

# リニアモータを用いた力制御スピニング加工機

荒井 裕彦\*

## Force-controlled Metal Spinning Machine using Linear Motors

Hirohiko Arai\*

Metal spinning is a plastic forming process that forms a metal sheet by forcing the metal onto a rotating mandrel using a roller tool. A novel metal spinning machine was designed in which the roller is directly driven by linear motors. We aim to form non-axisymmetric products by controlling the pushing force of the roller so that the roller can quickly track the changing radius of the mandrel. Our experimental results show that the linear motors substantially improve response of the force control and non-axisymmetric products can be rapidly formed. Open-loop force control without a force sensor was also studied. It exhibited a comparable performance to closed-loop control with regard to the forming time.

**Key Words:** Metal Spinning, Plastic Forming, Linear Motor, Force Control, Impedance Control

### 1. 緒 言

スピニング加工 [1] [2] とは、回転する成形型（マンドレル）に金属板の素材（ブランク）を加工ローラ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、身近な照明器具や調理器具等から、航空宇宙・半導体製造・原子力等の先端産業で用いられる部品の製造まで、広く利用されている。成形型を 1 個しか必要としないため、プレス加工と比べて型のコストが非常に低く、特に多品種少量生産や製品試作に適している。

スピニング加工ではマンドレルおよびワークを回転させながら成形加工を行うため、成形の対象は、通常、回転軸に直交する断面が円形の、軸対称形状に限定される。一方で、楕円形、多

角形、偏心など異形断面形状の製品が成形できるようになれば、スピニング加工の用途はさらに広がると考えられる。

これまでも異形断面形状のスピニング加工のためにいくつかの方法が考案されている。文献 [3] ではカムとリンク機構を用いてローラとマンドレルを同期して動かし、楕円断面のカップ状製品を成形した。また文献 [4] では主軸を平行移動または回転する機構により、パイプ端部を偏心あるいは傾斜軸形状に加工した。文献 [5] では主軸中心からずれて回転することが可能なチャック機構を用いて楕円形状を成形している。これらの方法ではそれぞれの形状に応じて特殊なメカニズムを有する専用の加工装置を必要とする。また文献 [6] では強力なバネを用いてローラをマンドレルに押し付けることで、楕円などの異形断面形状を成形した。一方文献 [7] では、ワークの回転角に同期して加工ローラを半径方向に往復させ、加工ローラとワークの接点が所定の断面形状に沿った軌道を描くように制御して、パイプ端部を楕円・偏心形状に縮径している。

筆者は前報 [8] において、位置/力ハイブリッド制御を用いて、加工ローラを軸方向に送りながら押し付け力を制御し、ローラをマンドレル形状に倣わせることにより異形断面形状の製品を成形する方法を提案した。この方法を用いてアルミニウム薄板を異形断面形状に成形することにも成功したが、マンドレル回転数が上げにくく加工時間が長くなるという問題点が見られた。

そこで、力制御の応答性を改善し加工時間の大幅な短縮をはかることを目的として、リニアモータを用いて加工ローラを駆動する力制御スピニング加工機を開発した。本論文では、試作したスピニング加工機の仕様および評価実験の結果について報告する。

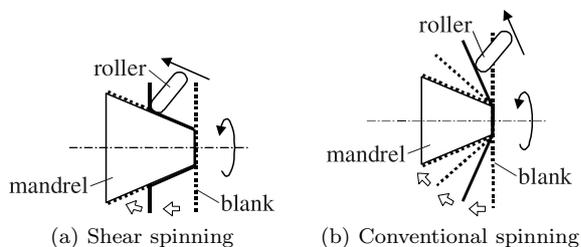


Fig. 1 Metal spinning

原稿受付 2007年2月22日

\*産業技術総合研究所知能システム研究部門

\*Intelligent Systems Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

■本論文は有用性で評価されました。

## 2. 力制御による異形断面形状の成形

文献[8]では異形断面形状の成形のために位置/力ハイブリッド制御を用いた。すなわち、異形断面形状のマンドレルを用い、加工ローラの押し付け力を制御して、素材を適切な力でマンドレルに押し付ける。一方、マンドレル回転軸と平行な方向のローラ送りに関しては、位置制御により一定速で加工ローラを移動させる。マンドレル形状に倣ってローラを動かすことにより、素材をマンドレルに密着させ、目標とする異形断面形状の製品を成形する。

本手法によれば、特殊な専用メカニズムを用いなくても異形断面形状の成形を行うことができ、マンドレルの交換のみで様々な形状に対応可能である。また、文献[7]の方法では、できあがる成形品の精度はローラの軌道を生成するための目標通過点の個数に左右される。しかし本方法では実物のマンドレルを形状の基準としているため、膨大な三次元形状データを制御に使うことなく成形が可能であるという利点がある。

こうした力制御による異形断面形状の成形において、加工時間の短縮は最も重要な課題の一つである。加工時間は(製品高さ)÷(マンドレル1回転当たりの加工ローラ送りピッチ)÷(単位時間のマンドレル回転数)で表される。異形断面形状の成形ではマンドレル回転数をかなり低くする必要があり、それが加工時間増加の原因となる。軸対称形状では通常200~1,500[rpm]程度の回転数が用いられるが、文献[8]の成形実験では15~30[rpm]程度が限界だった。1個当たり10~30[min]程度の加工時間がかかっており、これを大幅に短縮しなくてはならない。

異形断面形状の成形では、加工ローラはマンドレルの断面形状に倣い、マンドレルの回転に従って前進/後退を繰り返す。しかし、回転数が過大になるとローラの運動がマンドレル断面の凹凸に追いつかなくなり、力制御による応答が振動的になって製品の表面が波打ったり、素材の押し付けが不足して製品がマンドレルから浮き上がる原因となる。

一方、加工ローラの送りピッチは、ローラの押し付け力を強くするほど大きく取ることができる[9]。しかし異形断面形状の場合、ローラ押し付け力はマンドレルの回転を妨げるトルクの原因となる。そのため、マンドレル軸を駆動するモータのトルクによっては、ローラ押し付け力をあまり強くすることができない場合があり、結果的に送りピッチも小さくなる。

## 3. 高速化のための加工機開発

加工時間を短縮するために、文献[8]ではローラの動きに応じてマンドレル回転速度を調整する制御アルゴリズムを提案した。しかしこれはあくまで補助的な手段であり、上記のような問題は本質的には加工機のハードウェア設計において解決すべきである。本章では異形断面形状の成形を高速で行うための加工機の開発について述べる。

### 3.1 アクチュエータの選定

加工時間が長くなる原因はいずれも主にアクチュエータの性能不足にあると考えられる。加工機のアクチュエータには次のような特性が要求される。

加工ローラ用アクチュエータ：

- 十分なローラ押し付け力が発生できること。
- 高速で駆動可能であること。また高い加速度が発生できること。
- 高速領域においても力制御が可能なこと。また力制御の応答性が高いこと。
- 摩擦および実効慣性が小さいこと。
- 高いバックドライバビリティを有し、バックラッシュが小さいこと。

マンドレル用アクチュエータ：

- ローラ押し付け力に抗してマンドレルを回転させる十分なトルクを有すること。
- バックラッシュが小さく、外部トルクの急激な変化に耐えること。

文献[8]の装置ではDCサーボモータとボールねじを用いて加工ローラを駆動した。また従来のスピニング加工機では、油圧シリンダが広く用いられている。それらに対し、ここでは上記の要求を考慮して、新たにリニアモータを加工ローラ用の直動アクチュエータとして採用することとする。

リニアモータは電流に比例する推力を発生し、発生した推力をボールねじのような伝達機構を介することなく直接に駆動対象へ及ぼすことができる。伝達機構の機械的特性がループに入らないため力制御の応答性が向上できる。また加工ローラがマンドレルで急激に押し戻されても伝達機構にダメージを与える心配がない。摺動部分を持たないため摩擦摩擦は直線ガイド機構によるもののみであり、油圧シリンダやボールねじ機構と比べて摩擦が小さいと期待できる。市販の製品でも非常に高い速度・加速度を発生できるものがあり、高速の動作が可能である。したがってスピニング加工機において、加工ローラを駆動するための直動アクチュエータとしてリニアモータを用いれば、応答性の優れたローラの押し付け力制御が構成でき、異形断面形状の成形においてマンドレル回転数を大幅に上げられると考えられる。

### 3.2 加工機の試作

加工ローラの駆動用として、具体的にはコア付きコイル可動形のブラシレスリニアサーボモータ(日機電装 NLA-1000NM)を採用した。このタイプのリニアモータは推力密度が高く、小さいサイズでも大推力を得ることができる。またマンドレル回転軸はACサーボモータ(安川電機 SGMAH形)を遊星歯車で減速して駆動する。異形断面形状の成形においてはローラの押し付け力によってマンドレルに正逆両方向のトルクが交互に加わるため、バックラッシュの小さい(<3分)減速機を用いた(ハーモニックプラネタリ<sup>®</sup> HPG形)。ローラ押し付け力に抗してマンドレルを駆動できるように定格トルクには十分な余裕を持たせた。今回試作した加工機と文献[8]で用いた実験装置のアクチュエータの性能比較をTable 1に示す。

試作した加工機の概略図をFig. 2に示す。2組のリニアサーボモータを直交して配置したテーブルで加工ローラを駆動する。加工ローラはy軸に対して45°傾けて取り付ける。ローラ取付部には6軸力センサを備える。またx軸とマンドレル回転軸( $\theta$ 軸)は平行に配置した。異形断面形状の成形の際にはテーブ

Table 1 Specification of actuators

	new machine	setup of Ref.[8]
actuator for roller	linear servo motor	servo motor + ball screw
continuous force	1000 N	580 N
peak speed	3.0 m/s	0.17 m/s
actuator for mandrel	servo motor + planetary gear	servo motor + planetary gear
continuous torque	14 Nm	3.9 Nm
rated speed	270 rpm	250 rpm

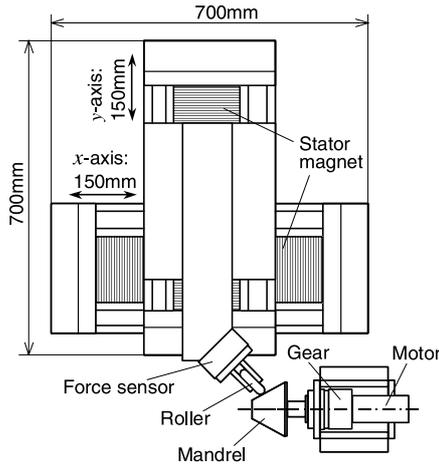


Fig. 2 Linear-motor-driven metal spinning machine

ル上側の  $y$  軸のみを力制御することにより、 $y$  軸モータと加工ローラだけがマンドレルに依って半径方向に高速で往復するため、実効慣性を小さく抑えることができる。

#### 4. 評価実験

##### 4.1 パラメータ同定

Fig. 3 に完成した加工機の写真を示す。初めに、各軸に一定速度入力・一定加速度入力を与え、クーロン摩擦、粘性摩擦係数、慣性を同定した。Table 2 に各パラメータをまとめる。

$x$ 、 $y$  軸のクーロン摩擦が予想外にかなり大きな値を示している。これは固定子の永久磁石とコア付き可動子との間に約 12,000 [N] という極めて強い吸引力が働くため、ガイド機構のリニアベアリングで大きな摩擦が発生してしまったためである。この点ではモータの選定に再考の余地があると思われる。とはいうものの無負荷状態で最大推力 3,000 [N] を加えたときの加速度は 6.9 [G] となり、マンドレルの凹凸への追従能力は十分と考えられる。

##### 4.2 制御則とその評価

スピニング加工には様々な手法があるが、そのうちで成型型側面に沿って板をしごくように工具を送り、1パスで成形を行うしごきスピニング (Fig. 1 (a)) を考える。この加工において、ローラ押し付け力については、マンドレル側面に対する法線方向の成分がほぼ一定となるように制御する。異形断面のマンドレルではローラ接点における法線方向が回転中に変動するた

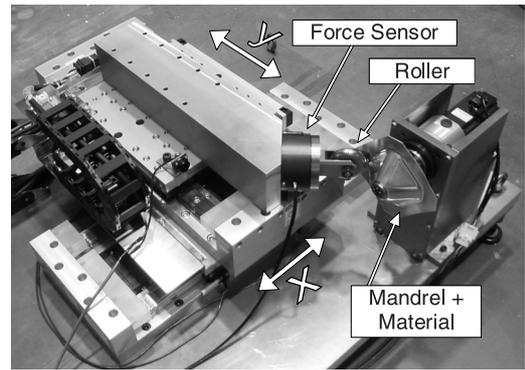


Fig. 3 Photo of linear-motor-driven metal spinning machine

Table 2 Dynamics parameters of each axis

	$x$ -axis	$y$ -axis	$\theta$ -axis
coulomb friction	100 N	97 N	1.0 Nm
viscous friction	153 Ns/m	153 Ns/m	0.07 Nms/rad
inertia	116 kg	43 kg	0.013 kgm <sup>2</sup>

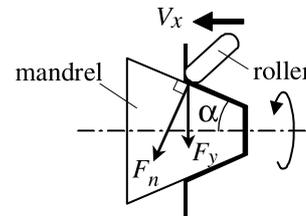


Fig. 4 Force control of roller

め、法線成分を一定方向の成分で近似する。マンドレルの代表的な円錐半角を定数  $\alpha$  とおき、マンドレルの半径方向に対して  $\alpha$  だけ傾いた方向の力成分を  $F_n$  とする。 $F_n$  が一定値  $F_{nd}$  となるように、半径方向の力成分  $F_y$  を制御する (Fig. 4)。 $F_n$  は厳密には法線方向成分と異なるが、マンドレル側面の主な傾き角は考慮されるので、法線方向にほぼ一定の力でローラを押し付けているとみなすことができる。

一方、マンドレル回転軸と平行な方向のローラ送り速度  $V_x$  に関しては、位置制御により一定速  $V_{xd}$  で加工ローラを移動させる。こうすることで、ローラが異形断面形状のマンドレルに依って半径方向に動いても、ローラの軌跡はフランジ (素材のうち未加工の外周部分) と同一の平面上に保たれ、フランジのしわを防ぐことができる。

本機ではマンドレル回転軸と  $x$  軸が平行であるから、 $x$  軸と  $y$  軸に独立の制御則を構成することができる。 $x$  軸に関しては通常の PD フィードバックによる位置制御を構成した。

$$f_x = m_x \{k_{vx}(V_{xd} - \dot{x}) + k_{px}(V_{xd}t - x)\} \quad (1)$$

$f_x$  は  $x$  軸モータ推力、 $m_x$  は  $x$  軸慣性、 $k_{px}$ 、 $k_{vx}$  はフィードバックゲインである。

$y$  軸に関しては仮想内部モデルによるインピーダンス制御則 [10] を用いた。まず押し付け方向の力成分が  $F_{nd}$  となるための  $y$  方向の力  $F_{yd}$  を求める。 $F_n$ 、 $F_x$ 、 $F_y$  の間には

$$F_n = F_x \sin \alpha + F_y \cos \alpha \quad (2)$$

という関係が成り立つので、

$$F_{yd} = (F_{nd} - F_x \sin \alpha) / \cos \alpha \quad (3)$$

とおいた。  $x$  方向の力  $F_x$  は力センサによる実測値を用いた。慣性  $M_y$ 、粘性摩擦  $B_y$  からなる仮想インピーダンスを設定し、  $y$  軸の目標加速度  $\dot{V}_{yd}$ 、目標速度  $V_{yd}$  を求める。

$$\begin{cases} \dot{V}_{yd} = (F_y - F_{yd} - B_y V_{yd}) / M_y \\ V_{yd} = \int \dot{V}_{yd} dt \end{cases} \quad (4)$$

$V_{yd}$ 、 $\dot{V}_{yd}$  を以下の速度制御則に入力すればよい。

$$f_y = m_y \{ \dot{V}_{yd} + k_{vy}(V_{yd} - \dot{y}) \} \quad (5)$$

$f_y$  は  $y$  軸モータ推力、 $m_y$  は  $y$  軸慣性、 $k_{vy}$  はフィードバックゲインである。高ゲインの速度フィードバックでクーロン摩擦の影響も抑制することができる。これにより仮想インピーダンス  $M_y$ 、 $B_y$  を介して目標の力  $F_{yd}$  を加えた状態が実現できる。

この用途では、加工ローラとワークがリジッドに接触し、接触点に大きな力を加えつつ、接触点の位置が高い速度・加速度で動く、という非常に厳しい条件の下で力制御を行う必要がある。また制御に起因する発振等は品質の劣化に直結するため、力制御はどんな場合にも安定なものでなくてはならない。そのため、加工の前に実験的に力制御則の評価を行い、試行錯誤により制御パラメータを決定した。偏心した円盤状のステンレス製カム（直径 110 [mm]、10 [mm] 偏心）を、マンドレルの代わりに  $\theta$  軸に取り付け、力制御により加工ローラを押し付けつつカムを回転させて、加工状態を模擬した。

力制御の応答性を改善するためには、インピーダンス制御則のパラメータ  $M_y$ 、 $B_y$  をなるべく小さい値とする方が望ましい。ところが慣性パラメータ  $M_y$  が実際の  $y$  軸慣性（43 [kg]）を下回ると発振が生じた。発振の周波数は 90 [Hz] で、ローラを剛体壁に押し付けて  $y$  軸モータ推力を加振した際の共振周波数 90 [Hz] と等しい。そこで慣性パラメータには多少余裕を持たせて  $M_y = 55$  [kg] と設定した。一方、粘性摩擦  $B_y$  は、変化させてもあまり大きな影響が現れなかったため、実際の値とほぼ等しく、 $B_y = 150$  [Ns/m] と設定した。また各フィードバックゲインは  $k_{px} = 5,000$ 、 $k_{vx} = 200$ 、 $k_{vy} = 360$  とした。

### 4.3 成形実験

文献 [8] と同じく 2 種類の異形断面形状マンドレル（Fig. 5）を用いて、成形実験を行った。マンドレル 1 は半角  $45^\circ$  の円錐台の側面 4 箇所をワイヤ放電加工により切断し、平面としたものである。回転軸に直交する断面は円弧と直線で構成される。マ

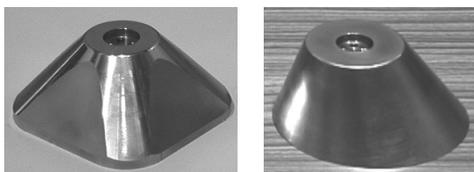


Fig. 5 Mandrels (1: left, 2: right)

ンドレル 1 では式 (3) の力制御則における  $\alpha$  を  $45^\circ$  とおいた。またマンドレル 2 は半角  $30^\circ$  の円錐を  $10^\circ$  傾けて頂部と底部を切断した形で、傾斜軸かつ偏心である。マンドレル側面の回転軸に対する傾きは最大  $40^\circ$ 、最小  $20^\circ$  となる。マンドレル 2 では  $\alpha = 30^\circ$  とした。ブランクは厚さ 1.0 [mm] 直径 150 [mm] のアルミニウム円板（A1100P-H24）である。加工ローラは直径 70 [mm]、丸み半径 9.5 [mm]、材質は工具鋼である。

Fig. 6 にマンドレル 1、マンドレル 2 を用いた成形品の写真を示す。本機ではマンドレル回転軸のモータトルクに余裕があるため、半径が大きくローラ押し付け力によるトルクが強く作用する部分も、マンドレルを回転させ続けることが可能である。文献 [8] の装置では、マンドレル 1 でローラ押し付け力が 450 [N] を超えると、マンドレル回転軸のトルク不足により加工途中で回転が停止する場合があった。しかし本機では、ローラ押し付け力 850 [N] を加えた状態でも、マンドレル回転軸のトルク指令は、最大トルクの 35% 未満であり、十分に余裕が見られる。

Fig. 7 にレーザ変位計で測定した成形品表面の断面形状を示す。マンドレルに沿って異形断面形状に成形されている。成形品表面とマンドレル表面との距離は、マンドレル 1 で 0.88 [mm] 未満、マンドレル 2 で 1.27 [mm] 未満だった。製品肉厚を考慮すると、成形品裏面とマンドレル表面の間隙はマンドレル 1 で 0.17 [mm] 未満、マンドレル 2 で 0.58 [mm] 未満となり、スプリングバックは比較的小さい。

マンドレル 2 について、マンドレル回転数を 60 [rpm] とおき、ローラ押し付け力目標値  $F_{nd}$  を 600, 700, 800, 900, 1,000 [N] として成形実験を行った。マンドレル 1 回転当たりのローラの回転軸方向送りピッチは一定値（0.4 [mm/rev]）とした。 $F_{nd} = 600$  [N] では成形品が部分的にマンドレルから浮き上がり、また文献 [8] でも見られたように  $20^\circ$  側の壁面に破断が生じた。一方、 $F_{nd} = 700 \sim 1,000$  [N] では成形に成功した。力目標値には約 1.4 倍の開きがあるが、いずれも良好な成形結果が得られている。押し付け力目標値の上限が幅の広い許容範囲を持つことは、文献 [9] でも観察された通りである。 $F_{nd} = 800, 1,000$  [N] のときの押し付け力  $F_n$  の測定値を、Fig. 8 のグラフに示す。

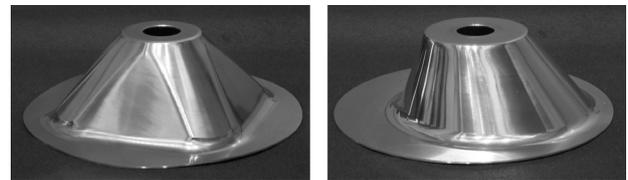


Fig. 6 Non-axisymmetric products (1: left, 2: right)

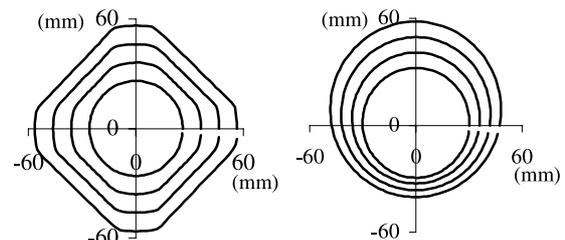


Fig. 7 Shape of products (1: left, 2: right)

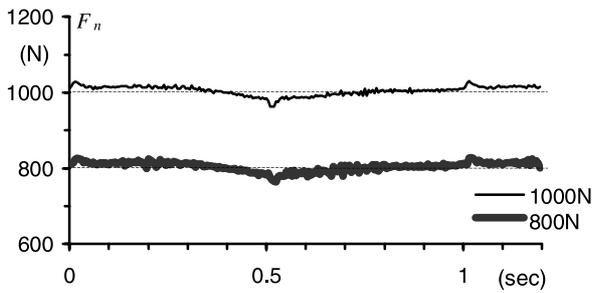


Fig. 8 Pushing force of roller

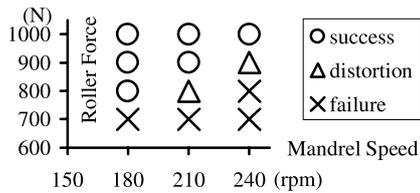


Fig. 9 Effect of pushing force vs. mandrel speed

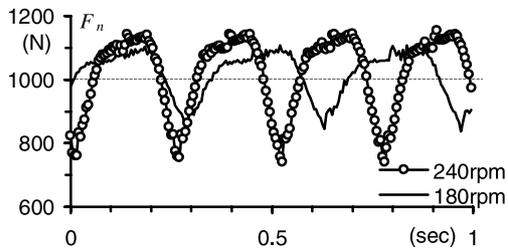


Fig. 10 Pushing force of roller

$F_n$  はほぼ目標値の通りに保たれ、フィードバックによる力制御が実現している。

次に同じくマンドレル 2 について、より高速回転の領域でマンドレル回転数とローラ押し付け力目標値  $F_{nd}$  を変化させて成形を行い、成形の可否を調べた (Fig. 9)。送りピッチは 0.4 [mm/rev] とした。図中で○印は成形に成功した場合を表す。△印では成形品の底部付近がマンドレルから浮き上がり形状が歪む。×印では加工ローラがワークを介してマンドレルと衝突し、プログラムが過大な加工力を検出して成形を中断する。押し付け力を強めるほどマンドレル回転数を上げることができるという傾向が見られる。

押し付け力目標値  $F_{nd}$  を 1,000 [N] としたときの押し付け力  $F_n$  の測定値を、マンドレル回転数 240 [rpm], 180 [rpm] について示す (Fig. 10)。加工ローラは激しく往復運動するため、Fig. 8 と比較すると、実際の押し付け力  $F_n$  は慣性力の影響でかなり変動する。変動の振幅はマンドレル回転数が上がるほど大きくなる。ただし平均値はそれぞれ 1,017 [N], 1,021 [N] で目標値 1,000 [N] とほぼ等しくなっている。また、成形が可能なローラ押し付け力にはプラス側に広いマージンがあるため [9]、いずれも成形には成功している。

次に目標値  $F_{nd}$  を 1,000 [N], 800 [N] としたときの押し付け力  $F_n$  を Fig. 11 で比較する (マンドレル回転数: 210 [rpm])。成形不良となる 800 [N] の場合は、1 回転ごとに  $F_n$  が不連続的にジャンプする瞬間がある。その直前には  $F_n$  が 600 [N] 付

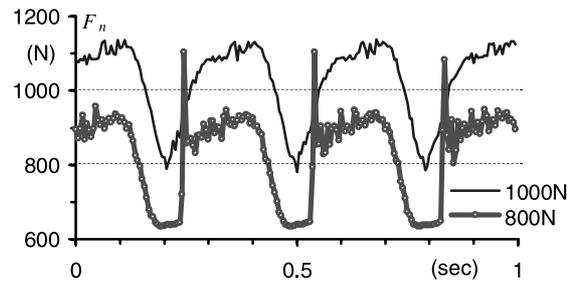


Fig. 11 Pushing force of roller

近まで低下する部分が見られる。ここでは押し付け力の不足により、加工ローラがワークに押し戻されて、マンドレルから浮き上がると考えられる。押し付け力のピークは、いったん浮き上がったローラが再びマンドレルと接触する際に生じる。マンドレル回転数が大きすぎたり  $F_{nd}$  が小さすぎると、浮き上がりが大きくなるために、ローラとマンドレルの接触における衝撃が強くなって、成形中断に至ると推測される。

マンドレル回転数が同じならば慣性力による  $F_n$  の振幅は等しくなるから、十分なローラ押し付け力目標値を与えれば、 $F_n$  が変動しても加工ローラがマンドレルから浮き上がることなく、成形が可能となる。Fig. 11 では、 $F_{nd} = 1,000$  [N] とすると、押し付け力の不連続的な変化がなくなり、 $F_n$  が連続的に推移して成形に成功している。

種々の加工条件で成形を繰り返した結果、マンドレル 1 では 60 [rpm]、マンドレル 2 では 240 [rpm] までは、ローラがマンドレルに追従し成形が可能であることを確認している。マンドレル 1 では、曲面部分と平面部分の境界で急激な押し付け力の変化が生じるため、回転数を上げることが難しい。

文献 [8] の実験装置の場合、マンドレル 1 では 15 [rpm]、マンドレル 2 では 30 [rpm] 程度が限界だったので、それぞれ 4 倍、8 倍まで回転数を上げることができた。また、十分な押し付け力を与えることが可能なので、加工ローラの送りピッチも大きく取れる。送りピッチを 0.4 [mm/rev] とすると、この加工速度では、高さ 30 [mm] の成形品を 75 [sec] (マンドレル 1)、19 [sec] (マンドレル 2) で作ることができる。リニアモータの採用により、異形断面形状の加工時間の大幅な短縮を達成できたと言える。

## 5. 開ループ力制御

前章までは、加工ローラの押し付け力制御のために、ローラ取付部に装着した 6 軸力センサからのフィードバックを用いてきた。しかし実用化の観点から言えば、力センサは一般に高価であり、過負荷や衝撃により壊れやすく、信号系や制御系も複雑となる。したがって、力センサを用いずに押し付け力の制御が可能となれば非常に有用である。また力センサは通常バネ要素を含むため、それを外せば装置の剛性が上がり、さらに精度の良い加工が可能である。本機ではリニアモータを用いているため、推力が直接ローラに伝わり、開ループでもモータ電流で容易に押し付け力が制御できると考えられる。そこで本章では、力センサを用いない開ループでの力制御が異形断面形状の成形に適用可能か検討する。

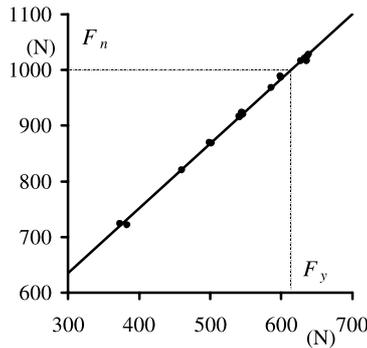


Fig. 12 Relationship between  $F_n$  and  $F_y$

開ループ制御の場合、 $x$  方向、 $y$  方向の力成分をそれぞれ正確に検出することができないため、マンドレル法線方向の力成分  $F_n$  を制御することは難しい (Fig. 4 参照). 代わりに  $y$  軸モータ推力  $f_y$  で半径方向の押し付け力  $F_y$  を制御する.  $F_y$  の目標値を  $F_{yd}$  とすると,

$$f_y = F_{yd} \quad (6)$$

という最も単純な制御則を適用した. 一方、 $x$  軸に関しては式 (1) と同じ PD フィードバックによる位置制御を構成した.

$$f_x = m_x \{k_{vx}(V_{xd} - \dot{x}) + k_{px}(V_{xd}t - x)\}$$

$F_n$  と  $F_y$  では方向が異なるため、目標値  $F_{yd}$  をどのように設定したらよいか調べる必要がある. そこでこれまでの開ループ力制御による成形実験において測定された  $F_n$  と  $F_y$  の値を比較する. マンドレル 2 を用いて成形に成功したケースにつき、測定された  $F_y$  の平均値 (数回転分の時間平均) を横軸に、 $F_n$  の平均値を縦軸にとってプロットしたものを Fig. 12 に示す. 加工ローラの送りピッチは 0.4 [mm/rev] である. マンドレル回転数は 120~240 [rpm] と広い範囲のデータが含まれているが、回転数とは関係なくプロットされた点はほぼ一直線上に並ぶ. すなわちローラの送りピッチが一定であれば、半径方向の押し付け力  $F_y$  の平均値と法線方向の押し付け力  $F_n$  の平均値は、線形の関係にあると見てよい.

前章の実験では、 $F_n$  を 1,000 [N] とした場合に良好な成形結果が得られた. そのためには、Fig. 12 より  $F_y$  を 600 [N] 程度にすればよいと推測される. そこで目標値  $F_{yd}$  を 600 [N] と設定して成形実験を行った. ローラ送りピッチはやはり 0.4 [mm/rev] である. マンドレル回転数が 60 [rpm] のとき、 $F_y$  は Fig. 13 のグラフのようになる. 開ループ制御の場合と比べて、力の実測値には慣性力と摩擦力による変動があるが、おおむね目標値 600 [N] に近い押し付け力が実現できている.

次に、マンドレル回転数を徐々に上げながら成形を繰り返し、回転数を 240 [rpm] まで上げてローラがマンドレルに追従し成形できることを確認した. マンドレル回転数が 240 [rpm] のときの  $F_y$  の変化を Fig. 14 に示す. Fig. 13 と比べて慣性力の影響が強くなり、 $F_y$  は大きく変化している. しかし Fig. 11 ( $F_{nd} = 800$  [N]) のような押し付け力の不連続的な変化は見られない. 実際にローラはマンドレルから浮き上がることなく、常

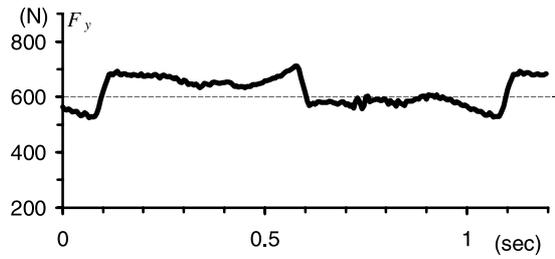


Fig. 13 Pushing force of roller

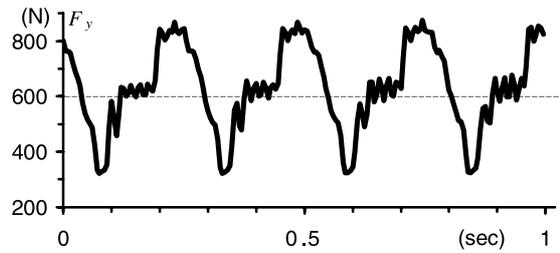


Fig. 14 Pushing force of roller

にワークをマンドレルに押し付けている. また  $F_y$  の平均値は 637 [N],  $F_n$  の平均値は 1,026 [N] で、目標値に近い値となっている.

マンドレル 1 についても開ループ力制御で成形実験を行い、回転数を 60 [rpm] まで上げられることを確かめた (押し付け力目標値  $F_{yd} = 600$  [N], ローラ送りピッチ 0.4 [mm/rev]). すなわち、マンドレル 1・2 とともに、マンドレル回転数の限界に関して言えば、式 (6) のような単純な開ループ力制御でも、力センサを用いた閉ループ力制御との性能の違いは見られなかった.

本用途では、成形が可能なローラ押し付け力の許容範囲が広く、力制御の精度はそれほど高くなくてもよい.むしろ、ローラがマンドレルの速い動きに倣い、十分な押し付け力で接触を確保できることのほうが重要である. また制御による発振等は絶対に防ぐ必要があり、安定な力制御則が要求されるため、開ループ制御のパラメータ設定は保守的なものとなる. 上記のような理由により、開ループでも閉ループ制御に匹敵する性能が得られたと考えられる. 今回は異形断面形状のみを扱ったが、軸対称形状の場合はローラの動きが極めて低速となるため、慣性力や摩擦力の影響がほとんどなくなり、開ループと閉ループの性能差はさらに縮まるだろう.

力センサのコストや耐久性、コントローラ構成の複雑さ等、他の要素も考え合わせると、開ループ力制御の閉ループ制御に対する実用上の優位性が示されたと言える. また、力制御の応答性をさらに上げるためには、 $y$  軸可動部の軽量化やリニアベアリングにおける摩擦力の低減等のハードウェア改良が必要であろう.

## 6. さらに高度な成形

前章までは主に加工時間の短縮に重点を置き、成形の高速化という観点から、開発した加工機の評価を行ってきた. そのため加工の方法として単純なしごきスピニングのみを用い、マンドレルも文献 [8] と同じ成形が比較的容易な形状のものを使用し

た。しかし一方で、従来の方法では加工が難しく付加価値性の高い製品を成形できるのならば、仮に加工に多少手間や時間がかかっても、加工機の用途はさらに広がるという考え方もある。

そこで本章では、成形がより困難と考えられ、これまでスピニング加工による加工例が見られない形状として、角錐台の成形を試みる。Fig. 15 に使用したマンドレルの形状を示す。材質はステンレス (SUS304) で、ワイヤ放電加工で製作されている。側面は回転軸に対し 30° 傾き、各辺の丸みは頂部が半径 3 [mm]、稜部が半径 2 [mm] である。特に稜部を通過する際にローラの運動の向きが急激に変化し、また非常に狭い面積に加工力が集中する点が障害になると予想される。ブランクは厚さ 1.0 [mm] 直径 150 [mm] のアルミニウム円板 (A1100P-H24) である。

初めに、前章までと同じくしごきスピニングによる成形を試してみた。半径方向の加工ローラ押し付け力目標値を  $F_{yd} = 600$  [N]、ローラ送りピッチを 0.4 [mm/rev] と設定した。力制御は開ループではなく力センサのフィードバックを利用したインピーダンス制御を用いている。また慣性力の影響を小さくするためマンドレル回転数を 7.5 [rpm] と非常に低く設定した。結果として一応角錐台の形はできるのだが、Fig. 16 のように成形品の稜部付近で壁面に亀裂が生じる。予想の通り、ローラが稜部を乗り越える付近で、ローラとマンドレルの角に挟まれた素材に集中的な荷重が加わり、板厚が薄くなって破断したと考えられる。

文献 [8] では、しごきスピニングによって異形断面の成形品の破断が生じた場合に、2 パスで成形することによって破断を防げることを示した。これは、板材のブランクから直接しごきスピニングを行うのではなく、マンドレルよりもやや大きい概形形状を作り、次に力制御により加工ローラを押し付けて、マンドレルに倣った形状に仕上げるといった方法である。破断の原因は異なるが、今回もこの方法が応用できると考えた。

まず概形形状を作成するために、同期スピニング加工 [7] を用

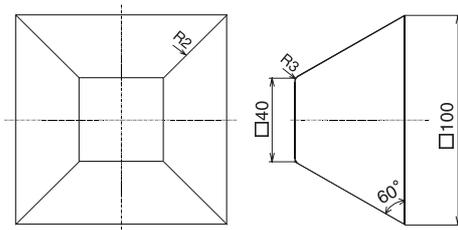


Fig. 15 Pyramid-shaped mandrel

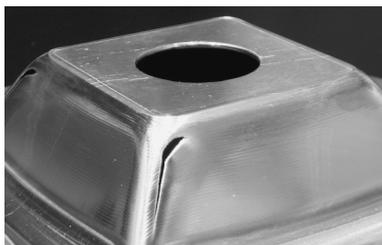


Fig. 16 Fractured product

いた。すなわち、ローラをマンドレルの回転角と同期して位置制御し、ローラが目標の断面形状に接するように動かして、マンドレルよりもやや大きい角錐台を成形する。この場合、ローラの軌道を生成するために、ローラの  $x$  方向、 $y$  方向の変位とマンドレル回転角  $\theta$  からなる点列のデータが必要である。

ここではローラの微い制御を用いて実物のマンドレルからデータを取得した。加工ローラを比較的小さい力でマンドレルに押し付け、マンドレルをゆっくり回転させながら、そのときの  $x$ ,  $y$ ,  $\theta$  を読み込む。このデータは、ローラとマンドレルが三次元的に接触しているためにマンドレル表面の形状データそのものではない。しかしローラとマンドレルが実際に接触している際のデータなので、ローラ形状による補正等を行うことなく、ほぼそのままローラの制御に用いることができる。

実験では、加工ローラの押し付け力を 20 [N] とし、3.75 [rpm] でマンドレルを回転させ、1 回転あたり 100 点のデータを記憶した。角錐台の形状は平滑なため、 $x$  軸方向に 3 箇所断面のデータを取得し、途中の部分は直線補間により形状データを計算した。さらにデータにオフセットを加え、マンドレルとローラの間にある程度隙間を与えてローラ制御のデータとした。Fig. 17 に最も径が大きい断面におけるデータを示す。マンドレルの角の部分を通る際にも  $y$  軸方向の動きは意外に滑らかである。これはローラの半径で鋭い角による急激な動きが緩和されるためと考えられる。

同期スピニングにおいては、補間による加工ローラの見目標位置のほか目標速度・目標加速度も計算して、摩擦補償・慣性補償を加えた PD 制御により加工ローラを制御した。マンドレルの回転数を 75 [rpm]、送りピッチを 0.5 [mm/rev] と設定した。この場合 56 [sec] で高さ 35 [mm] の概形形状の成形が終了する。加工ローラの  $y$  軸方向速度は最大 0.27 [m/sec]、加速度は最大 8.9 [m/sec<sup>2</sup>] に達した。Fig. 18 に概形加工の様子を示す。

成形された概形形状は、しごきスピニングの場合のように稜部に破断が生ずることなく成形されている。ただし目標点の数が 1 回転あたり 100 点と少なく、素材をマンドレルに押し付ける力も加えていないため、精度はあまり高くない。Fig. 19 (a) で概形形状とマンドレルをレーザ変位センサでスキャンしたデータを比較する。概形形状断面はマンドレルから最大 2.9 [mm] 浮き上がっており、マンドレルと成形品が密着していないことが分かる。

そこで、さらに力制御で素材をマンドレルに押し付け、仕上げ成形を行う。すでに大体の形はできあがっているので、押し付け力は稜部が破断しないように小さく設定することができる。ここでは半径方向の押し付け力目標値を  $F_{yd} = 350$  [N] と設定した。マンドレル回転数を 30 [rpm]、送りピッチ 0.4 [mm/rev] とし

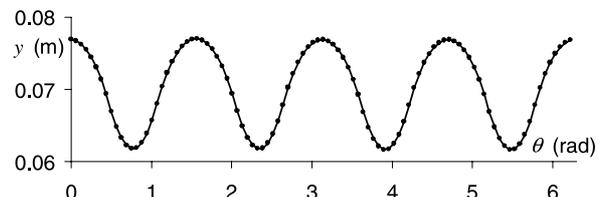


Fig. 17 Roller position data

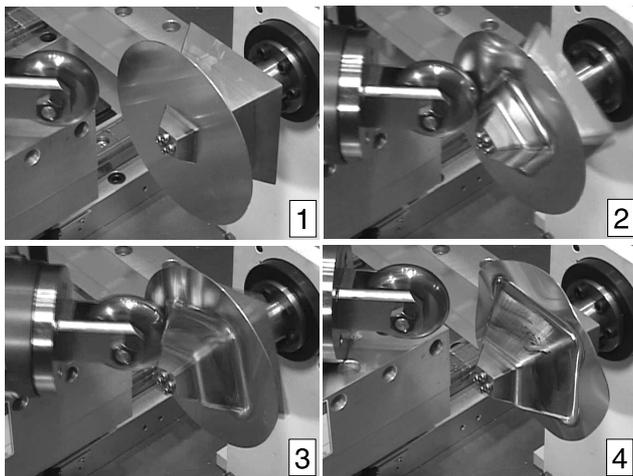
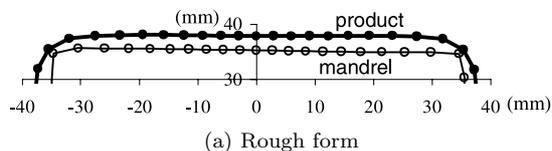
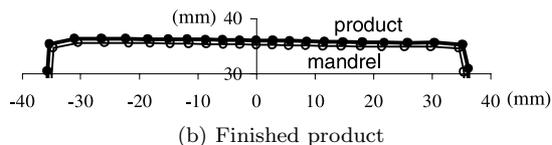


Fig. 18 Synchronized metal spinning



(a) Rough form



(b) Finished product

Fig. 19 Shape of product and mandrel

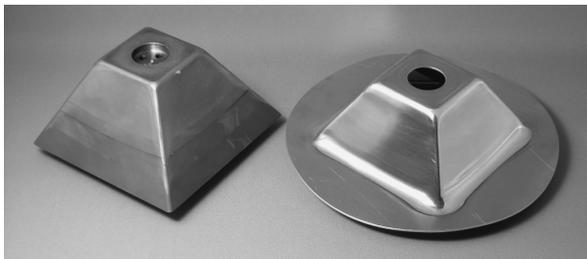


Fig. 20 Product and mandrel

成形を行った。破断が生じることなく成形が行われ、成形品の裏側がマンドレル表面に押し付けられて平滑になっていることを確認した。成形品とマンドレルの断面形状の比較を Fig. 19 (b) に示す。成形品断面とマンドレル断面との距離は 0.77 [mm] であり、成形品とマンドレルの間の隙間は非常に小さくなっている。成形品の肉厚は 0.43~0.54 [mm] で、ややむらはあるがプランクの厚さ 1 [mm] と側面の傾き 30° に対して sine 則 [1] がほぼ成立している。成形品とマンドレルの写真を Fig. 20 に示す。

## 7. 結 言

スピニング加工による異形断面形状の成形の高速化を目指して、リニアモータで加工ローラを直接駆動するスピニング加工機を新たに開発した。評価実験において、異形断面形状のマンドレルをこれまでの装置よりはるかに速く回転させても、ローラがマンドレルに追従して成形が可能であることを確認した。また開ループ力制御による異形断面形状の成形を試み、加工時間については閉ループ制御に匹敵する性能を示すことを確かめた。さらに、単純なしごきスピニングでは破断が生じる、成形の難度が高い形状について、同期スピニング加工と力制御による仕上げ成形の組み合わせにより成形可能なことを示した。なお、本論文で扱った加工実験の動画は [http://staff.aist.go.jp/h.arai/spin\\_j.html](http://staff.aist.go.jp/h.arai/spin_j.html) から閲覧可能である。

## 参 考 文 献

- [1] 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。
- [2] 荒井：“ロボットによるスピニング加工の研究—力フィードバック制御を用いたしごきスピニング—”，日本ロボット学会誌，vol.22, no.6, pp.798-805, 2004。
- [3] 天野，田村，森：“楕円錐スピニング法の開発”，第 98 回塑性加工シンポジウムテキスト，pp.69-77, 1985。
- [4] 新藤，石垣，加藤，入江：“管材の新しいスピニング加工技術の開発（偏芯，傾斜加工可能なスピニング技術 第 1 報）”，第 50 回塑性加工連合講演会講演論文集，pp.173-174, 1999。
- [5] X.C. Gao, D.C. Kang, X.F. Meng and H.J. Wu: “Experimental research on a new technology—ellipse spinning,” J. Materials Processing Technology, vol.94, pp.197-200, 2000。
- [6] B. Awiszus and F. Meyer: “Metal Spinning of Non-Circular Hollow Parts,” Advanced Technology of Plasticity 2005 (Proc. 8th Int. Conf. Technology of Plasticity), pp.353-354, 2005。
- [7] 荒井，藤村，岡崎：“同期スピニング加工による非軸対称断面管の成形”，第 56 回塑性加工連合講演会講演論文集，pp.687-688, 2005。
- [8] 荒井：“ロボットによるスピニング加工の研究—力制御を用いた非軸対称製品の成形—”，日本ロボット学会誌，vol.24, no.1, pp.140-145, 2006。
- [9] 荒井：“ロボットによるスピニング加工の研究—位置/力ハイブリッド制御による加工の特性—”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2003 予稿集 CD-ROM, 2A1-1F-E3, 2003。
- [10] 小菅，古田，横山：“ロボットの仮想内部モデル追従制御系—メカニカル・インピーダンス制御への応用—”，計測自動制御学会論文集，vol.24, no.1, pp.55-62, 1988。



荒井裕彦 (Hirohiko Arai)

1982 年東京大学工学部計数工学科卒業。同年本田技研工業 (株) 勤務。1984 年通商産業省工業技術院機械技術研究所入所。2001 年独立行政法人産業技術総合研究所に改組，現在知能システム研究部門主任研究員。工学博士。マニピュレータの制御，非ホロノミック系，パワーアシスト等の研究に従事。日本塑性加工学会，日本機械学会，IEEE などの会員。2001~2002 年度日本ロボット学会理事。2003 年より IEEE Trans. on Robotics の Editor。(日本ロボット学会正会員)