研 究

微小すべり振動下における MgO 単結晶の摩耗(第1報)*

——振動条件の影響——

杉田 忠彰**, 鈴木 和夫**, 渥美幸一郎***

Tadaaki Sugita, Kazuo Suzuki and Koichiro Atsumi: Wear Behavior of MgO Single Crystals under Vibrational Sliding (1st. Report) —Effects of Vibrational Condition—

The wear behavior of MgO single crystals on sintered alumina has been investigated under the condition of vibrational sliding. As a result, it was found that the rate of wear of MgO in the period of initial and transient frictions was very high, but it was rapidly decreased after the vibrational sliding of 10^4 cycles. The wear, the progress of which was shown by a discontinuous wear diagram like step pattern, was caused by the internal cracks.

The wear volume of MgO in the initial and transient state of wear were widely changed by the amplitudes of vibrational sliding; the rate of wear below the amplitude of $100\mu\text{m}$ was lowered by two orders of magnitude smaller than that above the amplitude of $100\mu\text{m}$. Meanwhile, the amplitude hardly affected the rate of wear in the steady state. Also, the rate of wear was linearly increased in proportion to the increase of contact load in all wear state.

(Received January 12, 1976)

I 緒 言

アルミナを中心として種々のセラミック材料はその高温における硬さ・耐摩耗性が高いので工具材料、軸受材料として広く用いられるようになった。その使用環境はかなり過酷なものが多く、これらの材料の弱点ともいえるべき衝撃・振動荷重を受けることが多い。従来の摩耗現象に関する研究は単純すべり状態のもとで行なわれ、その純粋な摩耗特性を導き出すために極力衝撃・振動の影響が入らないように注意されている。しかし、このことは実用におけるぜい性材料の性質を全面的に引き出していることにはならない。高温において塑性的な性質が現われてくるような場合は別として、ぜい性材料の摩耗は材料の微視的なぜい性破壊に支配されるところが大きいと考えられる。そして、そのときに衝撃・振動的な力の作用が摩耗現象に大きく関与してくるものと考えられる。

接触している2面間の微小なすべり振動が作用しているときに生ずるフレッティング摩耗は良く知られていて、金属材料を中心に多くの研究がみられる^{1,2)}。しかしながら、衝撃力が摩耗にどのように影響するかについての研究はあまりなく、Degge らの SAP (Sintered Aluminium Powder) に関するものの他数少ない³⁾。Degge らによれば衝撃・振動がそれぞれ単独に作用しているときと比較

して、それらが同時に作用するときには、摩耗は2桁程度大きくなることを示している。

本報においては、ぜい性材料の振動・衝撃下における摩耗現象解明の基本的な問題として、微小すべり振動下における MgO 単結晶の摩耗挙動をすべり振幅・振動数・接触荷重との関係で検討した。

II 実験方法

II-1 実験装置と方法

Fig. 1 に装置の概略を示す。微小すべり振動は、無段変速機付モータの回転を偏心カムを用いて上下運動に変換し、その運動をエデン平行ばね機構で水平方向の微小すべり運動に変えるものである。

振動数は無段変速機付モータの回転数およびプーリの有効径の比で調節される。すべり振幅の調節は偏心カムの偏心量とエデン平行ばねにとりつけた駆動アームの長さおよびエデン平行ばねの2枚の板ばねの間隔で行なわれる。このとき大きな変位を偏心カムの偏心量で得て、微調整は駆動アームの長さの変化で行なう。また、試料ホルダ台に取り付けられた2本のアームから糸で重錘をつるして試料に荷重を与える。

* 昭和49年11月本協会秋季(岡山)大会にて発表, 昭和51年1月12日受理

** 金沢大学工学部精密工学科 〒920金沢市小立野2-40-20

*** 東京芝浦電気(株) (現在)

Fig. 1 Wear testing apparatus consisted of vibrational sliding mechanism.

摩耗量の測定は試料ホルダ台上に差動トランスのコア部を取り付け、それによって摩耗高さの変化をレコーダに記録し、この値から計算によって求めた。このとき下部試料焼結アルミナの摩耗が加算されて出てくることになるが、 10^3 回における Al_2O_3 の摩耗高さはアラサメータによる測定結果から最大で $4\sim 5\mu\text{m}$ 程度であるので無視できる量として考えられる。

また、ぜい性材料の強度特性に空気中の水蒸気の影響が顕著であることは周知のことである。したがって、本実験においては装置全体をアクリル樹脂板で密閉し、除湿機によって湿度約50%に調節された空気を循環して一定の湿度にした。

ホットプレス焼結アルミナ板上で、 MgO 単結晶の $\{100\}$ 面を $\langle 100 \rangle$ 方向に微小すべりさせた。そのときの振動数は $5\sim 20\text{ Hz}$ である。すべり振幅は $10\sim 500\mu\text{m}$ 、接触荷重は $0.5\sim 2.0\text{ kg}$ (面圧では約 $27\sim 0.5\text{ kg/mm}^2$) の範囲で変化させ、 10^3 回までのくり返しすべりを行なった。

II-2 試料

試料は MgO 単結晶 (タテホ化学工業製) とホットプレス焼結アルミナ (日本タングステン製) を使用した。

MgO 単結晶は、純度99.95%で、転位密度は $1\times 10^4/\text{cm}^2$ である。試料は Fig. 2 に示すように、そのへき開性を利用して、インゴットから $\{100\}$ 面をもつ約 4 mm

の立方体を切り出し、 $\#400$ のダイヤモンド砥石によって、その頂角が $80^\circ (\pm 1^\circ)$ 先端直径が約 $300\mu\text{m}$ の円錐台形に成形した。その後、 120°C に加熱したリン酸浴で $3\sim 4$ 分間エッチングして、ダイヤモンド砥石による研削時の損傷、へき開時の損傷を除去した。

アルミナは、その表面を $\#800$ および $\#1200$ の BC 砥粒でラッピング後、ダイヤモンドペーストでバフ仕上げした。その表面あらさは $R_{\text{max}} 0.4\mu\text{m}$ である。

III 実験結果および考察

III-1 摩耗進行の形態

Al_2O_3 表面上で MgO 単結晶の $\{100\}$ 面が $\langle 100 \rangle$ 方向に微小往復すべり振動しているときの摩耗進行過程を連続的に記録してみた。Fig. 3 は、振動数 10 Hz 、接触荷重 2 kg 、すべり振幅 $300\mu\text{m}$ の場合の例を示す。摩耗線図の形に注目してみると、一般的にすべりのくり返し数が 10^3 回あたりまでは、(a) に示すように比較的連続的な摩耗進行を示すが、 10^3 回を越えると、ステップ状の特異な不連続摩耗となる。そして、すべりのくり返し数が 10^4 回を越えると、(b) に示すように摩耗は急減して定常状態となり、不連続なステップ状の摩耗が一そう顕著となる。しかし、 10^4 回を境にしてその前後でかなり異なった摩耗状態があったことを推測できる。

ここで、摩耗のごく初期について改めて検討してみた。Fig. 4 はすべり振幅を種々に変えたときの摩耗量とすべりくり返し数との関係である。摩耗の開始から 10^3 回前後までは摩耗量が非常に少なく、 10^3 回を越えると急速に増大する。 10^3 回までの摩耗が少ないことに関しては、厳密な規則性の存在というよりは一つの傾向としてそのようになると理解した方がよいようである。一般的には、 10^3 回から摩耗量が急増しはじめ、 10^4 回前後で、再び急減して、以後定常状態となる。この定常状態に達するまでを初期摩耗とする見方も成り立つが、ここでは、 10^3

Fig. 2. Geometric shape of MgO single crystals specimen.

Fig. 3 Wear progress diagram of MgO single crystals under two states of wear.
Frequency; 10 Hz, Contact load; 2 kg, Amplitude of sliding; 300 μm , Sliding plane; (001), Sliding direction; [100]

Fig. 4 Effects of amplitude of sliding on wear.
Frequency; 10 Hz, Amplitude of sliding; 100~400 μm , Contact load; 2 kg

Fig. 5 Relationship between change of contact pressure caused by increase of the contact area and behavior of wear of MgO.
Frequency; 10 Hz, Amplitude of sliding; 300 μm
Contact load; 0.5 and 2 kg.

回前後での摩耗量の急変化にも注目することにして、 10^3 回あたりまでを初期摩耗、 10^3 回から 10^4 回までを遷移摩耗、 10^4 回以後を定常摩耗として区別することにする。このような摩耗の形態はへき開破壊をとまう MgO 特有のものとして、金属材料などのフレッティング摩耗と区別して論ずるべきであろうと考えられる。

Fig. 5 は見かけの接触面圧力の変化と摩耗との相関々係を求めたものである。図より明かなように接触面圧力の大きい初期摩耗期で摩耗量が非常に少なく、接触面圧力のさがる遷移摩耗期で摩耗量は急増する。このことから、見かけの接触面圧力そのものが摩耗の多少を直接に支配するものではないことがわかる。むしろ、初期摩

耗は遷移摩耗の一種の前駆現象とみた方がよいかも知れない。

II-2 すべり振幅および振動数の影響

この種の摩耗において、すべり振幅の大小は、一往復のすべり量の大小と同意義であり、それが摩耗にどのように関係するかについて検討してみる必要がある。Fig. 6 は遷移摩耗の終りまでのすべり振幅と摩耗率との関係を示したものである。すべり振幅 100 μm を境にして、摩耗率が大きく異なっている。すべりのくり返し数との関連で検討してみると、すべり振幅が小さいほど少なくくり返し数で定常摩耗に入ることがわかる。そして、遷移摩耗の終りまでの全摩耗量も少なく、結果としてこの期

Fig. 6 Effects of amplitude of sliding on rate of wear in initial state of wear.
The diagram for amplitudes of 0~100 μm is scaled up in the upper side of this figure.
Frequency; 10 Hz, Contact load; 2 kg.

間の摩耗率は小さくなる。図中に拡大したすべり振幅の小さいところでは、摩耗率はすべり振幅の増加にともなって指数関数的に増大する。一方、100 μm のすべり振幅以上では摩耗率は直線的に増大し、100 μm 以下の場合よりも2桁も高い摩耗率となる。

これに対して定常摩耗期での摩耗率に対するすべり振幅の影響を求めたのが Fig. 7 である。この場合、実験記録からするとすべり振幅が 10 μm のときには摩耗が検出できない程度に小さかった。そして、図から明らかにように、50 μm 以下のすべり振幅の小さい範囲では、すべり振幅の減少とともに摩耗率は急減するが、50 μm 以上の場合には摩耗率は $3\sim 8 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{mm}$ あたりに落ち着き、すべり振幅の影響はあまりみられない。この結果と Fig. 6 との比較から全体の摩耗量を支配するのは遷移摩耗の程度であることがわかる。そして、すべり振幅が大きいくほど遷移摩耗が大きくなることが明らかである。

次に、すべり振幅がこの種の摩耗におよぼす影響と同様な理由で、すべりのくり返しの振動数の影響についても検討してみた。Fig. 8 は 5 Hz から 20 Hz までの間の

Fig. 7 Effects of amplitude of sliding on rate of wear in steady state of wear.
Frequency; 10 Hz, Contact load; 2 kg.

Fig. 8 Influences of vibration on wear.
Frequency; 5~20 Hz, Amplitude of sliding; 300 μm , Contact load; 2 kg.

振動数の下での初期から遷移期にかけての摩耗の状態を示したものである。一般的傾向として、低振動数（たとえば 5 Hz）の場合には、初期摩耗と遷移摩耗が少なくくり返し数で終り、高振動数（たとえば 20 Hz）では遷移摩耗が長期間続く。ここで、低振動数の場合は Fig. 6 の小すべり振幅の場合に、また、高振動数の場合は大すべり振幅の場合に対応する。振動数とすべり振幅の増加はすべり速度の増加を意味し、そのことが摩耗量にかなりの影響をおよぼしていると考えられる。一方、振動数とすべり振幅のいずれが増加しても初期から遷移期にかけての摩擦係数が増大する。例えば振動数 10 Hz のときの摩擦係数（約 0.45）は 5 Hz（約 0.2）のその約 2 倍であり、すべり振幅 500 μm のときの摩擦係数（約 0.55）は 100 μm （約 0.25）のその約 2 倍である。一般に、摩擦抵抗の大きい場合にはそのときの摩耗面に与える損傷の程度が大きいくと考えられることから、摩耗量の増大に無縁ではないように思われる。

また、8 Hz から 15 Hz の間での定常摩耗の振動数依存性はみられない。しかし、 3×10^5 回のくり返しすべりまでの全摩耗量を比較したとき、5 Hz のときに 0.5 mm^3 であり、8~15 Hz では $1.2\sim 1.7 \text{ mm}^3$ であり、20 Hz では 2.6 mm^3 であるところから、振動数は遷移摩耗量にかなりの影響を与えていることがわかる。

Ⅲ-3 接触荷重の影響

接触荷重と摩耗の関係について、すべり振幅 300 μm ,

Fig. 9 Change of rate of wear related with contact load in initial state of wear.
Frequency; 10 Hz, Amplitude of sliding; 300 μm .

Fig. 10 Change of rate of wear related with contact load in steady state of wear.
Frequency; 10 Hz, Amplitude of sliding; 300 μ m.

振動数 10 Hz の場合について調べてみた。その結果、定常摩耗の開始は接触荷重の増加とともに、より低く繰り返す傾向がみられた。また、Fig. 3 (b) にみられたような定常摩耗での摩耗線図のステップの高さは、接触荷重の増加につれて高くなる。たとえば、接触荷重が 0.5 kg のときにステップの高さは約 5.5 μ m であり、2 kg のときには約 6.5 μ m である。

Fig. 9 は、初期摩耗から遷移摩耗の終りまでの摩耗率と接触荷重の関係を示す。接触荷重は接触点応力の増加を意味するので、若干のばらつきを考慮しても接触荷重と摩耗とは直線関係で示されるとみるのが妥当であろう。同様に定常摩耗の接触荷重依存性を求めたのが Fig. 10 である。この場合にも、Fig. 9 と同様な理由で、摩耗は接触荷重と直線関係にあるとみてよいであろう。

IV 結 論

以上の実験の結果をまとめると次のようになる。

1. MgO 単結晶の微小すべり振動下における摩耗は不連続なステップ状に進行する。そして、最初の $10^3 \sim 10^4$ 回に大きな摩耗を示し、それ以後は摩耗の進行が極度に低下する。

2. すべり振幅の影響は大きい。すべり振幅 100 μ m 以下においては初期・遷移・定常摩耗期ともに小さな摩耗を示すが、100 μ m を越えるとくに初期・遷移期における摩耗が顕著となり、摩耗率は 100 μ m 以上ですべり振ともに対して直線的に増加する。

3. 接触荷重の増加につれて、初期・遷移期および定常期ともにその摩耗は直線的に増加する。

4. 振動数が高くなると、遷移摩耗量が増加する。

終りに、実験用試料の調製について格別の御配慮をいただいた日本タングステン㈱古川満彦氏とタテホ化学㈱矢野周介氏に厚く御礼を申し上げる次第である。

文 献

- 1) R. B. Waterhouse: Fretting corrosion, p81 Pergamon Press, 1972.
- 2) 築添, 大前: フレッシング摩耗に関する研究, 精密機械 38, 12 (1972) 36.
- 3) A. W. J. Degee, C. P. L. Commissaris and J. H. Zaat: The wear of sintered aluminium powder (S.A.P.) under conditions of vibrational contact, Wear 7 (1964) 535.

焼結金属分科会第 3 小委員会研究発表抄録

資料 No. 84

「鋼切削用超硬工具の初期欠損に関する研究」

住友電気工業㈱ 原 昭夫, 中谷征司, 浅井 毅

本報告は昭和 47 年から 48 年にかけて、精機学会大会において口頭発表した内容とはほぼ同じである。超硬合金切削工具刃先の損傷原因としては、摩耗や疲労欠損とともに初期欠損があるが、その重要性にもかかわらず初期欠損に関する研究はほとんどなされていない。これは研究の難かしさを一面で物語るものであろう。

第 1 報として、工具と被削材の接触様式の影響、第 2 報として切削-非切削時間比の影響、第 3 報として被削材および工具形状の影響、第 4 報として工具材種の影響を検討した。一貫して刃先へかかる応力と温度で欠損現象が整理できないかという考えを取っている。

資料 No. 85

「超硬工具切削の信頼性に関する研究 (第 1 報)」

一鋼の断続切削における工具寿命一

三菱金属㈱ 三宅, 根岸, 青木

超硬工具切削の信頼性を求めることと、靱性評価方法の確立を目的として超硬工具のチップングや欠損による工具寿命について、旋盤による鋼の断続切削における送りと工具寿命の関についての第 1 報である。

得られた結論は、

- (1) 鋼の断続切削における工具寿命は、工具寿命の要因をフランク摩耗、クレータ摩耗、チップングに分けて検討する必要がある。
- (2) チップングによる工具寿命はワイブル分布としてワイブル確率紙に直線関係で整理される。
- (3) 送りとチップングによる工具寿命の関係は送りの増大によって単調な減少関係でなく初め減少し、ある送りから増加し、ふたたび減少していく。