

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月17日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360309

研究課題名（和文）摩擦を利用した金属板材の金型フリー加工法の開発

研究課題名（英文）Development of Friction Stir Incremental Forming Method for Forming Sheet Metals

研究代表者

大津 雅亮（OTSU MASAOKI）

福井大学・工学研究科・教授

研究者番号：20304032

研究成果の概要（和文）：金型を用いないで摩擦を利用した金属板の加工法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、この加工が可能な専用の加工機を製作した。室温では加工が難しいAZ31, AZ61, AZ80 マグネシウム合金やA5052, A2017 アルミニウム合金および純チタン板を成形した。またこの加工プロセスについてコンピュータシミュレーションを行った。

研究成果の概要（英文）：Friction stir incremental forming method and forming equipment were developed which process is used for forming sheet metals without dies. AZ31, AZ61 and AZ80 magnesium alloy sheets, A5052 and A2017 aluminum alloy sheets and pure titanium sheets which are hard to deform at room temperature were formed by the developed method. Computational simulation about this forming process was also carried out.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2011年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2012年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学 材料加工・処理

キーワード：塑性加工，板材成形，金型フリー成形，難加工材料

### 1. 研究開始当初の背景

環境負荷低減のために輸送機械の軽量化が求められており、重い鉄鋼材料から軽金属や同じ重量でも高強度であるために結果的に軽量化が出来る高張力鋼への置換が求められている。しかしこれらの代替材料は室温での成形性が悪いため高温での加工が必要である。また、航空宇宙分野、自動車分野および建築分野では使用する金属板材の寸法

の大きい物が多く、成形のための金型のは非常に高価なる。したがって数量の余り多くない製品は金型を使用しない加工法が必要である。

金型を使用しない金属板材の成形方法にインクリメンタルフォーミング法がある。この方法は金属板材に棒状工具を押し当てながら移動させて成形する方法で、陶芸のろくろ成形のように、成形したい形状の等高線に

沿って棒状工具を移動させることによって簡単に任意形状に成形できる。上記の軽金属材料を加工する場合は板材を加熱しながら加工しなければならないが、大寸法の金属板を数百℃に加熱し続けることは大変で、長時間高温にさらすと金属組織も変化してしまう。

ところでアルミニウム合金やマグネシウム合金の接合において、近年は摩擦攪拌接合法が注目されている。この方法は回転する工具を金属板に押し当てて摩擦熱で局所的に加熱しながら接合するため少ない発熱量で接合が可能である。また摩擦により接合部付近の材料が流動することによって金属組織が微細になり様々な機械特性が向上する。

申請者らは通常のインクリメンタル成形においては摩擦の影響を低減するために潤滑油を用いて工具を低速で回転させながら成形を行うが、逆に摩擦攪拌接合のように積極的に摩擦現象を利用して、摩擦熱で加熱させながらインクリメンタル成形を行う摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法を開発した。(大津雅亮, 高島和希, 市川司, 網野廣之, 溝口雅士, 板材の成形方法及び装置, 特願 2009-040018, (2009)) この方法は高温での加工が必要な大寸法の金属板材の加工に適しており、成形だけでなく材質の向上も可能である。

本研究では、申請者らが開発した摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法による成形装置を開発し、成形した製品の形状評価、機械的特性評価および金属組織学的評価を行って航空宇宙分野、自動車分野および建築分野での適用を検討する。

## 2. 研究の目的

本研究では難加工材の金属板材を金型フリーで加工する摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法とその加工装置の開発および加工、加工メカニズムの解明を行うために、以下の項目を研究の目的とした。

- (1) 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング専用加工機の開発
- (2) AZ系マグネシウム合金板, 2000系アルミニウム合金板および純チタン板の成形
- (3) 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミングの加工プロセスのコンピュータシミュレーション

## 3. 研究の方法

### (1) 加工機の開発

AZ系マグネシウム合金板, 2000系アルミニウム合金板および純チタン板の引張試験を行い、このデータを本に加工機的设计・製作を行った。

### (2) 各種金属板の成形

加工対象の金属材料はマグネシウム合金(AZ31, AZ61, AZ80), アルミニウム合金(A5052, A2017)および純チタンとした。板厚は0.4~0.8mmとし、一辺の長さが100mmの正方形の板材を使用した。工具は材質がSKD51, 形状は先端が半球状で直径6mmの棒状工具を使用した。成形形状は底辺が80mm, 高さが20mmのピラミッド形状とした。加工パラメータとして、工具回転数, 工具送り速度, ピラミッド形状の頂点の半頂角とした。各加工パラメータを変更し、成形可能条件を探索した。

### (3) コンピュータシミュレーション

商用の塑性加工専用有限要素解析ソフトSimufact. formingを用いて加工プロセスのコンピュータシミュレーションを行った。材料データにはソフトウェアに標準で付属しているA5052アルミニウム合金のデータを用いた。計算は長時間を要するため、工具を板材に0.5mmだけ押し込み、20mmだけ工具を移動して加工を行うプロセスを計算し、加工後の板材形状や加工部温度を実験結果と比較した。

## 4. 研究成果

### (1) 加工機の開発

X, Y, Z軸となる3つの自動ステージとスピンドルモータを組合わせて加工機を製作した。この機械を用いることにより現用の装置では加工できない寸法, 板厚においても加工可能となった。

### (2) 各種金属板の成形

摩擦攪拌現象が発現した場合は、マグネシウム合金, アルミニウム合金板ともにスプリングバックが非常に小さくなるが、摩擦攪拌現象が発現しなかった場合は加工後のスプリングバックが大きく目的の成形形状とはならなかった。

#### ① マグネシウム合金板

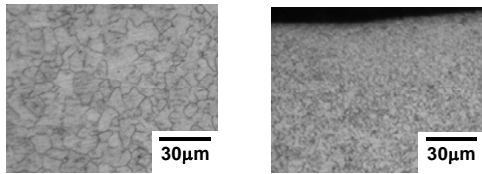
図1に示すようにAZ31, AZ61, AZ80の板材を成形できた。最も成形性が良かったときの各材料の半頂角はそれぞれ25°, 30°, 40°となった。



(a) AZ31 (b) AZ61 (c) AZ80

図1 各種マグネシウム合金板の最も成形性が良かったときの外観

金属組織を光学顕微鏡観察を行った結果、図2に示すように、結晶粒がナノサイズまで微細化しており、摩擦攪拌現象が発現していることが確認された。



(a) 加工前 (b)加工後  
図2 AZ31 板の加工前後の断面組織

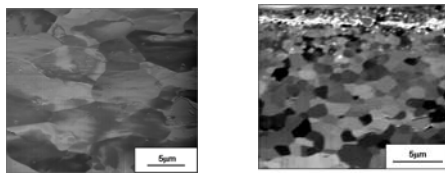
② アルミニウム合金板

図3に示すように A5052, A2017 の板材を成形できた. 最も成形性が良かったときの各材料の半頂角はそれぞれ 20°, 25° となった.



図3 A5052 の最も成形性が良かったときの外観

また, 金属組織を走査イオン顕微鏡で観察した結果, 結晶粒がナノサイズまで微細化しており, 摩擦攪拌現象が発現していることが確認された.



(a) 加工前 (b)加工後  
図4 A5052 板の加工前後の断面組織

A5052 アルミニウム合金板を行う際に, 新たな加工条件として工具送り方向と工具回転方向の関係を入替えることにより, 加工部の工具と板材の相対速度を変化させた. その結果, 見かけの工具送り速度と工具回転数で整理するのではなく, 工具と板材の相対速度が直接的に成形性に影響を及ぼしていることが確認された. また, 成形限界が大きくなる条件では成形精度も相関して良くなることが確認された.

A5052 アルミニウム合金板を行う際に, 加工初期は工具と板材の接触角度が小さく, 工具周速度の不足によって十分に工具による加熱・攪拌ができない点を解消するため, あらかじめ工具を傾斜させて加工を行った. その結果成形限界を向上することはできないが, 工具移動速度を速くしても加工可能な成形範囲が拡大した.

熱電対や放射温度計などでは, 板材が工具と接触して変形している部分の温度を測定

することはできなかったが, 工具自身と板材は異種金属であるため工具と板材の接触による熱起電力を利用して, 工具-被加工材熱電対法により加工部温度を測定した. 従来板材の裏側に熱電対を付けたり, 放射温度計で測定していた場合 450°C程度であったが, 本測定法により図5に示すように 580°Cまで上昇していることが確認された.

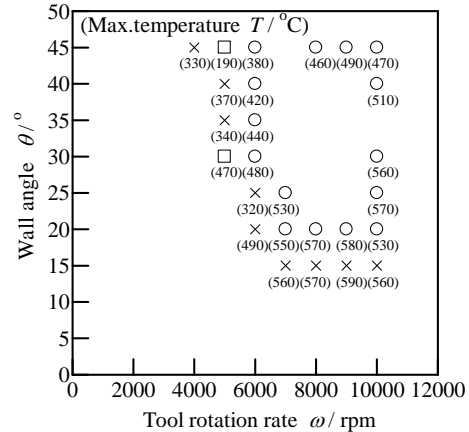


図5 A5052 板加工時の加工部最高温度

③ 純チタン板

図6に示すように純チタン板を成形できた. 最も成形性が良かったときの半頂角はそれぞれ 35° となった.

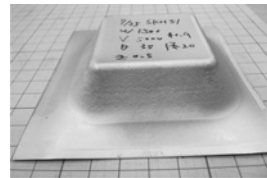
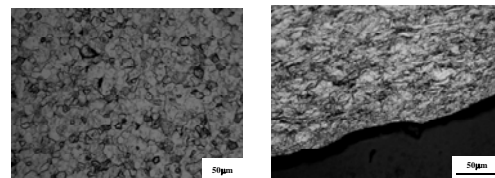


図6 純チタンの最も成形性が良かったときの外観

金属組織を光学顕微鏡観察を行った結果, ほとんど結晶粒が微細化しておらず, 多くの双晶が観察され, 摩擦攪拌現象が発現されていなかった.



(a) 加工前 (b)加工後  
図7 純チタン板の加工前後の断面組織

(3) コンピュータシミュレーション

商用の塑性加工専用有限要素解析ソフト Simufact. forming を用いて A5052 アルミニウム合金板を加工するシミュレーションを行

った。計算結果の信頼性を確認するため計算と同条件で実験を行った。温度分布計算結果は実験により測定した温度と一致した。

また、スクライブドサークル法を用いて板材のひずみ分布を求めた。通常のインクリメンタル成形と同様にサイン則が成立しており、計算結果と実験結果は一致した。また、試験片断面の形状と計算により求めた形状もよく一致した。これらの結果から、シミュレーションはよく加工現象を再現できていると考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

① Masaaki Otsu, Hiroto Arai, Mitsuhiro Matsuda, Kazuki Takashima, Friction Stir Incremental Forming of Titanium Sheets, Steel Research International, Special Edition (2012), 419-422. 査読有

② M. Otsu, T. Ichikawa, M. Matsuda, K. Takashima, Improvement of Formability of Magnesium Alloy Sheets by Friction Stir Incremental Forming, Steel Research International, Special Edition (2011), 537-541. 査読有

③ 大津雅亮, 松尾浩紀, 松田光弘, 高島和希, 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—, 塑性と加工, 52-605(2011), 710-714. 査読有

④ 大津雅亮, 市川司, 松田光弘, 高島和希, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法による AZ 系マグネシウム合金板の成形性と加工部の機械的特性—摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法の開発 第 2 報—, 塑性と加工, 52-605(2011), 705-709. 査読有

⑤ 大津雅亮, 市川司, 松田光弘, 高島和希, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法の開発, 塑性と加工, 52-603(2011), 490-494. 査読有

⑥ Masaaki Otsu, Hiroki Matsuo, Mitsuhiro Matsuda, Kazuki Takashima, Friction Stir Incremental Forming of Aluminum Alloy Sheets, Steel Research International, 81-9(2010), 942-945. 査読有

[学会発表] (計 20 件)

① 大津雅亮, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミングにおける加工部の温度測定, 日本塑性加工学会第 22 回北陸支部講演会, 2013 年 03 月 11 日, 富山市.

② 大津雅亮, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミングにおける工具姿勢が成形性に及ぼ

す影響, 日本塑性加工学会第 22 回北陸支部講演会, 2013 年 03 月 11 日, 富山市.

③ 大津雅亮, 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, 軽金属学会第 122 回春期大会, 2012 年 05 月 19 日～2012 年 05 月 20 日, 福岡市.

④ 大津雅亮, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法による A2017 板の成形, 軽金属学会第 122 回春期大会, 2012 年 05 月 19 日～2012 年 05 月 20 日, 福岡市.

⑤ 大津雅亮, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミングにおける工具回転方向が成形性に及ぼす影響, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 2012 年 09 月 09 日～2012 年 09 月 12 日, 金沢市.

⑥ Masaaki Otsu, Friction Stir Incremental Forming of Titanium Sheets, Metal Forming 2012, 2012 年 09 月 16 日～2012 年 09 月 19 日, クラクフ(ポーランド).

⑦ 大津雅亮, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミングにおける工具と板材の相対速度が成形性に及ぼす影響, M&P2012, 2012 年 12 月 02 日, 大阪市.

⑧ Masaaki Otsu, Formability of A2017 Aluminum Sheets by Friction Stir Incremental Forming, ASMP2012, 2012 年 08 月 30 日, チェンナイ (インド).

⑨ 大津雅亮, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミングの FE モデルの検討, 日本塑性加工学会第 21 回北陸支部期講演会, 2012 年 3 月 8 日, 福井市.

⑩ 大津雅亮, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミングで成形した板材のひずみ分布の測定, 日本塑性加工学会第 21 回北陸支部期講演会, 2012 年 3 月 8 日, 福井市.

⑪ 大津雅亮, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミングにおける工具回転方向が成形性に及ぼす影響, 日本塑性加工学会第 21 回北陸支部期講演会, 2012 年 3 月 8 日, 福井市.

⑫ 大津雅亮, 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-A2017 板の成形, 塑性加工連合講演会, 2011 年 10 月 27 日, 豊橋市.

⑬ 大津雅亮, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法による A2017 板の成形, 日本機械学会 2011 年度年次大会, 2011 年 9 月 14 日, 東京都.

⑭ 大津雅亮, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法の開発(第 2 報 A5052 板の成形), 第 61 回塑性加工連合講演会, 2010 年 10 月 16 日, 米沢市.

⑮ 大津雅亮, 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, 日本機械学会 2010 年度年次大会, 2010 年 9 月 8 日, 名古屋市.

⑯ 大津雅亮, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法による純チタン板の成形, 日本塑

性加工学会第4回西日本若手技術交流会,  
2010年9月2日,吹田市.

⑰ 大津雅亮, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法による難加工板材の金型フリー成形, 日本塑性加工学会第4回西日本若手技術交流会, 2010年9月3日, 吹田市.

⑱ Masaaki Otsu, Friction Stir Incremental Forming of Aluminum Alloy Sheets, Metal Forming 2010, 2010年9月20日, 豊橋市.

⑲ Masaaki Otsu, Comparison of Formability between AZ31, AZ61 and AZ80 Magnesium Alloy Sheets by Friction Stir Incremental Forming, Abstracts of The 6th KU-KITECH Symposium on Bulk Metallic Glasses and Advanced Materials, 2010年9月14日, 熊本市.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大津 雅亮 (OTSU MASA AKI)

福井大学・工学研究科・教授

研究者番号: 20304032

### (2) 研究分担者

吉村 英徳 (YOSHIMURA HIDENORI)

香川大学・工学部・准教授

研究者番号: 30314412

高島 和希 (TAKASHIMA KAZUKI)

熊本大学・工学研究科・教授

研究者番号: 60163193

松田 光弘 (MATSUDA MITSUHIRO)

熊本大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 80342865

北原 弘基 (KITAHARA HIROMOTO)

熊本大学・工学研究科・助教

研究者番号: 50397650