研 究

鉄系粉末金型潤滑成形法の最適化と拔出し挙動の動的および静的摩擦解析

上田 勝彦^{☆1}, 町田 輝史^{☆2}, 岩切 誠^{☆1}, 深川 浩一^{☆1}^{☆1}日立粉末冶金(株), 〒270-2295 松戸市稔台 520.^{☆2}玉川大学工学部, 〒194-8610 町田市玉川学園 6-1-1.

Optimization of Die-wall Lubrication Compacting Method of Iron Powder and Static/Kinetic Friction Analysis of Ejection Behavior

Katsuhiko Ueda^{☆1}, Terufumi Machida^{☆2}, Makoto Iwakiri^{☆1} and Hirokazu Fukagawa^{☆1}^{☆1}Hitachi Powdered Metals Co., Ltd., 520 Minoridai, Matsudo 270-2295.^{☆2}Department of Mechanical Engineering, Tamagawa University, 6-1-1 Tamagawa Gakuen, Machida 194-8610.

Received June 5, 2001

SYNOPSIS

The present paper describes a new evaluation for ejection behavior in iron powder compacting process and optimum die-wall lubrication conditions. In the new method, ejection force is broken down to static friction force and kinetic friction force, which make it possible to explain ejection behavior more clearly. The incremental rate of kinetic ejection force is more important for surface quality of compacts than the value of static ejection force. Among three lubricants used, zinc stearate showed the highest static ejection force but the lowest incremental rate of kinetic ejection force. It also showed an excellent surface quality of the compacts. Characteristic crystalline structure gave a low shear strength, which contributed to decrease the kinetic friction. In the die-wall lubrication method, the projected area rate of lubricant particles should be 90% or more, therefore, the multiple coating method which is repetition of short time shot is requested.

KEY WORDS

high-density, compaction, die-wall lubrication, ejection, static frictional force, kinetic frictional force

1 緒 言

粉末焼結製品の高密度・高強度化に優れているとされる金型潤滑成形に関して、近年、アメリカの Zinc Corp. of America の Walter G. Ball ら¹⁻³⁾によって静電粉体塗装の技術を応用した乾式の金型潤滑法が開発され、実用化にもっとも近い手法として注目されている。乾式潤滑法の大きな利点は、従来の粉末潤滑法(原料粉末内に潤滑剤を添加する手法)と同種の潤滑剤を使用できること、さらに溶剤等を使用しないため成形体の汚染がないことである。

金型潤滑による高密度成形法の開発にあたって著者らは前報で、原料粉末への潤滑剤添加量が成形体の密度に及ぼす影響と粉末-金型間ならびに粉末間の摩擦に及ぼす影響を明らかにし、鉄系粉末に添加する成形潤滑剤量を最適化または最小化した⁴⁾。本報では、静電粉体金型潤滑法において、成形体の高密度化とともに重要な拔出し性について検討を行った。拔出し圧力を静摩擦と動摩擦の両力場で評価する新しい手法を用いて、各種潤滑剤の性能、カジリ・凝着現象の発生、潤滑方法について新たな知見を得た。

2 実験方法

2.1 供試粉末および供試潤滑剤

鉄粉は、水アトマイズ鉄粉アトメル 300 M (株神戸製鋼所、粒径: 150 μm 以下)と、それを篩で 44 μm 以下に分級したものをを用いた。

潤滑剤は、金属石鹸のステアリン酸亜鉛(平均粒径 11 μm)、ステアリン酸リチウム(平均粒径 15 μm)、ならびにワックス系潤滑剤のエチレンビスアミド(平均粒径 17 μm)である。潤滑剤を 0.8~1.4 mass% の範囲で鉄粉に添加し、V 型混合機で 20 min 間混合した。なお、金型潤滑法を適用する供試粉末は潤滑剤添加量を 0.05 mass%⁴⁾とした。

2.2 金型潤滑の方法

金型潤滑には、Fig.1 に示すような静電粉体潤滑装置⁵⁾(Gasbarre Products Inc. 製)を用いた。ホッパーエアにより流動状態にされた潤滑剤は、送り込まれた潤滑エアによってベンチュリ効果で吸い上げられ、エアとともに帯電ガンに送られる。帯電ガンエアで加速された潤滑剤粒子は、樹脂との摩擦でプラスに帯電し噴射され、アースしたダイスに接近すると

マイナスの鏡像電荷が誘起されるため静電引力によりダイス内壁面に付着する。

実験では、ダイス内の所定位置に下パンチを挿入後、成形に支障のないダイス内壁面に15mm×10mmの金属テープを貼付して潤滑剤を塗布した。そして成形を開始する前にテープを剥離し、塗布状態を金属顕微鏡で観察後、その潤滑剤粒子の投影面積比を画像解析装置で算出して塗布面積率を確認した。塗布面積率 A_c は式(1)により求めた。

$$A_c = A_i / A_d \quad (1)$$

ここで A_i および A_d は、それぞれ顕微鏡視野内における潤滑剤粒子の投影面積と金属テープ面積(ダイス内壁面積を意味する)である。

このとき潤滑エア圧を $138 \sim 276 \times 10^3 \text{ Pa}$ 、塗布時間を0.1～3sの範囲でそれぞれ変化させた。なお、帯電ガンエア圧は $207 \times 10^3 \text{ Pa}$ とした。

2.3 成形及び抜出し方法

アムスラー型万能試験機を用い、圧力200～1000MPaの範囲で円柱試験片に圧粉成形した。試験片寸法は、直径20mmで高さ30mmである。ダイスからの抜出し法の模式をFig.2に示す。固定ブロック上のダイス内にノックアウトパンチを挿入しロードセルをセットした後、クロスヘッド速度2.9mm/sでパンチを降下した。

2.4 抜出し性の評価

実験手順としては、まず粉末潤滑法での抜出し圧力を評価し、その結果を金型潤滑法に適用することにした。抜出し挙動を評価するために、抜出し荷重-変位関係を計測しX-Tレコーダに記録した。

抜出し性の評価方法を模式的にFig.3に示す。一般に、抜出し荷重-パンチストローク(変位)線図は初めの直線部と、その後の緩やかな曲線部に分かれる。直線の終点(a)の荷重は成形体とダイス壁面との最大静止摩擦力を意味し、ここから成形体が抜出され始める。その後の緩やかに上昇する曲線(b→c)

は動摩擦力の増加を示し、成形体の先端がダイスから出始める(c)点で最大値を取り、完全に抜け落ちた時点(d)で零となる。すなわち、抜出し圧力 α_k は次式によって表せる。

$$\alpha_k = \alpha_s + \Delta\alpha_k \quad (2)$$

$$\alpha_s = P_s / A \quad (3)$$

$$\Delta\alpha_k = (t+l) \cdot \tan\theta \quad (\tan\theta: \text{MPa} \cdot \text{mm}^{-1}) \quad (4)$$

ここで、 α_s は(a)点における荷重 P_s を試験片の側面積 A で除した値であり、静的抜出し圧力と定義することにした。

$\Delta\alpha_k$ は抜出し圧力の最大増加割合(動的抜出し圧力)を示す。この動摩擦挙動は、加圧終了後、ダイス壁面に発生する成形体のスプリングバック力を直接測定して抜出し行程中の動摩擦力を求めることが困難なので、(b)と(c)点を直線で結んでできる仰角 θ (degree)を評価し、動的抜出し圧力の増加係数と

Fig.2 Ejecting of green compact and measuring method of the ejection force.

Fig.1 Schematic illustration of die-wall lubrication system (electrostatic powder coating method).

Fig.3 Load-punch stroke diagram and definition of static ejection force (a) and incremental rate of kinetic ejection force (θ).

定義することにした。 t は試験片の高さ、 l は図中に示すように試験片下面からダイス下面までの距離である。この両者の和がパンチストロークであり、本実験では全て一定である。また α_s は主に側圧力、粉末のポアソン比ならびに弾性係数、金型の弾性係数に、 $\Delta\alpha_s$ は主に潤滑剤の滑性、成形体とダイス内壁面での凝着・カジリ度合い、ダイス内壁面粗さ等により影響される値である。なお、ダイス内壁面粗さ(R_t)は、加圧軸方向 $0.43\mu\text{m}$ 、円周方向 $1.0\mu\text{m}$ である。

粉末潤滑法では各条件において試験数を3回とし、その平均値を求めた。また、いずれの潤滑法においても、抜出し終了毎にダイス内壁面に残った潤滑剤等の凝着物を#800のエメリー紙で除去後、アセトンにて洗浄した。

さらに 600°C で2時間、Endothermic Gas 雰囲気中で脱ろうした円柱試験片の摺動面を、両端からそれぞれ約5 mmと中央部の3ヶ所、走査電顕(SEM)で観察した。

3 実験結果

3.1 静的抜出し圧力に及ぼす潤滑剤、成形圧力、鉄粉粒度の影響

潤滑剤添加量が及ぼす静的抜出し圧力の影響をFig.4に示す。これは、粒径 $150\mu\text{m}$ 以下の通常の鉄粉を使用し、成形圧力 700MPa 一定とした場合の例である。図から、静的抜出し圧力は潤滑剤添加量の増加にともなって低下し、その水準は潤滑剤にステアリン酸亜鉛を用いた場合が最も高く、次にエチレンビスアミド、そしてステアリン酸リチウムが最も低い値を示すことが分かる。

成形圧力と静的抜出し圧力との関係をFig.5に示す。潤滑剤添加量は一定(1mass%)とした。図から、一般に成形圧力が高くなると静的抜出し圧力が増加し成形圧力 1000MPa 以上では

Fig.4 Effects of lubricant amount and lubricant type on static ejection force in powder lubrication method (compacting pressure: 700MPa).

僅かに低下することが分かる。潤滑剤の効果を見ると、低い成形圧力では目立たないものの成形圧力 600MPa 以上で増加割合が顕著な差を示し、高圧側ではステアリン酸亜鉛が最も高く、エチレンビスアミドが次位で、ステアリン酸リチウムが最も低い値を示すことが分かる。

また、図中に中実円プロット(●)で示した曲線は、ステアリン酸亜鉛潤滑で、鉄粉粒径 $45\mu\text{m}$ 以下の値である。中空円プロット(○)のものと比較すると、低い成形圧力領域ではその影響が少ないものの、成形圧力 600MPa 以上では粒径の小さい方が約23%程度低い値になることが分かる。

3.2 動的抜出し圧力の増加係数に及ぼす潤滑剤、成形圧力、鉄粉粒度の影響

動的抜出し圧力の増加係数に及ぼす潤滑剤添加量の影響をFig.6に示す。成形は、粒径 $150\mu\text{m}$ 以下の鉄粉を使用し、圧力 700MPa で行っている。図から、一般に潤滑剤添加量が増すにつれて動的抜出し圧力の増加係数が低下すること、その傾向はステアリン酸亜鉛が最も小さく、次位がステアリン酸リチウム、そしてエチレンビスアミドの場合に最も顕著であることが分かる。

動的抜出し圧力の増加係数に及ぼす成形圧力の影響をFig.7に示す。これは潤滑剤添加量が1mass%の場合である。図から、ステアリン酸亜鉛は潤滑剤3種のうちで特異な挙動を示すことが分かる。すなわち、ステアリン酸亜鉛は成形圧力 400MPa で最大値を示し、それより高い圧力では急激に低下し 1000MPa では負の値を取るようになる。図の中実円と中空円のプロット

Fig.5 Effects of compacting pressure, lubricant type and powder grain size on static ejection force in powder lubrication method (amount of lubricant: 1 mass%).

トを比較すると、両者の傾向は鉄粉粒径にほとんど影響されないことが分かる。

これに対して、ステアリン酸リチウムは成形圧力 600 MPa 近傍で急増し、800 MPa で最大となり 1000 MPa で減少に転ずる。エチレンビスアミドは成形圧力 800 MPa までほぼ直線的に上昇し、これもまた 1000 MPa で減少に転ずる。

3.3 成形体の表面状態

抜出し工程中にダイス内壁面と接触していた鉄粉粒子の状態を知るために、代表的な成形体(成形圧力 800 MPa, 潤滑剤添加量 1 mass%) の表面を観察した。その結果を Fig.8 に示す。抜出しは上パンチから下パンチ方向へ行ったので、上パンチ近傍の成形体表面がもっとも長い摺動距離を取っている。

図(a)のステアリン酸亜鉛の場合には、抜出し初期(下パンチ側)から後期(上パンチ側)に至るまで鉄粉粒子の状態にほとんど変化が認められない。これに対して、図(b)のステアリン酸リチウムの場合には、抜出しの進行にともなってダイスとの摩擦によって生じた粒子の塑性変形が次第に大きくなるとともに表面の気孔も減少していることが分かる。図(c)のエチレンビスアミドの場合には試験片中央部からすでに粒子の大きな塑性変形と表面気孔の減少、さらに抜出し方向に沿った摺動傷が認められ、抜出し後期では凝着・焼付きの様相を呈している。

3.4 塗布面積率に及ぼす金型潤滑剤塗布条件の影響

金型潤滑法において、潤滑エア圧力ならびに塗布時間が潤滑剤の塗布面積率に及ぼす影響を Fig.9 に示す。金型潤滑剤には、摺動表面損傷の少なかったステアリン酸亜鉛を用いた。図(a)から、塗布面積率は潤滑エア圧力 200×10^3 Pa 近傍で急激

Fig.6 Effects of lubricant amount and lubricant type on incremental rate of kinetic ejection force in powder lubrication method (compacting pressure: 700 MPa).

に増加し、それ以上では徐々に増加することが分かる。なお塗布時間は 0.1 s である。また図(b)から、塗布面積率は塗布時間とともに増加し、その傾向は 2 s 以上でやや緩やかになることが分かる。

潤滑エア圧力 207×10^3 Pa, 時間 0.1 s 一定とし、塗布回数と面積率の関係を調査した結果を Fig.10 に示す。図から、塗布回数 1 回では面積率 59.6% と低いものの、2 回では潤滑剤粒子がほぼダイス内壁面全体を覆う状態の 95.5% と高い水準になることが分かる。

3.5 金型潤滑法における静的抜出し圧力および動的抜出し圧力の増加係数

潤滑剤の塗布面積率が静的抜出し圧力および動的抜出し圧力の増加係数に及ぼす影響を Fig.11 (a), (b) に示す。塗布面積率は潤滑エア圧力、時間ならびに塗布回数を調整して変化させた。成形圧力は 700 MPa である。図から、静的抜出し圧力および動的抜出し圧力の増加係数とともに、塗布面積率が大きくなるにつれて単調に低下することが分かる。ちなみにステアリン酸亜鉛を 1 mass% 添加した粉末潤滑法と同等水準の静的抜出し圧力と動的抜出し圧力の増加係数は、塗布面積率 90% 以上で達成できることが分かった。

4 考 察

4.1 抜出し圧力における静摩擦力と動摩擦力について

金型潤滑成形において重要な評価の一つとされる抜出し性

Fig.7 Effects of compacting pressure and powder grain size on incremental rate of kinetic ejection force in powder lubrication method under various lubricants (amount of lubricant: 1 mass%).

について検討を行った。抜き出し性の評価は、抜き出し荷重の減少と成形体の形状保持および性状保存のために必要であると考えられる。通常、抜き出し荷重は成形荷重に比べて小さいの

で、後者の視点の方が重要である。一般に、抜き出し性はJPMA (P13)に規定されているように、抜き出し工程中の最大荷重値を評価する。しかし、そのみでは得られた成形体表面性状の

Fig. 8 Appearances of green compact surfaces, observed by a scanning electron microscope (compacting pressure: 800 MPa, amount of lubricant: 1 mass%).

Fig.9 Effects of lubrication air pressure and coating time on rate of projected area of lubricant (charge gun air: $207 \times 10^3 \text{Pa}$).

Fig.10 Increase of rate of projected area of lubricant by repeated coating (lubrication air: $207 \times 10^3 \text{Pa}$, coating time: 0.1s, charge gun air: $207 \times 10^3 \text{Pa}$).

相関に満足できない事例がしばしば発生している．例えば，実験結果のFig.4およびFig.5に示す静的拔出し圧力の大小は，Fig.8に示す成形体表面の性状に全く対応しないことが分かる．そこで，拔出し性または拔出し圧力を構成要素すなわち静摩擦力と動摩擦力に区別して評価する手法を試みた．

その結果として，Fig.6やFig.7に示すように，動的拔出し圧力の増加係数が小さいものは成形体表面性状も良好であることなど，その両者の間に強い相関が見出された．拔出し性の評価には動摩擦力の変化を精確にとらえることが必要であることを明らかにした．

いま純鉄系の一般的な成形条件である潤滑剤添加量1mass%，圧力700MPaでの静的拔出し圧力は，Fig.4から，ステアリン酸亜鉛14.4MPa，ステアリン酸リチウム10.7MPaとなる．また，動摩擦工程の最終点(Fig.3のb点)における拔出し圧力は，荷重-ストローク線図から，ステアリン酸亜鉛は15.2MPa，ステアリン酸リチウムは13.8MPaとなる．したがって，拔出し中の最大荷重値のみを評価する従来法によれば，ステアリン酸リチウムの方がステアリン酸亜鉛よりも拔出し性の優れた潤滑剤ということになるが，Fig.6から，ステアリン酸亜鉛の動的拔出し圧力の増加係数はステアリン酸リチウムに比べ2.7倍程度小さく，しかも表面性状も良好であった．

ステアリン酸亜鉛が最も優れた拔出し性を示した原因の一つとして，次のことが考えられる．ステアリン酸亜鉛の結晶は $(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO})_2\text{Zn}$ の化合物の層状構造である．この層は金属

Fig.11 Relationship between (a) static ejection force, (b) incremental rate of kinetic ejection force and rate of projected area of lubricant in die-wall lubrication method (die lubricant: Zinc-stearate, powder lubricant: 0.05 mass% Zinc-stearate, compacting pressure: 700 MPa).

原子が同一面上に順序よく並んで形成された金属平面と、この平面に対し、くし状に規則正しく並んだ脂肪酸鎖とから成っていると言われる⁹⁾。そのため層間で結晶がすべり破壊しやすい。さらに亜鉛は六方最密格子の結晶を持ち、異方性が強く強度が小さい。これらの特性が相まって、抜出し時に潤滑剤粒子のせん断劈開が効率良く進行した結果、潤滑剤微粒子が成形体とダイス内壁面との境界に数多く存在するようになり良好な抜出し性を示すものと考えられる。Fig.7で動的抜出し圧力の増加係数が400MPaで最大になったのは、このような低圧力域では抜出し時に発生するせん断力が低く、潤滑剤粒子の層間すべりが小さかったためと考えられる。

またステアリン酸リチウム($(C_{17}H_{35}COO)Li$)の潤滑性は、ステアリン酸亜鉛と同様に結晶の層間割れによって生ずると考えられるが、結晶が小さく層間距離も短いので層間強度が大きくなり、せん断破壊がステアリン酸亜鉛のように容易ではないのであろう。

エチレンビスアミド($((C_{17}H_{35}CONH)_2(CH_2)_2)$)のような合成ワックスは、主に粒子の延性によって潤滑性を発現する。しかし粉末冶金の抜出し工程のように摺動距離が比較的長く、摩擦境界面の凹凸が大きな環境下では、十分にその性能を発揮しないのであろう。

次に、鉄粉粒度が静的抜出し圧力と動的抜出し圧力の増加係数に及ぼす影響について考察する。Fig.12は成形体密度に

及ぼす成形圧力の影響を示す。成形体密度は抜出した成形体の直径、高さ、ならびに重量を測定して算出した。例えば200MPaの低圧成形では鉄粉粒度による密度差は 0.16 Mg/m^3 と比較的大きいが、成形圧力の上昇とともにその差は減少し、1000MPaではわずか 0.04 Mg/m^3 となる。一方、Fig.5の鉄粉粒度と静的抜出し圧力の関係では、600MPa以上の圧力で粒度の影響が顕著になっていた。よって鉄粉粒度の大小による静的抜出し圧力の差異は成形体密度には直接関係するものではなく、鉄粉粒子とダイス壁面との実質接触面積の相違によるものと考えられ、また動的抜出し圧力の増加係数(Fig.7)は、ステアリン酸亜鉛粒子の劈開破壊が容易に進行し十分に潤滑剤粒子膜を形成するため、鉄粉粒度の影響を受けないものと考えられる。

成形圧力をパラメーターにした実験では1000MPa以上で静的抜出し圧力ならびに動的抜出し圧力の増加係数が低下する傾向にある。これは、鉄粉粒子とダイス壁面の実質接触面積、金型の弾性変形及び成形体の剛性等が変化するためと考えられる⁷⁾。

4.2 金型潤滑法における抜出し性

前述のように、金型潤滑法では塗布面積率約90%で粉末潤滑法と同等の抜出し性を示す。粉末潤滑法で鉄粒子と潤滑剤粒子が単純に混合していると仮定して計算すると、1 mass%のステアリン酸亜鉛を鉄粉に添加して圧粉した密度 7.15 Mg/m^3 の成形体の潤滑剤体積含有率は6%程度になる。したがって、

Fig.12 Effects of compacting pressure and powder grain size on green density in powder lubrication method (lubricant: 1 mass% Zinc-stearate).

金型潤滑における塗布面積率も6%近傍で粉末潤滑法と同等の抜出し性を示すべきであるのに、実験では約90%の高い面積率が必要であった。これは混合機で十分に混合することにより、鉄粉粒子の周りを数多くの潤滑剤粒子が取り巻く状態になっているためと思われる。

高い塗布面積率を得るのに有効な静電粉体金型潤滑手法は複数回の塗布(多段塗布法)を行うことが必要であった。Fig.10の実験では一回当たりの塗布時間は0.1sである。2~3回の塗布を繰り返しても所要時間はわずかで、工業的には十分に有効な手法であると言える。開放された空間内では、塗布の際に発生する空気の流れが面積率の大小を大きく左右する。多段塗布法では、空気流による付着潤滑剤粒子の脱落、あるいは空気流同士の衝突による粒子の付着阻害等の悪影響を最小限にとどめることができ、高い面積率を得ることができるものと考えられる。

粉末潤滑法は圧粉成形中の粉末間潤滑にまず効果的であり、金型潤滑法は成形体と金型間潤滑に効果的である。後者は特に抜出し性に影響が現れる。一方、成形体の高密度化には原料粉末内への潤滑剤添加量の削減が有効である。前報の結果から純鉄系や鉄-黒鉛系の圧粉成形には、粉末間摩擦を考慮しても極微量の0.05 mass%添加でよいという知見を得た。続いて本実験では成形体と金型(ダイス内壁面)間の潤滑を補うための金型潤滑を施し、抜出し性を評価した。その結果、潤滑剤添加量0.05 mass%の試料粉末を用いた成形においても十

分な抜出し性が得られ、静電粉体金型潤滑による高密度化への指針を得ることができた。

5 結 論

金型潤滑を用いた高密度化粉末成形法の開発を進めるにあたり、潤滑法、潤滑剤、成形圧力、ならびに鉄粉粒度が円柱成形体の抜出し性に及ぼす影響を検討した。ことに、抜出し工程を静摩擦段階と動摩擦段階に分けることにより、次の新たな知見を得た。

- (1) 静的抜出し圧力と成形体表面性状の相関は乏しい。動摩擦力下での動摩擦増分による評価が重要で、成形体表面性状に大きな影響を与える。
- (2) 鉄系粉末の成形では、ステアリン酸リチウムやエチレンビスアミドなどの潤滑剤に比較して、劈開破壊性に優れたステアリン酸亜鉛の静的抜出し圧力は高いが、動的抜出し圧力の増加係数は小さく潤滑性に優れている。
- (3) 成形圧力が大きくなるといずれの潤滑剤も静的抜出し圧力が大きくなる。また動的抜出し圧力の増加係数はステアリン酸亜鉛の場合、他の潤滑剤に比べきわめて低水準で、しかも成形圧力が増すにつれて減少し、鉄粉粒径が及ぼす影響は小さい。
- (4) 静電粉体金型潤滑法において、潤滑剤粒子の塗布投影面積率が約90%以上で良い潤滑性を示す。それには1回当たりの塗布時間を短くした多段塗布法が適している。

文 献

- 1) W.G.Ball, F.W.Hinger, R.A.Mckotch and H.D.Pfingstler: "REPLACING INTERNAL WITH EXTERNAL LUBRICANTS", ADVANCES in Powder Metallurgy & Particulate Materials, 3(1994)71-82.
- 2) W.G.Ball, F.W.Hinger, R.A.Mckotch, H.D.Pfingstler and R.R.Phillips: "REPLACING INTERNAL WITH EXTERNAL LUBRICANTS: PHASE II", ADVANCES in Powder Metallurgy & Particulate Materials, 1(1995)2-11-2-23.
- 3) W.G.Ball, P.F.Hibner, F.W.Hinger, J.E.Peterson and R.R.Phillips: "REPLACING INTERNAL WITH EXTERNAL LUBRICANTS: PHASE III TRIBOSTATIC APPLICATION OF LUBRICANTS ONTO DIE WALLS", ADVANCES in Powder Metallurgy & Particulate Materials, 2(1996)6-3-6-14.
- 4) 上田勝彦, 町田輝史: "鉄系粉末の金型潤滑成形における添加潤滑剤の挙動", 粉体および粉末冶金, 47(2000)1051-1055.
- 5) W.G.Ball, P.F.Hibner, F.W.Hinger, J.E.Peterson and R.R.Phillips: "New Die Wall Lubrication System", The International Journal of Powder Metallurgy, 33(1997)23-24.
- 6) 吉田時行, 進藤信一ほか: 金属せっけんの性質と応用, 幸書房, (1995)36.
- 7) 沖本邦郎, 佐藤富雄, 山川俊夫: "金属圧粉体を金型から押し抜くときの圧粉体と金属間の摩擦係数について", 九州工業技術試験所報告, 13(1975)742.