研 究

旋削仕上面あらさ向上に関する研究*

—普通 鋳 鉄 に つ い て—

隈 部 淳 一 郎** 福 田 俊 穂***

Study for Improvement of Surface Finish

—Surface Roughness of Gray Cast Iron in Turning—

Junichiro KUMABE, Toshiho FUKUDA

According to literature, it has been very difficult to obtain surface roughness less than 2μ in turning. The purpose of the present paper is to reduce above mentioned limit and to obtain better surface finish.

The important results are as follows,

- 1) Surface roughness of 0.5μ is really possible by means of ultrasonic vibrating cutting (20 kHz in frequency, 16μ in amplitude, 40 m/min in cuttingspeed, with carbide tool K10) in turning gray cast iron (FC30).
- 2) Theoretically estimated roughness almost coincides with experimental value even in the region of less than 1μ .

1. 緒 言

最近の鋳鉄旋削加工においては、0.8s というような仕上面あらさの加工指示がなされるようになり、生産加工にあたる現場では、このような精密仕上面あらさとなつて、しかもばらつきを少なくして加工する体勢を整える必要が生じてきた。しかし、慣用の切削加工方法ではなかなか難しく、そう簡単に満足できることではないように思われる。

従来の研究結果を調べると、旋削でえられる鋳鉄の仕上面あらさは、たとえば Boley 精密旋盤を使ったような

場合でも図1に示されているように、 $H_{max}=4\mu$ が限界となっている¹⁾。このほかの論文、報告においても、最も良い仕上げを実施したときには、 $H_{max}=2\mu$ にまではなしようということがいわれている²⁾が、それ以上のあらさについては難しいとされているのが今日の加工技術の限界と考えられる。また理論値と実測値が一致しないことも寸法管理上好ましくない。切削工具の刃先形状が摩耗、疵などのない幾何学的な形状に成形されていて、しかも使用する旋盤精度が正常である場合の仕上面の理想的理論的あらさは、送り $S=0.05\text{ mm/rev}$ 、刃先半径 $R=0.5\text{ mm}$ とすると、 $H_{th}=0.63\mu$ となるのであるが、この H_{th} に対して実際の仕上面あらさは約 $H_{max}=4\mu$ が測定されており、理論値とかなりかけ離れた数値を示している。そこで要求された仕上面あらさを管理する場合には、切削条件を理論的条件からさらに上まわるところに設定しなければならないわずらわしい手間が必要となってくる。仕上面あらさが変わるたびごとに実験定数を探しているようでは生産管理上もはなはだ不都合である。

そこでここに仕上面あらさの目標を 0.5μ として、仕上面あらさの理論値と実測値がきわめてよく一致するといわれている振動切削を FC30 の普通鋳鉄材について試みて、理論値どおりの仕上面あらさが振動切削条件と専用の旋盤を用いることによってえられるかどうか、またそのときの仕上面あらさのばらつきがどうなるかについて明らかにしてみることにした。

図1 鋳鉄の切削仕上面あらさ (大越, 佐田, 鴨川)

*原稿受付 昭和44年11月17日。諏訪地方講演会 (昭和44年10月7日) にて発表

**正 会 員 理化学研究所 (埼玉県北足立郡 大和町広沢 2-1)

***帝国ピストンリング(株) (長野県岡谷市神明町 2-1-13)

2. 切削方法の考察

工具刃先形状が正しく成形されてあって、構成刃先が付着しないで、チッピングもないとすれば理論的仕上面あらさが当然えられなければならないところであるが、理論値と実際の仕上面あらさとは食い違いを生じている。その原因の一つとして考えられる工具刃先または加工物の変動の影響については、伊藤ら⁹⁾によって詳しく解析されている。他の原因として、せん断面前方へ生ずる塑性域の影響が考えられるが、これは切削条件および切削機構の選定によってほとんど無視できるようにまでなうるので、本研究の目的を達成するためには、工具刃先または加工物の微小変動を皆無にすることがキーポイントのように考えられる。そこで伊藤らの解析結果を参考にして適切な切削方法についての吟味、検討を行なう。

記号 H_{th} : $\Delta S, \Delta t$ が無い理想状態における理論的仕上面あらさ

ΔH : $\Delta S, \Delta t$ を考慮したときの仕上面あらさと理論的仕上面あらさとの差

H' : $\Delta S, \Delta t$ を考慮したときの仕上面あらさ
($=H_{th} + \Delta H$)

S : 送り

ΔS : 送り方向への工具切れ刃または加工物の微小変動量

Δt : 切込み方向への工具切れ刃または加工物の微小変動量

R : 工具の刃先半径

κ_1 : 作用前切れ刃角

κ_2 : 切込み角

2.1 使用切削工具形状

主軸にたががなく、切削抵抗による工具切れ刃または加工物の逃げやたわみなどがまったくなく、送り方向に正しく刃物台が送られ、スティックスリップもなく、送り量が常に一定で、刃先形状が成形したときとまったく同一の理想的状態を常に維持しているとしたときの理論的仕上面あらさは衆知のようにつぎのように表わされている。

a) $R=0$ の斜剣バイトの場合

$$H_{th} = \frac{S}{\cot \kappa_1 + \cot \kappa_2}$$

b) $R \neq 0$ の微小刃先半径 r のある場合⁴⁾

$$H_{th} = \frac{S}{\cot \kappa_1 + \cot \kappa_2} - r \left\{ \frac{\sin \kappa_1 + \sin \kappa_2}{\sin (\kappa_1 + \kappa_2)} - 1 \right\}$$

c) $R \neq 0$ で $S \leq 2R \sin \gamma$ の場合

図2 送り S に微小変動 ΔS のある場合

$$H_{th} = \frac{S^2}{8R}$$

d) $R \neq 0$ で $S \geq 2R \sin \gamma$ の場合

$$H_{th} = R(1 - \cos \gamma + T \cos \gamma - \sin \gamma \sqrt{2T - T^2})$$

$$\text{ただし } T = \frac{S}{R} \sin \gamma$$

本研究では切れ刃が成形しやすく、取付けが簡単で、因子が最も少なく、形状測定容易な c) の場合の先丸剣バイトを用いることにした。

以下の考察は c) によって進める。

2.2 送り方向への微小変動が仕上面あらさにおよぼす影響

工具刃先または加工物が送り機構、切削抵抗、刃物台のスティックスリップなどによって送り方向へのみ送りむらを生ずる場合で、図2で示すように送りに $S + \Delta S$ がある場合の ΔH は

$$\Delta H = \frac{S}{4R} \Delta S$$

ΔH は上式の関係で表わされるので、 ΔS が S の大きい領域で R の小さいときに生ずるとき、すなわち送りが大きくなって切削抵抗がより増加し、そのために送り方向に変動を生じやすいような場合に注意を要することを示す。理論的には 1μ 以下の超精密仕上面あらさでも当然えられなければならない理論的現象に近づけるためには、負荷の変動に影響されないように刃物台の運動を安定化すること、切削抵抗によって工具刃先または加工物が動的挙動をしないように剛性化するような対策をたてることが必要なことを示している。

2.3 切込み方向への微小変動が仕上面あらさにおよぼす影響

$\Delta S = 0$ で微小変動が送り方向にはないが、切込み方向に Δt が発生している場合の ΔH は、図3において

$$H' = R - \sqrt{\frac{R^2 S^2}{S^2 + \Delta t^2} - \frac{S^2}{4} + \frac{\Delta t^2}{2}}$$

しかるに Δt は変動するとしても S に比べて微小なの

図 3 切込み t に微小変動 Δt のある場合 図 4 Δt と ΔS が同時に作用する場合

で

$$\Delta H = \frac{\Delta t}{2}$$

上式の関係で示されているように切込み量 Δt の 1/2 が仕上面あらさに影響をおよぼすというものの、 0.5μ の超精密旋削仕上面あらさをうるためには、この Δt の影響も無視できないと考えられる。したがって切込み方向への微小変動もできるだけ小さくするように工夫することが絶対必要であると考えられる。

2.4 送り方向および切込み方向へ同時に作用する

微小変動が仕上面あらさにおよぼす影響

前記の 2.2, 2.3 が同時に作用する場合で、このときの仕上面あらさは図 4 から⁶⁾

$$H' = R - \sqrt{\frac{R^2(S+\Delta S)^2}{(S+\Delta S)^2 + \Delta t^2} - \frac{(S+\Delta S)^2}{4} + \frac{\Delta t}{2}}$$

しかるに $\Delta t^2 \ll (S+\Delta S)^2$

$$\therefore \Delta H \approx \frac{S}{4R} \Delta S + \frac{\Delta t}{2}$$

上式のように表わされており、両者の影響が加算されていく。

この ΔS , Δt の構成成分のなかで、旋盤の構造上からの変動はあらゆる技術的手段によって修正することは不可能ではないと考えられる。

しかし切削加工をするかぎり、たとえ切削抵抗を減少させたとしても切削抵抗の影響はなんらかの形で現れてくる。そこで超精密旋削仕上面あらさをうるためには、切削抵抗による工具、加工物、主軸などの時間的変

動が皆無になるような特別な旋削方法を従来とは違った立場から、考え方を新たに試みることが決め手であるように考えられる。

同時に切れ刃には常に構成刃先のような異物が付着せず、またチップングによる切れ刃の微細変形もないとして考察をしてきたこの仮定を実際に満足させる旋削方法であることも必要条件である。

いろいろ調査したなかで、超高速、通電、電解、放電、振動切削などによる切削抵抗を減小させる切削機構の適用が考えられるが、総合して考察した結果、構成刃先を考慮する必要がなく、しかも常に鋭利な刃先形状が維持されることが実証されていて、切削抵抗による加工物の動的挙動を皆無にさせる不感性切削機構⁶⁾を有する振動切削が最も適当であるように考えられる。

3. 振動切削方法⁷⁾

振動切削で、旋盤主軸に取りつけた加工物の固有振動数を f_0 、切削工具の振動数を f として、 $f/f_0 \gg 1$ の場合には、工具-サイクル中の正味切削時間 t_c 、工具の周期 T 、背分力 P_t 、旋盤主軸に取りつけた加工物の水平方向ばね常数 k とすると、加工物の水平方向の変位、すなわち切込み方向の変位 $\Delta t'$ は次式で表わされる⁸⁾。

$$\Delta t' = \frac{P_t}{k} \cdot \frac{t_c}{T}$$

振動切削のパルス状背分力によって上式で示されているように時間 t の関数の入らないまったく静的変位とすることができる。そしてさらに従来の切削法に比べて、仮に P_t が等しいとしても、 t_c/T だけ加工物の変位量を小さくさせることができる。実用している振動切削の t_c/T は参考までにあげると $t_c/T \approx 1/3$ 以下が用いられている。

このように振動切削によって、時間的変動のない切込み方向の変位とし、しかも変位量をごくわずかに小さくすることができることは、考察した理由によって理論的仕上面あらさにより近づけることを示し、今までにいわれていた 2μ の仕上面あらさの限界を破って、より平滑な仕上面あらさに加工できそうなことを裏づける。

一方、鋳鉄材の長手方向振動旋削加工実験によって、よりすぐれた円筒度となることが最近の研究⁹⁾で明らかにされたことなどから、鋳鉄切削に際しての切れ刃の損耗も無視できるほどのきわめて小さい量と考えられるので、以上考察した内容を中心にした技術的要素を入念に吟味、検討し、調整すれば理論的仕上面あらさに一致してしかも平滑な仕上面あらさの加工に成功するものと考えられる。

図5 加工物形状と実験方法

図6 実験装置

切削条件: 振動数 20.4 kHz, 振幅 16 μ , 回転数 220 rpm, 切込み 0.06 mm

図7 刃先半径, 送りと仕上面あらさ

4. 実験装置および実験方法

考察で行なったように使用旋盤には, より高精度の主軸回転精度とより安定した円滑な刃物台送り機構を有し, 振動切削機構および振動切削条件を十分に満足する切削工具刃先の振動姿態となる振動駆動装置を必要とする. そこでこのたび当理化学研究所において試作した超高精度振動切削正面旋盤 UC-120 VLS を用いることにした. 加工物は図5に示すような片状黒鉛普通鑄鉄 FC30 よりなる薄肉円環状加工物を用い, その端面部を正面振動切削することにした.

加工物を主軸端面に取りつけるために永久磁石をうめ込んで製作した特殊マグネットチャックを製作し, 軸方向に磁力を利用して吸引して密着させるようにし, 中心あわせはマグネットチャックに同時に設けたガイド板で行なうようにした.

バイト振動系は, $1/2$ 波長たて磁わい振動子および $1/2$ 波長振幅拡大用ホーンを用い, ホーンの先端にねじ部を設け, バイトに設けためねじとでねじ結合させ, バイトが自由に着脱できるようにして構成させた.

そして振動切削の基本原則にしたがい, 振動方向が切削方向と同方向となるように図5に示すようなバイトと加工物との関係位置にし, 振動切削条件である $v < 2\pi af$ (v : 切削速度, f : 切削工具の振動数, a : 振幅) の関係を満足する切削速度で切削テストを行なった. 仕上面あらさの測定には, 小坂式仕上面検査機 (SD-5) を使用した. 切削実験装置を図6の写真図で示す.

仕上面あらさ 0.5 μ を目標にして設定した切削条件をつぎに示す.

振動数: 20.4 kHz
 振幅: 16 μ
 送り: 0.06, 0.10, 0.15, 0.20 mm/rev
 切込み: 0.06 mm
 回転数: 220 rpm
 切削工具: 超硬 K10
 刃先半径: 0.6, 1.2, 1.5 mm

切削油剤：鉱油

加工物材質：片状黒鉛普通鑄鉄 FC 30

5. 実験結果および考察

一つの切削条件で平均して 5 個ずつ切削実験した後、仕上面検査機の触針を加工物の外周から中心に向けて移させて測定した結果のうちから任意に選り出して示したのが図 7 である。刃先半径 $R=0.6, 1.2, 1.5 \text{ mm}$ について送りを $0.06, 0.10, 0.15, 0.20 \text{ mm/rev}$ と変えた場合の実測値を示すもので、 H_{th} は理論値のあらさを示し、 H_{max} は実測した仕上面あらさを示す。

あらさ曲線上に、ところによって異常な突出部が見られるのは、切削表面のグラファイトのくぼみ、あるいは脱落によるピンホールのためであると考えられる。しかし、このグラファイト表層面と鑄鉄組織基地との段差が観測されているが、普通慣用切削で見られるようないちじるしい差はなく、またバイト二番面で強く加工物表面を摩擦して塑性変形させた表面状態は顕微鏡によって観察してもまったく見とめられない。ごくわずかな量であろうが、グラファイト部ではバイト刃先が食い込み、かたさのかたい基地部では刃先が逃げる現象がまだあると考えられる。この現象を皆無にすればさらに仕上面あらさの向上が期待できると考える。図 7 の実測結果を各刃先半径 R に対して送り S によってまとめた結果を図 8

切削条件：振動数 20.4 kHz ，振幅 16μ
回転数 220 rpm ，切込み 0.06 mm

図 8 仕上面あらさ H_{th} と H_{max} の比較

接触点 AB 間の加工物の挙動

図 9 電磁チャック上の加工物の挙動のモデル化

に示す。理論値曲線と実測値曲線とはよく一致している。 $H_{th}=0.3 \mu$ の理論的仕上面あらさに対して $H_{max}=0.5 \mu$ は測定器および測定精度から考えるとわずかの差で一致していると考えられる。

これらは、使用した旋盤の精度はもちろんのこと、切削実験後のバイト切れ刃のチッピングや構成刃先がまったく顕微鏡的にも観測されなかったこと、すなわち刃先形状に変化を生じないこと、送りを 0.05 mm/rev から次第に大きくしてゆき、 0.25 mm/rev としてもバイトを駆動する発振機からの出力波形にまったく変化がなかったこと、すなわちバイトの振動姿態が切削中でも変化しないために振動切削機構が十分に満足されていたためと振動切削特有の不感振動切削機構による効果が総合されてえられたものと考ええる。実際の加工物の取付け状態は図 9 に示す展開図のようになっているので、特に振動切削の不感振動切削効果が現われてえられたものと考ええる。

今慣用普通切削をしたとすると、加工物がチャック端面と接触している A, B, C 各点付近では、切削抵抗の影響をうけてもその中間に比べれば少ない動的挙動ですむが、AB 間, BC 間の加工物を切削するときにはより大きな切込みの変動が誘起される。しかし、振動切削ではこの AB 間でも工具と加工物との関係を示す図 9 の下方に示したモデル化した振動系と、すでに説明した関係

式でわかるように切込みの時間的変動を皆無にする．変化量 $\Delta t'$ も普通切削に比べて， t_c/T だけ小さくしている．

すなわち，加工物の取付状態，バイトの取付状態，主軸の剛性を含めて，剛性がないように見える加工物とバイトとの相対関係をあたかも極端に剛性化または超高精度化させたと同様な現象としたことによって，上記のよ

うな平滑で，しかも理論値と実測値とがよく一致する仕上面あらさがえられる結果となったものと考える．

つぎに仕上面あらさのばらつきの程度を調べてみることにした．切削条件をつぎに示す．

振 動 数: 20.4 kHz

振 幅: 16 μ

主軸回転数: 220 rpm

送 り: 0.10 mm/rev

切 込 み: 0.05 mm

刃 先 半 径: 0.85 mm

切 削 油 剤: 鉱物油

加工物材質: 片状黒鉛普通鋳鉄 FC30

実 験 個 数: 25 個

それぞれの仕上面あらさの測定結果を図 10 に示し，これらの仕上面あらさをグラフにした結果を図 11 に示す．測定結果のあらさ曲線から加工個数全数にわたって，ばらつきがほとんど見られない一様なあらさとなることが確認された．

この仕上面あらさの平均値と測定値のばらつきについて求めると，理論的仕上面あらさ $H_{th}=1.5 \mu$ に対して，25 個の加工数における実測値 H_{max} の平均値 $\bar{H}_{max}=1.62 \mu$ であり，理論値との差はきわめて少ない結果となった．測定値のばらつきを表わす標準偏差 σ はつぎのようになった．すなわち， $\sigma=0.084 \mu$ とわずかなばらつきを示す程度の結果となった．

すなわち，従来の慣用切削ではこのように 2 μ 以下の旋削仕上面あらさをうることは困難であることはもちろんであるが，仕上面あらさに対して統計的考察を余儀なくしなければならぬほど，仕上面あらさのデータはばらつきの普通であったが，この振動切削によることによって，そのわずらわしさが一掃され単純な理論式で検討しうることがわかった．この実験結果は仕上面あらさのねらいを理論的切削条件で設定することができ，量産加工における仕上面あらさの寸法管理を従来の切削加工法に比べて容易にし，しかも確実にさせることを意味している．

実験個数が連続 25 個では少ないようにも考えられるが，切削中の切りくずの状態やバイト刃先の摩耗程度や振動状態から総合考察するに，25 個程度の測定結果を吟味，検討することで十分であったと考える．量産加工しても図 11 の関係を維持する安定した仕上面あらさに加工しうるものと考える．

6. 結 論

以上の結果を要約すると，普通鋳鉄を 20 kHz 振動切

切削条件: 振動数 20.4 kHz, 振幅 6 μ
回転数 220 rpm, 送り 0.10 mm/rev
刃先半径 0.85 mm, 切込み 0.05 mm

図 10 25 個連続切削したときの仕上面あらさ測定結果

切削条件: 振動数 20.4 kHz, 振幅 16 μ
主軸回転数 220 rpm, 送り 0.10 mm/rev
切込み 0.05 mm, 刃先半径 0.85 mm

図 11 連続切削における仕上面あらさの変化

削ることによって

- 1) 従来の切削では限界とされていた $H_{max}=2\mu$ の壁を破って $H_{max}=0.5\mu$ の超精密旋削仕上面あらさがえられる。
- 2) 理論値とよく一致する仕上面あらさとなる。
- 3) あらさのばらつきも小さい。

以上のことを明らかにすることができた。本研究は、鋳鉄に対して 1μ 以下の仕上面あらさを理論式とほとんど一致させて、 $H_{max}=0.5\mu$ の仕上面加工をバイトを用いた旋盤加工によって実現したところに意義があると考えられる。今後順次解析を進めると同時に旋削加工でえられる平滑な仕上面あらさの極限の究明と他の成分の鋳鉄材についての実験研究をおこなってゆきたいと考えている。終りに本研究の遂行にあたり、ご援助をいただいた理化学研究所および帝国ビストンリング株式会社の関係

各位に深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) 大越 諄, 佐田登志夫, 鴨川昭夫: 精密切削仕上面あらさに関する研究, 科学研究所報告, **33**, 4 (1957) 209.
- 2) 田中義信, 津和秀夫: 精密工作法 上巻 共立出版株式会社 (1968) 121.
- 3) 伊藤 鎮, 福田理一, 金 吉雄: 旋削面あらさの構成に関する一考察, 精密機械, **34**, 5 (1968) 335.
- 4) 隈部淳一郎: 超音波振動旋削 (第2報), 精密機械, **26**, 4 (1960) 206.
- 5) 3) に同じ。
- 6) 隈部淳一郎, 谷口 修: 振動切削の動的解析 (第2報), 昭和44年精機学会諏訪地方学術講演会前刷 (1969-10-7).
- 7) 隈部淳一郎: 超音波振動切削機構の解析, 日本機械学会論文文集, **27**, 181 (1961-9).
- 8) 6) に同じ。
- 9) 発表予定。

情 報

(36頁よりつづき)

▽オキシクロリネーション法による塩化ビニール製造技術の開発 大槻 進 (東洋曹達工業研究第一部長) 高木利治 (同研究第2部長) 小坂勇次郎 (日本ポリケミカル研究所長)

▽管圧式空気構造建築技術の開発 村田 豊 (村田豊建築事務所長) 川口 衛 (法政大学助教授) 北村 弘 (大成建設設計課長) 藤井達夫 (同万国博富士グループ館新設工事作業所長) 細萱 武 (同工事主任)

▽超建築巨大架構の設計 神谷宏治 (都市建築設計研究所代表取締役) 福田朝生 (双星社竹腰建築事務所代表取締役) 坪井善勝 (東北大学教授) 長島正充 (都市建築設計研究所) 七海 実 (万国博お祭り広場建築工事共同企業体工事事務所長) 新聞信之 (同所長代理)

優秀な国産技術の充成に貢献したものの。

▽ステンレスクラッド鋼製造技術の育成 館 野 万 吉 (日本製鋼所取締役室蘭製作所長)

▽膜構造技術の育成 能村龍太郎 (太陽工業社長) 能村博正 (同専務)

▽コンピュータによる放送事業システムの確立 松浦 準雄 (NHK 理事)

情報処理技術者協会発足

通産省が、昨年実施した情報処理技術者認定試験の合格者を会員とし、同認定制度の推進母体となることを目標とした日本情報処理技術者協会がこのほど設立され、

会長に川口虎之輔明大教授、理事長に三宅竹松日本コンピュータ教育研究会理事長を選任して発足した。同協会は関係官庁や電子計算機メーカー、ユーザなどの情報処理関係事業所、教育機関などの支持を得て全有資格者の消息を交流会員相互の協力と啓発を深め、こんご認定試験受験者の後進の指導育成に努力して産業の発展と教育の振興に寄与するため設立されたものである。会員は現在18名だが、今年度300名を目標に会員の募集をはじめており、8月ごろに社団法人組織にしたい意向で、認可申請提出の準備を進めている。

事業として(1)情報処理技術者制度に関する調査、研究(2)機関誌、図書などの刊行、資料の収集(3)講習会、講演会、研究会、技能検定、通信教育、見学会の開催(4)情報処理技術の研究の将来および研究業績の表彰(5)情報処理の実務に関する相談、情報処理技術者のあっせんなどをあげている。

会員は正会員、特別会員、賛助会員、準会員があり、その資格は情報処理技術者認定試験合格者ならびに情報処理技術事業に理解ある者で、理事会に推薦された者、同協会の事業に賛同する法人、団体をはじめ情報処理技術者の資格を得ようとしている受験者、学生などである。

同協会の事務局は東京都千代田区内工業教育会館3階教育センタ内。(服部敏夫)