

<報 文>

# ねじれ形状部品の切削加工法の提案

## -1 枚歯はすば歯車の製作 -

Proposal on the Twisted Shape Parts Cutting Methods with NC Machining Tool

岐阜職業訓練支援センター

幾瀬 康史

東海職業能力開発大学校

市川 哲郎

# ねじれ形状部品の切削加工法の提案

## -1 枚歯はすば歯車の製作-

岐阜職業訓練支援センター 幾瀬 康史  
東海職業能力開発大学校 市川 哲郎

Proposal on the Twisted Shape Parts Cutting Methods with NC Machining Tool

Yasushi IKUSE, Tetsurou ICHIKAWA

**要約** NC 工作機械を用いたねじれ形状部品の切削加工において、工具径補正量は、工具径補正方向を直交座標系で見ると 3 次元方向に時々刻々変化するが、ねじれ方向に沿って見ると一定とみなすことができる。さらに直交制御軸（XYZ 軸）と回転制御軸を持つ NC 工作機械を用いると、工具を容易にねじれ方向に移動するヘリカル切削ができる。したがって、ねじれ部品は、ねじれ方向の工具径補正値を導出すれば、3 次元 CAD/CAM を使用することなく加工が可能となる。そこで、本研究では、ねじり形状の部品のねじり方向の工具径補正値を導出する方法を示し、この値を NC 制御装置に組み込まれている簡単な演算機能（カスタムマクロ機能）のみを用いて NC プログラムを作成し、NC 工作機械による加工法を提案する。この加工法の検証のため、NC 工作機械として、回転制御軸と直交制御軸（XYZ 軸）を持つターニングセンタを用いて、直方体をねじった形状を加工している。その結果、形状精度は 60mm 当たり最大 28  $\mu\text{m}$  を得ることができた。この応用として、1 組のインボリュートはすば歯車の加工に適用した。

## I はじめに

一般に NC 工作機械を用いてエンドミルなどの回転切削工具で機械加工する場合、部品の仕上がり形状に対して工具補正を考慮した工具軌跡(カッターパス)を作成する必要がある。特に 3 次元形状やねじれ形状の部品の場合、加工中に工具補正方向が 3 次元方向に時々刻々変化するので、カッターパスを手作業で作成することは困難なため、3 次元 CAD と CAM を用いる必要がある。なお、ねじれ形状部品とは、はすば歯車のように 2 次元形状の部品を厚さ方向に沿ってねじった形状を呼ぶことにする。特に部品を全周加工する場合や部品にアンダーカット部がある場合など、

XYZ の直交制御軸に加え回転制御軸を持つ NC 工作機械が必要となり、さらに 3 次元 CAD と 4 軸または 5 軸のカッターパスを発生できる高額な CAM システムが必要となる。ねじれ形状部品加工についても一般的に回転軸を必要とするので、3 次元 CAD と 4 軸または 5 軸用の CAM が必要となる。

しかし、切削工具としてボールエンドミルを用いてねじれ形状部品の NC 加工する場合、工具径補正方向をねじれ方向に沿って見ると一定とみなすことができる。したがって、ねじれ部品は、ねじれ方向に工具移動を考えれば、工具径補正が簡単になり、カッターパスを容易に作成することが可能となる。これによって、CAD/CAM システムを用いることなく切削加工できると考えられる。

そこで、本研究ではCAD/CAMを用いずに、NC工作機械に組み込まれている演算機能(カスタムマクロ機能<sup>(1)</sup>)のみを用いてボールエンドミルでねじれ形状部品を加工する方法について提案する。今回NC工作機械として、回転制御軸(C軸)と直交制御軸(XYZ軸)を持つターニングセンタを用いている。この切削加工法の検証のため、直方体をねじった形状を加工し、加工精度から評価を行った。その後、応用としてねじれ形状部品の1つである1枚歯のインボリュートはすば歯車<sup>(2)</sup>の切削加工法について示す。

1枚、2枚、3枚、4枚歯の少数インボリュートはすば歯車の創成法による切削加工は、約40年前、職業訓練大学校(現職業能力開発総合大学校)初代校長成瀬政男のもと広田平一らによってはじめて行われ、少数歯車でも滑らかに回転することが確認された。当時、その製作には、フライス盤のテーブル上に割出装置を取り付け、テーブルの左右送りと割出装置の回転を同期させて行うヘリカル加工が適用されていた。切削にはスクエアエンドミル工具の側面の切れ刃が使用され、そのエンドミル工具はインボリュート曲線の特徴を利用して、歯車の基礎円の接線と常に直角になるように配置され(参照図9のa点)、ヘリカル加工を繰り返すことで製作されていた。そのため、この切削法は、ボールエンドミルを用いて工具径補正を行う一般的なねじれ形状部品の加工には適用できない。一方、提案するボールエンドミルによる切削加工法を少数歯車歯車の切削に適用すると、工具の先端が球形であることから工具姿勢を変えられるので、加工に4軸(XYZC軸)のNC工作機械を必要としていたものを座標変換により3軸(XZC軸)のNC工作機械で可能になることや、良好な切削状態を得るために工具姿勢を変更できるなど利点が生まれる。また、今回加工に用いる4軸(XYZC軸)のターニングセンタで広田らの切削加工法で行うとすると、Y軸方向の可動範囲が50mm程度と極めて小さく部品の大きさに制限を受け歯車の刃先円直径が約φ60mm程度のものしかできないが、提案する方法ではφ200mm程度まで可能となる。なお、インボリュート歯車をギヤシェーパーや

ホブ盤を用いて少数歯車を創成する場合、アンダーカットや刃先の尖り等の問題が生じるため、工具圧力角20度の標準歯車では最小歯数17枚で、転移歯車でも7枚が限界となる。また、少数歯車では、かみ合い率は小さくなり、滑らかにかみ合うためには、ねじれ形状つまりはすば歯車にする必要がある。

## II ねじれ形状の加工原理

### 1 工具位置の導出原理

切削工具として、球状のボールエンドミルを用いて加工する場合、工具径補正は切削加工によって生成される表面に対して法線方向に行われる。つまり、この工具補正方向を求めるためには、図1のように仕上がり表面上のO点を通る適切な2つの接線ベクトルを選択し、そのベクトル積 $A \times B$ つまり法線ベクトル $C$ から求めることができる。したがって、工具補正ベクトル $E$ は次式で求められる。

$$E = \frac{A \times B}{|A \times B|} R_b \quad (1)$$

$A, B$  : 仕上がり表面上の接線ベクトル

$R_b$  : ボールエンドミルの半径

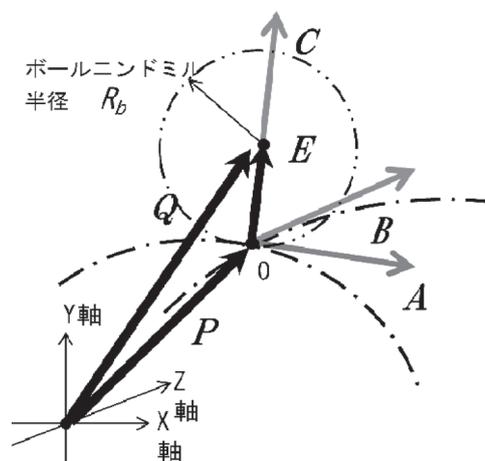


図1 工具補正ベクトル図

さらに工具位置は、図1のO点の位置ベクトル $P$ に工具補正ベクトル $E$ を加えれば求まる。つまり、ボ

ールエンドミルの位置ベクトル  $Q$  は次式となる。

$$Q = P + E \quad (2)$$

加工部品の表面上の任意の点を通る接線ベクトルは無限に存在するので、工具補正ベクトルを簡単に計算するためには、その中から適切な2つの接線ベクトル選択をすることが重要となる。ねじれ形状は、断面形状と厚さ方向のねじれ量によって決まるため、1つは断面形状にのみ依存する接線ベクトル、もう一つのベクトルは、ねじれ量のみ関係する接線ベクトルであることが望ましいと考えられる。他の接線ベクトルは両者の影響を受けるため複雑な値で示される。そこで今回は、図2のようにねじれ形状のねじり軸 (Z 軸) に直交する断面 (XY 断面) に描かれる断面曲線から求まる接線ベクトル  $A$  とねじれ角に依存する接線ベクトル  $B$  を選択した。ベクトル  $B$  は、図のように Z 軸を軸とし、かつ a 点を通る円筒側面上に描かれる曲線から求まる。この曲線は半径  $R$  とリード角  $\alpha$  で定義され、XY の断面形状には、無関係となる。

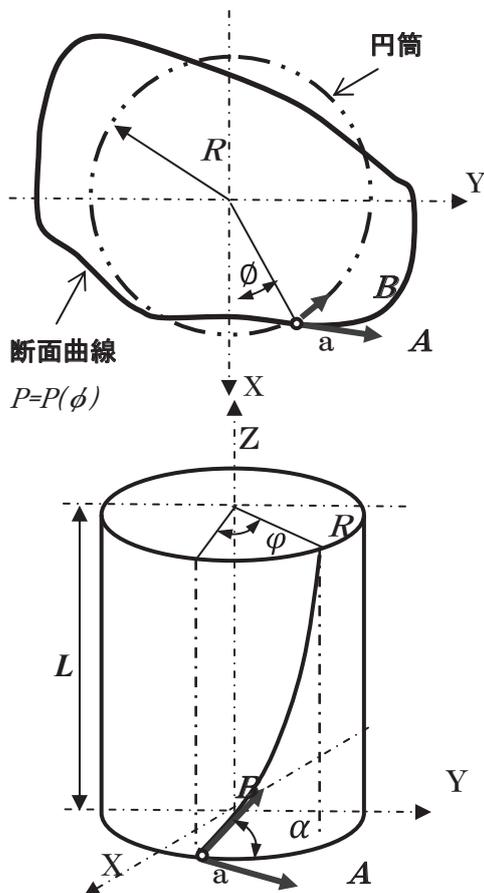


図2 ねじれ形状の接線ベクトル

図2からリード角  $\alpha$  は、

$$\tan \alpha = L / (R \cdot \phi) \quad (3)$$

で求められる。 $L$  はねじれ部品の軸方向の長さ、 $\phi$  は部品の全ねじり角、 $R$  は円筒の半径を示す。ここでねじり形状の断面曲線が回転角  $\phi$  をパラメータとする  $P = P(\phi)$  で与えられるとすると、ベクトル  $A$  は  $dP/d\phi$  で示され、次式となる。

$$A = \begin{bmatrix} dP_x / d\phi \\ dP_y / d\phi \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

また、ベクトル  $B$  は次のように示される。

$$B = \begin{bmatrix} -\sin \phi \\ \cos \phi \\ \tan \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \phi \\ \cos \phi \\ L / (R\phi) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(2)で求められる工具の位置ベクトルは、製品の周りを工具が移動する場合のものである。しかし、NC 工作機械を用いて加工する場合、製品が回転する 경우가多く、工作機械に合わせて回転座標変換をする必要がある。Z 軸まわりの回転座標変換式は次式で示される。

$$G = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

したがって、回転座標変換後の工具の位置ベクトル  $P_r$  は次式で求められる。

$$P_r = GP = G(A \times B) \quad (7)$$

## 2 NC プログラム

次に式(7)で求められた工具位置ベクトルを NC 工作機械に適用する方法について示す。ねじれ形状部品の加工するための NC プログラムは、工具径補正量を計算する必要があるため、通常の NC 言語に加え、NC 工作機械に付属するカスタムマクロ機能の演算機能を用いる必要がある。NC プログラムの流れを図3に示す。はじめに式(1)に基づき加工開始点の2つの接線ベクトルから法線ベクトルを求め、その値から工

具径補正ベクトルを演算し、そして工具位置ベクトルを算出する。その後、ねじれ方向に沿って1回のヘリカル切削をするという一連の流れを繰り返すことで製品を加工している。荒加工と仕上げ加工は、ピックフィードと工具長補正を変えることにより対応している。そのため、加工プログラムは、CAMで作成されるものに比べ、非常に短くすることができる。

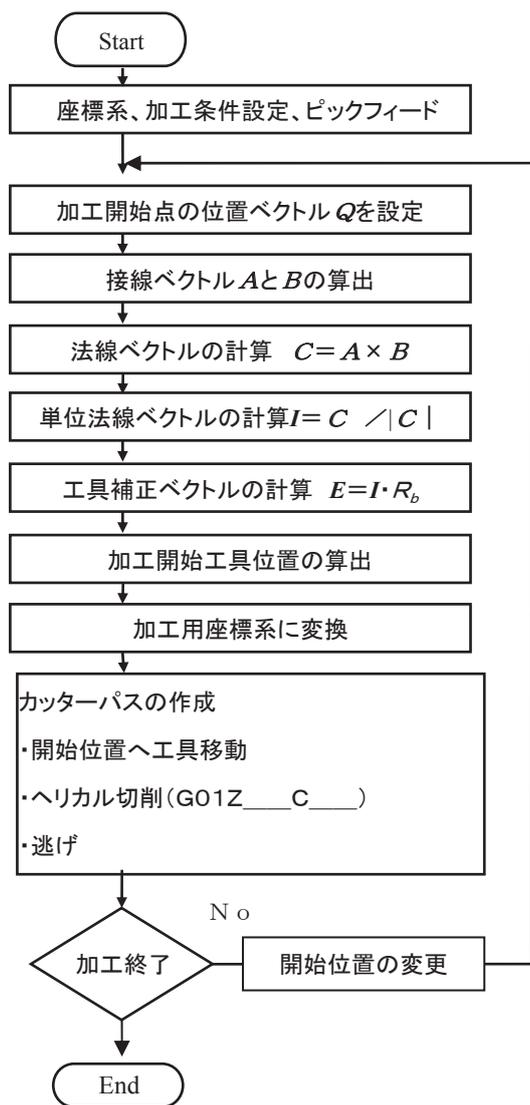


図3 加工プログラムのフローチャート

また、本報告では球状のボールエンドミルを工具としていることから、XY平面内で、工具の座標位置を補正計算用の座標系から加工用の座標系に変換ができる。そこで、プログラムでは、図4に示す2つの座標系を用いた。はじめに補正計算が簡単

きる座標系を選択し、その後、加工用の座標系に変換を行っている。具体的には、図2から求められる工具位置の座標値は、NCプログラムにそのまま適用することは、NC工作機械のストロークの制限や工具と製品の干渉から適用できない。一般的なターニングセンタでは、Y軸の可動範囲は小さくかつX軸は正の値のみという制限がある場合が多い。そこで、図4のように工具中心位置が常にX軸上に存在するように座標変換している。これによって、Y軸およびX軸の制限を受けないことになる。このときの座標変換は次式で示される。なおx y z cは加工用座標値、XYZCは補正量計算用座標値を示す。

$$P = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \\ 0 \\ Z \\ \theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{P_y}{P_x} \right) \quad (9)$$

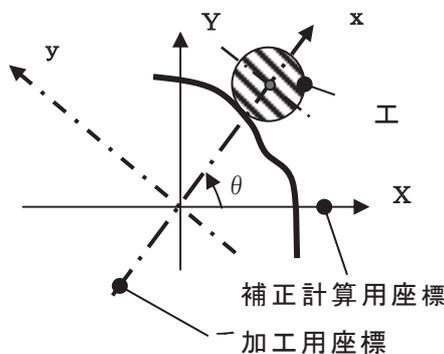


図4 座標変換

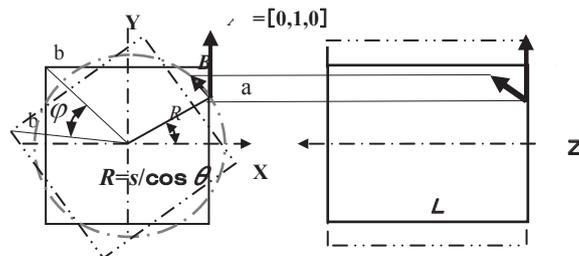


図5 直方体のねじり形状

### Ⅲ 加工事例

#### 1 工具補正の検証

提案したねじり形状部品の加工法、特に工具径補正の是非を検証するために、XY断面が正方形をなすねじり形状部品の試作した。断面が正方形のねじり形状部品の場合、加工が適切に行われているかどうかは、断面形状を測定すれば容易にわかることから、加工法の検証として、断面形状精度の測定結果と幾何学上の正方形とを比較検討した。図5に直方体のねじれ形状の接線ベクトルとパラメータの関係を示す。 $\mathbf{A}$ はXY断面曲線上の点aの接線ベクトルを示し、 $\mathbf{B}$ は点aを通る円筒面上のねじれ方向の接線ベクトルを示す。ベクトル $\mathbf{A}$ は、 $[0,1,0]$ と簡単に表すことができる。したがって、図中のa点における法線ベクトル $\mathbf{C}$ は、次式となる。

$$\begin{aligned} \mathbf{C} = \mathbf{A} \times \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} i & j & k \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & \tan \alpha \end{bmatrix} \\ &= i \tan \alpha + k \sin \phi \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)から法線ベクトル $\mathbf{C}$ は、リード角 $\alpha$ と加工位置のパラメータ $\phi$ で決定されることがわかる。したがって、リード角 $\alpha$ の方向にヘリカル加工すれば、工具径補正量は一定で良いことになり、補正が非常に簡単に設定できることがわかる。さらに法線ベクトルの方向のみ必要なので、大きさを無視し、簡略化すると、次式となる。なお、 $s$ はXY断面の正方形の1辺の長さの1/2、 $L$ は直方体の長さを示す。

$$\mathbf{C}_1 = i \frac{L}{\phi} + k \cdot s \cdot \tan \phi \quad (11)$$

この法線ベクトルをもとに一辺60mmの正方形断面でZ軸方向の長さが140mm、360度ねじった形状を実際に加工した例を示す。加工には、ターニングセンタを使用している。図6に加工した工作物を軸方向105mm(270度)で切断した様子を示す。図7にNCプログラム例を示す。プログラム例は、直方体の長手

方向の一面( $\phi:45^\circ \sim -45^\circ$ )加工を示す。なお、カスタムマクロ機能は工作機械メーカーおよびNC制御装置のパラメータの設定によって多少異なるので、工作機械に合わせてNCプログラムを変更する必要がある。次に提案した加工法で工具径補正が正しく行われているかどうか判定するために、この正方形のねじり部品の断面形状を調べ、評価を行った。図8に正方形の一辺の真直度を調べた結果を示す。60mm当たり最大 $28\mu\text{m}$ の誤差を生じている。工作機械や工具の精度から判断して、この誤差は小さく、工具径補正から生ずるものでないと判断される。したがって、この実験結果から判断すると、この径補正法は適切であると見なせる。

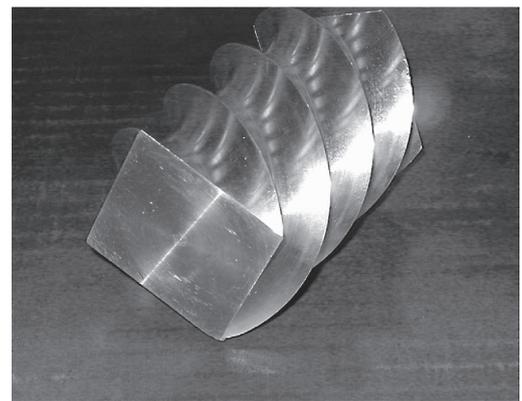


図6 直方体のねじり形状部品

#### 2 1枚歯歯車の製作

提案した径補正法の応用として、半径8mmのボールエンドミルを用いて歯車の製作を行った例を示す。工具径補正の計算を簡単にするため、XY断面の接線ベクトル $\mathbf{A}$ の内、簡単にベクトルが表現できるものを選択している。そして実際に加工する場合には、工具と製品の干渉をさけるためにベクトル計算で求められた工具位置を座標変換している。

図9に径補正計算に用いたインボリュート歯車の接線ベクトル $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ を示す。この場合、工具径補正の常に一定となるように設定している。つまり、Y軸の座標値 $r$ が変化しないように図中の $\theta$ を変化させている。したがって、a点のXYの座標値が $(r \theta, r)$ と

```

直方体のねじれ形状のNCプログラム
◎ワーク原点（Z軸：右端面、X軸：主軸中心）
.
N10      (初期設定)
#1=30.0  (断面：正方形の一辺の1/2)
#2=8.0   (ボールエンドミルの半径)
#3=360.0 (ねじり角度)
#10=1.0  (ねじれ方向 右:1 左:-1)
#4=140.0 (ねじり形状の長さ)
#5=10.0  (工具のアプローチ距離)
#6=20.0  (工具の逃げ距離)
#9=1.0   (ピックフィード)
#7=0     (角度 パラメータ)

WHILE [90.0GE#7] DO01
#15=45-#7 (加工範囲 45° ~ -45°)
N20      (加工点位置ベクトル P)
#17=#1   (i 成分)
#18=#1*TAN[#15] (j 成分)
#19=0    (k 成分)
N30      (XY 平面の接線ベクトル A)
#21=0    (i 成分)
#22=1.0  (j 成分)
#23=0    (k 成分)
N40      (ねじれ方向の接線ベクトル B)
#24=-SIN[#15]*#10 (i 成分)
#25=COS[#15]*#10 (j 成分)
#26=#4/[#1/COS[#15]*#3*3.1419/180.0] (k 成分)
N40      (法線ベクトル C)
#27=#22*#26-#23*#25 (i 成分)
#28=#23*#24-#21*#26 (j 成分)
#29=#21*#25-#22*#24 (k 成分)
N50      (工具位置ベクトル Q)
#30=SQRT[#27*#27+#28*#28+#29*#29]
#27=#27/#30*#2+#17 (i 成分)
#28=#28/#30*#2+#18 (j 成分)
#29=#29/#30*#2+#19 (k 成分)
#14=ATAN[#28]/[#27] (座標変換 C)
#16=SQRT[#27*#27+#28*#28] (座標変換 X)
#7=#7+#9
G00X130.0Z20.0
G00C[#14+#5*#3/#4*#10]
G01X[#16*2]
G01Z[#29+#5]
G01Z[#29-#4-#6]C[#14-[#3+#6*#3/#14]*#10]
G00X130.0
G00Z20.0C#14
M01
END1
.
.
.
    
```

図7 NCプログラム

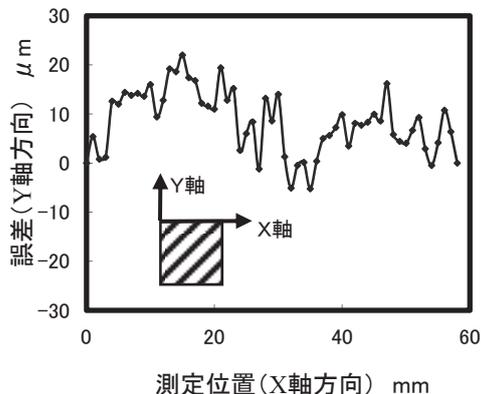


図8 直方体形状の真直度

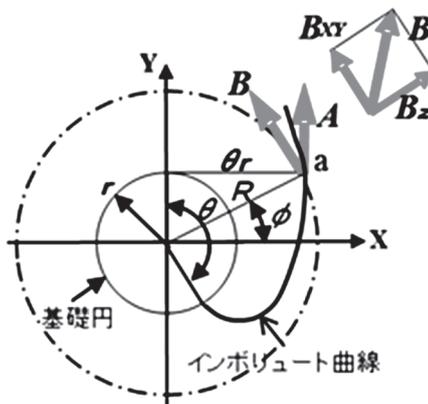


図9 インボリュート曲線

なる。 $r$ は基礎円半径を示し、 $\theta$ は基礎円の回転角を示す。また、 $\sin \phi$ は $r/R$ 、 $\cos \phi$ は $r\theta/R$ で示されるので、式(5)からベクトル  $B$  は次のように示される。

$$B = \frac{r}{R} \begin{bmatrix} -1 \\ \theta \\ \frac{L}{r\phi} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{1-\theta^2}} \begin{bmatrix} -1 \\ \theta \\ \frac{L}{r\phi} \end{bmatrix} \quad (12)$$

よって、計算に用いる接線ベクトルは方向のみが明らかであればよいので、ベクトル  $B$  は  $[-1, \theta, L/r\phi]$  で示される。

さらに式(1)から工具径補正ベクトル  $E$  は次式で求められる。

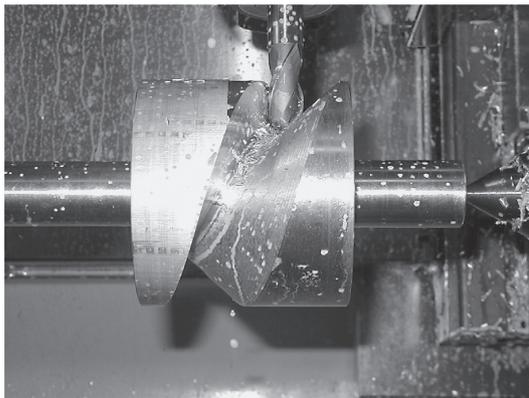
$$E = \frac{R_b}{\sqrt{\left(\frac{L}{r\phi}\right)^2 + 1}} \begin{bmatrix} \frac{L}{r\phi} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = R_b \begin{bmatrix} \sin \alpha \\ 0 \\ \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (13)$$

式(13)をみると、ベクトル $E$ は、基礎円 $r$ 、全長 $L$ 、ねじり角 $\phi$ に依存することから、工具径補正量一定値となることわかる。なお、前述の広田らの少数歯車の当時の製作資料から見ると、半径方向(図9のX軸)の補正として、ねじれ形状による工具補正量とねじれがない場合との差 $\Delta x$ を

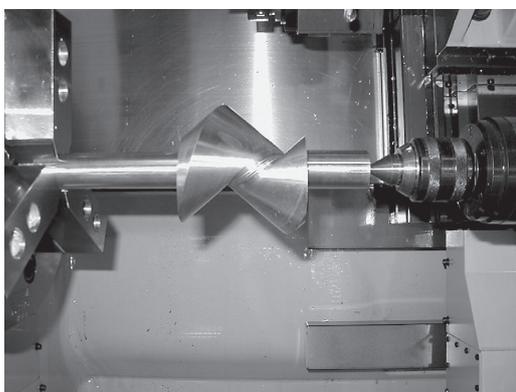
$$\Delta x = R_b(1 - \cos \beta) = R_b(1 - \sin \alpha) \quad (14)$$

で与えている。 $\beta$ はねじれ角を示し、リード角の余角である。

この補正量 $\Delta x$ を同様に変換すると、 $\Delta x = R_b(1 - \sin \alpha)$  となり、広田らの補正量と一致する。

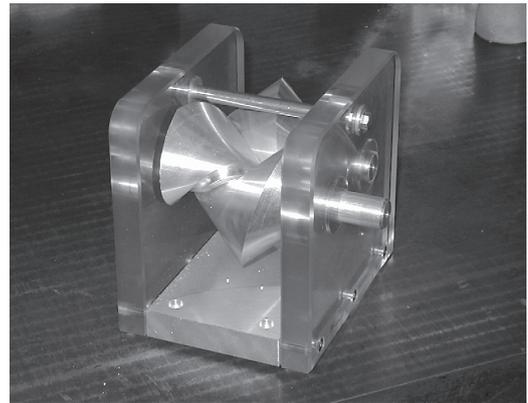


荒加工



仕上げ加工

図10 1枚歯歯車の加工の様子



基礎円直径：24mm 歯厚：90mm

ねじれ角：360度 圧力角：52度

図11 1枚歯歯車装置

また、加工開始点 $a$ の位置ベクトル $P$ は、

$$P = \begin{bmatrix} R \cos \phi \\ R \sin \phi \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \\ r \cdot \theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

示される。よって、工具の位置ベクトル $Q$ は式(2)で与えられる。そして、実際の加工では工具干渉を避けるため、位置ベクトル $Q$ で求められた座標値を式(8)により加工用の座標値に変換している。

図10に1枚歯歯車の荒加工と仕上げの様子を示す。荒加工は、仕上げのNCプログラムを用い、工具長オフセットとピックフィードを変更し加工している。また図11に完成した1組の1枚歯歯車を示す。この加工に要したプログラムは、50行程程度と非常に短くなったが、一個の加工時間は25時間程度と長くなった。その理由として、チャックとボールエンドミル工具または切削工具ホルダーとの干渉を避けるため支持部が細く長くなるので、荒削りでの切込みが大きく取れなかったことと、さらにこの歯車は歯先円と歯底円の直径差が約80mm程度あるため、荒削りを3回に分けて加工を行っている。そのため、提案した加工法は仕上げ面を基準に切削工具移動をしているので、加工を行わない空転時間あることがあげられる。

## IV おわりに

CAD/CAM を用いずに、NC 言語とカスタムマクロ機能だけを用いて、ねじれ形状の部品を製作できる方法を提案した。そして、正方形断面を持つねじり形状部品を製作し、その加工精度から加工法の是非を検討した。その結果、真直度として 60mm あたり  $28\mu\text{m}$  と高い精度で加工できたことから、提案した加工法の工具補正補法は適切なものと判断された。さらに本加工法を用いてインボリュート 1 枚歯歯車の製作を行った。しかし、加工時間についてみると、1 個の歯車の加工に 25 時間程度要しており、CAD/CAM を用いて加工した場合と比べ、加工時間について提案した切削加工法に優位性があるかどうかは今後の課題である。また、本加工事例では、ターニングセンタの刃物台に取り付けられる回転工具の軸方向と製品表面の法線方向とが完全に一致しないが、極めて近い状態で加工している。そのため、ボールエンドミルの先端に近いところで仕上げ加工が行われているので、良好な切削状態とはいえないので、今後さらに加工表面の向上ため、工具位置を回転座標変換して、適切な切れ刃で加工することが望まれる。今後の応用として、立体カムやポンプなど実用的な部品に適用したいと考えている。

### 謝辞

本研究あたり貴重な資料提供、ご助言をいただきました前職業能力開発総合大学校精密機械工学科教授 広田平一氏に深謝いたします。

### [参考文献]

- (1) 例えば、FANUC(株)NC 制御装置取扱説明書 16-MC など
- (2) 成瀬政男：「歯車」現代工学社,P235