



T. Kuboki

## 傾き自在な工具を用いた 薄板・箔のマイクロ逐次打点成形

久保木 孝\*

### 1. 研究の目的と背景

逐次打点加工はマイクロテクノロジー材料の微細塑性加工技術として注目されつつある。マイクロ部品の製造にはLIGA (Lithographie, Galvanoformung, Abformung)などが用いられるが、LIGAでは高精度な加工が可能である反面、生産能率は低い。これに対して、塑性加工を利用したマイクロ加工であれば、LIGAほどの高精度は得られなくても非常に高い生産能率を達成することができる。

塑性加工の中でも逐次打点加工は、マイクロ部品成形に有効な方法の一つである。早乙女らはハンマリングを利用した点打撃によってミクロンオーダーの自動車シャーシ形状の成形に成功している<sup>1)</sup>。ところで、通常のサイズの部品成形にも逐次打点成形が適用されてきている<sup>2)~4)</sup>が、これらのいずれの方法も点打撃を利用している。これに対し、筆者らは2mm厚さの金属板を対象として、所定の傾き角を有するパンチを用いた線状打撃を活用する逐次打点加工法を提案している<sup>5)</sup>。点打撃に比べて加工能率は高くなる。しかしながら、この方法はマイクロ部材を対象とする場合、パンチの傾き角の調整が難しく適用は困難であった。

本研究では、板厚が1mm未満の薄板や箔への適用も可能となる新たな線状打撃を用いる逐次打点加工を提案する<sup>6)</sup>。提案する加工法では台形状の打撃面を有する回転自在なパンチを用いることによって、被加工材に局所的な肉厚分布を与えることができる。これを利用すると体積一定則に基づき、肉厚変化と垂直な方向にも変形を与えることができ、例えば、曲げなどの変形を付与することができる。得られる成形品は医療用部品のスプリング、マイクロマシン用の軸受けブッシュなどへの応用が想定される。

### 2. 傾き自在パンチを用いる逐次打点加工

#### 2.1 傾き自在パンチの加工メカニズム

本研究において提案する傾き自在パンチを用いた逐次打点加工法のメカニズムを図1に示す。パンチが材料に押込まれるとともに回転自在パンチが自動的に傾き、材料に板厚分布を与える。パンチの打撃面は台形状を有しており、爪先部と踵部が回転中心を中心に回転できる構造となっている。発想を得る元となった原理を図2に示す。砂や雪などの粒状堆積層の上に、細い爪先と面積の大きい踵部を有する靴で立脚すると、足首部分で回転が生じ、爪先

側が粒状堆積層により深く食い込むはずである。

図1(c)に示すようにパンチの押込みと押し上げ、材料の送りを交互に繰り返すことによって、材料に面内曲げを与えることも可能である。その際、体積一定則のため、爪先部によって押される部分が、より薄くなるために曲げ円弧の外側となり、踵と接触する部分が曲げ円弧の内側となる。

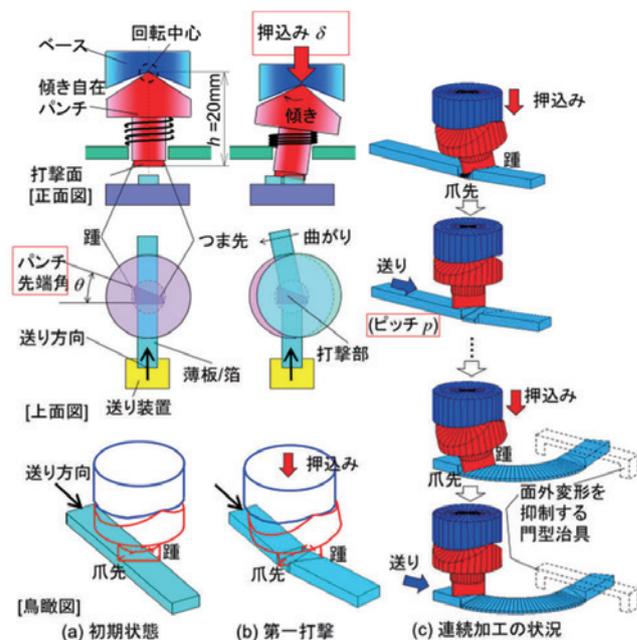


図1 傾き自在パンチを用いる逐次打点曲げ

パンチ打撃面の寸法とともに、より詳細な状況を図3に示す。もし、図3(b)のように傾かないとする場合、接触面圧は均一とすると、より面積の大きい踵側に生じる反力 $F_H$ は、爪先側に生じる反力 $F_T$ よりも大きい。この差によって回転モーメントが生じてパンチが傾く。図3(c)のようにある程度傾くと、加工硬化などによって変形の大きい爪先側の接触面圧が大きくなり、回転モーメントが0となり、平衡状態に達する。



図2 発想の基となった足首の動き

\*電気通信大学大学院情報理工学研究所 教授

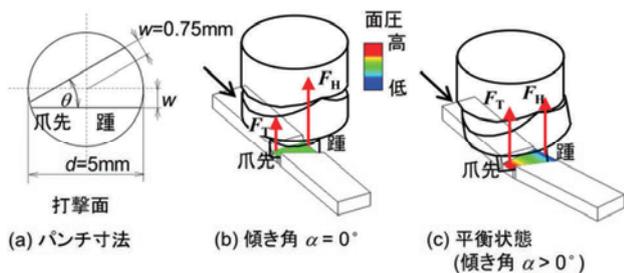


図3 傾き自在パンチを傾くメカニズム

爪先角 $\theta$ 、パンチの設定押込み $\delta_s$ 、送りピッチ $p$ が主な加工条件となる。設定押込み $\delta_s$ と実押込み $\delta_a$ には差が生じるが、これは機械の弾性変形が原因である。特に本加工のように薄板を板厚に対して大きな面積で加工する場合には加工部からの反力が大きくなり機械の弾性変形は無視できない。板の面内曲げ半径 $r$ は、パンチの設定押込み $\delta_s$ 、送りピッチ $p$ の影響を受け、 $\delta_s$ と $p$ を変更することによって、自在に面内曲げ半径 $r$ を変化させることが可能である。

パンチの設定押込み $\delta_s$ 、送りピッチ $p$ が、面内曲げ半径に及ぼす影響を図4に示す。前述の通り、爪先側が薄くなるため、図4(a)や(b)のように曲げ外側になる。押込み $\delta_s$ が大きくなると曲げ内外の板厚差が大きくなるため曲げ半径 $r$ は小さくなる。送りピッチ $p$ によっても曲げ半径 $r$ を制御することが可能である。送りピッチ $p$ が大きくなるとパンチと材料の接触面積が増加し、反力が増加、機械の弾性変形のために、実押込み $\delta_a$ が小さくなる。結果、曲げ半径 $r$ は大きくなる。

さらに興味深いことに、送りピッチ $p$ を過度に大きくすると図4(c)に示すように面内曲げの方向が逆転する。送りピッチ $p$ が過度に大きくなると、爪先側に未打撃部が出現する。未打撃部が生じ、平均的な肉厚が爪先側にて踵側よりも厚くなると、曲げ方向が逆転し、爪先側が曲げ内側、踵側が曲げ外側となる。逐次打点加工中にピッチを変更すると、図4(d)に示すようなS字面内曲げ成形も可能となる。

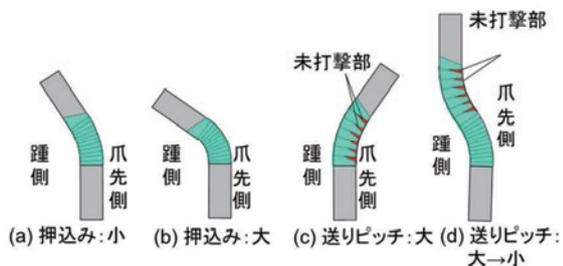


図4 加工条件が面内曲げ形状に及ぼす影響(概念図)

## 2.2 成形品の適用可能性

本加工法による成形品が、将来的に適用される可能性のあるマイクロ製品を図5に示す。医療分野への適用も想定される。近年、腹腔鏡手術を実施するための医療ロボットが開発されつつある。腹腔鏡手術では患者の患部に小さな

穴をあけるだけで済むため、患者への負荷を低減でき、ロボットと通信技術を合わせることによって遠隔手術も可能となる。川嶋らは医療ロボットの鉗子関節部に図5(a)に示すような高矩形断面を有するばねを適用し、マニピュレータ部分の小型化し、患者への負担低減に成功しつつある<sup>7)</sup>。この小型関節部に対して、本加工による成形コイルを適用できる可能性がある。そのほか、現在は別の方法で成形されているマイクロ水泳ロボットの推進尾<sup>8)</sup>、マイクロロボットの鉗子手先<sup>9)</sup>、マイクロ液滴ノズル<sup>10)</sup>、マイクロマシンのブッシュや軸受けなどへの適用が考えられる。

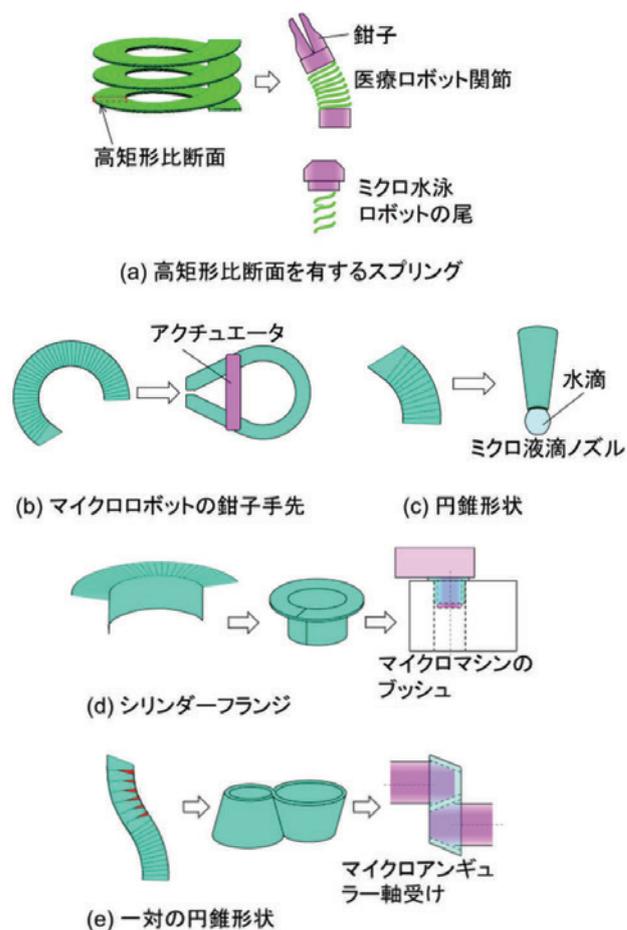
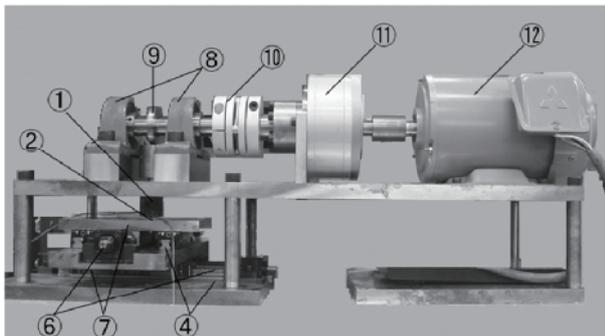


図5 傾き自在パンチを用いる逐次打点曲げ成形品の医療分野・マイクロ機械分野への適用の期待

## 3. 実験による有効性検証

### 3.1 試作機と加工条件

提案する方法の有効性を検証するために図6に示す試作機を製作した。モータの回転が減速機を介してカム軸に伝えられる。カムが一回転する毎に、カムによってパンチが押し上げられる動作と、スプリングによってパンチが押し戻される動作が繰り返される。パンチの上下運動に同期して、材料に送りが付与される。



①パンチホルダ, ②パンチ, ④テーブル  
⑥ボールスクリュー, ⑦リニアガイド, ⑧軸受け  
⑨カム, ⑩フレキシブルカップリング, ⑪減速機, ⑫モータ

図6 試作機の構成

加工条件を表1に示す. 材料として幅5mm, 厚さ0.5mm, アルミニウム A1050 板を用いた. パンチ打撃面の爪先角 $\theta$ を15~45°の範囲に設定し, 適正值を調査した. 板厚0.5mmに対して, 設定押し込み $\delta_s$ を0.2~0.5mmの範囲で設定しているが, 機械の弾性変形が生じるために実押し込み $\delta_a$ は, 設定押し込み $\delta_s$ よりはるかに小さくなる. 送りピッチ $p$ は0.25~1.5 mmの範囲で設定して, 影響を調査した.

表1 加工条件

板材	材質	A1050
	幅 $B$ /mm	5.0
	厚さ $t$ /mm	0.5
工具	材質	S45C
	打撃面-回転中心距離 $h$ /mm	20
	円柱部外径 $d$ /mm	5
	台形辺中心距離 $w$ /mm	0.75
	爪先角度 $\theta$ /°	15, 30, 45
モータ回転数 (rpm)		1400
ギア比		100
送りピッチ $p$ /mm		0.25 -1.5
設定押し込み $\delta_s$ /mm		0.2, 0.3, 0.4, 0.5

### 3.2 数値解析による理想条件での挙動

実験結果を示す前に, 理想条件下での材料の挙動を初等解析により調査した. 初等解析の流れを図7に示す. 初等解析では, 設定押し込み $\delta_s$ , 爪先角 $\theta$ などの加工条件から機械剛性を考慮して, 実押し込み $\delta_a$ , パンチの傾き角 $\alpha$ を求める. 図4(c)や(d)に示す未打撃部は存在しないと仮定する. さらに, パンチ打撃面全面が材料と接触すると仮定し, 送りピッチ $p$ の影響は考慮しない. 概略を以下に示す.

- (1) 実押し込み $\delta_a$ , パンチの傾き角 $\alpha$ を仮定する.
- (2) 傾き角 $\alpha$ に基づき, 材料の位置  $x$ (パンチ打撃面台形の高さ方向)に対する肉厚分布を求める.
- (3) 相当塑性ひずみは, 肉厚ひずみ  $-\log(t/t_0)$ に等しいとして, 応力分布 $\sigma(x)$ を求める.
- (4) 応力分布 $\sigma(x)$ からパンチの回転軸周りのモーメント $M$

を求め, もし,  $M$ が0でなければ, パンチ傾き角 $\alpha$ を修正する.

(5)  $M$ が0になれば,  $\sigma(x)$ を接触面積で積分することにより反力 $F$ を求める. この際, 所定の係数 $\gamma$ 倍する. これは, 薄肉材を工具に挟んで加工すると, 周りの材料からの拘束や摩擦の影響により, 実際の荷重は, 応力を接触面積で積分した値よりも, はるかに大きくなるためである<sup>11)</sup>.

- (6) 機械の弾性変形 $\delta_e$ を, 機械剛性 $k$ 考慮して,  $\delta_e = F/k$ として求め, もし,  $\delta_e + \delta_a = \delta_s$ が成立していない場合は, 最初に仮定した $\delta_a$ を修正する.

二つの係数比 $\gamma/k$ は, 予備実験をして, 解析結果と実験結果を比較することによって求めておく. 実押し込み $\delta_a$ , パンチの傾き角 $\alpha$ を定めることができれば, 金らが提案している体積一定則に基づく計算式<sup>9)</sup>を用いて曲げ半径を求めることができる.

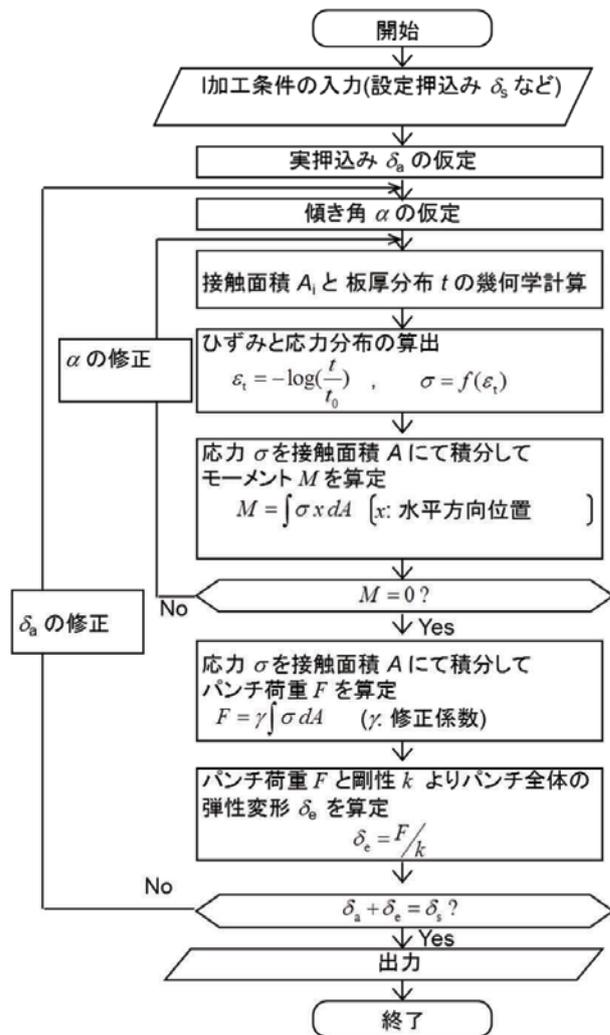
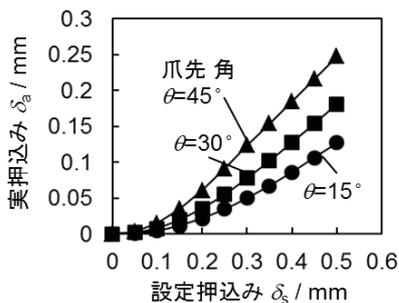
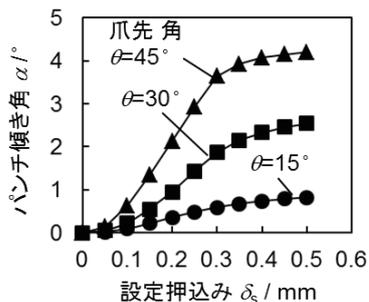


図7 実押し込みとパンチ傾きを求めるためのフローチャート



(a) 実押込み



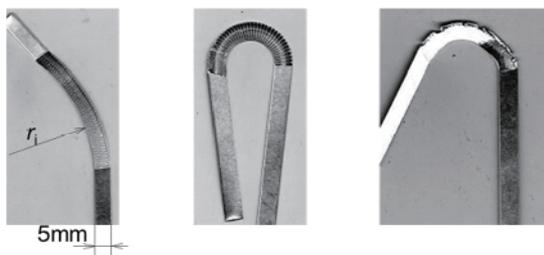
(b) パンチ傾き角

図 8 初等解析の結果

図 8 に初等解析の結果を示す。実押込み $\delta_a$ は設定押込み $\delta_s$ の増加とともに増加するものの、 $\delta_a$ は $\delta_s$ に比べてはるかに小さい。パンチ傾き角 $\alpha$ は設定押込み $\delta_s$ の増加とともに増加するが、この傾向はパンチ爪先角 $\theta$ が大きいほど強い。

### 3.3 実験における材料の変形状況

図 9 に送りピッチ $p = 0.5\text{mm}$ 、設定押込み $\delta_s = 0.5\text{mm}$ における板材の曲がり状況を示す。パンチ爪先角 $\theta = 30^\circ$ において最も曲げ半径が小さくなっている。初等解析の結果では、爪先角 $\theta = 45^\circ$ の方が $\theta = 30^\circ$ に比べてパンチ傾斜角 $\alpha$ が大きい、つまり、曲げ半径が小さくなるべきであった。この解析との差は、実験の $\theta = 45^\circ$ では図 4 に示したように未打撃部が存在するためである。なお、未打撃部の発生は図 3 に示す台形辺中心距離 $w$ や送りピッチ $p$ の影響も受ける。

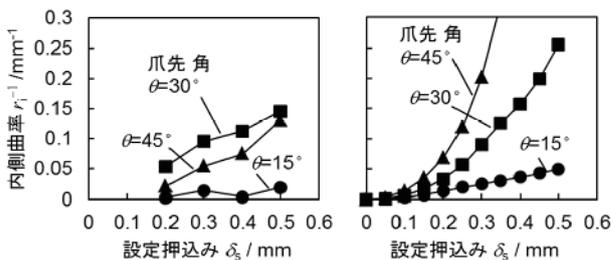


(a) 爪先角 $\theta = 15^\circ$  (b)  $\theta = 30^\circ$  (c)  $\theta = 45^\circ$

図 9 板の曲がり状況 (A1050, 板厚  $t = 0.5\text{mm}$ , 板幅  $B = 5\text{mm}$ , 送りピッチ  $p = 0.25\text{mm}$ , 設定押込み $\delta_s = 0.5\text{mm}$ )

図 10 にパンチ爪先角 $\theta$ と設定押込み $\delta_s$ が内側曲率 $r_i^{-1}$ に及ぼす影響を示す。図 4 にて説明した通り実験と初等解析ともに、設定押込み $\delta_s$ が大きくなるにしたがい内側曲率 $r_i^{-1}$ が大きくなる。パンチ爪先角 $\theta = 45^\circ$ における実験と解析の差は、実験における未打撃部の出現が主な原因である。また、全体として実験の半径曲率 $r_i^{-1}$ と解析値に差があるが、これは、摩擦力や板の幅広がりなどを、解析では考慮していなためと考えられる。

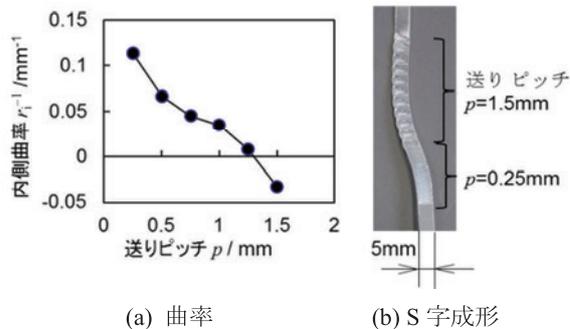
図 11 にパンチ爪先角 $\theta$ を $30^\circ$ とした場合において、送りピッチ $p$ が内側曲率 $r_i^{-1}$ に及ぼす影響を示す。縦軸の曲率半径 $r_i^{-1}$ が負である場合は、曲げの方向が反対になっていることを示す。送りピッチ $p$ が増加するとともに半径曲率 $r_i^{-1}$ が小さくなるが、この原因として以下の二つが考えられる。まず、一つ目は、送りピッチ $p$ が増加すると新たに打撃される材料の面積が増加する結果、パンチ荷重が増大し、実押込み荷重 $\delta_a$ が減少することが原因である。二つ目は、送りピッチ $p$ が過度に大きくなると未打撃部が出現することが原因である。送りピッチ $p$ は加工中に変更することが容易であるため、この現象を積極的に活用することができ、加工中に曲げの方向を反転させることも可能となる。図 11(b)に加工中に送りピッチ $\delta_a$ を変更して、S 字曲げに成功した例を示す。



(a) 実験結果

(b) 初等解析結果

図 10 爪先角と設定押込みが曲げ半径に及ぼす影響 (A1050, 板厚  $t = 0.5\text{mm}$ , 板幅  $B = 5\text{mm}$ , 送りピッチ  $p = 0.25\text{mm}$ )



(a) 曲率

(b) S 字成形

図 11 送りピッチが曲げ半径に及ぼす影響 (A1050, 板厚  $t = 0.5\text{mm}$ , 板幅  $B = 5\text{mm}$ , 設定押込み $\delta_s = 0.5\text{mm}$ , 設定押込み $\delta_s = 0.5\text{mm}$ )

#### 4. 箔への適用

更に板厚  $t=0.1\text{mm}$  厚, 幅  $B=1.0\text{mm}$  のアルミニウム箔への適用を試みた. 対象材の寸法減少に応じて図 12 に示すようにパンチを小型化した. 実押し込み  $\delta_a$  や材料幅  $B$  に比べてパンチ打撃面と回転中心の距離  $h$  が大きいと,  $\delta_a$  や  $B$  に比べてのパンチ打撃面の水平方向移動距離が相対的に大きくなるために適切な加工ができない. そこで,  $h$  を  $4\text{mm}$  まで縮小し, パイプ状のゴムで先端部分を囲む構造とした. なお, 爪先角  $\theta$  は, 板厚  $t=5\text{mm}$  の場合に最も曲率半径を小さくすることができた  $30^\circ$  を採用した.

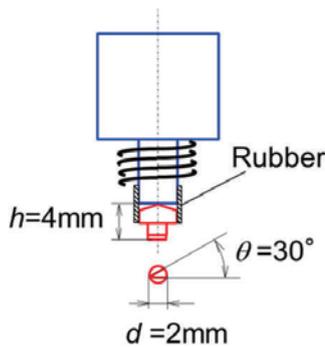


図 12 アルミニウム箔(厚さ 0.1mm)用のパンチ

成形形状を図 13 に示す. 板厚  $t$  が  $0.1\text{mm}$  である箔に対しても提案する加工法の適用に成功した. この場合も送りピッチの増加とともに曲げ半径が大きくなっていることが確認できる.



左より順に送りピッチ  $p$  が,  $0.0625\text{mm}$ ,  $0.125\text{mm}$ ,  $0.183\text{mm}$   
 図 13 アルミニウム箔への適用(板厚  $t=0.1\text{mm}$ , 板幅  $B=1\text{mm}$ , 設定押し込み  $\delta_s=0.1\text{mm}$ )

#### 5. まとめ

本研究では, 薄板や箔への適用も可能となる新たな線状打撃を用いる逐次打点加工を提案した. 提案する加工法では台形形状の打撃面を有する回転自在なパンチを用いることによって, 被加工材に局所的な肉厚分布を与え, 長尺

板材に対しては曲げ変形を付与することができる. 押し込みや送りピッチを変更するだけで, 曲げ半径を容易に制御可能であり, 特に, 送りピッチを調整すると, S 字面内曲げも実現可能である. 今回は,  $0.5\text{mm}$  厚のアルミ板から  $0.1\text{mm}$  厚のアルミニウム箔への適用に成功した. 得られる成形品は医療用マイクロ部品などへの応用が期待される.

#### 謝辞

本研究では天田金属加工機械技術振興財団(現の公益財団法人天田財団)ご援助により, 新たな加工法の特性を明らかにするとともに, 更なる研究を進めるに当たり, 本加工法の有用性に関する目処を得ることができました. ここに公益財団法人天田財団に心より感謝の意を表します.

#### 参考文献

- 1) Y. Saotome, T. Okamoto: An in-situ incremental microforming system for three-dimensional shell structures of foil materials, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 113, (2001), pp. 636-640.
- 2) 松原 茂夫: 数値制御逐次成形法, 塑性と加工, Vol. 35, No. 406 (1994), pp. 1258-1263.
- 3) R. Malhotra, A. Bhattacharya, A. Kumar, N. Reddy, J. Cao: A new methodology for multi-pass single point incremental forming with mixed tool paths, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 60(1), (2011), pp. 323-326.
- 4) P. Martins, L. Kwiatkowski, V. Franzen, A. Tekkaya, M. Kleiner: Single point incremental forming of polymers, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 58(1), (2009), pp. 229-232.
- 5) Y. Jin, T. Kuboki, M. Murata: Influence of strip materials on behavior of incremental in-plane bending, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 1, No. 162-163 (2005), pp. 190-195.
- 6) T. Kuboki, A. Azrie, Y. Jin: A new incremental in-plane bending of thin sheet metals for micro machine components by using a tiltable punch, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 63/1, (2014), pp. 249-252.
- 7) K. Tadano, K. Kawashima, K. Kojima, N. Tanaka: Development of a pneumatic surgical manipulator IBIS IV, *J. of Robotics and Mechatronics*, Vol. 22, No. 2 (2010), pp. 179-188.
- 8) S. Tottori, N. Sugita, R. Kometani, S. Ishihara, M. Mitsubishi: Selective control method for multiple magnetic helical microrobots, *J. of Micro-Nano Mech.*, Vol. 6, (2011), pp. 89-95.
- 9) R. Mackay, H. Le, R. Keatch: Design optimisation and fabrication of su-8 based electro-thermal micro-grippers, *J. of Micro-Nano Mech.*, Vol. 6, (2011), pp. 13-22.
- 10) S. Hirata, K. Hirose, Y. Irie, H. Aoyama: Improvement of the needle-type dispenser for precise micro-droplet dispensation -gap measurement between the needle tip and

the target surface based on needle vibration, *J. of Robotics and Mechatronics*, Vol. 24, No. 2 (2012), pp. 284-290.

- 11) T. Kuboki, K. Takahashi, K. Sanda, S. Moriya, K. Ishida: Development of a tube-spinning machine for thin tubes

with a large diameter, *Mater. Trans.*, Vol. 53, No. 5 (2012), pp. 853-861.