

三次元円筒座標系数値制御駆動による複雑形状成形技術の研究

職業能力開発総合大学校 生産機械工学科
教授 松原茂夫
(平成10年度研究開発助成 AF-98019)

キーワード：数値制御成形，チューブ成形，逆張出し成形

1. 研究の目的と背景

板金の伝統的な手加工の方法は汎用の工具により非常に複雑な形状を得ることができるすぐれた長所を持っており、一品生産又は極少量生産に欠くことのできない方法である。しかし、後継者の養成はマンツウマンの指導に頼らざるを得ないが、指導者の高齢化と数が少なくなっている、高い熟練度が必要のため、技能習得に要する期間が非常に長い、板金作業における重筋作業と騒音のため、技能を習得しようとする希望者が少ないなどの問題に直面している。

この問題を解決するため、著者は板金技能の技術化に取り組んできたが、その方法は単純な形状をもつ汎用工具の系統的な運動により成形を行い、製品形状と一対一に対応する金型（専用金型）のすべて、または、一部を不要とするものである。

これまでの研究により、工程（工具運動様式）の開発が容易である、成形品の形状は回転対称だけでなく、非軸対称複雑異形品の成形が容易である、成形限界が高い、金型が不要のため開発工期が短い、少量生産に適する、作業環境はプレス加工に比べて無騒音、安全性が高いなどの長所があることを見いだしている。

本研究においてはチューブ成形、及び、板材成形においてより複雑な形状を成形できる方法を開発することを目的とする。

I 部 チューブ成形

1. 緒言

数値制御工作機械の運動を利用してこれまでにチューブの口絞り¹⁾、口広げ^{2,3)}、管中央部の絞りなど⁴⁾の成形を行ってきた。図1にその方法を示す。この方法においては、機械のベッドと主軸ヘッドの間の最大寸法による制約があるため、扱うことができるチューブ材料の長さを大きくとることができないこと、管中央部の絞り成形に対しては長い工具が必要であること、及び、成形工具の形状をオーバーハングに対応できるようにしなければならないことなどの問題がある。

本報においては、これらの問題を解決することを目的として、円筒座標系駆動形式の数値制御機械によるチューブ

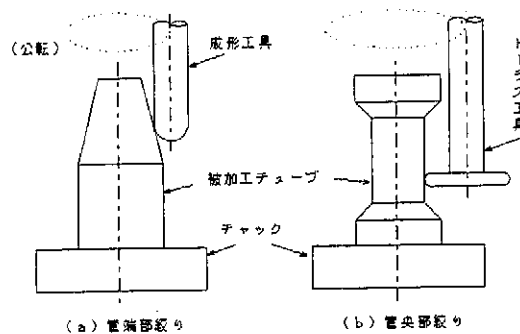


図1 チューブ成形形式（縦型）

成形方法を提案するとともに、対応する機械制御プログラム作成用コンピュータプログラムを開発した。

2. 成形方法

2-1 成形様式

図2に円筒座標系駆動形式の成形方法の様式を示す。成形工具はチューブの回転対称軸と角度（たとえば 90° ）をなして配置される。

図3に成形装置の構造を示す。チューブ材料は回転チャックに固定され、減速機構を経てサーボモータによって駆動される。工具とチューブの相対位置（半径方向、長手方向）、チューブの軸まわりの回転を適切に制御することによって成形を行う。短いチューブ材料に対しては片持ちで成形できるが、長い材料にも対応できるようにチューブの他端を支えることができる従動回転チャックを備えている。これはまた軸方向にも自由にすべることができるとともに、空気圧装置を利用してチューブに軸方向力（引張力、

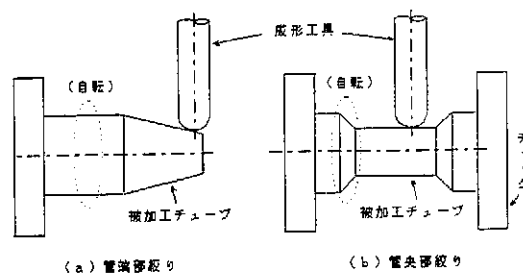


図2 チューブ成形形式（横型）

または、圧縮力)を加えることができる。

2・2 駆動方法

上述の運動を可能とする工作機械は、数値制御の定義によれば、円筒座標系の r , θ , z 軸に対応する軸として、たとえば、それぞれ Z , A , X の各制御軸を備えていればよい。このような機械は一般的ではないので、手持ちの数値制御工作機械(直交座標系同時3軸制御)の運動形式を改造することにより対処した。

Y 軸制御装置を θ 軸の制御に利用することとし、チューブ回転用モータとして Y 軸モータと同じ仕様のサーボモータを入手して使用した。この措置により、コネクタの差し替えだけで結線の変更を完了することができ、制御装置のチューニングも特に必要がなかった。

工作機械の制御軸と成形装置の軸の対応を表1に示す。

3. チューブ表面への模様形成

3・1 模様形成の方法

チューブ表面への比較的浅い溝づけを基本として、模様などのデザインを形成する。しごき方式および圧縮方式をそれぞれ独立に、あるいは、混合して用いることができる。

3・2 モデリング機能

表面に付ける模様を平面上に展開した図形として定義する。その方法として以下に示すものを使用することができる。

(1) 画像データ イメージスキャナ、デジタルスチルカメラ、デジタルムービーカメラなどによる画像データを入力データとして、輪郭抽出などによる二次元位置情報の抽出のほかに、カラーデータ、256階調モノクロームデータの濃度値を高さと関連づけた画像処理を行い高低をもつ形状として扱うこともできる。

(2) ドローイングデータ、文字フォントなど 文字フォントの利用においては一旦画面に表示し、必要であれば伸長、変形などの処理を行った後に輪郭抽出を行う、あるいは、細線化(1ドット幅の線図化)して工具駆動データとする(加工によって実際に生じる幅は成形工具の食い込み深さに依存する)。

画像データのフォーマットとしては、ビットマップの一つであるDIBフォーマットを標準として、これを対象として数値制御プログラムを作成するコンピュータプログラムを作成した。その他のフォーマットの画像データの変換は市販ソフトウェアによって容易に実行できる。

(3) 定形パターン 図4に示すような模様をパターン化しておき、展開する成形範囲、ピッチ、角度、寸法などのパラメータを選択することにより図形を定義する。異なるパターンを組み合わせることもできる。

(4) CADデータ 汎用CADによるデータ(DXFフォーマットによって出力された二次元図形データ)を読み込み使用することができる。

4. 絞り成形

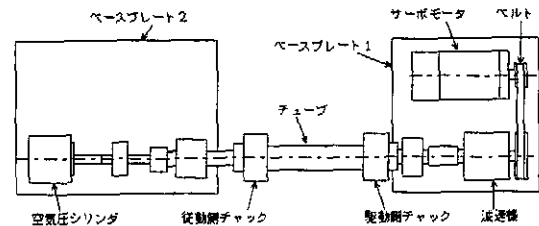


図3 成形装置の構造略図

表1 数値制御工作機械の座標系変換における座標軸の対応

円筒座標	直交座標
r	Z
θ	Y
z	X

4・1 横断面形状

成形目標とする横断面形状として円、楕円、正多角形(コーナまるみ半径を指定可能)、自由形状(スプライン曲線によって定義)により与えることができる。

4・2 縦断面形状

縦断面形状(長手方向形状)としては直線、円弧、自由曲線(スプライン曲線によって定義)により与えることができる。

これらの形状の定義には独自に作成したソフトウェアを用いることができるとともに、市販の汎用CADデータ(二次元図形データをDXFフォーマットによって出力したデータ)を利用することができる。

絞り成形では1工程で大きな加工度を与えることは難しいため多数の工程を要する。最小の成形工程数を実現する途中形状の決定方法はわからないので、素材チューブ寸法、成形目標寸法・形状、及び、指定工程数から幾何学的に内挿によって決めることとした。

途中工程の目標形状の例を図5に示す。横断面形状の与え方については縦型絞り成形における方法⁴⁾と類似している。

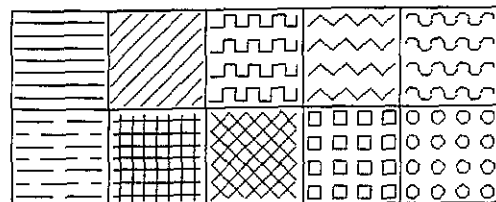


図4 模様の基本パターン

5. 制御プログラム(NCプログラム)の作成

上述のモデルの成形用数値制御プログラムの作成方法は筆者がこれまで種々の逐次成形用に作成してきたもの

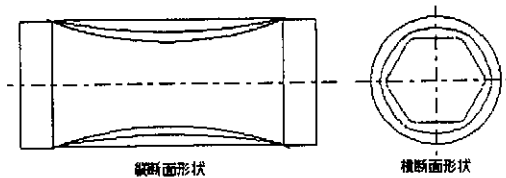


図5 絞り成形における各工程の目標形状

と基本的に同じであるが、機械構造の改造に関する部分について相違がある。

(1) 平面図形をチューブに巻き付けることにより、円筒座標系 (r, θ, z) に変換する。つぎに θ 軸と Y 軸の変換においては $\Delta\theta$ だけ駆動するための Y 軸移動指示値 ΔY は

$$\Delta Y = (\Delta y / 2\pi \cdot n_r) \Delta\theta$$

として与えられる。ここで、 Δy は工作機械のサーボモータ 1 回転あたりの Y 軸移動距離、 n_r は円筒座標系駆動装置のモータ 1 回転に対するチャックの回転数である。

(2) r 軸、 z 軸も表 1 に示すように座標系変換を行い、直交座標系 (X, Y, Z) でデータを構成する。

(3) 数値制御プログラム化する。

なお X, Z, A の各軸を備えた工作機械用の数値制御プログラムも作成することができるようにした。その場合には A 軸の回転指示値 α はラジアンから度に変換するだけでよい。

数値制御プログラムの作成にはパーソナルコンピュータによって実行できるプログラムを作成して使用した。これらの機能を実現するため C++ 言語によって記述し、Windows 95 対応のソフトウェアとして仕上げた。

6. 成 形

成形用のチューブ材料として工業用純アルミニウム (JIS A1050-O) で外径 30mm、肉厚 1mm のものを用いた。先端球半径が 1mm の成形工具を用いて深さ 1mm の模様付けを行った例を図 6 に示す。

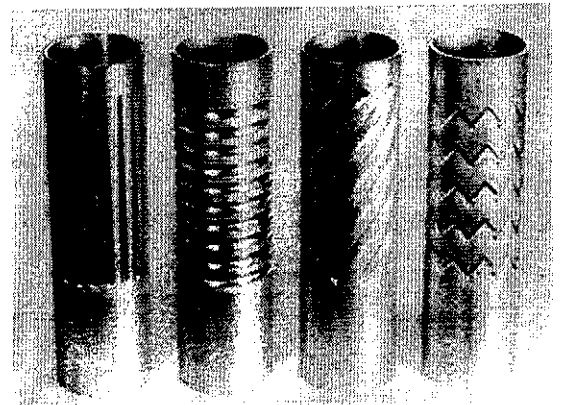


図6 模様付け成形品の外観例

7. 結 言

円筒座標系駆動型の数値制御機械を用いて、円形断面チューブに塑性変形により模様をつける、または、絞り成形をおこなうことができる数値制御プログラムを作成できるパーソナルコンピュータ用プログラムを開発した。

参考文献

- 1) 松原茂夫：塑性と加工, 35-398 (1994), 256.
- 2) 同上：松原茂夫：平 4 年塑加春講論, (1992), 581.
- 3) 同上：45 回塑加連講論, (1994), 761.
- 4) 同上：44 回塑加連講論, (1993), 345.

II 部 板材の部分球への逐次成形

1. 緒 言

多品種・少量生産に適するシステムとして、塑性加工分野においては、専用金型を用いることなく、金属板材を目的形状に成形するインクリメンタルフォーミングに関する研究が盛んに行われている。その形状として、たとえば、異形の横断面形状をもつ錐台形状¹⁾や柱形状の成形ができるが、壺形のような、くびれを持つ (アンダカット部を含む) 形状の成形はほとんど行われていない。

そこで本研究では、アンダカット部を含む成形品を対象とした数値制御逐次成形法の開発を目的として、これまでの円筒座標系駆動によるチューブ成形²⁾とダイレススピニング法³⁾の二つの成形形式を発展させ、板材の逆張り出

成形後、新たに絞り成形を加える成形法を開発した。

2. 成形方法及び成形システム

2.1 成形方法

本成形に用いる成形装置の構造を図 1 に示す。使用する数値制御工作機械 (NC フライス盤) の主軸に取り付けた先端が半球頭形状をもつ成形工具の $X-Z$ 平面上の運動と、スライドプレートに取り付けた被加工材料の回転運動を同期制御させて目的形状の成形を行う。

成形品形状の構成を図 2 に示す。成形品の形状は、主な形状をなす主成形部、変形しない平坦部、主成形部から平坦部への遷移部で構成される。

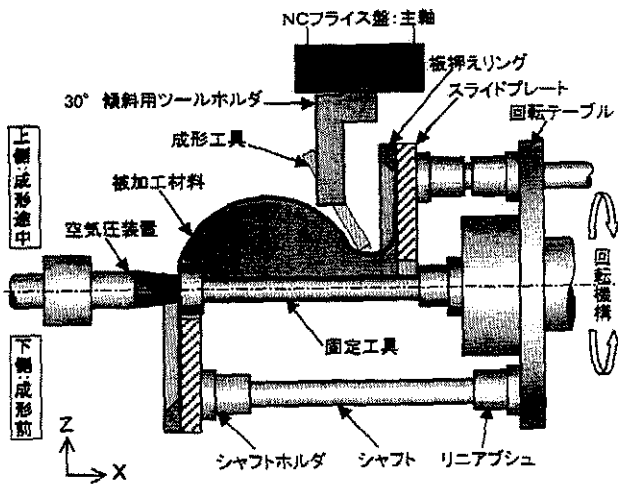


図1 成形装置の構造略図

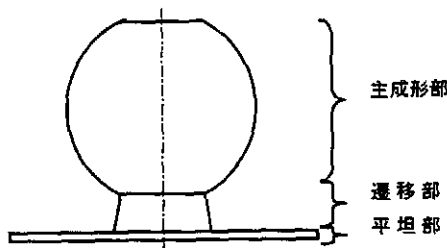


図2 成形品形状の構成

2.2 成形システム

ハードウェアでは、前節に示した成形方法を可能とするため、数値制御工作機械（NCフライス盤）を円筒座標系駆動形式の数値制御成形機械へ改造した。NCフライス盤のY軸制御を本成形装置の回転軸制御に流用した。Y軸の運動（回転運動）と同期させて、X、Z軸を駆動することができるため、軸対称形状だけでなく、非軸対称形状の成形も、機構上可能である。

このように改造した数値制御成形機械の駆動用NCプログラムは、市販されているCAD/CAMシステムでは作成できないので、C言語を用いたプログラミングにより専用のCAMソフトウェアを開発した。このCAMでは、成形品モデルは円筒座標系（ r, θ, z ）で記述され、成形工具の先端球半径分、オフセットされる位置も含めて、成形機械の直交座標系で指令するための座標系の変換が行われる。

3. 成形実験及び考察

3.1 成形実験

今回、成形品モデルの主成形部の形状を直径80mmの球に設定し、遷移部上の経路を直線経路と円弧経路の2方式に分けて、成形実験を行った。図3に遷移部が直線経路、図4に遷移部が円弧経路の例を示す。図中の丸数字は工程順序を示す。被加工材料は工業用純アルミニウム（JIS A1100-0、厚さ1mm、 n 値0.26）を直径200mmの円板に

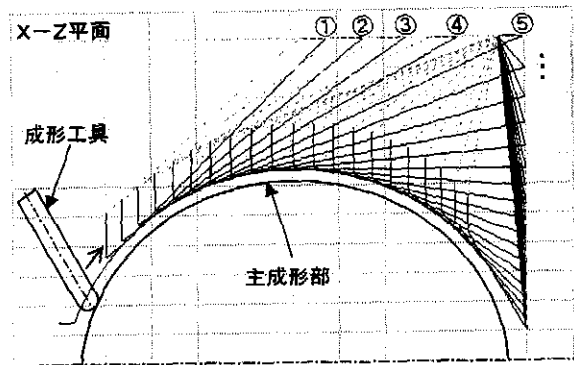


図3 遷移部が直線経路の場合

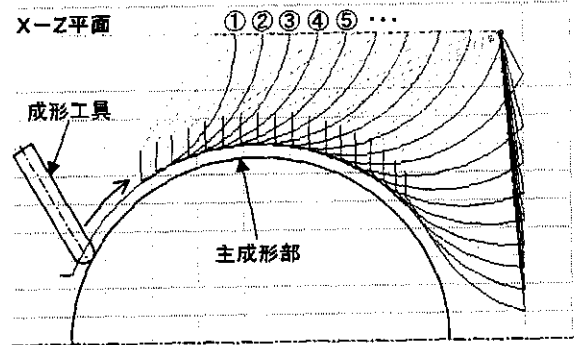


図4 遷移部が円弧経路の場合

切り出して用いた。

3.2 実験結果及び考察

遷移部上の経路が直線経路の場合は、しごきスピニングにおける sine 法則⁹⁾より、遷移部上の経路全体が肉厚の最小領域にあたることから、座屈が起りやすい。また遷移部と平坦部の境界に近い部分で、局部的に材料が伸ばされることから、肉厚の減少による破断が起りやすい。直線経路による成形においては、成形された球面部の面積は球全面積の76%まで成形することができた。

円弧経路の場合では、第2工程以降、円弧半径を徐々に小さくすること、アンダカット成形開始工程から傾き角度ピッチを小さくすることにより破断や座屈を抑え、成形限界を高めることができた。図5に円弧経路における最終工程の円弧半径と成形限界の関係を示す。ここで成形限界と

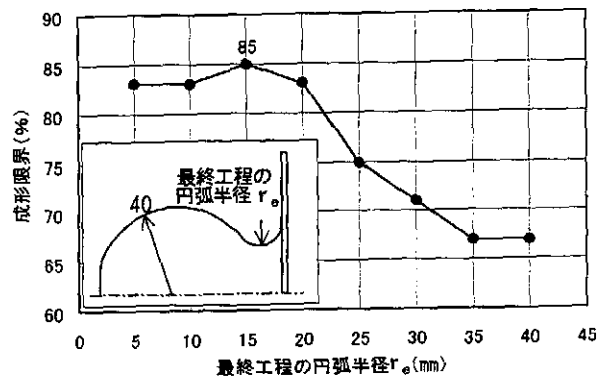
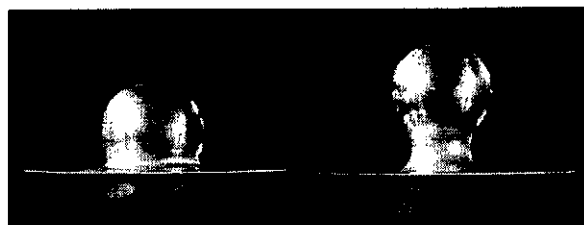


図5 最終工程の円弧半径と成形限界の関係

は、破断や座屈なしに成形できた部分球の面積と全球の面積の割合である。成形限界は最大で85%に達する。

遷移部の成形について、たとえば、成形限界が80%の製品が必要な場合、円弧半径5~20mmの間で選ぶことができる。

直線経路、円弧経路の場合の成形限界経路による成形品を図6に示す。



(a) 直線経路 (b) 円弧経路

図6 成形限界経路による成形品

4. 成形品の検討

直線経路、円弧経路による成形において、第1工程の傾き角度が 30° の場合の成形限界経路による成形品の肉厚分布を図7に示す。厚さひずみと円周方向ひずみ(格子法により測定)から、塑性変形における体積一定法則を用いて算出した子午線方向ひずみの分布を図8に示す。直線経路、円弧経路による成形とも、成形品の肉厚分布、

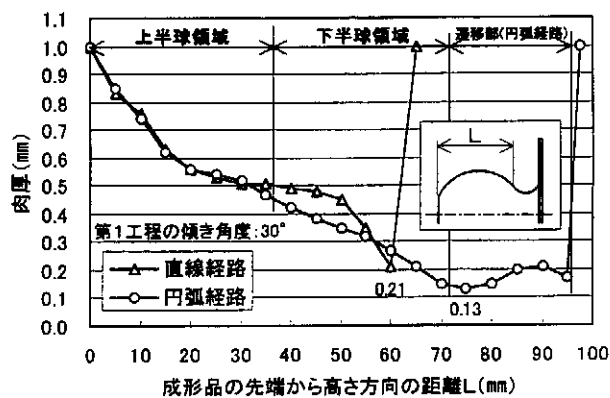


図7 成形品の肉厚分布

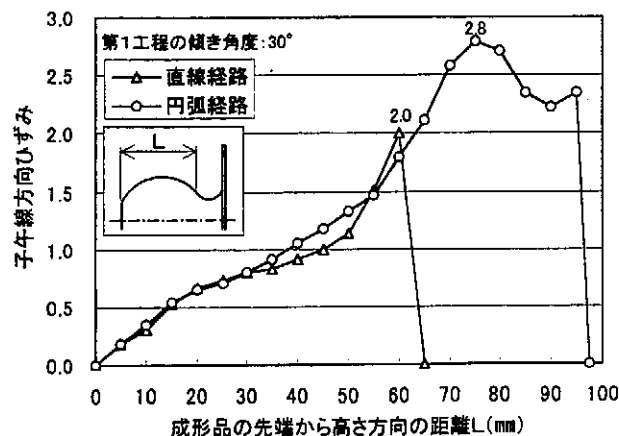


図8 成形品の子午線方向ひずみの分布

ひずみ分布は非常に不均一である。成形限界が最も高い円弧経路による成形品の遷移部においては、アングカット部での肉厚が約 $1/8$ まで減少し、子午線方向ひずみが2.8に達している。また上半球と下半球の境界部分において、1回の工程による成形では、sine法則より肉厚は0mmになるはずであるが、実際には、図7に示すように肉厚は約0.5mmであった。この境界部分は7回の工程により成形されており、かなりの絞り成形が行われることが示された。

本成形法は主成形部、遷移部及び平坦部が一体となった形状が不可避免的に得られることが特徴である。それゆえ、これら全体を製品として使用できる場合に特に有効である。

5. 非軸対称形状への成形

非軸対称形状への成形の可能性を検討するため、今回、直径80mmの部分球を成形した後、その主成形部の横断面形状を中心軸側に押し込む非軸対称化成形を行った。成形品の1回転におけるNCプログラムは、回転軸の 1° ごとの回転に対応するY指令値及びZ位置を求めて、これらの点を直線補間するものとして作成した。

成形品の例として、子午線方向にR溝をつけた形状の正面写真と平面写真を図9に示す。同図より、全体を通して、部分的に成形不良はなく、目的の形状が得られた。表面はこれまでの部分球の成形と同様に、良好な面が形成された。

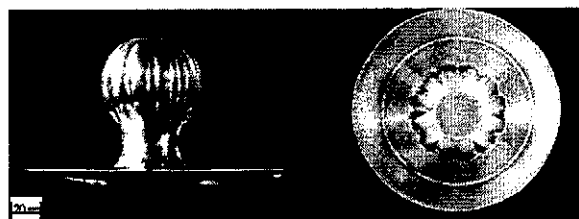


図9 子午線方向にR溝をつけた形状の成形品

6. 結 言

- (1) 試作した成形装置及びソフトウェアによる部分球の成形において、深いアングカット部をもつ形状の成形が可能である。
- (2) 遷移部上の経路として円弧経路を採用したとき、球面部の面積は球全面積の85%まで成形することができる。

参考文献

- 1) 松原茂夫：塑性と加工，35-406(1994)，1311。
- 2) 同上：平10春塑加講論，(1998)，69。
- 3) 同上：平6春塑加講論，(1994)，387。
- 4) 日本塑性加工学会編：スピニング加工技術，(1984)，55。