

金型の寿命向上に対する高硬度微粒子の高速衝突による表面創製効果

中部大学 工学部 機械工学科
 教授 加賀谷忠治, 教育技術員 加藤 政則
 平成10年度 卒業研究生
 太田 千尋, 大山 倫人
 (平成10年度 研究開発助成 AF-98018)

キーワード: 表面創製, 高硬度微粒子, 投射速度, 投射角度, マルテンサイト化, 圧縮残留応力, パンチ, 寿命延長

1. 緒言

プレス金型は、家電・自動車部品の量産をはじめ、精密な IC 部品にいたるまで、素形材加工に必要不可欠な治工具の一つで、これが“ものづくり”に果たす役割は非常に大きなものがある。しかし、最近では成形品の軽量・高品質化すなわち、強度と安全性の向上のために、高張力鋼板やステンレス鋼板などの難加工材が用いられるようになり、金型は一層苛酷な条件下での使用が増大する傾向にある。したがって、金型あるいはパンチの耐摩耗性、耐欠損性の向上や寿命の延伸を図ることが重要な技術課題となっている。

一方、金型などの治工具の長寿命化のためには、材料、熱処理および表面創製の三位一体が鉄則であり、一般に工具鋼、焼結高速度鋼、超硬などが用いられ、さらに、これらの表面・表面層に必要な特性を付与する各種の方法が利用されている⁽¹⁾。特に最近開発された金属・非金属微粒子の高速衝突・衝撃による微粒子衝撃処理法(Fine Particle Bombarding, FPB)は利便性の高い表面創製技術としてその適用が拡大されつつある⁽²⁾。

そこで本研究では、表面創製に及ぼす微粒子の投射速度や投射角度の影響について基礎的研究を行うとともに、金属プレス成形用パンチの寿命向上に対する表面創製効果について検討した。

2. 実験方法

微粒子の投射速度の影響の調査には、機械構造用合金鋼 SCM415 の丸棒材を長さ 100mm、幅 18mm、厚さ 5 mm にフライス・研削加工した後、真空浸炭処理を施した。投射角度の場合には、合金工具鋼 SKD11 のブロック材を 40 × 30 × 5 (mm) に機械加工してから真空炉中で加熱・N₂ ガス冷却後、170 °C にて焼戻しを施した。表 1 には FPB 処理条件を示したが、FPB 処理に際してこれらの試験片は表面を #400 のエメリーパーペーで一様に研磨するようにした。投射角度は図 1 に示すように、SCM415 真空浸炭処理鋼では 90 ° 一定の 2 段処理とし、投射速度を変化させた。SKD11 焼入・焼戻し鋼では 90 ° 60 ° 45 ° および 30 ° で 1 段処理した。またパンチに用いた材料は、焼結高速度鋼 (HAP10) のブロック材である。これをワイヤーカットにより切り出し、めねじ (M6 × 20) を加工して

表 1 FPB 処理条件

Test piece	Particle material	Meshsize of particle (#)	Ejection velocity (m/s)	Air pressure (MPa)	Bombarding time (s)
SCM415 (Vacuum carburized)	Cast steel	300	100	0.10	20
	Ceramics	300	100	0.10	20
	Cast steel	300	150	0.29	20
	Ceramics	300	150	0.29	20
	Cast steel	300	200	0.49	20
SKD11 (QT)	Ceramics	300	200	0.39	20
	H. S. S	300	200	0.64	20
HAP10 (Punch, QT)	H. S. S	400	200	0.44	20
	Ceramics	400	200	0.39	20

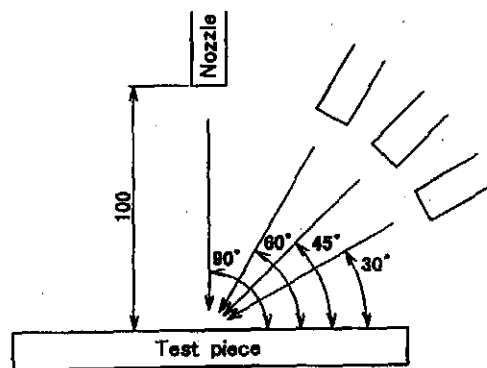


図 1 微粒子の投射角度

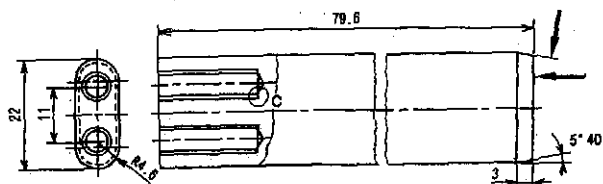
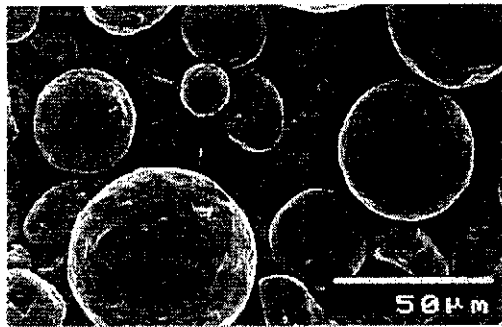


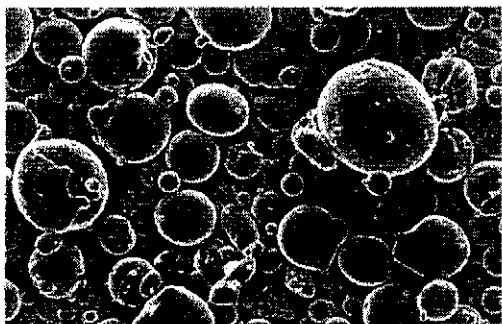
図 2 パンチの形状・寸法 (mm)

図 2 に示すパンチ形状とした後、HRC60 狙いの塩浴熱処理を行った。ただし、パンチ先端部の面取りは熱処理後にエンドミルにより施した (ミーリングのまま)。また、面取り部とその端面には表 1 に示す条件

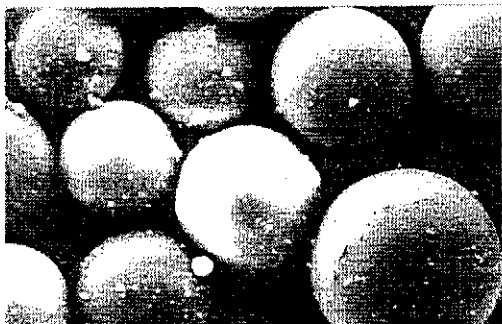
で FPB 処理をそれぞれ 2 段に施した (FPB)。図 2 の矢印は投射方向を示す。図 3 には用いた微粒子の外観と硬度を示した。



(a) 铸鋼 (HV700)



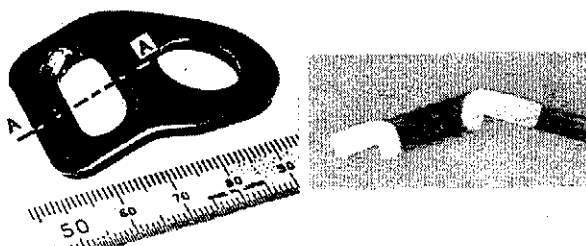
(b) 高速度鋼 (HV1000)



(c) セラミックス (HV1000)

図 3 微粒子の外観と硬度

ミーリングのままおよび FPB 処理パンチは 300 t プレスの自動車シートベルト部品・ミニアンカー成形用順送型に組み込み、高張力鋼板 SPFH590 ($\sigma_B = 590\text{MPa}$, $t = 3.2\text{ mm}$) の成形加工を行った。加工



(a) 外観 (b) A-A 断面
図 4 ミニアンカーの形状

条件は油潤滑下 50 ストローク / min である。なお、参考までにミニアンカーの外観と断面形状を図 4 に示したが、(b) の断面から穴縁の押し曲げと裏側への押し出し加工は冷間鍛造に近く、パンチにとってかなり苛酷であることがよくわかる。したがって、パンチの寿命は通常下型の場合に比較して 1/3 である。

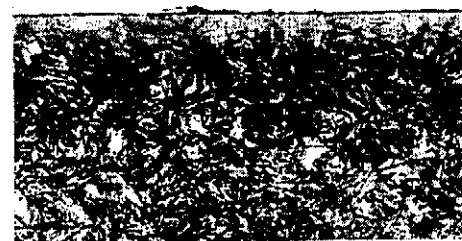
3. 実験結果および考察

3.1 表面創製に及ぼす微粒子の投射速度の影響

従来のショットピーニングに比較して微粒子の場合は投射エネルギーが小さいので、投射速度を 100m/s 以上に加速する必要がある。そこで、微粒子の投射速度による表面の組織変化について調査し、結果を図 5 に示した。ただし、投射条件は表 1 に示す通りであり、速度は空気圧を変化させることにより調節した。いずれも铸鋼、セラミックスの順に 2 段に処理した。図か



(a) 投射速度 100m/s



(b) 投射速度 150m/s



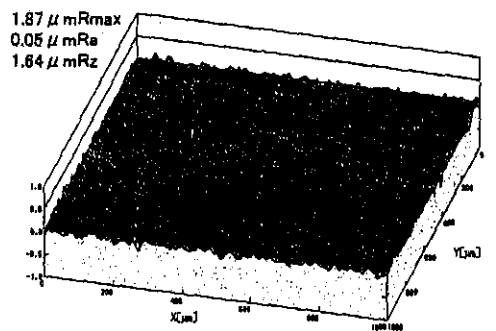
(c) 投射速度 200m/s

図 5 投射速度による表面創製層の変化 (SCM415 真空浸炭材)

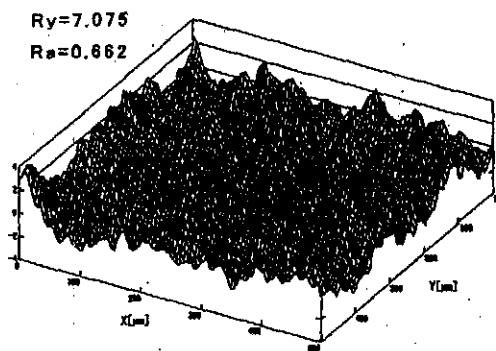
ら明らかなように、(a) の投射速度 100m/s では表面から約 $5\ \mu\text{m}$ の深さにわたって、内部の焼入組織とは異なるエッチングされにくい層が観察される。そして (b) の 150m/s の場合には約 $7\ \mu\text{m}$ 、(c) の 200m/s では約 $10\ \mu\text{m}$ の層が認められる。したがって、微粒子の投射速度が 100 ~ 200m/s とかなり広い範囲にわたって組織変化を引き起こし、速度の大きい方が表面創製

効果も大きくなる傾向にある。なお、X線回折によれば浸炭処理のままの表面層には約 15vol.%の残留オーステナイトが存在しているのに対して、FPB 処理したものではマルテンサイト組織であることが確かめられた。これはチタニウム材では微粒子の衝突によって著しい火花を発生する。窒素ガスでアルミニウム表面に投射した場合には微粒子の構成元素や窒素が内部へ拡散する⁽²⁾。また微粒子のもつ運動エネルギーの多くが熱に変換され、ワークの温度はかなりの高温に達すること⁽³⁾などから、微粒子の衝突によるワーク表面の急速加熱・冷却および微粒子による衝撃の繰返しに伴って表面層だけが塑性変形と再結晶を繰返し受けて、結晶粒の微細化や変態を生ずるものと推察される。

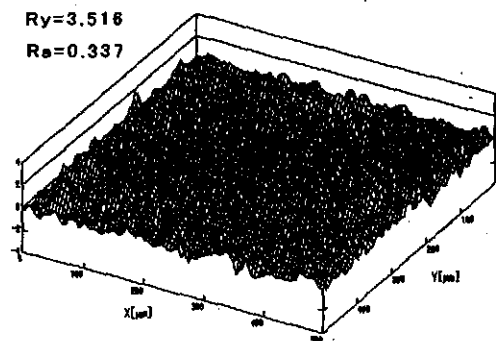
3.2 表面創製に及ぼす微粒子の投射角度の影響



(a) #400 磨き



(b) 投射角度 30°



(c) 投射角度 90°

図6 微粒子の投射角度による表面状態の変化

実際の機械部品や治工具などの FPB 処理に際し、処理面に対する微粒子の投射角度を一定に保つことは一般に困難である。そこで、投射角度が変化した場合の表面創製効果を SKD11 焼入・焼戻し材を対象に基礎的検討を行った。

図6は微粒子の投射角度による表面状態の変化を示したものである。(a)は#400 エメリーペーパーによる研磨面である。この表面に微粒子を 30° で投射した (b) では研磨条痕は消失するが、凹凸の激しい表面状態になる。これに対して 90° で投射した (c) の場合には一様な梨地状態となる。これらを表面粗さでみてみたのが図7である。微粒子の投射により粗さは増加し、その度合は 30 ~ 60° で大きく、90° では反対に 1/2 程度になる。これは低角度の場合には表面で掘り起こされるためであるが、実際にはノズルに揺動を与えたり、ワークを手動で操作することから、表面粗さはこれらの平均値程度になるものと推察される。

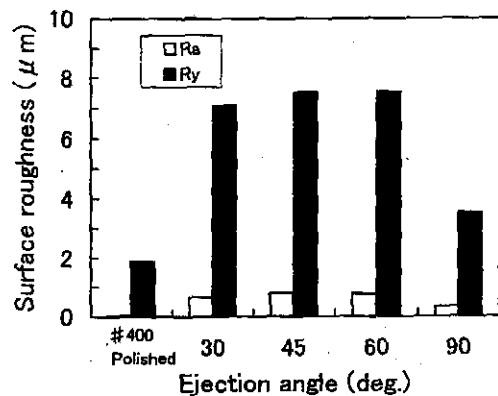


図7 投射角度と表面粗さの関係

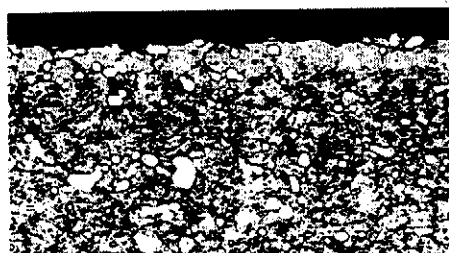
図8は断面組織を示したものである。図から明らかなように、表面にはどの場合にも約 10 μm の組織変化層が観察されるが、その厚さは投射角度の大きさに伴っていくぶん増加する傾向がみられる。

図9には断面におけるピッカース硬度分布を示した。分布状態は投射角度によらず表面で最大 (HV960 ~ 980) となり、表面からの深さにつれて低下し、約 0.2mm で母材値に収束する。したがって、表面では熱処理・研磨のままの母材硬度 (HV760) に比較して 1.3 倍ほどの上昇になる。

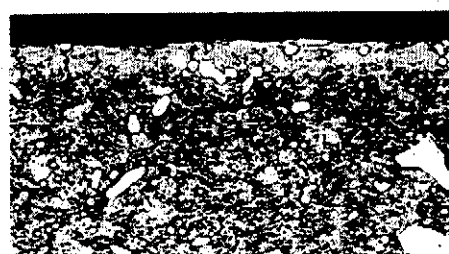
次に、FPB 処理による組織変化および硬度の上昇要因を明らかにするために、X線法により残留オーステナイト量について調査し、その結果を図10に示した。図示のように、熱処理・研磨した母材では約 25vol%のオーステナイトが残留していることがわかる。そして、これに 90° の投射角度で FPB 処理を施した場合には、オーステナイト量をもっとも減少する傾向がみられる。特に表面では投射角度にあまり関係なく 10vol%以下となり、著しく低下している。したがって、前述の組織変化層は残留オーステナイトがマルテンサイトに変態したものであり、これが高硬度を



(a) 投射角度 30°



(b) 投射角度 45°



(c) 投射角度 60°



(d) 投射角度 90°

図8 投射角度による断面組織の変化 (SKD11 焼入・焼戻し材)

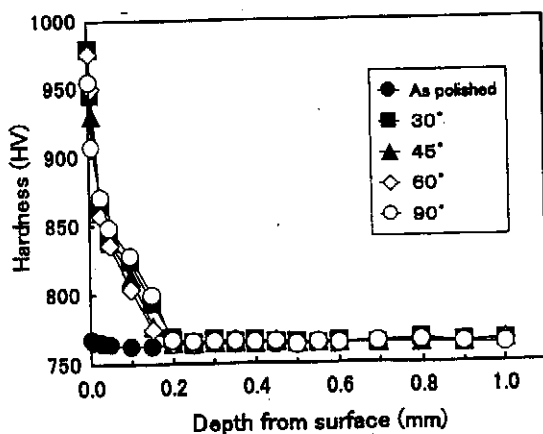


図9 断面硬度分布

呈する要因の一つと考えられる。また、このような組織変化に起因して表面には図 11 に示すように大きな圧縮残留応力が発生するが、この分布状態も 90° においてもっとも深くまで生じている。しかし、表面では投射角度による圧縮残留応力の差異が少なく、しかも応力の最大値はほぼ表面の組織変化層に生じ、母材の場合の約 2 倍に達している。

以上のことから、微粒子衝撃処理法は、投射角度によったあまり左右されない極めて利便性の高い表面創製法であると言える。

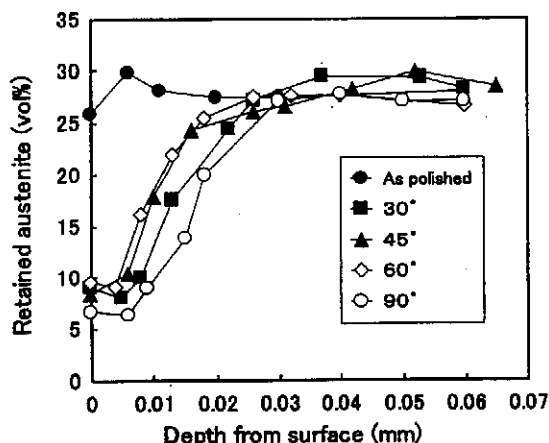


図10 投射角度と残留オーステナイト量

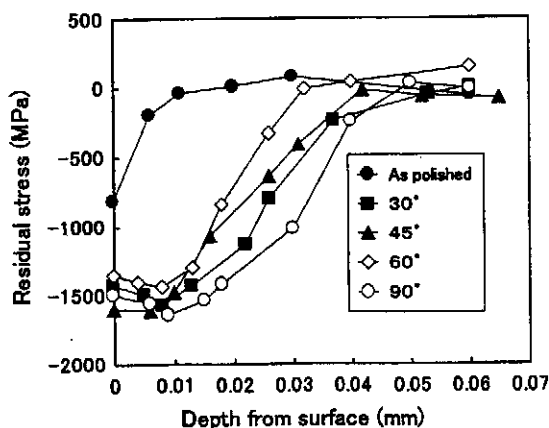
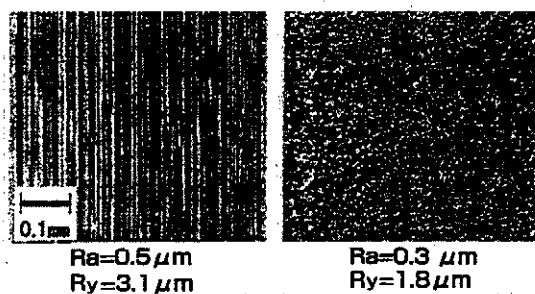


図11 投射角度と残留応力分布

3.3 微粒子衝撃処理によるパンチの寿命向上

前節までの基礎的検討結果に基づき、FPB 処理法を金属プレス成形用パンチ (HAP10) に応用し寿命の延伸効果について調査した。

図 12 はパンチの面取り部の表面状態を示したものである。図から明らかなように、(a)の焼入・焼戻し後にミーリングにより面取りした表面には、規則的な加工条痕がみられ、表面粗さは $3.1 \mu\text{mRy}$ である。しかし、この表面に対して FPB 処理を施すと、(b)のように微細なくぼみによる特有の梨地面となり、表面粗さは $1.8 \mu\text{mRy}$ と小さくなる。これは油溜りや応力集



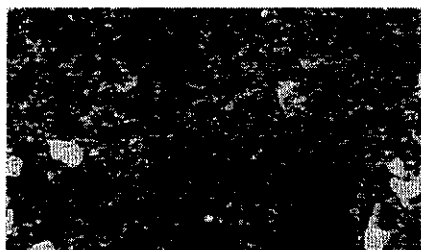
(a) ミーリングのまま (b) FPB 処理

図 12 パンチ面取り部の表面状態

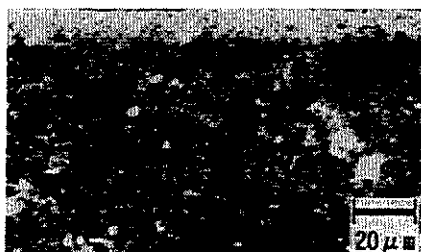
中低減の面でかなり効果的であると考えられる。

図 13 は、パンチの断面組織を示したものである。

(a) のミーリング加工のままのものは表面、内部ともほぼ一様な焼入組織を呈している。一方、FPB 処理を施した場合には、(b) のように表面から約 10 μm



(a) ミーリングのまま



(b) FPB 処理

図 13 パンチの断面組織

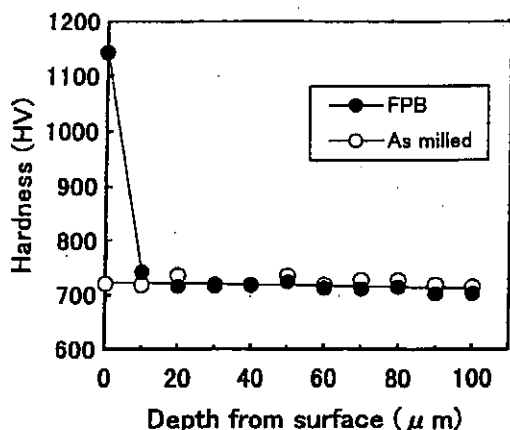


図 14 パンチの硬度分布

にわたってエッチングされにくい組織が現出した。これに対応した硬度分布が図 14 である。エッチングされにくい表面層は約 HV1100 と高硬度を示し、組織的にはほぼマルテンサイトと推察される。

図 15 は、圧縮残留応力の分布を示したものである。図において、ミーリング加工のままの面取り部の表面残留応力は、約 -500MPa である。これに対して FPB 処理を施した場合には、約 -1100MPa となり、エンドミル加工のままのものに比べて約 2 倍の大きな圧縮残留応力が付与されていることがわかる。

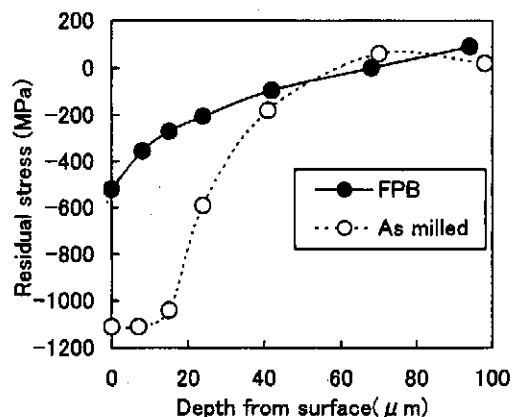


図 15 パンチの圧縮残留応力分布

次に、これらのパンチが破壊に至るまでの寿命、すなわち形成加工回数を調べた。

図 16 には、ミーリングのままのパンチの破損状態を示した。図示のように、ミーリングのままのものでは 30000 ~ 60000 回で角部に摩耗と大きな欠損を生じて寿命に至る。一方、FPB 処理した場合には 480000 ~ 540000 回の成形加工においても、図 17 のように先端部分には損傷が認められず、十分に継続使用が可能な状態である。しかし、この場合は図 18 に示したように、パンチの表面に大きなき裂が発生し、使用不能になった。破損個所はミーリングのままの場合と異なるが、平均した寿命はミーリングのものより 10 倍以上の延伸になる。また、き裂の発生状況を調べたところ、めねじ下穴とねじ部との接続付近 (図 1 の C 点) を起点としていることがわかった。これはミーリングのままの従来のパンチでは見られない破壊形態であり、FPB 処理によりパンチの先端部表面の加工条痕の消失による応力集中の低減、表面層が高硬度マルテン

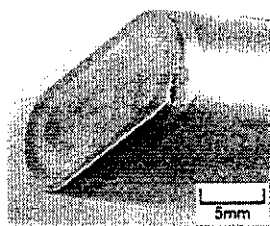


図 16 ミーリングのまま

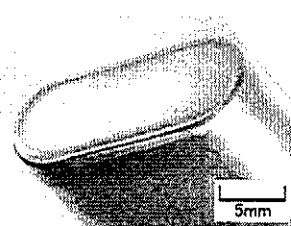


図 17 FPB 処理



図 18 パンチに発生したき裂 (矢印)

サイト組織に変態するとともに、この部分には大きな圧縮残留応力を生じてじん性も増したために、ねじ部付近の応力集中の大きい箇所から疲労破壊したものと考えられる。

4. 結言

微粒子の高速衝突・衝撃利用表面創製技術・FPB 処理法の基礎的検討および金属プレス用パンチの寿命向上に及ぼす FPB 処理による表面創製効果について検討した。その結果、表面創製効果は微粒子の投射速度が約 200m/s の場合に顕著であり、投射角度によって著しく左右されないことがわかった。また、FPB 処理

したパンチの寿命は、マルテンサイト組織化、表面層への圧縮残留応力の付与および表面・表面層の均一・均質化などに起因して、熱処理後ミーリング加工を施した場合に比較して 10 倍以上延長されることが明らかになった。このことは、単に治工具費の削減や生産性の向上に寄与するだけでなく、治工具交換の無駄時間を省き、治工具の再創製処理に要する労力と時間の節約等による間接的コストの低減に果たす役割も少なくないものと考えられる。

終わりに、本研究の一部は平成 10 年度(財)天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成を受けて遂行されたことを付記するとともに、関係各位に深甚の謝意を表します。

参考文献

- (1) 上田重朋, NP シリーズ ドライブレーティング (1989), 槇書店.
- (2) 加賀谷忠治・江上登, 電気製鋼, 71-1(2000), 51~58.
- (3) 伊藤健一・前田隼・江上登・井上宣之・加賀谷忠治, ショットピーニング技術, 11-2(1999), 2~3.