

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：12601
 研究種目：挑戦的萌芽研究
 研究期間：2012～2012
 課題番号：24656097
 研究課題名（和文）加熱併用型超音波マイクロ・インクリメンタル・フォーミングによる難加工材の微細造形
 研究課題名（英文）Incremental Microforming of Difficult-to-Work Material with Ultrasonic Assistance
 研究代表者
 帯川 利之（OBIKAWA TOSHIYUKI）
 東京大学・生産技術研究所・教授
 研究者番号：70134830

研究成果の概要（和文）：難加工材であるステンレス箔上に種々の微細なピラミッドをマイクロ・インクリメンタル・フォーミングにより造成し、成形限界を求めた。超音波スピンドルを使用し、動力計により加工力を測定した結果、箔に加工力を効率よく伝え、成形限界の大きな微細加工を実現するためにはスプリングバックを効果的に抑制する方法の開発が極めて重要であることが分かった。また成形限界を与える条件が、ステンレス箔とアルミ箔では大きく異なることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Various shapes of micro pyramids were formed on a stainless steel foil, one of difficult-to-work material, using incremental microforming and the forming limits were obtained for specified forming conditions. Forming forces revealed that it is necessary to develop a forming technology that suppresses the springback of a stainless steel foil in order to transmit forming forces to a foil efficiently and increase the forming limit. It was also found that the stainless foil has a forming limit formulation very different from an aluminum foil.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学

キーワード：機械工作・生産工学、ナノ・マイクロ工学

1. 研究開始当初の背景

ステンレス鋼やチタン合金はエネルギー関連材料として、また生体適合材料として、これからの高齢化社会、低炭素社会において益々重要な役割を担うものと予想される。エネルギー関連材料としては、モバイル機器のための各種素子の微細化、生体材料としては、テーラーメイド化、手術用器具等では低侵襲のための微小・微細化が大きな課題である。

このような微小化・微細化の課題を解決するためには、これらの材料の微細加工技術の発展が不可欠であるが、これらの材料は難加工材であり特に微小・微細部品では加工性が著しく悪い。そのため加工性の高い微細加工

技術の開発・適用が極めて重要である。一方、加工のフレキシビリティを高めるため、金型や特殊な微細工具を必要としない微細加工技術の開発が求められている。マクロな加工で重要な役割を果たす金型が、微細な加工では加工の柔軟性を阻害するだけでなく、微細金型の作成自体が極めて困難な作業となるからである。

こうした背景のもと、研究代表者は、金型が不要でかつ形状に対するフレキシビリティの高い微細成形加工技術として、マイクロ・インクリメンタル・フォーミングの開発を進めてきた。インクリメンタル・フォーミングは成形形状に対する柔軟性が高いだけでなく

成形限界も高いという特徴を有するため、薄板のラピッドプロトタイプング技術として知られている。厚さ10ミクロン程度のアルミ箔の微細成形加工においてはインクリメンタル・フォーミングの塑性限界が引張試験のその10倍以上になることを確認するとともに、100ミクロン以下の微細形状の成形加工技術を実現した。しかし成形限界の増大メカニズムについては、世界的に見ても研究がほとんど進展していない。そのため大きな伸びの発現機構の解明は、マイクロ塑性加工を推進するうえでの理論的なプラットフォームを提供するなど、少なからぬ効果をもたらすものと期待されている。

2. 研究の目的

ステンレス鋼やチタン合金などの難加工材に対し、金型が不要なマイクロ・インクリメンタル・フォーミングの技術を適用し、形状に対するフレキシビリティが高い微細加工技術を確立することを目的とする。これを表現するため、超音波スピンドルを用い、エネルギー関連材料として、また生体適合材料として用いられるステンレス鋼の立体的な膜状微細素子を成形する。具体的な目標としては、ステンレス箔の引張試験による伸びが1%程度であるのに対し、50%以上の伸びをマイクロ・インクリメンタル・フォーミングで実現する。さらに、大きな伸びの発現機構を解明するため、ステンレス箔とアルミ箔の成形限界を求め、それらの特性ならびにき裂の進展状況を比較検討する。

3. 研究の方法

本研究で使用した加工機を図1に示す。本機はX-Yステージ、Zステージ、超音波スピンドル、工具およびブランクホルダーより構成される。X-YステージとZステージの分解能は共に $0.01\mu\text{m}$ である。超音波スピンドルの最高回転数は 20000 min^{-1} 、超音波振動数は約 49kHz 、最大振幅は $2\mu\text{m}$ である。工具には、図2の先端半径 $100\mu\text{m}$ の超微粒子超硬棒を使用した。造形に用いたステンレス箔は厚さ $8\mu\text{m}$ であり、これを図3のテンショナーと呼ぶ突起のついた部品とOリングによって把持した後、図4のようにブランクホルダーで固定した。本研究ではバックアッププレートを使用しないので、ステンレス箔が加工力によってたわまないだけの張力を予めステンレス箔に付与する必要があり、このためにテンショナーを使用した。

なお、上述のようにステンレス箔の引張試験による伸びは1%程度であり、極めて小さい。ステンレス箔と比較するアルミ箔では、引張試験での伸びが約5%、マイクロ・インクリメンタル・フォーミングでの伸びは最大で100%以上である。

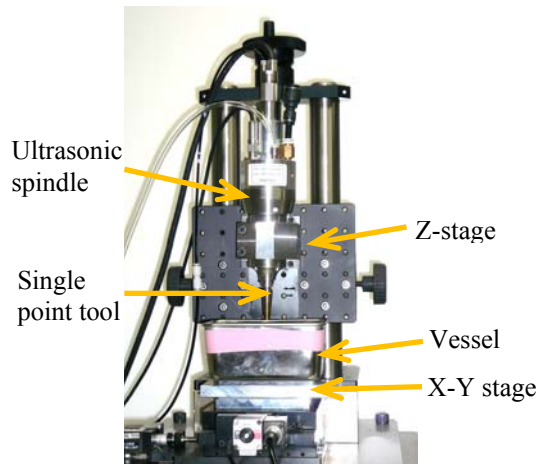


図1 マイクロ・インクリメンタル・フォーミング装置

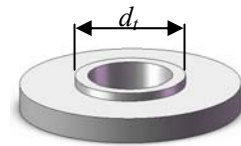


図2 マイクロ工具 図3 テンショナー (先端半径 $100\mu\text{m}$)

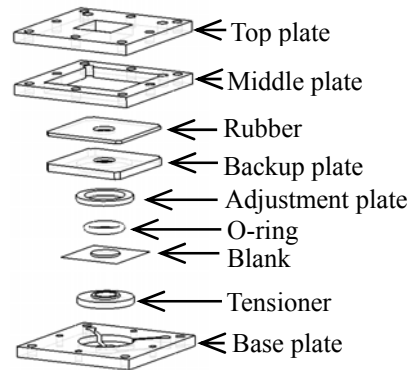


図4 ブランクホルダー

図1の微細成形装置では、工具を回転することによりステンレス箔にせん断応力を加え、箔の変形を促進する。また超音波振動によってその変形がより促進されることが期待される。工具と箔との界面の潤滑には還元水を使用した。高速で工具を回すと動圧が発生し、接触圧力の小さいところに水が侵入して潤滑するので、損傷の少ない加工が実現するものと考えられる。なお、還元水を用いずにドライで加工すると、薄膜の損傷が発生しやすく、全般的に加工が困難になる。

シングルポイント工具によるマイクロ・インクリメンタル・フォーミング過程の一例として、底面の外接円直径 D 、高さ h 、ピラミッドの中心軸と対向する二等辺三角形との

なす角 θ 、中心軸と対向する稜線とのなす角 α （以下では、 θ と α を共に半頂角と呼ぶ）のピラミッドの逐次成形プロセスを図5に示す。ブランクの厚さは t 、工具の回転速度は ω 、工具が一回の同一平面上の加工で押し出す高さは dz である。したがって工具がZ方向に dz だけ移動する毎に、工具軌跡は $dy = dz \tan \theta$ ($\Delta y = dz \tan \alpha$)だけ縮小する。

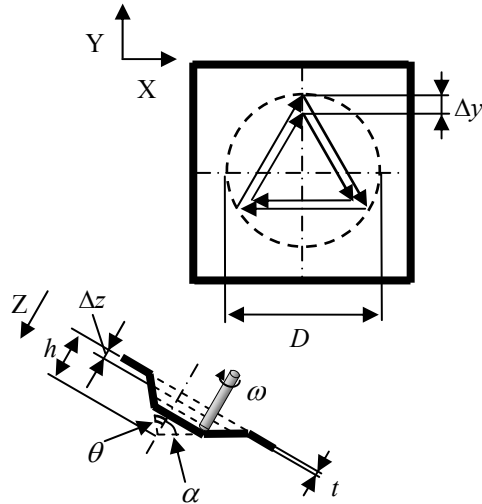


図5 シングルポイント工具による逐次成形プロセス

半頂角 θ のマイクロピラミッドが損傷なく成形された場合、ピラミッドを構成する二等辺三角形は、図6のように直角二等辺三角形から $\text{cosec}\theta$ 倍の高さの二等辺三角形に変形するので、伸び(%)は、 $100(\text{cosec}\theta - 1)$ 、伸び方向の対数ひずみは $\epsilon_\theta = \ln(\text{cosec}\theta)$ と与えられる。そこで、成形可能な最小の半頂角を実験により求め、それに対して上式で計算される対数ひずみを、二等辺三角形の最大主ひずみ $\epsilon_{\theta\max}$ とした。また稜線方向のひずみ ϵ_α とそれに垂直方向の表面のひずみ ϵ_{sb} を稜線における二つの主ひずみとして定式化するとともに、マイクロピラミッドの成形実験の結果より成形限界を与える $\epsilon_{\alpha\max}$ と $\epsilon_{sb\max}$ の関係を求め、ステンレス箔とアルミ箔の違いを明らかにした。

4. 研究成果

ステンレス箔のピラミッドのマイクロ・インクリメンタル・フォーミングの途中で加工力の測定を開始し、そこから工具が約 2.75 周する間に得られたステンレス箔の加工力の変化を図7に示す。この図では、z 方向の加工力として絶対値ではなく変動成分のみが示されている。一方、x 方向ならびに y 方向の加工力は、複雑に変化しているが、同じパターンが繰り返されており、ほぼ定常的な加工状態にある。

図8ではz方向の加工力を測定するため、

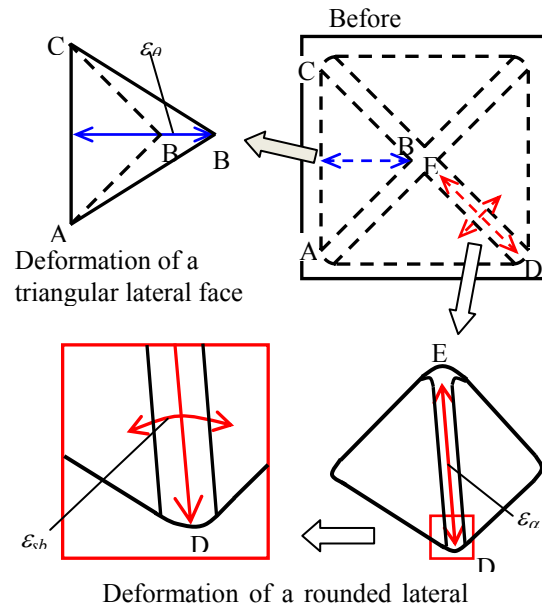


図6 ピラミッドのマイクロ成形加工前後の試験片の形状と側面ならびに稜線のひずみ

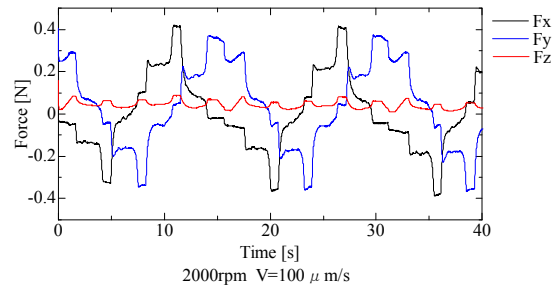


図7 ステンレス箔のマイクロ・インクリメンタル・フォーミングにおける加工力の変化（工具の周回数：約 2.75）。ただし z 方向の加工力は変動成分のみ。

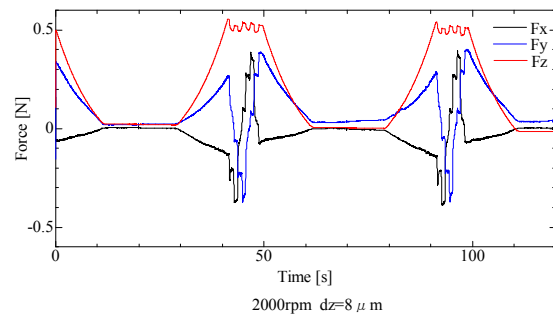


図8 ステンレス箔のマイクロ・インクリメンタル・フォーミングにおける加工力の変化

工具が1周する毎に工具を引き上げ、加工力が0となる状態を挿入した。工具が1周する間の加工力の変動ならびに除荷負荷過程での力の変化は、次の回でほぼ再現され、同じ

状態が繰り返されている。同図より工具を大きく引き上げるまで加工力が解放されないことから、除荷過程でステンレス箔が大きくスプリングバックすることが分かる。このようにステンレス箔のコンプライアンスが大きいため、最大振幅 $2\mu\text{m}$ の超音波振動では加工力に十分な変動を起こすほどの効果がなく、ステンレス箔のスプリングバックを効果的に抑制する方法の開発が極めて重要であることが分かった。

図9は、 n 角錐の成形限界における二等辺三角形の側面の主ひずみを、ステンレス箔とアルミ箔とで比較した結果である。ステンレス箔では、3角錐から5角錐までほぼ同じひずみで成形限界に達するのみ対し、アルミ箔では、成形限界での主ひずみの値がステンレス箔より大きく、しかも形状により大きく異なることが分かる。これよりステンレス箔については、成形限界が

$$\epsilon_{c1} = \epsilon_{\theta\text{max}} \quad (1)$$

で与えられることが明らかとなった。

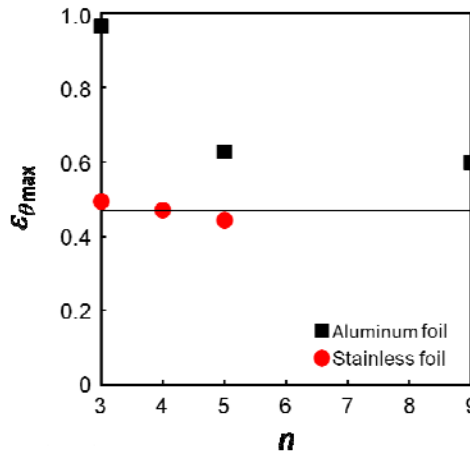


図9 ステンレス箔とアルミ箔の n 角錐の成形限界における二等辺三角形の側面の主ひずみの比較

一方、図10は、 n 角錐の成形限界における稜線上のふたつの主ひずみをそれぞれグラフの両軸にとり、それらの関係をステンレス箔とアルミ箔とで比較した結果である。アルミ箔では、井関らの定式化と同様に、成形限界として

$$\epsilon_{c2} = \epsilon_{\alpha\text{max}} + \epsilon_{sb\text{max}} \quad (2)$$

が成立することが分かる。

以上の結果より、式(1)のステンレス箔の成形限界からは、二等辺三角形の底辺と垂直な方向に大きな引張り応力が作用するため底辺と平行にき裂が生成されること、一方、アルミ箔の稜線における式(2)の成形限界からは、

$$\epsilon_{\alpha\text{max}} > \epsilon_{sb\text{max}} \quad (3)$$

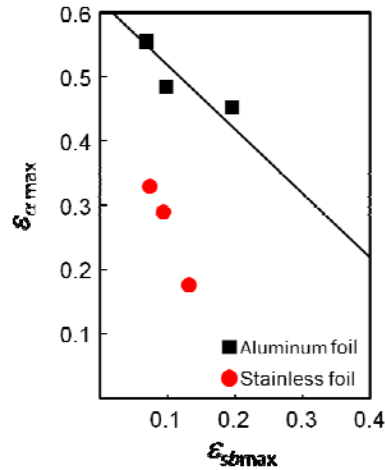


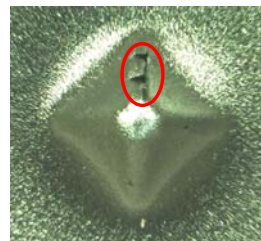
図10 ステンレス箔とアルミ箔の n 角錐の成形限界における稜線の二つの主ひずみの関係

であることを考慮すると、稜線にほぼ平行に大きな引張り応力が作用するため、稜線に垂直な方向にき裂が生成されることが予想される。

これを実証するため、成形限界を僅かに超えた状態でピラミッドの成形を行い、き裂の生成方向を観察した。図11にき裂の観察結果を示す。ステンレス箔では、三角錐においても四角錐においてもき裂は側面の二等辺三角形の底辺と平行に発生すること、一方、アルミ箔では稜線にほぼ垂直にき裂が発生することが確認され、提案した成形限界の妥当性が示された。



(a) ステンレス箔 ($\theta = 36.5^\circ$ and 38.1°)



(b) アルミ箔

図11 ステンレス箔とアルミ箔の成形限界付近におけるき裂の発生状況

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 1 件)

(1) Toshiyuki Obikawa, Tsutomu Sekine, Fabrication of miniature shell structures of stainless steel foil and their forming limit in single point incremental microforming, International Journal of Automation Technology, 査読有, Vol. 7, No. 3, 2013, pp. 256-262.
<http://www.fujipress.jp/IJAT/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

帯川 利之 (OBIKAWA TOSHIYUKI)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：70134830