

塑性加工による微細表面形状の創製

池 浩*

1. はじめに

21世紀の工学的なキーワードの一つとして加工の微細化ということがあげられよう。省資源・廃棄物の削減、あるいは携帯の利便性などあらゆる局面において微細化は有利であり、また地球規模の環境保全などを考える上でも必要な方向性だと思われる。塑性加工は大量生産の主要技術であるから、塑性加工が微細加工の能力を高めることは上記の課題解決に対して大きな貢献をすることにつながる。しかしながら従来の塑性加工技術は寸法精度という意味での精密化と良好な表面仕上げ(通常は平滑面を意味する)は常に課題とされてきたが、微細形状を加工することに対しての取り組みは十分なされてこなかったように思われる。

微細な塑性加工といってもマイクロマシンのように全体形状が微細なものもあるが、塑性加工の特質としては外形寸法で表面に微細な形状を加工する能力もある。それはショットピーニングや放電加工のような確率論的な形状創製もあるが、これからの課題としては決定論的な、つまりデザインされた形状を創製していくことの高めることが一つの大きな課題になってくると考えられる。

筆者はその一つの試みとしてイオンビーム・エッチングを応用した微細表面形状の創製を試みた¹⁾²⁾。これは超硬合金金型の表面に制御された微細なくぼみを多数創製するものである。さて塑性加工の技術として考えた場合、窪み形成よりも突起形成の方がかなり難しい加工であることがわかる。つまり、ヴィッカーズ硬さ試験などの圧痕形成をみても、周辺の盛り上がりおよび沈降が若干問題になるとしても圧子による被加工材の部分的排除により転写形状は基本的に形成される。また周辺の盛り上がりについては、行程終期に周辺の平面部による押しつぶし矯正効果が期待できる。しかし盛り上がりについてはそのような保証がなく、特に盛り上がり径に対する高さが大きな場合は困難である。さらに金型の微細窪みに充満することを期待する場合はより困難を伴う。これらの点から微細突起の形成過程について継続的に研究しているので³⁾⁴⁾最近の成果として紹介したい。

2. 微細表面形状金型の形成方法

微細加工を伴う金型は精密でなければいけないし、また摩耗による経時変化が厳しく問題になるので、超硬合金金型を使うことが多いと思われる。その場合の微細表面加工法の一つとしてドライエッチングの一つであるイオンビーム・エッチングがある。これは細いビームではなくある巨視的な径を持った粒子束による加工なので金型のように大面積を加工するのに適する。電子部品に対する応用例としてはすでいくつかの報告がある⁵⁾⁶⁾。通常はリソグラフィ技術でマスクを形成するが、プロセスが長いのと、エッチング深さが大きくとれないという問題がある。これに対して筆者が開発した方法¹⁾(図1)ではメタルメッシュのマス

クを用いることにより、深い分散した窪みを形成するうえでは有力な方法である(図2)。これを直接圧印工具として用いれば微細突起を部分的に有する製品が加工できるわけであるが、二次的な工具(極印)を製作しそれを圧印工具とすればイオンビーム・エッチングした超硬合金の微細表面形状と類似の窪み形状を有する製品も加工できる(図3)。

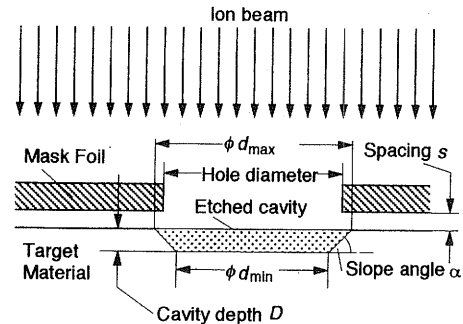


図1 金属メッシュをマスクとしたイオンビーム・エッチング。
sの大きさにより壁の角度αが変化する。²⁾

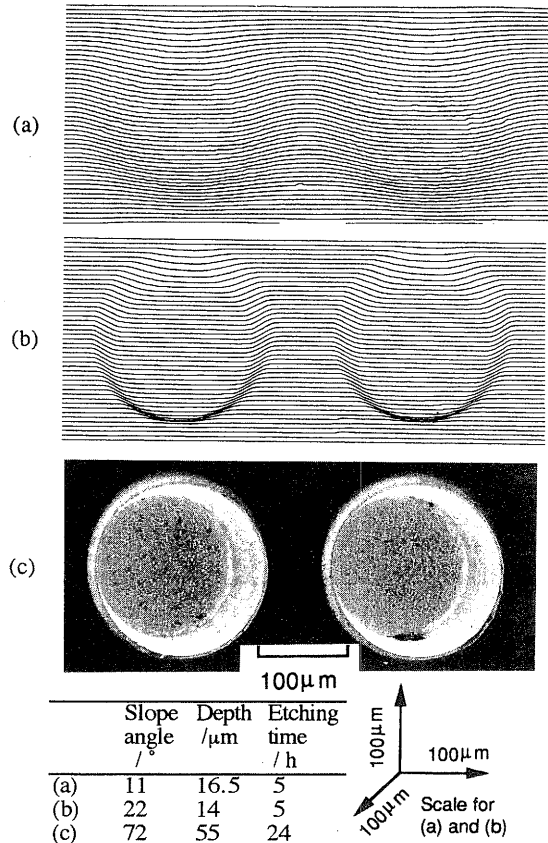


図2 超硬合金工具に形成された窪みの形状の例。²⁾

3. 微細表面形状の塑性加工の特徴

微細形状を有する金型が加工できるとしての加工技術面での問題はあるだろうか。実は「微細工具穴近傍の被加工材表面の材料が流入して突起が形成されるだけである」とはならない。

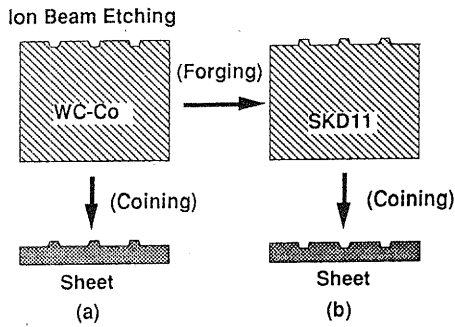


図3 窪みと突起を圧印で形成するプロセス。²⁾

まず塑性加工の特徴としてバルクが塑性変形するということがある。とすれば表面近傍もその影響を受けざるを得ない。早い話がたとえば巨視的表面積の増加する加工(たとえば圧延)において微細穴のついたロール等を使って加工すれば圧延方向の伸び変形と工具の微細穴の間に幾何学的な不適合が起こりうる。つまり工具の微細穴に盛り上がり次巨視的伸びによって穴から再度流出するということが要請される。ふつうの平滑ロールではこれは「ロールと板材間のすべり」という形で折り合いがついているわけであるが、微細形状ロールではそうはいかない。筆者の実験例⁷⁾では、数%の伸び(板厚減少率)までは比較的良好な微細表面形状(板材上の微細窪み)が得られたが、それ以上では幾何学的な相克による微細形状の不整が現れた(図4)。ただし定量的には窪みの寸法形状(特に壁の角度)の影響を受けてその程度は変化するであろう。板圧延においては平面ひずみ変形に近いので幅方向の広がりや抑制されるものの、圧延方向の伸びすなわち工具・板材界面の相対すべりが必然的に要請されるわけで、この機構を抑制することは困難である。原理的に微細表面形状の精密な加工には難しいところがある。

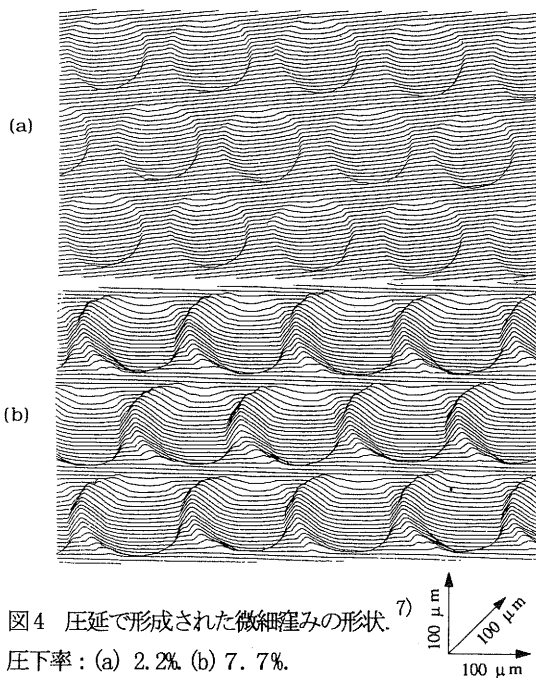


図4 圧延で形成された微細窪みの形状。⁷⁾
 圧下率: (a) 2.2% (b) 7.7%。

一方、鍛造系統の圧印加工においては特定の工具・被加工材界面の相対すべりを抑制することも可能であり、単純な転写加工に近いものが想定される。しかし実際にはバルクの塑性変形と微細表面形状の競合ともいべき状態、すなわち巨視的の成型に必要な接触面圧分布やバルクの塑性変形と結びついた工具・被加工材界面の微視的すべりが盛り上がりに影響する。すなわち微細形状と巨視的外形寸法との相対関係により挙動は変わってくると考えられる。

4. 圧印での微細突起の盛り上がりの寸法効果⁴⁾

以上の考え方にに基づき市販A1050P アルミ板を用いブランクサイズを直径 30mm、板厚を 2.0mm と固定し、異なる穴径の微細くぼみ列を半径方向に有するダイを作成し圧印を試みた。穴径は 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6 mm とし、60度ごとに半径方向に 2mm 間隔で分布するものとした(図5)。また工具の配置は図6に示す。ブランクの下側に配置した微細窪みを有するダイは周囲に 45度のテーパ部があり、ここがバルクの塑性変形の進行に伴い充満してくる。潤滑剤は normal-olefin を使用した。微視的成形高さの評価尺度としては無次元化成形高さ $NFH = \text{成形高さ}/\text{径}$ とした。加工の行程の尺度としては無次元化平均みかけ接触面圧 $NNCP = \text{みかけの接触面圧}/0.2\% \text{耐力}$ とした。またみかけの接触面圧とは垂直荷重/直径 30mm の円の面積で定義する。寸法効果がないとすれば同じ平均みかけ接触面圧 $NNCP$ に対して同じ無次元化成形高さ NFH を示すはずである。

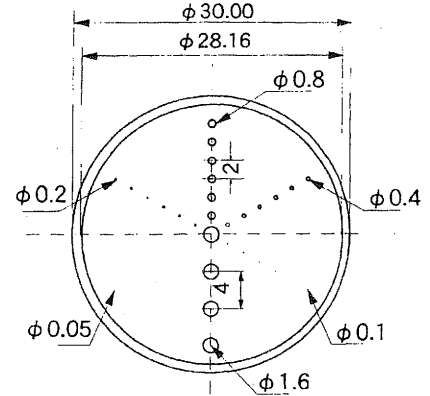


図5 圧印工具上の微細表面窪み。⁴⁾

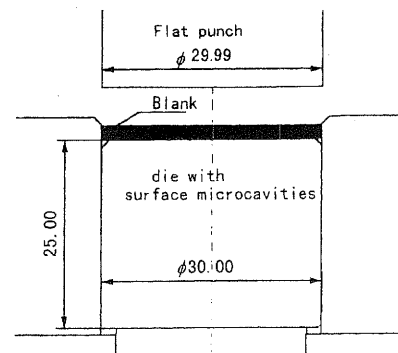


図6 圧印工具の配置。⁴⁾

バルクの塑性変形の進行状況は図7に示すように円周部の板厚等から無次元化みかけ接触面圧=3.2で開始すると判断される。一方微細突起の盛り上がり穴径0.05mm, 0.2mm, 0.8mmについて図8(a)(b)(c)に示す。またこれを半径位置に対してプロットし直して図9に示す。

一般的傾向としてもし盛り上がりの開始を2 μ mの成形高さで判定すれば臨界のNNCP=2.5(真実接触面圧=2.89)となる。一方、無次元化成形高さ=0.1で大規模盛り上がり開始と定義すると、NNCP=3.25(真実接触面圧=3.75)となる。この接触面圧以上では盛り上がり急速に進行する。なお真実接触面圧は縁部と穴部での非接触領域を考慮して実際の接触面積を算出した場合である。

穴径の影響は、半径位置の影響と組み合わせて出現している。0.05mmの場合は半径6mmの位置で盛り上がり最小になる。0.2mmではほぼ均一な高さ分布になり、0.8mmでは中心で最大、周辺で最小となっている。その絶対値をみると穴径0.05mmで概して無次元化成形高さNFHは大きく、穴径が大きいほどNFHの平均が小さくなる。

また比較的低接触面圧(図9(a))では周辺部での盛り上がりが高い傾向にあり、高い接触面圧になると(図9(b))上述の傾向になる。

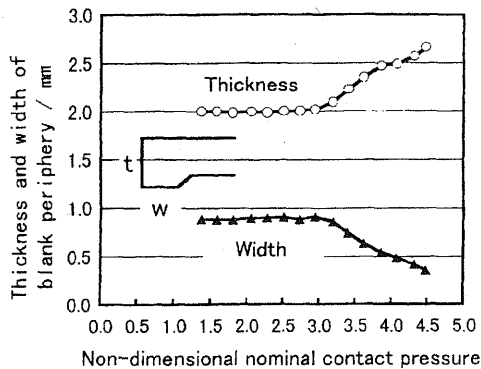


図7 プランク縁部の変形⁴⁾

5. 微細表面形状の形成の流れ則

接触面圧の低いところで外周の盛り上がり先行するのは弾性接触において外周の接触面圧が高くなる⁸⁾ことから、塑性変形が先行的に開始するのではないかと考えられる。それが全体に伝播した後は塑性論の示すように摩擦丘で中央が接触面圧が高い形に変化してくるのであろう。

一方バルクが塑性状態になるとプランクの外周が側壁に当たり、(加工開始前は0.01-0.02mm程度のクリアランスが存在する)閉塞的な状態になることにより外周部での接触面圧が増加する⁹⁾。この効果とあわせ、外周部での巨視的空隙への流入作用が工具・被加工材界面のすべりをもたらし盛り上げを促進する。

そのすべりの効果というのは盛り上がりそのものがブレーキをかけるので穴径が大きいほどすべりの絶対値が小さいことと、穴径に比べて相対的に小さいという両面から、穴径が大きい

と影響は小さく、穴径が小さいと著しく大きいという結果になる。この意味ではプランク寸法を一定にしたままでは塑性加工の相似則というのは成立しない。また相対流れが大きくなると盛り上がり部の変形²⁾や根本でのせん断が起こる³⁾。ドライに近い状態で加工していると除荷前に冷間接合したような状態になり一見せん断(破断)の生じたことはわからないが、液体潤滑剤が作用すると冷間接合が妨げられ工具の微細穴に流入した材料が取り残されることも生じる。

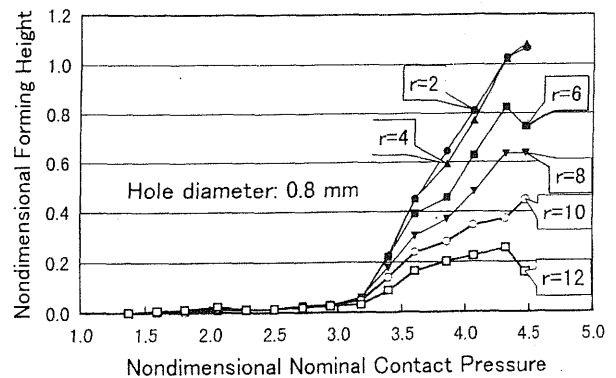
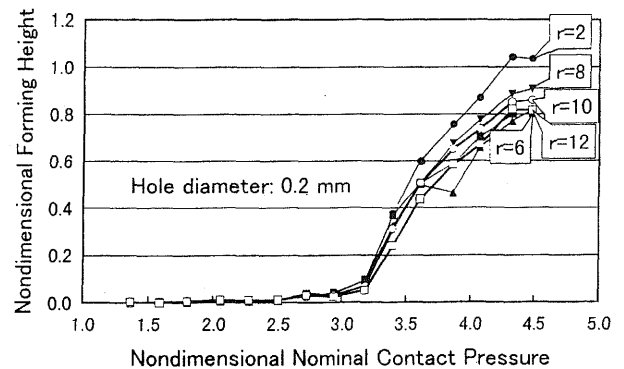
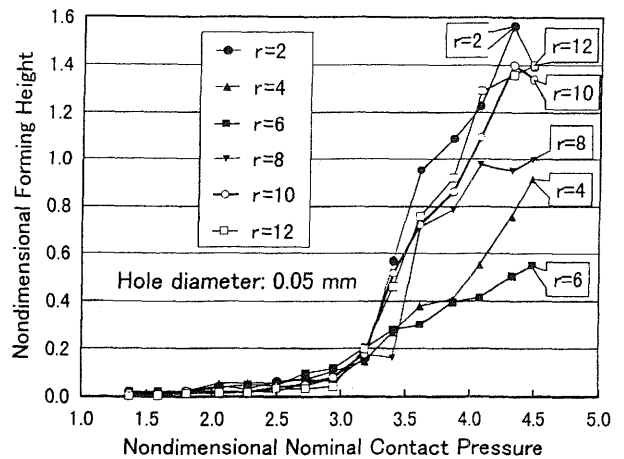


図8 無次元化成形高さとの無次元化みかけ接触面圧の関係⁴⁾
潤滑剤: Normal olefin.

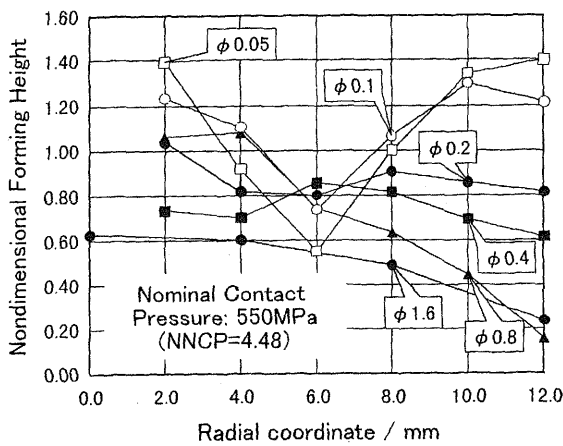
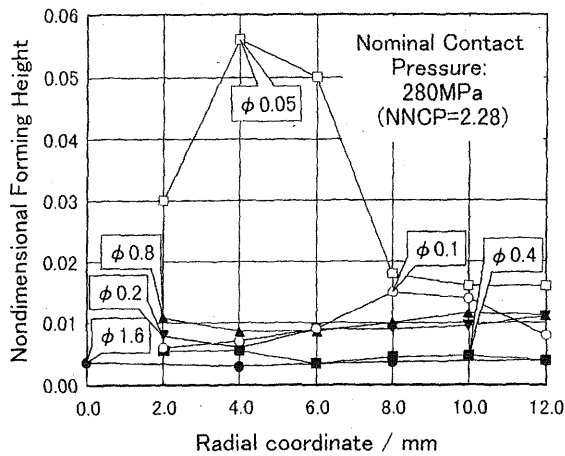


図9 微視的突起高さに及ぼす半径位置の影響⁴⁾

さらにブランクの寸法と微細表面形状の寸法の関係で穴径が大きくなってくると後方押し出しになってきて板材の反対側の面が浮き上がり局所的な面圧の低下が生じる。工藤¹⁰⁾の解析によると開口率0.1では板厚の82%の穴径で表面流動からバルクの盛り上がり(後方押し出し)に変化するという。穴径1.6mmはほぼその限界に当たり、実際、ブランク裏面で浮き上がりとはいかないまでも表面粗さが周辺より大きく、接触面圧が裏面で低下していることがわかる。これを別の言葉で言えば、穴径が大きいと盛り上がりに必要な流入する材料の体積が大きいため面圧が低下しNFHは小さくなる傾向があると言えよう。

まとめると

(1) 実験例では平均真実接触面圧が0.2%耐力の2.89倍で2 μ mの微視的な盛り上がり開始し、3.75倍で急速な盛り上がりが進行しはじめた。後者はバルクの塑性変形の開始と一致した。この2つの接触面圧の間で変形のモードが変化していると考えられる。

(2) 穴径が大きいと中央部で盛り上がり大きく、周辺で低い。穴径が小さいと中央部と周辺で大きくなる。中間の径では比較的一様な分布を示す。周辺部の盛り上がりはすべりの影響が大きいと考えられる。

(3) 板厚に比して穴径が大きいと流入体積が大きくなるので相

対盛り上がり高さは低くとどまる傾向にある。

6. おわりに

塑性加工による微細表面形状の形成はまだ緒についたばかりであり、特定の形状でしか実施例もない。著者の行っている基本的な検討から技術的な問題点もいくつか明らかになってきているので、それらの特性をふまえた加工技術が広がれば、今後伸びていく分野ではないかと考えられる。

またなかなか困難ではあるが今後は数値シミュレーションの課題としても取り上げられて良いように思う。

本研究を進めるにあたり科学研究費補助金一般研究(C)02650502ならびに財団法人天田金属加工機械技術振興財団の研究助成AF-92020をいただいたことを記し深謝の意を表します。

参考文献

- 1) Ike, H.: "Fabrication of 3-D Controlled Surface Microgeometry by The Technology of Plasticity", *Advanced Technology of Plasticity 1993*, Edited by Z. R. Wang, (1993), 55-60. International Academic Publishers.
- 2) 池 浩: "イオンビームエッチングと圧印を結合した微細表面形状の創製", *塑性と加工*, 36-411(1995), 369-376.
- 3) Ike, H. & Plancak, M.: "Coining Process as a means of controlling surface microgeometry", *J. Mater. Process. Technol.*, 80-81 (1998), 101-107.
- 4) Ike, H. & Plancak, M.: "Controlling metal flow of surface microgeometry in coining process", *Advanced Technology of Plasticity 1999*, M. Geiger, Ed. (1999), 907-912, Springer.
- 5) 長縄 尚・吉富 雄二・平山 国明: 動圧スラスト軸受の高精度加工, *塑性と加工*, 35-402 (1994), 875-880.
- 6) 岡崎 康隆・小田 拓嗣: イオンビームエッチング工具による精密部品のコイニング, *塑性と加工*, 36-411 (1995), 339-343.
- 7) 池 浩・銭 文軍: イオンビームエッチングを応用した微細表面形状を有する小型圧延ロールの作成と従動圧延加工, *塑性と加工*, 36-411(1995), 377-383.
- 8) Conway, H.D., Vogel, S. m. Farnham, K. A., & So, S: Normal and shearing stresses in indented strip and slabs, *Int. J. Eng. Sci.*, 4 (1966), 343-359.
- 9) 中村 保・近藤 一義・西谷 知栄, 塑性加工における表面平滑化条件(面圧と相対すべり量の影響), *機論 C* 56-530 (1990), 2794-2801.
- 10) Kudo, H.: Some analytical and experimental studies of axi-symmetric cold forging and extrusion - 1, *Int. J. Mech. Sci.*, 2 (1960) 102-127.