

非円形旋削への試み

(その1、斜交溝や円弧溝の場合の運動解析と切削力変化)

高野 英資、田村 隆*1、田中 義之*2、坂井 淳

Trial to Creation Mechanizm of Non-circular Contour by Turning
(Part 1, Analysis of Motion and Cutting Forces in Cases of Disclike Link
having Non-right-angled Line or Circular Arc Grooves)

Eisuke TAKANO, Takashi TAMURA Yosiyuki TANAKA and Jun SAKAI

1. 緒 言

前報⁽⁷⁾ではオールダム軸継手(図1)から導かれる楕円旋削機構(図2)を試作し、楕円旋削加工を行った場合の被削材の運動や切削速度ベクトルの大きさ並びにその方向変化、さらに切削力の変化の様子などについて、理論的、実験的に検討を行い、それらの検討結果を明らかにした。

本報では、図2の円板状中間リンク③に切られた直交溝が、ある角度 α で交わる斜交溝となる場合や、2本の直交溝のうちの一方の溝が、曲率半径があまり小さくない円弧溝となった場合に、中間リンク③に取り付けられた被削材にどのような輪郭形状をもつ物体を創成することになるのか、また、それらの運動や切削力変化が直交溝の場合に比べて、どのような違いを示すかについて述べる。円弧溝のとき、曲率半径が小さい場合に得られる輪郭曲線のうち、半円形状となる場合や多角形旋削の可能性、さらに斜交溝並びに円弧溝の場合に図2の駆動軸Aに与えられる駆動トルクに関する問題点などについては次報で改めて言及する。

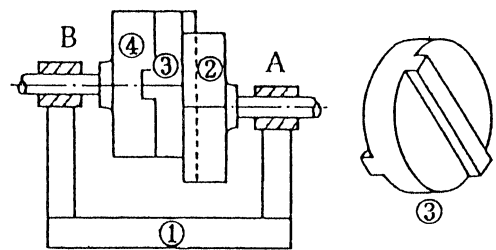


図1 オールダム軸継手

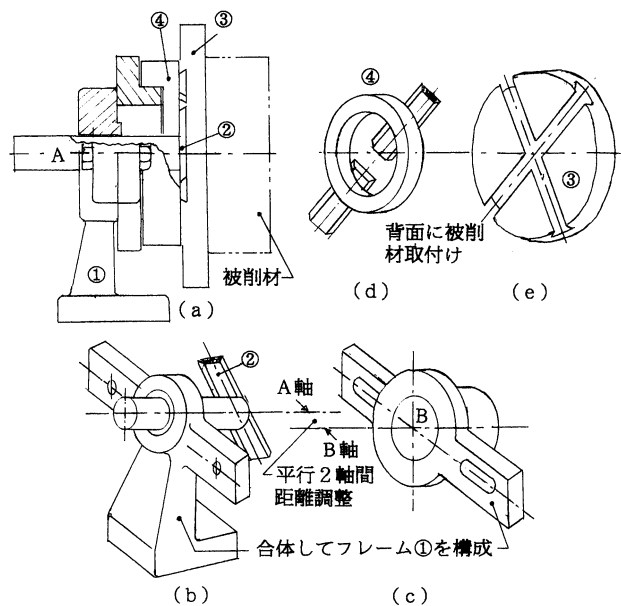


図2 楕円旋削加工機構の主要部概要

*1新潟大学工学部、*2大和ハウス工業株式会社

2. 中間リンク③に描かれる輪郭曲線

図2の中間リンク③が斜交溝や円弧溝を有する場合、バイトの先端が中間リンクに取り付けた被削材に与える輪郭曲線は、図2の機構において「節の交替」を行い、リンク③を固定節とした機構（直交溝の場合、この機構は楕円画器と言われる。）を用いて求めることができる。このとき、スライダーが取り付けられている駆動軸と被動軸の中心 A' 、 B' を結ぶ棒状リンク $A'B'$ （図3）上の点 C' （バイトの先端位置に相当）が中間リンクに固定した X - Y 面上に描く曲線が非円形旋削時に加工物に与えられる輪郭形状となる。次に、これらの輪郭曲線が斜交溝や円弧溝の場合、それぞれどのような形状となるかについて述べる。

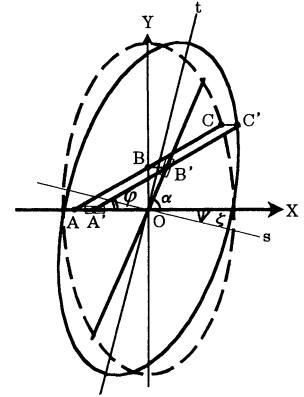


図3 中間リンクに描かれる輪郭曲線

2. 1 斜交溝をもつリンクの場合

初めにリンク③上に、ある角度 α ($\neq 90^\circ$) をなす2本の溝（うち1本は X 軸と一致）から成る斜交溝の場合を考える。直交溝の時と同様に点 A' と点 C' の距離を a 、点 B' と点 C' の距離を b とし、リンク $A'B'$ と X 軸とのなす角を φ とする。 φ が反時計回りに1回転したときのバイト先端の点 C' ($X_{c'}$, $Y_{c'}$) が描く軌跡を求める。便宜上 X 軸と Y 軸方向に一致する直交溝をスライドする2つのスライダ A , B と点 C も図示しておく。斜交溝におけるリンク $A'B'$ と直交溝をスライドするリンク AB はバイト先端位置を含め同じ寸法をもつものとする。すなわち、

$$AC=A'C'=a, BC=B'C'=b$$

$$AB=A'B'=AC-BC=a-b$$

である。直交溝の場合にはバイト先端の座標を C (X_c , Y_c) とすると、言うまでもなく次式が成り立ち、点 C は図3中の破線で示したように正楕円を描く。

$$X_c^2/b^2 + Y_c^2/a^2 = 1 \quad (2.1)$$

斜交溝の場合には、リンク $A'B'$ が X 軸に対し角度 φ だけ傾いたとき、リンク $A'B'$ と平行位置にあるリンク AB との関係、即ち $X_{c'} = X_c + (a-b) \sin \varphi / \tan \alpha$, $Y_{c'} = Y_c$, $\sin \varphi = Y_c/a = Y_{c'}/a$ を考慮すれば、式 (2.1) に代入することにより、 $X_{c'}$ と $Y_{c'}$ の関係が次式 (2.2) のように得られることがわかる。

$$X_{c'}^2/b^2 - 2P(X_{c'}/b)(Y_{c'}/a) + QY_{c'}^2/a^2 = 1 \quad (2.2)$$

ここで、

$$P = (a-b)/b \tan \alpha, Q = 1 + (a-b)^2/b^2 \tan^2 \alpha \quad (2.3)$$

さらに式 (2.3) で与えられる輪郭曲線がどのような曲線かを調べるために、 X - Y 座標から s - t 座標への変換を考える。 s - t 座標は図中に示したように X - Y 座標を角度 ξ だけ回転した座標である。したがって、 $X_{c'} = s \cos \xi + t \sin \xi$, $Y_{c'} = -s \sin \xi + t \cos \xi$ なる関係がある。これを式 (2.2) に代入し、 s^2 と t^2 の項を残し、 st の係数を零とするような角度 ξ を与えると次式 (2.4) が得られる。

$$s^2/b'^2 + t^2/a'^2 = 1 \quad (2.4)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} a' &= 1/\sqrt{(\sin \xi/b)^2 - P(\sin 2\xi/ab) + Q(\cos \xi/a)^2} \\ b' &= 1/\sqrt{(\cos \xi/b)^2 + P(\sin 2\xi/ab) + Q(\sin \xi/a)^2} \\ \xi &= (1/2) \tan^{-1} \{2Pab/(a^2 - Qb^2)\} \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

つまり、2つの溝が角度 α で交わる斜交溝をもつリンクによって描かれる輪郭は、 $X-Y$ 座標から式(2.5)の第3式を満たす角度 α だけ傾けた $s-t$ 座標を用いると、長軸半径 a' 、短軸半径 b' をもつ正楕円となる。図4には角度 α と長軸半径 a' および短軸半径 b' の間の関係を示した。このことから、角 α が 90° から小さくなるにつれ細長い楕円形状となっていくことがわかる。

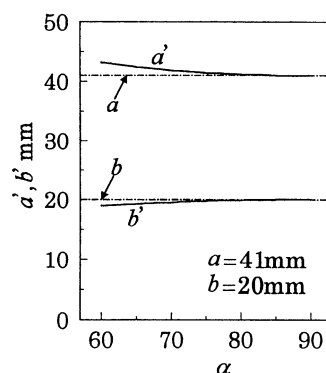


図4 角 α と長軸半径 a' 、短軸半径 b' の関係

2. 2 円弧溝をもつリンクの場合

次に、2本の溝のうち、1本は直線溝(X 軸と一致)、他方は X 軸上に中心をもつ半径 R の円弧状の溝をスライダ A' および B' がすべり運動するリンク $A'B'$ 上の点 C' の描く曲線を考える。図5(a)には前節同様に直交溝をスライドするリンク AB とこのリンク上の点 C の描く輪郭曲線を示しておいた。円弧溝の場合には、円弧が示す曲線の式は

$$X = R - \sqrt{R^2 - Y^2} \quad (2.6)$$

で表すことができる。したがって、リンク $A'B'$ が X 軸と角度 φ をなすときの直線状スライダ A' と円弧状スライダ B' を結ぶリンク $A'B'$ の延長線上にある点 C' の描く曲線の $X-Y$ 座標の値($X_{C'}$, $Y_{C'}$)は、 $B'H = AB \sin \varphi$ 、 $X_{C'} - X_C = R - \sqrt{R^2 - (a-b)^2 \sin^2 \varphi}$ 、 $Y_{C'} = Y_C$ が得られる。これらの X_C 、 Y_C を式(2.1)に代入し、 $\sin \varphi = Y_C/a$ から φ を消去すれば、 $X_{C'}$ 、 $Y_{C'}$ の関係が次式(2.7)のように得られる。

$$\{X_{C'} - R + \sqrt{R^2 - (1 - b/a)^2 Y_{C'}^2}\}^2 / b^2 + Y_{C'}^2 / a^2 = 1 \quad (2.7)$$

これが円弧溝と直線溝の中間リンクに描かれる輪郭形状を与える曲線の式となる。ここで、式(2.7)において、 $X_{C'}/b = u$ 、 $Y_{C'}/a = v$ 、 $R/b = r$ とおき、さらに、 $w = \sqrt{r^2 - (a/b - 1)^2 v^2}$ 、 $r - w = W$ とおくと次式が得られる。

$$u^2 - 2uW + \{2rb^2/(a-b)^2\}W + \{a(a-2b)/(a-b)^2\}W^2 = 1 \quad (2.8)$$

次に式(2.8)で示される曲線がどのような特性をもつ曲線であるかを知るために、 $u-W$ 座標系から $s-t$ 座標への変換を考える。 $s-t$ 座標は図5(b)で示したように、 $u-W$ 座標系を角度 β だけ回転したときの座標で、両者の間には $u = s \cos \beta - t \sin \beta$ 、 $W = s \sin \beta + t \cos \beta$ なる関係がある。この変換公式を用いて、式(2.8)に代入すると、 s^2 の項、 t^2 の項及び st の項をふくむ式が得られるが、 st の項の係数が零となる β 、すなわち $\beta = \tan^{-1}\{-2(a-b)^2/b^2\}$ を用いると、式(2.8)は結局式(2.9)のようになり、式中の A 、 B 、 C 、 D 、 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 などは式(2.10)、(2.11)のように与えられる。

$$(s+C)^2/A^2 + (t+D)^2/B^2 = 1 \quad (2.9)$$

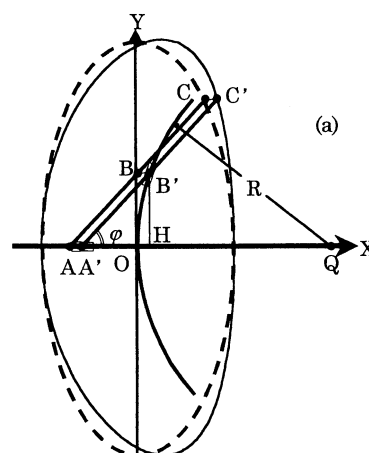
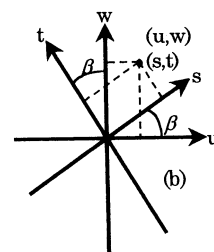


図5 中間リンクに描かれる輪郭曲線

ここで、

$$\left. \begin{aligned} A &= \sqrt{(1+C_1^2/A_1+D_1^2/B_1)/A_1} \\ B &= \sqrt{(1+C_1^2/A_1+D_1^2/B_1)/B_1} \\ C &= C_1/A_1, D = D_1/B_1 \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= 1 - \{b^2/(a-b)^2\} \sin^2 \beta - \sin 2\beta \\ B_1 &= 1 - \{b^2/(a-b)^2\} \cos^2 \beta - \sin 2\beta \\ C_1 &= \{rb^2/(a-b)^2\} \sin \beta \\ D_1 &= \{rb^2/(a-b)^2\} \cos \beta \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

式 (2.9) は $s-t$ 座標における正楕円を表し、リンク $A'B'$ 上の点 C' の軌跡は、結局楕円を基礎にして得られる曲線であることがわかる。よって、本報ではこれを疑似楕円と呼ぶことにする。図 6 は $a=40, b=20, R=100, 60, 25, 20$ とした場合に点 C' が $X-Y$ 平面に描く疑似楕円の計算例である。図 6 によれば、この機構において、 $a/2=b=R$ という特殊な条件を満たすとき描かれる輪郭は半円状になることがわかった。半円形状が得られる場合は次報において扱う。

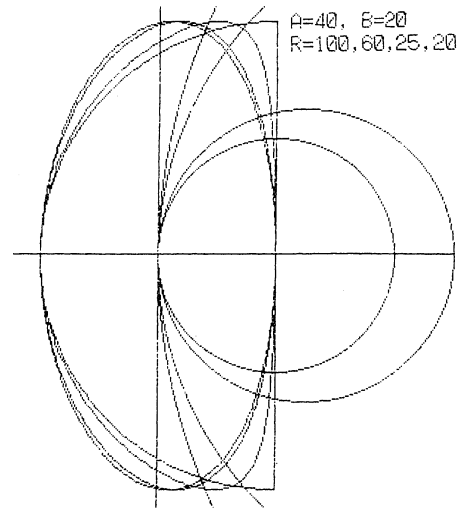


図 6 疑似楕円の計算例

3. 中間リンク③の運動

次に楕円旋削加工機構の中間リンク③が斜交溝または円弧溝を有する場合、主軸 A に回転を与えるとき中間リンクはどのような運動をするのだろうか。前章では、簡単のため中間リンクを固定し、このリンク上に $X-Y$ 座標を設定し、この $X-Y$ 面にリンク $A'B'$ 上の点 C' が描く曲線について考察した。以下ではフレームとなるリンク $A'B'$ を固定し、主軸 A' の回転によって $X-Y$ 座標をもつ中間リンクがどのような運動をするかを考えてみよう。ここで A', B', C' の各点を改めて A, B, C 等と書くことにする。

3. 1 斜交溝をもつリンクの場合

図 7 は、直線状スライダが取り付けいた主軸 A が回転角 θ の回転をするときの、斜交溝をもったリンクの運動の様子を示す。図中の $x-y$ 座標系は絶対静止座標系、 $X-Y$ 座標系は被削材が取り付けられた中間リンクとともに移動する座標系であり、 $s-t$ 座標は斜交溝をもつリンク上に新しく描き出された楕円の長軸、短軸を両軸とする移動座標系である。点 A, B, C は y 軸と一致するリンク (フレーム) AB 上の固定点であり、点 A を通る軸は旋盤の主軸にくわえて、スライダ A の軸心に回転動力を与える軸となる。また、

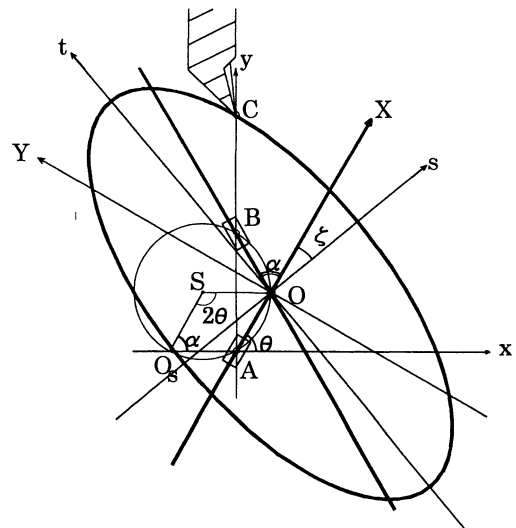


図 7 中間リンクの運動 (斜交溝)

A 軸と一体で回転するスライダ A は中間リンク③の X 軸方向溝をガイドとして相対的にすべり運動を行う。また B 軸と一体で回転する直線状スライダ B は同時に X 軸と角度 α をなす斜交溝をガイドとしてすべり運動を行う。ここで、 α は中間リンクに設けられた 2 本の溝のなす角であり、 ζ は X 軸と s 軸とのなす角であることは前にも述べた。

次に、この図において楕円旋削の時と同様に X-Y 座標の原点 O (x_0, y_0) の運動に着目する。図 7 において $OA = (a-b)(\sin \theta - \cos \theta / \tan \alpha)$ であり、点 O の絶対座標は $x_0 = OA \cos \theta$, $y_0 = OA \sin \theta$ となることから、 $\tan \delta = -1/\tan \alpha$ とおくと、次式が得られる。

$$(x_0 - A \sin \delta)^2 + (y_0 - A \cos \delta)^2 = A^2 \quad (3.1)$$

ここで、 $A = (1/2)(a-b)\sqrt{1+1/\tan^2 \alpha}$ である。したがって、式 (3.1) は $\sin \delta = -\cos \alpha$, $\cos \delta = \sin \alpha$ と書けることを考慮すれば、式 (3.1) は点 S ($-A \cos \alpha, A \sin \alpha$) を中心とし、半径 $OS = A$ の円を表すことになる。言うまでもなく、点 S は $\theta = 0$ のとき点 O の位置、すなわち点 O_s と点 B を結ぶ線分の中央位置である。したがって、2 つの溝の交点である移動座標の原点 O はこの円周上を移動していく。つまり、中間リンク③は主軸 A と同じ回転角速度で自転運動を行うと共に、原点 O は主軸の回転角 θ に対して、点 S を中心にいま求めた円周上を 2θ 、すなわち 2 倍の回転角速度で公転運動を行う。

図 8 は、斜交溝をもつ中間リンクが主軸回転角 θ の変化によりどのような運動をするかを、 $\theta = 0 \sim 165^\circ$ まで 15° きざみで一枚の図に示した。この図から y 軸上の一点にバイトの先端を固定したとき、その先端は確かに正しい輪郭形状を描くが、この $\theta = 45^\circ \sim 75^\circ$ 付近でバイトと被削物との間に干渉が起こる可能性があることがわかる。このことは、斜交溝のなす角 α の選定と共に切削段階において、適切な逃げ角を考慮したバイトを用いるなど、切削条件の設定が必要となることを示唆している。

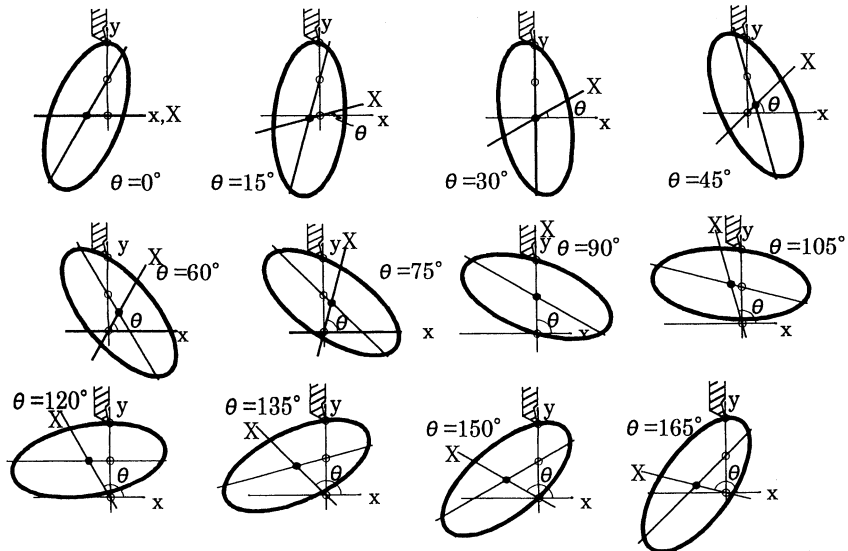


図 8 主軸回転角 θ に対するリンクの位置変化 (斜交溝)

3. 2 円弧溝をもつリンクの場合

前出図5の棒状リンク $A'B'$ を $x-y$ 絶対静止座標系の y 軸と一致するようにして固定し、その座標原点に点 A' を一致させて軸線 A' の回りにスライダ A' と一体の A' 軸を反時計回りに角度 θ だけ回転する。以下においては、前節同様簡単のため ' を省略し、 A' 、 B' 、 C' を A 、 B 、 C と表すことにする。図9のように、中間リンク上の点 $Q(x_Q, y_Q)$ は点 B を中心とし、半径 R の円周上を移動する。このとき、図9において $\varphi = \pi/2 - \theta$ であるから $a - b = nR (n > 0)$ とおくと、点 Q の軌道は

$$x_Q^2 + (y_Q - nR)^2 = R^2 \quad (3.2)$$

で示されるが、図9において $\sin \varphi = \cos \theta$ 、 $\cos \varphi = \sin \theta$ を考慮すれば、 $AQ = AO + OQ = R(n \sin \theta + \sqrt{1 - n^2 \cos^2 \theta})$ となるから、 $x_Q = AQ \cos \theta$ 、 $y_Q = AQ \sin \theta$ と表すことができる。このとき、後述(図16参照)するように、 $\angle ABQ = \varepsilon$ とおくと、スライダ A が取り付けられている主軸 A の回転角速度 $\omega = d\theta/dt$ に対し、中間リンク上の点 Q は不等角速度 $\omega_Q = d\varepsilon/dt$ で軸心 B の回りを公転運動することになる。

図10は主軸 A の回転角の変化に対して、直線と円弧溝をもった中間リンク③がどのような運動をするかを示したものである。 y 軸上の一点 C にバイトの先端を固定したときバイトの先端が中間リンク上に描く輪郭形状が示されている。この例では、斜交溝の場合と同様に $\theta = 30^\circ$ 付近でバイトと被削物との間に干渉が起こる可能性があることがわかる。したがって、切削段階において逃げ角を考慮した切削条件設定が必要となることを示している。

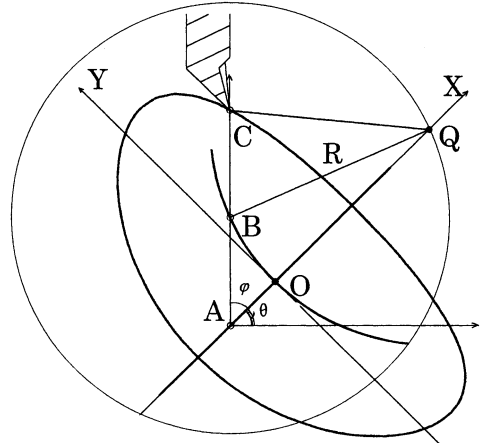


図9 中間リンクの運動(円弧溝)

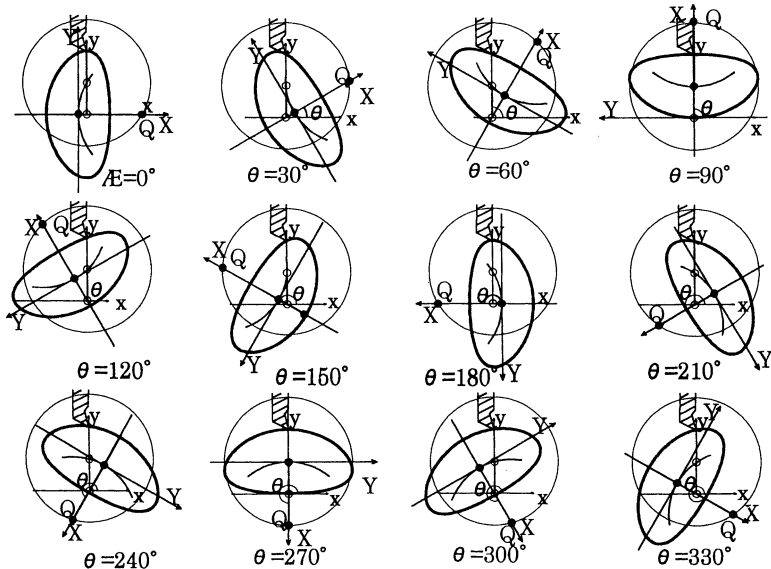
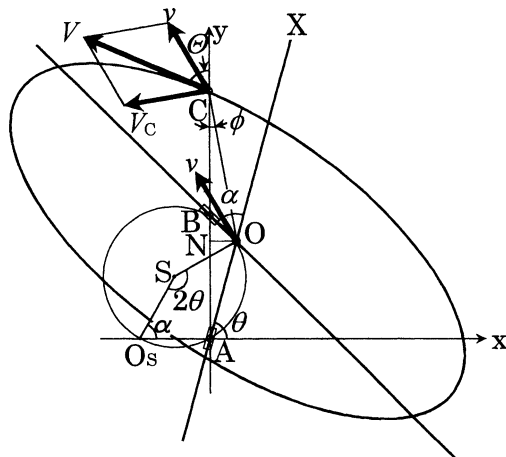


図10 主軸回転角 θ に対するリンクの位置変化(円弧溝)

前章では、スライド A と一体の主軸 A をその軸線の回りに回転させたとき、斜交溝または円弧溝をもつ中間リンク③の運動について考察した。本章では、非円形旋削を行った場合に、中間リンクに取り付けられた被削物が、フレームに固定したバイトの先端位置の点 C において、どのような方向からどのような速度で進入して来るかを調べるために、中間リンクが点 C において有する切削速度ベクトルについて考えてみよう。



4. 1 斜交溝をもつリンクの場合

$$v = \text{OS} \cdot 2\omega = (a - b) \sqrt{1 + 1/\tan^2 \alpha} \cdot \omega \quad (4.1)$$
$$V_c = OC \cdot \omega$$

$$= \sqrt{[a^2 - 2a(a-b)(\sin \theta - \cos \theta / \tan \alpha) \sin \theta + (a-b)^2(\sin \theta - \cos \theta / \tan \alpha)^2]} \cdot \omega \quad (4.2)$$
$$\phi = \sin^{-1}\{(\text{OA/OC})\cos\theta\} \quad (4.3)$$
$$V^2 = v^2 + V_C^2 - 2vV_C \cos(2\theta - \phi + \alpha - \pi/2) \quad (4.4)$$
$$V_C \sin \{3\pi/2(2\theta + \alpha - \phi)\} = V \sin \{\Theta - (2\theta + \alpha - \pi)\}$$

したがって、バイトの先端の点 C における x 軸方向及び y 軸方向の各切削速度成分 V_x 、 V_y は式 (4.6) のように求められる。

$$V_x = V \sin \Theta, \quad V_y = V \cos \Theta \quad (4.6)$$

— 7 —

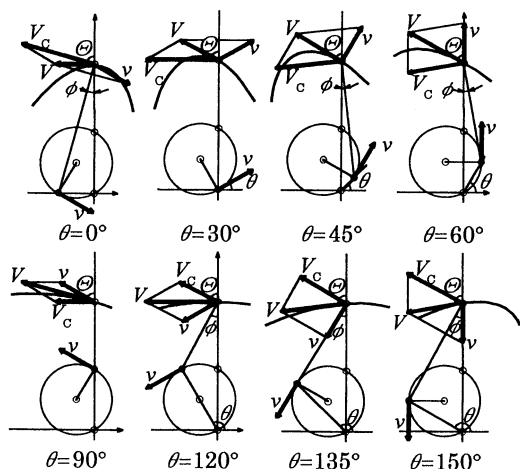


図12 速度ベクトルの大きさと方向変化 (斜交溝)

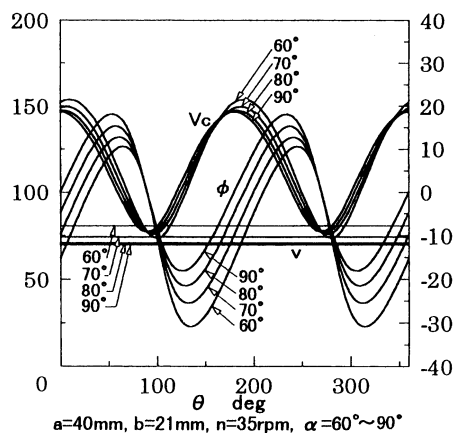


図13 θ に対する v , V_c 及び ϕ の変化曲線

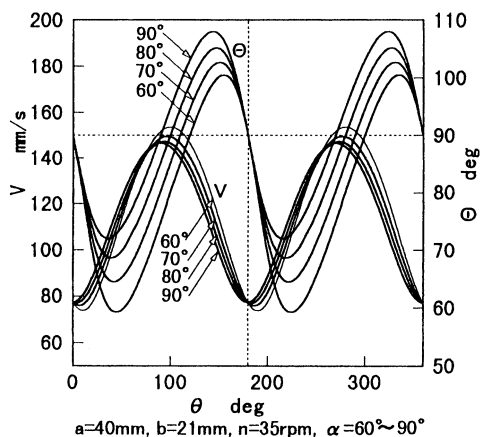


図14 θ に対する V 及び θ の変化曲線

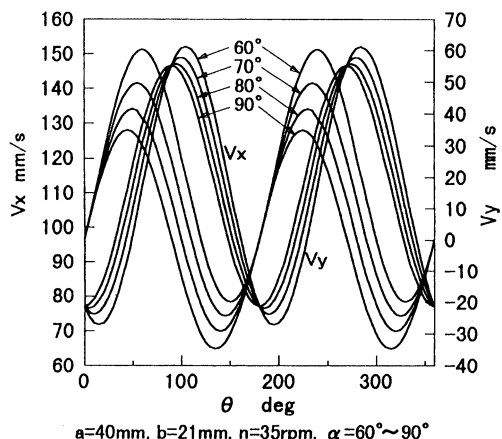


図15 θ に対する V_x 及び V_y の変化曲線

し、 180° を周期とする周期的変化を示すことがわかる。また、図13～15は溝角 α が $60^\circ \sim 90^\circ$ (10° 間隔)のとき、主軸Aの一回転 ($0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$) に対して、それぞれの速度ベクトルの大きさ及び方向の変化曲線をグラフ化して示したものである。図13は主軸回転角 θ に対する v 、 V_c 及び ϕ の変化曲線を、図14は V 、 θ の変化曲線を示し、また図15は V_x 、 V_y の変化曲線を示す。

4. 2 円弧溝をもつリンクの場合

図16は、中間リンク③が円弧溝をもつ場合に、点Cで示されるバイト先端部に対して被削物がどのように進入してくるかを調べるために、点Qが定点B回りを、半径 R の円軌道を描いて、回転運動することに着目し、各切削速度ベクトル成分の大きさ、方向などを定めるのに用いた図である。次に、点Qの絶対速度ベクトルを v_q 、中間リンク③が点Cの位置において、点Qに対して有する相対速度ベクトルを V_c 、この2つの合成速度ベクトルを V として、これらについて求めてみよう。言うまでもなく、

いま、 $\angle ABQ = \varepsilon$ とおくと、 $\triangle ABQ$ における余弦定理 $AQ^2 = AB^2 + BQ^2 - 2AB \cdot BQ \cos \varepsilon$ から得られる AQ 式と、3.2節で得た AQ 式を等置することにより、次式 (4.7) が得られる。

$$\epsilon = \cos^{-1}(n \cos^2 \theta - \sin \theta \times \sqrt{1 - n^2 \cos^2 \theta}) \quad (4.7)$$

したがって、主軸 A が一定の角速度 $\omega = d\theta/dt$ で回転するとき、点 Q は点 B の回りに不等角速度

$$\begin{aligned}\omega_Q &= d\varepsilon/dt = (d\varepsilon/d\theta) \cdot \omega \\ &= \{ (n \sin \theta + \sqrt{1 - n^2 \cos^2 \theta}) \\ &\quad / \sqrt{1 - n^2 \cos^2 \theta} \} \cdot \omega\end{aligned}\quad (4.8)$$

なる角速度で半径 R の軌道上を移動する。故に

点 Q の絶対速度ベクトル v_Q は次式 (4.9) のように与えられる。

$$v_\varrho = \text{BQ} \cdot \omega_\varrho = R\omega_\varrho \quad (4.9)$$

次に点 Q に対する点 C の相対速度ベクトル V_c を導くために距離 CQ を求める。ここで、計算を簡単にするために、3.2 節で定義した $a-b=nR$ を使い、 $BC=b=NR$ とおくと、 $AC=a=(n+N)R$ および $CQ^2=AC^2+AQ^2-2AC \cdot AQ \cos(\pi/2-\theta)$ から前出の $AQ=R(n \sin \theta + \sqrt{1-n^2 \cos^2 \theta})$ を代入して、次の CQ 式を得ることができる。

$$CQ^2 = R^2 (N^2 + 2nN + 1 - 2nN \sin^2 \theta - 2N \sin \theta \sqrt{1 - n^2 \cos^2 \theta}) \quad (4.10)$$

したがって、相対速度ベクトル V_c は、式 (4.10) から得られる CQ を用い、次式 (4.11) のように得られる。

$$V_C = CQ \cdot \omega \quad (4.11)$$

また、図16において、 $BC = b$ 、 $BQ = R$ 、 $\angle BCQ = \pi/2 - \phi$ 、 $\angle CBQ = \pi - \varepsilon$ であるから、 $BC \sin(\pi/2 - \phi) = BQ \sin(\phi + \varepsilon - \pi/2)$ を用いると、 $N \cos \phi = -\cos(\phi + \varepsilon)$ が得られる。これに式(4.7)を考慮すれば、次式(4.11')が得られ、 ϕ を求めることができる。ここで、 $N = b/R$ 、 $n = (a - b)/R$ である。

$$\begin{aligned} \cos^2 \phi = & \{1 - n^2 \cos^4 \theta + 2n \cos^2 \theta \sin \theta \sqrt{1 - n^2 \cos^2 \theta} - \sin^2 \theta (1 - n^2 \cos^2 \theta)\} \\ & / \{1 + N^2 + 2N(n \cos^2 \theta - \sin \theta \sqrt{1 - n^2 \cos^2 \theta})\} \end{aligned} \quad (4.11')$$

このとき、点Cの絶対速度ベクトル V は、斜交溝の場合と同様に、 v_Q と V_C を合成したものであり、
図16を参照すれば、

$$V = \sqrt{v_\phi^2 + V_C^2 - 2v_\phi V_C \sin(\epsilon + \phi)} \quad (4.12)$$

のように得られる。また、絶対速度ベクトル V の方向は図16中に定義した角度 θ を用いて表せば、 $V_c \sin(\varepsilon - \pi/2 + \phi) = V \sin\{\theta - (\varepsilon - \pi/2)\}$ から

$$\Theta = \epsilon + \cos^{-1}\{-(V_C/V)\cos(\epsilon + \phi)\} \quad (4.13)$$

を得ることができる。よって、式 (4.13) を用いれば、バイトの先端点 C における中間リンクに取り付いた被削物が主分力、背分力方向に有する x 軸及び y 軸方向の各切削速度ベクトル成分 V_x 、 V_y は

$$V_x = V \sin \Theta, \quad V_y = V \cos \Theta \quad (4.14)$$

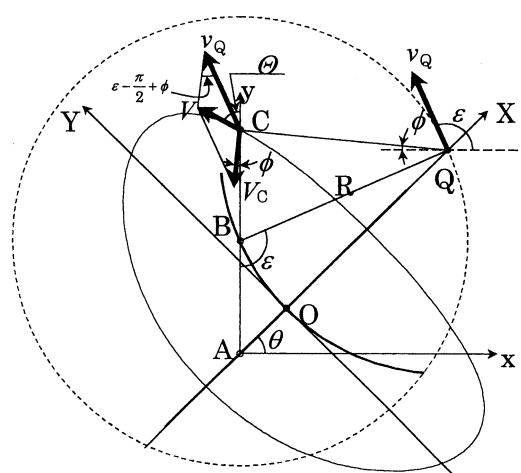


図16 切削速度ベクトル（円弧溝）

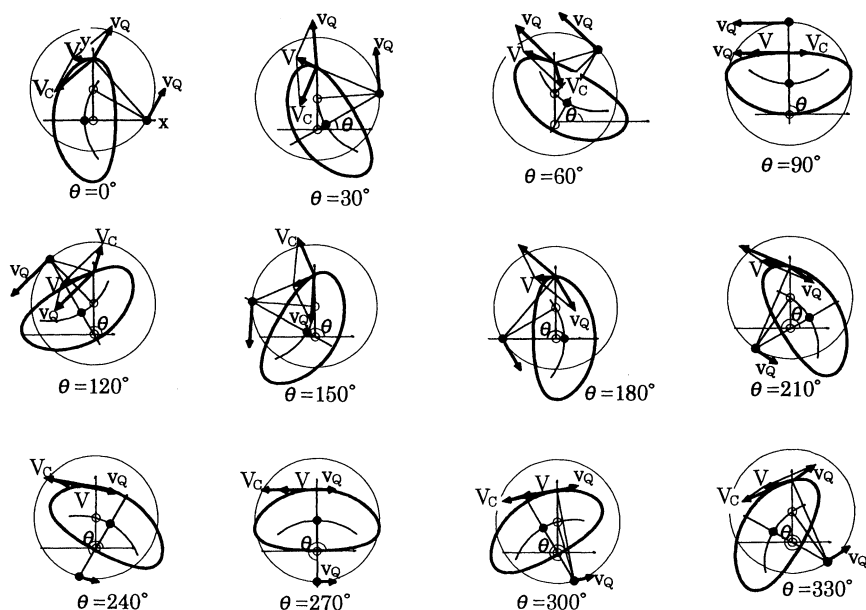


図17 速度ベクトルの大きさと方向変化（円弧溝）

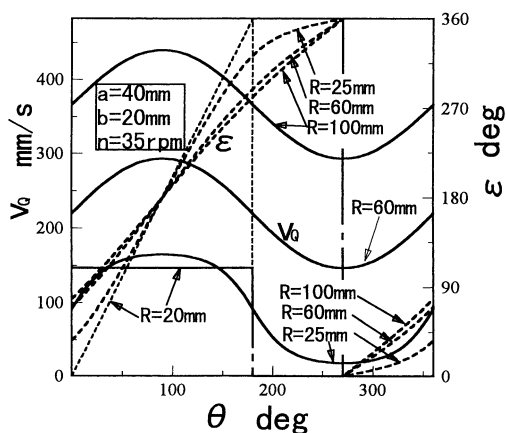


図18 θ に対する v_Q 及び ϵ の変化曲線

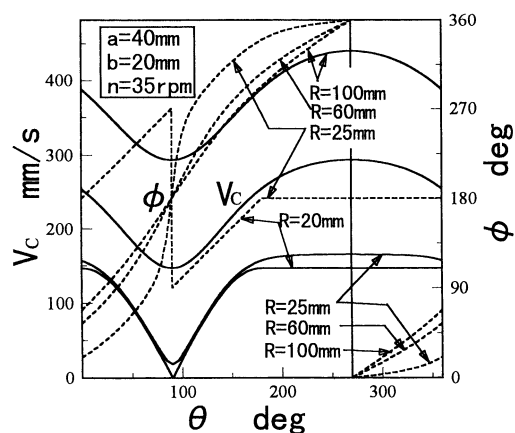


図19 θ に対する V_C 及び ϕ の変化曲線

となることがわかる。

図17は、これらの諸式を用い、 $a=40\text{mm}$ 、 $b=20\text{mm}$ 、 $R=100\text{mm}$ のとき、旋盤の主軸回転数 $n=35\text{rpm}$ とした場合の各切削速度ベクトルの変化の様子の一列をベクトル図に示したものである。また、図18～21は、 $a=40\text{mm}$ 、 $b=20\text{mm}$ 、旋盤の主軸回転数 $n=35\text{rpm}$ のとき、 $R=100$ 、 60 、 25 、 20mm となる場合について、それぞれ各切削速度ベクトルがもつ大きさ、方向並びに x 軸、 y 軸方向成分、すなわち v_Q 、 ϵ 、 V_C 、 ϕ 、 V 、 θ 、 V_x 及び V_y などの変化をグラフ化して示したものである。図中には次報で詳述予定の $2a=b=R$ の場合に得られる半円形状の結果も一部付記されている。

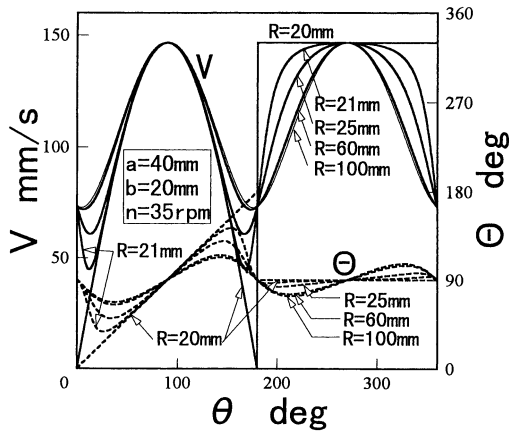


図20 θ に対する V 及び θ の変化曲線

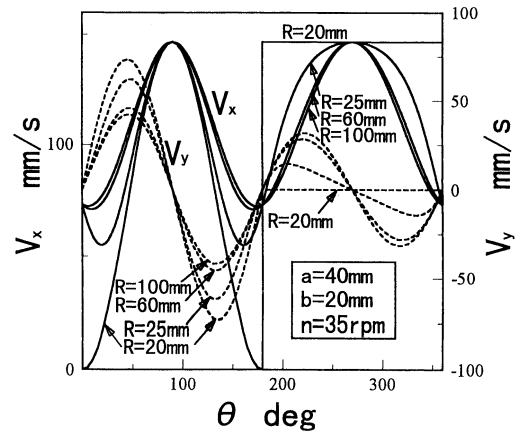


図21 θ に対する V_x 及び V_y の変化曲線

5. 非円形旋削における実験結果

本章では、中間リンク③が、斜交溝や円弧溝をもつとき、実際に旋削を行った結果得られた切削抵抗変化や輪郭精度に与える影響について述べる。

5. 1 実験方法

基本的には前報⁽⁷⁾で述べた楕円加工機による切削実験と同じ条件下で行っている。図22、23は非円形旋削加工の様子を示したもので、池貝鉄工株式会社AM20型旋盤の往復台のベッドフレーム上に非円形旋削加工機構を設置して行った。図24に示す切削力の測定装置は、旋盤の刃物台上に設置し、被削物は中間リンク③と一体のワーク取り付け用円盤に取り付け、固定した。切削力の測定は、前段階として、それぞれの溝形状の中間リンクをもつ加工機で予め

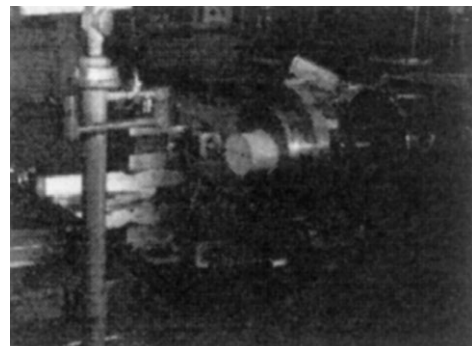


図22 非円形旋削加工の様子（側面撮影）



図23 非円形旋削加工の様子（背面撮影）

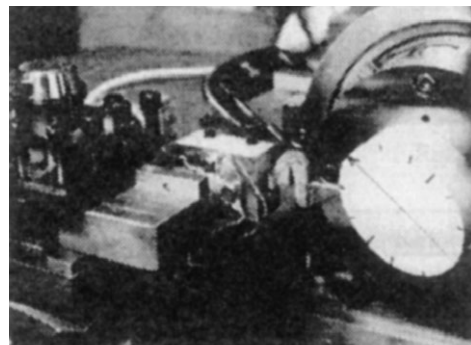


図24 工具動力計

非円形に工作しておき、それに突っ切りバイトを用いて厚さ 3 mm の薄板となるよう切り込みを入れた。実験は、その薄板を半径方向に一定の送りを与えて、主分力と背分力の 2 成分が作用する二次元切削とし、そのときの切削抵抗をバイトと旋盤刃物台との間に動力計を介することによって計測した。工作物の材質には、主として、ABS 樹 (ABS resin)、塩化ビニル樹脂 (PVC resin) を用いた。

5. 2 実験結果

図25に切削抵抗測定時の出力データの一例を示す。図(a)は角度 $\alpha = 60^\circ$ をもち斜交溝の場合で、図(b)は半径 R の円弧溝をもつ場合である。図(a)では、 $2a = 101.4\text{mm}$ 、 $2b = 66.2\text{mm}$ 、主軸回転数 $n = 50\text{rpm}$ 、半径方向送り $f = 0.4\text{mm/rev}$ であり、図(b)では $2a = 102.4\text{mm}$ 、 $2b = 67.3\text{mm}$ 、主軸回転数 $n = 50\text{rpm}$ 、半径方向送り $f = 0.4\text{mm/rev}$ である。

5. 2. 1 斜交溝をもつリンクの場合の切削抵抗変化

図26に角度 $\alpha = 60^\circ$ のときの斜交溝をもつリンクの場合の切削抵抗変化のグラフを示す。A 軸と B 軸の軸心距離はほぼ $a - b = 17\text{mm}$ に設定し、ABS 樹脂と PVC 樹脂の 2 つの被削材について、半径方向送りを $f = 0.3$ 、 0.4 、 0.5mm/rev 、主軸回転数を $n = 50$ 、 100 、 200rpm として旋削加工をした場合の主分力 F_x (白点)、背分力 F_y (黒点) について切削抵抗変化を示したものである。図中の▲、△印は、前述の中間リンク③に設置した X-Y 座標の X 軸、Y 軸がそれぞれ点 A、B、C を結ぶ直線に直角な x 軸に平行となる瞬間位置を示す。同図(a)、(b)は主軸回転数 n を一定としたとき、送り f を変えて測定したものであり、図(c)、(d)は f を一定とし、 n を変えた場合の測定例である。

5. 2. 2 円弧溝をもつリンクの場合の切削抵抗変化

図27は 2 本の溝のうち 1 本の溝が直線で、もう一方が半径 $R = 100\text{mm}$ の円弧溝をもつ中間リンクについて計測した結果の一例である。斜交溝の場合と同様に A 軸と B 軸の軸心距離がほぼ $a - b = 17\text{mm}$ の場合に、ABS、PVC の各樹脂製被削物について、半径方向送り速度を $f = 0.3$ 、 0.4 、 0.5mm/rev 、主軸回転数を $n = 50$ 、 100 、 200rpm にそれぞれ選定して旋削を行った結果、得られたグラフである。

円弧溝の場合の切削抵抗変化は、斜交溝の場合と同様、半径方向送り速度 f が大きくなるにつれ、主分力 F_x 、背分力 F_y とも大きくなり、また主軸回転数 n を大きくすると、切削抵抗の主分力 F_x 、背分力 F_y とも最大値と最小値の幅が小さくなる。さらに、主軸回転角 θ が $0^\circ \sim 180^\circ$ で加工される範囲と

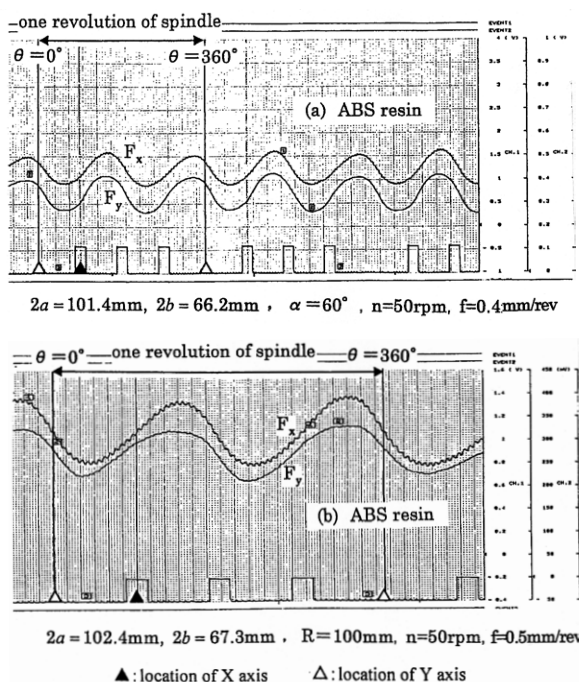


図25 主分力 F_x と主分力 F_y の実測例
(斜交溝、円弧溝)

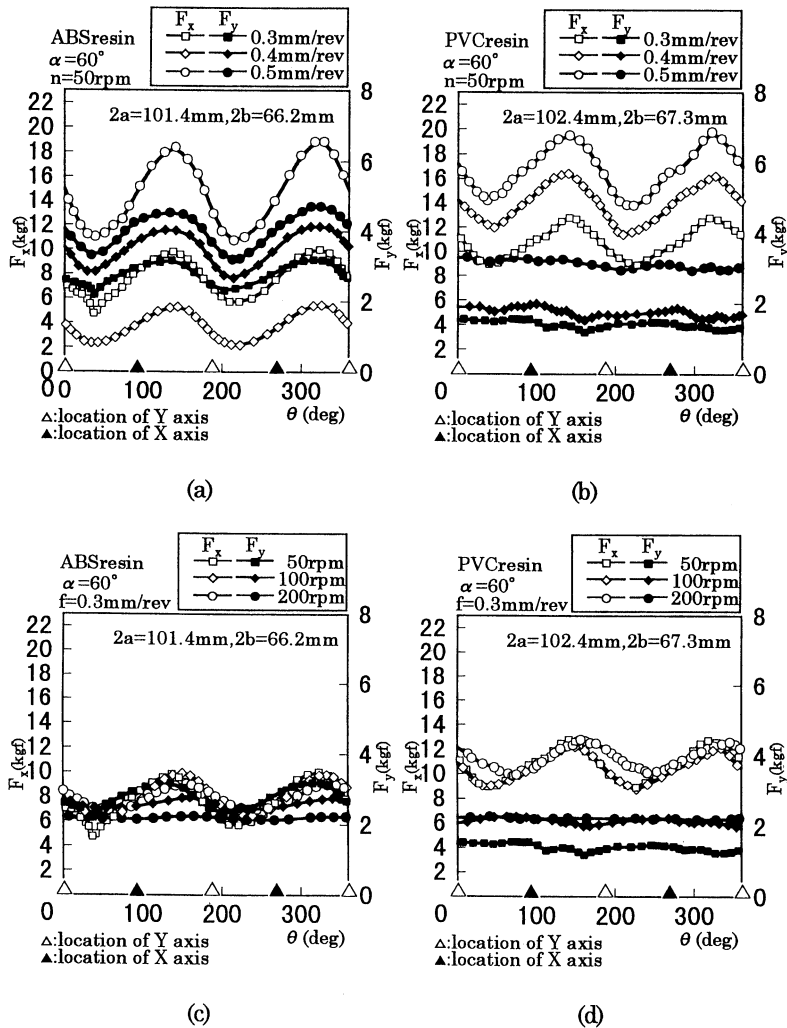


図26 切削抵抗の変化（斜交溝）

180°～360°の範囲では、切削抵抗の最大値と最小値の幅が異なり、前者の方が大きくなる傾向があるようである。これは、図20と比較すると、切削速度のグラフでも同じように最大値と最小値の幅に違いが見られ、これらの影響が現れたものと思われる。

5. 2. 3 斜交溝及び円弧溝をもつリンクによる被削物の輪郭誤差

図28、29は、試作した非円形旋削機構を用いて加工を行ったとき、それぞれ斜交溝及び円弧溝をもつリンクに取り付けられた被削物に与えられた輪郭誤差を調べたものである。創成楕円の輪郭精度の測定は前報⁽⁷⁾と同様の方法を用いて行われた。それぞれの図における各図(b)は溝をもつ中間リンクの部分を除き、全く同じ機構を用いているが、 $a-b=0$ として軸心A、Bを一致させて直径96.5mm（斜交溝）及び91.9mm（円弧溝）の円筒を旋削したときの輪郭誤差を示しており、これらは試作した加工機がもつ精度・性能を確かめるために行われた測定結果である。これによれば、斜交溝及び円弧溝を有する試

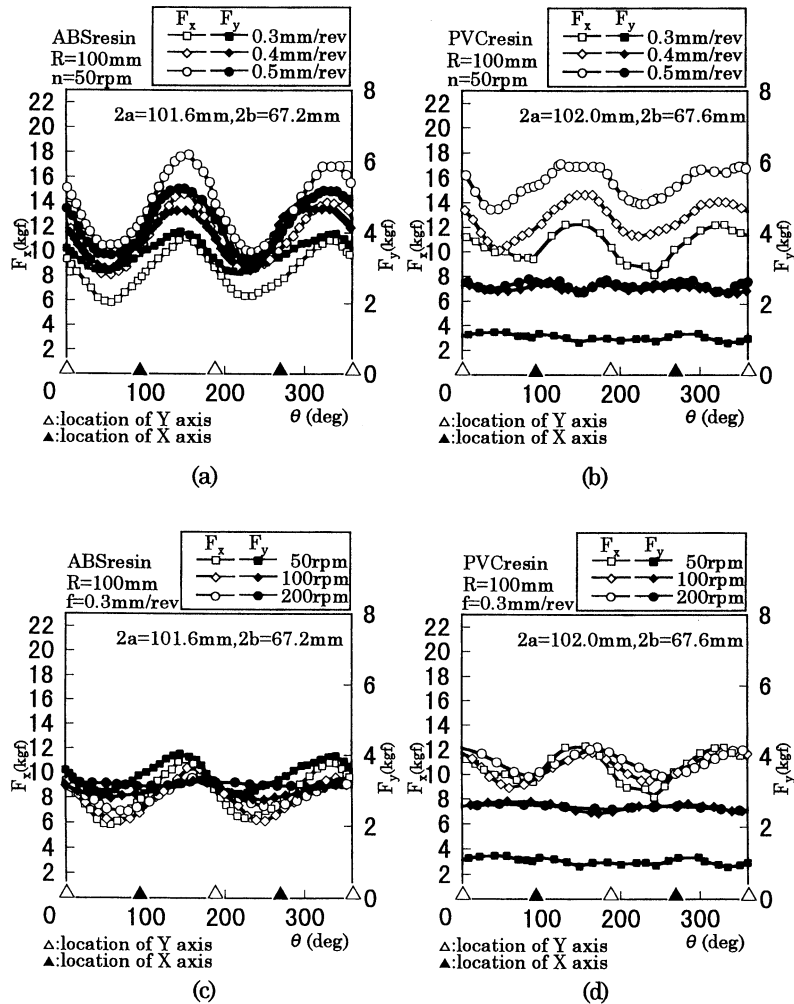


図27 切削抵抗の変化（円弧溝）

作した加工機構はかなりの高精度をもつものであることが分かる。

図28(a)は角度 $\alpha = 60^\circ$ 、 $a-b = 15.4\text{mm}$ 、 $2a = 93.5\text{mm}$ 、 $2b = 62.6\text{mm}$ のとき、被削物がアルミニウム合金の場合に旋削加工を行った結果である。後述するように、主分力 F_x の値が小さく、切削速度ベクトルの主分力方向成分 V_x が大きい値を示すときには、バイトのすくい角変化量 $d\gamma$ は正となる傾向があり、 $d\gamma$ が正のときには切削しやすいため輪郭は理論形状より小さ目となり、また、 $d\gamma$ が負のときには削りにくく輪郭形状が大き目になる傾向を与えるものと考えられる。

図29(a)は、 $R = 100\text{mm}$ 、 $a-b = 13.2\text{mm}$ 、 $2a = 91.7\text{mm}$ 、 $2b = 65.4\text{mm}$ の条件下で、円弧溝をもつ加工機によって旋削加工したときの被削物の輪郭誤差をやや誇張的に表現した同様の図である。

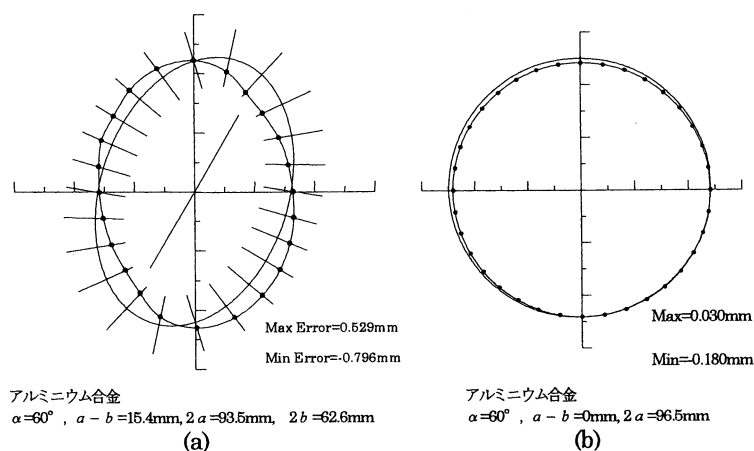


図28 被削物の輪郭誤差（斜交溝）

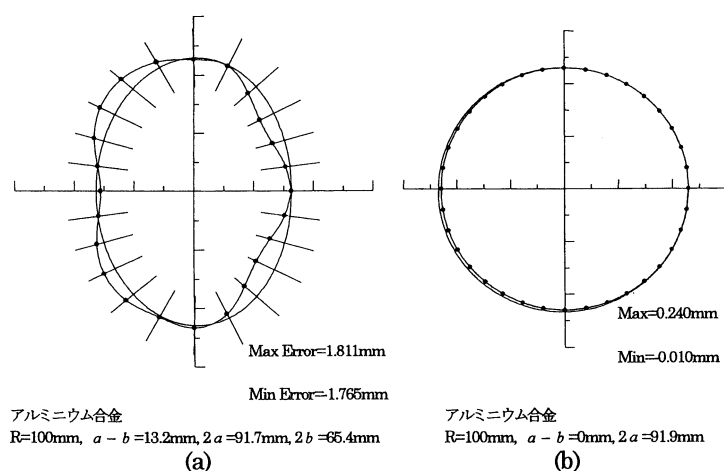


図29 被削物の輪郭誤差（円弧溝）

5. 3 直交溝をもつリンクとの比較

5. 3. 1 斜交溝をもつリンクの場合

図30は、斜交溝をもつリンクの場合の旋削が、直交溝の場合とどのような違いがあるかを示すために、切削抵抗（主分力） F_x と切削速度ベクトル成分 V_x 並びにバイトのすくい角変化量 $d\gamma$ などの関係を調べたものである。図30はABS樹脂を用い、斜交角 $\alpha=60^\circ$ 、 $2a=101.4\text{mm}$ 、 $2b=66.2\text{mm}$ 、主軸回転数 $n=50\text{rpm}$ 、半径方向送り速度 $f=0.5\text{mm/rev}$ の条件下で旋削加工を行ったときの主軸回転角 θ に対する F_x と V_x の関係（図(a)）、 F_x と $d\gamma$ との関係（図(b)）を求めたものである。いずれも実線は $\alpha=60^\circ$ の斜交溝の場合を示し、破線は $\alpha=90^\circ$ の直交溝の場合を示す。図30(a)によれば、主分力 F_x は直交溝のときより、斜交溝の場合にはその値が大きいところで変動し、主分力方向の切削ベクトル成分の変動幅も斜交溝の方が直交溝の場合より大きくなっている。また、すくい角変化量 $d\gamma$ も、同図(b)から $d\gamma$

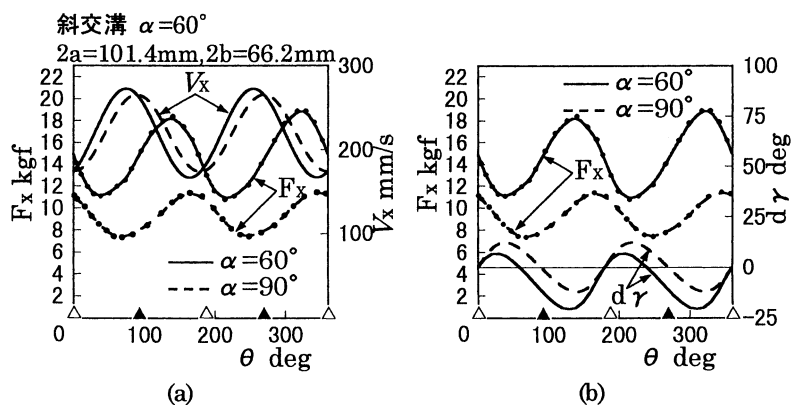


図30 直交溝と斜交溝の場合の V_x 、 F_x 及び $d\gamma$ の比較

> 0 の範囲より $d\gamma < 0$ となる θ の範囲が広がり、それに対応して F_x も直交溝の場合より大きい値のところで変動し、変動幅も大きいことが分かる。

5. 3. 2 円弧溝をもつリンクの場合

図31は中間リンク③が円弧溝をもつ場合について求めた、斜交溝の場合(図30)と同様の、図である。図31は、被削物に ABS 樹脂を用い、 $R=100\text{mm}$ 、 $2a=101.6\text{mm}$ 、 $2b=62.7\text{mm}$ 、主軸回転数 $n=50\text{rpm}$ 、半径方向送り速度 $f=0.5\text{mm/rev}$ において、主軸回転角 θ に対して主分力 F_x とこの方向の切削速度ベクトル成分 V_x の関係 (同図(a))、並びにすくい角変化量 $d\gamma$ と主分力 F_x の関係 (同図(b)) を求めたものである。

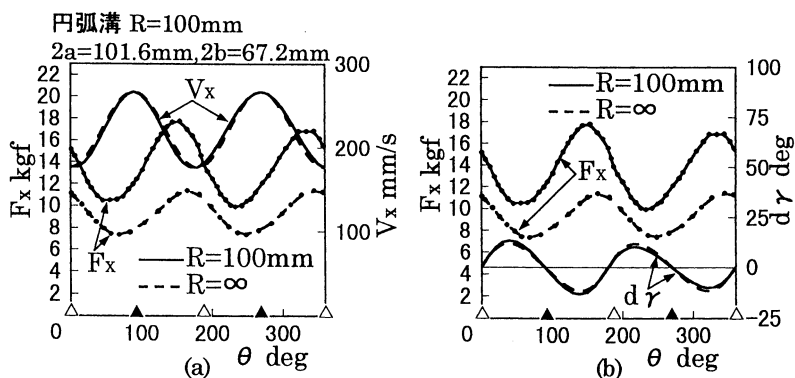


図31 直交溝と円弧溝の場合の V_x 、 F_x 及び $d\gamma$ の比較

6. 結 言

以上、前報⁽⁷⁾の楕円旋削加工機構につづいて、中間リンク③が斜交溝、円弧溝を有する場合の非円形旋削について、創成される被削物の輪郭形状や切削速度ベクトル並びに切削力の変化の様子を理論的、実験的に検討した。本文の中でも指摘したように、斜交溝角 α が小さい場合や、円弧溝の曲率半径 R が小さい場合には、バイトと創成される被削物とのあいだの干渉や主軸 A の回転動力が主軸回転角 θ のある部分で、負となる可能性が生じ得るなど、半円形や多角形旋削への障害を取り除く必要があることが判明したので、これらについては次報で採り上げる。

文 献

- (1) 林 則行・稲田重男・窪田雅男・北郷 薫：機構学，日本機械学会，352.
- (2) 稲田重男・森田 均：機構学，オーム社，188.
- (3) 木村勉・高野英資・田村隆：機械の仕組みと楕円旋削加工について，新潟大工研報告，No. 43, (1994 - 3)，1 - 15.
- (4) 石川好宏・高野英資・木村 勉・田村 隆：楕円加工機構と運動解析，日本機械学会北陸信越支部第32期総会・講演会講演論文集，No. 957 - 1（平成 7 年 3 月 18 日），195 - 196.
- (5) 田中義之・高野英資・田村 隆・石川好宏：楕円旋削における切削力変化，日本機械学会東北支部第32期総会・講演会講演論文集（仙台），No. 971 - 1（平成 9 年 3 月 8 日），308 - 309.
- (6) 田中義之・高野英資・田村 隆：非円形旋削への試み，日本機械学会100周年記念北陸信越支部講演会講演論文集（金沢），No. 977 - 1（平成 9 年 9 月 27 日），373 - 374.
- (7) 高野英資・田村 隆・石川好宏・坂井 淳：楕円旋削機構と切削力の測定，新潟工業短期大学研究紀要，第22号（2003年 3 月），21 - 32.

（平成16年 2 月 5 日受理）