

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289261

研究課題名(和文) 摩擦を用いた表裏面同時金型フリー加工法の開発

研究課題名(英文) Development of Die Free Double Side Forming Method of Sheet Metal Utilizing Friction

研究代表者

大津 雅亮(Otsu, Masaaki)

福井大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20304032

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：XYZの3軸とスピンドル1軸の合計4軸加工機を上下に組み合わせて合計8軸自由度の両面同時加工が可能な摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング加工機を開発した。開発した加工機を用いて室温では難加工材であるA5052アルミニウム合金板の加工を行った。片側工具のみで凹形状の加工を行って、板材を上下反転して凹形状の加工を行ったものと、両面同時加工で凹凸形状加工したものの形状精度を比較すると両面同時加工した方が成形精度が高かった。また片側工具のみで凹形状の加工を行ったものと2つの工具ではさみながら両面同時加工した場合の成形限界と成形精度を比較した。成形限界は変わらなかったが、成形精度は大幅に向上した。

研究成果の概要(英文)：Original forming machine for double sides simultaneous forming by friction stir incremental forming with 8 axes (upper and lower forming parts which each set consist of XYZ 3 axes and 1 spindle) was developed. A5052 aluminum alloy sheets were formed by the developed equipment. Convex-concave shape was formed from only single side and double side. Forming accuracy from double side was higher than that from single side. Concave shape was formed from both single side and double side and forming limit and forming accuracy were compared. Forming limit by both methods were same, however, forming accuracy by double side forming was significantly higher than that by single side forming.

研究分野：塑性加工

キーワード：板材成形 摩擦攪拌 金型フリー

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、成形のための金型は非常に高価となる。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、近年は摩擦撈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部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、逆に摩擦撈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撈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。

しかしながら、従来のインクリメンタルフォーミング法と同様に板材の片側からのみ工具を押し当てて加工を行うと、片側のみに凹んだカップ形状しか成形できない、板の弾性変形により形状精度が悪い、摩擦撈拌の影響が板厚方向に一定の深さしか届かないためあまり大きな厚さの板材の加工に適用できないなどの欠点がある。これらを解決する一つの方法として、板材の表裏両面から同時に加工することが考えられる。しかしながら、回転する棒状工具を XYZ 方向に移動するためには 3 軸 + 1 軸の加工機が表裏両面で 2 台必要でありかつ同期制御する必要があり、これを実現するための専用の加工機は存在し

ない。

本研究では、申請者らが開発した摩擦撈拌インクリメンタルフォーミング法を板材の表裏同時に加工を行う加工機を開発し、成形性や成形精度、形状自由度について調査した。

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撈拌インクリメンタルフォーミング法を板材の表裏同時加工を行う加工装置の開発および加工を行うために、以下の項目を研究の目的とした。

- (1) 摩擦撈拌インクリメンタルフォーミングの表裏同時加工機の開発
- (2) 凹凸形状加工
- (3) 両面同時加工による成形限界と成形精度

3. 研究の方法

(1) 加工機の開発

A5052 アルミニウム合金板の引張試験を行い、このデータをもとに加工機的设计・製作を行った。

(2) アルミニウム合金板の成形

加工対象の金属材料はアルミニウム合金 A5052 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 SKH51、形状は先端が半球状で直径 6mm の棒状工具を使用した。

まず始めに片側からのみ加工した場合と、上下工具で同じ形状を 2 つ同時に加工した場合の形状精度を比較した。次に底辺が 80mm、高さが 20mm のピラミッド形状を片側の工具のみで成形した場合と、上下工具ではさみながら加工した倍の成形精度を比較した。

4. 研究成果

(1) 加工機の開発

図 1 に示すように、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一組とした加工部を、上下二組を組合わせた加工機を製作した。この機械を用いることにより表裏両側から同時に加工可能となった。

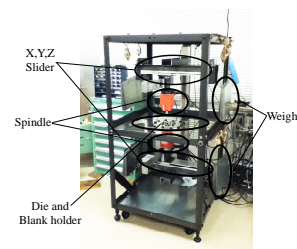


図 1 表裏同時加工機

(2) 凹凸形状加工

図 2 に示すように表裏同時加工と、片側からのみでの加工を行い、凹凸形状を成形し形状の比較を行なった。

摩擦撈拌インクリメンタルフォーミング

での表裏同時加工は上側，下側の成形工具を図3 (a)に示すようにそれぞれピッチ 0.5mmで移動させ，凹凸形状に成形した．片面加工では，成形工具を図3 (b)に示す加工経路で移動させ，板を金型から取外して裏返して取付け，再度加工を行うことで凹凸形状を成形した．

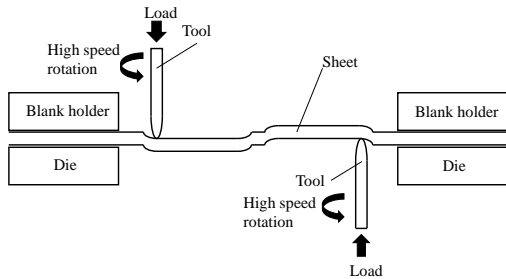
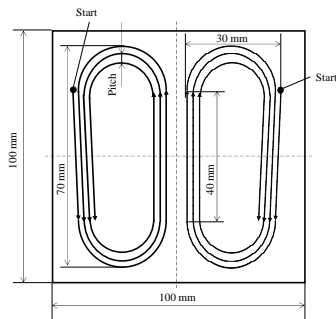
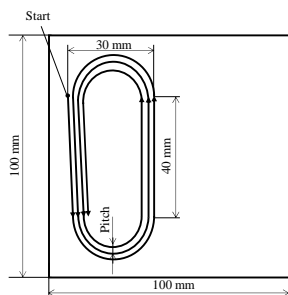


図2 表裏同時加工の模式図



(a) 両面同時



(b) 片面加工

図3 加工経路

表裏同時加工での成形品の断面形状，片面加工での成形品の断面形状，理想形状の比較を図4に示す．表裏同時加工，片面加工ともに理想形状より成形高さが低くなっている．また，表裏同時加工の上側工具と下側工具での成形高さは0.5mm程度の差が見られる．これらは，表裏同時加工機の剛性が小さいため，設定した押し込み量よりも実際の工具押し込み量が小さくなったことと，表裏同時加工機の押し込み量が上側と下側で差があることが原因と考えられる．2回目の片面加工での成形高さは表裏同時加工，1回目の片面加工での成形高さよりさらに2mm程度低くなっている．これは，1回目の片面加工で板が変形したことで，2回目の片面加工時に板と工具が上手

く接触しない部分ができただことが原因と考えられる．

表裏同時加工ではほぼ同形状の成形が可能だが，片面加工では2回目の加工時に成形高さが低くなるという傾向があり，同形状の成形は難しい．したがって，凹凸形状成形においては表裏同時加工の方が成形精度が高い．

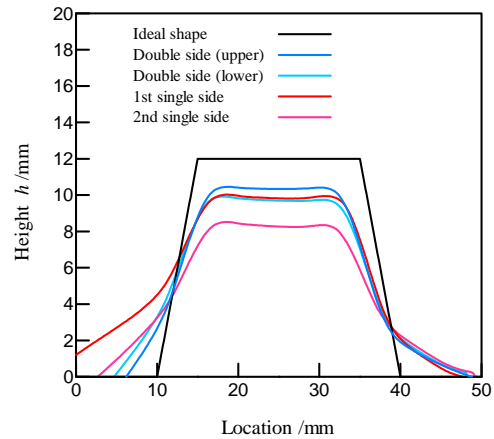


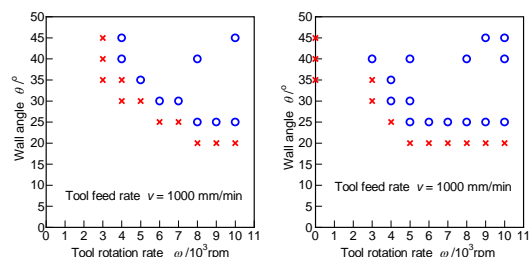
図4 断面形状

(3) 両面同時加工の成形限界と成形精度

目標形状は高さ5mm，底辺が70mmで角部半径17.5mmの四角錐台とした．錐面と工具とのなす角を傾斜角として20 - 45°の間で変化させた．工具送り速度は $v = 1000 \text{ mm/min}$ に固定し，工具回転速度は $\omega = 2500 - 10000 \text{ rpm}$ と変えて加工を行った．

加工後にレーザ変位計で直線状に表面形状を測定した．次にマイクロカッターで試験片を切断し，断面をスキャナで取込んだ画像上で板厚を測定した．

まず，成形可能条件について調査した．片側のみおよび両側同時加工における成形可能な加工条件を図5に示す．図中の印は成形高さ5mmまで成形可能，×印は成形途中で破断したことを示している．成形可能な最小傾斜角は片側および両側からの加工ともに $\theta = 25^\circ$ で変わらなかった．しかし，両側からの加工の方が成形可能な工具回転速度がより小さくなり，成形可能領域は広がった．これは両側から工具により拘束されるために，工具表面での面圧が上昇して摩擦攪



(a) 片側のみ

(b) 両面同時

図5 成形可能条件

拌現象が生じやすくなったからだと考えられる。

次に成形精度について調査した。傾斜角 = 40°, 工具回転数 = 10000 rpm として片側のみおよび両側同時加工した試験片の断面形状と目標形状を比較した結果を図 6 に示す。片側からのみ成形した場合は図 7 7(a)に模式図を示すとおり、板押えの根元からダレが発生して、全体的に傾斜面となっており、フランジ部分がほとんどない。しかし、両側から成形した場合は、ダレは少しあるものの図 7 (b)の模式図に示すように上下の工具で拘束されてフランジの角部および錐面が成形されており、成形精度は大きく向上した。

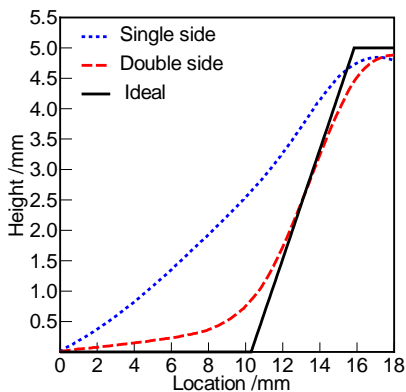
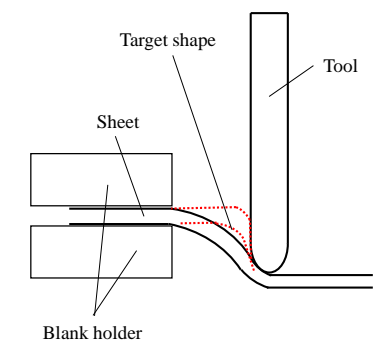
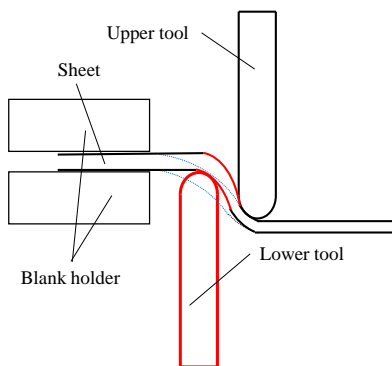


図 6 断面形状



(a) 片側のみ



(b) 両面同時

図 7 板材の変形の模式図

〔雑誌論文〕(計 4 件)

Masaaki Otsu, Yosuke Katayama, Takayuki Muranaka, Effect of Difference of Tool Rotation Direction on Forming Limit in Friction Stir Incremental Forming, Key Engineering Materials, 622-623(2014), 390-397. 査読有

DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.622-623.390

Masaaki Otsu, Mitsuteru Yasunaga, Mitsuhiro Matsuda, Kazuki Takashima, Friction Stir Incremental Forming of A2017 Aluminum Sheets, Procedia Engineering, 81(2014), 2318-2323. 査読有

DOI:10.1016/j.proeng.2014.10.327

R. Matsumoto, T. Tsuruoka, M. Otsu, H. Utsunomiya, Fabrication of Nonporous Layer on Surface of ALPORAS by Friction Stir Incremental Forming, Procedia Material Science, 4(2014), 229-233. 査読有

DOI:10.1016/j.mspro.2014.07.612

Ryo Matsumoto, Hiroyuki Tsuruoka, Masaaki Otsu, Hiroshi Utsunomiya, Fabrication of Skin Layer on Aluminum Foam Surface by Friction Stir Incremental Forming and its Mechanical Properties, Journal of Materials Processing Technology, 218(2015), 23-31. 査読有

DOI:10.1016/j.matprotec.2014.11.030

〔学会発表〕(計 31 件)

Masaaki Otsu, Excellent Formability of Light Metals Sheets by Friction Stir Incremental Forming, Metal Forming 2016, 2016年9月18-21日, クラクフ(ポーランド).

大津雅亮, 内村友郎, 岡田将人, 吉村英徳, 松本良, 村中貴幸, 予備成形により曲げ剛性を向上させた板材の摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング, 塑性加工春季講演会, 2016年5月20-22日, 京都市.

森成秀, 松本良, 大津雅亮, 宇都宮裕, 粉末を表面気孔に充填した発泡アルミニウム表面への摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング, 塑性加工春季講演会, 2016年5月20-22日, 京都市.

Masaaki Otsu, Yuanshuang Song, Masato Okada, Hidenori Yoshimura, Ryo Matsumoto, Takayuki Muranaka, Forming and Joining Simultaneous Processing of Two Sheet Metals by Friction Stir Incremental Forming, 日本塑性加工学会第25回北陸支部講演会, 2015年3月8日, 富山市.

大津雅亮, 内村友郎, 岡田将人, 吉村

英徳, 松本良, 村中貴幸, 予備成形により曲げ剛性を向上させた板材の摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング, 日本塑性加工学会第 25 回北陸支部講演会, 2015 年 3 月 8 日, 富山市.

松本良, 森成秀, 大津雅亮, 宇都宮裕, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミングおよびハンマリング加工の組み合わせによる発泡アルミニウムの表面緻密層の増厚化, M&P2015, 2015 年 11 月 14-15 日, 広島市.

大津雅亮, 永井駿哉, 村中貴幸, 吉村英徳, 松本良, 岡田将人, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミングによる表裏同時凹凸形状成形, M&P2015, 2015 年 11 月 14-15 日, 広島市.

大津雅亮, 姜偉, 村中貴幸, 松本良, 岡田将人, 金型を用いたアルミニウム合金板の摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング, M&P2015, 2015 年 11 月 14-15 日, 広島市.

大津雅亮, 市川聖也, 村中貴幸, 吉村英徳, 松本良, 岡田将人, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミングによる A5052 板材の表裏同時加工, 第 66 回塑性加工連合講演会, 2015 年 10 月 29-31 日, いわき市.

森成秀, 松本良, 大津雅亮, 宇都宮裕, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミングにより表面緻密層を形成した発泡アルミニウムの圧縮特性, 第 66 回塑性加工連合講演会, 2015 年 10 月 29-31 日, いわき市.

大津雅亮, 宋元霜, 岡田将人, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミングによる二枚の金属板材の成形・接合同时加工, 日本機械学会 2015 年度年次大会, 2015 年 9 月 13-16 日, 札幌市.

大津雅亮, 永井駿哉, 村中貴幸, 吉村英徳, 松本良, 岡田将人, 表裏同時摩擦攪拌インクリメンタルフォーミングによる凹凸形状成形, 日本機械学会 2015 年度年次大会, 2015 年 9 月 13-16 日, 札幌市.

大津雅亮, 小川拓郎, 村中貴幸, 吉村英徳, 松本良, 岡田将人, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法で成形した板材の形状及びひずみ分布計測, 日本実験力学学会 2015 年度年次講演会, 2015 年 8 月 28-29 日, 新潟市.

Masaaki Otsu, Wei Jiang, Takayuki Muranaka, Ryo Matsumoto, Masato Okada, Friction Stir Incremental Forming of Aluminum Alloy Sheets with Back Support Die, ASMP2015, 2015 年 8 月 10-13 日, ロンボク (インドネシア).

Masaaki Otsu, Seiya Ichikawa, Takayuki Muranaka, Hidenori Yoshimura, Ryo Matsumoto, Masato Okada, Front and Rear Sides Simultaneous Forming by

Friction Stir Incremental Forming, ASMP2015, 2015 年 8 月 10-13 日, ロンボク (インドネシア).

Masaaki Otsu, Friction Stir Incremental Forming of Light Metal Sheets, FimPart15, 2015 年 6 月 12-15 日, ハイデラバード (インド).

森成秀, 松本良, 大津雅亮, 宇都宮裕, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミングによる発泡アルミニウム表面への緻密層形成における増厚化, 塑性加工春季講演会, 2015 年 5 月 29-31 日, 横浜市.

大津雅亮, 小川拓郎, 村中貴幸, 吉村英徳, 松本良, 多段成形による摩擦攪拌インクリメンタルフォーミングにおける成形限界と成形精度の向上, 塑性加工春季講演会, 2015 年 5 月 29-31 日, 横浜市.

大津雅亮, 孫楽, 村中貴幸, 吉村英徳, 松本良, 金型を用いた摩擦攪拌インクリメンタルフォーミングによる凹凸形状加工, 日本塑性加工学会第 24 回北陸支部講演会, 2015 年 3 月 9 日, 福井市.

大津雅亮, 小川拓郎, 村中貴幸, 吉村英徳, 松本良, 多段摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法の開発, 日本塑性加工学会第 24 回北陸支部講演会, 2015 年 3 月 9 日, 福井市.

21 大津雅亮, 永井駿哉, 村中貴幸, 吉村英徳, 松本良, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミングを用いた表裏同時加工による凹凸形状成形, 日本塑性加工学会第 24 回北陸支部講演会, 2015 年 3 月 9 日, 福井市.

22 大津雅亮, 瀬戸晶大, 片山陽介, 松本良, 村中貴幸, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミングにおける工具径が成形性に及ぼす影響, 第 65 回塑性加工連合講演会, 2014 年 10 月 11-13 日, 岡山市.

23 大津雅亮, 片山陽介, 加尾卓也, 村中貴幸, 松本良, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミングプロセスの有限要素解析, 第 65 回塑性加工連合講演会, 2014 年 10 月 11-13 日, 岡山市.

24 大津雅亮, 瀬戸晶大, 片山陽介, 松本良, 村中貴幸, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法における工具径が成形性に及ぼす影響, 日本機械学会 2014 年度年次大会, 2014 年 9 月 7-10 日, 東京.

25 Masaaki Otsu, Mitsuteru Yasunaga, Mitsuhiro Matsuda, Kazuki Takashima, Friction Stir Incremental Forming of A2017 Aluminum Sheets, ICTP2014, 2014 年 10 月 19-24 日, 名古屋市.

26 Masaaki Otsu, Yosuke Katayama, Takayuki Muranaka, Effect of Difference of Tool Rotation Direction

on Forming Limit in Friction Stir Incremental Forming, Metal Forming 2014, 2014年9月21-24日, パレルモ(イタリア).

- 27 Masaaki Otsu, Yosuke Katayama, Takayuki Muranaka, Ryo Matsumoto, Finite Element Analyses of Conventional Single Point Incremental Forming and Friction Stir Incremental Forming of Aluminum Alloy Sheets, ICM&P2014, 2014年6月9-13日, デトロイト(米国).
- 28 大津雅亮, 瀬戸晶大, 片山陽介, 松本良, 村中貴幸, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法における工具小径化が成形性に及ぼす影響, 日本塑性加工学会第23回北陸支部講演会, 2014年3月13日, 白山市.
- 29 大津雅亮, 片山陽介, 加尾卓也, 村中貴幸, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法のFEM解析, 日本機械学会第21回機械材料・材料加工技術講演会, 2013年11月9-10日, 八王子市.
- 30 大津雅亮, 小川拓郎, 村中貴幸, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法で成形した板材の残留応力の評価, 日本機械学会第21回機械材料・材料加工技術講演会, 2013年11月9-10日, 八王子市.
- 31 大津雅亮, 片山陽介, 加尾卓也, 村中貴幸, 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法の有限要素解析, 日本機械学会2013年度年次大会, 2013年9月8-11日, 岡山市.

〔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 Masaaki)
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

(3) 研究分担者

村中 貴幸 (MURANAKA Takayuki)
福井工業高等専門学校・准教授

研究者番号: 50311022

(4) 研究分担者

松本 良 (MATSUMOTO Ryo)
大阪大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 50362645

(5) 研究分担者

岡田 将人 (OKADA Masato)
福井大学・工学研究科・講師
研究者番号: 60369973