

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24年 6月 6日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360060

研究課題名（和文） 金属／セラミック複合薄膜の三次元マイクロ・メゾ構造体の造形

研究課題名（英文） Fabrication of Micro/Meso Scale Shell Structures of Metal/Ceramic Composite

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）：微細箔状素子のフレキシブルな製造方法として、金型を使用しないマイクロインクリメンタルフォーミング技術を開発し、最小の形状寸法が50ミクロン程度のアルミ箔の微細シェル構造を成形した。成形したアルミ箔の微細構造に、必要に応じて酸化ハフニウムあるいは窒化チタンのコーティングを施した後、水酸化カリウム溶液中で、成形した微細構造部のアルミ箔のみを選択的にエッチングすることにより、セラミック薄膜のみの微細三次元構造体を作成することができた。

研究成果の概要（英文）：Single point incremental microforming of metallic foils without using any die and mould has been developed as a flexible fabrication method of micro shell structures. The minimum size of a shell structure was 50 μm in length. An aluminum micro shell structure was coated with hafnium oxide or titanium nitride and then, only aluminum foil of formed structures was etched selectively in a solution of potassium hydroxide to fabricate the micro shell structures of ceramics only.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	10,300,000	3,090,000	13,390,000
2010年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	15,100,000	4,530,000	19,630,000

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

近年、ミクロな機能性構造体の製作において、シリコン以外の多様な材料に対する要求が高まっている。最終的に要求される大きさは十ミクロンからサブミリサイズで、形状も複雑なものが多い。また、量産性より機能の柔軟性を重視する分野では、金型を用いる加工より素材への直接加工が望まれている。こうしたことから、高能率で形状と表面の加工制御性にすぐれた加工技術のマイクロ化が要求されている。

マイクロスケールの加工に対するこうした要求を満たすため、レーザや集束イオンビームなどのビーム加工、マイクロ放電加工、マイクロ切削加工など、種々の微細加工技術が鋭意研究されている。しかし成形加工では原則的に型を使用するためフレキシビリティに乏しく、またマイクロ化に対応した微細金型の作成が隘路となっている。そこで金型が不要で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の開発が求められている。

2. 研究の目的

インクリメンタルフォーミングは、金型が不要な塑性加工法であり、形状に対するフレキシビリティが高い唯一の成形加工法である。本研究では微細な膜状立体構造の柔軟かつ迅速な加工を実現するため、インクリメンタルフォーミングのマイクロ化技術を確認するとともに、塑性加工の特徴を生かし多様な膜構造の微細造形を可能とする加工技術の開発、さらには金属/セラミック複合薄膜構造体の造形技術の開発を目的とした。

インクリメンタルフォーミングは、一本の棒状工具を用いるだけで、一枚のブランク材から多様な形状を張出成形することが可能である。通常、金型の代わりに、バックングプレートとよばれる板をあてがい、逐次張出し成形を行うが、微細化においては、バックングプレートの作製も大きな障害である。そのため、本研究では、棒状工具以外に何も使用しないことを条件に加工技術の開発を実施することとした。

3. 研究の方法

金属/セラミック複合薄膜の三次元マイクロ・メゾ構造体の造形法の概略を図1に示す。ここでは、セラミック薄膜の微細な四角錐台を造形対象としている。最初に、マイクロインクリメンタルフォーミングによりアルミ箔上に微細な四角錐台を造形する。次に特定のセラミックによりアルミ箔をコーティングし、その後、アルミとセラミックが積層したピラミッドからアルミ箔を選択的にエッチングし、除去する。それによりピラミッド部はセラミック、それ以外の平坦部はアルミ箔で補強されたセラミック複合膜が完成する。

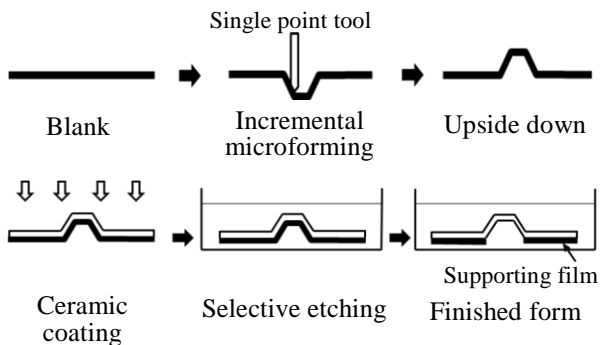


図1 金属/セラミック複合薄膜のマイクロ・メゾ構造体の造形法

本研究で使用した加工機のひとつを図2に示す。本機はX-Yテーブル、Zステージ、 θ_x - θ_y ゴニオステージ、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テーブルの分解能は0.01 μm 、最小の送り速度は0.0001 mm/sである。またZステージの分解能は0.01 μm 、ゴニオステージの分解能は0.001°であり、ゴニオステージは薄膜の水平補正に用いられる。スピンドルには、最高回転数 25000 min^{-1} と 60000 min^{-1} の電動式 (60000 min^{-1} では冷却用にエアを使用) の2種類を用意した。

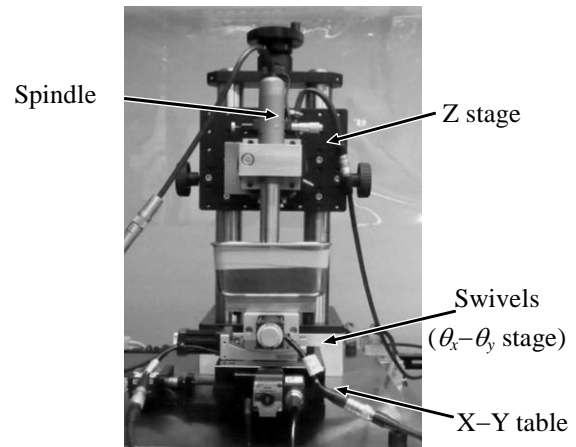
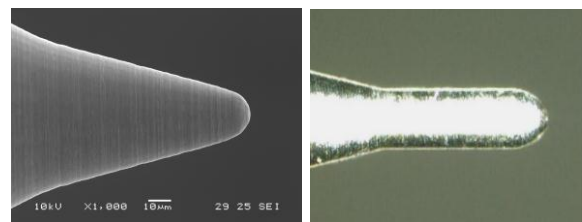


図2 マイクロインクリメンタルフォーミング装置

工具には、図3の先端半径10 μm と100 μm の超微粒子超硬棒を使用した。なお、半径10 μm の工具先端は、テーパを付けて強度を高めている。造形に用いたアルミ箔は厚さ12 μm の家庭用と厚さ6.5 μm の業務用である。両者とも8021相当材 (97.95%Al, 0.15%Si, 1.2-1.7%Fe, 0.05%Cu) であり、業務用は調質により強度と伸びの特性を改善したものとなっている。技術資料や文献によれば、アルミ箔の伸びは高々4%であるが、複雑な立体形状を成形するため、50-100%の伸びを実現することのできるマイクロインクリメンタルフォーミングの成形条件を探索する。



先端半径10 μm 先端半径100 μm
図3 マイクロ工具

箔を保持するためのブランクホルダーを図4に示す。本研究ではバックングプレートを使用しないので、アルミ箔が加工力によってたわまないだけの張力をアルミ箔に付与する必要がある。しかしアルミ箔に過大な張力を加えると成形限界が低下し、一方、張力が弱いと箔がたわみ精度が低下する。そこで図4のテンショナーと呼ぶ部品を考案し、突起部の直径が10 μm 間隔で異なる複数のテンショナーを用意し、その中から必要十分な張力を箔に与える最適なテンショナーを選択し使用した。また、工具を回転することによりアルミ箔にせん断応力を加え、箔の変形を促進することが不可欠であるが、その際の工具と箔との界面の潤滑に還元水を使用した。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。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。微細な

加工の場合、粘度の高い加工液は微小な隙間に入りにくくなると想定されるので、水のように粘性が小さいもののほうが効果的なようである。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。

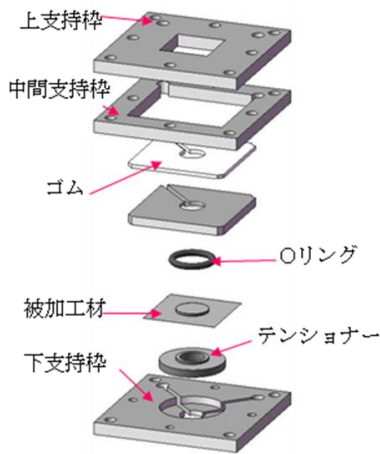


図4 ブランクホルダー

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の一例として、底辺の長さ L 、高さ h 、対向する二等辺三角形のなす角 2θ (以下では、 θ を半頂角と呼ぶ) 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、正方形をなす工具軌跡の一边は $2dx = 2dy = 2dz \tan\theta$ だけ縮小する。

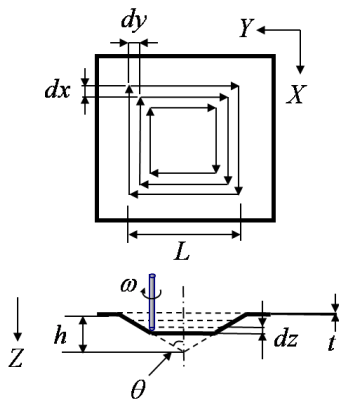


図5 シングルポイント工具による逐次成形プロセス

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の高さは、 $L/2$ から $(L/2)\text{cosec}\theta$ まで増大するので、伸び(%)は、 $100(\text{cosec}\theta - 1)$ 、伸び方向の対数ひずみは $\ln(\text{cosec}\theta)$ で与えられる。そこで、成形可能な最小の半頂角を実験により求め、計算される対数ひずみを、主ひずみ方向の成形限界とした。

上記の方法でピラミッド状に成形したアルミ箔へのセラミックコーティングは、酸化ハフニウム

HfO_2 については高周波マグネトロンスパッタ、窒化チタン TiN については反応性マグネトロンスパッタにより行った。またコーティング時のアルミ箔の温度はできる限り低温とし 450°C に設定した。次に、 35°C の 1.94% KOH 水溶液中においてピラミッドの部分のアルミ箔の選択的なエッチングを行い、セラミック薄膜のピラミッドアレイを作製した。

4. 研究成果

最初に、メゾスケールの上限である底辺の長さが 1.0 mm のピラミッドの成形条件について検討した。アルミ箔の厚さは $12\ \mu\text{m}$ 、工具先端半径は $100\ \mu\text{m}$ 、テーブルの送り速度は 0.94 mm/s 、工具軸方向の送り dz はアルミ箔の厚さと同じ $12\ \mu\text{m}$ である。図6は種々の半頂角 θ と工具回転数に対し成形を行ったときの実験結果であり、正の回転数は右回りの回転を、負の回転数は左回りの回転を表す。また○と×はそれぞれピラミッドの成形が損傷なしに行われた条件と損傷が生じた条件である。ただし、工具回転数 $20,000\text{ min}^{-1}$ において、対数ひずみ $\ln(\text{cosec}\theta)$ で 0.7 以上の3つの○とさらにその上の二つの×は、後述のように最適テーブル送り速度を求めたときの結果である。

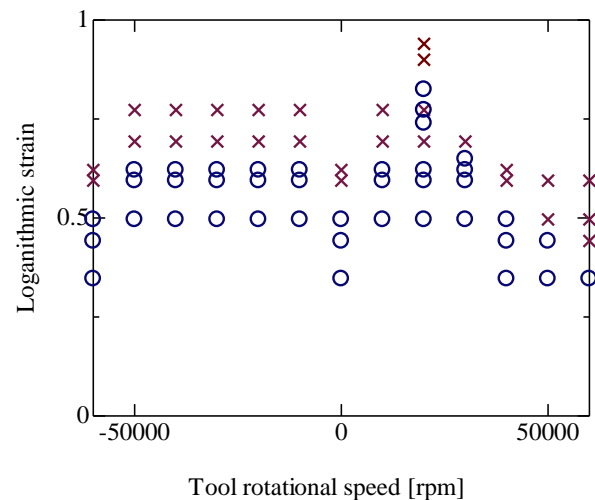


図6 成形限界に及ぼす工具回転速度の影響

工具が回転しない場合には、明確に成形限界が低下する。工具と箔の間の加工液(還元水)に工具の回転による動圧が発生しないため、潤滑が良好でないからである。また正回転の場合、 $40,000\text{ min}^{-1}$ 以上で成形限界が低下し、正負のいずれの回転でも毎分 $60,000\text{ min}^{-1}$ で成形限界が大幅に低下する。図5のように工具の軌跡が時計回りであるため、工具が正回転の場合、負の回転に比べて加工液が加工点に届きにくい。したがって $40,000\text{ min}^{-1}$ 以上の高速回転では、加工液が工具の回転に追従して連れ回ることが困難になり、成形限界が低下したものと考えられる。

上記の結果より、工具回転数を $20,000\text{ min}^{-1}$ とし、テーブル速度を変えて成形を行い、テーブル速度 0.47 mm/s において最小の半頂角 26° のピラミ

ッドを成形することができた。図7に上記の条件で成形した5個のピラミッド群を示す。側面の仰角は 64° で十分に高さがあり、その対数ひずみは0.825、伸びは128%である。引張試験での箔の伸びが約3-4%であるのに対し、マイクロインクリメンタルフォーミングではその30倍から40倍の伸びを実現することが明らかとなった。またバックギングプレートがなくても造形が十分に可能であることが確認された。

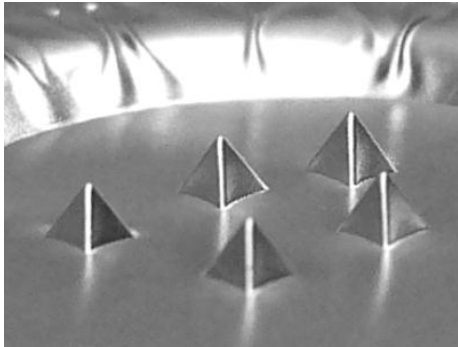


図7 最適加工条件で加工した微小ピラミッド群

次に、底辺の長さ $100\ \mu\text{m}$ のピラミッドの成形条件について検討した。アルミ箔の厚さは $12\ \mu\text{m}$ 、工具先端半径は $10\ \mu\text{m}$ である。予備実験の結果よりテーブルの送り速度は $0.30\ \text{mm/s}$ 、工具軸方向の送りは $1\ \mu\text{m}$ に設定した。種々の半頂角 θ と工具回転数に対し成形時の損傷の有無を判定した結果、成形限界 $\ln(\text{cosec}\theta)$ は $3000\ \text{min}^{-1}$ で0.556（伸びは74.4%）であった。また造形の形状寸法が小さくなると、最適な工具回転数ならびに成形限界が減少することが分った。本実験結果に基づいて、厚さ $6.5\ \mu\text{m}$ のアルミ箔に一边 $100\ \mu\text{m}$ と $50\ \mu\text{m}$ の微小ピラミッドを造形した。工具回転数は $3000\ \text{min}^{-1}$ 、送り速度は $0.030\ \text{mm/s}$ 、工具先端半径は $10\ \mu\text{m}$ である。図8に成形した半頂角 45° のピラミッドの顕微鏡写真を示す。精度は多少低下するが、微細な形状の造形が可能である。なお、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。そのため造形が微細になるにつれて、表面粗さが目立ってくる。

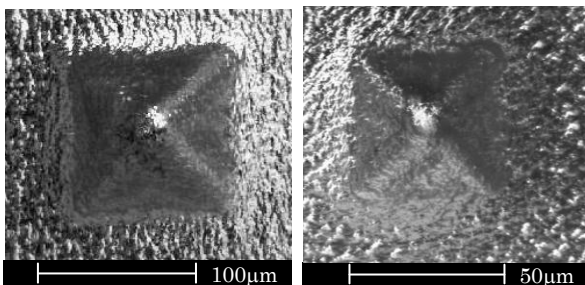


図8 底辺 $100\ \mu\text{m}$ （左）と $50\ \mu\text{m}$ （右）の微小ピラミッドの成形

微細な自由形状として、寸法 $150\ \mu\text{m}$ 、押し高さ $25\ \mu\text{m}$ の文字「T」と「U」の成形を行った。そ

れぞれの文字の断面は、曲線で構成されている。使用したアルミ箔の厚みは $6.5\ \mu\text{m}$ 、工具先端半径は $10\ \mu\text{m}$ 、工具回転数は $3000\ \text{min}^{-1}$ 、テーブル送り速度は $0.030\ \text{mm/s}$ 、軸方向送りは $1\ \mu\text{m}$ である。図9にアルミ箔上に成形された「T」と「U」の顕微鏡写真を示す。マット面の凹凸により光が散乱するため粗さが目立つが、マット面の粗さはRaで $0.185\ \mu\text{m}$ 、Rzで $0.940\ \mu\text{m}$ であり、 $25\ \mu\text{m}$ の押し高さと比較すれば、形状に及ぼす表面粗さの影響は見かけほど大きくない。

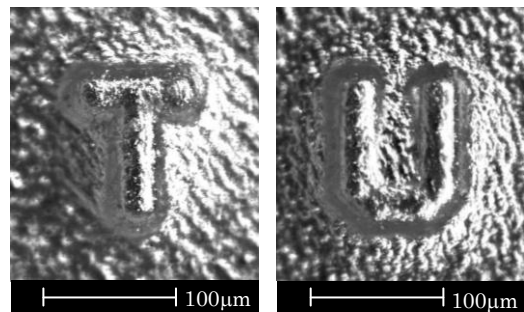


図9 微細文字「T」と「U」

もう少し大きな自由形状の成形結果を3例示す。図10は寸法 $500\ \mu\text{m}$ 、押し高さ $144\ \mu\text{m}$ の数字「3」と文字「D」の成形結果である。上の写真が加工部分を鳥瞰したものであり、下は加工された「3」と「D」の拡大写真である。字の太さは $100\ \mu\text{m}$ 以下であるが、図9の約3倍の太さがある。この程度まで寸法が大きくなれば、かなり精度のよい成形が可能である。

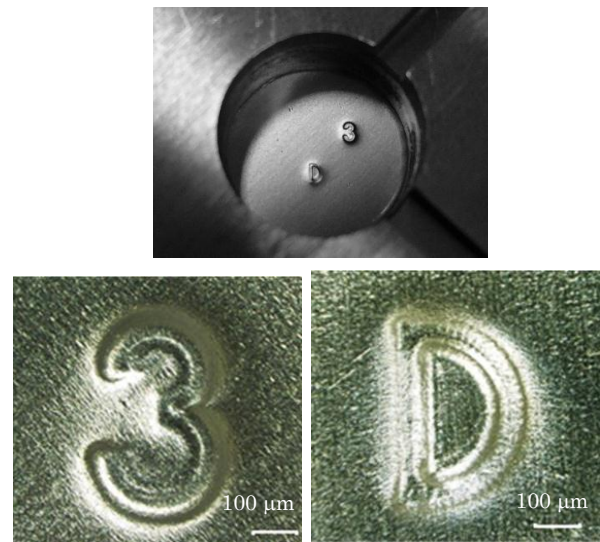


図10 寸法 $500\ \mu\text{m}$ の数字「3」と文字「D」。（上図は加工領域の全体写真）

図11は円錐台上に成形されたスピード状の錐台である。円錐台の直径は $1\ \text{mm}$ であり、同一の箔上に3個成形がされた。アルミ箔の厚さは $12\ \mu\text{m}$ であり、加工条件を、工具半径 $100\ \mu\text{m}$ 、工具回転数 $4000\ \text{min}^{-1}$ 、テーブル速度 $80\ \mu\text{m/s}$ 、工具の軸方向送り $dz = 10\ \mu\text{m}$ に設定した。円錐台は、円状の

工具軌跡の半径を一定の割合で減少させることにより成形された。同様にしてスペード状の錐台では、スペード状の工具軌跡の大きさを一定の割合で減少させている。その結果、工具の軌跡としては単純であるが、比較的複雑な曲面の成形が実現した。

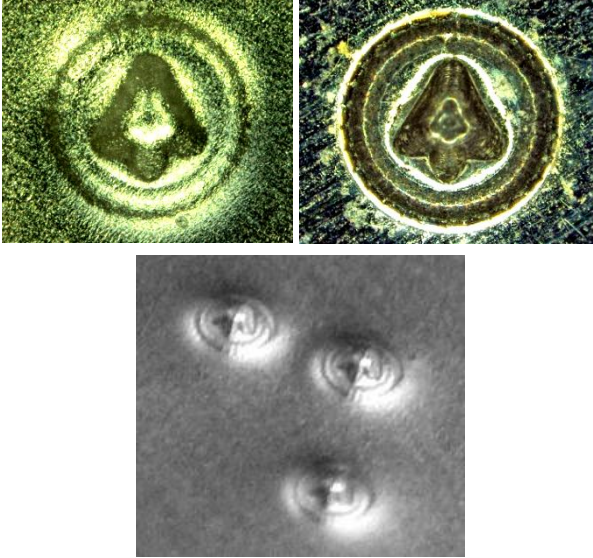


図 11 円錐台上に成形されたスペード状の錐台（左）、工具側から見た凹状の加工面（右）ならびに箔上に成形された 3 個のオブジェクト

自由形状の最後の成形例として、長さ 1 mm、造形高さ 230 μm の車体を図 12 に示す。箔の厚さは 12 μm 、加工条件としては、工具半径 100 μm 、工具回転数 20000 min^{-1} 、テーブル速度 0.23 mm/s である。顕微鏡写真では光によって角が強調されるため、平坦な部分が大きく窪んでいるように見えるが、レーザ変位形で計測した断面からは、僅かな窪みしか確認されない。なお、成形された箔を計測のためにホルダーから取り外す際に、箔が引っ張られたため、車体断面の下側では形が多少崩れ、傾斜が緩やかになっている。

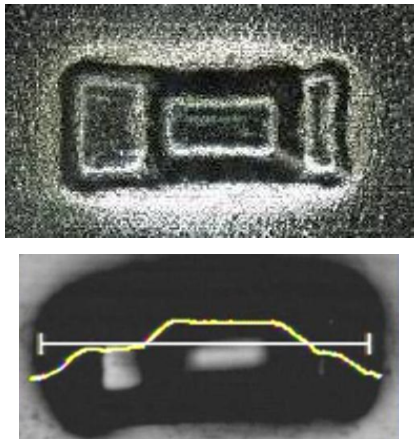


図 12 成形された車体とその断面形状

最後に金属/セラミック複合薄膜構造体の造形結果を示す。図 13 は TiN をコーティングした後の四角錐、三角錐の状態である。アルミニウムは融点 660 $^{\circ}\text{C}$ 、再結晶温度 400 $^{\circ}\text{C}$ であることから、コーティング時の温度 450 $^{\circ}\text{C}$ ではアルミニウムの変形が生じやすく、ピラミッドの稜線には大きな変形が見られないものの、稜線間の側面がへこんでいる。しかしコーティング膜に目に見えるき裂や欠陥は確認されなかった。

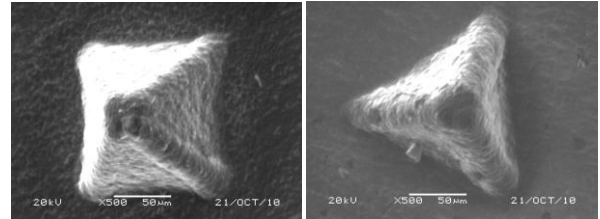


図 13 コーティングされたピラミッドの状態

コーティングされたピラミッド（四角錐台）を 1.94% KOH 水溶液中でエッチングした後の状態を、ピラミッドの上と底から観察した。図 14 の左右の顕微鏡写真のコーティング材料はそれぞれ TiN と HfO_2 であり、それぞれの上の図が上部から観察した状態、下の図が底から観察した状態である。上から見る限り、エッチングによるコーティングの変化は見られない。一方、底からの観察では、アルミニウムと異なる色がピラミッドの裏側に出現していることが確認される。これは成形されたピラミッドのアルミニウムがエッチングされ、セラミックが出現したことによるものである。

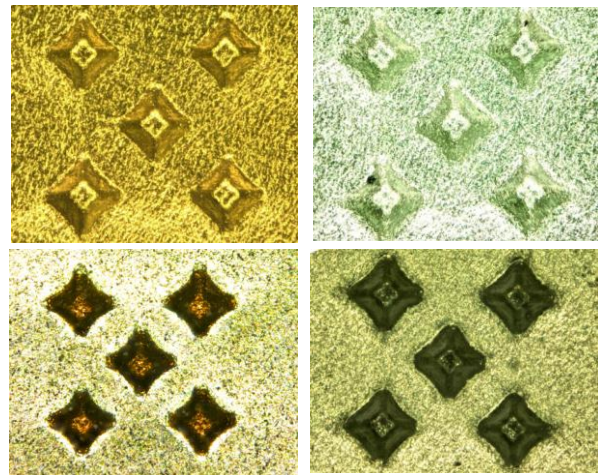


図 14 コーティングされたピラミッドのエッチング後の状態（上、Top view、下、Bottom view、左：TiN コーティング、右： HfO_2 コーティング）

コーティングされた HfO_2 は光を通すので、エッチング終了時点の状態を、光の当て方により確認した。図 15 の上の図は、セラミックコーティングされたピラミッドの上側からの顕微鏡写真である。一方、下の顕微鏡写真はアルミ箔側から光を当てコーティングされたピラミッドの上部より透過光

を観察したものである。ピラミッド部だけ光が透過していることは明らかである。すなわち大きなひずみを受けたピラミッド部が選択的にエッチングされていることが、確認できる。

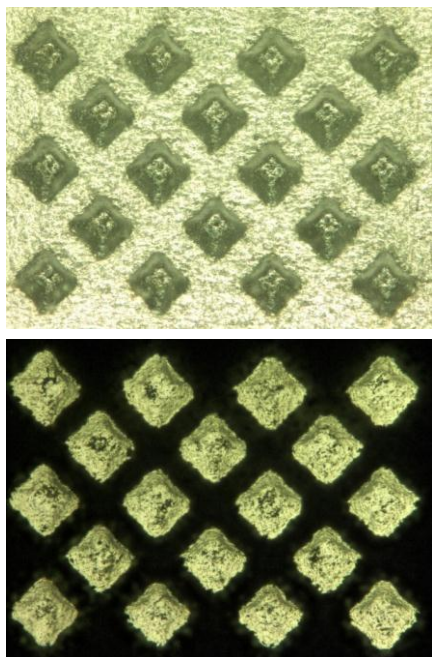


図 15 コーティングされたピラミッドのエッチング後の状態（上：反射光による Top view, 下：透過光の Top view）

以上の結果より、成形したアルミ箔を犠牲材料として使用することによりセラミックのピラミッドを造形できることが明らかとなった。またピラミッド部のアルミ箔の選択的エッチングにより、ピラミッド部を除けば、アルミ箔がサポート材として機能する。図 15 のマイクロピラミッド群を俯瞰した顕微鏡写真を図 16 に示す。ピラミッド（四角錐台）の底辺は $65\ \mu\text{m}$ 、高さ $32\ \mu\text{m}$ であった。

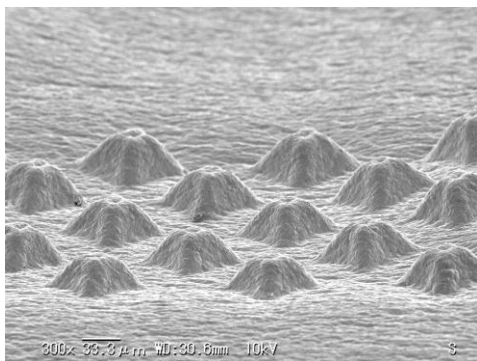


図 16 アルミ箔を犠牲材料にして造形したセラミック(HfO_2)薄膜の四角錐台

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 5 件)

- ① T. Obikawa, T. Hakutani, T. Sekine, S. Numajiri, T. Matsumura, M. Yoshino, Single-point incremental micro-forming of thin shell products utilizing high formability, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, 査読有, Vol. 4, No. 6, 2010, pp. 1145-1156, DOI: 10.1299/jamdsm.4.1145
- ② T. Sekine, T. Obikawa, Single point micro incremental forming of miniature shell structures, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, 査読有, Vol. 4, No. 2, 2010, pp. 543-557, DOI: 10.1299/jamdsm.4.543
- ③ T. Obikawa, S. Satou, T. Hakutani, Dieless incremental micro forming of miniature shell objects of aluminum foils, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 査読有, Vol. 49, No. 12, 2009, pp. 906-915, DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.07.001

〔学会発表〕(計 7 件)

- ① T. Obikawa, N. Matsumoto, S. Togo, T. Matsumura, J. Leopold, Fabrication of Micro Pyramids of Thin Ceramic Film Utilizing Incremental Micro-Forming and Coating, THE "A" Coatings Ninth International Conference on Manufacturing Engineering Proceedings, pp. 57-64, Makedonia Palace Hotel, Thessaloniki, Greece, Oct. 3rd, 2011
- ② T. Obikawa, T. Sekine, Fabrication of Miniature Shell Structures of Stainless Foil Using Single Point Incremental Micro Forming, Abstracts of the twenty second International Conference on Computer-Aided Production Engineering, Edinburgh, p. 7, Novotel Edinburgh City Centre, Edinburgh, United Kingdom, April 28th, 2011
- ③ 松本憲幸, 帯川利之, セラミック薄膜の三次元造形, 2010 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 1091-1092, 埼玉大学 2010 年 3 月 18 日
- ④ T. Sekine, T. Obikawa, Single point micro incremental forming of miniature shell structures, Proceedings of the Fifth International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, pp. 643-646, Osaka University, Dec. 4th, 2009.

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