

# ロボットによるスピニング加工の研究

## — カフィードバック制御を用いたしごきスピニング —

○荒井 裕彦 (産業技術総合研究所 知能システム研究部門)

### Robotic Metal Spinning

#### — Shear Spinning Using Force Feedback Control —

○ Hirohiko ARAI

(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

**Abstract**— Metal spinning is a plasticity forming process that forms a metal sheet or tube by forcing the metal onto a rotating mandrel using a roller tool. This is a study on metal spinning applying robot control techniques such as force feedback control with the aim to develop flexible and intelligent forming processes, and to expand a new application area for robot control. An experimental setup was developed for gathering basic data on the forming process. Some results of preliminary experiments are presented. The influence of the clearance between the roller and mandrel is also discussed. The author proposes applying position/force hybrid control for shear spinning, which is free from fine adjustment of the clearance. The effectiveness of the proposed method was experimentally verified.

## 1. はじめに

本研究では、金属の塑性加工法の一つであるスピニング加工にカフィードバック制御などのロボット制御技術の適用を試みる。それにより加工のフレキシブル化・インテリジェント化をはかり、ロボット制御技術の新たな応用分野開拓を目指す。ここでは研究の背景および目的について述べ、基礎加工データ収集のために試作した実験装置とそれを用いた予備実験の結果を紹介する。またローラとマンドレルの間のすきまの影響について論じる。すきまの微調整が不要な、位置/力ハイブリッド制御を用いたしごきスピニングを提案し、加工実験により効果を確認する。

## 2. 研究の背景と目的

スピニング加工<sup>1,2)</sup>とは、回転する成形型(マンドレル)に板状や管状の素材(ブランク)を加工ローラやへらで押し付けて成形する塑性加工の一手法である(**Fig.1**)。金属を材料とするシェル状の製品の成形加工法として、家庭用容器、装飾工芸品、照明器具、通信機材(パラボラアンテナなど)、ボイラ、タンク、ノズル、エンジン部品、タイヤホイールなどの部品・製品の製造に広く用いられている。この加工法は熟練作業員による高度なものづくりの技能としても近年注目され<sup>3)</sup>、例えばH2ロケットの先端カバーなどがこうした手作業(へら絞り)によって製作されたことが広く知られている。

スピニング加工の特長として、

- プレス成形と比べ複雑な形状の製品が成形可能。
- 成形型が1個のみのため加工の準備が容易。
- 加工力が小さいため設備がコンパクト。
- 切削加工などと比べ材料が節減できる。
- 加工精度が高く、製品の表面性状も良好。

などが挙げられる。すなわち、ラピッドプロトタイプ

ング(b.)やネットシェイプ(d.)といった加工技術における最近の動向と合致する。また、塑性加工において近年注目を集めている逐次成形法(インクリメンタルフォーミング)<sup>4)</sup>の一種として位置づけることもできる。

しかし、その自動化に関しては塑性加工分野の中でも遅れが目立つ。比較的簡単な形状の製品についてはNC自動機(スピニングマシン)による量産化が実現しているが、その教示作業は現在でも熟練作業員の技能に強く依存する。その研究についても他の加工法と比較してかなり停滞しており、国内外ともに大学・研究機関では研究者層が薄い。これは変形機構が三次元的で非常に複雑なためFEMシミュレーション等で十分扱えないこと、制御パラメータが多く機器開発を要することなどが原因と思われる。したがって変形原理も未解明の点が多く、特に絞りスピニングと呼ばれる手法では加工手順も理論的には確立していない。そのため実際の加工では熟練作業員の経験に頼っているのが実状である。

スピニング加工に関する代表的な研究としては次のようなものが見られる。まず、葉山ら<sup>5)</sup>は絞りスピニングにおいてそれまでの機械式テンプレートによる加工ローラの経路を数値制御に置き換え、種々の加工条件を実験的に求めた。川井ら<sup>6)</sup>は過去の加工事例に基づく

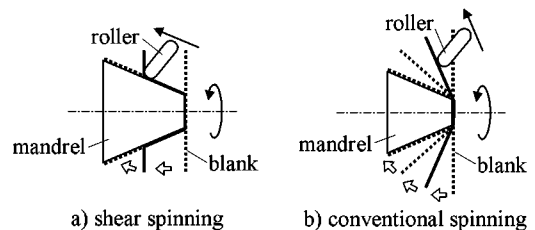


Fig.1 Metal spinning

データベースを構築し、それをもとに加工条件や工程を選定することを提案した。島ら<sup>7)</sup>は2つの加工ローラでワークを挟むことによりマンドレルを用いないスピニング加工法について研究を進めている。また Katupitiyaら<sup>8)</sup>は熟練作業者の技能を自動機による加工プロセスに取り入れるためのシステムを提案している。

一方で、ロボット研究分野においては、大学・研究機関の研究者の非製造業分野への進出志向により、製造業における産業応用の研究には一種の空洞化が生じているという現状がある。そのために産業用ロボットの用途はハンドリング・組立・溶接・塗装など旧来のレパトリーからそれほど広がっていない。こうした用途にのみ目が向けられるために、産業用ロボットは既に成熟した古い技術であるとの見方さえある。

現在の産業用ロボットは、主に熟練を要しないライン作業者の代替に相当する、付加価値の低い単純繰り返し作業に用いられ、高速化による量産能力と低価格化によりようやく採算性を維持している。しかし、製造業における別の生産形態として、経験を積んだ熟練作業者にしかできない、少量でも付加価値が非常に高いものづくりが様々な現場で行われている<sup>3)</sup>。こうした分野に、もっぱらアカデミックなロボット研究として蓄積された感覚フィードバック制御などの技術を活用して進出し、高機能のロボットでも採算の取れる高付加価値の応用作業を実現することができれば、ロボット技術の新たなマーケットが大きく開ける可能性がある。

ロボット工学においてはロボットアームの力制御が長年にわたり研究され、位置/力ハイブリッド制御・インピーダンス制御などに関する多くの理論的・技術的な蓄積を有する。しかし、ロボット研究者の製造業離れとも相まって、実用化されているのは組立・研削などわずかな種類の作業にすぎず、付加価値性の高い有効な応用については未だに模索の状態にある。

手作業によるスピニング加工では作業者の感覚、特にローラを介して伝わる力の感覚が重要な役割を果たすと言われている<sup>3)</sup>。またスピニング加工は局所変形による加工のため、他の塑性加工と比べて加工力ははるかに小さい。制御パラメータが多く加工の自由度が高い点でもロボットに適した作業である。手作業による生産が製造業として成立していることからわかるように、多品種少量生産かつ高付加価値の加工法であり、力制御ロボットの採算性は高いと予想される。

そこで、本研究ではスピニング加工に力制御などのロボット制御技術を導入することにより、加工のフレキシブル化・インテリジェント化をはかる。具体的には加工状態のフィードバックに基づき実時間で加工条件を調整することにより、欠陥の発生を未然に防ぎ、熟練作業者に匹敵する高品質の製品の成形を目指す。またロボット特有の多自由度性を活用して、従来の自動機では実現できなかった複雑な形状の製品の成形を試みる。従来のロボットの作業が「ものを運ぶ」ことを主体としているのに対し、本研究では「ものを変形する」という新たな要素が要求される。したがって、これまでのロボット技術の蓄積を利用しつつも、挑戦的な研究課題の展開が期待できる。

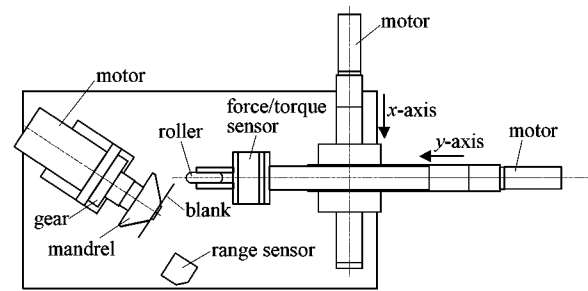


Fig.2 Experimental setup

Table 1 Specifications of each axis

|                    | $x, y$ axis | $\theta$ axis |
|--------------------|-------------|---------------|
| Rated Force/Torque | 580 N       | 3.9 Nm        |
| Rated Speed        | 100 mm/s    | 250 rpm       |
| Resolution         | 0.5 $\mu$ m | 0.009 deg     |

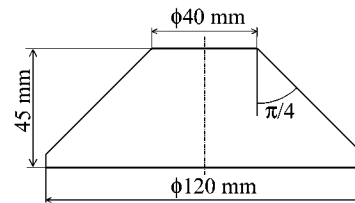


Fig.3 Mandrel

### 3. 実験装置の試作

スピニング加工の基礎実験を行うため、実験装置を試作した。種々の材質・パラメータの下で成形加工を行い、成形の可否、製品形状・肉厚分布、表面性状、加工力などの加工データを収集することを目的とする。特にしわ・破断等の欠陥発生前後の挙動を記録し正常加工時のデータと比較する。

Fig.2 に実験装置の概略図を示す。x 軸、y 軸の直動送りにはそれぞれ DC サーボモータ (60W) によりボールねじ (ピッチ 2mm) を駆動している。成形型の回転軸 ( $\theta$  軸) は DC サーボモータ (120W) を遊星歯車減速機 (減速比 1/10) により減速している。 $\theta$  軸は x 軸に対し  $60^\circ$  傾けて取り付けられている。いずれの軸も角度検出にはロータリーエンコーダ (1000p/r) を使い、カウンタで 4 通倍している。各軸の仕様を Table 1 に示す。

加工ローラは直径 70mm、ローラ丸み半径 9.5mm、材質は工具鋼 (SKD11, 焼き入れ) である。ローラと y 軸の間に 6 軸力センサを装着する。マンドレルの形状を Fig.3 に示す。材質はステンレス鋼 (SUS304) を用いた。また、レーザ式距離センサによりワークに発生するしわを測定する。測定範囲は 80mm、分解能は 0.18mm である。

エンコーダ、力センサ、距離センサの信号は I/O ボードを介してパーソナルコンピュータ (CPU: Pentium, 233MHz) に取り込み、D/A ボードからサーボドライバに電流指令を送る。制御のサンプリング周期は 1ms である。

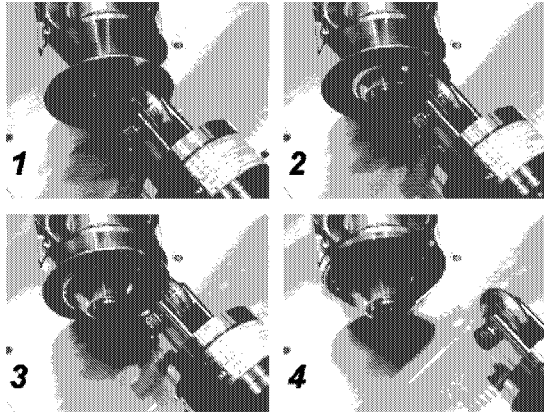


Fig.4 Forming experiment

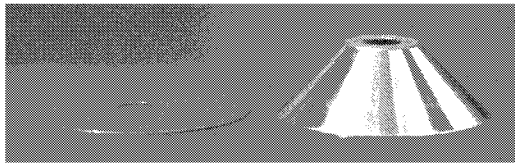


Fig.5 Blank and product

#### 4. 予備実験

上記の実験装置を用いて、加工データを収集する予備実験を行った。加工方法としては、しごきスピニング（ローラをマンドレルに沿って送り、素材をしごいて成形する方法）を試みた。ブランクは直径 120mm、厚さ 0.78mm のアルミニウム円板（A1100-O 材）である。

しごきスピニングの場合、マンドレル側面の回転軸に対する傾きを  $\alpha$ 、元のブランクの厚さを  $t_0$  とおくと、成形後の製品の肉厚は

$$t = t_0 \sin \alpha \quad (1)$$

となることが知られている<sup>1,2)</sup>。この場合、 $t_0 = 0.78\text{mm}$ 、 $\alpha = 45^\circ$  であるから  $t = 0.55\text{mm}$  となる。そこで、マンドレルとローラの間すきまは 0.55mm とした。加工面の潤滑のために噴霧式潤滑剤 CRC5-56 を塗布した。

各軸の制御則として単純な高ゲインの PD 制御を用いた。 $x$  軸、 $y$  軸についてはローラがマンドレル側面と平行な直線上を一定速度で移動するように制御した。また  $\theta$  軸についてもマンドレルを一定角速度で回転させた。加工中の各軸変位、モータ電流指令値、カセンサ信号、距離センサ信号を記録した。

Fig.4 に加工の様子を示す。また Fig.5 はブランクおよび加工結果の一例である。マンドレル形状に沿った成形が行われている。

次に、加工の際にローラが素材に加える加工力を計測した。マンドレル側面に沿ったローラ送り方向の力の成分を  $F_X$ 、マンドレル側面に対する法線方向の成分を  $F_Y$ 、マンドレル回転円周の接線方向の成分を  $F_Z$  と定義する (Fig.6)。横軸をローラの送り変位  $X$  としたときの  $F_X$ 、 $F_Y$ 、 $F_Z$  の変化を Fig.7 に示す。 $X$  方向の送り速度は 0.1mm/s、 $\theta$  軸の角速度は 120rpm

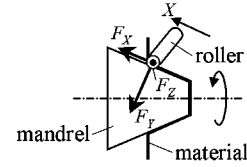


Fig.6 Force components at roller

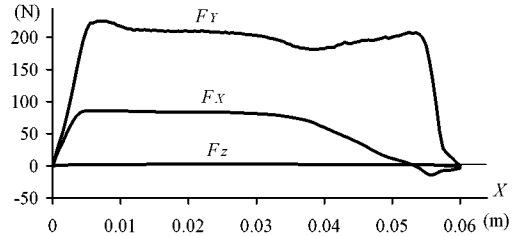


Fig.7 Forming force

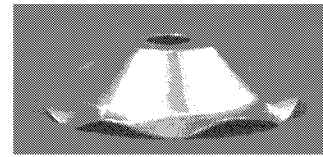


Fig.8 Wrinkled flange

(4π rad/s) である。マンドレル 1 回転当たりの送り量は 0.05mm/rev となる。

$F_Y$  は素材をマンドレルに押し付ける力であり、200N 前後ではほぼ一定である。ローラの送り力  $F_X$  は、加工前半は 90N 程度で一定だが、後半は成形が進むにしたがって次第に減少する。これはフランジ（素材のうち未加工の平板部分）の幅が狭くなってゆくと、フランジの剛性が低くなり抵抗力が減少するためと思われる。加工円周の接線方向の力  $F_Z$  は  $F_X$ 、 $F_Y$  と比べてきわめて小さく、最大で 3N 程度だった。いずれの方向の力も一般の産業用ロボットなどを用いて加えることができる程度の強さである。また、モータ電流は定格値と比べてかなり小さく、トルクには十分に余裕があることも確認した。

加工ローラの送り速度を上げてゆくとフランジが座屈してしわが発生する。しわが生ずると成形が不均一になり品質が低下する。また、しわが深い場合はローラの進行が妨げられ成形自体が不可能になる。Fig.8 にしわが発生した加工結果の一例を示す。

レーザ式距離センサを用いてしわの発生状況を調べた。フランジ外周から約 5mm の点の凹凸を距離センサで計測したものを Fig.9 に示す。このときの  $X$  方向の加工ローラ送り速度は 0.1mm/s、 $\theta$  軸角速度は 60rpm (2π rad/s) である。1 回転当たりの送り量は 0.1mm/rev となる。マンドレルが 25 回転する毎に 1 回転分のフランジ凹凸（ブランク取付面からの距離）を計測し、 $\theta$  軸の角度を横軸としてプロットした。

加工の初期 (No.1~6) はフランジがほぼ平板の状態である。後半 (No.7~12) では、浅かったしわが次第に成長して深くなってゆく様子が見られる。フランジ幅が狭くなり、剛性が不足して平面を保つこ

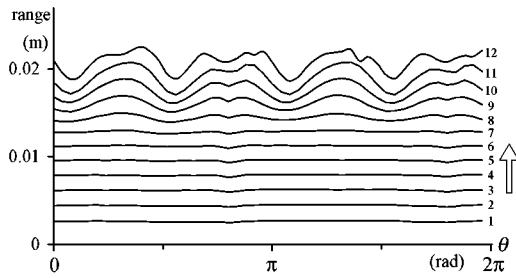


Fig.9 Growth of wrinkle

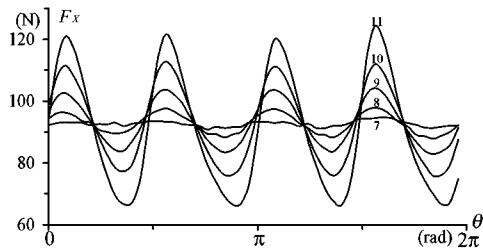


Fig.10 Fluctuation of forming force

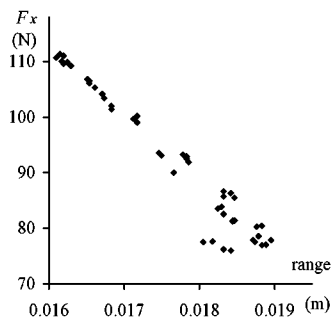


Fig.11 Wrinkle and forming force

とが難しくなるためと思われる。

しわが発生している時の加工力の変化を調べた。

Fig.10はNo.7~11のデータについてローラの送り力  $F_X$  を示したものである。しわが深くなるにしたがって加工力の変動も大きくなっている。No.10のデータについて、フランジの凹凸を横軸に、加工力  $F_X$  を縦軸にとってプロットしたものを Fig.11 に示す。ただし距離センサは加工ローラのちょうど反対側にあるため、 $\theta$ 軸の位相は  $180^\circ$  ずらしてある。フランジの凹凸と加工力の変動の間には、ほぼ線形の関係が見られる。したがって、しわの発生やその大きさを加工力の変動からオンラインで検出できると考えられる。

## 5. すきまの設定

スピニング加工における種々の加工条件のうち、加工装置の制御という観点から特に設定が難しいと思われるのは、マンドレルと加工ローラの間すきま (Fig.12) である。しごきスピニングの場合、成形後の肉厚は式 (1) で表されるため、すきまもそれにしたがって正確に制御する必要がある。すきまが大きすぎる場合、しわが発生しやすく、製品がマンドレルに密着しないため精度が悪化する。またすきまが小さすぎる場合、加工力が著しく大きくなり、材料の流れによって製品がゆ

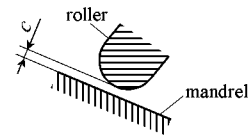


Fig.12 Clearance between mandrel and roller

がむ場合もある。

そのために、あらかじめマンドレルに対するローラの相対位置を精密に位置合わせしておかなくてはならない。またマンドレルの断面形状も正しく把握する必要がある。さらに、加工力が加わった状態でローラの目標経路を正確に追従しなくてはならない。装置の剛性が低い場合は、加工力によるたわみにより設定したとおりのすきまが実現できない恐れもある。

ここで扱っているマンドレル形状は単純な円錐形のため、式 (1) により成型後の肉厚が簡単に予測できる。しかしマンドレル形状がより複雑で側面の傾きが不規則に変化する場合などは、肉厚分布を正確に予測することは難しい。また、1パスのしごきスピニングではなく、素材を段階的に変形してマンドレルに沿う形状に成型する多サイクル絞りスピニングにおいては、最終的な肉厚分布の予測はさらに困難になる。すきまの設定は現場の作業者の経験にかなり依存し、試験的な成形によりすきま調整を行うことも多いようである。

すきまの設定値を幾通りか変えて加工を行い、結果を比較した。さきに述べたように、式 (1) による理論上の製品肉厚は  $0.78 \sin 45^\circ = 0.55[\text{mm}]$  である。加工ローラ送り速度  $\dot{X}$ 、マンドレル回転速度  $\dot{\theta}$  は、しわが発生した前節の事例と同じくそれぞれ  $0.1\text{mm/s}$ 、 $60\text{rpm}$  とした。すきまは  $0.25\text{mm}$ 、 $0.4\text{mm}$ 、 $0.55\text{mm}$ 、 $0.7\text{mm}$  の4通りを試みた。

Fig.13は、レーザ式距離センサにより計測したフランジの凹凸を示す。マンドレルが10回転する毎に1回転分のデータをプロットしてある。すきま  $0.25\text{mm}$  の場合はしわが生じることなく加工が完了している。一方、それ以外の場合は途中で凹凸の振幅が急に増加し、しわが発生していることがわかる。

Fig.14は加工力のうち押し付け力  $F_Y$  を比較したものである。すきまが小さくなるほど  $F_Y$  は大きくなる。また、成形された製品の裏側を調べると、すきま  $0.25\text{mm}$  の場合には全体にわたりマンドレルに押し付けられて光沢が生じている。一方、すきま  $0.7\text{mm}$  の場合には素材表面の仕上げ跡がそのまま残っている。素材がマンドレルから浮いているため、製品の精度も劣ると考えられる。

Fig.15はローラの送り力  $F_X$  である。すきまが  $0.4\text{mm}$  以上の場合には  $F_X$  が変動し、このことからしわの発生がわかる。すきま  $0.25\text{mm}$  の場合には送り力は他の場合よりも小さくなる。

なお、一つの条件について各3回ずつ加工実験を行ったが、同一の条件に対してはしわの発生の有無、しわの深さなどに関してほぼ同様の加工結果が得られ、実験には再現性が認められた。

上記の結果を見ると、すきまが過小となるはずの  $0.25\text{mm}$  の場合に最も良好な結果が得られている。とこ

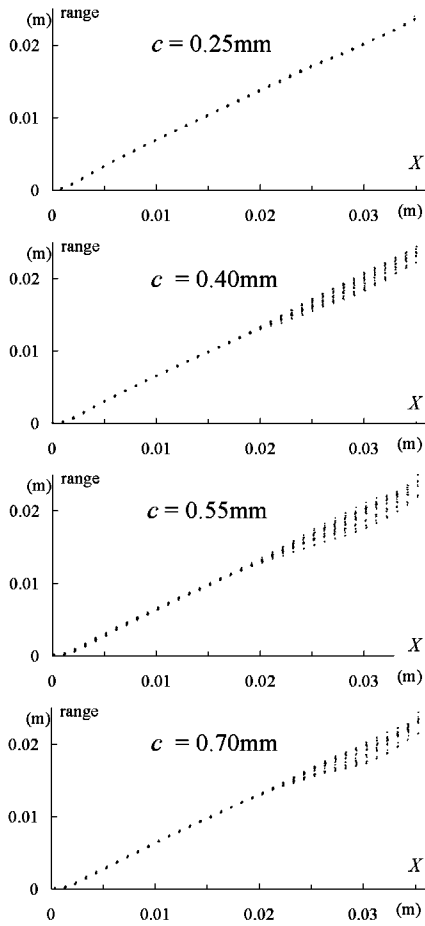


Fig.13 Height of flange

ろが、成形された製品の肉厚をマイクロメーターで実測したところ、すきま 0.25mm の場合、肉厚は 0.55~0.56mm で、式 (1) の肉厚に近い値だった。すなわち、設定が 0.25mm の場合についても、実際にはその通りのすきまが実現されているわけではなく、加工力による装置のたわみのためむしろ理論値に近い適切なすきまが得られていると推測される。この場合サーボ偏差による経路ずれは最大で 0.04mm 程度に相当し、装置の機械的変形の寄与が大きい。逆にすきま設定が理論値に最も近い 0.55mm の場合は、たわみにより実際のすきまが設定よりも大きくなるためにしわが発生すると考えられる。このときの実際の肉厚はフランジ付近で 0.59~0.62mm であり、理論値よりも厚くなっている。

このように、すきまの設定値によって加工結果はかなり違ったものとなる。装置の剛性が低い場合はすきまを式 (1) の理論値より小さくすることが望ましい。しかし、どの程度小さくすればよいかは装置や加工対象に依存するため、試験的な加工が必要となる。逆に、装置の剛性が高い場合は、すきまの設定はよりクリティカルになり、マンドレルに対してローラを非常に正確に動かさなくてはならない。特に薄い板を加工する場合、適切なすきまの許容範囲が狭くなると思われる。

## 6. カフィードバック制御の適用

前章で述べたようなすきまの設定の問題は、加工ローラを位置ベースで制御するために生ずる。製品の目標

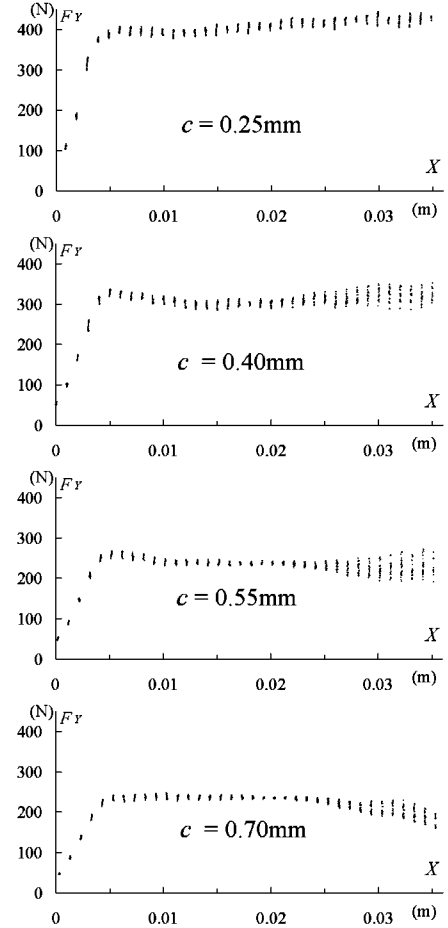


Fig.14 Pushing force  $F_Y$

形状は素材をマンドレルに密着させることで得られるから、マンドレルとローラの上に製品肉厚分のすきまを設けるのではなく、適切な力で素材をマンドレルに押し付けてやればよいと思われる。そこでカフィードバック制御の適用を試みる。

力制御の手法としては、位置と力のハイブリッド制御<sup>9)</sup>を用いた。マンドレル側面に平行なローラ送り方向  $X$  に関しては位置制御により一定速  $\dot{X}_d$  で加工ローラを移動させる。マンドレル側面に対する法線方向については加工ローラの押し付け力  $F_Y$  が一定値  $F_{Yd}$  となるように制御する。位置制御については PD フィードバック、力制御については PI フィードバックを用いた。制御則は以下のように表される。

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} = \mathbf{f}_P + \mathbf{f}_F \quad (2)$$

$$\mathbf{f}_P = \mathbf{M}\mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} k_{vX}(\dot{X}_d - \dot{X}) + k_{pX}(X_d - X) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{f}_F = \mathbf{J}^T \begin{bmatrix} 0 \\ F_{Yd} + k_{pF}(F_{Yd} - F_Y) + k_{iF} \int (F_{Yd} - F_Y) \end{bmatrix}$$

ただし、 $f_x, f_y$  は  $x, y$  軸の駆動力、 $\mathbf{M}$  は  $x, y$  軸の慣性行列、 $\mathbf{J}$  は  $xy$  座標と  $XY$  座標間の変換行列、 $k_{vX}$ 、 $k_{pX}$ 、 $k_{pF}$ 、 $k_{iF}$  はフィードバックゲインである。

この制御則を用いてスピニング加工を行った。ローラ送り速度  $\dot{X}$ 、マンドレル回転速度  $\dot{\theta}$  は、前章と同様

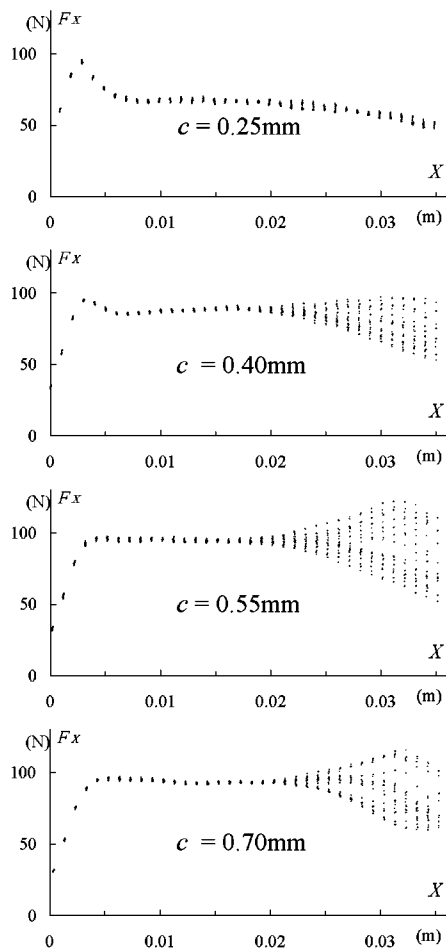


Fig.15 Feeding force  $F_X$

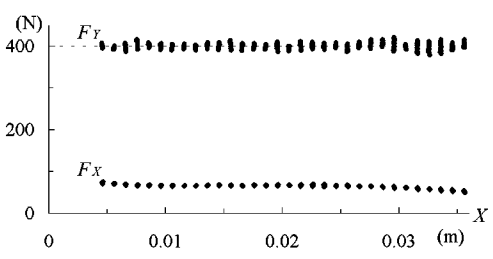


Fig.16 Forming force

にそれぞれ 0.1mm/s, 60rpm とした。ローラの押し付け力  $F_{Yd}$  は、前章の実験で良好な結果が得られたすきま 0.25mm の場合の押し付け力に基づき、400N とした。最初に加工ローラがブランクに接触し素材がローラの曲面部分に合わせて凹むまでは位置制御を適用し、その後位置/力ハイブリッド制御に切り替えて加工を行った。

Fig.16 に加工力  $F_X, F_Y$  の変化を示す。ローラの押し付け力  $F_Y$  がフィードバック制御によりほぼ 400N に保たれていることがわかる。また Fig.17 にフランジの凹凸を示す。ほとんどしわが発生することなく加工が進行している。Fig.18 に本制御則による加工結果の一例を示す。製品の肉厚は 0.56~0.57mm であり、ほぼ式 (1) の理論値通りになっている。

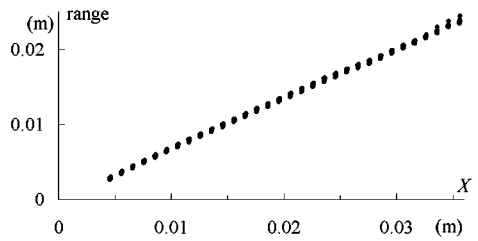


Fig.17 Height of flange

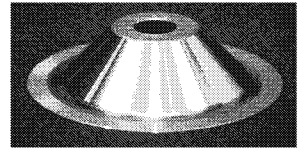


Fig.18 Product by force control

さらに、押し付け力の設定値を  $\pm 10\%$  変化させ、 $F_{Yd} = 360N, 440N$  としてそれぞれ加工を試みた。いずれの場合もしわの発生しない良好な加工結果が得られた。

この手法を用いることにより、マンドレルと加工ローラのすきまを設定することなくスピニング加工が行える。微小なすきまの設定は比較的ラフな押し付け力の設定に置き換えられる。ローラとマンドレルの厳密な位置合わせは不要であり、装置の剛性に関わりなく同じ押し付け力の設定値を用いることができる。また本手法はしごきスピニングだけでなく、多サイクル絞りスピニングの最終段階でマンドレルに素材を密着させる場合にも有効と考えられる。

## 7. おわりに

ロボット制御技術を利用したスピニング加工に関して、研究の背景と目的を述べ、実験装置と予備実験の結果を紹介した。また、マンドレルとローラのすきまの設定について考察し、位置/力ハイブリッド制御を用いたスピニング加工の有用性を実験により確認した。

### 参考文献

- 1) 日本塑性加工学会編：回転加工 - 転造とスピニング -, コロナ社, 1990.
- 2) 日本塑性加工学会編：スピニング加工技術, 日刊工業新聞社, 1984.
- 3) 小関：NHK 人間講座 ものづくりの時代~町工場の挑戦, 日本放送出版協会, 2001.
- 4) 井関ほか：21 世紀のインクリメンタルフォーミング, 塑性と加工, Vol. 42, No. 489, pp. 984-990, 2001.
- 5) 葉山, 中村, 渡辺, 浜野：数値制御スピニング機械によるロールパスプログラミング, 塑性と加工, Vol. 27, No. 308, pp. 1053-1059, 1986.
- 6) 川井, 澤野, 伊藤：スピニングデータベースの試作, 塑性と加工, Vol. 30, No. 345, pp.1411-1415, 1989.
- 7) 島, 小寺, 村上：フレキシブルスピニング加工法の開発, 塑性と加工, Vol. 38, No. 440, pp.814-818, 1997.
- 8) J.Katupitiya, M.W.Yiu and D.Springford: Automation of Metal Spinning Machines Using CNC Controllers and Human Skill Integration, Proc. The 4th Int. Conf. on Motion and Vibration Control (MOVIC'98), Zurich, Switzerland, 1998.
- 9) 吉川：ロボット制御基礎論, コロナ社, 1988.