平坦化された 5052 アルミニウム合金薄板の
インクリメンタル張出成形の可能性

高野 拓樹*・北澤 君義*

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 58, No. 10 (2008), pp. 509-515

Possibility of incremental forming of flattened 5052 aluminum alloy sheets

Hiroki TAKANO* and Kimiyoshi KITAZAWA*

For CO₂ emission reduction, a cold recycling process of sheet metal wastes has been proposed. In this process, a bent sheet of sheet metal waste is unbent into a sheet metal with a triangular residual corner, and this residual corner is incrementally flattened. The thinned bent corner can be thickened during the incremental flattening. However, this flattened sheet has a groove on the center of the thickened region, i.e., the thickness of the bent corner after flattening is thinner than the thickness of the surroundings. In the cold recycling, this groove should influence on the forming limit of the flattened sheet metal. Here, we focused on this groove and experimentally investigated the possibility of cold recycling of 5052 aluminum alloy sheets. Although the forming limit of the flattened 5052 aluminum alloy sheet was decreased in that of uniform 5052 alloy sheet, this flattened sheet can be formed into conical shells by incremental forming. Furthermore, it was found that the groove on the thickened region was shallow because of shortening the length of the triangular side of the residual corner, and then the forming limit of this flattened sheet was increased. These experimental results suggest that the forming limit of the flattened 5052 aluminum alloy sheet should be close to that of a uniform 5052 alloy sheet as the groove is shallower.

(Received May 1, 2008 Accepted July 1, 2008)

Keywords: 5052 aluminum alloy sheet, cold recycling process, incremental forming, flattening, formability

1. 緒 言

地球温暖化防止の観点から、近年、自動車へのアルミニウム合金の適用が進んでおり、製品使用時の CO₂ 排出量の削減が可能となりつつある。これらの製品をライフサイクルで考えると、製品使用時の CO₂ 排出量だけでなく、使用後のリサイクル時に発生する CO₂ 排出量を削減することが重要になる。金属薄板製品は、通常、溶解過程を経てリサイクルされる。この溶解過程では、莫大なエネルギーが消費され、大量の CO₂ が排出される¹⁾。もし、これらの金属薄板製品を非加熱でリサイクルすることが可能になれば、CO₂ 排出量を大幅に削減できる。このような観点から、金属薄板製品を非加熱で元の薄板形状に戻す技術が検討されはじめている^{2~4)}。よく知られているように、金属筐体の曲げコーナ部は減肉している⁵⁾。このため、金属筐体を固体状態で曲げ戻すと、この曲げコーナ部に対応した部分が減肉したままの薄板となってしまう。そこで、我々はこの減肉した曲げコーナ部を平坦化と同時に増肉化させるインクリメンタル平坦化プロセスを提案した⁴⁾。このプロセスでは、Fig. 1 に示すように、まず、金属筐体から曲げ板を取り出す。次に、曲げコーナ部を残した状態で曲げ戻し、残存コーナ部を有する薄板を作成する。そして、この残存コーナ部にインクリメンタル平坦化処理を施して増肉化させる。すなわち、この平坦化過程では、残存

コーナ部の斜辺の体積が底辺へ移動するため、減肉した曲げコーナ部は増肉化する。このようにして平坦化された薄板を別の製品形状に成形するコールドリサイクルプロセスを既報で提案し、1050 アルミニウム薄板のコールドリサイクルの可能性について明らかにしている⁶⁾。この 1050 の場合、Fig. 2 (a) に示すように、平坦化後の曲げコーナ部中央の B 点の板厚は、曲げコーナ部中央の平坦化前の減肉した状態における板厚約 0.91 mm の状態から、平坦化後には約 1.18 mm の状態まで増肉化している。しかし、5052 アルミニウム合金薄板の場合、同図 (b) に示すように、曲げコーナ部中央の B 点の板厚は、平坦化前の減肉した状態の板厚約 0.84 mm の状態から、平坦化後には約 0.98 mm の状態までの増肉化にとどまっている⁷⁾。このように曲げコーナ部中央の板厚は増大するものの、B 点よりもその周囲の板厚の増加の方が大きいため、平坦化後の板厚分布は二山形となり、増肉部中央に溝をもつ薄板になってしまう。特に、5052 の溝は 1050 の溝よりも深い。この溝は一種の表面きずとしてとらえることもできる。表面きずは薄板の成形限界に影響を及ぼす⁸⁾。このため、コールドリサイクルにおける 5052 の成形限界は、1050 の成形限界よりも低いことが予想される。しかし、実用上の観点から重要となるアルミニウム合金薄板のコールドリサイクルの可能性については明らかにされていない。

そこで本研究では、5052 合金薄板のコールドリサイクルの

* 信州大学工学部環境機能工学科 (〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1)。Department of Environmental Science and Technology, Faculty of Engineering, Shinshu University (4-17-1 Wakasato, Nagano-shi, Nagano 380-8553).

可能性を明らかにする目的で、平坦化された 5052 合金薄板のインクリメンタル張出成形の成形限界について実験的に検討した。そして、得られた実験結果をもとに、5052 合金薄板のコールドリサイクルにおけるインクリメンタル張出成形の成形限界の上限について考察した。

2. 実験方法

2.1 試料薄板

実験には、市販のアルミニウム合金薄板 (A5052-H34, 板厚 $t_0=1.0\text{ mm}$) とアルミニウム薄板 (A1050-H24, 板厚 $t_0=1.0\text{ mm}$) を用いた。Table 1 にこれらの薄板の機械的性質を

Fig. 1 Cold recycling process of sheet metal waste.

Fig. 2 Thickness distributions of flattened sheet metal ($F=10\text{ N}$, $W=10\text{ mm}$, $\omega=36\text{ rpm}$, $V_f=35\text{ mm/min}$).

Table 1 Mechanical properties of materials used

Materials	Thickness t_0 (mm)	Yield stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile strength σ_B (MPa)	Work hardening exponent, n	C (MPa)
A5052-H34	1.0	211	266	0.10	380
A1050-H24	1.0	101	109	0.05	140

$$\sigma = C\epsilon^n, \sigma: \text{stress}, \epsilon: \text{strain}$$

示す。これらの薄板を一辺 230 mm の正方形に切断後、Fig. 3(a) に示すように、曲げ半径 $R=0.01\text{ mm}$ 、曲げ角度 $\alpha=90^\circ$ の条件で、プレスブレーキを用いて曲げ加工を施し、残存コーナ部を有する薄板を作成した。残存コーナ部の斜辺の長さ W は、10 mm と 5 mm の 2 条件に設定した。なお、 $W=5\text{ mm}$ は、本研究で用いたプレスブレーキで加工可能な W の最小値である。これらの残存コーナ部に同図 (b) に示すようにインクリメンタル平坦化を施し試料薄板を作成した。ここでは、潤滑剤として、環境配慮の観点から、非塩素系切削油 (粘度: $1.82 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) を用い、工具と試料薄板の両方に塗布した。また、平坦化条件を、工具回転数 $\omega=36\text{ rpm}$ 、薄板送り速度 $V_f=35\text{ mm/min}$ 、ボルト締め付け力 F を 200 N に設定した。 $F=200\text{ N}$ は、ボルトを締付けるために用いたトルクレンチの最大トルクである。このようにして平坦化された 5052 の板厚分布を Fig. 4 に示す。なお、同図中に $F=200\text{ N}$ の場合と予備実験で検討した $F=10\text{ N}$ の場合の板厚分布を示す。 $F=200\text{ N}$ にすることにより、問題となる B 点の板厚は、

(a) Shape and dimensions of a sheet metal with a residual corner

(b) Incremental flattening

Fig. 3 Incremental flattening of a sheet metal with a residual corner.

Fig. 4 Influence of the blank holding force on thickness distributions of flattened 5052 aluminum alloy sheets ($\omega=36$ rpm, $V_f=35$ mm/min, $\circ$: $F=10$ N, $\bullet$: $F=200$ N).

同図 (a) に示す $W=10$ mm と同図 (b) に示す $W=5$ mm のいずれの場合においても増大している。このため、ここでは F を 200 N に設定した。

2.2 インクリメンタル張出成形条件

平坦化された薄板を、Fig. 5(a) に示すように CNC インクリメンタル張出成形機を用いて円すい台状シェルに成形した。ここでは、円すい台の底面半径を 85 mm とし、円すい台の半頂角 β を 5° 間隔で 20° から 55° までの範囲に設定した。シェル側壁に付与されたひずみが、サイン則⁹⁾に従う場合、子午線方向ひずみ ε_ϕ は次式で与えられる。

$$\varepsilon_\phi = -\ln(\sin \beta) \quad (1)$$

本研究では、先端が半球状になった直径 10 mm の棒状工具を用いた。この棒状工具が、残存コーナ部の凹部側であった面に接触するように張出成形を施した。この成形では、同図 (b) に示すように、1 パスの工具パススケジュールで試料薄板の円すい台状張出成形を行い、工具移動速度 V_p を 13.2 mm/min、試料薄板回転数 N を 85 rpm に設定した。潤滑剤には、高粘度プレス油 (粘度: 7.34×10^{-4} m²/s) を用い、棒状工具と試料薄板の双方に塗布した。また、成形限界に対する増肉部の配置条件の影響を調べるため、同図 (c) に示すように、増肉部がシェルの頂点を通るように配置した場合 (以下、A タイプと呼ぶ) と、増肉部がシェルの側壁を通るように配置した場合 (以下、B タイプと呼ぶ) の 2 種類の配置条件で、試料薄板の成形限界を求めた。比較のため、均一な薄板の成形限界についても求めた。

2.3 ひずみの測定

本研究では、格子線ひずみ解析法を用いてシェル側壁に付与されたひずみを測定した。Fig. 6 に示すように、まず、成形前の試料薄板に、線幅 1 mm の油性ペンを用いて 1 mm 間隔で格子を描いた。次に、デジタル工具顕微鏡を用いて、成形前後において、対応する格子の寸法を測定し、子午線方向ひずみ ε_ϕ 、円周方向ひずみ ε_θ を次式を用いて算出した。

$$\varepsilon_\theta = \ln\left(\frac{Y}{Y_0}\right) \quad (2)$$

(a) CNC incremental forming machine

(b) Conical shell geometry and tool pass schedule

(c) Array conditions of thickened region

Fig. 5 Incremental forming of flattened sheet metal using CNC incremental forming machine.

Fig. 6 Grid method used for strain measurement.

$$\varepsilon_\phi = \ln\left(\frac{X}{X_0}\right) \quad (3)$$

ここで、 X_0 と X は、それぞれ、成形前後の円周方向の線の幅であり、 Y_0 と Y は、それぞれ、成形前後の子午線方向の線の幅である。また、ポイントマイクロメータを用いて同図中の P 点における板厚を測定し、板厚ひずみ ε_t を、次式を用

いて算出した。

$$\varepsilon_t = \ln \left(\frac{t}{t_0} \right) \quad (4)$$

ここで、 t_0 と t は、それぞれ成形前後の板厚である。

3. 実験結果および考察

3.1 5052 アルミニウム合金薄板のコールドリサイクルの可能性

$W=10$ mm の条件で平坦化された 5052 の円すい台状張出成形の成形結果を **Fig. 7** に示す。A タイプの成形結果を同図 (a) に、B タイプの成形結果を同図 (b) に、比較のために用いた均一な薄板の成形結果を同図 (c) に、それぞれ示す。まず、A タイプの場合、同図 (a1) に示すように半頂角 $\beta=45^\circ$ のシェルの成形が可能であり、同図 (a2) に示すように $\beta=40^\circ$ になるとクラックが増肉部中央の溝 (Fig. 4 (a) の B 点に対応) から発生し、この溝に沿って子午線方向に伝播した。この成形限界は、同図 (c) に示す均一な薄板の成形限界と比較すると 15° 低いものの、A タイプの場合のインクリメンタル張出成形の可能性が初めて明らかになった。次に、B タイプの場合、同図 (b1) に示すように、半頂角 $\beta=55^\circ$ のシェルの成形が可能であり、同図 (a2) に示すように $\beta=50^\circ$ になるとクラックが増肉部中央の溝から発生し、この溝に沿って円周方向に伝播した。この成形限界は、同図 (c) に示す均一な薄板の成形限界と比較すると 25° 低いものの、B タイプの場合のインクリメンタル張出成形の可能性が初めて明らかになった。このように、A タイプと B タイプで成形限界は異なるものの、 $W=10$ mm の条件で平坦化された 5052 のインクリメンタル張出成形の可能性が初めて明らかになった。この結果は、5052 のコールドリサイクルの可能性を示している。

3.2 成形限界に対する W の影響

$W=5$ mm の条件で平坦化された 5052 の円すい台状張出成形の成形結果を **Fig. 8** に示す。A タイプの成形結果を同図 (a) に、B タイプの成形結果を同図 (b) に、それぞれ示す。まず、A タイプの場合、同図 (a1) に示すように半頂角 $\beta=40^\circ$ のシェルの成形が可能であり、同図 (a2) に示すように $\beta=35^\circ$ になるとクラックが増肉部中央の溝 (Fig. 4 (b) の B 点に対応) から発生し、この溝に沿って子午線方向に伝播した。この成形限界は、Fig. 7 (c) に示した均一な薄板の成形限界よりも 10° 低い。B タイプの場合、同図 (b1) に示すように、半頂角 $\beta=50^\circ$ のシェルの成形が可能であり、同図 (a2) に示すように $\beta=45^\circ$ になるとクラックが増肉部中央の溝から発生し、この溝に沿って円周方向に伝播した。この成形限界は、Fig. 7 (c) に示した均一な薄板の成形限界よりも 20° 低い。このように、A タイプと B タイプで成形限界は異なるものの、 $W=5$ mm の条件についても平坦化された 5052 のインクリメンタル張出成形の可能性が明らかになった。この $W=5$ mm の場合の成形限界は、Fig. 7 に示した $W=10$ mm の場合の成形限界よりも高い。したがって、 W を短くし、増肉部中央の溝を浅くすることにより、平坦化された 5052 の成形限界は均一な 5052 の成形限界に近づくものと思われる。

3.3 増肉部周辺のひずみ分布に対する W の影響

上述のように、 W を短くし、増肉部中央の溝 (Fig. 4 の B

Fig. 7 Conical shells formed by incremental forming (Flattened sheet metal: A5052-H34, $W=10$ mm, arrows indicate cracks).

Fig. 8 Conical shells formed by incremental forming (Flattened sheet metal: A5052-H34, $W=10$ mm, arrows indicate cracks).

点に対応) を浅くすることにより平坦化された 5052 の成形限界は向上した。また、破断した条件では、いずれの W においてもクラックは増肉部中央の溝から発生した。したがって、この溝にひずみが集中し破断している可能性がある。そこで、成形限界に近い条件で増肉部周辺のひずみ分布を求めた。A タイプの増肉部周辺のひずみ分布を **Fig. 9** に示す。同図中の実線は、サイン則から計算されたひずみである。また、A 点と C 点は増肉部と素板部の境界であり、B 点は増肉部中

央の溝である。A タイプの場合、Fig. 7(a2) と Fig. 8(a2) に示したように、クラックは増肉部中央の溝に沿って子午線方向に伝播した。この結果は、溝近傍で円周方向ひずみ ε_θ のひずみ集中が生じていることを示唆している。そこで、この ε_θ に注目すると、同図 (a) に示すように $W=10\text{mm}$ の条件では、 ε_θ はサイン則の値 ($\varepsilon_\theta=0$) との差が増肉部中央の溝 B 点の場所約 0.08 となり最大値になっている。しかし、同図 (b) に示すように、 $W=5\text{mm}$ の条件では、B 点の ε_θ はサイン則の値との差が約 0.04 となり、 $W=10\text{mm}$ の場合の半分に

なっている。この結果は、 W を短くすることにより溝へのひずみ集中が減少することを示唆している。B タイプの増肉部周辺のひずみ分布を Fig. 10 に示す。B タイプの場合、Fig. 7(a1) と Fig. 8(a1) に示したように、クラックは増肉部中央の溝に沿って円周方向に伝播した。この結果は、溝近傍で子午線方向ひずみ ε_ϕ のひずみ集中が生じていることを示唆している。そこで、子午線方向ひずみ ε_ϕ に注目すると、同図 (a) に示すように $W=10\text{mm}$ の条件では、 ε_ϕ はサイン則の値 ($\varepsilon_\phi=0.19$) との差が増肉部中央の溝 B 点の場所 0.06 となり

Fig. 9 Comparison of measured strain components with calculated strain components. Half-apex angle β of type A shell is 45° . Positions A and C denote the boundaries between the thickened and original regions. Position B denote the center of the thickened regions (○●●: measured strain components, —: sine law).

Fig. 10 Comparison of measured strain components with calculated strain components. Half-apex angle β of type B shell is 55° . Positions A and C denote the boundaries between the thickened and original regions. Position B denote the center of the thickened regions (○●●: measured strain components, —: sine law).

Fig. 11 Thickness distributions of flattened 1050 aluminum sheet ($F=200$ N, $\omega=36$ rpm, $V_f=35$ mm/min).

最大値になっている。しかし、同図 (b) に示すように $W=5$ mm の条件では、B 点の ε_ϕ はサイン則の値との差が約 0.03 となり、 $W=10$ mm の場合の半分になっている。このように、A タイプと B タイプのいずれのタイプにおいても、 W を短くし増肉部中央の溝を浅くすることにより、この溝へのひずみ集中が減少した。このため、 $W=5$ mm の場合の成形限界は、 $W=10$ mm の成形限界よりも高くなったと考えられる。

3.4 成形限界の上限

W を 5 mm に設定し、増肉部中央の溝を浅くすることにより、平坦化された 5052 のインクリメンタル張出成形の成形限界が向上した。もし、5052 の増肉部中央の板厚を増大させ、この溝をさらに浅くすることが可能になれば、この 5052 の成形限界は、成形限界の上限である均一な 5052 の成形限界に近づく可能性がある。ところで、Fig. 2 に示したように 1050 の溝は 5052 の溝よりも浅い。したがって、1050 を $W=5$ mm の条件で平坦化すれば、この溝はさらに浅くなるはずである。そこで、この 1050 について、 $W=5$ mm, $F=200$ N, $\omega=36$ rpm の条件で平坦化処理を施し、インクリメンタル張出成形の成形限界を求めた。なお、比較のため、 $W=10$ mm の条件で平坦化された 1050 の成形限界についても求めた。

Fig. 11 に、インクリメンタル平坦化された 1050 の板厚分布を示す。同図 (a) に示すように $W=10$ mm の場合、板厚分布は二山形となるものの、曲げコーナ部中央の B 点の板厚は、Fig. 2 (a) に示した B 点の板厚よりも増大し、溝は浅くなっている。一方、 $W=5$ mm の場合、同図 (b) に示すように、曲げコーナ部中央の B 点の板厚は、 $W=10$ mm の場合と同程度であるものの、板厚分布は一山形になった。この一山形になった $W=5$ mm の条件で平坦化された 1050 の円すい台状張出成形の成形結果を Fig. 12 に示す。同図 (a) に示す A タイプ、同図 (b) に示す B タイプのいずれのタイプも、同図 (c) に示す均一な薄板の成形限界と一致した。1050 と 5052 の成形限界を Table 2 に示す。一山形となった $W=5$ mm の条件で平坦化された 1050 の成形限界は、増肉部の配置条件にかかわらず、均一な 1050 の成形限界と一致した。したがって、平坦化された 5052 の増肉部の板厚分布を 1050 のように一山形にすることが可能となれば、コールドリサイクルにおける 5052 のインクリメンタル張出成形の成形限界は、均一な 5052 のインクリメンタル張出成形の成形限界に近づくも

Fig. 12 Conical shells formed by incremental forming (Flattened sheet metal: A1050-H24, $W=5$ mm, arrows indicate cracks).

のと思われる。

4. 結 言

5052 アルミニウム合金薄板のコールドリサイクルの可能性を明らかにする目的で、インクリメンタル平坦化された 5052 インクリメンタル張出成形挙動を明らかにし、以下の結果を得た。

(1) 残存コーナ部の斜辺の長さ W が 10 mm の場合、A タイプのシェルは円すい台の半頂角 β が約 45° 以上の条件で成形可能であり、B タイプのシェルは β が約 55° 以上の条件で成形可能であった。 W が 5 mm の場合、A タイプのシェルは β が約 40° 以上の条件で成形可能であり、B タイプのシェルは β が約 45° 以上の条件で成形可能であった。このように 5052 アルミニウム合金薄板のコールドリサイクルの可能性が初めて明らかになった。

(2) W を短くし、増肉部中央の溝を浅くすることにより、平坦化された 5052 の成形限界が向上した。しかし、これらの成形限界は、均一な 5052 の成形限界よりも低い。

(3) $W=5$ mm の条件で、1050 を平坦化した場合、平坦化後の増肉部の板厚分布は一山形になった。また、この平坦化された 1050 の成形限界は均一な 1050 の成形限界と一致した。したがって、5052 の板厚分布を 1050 のように一山形にできれば、コールドリサイクルにおける 5052 の成形限界は均一な 5052 の成形限界に近づくものと思われる。

本研究は、平成 19 年度天田金属加工機械技術振興財団研究助成 (AF-2007035) をもとに行われた。

Table 2 Forming limit of incremental forming of flattened sheet metals

Sheet metal		Type	W (mm)	Strain, ϵ_ϕ (%)									
				20		40		60		80		100	
A1050-H24	Uniform sheet metal	—	—	○	○	○	○	○	○	○		●	
	Flattened sheet metal	A	5	○	○	○	○	○	○	○		●	
			10	○	○	○	○	○	○	○		●	
		B	5	○	○	○	○	○	○	○		●	
			10	○	○	○	○	○	●	●	●	●	
	Uniform sheet metal	—	—	○	○	○	○	○	○		●	●	
A5052-H34	Flattened sheet metal	A	5	○	○	○	○	●	●	●	●	●	
			10	○	○	○	●	●	●	●	●	●	
		B	5	○	○	●	●	●	●	●	●	●	
			10	○	●	●	●	●	●	●	●	●	
	Uniform sheet metal	—	—	○	○	○	○	○	○		●	●	
				○	○	○	○	○	○		●	●	

●: Crack, ○: Success.

参 考 文 献

- 1) G. Lazzaro, C. Atzori: Light Metals, Proc. TMS Annual Meeting, (1992), 1379–1384.
- 2) 畑中伸夫, コンソルショ ナモコ, 高倉章雄, 飯塚高志, 山口克彦: 軽金属, **56** (2006), 45–50.
- 3) 畑中伸夫, コンソルショ ナモコ, 高倉章雄, 飯塚高志, 山口克彦: 軽金属, **56** (2006), 221–225.
- 4) 高野拓樹, 北澤君義, 山本 晃, 丸谷 苗: 軽金属, **57** (2007), 234–239.
- 5) 益田森治: 薄板の曲げ加工, 誠文堂新光社 (1958), 16–18.
- 6) H. Takano, K. Kitazawa and T. Goto: Int. J. Mach. Tools Manuf., **48** (2008), 477–482.
- 7) 高野拓樹, 北澤君義: 平成 19 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2007), 89–190.
- 8) Z. Marciniak and K. Kuczyński: Int. J. Mech. Sci., **9** (1967), 609–620.
- 9) S. Kalpakcioglu: J. Eng. Ind., Trans. ASME, **83** (1961), 125–130.