

機関番号：33302

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560117

研究課題名 (和文) 超硬質材料を対象とした高能率・高精度みがき加工に関する研究

研究課題名 (英文) Study on the high efficiency and high precision polishing of super-hard material

研究代表者

加藤 秀治 (KATO HIDEHARU)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：90278101

研究成果の概要(和文):本研究ではポリベンズイミダゾール材を磨き工具に用いることにより,超硬合金材料を対象とした高能率・高精度みがき加工について検討した.ポリベンズイミダゾール(PBI)材料と超硬合金材料を高速摺動させることにより,超硬材料が短時間(約60秒)で仕上げられることを明らかとしている.また,摺動速度,面圧力がそれぞれ20.0m/s,6.4MPa付近が適切であり,この条件付近において超硬合金の主成分であるWCの分解・酸化反応温度890Kに達していることを明らかとした.

研究成果の概要(英文):In this research, the pin-on disk friction wear test by combination on a cemented carbide pin and a polybenzimidazole(PBI) disk is performed. And the influence polishing speed and pressure affect polish efficiency and surface roughness is investigated using a pin-on disk friction wear test. A cemented carbide is polished for a short time also by the pin-on disk friction wear system by the combination of cemented and PBI. It showed clearly for the conditions of pressure 6.4MPa and polishing speed 20.0 m/s to be suitable from the result of polish efficiency and surface roughness.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野:切削工学

科研費の分科・細目:機械工学・生産工学・加工学

キーワード:超硬合金,高速摺動,ポリベンズイミダゾール,金型,磨き加工

1. 研究開始当初の背景

近年,携帯電話やデジタルカメラなどの家電製品は需要を拡大するだけでなく,通信処理速度の高速化や画面の高質化などの高性能化が進められている.これには半導体デバイスや光学系レンズなどの部品開発がキー

ポイントとなっており,部品そのものや製造装置には炭化珪素や超硬合金などの超硬質材料を用いる場合が多く見られ,加工の難しさが指摘されている.特に,内視鏡などの高度な医療用機器やデジタルカメラなどの光デジタル機器は光学系のコンパクト化を図

り製品の小型化に取り組んでいるが、これには高い屈折率を有する非球面ガラスレンズが必要である。非球面レンズは硬度・粘性の高いガラス材料を圧縮成形するガラスプレス法により製造され、超合金製の非球面金型が使用されている。金型はダイヤモンドホイールを用いて超精密研削加工し、その後、熟練技能者の腕や勘に依存するみがき加工が施されているが、レンズ形状の複雑化、波長の短波化に伴う表面粗さの向上やレンズの小型化などの要求を満たすためには高能率・高精度な磨き加工が必要となる。また、圧縮成形する際の成形温度は600℃以上となるため、加熱・冷却サイクルに伴う金型の熱疲労による寿命の低下や、成形時に超合金の組成であるコバルトのプールの損傷が生じるためレンズ表面の品位低下を招くなどの問題を抱えている。この対応策として、金属結合相(Co,Ni)を含まないバインドレス超合金材料(耐酸化性、硬さに優れる)が開発され、金型への適用が検討されているが、従来型超合金以上の難加工性を示すため高能率な研磨ができない状況でもある。

2. 研究の目的

最先端技術を支える部品製造においても特殊な超硬質材料が使用される場合が多く、材料の有する難加工特性が問題視されている。このため微細摩耗粉生成現象を有するポリベンジミダゾール材を工具として用いることにより、超合金材料を対象とした高能率・高精度みがき加工の構築を試みる。

- (1)ピンオンディスク方式による高速摺動による再現性を確認し、磨き加工条件の最適化を試みる。
- (2)高速摺動による磨きメカニズムの解明を試みる。
- (3)最適みがき加工条件を考慮したオリジナルの軸工具形状を提案し、小径エンドミル工具の外周刃の鋭利化や金型表面みがきなど、自由曲面を有する複雑形状部品への適用も検討する。

3. 研究の方法

はじめに超合金の研磨現象におけるPBIの優位性の検証を行うため、超硬エンドミルによる高速切削を行う手法を用いて摩耗部に生ずる研磨現象の確認を行った。本実験で使用する被削材のPBI材料は、スーパーエンジニアリングプラスチック材料の中で最も耐熱特性に優れる材料であり、原料粉をホットプレスで圧縮成形し板形状として供給される。ただし、金型に接する部分は変質層が残ることから、この部分を除去し、20×10×30mmの形状として使用した。この材料は硬度HRA50と高く、特に引張強度は純アルミニウムと同等の160MPaを有する特性を有してい

表1 実験に使用するエンジニアリングプラスチックの材料特性

	Tensile strength (MPa)	Rockwell hardness (R.T.)	Deformation temperature (K)	Glass-transition temperature (K)
PBI	160	HRA50	708	710
PAI	190	HRE78	547	553~563
PBI-Alloy	118	HRM111	573	—
PEEK	94	HRM98	413	416
PEI	105	HRM109	473	490
PI	186	HRM92~102	633	—
PC	62	HRM80	408	418
PSU	72	HRM69	448	463

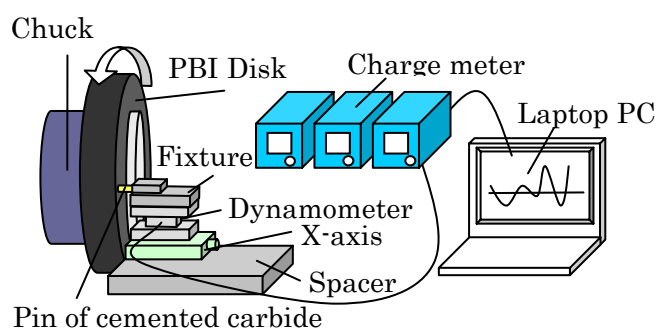


図1 実験装置の概略図

る。また、この比較のため数種類のスーパーエンジニアリングプラスチック材料(表1参照)をPBIと同形状で用意した。使用工具は超微粒子超合金製のねじれ角30°、外周すくい角3°、底刃逃げ角13°の直径1.6mmの2枚刃スクエアエンドミルを使用した。切削条件は切削速度(V)16.7m/s、一刃当りの送り量(Sz):4.3μm/tooth、軸方向切り込み(Aa):50μm、半径方向切り込み(Ar):30μmとし、0.5MPaのドライエアを供給する肩加工上向き乾式切削とした。各被削材を400μm加工後の底刃逃げ面の状態で評価した。

次に高速摺動実験における基礎的特性の検証を行う。実験は図1に示すような旋盤を用いてピンオンディスク摩擦摩耗試験を高速摺動で実施する形式とした。なお、円板形状のPBI材とピン形状の超合金の組み合わせとした。PBI材は外形270mm×厚さ30mmの円板形状で使用した。ピンは1μm以下のWC粒子をCo結合剤で焼結した超微粒子超合金材料であり、形状はシャンク直径4mm、先端直径2mm、長さ17mmのペンシル型形状とした。また、ピンの突出し長さは8mmとした。実験条件は摺動速度6.0, 12.0, 20.0, 23.5m/s、圧力3.2, 6.4, 9.6MPaを用いた。圧力条件を決定する荷重は工具動力計からアンプを

介してパソコンに表示され、これが一定値となるよう調整した。摺動時間は75sとし、15s間隔で後退量を計測した。なお、摩耗量の測定にはデジタルマイクロscopeを利用して、使用前のピン側面にマーキングを施し、これを基準に測定前後の値の差分(ΔL)から後退量を計測した。温度測定はピン端面付近に施した溝部分にK型(アルメルクロメル)熱電対を配置し、耐熱性の高いセラミックスボンドを用いて固定した。

4. 研究成果

(1) 主な成果

① 各種スーパーエンジニアリングプラスチック材料を用いた場合の研磨現象の検証

摩擦摩耗試験を実施する前段階として PBI 材の有用性を確認するため、PBI 材と数種類のスーパーエンジニアリングプラスチック材料の高速切削加工を行い、超硬合金エンドミル工具の底刃逃げ面に着目し、研磨効果について検討した。図2はPBI材と代表的なスーパーエンジニアリングプラスチック材料を加工後の底刃逃げ面状態を示す。同図(a)より、ポリアミドイミド(PAI)材は付着物が多く、WC粒子が確認できない状態である。ポリイミド(PI)材はWC粒子形状が確認できるものの研削痕が残存している状態である(同図(b)参照)。それに比し、同図(c)のPBI材の場合はWC粒子がはっきりと確認でき、切刃稜線も鋭利であることから極めて平滑面となっていることが明らかである。その他のスーパーエンジニアリングプラスチックにおいては、付着物や研削痕が残存している状態であった。これらの底刃逃げ面状態において、熱変形温度が比較的低いプラスチック材料の場合は、プラスチックが熔融しエンドミル底刃逃げ面に付着してしまう傾向が強い。一方、耐熱性の高いプラスチックは高速摺動による温度上昇にも耐えられることから、摺動面の付着物が抑制されたと考えられる。

以上のことから、PBI材以外のスーパーエンジニアリングプラスチックでは超硬合金製エンドミル工具の底刃摩耗が安定した状態で再現するには至らず、PBI材のみが超硬合金の研磨に有効であることが明らかとなった。

② 摺動速度の違いが研磨能率に及ぼす影響

図3は代表的な押付け圧力6.4MPaの条件で摺動速度を変化させた場合の後退量を調べたものである。図より、いずれの摺動速度条件においても超硬合金ピンの後退量は時間とともに増加していることが明らかである。そこで、このグラフの傾きから単位時間当たりの後退量(以後、研磨能率と呼ぶ)を算出し、これを評価指標とした。摺動速度を変化させた場合の研磨能率の比較を図4に示す。

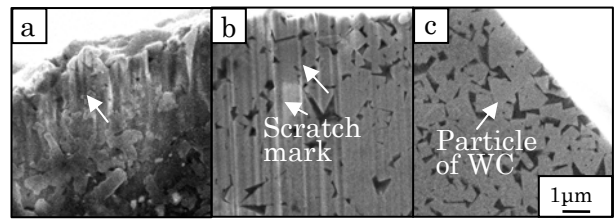


図2 エンドミル底刃の比較; (a)PAI, (b)PI (c)PBI

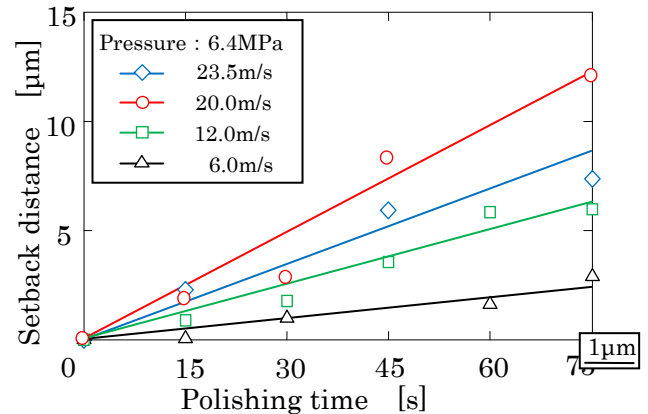


図3 研磨時間と後退量の関係

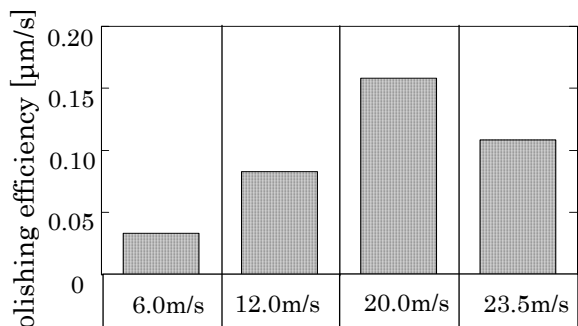


図4 各摺動速度における研磨能率の比較

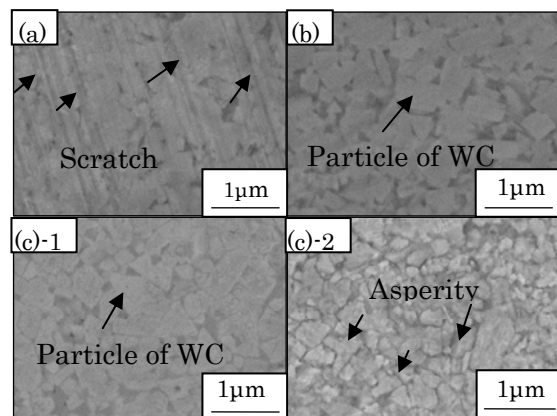


図5 各摺動速度における研磨面の比較; (a)6.0m/s, (b)20.0m/s and (c)23.5m/s

図より、摺動速度 20.0m/s が最も効率よく研磨できていることが明らかである。そのときの摺動面の比較を図 5 に示す。図より、摺動速度 6.0m/s では、WC 粒子が明確に観察されず、研磨痕が残存している(同図(a)参照)。一方、同図(b)の 20.0m/s では WC 粒子形状が確認でき、研磨痕も残存しない良好な摺動面である。しかし、高速条件の 23.5m/s では WC 粒子形状が確認できる部分(同図(c)-1)もあるが、所々に微視的な凹凸が残存している部分(同図(c)-2)も確認できる。これは摩擦温度が高温となり、表面が微視的に損傷したためと推測できる。そこで、摺動面温度の測定を行った。図 6 は押付け圧力 6.4MPa 時の各摺動速度における摺動面温度を示す。図より、摺動速度 6.0m/s は約 430K、20.0m/s は約 810K、23.5m/s は約 770K まで温度上昇している。摺動速度 20.0m/s と 23.5m/s に比し、6.0m/s は明らかに摺動面温度が低い。摺動速度 6.0m/s の条件では、炭化タングステン WC の分解・酸化反応温度である 890K に明らかに達していない。それに比し、20.0m/s と 23.5m/s の高速条件では反応温度にまでは達していないものの、本実験が摺動を伴う動的な実験であることを考え合わせると、890K 以下でもメカノケミカル反応が関与している可能性が高い。また、この測定温度値は摺動面近傍の温度であるため真実接触面の温度は測定値よりも高いと推測でき、高速条件では超硬合金の分解・酸化反応が生じたものと考えられる。反応温度に達すると超硬合金の主成分である WC はタングステンと炭素に分解され、遊離した W は WO_3 を生成し、C は CO_2 となって放出されるため、研磨能率が向上したものと考えられる。しかし、両条件では温度は同程度の値を示すものの、研磨能率と摺動面においては 20.0m/s の条件が良好な結果を示している。これは、摺動時のびびりが原因であると推測できる。実験中の主分力と背分力の振れは 23.5m/s の方が大きい値を示した。背分力が大きくなる原因はびびりであり、主分力が大きくなる原因としてはたわみが生じていることが考えられる。このため、摺動速度が 23.5m/s の条件では、研磨能率が劣り、摺動面が安定しなかったものと推測される。

③ 押付け圧力の違いが研磨能率に及ぼす影響

前項の結果より、摺動速度 20.0m/s の条件で能率的な研磨が可能であったことから、摺動速度を一定として、圧力変化が加工能率に及ぼす影響を調べた。図 7 は圧力を変化させた場合の摺動面の状態を比較したものである。同図(a)に示す低圧条件の 3.2MPa では、WC 粒子の凹凸が生じており、WC 粒子が研磨された場合に観察される角張った形状は確認できない。これに比し、圧力が高い 9.6MPa の場合には、WC 粒子の角張った形状が確認で

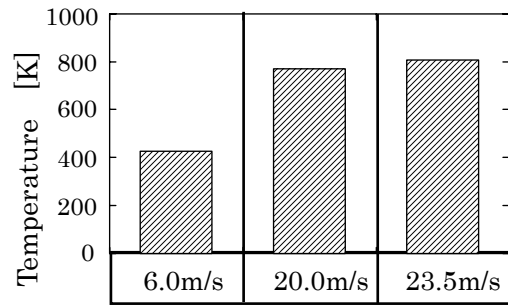


図 6 各摺動速度における摺動面温度の比較

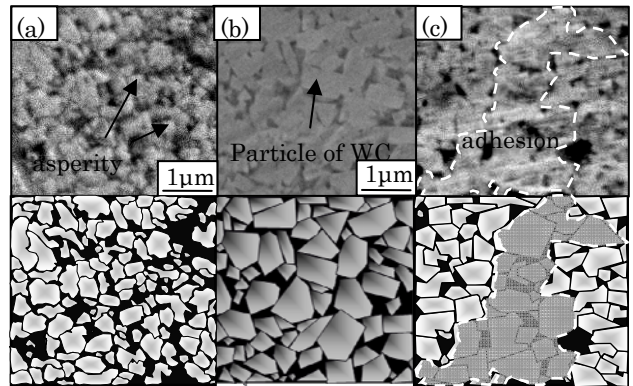


図 7 各押付け圧力条件における摺動面の比較；
(a) 3.2MPa and (b) 6.4MPa, and (c) 9.6MPa

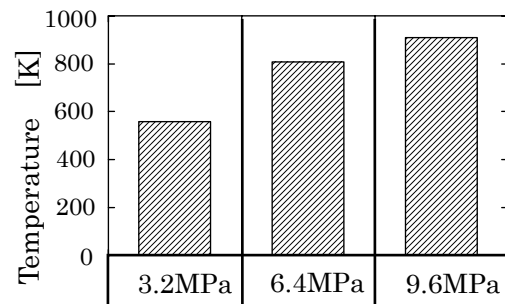


図 8 摺動速度 20.0m/s 一定で押付け圧力を変化させた場合の摺動面温度の比較

きる箇所があるものの、PBI の付着が数多く確認され(同図(b)点線枠部分)、十分な磨き面となっていない。研磨能率の高かった 6.4MPa の条件では WC 粒子特有の角張った形状が明確に確認でき、付着物もないことから良好な摺動面状態といえる。図 8 は摺動速度 20.0m/s 一定で押付け圧力を変化させた場合の摺動面温度の比較を示す。図より、3.2MPa では約 560K と明らかに反応温度よりも低く研磨ができなかったことが明らかである。また、9.6MPa では約 910K を示し、超硬合金の分解・酸化以上の温度まで上昇していることが明らかとなった。一方、6.4MPa、9.6MPa の条件においては WC 粒子の確認ができたが、9.6MPa の条件では多くの付着物が確認できた。そこ

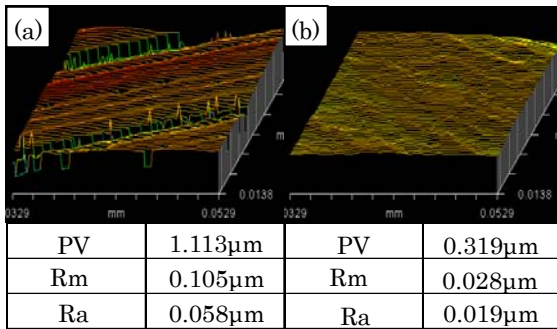


図 9 研磨処理前後の超硬合金表面の比較；
(a) 研磨処理前， (b) 研磨処理後

で、PBI と熱との関係を確認すると、この両条件において PBI の熱変形温度である 708K に達している。しかし、今回は超微粒子超硬合金の温度を測定しており、PBI 材は熱伝導 (0.41W/mK) が金属材料に比べて低い材料であることから超微粒子超硬合金と同じような温度領域まで上がっていないことや粘弾性特性が 700K 付近の温度になると損失係数などが大きく変化することを考え合わせると、押付け圧力 9.6MPa 時には PBI が 700K を大きく超え、PBI に熱変形を生じ、接触状態が安定せず表面性状が悪化したと考えられる。一方、押付け圧力 6.4MPa では PBI が熱変形温度に達することなく、安定した研磨が可能になったと推測できる。

④最適条件における摺動面粗さの検証

最適条件である摺動速度 20.0m/s、押付け圧力 6.4MPa における超硬合金摺動面の表面粗さ測定を行った。図 9 は非接触表面形状測定機 (ZYGO) を用いて 3 次元表面形状を測定した結果を示す。図より、実験前のピン表面粗さが PV 値で 1.113 μm 、Ra 値で 0.058 μm に対し、適正条件を用いて摺動させた後の表面は、PV 値で 1.113 μm 、Ra 値で 0.019 μm と約 3 分の 1 程度の表面粗さを示し、実験前よりも平滑となることが明らかとなった。

⑤結果

本研究では、高速エンドミル加工による切削実験により PBI 材とその他のプラスチックとの比較実験を行い PBI 材が唯一超硬合金材料を平滑化する特性を有していることを明らかとした。また、ピンオンディスク摩擦摩耗試験による摺動実験により摺動速度ならびに押付け圧力の違いが研磨能率や表面粗さに及ぼす影響を検討した結果、切削実験のように常に処女面と摺動している状態ではなく、繰り返し摩耗するような摺動実験においても超硬合金摺動面は平滑となることを確認し、ピンオンディスク摩擦摩耗試験により、摺動速度 20.0m/s で押付け圧力 6.4MPa の条件が適正条件であることを明らかとし

た。さらに、ポリベンゾイミダゾール材と超硬合金を数十秒摺動させるだけで、表面粗さが PV 値で 0.319 μm と極めて平滑な面を得ることができることも明らかとなった。また、本研磨法においては、適正条件において超硬合金の主成分である WC の分解・酸化反応温度 890K を超え、空気中の酸素と W 及び C が反応することにより、研磨能率が向上している機構となることを明らかとした。

(2) 成果の位置づけ

本実験で得られた研磨法は従来の超硬合金製金型のみがき加工の大幅な時間短縮が実現できるばかりでなく、オイルを必要としないドライ研磨加工が実現できるため、環境に優しい加工法である。また、研磨面の表面の粗さ特性の点では PV 値で 1 マイクロ以下の値が得られており、最終仕上げ加工の工程として使用するには難しい。しかし、上述したような短時間での研磨を可能としていることから、最終仕上げの前工程を一気に短縮する可能性がある。この点は今後の超硬合金製の金型の加工工程短縮に有益な指針となるものと考えられる。

(3) 今後の展望

当初の研究目的としては複合加工機とのコンビネーションで自由曲面金型だけでなく、複雑形状を有するエンドミル工具の切れ刃のマイクロチップングや研磨痕を除去することまでを想定していたが、十分な検討ができなかった。今後はこの研磨機構を利用して、特に微細加工に用いられる小径工具の切れ刃の鋭利化の実現を試みたいと考える。

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 2 件)

- ① 加藤秀治, 超硬合金素材の表面仕上げに関する試み (PBI を用いたみがき仕上げの可能性), ツールエンジニア, 査読無, Vol. 52, No. 5, 2011, pp. 50-54.
- ② Hideharu Kato, Kazuhiro Shintani and Kazuo Iwata, High-Speed Milling Using a Developed Desktop Machine Tool, International Journal of Automation Technology, 査読有, Vol. 4, No. 2, 2010, pp. 103-109.

〔学会発表〕 (計 2 件)

- ① 加藤秀治, 吉川光彦, 新谷一博, ポリベンゾイミダゾール材を用いた超硬合金材料の摺動研磨に関する研究-ピンオンディスク摩擦摩耗試験による基礎的摩耗現象の

検討-，精密工学会，2010年9月27日，名古屋大学.

- ②加藤秀治，吉川光彦，新谷一博，ポリベンゾイミダゾール材料を用いた超硬合金材料の高能率磨き加工に関する研究 - 研磨メカニズムの解明と摺動条件の選定 - ，砥粒加工学会，2009年9月4日，ものづくり大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 秀治 (KATO HIDEHARU)
金沢工業大学・工学部・教授
研究者番号：90278101

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

新谷 一博 (SHINTANI KAZUHIRO)
金沢工業大学・工学部・教授
研究者番号：80139758