

バブルモデルによる摩耗のシミュレーション

千葉工業大学
平塚 健一

1. 凝着摩耗の特徴

摩擦によって材料の表面が減量していく「摩耗 (Wear)」は、その機構から Adhesive wear, Abrasive wear, Surface fatigue, Corrosive wear の四つに大きく分類される[1]. その中で, Adhesive Wear すなわち凝着摩耗は最も一般的に見られる摩耗形態であるが, その機構は充分明らかになっていないとはいいい難い[2]. その原因は, この名称の矛盾した表現にある. すなわち, 凝着とは二面がくっつくことであり, 摩耗とは逆に二面から離れることである. つまり凝着は摩擦力発生の原因にはなっても, それのみでは摩耗粉生成の機構にはならないのである.

しかし現実凝着摩耗においては,

- 1) 両面がくっつきやすい組み合わせほど摩耗する,
- 2) 摩耗粉は両摩擦材の混合物である,
- 3) 潤滑すると摩耗が減る,

などの特徴から, その根本原因は凝着作用であるといえる (凝着作用がなければ鉛筆やチョークで字を書けない). そこで凝着摩耗機構を解明するためには, 二面の「凝着」から, 独立した「摩耗粉生成」までを段階にわけて理解する必要がある.

摩耗の過程を見てみよう. 直径2mmの錫を回転する錫円板に押しつけたときの挙動について, 電子顕微鏡で観察した様子を図1に示した. 実際にはすべり距離375mm 空气中で摩擦させ, 試験を停止し真空にして同一箇所を観察している. (1)から(4)へと摩擦が進行するにつれ, ピンと円板の界面に新たな物質が次第に大きく生成されている (酸素中でこの現象が顕著に生じる). こ

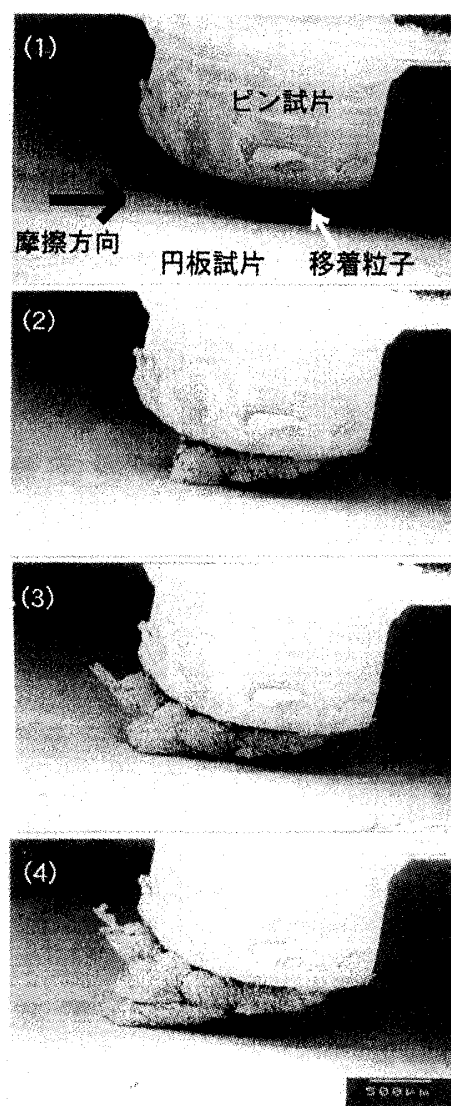


図1 スズピン対スズ円板間で成長する移着粒子のSEM内その場観察, 摩擦距離375mm 毎, 摩擦速度 = 2.5mm/s, 荷重 = 2.7N

これは、円板表面からの移着物が次々と堆積したものである*)。図中、移着粒子とよんでいるのは、これが面から独立したものではないからである。摩耗粉とは、このように界面に堆積したものが、ある時点で摩擦方向後方に押し流され独立したものである。以上より、接触から摩耗粉生成までの各段階は次のようにまとめられる。

接触→凝着→移着→さらに移着→逆移着（界面から離脱）→摩耗粉生成（表面から離脱）

図1に示された過程はこの中の「さらに移着」の段階である。そこでは、界面にピン・円板以外の第3の物質が生じたが、それは同じ金属同士の摩擦の結果であったことに注意したい。なぜなら同じ材料、たとえばバター同士を摩擦させても、面間にはこのような物質は発生しないからである。バターの場合は、各々の表面から他方へと移着するため界面に堆積しない。それに対して金属同士では、移着粒子への移着が次々に生じ、界面に堆積する。このことから凝着摩耗における摩耗粉生成機構のポイントは、移着が移着粒子へと一方的に生じる不可逆過程の存在であるといえる。

筆者は、この不可逆過程の原因を、界面部が加工硬化や雰囲気気体の固溶体硬化によってせん断強くなるからだとして解釈している[5]。凝着摩耗機構のより深い理解のためには原子レベルでの解析、つまりMD (Molecular Dynamics)やAFMによる解析[6]の必要がある。しかし筆者は手軽に現象を可視化できる手法として、バブルモデルによるシミュレーションを試みた[7]。以下にそれを紹介する。

2. バブルモデルによる摩耗のシミュレーション

水面上に浮かべた均一な泡集団を原子に見立て、それら同士を相対的にすべらせ摩擦のシミュレーションをする研究は古い[8,9]。しかしながら、凝着摩耗をシミュレートしたものはない。筆者はお茶を点てる際に水面上を泡が茶筌と共に動くことに気づいた。これは、泡がついていくものを使えば泡集団の一部を除去できること、つまり泡の「移着」や「摩耗」を作り出せることを意味する。茶筌と同様の機能をここでは発泡スチロールの球で実現させた[10]。

図2は、直径1.5mmの泡の集団（固定子）の境界線より内側に、等間隔で直径6.0mmの

*) この様子をピンが円板を削っている、と表現することもできよう。実際に円板は削られている。しかし、この場合、削られたものは摩擦界面外に排出されず、削る方であるピン表面に次々と堆積している。もっと正確に言えば、削られたものが次の瞬間には削るものへと転換している。これと明らかに対比されるのはアブレシブ摩耗である。その場合、削られたものは削るもの（刃物）にはならず、刃物は常に刃物である。また、刃物が相対的に動けば削られたものは刃物の前方（すくい面）に押し上げられ、つまり摩擦面から外に排出され、連続的に摩耗粉になり続ける[3]。また、両者の摩耗に対して潤滑剤の働きは正反対である。すなわち、凝着摩耗において、潤滑剤は両者の凝着を妨げ、摩耗を抑制するものであるが、アブレシブ摩耗では摩耗を促進する[4]。

球状発泡スチロールを浮かべて、その境界を同じ直径を持った泡のもうひとつの小さな集団（移動子）で摩擦したものである。移動子のフレームは固定子の中にまで押し込まれてはいない。小泡集団を大泡集団の境界線に沿って移動させると、大泡集団中の発泡スチロール球とその周囲の泡が、ともに小泡集団に引きつられて移着する。大泡集団中の泡が小泡集団へと移動したことになる。しかしながらこの現象は、図3のように「球」を直径6.0mm発泡スチロールの「円板」に代えると生じない。また泡のみの場合も生じない。

泡集団の移着の原因は、発泡スチロール球のまわりの結晶性が乱されて泡同士の結合が弱くなったためではない。逆に、球浮き子の導入によってそのまわりに、引張りやせん断に対する抵抗の大きな場が形成されたためである。以下にそれを説明する。

図4に泡同士の引張り試験を、球や円板を導入した場合と比較した。泡のみの場合、片方のフレームを軸方向に変位させると、それにつれ他方に発生する力は段階的に低下する。これは変位するにつれ、フレーム間で泡の再配列が生じたためである。円板の場合にはそのような段階的な減少はないが、最大引張り力は泡と同程度である。それに対して球を配置した場合は、最大引張り力は約3倍にまで大きくなる。この原因は球間の隙間が狭いために働くラプラス力

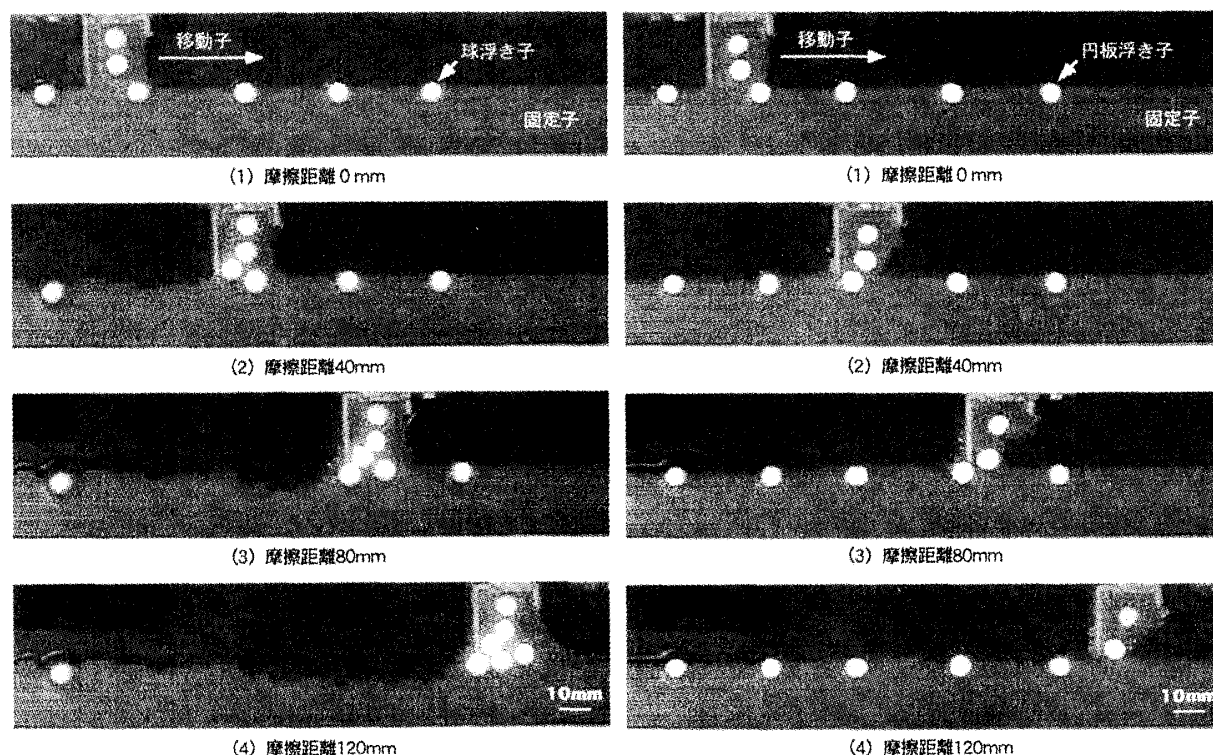


図2 球浮き子を泡の境界につけた場合の泡集団の移着の様子，摩擦速度＝2.0mm/s，移動子フレームの泡集団への押し込み深さ＝0mm

図3 円板浮き子を泡の境界につけた場合の泡集団の移着の様子，摩擦速度＝2.0mm/s，移動子フレームの泡集団への押し込み深さ＝0mm

と、球間と球外での水の高さの違いによる球に働く水平力の差による。

図5にフレームを横に変位させた場合のせん断試験の結果を示した。この場合も球浮き子を配置した方が、泡同士、あるいは円板浮き子を配置した場合よりもせん断強さは2倍程度に大きくなる（泡のみの場合、泡の周期に対応してスティック・スリップが現れる）。

これらの実験結果から、フレームで押し込まなくとも球と泡が取り去られた（移着が進行した）のは、球周囲において引張りやせん断に対する抵抗が大きくなったためであることが理解された。円板の場合に移着しなかったのは、その周囲が泡同士以上の引張り強さやせん断強さを持たなかったからである。

移動子のフレームを発泡スチロール球および円板の直径の1.5倍つまり9mmの深さにまで泡中に押し込んで、図2、3と同様の実験をおこなった。移着した泡の数をグラフにしたのが図6である。どちらの

場合も移着した泡の数は摩擦距離に比例し、かつその両者に差はなかった。また、フレーム押し込みなしの場合の移着した泡の数もあわせて示した。円板や泡のみの場合、摩擦しても泡は移着しなかったことはこの図からも確認される。一方、球を用いると移着した泡の数は摩擦距離の2乗に比例した。

これらの現象を摩擦機構の観点から整理してみる。円板や球の直径の1.5倍の深さにまでフレームを押し込んだ場合は、その深さから強制的に泡を除去しているの、これはアブレシブ摩擦に対応す

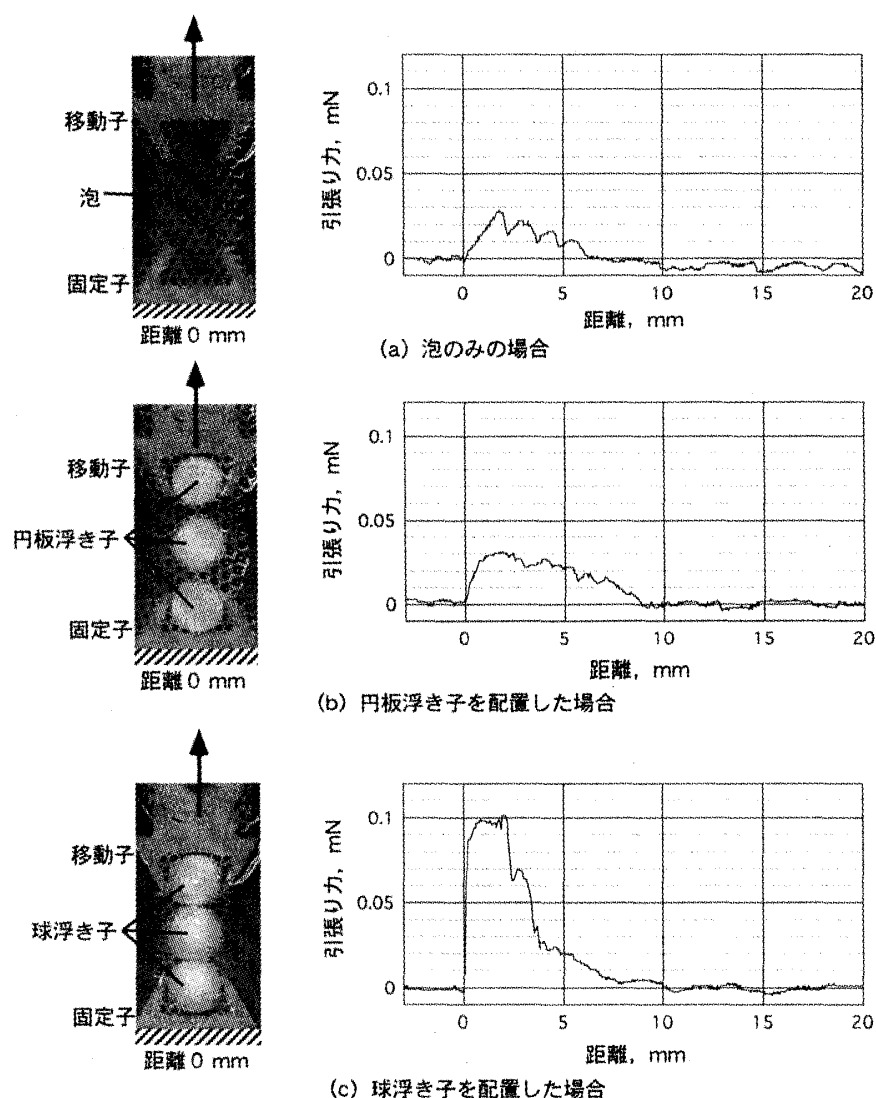
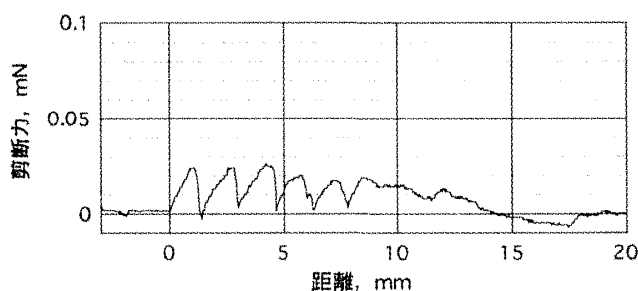
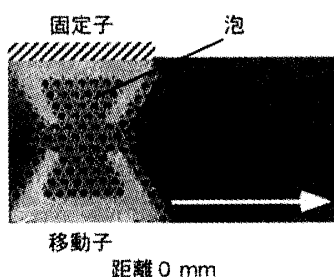


図4 各種浮き子がある場合の泡集団の引張りに伴う力の変化、引張り速度＝0.5mm/s

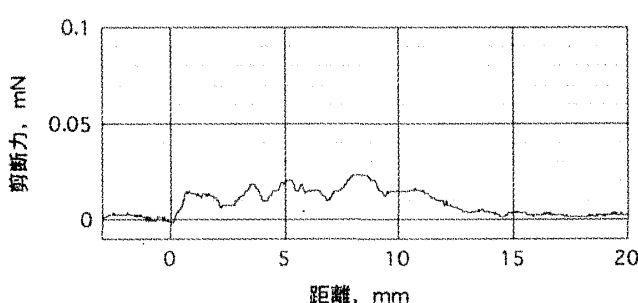
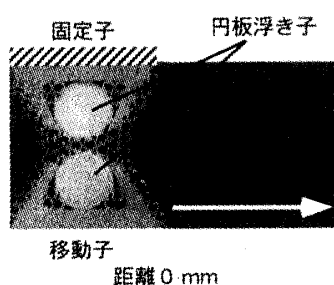
る. その場合の泡除去量は引張りやせん断に対する抵抗の大きさには無関係になる. 一方, 球の周りに存在する引張り・せん断抵抗の大きな場によって, 境界よりも内部から泡が移動する現象は, 刃物の押し込みがなくとも摩耗することを示している. これは凝着によって材料が移りつく凝着摩耗に対応する. ただし, 移着を引き起こす原因は単なる凝着力ではない. それは, 内部よりも界面の方が, 引張り強さ, せん断強さが, 大きいことにある. すなわち二つの面が凝着したとき, 界面からせん断破壊が生じないのは, その部分がせん断に対して強いからである. その結果, 内部破断によって移着が生じる. また一度生じた移着粒子へと移着が続くのは, 移着粒子内部がせん断強くなっているからに他ならない. このように泡集団の機械的性質を部分的に変化させることによって凝着摩耗の重要な段階である移着粒子の成長過程を再現できた.

3. 凝着摩耗の機構

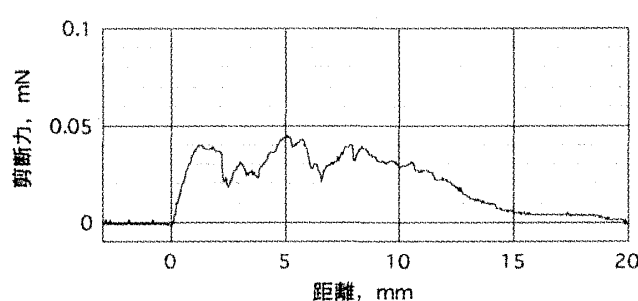
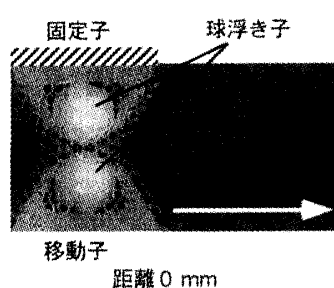
以上見てきたように, 凝着摩耗において刃物は存在していないのに表面部分が移着するのは, 界面がせん断強くなりその部分が破断されずに内部から破断が生じるからである. 空气中で摩擦した場合, 新生面はすぐさま空気に触れて, 酸素が吸着あるいは固溶, 酸化にまで進む状態が得られる. そのため



(a) 泡のみの場合



(b) 円板浮き子を配置した場合



(c) 球浮き子を配置した場合

図5 各種浮き子がある場合の泡集団の摩擦に伴うせん断力の変化,
摩擦速度 = 0.5mm/s

繰り返して摩擦してもその度に移着が生じる。移着粒子は常に酸素にさらされているために固溶・酸化が進みせん断強さを保持できる。そのため移着粒子へと一方向の移着が生じる。そのままでは移着粒子は次第に大きくなる一方であるが、大きくなるにつれ、その両端にかかるモーメントも大きくなるので適当な大きさで破断が生じ、界面から外へ排出される。そしてどちらの面からも離れた時にそれは摩耗粉とよばれることになる。

凝着摩耗機構のポイントは移着粒子の成長過程である。それは一般的にいえば、動けば動くほどまわりの物質がそこにまとわりついてくる現象だといえる。その例は身のまわりでも多数見られる。たとえば、わたアメ、毛玉、垢、雪だるま、消しゴムかすの生成[11]などである。また、一度相手側につく

と次の瞬間から元の側を攻撃するようになるのは将棋のルールに似ている。凝着摩耗への興味が尽きないのはこのように、日常の現象にそれを発見するからであろう。

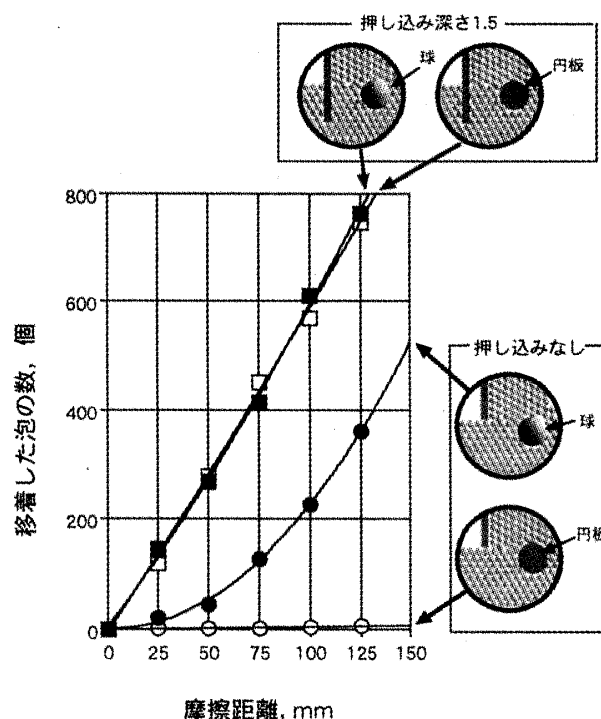


図6 球および円板浮き子が存在する場合の2種類の押し込みによる泡集団の移着量、
摩擦速度 = 2.0mm/s

参考文献

- [1] Encyclopaedia Britannica, <http://www.britanica.com>
- [2] 日本トライボロジー学会編, トライボロジー辞典, 養賢堂 (1995)
- [3] 白井英治, 白樫高洋著, 加工の力学入門 (1996) 東京電機大学出版局, 118
- [4] 笹田直, 尾池守, 潤滑, 27, 9, (1982) 703
- [5] K.Hiratsuka & M.Goto, Wear, 238 (2000) 70
- [6] B. Bhushan, J. N. Israelachvili & U. Landman, Nature, 374, 13 April (1995), 607
- [7] K.Hiratsuka, Y.Abe & K.Fujisawa, 25th Leeds-Lyon Symposium on Tribology Elsevier Science Pub. (1999) 475
- [8] L. Bragg & J. F. Nye, Proc. Roy. Soc. London, A, 190, (1947) 474
- [9] J. M. Georges, G. Meille, J. L. Loubet & A. M. Tolen, Nature, 320, (1986) 342
- [10] 阿部有美子, 平塚健一, トライボロジー会議予稿集 (高松) (1999) 309
- [11] 平塚健一, 固体物理, 35, 10 (2000) 852