

ロボットによるへら絞り ～ ものづくりとロボット技術 ～

荒井 裕彦**

Robotic Metal Spinning - Manufacturing Craftsmanship and Robot Technology - Hirohiko ARAI

Key words: metal spinning, plastic forming, robot, force control, craftsmanship, highly skilled worker

1. へら絞り (スピニング加工)

へら絞りとは、回転する成形型に取り付けた金属板を、ローラやへらなどの工具で型に押し付けて成形する塑性加工の一手法である。スピニング加工とも呼ばれる。素材が平板の場合、図 1 a) のように工具を複数のパスに従って送り、段階的に変形する絞りスピニングと、b) のように成形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の二通りの方法がある。アルミニウム・ステンレス・鋼などの一般的材料はもちろん、チタン・モリブデン・インコネルなどの難加工材も成形が可能である。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などから、航空宇宙・半導体製造・原子力など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。

スピニング加工を行う機械をスピニングマシンと呼び、NC 装置によって加工ローラを位置制御するものが現在の主流である。一般には、作業者がジョイスティックによりローラを操作して実際に成形を行い、その際に記憶した軌道を再生してそれ以降の成形を行う教示再生方式が採用される。特に大量生産や厚い金属板の成形にはこうしたスピニングマシンが使われている。

一方で、機械を用いた加工のほかに、人力の手作業による加工が現在でも盛んに行われている。先端に工具が付いた長い金属棒 (へら棒) を構え、てこの原理で工具を金属板に押し付ける。作業者は金属の変形状態を注視し、手応えを体で感じ、金属が軋む音を聴いて、工具を押し力を加減する。熟練者になると、複雑な形状の製品もほぼ均一な厚さで成形することができる。この人力によるへら絞り

は、熟練した職人による高度なものづくりの技能の一つとして近年注目され、マスコミなどでもしばしば取り上げられている。日本スピン(株)と(株)北嶋絞製作所の 2 社が、国産ロケット H 2 A の先端カバーを人力のへら絞りで作ったことが、そのきっかけとなったようだ。

へら絞りの最大の長所は、成形型が 1 個だけで済むことだ。高い精度を要しない製品の場合などは金型ではなく木型を使うこともある。したがって、プレス成形と比べると型のコストははるかに低く、多品種少量生産や小ロットの試作品で特に有利である。そのほかにも、加工限界が高く素材を大きく変形することができる、切削加工と比べ材料の歩留まりが良い、加工精度が比較的高く製品の表面性状も良好である、などさまざまな利点がある。

へら絞りは熟練技能に対する依存度が高い加工法である。人力のへら絞りは無論のこと、スピニングマシンを用いる場合ですら、教示作業は熟練作業者の技能にかなり頼っている。本特集の主題である技能の伝承が、きわめて重要な役割をもつ分野と言える。前記の日本スピン(株)も、へら絞り技能の評価制度を社内で独自に設け、技能を文章化して作業標準書を作成するなど、技能者の育成に力を入れているとのことだ。

2. ものづくりとロボット

筆者はここ数年、ロボット技術を応用したへら絞りの研究を進めている。加工の知能化・フレキシブル化やそれによる製品の高付加価値化とともに、ロボット屋の立場から言えば、ロボット技術の新たな応用分野を開拓することを目指している。

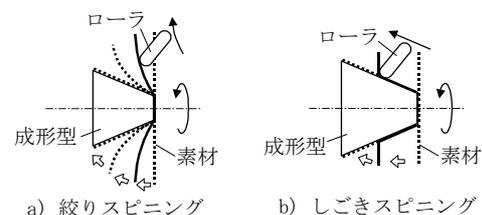


図 1 へら絞り (スピニング加工)

** (独) 産業技術総合研究所 知能システム研究部門
〒305-8564 茨城県つくば市並木 1-2-1
TEL029-861-7088 FAX029-861-7201
Email: h.arai@aist.go.jp
<http://staff.aist.go.jp/h.arai/>

ロボット分野では、大学・研究機関の研究者のものづくり離れが深刻であり、製造業分野でのロボット応用に関する研究には一種の空洞化が生じている。人間共存や極限作業などの非製造業分野に対しては、そこに進出すればロボット産業にはバラ色の未来が開けているかのごとき安易な期待感を煽る風潮が見られるのと対照的に、「製造業はもう古い、産業用ロボットから脱却すべきだ」などといった根柢のない先入観が、研究者の間で蔓延している。

たしかに産業用ロボットの用途は、今でもハンドリング・組立・溶接・塗装など、当初のレパトリーからそれほど広がっていない。現在の産業用ロボットは、主として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コストダウンにより採算性を維持していると言える。こうした用途にしか目が向けられないために、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。

しかし、製造業での生産形態は大量生産だけではない。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²⁾。まさに本特集で取り上げられているような作業の数々である。こうした分野で様々なロボット技術を活用し、高機能のロボットを使っても採算が取れるような高付加価値の応用作業に挑戦してゆけば、ロボット技術の新たな市場が開ける可能性が十分にあると筆者は考えている。

ロボット技術の応用と言っても、必ずしも産業用ロボットそのものを使うことは意味しない。もっと広範にメカトロニクス技術と呼んでも良いが、アクチュエータ・センサ・制御などのロボット要素技術を要所所に導入するという程度からはじまって、様々なレベルの応用があり得る。

勘違いされることも多いのだが、ロボット技術は本質的にはローテクであって、だからこそ役に立つ場面も多い。初期投資が小さくて済み、中小規模の企業でも手軽に導入できる。ナノテクやバイオなど、専用の建物を建てることから始めなくてはならないようなハイテク技術とは投資の桁が違う。使うのに大した専門知識が要らない点でも敷居が低い。むしろ実用上は場面に応じた創意工夫の方がものをいう。ロボット技術は設備投資よりもマンパワーが勝負の、人間臭い手作りの技術なのだ。道具として使いこなせば、ものづくりの現場に非常になじみ易い技術であり、活躍できるところはまだまだ隠れているはずである。

3. ロボットによるへら絞り

3.1 力制御を用いたへら絞り³⁾

話をへら絞りに戻し、筆者のへら絞りに関する研究をいくつか紹介しよう。最初は力制御を応用したへら絞りである。人力によるへら絞りでは、へら棒を介して作業者に伝わる力の感覚が特に重要な役割を果たす。一方でNCスピニングマシンでは、加工ローラはサーボ機構により位置制御されており、力の感覚は持たない。それらの間を埋めるものとして、カフィードバック制御を導入し、ローラに装

着した力覚センサで加工力を検出して、ローラを押しす力をアクチュエータで制御することを考えた。

ロボット分野ではロボットアームの力制御が長年研究され、多くの理論的・技術的な蓄積がある。しかし、ロボット研究者の製造業離れもあって、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、付加価値の高い有効な応用については未だに模索の状態にある。

へら絞りは、ローラの接触している点だけが局所変形する、逐次的な成形プロセスのため、他の塑性加工と比べて加工力のはるかに小さい。何トンもの力が必要なプレスと異なり、ちょうど既存のロボット技術で扱いやすいレベルの力である。またローラの動きが自在で、複数軸を扱う点でもロボットの運動制御技術を活用できる。

へら絞りにおける種々の加工条件のうち、従来型のスピニングマシンの制御という観点から特に設定が面倒なのは、成型型と加工ローラの間隙である。通常、隙間は成型後の製品の肉厚と正確に一致するように制御する必要がある。隙間が大きすぎると、しわが発生しやすく、製品が型に密着しないため形状精度が劣化する。また加工限界も下がり、破断が生じやすくなる。逆に隙間が小さすぎると、加工力が著しく大きくなり、材料の流れによって製品が歪む場合もある。薄い板を加工する場合は、適切な隙間の許容範囲も狭くなる。

そのために、あらかじめ成型型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。また型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で設定したとおりの隙間が実現できない恐れもある。

単純な円錐形のしごきスピニング(図1b)ならば、簡単な式で成型後の肉厚が計算できる。しかし複雑な形状では、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型に沿う形状に成形する多サイクル絞りスピニング(図1a)では、最終的な肉厚分布の予測はさらに困難になる。

へら絞りの現場で、座標を数値で打ち込む普通のNCよりも、教示再生方式が好まれる理由はここにある。教示再生方式では教示時の現物合わせとなるため、ローラの厳密な位置合わせや経路指定が不要になる。ただし、それで適正な隙間が得られるかどうかは、教示を行う作業者の技量に依存する。

このような隙間の設定の問題は、加工ローラを位置制御するために生ずる。機械によるへら絞りの難しい点は、成型型とローラの動きの両方が形状を与えていて、そのどちらもが硬いことだ。人力の場合は、硬い成型型に工具を柔らかくなじませて押し付けることができる。筆者も人力のへら絞りを体験したことがあるが、製品の肉厚に成型型が当たっているかどうかは、へら棒ごしの手応えの変化で素人でも感じ取ることができた。人間は元々そういう力加減が得意なようだ。

フィードバック制御は、人間のそうした能力を機械の上で実現するものとも言える。製品の目標形状は素材を成形型に密着させることで得られる。そこで、型とローラの間には製品肉厚分の隙間を設けるのではなく、適切な力で素材を成形型に押し付けてやればよい。

図2のような簡単な装置を用いて、力制御によるへら絞りの実験を行った。x軸、y軸の直動送りと主軸(θ軸)の回転はDCサーボモータで駆動する。加工ローラは工具鋼で、直径70mmである。ローラ取付部に6軸力覚センサを装着する。素材は直径120mm、厚さ0.8mmのアルミニウム円板である。半角45°の円錐状の成形型を用いた。加工方法は最も単純な1パスのしごきスピニングである。本装置による加工の様子を図3に示す。

力制御の手法としては、位置/力ハイブリッド制御を用いた。位置/力ハイブリッド制御とは、作業において位置を制御すべき方向と力を制御すべき方向を定義し、それぞれに関して位置制御と力制御を同時に行う制御方式である。図4のように位置制御と力制御のフィードバックループを構成し、座標変換により各アクチュエータに駆動力を分配することによって実現される。

成形型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 V_x で加工ローラを移動させる。成形型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_{y0} となるように制御する(図5)。図6に力制御を用いた加工結果の一例を示す。しわなどの欠陥が発生す

ることなく加工が完了している。

力制御によりへら絞りができることは分かったが、問題は具体的にどのような力でローラを押し付ければ良いかということである。そこで次に、ローラの送り速度 V_x 、成形型の回転速度 ω 、ローラの押し付け力 F_y を変化させて多数の成形を行い、加工パラメータの変動による加工特性の変化を調べた⁴⁾。

その結果、ローラの押し付け力 F_y が一定の場合、ローラ送り速度 V_x および成形型の回転速度 ω については、それぞれ単独ではなく、成形型1回転あたりのローラ送り量 $\Delta X(=V_x/\omega)$ が、成形結果を左右することが分かった。この点は位置制御による通常のへら絞りと同じである。

また、ローラ押し付け力 F_y が不足の場合は成形に失敗するが、ある値以上の力でローラを押し付ければ、かなり広い範囲でほぼ同程度の良好な成形結果が得られる。素材を成形型に密着させるのに必要な押し付け力と、ローラと型の間で素材が潰れて材料の流れが生じる押し付け力との間には、相当の幅があるようだ。したがって、力制御はそれほど厳密なものでもなくとも良い。

以上のように、力制御を用いれば、成形型とローラの隙間の面倒な設定を省いてへら絞りが行える。微小な隙間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。ローラと型の厳密な位置合わせは不要であり、押し付け力の設定は装置の剛性の影響を受けない。また本手法はしごきスピニングだけでなく、絞りスピニングの最終段階で型に素材を密着させる場合にも有効と考えられる。

3.2 非軸対称形状のへら絞り⁵⁾

へら絞りの最大の泣き所は、成形型と素材を回転させながら成形加工を行うため、一般には回転軸に直交する断面が円形の、軸対称形状しか成形できないことである。一方、へら絞りで作られているタンク底板やホッパー、自動車排気管、照明器具などについて、楕円形、多角形、偏心など非軸対称形状品のニーズも多い。これらが成形できるようになれば、へら絞りの用途はさらに広がるだろう。

これまでに偏心・傾斜軸形状 θ 、楕円断面 η など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もつ専用の加工装置を必要とする。また製品の表面に凹

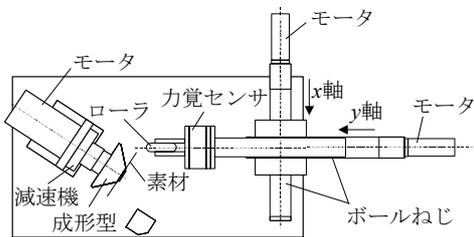


図2 加工実験装置



図3 加工の様子

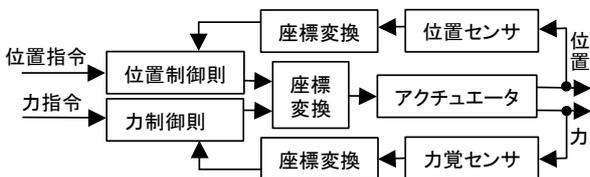


図4 位置/力ハイブリッド制御

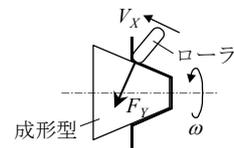


図5 ローラの押し付け力制御

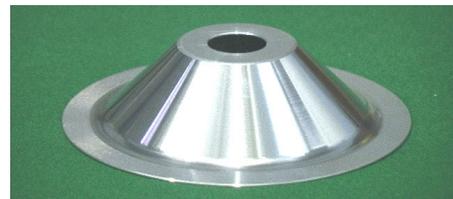


図6 力制御による成形品

凸の模様を付ける程度であれば、人力のへら絞りでも可能だが、断面が円形から大きく外れた形状は、やはりなかなか難しいようである。

筆者は前節の方法を応用して非軸対称製品の成形を試みた。非軸対称形状の成形型を用い、ローラの押し付け力を制御して、素材を適切な力で型に押し付ける。成形型の形状に倣ってローラを前後に動かすことにより、素材を型に密着させ、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、成形型の交換のみで様々な形状に対応可能である。また実物の成形型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。

2種類の非軸対称形状の成形型を用意して、成形実験を行った。成形型1は半角45°の円錐台の側面4カ所をワイヤ放電加工により切断し、平面としたものである。また成形型2は半角30°の円錐を10°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。図7に成形型1を用いた加工の様子を示す。また図8に成形型と成形された製品の写真を示す。どちらの成形型についても、成形品は型に密着して良好な精度で成形することができた。

4. 技能とロボット

実は、本稿の執筆を引き受けた時に委員会から頂いた題は、「技能のロボット化」だった。2007年問題や技術伝承、人材育成に対する一つの解決策として、そうしたアプローチを取り上げたいとのことだった。熟練者の技能をロボットに移植するというのは、興味深いテーマでもあり、筆者も研究を始めた頃はそれを狙わないでもなかった。しかし現在の方向性としては、ご覧の通り、むしろスピニングマシンの高機能化といった位置づけの研究となっている。

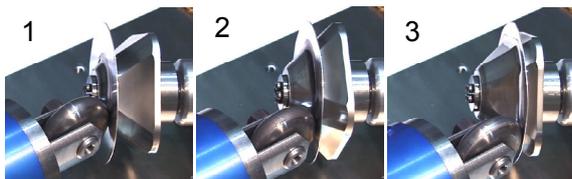


図7 加工の様子

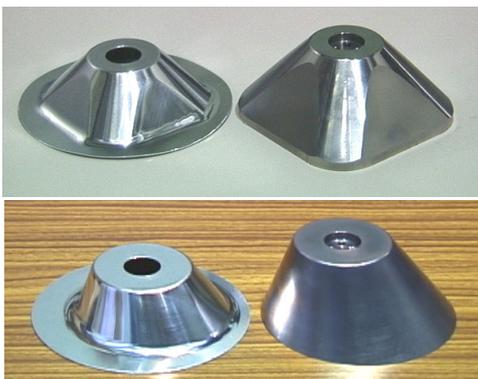


図8 成形品と成形型（上：成形型1，下：成形型2）

人間には人間の技能、機械には機械の技能がある。人間の技能はもちろん参考にはなるが、それをそのままロボットにコピーすることは意味がない。例えばへら絞りの熟練者は、へら棒を巧みにあやつって材料を寄せ、製品の肉厚を調節できる。一方でスピニングマシンの使い方として、厚めの素材を加熱した上で大きな力で押し潰して望みの肉厚分布を得るといった鍛造に近い手法がある。目的は共通でもやり方は全く異なっている。技能そのものが目的なのではなく、それによって出来る製品の付加価値が重要なのだ。だから人間の技能にこだわらず、機械なりの特長を活かせればよいと考えている。

とは言え、そうしてできた機械を現場で使うのもやはり人間である。そこには新たな技術を使いこなす新しい技能が生まれるはずだ。力制御によるへら絞りと言えば、どんな材料にどんな押し付け力を設定するかは、最終的には現場の経験で決めなければならない。熟練工が不要になるというふれこみで登場したNC工作機械も、結局のところNC熟練工を必要としたのではないか。しかもNC化以前の加工のノウハウが無用になったわけではなく、それがなければやはりまともな加工はできないのである。現場に底力がなくては、新しい技術も根づかない。そうしたことはへら絞りでも、またどんな技術についても言えるだろう。

ものづくりにおける熟練は、単なる反復による習熟ではなくて、かならず創造のプロセスを含んでいる。へら絞りも鍋釜を絞るところから始まったのであって、最初から高度な製品を作る熟練技能が完成していたわけではない。筋力はアクチュエータに、手技は制御技術に、経験やノウハウはデータベース⁸⁾に置き換えることが仮にできたとしても、再現できる技能は固定されたものでしかない。現場で試行錯誤して絶えず技能をレベルアップする人材は、やはり不可欠なのである。だから、現場の皆さんには、技能のロボット化などはあまりあてにせずに、技術伝承、人材育成をしっかりとやって頂きたいと考えている。

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) 小関智弘：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)。
- 3) 荒井裕彦：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，**22**, 6, (2004) 798-805。
- 4) 荒井裕彦：ロボットによるスピニング加工の研究－位置/カ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，(2003) 2A1-1F-E3。
- 5) 荒井裕彦：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，**24**，(2006) 掲載予定。
- 6) 新藤健二，石垣賢三，加藤和明，入江徹：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，(1999) 173-174。
- 7) 天野富男，田村公男，森茂樹：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，(1985) 69-77。
- 8) 川井謙一，澤野清輝，伊藤浩之：スピニングデータベースの試作，塑性と加工，**30**，345，(1989) 1411-1415。