

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 －

〔和文要約〕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従来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。本研究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合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。

Study on metal spinning using robot technology

- Bricolage for reality-situated development of a manufacturing process -

Abstract: Metal spinning is a plastic forming method in which rotating metal blank is pushed to form by a roller tool. It is suitable for limited production lots of a wide variety of products due to low cost forming dies. Forming of non-axisymmetric shapes, which has been conventionally difficult, is achieved by using robot technology. A prototype of practical spinning machine is developed in collaboration with a spinning machinery manufacturer. In this study, commercialization highly took precedence over academic contribution. It was basically driven in a bottom-up and trial-and-error fashion. Temporal target and scenario were frequently modified depending on the current situation. Bricolage, making do with combination of available and limited resources at hand, played a key role in the research activity. Decision making reflected three-reality theory, which makes importance of real place, real thing and real fact. User satisfaction was placed a high value and sales activities were dealt as a part of the study.

1 開発技術の概要

スピニング加工（図1）とは、板やパイプなどの金属素材をモータで回転させながら、加工ローラ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、ステンレスほか様々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、建築装飾など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、などである。

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、偏心など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、従来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。本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非常に低く、立ち上げも速くなる。そのため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などに威力を発揮することが期待できる。

異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2つの方法を用いている。力制御スピニング[3]では、作りたい形状と同じ異形状の金型を用い、加工ローラを力制御して成形を行う。ローラ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、ローラを一定速度で送り制御する。ローラ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、ローラをボールネジで駆動していたが、異形状を成形する場合、金型の表面形状に合わせてローラを半径方向に非常に速く往復させる必要がある。そこで、ローラをリニアモータ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[5]では、加工ローラ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を半径方向に前進／後退させ、ローラ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。成形後の型の取出しが困難な異形断面管を中空のまま成形する際などに特に有効である。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本機で実行可能である。推力増加と摩擦力低減を両立させた吸引力相殺型リニアモータを採用し、ワーク直径400mm、厚さ2mmの鋼板まで成形できる。本機は開発以来、日本国際工作機械見本市、おた工業フェアなど多数の展示会に出展し、異形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

本研究は産総研が独法化した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—学術性への偏重—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、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、査読過程において採否には影響しない。一方、いったん論文が採択されると、こうした虚構の研究目的を含めて研究内容がオーソライズされる。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良くできているため、同じ系譜の研究では正当化の理由が継承される。また先行研究の存在自体が後発研究を正当化する。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。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。

本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、一種の直観としか説明できないが、本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った。へら絞りでは作業者の感覚、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。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。また本研究にはロボット研究者への研究を通じた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

本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ー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取った。現物を動かすことで、研究の進展、新たな発想、認識の変化、偶然の外部要因など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合せ、自分の手でものを作ることをいう。芸術や教育の分野で注目されることが多かったが、近年、経営学などの分野で、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合せを用いて間に合わせること」と再定義した。ここで資源とは単に道具や材料などの物的資源だけでなく、技術や人材など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合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。本研究のスタイルは、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持つ。本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持っているわけではない。そこで本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持ち価値を生む。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持つように努めた。

4 研究の経過

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。高価な力センサやサーボドライバ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など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、1msec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。

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未だ得られていない。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、ということが絞りきれなかった。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。

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ぼうと、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。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。

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、これが本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を見かけたことから、加工機への利用を考案した。本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、リニアモータ実験機（図4）を試作することができた。

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、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共同開発を行った（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。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。

上記のように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ことが分かる。予算獲得や企業との交流、展示会への出展など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はたらきかけというケースが多く、これらの研究支援部門が本研究の進展

に果たした役割は非常に大きい。また本研究では工技院時代の名残のモザイク状態によるロボット分野と製造分野の研究室混在にプラスの効用があり、特に塑性加工分野の知識習得で非常に役立った。

5 要素技術の統合

5.1 ブリコラージュによる構成

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、本研究では随所で様々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持っていた。それらを組合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工具箱を充実させていった。このとき基本要素となっている制御則など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も、すぐ入手可能な既存の要素技術である一方、通常の使用とは少し違う使い方をしている。リニアモータステージは高速・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。またリニアモータではボールネジなどの伝達機構による損失がないことを利用して、力センサ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。

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など、従来のスピニング加工機が備えていた様々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

本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。生産の現場を持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。これを様々な金属材料、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などへとバリエーションを広げてゆ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ゆくためには、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、金属材料など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10)。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部品の図面からどのような形状にニーズがあるのか把握する上で非常に参考となった。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、ユーザ企業から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など塑性加工知識の重要性を再認識した。またユーザ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やすくなった。成形する形状は角筒、変形パイプ、湾曲形状など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巾を拡げることができた。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 展示会における加工実演

本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、現在までに出版回数は11回に上る。成果普及のメディアとして非常に有効であり、潜在ユーザ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など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。非常に厳しい意見も含め、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。一方で産学連携を謳っ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。

5.4 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、加工例などを学ぶため、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持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。ま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など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位は本研究のページで、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、試作問合せなど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持つ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本研究の価値は、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。ロボット研究者は製造業への関心が低く、塑性加工研究者はメカトロニクス知識が壁となって敬遠するため、どちらからも空白となっていた所にうまく嵌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。しかし本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合せが生じ、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]。

本研究では、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きわめて不満足である。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、最後まで責任を持ちたいと考えている。今後の展開として、多品種少量生産に有利と言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、加工機の高速度化・強力化とそれに伴う課題に取り組みたい。またマグネシウムなど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：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)，798-805，(2004).

- [3] 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*, 24(1), 140-145, (2006).
- [4] 荒井: 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, 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*, 687-688, (2005).
- [6] 荒井ほか: 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, 黒川: 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/achiev/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: 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)の心眼*, 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, *町工場 世界を超える技術報告*, 小学館 (1999).
- [18] 小関, *鉄を削る—町工場の技術*, 筑摩書房 (2000).
- [19] 田窪ほか, 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, 館, 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, *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

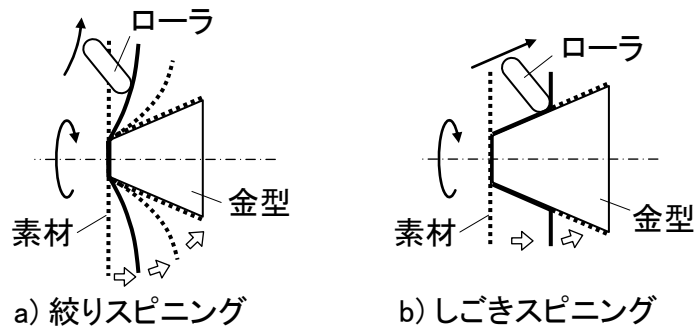


図1 スピニング加工（板材の場合）

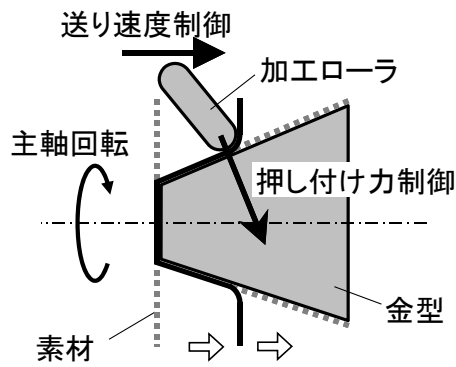


図2 力制御スピニングによる異形状の成形

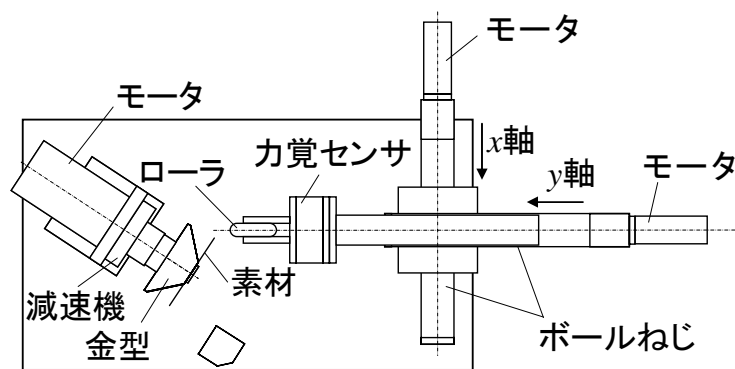


図3 スピニング加工実験装置



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

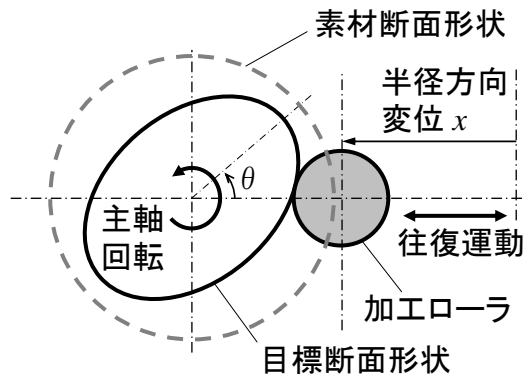
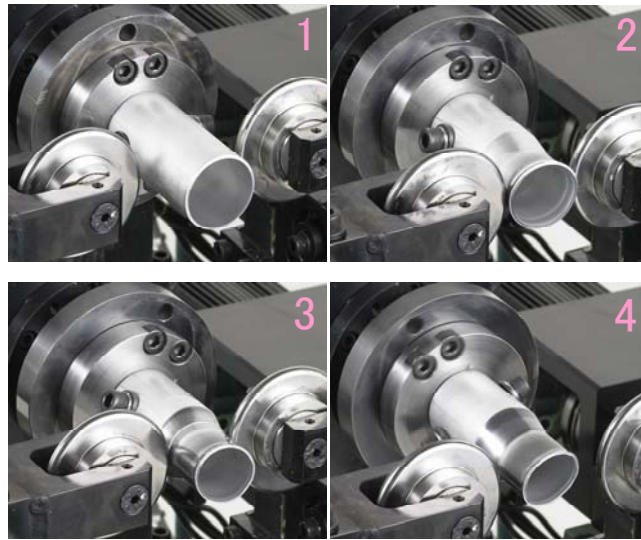


図5 同期スピニングによる異形状の成形



a) 2ローラ式スピニング加工機



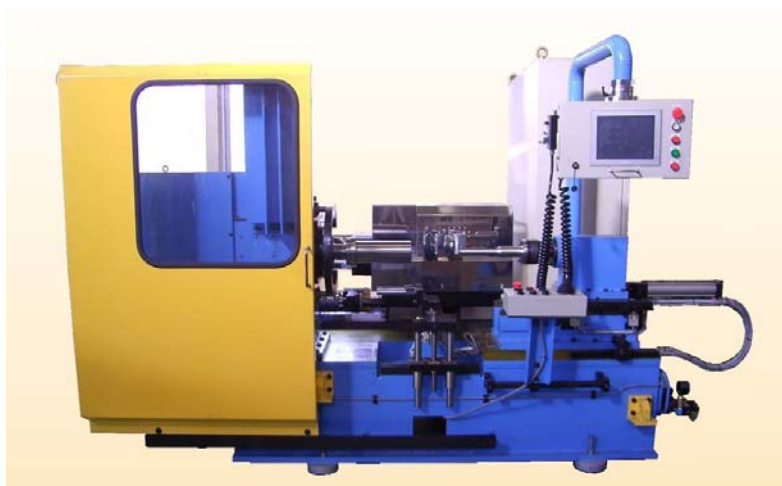
b) 加工の様子

<http://staff.aist.go.jp/h.arai/video/pipeweb1.wmv>



c) 成形例

図6 2ローラ加工機を用いた同期スピニング



a) プロトタイプ機



c) 成形例

図7 異形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

<http://staff.aist.go.jp/h.arai/robospin.html>

表1 プロトタイプ機の主要な諸元

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



図8 企業に導入された異形スピニング加工機
 (株式会社パパス <http://www.papas-kk.co.jp/hera/hera.htm>)

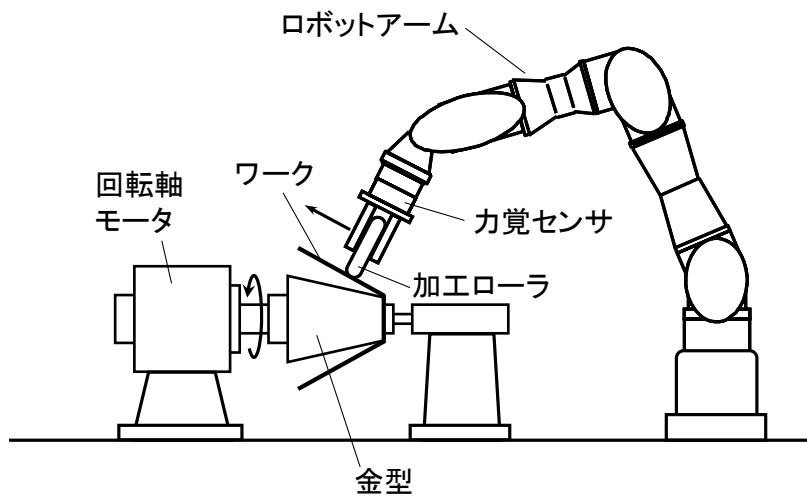


図9 初期の構想（へら絞りロボット）

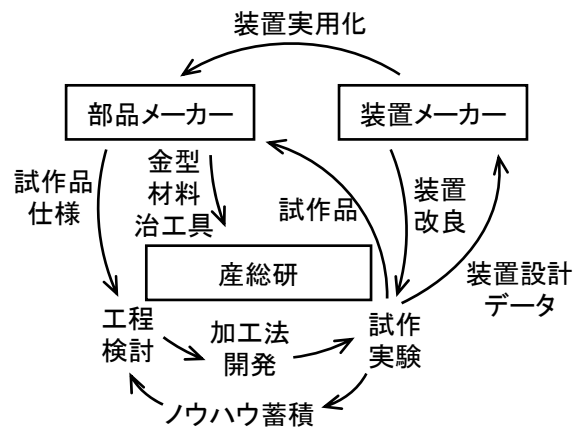


図10 試作トライによる加工ノウハウの蓄積