



I. Shimizu

塑性加工における潤滑性及び仕上げ面精度に対する被加工材表面トポグラフィの影響

清水 一郎*

1. はじめに

塑性加工において流体潤滑剤は、工具／被加工材界面の摩擦低減や製品表面の保護、加工熱発散などのために幅広く用いられているが、その際の潤滑剤選択は、加工性や最終製品の表面精度に多大な影響を及ぼす。例えば、粘度の高い潤滑剤を用いれば摩擦低減に有効である反面、潤滑膜厚が増大するために表面あれが成長し、最終的な表面精度が低下する。一方、低粘度潤滑剤を用いれば表面あれ抑制には有効であるが、潤滑膜切れを起こしやすく摩擦力が増大してしまう。すなわち、流体潤滑を伴う塑性加工において、潤滑性と仕上げ面精度とは相反する要素であり、両立が難しいとされてきた。

これに対して近年、潤滑性（摩擦力低減）と仕上げ面精度向上（表面あれ抑制）を両立できる可能性を持つ2次元的な潤滑機構が提案された。Mizunoら¹⁾は改良した平面ひずみ圧縮試験において、被加工材表面に存在する微小な凹凸による潤滑性向上効果を最初に確認し、「微視的塑性動流体潤滑機構（Micro Plasto Hydro Dynamic Lubrication mechanism, MPHDL）」と名付けた。この機構においては、被加工材表面の微小な凹部（ポケット）に捕捉された潤滑剤が、塑性加工中の高い接触圧力とせん断応力によって境界接触領域へ漏出することにより摩擦低減をもたらすと説明されている。その後、小豆島ら²⁾³⁾は、独自に開発した透明ダイスによる直接観察手法によって MPHDL 機構の確証を示した。続いて Bechら⁴⁾は、潤滑剤漏出に対する種々の加工条件の影響を調べるとともに、類似した機構として「微視的塑性静流体潤滑機構（Micro Plasto Hydro Static Lubrication mechanism, MPHSL）」を提案し、被加工材微小ポケット内の潤滑剤が、加工に伴う静水圧上昇によって境界接触領域へ漏出すると説明した（これら2つの潤滑機構における日本語称は池の解説⁵⁾に基づく。以下ではこれらをまとめて微視的塑性流体潤滑機構と呼ぶ）。さらに、これらの2次元的な潤滑機構については、木原ら⁶⁾、Felderら⁷⁾、Wangら⁸⁾、Steinhoffら⁹⁾、Geigerら¹⁰⁾、Schmoeckelら¹¹⁾、Loら¹²⁾によって詳細な検討が行われており、特に木原らは、被加工材ポケットに捕捉された潤滑剤が、静水圧上昇に伴って工具表面の微小溝を伝わって漏出する「チャンネルジャッキング機構（Channel Jacking Mechanism）」を新たに提案している。

これら多くの研究成果にも関わらず、被加工材表面トポグラフィ（表面凹凸の寸法・形状）が2次的潤滑機構に及ぼす影響については、未だほとんど明らかにされていない。このような観点から筆者らは、微視的塑性流体潤滑機構に影響する因子の中で、特に被加工材表面の微視的形態に着目し、初期の表面形態および加工に伴う局所的な形状変化が2次的潤滑機構に及ぼす影響について、実験的および解析的に検討を行っている¹³⁾¹⁴⁾。具体的には、異なる表面凹凸を設けた板材の引抜き加工を行い、初期表面形態が潤滑メカニズムに及ぼす影響について実験的に調べた。また、剛粘塑性有限要素法を用いて、被加工材表面に存在する潤滑剤ポケット内の静水圧変化および潤滑剤挙動について解析を試みた。本稿では、これまで行ってきた研究内容と得られた成果の概要について紹介する。

2. 実験方法

2.1 試験片

用いた試験素材は、板厚 2mm のアルミニウム板材である。まず、素材から図1の形状に切り出し、 $1\mu\text{mRa}$ 以下まで表面研磨後に、設定した領域の表面形態を変化させた。

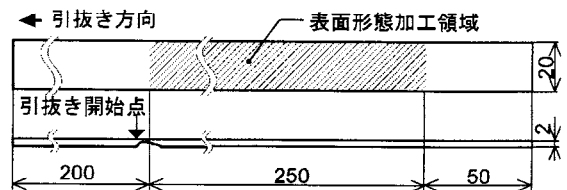
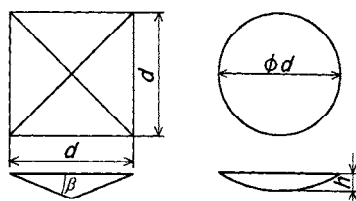


図1 引抜き試験片 (mm)

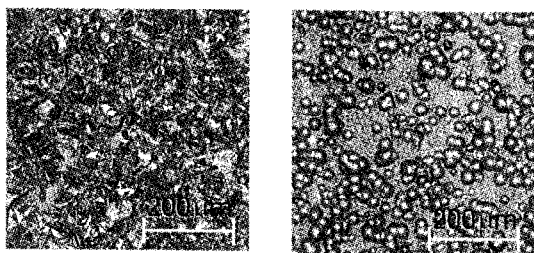
試験片表面に設ける微小形態としては、図2に示すような四角錐または部分球をコイニング加工によって規則的に縦横配置した確定論的形態と、図3に示すようなアルミナ粉(#54)またはガラス球(#80)を用いたブラスト加工による確率論的形態とした。確定論的形態については、四角錐の斜面角を $\beta=4, 8, 12^\circ$ 、部分球の曲率半径を 5.5mm とし、引抜き方向に間隔 Dr で、幅方向に均等に N 列配置した。また、コイニング加工後には表面を再び研磨し、コイニングに起因するポケット周囲の盛り上がりを取り除いた。一方、確率論的形態は、ブラスト加工における噴射圧を変化させることによって形態密度を変化させ、

三次元的な算術平均粗さ $Sq^{1.5)}$ で表現した。



(a) 四角錐 (b) 部分球

図2 潤滑剤ポケット (確定論的表面形態)



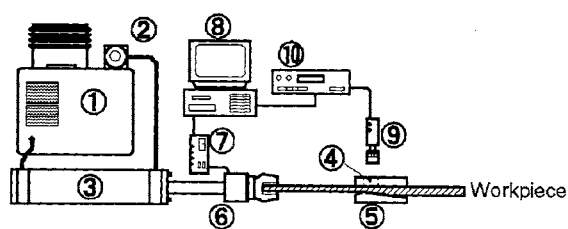
(a) アルミナ粉の場合

(b) ガラス球の場合

図3 ブラスト加工による確率論的表面形態

2. 2 引抜き試験

引抜き試験は図4に示す装置を用いて行った。この装置は主に、油圧系、加工系、画像処理系で構成されており、上ダイスに強化ガラスを用いることによって、引抜き途中の試験片表面をCCDカメラにて直接観察することができる^{2) 3) 13)}。また、引抜き力はシリンダに取り付けたロードセルで測定し、画像と同期させながらパーソナルコンピュータに記録される。なお、引抜き加工のための傾斜は下ダイスのみに設けており、ダイス角は $\alpha=3, 4^\circ$ とした。



- | | |
|---------|----------|
| ①油圧ポンプ | ②バルブ類 |
| ③油圧シリンダ | ④強化ガラス |
| ⑤引抜きダイス | ⑥ロードセル |
| ⑦ひずみアンプ | ⑧コンピュータ |
| ⑨CCDカメラ | ⑩ビデオレコーダ |

図4 引抜き試験装置

表面形態を変化させた試験片表面には、動粘度 ν の異なる数種類のパラフィン系純鉱油を塗布した (以下では動粘度 ν を 313K での値で代表させる)。粘度-圧力指数は、いずれの潤滑剤についても約 2.2

$\times 10^{-2}$ (1/MPa) であった。一方、試験片裏面に塗布する潤滑剤としては、摩擦係数が低く加工中に変動しにくい固体潤滑剤を用いた。

3. 実験結果と考察

3. 1 試験片表面凹部からの潤滑剤漏出

引抜き途中における潤滑剤挙動の例として、四角錐形状の潤滑剤ポケットを用いた場合の潤滑剤漏出の様子を図5に示す。図中の変数 r は板厚減少率を表し、引抜き前後で板厚が t_0 から t まで変化したとすると、 $r = (t_0 - t)/t_0 \times 100$ で与えられる。ポケット内が流体潤滑剤で満たされた状態から引抜き加工を行うと、この例のようにポケットの前方および後方に潤滑剤の漏出が生じる。これは小豆島ら³⁾や Bechra⁴⁾によって報告された結果と同様の局所的な潤滑膜形成であり、平均的な摩擦を減少させ、引抜き力を低減する効果をもたらす。なお、ポケットから見て引抜き前方への漏出は MPHSL 機構、後方への漏出は MPHDL 機構によると考えられ、本例では双方とも生じているが、加工条件等を制御すれば排他的に生じさせることも可能である。

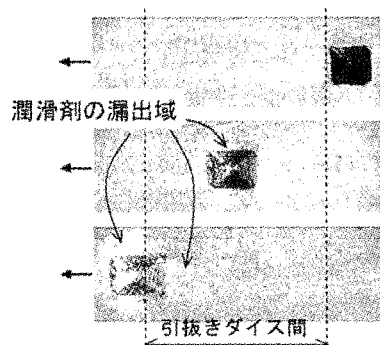
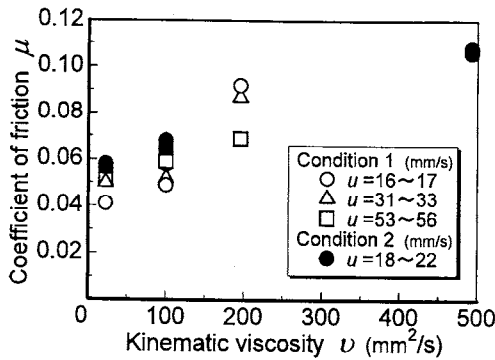


図5 四角錐ポケットからの潤滑剤漏出
($\nu=195.2\text{mm}^2/\text{s}$, $r=20\%$, $d=1100\mu\text{m}$)

3. 2 表面形態による摩擦係数の変化

四角錐ポケットを表面に配置した試験片について、潤滑剤粘度に伴う摩擦係数の変化を図6に示す。潤滑剤ポケットの形状にかかわらず、全体的に粘度が高くなるほど摩擦係数が大きくなる傾向が認められた。すなわち、低粘度の潤滑剤において低い摩擦係数が得られていることは、少なくともここで用いた試験条件下では、加工途中に潤滑剤ポケットから漏出した潤滑剤が工具/被加工材界面の広範囲に至ることによって、「流体潤滑的」な効果をもたらしたことを示唆していると考えられる。なお、この傾向は Mizuno ら¹⁾が平面ひずみ圧縮-摩擦試験によって得た結果とも定性的に一致している。



Condition 1 ($\beta=22^\circ$, $d=1.2\text{mm}$, $N=3$)
Condition 2 ($\beta=4^\circ$, $d=0.8\text{mm}$, $N=4$)

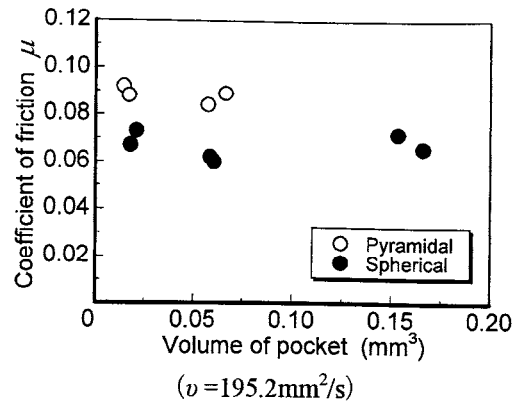
図6 潤滑剤粘度に伴う摩擦係数の変化
(四角錐ポケット)

図6の条件1に関しては、引抜き速度が摩擦係数に及ぼす影響についても調べているが、潤滑剤粘度が $100\text{mm}^2/\text{s}$ 以下では、引抜き速度が大きくなるほど摩擦係数も大きくなり、Mizuno ら¹⁾の結果と一致した。しかしながら、それ以上に粘度が高くなると、逆に引抜き速度が大きいほど摩擦係数が小さくなる結果となった。これは、高粘度潤滑剤では速度が大きくなるほど潤滑剤ポケット後端での潤滑剤引込みが顕著となり、後方への潤滑剤漏出による二次的潤滑効果が向上するためと考えられる。

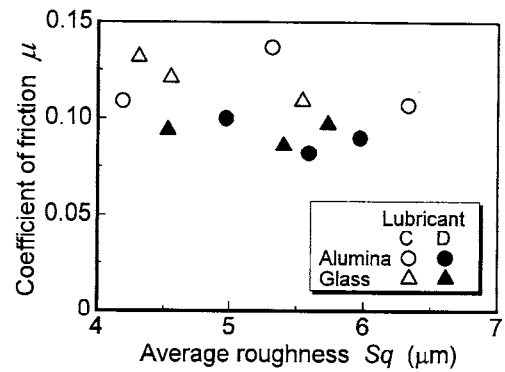
次に、表面形態に伴う摩擦係数の差異を図7に示す。確定論的表面形態を設けた場合では(図7(a))、四角錐よりも部分円形状の方が摩擦が低減される結果となった。そこで実際に後方への潤滑剤漏出を比較してみると、後者の方が、漏出がより広域に渡っていた。この結果は、部分円形状の方が微視的塑性流体潤滑機構の発動に適していることを示唆している。なお、潤滑剤ポケットの体積が異なっても摩擦係数はほとんど変化しなかった。引抜き後もポケットが残存していることや、潤滑剤漏出面積にほとんど差が無いことを考慮すれば、漏出した潤滑剤量を超えるポケット容積は潤滑に寄与しないと予想される。

一方、確率論的表面形態の場合(図7(b))、図3に示すようにアルミナ粉およびガラス球のブラスト加工による見かけの形態が大きく異なるにもかかわらず、摩擦係数には明確な違いが認められなかった。また、初期表面粗さの影響についても傾向が認められず、総じて確定論的表面形態より高い摩擦係数を示した。これらの結果は、全面が覆われるような確率論的表面形態を用いた場合、その不規則性から巨視的な境界潤滑に近い混合潤滑状態となり、局所的な形態の違いがほとんど影響を及ぼさないことを示していると考えられる。以上の結果は、二次的潤滑機構

を効率的に発生させるためには、確定論的表面形態を適切に配置する方が望ましいことを示している。



(a) 確定論的表面形態



(Lubricant C: $\nu=195.2\text{mm}^2/\text{s}$)
(Lubricant D: $\nu=492.5\text{mm}^2/\text{s}$)

(b) 確率論的表面形態

図7 初期表面形態による摩擦の変化
($u=14\sim 16\text{mm/s}$, $r=18\%$)

3.3 微視的塑性流体潤滑機構の制御

前節まで、被加工材表面の微視的形態が塑性流体潤滑機構に少なからぬ影響を及ぼし、摩擦状態を支配することを実験的に示してきた。ここでは、表面形態を変化させることによって塑性流体潤滑機構の制御を試みた一例を紹介しておきたい。

微視的塑性流体潤滑の発生については、微小四角錐ポケットを表面に持つ被加工材の引抜き加工に関して、小豆島ら²⁾により次のように説明されている。

- 被加工材の塑性変形に伴って、ポケット内部に封じ込められている潤滑剤の静水圧 q_0 が上昇する。
- 同時に、被加工材と工具の相対運動により、ポケット斜面上で動圧 q の上昇が発生する。

- 静水圧と動圧の和 q_0+q がダイスの接触圧 p を超えると、潤滑剤の漏出が開始される。このとき、ダイス接触圧は引抜き前方ほど低いので、動圧が低ければ前方への漏出（図 8 (a), MPHSL) が、動圧が高ければ後方への漏出（図 8 (b), MPHDL) が生じる。

このモデルに基づくと、各加工条件に応じてポケットの形状を変化させることにより、MPHDL および MPHSL の発生を制御することが可能になると期待される。

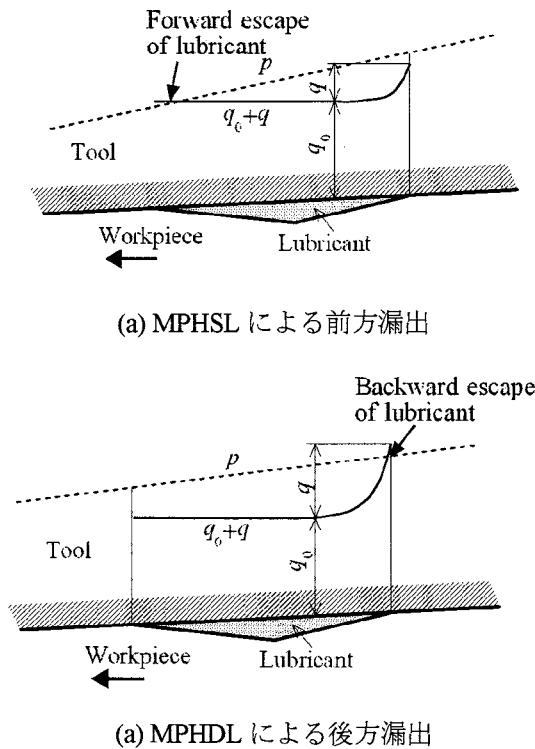
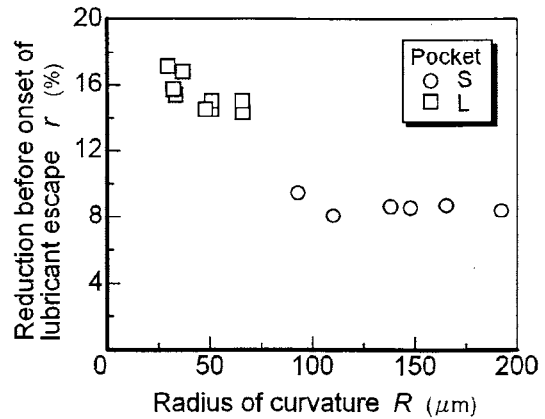


図 8 引抜き加工における被加工材表面ポケットからの潤滑剤漏出モデル

このことを確かめるために、四角錐ポケットを用いて、ポケット後端の曲率半径 R を種々に変えた試験片を準備し、同じ潤滑剤および加工速度で引抜き試験を行って、潤滑剤漏出の開始点の変化を調べた結果を図 9 に示す¹³⁾。斜面角 β が大きいポケットの場合、潤滑剤漏出の開始位置は、ポケット後端の曲率半径が大きくなるほど早くなるが、斜面角 β が小さい場合には、曲率半径に関わらずほぼ一定となることがわかる。この結果は、四角錐ポケットの斜面が動圧発生に重要な役割を果たしており、斜面角が十分小さいか、斜面角が大きくとも曲率半径を大きくすれば、十分な動圧発生による潤滑剤漏出の制御が可能であることを示唆している。



(Pocket S: $\beta \approx 3.5^\circ$, Pocket L: $\beta \approx 11.5^\circ$)

図 9 MPHDL による潤滑剤漏出開始位置に対するポケット後端曲率半径の影響

4. 有限要素解析

4.1 解析方法

被加工材ポケット内に封じ込められた潤滑剤における、引抜き加工に伴う静水圧変化と潤滑剤挙動を調べるために、剛粘塑性有限要素法を用いてシミュレーション解析を試みた。

被加工材は Mises 型の剛塑性体とし、 n 乗硬化型の応力-ひずみ関係

$$\bar{\sigma} = 321\bar{\varepsilon}^{0.08} \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

に従うものとした。ここで、 $\bar{\sigma}$ は相当応力、 $\bar{\varepsilon}$ は相当塑性ひずみ、 n は加工硬化指数である。一方、潤滑剤には粘塑性構成式

$$\sigma_{ij} = 2\eta\dot{\varepsilon}_{ij} - p\delta_{ij} \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

を用いた。ここで、 η は粘度、 p は圧力、 δ はクロネッカーデルタである。潤滑剤粘度の圧力依存性は、

$$\eta = \eta_0 \exp(\varphi p) \quad (\text{MPa}\cdot\text{s}) \quad (3)$$

で与え、工具/被加工材間の摩擦条件には、アモン・クーロンの摩擦則を用いた。なお、以下では実験に合わせて、 $\eta_0 = 1.16 \times 10^{-6} \text{MPa}\cdot\text{s}$ 、 $\tau = 22.2 \text{GPa}^{-1}$ としている。

解析対象としたモデルは、図 10 に示すように、微小な潤滑剤ポケットを縦横一定間隔で表面上に設けた金属板材の引抜き加工とした。なお、隣接するポケットは互いに影響を及ぼさない程度に充分離れているものとする。この被加工材を、図 11 のように上側にのみダイス角 α を設定したダイス間で、速度 2mm/s で引抜くことによって板厚を減少させる。なお、板幅は板厚に比べて十分に大きく、寸法が変化しない平面ひずみ状態と仮定する。本来の引抜き

加工では板材がダイス間に連続的に供給されるが、ここでは有限要素解析を容易にするために、被加工材の長さをポケット部分に影響を与えない程度にとどめた。また、ポケットの形状は、図11に示すように、三角断面を持つタイプAと、平坦底を持つタイプBの2種類を設定した。

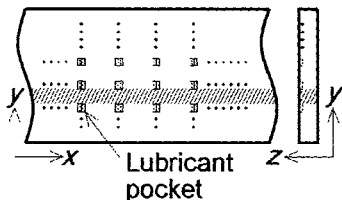


図10 潤滑剤ポケットを持つ引抜き加工モデル

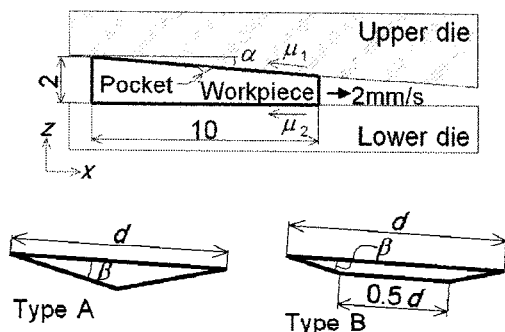


図11 解析モデルと潤滑剤ポケット形状

このような問題に対して有限要素法を適用する場合、厳密には3次元モデルが有効であるが、被加工材全体とポケットの寸法差が大きいため、要素分割において節点数および要素数を極度に増やさなければならない。しかしながら図10のモデルをそのまま2次的に要素分割すると、ポケットは板幅方向に続く切り欠き状になってしまう。そこで、次のような手順に沿って解析を行う新たな手法を提案した。

第1段階：まず、ポケット内部を被加工材と同じ材料としたモデルを用いて解析を行い、ポケット左右端における各変形段階での節点変位を記録しておく。

第2段階：次に、同じ要素分割モデルにおいてポケット内部を潤滑剤（剛粘塑性体）として解析を行う際に、ポケット左右端の節点に、先に求めた節点変位を与えることによって、ポケットの変形を拘束する。

このようにポケットに変形拘束を与えることは、図10に示す被加工材において、斜線部分のようにポケットが存在しない領域によってポケットの変形が制限されることに対応している。

4.2 解析結果

ポケットの位置における板厚減少率 $r=10\%$ の際の相当応力分布およびポケット形状を図12に示す。潤滑剤ポケットは引抜き加工に伴って、明らかに薄く、長く変形しており、ポケット下部における強い応力勾配のために、ポケット周辺の相当応力分布は大きく変化している。この結果は、ポケット下部の材料流動が、局所的にポケットを閉じる方向へ作用していることを表している。

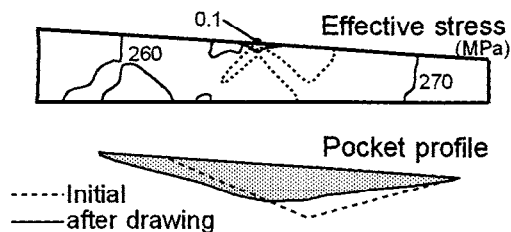


図12 引抜き後の相当応力分布とポケット形状変化 ($r=10\%$, $\alpha=4^\circ$, $\beta=20^\circ$)

次に、ポケットに捕捉されている潤滑剤内の静水圧上昇とダイス圧の変化の様子を図13に示す。この条件においては、板厚減少率 $r=7\%$ に達した際にダイス圧が最大値をとり、その後、徐々に減少する傾向を示す。一方、潤滑剤内の静水圧は上昇を続け、最終的に $r=17\%$ でポケット前端的ダイス圧に達することがわかった。すなわちこの際に、ポケット前端より潤滑剤の漏出が開始すると予想される。このことは、Sørensen ら¹⁶⁾ によって実験的に観察された結果とほぼ一致している。

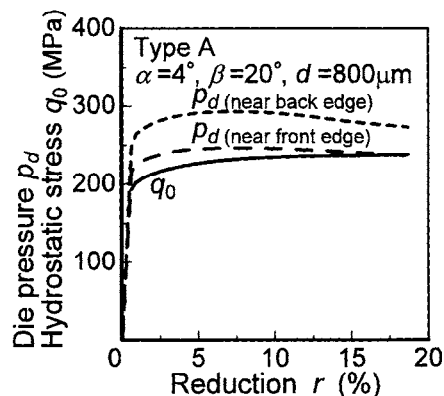


図13 ダイス圧およびポケット内部における静水圧の引抜き加工に伴う変化

最後に、ポケット形状による潤滑剤内の静水圧変化を図14に示す。静水圧は、ポケット斜面角が大きくなるほど減少する傾向を示しており、ポケット形状が潤滑剤内の静水圧に影響を及ぼすことを示唆している。一方、ポケットの寸法が変化しても、静

水圧はほぼ同一の値となることがわかる。さらに、平らな底面を持つタイプBのポケットにおいては、若干ではあるもののタイプAより静水圧が増加している。これらの結果は、ポケット形状が2次的潤滑機構の発動に不可欠な静水圧上昇にも影響する可能性を示している。

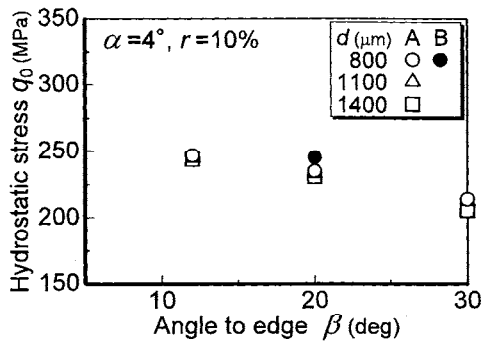


図 1 4 潤滑剤内の静水圧上昇に対するポケット形状の影響

5. まとめ

塑性加工における潤滑性と仕上げ面精度向上の両立に適した2次的潤滑機構について、特に被加工材表面の微視的形態制御からその最適化を目指すアプローチについて述べた。

アルミニウム板材の引抜き試験から、平均的な引抜き力が、表面に確定論的な潤滑剤ポケットや確率論的な凹凸を設けることによって低下することを確認した。確定論的表面形態を設けた場合には、ポケット形状が摩擦係数低下に寄与する結果が得られた。一方、確率論的表面形態では、局所的形態が異なっても摩擦係数に明確な変化傾向がなく、潤滑剤粘度が低くなると摩擦係数が上昇した。この結果は境界潤滑に近い混合潤滑状態となったことを示していると推測される。これらの違いを考慮すると、微視的塑性流体潤滑機構を効率的に利用するには、確定論的表面形態を適切に配置することが望ましいと考えられる。

次に、解析的アプローチの第1段階として、引抜き試験における潤滑剤ポケット内の静水圧変化に関して剛粘塑性有限要素解析を行った。その結果、ポケットの斜面角が小さくなるほど静水圧が上昇し、微視的塑性流体潤滑機構が促進される可能性が高いこと、また、ポケットの体積は静水圧上昇にほとんど影響しないことを示した。

これらの研究成果は、摩擦低減と仕上げ面精度向上の両立という目的には未だ十分とはいえ、基礎

的検討の域を脱してはいないものの、被加工材表面トポグラフィの最適化が目的達成に十分な可能性を有していること、その最適化の方向性を示すことができたと考えている。今後、本研究のさらなる発展を目指したい。

最後に、本研究に助成頂いた(財)天田金属加工機械技術振興財団に深く感謝する。また、研究実施に際しご協力頂いた元岡山大学大学院生、西江智之氏(現:三菱電機(株))、小寺功史氏(現:(株)化繊ノズル製作所)に謝意を表す。

参考文献

- 1) Mizuno, T. and Okamoto, M., Journal of Lubrication Technology, Trans. ASME, **104** (1982), 53.
- 2) 小豆島・坪内・工藤・古田・峰村, 塑性と加工, **30-347** (1989), 1631.
- 3) Azushima, A., Uda, M. and Kudo, H., Annals of the CIRP, **40-1** (1991), 227.
- 4) Bech, J., Bay, N. and Eriksen, M., Wear, **232** (1999), 134.
- 5) 池, 塑性と加工, **42-485** (2001), 487.
- 6) 木原・片岡・相澤, 塑性と加工, **33-376** (1992), 556.
- 7) Felder, E. and Samper, V., Wear, **178** (1994), 85.
- 8) Wang, Z., Kondo, K. and Mori, T., ASME Journal of Engineering for Industry, **117** (1995), 351.
- 9) Steinhoff, K., Rasp, W. and Pawelski, O., Journal of Materials Processing Technology, **60** (1996), 355.
- 10) Geiger, M., Engel, U. and Pfestorf, M., Annals of the CIRP, **46-1** (1997), 171.
- 11) Schmoeckel, D., Prier, M. and Staevs, J., Annals of the CIRP, **46-1** (1997), 175.
- 12) Lo, S.-W. and Horng, T.-C., ASME Journal of Tribology, **121** (1999), 633.
- 13) Shimizu, I., Andreasen, J. L., Bech, J. I. and Bay, N., Journal of Tribology, Trans. ASME, **123-2** (2001), 290.
- 14) Shimizu, I., Martins, P. A. F., Bay, N., Andreasen, J. L. and Bech, J. I., Proc. 2nd International Conference on Tribology in Manufacturing Processes, **2** (2004), 703.
- 15) Stout, K. J. ed., Development of Methods for the Characterisation of Roughness in Three Dimensions, (2000), Penton Press, 219.
- 16) Sørensen, C. G., Bech, J. I., Andreasen, J. L., Bay, N., Engel, U. and Neudecker, T., Annals of the CIRP, **48-1** (1999), 203.