超音波重畳された研削液が加工特性に及ぼす効果の実験的検証*

—目づまりしやすい材料における研削性能の向上—

石 松 純** 祝 田 惇 史*** 磯 部 浩 巳†

Experimental Verification of Effect of Ultrasonic Excited Grinding Fluid on Grinding Performance

Jun ISHIMATSU, Atsushi IWAITA and Hiromi ISOBE

Wheel loading is one of the serious problems on high efficiency grinding, creep feed grinding, and grinding using fine grain. Some researches were experimentally demonstrated ultrasonically excited grinding fluid which includes cavitation bubble, prevent the loading and improve surface integrity. In this study, simple comb-form exciter has been developed. It is inserted between the fluid supplying nozzle and grinding point. Influence of distance between exciter and grinding point has been investigated to optimize distance. The performance of exciter has been investigated through grinding hard-to-grind material with WA grinding wheel. As a result on aluminum alloy and SUS, influences improvement of surface integrity, reduction of grinding force and suppression of grinding force escalation, with ultrasonically excited fluid generated by the comb-form exciter are confirmed. The performance of exciter has been investigated also for ferrous material which known as easy-to-grind material. As a result, surface integrity improvement which influenced by ultrasonically excited fluid is confirmed also for ferrous material.

Key words: grinding, ultrasonic supported machining, grinding fluid, loading inhibition, surface roughness

1. 緒 言

多くの研削加工において研削液を加工部に供給しながら行う。研削液を用いる目的は、研削切りくずの排出による砥石の目づまり抑制、研削点の摩擦抵抗低減、研削点の温度上昇抑制があげられる。しかし、クリープフィード研削、微粒砥石による研削、および切りくずが切刃に溶着しやすい材料の研削の場合、砥石の目づまりが大きな問題となる。砥石の目づまりを抑制する方法として、研削液に超音波エネルギーを重畳する方法^{1)~3)}が提案されている。これは液体に超音波エネルギーを重畳することで発生するキャビテーション気泡が破裂する際の衝撃力により物体表面の汚れを除去する超音波洗浄の原理を利用したものである^{4)~5)}。また、キロゾニック振動援用クーラントを併用したフレキシブル導液シート法による砥石洗浄およびメガゾニック援用クーラントによる加工等では、超音波エネルギーを重畳した研削液による目づまり抑制作用および表面粗さの改善効果について論じられている^{1)~3)6)}。しかし、シートなどの付属設備が必要であるなどの問題³⁾⁶⁾がある。

本研究では、研削液供給ノズルから噴流状態で大気中に吐出された研削液に超音波振動を重畳する簡便な方法を提案する。そして振動エフェクタによる超音波エネルギーの重畳が加工特性に与える効果を比較した。

2. 原 理

本研究は、液体に超音波エネルギーを重畳することで発生するキャビテーション気泡を利用して研削性能の改善を図るものである。一般的に研削液はノズルから吐出され、研削加工点に向けて供給される。この噴流中に超音波振動するエフェクタを挿入し、研削液にエネルギーを重畳する。くし歯状のエフェクタ(図1)は、研削液の供給を阻害せずに超音波エネルギーを重畳する。図2に振動エフェクタの配置と超音波重畳の様子を示す。a)の慣用研削液と比較して b)の超音波エネルギーを重畳した研削液は気泡を含有して白く写っていることが確認できる。超音波振動のエネルギーが重畳された研削液によってチップポケットや砥粒に凝着した被削材、すなわち目づまりの抑制が期待される。

3. 実験装置と方法

振動エフェクタはボルト締めランジュバン振動子で励振される。エフェクタの全長は90mmで幅は使用するボルト締めランジ

* 原稿受付 平成 25 年 12 月 3 日

** 学生会員 長岡技術科学大学大学院 (新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

*** 学生会員 長岡技術科学大学大学院 (現ジェイテクト)

† 正 会 員 長岡技術科学大学 (新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

Fig. 2 Comparison of ordinary fluid and ultrasonic excited fluid

ユバン振動子に合わせ 25mm とした。くし歯部分は幅 1.5mm, ピッチ 3.5mm とした。レーザドップラー振動計を用いてくし歯先端の長手方向振幅を縦方向 5mm 毎に測定した結果を図 3 に示す。横軸の番号は、図 1 中の①～⑤に対応する。どの位置でも、30 μ m 程度振動していることが分かった。図 2 に示した通り、研削液供給ノズルを研削加工点に向け、研削液噴流吐出後の任意の位置に振動エフェクタを挿入する。エフェクタの角度は水平とし、研削液ノズル角度は水平に対して 30°とする。これはノズルから吐出後に自由落下する研削液が加工点近傍にかかる角度である。研削抵抗は圧電式多成分小型切削動力計を用いて接線分力と法線分力を測定する。

4. 実験

4.1 エフェクタと加工点間の距離の影響

振動エフェクタと加工点の距離 C_{W-E} と研削抵抗低減効果の関係を検証した。なお、距離 C_{W-E} が 50mm 以下では砥石と接触する危険性があり、70mm 以上では吐出した研削液の流路からエフェクタが外れてしまうため、距離 C_{W-E} を 50mm, 60mm, 70mm とし A5052 に対して加工を行い、慣用研削液による加工の結果と比較を行った。アルミニウム合金は軟質であるため、切りくずが砥粒切れ刃に溶着し、目づまりしやすい材料として

Fig.3 Amplitude of teeth

知られている^{9)~12)}。加工条件および砥石の組成を表 1 に示す。予備加工実験を行い、この加工条件では目づまりが発生することを確認している。切り込み量は砥石半径方向に 5 μ m, 研削液には水溶性研削液(CHEMICOOL SR5)を使用し、研削液流量は 3L/min である。砥石回転数は 2880rpm, 砥石周速度は 27.1m/s である。被削材は砥石送り方向長さ 80mm, 幅 8mm である。なお、砥石の回転軸方向への送りを行わず、目づまりが生じやすい平面プランジ研削を行った。研削抵抗の推移を図 4 に示す。ここでの研削抵抗とは 1 回の切込において研削開始点から研削終了点までに測定された研削抵抗値の平均である。測定した 4 種のデータに対して分散分析を行った結果、分散比 $F=89.8$ となり F 境界値を上回る。また P 値も 1.5×10^{-25} と棄却域と比較して充分小さく、統計的に有意に差があることが分かった。研削の進展に伴い目づまりが生じ研削特性が悪化して、次第に研削抵抗が増える。研削抵抗を最小二乗法によって近似した 1 パスあたりの研削抵抗増加率で比較すると、慣用研削では 5.7mN/path であり研削抵抗の増加傾向がみられる。超音波エネルギーを重畳した場合は $C_{W-E}=50$ mm で 1.1mN/path, $C_{W-E}=60$ mm では 2.7mN/path, $C_{W-E}=70$ mm では 3.2mN/path であり、慣用研削液に比べ超音波エネルギーを重畳した条件では研削抵抗の増加傾向が抑制された。以上の結果より今回の条件内では $C_{W-E}=50$ mm の条件で最も超音波重畳の効果が大きいことがわかった。以降の加工実験においても、 $C_{W-E}=50$ mm とする。

4.2 A5052 および SUS304 に対する加工

A5052, SUS304 に対する超音波重畳研削液の効果を検証した。オーステナイト系ステンレス鋼である SUS304 は耐食性に優れるが、一般砥粒との親和性がありアルミニウムと同様に目づまりしやすい材料である⁷⁾¹²⁾¹³⁾。加えて、熱伝導率が炭素鋼に

Table 1 Grinding condition

Work material	A5052, SUS304, SKS3
Depth of cut	5 μ m
Feed rate	25mm/s(A5052) 160mm/s(SUS304, SKS3)
Grind fluid	CHEMICOOL SR5(soluble type)
Flow rate	3 l/min
Rotational speed	2880rpm
Grinding speed	27.1m/s
Grinding wheel	WA60K8VSK-1 180 $\times$ 13 $\times$ 31.75mm
Size of work	8 $\times$ 80mm
Dynamometer	Kistler 9256C1
Grinding type	Plunge grinding

Fig.4 Influence of distance between effector and grinding force

比ベ 1/3~1/4 と低いため研削熱が逃げにくいという特徴がある。研削速度は A5052 に対しては 25mm/s, SUS304 に対して 160 mm/s とした。

4.2.1 A5052 材における研削抵抗

研削開始後 30 回目の加工における研削抵抗の結果を図 5 に示す。通常研削液を用いた研削(以下、慣用研削)では、超音波重畳研削に比べ研削抵抗が大きくなっていると共に、研削抵抗のばらつきも大きいことが分かる。図 6 に A5052 研削中の研削抵抗の推移を示す。図中のバーは 1 回の切込における研削抵抗の標準偏差, すなわち研削抵抗のばらつきを表す。目づまり状態になると砥粒に凝着した切りくずが堆積して工作物と摩擦し合い、研削抵抗が増加し、極端な場合には研削不能になる¹¹⁾。慣用研削では加工回数の増加にともなって目づまりに起因する、研削抵抗の増加が確認できる。一方、超音波重畳研削では研削抵抗の増加が抑制されていることがわかる。目づまりのないドレッシング直後の研削回数 1~10 パスの研削抵抗の平均値は慣用研削において 3.0N, 超音波重畳研削で 2.2N となり、研削抵抗の低減効果も確認された。また増加率を比較すると、慣用研削では 5.7mN/path であるのに対して、超音波重畳研削では、1.1mN/path となった。1~200 パスの研削抵抗の標準偏差の平均値は慣用研削において 0.9N, 超音波重畳研削において 0.5N となり超音波重畳においてばらつきの改善が見られた。

4.2.2 エフェクタによる影響

図 7 に示すようにエフェクタを外した状態で、また研削液流量を増やした研削を行い前節の超音波重畳を行った際の結果と比較した。送りは前節と同じく 25m/s 研削液流量を 4.5L/min とした。結果の比較を図 8 に示す。エフェクタを設けない場合の研削抵抗の平均値は 2.6N であり、エフェクタを設け超音波重畳をしない場合の値よりは小さく、エフェクタを作動させた時の値よりは高い値を示した。一方で、標準偏差の平均値は 2.2N とエフェクタを設置した場合に比べて、ばらつきが大きくなった。

4.2.3 SUS304 材における研削抵抗

次に、SUS304 研削中の研削抵抗の推移を図 9 に示す。

Fig.5 Deviation of grinding force in 1 path

Fig.6 Grinding force escalation (A5052)

Fig.7 Setup without effector

Fig.8 Grinding force escalation

SUS304 の研削においてはドレッシング直後の研削回数 1~10 パスの研削抵抗の平均値が慣用研削において 18.2N, 超音波重畳研削において 17.0N となった。また増加率を比較すると、慣用研削では 7.9mN/path であり目づまりによる研削抵抗の増加傾向がみられる。超音波重畳研削では、3.8mN/path となった。1~200 パスの研削抵抗の標準偏差の平均値は慣用研削において 5.9N, 超音波重畳研削において 4.3N となり SUS304 材においても超音波重畳によるばらつきの改善が見られた。

4.2.4 研削前後での目づまり状況の比較

研削加工前後で砥石表面の状態を比較するために、砥石直下にマイクロスコープ(Keyence 社製 VHX-200)を据え付け、砥石表面写真の撮影を行った。図 10 にマイクロスコープの設置状況を示す。砥粒である WA と結合剤であるビトリファイドは光を透過するのに対して凝着物は金属であるため光を透過しない。撮影した画像に対して輝度を基にし

Fig.9 Grinding force escalation (SUS304)

Fig.10 Camera setup for wheel surface

て二値化処理を行い、光を透過しなかった黒色部分を目づまりとしてその面積率を計算する。撮影は加工前、100パス加工終了後および200パス加工終了後に行い、それぞれ無作為に砥石上10ヶ所を撮影し、二値化画像に占める黒色部分の画像に占める割合の平均値を求めた。

図11にA5052研削後砥石表面の二値化画像を示す。それぞれ、通常研削液、超音波エネルギーを重畳した研削液による研削において100パス加工後および200パス加工後の結果である。研削回数の増加にともない、黒色部分すなわち砥石表面の目づまりが増加し、超音波重畳の方が目づまりの増加が抑制されていることがわかる。図12にSUS304研削後砥石表面の二値化画像を示す。SUS304の研削回数200パスにおける目づまり面積率は、慣用研削で21%、超音波重畳において12%となり超音波重畳研削液によって目づまりを

Fig.11 Loading on wheel surface against A5052

Fig.12 Loading on wheel surface against SUS304

Fig.13 Percentage escalation of wheel loading

抑制できることが分かった。図13にA5052およびSUS304の目づまり面積率の推移を示す。点A5052の研削回数200パスにおける目づまり面積率は、慣用研削で10%、超音波重畳において4%となった。

4.2.5 粗さ曲線と表面粗さ

加工後の研削面を比較するためにそれぞれ3ヶ所ずつ表面粗さを計測した。図14にA5052研削後の被研削面プロファイルと被研削面の写真を示す。表面粗さは3点の平均値で、エフェクタなしの条件において $6.5\mu\text{mRz}$ 、エフェクタを設置し、ノズルが遠ざかることにより $8.4\mu\text{mRz}$ と性状が悪化するが、超音波エネルギーの重畳によって $5.3\mu\text{mRz}$ に向上した。河西ら¹¹⁾はアルミニウムの研削において目づまり量が増加すると、砥粒に凝着した切り屑によって研削面にスクラッチが発生することにより仕上げ面粗さが悪化することを実験的に明らかにしている。超音波を重畳しない2条件では被研削面にスクラッチが発生しているが、超音波重畳研削による結果には見られない。図15にSUS304研削後の被研削面プロファイルを示す。表面粗さは慣用研削において $9.0\mu\text{mRz}$ から超音波重畳によって $7.6\mu\text{mRz}$ に向上した。慣用研削の被研削面では、スクラッチが見られ、SUS304においても超音波エネルギーの重畳による改善効果が見られた。

4.3 目づまりしにくい材料に対する加工

研削性の悪い材料に対し、目づまりしにくく研削しやすい材

Fig.14 Surface roughness and profile (A5052)

Fig. 15 Surface roughness and profile (SUS304)

料に対する超音波重畳研削液の効果を検証するために SKS3 の研削を行った。条件は SUS304 の研削と同様である。SKS3 に対する慣用研削加工および超音波振動重畳研削液を供給しながらの 1~200 パスの研削抵抗の推移を図 16 に示す。研削開始直後である研削回数 1~10 パスの研削抵抗の平均値は慣用研削において 21.0N、超音波重畳研削において 17.1N となった。また、最小二乗法によって近似した曲線の傾きを比較すると、慣用研削では 20mN/path、超音波重畳研削においても 20mN/path であった。初期研削抵抗の差に関わらず研削抵抗の増加傾向に差が出なかった理由としては、目づまりしにくい SKS3 では砥粒摩耗に起因するところが多いが、低減した研削抵抗でも摩耗が進んだのではないかと考えられる。一方、200 パス中の平均値として研削抵抗の標準偏差は慣用研削において 4.2N、超音波重畳研削において 3.3N と安定な研削となった。結果から SKS3 の研削でも研削抵抗低減効果が見られることがわかった。

図 17 に粗さ曲線と被研削面の写真を示す。表面粗さは慣用研削において $3.5\mu\text{mRz}$ から超音波重畳によって $3.3\mu\text{mRz}$ に向上した。被研削面の写真からは、SKS3 の研削では慣用研削、超音波重畳研削ともに目だったスクラッチ痕は見られなかった。

これらの結果より、前節での A5052、SUS304 での加工における研削抵抗の増加は目づまりによるものであると確認できた。

5. 結 言

本研究では、研削液に超音波振動エネルギーを重畳する簡便なエフェクタを開発し、目づまりしやすい材料に対して加工を行い、超音波振動エネルギー重畳による目づまり抑制効果を検証した。また、目づまりしにくい材料に対しても研削加工を行い、効果を比較した。それらから、次のような結果を得た。

- (1) 振動エフェクタは加工点に近い方が、研削抵抗低減効果が高いことが分かった。
- (2) 目づまりしやすいとされるアルミニウム A5052 の研削において研削加工後の画像の 2 値化処理により目づまりを比較し、通常研削液による加工で 10% の目づまり率に対し超音波重畳研削液による加工では 4% となり目づまり抑制効果があることを確認した。研削抵抗において、超音波重畳により加工毎の増加率が $5.7\text{mN/path} \rightarrow 1.1\text{mN/path}$ 、加工中のばらつきが $0.9\text{N} \rightarrow 0.5\text{N}$ と抑制効果があることを確認した。
- (3) 同じくステンレス SUS304 の研削においても目づまり率が $21\% \rightarrow 12\%$ 、研削抵抗の増加率が $7.9\text{mN/path} \rightarrow 3.8\text{mN/path}$ 、研削のばらつきが $5.9\text{N} \rightarrow 4.3\text{N}$ と改善効果が

Fig. 16 Grinding force escalation (SKS3)

Fig. 17 Surface roughness and profile (SKS3)

あることを確認した。

- (4) SKS3 の研削加工において、超音波重畳研削による研削抵抗低減効果が $4.2\text{N} \rightarrow 3.3\text{N}$ 、表面粗さにおいて $3.5\mu\text{m} \rightarrow 3.3\mu\text{m}$ の改善効果を確認した。研削抵抗の増加傾向に差はみられなかったものの、初期研削抵抗に差があることが分かった。

参 考 文 献

- 1) Toshiharu SHIMIZU, Shinichi NINOMIYA, Yoichi SHIRAISHI, Manabu IWAI, Tetsutaro UEMATSU, Kiyoshi SUZUKI: Effects of in-process wheel cleaning by a coolant flow guided flexible sheet method using coolant accelerated by kilo-sonic vibration, Journal of the Japan Society of Grinding Engineers, **53**, 1 (2009)39
- 2) 鈴木清, 白石陽一, 三代祥二, 関根弘光, 植松哲太郎, 岩井学: キロソニックフローティングノズルによる研削特性, 2003 年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, (2003)313.
- 3) 鈴木清, 岩井学: メガソニッククーラント加工法の研究(第一報), 砥粒加工学会会誌, **48**, 2(2004)95.
- 4) 村井 等: キャビテーション (発生の機構と形態, 気泡の挙動, 騒音), 日本舶用機関学会誌, **11**, 9, (1976)682.
- 5) 阿座上 瑞美: 超音波洗浄における異物除去メカニズム 共振気泡による摩擦作用, **47**, 1(1996)37.
- 6) 二宮進一, 清水俊晴, 西崎匡, 岩井学, 植松哲太郎, 鈴木清: 金属製フレキシブル導液シートによるメタル硬度ダイヤモンドホイールの電解インプロセスドレッシング研削, 砥粒加工学会誌, **52**, 8(2008)478.
- 7) 庄司克雄: 研削加工学, 養賢堂(2004)129.
- 8) 愛恭輔: 現場で役立つ研削加工の勘どころ, 日刊工業新聞社(2007)116.
- 9) 長谷川嘉雄, 花崎伸作, 宋地復: アルミニウム合金研削時の目づまり現象, 軽金属, **33**, 6(1983)323.
- 10) 野口武志, 重松日出見: アルミニウム研削に関する研究, 日本機械学会論文集, C 編, **48**, 425(1982)139.
- 11) 河西 敏雄: アルミニウムの研削 (第 1 報), 精密機械, **34**, 12 (1968) 38.
- 12) 幸島和彦, 鬼鞍宏猷, 佐久間敬三: ステンレス鋼の研削における CBN ホイールの目づまり現象, 精密工学会誌, **58**, 7(1992)1209.
- 13) 田中秀穂, 熊谷信男: 難削材の研削 チタン合金, ステンレス鋼について, 精密工学会誌, **58**, 4 (1992)601.