逐次張出し成形機と成形法に関する研究

田中　興一[*]　坂井　修[*]　相田　収平[*]　宮口　弘明[*]

A Study on Incremental Forming Machine and Forming Process

TANAKA Kouichi[*], SAKAI Osamu[*], AIDA Shuhei[*] and MIYAGUCHI Hiroaki[*]

抄　　録

本研究では、逐次張出し成形の実用化を目的として、汎用 NC フライス盤の活用による様々な形状の成形可能性を検討した。今年度は、実用化の第一歩として、半球殻や皿形状などの垂直壁を持つ形状をはじめとした各形状の成形実験を試みた結果、複数の成形工程を組み合わせること、および工具移動経路を検討することで板をより均一に張出すことができ、各種の成形が可能であることを確認した。

1. 緒　　言

国内の製造業を取り巻く環境は、多品種・少量化と製品サイクルの短期化が急速に進んでいるとともに、試作用成形品や一品注文生産の要求も高い。このため、型を必要としないフレキシブルな板成形技術である逐次張出し成形法は、金型のすべて、または一部が不要となるために注目され、様々な研究が行われており[1)~3)]、県内でも約 10 年程前に、県央地域地場産業振興センターにおいて、成形と逐次成形機の試作が試みられている[4)]。

しかしながら、この成形法は未だ広く実用化されていない状況にある。その理由として

（１）以前はコンピュータの性能やソフトウェアの機能や価格などの点から３次元 CAD/CAM が広く普及してはいなかった。

（２）この成形法は張出し後の板厚がその形状の傾き角に依存するために垂直壁を有する形状の成形が難しい。

（３）成形機の開発が進み、市販されているが、逐次張出し成形専用機であり、かつ高価である。

などの問題が挙げられる。

上記（１）については、ここ数年のコンピュータ関連のハードウェア、ソフトウェアの進歩や、３次元 CAD/CAM が広く普及してきたことなどで解決されつつある。

本研究では、これらの問題を解決し、逐次張出し成形の実用化にはずみをつけることを目的として、汎用 NC フライス盤を活用することで、様々な加工用途への対応が可能となるフォーミングセンタの提案を行う。さらに成形が困難である垂直壁を持つ形状の成形方法等について実験的に検討するとともに、板厚変化や形状精度について考察を行うことで、様々な形状の成形可能性を検討した結果について報告する。

2. 逐次張出し成形の概要

図 1 に、逐次張出し成形の概略を示す。逐次張出し成形とは、３次元 CAD/CAM によって成形する形状の設計および成形プログラムを作成し、このプログラムを数値制御によって、工作機械の主軸に取り付けた棒状の工具を動かすことによって、金属板を所望の形状に張出させる塑性加工法であり、大別して、

＊　研究開発センター

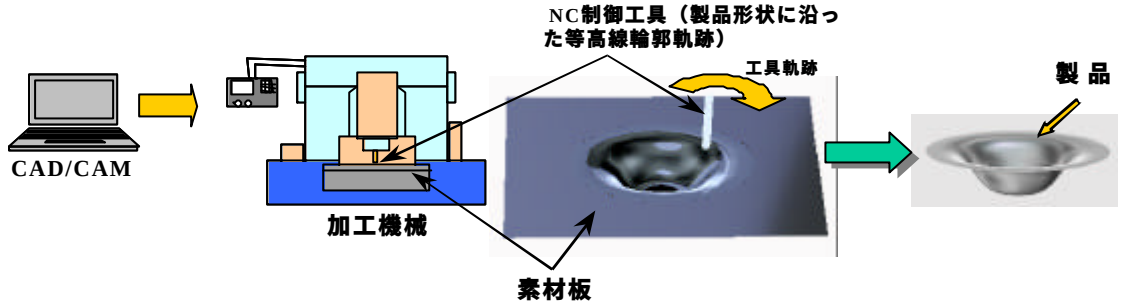

図 1　逐次張出し成形の概略

素材板の下に成形品の平面形状に応じた型枠を用意して成形する型枠成形方式と成形する形状の総型マンドレルを要するマンドレル成形方式がある。型枠成形方式は、治工具が簡易である反面、自由曲面のような深さ方向に複雑な変位を伴う形状の成形は難しい。一方、マンドレル成形方式では、成形する形状に応じた総型が必要となるが、自由曲面の成形が可能であるなどの特長がある。これら逐次張出し成形のメリットとしては、

（1）金型のすべて、または一部が不要。
（2）従来の絞り加工では困難な、自由曲面を含んだ形状の成形が可能である。
（3）金型の製作時間を短縮できるために、意匠検討などの試作品を速く成形することができる。

などの点が挙げられる。

3.　NC フライス盤を活用した成形機

NC フライス盤およびマシニングセンタは広く普及しており、既設備として保有している企業も多く、これらを逐次張出し成形に活用することで、本成形技術の実用化に極めて有効な手段と考えられる。

図 2 に本研究で使用した成形機、および逐次張出し成形用ジグの外観を、表 1 には成形機の主な諸元を示す。機械のコンセプトは以下のとおりである。

（1）成形機上で型枠やマンドレル加工と張出し成形の両方を同一成形機上で実現するため、切削加工の機能および同時 3 軸制御機能が備わっている必要がある。
（2）型枠やマンドレル加工の効率化と加工後直ちに金属薄板の張出し成形を行うためには、ATC（自動工具交換システム）は必要不可欠な機能である。
（3）企業や大学などからの意見・要望調査の結果、成形可能な大きさは X 軸、Y 軸とも 400mm 以上が必要である。
（4）高速な成形を実現するため、テーブル送り速度は 10m/min 以上が必要である。

表 1　成形機の主な諸元

メーカー	（株）静岡鐵工所
工具ストローク（X × Y × Z）	1000×500×400 mm
最大成形速度	10 m/min
ATC	8 本
位置決め精度	0.005 mm
繰り返し精度	0.002 mm

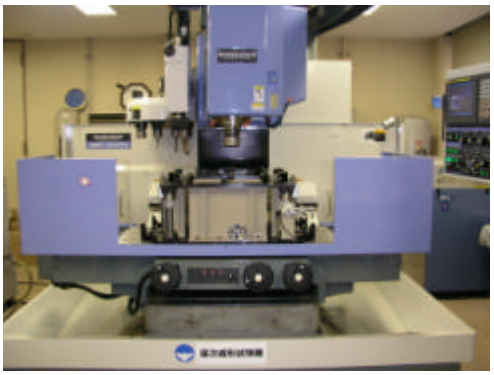

図 2　逐次張出し成形機およびジグ

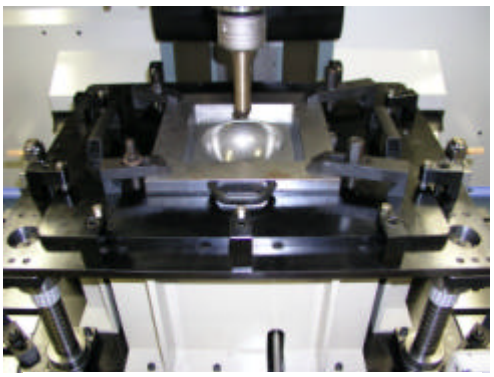

図 3　棒状工具と成形用ジグ

以上の機能を満たす成形機として、（株）静岡鐵工所製 ATC 付きベッド型 CNC フライス盤 SMV-520 を選定するとともに、機上に型枠、マンドレルの両成形方式が可能な成形ジグ（最大成形寸法 X=500mm、Y=400mm、Z=300mm）をセットして成形実験を行った。

4. 逐次張出し成形実験

4.1 実験装置および実験方法

成形実験に供した材料は工業用純アルミ板 A1050-O、冷間圧延鋼板 SPCC、ステンレス鋼板 SUS304 の 3 種とし、板厚分布および形状誤差測定には板厚 t_0=1.0mm、成形荷重測定には t_0=0.5mm の板材をそれぞれ使用した。また、成形には前述の NC フライス盤の主軸に先端が球形状を有する棒状工具（R=5、10、15）を取り付け、実験を行った（図 3）。また、成形中の荷重は、工具シャンク部に水晶圧電式 3 分力計（日本キスラー（株）製 9047B）を組込み、測定した。

本研究で成形を試みた形状として、内径が 147mm および 84mm である半球殻や円形皿、および正方形皿などの垂直壁を有する形状の他、自由曲面を含む能面なども取り上げ、成形実験を行った。

4.2 半球殻成形実験

半球殻は、形状の一部に垂直壁を有するために 1 工程での成形が困難である。これは、逐次張出し成形における局部的板厚 t と成形前の板厚 t_0 と半頂角 θ との間には、ほぼ、

$$t = t_0 \sin\theta$$

の関係が成り立つ[1)]ことからも納得できる事実である。

そこで、半頂角 θ が小さくなることによる板厚減少を抑え、なるべく形状全体について均一な板厚とすべく、複数の工程を組み合わせることによる半球殻の成形を試みた。まず第 1 工程では、フランジ部から頂部（底部）に向かって張出し成形を行う。第 2 工程以降は逆に頂部からフランジ部に向かって張出し成形を行うことで、成形に伴う板厚減少を極力抑え、均一に張出すことで、最終的に垂直壁の成形を行うものである。

内径 147mm 半球殻成形実験の結果、3 種の板材すべてについて半球殻の張出し成形が可能であった。成形に要した工程数は 16、成形時間は約 54 分であった。図 4～図 6 には、得られた半球殻および各材種における子午線方向の板厚分布と形状誤差を示す。

板厚は、フランジ部分から半球形状部分に移ると急激に減少し、頂部近傍を除いてはほぼ全域にわたって 0.45mm 程度に分布している。これは、円形の板を半球状に張出した場合に表面積が 2 倍になり、したがって板が均

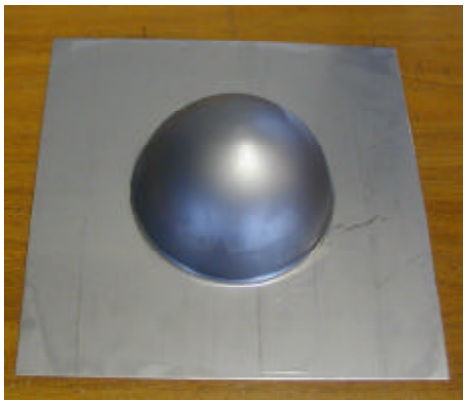

図 4 成形した半球殻（SUS304）

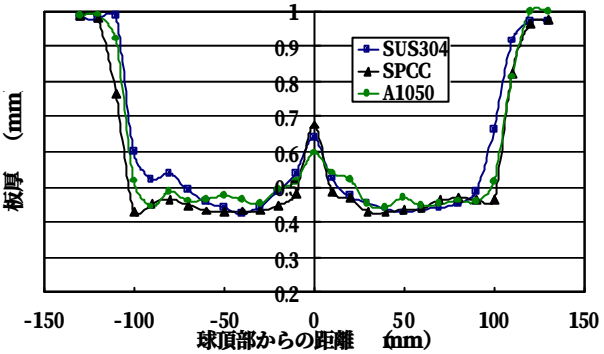

図 5 半球殻の板厚分布

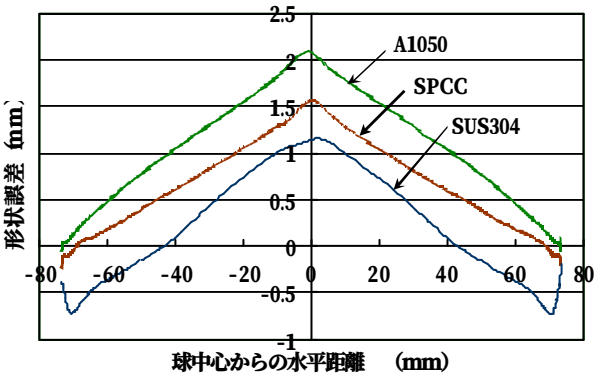

図 6 半球殻の形状誤差

一に張出された場合には成形後の板厚が 1/2 になることと良い一致が見られ、本成形法では板を逐次、均一に張出していることが推測される。また、球面頂部では工具移動速度がゼロになってしまい、板に対して有効な張出しの付与ができないために板厚が大きくなっている。子午線方向の形状誤差には、この影響が見られ、各材料とも頂部に近づくに従って形状誤差が大きくなっている。また、SUS304 では球直径部近傍において約 1.0% 程度の径の減少誤差が生じており、他の材料に比べスプリングバックの影響が強く出ているものと推測される。

また図 7～図 10 には、SPCC および SUS304 について内径 84mm の半球殻成形工程の際に生じる X-Y 方向（水平面内）と Z 方向（鉛直方向）の荷重を示す。

X-Y 方向荷重では全工程を通して常に荷重が加わっているのに対し、Z 方向荷重は、成形に要する全 16 工程のうち第 1 工程では、成形中を通して荷重が認められるが、第 2 工程以降では、工程の初期に球殻の頂部に対して工具を鉛直方向に押し込む際の荷重が認められる他は、顕著に現れていない。また、SPCC に比べ SUS304 の方が大きな荷重が発生しており、第 1 工程で比較した場合には、X-Y 方向で約 1.6 倍、Z 方向で約 1.3 倍程度である。一方、工程が進むにしたがって、SPCC では発生する荷重も徐々に減少していく傾向が見られるのに対し、SUS304 では、逆に、より大きな荷重が発生している。工程が進むにしたがって球殻部分の板厚は減少していくが、SUS304 では加工硬化が進むために、より大きな荷重が発生するものと考えられる。

4.3 円形皿および正方形皿成形実験

本研究で提案した複数の工程を組み合わせる方法により、さらに深い垂直壁を持つ円形皿と正方形皿についても成形を試みた。

実験の結果、図 11 に示す深さ 30mm の円形皿については各材種での成形が可能であった。また、図 12 に示す深さ 24mm の正方形皿については A1050-O、SPCC については成形可能であったのに対し、SUS304 については加工硬化が進行し最終工程で破断に至っ

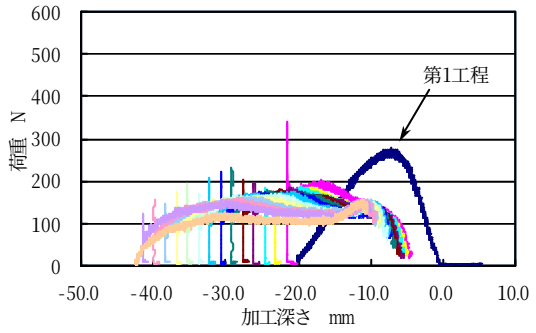

図 7 SPCC X-Y 方向荷重

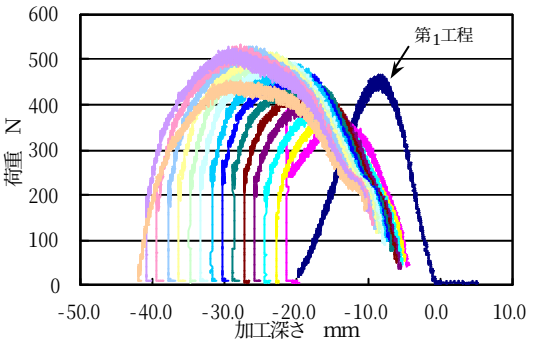

図 9 SUS304 X-Y 方向荷重

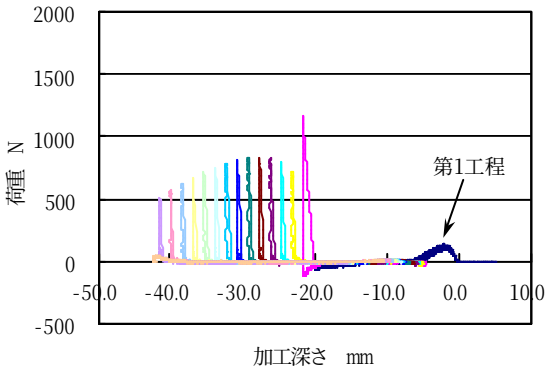

図 8 SPCC Z 方向荷重

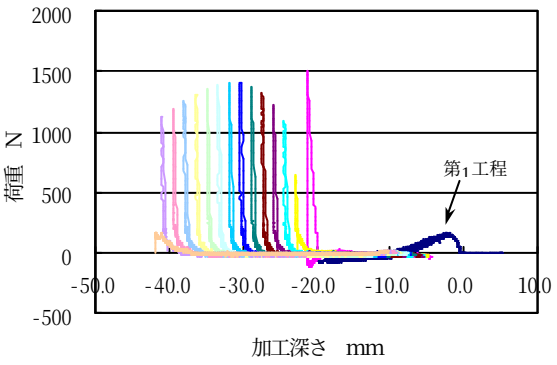

図 10 SUS304 Z 方向荷重

た。図 13、図 14 には、成形した形状についてのひずみ分布測定結果を示す。半球殻の頂部付近はほぼ等二軸ひずみの状態を示すとともに、球直径部に近づくにしたがって、等二軸ひずみと平面ひずみの間、すなわち張出し領域に分布している。一方、正方形皿では、X 軸上、すなわち対辺方向では平面ひずみ状態、対角線上では等二軸ひずみ状態を示しており、コーナー部においては、半球殻形状と比較しても特に大きなひずみが生じており、成形に厳しい形状であることがこの結果からもうかがえる。しかしながら、概ね本研究で提案した成形法が、垂直壁を有する形状に対して有効であることを確認した。

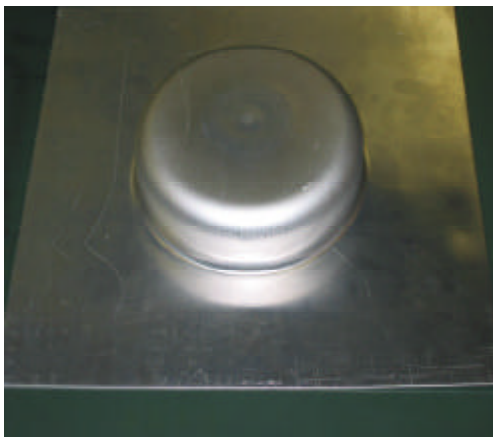

図 11　円形皿（SUS304）

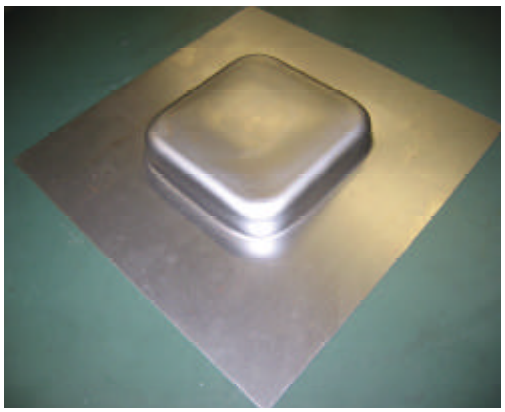

図 12　正方形皿（SPCC）

4.4　各種形状の成形

前述した単純な幾何形状のみならず、逐次張出し成形によるその他の成形例を図 15、図 16 に示す。図 15 はアニメキャラクタをイメージした成形品であるが、このように複雑な形状であっても、顔輪郭の型枠だけを使用した逐次張出し成形であり、目や鼻などに総型を使用せずに成形が可能である。しかしながら、図 16 に示す複雑な形状に対しては、総型マンドレルが必要である。

5. 逐次張出し成形用 CAM の開発

本研究で提案した張出し成形法により所望する形状の成形を行う際には、NC プログラムを必要とするが、現在広く普及している切削用の CAM システムでは、(1)成形する形状の他に中間工程の形状を含んだ複数の形状を定義する必要がある。(2)切削加工で用いられる等高線工具軌跡では、各等高線間での工具移動の際の成形痕が残ってしまう。など、逐次張出し成形に適していない面もあることから、図 17 に示すような専用 CAM の開発を試みた。このシステムでは、市販の 3 次元 CAD で設計した後に STL ファイル形式で出力した成形形状データを読み込んで工程計算を行い、NC プログラムを作成する機能を持っており、主な幾何学形状については、実用的なレベルまで開発が進んでいる。今後は、自由曲面を含んだ複雑な形状についても適用

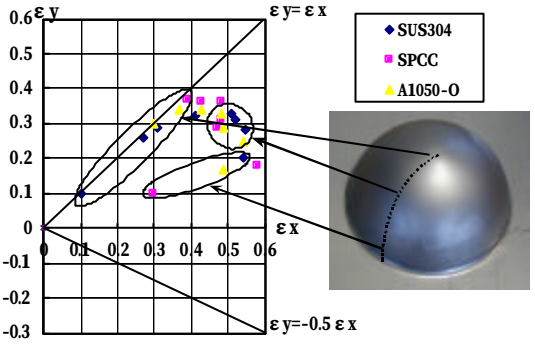

図 13　半球殻のひずみ分布

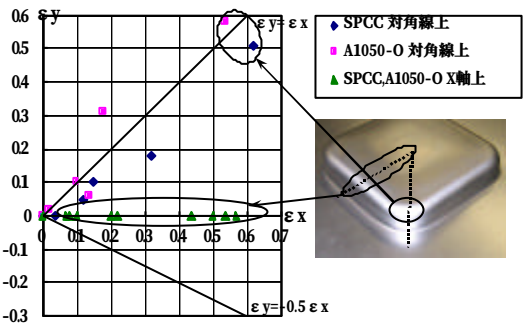

図 14　正方形皿のひずみ分布

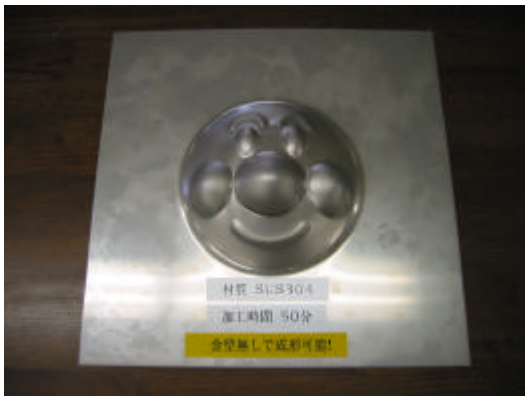

図 15　アニメキャラクタ（SUS304）

図 16　能面（A1050-O）

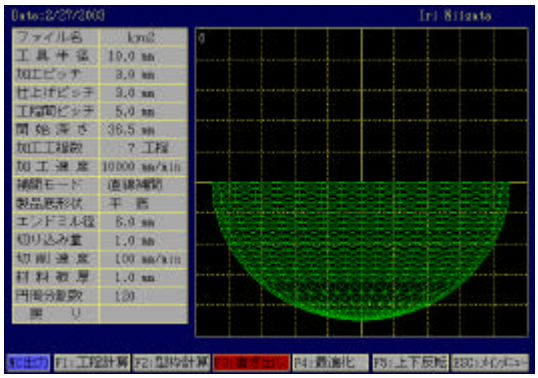

図 17　逐次張出し成形用 CAM

可能なシステムにすべく開発を継続している。

5.　結　　言

（1）NC フライス盤を活用したフォーミングセンタを提案し、工具軌跡、中間形状、工程分割等の工夫を行うことで、垂直壁を有する各種形状の逐次張出し成形を可能とした。

（2）半球殻の板厚測定の結果、成形品はほぼ均一に張出されているとともに、形状精度についても概ね良好な結果が得られた。

（3）ひずみ分布測定の結果、半球殻などに比べ、正方形皿では特に対角線方向のコーナー部に大きなひずみが生じることが確認された。

（4）半球殻成形時の荷重測定の結果、第 2 工程以降ではほぼ水平面内の荷重で成形が進むこと、および SUS304 では、加工硬化の影響により工程が進むに従って大きな荷重が発生することが確認された。

（5）逐次張出し成形用の CAM システムを開発し、実用化にはずみをつけた。

参考文献

1）松原茂夫：平 5 春塑加講論(1993)，611.
2）北澤ほか：軽金属，46-5(1996)，219.
3）吉川ほか：平 11 春塑加講論(1999)，305.
4）井関ほか：平 6 春塑加講論(1994)，573.