

# 非溶解プロセスによる金属薄板廃棄物の リサイクルに関する研究

信州大学工学部 環境機能工学科

助手 高野拓樹

(平成 19 年度奨励研究助成 AF-2007035)

キーワード：コールドリサイクルプロセス、金属薄板廃棄物、インクリメンタルフォーミング

## 1. 研究目的と背景

金属薄板からプレス成形により製造された家電製品筐体や自動車ボディパネルなどの金属薄板製品は、通常、使用後に溶解工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CO<sub>2</sub>が排出される<sup>1)</sup>。図1に示すように、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、CO<sub>2</sub>排出量を大幅に削減できるはずである。本研究では、この非加熱プロセスをコールドリサイクルプロセスと呼ぶことにする<sup>2)</sup>。

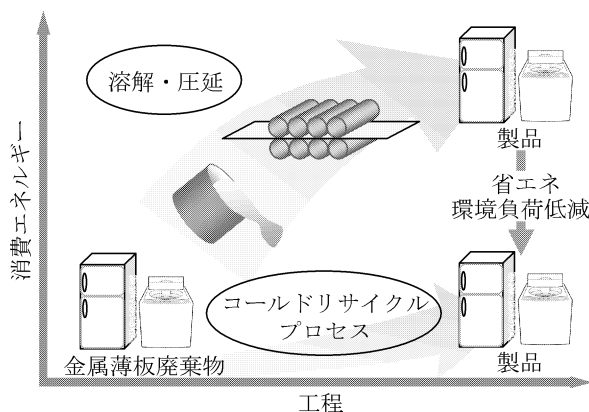


図1 金属薄板廃棄物のリサイクルプロセス

塑性加工の観点から見ると、このコールドリサイクルプロセスを、筐体を薄板に戻す平坦化プロセスと平坦化された薄板の再成形という2つのプロセスとしてとらえることができる。まず、第一のプロセスである平坦化では、筐体製造時の曲げ加工によって筐体のコーナー部はすでに減肉しているため<sup>3)</sup>、そのまま曲げ戻すと、減肉部を有する薄板になるという課題がある。このため、平坦化と同時に減肉部の増肉化を可能にする新しい塑性加工技術の開発が必要になる。次に、第2のプロセスである再成形については、平坦化された不均一な薄板の塑性加工としてとらえることができる。塑性加工では、均一な薄板を成形素材としてきたため、不均一な薄板の成形については、次の数例を除くとほとんど明らかにされていない。すなわち、プレス絞り成形では、自動車ボディパネル等の製造で用いられるテーラードブランクの成形について報告されているのみであり<sup>4)</sup>、リサイクルを対象とした不均一な薄板の再成形については明らかにされていない。また、プレス張出し成形では、Marciniak<sup>8)</sup>らにより明らかにされているように、ごくわずかな初期不整の存在が薄板の成形限界を著しく低下させるため、プレス張出し成形による不均一な薄板の成形は極め

て難しい。一方、金型を用いない張出しタイプの成形法として1990年代にわが国で誕生したインクリメンタルフォーミングについては、逐次ひずみ配分効果の存在により、溶接板<sup>9)</sup>や多孔板<sup>10)</sup>などの不均一な薄板の張出し成形が可能になることが明らかにされはじめている。しかし、リサイクルを対象とした不均一な薄板のインクリメンタル成形の可能性については明らかにされていない。

このような背景のもと、本研究は、従来のリサイクル時の大量のCO<sub>2</sub>排出という問題を塑性加工の観点から解決するコールドリサイクルプロセスを提案し、このプロセスの可能性について実験的に明らかにするものである。

## 2. コールドリサイクルプロセスの提案

### 2.1 インクリメンタル平坦化

上述のように、コールドリサイクルの第1プロセスである平坦化では、減肉した曲げコーナー部の増肉化が課題である。この課題を解決するため、インクリメンタル平坦化プロセスを提案した<sup>11)</sup>。図2に示すように、このプロセスではまず、金属筐体を解体し、曲げ板を取り出す。次に、曲げコーナー部を残した状態で曲げ戻し、残存コーナー部を有する薄板を取り出す。そして、この残存コーナー部に平坦化を施す。

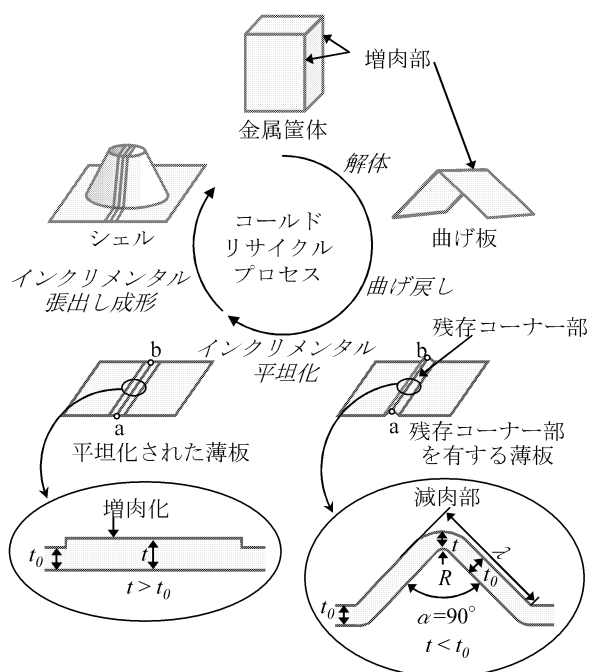


図2 コールドリサイクルプロセス

同図中に示すように、残存コーナー部の斜辺の体積が底辺へ移動するため、減肉部の増肉化が可能になる。本研究では、アルミニウム合金薄板 (A5052-H24, 板厚  $t_0=1.0$  mm) と市販のアルミニウム薄板 (A1050-H24, 板厚  $t_0=1.0$  mm) の2種類の薄板を用いた。これらの薄板を1辺230 mmの正方形に切断後、プレスブレーキを用いて、曲げ角度  $\alpha=90^\circ$ 、曲げ半径  $R=0.01$  mm, 斜辺の長さ  $\lambda=5$  mmの形状に曲げ加工を施し、残存コーナー部を有する薄板を作成した。この残存コーナー部は、図3(a)に示す、新たに開発したインクリメンタル平坦化装置によって平坦化された。この装置は、汎用の横フライス板にブラネタリー形状の工具を装備したものである。同図(b)に示すように、この工具は、6つの工具が回転軸の周りに配置された構造になっている。ここでは、工具回転数  $\omega=36$  rpm, 試料薄板の送り速度  $V_f=35$  mm/min, 試料薄板の拘束力  $F=200$  Nの条件に設定し、潤滑剤として非塩素系切削油 (粘度 18.2 cSt) を用い、残存コーナー部に平坦化を施した。

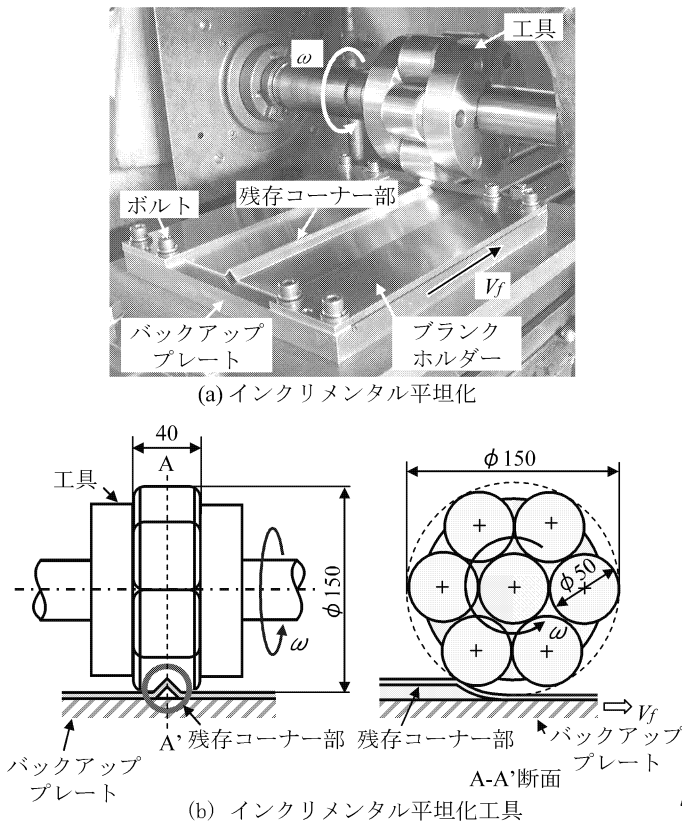


図3 残存コーナー部のインクリメンタル平坦化

## 2.2 平坦化された薄板のインクリメンタル張出し成形

コールドリサイクルの第2プロセスである再成形では、平坦化された不均一な薄板の成形性が課題となる。そこで本研究では、図4(a)に示すように、CNC インクリメンタル張出し成形機を用いて、平坦化された薄板から円すい台状シェルを作成し、薄板の成形限界を求めた。ここでは、円すい台の底面直径を85 mmとし、円すい台の半頂各  $\beta$  を5°間隔で20°から55°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<sup>12)</sup>に従う場合、子午線方向ひずみ  $\varepsilon_\phi$  は次式で表される。

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

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張出し成形を行い、工具移動送り速度  $V_p=13.2$  mm/min, 薄板回転数  $N=85$  rpm に設定した。潤滑剤には、高粘度プレス油 (粘度: 734 cSt) を用い、工具と薄板の両方に塗布した。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、増肉部がシェルの中央を通るようにした場合 (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した場合 (以下、Bタイプと呼ぶ) の2種類の配置条件で、平坦化された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も求めた。

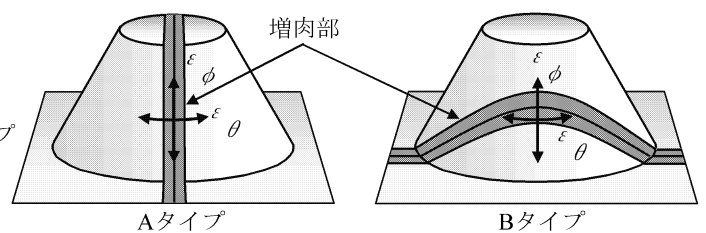
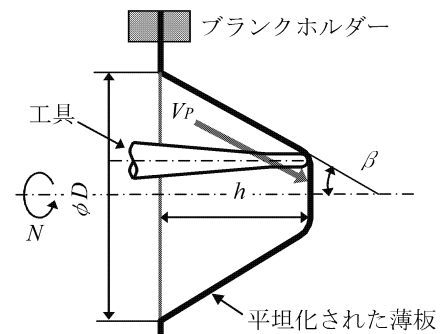
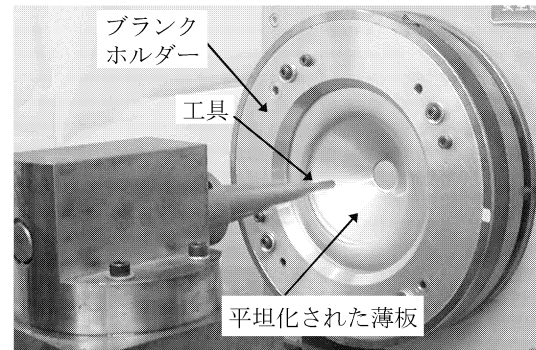


図4 平坦化された薄板のインクリメンタル張出し成形

## 3. 実験結果および成果

### 3.1 減肉した曲げコーナー部の増肉化

図5に、インクリメンタル平坦化された薄板の外観を示す。5052 アルミニウム合金薄板と1050 アルミニウム合金のいずれの薄板も、同図(a2)および(b2)に示すように、残存コーナー部は完全に平坦化された。これらの平坦化された薄板の板厚分布を図6に示す。5052 アルミニウム合金薄板の場合、同図(a)に示すように、板厚分布は二山形となり、溝を有する薄板になってしまうものの、課題となる曲げコーナー部B点の板厚は、約1.10 mmまで増肉化し

た。一方、1050 アルミニウム薄板の場合、同図(b)に示すように、板厚分布は一山形となり、B 点の板厚は、約 1.24 mm まで増肉化した。このように、インクリメンタル平坦化の適用により、コールドリサイクルにおける第 1 プロセスの課題であった減肉した曲げコーナー部の増肉化が可能となった<sup>13,14)</sup>。なお、本研究では、残存コーナー部の平坦化手法として、プレス成形や圧延を検討しているものの、これらの手法では、減肉した曲げコーナー部を初期板厚以上に増肉化できないことを明らかにしている<sup>15)</sup>。

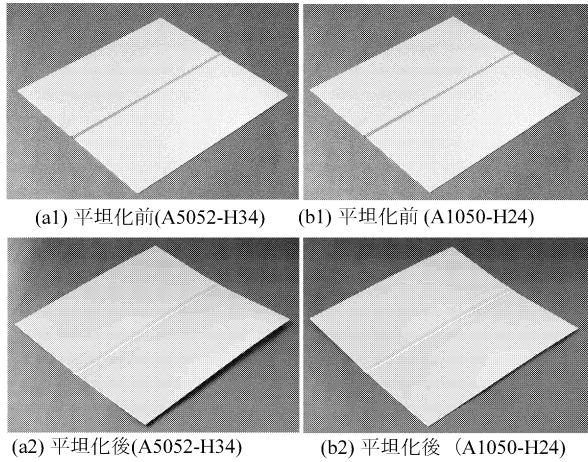


図5 インクリメンタル平坦化された薄板の外観

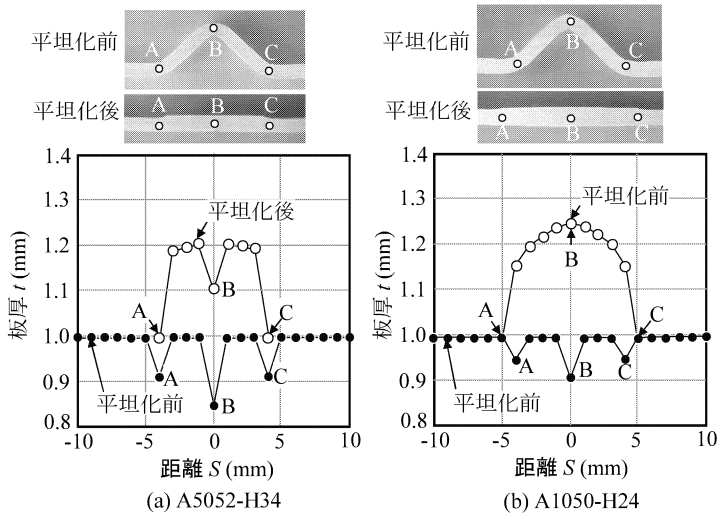


図6 平坦化された薄板の板厚分布

### 3.2 平坦化された薄板の成形限界

平坦化された 5052 アルミニウム薄板のインクリメンタル張出し成形結果を図 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(図 6(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、図(c)に示した均一な薄板の成形限界よりも  $10^\circ$  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、図 7(c)に示した均一

な薄板の成形限界よりも  $20^\circ$  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、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し成形が可能であることが明らかとなった。

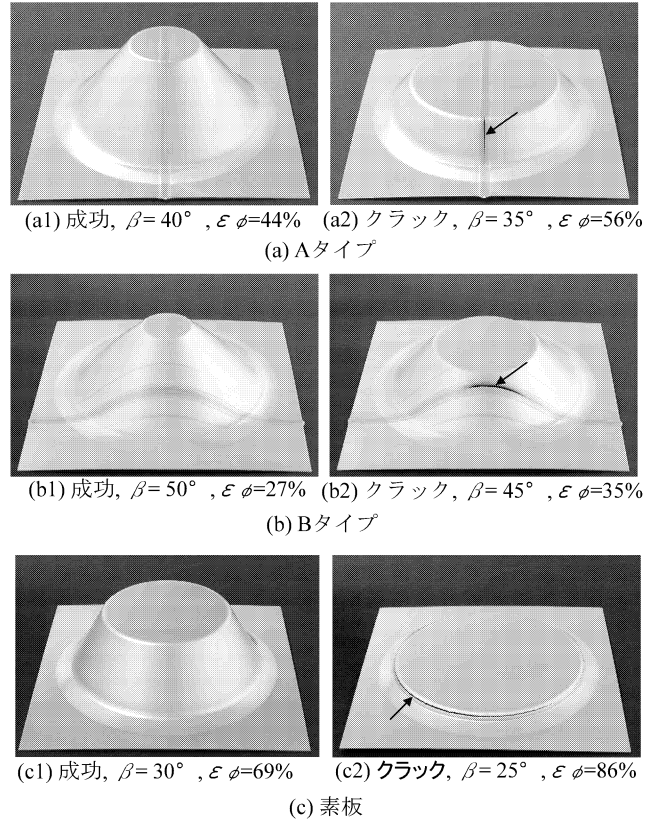


図7 平坦化された薄板の成形限界に対する増肉部配置の影響 (A5052-H34, 矢印はクラックを示す)。

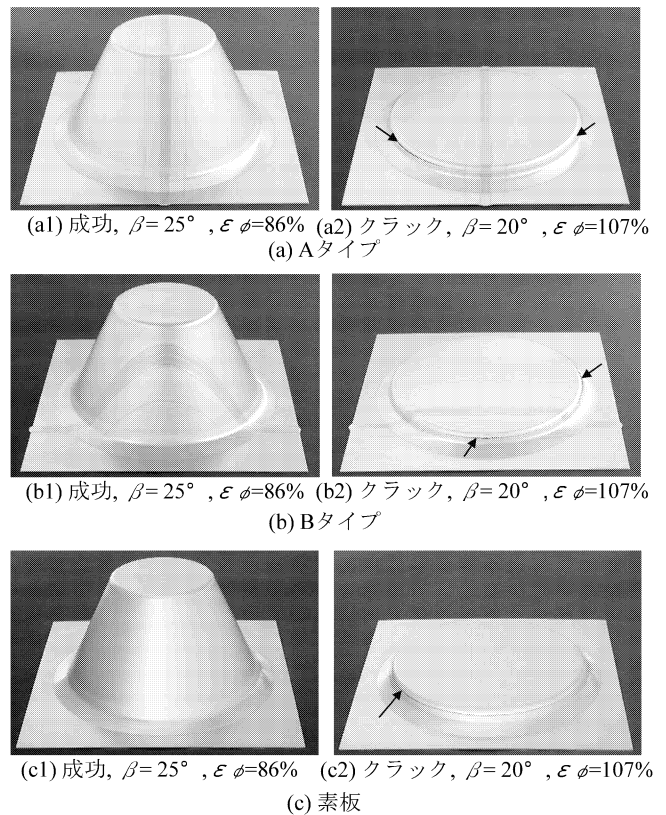


図8 平坦化された薄板の成形限界に対する増肉部配置の影響 (A1050-H24, 矢印はクラックを示す)。

平坦化された 1050 アルミニウム薄板のインクリメンタル張出し成形の成形結果を図 8 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. このように, 1050 アルミニウム薄板の場合, 平坦化された薄板の成形限界は増肉部の配置条件の影響を受けず, しかも, この成形限界は, 均一な薄板の成形限界と一致した.

これらの成形限界を表 1 にまとめる. 以上の結果は, コールドリサイクルにおける第 2 プロセスの課題であった平坦化された薄板の再成形が可能であることを示唆している<sup>16)</sup>.

表1 平坦化された薄板のインクリメンタル張出し成形限界

薄板	タイプ	ひずみ $\epsilon_\phi$ (%)									
		20	40	60	80	100					
A1050-H24	素板	—	○	○	○	○	○	○	●		
	平坦化された薄板	A	○	○	○	○	○	○	○	●	
		B	○	○	○	○	○	○	○	●	
A5052-H34	素板	—	○	○	○	○	○	○	●	●	
	平坦化された薄板	A	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		B	○	○	○	○	○	○	○	○	○

●: クラック, ○: 成功.

### 3.3 コールドリサイクルプロセスの適用による CO<sub>2</sub> 排出量の削減効果

上述のように, コールドプロセスによる金属廃棄薄板のリサイクルが可能であることが明らかになった. ここでは, リサイクル中に発生する CO<sub>2</sub> 排出量に焦点を当て, 従来のリサイクル中に消費されるエネルギーを溶解エネルギー  $Q$ , コールドリサイクルプロセス中に消費されるエネルギーを塑性変形仕事  $W$  とし, コールドリサイクルプロセスの適用による CO<sub>2</sub> 排出量の削減効果について明らかにした. 以下に  $Q$  と  $W$  の計算方法を示す. まず, 金属 1mol の温度を  $T_i$  から  $T_{i+1}$  に上昇させるために必要なエネルギー  $q$  は次式で与えられる.

$$q = \sum_{i=1}^n \left\{ \int_{T_i}^{T_{i+1}} \Delta C_p dT + F_i \right\} \quad (2)$$

ここで,  $C_p$  は比熱容量,  $F_i$  は融解熱である. 板厚  $t$ , 1 辺の長さが  $L$  の正方形の薄板の溶解エネルギー  $Q$  は次式で与えられる.

$$Q = \frac{1000tL^2d}{M} \sum_{i=1}^n \left\{ \int_{T_i}^{T_{i+1}} \Delta C_p dT + F_i \right\} \quad (3)$$

ここで,  $d$  は金属の密度,  $M$  は金属の原子量である. 次に, 単位体積当りの塑性変形仕事  $w$  は次式で与えられる.

$$w = \int_0^{\epsilon_{eq}} \sigma_m d\epsilon_{eq} \quad (4)$$

ここで,  $\sigma_m$  は相当塑性応力,  $\epsilon_{eq}$  は相当塑性ひずみである. よく知られているように, 式(4)は次式で表される.

$$w = \sigma_m \epsilon_{eq} \quad (5)$$

ここで,  $\sigma_m$  は平均変形抵抗である. 板厚  $t$ , 長さが  $L$ , 斜辺

の長さが  $\lambda$  の残存コーナ一部を平坦化するために必要な塑性変形仕事は次式で表される.

$$W = 2Lt\lambda\sigma_m\epsilon_{eq} \quad (6)$$

表 2 に溶解エネルギーと塑性変形仕事の算出に用いられたパラメータを示す<sup>17,18)</sup>.

表2 融解エネルギー  $Q$  と塑性変形仕事  $W$  の算出に用いられたパラメータ

材料	アルミニウム板	スチール板
原子量 $M$	27	57
密度 $D$ (kg/m <sup>3</sup> )	2700	7900
融解熱 $F_i$ (kJ/mol)	11 (S→L)	1.7( $\alpha \rightarrow \beta$ ) 0.88( $\beta \rightarrow \gamma$ ) 0.46( $\gamma \rightarrow \delta$ ) 16( $\delta \rightarrow L$ )
a, b (10 <sup>3</sup> ), c (10 <sup>-5</sup> )	S: 4.9, 3.0, - (300~930) L: 7.0, -, - (930~1300)	$\alpha$ : 3.4, 7.1, -0.43 (300K~1000K) $\beta$ : 10, -, - (1000K~1200K) $\gamma$ : 4.9, 3.0, - (1200K~1700K) $\delta$ : 10.30, -, - (1700K~1800K) L: 10.00, -, - (1800K~1900K)
平均変形抵抗 $\sigma_m$ (N/m <sup>2</sup> )	200	900
相当塑性ひずみ $\epsilon_{eq}$	1	1

$C_p = a + bT - c/T^2$ , S: 固体, L: 液体.

これらの式から計算された結果を表 3 に示す. 板厚  $t=1.0$  mm, 1 片の長さ  $L=4.0$  m の正方形のアルミニウム薄板をリサイクルする場合, 従来のリサイクルプロセス中に消費されるエネルギー  $Q$  は約 26000 kJ にも達する. 一方, コールドリサイクルプロセスを適用した場合, 消費されるエネルギー  $W$  は約 8 kJ に留まっている. 従って, 従来のリサイクルプロセスから排出される CO<sub>2</sub> 排出量を  $A_Q$ , コールドリサイクルプロセスから排出される CO<sub>2</sub> 排出量を  $A_W$  とした場合,  $A_Q/A_W$  は約 3300 分の 1 となる. また, 同じ大きさのスチール板をリサイクルする場合,  $A_Q/A_W$  は約 3000 分の 1 となる.

表3 コールドリサイクルプロセスのCO<sub>2</sub>排出量削減効果

$L$ (m)	融解プロセス $Q$ (kJ)		コールドリサイクルプロセス $W$ (kJ)		$A_Q/A_W$	
	アルミニウム板	スチール板	アルミニウム板	スチール板	アルミニウム板	スチール板
2.0	6500	27000	4.0	18	1600	1500
2.2	7900	33000	4.4	20	1800	1700
2.4	9400	39000	4.8	22	2000	1800
2.6	11000	46000	5.2	23	2100	2000
2.8	13000	53000	5.6	25	2300	2100
3.0	15000	61000	6.0	27	2400	2300
3.2	17000	69000	6.4	29	2600	2400
3.4	19000	78000	6.8	31	2800	2600
3.6	21000	88000	7.2	32	2900	2700
3.8	24000	98000	7.6	34	3100	2900
4.0	26000	110000	8.0	36	3300	3000

$L$ : 正方形の1辺の長さ,  $A_Q$ : 融解プロセス中に排出されるCO<sub>2</sub>排出量,  $A_W$ : コールドリサイクルプロセス中に排出されるCO<sub>2</sub>排出量, 1kJ当りのCO<sub>2</sub>排出量は, 消費エネルギーを電気エネルギーと仮定し,  $1.54 \times 10^{-4}$  kgとした<sup>19)</sup>.

このように、コールドリサイクルプロセスの適用により、リサイクル中に排出されるCO<sub>2</sub>を大幅に削減できることが明らかになった<sup>20,21)</sup>。

## 5. まとめ

リサイクルは、環境負荷を低減することができる方法のひとつである。一方、このリサイクルには多くの問題が含まれているのも事実である。本研究では、この問題のひとつである金属廃棄薄板のリサイクル中に発生する大量のCO<sub>2</sub>に焦点を当て、塑性加工学的観点から、この問題を解決することを試みた。その結果、従来の溶解プロセスを含むリサイクルに比べ、新しく提案したコールドリサイクルプロセスの適用により、リサイクル中に発生するCO<sub>2</sub>を大幅に削減することに成功した。

## 謝辞

本研究の一部は平成19年度天田金属加工機械技術振興財団研究助成(AF-2007035)をもとに行われました。ここに厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) G. Lazzaro, C. Atzori: Light Metals, Proc. TMS Annual Meeting, (1992), 1379-1384.
- 2) H. Takano, K. Kitazawa, T. Goto: International Journal of Machine Tools & Manufacture, 48(2008), 477-482.
- 3) 益田森治: 薄板の曲げ加工, 誠文堂新光社, (1958)16-18.
- 4) 安田克彦: 塑性と加工, 20(1979), 755-761.
- 5) B. Irving: Welding Journal, 74(1995), 49-52.
- 6) J. K. Baysore, M. S. Williamson, Y. Adonyi, J. L. Milian: Welding Journal, 74(1995), 345s-352s.
- 7) 夏見文章: プレス技術, 34(1996), 18-25.
- 8) Z. Marciniak, K. Kuczyński: International Journal of Mechanical Science, 9(1967), 609-620.
- 9) 北澤君義, 林真太郎: 日本機械学会論文集 C 編, 64, (1998), 330-335.
- 10) 北澤君義, 林真太郎: 日本機械学会論文集 C 編, 63(1997), 3681-3687.
- 11) 高野拓樹, 北澤君義, 山本晃, 丸谷苗: 軽金属, 57(2007), 234-239.
- 12) S. Kalpakcioglu: Journal of Engineering for Industry - Transactions of the ASME, 83(1961), 125-130.
- 13) 高野拓樹, 北澤君義: 軽金属, 58(2008), 503-508.
- 14) H. Takano, K. Kitazawa, International Conference on Technology of Plasticity, Korea, September, (2008), 1789-1794.
- 15) H. Takano, K. Kitazawa: Environmental Research Event: 2007 Conference Proceedings and Program, Australia, December, (2007), 279-286.
- 16) 高野拓樹, 北澤君義: 軽金属, 58(2008), 509-515.
- 17) 金属データブック, 日本金属学会編, 丸善(1974), 16.
- 18) 鈴木弘: 塑性加工, 裳華房, (1971), 64.
- 19) 環境省, 地球温暖化防止に関する法律施行令,(2006).
- 20) H. Takano, K. Kitazawa, H. Yamamoto, N. Marutani: The 22nd International Conference on Solid Waste Management, 831-843, America, March, (2007).