研 究

プレス成形したビトリファイド砥石における 密度むらとこれによる諸性質の局所の変動お よび残留応力の発生について*

山 本 明**

Locally Uneven Density and Qualities and Residual Stress in Press
Formed Vitrified Grinding Wheels

Akira YAMAMOTO

The vitrified grinding wheels used in precision grinding works are usually burned after forming by press. At forming, unequal material flow in different location causing from the friction between die wall and material particles or particles themselves results in locally uneven density to the wheel. This paper presents data necessary to discuss the effect of uneven density on wheel qualities, especially strength. At first, an example possible to estimate the density distribution in the wheel through experimental results of the layer method and the grade distribution is shown. As uneven density means local unevenness of acting stress when forming, basic experiments are carried out to derive the relations between forming pressure and mechanical strength, structure or grade of the wheel. These results indicate that the acting pressure plays a significant part for the wheel qualities.

On the other hand, locally uneven thermal expansion attended by uneven density brings about residual stress in the wheel at the cooling process of burning. In this paper, by means of heating the wheel affixed wire strain gages residual stress distributions are estimated non-destructively. Consequently, it is proved that there is a good magnitude of residual stress in the wheel and this method is useful to find unevenness of density and existence of residual stress.

1. 密度むらの発生とその影響

精密工作に使用されるビトリファイド砥石は最近では、プレス成形後焼成して製造されるものが多い。プレス圧力としては cm^2 当り 80~150 kg が用いられているようで、圧力が1トンを超える焼結金属の場合に比べるとかなり低い。それでも成形にさいして、約数十%の高さにまで圧縮されるので、型と粉体間および粉体同志の摩擦のために、粉体は一樣に流動せず、いわゆる密度むらを生じる。したがって諸性質も局所的に変動することになる。焼結金属では圧力が高いためこの密度むらはかなりひどく¹⁾、製品品質向上のために型の設計とか加圧法について対策がいろいろ考えられている。圧力の低い研削砥石では密度むらはそれほどひどくないと想像されるが、それでもたとえば、各面で結合度の平均値が異なるほか、一つの面でも等結合度の部分を連ねて等高線を描きえたことなども見聞する。

また密度むらに原因して、焼成の冷却過程における収縮量も各所でわずかながら異なるから、たとえば結合剤が数百℃以下では粘性を失って砥石を弾性体とみなせるとすると、製品には残留応力を発生していることになる。

研削砥石の破壊周速を試験してみると、生産管理の悪い砥石では破壊周速 v が $\pm 5\%$ 程度もばらつく。破壊は円周応力が最大値をとる穴周縁から起こるのであるが、弾性理論によるとこの破壊応力 σ_{tm} は v^2 に比例するので、 v が $\pm 5\%$ ばらつくときには σ_{tm} は約 $\pm 10\%$ もばらついていることになる。現在、回転破壊が最大応力と平均応力のいずれに支配されるのかが問題となっているのであるが、この決定実験に対しても σ_{tm} のばらつきが障害となる。砥石のようなぜい性材料では、その破壊現象は確率的現象として扱わねばならない²⁾ のであるが、ここにおける試料の破壊強さのばらつきには上の密度むらが強く関係していることに見逃せない。

本研究は研削砥石における密度むらの程度、これから起こる機械的性質の局所の変動および残留応力の大きさ程度を知ることを目的とした。これらは当然、砥石材料

*原稿受付 昭和47年5月19日。昭和46年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和46年11月7日)にて発表。

**正会員 大阪大学基礎工学部(豊中市待兼山町)

図 3 圧縮比の変化

図 4 組織の変化

一定とし、これに対する加圧後の高さの比 (圧縮比 R_{h1}) の変化である。この比は実験範囲では図にみるようにほぼ $p^{-0.1}$ に比例するとおくことができ、 $p=1 \text{ t/cm}^2$ では高さが約半分にまで圧縮される。R 砥石のほうが圧縮されやすいのはこのポンドに含まれる黄土 (酸化第二鉄を含む) が潤滑性にとむためである。

これを乾燥したのち、焼成前後の高さの変化 (比 R_{h2}) を調べたのが下図で、 p が大きいほどほとんど収縮しないことがわかる。R 砥石ではこれよりわずかに 1 に近いがほとんど変わりはない。

つぎに、重量測定によって組織を調べた結果が図 4 である。同じ砥石材料が p の変化によって高さが変わるのであるから、かさ比重 s 、砥粒率 V_g がほぼ $p^{0.1}$ に比例するのは当然であろう。気孔率も付記のように

$$V_p = 1 - 0.37 p^{0.1} \quad (1)$$

と近似できた。いずれも p の小さいところで指数関係から外れて横ばいとなるのは粉体の自重による充填の影響と考えられる。

図 5 粒径の変化

ここで、加圧によって砥粒がこわれていないかという心配があったので、生砥石から砥粒を洗い出し粒度分布を調べてみた。各ふるい上の残量 (重量積算 $R\%$) の分布は試験片ごとにばらつきが大きかったので、粒子径 D に対して R を正規確率紙上にとり、分布の中央値を推定した。この結果が図 5 で、図には原料粉と p の高い場合および低い場合を例示してある。原料粉の分布密度は対称に近くほぼ正規分布していて、 D は約 150μ から約 250μ の間にある。しかし p の増加に伴って破碎が増し、分布密度は細粒側に流れ、生じた細粉の中には粗粒径の $1/2$ 以下になるものもでてくる。この様子は摩擦の大きい L 砥石で著しい。いま R が 50% である粒径 D_{50} を目安にとって細粒化の状態を示したのが下図で、L 砥石のばあい $p=1000 \text{ kg/cm}^2$ では原料粉の $1/1.15$ となる。ここで、強さは粒径の $-1/2$ 乗に比例するという法則²⁾を適用してみると、上の場合 $p=50 \text{ kg/cm}^2$ の場合に対し強さ増加は約 7% ということになる。

図 6 は曲げ強さ σ_b (試験片寸法 $80 \times 23 \times 9 \text{ t}$, 中央集中荷重, 支点距離 50 mm), 引張強さ σ_t ($77 \times 48 \times 9.7 \text{ t}$, 長さ方向の中央部を幅 42.5 mm にわたりの厚 14.9 mm に対称に切欠く), 圧縮強さ σ_c ($35 \times 23 \times 8 \text{ t}$, 厚さ方向に圧縮) の測定結果である。 σ_b と σ_t では R 砥石の場合について、同条件測定値のばらつき程度を例示しておいたが、ばらつきはかなり大きく、とくに σ_t で著し

図 6 機械的性質の変化

い、加圧に伴う充填状態がいつも同じように起こらないこと、強さは組織敏感度でかつ確率的であることも一原因である。上図は動弾性係数 E_{dyn} の変化であって、超音波強制振動法⁷⁾によって測定したものである。 E_{dyn} と σ_b の間に強い相関が認められる^{7),8)}。

いずれの強さも p の増加に伴い、その指数関係に従ってかなり上昇し、上昇率の高い R 砥石では $p=1000$ kg/cm² では 100 kg/cm² のときの 2 倍以上になる。また L 砥石は p が小さい範囲では R の約 1.5 倍の強さをもっているが、 p の上昇に伴って R 砥石に近づいていくことが見られる。

一般に固体材料の破壊強さは微視的構造が直接巨視的測定値に反映するような組織敏感性をもつ。研削砥石は砥粒・結合剤・気孔よりなる不均一系混合物であるので、当然、砥粒や気孔の形状・寸法・分布の影響が著しい。

多孔性金属やセラミックスなどの破壊強度の実験値はこれを二成分系材料と考え、空孔の体積分率を V_p 、マトリックスの強度を σ_m として次式でうまく整理できる場合が多い³⁾。

$$\sigma = \sigma_m (1 - V_p)^n, \quad n = 3 \sim 6 \quad (2)$$

$$\sigma = \sigma_m \exp(-\beta V_p), \quad \beta = 4 \sim 9 \quad (3)$$

図 6 に示した p^m に比例する形の実験式と式(1)を組合わせることによって式(2)を導きうるから、式(2)は砥石においても成立する。このとき $n=10m$ であって、 n はたとえば L 砥石では $\sigma_t, \sigma_b, \sigma_c$ の順に 1.4, 3, 5.6 と大きくなり、この順にマトリックスの体積分率が強く影響することを示している。

p が大きくなるに伴い、L 砥石の強さが R 砥石の強さに近づくことについては、充填率が非常に大きくなるに伴って微細構造の影響が強くなるための効果と考えるのが適当であろう。この影響はとくに σ_t で強く現われている。

つぎに、ピット食込み深さ (O/B 値, 8 個の平均) は図 7 のように変化した。図の右端に示したアルファベット結合度を参照して、 p によって結合度が大きく変化することがわかる。たとえば L 砥石では、 $p=180$ kg/cm² 付近では L, 140 kg/cm² 付近では K といった具合である。これが p で結合度を調整できるゆえんである。また図 2 のような O/B 値の分布から加圧時の応力分布をこの関係を利用して便宜的に考察できる。たとえば図 2 と図 7 を対応させてみると、O/B 値 39 の部分は $p=230$ kg/cm², 47 の部分は 170 kg/cm² というわけで、この二つの値はその比例中項である圧力に対して $\pm 16\%$ の変動に当る。ところが、この二つの図の砥石材料は配合が異なっており、また図 2 のプレス圧力は 100 kg/cm² であったから、図 7 の特性曲線は砥石材料で変化することを知る。

4. 残留応力発生についての基礎的考察

焼成砥石は製造中、生砥石の乾燥、焼成に伴う化学的变化、熱膨張に基づく冷却中の局所的な収縮量の差に原因して、乾燥後の生砥石、焼成後の製品に変形とか割れ

図 7 O/B 値の変化

を発生することがある。実際にみられる割れ発生個所のパターンは収縮量のひどかった場所に依じて外周側・中央・穴側の3種類にほぼ分類できる。

ここで考えるのは、破壊強さの立場から、製品に生じる残留応力であって、炉の冷却曲線が示すようなきわめて遅い冷却速度では砥石各部分で冷却速度に差はないものとする、局所的な線膨張係数 α の差に応じて残留応力が発生することになる。この残留応力は (1)砥粒とこれを包む結合剤を一組とした微視的残留応力 (2)密度むらに原因する局所的残留応力 (3)補強砥石のように外周と内周で密度ないしは砥石材料を変えたときに起こる砥石全体に分布する残留応力に分類でき、実際ではこの三つが重なって分布する。

4.1 砥石の線膨張係数 α

まず、等粒球状の砥粒が結合橋(長さ b)を介して隣接している簡単な砥石モデルについて、 α を求めてみる。砥粒率 V_g が最疎充填率(正方充填, 52.36%)または最密充填率(菱面体充填, 74.05%)以下のときは、粒子(直径 d)と同心にある直径 $a (=d+b)$ の球が最疎または最密充填状態にあると考えることによって

$$\frac{d}{a} = \sqrt[3]{\frac{6V_g}{\pi}}, \quad \frac{d}{a} = \sqrt[3]{\frac{4.25V_g}{\pi}} \quad (4)$$

を導くことができる。砥石の線膨張係数 α に関して距離 a を一つの単位とみなすことができるから、結合剤と砥粒の線膨張係数を α_b と α_g 、その比を $K=\alpha_b/\alpha_g$ とすると

$$\alpha = \alpha_g \left\{ \frac{d}{a} (1-K) + K \right\} \quad (5)$$

さて、文献によると⁴⁾ A系砥粒の α_g には $(5 \sim 10.2) \times 10^{-6}$ の範囲でいろいろな数値がみられる。データには純度・集晶・単結晶と測定方位・測定温度の影響が含まれる。また α は温度に対してほぼ直線的に増加し、この温度係数を計算して $0.005 \times 10^{-6}/\text{deg}$ 程度の値がえられた。いま、 $\alpha_g = 7 \times 10^{-6}$ 、 $K=6/7$ 、 $V_g=0.55$ を仮定すると、 $\alpha=0.986$ 、 $\alpha_g \approx 6.9 \times 10^{-6}$ となり、 α は α_g に非常に近い。

前項と同じ砥石材料で $10 \times 10 \times 100 \text{ mm}^3$ の棒状試験片を作り、 α を測定した結果は図8のようである。これ

$$R: 5.3 \times 10^{-6} p^{0.024} \quad L: 5.55 \times 10^{-6} p^{0.02}$$

$$\alpha \text{ の温度こう配 (100}^\circ\text{C)} 0.042 \times 10^{-6}/\text{deg}$$

図8 α の変化

は透明石英管と電気マイクロメータを使った装置で測られた。測定精度を上げるために、また α が温度こう配をもつための測定値のばらつきに

図9 補強砥石の寸法

悩まされた結果、沸騰水で加熱したので、これらは常温 $\sim 100^\circ\text{C}$ での値である推定される温度こう配は付記のようになり大きい。結合剤だけを焼成してこれから求めた α_b も付記のようで、 α_b とこれに非常に近い α_g との間で、 p の増加に伴って α がわずかに増加することがみられる。 α をもし理論式のように V_g の関数とみると、その影響は理論式の場合よりやや大きく、これは実際とモデルとの相違によるのであろう。

4.2 残留応力の大きさについての理論的推定

製品に生じる残留応力の大きさ程度を知るために、4.でのべた3種類のうち、扱いやすくかつ大きいと思われる(3)の場合について計算してみる。

図9のようなそれぞれ均一な二つの砥石部分よりなる平形砥石を考える。この種の砥石は補強砥石として実用されており、回転破壊のはじまる内周部に細粒・高結合度の砥石を使用する。

この砥石の残留応力は厚肉組合せ円筒の焼ばめの式⁵⁾を応用して求めることができる。焼成冷却過程において、常温より $T^\circ\text{C}$ 高い温度以下では砥石を弾性体とみなすことができるとすると、焼ばめにおける半径しめし δ に相当するものは図に示す付号を用いて

$$\delta = (\alpha_2 - \alpha_1) T b \quad (6)$$

であり、逆に $\alpha_1 > \alpha_2$ ならば δ に相当するすきまを作ることになる。 δ によって生じる相互圧力 p_m を求め、それぞれの砥石部分において、内外圧をうける厚肉円筒の式⁵⁾を応用することによって、円周応力 σ_t 、半径応力 σ_r が求まる。

いま、砥石寸法を $a=50$ 、 $b=100$ 、 $c=150 \text{ (mm)}$ 、各砥石部分の物性値を表1のように仮定し、また $T=500^\circ\text{C}$ とすると、図10のような残留応力分布がえられる。表の物性値では $\alpha_1 > \alpha_2$ であるため、内周側砥石のほうが大きく収縮するので、 δ は負(すきまの発生)、相互圧力 p_m は引張応力となり、図にみるように内周側砥石

表1 仮定した砥石材料とその物性値 ($\nu_1 = \nu_2 = 0.2$)

砥石部分	砥石材料	$E \text{ kg/cm}^2$	$\alpha_1 - \alpha_2$
1	WA 120 N9 ($V_g=44\%$ $V_p=38\%$ $V_b=18\%$)	5.2×10^5	0.07×10^{-6}
2	WA 80 K8 (46% 42.5% 11.5%)	3.9×10^5

図 10 計算例における応力分布

では σ_t も σ_r も引張応力となる。回転破壊強さを増し、また内外砥石の接着強度を増すためには σ_t と σ_r は圧縮応力であることが望ましいことはいまでもない。 $\alpha_2 > \alpha_1$ か、これができなければ、 $\Delta\alpha$ の小さいことが要求される。このためには二つの砥石部分の結合度を近づけ、強さの上昇は細粒化によってのみえるようにするほうがよいと思われる。

この計算では $\Delta\alpha$ を α の約 1% と仮定したが、それでも最大応力は引張強さの約 10%、回転破壊強さ σ_{tm} の数%に当る。応力値は δ 、したがって $\Delta\alpha$ 、 T と E に比例して大きくなるので注意しなければならない。

表 1 の材料でバイメタルのような角形砥石（各砥石の厚さ 5 mm）を作ったときの残留応力を計算⁶⁾してみたところ、上の平形砥石と同じぐらいの大きさの最大応力がえられた。

4.3 残留応力の測定例

残留応力のある砥石に抵抗線ひずみゲージを貼って温度上昇させると、熱応力が発生し、膨張量の上にこのひずみ量の加わったものが測定される。理論的には温度の上昇時（再加熱時）と下降時（製品の焼成冷却過程）ではひずみ量の変化は可逆的であるから、ひずみ量の温度に対する変化は図 11 のように並行し、常温では残留ひずみ量だけずれる。そこで、温度上昇させて、砥石結合剤が粘性流動し始める温度（常温 + $T^\circ\text{C}$ ）におけるひずみ量を測定することができれば、これから非破壊で* 残留応力が求まることになる。もし、物性値が温度で変化しないならば、図のようにひずみ量は温度に対して直線的に変化するが、実際はそうでない上、これらの値と T （あるいはみかけの T ）が不明なので、残留応力は求まらず、その傾向したがって密度むらの様子を推定しうる

*砥石の一部をダイヤモンドカッタなどで切離したときの变形状態を調べても残留応力の様子を知らうるが、応力の分布状態によってはかなり制約をうける。

図 11 残留応力の測定原理

に止まる。

つぎに、測定結果についての考察は次報にゆずることにして、ここでは測定法と、砥石には大きな残留応力が存在するという測定例を紹介しよう。現在、この実験を行ないうるまでに適当な高温ゲージと接着剤は十分に発達しておらず、た

とえば 300°C まで使用できる加熱硬化型シリコン系接着剤は接着に際し最終的には 300°C で 2 時間キュアする必要がある。試用結果によると、結果に対し高温キュアに問題があるとも思われるので、ここではこの結果の報告を省略し、 170°C まで使用できる常温硬化型ポリエステル系接着剤を使用した場合の測定例についてのべる。 170°C 以下の測定では安価なポリエステルベースのゲージが使用できる。

ここで、ゲージの熱出力には $\pm 1.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ （カタログ値）のばらつきがあり、このばらつきが測定値と同じオーダーの大きさであることに注意がいる。しかし、同じロットのゲージについて試験したところ、熱出力のばらつきは上の値の $1/20$ 以下であったので、この測定法が可能となった。それでも、測定結果の考察にはこのばらつきの考慮が必要である。

図 12 の (a)、(b) は付記寸法・仕様（括弧内は補強径）の平形補強砥石、(c) は普通の平形砥石についての測定例で、ここではとくに大きな残留応力と密度むらをもっと推定されるものを取り上げた。熱膨張量を消去するために、ダミーとしてそれぞれの砥石材料の破片を使用した。被試験材料と完全に材料が一致しないので、ゼロひずみ量は温度軸と一致しないことになった。(c) はこの不一致がひどい場合である。また、使用した二つのダミー材料間の膨張量差は (a) に点線で示してあるが、 $\Delta\alpha$ に直して約 0.6×10^{-6} （ α の約 10%）ある。

使用したゲージはゲージ長 10 mm、グリッド幅 2 mm（鋼用）のもので、付図に示す位置に円周方向ひずみを検出するように貼られた。内外周のものは円筒面に沿って、補強径付近のものはこの径から中心距離で 7 mm 離れて貼ってある。測定は 50, 100, 150°C で行ない、砥石は 50° を約 20 分の割合で温度上昇させ、測定温度に 10 分保持したのちに測定された。なお、 250°C 以下では測定値に可逆性と再現性のあることが確認された。

さきの図 11 を参照して右上りの曲線は圧縮、右下り

図 12 膨張差の測定例

の曲線は引張りの残留応力をもっと判断できるが、ゼロひずみ曲線の位置が不明なので中間の曲線では応力符号を確認できない。

また、図からつぎのようなことがわかる。(1)熱膨張量((a)の左上点線)の数分の1に相当する熱ひずみ量の発生もみられる。このまま $T^{\circ}\text{C}$ まで推移すると、引張強さを超えるような残留応力値がえられる場合も出現する。(2)補強砥石の場合、密度むらもあるので、均質弾性体を仮定した図 10 のような応力分布となるとは限らず、(a), (b) の場合は補強径に近いところで最大引張応力をもつ。(3)(b), (c) を参照して、密度むらによる残留応力と異種材料組合せから生じるそれとは同じオーダーの大きさである。この例に見るように、この加熱試験は密度むらの発見にも使える。また(c)に示した砥石は静バランスにおける不平衡量もやや大きいもの(8g)であった。(4)(c)の砥石はダミー砥石と材料の一致程度が悪かったために、全部が引張応力であるような結果となっているが、実際は外周と内周で引張、中央部分では圧縮応力であると推定できる。この砥石は悪い例であって、どの位置での測定値もほぼ一致し、残留応力を持たないものもあった。

5. ま と め

プレス成型ビトリファイド砥石は成形時摩擦のため生
1972年10月

粉が一様に流動せず、このために密度むらを生じている。本研究はこの密度むらの回転破壊強さと製品品質に及ぼす影響を考察する資料を提供する目的で行なわれた。たとえば穴周縁部で強さに約 10% の変動があると破壊周速は 5% 変化することになる。研究項目とえられた主な結論はつぎのようである。

- (1) 層線変化と結合度分布からみた密度むらは大きく、内周部のチャージ量を多くした大型センタレス砥石では、アルファベット結合度の変化は 3 段階にもわたった。
- (2) 密度むらは成型加圧時、作用応力が場所で異なることを意味するので、基礎的に成形圧力と機械的性質・組織・結合度との関係を調べた。圧力によってこれらは大きく変化し、強さは圧力を 100 kg/cm^2 から 1000 kg/cm^2 とすると約 2 倍になる。この結論から製品では作用力が場所によって数十%も異なっていることが想像された。
- (3) 密度むらがある砥石とか異種材料の組合せ砥石では、焼成後の冷却過程において残留応力を発生する。これは熱膨張係数 α が異なるためであって、計算によると組合せ砥石では α が 1% 異なると引張強さの約 10% にあたる残留応力が発生する。砥石に抵抗線ひずみゲージを貼り加熱することによって、残留応力と密度むらの様子を推定できる。実測結果によると、密度むらは大き

く，また意外と大きな残留応力をもっている場合も想像された。

終りに，実験にご協力をえ，とくに図 1 とその測定値の提供をうけた瑞穂研磨砥石(株)松森昇部長，また図 6 の E_{dyn} の測定をお願いした 関西大学矢野章成教授に深甚の謝意を表する．またこの研究が科学研究費による研究の一部であることを付記する．

参 考 文 献

- 1) 津和秀夫，明田勇蔵：粉末金属部品の成形に関する研究，第 1 報，精密機械，**29**，12 (1963) 945.
- 2) 山本 明，堀 素夫，上田忠男：研削といしの回転破壊強さ，機械学会論文集，**36**，284 (1970-4) 655.
- 3) たとえば，井伊谷編：粉体工学ハンドブック，p 152，朝倉書店 (1966).
- 4) たとえば I.E. Campbell: High Temperature Technology, Electrochemical Soc., (1956) 50. O.J. Whittemore Jr.: J. Ame. Ceramic. Soc., **39**，12 (1956) 443. J.B. Austin: J. Ame. Ceramic. Soc., **14**，(1931) 795.
- 5) 機械学会：機械工学便覧，改訂第 5 版 (1968) 4-88，86.
- 6) Mok-Kong Shen: Temperature Deformation of Bi-metal Beams, ZAMM **46**，5 (1966) 325.
- 7) 田中行雄，矢野章成，樋口誠宏：微粒砥石の弾性率について，精密機械，**37**，10 (1971) 754.
- 8) 海野邦昭，篠崎 襄：研削砥石の動弾性係数と機械的強さ，精密機械，**38**，4 (1972) 349.