研 究

研削機構の研究(第1報)

仕上面粗さ (I)

正 会 員 越 智 隆 冬*

Study on the Grinding Action

Takafuyu OCHI

The Cutting mechanism of grits on the grinding wheel is very complicated. There are many factors which have direct influences upon grinding action as it is well known.

In order to make the problems easy to solve, the following hypothesis may be introduced: All the factors except the relation between characteristics of wheels and work materials are independent to each other.

In this report I derive the general solution for the roughness of ground surface theoretically and prove it on the grinding conditions experimentally.

1. 緒 言

研削加工は重要な精密工作法であり、広く研究されているが、観点を異にして考察するのも有意義であると考え一連の解析と実験を試みることにした。

砥粒による切削機構に関係する因子は研削条件、砥石の性格、形状寸法等の幾何学条件、加工物の材質或は冷却剤、装置の特性等非常に多く、考察の対象も面の粗さ、抵抗、熱現象や砥石の機構等沢山ある。しかしこれらの因子を全部同時に考察することは不可能であるから次の仮定を設ける。即ち、上の諸因子は砥石と加工物の関連を除くと、どの因子も互に独立な変数として個々の問題の解析ができるとする。勿論経験上無理のない仮設でこれを用いて順次解析を行う。本報では第一に仕上面創生の一般的解析を行い、その実験的証明のうちの研削条件について述べることにする。

2. 研削仕上面粗さの一般解

研削による仕上面創生は次の仮定に従うものとする。

イ. 加工物からの切屑の削除は塑性的に行われる。ロ. 砥粒は砥石面上に均一に分布し、先端は同一円周上に揃う。ハ. 面の粗さは研削方向に直角方向の粗さのみで研

削方向の粗さは無視し得る。ニ. 加工は正常で砥石の摩耗や研削条件の変化から生ずる二義の影響はない。以上の仮定を利用して仕上面の創生について考察する。

図1にて、加工物の半径方向の任意断面A Bについて考察してみる。先づ砥粒Xで研削されたA点は次第に進

図1 仕上面創生機構

みA'に至る。この時、砥粒Yが2回目の研削を行い深さT迄切り込み仕上面上に最も深い条痕を残す。その後YZ間の砥粒は面上の山の一部分を削り落しつゝ切り込みを減じ切断面A BがA''B''に至つて砥粒Zの接触(C''点)を最後にこの断面上に粗さHの面が完成する。この機構に関する諸条件や仮設を考え合わせると、仕上面創生には「加工開始から最終の面を完成する期間に考察すべき断

* 愛媛大学工学部

面をよぎつた砥石面上の砥粒（切刃）総数 i が最も重要な因子と結論される。故に仕上面創生は i の吟味に始まらねばならぬ。

現在面粗さの表示は最高粗さ ($H_{\max}$) を採用しており、仕上面上の凹凸分布も全く不規則であり、これでは一般的解析はできないから改めて平均化した粗さ (H) の利用を考える。

若し $H_{\max}$ と H の間に一元的の関係があれば良いわけである。図2にて、実際に加工物に残る粗さ $H_{\max}$ は (a) であるが、これを平均化し (b) のような均一断面の条痕を持つ粗さ H を得るとする。図から「条痕平均幅 b 」は $H \propto b$ である一方 $H_{\max}$ と b の関係を実測して (c) を得るが、略々 $H_{\max} \propto b$ と認めてよい。これより $H_{\max} \propto H^{1/2}$ であり平均化した粗さ H を論ずることは直ちに $H_{\max}$ についての解析であることが証明される。以上の点を基に粗さの一般解析を試みた。

図2 平均条痕巾と粗さ

図 (b) で研削された面の長さ S の間にある条痕数を m とすると

$$H = S/2t\alpha \cdot 1/m = K_1 \cdot 1/m \quad \dots\dots\dots(1)$$

今、何等かの原因で条痕数が Δm だけ変化したために粗さに ΔH の増減があるとすると (1) より

$$\Delta H \approx -K_1 \cdot \Delta m/m^2 = -H \cdot \Delta m/m \quad \dots\dots\dots(2)$$

次に粗さ H , 条痕数 m の仕上面が予期されるべき時に研削条件の変化等の外的原因のために砥粒 Δi 個が更に研削に加わり、予定の m 個の山となるべき部分のうち一部の頂部を削除して更に条痕を創生する。(反対の場合も同様に類推されるから説明は一方についてのみに行う)。 Δi のうちには予期の条痕と一致したり、切り込み量や時期の理由で条痕増加とならない砥粒数 $\Delta m'$ があるため、条痕増加数 Δm は Δi よりも大分少い。併し、研削に関与する砥粒の増減は条痕とならない砥粒数の増減を来たと同程度に条痕数の増減を招くとみてよい。しかも砥粒分布は均一であるから平均的に次の式を認めてよいと思う。明らかに $\Delta i = \Delta m + \Delta m'$ であり且つ

$$\Delta i \propto \Delta m, \quad \Delta i \propto \Delta m' \quad \dots\dots\dots(3)$$

一方、 Δi の増加の際に面上の所期の山数 m が多程砥粒の増加分と出会う頂部即ち削られる山数も多くなる。斯様に削られる山数の増加数 $\Delta m''$ は所期の山数 m が倍加すれば又倍加すると考えられ、 $m \propto \Delta m''$ となる。又一个の頂部が削られると新しい条痕一個を生ずるとみれば、 $\Delta m = \Delta m''$ である。以上を総合すると、

$$\Delta m \propto m \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$(3) \text{と} (4) \text{から} \quad \Delta m \propto m \cdot \Delta i$$

$$\text{或は} \quad \Delta m = km \cdot \Delta i \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$(5) \text{と} (2) \text{から} \quad \Delta H = -kH\Delta i$$

Δ を微分として次式が成立つとする。

$$dH = -kHdi \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\therefore H = Ce^{-ki} \quad \dots\dots\dots(7)$$

粗さの一般解として (7) 式が得られる。

3. 一般解の考察

(7) 式はこの形のまゝでは実用できないから、実際について式を検討する。

1. 積分常数 C 積分の境界条件に負うもので、その主な因子は切り込み量 T であるから、これを取り出して次のように表わす。

$$C = A \cdot T \quad \dots\dots\dots(8)$$

常数 A および (7) 式の常数 k は後節に詳述する。

2. 砥粒総数 i 図1で、ABにて考察すべき断面の加工が始り A'B' に至り粗さ H の面が完成する間にその断面を通過した砥粒切刃総数が i である。

図1にて工程の順を追つて見ると、第1回研削は切り込み T で加工して粗さ H_1 を得る。その間の接触弧は $\widehat{ACB'} + \widehat{B'C''}$ である。同一点の第2回研削は切り込み H_1 で始り粗さ H_2 を得る。同様に n 回繰返し後の粗さを H_n とする。第1回目の研削に関与した単位幅当りの砥粒数を i_1 とすれば

$$i_1 \approx \frac{V}{v} \sqrt{\frac{dD}{d+D}} (\sqrt{T} + \sqrt{H_1}) \varepsilon$$

繰返し n 回目には

$$i_n \approx \frac{V}{v} \sqrt{\frac{dD}{d+D}} \left[\sum_{j=1}^n (\sqrt{H_{j-1}} + \sqrt{H_j}) \right] \varepsilon \quad \dots\dots\dots(9)$$

但し、 $H_0 = T$, ε は砥石面上単位面積当りの砥粒数、 d および D は加工物と砥石車の直径である。

i_n の値を (7) に代入すればよい。これは切り残し量の式²⁾と本質的に一致する。しかし式の形は実際計算や実験の吟味には不適當である。又図1で A'B' にて最も深い条痕ができた後 A''B'' に至る間は砥粒切刃は加工面から退行するので、A'B' を境にその前後の部分の加工に

対し同次の ϵ を与えるのは無理である。そこで次の仮定の下に実用的な近似式を求めてみる。即ち、同一点を繰返し研削することはその回数倍の砥粒分布密度の砥石で唯一回研削するのと等しく、且つ有効な加工は $\overline{ACB'}$ の間に行われるとする。故に砥石幅を B 、送り量を S 、繰返し回数を N とすると同一点の繰返し研削回数は $N \cdot B/S$ であるから、

$$i \approx \frac{V}{v} \sqrt{\frac{dD}{d+D}} \sqrt{T \cdot N \frac{B}{S} \cdot \epsilon} \dots\dots\dots(10)$$

$$(7) \text{ から } \therefore H = A T e^{-k \frac{V}{v} \sqrt{\frac{dD}{d+D}} \sqrt{T \cdot N \frac{B}{S} \cdot \epsilon}} \dots\dots\dots(11)$$

(11) は計算も容易であり、仮定により繰返しの場合の切り込みと接触弧の算出の過大過少が相補い無理も少く、その誤差も容易に実験的に補正できると思われる。

3. 研削回数および送り量 B/S は必ずしも整数でない。 $N=1$ であれば仕上面上に B/S の整数値の回数に当る加工面とそれより 1 回多く研削された部分が交互に現われる。しかし回数が増すと 1 回程度の回数による粗さの差は極く小さい。従つて実際計算では $N \cdot B/S$ の整数部を近似的に用いる。本報で回数の極く小さい時の実験値のばらつく傾向の原因の一つはここにある。

その他 $S=0$ の場合は $N \cdot B/S$ として円筒内外面研削では加工中の加工物の回転数、平面研削ではその間の往復回数の 2 倍とする等、時に応じて決まる。

4. 砥粒分布密度 ϵ (個/mm²) ϵ は砥石本来の問題であり、粒度、結合度、砥材、組織又はドレスの状況の他加工物の性質や冷却剤等について、加工前後の砥石面の密度の変化状況に基礎をおき決定せねばならぬ。即ち主として実験的解析によるものであり詳細は次報にゆづり本報では単に砥石と加工物とで決まる変数として論を進め、計算にはその都度測定値を与えておく。

4. 加工条件に関する実験

従来発表されている実験結果によれば例外もあるが定性的には同系統の傾向を示すものが多い。そこで大分性格の異なる材質を加工して得た特性をこれら従来の試験値と比べた場合に定性的にも一般式が適合すれば、式の普遍性は非常に増す。この意味で本実験の加工物は焼入工具鋼の仕上面に厚さ約 100 μ の鍍金をした硬質クロム面を用い、一般性や材質による差異の比較のため適宜硬鋼その他の実験を加えた。この加工法は磨減したゲージ等の再生によく利用されるが、実験データが余りないので参考のため選んだ。

装置は大島製作所製工具研磨盤で砥石と加工物の回転

速度を広く変えるため各々に変速モーターを使用した。砥石は呉製砥所試作の A 砥石で各粒度毎に結合度数種を選び組織は 5 に一定した。寸法は 7" $\times$ 1/2" $\times$ 1 1/4" である。又比較のため G.C およびラバ等手持ちの砥石数個も併用した。実験では次の基準条件を保ちながら、そのうち任意の一条件を変えるようにした。即ち $T=0.01$ 或は 0.008mm, $S=B/4 \approx 3.2$ mm/rev, $V=26$ m/s, $v=0.275$ m/s とし、面の検査は大越式と 1 μ 以下には小坂式を用いた。

試験毎に砥石はドレスした後 35mm ϕ $\times$ 30mm の棒鋼を研磨して砥石面を一定に整える。その後同形の試験用加工物に取り代えて基準の切り込みを二度与えて加工し、二度目を試験値とした。以下試験結果のうち研削条件に関する値を挙げる。

1. 切り込み深さ T が大きくなると面の荒れる傾向が強くなるが、他の材質に比べて正常研削の範囲が広い。これはクロムの脆さ等の或る加工性と砥石の特性の相互関係の影響によるものである。

試験値は図 3 にその例を示すような特徴を持っている。各条件での結果を総合すれば大体、 $H_{\max} \propto T^{0.47 \sim 0.6}$ の関係に在るとみてよい。

2. 砥石および加工物の周速 仕

図 3 切り込み深さの影響

図 4 砥石と加工物の周速の影響

上面に対するこれらの影響は図 4 に例示する。 V の増加に従つて面の向上も少くなり、遂には却つて粗くなる傾向すら現れる。しかしこれは装置が不適当なためで或る程度迄は理論通り高速研削が有利な様に類推

される。一方極く低速の場合も粗くなる傾向が強い。これらは他の材質とも類似の性質である。 V に関する測定値は揃いが悪い。しかし平均的に略々 $H_{\max} \propto V^{-(0.8 \sim 1.0)}$ が得られるが、 $15 < V < 25$ m/s の変域では $H_{\max} \propto V^{-1}$

とみて差支えない。

v の吟味には送り量が一定と送り速度が一定の場合の試験があるが、 v 本来の性格の解析は前者が適当である。図4はこの場合の例で略々 $H_{\max} \propto v$ とみてよい。定性的には他の材質の加工と同じ傾向にあるが、他に比して v の変化に対してはより敏感である反面正常の範囲が広いように思われる。

理論では v と V の指数の絶対値は等しいが実測値は v の方が大きい。これは v は僅かであるが送り速度の影響を含み或は v と V に対する装置からの影響の差等の理由が考えられるので、これらを総合して $H_{\max} \propto v/V$ と考えてよい。

図5 送りと研削回数の影響

の考察である。結果は正常の範囲で $H_{\max} \propto e^{-B/S}$ の関係が得られ、特に $S/B < 0.6$ では充分実測と合致する。

N についても図から B/S と同様に $H_{\max} \propto e^{-N}$ が得られる。 $N < 15$ 位ではよく一致する。又 $N = 20$ でも面の向上が認められるが、一方では却つて脱落砥粒や切屑の介入等で面の荒れる恐も増し適正を欠く。

両者を合わせると $H_{\max} \propto e^{-N \cdot B/S}$ が得られ、図5の値から図6が考えられる。 $N \cdot B/S$ の小さい時は B/S の小数部に因る測定誤差の影響で測定値のばらつきが目立つ。

図6 同一点研削回数の影響

上式では $N \cdot B/S \rightarrow \infty$ の時 $H_{\max} \rightarrow 0$ となるが、実際の場合では回数が或る程度以上では一定の粗さ H_0 (限界粗さ³⁾ 以上には向上しないのみならず、上述のように却つて面が荒れる場合が多くなり一般に H_0 の決定は困難である。結局実用的には正常研削の範囲としての $N \cdot B/S$ の変域を限定するのが妥当であり、大体 50~60以下が適当であろう。

4. 送り速度 送り速度 f m/s 本来の性格は B/S を一定に保つた試験によるべきであるが、砥石の都合でできないので次の類推に止める。 f の存在のため加工物周速には $\sqrt{v^2 + f^2}$ を用いるべきであるが、現実には $f/v = S/\pi d$ の程度の影響で極端な場合の外は影響は少い。しかし v の実験等からの推察での f の影響はこの比率より大きいようである。これは f のために僅かながら $\sqrt{v^2 + f^2}$ と V の方向が喰い違い或は f や B/S の変化による抵抗や振動の増減に原因するもので、本質的な f の影響ではない。一般に S が特に大きく d が極めて小さい場合に $\sqrt{v^2 + f^2}$ を適用する程度でよい。

5. 実験結果の考察

前項で式(11)に含まれる変数のうち研削条件について実測した。この結果を式について考察する。

1. v, V および T , 式(11)中の v, v, T 以外は総て一定値と考えて吟味を行う。実際の場合においても T および V/v の変域は他に比べて比較的狭いので、その変域内では exp. 曲線は近似的に直線と見做せば式(11)から近似値 $H_{\max}, T \cdot v / (V \cdot \sqrt{T}) = T^0 \cdot v \cdot V^{-1/4}$ を得る。実験値は明らかにこの関係を証明している。実測値の指数の揺がりは近似の或は測定の誤差とみてよい程度である。変域が多少広い場合の測定値の指数曲線的な偏りもこの事情をよく説明している。

2. 同一点研削回数 式中の N, B, S 以外の変数は一定値とすると、式は $H_{\max} \propto e^{-N \cdot B/S}$ となる。 $N \cdot B/S < 50$ 位では実験値と全く一致する。回数の小さい時は B/S の小数部のため資料の検査箇所による実験値のばらつきが多いが、 $N \cdot B/S$ の整数部をとれば平均値として充分役立つ。

3. k の決定 式(5)の成立からみて k の意味は、研削に関与した砥粒総数とそのうち仕上面に条痕を残した砥粒数の関係を示す因子である。この定義からも k は i の増加と共に減少するように思われる。又式(10)を求める仮定からも $N \cdot B/S$ の増加に従い i はより過大に示される筈である。故に k でこれらの補正も行おうとすれば $N \cdot B/S$ の函数となり常数とはなし難い。今数種の実験値から次項に述べる理由で $A = 1$ として式(11)から算出した $k = N \cdot B/S$ の関係を図7に示す。図の計算値のばらつきは加工物の種類や砥石の影響が主な原因で、とも密接な関係がある。しかし考察を単純にするため k は研削回数のみの函数とし、加工物や砥石に対する補正や考察は ϵ と A に含ませることにより、図7を k の決定値と認めることができる。

図 7 k の値

4. A および ϵ 同一砥石で同一条件の加工をしても加工物が違えば $H_{\max}$ や H_0 は異り、或は同一材質でも冷却液の有無等で粗さの差を生じる。若し一般式の中へこれらの差異の修正値を与えるとすれば A と ϵ に依らねばならぬ。先づ各材質に対する砥石の磨耗性や砥粒の破碎性或は乾湿の差等を考え、加工前後の砥粒分布の平均値を取る等して測定値に適合するよう ϵ を補正決定する。それでなお補正できない偏差に対し A の利用を考える。式(11)の右辺はその変域の上限値は T である。従つて A の値は理論的には 1 とすべきである。しかし上記の

理由で実験と理論値の間で k と ϵ で及ばぬ補正に利用するとして主に材質と乾湿の補正を与えれば恐らく $A = 1$ ではない。その値の決定は次報にゆづる。今図 7 の線図の値で実験値を逆算すると湿式では $A = 0.8 \sim 1.1$ で材質毎の偏りもみられ又 1 に近い等上の説明を証している。

6. 結 語

クロムの加工特性は定性的には鋼と類似の点が多い。

仕上面粗さの一般式は式(11)で与えられ、本報では研削条件に対して式の実験的証明を行つた。

k は図 7 で与えられ研削回数に対する補正を行う。 ϵ は砥粒分布数であり A は本来 1 であるが、共に砥石や加工物の特性および乾湿に対する補正を含み改めて実測により決定する。

式の適用は適正研削の領域に限定され、且つ使用する単位は mm, sec. である。

(1955, 7 月 26 日受付)

註;

- 1), 4) 渡辺半十: 精密機械, 19 巻, 3 号 (昭 28 年 3 月)
- 2) 塩崎進: 機械学会論文集, 18 巻 74 号 (昭 27)
- 3) 小野浩二: 機械学会論文集, 18 巻 74 号 (昭 27)

放電研削法の研究 (第 2 報)

正会員 倉藤 尚雄* 正会員 須田 孝* 正会員 芝 康平*

1. 緒 論

放電研削法第 1 報の実験結果に基づき、旋盤改造の放電研削装置を作つて、毎分の加工量、研削面の仕上について実験を行つた。

2. 実験装置及び方法

a. 実験装置

加工電極は、軟鋼製、厚さ 1cm、直径 25.5cmφ で、945rpm 2HP の電動機からベルト駆動して、1000rpm させる。加工液は歯車ポンプを 1400rpm. 1HP のポンプで駆動して供給する。

電源は 100V. 10KW の電動式 DC 発電機で、勵磁電流を

* 東京大学工学部

変える事によつて、電圧を 20~100V に変える事が出来る。

b. 試験材料

タンガロイ 10×10×50mm の材料の、10×10mm の平面を研削した。

c. 実験方法

電源電圧、給電抵抗を予め決めておいた一定の値に保持し、試験片を電極面に出来るだけ平行に取付け、電極面に 5mm 位迄近接させる。次にポンプをまわして、加工液を電極と試験片の間に供給し、電極を回転させ、給電回路をとちる。それから、マイクロメータねじて試験片を送り、加工電流を 12~13A に保つ様にする。試験片の面 (10×10mm) 全体から火花が出る様になれば、全面が予備加工出来た訳である。