歯形工具の板厚方向圧縮によって生じたしわを利用した 金属薄板の張出し成形*

林 伸 和^{*1}, 小 林 政 教^{*1}

Stretch Forming of Sheet Metal Using Wrinkle Appeared in Compression for Thickness Direction by Tooth-Shaped Tool

Nobukazu HAYASHI^{*2} and Masanori KOBAYASHI

^{*2} Department of Mechanical Engineering, Toyota National College of Technology,
2-1 Eisei-cho, Toyota-shi, Aichi, 471-8525 Japan

For example, strain-hardened aluminum sheet has only poor stretchability. But it has still enough ductility. This study aims to give the same deformation as "stretching" for these materials not by tension in plane but compression for thickness direction. Tooth-shaped tool was made, and thin aluminum sheet was compressed between the tool and flat die. Material under the tooth yielded, flowed out into grooves next the tooth, buckled, and formed wrinkle. To check stretchability of sheet with wrinkle, strip specimen was machined out and examined. The strip did not fracture by tensile force before the wrinkle was stretched out. Finally sheet with wrinkle was pure-stretched using an elliptic-headed punch and confirmed to have very large forming depth.

Key Words: Plastic Forming, Press Working, Buckling, Formability, Stretch Forming, Tooth-Shaped Tool, Wrinkle, Forming Depth

1. 緒 論

軽量化と製造プロセスの合理化を同時に達成できる観点から、機械部品の"板金化"が注目されている⁽¹⁾⁽²⁾。板材成形では深絞りや張出しと呼ばれる加工法が中心となるが、板厚が小さくなると絞り加工ではしわ発生が深刻な問題となり、その場合は張出しに重点を置いた工程設計となる。

張出し性は材種、調質度によって大きく異なる。一般に成形性が良好であると考えられているアルミニウム材でも、Mgを多量に含有している5000系のアルミニウム合金、あるいは工業用純アルミニウムでも硬質材においては張出し性は悪い⁽³⁾。またどのような材料であっても、板厚が小さい場合は張出し性が低下することが知られている⁽⁴⁾。そこで本研究では、これら板

材のように材料自身は変形能が特別に小さいわけではないが、板面内2軸引張りによつては十分な変形が得られない材料に対し、大きな"張出し"変形を与えることができる一つの方法を提案する。考え方として、張出しと同じ板厚減少、板面積拡大という変形を、面内引張りではなく、板厚方向圧縮によって、獲得しようとするものである。

2. しわ付き板の張出しプロセスの提案

2.1 しわ付き板の張出しプロセスの概念 本研究で提案する圧縮力による張出しプロセスの概念を図1に示す。第1プロセスはしわをつくる工程である。本

Fig.1 Wrinkling and Stretching Process

* 原稿受付 2001年10月1日。

^{*1} 正員、豊田工業高等専門学校機械工学科(〒471-8525 豊田市栄生町2-1)。

E-mail: nhayashi@toyota-ct.ac.jp

Fig.2 Wrinkle formation mechanism

Fig.3 Tooth-shaped tool

研究では平面ダイスの上で歯形工具を板材に押しつけることによって、歯形工具の溝部に同心波形のしわを作り出す。第2プロセスでそのしわを、折り畳んだ提灯を伸ばすように展開することにより、所望の形に成形する2段階プロセスである。

2.2 歯形工具によるしわ創成加工 図2にしわ発生の機構を示す。歯形工具と平面ダイスで初期板厚 t のブランクを挟み、板厚方向に tc まで圧縮する。板厚減少によって加工前に歯の下にあった材料は、歯のない溝部へと押し出される。このとき板厚が小さく、圧縮量が多い場合は図2(b)に示すように折れ曲がりが発生し、波形のしわとなるが、板厚が大きく圧縮量が小さい場合は図2(c)に示すように溝部材料は単に板厚が増大すると考えられる。歯形工具の寸法を図3に示す。

円形の薄板を平らな工具間で据込み加工するとき、工具と材料間には摩擦が存在するため、圧縮力は板材の直径と板厚の比に比例して、非常に大きくなる⁽³⁾。したがって常識的には本研究で用いるような直径/板厚=250~50の条件で圧縮変形させることは、加工荷重、工具強度の観点からかなり困難である。それを本研究では工具を歯形とすることにより、容易に実現している。

板の波形状創成を歯形工具と平面ダイスの組合せで実現していることも大きな特徴である。このため上型、下型の製作においてマッチングを考える必要がなく、特に下型ダイスは平面であればよいから、製作コストの減少に多いに有効である。

Table 1 Tensile properties (mean value)

Material	Thickness (mm)	S_T (MPa)	n -value	e_L (%)
A1050-H24	0.2	148	0.004	1.5
	0.6	143	0.012	3.3
	1.0	128	0.013	6.6
A1050-O	0.6	88	0.279	36.2

S_T : Tensile strength

e_L : Total elongation (Nominal strain)

Fig.4 Experimental apparatus

ただし本研究の方法では、歯形工具の歯下のブランク厚さ tc は加工進行に伴い小さくなるが、溝部のブランク厚さはほとんど変化しない。すなわち、プロセスが進むと、ブランクの場所によって板厚に差が生じる。この点に関しては予め注意が必要である。

3. 実験条件および方法

3.1 供試材 板厚0.2, 0.6, および1.0mmのアルミニウムA1050-H24材、さらに0.6mmの材料についてはこのH24材を623K×1hで焼鈍した材料についても検討を行った(A1050-O材)。引張特性値の面内平均値(圧延方向から0°, 45° および90° 方向に測定した引張特性値 X から $\bar{X} = (X_0 + 2X_{45} + X_{90})/4$ で算出)を表1に示す。H24材は n 値が小さく、全伸びは小さい。またこのような材料は、張出し性が良好でないこと、および板厚が小さい程成形性は悪くなることがわかっている⁽³⁾。

3.2 実験装置 一辺88mmの正方ブランクを図4に示すように、平面ダイスとφ50mmの穴を持つ上プレート(板押さえ)によって挟み、歯形工具に荷重を加えた。ダイス面、歯形工具面ともにグラフアイトグリースで潤滑した。圧縮荷重は(株)島津製作所のアムスラー形万能試験機REH100形によって加えた。

4. 実験結果および考察

4.1 材種の影響 板厚0.6mmのH24材から実験を始めた。パンチ荷重を増大させると250kNまではほと

(a) View from upside

(b) Cross section

 Fig.5 Photograph of blank with wrinkle
(initial thickness, t , is 0.6mm, and thickness
under the tooth, t_c , is 0.35mm)

んどブランクは変形しないが、その後急激に変形が進行し、同時にパンチ荷重は低下した。図5にパンチ行程が0.25mm、すなわち $t_c=0.35\text{mm}$ のときに発生したしわの写真を示す。図3の工具中心部A、内側の溝部Bおよび外側の溝部Cの位置にしわが発生した。以後B部(Inner)およびC部(Outer)に生じたしわについて検討した。

図6にパンチ荷重—パンチ行程線図、図7にパンチ荷重—しわ高さ線図、図8にパンチ行程—しわ高さ線図を示す。ただし、しわ高さは、図2において距離 h とした。材種の影響を見るため、O材についても同様の実験を行った。H24材の場合、図6からパンチ行程が約0.05mmを越えるとパンチ荷重が減少し、このしわ発生は座屈現象の一つであると見ることができる。一方O材の場合、パンチ荷重は圧縮加工中減少せず、加工力からこのプロセスが座屈現象であるということはいえない。しかし、この場合も図7および図8から、パンチ荷重が約140kN、パンチ行程が約0.05mmまではしわが形成されないが、その後急速にしわ高さが大きくなることが読み取れ、H24材と同様に波形のしわを持つ板を作製することができた。

4.2 板厚の影響 板厚0.2mmおよび1.0mmのH24材の場合も同様に検討した。結果を図9—11に示す。板厚0.2mmの場合、変形開始後のパンチ荷重の低下は0.6mmの場合より顕著に現れ、容易にしわを形成することができた。また図10あるいは図11から、B部(Inner)とC部(Outer)の2つのしわ高さはよく揃ってい

 Fig.6 Effect of temper on Punch load
—Punch stroke diagram ($t=0.6\text{mm}$)

 Fig.7 Effect of temper on Wrinkle height
—Punch load diagram ($t=0.6\text{mm}$)

 Fig.8 Effect of temper on Wrinkle height
—Punch stroke diagram ($t=0.6\text{mm}$)

Fig.9 Effect of blank thickness on Punch load—Punch stroke diagram

Fig.10 Effect of blank thickness on Wrinkle height—Punch load diagram

Fig.11 Effect of blank thickness on Wrinkle height—Punch stroke diagram

Fig.12 Relation between tensile load and displacement in strip with wrinkle ($t=0.2\text{mm}$, width=5mm)

Fig.13 Profile of strip specimen with wrinkle ($t=0.2\text{mm}$, $t_c=0.1\text{mm}$, width=5mm)

ることがわかる。この結果から、一様な高さを持つ波形状のしわが必要な場合は、板厚が小さい方がよいといえる。

一方板厚が1.0mmと大きくなると、今述べたことと反対の変形挙動を示している。すなわちパンチ荷重は変形開始後も増加し続け、また2つのしわは高さが大きく異なっている。今述べた板厚増加による変形挙動の変化は、4・1で検討したO材の変形挙動と類似している。

5. しわ付き板の引張特性

5・1 しわ付き板の引張試験 前章のようにして作製したしわを持つ板の伸展特性を調べるため、しわ付き試料から短冊状の引張試験片を採取し、引張試験した。しわが創成できても、十分伸び広がる前に破断が生じるときは、本研究の狙いは達成されない。試験片は圧延方向と平行に、同心円形のしわの中心を通るように、幅5mmの短冊状に精密砥石切断機を用いて切り出した。

引張試験は、短冊試験片のしわの外側の平坦部をチ

 Fig.14 Relation between tensile load and displacement in strip with wrinkle ($t=0.6\text{mm}$)

Fig.15 Profile of elliptic-headed punch

ャック間距離68mmでつかんで行った。図12は板厚0.2mmの場合、歯形工具の歯下の板厚 t_c が0.15mm、0.13mm、および0.1mmとなるまで圧縮変形を与えたとき、短冊試験片の引張荷重とチャック変位の関係を示す。図からいずれの場合も、引張りの初期段階では小さな荷重で大きく変形しているが、チャック変位が大きくなり、ある値に達すると荷重は急激に大きくなり、破断している。図13は $t_c=0.1\text{mm}$ の場合、試験開始時および荷重が急激に増大し始めるチャック変位が10mmの試験片の断面写真を示す。破断は、波形のしわと板厚の最も小さな平坦部の繋ぎ目で生じた。これらより、しわ付き試験片は小さな引張荷重で大きく変形している領域でしわが伸ばされ、しわが伸びきる付近から荷重が増加し始め、最後に破断したことがわかる。図12から $t_c=0.1\text{mm}$ の場合の破断応力を計算すると、破断力/断面積 $=60/(0.1 \times 5)\text{N/mm}^2=120\text{MPa}$ となり、表1に示されている材料の引張強さとおおよそ一致していることが読み取れる。このことから、本研究材種のしわを持つ試験片に特に弱い部分は存在せず、しわを伸展する工程で早期に破断してしまうことがないことが確認できた。

 Fig.16 Comparison of pure stretchability between flat and wrinkled blank in elliptic-headed punch ($t=0.2\text{mm}$, t_c of wrinkled blank $=0.1\text{mm}$)

(a) Fracture specimen in normal flat blank

 (b) Stretching of blank with wrinkle in $t_c=0.1\text{mm}$

 Fig.17 Photographs of pure-stretched blanks by elliptic-headed punch ($t=0.2\text{mm}$)

図14に板厚0.6mmの場合、 t_c が0.45mm、0.4mm、および0.3mmのしわ付き短冊試験片の引張荷重とチャック変位の関係を示す。特に t_c が0.3mmのとき明瞭にその特徴が出ているが、図12の0.2mmの場合と定性的に同じ結果が得られた。

5.2 しわ付き板が簡単に破断しない理由 圧縮加工によって歯下の材料は圧縮方向と直角方向に工具から押出される。しかしそのまま自由に材料が移動できるわけではなく、隣の歯下から押出された材料とぶつかり、上方へ折れ曲がる。このようにして、しわ付き試

験片には板厚変化や曲げ変形がもたらされるが、いずれの変形も緩やかである。このことは図13(a)によく表されている。そのためしわ付き試験片の引張りにおいて、しわが伸びるまで破断が生じなかったものと理解できる。

6. しわ付き板の張出し試験

6.1 楕円パンチによる張出し試験 板厚0.2mmの場合、図15に示す直径40mmの楕円パンチ、および2重ビード付きの穴径43mm、肩半径6mmのダイスを用いた純粋張出し試験によって得られた荷重-パンチ行程線図を図16に示す。ブランクとパンチ間はグラファイトグリースを用いて潤滑した。図15の楕円パンチを使用した理由は、種々のプロファイルを持つパンチを用いて張出した結果、円周方向のしわが生じにくく、そのうえ大きな限界張出し深さ（ブランクが破断したときの張出し深さ）が得られたためである。しわを予め作製することなしで直接張出した場合は、限界張出し深さは6mmであった。一方、歯下の板厚 t_c を0.1mmまで圧縮し、しわを発生させ張出した場合は、15mmまで破断しない。

平板（しわなし）を張出して破断した場合、および $t_c=0.1\text{mm}$ のしわ付き板をパンチ行程14mmまで張出した場合の写真を図17に示す。本研究では歯形工具の歯数は3と少ない。しわ数は2で、パンチ形状としわ寸法は十分マッチングがとれておらず、パンチ頂点近傍にわずかな円周方向しわが生じている。しわ付き板の精密な張出しを行うためには、歯形工具の歯数を増加させ、しかもパンチの幾何形状とマッチさせる必要がある。詳細については、今後の課題としたい。

7. 結 論

張出し性の悪い板材に、張出し成形と同様な板面積増大、板厚減少という変形を与えるため、第1ステップとして歯形工具を用いてしわを持つ板を作製し、第2ステップでそのしわを展開するというプロセスを考案した。

板厚0.2、0.6および1.0mmの工業用純アルミニウム

H24材、および比較として板厚0.6mmの焼きなまし材を対象として、直径50mm、同心円形状に歯幅3mm、溝幅3mm寸法の歯形工具を作製し、平面ダイスとの間で板厚方向圧縮加工を行った結果、

- (1) いずれの場合もしわが発生し、同心波形状のしわを持つ板を作製することができた。
- (2) 硬質材で板厚が小さいとき、パンチ行程増大に伴いパンチ荷重が小さくなったことから、(1)のしわ発生は座屈現象の1つと判断された。

また、板厚0.2mmのH24材の場合、しわ付き板の伸展特性を調べたところ、

- (3) 短冊状に切り出したしわ付き板の引張試験によって、しわがかなり伸びるまで破断しないことを確認した。
- (4) 楕円パンチによる純粋張出し試験の結果、限界張出し深さは、通常の平板の場合は6mm、しわ付き板では15mmと非常に大きな値が得られた。

本報告の一部は豊田工業高等専門学校の卒業研究として行われたものである。実験遂行は卒研 生 倉橋 弘君、近藤昌三郎君に負うところが大きい。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 前田昭宏・荒木邦彦、金属製歯形部品の成形技術、塑性と加工、39-445 (1998), 106-110.
- (2) 加藤浩三・近藤一義・林伸和、深絞り容器壁部の板厚増加を伴う型鍛造、機論、65-634, C(1999), 2555-2560.
- (3) 河合望・森敏彦・林伸和、非熱処理形アルミニウム合金板のひずみ硬化則に関する考察、機論、52-477, C(1987), 1682-1687.
- (4) 小林政教・黒崎靖・河合望、金属薄板の純粋張出し深さに及ぼす板厚の影響、機論、55-516, C(1989), 2221-2227.
- (5) 例えば新版塑性加工学、河合望、朝倉書店、(1988), 137.