

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 9 月 14 日現在

機関番号：32714

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13850

研究課題名（和文）加工熱を大幅に減らす難削材の高精度・高品位研削加工

研究課題名（英文）A grinding technology of difficult-to-grind materials for suppressing the heat generation

研究代表者

今井 健一郎 (IMAI, Kenichiro)

神奈川工科大学・工学部・准教授

研究者番号：00308537

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：難削材には、高強度、高融点、低熱伝導の金属材料や、硬脆性の材料などがある。これらの材料の研削加工においては、研削ホイールと被削材間に生ずる研削熱を抑制することが加工の容易化を促すと考えて、本研究に取り組んだ。その手段として、研削ホイールに径方向の超音波振動を援用した。結果として、研削ホイール作用面にある極めて多くの砥粒が微小切削を繰り返して材料を除去するとともに、研削ホイールと被削材間が断続的に接触することで研削熱を抑制することができた。インコネル718やチタン合金等の耐熱合金、単結晶SiCやアルミナセラミックスの硬脆材料において、表面損傷の少ない研削加工面を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：When a material is difficult-to-grind, where does the cause of that difficulty lie? Generally speaking, the cause is often that the material has high strength, is hard and brittle, or has outstanding heat resistance. In this research, it is presumed that if grinding heat produced between the grinding wheel and ground material while grinding can be suppressed, then it should be possible to cope with many cases where grinding is difficult. Therefore, a processing experiment was performed in which grinding of some materials was carried out with vibration assist in the radial direction of the grinding wheel. With this approach, since contact between the grinding wheel and ground material is intermittent, it is possible to reduce friction acting between the two, and as a result, it should be possible to suppress grinding heat. The above is effective for grinding the Inconel718, titanium alloy, and SiC wafer, difficult-to-grind materials.

研究分野：難削材の研削加工と切削加工

キーワード：難削材 研削加工 超音波振動 加工熱 切削加工

1. 研究開始当初の背景

難削材の研削加工に関する研究は内外に多い。それらの研究は、通常材料の難削性に基いて対応が行われる。例えば、高強度の材料には高剛性の工作機械を用いる、硬脆性の材料については高精度な微細加工を行う、高耐熱性の材料には、効果的な冷却と潤滑を促す加工液を適用する、といった具合である。一方、本研究では、単結晶シリコンの研削加工において、超音波振動を援用したとき研削抵抗が低めに安定し、切込みを大きくしても延性モードの研削加工面が得られることを実験的に確かめていた。また、振動を援用した場合、研削焼けの発生が減ることを、いくつかの材料の研削加工において経験的に把握していた。そこで、超音波振動の援用が、難削材の研削加工に有効な手段になることを想定した上で、加工熱の低減を図ることが難削材の研削加工の容易化にもっとも重要であると考えた。

2. 研究の目的

難削材の研削加工を容易にするためには、加工時の熱の発生を抑制すれば良いとの仮説を立てた。その理由は、難削性は材料の強度、硬脆性、耐熱性に起因することが多いからである。本研究では加工熱を抑制する手段として、超音波振動を背分力方向に援用することで、研削ホイールと被削材間の断続的接触を促す加工法が効果的であると予想した。その目的は、

振動援用時の砥粒の材料除去プロセスとパルス力（衝撃力）の関係、
砥粒による微細な材料除去と研削ホイールによる大切込みの両立、
工具-被削材間の低摩擦化、
を実験的に明らかにすることである。これらの目的が達成できれば、難削材の高精度・高品位な研削加工が容易になる。

3. 研究の方法

通常の振動を援用しない研削加工の場合、工具である研削ホイールと被削材間の接触は加工中連続する。また、切削加工に比べて接触面積の大きな研削加工では、潤滑剤の浸透性にも問題があり、結果として加工温度が上昇しやすい。さらに図1に示すように、材料を除去する砥粒は不揃いでありながら、全体としては大きな負のすくい角と逃げ面のない状況にある。したがって、加工に要するエネルギーの多くが加工熱として消費され、そのほとんどが摩擦熱であると考えられる。このような観点から、本研究では、図2に示すように、研削ホイールの径方向に超音波振動を援用する方法を採用した。こうすることで、研削ホイールと被削材間は断続的な接触状態になり、個々の砥粒は短時間に少しずつ材料を除去することになる。本実験においては、超音波振動援用の効果をより明らかにするため、定荷重で、基本 60 秒の一定時間研削

ホイールと被削材を接触させる方法とした。実験装置概要図を図3に示す。研削ホイールは直径 93mm、ホイール作用面の幅は 4mm であり、実験時の回転数は 400rpm を基本とする。これは振動の効果を促すため、通常と比較すればかなり低速である。振動周波数は固定で約 39kHz、振幅は両振幅で最大 4 μ m とした。研削抵抗の測定には Kistler 社の 3 成分動力計を用いた。被削材には、耐熱合金のインコネル 718、チタン合金 Ti-6Al-4V、硬脆性材料である単結晶 SiC ウェハなどを用いた。なお、上記目的については、ダイヤモンド切削バイトを用いた合成石英ガラスの背分力方向振動切削を行っている。

研削ホイール-被削材間の連続接触



砥粒-被削材間の接触状態

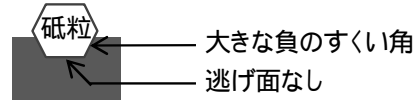


図1 研削熱の増加要因

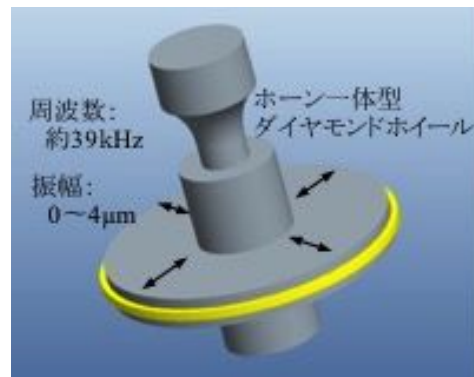


図2 研削ホイールと径方向振動の関係

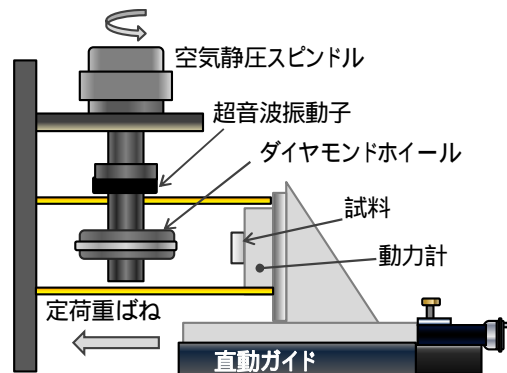


図3 定荷重型研削加工の装置概要図

4. 研究成果

(1) 研究の目的で挙げた の成果
合成石英の延性 脆性遷移を調べるため、

切削加工を行った。結果として、振動を援用しない場合は切込み約 $0.1\mu\text{m}$ でクラックが生じたのに対し、背分力方向に振動を援用した場合は、約 $0.2\mu\text{m}$ の切込みとなった(図4)。すなわち、臨界切込み深さが約2倍になる結果を得た。詳細はまだ不明確であるが、砥粒が切込み方向に短時間(この実験の場合は1kHz)で動くことによるパルス力(衝撃力)に起因する結果と考えている。

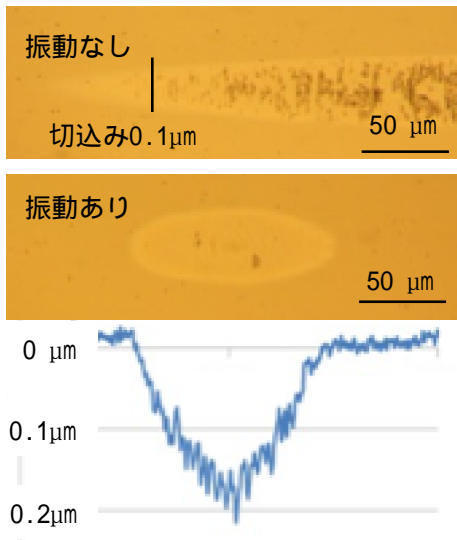


図4 合成石英ガラスの切削加工における振動援用の有無と臨界切込み深さ

(2) 研究の目的で挙げた の成果

まず、インコネル 718 (Ni 基耐熱合金) の研削加工では、径方向振動の援用の有無で明らか加工面の違いが生じた。振動なしの場合は、研削ホイールと材料間の加工熱による熱損傷が生じた。両者の研削加工面の写真を図5に示す。この熱損傷は、研削ホイールの一部が溶けてインコネルの表面に溶着したものであった。また、チタン合金においても、インコネルほどの熱損傷ではないが、振動なしの場合に同様の熱損傷が生じたことを確認した。したがって、研削加工において、より負荷のかかる大切込み化については、超音波振動の援用が有効であると言える。

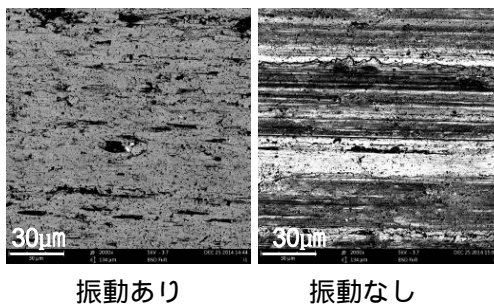


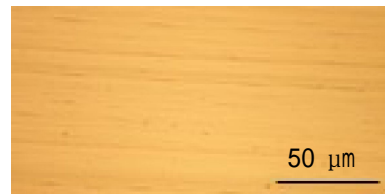
図5 インコネル 718 の研削加工面写真

次に、硬脆性材料として単結晶 SiC ウェハの加工例について示す。この材料は次世代半導体材料としても有力視されている材料で

ある。この材料は、砥粒1つ1つが微細な除去加工を行わないと、加工表面に脆性破壊を生じやすい。ここでは、上述した通り、研削ホイールに径方向振動を援用した場合としない場合で加工面を比較した。その結果、振動を援用した場合の表面粗さは、援用しない場合と遜色のない粗さとなり、かつ延性モード研削加工面(表面上、脆性破壊痕がほとんど生じていない面)を得ることができた。研削加工面の写真と表面粗さの測定結果を図6に示す。同図の振動援用時の振幅は $3.8\mu\text{m}$ であるが、およそ $2.0\mu\text{m}$ 以上の振幅で同様の結果が得られた。この結果は、振動援用時はホイール作用面上の砥粒によって、図4で示したような微細な除去加工が行われた結果と考えられる。ただし、振動援用の加工面は微細かつ均一な凸凹面で形成されており、これをどのように評価するかは今後の課題である。



振動なし Ra: 15nm, Rz: 55nm

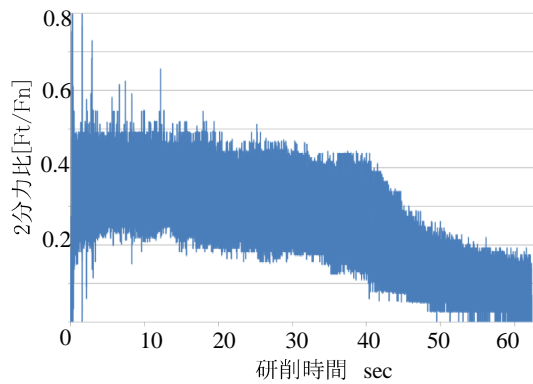


振動あり Ra: 9nm, Rz: 37nm

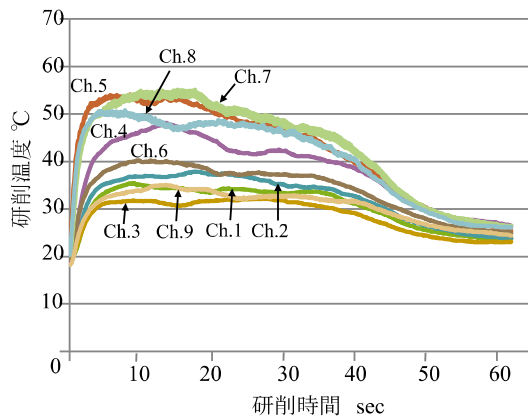
図6 単結晶 SiC ウェハにおける振動援用の有無と研削加工面の観察、粗さ測定結果

(3) 研究の目的で挙げた の成果

実際に研削ホイールに径方向振動を援用した場合、低摩擦化が図れるかどうかは、接線研削抵抗 F_t と法線研削抵抗 F_n の二分力比 F_t/F_n で評価できる。また、二分力比が研削ホイールと被削材間の摩擦を表しているのであれば、結果として両者間で発生する摩擦熱に起因する加工温度とも関係すると考えられる。これらを明らかにするため、前述のインコネル 718 の加工実験の際、被削材裏面に熱電対を設置して、温度変化を測定した。その結果、 F_t/F_n 比の変化と温度変化との間に相関があることを明らかにした(図7 a), b)。しかしながら、図5で示したように研削加工面の差が大きすぎたため、二分力比の値は定量的に比較評価できず、振動援用の効果として考えられた加工時の低摩擦化については、加工面の熱損傷の有無から定性的に判断するにとどまった。



a) 研削加工中の2分力比の推移



b) 研削加工中の試料裏面温度

図7 振動援用研削加工における2分力比(Ft/Fn比)と試料裏面温度との相関

以上の成果については、「5. 主な発表論文等」における学会発表で詳しく報告している。なお、アルミナセラミックスの加工においては、今年に入ってから振動援用時に脆性破壊痕が減少する条件を見出しており、目的の成果として有用であったと考えている。

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 1件)

今井健一郎、径方向振動を援用した難削材料の研削加工、超音波テクノ(日本工業出版)、査読無し、Vol.28, No.6、2016、pp.30-34

〔学会発表〕(計 5件)

Kenichiro Imai、Radial Directional Vibration-assisted Grinding of Ti-6AL-4V alloy、ISAAT2017、R307、2017.12.4、OIST(沖縄)

小山内裕太 今井健一郎、合成石英ガラスの背分力方向振動切削における切削抵抗の変動、精密工学会学術講演会秋季大会、E63、2017.9.22、大阪大学

今井健一郎、アルミナセラミックスの延

性モード研削加工における径方向振動援用の効果、砥粒加工学会学術講演会 ABTEC2017、A01、2017.8.30、福岡工業大学

米谷宇人 今井健一郎、超音波振動を援用したアルミナセラミックスの延性モード研削加工、砥粒加工学会学術講演会 ABTEC2016、B20、2016.9.1、兵庫県立大学姫路

今井健一郎、径方向振動を援用したインコネル718の研削加工、砥粒加工学会学術講演会 ABTEC2015、A01、2015.9.9、慶應義塾大学日吉

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

今井 健一郎 (IMAI Kenichiro)
神奈川工科大学・工学部・准教授
研究者番号：00308537

(2)研究分担者

なし ()

研究者番号：

(3)連携研究者

なし ()

研究者番号：

(4)研究協力者

なし ()