

〈12 回連載 ショートレクチャー〉

若手技術者のための研削工学

(第 2 回) 研削砥石の特性と使用法

奥山繁樹 (防衛大名誉教授)

1. はじめに

前回のレクチャーで研削加工の歴史や特徴について解説したが、特徴のほとんどは研削砥石に起因している。研削加工の特性を発現させるため、工具となる砥粒には、①工作物に容易に貫入できる硬さ、②切れ刃を自生させる適度な破砕性、③高温での科学的安定性と耐摩耗性が不可欠といえる。このため古くは、ガーネット(ざくろ石)、コランダム(鋼玉)、エメリーなど、天然の鉱物質が用いられた。その後、優れた加工性能を持つアルミナ(Al_2O_3)質や炭化ケイ素(SiC)質の人造砥粒が生産され、さらに地球上に存在しなかった立方晶窒化ホウ素(cBN)砥粒が開発され、加工性能の向上に寄与している。

今回は研削加工の特性を生かす第一段階として、研削砥石の構造と特徴および使用法の概要について学んでいただくことにする。

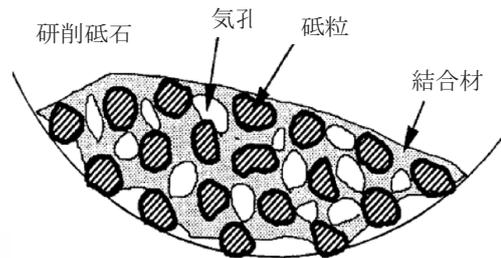
2. 研削砥石の構造と性質

2.1 砥粒の材質、特徴および用途

図 1 に砥石構成の 3 要素つまり、「砥粒」、「結合材」、「気孔」の模式図と、それぞれの役割を示す。また、表 1 に一般砥粒の材質、特徴および用途を、表 2 に一般砥粒と超砥粒(cBN とダイヤモンド)の材料特性を示す。

アルミナ系砥粒は、ルビーと同じ材質で非常に硬く、鉄との親和性(凝着性)が低く、比較的安価であることから、鋼の研削に広く用いられる。このうち、純度の高い WA 砥粒は破砕性が高く、鋭いエッジを持つ切れ刃ができやすいので、硬質鋼の精密・軽研削に適している。

炭化ケイ素系砥粒は、アルミナより硬度、融点とも優れているが、鉄と反応して凝着しやすいため、主に非鉄



- 砥粒**: 高硬度材料であり、工作物を微小切削する
結合材: 砥粒を砥石に固定し、かつ砥石全体の形状を維持する
気孔: 切りくず、研削液などを一時的にためる空間を提供する

図 1 砥石構成の 3 要素

表 1 一般に使われる砥粒の材質、特徴および用途

人造砥粒	記号	特徴	色調	用途
褐色アルミナ	A	WA に比べて韧性が高く、重研削が可能	褐色	スラブなどの重研削、鋼材一般の研削、軟らかい鋼材の精密研削
白色アルミナ	WA	破砕性が高く、鋭いエッジをもつ	白色	焼入れ鋼、工具鋼などの精密研削、軽研削
アルミナジルコニア	AZ (25)	韧性、耐摩耗性が高い	ねずみ色	ステンレス鋼、特殊鋼など難削材の切断砥石、オフセット砥石
黒色炭化ケイ素	C	硬度が高く、GC より韧性もあるが、Fe と反応	黒色	非鉄金属、硬質非金属、鋳鉄の研削
緑色炭化ケイ素	GC	高硬度、高破砕性、鋭いエッジをもつ、Fe と反応	緑色	超硬合金、特殊鋳鉄、非鉄金属、硬質非金属などの精密研削

金属、鋳鉄などの研削に用いられる。このうち、純度の高い GC 砥粒は破砕性が高く、高硬度材の精密研削に適している。

研削加工のさらなる高能率化, 超精密化への要求や, 新たな硬脆材の出現に対応するため, 高価であるが硬度のさらに高い超砥粒が広く用いられるようになった. 中でもダイヤモンドは, あらゆる物質の中で最も硬く, 摩擦係数が低く, 熱伝導率が高い, 極めて優れた工具材料である. しかし酸化開始温度が低く, かつ鉄と反応して摩耗しやすいので, 鉄系材料の加工に用いられることはほとんどない. ダイヤモンドには天然ダイヤ(D)と人造ダイヤ(SD)があるが, 後者は材料特性が安定していることなどから, 近年多用されている. 一方, cBN はダイヤモンドより硬度が低いものの, 鉄と反応しにくく, 高温での使用にも耐えるため, 鉄系難削材の加工に用いられている.

最近の砥粒には, 破砕性をコントロールしたもの, 鋭利な角を持たせたもの, 微細多結晶質のもの, 特殊なコーティングを施したもの, などが開発され, 用途の拡大, 加工性能の向上に寄与している.

2.2 粒度

いずれの砥粒も, 粒径によって分けて(分級して)使用される. 「粒度」は粒径の指標値であり, 粒度 F4~F220 (旧 JIS では, #で表記)の粗粒, 粒度 F230~F1200 の一般研磨用微粉, 粒度#240~#8000 の精密研磨用微粉などがある. ふるいで分級する場合の粒度番号は, 1 インチあたりのふるい目の数(メッシュ)で表している.

筆者らの試算によると, 平均粒径(mm)と粒度 F には, ほぼ次式の関係が認められる.

$$\text{平均粒径} = 22.9 F^{-1.08} \quad (1)$$

上式は, JIS に定められた電気抵抗試験法による精密研磨用微粉の粒径(累積高さ 50%点)にも適用できるので, 利用頂きたい.

2.3 結合度と組織

砥石の「結合度」は, 砥粒保持力の指標値である. 結合度は, 図 2 に示すビットの食い込み深さによって測定され, 最も柔らかい A から Z までの 26 段階に分けられるが, 通常 H~N 程度のものが用いられる.

一方, 「組織」は「砥粒率」(砥石全体に占める砥粒の

表 2 各種砥粒の材料特性

		cBN	ダイヤモンド	アルミナ	炭化珪素
硬さ (HK)		4500~4700	7000~8000	1750~2200	2500~3200
反応性		高温で水, アルカリと反応	Fe, Ni, W, Mo と比較的反応	安定	Fe と反応
熱安定性	空气中	1300℃まで安定	600℃で酸化が始まる	2100℃で熔融	1500℃より酸化
	真空中	1600℃より hBN に転換	1400~1700℃で黒鉛に転換	同上	2220℃で分解

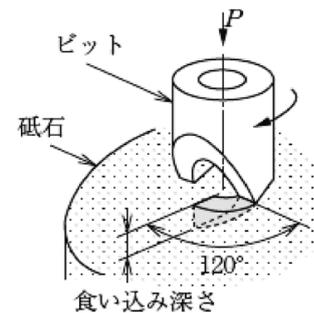


図 2 大越式結合度試験法 (改良ビット法)

体積百分率)の指標値である. 組織番号と砥粒率 V_g とは次式の関係がある.

$$\text{組織番号} = \frac{1}{2}(62 - V_g) \quad (2)$$

一般に, 砥粒率 50%前後のものが用いられるが, 砥石径が大きいと工作物との接触面積が広くなって研削焼けが発生しやすくなることから, 気孔率をとりわけ多くした多孔砥石が用いられることがある.

一方超砥粒の場合には, 砥粒率の代わりに「集中度」(コンセントレーション: 砥粒の体積百分率)が指標値として用いられる. 集中度 200 とは体積百分率が 50%, 集中度 100 は体積率が 25%であることを意味する.

集中度は, 研削の目的と条件によって適宜選択することになるが, 工作物との接触面積が小さい小径砥石の場合には 100 程度のものが, 大径砥石の場合には 75~50 のものが用いられることが多い.

2.4 結合材の種類と用途

表 3 は, 結合材(ボンド材とも言う)の種類, 性質と用途を示したものである. 一般砥粒では, 適度な破砕性と剛性を有するビトリファイド(陶磁器質)を用いたものが多く, 主に精密研削に用いられる. 使用条件が過酷な

場合には、さらに弾性と粘りがあり、耐衝撃性の高いレジノイド(熱硬化性樹脂)が用いられる。

一方、超砥粒は高価であることから、砥粒の保持力が強いメタル系の結合材や電着砥石が用いられることが多い。

2.5 砥石の表示法

研削砥石の呼び記号の付け方は、JIS で規定されている。一般砥粒砥石の一例を以下に示す。

JIS R 6211-1	1A1	205(D)	×10(T)	×50.8(H)				
規格番号	形状	寸法(外径×厚さ×孔径)						
51	A	36	L	5	V	23	33	
砥粒の 細分記号	砥粒 の種類	粒度	結合度	組織	結合剤 の種類	細分 記号	最高使用 周速度	

この例は、円筒研削に用いられる 1 号平形のスレート砥石の場合であり、二つある細分記号は製造業者独自のものである。最高使用周速度を超えると砥石が遠心力によって破壊される恐れがあるので、十分注意する必要がある。

つぎに、超砥粒ホイールの一例を示す。

JIS B 4131	SD	200	N	75	B
規格番号	砥粒 の種類	粒度	結合度	コンセント レーション	結合剤 の種類

1A1	205(D)	×20(T)	×3(X)	×50.8(H)
形状	寸法(外径×厚さ×砥粒層厚さ×孔径)			

粒度、結合度および結合材の種類を表記法は一般砥粒砥石と同じであるが、その他にコンセントレーションと砥粒層の厚さが示されている。

3. 研削砥石のバランス

砥石にアンバランスがあると、回転に伴って振動が発生し、加工面にびびりマークができるばかりでなく、危険でもある。そのため、砥石を使用する前に、回転軸まわりのバランスを精密にとっておく必要がある。

バランスには、フランジで固定した砥石の静的な重力釣り合わせを行う天びん式(図 3)や転がり式があるが、静的な方法は砥石をスピンドルに取り付けた状態でのバランスを保証するものではない。そこで精密研削

表 3 結合材の種類, 性質と用途

結合材	特徴	性質	用途
ビトリファイド(V)	・結合度を広範囲に作れる。 ・適応砥粒:A系, C系, 超砥粒。	・砥粒の保持力が強い。 ・経時変化がなく品質が安定。 ・剛性高く, 形状保持性に優れる。	・精密研削 ・円筒研削 ・ホーニング
レジノイド(B)	・作製の温度が低く, 適当な補強材や添加剤の使用可。 ・適応砥粒:A系, C系, 超砥粒	・ビトリファイド結合材より強度が高いので, 高周速度で使用可。 ・弾性があり衝撃の大きな研削に適。	・自由研削 ・工具研削 ・オフセット研削
メタル(M)	・ブロンズ, スチール系金属粉末を焼結。 ・適応砥粒:超砥粒	・砥粒保持力が大で, 寿命が長い。 ・熱伝導率大	・石材加工 ・高脆材の鏡面加工
電着(P)	・ニッケル・銅メッキにより台金に砥粒を強固に固定。 ・適応砥粒:超砥粒	・砥粒が独立して突き出しているため, 切れ味が非常によい。	・複雑な異形品 ・極小品

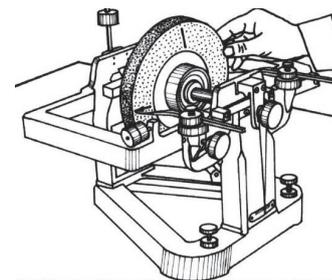


図 3 天びん式バランス法

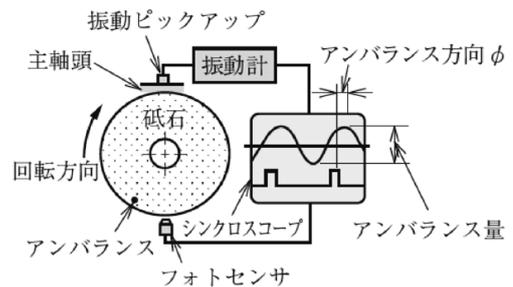


図 4 遠心力式機上バランス法

を行う場合には、図 4 に示すように、スピンドルに砥石を取り付けて回転させ、遠心力によって発生するアンバランスの大きさと方向を計測しながらバランス調整する必要があります。遠心力を利用したバランス装置は市販されていることから、使用法や特性については、カタログなどをご参照願いたい。

4. ツルーイング・ドレッシング

精密研削では、砥石外周の振れや砥石形状の不整を嫌うため、砥石をスピンドルに取り付けた後に、ダイヤモンド・ドレッサなどを用いてその外周を削って振れをとる必要がある。この作業がツルーイング(形直し)である。また、砥石の表面(作業面)形状を工作物に転写する

総形研削において、あらかじめ砥石表面を目的の形状に整形する作業もツルーイングである。

一方、(a)ツルーイングだけでは切れ刃の突き出しが不十分な場合、(b)研削作業によって切れ刃の「目こぼれ」が激しくなった場合(図5)、(c)砥粒が摩滅・摩耗により「目つぶれ」した場合(図6)、そして(d)切り屑がチップポケットに付着して砥石が「目詰まり」した場合(図7)には、ドレッシング(目立て)を行う必要がある。

一般砥粒砥石の場合には、気孔があり、結合材はもろく、砥粒も破碎しやすいから、ダイヤモンド・ドレッサでツルーイングすれば、ことさらドレッシングを行う必要はない。しかし超砥粒ホイールの場合には、砥粒保持力を高めた無気孔(マトリックスタイプ)のものが多く、ツルーイングをただけでは結合材に埋没している砥粒を砥石表面に突き出させることはできない。

そこで、スティック状のGC砥石を高切り込み、低送り速度で研削して、結合材を除去する方法や、ブレーキ装置のついた横軸形ツルーイング装置(ブレーキツルア)にGC砥石を取り付けて超砥粒ホイールに作用させる方法などがある。さらに高精度の研削仕上げを行う場合には、図8に示すように軟質のカップ形GC砥石と超砥粒ホイールを相対運動させ、砥石を精密整形すると同時に、目立てを行う方法が用いられる。

一方、小径の軸付き砥石の場合には、ツルーイング・ドレッシング抵抗によって砥石軸がたわみ、整形精度が低下するため、放電ドレッシングが行われることがある。この方法では、導電性の結合材を用いた砥石に対して放電加工用電極材をツルアとして用い、両者にパルス電圧を印加することによって行う。なお歯車研削などにおいて、砥石作業面を総形に整形する場合には、総形の電着砥石がツルアとして用いられるが、導電性結合材を用いた砥石の場合には、ワイヤ放電加工の応用によって、整形することも可能である。

さらに、電解作用を利用した電解インプロセス・ドレッシング(ELID)法が開発され、主に超精密研削の分野で成果を上げている。鏡面加工を行うには、なるべく微細な超砥粒を用いたいところであるが、研削を始めるとたちどころに目詰まりしてしまう。しかしこの方法によれば、加工中にメタル系結合材の表層を電解作用によって除去することで砥粒切れ刃を突き出させ、持続的かつ能率的に超精密研削を行うことができる。

なお、ツルーイングとバランスィングは互いに影響する

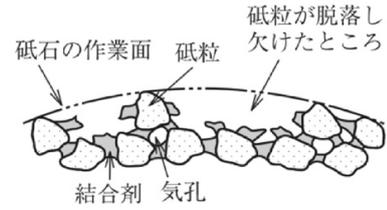


図5 目こぼれ

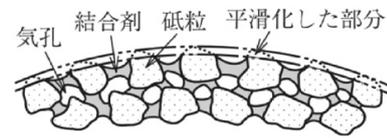


図6 目つぶれ



図7 目詰まり

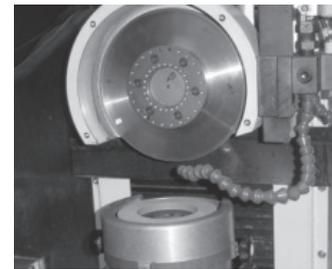


図8 カップ形ツルアによる超砥粒ホイールのツルーイング・ドレッシング

ことから、あらかじめツルーイングを行って砥石外周の振れをとってから機上バランスィングを行い、さらに精密ツルーイングする必要がある。

5. おわりに

工作物材質と加工目的に応じた適切な砥石の選択とバランスィングおよびツルーイング・ドレッシングは、研削加工の特性を生かすために、ユーザが関与できる重要分野であることから、皆さんの研鑽に期待したい。

なお、さらに深い知識を望む読者には、「砥石」と「研削・研磨」の総合情報サイト(<http://www.toishi.info>)、あるいは前回紹介した教科書「機械加工学の基礎(コロナ社)」などをご参照頂きたい。

次回はユーザが関与できる、もう一つの重要分野である研削液の選定と供給法について、潤滑と冷却の基礎から解説することにした。