

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05166

研究課題名(和文)新ダブルサイド・インクリメンタル成形による残留応力制御とプロセスの高精度化

研究課題名(英文)Residual stress control by double-sided incremental forming

研究代表者

田中 繁一(tanaka, shigekazu)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：60197423

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：インクリメンタルフォーミングで得られる成形品内には過大な残留応力が存在し、激しい負のスプリングバックが発生する。本研究では、スローイング法により推定した材料モデルと部分モデルを用いる数値シミュレーションにより、ゆがみをもたらす残留応力の生成メカニズムとダブルサイド・インクリメンタルフォーミングの2工具の相対配置が残留応力に及ぼす影響を考察した。系統的な考察の結果、以下のことを明らかにした。工具系のピッチ角の調整により工具パス方向の残留モーメントをほぼ0にできる。また、工具間ギャップを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を最小にできる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

インクリメンタルフォーミングは、日本で提案された新しいCNC塑性加工技術で、基本方式では1つの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。本方式は高価な金型を用いないフレキシブル成形技術である。しかし、このプロセスで得られるほとんどの成形品には過大な残留応力が蓄積しており、クランプ解放やトリミング後に激しい負のスプリングバックが発生し、これが実用化に際しての最大の課題となっている。これに対して本研究の成果はダブルサイド・インクリメンタル成形を採用し、そのマスターおよびスレーブ工具の相対運動をどのように制御すればよい結果が得られるかの重要な基礎資料を提供する。

研究成果の概要(英文)：Excessive residual stress exists in incremental formed sheet metal parts, resulting in severe negative springback. In this study, the mechanism of residual stress generation that causes distortion and the effect of the relative location of the two tools in double-side incremental forming on residual stress were examined through numerical simulation using a material model estimated by the throwing method and a partial model. The results of the systematic study revealed the following. The residual moment in the tool path direction can be reduced to almost zero by adjusting the pitch angle of the tool system. The residual moment in the tool path direction can be minimized when the gap between the tools is about the initial thickness.

研究分野：塑性加工学

キーワード：インクリメンタルフォーミング 板成形 残留応力

1. 研究開始当初の背景

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。一方で、実用化を阻む課題が存在する。形状精度不足は最重要なものであり、「(成形中の) ゆがみ」と「スプリングバック(ゴー)」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。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。本課題では、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。

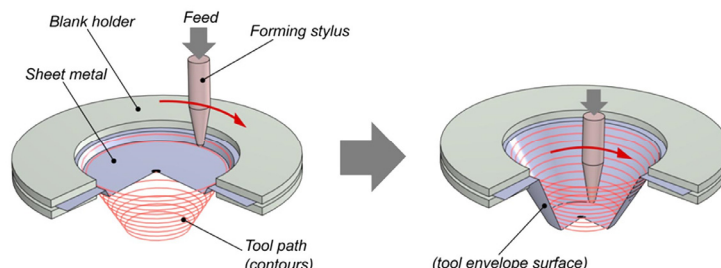
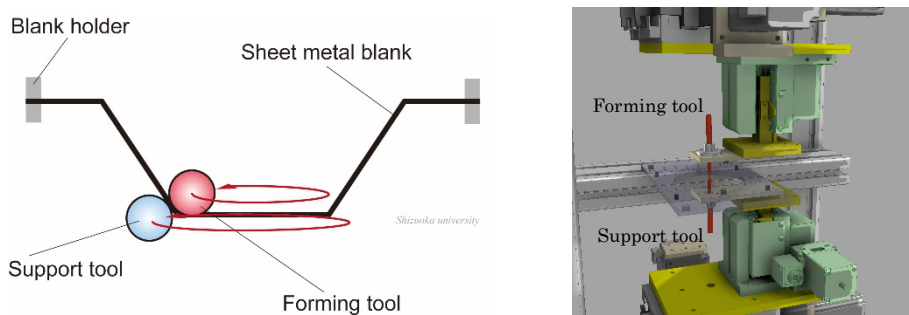


図 1 インクリメンタルフォーミングの基本方式

2. 研究の目的

最初に従来のプロセス (SPIF: Single-Point Incremental Forming) での残留応力の詳細を成形品への Hole-drilling 法の適用と FEM により把握する。ダブルサイド・インクリメンタルフォーミングは、図 2 のように素板を挿んでその両側にマスター工具とスレーブ工具を配置する。従来のプロセスでは、スレーブ工具を素材に対して単に対照配置したもので、スプリングバック抑制の効果は小さい。本課題では、同図のようにスレーブ工具を独立に位置制御して素材のパス方向と子午線方向の「曲げ・曲げ戻し」挙動の制御によるスプリングバック抑制の効果を明らかにする。



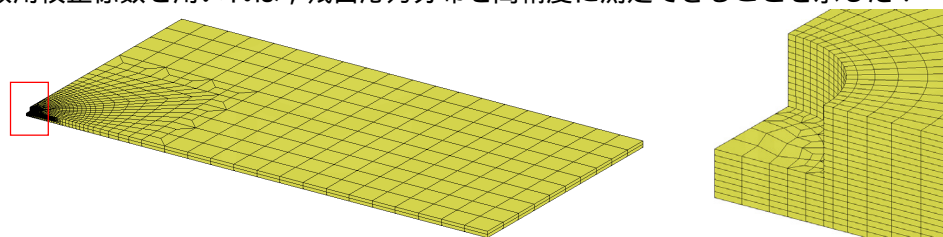
(a) 工具の動作概要 (b) DSIF 成形機の例

図 2 ダブルサイド・インクリメンタルフォーミング

3. 研究の方法

3.1 修正された Hole-drilling 法を用いる残留応力計測

Hole-drilling 法は残留応力の板厚方向の分布を計測できる手法である。Hole-drilling 法を規格化している最新の ASTM E837-20 では、標準化されたひずみゲージに対する測定方法を測定対象の板厚によって「厚板」、「中間板」、および「薄板」に分類して校正係数を示しているが、板厚方向に不均一な分布をもつ「薄板」の場合には計測値は導入した応力とは大きく異なる。したがって、高精度な測定を行うために、図 3 のように測定対象の板厚や測定ジオメトリにあわせて FEM により校正係数を再計算した。それを用いた計測プロセスを計算機内でテストして、修正した薄板用校正係数を用いれば、残留応力分布を高精度に測定できることを示した。



(a) 全体 (1/4 モデル) (b) 穿孔部

図 3 校正マトリクス計算のための FEM モデル

3.2 インクリメンタルフォーミングのFEM解析

図4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、板厚方向に十分な要素数を確保し難く、成形パラメータを系統的に変更するのも難しい。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。Sin則に基づき面BCは固定し、面ADの $R\phi$ 方向の変位を拘束した。また、面ABと面CDで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。素材の板厚は 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、Marc2020を用いた。2つの工具（先端）配置の定義を図5(a)に示す。その配置は、工具系の代表点、ここでは工具間中点Xの座標 ξ_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角に準じる。同図(b)-(d)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(b)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、同図(c)のように工具進行方向に対してスレー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。

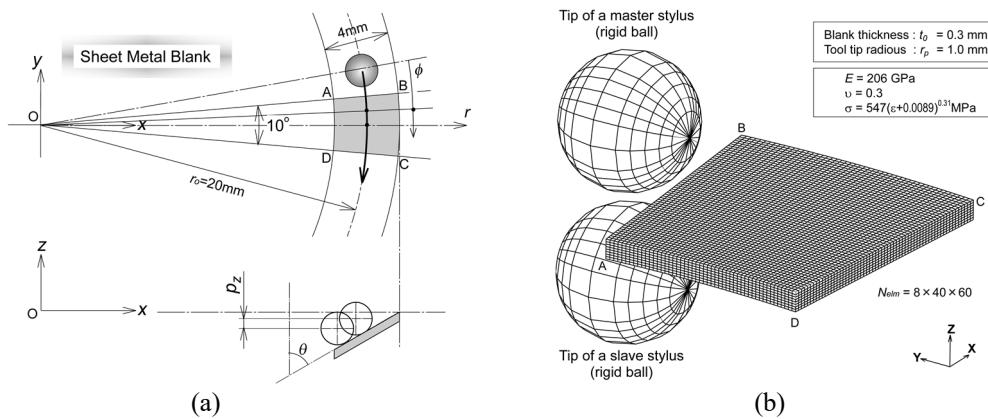


図4 計算モデル

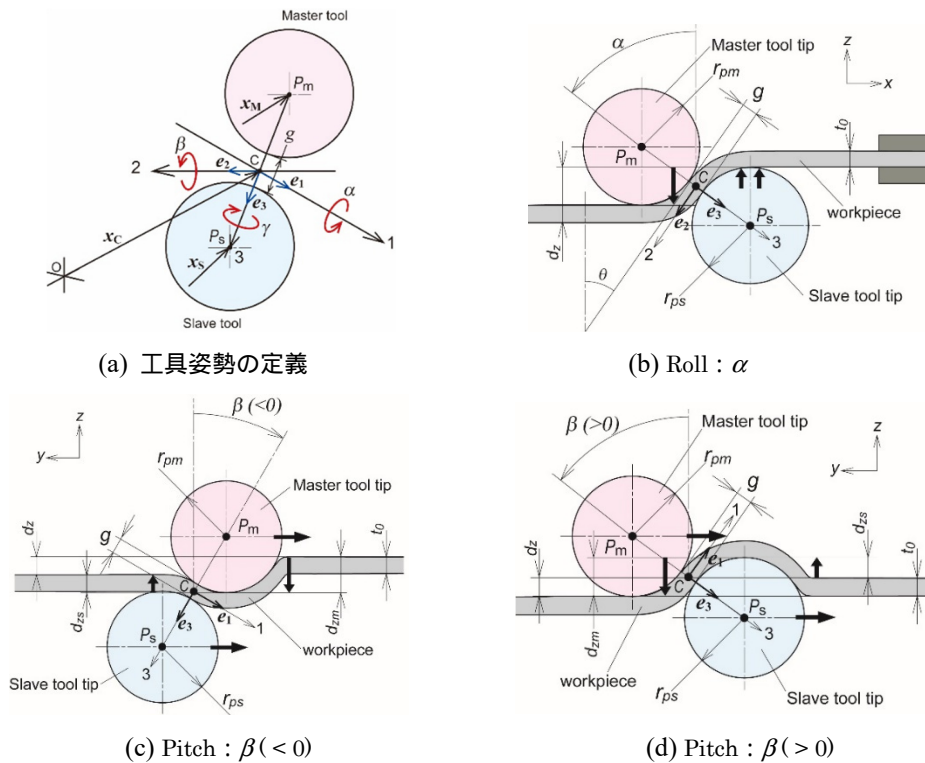


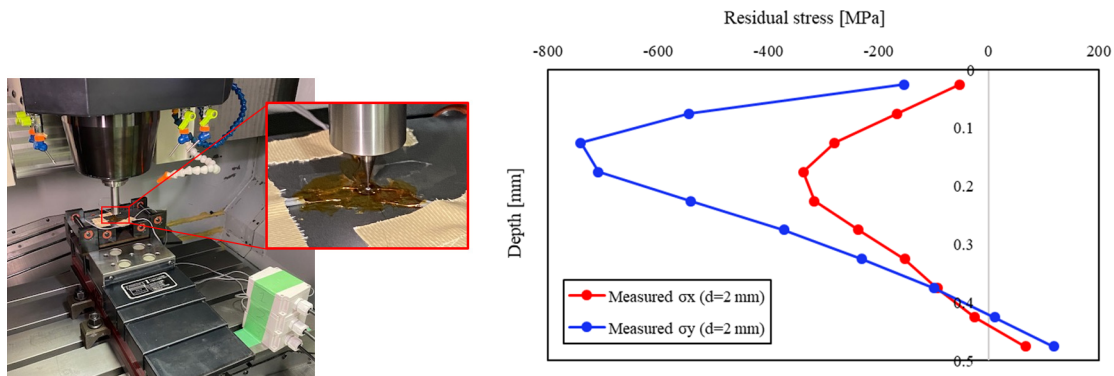
図5 ダブルサイド工具の配置

4. 研究成果

4.1 インクリメンタル成形された材料内の工具パス方向残留応力の分布

図6はインクリメンタル成形品（Blank: SPCC, $t_0=1\text{mm}$, tool: $r_p=10\text{mm}$, vertical feed $p_z=0.1\text{mm}$, product: pyramid-like shell with $\theta=30^\circ$ in half apex angle）の残留応力計測結果である。測定結果で

は x 方向 y 方向どちらも工具非接触面側は圧縮の応力が発生し、表面から 0.15 mm 付近で最大となり、それ以降は深くなるにつれ減少して、板厚中央で圧縮から引張へと変化する。この分布の形は x 方向 y 方向とも類似しているが、 y 方向の残留応力のほうが 2 倍程度大きい。この応力分布はインクリメンタル成形板をトリミングした際の内側に巻き込む現象を引き起こす。

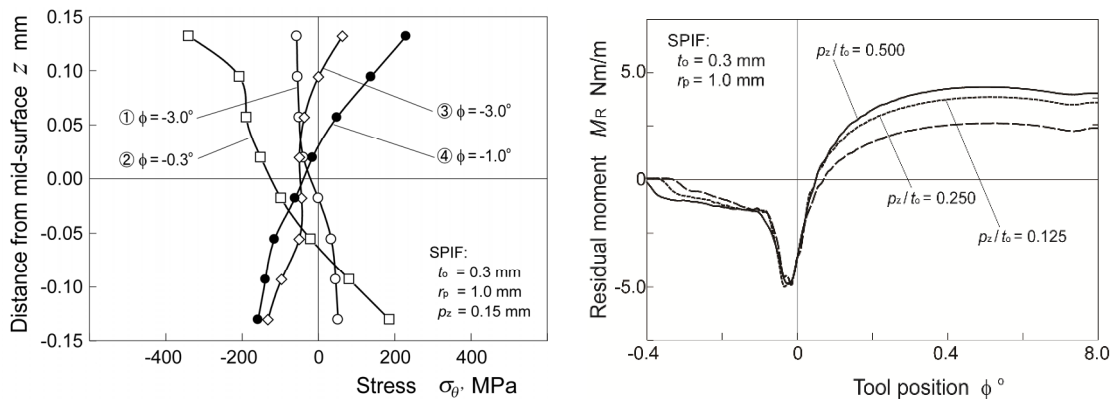


(a) エンドミル穿孔を用いた Hole-drilling 法 (b) 残留応力分布 (Tikhonov 正則化後)
 図 6 インクリメンタル成形品内の残留応力

4.2 シングルポイント・インクリメンタル成形の工具パス方向残留応力の分布

図 7(a)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_ϕ の、 $\phi = 0, r = 20\text{mm}$ 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受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。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。

同図(b)は、(a)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($\phi = 8^\circ$)に凹に曲がるようとする(スプリングオー)モーメントが残留している。



(a) 残留応力分布 (b) 残留モーメント
 ($t_0 = 0.3\text{ mm}$, $r_p = 1.0\text{ mm}$, $p_z/t_0 = 0.500$) ($t_0 = 0.3\text{ mm}$, $r_p = 1.0\text{ mm}$, $p_z/t_0 = 0.125 - 0.500$)
 図 7 工具パス方向残留応力の板厚方向分布 (シングルポイント・プロセス)

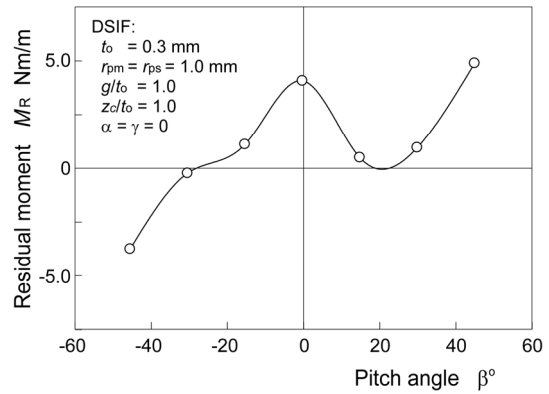
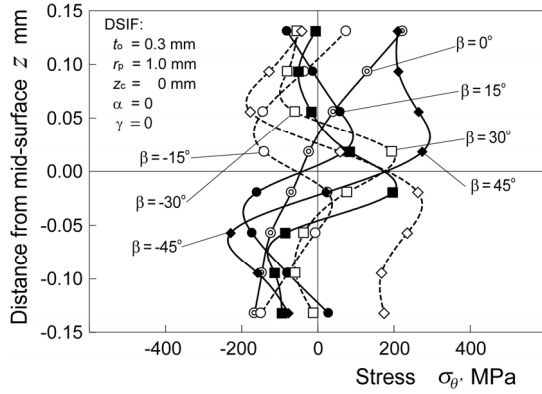
4.3 ダブルサイド・インクリメンタル成形の工具パス方向残留応力の分布

図8(a)は、 $\beta = -45^\circ \sim 45^\circ$ と変更した場合の残留応力の結果の一例を示しているが、 β の変更によりその分布は様々に変化する。

一方、同図(b)は、(a)の結果を含む一連の計算結果から得られる残留モーメントの β に対する変化を示しているが、 $\beta = -30^\circ$ 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ーブ工具が後進するために成形形状を定めにくく、後者のスレーブ工具が先進する配置が成形には適している。

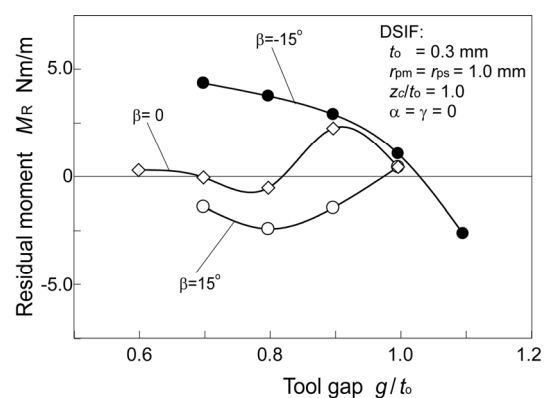
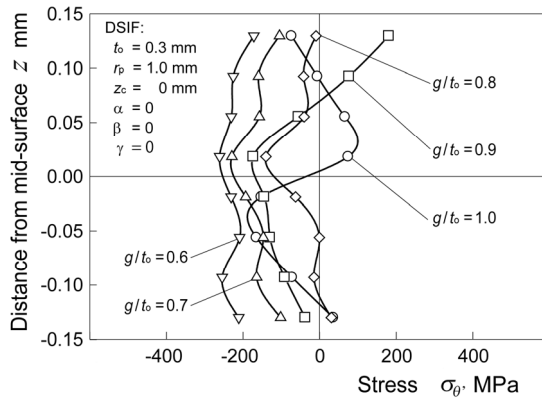
図9(a)は、 $\beta = 0$ として、工具間隙 g を変更した場合の結果の一例で、同図(b)は(a)の結果を含む一連の計算結果から得られる残留モーメントを示す。工具を対称配置する $\beta = 0$ の場合には、 g を小さくして圧縮することにより残留モーメントは減少、あるいはほぼ0になる。

一方、 $\beta \neq 0$ の場合には、 Σ 字あるいは逆 Σ 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しており、工具間隙はほぼ初期板厚 ($g = t_0$) とするのが適切である。



(a) 残留応力分布 ($t_0 = 0.3 \text{ mm}$, $r_{pm} = r_{ps} = 1.0 \text{ mm}$, $z_c / t_0 = 0.500$, $g/t_0 = 1.0$, $\alpha = 0$, $\beta = -45 \sim +45$, $\gamma = 0$)
 (b) 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8 工具パス方向残留応力の板厚方向分布 (ダブルサイド・プロセス)



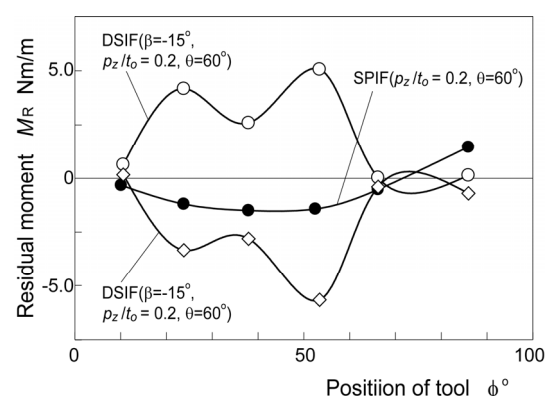
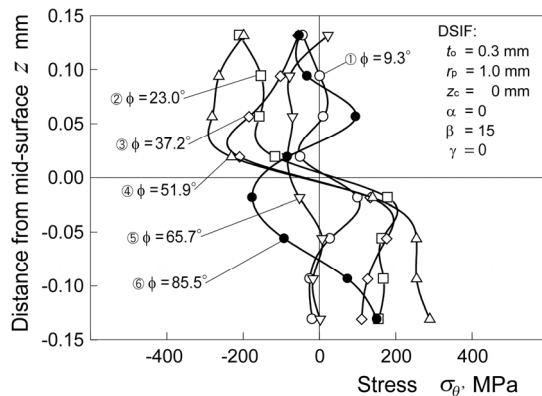
(a) 残留応力分布 ($t_0 = 0.3 \text{ mm}$, $r_{pm} = r_{ps} = 1.0 \text{ mm}$, $z_c / t_0 = 0.500$, $g/t_0 = 0.6 \sim 1.1$, $\alpha = 0$, $\beta = 0$, $\gamma = 0$)
 (b) 残留モーメント ($t_0 = 0.3 \text{ mm}$, $r_{pm} = r_{ps} = 1.0 \text{ mm}$, $z_c / t_0 = 0.500 \text{ mm}$, $g/t_0 = 0.6 \sim 1.1$, $\alpha = 0$, $\beta = -15, 0, 15$, $\gamma = 0$)

図9 工具パス方向残留応力の板厚方向分布 (ダブルサイド・プロセス)

4.4 ダブルサイド・インクリメンタル成形の子午線方向残留応力の分布

図10は、子午線方向の応力の結果の一例と子午線方向残留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で $\beta = -15^\circ$ とした場合には、急激に正のモーメントが発生し、その後減少してわずかな正のモーメントが残るが、 $\beta = 15^\circ$ の場合はその逆である。



(a) 残留応力分布 ($t_0 = 0.3 \text{ mm}$, $r_{pm} = r_{ps} = 1.0 \text{ mm}$, $p_z = 0.15 \text{ mm}$, $g/t_0 = 1.0$, $\alpha = 0$, $\beta = +15^\circ$, $\gamma = 0$)
 (b) 残留モーメント ($t_0 = 0.3 \text{ mm}$, $r_{pm} = r_{ps} = 1.0 \text{ mm}$, $p_z = 0.15 \text{ mm}$, $g/t_0 = 1.0$, $\alpha = 0$, $\beta = -15^\circ, 15^\circ$, $\gamma = 0$)

図10 子午線方向残留応力の板厚方向分布 (ダブルサイド・プロセス)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 島涼輔 中井晴大 田中繁一
2. 発表標題 ブロック式マルチステップ・インクリメンタル成形における稜線痕跡の抑制とその材料移動
3. 学会等名 2021年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古澤樹 田中繁一 早川邦夫
2. 発表標題 インクリメンタル成形された軟鋼板の集合組織
3. 学会等名 第71回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白鳥大毅 尾崎未来乃 田中繁一
2. 発表標題 インクリメンタル成形における局所薄肉化現象
3. 学会等名 第73回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鷺見竜弥 山田楓也 田中繁一
2. 発表標題 インクリメンタル成形のFEMのための応力 - ひずみ曲線に関する考察
3. 学会等名 第73回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中繁一
2. 発表標題 自動車用板金小部品のインクリメンタルフォーミング
3. 学会等名 第73回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------