

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560106

研究課題名（和文）超微結晶 cBN 砥粒を用いた次世代超高速研削システム開発

研究課題名（英文）Development of Innovative Ultrahigh-Speed Grinding Systems Using Ultrafine-Crystalline cBN Abrasive Grains

研究代表者 市田 良夫（ICHIDA YOSHIO）

宇都宮大学・工学研究科・教授

研究者番号：50091939

研究成果の概要：本研究は、ナノメータオーダの超微細一次 cBN 粒子が緻密に結合した結晶構造を有する新しいタイプの超微結晶 cBN 砥粒（UcBN）を開発すると共に、それを用いた次世代高性能 UcBN ホイールを試作し、その研削性能を評価したものである。この結果、UcBN 砥粒は従来の cBN 砥粒の 2～4 倍の破壊強度をもち、優れた耐摩耗性と研削性能を発揮することを明らかにした。さらに、UcBN を用いた超高速研削システムの構築を試み、200m/s 以上の超高速条件においても UcBN 砥粒が優れた摩耗性および研削性能を示すことを明らかにした。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：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：切削・研削加工，超高速研削システム，超微結晶 cBN 砥粒，磁気軸受けスピンドル，cBN ホイール，砥粒切れ刃摩耗，研削エネルギー

1. 研究開始当初の背景

本研究は、ナノメータオーダの超微細一次 cBN 粒子が緻密に結合した結晶構造を有する新しいタイプの超微結晶 cBN 砥粒（以後 UcBN と呼ぶ）とそれを用いた次世代高性能 cBN ホイール並びに cBN 超高速研削システムを開発することを目的とする。

cBN 砥粒及び cBN ホイールに関する研究は、これまで国内外で活発に行われ、多くの成果が得られてきた。しかし、それらの研究の多くは現存するホイールの研削性能やドレッシング技術など cBN ホイールの応用に関する研究が主体であり、「cBN 砥粒自身の結晶構造や物性の研究」、「新しい cBN 砥粒の開発」、「cBN ホイールの内部組織や構造に関する研

究」等についてはほとんど行われていないのが現状である。

本研究では、ナノメータオーダ（数十から数百 nm）の超微細粒子が緻密に結合した結晶組織を有する新しいタイプの cBN を合成し、それを用いた次世代 cBN ホイールの開発及びそれを搭載した次世代超高速研削加工システムを構築しようとするものであり、21 世紀における新たな先端研削加工分野を切り開く重要な役割を担うものとして位置付けられる。当該研究代表者らは、粒径がサブミクロンオーダの超微細 cBN 粒子が均一かつ強固に結合した結晶組織を有する新しいタイプの cBN の合成に成功している。本研究ではこの合成法をさらに改善し、粒径が数十から数

百 nm のさらに微細な結晶粒子からなる UcBN を合成する。さらに、研究代表者らが開発したビトリファイドホイールの製造法「コーティング法」を UcBN に適用し、均一な組織をもつ高性能 UcBN ホイールの開発を行う。同時に、これまで数年にわたって検討してきた 5 軸制御型磁気軸受スピンドルと超微結晶 UcBN ホイールを融合させた超高速研削装置を試作する。クーラントレス化、ホイール及びスピンドルの長寿命化等に基づく省資源・省エネルギー化を図った環境にやさしい次世代 cBN 超高速研削加工システムを開発する。

2. 研究の目的

(1) 超微結晶 cBN を用いた次世代高性能 cBN ホイールの開発

化学的気相成長法 (CVD) により作製した高純度・高結晶性 hBN を超高圧・超高温の条件下で無触媒・直接転換することにより、粒径数十 nm から数百 nm の超微細一次 cBN 粒子からなる多結晶型超微結晶 UcBN の安定合成法の研究開発を行う。さらに、これまで企業との共同研究により検討してきた均一組織を有するビトリファイドホイールの製造法「コーティング法」を適用し、耐摩耗性と研削性能に優れた超微結晶 UcBN ホイールを開発する。

(2) 磁気軸受スピンドル搭載環境調和型 cBN 超高速研削システムの開発

これまで研究を進めてしてきた 5 軸制御型磁気軸受スピンドルと超微結晶 UcBN ホイールを融合させて超高速研削装置を試作すると共に、クーラントレス化、ドレッシングシステムの最適化、ホイール及びスピンドルの長寿命化に基づく省資源・省エネルギー化を図った次世代環境調和型 cBN 超高速研削加工システムを開発する。開発した cBN-U ホイールと超高速研削加工システムによる研削性能実験を行い、加工精度、加工表面品位、加工能率等の基本的加工特性とプロファイル研削、鏡面研削、マクロ研削等の各種加工方式への応用について検討すると共に、本研究で達成可能な環境負荷低減に関する総合的評価を行う。

3. 研究の方法

(1) 超微結晶 UcBN-U 砥粒及び次世代高性能 cBN ホイールの作製

超微細 cBN 粒子が均一かつ強固に結合した UcBN 砥粒の安定合成法を検討するため、シリンダ内径 36mm のフラットベルト型超高圧発生装置を設計・製作し、hBN からの無触媒・直接転換法による cBN 合成実験を行う。合成物の特性に及ぼす原料結晶 hBN の純度及び結晶性の影響、温度・圧力条件の影響等を明らかにし、超微結晶 UcBN の最適合成条件を追究する。

さらに、従来の産学連携共同研究によって

開発した均一組織を持つビトリファイド cBN の製造法を適用して、UcBN 砥粒を用いた高性能 cBN ホイールを試作し、その研削特性を評価する。

(2) UcBN ホイールを搭載した次世代超高速研削システムの開発

高速駆動テーブルを試作し、これを既設の研削盤本体に組み込んで超高速研削システムを作製する。さらに、前年度作製した超微結晶 UcBN ホイールを搭載し、加工精度、加工表面品位、加工能率等の加工特性に関する評価を行うと共に、環境負荷低減についての総合的評価を行う。

4. 研究成果

(1) 開発した UcBN 砥粒の結晶構造と特徴

開発した超微結晶 UcBN 砥粒の SEM 観察結果の代表的な一例を図 1 に示す。砥粒のアスペクト比 (長径/短径) は約 1.5 で、やや細長い形状をしている。砥粒の内部および表面共に、サブミクロンオーダーの極微細一次結晶粒子が均一に結合した結晶組織から構成されている。cBN ホイールとして、粒度 #80/100、集中度 100、結合度 L のストレートタイプホイール (外径 200mm、幅 10mm) を作製した。研削実験は、横軸平面研削盤を用いた平面プランジ研削方式 (上向き研削) で行った。実験条件を表 1 に示す。なお、従来の代表的な単結晶砥粒 (cBN-B で表示) を用いたホイールも UcBN ホイールと同一条件で作製し、比較用ホイールとして用いた。以後、UcBN 砥粒を cBN-U 砥粒と表示する。なお、研削過程における cBN ホイール作用面の観察は、4 つの電子線プローブを備えた SEM/EDM3000 (マルチプローブ SEM) を用いて行った。

cBN ホイールはいずれも、AE センサ内蔵ロータリダイヤモンドドレッシング装置を用い、周速比 0.5、ドレッサ送り 0.1mm/rev、切込み深さ 2 μ m \times 5 回の条件でドレッシングを行い、実験に供した。本実験では特に cBN-U ホイールの工作物送り速度を 0.15~0.35m/s と変化させ、高能率研削への適用を試みた。

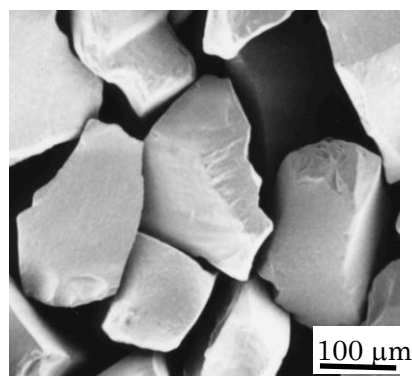


Fig.1 SEM image of UcBN abrasive grains

Table 1 Grinding conditions

Grinding method	Surface plunge grinding (up cut)		
Grinding wheel	CBN80L100V Dimensions: $\phi 200 \times \phi 10 \text{ mm}$		
cBN grain	Monocrystalline cBN (cBN-B) Ultrafine-crystalline cBN (cBN-U)		
Peripheral wheel speed v_s	33m/s		
Wheel depth of cut a	10 μm		
Work speed v_w	0.15	0.25	0.35 m/s
Stock removal rate Z'	1.5	2.5	3.5 mm ³ /mm ³ ·s
Grinding fluid	Soluble type (JIS W-2-2) 2% dilution		
Workpiece	High speed steel (JIS SKH51) Hardness: 65HRC Dimensions: 100 ^l × 5 × 30 ^b mm		

(2) 超微結晶 UcBN ホイールの研削特性

図 2 は、研削の進行に伴うホイール半径摩耗 ΔR および摩耗体積 V'_g の変化を比較したものである。いずれの cBN ホイールにおいても、研削開始直後に初期摩耗が生じるが、 $V'_w=2000\text{mm}^3/\text{mm}$ を超えると V'_g は V'_w にほぼ比例して増大する傾向を示す。そこで、この傾きの逆数を定常研削比 G_s とすると、cBN-U ホイールの研削比 G_s は、工作物送り速度 $v_w=0.15\sim 0.35\text{m/s}$ に対し 7047~5919 となり、高能率研削においても高い研削比が維持され、優れた耐摩耗性を有することが確かめられた。

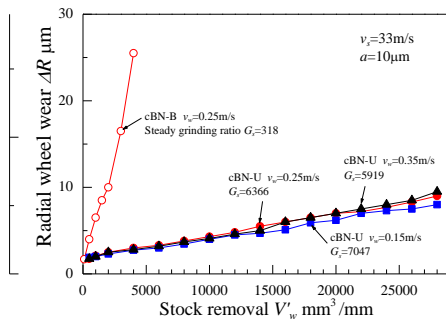
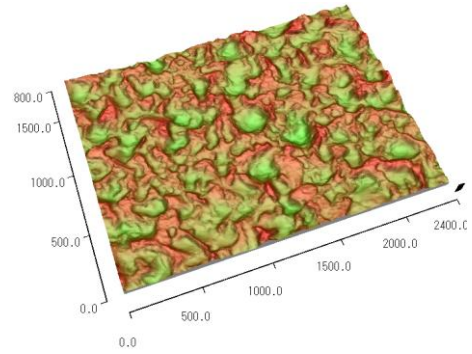
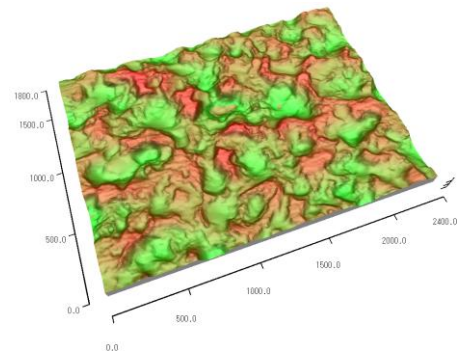


Fig. 2 Change of radial wheel wear ΔR and wheel wear volume V'_g as accumulated stock removal V'_w increases

研削過程におけるホイール作用面の変化をマルチプローブ SEM を用いて三次元観察した結果の代表的な一例を図 3 に示す。cBN-B ホイールを用いて $V'_w=4000\text{mm}^3/\text{mm}$ 研削した後のホイール作用面に比べて、cBN-U ホイールを用いて $V'_w=20000\text{mm}^3/\text{mm}$ 研削した後のホイール作用面には、多数の砥粒切れ刃が存在しており、切れ刃が密に分布している状況が把握される。すなわち、cBN-U ホイールは



(a) cBN-U wheel ($V'_w=20000\text{mm}^3/\text{mm}$)



(b) cBN-B wheel ($V'_w=4000\text{mm}^3/\text{mm}$)

Fig. 3 3D-profiles of cBN wheel surface in grinding process

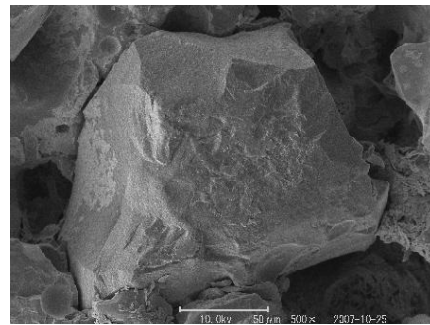


Fig. 4 Typical example of worn cBN-U grain cutting edge in grinding process ($V'_w=20000\text{mm}^3/\text{mm}$)

砥粒切れ刃の破碎やそれに伴う脱落による摩耗が少なく、作用面上の切れ刃分布を安定して維持する能力に優れていることがわかる。

cBN-U 砥粒切れ刃の典型的な摩耗形態の観察例を図 4 示す。砥粒切れ刃は主に微小破碎による脆性摩滅に基づいて形状を変化させ、鋭利な切れ刃を維持しているのが確認される。

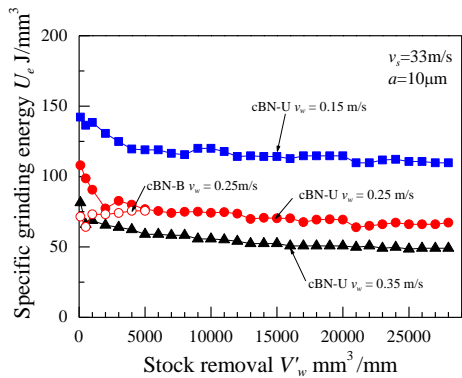


Fig. 5 Change of specific grinding energy U_e as

図5は、研削の進行に伴う比研削エネルギーの変化を示したもので、cBN-Uホイールの比研削エネルギーは高能率研削においても $100\text{J}/\text{mm}^3$ 以下の低い値を安定して維持している。

一方、研削の進行に伴う仕上面粗さの変化を図6に示す。粗さは研削除去量とともに増大するが、cBN-Uホイールの場合の増大率は、cBN-Bホイールのそれよりもかなり低く、仕上面粗さに基づくホイール寿命は高能率研削においても長く保たれるのが確認される。

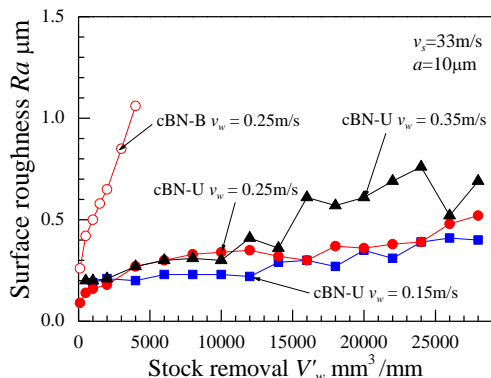


Fig. 6 Change of surface roughness of ground surface as accumulated stock removal V'_w increases

(3) まとめ

サブミクロンオーダーの極微細一次結晶粒子が均一に結合した結晶組織を有する超微結UcBN砥粒を開発した。UcBN砥粒を用いたビトリファイドボンドホイールの研削性能に及ぼす研削除去率の影響について検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) cBN-Uホイールは、工作物送り速度を増大させた高能率研削においても、高い研削比を示し、優れた耐摩耗性を有する。
- (2) cBN-Uホイールは主に切れ刃先端の微小破砕による脆性摩滅に基づいて摩耗する。
- (3) cBN-Uホイールは、高能率研削において

も低い研削エネルギーと仕上面粗さを維持する能力にすぐれている。

さらに、磁気軸受けを用いた超高速研削盤を試作し、これを用いた超高速研削実験を行った。その結果、 200m/s 以上の超高速の条件においてもUcBN砥粒は優れた耐摩耗性および研削性能を発揮することが確かめられた。

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 7件)

- ① Y. Ichida, R. Sato, M. Fujimoto and N. B. Fredj: Fractal Analysis of Self- Sharpening Phenomenon in cBN Grinding, Key Engineering Materials, Key Engineering Materials, 389-390, 42-47, 2009, 査読有
- ② M. Fujimoto and Y. Ichida: Micro Fracture Behavior of Cutting Edges in Grinding using Single Crystal cBN Grains, Diamond and Related Materials, 17, 1759-1763, 2008, 査読有
- ③ 藤本正和, 市田良夫, 佐藤隆之介, cBN研削における切れ刃摩耗挙動のフラクタル解析, 精密工学会誌, 74, 5, 468-473, 2008, 査読有
- ④ Y. Ichida, R. Sato, M. Fujimoto and H. Tanaka, Fractal Analysis of Cutting Edge Wear in Superabrasive Grinding, JSME Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, 2, 640-650, 2008, 査読有
- ⑤ Y. Ichida, Creep Feed Profile Grinding of High-Speed Steel using Ultrafine-Crystalline cBN Wheels, JSME Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, 2, 385-395, 2008, 査読有
- ⑥ Y. Ichida, Mechanical Properties and Grinding Performance of Ultrafine- Crystalline cBN Abrasive Grains, Diamond and Related Materials, 17, 1791-1795, 2008, 査読有
- ⑦ B. B. Fathallah, N. B. Fredj, H. Sidhom, C. Braham and Y. Ichida, Effects of Abrasive Type Cooling Mode and Peripheral Grinding Wheel Speed on the AISI D2 Steel Ground Surface Integrity, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 49, 261-272, 2008, 査読有

[学会発表] (計 10件)

- ① 市田良夫, 飯塚裕己, 佐藤隆之介, AFMを用いたナノスサーフェスの創成, 2009年度精密工学会秋季大会学術講演会演説文集, 2008年9月10日, 中央大学
- ② 飯島史浩, 市田良夫, 佐藤隆之介, cBN砥粒切れ刃による超合金研削機構のFEM解析, 2009年度精密工学会秋季大会学術講演会演説文集, 2008年9月10日, 中央大学
- ③ 井上雄一郎, 市田良夫, 藤本正和, 佐藤隆之介, 上野秀雄, 松井敬資, 超微結晶UcBN砥粒の研

削性能に関する研究(第4報)ービトリファイドホイールの研削特性に及ぼす研削除去率の影響ー2009年度精密工学会秋季大会学術講演会演論文集, 2009年9月10日, 中央大学

- ④ 市田良夫, 藤本正和, 佐藤隆之介, 上野秀雄, 超微結晶UcBNホイールのドレッシングに関する研究, 2009年度精密工学会秋季大会学術講演会演論文集, 2008年3月10日, 中央大学
- ⑤ 市田良夫, 佐藤隆之介, 藤本正和, 井上雄一郎, 超微結晶UcBN砥粒の研削性能に関する研究(第3報)ー試作ビトリファイドcBNホイールの研削特性ー, 2008年度精密工学会秋季大会学術講演会演論文集, 2008年9月18日, 東北大学
- ⑥ 藤本正和, 市田良夫, 佐藤隆之介, cBNホイールを用いた研削過程における微小切れ刃の発現, 2008年度精密工学会秋季大会学術講演会演論文集, 2008年9月18日, 東北大学
- ⑦ 垣生 茂, 市田良夫, 佐藤隆之介, 上野秀雄, ファインセラミックス研削仕上面の3次元フラクタル解析,, 2008年度精密工学会秋季大会学術講演会演論文集, 2008年9月18日, 東北大学
- ⑧ Y. Ichida, High-Efficiency Grinding of Cold-Work Die Steel with Ultrafine- Crystalline cBN Abrasive Grains, 6th Int. Scientific and Technical Symposium on Manufacturing and Materials, 2008年11月14日, Monastir, Tunisia, 査読有
- ⑨ Y. Ichida, M. Fujimoto, J. Akbari and R. Sato, Evaluation of Cutting Edge Wear in cBN Grinding Based on Fractal Analysis, 6th Int. Scientific and Technical Symposium on Manufacturing and Materials, 2008年11月15日, Monastir, Tunisia, 査読有
- ⑩ Y. Ichida, R.Sato, and H. Kajino, Development of Ultrafine-Crystalline cBN Abrasive Grains for Innovative Grinding Technology, Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier (The 41th CIRP International Conference), 2008年5月27日, University of Tokyo, 査読有

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

○取得状況 (計 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

市田良夫 (ICHIDA YOSHIO)

宇都宮大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 50091939

(2) 研究分担者

佐藤隆之介 (SATO RYUNOSUKE)

宇都宮大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 20312861

(3) 連携研究者