摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法による A5052 板の成形

——摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法の開発 第 3 報——

大津 雅亮* 松尾 浩紀** 松田 光弘*** 高島 和希***

Forming of A5052 Aluminum Alloy Sheets by Friction Stir Incremental Forming

—— Development of Friction Stir Incremental Forming 3rd Report ——

Masaaki OTSU *, Hiroki MATSUO **, Mitsuhiro MATSUDA *** and Kazuki TAKASHIMA ***

(Received on March 9, 2010)

5000 series aluminum alloys do not have sufficient ductility and their applications are limited. To enhance the use of these alloys, it is necessary to develop new forming processes with high formability. The authors have developed a friction stir incremental forming method of forming magnesium alloy sheets without heating and reported on the formability of magnesium alloy sheets at room temperature. In this study, friction stir incremental forming was applied to forming A5052 aluminum alloy sheets, and the formability of these sheets was investigated. Tool rotation rate, tool feed rate and the half apex angle of the pyramidal frustum were changed. Hardness test and tension test on the formed parts were also carried out. A5052 sheets with a 0.5 mm thickness were successfully formed into a pyramidal frustum with a minimum half apex angle of 20°. This result coincides with an elongation of 192% although the fracture elongation of those sheets in the tension test at room temperature was only 14%. The Vickers hardness and tensile strength of the A5052 parts formed by the developed method were decreased compared with those of the unformed ones. Even with added strain by forming, however, the elongation of formed parts was greater than that of the unformed ones owing to the occurrence of grain refinement by dynamic recrystallization during forming.

Key words: new forming process, incremental forming, friction stirring, A5052, aluminum alloy sheet, formability, tension test, hardness test, elongation.

1. 緒 言

環境負荷低減のために、様々な工業製品の軽量化が進められており、鉄鋼材料からアルミニウム合金への代替も検討されている。一方、板材成形の分野では、大きな板材の加工や多品種少量生産品では金型コストが問題となるため、金型を利用しないインクリメンタルフォーミング法が開発されている。この成形法は塑性変形領域が小さな領域に限定されるため成形荷重が著しく低減され、プレス成形よりも成形限界が向上することが確認されている¹⁾。しかしながら、アルミニウム合金 5000 系や 1000 系の加工・熱処理材は、強度は高いが、破断伸びが小さいため、インクリメンタルフォーミングにおいても成形性はあまり良くない²⁾。ところで、筆者らは室温での成形が難しいマグネシウム

合金板を室温で成形するために、従来のインクリメンタルフォーミング法と摩擦攪拌接合法を組合わせた、新しい成形プロセスである摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法を開発した³⁾。本法ではマグネシウム合金 AZ31 板を室温で成形することができ、従来のインクリメンタルフォーミング法を用いて熱間成形した場合よりも成形性が良かった。また、AZ31 よりも高強度で難加工性の AZ61 および AZ80 板についても室温で成形することができた。また、加工部近傍は大ひずみが導入されて動的再結晶を生じて結晶粒が微細化していた。この方法の成形性向上のメカニズムはまだ解明されていないが、単純な温度上昇だけではなく、加工中の動的再結晶や結晶粒微細化による粒界すべりなども影響している可能性があり、その他の難加工材についても適用できる可能性がある。

本研究では、摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法をアルミニウム合金薄板の成形に適用し、成形条件、加工時の温度測定、成形後の加工部における機械的性質および組織の調査を行った。

2. 実 験 方 法

成形には 3 軸 NC 工作機のローランドディージー社製 MDX-540 を使用し、エンドミルの代りに高速度工具鋼

* 福井大学大学院工学研究科 〒910-8507 福井市文京 3-9-1
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
University of Fukui, 3-9-1, Bunkyo, Fukui, 910-8507, Japan.

** 熊本大学工学部 〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1
Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering,
Kumamoto University, 2-39-1, Kurokami, Kumamoto, 860-8555, Japan,
Under Graduate Student.

*** 熊本大学大学院自然科学研究科 同上
Department of Industrial Science, Graduate School of Science and Technology,
Kumamoto University, ibid.

SKH51 製の先端が半球形状の $\phi 6\text{mm}$ の成形工具を使用した。板材はFig. 1に示すような金型の上に置き、ブランクホルダーによりボルトで固定した。板材は一边の長さが100mmの正方形で厚さ $t=0.5\text{mm}$ のA5052-H34板を用いた。一般的なA5052-H34材の物理的特性^{4), 5)}および機械的特性⁶⁾をそれぞれTable 1, Table 2に示す。

成形工具はピッチ0.5mmでFig. 2で示すように移動させて、底面が一边80mmである正方形の正四角錐台の形状に成形し、Fig. 3で定義される半頂角 θ を変えることにより成形性を調査した。この場合半頂角が小さい方が必要な伸び変形量が大きいため成形性がよいことを示す。熱電対は加工部表面に取付けると工具が通過する際にすぐに外れてしまうため、板材の裏面にスポット溶接で取り付けた。成形終了後に加工部の機械特性を調べるために、Fig. 4で示す部分から引張試験片を採取して、室温において引張試験を行った。引張試験片を採取したところと同様の場所から硬さ試験片も採取して、ビッカース硬さ試験も行った。

3. 実験結果および考察

3.1 工具回転の効果

工具送り速度 $v=3000\text{mm/min}$ 、半頂角 $\theta=30^\circ$ の条件において、工具回転数 ω を変化させた時の成形限界高さをFig. 5に示す。ここで成形限界高さとは、板材が破断することなく成形できる最大高さである。本研究において、成形装置の制約から成形可能な成形品の上限高さは20mmである。

Fig. 1 Schematic illustration of forming tool, die and sheet

Fig. 2 Forming path and sequence

従来のインクリメンタルフォーミング法による成形、すなわち工具回転数 $\omega=0\text{rpm}$ の条件では、NC工作機に過剰の負荷がかかったため工作機が停止して、ほとんど成形はできなかった。また、 $\omega=2000\text{rpm}$ から $\omega=6000\text{rpm}$ は成形途中に加工部が破断してしまい、高さは $h=6\text{mm}$ 程度までしか成形ができなかった(Fig. 6(a))。しかし、 $\omega=7000\text{rpm}$ 以上になると成形高さは飛躍的に向上し、使用したプログラムで設定できる成形高さの限界値である $h=20\text{mm}$ まで加工ができた(Fig. 6(b))。

そこで工具回転による摩擦熱に注目し、成形性が飛躍的に向上する $\omega=7000\text{rpm}$ とその直前の $\omega=6000\text{rpm}$ において、加工部の温度測定を行った。その結果 $\omega=6000\text{rpm}$ 、 $\omega=7000\text{rpm}$ ともに加工時の最高温度はそれぞれ 273°C 、 285°C であり、どちらも静的再結晶温度 330°C ⁵⁾には到達していなかった。また $\omega=6000\text{rpm}$ と $\omega=7000\text{rpm}$ における最高温度の差は 12°C しかないため、成形高さの向上は加工温度だけで

Table 1 Physical properties of A5052^{4), 5)}

Density / $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$	2.68
Liquidus temperature / $^\circ\text{C}$	649
Solidus temperature / $^\circ\text{C}$	607
Thermal conductivity / $\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}$	0.14
Thermal expansion coefficient / $10^{-6}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	23.8
Specific heat / $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	0.9
Young's modulus / GPa	70.31
Poisson's ratio	0.33
Static recrystallization temperature / $^\circ\text{C}$	330

Table 2 Mechanical properties of A5052-H34⁶⁾

Temperature / $^\circ\text{C}$	Tensile strength / MPa	Elongation / %
25	260	16
100	260	18
150	205	27
205	165	45
260	85	80
315	50	110
370	34	130

Fig. 3 Definition of half apex angle

Fig. 4 Location of taking tensile test and hardness test specimens

なく、その他の要因があると考えられる。

次に、未加工材および $\omega=7000\text{rpm}$ で成形したときの、加工部断面の走査イオン顕微鏡(Scanning Ion Microscope: SIM)像を Fig. 7 に示す。A5052-H34 材は圧延後安定化処理を施した材料であり、結晶粒は圧延方向に伸張しており、まだひずみも残留している。そのため、Fig. 7(a)に示すように、未加工材の結晶粒内でも残留ひずみの分布によるコントラストの分布があった。また、試料表面と内部での結晶粒の大きさに違いはなかった。

Fig. 7(b)に示すように、工具送り速度 $v=3000\text{mm/min}$ 、工具回転数 $\omega=7000\text{rpm}$ 、半頂角 $\theta=45^\circ$ で成形したときは、表面から $5\mu\text{m}$ は粒径 500nm 程度の等軸粒となっていた。表面から $5\mu\text{m}$ 以上内部になると、表面からの距離が大きくなるにしたがって結晶粒は $1\text{--}2\mu\text{m}$ 程度の等軸粒となり、未加工材に見られたような結晶粒内にひずみ分布は見られなかった。これは成形時に大ひずみが導入されるため、動的再結晶が生じて、ひずみが緩和されたからだと考えられる。また、表面近傍で白いコントラストで示される結晶粒ではないものが観察された。これは顕微鏡観察試料の研磨状態が悪く、SIM 観察時に白く写ったと考えられるが詳細は不明である。

Fig. 5 Relation between forming limit height and tool rotation rate ($v=3000\text{mm/min}$, $\theta=30^\circ$)

(a) $\omega=6000\text{rpm}$

(b) $\omega=7000\text{rpm}$

Fig. 6 Appearance of formed sheets ($v=3000\text{mm/min}$, $\theta=30^\circ$)

3.2 成形可能条件

半頂角を $\theta=45^\circ$ で固定して工具送り速度、工具回転数を変えて成形可能条件を調査した結果を Fig. 8 に示す。図中の○印は装置の成形限界まで成形が可能であったことを示しており、×印は途中で破断して成形ができなかった場合である。また△印は成形が不安定で、成形が可能となるとき、不可能となるときがある場合である。工具送り速度 $v=4000\text{mm/min}$ 以下のときは工具回転数を大きくすれば成形が可能であった。しかし、 $v=500\text{mm/min}$ では加工部の入熱・攪拌過多となり成形ができなかった。工具送り速度 $v=5000\text{mm/min}$ 以上では、工具回転数が高いにもかかわらず成形はできなくなり、工具回転速度 $\omega=10000\text{rpm}$ では全く成形できなかった。摩擦攪拌接合加工においても、工具送り速度と工具回転数の間には、良好に加工するための最適な条件があることが報告されており⁷⁾、摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法においても、良好な加工に適した工具回転数と工具送り速度があると考えられる。

次に工具送り速度を $v=3000\text{mm/min}$ と固定し、工具回転数 ω を変化させて成形可能な半頂角 θ の範囲を調べた結果を Fig. 9 に示す。従来のインクリメンタルフォーミング法による板厚 0.4mm のA5052-H34材の成形は、半頂角 $\theta=35^\circ$ まで成形可能であることが報告されている²⁾。本研究においても、工具回転数 $\omega=0\text{rpm}$ を従来のインクリメンタルフォーミングとみなして成形を行うと、半頂角 $\theta=45^\circ$ まで成形可能であった。工具回転数を大きくしていくと、 $\omega=6000\text{rpm}$ までは成形できる半頂角はほとんど変わらなかったが、 $\omega=7000\text{rpm}$ 以上になると $\theta=25^\circ$ まで成形可能となり、 $\omega=10000\text{rpm}$ では $\theta=20^\circ$ まで成形可能となった。

また、従来のインクリメンタルフォーミングによる成形後の試料($\omega=0\text{rpm}$, $\theta=45^\circ$)と摩擦攪拌インクリメンタルフォ

(a) Without forming

(b) $v=3000\text{mm/min}$, $\omega=7000\text{rpm}$, $\theta=45^\circ$

Fig. 7 Microstructure of sheets with and without forming

Fig. 8 Formable working conditions ($\omega=10000\text{rpm}$, $\theta=45^\circ$)

ーミング法による成形後の試料($\omega=10000\text{rpm}$, $\theta=20^\circ$)の外観写真をそれぞれ Fig. 10 に示す. 従来のインクリメンタルフォーミング法で成形した試料の加工面は焼付きが発生して非常に粗い面となったが, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法で成形した試料の加工面は工具が通過した痕は見られるが, 光沢のあるきれいな面となった. このように, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法では, 従来のインクリメンタルフォーミング法に比べて成形面がきれいであることに加え, 成形性が飛躍的に向上した.

次に工具回転数を $\omega=10000\text{rpm}$ に固定し, 工具送り速度, 半頂角を変えて成形可能条件について調査した結果を Fig. 11 に示す. 工具送り速度 $v=5000\text{mm/min}$ 以上では全く成形できなかった. また, $v=2000\text{--}4000\text{mm/min}$ では成形可能な半頂角に差異はなく, $v=1000\text{mm/min}$ 以下になると成形できなかった.

また Fig. 9 に示すように, 工具を回転させないで従来のインクリメンタルフォーミング法で成形した場合, 最小の半頂角 $\theta_{\min}=45^\circ$ までしか成形できなかった. しかし, Fig. 11 に示すように摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法で

は, 工具送り速度 $v=2000\text{--}3000\text{ mm/min}$, 工具回転数 $\omega=10000\text{rpm}$ において, 最小の半頂角 $\theta_{\min}=20^\circ$ まで成形が可能であった. ここで, 平面ひずみ変形状態でサイン則にしたがって変形したと仮定した時の, 半頂角と相当ひずみおよび伸びの理論上の関係を Fig. 12 に示す. 本実験で用いた A5052-H34 板の引張試験による室温での破断伸びは 14% であった. 従来のインクリメンタルフォーミング法での成形可能な半頂角 $\theta=45^\circ$ では伸びが 41% 相当となり, 従来のインクリメンタルフォーミング法においても成形性は向上している. しかし, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法による成形可能な半頂角 $\theta=20^\circ$ では, 伸びが 192% 相当となり, 著しい成形性の向上が確認された.

以上の実験結果と摩擦攪拌インクリメンタルフォーミングの加工メカニズム³⁾より, 最適加工条件は以下の因子によって決定されると考えられる. まず被加工材の比熱や熱伝導率や再結晶温度などの物理的特性である. 次に高温における引張強さ, 破断伸びなどの機械的特性である. これらの被加工材の材料特性に合わせて, 適度に摩擦攪拌が発生する範囲の工具回転数および工具送り速度の組み合わせの選択が必要である.

3.3 加工部の硬さ

未加工材および成形した加工部断面の板厚中央部の硬さ試験を行った. 工具送り速度は $v=3000\text{mm/min}$ とし, 従来のインクリメンタルフォーミング法で成形したもの ($\omega=0\text{rpm}$, $\theta=45^\circ$) と摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング

Fig. 9 Formable working conditions ($v=3000\text{mm/min}$)

Fig. 10 Appearance of formed and reverse surface ($v=3000\text{mm/min}$)

Fig. 11 Formable working conditions ($\omega=10000\text{rpm}$)

Fig. 12 Theoretical equivalent strain and elongation as a function of half apex angle

法で成形したものの 2 種類($\omega=7000\text{rpm}$, $\theta=45^\circ$), ($\omega=10000\text{rpm}$, $\theta=20^\circ$), 未加工材の硬さを比較した結果を Fig. 13 に示す.

従来のインクリメンタルフォーミングにより成形を行ったものは, 未加工材に比べて硬さが高くなっていた. これは未加工材の A5052-H34 処理は圧延後安定化処理を施したものであるため, Fig. 7(a)に示すようにひずみが残留してある程度加工硬化しているが, これにさらにひずみを付加して加工硬化したため, より硬さは高くなったと考えられる. しかし摩擦攪拌インクリメンタルフォーミングで成形したものは, 2 種類の試料ともに未加工材に比べて硬さは低下していた. 摩擦攪拌接合加工でも同様に加工部の硬さ低下は確認されており⁸⁾, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミングにおいても, 工具を高速回転させているために, 成形時に高温となって, さらに大ひずみが導入されて動的再結晶を生じて, 未加工材に含まれていたひずみが緩和されたために硬さが低下したと考えられる.

3.4 加工部の引張強さと破断伸び

Fig. 4 に示すように, 成形した試料の錐面部分から引張試験片を切出し, 加工部の引張試験を行った. 未加工材と従来のインクリメンタルフォーミング材($v=3000\text{mm/min}$, $\omega=0\text{rpm}$, $\theta=45^\circ$), 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング材 ($v=3000\text{mm/min}$, $\omega=7000\text{rpm}$, $\theta=45^\circ$) の 3 種類を比較した. なお成形後は表面が粗くなっているものも, 表面を研磨等をせずにそのまま引張試験を行った. 試験結果を Fig. 14 に示す.

未加工材は引張強さが 275MPa, 破断伸びは 14%であった. これに対して従来のインクリメンタルフォーミング材は引張強さが 230MPa, 破断伸びは 5%となり, 引張強さと破断伸びともに低下した. 引張強さが低下したのは Fig. 11(a), (b)に示すように加工部表面が焼付きにより大きく肌荒れを起こして, この凹凸により板厚が極端に薄い部分ができたり, 応力集中により変形が集中したためである. また成形後に熱処理等を行わずに引張試験を行ったことから, すでにひずみが導入された上に引張試験を行ったため, 破断伸びは小さくなった.

一方, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング材は引張強さ 240MPa, 破断伸びは 17%となった. 引張強さは従来のインクリメンタルフォーミング材より少し高くなったが, これは摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング材の加工部表面の凹凸は, インクリメンタルフォーミング材ほど大きくはなかったからだと考えられる. また, 加工後に引張試験を行っても未加工材よりも破断伸びが大きくなったのは, 加工時に動的再結晶によってひずみが緩和されたことと, 結晶粒微細化によって延性が向上したからだと考えられる.

4. 結 言

開発した摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法を用いて, A5052-H34 板の成形性について調査し, また加工部の硬さ試験と引張試験を行った. 板厚 0.5mm の A5052-H34 板は, 室温での引張試験による破断伸びは 14%であった. しかし摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法で四角錐

Fig. 13 Vickers hardness of formed parts ($v=3000\text{mm/min}$)

Fig. 14 Tensile strength of formed parts ($v=3000\text{mm/min}$)

台形状に成形すると, 最小の半頂角は 20° となり, 伸びが 192%相当となるまで成形できて, 成形性が飛躍的に向上し, さらに外観も光沢のあるきれいな面に成形できた. また本方法で成形すると加工部の硬さ, 引張強さはともに減少するが, 破断伸びは未加工材よりも大きくなった. また, 加工部は加工中に動的再結晶により結晶粒が微細化した.

参 考 文 献

- 1) Wang, Y., Huang, Y., Cao, J. & Reddy, N.V.: Proc. Int. Manuf. Sci. Eng. Conf., MSEI_ICM&P 2008, (2008), 72547.
- 2) 北澤君義・西田保・藤野博文: 軽金属, **51-2**(2001), 103-107.
- 3) 大津雅亮・市川司・松田光弘・高島和希: 塑性と加工, **52-603**(2011), 490-494.
- 4) 日本アルミニウム協会標準化総合委員会編: アルミニウムハンドブック, (2001), 26-29, 日本アルミニウム協会.
- 5) 軽金属協会編: アルミニウムハンドブック, (1963), 436-440, 朝倉書房.
- 6) 日本アルミニウム協会標準化総合委員会編: アルミニウムハンドブック, (2001), 39, 日本アルミニウム協会.
- 7) 鈴木理一・高橋武彦・日置進・山本尚樹・金子勇太: 溶接学会論文集, **25-1**(2007), 135-139.
- 8) 小久保正史・高山善匡・和井伸一・金内良夫・加藤一・平野聡: 軽金属, **58-4**(2008), 146-150.