

単結晶ダイヤモンド製圧子を用いた超音波援用

マイクロインデンテーションによるテキスチャリング

鈴木 浩文, 岡田 睦

森田 晋也 (東京電機大学), 浜田 晴司 (多賀電気㈱)

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.

本実験では, ランジュバン型の圧電素子を用いて超音波援用インデンテーションシステムを開発し, 単結晶ダイヤモンド製インデンテータ (圧子) をレーザ加工と遊離砥粒による研磨加工により試作した. そして, 無酸素銅, 6-4 黄銅, 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い, インデンテーションプロセスにおける荷重と変位の関係, 転写性について検討を行ったので報告する.

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) 光学系レンズの成形型 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形型の超精密微細加工」が不可欠である.

(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 μ 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[2-4]。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[5-6]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。単純な圧子による押し込み加工では微細形状の高精度高能率加工が困難であるが、それに反して、(1)なぜ超音波を付加することにより低圧力で材料の塑性流動が生じるのか、(2)高精度・高能率転写加工ができるのかを、塑性流動解析、実験的検証により、明らかにすることを本研究の目的として実験を実施した。

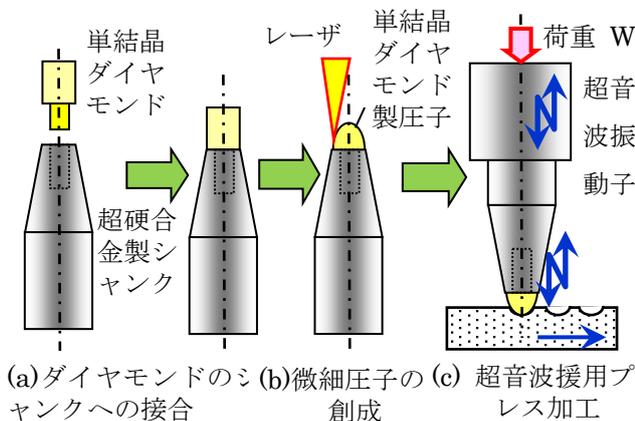


図1 レーザ光による単結晶ダイヤモンド製圧子のマイクロ加工と超音波援用インデンテーション

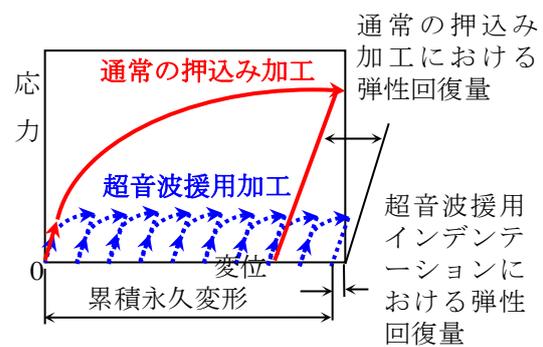
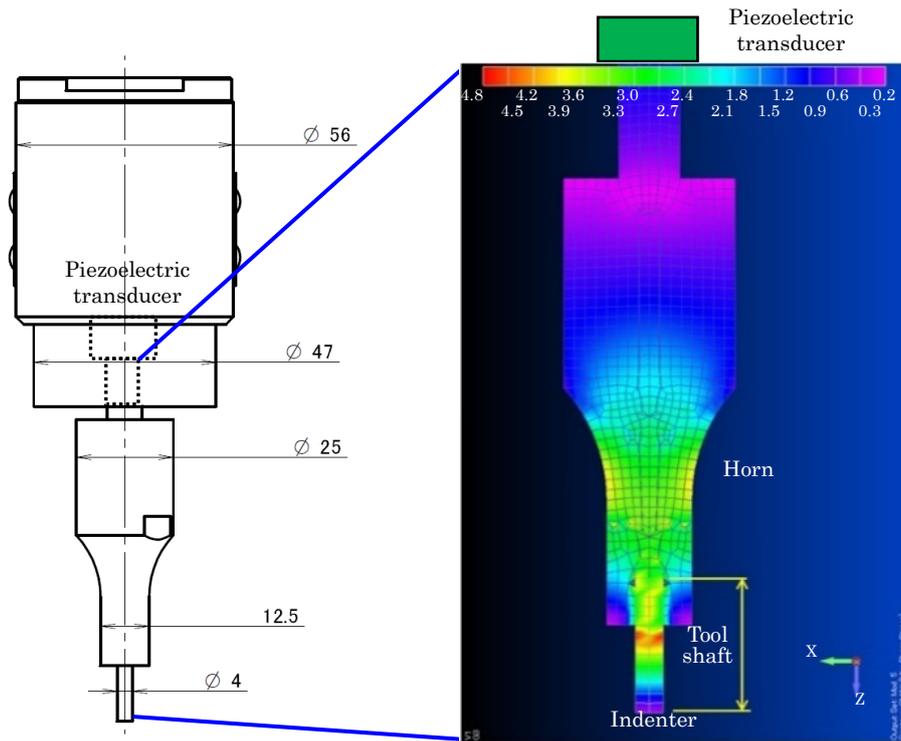


図2 超音波援用インデンテーションの効果

2. 超音波振動援用ナノインデンテーションシステムの開発

開発した超音波振動援用ナノインデンテーションシステムを**図3**に示す。ランジュバン型の圧電素子を用いて超音波振動を創成した。縦方向の超音波振動はホーンにより振幅を増大し、先端のダイヤモンド圧子に伝達する構造となっている。

超音波振動システムを開発するにあたり、**図3(b)**に示すようにANSYSを用いて超音波振動解析を行い、システムと最適な振動ホーンの形状を設計した[7-9]。3軸制御NC駆動装置（芝浦機械(株)製UVM350B）に圧電素子型の超音波振動装置を取付け、単結晶ダイヤモンド圧子はコレットチャックを介して超音波装置に取付ける。また、プレス力測定のため、金型・ワークジグを動力計（キスラー製）に取り付け、押し付け荷重、圧子の位置を制御するシステムを構築した。超音波振動装置の振動数は39kHz、振幅は2~6.2 μm となるようにした。駆動テーブルはX,Y,Z軸同時制御で、位置決め精度は10nmである。



(a) 超音波振動装置の概略図

(b) 超音波振動解析

図 3 開発した超音波援用インデンテーションシステム

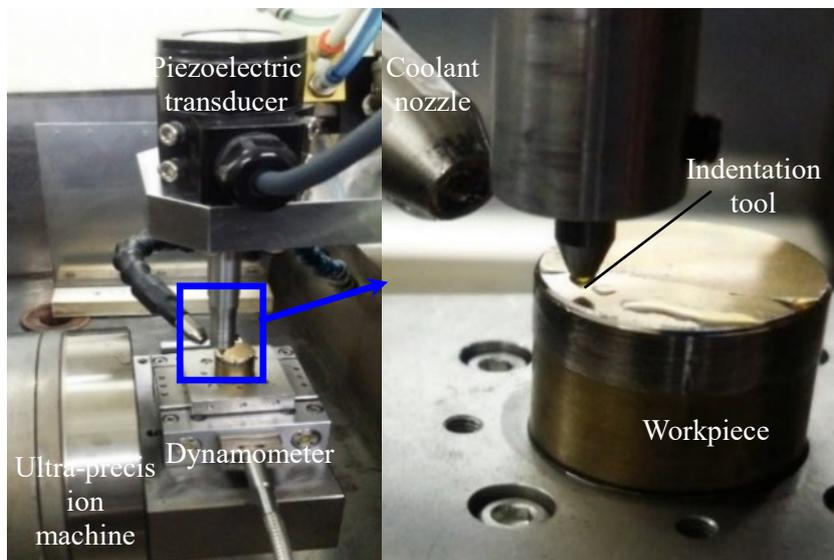
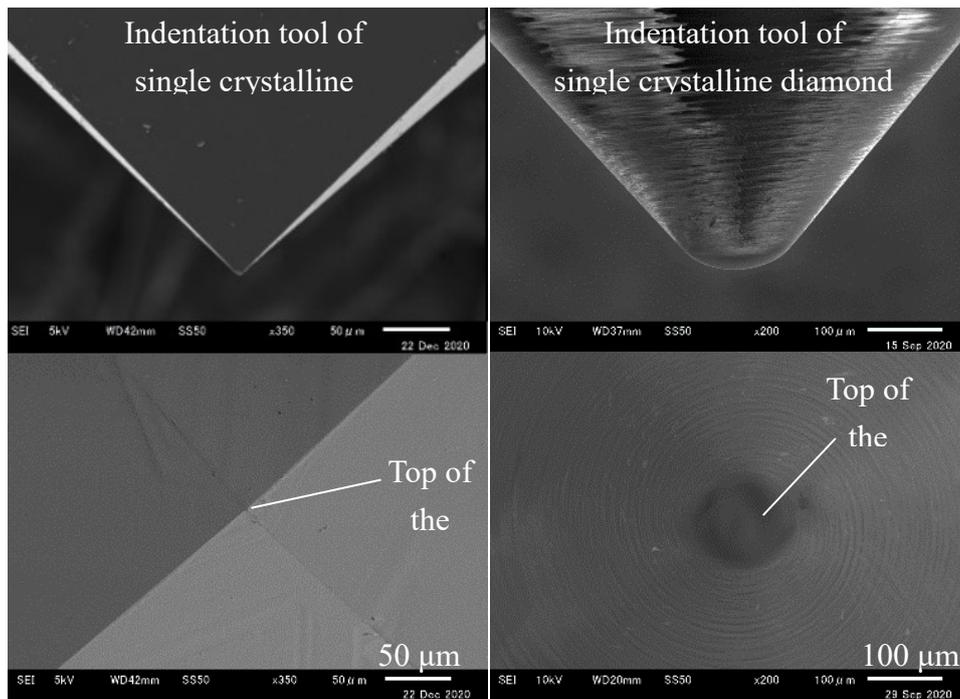


図 4 開発した超音波援用インデンテーション装置

3. 単結晶ダイヤモンド製の圧子の試作

単結晶ダイヤモンド製の圧子は図 1 のレーザファブリケーションシステムにより試作した。レーザ光を走査し自由曲面を創生することが出来る。使用したレーザは IR YVO₄ ($\lambda=1.064 \mu\text{m}$)を用いた試作した、2種類の単結晶ダイヤモンド製の圧子の SEM 写真を図 5 に示す。先端が 90 度の四角錐形状と、曲率半径 100 μm の円弧形状の圧子を試作した。



(a) Four-corner cone (90 degrees) (b) Spherical shape (100 μm R)

図5 試作した単結晶ダイヤモンド製のインデンテーション圧子

3. 実験方法

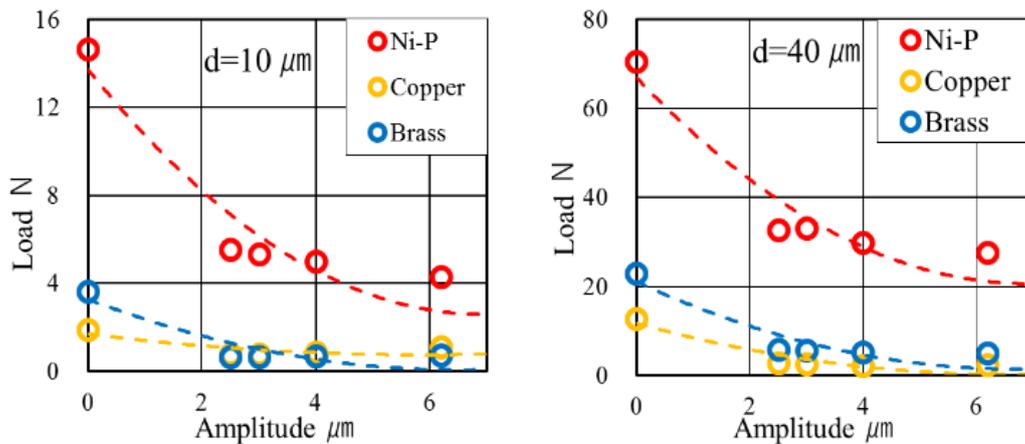
インデンテーション実験の条件を表1に示す。超音波振動装置の振動数は39kHz、振幅は2~6.2 μmとなるようにした。駆動テーブルはX,Y,Z軸同時制御で、位置決め精度は10nmである。押し込み量は5・80 μmとし、インデンタの動きとインデンテーション時間は超精密機械のNCシステムにより制御した。工作物は、6-4黄銅、無酸素銅、無電解Ni-Pを用いて実験した。インデンテーション荷重はキスラー社の動力計によりインプロセスで計測した。インデンテーション加工はドライでも可能であるが、ダイヤモンド圧子の摩耗と破損を防止するため、白灯油を掛けながら潤滑して加工を行った。

表1 実験条件

Tool material	Single crystalline diamond (SCD)		
Shape	Four-corner cone	Semi-sphere	
Top edge shape	90 degrees	0.1 mm R	
Ultrasonic oscillator	Piezoelectric		
Frequency	39 kHz		
Amplitude	0, 2.0 - 6.2 μm		
Workpiece	6-4 Brass	Oxygen free copper	Electroless Ni-P
Hardness	HV 153	HV 100	HV 565
Indented depth	5, 10, 20, 40, 80 μm		
Feed rate	100 mm/min		
Indentation time	0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6 s		
Coolant	White kerosene		

4. 超音波援用インデンテーションの基礎的特性の評価

はじめに、超音波援用インデンテーションの基礎的特性を把握するために、無電解Ni-P、無酸素銅、6-4黄銅を材料に対して、インデンテーション荷重、インデンテーション深さを変化させて特性を評価した。3種類の材料に対して、インデンテーション深さが10 μm 、40 μm において、超音波振動の振幅を変化させて時の荷重の変化を図6に示す。硬度の高い材料ほどインデンテーション荷重が大きく、振幅が大きいほど荷重が小さくなっていることがわかる。

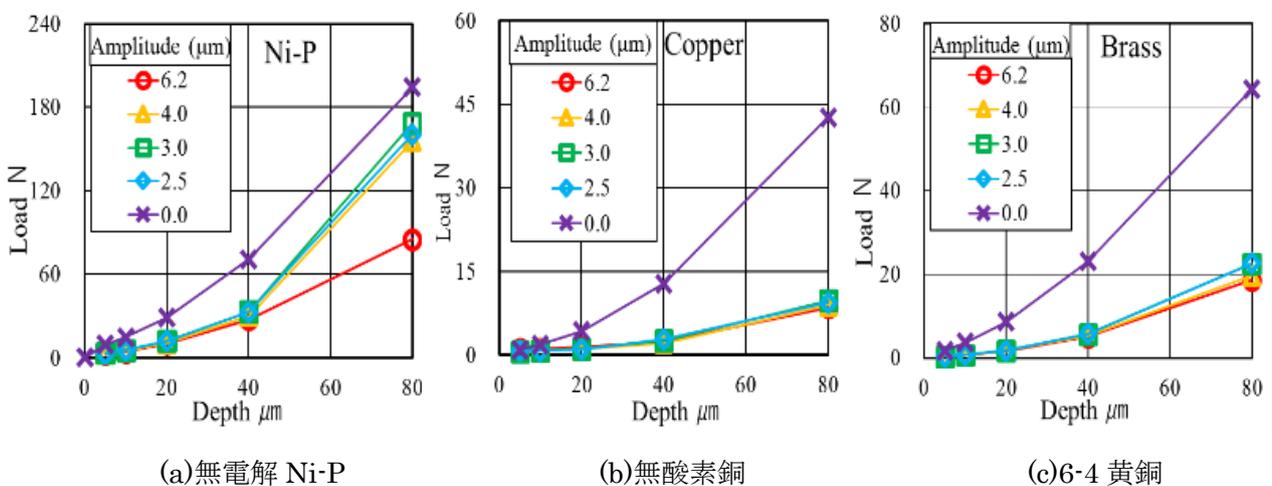


(a) インデンテーション深さ, $d=10\ \mu\text{m}$

(b) インデンテーション深さ, $d=40\ \mu\text{m}$

図6 超音波振動の振幅に対する荷重の変化 (無電解Ni-P, 無酸素銅, 6-4黄銅)

次に、無電解Ni-P、無酸素銅、6-4黄銅を材料に対して、インデンテーション荷重、インデンテーション深さを変化させて特性を評価した。3種類の材料に対して、インデンテーション深さの変化によるインデンテーション荷重の変化を図7に示す。超音波振動の振幅が大きいほど変形に必要な荷重が小さくなっていることがわかる。



(a)無電解 Ni-P

(b)無酸素銅

(c)6-4黄銅

図7 超音波振動のインデンテーション深さに対する荷重の変化

また、設定したインデンテーション深さに対する実際の加工深さの変化を図8に示す。いずれの超音波振動の振幅においても設定深さ通りの加工が行われている。

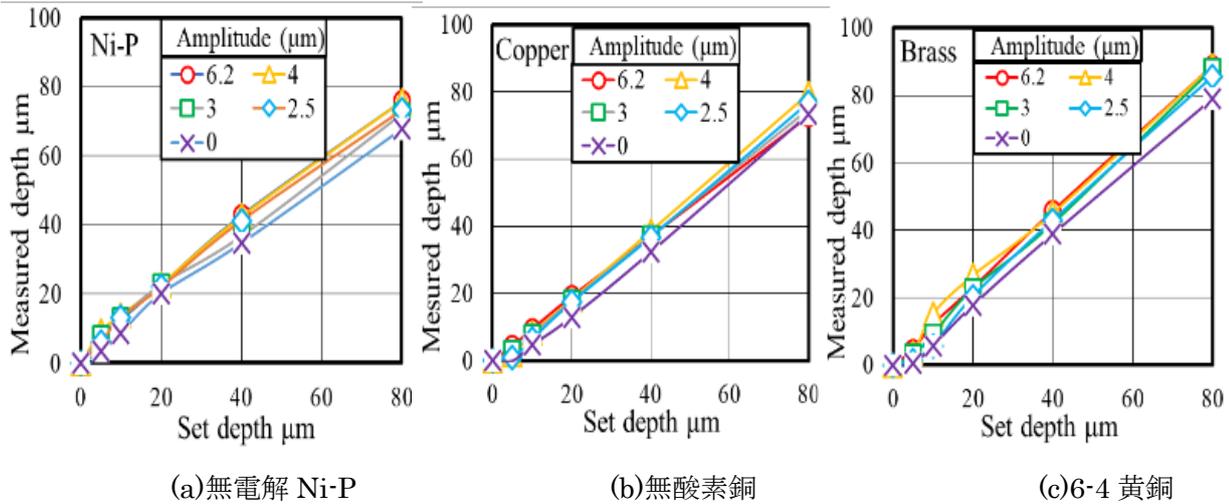
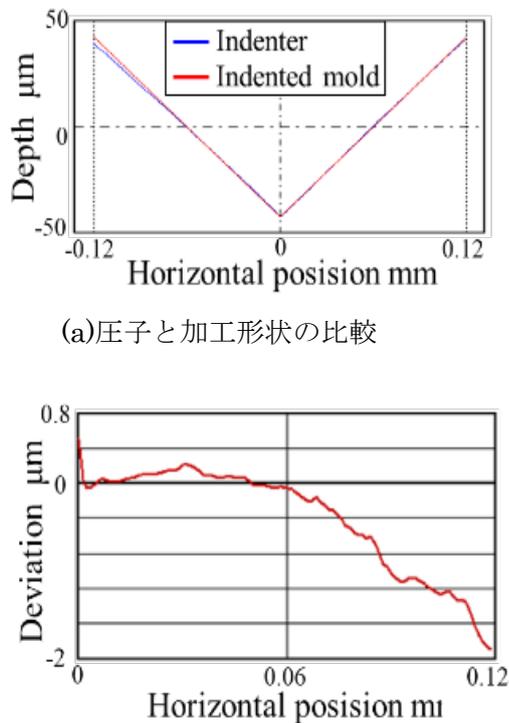


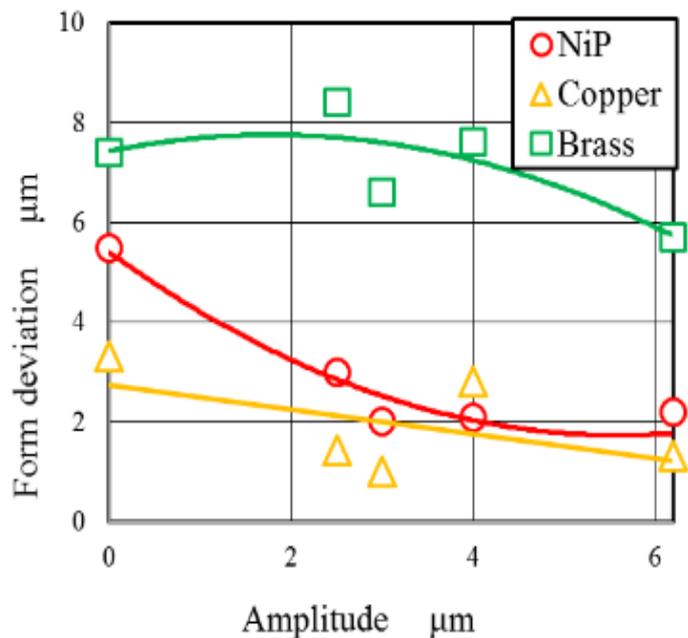
図8 インデンテーション深さに対する加工深さの変化

次に、圧子に対するインデンテーションの転写性を検討した。90度の四角錐のインデンテータを用いて、視聴音波振動の振幅に対する転写性を評価した結果を図9に示す。超音波振動の振幅が大きいほど転写性が優れていることがわかる。無電解 Ni-P は最も硬度が高いが、転写性は比較的良好であった。比較的硬度が低い黄銅が最も悪かった。



(a) 圧子と加工形状の比較

(b) 圧子と加工形状の差の分布

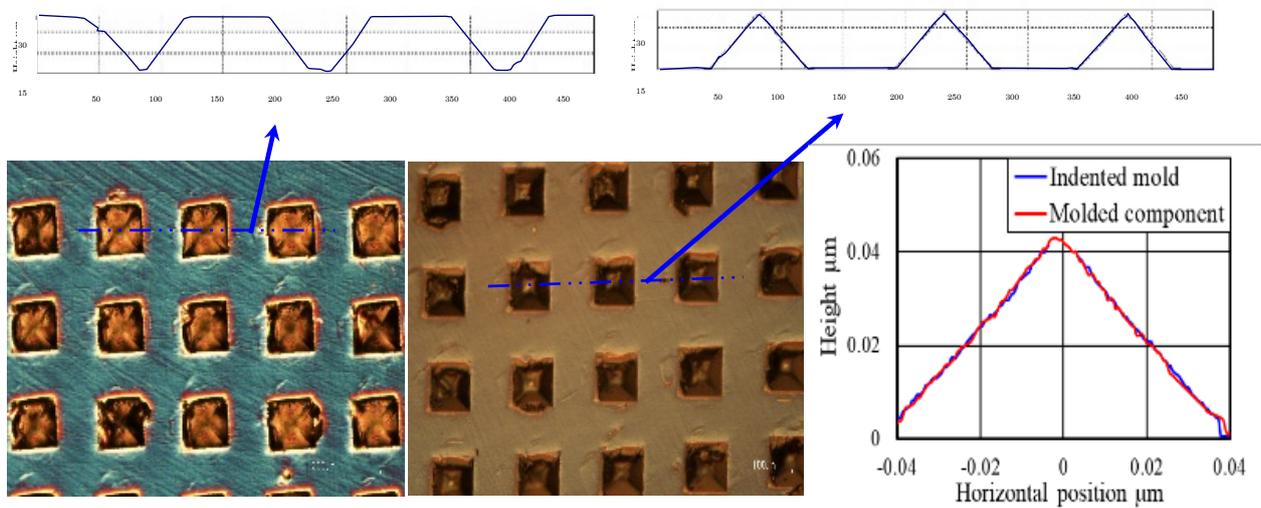


(c) 超音波振動の振幅に対する転写性の評価

図9 超音波振動の振幅に対する加工の転写性

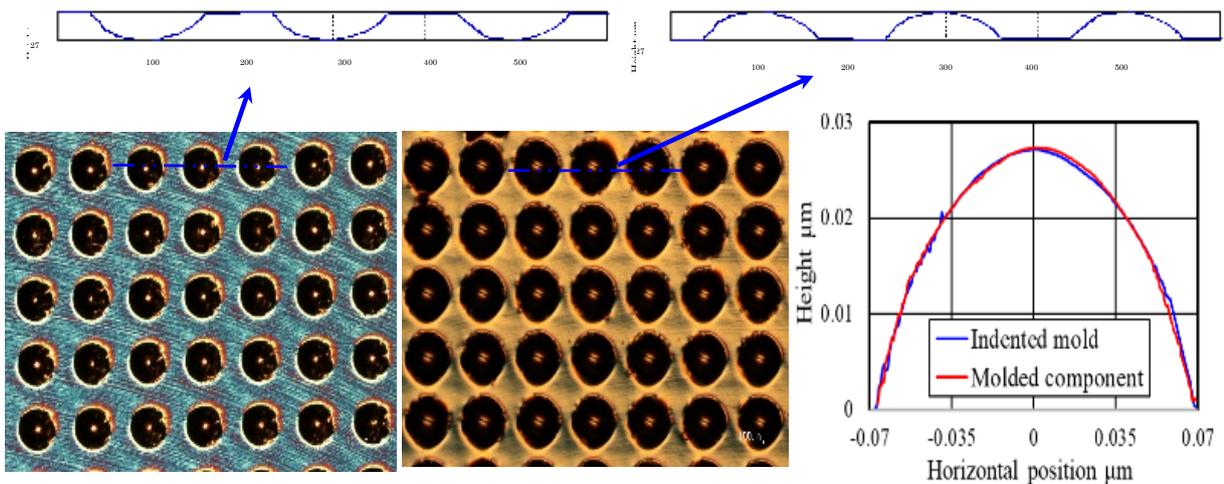
5. 超音波援用インデンテーションによるアレイ金型の試作実験および成形実験結果の評価

最後に、四角錐および球形状の無電解 Ni-P 製アレイ金型を圧子により超音波援用インデンテーションを行った。インデンテーション後に金型はバリを除去するために、平面切削を行った。四角錐の圧子を用いて加工したアレイ金型を図 10(a)に、このアレイ金型でアクリル樹脂に加圧圧縮成形した成形品図 10(b)に示す。金型の断面と成形品の断面も上に示した。また、金型と成形品の断面を重ねて表示した図を 10(c)に示す。エッジ先端も転写され、良好に成形できていることがわかる。同様に、球形状の圧子を用いて加工したアレイ金型を図 11(a)に、このアレイ金型でアクリル樹脂に加圧圧縮成形した成形品図 11(b)に示す。金型と成形品の断面を重ねて表示した図を図 11(c)に示す。エッジ先端も転写され、良好に成形できていることがわかる。



(a) 四角錐アレイ金型（無電解 Ni-P） (b)四角錐アレイ成形品（アクリル） (c)成形転写性

図 10 四角錐アレイ金型（無電解 Ni-P）とアクリル製アレイ成形品



(a) 球面アレイ金型（無電解 Ni-P） (b)四角錐アレイ成形品（アクリル） (c)成形転写性

図 11 球面アレイ金型（無電解 Ni-P）とアクリル製アレイ成形品

6. 結 言

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、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、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、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・高能率塑性変形特性を明らかにし、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検討した。その結果、無酸素銅，黄銅，無電解Ni-Pなどの精密金型材料に対して、高精度で高能率に微細加工できることが示された。

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, Yamagata Y, Morita S, Higuchi T (2012) Precision Grinding of Structured Ceramic Molds by Diamond Wheel Trued with Alloy Metal: CIRP Annals – Manufacturing Technology 61(1): 283–286.
- [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] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.