

工作機械を用いた薄板の逐次成型法の変形解析による実用化

東京農工大学工学部機械システム工学科

教授 澤田孚夫

(平成10年度研究開発助成AF-98010)

キーワード: インクリメンタルフォーミング, 張出成形, 有限要素法

1. 研究の目的と背景

塑性加工といえば大量生産であり, しかも切削加工製品に比較して強度の強い成形品が作られている. しかしながら, 素材から製品を成形する第2次成形では, 近年多種類の形状で数10~数100個程度の少量の製作が望まれていた. この要求に応える研究として中島¹⁾が, プレス加工の金型の代わりに沢山の金属棒を使用し, それらの先端の位置を制御して成形する表面形状を形作ることを試みたのが最初である. その後日立製作所²⁾で, タービン翼の複雑な形状をハンマと金床を制御して製作した. またハンマを人間が自由に使いこなす板金作業に注目し, 島ほか³⁾がコンピュータでハンマを制御し成形しうる研究に着手した.

このように塑性加工における多種少量生産の手段としては, 制作に費用と日数を要する従来の金型を使用せずに加工する方法が考えられている. 薄板の金属材料による製品は, 日常生活の身のまわりに多くあり, 上記の研究の中で1980年代より開発された. それはフライス板⁴⁾, 旋盤⁵⁾, ポールローラ⁶⁾などの汎用工作機械を使用し, 金型の変わりに金属棒をジグとして用いるものである. このジグを薄板金属に接しながら動かして薄板を希望する形状に成形するが, その運動経路を決めてコンピュータに入力してジグを制御しながら成形する. そのためこれらの方法は多種少量生産の本来の目的に全く適合するものである. 成形に当たってはジグを変形段階ごとに移動させるため, 素材は逐次変形して行く. このため, 数値解析に用いられている増分解析になぞられて, インクリメンタルフォーミングと名付けられたと思われる. そして成形するための開発研究が, 文献3)~6)の研究者をはじめとして中村ほか⁷⁾によっても行われ, 90年代後半に入って実用化される段階に入った⁸⁾.

このような研究開発がされる中で, ことに薄板の逐次成形では通常の引張試験では想像できないくらい大きな張り出し性を示し, 伸びで75%以上⁴⁾を示す. このようになぜ大きな伸びを示すかが第1の問題である. 又, 円錐や角錐に成形されるようにジグを動かし

ても傾いてしまう(後に詳述)⁹⁾ことや, 底の平らな円錐状容器の成形に当たっては, 容器の底が凹んでしまう⁵⁾という形状不良の報告もされている.

そこで本報では, これらの研究開発の中に初めて解析の面から変形具合を算定し, そのメカニカルな原因を求め, かつ種々の形状設計に合致させることを目指すことにした.¹⁰⁾¹¹⁾

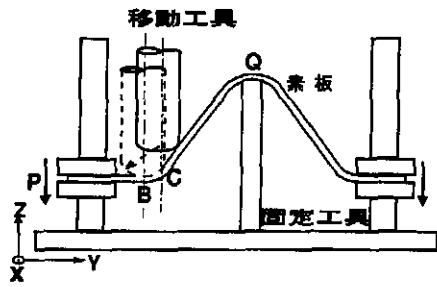
2. 研究方法

2・1. 成形方法

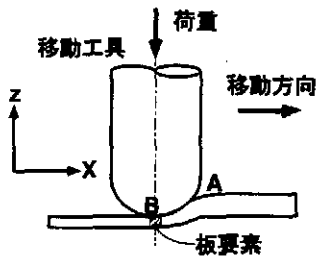
薄板の逐次成形で松原教授の考案した図1(a)のような方法⁴⁾を研究する. それは, この装置による変形状況が他の方法と比較して定量的に良く研究されていること, コンピュータシミュレーションする場合に, 与える境界条件と素材変形挙動が最も簡単であるため, 検討しやすいからである.

図1(a)は, 変形前に平らな正方形素板の周囲を固定板に固定している. この固定板は, フライス盤ベッド状に設置したダイセットのガイドポストに取り付けてあり, 上下に自由に動くことができる. 中央の固定工具はダイセットに固定してあって, 成形中ここでのみ固定することになる. 一方図1の移動工具は, 固定工具Qの付近をz方向に深さaだけ押し込んだ後Q点を中心に回転移動させる. すると押し込んだ量だけ素板の固定板は下がる. 移動工具が1回転すると, いま描いた円の軌跡より外側(図1でy方向の原点側)にbだけ移動し, 再びaだけ押し込む. この後Q点まわりに1回転する. この操作を繰り返すと, 平らな素板は円錐形に成形できる. このときの円錐形の頂点Qをとる中心線と母線との傾き角 θ は, $\tan \theta = b/a$ で与えられる. なお実際の成形に当たっては, 移動工具は縦フライス盤の主軸に固定してある, ダイセットはフライス盤ベッド状に固定してあるので, コンピュータのプログラムに従ってベッドを上下左右両方向に移動することができ, 素板に3次元形状を与えることができる.

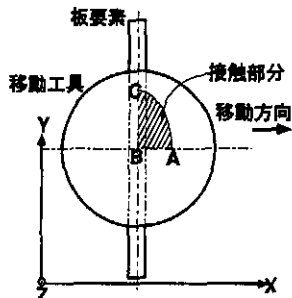
2・2. 薄板の変形と2次元シミュレーションモデル



(a) 概要図



(b) XZ 面



(c) 工具上面図

図1 逐次張出し成形法

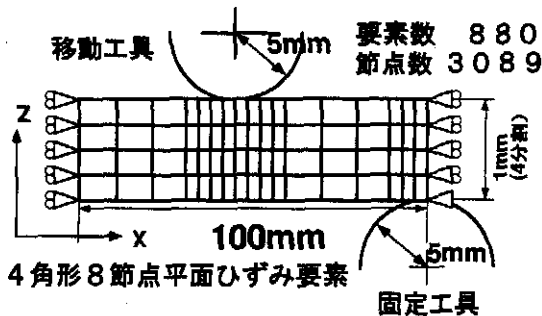


図2 平面ひずみモデル

材料 : Al-1050-0材
 半径 : 50mm
 中心角 : 30度
 中板厚 : 1mm
 ヤング率 : 73.5Gpa
 $\sigma_y = 35.4\text{Mpa}$
 $C = 177\text{Mpa}$
 $n = 0.295$
 ポアソン比 : 0.339

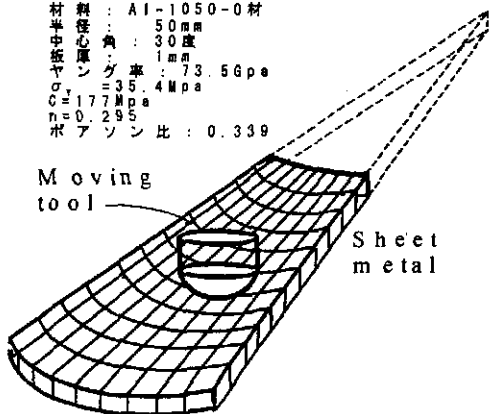


図3 3次元解析モデル図

図1 (a)のように実線で示す工具が、x方向に進む場合を想定する。この場合、工具中心を通るxz面を図(b)に示すと、工具中心線より右側の板は素板で、A点で工具に接触した後徐々に変形し、B点ではy方向の線素は図(a)と(c)のBC方向に引張られ、その後変形は終了すると思われる。このとき図(a)で2つの工具中心を通る断面yz面で考えると、点Bの外側と点Qとでは、変形を受けないのでx方向(又は円周方向)に伸びない。従って、図(c)で移動工具を押し込んで素板が変形中、ほぼyz面内で平面ひずみをすると考えられる。すなわち、点PQを結ぶ板要素は、はじめ変形を受けていないとき水平な直線であったが、移動工具によって順次押し込まれてBCのように変形していると考えられる。この場合、図(a)のCQとBPでは引張りを受けるだけである。このような板要素の変形プロセスを考えると、図2のように薄板の平面ひずみモデルで近似的に表すことができるので、工具による板の押し曲げ変形を考察する。解析は、ABAQUSプログラムを用い、四角形8節点アイソパラメトリック要素(低減積分)で、要素数880、節点数3089、素材はAl-1050-0材($\sigma_y=35.4\text{MPa}$, $C=177\text{MPa}$, $n=0.295$)である。

2・3 3次元シミュレーションモデル

図1 (b)と(c)に示されるように、移動工具によって変形を受ける素板は、工具との接触面近傍では正確には3次元変形を受けている。そこで前項の2次元モデルに加えて3次元モデルを作成し解析した。モデル図を図3に示す。コンピュータメモリーの関係で、固定工具の素板の固定をQ点より外側に50mmずらしてある。頂点Qにおける開き角30°の扇形を考え、 $r=50\sim 100\text{mm}$ の間を1mm、円周角を1°間隔に要素分割した。板厚は1mmで、厚さ方向の要素は2要素である。使用した有限要素は、六面体8節点立体要素(要素数3000、節点数4743)で低減積分を使用し、材料定数は2次元モデルの場合と同一である。

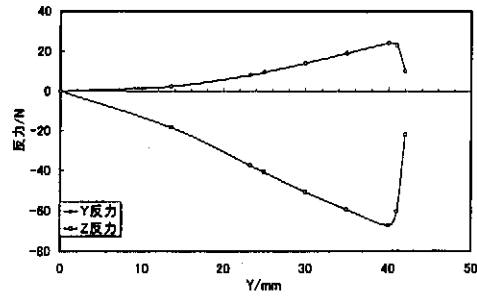
3. 数値解析結果と考察

3・1 2次元解析

図4は、薄板モデルの中央を半径5mmの円形断面の移動工具で水平の位置から40mm押し込んだ場合を示す。図(a)は変形図を示し、板厚は同一要素の上下の節点間距離とした。薄板が最初に工具に接触した点fは、工具の押し込みにつれて右方に移動する。工具との接触域はほぼ工具の右側になるが、押し込みが40mmになると図の領域が接触している。図(b)に工具を垂直に35から40mm押し込んだときの材料の移動と板厚の分布を示す。工具の左側で工具と接触していないところでも、偏差応力が図(c)のように大きくなって板厚が徐々に減少し、C点で最小板厚(板厚ひずみ24.6%)

を示す。これは薄板のCQ方向(図1(a))の引張りが大きくなるからである。工具が35mmのとき最小板厚点はeであるが、工具が40mmの時1mm右方へ移動する。薄板が工具から離れると板厚はほとんど変化してない。図(d)に示すせん断応力は、ポンチとの接触開始と終了点で大きく、ことに接触終了点からの値2mmの区間である程度の値を示しているが、これは変形にあまり寄与していない。

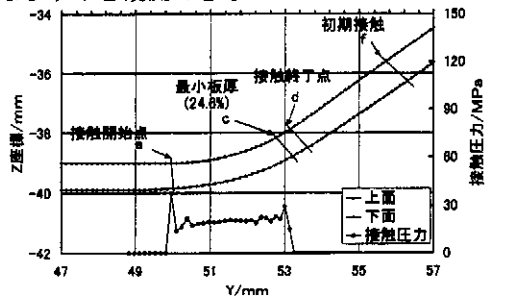
押し込み量を変化させたときどのくらいまで変形するかを計算した。図(e)はそのときの移動工具の荷重をz方向反力としてあらわしてある。すると押し込み量が40mm近辺で最大荷重となり、そのあとは押し込み量を増加させると急激に減少し、素材の板厚が負になってしまう場合もある。これはくびれが発生したと考えられるので、2次元平面モデルでは、実験のような大きなひずみを観測できなかった。



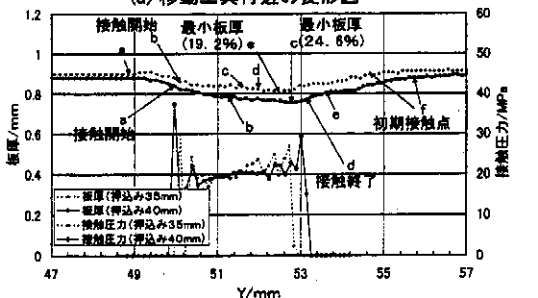
(e) 強制変位と工具反力の分布

図4 2次元解析結果

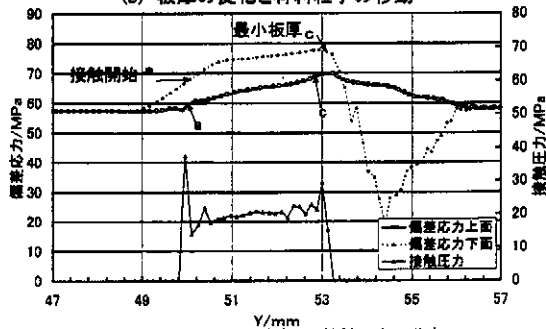
薄板の逐次成形では、通常工具が1ステップ毎にy方向に移動するとともにz方向に押し込む。そこで工具を垂直に38mm押し込んだ後、 $\Delta y = \Delta z = -2\text{mm}$ と斜め移動したところ図5のようになった。工具の接触点からY=50mm近辺までは、工具垂直押し込み(図4(b))が40mmの時の板厚分布とほぼ等しいが、それ以上の地点では板厚はさらに減少している。これは薄板が工具先端半径5mmに曲がった後、最小板厚点h(板厚ひずみ27.6%)の右方で曲げ戻しを受けており、引張りの偏差応力のもとにおいて伸びている。さらにせん断応力の値を持つ付近が接触終了点から約5mm続いている。このことからポンチとの接触終了直前より板の曲げ戻しが行われている。なお、このときの固定工具における薄板は一樣曲げ状態で板厚ひずみは22%、直線部のひずみは11%である。



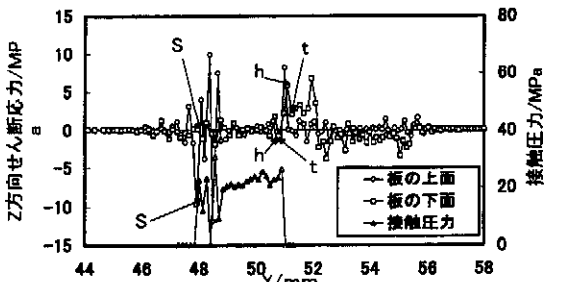
(a) 移動工具付近の変形図



(b) 板厚の変化と材料粒子の移動



(c) Y方向の偏差応力と接触圧力の分布



(d) Y面におけるせん断応力分布(押し込み40mm)

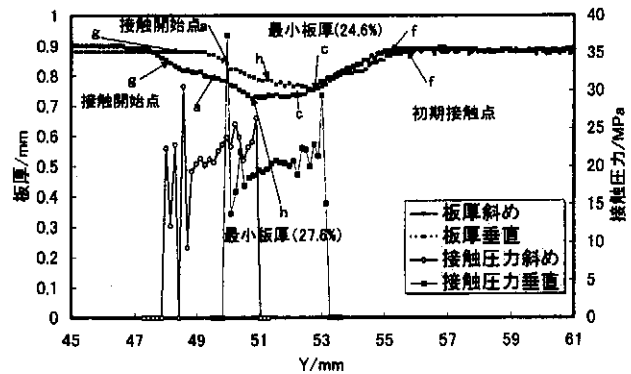


図5 垂直と斜め押し込みの板厚変化

次に実際の加工で行っている工具移動を繰り返し、逐次成形のシミュレーションをした。移動工具をX=50mmのとき押し込み30mmを行った。その後移動工具を引き上げて除荷し、移動工具を2mmだけ水平方向に移動し、再び押し込む。このときの押し込み量を2mm増加させる。したがって、素版の固定工具の鉛直線(z軸に平行)と45°の傾き角をなす。最初の押し込み時の板厚は14.1%しか変形していない。しかしこの操作を3回繰り返すと図6の結果となり、素版の板厚が最初の押し込みを除いて18.16~18.46%とほぼ一定の板厚となった。しかしながら、工具の移動量から松原の実験で得られた sine 則¹²⁾によって計算すると、板厚

ひずみは $\epsilon_t = 0.293$ (29.3%) となるはずであるが、得られた結果はかなり小さい。

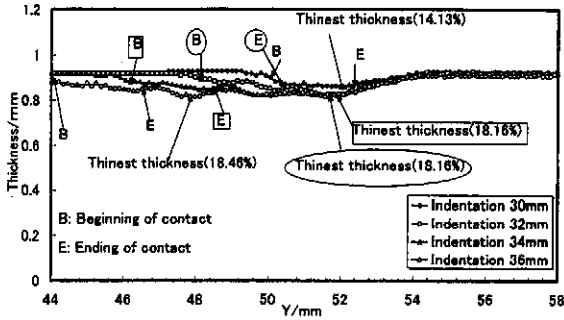
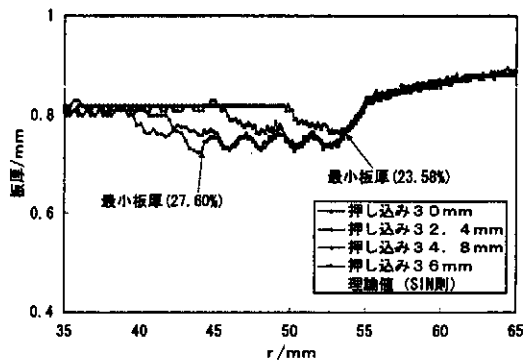
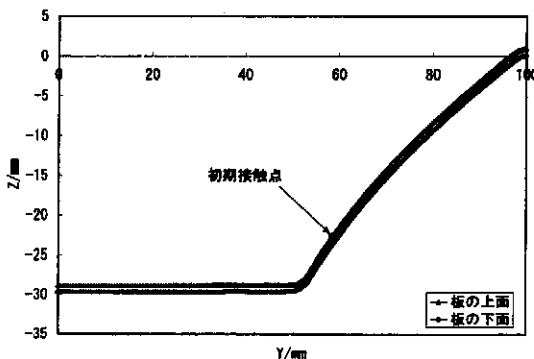


図6 繰返し押し込みによる板厚の変化

そこで非現実的であるが、軸対称変形を考えた。すなわち、工具を棒状でなく、幅10mmの円輪ポンチ(上断面はドーナツ型)で押し込む。最初 $x=50\text{mm}$ で押し込み、次に除荷して外側に $y=2\text{mm}$ 移動した後、1.2mm さらに押し込む(比率5:3)。すると図7(a)のようになり、板厚がほぼ一定であるが板厚ひずみが27.6%で、sin則のひずみより大きい。すなわち、変形しすぎた結果であって、これは図7(b)のように斜めに変形した薄板が上に凸の丸みがあるので、円周方向に変形したことが原因とわかった。



(a) 各押し込み量による板厚変化



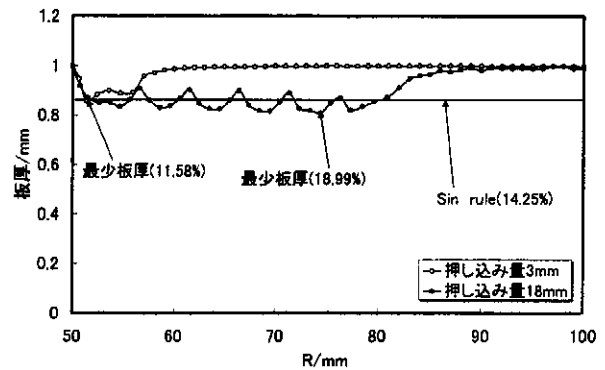
(b) モデル形状(押し込み30mm)

図7 軸対称解析結果

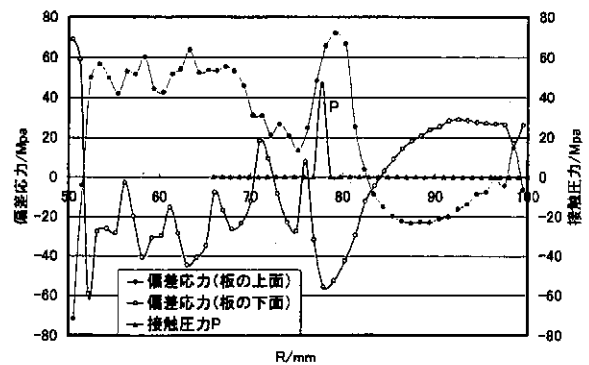
3・2 3次元解析

次に3次元モデルで解析した。図8(a)は押し込み量を18mmとし、 $\tan \theta = 5/3$ になるように移動工具を r

$=55\sim 80\text{mm}$ まで移動させて変形したときの板厚分布を示す。移動工具の移動ピッチが粗いため、板厚は凹凸上に変化しているが、sin則にはほぼ一致する。図8(b)は、偏差応力 σ_r の半径方向分布を示す。固定端(左側)では、板の上下面応力がそれぞれ負と正となって曲げを受けていることを示す。移動工具が通過した $r=80\text{mm}$ までは、その偏差応力が逆転しており、曲げ戻しを受けている。図では工具が80mmのところにあるが、接触圧力が大きくなる左側部分でも、板の上側が引張り、下側が圧縮となっている。これは現象的におかしいが、次の図からコンピュータ容量の都合で要素数を粗くしたことによると思われる。



(a) 板厚分布図



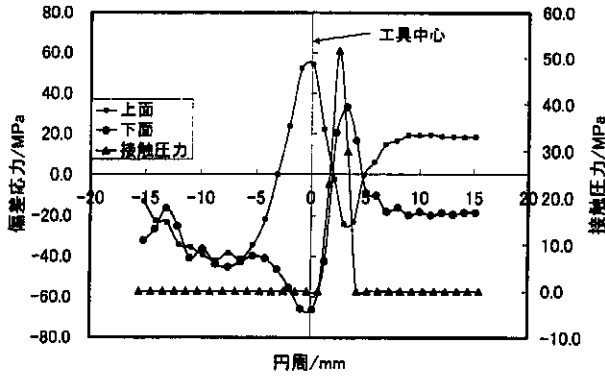
(b) 半径方向偏差応力分布図(押し込み量18mm)

図8 3次元解析結果

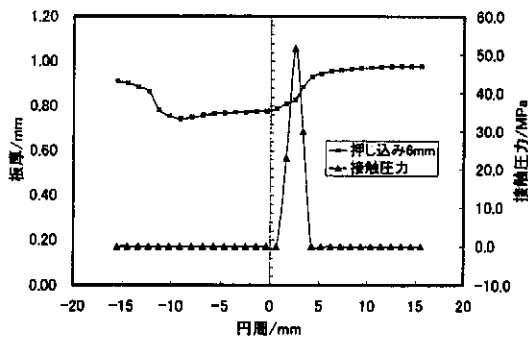
図9(a)は、移動工具が図3の $r=60\text{mm}$ の位置を左側から右側へ移動しているとき、工具が中央に来たときの σ_r 、 σ_z の分布と、工具接触、圧力分布を示す。押し込み量は6mmである。図の右側では緩やかな上に凸の変形を示し、工具との接触で上に凹の曲げを受け、図の中央付近で曲げ戻しを受けている。このときの平均板厚 t は、図9(b)に示すような工具接触圧が立ち上がるまでひずみがないが、接触圧力が大きくなると板ひずみが大きくなり、接触圧力が下がっても曲げ戻しのためわずかに伸びている。

ところで、逐次張り出し成形が大きな伸びを示すことについて考察する。後藤¹³⁾は、丸棒の単軸引張りにおいて、側面圧が作用すれば大きなひずみを示すことを、詳しく述べている。そこで側面圧を示すと図9(c)

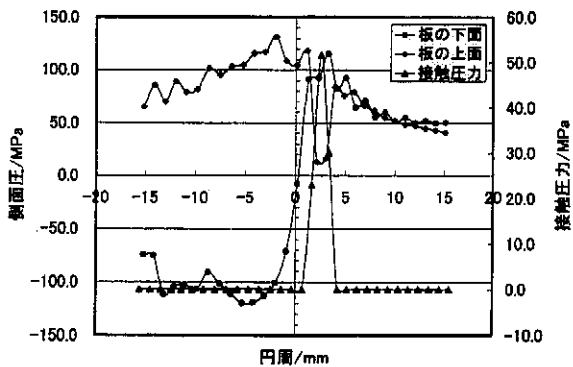
のようになる。横軸が15mmから5mmになるまで徐々に大きくなり、ポンチと接触する部分で図9(b)のように、板厚が急激に減少する。ポンチから離れると、側圧が急に零となり、ほとんど板厚も減少しない。従って、板厚現象に伴う素材の大きな張り出しは、主として側圧による効果と結論できる。なお、今までの解析で押し込みが14mmまでは移動工具の反力が増大する一方なので、破断限界までを示すひずみは、もっと大きな値が得られる。



(a) 円周方向の接触圧力と偏差応力分布



(b) 円周方向の接触圧力と板厚分布



(c) 円周方向の接触圧力と側面圧分布

図9 円周方向の側面圧力と側面圧分布

3.3 固定板が斜めの場合

製品に軸対象の形状のみならず、種々の形状に成形する方法の一つとして、図10(a)に示すように、素版を斜めに固定して図1(a)と同様に移動工具によって成形する⁹⁾。このとき素版より上方部は円錐形にならず、緩やかに傾いてしまう。図10(b)はその成形例である。これは成形時の移動工具による加工された部分

の弾性変形によって生じると推測される。そこで図2の平板モデルと3次元モデルで解析したところ、図10(a)の中心線より右側の部分ではある程度計算できるが、左側のゆるい傾斜部分については、まったく計算できなかった。この原因は、移動工具と素版とが狭い領域で接触するため応力集中が生じる。ABAQUSプログラムは自動計算によって、非常に小さいステップで繰り返し計算を進める。しかしながら、1回の押し込みに半月から1ヶ月以上の計算を要することとなり、事実上計算不可能となった。この解決策として、陰解法のABAQUSコードに依存せず、陽解法の有限要素法で実行してみる必要がある。現在陽解法3次元プログラムの開発を行っている。

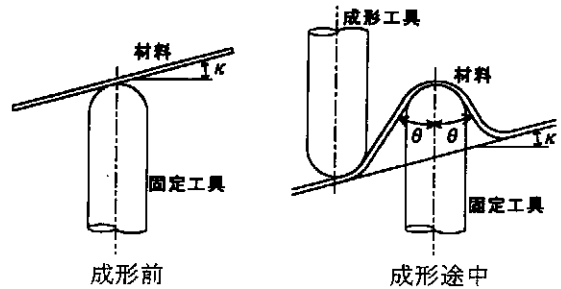
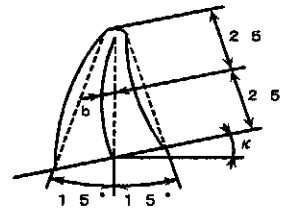


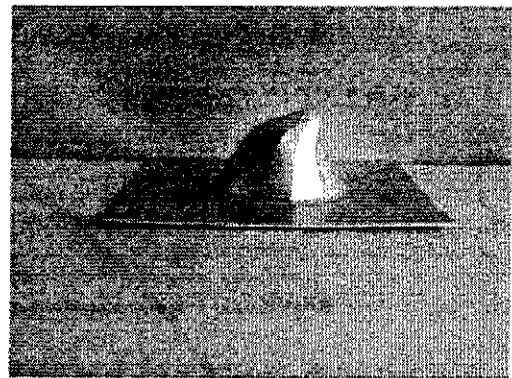
表 3-1 わん曲

材料傾斜角 κ	わん曲 b / mm
0	0
5	0.8
10	1.6
15	2.6
20	3.4



成形後

(a) 工具の配置



(b) 成形例

図10 斜め成形結果

4. 結び

ポンチとダイスを使わない画期的な成形法であるインクリメンタルフォーミングに初めて解析的側面からアプローチし、3次元解析で実験結果を良く表すこと、および素材の張り出し性が大きく、その成形限界の大きなことは側圧の効果であることを明らかにした。しか

しながら、成形品の寸法形状精度不良については解析できていない。この原因はおそらく有限要素法の解法を改めると解決できる見込みである。なお、静的陽解法はわが国に独特な解法であるので、陽解法による汎用3次元プログラムは市販されておらず、すぐに計算することはできない。

謝 辞

本表題の研究にあたって、天田金属加工技術振興財団より助成金を交付された。おかげさまで基本的な大きな研究成果が得られた。これをもとにして、さらに未解決の問題を解く糸口を見つけた。ここに厚くお礼申し上げる。

文 献

- 1) 中島尚正：機械学会誌，72-603，(1969)，498.
- 2) 中村敬一・李明哲・渡辺忍他：平4 塑加春講論集，(1992)，523.

- 3) 長谷部忠司・島進：35-406，(1994)，1323.
- 4) 松原茂夫：塑性と加工，35-406，(1994)，1258.
- 5) 北澤君義・若林昭彦・村田和也他：塑性と加工，35-406，(1994)，1348.
- 6) 井関日出男：機械学会論文集(C)，58-554，(1992)，3147.
- 7) 松原正基・田中繁一・中村保：塑性と加工，35-406，(1994)，1330.
- 8) 呂 言：塑性加工学会板金プレス成形分科会，47回 SMF セミナー，(1998)，57.
- 9) 松原茂夫：46 回塑加連講論，(1995)，33.
- 10) 澤田孚夫・松原茂夫・福原軍平・坂本誠：49 回塑加連講論，(1998)，139.
- 11) T. Sawada, S. Matsubara, M. Sakamoto, et al: 6th ICTP, (1999), 1501.
- 12) 松原茂夫：塑性と加工，35-406，(1994)，1311.
- 13) 後藤学：H11 塑加講論春，(1999)，159.