定圧研削によるファインセラミックスの被研削性評価に関する研究(第2報)*

—除去速度の経時変化に基づく被研削性の評価—

澤 武一** 長渡康幸*** 幾瀬康史† 海野邦昭**

A research on the Evaluation of Grindability of Fine-ceramics by Constant Pressure Grinding (2nd Report)

—Evaluation of the Grindability based on Change of Removal Rate—

Takekazu SAWA, Yasuhiro NAGATO, Yasushi IKUSE and Kuniaki UNNO

The grindability of fine-ceramics is the most important information in order to determine the optimum grinding conditions and dressing intervals. This study proposed the method of grindability evaluation of fine-ceramics by using removal rate in constant pressure grinding. The grindability evaluation is based on the change of removal rate accompanied by the increase in stock removal. As a result, the grindability could be evaluated quantitatively by using the change ratio of the removal rate on the basis of primary removal rate.

Key words : grindability, constant pressure grinding, removal rate, diamond wheel, fine-ceramics

1. はじめに

研削加工技術は、新素材の開発とともに進歩している一方で、現在でも基本的な課題が多く、たとえば、ダイヤモンドホイールの作業面性状を最適化するためのツルーイング・ドレッシング技術やその評価方法に関しては未だ定量的な手法は確立されていない。また、研削加工を行う場合、最も重要となるのが研削条件の設定と目立て間寿命(ドレッシングからドレッシングまでの間隔)の把握であるが、ファインセラミックスは、非常に多くの種類があり、またそれぞれの種類によって被研削性が大きく異なるため、被研削性に関するデータベースは確立していない。このため、加工現場では、熟練した技能者の経験に基づく定性的な研削条件の設定と目立て間寿命の評価が行われており、定量的な研削条件および目立て間寿命の設定はなされていない現状がある。2008年を迎え、団塊の世代と呼ばれる熟練技能者の退職が進み、従来経験に頼っていた加工現場でも早急な被研削性のデータベースの確立が急務であると言える。しかし、ファインセラミックスの種類、すなわち、その機械的ならびに物理的特性に依存する被研削性と目立て間寿命に関するデータベースを確立するには膨大な労力と時間が必要になり、多大なコストが掛かることになる。このため、簡易的で短時間にかつ安価にファインセラミックスの被研削性が評価できる方法の開発が必要と考えられる。

このような見地のもと、本研究では、ファインセラミックスの被研削性を簡便に評価できる方法として、定圧研削時の除去速度を用いることを提案し、これまでに、ファインセラミックスの被研削性を定性的に評価できることを示した¹⁾。さらに、前報²⁾では、被研削性を定量的に評価することを目的として、研削圧力と初期的な除去速度の関係に及ぼす被研削材の機械的性質の影響について検討し、延性モードと脆性モード研削時における除去速度の定式化を行い、ファインセラミックスの機械的性質から材料の削り易さに関する被研削性を定量的に評価できる指針を導いた。

本報では、前報で検討した定圧研削時の初期的な除去速度の評価に加え、研削加工の進行に伴う除去速度の経時的な変化に着目し、定圧研削時における研削量と除去速度の関係を調べ、除去速度の変化に基づく被研削性の評価を行った。その結果、初期的な除去速度を基準とする除去速度の変化率を比較することにより、ホイールの切れ味劣化に関わる被研削性を定量的に評価できる指針を得たので、以下に報告する。なお、この被研削性の評価方法は、換言すると、ダイヤモンドホイールの目立て間寿命の評価法としても使用でき、研削加工の自動化に関し非常に有効な情報を得ることができると考えられる。

2. 定圧研削時の除去速度から得られる情報

図1に、定圧研削時の除去速度から得られる二つの被研削性に関する情報を示す。

一つは初期的な除去速度であり、ツルーイング・ドレッシング直後のホイールでファインセラミックスを定圧研削し、研削圧力と除去速度の関係から、材料の被研削性が評価できる²⁾。すなわち、同じ研削圧力で研削した場合、除去速度が高いセラミックスほど被研削性が良いと見なす評価方法が適用できる。定圧研削における研削圧力と除去速度の関係は、通常行われる定切込み研削における研削量と法線研削抵抗の関係に置換することがほぼ可

Fig.1 Information acquired from the removal rate in constant pressure grinding

* 原稿受付 平成19年12月3日

** 正会員 職業能力開発総合大学校(相模原市橋本台 4-4-1)

*** 正会員 近畿職業能力開発大学校(岸和田市稲葉町 1778)

† 正会員 職業能力開発総合大学校東京校(小平市小川西町 2-32-1)

能であり、上記の関係を被研削材の機械的性質から定量的に把握できれば、研削条件の最適化および高能率化にとって有意義な情報となる。

もう一つは研削の進行に伴う除去速度の時間的な変化であり、この値から、ファインセラミックスの被研削性を評価するものである。つまり、研削時間の経過や研削量に対し除去速度が低下し難い、換言すれば、ダイヤモンドホイールの目立て間寿命が長ければ被研削性が良いと見なす評価方法である。そして、定圧研削時の目立て間寿命と一般的に行われている定切込み研削における目立て間寿命を関連付けることができれば、この評価法から得られる情報は、研削加工の自動化に向けて有用な情報となる。

以下、後者に示した除去速度の経時的な変化からホイールの切れ味劣化に関する被研削性を定量的に評価することを目的として、ファインセラミックスの種類が定圧研削時の研削量と除去速度に及ぼす影響について検討する。

3. 定圧研削装置と実験条件

図2に、試作した定圧研削装置の概要を示す。本装置は工具研削盤のテーブル上に設置し、荷重を加えると試験片がダイヤモンドホイールに一定圧力で押し付けられ、定圧研削できるようになっている。本装置の工作物送り機構にはリニアスライドを用いた。研削実験では、一定圧力で種類の異なるファインセラミックスを研削し、研削の進行に伴う除去速度の変化を調べた。具体的には、研削の進行に伴う試験片の変位量を、変換部にひずみゲージを応用したダイヤルゲージ式の変位変換器で測定し除去速度を求めた。今回の実験で使用した試験片は、最も一般的なファインセラミックスとして常圧焼結の炭化けい素および窒化けい素、ジルコニア、アルミナを用いた。試験片の加工面形状は、4mm×4mmの正方形である。

表1に実験で使用した試験片の機械的性質を、表2に定圧研削実験の条件をそれぞれ示す。なお、研削実験においてはダイヤモンドホイール作業面の初期性状を一定にする必要があるが、ツルueing・ドレッシングにはプレーキドレッサを使用し、ツルueingにはGC80、ドレッシングにはWA220を用い、ツルueing・ドレッシング条件は、予備実験により十分な検討を行った上で設定した。なお、砥粒突き出し高さの測定は電気マイクロメータによる触針法、ホイール作業面の観察はCCDカメラにより行った。

4. 定圧研削における除去速度の経時的変化

4.1 研削量の増加に伴う除去速度と除去速度率

図3に、表2に示した条件で炭化けい素と窒化けい素を定圧研削した場合の研削量と除去速度の関係を示す。なお、本実験では、同じ定圧研削実験を3回行い、除去速度の再現性を十分に確認している。炭化けい素と窒化けい素の除去速度を比較すると、前者の方が除去速度が高くなることが確認できる。この結果より、本実験条件では、炭化けい素の方が被研削性が良いと判断できる。これは、研削圧力が比較的高い場合には、脆性破壊を主とする研削形態になり、破壊靱性値の小さな炭化けい素の除去速度が大きくなったためと思われる。

次に、両セラミックスともに研削量の増加に伴い除去速度が低下することがわかる。これは、研削の進行によりホイールの切れ味が劣化し、除去速度が低下するものと考えられる。目立て間寿

Fig.2 Appearance of experimental system

Table1 Properties of workpiece materials

Workpiece material	Vickers hardness Gpa	Fracture toughness MNm ^{-3/2}	Young's modulus Gpa
Silicon carbide	21.3	4.4	401
Silicon nitride	13.9	5.6	294
Zirconia	12.6	8.0	205
Alumina	14.6	4.8	390

Table2 Experimental conditions

Wheel	SDC230N100B
Wheel speed : Vg	10.8m/s
Workpiece	Silicon carbide
	Silicon nitride
	Zirconia
	Alumina
Workpiece size	4 mm × 4 mm
Grinding pressure : Gp	4.7 N/mm ²
Grinding fluid	Soluble type (1/50) 0.35 l/min

Fig.3 Relationship of stock removal and removal rate

命に関わる両者の被研削性を定量的に比較する場合には、図に示すように、炭化けい素と窒化けい素の除去速度に大きな違いがあるため、その差が確認し難いという不都合がある。そこで、研削量と除去速度率の関係を求めることにした。

なお、本実験における除去速度率とは、研削量1.0mm³/mm²時の除去速度を基準とし、各研削量における除去速度を除した値を百分率で表したものと定義することにする。

$$RD = (Z_n / Z_0) \times 100 \quad (1)$$

ただし、RD：除去速度率 [%]、Zn：研削量n mm³/mm²時の除去速度、Z0：研削量1.0mm³/mm²時の除去速度である。

図4に、炭化けい素と窒化けい素を定圧研削した場合の研削量と除去速度率の関係を示す。図から、図3で示した被研削材の除去速度の大小に関係なく、除去速度の変化が定量的に評価できることが確認できる。すなわち、研削量の増加に伴って除去速度率の低下する傾きが大きく、一定の値に速く到達する被研削材ほど、ダイヤモンドホイールの切れ味の劣化が速い被研削材と言える。換言すれば、ダイヤモンドホイールの目立て間寿命を評価基準と

した場合の被研削性が悪いという評価ができることになる。

上記のような評価に基づき、本図を考察すると、窒化けい素は炭化けい素に比べ研削量の増加に伴う除去速度率の低下が大きく、研削量 $40\text{mm}^3/\text{mm}^2$ において除去速度率が極めて小さくなり一定の値に収束することが認められる。このことから、窒化けい素は炭化けい素よりもダイヤモンドホイールの切れ味劣化に及ぼす影響が大きく、目立て間寿命が短いということが判断できる。

以上の結果から、研削量の増加に伴う除去速度率を比較することにより、ホイールの切れ味劣化に関する被研削性を定量的に評価できる可能性を見出した。そこで、このような定圧研削によるファインセラミックスの被研削性の評価法が妥当かどうか検討するために、アルミナとジルコニアを用いて定圧研削実験を行った。

図5に、アルミナとジルコニアを定圧研削した場合の研削量と除去速度率の関係を示す。なお、参考のため、図4に示した炭化けい素と窒化けい素の実験値も合わせて示す。図より、アルミナでは、炭化けい素や窒化けい素と同様に、研削量の増加に伴い除去速度率が低下することが確認できる。一方、ジルコニアでは、研削の進行により除去速度率にバラツキがあるが、研削量が増加しても除去速度率に大きな変化が見られない。このように、セラミックスの種類により、除去速度率の変化の傾向と割合が異なっていることから、経時的な除去速度率の変化に基づきホイールの切れ味劣化に関するファインセラミックスの被研削性を評価することは可能であると考えられる。なお、ジルコニアにおいて研削の進行による除去速度率が大きく変化しない原因については、後述する研削量と研削仕上げ面性状の関係から考察する。

4.2 研削量の増加に伴うホイール作業面の変化

研削量の増加に伴う除去速度の変化は、ダイヤモンドホイールの作業面性状の劣化と関係すると考えられる。そこで、研削量の増加に伴う除去速度とダイヤモンドホイールの作業面性状の関係について検討した。

図6に、ドレッシング前後のダイヤモンドホイール作業面の光学デジタル写真と断面曲線を示す。なお、ツルーイングおよびドレッシングは、前述したようにブレーキドレッサを使用して行っている。図6(a)より、ドレッシング前では砥粒の突き出しがほとんど確認できないが、ドレッシング後では砥粒の突き出しが観察できる。図6(b)より、ドレッシング前の砥粒突き出し高さは約 $5\mu\text{m}$ である一方、ドレッシング後の砥粒突き出し高さは約 $20\mu\text{m}$ であることが確認できる。次に、研削量の増加に伴うダイヤモンドホイール作業面の変化について検討する。

図7に、炭化けい素を定圧研削した場合の研削量 $2.5\text{mm}^3/\text{mm}^2$ 、 $8.0\text{mm}^3/\text{mm}^2$ 、 $90\text{mm}^3/\text{mm}^2$ におけるダイヤモンドホイール作業面の光学デジタル写真と断面曲線を示す。図より、研削量 $2.5\text{mm}^3/\text{mm}^2$ の研削初期の場合には、ダイヤモンドホイール作業面上に砥粒が点在し、砥粒突き出し高さもドレッシング直後とほとんど変化していないことが確認できる。次に、暫く研削が進行した研削量 $8.0\text{mm}^3/\text{mm}^2$ の場合には、砥粒突き出し高さが幾分小さくなっていることが確認できるが、大きな砥粒の脱落は見られず、全体的には比較的安定した研削が行い得る状態であると言える。しかしながら、研削量 $2.5\text{mm}^3/\text{mm}^2$ の時よりも砥粒の数が少ないように思われる。これは、ドレッシング直後の不安定な砥粒が脱落したことによるものと推察される。そして、長時間研削した研削量 $90\text{mm}^3/\text{mm}^2$ の場合には、ほとんどの砥粒が摩滅または脱落していることが確認できる。

ここで、研削量とホイール作業面の変化を先に示した図4と関連して考察すると、研削量 $2.5\text{mm}^3/\text{mm}^2$ では、ドレッシング直後

Fig.4 Relationship of stock removal and ratio of removal rate

Fig.5 Relationship of stock removal and ratio of removal rate

(A) Photographs of wheel working surface

(B) Profiles of wheel working surface

(a) Before dressing (b) After dressing

Fig.6 Photographs and profiles of wheel working surface before and after dressing

でホイール作業面上の砥粒が不安定な状態で研削が行われ、この不安定な砥粒が脱落することにより除去速度率が急激に減少する領域であり、研削量 $8.0\text{mm}^3/\text{mm}^2$ では、ホイール作業面が安定し、研削の進行に伴い砥粒が徐々に摩滅または脱落するために、除去速度率が定常的に低下する領域であると考えられる。そして、研削量 $90\text{mm}^3/\text{mm}^2$ では、作業面上に砥粒がほとんど認められない状態、または砥粒が摩滅した状態となり、研削加工が進行せず目立て間寿命に近い領域であると言える。

4.3 研削量の増加に伴う研削仕上げ面性状の変化

通常の研削において、ホイール作業面上の砥粒が全て脱落または摩滅した状態を目立て間寿命に至ったと考えることは妥当性がないので、除去速度率がある一定値に達したら目立て間寿命に至ったと判断すべきである。そこで、その判断基準の一つである研削量の増加に伴う研削仕上げ面性状の変化について吟味する。

Fig.7 Photographs and profiles of wheel working surface after constant pressure grinding

図8に、炭化けい素と窒化けい素を定圧研削した場合の研削量 $2.5\text{mm}^3/\text{mm}^2$ 、 $8.0\text{mm}^3/\text{mm}^2$ 、 $90\text{mm}^3/\text{mm}^2$ における研削仕上げ面をSEM観察した結果を示す。なお、窒化けい素では、除去速度率が研削量 $40\text{mm}^3/\text{mm}^2$ でほぼゼロになるため、この時の研削仕上げ面を炭化けい素の研削量 $90\text{mm}^3/\text{mm}^2$ と比較している。図より、炭化けい素の場合には、ほぼ全域が脆性破壊に伴う不規則な表面をしているのに対し、窒化けい素の場合には、局所的な脆性破壊と塑性流動によって生じたと考えられる明確な研削条痕が観察でき、両者は異なった加工形態を示している。

しかしながら、両者とも、研削量の増加に伴う研削仕上げ面性状の変化は似ており、研削量 $8.0\text{mm}^3/\text{mm}^2$ では、研削条痕が幾分観察されるが研削仕上げ面全体にクラックが多数発生し、クラックも大きい。研削量 $90\text{mm}^3/\text{mm}^2$ になると、炭化けい素では研削仕上げ面に微細な研削条痕が発生し、研磨仕上げ面の様相を呈しているのに対し、窒化けい素では仕上げ面全体が押し潰されたようになっていることが認められる。

これら研削仕上げ面性状の変化から定圧研削時の研削状態を推察すると、ドレッシング直後では砥粒の突き出しが高く、不安定な砥粒も含め砥粒密度も高いため幾分延性的な研削となり、その後、研削圧力に依存した安定した研削が行われる状態に移行し、さらに研削が進行すると徐々に砥粒が摩滅脱落し、目立て間寿命に達すると考えることができる。そして、この推察は前述したホイール作業面性状の変化とほぼ一致する。

4.4 除去速度率とホイールの目立て間寿命

図5でしたように、ジルコニアを除く各種セラミックスは、研削量の増加に伴って除去速度率が低下し、除去速度率が一定の値に収束するのは除去速度率が0%から10%の間であることが確認できる。さらに、この除去速度率が一定の値に収束する領域は、図7、図8から、ホイール作業面上の砥粒がほとんど脱落または摩

Fig.8 SEM photographs of workpiece surfaces ground of SiC and Si₃N₄ after constant pressure grinding

滅した状態で、定切込み研削は不可能であることがわかる。これらの結果を総括すると、ダイヤモンドホイールの目立て間寿命は、その評価基準を除去速度率10%以下に設定するのが妥当であると考えられる。しかしながら、除去速度率が0%の場合をホイールの目立て間寿命とすることは実際の研削加工の場合において妥当性がないので、本研究においては、除去速度率5%程度がホイールの目立て間寿命を決定する上でのしきい値として相応しいと考えている。

なお、研削量が増加するにも関わらず、除去速度率がそれほど低下しないジルコニアでは、研削量 $2.5\text{mm}^3/\text{mm}^2$ 、 $8.0\text{mm}^3/\text{mm}^2$ および $90\text{mm}^3/\text{mm}^2$ において、いずれの研削仕上げ面でも研削条痕が発生し、延性的な研削形態になっていることが伺え、研削仕上げ面に大きな変化は見られなかった。これは、ジルコニアの場合、研削熱によりその硬度が低下し、延性的な研削形態で研削されるため、ホイールの作業面の劣化があまり生じず、その結果、研削が進行しても除去速度がそれほど変化しないものと思われる。

4.5 除去速度率の指数近似による被研削性の定量的評価

目立て間寿命に関わるファインセラミックスの被研削性を定量的に評価するためには、除去速度率の変化を研削量の関数として表す必要がある。そこで、各種セラミックスの研削量と除去速度率の関係を最小2乗法により指数近似を行い、被研削性の定量的な評価方法を検討した。指数関数の定義式を式(2)に示す。

$$y = 100e^{bx} \quad (2)$$

ただし、 y : 除去速度率の近似値、 e : 自然対数の底、 b : 定数(除去速度率の変化の傾き)、 x : 変数(ここでは研削量を示す)。

図9に、研削量と除去速度率の関係を指数近似した結果を実験値と合わせて示す。図より、窒化けい素を除いては、実験値と指数近似曲線がよく対応していることが確認できる。この結果より、

今回の実験条件下では、定圧研削における研削量と除去速度率の関係は、ほぼ指数関数で置換できると考えられる。ここで、窒化けい素の場合、指数関数と実験値が幾分一致しない傾向にあるのは、今回実験に用いた窒化けい素は常圧焼結法で作られており、圧力むらを生じやすいので、その均質性に起因するものではないかと推察しているが、更に詳細な検討を行いたいと考えている。

表3に、図9で示した近似曲線の定数bを示す。表から、定数bは、窒化けい素が最も小さく、次いで炭化けい素、アルミナであり、ジルコニアが最も大きいことが確認できる。この傾向は、従来一般的に言われている被研削性に関する定性的傾向とほぼ一致している。したがって、定圧研削時の研削量と除去速度率の関係を指数関数で近似した場合の定数bを調べることで、目立て間寿命に関わるファインセラミックスの被研削性を定量的に予測できると考えられる。上記の評価指針に従えば、表3の結果より、炭化けい素は、窒化けい素よりも目立て間寿命に関わる被研削性が良いと評価されることになるが、この評価は研削条件に依存することが考えられ、現在のところデータ数が少ないので、更に実験を実施し、研削条件に対応したデータベースの確立と詳細な検討を行う必要がある。また、定数bは、被研削材の高温強度に依存することが予測できるため、今後、研削点温度の測定や低研削圧力における実験を行うことにより、さらに吟味を行いたいと考えている。

5. ま と め

ファインセラミックスの被研削性を簡便に評価する方法として、定圧研削時の除去速度を用いることを提案し、研削量と除去速度の関係調べ、除去速度の変化に基づく被研削性の評価を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) ドレッシング直後の初期的な除去速度を基準とする除去速度率を比較し、研削量の増加に伴う除去速度率の変化が大きなファインセラミックスほどダイヤモンドホイールの切れ味劣化に及ぼす影響が大きく、被研削性が悪いという評価ができる。
- (2) 除去速度率に基づいてホイールの目立て間寿命を評価する場合、ダイヤモンドホイールの作業面性状および被研削材の研

Fig.9 Relationship of stock removal and ratio of removal rate

Table3 Constant values of various fine-ceramics

Material	Value of b
Silicon carbide	-0.032
Silicon nitride	-0.068
Zirconia	-0.002
Alumina	-0.017

削仕上げ面の両面を考慮した結果、本実験条件下では、除去速度率5%程度がホイールの目立て間寿命を決定する上でのしきい値として妥当と判断された。

- (3) 研削量と除去速度率の関係は、指数関数でほぼ近似することができ、指数関数の定数b(除去速度率の変化の傾き)を比較することにより、目立て間寿命に関わるファインセラミックスの被研削性を定量的に評価できる可能性を見出した。

謝 辞

本研究にあたり、ダイヤモンドホイール、セラミックス、研削油剤のご提供を頂いたノリタケボンデッドアブレーション(株)、昭和電工(株)、ユシロ化学工業(株)の各社に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 海野邦昭: CBN・ダイヤモンドホイールの使い方, 工業調査会, (1991) 174.
- 2) 澤武一, 長渡康幸, 幾瀬康史, 海野邦昭: 定圧研削によるファインセラミックスの被研削性の評価に関する研究(第1報)ー延性モードと脆性モード研削時の除去速度の定式化ー, 精密工学会誌, 74, 3(2008) 247.