

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 —

○荒井 裕彦 (産業技術総合研究所)

Robotic Metal Spinning

— Forming Non-axisymmetric Products Using Force Control —

*Hirohiko ARAI, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

Abstract — Metal spinning is a plastic forming process that forms a metal sheet by forcing the metal onto a rotating mandrel using a roller tool. Products formed by metal spinning have been inherently limited to round shapes. In this paper, we propose metal spinning of non-axisymmetric products by applying hybrid position/force control. The pushing force of the roller is regulated so that the roller can track the changing radius of the mandrel. Our forming experiment demonstrates that a thin aluminum sheet can be formed into a non-axisymmetric shape.

1. 緒言

スピニング加工[1]とは、回転する成形型（マンドレル）に板状の素材（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）。金属を材料とする多様なシェル状の製品の成形加工法として広く用いられている。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、多品種少量生産や製品試作に適している。また、この加工法はNC自動機（スピニングマシン）のみでなく熟練作業員による人力の作業（へら絞り）によっても行われ、高度なものづくりの技能の一つとされている。本研究ではスピニング加工にロボット制御技術を適用することにより、加工のフレキシブル化・インテリジェント化をはかり、ロボット技術の新たな応用分野開拓を目指す[2]。

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、一般には回転軸と平行な方向への加工ローラのある送り量に対して、マンドレル半径方向のローラ位置は一定に保たれる。そのため通常のスピニング加工での成形対象は回転軸に直交する断面が円形の軸対称形状に限定されている。一方、スピニング加工で作られているタンク底板や自動車排気管、照明器具等において、非軸対称形状製品のニーズも多い。これら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思われる。これまでに偏心・傾斜軸形状[3]、楕円断面[4]等の製品の成形方法が考案されているが、それぞれ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。

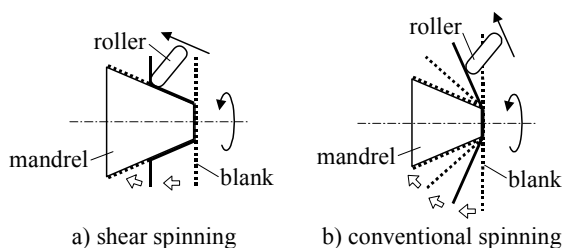


Fig. 1 Metal Spinning

本報では、位置/力ハイブリッド制御手法を用いて加工ローラの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非軸対称形状の製品を成形する方法について報告する。加工実験によりアルミニウム薄板が非軸対称形状のマンドレルに沿って成形できることを示す。

2. 位置/力ハイブリッド制御による加工

著者はこれまでにスピニング加工（軸対称形状のしごきスピニング）への位置/力ハイブリッド制御の適用を提案し、その効果を確認している[2]。

従来のスピニングマシンでは加工ローラを位置制御しており、マンドレルとローラの間隙が成形後の製品の肉厚と正確に一致するよう制御する必要がある。この隙間の決定は操作者の経験にかなり依存し、試験的成形による調整を要した。しかし製品の目標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間隙に製品肉厚分の隙間を設けるのではなく、ローラに適切な力を加えて素材をマンドレルに押し付けてやればよい。そこで文献[2]では、マンドレル側面に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、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が一定となるように制御する方法を用いてスピニング加工を行った。この方法によりローラとマンドレル間の隙間の微調整が不要となる。

ここではその方法を応用して非軸対称製品の成形を試みる。すなわち、非軸対称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。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、目標とする非軸対称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非軸対称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。また実物のマンドレルを形状の基準としているた

め、膨大な3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。

非軸対称形状の場合、ローラとマンドレルは3次的に接触する。文献[2]では加工ローラの送り方向をマンドレル側面と平行にとったが、これをそのまま用いるとローラの軌跡がフランジ（素材のうち未加工の外周部分）と同一の平面上から外れ、フランジにしわが発生する恐れがある。そこで、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。一方、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 F_n が一定値 F_{nd} となるように、回転軸と直交する成分 F_y を制御する (Fig. 2)。制御則は次のように表される。

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} = \mathbf{f}_p + \mathbf{f}_F \quad (1)$$

$$\mathbf{f}_p = \mathbf{MJ}^{-1} \begin{bmatrix} k_{vx}(V_{xd} - V_x) + k_{px}(V_{xd}t - X) \\ 0 \end{bmatrix}$$

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

ただし、 f_x, f_y はアクチュエータ駆動力、 \mathbf{M} はアクチュエータ慣性行列、 \mathbf{J} はアクチュエータ座標と XY 座標間の変換行列、 c は正の定数、 $k_{vx}, k_{px}, k_{pF}, k_{iF}$ はフィードバックゲインである。

3. 加工実験

実験装置を Fig. 3 に示す。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。減速機付 DC サーボモータ (減速比 1/10, 120W) によりマンドレ

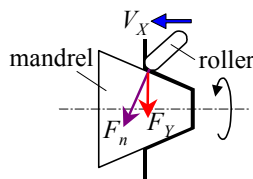


Fig. 2 Hybrid Position/Force Control

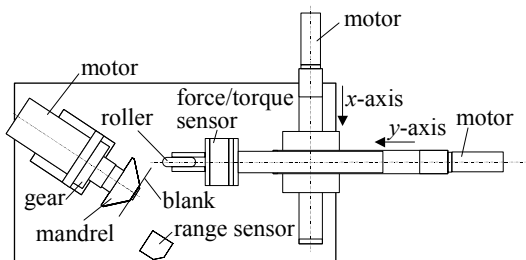


Fig. 3 Experimental Setup

ル (θ 軸) を回転させる。 θ 軸は x 軸に対し 60° 傾けて取り付けられている。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, 焼入) である。ローラと y 軸の間に 6 軸力センサを装着する。エンコーダ、力センサの信号を I/O ボードを介してパソコン (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。

非軸対称形状のマンドレルとして、2種類の形状を用意した。マンドレル1 (ステンレス鋼, SUS304) の形状を Fig. 4 に示す。円錐台の側面4カ所をワイヤ放電加工により切断し、平面とした。回転軸に直交する断面は円弧と直線で構成され、非軸対称形状である。ブランクは直径 120mm, 厚さ 0.78mm のアルミニウム円板 (A1050-O 材) である。

Fig. 5 に加工の様子を示す。加工ローラの送り速度 V_x は 0.0177mm/sec, マンドレルの角速度は 7.5rpm である。一回転あたりの送りピッチは $\Delta X = 0.141$ mm となる。加工方法はしごきスピニング (ローラをマンドレルに沿って1パスで送り、素材をしごくように成形する方法) とした。

ローラの押し付け力 F_n は 400~450N とした。ただし F_n の方向は円弧部分を加工している際の法線方向 (回転軸に対して 45° 方向) に固定した。回転軸に平行な X 方向, 回転軸に直交する Y 方向のローラ変位を Fig. 6 に示す。 X 方向についてはマンドレル側面の起伏に関らずほとんど変動せず、一定速のローラ

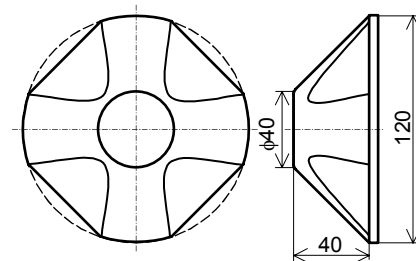


Fig. 4 Mandrel #1

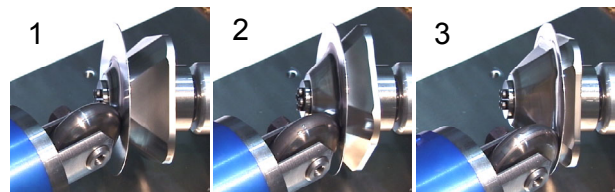


Fig. 5 Forming Process

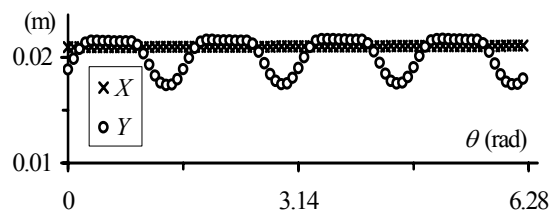


Fig. 6 Position of Roller

送りが実現されている. 一方で Y 方向についてはマンドレルに倣ってローラが前後に移動している. マンドレル回転軸を基準としてローラ中心位置までの距離をプロットしたものを Fig. 7 に示す. マンドレル断面形状に沿ってローラが動いている.

$F_n = 400N$ の時にローラが素材に加える加工力を Fig. 8 に示す. F_n はマンドレル側面に対する法線方向の成分, F_t はマンドレル側面に平行な方向の成分, F_z はマンドレル回転円周の接線方向の成分である. F_t, F_z は特にローラがマンドレル側面の平面部分を通過する時にかなり大きく変動する. これは平面部分ではローラとマンドレル側面が斜めに接触し, しかもその角度が変化するためである. ローラの押し付け力 F_n にも多少の変動は見られるが, 力制御によりおおむね 400N 前後に保たれている.

押し付け力が $F_n = 450N$ を越えると, 接線方向成分 F_z が過大となるために外周半径の大きな底部付近の加工でマンドレル回転軸のトルクが不足し, 回転が停止する場合があった. 非軸対称形状の成形ではマンドレル回転軸にも十分なトルクの余裕が必要と考えられる. また F_z の符号が変化する点ではローラから加わるトルクの向きが逆転するためにマンドレル回転軸の減速機でバックラッシュによる衝撃音が観察された. ギア等のダメージを防ぐためにはバックラッシュの小さい減速機を用いることが望ましい.

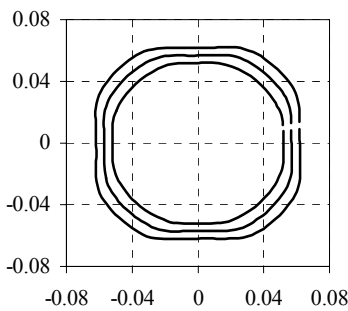


Fig. 7 Path of Roller

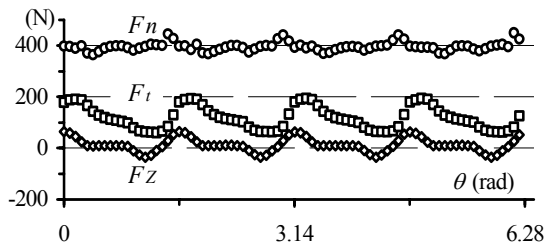


Fig. 8 Forming Force



Fig. 9 Mandrel #1 and Product

Fig. 9 にマンドレル及び成形された製品の写真を示す. 円錐を切断した平面部分もマンドレルの形状の通りに成形される. フランジもほぼ平面のままである. レーザ変位計を用いて平面部分のマンドレル側面形状と成形品の外形を比較した (Fig. 10). スプリングバック (弾性による成形後の戻り) は比較的小さく, 成形品はマンドレルに密着している.

成形品の肉厚は曲面部分で 0.55~0.56mm, 平面部分で 0.44~0.46mm 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 α , 元のブランクの厚さを t_0 とおくと, 成形後の製品肉厚 t は

$$t = t_0 \sin \alpha \quad (2)$$

となる[1]. 曲面部分では $\alpha = 45^\circ$, 平面部分では $\alpha = 35^\circ$ であるから, (2)式より計算された肉厚はそれぞれ 0.55mm, 0.45mm であり, 実際の肉厚とよく一致している.

マンドレル 2 (炭素鋼, S45C) の形状を Fig. 11 に示す. 半角 30° の円錐を 10° 傾けて頂部と底部を切断した形である. 形状としては傾斜軸かつ偏心で, 回転軸に直交する断面は楕円形となる. マンドレル側面の回転軸に対する傾きは最大 40° , 最小 20° となる.

このマンドレルを用いた場合, 1パスのしごきスピニングを行うと加工条件によっては壁面に破断が生じるケースがある. Fig. 12 の例では, 加工ローラの押し付け力: $F_n = 400N$, マンドレル回転数: 15rpm, マンドレル一回転当たりの X 方向送りピッチ: $\Delta X = 0.15mm/rev$ である. 破断は成形がかなり進んでから 20° 側の壁面中央において生じ, 引張形の破断である.

そこで加工条件のうち加工ローラの押し付け力 F_n と送りピッチを変化させて成形試験を行い, 成形の可否を調べた (Fig. 13). マンドレル回転数はいずれも 15rpm である. 図中で○印は成形に成功した場合を表す. ×印では 20° 側の壁面に破断が生じる. また△印では 40° 側のフランジにしわが発生する.

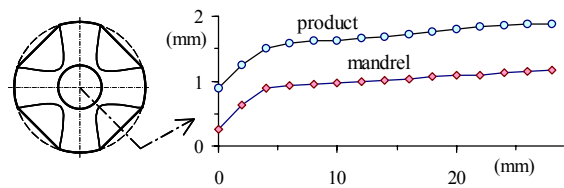


Fig. 10 Profile of Product

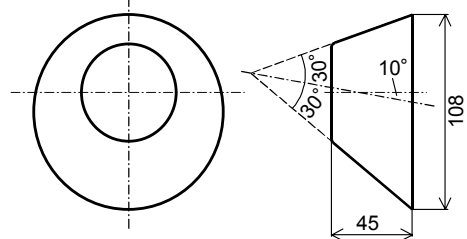


Fig. 11 Mandrel #2

ローラの押し付け力を強めることで、同じ回転数及び送りピッチのもとでも破断やしわの発生を防げることが明らかになった。これは押し付け力が加わることで素材のずれ変形が助けられ、壁面の破断やフランジの座屈（しわ）の原因となる壁面の引張応力が小さくなるためと推測される。Fig. 14 に成形に成功した製品とマンデル2の写真を示す。

レーザ変位計を用いて20°側及び40°側のマンデル側面形状と成形品の外形を比較した (Fig. 15) . 加工パラメータは押し付け力：500N, 送りピッチ：0.1mm/rev である。20°側の壁面では頂部付近でやや

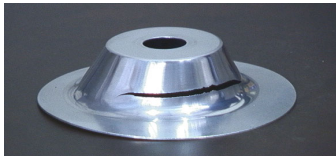


Fig. 12 Example of Fracture

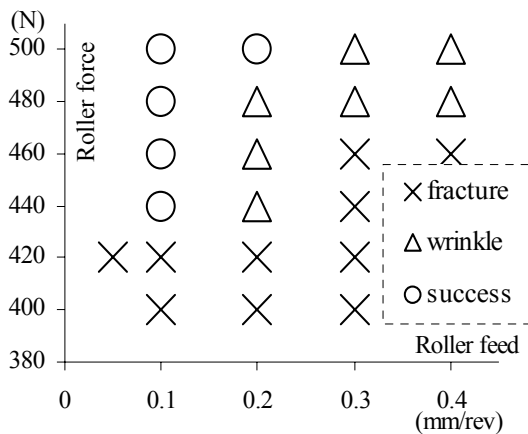


Fig. 13 Effect of Pushing Force vs. Roller Feed



Fig. 14 Mandrel #2 and Product

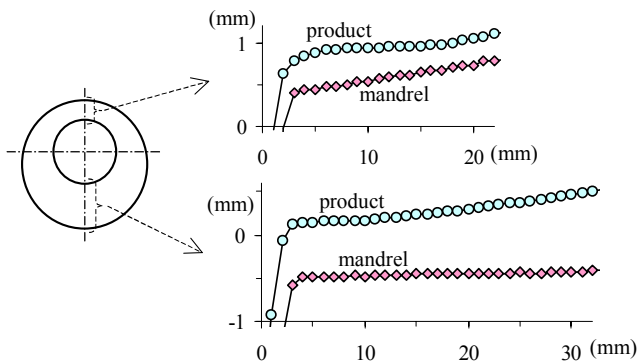


Fig. 15 Profile of Product

マンデルからの浮き上がりが見られ、一方40°側の壁面では底部付近で多少のスプリングバックが見られるものの、全体としてはおおむねマンデルの形状に従った成形が行われている。

成形品の肉厚は40°側の側面では0.50~0.52mmである。(2)式より計算された肉厚は0.50mmであるから実際の肉厚とほぼ一致している。一方、20°側の肉厚はややむらがあり、頂部付近で0.30~0.35mm、フランジ付近では0.20~0.22mmであった。(2)式による肉厚は0.27mmである。頂部付近での外形の浮き上がりと考え合わせると、頂部付近では500Nでも押し付け力がやや不足しており、均一な成形を行うには、さらに強い力で素材を押し付ける必要があると推測される。

破断を防ぐためのもう一つの方法として、2パスの成形も試みた。はじめに半角45°のしごきスピニングをマンデルに接触しない状態で途中まで行い、マンデルよりもやや大きい円錐台形状の中間製品を作る。次に力制御により加工ローラを押し付けてマンデルに倣った形状に仕上げる (Fig. 16) . マンデル回転数/ローラ送りピッチは、1パス目では240rpm/0.05mm, 2パス目では30rpm/0.2mmとした。2パス目のローラ押し付け力を $F_n=400N$ としたが、1パスでの成形とは異なり破断は生じなかった。より弱い押し付け力でも成形が可能となる点は有利と考えられる。

またこのときの成形品の肉厚は、20°側の頂部付近で0.47~0.50mm, フランジ付近では0.32~0.35mm, また40°側の頂部付近で0.52~0.55mm, フランジ付近では0.50~0.52mmとなった。20°側と40°側の肉厚の差は(2)式のsine則よりもむしろ緩和されるようである。

4. 加工時間の短縮

本手法による非軸対称形状の成形を実用化する上で、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)÷(マンデル一回転当たりの加工ローラ送りピッチ)÷(単位時間のマンデル回転数)で表される。非軸対称形状の成形では軸対称の場合よりもマンデ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。例えば高さ30mmの製品を送りピッチ0.1mm/rev, マンデル回転数15rpmで加工する場合, 加工に20min

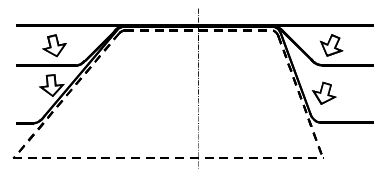


Fig. 16 Two-pass Spinning

の時間がかかる。実際、前章の加工では10~30min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。

非軸対称形状の成形では、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。本研究で用いた実験装置の場合、加工条件の設定にも依存するが、マンドレル1では約15rpm、マンドレル2では約30rpmを超えるとこうした現象が見られた。

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 (Fig. 12 参照)。しかし非軸対称形状の場合、マンドレル1による成形で見られたように、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る。

上記のような問題は、本質的には加工装置のハードウェア設計において解決すべきである。すなわち、各モータをより強力で定格トルクの大きなものとする。加工ローラを駆動するモータはロータ慣性の小さい高パワーレートのタイプに替え、ボールねじのピッチも大きくする。これによりローラの押し付け力を強めて加工の際の送りピッチを大きく取ることができる。またマンドレルの回転数を上げてローラが追従可能となる。

一方、あくまで補助的な手段ではあるが、ローラやマンドレルの制御によっても加工時間をある程度は短縮できる可能性がある。こうした制御をハードウェアの改良と併用すればさらに有効と思われる。そこで本章ではより短い時間で加工を行うための制御手法について検討を行う。

マンドレル1および2はいずれも頂部付近の断面が円形あるいは円形にきわめて近い楕円形である。そのため、これらを用いた加工を観察すると、加工開始直後は加工ローラのマンドレル断面形状に倣った運動の振幅が小さく、ローラを駆動するモータの回転数やトルクにはかなりの余裕が見られる。したがってこうした部分を加工する際にはマンドレルの回転速度をさらに上げることが可能と考えられる。

それに対して、マンドレルの底部付近の加工では、マンドレル断面の凹凸あるいは偏心が大きくなるため、加工ローラは大きな振幅で運動する。こうした部分では、加工ローラがマンドレル形状に追従できなくなるために問題が生じやすい。ここではマンドレルの回転速度を十分低く抑える必要がある。

基本的なアイデアは、NCスピニングマシンでは一般に一定値に固定されていたマンドレル回転速度を可変とすることである。ローラが大きく動く部分ではマンドレルの回転速度を抑えながら、ローラの動きが小さく速度に余裕のある部分ではマンドレル回転速度を上げて、全体として加工時間を短縮する。加工ローラの力制御を用いたしごきスピニングでは、加工特性はローラの押し付け力と送りピッチでほぼ決定される[5]。そこで押し付け力 F_n と送りピッチ ΔX は一定とし、マンドレルの回転速度 $\dot{\theta}$ のみを加工ローラの位置変動に応じて調整する。加工ローラの送り速度は $V_x = \Delta X \dot{\theta} / 2\pi$ となる。

マンドレル回転速度の具体的な調整則として、次のような関係を成り立たせることを考える。

$$\dot{Y}^2 + K\dot{\theta}^2 = V \quad (3)$$

ここで θ はマンドレル回転角、 Y はマンドレル回転軸に垂直な方向のローラ変位、 K, V は正の定数である。上式は無次元化されたアクチュエータ空間において接線速度を一定とすることを意味する。ところでローラは回転するマンドレルと接しているから、その変位は θ の関数として $Y(\theta)$ と表される。したがって、

$$\dot{Y} = \frac{dY}{d\theta} \dot{\theta} \quad (4)$$

$dY/d\theta$ はマンドレルの断面形状で決定され、マンドレルの回転によって生ずるローラ位置 Y の変動を表す。(4)式を(3)式に代入して、

$$\left\{ \left(\frac{dY}{d\theta} \right)^2 + K \right\} \dot{\theta}^2 = V \quad (5)$$

したがってマンドレルの回転速度を、

$$\dot{\theta} = \sqrt{V / \left\{ \left(\frac{dY}{d\theta} \right)^2 + K \right\}} \quad (6)$$

とすればよい。すなわち、ローラ位置の変動 $dY/d\theta$ が大きくなるほどマンドレルの回転速度 $\dot{\theta}$ は低下する。マンドレルの断面が円形でローラ位置 Y が変動しないとき($dY/d\theta=0$)、マンドレルの回転速度は最大値 $\sqrt{V/K}$ をとる。 K は正規化のための係数であるから、例えば各モータが定格回転数の時の $\dot{Y}, \dot{\theta}$ をもとに決定できる。また、マンドレルの最大回転数を $\dot{\theta}_{MAX}$ とするには、 $V = K\dot{\theta}_{MAX}^2$ とすればよい。

次に、 $dY/d\theta$ としてどんなデータを用いるかを考える。(4)式より、

$$\frac{dY}{d\theta} = \frac{\dot{Y}}{\dot{\theta}} \quad (7)$$

であるから、加工中の $\dot{Y}, \dot{\theta}$ を実測すれば実時間で $dY/d\theta$ を知ることができる。一方、マンドレルの回転速度は緩やかに変化することが望ましい。回転速度が急激に変化すると、マンドレルを駆動するモータにとって負荷となるだけでなく、加工ローラの大きな加減速の原因にもなる。そこで、 $(dY/d\theta)^2$ の1回転分（現時点から1回転前まで）の平均値を求め、それを(6)式に代入してマンドレルの回転速度を求めた。

この方法で用いるのは $(dY/d\theta)^2$ のマンドレル1回転分のデータのみであり、必要なメモリ容量はマンドレル全体の3次元形状データと比べてはるかに少ない。また実時間で加工を行いながらデータを取得するため、加工前に計測を行う必要も生じない。

上記のようなマンドレル回転速度の調整則を用いてマンドレル2による加工実験を行った。位置/力ハイブリッド制御則は(1)式とほぼ同じものである。ただし加工ローラの送り速度 V_f はマンドレル回転速度に比例して変化する。加工ローラの押し付け力は480N、送りピッチは0.1mm/revとした。

Fig. 17に顶部から(a)5mm, (b)20mmの位置を加工しているときの加工ローラ速度 \dot{Y} を示す。マンドレル回転数は(a)では64.3rpm, (b)では16.0rpmと自動的に調整されている。ローラの位置変動の幅は(b)の方が大きい。マンドレル回転速度の変化により加工ローラ速度のピーク値はともに $\pm 0.01\text{m/sec}$ 程度に抑えられている。また、精度や肉厚など成形された製品の品質はマンドレルを一定速度で回転させた場合と変わらないことも確認した。

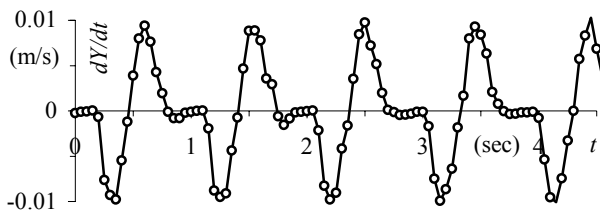
Fig. 18に加工開始時から終了時までのマンドレル回転速度の変化を示す。全体の加工時間は569.6secかかっている。このとき、最小の回転速度(13.2rpm)で最初から最後まで一定速度でマンドレルを回転させたとしても加工時間は1100.6secかかる。したがって、この例では本方法の採用により加工時間は約半分にまで短縮されている。とは言うものの1個の加工に10分近い時間を要しており、最初に述べたようにハードウェアの改良はやはり必須である。

5. 結 言

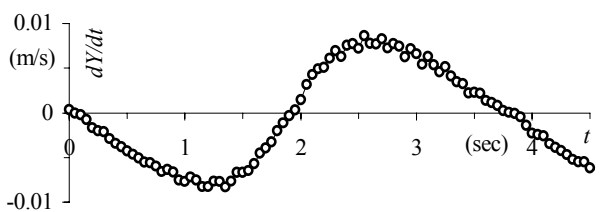
金属薄板のスピニング加工において、位置/力ハイブリッド制御を用いて加工ローラをマンドレル形状に倣わせることにより、非軸対称形状の製品が成形できることを確認した。またマンドレル回転速度を調整して加工時間を短縮する手法を提案し、その効果を確認した。今後は加工対象の材質や板厚など加工パラメータの範囲をさらに広げ、加工条件と加工結果の関係をより詳細に調べてデータベース化することが必要であろう。

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—カ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] 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.
- [4] 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.
- [5] 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—”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'03講演論文集, 2A1-1F-E3, 2003.



(a) 5mm from top



(b) 20mm from top

Fig. 17 Velocity of Roller

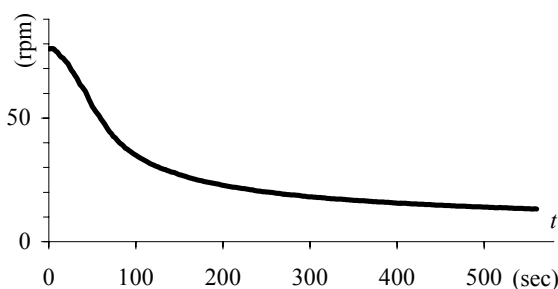


Fig. 18 Change of Mandrel Speed