

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 22 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289012

研究課題名(和文) 砥石内直接研削液供給による研削点環境最適化に関する研究

研究課題名(英文) Study on the optimization of grinding point environment by a direct supply of grinding fluid from inner side of the grinding wheel

研究代表者

笹原 弘之 (Sasahara, Hiroyuki)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00205882

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：研削砥石の内部から研削液を研削点に直接的に供給し、研削点の温度・雰囲気をも最適制御する加工方法を提案した。この方法により、WA砥石とCBN砥石により鋼やチタン合金の研削を行う装置を開発し、研削加工の高能率化、加工変質層の最小化、加工精度と加工面あらさの向上、穴内面の形状精度の向上が可能となることを示した。また、CFRPの研削加工においても開発した手法が有効であることを示した。

研究成果の概要(英文)：A new grinding process in which the grinding fluid is supplied from the inner side of the grinding wheel was proposed. It aimed to control the temperature and environment around the grinding point appropriately. It was shown that the followings were enabled; 1) higher grinding efficiency, 2) smaller amount of the affected layer, 3) improvement of machining accuracy and surface roughness, and 4) possible application for curved shape or inner surface of small deep bore. In addition, it was shown that the developed technique is valid for the finish machining of Carbon Reinforced Plastics (CFRP).

研究分野：生産工学

キーワード：機械工作・生産工学 研削加工 研削油剤

1. 研究開始当初の背景

(1) 数百ミリメートルから数メートルオーダの領域での曲面加工（例えば、大型の金型、ジェットエンジンやガスタービンエンジンのブレードなど）はエンドミルを用いた切削加工に大きく依存している。切削加工の能率は高いが、研削加工に比べれば到達できる粗さが大きいので、切削加工後にいわゆる手磨き避けられない場合が多いが、磨きは一般に定圧加工であるため形状精度を損なう欠点がある。

(2) 研削加工では一般に加工力が大きく発生する熱量が大となるため、加工点の温度が高くなり、研削焼けや砥石の目づまりの原因となって高能率化の障害となる。冷却のために研削液が供給されるが、通常の外部ノズルからの供給では必ずしも加工点に十分な量が供給されない。その理由は、高速で回転する砥石まわりの空気層に阻まれること、工作物-砥石間の接触長さが長い条件（切込みが大きな研削）では、研削液が加工点の高温により蒸発し接触部の途中以降冷却能を有しなくなるなどの理由による。

(3) そのような問題点に対して、例えば、S. Ebbrell らにより最適な研削液供給量に関する研究も行われているが、外部から研削液を供給する限り、冷却能の観点では限界が存在する。また、Bijoy Mandala らにより非常に大きな流速で空気層を突き破る必要があることが示されており、消費エネルギー的にも問題が多い。外部ノズルにより砥石内部に研削液を含浸させ、遠心力で加工点へ供給する技術（英国特許 GB2332634B）が開発され実用に供されているが、特許に関連して専用の砥石を使用することが必要であり高価である。また、曲面加工への対応に問題がある。

2. 研究の目的

研削砥石の内部から研削液を研削点に直接的に供給し、研削点の温度・雰囲気をも最適制御する加工方法を開発する。この方法により、研削加工の高能率化、加工変質層の最小化、加工精度と加工面あらかさの向上、曲面の形状加工の自由度向上が可能とすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 砥石内直接研削液供給を可能とする試験装置の開発

砥石内から研削液を直接的に研削点に供給することがキーテクノロジーであり、それを可能とする試験装置の製作を行う。研削液供給ポンプに脈動を付与し、砥石の目詰まり除去の効果を明らかにする。

(2) 研削点加工環境が及ぼす効果の測定

研削点加工環境として特に加工温度を制御し、研削力、研削温度、加工変質層、残留応力などに及ぼす影響を定量的に測定する。

(3) 研削点環境として不活性ガス・研削液の気液混合体の供給効果

研削点環境の最適化において、研削液と同時に不活性ガスなどの気体を気液混合状態で供給する効果を重畳する。窒素ガスやアルゴンなどを研削液と混合することで、研削点での空気中の酸素を排除し、酸化による発熱や砥粒自体の劣化を回避できることを検討する。

(4) 超砥粒ホイールへの適用

台金付の超砥粒ホイールあるいはセラミックボンド長砥粒ホイールに対しても、砥石内部から研削液を供給し、その供給効果を明らかにする。

(5) 穴加工・CFRP 加工への適用

穴内面の加工では工作物-砥石間の接触長さが大となるため研削液の効果的な供給が難しい。この場合、砥石内部からの研削液供給が最も効果を発揮すると考えられ、産業的にインパクトがある事例として、穴内面研削における加工状態を明らかにし、高能率・高品位加工を実現する。

4. 研究成果

(1) 砥石内直接研削液供給機

砥石内研削液供給機構における WA ピトリファイド砥石を用いた場合のツールホルダと加工時の研削液を供給している様子を図 1 に示す。内部に研削液を通す流路を設けており、マシニングセンタのスピンドルスルー構造の主軸頭に装着し使用可能な仕様とした。図 1 中央の写真より、研削液が砥石の内部から外周を通して供給されていることがわかる。

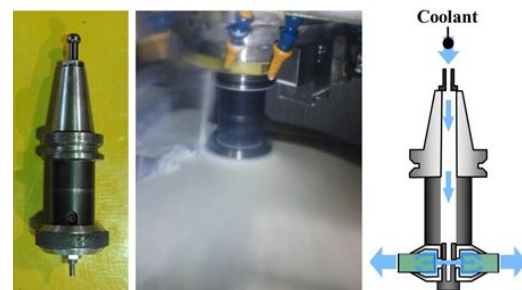


図 1 砥石内研削液供給機構

(2) 研削点加工環境が及ぼす効果の測定

表 1 に示す加工条件で薄板を研削し、加工温度を調べた。研削速度、主軸送り速度、研削液供給量等は一般的なものとし、特に加工特性に大きな影響を与えるとされる切込み量、砥石の種類を変化させた。300×60×3 mm の薄板状の試験片をジグに取り付け、加工点裏側の温度を赤外線放射温度計で測定した。

各条件における最高温度を図 2 に示す。なお、仕上げ面に研削焼けが見られなかった条件をソリッドシンボル、研削焼けが見られた条件をオープンシンボルにて示している。また、グラフ横軸の表記方法について、砥石内研削液供給 (Internal) を In. とし、通常のノズルからの外掛け供給 (External) を Ex. と

記す。

まず、研削液の供給方法の違いによる影響に着目する。外掛け供給では、WA ビトリファイド砥石での加工においては、切込み量 0.02 mm での最高温度は 42.9 であり、砥石内研削液供給の最高温度は 41.6 である。よって、大差はないがわずかに砥石内研削液供給のほうが低いことがわかる。また、CBN 電着ホイールにおいても同様に、同切込み量での最高温度はわずかに砥石内研削液供給のほうが低いことがわかる。一般に Ti-6Al-4V の研削加工には困難が伴うことが知られているが、加工温度を低下し加工が可能であることが示された。

次に、切込み量の違いによる影響に着目する。WA ビトリファイド砥石での加工においては、切込み量 0.02 mm と 0.04 mm を境界に最高温度は 41.6 から 199.0 へと急激な上昇が見られ、0.04 mm 以上の切込み量の条件においては全て研削焼けが発生していることがわかる。これに対し、CBN 電着ホイールでの加工においては、切込み量 0.2 mm と 0.3 mm を境界に最高温度は 57.7 から 318.6 へと急激な上昇が見られ、0.3 mm の切込み量の条件において研削焼けが発生していることがわかる。したがって、急激な温度上昇が見られる切込み量と、研削焼けが発生する切込み量はおおよそ一致すると考えられる。このように、ある切込み量を境界に急激な温度上昇が見られる原因としては、研削液による熱エネルギーの除去量が、熱エネルギーの発生量を下回ることが考えられる。切込み量を大きくすることによる研削抵抗の増大に伴い、加工点での熱エネルギーの発生量も増大し、ある切込み量で研削液の冷却が不足しはじめる。

表 1 実験条件

Type of grinding fluid supply	Internal	External
Grinding velocity : V_s	m/min 1200	
Feed rate : V_f	mm/min 500 (Down cut)	
Tool	WA vitrified bonded	CBN electrodeposited
Depth of cut : D	mm 0.02, 0.04, 0.06, 0.1	0.1, 0.2, 0.3
Type of grinding fluid	Emulsion	
Amount of grinding fluid supply	L/min 10	
Material of workpiece	Ti-6Al-4V	

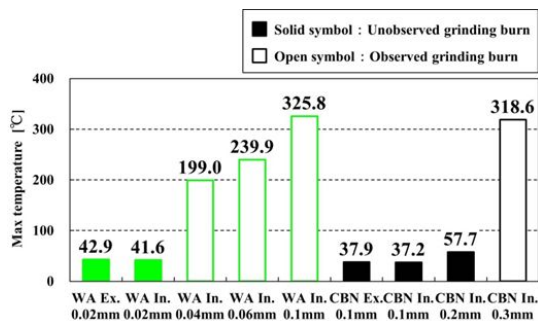


図 2 研削温度への影響

次に、板厚方向すなわち送りと垂直方向の算術平均粗さを測定した結果を図 3 に示す。

まず、研削液の供給方法の違いによる影響に着目する。WA ビトリファイド砥石での切込み量 0.02 mm の加工においては、外掛け供給で 1.69 μ m、砥石内研削液供給で 0.42 μ m と、砥石内研削液供給のほうが表面粗さは小さいことがわかる。これは、砥石内研削液供給を用いることにより、加工点の砥粒先端に確実に研削液を到達させることができ、砥粒刃先の摩滅を抑制し、切れ味を保持しているためであると考えられる。難削材である Ti-6Al-4V の加工においてもその優位性を持つといえる。

また、WA ビトリファイド砥石での加工において、切込み量が大きいほど表面粗さが大きいことがわかる。これは切込み量の増大に伴った研削抵抗の増大による、砥石の自生作用、砥粒の摩滅、および加工温度の増大に伴う仕上げ面表層の研削焼けによる酸化膜の発生のためであると考えられる。これに対し、CBN 電着ホイールでは、切込み量の大きさに伴った表面粗さの変化は見られず、0.3 mm の条件のみ著しく大きいことがわかる。ここで、CBN 電着ホイールは自生作用が非常に起きにくいことから、砥石表面の砥粒形状がそのまま転写される。切込み量 0.1 mm、0.2 mm の条件では、加工温度も同等の低い値であり、仕上げ面表層の研削焼けはなく、砥粒形状がそのまま転写され同等の表面粗さとなったと考えられる。

また、切込み量 0.3 mm の条件では著しく加工温度が高いため、材料が軟化して延性が増し切削のむしろのような状態が砥粒先端付近で起きることによって仕上げ面に凹凸ができ、表面粗さが大きくなったと考えられる。

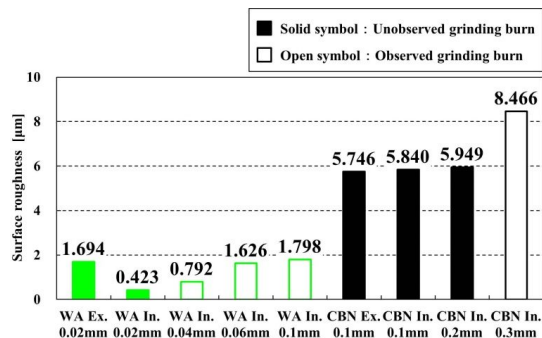


図 3 表面粗さへの影響

さらに、図 4 に研削表面の残留応力の測定結果を示す。チタン合金では残留応力の測定が困難であったため、被加工物は炭素鋼 S45C とした。なお、グラフの白抜きの系列は研削焼けが見られた条件を示している。

研削液供給量 5 L/min では、いずれの研削条件においても約 300 MPa の圧縮残留応力となり、大きな差はみられなかった。研削液供給量 2 L/min の切込み深さ 0.05 mm と 0.08 mm において、通常の研削液供給方法では研削液が供給されない工作物下側で研削焼けが発生したが、砥石内研削液供給では研削焼けが発生しなかった。残留応力はいずれの研削液

表2 研削条件

Type of coolant supply	External, Internal	
Type of grinding wheel	WA Vitrified Bonded	
Grinding velocity V	m/s	20
Feed rate v	mm/min	500
Depth of cut d	mm	0.05, 0.08, 0.1
Grinding fluid	Emulsion type	
Amount of coolant supply Q_{total}	L/min	2, 5
Grinding method	Up	
Material of work piece	S45C	

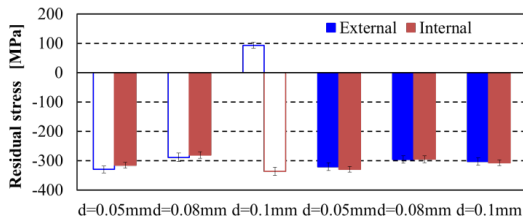


図4 研削面の残留応力

供給方法においても約-300 MPaの圧縮残留応力となった。これは、残留応力は工作物中央部で測定しており、中央部では研削焼けが発生していないためである。砥石内研削液供給では接触弧内に効率よく研削液を供給されているため、通常の研削液供給方法では研削焼けが発生する切込み深さにおいても、研削焼けが発生せず大きな圧縮残留応力が得られたと考えられる。

(3)超砥粒ホイールによる小径穴内面加工への適用

図5に開発した砥石内研削液供給機構が使用可能な小径深穴内面用の砥石軸を示す。専用工具は、研削加工対象とする部品の内径寸法に合わせ、超鋼合金の軸(8mm)の中心部に研削液が通過する1.5mmの穴を持つ。砥石を取り付けるための小径部の先端にはおねじが切っており、M3六角フランジ付ナットを取り付け砥石を拘束する。

図6に砥石の写真を示す。平型9×10×4のファインセラミックスポンド、CBN砥粒、粒度#200、結合度Kのものを使用した。試験片は外径34.0mm、内径9.88mmの円筒形とし、素材にはS45Cを使用した。内径は研削加工試験前にボーリングバイトによる前加工を行い、試験片の内径とテーブル回転中心の芯出しを行った。

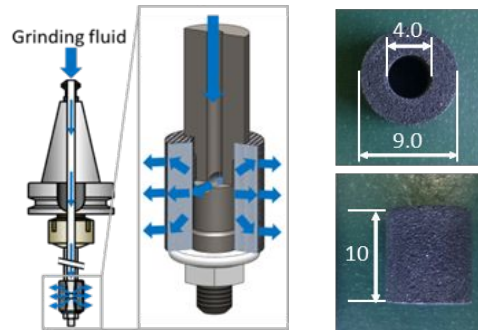


図5 小径研削用砥石軸 図6 研削砥石

図7に、砥石内研削液供給機構を用いた場合と通常の研削液供給方法を用いた場合の表面粗さを示す。前加工面の表面粗さは2.74 μ mRzである。研削加工後、表面粗さは、いずれの研削液供給方法でも1.80 μ mRz以下である。砥石内研削液供給機構を用いた条件と通常の研削液供給方法を用いた条件を比較すると、いずれの条件においても砥石内研削液供給機構を用いた条件で表面粗さが向上することがわかる。また、測定値のばらつきも通常の研削液供給方法と比較して小さくなる傾向にあるといえる。

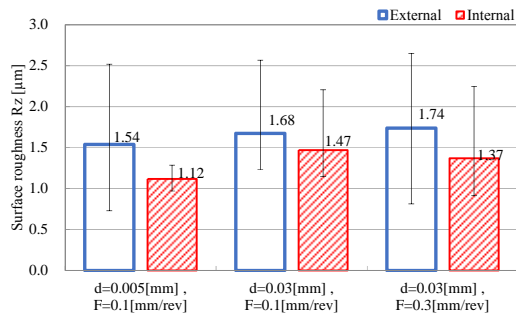


図7 穴加工面の粗さの比較

図8に真円度を示す。研削加工前の深穴の真円度はそれぞれ2.81 μ mである。研削加工後、いずれの条件も砥石内研削液供給機構を用いた条件で形状精度が良化し、真円度1.0 μ m以下であることがわかる。研削熱は工作物の形状精度に大きな影響を与える。砥石内研削液供給機構を用いた条件では安定して良好な形状精度が得られていることから、加工面の効果的な冷却効果が得られているものと考えられる。特に切込み深さ0.03mm、送り速度0.3mm/revの条件では研削液供給方法の違いによる形状精度の差異が他の条件と比較し大きい。これは発熱量の大きい条件において、砥石内研削液供給機構による冷却が効果的に働いたためと考えられる。

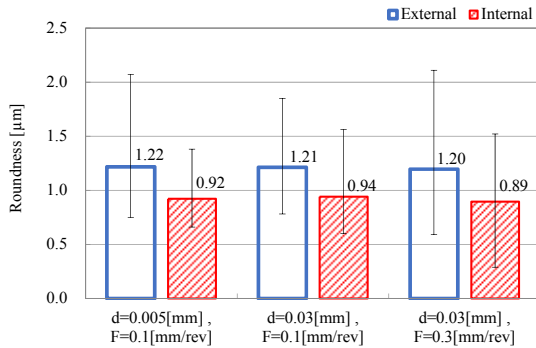


図 8 真円度の比較

(4) CFRP 加工への適用

砥石内研削液供給を CFRP の端面仕上げ加工に対する適用可能性を示すため、CFRP 板材の端面加工を行い、現在広く用いられているエンドミルによる切削加工との比較を行った。被削材には、一方向プリプレグ QU135-197A を積層した CFRP プレート(航空機部材向け)を用いた。積層構成は 0°, 45°, 45°, 90° とした擬似等方材である。被削材の形状は長さ 200mm 幅 100mm 厚さ 7.8mm の板材である。

図 9 に、送りに垂直な方向の表面粗さを示す。加工距離 2m において、砥石内研削液供給による研削の表面粗さは、切削加工の 10 分の 1 以下となっていた。また、切削加工の場合には加工距離が長くなるにつれて粗さが増大しているのに対し、本手法では加工距離 50m までほとんど変化が無かった。

走査型電子顕微鏡により加工面を観察すると、切削加工では大きくぼみや繊維の剥離が発生しているのに対し、本手法による研削では平滑な加工面となっていた。

研削加工ではありながら、切削と同等以上の能率での CFRP の端面加工が可能であり、粗さが小さい加工を実現可能であることが示された。

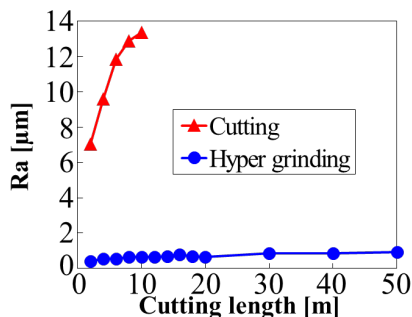


図9 CFRP加工面の粗さ

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計 5件)

Kosaku Nomura, Naoya Takeuchi, Atsushi Kusakabe, Masahisa Chino and Hiroyuki Sasahara, Improvement of surface roughness with micro-axial vibration of spindle by pressure pulsation of grinding fluid supplied through inside of wheel, Advanced Materials Research, 査読有, Vol. 806, 2015, pp.673-677, DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.1136.673

Yoshiya Fukuhara, Syuhei Suzuki and Hiroyuki Sasahara, Development of in-process monitoring system for grinding wheel surface temperature and grinding state, Advanced Materials Research, 査読有, Vol. 806 2015, 624-629, DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.1136.624.

Nagatoshi Nakatsuka, Yudai Hirai, Atushi Kusakabe, Yasuhiro Yao and Hiroyuki Sasahara, Effect of coolant supplied through grinding wheel on residual stress of grinding surface, Advanced Materials Research, 査読有, Vol. 1017, 2014, pp.33-37, DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.1017.33

Kosaku Matsubara, Jun Tsuchimura, Shota Kawazoe and Hiroyuki Sasahara, Form accuracy of internal grinding of small and deep holes with coolant supplied from inner side of grinding wheel, Advanced Materials Research, 査読有, Vol. 1017, 2014, pp.50-54, DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.1017.50

Hiroyuki Sasahara, Tomoko Kikuma, Rei Koyasu, Yasuhiro Yao, Surface grinding of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) with an internal coolant supplied through grinding wheel, Precision Engineering, 査読有, Vol. 38, NO.4, 2014, pp.775-782, DOI:10.1016/j.precisioneng.2014.04.005

(学会発表)(計 11件)

土村潤, 松原光作, 笹原弘之, 小径砥石における砥石内研削液供給の効果, 2016

年度精密工学会春季大会学術講演会，
2016.3.15～2016.3.17，東京理科大学(千葉県・野田市)。

平井由大，中塚永敏，日下部篤史，笹原弘之，砥石内研削液供給における研削熱の除去と加工面への影響，2016年度精密工学会春季大会学術講演会，2016.3.15～2016.3.17，東京理科大学(千葉県・野田市)。

Yoshiya Fukuhara, Syuhei Suzuki and Hiroyuki Sasahara, Development of in-process monitoring system for grinding wheel surface temperature and grinding state, 8th International Symposium on Advances in Abrasive Technology, 2015.10.6, Jeju Island (Korea).

Kosaku Nomura, Naoya Takeuchi, Atsushi Kusakabe, Masahisa Chino and Hiroyuki Sasahara, Improvement of surface roughness with micro-axial vibration of spindle by pressure pulsation of grinding fluid supplied through inside of wheel, 18th International Symposium on Advances in Abrasive Technology, 2015.10.5, Jeju Island (Korea).

Nagatoshi Nakatsuka, Yudai Hirai, Atsushi Kusakabe, Yasuhiro Yao and Hiroyuki Sasahara, Effect of coolant supplied through grinding wheel on residual stress of grinding surface, 17th International Symposium on Advances in Abrasive Technology, 2014.9.23, Hawaii Island (USA).

Kosaku Matsubara, Jun Tsuchimura, Shota Kawazoe and Hiroyuki Sasahara, Form accuracy of internal grinding of small and deep holes with coolant supplied from inner side of grinding wheel, 17th International Symposium on Advances in Abrasive Technology, 2014.9.23, Hawaii Island (USA).

松原光作，土村潤，川添将太，笹原弘之，砥石内研削液供給機構を用いた小径深穴内面の研削加工の形状精度，日本機械学会 2014 年度年次大会，2014.9.8，東京電機大学(東京都・足立区)。

中塚永敏，平井由大，八尾泰弘，笹原弘之，砥石内から供給される研削液が研削面の残留応力に及ぼす影響，日本機械学会 2014 年度年次大会，2014.9.8，東京電機大学(東京都・足立区)。

中江慶吾，中塚永敏，平井由大，笹原弘之，砥石内研削液供給機構を用いた難削材の研削加工-切込み量が加工特性に与える影響-，2014 年度精密工学会春季大会学術講演会，2014.3.20，東京大学(東京都・文京区)。

Tomoko Kikuma, Rei Koyasu, Yasuhiro Yao and Hiroyuki Sasahara, The Effects of the Internal Coolant Supply through Grinding Wheel on the Grinding of CFRP, The 5th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology, 2013.11.12 ~ 2013.11.15, Taipei (Taiwan).

中江慶吾，平井由大，中塚永敏，日下部篤史，笹原弘之，砥石内研削液供給による研削加工が残留応力に与える影響，2013 年度精密工学会秋季大会学術講演会，2013.9.13，関西大学(大阪府・吹田市)。

〔その他〕
ホームページ等
<http://web.tuat.ac.jp/~saslab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

笹原 弘之 (SASAHARA, Hiroyuki)
東京農工大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：00205882

(2) 研究分担者

中本 圭一 (NAKAMOTO, Keiichi)
東京農工大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：90379339

岩本 薫 (IWAMOTO, Kaoru)
東京農工大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：50408712

(3) 研究協力者

八尾 泰弘 (YAO, Yasuhiro)