

知能化メタルフロー制御成形を指向した 手指機能模倣 CNC 塑性加工機の開発

北澤 君義*

1. はじめに

量産技術の雄として全盛を極めたプレス成形は、多品種少量生産化への対応が原理的に難しいという宿命を背負っている。この問題を解決する一つの成形法として、インクリメンタルフォーミングが注目されている。このインクリメンタルフォーミングはそのルーツを古代文明の時代にまで遡る、いわゆる塑性加工本来の手法であるが、コンピュータなどの基盤技術が整いつつある現代において、多品種少量生産化への対応を可能にする全く新しい知能化生産手法として蘇りつつある。

従来のプレス成形法では、材料・機械・金型からなるその基本要素のうちで形状付与機能を金型に集中的に担わせ、そのぶん機械（ハード）の運動自由度を極限まで低下させるため、多品種少量生産化に適応できない。ここで取り上げるインクリメンタルフォーミングでは形状付与の機能をハード（工具と機械）とソフト（制御戦略）に広く分散して担わせることにより、「高い形状付与の自由度」を有しているため、プレス成形の意味における金型（縦型）を用いないで自在な成形が可能になる。さらにこの「高自由度」の積極的な利用により、塑性加工の究極的な課題の一つであるメタルフロー制御への展開が可能になるものと思われる。国内外の研究を方法論別に分類すると、① CNC 工作機械を用いる手法、②手板金（逐次ハンマリング）手法、③転動鋼球を用いる手法、④多点プレスを用いる手法、⑤ショットビーニングを用いる手法等に分けられる。特に①の手法については、工具運動の自由度が極めて大きいため、メタルフロー制御の可能性を含めてほとんど手付かずの状態にある。この場合「高自由度」下における工具パススケジュールの求め方（推論ルールとデータベース）が重要な課題の一つになる。また張出しタイプの成形であるため、壺、円筒、深い球、鼓など、この手法において課題として残されている成形形状も多い。

これらの課題を解決するためには、陶芸ろくろ作業における人手指の材料流れ制御機能とスキル

獲得過程に代表されるような、高度な「巧みの技」を生み出すための「高自由度」を有する金属塑性加工システムの開発が究極的な目標の一つになる。

そこで本研究では、まず陶芸ろくろ作業における手指の材料流れ制御機能を模倣した新しい金属塑性加工機を開発した。つぎにひずみ配分法則等について検討し、その結果をもとに工具パススケジュールの推論システムを構築した。そしてこのシステムと開発機を用いて、壺、鼓などの成形を行い、課題として残されていたこれらシェル形状の成形が可能になることを示すとともに、メタルフロー制御の可能性についても初めて明らかにした。さらに触覚情報をもとに、不整変形を回避するシステムの開発も行った。以下にその概要について述べる。

2. 手指機能模倣 CNC インクリメンタル成形

2.1 成形装置の試作

手指の機能を模倣する観点から、工具として棒状工具および棒状工具対を採用した。人の手指では関節を曲げることにより、加工物との干渉の回避が可能になる。しかし金属薄板のインクリメンタル成形では棒状工具に大きな負荷が作用する場合もあり、多関節の棒状工具の採用は機構・強度設計的な観点から極めて難しい。

そこで関節の無い棒状工具を用いるかわりにその運動を制御することにより、加工物との干渉を回避する方式を採用した。このような観点から、手指先端の運動機能を模倣できるように CNC 旋盤の運動自由度を大幅に拡張した CNC インクリメンタル成形機を開発した。この開発機では1本の棒状工具の運動自由度を最大で5自由度まで活用することができ、かつメタルフロー制御と高精度加工を行う上で欠かせない触覚情報を取り込む構造になっている。すなわちブランクホルダーの薄板接触部を高分子系絶縁体で製作し、棒状工具と金属薄板の接触状態をスイッチとした電気回路方式を採用し、成形プロセス中の触覚情報が得られるようにした。また工具に作用するモーメン

トの測定により力覚情報の把握も可能になっている。なお先端部を多領域区画に絶縁分割した棒状工具を試作して実際の成形に用いたところ、この分割境界の微小な凹凸が成形面に転写され、さらにこの部分に薄板から剥離した屑が構成刃先のように固着し、成形面が著しく肌荒れした。このため棒状工具表面上の接触部位の特定については断念した。

ところで開発機では薄板の保持方式として図1(a)に示すように壺底をホールドする方式(中心保持方式)と同図(b)に示すように壺フランジをホールドする方式(外縁保持方式)のいずれの方式においても成形可能であるが、ここでは同図(b)の外縁保持方式の結果について述べることにする。外縁保持方式で成形すると薄板の安定保持が可能になり、反転成形法との組合せにより1本の棒状工具を用いただけでも様々な形状の自在成形が可能になるという実用上のメリットがある。

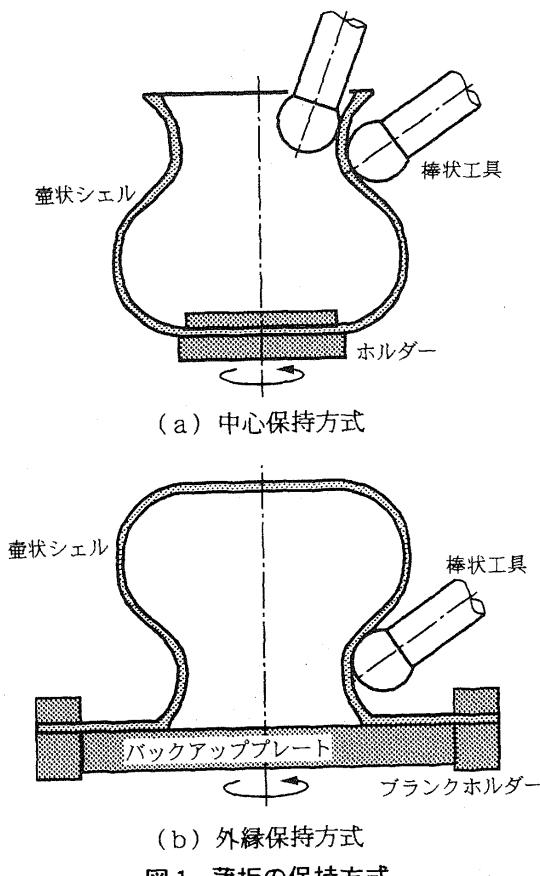


図1 薄板の保持方式

2.2 プロセス推論ルール

シェルモデルおよびこれに表層しごき効果を導入したモデルを用いて、「高自由度」下における

工具パススケジュールを推論するための諸ルールについて検討した⁽¹⁾⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。まずシェルモデルを用いて、インクリメンタルフォーミングプロセスに対する幾何学的な制約条件について調べ、ひずみ配分に対する2つの基本法則の存在を証明した⁽⁴⁾。特にプロセス短縮化の観点から重要となる1パス張出し成形について、そのひずみ分布がサイン則に従う分布となる結果を導き、この結果を実験的に検証した⁽⁷⁾。そしてこれら基本法則を用いて最終輪郭形状と肉厚分布を指定した場合のインクリメンタル張出し成形プロセスのシミュレーションを行い、その有効性を確認した⁽⁴⁾。次にメタルフロー挙動を予測する目的で、上述のシェルモデルに表層しごき効果を導入したモデルを用いて、棒状工具のしごきに起因した薄板の増減肉化挙動を予測するための定性推論ルールを求めた。そしてこれらのルールを用いて、任意の製品形状を成形するためのプロセス推論システムを構築した。

2.3 薄板の壺状・鼓状等の張出し成形の可能性

以上の知見をもとに、張出しタイプのCNCインクリメンタル成形では成形が難しいと考えられている薄板の壺状成形等の成形プロセスを求め、開発機を用いて検証実験を行った⁽⁶⁾。図2に成形例(板厚1mmのアルミニウム硬質板)を示す。このように開発機を用いることにより、オーバーハング部を有する壺状容器の張出し成形が初めて可能になった。なおこの容器の最大ひずみは相当塑性ひずみで100%を越え、通常の金属薄板が超塑材料のように成形されている。

さてこの壺状容器の頂上部には最初のパスで成形された円すい台の上面が残留している。この現象は逐次成形のひずみ累積に伴い、未変形部が上方向に剛体移動するために生じる、インクリメン

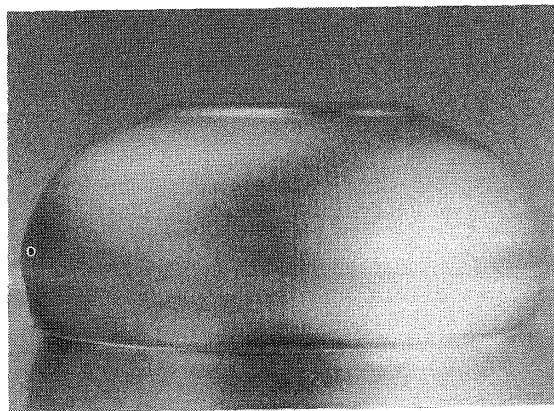


図2 アルミニウム硬質板の壺状張出し成形例⁽⁶⁾

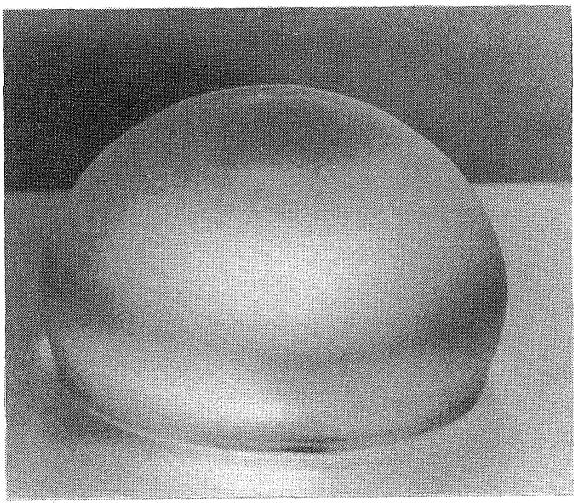
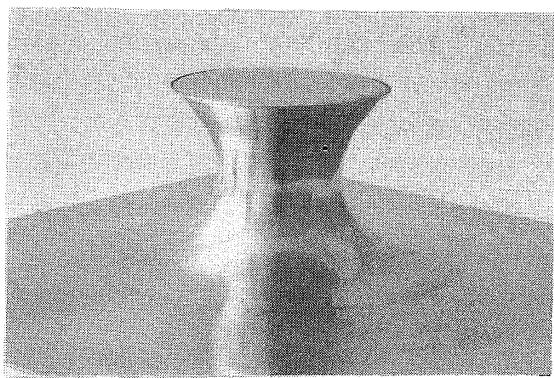


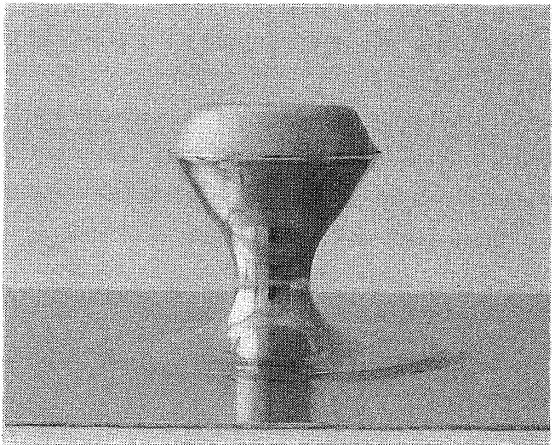
図3 アルミニウム硬質板の球面状張出し成形例⁽¹²⁾

タルフォーミングに特有な現象（以下、逃げ現象と呼ぶ）である。この逃げ現象がわずかに残留する場合には、触覚情報をもとにした後続パススケジュールの変更により、その抑止が可能になる⁽⁹⁾。しかしこの逃げ現象はプロセス初期の張出し形状、特に張出し高さの設定に強く依存するため、一般的には最初のパスにおいて張出し高さを適切な範囲の値に設定する必要がある。この設定条件の求め方については、別途、実験的に解明した。この条件に従って初期パスにおける円すい台の張出し高さをこの条件に従って設定することにより、図3に示すオーバーハング部を有する球面の張出し成形が可能になった⁽¹²⁾。

円筒形状⁽⁸⁾や鼓形状⁽¹³⁾については、「いったん張出し成形した後に、反転し、インクリメンタル成形を行う」反転成形法を適用したパススケジュールにより、その成形が可能になることを初めて明らかにした。この場合においても、逃げ現象が発生するため、その予測が重要な課題の一つになった。たとえば図4に示すように最初の張出しパスで円すい台の高さを適切な値に設定することにより同図(a)に示すように鼓の成形が初めて可能になったが、この場合よりも円すい台の高さを高めに設定（もちろん鼓の高さよりも低く設定）した場合には、同図(b)に示すように鼓の頂上部に円すい台が残留した。逆にこの逃げ現象の利用という観点から同図(b)を眺めると、細長くくびれた口を有する壺の成形が可能になることがわかる。円筒形状についても反転成形法の適用により、その成形が初めて可能になった（図5参照）。



(a) 鼓



(b) 頂上部に円すい台が残留した鼓

図4 アルミニウム硬質板の鼓状成形例⁽¹³⁾

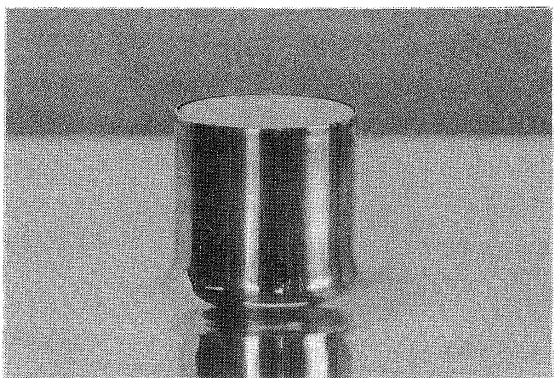


図5 アルミニウム硬質板の円筒状成形例⁽⁸⁾

2.4 メタルフロー制御の可能性

工具運動の「高自由度」を生かしたメタルフロー制御成形の可能性を探った⁽²⁾⁽¹¹⁾。前述の推論システムを用いて、図5の円筒の均肉化プロセスについて検討した結果、推論された工具パススケジュールはパス間の幾何的な増減肉に着目した簡

便な推論法から求められた平行直線群のパススケジュールと一致した。この推論された平行直線群のパススケジュールで実際に成形したところ、均一な側壁厚を有する円筒を成形することができた。このように工具パススケジュールの適切な選択により、メタルフロー制御が可能になることが初めて明らかになった。なお図3の球面成形等に対してこの推論システムをもとに、減肉化が集中し易い場所にメタルを堆積させるパスを選択することにより、減肉化が抑制され、破断の回避が可能になった。

2.5 触覚情報をもとにした不整変形の回避法

開発したシステムを用いて、アルミニウム板、アルミニウム合金板、銅板等の各種薄板を様々な形状に成形し、成形形状と肉厚分布、くびれ・しわ・座屈などのメタルフローに起因した不整変形の発生状況を調べ、成形挙動に対する工具パススケジュールの影響に関するデータベースを整備した。また触覚と力覚を組み合わせたセンシング法により、「しわ・座屈」の発生初期段階を検知する方法論を開発した。すなわちCNCインクリメンタル成形中に薄板が著しく減肉化する場合があるため、力覚のみによる変形状態の予想は困難を極める。しかし触覚との組み合わせにより力覚の感度が飛躍的に向上し、その振動成分から成形過程中に生じる「しわ・座屈」の発生初期段階の把握が可能になり（軸対称モードと非軸対称モードの識別も可能）。そして検知された「しわ・座屈」の発生初期段階においてデータベースをもとにした工具パススケジュールの自動変更を行うアルゴリズム（しわ・座屈の回避プロセス）を構築し、その有効性を実験的に検証した。

3.まとめ

本研究では、まず陶芸ろくろ作業における手指の材料流れ制御機能を模倣した新しい金属塑性加工機を開発した。つぎにひずみ配分法則等について検討し、その結果をもとに工具パススケジュールの推論システムを構築した。そしてこのシステムと開発機を用いて、壺、鼓などの成形を行い、課題として残されていたこれらシェル形状の成形が可能になることを示すとともに、メタルフロー

制御の可能性についても初めて明らかにした。さらに触覚情報をもとに、不整変形を回避するシステムの開発も行った。逃げ現象が極わずかな場合には、触覚情報のみをもとにしたパススケジュールの自動変更により、逃げ現象の回避が可能になるものの、大きな逃げ現象が発生する場合には、触覚情報のみによる対処には限界がある。そこで現在、本研究で得られた知見をもとに、成形中の成形形状をレーザー計測しながら成形形状を逐次修正する新たな機能を搭載したCNCインクリメンタル成形システムの開発を行っている。

研究の機会を与えていただき、またご支援を賜りました財団法人天田金属加工機械技術振興財團に厚く御礼申し上げます。

本研究にかかわる発表（おもな既発表）

- (1) 金子哲也・北澤君義: 平成5年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1993), 619-620.
- (2) 北澤君義・若林昭彦・金子哲也: 平成5年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1993), 621-624.
- (3) 金子哲也・北澤君義: 第44回塑性加工連合講演会講演論文集, (1993), 349-350.
- (4) 北澤君義・金子哲也: 平成6年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1994), 597-600.
- (5) 北澤君義・金子哲也: 平成6年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1994), 601-602.
- (6) 若林昭彦・北澤君義: 第45回塑性加工連合講演会講演論文集, (1994), 747-750.
- (7) 北澤君義・尾角拓勉: 日本機械学会論文集(C編), 62(597), 2012-2017, 1996.
- (8) 北澤君義・中島明: 日本機械学会論文集(C編), 62(597), 2018-2024, 1996.
- (9) 北澤君義・林真太郎・山崎純生: 軽金属, 46(5), 219-224, 1996.
- (10) 北澤君義: 軽金属, 47(3), 145-150, 1997.
- (11) 北澤君義・若林昭彦・村田和也・八重島公郎: 軽金属, 46(2), 65-70, 1996.
- (12) 北澤君義・山崎純生: 平成8年度塑性加工春季講演会講演論文集, 118-119, 1996.
- (13) 北澤君義・高木満久: 平成8年度塑性加工春季講演会講演論文集, 120-121, 1996.