研 究

研削砥石における切れ刃の摩耗について*

— Al_2O_3 砥粒の第2摩耗領域 (第1報)—

河 村 末 久**

On the Wear of Abrasive Grains in the Grinding

—Secondary Zone of Al_2O_3 Grains (1st Report)—

Suehisa KAWAMURA

It is intended to verify how a fused state of the worn surface, called the secondary zone, is formed on the wear-land of alundum wheel and also how it changes in the grinding process. In this experiments, high carbon tool steel is ground with alundum wheel under two grinding speeds, and the observation is performed not on replica but on the worn surface with metallurgical microscope. And then the forming conditions of the nuclei that grew into the secondary zone are considered. The results are as follows:

- (1) When a wheel is used at the speed of 2000 m/min, nuclei appear at the trailing edge of the wear-land while with decreasing of the speed the appearing position gradually travels toward the central portion. And at 1160 m/min a closed type of the secondary zone is formed.
- (2) If the secondary zone is formed on a cutting edge with comparatively large length of the wear-land, it spreads rapidly to the other cutting edges lying the same grinding direction with smaller length of the wear-lands.

1. はじめに

研削作業中に研削能率, 加工精度, 仕上面あらさなどが次第に悪化する主要な原因として, 研削砥石の摩耗をあげることができる。砥石の摩耗特性はすりへりで砥粒の先端が平坦化されるような摩滅現象と砥粒の破碎性とに影響され, 切れ味の持続性の良否は両者のいずれが支配的にかかっている。通常, 精密研削を称されている条件下では先端の平坦化現象によって切れ味の劣化がおこると言われている。そこですりへり摩耗を低減させて切れ味の持続性や生産能率の向上をはかるには, このようすりへり摩耗の機構を詳細に検討する必要がある。

著者達は研削砥石の切れ刃に関するこれまでの研究で, (1). 切れ刃による材料の除去作用はある食込み深さ以上で行なわれ, 切始め深さ以下では切れ刃は工作物上をすすべりするに過ぎないこと, (2). 切始め深さの分布は切れ刃の構成状態, 特に結合剤と関係が深いこと^{1), 2)} (3). 作業面上の溶着物を除去して砥粒の摩耗面を観察すると, Al_2O_3 砥粒の切れ刃では摩耗面がある大きさ以上になるとその後端部に特異な摩耗領域が生成されるよう

になるのが認められること³⁾などを明らかにしてきた。

数多くのこれまでの研究を通じて⁴⁾, 砥粒は微細な破碎, 塑性流動, 化学反応などの単独ないしは複合の機構のもとで摩耗することが知られているが, 微視的な摩耗の挙動については依然不明の点が多いのが実状で, 研削条件の合理化を検討するにはなお資料不足が感ぜられる。

そこで本研究では砥粒切れ刃の摩耗面の状態を微視的に検討してすりへり摩耗の機構を解明しようとした。まず本報では Al_2O_3 砥粒の摩耗面に生成される特異な領域を第2摩耗領域と呼ぶこととし, 第2摩耗領域の生成核, 領域化された部分の形状と成長の過程, 第2摩耗領域を生成した切れ刃の破碎挙動などについて研究した結果を報告する。

2. 実験の方法と切れ刃の観察

実験には平面研削盤を用い, 炭素工具鋼を A46 PmV および A46O mV で表1の条件で研削した。テーブルの送り是一方向からのみ与え, これによって砥石の摩耗が一方の端面から他の端面にかけて順次変化するようにした。

使用したままの砥石作業面は通常溶着物の薄い膜でおおわれているので, 摩耗面を観察するにはこれを除去し

*原稿受付 昭和44年7月16日。昭和44年度春季大会学術講演会(昭和44年4月3日)にて発表

**正 会 員 防衛大学校機械工学科(横須賀市走水 1-10-20)

表 1 実験の条件

砥石	種類	A 46 PmV	A 46O mV
	直径	205 mm	178 mm
工作物	作業幅	9 mm	7 mm
	種類	SK 3 (焼入れ: $R_c 62$)	
研削条件	寸法	15×150 mm ²	
	砥石周速	1930 m/min	1160 m/min
	テーブル速度	10 m/min	
	切込み	10 μ	13 μ
	送り	0.6 mm/stroke	0.5 mm/stroke
目おなし	その他	上向き研削, Dry	
	送り	10 μ ×5回, 5 μ ×2回	10 μ ×3回, 5 μ ×3回
目おなし	送り	0.02 mm/rev	0.03 mm/rev

(a) 切れ刃の観測装置

(b) 切れ刃の測定方法

図 1 切れ刃の観測装置と測定方法

なければならない。本実験では所定の研削回数まで研削した砥石は研削盤から保持具と共に取り外し、摩耗面上に付着した溶着物を塩酸で溶去したのち水洗して乾燥させ、図 1 (a) に示す測定台に両センタで支持して取りつけた。摩耗面の観察や測定は位相差顕微鏡と顕微干涉計による以外は測定台の金属顕微鏡で垂直上方から行なった。測定帯は図 1 (b) のように幅 0.25 mm とし、この中に含まれている 200 箇の切れ刃について摩耗面の長さ l 、第 2 摩耗領域の有無、領域の大きさなどを配列の順序に従って求めた。そして摩耗程度の相違による第 2 摩耗領域の生成状態の差異は端面から測定帯の中心線までの距離を変化させることによって求め、これらを通じて

図 2 Al_2O_3 砥粒の摩耗面

研削中における第 2 摩耗領域の成長や変化の過程を追求した。なお結合剤切れ刃の摩耗面は測定から除外した。

3. 実験の結果と考察

3.1 第 2 摩耗領域の核

Al_2O_3 砥粒の摩耗面に第 1 摩耗領域と第 2 摩耗領域とが共存している場合の状態を図 2 に示す。第 1 摩耗領域は摩耗の初期段階から認められるなめらかな表面の領域で、切れ刃後に近い部分がこれに相当する。他方第 2 摩耗領域は、摩耗面がある程度以上の大きさになったとき摩耗面の後端部に生成される特異な領域で、びらん性を帯びている。このような第 2 摩耗領域は当初小さな核が生成され、研削中にこれが次第に成長することによって形成されたものである。核の生成条件、すなわち摩耗面がどの程度の大きさになったとき、いずれの部分にできるかについては後述することにし、ここでは観察された核の形状について述べる。

通常第 2 摩耗領域の核は摩耗面の条こんに沿って生成され、細長い糸くず状を呈している。糸くず状の核は摩耗面の後端部の限られた部分にほぼ同時に多数生成され、研削中にこれらが相互に連接されたとき領域として認められるようになる。図は第 2 摩耗領域が切れ刃後の方向に成長中のもので、核は第 2 摩耗領域の前縁に先行して伸びている糸くず模様に類似している。

3.2 第 2 摩耗領域の成長と他への波及

炭素工具鋼 SK-3 を 30 回まで研削した砥石 A 46 P の摩耗面を調べてみると、端面から 5 mm 以内の部分については第 2 摩耗領域を生成した切れ刃が非常に多く認められるが、7 mm 以上ではほとんど認められなくなる。 $B=7$ mm, $=5$ mm の場合について摩耗面の長さ l の分布と第 2 摩耗領域の生成頻度の相違を比較すると図 3 のようになる。 $B=7$ mm では (a 図) 第 2 摩耗領域を生

図 3 測定場所に第2摩耗領域の生成状態の相違

図 4 第2摩耗領域が肥大の途上にある部分の状態 (実験条件は図3と同じ)

成した切れ刃は $l \geq 0.1$ mm のもので目立つが総数4箇にすぎない。しかし $B=5$ mm では (b 図) 第2摩耗領域で汚染された切れ刃は前者に比して格段の増加を示しており、 l の大きいものほど高い汚染率となっている。そして $l < 0.05$ mm という微小な切れ刃でも約 50% の高い汚染率になっているのは注目される。このように測定帯の位置を移動してみると、第2摩耗領域の有無の境界はかなり明瞭に確認できる。図 4 はこのような境界線上 ($B=5.5$ mm) についての測定結果を示したもので、第2摩耗領域が成長途上にある過渡的な状態にあることがわかる。

これらの結果から、第2摩耗領域はまず摩耗面の大きい切れ刃 (ここでは $l \geq 0.1$ mm) に生成されること、その後これと同一円周上に点在する他の切れ刃にも速やかに波及すること、他の切れ刃への伝播波及は l の大きいものほど容易であることなどを指摘できる。ブランチ研削用の砥石では当初に第2摩耗領域が生成される切れ刃は作業面上の幅と無関係に散在することになるので、第2摩耗領域の有無の境界は局部的なもの以外には存在しない。そして全作業表面の切れ刃がほぼ同時に汚染され、これと前後して切れ味の劣化が急速に進行する。

3.3 第2摩耗領域の成長過程と切れ刃の変化

図 5 には $B=1$ mm の場合について第2摩耗領域の生成状態を示した。ここでは $l \leq 0.025$ mm という微小な切れ刃でも約 50% という高い汚染率を示している。第2摩耗領域の生成を熱作用に基づくと考えれば摩擦面の温度分布を考慮することによって領域の発生、成長が満

図 5 第2摩耗領域が十分に成熟した部分の状態

足に説明できることを示したが³⁾、これだけでは図のような小さな汚染切れ刃の存在は説明しきれない。そこで他の原因を検討してみるために摩耗面の長さ l と生成された第2摩耗領域の長さ l_{sf} との関係を求めてみると図 6 のようになる。第2摩耗領域が成長途上にある $B=5.5$ mm では l_{sf} は (a) のような分散値を示すが、これが十分に成長をとげた部分では (b) のようにある範囲内に密集する傾向を示す。ここで両者について $l=l_{sf}$ なる関係を満足する切れ刃、すなわち全摩耗表面が第2摩耗領域でおおわれている切れ刃に注目してみると (a) よりも (b) の場合に多く、同じ (b) では l が大きい場合よりも小さい場合 (特に $l \leq 0.05$ mm) に顕著になっているのが認められる。 $l=l_{sf}$ なる関係が l の小さい切れ刃に多く認められるのは、当該切れ刃の第2摩耗領域がその本

(a) 第2摩耗領域が肥大中の場合

(b) 第2摩耗領域が成長を遂げた場合

図6 摩耗面の長さ l と第2摩耗領域の長さの関係

来の生成過程——摩耗面がある程度以上の大きさになったとき後端部に生成され、切れ刃稜の方向に向かって成長してゆく——に従ってそれ独自を対象として生成されたものではないことを端的に物語っている。

そこでこれらの切れ刃に特に注目して観察を行なってみると、生成原因としてつぎの二つの場合が考えられる。

(1) 破碎に伴って派生された場合

本来の過程に従って第2摩耗領域が生成され、その後これが成長する間に部分欠損が生じ、数箇の切れ刃に分離されるようになった場合。

(2) 誘出的な場合

数箇の切れ刃がごく密集している場合には空間が目つまりして作用上では一体化されるようになる。このとき個々の l は短小でも一体化によって第2摩耗領域が生成されやすくなり、 $l = l_{sf}$ を満足する切れ刃が誘出される。

このうち(1)の場合については摩耗面の後縁部のクラックに沿って破碎が起こりやすいのが認められている。このような破碎は砥粒の自生作用と関連して興味深い、多くの場合適正な研削条件を見出すことは困難で、切れ味の劣化は次第に深刻化してゆく。

以上のことがらを考慮に入れて第2摩耗領域の核の生成、成長ならびにその後の変化の様子を示すと図7のような関係が描かれる。切れ刃は日なおした状態Aから次第に摩耗して l を増大し、状態Bを経て第2摩耗領域の生成開始点Cに至る。さらに l が増大すると第2摩耗領域の大きさ l_{sf} を急速に増しながら曲線D, E, Fをたどる。このとき第2摩耗領域内には多数のクラックが生

第2摩耗領域が成長すると分裂が起こりやすくなる

図7 第2摩耗領域の生成と、その肥大の過程

成され、砥粒は破碎しやすくなっている。いま状態Eにおいて部分欠損が起こり、切れ刃が二分されるようになるとEは E_1 と E_2 に置き換えられる。分裂の時期をFで考えると同様にして F_1 と F_2 へのプロット変えが行なわれる。そしておのおのは l が短小でも第2摩耗領域で汚染されており、 F_1 のように $l = l_{sf}$ が満たされる切れ刃も派生することとなる。曲線CDEFは研削条件に影響されると考えられるが、本実験ではC点に相当する l として 0.1 mm 程度が妥当である。

3.4 第2摩耗領域の形状と構造

以上に示したように、第2摩耗領域の前縁が砥粒の摩耗面内にあるか切れ刃稜に相当する最前端部まで及んでいるかによって、切れ刃の由来や汚染の経過に相違が考えられる。汚染された切れ刃について、第2摩耗領域の形態を観察結果に基づいて分類すると図8のようにな

る。このうち低速形の第2摩耗領域(b)は周速1160 m/minの場合に多く認められたもので、摩耗面内に閉領域を形成しているのが特徴と言える。これら4形態のうち常速形第2摩耗領域(b)と低速形の(b)とがその基本をなすこと、(c)(d)は(a)(b)の破碎に伴って派生したか、目つまりによって他の切れ刃と作用上一体化され、この結果第2摩耗領域が誘出されるようになった切れ刃に該当する場合は多いのは容易に想像される。低速形第2摩

常速形(a)に部分欠損がおこると(a)と(c)が、低速形(b)に部分欠損がおこると(a)と(d)が派生数 α の切れ刃が作用上で一体化すると(a),(c),(d)が誘出される

図8 第2摩耗領域を有する切れ刃の形態的分類

砥石: A 46O, $V=1160$ m/min

図9 低速形第2摩耗領域

耗領域の生成については詳細を後述することとし、ここではその形状を図9に示すにとどめる。また汚染された摩耗面の微細な表面構造の変化についてはすでに概要を明らかにしている⁸⁾ので二つの領域の高低差を求めて表面構造を知ろうと試みた。図10は第1摩耗領域と第2摩耗領域の境界部分を顕微干渉計で調べたもので、略図の点線を境に干渉縞が屈曲しているのが認められる。縞模様その他から二領域の高低差は 0.1μ 程度であること、第1摩耗領域に比べて第2摩耗領域は低い平面をなしていることなどが明らかとなった。したがってこれまで第2摩耗領域と称してきた部分は、砥粒が高温の雰囲気中で工作物とある種の化学反応をひき起こして深さ 0.1μ 程度まで酸に可溶な物質を生成し、これが溶去された領域に外ならないことがうかがえる。

3.5 低周速下での第2摩耗領域

砥石周速を低下させると汚染の開始点は摩耗面の後縁より若干前方に移行し、図9のような閉領域が形成されるようになる。図11は周速1160 m/minで使用した砥石について l の度数分布を求め、かつ汚染の状態を形態

図10 顕微干渉計による第1摩耗領域と第2摩耗領域の高低差の観察

(a) 第2摩耗領域が肥大の過程にある場合

(b) 第2摩耗領域が成長した場合

図11 生成された第2摩耗領域の形態と頻度

図 12 l_{sf} , l_{sr} と l の関係

ごとに分類して示したものである。(a) 図は第 2 摩耗領域が成長途上にある $B=4$ mm の結果で、低速形の占める割合は l が大きいほど高くなっている。一方常速形のものはいわゆる少なく、 l の小さいものについては大部分が破碎に伴う派生か一体化による誘出の類となっている。また (b) 図は第 2 摩耗領域がかなり成長をとげた $B=1$ mm の場合で、 l が大きいほど低速形の占める割合が多いこと、(a) に比べて常速形のもの若干高い割合になっていることなどが認められる。

いま、閉領域をなす図 9 のような第 2 摩耗領域が生成され始める l の限界値と位置を知るために、第 2 摩耗領域の前縁および後縁までの長さ l_{sf} , l_{sr} と l の関係を求めてみると図 12 のような結果が得られる。この図で l_{sf} (黒丸印) に注目してみると、 l が小さい (特に $l < 0.075$ mm) 切れ刃では第 2 摩耗領域の前縁が切れ刃稜まで前進しているもの ($l_{sf}=l$) が非常に多く認められる。これらは生成の理由として破碎に伴う場合などに該当するので、当面の問題を考えるには除外するのが適切である。そこで、研削中に l が次第に増してある大きさ l_0 で第 2 摩耗領域を生成し、その後も引き続き破碎することなく l が順調に増大する場合を仮定すると、 l と l_{sf} , l_{sr} の関係は付記した曲線のように表わせる。曲線の交点は第 2 摩耗領域を生成し始める限界の摩耗長さ l_0 と、第 2 摩耗領域の生成点を示している。測定帯の位置 B を移動させた場合の結果も考慮すると本実験では $l_0=0.125$ mm, 生成点として $l_{sf}=l_{sr}=0.03$ mm が得られる。また線図からわかるように、第 2 摩耗領域の前縁の伸長速度に比べて後縁のそれは非常に小さい。

第 2 摩耗領域の生成点がこのように若干前方に移行し

ているのは、スライダである砥粒の周辺部から実際にはかなりの熱量が雰囲気中に拡散していること、接触面内での発熱量が切れ刃の前縁部では後縁部よりも多く均一でないことなどの理由によると考えられる。低速形の第 2 摩耗領域は周速 1930 m/min で使用した砥石でも認められるが、周速を低下させるに従って顕著になる。

4. 結 論

以上の結果をまとめるとつぎのようになる。

1) 第 2 摩耗領域の核は研削条こんに沿って生成され、細長い糸くず状を呈している。生成された多数の核が研削中に肥大化して相互に連接するようになったとき領域を形成する。

2) 第 2 摩耗領域は摩耗面上に生成された砥粒と工作物との反応物質が溶去された部分で、第 1 摩耗領域と第 2 摩耗領域にはほぼ 0.1 ミクロンの高低差がある。

3) 第 2 摩耗領域は砥粒摩耗面の長さ l が 0.1 mm ~ 0.125 mm 程度になったとき生成し始める。いったん第 2 摩耗領域がある切れ刃にできると、摩耗面の長さがこれよりも短い他の切れ刃でも第 2 摩耗領域による汚染を受けやすくなる。このような汚染の受けやすさは l の大きいものほど容易である。

4) 第 2 摩耗領域の生成が始まった砥石で研削を続行すると $l < 0.05$ mm の微小切れ刃でも第 2 摩耗領域を具有するようになる。これらには汚染によってもたらされたもの以外に、(i) 密集する切れ刃が作用中に一体化されて第 2 摩耗領域を誘出される結果となったもの、(ii) 第 2 摩耗領域が肥大化する際に砥粒が部分欠損を起こし、数箇の微小な切れ刃に分裂した結果によるものなどが多く含まれている。

5) 第 2 摩耗領域を生成した切れ刃はその形態によって 4 種類に分類できる。このうち基本形態のものとして常速形および低速形第 2 摩耗領域をあげることができる。第 2 摩耗領域の生成開始点は前者では摩耗面の後端部であるが後者では若干前方に移行した摩耗面内にある。低速形第 2 摩耗領域は閉領域をなすのを特徴とし、その前縁に比べて後縁の伸長速度は非常に小さい。

文 献

- 1) 田中, 津和, 河村: 研削加工の諸条件が研削砥石の性能に及ぼす影響について (第 2 報), 精密機械, 30, 12 (1964) 908.
- 2) 同上 (第 3 報), 精密機械, 31, 3 (1965) 227.
- 3) 同上 (第 4 報), 精密機械, 31, 5 (1965) 397.
- 4) たとえば, R.P. Steijn: On the Wear of Sapphire,

J. Appl. Phys., **32**, 10 (1961) 1951.E. J. Duwell: The Effect of Sliding Speed on the Rate of Wear of Sapphire on Steel, Wear, **9**, (1966) 363.

N. S. Eiss: Wear of Sapphire on Steel, Am. Ceram. Soc. 67th Annual Meeting Paper No. 7-c-65 (1965) など.

—表紙写真説明—

電 解 研 削 用 砥 石

本製品はアメリカ・アノカット社およびハーモント社の協同研究により完成した技術を導入し、国産化に成功した本格的電解研削用砥石で性能、ライフともきわめて優秀である。電解研削を行なうに当っては電力供給装置、研削盤、砥石および電解液が完全にマッチしたとき100%の性能を発揮する。

電解研削の利点

1. 研削能率が非常に高い。
2. 研削能率は他の条件が一定であれば被加工物の熱処理に無関係である。
3. 砥石のダイヤモンドの粒度と仕上面あらさは関係がない。すなわち、粗取りから仕上まで同一の砥

石で行なえ、スクラッチのない平滑な仕上面が得られ、かつ仕上精度もよい。

4. 電解研削は発熱がとまなわれないから被加工物の焼けクラックや研削ひずみが生じない。また後にかえりが生じない。
5. 砥石の寿命が非常に長い。これは電解研削においては研削量の90%以上が電気化学的に除去されるので機械的研削による砥石の摩耗が非常に少ないことによる。
6. 電解研削は超硬合金のみならず他の導電性材料にも応用できる。

電 解 研 削 用 砥 石 寸 法 表

ELC-1 TYPE ストレート型

ELC-6 TYPE カップ型

●ELC タイプ (超硬合金用) ダイヤモンド砥石

カップ型砥石

タイプ番号	D	a (max)	h (max)	t
ELC-6150	150	20	20	1.5 3.0
ELC-6175	175	25	25	
ELC-6250	250	65	25	
ELC-6300	300	75	25	
ELC-6350	350	100	25	

ストレート型砥石

タイプ番号	D	a (max)	h (max)	t
ELC-1150	150		12	1.5 3.0
ELC-1175	175		12	
ELC-1250	250		12	

●ELHS タイプ (合金鋼用) ノンダイヤモンド砥石

カップ型砥石

タイプ番号	D	a (max)	h (max)	s
ELHS-6150	150	20	20	12
ELHS-6175	175	25	25	12
ELHS-6250	250	65	25	6
ELHS-6300	300	75	25	6
ELHS-6350	350	100	25	6

日本クリステンセン・ダイヤモンド工業(株)

横浜市港北区箕輪町 816

TEL 044 (62) 1141 (代表)