砥粒面形状測定器の試作と測定例*

—砥石面性状の統計的研究(第1報)—

白 井 英 治** 井 上 誠***

Measuring Apparatus for Apex Shape of Abrasive Grain and Some Results of Measurement

—Statistical Investigation on Surface Nature of Grinding Wheel (1st Report)—

Eiji USUI, Makoto INOUE

In order to investigate the correlation between surface nature of grinding wheel and its ability of grinding, an apparatus for measuring the apex shape of abrasive grain in the surface of grinding wheel is built up by way of trial. The apparatus enables to obtain the distributions of normal direction and area of the apex surfaces by projecting a fine laser beam to the wheel surface and detecting the reflected beam from the apex. The results of measurement with the apparatus are compared with the directly obtained profiles of the wheel surface and the ground surface by the wheel. The results are further compared with the apex shape obtained by the replica method. It is then confirmed by the comparisons that the results with the apparatus are fully consistent with the real state of the wheel surface. Material of abrasive grain, sharpness of diamond dresser and feed rate of dressing appear to greatly influence on the nature of the wheel surface and these influences are detectable with the apparatus in the present paper.

1. ま え が き

研削砥石面の砥粒切れ刃は単純な円すいや半球ではなく、砥粒材質、砥石組成、被削材、ドレッシング条件、研削条件などに応じた固有の統計的形状分布特性をもつと考えられる。本研究はこのような切れ刃形状分布ならびに切れ刃間隔を測定し、統計的にとらえた砥石面の性状と砥石の研削性能とを関連づけようとするものである。

そこでまず、レーザ光の微小なスポットを砥石表面に投射して反射光の検出により砥粒面法線方向とその面積の分布を求める装置を試作し、次いで相関器を併用して砥粒形状特性を測定する方法を考えた。そして一般に使用される砥石 WA 46 J を使って砥石表面の結合剤を除去した効果の観察、屈折を除くための砥石表面のアルミ蒸着の必要性の検討を行った。さらに砥石種類、ドレッサ形状、ドレッサ送り速度を変えて砥粒形状特性を測定し、他の直接的測定法による結果と比較照合した結果、本測定装置の有意性が確かめられたので報告する。

2. 測定装置の試作と測定方法

2.1 測定装置の試作

測定装置の概要を図1に示す。同図においてレーザ管 L から出た単一モード光は反射鏡 M₁, M₂ を経て集光レンズ L₁ を通り、砥石面上の測定点 P に焦点を結んで砥粒面により反射される。PL₁ に直角方向に設置した光学系のスリット S₁, 受光レンズ L₂, スリット S₂ を通過した光はフォトダイオード D で検出され、増幅されてデータレコーダに集録される。このとき集録される砥粒反射面の法線は PL₁, PL₂ のなす角の二等分線とほぼ一致し、

B: ヘッド, C: わく, D: フォトダイオード, L: レーザ管, L₁: 集光レンズ, L₂: 受光レンズ, M₁, M₂: 反射鏡, S₁, S₂: スリット

図1 測定装置の概要

* 原稿受付 昭和48年9月25日. 昭和47年度精機学会春季大会学術講演会(昭和47年4月7日)および昭和48年度精機学会春季大会学術講演会(昭和48年4月5日)にて発表.

** 正 会 員 東京工業大学工学部(東京都目黒区大岡山2-12-1)

*** 学生会員 東京工業大学大学院

図2 測定装置

反射面性状（反射率，反射面積を含む）はパルスの形に置換される．光学系を含む測定ヘッドBはY-Y'軸のまわりに旋回でき，Bを含むわくCはZ-Z'軸のまわりに旋回できる．そして全体は砥石に対して左右上下方向に微動できる構造となっている．図2はこれらの構造部分の写真である．図3において砥粒面の法線方向を $\vec{n}$ ，砥石軸に平行にx軸，砥石円周の接線をy軸，砥石半径方向をz軸にとれば，図示の角 θ, φ はそれぞれ図1のわくC，測定ヘッドBの旋回で与えられることになる． θ, φ の変化ですべての反射面の法線が与えられるから，任意の θ, φ に測定系を固定し，砥石を回転させれば法線が θ, φ 方向の砥粒面が電気的パルス波形として記録される．

単一モードのレーザー光を用いた理由は，レンズで容易にスポットを小さく絞ることができ，白色光に比べて光度も大きいので十分な感度が得られると考えたからである．レーザー光をレンズで絞るときの最小スポット径は次式で与えられる．

$$d_1 = f_1 \theta \quad (1)$$

d_1 は最小ビーム直径， f_1 は集光レンズ L_1 の焦点距離， θ はレーザービームの開き角である．一方，図4において焦点距離 f_2 の受光レンズ L_2 から b だけ離れた位置にあるスリット S_2 （直径 s_2 ）の実像が L_2 から a の距離にできるものとする． a, b, f_2, s_2 および直径 d_2 の間に次の関係式がある．

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f_2} \quad (2)$$

$$d_2 = \frac{a}{b} s_2 \quad (3)$$

図3 θ, φ の定義

図4 光学系の要点

図5 砥粒面の大きさの分布

この d_2 と d_1 で作られる同図の斜線域Aが測定範囲であり，この領域内の砥粒面が測定されるが，考えやすいように，

$$d_1 = d_2 \quad (4)$$

とし，両光軸が直交する配置を採用した．また製作の便宜のため

$$f_1 = f_2 \quad (5)$$

とし， a は設計上から適切な値に決める．以上，式(1)～(5)から， d_1, a を与えれば f_1, f_2, b, d_2, s_2 が定まる．またスリット S_1 は測定される反射面の角度範囲を $2 \tan^{-1}(s_1/2a)$ に規制するためのものである．試作した装置では $d_1 = 1/100 \text{ mm}^\phi$ ， $2 \tan^{-1}(s_1/2a) = 18^\circ (\pm 9^\circ)$ とした． $d_1 = 1/100 \text{ mm}^\phi$ とした理由は，砥粒切りくず接触長さを考慮して，最上層の砥粒が研削に関与する最大高さを最大砥粒切込み深さの数倍程度とみたためである．またWA #24, GC #24の数個の単砥粒（砥石製造まえの）について砥粒面の大きさの分布を調べた結果は図5となりWA砥粒では $1200 \sim 1400 \mu\text{m}^2 (39 \sim 42 \mu\text{m}^\phi)$ ，GC砥粒では $500 \sim 700 \mu\text{m}^2 (25 \sim 30 \mu\text{m}^\phi)$ 程度の面が多かったことによる．すなわち砥粒先端は極端に微細な構造をもたず， $d_1 = 10 \mu\text{m}^\phi$ 程度のスケールの多面体としてとらえれば十分であると考えた． $2 \tan^{-1}(s_1/2a) = \pm 9^\circ$ とした理由もこれに関係する．すなわち砥粒面の微細な構造による影響を減じ，上述の多面体としてとらえるためにかなり大きな許容角度範囲としたものである．なお，

図6 蒸着前後の比較

d_1 , $2 \tan^{-1}(s_1/2a)$ の値については今後さらに検討し、適正な値を見いだしたいと考えている。図1におけるP点は θ, φ の変化に対し不動の回転中心でなければならない。このため砥石のない状態で半透鏡をP点付近に水平に固定し、生ずる最小スポットの像を上から顕微鏡でみながら、 θ, φ の変化に対して像が不動となるように受光系を調節すれば、両光軸と回転中心が一致する。

データレコータに集録される電気的パルスには、砥粒反射面の数とピッチ、面積、反射率、反射面の方向（反射面の法線方向は測定角 (θ, φ) で表現できる）などの情報が含まれるが、これらをどのように抽出し、砥石面の性状をどのような統計量で表せばよいかは次報以後の問題とし、本報では測定角 θ, φ におけるパルス波形の自己相関関数 $R(\tau)_{\theta, \varphi} = \int f(x+\tau)f(x) \cdot dx$ の $R(0)$ 値

$$R(0)_{\theta, \varphi} = \int_0^{\text{砥石1回転}} f(x)^2 dx \quad (6)$$

を指標として測定結果をまとめた場合を報告する。 $R(0)_{\theta, \varphi}$ は砥石1回転あたりの θ, φ 方向反射光量の自乗平均値に比例する。

2.2 スポット光の砥粒内屈折、結合剤の影響の吟味

砥粒自体は透明度の高い結晶であるので、測定光の砥粒内への屈折の影響を調べる必要がある。図6は、ドレッシングのみを行った砥石と表面をアルミ蒸着した砥石を用い、 $\theta=0^\circ$, $\varphi=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ において砥石表面から半径方向の深さに対する $R(0)$ の分布を測定して比較した結果である。WA46Jm1(直径170mm ϕ)の砥石、砥石測定回転数0.5rpmであり、TEAC C-110の相関器を使

図7 結合剤処理の効果

用し、サンプリング間隔2msを用いた。同図の縦軸は $R(0)$ 、横軸は測定深さであるが、図4の測定域A(直径 d_1 の球と考える)を砥石面に近づけたとき、パルスを計数し始める位置をもって深さゼロとしている。測定域は直径 d_1 の広がりをもつから砥石表層の砥粒先端分布が均一なら、 $R(0)$ は測定深さとともに増大し、測定深さ10 μm 程度で測定域Aが砥石表面下に埋没するにおよび $R(0)$ は一定値に達するはずである。したがって測定深さ10 μm 以下は意味がなく、それ以上の場合のみをプロットしている。なお相対的な比較のため、蒸着前は出力パルス増幅器50倍、蒸着後は5倍で測定した。同図から判断して両者の形はほぼ同じであるとみなしうる。すなわち、蒸着しなくても屈折光の影響は無視できると考えられる。したがって以降の測定では蒸着操作を省くことにした。

ドレッシングされた砥石は、結合剤が砥石表面まで付着していると考えられるので、正しい砥粒形状を求めるため表面の結合剤を除去する必要がある。そのため砥粒を溶かさずに結合剤を溶かすフッ化水素水を浸みこませた吸収紙を砥石表面に軽く押しつけ、その後十分な水洗を施す処理方法を採用した。その結果を図7に示す。測定角 $\theta=\varphi=0^\circ$ で、横軸は測定深さ、縦軸は $R(0)$ である。同図より、ドレッシング直後の砥石では他のものに比べて $R(0)$ の値がかなり大きい、結合剤処理の回数が増大するにつれて $R(0)$ の値はだんだん小さくなっていくのがわかる。表面の結合剤がしだいに除去されていくためであり、また2回目以降の結合剤処理では $R(0)$ -深さ曲線がほとんど変化しないことから、フッ化水素は結合剤のみを除去していることが確かめられる。以上の結果から、以後の測定では常に3回の結合剤処理を行うことにした。

図8 ドレッサ先端の形状

測定砥石: WA 46 Jm 1 (170 ϕ), ドレッサ切込み: 30 μ m,
砥石回転数: 2800 rpm, 測定砥石回転数: 0.5 rpm, 増幅
器倍率: 50 倍, 測定角 θ : 0 $^\circ$

図9 先端の平らなドレッサでの測定結果 (WA 砥石)

3. ドレッシング条件による砥石面変化の 測定と検討

研削仕上面あらし, 研削抵抗などが砥石面のドレッシング条件により変化することはよく知られている¹⁾. ドレッシング条件により砥石面の性状が変化するためであるが, 本報告の試作装置により, この変化がとらえられるかどうかを検討してみた. 測定は図6におけると同様に, $\theta=0^\circ$ とし, $\varphi=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ と変化させた $R(0)$ を砥石表面からの深さに対して求めた. $\theta=0^\circ$ であるから, 測定結果は砥石幅方向の断面内の砥粒形状特性を示すことになる. またナイフエッジ型触針と表面あらし測定器によって求めた砥石表面のプロフィル, 同じ条件の砥石で研削した研削仕上面プロフィルおよびレプリカ法による砥粒先端形状の顕微鏡写真を本測定器による測定結果と照合し, 測定の妥当性を吟味した.

3.1 試作装置による測定結果

3.1.1 先端の平らなドレッサによる結果

測定砥石: GC 21 (180 ϕ), その他の
条件は図9に同じ

図10 先端の平らなドレッサでの
測定結果 (GC 砥石)

使用したダイヤモンドドレッサ先端の顕微鏡観察による形状を図8に示すが, まず同図(a)の先端が平らなドレッサを使用した. 砥石はWA 46 J (170 ϕ) およびGC 21 (180 ϕ)であり, WA 砥石についてはドレッサ送り速度 f を 0.107, 0.214, 0.321, 0.428 mm/rev の4種類とし, GC 砥石では f を 0.214 mm/rev としてドレッシングした後, 結合剤処理を3回施してから測定した. WA 砥石, GC 砥石についての測定結果をそれぞれ図9, 図10に示す. 縦軸は砥石回転あたりの $R(0)$ であり, 砥石幅方向に 0.1 mm ずつ5箇所位置を変えて測定し, その平均値をプロットしてある. 測定条件は図6におけると同様である. 両図をみると, 使用したドレッサの先端が平たんため, 砥粒頂部は平らに削りとられ, $\theta=\varphi=0^\circ$ の面が著しく多くなっているのがわかる. また $\varphi \neq 0^\circ$ の面は測定深さの大なる位置で現れてくるが, これは台形になった砥粒の斜面部とドレッシングの影響を受けない下層砥粒が測定されるようになるためである. ドレッサ送り速度の影響については, $f=0.321$ mm/rev の場合に $\theta=\varphi=0^\circ$ の砥粒面が最も多い結果となっているが, この理由は明らかでない. また大送りの $f=0.428$ mm/rev の場合には砥粒の破碎が顕著になり²⁾, $R(0)_{\varphi=0^\circ}$ の極大値が減少する. 同じ条件でのWA 砥石とGC 砥石を比較すると, GC 砥石の $R(0)_{\varphi=0^\circ}$ の極大値は, WA 砥石のそれより小であり, 一方 $R(0)_{\varphi \neq 0^\circ}$ は逆にWA 砥石のそれより大きい. すなわちGC 砥石の方が先端の平たんな砥粒の割合が少なく, WA 砥石に比べて破碎性に富むとする従来の報告³⁾を裏付けている. なお図9, 図10の場合, $R(0)_{\varphi=0^\circ}$ の極大値が測定深さ20 μ mで生じ図6, 図7の場合と異なっているが, この理由は明らか

測定砥石: WA 46 Jm 1 (170 ϕ), 以下条件は図 9 に同じ

図 11 先端の比較的鋭いドレッサでの測定結果 (WA 砥石)

測定砥石: GC 21 (180 ϕ), 以下条件は図 9 に同じ

図 12 先端の比較的鋭いドレッサでの測定結果 (GC 砥石)

でない。測定深さゼロの設定には任意性があり、図 9 (4) の場合以外はこれによる誤差ではないかと考えている。

3.1.2 先端の比較的鋭いドレッサによる結果

図 8 (b) のドレッサを用いた場合の結果を図 11, 図 12 に示す。諸条件はいずれも前 2 図と同様である。ドレッサ送りが十分小さい $f=0.107\text{mm/rev}$ の場合には図 9 と同様な結果であるが、他の場合には全く異なる結果となっている。WA 砥石の場合には f の増大とともに $R(0)_{\phi=0^\circ}$ の極大値は急激に減少し、一方その位置での $R(0)_{\phi \neq 0^\circ}$ の値は増大して砥石半径方向の砥粒先端分布は均一化してくる。この傾向はドレッサ先端が鋭く、送りが大なるほど、砥粒破碎が増大し、先端のみが平たんに削りとられることが少なくなるためと考えられる。また GC 砥石の場合は、 $R(0)_{\phi=0^\circ}$ の最大値は図 10 におけるよりはるかに小であり、さらに f が大になると砥石表面の砥粒の脱落が増し、砥石半径方向に砥粒先端密度が

(a) 先端の平らなドレッサの場合

(b) 先端の比較的鋭いドレッサの場合

砥石: WA 46 Jm 1 (170 ϕ), ドレッサ切込み: 30 μm ,
砥石回転数: 2800 rpm

図 13 砥石表面プロフィール

増大する状態になるものと考えられる。

3.2 直接的方法による測定結果との比較

3.2.1 触針法による砥石面プロフィールとの比較

本報告の測定はいずれも $\theta=0^\circ$ の場合であるから測定結果は砥石幅方向の断面と対応している。そこで表面あらさ測定器とナイフエッジによる織岡の方法⁴⁾で砥石幅方向の砥石面のプロフィールを求め、試作装置による結果と比較してみた。図 13 (a), (b) はそれぞれ図 9, 図 11 の測定に用いた WA 砥石 (結合剤処理済み) のプロフィールであり、幅 2.3 mm, エッジ角 90° のナイフエッジ、縦倍率 300 倍、横倍率 35 倍での結果である。図 13 (a) の先端が平らなドレッサによるプロフィールでは砥粒先端が平たんなものが多く、特に $f=0.321\text{mm/rev}$ の場合に平たんさが目立ち、 $f=0.428\text{mm/rev}$ ではやや平たんさが失われるなど図 9 の結果とよく対応している。また図 13 (b) の先端が比較的鋭いドレッサによるプロフィールで

研削砥石: WA 46 Jm 1, ドレッサ切込み: $30\mu\text{m}$, 砥石周速: 1500 m/min , テーブル送り: 10 m/min , 切込み: $30\mu\text{m}$, 被削材: SK 4 (焼なまし), 乾研削 (1パス)

図 14 研削仕上面プロフィール

は $f=0.107\text{ mm/rev}$ の場合を除き, 砥粒先端の鋭利さが顕著であり, 図 13 (a) と明りょうな対照をなすとともに, 図 11 の結果によく対応していることがわかる. なお前述の図 4 の測定域 A は直径 $10\mu\text{m}$ 程度の球と考えてよいが, この球状域が図 13 (a), (b) の砥石面を走査すると考えると, $10\mu\text{m}$ の測定域寸法はほぼ妥当なものであることが理解できる.

3.2.2 研削仕上面あらさとの比較

測定装置による結果を検討するため, 研削仕上面プロフィールを求めて比較してみた. 図 14 (a), (b) はそれぞれ図 9, 図 11 の WA 測定砥石 (結合剤処理済み) による研削仕上面プロフィールである. 小坂式表面あらさ測定器による縦倍率 1000 倍, 横倍率 100 倍での結果である. 焼入れされない炭素工具鋼 SK 4 の被削材を用い, 砥石周速 1500 m/min , テーブル送り 10 m/min , 砥石切込み $30\mu\text{m}$ でワンパス平面乾研削を行った. 同図 (a) の平らなドレッサによる結果では, ドレッサ送り速度 f にかかわらず, あらさが同じ程度で, 平たい谷底形状がかなり見られる. 一方, 同図 (b) の比較的鋭いドレッサによる結果では f が大きくなるに従いあらさが大きくなり, 谷底もとがった形状になってくる. また, 同図 (a) に見られないうねりが顕著になってくる. すなわち, 平らなドレッサでは砥粒先端は削り取られ, 比較的鋭いドレッサ

砥石: 図 9 (1), 図 13 (a) (1) の測定に用いたもの

図 15 レプリカ法による砥粒先端の形状

では f が大きくなるにつれて砥粒の破砕が増し, さらにドレッサ送りに伴うねじ状のうねりが生ずるためと考えられ, 本装置による測定結果をよく説明するものと思われる.

3.2.3 レプリカ法による砥粒先端の観察との比較

砥粒先端の形状を断面形についてでなく, 立体的に確かめる目的で, 砥石表面を樹脂に転写して観察してみた. 図 15 は図 9, 図 13 (a) の測定に用いた WA 砥石 (結合剤処理済み), $f=0.107\text{ mm/rev}$ 平たんだレッサの場合の砥石面の写真である. 同図内の模様が砥粒先端部であり, その中の白い部分が平たんな頂部を示している. 砥粒に対する寸法はかなり大であり, 砥粒切れ刃の大部分が平たんであるとする前述の観察結果を裏付けていると思われる.

4. 結 論

- (1) 砥石面の砥粒形状分布特性を調べるため, レーザ光の微小スポットを砥石表面に投射し, 反射光の検出によって砥粒面法線方向とその面積の分布を求める装置を試作した.
- (2) 測定に際して砥粒と結合剤を区別するにはフッ化水素を用いる処理により砥石表層の結合剤を除去すればよいこと, 砥粒内の屈折光の影響は無視でき, 砥石面に金属蒸着を行う必要はないこと, が明らかになった.
- (3) 砥石種類, ダイヤモンドドレッサの先端形状, ドレッサの送り速度によって砥石面の砥粒形状分布が著しく相違することを試作装置によって検出したが, これらの結果は触針法による砥石表面プロフィール, 研削仕上面プロフィール, レプリカ法による砥粒先端の顕微鏡観察にもとづく推定とよく一致することが確かめられた.

文 献

- 1) 牧野秀一, 井上英夫, 福島英一: 研削作用におよぼす目立て条件の影響, 機械試験所所報, 16, 5 (1962) 214.
- 2) 鈴木憲二, 高橋邦夫: 研削砥石のドレッシングの研究 (第 1 報), 精密機械, 30, 3 (1964) 246.
- 3) 例えば, 熊谷直次郎: 研削砥石の研削刃に就て, 精密機械, 9, 5 (1942) 325.
- 4) 織岡貞次郎: 確率論を応用した研削仕上面創成の理論, 日本機械学会誌, 63, 499 (1960) 1185.