



T. Obikawa

## インクリメンタル・マイクロフォーミングによる 金属，セラミック微細薄膜構造の造形

帯川 利之\*

### 1. まえがき

マイクロな機能性構造体は、センサーやフィルター、生体用のマイクロテスター等としての利用が期待されており、その創成技術として、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加工技術の開発が求められている。この要求に応えるため、マイクロ切削加工、マイクロビーム加工、マイクロ放電加工、インクリメンタル・マイクロフォーミング等、微細な金型を必要としない種々の加工技術が鋭意研究されている。また最近では、微細なアディティブマニファクチャリング (AM) の研究も進められている。

本報では、マイクロ塑性加工のラピッドプロトタイピングともいうべき、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を利用した金属とセラミックの微細な薄膜構造の造形について述べる。対象とする寸法は概ね数十ミクロンから1ミリメートルであり、これに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。金属箔の成形では、アルミ箔の成形特性、アルミ箔とステンレス箔の成形特性の相違、成形特性に及ぼす超音波スピンドルの効果について検討し、セラミック膜の造形では、インクリメンタル・マイクロフォーミングにコーティングとエッチングとを組み合わせた造形技術の開発を検討した。

### 2. 実験方法

#### 2.1 実験装置

超音波振動スピンドルを使用した時のインクリメンタル・マイクロフォーミング装置を図1に示す。マイクロ成形装置は少しずつ進化しているが<sup>1-3)</sup>、X-YテーブルとZステージの分解能はともに0.01  $\mu\text{m}$  である。超音波スピンドルの振動数は42.5 kHzであり、その振幅は0.5  $\mu\text{m}$  に設定した。また図1では、主軸端から下向きに噴出している超音波スピンドルの冷却用圧縮空気が成形中の箔に直接当たるのを防止するため、風よけのアクリル板が取り付けられている。

ブランクホルダーの構成を図2に示す。その構造は少し複雑であるが、オーリングとテンショナー(図2右下に拡大図)の組合せにより、箔に適度な張力をかけ箔を水平に保持する

方法を採用している<sup>2,3)</sup>。この組合せは、海外で開発されたインクリメンタル・マイクロフォーミング装置にも適用されている<sup>4)</sup>。

一般に、インクリメンタルフォーミングでは、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、加工寸法が微細になるとバックングプレートの加工自体が難しくなるので、バックングプレートを使用せずに加工を行った。

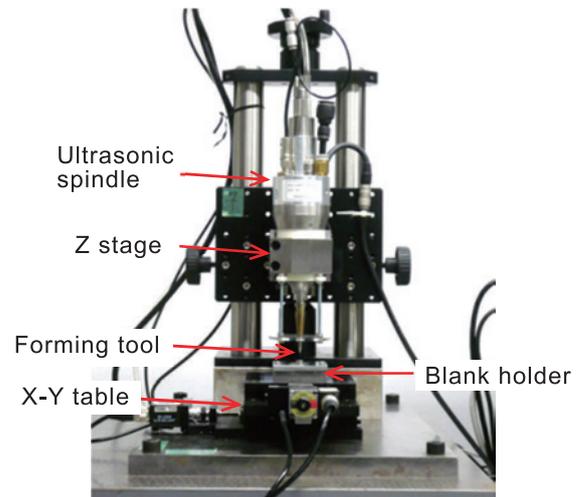


図1 インクリメンタル・マイクロフォーミング装置

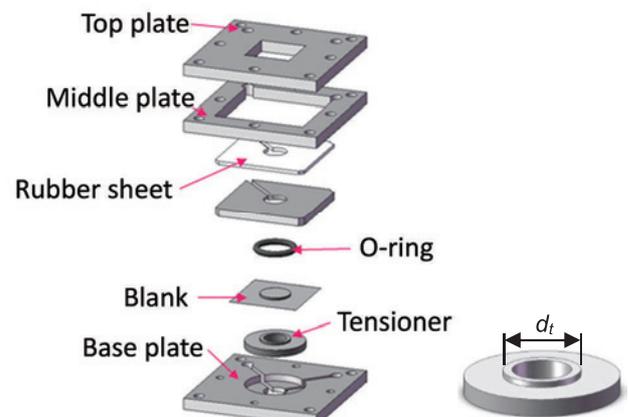


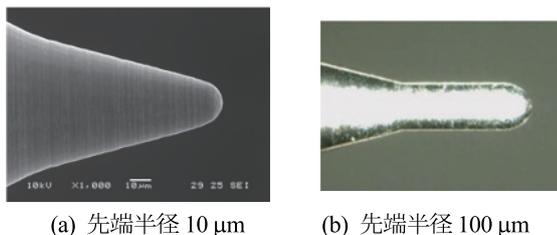
図2 ブランクホルダーの構成とテンショナー拡大図 (右下)

工具には、図3の先端半径10  $\mu\text{m}$  と100  $\mu\text{m}$  の超微粒子超硬を、また加工用の箔には厚さ12  $\mu\text{m}$  のアルミ箔 (8021 相当材) と厚さ8  $\mu\text{m}$  のステンレス箔 (SUS304) を使用した。

\* 東京大学生産技術研究所 教授

箔は薄くなるにつれて伸びが減少する。両者の引張試験における伸びはそれぞれ3-5%程度<sup>5)</sup>と1%程度<sup>6)</sup>と想定され、通常の成形加工でこれらの箔に大きなひずみを与えることは難しい。

加工液には還元水あるいは 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。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、一般的に加工が困難になる。



(a) 先端半径 10 μm (b) 先端半径 100 μm

図3 マイクロ成形工具

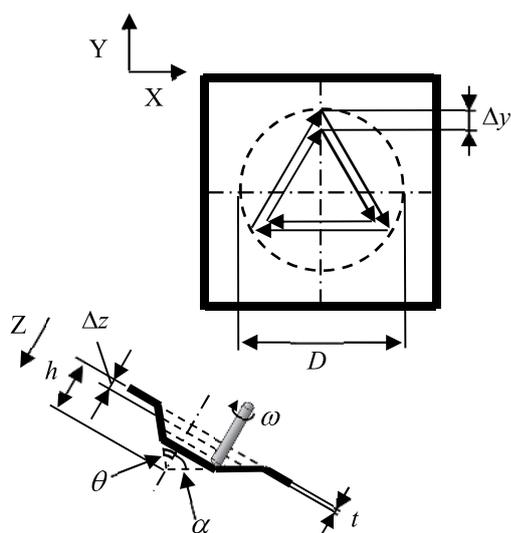


図4 シングルポイント工具による逐次成形プロセス

### 2.2 実験方法と成形限界の評価

シングルポイント工具によるインクリメンタル・マイクロフォーミングの一例として、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  $\theta$ 、中心軸と対向する稜線とのなす角  $\alpha$  (以下では、 $\theta$  と  $\alpha$  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4に示す。プランクの厚さは  $t$ 、工具の回転速度は  $\omega$ 、工具が一回の同一平面上の加工で押し出す高さは  $\Delta z$  である。したがって工具が  $Z$  方向に  $\Delta z$  だけ移動する毎に、工具軌跡は底辺と直角に  $dy = \Delta z \tan \theta$  だけ縮小し、頂点は  $\Delta y = \Delta z \tan \alpha$  だけ内側に移動する。

半頂角  $\theta$  のマイクロピラミッドが損傷なく成形された場合、ピラミッドの側面を構成する二等辺三角形は、図5のように

直角二等辺三角形から  $\operatorname{cosec} \theta$  倍の高さの二等辺三角形に変形するので、伸び (%) は  $100(\operatorname{cosec} \theta - 1)$ 、伸び方向の対数ひずみは  $\epsilon_\theta = \ln(\operatorname{cosec} \theta)$  で与えられる。そこで、損傷なく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  $\epsilon_{\alpha \max}$  とした。一方、稜線は線ではなく丸みを有し、内側が工具先端と同じ半径の円筒面となるので、稜線方向のひずみ  $\epsilon_\alpha$  とそれに垂直方向の外側表面のひずみ  $\epsilon_{sb}$  を稜線における二つの主ひずみとして定式化した<sup>2)</sup>。また、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  $\epsilon_{sb \max}$  を求め、それらの関係を明らかにした。

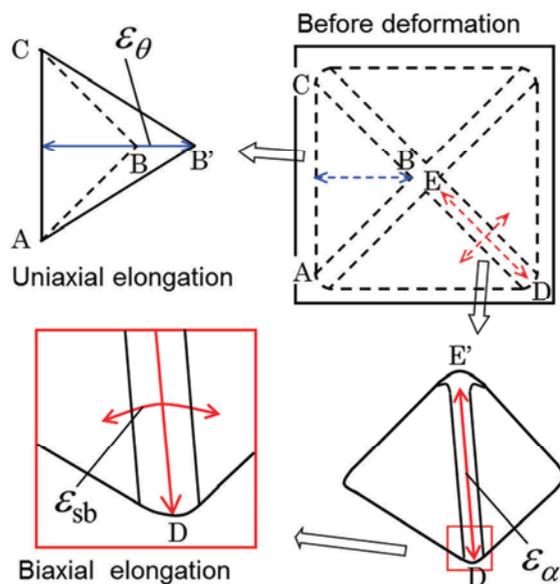


図5 マイクロピラミッドの成形加工前後の試験片の形状と側面ならびに稜線のひずみ

### 2.3 セラミックス薄膜構造物の造形

アルミ箔のインクリメンタル・マイクロフォーミングを利用して、以下の方法によりセラミック膜のマイクロ造形を行った。

- 1) インクリメンタル・マイクロフォーミングにより、マイクロピラミッドアレイをアルミ箔上に成形する。
- 2) 高周波マグネトロンスパッタによりアルミ箔のマイクロピラミッドアレイに酸化ハフニウム ( $\text{HfO}_2$ ) をコーティングする。
- 3) 1.94% KOH 水溶液中においてピラミッドの部分のアルミ箔 (犠牲材料) をエッチングで除去し、セラミック膜のマイクロピラミッドアレイを製作する。

## 3. 結果と考察

### 3.1 アルミ箔の成形特性

図6にインクリメンタル・マイクロフォーミングにより成形した底辺 1.0 mm の微小ピラミッド群を示す<sup>3)</sup>。使用した工具先端半径は 100 μm、ピラミッドの半頂角  $\theta$  は 26° である。

すなわち、側面の仰角は  $64^\circ$  でピラミッドには十分に高さがある。側面の二等辺三角形の対数ひずみは  $0.825$ 、伸びは  $128\%$  であり、引張試験での箔の伸びに比べ非常に大きい。またバックングプレートがなくても十分に成形が可能であることが確認できる。

図7は先端半径  $10\ \mu\text{m}$  の工具で成形した底辺  $100\ \mu\text{m}$ 、半頂角  $\theta = 35.3^\circ$  の微小な四角錐台をアルミ箔上に5個配列したものである<sup>7)</sup>。本実験では光沢のないマット面を表にして、光沢のあるブライト面側から加工を行っている。そのため成形形状が微細になるにつれて、表面粗さが目立つようになり精度も多少低下するが、微細加工としてのピラミッドの成形は十分に可能である。

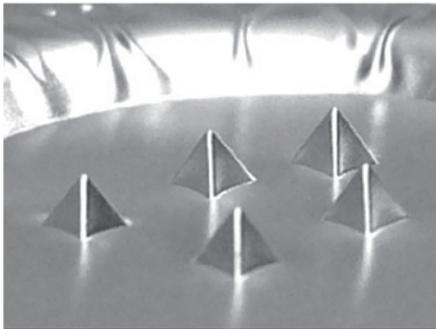


図6 底辺  $1.0\ \text{mm}$  の微小ピラミッド群

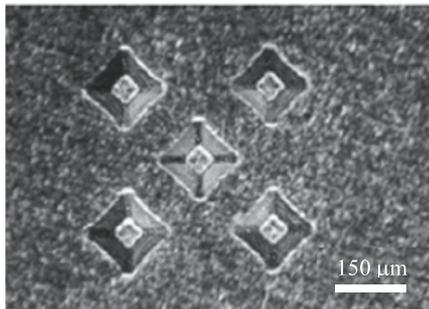


図7 底辺  $100\ \mu\text{m}$  の微小ピラミッド

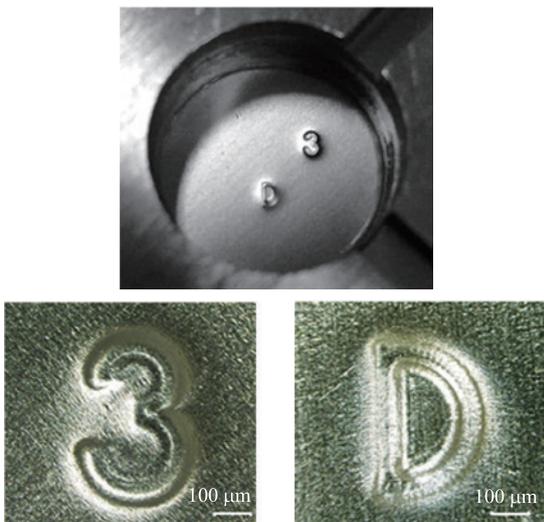


図8  $500\ \mu\text{m}$  の大きさの数字「3」と文字「D」  
(上図は加工領域の全体写真)

最後に、 $500\text{--}1000\ \mu\text{m}$  の大きさの自由形状の成形結果を2例示す。いずれもアルミ箔の厚さは  $12\ \mu\text{m}$  であるが、使用した工具の先端半径は  $10\ \mu\text{m}$  と  $100\ \mu\text{m}$  である。図8に成形した  $500\ \mu\text{m}$  の大きさの数字「3」と文字「D」を示す<sup>3)</sup>。上図が加工領域の全体写真であり、下図が加工された「3」と「D」の拡大写真である。これらの数字と文字の押し出し高さは  $144\ \mu\text{m}$  であり、微小な押し出しを繰り返すことにより成形を行った。同図より分かるように、数字の太さが  $100\ \mu\text{m}$  程度まで大きくなれば、精度のよい成形が可能である。

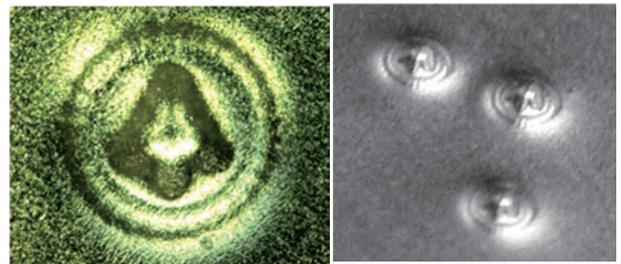


図9 円錐台上に成形されたスペード状の錐台（左）と箔上に成形された3つのオブジェクト

図9は円錐台上に成形されたスペード状の錐台である<sup>2)</sup>。円錐台の直径は  $1.0\ \text{mm}$  であり、同一の箔上に3組の錐台が成形された。円錐台とスペード状の錐台は、押し出しとともに工具軌跡を一定の大きさだけ縮小させることにより成形している。

### 3.2 アルミ箔とステンレス箔の成形特性の相違

厚さ  $12\ \mu\text{m}$  のアルミ箔と厚さ  $8\ \mu\text{m}$  のステンレス箔の成形特性を複数の正多角錐の成形限界に基づき比較した。ただし、正多角錐の底面の外接円直径  $D$  (図4) は  $1.0\ \text{mm}$ 、工具先端半径は  $100\ \mu\text{m}$  である。

図10は、成形限界における正多角錐の側面の二等辺三角形の最大主ひずみ  $\epsilon_{\theta\text{max}}$  と底面の正多角形の頂点(正多角錐の稜線)の数  $n$  の関係である<sup>8)</sup>。ステンレス箔では、3角錐から5角錐まではほぼ同じ  $\epsilon_{\theta\text{max}}$  で成形限界に達するが、アルミ箔では、成形限界における  $\epsilon_{\theta\text{max}}$  の値がステンレス箔より大きく、しかも頂点の数により大幅に変化する。一方、図11では、成形限界における正多角錐の稜線上のふたつの主ひずみ  $\epsilon_{\theta\text{max}}$  と  $\epsilon_{\phi\text{max}}$  をグラフの両軸にとり、アルミ箔とステンレス箔に対し得られたそれらの関係をプロットした<sup>8)</sup>。

図10と図11の結果より、ステンレス箔の成形限界は、ひずみ基準

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

により、またアルミ箔の成形限界はひずみ基準

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

により表すことができると考えられる。式(1)の成形限界から、ステンレス箔では二等辺三角形の底辺と垂直に作用する引張応力により、底辺と平行にき裂が生成すると予想される。一方、稜線における式(2)の成形限界において、

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

であることを考慮すると、アルミ箔では稜線に平行に作用する引張応力により、稜線に垂直にき裂が生成すると予想される。なお、インクリメンタル・フォーミングと他の塑性加工の成形限界が大きく異なるように、同じインクリメンタルフォーミングでも側面と稜線では変形状態が異なるので、上述のように、成形限界として異なるひずみ基準を適用する必要があるのは、当然のことと考えられる。

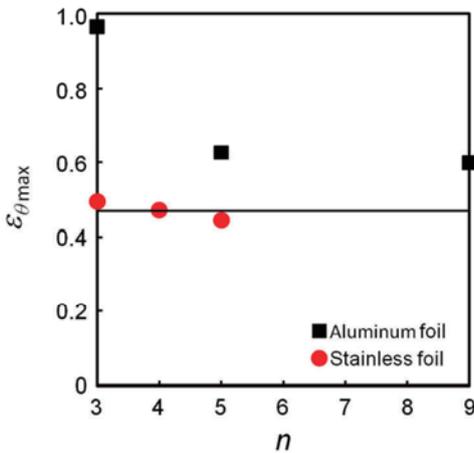


図 10 アルミ箔とステンレス箔の正  $n$  角錐の成形限界における側面の二等辺三角形の主ひずみ

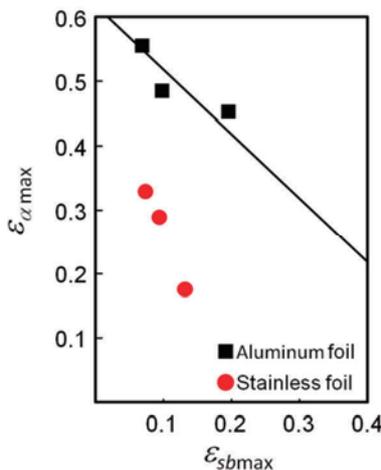
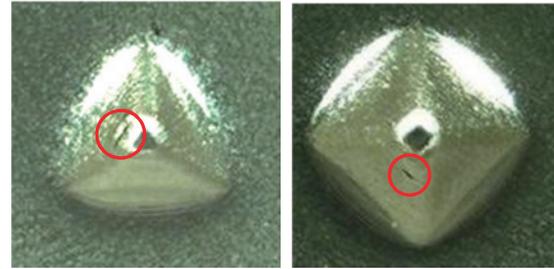
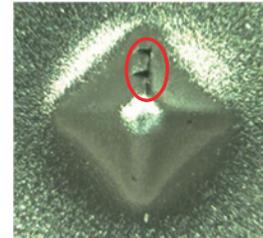


図 11 アルミ箔とステンレス箔の正  $n$  角錐の成形限界における稜線のふたつの主ひずみの関係

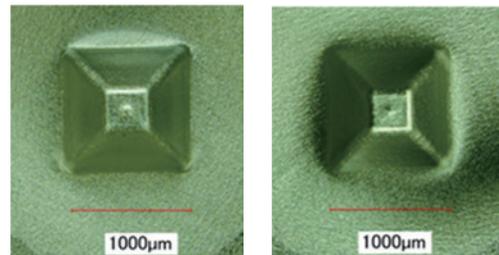


(a) ステンレス箔 ( $\theta = 36.5^\circ$  and  $38.1^\circ$ )



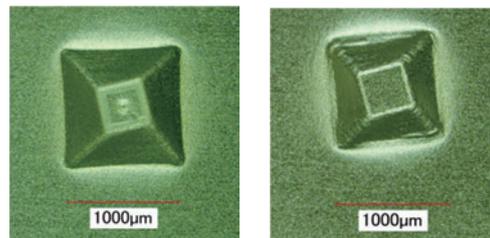
(b) アルミ箔

図 12 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態



(a) 超音波振動有 (b) 超音波振動無

図 13 超音波振動による四角錐台の成形精度の向上



(a) 超音波振動有 (b) 超音波振動無

図 14 超音波振動によるねじれ四角錐台の成形精度の向上

き裂の発生に関する予測を実証するため、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 12 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。

### 3.3 超音波振動の効果

超音波振動の効果については、定量的な検討がまだ十分に行われていないので、ここでは定性的な結果を示す。図 13

と図14は先端半径100 $\mu\text{m}$ の工具を用いてアルミ箔上に成形した底辺1.0mm, 半頂角 $\theta=39.5^\circ$ の四角錐台とねじれ四角錐台である。なお, 加工液としてn-プロピルアルコールを使用したことにより, 還元水より成形限界が低下している。この条件では超音波振動の有無の違いが2種類の四角錐台の稜線と底辺の成形に明確に現れた。すなわち超音波振動により四角錐台の稜線と底辺がより明確になり, 加工精度が明らかに向上している。特に加工が難しいねじれ四角錐台において加工精度の向上は著しい。

### 3.4 セラミックス薄膜構造物の造形

最初に, 図15の形状と配列を有する多数の微細ピラミッドを, 先端半径10 $\mu\text{m}$ の工具を使用してアルミ箔上に成形した。次に, 成形したアルミ箔に3 $\mu\text{m}$ の厚さで $\text{HfO}_2$ のコーティングを施し, 最後にKOH水溶液でアルミ箔をエッチングした。アルミ箔の微細ピラミッドの部分は, 成形時に大きなひずみを受けているので, 内部欠陥が多くエッチング速度が速い。そのため, マスキングをしなくても微細ピラミッドの部分のアルミ箔が早く溶け出す。このようにして造形した $\text{HfO}_2$ の四角錐台を図16に示す。コーティング時に, 成形した微細ピラミッド群を450 $^\circ\text{C}$ に昇温するため, 熱変形が避けられないが, ピラミッドの形状が崩れるようなことはない。ピラミッドの部分のアルミ箔が完全にエッチングされていること確認するため, 図16を下部からの透過光により観察した。図17はそのときの上部からの顕微鏡写真である。 $\text{HfO}_2$ は透明ではないが, 3 $\mu\text{m}$ の厚さであれば十分に光を通すので, 図17の結果から, アルミ箔がほぼ完全にエッチングされていること, よって図16のピラミッドは $\text{HfO}_2$ で構成されていることが確認された。

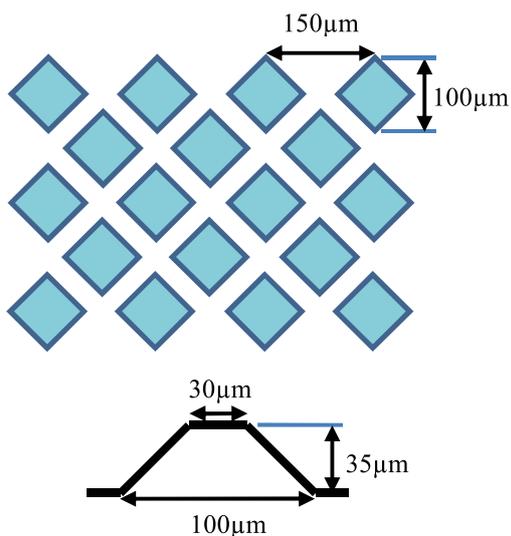


図15 セラミックスの四角錐台の配列と対角断面の形状

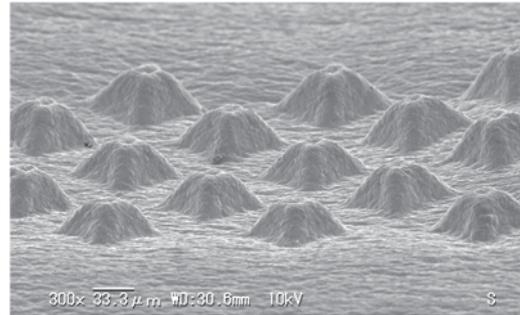


図16 セラミックスの微細薄膜構造アレイのSEM観察

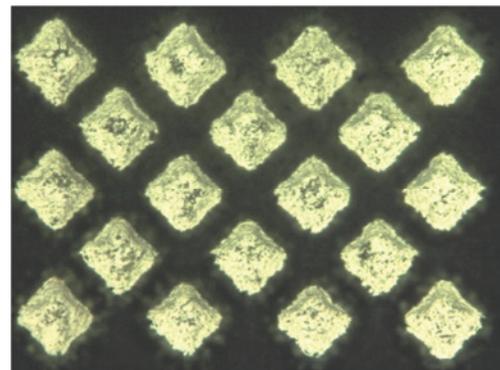


図17 セラミックスの微細薄膜構造アレイの透過光による観察

## 4. まとめ

本報ではインクリメンタル・マイクロフォーミングを利用した金属とセラミックスの微細な薄膜構造の造形に関する研究成果について述べた。最初に, 先端半径が10から100ミクロンの工具を使用することにより, 種々の微細成形加工が実現可能であることを示した。次に, 複数の正多角錐の成形限界に基づいてアルミ箔とステンレス箔の成形特性の違いを明確にした。また超音波スピンドルを使用するときの精度の向上について定性的に検討した。最後に, アルミ箔の成形加工を利用して100ミクロン以下のセラミックスのマイクロ構造を造形する方法を示した。

## 謝辞

本研究の一部は公益財団法人天田財団の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します。

## 参考文献

- 1) T. Obikawa, S. Satou, T. Hakutani: Int. J. Mach. Tools Manuf., 49, (2009) 906-915.
- 2) T. Sekine, T. Obikawa: J. Adv. Mech. Des. Sys. Manuf., 4,

- (2010) 543-557.
- 3) T. Obikawa, et al.: J. Adv. Mech. Des. Sys. Manuf., 4, (2010) 1145-1156.
- 4) M. Beltran, et al.: ASME J. Micro Nano-Manuf., 1, (2013), 031005-1-15.
- 5) <http://ufo.uacj-group.com/products/foil.html>
- 6) 福士みゆき, 宮田 寛, 村上 明 : 日本機械学会論文集 (A 編) , 72, (2006) 880-885.
- 7) T. Obikawa, et al.: Proc. 9th Int. Conf. THE “A” Coat. Manuf. Eng., Thessaloniki (2011) 57-64.
- 8) T. Obikawa, T. Sekine: Int. J. Auto. Tech., 7, (2013) 256-262.