

スライド式単位工具による薄板の フレキシブル局所逐次成形機の試作

井関 日出男*

1. 緒言

情報化社会を迎え、発展途上にある情報伝達技術と完熟したきらいのある塑性加工技術との接点を模索していたところ、プレス成形のプレスには印刷機の意味もあり、日進月歩のプリンター、コピー、グラフィックス、ファクシミリなどの情報機器はプレス機械と同根であることに気が付いた。紙に白黒や on-off の情報を転写しているのが情報・印刷機器で、薄板に製品形状という情報を転写しているのがプレス機械であると解釈することもできる。情報の量や質に差があるが、機能的に共通するものがあり、フレキシブル化やインテリジェント化の際に参考になると思い、研究テーマとして暖めておいた。

最近、消費者ニーズの傾向が個性化や希少化を指向するようになり、広範囲に多様化した製品が求められ、薄板プレス加工においても多品種少量生産に対応できるフレキシブルな生産システムや成形技術が要請されるようになってきた。しかしながら、少品種大量生産に適した成形法として発展している従来の薄板プレス加工は、金型の設計、製作、修正及びトライアルに多大な時間とコストを必要することから、多品種少量生産への対応は困難とされてきた。

けれども、活版印刷における活字を組む方法で、パンチやダイスの曲面形状を離散化してフレキシブルな集合金型を創成する試みもこれまでに行われていた。針金束や組立て型^{(1),(2),(17),(18)}、単位ブロック工具型^{(3),(4)}、ユニバーサル多点プレス

型^{(5),(6),(7),(19),(24)}などの研究が挙げられる。

一方、お習字の運筆やグラフィックプロッターのような方法で、平面形状の薄板を部分的に逐次加工して曲面形状を成形する試みもこれまでに行われていた。回転対称形状についてはストレッチローラーなどのスピニング^{(8),(9)}、ボールローラーによる転動加工^{(10),(11)}、棒状工具による揺動回転成形⁽¹²⁾などがある。非回転曲面形状についてはショットピーニング成形⁽¹³⁾、局部加熱成形⁽¹⁴⁾やボールによる逐次張出した成形など^{(15),(23)}が挙げられる。

また、これらの成形法の組合せや複合化を行い、両者の長所を取り入れたフレキシブルな逐次成形技術の開発⁽¹⁶⁾にも大きな関心が寄せられている。さらに薄板の逐次成形における変形様式、成形可能な曲面形状、成形限界やスプリングバックについての研究も必要になってきている。

著者らは、内筒がネジでスライドする二重角筒の単位工具からなる組立て金型を考案し、フレキシブル金型とインクリメンタル成形法の長所を取り入れた逐次成形装置を試作し⁽²⁰⁾、薄板のくら形面成形^{(21),(22)}の可能性を検討した。また、成形性の差異を明瞭にするためにアルミニウム H 材の正方形板（辺長 $l_0=81\text{mm}$ 、板厚 $t_0=0.3\text{mm}$ 、引張り破断ひずみ 0.7%）を用いて、くら形面の成形限界やスプリングバックに及ぼす成形条件の影響を実験的に検討⁽²⁵⁾した。本稿では、これらの情報・印刷機器にヒントを得たフレキシブルな逐次成形法と二、三の実験結果を紹介する。

2. 試作した成形装置及び実験方法

2.1 二重角筒スライド式単位工具

図1に示す単位工具は、7mmの内角筒と9mmの外角筒から構成されており、内角筒はナットとボルトネジによって±20mmスライドできる機構になっている。この機構によって自動化の際にz軸の制御を省略できる。内角筒に磁石で取り付けられたボールまたは半球（直径9mm）は薄板の逐次成形と成形形状の保持を行う。

2.2 成形方法

成形装置の断面の概略図及び写真を図2及び図3に示す。単位工具は、上下の型枠の中に15行×15列に配置されており、ボルトネジの回転によって上下にスライドし、任意の曲面形状を離散的に創成できる。図4に単位工具の移動状態とフレキシブル集合金型を示す。薄板は単位工具によって作られる離散的の曲面に拘束されながら製品形状に

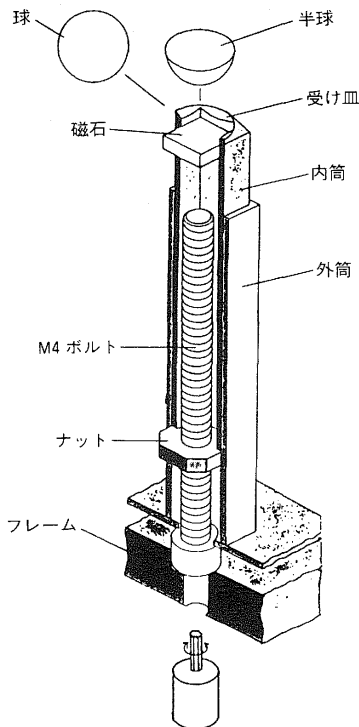


図1 二重角筒スライド式単位工具

逐次成形されていく。薄板表面への工具端部形状の転写を避けるためにウレタンゴムのシート（JIS硬さ90）を使用した。

2.3 くら形面形状

製品のくら形面形状を図5に示す。位置(x, y)にある単位工具の高さの設定値zは、次式から求められる。

$$z = (\rho_0^2 - y^2)^{1/2} - (\rho_0^2 - x^2)^{1/2}$$

ここで、 ρ_0 はx, y軸面における曲率半径である。実験での工具の高さzはゴム厚さhの影響を補正して設定した。金型面の曲率半径 ρ_0 が小さいほど（金型面曲率 $1/\rho_0$ が大きいほど）、成形が困難になると考えられるので、成形限界や成形精度の尺度として ρ_0 や $1/\rho_0$ を用いた。

図6に示す製品の寸法 l_m , λ を測定し、次式から製品の成形曲率、スプリングバック量を近似的に算出した。

$$\text{成形曲率 } \rho = \lambda/2 + l_m^2 / (8\lambda)$$

$$\text{スプリングバック } \Delta\rho = (\rho - \rho_0) / \rho_0$$

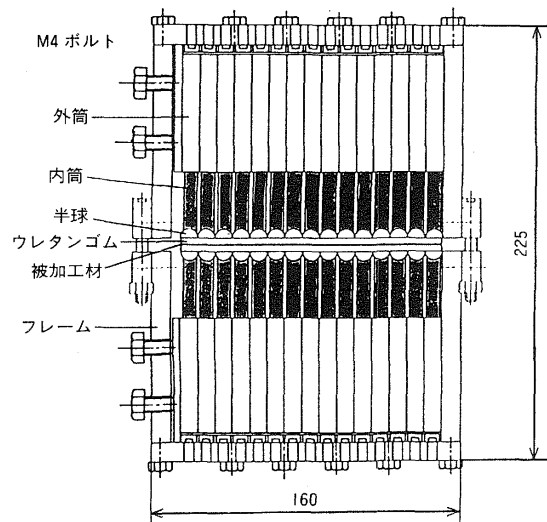


図2 逐次張出し成形装置の概略

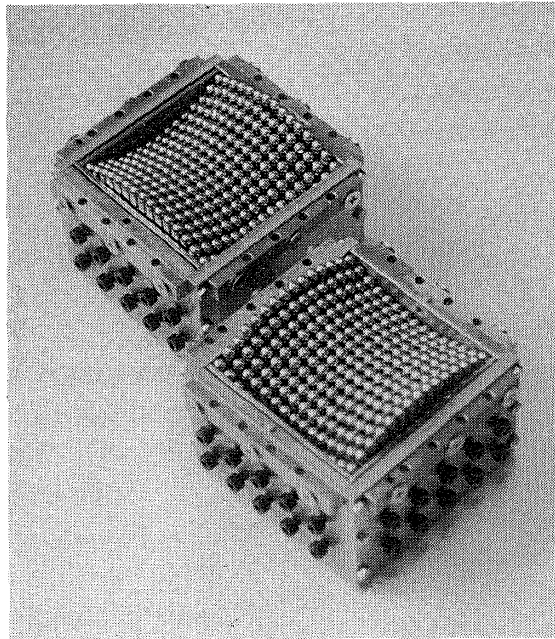


図3 フレキシブル集合金型による逐次成形装置

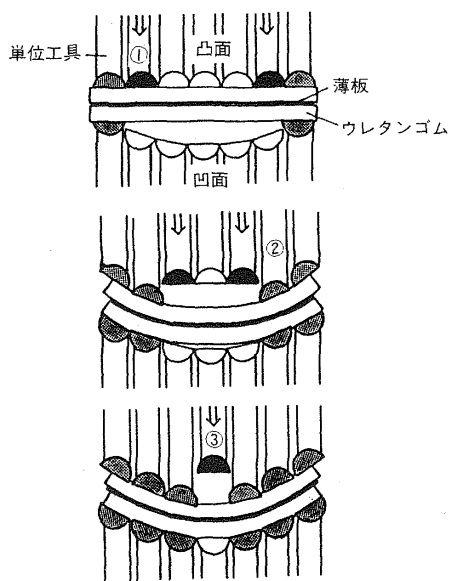


図4 単位工具の移動による逐次成形

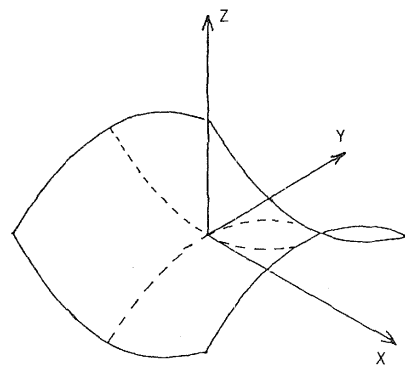


図5 製品のくら形面形状

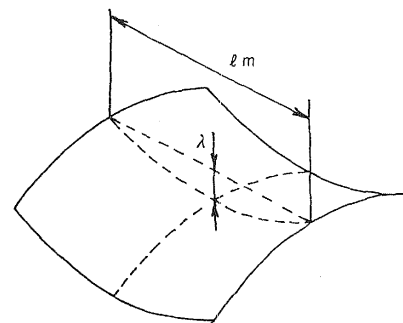


図6 ℓ_m および λ

2.4 逐次成形経路

各单位工具が独立して移動できる離散化集合金型では製品形状に至る成形経路は無数に存在する。成形実験によると曲げ、曲げ戻し回数が少ないときに成形限界が向上するので、下型（ダイス側）が製品形状に固定された場合について、比較的単純な次の3経路を採用している。（図7参照）。①等高線台形経路；製品形状までの距離が小さい部分から等高線状に成形が行われる。②等高線曲面経路；製品形状までの距離が大きい部分から等高線状に成形が行われる。③曲率変化経路；曲率 $1/\rho_0$ が徐々に大きくなるように成形される。

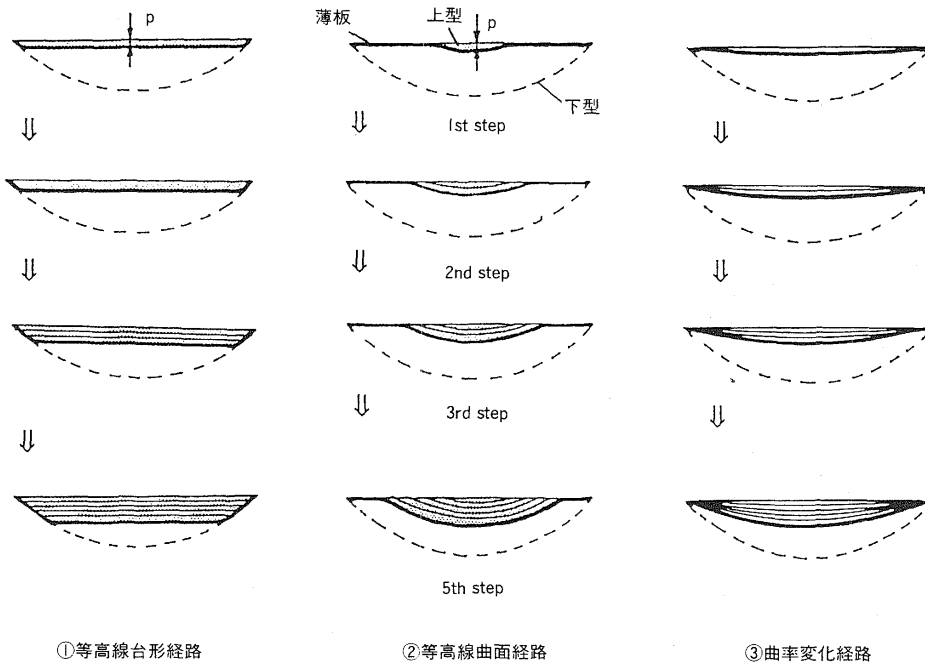


図7 逐次成形経路

3. 成形結果及び考察

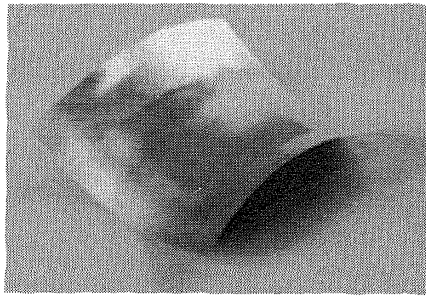
3.1 逐次成形における成形品

フレキシブル金型装置で成形したくら形面の成形品の例を図8に示す。

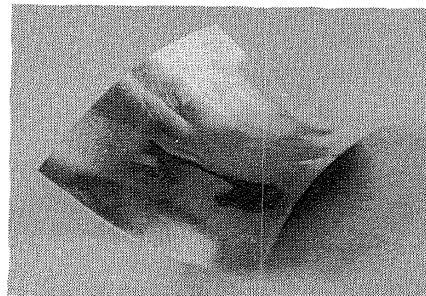
(a)は良好に成形されており、(b)は周辺部の中央において破断が、(c)は中央付近にしわが生じた例である。(d)は半球工具の鋭利な部分でせん断されている。

3.2 工具端形状及びウレタンゴム厚さの影響

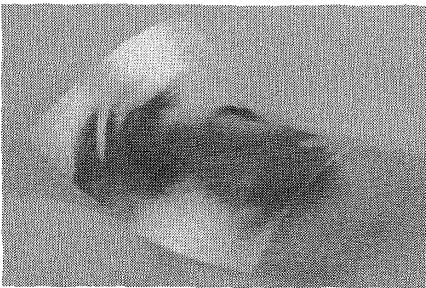
図9の(a)、(d)は工具端形状が半球と球の場合の成形品であり、工具端形状が転写されている。ウレタンゴム厚さ h を3.5mmに変えて、金型面曲率半径 ρ_0 を60mmにしたときの成形品が(b)、(c)、(e)及び(f)であり、ゴム厚さ h が大きくなるにつれて表面状態は改良されている。



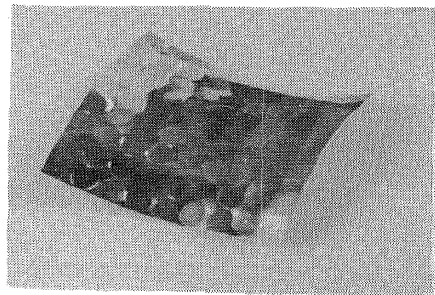
(a) 成形



(b) 破断

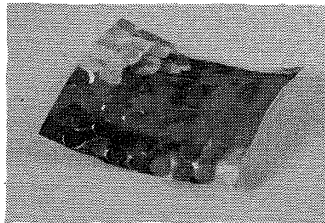


(c) しわ

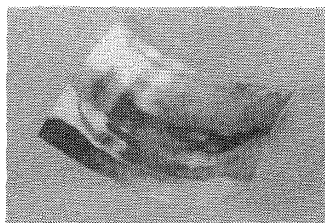


(d) せん断

図 8 くら形面の成形品



(a) $\rho_0 = 100\text{mm}$

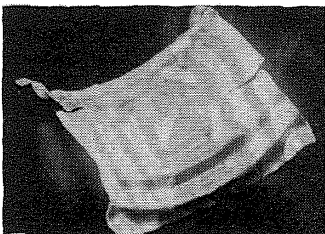


(b) $\rho_0 = 60\text{mm}, h = 3\text{mm}$

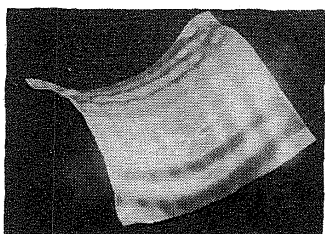


(c) $\rho_0 = 60\text{mm}, h = 5\text{mm}$

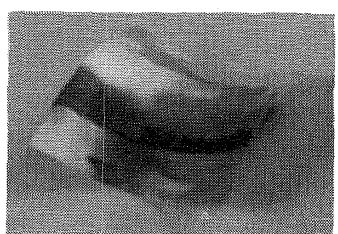
(1) 半球状工具



(d) $\rho_0 = 60\text{mm}$



(e) $\rho_0 = 60\text{mm}, h = 3\text{mm}$



(f) $\rho_0 = 60\text{mm}, h = 5\text{mm}$

(2) 球状工具

図 9 工具端形状及びウレタンゴム厚さの影響

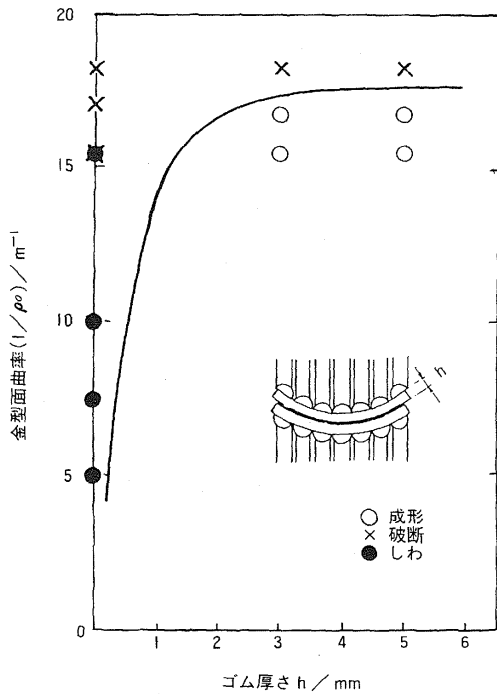


図10 金型面曲率とゴム厚さの関係

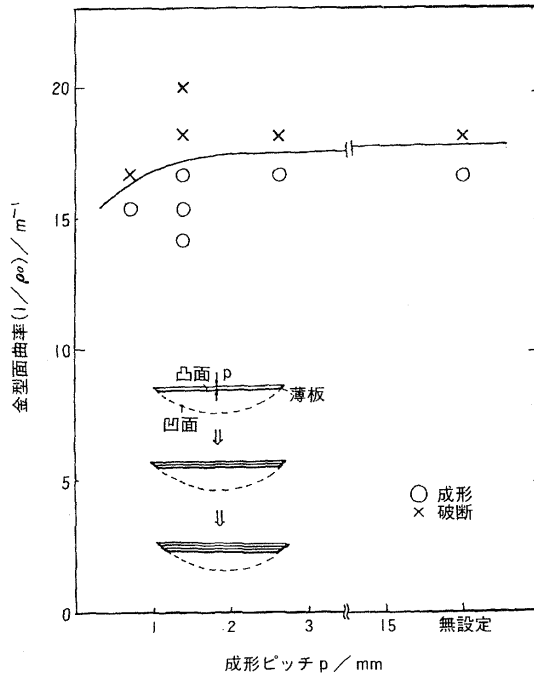


図11 金型面曲率と成形ピッチの関係

3.3 金型面曲率による成形限界

(a) ウレタンゴム厚さの影響

図10は①等高線台形経路を用いて、金型面の曲率 $1/\rho_0$ とゴム厚さ h の関係を調べたものである。ゴム厚さが大きくなると金型面の曲率限界は一定になる傾向を示した。

(b) 成形ピッチの影響

図11は①等高線台形経路を用いたときの金型面の曲率 $1/\rho_0$ と z 軸方向の成形ピッチ p の関係を調べたものである。成形ピッチ p が大きくなると金型面の曲率限界は一定になっているが、②等高線曲面経路の場合には減少する傾向を示した。

(c) 逐次成形経路の影響

図12は、①等高線台形、②等高線曲面及び③曲率変化経路を用いたときの金型面の曲率 $1/\rho_0$ による成形限界図であり、等高線台形経路の成形限界が大きくなる傾向を示した。

3.4 スプリングバック

(a) ウレタンゴム厚さの影響

図13はスプリングバック $\Delta\rho$ と金型面の曲率 $1/\rho_0$ の関係を示したもので、ウレタンゴム厚さ h が $3 \sim 5$ mm のとき $\Delta\rho$ は $5 \sim 6\%$ であった。

(b) 工具端形状の影響

図14に示すように半球から球状工具にかえると、工具形状の拘束力の分布の影響によって、スプリングバック $\Delta\rho$ はおよそ $5 \sim 15\%$ になった。

3.5 総形金型による成形との比較

図15、16はアルミニウム H 材と O 材を用いて、フレキシブル金型から創成した総形金型による成形（総形成形）と①等高線台形経路による逐次成形との比較をしたものであり、逐次成形によってバックリングが生じにくくなり、成形限界が大きく向上した。

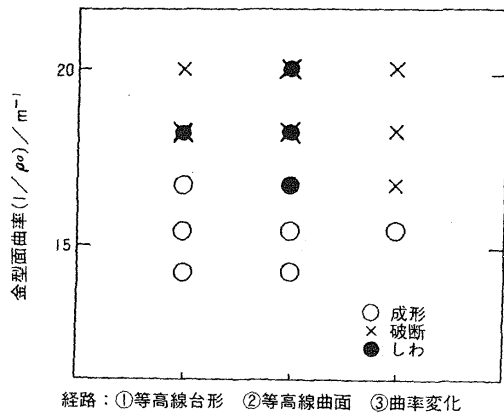


図12 金型面曲率と逐次成形経路の関係

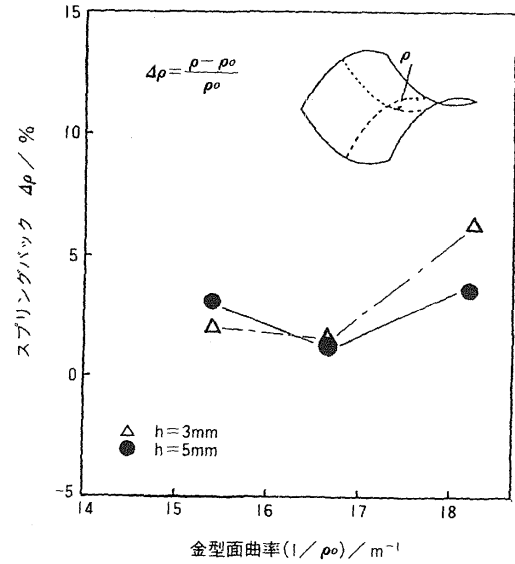


図13 スプリングバックに及ぼすゴム厚さの影響

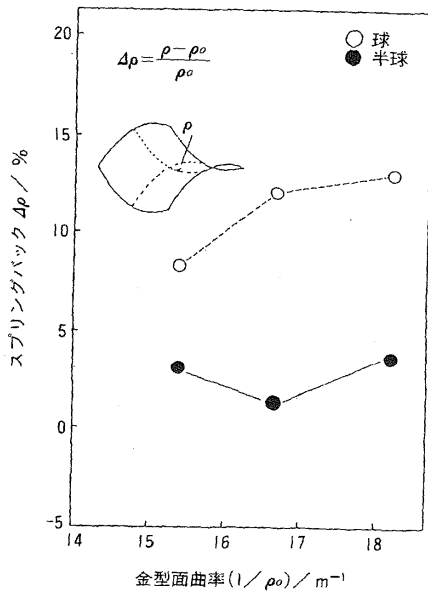


図14 スプリングバックに及ぼす工具端形状の影響

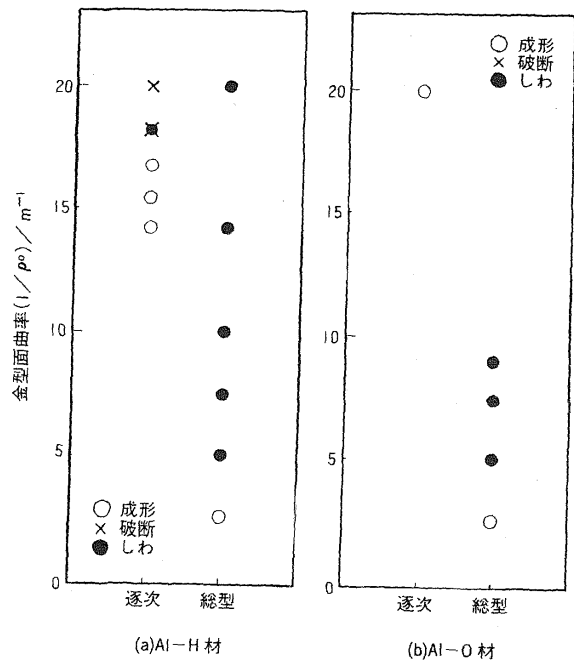
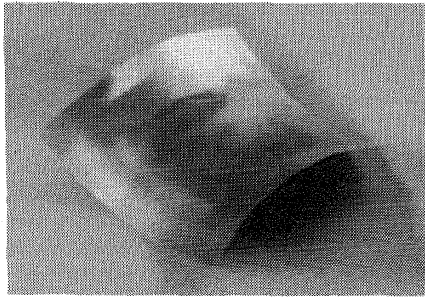
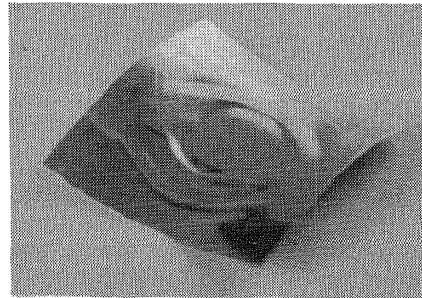


図15 逐次成形と総型成形における金型面曲率の比較

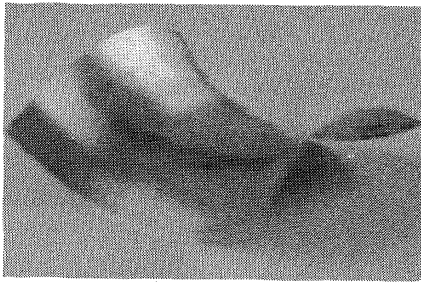


逐次成形 $\rho_0 = 60\text{mm}$

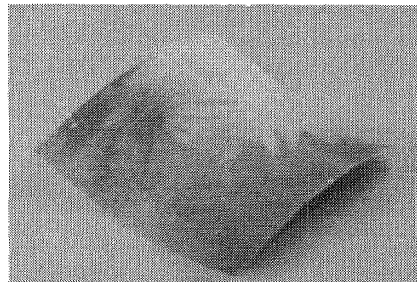


総型成形 $\rho_0 = 100\text{mm}$

(a) Al-H材



逐次成形 $\rho_0 = 50\text{mm}$



総型成形 $\rho_0 = 100\text{mm}$

(b) Al-O材

図16 逐次成形と総型成形による成形品例

4. 逐次成形装置のロボット化の検討

図17は手動の逐次成形装置をロボット化するためのフレキシブル逐次張出し成形機の機構装置の設計図である。逐次成形装置のボルトはコレットチャックによって回転し、成形高さ z の位置決めをする。 z 軸回転部はサーボモーター駆動のX-Yテーブルによって位置 (x,y) 決めされる。現在、機構装置を製作中で、ボルト締めロボット制御用のコンピュータプログラムの開発中である。成形可能な曲面形状の調査が迅速に行われ、表面精度が向上することやスプリングバックによる形状誤差も繰返し学習によって修正できるようになることなどを期待している。

5. 結言

最近の日米貿易摩擦や知的所有権のあおりのお陰で、萌芽的研究を重視する動きが出てきたのに便乗し、ドット式プリンターのようなフレキシブルな逐次成形法を提案した。スライド式単位工具を用いた離散集合金型によって転写される薄板表面の凹凸はゴムシートによって改良できることや難加工形状のくら形面成形において金型面曲率による成形限界が総型成形よりも大きく向上することを示せた。

以上、高精度や高生産性からは目をそらし、フレキシブル性に焦点を絞った成形法を紹介した。実用化に対し、ハード的には小型で強力なアクチュエータを数多く必要とするが、従来のプレス加工と大きく異なる成形法であり、アカデミックでソフト的な研究課題も多いようである。

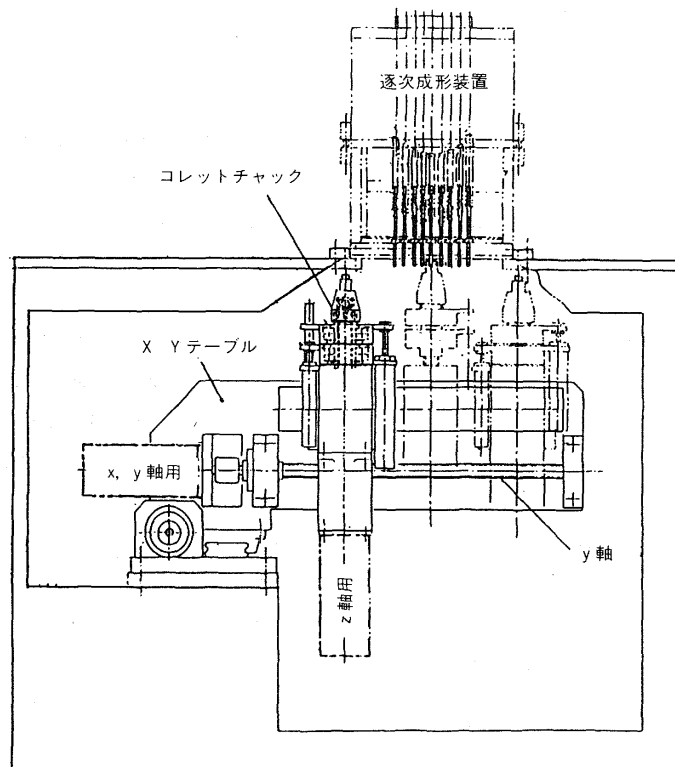


図17 フレキシブル逐次張出し成形機の機構装置図
 [朋立技研(株)の好意による]

謝辞

本研究は天田金属加工機械技術振興財団より研究開発助成を受けて促進したことを付記して、謝意を表します。また成形機の自動化の設計、製作にご尽力いただきました朋立技研(株)の方々にご御礼申し上げます。本研究に協力してくれた大学院生、高場浩二君[現在、川崎重工(株)]にも感謝いたします。

参考文献

- 1) 中島, 日本機械学会誌, 72-603 (1969), 498.
- 2) 中島, 塑性と加工, 21-235 (1980), 706 .
- 3) Hardt,D.E.et al.,Proc.9th NAMRC, (1981), 140 .
- 4) 井関・加藤・高場, 第41回塑加連講論集, (1990-10), 271 .
- 5) 北野, 京都大学学位論文, (1961).
- 6) 西岡・西牧・松石・田中・安川・山内・東郷, 日本造船学会論文集, 132 (1972), 481 .
- 7) 渡辺・桑原・蛭田・柴田, 平成2年度日本塑性加工学会賞受賞研究, (1991-5).
- 8) 葉山, 塑性と加工, 21-235 (1980), 690 .
- 9) 馬場, 塑性と加工, 29-324 (1988), 13.
- 10) Mason,B.& Appleton,E.,Proc. 3rd Int.Conf.On Rotary Metalworking Processes, (1984), 495 .
- 11) 本荘・笠松・古川・第42回塑加連講論集, (1991-9), 273 .
- 12) 北澤・清野, 平成2年度塑加春講論集, (1990-5), 437 .
- 13) 近藤・中村, 昭和60年度塑加春講論集, (1985-5), 197 .
- 14) 町田・塑性と加工, 24-274 (1983), 1093.
- 15) 井関・加藤・坂本, 第40回塑加連講論集, (1989-10), 41.
- 16) 中村・北澤・小川・井関・松原, 日本塑性加工学会, SMFセミナー, No.15 (1990-10), 51.
- 17) E.v.Finckenstein & M.Kleiner, Annals of the CIRP, 40-1 (1991), 311 .
- 18) R.D.Webb & D.E.Hardt, Trans.ASME, J.Eng.Ind. 133-1 (1991), 44.
- 19) 岩崎・田浦・塑性と加工, 20-218 (1979), 165 .
- 20) 井関・加藤・高場, 第42回塑加連講論集, (1991-9), 265.
- 21) 須藤, 塑性と加工, 14-146 (1973), 184 .
- 22) 戸澤・川田・小山・宮澤, 昭和53年度塑加春講論集, (1978-5), 329 .
- 23) 田中・中村・平岩・今泉・松原, 平成4年度塑加春講論集, (1992-5), 545 .
- 24) 李・中村・渡辺・埜, 平成4年度塑加春講論集, (1992-5), 519, 523.
- 25) 井関・加藤・高場, 平成4年度塑加春講論集, (1992-5), 527 .