

難加工材の超音波インクリメンタル・マイクロフォーミング

東京大学 生産技術研究所
教授・帯川 利之
(平成 26 年度一般研究開発助成 AF-2014023)

キーワード：インクリメンタルフォーミング，金属箔，超音波加工

1. 研究の目的と背景

微細で生体適合性の高い構造は、生体用の担体やセンサー、マイクロテスター、フィルター等の機能部品としての利用が期待されている。シリコンや樹脂のマイクロ加工に対しては、フォトリソグラフィやナノインプリンティングなどが広く用いられているが、ステンレス鋼やチタン合金等の金属に対しては、形状と表面の加工制御性にすぐれたマイクロスケールの高能率な加工技術の開発が求められている。

一方、高効率で環境負荷の小さいエネルギー源として、燃料電池の高度な利用が求められている。自動車用の燃料電池のさらなる高効率化、将来的には携帯用情報通信機器の超小型の燃料電池の開発が期待され、ステンレス鋼のセパレータの厚さの低減と溝パターンの微細化技術が求められている。また、チタン箔に対しても生体用の担体などの利用のため、微細なパターンニング技術の開発が期待されている。

マイクロインクリメンタルフォーミングは、金属箔を対象とした逐次成形加工法であり、微細なラピッドプロトタイピングとしての特徴を有している¹⁻⁴⁾。金型や工作物を支えるバックングプレートを使用せず、単純な棒状工具を用いて箔を微量押し出す単純な操作を繰り返すことにより、自由度の高い加工を実現している。成形寸法は概ね数十ミクロンから 1 ミリメートルであり、使用する棒状工具の先端半径は 10 から 100 ミクロンである。

本研究では、将来的に幅広い応用が期待される難加工材の箔のシングルポイント・インクリメンタル・マイクロフォーミング技術の基礎を確立する。難加工材であるステンレス箔⁴⁾やチタン箔は、剛性が高いためにスプリングバックが大きく、成形時にアルミ箔のような高い形状精度が得られない。そこで、超音波振動スピンドルを適用し、成形形状の高精度化を図る。

まずは加工が容易なアルミ箔を対象に、超音波振動がインクリメンタルマイクロフォーミングに及ぼす影響を明らかにする。次に、アルミ箔で得られた知見を基に、難加工材である SUS304 のステンレス箔と純チタン箔の加工を実施する。また、超音波振動とレーザー加熱が加工に及ぼす影響について検討する。

2. 研究方法

2.1 実験装置

マイクロインクリメンタルフォーミングに用いたデスクトップ形の実験装置を図 1 に示す。実験装置は開発当初から少しずつ変化しているが¹⁻⁴⁾、同図では、超音波振動スピンドルと加熱用のレーザーが装着されている。超音波スピンドルの振動方向は軸方向(Z 方向)、振動数は 42.5 kHz である。厚さが 12 μm 以下の薄い箔をブランク材とするため、超音波振動で箔が損傷を受けないように、振幅を最小値の 0.5 μm に設定した。

X-Y テーブルと Z ステージの分解能はともに 0.01 μm である。図 1 では、超音波スピンドルの冷却に用いる圧縮空気が主軸端から下向きに噴出する。成形中に圧縮空気が箔に直接当たるのを防止するため、アクリルの遮蔽版が取り付けられている。レーザーは局所加熱に用いるため出力が 130 mW と小さい。レーザー光はブランクホルダーの下に置かれたプリズム反射し、箔の裏側を加熱する。

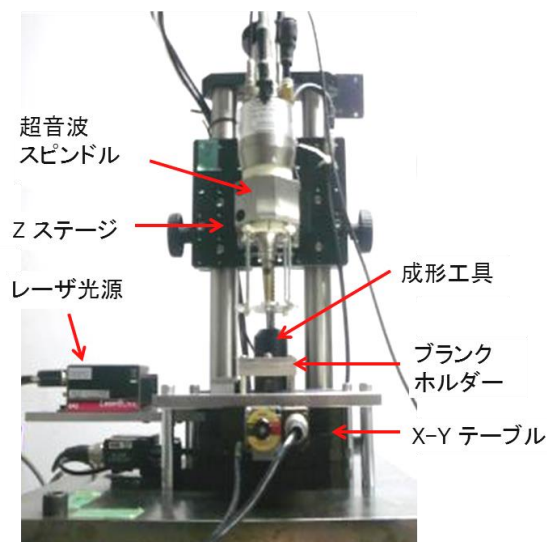


図 1 インクリメンタル・マイクロフォーミング装置

一般に、インクリメンタルフォーミングでは、成形範囲を制限するため、バックングプレートと呼ばれる支持板を使用する。しかし、微細加工ではバックングプレートの加工自体が難しくなるので、棒状工具のみ

を使用し、バックリングプレートを使用しない加工技術を開発している¹⁻⁴⁾。

図2にブランクホルダーの構造を示す。箔に適度な張力をかけ箔を水平に保持するため、オーリングとテンショナーの組合せを使用した²⁻⁴⁾。テンショナーの拡大図を図2右下に示す。

成形に使用した箔は、厚さ $6.5\ \mu\text{m}$ と $12\ \mu\text{m}$ のアルミ箔 (8021 相当材), 厚さ $8\ \mu\text{m}$ のステンレス箔 (SUS304), 厚さ $5\ \mu\text{m}$ の純チタン箔である。また、棒状工具には、図3の先端半径 R が $10\ \mu\text{m}$ と $100\ \mu\text{m}$ の超微粒子超硬を用いた。また加工液は n-プロピルアルコールを使用した。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加工液が侵入して潤滑する。その結果、加工力が低下し、損傷の少ない加工が実現するものと考えられる⁵⁾。なお、加工液を用いずにドライで加工すると、箔は損傷しやすく、加工が困難になる。

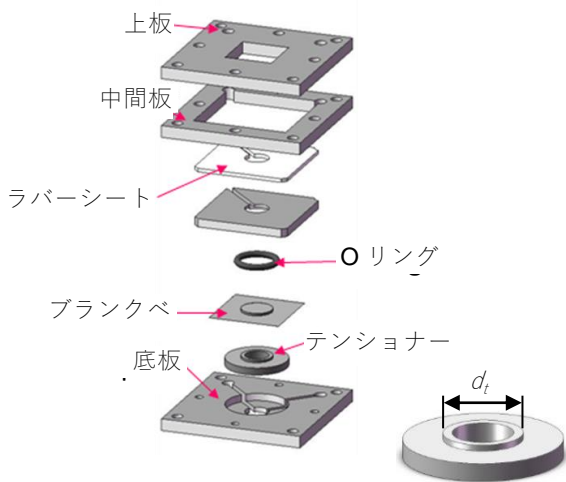
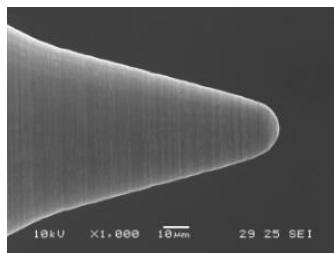
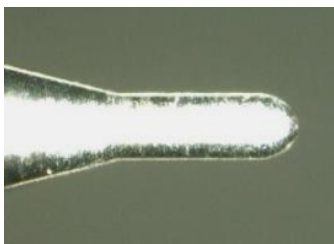


図2 ブランクホルダーの構成とテンショナー拡大図 (右下)



(a) 先端半径 $10\ \mu\text{m}$



(b) 先端半径 $100\ \mu\text{m}$

図3 マイクロ成形工具の先端形状

2.2 成形方法と成形限界

棒状工具によるマイクロインクリメンタルフォーミングの一例として、図4に、三角錐の逐次成形プロセスを示す。三角錐の底面の外接円直径は D , 高さは h , 三角錐の中心軸とそれに対向する側面の二等辺三角形とのなす角は θ , 中心軸とそれに対向する稜線とのなす角は α である。なお、 θ と α を共に半頂角と呼ぶ。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 d_z である。したがって工具が Z 方向に d_z だけ移動する毎に、正三角形の工具軌跡は、底辺と直角に $d_y = d_z \tan\theta$ だけ縮小し、頂点は $\Delta y = d_z \tan\alpha$ だけ内側に移動する。

主軸回転速度とテーブル速度は特に断らない限り、それぞれ $5,000\ \text{min}^{-1}$ と $200\ \mu\text{m/s}$ であるが、チタン箔に $D = 283\ \mu\text{m}$ のマイクロピラミッドを成形するときは、主軸回転速度を $10,000\ \text{min}^{-1}$ に、テーブル速度を $150\ \mu\text{m/s}$ に変更した。軸方向送り d_z は厚さ $6.5\ \mu\text{m}$ と $12\ \mu\text{m}$ のアルミ箔に対しそれぞれ $5\ \mu\text{m}$ と $12\ \mu\text{m}$, ステンレス箔に対し $5\ \mu\text{m}$, チタン箔の $D = 1.41\ \text{mm}$ and $D = 283\ \mu\text{m}$ の四角錐台の成形に対し、それぞれ $2\ \mu\text{m}$ と $1\ \mu\text{m}$ に設定した。

半頂角 θ のマイクロピラミッドを成形すると、ピラミッドの側面を構成する二等辺三角形は、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。その伸び (%) は $100(\text{cosec}\theta - 1)$, 伸び方向の対数ひずみは $\varepsilon_\theta = \ln(\text{cosec}\theta)$ である。半頂角 θ を変え、損傷なく成形可能な最小の θ の値を求め、それに対して上式で計算される対数ひずみを、成形限界における二等辺三角形の最大主ひずみ $\varepsilon_{\theta\text{max}}$ とした。

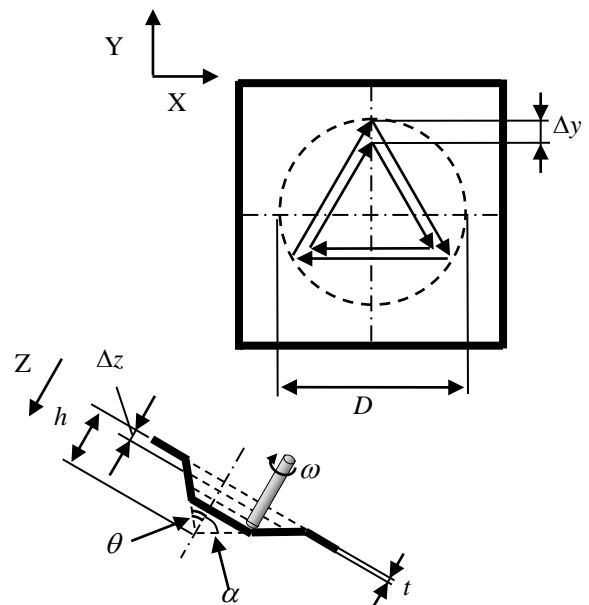


図4 棒状工具による逐次成形プロセス

3. 研究成果

3.1 アルミ箔の成形限界に及ぼす超音波振動の効果

図5と6にアルミ箔の四角錐台の成形限界に及ぼす超音波振動とレーザー加熱の影響を示す。箔の厚さは $6.5 \mu\text{m}$ 、四角錐台底面の外接円の直径は 1.41 mm 、工具径は $100 \mu\text{m}$ である。また、図5がレーザー加熱の無い場合、図6がレーザー加熱のある場合の結果である。


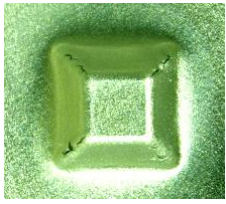
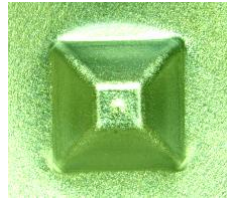
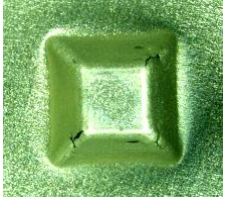
θ	39.5°	37.4°
ε	0.45	0.50
NV & NH		
V & NH		

図5 アルミ箔の四角錐台の成形限界に及ぼす超音波振動の影響


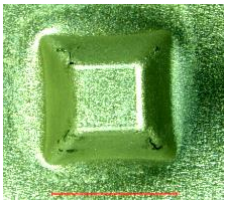
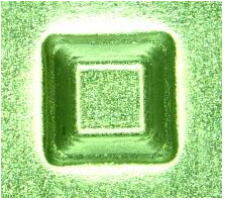
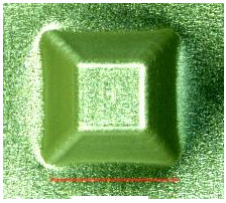
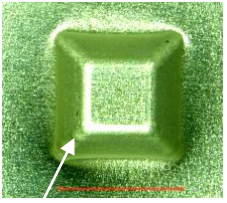

θ	37.4°	35.2°
ε	0.50	0.55
NV & H		
V & H		
θ	32.9°	30.0°
ε	0.61	0.69
V & H		

図6 アルミ箔の四角錐台の成形限界に及ぼす超音波振動とレーザー加熱の影響

両図では、超音波振動の有無をそれぞれ記号VとNVで、レーザー加熱の有無をそれぞれHとNHで示す。また図の顕微鏡写真の上の欄に半頂角 θ とそれに対する対数ひずみ ε の値を表示した。

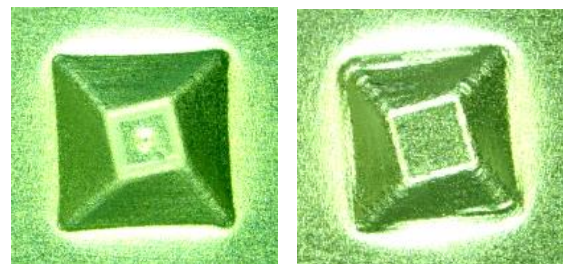
図5より、レーザー加熱の無い場合、超音波振動の有無にかかわらず $\theta = 39.5^\circ$ の四角錐台は損傷なく成形され、 $\theta = 37.4^\circ$ ではき裂が発生、成長した。き裂は既報⁴⁾と同様に稜線に沿って多く見られた。これらの結果より、レーザー加熱の無い場合の成形限界 ε_c は0.45であり、超音波振動の影響はほとんどないことが分かった。本実験における成形限界は、還元水を潤滑液として使用した実験結果^{2,3)}より小さいが、その理由はn-プロピルアルコールが還元水より潤滑性に乏しいこと、アルミ箔の厚さが $12 \mu\text{m}$ から $6.5 \mu\text{m}$ になり箔の伸びが減少したことによるものと思われる。

レーザー加熱を使用した時には、図6より成形限界が増加し、超音波振動のある場合 $\varepsilon = 0.55$ 、超音波振動の無い場合 $\varepsilon = 0.50$ となった。これよりレーザー加熱は成形限界を増加させ、超音波振動との併用時に最大になることが分かった。

3.2 アルミ箔の成形精度に及ぼす超音波振動の効果

本節では、比較的複雑な形状のピラミッドを成形し、超音波振動が加工精度に及ぼす影響を検討した。ただし、レーザー加熱は使用していない。

図7は、先端半径 $100 \mu\text{m}$ の工具を用いて厚さ $6.5 \mu\text{m}$ のアルミ箔上に成形した底辺 1.0 mm 、半頂角 $\theta = 39.5^\circ$ のねじれ四角錐台である。ねじれ四角錐台では、側面の半分で仰角が増大し、反対側の半分で仰角が低下する。したがって、稜線の両側でひずみが異なり力の平衡が取れにくい。超音波振動を付加すると、ピラミッドの側面は波打った状態が消えて滑らかになり、成形状態が安定し、加工精度が大幅に向上した。

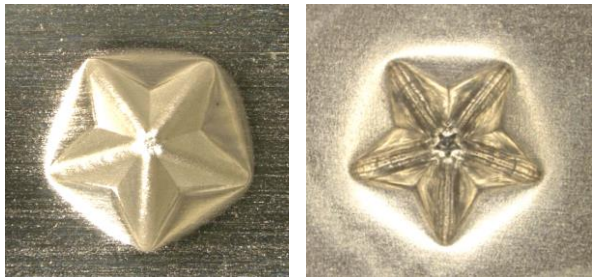


(a) 超音波振動有り (b) 超音波振動無し

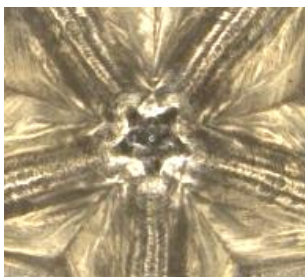
図7 アルミ箔のねじれ四角錐台の成形限界に及ぼす超音波振動の影響

次の例として、図8、9に星形ピラミッドの成形結果を示す。星の外接円の直径は 1.6 mm 、アルミ箔の厚さは $12 \mu\text{m}$ である。図8は超音波振動を付加した場合、図9は超音波振動を付加しない場合である。両図の星形ピラミッドは共に、稜線と谷部が良好に成形され、全体的な

形状をみるかぎりには、とりわけ際立った違いがみられない。しかし、成形工具が直接接触する裏側では、成形後の中心部の形状に明確な違いがみられた。即ち、超音波振動のある場合には、五角形の軌跡が明確に残っているが、超音波振動のない場合には、工具軌跡が不明確で、工具の移動とそれに伴う成形プロセスが不安定であったと推察される。

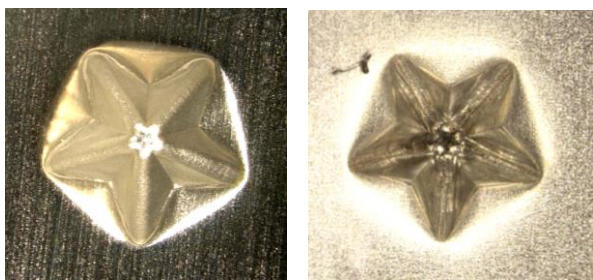


(a) 上部からの観察 (b) 底部からの観察

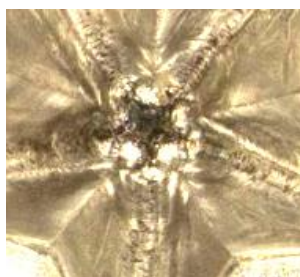


(c) ピラミッド中央部（裏面）

図 8 アルミ箔の星形ピラミッド（超音波振動有り）



(a) 上部からの観察 (b) 底部からの観察



(c) ピラミッド中央部（裏面）

図 9 アルミ箔の星形ピラミッド（超音波振動なし）

図 7, 8, 9 の結果より超音波振動は成形部品の形状精度を改善することが分かった。そこで、超音波振動を使

用し、図 10 の階段状のピラミッドを成形した。底面の外接円の直径は 1.41 mm、箔の厚さは 6.5 μm である。平坦部が狭いが、しわや大きなゆがみは確認されない。

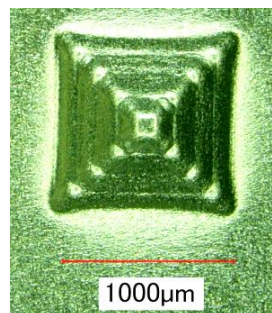


図 10 アルミ箔の階段状ピラミッド
（超音波振動有り）

3.3 ステンレス箔の成形に及ぼす超音波振動の効果

上述のように、超音波振動は、星形ピラミッドや振じれピラミッドのような複雑なピラミッドの形状精度の改善に効果的であった。しかし、アルミ箔の四角錐台の成形においては、当初より形状精度に特段の問題が発生していないので、超音波振動もレーザー加熱もほとんど効果がみられなかった。一方、曲げ剛性の高いステンレス箔の四角錐台の成形においては、超音波振動とレーザー加熱は形状精度を効果的に改善した。

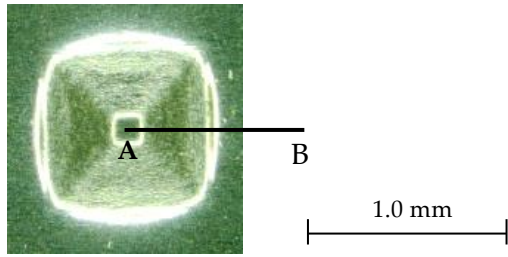
図 11 は、厚さ 8 μm のステンレス箔上に成形した $D = 1.0 \text{ mm}$, $\theta = 45^\circ$ の四角錐台の側面プロファイルであり、同図(a)の直線 AB に沿って共焦点レーザー変位計で測定した。同図(b), (c)はそれぞれ、超音波振動とレーザー加熱をいずれも使用しない場合とそれらを共に使用した結果である。測定されたプロファイルでは、ピラミッドの側面と箔のベースラインとが曲線で結ばれているが、超音波振動とレーザー加熱を共に使用した場合には、曲線の曲率半径が小さく、精度の高い成形が実現している。

成形精度を定量的に評価するため、成形されたプロファイルにおける図 12 の距離 δ (理想的な側面とベースラインとの交点 C から曲線までの最短距離) を測定した。スプリングバックの無い理想的な成形プロファイルでの距離 δ を δ_0 とおくと、 $\delta - \delta_0$ が形状誤差となる。

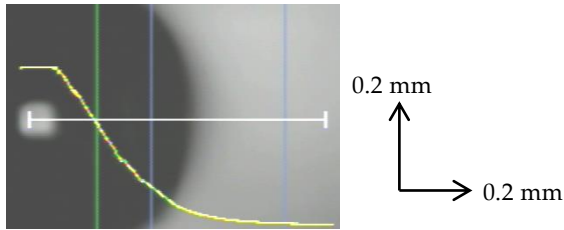
理想的な成形プロファイルにおける距離 δ_0 は、

$$\delta_0 = R \left[\sqrt{1 + \tan^2 \left(\frac{\pi - 2\theta}{4} \right)} - 1 \right] \quad (1)$$

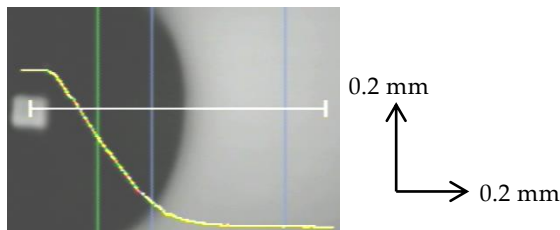
で与えられるので、 $R = 100 \mu\text{m}$, $\theta = 45^\circ$ において $\delta_0 = 8.2 \mu\text{m}$ である。また δ の値は、超音波振動とレーザー加熱をいずれも使用しない場合に 43 μm 、それらを共に使用した場合には 26 μm であることから、超音波振動とレーザー加熱は、形状精度を 34.8 μm から 17.8 μm に半減させたことが分かる。



(a) 側面プロファイルの計測ライン



(b) 側面プロファイル (NV, NH 条件)



(c) 側面プロファイル (V, H 条件)

図 11 ステンレス箱の四角錐台の側面プロファイル

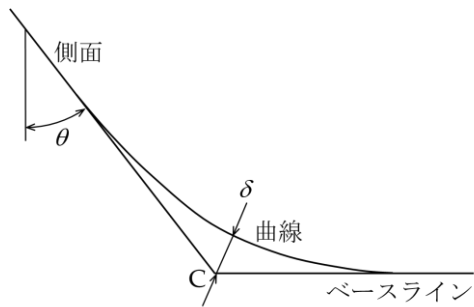


図 12 四角錐台の側面プロファイルの精度評価

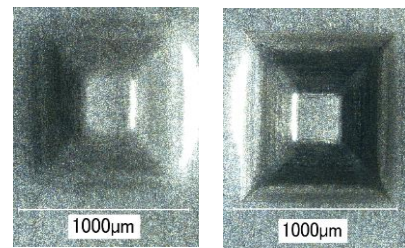
3.4 チタン箱の成形に及ぼす超音波振動の効果

チタン箱のピラミッドの成形に及ぼす超音波振動の影響を図 13 に示す。箱の厚さは $5 \mu\text{m}$, $D = 1.41 \text{ mm}$, $\theta = 50^\circ$ である。また同図(a), (b)はそれぞれ、超音波振動を付加した場合としない場合の結果である。超音波振動を付加した場合には成形したピラミッドの表面が平滑であるのに対し、超音波振動を使用しない場合にはしわがみられる。しわの間隔は、成形工具の軸方向送り dz より非常に大きい。前節のステンレス鋼の結果と本結果より、難加工材の高精度な成形に対し、超音波振動が有効に作用することが分かる。

上記の結果を踏まえ、 $D = 283 \mu\text{m}$ の微小四角錐台の成

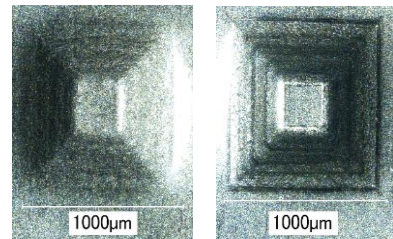
形を、超音波振動を援用し実施した。使用した成形工具の半径は $10 \mu\text{m}$ である。図 14 に成形されたピラミッドの顕微鏡写真を示す。チタン箱の微小四角錐台の成形は可能であるが、その精度は図 13(a)の結果と比較し明らかに低下した。

本実験では、極細工具の使用に伴い、上述のように、工具の回転数を $5,000 \text{ min}^{-1}$ から $10,000 \text{ min}^{-1}$ に増加させたが、工具の表面速度は 1/5 に低下した。また、工具への負荷を低下させるため、テーブル速度を $200 \mu\text{m/s}$ から $150 \mu\text{m/s}$ に、軸方向送り dz を $2 \mu\text{m}$ から $1 \mu\text{m}$ に変更した。成形精度低下の主たる理由が工具表面速度の低下であると思われるが、成形精度を向上させるためには、加工条件の最適化が不可欠である。



(a) 超音波振動あり

(左：トップビュー，右：ボトムビュー)



(b) 超音波振動なし

(左：トップビュー，右：ボトムビュー)

図 13 チタン箱の四角錐台の成形限界に及ぼす超音

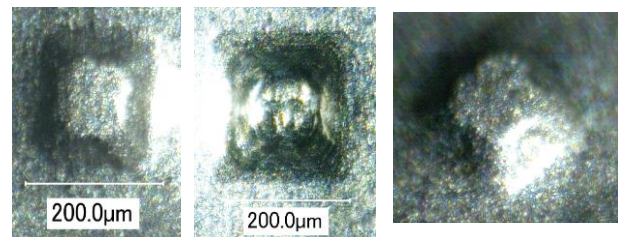


図 14 超音波チタン箱の四角錐台の成形に及ぼす超音波の影響 (左：トップビュー，中央：ボトムビュー，右：俯瞰)

4. 結論

剛性が高く、スプリングバックが大きいステンレス箱やチタン箱の微小なインクリメンタルフォーミング技術を確立するため、超音波振動スピンドルを適用し、成形形状の高精度化を図った。

最初に、超音波振動を使用したアルミニウム合金の成

形を行い、レーザ加熱を併用する場合に成形限界が増加することを確認した。また、複雑な形状の成形では、超音波振動が成形精度を大幅に改善することを明らかにした。次にステンレス箔の成形においては、比較的単純な四角錐台の成形においても超音波振動とレーザ加熱により成形精度の大幅な改善が得られることを示した。また、チタン箔の成形においても超音波振動により高精度な成形が実現することを示した。しかし、微小な成形においては、加工条件の最適化が高精度加工のために必要であることを確認した。

謝 辞

本研究の一部は、公益財団法人天田財団の平成 26 年度一般研究開発助成によるものである。記して深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) T. Obikawa · S. Satou · T. Hakutani : Dieless incremental micro forming of miniature shell objects of aluminum foils, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 49, (2009), 906-915.
- 2) T. Sekine · T. Obikawa : Single point micro incremental forming of miniature shell structures, *J. Adv. Mech. Des. Sys. Manuf.*, 4, (2010), 543-557.
- 3) T. Obikawa · T. Hakutani · T. Sekine · S. Numajiri · T. Matsumura · M. Yoshino : Single-point incremental micro-forming of thin shell products utilizing high formability, *J. Adv. Mech. Des. Sys. Manuf.*, 4, (2010), 1145-1156.
- 4) T. Obikawa · T. Sekine : Fabrication of miniature shell structures of stainless steel foil and their forming limit in single point incremental microforming, *Int. J. Aut. Tech.*, 7, (2013), 256-262.