

高速微細加工装置の開発（第1報）

矢澤孝哲*・野口圭太**・福田洋平***・梶田正美†・扇谷保彦*・小島龍広††

Development of fast dimpling machine

by

Takanori YAZAWA*, Keita NOGUCHI**, Yohei FUKUDA***, Masami MASUDA†,

Yasuhiko OGIYA* and Tathuhiro KOJIMA††

Producing micro texture on surface, it's possible to give various characteristics of functions. But, it's not known the correlation between micro texture on surface and function of surface. In the case of achieving dimple texture with 2 μ m pitch in square 1mm on a side, number of dimples is needed 250,000. If dimpling speed was 1/s, it takes about 70 hours to finish the dimple texture. Therefore, fast dimpling machine is needed. In this study, fast dimpling machine which can make the accurate dimple texture was developed. Form accuracy is determined by the so-called copy principle and depth accuracy is determined by the road control dimpling. In this paper, the application of the dimpling machine with road control is shown. And the result of making dimple texture by the machine is shown.

Key words: *Dimple texture, Functional surface, road control dimpling*

1. 緒言

表面に微細加工を施すことにより機能付与,機能の性能向上をさせることができ,それら表面の機能の項目は多岐にわたっている.例えば,トライボロジ,光学,濡れ,付着,吸着など,様々な働きを実現させる機能表面を有する部品や製品が数多く作られている¹⁾.しかしながら,表面の微細形状と機能の相関把握は難しく未だ十分に確立されていない.このような表面機能をもった機能表面を得るには,現状ではトライ&エラーの繰り返しで目的の表面機能を満足する機能表面を得ており,時間・コストの観点から問題となっている.したがって,この問題を解決し,機能表面の効率的な設計・製作には,微細形状と表面機能との相関把握が必要不可欠である.

微細形状と表面機能の相関把握するためには,

- (1) 微細形状とパターンが既知のディンプルテクスチャを加工するための加工装置
- (2) 機能の正確な評価が必要となる.

微細形状のディンプル群(テクスチャ面)を得る場合,例えば1mm四方の面内にピッチ2 μ mずつ形成すると,総ディンプル数は250,000個となる.これらのディンプルを1秒間に1個ずつ個別に加工すると,約70時間の加工時間を必要とする.さらに大きなディンプルテクスチャ面を加工するには,莫大な時間を費やしてしまい,高速にディンプルテクスチャ面を形成できる加工装置が必要である.

そこで本研究では,高速にディンプル加工を行うこ

平成21年8月31日受理

* 機械システム工学科 (Department of Mechanical Systems)

** 機械システム工学科 (現アイシン精機) (Department of Mechanical System Present address : AISIN SEIKI)

*** 大学院生産科学研究科 (Graduate School of Science and Technology)

† 豊橋技術科学大学 (TOYOHASHI UNIVERSITY of TECHNOLOGY)

†† 教育研究支援部

とのできる(1)の加工装置の設計・試作,ソフトウェアの設計・試作し,荷重制御式による押し込み加工を行い,均一な深さ,形状のディンプルを加工し,ディンプルテクスチャ面を形成することを目的としている。

2. ディンプル加工の概要

2.1 ディンプルテクスチャ加工における問題点

押し込み加工により微細ディンプルテクスチャ面を形成する問題として,

- (1) 加工時間
 - (2) 深さ精度
 - (3) 形状精度
- があげられる。

(1) 加工時間

ディンプルテクスチャ加工において,仮に $\square 15\text{mm}$ の面内にピッチ $2\mu\text{m}$ ずつのディンプルを形成すると,ディンプルの個数は一列で 7,500 個,総数 56,250,000 個となる.このとき,ディンプルを 1 秒間に 1 個加工すると約 651 日かかり,1 秒間に 50 個加工しても約 13 日かかってしまう.そこで,ディンプルテクスチャ面形成には,ディンプル加工装置の高速化が必要となる。

(2) 深さ精度

ディンプルテクスチャ加工をする際,深さ精度のよいディンプルを形成するには,ステージ上下運動誤差,試料の微小なうねり,熱変形などを考慮する必要がある.そこで,本研究では,押し込み量を位置決めにより制御する加工ではなく,荷重制御により荷重を計測し制御して加工を行うこととした.これは加工力を一定で加工することができ,ステージ上下運動誤差,試料の微小なうねり,熱変形による影響を吸収するためであり,サブミクロンレベルの深さ精度で均一なディンプルを加工できると考えられる。

(3) 形状精度

ディンプルを押し込み加工によって加工するには,圧子を試料表面に転写してディンプル加工を行うため,良好な形状転写精度が必要となる.森らの研究¹⁾で,軟質金属材料ではディンプル形成においては工具形状の転写精度がよいとの報告がある.そのため,材料に真鍮,銅を用いた.また押し込み工具となる圧子は,硬さ,金属との親和性の低さ,サブミクロンレベルの形状精度で形成できることから単結晶ダイヤモンド圧子,サファイア球圧子とした。

2.2 装置の要求仕様

2.1 で述べた加工時間,深さ精度,形状精度の問題点を考慮し,開発する装置の仕様を決定した.装置の要求仕様を Table 1 に示す. 7500 万個のディンプルを 2 週間に以内に加工できるよう加工速度 $50/\text{s}$ とした.深さは $\pm 10\%$ の誤差まで許容することとし, $0.5 \pm 0.05\mu\text{m}$ とした.曲率半径は, $5 \pm 0.1\mu\text{m}/100 \pm 1\mu\text{m}$,ピッチ $\geq 2\mu\text{m}$ とした。

Table 1 Requirement specifications

Requirement items	Requirement values
Dimpling speed	50/s
Depth	$0.5 \pm 0.05\mu\text{m}$
Radius of curvature	$5 \pm 0.1\mu\text{m}, 100 \pm 1\mu\text{m}$
Pitch	$\geq 2\mu\text{m}$

2.3 加工原理

装置のシステム構成を Fig. 1 に示す.加工は以下の手順で行う。

- (1) PC より DA 変換した信号を PZT アンプにより増幅させて PZT に出力し,工具を試料に押し込む。
- (2) 圧子先端が試料表面に接触するとフォースゲージにより垂直方向の荷重を検出し,AD 変換された値が PC に入力される。
- (3) (2)の入力値が目的とする荷重に達すると,圧子を一定時間保持させた後,工具を押し込み方向の初期値に戻す。
- (4) PC よりステージコントローラに信号を送り,ステージを移動させる。

これらの(1)~(4)の動作を 1 サイクルとし,押し込み加工を繰り返し行うことで,複数のディンプルを加工し,ディンプルテクスチャ面を形成する。

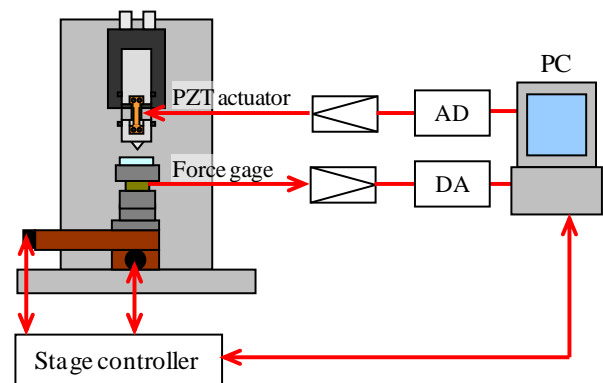


Fig. 1 Fast dimpling machine by force control system

3. 加工装置の試作

3.1 押し込み工具

本研究のディンプル形成方法は、押し込み加工によって圧子を試料表面に押し込み加工を行う。今回は、先端R5 μ mの単結晶ダイヤモンド圧子と先端R100 μ mのサファイア球圧子の2種類の圧子を設計・製作した。Fig. 2にそれぞれの圧子の形状を示す。

3.2 押し込み装置

Fig. 3に工具押し込み装置の概要図を示す。複数のディンプルを高速かつ高精度に打つため、アクチュエータに積層圧電素子(PZT)を用い、固定部と駆動部はリン青銅板ばねを用いて固定した。また、駆動部はアクチュエータで発生した微小変位を正確に圧子に伝えるため、軽量になるようA5056を用いて製作している。

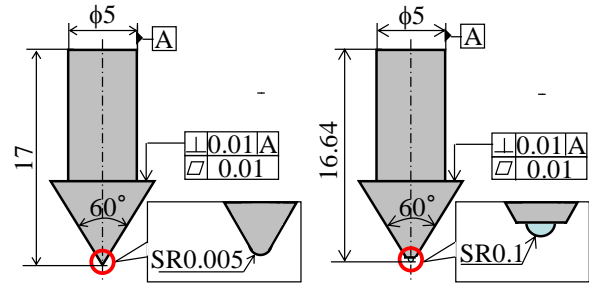
3.3 工作物ホルダ

Fig. 4に工作物ホルダの概略図を示す。Kistlerのフォースゲージ(9251A)により垂直方向の荷重を検出し、その値を読み取りながら制御することにより、ステージの上下運動誤差、試料の微小なうねり、熱変形などの影響を抑えるようにした。そのため、工作物土台部をできるだけ軽くし高い共振周波数を得ることができるよう厚さを7mmとし、固定用のボルトは、7mmのねじ込みしろで十分な締結力を得るため細目ねじを用いた。工作物は接着材により工作物土台部に固定するため、工作物の土台は溝を設け無駄な接着材が流れ込むようにした。また材料には、高い共振周波数を得ることができるように剛性である必要があるため、S45Cを用いた。

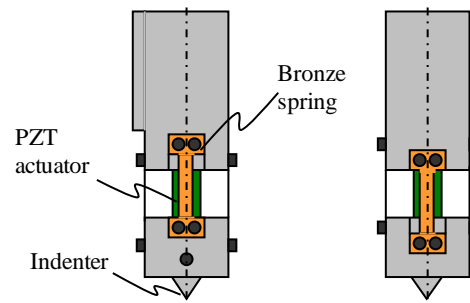
3.4 装置の全体構成

Fig. 5に加工装置の写真を示す。装置は、工作物側と工具側とで構成されている。工作物側は、2つの一軸の自動ステージで構成されたXYステージの上に前述の工作物ホルダが固定されている。工具側は、イケールにZ軸粗微動ステージを介して、押し込み装置が固定されている。

インパルス加振試験を行い、実験状態における装置工作物保持部の動剛性を計測した。その結果、共振周波数は840Hzとなり、高速なディンプル加工にも十分に対応できることが確認された。



(a)Diamond indenter (b)Sapphire ball indenter
Fig. 2 Schema of indenters



(a)Side view (b)Front view
Fig. 3 Schema of tool unit

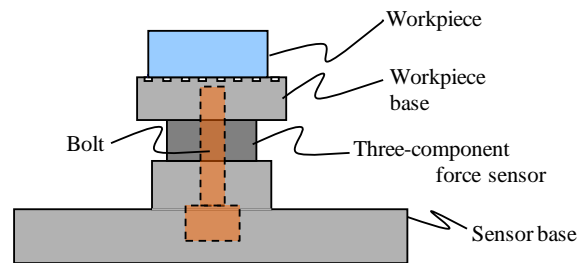


Fig. 4 Schema of workpiece holder

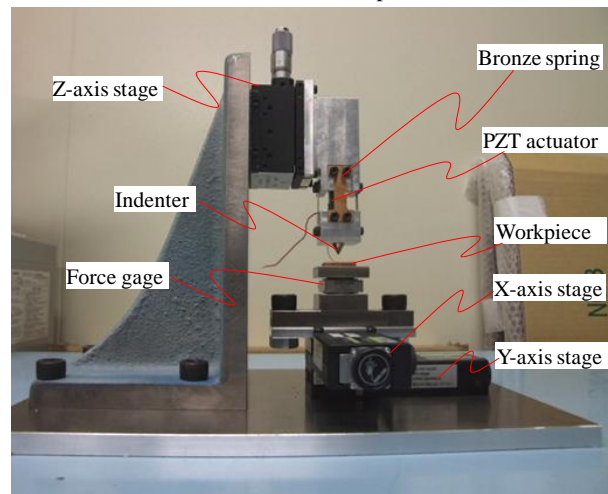


Fig. 5 Picture of fast dimpling machine by force control

4. 単発ディンプル加工

4.1 加工時の荷重状態

単発のディンプルを加工中の PZT への出力信号とフォースゲージからの入力信号を計測した.実験の条件は,圧子の押し込み力(目標値)となる値を 0.05N,0.1N,0.2N,0.3N,0.8N,1.0N とし,圧子はダイヤモンド圧子を用い,工作物の材料は真鍮を用いて加工を行った.

Fig. 6 に 0.1N 時における PZT への出力信号とフォースゲージからの入力信号のグラフを示す.PZT への出力信号が徐々に上昇し,4.2V 付近まで到達した時点で,フォースゲージより検出された押し込み力が急激に上昇している.この上昇部分は,圧子が工作物に接触を始め,内部に押し込んでいることにより発生している.さらに PZT の出力信号が一定に上昇していき,フォースゲージの信号が目標値となる 0.1N の出力制御により,その荷重が Dwell time で一定時間保持されている.その後,PZT への出力信号を低下させ始めると同時に,フォースゲージの出力は低下している.フォースゲージの出力が 0 に戻った時点で,圧子は工作物から所定の間隔で引き離され,加工が完了する.

4.2 単発ディンプル加工結果

Table2 に,顕微鏡によって取得したそれぞれの荷重目標値における工作物表面のディンプル画像を示す.また,Table2 の画像を見ると,目標値が大きくなるにつれて,ディンプルの大きさも大きくなっている.これにより,荷重制御によるディンプル加工が有効に行えており,荷重によって大きさを制御できることが確認された.

4.3 速度検証

ディンプル加工において,大規模面積にディンプルテクスチャ面を形成するには,より速い加工速度が求められる.そこで,本装置の最大加工速度を単発ディンプル打ち込みによって検証した.実験条件を Table3 に,Fig. 7 に最大加工速度時における PZT とフォースゲージの信号を示す.Fig. 7 から目標値となる 0.5N で押し込み力が保持されており荷重制御が正確に行えていることがわかる.一発の加工に約 0.1 秒かかっており,最大加工速度は約 10/s となった.PZT 出力信号の上り刻み幅と下り刻み幅をさらに広げて高速に加工運動を行うことは,装置の仕様において可能である.しかし,オーバーシュートが発生し,目標値となる荷重を超えた押し込み力で加工してしまうため,均一な深さ形状のディンプルを加工するという点で望ましくない.目標荷

重を超えてしまう要因として,使用した AD ボードの動作周波数が,制御速度に対応できず荷重がオーバーしていると考えられる.ボードを変更し動作周波数をあげることができれば,荷重制御を有効に行うことができ,最大加工速度をさらに上げることが可能である.

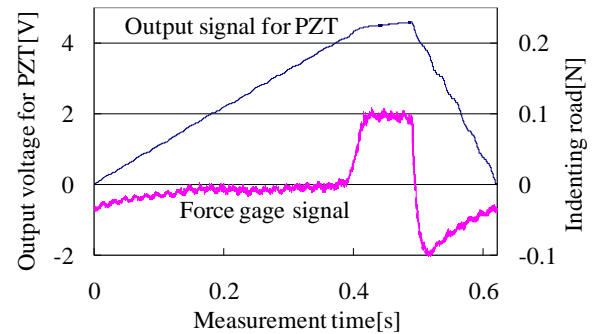


Fig. 6 Signal of PZT and Force gage for single dimpling

Table2 Effect of indenting road on dimple diameter

Indenting road [N]	0.05	0.1	0.2
Picture of dimple			
Indenting road [N]	0.3	0.8	1.0
Picture of dimple			

Table3 Experimental setup for speed verification

Indenting road [N]	0.5
Workpiece material	Copper
Tool	Sapphire ball indenter (R0.1)

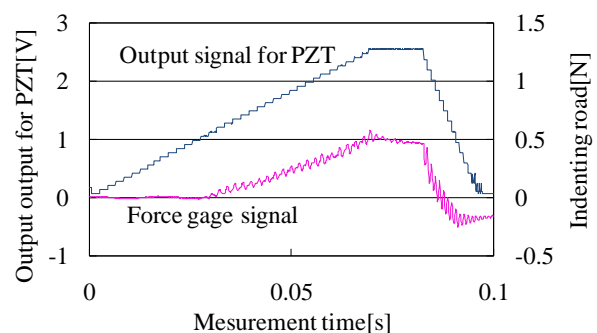


Fig. 7 Signal of PZT and Force gage in fastest dimpling condition

5. 加工実験

連続加工により、ピッチ $26\mu\text{m}$ でディンプルテクスチャ面を形成した。実験条件を Table4 に、テクスチャ面画像を Fig. 8, 加工時の PZT とフォースゲージの信号を Fig. 9, Fig. 10 に示す。銅とステンレスどちらもディンプルテクスチャ面を形成できている。

銅とステンレスのテクスチャ面の画像を比較すると、ステンレスよりも銅の工作物の方が、ディンプルが大きく形成されている。ディンプル加工を行う場合、降伏応力 σ_y とヤング率 E の比で表わされる弾性回復ひずみ σ_y/E の値が小さい材料ほどスプリングバック量が小さく、工具形状の転写精度が良い。そのため、深さ一定の条件で加工を行った場合には、ステンレスのディンプルが大きくなる。しかし、今回の実験は押込み荷重一定の条件で加工を行っている。深さ一定でディンプル加工を行う場合、必要押込み荷重は、工作物材料の硬さに対して比例的となる。実験で使用したステンレスの硬さは銅の約 2 倍であるため、この影響が顕著に表れていると考えられる。

PZT とフォースゲージの信号を見ると、両工作物とも目標値となる 0.5N の押込み荷重で加工できており、荷重制御によって均一な深さ大きさのディンプルが加工できていると考えられる。

また、本装置を用いて文字パターンのディンプルや回折格子としての機能を持ったテクスチャ面の製作も行った。Fig. 11 に写真を示す。

6. 結言

微細形状とパターンが既知のディンプルテクスチャを加工するための加工装置の設計・試作し、ソフトウェアの設計・試作によって、荷重制御による押込み加工によってディンプル加工を行い、以下の結果が得られた。

1. PZT とフォースゲージを用い、荷重制御による押込み加工が行えるディンプル加工装置を製作した。
2. 単発ディンプル加工により、荷重制御による押込み加工が有効であることを確認した。
3. ステンレスと銅にテクスチャ面を形成した。
4. 均一なディンプル加工を行うことのできる最大加工速度は $10/\text{s}$ となった

今後は、さらなる加工の高速化・大面積化を行うとともに、製作したテクスチャ面の計測・機能の正確な評価を行う必要がある。

謝辞：本学機械システム工学科加工システム学研究室のメンバー、特に服部陽介君に、あらゆる面で協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 森弘樹, 榊田正美, 矢澤孝哲, 小泉達洋; 微小球状工具により形成されたディンプル・溝の形状精度, 精密工学会学術講演会論文集, Vol.2002A, pp.440-440, 2002
- 2) 黒沼 聡, ディンプル加工機の試作とテクスチャ形成, 新潟大学修士論文集

Table4 Experimental setup for multi dimpling

Workpiece material	Copper	SUS
Indenting road [N]	0.5	
Tool	Sapphire ball indenter (R0.1)	
Pitch [μm]	26	
Number of dimple	77377	133250
Average dimpling speed [s]	2.8	5
Dimpling time [h]	7.7	7.4

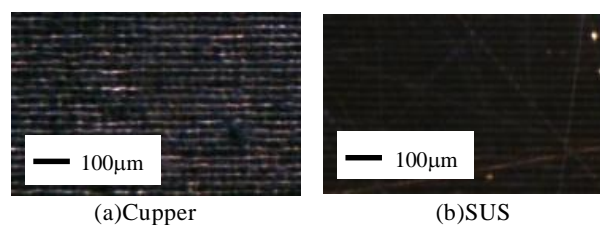


Fig. 8 Picture of dimple texture

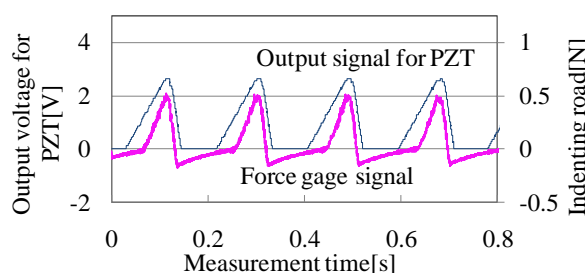
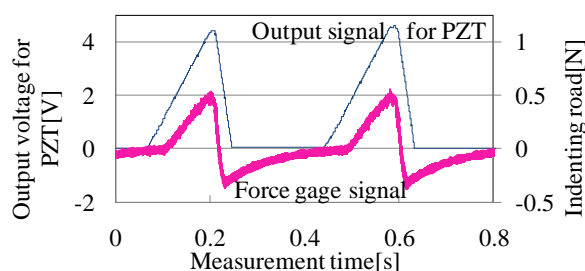
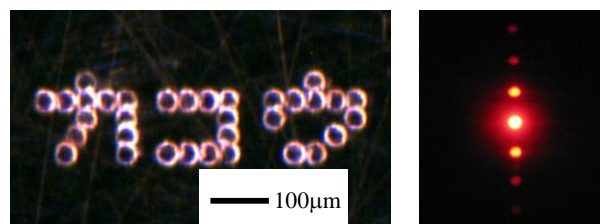


Fig. 10 Signal of PZT and Force gage (SUS)



(a) Text pattern (b) Surface function of multi dimple

Fig. 11 Texture function example