



T. Yazawa

微細塑性加工による 金属表面の高機能化とその機能評価

矢澤 孝哲*

1. 研究の目的と背景

物体表面に、微細形状を形成することによって、光・シールド・潤滑・耐粘性などの機能を付与させることができる。このうち、微小球状圧子を軟質金属に押し込み、ミクロン～サブミクロン深さのディンプルを形成するとき、ディンプル肩部にバリが発生することはよく知られている。しかし、そのバリ発生メカニズムは、定量的に明らかにされているとは言い難い。そこで研究では、ディンプル形成の際のバリ発生メカニズムと、圧子形状の転写精度について実験及び有限要素法による解析した。さらに高機能表面加工のための高速ディンプルテクスチャ加工機を開発した。

2. 微細塑性加工におけるバリ発生メカニズム解析¹⁾

2.1 実験条件・実験方法

実験には、島津製微小硬度計 DUH-50 を用いた。一定荷重速度で圧子を押し込み、同じ荷重速度で除荷することによりディンプルを形成した。実験条件は表 1 に示す通りである。

なお、形成されたディンプルの凹球面形状は、SPM により測定し、ディンプル中心を通る断面形状を求めた。

2.2 解析条件・解析方法

微小ディンプル形成に関する押し込み変形の解析には、P法有限要素解析ソフト StressCheck V4.0 を使用した。P法では、従来の有限要素法のように要素分割を細かくするかわりに、高次の関数を用いて変位を近似することにより精度を向上させている。そのため、従来法に比べて大きな要素分割で解析を行うことができる。

解析条件を表 2 に示す。解析方法は、図 1 に示すように、軸対称問題を想定した弾塑性解析とし

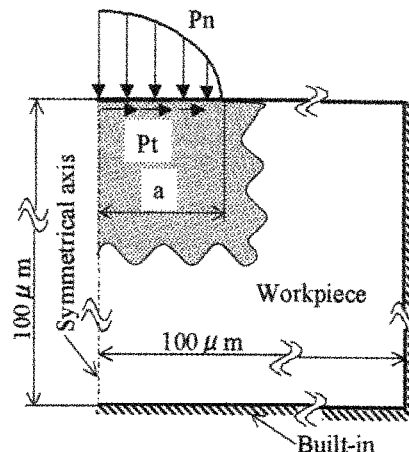


Fig. 1 Analysis model of forming dimple

た。圧子と試料の接触面に対して押し込み方向および直角方向にそれぞれ P_n , P_t なる荷重分布を与える。 P_n はヘルツの接触理論¹⁾ より求め、 P_t は P_n 及び圧子形状、押し込み深さから決定した。 a は圧子と試料の接触範囲を表している。

以上の方法により解析を行った。

2.3 実験結果と解析結果の比較及び考察

(1)ディンプル形状とバリ発生メカニズム

図 2 に、微小硬度計を用いて押し込み荷重 294mN で形成したディンプルの断面形状と、それに対応する解析結果の一例を示す。

実験結果と解析結果を比較すると、ディンプル凹球面形状、ディンプル肩部に発生するバリ形状ともよく対応していることがわかる。したがって、今回行った解析方法でディンプル形成のシミュレーションを行うことができるといえる。

次に、ディンプル肩部に生じるバリの発生メカニズムについて、油粘土に鋼球を押し込んだときの変形状態と解析モデルの変形状態から考察する。

Table 1 Experimental conditions

Forming equipment	Dynamic ultra micro hardness tester Shimadzu Co. DUH-50
Tool	Sapphire ball : $\phi 0.2\text{mm}$
Indenting load	98mN—392mN
Loading speed	12.7mN/s
Workpiece	A5186
Measuring equipment	SPM (TopoMetrix TMX-2000)

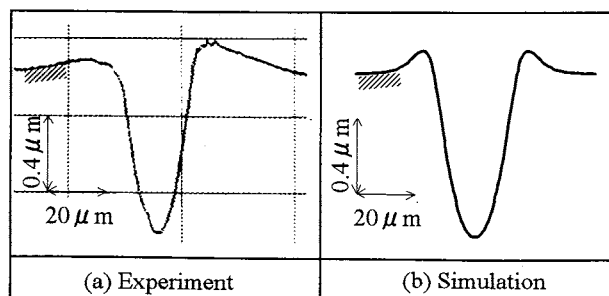


Fig. 2 Cross section of formed dimple

図3に、油粘土と解析モデルの変形状態を示す。

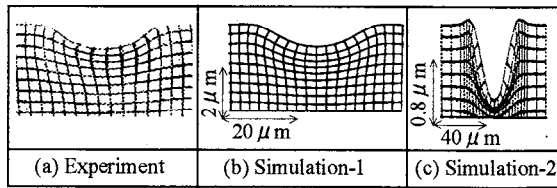


Fig. 3 Deformation of dimple in cross section through center axis

図3 (a), (b) において、形成されたディンプル凹球面の表層よりも、より内部が大きく塑性変形していることがわかる。

すなわち、圧子・試料間の接触面では、摩擦により試料の塑性流動が拘束されるのに対し、内部の試料の塑性流動によってバリが発生すると考えられる。

図3 (b) を、図2と対比するために縦方向に3.2倍、横方向に0.37倍した結果を図3 (c) に示す。この図からも、ディンプル肩部にはバリの発生が明らかである。

(2) 圧子形状の転写精度

図4に、ディンプルを形成するときの押し込み荷重に対する(弾性回復量 d_r / 荷重時押し込み深さ d_L) を解析により求めた結果を示す。

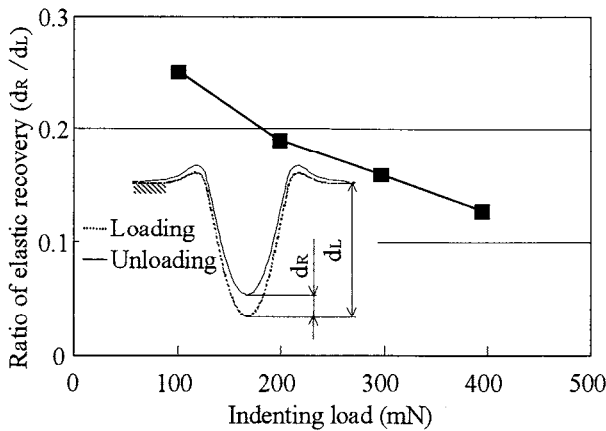


Fig. 4 Influence of indenting load on ratio of elastic recovery

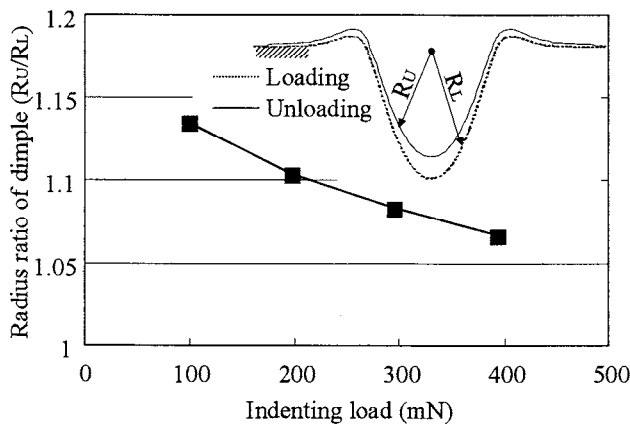


Fig. 5 Influence of indenting load on radius ratio of dimple

この図から、押し込み荷重が増加するにつれ、 d_r/d_L は減少していることがわかる。これは、小さな押し込み荷重では塑性変形領域が小さく、押し込み深さに対して除荷した際の弾性回復量が相対的に大きいことを意味する。

図5は、負荷時に対する除荷時のディンプル凹球面半径の比を解析により求めた結果である。この図から、以下のことがいえる。

- ①押し込み荷重によらず、除荷時の凹球面半径は負荷時のそれよりも大きくなっている。
- ②押し込み荷重が大きくなるにつれ、除荷時の凹球面半径が負荷時のそれに近づいている。

押し込み荷重が小さいときは、押し込み深さに対して弾性回復量の割合が大きく、ディンプル底部が相対的に大きく押し戻され、結果的には凹球面半径は大きく形成される。したがって、押し込み荷重を大きくすることによって、凹球面形状を圧子形状に近づけることができ、転写精度を向上させることができる。

図6に、微小硬度計を用いて押し込み荷重 98mN, 392mN で形成されたディンプルの測定結果を示す。この図から、解析結果と同様に、98mN で形成した凹球面半径の方が392mN のそれよりも大きいことがわかる。

以上より、大変形領域での塑性加工現象とほぼ同様のことが、このようなサブミクロン塑性加工領域においてもいえる。

2.4 まとめ

ディンプル肩部に生じるバリ及び圧子形状の転写精度について実験と解析を行い、以下のことを明らかにした。

- 1) 今回行った解析方法により、ディンプル形成のシミュレーションを行うことができる。
- 2) ディンプルを形成する際、肩部に発生するバリは、表層ではなくその直下の材料の塑性流動による。
- 3) 押し込み荷重が小さいときには、形成される凹球面半径は工具半径より大きい、押し込み荷重

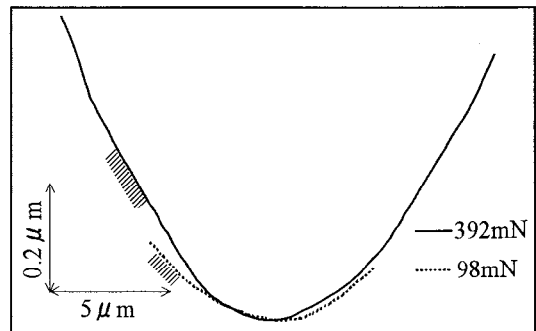


Fig.6 Close up of cross section of dimple

を大きくすることにより，工具半径に近づけることができる。

3. 高速ディンプルテクスチャ加工機の開発²⁾

3.1 加工機のシステム構成

図7に実験装置のシステム構成を，表2に使用した構成要素を示す。フォースゲージにより垂直方向の荷重を検出し，その値を用いて制御することにより，試料表面の微小なうねりおよび自動ステージのピッチング誤差の影響を抑えている。

センサ・アクチュエータに関する信号の入出力および制御にはDSPボードを使用し，自動ステージとは独立した制御ループを形成することにより，システムの高速度を図った。また作業能率向上のため，加工結果を工具と同軸上に配置した光学式微小変位計HIPOSSにより簡易にオンマシン計測で

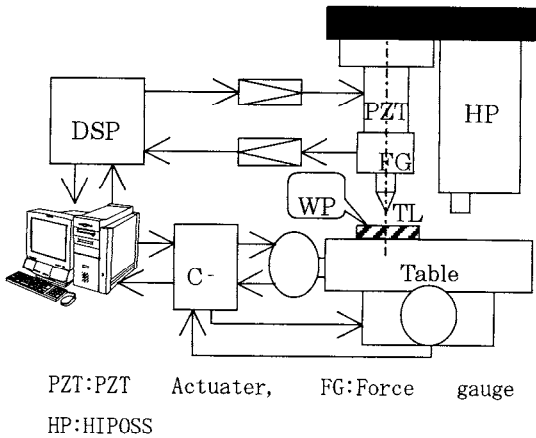


Fig.7 System of multi dimpling machine

きるシステムした。

まず加工したい初期位置まで移動し，自動ステージ(X)を止める。その状態でアクチュエータに電圧をかけ，工具を試料に押し込む。押し込む際にPZTアクチュエータ先端に取り付けられたフォースゲージにより，工具-試料間に発生する垂直

Table 2 Components of multi dimpling machine

DSP	dSPACE DS1102
PZT Amplifier	MESS-TEC M2610
Stage	SIGUMA KOKI PH564-B
Force gauge	Kistler 9001A
Measurement equipment	HIPOSS(High precision optical surface sensor)
Software	"MATLAB3.0" "Simlink3.0" "Control disk"

荷重を検出する。検出された荷重が所望する深さに相当する値に達すると，その時点で一定時間(Dwell time)工具を保持した後，工具を押し込み

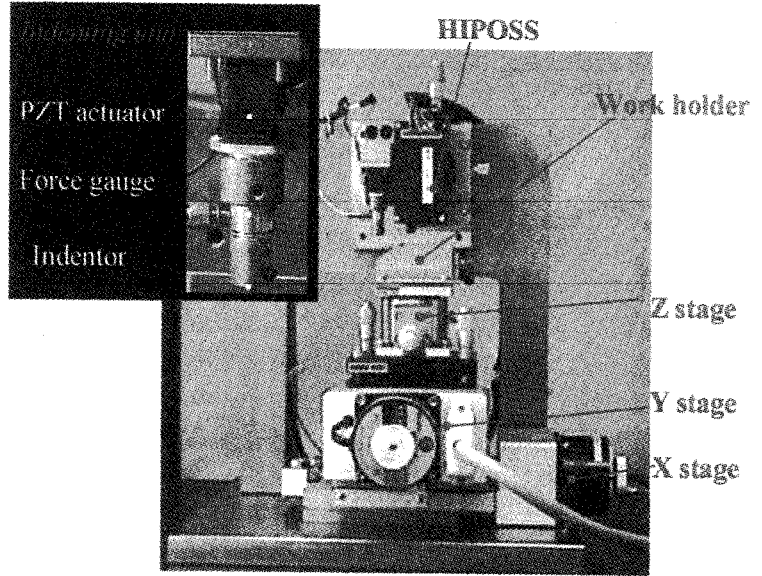


Fig.8 Photograph of multi dimpling machine

方向の初期位置にもどす。初期位置に戻るとDSPよりPCを介して自動ステージ(X)のコントローラボックスへトリガ信号が送られる。コントローラボックスはその信号を受け取ると，事前にPCよりダウンロードしていたプログラムにより，ステージを必要とするピッチだけ移動させる。移動終了がDSPに伝えられると，新たにアクチュエータに電圧をかけ，工具を試料に押し込む。以上のサイクルを繰り返し，ディンプル列を形成する。列を形成後，自動ステージ(Y)を必要ピッチだけ移動する。移動後，次のディンプル列を形成する初期位置になるように自動ステージ(X)を移動する。以上の繰り返しにより連続したテクスチャ面を形成する。装置の外観を図8に示す。

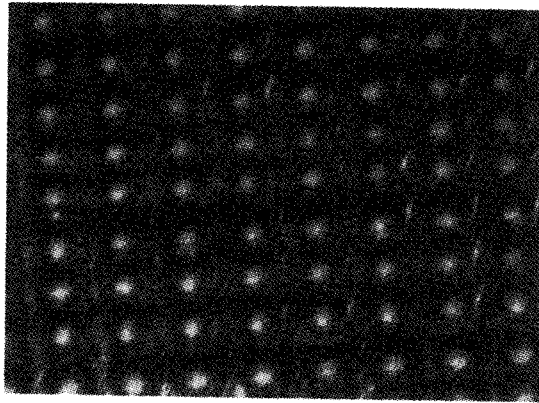
なお加工実験は，表3に示す実験条件で行った。

Table 3 Experimental conditions of multi dimpling

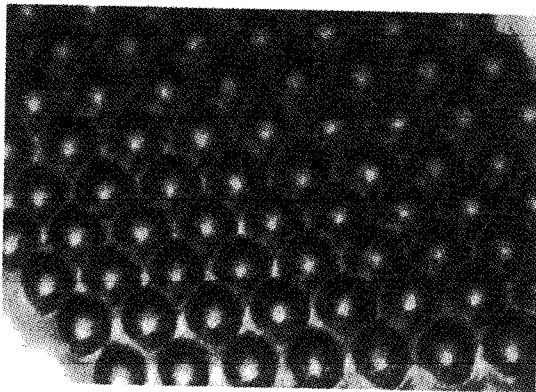
Forming equipment	Multi dimpling machine
Normal load [N]	294mN
Workpiece	A5186
Tool	Conical tool : Shape of tips: 20 μ m Sapphire ball: ϕ 0.2mm
Measurement equipment	HIPOSS, Taly step

3.2 実験結果および考察

図9に本装置により形成したディンプルテクスチャ(ディンプル数10×10)を示し，図1



(a) Square



(b) Parallelogram

Fig.9 Example of dimple texture

0に形成時の指令値信号ならびにフォースゲージの出力信号を示す。図9 (a)は 10×10 の直径の等しいディンプルをマトリックスに押し込んだ場合であり、(b)は列が変わる毎にX方向に半ピッチずらした位置を起点に 10×10 のディンプルテクスチャを形成した場合である。どちらも、ほぼ等ピッチで直径もそろったディンプルが形成されていることがわかる。また図10より、荷重制御によりディンプルが形成されていることがわかる。なお、本ディンプルテクスチャ形成に要した時間は10秒である。

図11に連続ディンプルの断面形状の一例、図12にAFMによる測定結果を示す。深さ方向に $0.5 \mu\text{m}$ 、直径方向に $1 \mu\text{m}$ 、ピッチとして $1 \mu\text{m}$ のばらつきを持つが、形状はほぼ一定であり、本装置によって良好な押し込み加工が行われたと考えられる。以上のことから、本装置を用いて、ミクロンレベルのディンプルテクスチャを 10 Hz のスピードで加工することが可能である。

3.3 まとめ

高速かつ高精度に微小なディンプルの集合面(ディンプルテクスチャ)を形成する装置を試作し、装置によって加工したディンプルテクスチャを評価した。装置にはPZTアクチュエータとフォ

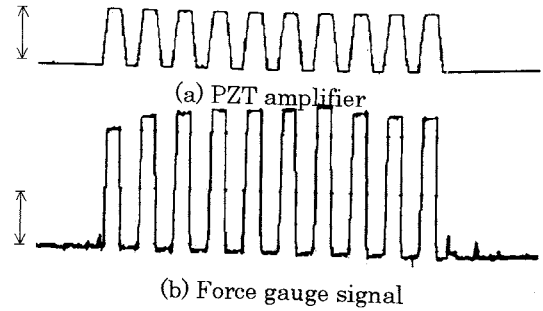


Fig.10 Output signal of force gauge and input signal of PZT amplifier



Fig.11 Example of dimple profile

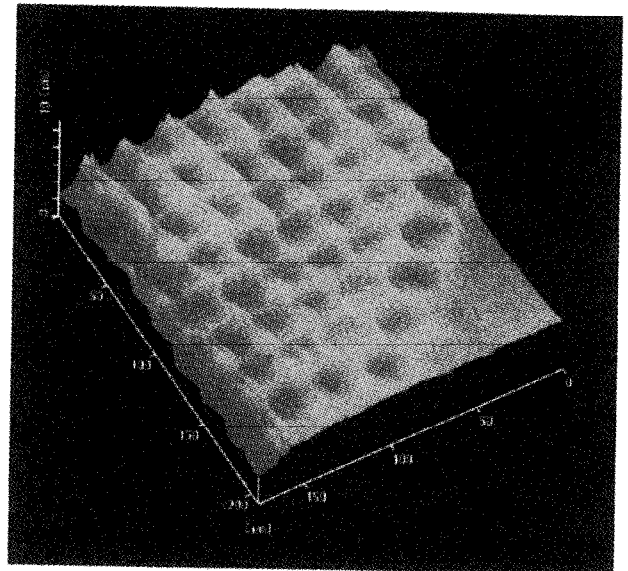


Fig.12 AFM image of dimple texture

ースゲージを使用し、荷重制御により工具-試料間誤差の影響を抑えるようにした。その結果、ミクロンレベルのディンプルテクスチャを 10 Hz のスピードで加工することができた。

4. ディンプル形状誤差の机上計測法の提案³⁾

ディンプルの形状誤差を机上測定することで、加工作業の効率化や誤差の補正をすることが可能である。机上測定に必要な条件として、

- 1)非接触・高速測定であること
 - 2)空気揺らぎ、振動といった加工現場での外乱の影響を受けにくいこと
 - 3)小型・軽量であり、容易に装置のセッティングが容易なこと
- が挙げられる。

以上を踏まえ、図13に提案するディンプル形状誤

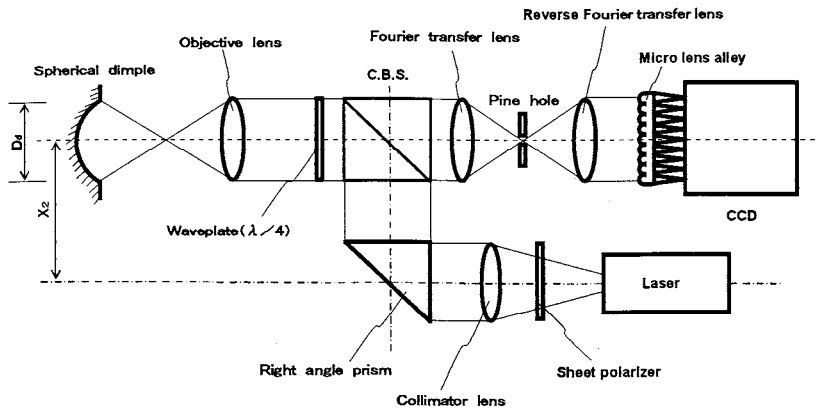


Fig.13 Principle of dimple on-machine measurement system

差の机上計測法の原理図を示す。凹球面ディンプルより戻ってきたレーザー光から、空間周波数フィルタにより形状誤差成分のみを抽出する。これが、マイクロレンズアレイに入射すると、形状誤差に従ってスポット像の位置が変化する。このスポット像の位置を理想状態の位置と比較することで、形状誤差を算出することができる。

5. 光学機能特性

図9(a)のディンプルテクスチャを用いて作製したスポットアレイを図14に示す。このスポットアレイは、レーザー光をディンプルテクスチャに照射するだけで作製でき、ディンプル形状によりスポット形状が、ピッチ誤差によりスポットピッチが影響される。この結果から、スポット形状の崩れもなく、ピッチも一定のディンプルが加工されていることがわかる。これにより、所望のディンプルテクスチャにより、ピッチの異なるスポットアレイを容易に作製できることがわかる。また、ディンプルテクスチャを使用して作製したマイクロレンズアレイを図15に示す。

5. 結言

ディンプル肩部に生じるバリ及び圧子形状の転写精度について実験と解析を行い、以下の

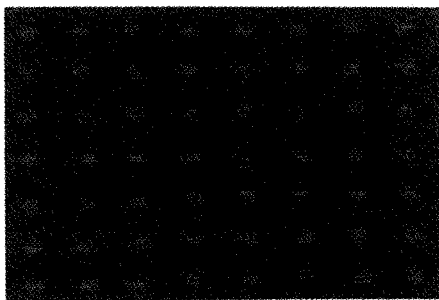


Fig.14 Spot array

ことを明らかにした。
 1)今回行った解析方法により、ディンプル形成のシミュレーションを行うことができる。
 2)ディンプルを形成する際、肩部に発生するバリは、表層ではなくその直下の材料の塑性流動による。
 3)押し込み荷重が小さいときには、形成される凹球面半径は工具半径より大きいが、押し込み荷重を大きくすることにより、工具半径に近づけることができる。

次に、高速に微小なディンプルの集合面を形成する装置を試作し、ディンプルテクスチャを10Hzで形成した。

さらに、ディンプルテクスチャによりスポットアレイを作成した。その結果、スポット形状崩れもなく、ピッチ一定のスポットアレイを作製できた。

謝 辞

本研究の一部は、(財)天田金属加工機械振興財団の研究助成により行われました。また、本研究の一部は、新潟大学在籍時に研究したものであり、榊田教授および榊田研究室の学生の指導・協力により行われました。ここに深く感謝します。

参考文献

- 1) 森他：2000年度秋季精密工学会学術講演会論文集, p306
- 2) 矢澤他：日本機械学会北陸信越支部第38期総会・講演会講演論文集, p35
- 3) 矢澤他：精密工学会九州支部鹿児島地方支部講演会講演論文集, p39

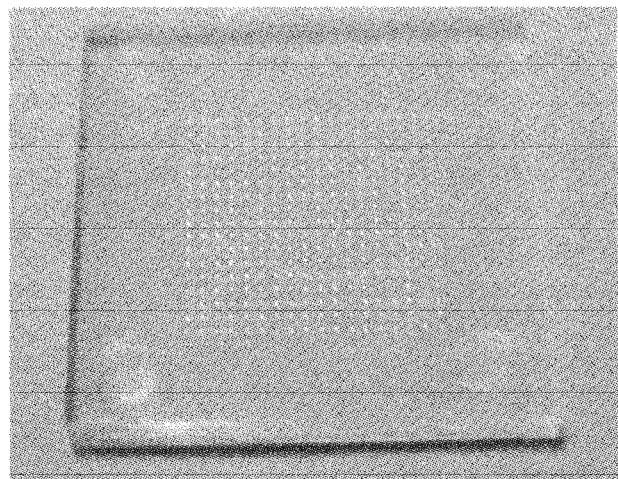


Fig.15 Micro lens array