

板材のインクリメンタルフォーミングに関する研究

木村豊恒^{*1)}

Study on Incremental Forming of Sheet Metals

KIMURA Toyotsune^{*1)}

多品種少量生産への対応技術として、コストや納期のかかる型を用いずに金属薄板を自在な形状に成形するインクリメンタルフォーミングが注目されている。そこで本研究では、マシニングセンタを利用してインクリメンタルフォーミングの実験を行い、汎用の工作機械によるインクリメンタルフォーミングの実用性を検証した。その結果、円すい台形状であれば傾斜角 20°まで成形が可能であること、また一部にほぼ垂直部分を持つ半球形状においても中間工程を経ることで成形可能であることが判明した。これらのことから、汎用の工作機械を用いたインクリメンタルフォーミングについて実用化の可能性のあることがわかった。

1. 緒言

製品の多様化が進む中、県内製造業においても「多品種少量生産」や「製品サイクルの短期化」への対応が求められている。しかし、金属板の成形方法は現在の製造工程では、専用金型を作製してプレス加工を行うのが一般的で、この方法は非常に大きなコストと納期を要し、製品の多様化の要求に対応できない。このため、金型を必要とせず、金属薄板を自由な形状に成形加工する技術であるインクリメンタルフォーミングが注目されている。

インクリメンタルフォーミング(逐次張出し成形法)は、棒状工具により金属薄板を局部的に塑性変形させることを連続的に行い、自在な形状に成形する塑性加工技術で、1990年代から日本を中心に研究が行われている^{1)~4)}。本技術は従来の金型を用いたプレス成形法の数倍の成形限界を示すことも注目されており、現在は試作、少量生産あるいは補修部品の製作への応用が模索されている。

ところで県内には金属プレスや板金加工を行っている企業が多数あり、金型を製作せずに薄板の成形加工が可能となれば、コストの削減と製品開発期間の短縮が期待でき、他社への大きなアドバンテージとなりうるものと思われる。

また本技術は棒状工具を数値制御して加工を行うことから、その動作はNCフライスに非常に近いものである。NCフライスは汎用工作機械として一般に普及しており、企業においても既存のNCフライスやマシニングセンタへの治具の後付け、あるいは改造を行うことで、本技術を導入できる可能性が大いに考えられる。

そこで、本研究では汎用のマシニングセンタを利用し、簡易的なインクリメンタルフォーミングの実験を行うことで、マシニングセンタを流用した場合のインクリメンタルフォーミングの実用性を検証し、可能性を検討したのでそれを報告する。

2. 実験方法

2.1 実験装置の概要

成形加工実験に使用した(株)森精機製作所製マシニングセンタ(MV-40m)の外観を図1に示す。実験用成形材料としては市販のアルミ及びステンレスの薄板($t=0.5\sim 2.0\text{mm}$, $150\text{mm}\times 150\text{mm}$)を選定した(表1)。



図1 実験に使用したマシニングセンタ

表1 実験に用いた材料

材料	厚さ mm	規格	引張強 さ N	伸び %
アルミ	0.5	A1050P-H24	132	14
	1.0	A1050P-H24	113	29
	1.5	A1100P-H14	130	8
	2.0	A1050P-H24	120	15
ステンレス	0.5	SUS430	502	31
	1.0		502	31

実験には加工時の荷重を測定するために切削動力計(kistler 9257B)を用いるため、切削動力計の接触面に取り付けができ、Z軸方向に成形スペースを持つ嵩上げ構造

*1) 機械・電子・情報技術チーム

の板金固定治具を設計製作した．これをマシニングセンターのマシンバイスに取り付けて実験を行った．

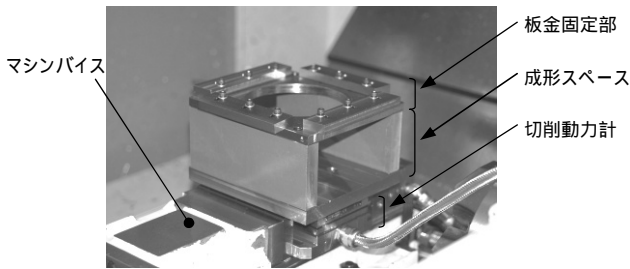


図2 製作した板金固定治具

2.2 成形加工プログラムの作成

成形性を評価するための加工形状を円すい台（開口部直径100mm、高さ50mm）と設定し（図5）、マシニングセンターで自動運転を行う加工プログラムの作成を行った．インクリメンタルフォーミングの工具軌跡は一般的な切削加工時の等高線仕上げ加工の動きに似ているため、市販のCAD/CAM ソフトが利用できる．そこで切削用三次元CAD/CAM ソフト(OneCNC XR4 Mill 3D Expert)を用いて、当初は等高線仕上げ加工機能により加工プログラムを作成した．しかし、この方法で作成した工具軌跡は、Z方向に一段ずつ下降する際に常に中心からの方向が同じ箇所を下降するため、その箇所材料の変形が大きくなりやすく、また厚さも薄くなることから亀裂が発生しやすい（図3）．

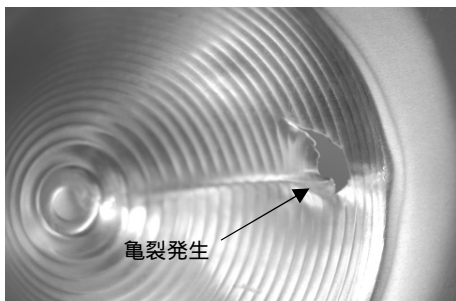


図3 亀裂発生例

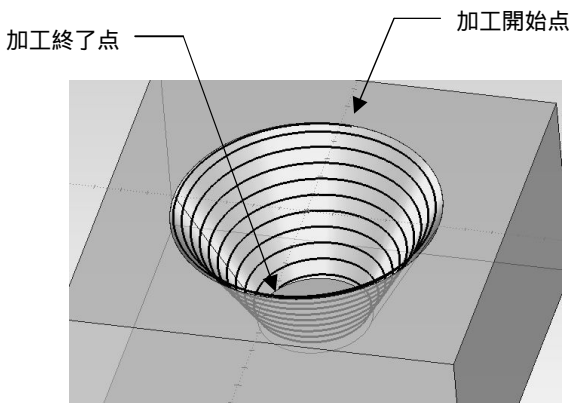


図4 CAMソフトにより作成した工具軌跡

そのため等高線加工ではなく、使用したCAMソフトがその機能として有するスパイラル加工を手直しすることで、図4のような外側から螺旋状に移動していく工具軌跡を作成した．

2.3 成形性評価実験

成形性を評価するために上述の加工プログラムをマシニングセンターに送信し、DNC 運転にて円すい台形状の成形加工実験を行った．傾斜角の角度を15~40°の範囲で変化させて、どの角度まで成形が可能かという成形限界を検討した．図6のように工具形状は先端が半球型になった棒状で、直径10mmと4mmの2種類の工具を用いて実験を行った．

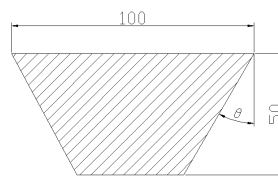


図5 サンプル成形品の形状



図6 加工工具

2.4 成形時の荷重測定

切削動力計を用いて、成形加工時のXYZ方向の荷重を測定した．実験では円すい台形状を加工しており、材料に対してはほぼ円運動を繰り返すため、XとY方向荷重はいずれも正弦波と同様の挙動を示し、XとYでπ/2だけ位相がずれたものになる．そこで円周方向荷重を算出するために以下の式を用いた．

$$Fr = \sqrt{Fx^2 + Fy^2} \tag{1}$$

ただし、それぞれFrは円周方向、FxはX方向、FyはY方向の荷重である．これを基にグラフ化すると図7のようになる．

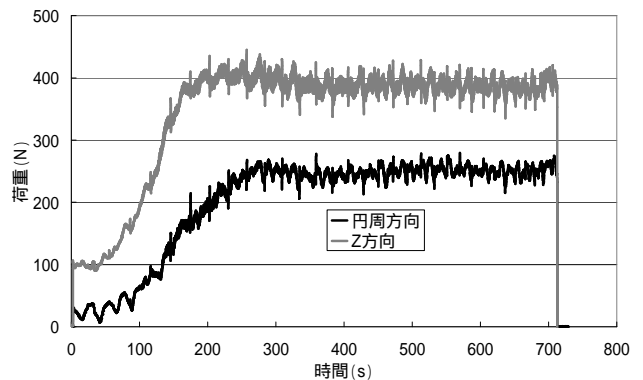


図7 円周方向及びZ方向荷重

2.4 成形後のサンプルの寸法評価

成形したサンプルの形状を評価するために、(株)ミツトヨ製の三次元測定機 (H503) を用いて微い測定を行い、中心を通る断面の輪郭形状を取得した。この取得データと設計値との比較によりどの程度の精度かを評価した。

また、どの部分がどの程度伸びているかを測定し、板厚を推定した。板厚の測定は三次元測定機を用いても、表と裏を測定して、そのデータを合わせ込む必要があるが、サンプルが薄板であるため、測定誤差及び変形誤差が生じ易く、板厚の測定は困難である。そこで、成形加工前の材料にメッシュパターンを作成し、パターンの変形量から厚さを推測する方法を用いた。メッシュパターンの作成には、ケガキにも使用できるスプリング内蔵自動ポンチ(図 8)を用い、これをマシニングセンタの主軸に取り付け、プログラム運転により材料裏面に 2 mm ピッチの格子形状を作成した。

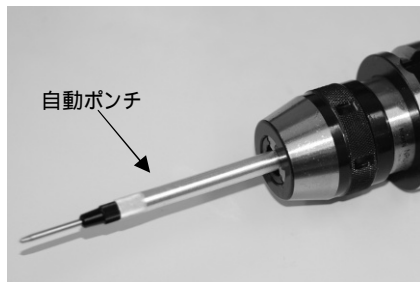


図 8 メッシュパターン作成に使用した自動ポンチ

3. 結果及び考察

3.1 成形性評価実験

実験結果を表 1 及び表 2 に示す。アルミ 0.5mm、1.0mm、ステンレス 0.5mm の板厚が小さい場合には 4 工具の方が成形性は良く、アルミ 1.5mm、2.0mm、ステンレス 1.0mm の板厚が大きい場合は 10 工具の方が成形性は良好であった。また成形限界が最も高かったのは、4 工具を用いたときのアルミ 0.5mm と 1.0mm であるが、傾斜角が 20° まで成形が可能であった。被加工部が均一に伸びたものとして伸びを計算すると 190% を越えたことになる。一般にこのような円すい形状の板厚については、インクリメンタルフォーミングでは初期板厚 t_0 と成形後の斜面部の板厚 t と斜面傾斜角 θ の間には以下のサイン則が成立することが知られている¹⁾。

$$t = t_0 \sin \theta \quad (2)$$

式(2)より傾斜角 20° の成形品は 0.5mm の材料では成形後の板厚は 0.17mm となり、1.0mm の材料では成形後

0.34mm となる。なお表 1 に示すようにアルミ 2.0mm とステンレスの 0.5mm 及び 1.0mm は他に比べて引張伸びの大きい材料であるが、本実験結果からは引張伸びと成形性との相関は見られなかった。成形時の状況から判断すると、薄板の場合は成形時に板厚が小さくなり、亀裂が発生することで成形不良となるが、板厚が大きい場合は、工具が接触する部分で摩擦による傷や削れが生じて破断となる傾向がある。このように材料が薄くて軟らかい場合は、工具の応力により、板材の裏側に引張応力が生じることで、裏側も塑性変形を生じるが、材料が厚い場合は裏側にまで応力が伝わらず、工具との接触部分だけに局部的に圧縮応力が加わり、摩擦が増大することが原因と推察される。

表 2 先端直径 10 工具による結果

傾斜角	40	30	25	20	15
AL0.5			×		
AL1.0				×	
AL1.5				×	
AL2.0			×		
SUS0.5		×			
SUS1.0	×				

表 3 先端直径 4 工具による結果

傾斜角	40	30	25	20	15
AL0.5					×
AL1.0					×
AL1.5	×				
AL2.0	×				
SUS0.5			×		
SUS1.0	×				

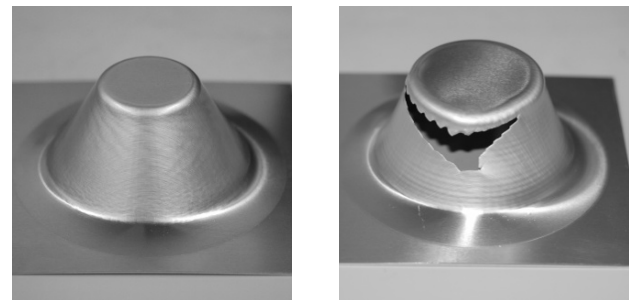


図 9 成形加工実験の成功例と失敗例

3.2 成形時の荷重測定

成形加工時の荷重を測定し、工具先端径の違いによる、成形時の荷重の違いを比較した。材料はアルミ 1.0mm を用いて、同じ加工プログラム (Z 軸押し込み量 1.7mm) により 4 工具と 10 工具で XYZ 方向荷重を測定し、Z 方向荷重と円周方向荷重に換算したものを図 10 と図 11 に示す。

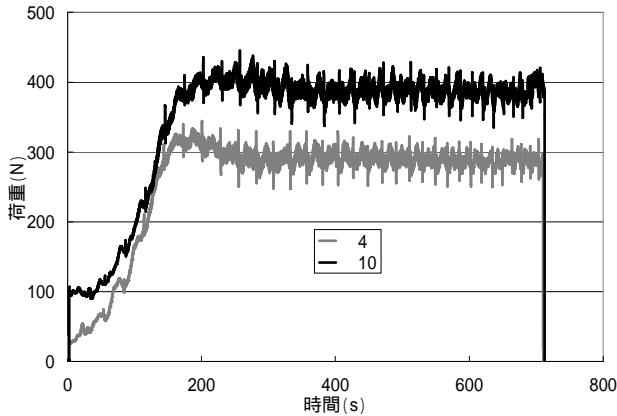


図 10 Z 軸方向の荷重の比較

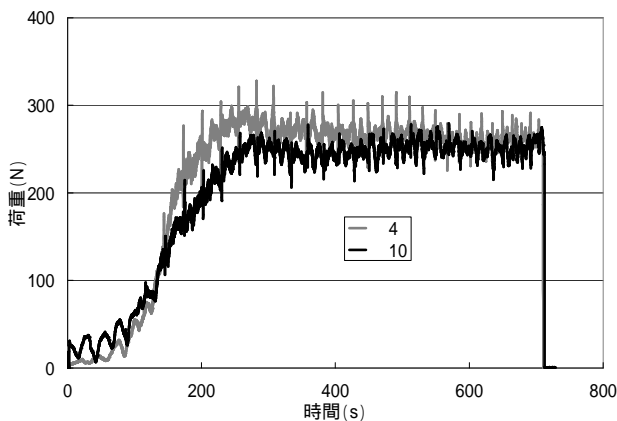


図 11 円周方向の荷重の比較

図 10 の Z 軸方向の荷重を見ると、4 に比べて 10 の工具は 3 割程度荷重が増加することが確認された。押し込み量は同じであるが、10 の方が大きな面積を塑性変形させる必要があるため、荷重が増加したのと思われる。しかし図 11 を見てみると、円周方向の荷重は工具径による違いは見られない。Z 方向と同じく 10 の方が大きな面積を塑性変形させる必要があるが、4 では先端の半径 2mm の部分で押し込み量である 1.7mm を変形させていくことになるが、10 では半径が大きい分、それがより変形させやすくなり、それらが相殺したため、こうした結果になったものと推察される。

3.3 成形後のサンプルの寸法評価

3.3.1 円すい台形状サンプル

メッシュパターンを施した材料を用いて円すい台形状の成形加工を行った結果を図 12 に示す。図 12(b) はサンプルを真正面から撮った写真であるが、元のメッシュパターンがほとんど直線になっており、変形していないように見えることから Z 方向にだけ変形が生じていることがわかる。

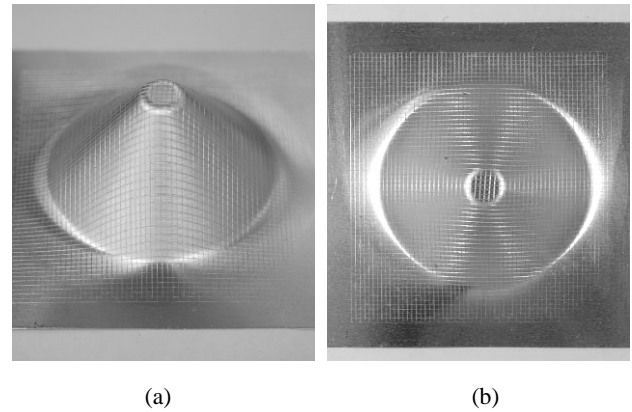


図 12 メッシュパターンサンプル(円すい台形状)

三次元測定機により測定した輪郭形状データを図 13 に示す。設計値は高さ 50.5mm、傾斜角が 40° のところ、測定値は高さ 50.8mm、傾斜角 39.92° であった。ほぼ設計通りの形状で成形が可能であった。

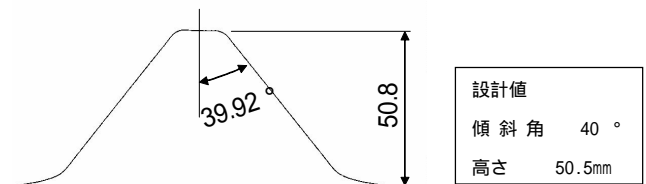


図 13 輪郭形状測定の結果(円すい台形状)

3.3.1 半球形状サンプル

半球形状は端部に垂直部分を持つが、前述のサイン則及び成形性評価実験より、斜面は 20° 程度までしか成形できないため、円すい台形状を加工したときと同様の加工方法では不可能である。そこで図 14 に示すように 2 回の中間形状を経ることで最終形状を得ることができた。

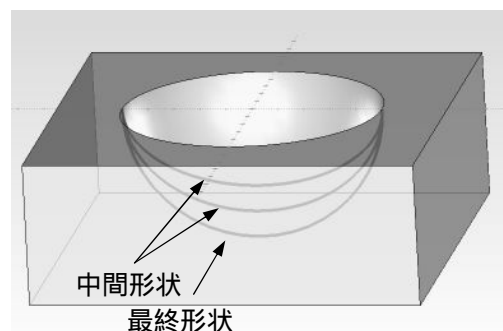


図 14 中間工程の形状

メッシュパターンを施した材料を用いて半球形状の成形加工を行って得られたサンプルを図 16 に、またそのサンプルを三次元測定機により測定した輪郭形状データを図 17 に示す。設計値は半径 50.5mm のところ、測定値は 49.86mm

であった。スプリングバックの影響もあり、少し小さめに仕上がるため、それを考慮した加工プログラムが必要と考えられる。

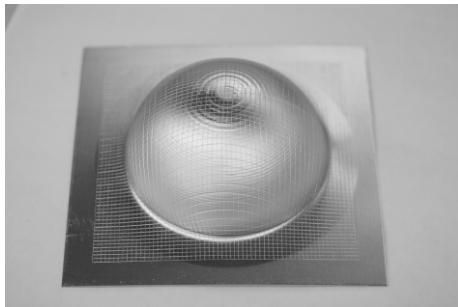


図 15 メッシュパターンサンプル（半球形状）

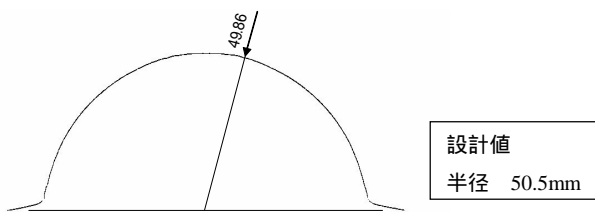


図 16 輪郭形状測定の結果（半球形状）

成形後のメッシュパターンの測定値し、成形の前後で体積が一定であることから、厚さは伸びに反比例するものとして換算して分布を求め、得られた結果を図 17 に示す。

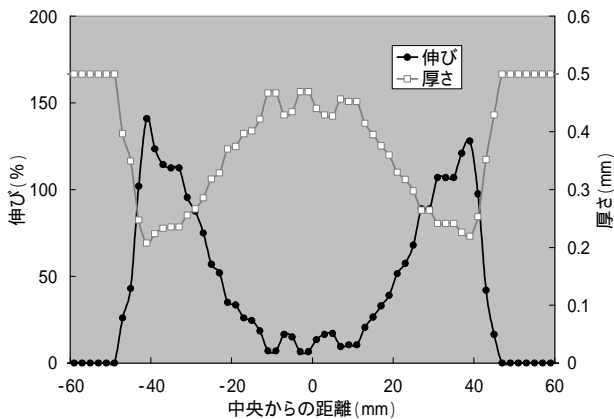


図 17 板厚分布（半球形状）

中央部はほとんど伸びていないため、厚さも大きく、全体的に均でないことがわかる。今回は 2 mm ピッチのメッシュの伸びで厚さを換算したが、サンプルを観察すると、メッシュのピッチ間においても、厚さが不均一になっていることが確認できることから、部分的には今回得られた最小厚さの 0.2mm を下回る箇所もあると考えられる。強度的な点から言えば、厚さを均一にすることが理想的であるた

め、加工プログラムにおける中間形状の最適化が必要と思われる。どのような中間形状が最適であるかは今後の課題である。また厚さ分布の測定もさらに高精度化が必要となる。

4. 結言

マシニングセンタによってアルミ及びステンレスの薄板をインクリメンタルフォーミング加工する実験を行い、汎用工作機械によるインクリメンタルフォーミングの実用性を検討した。その結果、以下の知見を得た。

成形性評価実験により、板厚が小さい場合には 4 工具の方が成形性は良く、板厚が大きい場合には 10 工具の方が成形性は良好であった。

円すい台形状の成形では、傾斜角 20°（伸び換算で約 200%）まで成形が可能あることがわかった。

成形時の荷重測定では、Z 方向荷重は 4 工具よりも 10 工具の方が大きいことがわかった。

成形品の寸法評価では、ほぼ設計形状通り成形できていることがわかった。

メッシュパターンの変形量から厚さの推定を行い、厚さの分布が明らかになった。

なお、本研究において成形加工に用いたマシニングセンタ及び測定に用いた三次元測定機は、財団法人 JKA の「機械工業振興補助事業」により導入、設置した。

KEIRIN 

参考文献

- 1) 松原茂夫；塑性と加工,35-406,p1258,(1994)
- 2) 井関日出男・久門統；塑性と加工,35-406,p1336,(1994)
- 3) 北沢君義・若林昭彦・村田和也・清野次郎；塑性と加工,35-406,p1348,(1994)
- 4) 21 世紀のインクリメンタルフォーミング小特集,塑性と加工,42-489,p983(2001)