

# 局部的表面塑性加工の研究

理化学研究所 素形材工学研究室

前任研究員 池 浩

(平成7年度研究開発助成 AF-95019)

キーワード: 微細表面形状、コイニング

## 1. 研究の目的と背景

塑性加工が多数の製品を高効率、高精度で生産する手段として優れている点を、微細な加工まで拡大することは加工技術のポテンシャルを上げるうえで大きな意義があると考えられる。特に塑性加工の場合、製品全体の寸法形状をマイクロマシンの部品のような小さな物に限定せず、大型の部品の加工まで発展しうる可能性をもっていることは効率という以上に優れた特徴であると考えられる。

一般に塑性加工においては通常の意味での形状(全体形状)を確保する必要があるが、微細表面形状の加工ではさらに微細表面形状の精度が問題となり、2重の要求を満たす必要がある。

また成形機構の観点からすると全体の流動(バルクの塑性変形)と表面近傍の流動を区別して考える必要が生じる。しかし最近の数値シミュレーションの発達をもってしても微細表面形状を正確に組み込んだ被加工材全体の弾塑性変形解析は困難な実情にある。したがってある程度実験的な情報に頼らざるをえない。

著者は従来から微細表面形状の塑性加工についての検討を行ってきたが<sup>1)~3)</sup>、その結果として微細表面形状の局部的な成形状態の促進あるいは抑制などの制御技術確立する必要性が生まれてきた。本研究では円板状試験片に微細表面形状を組み合わせ、巨視的および微細表面形状の変形機構および制御技術の解明を目的とする。

## 2. 対象とする加工の特徴と従来の研究

本研究では圧印加工に類する微細表面形状の加工を取り扱う。ただし通常の圧印加工では深さ方向の微細度にくらべ表面内のパターンは巨視的であることが多いが、ここでは面内のパターンも微細であり、またパターンの分布密度も高いものを対象としている。

圧印加工はコインをつくる技術として古くから発達してきた。それは多くの場合一種の閉塞鍛造であり、バルクの大きな変形なしにダイ表面の幾何学的形状を転写することに特徴がある。バルクの材料流れを抑制することは工具と材料の界面の摺動を最小化することにもつながり表面損傷の抑止にもなっている。

圧印加工は大別して窪みの成形(突起の押し込み)と突起の成形(盛り上り)に分けられる。ここではより技術的に困難の多い突起の成形(盛り上り)を対象とする。圧印に関しては平面ひずみでの基本的な変形を上界法で検討した研究<sup>4)</sup>などが知られているが、巨視的なバルクの変形を伴った後方押し出しにおける盛上りの解析である。しかし本研究で対象とするのはバルクの塑性変形とは一線を画した微細表面形状の変形である。微細表面形状の圧印加工の特徴は試験片の外寸法に対して目的とする微細表面形状の寸法が小さいことである。一例としては突起の直径は175 $\mu\text{m}$ 、高さは26~28 $\mu\text{m}$ であり、ブランク径30mm、板厚2mmに対してそれぞれ0.6%および1.3%にしか過ぎ

ない。したがって加工は表面の局部的な塑性変形となる可能性がある。実際、閉塞鍛造に近い加工をおこなっているバルクの塑性変形と微細表面形状の変形とは分離して考える必要がある。この意味で通常の圧印の研究とは問題意識を異にしている。

この意味で微細表面形状の加工に関わる研究例は少ない<sup>5)6)</sup>。著者は圧印による微細表面形状の加工を試み、均一に微細表面突起を形成させる場合の変形状態と問題点を明らかにした<sup>1)~3)</sup>。しかし3次元的形状の解析精度に限界があったので変形機構は十分に解析できなかった。本報ではレーザ顕微鏡などを利用して微細表面突起の形成機構と3次元的な微細形状転写の問題点を検討した。

## 3. 実験方法

### 3.1 ダイの微細表面形状

2種類のダイを用いた。ひとつは多数の比較的密集した微細突起の成形を意図したもの、もう一つは圧印加工におけるバルクの変形と局部微細変形の違いを確かめるため、直径の違う6種類ストレート穴を有するダイを作成し、半径位置と盛り高さの関係を調べるためのものである。

密集型は図1(a)に示すように開口部直径175 $\mu\text{m}$ 、底部直径150 $\mu\text{m}$ 、ピッチ260 $\mu\text{m}$ で正三角形頂点位置に配列したパターンを使用した。深さは26~28 $\mu\text{m}$ 、壁の傾斜は約65度である。この微視的パターンは直径2.7mmの予め平面に研削されたWC-Co超硬合金ダイ上にイオンビームエッチングにより形成され<sup>1)</sup>均一に分布している。

6種類の穴径のダイは図1(b)に示すように分布させたものである。穴径は0.05, 0.10, 0.20, 0.40, 0.80, 1.60mmの6種類とし、半径方向に60°おきに配置した。SK3材に超硬合金ドリルによりストレート穴を成形し、深さは径の3倍とした。熱処理および研削して仕上げのち、前報と同じ装置により圧印加工を行った。ダイの平滑部の表面粗さは0.21 $\mu\text{mRa}$ 、2.9 $\mu\text{mRy}$ である。

### 3.2 加工機械と工具

最大荷重380kNの液圧プレスを使用した。負荷速度はできるだけ低速とし、加工中は3 $\mu\text{m/s}$ (2kN/s)程度であった。圧印工具は図2に示すように構成される。下部の超硬合金の上面に微細表面窪みが形成されている。超硬合金工具の端部には45度のコーナーカットがある。上部パンチは工具鋼でE L I D研削<sup>7)</sup>により鏡面化されている。

### 3.3 板材

工業的純アルミニウム(A1050P H24)板厚2.0mmを使用した。供試材の相当応力[MPa]-相当ひずみ関係は接着試験片を用いた板材板面垂直方向の圧縮試験により次のように求められた。耐力は122MPaである。

$$\sigma = 158.3 (\varepsilon - 0.218)^{0.167}$$

板材の表面粗さは圧延垂直方向に0.14 $\mu\text{mRa}$ 、0.88 $\mu\text{mRy}$ である。

### 3.4 試験片の準備と潤滑

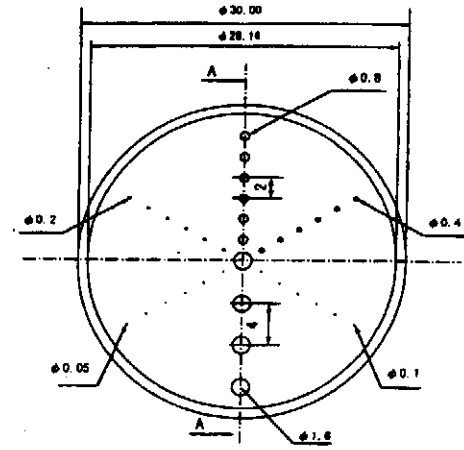
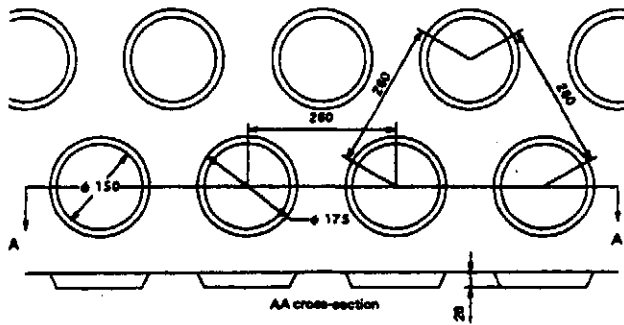


図1 微細穴を有する工具。(a)密集型微細穴の形状。(b)6種類の穴径を有するダイ。

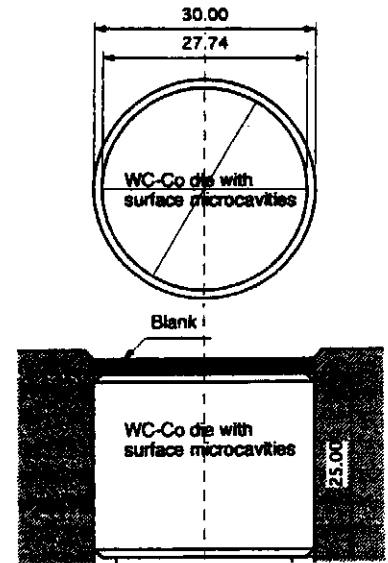
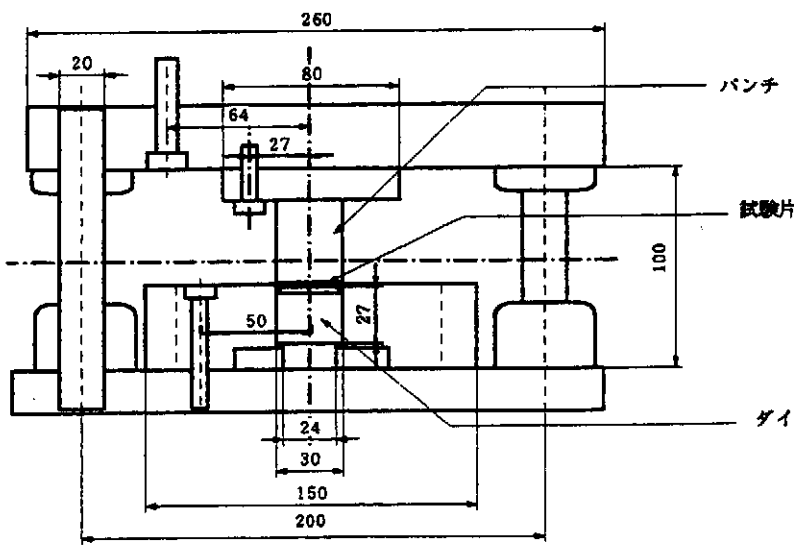


図2 圧印装置の組立図 (a)とダイ及びブランクの配置図 (b)。寸法は密集型ダイ。

試験片は旋削により直径 29.96~29.99 mm の円板に仕上げた。(一部は直径 24.96~24.99 mm として自由鍛造形式の変形を観察したがここでは結果は略す。)

試験片表面は試験直前にアセトンを含んだ Kimwipe で脱脂した。潤滑条件としてはそのまま実験に供するもの(無潤滑)と n-オレフィン<sup>8)</sup>を塗布するものの2条件とした。なお n-オレフィンは必要最小限度とするため Kimwipe でぬぐい取った。その結果板材に塗布した状態での平均膜厚は秤量法により 0.8 μm と見積もられた。

### 3. 5 工具面の微細窪みの同定

実験結果の計測は各荷重で停止した別々の試験片により行った。しかし工具の微細穴にはある程度の幾何学的なバラツキがあるので常に同一の窪みに注目して比較することが実験精度をあげる上で必要であった。そこで密集型のダイ面上には中心を通り 60° をなす2本の直線をダイヤモンド圧子により基準線をけがくことにより、窪みおよび突起の同定を可能とした。微細表面形状の計測は中央部、周辺部、およびその中間部の3箇所で行った。

## 4. 実験結果

### 4. 1 形状変化と充満挙動 (密集型ダイ)

成形荷重の増大に伴う微細表面突起の形状変化は走査型レーザー顕微鏡による微視的突起の頂点の高さ測定により評価した。レーザー顕微鏡による3次元像の例を図3に示す。平均接触面圧に対する突起の最高部高さ変化を図4に示す。

圧印の初期段階(みかけ接触面圧 127MPa)では、圧延による表面粗さが優越しており、3次元高さとしては認識できないが、平面像では接触・非接触の境界は識別できる。平均接触面圧 170MPa では周辺部および中間部の高さが中心部の高さを上回っている。また周辺部では軸方向に突起の非対称性が現れる。平均接触面圧 255MPa 以上では板材の微細表面突起の頂上は微細窪みの天井に接触するようになる。接触面の広さは荷重とともに発達する。周辺部では半径方向の突起の不整が発達する。

図5は縁部の板厚と幅の変化を示す。接触面圧 380MPa 以上では板厚が増加し幅が減少してこの条件下でのバルク材料流れが存在することを示す。しかし前述の周辺部の不整発達はこの以下の接触面圧ですでに生じている。なお潤滑した場合は材料流れの界面からの拘束が少なくなるため板厚・幅の変化が大きい。

図6は同一の窪みにおける突起の発達をプロフィールで

示す。382MPa ではほぼ完全な充満が生じて考えられるが、図 4 で論じた場所による充満の発達速度および形状不整の度合いが明瞭である。

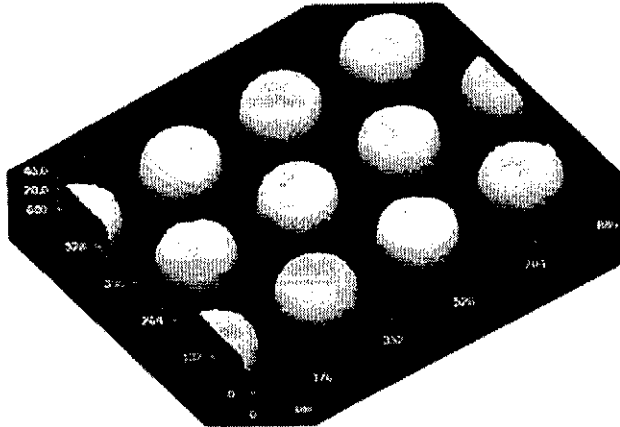


図3 微細盛り上のレーザー顕微鏡3次元像。

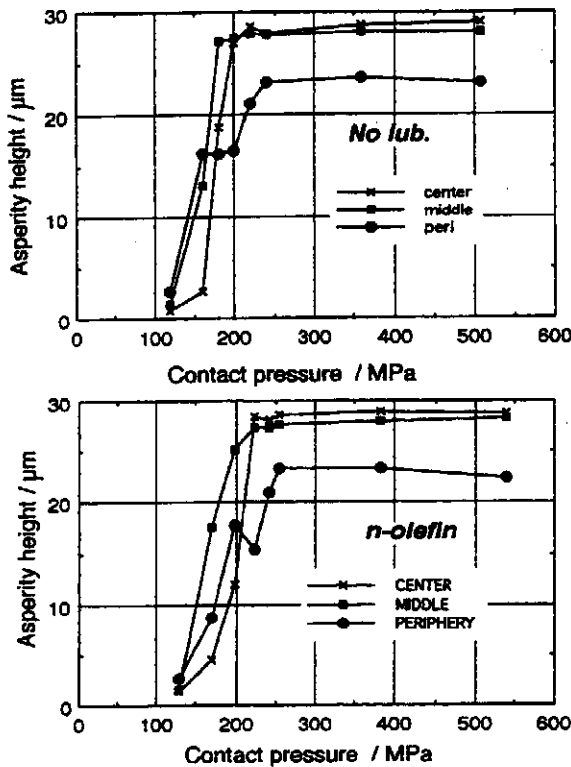


図4 突起の成長。(上)無潤滑。(下)n-olefin潤滑。

#### 4. 2 6種の穴径のダイにおける微細表面形状

以下では塑性加工における相似則を考慮して微細突起の高さを穴径との比で無次元化して表示した。またみかけ平均接触面圧は耐力との比をとって無次元化した。

#### 4. 2(a) パルクの塑性変形

圧印加工ではダイのコーナーカットに対応する部分に空間があるのでバルクの塑性変形が生じるとblank周辺部に巨視的盛り上がりが生じる。(図7参照) そのときの(平均)みかけ接触面圧(荷重/φ30の円の面積)は材料の耐力(123MPa)の3.2倍であった。

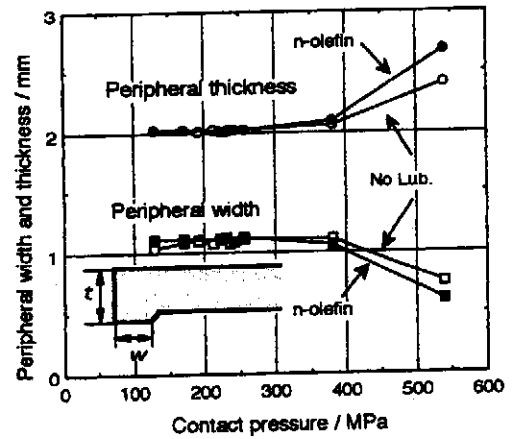


図5 縁部の板厚と幅の変化。密集型ダイ。

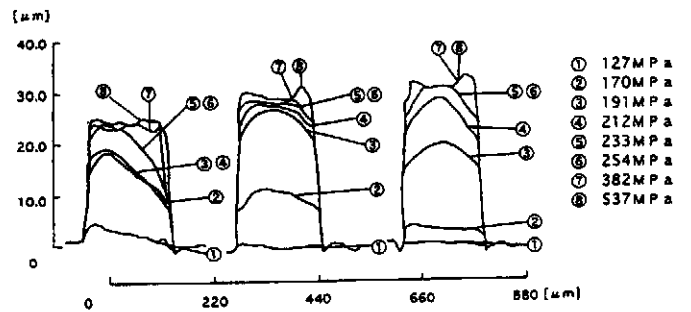


図6 密集型ダイにおける突起の断面形状の変化。(左)縁(中)中間部(右)中心部。無潤滑。

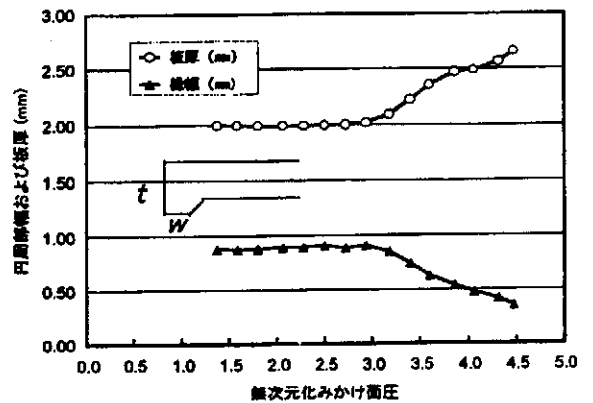


図7 blank縁部のバルクの塑性変形。6種の穴径ダイ。

#### 4. 2(b) 荷重(みかけ面圧)の効果 (図8参照)

穴の半径位置による違いはあまり大きくなく、盛り上りの開始を成形高さ2μmで定義すると真実接触面圧で2.89(みかけ面圧2.5)、成形高さ0.1の時点で判断すると3.75(みかけ面圧3.25)となる。(ダイ外縁部の隙間による修正率1.135倍、および開口率による修正1.019倍を考慮して換算した。)みかけ面圧3.2で接触面圧に対する成形高さの増加率が急増する。これは図7におけるバルクの塑性変形が開始する点と対応する。

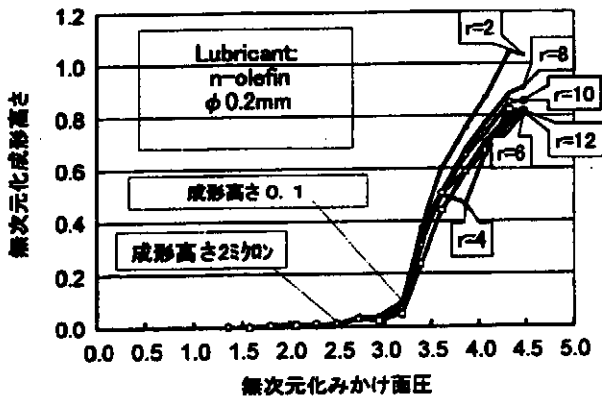


図8 成形高さと見かけ接触面圧の関係. 穴径: 0.2mm.

#### 4. 3(c) 半径位置の影響 (図9参照)

低面圧では穴径  $\phi 0.05$  を例外として外周部がやや高くなっている. 一方高面圧では穴径の大きいものでは中心部が高いが穴径が小さいと中心部と外周部の両側で高くなる.

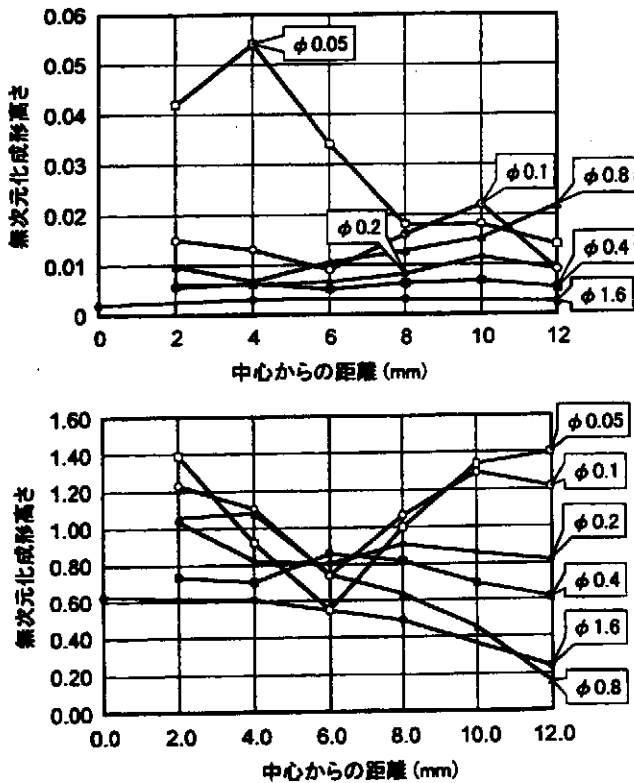


図9 微視的突起高さに及ぼす半径位置の影響.

- (a) みかけ接触面圧 280MPa (無次元化面圧 2.06).
- (b) みかけ接触面圧 550MPa (無次元化面圧 4.48).

### 5 考察

#### 5. 1 盛り上げに及ぼす平均接触面圧とすべり

従来, 工具の微細穴への材料の流入あるいは盛り上げは近傍の接触面圧によって定まるという考え方が強い. 盛り上げ量によって逆に接触面圧分布を測定しようとする試みさえある<sup>9)</sup>. しかし実際には微細穴近傍の相対すべりによって影響を受ける.

微細表面形状の形成は巨視的な工具・板界面のすべりの抵抗になるから, マクロに見たとき表面に非常に大きな摩擦を有する平面という近似ができる. とすれば塑性変形はいわゆる摩擦丘により円板の中央部で接触面圧が高くなる. 一方弾性変形範囲では円板縁部で接触面圧が高い<sup>10)</sup>. 微細穴部分で局部的に塑性変形を開始する時点では縁部で接触面圧が高いかあるいは等圧分布で, 塑性域が広がるにつれ中心部の接触面圧が高くなる. しかし他方で塑性変形により半径方向の流れが生じ, 特に縁部ですべり量がおおきくなる. このすべり量は穴径に対しての比で評価すべきものであるから, 穴が小さいほど影響を大きく受ける. 実験結果はこれらの考え方を裏付けている.

#### 5. 2 バルクの塑性変形

図8で示されているように盛り上げにはバルクの塑性変形を伴わない局部的な段階のものと, バルクの塑性変形開始後の大規模なものとの2段階がある. 前者においてはこの場合, 直径の数%までの成形がなされているが, バルクの塑性変形を伴う場合は穴径と等しい高さまで盛り上げているし, さらに平均接触面圧が上昇すればそれ以上の成形も可能であろう. バルクの塑性変形は図7では無次元化みかけ面圧 3.2 を境に生じたと考えられるがこの値は縁部の空隙がどのような形で存在するかに依存するものであり, いわば試験片のマクロな境界条件で決まっている. したがってマイクロな成形高さを予測するに, 突起の盛り上げを無視して平滑な工具で摩擦が非常に大きいという仮定で変形をシミュレートし, そのバルク変形の開始点から突起部分に注目した局部的マイクロシミュレーションに移るという2段階の変形解析も考えられる.

### 6. まとめ

微細表面形状の塑性加工による形成の原理を検討し, 微細表面突起の局部的な成形高さの制御のための基礎的な知見を得る目的で2種類の圧印実験を行った.

微細穴密集型の工具 (開口率 0.4) では無次元化見かけ接触面圧 1 から盛り上げが始まり, 無次元化見かけ接触面圧 2 で微細穴底部への接触が始まり, 無次元化見かけ接触面圧 3 で充填が完了した. このときバルクの塑性変形は無次元化見かけ接触面圧 3 付近から開始しているのので, バルクの塑性変形なしにほぼ充填が終了した. しかしこれは穴径に対してくぼみ深さが 15%程度という浅い形状のためと考えられる.

バルクの塑性変形と盛り上げの関係をより詳しく検討するため6種類の穴径の深い微細窪みをもつ圧印工具を試作して接触面圧, 穴径, 半径位置の盛り上がり高さに及ぼす影響を調べた. 無次元化見かけ接触面圧 2.5 で盛り上がり開始し, 微小盛り上げ段階(無次元化成形高さ数%以下)では工具外周部で接触面圧が高くなる傾向がみられ, 密集型と同じ結果を与えた. 一方バルクの塑性変形が始まる無次元化見かけ接触面圧 3.2 で急速な盛り上げが開始することが明らかとなった. より高面圧では無次元化成形高さは1まで達し, (1)摩擦丘により中心部の接触面圧が高くなる効果と(2)外縁部でのバルク塑性変形によるすべりの効果, で中央と外周とが高い傾向が見られた. バルクの塑性変形によるすべりの影響は穴径が小さいほど相対的に大きくなり, 一種の寸法効果を示した.

以上の結果から微細表面形状を有する工具による圧印加工に数値シミュレーションを簡易的に適用するには, 微細形状を無視して摩擦の大きい境界条件での変形解析を行い, バルクの塑性変形の開始点を決定し, 次に局部

の変形解析に移行するという2段階法が考えられた。

これらの知見により今後微細表面形状の分布を制御する条件ならびに解析方法が展望できた。

なお本研究の研究成果は文献 11)-13)において発表された。また1998年9月イギリスのバーミンガムで開催されるMetalForming'98の国際会議で講演発表される予定である。

#### 謝辞

本研究の一部は Prof. M. Plancak (Novi Sad Univ., Yugoslavia)との共同研究として実施した。また実験に際しては山口賢一、斎藤智之両氏(当時東洋大学工学部学生)の協力を得た。本研究の一部には(財)天田金属加工機械技術振興財団の研究助成を受けた。板材は住友軽金属工業(株)からご提供いただいた。潤滑剤は出光興産(株)よりご提供いただいた。以上のご協力に対し心から謝意を表します。

#### 参考文献

1) 池 浩：塑性と加工, 36-411 (1995), 369-376.

2) 池 浩・銭 文軍：塑性と加工, 36-411 (1995), 377-383.

3) Ike, H.: *J. Mater. Process. Technol.*, **60** (1996), 363-368.

4) Bocharov, et al.: *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, **84-4** (1962), 491.

5) Delamare, F. et al.: *J. Mech. Work. Technol.* **10** (1984), 253-271.

6) 岡崎 康隆・小田 拓嗣：塑性と加工, 36-411(1995), 339-343.

7) Ohmori, H. et al.: *Ann. CIRP*, **39** (1990), 329.

8) 志渡 誠一・小野寺 健次・川並 高雄, トライボロジスト, 37-7 (1992), 583-589.

9) J. M. Orximenko & B. D. Kopsky: 塑性と加工, 7-68 (1966), 485-488.に紹介されている。

10) 加藤 仁・山口 勝美・加藤 隆雄: 機論 3 部, **44-381** (1978), 1742.

11) 池 浩・Miroslav Plancak: 平成9年度 塑性加工春季講演会講演, (1997) 289-290.

12) 池 浩: 平成10年度 塑性加工春季講演会講演, (1998) 127-128.

13) Ike, H. & Plancak, M.: "Coining process as a means of controlling surface microgeometry", *J. Mater. Process. Technol.*, (1998), in print.