

砥石の構造(その3):砥粒の種類とその適性

《超砥粒編》

海老塚 香子 (ハイペリオン・マテリアルズ&テクノロジーズ合同会社)*

1. はじめに

ダイヤモンドはその美しさ、希少性により古代より人を魅了してきたが、近代になるとダイヤモンドの様々な優れた物的特性も明らかになった。ダイヤモンドは炭素の結晶体であるが、結晶構造が黒鉛とは異なり、隣り合った炭素原子が電子を共有することによって三次元的に強く結びついている。この構造により、世の中に存在する他物質と比べ、圧倒的に硬度や耐摩耗性に優れている。また熱伝導性にも非常に優れ、熱膨張率が低い。化学的にも安定している。これらの特性を生かし工具材料として利用されるようになった。1955年に米国のゼネラルエレクトリック(GE)社が人造ダイヤモンドの開発に成功してからは工業用途での利用が急速に広がり、今日では、自動車、機械、エレクトロニクスなど世界の主要な産業を支える工業用材料となっている。日本では1965年に人造ダイヤモンドの輸入が始まると流通量は年々飛躍的に伸び、工具業界の発展に貢献した。2017年には4億カラット近くが日本に輸入されてきており、その大半は中国からとなっている。*

ダイヤモンドの次に高い硬度をもつ立方晶窒化ホウ素(CBN)は、自然界には存在しない、GE社が開発した物質である。鉄に対し不活性でダイヤモンドより耐熱性が高いことから、ダイヤモンド工具が不向きとされる鉄系被作物の加工に広く用いられている。それぞれの特性を図1に示す。

アルミナや炭化ケイ素などの一般砥材より遥かに硬度が高いことから、ダイヤモンド、CBN(Cubic boron nitride)の砥粒を総称して「Super-abrasives 超砥粒」と呼ぶ。本稿ではダイヤモンドのなかでも高温高压技術によって製造される人造ダイヤモンドおよびCBN砥粒について論じる。

2. 開発の歴史

ダイヤモンド合成の試みは18世紀にまで遡る。19世紀末にはモアッソン、ハネーなど、数々の科学者がダイヤモンドの構造を研究し合成実験を行ったが、誰も成功することができなかった。当時、工業用途には天然ダイヤモンドが使用され

ていたが、1940年代後半になると、自国内で天然ダイヤモンドが確保できないアメリカ合衆国で合成ダイヤモンドの必要性が高まり、1950年にはGE社にて大規模な研究が再開された。

GE社は地球奥深くの高温・高压状態を再現する装置を完成させ、1955年2月にはダイヤモンドの製造、再現能力を発表した。当時開発されたベルト型の静的な高温高压装置の仕組み(図2)が今もダイヤモンド合成に広く用いられている。

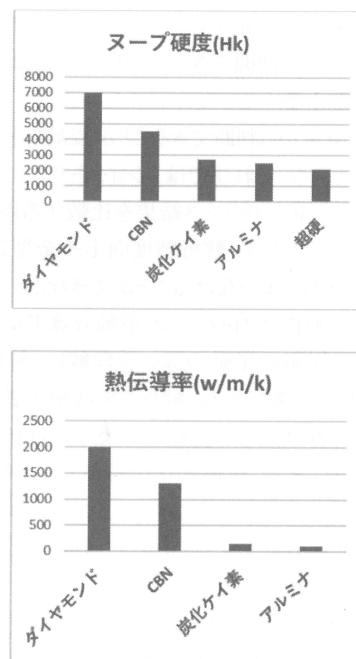


図1 ダイヤ、CBN、その他物質の特性比較

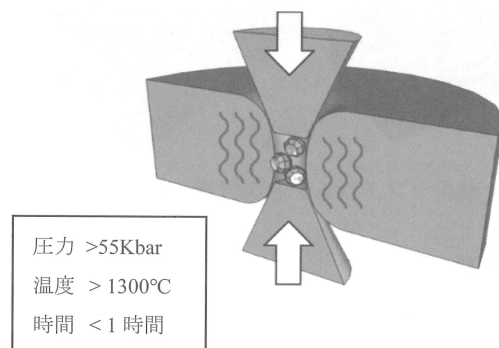


図2 ベルトプレス概要

* ハイペリオン・マテリアルズ&テクノロジーズ合同会社:
〒222-0033 神奈川県横浜市港北区新横浜2-5-14

** 財務省貿易統計によれば、ダイヤモンドの年間輸入数量は2018年に3.86億カラットで、そのうち中国からの輸入が2.4億カラット。統計では人造、天然、用途の区別はないが、輸入されるダイヤモンドのほとんどが人造の工業ダイヤモンドと推測される。

その後も GE 社の科学者たちは高硬度物質の研究を行っていたが、1969年、黒鉛と原子構造が似ている六方晶窒化ホウ素を高温高圧プロセスにかけたところ、自然界には存在しない CBN という物質が合成された。CBN 砥粒はダイヤモンドほどの硬度はなかったが、先述のように鉄系被作物の加工に優れていることが確認され、焼入鋼研削用砥粒として商品化された。

超砥粒の使用は工業製品の生産効率を大幅に向上させ、また環境負荷の低減にもつながっている。建築物、自動車、電子部品など、私たちの身近にあるさまざまなものの製造に超砥粒が用いられており、今やなくてはならない重要な材料といえる。

3. 用途によるダイヤモンド砥粒の種類

ダイヤモンドは正六八面体の結晶がもつとも安定しており、靱性が高いとされる。合成プロセスを調整することにより、結晶性ならびに靱性の異なる砥粒を製造することが可能である。砥粒の特性の違いがダイヤモンド砥粒製品のグレードとなり、異なる工具用途に用いられている。以下に主な工具に用いられる砥粒を紹介する。

砥粒保持力が強いメタルボンド砥石用には、図 3 に示すように、結晶性が良くブロッキーで靱性が高い砥粒が主に用いられる。より高い温度、高い圧力をかけ、時間をかけて成長させた砥粒である。高硬度高脆材料を衝撃破砕モードで加工するのに適している。メタルボンドとの結合を強め、砥粒脱落を抑えるためにチタンやクロムの薄膜金属コーティングが施されることも多い。

電着砥石用途では、砥粒形状が被作物に転写されるため、形状、サイズが揃っており、砥粒強度が高い砥粒が求められる。そのためメタルボンド砥石用の結晶性の高い砥粒が用いられることが多い。電着中のノジュール発生を抑制するため、砥粒表面を洗浄処理し、不純物の付着を除去した状態が好ましい。

超硬、セラミックス、複合素材などの研削加工に幅広く用いられるレジンボンド砥石には、図 4 に示すような、切れ味がよい高破砕性のダイヤモンド砥粒が適している。このような砥粒は、不規則な形状で起伏のある稜線をもち、微細破砕と自生発刃を繰り返すため、研削能率を長く維持することができる。レジンボンドとの機械的結合の改善また研削熱の拡散の目的で、ニッケル、銅、銀などの金属コートをした砥粒が専ら用いられる。砥粒脱落をコントロールするためにニッケルのコート量を調整した製品やスパイク状のコーティングを施した製品(図 5)など、コーティングのバリエーションも多く存在する。

4. 用途による CBN 砥粒の種類

CBN の結晶は 111 面が優位であり、鋭利な切れ刃が特徴である。CBN 砥粒合成においては、触媒やプロセスの変更によりさまざまな形状や強度、破砕モードなどの特性をもたせることが可能である。そのため市場には数多くの CBN 砥粒グ

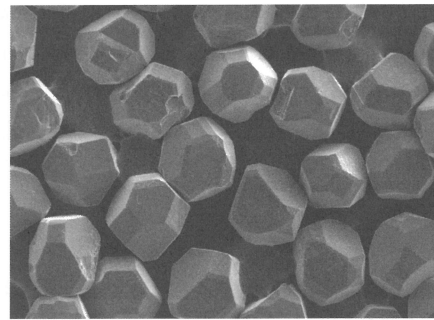


図 3 メタルボンド用ダイヤモンド砥粒

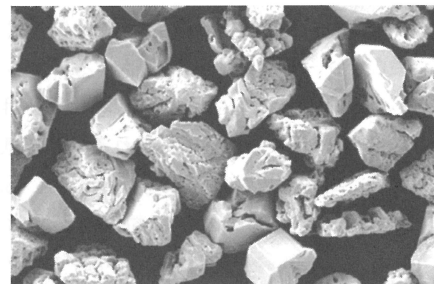


図 4 レジンボンド用ダイヤモンド

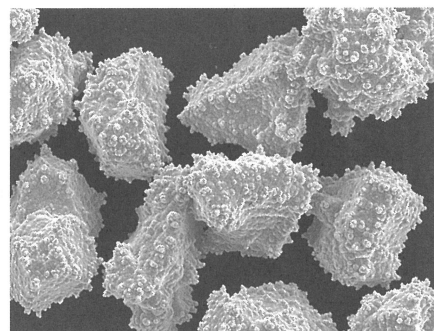


図 5 ニッケルスパイクコートのダイヤモンド砥粒

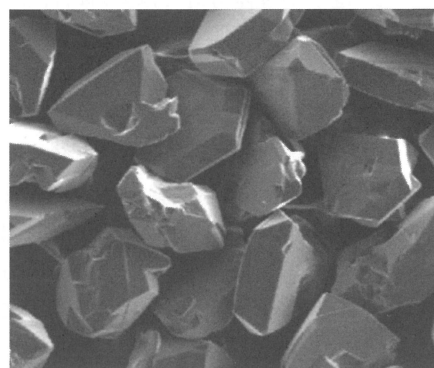


図 6 CBN 砥粒(アンバー)

レードが出回っている。マイクロ破砕する破砕性のよい砥粒はその色から「ブラック」と呼ばれ、結晶がよく靱性が高い砥粒は「アンバー(琥珀)」「ゴールド」と呼ばれることがある。図 6 にアンバー砥粒を示す。

日本では諸外国に比べ早くからカムシャフトをはじめとする自動車分野などの量産部品加工にビトリファイドボンドのCBN砥石が採用され、1980年代後半からCBN砥粒の消費量が飛躍的に伸びた。本用途では、当初は破碎性が高いCBN砥粒が好まれたが、図6のように、より結晶性がよく大きな切れ刃を有する砥粒が主流となってきている。また高い焼成温度でも劣化しない耐熱性も重要視されている。従来、ビトリファイドボンドには適したコーティングがなく、裸のCBN砥粒が専ら使用されていたが、近年ではボンド組成に近いガラス系の素材でコーティングをすることでボンドとの密着性を高めたガラスコートCBN砥粒も発表されている。

メタルボンド砥石、レジンボンド砥石用には用途や目的に応じてさまざまなグレードの砥粒が使用されるが、ダイヤモンド同様、メタルボンド用にはチタンなど、レジンボンド用にはニッケルなどの金属コーティングが用いられる。電着砥石用にはよりブロッキーで高靱性の「ゴールド」砥粒が用いられることが多い。図7の多結晶CBN砥粒は砥粒強度が非常に高く、劈開がないため大きな破碎を起こすことがない。そのため耐熱合金の高効率研削やホーニングなど、厳しい条件の加工に適している。

5. ミクロンパウダーについて

成長させた砥粒は国際規格に準じてメッシュ(篩)を用いてサイズ分けされるため、メッシュ品と総称される。それに対し、成長砥粒を粉碎して細粒にしたものをミクロンパウダーと呼んでいる。一般的にはサブミクロンサイズから粒径100 μm で、仕上げ加工、精密加工に使用される。ミクロンパウダーは沈降法、水簸法などの技術を用いて特定サイズに精密分級され、平均粒径や分布幅などで規格が定められる。サイズには国際規格は存在せず、各メーカーが独自のサイズ規格を作っている。メーカーによってサイズの計測技術も異なる場合があるので注意が必要である。電子半導体分野ではより細目、より狭い分布幅の製品の需要が増えており、いかに分布を厳密に管理出来るかが課題となっている。図8、9にダイヤモンドミクロンパウダー、粒度分布表の例を示す。

例外として、粉碎砥粒ではなく、成長させたダイヤモンドをミクロンパウダーと同様に精密分級した製品もあり、成長ミクロンと呼ばれている。粉碎砥粒よりも靱性が約40%高く、図10のとおり、形状もダイヤモンド結晶本来の正六八面体に近い。ただし現在ではサイズ展開が比較的粗目のみに限られている。

粉碎前の母材となる砥粒の靱性、形状などの特性がミクロンパウダーになっても残ると言われており、母材の違いからグレードが分かれている。ダイヤモンドのミクロンパウダーであれば、メタル系、レジン系に大きく分かれているのが一般的で、CBNのミクロンパウダーも母材でグレード分けされている。メッシュ品同様、ボンド材に合わせ、ニッケルやチタンのコーティングも施されるが、コーティングができる細目サイズには限界があり、ニッケルコートでは平均粒径8 μm 、チタンコートでは5 μm 程度が最小サイズとなっている。

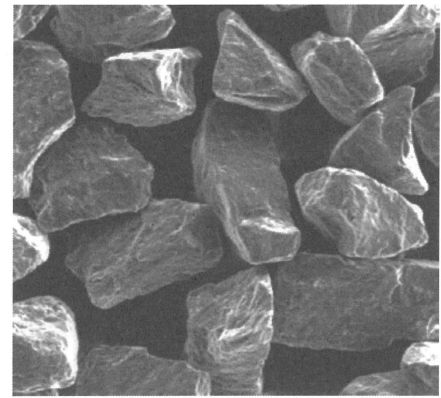


図7 多結晶CBN砥粒

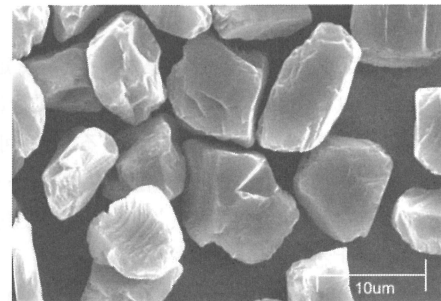


図8 ダイヤモンドミクロンパウダー

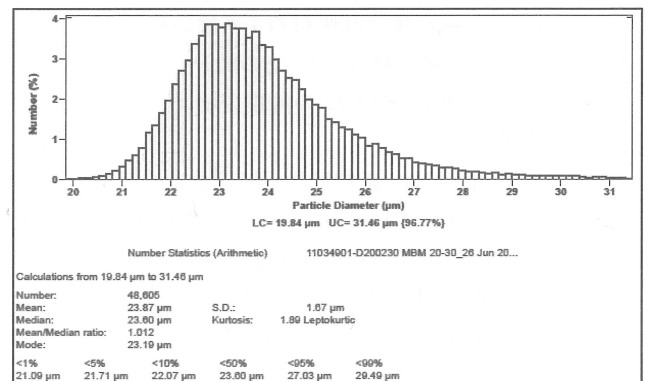


図9 粒度分布表例

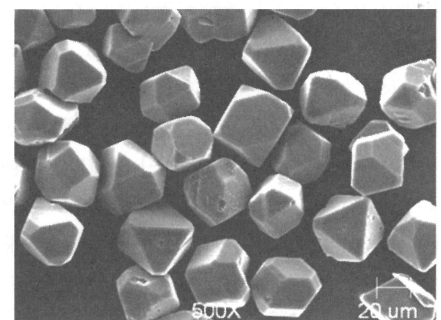


図10 成長ミクロン

ダイヤモンドミクロンパウダーはもとより遊離砥粒として研磨加工に多く用いられてきたが、近年では電子半導体向けの基盤にサファイア、炭化ケイ素などの難削材が増えており、その研磨用途の需要が増加している。このような基盤の研磨には爆発衝撃圧縮法(動的高圧法)による多結晶ダイヤモンドが使用されることが多かったが、高温高圧法による単結晶ダイヤモンドでも研磨に適した砥粒が開発されている。図 11 に示す製品では通常のダイヤモンド砥粒の表面に化学処理によって微細な切れ刃が創生されており、研磨レートの向上とスクラッチの低減が可能となっている。多結晶ダイヤモンドより製造可能サイズが幅広く供給量も安定していることもあり、遊離砥粒として広く使用されている。砥石に用いると、表面の凹凸形状がボンド材との密着性を高める効果が報告されている。

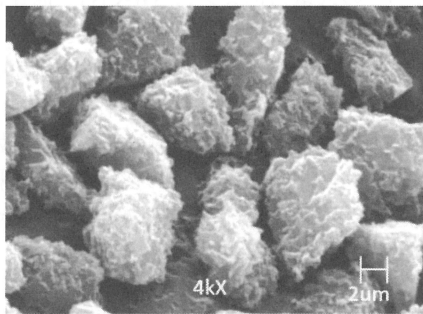


図 11 研磨用単結晶ダイヤモンド

6. 最近の市場動向

従来はダイヤモンド、CBN 砥粒は靱性やメッシュサイズのみで管理されていたが、市場の要求が細分化、複雑化するにつれ、より多く、より細かい管理が求められるようになってきている。例を挙げれば、国際規格よりも細かいサイズ分け、粒度分布中の最小および最大粒径の管理、コーティングのカスタマイズ、アスペクト比などによる形状仕様、残留金属の種類や量の制限、砥粒表面の機械的、化学的特性など、様々な要望が砥粒メーカーに寄せられている。独自の受入検査を行っている工具メーカーも多い。砥粒メーカーにおいては、さまざまな要望に応えられる柔軟な製造体制、各種の数値管理が可能な分析機器の完備、より厳しい管理項目を維持するための品質管理システムを構築することが非常に重要となっている。

砥石に目を向ければ、メタル、レジン、ビトリファイドに当てはまらない、いわゆるハイブリッドボンドが増え、メーカーそれぞれ

のボンド材が開発されている。使用される砥粒もメタルボンド用、レジンボンド用といった括りだけではなく、幅広いボンド材、プロセスに合うラインアップが必要とされる。特定用途向けと銘打っていた砥粒が、全く異なるボンド材や用途と相性が良いことが分かることもある。先入観にとらわれず、柔軟な発想で新しい試みに取り組んでいくことが肝要であろう。

工業用ダイヤモンドの用途は専ら研削、研磨、切断工具であるが、様々な産業分野でダイヤモンドの卓越した特性が改めて注目され、工具以外での利用も徐々に広がっている。世界的にダイヤモンドの生産が伸びて、より身近な材料になったことも一因である。高い熱拡散率を生かした TIM(熱界面材料)、高い光屈折率を利用した光学用途、医療用途など、工具以外の用途で盛んにダイヤモンド利用の研究が進んでいる。今後、ダイヤモンド使用量が大きく増加する可能性も秘めている。

7. まとめ

70 年以上前に GE 社が人造ダイヤモンド、CBN を開発して以来、超砥粒製品は重要な工業原料として幅広い産業を支えてきた。当初は流通量が限られた高価な材料であったが、需要増加とともに砥粒メーカーの数も増え、切磋琢磨してよりよい製品開発に取り組んだ結果、現在ではさまざまな特性の砥粒が入手しやすい環境になっている。今後もダイヤモンド、CBN の優れた特性が発揮される用途がますます広がることと確信している。

8. 参考文献

- 1) 瓜生裕二: 最近のダイヤモンド・CBN 砥粒について, 精密工学会大会学術講演会講演論文集, 2008 年秋季号, (2008).
- 2) 瓜生裕二: 地球環境に優しいダイヤモンド・CBN 加工, 日刊工業新聞, (2009.2.23).
- 3) 瓜生裕二: 超砥粒, 砥粒加工学会誌, 60, 5, (2016).
- 4) 崎川範行: ダイヤモンド, 共立出版, 1986.
- 5) 瀬高信雄ほか編: 人造ダイヤモンド技術ハンドブック, サイエンスフォーラム, (1989).
- 6) ダイヤモンド工業協会: ダイヤモンド工業協会 50 年史, ダイヤモンド工業協会, (1998).
- 7) ダイヤモンド工業協会編: ダイヤモンド技術総覧, NGT 出版, 2007.
- 8) 戸倉和: ダイヤモンド-性質・合成・加工・応用-, 精密工学会誌, 78, 3, (2012).
- 9) Larry Carley: Superabrasives - On The Cutting Edge, Automotive Rebuilder Magazine, A Babcoex Publication, (1997).
- 10) S.F.Krar and E.Ratterman: Superabrasives: Grinding and Machining with CBN and Diamond, Glencoe/McGraw-Hill, (1990).
- 11) Stephen Hayden: The Continuing Evolution of Manufactured Superabrasives, Finer Points, vol 7, No.4, Industrial Diamond Association Inc., (1996).