

超音波援用マイクロインデンテーションの応用による

海洋生物付着防止用テキスチャリングソーラパネルの開発

後藤 晃，鈴木 浩文（中部大学），森田晋也（東京電機大学），
由井 明紀（神奈川大学），森泉 利之（城南ダイヤモンド工業㈱）

近年，表面にナノ・マイクロメートルレベルの微細なパターンを創成するテキスチャリングのニーズが増大している．これにより，光学レンズの回折効果の付加・色消し効果の付加，歯科用 Ti インプラントの生体細胞融合性の向上，表示パネルの反射防止機能の付加，ソーラパネルの吸収率の向上，撥水性の向上など様々な効果が期待できる．従来的には「切削加工」などの機械的除去加工で実施されているが，効率の悪い，量産性が劣るなど実用化に大きな課題が有る．

そこで本研究では，高能率加工を行うために変形加工である「ナノインデンテーション」に着目し，(1)レーザ加工を応用した単結晶ダイヤモンド等のマイクロインデンテータ（圧子）を創成し，(2)超音波振動援用のナノインデンテーションシステムを開発し，(3)超音波振動を付加することによる無電解 Ni-P などのアモルファス金属材料の高精度・高能率塑性変形メカニズムを解明し，加工条件を最適化し，(4)微細で構造的な超精密形状の創成の高精度・高能率加工を実現することを提案し，実施した．

本報告では，円錐形状の単結晶ダイヤモンド製圧子を試作し，これまでに開発した超音波援用インデンテーションシステムを用いて，無電解 Ni-P メッキに対してインデンテーション実験を行った．先端角 90° ， 60° ， 45° の 3 種類の圧子を用い，荷重を変化させて荷重と変位の関係，表面粗さ転写性，超音波エネルギーなどの加工特性を評価し考察した．最後に，3 種類の先端角圧子でマイクロアレイ金型を試作し，UV 成形を行い，テキスチャリングパネルを試作し，成形転写性，光学透過性について評価したので報告する．

1. 緒言

近年，様々な領域で超精密・微細テキスチャリングの需要が増大している[1][2]．その例を以下に示す．

(a) 光学系レンズの成型型 回折レンズ，赤外レンズ等の車載センサ，内視カメラ，マイクロカプセル等の医療デバイス等において，素子の形状のテキスチャリング化，ガラス化，マイクロ化，高精度化が求められ，量産成形のため「テキスチャリング成型型の超精密微細加工」が不可欠である[3]．

(b) 歯科用 Ti インプラント 生体細胞と適合性が優れるチタン(Ti)は既に人工骨にも用いられ，最近の研究では歯科 Ti インプラント表面に $10\mu\text{m}$ 幅程度の微細溝を設けると生体融合性が高まるとの報告がある．Ti は難削材であり微細加工が困難である．

(c) 表示デバイス用反射防止機能表面 スマートフォン、液晶パネルや車載表示パネルに、光の波長レベルの段差の微細なパターンを創成することにより、表示パネルの反射光を防止する効果が付加できる。

その他、撥水性の向上、光の吸収率の向上、汚れの付着の防止機能などが有るが割愛する。このように様々なテクスチャリング付加の効果があるが、多くは量産成形するため、高精度・高能率のテクスチャリングがキー技術となっている。

従来は「切削加工」などの機械的除去加工で実施されるが、効率が悪い、量産性が劣るなど実用化に大きな問題が有る[4][5]。一方、本提案の「超音波振動援用ナノインデンテーションによる微細形状の高精度テクスチャリング」では、**図1**に示すようにレーザプロセス[3]で単結晶ダイヤモンド製圧子を創成し、超音波振動を援用しながらインデンテーション（圧入）を行うため、**図2**に示すように小さな押し込み圧力で金属やアモルファス材料の微細形状の高精度・高能率転写加工が可能であることが予備実験の結果から明らかとなっている[6][7][8]。

先行研究では先端形状が球状の圧子と四角錐の圧子を用いて実験を行い、超音波振動を援用することで加工効率と転写精度が向上する結果を得た。この結果を踏まえ、本実験では円錐形状の圧子を用いて超音波援用インデンテーション加工を行い、マイクロレイ金型を作製した。また、マイクロレイ金型を用いてUV成形を行い、転写性および成形品の光学特性を評価し、検討を行った。

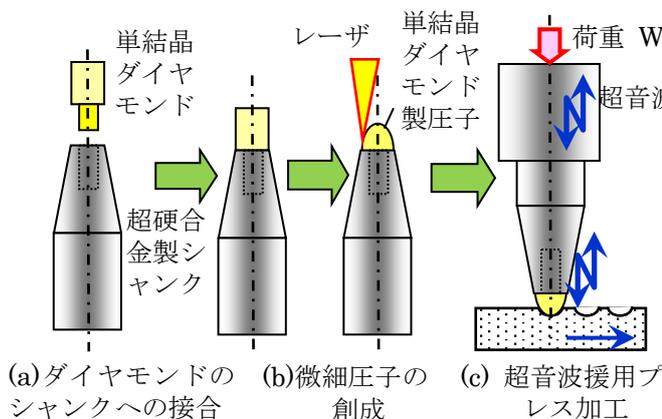


図1 レーザ光による単結晶ダイヤモンド製圧子のマイクロ加工と超音波援用インデンテーション

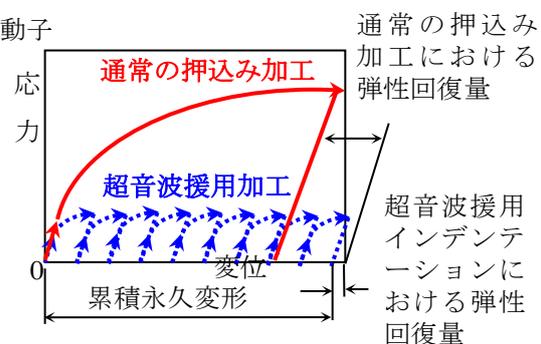


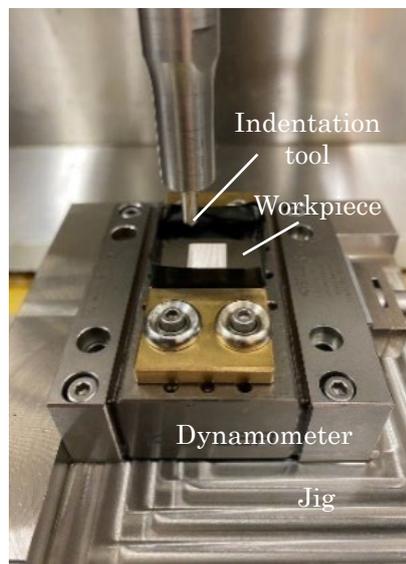
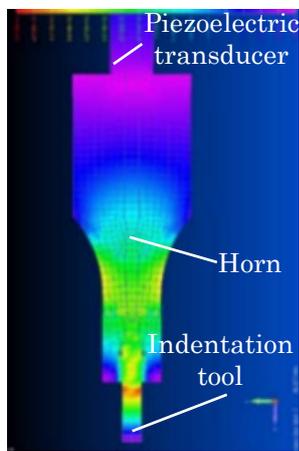
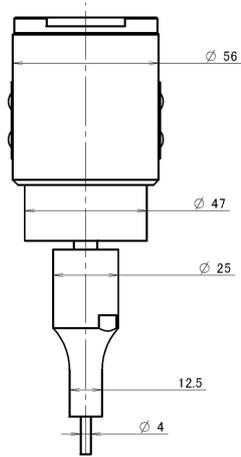
図2 超音波援用インデンテーションの効果

2. 超音波援用インデンテーションによる微細円錐穴加工

2.1 超音波援用インデンテーションの実験装置および実験方法

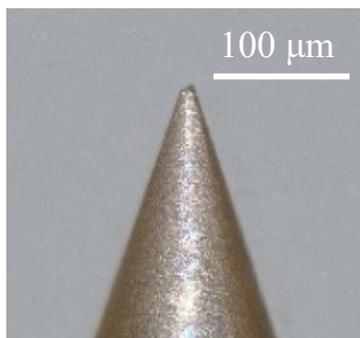
超音波援用インデンテーション装置の概略図を**図3**に示す。装置上部にラジバン型圧電素子を振動子として搭載し超音波振動を発生させた[8]。超音波振動はホーン部分で振幅が増大し、先端で振幅が最大となっている。実験に使用した超音波援用インデンテーション装置を**図4**に示す。開発した超音波援用装置は、ボールネジ駆動の3軸制御の精密工作機械（東芝機械製 UVM350B）に搭載した。テーブルの位置決め分解能は 10 nm である[9]。動力計(Kistler 製)によりインデンテーション

力を計測した。実験に使用した単結晶ダイヤモンド製圧子のマイクロ画像を図 5 に示す。圧子は高周波加熱装置を用いて、単結晶ダイヤモンドを超合金製シャンクに銀ろうで接合し、レーザ加工によって先端形状を創成した。

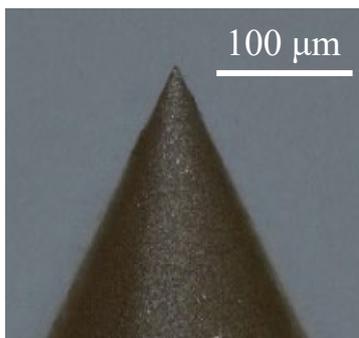


(a) 装置の概略図 (b) 超音波振動の分析

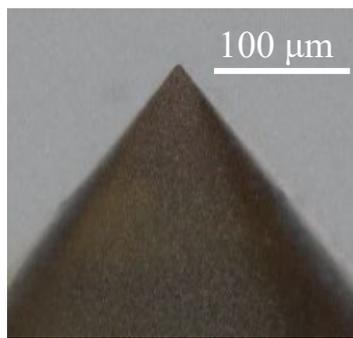
図 3 超音波援用インデンテーションシステム 図 4 超音波援用インデンテーション装置



(a) 45°



(b) 60°



(c) 90°

図 5 単結晶ダイヤモンド製圧子のマイクロ画像

表 1 実験条件

工具材料	単結晶ダイヤモンド
先端形状	円錐
先端角度	45°, 60°, 90°
超音波振動	ランジュバン型圧電素子
振動数	39 kHz
振幅	0, 2.5, 3.0, 4.0, 6.2 μm
工作物	無電解Ni-P (HV 519)
母材	STAVAX
めっき膜厚	300, 500 μm
押込み量	20, 50, 100 μm
送り速度	10 mm/min
クーラント	白灯油中加工

先行研究では先端形状が球状の圧子と四角錐の圧子の 2 種類を用いた実験結果を報告した。本実験では、先端形状が円錐の圧子を用いて無電解 Ni-P めっきされた工作物に超音波援用インデントレーション加工を行い、押し込み深さによる荷重の変化、ばり高さの変化、圧子と圧子痕の転写性、超音波振動による加工エネルギーの変化を評価した。また、実験結果からマイクロレイ金型を作製する条件を設定し、UV 成形用のマイクロレイ金型を作製した。実験条件を表 1 に示す。

2. 2 実験結果

(a) 超音波振動なし

マイクロレイ金型を作製する前に、圧子の工具特性を評価した。工具特性の評価は超音波振動を援用せずインデントレーション加工を行い、押し込み荷重の変化、ばり高さの変化、圧子と圧子痕の形状誤差の測定を行った。押し込み量を変化させたときの押し込み荷重の変化を図 6(a) に示す。すべての圧子で押し込み量が増加すると押し込み荷重も増加した。また、圧子の先端角度が大きいほど荷重は増加した。押し込み量を変化させたときのばりの高さの変化を図 6(b) に示す。先端角度 60°の圧子は押し込み量が増加するとばりの高さも増加したがそれ以外の圧子は押し込み量が 50 μm の場合ばり高さが減少する傾向がみられた。押し込み量を変化させたときの形状誤差の変化を図 6(c) に示す。形状誤差は圧子痕と圧子の形状を重ね合わせ、ずれを計測し、P-V 値を算出した。すべての圧子で、押し込み量が増加すると形状誤差の P-V 値は増加した。

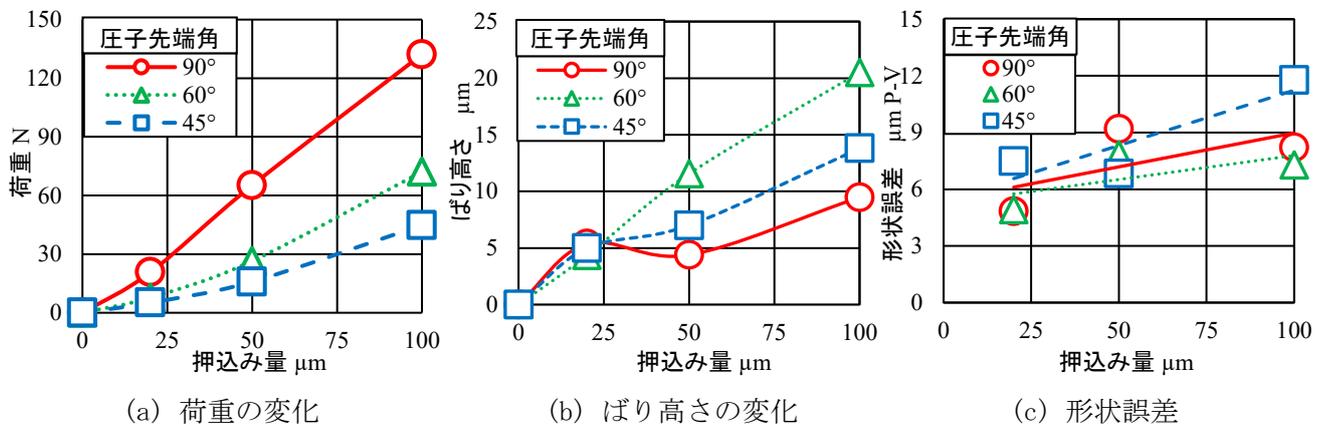


図 6 押し込み量ごとによる各値の変化

(b) 超音波振動あり

ここで超音波振動を援用し実験を行ったところ、先端角度が 45°、60°の圧子は破損した。破損の原因は、超音波振動による先端部の横振れによるものだと考える。これより先端角度が 90°の圧子に超音波振動を援用し実験を行った。押し込み量を変化させたときの振幅ごとの荷重の変化を図 7(a) に示す。超音波振動を援用していない状態に比べ、全ての振幅の条件で大幅に荷重が減少した。押し込み量を変化させたときの振幅ごとの形状誤差の変化を図 7(b) に示す。先行研究では、先端角度が 90°の四角錐圧子を用い、振幅が 3.0 μm のとき、押し込み量が増加するほど形状精度が悪化したが、

本研究では先端角度が 90° の円錐圧子を用い、振幅が $3.0\ \mu\text{m}$ のとき、押し込み量を増加させても形状誤差は小さく、一定となった。押し込み量を変化させたときの振幅ごとの加工エネルギーの変化を図 7(c) に示す。押し込み量が大きくなるほど加工エネルギーも増大した。また超音波振動の振幅が増加するほど加工エネルギーは減少した。加工エネルギーより算出した超音波振動による振動エネルギーの変化を図 7(d) に示す。この結果から、成形時の加工エネルギーの約 70 % が超音波振動の振動エネルギーにより補われていることが分かった。

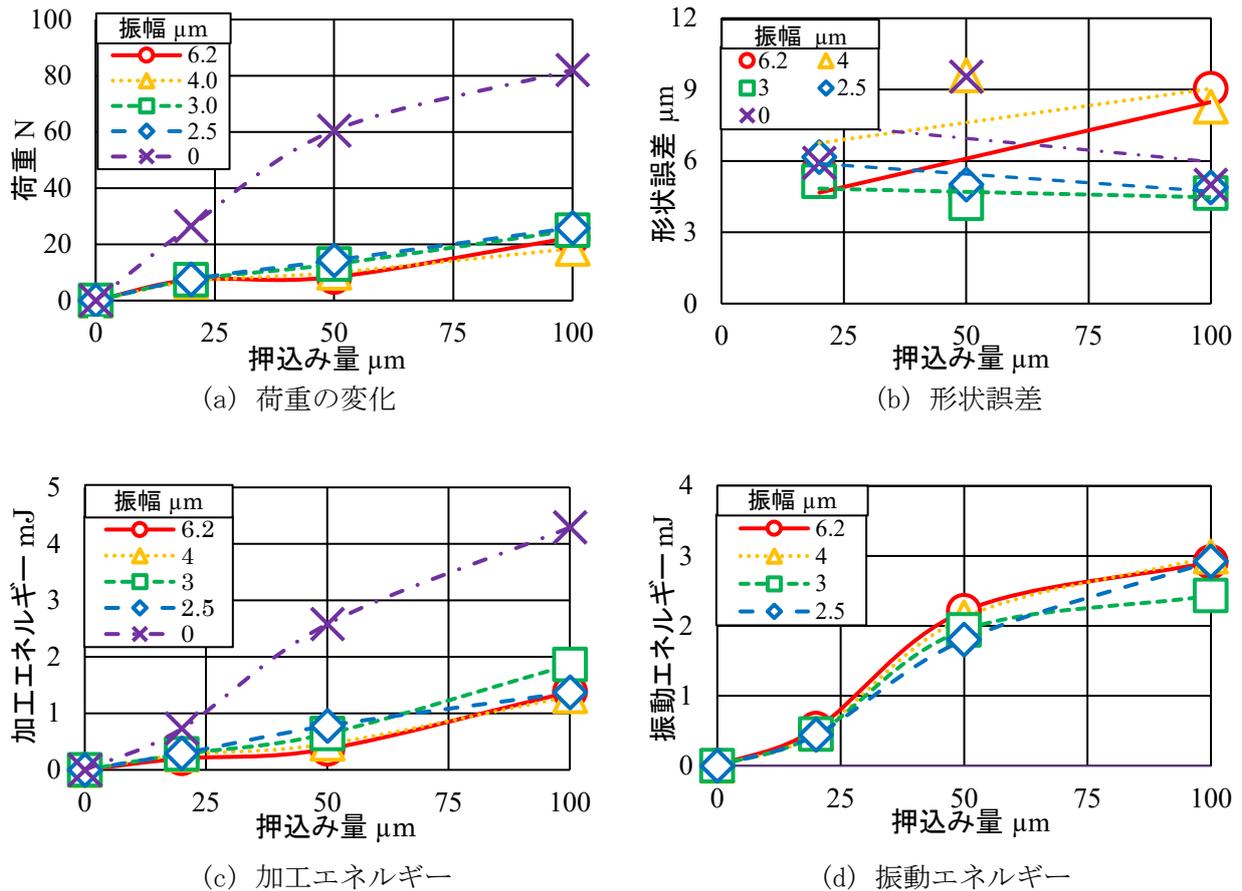
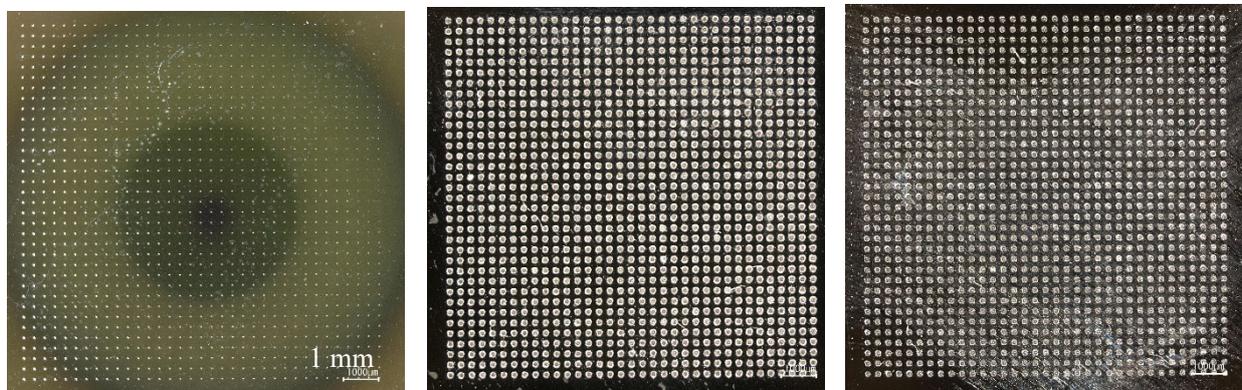


図 7 超音波振動の振幅および押し込み量ごとの各値の変化



(a) $45^\circ d=50\ \mu\text{m}\ \lambda=0\ \mu\text{m}$

(b) $60^\circ d=50\ \mu\text{m}\ \lambda=0\ \mu\text{m}$

(c) $90^\circ d=50\ \mu\text{m}\ \lambda=3.0\ \mu\text{m}$

図 8 マイクロアレイ金型のマイクロ画像

(c) マイクロアレイ金型の作製

実験の結果を踏まえ、押込み量 $50\ \mu\text{m}$ で 35×35 個のマイクロアレイ金型を作製した。実験の結果から先端角度が 45° 、 60° の圧子は超音波振動を援用せず加工を行った。作製したマイクロアレイ金型の全体画像を図 8 に示す。超音波振動の有無とマイクロアレイの加工数による形状誤差の変化を図 9 に示す。超音波振動なしの結果と比較した場合、超音波振動ありの結果はマイクロアレイの加工数が増加した場合でも形状誤差の変化は小さく、ばらつきも小さいことから、超音波振動の援用がマイクロアレイ金型の加工において有効である結果を得た。

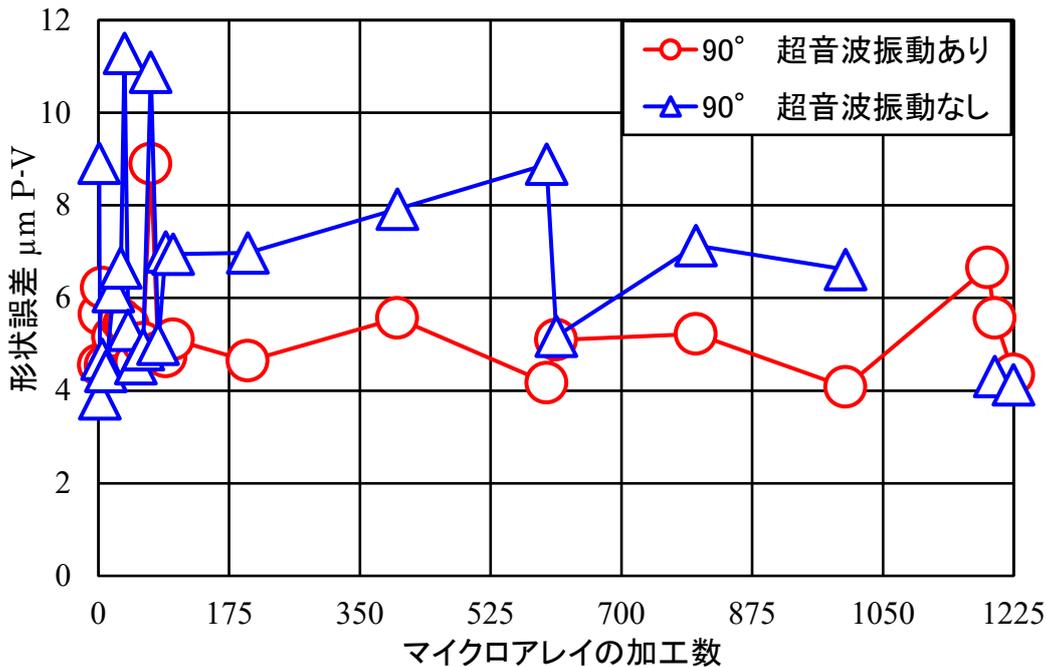


図 9 マイクロアレイの加工数による形状誤差の変化

3. UV 成形

3.1 UV 成形の実験装置および実験結果

実験では、超音波援用インデンテーション加工により作製した圧子痕の角度 90° のマイクロアレイ金型と角度 60° のマイクロアレイ金型を用いて、UV 成形を行い、成形転写性、光学透過性を評価した。UV 成形のプロセスを図 10 に示す。マイクロアレイ金型を成形用治具に取り付け、 $0.2\ \text{MPa}$ で加圧した状態で紫外線を 2 分間照射した。UV 成形機の外観を図 11、使用したマイクロアレイ金型を図 12、UV 成形用治具を図 13 に示す。

UV 成形の実験条件を表 2 に示す。UV 成形に使用した紫外線硬化樹脂はアクリル系光硬化性樹脂であり、離型性と非着色性に優れたものを使用した [10]。

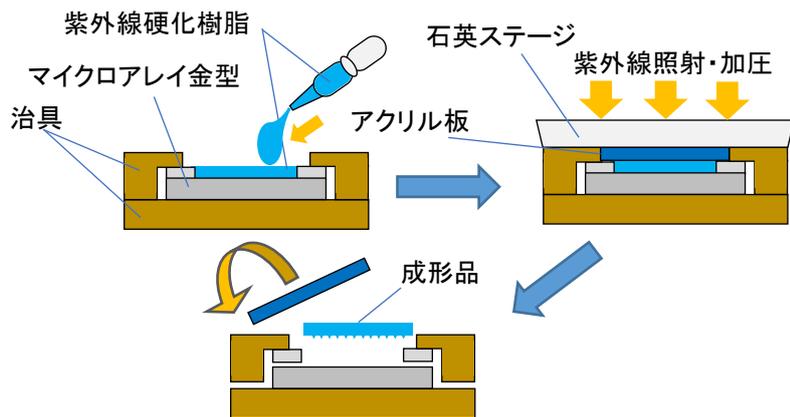
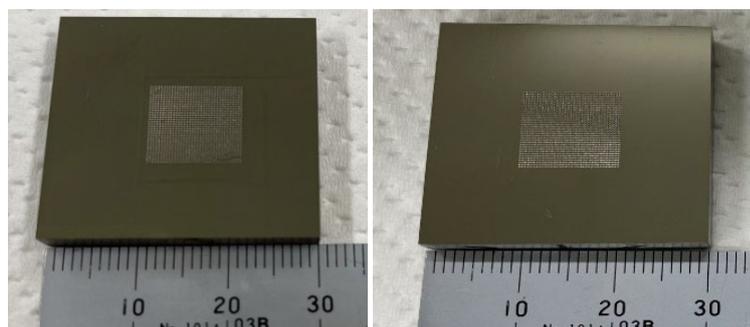


図 10 UV 成形のプロセス



図 11 UV 成形機の外観



(a) 圧子痕の角度 90°

(b) 圧子痕の角度 60°

図 12 マイクロアレイ金型



図 13 UV 成形用治具の外観

表 2 UV 成形の実験条件

金型	マイクロアレイ金型
金型の寸法	30 mm×30 mm
アレイの数	35×35
ピッチ	300 μm
形状	円錐
圧子痕の角度	60°, 90°
紫外線硬化樹脂	PAK-02 (東洋合成)
紫外線照射時間	2 分間
押し圧	0.2 MPa
成形品の厚さ	200 μm

3. 2 UV 成形の実験結果

成形品を作製後、マイクロアレイ金型の形状と成型品の形状を測定し、成形転写性を評価した。成形品の全体画像および各点でのマイクロ画像を図 14 に示す。画像から円錐形状の凸形状を確認することができ、微細形状でも樹脂が流れ込むことが確認できた。マイクロアレイ金型と成型品の形状誤差の変化を図 15 に示す。圧子痕の角度 90°のマイクロアレイ金型は、加工数による形状誤差の変化は小さく、角度 60°よりも良好な転写性を得た。

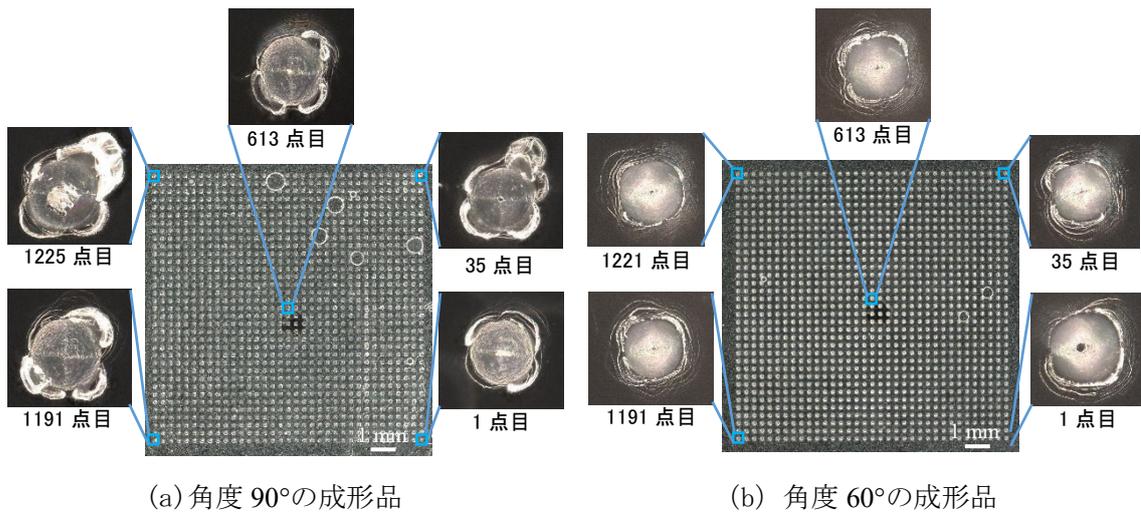


図 14 成形品の全体および各点でのマイクロ画像

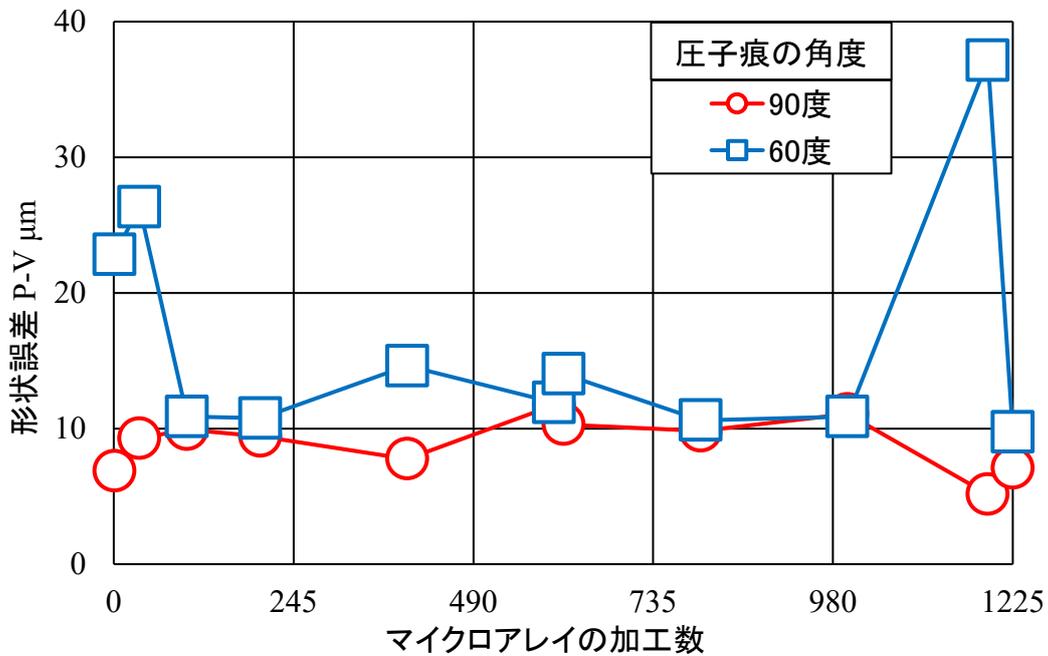


図 15 マイクロアレイの加工数による形状誤差の変化

3.3 透過率の測定装置および測定方法

UV 成形後、成形品の光学特性を評価するため透過率の測定を行った。図 16 に実験に用いた透過率測定の概略図を示す。ランベルトーベールの法則より透過後の光の強度を求めたのち、入射前の光の強度に対する、透過後の光の強度の割合を透過率とし算出した。測定の様子を図 17 に示す。

測定条件を表 3 に示す。テキスチャの有無による透過率の比較を行うため、テキスチャなしの成形品を作製した。測定環境は大気中、光源と測定物の距離を 7 mm、測定台と測定物の距離は 43 mm とした。測定する波長の領域は 300-1000 nm とした。

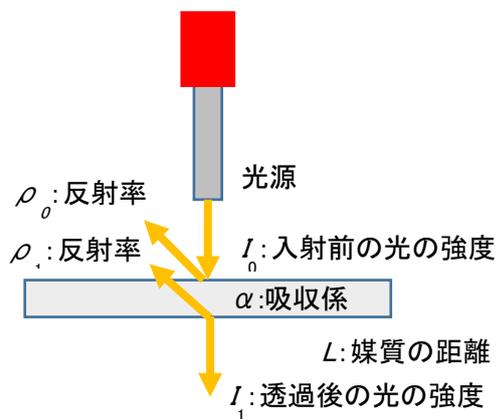


図 16 透過率測定器の概略図

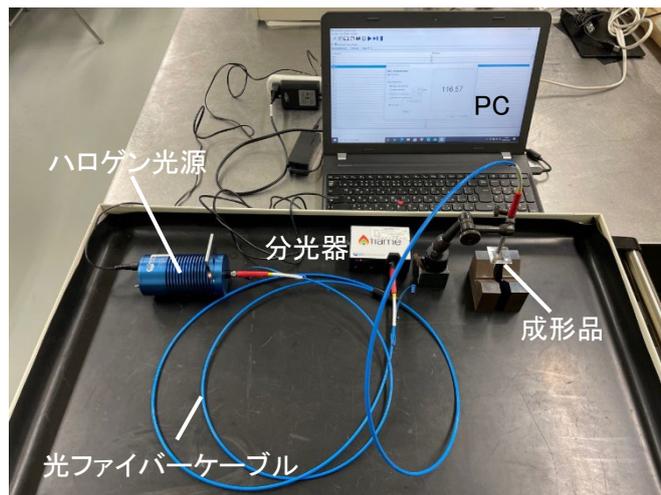


図 17 透過率の測定の様子

表 3 透過率の測定条件

測定器	FLAME (Ocean Optics 製)
測定した環境	大気中
測定物	角度 60, 90 度の成形品, テキスチャなしの成形品
光源と測定物の距離	7 mm
測定台と測定物の距離	43 mm
測定した波長	300~1000 nm

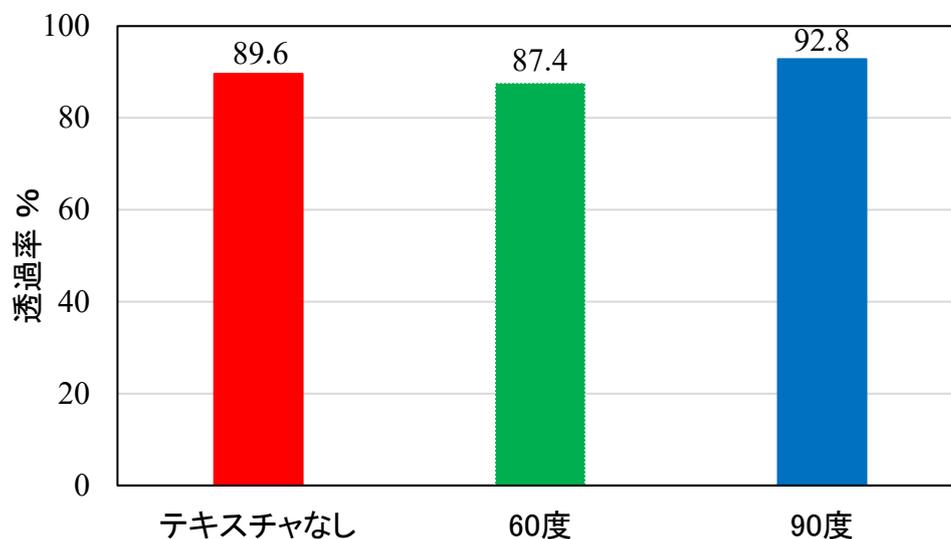


図 18 成形品の透過率

3. 4 透過率測定の実験結果

各成形品の透過率の結果を図 18 に示す。テキスチャなしの成形品が 89.6%に対し、角度 60°の透過率は 87.4%、90°の透過率は 92.8%であることから、テキスチャの有無に関わらず高い透過率を得た。また、圧子痕の角度による透過率の差も小さい結果を得た。

4. おわりに

本研究では、構造化金型の加工時間の短縮、切削コストの低減、加工効率の向上を目的として、超音波援用インデンテーションによるテキスチャ面創成の新しい加工法とシステムの提案し開発した。本報告では、円錐形状の単結晶ダイヤモンド製圧子を試作し、これまでに開発した超音波援用インデンテーションシステムを用いて、無電解 Ni-P メッキに対してインデンテーション実験を行った。先端角 90°、60°、45°の3種類の圧子を用い、押し込み量を変化させて荷重と変位の関係、表面粗さ転写性、超音波エネルギーなどの加工特性を評価し考察した。最後に、3種類の先端角圧子でマイクロアレイ金型を試作し、UV 成形を行い、テキスチャリングパネルを試作し、成形転写性、光学透過性について評価した。超音波援用インデンテーション加工の実験からは以下の結果を得た。

- (1) 四角錐圧子に比べ、ばりが均一になる。
- (2) 超音波振動の効果により形状の転写性が良好となった。
- (3) 超音波振動を援用することで転写性の良いマイクロアレイ金型を作製できた。

作製したマイクロアレイ金型を用いて UV 成形を行い、以下の結果を得た。

- (1) 先端が鋭角なほど転写性は悪化する。
- (2) 円錐形状のテキスチャ面は透過率の変化が小さい
- (3) 圧子痕の角度による透過率への影響は小さい

謝辞

本研究は、科学研究費補助金 基盤研究 (B) 20H02486、公益財団法人 アマダ財団研究助成、公益財団法人 大沢科学技術財団研究助成、中部大学生産技術開発センターの助成により行われた。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- [1] Yoshioka H, Kojima K, Toyota D (2020) Micro Patterning Curved Surface with a Fast Tool Servo System for Micro Milling Process: CIRP Annals – Manufacturing Technology 69(1): 325-328.
- [2] Brinksmeier E, Riemer O, Gessenharter A, Autschbach L (2004) Polishing of Structured Molds: CIRP Annals – Manufacturing Technology 53(1):247–250.
- [3] Suzuki H, Okada M, Asai W, Sumiya H, Harano K, Yamagata Y, Miura K (2017) Micro Milling Tool Made of Nano-Polycrystalline Diamond for Precision Cutting of SiC: CIRP Annals – Manufacturing Technology 66 (1) 93–96.
- [4] Suzuki H, Okada M, Lin W, Morita S, Yamagata Y, Hanada H, Araki H, Kashima S (2014) Fine Finishing of Ground DOE Lens of Synthetic Silica by Magnetic Field-Assisted Polishing: CIRP Annals – Manufacturing Technology 63(1): 313–316.
- [5] Suzuki H, Okada M, Fujii K, Matsui S, Yamagata Y (2013) Development of Micro Milling Tool

- Made of Single Crystalline Diamond for Ceramic Cutting: CIRP Annals – Manufacturing Technology 62(1): 59–62.
- [6] Abdullah A, Paknejad M, Dashti S, Pak A, M Beigi A (2014) Theoretical and Experimental Analyses of Ultrasonic-Assisted Indentation Forming of Tube: Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 228(3): 388-398.
- [7] Michalski M, Lechner M, Gruber L, Merklein M (2018) Influence of vibration on the shear formability of metallic materials: CIRP Annals – Manufacturing Technology 67(1): 277–280.
- [8] Suzuki H, Hamada S, Okino T, Kondo M, Yamagata Y, Higuchi T (2010) Ultraprecision Finishing of Micro-Aspheric Surface by Ultrasonic Two-Axis Vibration Assisted Polishing: CIRP Annals – Manufacturing Technology 59(1): 347–350.
- [9] Suzuki H, Nakagawa T, Suzuki A, Okada M, Hamada S (2021) Fabrication of textured surface with ultrasonic vibration-assisted indentation, CIRP Annals – Manufacturing Technology 70(1): 321-324.
- [10] 坂井 信支, 平澤 玉乃 (2009) 光ナノインプリント用光硬化樹脂とその特性評価方法 : 高分子論文集, Vol.66, No.3, pp.88-96