

単粒湿式研削におけるアルミナ砥粒の摩耗過程

水谷 秀行*, 岡村 健二郎*

Wear Process of Alumina Abrasive Grain in Single-Grit Grinding with Grinding Fluid

Hideyuki MIZUTANI* and Kenjiro OKAMURA*

(Received May 25, 1989)

This paper deals with the wear process of an abrasive grain in single-grit grinding with grinding fluid. The grinding tests have been carried out using emulsion-typed grinding fluids with or without extreme pressure additive containing sulfur. The single-grit made of white alumina was used as the abrasive grain, and annealed carbon steel S55C was used as the work material. The wear aspects on the grain were observed mainly by SEM and EPMA. When the fluid without the additive is used, the wear of the grain is promoted mainly by micro-fractures and micro-chippings. The irregularities of the grain flat which are formed by the micro-fractures and micro-chippings cut the work material as sub-cutting edges. Fractural phenomena of the grain are repressed by using the additive; however, the process of the chemical reaction between the grain material and the work material is facilitated by using the additive.

1. 緒言

研削加工においては、そのほとんどの場合に研削油剤が使用されており、これが研削現象を支配する基本条件の一つとなる。研削油剤を適切に選択、使用することによって、これのもつ潤滑、冷却、清浄、防錆などの基本作用によって、研削抵抗及び研削熱の削減、砥粒切れ刃寿命の延長や仕上げ面性状の向上などの効果^{1)~3)}が期待される。しかし、使用する研削油剤の作用は研削点における切れ刃と工作物との接触圧力、温度、油剤の進入状況など多くの周辺条件によって複雑に変化し⁴⁾、その効果は一義的に決定することは困難である。従って、実際の研削作業において研削油剤をより効果的に、しかも経

済的に使用するためには、切れ刃の摩耗やその研削における作用の実態を明らかにする必要がある。このような観点から、既に乾式研削における砥粒の摩耗過程をSEM, EPMAなどにより追跡観察し、その場合の砥粒摩耗は、主として表層部の塑性流動にもとづくすりへり的な摩耗現象によって進行することを明らかにし、報告した⁵⁾。本報告では、砥粒の摩耗及び表面生成過程に及ぼす研削油剤の影響を、既報の乾式の場合と比較、検討するとともに、油剤添加剤の作用についても実験的に検討を行った結果を報告する。

2. 実験方法

研削における諸現象は極めて多くの因子によって支配され、そこには複雑かつ微細な加工現象が存在するた

*機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

め、これまでも多くの研究が行われ^{6)~12)}、それら解明の努力がなされてきた。しかし、研削点近傍における諸現象については未だ不明な点が多く、たとえば研削仕上げ面性状を支配する要因として極めて重要と考えられる砥粒切れ刃の微視的な摩耗過程¹³⁾¹⁴⁾や仕上げ面生成過程の実態、さらにはこれら研削現象に及ぼす研削油剤の影響などについては必ずしも十分に明らかにされてはいないように思われる。本研究では、砥粒と工作物との幾何学的干渉形状が実際の研削の場合のそれと対応するように配慮した上で、現象を極めて単純化された条件のもとでとらえるため、単粒研削実験を実施し、砥粒の摩耗ならびに表面生成過程に及ぼす研削油剤の影響を SEM, EPMA などにより詳細に観察、検討することにした。

2.1 供試試料及び実験装置

供試砥粒は、白色溶融アルミナインゴットから小片を切り出し、これを単粒保持具先端に埋め込み、図 1 に示す円錐台とした。被削材料は、表 1 に示す化学成分の機械構造用炭素鋼 S 55 C で、形状及び作成方法は前報⁹⁾と同様である。

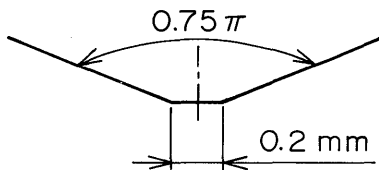


Fig.1 Dimensions of single-grit.

Table 1 Chemical compositions of specimen.

Material	Chemical compositions						Remark
	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Fe (%)	
S 55 C	0.55	0.29	0.83	0.014	0.016	bal	Vickers hardness (49 N) 193

研削油剤は、# 60 精製スピンドル油を基油とする O/W 型エマルジョンで、乳化剤には非イオン系界面活性剤を使用した。添加剤（以下 EP 剤と略称する）としては硫黄系極圧添加剤ジ・タージャリ・ノニール・ポリサルファイド (Di-Tertialy-Nonyl-Polysulphide, 通称 TNPS) を使用し、基油に対し重量比で 15% 添加した。研削油剤は EP 剤の有無にかかわらず、いずれの場合も純水により 50 倍希釈の乳状液とし、直径 5 mm の供給口から毎分 5 l の割合で研削点に供給した。

研削盤は、岡本工作機械製作所製 PSG-62 AV 型横軸平面研削盤を用い、一定形状に成形された砥粒を砥石軸に取り付けた単粒実験用アルミニウム合金製円板の外周

部に、その先端回転円直径が 200 mm となるように固定した。またテーブル左右送りは極めて低速度を必要とするため、研削盤に付設の油圧駆動によらず、研削盤の側方に設置したねじ切り旋盤の送り機構を研削盤のテーブルに伝えることによって低速で、安定した送り運動を得られるようにした。

2.2 実験条件及び試料の観察方法

実験条件は、単粒実験で実加工の研削状態が再現できるように配慮して、次のように決定した。

研削方式：単粒による横軸平面上向き研削

砥粒周速度： $V_s = 1600$ m/min

工作物送り速度： $V_w = 0.11$ m/min

半径方向切込み量： $\Delta = 5$ μ m

上記の条件によって得られる単粒研削痕は、連続した溝として得られるため、これの研削開始点からの長さを研削長さ G.L. と定め、これが一定値に達したところで適宜観察、測定を行うようにした。試料の観察は主として SEM, EPMA などによって行い、光学顕微鏡による観察も併用した。また、砥粒の摩耗状態と研削溝との対応を調べる場合には、両者の断面プロファイルを触針式表面形状測定器により測定した。

2.3 単粒実験と砥石による研削加工との対応

前述のような単粒実験と砥石による研削との関連性を切れ刃と工作物との相互干渉形状の観点から検討すると、単粒実験と砥石による研削との大きな相違点は、単粒実験の場合には、回転工具円周上の作用切れ刃数が 1 個であるのに対し、後者では砥石作用面上にそれが多数存在することである。そして連続切れ刃間隔 δ は、単粒実験では、 $\delta = \pi D$ (D : 単粒切れ刃の回転円直径) となり、円周長さに相当し、かなり大きな値となるのに対し、研削砥石の場合の δ は、数 mm~十数 mm 程度となることが知られている。ここではごく一般的な研削の場合を想定して、砥石の連続切れ刃間隔 δ を 5 mm と仮定して、切れ刃と工作物との幾何学的干渉状態について検討する。

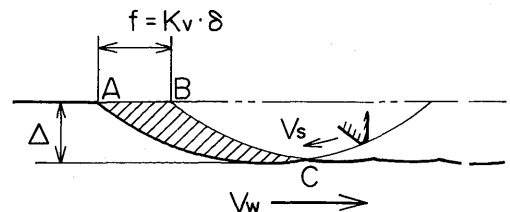


Fig.2 Geometrical interference between cutting edge and work material

まず、図2は切れ刃1個当たりの幾何学的干渉状態を示す。ここで、切れ刃速度を V_s 、工作物速度を V_w とし、速度比 $K_V = V_w / V_s$ と定義すれば、図中 f は、

$$f = K_V \cdot \delta \dots\dots\dots (1)$$

となる。これに前述のような単粒実験条件を適用して f を求めれば $f = 0.043 \text{ mm}$ となり、切れ刃と工作物との幾何学的干渉形状（図中ABC）が決まる。いま、研削の一般的な例として次のような条件を仮定する。砥石直径 $D = 200 \text{ mm}$ 、砥石周速度 $V_s = 1600 \text{ m/min}$ 、砥石半径方向切込み量 $\Delta = 5 \text{ }\mu\text{m}$ 、連続切れ刃間隔 $\delta = 5 \text{ mm}$ 。これらの条件のもとで、切れ刃1個当りの相互干渉形状が前述の単粒実験の場合と同程度となるための工作物速度は、(1)式の関係より、 $V_w = 13.8 \text{ m/min}$ となり、この値は通常の研削加工条件の範囲内にあると判断される。

次に、切れ刃1個当りの切削回数の観点から単粒実験と砥石による研削加工との対応について考察すると、前述のような条件のもとで、切れ刃1個当りの切削回数が単粒実験の場合と砥石による研削の場合とで同じになるようにするためには、研削長さ $G.L.$ を工作物速度 V_w に比例して増大させる必要がある。ここで、単粒実験の場合の $G.L.$ を砥石による研削加工の $G.L.$ に換算すれば、両者における V_w の比 $13.8/0.11 = 125.5$ より、単粒実験における $G.L.$ の値は、これの約125倍の距離を砥石によって研削したことに相当する。従って、単粒実験では比較的短い $G.L.$ の間に、砥石による研削の場合の相当長い $G.L.$ に対応した研削過程をみる事ができる。

3. 実験結果とその検討

図3は、 $G.L. = 10 \text{ mm}$ における切れ刃接触面のSEM写真である。図中(a)は、極圧剤を含まない乳状液（以下無添加乳状液と略称する）、(b)は硫黄系極圧剤(EP剤)添加乳状液を使用した場合を示す。この時期の摩耗状況は、添加剤の有無にかかわらず、研削方向の条痕が

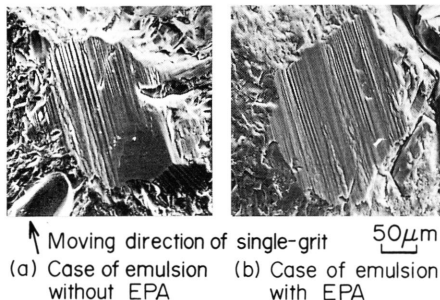


Fig.3 Secondary electron micrographs of worn surface of single-grit. ($G.L. = 10 \text{ mm}$)

形成されるなどの点で両者は巨視的には酷似の摩耗形態を示している。しかし、微視的には(a)の無添加乳状液の場合には、亀裂の発生など切れ刃接触面にはぜい性的な摩耗形態も認められる。

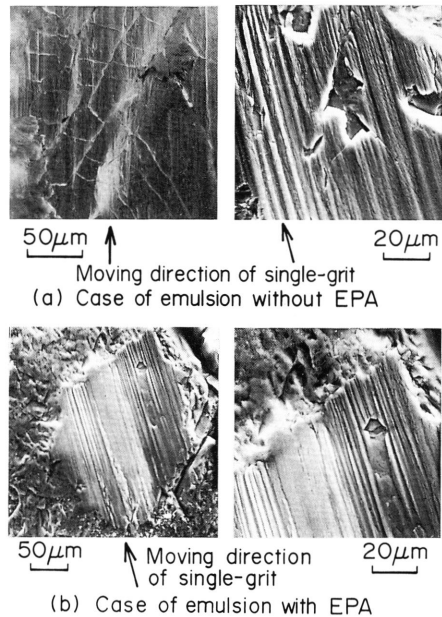


Fig.4 Secondary electron and optical micrographs of worn surface of single-grit. ($G.L. = 15 \text{ mm}$)

そしてさらに研削長さが増大すると、添加剤の有無による差異が顕著となる。まず、図4(a)が無添加乳状液使用の場合の切れ刃接触面の摩耗状況であり、左に光学顕微鏡、右にSEMによる観察結果を示す。それによれば、切れ刃接触面には多くの微小亀裂とともに、表層部の剥離やチッピング現象が各所にみられる。これに対し、同図(b)のEP剤添加乳状液を使用した場合には、前観察時（図3(b)）と比較して摩耗形態にほとんど変化がなく、やはりぜい性的な挙動はほとんど認められない。このように同系統の研削油剤（ここでは水溶性エマルジョン）を使用した場合でも、極圧添加剤の有無によって砥粒の摩耗形態に相当大きな差異が現われる。すなわち無添加乳状液使用の場合には、断続切削による機械的衝撃作用と研削油剤の供給による熱衝撃作用とによって、砥粒は主にぜい性的な挙動によって摩耗するが、これにEP剤を添加すると割れやチッピングなどのぜい性的な挙動が抑制され、砥粒の摩耗はすりへり的な摩耗形態に移行する。このようなEP剤を添加した場合の砥粒摩耗の進行過程は、乾式研削における砥粒の摩耗形態⁵⁾に類似している。

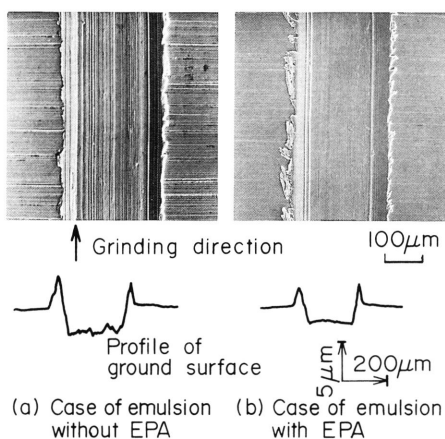


Fig.5 Secondary electron micrographs and profiles of ground surface. (G.L.=15 mm)

図5は、研削長さ G.L.が比較的短い時期の研削溝の SEM 写真とその断面プロフィールである。無添加乳状液使用の場合には、図中(a)上段にみられるように研削溝底には研削方向の条痕がはっきりと認められ、また下段の断面プロフィールにみるように溝底には2 μ m 程度の凹凸が形成されているのがわかる。しかし、EP 剤添加乳状液を使用した場合には、図5(b)にみられるように溝底は極めて平滑であり、仕上げ面粗さの向上に対する EP 剤の効果が顕著に現われている。またこの時期の研削溝の

特徴として、添加剤の有無にかかわらず溝側方への盛り上がり大きいことが挙げられるが、乾式研削の場合⁵⁾に比べれば研削溝底の粗さ及び盛り上がりはかなり低減している。

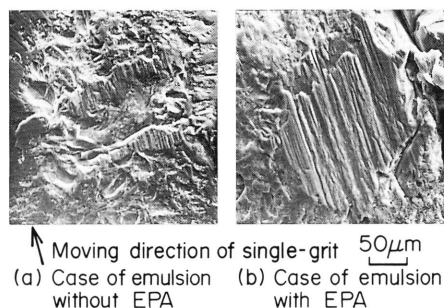


Fig.6 Secondary electron micrographs of worn surface of single-grit. (G.L.=60 mm)

図6は、60 mm 研削後の切れ刃接触面の SEM 写真である。(a)の無添加乳状液使用の場合には、研削の進行に伴い切れ刃接触面に微細な割れやチッピングなどの進展による相当大きな破碎現象が認められるが、(b)の EP 剤添加の場合には、主として塑性流動にもとづくすりへりの現象によって漸次摩耗が進行している状況がうかがわれる。

図7に G.L.=100 mm~260 mm の切れ刃接触面の

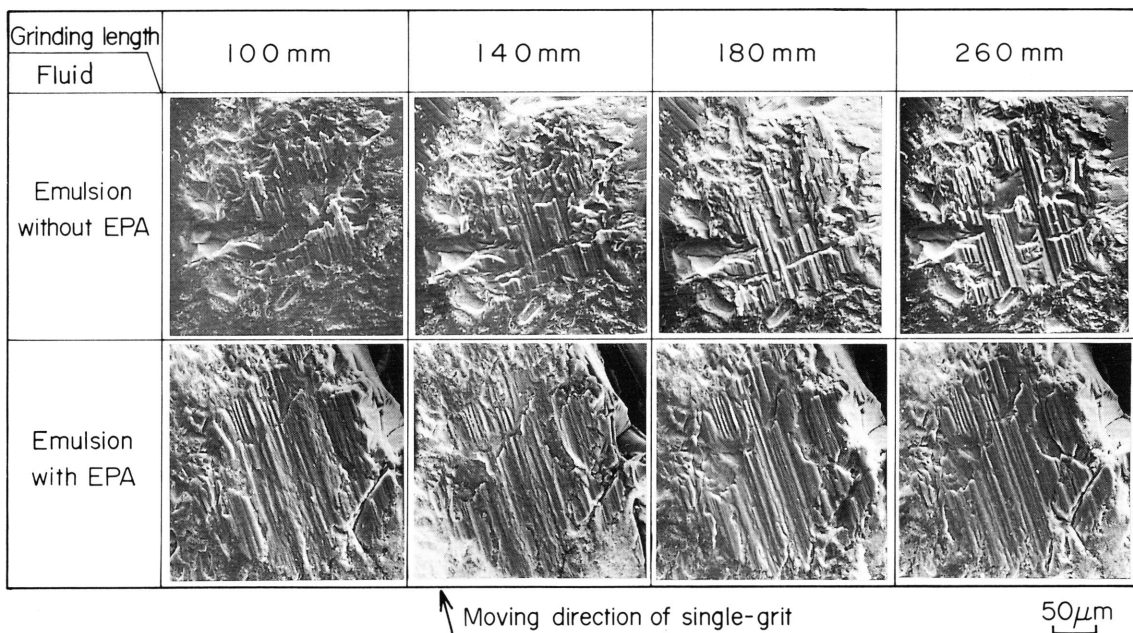


Fig.7 Transition of worn surface of single-grit. (G.L.=100-260 mm)

SEM 写真を示す。まず図中上段の無添加乳状液使用の場合は、前観察時（図 6(a)）に比較的大きな破碎現象のみられた切れ刃接触面には、研削長さの増加に伴って、再び平坦部分が広がる傾向がみられる。しかし、切れ刃接触面は一様な平滑面ではなく、研削方向の条痕とともに破碎現象によって形成された微小凹凸が各所に認められ、また付着物様のものも観察される。これに対し、下段の EP 剤添加乳状液使用の場合には、この時期にきて、割れや剥離の発生など、ややぜい性的な摩耗現象も認められるものの、やはり無添加乳状液使用の場合に比べてこうした現象はかなり抑制されているのがわかる。

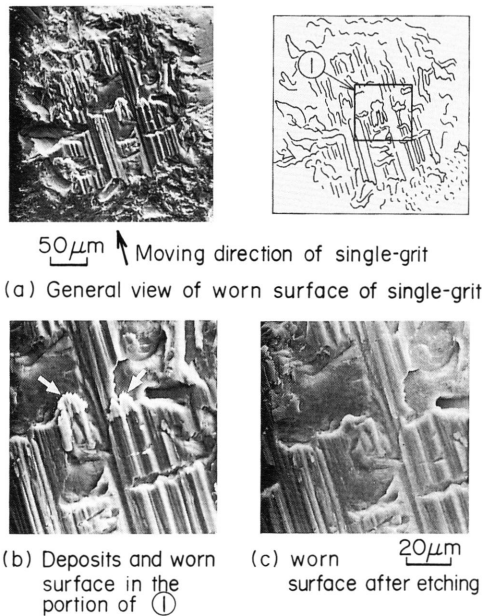


Fig.8 Microscopic wear aspects and deposits in worn surface of single-grit.

図 8 は、研削過程で切れ刃接触面に形成される微小凹凸の研削に際しての作用の実態を SEM 観察によって調べたものである。図中(a)は、切れ刃接触面の全体像であり、(b)及び(c)は、(a)の説明図中①部分の拡大写真である。(b)、(c)は同一部分の酸洗前と酸洗後の状態を示す。(b)の酸洗前の SEM 写真によれば、研削方向の条痕が破碎現象によって途切れた部分に図中矢印で示す付着物様のものが認められ、これらのものは図中(c)にみられるように酸洗によって完全に腐食除去されており、従ってこれらは被削材金属の小片、すなわち微細切りくずが付着していたものと考えられる。また付着物が除去された後の部分には比較的鋭利な稜線が形成されており、これらが二次切れ刃として材料除去ならびに仕上げ面の創成に関与していることが認められた。

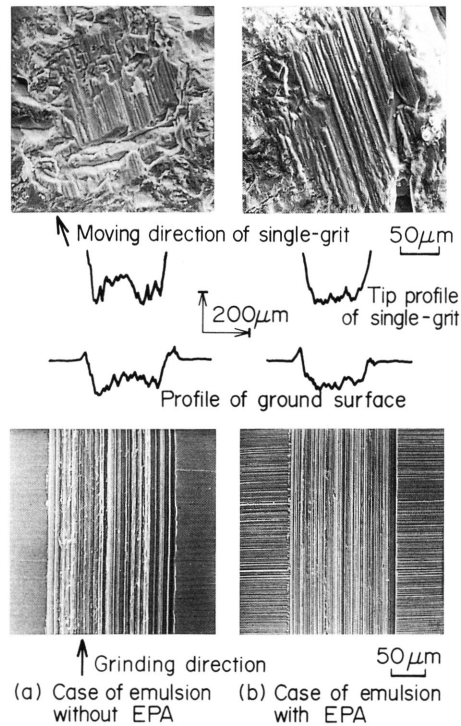


Fig.9 Comparing of worn surface of single-grit with ground surface. (G.L. = 420 mm)

図 9 は、420 mm 研削後の切れ刃接触面と、それによって生成された同時期の研削溝の SEM 写真及びその断面プロフィールを示す。切れ刃接触面の断面プロフィールによれば、(a)の無添加乳状液使用の場合には、(b)の EP 剤添加の場合に比べて相当大きな凹凸が形成されているのがわかる。これは図中上段の SEM 観察の結果より、切れ刃の摩耗に破碎の現象が関与していることによるものと考えられる。またこのような状況に対応して研削溝底粗さも無添加乳状液の場合に比べて、EP 剤添加の場合の方が小さくなっている。図 9 下段の研削溝の SEM 写真によれば、添加剤の有無にかかわらず、図 5 の研削長さが短い時期に比べて、研削溝底の条痕がはっきりと現われるようになり、これに伴って溝側方への盛り上がりも減少している。このような研削長さの増加に伴う盛り上りの減少は、切れ刃接触面における微小凹凸の形成によるものと考えられる。また、前報⁵⁾の乾式研削溝と比較して大きく異なる点は、湿式研削では、研削溝底への微細切りくずの二次付着がほとんど認められないことであり、研削油剤供給による切りくず洗浄及び凝着防止の効果が現われているといえる。

図 10 は、湿式研削における切れ刃接触面の EPMA 分析の結果である。上段に SEM 写真を示し、その部分の

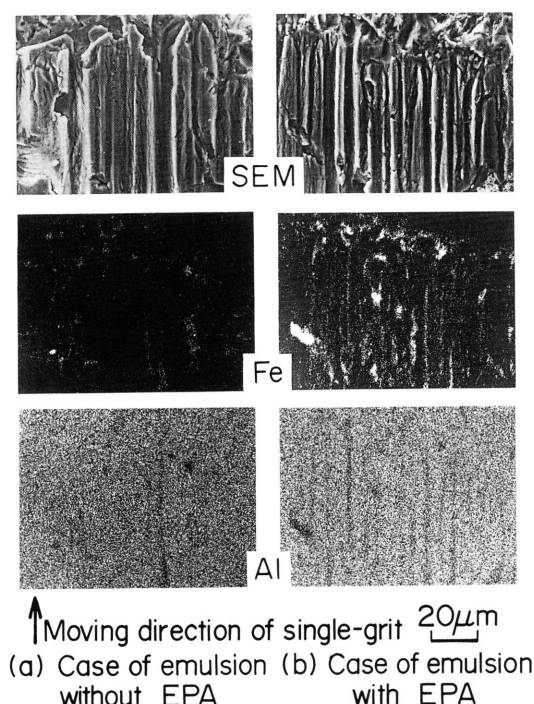


Fig.10 Secondary electron and characteristic X-ray micrographs of worn surface of single-grit.

元素分析の結果が中段以下であり、白くみえる部分がFe, Alそれぞれの分布を示す。図中(a)の無添加乳状液使用の場合の切れ刃接触面には被削材の主成分Feはほとんど検出されないが、EP剤を添加した場合には研削方向に沿ってFeの存在が明瞭に認められ、その部分に対応してAl濃度がやや希薄になっている。この場合、切れ刃接触面に極圧成分の硫黄(S)を検出することはできなかったが、前述のようなFeの存在については、油剤中の極圧成分の作用によって、砥粒材料と被削材との間で反応生成物が形成され易くなり、これが切れ刃接触面に移着、残留したものと考えられる。これが従来言われているような $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ¹⁵⁾などであるとすれば、切れ刃接触面表層部は、砥粒材料であるアルミナに比べて軟質、低融点物質となるため、切れ刃と工作物の接触部分は塑性流動を生じ易く、無添加乳状液を使用した場合の砥粒のぜい性的な摩耗は、硫黄系極圧剤を使用することによって、すりへりのな摩耗形態に移行するものと考えられ

る。

4. 結 言

単粒湿式研削におけるアルミナ砥粒の摩耗過程をSEM, EPMA などにより観察, 検討した結果, 次のことが明らかとなった。

- (1) 極圧剤を含まない水溶性エマルジョン型研削油剤を使用すると微細な割れやチッピングなどのぜい性的な摩耗現象が顕著に現われるが、硫黄系極圧剤を添加すると砥粒のぜい性的な摩耗挙動が抑制され、すりへりのな摩耗が支配的となる。
- (2) 研削過程で切れ刃接触面に形成される微小凹凸は、二次切れ刃として材料除去及び仕上げ面の創生に関与している。
- (3) 砥粒の摩耗は機械的摩耗のほか研削中の高温、高压下での砥粒と被削材との反応による化学的な作用によっても進行し、硫黄系添加剤は砥粒の化学摩耗を助長する。

参 考 文 献

- 1) 正野崎友信：精密機械，**27**，6 (1961)，363.
- 2) 古市亮蔵，中山 守，桜井充彦，常次哲也：日機論(第3部)，**31**，232 (1965)，1861.
- 3) 重松日出見，富田 進，野口武志：潤滑，**25**，3 (1980)，176.
- 4) 今中 治：潤滑，**11**，11 (1966)，447.
- 5) 水谷秀行：中部大学工学部紀要，**21** (1985)，1.
- 6) 松井正己，庄司克雄：精密機械，**48**，12 (1982)，1634.
- 7) W.Graham and C.M. Vautsadopouros：Tool Des. Res.，**18** (1978)，95.
- 8) 岡村健二郎，中島利勝，平 邦昭，藤原煌三：精密機械，**33**，3 (1967)，161.
- 9) 津和秀夫：機械の研究，**18**，4 (1966)，486.
- 10) 吉川弘之：精密機械，**31**，11 (1965)，907.
- 11) 竹中規雄，笹谷重康：日機論(第3部)，**28**，196(1962)，1615.
- 12) 大越 諄，吉川弘之，佐田登志夫：精密機械，**25**，6 (1959)，28.
- 13) 松井正己，庄司克雄，田牧純一：精密機械，**42**，5 (1976)，376.
- 14) 田中武司，井川直哉：精密機械，**39**，6 (1973)，608.
- 15) 田中義信，津和秀夫，河村末久：精密機械，**31**，5 (1965)，397.