

潤滑性および仕上げ面精度向上を目的とした 表面マイクロトポグラフィの最適化に関する研究

岡山大学 工学部機械工学科

助手 清水一郎

(平成 12 年度研究開発助成 AF-2000005)

キーワード：トライボロジ、流体潤滑、表面トポグラフィ

1. 研究の目的と背景

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、その潤滑剤選択や潤滑条件の決定は未だ経験によるところの大きいのが実状である。これに対して、近年における高精度化への要求に伴い、最終表面を左右する潤滑状態の最適化が強く求められつつある。そのためにはまず、工具／被加工材界面における潤滑状況およびそのメカニズムを正確に把握することが必要不可欠である¹⁾。

一般に潤滑剤が高粘度であれば、潤滑膜厚が増大するために摩擦低減に有効である反面、表面あれの成長を助長する。一方、低粘度潤滑剤を用いれば膜厚が薄いので表面あれ抑制に有効であるが、摩擦力の増大を招き摩耗の原因となる。このように、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、塑性加工における2次的な潤滑機構として微視的塑性動流体潤滑機構^{2) - 4)} および微視的塑性静流体潤滑機構⁵⁾ が提案されている(名称は池の解説⁶⁾ 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ことにする)。これらのメカニズムは、潤滑剤が被加工材表面の微小凹凸にトラップされ、加工中に界面に漏出する挙動が基礎となっているが、種々の因子がそれらのメカニズムに及ぼす影響については、未だ十分に解明されているとはいえない^{7) 8)}。

本研究は、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トポグラフィ(表面形態および構造)に着目し、初期表面形態および加工に伴う局所形状変化が2次的潤滑機構に及ぼす影響の解明を目的として行うものである。工藤ら⁹⁾ によって解説されているように、微視的塑性流体潤滑機構は厚い油膜を工具／被加工材界面へ供給するものではなく、薄い油膜を分散的に供給するものと理解できる。したがって、これらのメカニズムを最適制御することによって、摩擦低減と仕上げ面精度向上を両立できる可能性がある。そこで本研究では、引抜き加工に伴う工具／被加工材界面の連続観察が

可能な試験装置を製作し、この装置を用いて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検討を加えた。また、本研究課題に対する有限要素法による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および潤滑剤挙動について解析を試みた。

2. 引抜き試験方法

2.1 試験装置

今回製作した引抜き試験装置を図1に示す。この装置は主に、油圧系、加工系、画像処理系で構成されている。試験片は上下の引抜きダイス間で加工されるが、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し、その画像をビデオレコーダに連続記録す

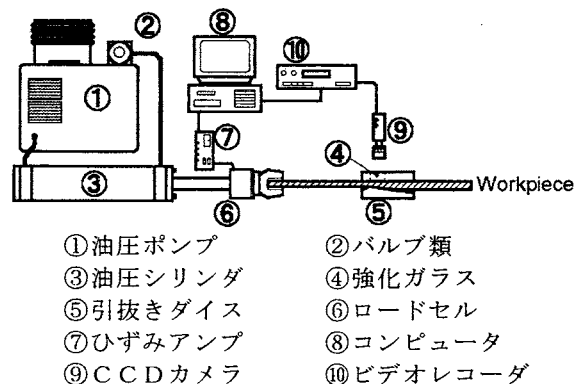
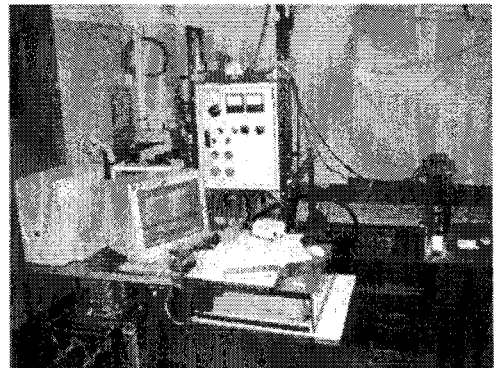


図1 引抜き試験装置

ることができる^{3) 4)}。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 $\alpha=4^\circ$ とした。

2・2 試験片

試験片には、板厚 2mm の純アルミニウム板材を用いた。まず、素材から図2のような形状をフライス盤で切り出し、#2000 までの研磨紙で表面を研磨して $1\mu\text{mRa}$ 以下とした後、設定した領域の表面形態を変化させた。

試験片表面の微小形態としては、図3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、および図4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を設けた。確定論的形態については、四角錐の斜面角を $\beta=4^\circ$ 、部分球の曲率半径を 5.5mm と固定し、引抜き方向に間隔 D_r 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#2000 の研磨紙で軽く手研磨し、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

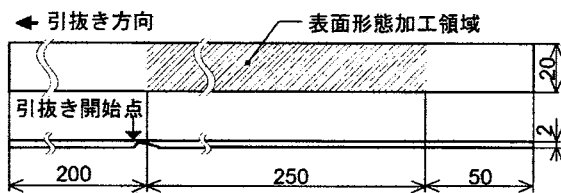


図2 引抜き試験片 (mm)

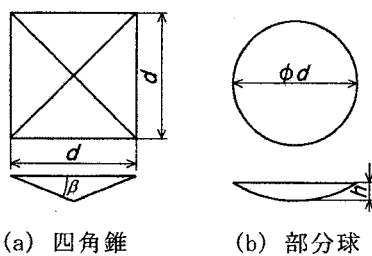


図3 潤滑剤ポケット (確定論的の表面形態)

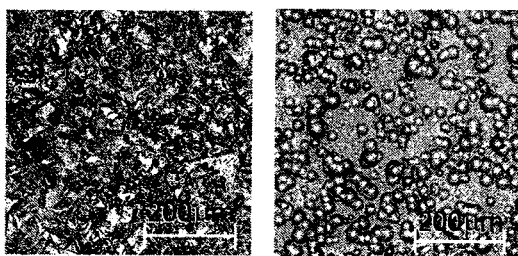


図4 ブラスト加工による確率論的の表面形態

って形態密度を変化させ、三次元的な算術平均粗さ S_q^{10} で表現した。

これらの加工の後、673K 1時間保持炉冷の条件下で焼鈍を行って残留応力を除去した。なお、単軸引張り試験を行った結果、本試験片材料の 0.2%耐力は 31MPa、引張り強さは 62MPa であった。

2・3 潤滑剤

試験片表面 (表面形態を変化させた面) には、表1に示すような粘度の異なるパラフィン系純鉱油を用いた。粘度圧力指数はいずれの潤滑剤についても約 2.2×10^{-2} (1/MPa) であった。

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ないことを条件として選択した結果、グラファイト系と BN (ボロンナイトライド) 系の固体潤滑剤を重ねて用いた。この潤滑剤による摩擦係数は $\mu \approx 0.11$ であった。

表1 潤滑剤の性質

記号	動粘度 (mm^2/s , 313K)	密度 (g/cm^3 , 288K)
A	22.47	0.8694
B	99.85	0.8849
C	195.2	0.9008
D	492.5	0.9010

3. 解析方法

解析対象は、図5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6(a)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 u 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る。また、被加工材と工具の接触面には摩擦係数 μ のクーロン摩擦が働くとする。

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6(a)のモデルをそのまま2次元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。

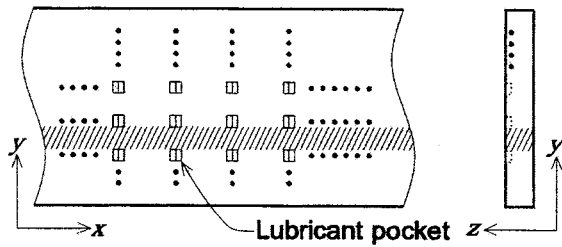
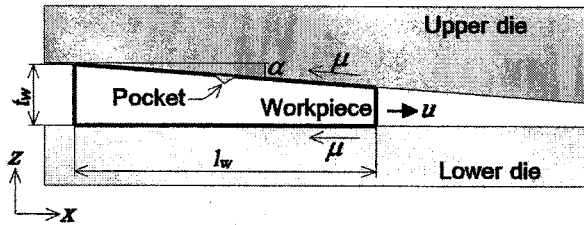
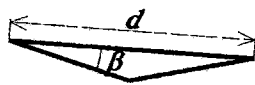


図5 潤滑剤ポケットを持つ引抜き試験片の解析モデル



(a) 引抜き試験



(b) 潤滑剤ポケット

図6 引抜き試験および潤滑剤ポケットの解析モデル

第1段階: 解析には2次元剛塑性有限要素法を用い、平面ひずみ条件とする。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5に示す被加工材において、斜線部分のようにx方向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。実際に、ポケットからの潤滑剤漏出が起こっていない段階で、ポケットとその周囲のx方向変形量にほとんど差がないことは確認している。

以上のような方法を用いて、図6(b)に示すような引抜き方向に斜面を持つポケットを用い、上面寸法dや斜面角βなどの影響を調べた。

なお、剛塑性有限要素法においては、潤滑剤をニュートン流体と仮定すると、剛粘塑性体として取り扱うことができる。このとき潤滑剤部分の構成式は、

$$\sigma_y = 2\eta\dot{\epsilon}_y - p\delta_y \dots\dots\dots (1)$$

のようになる。ここでηは粘度、pは圧力、δ_{ij}はクロネッカーデルタである。また粘度については、次の圧力依存性が成り立つとした。

$$\eta = \eta_0 \exp(\alpha p) \dots\dots\dots (2)$$

ここでη₀は大気圧における粘度、αは粘度-圧力係数である。一方、被加工材については相当応力-相当塑性ひずみ関係が

$$\bar{\sigma} = 123\bar{\epsilon}^{0.208} \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる金属材料を想定した。

4. 実験結果と考察

4・1 試験片表面の様子

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7に示す。流体潤滑剤をポケット内に満たした状態で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Bechら⁴⁾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。

4・2 引抜き力および摩擦係数の変化

加工に伴う引抜き力変化の例を図8に示す。引抜き力は比較的安定しているものの、全域を通じて一定にはならず、最大で約10%程度の変動を伴う。そこで、摩擦係数を算出する際には引抜き力の平均値を用いることにした。なお、表面に潤滑剤ポケットやブラスト加工による微小凹凸を設けた試験片では、何も設けていない試験片と較べて、本研究で行った全ての条件下で引抜き力が低減される結果が得られた。

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9に示す。条

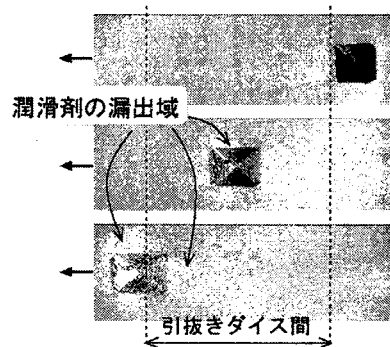


図7 試験片表面ポケットからの潤滑剤漏出の例(潤滑剤C, R=20%, d=1100μm)

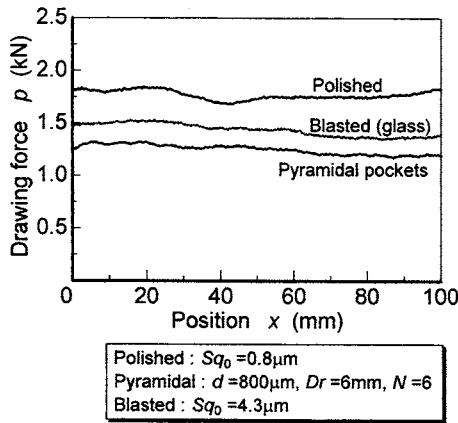


図8 引抜き力変化の例 (潤滑剤 D, $R=18\%$)

件にかかわらず、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。かなり低粘度の潤滑剤でも低い摩擦係数が得られていることから、この結果は、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²⁾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等しい。

また、図9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。その結果、潤滑剤粘度が $100\text{mm}^2/\text{s}$ 以下 (潤滑剤 A, B) の場合には、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²⁾ や阮ら¹¹⁾ によって報告されている結果と一致した。しかしながら、粘度が高い潤滑剤 C では、逆に引抜き速度が大きいか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、後方へ潤滑剤漏出による2次的潤滑効果が向上するためと考えられる。

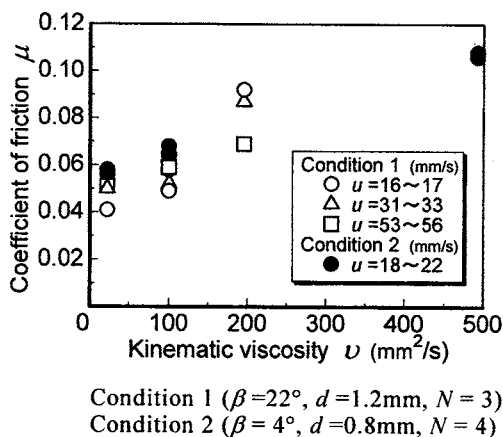
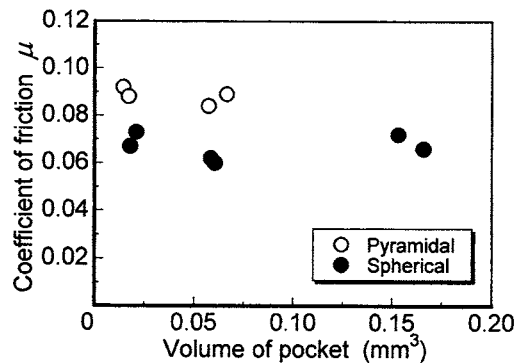


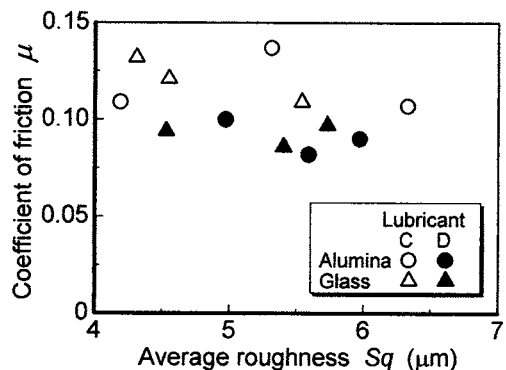
図9 潤滑剤粘度が摩擦に及ぼす影響 (四角錐ポケット)

次に、表面形態に伴う摩擦係数の差異を図10に示す。確定論的表面形態を設けた場合には (図10 (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と推測されるが、著者らは以前の研究¹²⁾にて、潤滑剤ポケットが同じ四角錐形状でも、わずかな形状の差が潤滑機構に大きな影響を及ぼすことを示しており、この点についてはさらに詳細な検討が必要である。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ほとんど寄与しないことを示唆していると予想される。

一方、確率論的表面形態の場合 (図10 (b)), 図4に示すようにアルミナ粉およびガラス球のプ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



($u=14\sim 16\text{mm/s}$, $R=18\%$, $N=3$, Lubricant C)
(a) 確定論的表面形態



($u=14\sim 16\text{mm/s}$, $R=18\%$)
(b) 確率論的表面形態

図10 初期表面形態による摩擦の変化

な確率論的形態を用いた場合、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、2次的潤滑機構を効率的に発生させるためには、確定論的形態を適切に配置する方が望ましいことを示している。

5. 有限要素法による解析結果

5・1 据込み試験による静水圧評価の検証

引抜き試験の解析を行う前に、実験的に測定可能な据込み試験に伴う潤滑剤ポケット内の静水圧変化について、実験と解析の結果を比較した。据込み試験片および試験方法を図11(a)に、得られた静水圧変化と有限要素解析結果を図11(b)に示す。静水圧は圧縮の初期に急激に上昇し、その後は増加割合が徐々に低下する点、また、潤滑剤ポケットの斜面角が小さくなるほど静水圧が大きくなる点など、有限要素法による解析において実験結果とほぼ同様の傾向を得られることが確認できた。

5・2 引抜きにおけるポケット内の潤滑剤挙動と静水圧

そこで、次に引抜き加工への適用を試みた。ここでは以下のパラメータを一定とし、ダイス角 α 、ポケットの上面寸法 d および斜面角 β を変化させて比

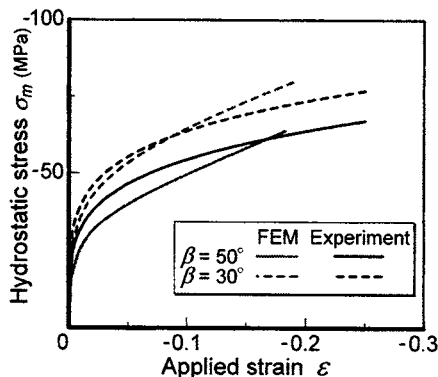
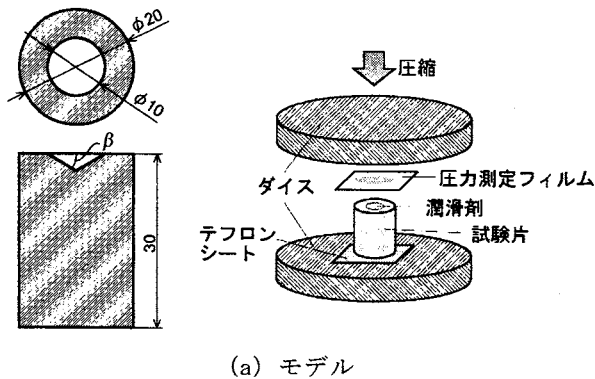


図11 据込み試験に伴う潤滑剤ポケット内静水圧に関する実験結果と解析結果の比較

較検討した結果の一部について述べる。なお変形量はポケット中央位置の板厚減少率 r で表す。

引抜き速度： $u=1$ mm/s 摩擦係数： $\mu=0.15$

被加工材寸法： $l_w=10$ mm, $t_w=2$ mm

潤滑剤粘度： $\eta_0=1.8\times 10^{-6}$ MPa·s

粘度-圧力係数： $\alpha=2.2\times 10^{-2}$ MPa $^{-1}$

まず最初に、引抜き加工途中における被加工材内の相当応力分布を図12に示す。引抜き加工を単純化したモデルではあるものの、相当応力は全体的には通常の引抜き加工とほぼ同様に分布しており、加工の進行に伴って徐々に増加している。また、ポケット周囲では大きな応力勾配が現れ、それに伴ってポケット下部で応力分布に乱れが生じている。

次に、ポケット内での潤滑剤挙動の例を図13に示す。潤滑剤は、上面では被加工材とダイスの相対移動に伴って後方へ流れており、その流れによってポケット内部で渦を巻くような挙動を示している。また、ポケットの後方ほど流れが速度を増している様子が見える。さらに、ダイス角が大きくなるほどポケット内での流れが速くなっている。このことは、相対的にダイス角の大きい方が微視的塑性流体潤滑機構が促進されることを示唆している。

微視的塑性流体潤滑機構の発生に対して、ポケット内における静水圧および動水圧上昇が少なからず影響することは、これまでの研究における共通の見解である。そこで、ポケット内で平均した静水圧応

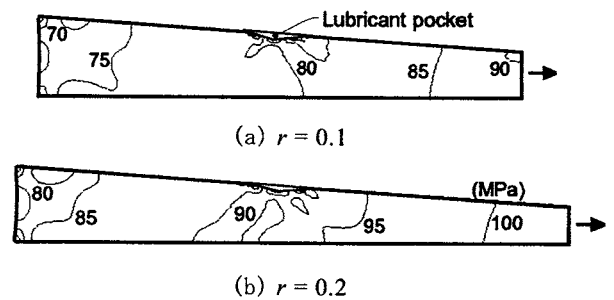


図12 引抜き加工に伴う試験片内の相当応力分布 ($\alpha=4^\circ$, $d=1100\mu\text{m}$, $\beta=12^\circ$)

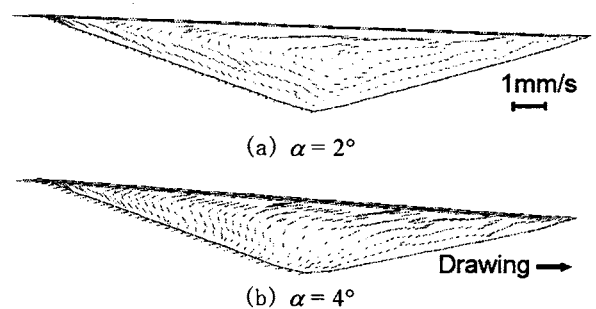


図13 ポケット内における潤滑剤流れの例 ($r=0.1$, $d=1100\mu\text{m}$, $\beta=20^\circ$)

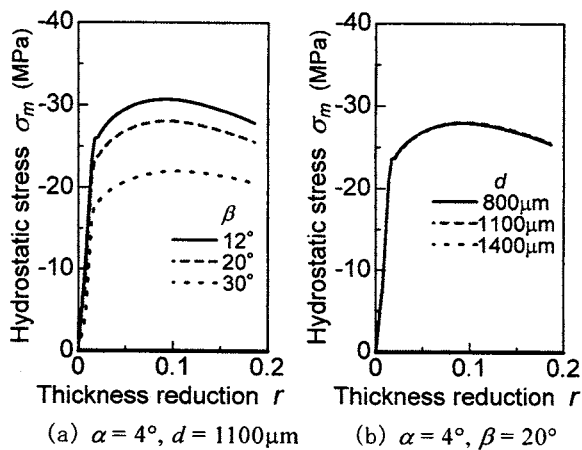


図 1 4 引抜きに伴う潤滑剤ポケット内の静水圧変化

力の変化を求めた結果を図 1 4 に示す。いずれの条件下においても、静水圧応力は引抜き加工の初期において急激に増加し、極大値まで徐々に増加した後、減少に転ずる傾向を示している。また、図 1 4 (a) より、斜面角 β が小さくなるほど静水圧応力は上昇する。これらの結果は、引抜きの比較的初期においても微視的塑性流体潤滑機構が生じ得ること、斜面角が小さくなるほど潤滑機構が生じやすいことを表していると考えられる。一方、図 1 4 (b) に示すポケット寸法 d の影響については、800~1400 μm の範囲で変化させても、静水圧応力にほとんど変化が現れなかった。これは図 1 0 (a) でも示したように、ポケットの容積は微視的塑性流体潤滑機構に影響を及ぼさないことを示唆していると考えられる。

6. 結び

アルミニウム板材の引抜き試験を行い、初期表面形態が工具/被加工材界面の潤滑状態に及ぼす影響について検討した。板材引抜きにおける平均的な引抜き力は、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が確認された。確定論的表面形態を設けた場合には、潤滑剤粘度が低くなるほど摩擦係数が低下する傾向が得られた。この結果は、微視的塑性流体潤滑によって工具/被加工材界面に潤滑剤が漏出することに起因すると考えられる。一方、確率論的表面形態では、局所的な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、本研究で行った条件下では境界潤滑に近い混合潤滑状態となったことを示唆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最も望ましいと結論される。

また、本研究課題に対する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および潤滑剤挙動に関して有限要素法解析を試みた。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にほとんど影響しないことを示した。

なお、本報では仕上げ面精度に影響する最終表面状態について詳細に触れることができなかった。確定論的表面形態を用いた場合に引抜き加工後の表面粗さを測定したところ、潤滑剤漏出域では低粘度潤滑剤ほど粗さが小さくなる傾向が得られたが、その他の領域では逆に低粘度潤滑剤の方が大きな粗さを示した。この原因については今のところ不明であり、局所的な粗さの成長挙動を考慮しながら検討を行う必要がある。また今後、潤滑剤ポケットの形状や配置などを変化させ、さらに実験結果を積み重ねることによって、潤滑状態の最適化手法の確立に寄与したいと考えている。

謝 辞

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致します。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))および小寺功史氏(現:(株)化繊ノズル製作所)に謝意を表します。

参考文献

- 1) 水野・池, 塑性と加工, **36**-413 (1995), 560-565.
- 2) Mizuno, T. and Okamoto, M., Journal of Lubrication Technology, Trans. ASME, **104** (1982), 53.
- 3) 小豆島・坪内・工藤・古田・峰村, 塑性と加工, **30**-347 (1989), 1631.
- 4) J. Bech, N. Bay and M. Eriksen, Wear, **232** (1999), 134.
- 5) 片岡・木原・相澤, 塑性と加工, **30**-340 (1989), 709.
- 6) 池, 塑性と加工, 42-485 (2001), 487.
- 7) 池, 塑性と加工, **34**-393 (1993), 1075.
- 8) 小豆島, 塑性と加工, **39**-455 (1998), 1198.
- 9) 工藤・小豆島, 塑性と加工, **27**-300 (1986), 72.
- 10) K. J. Stout ed., Development of Methods for the Characterisation of Roughness in Three Dimensions, (2000) Penton Press, 219.
- 11) 阮・工藤・坪内・堀, 塑性と加工, **28**-312 (1989), 41.
- 12) I. Shimizu, J. L. Andreasen, J. I. Bech and N. Bay, Journal of Tribology, Trans. ASME, **123**-2 (2001), 290.