

## エンドミルによるスクロール形状部品の 高精度・高能率加工法に関する研究\*

(第1報, 最大切削面積と仕上げ面粗さに基づく高精度・高能率加工法の提案)

岩部 洋育\*<sup>1</sup>, 島田 智晴\*<sup>2</sup>

### Establishment of High-Accuracy and High-Efficiency Machining Method for Scroll-Shape Workpiece with End Mill (1st Report, Proposal of High-Accuracy and High-Efficiency Machining Methods Based on Maximum Chip Area and Surface Roughness)

Hiroyasu IWABE and Tomoharu SHIMADA

This paper deals with the establishment of a high-accuracy and high-efficiency machining method of a scroll-shape workpiece using numerically controlled machine tools. The main results are as follows. (1) The involute curve is described by the approximation using multi-circular elements, and the differences between the two curves are less than  $0.2\mu$  under the dividing angle  $\Delta t=0.09$  rad and other calculation conditions. (2) The cutter paths for machining the inside and outside surfaces of the scroll-shape workpiece are calculated, and the calculation method of the maximum chip areas based on the coordinate of the cutter centers is shown. (3) Three methods are proposed for machining the inside surface with a constant maximum chip area: (a) the radial depth control method, (b) the feed control method and (c) the spindle revolution control method. Using these methods, a drastic improvement of the machined accuracy, especially in the neighborhood of the center, is expected. (4) For the outside surface, a feed control method is proposed for a constant maximum chip area and a restraint condition of the maximum surface roughness. This method realizes reduction of the machining time to one-half, and large increase of the efficiency can be expected.

**Key Words:** End Mill, Scroll-Shape Workpiece, Chip Area, Surface Roughness, Radial Depth Control, Feed Control, Spindle Revolution Control, High-Accuracy Machining, High-Efficiency Machining

## 1. 緒 言

低振動, 低騒音を最大の特徴とするスクロール圧縮機は Creux によりその原理が発明された<sup>(1)</sup>。この圧縮機は近年空気漏れを防ぐチップシールの開発や数値制御工作機械により曲面の加工が容易になったことなどにより, 自動車, 家庭用空調機および自動販売機等に利用されるようになった。その心臓部は二つのスクロールと呼ばれる渦巻状の壁からなり, 壁の内外面はエンドミルによって加工される。しかしスクロールはインポリュート関数で表現される形状であるため, 通常の一一定切込みおよび送り速度による条件ではその中心部と外周部および内面と外面で切削状態が大きく変化する。すなわち, 実半径方向切込みの変化によって切削面積さらには切削力に変化することになり, 通常の加工法ではスクロールを高精度かつ高能率に加工する

ことが困難となる。そのため生産現場では能率を犠牲にしても加工精度を維持する目的から, 送り速度を低くしているが, その値および減速して加工する範囲は経験的に求めている場合がほとんどである。

そこで本研究は, 通常の3軸制御工作機械を用いることを前提として, スクロール形状部品の高精度・高能率加工法の確立を目的とする。まずスクロール形状の定義と工具経路の計算方法を示すとともに, 加工位置による最大切削面積の変化を幾何学的に解析する。次に解析結果に基づいて, スクロールの中心より外周までの加工における最大切削面積を一定にする加工法を提案する。スクロール内面に関しては切込み制御, 送り速度制御および主軸回転数制御による方法であり, とともに加工精度の大幅な改善が期待できる。外面に関しては送り速度制御に仕上げ面粗さを拘束条件に加えた方法であり, 加工能率の大幅な向上が期待できる。

## 2. スクロール形状と工具経路

### 2・1 スクロール形状の計算方法 スクロールの

\* 原稿受付 平成6年6月6日。

\*<sup>1</sup> 正員, 新潟大学工学部 (〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050)。

\*<sup>2</sup> 国際電気(株) (〒105 東京都港区虎ノ門2-3-13)。

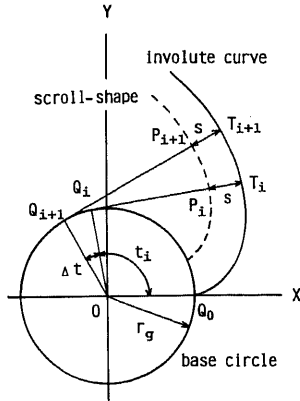


図1 スクロール形状の定義

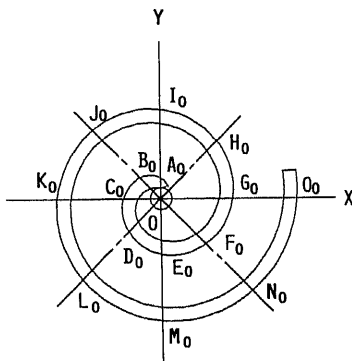


図2 スクロール形状の一例

形状はインボリュート関数により与えられ、インボリュート曲線より一定の距離  $s$  離れた曲線で定義される。図1は  $X$ - $Y$  座標系において両者の関係を示したものであり、実線で示すインボリュート曲線上の点  $T_i$  より基礎円に接線を下ろし、その接点を  $Q_i$  とすると、破線で示すスクロール形状は点  $T_i$  より  $s$  の距離にある接線  $T_iQ_i$  上の点  $P_i$  を結ぶことによって得られる。 $r_g$  を基礎円半径、 $\Delta t$  を分割角度、 $X$  軸から反時計方向に点  $Q_i$  までの角度を  $t_i$  とすると、点  $P_i$  の座標は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} X_i &= r_g \cos t_i + (r_g t_i - s) \sin t_i \\ Y_i &= r_g \sin t_i - (r_g t_i - s) \cos t_i \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

$$t_i = \Delta t \cdot i (i=1, 2, \dots, n)$$

図2は  $r_g=3.5$  mm,  $\Delta t=0.09$  rad,  $s=7.9$  mm (内面),  $3.3$  mm (外面) および  $n=130$  の条件を式(1)に代入して点  $P_i$  の座標を計算し、各点を結んだものである。図2中の点  $A_0$  ないし  $O_0$  はスクロールの外面と  $X$  軸、 $Y$  軸および両軸と  $45^\circ$  をなす一点鎖線との交点であり、後述する切削状態の変化が生じる位置の

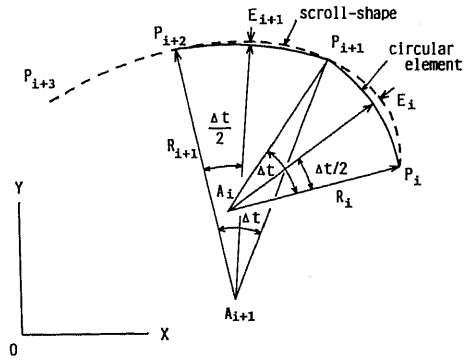


図3 円弧によるインボリュート曲線の近似法と誤差

目安としている。なお、内面についても同様の交点によって示すものとし、その際には添字  $I$  を用いる。

2.2 工具経路の計算方法 本研究においては図2で示したスクロール形状を、3軸制御の工作機械を用いて加工することを前提にしており、点  $P_i$  から  $P_{i+1}$  までの間の補間方法は、後述する図3からも明らかのように、直線補間に比べて補間精度が高い円弧補間を採用する。円弧補間により指令を与える場合、曲率中心の座標および曲率半径の値が必要となる。そこで図3に示すように、連続する3点  $P_i(X_i, Y_i)$ ,  $P_{i+1}(X_{i+1}, Y_{i+1})$  および  $P_{i+2}(X_{i+2}, Y_{i+2})$  を通る円弧を計算する。円の方程式は次式で与えられるため、3点の座標値を次式に代入して連立方程式を解き、係数  $C_1, C_2$  および  $C_3$  を計算すればよい。

$$\left. \begin{aligned} X_k^2 + Y_k^2 + C_1 X_k + C_2 Y_k + C_3 &= 0 \\ (k=i, i+1, i+2) \dots \dots \dots (2) \end{aligned} \right\}$$

曲率中心点  $A_i(XA_i, YA_i)$  および曲率半径  $R_i$  は式(2)の係数を用いて次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} XA_i &= -C_1/2 \\ YA_i &= -C_2/2 \\ R_i &= \sqrt{(C_1^2 + C_2^2)/4 - C_3} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

しかしインボリュート関数で与えられるスクロール形状を複数の円弧で近似するため、近似による誤差は避けられない。図3の円弧  $P_iP_{i+1}$  において、点  $P_i$  より円周角に相当する分割角度の半角 ( $\Delta t/2$ ) の位置からスクロール形状までの法線方向の距離  $E_i$  によりこの近似誤差を表現すると、分割角度  $\Delta t$  が小さい程誤差は小さくなり、 $\Delta t=0.09$  rad で  $E_i=0.16$   $\mu\text{m}$  以下である。1パルス  $1$   $\mu\text{m}$  で工具経路の指令が行われることを考えると、この値は十分小さく、以下の計算では  $\Delta t=0.09$  rad を使用している。

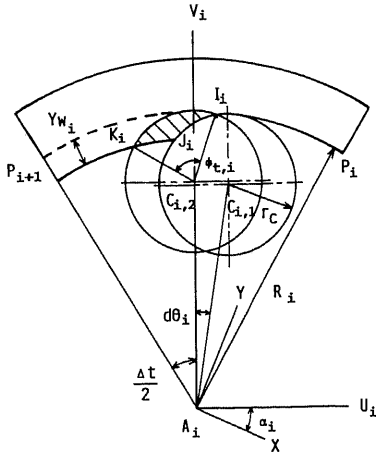


図4 内面加工における切削状態の投影図

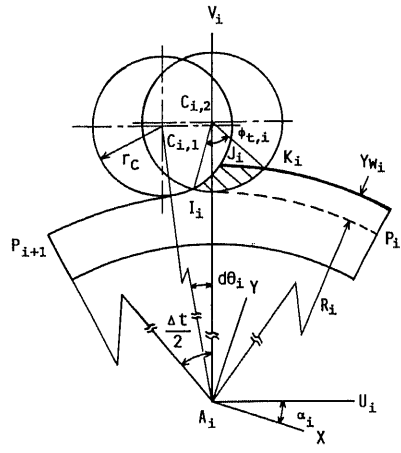


図5 外面加工における切削状態の投影図

### 3. ねじれ刃による切削面積の計算

3・1 内面加工の場合 図4はスクロール内面の点  $P_i$  より  $P_{i+1}$  までの区間の切削状態を Z 軸方向よりながめたもので、円弧  $P_iP_{i+1}$  の曲率中心点  $A_i$  を原点とする座標系を用いている。図4において円弧  $I_iJ_i$  および  $I_iK_i$  はある切れ刃と次の切れ刃の軌跡の一部であり、それぞれの工具中心は点  $C_{i,1}(UC_{i,1}, VC_{i,1})$  と  $C_{i,2}(UC_{i,2}, VC_{i,2})$  である。工具中心が点  $C_{i,1}$  より  $C_{i,2}$  に移動する間に、ねじれ刃による切削面積は工具の回転に伴って時々刻々に変化するため<sup>(2)</sup>、ここでは最大切削面積  $A_{max,i}$  を求めることにする。ねじれ刃による側面加工において、切削面積はその形状を Z 軸方向から X-Y 面に投影すると、例えば図4の斜線部の形状となる。本文ではこの面積を投影面積と呼ぶが、最大切削面積はねじれ刃が工作物に接触している角度  $(\phi_{t,i})$  が最大となる図4の状態において生じる。

そこでまず、斜線部で示す最大切削面積の投影面積  $AP_{max,i}$  を計算する。なぜなら  $A_{max,i} = AP_{max,i} / \sin \eta$  ( $\eta$ : ねじれ角) の関係にあるからである。この投影切削面積は後述する方法により求められる3点  $I_i, J_i$  および  $K_i$  の座標を用いて数値計算することができる。なお点  $P_i$  より  $P_{i+1}$  まで仕上げる間の最大切削面積は一定であるため、この区間の投影切削面積を上記3点で囲まれた部分により代表している。また以下の計算を容易にするため点  $C_{i,2}$  を V 軸上にとっており、 $U_i$  軸は X 軸に対して  $\alpha_i$  回転するが、その値は次式で与えられる。

$$\alpha_i = \tan^{-1} \{ (Y_{i+1} - Y_i) / (X_{i+1} - X_i) \} \dots\dots\dots (4)$$

なお点  $C_{i,2}$  および  $C_{i,1}$  の座標は、主軸回転数を

$Ns$ (rpm)、送り速度を  $Fs$ (mm/min)、刃数を  $Zn$  および工具半径を  $r_c$ (mm) とするとそれぞれ次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} UC_{i,2} &= 0 \\ VC_{i,2} &= R_i - r_c \\ UC_{i,1} &= (R_i - r_c) \sin d\theta_i \\ VC_{i,1} &= (R_i - r_c) \cos d\theta_i \\ d\theta_i &= Zn \cdot Ns / \{ 60Fs(R_i - r_c) \} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

3点  $I_i(U_i, V_i)$ ,  $J_i(U_j, V_j)$  および  $K_i(UK_i, VK_i)$  の座標は、点  $C_{i,2}$  および  $C_{i,1}$  を中心とし、半径がそれぞれ  $r_c$  の円(切れ刃の軌跡)および中心が点  $A_i$ 、半径が  $R_i - Y_{wi}$  または  $R_i + Y_{wi}$  の円(前加工面)のうち2円の交点により与えられる。投影切削面積は上記3円により囲まれるため、その値は次式で計算できる。なお、 $F(U_i)$  および  $G(U_i)$  は後述する式(7)および(8)で与えられる円の方程式である。

$$AP_{max,i} = \int_a^b \{ F(U_i) - G(U_i) \} dU_i \dots\dots\dots (6)$$

具体的には以下に示す(i)および(ii)の場合に分けてシンプソン則を用いて数値計算するが<sup>(3)</sup>、分割数は10としており、 $AP_{max,i}$  に  $1/\sin \eta$  を乗じることにより最大切削面積  $A_{max,i}$  を求めている。

$$\begin{aligned} (i) \quad & U_j \geq U_i \geq UK_i \quad (a = UK_i, b = U_j) \\ & \left. \begin{aligned} F(U_i) &= \sqrt{r_c^2 - (U_i - UC_{i,1})^2} + VC_{i,2} \\ G(U_i) &= \sqrt{r_c^2 - U_i^2} + VC_{i,2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (ii) \quad & UK_i \geq U_i \geq UI_i \quad (a = U_j, b = UI_i) \\ & \left. \begin{aligned} F(U_i) &= \sqrt{r_c^2 - (U_i - UC_{i,1})^2} + VC_{i,2} \\ G(U_i) &= \sqrt{(R_i - Y_{wi})^2 + U_i^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

なお図4において $\angle I_i C_{i,2} K_i(\phi_{t,i})$ は切削を行っている切れ刃の最大接触角であり、式(9)および(10)により次のように与えられる。

$$\phi_{t,i} = \cos^{-1} \{ (UI_i UK_i + VIC_i VKC_i) / r_c \} \dots\dots\dots (9)$$

$$\left. \begin{aligned} VIC_i &= VI_i - VC_{i,2} \\ VKC_i &= VK_i - VC_{i,2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

3・2 外面加工の場合 図5は外面加工における切削面積の計算方法を示したもので、工具の進行方向は図4の逆になる。最大切削面積の計算方法は内面加工の場合と同様であり、まず3点 $I_i, J_i$ および $K_i$ の座標を計算する。次に式(5)ないし(8)を用いて投影切削面積を計算し、その後 $1/\sin \eta$ を乗じて求めている。ただし外面加工の場合、3点 $I_i, J_i$ および $K_i$ の $U$ 座標の大小関係が入り替わるため、3・1節の場合分け

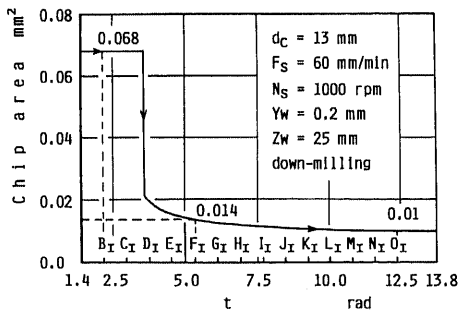
の不等号が反転する。また関数 $F(U_i)$ と $G(U_i)$ の第1項の符号および式(8)中の $Yw_i$ の符号の正負が反転する。

4. 高精度・高効率加工法の提案

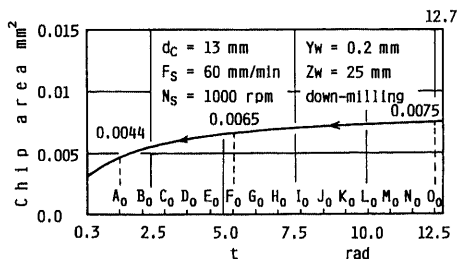
4・1 通常の加工法による問題点 図6は表1に示す通常の切削条件によりスクロール内外面を下向き切削により仕上げ加工する場合の、最大切削面積 $A_{max}$ の変化を示したものであり、図6(a)は内面加工、図6(b)は外面加工の場合である。内面加工の場合、最大切削面積は矢印で示すように中心部より外周部に向かって変化する。図6より中心部となる点 $B_i$ および $C_i$ 近傍で非常に大きな値となるが点 $D_i$ 近傍より急激に減少し、外周部の点 $O_i$ では中心部の約1/7となる。この理由は凹曲面をエンドミルで加工する場合、その曲率半径が中心部の近傍では工具の半径に近くなるため、実際の半径方向切込みが幾何学的に設定した値 $Yw_i$ に比べて非常に大きくなることによる<sup>(4)</sup>。また点 $B_i$ および $C_i$ 近傍は市販のスクロール形状の設計仕様に準じて曲率半径の等しい円弧により近似しており、その接続点で曲率半径の大きさが約1.5倍に増加するためである。

表1 切削条件

cutting speed	V m/min	40.84
spindle revplution	Ns rpm	1000
axial depth of cut	Zw mm	25
radial depth of cut	Yw mm	0.2
feed	Fs mm/min	60
diameter	dc mm	13
helix angle	$\eta$ deg	45



(a) 内面加工



(b) 外面加工

図6 通常の加工法による最大切削面積の変化

このような最大切削面積の大きな変化は、その値にほぼ比例する切削力の大きな変化の原因となる。エンドミル加工においては、この切削力によって工具およびチャックを含む主軸の変形、さらには工作物の変形が生じるため、両者の相対変位による加工誤差<sup>(5)</sup>の発生および加工誤差の大きさがスクロールの位置によって異なることが予想される。

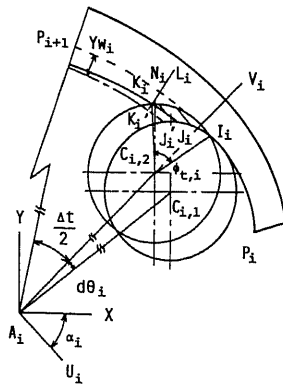
一方図6(b)に示す外面加工の場合は、矢印で示すように外周部から中心部への加工となる。図6より最大切削面積は中心部に向かうにつれて減少するが、点 $O_i$ 近傍でも $0.0075 \text{ mm}^2$ と小さい。この理由はエンドミルにより凸曲面を加工する場合、凹曲面の加工とは逆に実際の半径方向切込みが減少することによる。その結果、内面加工に比べて加工誤差は小さくなることが予想される。しかし、内面と同程度の公差内に仕上げられることを考えると、外面の加工においてはもっと送り速度を高くすることが可能であり、内面加工の条件と同じ値にすることは、加工能率を低くしていることになる。

そこで、以下に内面については高精度加工法、外面については高効率加工法に関して検討を行う。ただし、本報ではともに計算結果に基づいて行うものとし、実験による改善効果の検討結果については次報で行う。

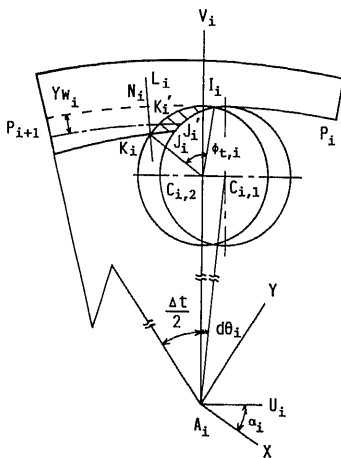
4・2 内面の加工精度改善方法 加工精度を改善

するとともに均一に保つためには、スクロール内面の任意の位置における最大切削面積を一定の値に制御すればよい。そこで本研究においては、上記の目的を実現する方法として、(a)前加工面により半径方向切込みを制御する方法、(b)送り速度を制御する方法および(c)主軸回転数を制御する方法を提案する。なお最大切削面積の値は図6(a)の結果より最大値の約1/5となる点  $F_i$  近傍における値  $0.014 \text{ mm}^2$  を用いることにする。

図7は前述した(a)の方法による加工精度改善方法の概略図である。図7(a)に示す曲率半径が小さい場合、前加工面が一点鎖線となる条件で切削を行うと、投影切削面積は3点  $I_i, J_i, K_i$  で囲まれた形状となる。これはスクロールの点  $B_i$  ないし  $C_i$  近傍の切削に相当し、投影切削面積は増大する。工具の中心点  $C_{i,2}$  の位置を変更せずに投影切削面積を減少させるためには、



(a) 曲率半径が小さい場合



(b) 曲率半径が大きい場合

図7 前加工面による半径方向切込みを制御する方法

半径方向切込みが減少するように前加工面を作成すればよい。

一方図7(b)に示す曲率半径が大きい場合、前加工面が図7(a)と同様な条件の切削を行うと、投影切削面積は減少するため、半径方向切込みが増加するように前加工面を作成すればよい。投影切削面積を一定とする前加工面をそれぞれ実線で示しているが、この前加工面は点  $C_{i,2}$  を中心とし、点  $I_i$  より反時計方向に  $\phi_{t,i}$  だけ回転した点  $K_i(UK_i, VK_i)$  を2・2節で述べた方法により円弧で結んで求めている。表1の条件では  $\phi_{t,i} = 18.5^\circ$  であり、点  $K_i$  の座標は次式により計算している。

$$\begin{Bmatrix} UK_i \\ VK_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_i & -\sin \phi_i \\ \sin \phi_i & \cos \phi_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} UI_i \\ VI_i - VC_{i,2} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (11)$$

なお、点  $A_i$  と  $K_i$  を結びその延長線と破線で示す加工予定面との交点を  $N_i$  とすると、 $K_i N_i$  の長さが制

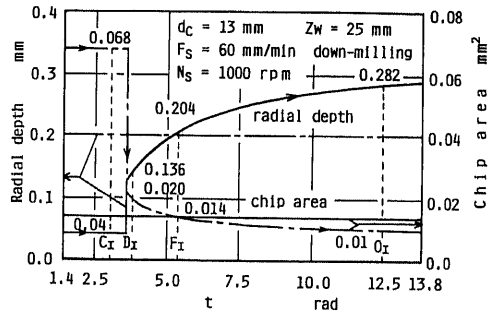


図8 半径方向切込み制御による切込みと最大切削面積の変化

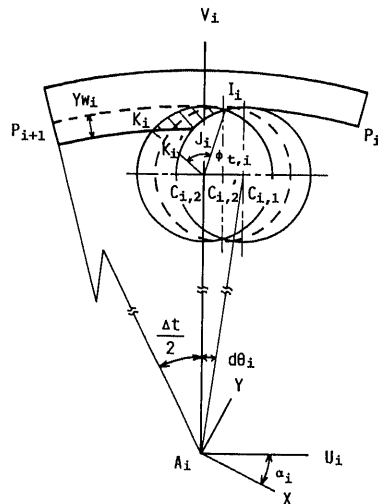


図9 送り速度または主軸回転数を制御する方法

御された半径方向切込みとなる。図8は(a)の方法により制御を行った場合の半径方向切込みおよび最大切削面積(実線)の計算結果である。なお、スクロールの位置を示す横軸の記号  $C_i$ ,  $D_i$ ,  $F_i$  および  $O_i$  の位置では切削状態の特徴的な変化を数値で比較しており、後述する図10ないし12に関しても同様である。図8よりスクロールの中心部(点  $C_i$  近傍)で半径方向切込みは0.04 mmと小さいが点  $C_i$  と  $D_i$  の間で急増し、その後外周部に移動するにつれて徐々に増加して点  $O_i$  では0.282 mmに達する。しかし最大切削面積は一定値(0.014 mm<sup>2</sup>)であり、一点鎖線で示した通常の加工法における半径方向切込みおよび最大切削面積の変化との差が明らかである。

一方図9は前述の(b)および(c)による加工精度改善方法について示したものである。まず前者の送り速度制御について考えると、実線で示した前加工面の位置を変更せずに投影切削面積を一定にするためには、送り速度を増減させて工具中心点の位置を変更する必要がある。図9においては曲率半径が大きく、設定送りよりも高い送りを指令して投影切削面積を一定にしようとする場合であり、工具中心は通常の指令による点  $C_{i,2}$  より  $C_{i,1}$  に移動していることを示している。このような送り速度  $F_{s,i}$  を±1%の変動幅を許容して近似的に次の手順により求めている。

- (1) 設定送り速度  $F_s=60$  mm/min を式(5)に代入し、点  $C_{i,2}$  および  $C_{i,1}$  の座標を計算する。
- (2) 3点  $I_i$ ,  $J_i$  および  $K_i$  の座標を計算する。
- (3) 式(6)ないし(8)を用いて最大切削面積  $A_{max,i}$  を計算する。
- (4)  $A_{max,i} \times 1.01 > 0.014$  ならば  $F_s = F_s + 1$ ,  $A_{max,i} \times 1.01 < 0.014$  ならば  $F_s = F_s - 1$  として手順(1)にもどる。その他の場合は  $F_{s,i} = F_s$  とする。

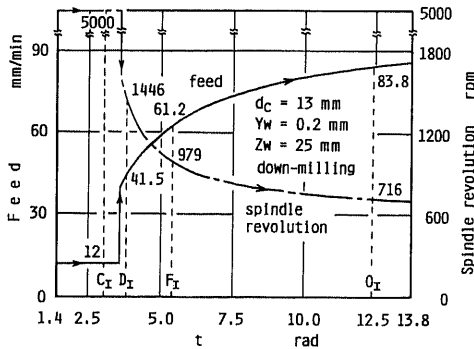


図10 送り速度または主軸回転数制御による送り速度と主軸回転数の変化

上記手順により、最大切削面積がほぼ一定な条件でスクロールの各位置を加工するための送り速度が求められる。図10は図6と同様の座標軸を用い、 $F_s=60$  mm/minの条件による送り速度の計算結果(実線)を示したものである。図10より中心部で送り速度は最小値(12 mm/min)を示すが、点  $C_i$  と  $D_i$  の中間位置で急増した後外周部に移動するにつれてゆるやかに増加して点  $O_i$  の位置で83.8 mm/minになる。なお、点  $F_i$  で設定値(60 mm/min)に一致していない。これは図6に示した点  $F_i$  における最大切削面積(0.014 mm<sup>2</sup>)が四捨五入による値であることによる。

一方半径方向切込みおよび送り速度が拘束される場合、主軸回転数を変化させることにより最大切削面積を一定にすることが可能である。すなわち設定した主軸回転数  $N_s$  に、手順(1)ないし(4)で求めた値  $F_{s,i}$  の設定値( $F_s$ )に対する比率( $F_{s,i}/F_s$ )の逆数を乗じた値を用いればよく、その計算には上記手順の  $F_s$  を  $N_s$  および  $F_{s,i}$  を  $N_{s,i}$  に置換するだけでよい。ただし不等号は逆向きになる。 $N_s=1000$  rpmの条件を用いてスクロールの各位置における主軸回転数を計算し、その結果を図10の一点鎖線で示している。図10より中心部で主軸回転数は最大値(5000 rpm)を示すが、点  $C_i$  と  $D_i$  の中間位置で急減し、その後外周部に移動するにつれてゆるやかに減少しており、送り速度と反対の傾向を示す。

表2 スクロール内面加工の加工時間

cutting method	cutting time	ratio
ordinary cutting	3 min 9.9 s	1.00
feed control with $A_{max}$	2 min 40.1 s	0.84
radial depth control with $A_{max}$	3 min 13.6 s	1.02
spindle revolution control with $A_{max}$	3 min 9.9 s	1.00

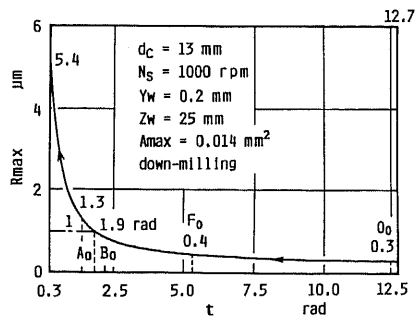


図11 送り速度制御によるスクロール外面の仕上げ面粗さの変化

表 3 スクロール外面加工の加工時間

cutting method	citting time	ratio
ordinary cutting	6 min 34.6 s	1.00
feed control with Amax and Rmax	3 min 11.0 s	0.48

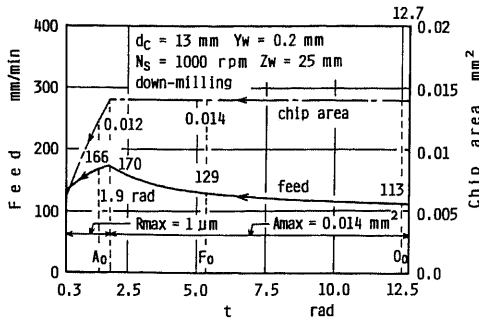


図 12 送り速度制御による送り速度と最大切削面積の変化

表 2 は上記 3 種類の加工法による加工能率を加工時間により比較したものである。表 2 より送り速度制御による加工時間が他の方法に比べて約 30 s 短く、加工能率が約 16% 向上している。しかし、半径方向切込みおよび主軸回転数制御による場合は通常の加工法の加工時間とほぼ等しく、両方法により加工能率の改善は期待できない。

4.3 外面の加工能率改善方法 外面加工における最大切削面積の変化は図 6 (b) のようになり、4.1 節で述べたように内面加工と同一の加工条件を用いると加工能率は低くなる。しかし加工能率を高める目的から送り速度を高くすると、中心部は曲率半径の小さい凸面であるため、次式で与えられるツースマークによる仕上げ面粗さ<sup>(6)</sup>が増大する。

$$\left. \begin{aligned} R_{\max} &= Sz^2 \cdot R_i / \{8rc(R_i + r_c)\} \\ Sz &= (R_i + r_c) \sin d\theta_i \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

ここで Sz は 1 刃当たりの送りであり、図 5 においては点  $C_{i,2}$  と  $C_{i,1}$  の距離である。

図 11 は表 1 の条件および式 (3)、(5) および (12) を用いて計算した仕上げ面粗さである。図 11 より仕上げ面粗さは外周部では  $0.3 \mu\text{m}$  と小さく、中心部に移動するにつれてゆるやかに増加するが、点  $B_0$  と点  $A_0$  の中間 ( $t=1.9 \text{ rad}$ ) で  $1 \mu\text{m}$  に達してから急激に増加し、スクロールの先端近傍 ( $t=0.3 \text{ rad}$ ) では  $5.4 \mu\text{m}$  となり、点  $O_0$  の 18 倍に達する。

そこで、外面の加工精度を低下させずに加工能率を

改善するために、前述の (b) の方法を改良した方法を提案する。すなわち、手順 (1) ないし (4) により、最大切削面積が一定値 ( $0.014 \text{ mm}^2$ ) になるような送り速度を計算するもの、仕上げ面粗さに最大値を定め、その値を最大切削面積より優先させて送り速度を定める方法である。本研究においては、最大仕上げ面粗さを  $1 \mu\text{m}$  と定めており、そのような送り速度を手順 (1) と (2) の間に次の手順を挿入して計算している。

(1)' 式 (12) を用いて仕上げ面粗さを計算し、その値が  $R_{\max} \times 1.01 > 1 \mu\text{m}$  ならば  $F_s = F_s - 1$  として手順 (1) に戻る。その他の場合は手順 (2) に進む。

図 12 は外面加工における送り速度(実線)と最大切削面積(一点鎖線)の変化を示したものである。図より外周部から中心部に向けて送り速度が増加し、最大切削面積を一定にしている。しかし、 $t=1.9 \text{ rad}$  の位置で仕上げ面粗さが  $1 \mu\text{m}$  に達するため、この位置から中心部までは  $R_{\max}=1 \mu\text{m}$  を維持するような送り速度が選択される。すなわちスクロールの曲率半径  $R_i$  の減少に比例して送り速度が低下するため、最大切削面積も減少することになる。

表 3 は表 2 と同様に加工時間を比較したものである。仕上げ面粗さに拘束されて中心部で加工能率は低下するものの、加工時間は送り速度制御を行うと通常の加工法に比べて半減し、加工能率の大幅な向上が期待できる。

### 5. 結 論

本研究によって得られた結論は次のとおりである。

(1) インボリュート曲線を複数の円弧により近似した。実験の条件では分割角度  $\Delta t=0.09 \text{ rad}$  を用いて、両曲線の差が  $0.2 \mu\text{m}$  以下となる近似を実現している。

(2) スクロール内外面の加工用工具経路の計算を行い、その座標に基づいて最大切削面積の計算方法を示した。

(3) スクロール内面の加工に関しては、最大切削面積を一定とする三つの加工法を提案した。すなわち、(a)前加工面により半径方向切込みを制御する方法、(b)送り速度を制御する方法および(c)主軸回転数を制御する方法であり、特に中心部近傍における加工精度の大幅な改善が期待できる。

(4) スクロール外面の加工に関しては、最大切削面積を一定とする送り速度の制御に仕上げ面粗さを拘束条件に加えた方法を提案した。この方法により加工時間はほぼ半減し、大幅な加工能率の向上が期待できる。

文 献

- (1) Creux, L., Rotary Engine, *US. Patent*, 801, 182(1905).
  - (2) 岩部・藤井, 精密工学会誌, 56-10(1990), 1889.
  - (3) 足立・竹内, メカトロのための数値計算, (1988), 74, 森北出版.
  - (4) 岩部・藤井・斎藤・岸浪, 精密工学会誌, 55-5(1989), 841.
  - (5) 藤井・岩部・鈴木, 精密機械, 43-7(1977), 807.
  - (6) 宮沢・高田, 精密機械, 47-2(1981), 234.
-