

ダブルサイド・インクリメンタルフォーミングにおける工具配置の最適化

静岡大学工学部 大学院工学領域機械工学系列
教授 田中 繁一
(平成 29 年度 一般研究開発助成 AF-2017032)

キーワード：インクリメンタルフォーミング，スプリングバック，残留応力

1. 研究の目的と背景

インクリメンタル・フォーミングは、塑性加工のフレキシブル化を目指した新しい CNC 加工技術で、図 1 の基本プロセスでは棒状工具を等高線パスに沿って動かして目的とする曲面形状をその包絡面として得る。自動車、航空機等の輸送機械、および建築用曲面外板への応用が始まっている¹⁾。

一方で、実用化を阻む課題が存在する。形状精度不足は最も重要なものであり、「(成形中の)ゆがみ」や「スプリングバック(ゴー)」（図 2）がそれである。また、クリアランス部に生じる「だれ」も同様である。

ダブルサイド・インクリメンタルフォーミング(Double-Side Incremental Forming : DSIF) は、1990 年頃の黎明期から注目され、上記課題の解決に対する有効な手法である¹⁾⁻³⁾。しかし、そのプロセス、あるいは工具配置をどのように制御するかについてはまだ結論には至っていない。本報告では、主に FEM を用いて工具配置が残留応力に及ぼす影響を系統的に調べた。

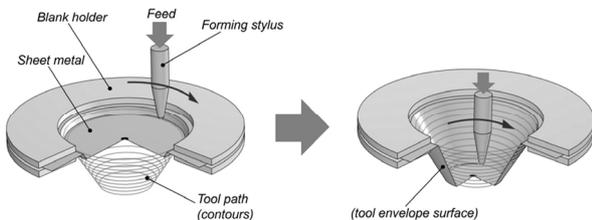


図 1 インクリメンタル・フォーミングの基本方式 (シングルポイント・プロセス)

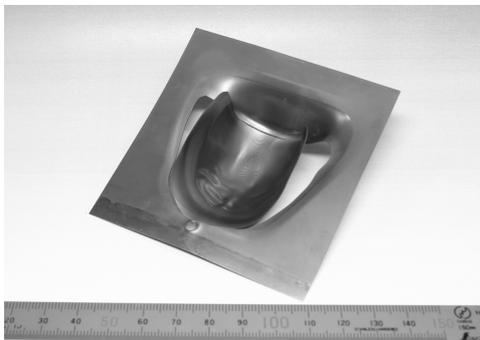


図 2 インクリメンタル成形されたシェル部品の負のスプリングバック(Blank: pure titanium, blank thickness: $t_0=0.2\text{mm}$, tip radius: $r_p=1.0\text{mm}$, tool feed: $p_z=0.05\text{mm/rev.}$, surface treatment: anodic oxidation, lubricant: vegetable oil)

2. ダブルサイド・インクリメンタルフォーミング

ダブルサイド・プロセスでは、図 3 のように独立した 2 つの工具を素板の両側に配置して成形を行う。多くの研究では 2 つの工具を素板に対して対称対向位置に配置している。しかし、この配置では圧縮以外の負荷を素材に与えるのは難しい。しかし、図 4(a)に対称対向あるいは若干ずらすことにより素材に曲げ・曲げ戻しの負荷を複雑に素材に導入できる。さらに、同図(b)のように広範囲に配置制御できれば、たわみあるいはだれ変形を抑制しながら成形を行うことができる。

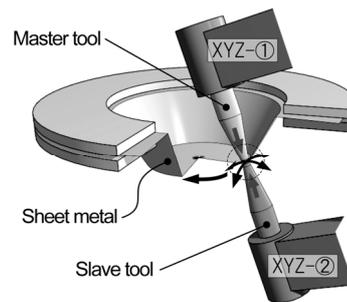


図 3 ダブルサイド・インクリメンタルフォーミング

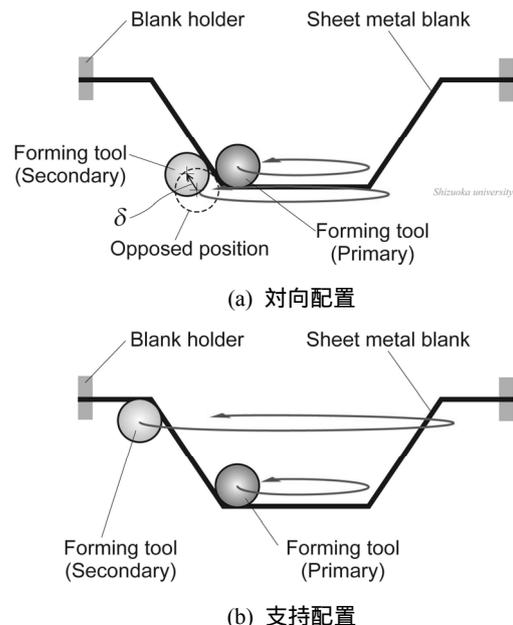


図 4 ダブルサイド・インクリメンタルフォーミングにおける工具配置

3. インクリメンタルフォーミングの3次元FEM解析

3.1 計算モデル

図5は、計算に用いた計算モデルである。素材全体を計算対象とすると多大な時間を必要とし、系統的に成形パラメータを変更したり板厚方向に十分な要素数を確保し難い。したがって、同図(a)のように、円板からリング領域を切り出し、さらに中心角 10° の領域を計算対象とした。工具は直径 $2r_p$ の剛体球とし、モデル中央を円弧に沿って移動する。多周回の場合には、 $r_0 = 20\text{mm}$ 前後を1通過ごとに $-z$ 方向に p_z だけ送りながら周回する。

同図(b)は用いたメッシュモデルである。側に基づき、面 BC は固定し、面 AD の R ϕ 方向の変位を拘束した。また、面 AB と面 CD は周期境界条件を定義してプロセスを近似した。板厚方向の変形が必ずしもシェル要素の仮定に適合しないので solid 要素を用い、さらに板厚方向に8要素を配置した。素材は、板厚は 0.3mm とし、軟鋼板を想定した。ただし、異方性は考慮していない。解析には、Marc2018.1 を用いた。

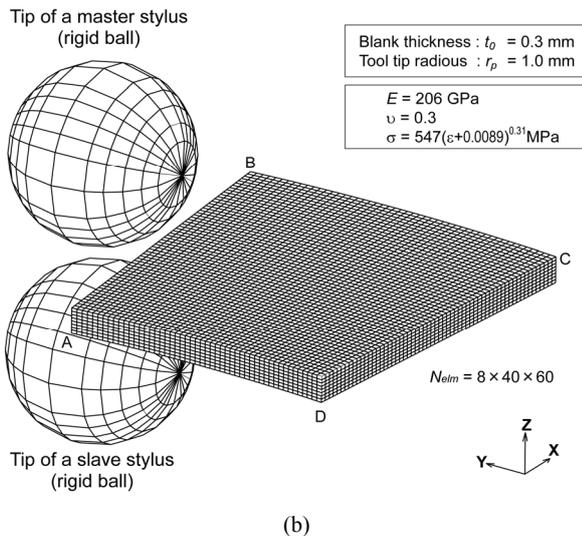
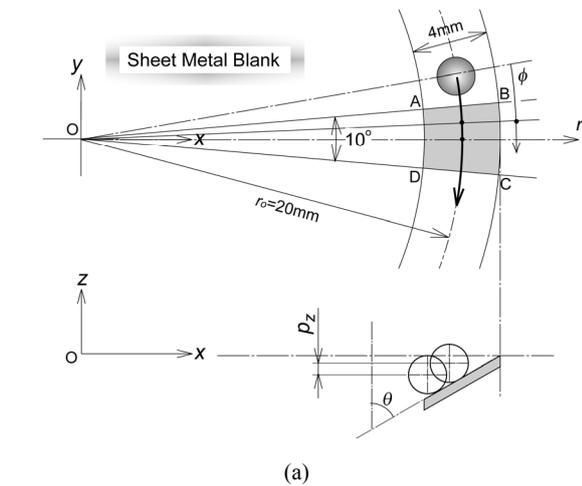


図5 メッシュモデル

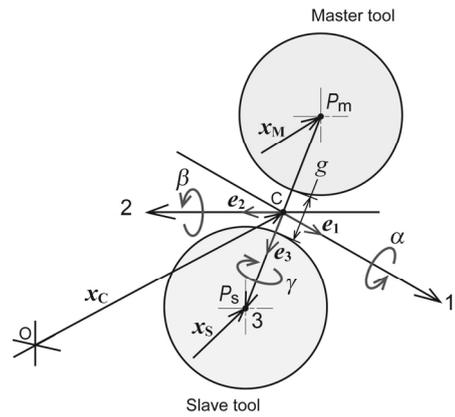
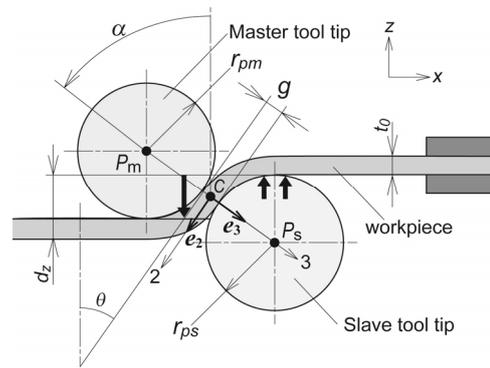
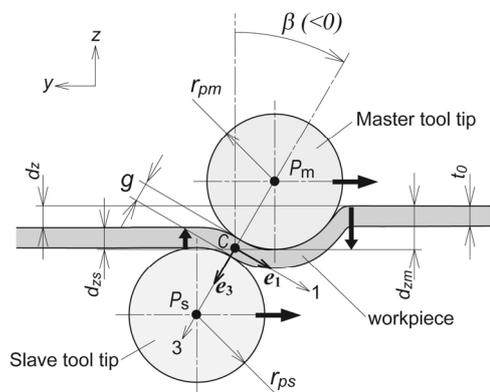


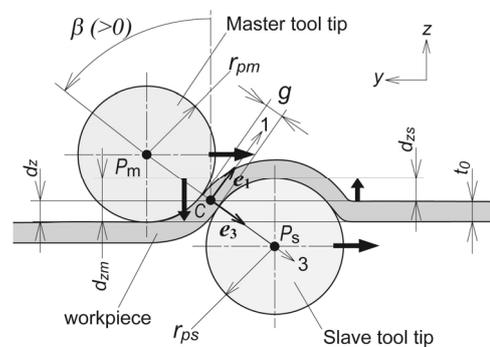
図6 ダブルサイド工具の配置



(a) Roll : α (支持モード)



(b) Pitch : $\beta (< 0)$ (対向モード)



(c) Pitch : $\beta (> 0)$ (対向モード)

図7 ダブルサイド工具配置の詳細

3・2 工具配置

2つの工具(先端)配置の定義を図6に示す。その配置は、工具系の代表点、ここでは工具間中点Cの座標 x_c とその姿勢を定義する(α, β, γ)、および工具間隙 g により決定される。 (α, β, γ) の定義の詳細は、Euler角(θ, ϕ, γ)⁴⁾に準じる。

図7は、各回転角の役割の詳細を示している。 e_3 がおおよそ素板面法線方向となるために、 α は主に成形形状に依存するが、同図(a)のようにクリアランス部を支えてダレ変形を抑制することもできる。

β は、図(b)のように工具進行方向に対してスレブ工具の先進度を定義する。これにより、材料には工具進行方向に曲げ・曲げ戻しの変形を付与される。 γ は、工具の子午線方向の振り角(片揺れ)を与える。

3・3 シングルポイント・インクリメンタル成形

図8は、シングルポイント成形の場合の工具パス方向の応力 σ_θ の、 $\phi=0, r=20$ での板厚方向の分布の時間変化を示している。工具直前では材料は強い圧縮をうけ圧縮塑性ひずみが生じる。このとき材料は工具形状にフィットして凹形状になっている。その後、材料が工具下面を通過すると直線状に戻され、その結果引張り応力が表面に残留する。

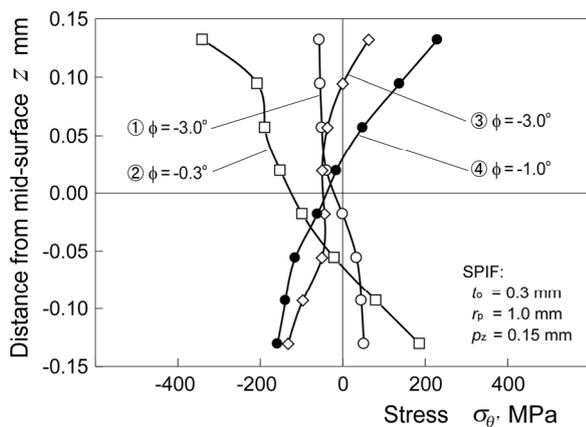


図8 工具パス方向応力の板厚方向分布の変化 ($t_0 = 0.3 \text{ mm}, r_p = 1.0 \text{ mm}, p_z / t_0 = 0.500$)

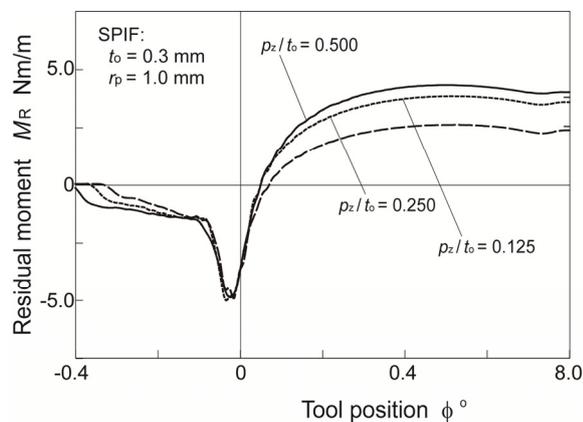


図9 工具パス方向応力によるモーメント ($t_0 = 0.3 \text{ mm}, r_p = 1.0 \text{ mm}, p_z / t_0 = 0.125 - 0.500$)

以上の過程に加えて、材料は工具下を通過する際に、上に凸に曲げ、下に凸に曲げ、平坦と曲げ曲げ戻しを受けている。工具の通過により素材表面側には引張り応力が裏面には圧縮応力が生成し、残留する。

図9は、図8の応力分布から得られるモーメントの変化を工具移動(時間)に対して示したもので、最終的($\phi=8^\circ$)に凹に曲がろうとする(スプリングゴ)モーメントが残留している。

3・4 ダブルサイド・インクリメンタル成形(1)

図10と11は、 $\beta = -30^\circ$ および $\beta = 30^\circ$ の場合の結果である。それぞれ、マスター工具、およびスレブ工具が進進する場合である。前述のシングルポイント成形に比較して、応力が非常に大きいとともに、分布の反転回数も多い。 $\beta = -30^\circ$ と $\beta = 30^\circ$ の履歴は異なるが、両表層が圧縮で板厚中央部が引張りの分布が残留する。

図12は、 $\beta = -45^\circ \sim 45^\circ$ と変更した場合の残留応力を示しているが、 β の変更によりその分布は様々に変化する。

一方、図13は、図12から得られる残留モーメントを示しているが、 $\beta = -30^\circ$ および $\beta = 20^\circ$ あたりでモーメントが最小化する。ただし、前者の場合にはスレブ工具が進進するために成形形状を定めにくく、後者のスレブ工具

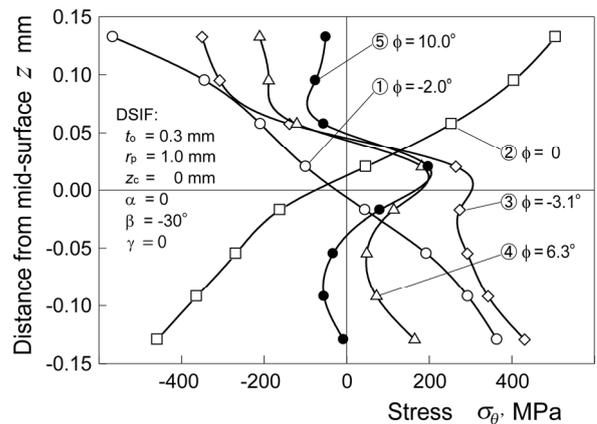


図10 工具パス方向応力の板厚方向分布の変化 ($t_0 = 0.3 \text{ mm}, r_{pm} = r_{ps} = 1.0 \text{ mm}, z_c / t_0 = -0.500, g / t_0 = 1.0, \alpha = 0, \beta = -30, \gamma = 0$)

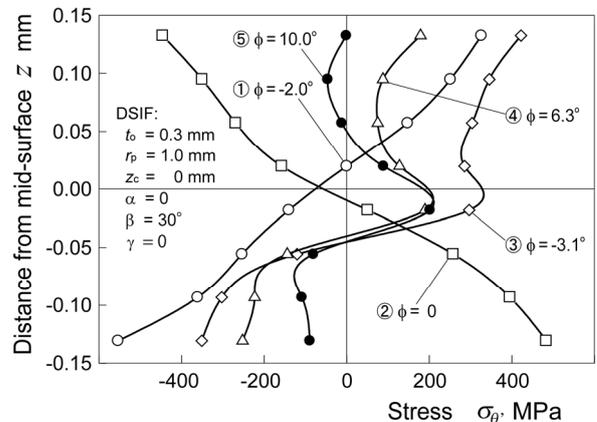


図11 工具パス方向応力の板厚方向分布の変化 ($t_0 = 0.3 \text{ mm}, r_{pm} = r_{ps} = 1.0 \text{ mm}, z_c / t_0 = 0.500, g / t_0 = 1.0, \alpha = 0, \beta = +30, \gamma = 0$)

が先進する配置が成形には適している。

図 14, 15, および 16 は, それぞれ, $\beta=0, -15, 15^\circ$ として, 工具間隙 g を変更した場合の結果で, 図 17 は対応する残留モーメントを示す。工具を対称配置する $\beta=0$ の場合には, g を小さくして圧縮することにより残留モーメントは減少, あるいはほぼ 0 になる。

一方, $\beta=0$ の場合には, S 字あるいは逆 S 字の応力分布となり, とくに, $\beta>0$ の場合には g を変更してもその分布はほとんど変化しない。残留モーメントは, g の減少とともに増大するので, 工具間隙はほぼ初期板厚とする ($g=t_0$) のが適切である。

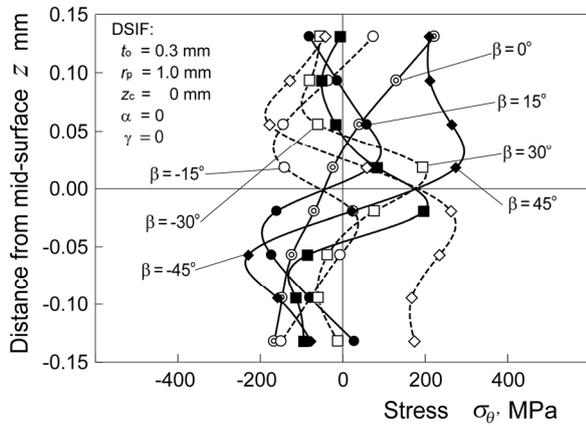


図 12 工具パス方向応力の板厚方向分布
($t_0 = 0.3 \text{ mm}$, $r_{pm} = r_{ps} = 1.0 \text{ mm}$, $z_c / t_0 = 0.500$, $g/t_0 = 1.0$, $\alpha = 0$, $\beta = -45 \sim +45$, $\gamma = 0$)

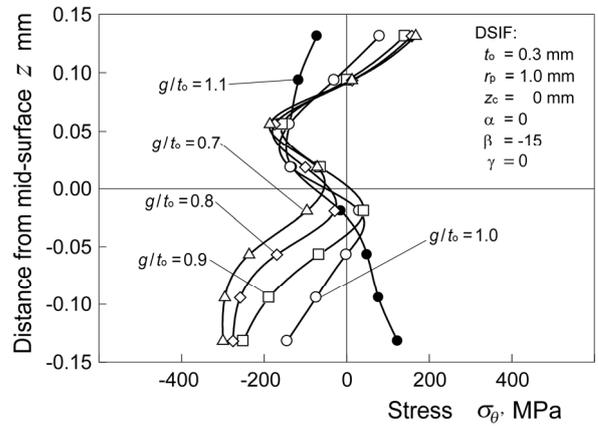


図 15 工具パス方向応力の板厚方向分布
($t_0 = 0.3 \text{ mm}$, $r_{pm} = r_{ps} = 1.0 \text{ mm}$, $z_c / t_0 = 0.500$, $g/t_0 = 0.6 \sim 1.1$, $\alpha = 0$, $\beta = -15$, $\gamma = 0$)

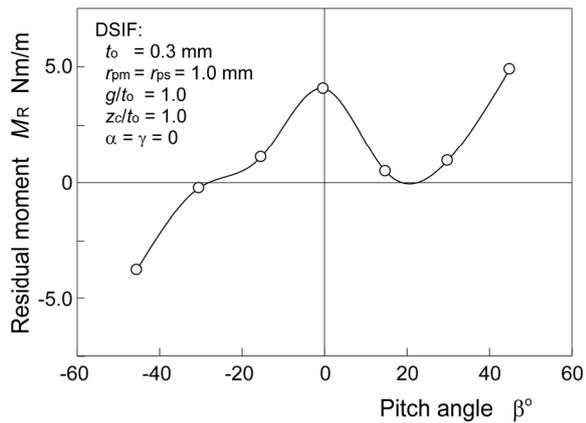


図 13 工具パス方向の残留モーメント
($t_0 = 0.3 \text{ mm}$, $r_{pm} = r_{ps} = 1.0 \text{ mm}$, $z_c / t_0 = 0.500 \text{ mm}$, $g/t_0 = 1.0$, $\alpha = 0$, $\beta = -45 \sim +45$, $\gamma = 0$)

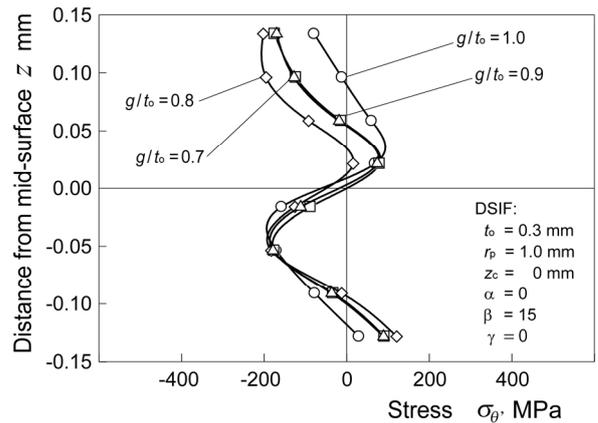


図 16 工具パス方向応力の板厚方向分布
($t_0 = 0.3 \text{ mm}$, $r_{pm} = r_{ps} = 1.0 \text{ mm}$, $z_c / t_0 = 0.500$, $g/t_0 = 0.6 \sim 1.1$, $\alpha = 0$, $\beta = +15$, $\gamma = 0$)

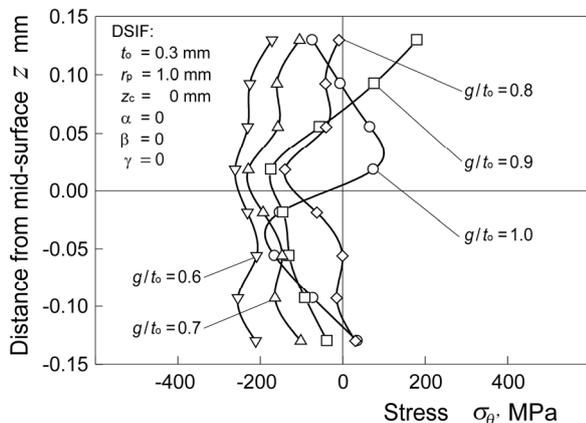


図 14 工具パス方向応力の板厚方向分布
($t_0 = 0.3 \text{ mm}$, $r_{pm} = r_{ps} = 1.0 \text{ mm}$, $z_c / t_0 = 0.500$, $g/t_0 = 0.6 \sim 1.1$, $\alpha = 0$, $\beta = 0$, $\gamma = 0$)

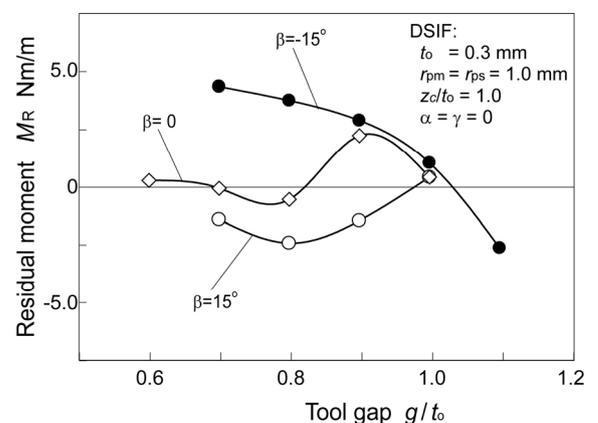


図 17 工具パス方向の残留モーメント
($t_0 = 0.3 \text{ mm}$, $r_{pm} = r_{ps} = 1.0 \text{ mm}$, $z_c / t_0 = 0.500 \text{ mm}$, $g/t_0 = 0.6 \sim 1.1$, $\alpha = 0$, $\beta = -15, 0, 15$, $\gamma = 0$)

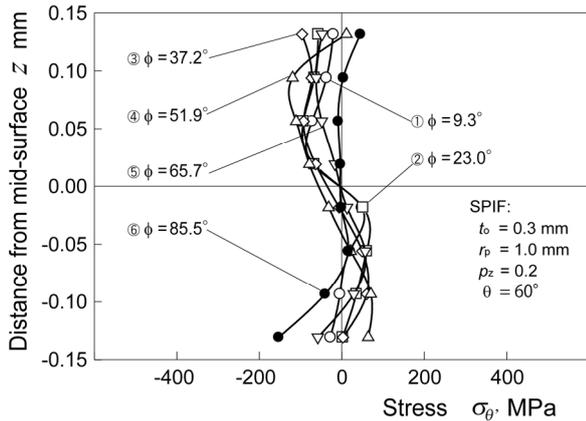


図 18 子午線方向応力の板厚方向分布の変化 (SPIF)
($t_0 = 0.3 \text{ mm}$, $r_p = 1.0 \text{ mm}$, 工具送り: $p_z = 0.15 \text{ mm}$)

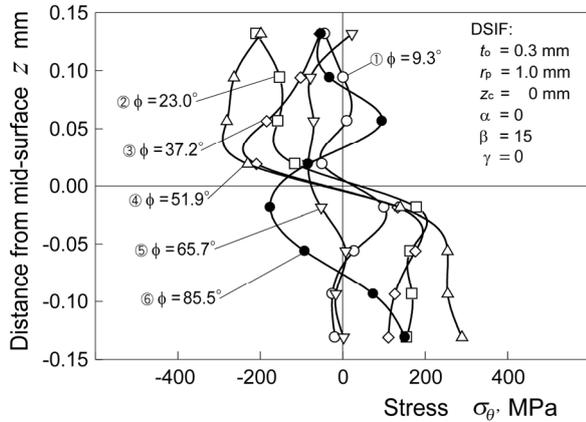


図 19 子午線方向応力の板厚方向分布の変化 (DSIF)
($t_0 = 0.3 \text{ mm}$, $r_{pm} = r_{ps} = 1.0 \text{ mm}$, $p_z = 0.15 \text{ mm}$,
 $g/t_0 = 1.0$, $\alpha = 0$, $\beta = +15^\circ$, $\gamma = 0$)

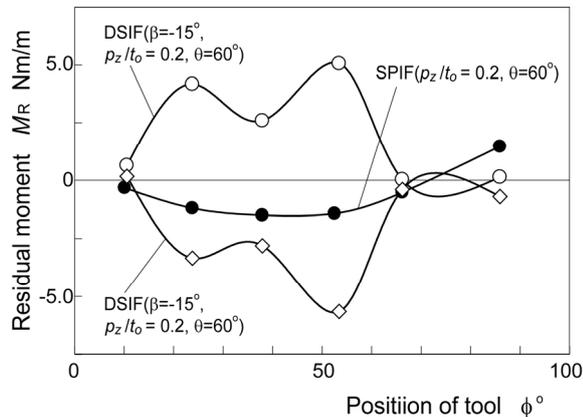
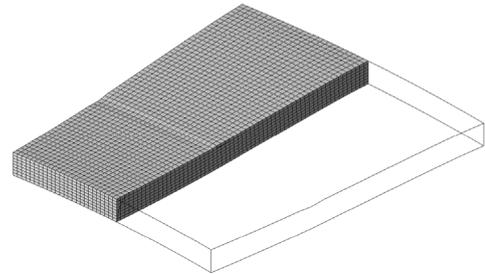


図 20 子午線方向応力の残留モーメントの変化
($t_0 = 0.3 \text{ mm}$, $r_{pm} = r_{ps} = 1.0 \text{ mm}$, $p_z = 0.15 \text{ mm}$,
 $g/t_0 = 1.0$, $\alpha = 0$, $\beta = -15^\circ, 15^\circ$, $\gamma = 0$)

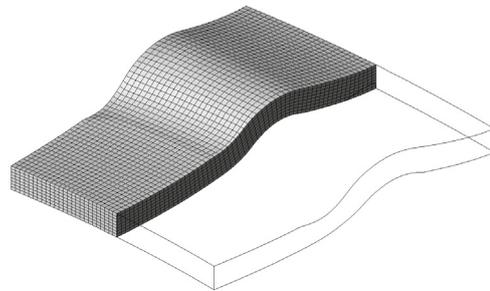
図 18, 19, および 20 は, 子午線方向の応力とそのモーメントの変化を示している。シングルポイント成形では, 緩やかに負のモーメントが増大した後に緩やかに増大して正のモーメントが残る。一方, ダブルサイドプロセス ($\beta = -15^\circ$) の場合には, 急激に正のモーメントが採用し, その後減少してわずかな正のモーメントが残り, $\beta = 15^\circ$ の場合はその逆である。

3・5 ダブルサイド・インクリメンタル成形(2)

図 21 は, 図 7(a)の配置 ($\alpha = 30^\circ$) を用いてクリアランス部のダレ抑制を行った結果である。同図(a)はシングルポイント成形の結果であるが, 素板の大きな弾性たわみのために工具痕は浅く, 成形がなされていない。一方, 同図(b)では, スレーブ工具がマスター工具とクランプ間を下から支えたために, たわみを抑えて工具パス線に沿って十分な深さに成形されている。



(a) シングルポイント・プロセス
($t_0 = 0.3 \text{ mm}$, $r_p = 1.0 \text{ mm}$, $p_z/t_0 = 0.2$)



(b) ダブルサイド・プロセス (支持モード)
($t_0 = 0.3 \text{ mm}$, $r_{pm} = r_{ps} = 1.0 \text{ mm}$, $p_z/t_0 = 0.2$,
 $g/t_0 = 1.0$, $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 0$, $\gamma = 0$)

図 21 工具通過後の素材形状

4. まとめ

ダブルサイド・インクリメンタルフォーミングにおける 2 つの工具の配置が残留応力に及ぼす影響を FEM を用いて系統的に調べた。

- a) 適切な工具系の β (縦揺れ) により, 工具パス方向の残留モーメントをほぼ 0 にすることができる。
- b) 工具間隙 g は, 初期板厚程度にした場合に工具パス方向の残留モーメントが小さくなる。
- c) 工具系の α (横揺れ) により, クリアランス部等のたわみ変形を抑制できる。

参考文献

- 1) Malhotra, R., Cao, J., et al., J. Manuf. Sci. Eng. Dec, 133(6): 061019, (2011).
- 2) Rakesh, L., Amit, S., Reddy, N.V., J. Manuf. Sci. Eng. Sep, 138(9): 091008, (2016).
- 3) Wang, H., Zhang, R., et al., Int. J. Advanced Manuf. Tech. 96 (2018).
- 4) Goldstein, Herbert, Classical Mechanics (2nd ed.), Addison-Wesley, (1980).