

ロボット技術を用いたスピニング加工 (へら絞り)

— 手作りの現場密着型ものづくり —

荒井 裕彦

スピニング加工とは、金属素材を回転させながら加工ローラーを押し付けて成形する塑性加工法で、金型コストが低く多品種少量生産に有利である。スピニング加工にロボット技術を導入して、これまでは困難だった異形状の成形を実現し、加工機メーカーとの連携により実用的な加工機のプロトタイプを開発した。この研究では、実用化の優先を基本的方向性としてボトムアップかつ探索的に進め、現在の状況に応じ目標やシナリオを常時修正した。その場で入手可能な有限のリソースの組み合わせを活用するブリコラージュが研究活動において大きな役割を果たした。現場・現物・現実を重視する三現主義の立場で意思決定を行った。顧客満足度の向上を価値基準に加え、営業活動も研究のうちに位置づけた。

キーワード: スピニング加工、ロボット、塑性加工、ボトムアップ、ブリコラージュ、三現主義

Spinning process using robot technology

– Field-based bricolage of manufacturing technology –

Hirohiko ARAI

Metal spinning is a plastic forming method in which rotating metal material is pushed by a roller to form a product. It is suitable for production of a wide variety of products in small quantities due to low cost forming dies. We have achieved fabrication of non-axisymmetric shapes by using robot technology, which was difficult to realize by conventional methods. A prototype of a practical spinning machine has been developed in collaboration with a spinning machinery manufacturer. In this research, we have basically set preference for commercial realization over academic contribution. This research was carried out in a bottom-up and trial-and-error manner, and the targets of this research were frequently modified depending on the situation. Bricolage, utilizing the combination of available and limited resources at hand, has played a key role in the research activity. Decision-making has reflected Three-actuality theory, which values actual field site, actual material, and actuality. We have added the increase of customer satisfaction to the criteria of value and have set the sales activities as a part of the research.

Keywords: Metal spinning, robot, metal forming, bottom-up, bricolage, san-gen-shugi

1 開発技術の概要

スピニング加工(図1)とは、板やパイプ等の金属素材をモーターで回転させながら、加工ローラーを押し付けて成形する塑性加工の一手法である^[1]。空洞状の金属製品を作る方法として、アルミニウム、鉄、ステンレス他さまざまな金属素材に適用できる。照明器具、調理器具、自動車、電気製品、化学プラント、圧力容器、航空宇宙、建築装飾等の産業に広く利用される。また人力によるスピニング加工をへら絞りと呼び、ものづくりの高度な熟練技能の一つとして知られている。スピニング加工の長所は、①金型がオス側だけで済むために金型コストが低い、②切削加工と比べ材料の歩留まりが良い、③加工に要する力が小さく装置が小型で騒音・振動が少ない等である。

筆者らは、より付加価値の高い加工を行うために、スピニング加工へのロボット制御技術の導入を試みてきた^[2]^[6]。特に楕円形や多角形、偏心等の異形状が成形できる

スピニング加工機および加工法を開発している。中空の金属製品を作る場合、これまでのスピニング加工で成形できる丸物以外の製品は、手間のかかる板金溶接や型代の高価なプレスで作らざるを得なかった。この加工法では一般に金型を1個しか必要とせず、型を使わずに成形できる場合もあるので、プレス加工と比べて型のコストがとても低

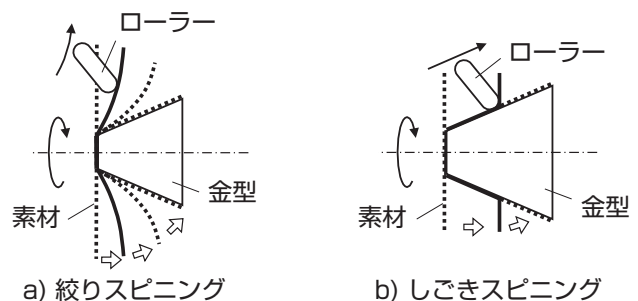


図1 スピニング加工(板材の場合)

産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 〒305-8564 つくば市並木 1-2-1 つくば東
Advanced Manufacturing Research Institute, AIST 1-2-1 Namiki, Tsukuba 305-8564, Japan E-mail: h.arai@aist.go.jp

Original manuscript received January 26, 2012, Revisions received March 5, 2012, Accepted March 7, 2012

く、立ち上げも速くなる。現状では1個あたりの加工時間が数十秒～数分程度かかるため、大量生産にはやや不向きだが、小ロットの多品種少量生産、単品の特注品や製品開発における試作等に威力を発揮することが期待できる。

異形形状を成形するには「力制御スピニング」「同期スピニング」という二つの方法を用いている。これらにより、これまでの丸物用のスピニング加工機ではもちろん、熟練者によるへら絞りでも不可能だった異形形状の成形に対応できるようになった。力制御スピニング^[3]では、作りたい形状と同じ異形形状の金型を用い、加工ローラーを力制御して成形を行う。ローラーの押し付け力を適切な値に保つように制御し、回転する金型に素材を押し付ける。一方、金型の回転軸と平行な方向には、ローラーを一定速度で送り制御する。ローラーは金型形状に倣って動き、素材を型に密着させる。その結果、金型と同じ異形形状の製品を作ることができる(図2)。

初めは図3のような加工機を実験に用い、ローラーをボールネジで駆動していたが、異形形状を成形する場合、金型の表面形状に合わせてローラーを半径方向にとても速く往復させる必要がある。そこで、ローラーをリニアモーターによって直接駆動する新たなスピニング加工機(図4)を試作した^[4]。力制御の応答性が高く、ローラーが金型の形状に

すばやく追従するので、成形時間を大幅に短縮できる。また、力センサーを用いない開ループ力制御でも異形断面形状が成形できる。

同期スピニング^[6]では、加工ローラーをワークの回転角と同期して数値制御する(図5)。そのため回転角が制御できるサーボモーターによって主軸を駆動する。ワークの回転角に応じて加工ローラーを半径方向に前進/後退させ、ローラーとワークの接触点の軌跡が作りたい断面形状を描くようにローラーを動かす。一方、主軸方向に沿って断面形状を変化させ、ワーク全体を所定の形状に成形する。この方法では金型を用いずに異形断面形状を成形することもできる。成形後の型の取り出しが困難な異形断面管を中空のまま成形する際等に、特に有効である。同期スピニングによるパイプ加工に適した2ローラーの加工機(図6)も試作した。

さらに、スピニング加工機の専門メーカーである株式会社大東スピニングとともに、異形形状に対応した実用的なスピニング加工機のプロトタイプ(図7、表1)を共同開発した^[6]。上記の力制御スピニングと同期スピニングの両方が、この機械で実行可能である。推力増加と摩擦低減を両立させた吸引力相殺型リニアモーターを採用し、ワーク直径400 mm、厚さ2 mmの鋼板まで成形できる。この機械は

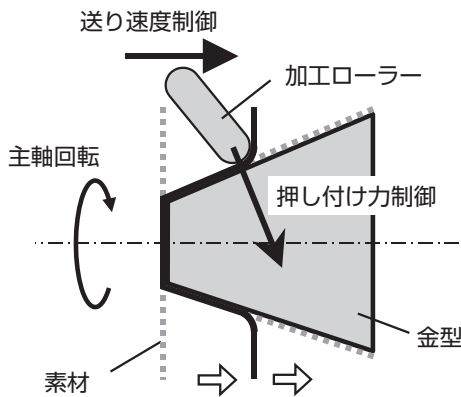


図2 力制御スピニングによる異形形状の成形

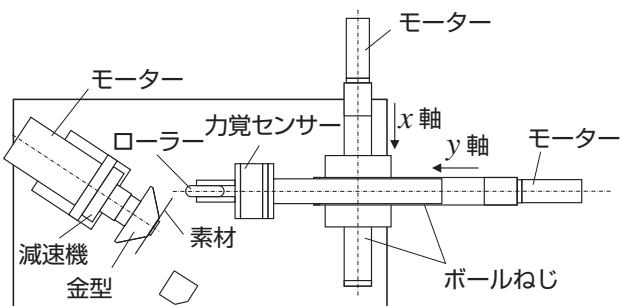


図3 スピニング加工実験装置

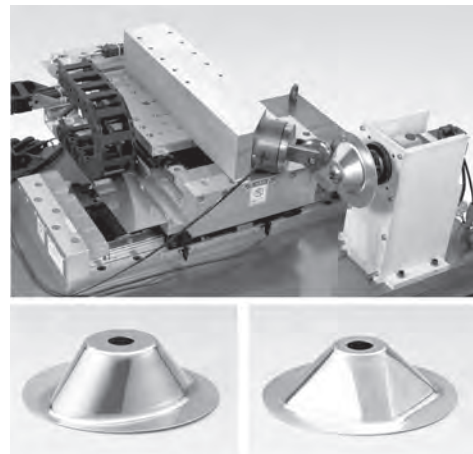


図4 リニアモーター駆動スピニング加工機(実験機)と成形例
http://staff.aist.go.jp/h.arai/linspin_j.html

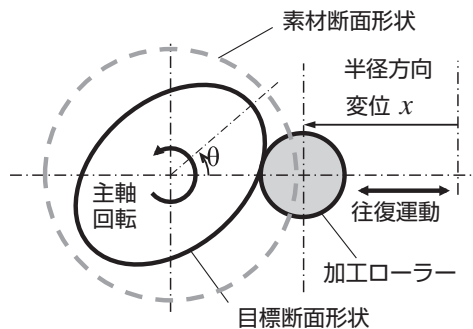


図5 同期スピニングによる異形形状の成形

開発以来、日本国際工作機械見本市、おおた工業フェア等多数の展示会に出展し、異形状のスピニング加工の実演を行った。同社ではこれをベースとした加工機の受注販売を開始した。現在までの出荷実績は1台のみだが、株式会社パパスという金属加工業の企業に納入されている(図8)。

2 背景と動機

2.1 学術性偏重への反省

この研究は産業技術総合研究所（産総研）が独立行政法人化した2001年頃に着手した。そのきっかけとなったのは、それまでの工業技術院（工技院）時代に筆者自身が行ってきたロボット分野の研究-学術性の偏重-への反省である。例えば、学術論文の冒頭で研究目的を説明するとき、自分自身の対応を振り返ると、それは多くの場合、近い将来には実現することが困難な目標を掲げる等、学術的な研究を正当化するために机上で創作したフィクションだった。論文の研究目的にはある程度のもっともらしさは求められるが、厳密な真偽の検証は要求されず、査読過程にお

表1 プロトタイプ機の主要な諸元

寸法	巾 2875 mm × 奥行 1820 mm × 高さ 1895 mm
X軸 (半径方向)	吸引力相殺型リニアモーター 定格推力 4000 N
Z軸 (主軸方向)	サーボモーター + ボールねじ 定格推力 10000 N
主軸	サーボモーター + 遊星減速機 定格出力 7.5 kW 定格回転数 375 rpm
ワーク	最大直径 400 mm 最大高 350 mm

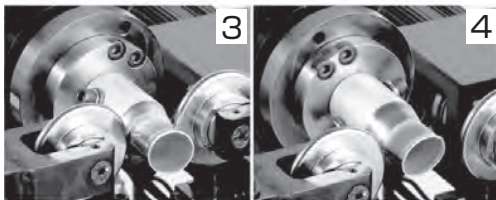
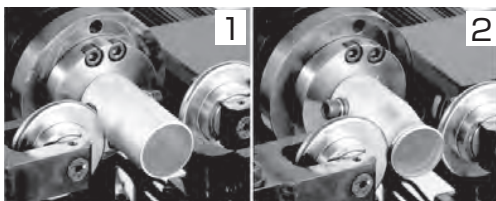
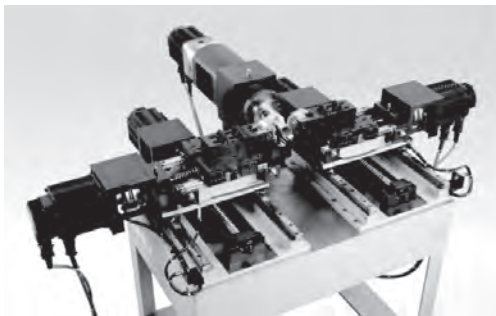


図6 2ローラー加工機を用いた同期スピニング

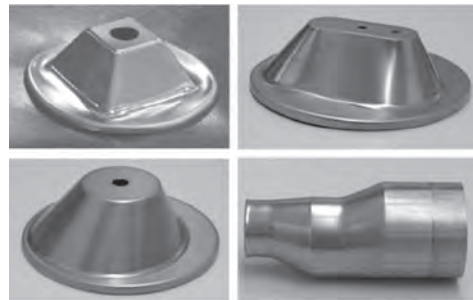
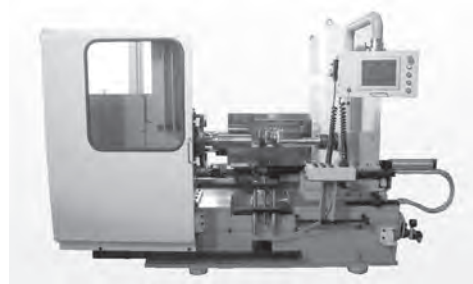


図7 異形状が成形可能なスピニング加工機の実用機プロトタイプ



図8 企業に導入された異形スピニング加工機

いて採否には影響しない傾向がある。一方、いったん論文が採択されると、こうした虚構であるかもしれない研究目的を含めて研究内容がオーソライズされがちである。こうして作られた研究目的は、研究の存在意義を肯定するのに都合よくできているため、同じ系譜の研究では正当化の理由が継承されることが多い。また先行研究の存在自体が後発研究を正当化する場合もある。研究目的の再引用が繰り返され、多数の研究者間で流通するうちに、フィクションがあたかも検証された事実であるかのように錯覚され、独り歩きを始める危険性がある。筆者自身、虚構と自覚しつつ書いた研究目的がそのまま他の研究者に引用されるに至り、空恐ろしさを感じるようになった。

この研究に着手した当時、ロボット分野では産学が乖離し、学術的な研究は盛んだが研究成果の実用化は進まない、という状況が続いていた。その背後には、こうした研究目的の虚構性という問題があると感じられた。また筆者は、それまで産業用ロボットへの関心が薄く、製造業分野を応用先として想定したことがあまりなかったが、それも実用に結びつく研究ができない原因の一つと考えた。こうした問題意識のもとに、ものづくり分野での実用的なロボット研究の課題を模索しはじめた。

2.2 へら絞りとの出会い

2001年8月にH2Aロケット1号機が打ち上げに成功し、そのノーズコーンがへら絞りで製作されたことから、へら絞りの作業がテレビで繰り返し放映された。その頃「ものづくり」のブームがあったことも一つの原因である。筆者はそれにより、へら絞りの存在を初めて知り、一種の直観として説明できないが、この研究の着手を決心した。

当初は、産業用ロボットの応用として、先端にローラー工具を取り付けたロボットアームを用いるへら絞り作業(図9)をイメージし、人工の熟練技能工の工学的な実現の一例として構想していた。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、多くの理論的・技術

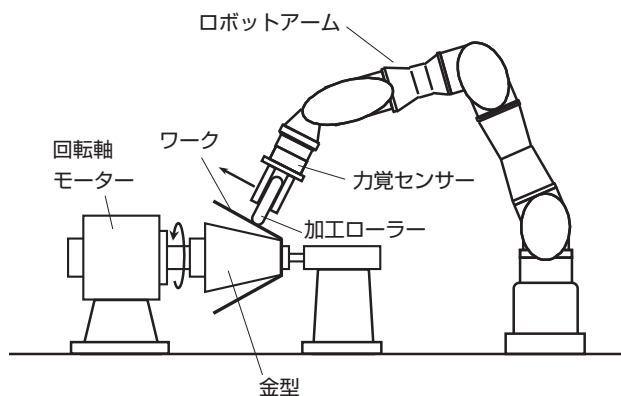


図9 初期の構想（へら絞りロボット）

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、力制御が実用化されているのは組立・研削等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った。へら絞りでは作業者の感覚、特にローラーを介して伝わる力の感覚が重要な役割を果たす。また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のはるかに小さい。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と考えた。手作業による生産がビジネス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、ロボット技術を導入した際の採算性は高いと推測した。またこの研究には研究を通じたロボット研究者へのメッセージ発信という裏の意図も込めており、ロボット技術の特長とポテンシャルを活かせる良質な応用領域が、ものづくり分野に開けていることを具体的な応用例をもって示すことで、ロボット研究者の製造業への関心を喚起したいと考えた。

3 研究のスタイルと行動原理

3.1 ボトムアップの研究スタイル

この研究は、筆者にとってロボット分野から塑性加工分野という異分野への進出であり、予備知識ゼロからのスタートのため、何も分からない状態から手探りで研究を進めていった。そのため前章に述べた研究目標も正しく設定できているとは信じず、あくまで仮のものという前提に立った。したがってトップダウンで目標実現の具体的なシナリオを立て、開発すべき要素技術へとブレイクダウンするという計画駆動的なやり方は選択しなかった。

代わりに、「ロボット技術を応用してスピニング加工に役立つ技術を実用化する」という程度の緩い方向付けのもとで、曖昧な研究目標、仮のシナリオのまま、とりあえず手を動かしてものを作り、随時修正を加えるという戦術をとった。現物を動かすことで、研究の進展、新たな発想、認識の変化、偶然の外部要因等の状況変化が生ずる。それに応じて、目標変更やシナリオ書き換えを常に行う。また、要素技術はその場その場での手持ちのありあわせを使い回し、第一の選択基準は今すぐ手に入って使えることとした。こうしたものを使って開発された技術を、新たに要素技術のストックに加えた。ボトムアップで探索的なアプローチであり、分析的な計画による事前合理性よりも結果のフィードバックによって得られる事後合理性^[7]を重視した。

3.2 研究の方向性と行動原理

基本的な方向性は、実用化の優先で、学術的な興味よりも有用性を第一に考え、さきに述べた研究目的の虚構性を極力排除するよう努めた。また行動原理としては、①ブ

リコラージュ、②三現主義、③営業マインド、の3点に特徴があったと考える。

「ブリコラージュ」bricolageとは、人類学者レヴィ=ストロースが著書「野生の思考」^[8]の中で創造的な思考活動の原初的な形態として取り上げた概念である。フランス語で「器用仕事」を意味し、持ち合わせの道具や材料を工夫して組み合わせ、自分の手で物を作ることをいう。芸術や教育の分野で注目されることが多かったが、近年、経営学等の分野で、技術経営や知識管理、組織論の立場から、事業創出やイノベーションにおけるブリコラージュの実利的な効用が議論されている^{[9][14]}。制約された経営資源のもとでの事業創出におけるブリコラージュの役割を論じた文献^[13]では、ブリコラージュを「新たな問題や機会に対して手持ちの資源の組み合わせを用いて間に合わせること」と再定義している。ここで資源とは、単に道具や材料等の物的資源だけでなく、技術や人材等を含む広い意味に拡張されている。また、ブリコラージュを構成する主要な要素として、1) 目下の問題とは関係なく集められた持ち合わせの資源を利用すること、2) 本来の用途から外れた使い方も含む組み合わせで、既存の資源から新たな価値を生み出すこと、3) 制約を受け入れず、問題に対して積極的行動を指向すること、の3点を挙げている。この研究のスタイルは、意識してブリコラージュを行ってきたわけではないが、上記3点のいずれとも合致していると言える。

三現主義とは、現場・現物・現実の3つの「現」を重んじる考え方である。問題が生じたときに、机上の論理に頼るのではなく、現場に足を運び、現物を手に取って眺め、現実を把握するという基本姿勢であり、ホンダやトヨタをはじめとする日本の企業の多くに行動規範として広く浸透している。こうした考え方は日本ばかりでなく、例えばファーガソンによる「技術屋（エンジニア）の心眼」^[15]にも三現主義に近い思想が見られる。また文献^[11]でブリコラージュの成功例として取り上げられた、デンマークの風力タービン開発も現場重視で進められた。三現主義は単なる精神論ではなく、最終結果からのフィードバックの経路を短く、修正のサイクルを速くすることにより、途中で加わるノイズやバイアスを排除する効果をもつ。この研究では探索的な意思決定の場面で、現場・現物・現実に基づく判断を行うことが多かった。ただし、産総研は開発された成果が実際に使われる生産の現場をもっているわけではない。そこでこの研究では、そうした現場に少しでも接近するためのいくつかの工夫を行った。

また研究者とは、無形の財を提供するなりわいである点で、突き詰めればサービス業に属する。サービスは顧客に届いて、はじめて意味をもち価値を生む。そこで、顧客満

足度の向上を研究の価値基準に加え、営業活動も研究のうちという意識をもつように努めた。

4 研究の経過

4.1 手作りの加工機からの出発

まず、自分で実際にスピニング加工を行うために簡単な加工機（図3）を組み立てるところから出発した。高価な力センサーやサーボドライバーは、昔の装置のジャンクを再利用し、約100万円の材料費で作ることができた。また制御用のパソコンは、他の研究者から中古を譲り受けたものにISAバスの入出力ボードを搭載し、Windows98のDOSモードでTurbo C++を使ってプログラミングを行った。装置を動かすためのプログラムや制御則等も、過去のロボット研究で用いたものを改造して流用した。当時としても時代遅れの構成だったが、1 msecのサンプリングでの実時間制御が十分可能であり、これを用いて力制御を用いたスピニングの基礎実験を進めた。

4.2 ロボットアーム応用の挫折

一方、産業用ロボット応用による熟練技能の実現という技術コンセプトは、比較的早い時期に挫折した。ロボットアームを用いて行ったスピニング加工は、剛性不足による振動発生で失敗し、後にも再度挑戦^[16]するが、実用化につながるような結果はいまだ得られていない。もう一つの問題は、誰がこの技術の顧客となるのかが曖昧なことだった。産業用ロボットメーカーなのか、ロボットを使って加工を行うユーザー企業なのか、スピニング加工機メーカーがロボットアームを使うのか、ということが絞られていなかった。以後は産業用ロボットの応用ではなく、旋盤型の加工機に集中して、従来機の高機能化という形をとる。これにより技術の提供先が加工機メーカーへと明確化した。

4.3 技能観の変化による方向転換

また、元旋盤工の作家である小関智弘氏の著作^{[17][18]}から、町工場におけるものづくりについて学ぶうち、熟練技能の本質は反復訓練による体技ではなく、創造的な思考プロセスにあることを認識した。人間には人間の技能、機械には機械の技能があり、人間の技能をそのままロボットにコピーすることは意味がない。技能そのものが目的ではなく、それによる製品の付加価値が重要なことから、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た。

機械を現場で使うのもやはり人間であるから、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。力制御スピニングで言えば、どのよう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。ものづくりにおける熟練は、必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。筋力や手技を機械に置き換えたとしても、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、やはり不可欠である。そこで熟練技能者の代替ではなく、人間が使いこなすことで威力を発揮する高度な道具としての装置開発を目指すようになった。

4.4 異形状成形への集中化

一方、最初に作った装置では、力制御スピニングの応用により異形状の成形に成功し、これがこの研究のセールスポイントとして製品イメージの中心となる。その頃、産学官連携部門の協力で、企業との定期的な交流を開始した。スピニング関連を含む数社の企業を招いた研究会で産総研のシーズを紹介する一方、企業側のニーズを聞くことで開発ターゲットをある程度絞込んだ。加工機メーカーの(株)大東スピニングはこの研究会に参加しており、異形状の成形に深い関心を示して共同研究の申し出があった。この提案に基づいて中小企業庁による共同研究予算を獲得し、同期スピニングの実験機(図6)を試作した。

力制御スピニングによる異形状では加工時間の短縮が問題だったが、たまたま訪れた国際ロボット展でリニアモーターを見かけたことから、加工機への利用を考案した。この研究では学会発表よりも特許出願に力を入れていたが、リニアモーターを用いた加工機についての出願がきっかけとなって知的財産部門による特許強化の予算を獲得し、リニアモーター実験機(図4)を試作することができた。

4.5 実用機の普及を目指して

後述する試作トライと展示会での加工実演を繰り返すうち、(株)大東スピニングから知財ライセンス契約の申し出を受けた。これをもとに、特許関連予算により実用機プロトタイプのコラボ開発を行った(図7)。一方で、筆者自身は2009年に先進製造プロセス研究部門へ異動し、研究の重点をロボットの応用分野開拓から加工技術自体に移すこととなる。(株)大東スピニングでは異形状に対応可能な加工機の受注生産も開始したが、リーマンショック以後の景気停滞で普及は滞っており、打開を模索している。

4.6 シナリオに依存しない研究展開

上記のように研究が進展する経過を辿ると、一貫したシナリオはなく、外部要因や偶然要因によって研究目標が大きく変遷していることが分かる。予算獲得や企業との交流、展示会への出展等のポジティブな外部要因としては、産総研内の産学官連携部門や知的財産部門からの働きかけというケースが多く、これらの研究支援部門がこの研究の進展に果たした役割はとて大きい。またこの研究で

は、工技院時代からの名残でロボット分野と製造分野の研究室がモザイク状態に混在して配置されていたことがプラスに作用し、特に塑性加工分野の知識習得でとても役立った。

5 特徴的な研究活動

5.1 ブリコラージュによる構成—ボトムアップの要素技術統合

前章の冒頭で述べた加工機の自作も典型的なブリコラージュだが、この研究では随所でさまざまなレベルのブリコラージュを行っている。要素技術はおおよそ階層構造に整理でき、下位から見て実現すべき機能が上位から見れば要素技術となっている。例えば開始当初は力制御や位置制御を手持ちの要素技術としてもっていた。それらを組み合わせて、加工機の動作としての力制御スピニングや同期スピニングを実現した。次の段階では、それらを要素技術として組み合わせて、実際の部品に対して板材加工やパイプ加工を行った。このように下からの積み重ねで技術をストックした道具箱を充実させていった(図10)。このとき基本要素となっている制御則等は、ロボット分野で行った研究に由来しており、例えば力制御スピニングで用いたインピーダンス制御は、もともと人間とロボットの協調作業の研究^[19]に用いていた制御則をアレンジして使っている。

加工時間短縮のために採用したリニアモーターも、すぐ入手可能な既存の要素技術である一方、通常の用途とは少し違う使い方をしている。リニアモーターステージは高速・高精度の位置決めデバイスとして使われることが多いが、ここではバックドライバビリティ(力が加わったときに、柔軟にその力に追従して押し戻される特性)が優れた力制御用のアクチュエータとして用いた。資源のもつ属性を読み替えて、意図された機能とは異なる機能をも引き出して使うというブリコラージュの特徴が、ここにも見られる。また、リニアモーターではボールネジ等の伝達機構による損失がないことを利用して、力センサーを用いない開ループ制御で力制御を行っている。これは20年以上前に行った、ダイレ

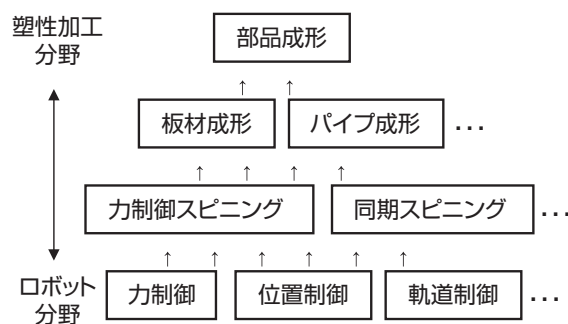


図10 要素技術の階層構造

クトドライブロボット（関節軸に減速機を用いないロボット）による開ループ力制御の経験^[20]から発想したものである。

（株）大東スピニングとの連携により、現場での使用に根ざした手持ちの要素技術のレパートリーを増やすことができた。実用機プロトタイプの開発では、金属素材を主軸に固定するための心押し棒やブランク受け、素材の板にしわが発生するのを防ぐバックアップローラー等、これまでのスピニング加工機が備えていたさまざまな周辺機能を付加することで、実用性をより高めている。

5.2 試作トライによる加工ノウハウの蓄積—現場・現物・現実に近づきたい

この研究では、企業との共同研究を通じた実部品の試作トライが大きな役割を果たしている。生産の現場をもたない産総研にとって決定的に不足するのは、経験の積み重ねに基づく要素技術へのフィードバックである。例えば異形断面形状の成形に成功したといっても、当初は限定された材料と加工条件の下での単純な形状の成形にすぎなかった。これをさまざまな金属材料、加熱下の温間加工、多サイクルの絞りスピニング、段やくびれのある複雑形状等へとバリエーションを広げていかなくてはならない。一方、どの要素を優先して開発を進めるべきかを絞り込まなくては、いたずらに労力を費やす結果となる。開発する価値のあるノウハウをピンポイントで選択して効率良く開発していくためには、企業と連携して、現実の部品を試作することが最も近道である。開発された加工技術は少なくとも類似部品に関しては無駄にならない。手持ちのノウハウを増やし、それらを組み合わせることで多彩な加工に対応することができる。

金属加工業、自動車部品、計測機器、金属材料等多数のメーカーから試作テストの依頼を受け、保有している実験用加工機を駆使して企業から提示された部品の試作を行い、それを通じて加工に必要なノウハウを開発した（図11）。実際のテストはこれまでに10件程度だが、打診のみのケースを含めると30件以上にのぼる。テストには至らな

い場合でも、打ち合わせの過程で、どのような形状にニーズがあるのか把握することができ、とても参考となった。テストでは開発スピードが重要なため、治具や材料等については企業から現物支給を受けた。また、加工機の改良に必要な設計データを取得した。こうした実績を積み種々の加工サンプルを揃えることは、加工法のPRともなった。実際の装置導入には至っていないものの、ユーザー企業から（株）大東スピニングに装置製作の見積り依頼を行うケースも出てきている。

試作トライを通して、材料特性等の塑性加工知識の重要性を再認識した。またユーザーには、装置だけでなく加工ノウハウも提供する必要があることを理解した。試験の積み重ねにより、手持ちの治具の種類が増えてきたため、これまでは難しかった形状や材料にも対応し易くなった。成形する形状は角筒、変形パイプ、湾曲形状等次第に難度の高いものとなっており、扱う材料も種類が増えて、異形部品成形のノウハウの幅を広げることができた。工場の現場に入って加工テストを繰り返すうち、現場知識を取り入れてそれを開発に活かす機会も多い。筆者自身もかなり職人化することで、現場技術者との意思疎通が円滑となった。

5.3 営業活動と研究活動の融合

5.3.1 展示会における加工実演

この研究では、外部の展示会に加工機を持ち込んだ加工実演を重視しており、現在までに出展回数は11回に上る。成果普及のメディアとしてとても有効であり、潜在ユーザーからのフィードバックを受ける場としても活用してきた。特に工作機械見本市等ものづくりの専門企業が多数出展する大規模展示会では、中小企業の現場作業員から大企業の管理職まで広い範囲のプロフェッショナルに加工を見せて、意見や質問を聞くことができた。とても厳しい意見も含め、実用化のために取り組むべき課題について、学会発表よりもはるかに有益な知見が得られた。試作トライを依頼してきた企業の大半は、展示会で加工実演を見た企業である。一方で、産学連携を目的とした分野不問の展示会では、専門家の来場者比率が少なく、あまりこうした効果は得られなかった。

5.3.2 Web利用による営業活動

上記の試作トライと展示会出展も営業活動の一環だが、Web利用を軸とした営業・広報も展開した。研究に着手した時期に、スピニング加工の業態、地域分布、加工例等を学ぶため、Web検索でスピニング加工関連の企業を検索した。国内115社・国外189社の企業が見つかり、開発した技術の受け皿として十分なボリュームをもつ産業であることが確認できた。これを基に「スピニング加工・へら絞りリンク集」というリンク集^[21]を作成した。各社に対して

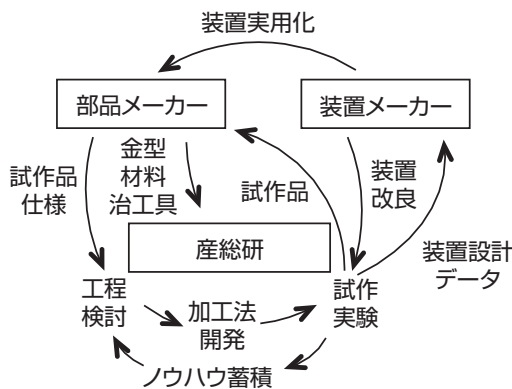


図11 試作トライによる加工ノウハウの蓄積

リンク作成の連絡をすると同時に産総研での研究内容を送付して紹介した。また、企業連絡先をリスト化し、展示会の前には近隣の企業に招待状を送付した。展示会で関心を示した企業には、資料や加工の動画 CD、場合によっては加工サンプルを送る等のフォローアップに努めている。「スピニング加工」で google 検索をかけると第 1 位はこの研究のページで、第 2 位は上記のリンク集（2012 年 1 月までに約 2 万 9 千ヒット）である。このページが入り口となったリンク依頼、技術相談、試作問い合わせ等企業からの接触も多い。こうした営業活動も、手持ちの限定された資源を組み合わせることで効果を得ている点で、一種のブリコラージュと言える。もっとも、スピニング業界に広い販路をもつ株大東スピニングと連携してからは、アマチュア的な営業の出番も減ってきている。

6 考察と今後の展開

基本的に既存技術で構成されたこの研究の価値は、専門分野のはざまで見落とされたニッチ領域を発見できた点にあると思われる。ロボット分野と塑性加工分野の間の発想のギャップのために誰も着手していないところに、思い切って飛び込んだことが、異形成形のブレイクスルーを生んだと考える。ロボット研究者は製造業への関心が低く、そこでの応用模索を怠り、塑性加工研究者はメカトロニクス知識が壁となって新規な制御技術の適用を敬遠するため、どちらからも空白となっていた所にうまくはまり込んだ形である。

元来ブリコラージュは近代的な科学技術と対立する思考様式として文献^[8]に登場する。しかしこの研究では、ブリコラージュが研究活動そのものとして重要な役割を果たした。ブリコラージュは既存かつ有限の資源から出発するが、各資源の意味の読み替えにより無限の組み合わせが生じ、新たな価値が創造される^[14]。新製品の開発においても、本質的に新しい要素技術は通常ほんの一部であり、大半は既存技術で構成されるため、そこにはブリコラージュが要求される。またブリコラージュでは、一般に使い慣れた手に入りやすい構成要素を使うため、信頼性が高く実用化の敷居の低い技術が得られると考えられる^[11]。

この研究では、当初のシナリオや自己のコア技術に固執せず、臨機応変に外部要因や結果のフィードバックに対応して研究を化けさせていったこと、とりわけ袋小路に陥りそうな方向から迅速に撤退したことが良い結果をもたらした。現場・現物・現実の三現主義が早期の判断の助けとなった。

現時点では経済状況の影響もあって、いまだ実際の生産現場で十分使われておらず、売れる技術になっていない点が極めて不満足である。いわゆる「研究の手離れ」よりも

普及に至るまでのアフターサービスを志向しており、最後まで責任をもちたいと考えている。多品種少量生産に有利といっても加工のスピードは重要であることが企業との交流から理解できたので、今後の展開として、加工機の高速度・強化とそれに伴う課題に取り組みたい。また、マグネシウム等難加工材料への適用にも着手しており、材料学的な知見との融合もさらに必要と感じている。

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] 荒井裕彦: 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, 22 (6), 798-805 (2004).
- [3] 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 (1), 140-145 (2006).
- [4] 荒井裕彦: リニアモータを用いた力制御スピニング加工機, 日本ロボット学会誌, 26 (1), 49-56 (2008).
- [5] 荒井裕彦, 藤村昭造, 岡崎功: 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, 687-688 (2005).
- [6] 荒井裕彦ほか: 異形断面形状が成形可能な力制御スピニング加工機, 日本ロボット学会誌, 28 (1), 49-50 (2010).
- [7] 林晋, 黒川利明: 二つの合理性と日本のソフトウェア工学, 科学技術動向, 42, 11-21 (2004).
http://www.nistep.go.jp/achieve/ftx/jpn/stfc/stt042j/0409_03_feature_articles/200409_fa01/200409_fa01.html
- [8] C. レヴィ=ストロース(大橋訳), 野生の思考, みすず書房, 22-28 (1976).
- [9] K. E. Weick: *Making sense of the organization*, Wiley-Blackwell, 57-68 (2000).
- [10] C. Ciborra: *The labyrinths of information: Challenging the wisdom of systems*, Oxford University Press, 29-53 (2002).
- [11] R. Garud and P. Karnoe: Bricolage versus breakthrough: Distributed and embedded agency in technology entrepreneurship, *Research Policy*, 32 (2), 277-300 (2003).
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048733302001002>
- [12] T. Baker, A. Miner and D. Eesley: Improvising firms: Bricolage, account giving and improvisational competency in the founding process, *Research Policy*, 32 (2), 255-276 (2003).
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048733302000999>
- [13] T. Baker and R.E. Nelson: Creating something from nothing: Resource construction through entrepreneurial bricolage, *Administrative Science Quarterly*, 50 (3), 329-366 (2005).
<http://asq.sagepub.com/content/50/3/329>
- [14] 三宅秀道: ブリコラージュと製品開発, 東海大学紀要政治経済学部, 43, 161-175 (2011).
http://www.u-tokai.ac.jp/undergraduate/political_science_and_eco/kiyou/index/pdf/2011/12_mitake.pdf
- [15] E.S. ファーガソン: 技術屋(エンジニア)の心臓, 平凡社 (1995).
- [16] A. Ozer and H. Arai: Robotic metal spinning - Experimental implementation using an industrial robot arm, *Proc. 2009 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA2009)*, 140-145 (2009).
- [17] 小関智弘: 町工場 世界を超える技術報告, 小学館 (1999).
- [18] 小関智弘: 鉄を削る-町工場の技術, 筑摩書房 (2000).
- [19] 田窪朋仁, 荒井裕彦, 谷江和雄, 林原靖男: 人とロボットに

よる長尺物の協調運搬(仮想非ホロノミック拘束による水平面内の制御手法), *日本機械学会論文集C編*, 66 (648), 2677-2684 (2000).

- [20] 荒井裕彦, 館暉: 直接駆動マニピュレータの人力操作における操作力検出と能動的力補助, *日本ロボット学会誌*, 4 (3), 209-219, (1986).
- [21] 荒井裕彦: *スピニング加工・へら絞りリンク集* (2003). http://staff.aist.go.jp/h.arai/splink_j.html

執筆者略歴

荒井 裕彦 (あらい ひろひこ)

1982年東京大学工学部卒業。同年本田技研工業(株)勤務。1984年通産省工技院機械技術研究所入所。2001年産業技術総合研究所知能システム研究部門技能・力学研究グループ長。2003年同部門副部門長付主任研究員。2009年先進製造プロセス研究部門難加工材成形研究グループ主任研究員。2005年より筑波大学大学院システム情報工学研究科教授(連携大学院)兼任。博士(工学)。日本機械学会フェロー、日本ロボット学会フェロー。日本塑性加工学会、IEEEの会員。この研究では着想から装置開発、加工実験、営業活動までを担当。



査読者との議論

議論1 第4章の構成

質問(長谷川 裕夫:産業技術総合研究所つくばセンター)

研究の成果をまとめた第4章の部分は、ロボットアーム適用の挫折から、熟練技能の代替というロボットの発想ではなく高度な道具を目指し、加工機の改良のアプローチによる成功、さらに高付加価値製品製造を可能とする力制御スピニングの開発に至る、この論文における独自の研究開発の流れが明確になるよう構成してください。

回答(荒井 裕彦)

第4章をいくつかの節に分割してタイトルを付け、ある程度のみより毎に意味を与えました。第4章で最も言いたいことは、「研究が進展する経過をたどると、一貫したシナリオはなく、外部要因や偶然要因によって研究目標が大きく変遷している」という点でした。それがこの研究でとったボトムアップで探索的なアプローチと密接に関連しています。そこで、研究開発の過程でいくつかの事柄が複線的に流れながらいろいろな事象がランダムに起きて、そのつど臨機応変に対応していくという、混沌とした研究経過の現実の姿をなるべく反映させるような記述を採りました。

議論2 第5章の構成

質問(長谷川 裕夫)

第5章は、第3章で述べた行動原理の具体的な記述となっています。プリコラージュ、三現主義、営業マインドの3つの原理に対応させて、節とそのタイトルを構成してください。また、研究開発におけるプリコラージュの部分では、理解を助けるための図がある方がよいと思われます。

回答(荒井 裕彦)

第5章の各節のタイトルを、「5.1 プリコラージュによる構成 - ボトムアップの要素技術統合」、「5.2 試作トライによる加工ノウハウの蓄積 - 現場・現物・現実に近づきたい」、「5.3 営業活動と研究活動の融合」として、第3章で述べた行動原理のそれぞれが第5章の活動のどこに現れているかが明確になるように構成しました。また、プリコラージュによる構成の説明用として「要素技術の階層構造」を示す図を追加しました。

議論3 この開発技術の達成レベル、ブレイクスルー

質問(松木 則夫:産業技術総合研究所四国センター)

第1章の開発技術の概要において、達成された技術レベルの自己評価をしてください。開発された技術が、例えばこれまでの熟練者によるへら絞り加工等と比較してどうなのか、精度、加工速度、制限事項等の項目について検討をお願いします。また、今回開発された技術しかできないブレイクスルーがあれば、記述してください。

回答(荒井 裕彦)

第1章に、「これらにより、これまでの丸物用のスピニング加工機ではもちろん、熟練者によるへら絞りでも不可能だった異形状の成形に対応できるようになった」という記述を追加し、この開発技術がこれまでの加工技術にない優位性をもつことを明らかにしました。この開発技術で一番のブレイクスルーと考えられる異形状成形に関しては、スピニングという同じ土俵の上では直接比較する対象がありません。プレス加工との比較として、「現状では1個あたりの加工時間が数十秒～数分程度かかるため大量生産にはやや不向きですが、」という表現を追加しました。

議論4 ブレイクスルーを生み出した研究開発の流れ

質問(松木 則夫)

この開発技術のブレイクスルーや特徴的な技術が、どのような研究スタイル、行動原理により得られたのか、という視点で、第3章、5章を対比する形で記述していただくと分かりやすくなると思います。同様に、第4章では、新たに達成された技術がどうして起こったのか、という視点を強調していただきたいと思います。

回答(荒井 裕彦)

第3章、第5章の活動は、第1章に述べたブレイクスルーを得るためというよりも、ブレイクスルーを現実解に落とし込んで、使ってもらえる形にするための努力のほうにウエートを置いています。第3章で述べた行動原理のそれぞれが第5章の活動のどこに現れているかが明確になるように第5章の各節のタイトルを修正しました。

第4章では、「研究が進展する経過をたどると一貫したシナリオはなく、外部要因や偶然要因によって研究目標が大きく変遷している」という点を最も述べたかったため、いくつかの事柄が複線的に流れながらいろいろな事象がランダムに起きて、そのつど臨機応変に対応していくという、混沌とした研究経過の現実の姿をなるべく反映させるような記述を意図的に選びました。新たに達成された技術が得られた要因は、むしろ第6章で述べた「専門分野のはざまで見落とされたニッチ領域を発見できた」ということが最も大きいと思われるので、その部分の記述を強調しました。