

超高速回転工具によるサブミクロン薄膜の インクリメンタル・マイクロフォーミング技術の開発

東京大学 生産技術研究所
教授 帯川利之
(平成 19 年度一般研究開発助成 AF-2007017)

キーワード：インクリメンタルフォーミング，薄膜，マイクロ加工，セラミック構造物

1. 研究の目的と背景

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，形状も複雑であるものが多い．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．

フレキシビリティが高くしかも多様な材料に適用できるマイクロ加工法として，切削加工，放電加工，レーザー加工等の除去加工のマイクロ化が鋭意研究されている．一方，成形加工では型を多用するため，全体的にフレキシビリティに乏しい．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．ところが本研究で用いる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．そこで微細な膜状構造の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について検討した．

インクリメンタルフォーミングでは，先端が半球状の一本のシングルポイント工具を使用し，薄板を逐次押し出すことにより所望の形状に成形する¹⁻⁵⁾．したがってシングルポイント切削工具（所謂バイト）と同様に，多様な形状の加工が可能であり，フレキシビリティが高い．また工具経路の設定も自由曲面の切削加工と同様であり，CADで形状を作成した後，先端半径だけオフセットした工具の経路を求める．しかしインクリメンタルフォーミングのマイクロ化については，世界的にほとんど研究実績がない．特に100 μm 以下の大きさの造形では，結晶の寸法が成形に直接影響を及ぼすと考えられるため，基礎的な研究が不可欠である．

マイクロ化に際して，特に重要な課題は，厚さが10 μm 程度の素材においてもインクリメンタルフォーミングに特有な高い伸びを実現することである．一般に，素材が薄くなるとともに伸びが減少し，厚さ10 μm のアルミ箔では3-4%まで低下する．このような素材でも100%程度の伸びを実現する加工条件を探索する必要がある．そこで，比較的単純な形状の成形において，高い成形限界を実現する加工条件を明らかにするとともに，厚さ1 μm

以下の極薄箔の成形ならびに多少複雑な形状の成形にインクリメンタル・マイクロフォーミングを適用した．さらにセラミックスの薄膜構造物を造形する方法として，マイクロ成形を行ったアルミ箔を犠牲材料として使用する方法についても検討を行った．

2. 実験方法

2.1 実験装置

本研究では2台の加工機を使用した．その1台（以下，IMFMOと呼ぶ）は既報⁶⁾のものであり，もう1台（以下，IMFMNと呼ぶ）は新たに開発した図1の装置である．両者とも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が，X-Yテーブルの分解能と送り速度が異なる．X-Yテーブルの分解能はIMFMOで0.1 μm ，IMFMNで0.01 μm であり，最小の送り速度はIMFMOで0.078 mm/s，IMFMNで0.0001 mm/sである．また両加工機とも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 $^\circ$ 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 rpmと60000 rpmの電動式（60000 rpmでは冷却用にエアーを使用）の2種類を用意した．

工具には，図2のように先端半径10 μm ，20 μm ，100 μm の超微粒子超硬を使用した．先端半径10 μm の工具には，

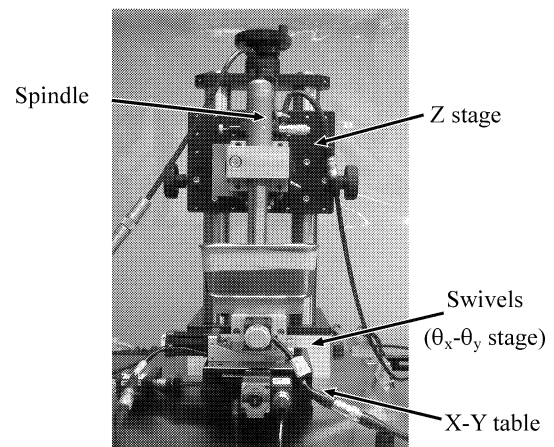


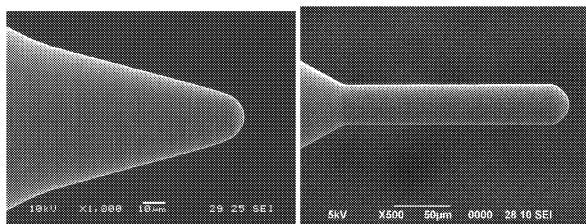
図1 インクリメンタル・マイクロフォーミング装置

同図のようにテープを付けて強度を高めたタイプの他に、テープのないストレートのタイプを用いた。加工用薄膜には厚さ $12\ \mu\text{m}$ の家庭用のアルミ箔と $6.5\ \mu\text{m}$ の業務用アルミ箔を使用した。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、後者は調質し強度と伸びの特性を改善したものである。厚い箔では両者の伸びに大きな差があるが、薄い箔の伸びの差はわずかである。技術資料⁷⁾によれば、前者の伸びは高々約 3%、後者の伸びは約 4%であるが、インクリメンタル・マイクロフォーミングで複雑な形状を成形する場合、これらの箔に対し、80-100%の伸びを実現しなければならない。なお、結晶粒径はそれぞれの素材に対して、30-100 μm と 5-10 μm である⁷⁾。

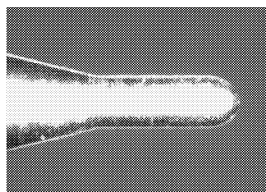
図3は箔を保持するためのブランクホルダーである。アルミ箔に過大な張力を加えると成形限界が低下し、一方、張力を加えないと箔がたわみ精度が低下する可能性がある。既報⁶⁾では、成形限界の低下を避けるため張力を与えずに加工したが、その場合には箔をたわますことなく把持するのが難しく熟練を要する。そこで軽く張力を与えるため図3のホルダーを考案した。

一般に、インクリメンタルフォーミングでは、バックキ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キングプレートの加工自体が難しくなるので、可能であればこれを使用することのない加工を実現したい。既報⁶⁾では、高速で主軸を回転すると下記の理由により加工力が低下するとともに、変形が工具接触部に集中することが明らかになった。したがって本研究でも加工のフレキシビリティを増大させるため、バックキングプレートを使用せずに加工を行った。

加工液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。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。ただし微細な加工の場合、粘度が高いと加工液が微小な隙間に入りにくくなると想



(a) 先端半径 $10\ \mu\text{m}$ (b) 先端半径 $20\ \mu\text{m}$



(c) 先端半径 $100\ \mu\text{m}$

図2 マイクロ工具

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である。なお、還元水を用いずにドライで加工すると、薄膜では損傷が発生しやすく、全般的に加工が困難になる。

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4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。

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、成形可能な最大の半頂角を実験により求め、計算さ

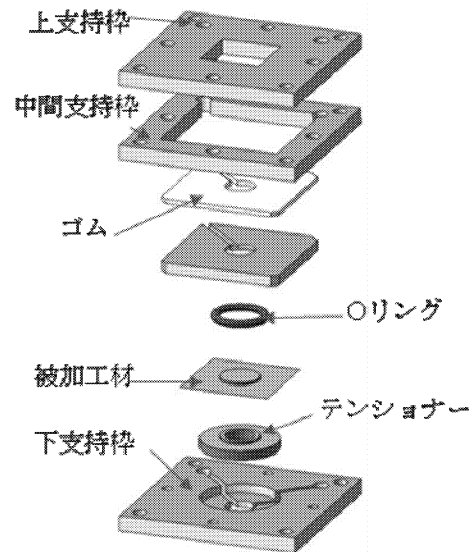


図3 ブランクホルダー

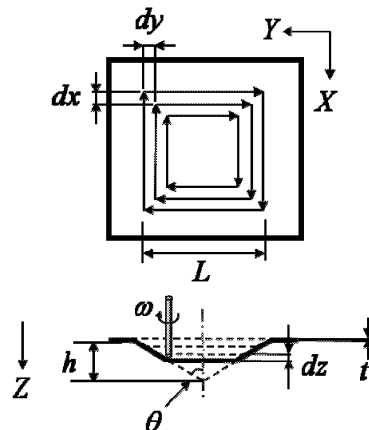


図4 シングルポイント工具による逐次成形プロセス

れる対数ひずみを、主ひずみ方向の成形限界とした。

2.3 セラミックス薄膜構造物の造形

上記の方法でピラミッド状に成形したアルミ箔に、先ず、高周波支援マグネトロンスパッタによりセラミック (HfO_2) のコーティングを行った。次に、1.94% KOH 水溶液中においてピラミッドの部分のみのアルミ箔をエッチングで完全に除去し、セラミックの薄膜ピラミッドを作成した。

3. 結果と考察

3.1 底辺 1 mm のピラミッドの造形と加工条件

最初に、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 μm 、工具先端半径は 100 μm 、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 μm 、使用した装置は IMFMO である。図 5 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 rpm において、対数ひずみで 0.7 以上の 3 つの○とさらにその上の二つの×は、下記に述べるようにテーブル送り速度を最適化した結果である。

工具が回転しない場合には、工具先端半径が 500 μm の既報⁶⁾の結果と同様に、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、潤滑が良好に行われなからである。また正回転の場合、40,000 rpm 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 rpm で成形限界が大幅に低下する。図 4 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 rpm 以上の高速回転では、加工液が工具の回転に追随して連れ回ること

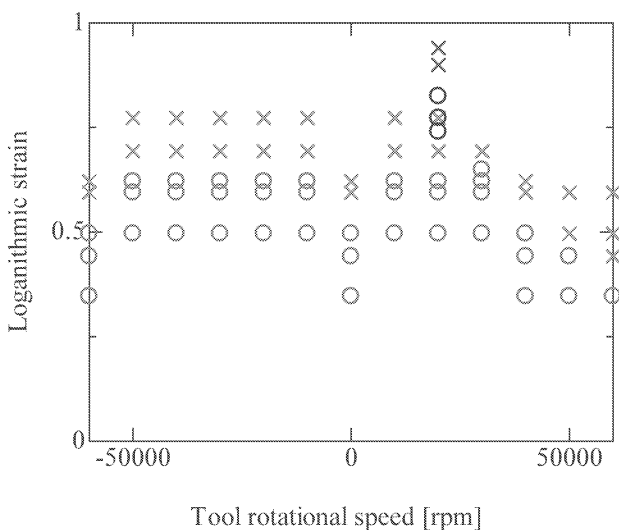


図 5 成形限界に及ぼす工具回転速度の影響

とが困難になり、成形限界が低下したものと考えられる。

図 6 は、半頂角 θ を一定値 31.5° に固定し、種々の工具回転速度とテーブル速度に対しピラミッドを成形した結果である。半頂角と工具回転速度、テーブル速度以外の条件は図 5 と同じであり、図中の○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。半頂角 31.5° は対数ひずみで 0.649、伸びで 91.4% に相当し、工具回転数が 30,000 rpm、テーブル速度が 0.94 mm/s における成形限界である。同図より、一定の工具回転数に対し、高送り側と低送り側に箔の破断領域があり、許容領域はそれらの間の存在する。またこれより最適なテーブル速度は工具回転数にほぼ比例することが分かった。

上記の結果より、工具回転数を 20,000 rpm、そのときの最適なテーブル速度を 0.47 mm/s、半頂角を 26° として成形を行った結果、図 7 の 5 個のピラミッド群を成形することができた。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。その結果、引張試験での箔の伸びが約 3% であるのに対し、インクリメンタル・マイクロフォーミングでは約 40 倍の伸びを実現することができた。またバック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。

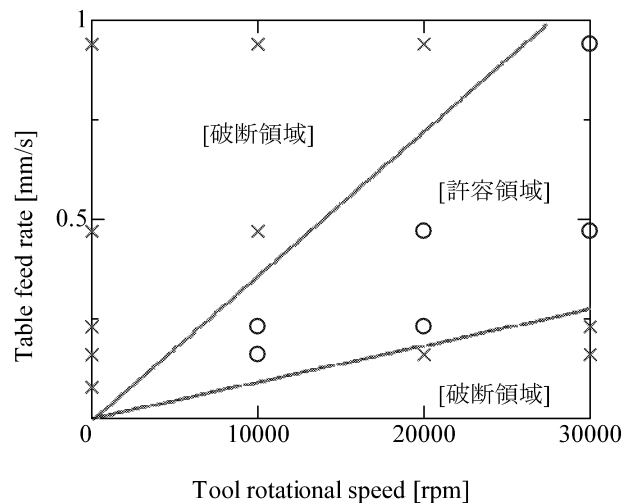


図 6 工具回転速度とテーブル速度の成形限界への影響

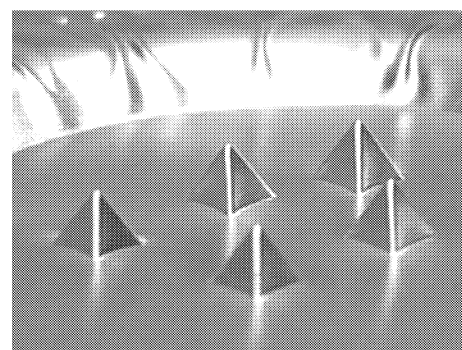


図 7 最適加工条件で加工した微小ピラミッド群

3.2 底辺 100 μm 以下のピラミッドの造形

次に、底辺の長さ 100 μm 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 μm であり、工具先端半径は 10 μm 、テーブルの送り速度は 0.30 mm/s、工具軸方向の送りは 1 μm 、使用した装置は IMFMN である。図 8 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、●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。縦軸は、図 5 と同様に、半頂角 θ より算出される対数ひずみ $\ln(\text{cosec}\theta)$ であり、●の最大値が成形限界を表す。同図より、成形限界は 3000 rpm で最大値 0.556 (伸びは 74.4%) をとり、図 5 の最適化前の成形限界より多少減少するものの、オーダ的にはほぼ同じ成形限界を示すことが分かった。また 1 mm の大きさの場合とは異なり、造形の形状が小さくなると、最適な工具回転数も減少した。

このときに使用した工具は先端部にテーパをつけないストレートのものであった。このため、テーパ付きのものに比べると剛性が低く、高速回転側では、振れ回りが多少大きくなり、その結果として図 8 の成形限界が大きく変動したものと思われる。当初、既報⁶⁾の結果から、工具が細くなるほど工具回転数を上げ、高い工具表面速度を維持する必要があると考えていたが、実際には工具

の回転速度を適度に下げる必要があることが分かった。

図 9 に工具回転数 3000 rpm、送り速度 0.030 mm/s、半頂角 45° の条件で成形した一辺 100 μm と 50 μm の微小ピラミッドの CCD 顕微鏡写真を示す。アルミ箔の厚さは 6.5 μm 、工具先端半径は 10 μm である。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。

3.3 マイクロ自由形状加工

微細な自由形状として、寸法 150 μm 、押し出し高さ 25 μm の文字「T」と「U」の加工を行った。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 μm 、工具先端半径は 10 μm 、工具回転数は 3000 rpm、テーブル送り速度は 0.030 mm/s、軸方向送りは 1 μm 、使用した装置は新しく開発した IMFMN である。

図 10 に加工した「T」と「U」の CCD 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 μm 、Rz で 0.940 μm であり、25 μm の押し出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。既報⁶⁾の軸方向送り $dz = 25 \mu\text{m}$ の結果では、加工面における工具の送りと直行方向の粗さは、Rz で 1.5 μm 程度であった。

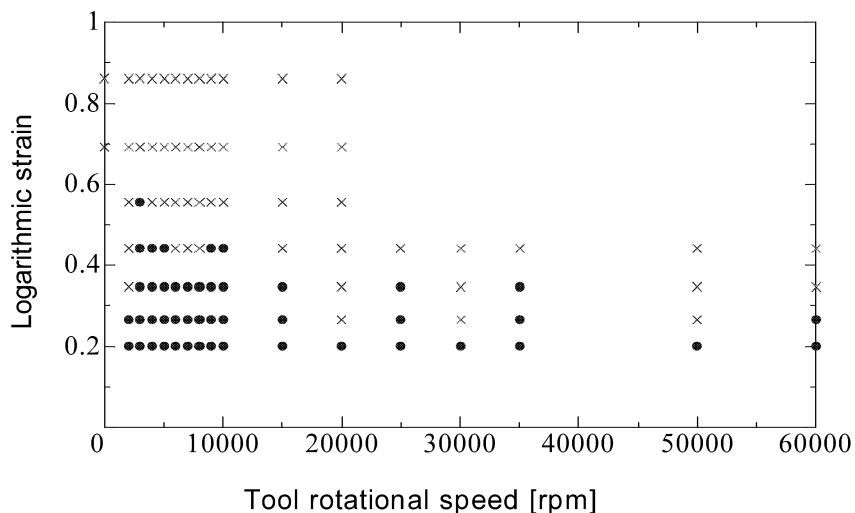


図 8 微細ピラミッドの成形限界に及ぼす工具回転速度の影響

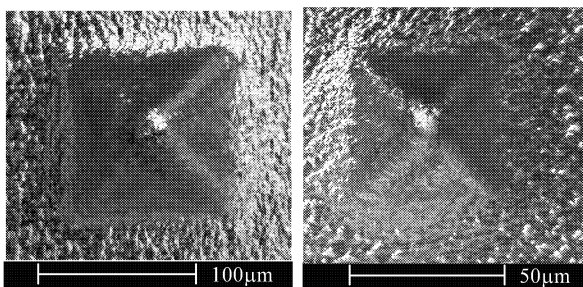


図 9 底辺 100 μm (左) と 50 μm (右) の微小ピラミッドの成形

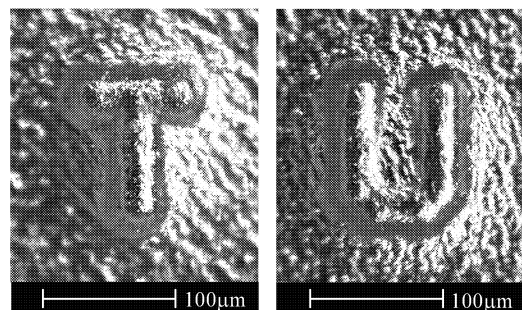


図 10 微細文字「T」と「U」

本報での軸方向送りは $1\ \mu\text{m}$ であるので、加工面の粗さは、加工前のマット面の粗さとほぼ同程度であると思われる。また図3のテンショナーの内径は $10\ \text{mm}$ であり、微細な造形物に対して十分に広い。それにもかかわらずマイクロ自由形状の加工においても、型やバックリングプレートを用いる必要がなく、微細な形状の加工をフレキシブルに行うことが可能である。ただし今後は、加工面の品位を向上させるため、 $100\ \mu\text{m}$ 程度の大きさの微細加工において、両面がブライト面のアルミ箔を使用する必要がある。

次に厚さ $0.8\ \mu\text{m}$ の極薄の純アルミ箔で「D」の文字の成形を行った。文字の寸法は $100\ \mu\text{m}$ 、加工条件は工具回転数が $2000\ \text{rpm}$ であることを除き、図10と同じである。ただしDの場合、一方向から加工を行うので、文字の中心部を最初の高さに押し戻すことができない。そこでDの文字とその内側の全体を $12.5\ \mu\text{m}$ 押し出した後、さらに内側だけを $12.5\ \mu\text{m}$ 押し出した。結果を図11に示す。極薄箔は両面ともブライト面であるため、図10と比較すると箔素材の凹凸が小さい。またテンショナーにより箔に適度な張力が与えられているため、既報⁸⁾のような皺は確認されなかった。

図9-11にみられるように、寸法が $100\ \mu\text{m}$ 程度になると成形精度が低下する。両面がブライト面でない場合には、箔の厚さの不均一性が加工精度に影響するが、それ以上に結晶粒径の影響が大きいと考えられる。これらの造形で使用した調質の8021材の結晶粒径は $5-10\ \mu\text{m}$ であり、一方1N30材の結晶粒径は $30-100\ \mu\text{m}$ である⁷⁾。例えば図10の文字「T」と「U」の成形を想定すると、文字の太さは約 $30\ \mu\text{m}$ であるので、結晶粒径 $30-100\ \mu\text{m}$ の1N30材では成形が極めて困難になるのは明らかである。調質の8021材では、結晶粒径は文字の太さより小さいが、それでもマクロな加工に比べれば、箔の成形に及ぼす結晶粒径の影響は無視できないはずである。またインクリメンタルフォーミングのような拘束の小さい塑性変形であれば、結晶の方位異方性が顕在化すると考えられる。それにも係らず、ほぼ所定の形状に加工されている点は、特記すべきであろう。

最後に、結晶寸法の影響のない $500-1000\ \mu\text{m}$ 大きさの自由形状の成形結果を3例示す。図12は寸法 $500\ \mu\text{m}$

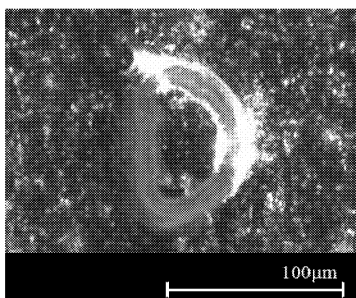


図11 微細文字「D」

μm 、押し出し高さ $144\ \mu\text{m}$ 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。加工条件は、図7と同じである。字の太さは $100\ \mu\text{m}$ 以下であるが、図10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13は円錐台上に成形されたスペード状の錐台である⁹⁾。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 $4000\ \text{rpm}$ 、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押し出し

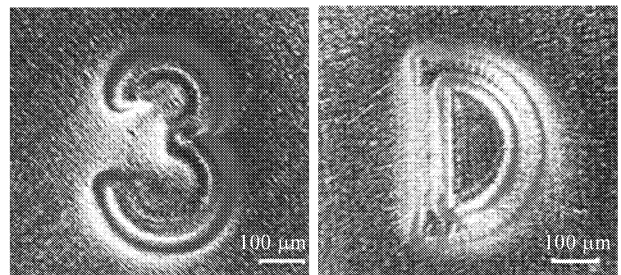
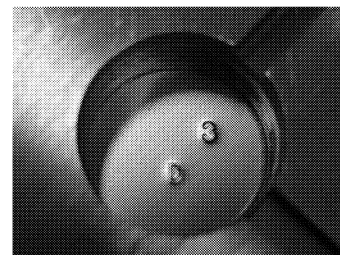


図12 寸法 $500\ \mu\text{m}$ の数字「3」と文字「D」。(上図は加工領域の全体写真)

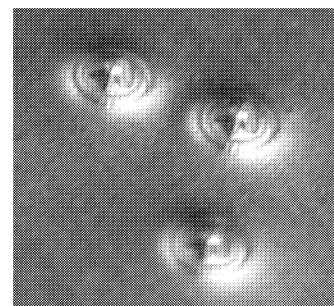
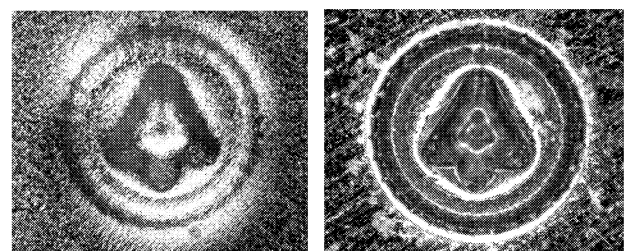


図13 円錐台上に成形されたスペード状の錐台(左)、工具側から見た凹状の加工面(右)ならびに箔上に成形された3個のオブジェクト

とともに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押し出しとともに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比較的単純であるが、2次元半の加工により比較的複雑な曲面の成形が実現できた。

最後の成形例として、図14に長さ1mm、造形高さ230 μm の車体を示す⁶⁾。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20000rpm、テーブル速度0.23mm/sである。CCD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。

3.4 セラミックス薄膜構造物の造形

成形したアルミ箔を犠牲材料として作成したセラミック(HfO_2)の四角錐台を図15¹⁰⁾に示す。左図は5つのセラミック錐台のCCD顕微鏡写真であり、右図は下からの透過光により同じ部分を撮影したものである。セラミック錐台の頂点の暗部には、まだ少しアルミ箔

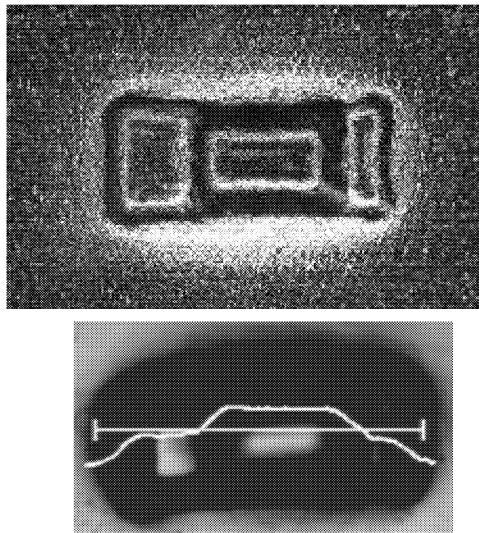


図14 成形された車体とその断面形状

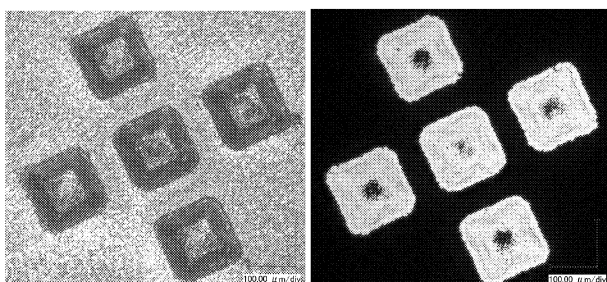


図15 アルミ箔を犠牲材料にして造形したセラミック(HfO_2)薄膜の四角錐台

の一部が残っているが、ほぼセラミックのみ錐台が完成したことが分かる。

4. 結論

本研究では、薄膜のインクリメンタル・マイクロフォーミングを実現するための加工条件について検討を行った。まず、工具を比較的高速で回転し、還元水を潤滑液として使用することにより、型もバックアッププレートも使用せずに、種々の形状、種々の寸法の3次元微細シェル構造の成形が可能であることを示した。その結果、微細形状のフレキシブルな成形に、インクリメンタル・マイクロフォーミングを適用できることが分かった。さらに成形されたアルミ箔を犠牲材料とすることにより、セラミックの微細シェル構造の成形が可能であることを示した。なお、成形限界に関する議論はについて、文献6)ならびに9)を参照されたい。

謝辞

本研究の一部は財団法人天田金属加工機械技術振興財団の平成19年度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) 井関日出男・加藤和典・坂本誠一郎：日本機械学会論文集(C編)，58-554(1992)，3147-3155.
- 2) O. Sakai・S. Aida・T. Gotou・K. Magara・H. Iseki：Proc. 8th ICTP, Verona, (2005), 355-356.
- 3) S. Matsubara：Proc. I. Mech. E. (Part B), J. Eng. Manuf. 215-7 (2001), 959-966.
- 4) P.A.F. Martins・N. Bay・M. Skjoedt・M.B. Silva：CIRP Annals, 57 (2008), 247-252.
- 5) J. Jeswiet・F. Micari・G. Hirt・A. Bramley・J. Dufloy・J. Allwood：CIRP Annals, 54 (2) (2005), 88-114.
- 6) T. Obikawa・S. Satou・T. Hakutani：Int. J. Mach. Tools Manuf., 49-12 (2009), 906-915.
- 7) <http://www.saf.co.jp/A07-1sohaku.html>
- 8) 帯川利之・佐藤俊介：2007年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(2007)，893-894.
- 9) T. Sekine・T. Obikawa：J. Adv. Mech. Des. Sys. Manuf., 投稿中
- 10) 松本憲幸・帯川利之：2010年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，掲載予定