

線状逐次打点による薄膜のマイクロ曲げ成形

電気通信大学 知能機械工学科

准教授 久保木 孝

(平成 21 年度一般研究開発助成 AF-2009017)

キーワード：逐次打点，マイクロ加工，面内曲げ

1. 研究の目的と背景

マイクロテクノロジー材料の微細塑性加工技術として、逐次打点加工法が注目されつつある。逐次打点加工法とは、汎用工具を用い、素材と工具の動きを制御し、連続的に或いは断続的に工具で素材を局所的に打撃し、素材に塑性変形を与える加工法である¹⁾。同一工具により様々な形状の製品を製造することが可能な独創的な成形加工法である。逐次打点加工法を用いることにより、所望の様々な形状の製品を製造することが可能となるので、多品種少量生産である医療機器部品の生産に適していると考えられる。今後、医療機器部品などの製造方法として期待されているマイクロ加工技術に塑性加工を利用することによって、中空である筐体などの加工の効率化が可能になると考えられる。

本研究では、マイクロマシンの筐体などの微細な 3 次元構造部材を成形することを念頭に、これまでマイクロ塑性加工で用いられてきた点打撃ではなく、線状打撃による逐次曲げ加工の成形特性解明を目的とする。逐次曲げ加工条件が曲げ半径に及ぼす影響を加工ピッチと押し込み量から検討する。パンチの押し込み量と加工ピッチが曲げ半径に及ぼす影響を明らかにし、目標の曲げ半径を得るための押し込み量と加工ピッチを検討する。また、加工領域や被加工材の肉厚変化による曲げ半径への影響を調査する。

2. 研究方法

図 1 に逐次打点加工の概要を示す。従来の研究においては図 1 に示すように傾斜角を有する工具が用いられていた²⁾。金らの研究では、厚さ 2mm、幅 15mm の板に対して、工具傾斜角 α_v を 2° に設定することによって、曲げ半径 70mm 程度の面内曲げ加工に成功している。

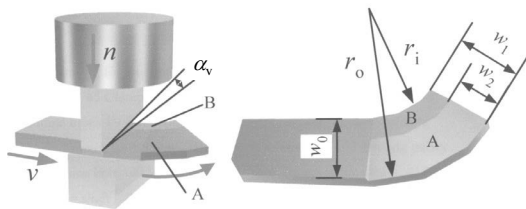


図 1 工具傾斜角を用いた面内曲げ加工法²⁾

本研究では、さらに薄肉厚 0.1~0.4mm の板材の面内加工を実現するために、新たに加工装置を作製した。基本構成は金らの研究における装置と同様であるが、コンパクト化するために、プーリベルトの代わりに、カムシャフトを用いて、パンチの上下駆動を行うことにした。実験装置の概略図を図 2 に示す。実験装置は、水平 2 方向に材料を送

るための XY テーブル、打撃部、駆動装置からなる。駆動装置には、三菱電機製三相誘導電動機 SF-JR 1.5kW を使用した。④XY テーブルには、位置制御を行うため⑥ボールネジ、⑦リニアガイドが組み込まれている。駆動装置は⑫モーター、⑪減速器、軸、⑧軸受、⑨カムから構成され、モーターの回転によってカムを回転させ、②パンチを試験片に押込む構造となっている。打撃部では、②パンチは円筒状の①パンチホルダで保持され、⑨カムによって下方に押される。①は上板に固定されている。①と②の間に⑤バネが組み込まれており、カムから力を受けないとき、バネによってパンチ位置がリセットされる。厚さ 0.1mm のスペーサをパンチとカムの間に必要数だけ挟みこむことによって設定押し込み量を調整することができる。

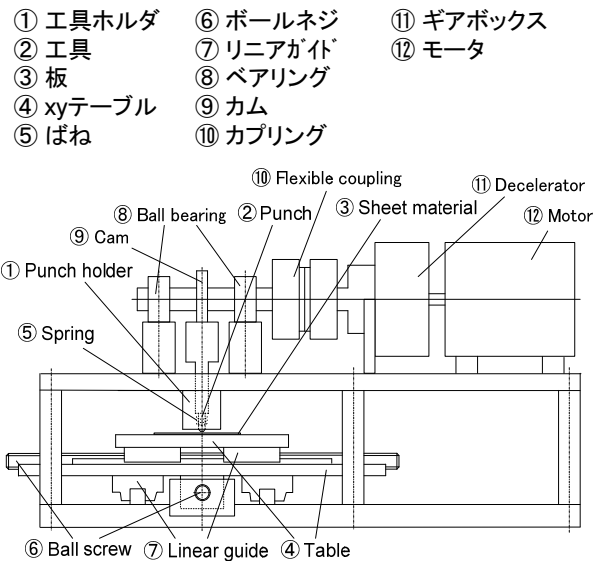


図 2 薄肉用逐次打点曲げ装置

2mm 板厚を対象とした金らの研究と同様に、工具の先端に傾斜角を設ける方法を、本研究の 0.4~0.1mm の板厚の加工に適用することは難しい。相似則が成り立つと考ええると、工具傾斜角を $0.5 \sim 0.1^\circ$ に設定する必要があるが、パンチ摺動部の間隙や機械の弾性変形を考慮すると、加工中に工具が傾き傾斜角が変化するため、設定通りの傾斜角を材料に付与することは非常に難しい。

そこで、本研究では、工具を回転自在とし、且つ、工具先端底面を台形台とする逐次打点面内曲げ加工法を考案した。工具先端の概略図を図 3 に示す。水平状態で工具を材料に押し込むと、工具底面の台形台の細い先端部分での面圧が大きくなり、台形台先端部がより深く材料を押し込

むように工具が回転するはずである。

実験の試験片には幅 5mm, 肉厚 0.4mm から 0.1mm まで 0.1mm 刻みの 4 種類, 材質が純アルミニウム A1050 の板材を使用した。打撃用パンチとして, 材質が S45C, 加工部が台形型, 先端幅が 0.5mm, 後端幅が 5mm の傾斜角を有しない平坦工具を用いた。工具傾斜角の代わりに, 自在に工具が傾く構造として面内曲げ加工を実現するため, 工具を工具受けと打撃工具に二分割し, 工具受け下面に 20°, 打撃工具の上面に 30°の傾き面を設けた。

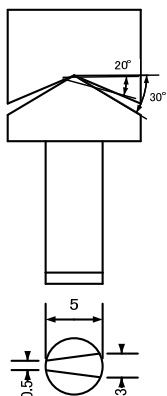


図 3 工具形状

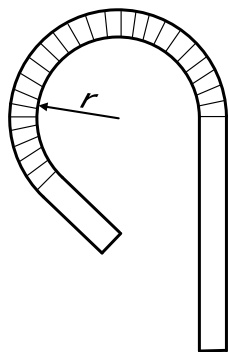


図 4 曲げ形状概念図

表 1 加工条件

板材	幅 B /mm	5.0
	厚さ t /mm	0.4, 0.3, 0.2, 0.1
	材質	A1050 (JIS)
工具	幅 w /mm	0.5
	台形先端幅 B_1 /mm	0.5
	台形後端幅 B_2 /mm	3.0
材質		S45C (JIS)
モータ回転数 (rpm)		1400
ギア比		100
送りピッチ p /mm		0.25, 0.5, 0.75, 1.0
設定押込み δ_s /mm		0.1, 0.2, 0.3, 0.4

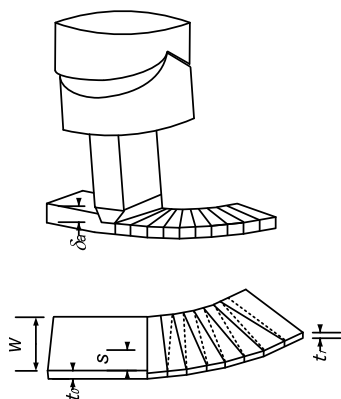
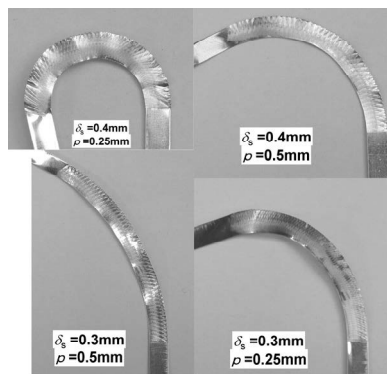
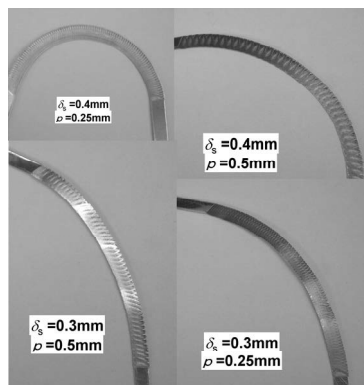


図 5 成形品板厚の定義

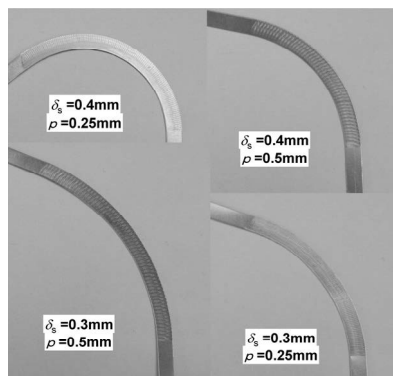
δ_s : Actual indentation
 w : Width = 5.0mm
 t_0 : Thickness before forming
 t_t : Thickness after forming
 s : Beating width
 p : Pitch



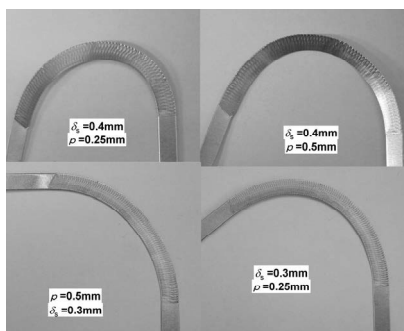
(a) 素材板厚 $t_0=0.1$ mm



(b) 素材板厚 $t_0=0.2$ mm



(c) 素材板厚 $t_0=0.3$ mm



(d) 素材板厚 $t_0=0.4$ mm

図 6 成形品形状

実験に用いた試験片の寸法及び加工条件を表 1 に示す。設定押し込み量 $\delta_s=0.1, 0.2, 0.3, 0.4\text{mm}$ ，加工ピッチ $p=0.25, 0.5, 0.75, 1.0\text{mm}$ にて加工を行った。実験手順は，モータを用いてカムを回転させ，パンチを試験片に押し込み，カムが回転してパンチ位置がリセットされている間に試験片を長手方向に指定したピッチ分だけ移動し，再び押し込んだ。これを繰り返すことにより，図 4 に示すような面内曲げ加工が可能となる。逐次加工した後，マイクロメータを用いて試験片の厚さを測定した。測定時の試験片の厚さの定義を図 5 に示す。荷重を負荷する前の試験片の厚さを t_0 ，負荷した後の試験片の厚さを t_1 として真押し込み量 δ_d を求めた。試験片をスキャナで画像データ化し，曲率を算出し，その平均値を試験片の曲率，その逆数を曲率半径とした。加工力の測定は，工具に貼り付けたひずみゲージによって行った。

3. 研究成果

3.1 加工後の試験片形状

加工後の試験片の写真を図 6 に示す。いずれの肉厚条件においても設定押し込み量を大きくするにつれて，曲げ半径は小さくなった。

3.2 初期肉厚と曲げ半径の関係

肉厚毎の最小曲げ半径を示した結果を図 7 に示す。肉厚が小さくなるにつれて曲げ半径は肉厚が大きい場合に比べて増加する傾向を示した。肉厚 0.1mm においては曲げ半径が 8.23mm となったが割れやしわなどの不良変形が発生した。

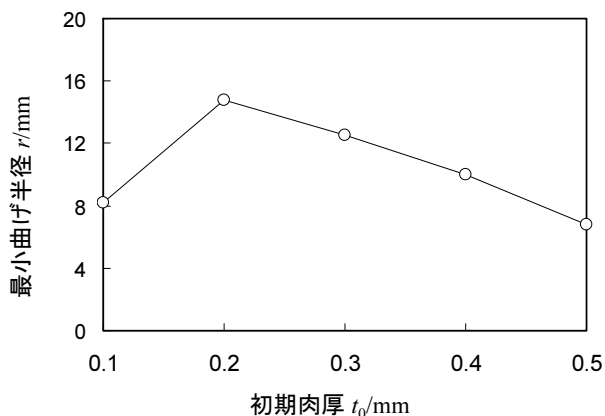


図 7 初期肉毎に得られた最小曲げ半径

3.3 設定押し込み量 δ_s と曲げ半径 r の関係

設定押し込み量 δ_s と曲率 r^{-1} の関係を図 8 に示す。いずれの肉厚においても設定押し込み量を大きくするにつれて，曲率は大きくなった。肉厚が小さくなるにつれて曲率は小さくなり，設定押し込み量 $\delta_s=0.4\text{mm}$ における肉厚 $t_0=0.3\text{mm}$ では 0.2mm と比べて曲率 r^{-1} は 2 倍であった。前項にも記述したように設定押し込み量 0.4mm において肉

厚 0.1mm の値の増加が大きい，しわや割れが発生している。

3.4 ピッチ p と曲げ半径 r の関係

ピッチ p と半径 r の関係を図 9 に示す。いずれの肉厚条件においても，ピッチを大きくするにつれて曲げ半径は大きくなった。先端幅が 0.5mm の工具を使用しているため，ピッチ 1mm においては未加工領域ができるためであると考えられる。また，ピッチが大きくなるにつれて一回あたりの加工領域が大きくなるため，応力が小さくなり，曲げ内側と外側の肉厚差が小さくなるので曲げ半径が大きくなると考えられる。

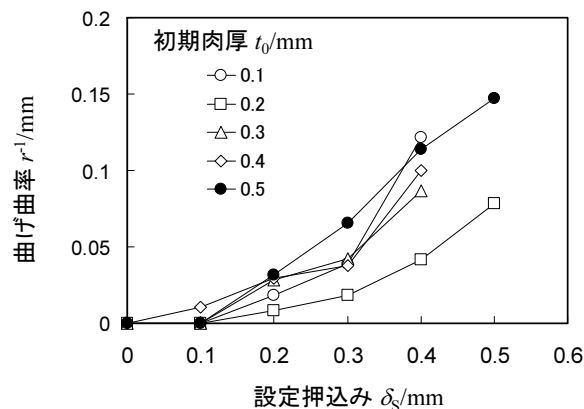


図 8 押し込みが曲率に及ぼす影響

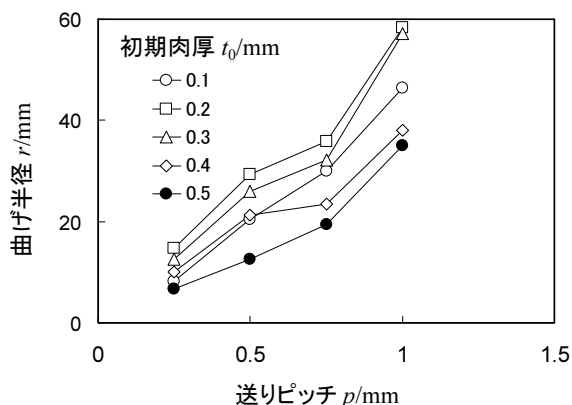


図 9 送りピッチが曲率に及ぼす影響

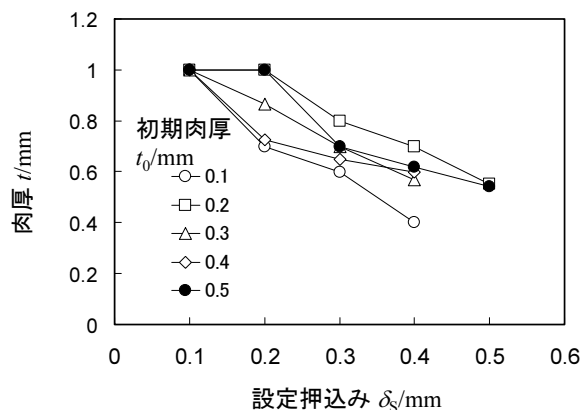


図 10 設定押し込みが肉厚に及ぼす影響

3.5 設定押し込み量 δ_s と加工後の肉厚 t の関係

設定押し込み量 δ_s と加工後の外側の肉厚 t_2 を加工前の肉厚で割った値 t_2/t_0 との関係を図10に示す。いずれの肉厚条件においても設定押し込み量を大きくするにつれて値は小さくなった。また設定押し込み量によって減少量のばらつきはあるものの、ばらつきの差は小さく、傾向は類似していた。

3.6 真押し込み量 δ_a と曲げ半径 r の関係

真押し込み量 δ_a と曲げ半径 r の関係を図11に示す。真押し込み量とは加工前と加工後の肉厚の差であり、肉厚によって押し込み量が異なるため加工後の肉厚差を加工前の肉厚で除した値を示す。肉厚が小さくなるにつれて同じ真押し込み量でも、曲げ半径が大きくなることが確認できた。同じ曲げ半径を得る場合、肉厚が小さくなるにつれて真押し込み量を大きくする必要がある。これは材料流動に起因するものと考えられる。肉厚が小さいと大きい場合に比べて、内側と外側の肉厚差が小さくなるため、同じ曲げ半径を得るためには加工後の試験片の肉厚差をより大きくする必要があると考えられる。

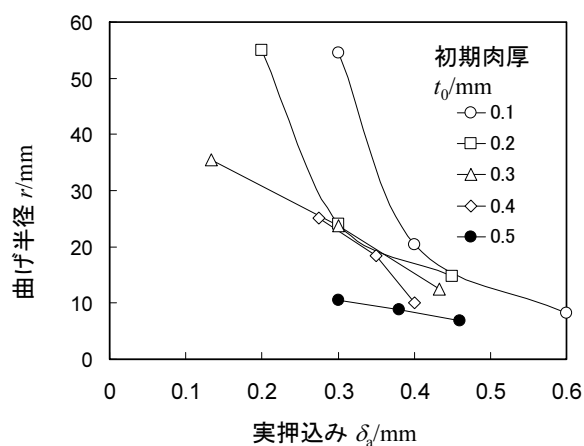


図11 実押し込みが曲げ半径に及ぼす影響

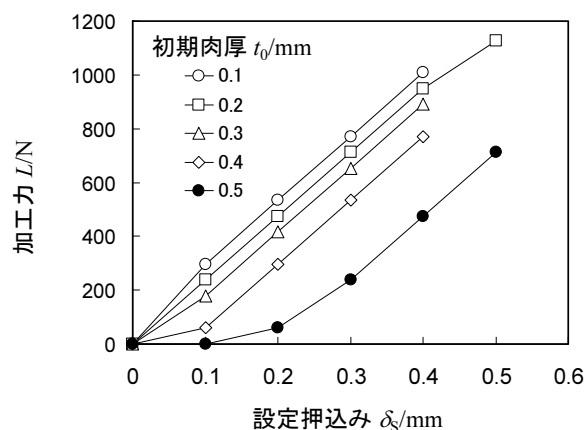


図12 設定押し込みが加工力に及ぼす影響

3.7 加工力と押し込み量の関係

設定押し込み量 δ_s と加工力 L の関係を図12に示す。設定押し込み量が増加するにつれて加工力も大きくなることが確認できた。肉厚が大きいほうが加工時にかかる荷重は小さく、肉厚が小さくなるにつれて加工力が大きくなる。これまで筆者らは、薄肉の逐次打点曲げの方法として、打

撃領域を板幅の半分と定めた加工法を採用している³⁾。その際に必要となった加工力は3000~4000Nであった。今回の加工においては加工力は最大で1100Nであり、1/3程度である。これは工具形状を台形にしたことで試験片との接触面積が小さくなったためと考えられる。

加工力 L と曲げ半径 r の関係を図13に示す。同じ荷重においても肉厚が大きいほうが曲げ半径が小さいことが確認できる。肉厚が小さい場合でも荷重を大きくすることによって曲げ半径は小さくすることができる。

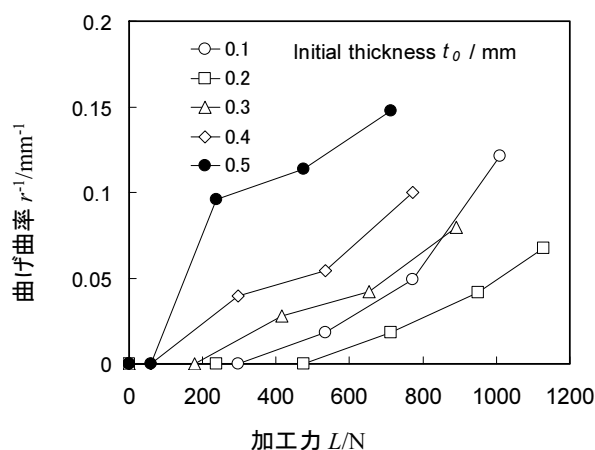


図13 加工力と曲げ曲率の関係

4. 考察

図14に逐次打点加工時の模式図を示す。同図(b)のように工具を分割型にし底面を台形にすることで、打撃領域を板幅の半分とする加工³⁾と同等の曲げ半径を得られた理由として、同じ設定押し込み量においても、一体型よりも曲げ外側での真押し込み量が大きいと考えられる。台形にすることにより試験片に負荷される応力が試験片の内側では小さく外側では大きくなるので、試験片の長手方向への伸びに差をつけることができた。工具を分割にすることで一体型に比べ、同じ設定押し込み量においても試験片の外側は押し込み量がより大きくなり、長手方向への伸びの差をより大きくすることができたためであると考えられる。押し込み量と加工後の肉厚との関係からみても、妥当であると考えられる。

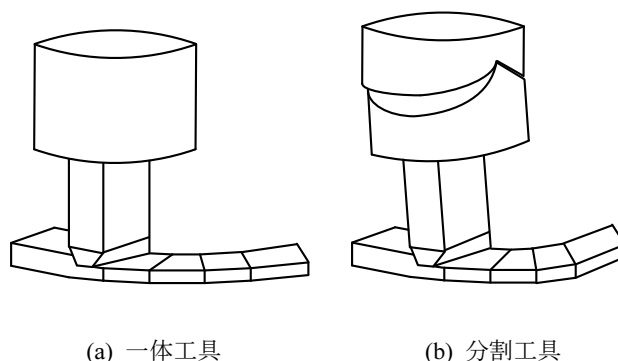


図14 ダイス分割による曲げ効果

図 15 に加工後の肉厚分布の模式図を示す。図 15(a)のように打撃領域を板幅の半分とすると、変形後の板厚には幅方向に差が生じ、板が曲がる。図 15(b)のように底面を台形形状としても工具が一体であれば、板厚の幅方向の差は小さく、板の曲がりも小さい。図 15(c)のように r に底面を台形形状とし、工具を分割すると、工具が押し込みに応じて回転し、幅方向に板厚差が生じ、板は効率的に曲がる。また、図 15(c)の場合は、図 15(a)に比べて板の表面に段差がなく、見た目も美しい。図 16 に分割型工具を用いて加工した際の板の断面を観察した結果を示す。連続的に板厚が変化していることを確認することができる。

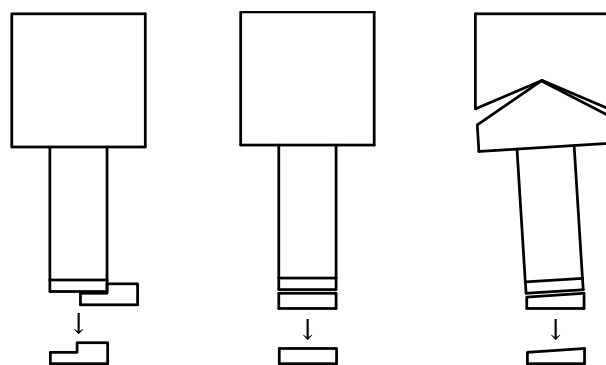
5. 結言

逐次曲げ加工条件が曲げ半径に及ぼす影響を明らかにするために、加工ピッチ、押し込み量、被加工材の肉厚など条件を変え実験を行った。実験の結果より得られた結論を述べる。

- 1) 肉厚を小さくした場合でも、押し込み量を大きくするにつれて、曲げ半径は小さくなる。しかしながら肉厚が大きい場合に比べて曲げ半径は大きくなる。これは肉厚が小さくなるにつれて、加工後の試験片の内側と外側での肉厚差が小さくなるためである。
- 2) 肉厚が小さくなるにつれて、加工に必要な荷重が大きくなる。そのため肉厚が大きい場合と同様の曲げ半径を得るにはより大きな荷重が必要となる。
- 3) 今回の加工においては最大加工力は 1100N であり、加工領域が板厚の半分($s=1/2$)の部分加工の 1/3 である。これは工具形状を台形にしたことで試験片との接触面積を小さくすることができ、応力を大きくすることができたためである。
- 4) 短形比 w/t が 40 大きくなったものを不良変形がない条件で $r=16\text{mm}$ まで曲げることができた。また肉厚と曲げ半径の関係を示す近似式 $-25.2t+20.1=r$ が得られた。肉厚 0.1mm においては曲げ半径が 8.23mm となったが割れやしわなどの不良変形が発生した。

謝 辞

本研究では天田金属加工機械技術振興財団のご援助により、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。ここに天田金属加工機械技術振興財団に心より感謝の意を表します。



(a) 打撃域=半分 (b) 底面=台形 一体工具 (c) 底面=台形 分割工具

図 15 打撃様式の違いによる変形挙動の違い

参考文献

- 1) 早乙女康典：マイクロ成形加工の現状と展望，日本塑性加工学会誌 49-570，コロナ社（2008），pp.4-7
- 2) 金英俊，村田眞，久保木孝：逐次打点法による面内曲げ加工に関する研究，電気通信大学：博士学位申請論文，（2006.3）pp.16-17
- 3) Satoshi Hama, Takashi Kuboki, Makoto Murata: Control of bending radius in incremental bending process of very thin sheet metals, Proc. 10th INT. Conf. Techn. Plast. (ICTP2011), (2011), Aachen, pp. 1132-1135.