

# 高精度なインクリメンタル成形のための複数工具を用いた 残留応力制御に関する研究

静岡大学工学部 機械工学科

准教授 田中繁一

(平成 18 年度研究開発助成 AF-2005013)

キーワード：インクリメンタルフォーミング、スプリングゴウ、板プレス成形

## 1. 研究の目的と背景

インクリメンタル成形技術は 1990 年代から日本を中心に活発に研究がされてきた<sup>1)-3)</sup>。デジタル制御されたフレキシブルなダイレス成形であることおよび劇的に高い成形限界を利用した応用が思案され、近年は海外での研究が急速に増えている<sup>4)</sup>。

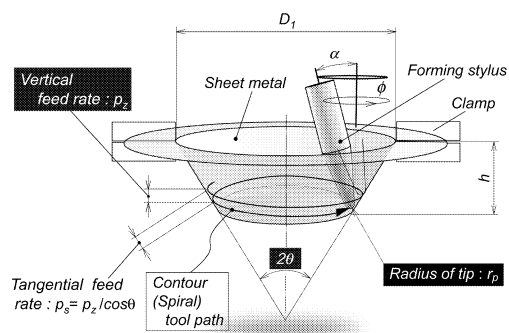
一方で、歯科医療におけるチタン製の補綴物などはインクリメンタル成形の有望な応用分野である。とくに、チタン製の補綴物の製作においては、その高温活性に起因する鋳造の難しさや装置の高コスト化を克服する有望な技術である<sup>5)</sup>。図 1 はこの成形技術を総義歯用チタン床の製作に応用した例である。単一工具前方張出し方式のインクリメンタル成形により純チタン薄板を上顎形状に成形するもので、従来のロストワックスプロセスの置き換えを目的としている。しかし、不要な外周部位を成形後に切断すると同図(c)のように、スプリングゴウ的な大きなゆがみが発生する。不均一に分布する残留応力によるゆがみや低剛性形状部位のたれ変形等に起因する形状精度の不足は実用に際して重大な問題となる。

本研究では、前方張出し方式のインクリメンタル成形により製作された部品の一部を短冊状に切断して、その反りから工具形状や工具送りなどが残留モーメントに及ぼす影響を考察するとともに、残留応力の生成メカニズムを弾塑性有限要素シミュレーションにより検討した。さらに、対向する二工具による曲げ・曲げ戻しおよび逐次ハンマリングを伴うプロセスの残留応力低減効果についても弾塑性有限要素解析を用いて検討した。

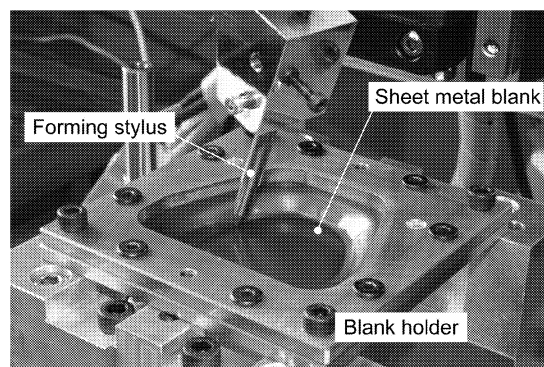
## 2. インクリメンタル成形品のトリム後のゆがみ

### 2・1 実験方法

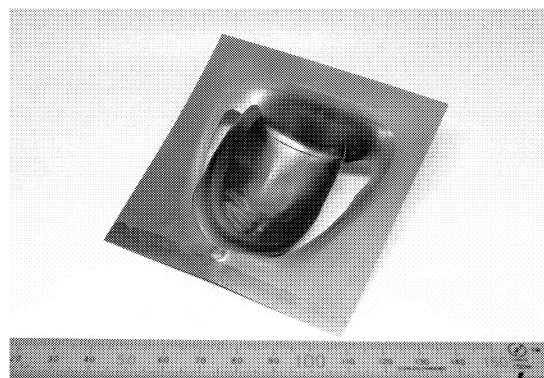
本研究では、製品の一部を短冊に切断してその曲率によりスプリングゴウ現象を考察した。純チタン薄板を図 2 のように四角錐台形状に成形した後、ワイヤ放電加工により A-D の 4 種類の短冊片を切り出して曲率を測定した。実験には市販の純チタン薄板 (JIS#1) を使い、工具によるかじりを防ぐために試験片はりん酸溶液を用いた陽極酸化皮膜処理を施し植物油により潤滑した。実験条件を表 1 に示す。成形変数は工具送り  $p_z$ 、工具先端半径  $r_p$ 、製品半頂角



(a) 一工具インクリメンタル成形プロセス



(b) 4 軸インクリメンタル成形機。



(c) インクリメンタル義歯床のトリム後のゆがみ。

図 1 単一工具前方張出し方式インクリメンタル成形の概要

$\theta$ および圧延方向 $\alpha$ である。成形実験には図1(b)の傾向工具方式の4軸インクリメンタル成形機を用いた。

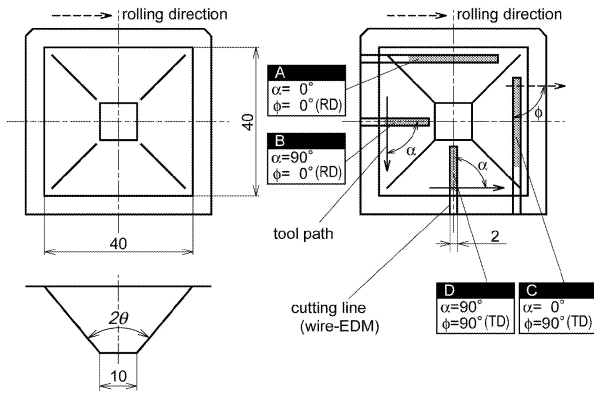
表1 実験条件

Blank	Commercial pure titanium (JIS#1)
Thickness: $t_0$	0.2 mm
Tip radius: $r_p$	0.5, 1.0, 2.0 mm
Tool feed rate: $p_z$	0.05 - 0.20 mm/rev.
Lubrication:	Vegetable oil with anodic oxidation (phosphoric acid)

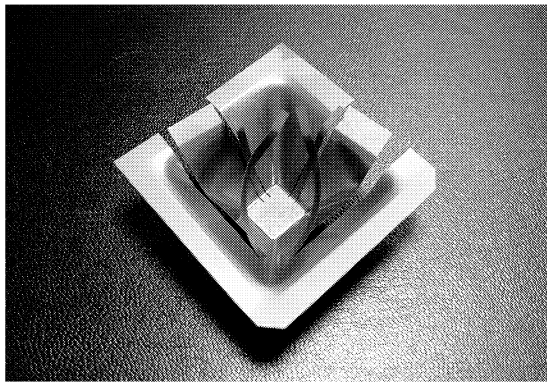
## 2・2 実験結果

図3~5は、インクリメンタル成形された四角錐台から切り取られた短冊片の曲率を示している。ここで、曲率の正値は図2(b)のように凹形に反るスプリングゴ-変形を意味する。図3から明らかなように、圧延方向は曲率にほとんど影響を及ぼさない。工具送り $p_z$ が減少すると工具パスに垂直な短冊片( $\alpha=90^\circ$ )の曲率は増加するが、工具パスに沿う短冊片( $\alpha=0^\circ$ )では $p_z$ の減少により曲率は減少あるいは $p_z=0.1$ 近傍でピーク値をもつ。図4は工具先端半径を変更した場合の結果であるが、工具先端半径が大きく

なると、短冊片BとD( $\alpha=90^\circ$ )の曲率は減少する。一方、短冊片AとC( $\alpha=0^\circ$ )においては工具先端半径の増加は曲率の増加をもたらす。図5は半頂角 $\theta$ を変更した場合の結果である。接線方向の工具送り $p_s$ は $p_s = p_z / \cos\theta$ により得られるので、半頂点角度 $\theta$ が増加すると接線工具送り $p_s$ が増加し、 $\theta$ の増加は工具経路( $\alpha=90^\circ$ )に垂直な短冊片の曲率を増加させる。一方、 $\theta$ の増加に従って、短冊片( $\alpha=0^\circ$ )の曲率は減少する。



(a) 試験片形状と短冊片の配置



(b) インクリメンタル成形四角錐台から切り出された短冊片の反り ( $t_0 = 0.2$  mm,  $r_p = 1.0$  mm,  $\theta = 45^\circ$ )

図2. 試験片

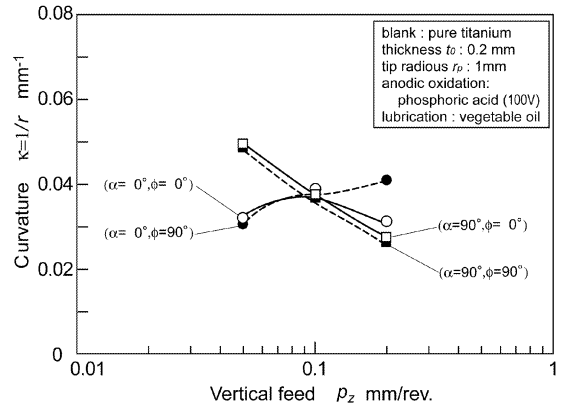


図3 切出し短冊片の曲率 (圧延方向:  $\phi=0, 90^\circ$ ,  $\theta=45^\circ$ )

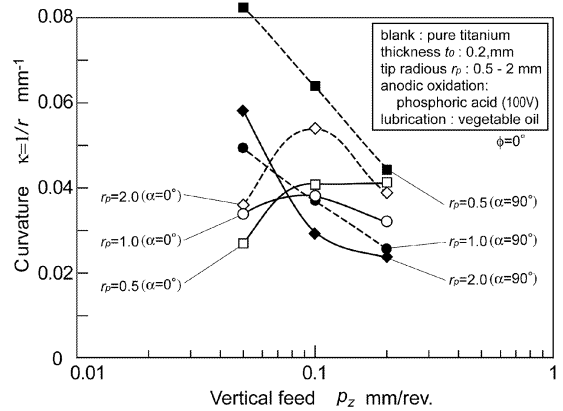


図4 切出し短冊片の曲率  
(工具先端半径:  $r_p = 0.5 - 2.0$  mm,  $\theta = 45^\circ$ )

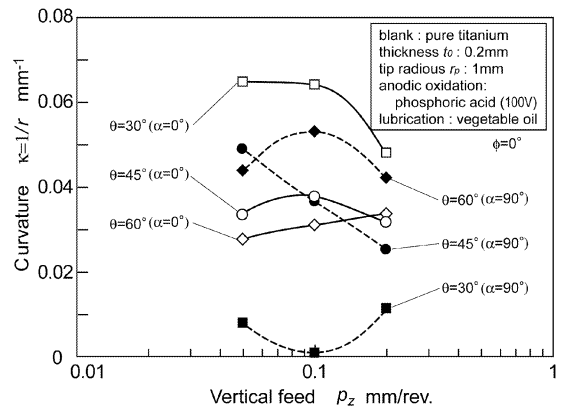
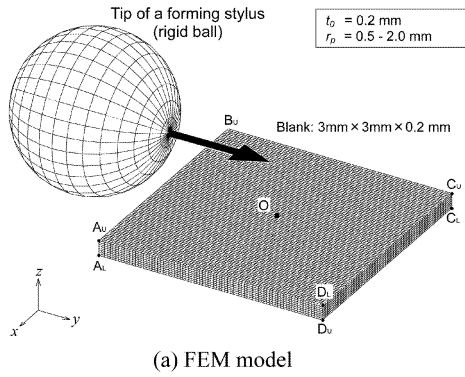
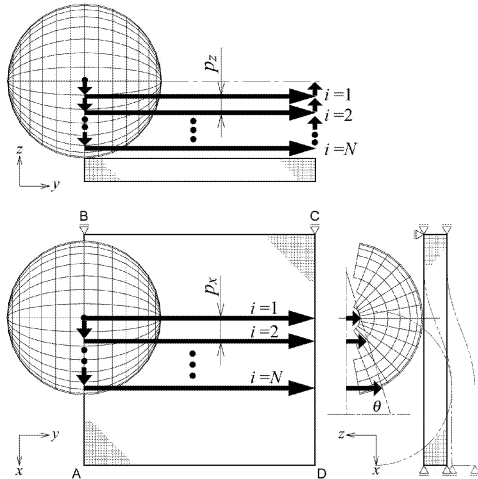


図5 切出し短冊片の曲率  
(四角錐台の半頂角:  $\theta = 30 - 60^\circ$ )



(a) FEM model



(b) Tool motion

図5 計算モデル① (単一工具プロセス)

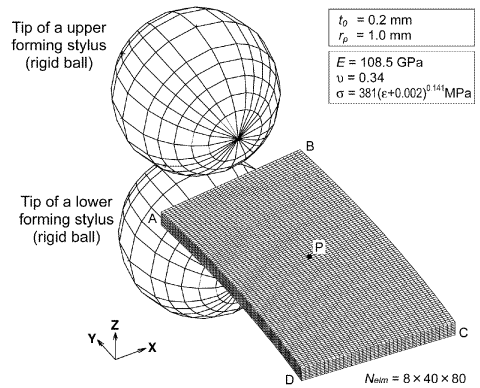
### 3. FEM 解析

#### 3・1 計算モデル①

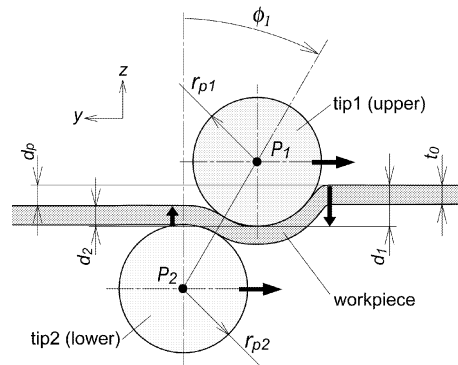
FEM 解析には、商用ソフトウェア MARC2005R3 を用いた。図5は単一工具プロセスの計算に用いたメッシュモデルである。工具先端寸法が素材の板厚に近いために、素板は厚さ方向に8層にソリッド要素を配置してモデル化した。しかし、計算コストの問題から工具下の部分領域のみをモデル化した。部分モデルにはモデル化されない周囲材料の剛性を補償する適切な境界条件が必要であるが<sup>6)</sup>、ここでは図9の単純な境界条件を部分モデルに適用した。材料のヤング弾性率は  $E=110.7\text{GPa}$  で、ポアソン比は  $\nu=0.338$  である。降伏応力は  $\sigma=467(\epsilon+0.002)^{0.143}\text{MPa}$  とし、平均  $r$  値を  $r=5.25$  とし Hill の二次の降伏関数  $\bar{\sigma}$  を用いた。

#### 3・2 計算モデル②

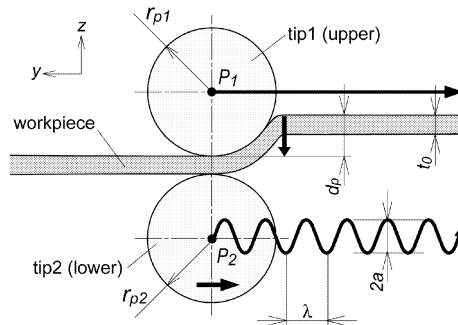
クランプ除去あるいはトリム後の製品のゆがみに対して、逐次逆張出し成形では工具・支持板間の圧縮力によるスプリングバック状の形状不良の低減が試みられている。しかし、この方式は、多パスプロセスに対応できない点や複雑形状の成形においては総型などで素板を支持しなければならない。本研究では、図6(a)のように裏面に対向する2つめの工具を配置してその動作を同図(b)および(c)のように制御した場合の残留モーメント低減効果を検討し



(a) FEM model



(b) Re-bending mode



(c) Hammering mode

図6 計算モデル② (対向二工具プロセス)

た。同図(b)では、下工具により曲げ戻しを行い、(c)では振幅  $a$  と波長  $\lambda$  の正弦波パスに沿って移動する下工具により周期的に素板を裏面から圧縮する。

#### 3・3 計算結果①

図7は、工具が素材中央を通過するときの工具進行方向の垂直応力と塑性ひずみの分布を示している。ここで、三角形は工具位置を表している。工具通過後の帯状領域の上層と下層にはそれぞれ引張応力および圧縮応力が残留しており、これは必然的に経路に沿って素材を切り出した場合にそれに上向き反りを引き起こす。また、素材は工具先端前方で  $y$  方向に圧縮されて塑性圧縮ひずみが生じ、素材が工具直下を過ぎた後の平坦化においても完全には0

にはならず引張り残留応力を生成している。

図8-10は素材中央の点に位置する板厚方向の8要素の応力 $\sigma_y$ を示している。図8は、その応力分布の遷移を示しているが、その分布は工具の通過に伴い2回反転している。素材は、曲げ、逆曲げおよび再曲げ（平坦化）をうけている。図9は、工具先端半径を変更した場合の結果であるが、素材中央の点の応力のみに着目した場合には大きな差異はない。図10は、工具の送り量を変更した場合の結果で、工具の送りを小さくすると応力の板厚方向の勾配は減少し、 $p_z=0.05\text{mm}$ では上面の残留応力は負となる。

### 3・4 計算結果②

図11は、下工具を用いて曲げ・曲げ戻しを行った場合

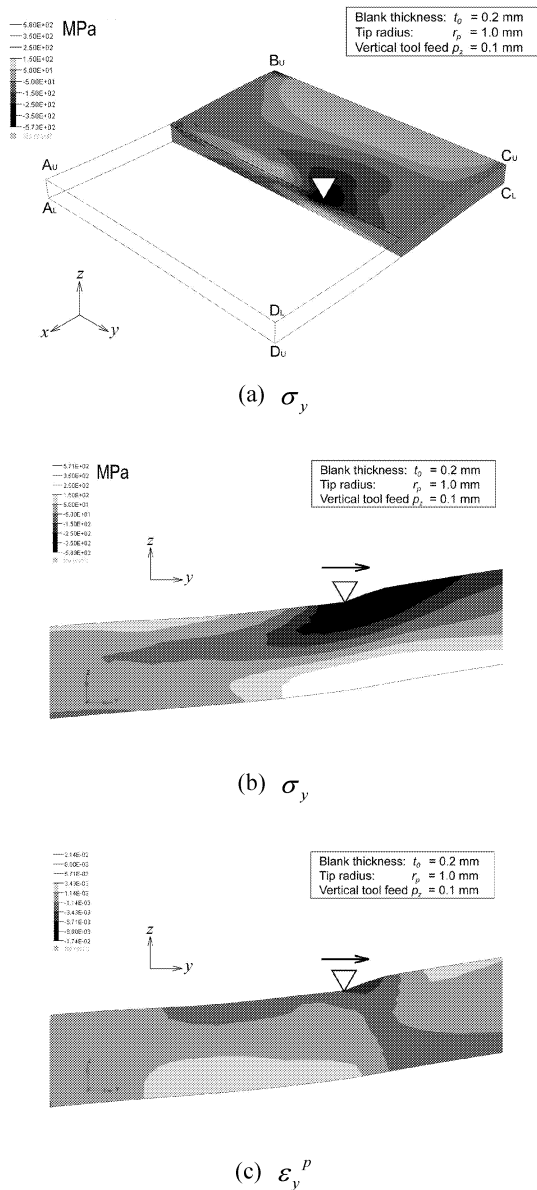


図7 成形工具直下の応力および塑性ひずみ分布  
( $t_0 = 0.2\text{mm}$ ,  $r_p = 1.0\text{mm}$ ,  $p_z = 0.10\text{mm}$ ,  $N = 1$ )  
(displacement:  $\times 5$ )

の結果であり、下工具による最初の曲げ量を大きくすれば分布を反転させることはできるが、残留曲げモーメントが0になる条件域は狭く両工具の押し込み量をそのように制御するのは容易でない。

図12,13は対向する下工具による裏面からのハンマリングを併用した場合の結果である。図12は応力 $\sigma_\theta$ の分布を示しているが、板厚方向の圧力勾配は、下工具によるハン

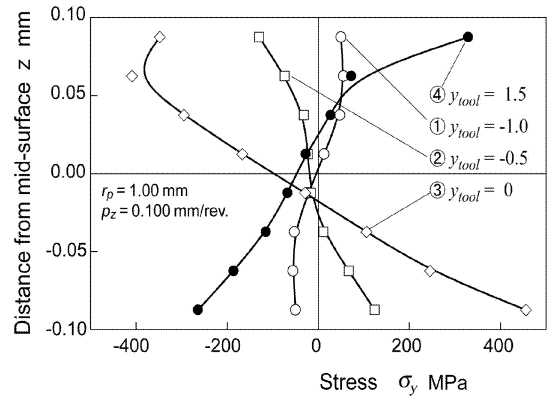


図8. 板厚方向の応力分布。  
( $t_0 = 0.2\text{mm}$ ,  $r_p = 1.0\text{mm}$ ,  $p_z = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 1$ )

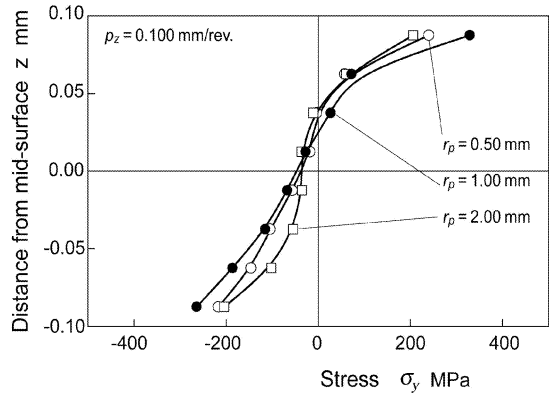


図9. 板厚方向の応力分布  
( $t_0 = 0.2\text{mm}$ ,  $r_p = 0.5 - 2.0\text{mm}$ ,  $p_z = 0.1\text{mm}$ ,  $N = 1$ )

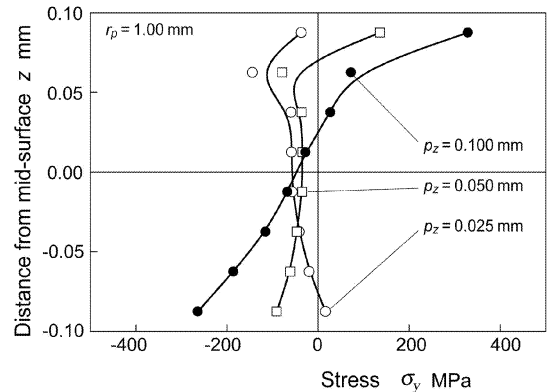


図10. 板厚方向の応力分布  
( $t_0 = 0.2\text{mm}$ ,  $r_p = 1.0\text{mm}$ ,  $p_z = 0.025 - 0.100\text{mm}$ ,  $N = 1$ )

マリングにより減少している。また、図 13 は素材中央の点での板厚方向の残留応力分布を示している。単一工具の場合に比べて明らかに残留曲げモーメントは減少している。とくに、振幅が  $a/t_0 = 0.1$  の場合には曲げモーメントは非常に小さい。

#### 4. まとめ

インクリメンタル成形により製作されるシェル部品のトリミング後のスプリングゴージャおよび対向する二工具を用いるプロセスによる残留モーメント低減効果を主に FEM 解析により調べた。

- 短冊片切り出し試験によれば、インクリメンタル成形品の面内任意方向にスプリングゴージャを引き起こす残留曲げモーメントが生成される。
- FEM シミュレーションの結果によれば、素材の上側と下側にそれぞれ引張および圧縮の残留応力が生成される。
- 工具送り量は残留応力分布に影響を及ぼし、十分小さな送り量では表面に引張り応力が残留しない。一方、工具先端半径が残留応力分布に及ぼす影響は小さい。
- 素材裏面側に対向して配置した工具による周期的な圧縮はトリム後のスプリングゴージャを引き起こす残留曲げモーメントを低減する。

#### 参考文献

- Iseki H., Kato K., Sakamoto S., "Forming Limit of Flexible and Incremental Sheet Metal Bulging with a Spherical Roller", Advanced Technology of Plasticity 1993, pp. 1635-1640.
- Kitazawa K., "Incremental Sheet Metal Stretch Expanding with CNC Machine Tools", Advanced Technology of Plasticity 1993, pp. 1899-1904.
- <http://www.amino.co.jp/>
- Jeswiet J., Micari F., Hirt G., Bramley A., Dufloy J., Allwood J., "Asymmetric sin-gle point incremental forming of sheet metal" CIRP Annals, 54/2. 2005.
- Tanaka S., Nakamura T., Hayakawa K., Nakamura H., Motomura K., "Incre-mental sheet metal forming process for denture plate", Advanced Technology of Plasticity 2005, pp. 349-350.
- Sebastiani G., Brosius A., Tekkaya A. E., Homerg W., Kleiner M., "Decoupled Simulation Method For Incremental sheet Metal Forming", Proc. NUMI-FORM'07, eds, Cesar de Sa, J. M. A., Santos, A. D., 2007, pp. 1501-1506.
- Hill R., "A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals", Proc. R. Soc. Lond. A193, 1948, pp. 281-297.

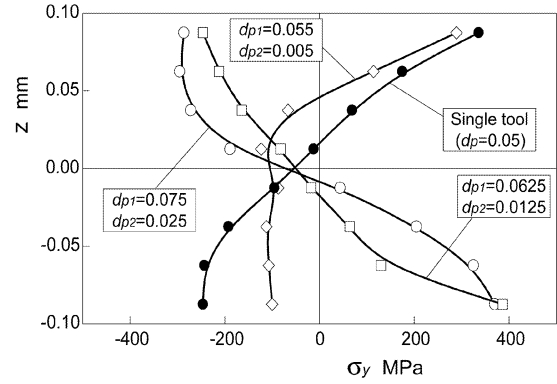


図 11. 板厚方向の応力分布 (曲げ・曲げ戻し方式)

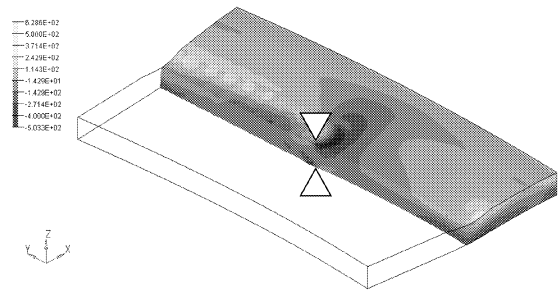
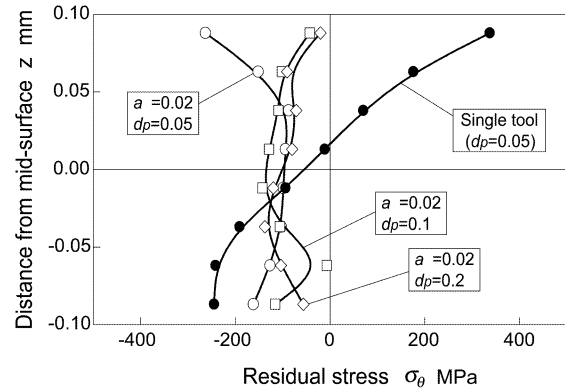
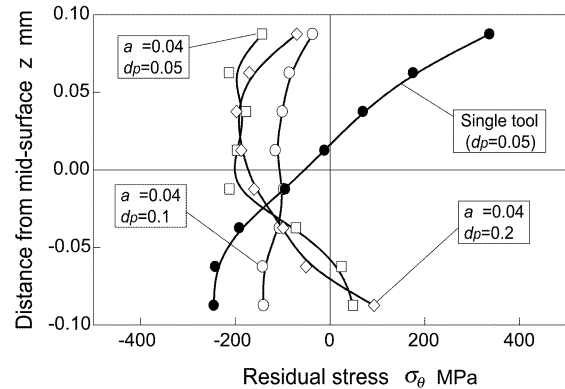


図 12. 応力分布 (ハンマリング方式)  
( $t_0=0.2\text{mm}$ ,  $r_p=1.0\text{mm}$ ,  $p_z=0.1\text{mm}$ ,  $a=0.02\text{mm}$ ,  $\lambda=0.2\text{mm}$ )



(a)  $a/t_0=0.1$



(b)  $a/t_0=0.2$

図 13. 板厚方向の応力分布 (ハンマリング方式)  
( $t_0=0.2\text{mm}$ ,  $r_p=1.0\text{mm}$ ,  $p_z=0.05\text{-}0.2\text{mm}$ )