

型レス厚板インクリメント成形技術の研究開発

大阪大学 接合科学研究所

教授 麻 寧緒

(2018年度 一般研究開発助成 AF-2018010-B2)

キーワード：型レス，インクリメント成形技術，厚板，低荷重

1. 研究の目的と背景

従来の型レスインクリメントシートフォーミング (Incremental Sheet Forming: ISF と略す) は、Fig.1(左) に示す薄板シート材を対象にして、棒状の成形ツールを三次元空間で移動させ、目標形状を成形する加工法である [1]。成形経路を制御するため、CNC マシンやロボットアームを用いる。プレス加工法と比較して、ISF 加工法は、金型が不要なので、金型の開発期間と製作費用が節約され、コストダウンの効果が大きい。一方、型レス ISF 加工法は、成形時間が長いので、大量生産よりも少量生産または単品の注文生産に適する。また、材料のインクリメント成形限界は、材料のプレス成形限界より大幅に増加する。

従来の ISF 加工法は、摩擦により成形ツールへ横荷重がかかるため、被成形材の板厚が厚い場合に、ツールの剛性と強度の制約により適用が困難となる。現状では、厚板を輸送機器、圧力容器などの曲面形状に加工するため、厚板表面の加熱による曲げ加工法 [2]、または、マルチポイントプレートフォーミング (MPF) の加工技術が利用されている [3~5]。

本提案では、成形ツールに大きな横荷重がかからない厚板インクリメント成形法 (die-less single-tool multi-point plate forming: DS-MPF と略す) の研究開発を行う。DS-MPF 成形法のイメージが、Fig.1(右) に示されるように、厚板を平面内で移動させながら、上下方向で移動する成形ツールと厚板の接触により成形する方法である。成形ツールが下方へ移動する時に成形を行い、上方へ移動する時に厚板を平面内で移動させることで、成形ツールに横荷重がほぼかからないことを実現する。このように、被加工厚板を平行移動させながら成形ツールの繰り返し上下移動により複雑な三次元形状を徐々に加工することが可能と考えている。具体的には、成形ツールの上下移動をサーボプレス機で制御し、被加工厚板の平面内の移動を CNC マシンで制御する。

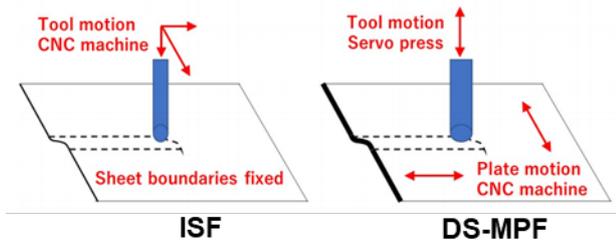


Fig.1 Concept of ISF and DS-MPF.

2. 研究内容と研究手法

本研究内容の概略を Fig.2 に示す。研究手法としては、数値解析と実験検証をそれぞれ用いた。具体的な研究の流れは、① DS-MPF 加工方案の設計、②加工方案の数値解析、③ 加工方案の実験検証、④ 加工方案の分析、⑤ DS-MPF の実用化提案からなる。まず、数値解析を先行して DS-MPF 加工法のフィジビリティを明らかにし、次に実験検証を実施し、最後に実用化の提案を行う。

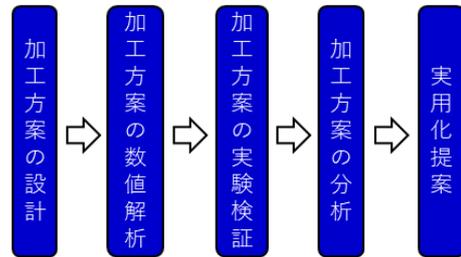


Fig.2 Research contents and sequence.

3. DS-MPF 試験方案の設計

Fig.3 には設計した DS-MPF 試験方案を示す。ツールヘッドは、X、Y と Z の 3 方向での移動が可能である。マイナス Z 方向は加工方向である。成形ツールを加工位置までに移動させる非加工移動は、プラス Z 方向や X と Y の方向での変位で設定される。ツールが加工位置に到達した後、マイナス Z 方向へ移動させ、板材を押し曲げる。ツールは、横方向の力を受けず、押し曲げにより厚板を三次元曲面形状に成形する。ツールがプラス Z 方向に上がると、押し曲げた板材にスプリングバックが発生する。このような押し曲げを予め設定したマルチポイントで行い、設計した形状になるまで繰り返す。

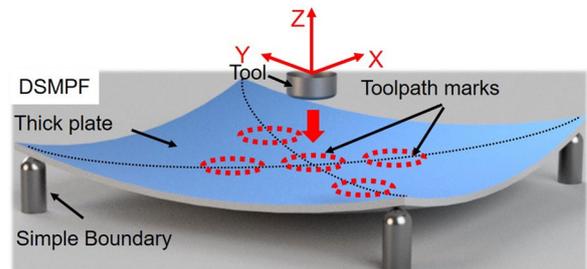


Fig.3 Schematic diagrams of DS-MPF.

厚板を曲げ加工するため、面内ひずみを減らす簡単支持の境界条件が望まれる。簡単支持の境界条件下で、曲げひずみが最大となり、面内ひずみを極力小さくすることができる。結果として、三次元曲面形状に加工するために必要な成形荷重が小さくなり、板厚減少も抑制することができる。

4. DS-MPF 加工方案の数値解析

4.1 目標形状の設計

設定した目標形状は、Fig. 4 に示した球形の一部である。球形の半径 R と中心部の成形深さをそれぞれ 1000mm, 57mm とする。板材の寸法は 500 x 500 x 8 mm である。材質は、船体や橋梁および容器に広く利用されている鋼板 SS400 である。

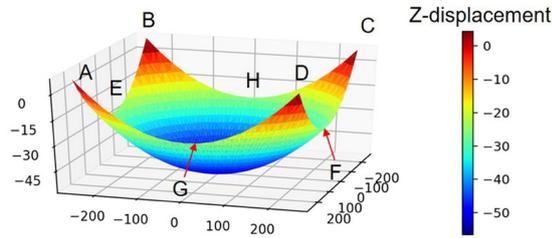


Fig. 4 Spherical surface target with a radius of 1000 mm.

4.2 数値解析モデリング

数値解析の有限要素モデルを Fig. 5 に示す。用いたシェル要素のサイズは 5×5 mm である。曲げひずみを評価するため、シェル要素の板厚方向に 5 点の積分を設定した。加工ツールの直径と先端半径 R はそれぞれ 60 mm と 100 mm である。板材角部に配置する円柱状 Support-A の直径は 30 mm で、先端 R と角 R がそれぞれ 125 mm と 10 mm である。板材のエッジ中央に配置する四角形状 Support-B の長さとは幅は、それぞれ 100 mm と 50 mm である。Support B は、自由に回転でき、加工中に変形している板材のエッジと常に接触している。被加工 SS400 材の機械的特性と応力ひずみカーブをそれぞれ Table 1 と Fig. 6 に示す。成形解析には、MISES 降伏関数や等方加工硬化則を用いた。

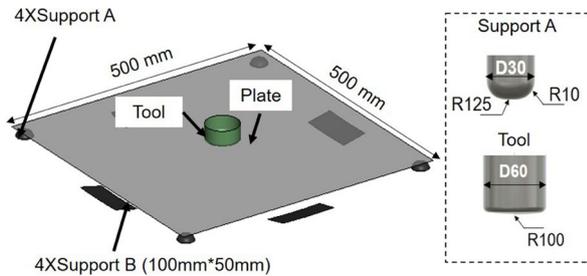


Fig. 5 Finite element analyzing model.

Table 1 Material properties of SS400 with thickness 8 mm.

Material	E (MPa)	Poisson's ratio	TS(MPa)	YS(MPa)	Elongation (%)
SS400	203369	0.3	450	369	24

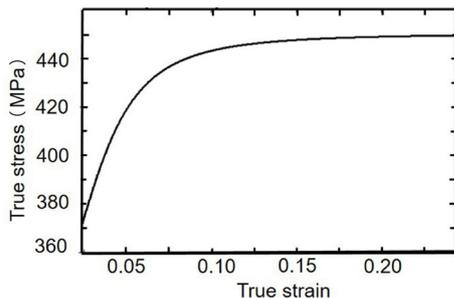


Fig. 6 True stress-strain curve of SS400 used in FE analysis.

4.3 加工位置の設定法

Fig. 7 a) には、被加工材の断面モデルと加工位置を示す。加工位置が板材中心 Q の場合、接触位置とツールの中心位置は重なる。加工位置が中心でない場合、ツールの中心位置と接触位置は異なる。これらの位置を、それぞれ板材中心 Q からの距離 R と R_c で表す。図中の O 点と P 点は、断面の両エッジ点である。

最初の加工位置を板材中心 Q とすると、板材の断面は、 OQP に沿って変形する。目標形状との最大誤差 ΔH_1 が N 点で発生する。そこで、次の加工位置を N 点に設定すると、 N 点での加工による断面変形は $O-N-Q-N'-P$ に沿う。最大形状誤差は L 点で発生する。同じように最大形状誤差点を次の加工位置にする方法を、加工位置の最大形状誤差点設定法(簡単に、最大誤差点設定法と略す)と呼ぶ。このように加工位置を決定し、順次加工すれば最大形状誤差が許容値以下になる。Fig. 7 b) には、最大誤差点設定法を用いて多点の加工回数と最大形状誤差の関係を示す。3 点以上の加工による最大誤差は 3.6 mm 以下になり、許容値と設定した板厚の半分以下となった。

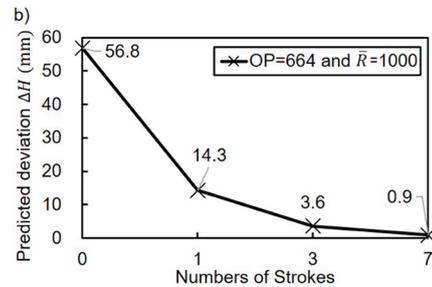
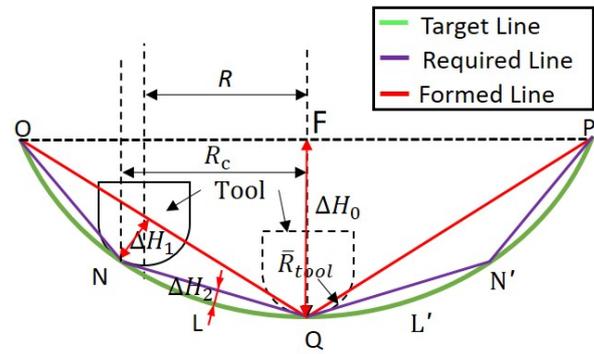


Fig. 7a) Stroke positions for a 2D section model; b) The maximum deviation changes with total stroke number

4.4 加工位置と形状誤差の定量関係

Fig. 8 a) には、最大誤差点設定法を用いて決定した中心点加工と第 1 Loop ループ加工 (合計 5 点加工) の順番を示す。第 1 Loop の位置 $R=75$ mm の条件を用いた数値解析で得られた B-B 中央断面の形状変化を Fig. 8 b) に示す。 $R=75$ mm と設定した第 1 Loop 加工後の最大形状誤差は 3.28 mm で、 $R=50$ mm の位置で発生した。第 1 Loop の加工位置 R を 35~200 mm の範囲に変化させた場合に、最大形状誤差と加工位置 R の関係を Fig. 8c) に示す。第 1 Loop の位置 R を 100 mm 以下に設定すれば、最大形状誤差を板厚の半分 (4 mm) 以下に抑えることが分る。

数値解析による最大形状誤差と第 1 Loop 加工位置 R の定量関係を式 (1) に整理することができる。

$$\Delta H = 5.564 \times 10^{-2} + 8.621 \times 10^{-2} R - 7.475 \times 10^{-4} R^2 + 2.806 \times 10^{-6} R^3 \quad (1)$$

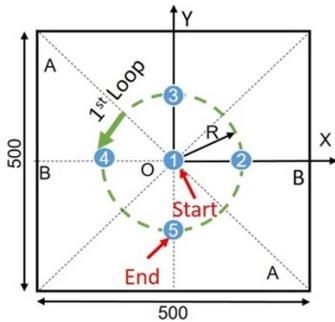


Fig. 8a) DS-MPF stroke positions and sequence from the 1st point to the 1st loop.

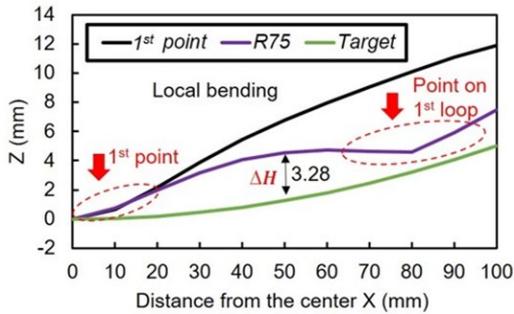


Fig. 8b) B-B section profile comparison between the formed shape and target after the 1st loop with R=75mm

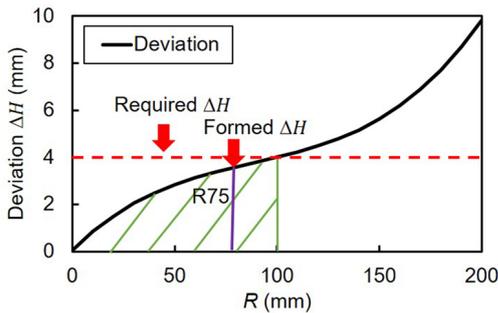


Fig. 8c) Relationship between the 1st loop stroke position R and DS-MPF deviation

4.5 成形形状に及ぼす加工順序の影響

Fig. 9 a) には、2 Loops (合計 9 点加工) の方案に関して、加工順序を中心から外 (IN/OUT) と外から中心 (OUT/IN) にそれぞれ設定して数値解析を行った。IN/OUT と OUT/IN の加工手順による成形形状の Z 座標分布をそれぞれ Fig. 9 b) と Fig. 9 c) に示す。IN/OUT の加工順序は、OUT/IN の順序より深く成形できることが分る。IN/OUT の成形形状も滑らかになる。

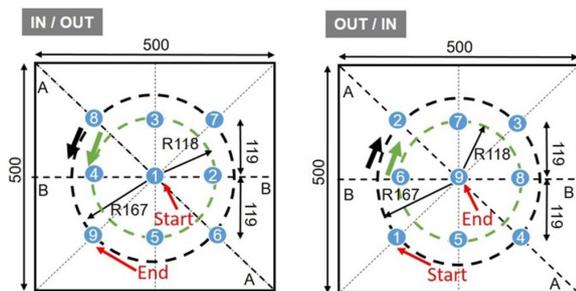


Fig. 9a) Two types of DS-MPF stroke sequence

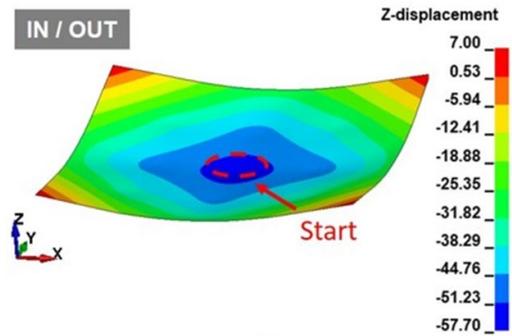


Fig. 9b) DS-MPF shape by IN/OUT stroke sequence

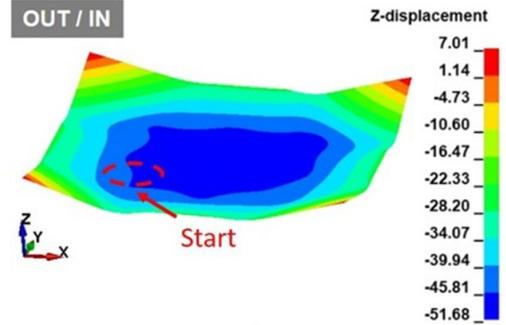


Fig. 9c) DS-MPF shape by OUT/IN stroke sequence

5. DS-MPF 加工法の実験検証

5.1 試験セットアップ

先行した数値解析の検討結果に基づき、Fig. 10 a) に示す AC サーボプレス機にて DS-MPF 加工試験を行った。加工用ツールとサポート治具 (Support A, Support B, Support C) および詳細寸法をそれぞれ Figs. 10 b), c) と d) に示す。Support B は、自由に回転でき、その高さも調整できる。

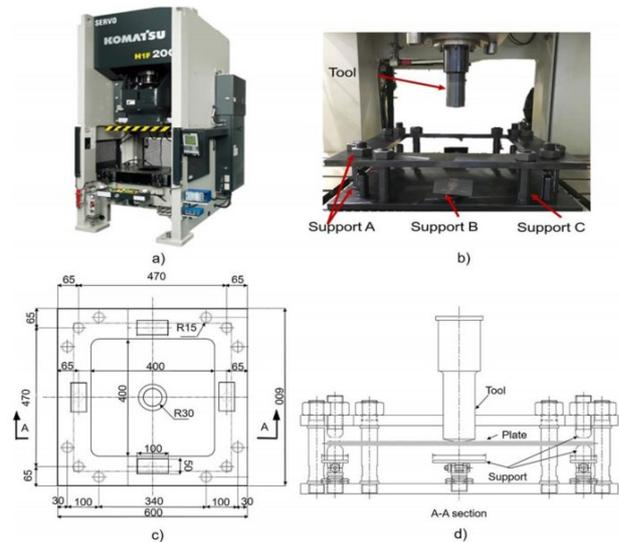


Fig. 10 Experiment setup for DS-MPF

5.2 加工位置と加工順番の設計

DS-MPF 試験は、Fig. 11 a) に示すように、厚さ 8mm と長さ 500mm の正方形鋼板の中心から外向きに第 1 Loop (R=35mm), 第 2 Loop (R=65mm), 第 3 Loop (R=118mm), 第 4 Loop (R=167mm) の順で合計 33 点の曲げ加工を行った。初期設計した 33 点の加工ストローク変位 (Z-displacement) を

Fig. 11 b)の緑棒グラフで示している。Fig. 11 b)の灰色棒グラフは、初期設計の条件で試験を実施した後の形状を測定し、スプリングバックを補正した加工ストローク変位 (After compensation) である。

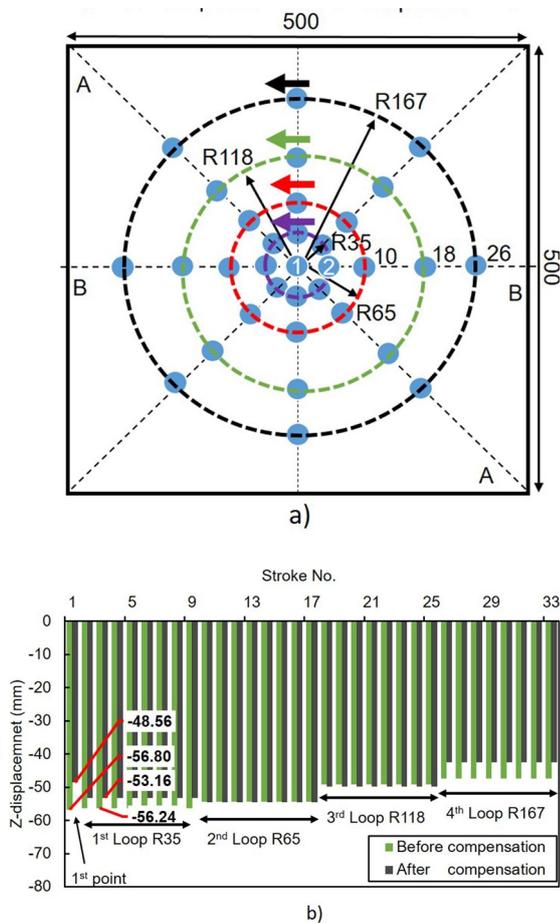


Fig. 11 DS-MPF positions and sequences; a) positions of 33 strokes, b) Z-displacement of each stroke before and after spring-back compensation.

5.3 DS-MPF 試験結果と数値解析結果の比較

上述したスプリングバック補正後 (After compensation) の DS-MPF 加工条件を用いて試験で得られた厚板の成形形状を Fig. 12 a) に示す。A-A 断面と B-B 断面における形状プロフィールをそれぞれ Fig. 12 b) と c) に示す。実験測定や数値解析および設計の断面プロフィールは良く一致していることから DS-MPF 加工法の有効性と良い精度を実証した。

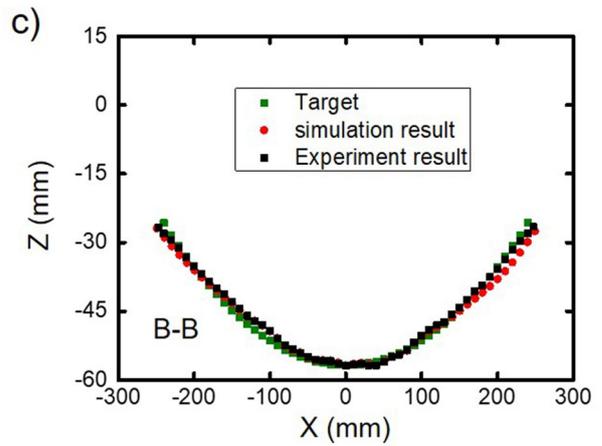
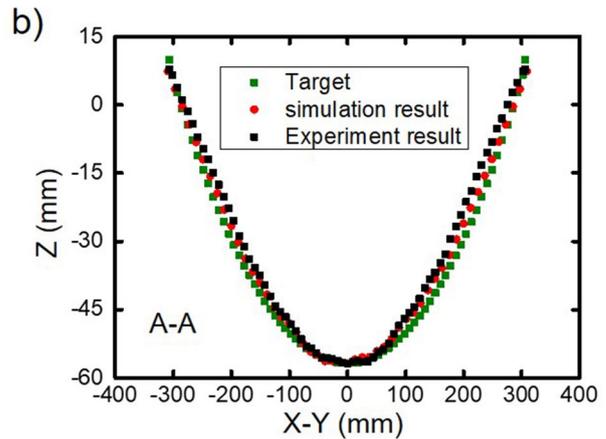
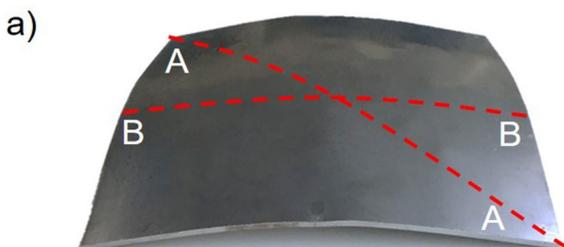


Fig. 12 a) Experimental photo of DS-MPF plate, b) A-A section profile comparison among simulation, experiment and designed target, c) B-B section profile comparison.

6. DS-MPF 加工方案の分析

6.1 ひずみ分布

数値解析で得られた成形形状の被加工面の B-B 断面における曲げひずみ $\Delta \epsilon_x$ の分布を Fig. 13 に示す。ここでの $\Delta \epsilon_x$ は表面と裏面のひずみ差である。最初の中心位置でのツール加工で約 9%の曲げひずみが発生した。加工終了後、すべてのツール加工位置における曲げひずみは、ほぼ同じで約 6%になる。中心位置の厚さ方向でのひずみ分布を Fig. 14 に示す。厚さ方向での分布はほぼ線形である。板厚中立軸での塑性ひずみは約 3%である。

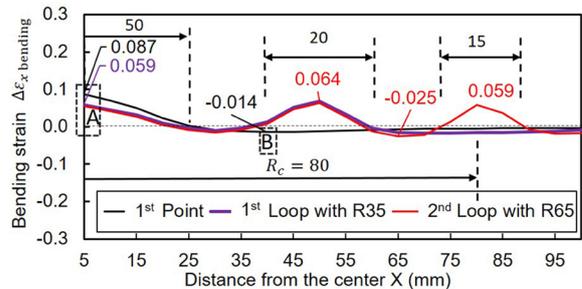


Fig. 13 Bending strain distribution comparison between formed plates after the 1st point strokes, after the 1st Loop, and after the 2nd loop.

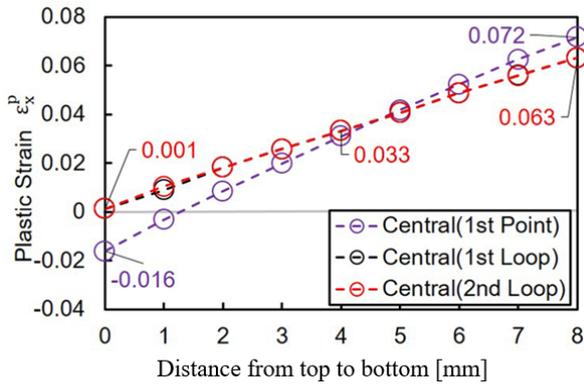


Fig. 14 Plastic strain distribution at center point A

6.2 加工荷重

Fig. 15 には、被加工板材のエッジを完全固定した境界条件（プレス加工の境界条件に相当）と簡単支持した DS-MPF 試験条件をそれぞれ用いて数値解析により予測した荷重と中心位置加工ストローク変位の関係を示す。本 DS-MPF の最大加工荷重は約 65kN である。プレス加工に近い固定境界の最大加工荷重（408kN）の 1/8 程度である。すなわち、DS-MPF の加工荷重は非常に小さい利点がある。

板厚が 8mm と 6mm の場合において、DS-MPF 試験条件を用いて数値解析で予測した加工荷重と加工位置の関係を Fig. 16 に示す。板厚が 8mm から 6mm に変わった場合、最大荷重は 82kN から 53kN に低減した。

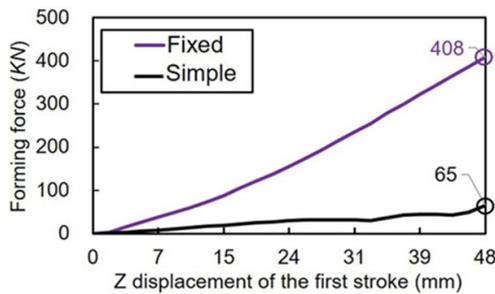


Fig. 15 Forming force history of the first stroke with a fixed boundary and DS-MPF simple support boundary

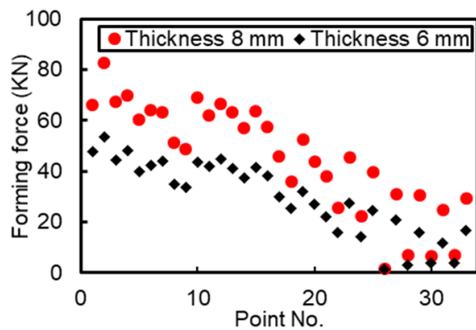


Fig. 16 Peak forming force of each stroke.

7. DS-MPF 実用化の提案

上述した DS-MPF 検証例では、小さな成形ツールと 65kN 以下の荷重で 8mm の厚板を目標の球形部材に成形することに成功した。従来の温間曲げ加工法やプレス曲げ加工法と比較して、厚板を対象とする DS-MPF 成形法は、専用の

大型プレス機が必要なく、投資コストが治具製作費に限られており、尚且つ任意な形状を成形することが可能である。

これから本研究の成果と DS-MPF の利点を活用して、Fig. 17 に示す (a) 圧力容器 [6]、(b) LPG または LNG 溶接タンク [7]、(c) 船体の首尾曲面 [8] および (d) 任意曲面形状 [9] の成形に展開できるように提案する。

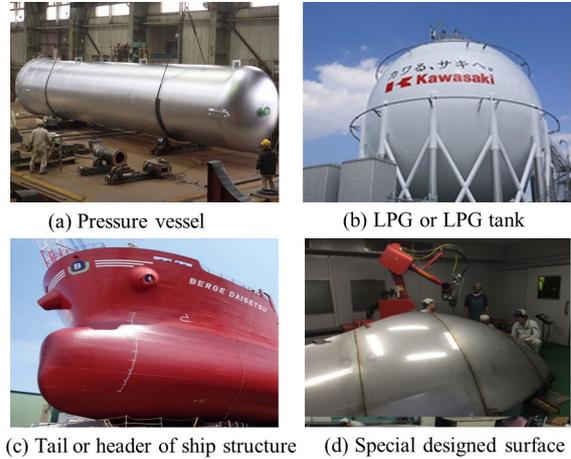


Fig. 17. Future applications of DMPF

8. まとめ

厚板用インクリメントフォーミング技術として DS-MPF (die-less multi-point plate forming) を新たに開発し、数値解析と検証試験により本開発加工法の有効性を示し、以下の結論が得られた。

- 低荷重で厚板を曲げ加工することが可能であるため、大型プレス機械を必要としない。
- 円柱型加工ツールのサイズが小さく、加工時に横荷重が発生しないため、ツールの寿命は長いと考えられる。
- 数値解析手法、または、AI 技術を活用して最適な加工位置と順番を設定し、小型サーボプレス機と NC 制御の移動台を用いて任意な目標形状を効率高く加工することが可能である。
- 任意な目標形状に加工するため、サポート治具の設計が重要である。

9. 付録

本研究開発助成 AF-2018010 による学術成果の学会発表と論文投稿の実績を以下にまとめる。

- 1) 麻寧緒, 宮本健二, Yahia Abdel Nasser, Houfu Fan, Xinhai Zhu, 移動型アダプティブメッシングによるインクリメントシートフォーミングの解析, 2018 年度塑性加工春季講演会論文集, p166-167
- 2) 馬運五, 宮本健二, シェリーフ ラシー, 麻寧緒, インクリメント板成形技術の研究開発と実用 (第 1 報: ピラミッド形状フォーミングのモデリングと実験検証), 2019 年度塑性加工春季講演会論文集, 2019 年 6 月 7-9 日, p257-258.
- 3) 佐藤真之介, 宮本健二, 馬運五, Sherif Rashed, 麻寧緒, インクリメント板成形技術の研究開発と実用 (第 2 報: 四角形状フォーミングのモデリングと実験検証), 2019 年度塑性加工春季講演会論文集, 2019 年 6 月 7-9 日, p259-260.

- 4) 宮本健二, 三輪紘敬, 内山典子, 村上亮, 麻寧緒, Yahia Abdel Nasser, Sherif Rashed, インクリメント板成形技術の研究開発と実用(ひずみ分布が寸法精度に及ぼす影響(第3報)), 第70回塑性加工連合講演会論文集, 2019年10月12-13日, p145-146.
- 5) Wu Song, 馬運五, Sherif Rashed, 麻寧緒, インクリメント板成形技術の研究開発と実用(第4報:厚板インクリメント成形のモデルと解析), 第70回塑性加工連合講演会論文集, 2019年10月12-13日, p147-148, 千葉.
- 6) Song WU, Sherif Rashed, 松岡裕介, 麻寧緒, インクリメント板成形技術の研究開発と実用(第5報)-厚板インクリメント成形の数値解析と実験検証-, 第71回塑性加工連合講演会論文集, 2020年11月14-15日, p345-346
- 7) 麻寧緒, FE解析によるインクリメンタルフォーミング部品形状の高精度化, 「ダイフリー板材成形技術の最前線」, 塑性加工学会・板材成形分科会2021年度総会・第82回SMFセミナー, 2021年4月6日オンライン.
- 8) Song Wu, Yunwu Ma, Leitao Gao, Yixi Zhao, Sherif Rashed, Ninshu Ma, A novel multi-step strategy of single point incremental forming for high wall angle shape, *Journal of Manufacturing Processes*, 56 (2020) 697-706.
- 9) Song Wu, Ninshu Ma, Sherif Rashed, Naoki Osawa, Development of die-less single-tool multi-point plate forming technology for 3D curved shape, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, online on September 1, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07883-w>
- 10) Wu, S., Gao, L., Y., Matsuoka, Rashed, S., Zhao, Y., & N. Ma, Multi-step toolpath approach to improve dimensional accuracy of a non-axisymmetric part in incremental sheet forming and its mechanism analysis, *Journal of Mechanical Science and Technology* (Under review).

参考文献

- [1] Young D., & Jeswiet, J. (2004). Wall thickness variation in single-point incremental forming. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 218(11), 1453-1459
- [2] Das, B., & Biswas, P. (2018). A Review of Plate Forming by Line Heating. *Journal of Ship Production & Design*, 34(2).
- [3] Li, M., Liu, Y., Su, S., & Li, G. (1999). Multi-point forming: a flexible manufacturing method for a 3-d surface sheet. *Journal of Materials Processing Technology*, 87(1-3), 277-280.
- [4] Heo, S. C., Seo, Y. H., Ku, T. W., & Kang, B. S. (2010). A study on thick plate forming using flexible forming process and its application to a simply curved plate. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51(1-4), 103-115.
- [5] Shen, W., Yan, R. J., Lin, Y., & Fu, H. Q. (2018). Residual stress analysis of hull plate in multi-point forming. *Journal of Constructional Steel Research*, 148, 65-76.
- [6] <http://www.kotobuki-techrex.co.jp/rpv.html>
- [7] https://www.khi.co.jp/energy/hydrogen/hydrogen_tank.html
- [8] <http://www.bergebulk.com/wp-content/uploads/2014/11/Blue-Matters-Brochure.pdf>
- [10] <https://www.kikukawa.com/technology/fiber-laser-welding/>