雰囲気と摩耗*

笹田 直**

Effect of Environmental Atmosphere on Wear of Metals / Tadashi SASADA

Key words: adhesive wear, environmental atmosphere, chemisorption of gas molecules, severe wear, mild wear, severe-mild wear transition, antiwear property of solids

1. はじめに

固体の摩耗において、摩擦する相手方の材質によりその摩耗量および摩耗の形態が著しく相違することはよく知られている。相手方が硬く、さらに表面粗さが大で、その表面突起をもって削る、アブレシブ摩耗と言われる摩耗形態においては、いわば刃物の役割をする相手方の材質は摩耗にさほど大きな影響を及ぼさない。ところがこれに対し、“くっついて千切れる”凝着摩耗¹⁾においては、摩擦する相手固体との間の化学的・金属学的相互作用が摩耗に著しい影響を及ぼし、相手方の材質(図1のB)を言わずにそのもの自体(A)の耐摩耗性を云々することにほとんど意味がない。

しかしながら摩耗に関与する物質はA, Bの2固体だけではない。その周囲に雰囲気Cが存在する。Cはいわゆる乾燥摩擦の場合には気体であるが、液体の場合もあり、また液中に酸素が溶存している場合もある。そして摩擦面間で生ずる物質の変化、ならびに力学的作用に対し、A, Bとともに雰囲気Cが関与するのである。

固体の広い意味の表面変化に対し、雰囲気が影響す

るのは摩耗に限ったことではない。たとえば固体の破壊に対して雰囲気は影響を及ぼす。破壊とは固体の中のある原子(例えばFe)の隣の原子(Fe)が離れてゆく、ということではなく、隣が別の原子(例えばO)によって置き替わる現象だからである。この、破壊に対する雰囲気の影響は、固体の体積に比べてその表面積の大きな現象ほど強く現れる。摩耗はその代表的な例であって、たとえば後述するマイルド摩耗粉1個の大きさは100 Å程度であり、このような小粒子を母表面から分離するのに(分離しただけでそれがそのまま1個の摩耗粒子になるのではないが²⁾)表面突起を一種の試験片と見なした普通の材料試験を想像するのではあまりにも現実とかけ離れているのである。

そのようなわけで、摩耗は摩擦し合う2固体A, Bのみならず雰囲気Cの影響を受ける、いやむしろ雰囲気Cによって支配される、と言ってよい。常にA, B, C三者が“物質として”、つまり化学的に作用し合って摩擦が生じ、それに伴って摩耗を生ずるのである。

A, B: 摩耗材, C: 雰囲気
図1 摩耗に関与する物質

* 原稿受付 平成4年12月21日

** 千葉工業大学(習志野市津田沼2-17-1)

1954年 東京大学工学部精密工学科卒。
日本精工、東大航空研究所、東工大工学部を経て1991年より現職。工学博士。
トライボロジーおよび医工学を専攻。主著「バイオトライボロジー」(産業図書、1988)

2. 雰囲気とともに摩耗はどう変わるのか？

それならば雰囲気が全くない環境の下で固体を摩擦したら摩耗はどうなるのか。厳密にこの状態を想像することはいささか難しい。化合物は一般に雰囲気圧力が低下すると分解するから、単体を考える必要がある。元素単体から成る固体でもそれ自身の蒸気圧を有するから、完全真空中に固体が存在するのは絶対零度に限られることになる。こう言うことは話が進まないから、ともかくも元素単体が、いわゆる真空中、すなわち地球上で技術的に作られた減圧気体中で摩擦される場合を考えよう。

この場合、摩擦係数は無限に大きくなる。少し詳しく言うと、全見掛け接触面にわたって2固体の凝着が生じ、摩擦抵抗は2固体の弱い方のバルクのせん断抵抗になってしまう³⁾。これではそもそもすべりという現象が生じないのであるから、摩耗は考えようがない。

この想像は事実に近い。いわゆる超高真空中で純金属清浄面同士を摩擦すると摩擦抵抗は極めて大で、摩擦係数にして（このような場合、“係数”という概念が成立するわけではないが、仮に摩擦抵抗を荷重で除して） $f=5$ とか 10 とかいう値になることが知られている。この場合、金属同士は凝着が著しく、摩擦面は大いに荒れるが摩耗粒子はほとんど生成されない。固体Aが相手方Bに移着する、あるいはその逆、ということはあるが、粒子が脱落しないのであるから両者を合わせた体積減量すなわち摩耗量はほとんどゼロに等しい。

雰囲気が存在しない場合、固体の新たに作られた表面の活性を中和するものは相手方の固体、あるいは仮に遊離した粒子だけであり、従ってそれは表面に移着という形でとり込まれてしまい、生じた粒子は系外に脱落出来ない。言葉を変えると、摩耗粉が脱落し、摩耗量という体積減量が生ずるためには雰囲気がなくてはならないということであって、雰囲気はその意味で摩耗に対して単なる一作用因子以上の働きをするのである。

さて、雰囲気が豊富になるに従って摩耗率は増大する。図2は雰囲気圧力をパラメータとして繰返し摩擦回数に対する摩耗量の関係、いわゆる摩耗進行曲線を描いたものであるが、普通の繰返し摩擦方式の場合、横軸

図2 雰囲気圧力をパラメータとした摩耗量と摩擦繰返し数

初期においては母表面から離れた小粒子（移着素子²⁾）は相手方に移着するのみで脱落せず、そのため摩耗率が極度に低い。ある摩擦距離の後、移着粒子が大型に成長して脱落を始め²⁾、ここから摩耗量という体積減量が始まるが、高真空中においては図の(1)に示すように摩耗量は極めて少ない。

雰囲気圧力が増すと、新しく破断して生じた新鮮な固体表面に雰囲気気体分子が吸着し、摩擦面間に生じた粒子の移着を妨げ、その脱落を容易にするため、摩耗量が(2),(3)と増大してゆく。この場合、生ずる摩耗粒子は2固体の間で再移着を繰り返して集合成長した大型金属様の粒であり、表面は吸着酸素で覆われているというものの、内部まではほとんど酸化されていない。また2固体A,Bが異物質である場合、一般にはこれら粒子1個1個はそれぞれ両物質の混合物である²⁾。この事実、母表面の突起が摩擦によって切断されたものがそのまま摩耗粒子となったものではないことを意味している。この粒子形成の詳細は別に述べた²⁾⁴⁾ので省略するが、母表面からの小粒子（移着素子）の相手面への移着→摩擦の進行によりこれら小粒子の摩擦面間における集合成長→大型の移着粒子→その脱落（摩耗粒子）という過程を経るのである。

図3(a)に高真空中で得たNi/Ni摩擦による摩耗

(a) 摩耗粒子

(b) 摩耗痕

図3 8×10^{-4} Pa 真空中、Ni/Ni 摩擦で得た摩耗粒子と摩耗痕

図4 大気中、Ni/Ni 摩擦初期に得たシビア摩耗粒子と、遷移後発生したマイルド摩耗粒子

粒子を掲げた。全摩耗量は少なく、従って粒子の数は極めて少ない。また (b) はその場合の Ni 摩擦痕である。凝着してひき千切られた様子がわかるであろう。図4 (a) は多少雰囲気圧力を高めて得た Ni の摩耗粒子である。図3 (a) と同じ大型金属様の粒子だが、その総量はやや多い。

ところが雰囲気圧力を更に高めると (図2 (4)), 新しい現象が発生する。それはシビア・マイルド摩耗遷移と呼ばれる現象、つまり、ある摩擦繰返しの後、突然極めて微細な摩耗粉を生じ、摩耗率もそれまでの1/100 以下となるマイルド摩耗に遷移するのである。この状態で生じる摩耗粉の例を図4 (b) に示す。粒径は固体の種類によって異なるが、大略 $1\mu\text{m}$ 以下、Fe の場合は $0.01\mu\text{m}$ にも達する。微細なために酸化したのか、それとも酸化した層が摩耗粉となったのか、議論は分かれるところだが、とにかく内部まで酸化している。これに伴って摩耗面もこの転移以降、平滑になってゆく。

この遷移はかなり突然に現れる。図2 (4) よりもっと雰囲気の希薄な状態 (3), (2), (1) でも、繰返し摩擦回数を増せばこの遷移は現れるのかもしれないが、実験の場合は通常ある繰返し数 n_0 で試験をやめるから、全摩擦距離にわたってマイルド摩耗が現れないように見えるのである。この、マイルド摩耗に遷移する以前の、摩擦の初期にあらわれる金属様大型の摩耗粒子を伴い、摩耗面の荒れがはなはだしく、摩耗率の (マイルド摩耗に比べて) 高い摩耗形態をシビア摩耗と称している。

さらに雰囲気圧力が高い場合には、図2 (5), (6) と、初期にあらわれるシビア摩耗の摩耗率は高く、その期間は短くなり、マイルド摩耗に早期に移行するようになる。前述のごとく普通、摩耗試験の場合、摩擦距離あるいは摩擦繰返し数 n_0 は一定にとるから、この n_0 における摩耗量を雰囲気圧力に対してプロットすると図5 のようになり、三科の描いた実験結果⁵⁾ と

一致する。雰囲気はこのように摩耗に対してシビア摩耗率を高めるとともにその期間を短縮させ、マイルド摩耗に遷移させる効果を示し、結果として図5 のように摩耗を増大させたり、あるいは減少させたりする。

さて、今まで、単純に雰囲気という言葉を使っていたが、ふつう最も強く影響を及ぼすのは酸素である。これは酸素の金属

に対する吸着活性が高く、また化合物 (酸化物) 生成が他の雰囲気成分より容易であるという事実によるものと考えられる。酸素以外の気体に関しても摩耗に対する効果は若干しらべられてはいるが⁹⁾、酸素を完全に排除した状態を得ることが難しく、その報告は多くない。

シビア・マイルド摩耗遷移がなぜ生ずるのか、という問題は、世界中で幾人かの有力な研究者が取り組んでいるにもかかわらず、まだ解決していない。ただ、少なくとも以下の事実はこの問題の鍵となっていると思われる。

- i) シビア・マイルド摩耗遷移をもたらすに要する摩擦期間は摩擦距離ではなく、同一個所の摩擦の繰返し数である、ということ。すなわち過去の摩擦で作られた移着層の上を更に摩擦することによってこの遷移が現れる。常に新しい相手面が現れるような摩擦形式では永久にシビア摩耗が続く。
- ii) 図2 からわかるように、マイルド摩耗が現れるためには雰囲気酸素が絶対必要である。
- iii) 元素単体同士を摩擦する場合、マイルド摩耗が現れるためには少なくとも一方の固体が遷移金属であることが必要である⁹⁾。非遷移金属同士で

図5 摩擦繰返し数 n_0 における全摩耗量と雰囲気圧力

はたとえ繰返し摩擦を行ってもマイルド摩耗は現れない。

以上の事実から筆者は、マイルド摩耗は摩耗に際して生じた新鮮表面に対する雰囲気酸素分子の化学吸着 (chemisorption) によるものであると推定している⁶⁾。とくに上の iii) は重要で、細かい酸化物摩耗粉を生ずるマイルド摩耗の現れるのは、酸化しやすいと考えられている Zn や Al (いずれも非遷移金属) ではなく、化学吸着に活性の高い Fe, Ni, Pt (いずれも遷移金属) だからである。

シビア・マイルド摩耗遷移に関して、実用上の材料の耐摩耗性の観点から一言付け加えておきたい。大気圧下の乾燥摩耗において、シビア摩耗とマイルド摩耗とはその摩耗率が通常数百倍は異なる。したがって耐摩耗材料とはなるべく早い時期 (少ない摩擦繰返し) にシビア・マイルド摩耗遷移の起こるような材料にはかならない。シビア摩耗,あるいはマイルド摩耗の中で摩耗率が多いの少ないのと言ってもそれは微々たる問題に過ぎないのである。マイルド摩耗を生ずる原因が気体の化学吸着,すなわち遷移元素の d-electron に在るとするならば,耐摩耗材料とはこの d-character に準ずる性質を備えている必要がある。このような観点から, f-character の希土類金属, 半導体およびある種のセラミックス, atomic configuration の不安定なアモルファスおよび焼入鋼, それに金属間化合物などがいわゆる耐摩耗材料として取り上げられるのである⁷⁾。

3. 摩耗に伴う雰囲気酸素分子の吸着

摩耗に際し新しく作られた表面に化学吸着し, 雰囲気酸素が消費されることを筆者らは最近実証した。図 6 がその結果⁸⁾で, 同種純金属同士を同一条件の下で繰返し摩擦させ, シビア摩耗の範囲で周囲の酸素の消費量を測定したものである。当然ながら摩耗率は金属によって異なり, かつ摩耗粒子の形や大きさも異なる。したがって図 6 は単位表面積あたりの酸素吸着量を示すのではなく (それは例えば Trapnell の研究⁹⁾などで既に知られている), それまでに摩耗によって作られた全表面に対する吸着量を表すものである。

図 6 を見て, 直ちに気付くのは, 希土類の吸着が著しく大であることである。それに次いで, 遷移金属の気体吸着が多い。Ag, Zn, Sn などの非遷移金属ではほとんど吸着が測定されなかった。

このシビア摩耗状態で酸素吸着の多い金属において

酸素圧力 1.2×10^{-4} Pa, ピン/回転円板摩擦形式, 荷重 4.2 N, 摩擦速度 42 mm/s

図 6 同種金属同士のシビア摩耗における酸素吸着⁸⁾

のみ, マイルド摩耗出現の可能性を有するのである。このことは遷移金属とくに希土類がシビア・マイルド摩耗遷移を生じやすい理由がその雰囲気酸素吸着活性にあるとした既述の推論の裏付けでもある。

4. おわりに

以上, 固体の凝着摩耗に対する雰囲気の役割について述べた。雰囲気は摩耗を生ずるために絶対必要であり, 単に摩耗に影響を及ぼすというよりむしろ摩耗現象を支配する。マイルド摩耗時における気体吸着⁸⁾,あるいは液体雰囲気の効果¹⁰⁾など, 言い残した問題は多いが, 与えられた紙数は尽きたので搁筆する。

文 献

- 1) 笹田 直: 摩耗理論の変遷, 潤滑, 27, 10 (1982) 713.
- 2) 笹田 直: 摩擦による固体表面の損傷, 日本機械学会誌, 75, 641 (1972) 905.
- 3) D. Tabor: Junction Growth in Metallic Friction; The Role of Combined Stresses and Surface Contamination, Proc. Roy. Soc., A 251, (1959) 378.
- 4) 笹田 直: 凝着と摩耗, 潤滑, 24, 11 (1979) 700.
- 5) 三科博司: 金属の凝着摩耗における雰囲気特性 (I), トライボロジスト, 35, 1 (1990) 60.
- 6) T. Sasada: Fundamental Analysis of the "Adhesive Wear" of Metals - Severe and Mild Wear -, Proc. JSLE Int. Tribology Conf., (1985) 623.
- 7) T. Sasada: Tribological Modeling for Mechanical Designers, ASTM STP 1105, (1991) 143.
- 8) T. Sasada, K. Hiratsuka and H. Saito: Adsorption of Surrounding Gas Molecules on Pure Metal Surfaces during Wear Processes, Wear, 135, 2, (1990) 251.
- 9) B. M. W. Trapnell: The Activities of Evaporated Metal Films in Gas Chemisorption, Proc. Roy. Soc., A 218, (1953) 556.
- 10) 野呂瀬 進, 笹田 直: 油潤滑下における摩耗の速度特性とそれに対する添加剤の作用, 潤滑, 24, 5 (1979) 299.