

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 3月31日現在

機関番号：32612
 研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22360055
 研究課題名（和文） 高強度非球面金型の超精密切削を可能にするためのナノ粒子潤滑揺動切削法
 研究課題名（英文） Fabrication of ultraprecision aspherical molds on high-strength materials by tool-swinging cutting with nanoparticle lubrication
 研究代表者
 閻 紀旺 (YAN, JIWANG)
 慶應義塾大学・理工学部・教授
 研究者番号：40323042

研究成果の概要（和文）：ダイヤモンドバイト揺動切削法を提案し、高強度材である反応焼結SiCの超精密切削を試みた。バイトの揺動誤差を測定するために、白色干渉計を用いたバイト形状の機上測定システムを構築した。また、切削油剤として高粘性・高付着力のグリースを工作物の表面に塗布した。その結果、ダイヤモンドバイト摩耗が大幅に抑制され、表面粗さ4nmRaの延性モード加工が実現されていることを確認した。

研究成果の概要（英文）：A tool-swinging method was proposed to reduce tool wear in diamond turning of high-strength mold materials. The swinging of a round-nosed diamond tool was driven by a B-axis rotary table of the machine the center of which was consistent with the tool curvature center. The tool swinging error was detected and compensated by an on-machine measurement system. As lubricant, grease was applied onto the workpiece surface. At an appropriate swinging speed, the tool wear was greatly reduced compared with the conventional method. A surface finish of 4 nmRa was obtained on reaction-bonded silicon carbide with generating continuous chips.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	8,700,000	2,610,000	11,310,000
2011年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2012年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
年度			
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

研究分野：生産工学・加工学

科研費の分科・細目：超精密加工

キーワード：超精密切削、金型加工、工具摩耗、ナノ粒子潤滑、ダイヤモンド工具、硬脆材料、非球面、光学部品

1. 研究開始当初の背景

近年、非球面レンズなどの複雑かつ高精度な形状を有するガラス光学素子の需要が高まっている。これらの光学素子の多くは高温ガラスモールドプレス成形によって量産されているため、高精度の金型が必要である。

また、ガラス成形金型には高い熱耐久性が求められるため、現在主に超硬合金(WC)や炭化珪素(SiC)などが金型材料として使用されている。これらの金型材料はいずれも高硬度、高強度であり、代表的な難削材である。その加工法は研削・研磨が一般的であるが、

加工精度の保証が極めて難しく、加工・計測・再加工の繰り返しによって加工時間が長くなる問題がある。また、研削・研磨による微細複雑形状の加工も困難である。

一方、超精密切削は加工自由度が大きく微細複雑形状を加工することが容易であるため、金型材料の加工にとって重要視されている。これまでも硬脆材料の切削では、曲率半径が 1mm 以下の R バイトを用いた延性モード切削法が用いられてきている。しかし、バイト送り量を極めて小さくせざるを得ないため加工時間が長くなり、バイト摩耗も大きくなる問題があった。これに対して、筆者らはダイヤモンド平バイトによる延性モード切削法や大曲率半径 ($R > 10\text{mm}$) の R バイトを用いた延性モード切削法を提案し、加工時間の短縮およびバイト摩耗の低減に効果があることを確認した。また、バイト刃先に超音波振動を加えながら切削加工を行うことで、延性モード加工性を向上させると同時にバイト摩耗を低減できるという報告もある。しかしながら、上記のいずれの方法も、WC や SiC の切削加工へ適用する際に、バイト刃先の摩耗およびマイクロチップングが激しくなっていく問題がある。そのため、WC、SiC 金型の超精密切削の成功例は報告されていないのが現状である。

ところで、耐熱合金やステンレス鋼の切削加工において、いわゆるロータリ切削が行われている。ロータリバイト (通常超硬合金製) を用いることにより切れ刃が常に更新され、切削温度の上昇が抑えられるため、バイト摩耗を大幅に低減できることが知られている。もしこのロータリ切削法を超精密切削の領域へ適用できれば、高強度材金型の加工が可能になるのではないかと考えられる。しかし、単結晶ダイヤモンドは寸法および結晶方位制限のため、ロータリバイトに製作することが現在の技術レベルでは不可能である。

2. 研究の目的

本研究では、ロータリ切削法と同様なバイト摩耗低減効果を得るために、図 1 に示すように加工機 B 軸回転テーブルを利用した揺動切削法を提案する。また、高強度材料の切削において特に問題になっている切れ刃マイクロチップングを防ぐために、図 2 に示すように金属ナノ粒子を高粘性・高付着力のグリースに混入させた複合型切削油剤をバイト表面へ塗布する。これにより、ダイヤモンドバイトの使用寿命を飛躍的に延ばし、従来不可能とされてきた WC、SiC 非球面金型の超精密切削を可能にする。

3. 研究の方法

本研究では、反応焼結 SiC の切削加工を通して本提案方法の有効性を検証した。

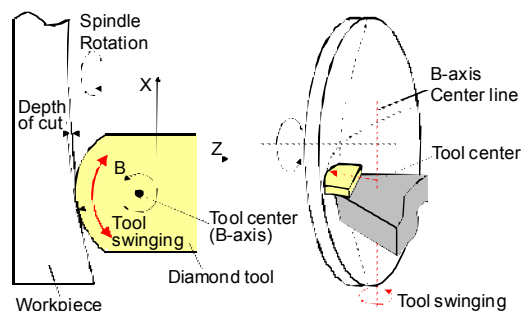


図 1 ダイヤモンド工具揺動切削法

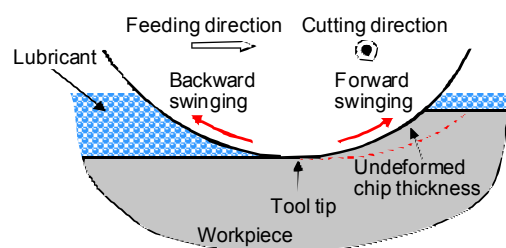


図 2 揺動切削におけるナノ粒子潤滑

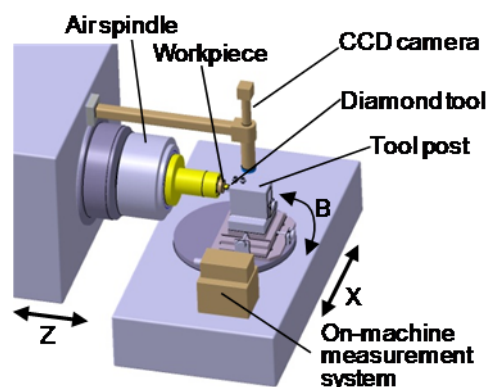
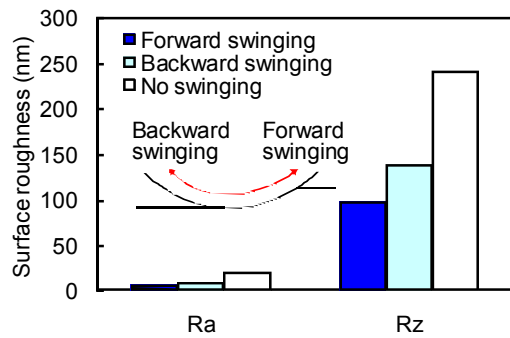
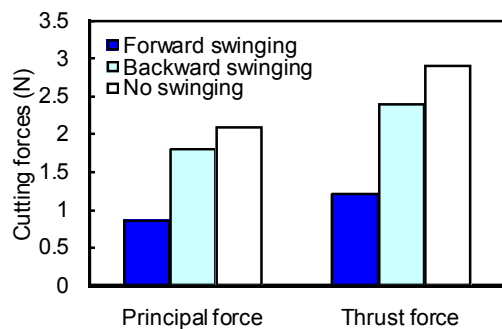


図 3 実験装置概略図

実験には、不二越社製 XZB 3 軸同時制御超精密加工機 ASP-15 を使用した。図 3 に加工装置の概略図を示す。被削材を主軸に、バイトを B 軸にそれぞれ固定した。曲率半径 10 mm の天然ダイヤモンド R バイトを使用した。バイトすくい角は 0° 、逃げ角は 7° である。バイトの曲率中心を B 軸テーブルの回転中心とほぼ一致するように刃物台の微調整を行った。工作物直径は 30mm、厚さは 10mm である。また、バイトの揺動によって生じる切り込み深さの誤差を測定するために、白色干渉計を用いた机上測定システムを構築した。本システムを用いて揺動誤差を測定し、誤差データに基づいて NC プログラムを修正することで加工精度の保証を実現した。



(a)



(b)

図 4 工具揺動方向が表面粗さと切削抵抗に及ぼす影響

4. 研究成果

(1) 揺動方向に影響

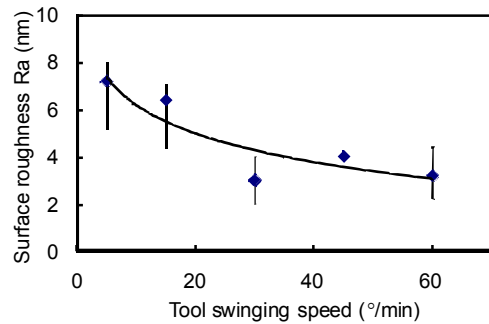
まず、工具の揺動方向の影響を調べた。図 4 に工具揺動方向が切削面粗さと切削抵抗に及ぼす影響を示す。同図より、工具揺動ありの場合は揺動なしの場合に比べて表面粗さおよび切削抵抗が低くなり、切削特性が改善されることがわかる。また、後方揺動に比べて前方揺動のほうが比較的有利であることも明らかとなった。

(2) 揺動速度の影響

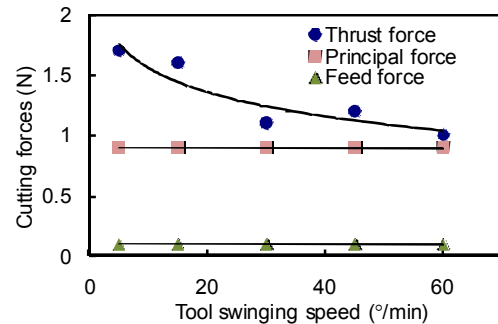
次に、工具の揺動速度の影響を調べた。図 5 に工具揺動速度が切削面粗さと切削抵抗に及ぼす影響を示す。同図より、工具揺動速度を増加させるにしたがって表面粗さが減少し、切削抵抗も低下することがわかる。また、切削抵抗の 3 成分において特に背分力の減少が顕著であった。

(3) 潤滑方法の影響

各種の潤滑条件下で反応焼結 SiC を切削し、ダイヤモンドバイトの刃先部分を走査電子顕微鏡 (SEM) で観察した。工具逃げ面摩耗幅を測定し、加工面積の増加に対する逃げ面摩耗幅の変化を図 6 に示した。工具揺動ありの場合は揺動なしの場合に比べて工具摩耗が著しく低減することがわかる。また、白灯油噴霧潤滑よりも MoS₂ ナノ粒子含有グリース塗布による潤滑が効果的であった。



(a)



(b)

図 5 工具揺動速度が表面粗さと切削抵抗に及ぼす影響

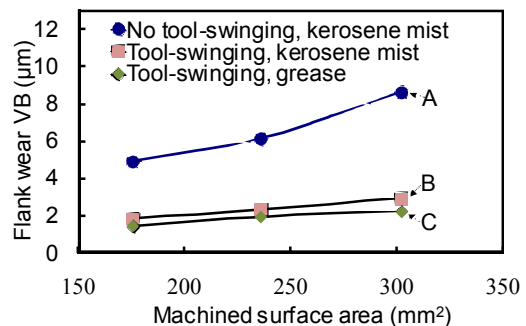
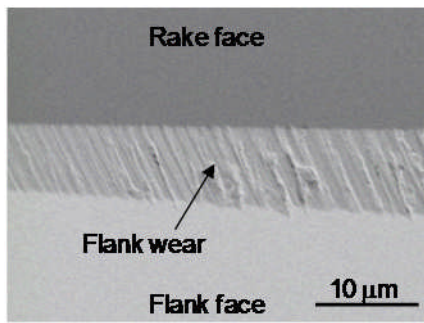
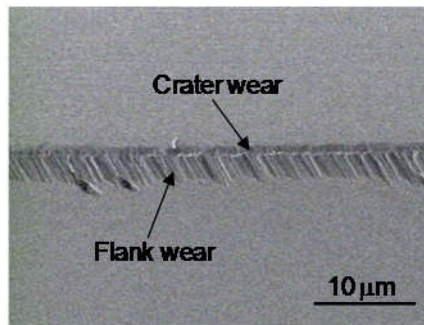


図 6 工具摩耗における潤滑方法の影響

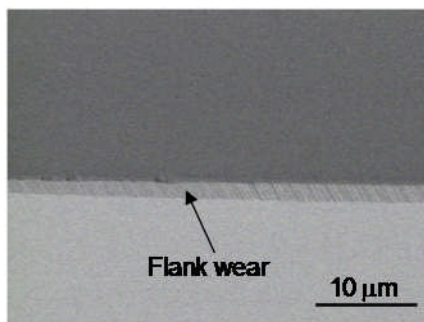
図 7 (a) は従来切削法 (バイト揺動を行わない方法) を用いて、白灯油ミストを切削油剤として使用した場合の切れ刃 SEM 写真であり、切れ刃には約 6 μm の大きな逃げ面摩耗が見られている。また、摩耗面にはバイト送り量と一致した周期的な摩耗条痕が観察された。図 7 (b) は、バイト揺動切削法 (揺動速度 2.5 deg/min) で白灯油ミストを切削油剤として使用した際の切れ刃 SEM 写真である。バイト揺動を行うことで、フランク摩耗が 3 μm 程度に低減された。次に、切削油剤としてグリースを工作物表面へ塗布して揺動切削加工 (揺動速度 5 deg/min) を行った結果を図 7 (c) に示す。バイト切れ刃の摩耗が僅かに観察されるだけで、バイト寿命が大幅に向上されていることがわかる。



(a)



(b)



(c)

図 7 ナノ粒子潤滑援用揺動切削法による工具摩耗低減の効果

(4)加工事例

図 8 はバイト揺動法(揺動速度 25 deg/min)で加工した反応焼結 SiC の切りくずの SEM 写真である。切りくずが流れ型となっており、延性モード加工が実現されていることがわかる。図 9 は、ZYGO NewView-5000 を用いて測定した切削面の 3 次元表面粗さの結果である。加工面は非常に平滑であり、表面粗さは 36nm Rz、4 nm Ra であった。

以上の結果より、切削油剤としてナノ粒子含有グリースを工作物表面へ塗布し、バイトを揺動させながら切削を行うことにより、高強度材料切削時のバイト摩耗を大幅に低減し、高精度の金型加工が可能であることが実証された。

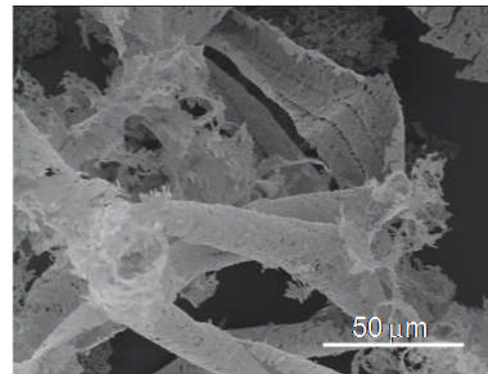


図 8 反応焼結 SiC 切りくずの SEM 写真

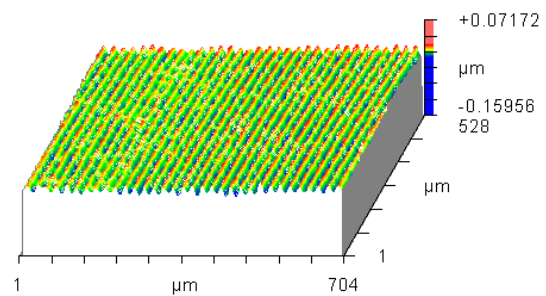


Figure 11

図 9 反応焼結 SiC 切削面の 3 次元測定結果

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- (1) J. Yan, Z. Zhang, and T. Kuriyagawa: Effect of Nanoparticle Lubrication in Diamond Turning of Reaction-Bonded SiC, *International Journal of Automation Technology*, 5, 3 (2011) 307-312. 査読有
- (2) Z. Zhang, J. Yan, and T. Kuriyagawa: Study on tool wear characteristics in diamond turning of reaction-bonded silicon carbide, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 57, 1 (2011) 117-125. 査読有
- (3) Z. Zhang, J. Yan, and T. Kuriyagawa: Tool-Swinging Cutting of Binderless Tungsten Carbide, *Advanced Materials Research*, Vol. 139-141, (2010) 727-730. 査読有
- (4) J. Yan, Z. Zhang, and T. Kuriyagawa: Tool wear control in diamond turning of high-strength mold materials by means of tool swinging, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59, 1 (2010) 109-112. 査読有

6. 研究組織

(1) 研究代表者

閻 紀旺 (YAN JIWANG)
慶應義塾大学・理工学部・教授
研究者番号：40323042

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし