

クリープフィード研削時に生じる残留応力の解析 (第 4 報) ——研削時発生熱量分布の統計的算出——

Analysis of Residual Stress During Creep Feed Grinding (4th Report)
——Stochastic Analysis of Heating Distribution During Grinding——

谷 泰 弘*・仙 波 卓 弥*・佐 藤 壽 芳*
Yasuhiro TANI, Takuya SEMBA and Hisayoshi SATO

1. 結 言

機械加工により工作物の表層に生じる加工変質層は、工作物の表面精度のみでなく、その製品の機械的性質にも多大な影響を与えるため、大きな問題となっている。ところでクリープフィード研削は高能率研削の一つとして近年特に注目を集めている。この研削方法は、高切込みのために発生熱量が大きく、しかも工作物と砥石との接触長さが大きいので研削液の研削点への供給が困難で、また低速送りのために工作物へ局所的な熱伝導が生じるので、研削焼けや研削割れが生じやすく、最適の研削条件の選択が難しくなっている。

そこで本研究では、このクリープフィード研削における熱発生および工作物への熱流入の様子を解析的にシミュレートし、この研削により工作物に生じる二次的な熱残留応力を予測しようとするものである。このため、本報告ではこの解析において荷重条件として必要となる、研削時における発生熱量分布を統計的手法により算出する。

2. 発生熱量分布の統計的算出

砥石と工作物の接触部における任意の砥粒切れ刃点における単位時間当たりの発生熱量 Q は、

$$Q = \frac{F \cdot V}{J} \dots\dots\dots (2.1)$$

とかける。上式にて F : 任意の砥粒切れ刃点 $P(X, Y)$ における接線方向研削力、 V : 点 P における接線方向研削速度、 J : 熱の仕事当量 ($J = 0.427 \text{ kgm/cal}$) である。

ところでクリープフィード研削の場合には、一般に砥石周速度 \gg 工作物送り速度であるから、その研削状態を図 1 のようにモデル化すれば、点 P での接線方向研削速度 $V(X, Y)$ は、

$$V(X, Y) = \omega \sqrt{X^2 + Y^2} \dots\dots\dots (2.2)$$

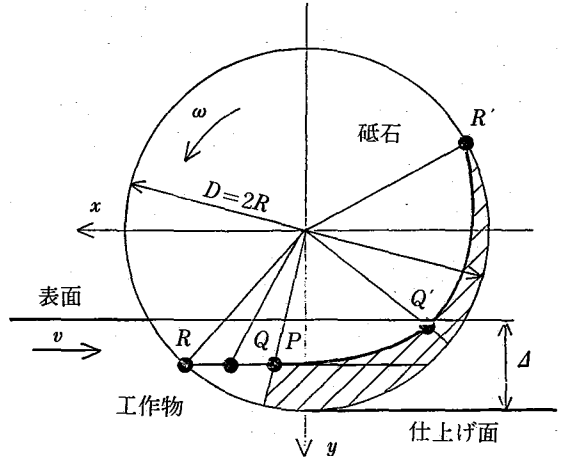


図 1 クリープフィード研削のモデル化

と定義される。ここで ω : 砥石の回転角速度 ($= 2\pi N$, N : 砥石回転数) である。

次に研削力について考える。砥粒切れ刃は砥石作業面の表層にて三次元的に一樣分布¹⁾をしているものとし、砥石内における砥粒一個の平均占有体積を W_0 とする。竹中²⁾によれば、

$$W_0 = \frac{\pi}{6v_g} \left(\frac{45}{G^{1.28}} \right)^3 \dots\dots\dots (2.3)$$

の関係がある。ここで G : 砥石粒度番号、 v_g : 砥材率 (砥石全体の体積を 1 としたときの砥材の体積) である。

砥石中心に原点を設けた図 1 のような直角座標系において、砥石の任意の X 断面での発生熱量 $Q(X)$ は、式 (2.1) より、

$$Q(X) = \frac{1}{J} \int_{R-\Delta}^{\sqrt{R^2-X^2}} F(X, Y) V(X, Y) dY \quad (2.4)$$

である。上式で $R = D/2$, D : 砥石直径, Δ : 砥石切込み深さ, $F(X, Y)$: 点 $P(X, Y)$ の位置に存在する砥粒切れ刃に作用する研削力である。この点 P における研削力は、

* 東京大学生産技術研究所 第 2 部

研 究 速 報

$$F(X, Y) = P_0(X, Y) \cdot \eta(X, Y) \times \int_0^{A-R+Y} P_0(X, Y) f(g) dg \quad (2.5)$$

となる。上式にて、 $P_0(X, Y)$: 点 $P(X, Y)$ に砥粒が存在する確率 ($=1/W_0$)、 $\eta(X, Y)$: 点 P に砥粒切れ刃が存在したとして、その切れ刃が有効切れ刃となる確率、 $P_0(X, Y)$: 点 P に砥粒切れ刃が存在し、しかもその切れ刃が有効切れ刃であったとしたときに、その切れ刃が g の切込み深さを有する確率、 $f(g)$: 単粒切れ刃の研削抵抗式で、切込み深さの関数として表されているものである。

2.1 有効切れ刃率

有効切れ刃率とは、任意の点に存在する砥粒切れ刃が実際に研削に関与する確率で、松井³⁾によれば、次式のように体積 $V_v(X, Y)$ に砥粒切れ刃が一つも存在しない確率により与えられる。

$$\eta(X, Y) = \exp\left(-\frac{V_v(X, Y)}{W_0}\right) \quad (2.6)$$

ここで体積 $V_v(X, Y)$ は次のように定義される。

今図1のような下向きの研削状態を考える。点 P が有効切れ刃であるかどうかを判定するためには、現時点で一致している工作物上の点 P の動きを考える。この工作物上の点 P に時刻 t (現在 $t=0$) で砥石上のどの点が重なっている (たとえば砥石上の Q や R の点) かを考え、その点の $t=0$ での位置 (Q' または R') を求め、それを連ねた線 $PQ'R'$ が砥石内で工作物上の同一点を切削する連続切れ刃が存在する線となる。砥石内でこの線を稜線としこの線より外側に作られる三角錐の体積 (図1にてハッチングを施した部分) が求める体積 V_v となる。

そこで次に時刻 t での点 P の位置 $(X-ut, Y)$ がどの時点で砥石に接したか (図1の点 R) が問題となる。この時刻 t' は、

$$(X-ut')^2 + Y^2 = R^2$$

より、

$$t' = \frac{X - \sqrt{R^2 - Y^2}}{v}$$

と求められる。ここで v : 工作物の送り速度である。よって、

$$V_v(X, Y) = \int_{t'}^0 \{R - \sqrt{(X-ut)^2 + Y^2}\}^2 \times \tan\gamma \cdot R \left(\omega \pm \frac{v}{R}\right) dt \quad (2.7)$$

と定義される。上式での複号は、+ : 下向き研削、- : 上向き研削である。また r : 砥粒平均半頂角である。

2.2 切込み深さの確率密度関数

点 $P(X, Y)$ において切込み深さが g となる確率は、次のように与えられる³⁾。

$$P_0(X, Y) = -\frac{\partial f_0}{\partial g} \quad (2.8)$$

ここで $f_0 = \exp(-V_v(X, Y-g)/W_0)$ である。式(2.6)で示されるように f_0 は点 $(X, Y-g)$ における有効切れ刃率であるが、幾何学的な意味から点 $P(X, Y)$ に対しては、切込み深さが g 以上となる確率を示している。

2.3 発生熱量分布の導出

式(2.6)、式(2.8)を式(2.5)に代入すれば、

$$F(X, Y) = \frac{B}{W_0} \exp\left(-\frac{V_v(X, Y)}{W_0}\right) \times \int_0^{A-R+Y} \left\{ -\frac{\partial}{\partial g} \exp\left(-\frac{V_v(X, Y-g)}{W_0}\right) \right\} f(g) dg \quad (2.9)$$

となる。ここで B : 砥石幅で、この値をかけることにより奥行き方向の積分を行ったことになる。式(2.9)にて $f(0)=0$ を考慮して、部分積分を行えば、

$$F(X, Y) = -\frac{B}{W_0} \exp\left(-\frac{V_v(X, Y)}{W_0}\right) \times \left\{ \exp\left(-\frac{V_v(X, R-\Delta)}{W_0}\right) f(\Delta-R+Y) - \int_0^{A-R+Y} \exp\left(-\frac{V_v(X, R-g)}{W_0}\right) \frac{\partial f(g)}{\partial g} dg \right\} \quad (2.10)$$

となる。したがって式(2.2)、式(2.10)を式(2.4)に代入して、

$$Q(X) = \frac{B\omega}{W_0 J} \int_{R-\Delta}^{\sqrt{R^2-X^2}} \sqrt{X^2+Y^2} \times \exp\left(-\frac{V_v(X, Y)}{W_0}\right) \times \left\{ -\exp\left(-\frac{V_v(X, Y)}{W_0}\right) f(\Delta-R+Y) + \int_0^{A-R+Y} \exp\left(-\frac{V_v(X, Y-g)}{W_0}\right) \frac{\partial f(g)}{\partial g} dg \right\} dY \quad (2.11)$$

3. 計 算 結 果

いま砥石直径 $D=172$ mm, 砥石粒度番号 $G=80$, 砥材率 $vg=0.45$ ($W_0=0.00521865$ mm/grain), 砥石回転数 $N=3000$ rpm, 工作物送り速度 $v=10$ mm/min, 砥石切込み深さ $\Delta=1$ mm, 砥粒平均半頂角 $r=70^\circ$ として計算を行えば、図2に示されるような発生熱量分布を得る。横軸は砥石最大切込み点からの距離で図1に示される X 座標に当たる。縦軸は単位時間単位接触面積当たりの発生熱量である。これは通常のクリープフィード研削における研削条件にて計算を行ったもので、古川らが湿式ブランジ研削にて測定した工作物の接触域内の温度分布⁴⁾と似た傾向を示している。ただこの結果によれば、温度分布が上向き研削と下向き研削で比較的大きな差異を生

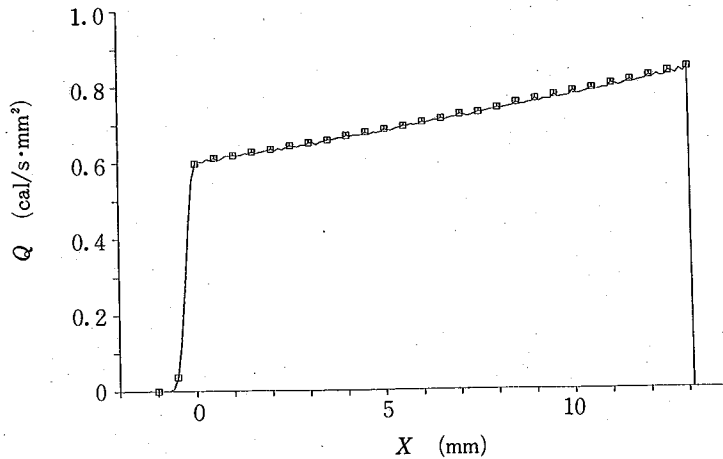


図2 クリープフィード研削における発生熱量分布

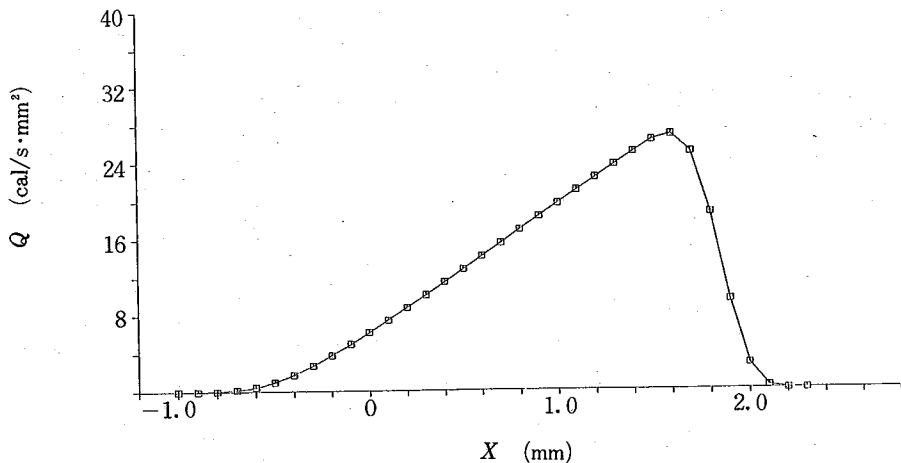


図3 通常研削における発生熱量分布

じているのに対して、本計算においては上向き、下向きにてほとんど差のない発生熱量分布となっている。これは砥石の回転方向にそった切りくずや空気などの流れのために熱量の移動があり、発生熱量では差が生じていないにもかかわらず、温度分布でははっきりした違いとなっているためと考えられる。

通常の研削条件（砥石回転数 $N=3000$ rpm, 工作物送り速度 $v=10$ m/min, 砥石切込み深さ $d=30$ μ m）にて計算を行えば、図3のような発生熱量分布となる。これを高沢⁵⁾や松井ら⁹⁾の熱電対による砥石研削点温度の測定結果と比較的最近の実験結果⁷⁻⁹⁾などと比較すれば定性的によく一致していることが判る。

解析により研削時に生じる残留応力を算出することを目的としており、赤外線放射温度計を用いて研削時の工作物の温度を測定している。このため乾式にて小切込み、

低速送り研削を行い、解析と対応させるためのデータを収集している（後報）。そこでここではその実験条件にて計算を行ってみた。図4はその結果である。切込み深さが増大すると接触長さが増加するが、その傾向は全く同一である。図5には砥石切込み深さに対する全発生熱量、単位時間単位接触面積あたりの発生熱量の変化の様子を示している。この図にてもわかるように全発生熱量は大きく変化しているものの、単位接触面積当たりの熱量はほとんど変化していない。砥石あるいは工作物へはこうして発生した熱量が、それらの熱物性値や速度比等により決定される流入割合¹⁰⁾により分配されるものと考えられる。

4. 結 言

本報告では、クリープフィード研削時に生じる熱残留

研 究 速 報

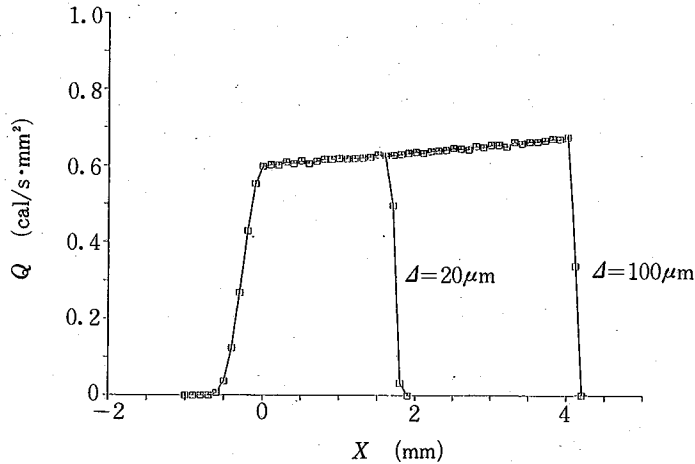


図 4 砥石切込み深さと発生熱量分布との関係

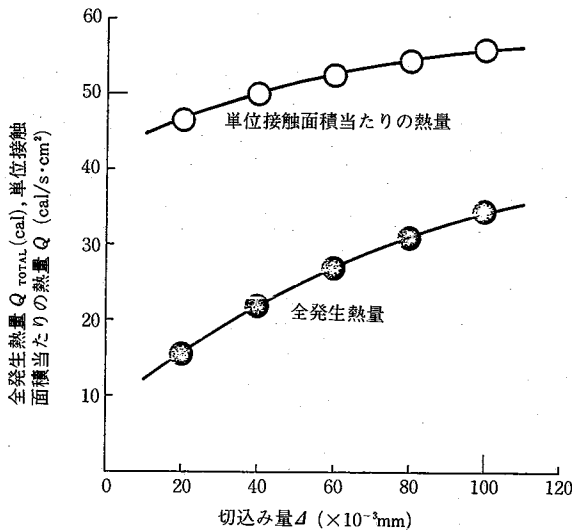


図 5 砥石切込み深さによる発生熱量の変化

応力を解析する際に荷重条件として必要となる工作物と砥石との接触領域における発生熱量分布を、単一砥粒点における研削仕事による熱発生をもとに統計的に集積することにより導出した。この結果から研削方向により発生熱量分布としては変化のないものが得られると考えられること、工作物が低速で送られる状態では砥石切込み深さにより単位時間単位接触面積当たりの発生熱量は大きく変化しないこと、またその発生熱量分布の傾向がほ

ぼ同一であることが明らかとなった。

(1983年11月21日受理)

参 考 文 献

- 1) たとえば, 中山一雄: 研削砥石の切れ刃分布, 昭和 42 年度精密機学会秋季大会学術講演会前刷, (昭 42-10), 107
- 2) 佐藤健児・松井正己・堀内昭世: 研削砥石の切れ刃分布に関する一考察, 日本機械学会第 31 期全国大会学術講演論文集, (昭 43-10)105, 他
- 3) 竹中規雄・笹谷重康: 研削作用に関する研究(第 2 報), 日本機械学会論文集, 26, 163(昭 35-3)403
- 4) 松井正己: 正面研削に関する研究, 精密機械, 40, 11(昭 49)1007
- 5) 古川勇二・塩崎進・大石進・須賀治: クリープフィードプロフィール研削の熱解析, 昭和 55 年度精機学会春季大会学術講演会論文集, (昭 55-3)176
- 6) 高沢孝哉: 研削面表層温度分布の理論とその測定法, 精密機械, 30, 11(昭 39)851
- 7) 松井正己・本多良長・瀬戸口良三: 研削焼けに関する研究, 精密機械, 31, 12, (昭 40)966
- 8) 鍵和田忠男・斎藤勝政: 平面研削における被削材温度の測定, 日本機械学会論文集, 42, 358, (昭 51-6)1925
- 9) 河村未久・岩尾卓博・西口重雄: 研削焼けの基礎的研究(第 2 報), 精密機械, 45, 1(昭 54)83
- 10) 奥山繁樹・河村未久: 研削における干渉領域内の温度分布と局部的熱変形, 精密機械, 54, 5(昭 54)536
- 11) たとえば, 長谷川喜雄・奥山繁樹: 研削熱の流入割合の理論, 精密機械, 47, 7(昭 56)867, など