論文

インクリメンタルフォーミングにより 予備成形した素板の超塑性成形

鈴木 信行* 高科 建太郎** 地西 徹*

Superplastic Forming of a Sheet Preformed by Incremental Forming

Nobuyuki SUZUKI*, Kentaro TAKASHINA** and Tohru JINISHI*

(Received on June 2, 2009)

Superplastic blow forming usually poses difficulty in controlling thickness variation on formed articles because of its deformation style of free bulging. Also, when a large deformation is formed, microcavities are formed in the micro-structure of aluminum alloy, which degrade mechanical properties of the alloy. In order to overcome these demerits, a new process using two stages of forming has been proposed. In this process, a blank sheet is bulged locally by incremental forming using a bar tool in the preliminary stage, then it is superplastically formed in the finishing stage. Some forming experiments were conducted to determine the feasibility of this new forming process using fine-grain-quality 7475 aluminum alloy as blank sheets. Firstly, blank sheets were preformed into quadrilateral pans with a given depth by incremental forming. Then, their bottoms were formed into a quadrilateral cone by superplastic forming. Lastly, each article was formed successfully with a thickness distribution as predicted from the controlled height of the preformed articles. It was also found that the new forming process performs effectively under certain range conditions.

Key words: superplastic forming, sheet metal forming, incremental forming, experimental analysis, strain distribution, forming property, thickness decreasing, deformation mechanism, aluminum alloy.

1. 緒 言

超塑性ブロー成形は、素板に超塑性張出し変形を与えて型に沿わせ、所望の形状を得る加工法である。使用する型は目的とする形状の片側のみで、複雑かつ高精度な成形が可能となる。通常高い加工温度と低いひずみ速度が必要であり、一般に生産性は低い。このような特徴からこの加工法は多品種少量生産品に適し、航空機構造部品等への適用が進んでいる¹⁾。ただし、成形の進行は主として素板の自由張出し変形に依存するため、成形品の板厚分布を任意に制御することは困難である。対象形状によっては所望の板厚配置が得られず、成形が可能であっても実用に供することができない場合もある。

一方、大変形と同時に複雑な造形を実現できる薄板成形技術として、棒状工具を使用したインクリメンタルフォーミングが開発されている²⁾。この成形法は専用金型を必要

としないため、新製品の開発試作や修理品等の極少量の生産品に対する簡便かつ即効的な製造手段として好適であり、近年注目を集めている^{3)~7)}。変形様式は、棒状工具の進行方向に対して垂直方向のみに伸びを生じる平面ひずみであり^{8), 9)}、素板の板厚は成形面の傾斜角度に律せられて変化する。したがって、これを自由に調整することはできず、成形面が垂直に近づくとも板厚は大きく減少して破断に至る。また、成形は通常冷間で行われ、スプリングバックの発生は不可避である。製品の形態によってはスプリングバックにより大きな歪みを生じ、形状の要求精度を満たせない場合もある。

そこで筆者らは、この二つの加工技術を組み合わせた成形技術を考案した¹⁰⁾。すなわち、超塑性仕様の素板をインクリメンタルフォーミングにより予備成形し、これを超塑性成形により最終形状に仕上げる加工プロセスである。それぞれの成形法の特徴を合理的に組み合わせることにより、これまで単独の工程では実現が困難であった板厚分布の調整と、高い形状精度の達成が期待できる^{11), 12)}。工程数は倍増するが、それぞれの加工時間は縮減するため、生産性への影響は小さいと予測される。特に超塑性成形時間の短縮は、大量の熱エネルギーを消費するホットプレスの稼動

* 日本飛行機株式会社 航空宇宙機器事業部 製造部 生産技術課
〒236-8540 横浜市金沢区昭和町 3175
Manufacturing Department, Aerospace Division, NIPPI Corporation
3175, Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama 236-8540, Japan.

** 同 航空整備事業部 品質保証部 品質保証課
〒242-0026 大和市草柳 2 丁目 28 番
Quality control Department, Aircraft Maintenance Division, NIPPI Corporation
2-28, Soyagi, Yamato 242-0026, Japan.

時間を節約し、これによる加工コストの低減も見込まれる。

この新しい加工プロセスによる板厚調整機能の有効性の調査を目的とし、単純な形状について加工実験を実施した。以下にその結果を示す。

2. 試験方法

供試材は、平均結晶粒径が約 $10\mu\text{m}$ 、厚さ 1.5mm の超塑性仕様アルミニウム合金板材 7475 (神戸製鋼所製 KS-7475-T4) を使用した。冷間での成形を容易とするため、 410°C で 2h 保持、その後 25°C/h で 260°C まで徐冷して自然放冷し、焼きなまし状態の素板とした。その機械的性質は、 $\sigma_{UT}=191\text{MPa}$ 、 $\sigma_y=83\text{MPa}$ 、 $e=21\%$ である。

まず始めに、予備成形として先端球面径が $\phi 20\text{mm}$ の棒状工具と角柱状の支持型を使用し、 $400\times 400\text{mm}$ に切り出した素板を底面が $250\times 250\text{mm}$ 、母線の傾斜角度 60° の四角錐台容器状にインクリメンタルフォーミングした。その成形高さ h は、Fig. 1 に示すように、 50mm 、 100mm 、 150mm 、 182mm の 4 種類とした。高さ $h=182\text{mm}$ は、仕上げ成形高さであり、この供試体に関しては予備成形のみで最終形状に仕上げた。鉱油系潤滑剤を塗布し、板面に平行な方向の工具送り速度を 10m/min 、周回ごとの垂直方向の送りピッチを 0.5mm として成形を進めた。

次に、これらの予備成形した供試体を、超塑性ブロー成形により最終形状に仕上げた。スライドおよびボルスタに熱盤が装備されたホットプレスに成型型をセットし、型内部の温度を $516^\circ\text{C}\pm 5^\circ\text{C}$ に保持した。そして予備成形した供試体を型にセットしてフランジ外周をシールし、上方より圧力 p の工業用圧縮空気を負荷した (Fig. 2)。圧力負荷スケジュールは、各予備成形形状に応じて想定される変形部

Fig. 1 Shapes of the preforming and finish forming

Fig. 2 Schematic cut view of superplastic forming using preformed sheet

の最大ひずみ速度が $2\times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ となるよう解析計算¹³⁾により求めて、これに従った圧力を自動ガス圧力供給装置により連続負荷した。

3. 結果および考察

3.1 予備成形状態

予備成形としてインクリメンタルフォーミングを行った供試体の概観を Fig. 3 に示す。いずれの供試体についても、計画した四角錐台高さ h を与えることができ、良好な外観の成形状態が得られた。各供試体は高さに関係なく傾斜角度が同一であるため、成形面の表面粗度に差は見られない。しかし、どの供試体についても四角錐台の側壁面にはスプリングバックによる膨らみが見られ、光の反射状況から、その変形は四角錐台高さ h が大きくなるほど顕著となっているようである。

Fig. 4 に各供試体 (Fig. 3(a)~(d)) の、底辺に垂直な軸断面の板厚の変化を示す。インクリメンタルフォーミングにより変化した板厚は、一般に正弦則と呼ばれる平面ひずみ問題として得られることが知られており^{8), 9)}、いずれの供試体についてもこれに整合した値を示している。すなわち成形を受けた領域の板厚は、その範囲や位置に関わらず一

Fig. 3 Over views of preformed article((a)~(c)) and perfect formed article(d) by incremental forming

Fig. 4 Thickness variation on the articles preformed by incremental forming

定で、すべて素板元板厚の 1/2 に減少している．これに対して変形を受けない四角錐台上面および外周フランジ面は、母材のままであり板厚減少は無い．

3.2 仕上げ成形状態

Fig. 5 に予備成形の無い平板および Fig. 3(a)～(c)に示す予備成形を行った供試体を超塑性成形により仕上げ成形を行った後の概観を示す．いずれの成形体についても型に沿って完全に変形が進み、良好な概観の最終形状が得られている．予備成形された供試体については、超塑性変形を生じた領域の表面の光沢が失われており、それぞれの成形領域が明瞭に区別される．その境界線は、四角錐台の底面と平行な鉢巻状となり、ほぼ一平面上に載っていると見なせる．

Fig. 5(a)～(d)に示した供試体について、四角錐台の底辺に垂直な軸断面の板厚変化を Fig. 6 に示す．平板から成形した供試体 (Fig. 5(a)) を除き、いずれの供試体 (Fig. 5(b)～(d)) についても、側壁部にピーク状の不連続な変化部のある分布を示している．これを Fig. 4 と比較すると、変化した範囲はピークから中心側の範囲のみであり、その外側の範囲については顕著な変化は見られない．また、ピーク的位置は、予備成形と仕上げ成形の境界に対応しており、その高さは予備成形高さ h とは無関係で、どの供試体についてもほぼ一定である．この境界部の詳細に関しては、次節 3.3 に示す．

ピークと供試体中心の間の板厚は、いずれの供試体についてもピークから中心に向かって減少している．中心側の板厚は、予備成形高さ h により大きく異なっており、予備成形高さ h が大きいほど板厚減少は軽減されている．平板から直接超塑性成形した場合は、四角錐台裾部から中心に向かって連続的に板厚が減少し、中心では素板元板厚の約 1/6 となる．

成形体をその軸に沿って切断し、これらを重ねて頂部の板厚を比較した写真を Fig. 7 に示す．これは Fig. 4 および Fig. 6 に示す板厚変化を実成形体の直接比較により示したものであり、歴然とした板厚の差が目視的にも明瞭に確認される．この状況から、本加工プロセスの適用により、従来困難であった超塑性成形による板厚変化を積極的に、しかも非常に広い範囲で調整できる見通しが得られた．

3.3 成形境界

Fig. 5(b)～(d)に示す各四角錐台側壁に現れた境界線について、これに垂直な板断面を拡大して観察した結果を Fig. 8 に示す．いずれの境界部についても、Fig. 6 からわかるように素板元板厚に近い板厚が残留している状況が確認される．これらは、予備成形で四角錐台側壁を形成するインクリメンタルフォーミングの開始点付近に相当しており、予備成形ではここから供試体外側に向かって徐々に板厚の減少が始まり、冷間加工度が連続的に増加する領域となっている．外表面は型面に接し成形されているため、板厚の不連続さは主に内表面側に形成されている．

Fig. 8 の各断面について、光学顕微鏡により結晶粒の状態を観察した結果をそれぞれ Fig. 9 に示す．どの供試体についても、予備成形範囲では結晶粒が粗大化しており、特に仕上げ成形領域との境界部では、異常に成長した結晶粒が見られる．これら結晶粒の粗大化は、超塑性成形温度へ

Fig. 5 Over views of superplastic formed article to the perfect shape

Fig. 6 Thickness variation on the articles of perfect formed from preformed sheet

Fig. 7 Piled up cut sections of perfect formed articles

の加熱により、冷間加工の間に蓄積されたひずみエネルギーが開放された結果と考えられる．予備成形範囲は一定レベルの均一な冷間加工を受けているが、これが始まる境界部には、連続的な加工度の変化領域が存在すると考えられ

Fig. 8 Cut view of boundary area on articles

Fig. 9 Optical micro graph of the boundary on formed articles

る。この領域の中で、ある大きさの加工度に対応した結晶では、ひずみエネルギーの解放に伴う粒界の複雑な再編成が起こり、異常な粗大粒が出現したものと推定される¹⁴⁾。結晶粒が粗大化した領域では、粒の回転や界面の滑りの発現は既に困難であり、超塑性変形能はほぼ失われていると考えられる。その結果この領域では、仕上げ成形での超塑性変形は発現せず、通常の塑性変形もほとんど生じず、板厚減少は軽微となったものと思われる。

この結晶粒形態の変化は、予備成形が単に局所的な板厚変化や立体化を与えるのみでなく、素板の局所的な超塑性変形能の抑制に利用できると考えられる。すなわち、超塑性成形前に部分的な冷間加工を与えることにより、素板の局所的な応力-ひずみ関係の調整が可能となることを示唆している。

3.4 超塑性変形過程

Fig. 10 に、予備成形のない平板および Fig. 3(a)~(c) に示す予備成形された供試体の超塑性変形過程を、四角錐台底辺に垂直な軸断面形状の比較により示す。予備成形したいずれの供試体についても、その変形は、四角錐台上面の四角形が浅いドーム状に膨らみ、その後徐々に型側壁への接触範囲が拡大し、四角錐の側面が形成されて行く様子がわかる (Fig. 10(b)~(d))。あたかも四角錐台上面周囲が安定

Fig. 10 Continuous deformation process on superplastic forming

Fig. 11 Over view of piled cut section on the articles of perfect formed by incremental forming

して支持された状態で変形が進んでいる。これは、平板から直接超塑性成形した場合の変形過程 (Fig. 10(a)) と同じと見なすことができる。一般に予備成形領域は、成形品の形状や成形品と型間の摩擦の影響も受けられるが、Fig. 9 に見られるように、基本的に超塑性変形能を失っており、予備成形と仕上げ成形の領域を独立して扱うことが可能であると考えられる。

3.5 スプリングバックの変化

Fig. 11 に、インクリメンタルフォーミングにより最終形状に成形した供試体と、これを超塑性成型型にセットして 0.7MPa のガス圧力を 5min 負荷した後の供試体を、四角錐台の底辺に垂直な軸での切断した断面を重ねて示す。

インクリメンタルフォーミングにより成形したままの供試体は、四角錐台の側壁面がスプリングバックにより全体に膨らみを生じている。工具からの接触加圧による強加工を受け、板表面および内部にある方向の応力差が生成された結果であると考えられる。これに対し、同供試体を超塑性成形条件で一定時間加熱、加圧保持すると、切断しても断面の歪みは見られず、型形状通りの真直度が維持されている。この結果は、短時間であっても超塑性成形環境下に置くことにより、冷間加工で生成した残留応力がほぼ完全に除去されることを示している。すなわち本加工法では高温工程が組み合わせるため、インクリメンタルフォーミングの高精度化を容易に実現できる。

Fig. 12 Micro cavities of optical micro graph in perfect formed articles

3.6 キャビティの生成

Fig. 12 に、四角錐台頂部付近の超塑性変形部のミクロ組織を示す。予備成形無しで平板から直接最終形状に超塑性成形した供試体では、厳しい変形を受けて頂部の板厚が大きく減少するため、数 μm オーダーのキャビティが多数生成されている (Fig.12 (a))。これに対し、深さ $h=150\text{mm}$ まで予備成形を行った後に超塑性成形を行った供試体では、板厚が半減した変形を受けてキャビティが生成されているが、前者に比較してその大きさは微小かつ少数である (Fig.12 (b))。本加工プロセスは、最終形状に対して超塑性変形量を節減しているため、この差は従来から知られている超塑性変形量とキャビティ生成量の関係から、至極当然の結果と言える。

キャビティの生成は、成形品の機械的特性を劣化させるため、その抑制技術は構造部材の製造工程にとって非常に有用である。Fig. 12 は板厚の調整と同時にキャビティの生成を抑制する一手法となる可能を示しており、本加工プロセスの効果的な適用は、超塑性成形品の工業的利用価値の向上に寄与できる。

4. 結 言

インクリメンタルフォーミングと超塑性成形を組み合わせた新しい加工プロセスを提案し、四角錐台の成形実験を通してその成立および成形品の板厚分布の調整に関する有効性を評価した。以下にその知見をまとめる。

- (1) インクリメンタルフォーミングを予備成形、超塑性成形を仕上げ成形とする加工プロセスは、複雑で厳しい造形を容易にすると同時に、所定の板厚配置を求められる多品種少量生産品に対して有用な製造手段となりえる。
- (2) インクリメンタルフォーミング後に超塑性成形を行うことで、スプリングバックによる歪みが矯正され、高い形状精度を得ることが容易に可能となる。
- (3) 本加工法は、予備成形による変形量の獲得により相対的に超塑性変形量を軽減できるため、キャビティ生成の抑制手法として利用できる可能性がある。
- (4) 冷間加工を受けた領域は、加工度に応じて超塑性成形時に結晶粒の成長が起こり、超塑性変形能を失う。

謝 辞

本研究は、(社)日本航空宇宙工業会の平成 20 年度委託研究として行われたことを付記し、そのご支援に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 鈴木信行・地西徹：塑性と加工，**46**-537(2005), 944-948.
- 2) 松原茂夫：同上，**35**-406(1994), 1311-1316.
- 3) 松原茂夫：同上，**42**-489(2001), 991-995.
- 4) 井関日出男：同上，**42**-489(2001), 996-1000.
- 5) 北澤君義：同上，**42**-489(2001), 1001-1007.
- 6) 松居正夫・松田文憲：同上，**42**-489(2001), 1046-1050.
- 7) 網野廣之・呂言：同上，**42**-489(2001), 1051-1055.
- 8) 北澤君義・若林昭彦・村田和也・八重嶋公郎：軽金属，**46**-2(1996), 65-70.
- 9) 北澤君義・中根正勝：同上，**47**-8(1997), 440-445.
- 10) 鈴木信行・地西徹：特許出願，特願 2006-279818.
- 11) 日本航空宇宙工業会研究報告書 No.2003(2009).
- 12) Suzuki, N., Takashina, K. & Jinishi, T. : Proceedings of 9th ICTP(2008), 247-248.
- 13) 鈴木信行・高津正秀・田辺良則・東健司：軽金属，**51**-1(2001), 18-22.
- 14) Takashina, K. & Suzuki, N. : Proceedings of 9th ICTP(2008), 573-574.