- 12) 三科博司, 蒔田裕之, 笹田 直, 野呂瀬 進 ; 潤滑, **24**, 466 (1979).
- 13) B.M.W. Trapnell ; *Proc. R. Soc., A* **218**, 1135, p. 566 (1953).
- 14) 平塚健一 ; 物性研究, **81**, (6), 872 (2004).
- 15) K. Hiratsuka, K. Muramoto ; *Wear*, **259**, 467 (2005).
- 16) A. Hase, M. Wada, H. Mishina ; *Tribology Online*, **3**, (5), 298 (2008).
- 17) H. Mishina, A. Hase, T. Nakase, M. Dohi ; *J. Appl. Phys.*, **105**, 093911, 1 (2009).
- 18) 長谷亜蘭, 市本大和, 小林英樹, 新井里美, 大森達夫, 三科博司 ; 第12回埼玉工業大学若手研究フォーラム論文集, p. 162 (2014).
- 19) U. Landman, W. D. Luedtke, J. Gao ; *Langmuir*, **12**, 4514 (1996).
- 20) 長谷亜蘭, 三科博司 ; 埼玉工業大学工学部紀要, **23**, 3 (2013).
- 21) T. Kizuka ; *Phys Rev Lett*, **81**, 4448 (1998).
- 22) A.P. Merkle, L.D. Marks ; *Wear*, **265**, 1864 (2008).
- 23) A. Hase, H. Mishina ; *Proc. of World Tribology Congress 2009*, Kyoto, p. 225 (2009).
- 24) A. Hase, H. Mishina ; *Tribology International*, **42**, 1684 (2009).
- 25) 長谷亜蘭, 三科博司 ; トライボロジー会議予稿集 東京2010-5, p. 63 (2010).
- 26) A. Hase, H. Mishina, M. Wada ; *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, **3**, (4), 333 (2009).
- 27) J.D. Verhoeven ; *Fundamentals of Physical Metallurgy*, John Wiley & Sons, Inc., New York (1975).
- 28) 笹田 直 ; 千葉工業大学研究報告 理工編, **51**, 33 (2004).
- 29) H. Mishina, A. Hase ; *Wear*, **308**, 186 (2013).
- 30) H. Mishina ; *Wear*, **180**, 1 (1995).