

低速度塑性加工における潤滑挙動

片岡 征二

①

低速度塑性加工における潤滑挙動

片岡 征二

＜ 目 次 ＞

第1章 緒論	1
1.1 緒言	1
1.2 摩擦の法則と摩擦の原因を求める従来の研究	2
1.2.1 摩擦の法則を求める研究	2
1.2.2 摩擦の原因を求める研究	3
1.2.3 凝着説による Amontons-Coulomb の摩擦法則の説明	6
1.2.4 近代における摩擦の理論	8
1.3 潤滑剤の役割	10
1.3.1 潤滑の目的	10
1.3.2 流体潤滑に関する従来の研究	11
1.3.3 流体力学による圧力発生機構	13
1.3.4 潤滑の形態と Striebeck 曲線	14
1.4 塑性加工における潤滑機構に関する従来の研究	15
1.4.1 工具・材料接触面間への潤滑油の導入機構	15
(1) 流体力学的な圧力による導入	15
(2) 材料表面の凹凸による導入	18
(3) 吸着による導入	18
1.4.2 工具・材料接触面間での潤滑機構	18
(1) 接触モデル	18
(2) ミクロプールの効果	20
1.5 工具・材料接触面間での潤滑機構に関する従来の研究	20
1.5.1 春日・山口の潤滑モデル	20
1.5.2 水野の潤滑モデル	22
1.5.3 阮・工藤の潤滑モデル	24
1.5.4 小豆島らの潤滑モデル	25
1.5.5 潤滑機構に関する従来の研究のまとめ	28
1.6 本研究の目的及び構成	28
1.6.1 本研究の目的	28

1.6.2 本研究の構成	31
第2章 低速しごき加工における工具・材料接触面の観察	35
2.1 緒言	35
2.2 実験方法	35
2.2.1 被加工材	35
2.2.2 エッチング条件, 凸材と凹材	36
2.2.3 実験装置	37
2.2.4 潤滑油	39
2.2.5 摩擦係数 μ の求め方	40
2.3 実験結果	41
2.3.1 材料表面の観察結果	41
2.3.2 摩擦係数測定結果	46
2.4 考察	49
2.4.1 材料表面観察による潤滑機構の考察	49
2.4.2 摩擦係数測定結果による潤滑機構の考察	50
(1) 圧延材と凸材の検討	50
(2) 凹材の検討	51
2.5 結言	53
第3章 低速しごき加工における材料表面粗さ, 工具表面粗さ, 潤滑油粘度 及び加工速度の影響	55
3.1 緒言	55
3.2 実験方法及び実験条件	56
3.2.1 被加工材及び表面処理	56
3.2.2 工具(平ダイス)表面粗さ	56
3.2.3 潤滑油及び実験方法	57
3.3 実験結果	59
3.3.1 加工速度1.5mm/sにおける圧延材の摩擦係数測定結果	59
3.3.2 加工速度1.5mm/sにおけるエッチング材の摩擦係数測定結果	60

3.3.3	加工速度の影響	60
3.3.4	摩擦力(F)ーストローク(S)線図の観察	63
3.4	考察	65
3.4.1	被加工材表面粗さ, 工具表面粗さ及び潤滑油粘度の影響	65
(1)	圧延材を用いた場合の工具表面粗さ及び潤滑油粘度の影響	65
(2)	エッチング材を用いた場合の工具表面粗さ及び潤滑油粘度の影響	66
3.4.2	加工速度, 工具表面粗さ及び潤滑油粘度の影響	67
(1)	高粘度油のミクロブールからの流出挙動に及ぼす速度の影響	67
(2)	高粘度油の流出挙動に及ぼす工具表面粗さと速度の影響	70
(3)	低粘度油の流出挙動に及ぼす工具表面粗さと速度の影響	73
3.5	結言	78
第4章	潤滑挙動に及ぼす圧下率の影響	81
4.1	緒言	81
4.2	実験方法及び実験条件	81
4.3	実験結果	82
4.3.1	試験片表面が圧延面の場合の摩擦係数測定結果	82
4.3.2	試験片表面がエッチング面の場合の摩擦係数測定結果	83
4.3.3	極低速条件における摩擦係数測定結果	85
4.3.4	材料表面の観察結果	87
4.3.5	加工後の工具(平ダイス)表面の観察	89
4.4	考察	91
4.4.1	高粘度油の流出挙動に及ぼす圧下率の影響	91
4.4.2	低粘度油の流出挙動に及ぼす圧下率の影響	95
4.5	結言	96
第5章	低速度塑性加工における潤滑機構に関するモデル	98
5.1	緒言	98
5.2	塑性静圧的ミクロブール潤滑モデルの裏付けとなる現象	99
5.2.1	動圧効果ではなくて静圧効果によって流出することを裏付ける現象	99

5.2.2	工具表面粗さを考慮せねば説明できない現象	100
5.2.3	$\eta \cdot V$ の増加にともなう摩擦係数の増加現象は粘性抵抗の影響ではなくて、 $\eta \cdot V$ の増加にともなってマイクロブールから潤滑油が流出し難くなるためであることを裏付ける現象	101
5.3	本研究によって明確にすることのできた潤滑機構のモデル	102
5.3.1	塑性静圧マイクロブール潤滑機構のモデル	102
5.3.2	Butler の試験体による塑性静圧マイクロブール潤滑モデルの確認実験	105
5.4	マイクロブール潤滑モデルの定量的解析	108
5.4.1	Channel Jacking Mechanism (C. J. M.)	108
5.4.2	C. J. M. モデル式	108
5.4.3	マイクロブールとチャンネルのモデル	111
(1)	マイクロブール直結モデル	111
(2)	網目連絡モデル	111
(3)	ロゼットリーフモデル	112
5.4.4	摩擦の時間則に関する検討	112
5.4.5	板の引抜／しごき加工における摩擦係数の挙動解析への応用	113
(1)	摩擦係数の挙動の C. J. M. に基づく解釈	113
(2)	C. J. M. 及び時間則に基づく摩擦係数の数式モデル	113
(3)	実験データに基づく検討	115
5.5	結言	118
第6章	総括	120

第 1 章 結 論

1 . 1 緒 言

塑性加工において、トライボロジーの果たす役割は非常に大きい。潤滑の適否は、被加工材の破断発生や工具の破壊等の加工の成否に直接的な影響を及ぼすものであるとともに、焼付きや摩耗の発生による工具寿命及び製品表面品位の低下に対しても、きわめて大きな影響を及ぼすことはよく知られたことである。

したがって、これまでも塑性加工におけるトライボロジーに関する研究は必然的に多く行われているが、これらを大きく分けると、潤滑油あるいはその添加剤等の化学的な作用に注目したものと、潤滑油の物理的あるいは流体力学的特性に注目したものとに分けられる。前者は、いわゆる潤滑油中に含まれるある種の成分、あるいは添加剤等が摩擦界面において形成する境界潤滑膜の有効性等について検討するものである。たとえば、工具と材料との摩擦界面において、潤滑剤の金属表面への吸着性とか化学反応性が摩擦・摩耗あるいは焼付き・かじり等に及ぼす影響について検討するものである^{1)~8)}。一方、後者は潤滑油の粘度及び工具と被加工材との相対運動に関連して、潤滑油の工具・材料接触面間への導入機構^{9)~18)}、及び封じ込め機構^{19)~22)}、あるいは導入された潤滑油の摩擦界面での流体力学的挙動が、摩擦・摩耗^{23)~48)}、焼付き・かじり^{41)~44)}等に及ぼす影響を取り扱うものである。

しかし、塑性加工では、工具と材料との間の摩擦界面全面が、これら流体力学的作用のみによって支配された潤滑状態となることは滅多にないことであるし、逆に摩擦界面全面が潤滑剤の化学的作用によって説明できるような潤滑状態となることもない。すなわち、塑性加工における摩擦界面の潤滑状態は、ある部分では潤滑剤の吸着膜や反応膜の特性に支配された摩擦が生じており、ある部分では潤滑油の粘性に影響された摩擦が生じている状態にある。どちらが支配的であるかは、加工の形態によって著しく異なるが、何れにせよ両者を完全に分離して取り扱うことはできない。本研究は、潤滑油の物理的あるいは流体力学的挙動に注目して、塑性加工における潤滑機構の究明を図るということを目的としているが、このような場合にも、これら潤滑油の化学的な作用に対する考慮が必要である。

さらに原点に立ち返って、そもそも摩擦とは何なのか、また、潤滑油は如何なる作用によって摩擦を低減し得るのかについての理解も、塑性加工におけるトライボロジーの研究を遂行するためには必要である。

本章においては、このような観点から、まず摩擦・摩耗に関してこれまでに行われてきた研究の一部と、この研究によって明らかにされた、現在における摩擦・摩耗に対する概念を示す。つぎに、摩擦・摩耗を減少させるために潤滑油は如何なる役割を演じているのか、またこの場合、潤滑油の化学的作用と流体力学的作用とは如何なる作用によって摩擦・摩耗に影響を及ぼすのかについて示す。つづいて、これら、すなわち潤滑油の化学的作用及び流体力学的作用に基づいて考えられ、また発展してきた、現段階において議論されている塑性加工の潤滑機構の概念を示す。最後に、これらに関係する本研究の目的を明確にする。

1. 2 摩擦の法則と摩擦の原因を 求める従来の研究

1. 2. 1 摩擦の法則を求める研究

摩擦現象の科学的研究の夜明けは15世紀のイタリアのルネッサンスに始まる。Leonardo da Vinci は、固体間で生じる摩擦に関して多くの実験を行った。彼の行った実験について、曾田範宗著「摩擦の話」⁴⁵⁾を引用して述べると以下のようである。

「まず Leonardo da Vinci は、摩擦力はものの材質が違うと、大きさも違うことを記述している。これは摩擦の大きさに関して述べられた歴史上初めての記述であるとともに、18世紀に完成した摩擦の凹凸説に対するアンチテーゼが、この材質の違いによる摩擦の違いの問題であったこと、さらにこのアンチテーゼが後述の近代の摩擦理論として実を結ぶことを考えると、この記述は特筆すべき記録である。

ついで表面のなめらかなもの、あらいものなどの摩擦の比較から、なめらかなものほど摩擦が低くなることを示している。これは、摩擦力の原因は、結局固体表面の粗さ、すなわち凹凸にあるということを示すものであり、この考えは、その後17、18世紀にフランスで発展した摩擦の凹凸説として完成するものである。

さらに、あらゆる物体は、すべらそうとすると摩擦力という抵抗を生じる。この摩擦力の大きさは、表面がなめらかな平面と平面との摩擦の場合、その重量の4分の1であると

いうことも示している。これは摩擦力が重さ、すなわち垂直力に比例すること、換言すればこの比例常数である摩擦係数の概念をはじめて規定したものとして、まさに画期的な記述である。」

Leonardo da Vinci 以後、約 200 年の間、摩擦の研究に関しては大きな前進はなかった。しかし、1699 年にフランスの Amontons は、実験室的な方法で摩擦の研究を系統的に行い、摩擦力和荷重が比例すること、摩擦係数は摩擦面の接触面積の大小に関係しないこと、さらにすべり速度が摩擦力に殆ど関係しないことを明らかにした。これらの実験結果は、Leonardo da Vinci によって発見された前述の摩擦の法則を再発見したと言えるものであるとともに、この 100 年後に完成される Coulomb の摩擦の法則を、事実上すでに確認していたと言えるものである。

Amontons の時代以後、摩擦に関する研究は多く行われ、摩擦の性質もある程度の理解ができるようになったものの、摩擦実験は殆どが実験室的なものばかりであり、実地に適用するにはデータとして信頼性が低いものであった。Coulomb はこれらの摩擦実験に比べて、大がかりな実験装置を用いて種々の実験を行い、Amontons 等の得た実験結果を再確認した。さらに Coulomb は、静摩擦、すなわちすべりを起こすのに要する力と、動摩擦、すなわちすべりを維持するのに要する力との区別をはっきりさせ、動摩擦は静摩擦よりもかなり低いことを示し、また、動摩擦はすべり速度に殆ど影響されないことも観察した。このようにして、力学現象の中でのぞかれる固体の摩擦現象を解釈する上で重要な Coulomb の摩擦の法則（あるいは Amontons-Coulomb の摩擦法則）は確立されるに至る。

Amontons-Coulomb の摩擦法則の法則を簡条書にすると以下のようである⁴⁶⁾。

- (1) 摩擦抵抗は見かけの接触面積に無関係で、垂直荷重に比例する。
- (2) 摩擦抵抗は摩擦速度に無関係である。
- (3) 接触する 2 固体が互いにすべり始めるに要する力は、すべりを継続させるに要する力よりも大きい、すなわち静摩擦は動摩擦より大きい。

1. 2. 2 摩擦の原因を求める研究

摩擦の法則の確立ということと平行して、固体の摩擦の起きる原因についても、長く議論がなされてきた。17, 18 世紀においては、この摩擦の原因として固体の表面の凹凸に起因するとする凹凸説が主流であった。すなわち、摩擦抵抗の発生する理由は、固体と固体との接触面上に凹凸があり、2 面を接触させるとお互いの凹凸がかみ合うので、この 2 面

をすべらせるためには、その凸部にそって繰り返し持ち上げたり、凸部を破壊したりする仕事をしなければならない。それが摩擦力の発生する基本的な原理だとしたものが凹凸説である。したがって、潤滑油を塗ると摩擦抵抗が小さくなるのは、潤滑油がその表面の凹凸の凹部を埋め、実質的な凹凸を小さくするからであるという考えも示された。

Coulomb はこの点に関して、Fig.1 の様なモデルを示し、凹凸説を支持する立場を取った⁴⁷⁾。要するに、2面の細かい凹凸がかみ合っているモデルにおいて、一つの面が他の面の凹凸を上下しながらすべる場合、Fig.1 (b) に示す様に一つの面の粗さの平均角度を θ とし、他方の面の粗さの凸部がこれを乗り越える場合を想定し、摩擦係数 μ は $\tan \theta$

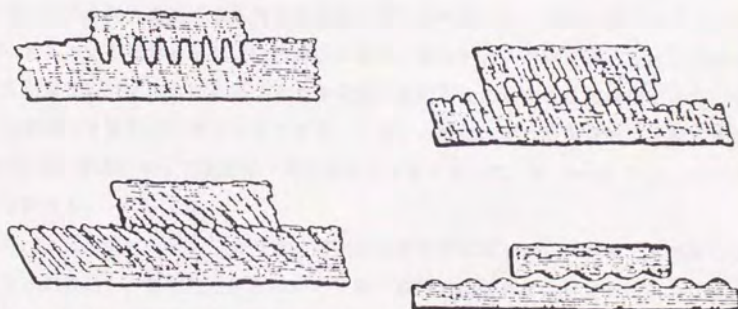


Fig. 1 (a) Illustrations from Coulomb (1785) showing his view of interlocking surface asperities

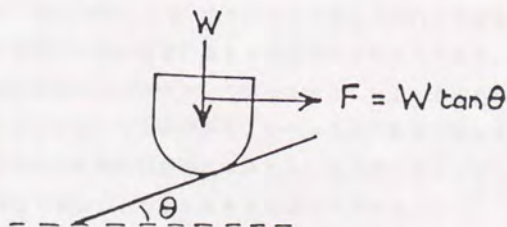


Fig. 1(b) For a slope of θ , the coefficient of friction = $\tan \theta$

に等しくなることを示した。こうして摩擦係数は見かけの接触面積や垂直荷重、すべり速度などに無関係となり、これまで Coulomb が種々の接触面積と荷重について実験した結果が説明できることから、凹凸説を摩擦の原因とする主張をした。

しかし、この凹凸説は、1804 年に、Leslie 等によって指摘されたように⁴⁷⁾、エネルギー消散機構に基づいていないという弱点を持っていた。すなわち、いま、表面の凹凸を硬いものと仮定すると、すべり面が相対する表面の凸部の上にただ持ち上げられ、またすべり下りするというプロセスは、エネルギーバランスとしては不可解なものとなる。それは実際にはエネルギーが消散されているにもかかわらず、何等機械的エネルギーが消費されないことになるからである⁴⁸⁾。

固体摩擦が起きる原因を他に求めるものとしては J.T.Desaguliers の分子説(凝着説)がある。彼は摩擦力を生ずる本当の原因は、摩擦面の持つ分子力の交差、すなわち分子間引力にあるという見解を示し、凹凸説とは逆に、摩擦力は表面がなめらかなになるほど大きくならねばならないと主張した。その理由は、表面がなめらかなほど摩擦面は互いに接近し、表面の分子間引力が増すからである。しかし、彼は、これを実験的に証明することができず、20 世紀になって表面加工技術が進歩するに至って、W. Hardy によって証明されることになる。

W. Hardy は 1919, 1920 年にガラス面同士で摩擦の実験を行った結果、非常になめらかに仕上げた表面と、粗く仕上げた表面とでは、摩擦力は変わらないどころか、仕上げ程度の良いガラス面ほどかえって摩擦が大きくなることを見出した⁴⁹⁾。さらにこの場合、仕上げ程度の良いガラス面同士の摩擦ほどその表面が傷付いたことを明らかにした。このことには二つの重要な意味が含まれている。その一つは凹凸説の否定である。すなわち、前述のように凹凸説での粗さの凹凸とは、粗さの大小ではなく凹凸の角度を問題としている。したがって、凹凸の角度が一定のまま、粗さが非常に小さくなったとき、すなわち凹凸説でいうところの凹凸の斜面を上下するという概念が成立しなくなる場合において、むしろ摩擦力が大きくなることを示したものである。もう一つは、摩擦が単なる固体表面の分子間の引力によるエネルギー損失の問題のみではなく、分子間引力に起因して表面の破壊をも生じる材料学的現象であることを示したと言えるものである。

さらに Hardy は、以上のような単なる固体表面の平滑さと摩擦との関係についてのみを示しただけでなく、固体表面の凹凸よりもむしろ表面を覆う分子層の性質のほうが決定的に摩擦に関与していることも、一連の実験において明らかにした。凹凸説では前述のよ

うに、摩擦の大小は凹凸の角度の大小のみによって決まることから、表面にどのような分子層が存在しようとも、粗さの角度が一定ならば摩擦係数も一定にならなければならない。しかし、Hardy は表面仕上げが一定でも、表面に吸着した分子層とその化学的構造が摩擦に大きな影響を及ぼすことを明らかにした。

一方、これとは逆の方法によって、Holm はやはり表面に形成される分子膜が摩擦に対して支配的な役割を演じていることを示した。すなわち、Holm は初めて真空中で極めてきれいな表面を持つ固体同士の摩擦実験を行い、固体表面のわずかな汚れでもそれを真空中で加熱して蒸発させて除去すると、それだけで摩擦係数が著しく増大すること、またそこにわずかの気体を送入するだけで、その気体分子の吸着によって摩擦係数が著しく低下することを明らかにした。

この Hardy と Holm の実験によって得られた結果は、固体表面に存在する凹凸の変化によって摩擦係数が変化するという凹凸説に比較して、わずかの吸着膜の有無や吸着膜の化学的性質の変化によって、これら凹凸による影響をはるかに超越した摩擦係数の変化が生じることを明らかにしたもので、凹凸説を根本から覆すものとなった。また、こうした吸着分子層の存在する場合の摩擦は、境界摩擦と呼ばれるようになった。

1. 2. 3 凝着説による Amontons-Coulomb の摩擦法則の説明.

摩擦の主因は二つの固体表面間に作用する分子間引力であるとする凝着説においては、摩擦力は接触面積に比例することになる。すなわち、単純に接触面積が大きければ大きいほど摩擦力は大きくなることになる。しかし、このことはこれまでの多くの摩擦の実験において得られた結果、すなわち摩擦力は接触面積に無関係であるという実験事実と一致しない。このことを説明するには、二つの固体表面の凹凸の接触によってできる真実の接触面積と単なる幾何学的な見かけの接触面積という概念の導入が必要となる。このことに関しては、1938年に Holm によって、真実接触面積と見かけの接触面積との間には大きな隔りがあることが認められた。その概要は以下のようなものである⁵⁰⁾。

固体の表面は如何になめらかに磨きあげたとしても、その表面は完全な幾何学的な平面とはなり得ず、必ず何等かの凹凸は残るものである。こうした表面を持つ二つの物体を向かい合わせて、ある接触荷重 P の下で互いに押し付けると、その表面の全体の面積（見かけの表面積）の一部分である凸部だけが互いに真実接触をする。要するに、一見して広い面積で接触し合っている固体でも、本当に接触し合っているのは、わずかな真実接触面上

だけであるということである。この概念図をFig.2 に示す。この真実接触面積 A_r は一般に見かけの接触面積 A_a に比べて非常に小さいため、そこでの接触圧力は非常に大きなものとなり、柔らかい材料の塑性流動圧 p_m にも達し得る。したがって真実接触面積 A_r を垂直荷重 P と p_m で表すと次式のようになる。

$$A_r = P / p_m \quad \dots\dots\dots (1)$$

見かけの接触面が連続的であるのに反して、真実接触面が不連続的であるという考えは、すでに Coulomb の時代から存在していたが、明確に上式によって定式化し、さらに実際に真実接触面積は垂直荷重に正比例することを明らかにしたのは Holm である。この Holm の真実接触面の概念によって、Amontons-Coulomb の摩擦の法則を凝着説の立場で以下のように説明することができる。

いま s を真実接触面上で生じている、凝着による結合部のせん断に要する平均せん断応力とすれば、結合部全体をせん断するための全体の力は $A_r \cdot s$ で与えられる。したがって掘り起こしの力を無視すれば、摩擦力 F は

$$F = A_r \cdot s \quad \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。前述の (1) 式におけるように、真実接触面積 A_r は垂直荷重 P および柔らかい方の材料の塑性流動圧 p_m のみによってきまるもので、2 面の見かけの接触面積には無関係となる。したがって摩擦力 F は面の見かけの面積には関係しないことになる。いま A_r を置き換えれば、

$$F = P \cdot s / p_m \quad \dots\dots\dots (3)$$

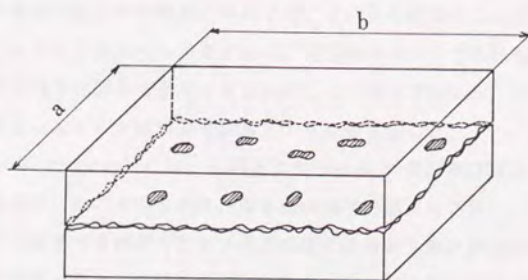


Fig.2 Relation between apparent contact area and real contact area.

これより摩擦係数 μ は

$$\mu = s/p_n \dots\dots\dots (4)$$

となり、 s および p_n は材料によって一定と考えれば、摩擦力は荷重に正比例し、摩擦係数は事実上垂直荷重には関係しない。これはすなわち Amontons-Coulomb の第一法則である。

しかし、重要なことは、この法則は緊密な接触面積が加えた垂直荷重と共に増加する条件下においてのみに成立することである。したがって、片側の物体表面が降伏して非線形挙動を行う場合には、摩擦力が垂直力に依存しない場合も生じるわけである。

1. 2. 4 近代における摩擦の理論

Hardy は、前述のように吸着分子膜が摩擦に対して著しく大きな影響を及ぼすこと、また各種の固体表面に対して、パラフィン、アルコール、脂肪酸を塗布して行った実験結果から、静摩擦は固体の表面、潤滑剤の化学的特性、及び鎖中の炭素数の各影響の関数であることを見いだした。このことから Hardy は、摩擦の原因は力の表面場によると考え、潤滑剤の作用機構は、表面の原子や分子の不飽和が潤滑剤分子によって飽和され、その表面エネルギーが桁違いに低下するためとした。すなわち、潤滑油を塗布すると潤滑剤分子は固体の表面の不飽和部分に物理的に吸着し、その表面に均一な単分子膜を形成し、かつ固体表面に配向する。このような状態にある二つの固体表面を向かい合わせて押し付けると、余分な潤滑剤分子は系外にしぼり出されてしまい、最終的には単分子吸着膜のみで隔離された状態となる。金属面に付着するのは極性基の部分であるから、結局2面の接触は潤滑剤分子の他端の無極性基と無極性基との間で起こり、この状態で2面間をすべらせた場合、摩擦力は著しく小さなものとなる。要するに、境界潤滑剤としての有効性は、これらの膜が下地表面の力の場を何処まで小さくするかによって評価されるが、この効果が潤滑剤分子の極性と鎖長とによることは明かであるという見解を示した。

しかし、Bowden と Tabor^{5,1)} は、このような Hardy の境界潤滑論は単純化しすぎているということを指摘した。その理由は、最も良好な境界潤滑油を用い、非常に軽荷重の下での摩擦でも、一度すべりが起こると下地の金属には何がしかの摩耗が生じる。この部分を詳しく微視的に調べると、金属は分子の大きさに比べてはるかに大きい深さまで引きちぎられているのが確認できる。この結果からみて、一般に潤滑された金属の摩擦は、Hardy が示したようなただ単に潤滑剤の一方の単分子層が他の単分子層の上をすべることに起因

するものでもなければ、また単なる表面力の関数でもないことが分かる。それはここに関与する金属の巨視的な性質によって大きく影響されるはずである。このような考えに基づいて、Bowden と Tabor は次のような接触のモデルを提案した。

潤滑した金属を接触させて荷重を加えると、金属表面の凹凸の凸部同士の接触が生じ、その接触部は加えられた荷重を支えるに十分なだけ塑性流動する。この過程において、潤滑剤の膜は二つの金属の間に挟まれ、そこでは非常に高い圧力を受ける。しかし、この圧力は全接触領域において一定となることは考えられず、圧力が最高となる部分ではこれらの潤滑膜の破断も生ずる。さらに、2面間に生ずるすべりは、これらの分子膜の破断を助長するように作用する。この潤滑剤の膜の破断がどの程度に生じるかは、2面の接触状況及びその潤滑剤の膜の性質に依存する。そして、潤滑膜が部分的に破断すると、そこでは分子の大きさに比べてずっと大きい金属同士の結合、すなわち凝着が2面間に形成されることになる。

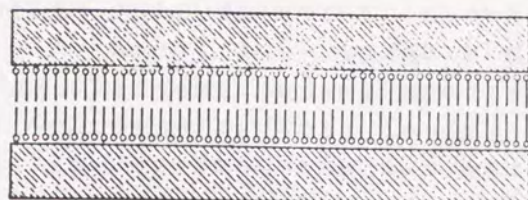
運動に対する抵抗の一部、すなわち摩擦力の一部はこの金属同士の結合部をせん断するのに必要な力である。また潤滑剤の膜そのもののすべりに対する抵抗もあるから、結局摩擦力 F は次のように表される。

$$F = A_r \{ \alpha s_m + (1 - \alpha) s_l \} \dots\dots\dots (5)$$

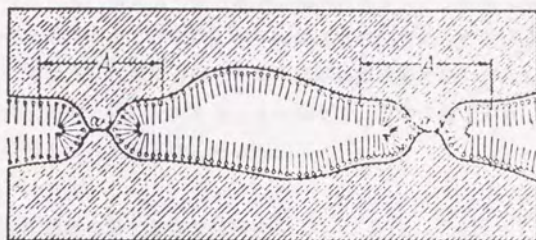
ここに、 A_r は垂直荷重を支える真実接触面の面積、 α は潤滑剤の膜の破断面積の割合、 s_m は金属同士の接触結合部のせん断強さ、 s_l は潤滑剤の膜のせん断強さである。

こうして、もしも一定の潤滑剤と表面とが与えられた場合、 α がほぼ一定であるならば、摩擦力 F は A_r に比例する。したがって Amontons-Coulomb の法則は非潤滑の場合と同様に潤滑面においても成立する。

境界潤滑機構に関する以上のような Bowden と Tabor の考え方と、Hardy の示唆した考え方との主な相違を図示すると Fig.3 のようである。Fig.3 (a) は Hardy の提案した境界潤滑機構を描いたもので、単分子吸着分子層の無極性基同士の間の相互作用を表している。この場合には何等の金属接触は起こらない。一方、Fig.3 (b) は潤滑剤分子の膜は限定された極小部において破断するというを前提とした、Bowden と Tabor の提案した接触機構を描いたもので、潤滑剤の分子層はいくつかの局的小領域 αA で破断を生じている。こうしてできた金属接触の結合部をせん断するときの抵抗が摩擦の主因となつた。以上が近代の摩擦に対する考え方と言えるものである。



(a)



(b)

Fig.3 Schematic illustration of contact model proposed by Hardy(a) and Bowden(b).

1. 3 潤滑剤の役割

1. 3. 1 潤滑の目的

真実接触面上においては、清浄な金属面間では金属同士が、あるいは、気体分子や液体分子の吸着膜で覆われた表面ではその分子同士が、また、その両者の中間では、金属と吸着膜とが凝着を生じ、これが摩擦の主原因となる。このような二面間の直接接触によって生じる凝着は、また、摩耗とか焼付きの原因ともなる。

したがって、すべり合う二つの金属の摩擦を減らすには、あるいはこれら凝着摩耗や焼付きを防ぐには、二面間に生じる凝着、特に金属結合を減少させることが重要となる。この金属結合を減少させるには二つの金属の接触面における表面エネルギーを低減させればよいということになる。具体的には、接触面間に分子膜程度の厚さの内部の金属とは異なる

る物質の膜を介在させ、金属の高い表面エネルギーを、これらの物質の低い表面エネルギーに代えることによって解決できる。さらに、二面間に液体の厚い膜を介在させて、二面の近距離力、遠達力による干渉を完全に遮断できれば、理想的な方法となる⁵²⁾。

すべり合う二つの面の間を潤滑するということは、これらの原理に基づくものであるが、このような単分子あるいは数分子程度の薄い潤滑膜によって、金属結合を防ごうとする場合を境界潤滑と言い、これは前にも述べたように潤滑剤の化学的作用によって支配された潤滑状態である。一方、潤滑油の厚い膜を二面間に挟んで、二面間の直接的な干渉を完全に遮断した場合を流体潤滑と呼び、これらは潤滑油の物理的な作用、あるいは流体力学的な作用によって支配された潤滑状態である。実際の摩擦面においては、全ての面が境界潤滑あるいは流体潤滑のいずれかであることは少なく、両者の混ざり合った状態であることが多い。この状態を混合潤滑と呼んでいる。

1. 3. 2 流体潤滑に関する従来の研究

潤滑下にある機械部品の運動に関する初期の研究の多くは、円筒軸受けの潤滑に関して行われた。円筒軸受けの回転に対する摩擦力が、潤滑油の粘性の大小に比例すること、すなわち流体摩擦によることを理論的に定式化したのは N. P. Petroff (1883年) である。N. P. Petroff は (6) 式に示す流体のせん断抵抗に関するニュートンの式を基にして、(7) 式に示す軸受け内の摩擦を与える式を導いた⁵³⁾。

$$F = \eta A U / h \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、F：平行な2面間に生ずる摩擦力

η ：潤滑油の粘性係数

A：平行な面の面積

U：2面間のすべり速度

h：2面間の距離（潤滑膜の厚さ）

$$\mu = 2 \pi^2 (D/C) \cdot \eta N / p \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 μ ：与えられた寸法の軸受けの摩擦係数

D：軸の直径

C：軸受けの長さ

η ：潤滑油の粘性係数

N: 回転速度

p: 軸受けの平均圧力

しかし、この軸受け圧力 p に相対して、軸受け面間に存在する潤滑油に圧力を発生させる機構に付いては明らかにされなかった。1886年に O. Reynolds は、円筒軸受けに油をさして軸を回転するとき、軸は軸受け面との間に薄い流体潤滑膜を形成して回転し、軸と軸受けとは直接接触することはないという原理を流体力学的に明らかにした。言い替えると、回転により油膜の中に流体力学的な圧力が発生することを理論的に証明した。この O. Reynolds によって導かれた式は Reynolds 方程式と呼ばれ、流体潤滑理論の基礎となるものである。座標を Fig.4 に示すように定めた場合の Reynolds 方程式の一般形を (8) 式に示す。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 (U_1 - U_2) \frac{\partial h}{\partial x} + 6h \frac{\partial}{\partial x \partial t} (U_1 + U_2) + 12V \dots \dots \dots (8)$$

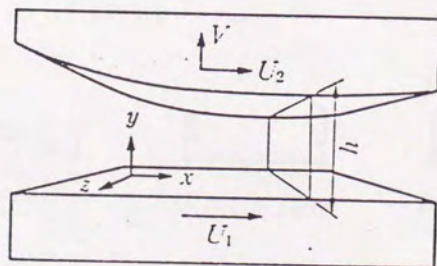


Fig.4 Coordinate systems.

1. 3. 3 流体力学による圧力発生機構

前述のように、流体潤滑は二面間に連続した厚い潤滑膜を挟んで、二面が運動中あるいは加工中に接触することがない潤滑状態のことである。摩擦面に作用する荷重に対抗して、このような流体膜を形成させるためには、二面を押しつけて接触させようとする垂直荷重に釣り合うだけの圧力を潤滑膜内に発生させなければならない。この圧力は、二面間に適当な開き方と速度を与えると、その相対運動によって発生させることができる。これを動圧効果と言う。その圧力の発生機構には Fig.5に示したようなものがあるが、この圧力分布は、Reynolds 方程式を種々の条件を用いて解くことによって求めることができる⁵⁵⁾。

Fig.5 (a)はくさび効果と呼ばれるもので、くさび角 α をもつ面に対して、一方が速度 V で相対的に動くと、潤滑油が引きずられてくさびの中に押し込まれ、高い圧力を発生させて二面を隔てる。(b)は伸縮効果と呼ばれるものである。これは、運動している平行な二面の速度を面内においてだんだん小さくしていくと圧力が発生する。(c)は絞り膜効果と呼ばれ、平行な二面がある速度をもって接近すると、間に挟まれた潤滑油の中央部に高い圧力が発生する。

流体潤滑はこのような効果によって油圧を発生させ、二面間に流体膜を形成し、二面が直接接触するのを防いでいるわけであるから、摩擦力は流体膜の粘性による摩擦抵抗のみによって生ずる。その結果、境界潤滑に比べ摩擦力は著しく低下する。また、二面は流体膜によって完全に隔てられているために、その間に直接的な相互作用はほとんどなく、凝着とかこれによる摩耗も生ずることはない。

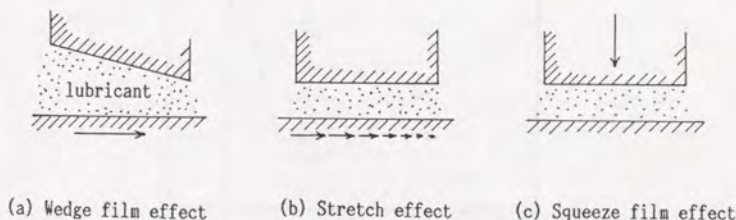


Fig.5 Pressurizing mechanism in hydrodynamic lubrication.

1. 3. 4 潤滑の形態とStriebeck曲線

Striebeck は、荷重やすべり速度がすべり軸受けや転がり軸受けの摩擦や潤滑に及ぼす影響に付いて詳細に研究した。これによって、境界潤滑、混合潤滑および流体潤滑という潤滑状態の区分を表すのによく用いられるStriebeck 曲線を描いた。Fig.6 はその一般化された Striebeck 曲線である。

潤滑油の粘性係数を η 、軸受けの周速を U 、軸と軸受けとの間に作用する圧力を p とし、摩擦力 F 、あるいは摩擦係数 μ と $\eta U/p$ との関係を表したものである。横軸は、右へ行くほど二面間において流体力学的に形成される潤滑膜が厚くなること、すなわちベアリング部において軸の回転速度が大きくなるか、潤滑油の粘度が高くなるほど接触界面に導入される潤滑油の量が大きくなることを示している。このことは、Reynolds 方程式に基づく解析によっても分かっている。

図に示す領域Ⅰはいわゆる境界潤滑領域で、二面は数分子あるいはそれ以下の薄い境界潤滑膜によって隔てられた状態である。場合によっては金属同士の直接接触も生じている。この潤滑状態に、潤滑油の粘度を高くする、速度を速くする、あるいは荷重を低下させるなどの変化を与えていくと、二面間に存在する潤滑膜の厚さは次第に厚くなって、二面間の間隔が拡がり、その接触は表面粗さの凸部のみで生ずるようになる。この潤滑状態が領

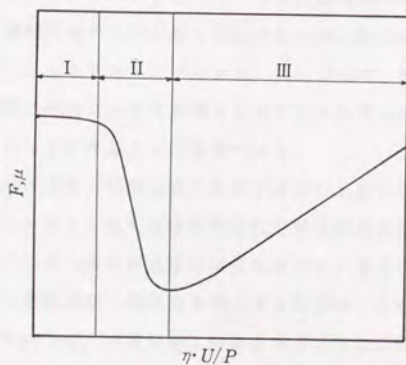


Fig.6 Striebeck curve.

域Ⅱの混合潤滑と呼ばれるもので、垂直荷重の一部は流体潤滑膜で支えられ、残りの荷重は接触し合っている表面の凸部で境界潤滑膜を介して支えられている。

この状態から二面の運動状態がさらに横軸にそって右へ移行すると、二面間の油膜の厚さはますます増大し、ついには、全面にわたって連続する厚い潤滑油の膜によって完全に隔てられるようになる。この領域Ⅲが流体潤滑と呼ばれる状態であり、摩擦力は流体膜を形成している潤滑油の粘性抵抗のみに依存するようになる。したがって、流体潤滑では境界潤滑の摩擦係数に比べ、一桁も二桁も小さくなるのが普通である。しかし、さらに横軸にそって右へ移行すると、再び摩擦力は増加するようになる。これは潤滑油の粘性による摩擦抵抗の増加と、潤滑油の粘性による発熱による温度上昇が生じ、これによって粘度が下がり、速度が増すのにかえって形成油膜厚みが下がることによるものである。

1. 4 塑性加工における潤滑機構 に関する従来の研究

1. 4. 1 工具・材料接触面間への潤滑油の導入機構

(1) 流体力学的な圧力による導入

塑性加工では、実際に潤滑油が必要なのは、工具と被加工材が接触し合っている摩擦界面においてである。しかし、この部分に外部から直接潤滑油が供給されることはまれであり、多くの場合は、摩擦界面の入口付近に供給されるか、加工の前に二面間に与えられた潤滑油がそのまま封じ込められるかだけである。したがって、摩擦界面に導入された潤滑油の量の多少が二面間の摩擦に大きな影響を及ぼすことを考えれば、この導入機構、あるいは封じ込め機構を明らかにすることは重要である。

摩擦界面への潤滑油の流体力学的な導入あるいは封じ込めには、前節において示したように、動圧効果のうち、主としてくさび効果と絞り膜効果が作用する。摩擦界面入口近傍、すなわち工具と被加工材との接触が始まる付近において、くさび効果によって高い圧力を発生させ、面圧の高い摩擦界面へ潤滑油を導入する形態は、引抜き加工、しごき加工、圧延などに見られる。Fig.7 は、引抜き加工におけるダイス入口部の状態を示したものである。まず、材料が V の速度を持ちながら、くさび角 α （ダイス半角 α ともいう）で接近する。この時、摩擦界面入口前部における潤滑油の圧力が P_i であるとすると、塗布された潤滑油はくさび効果によって圧力が高められ、その圧力が材料の降伏強さ P_0 になったと

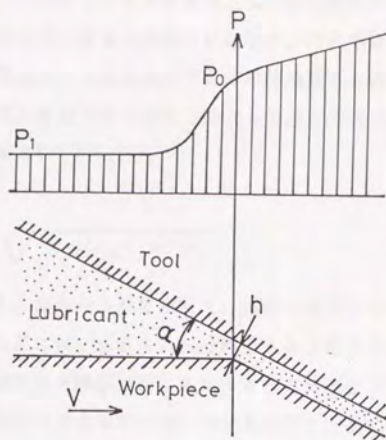


Fig.7 Schematic illustration of wedge film effect.

きにはじめて摩擦界面に入り込むことが可能となる。この時のグイス入口部に形成される潤滑膜の厚さ h は、(8) 式に示した Reynolds 方程式を解くことによって次式のように求めることができる^{(5), (54)}。ここで η は潤滑油の粘性係数である。

$$h = 3 \eta V \cot \alpha / (P_0 - P_1) \dots\dots\dots (9)$$

結局、材料の速度、すなわち加工速度が大きいほど潤滑膜は厚くなり、導入量が増加することを示している。また、摩擦界面における接触圧力が低いほど、言い替えれば、材料が柔らかいほど摩擦界面入口において形成される潤滑膜が厚くなる。さらに、くさび角が小さく潤滑油の粘度が高いほど、導入される潤滑油の量は多くなることが理解できる。

一方、絞り膜効果による潤滑油の封じ込めは、絞り加工におけるしわ押え面や、据込加工、押出加工の初期の段階にみられる。円柱の端面を、圧板を用いて押しつぶすときに潤滑油が絞り膜効果によって封じ込められる状態を Fig.8 に示す。いま、圧板が速度 V で外径寸法 L の円柱端面に接近すると、中央部付近に圧力が発生する。二面間の距離 h が小さ

くなるにしたがって圧力はますます高くなって円柱端面を变形させ、最終的には潤滑油が封じ込まれるようになる。潤滑油の粘性係数を η 、円柱の降伏応力を P_0 とすると、最終的に二面間に封じ込められる潤滑油の中央部の油膜厚さ h は、くさび効果におけるのと同様にReynolds方程式と被加工材の塑性方程式とを連立させて解くことによって以下のよう求めることができる^{(21)・(22)・(54)}。

$$h = \sqrt[3]{3 \eta V L^2 / P_0} \dots\dots\dots (10)$$

加工速度が大きく、潤滑油の粘度が高く、材料の降伏応力が低いほど、また円柱の外径が大きいほど、中央部に封じ込められる油膜厚さ h は厚くなることを示している。

以上のように、潤滑油が摩擦界面にもたらされるメカニズムは、動圧効果であるくさび効果あるいは絞り膜効果によるが、どちらが支配的であるかは加工の形態によって異なる。しかし、いずれにしても、これらの潤滑油の導入量の増加は、摩擦界面において流体潤滑

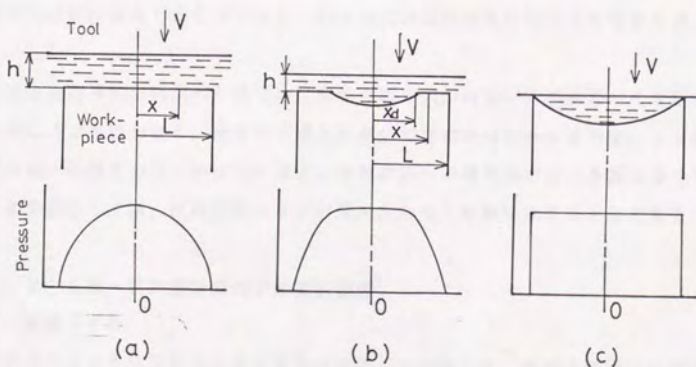


Fig.8 Schematic illustration of squeeze film effect.

部の増加を意味し、これらは摩擦・摩耗を低下させることに直接つながるものである。とくに絞り膜効果の場合、潤滑油が封じ込められる過程において、中央部から周囲へ潤滑油が流出すると考えられるが、これらは二面間の潤滑にとっては良い結果となり得るものである。

(2) 材料表面の凹凸による導入

前にも述べたように、材料の表面には小さな凹凸があり、その凹部に溜った潤滑油は、工具と材料が接触するときに、逃げる隙間がないと機械的に封じ込められたまま摩擦界面に持ち込まれる。この導入機構はすべての塑性加工において期待ができる。とくに、低粘度の潤滑油を使用するとき、あるいは加工条件によって、くさび効果や絞り膜効果だけでは十分潤滑油を持ち込めないようなときに効果がある。これらの効果を積極的に利用して、材料の表面を酸による腐食、ショットピーニングあるいはバレルなどによってあらかじめ粗くしておくこと、摩擦力が低下することが認められている⁵⁶⁾。

(3) 吸着による導入

潤滑油のある種のもは、金属の表面に物理的あるいは化学的に吸着する。物理的吸着とは、主としてファンデルワールス力によるものであり、温度を上げたり、圧力を減少させたりすると、比較的容易に分子間の結合が切れてはなれる。化学的吸着では、吸着分子と金属が化学的に結合したものであり、結合力は物理的吸着に比べてはるかに強いものとなる。

このような潤滑油の材料への吸着は、摩擦界面の入口において潤滑油がそぎ落とされることに対しての抵抗となり、潤滑油の導入においては重要な役割を果たす。すなわち、被加工材表面への吸着が強ければ強いほど、摩擦界面への潤滑油の持込み量は多くなると言える。この例としては、乾燥被膜タイプの潤滑油の導入形態にみることができる。

1. 4. 2 工具・材料接触面間での潤滑機構

(1) 接触モデル

前項に示したような潤滑油の導入機構が効果的に作用して、多量の潤滑油が摩擦界面に持たせられたとしても、塑性加工においては特殊な条件を除いて、摩擦界面の全面に連続した流体潤滑膜が形成されるということはない。たとえ摩擦界面入口で、厚い流体潤滑膜が形成されたとしても、塑性変形の進行にともなって、すなわち工具入口から出口に近付くにつれて、材料は肌あれを生じ、その表面粗さが急激に増大するために、これらの連続

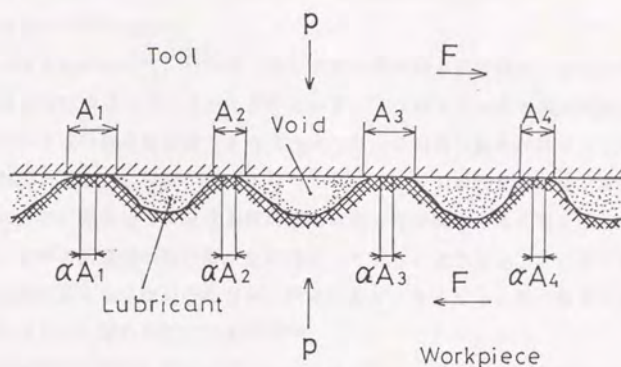


Fig.9 Schematic illustration of contact model
in plastic deformation process.

する流体潤滑膜は多くの場合中断され、表面粗さの凸部で工具との接触を生じるようになる¹⁵⁾。このようなことから、塑性加工の摩擦界面における工具と材料との接触模型は、一般的に Fig.9 のように示される。

被加工材表面の凸部が工具によって平坦化された部分は、工具と材料との真実接触面に近い状態にあると見なされる部分であるが、塑性加工の場合、一般的な機械の摺動面に比べて数段大きいものとなる。これは、切削や研削加工によってできた表面粗さに比べると、材料の塑性変形による肌あれのために表面の粗さが大きくなり、しかもその粗さの凸部が高い面圧によって押しつぶされ平坦化されるためである。また、反対に金型の表面粗さは、材料の粗さに比べると、一般的には無視できるほど小さいので、Fig.9 のように平滑面と見なされる。

この工具によって材料が平坦化された接触面上においては、多くの場合、全面にわたっていわゆる境界潤滑が支配的と考えられ、単分子あるいは数分子の境界潤滑膜がその摩擦を支配していると考えられている^{28), 57), 58)}。したがって、境界潤滑膜を形成するのに有効な添加剤とされる油性剤、あるいは極圧剤等の有効性に関して行われた研究は、主としてこの部分を対象として、潤滑剤分子の吸着性とか化学反応性が摩擦・摩耗あるいは焼

付き・かじりに及ぼす影響について検討した研究であると言える。

(2) ミクロプールの発生

Fig.9 のモデルにおいて、材料と工具との間に潤滑油が封じ込められている部分は、塑性加工においては普通ミクロプールと呼ばれる。ミクロプール中の潤滑油には、加工の進行にともなって高い静水圧が発生するようになり、この高い静水圧によって加工面圧の一部が受け持たれるようになる。このようなミクロプール中の潤滑油に高い静水圧が発生するということが、塑性加工における潤滑機構の大きな特徴であると言える。したがって、ミクロプール中の潤滑油に高い静水圧が発生していないような加工度の低い条件よりも、むしろ加工度が高くなった場合の方が、摩擦係数が小さくなったり、凝着による引っかかり傷が減少することも認められている^{58), 59)}。

一方、接触面上の圧力とミクロプール中に封じ込められた潤滑油の圧力との差が小さくなれば、ミクロプール中の潤滑油が境界潤滑状態にあるとされる工具と材料との接触面に浸入することも可能となると考えられる。このミクロプールからの潤滑油の浸透流出機構は、工具と材料との接触面に形成される隙間と関連して、潤滑油の物理的特性によって支配されると考えられるものであるが、このミクロプールからの潤滑油の流出の多少は、接触面上の潤滑剤の化学的挙動に対しても大きな影響を及ぼすものである。したがって、この流出機構の把握は、塑性加工におけるトライボロジーに関する研究を遂行する上で重要である。しかし、このミクロプール中の潤滑油の挙動、及びミクロプールから接触面上への潤滑油の流出機構は、未だ不明な点が多く、これらに関して現在多くの研究が行われている。次節においてその研究の一部を示すことにする。

1. 5 工具・材料接触面間での潤滑機構に関する従来の研究

1. 5. 1 春日・山口の潤滑モデル^{28), 58), 59)}

春日・山口らは、塑性加工における潤滑機構を検討するに当たり、巨視変形に必要な加工圧と、摩擦を生じる工具圧とを分離させることができ、しかも工具面と材料とに相対すべりを生じさせ得るような摩擦試験方法として、深絞り加工のフランジ面に注目した。すなわち、絞り加工においては、塑性変形しているフランジ部の材料表面への加圧は、しわ押え力を変化させることによって自由に变化させることができ、フランジ部の巨視変形に

必要な加工力はポンチ力によって与えることができる。この方法によって、加工中にフランジ部の材料表面に生じる肌あれが、すべりをともないながらしわ押え力によって圧下修正される状況を、肌あれの凹部に封じ込められた潤滑油との関連の下で実験的に検討した。この実験においては、フランジ部に生じる摩擦力を測定し、さらに工具によって平坦化された部分の割合、すなわち接触率とを測定し、両者の関係から塑性加工における潤滑機構について検討を加えた。

この結果、摩擦力を反映する最大ポンチ荷重が、しわ押え荷重の変化に対して示す傾向と、フランジ部における接触率の変化との傾向とが極めてよく類似しており、接触率と摩擦率との結びつきが歴然としていることが確認された。さらに、潤滑油の粘度の増加によって接触率が低下すること、さらにこれにともなって摩擦係数が低下することが確認された。また、接触部の単位体積当りの摩擦抵抗（摩擦せん断応力） τ_m が、潤滑剤に依存する常数（鉱油 1.0 kgf/mm^2 ，動植物油 0.7 kgf/mm^2 ，せっけん 0.4 kgf/mm^2 ）となることが明らかにされた。

これらの実験結果により、Fig.10 に示すような潤滑モデルが提案された。図において、平坦部Mは、材料の塑性変形による自由表面の挙動が工具によって拘束されて生じた表面でこの面を接触面と呼ぶ。一方、凹部Pは工具の直接拘束を受けない自由表面である。平坦部では、薄い境界潤滑膜によって工具と材料は隔てられている。また凹部では、その一部が潤滑剤で満たされたBの状態か、なお空所を残すAの状態かのいずれかであろうと考えられた。このBの状態では工具面圧の一部は潤滑剤によって受け止められ、潤滑状態は静水圧的粘性潤滑となり、一方これに対し平坦部では境界潤滑状態となる。

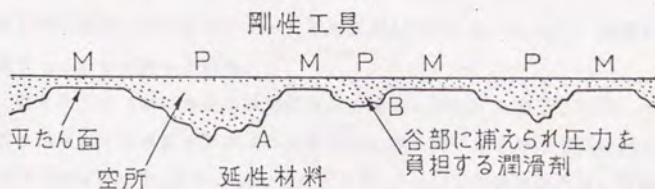


Fig.10 Schematic illustration of lubrication mechanism proposed by Kasuga.

この状態から工具の圧下力が増加すると、Aのような凹部に空所がある限り材料表面は、これを埋めるまで容易に変化するであろうし、逆にBのように潤滑剤が十分に満たされていれば、潤滑剤が圧縮され静水圧が発生する。この静水圧の発生は、材料の平坦化を妨げるように作用し、工具との接触を防ぎ潤滑に好効果をもたらすことになる。

以上のように、潤滑油の存在の下で、絞り加工の縮みフランジ部における肌あれと、工具による平坦化との関係が摩擦力に及ぼす影響について検討した結果から、表面粗さの凹部（マイクロブール）中の潤滑油には高い静水圧が発生し、これが工具と材料との接触を妨げ、接触率を低下させることによって摩擦を低下させているということを明らかにした。しかし、この摩擦界面の潤滑モデルにおいては、被加工材の表面の凹部に封じ込められた潤滑油が、工具によって平坦化された部分に入り込み得るかどうかが、さらに入り込めるとしたらそれは如何なる機構なのか、またその入り込む量に影響を及ぼす因子とは何なのかについては、十分に検討されていない。

1. 5. 2 水野の潤滑モデル^{33), 34)}

水野らは、摩擦界面における非接触部の圧力、すなわちマイクロブール中の潤滑油の圧力 q を十分に発生させ得るような「摺板の平面ひずみ圧縮・摩擦試験」を行い、塑性加工における潤滑機構について検討を加えた。その結果、動・植物油では、摩擦せん断応力 τ_m が春日らの実験における値に近い結果となるのに対し、粘度の高い鉱油の場合には、圧力が高くなると摩擦せん断応力 τ_m が春日の実験における値よりもかなり大きな値となることを見出した。この原因を、動・植物油と鉱油との圧力係数の違いに求めることができるとした。すなわち、鉱油の場合には、マイクロブール中で高い圧力のために著しく高粘度化し、その潤滑油自体の流体摩擦が無視できない場合があると考えた。これは、鋼の圧延では、粘度の高い鉱油を用いるとかえって摩擦係数が下がらないという、現場の報告と定性的に一致することも把握している。

さて、これらのマイクロブール中の潤滑油自体の摩擦を支配する因子として、水野は加圧力下における粘度 η （推定値）とすべり速度 V との積 $\eta \cdot V$ を求め、これに対して摩擦界面における平均摩擦応力 τ_m をプロットしたところ、Fig.11 に示すように、接触率あるいは平均油膜厚さが同じ場合には、植物油、鉱油を問わず τ_m が $\eta \cdot V$ の対数に比例して増大する領域があることを見出した。

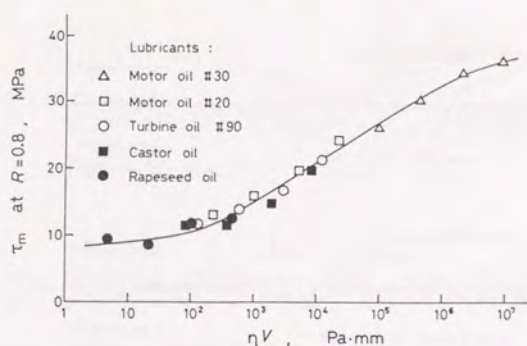


Fig.11 Correlations between τ_m at $R=0.8$ and $\log(\eta \cdot V)$.

τ_m ; friction shear stress

R ; contact ratio

η ; lubricant viscosity

V ; sliding speed

以上のような「帯板の平面ひずみ圧縮・摩擦試験」によって摩擦抵抗を求めて検討を加えた結果と、加工後の被加工材の表面をSEMによって観察した結果に基づいて、塑性加工における摩擦界面の潤滑機構としてFig.12のようなモデルを描いた。すなわち、 $\eta \cdot V$ が小さいときは、春日らのモデルにおけるのと同様にピット（マイクロプール）中の潤滑油は静水的に圧力を負担するにとどまるが、 $\eta \cdot V$ が大きくなるとピットの潤滑剤が動圧効果の作用により接触部へと入り込み、そこの膜厚を増大させるようになる。しかし、この膜厚の増大による摩擦応力の低下する割合よりも、 $\eta \cdot V$ の増加による潤滑油自体の粘性抵抗（あるいは油膜のせん断抵抗）の増加の方が優勢なため、これを反映して摩擦抵抗（摩擦せん断力） τ_m が増大するということである。こうした挙動は、接触面上の圧力 p とマイクロプール中の潤滑油の圧力 q との差が小さいという、塑性加工独特の条件下でこそ具現されるものであり、これらは微視的塑性流体潤滑機構（micro plasto-hydrodynamic lubrication）と呼ばれた。

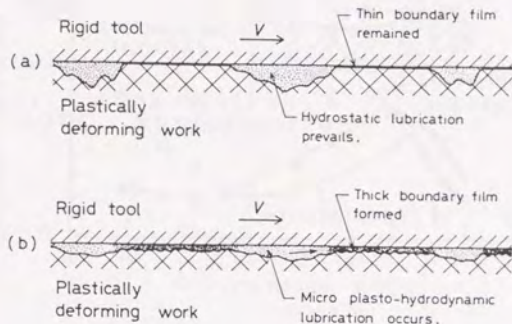


Fig.12 Schematic illustration of changes in lubricating conditions with viscosity under pressure η and sliding speed V ; (a) when the product $\eta \cdot V$ is small and (b) when the product $\eta \cdot V$ is large.

1. 5. 3 阮・工藤の潤滑モデル⁴⁸⁾

工藤らは、液体潤滑油を用いる冷間の平板引抜き加工において、工具と材料の相対すべり速度が比較的小さく、通常は境界潤滑または混合潤滑が支配的にあると考えられる状態において摩擦係数が加工速度とともに増えるという、Fig.6 に示した Striebeck線図の傾向に反する現象がしばしば生ずることに注目した。その結果を Fig.13 に示す。

彼らの研究では、主としてアルミニウム硬化板（一部、軟鋼板）を試験片とし、各種潤滑油、異なる塗布量、種々の試験片表面粗さを用いて、試作した広範囲速度引抜き試験機によって摩擦係数を測定した。さらに、接触面温度測定結果ならびに引抜き加工後の試験片の表面観察結果と合わせて、次のことを明らかにした。

1) 被加工材表面が酸による腐食面のようにある程度粗ければ、引抜き速度およそ $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ の範囲で、速度の上昇とともに摩擦係数が大きくなり、 $10^{-1} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ においては $10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ の時の摩擦係数の2倍以上になる現象が確認された。接触圧力が3倍以上あ

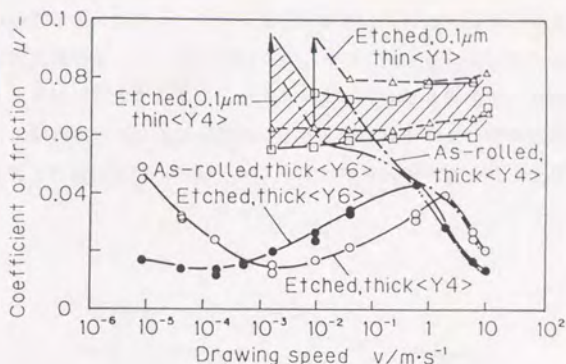


Fig.13 Effects of specimen surface roughness and lubricant film thickness upon coefficient of friction-drawing speed relation : A1-H, reduction in thickness $r=20\%$, and semi-die angle $\alpha=4^\circ$.

る軟鋼ダル仕上げ板の引抜き試験においても同様な傾向が見出された。

2) このような腐食面のアルミニウム板を使用した場合、上に示した引抜き速度範囲の下限付近で摩擦係数は 0.02 以下となり、引抜き加工後の表面粗さも $1 \mu\text{mRmax}$ 以下ときわめて滑らかであった。

3) 上記の速度範囲における潤滑機構として、素材表面の微視的ポケット（ミクロプール）に封じ込められた潤滑油が、表面の微視的突起平坦部（接触部）に動圧効果によって引き込まれて、厚さ $0.1 \mu\text{m}$ のオーダーの流体潤滑膜を形成するという、前述の水野の微視塑性流体潤滑モデルが確からしいことを示した。

1. 5. 4 小豆島らの潤滑モデル³⁹⁾

小豆島らは、アルミニウム平板の引抜き加工において、そのダイス材質として石英ガラス用い、加工中の摩擦界面を顕微鏡で直接観察した。その結果、ミクロプール中の潤滑油が接触面上に流出するのを確認した。この場合、低粘度油がミクロプール中に封じ込められた時には、加工の進行にともなって進行方向の前後方向に流出すること、一方、高粘度

油の場合には後方に主に流出し、その量は低粘度油より少なくなることを確認した。

このような流出機構として、彼らは以下のような考えを示している。まず、据込み加工を対象とし、マイクロボールに封じ込められた潤滑油に生じる圧力を、潤滑油自体の圧縮率との関連の下で解析すると、圧下率がわずか4%程度において、潤滑油の圧力は接触面上の圧力とほぼ等しい値にまで上昇する。このような状況下において、工具と被加工材が相

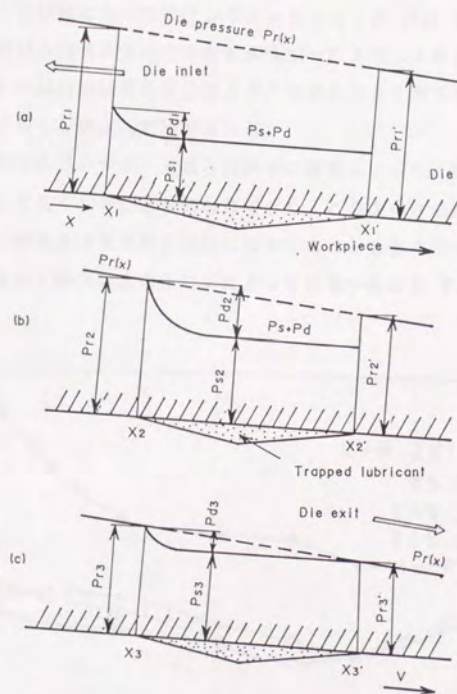


Fig.14 Models to account for oil permeation from surface pocket into real contact area (b) backward permeation, (c) backward and forward permeation

対すべりを生じると、ミクロブール中の潤滑油には動圧効果によってミクロブール後端部において圧力の上昇がもたらされ、この圧力の上昇によって、潤滑油はミクロブール後端から接触面上へ流出することが可能となる。その模型図をFig.14 に示す。(a)は圧下が小さい入口近傍の状態を想定したものであるが、被加工材の圧下によって生じるミクロブール中の潤滑油の静水圧 P_{s1} が、接触面上の圧力 P_{r1} , P_{r1}' にまで達し得ず、動圧効果によって圧力上昇 P_{d1} が生じても、潤滑油はミクロブールから接触面上へは流出し得ない。(b)は、圧下によって生じるミクロブール中の静水圧 P_{s2} がある程度高くなった状態で、このような状態において動圧効果による圧力上昇 P_{d2} がもたらされると、ミクロブール後端における潤滑油の圧力が接触面圧 P_{r2} と等しくなり、ここから潤滑油が後方へ流出する。この場合には高粘度油ほどその効果が大きくなるので、高粘度油の後方からの流出現象はこのことによって説明される。

一方、引抜き加工においては、工具と材料との摩擦によって、面圧 $P_r(X)$ が工具入口から出口に向かって低くなることが知られており、このような条件下では、低粘度油の場合、ミクロブール前方及び後方から同時に流出することも有り得るという考えを示した。すなわち、低粘度油の場合には動圧効果によって発生する圧力 P_{d3} は小さく、そのため

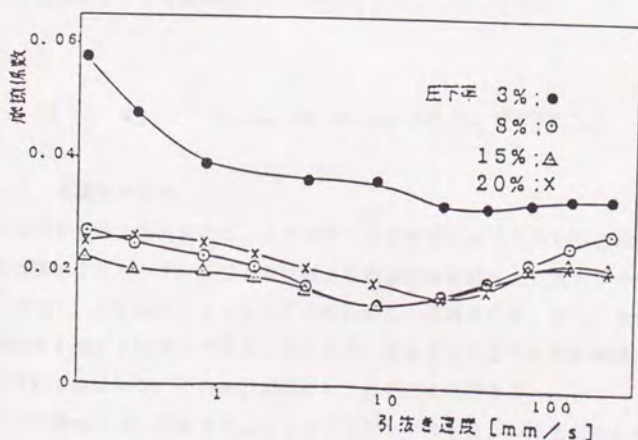


Fig.15 Friction in sheet drawing test.

Fig.12 (c) に見られるようにミクロブールがダイス出口に近付いて静水圧 P_{s3} が高まり、 $P_{s3}+P_{d3}$ がミクロブール後端のダイス圧力 P_{r3} に達したときミクロブール前端でも P_{s3} が P_{r3}' に達することが予想できる。これによってミクロブール前後端からの流出は説明できるとしている。

また、別に行ったアルミ材の引抜き加工実験において⁶⁸⁾、Fig.15 に示すように引抜き速度が 10 mm/s を越えると、摩擦係数が引抜き速度の増加にともなって増加するのが認められ、これはマイクロPHL（マイクロ塑性流体潤滑）によるとしている。

1. 5. 5 ミクロブール潤滑機構に関する従来の研究のまとめ

塑性加工の工具・材料摩擦界面に形成されたミクロブールの潤滑機構に関して、これまで行われた研究の内容は、要約すると、つぎの二つについて検討したものであると言える。まず第一は、ミクロブールから接触面上への潤滑油の浸透流出機構であり、第二は、 $\eta \cdot V$ の増加にともなって摩擦係数が増加する原因の追求である。このことに対するそれぞれのモデルの内容を整理して示すとTable 1 のようになる。何れのモデルも、ミクロブールからの潤滑油の流出機構は、主としてミクロブール中の潤滑油に生じる動圧効果によるものとしている。また、 $\eta \cdot V$ の増加にともなって摩擦係数が増加する原因は、摩擦界面で高圧のために高粘度化した潤滑油自体の粘性抵抗によるとしている。

1. 6 本研究の目的及び構成

1. 6. 1 本研究の目的

工具・材料の摩擦界面において、ミクロブール中に封じ込められた潤滑油は、境界潤滑が支配的な状態にあるとされる工具と材料との直接接触面間に入り込めるのかどうかということ、さらに、入り込めるとしたらそれは如何なる機構なのか、また、その入り込む量に影響を及ぼす因子とは何なのかということは、塑性加工における潤滑機構においても最も不明とされる点であり、その説明が待たれているところである。

このことに関しては、前節で示したようにこれまでも多くの研究が行われ、主としてミクロブール中の潤滑油が、動圧効果によって工具と材料との接触面間に浸透流出するというモデルが提案されている。しかし、これらのモデルも、現段階では、塑性加工におけ

Table 1 Resume of lubrication models.

	ミクロプールから潤滑油の流出機構	$\eta \cdot V$ の増加に伴って摩擦係数が増加する原因
水野のモデル	<p>動圧効果による。従って潤滑油の高圧における粘度ηと速度Vの積$\eta \cdot V$が大きい条件において接触面間に浸入する。</p> <p>(影響因子)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・潤滑油粘度η ・加工速度V 	摩擦界面における高粘度化した潤滑油の粘性抵抗による。
阮・工藤のモデル	<p>動圧効果による。従って潤滑油の高圧における粘度ηと速度Vの積$\eta \cdot V$が大きい条件において接触面間に浸入する。</p> <p>(影響因子)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・潤滑油粘度η ・加工速度V ・ミクロプール後端に形成されるくさび角 	<p>摩擦界面における高粘度化した潤滑油の粘性抵抗による。</p> <p>(とくに工具と材料との接触面間に形成される薄い油膜の流体的せん断抵抗による)</p>
小豆島のモデル	<p>ミクロプール後端からの流出は動圧効果による。前方からの流出は摩擦界面の面圧の変化による。</p> <p>(影響因子)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・潤滑油粘度η ・加工速度V ・ミクロプール後端に形成されるくさび角 ・摩擦界面の面圧変化 	マイクロPHL

る潤滑機構を十分に説明できるものであるとはいえない。とくに、これらのモデルにおいては、何れも工具表面粗さが全く考慮されていないことが指摘されよう。すなわち、工具表面粗さに注目した場合、ラッピングによって仕上げた工具でも、その表面粗さはせいぜい $0.01\mu\text{m}$ R_{max} 程度のオーダの粗さがあり、一般的に仕上げられた工具表面では $1\mu\text{m}$ R_{max} 程度のオーダにもなる。これらの値は潤滑油分子の大きさに比べれば遙かに大きい値であり、これまでに示された潤滑機構のモデルのように、工具の表面粗さを原子レベルの平滑面と仮定し、動圧効果によってミクロブールから潤滑油が流出しない限り、工具と材料との接触面間に潤滑油は入り込み得ず、また、動圧効果による流出が無い限り接触面間の全ては、薄い数分子膜程度の境界潤滑膜によって潤滑されるような状態にあるとするのは、接触モデルを単純化し過ぎていると言えよう。これらのモデルにおいて、工具と材料とが直接的な接触を生じていると考えられている接触部分に、すなわち、材料が工具によって平坦化された部分と、その工具とが接触している部分に、さらに Fig.3 (b) に示した Bowden の接触モデルのような、ミクロな凹凸の接触を上乗せして考えるべきである。要するに、Fig.9 のモデルはあたかも Bowden の接触モデルに基づいて描かれたかのように見えるが、実際に Bowden が意図するところの接触が生じているのは、さらに粗さの概念が一桁小さい、工具と材料とが直接接触していると考えられている、いわゆる平坦部上であると考えるのが妥当であろう。すなわち、工具によって材料が平坦化された部分に、さらに工具粗さによって形成される微細な隙間や油溜りが存在するような接触モデルが考えられる。このような工具粗さを考慮するとき、その粗さによって形成されるミクロブールの周囲の接触面間の微小な隙間が、ミクロブールからの潤滑油の流出挙動に対して大きな影響を及ぼすであろうということは、十分予測されるところである。

このような観点から、本研究は、被加工材表面粗さの凹部に潤滑油が捕捉されて摩擦界面にもちこまれ、そこでミクロブールが形成されるような潤滑状態において、このミクロブールの形態と使用する潤滑油の流体力学的特性、すなわち粘度などとの関連の下で、ミクロブール中に存在する潤滑油の挙動、あるいはミクロブールから接触面上への潤滑油の浸透流出機構について、工具表面粗さの影響に注目しながら実験的に調査し検討する。具体的には、工具表面粗さとともに、このようなミクロブール中の潤滑油の挙動、あるいは流出機構に影響を及ぼすであろうと考えられる種々の因子、例えば、被加工材表面粗さ、潤滑油の動粘度、加工速度、圧下率等を、個々あるいは複合的に取り上げ、試作したしごき型摩擦試験装置による平板のしごき試験において、その影響について調査する。これ

らの実験によって得られたデータに基づいて、被加工材表面粗さが大きく、かつ低速加工の場合に、塑性加工の潤滑状態を支配している可能性のある、ミクロブール潤滑機構の解明を図ることを目的としている。

1. 6. 2 研究の構成

本論文においては、第2章では、まず、ミクロブールから潤滑油が工具と材料との接触面間に浸透流出する挙動を直接的に観察することが必要であると考えられ、この目的のために平板しごき型実験装置を試作する。またこの装置によって、この時の摩擦界面の摩擦係数を測定することができるようにした。実験では、被加工材表面に低倍率の顕微鏡でも観察できるような比較的大きめのミクロブールをエッチングによって形成し、使用する潤滑油の粘度を種々変化させて、これにしごきを加え、ミクロブールからの潤滑油の流出挙動を観察するとともに、その時の摩擦係数の変化に付いて検討を加える。

ミクロブールから潤滑油が接触面上に浸透流出するという潤滑機構においては、前項で述べたように、工具表面粗さが重要な役割を演じていると予測されるところであるが、加工速度もこのような潤滑機構に影響を及ぼす因子と考えられる。第3章においては、使用する潤滑油の粘度との関連の下で、ミクロブールからの潤滑油の流出挙動に及ぼす工具表面粗さ及び加工速度の影響に付いて検討を加える。

第4章においては、ミクロブールからの潤滑油の流出機構に及ぼす圧下率の影響に付いて検討を加える。すなわち、しごき加工や引抜き加工においては、摩擦界面の面圧が工具入口から出口に向かうにしたがって減少することが認められている。このような条件においては、金属と潤滑油の圧縮率の相違から、ミクロブール中の潤滑油の圧力が接触面上の面圧より高くなることも起こり得るが、このような条件におけるミクロブール潤滑機構について検討を加える。

第5章では、前章までの結果を基にして、ミクロブールから接触面上へ潤滑油が浸透流出するという潤滑機構において、これまでのモデルにおいて提案されている動圧効果では説明できない現象が数多くあることを示し、一方、これらを無理なく説明し得る、本研究によって明らかにすることのできた塑性静圧ミクロブール潤滑機構のモデルを示す。また、流出挙動の定量的な解析を試みる。

第6章は総括であり、この研究によって明らかにされた主な結果及び知見に付いて総括する。

<参考文献>

- 1) 佐賀二郎・岩崎源：塑性と加工，9-85(1968)，93.
- 2) 河合望・近藤一義・清水勲・龍神毅：機械学会論文集，37-301(1971)，1782.
- 3) 河合望・近藤一義・清水勲・中村保：機械学会論文集，37-301(1971)，1788.
- 4) 小坂田宏造・鳴瀧良之助・南謹二：塑性と加工，15-164(1974)，737.
- 5) 佐藤 夫・上杉平二・萩原文男・野上忠：塑性と加工，19-214(1978)，942.
- 6) 木原諄二・川中秀夫・永森弘之・松田弘之：塑性と加工，20-219(1979)，323.
- 7) 小松崎茂樹・上松豊翁・奈良原俊和：塑性と加工，29-330(1988)，748.
- 8) 小松崎茂樹・上松豊翁・奈良原俊和：塑性と加工，29-333(1988)，1063.
- 9) Shima, S., Watanabe, Y., Oyane, M. : Trans. ASME, Journal of Tribology, 107-4 (1985), 211.
- 10) Bloor, S.M., Dowson, D., Parsons, B. : Journal Mechanical Engineering Science, 12-3 (1970), 178.
- 11) Wilson, W.R.D., Murch, L.E. : Trans. ASME, Journal of Lubrication Technology, 98-6 (1976), 426.
- 12) Dow, T.A., Kannel, J.W., Bupara, S.S. : Trans. ASME, Journal of Lubrication Technology, 97-1 (1975), 4.
- 13) 小豆島明・木原諄二・五弓勇雄：塑性と加工，19-214(1978)，958.
- 14) 五弓勇雄・木原諄二・有村透・岡戸克：塑性と加工，14-145(1973)，160.
- 15) 水野高爾：塑性と加工，7-66 (1966)，383.
- 16) 水野高爾：塑性と加工，7-68 (1966)，447.
- 17) 小倉茂稔：塑性と加工，20-218 (1979)，215.
- 18) 葉山益次郎：塑性と加工，13-139(1972)，600.
- 19) Ratnagar, D.D., Cheng, H.S., Schey, J.A. : Trans. ASME, Journal of Lubrication Technology, 96-10 (1975)，591.
- 20) 春日保男・堤成晃・井藤正照：塑性と加工，16-174 (1975)，593.
- 21) 大矢根守哉・小坂田宏造：機械学会論文集，34-261 (1968)，1001.

- 22) 大矢根守哉・小坂田宏造：機械学会論文集，35-271 (1969)，673.
- 23) Pearsall, G.W., Backofen, W.A. : Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry, November (1983), 329.
- 24) Wilson, W.R.D., Delmolino, W.P. : Wear, 29 (1974), 1.
- 25) Butler, L.H. : Metallurgia, April (1960), 167.
- 26) Nellesmann, T., Bay, N., Wanheim, T. : Wear, 43 (1977), 45.
- 27) 池 浩・井上純：塑性と加工，30-336 (1989)，97.
- 28) 春日保男・山口勝美：塑性と加工，6-51 (1965)，189.
- 29) 木原諄二・相澤龍彦・坂本宏規：昭63塑性加工春季講演論文集，(1988)，375.
- 30) 木原諄二・相澤龍彦・片岡征二：昭63塑性加工春季講演論文集，(1988)，383.
- 31) 相澤龍彦・木原諄二：40回塑性加工連合講演会論文集，(1990)，215.
- 32) Aizawa, T., Kihara, J., Kataoka, S. : Proc. 5th Int. Congress Tribology (1989), Vol.2, 155.
- 33) Mizuno, T., Okamoto, M. : Trans. ASME, Journal of Lubrication Technology, 104-1 (1982), 53.
- 34) Mizuno, T., Hasegawa, K. : Trans. ASME, Journal of Lubrication Technology, 104-1 (1982), 23.
- 35) Avitzur, B. : Wear, 126 (1988), 227.
- 36) 河合望・中村保：機械学会論文集，39-328 (1973)，3811.
- 37) 河合望・近藤一義・中村保：日本機械学会論文集，39-326 (1973)，3181.
- 38) 工藤英明・長浜高四郎・高木康司・成子由則：塑性と加工，13-139(1972)，593.
- 39) 小豆島明・坪内昌生・工藤英明・古田憲明・峯村憲：塑性と加工，30-347 (1989)，1631.
- 40) 阮 鋒・工藤英明・坪内昌生・堀隆弘：塑性と加工，28-312(1987)，41.
- 41) 中村保・金原秀幸：日本機械学会論文集，54-506 (1988)，2388.
- 42) 池 浩：塑性と加工，27-300 (1986)，63.
- 43) 池 浩：塑性と加工，24-272 (1983)，933.
- 44) 小松崎茂樹・上松豊翁・奈良原俊和：塑性と加工，30-340(1989)，689.
- 45) 曾田範宗：摩擦の話，(1974)，岩波新書.
- 46) 日本潤滑学会編：潤滑ハンドブック，(1975)，養賢堂.

- 47) Tabor, D. : Trans. ASME, Journal of Tribology, 103-4 (1981), 169.
- 48) H. チコス：トライボロジー, (1981), 講談社サイエンティフィック.
- 49) 宮川行雄：潤滑, 28-7 (1982), 485.
- 50) 曾田範宗：日本機械学会誌, 81-719 (1978).
- 51) Bowden, F.P., Tabor, D. : The Friction and Lubrication of Solid, (1950), Oxford, Clarendon Press. 曾田範宗訳：固体の摩擦と潤滑, (1978), 丸善.
- 52) 木村好次：塑性と加工, 15-159 (1974), 321.
- 53) 桜井俊男：新版潤滑油の物理化学, (1978), 幸書房.
- 54) 日本塑性加工学会編：塑性加工におけるトライボロジー(1988), コロナ社.
- 55) 木村好次：塑性と加工, 17-191 (1976), 1010.
- 56) 佐賀二郎：塑性と加工, 8-81 (1967), 548.
- 57) 河合望・中村保：塑性と加工, 19-204 (1978), 61.
- 58) 春日保男：塑性と加工, 9-87 (1968), 207.
- 59) 春日保男：塑性と加工, 13-139 (1972), 581.
- 60) 宇田道正・小豆島明・坪内昌生：平2年塑性加工春季講演会論文集, 169.

第2章 低速しごき加工における工具・材料 接触面の観察^{1), 2)}

2. 1 緒 言

塑性加工中の工具と材料との摩擦界面において、材料表面の粗さの凹部に潤滑油が封じ込められた状態をマイクロプールと呼んでいるが、このマイクロプール中の潤滑油の挙動が混合潤滑状態にあるとされる塑性加工の潤滑機構に対して、大きな影響を及ぼしている可能性があることについては前章において述べた通りである。本研究の目的は、摩擦界面に形成されたマイクロプール中に封じ込められ、高い静水圧を発生している潤滑油が、境界潤滑状態にあるとされる工具と材料との直接接触面間へ浸透流出する挙動について詳細に検討し、塑性加工の潤滑機構を究明しようというものであるが、このためには、まずマイクロプールからの潤滑油の流出挙動を直接観察することが必要である。

本章では、あらかじめ被加工材の表面に、低倍率の顕微鏡でも観察できるような、比較的大きな一定形状のマイクロプールをエッチングによって形成し、これにしごきを加えて、これらのマイクロプールから工具と材料との接触面間へ潤滑油が流出する挙動について観察することを試みた。この観察が容易にできるようにするために、平板のしごき型摩擦試験装置を試作し、また、この装置によってこの時の摩擦界面における摩擦係数を測定し、顕微鏡観察による結果と併せて、マイクロプールからの潤滑油の浸透流出挙動について検討を加える。

2. 2 実験方法

2. 2. 1 被加工材

被加工材は 7-3 黄銅 (C2600P-1/2H) で板厚 1 mm のものを使用した。その引張強さは 370 MPa、伸びは 47% である。この材料は、圧延のままでの表面粗さが $0.3 \mu\text{mR}_{\text{max}}$ と比較的平滑であり、また加工後の肌あれも小さく、さらに予備実験の結果では焼付がほ

とんど発生しなかった。これらの被加工材を切削加工によって $25 \times 140 \text{ mm}$ の短冊状に仕上げた後、そのままの表面状態（以後圧延材と呼ぶ）で、またはつぎに述べるようなエッチングを施した表面状態（以後エッチング材と呼ぶ）とした後、幅約 30 mm のU型に曲げ加工を行って実験に使用するしごき試験片とした。この場合、エッチング面が表側となるようにU曲げ加工を行った。

2. 2. 2 エッチング条件、凸材と凹材

Fig.1 に示すようなエッチングパターンを被加工材の片側表面に焼付けた後、塩化第二鉄を用いてエッチングを施した。直径 1 mm の円の部分がエッチングされて凹となるもの（以後凹材と呼ぶ）と、逆に他の部分がエッチングされて円の部分が凸となる（以後凸材と呼ぶ）ような2条件の試験片を作成した。これによって、摩擦界面において一つ一つが独立していて、閉じた形状となったマイクロボールが存在し、加工にともなってそこで静水圧を発生し得るような条件と、マイクロボールが連続した形態で存在し、加工中に潤滑油がこれらのマイクロボールを通して流出してしまうような条件について検討を加えることを目

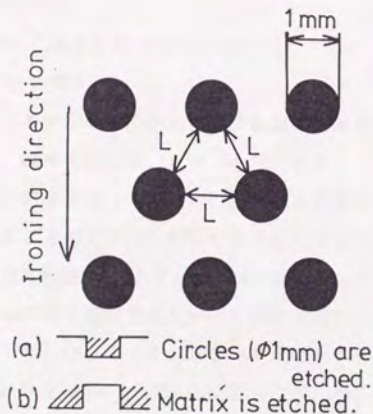


Fig.1 Etching pattern.

的とした。円と円の間隔 L の長さは 0.1, 0.25, 0.5, 2.5 mm に変化させた。この場合、加工中の摩擦界面にミクロプールが何列ぐらい入り込むかは、後述のしごき率との関連による。エッチングの深さはいずれも $60 \pm 10 \mu\text{m}$ とした。

2. 2. 3 実験装置

しごき加工中の摩擦状態を検討するために、Fig.2及び Fig.3 に示すような平板しごき型摩擦試験装置を試作した。U型に曲げた試験片③をポンチ④にかぶせ、一對の平ダイス⑤の間を通過させることによって所定のしごきを加えるものである。平ダイスは、加工中のダイス面上の荷重を垂直方向、水平方向に分解して測定できるような八角計ロードセル^{3), 4)}①, ②に取り付けられている。このロードセルは左右に1個ずつ取付けられ、それぞれ No.1, No.2 ロードセルとした。これらのロードセルのクロストークを考慮した線形計算式を以下に示す。

No.1 ロードセルに対しては、

$$\text{垂直力 } FV = 0.945 (SV - 0.066 SH)$$

$$\text{水平力 } FH = 0.808 SH$$

No.2 ロードセルに対しては、

$$\text{垂直力 } FV = 0.972 (SV - 0.103 SH)$$

$$\text{水平力 } FH = 0.833 SH$$

SV, SHはそれぞれロードセルの加工中の垂直方向出力、水平方向出力である。補正項は無視できるほど小さい。摩擦係数 μ は、 $\mu = FH/FV$ によって求めることができる。

平ダイス先端部には、超硬合金 (JIS G2相当) を装着し、その表面粗さの凹凸の凹部 (チャンネル部) がしごき加工方向に対して直角になるように研削仕上げした。その表面粗さはしごき加工方向に測定して $0.8 \mu\text{m } R_{\text{max}}$ とした。ダイス半角はスペーサブロックを交換することによって種々選択できるが、本実験においては 5° 一定とした。

また、しごき率 (圧下率) R はシックネスゲージをポンチと平ダイス間にはさみ、クリアランスを調整して見かけ上 25% と 40% に設定したが、加工後に板厚を測定した結果は、それぞれ $R' = 17\%$, 30% となった。以後においてしごき率を表記する場合には、実際のしごき率 R' を用いることにする。この場合、加工中に工具と材料とが接触している長さ、すなわち摩擦界面の長さを計算すると、 $R' = 17\%$ の時は 2mm , $R' = 30\%$ の時は 3.5mm となる。したがって前述のエッチングパターンにおける円と円の間隔 L との関係において、

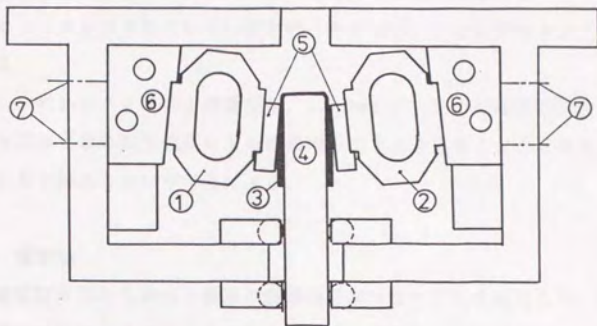


Fig.2 Schematic representation of friction testing apparatus;

- ① Load cell (No.1), ② Load cell (No.2) ③ Workpiece,
- ④ Punch, ⑤ Flat die, ⑥ Spacer block to adjust die angle,
- ⑦ Reduction - adjusting screws.

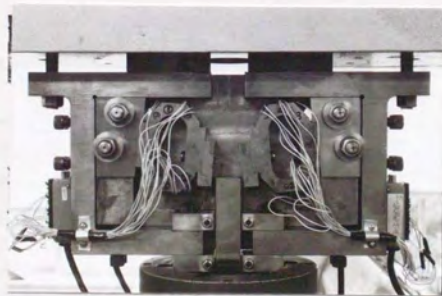


Fig.3 Photograph of friction testing apparatus.

$R' = 17\%$ のときに、円と円の間隔 $L = 2.5\text{mm}$ のものを被加工材として用いた場合に、一時的に加工中の摩擦界面にミクロブールが全く存在しなくなることも生ずる。この時の工具と材料のエッチングされていない平坦部との接触は、いわゆる見かけ上で 100% の接触率となる。

加工速度、すなわちポンチの上昇速度は、 1.5 mm/s 一定の低速度で実験を行った。これは、工具入口における動圧効果による潤滑油の引き込み量を少なくすることと、加工による温度の上昇を抑えるという考えによる。

2. 2. 4 潤滑油

潤滑油は動粘度が異なる炭化水素系の潤滑油（ポリブテン）を使用した。本実験においては、境界潤滑性を向上させるような油性剤、極圧剤等の添加剤は加えていない。その大気圧中における特性をTable 1 に示す。また、摩擦界面の面圧が非常に高くなる塑性加工においては、使用する潤滑油の高圧粘度特性を把握しておくことは重要である。そこで、ASME: Pressure-Viscosity Report⁵⁾ を参考にして、ポリブテンの高圧動粘度を求めた。その一例をFig.4 に示す。常圧粘度の高低の順位は、高面圧条件においても変化が無いことが確認できる。したがって以後においては、潤滑油の粘度の表示として、すべて大気圧中における動粘度を用いることにする。

実験は同一条件で試験片を各3枚づつしごいた。それぞれ、一枚目をしごく前には必ず# 1500 の研磨紙によってダイス面をラッピングし、その後ベンジンで脱脂してから所定

Table 1 Kinematic viscosity of lubricants (cSt).

Designation of lubricants Temperature	Ip	0H	5H	15R	100R	300H	2000H
37.8°C	12.5	30	123	850	8300	37000	-
98.9°C	2.8	4.5	10.5	38	220	850	4600

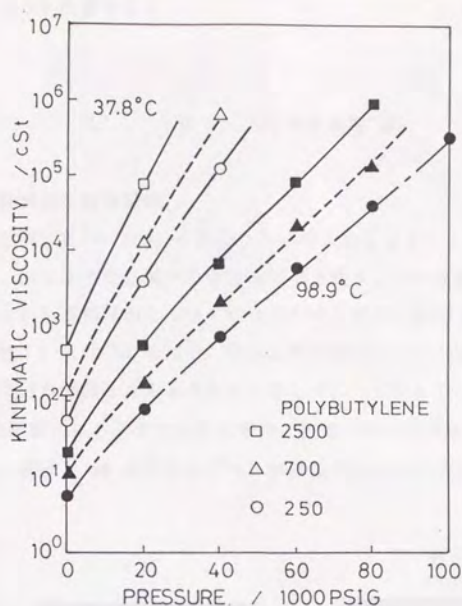


Fig.4 Relationship between pressure and viscosity.

の潤滑油を塗布した。ラッピングによる表面粗さの変化は無視できるほど小さいものであった。2枚目以後はラッピングせず、脱脂後に潤滑油を塗りなおすのみとした。1～3枚目における摩擦係数の変化はほとんど認められなかった。

2. 2. 5 摩擦係数 μ の求め方

摩擦係数 μ は全ストローク (T.S.) を通して一定値を示すものが多いが、条件によってはストロークの進行にともなって増加するもの、あるいは加工初期に高い値を示すものも認められた。本実験では、加工の始まる点から全ストロークの 1/4, 2/4, 3/4 ストローク点における摩擦係数を求めた。この場合、3枚の試験片をしごくことによって、各ストローク点において、それぞれ合計6個のデータがえられることになるが、以下におい

ては、これら各点の平均値を示す。

2. 3 実験結果

2. 3. 1 材料表面の観察結果

しごき率（圧下率） $R' = 30\%$ の条件において、全しごきストロークの約 $1/2$ の点で加工を中断して、加工途中の試験片を逆方向に引き抜き、その試験片が平ダイスと接触していた部分、すなわち摩擦界面となっていた部分の試験片の表面を顕微鏡で観察した。

まず、低粘度油 Ip 及び OH を用い、被加工材表面にあらかじめエッチングによって形成した $\phi 1 \text{ mm}$ の円が凹部となるようなエッチング材（凹材）で、その円と円との間隔 L を 2.5 mm とした試験片にしごきを加えた場合の表面状態の観察結果を Fig.5 に示す。観察したところは、直径 1 mm のマイクロボールが摩擦界面から出る直前のダイス出口付近で

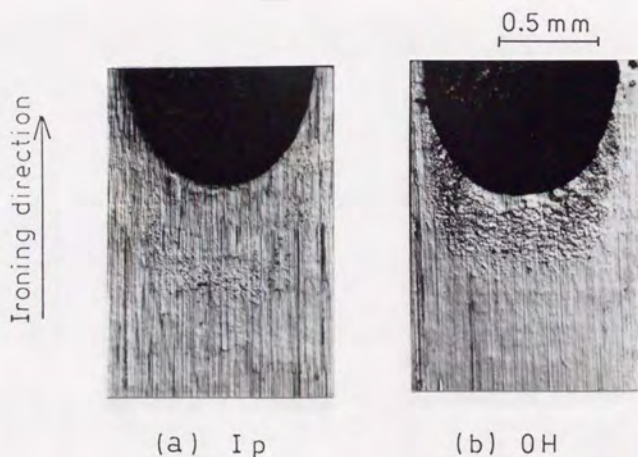


Fig.5 Infiltration of less viscous lubricant into boundary contact region under processing ($L : 2.5 \text{ mm}$).



Fig.6 Infiltration of less viscous lubricant into boundary contact region under processing (L: 0.5mm, Lubricant: Ip).

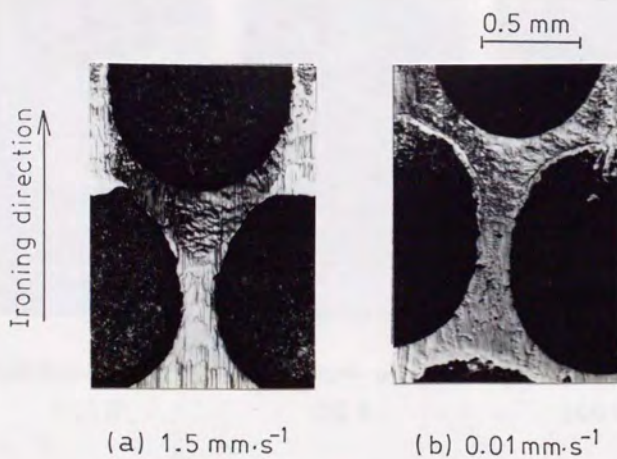


Fig.7 Infiltration of less viscous lubricant into boundary contact region under processing (L: 0.1mm, Lubricant: Ip).

ある。写真では、試験片がダイスによって上から下へしごかれた場合の、マイクロブール後端付近の状態を示している。この条件は、一つ一つが独立していて、それが閉じた形状となっているようなマイクロブールが摩擦界面に存在する場合の、マイクロブールからの潤滑油の流出挙動をシミュレートするものである。

これらの写真からも明らかのように、低粘度の潤滑油 Ip,あるいは Oh の何れを用いた場合でも、マイクロブール後端から潤滑油がエッチングされていない部分、すなわち工具と材料とが見掛け上接触をしていたと言える部分に入り込んだ形跡が明瞭に観察された。さらに、 $L=0.5\text{mm}$ の条件においては、Fig.6 に示すように最も低粘度油の Ip を用いた場合には、しごき加工の進行方向に対して、マイクロブールから左右の横方向の接触面上に潤滑油が入り込んだ形跡が伺える。さらに、マイクロブールとマイクロブールの間隔を最小とした $L=0.1\text{mm}$ では、Fig.7 (a) に示すようにかなり厚い潤滑油の膜が、マイクロブール後端から接触面上へ入り込む状態が確認できた。この状態は同図の (b) に示すように、ミク

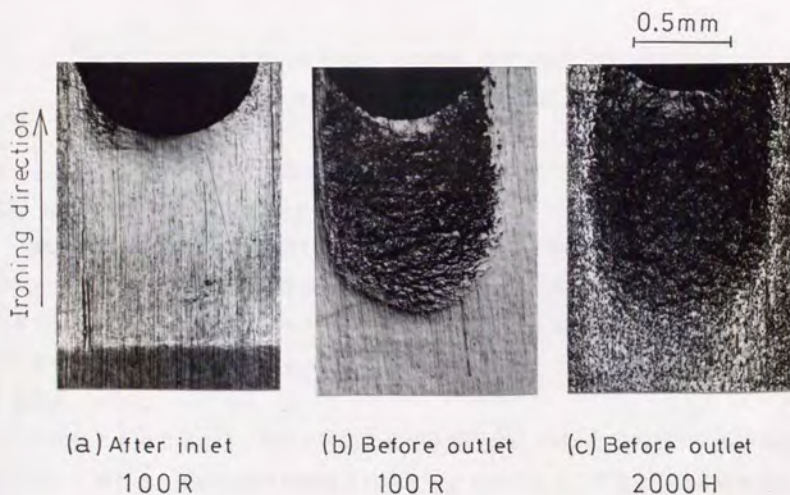


Fig.8 Infiltration of highly viscous lubricant into boundary contact region under processing ($L: 2.5\text{ mm}$).

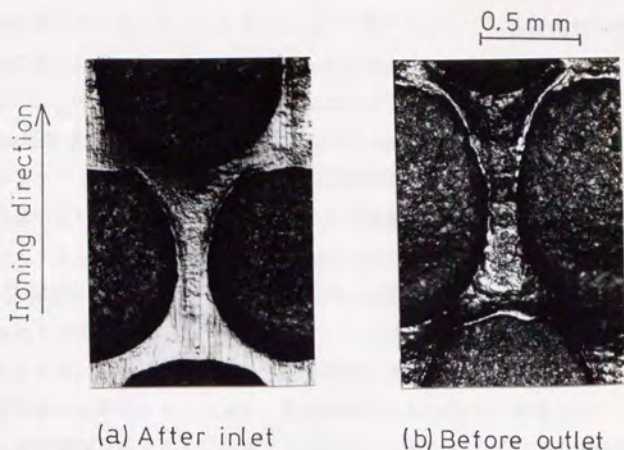


Fig.9 Infiltration of highly viscous lubricant into boundary contact region under processing ($L : 0.1 \text{ mm}$).

ロブール中に封じ込まれた潤滑油には動圧効果がほとんど生じないであろうと考えられる 0.01 mm/s の極低速とした場合でも同様に観察された。

一方、高粘度の潤滑油 100R 及び 2000H を用い、 $L = 2.5 \text{ mm}$ とした場合の顕微鏡写真を Fig.8 に示す。観察したところは、マイクロブールが完全に摩擦界面上に入り込んだ時点のダイス入口付近と、マイクロブールが摩擦界面から出る直前の出口付近である。この場合も、試験片が平ダイスによって上から下へしごかれたときの、マイクロブールの後端付近の状態を示している。

入口付近のものでは、マイクロブールの後端の平坦部分に“だれ”を生じているのが認められる。これらは、低粘度油では観察されなかったものである。中央から出口付近では、この“だれ”から潤滑油が接触面上に入り込み、これが加工の進行方向に対して後方に帯状に伸びる状態が観察された。ここで注目すべきことは、潤滑油があまり横方向へ広がることなしに、流動性を失った固体状となって入り込むということである。この傾向は 15R 以上のすべての高粘度油に認められた。さらに、 $L = 0.1 \text{ mm}$ では、Fig.9 に示すように、

ダイス入口付近において、すでにかなり厚い潤滑膜がマイクロボール後端部を押しつぶすかのようにして接触面上へ入り込む状態が確認できた。また、ダイス出口付近においては、接触面上全体がこの厚い油膜によって覆われるのが観察された。この状態は、加工速度を 0.01mm/s の極低速とした場合でも同様に観察された。

一方、エッチングを施していない試験片（圧延材）及びエッチング材で凸材の場合には、低粘度油を用いた時の加工後の表面は、どちらの試験片とも境界潤滑状態にあったことを示すようなスクラッチの多い光輝面となっているのが観察された。これに比べて、高粘度油 100R 及び 2000H を用いた場合、圧延材を用いた場合の加工後の表面は、厚い油膜が形成されていたことを示す表面状態が観察された。しかし高粘度油でも、直径 1mm の円が凸部となるエッチング材（凸材）では、低粘度油と同様にその接触面はほとんどの部分がスクラッチの多い光輝面を示しており、境界潤滑が支配的な表面状態となっているのが観察された。高粘度油を用いたしごき加工の場合の、圧延材と凸材の加工後の表面の顕微鏡写真を Fig.10 に示す。

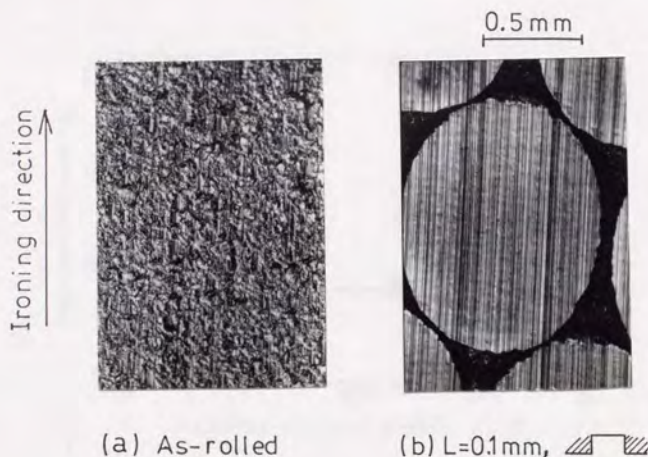


Fig.10 Surface appearance of workpiece after ironing
(Lubricant: 2000H, Reduction: 17%)

2. 3. 2 摩擦係数測定結果

圧延材を用いた場合の、摩擦係数 μ の測定結果を Fig.11 に示す。低粘度油においては stick-slip が発生し、水平力に脈動を生じるが、ここではその極大値と極小値の平均を水平力とし、これより摩擦係数を求めた。これらの結果、潤滑油の動粘度が 10^2 cSt より低い場合においては、潤滑油の動粘度が低いほど摩擦係数は大きく、また、 10^2 cSt より高い場合には、動粘度の増加にともなって摩擦係数は若干増加する傾向にある。これらは一般の Striebeck 曲線と傾向が一致する。しごき率の影響はほとんど認められない。

直径 1mm の円が凹部となる凹材において、円と円との間隔 L を 0.1, 0.5, 2.5mm に変化した場合の結果を Fig.12 (a)~(c)に示す。この場合、これらのエッチングによって形成された凹部が、ミクロプールとなって摩擦界面に入り込む条件によっては面圧、接線力ともに脈動を生じたが、ここではこれらの極大値と極小値の平均値によって摩擦係数を求めた。また、摩擦係数は 3/4 ストローク点の値を示している。

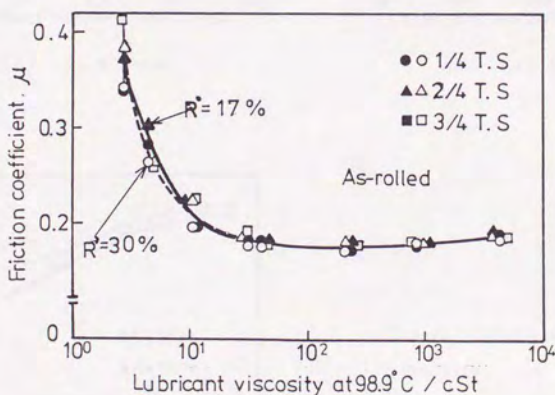
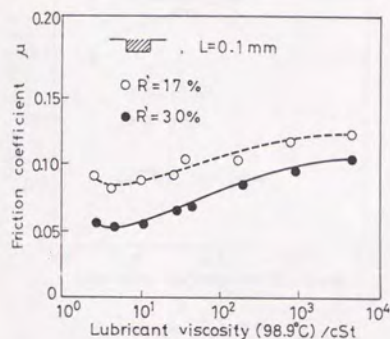
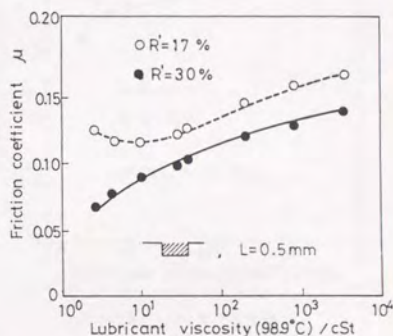


Fig.11 Effect of lubricant viscosity on friction coefficient μ .
(As - rolled surface workpiece.)

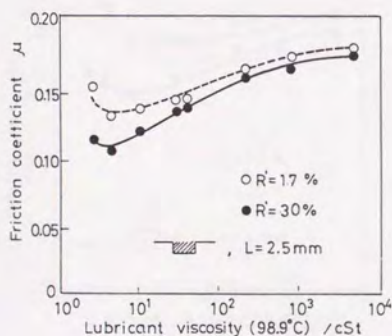
これらの結果から明らかなように、エッチングを施した試験片においては Fig.10 の圧延材の結果とは逆に、低粘度油ほど摩擦係数が小さくなるか、あるいは低粘度油側に摩擦係数の極小が現れる。また、圧延材の場合には、しごき率の影響はほとんど認められなかったのに対し、エッチング材で凹材の場合には、しごき率を大きくすると摩擦係数が減少するのが認められた。とくに、円と円の間隔 L の小さい場合に顕著に認められる。ここで



(a) $L = 0.1$ mm



(b) $L = 0.5$ mm

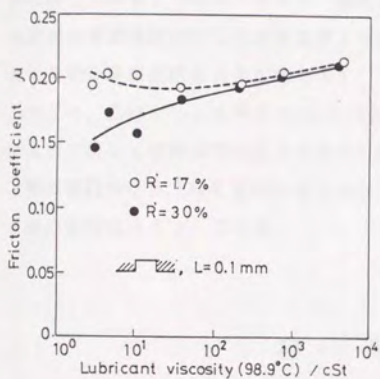


(c) $L = 2.5$ mm

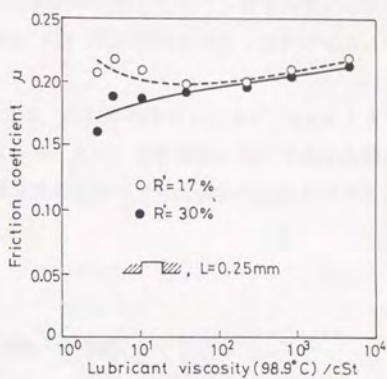
Fig.12 Effect of lubricant viscosity on friction coefficient μ .

(Etched surface workpiece.)

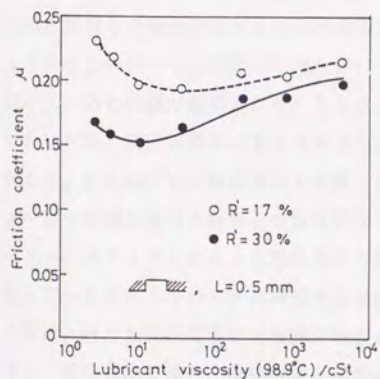
注目されるのは、高粘度油を使用した場合でも、 $L=0.1\text{mm}$ の条件、すなわち、いわゆる工具と材料平坦部との接触率が小さい条件においては、しごき率が 30% のときの摩擦係数が 0.1 以下にまで低下し得るということである。



(a) $L = 0.1 \text{ mm}$



(b) $L = 0.25 \text{ mm}$



(c) $L = 0.5 \text{ mm}$

Fig.13 Effect of lubricant viscosity on friction coefficient μ .
(Etched surface workpiece.)

Fig.12 とは逆に、直径 1 mm の円が凸部となるエッチング材（凸材）を用い、円と円の間隔 L を、0.1, 0.25, 0.5 mm に変化させた場合の結果を Fig.13 (a)~(c) に示す。しごき率 $R'=17\%$ の場合、 L の小さいときには粘度の影響は比較的小さいが、 L が 0.5 mm においては、低粘度油の摩擦係数が増加するのが認められる。この結果を、Fig. 11 に示す圧延材の結果と比較してみると、低粘度油の摩擦係数は著しく小さな値となり、逆に高粘度油の摩擦係数はむしろ大きな値となる。また Fig.12 の凹材の結果と比較すると、何れも凸材の摩擦係数は大きな値を示す。

つぎに、凸材でしごき率が 30% の場合であるが、低粘度油ではしごき率 17% のときの値に比べ著しく摩擦係数が低下するのが認められる。また、高粘度油に比べて低粘度油ほど摩擦係数は小さくなる傾向にある。一方、高粘度油においては、低粘度油に比べてしごき率の影響は小さいと言える。

2. 4 考 察

2. 4. 1 材料表面観察による潤滑機構の考察

Fig.5 に示した材料表面の顕微鏡観察の結果において、低粘度油を用いた低速加工の場合でも、ミクロプールの潤滑油がエッチングによって形成したミクロプール後端から、工具と材料との接触面間へ入り込み得ることが確認された。また、Fig.6 に示したようにミクロプールの後端のみならず、ミクロプールの周囲から等方的に潤滑油が接触面間に入り込む状態が観察された。さらに、Fig.7 に示すように、凹材で $L=0.1\text{mm}$ の条件においては、動圧効果によるミクロプールからの潤滑油の流出がほとんど生じないと考えられる。0.01mm/s の極低速加工条件においても、低粘度油は厚い油膜となって、ミクロプールの周囲の工具と材料との接触面間へ入り込むのが観察された。これらの場合、ミクロプールはエッチングにより形成されたものであり、その周囲はかなりシャープエッジとなっているにもかかわらず潤滑油が入り込むのが注目されることである。これらの観察結果は、何れも動圧効果による潤滑油の流出^{6)~10)}ということでは説明できないものであり、低粘度油の場合、動圧効果とは別の潤滑機構によって工具と材料との接触面間へ入り込むことを示唆するものである。

一方、Fig.8 に示したように、潤滑油の動粘度が高くなるにしたがって摩擦界面では高

面圧のために潤滑油の動粘度はさらに高くなり、あたかも固体状に挙動する状態が観察された。このような潤滑油の状態では、ミクロブールから工具と材料との接触面間へ流出し難くなるとともに、たとえ接触面間に入り込んだとしても、そこで流動するための抵抗が大きい故に、接触面間に均一に十分行き渡らないであろうと推察される。

2. 4. 2 摩擦係数測定結果による潤滑機構の考察

(1) 圧延材と凸材の検討

圧延のままの面を試験片の表面とした圧延材では、低粘度油側で摩擦係数が最大となる。被加工材表面粗さが小さく、低速加工であるために、第1章でも示したように低粘度油では工具と材料との摩擦界面への持込み量が小さく、加工中に摩擦界面で潤滑油が不足した状態となり易いためと考えられるものである。

一方、凸材で、しごき率 17% の場合には、圧延材に比べて低粘度油の摩擦係数は低下するものの、やはり低粘度側で摩擦係数の増加する傾向が認められる。しかし、しごき率が 30% と大きくなると低粘度油の摩擦係数は低下し、むしろ潤滑油の動粘度が低くなるほど摩擦係数が小さくなる傾向を示す。このような低粘度油における摩擦係数の挙動は、以下のように考えることができる。

凸材を被加工材とし、しごき率が小さい条件においては、エッチングによって加工され凹部となっている部分は、加工中の摩擦界面においては連続した状態、すなわちミクロブールが連続した状態で存在することになる。したがって、このようなエッチングによって形成された連続するミクロブール中の低粘度油は、加工の進行にともなってこれらのミクロブールを通して系外へ流出してしまい、ほとんど静水圧を発生することはない。このことは過去に行った円筒しごきにおける実験^{11), 12)} からも明らかである。連続するミクロブール中に存在する低粘度油は、ダイス面上をすべって行く間に、金型の表面で破断した境界潤滑膜を補修する程度の効果しかないと思われる。しかし、このような場合でも、圧延材のように、接触面上で著しい潤滑油の不足をきたし、油膜が破断して固着状態に近くになっているものに比べれば、潤滑的には遙かに良好な条件である。これらは、実際の加工においても、加工の途中で潤滑油を塗り直すと、加工力が低下するという事実からも明白である¹³⁾。この結果、凸材における摩擦係数が圧延材に比べて小さくなったものと考えることができる。

一方、凸材においてもしごき率を 30% と高くすると、低粘度油の摩擦係数は低下し、

高粘度油よりむしろ摩擦係数が小さくなるのが認められる。しごき率が 30% の場合、顕微鏡観察の結果では、凸となっている円がつぶされ、円と円との間に存在する隙間が次第に小さくなり、ついには、閉じた形状のマイクロブールの状態に近付くような状況が観察された。このように、凸材でも閉じた形状のマイクロブールが形成されるようになると、低粘度油ほど摩擦係数が小さくなるということが注目される場所である。このことに関しては、次項においてさらに検討する。

(2) 凹材の検討

加工当初から、被加工材表面に大きなマイクロブールが存在する場合には、潤滑油の動粘度にはよらず、工具入口付近においてバッファー効果によって、被加工材の平坦部分の潤滑油はマイクロブール中に一度取り込まれることになる。すなわち、工具入口近傍において動圧効果によって潤滑油に圧力上昇が生じたとしても、被加工材の平坦部分の潤滑油は加工の進行にともなってマイクロブールへと逆に流出してしまうために圧力上昇が緩和され、結局工具入口近傍では、平坦部分に流体力学的作用による潤滑膜は形成され難い。このことは、Fig. 10 に示した圧延材と凸材の加工後の表面を観察した結果においても、圧延材に比べて凸材の表面には油膜が形成されていないということからも裏付けられる。このような状態が工具出口まで続く場合には、摩擦係数は潤滑油の動粘度に関係なく高い一定の値を示すであろう。しかし、低粘度油においては、一つ一つが独立していて、閉じた形状のマイクロブールが摩擦界面に形成されるような状況となると、高粘度油に比べて著しい摩擦係数の低下が認められる。とくに、しごき率の高い場合に顕著である。

このように、摩擦界面に閉じた形状のマイクロブールが形成されると、低粘度油の場合、潤滑状態が著しく改善されるということは、Fig. 14 に示すような凹材 ($L = 2.5\text{mm}$) における脈動の極大値及び極小値と、凸材 ($L = 0.1\text{mm}$) の摩擦係数とを比較することによって確認することができる。

前にも述べたように、凹材 ($L = 2.5\text{mm}$) では、円と円の間隔 L が、しごき率 17% の加工条件において幾何学的に形成される工具入口から出口までの距離、すなわち摩擦界面の長さ (2mm) に比べて大きい。このため、工具と材料とが摩擦し合っている摩擦界面上から最初のマイクロブールの列が出てしまうと、つぎのマイクロブールの列が入り込む前の段階において、摩擦界面にマイクロブールが全く存在しない状態となる。この時点において摩擦係数の値に極大値が生じる。逆に極小値は、これらエッチングによって形成したミクロブ

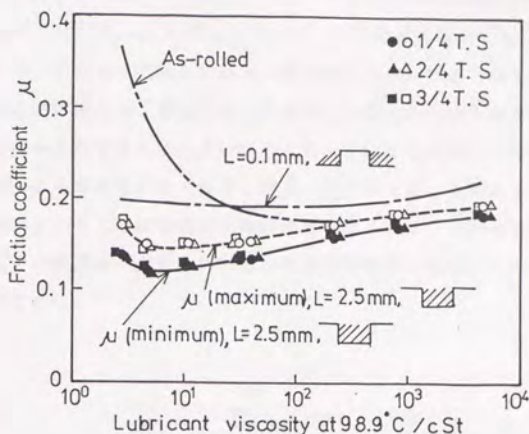


Fig.14 Relation between friction coefficient and lubricant viscosity. Reduction in thickness: 25%.

ールの列が摩擦界面に1列完全に入り込んだときに生じる。

このような凹材 ($L=2.5\text{mm}$) が極大値を示すときの条件, すなわち, 摩擦界面にマイクロブールが全く存在しなくなる条件に比べて, 凸材の場合には, そのマイクロブールは連続しているものの, 加工中に常時ある程度の潤滑油を満たしたマイクロブールが摩擦界面に存在していることになる。それにもかかわらず, 低粘度油の場合, 凸材の摩擦係数は凹材の摩擦係数の極大値よりも大きな値を示す。また, 凹材のマイクロブールの1列が完全に摩擦界面に入り込んだ場合の, 摩擦界面におけるマイクロブールの割合を概算すると, 約 5 ~ 10 % 程度にすぎないにもかかわらず, このような条件下, すなわち摩擦係数が極小値を示すときの低粘度油の摩擦係数は, 圧延材及び凸材に比べて著しく小さな値を示す。この結果から, 前項の凸材の 30 % のしごき率における場合と同様に, 低粘度油においては, 閉じた形状のマイクロブールが摩擦界面に入り込んだときに, 潤滑状態が広い範囲にわたって著しく改善されることが分かる。

一方、潤滑油の動粘度が高くなるにしたがって、Fig. 14 の結果からも明らかなように、摩擦界面に閉じた形状のミクロブールが入り込んだとしても摩擦係数の低下する割合は小さくなる。しかし、Fig. 12 (a) に示したように、高粘度油の場合でも $L=0.1\text{mm}$ で、しごき率が 30% の、いわゆる工具と材料との接触率が小さい状態となる条件（この場合、ミクロブールから固体状となって入り込んだ潤滑油が接触面の多くの部分を覆い、接触率は幾何学的な接触率よりもさらに小さい状態となっているのが観察された。）では、摩擦係数は 0.1 以下の小さな値にまで低下し得る。このことは、高粘度油でも工具と材料との直接的な接触率を小さくすれば摩擦係数は小さくなり得ることを示すものであり、高粘度油の場合でもその摩擦は、工具と材料との接触面間の潤滑状態によって支配されていることを示すものである。

2. 5 結 言

エッチングによって被加工材表面にミクロブールのモデルを形成し、摩擦界面に存在するミクロブールからの潤滑油の接触面間への浸透流出挙動について検討を加えた。その結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 低粘度油を用いた場合、潤滑油は等方的にミクロブールの周囲に浸透流出しているのが観察された。さらに、動圧効果による流出がほとんど生じないと考えられる、 0.01mm/s の極低速加工条件においても、低粘度油は厚い油膜となってミクロブールの周囲の工具と材料との接触部へ入り込むのが観察された。この場合、ミクロブールの周囲は何れもエッチングにより形成されたものであり、かなりシャープエッジとなっているにもかかわらず潤滑油が入り込む。これらの結果は、何れも動圧効果による潤滑油の流出ということでは説明できないものである。
- 2) 被加工材の表面粗さが小さく、かつ、加工速度の小さいような条件、すなわち低粘度油においては摩擦界面に十分持ち込まれず、摩擦界面でミクロブールが形成されないような条件においては、低粘度油ほど摩擦係数は大きくなる。しかし、一つ一つが独立していて、閉じた形状のミクロブールが摩擦界面に形成されるようになると、潤滑状態が広い範囲にわたって著しく改善され、逆に摩擦係数は低粘度油ほど小さくなることが明らかとなった。

- 3) 高粘度油になるにしたがって、摩擦界面では高面圧のために、潤滑油自体の粘度も増加し、あたかも固体状に挙動することが顕微鏡観察によって示された。また、高粘度油の閉じた形状のマイクロボールが摩擦界面に形成されても、低粘度油のような摩擦係数の低下はきたさないこと、しかし、高粘度油でも工具と材料との直接的な接触率が小さくなる条件においては、摩擦係数が 0.1 以下の小さな値となり得ることが確認できた。

＜参考文献＞

- 1) 片岡征二・菅野恵介・木原諄二：37回塑性加工連合講演会講演論文集，(1986)，447.
- 2) 片岡征二・菅野恵介・木原諄二：塑性と加工，29-327 (1988)，368.
- 3) Yang, C. T.: Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry (1968, Feb), 127.
- 4) Cook, N.H., Loewen, E.G., Shaw, M.C.: American Machinist, 10-5 (1954), 125.
- 5) ASME: Pressure-Viscosity Report, (1953).
- 6) Mizuno, T., Okamoto, M.: Trans. ASME, Journal of Lubrication Technology, 104-1 (1982), 53.
- 7) 小豆島明・坪内昌生・工藤英明・古田憲明・峯村憲慧：塑性と加工，30-347 (1989)，1631.
- 8) 阮鋒・工藤英明・坪内昌生・堀隆弘：塑性と加工，28-312 (1987)，41.
- 9) 工藤英明：潤滑，30-2 (1985)，101.
- 10) 水野高爾・平崎彦治：潤滑，21-5 (1976)，324.
- 11) 片岡征二・田中益夫：31回塑性加工連合講演会講演論文集，(1980)，239.
- 12) 片岡征二・菅野恵介・木原諄二：塑性と加工，29-325 (1988)，172.
- 13) J. A. Schey: Tribology in Metalworking, (1983), Amer. Soc. Metals.

第3章 低速度しごき加工における材料表面粗さ、工具表面粗さ、潤滑油粘度及び加工速度の影響^{1)~7)}

3. 1 緒 言

前章においては、被加工材表面にあらかじめ直径1mm、深さ約60 μ mのミクロブールをエッチングによって形成し、使用する潤滑油の粘度を種々変化させてしごき加工を行い、その時のミクロブール近傍における材料の表面の変化を顕微鏡で観察することによって、さらに、加工中の摩擦係数を測定することによって、ミクロブールからの潤滑油の流出挙動に付いて検討を加えた。

この結果、低粘度油はミクロブールから接触面上へ等方的、あるいはむしろしごき方向に垂直な横方向により多く入り込むこと、またこの場合、0.01 mm/sの極低速度のしごき加工においても接触面上に入り込み得ることを確認した。さらに、低粘度油の場合、摩擦界面に閉じた形状のミクロブールが形成されるようになると、摩擦界面の潤滑状態が広い範囲にわたって著しく改善されることを確認した。

このような潤滑機構が生じる場合、工具と材料との直接接点部は、ミクロブールを一つ一つ分断し、そこに潤滑油を封じ込めているメタルシールと想定され得るものであるが、第1章においても述べたように、そのシール部を構成している工具の表面粗さは、潤滑油の動粘度とともに、このミクロブールからの潤滑油の浸透流出挙動を支配すると言えるほどの重要な因子の一つとして考えられるべきものである。

また、このような潤滑機構が生じるような加工条件においては、時間のファクター、すなわち加工速度が関与するであろうことが十分予測されるところである。要するに、加工中の摩擦界面において形成されたミクロブールから、工具と材料との直接接点間に潤滑油が浸透流出するようなプロセスが長時間持続した場合、たとえば、工具と被加工材との相対速度が非常に小さくなった場合、ミクロブール中に封じ込められて高い静水圧を発生していた潤滑油が、つぎには、摩擦界面の工具入口から出口に至る間に如何なる挙動を示すかは興味のあるところである。

本章ではこのような観点から、前章で用いたのと同様の平板しごき型摩擦試験装置において、平ダイスの表面粗さを種々変化させ、さらに加工速度を 0.01 mm/s の極低速から 10 mm/s まで変化させ、潤滑油の動粘度との関連の下で、工具表面粗さ及び加工速度が、摩擦界面に形成されたミクロプールの潤滑油の流出挙動に及ぼす影響について調査し、検討を加える。

3. 2 実験方法及び実験条件

3. 2. 1 被加工材および表面処理

摩擦界面において、材料の表面に形成されるミクロプールの多少及び大小は、潤滑挙動に影響を及ぼす重要な因子である。そこで、被加工材の表面状態を、圧延面をそのまま被加工材の表面とした圧延材で、しごき加工方向と圧延方向が一致するもの、同じく直角になるもの、また、1平方インチあたり 250×250 メッシュのモアレ原版によるエッチング面（エッチング材）のような表面とし、その表面状態の影響に付いても検討を加えた。エッチング材においては、深さ約 $20 \mu\text{m}$ 、一辺約 $60 \mu\text{m}$ の方形ビットが 0.1 mm ビッチで均一に分布した表面状態となる。なお、エッチング材においては、しごき加工方向と圧延方向を一致させた。これらの被加工材の表面の粗さ曲線を Fig.1 に示す。

被加工材の材質は前章と同様の 7-3黄銅（C2600P-1/2H）で、板厚 t は 1 mm のものを使用した。これを $25 \times 140 \text{ mm}$ の短冊状に仕上げてから表面処理を施した。表面処理は片側のみとし、処理した面が外側となるように、ポンチ肩幅約 30 mm のU曲げ型（クリアランス 1.2 t ）を用いて曲げ加工を行い、これを実験に使用する試験片とした。

3. 2. 2 工具（平ダイス）表面粗さ

工具先端には超硬合金（JIS G2 相当）を装着し、その表面粗さを Fig.2 に示すように種々変化させた。以下においては、表面粗さの小さいものから順に No.1, No.2, … No.5 と表記することにする。No.1 工具はラッピング加工によって仕上げたもので、その表面粗さは、表面粗さ計の倍率を2万倍に拡大しても、なおはっきりとした凹凸が認められないほどに平滑な面となっている。ラッピング加工によって仕上げた工具以外のものは、とくに注記したものを除いて、しごき加工方向に対しその粗さの凹凸の凹部、すな

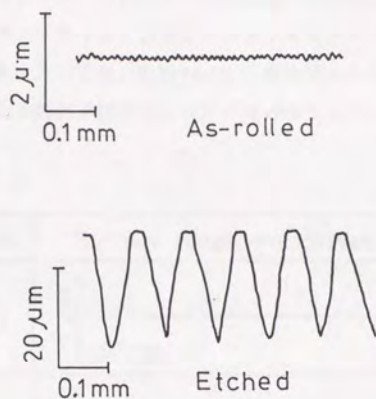


Fig.1 Surface roughness curves of workpiece recorded perpendicularly to the ironing direction.

わちチャンネルの方向が垂直となるように研削加工によって仕上げた。No.5工具で最大の約 $3\mu\text{mRmax}$ の表面粗さとなる。

3. 2. 3 潤滑油及び実験方法

潤滑油はこれまでと同様のもので、第2章の Table 1 に示した油性向上剤も極圧剤も含まない炭化水素系合成潤滑油である。潤滑油の塗布は同様に、工具（平ダイス）面及び試験片の工具（平ダイス）側とした。

実験においては、同一条件で試験片を各2枚づつしごき加工した。1枚目、2枚目とも、しごく前には#10000の研磨紙によってダイス面を軽くラップし、その後十分脱脂してから所定の潤滑油を塗布した。

なお、ポンチと平ダイスとのクリアランスは、シックネスゲージを用いて調整し、片側のクリアランスを板厚の60%にした。この場合の実際のしごき率は、前章で示したよ

うに 30% となる。また、ダイス半角はすべて 5° 一定とした。加工速度は、工具表面粗さに注目した実験においては 1.5mm/s 一定の低速で実験を行った。この場合の被加工材としては、圧延材、サンドブラスト材及びエッチング材を用いた。一方、加工速度の影響について注目した実験においては、 0.01mm/s の極低速から 10mm/s までの間で 4 段階に変化させた。この場合の被加工材はエッチング材のみとした。

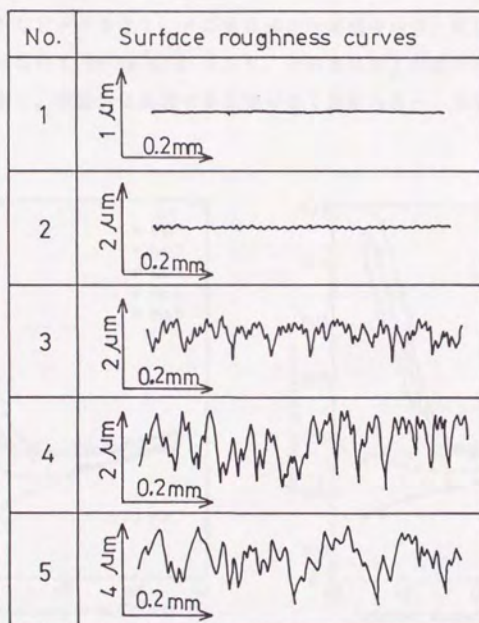


Fig.2 Surface roughness curves of flat die recorded parallel to the ironing direction.

3. 3 実験結果

3. 3. 1 加工速度 1.5 mm/s における圧延材の摩擦係数測定結果

Fig.2 に示したような種々の表面粗さに仕上げた工具を用い、加工速度を 1.5 mm/s 一定として、圧延材を被加工材とした場合の摩擦係数測定結果を Fig. 3 に示す。圧延材の場合、摩擦力 (F) - ストローク (S) 線図において、高粘度油の摩擦力は多くの場合、加工の当初にわずかなピークを生じ、その後はほぼ一定値を示す。低粘度油では多くの場合、加工初期の段階において stick-slip を生じ、その後は加工の進行にともなってその振幅は減少する。しかし、摩擦力は漸増するものが多く認められた。本実験では全ストローク

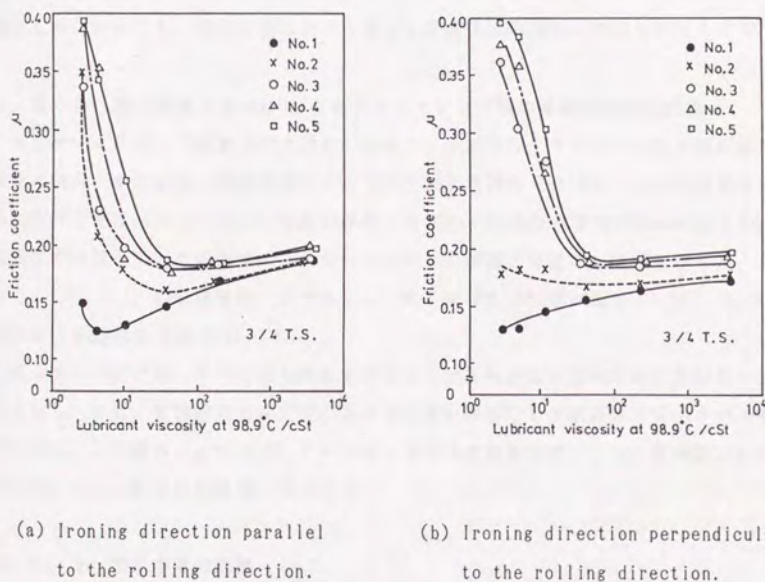


Fig.3 Effect of lubricant viscosity on friction coefficient μ for various surface roughness of the flat die and for as-rolled surface workpiece.

(T. S.) の 1/4, 2/4, 3/4 ストローク点における摩擦係数 μ を求めた。Fig. 3 (a) 及び (b) は、それぞれ、しごき加工方向に対して圧延方向が平行方向、及び直角方向の試験片における 3/4 ストローク点の摩擦係数の測定結果である。

素板の圧延方向としごき加工方向が平行となるようにして作製した圧延面の試験片においては、ラッピングによつて仕上げた No. 1 工具を除いて、98.9 °C の動粘度が 10^2 cSt 以下では、低粘度油ほど摩擦係数は大きくなるのが認められる。また、この場合、しごき加工方向と垂直方向に付けた工具表面粗さの大きいものほど摩擦係数が大きくなる。しかし、ラッピングした工具においては、摩擦係数は 98.9 °C の動粘度が $10^0 \sim 10^1$ cSt において極小となるような結果を示している。

一方、圧延方向としごき加工方向が直角となる試験片では、工具表面粗さの大きい場合には、平行方向の試験片の結果と同様の傾向にある。しかし、ラッピング工具では、潤滑油の動粘度が低いほど摩擦係数は小さくなり、またそれよりも表面粗さの大きい No. 2 の研削工具においても、低粘度油における著しい摩擦係数の増加は認められなくなる。

3. 3. 2 加工速度 1.5 mm/s におけるエッチング材の摩擦係数測定結果

エッチングによって被加工材表面に、あらかじめ微細なマイクロボールを多数形成した試験片の場合、すなわち、摩擦界面において潤滑油の豊富なマイクロボールが多数存在するような条件下では、何れも加工の初期の段階でわずかな摩擦力の増加が認められるが、これらはすぐに低下し、その後は全ストロークに対して摩擦力はほぼ一定値を示した。したがって、1/4 T.S. 点以降では、すでにすべてのものは定常状態に達している。3/4 T.S. 点における結果を Fig. 4 に示す。

エッチング材では、すべての工具粗さにおいて摩擦係数は潤滑油の動粘度が低いほど小さくなる。また、低粘度油では工具の粗さが大きいほどむしろ摩擦係数は小さい値を示すとともに、この場合、 $\mu = 0.03$ という著しく小さな値を示す。一方、高粘度油になるにしたがって工具粗さの影響は小さくなる。

3. 3. 3 加工速度の影響

エッチング材を用い、潤滑油の粘度及び工具表面粗さを種々変化させ、さらに加工速度を $0.01 \sim 10$ mm/s に変化させて摩擦係数を測定した結果を Fig. 5 (a) ~ (d) に示す。この場合の摩擦係数は、しごき加工の全ストローク (T.S.) の 3/4 の点における摩擦係

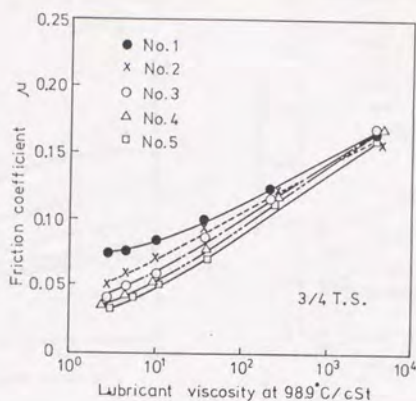


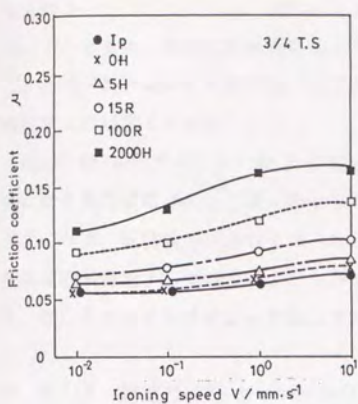
Fig. 4 Effect of lubricant viscosity on friction coefficient μ for various surface roughness of the flat die and for etched surface workpiece.

数 μ を求めた。摩擦係数(F)ーストローク(S)線図において摩擦係数は、加工の当初においてピークを示し、以後低下して定常状態に達するという挙動を示したが、3/4ストローク点においては何れのものも摩擦係数は定常状態に達している。

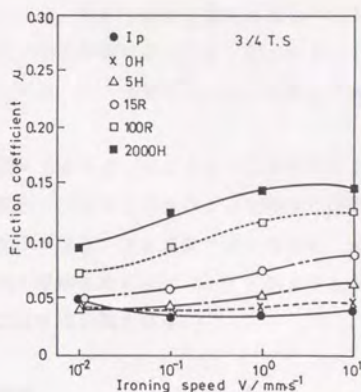
Fig. 5 (a) に示したように、粗さの非常に小さい No. 1 工具 (ラッピング工具) の場合、すべての潤滑油の動粘度において、しごき加工速度の増加にともなって摩擦係数が増加するのが認められる。とくに、高粘度油においては顕著に認められる。また、何れの加工速度においても、低粘度油ほど摩擦係数は小さい値を示す。

研削によって仕上げた No. 2 工具においては、Fig. 5 (b) に示すように No. 1 工具とほぼ同様の傾向を示すが、加工速度が遅い場合に低粘度油の摩擦係数が若干増加するのが認められる。また、摩擦係数は、粗さの小さい No. 1 工具よりもむしろ全体的に小さく、この傾向は低粘度油において、より顕著に認められる。

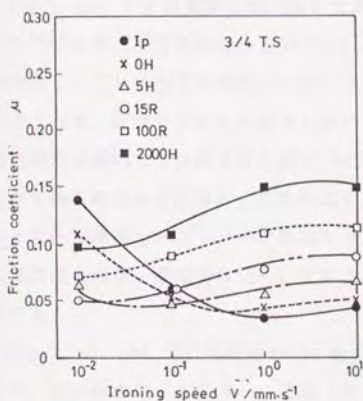
しごき加工方向に垂直な方向に粗さを付けた工具において、その表面粗さが最も大きい No. 5 工具においては、Fig. 5 (c) に示すように動粘度の高い潤滑油の場合には、No. 1 工具及び No. 2 工具と同様に、やはり速度の増加にともなって摩擦係数が増加するのが認め



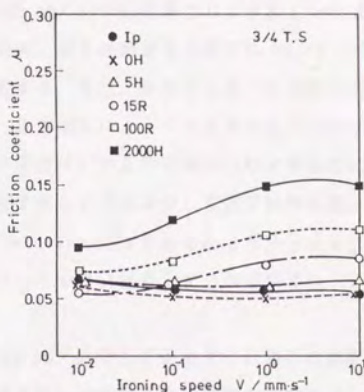
(a) No.1 flat die



(b) No.2 flat die



(c) No.5 flat die



(d) No.6 flat die

Fig.5 Effect of ironing speed on friction coefficient for various lubricant viscosity and for various surface roughness of flat die. (No.6 flat die has the same roughness as No.5 flat die, but the channel of the surface roughness is parallel to ironing direction.)

められる。一方、しごき加工速度が 1 mm/s 以上では、低粘度油ほど摩擦係数は小さな値を示すとともに、他の工具条件に比べて低粘度油の摩擦係数は最も小さい値を示す。しかし、 $0.01\sim 0.1\text{ mm/s}$ の低速加工速度領域においては、逆に低粘度油の摩擦係数が急激に増加するのが認められる。

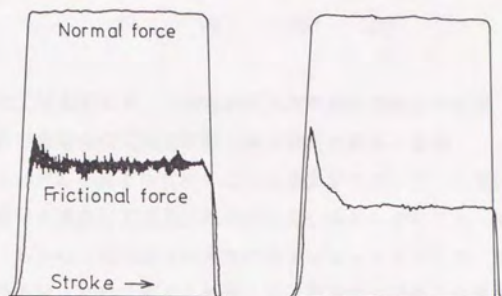
Fig. 5 (d) に示すように、No. 5 工具と粗さは同じであるが、しごき加工方向に平行な方向に粗さを付けた No. 6 工具においては、高粘度油では他の工具条件とほぼ同様の傾向を示す。一方、低粘度油においては、No. 2 工具とほぼ同様に、加工速度が遅い場合に、摩擦係数は若干増加する傾向を示す。しかし、全体的な摩擦係数の値は No. 2 工具よりも大きく、むしろラッピングによって仕上げた No. 1 工具に近い値となる。

3. 3. 4 摩擦力(F)ーストローク(S)線図の観察

エッチング材を用い、平板しごき型摩擦試験装置によって得られた、摩擦力 (F)ーストローク (S) 線図の一例を Fig. 6 及び Fig. 7 に示す。

Fig. 6 (a), (b) は高粘度油 100R を用い、 0.01 mm/s の極低速でしごき加工した場合のものである。表面粗さの小さい No. 1 工具の場合、加工が始まると同時に stick-slip が発生し、これは加工の最終ストロークまで持続する。また、摩擦力は加工の初期に若干大きくなり、以後わずかしき低下しない。一方、研削加工によってしごき加工方向に垂直な方向に比較的大きな粗さを付けた No. 5 工具の場合は、加工の初期の段階で摩擦力に明らかな最大値がみられるが、これらは加工が進行するとすぐに減少して定常状態に達する。この場合、摩擦力ーストローク線図において stick-slip はほとんど生じないとともに、定常状態における摩擦力は No. 1 工具よりも、むしろ小さい値を示すのが注目されるところである。

Fig. 7 (a), (b) は低粘度油の 0H を用い、 0.01 mm/s でしごき加工した場合の結果である。表面粗さの小さい No. 1 工具 (ラッピング工具) の場合、加工の初期に摩擦力の最大値を示すが、すぐに減少して定常状態に達する。最大値を生ずる付近では stick-slip が連続的に発生するが、定常状態に達した後は間欠的に発生するのみとなる。また、高粘度油に比べて摩擦力は小さな値を示す。一方、工具粗さの大きい No. 5 工具の場合は、加工が始まると同時に激しい stick-slip が生じる。これは、ストロークの進行にともなってその振幅は減少はするが、最後まで激しく続く。また、No. 5 工具における最大値も、ほぼ定常状態に達した場合の摩擦力も、No. 1 工具に比べ大きくなる。

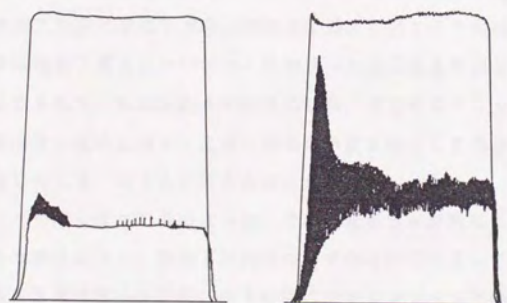


(a) No.1 flat die

(b) No.5 flat die

Fig.6 Various curves of normal and frictional force in ironing test.

(Lubricant: 100R, Ironing speed: 0.01 mm/s.)



(a) No.1 flat die

(b) No.5 flat die

Fig.7 Various curves of normal and frictional force in ironing test.

(Lubricant: 0H, Ironing speed: 0.01 mm/s.)

3. 4 考 察

3. 4. 1 被加工材表面粗さ、工具表面粗さ及び潤滑油粘度の影響

(1) 圧延材を用いた場合の工具表面粗さ及び潤滑油粘度の影響

加工速度を 1.5mm/s 一定として行ったしごき実験において、圧延面そのままを被加工材表面とした圧延材の場合、工具表面粗さが大きい条件においては、低粘度油ほど摩擦係数が大きくなる。しかし、表面粗さの非常に小さいラッピング工具、すなわち No.1 工具においては、圧延方向に平行にしごく条件となる試験片の場合、低粘度油側に極小値を生じる。さらに、圧延方向に直角方向にしごく条件となる試験片では、ラッピング工具の場合、低粘度油ほど摩擦係数が小さくなり、No.2 の研削工具においても低粘度油における摩擦係数の著しい増加は認められなくなる。このような圧延材における潤滑油の挙動は、工具表面粗さに相応したマイクロプールの形成状況を考慮することによって、以下のように考えることができる。

被加工材の表面粗さが、圧延のままの面のように非常に小さい場合は、前章までにも示してきたように、潤滑油の導入はダイス入口における流体力学的作用、すなわち動圧効果が主となる。したがって、低粘度油は高粘度油に比べて摩擦界面への導入量が少なく、工具の粗さをしごき加工方向に垂直な方向に付けた工具において、その粗さが大きい場合、この工具表面粗さに相対し得るスケールのマイクロプールは形成され得ない。この結果、研削加工によって形成された工具表面粗さの凹凸の凹部、すなわちチャンネル部に存在する潤滑油には高い静水圧が発生し得ず、工具の粗さの凸部を核として境界潤滑が支配的となり、摩擦係数が著しく大きくなったと考えることができる。

一方、ラッピングで仕上げた工具のように、その表面粗さが非常に小さい場合には、工具入口でのわずかな動圧効果と、被加工材表面のわずかな凹凸によって摩擦界面に持ち込まれる潤滑油でも、工具の粗さが非常に小さい故に、マイクロプールと呼べるような油溜りが形成された状態となり得る。すなわち、摩擦界面においてマイクロプールが形成されるかされないかの判断基準は、工具表面粗さとの相対的なものであって、工具表面粗さが非常に小さければ、非常に小さな油溜りでもマイクロプールとして機能するようになると考えられる。このような状態になると、低粘度油ほど摩擦係数が小さくなるということは、前章の結果と一致するものである。この場合、圧延方向に平行にしごくとき、材料表面の圧延粗

度によって形成されるチャンネルの方向に沿って潤滑油が流れ出ることが考えられ、直角方向にしごいたほうがそこから流出し難く、静水圧を発生する状態になり易い。

(2) エッチング材を用いた場合の工具表面粗さ及び潤滑油粘度の影響

工具表面粗さに比較して、相対的にミクロブールが小さい状態にある圧延材においては、工具表面粗さのチャンネル部に存在する潤滑油の挙動が、その摩擦状態を支配するような重要な役割を演じていることは、前項までの検討結果からも明らかである。しかし、本章の主題である、被加工材表面に存在するミクロブールから、工具と材料との接触面間に潤滑油が浸透流出するような潤滑機構において、この工具粗さが如何なる影響を及ぼすのかということについては、まだ十分に検討されていない。これは、前述のように、圧延材では工具粗さが大きい場合には、このような潤滑機構が生じるのに十分であるような大きさのミクロブールが形成され得ないためである。

これらに比べて、摩擦界面において、十分な大きさで、かつ、多数のミクロブールが存在するような条件となるエッチング材では、工具表面粗さの影響が明確に観察される。

加工速度を 1.5 mm/s 一定として行ったしごき実験において、Fig.4 に示したように、エッチングを施した被加工材を用いた場合、圧延材とは逆に、すべての条件で低粘度油ほど摩擦係数が小さくなり、また、しごき加工方向に垂直な方向に粗さを付けた工具の場合、その工具の表面粗さが大きいものの方がむしろ摩擦係数が小さくなる。さらに低粘度油においては、その工具の粗さが大きい場合に、摩擦係数が 0.03 という非常に小さな値を示すようになる。これらの事実と、前章の結果と考え合わせれば、低粘度油の場合、工具の表面粗さが大きいほど、この工具粗さによって接触面間に形成されたチャンネル部を通して接触面間に入り込み易く、さらにこのチャンネルを流路として接触面上に広く広がり、そこで容易に高い静水圧を発生させるような状態に達するという潤滑機構の存在が示唆される。このことを言い替えれば、工具表面粗さに比較して十分な大きさのミクロブールが形成されるような条件においては、しごき加工方向に垂直な方向に付けた工具の粗さのチャンネルが、ミクロブールから流出する潤滑油の重要な流路となっていることを示唆するものである。

一方、高粘度油になるにしたがって摩擦係数が増加すること、さらに工具表面粗さの影響が小さくなることから、前章で示した摩擦界面の観察結果及び摩擦係数測定結果とも考え合わせれば、高粘度油になるほどミクロブールから接触面上に入り込み難くなるととも

に、たとえ入り込んだとしても、工具粗さのチャンネルを流路として移動する場合にも大きな抵抗が生じ、低粘度油のように接触面間に広く広がって潤滑をするという効果は少なくなるということが伺われる。

以上のように、加工速度を 1.5mm/s 一定とし、圧延材とエッチング材を被加工材として行った平板のしごき加工の実験から、摩擦界面に閉じた形状のミクロブールが形成されるような状態となる場合の、ミクロブールから工具と材料との接触面間への浸透流出のおよそのメカニズムは理解できるようになったと言えよう。このような潤滑機構は、さらに、以下のように、加工速度の影響について検討することによって、より明確なものとすることができる。

3. 4. 2 加工速度、工具表面粗さ及び潤滑油粘度の影響

(1) 高粘度油のミクロブールからの流出挙動に及ぼす速度の影響

加工速度を 0.01mm/s の極低速まで小さくして行った平板のしごき実験から、低粘度油を用いた場合の工具粗さの大きい条件を除いて、何れも加工速度の低下にともなって摩擦係数が低下するのが認められた。とくに、高粘度油の場合には、何れの工具粗さにおいても、加工速度の低下にともなって摩擦係数の低下する割合が大きい。

しかし、ここで注目されることは、Fig.5 に示したように、粘性抵抗の影響が非常に小さいと考えられる 0.01mm/s の極低速の場合でも、高粘度油の摩擦係数は低粘度油のレベルにまで低下し得ないこと、さらに、Fig.6 の摩擦力-ストローク線図に示したように、工具粗さの小さい No.1 工具の極低速条件においては、高粘度油を用いた場合の摩擦力に連続的な stick-slip が発生するのが観察されるということである。この場合、低粘度油では stick-slip はほとんど発生しない。これらのことから、極低速加工条件においても、高粘度油の摩擦界面は、低粘度油に比べてメタルコンタクトをとまなう境界潤滑が支配的な状態にあると判断される。

このような状態から加工速度を増加させると、動圧効果により工具入口における潤滑油の引き込み量が増加することによって、普通摩擦係数は低下するようになる。しかし、この実験の結果においては、高粘度油の摩擦係数は速度の増加にともなって逆に増加する。このことから、加工速度が大きくなるにしたがって、ミクロブールから工具と材料との直接接触面間への潤滑油の浸透流出量が、時間的に、さらに減少することが一因となっていることが考えられる。これらのことについて、さらに検討するために以下のような潤滑油

に添加剤を添加する実験を試みた。

すなわち、加工中の摩擦界面において、工具と材料とが直接接触を生じている部分が境界潤滑の支配的な状態となっていれば、被加工材あるいは工具表面上に効果的な境界潤滑膜を形成し得る油性剤、あるいは極圧剤等の添加剤を潤滑油中に添加することによって、摩擦係数は低下すると考えられる^{8)・12)}。とくに、工具と材料との直接接触面上において、部分的に油膜が破断し、金属同士の直接接触による凝着が生じるような状態、すなわちメタルコンタクトが生じるような状態となっていれば、油性剤、極圧剤等の添加剤の効果は顕著に現れる。逆に、ミクロブールから潤滑油が接触面間へ浸透流出し、さらに、工具粗さによって形成されるチャンネルを通して接触面上に広く広がり、そこで流体潤滑膜を形成するような状態が効果的に生じていれば、あるいは部分的には数分子程度であれ、ミクロブールから入り込んだ潤滑油がメタルコンタクトを防ぎ得るような油膜を形成していさえすれば、これらの添加剤の効果は認められなくなると考えられる。

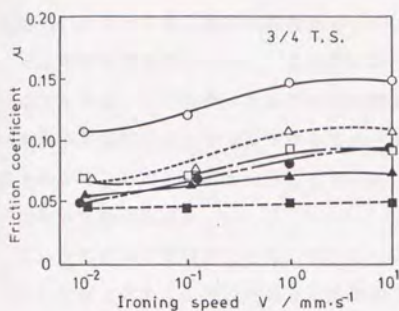
したがって、このような油性剤、極圧剤の特性を利用することによって、摩擦界面に形成された工具と材料との接触面間の潤滑状態について評価し得る。

被加工材はこれまでと同様のエッチング材を用い、その表面に、つぎに示す四つの条件で、塩化ステアロイル [$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COCl}$]¹³⁾ を 5 wt% 添加した潤滑油を、あるいは高濃度の塩化ステアロイルをそのままの状態です定の時間被加工材表面に塗布し、その後ベンジンで十分脱脂してから、何れも無添加の高粘度油 2000H を用いて、これまでと同様のしごき実験を行った。

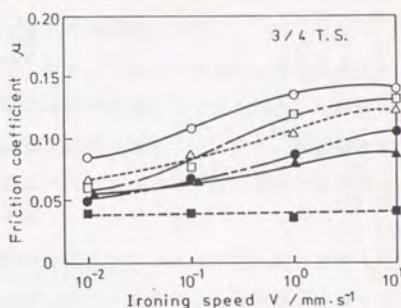
- ①しごき加工時に用いるのと同じ動粘度の潤滑油に、重量比で 5% の塩化ステアロイルを添加し、この潤滑油を試験片の工具側表面に均一に 5 分間塗布。
- ②同じく 2 時間塗布。
- ③高濃度の塩化ステアロイルを試験片の工具側表面に 2 分間塗布。
- ④同じく 1 時間塗布。

この場合、塗布方法の違いによって吸着量が異なり、それに応じて種々の条件の塩化ステアロイルの境界潤滑膜が、加工の前段階において被加工材の表面に形成されるはずであると考えられた。しかし、実際には、これらの塗布した潤滑剤の拭き取り難さが主として影響していると考えられる^{14)・15)}。

これらの塗布方法を変えて実験を行った場合の結果を Fig.8 (a), (b) に示す。この場合、無添加油、及び 5 wt% 塩化ステアロイル添加油の結果も併記した。(a) は工具表面



(a) No.1 die, 2000H



(b) No.5 die, 2000H

Fig.8 Influence of pretreatment to surface of workpiece on the friction coefficient at the point of 3/4 to total ironing stroke. (Higher viscosity lubricant, 2000H.)

Lubricant without additive (○). Lubricant with 5 wt% additive (●). Lubricant (without additive) only applied on the surface of workpiece after removing the precoated lubricant with 5 wt% additive which are held for 5 min (△) and 2 h (□) in atmosphere. Lubricant (without additive) only applied on the surface of workpiece after removing the precoated lubricant with concentrate Stearoyl Chloride which are held for 2 min (▲) and 1 h (■).

粗さの小さいラッピング工具を用いた結果であるが、5 wt% 塩化ステアロイルを添加した潤滑油を、加工前に被加工材の表面に5分間塗布しただけでも、摩擦係数が著しく低下するのが認められる。また、2時間塗布したものでは、5 wt% の塩化ステアロイルを添加した潤滑油をそのまま実験に用いた場合の摩擦係数と、ほとんど変わらなくなる。一方、Fig.8 (b) のしごき加工方向に垂直な方向に粗さを付けた研削工具の場合には、ラッピング工具のこれらの摩擦係数と比べると若干高くなる。これは、その工具粗さの凸部での掘り起こしによってこれらの薄い皮膜が削り取られるため、メタルコンタクトが増加するた

めであると考えられる。しかし、この場合にも、加工前に 5 wt% の添加油をわずか 5 分間塗布しただけでも、摩擦係数ははっきりと低下するのが認められる。

ここで最も注目されるのは、高濃度の塩化ステアロイルを試験片表面に 1 時間塗布したものであって、この条件においては高粘度油でも摩擦係数が著しく小さくなり、低粘度油の摩擦係数程度の値にまで低下すること、また、加工速度の増加に対しても、摩擦係数がほとんど増加しなくなるということである。このことは、ラッピング及び研削の両工具条件において認められる。

これらの結果で重要なことは、塗布した高濃度の塩化ステアロイルの拭き取り難さということを含めても、工具と材料との接触面間に塩化ステアロイルによる境界潤滑膜が十分に形成されるような条件となれば、高粘度油でも全速度領域において低粘度油の摩擦係数に近い値にまで小さくなり得るということである。このことは、無添加の高粘度油を用いた場合には、その接触面上はメタルコンタクトを含む境界潤滑が支配的な状態にあり、さらにこれらは、加工速度の増加にともなって増加するということを裏付けるものである。これらのことを言い替えば、無添加の潤滑油を用いて行ったこれまでの実験において、摩擦係数が潤滑油の動粘度及び加工速度の増加にともなって増加するのは、加工速度及び潤滑油の動粘度の増加にともなう、粘性抵抗の増加ということが原因ではなくて、ミクロブールから接触面間への潤滑油の流出量が、潤滑油の動粘度と加工速度の増加にともなって減少し、この結果、流体潤滑によって潤滑される部分が減少することが原因であるということを示すものである。

(2) 高粘度油の流出挙動に及ぼす工具表面粗さと速度の影響

前項においては、主として、高粘度油のミクロブールからの潤滑油の流出挙動に対する速度の影響について検討したもので、工具表面粗さの影響については触れなかったが、ここでは、極低速の加工速度において、ミクロブールから潤滑油が接触面上に浸透流出する場合の工具表面粗さの影響について検討を加えることにする。

高粘度油の場合の工具表面粗さの影響であるが、高粘度油でもしごき加工方向に垂直方向に粗さを付けた工具においては、その工具表面粗さが大きくなるほどミクロブールから接触面間に潤滑油が入り込み易くなるということが伺える。これは以下に示す実験結果から裏付けられる。

1) 本実験に使用したしごき型摩擦装置の場合、加工に際して試験片と工具とが最初に接触する部分においては線接触となり、この結果、潤滑油の油膜が破断して境界潤滑状態になり易い。このためほとんどの加工条件において、加工の当初に摩擦力(F)ーストローク(S)線図に最大値を生ずることになる。この場合、 0.01mm/s の極低速の加工速度においては、より顕著に生ずる傾向にあるが、Fig.6に示したように、しごき加工方向に垂直な方向に粗さを付けた、表面粗さの大きい No.5 工具の最大値は、ラッピング工具の No.1 工具の値よりも大きい値を示す。しかし、加工の進行にともなってエッチングによって形成されたマイクロブールが次々と摩擦界面に入り込むようになると、すぐに低下して定常状態に達し、No.5工具の摩擦力は逆に No.1 工具の値より小さくなる。このことは、高粘度油でも工具表面粗さが大きい場合には、マイクロブールから工具表面粗さのチャンネルを通して、接触面間に入り込み易くなることを示している。

2) Fig.6に示した摩擦力ーストローク線図において、高粘度油で 0.01mm/s の極低速のしごき加工の場合、工具粗さの小さい No.1 工具では定常状態に達した後も、連続的に stick-slip を生じる。これは、極低速の場合、高粘度油でも摩擦界面入口における動圧効果によって供給される油量は極めて小さくなり、二面の摺動にともなう金属同士の接触と引き離しが絶えず生じることによると考えられる。一方、これに比べて工具粗さの大きい研削工具の No.5 工具では、定常状態に達した後は、このような stick-slip はほとんど生じない。これは、高粘度油でも、しごき加工方向に垂直な方向に付けた粗さが大きい場合には、マイクロブールから接触面上に浸入し易くなるとともに、工具粗さのチャンネル部に潤滑油をある程度貯えることができるためと考えられるものである。

3) 試験片と工具が最初に接触する部分では、工具粗さが大きく、極低速の場合、エッチングによって形成したマイクロブールが消滅するのが観察された。この状態を Fig.9の顕微鏡写真に示す。Fig.9(a)は、No.1 工具で、 0.01mm/s の条件の場合であるが、エッチングによって形成したマイクロブールが、加工後もはっきりと残っているのが観察される。しかし、しごき加工方向に垂直な方向に比較的大きな粗さを付けた No.5 工具では、(b)に示すようにマイクロブールはほとんど消滅している。一方、No.5 工具の場合でも、加工速度を増加させると、(c)のように加工後の表面にはマイクロブールが残存しているのが観察されるようになる。このことは、しごき加工方向に垂直な

方向に付けた工具の粗さが大きく、極低速の条件では、高粘度油でもミクロプールから工具粗さのチャンネルを通してすべて系外へ流出したことを示すものである。

以上に示した事項は何れも、しごき加工速度の非常に遅い条件では、高粘度油でもエッチングによって形成されたミクロプールから、エッチングされていない部分と工具との接触面間に入り込み得ること、またこの場合、しごき加工方向に垂直な方向に付けた工具表面粗さが大きいほど入り込み易いということを示すものである。しかし、これらのことはまた、ある程度速度が大きい場合には、すなわち、 1.5 mm/s の加工速度におけるような場合には、工具表面粗さが大きくても高粘度油はミクロプールから流出し難いことを示すものでもある。

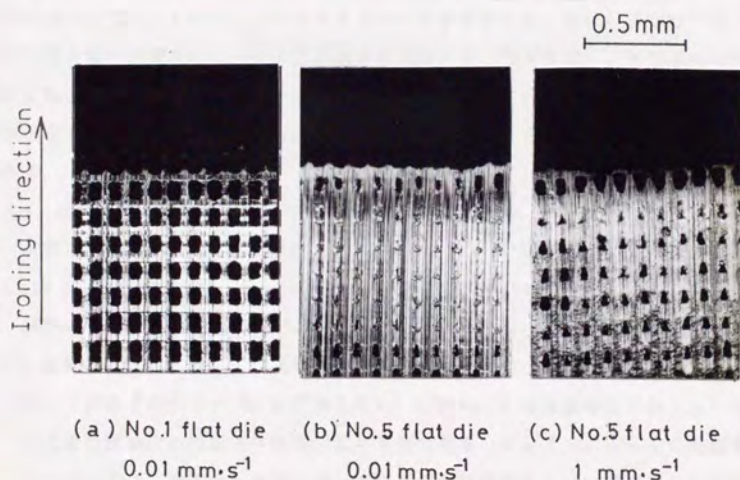


Fig.9 Surface appearance of first contact region after ironing.
(Lubricant: 100R.)

(3) 低粘度油の流出挙動に及ぼす工具表面粗さと速度の影響

高粘度油の状態から、潤滑油の動粘度が低下するにしたがって流動性が良好となり、ミクロブールから工具と材料との接触によって形成されたメタルシールの欠陥部を通して接触面間に流出する量が増加するようになる。この場合、欠陥の大きい状態となる、しごき加工方向に垂直な方向に付けた工具表面粗さが大きくなるほど流出量は多くなる。これらの潤滑油は、その工具表面粗さのチャンネルを流路として接触面上に広く広がり、そこで静水圧を発生して摩擦係数を著しく低下させ得る。このような低粘度油のミクロブールからの流出挙動の考えに関しては、5. 4. 1 項ですでに述べた通りである。

さて、速度の影響であるが、低粘度油の場合、このような潤滑状態からさらに加工速度が低下すると、ミクロブールからの潤滑油の流出機構、すなわちミクロブールメカニズムがより効果的に作用するようになり、ミクロブールから接触面上への潤滑油の流出量は増加するようになる。しかし、このようなプロセスが長時間続く条件、すなわち加工速度が非常に遅くなった場合には、その工具粗さが大きいと、つぎには、ミクロブール中の潤滑油がこれらの工具粗さのチャンネルを通してすべて工具の外へ流出してしまい、逆に潤滑油が不足する状態が生じるということが考えられる。これらは以下の実験結果から裏付けられる。

1) Fig.5 (c) に示したように、工具粗さの大きい No. 5 工具を用いて、速度の非常に遅い条件において、低粘度油の摩擦係数 μ は著しい増加を生じる。さらに、Fig.7 (b) に示したように、摩擦力-ストローク線図においても、激しい stick-slip が連続的に発生し、これらは加工の最後まで続く。

2) 試験片の加工後の表面を顕微鏡で観察した結果を Fig.10 に示す。上の2枚の写真は、工具粗さの小さい No.1 工具を用い、 0.01mm/s の極低速度で加工した場合の、加工後の試験片の端部と中央部付近の写真である。エッチングによって形成されたミクロブールは、加工後も全面に残っているのが観察される。一方、下の2枚の写真は、しごき加工方向に垂直な方向に比較的大きな粗さを付けた No.5 工具を用い、 0.01mm/s の極低速で加工した場合のものであるが、試験片の加工方向に対して左右の端部付近では、エッチングによって形成されたミクロブールが全く消滅しているのが観察される。また、面の中央部分に残存したものも、小さく浅くなっているのが確認できる。しかし、ここには示さなかったが、No.5 工具でも、 1mm/s 以上の場合、板の最端部のミクロブールでさえははっきりと残っているのが確認された。このことは、

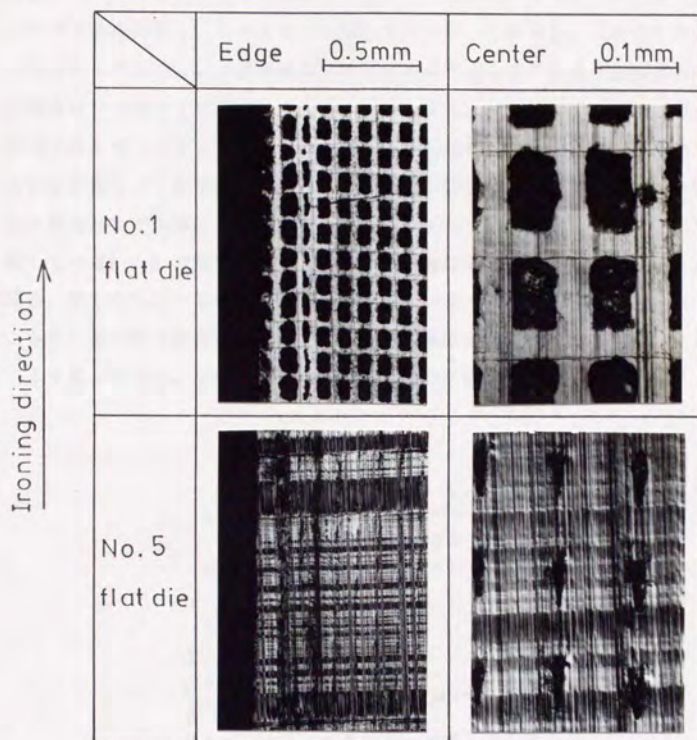


Fig.10 Surface appearance of workpiece after ironing.

(Lubricant: OH, Ironing speed: 0.01 mm/s.)

- 1) で示した現象とともに考え合わせれば、マイクロプール中の潤滑油が工具粗さのチャンネルを通してすべて系外へ流出し、マイクロプールが消滅することによって摩擦係数が著しく増加したことを示すものである。
- 3) マイクロプール中の潤滑油が、しごき加工方向に垂直な方向に付けた粗さのチャンネルを通して系外へ流出することを確認するために、No.5 工具の、しごき加工

方向に対して左右両端となる部分の粗さを、ダイヤモンドラッパバーによって取り除いた平ダイスを作製し、これを用いた実験を試みた。この場合、工具の中央部の幅20mmの部分にのみ No.5 工具の粗さのチャンネルが残っているような状態となり、左右の部分はラッピング工具の粗さに近いものとなる。したがって、加工中においては、その工具の粗さのチャンネルは試験片の左右の両端から約2.5mm の点において途切れることになる。この工具を用いて行った実験の結果を Fig.11 に示す、低粘度油を用いた極低速加工条件においても、工具粗さのチャンネルが試験片の両端の外部まで連続しているFig.5 の結果におけるような、摩擦係数の増加は認められなくなる。この場合、加工中においても stick-slip はチャンネルの連続するものに比べて小さく、さらに、加工後の表面のミクロブールは、工具粗さのチャンネルの連続するものに比べよりはっきりと、かつ、全面に残っているのが観察された。

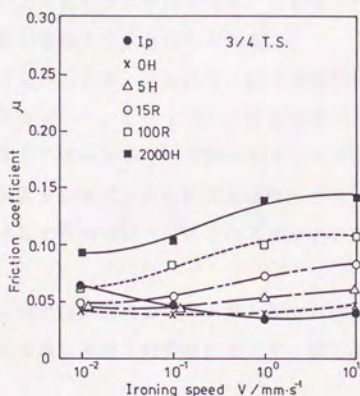


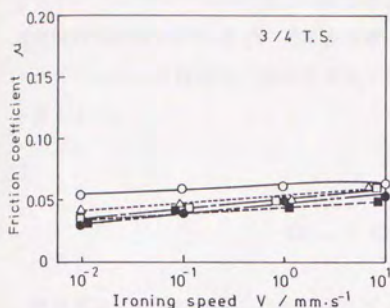
Fig.11 Effect of ironing speed on friction coefficient μ for various lubricant viscosity. (The edge surface of No.5 flat die were smoothed in width of 2.5mm for each.)

4) No.5 工具と同じ粗さの工具で、その粗さがしごき加工方向に対して平行方向になるように研削仕上げした No.6 工具では、顕微鏡による観察結果において、極低速度でもミクロプールの消滅は生じない。また、 0.01mm/s の極低速でも、Fig.6 に示したように、しごき加工方向と垂直な方向に粗さを付けた No.5 工具のような摩擦係数の増加は認められない。これらは、しごき加工方向に平行方向の粗さの場合には、加工の進行にともなって、工具の粗さのチャンネルに沿って被加工材の表面が進行するので、実質的には、工具粗さが小さくなるように挙動することに起因する。すなわち、しごき加工方向に対して直角方向の粗さの場合は、加工にともなって、被加工材の表面が工具の粗さの凸部を1つ1つ乗り越えながら進行するため、被加工材が工具粗さのチャンネルを完全に埋め尽くすには至らない。したがって、工具の粗さのチャンネル部にはメタルシールの欠陥をより多く残すことになる。これに比べて、加工方向に平行方向の粗さの工具では、被加工材の表面は加工の進行にともなって工具の粗さに、より馴染むように変形する。この結果、被加工材表面と工具の粗さのチャンネル部で形成されるシールの欠陥は小さなものとなり、工具粗さが大きいにもかかわらず、粗さの小さい工具に近い挙動を示すと考えられる。

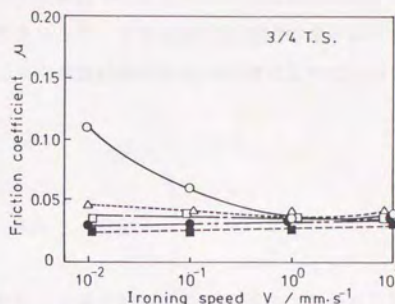
以上のことから次のことが言える。すなわち、加工速度が小さくなり、さらに潤滑油の動粘度が小さくなる条件において、しごき加工方向に垂直な方向に付けた工具の粗さを大きくすることにより、ミクロプールがすべて消失するという事実は、潤滑油の動粘度の低いほど、また工具粗さが大きいほど、さらに加工速度が小さいほどミクロプールの周囲のメタルシールの欠陥を通して接触面間へ供給される潤滑油の量が増大するということを裏付けるものである。

以上で示したような低粘度油の場合のミクロプールからの流出挙動は、高粘度油の場合と同様に、潤滑油中に添加剤を添加した実験によって、以下のように、さらに明確にすることができる。

Fig.12 (a), (b) は、しごき加工時に潤滑油として低粘度油 0H を用いた場合の結果である。Fig.12 (b) に示した、しごき加工方向に垂直な方向に付けた工具粗さの大きい研削工具においては、ミクロプールの消滅しない 1mm/s 以上の条件では、高濃度の塩化ステアロイルを1時間塗布したものでも、無添加油の摩擦係数とほぼ同じ値となる。これは、これまで述べてきたように、低粘度油の場合、その工具粗さの大きい条件においては、ミクロプールから工具粗さのチャンネルを通して強制潤滑状態で、すなわち静圧効果によ



(a) No.1 die, OH



(b) No.5 die, OH

Fig.12 Influence of pretreatment to surface of workpiece on the friction coefficient at the point of 3/4 to total ironing stroke.

(Lower viscosity lubricant : OH.)

Lubricant without additive (○). Lubricant with 5 wt% additive (●). Lubricant (without additive) only applied on the surface of workpiece after removing the precoated lubricant with 5 wt% additive which are held for 5 min (△) and 2 h (□) in atmosphere. Lubricant (without additive) only applied on the surface of workpiece after removing the precoated lubricant with concentrate Stearoyl Chloride which are held for 2 min (▲) and 1 h (■).

って接触面上に入り込んだ潤滑油が、その多くの部分を静圧的流体潤滑状態にし、摩擦係数を著しく小さくしていることを示すものである。

一方、Fig.12 (a)に示した工具粗さの小さいラッピング工具の場合、無添加油では摩擦係数は若干大きい値を示す。このことは、本章の3. 4. 1項でも述べたように、工具粗さが小さいために、ミクロプールからの潤滑油の流出量が少なくなり、添加剤の効果が生じたと考えられるものである。

以上のような、被加工材表面粗さ、工具表面粗さ、潤滑油粘度、加工速度を種々変化させてミクロブールからの潤滑油の流出機構に付いて検討した本章における実験の結果から、潤滑油の動粘度が低いほど、工具表面粗さが大きいほど、さらに加工速度が小さいほどミクロブールからの潤滑油の流出量が多くなるという潤滑機構の存在が明確なものとされたと言えよう。

3. 5 結 言

摩擦界面において形成されるミクロブールから、工具と材料との接触面間に潤滑油が流出するというミクロブールメカニズムが作用するような潤滑機構においては、工具表面粗さと潤滑油の動粘度、及び加工速度が大きな影響を及ぼす因子であると考えられた。そこでミクロブールメカニズムに及ぼすこれらの因子の影響について検討を加え、以下の結果を得た。

- 1) 被加工材表面粗さが圧延面のように小さい場合、しごき加工方向と垂直な方向に付けた工具表面粗さが大きいと、低粘度油の摩擦係数は著しく大きくなる。しかし、その工具表面粗さが非常に小さい場合には、逆に潤滑油の動粘度が低いほど摩擦係数が小さくなるという現象が認められた。
- 2) 工具表面粗さに比べて、ミクロブールが相対的に大きくなるような条件では、低粘度油ほど、また、しごき加工方向に垂直な方向に付けた工具の表面粗さが大きいほど、摩擦係数は小さくなる。このことから、潤滑油の動粘度が低いほど、また工具表面粗さが大きいほどミクロブール中の潤滑油が、工具粗さによって形成される粗さのチャンネルを通して工具と材料との接触面間に浸入流出し易いことが示唆された。
- 3) ミクロブールが形成される条件でも、高粘度油になるにしたがって摩擦係数は大きくなり、また工具表面粗さの影響は小さくなる。このことから、高粘度油ほどミクロブールから工具と材料との接触面間に入り込み難くなるとともに、たとえ入り込んだとしても、工具粗さのチャンネルを流路として移動する場合にも大きな抵抗が生じ、低粘度油のように接触面上に広く広がってそこを潤滑するという効果は少なくなるといことが伺われた。
- 4) 粘性抵抗の影響が非常に小さいと考えられる 0.01 mm/s の極低速度の場合でも、

高粘度油の摩擦係数は低粘度油のレベルにまで低下し得ないこと、さらにこの場合、摩擦力-ストローク線図に連続的な stick-slip が発生するのが観察されることから、極低速加工条件においても、高粘度油の摩擦界面は、低粘度油に比べてメタルコンタクトを伴う境界潤滑が支配的な状態にあると判断された。

- 5) 境界潤滑膜として有効に機能する塩化ステアロイルの潤滑膜を、加工の当初から被加工材の表面に十分に形成した条件においては、高粘度油でも摩擦係数は低粘度油の値近くまでに低下するとともに、速度の増加に対して摩擦係数がほとんど一定の値を示すようになる。このことと、前述の1)～4)項の事実とを考え合わせると、全速度領域において、無添加の高粘度油の摩擦界面ではメタルコンタクトを含む境界潤滑が支配的であること、さらに潤滑油の動粘度と加工速度の増加にともなって、流出量がより少なくなるということが示される。また、このことから、摩擦界面で粘性が著しく増加していると考えられている高粘度油でも、本実験におけるような低速度の加工領域においては、その粘性抵抗は、メタルコンタクトを含む境界潤滑膜のせん断抵抗に比べれば無視できるほど小さなものでしかないことが確認できる。
- 6) 低粘度油で、しごき加工方向と垂直な方向に付けた工具の粗さが大きい条件では、摩擦係数は流体潤滑が支配的であることを示唆するほどに小さくなるが、このプロセスが長時間続くと、言い替えると、加工速度が非常に小さくなると、つきにはミクロブール中の潤滑油がこれらの工具粗さのチャンネルを通して系外にすべて流出し、逆に摩擦係数が増加することが確認された。

加工速度が小さくなり、さらに潤滑油の動粘度が小さくなる条件において、しごき加工方向に垂直な方向に付けた工具の粗さを大きくすることにより、ミクロブールがすべて消失する事実は、ミクロブールの周囲のメタルシールの欠陥を通して潤滑油が接触面間へ供給されるメカニズムの存在を裏付けるものである。

< 参考文献 >

- 1) 片岡征二・菅野恵介・木原諄二：38回塑性加工連合講演会講演論文集、(1987)、465。
- 2) 片岡征二・菅野恵介・木原諄二：塑性と加工、29-334 (1988)、1132。
- 3) 片岡征二・菅野恵介・木原諄二：63年塑性加工春季講演会講演論文集、(1988)、379。

- 4) 片岡征二・木原諄二・相澤龍彦：塑性と加工，30-340 (1989)，709.
- 5) Kataoka, S., Kihara, J., Aizawa, T.: Proc. 5th Int. Congress Tribology (EUROTRIB-89), Vol. 3, 150.
- 6) 片岡征二・菅野恵介・木原諄二：39回塑性加工連合講演会講演論文集，(1988)，123.
- 7) 片岡征二・木原諄二：塑性と加工，30-342 (1989)，1058.
- 8) 木村好次：塑性と加工，15-159 (1974)，321.
- 9) 宮川行雄：塑性と加工，4-33(1963)，676.
- 10) Kreuz, K.L., Fein, R.S., Rand, S.J.: Wear, 23 (1973)，393.
- 11) 川村益彦・藤田憲治・二宮清：潤滑，25-9 (1979)，621.
- 12) 木村好次・岡部平八郎：トライボロジー概論，(1984)，養賢堂.
- 13) Bowden, F.P., Tabor, D.: The Friction and Lubrication of Solids, (1950)，Oxford, Clarendon Press. 曾田範宗訳：固体の摩擦と潤滑，(1978)，丸善.
- 14) Kataoka, S., Kihara, J., Aizawa, T.: Proc. 3rd Int. Conference on Technology of Plasticity (1990)，Vol. 1, 575
- 15) 片岡征二・木原諄二・相澤龍彦：平成元年塑性加工春季講演会講演論文集，(1988)，379.

第4章 潤滑挙動に及ぼす圧下率の影響¹⁾

4. 1 緒 言

ミクロプールから、工具と材料との接触面間へ潤滑油が流出するというような潤滑機構において、工具入口から出口に至る間の摩擦界面における面圧の変化は、これまで検討を加えてきた工具表面粗さ、潤滑油の動粘度及び加工速度などの因子と同様に、ミクロプール中に封じ込められた潤滑油の流出挙動に大きな影響を及ぼす因子の一つであると考えられる。すなわち、工具の入口から出口に至る間にその摩擦界面の面圧が変化する場合には、ミクロプール中の潤滑油の圧力が工具と材料との直接接点部の面圧よりも高くなることも起こり得る。この結果、ミクロプール中の潤滑油が、ミクロプール近傍のダイス圧力をほとんど受け持つという状況も生ずる。このような状況の下では、ミクロプールから工具粗さによって形成されたチャンネルを通して潤滑油が流出するという機構、すなわち、ミクロプールメカニズムがより効果的に作用するようになると考えられる。

摩擦界面において面圧が変化するような加工法としては、引抜き加工や圧延などが知られている^{2)~5)}。引抜き加工においては、被加工材が工具入口に入った直後において著しく高い面圧が発生し、圧下が進行すると急激に低下し、以後工具出口に至るまで漸減することが実際に面圧を測定した実験において示されている⁴⁾。

本章では、このような観点から、前章までと同様の平板のしごき加工において、圧下率、すなわちしごき率を種々変化させ、これにともなう生じるであろう面圧の変化が、ミクロプールメカニズムに及ぼす影響について検討を加える。

4. 2 実験方法及び実験条件

被加工材の材質は7-3黄銅板 (C2600P-1/2H) で、板厚 2mm のものを使用した。これを 20×140 mm の短冊状に仕上げてから曲げ加工を行い、実験の試験片とした。表面状

態は前章と同様の圧延面をそのまま試験片表面とした圧延材と、エッチングによって微細なミクロプールを試験片表面に形成したエッチング材とした。

実験装置は前章までに用いたのと同じ、しごき型摩擦試験装置を用いたが、ここでは、圧下率の影響をよりはっきり掴む目的で、被加工材の板厚を 2mm としたため、摩擦係数測定用の八角形ロードセルを容量の大きなものに改造した。

工具表面は、前章におけるのと同様に、粗さの小さいラッピング工具及びしごき加工方向に垂直な方向に研削加工によって比較的大きな粗さを付けた研削工具の2種類を用いた。研削工具の表面粗さは、しごき加工方向に平行な方向に測定して約 $3\mu\text{m R}_{\text{max}}$ とした。これは、前章の No.5 工具に相当するものである。一方、ラッピング工具は No.1 工具に相当する。潤滑油はこれまでと同様のものを用いたが、本章における実験においては添加剤は一切添加しない。

圧下率 (R') は、2%~40% の間で6段階に変化させた。この場合、しごき加工後の試験片の板厚を測定しながら、所定の圧下率となるようにクリアランスを調整した。また、ダイス半角は、これまでの実験と同様に 5° 一定とし、加工速度は 0.01mm/s と 1mm/s の2段階に変化させた。

4. 3 実験結果

4. 3. 1 試験片表面が圧延面の場合の摩擦係数測定結果

圧延のままの表面の圧延材を試験片として用いた場合の摩擦係数の測定結果を Fig.1 に示す。Fig.1 (a) は工具粗さの小さいラッピング工具を用いた場合の結果であるが、潤滑油の動粘度の影響、及び圧下率 (R') の影響は小さい。

一方、しごき加工方向に垂直な方向に比較的大きな粗さを付けた研削工具の場合には、Fig.1 (b) に示すように、圧下率の小さいところでは、低粘度油の摩擦係数は高粘度油よりむしろ小さい値を示しているが、圧下率がわずかに大きくなると、摩擦係数の著しい増加が認められ、それ以後の圧下率においては高粘度油よりも著しく大きな値を示す。これに比べて高粘度油を用いた場合には、ラッピング工具におけるのと同様に圧下率の影響は小さく、むしろ圧下率の増加にともなって摩擦係数は低下する傾向を示す。

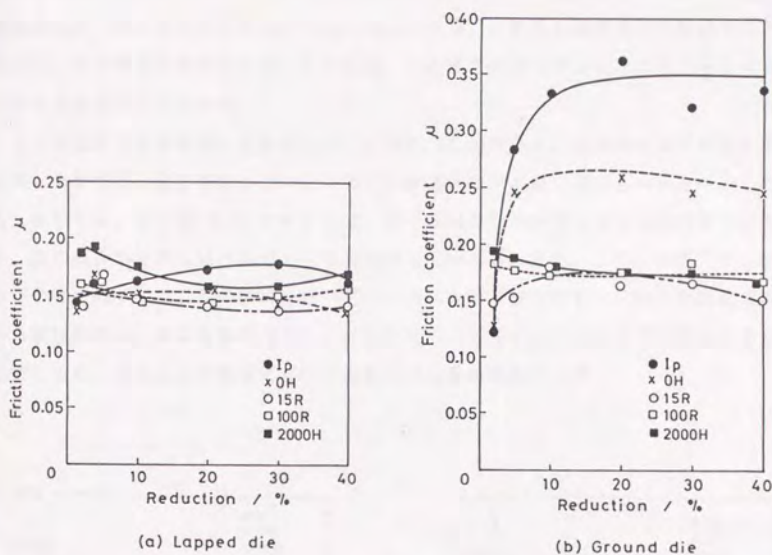


Fig.1 Effect of lubricant viscosity and surface roughness of flat die on relation between friction coefficient μ and reduction in thickness. (As-rolled surface workpiece, 1 mm/s.)

4. 3. 2 試験片表面がエッチング面の場合の摩擦係数測定結果

エッチング材を試験片とした場合の摩擦係数の測定結果を Fig.2 (a), (b) に示す。ラッピング工具、及び研削工具における結果とも、摩擦係数は潤滑油の動粘度が低いほど小さい値を示し、また、何れの動粘度の潤滑油においても、圧下率の増加に伴って摩擦係数が低下するのが認められる。

ここで注目されるのは、よく観察すると動粘度の高い潤滑油の 15R, 100R 及び 2000H においては、圧下率の増加に対する摩擦係数の低下割合は、ラッピング工具よりも研削工

具の方が大きいということである。したがってしごき率 2% においては、両工具における摩擦係数はほぼ同じ値であるが、しごき率が高くなると、工具粗さの大きい研削工具の摩擦係数は、ラッピング工具よりも小さな値となる。これらの傾向は、中程度の圧下率において、より顕著に認められる。これらは、これまでに示してきたミクロブールメカニズムの考えに従うものである。

さらに注目されるのは、低粘度油の Ip 及び 0H の場合に、工具表面粗さの大きい研削工具においては、圧下率の小さいところでも摩擦係数があまり増加しないということである。すなわち、圧下率 2% においては、若干摩擦係数が大きくなるのが認められるものの、他の条件のものに比べれば、その値は著しく小さい。また、これらは圧下率が増加するとすぐに低下して、その後はほぼ一定の小さな摩擦係数を示す。これらの研削工具における摩擦係数は、他の高粘度油あるいは低粘度油でラッピング工具を用いた条件のものと比較しても、ほとんどの領域において最も小さな摩擦係数を示す。

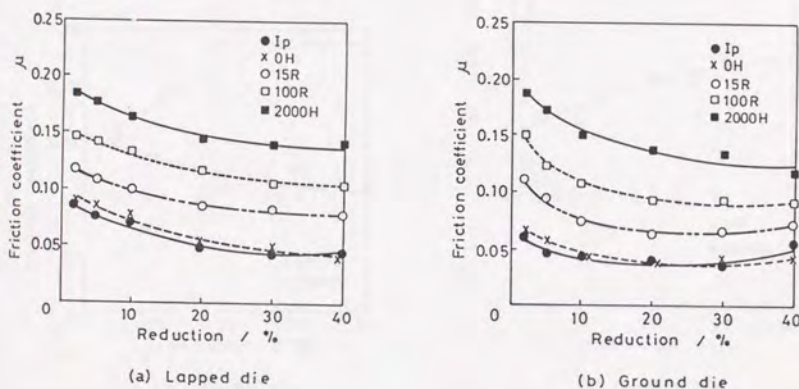


Fig.2 Effect of lubricant viscosity and surface roughness of flat die on relation between friction coefficient μ and reduction in thickness. (Etched surface workpiece, 1 mm/s.)

4.3.3 極低速条件における摩擦係数測定結果

しごき加工速度を 0.01mm/s の極低速とした場合の、摩擦係数の測定結果を Fig.3 及び Fig.4 に示す。

試験片表面を圧延面とした場合には、Fig.3 に示すようにラッピング工具及び研削工具の両工具条件において、低粘度油の 0H の摩擦係数は圧下率の増加にともなって増大する。とくに研削工具においては、圧下率の小さいところでも急激な摩擦係数の増加がみられる。

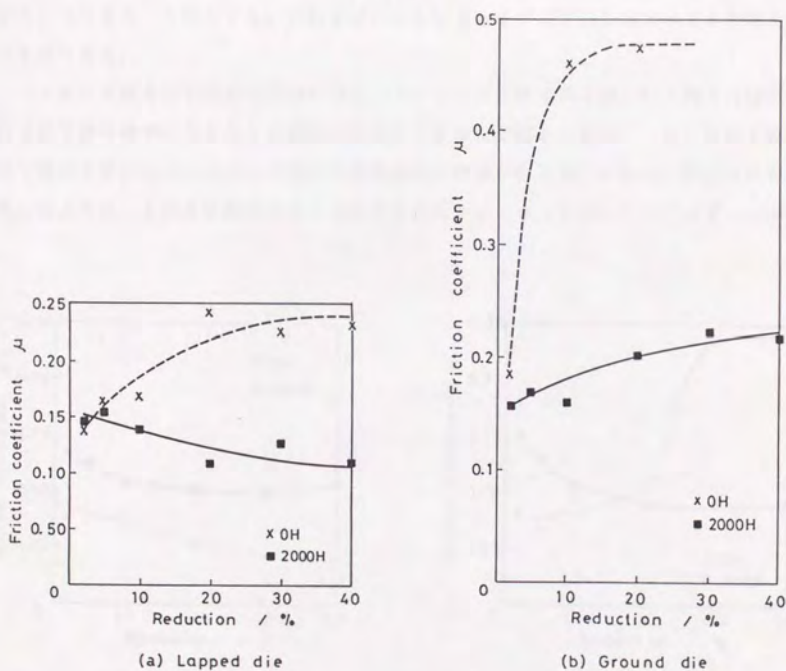


Fig.3 Effect of lubricant viscosity and surface roughness of flat die on relation between friction coefficient μ and reduction in thickness. (As-rolled surface workpiece, 0.01mm/s .)

これに比べて高粘度油では、研削工具の場合には、摩擦係数は圧下率の増加にともなって増大するが、ラッピング工具では逆に圧下率の増加にともなって減少する。

一方、エッチング材を試験片として用いた場合、高粘度油の摩擦係数は、Fig.4 に示すように、 1 mm/s の場合と同様に圧下率の増加にともなって低下する。ここで注目されるのは、高粘度油の場合、すべての圧下率において、加工速度が 0.01 mm/s における摩擦係数が 1 mm/s の時の Fig.2 の結果に比べて小さくなるということと、この場合、しごき加工方向に垂直な方向に粗さを付けた研削工具の方が、むしろ摩擦係数が小さくなるということである。このことも、これまで示してきたマイクロブルメカニズムの考えに従うものである。

エッチング材を用いた低粘度油の場合、ラッピング工具では 1 mm/s の時と同様に、やはり圧下率の増加にともなって摩擦係数は低下するのが認められる。一方、研削工具においては圧下率の大きいところで急激な摩擦係数の増加が生じる。これは、第3章において示したような、工具表面粗さによって形成されたチャンネルを通してマイクロブル中の潤

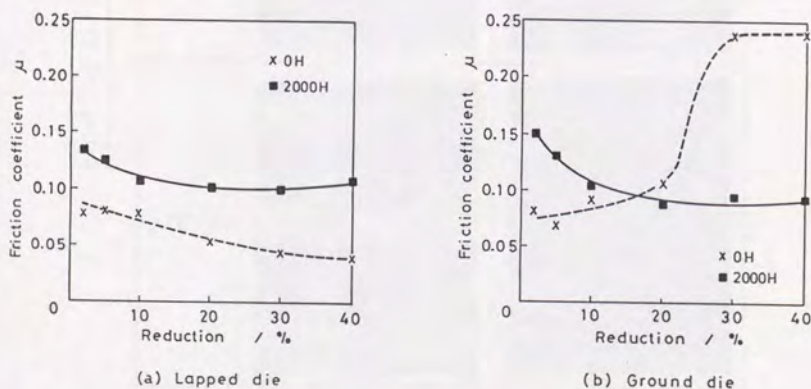


Fig.4 Effect of lubricant viscosity and surface roughness of flat die on relation between friction coefficient μ and reduction in thickness. (Etched surface workpiece, 0.01 mm/s .)

滑油がすべて系外へ流出し、ミクロプールが消滅する現象が圧下率の大きなところで生じたことによると解釈される。

4. 3. 4 材料表面の観察結果

40%の圧下率において、加工途中の試験片を加工方向と逆方向に引き抜き、この時、材

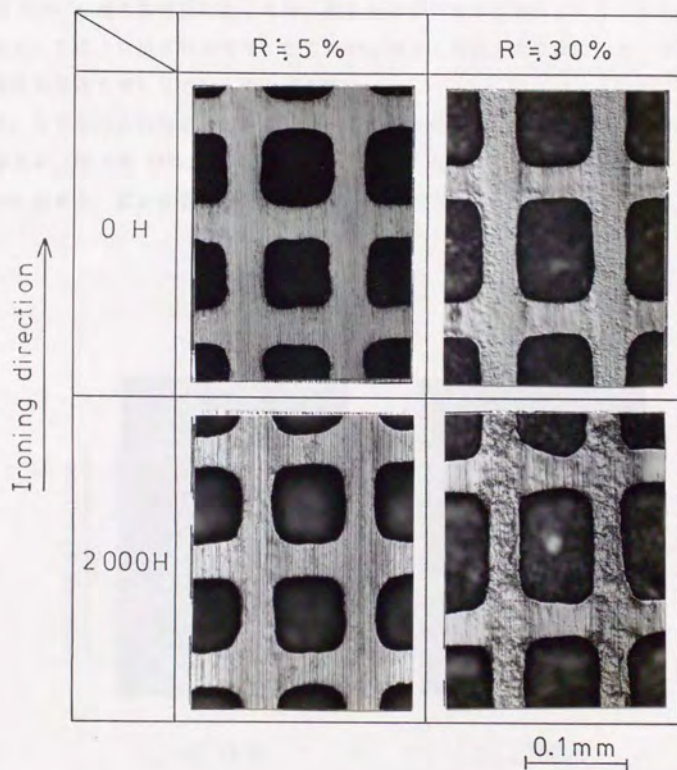


Fig.5 Infiltration of lubricant into boundary contact region under processing (with use of lapped die and etched workpiece).

料が工具と接触していた部分，すなわち摩擦界面となっていた部分の材料表面を顕微鏡で観察した，この場合の加工速度は 1 mm/s である。

Fig.5 は，試験片としてエッチング材を用いて，ラッピング工具によってしごいた場合の顕微鏡写真である．低粘度油の 0H 及び高粘度油の 2000H とも，工具入口付近，すなわち圧下率が約 5% と小さい場合には，ミクロブールから接触面上へ潤滑油が入り込んだという状況は確認できない．しかし，圧下率が大きくなった工具中央付近，すなわち圧下率が約 30% を越える付近においては，明らかに潤滑油が接触面上へ入り込んだ状態が観察される．ここで注目されるのは，加工方向に対して前後方向ではなくて，むしろ左右の横方向に入り込んでいるということである．

一方，しごき加工方向に垂直な方向に比較的大きな粗さを付けた研削工具を用いてしごいた場合の，圧下率 25% 付近における表面状態を Fig.6 に示す．この場合の加工速度は 1 mm/s である．低粘度油 0H 及び高粘度油 2000H ともに，Fig.5 に示したラッピング

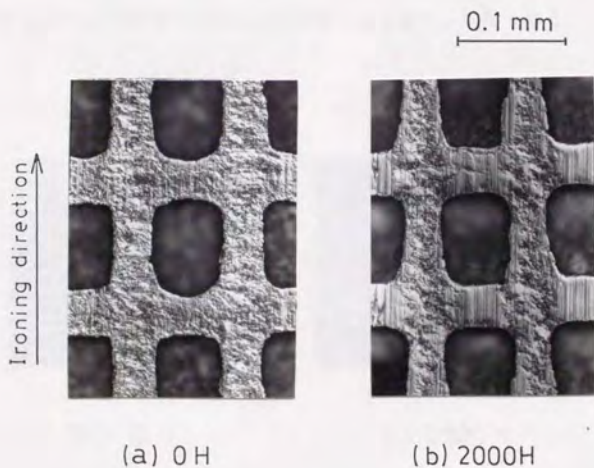


Fig.6 Infiltration of lubricant into boundary contact region with use of ground die under processing. (Reduction; 25%)

工具を用いた場合に比べて、厚い油膜に覆われていたことを伺わせるような表面状態となっているのが観察される。しかし、よく注意してみると、高粘度油のマイクロボールの後端部にはこれらの厚い油膜が形成されていないのが観察される。これに比べて、低粘度油では、この部分にも厚い油膜が形成されていたことを示す表面状態となっている。

4. 3. 5 加工後の工具（平ダイス）表面の観察。

加工速度を 1 mm/s とし、同一条件で試験片を各5枚づつ連続的にしごき加工し、加工後にその平ダイスの表面を観察した。この場合の平ダイスは、何れも表面粗さの小さいラッピング工具を用いている。

まず、エッチング材を試験片として用いた場合の結果を Fig.7 の写真に示す。Fig. 7 (a) は、潤滑油として低粘度油の 0H を用いた場合の結果である。写真において、白く見える部分が被加工材の黄銅が凝着によってダイス面上に移着したところである。被加工材がしごき加工され始める摩擦界面入口部において、若干凝着による黄銅の移着が見られる。これらの移着現象は、摩擦界面出口に進むにつれて、すなわち、圧下率が大きくなるにつれてしだいに減少し、中央部付近においてはほとんど認められなくなる。

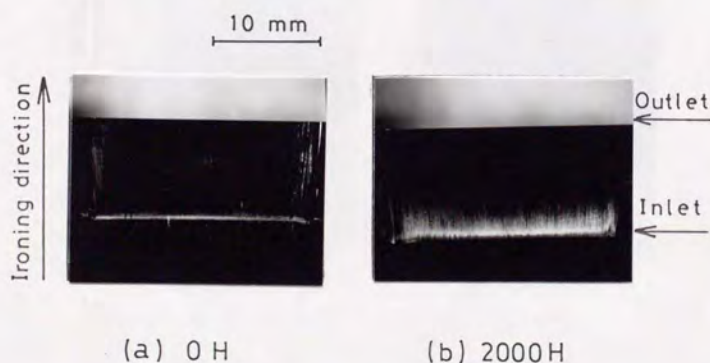


Fig.7 Surface appearance of flat die after the 5th ironing
(Etched surface workpiece, lapped die).

一方, Fig.7 (b)は高粘度油の 2000H を用いた場合の結果である. 低粘度油の 0H に比べて, 摩擦界面入口付近において激しい被加工材の移着が認められる. また, その幅もしごき加工方向に向かってかなり大きく広がっているのが観察される. しかしこの場合も, 圧下率が大きくなる工具中央部を過ぎると消滅する.

摩擦界面入口における移着状態をさらに詳細に観察するために, 工具入口近傍の移着の生じている部分を顕微鏡で観察した. その結果をFig.8 に示す. この場合, 黒く見えるのが移着した黄銅である. 低粘度油に比べ, 高粘度油では移着量が多く, これらはダイス出口方向に向かって幅広く広がっているのが認められる.

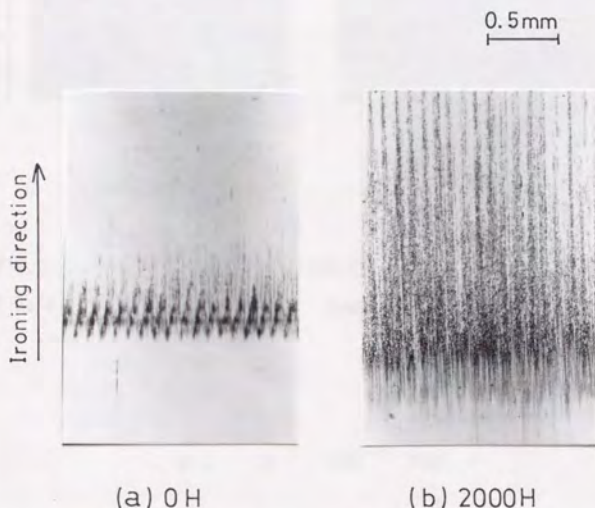


Fig.8 Micrographs of flat die surface after the 5th ironing
(Etched surface workpiece, lapped die).

一方、被加工材として圧延材を用いた場合の加工後の平ダイス表面の観察結果を Fig.9 (a), (b)に示す。ここで注目されるのは、エッチング材の場合には工具と被加工材が接触し始めた部分、すなわち摩擦界面入口付近において凝着による被加工材の移着が生じ始めるのが観察されるのに対し、圧延材の場合には、逆に摩擦界面出口に進むにつれて移着が多くなるということである。

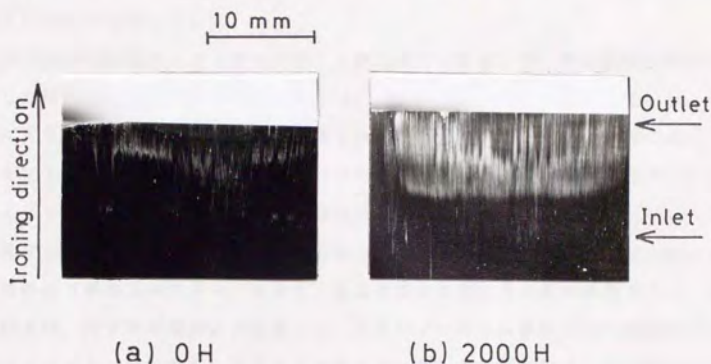


Fig.9 Surface appearance of flat die after the 5th ironing
(As-rolled surface workpiece, lapped die).

4. 4 考 察

4. 4. 1 高粘度油の流出挙動に及ぼす圧下率の影響

高粘度油を用い、工具表面粗さが小さい条件の場合には、エッチングによって形成したマイクロブールから接触面上への潤滑油の浸透流出量は少なく、摩擦界面はメタルコンタクトを含む境界潤滑が支配的となるということを前章までに述べてきた。しかし、本実験においては、圧下率の大きいところでは、高粘度油でもかなりの量が流出しているのが認められる。これらは以下に示す実験結果からも明らかである。

- 1) しごき加工後の平ダイスの表面を観察した Fig.7, Fig.8 及び Fig.9 の結果では、高粘度油を用いて圧延材をしごき加工した場合には、摩擦界面出口側の方に移着が多く生じているのが観察される。これに比べて、エッチング材では逆に、しごき加工が始まる摩擦界面の入口付近、すなわち圧下率が小さいところで移着が観察され、圧下率が約 15~20% を過ぎるとほとんど移着は認められなくなる。これらの結果は、エッチング材においては、圧下率が大きくなると、高粘度油でもミクロブールから流出していることを示している。
- 2) 加工途中の試験片（エッチング材）を逆方向に引き抜いて、その表面を顕微鏡で観察した結果、圧下率の大きいところでは、高粘度油でも明らかにかなりの量、接触面上に入り込んだと思われる形跡が観察された。この場合ラッピング工具に比べて、しごき加工方向に垂直な方向に粗さを付けた研削工具では、より顕著に認められた。
- 3) エッチング材の場合の高粘度油の摩擦係数は、圧下率の小さいところでは大きな値を示すが、圧下率の増加にともなって減少する。この場合、ラッピング工具より研削工具の低下率の方が大きい。さらに、加工速度の小さい方が摩擦係数が小さくなる。これらは、圧下率の増加にともなって、ミクロブールから接触面上へ潤滑油の流出するメカニズム、すなわち、ミクロブールメカニズムが作用し始め、圧下率が大きくなるにつれてその流出量が増加すること、さらに、工具表面粗さと加工速度の低下にともなってその量が増加することを示すものである。

以上のような、これまでは低粘度油に比べてミクロブールから流出し難いと考えられた高粘度油の場合でも、圧下率の大きいところでは、ミクロブールから接触面上へ流出するようになるというメカニズムは、前述の摩擦界面における面圧の変化を考慮することによって、以下のように説明することができる。

はじめにも述べたように、引抜き加工などにおいては、工具入口から出口に至る間で面圧が変化する。五弓ら⁴⁾が電気銅を用いて引抜き加工を行い、その面圧を実測した Fig.10 に示す結果においては、工具入口近傍における面圧は、変形抵抗のほぼ2倍にも達する高い面圧となる。しかし、これらは加工が進行すると急激に低下してほぼ変形抵抗の値にまで低下し、以後は工具出口に至るまで漸減することが示されている。このような面圧の変化に追従して、一つのミクロブールが工具入口から入って出口から出るまでの間に、その中に封じ込まれている潤滑油の圧力が如何なる変化をするのかについて注目することによって、高粘度油の流出機構はつぎのように考えることができる。

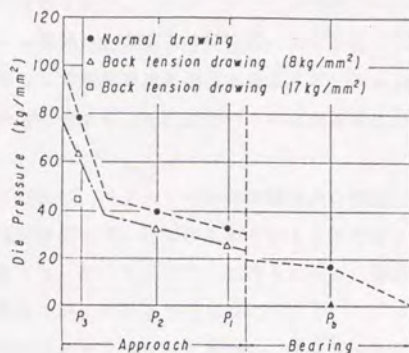


Fig.10 Measured die pressure at four positions. Dotted line is the estimated die pressure distribution⁴⁾.

まず、工具入口における高い面圧によって、被加工材である金属には塑性変形が生じる。これにともなう、ミクロブール中の潤滑油は圧縮され、圧力を発生し始める。しかしここで、金属と潤滑油との圧縮率の相違から、工具入口の近傍、すなわち圧下率の非常に小さいところでは、ミクロブール中の潤滑油の圧力は、これら工具と材料との接触面におけるような高い面圧までには上昇し得ない。第2章で示したエッチングミクロブールのバッファ効果は、このような時点において生じる。ここからさらに圧下率が増加し、ミクロブールの体積が減少することによって、潤滑油の圧力は著しく高められるようになり、この時点において、接触面上の面圧と等しい値にまで上昇し得るようになる。小豆島⁶⁾ら据込みにおける解析によれば、3～4%の圧下率の時に潤滑油の圧力は接触面上の圧力にほぼ等しくなるとされている。

このように、ミクロブール中の潤滑油の圧力と接触面上の圧力が等しい状況に達してから、さらに圧下率が増加すると、前述のように摩擦界面の平均面圧はさらに低下する。金属同士の接触となっている接触面上の面圧は、これにともなう直接的に低下するようになる。しかし、潤滑油は圧縮率が金属材料に比べて100分の1程度であるため、このような面圧の低下が生じて、入口部で生じた高面圧を保ち続ける可能性がある。ここで、摩

擦界面の平均面圧は金属同士の接触部の圧力とマイクロブール部の圧力にそれぞれの面積を乗じて平均したものであるから、マイクロブール中の潤滑油が高い圧力を保っていることによって、マイクロブール周囲の金属同士の接触部の面圧が低下することになる。この結果、圧下率の増加にともなって摩擦界面の面圧が低下するような加工条件の場合には、工具と材料との接触面間の面圧よりも、マイクロブール中の潤滑油の圧力が高くなるという現象が生じることになる。

このような状況になれば、メタルシールの欠陥部から接触面上へ流出する潤滑油の量は著しく増加する。高粘度油では、圧下率の小さいところではほとんど流出し得なかったために、圧下率が大きくなって、このような状態となると、潤滑油はメタルシールの欠陥部から接触面上へと急激に流出するようになる。

以上のように、圧下率が大きくなった場合に、高粘度油のマイクロブールから接触面間へ流出する機構は、これまで述べてきたメタルシールによる潤滑機構に、摩擦界面における面圧の変化と、金属と潤滑油の圧縮率の違いによって生じるマイクロブール中の潤滑油の圧力の上昇を考慮することによって説明することができる。これらのメカニズムはまた、筆者の共同研究者によって現在力学的に解析されつつある⁷⁾。

以上においては、圧下率の大きいところでの高粘度油のマイクロブールからの流出挙動について検討したものであるが、ここで、圧下率の小さいところに注目すれば、やはりこれまでと同様に高粘度油はマイクロブールから流出し難いことが示される。すなわち、Fig.7及び Fig.8に示したように、圧下率の小さいところで生じる平ダイスへの移着現象において、低粘度油に比べて高粘度油の場合の移着量は明らかに多く、さらにダイス出口方向に向かってその幅が大きく成長しているのが観察される。これらの結果は、圧下率の小さいところでは、高粘度油ほどマイクロブールから接触面上へ流出し難いということを直接的に示すものである。ここで重要なことは、このように、高粘度油の場合に平ダイスへの移着量が多いという事実は、凝着部のせん断抵抗が摩擦の原因であるとする現代の摩擦の理論からすると、高粘度油ほど摩擦係数が大きくなるのは当然のことであり、このことからこれまで述べてきたように、高粘度油の摩擦係数が大きくなるのは粘性抵抗が原因ではなくて、高粘度油ほどマイクロブールから流出し難く、接触面上でメタルコンタクトを含む境界潤滑領域が増加するためであるという考えが裏付けられる。

4. 4. 2 低粘度油の流出挙動に及ぼす圧下率の影響

一方、低粘度油においては、エッチング材の場合、これまで述べてきたように圧下率の小さい領域を含め、全領域においてミクロブールメカニズムが有効に作用していることが伺われる。これらは、以下の結果から裏付けられる。

1) エッチング材の場合、Fig.7, Fig.8 に示したように圧下率の小さいところではラッピング工具への黄銅の移着が認められるが、これは前述のように、エッチングブールのバッファ効果によるものと考えられる。すなわち、試験片表面のエッチングされていない平坦部の潤滑油が、加工の進行にともなってエッチングされたブール部へ逆流出し、平坦部上においては、凝着部を含む境界潤滑が支配的となったためである。したがって、この境界潤滑状態がいつ解消されるかは、すなわち、どの時点においてこれらの凝着が生じなくなるかは、ミクロブールメカニズムが効果的に作用しているかどうかを評価する目安となり得るものである。

さて、低粘度油を用いた場合でも、圧下率が小さいところでは凝着によって生じた黄銅の移着が観察されるが、この場合、高粘度油を用いた場合に比べて移着量は著しく少なく、また圧下率がわずかに増加するとすぐに減少し、移着はほとんど認められなくなる。これらは、低粘度油の場合、圧下率が小さい条件においても、高粘度油に比べてミクロブールメカニズムが有効に作用し、工具と材料との直接面間に浸透流出し易いことを示すものである。

2) エッチング材の場合、圧下率の小さいところから大きなところまで、全領域において、摩擦係数は低粘度油ほど小さい。とくに圧下率の小さいところでも、低粘度油を用いて、しごき加工方向に垂直な方向に比較的大きな粗さを付けた研削工具を用いた場合の摩擦係数が、他の条件のもののように増大しないのが注目されることである。このことは、低粘度油においては、全領域において、ミクロブールメカニズムが有効に作用していることを示すとともに、とくに、工具粗さの大きい場合には、圧下率の小さなところでもミクロブールメカニズムが有効に作用していることを示すものである。すなわち、低粘度油の場合、シール部の欠陥が大きければ、ミクロブール中の潤滑油に静水圧が発生するとすぐにミクロブールからの流出が起こることを示している。これもまた、これまでの考えに従うものである。

3) しごき加工方向に垂直な方向に粗さを付けた研削工具を用いてしごき加工した場合、低粘度油においては、材料の表面状態は Fig.6 (a)に示すように厚い油膜に覆われて

いたことを伺わせるような表面状態となっている。これは、圧下率の大きいところで、ミクロブール中の潤滑油の圧力が接触面上の面圧よりも高くなるという現象と、低粘度油で、工具粗さが大きいという条件における流出量の増大とが重なり合って、このようなミクロブールからの多量の流出がもたらされたと解釈できる。

以上のように、圧下率を種々変化させてミクロブールメカニズムについて検討した結果からも、低粘度油の場合には、これまで述べてきたミクロブールメカニズムが圧下率の小さいところから大きなところまで、広範囲にわたって効果的に作用していることは明らかである。

4. 5 結 言

摩擦界面の面圧が、圧下率の増加によって変化するような加工条件において、その面圧の変化がこれまで述べてきたミクロブールメカニズムに及ぼす影響について検討した。その結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 低粘度油の場合には、圧下率の小さいところから大きなところまで、全領域において、これまで述べてきたミクロブールメカニズムが効果的に作用していることが確認できた。とくに、しごき加工方向に垂直な方向に付けた工具の粗さが大きい場合には、しごき加工が始まるとすぐにミクロブールメカニズムが作用し始めることが伺える。
- 2) 高粘度油の場合、圧下率の小さいところでは、低粘度油に比べて工具への被加工材の移着量が大きく、さらに摩擦係数も大きな値となる。これらは、高粘度油ほどミクロブールから流出し難いということを示すものであり、動圧効果によって流出するモデルでは説明できないものである。また、凝着部のせん断抵抗が摩擦の原因であるとする摩擦の理論からすると、高粘度油ほど摩擦係数が大きくなるのは当然であり、このことから、高粘度油ほど摩擦係数が大きくなるのは、粘性抵抗によるものではなくて、高粘度油ほどミクロブールから流出し難くなるためであるとする、これまでに示してきたミクロブールメカニズムの考えが裏付けられる。
- 3) 高粘度油でも圧下率が増加すれば摩擦係数は小さくなる。これは、圧下率が大きくなると高粘度油でも接触面間に浸入するようになったことによる。高粘度油の摩擦が、粘性抵抗によって支配されているならば、圧下率が大きくなっても摩擦係数は一定値

を示し、このように低下することはないと考えられる。このことも、高粘度油ほど摩擦係数が大きくなるのは、粘性抵抗によるものではなくて、高粘度油ほどマイクロブールから流出し難くなるためであるとする、これまでに示してきたマイクロブールメカニズムの考えを裏付けるものである。

- 4) 高粘度油でも、圧下率が大きくなるとマイクロブールから接触面上へ潤滑油が流出するのが確認できたが、このような潤滑機構は、これまで述べてきたメタルシールの欠陥部から流出するという潤滑機構に、摩擦界面における面圧の変化と潤滑油の圧縮率を考慮し、これによってマイクロブール中の潤滑油の圧力が、工具と材料との接触面間の面圧より高くなる現象が生じるということを加味することによって説明することができる。

＜参考文献＞

- 1) 片岡征二・木原諄二・相澤龍彦：平2年塑性加工春季講演会講演論文集，(1990)，173.
- 2) Lenard, J.G.: Proc. 5th Int. Congress Tribology (EUROTRIB-89), VOL.2, 210.
- 3) Green, A.P., Hill, R.: Journal of the Mechanics and Physics of Solids, (1952) Vol.1, 37.
- 4) 五弓勇雄・岸輝雄・二宮敬：金属学会誌，1-31 (1967)，83.
- 5) 小島之夫・森川裕彦・水野高爾：塑性と加工，26-295 (1985)，855.
- 6) 小豆島明・坪内昌生・工藤英明・古田憲明・峯村憲：塑性と加工，30-347 (1989)，1613.
- 7) 陰山哲也・木原諄二・相澤龍彦：平成元年度東京大学卒業論文「マイクロブールモデルの解析的研究」

第5章 低速度塑性加工における潤滑機構に関するモデル

5. 1 緒 言

摩擦界面に形成されたミクロブールが、塑性加工の潤滑機構において重要な役割を演じていることは、これまでの多くの研究からも明らかである^{1)~3)}。しかし、ミクロブール中に封じ込められた潤滑油の流出挙動、すなわちミクロブールメカニズムに付いては、未だ十分理解できるまでには至っていない。

本研究は、このような状況を踏まえ、ミクロブールの形態と使用する潤滑油の流体力学的特性、すなわち動粘度などとの関連の下で、工具粗さに注目しながら、これらミクロブールメカニズムについて検討を加えた。この結果、まず、ミクロブールからの潤滑油の流出機構を検討するために行った一連の実験から、その流出がこれまでのモデルによって提案されているような動圧効果によって生じるというのではなく、工具と材料との接触によって形成されるメタルシールと想定される接触部の欠陥から、強制潤滑に似た状態で、すなわち静圧効果によって流出するということを裏付ける多くの結果を得た。この場合、潤滑油の粘度がその流出挙動に大きな影響を及ぼしていること、さらに、工具表面粗さが潤滑油の流出する際の重要な流路となっているということを裏付ける数多くの実験結果を得ることができた。また、 $\eta \cdot V$ の増加にともなう摩擦係数の増加現象に関しても、潤滑油自体の粘性抵抗の増大に起因するのではなく、 $\eta \cdot V$ の増加にともなう、逆にミクロブールから潤滑油が流出し難くなるために摩擦係数が増加するということを裏付ける実験結果を得た。

本章ではまず、ミクロブールからの潤滑油の流出機構に関して、動圧効果では説明できない現象、逆に言えば、工具表面粗さの凹凸の凹部によって形成されたチャンネルを通して、静圧効果によって流出しているというモデルの裏付けとなる現象を整理して示すことにする。また、 $\eta \cdot V$ の増加にともなう摩擦係数の増加現象に関しても、潤滑油自体の粘性抵抗ではなく、 $\eta \cdot V$ の増加にともなうミクロブールから潤滑油が流出し難くなるために摩擦係数が増加するということを裏付ける実験結果を整理して示す。その後、この

ような潤滑現象のすべてを無理なく説明することのできる、本研究の実験によって明らかにすることのできた静圧効果によるマイクロブール潤滑機構のモデルを示すことにする。最後に、これらのモデルを定量的に理解するために行った、Butlerの試験体⁴⁾を用いた据込みによる確認実験と、定量的解析による検討結果を示す。

5. 2 塑性静圧的マイクロブール潤滑モデルの裏付けとなる現象

5. 2. 1 動圧効果ではなくて静圧効果によって流出することを裏付ける現象

- 1) 第2章 Fig.7 に示したように、低粘度の潤滑油を用いた極低速 (0.01mm/s) 加工、すなわち、エッチングによって形成した直径 1mm のマイクロブール中に封じ込められた潤滑油に対して、動圧効果がほとんど生じないと考えられる条件でも、このマイクロブールから潤滑油が工具と材料との接触面間に、かなり厚い潤滑膜となって浸透流出しているのが確認できた。
- 2) 第2章 Fig.6 に示したように、低粘度の潤滑油はエッチングによって形成された直径 1mm のマイクロブールから、工具と材料との接触面間へ等方的に浸透流出しているのが確認できた。また、第4章の Fig.5, Fig.6 においては、低粘度油、高粘度油ともに、モアレ原版を基にしてエッチングによって形成した微細なマイクロブールから、接触面間へ等方的に、あるいはむしろしごき加工方向に垂直な横方向により多く流出しているのが確認できた。動圧効果によってマイクロブールから流出するのであれば、潤滑油は方向性を持ってマイクロブールの後端に流出するはずである。
- 3) エッチングによって形成されたマイクロブールの周囲は、シャープエッジになっている。すなわち、動圧効果(くさび効果)は生じないはずである。それにもかかわらず、第2章 Fig.5~Fig.8 及び第4章 Fig.5, Fig.6 に示したように、エッチングによって形成されたマイクロブールから潤滑油が接触面上に流出するのが確認できる。
- 4) 第2章 Fig.14 に示したように、直径 1mm のエッチングマイクロブールの間隔 l を大きくし、しごき率を 17% とした条件では、摩擦界面にマイクロブールが全く存在しなくなると、その1列が完全に入り込んだ状態とが交互に現れる。低粘度油の場合、マイクロブールの1列が一度入り込むと、つぎのマイクロブールが全く存在しない条

件となったときにも、著しく潤滑状態が改善されることが明らかとなった。このことは、1)～3)で示した顕微鏡観察の結果と考え合わせると、低粘度油の場合、マイクロブールが摩擦界面に入り込んだときに、強制潤滑状態で、すなわち静圧効果によってマイクロブールから広い範囲にわたって潤滑油が接触面間に流出しているということを示すものである。

5) 第3章において示したように、 0.01mm/s の極低速加工において、試験片としてエッチング材を用い、工具としてラッピング工具を使用した場合、高粘度油の摩擦力-ストローク線図には連続的な stick-slip が生じているのが観察された。動圧効果によってマイクロブールから潤滑油が流出するのであれば、高粘度油ほど流出量は多くなり、stick-slipは低粘度油に比べて発生し難くなるはずである。

6) 第4章 Fig.7, Fig.8 の写真に示したように、摩擦界面入口付近における被加工材の平グリスへの移着量は、高粘度油ほど多い。このことも、摩擦界面において高粘度油ほどマイクロブールから流出し難いことを示すものである。

5. 2. 2 工具表面粗さを考慮せねば説明できない現象

1) 第3章の Fig.4 に示したように、エッチング材を試験片とした場合、低粘度油ほど、さらに工具表面粗さが大きいほど摩擦係数が小さくなる。このことは、低粘度油ほど、また工具表面粗さが大きいほど、接触面間への静圧効果による潤滑油の流出量が多くなることを示すとともに、マイクロブールからの潤滑油の流出に対して、工具粗さによって形成されたチャンネルが重要な流路となっていることを示している。

2) 第3章の Fig.10 に示したように、エッチング材の加工後の表面観察において、低粘度油の場合、しごき加工方向に垂直な方向に比較的大きな粗さを付けた工具を用い、かつ、加工速度が非常に小さい条件では、エッチングによって形成されたマイクロブールが消滅するのが観察された。しかし、その工具の粗さを、工具の両端において削り取って小さくしたもの、また、同じ粗さの工具でしごき加工方向に平行な方向に粗さを付けたものでは、このような現象は生じない。これもまた、マイクロブールからの潤滑油の流出挙動に対し、しごき加工方向に垂直な方向に付けた工具粗さのチャンネルが重要な役割を演じていることを示すものである。

3) 第4章の Fig.5, Fig.6 に示したように、加工中の材料を逆方向に引き抜き、顕微鏡でその表面を観察した結果、しごき加工方向に垂直な方向に付けた工具粗さの大き

い研削工具の方が、ラッピング工具に比べて摩擦界面において厚い油膜が形成されていたことを示す表面状態となっているのが観察された。

- 4) 第4章において示したように、ラッピング工具では圧下率が小さくなるにしたがって低粘度油でも摩擦係数が大きくなるのが認められる。しかし、しごき加工方向に垂直な方向に比較的大きな粗さを付けた研削工具では、圧下率が小さい場合でも、その摩擦係数の増加はラッピング工具に比べて小さい。このことは、研削工具においては、その粗さによって、圧下率の小さい場合でもミクロブールメカニズムが有効に作用していることを示しているといえるものであって、工具粗さが重要であることを示すものである。

5. 2. 3 $\eta \cdot V$ の増加にともなう摩擦係数の増加現象は粘性抵抗の影響ではなくて、
 $\eta \cdot V$ の増加にともなってミクロブールから潤滑油が流出し難くなるため
であることを裏付ける現象

- 1) 第2章 Fig.12 (a) に示したように、エッチングで形成した $\phi 1\text{mm}$ のミクロブールの間隔 l を小さくし、工具と材料とが接触する割合、すなわち接触率が小さくなる条件においては、高粘度油でも摩擦係数は 0.1 以下にまで低下する。このことは、工具と材料との接触部分が摩擦を支配していることを示すものであって、ミクロブール中に存在する潤滑油を含めて、高粘度油における粘性抵抗の影響は小さいものでしかないことを示している。

- 2) 第3章において示したように、潤滑油自体の粘性抵抗の影響が小さくなると考えられる 0.01 mm/s の極低速加工においても、高粘度油の摩擦係数は低粘度油の値に比べて大きい。この場合、高粘度油の摩擦線図には、連続的な stick-slip が観察される。このことは、低粘度油に比べて高粘度油ほど接触面上においてメタルコンタクトを含む真実接触面の面積が多いことを示すものである。すなわち、高粘度油ほどミクロブールから流出し難く、このことが高粘度油ほど摩擦係数が大きくなる原因であることを示すものである。

- 3) 第3章で示したように、高粘度油でも、塩化ステアロイルの吸着膜が十分形成される条件では、摩擦係数は低粘度油の値近くまで低下するとともに、速度の増加に対しても一定の値を示すようになる。このことは、高粘度油でも、何等かの方法で接触面

間で生じている凝着を減少させれば、摩擦係数は低粘度油の値近くまで小さくなることを示すものである。このことはまた、潤滑油自体の粘性抵抗は著しく小さいものでしかないことを示している。

4) 第4章において示したように、エッチング材の場合、高粘度油でも圧下率が増加すれば摩擦係数は小さくなる。これは、高粘度油でも圧下率の増加にともなってマイクロブールメカニズムが有効に作用し、接触面上に潤滑油が入り込み、凝着部が減少することによって摩擦係数が減少すると考えられるものであるが、高粘度油における摩擦が、粘性抵抗によって支配されているのなら、圧下率が大きくなっても摩擦係数は一定の高い値を示すはずである。

5) 第4章 Fig.7, Fig.8 の写真に示したように、高粘度油では被加工材の平ダイスへの移着量が多い。このことは摩擦界面において凝着部分が多いことを示すものであり、凝着を摩擦の原因とする近代の摩擦の考えと一致する。すなわち、高粘度油の摩擦係数が大きいのは、潤滑油自体の粘性抵抗に起因するのではなくて、高粘度油ほどマイクロブールから流出し難く接触面上に凝着を生じ易いことによると結論できる。

5. 3 本研究によって明確にすること のできた潤滑機構のモデル

5. 3. 1 塑性静圧マイクロブール潤滑機構のモデル

塑性加工におけるいわゆる混合潤滑状態の場合、摩擦界面に形成された、一つ一つが独立していて、閉じた形状となったマイクロブール中の潤滑油には高い静水圧が発生し、条件によっては、工具と材料との接触面間の面圧に匹敵するまでに高くなり得る。マイクロブール中で高い静水圧を発生した潤滑油は、つぎには強制潤滑に似た状態で、すなわち静圧効果によって境界潤滑状態にあるとされる接触面間に入り込む。これらの潤滑機構は、マイクロブールの周囲の接触状態を、欠陥をともなったメタルシールとみなすことによって容易に理解することができる。すなわち、工具と材料との直接接触によって形成された微小な空間に潤滑油が封じ込まれ、そこで変形中に高い静水圧を発生するような状況を、メタルシールによって潤滑油が封じ込まれているような状況であると想定する。

シール部を構成する工具と材料との表面には、加工当初から何等かの粗さが存在してい

る。このような二面の接触面間においては、原子的スケールの均一な接触とはなり得ず、二面の粗さ、とくに工具の粗さに応じてシール部に欠陥を残すことになる。また、圧下率の増加にともなって摩擦界面の面圧が減少するような加工、例えば引抜き加工、押出し加工、しごき加工等においては、被加工材である金属材料と潤滑油との圧縮率の相違から、圧下率の増加にともなって、境界潤滑状態にある接触面上の面圧よりもミクロブール中の潤滑油の圧力が高くなるということも起こり得る。このような状況の下では、境界潤滑部に形成されるミクロンオーダー以下のわずかな隙間を通して、さらには、摩擦界面における面圧の変動に乗じて、ミクロブール中で高い静水圧を発生した潤滑油は、静圧効果によって境界潤滑部へと流出する。この場合、メタルシールが不完全になるほど、いいかえれば、工具と被加工材間に存在する隙間が大きくなるほど、また、接触面上の面圧よりもミクロブール中の潤滑油の圧力が高くなるような条件となる場合ほどその量は多くなる。さらに、加工速度も流出量に対して重要な因子となり得るものであって、加工速度の低下にともなってその流出量は増大する。

このようなミクロブールメカニズムが作用する潤滑機構においては、潤滑油の粘度の影響はとくに重要なものであって、粘度が低いほどミクロブールから欠陥を通して接触面間へ流出する際の抵抗が小さく、潤滑油の流出量は粘度の低下にともなって増大する。とくに、低粘度の潤滑油においては、ミクロブール中で潤滑油に圧力が発生する状態となりさえすれば、広範囲な加工条件下において、ミクロブールメカニズムが有効に作用するようになる。

このようにして、工具と材料との接触面間に浸透流出した潤滑油は、つぎにはこれらの粗さによって形成されたチャンネルを通して広く広がり、ついには接触面間のチャンネルすべてにおいて高い静水圧を発生させるようになる。接触面間において広く広がるということに関しても、潤滑油の動粘度が大きな影響を及ぼす。接触面間に存在する粗さのチャンネルにおいてこのような高い静水圧が発生するようになると、これらは元のミクロブールと同じ様な挙動をし、加工荷重を支えるとともに、ここから工具粗さの凸部と材料との接触面間をも潤滑するようになる。あるいは、工具粗さのチャンネル部において、工具の粗さの凸部と材料との接触面間の面圧と同じ程度の高い静水圧を発生しているような状態であれば、材料表面にわずかなファンデルワールス力によって吸着している潤滑油分子であっても、二面間の摺動にともなってこれら工具粗さの凸部と材料との接触している部分へと、機械的に引きずり込まれることもあり得るであろう。

一方、潤滑油の粘度が高くなるにしたがって、微細な隙間に浸入する際の抵抗が大きくなるため、ミクロプールから工具と材料との接触部への静圧効果による浸透流出量は減少する。また、たとえ入り込んだとしてもチャンネルを通して移動する場合にも抵抗が大きく、低粘度油のように広く広がるという効果も小さくなる。さらに高粘度油になると、ミクロプール中より動かず、あたかも材料とともに塑性変形するように挙動し、しごき加工方向にのみ移動する。したがって、摩擦界面においてミクロプールが形成されるような条件においても、低粘度油のような著しい摩擦係数の減少を生じさせることはない。しかし、ミクロプールからメタルシールの欠陥を通して移動する過程に対する抵抗は、潤滑油の動

Table 1 Resume of lubrication models.

	ミクロプールから潤滑油の流出機構	$\eta \cdot V$ の増加に伴って摩擦係数が増加する原因
本研究のモデル	<p>メタルシールの欠陥部からの流出。したがって工具表面粗さが大きいほど、低粘度油ほど、加工速度が小さいほど流出量は多くなる。</p> <p>この場合、金属と潤滑油との圧縮率の相違と、摩擦界面の面圧の変化はミクロプール中の潤滑油を接触面に押し出すように作用する。</p> <p>(影響因子)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 工具表面粗さ ・ 潤滑油粘度 η ・ 加工速度 V ・ 摩擦界面の面圧変化と圧縮率 	$\eta \cdot V$ の増加にともなって、ミクロプールから潤滑油が流出し難くなることによる。

粘度に起因するものであり、プロセスの時間が長い、圧下率の増加にともなって摩擦界面の面圧が減少するにもかかわらず、ミクロブールの圧力が高くなる条件では、高粘度油でも、動粘度の低い潤滑油と同様にミクロブールからメタルシールの欠陥を通して接触面上へと浸透流出し、摩擦係数は低下するようになる。

以上で示したミクロブール潤滑機構のモデルを、第1章の Table 1 に準じてまとめると Table 1 のようになる。

5. 3. 2 Butler の試験体による塑性静圧ミクロブール潤滑モデルの確認実験^{4) ~ 6)}

前項において述べたように、ミクロブール中の潤滑油の工具と材料との接触面間への浸透流出挙動は、メタルシールと想定した接触面間に形成された欠陥を通しての流出挙動と考えることによって容易に説明することができる。ここでは、さらにメタルシールに近い状態をシミュレートし得る、Butler の試験体を用いて考察実験を行い、ミクロブールからの潤滑油の流出挙動に及ぼす潤滑油の粘度及び工具表面粗さの影響について検討を加え、塑性静圧ミクロブール潤滑モデルの確認をする。

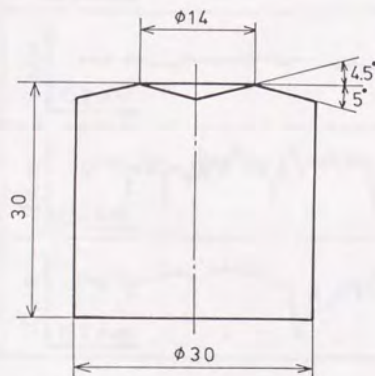


Fig.1 Nominal dimensions of coned specimen.

試験体の模式図を Fig.1 に示す。中心部の窪み部は直径 14 mm で、コーン状の窪みの頂角は 171° である。この窪み部の上縁部から試験体外縁までは勾配 5° の傾斜に旋削してある。加工を開始する前に窪み部に液体を十分に貯え、平面工具で圧縮し、窪み部からの液体の流出量を測定評価する。平面工具は焼き入れした工具鋼を用い、試験体と接触する側の端面に半径方向の粗さをつけた。工具粗さは4段階に変化させ、その粗さのトレースを Fig.2 に示す。

実験は、Butlerの試験体を油圧プレスで圧縮速度 $0.5\text{mm}/\text{min}$ の低速度で据込んだ。この時、工具と最初に接触するコーン状の窪み部の上縁部が、まず圧縮されてリング状に平坦化される。その平坦化された部分の外縁が、試験体外縁の位置に達した時点で試験体を取り外し、中央部に残存したコーン状の窪み部の形状を粗さ計で測定した。このときの窪

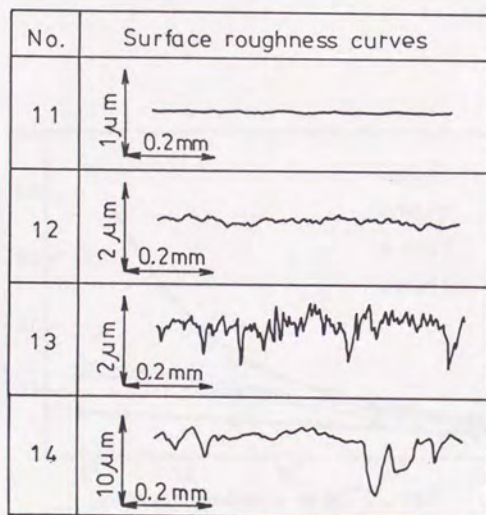


Fig.2 Surface roughness curves of flat die used for compression of coned specimen.

み部の形状と試験前の窪み部の形状とから、据込み前後における窪み部の内容積変化を求めた。この値は、窪み部からの液体の流出量を表す。

潤滑油としてはこれまでのしごき実験で用いたのと同様の潤滑油を用いた。また、最も低粘度の液体として、ここでは水を用いた。水の高压粘度特性から、加工中の高面圧条件においても、他の潤滑油に比べて最も低粘度の液体であると思われる⁷⁾。試験体の材質は6-4 黄銅である。

容積変化率と液体の粘度との関係を求めた結果をFig.3 に示す。この結果から液体の粘度が低いほど、また、工具表面粗さが大きいほど容積変化率が大きくなることが分かる。これらは、実験的に粘度の低い液体ほど、また、工具表面粗さが大きいほど窪み部から静圧効果によって流出し易いことを示している。さらにこの場合、工具表面の粗さが、流出する液体の流路として有効に作用することを示しているものであり、前項において提案した静圧ミクロボール潤滑モデルを裏付けるものである。

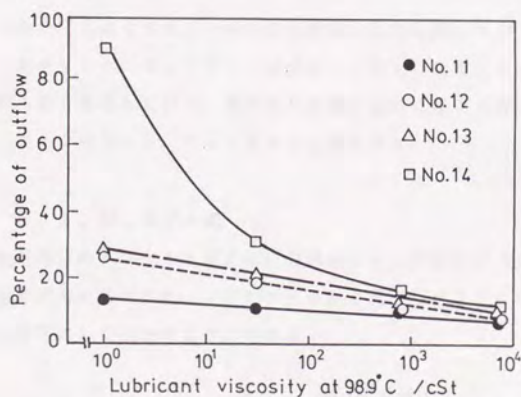


Fig.3 Effect of lubricant viscosity on outflow of lubricant from coned cave in loading normal force.

ここで、工具表面粗さの最も小さい No.11 工具を用いた場合、高粘度油 2000H でも窪み部の容積が減少し、さらにこの値は低粘度油になるにしたがって若干増加するのが認められる。これは、加工によって窪み部から潤滑油が流出したと考えるより、潤滑油の圧縮率に依存した窪み部の変化と判断した方が妥当であろうと思われる。

5. 4 ミクロプール潤滑モデルの 定量的解析

5. 4. 1 Channel Jacking Mechanism (C.J.M.)

ミクロプール中の潤滑油が、工具と材料とのシール部の欠陥から浸透流出し、さらに、工具粗さのチャンネルに沿って流れる挙動を、以下のような Channel Jacking Mechanism と想定して定量的解析を試みる。

孤立したミクロプールから派出し、ネットワークを組むマイクロチャンネル内にミクロプールから潤滑油が押し込まれる。チャンネル内に潤滑油が十分に満たされると流れが止まり、チャンネル中の圧力はミクロプール中の潤滑油の圧力と同じ圧力となる。この段階で、静水圧を発生したチャンネルネットワークが完成して加工荷重を支える。

チャンネルが外部と径絡していて、潤滑油の流動が過度に起こり得る場合には、系外に潤滑油が流出してミクロプール、チャンネルとも消失する。

5. 4. 2. C. J. M. モデル式

チャンネルを直径Dのトンネルと考える。潤滑油のせん断抵抗は Newton 則に従い、その粘度は指数則で圧力に依存する。ミクロプールから延びるチャンネル中の潤滑油の平衡式を、Fig.4 を参考にして以下のように考える。

$$\frac{\pi D^2}{4} \cdot dp = \frac{\pi D \cdot \eta v}{D} \cdot dx + \frac{\pi D^2 \rho dv}{4 dt} \cdot dx \dots\dots\dots (1)$$

ここで、pはチャンネル中の潤滑油の圧力で、xはミクロプールからの長さ、 η は潤滑油の粘性係数、vは潤滑油の平均流速、 ρ は潤滑油の密度、tは時間である。なお、(1)式の右辺の第1項は、チャンネル壁面から作用する摩擦抵抗であるが、厳密には1~2の

係数の補正が必要である。

潤滑油を非圧縮性とする、 $dv/dx=0$ であるから、(1)式は p と x についての微分方程式となる。潤滑油の粘度の圧力依存性を

$$\eta = \eta_0 \exp(\gamma p) \quad \dots\dots\dots (2)$$

η_0 : 大気圧での潤滑油の粘性係数

γ : 粘度の圧力指数

とする。対象が低速加工なので粘度の温度依存性は考慮しない。ここで、

$$\alpha = \frac{4 \eta_0 v}{D^2}, \quad \beta = \frac{\rho dv}{dt}, \quad \varepsilon = \frac{\beta}{\alpha}$$

とおく。

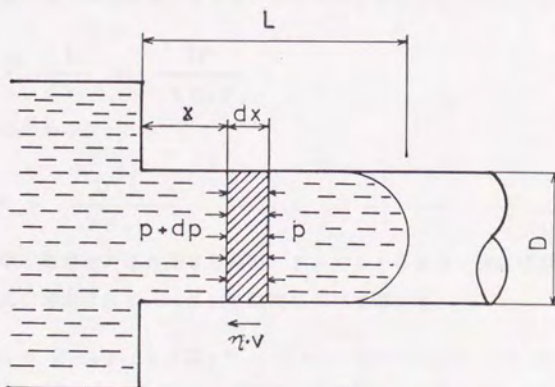


Fig.4 Forces on a minor element

$x=0$ で $p=k$ (k :材料の変形抵抗), $x=L$ (L :チャンネル中の潤滑油の延長長さ)で $p=0$ の境界条件で(1)を解く。 $X=\exp(\gamma p)$ とおくと,

$$\frac{dX}{X(X+\varepsilon)} = \alpha \gamma dx$$

と(1)は変形される。したがって,

$$\left[\ln \left\{ \frac{X}{(X+\varepsilon)} \right\} \right]_1^{\exp(\gamma p)} = \varepsilon \alpha \gamma L = \beta \gamma L$$

1に比べて $\exp(-\gamma p)$ が無視できるとすると,

$$\ln(1+\varepsilon) = \beta \gamma L$$

と書ける。左辺を1のまわりで展開して線形化すると,

$$\varepsilon = \beta \gamma L$$

よって,

$$\alpha \gamma L = 1$$

の関係が導出される。すなわち, ($dv/dx=0$ より) $dL/dt=v$ であるから

$$L \cdot \frac{dL}{dt} = \frac{D^2}{4\eta_0\gamma}$$

$t=0$ で $L=0$ だから,

$$L^2 = \frac{D^2 t}{2\eta_0\gamma} \dots\dots\dots (3)$$

とチャンネル中の潤滑油の延長長さ L と時間 t , チャンネルの太さ D , 大気圧粘度 η_0 , 粘度の圧力指数との関係式が導出される。(3)を時間について解いて,

$$t = 2\eta_0\gamma (L/D)^2 \dots\dots\dots (4)$$

となる。これより, 一つのチャンネルに潤滑油が充満し, そこに圧力が発生する時間は, チャンネルのアスペクト比の平方に比例することが分かる。

この力学的取扱で意味のある値としては, 潤滑油の分子の大きさを考慮すれば, $D>5$ nm程度までの範囲と考えることができよう。

5. 4. 3 ミクロブールとチャンネルのモデル

工具表面と被加工材表面との間に存在するミクロブールとチャンネルの形態として、ここで例示するいくつかのモデルがある。ここでは3種類の形態を考えてみた。

(1) ミクロブール直結モデル

ミクロブール同士が太さの異なるチャンネルによって径絡されているとする。太さがDで評価されるチャンネルに圧力が発生するまでの時間 t_D は、(4)を用いてつぎのように算定できる。すなわち材料の圧縮が始まってから時間 t_D 後にLがブールの平均間隔 L_m の半分に達して、チャンネルネットワークによる荷重支持状況が完成すると考える。

(4)式から、

$$t_D = \frac{1}{2} \eta_a \gamma (L_m/D)^2 \dots\dots\dots (5)$$

と求められる。どの程度の太さのチャンネルが潤滑油で満たされ、圧力を発生して加工荷重を支持すれば、ほとんど全面に潤滑油が存在するようになったと判断して良いかが問題となる。またこのモデルでは最も細いチャンネルの充満が済むまでの時間 t_{Dmin} が固体支持の存在時間に相当する。

$$t_{Dmin} = \frac{1}{2} \eta_a \gamma (L_m/D_{min})^2 \dots\dots\dots (6)$$

この場合の D_{min} は単純には決まらない。力学的取扱の意味のある最小径とする必要もない。

(2) 網目連絡モデル

太いチャンネルの充満と圧力発生が終了するとそれに続いてつぎのクラスのチャンネルの充満が始まるというモデルで、最細のチャンネルの充満が終了するまでの時間は、太さが上のクラスのチャンネルの充満と圧力発生に要した時間の総和となる。しかし、(4)から明らかなように、充満すべきチャンネルの長さを L^i とその太さを D^i とすると、充満の時間 t^i は、 $(L^i/D^i)^2$ に比例するので、最も時間のかかるプロセスが決定的に時間を制御することになる。時間に対するチャンネル部の摩擦係数推移は、どのクラスのチャンネルの充満が、潤滑状態を大きく変えるのかにかかっている。

このモデルでは、最も太いキャピラリーはブル同士を径絡し、つぎのクラスのチャンネルが太いチャンネル同士をつなぎ、というように、直列にプロセスが進行することを想定している。

(3) ロゼットリーフモデル

マイクロブル直結モデル及び網目連絡モデルでは、ブルがチャンネルに径絡されていることを前提としているが、ロゼットリーフモデルでは、ブルから袋小路のチャンネルが派出し、そこから細いチャンネルが出て葉脈のようなネットワークを形成することを想定している。時間則その他の考察はほとんど網目連絡モデルと同様である。

マイクロブル直結モデル及び網目連絡モデルとの違いは、太さの細いチャンネルの充満時間が必ずしもより太いチャンネルより長くかかるとは限らない点と、全プロセス時間が総和となる点とである。つまり、太さが異なってもアスペクト比が同じなら充満して圧力を支持するようになる時間は同じである。

5. 4. 4 摩擦係数の時間則に関する検討

工具による被加工材の圧縮が始まってからの固体接触部の摩擦係数の変化は、本来改めてチャンネルの形態に基づいて液体支持部の面積比の変化などを、直接評価して検討し、その時間則を導出するべきである。しかし、チャンネルへの潤滑油の充満が始まれば、固体支持部の摩擦係数は時間の単純減少関数で表現できるはずである。固体支持の状態から液体支持の状態に変化する時間 t_0 が、チャンネルの状態を表すパラメータ $(L/D)^2$ (今後簡単のため a とおく。) を用いて、

$$t_0 = 2 \eta_0 \gamma a \dots\dots\dots (6')$$

で表されるとする。なお、 a を等価平方アスペクト比と称することとする。

チャンネルが完全に液体で満たされ、流れが止まって圧力が発生するまでの間の摩擦係数の変化を表現する時間則として、指数時間則やべき乗時間則が考えられる。チャンネルのマイクロブルからの距離に対する圧力変化が、指数関数的であることを参考にすると、指数時間則か、1 よりも大であるべき乗則を採用するのが妥当である。指数時間則において摩擦係数 μ は、

$$\mu_o = (\mu_b - \mu_f) (1 - t/t_a) \exp(-t/t_a) + \mu_f \cdots (7)$$

と表される。一方、べき乗時間則はつぎのように表される。

$$\mu_o = (\mu_b - \mu_f) (1 - t/t_a)^n + \mu_f \cdots (8)$$

なお、 μ_b はチャンネルへの液体の押し込みが始まらない前の摩擦係数であり、 μ_f はチャンネルへの液体の押し込みが十分なされた後の摩擦係数である。 μ_b は初期のミクロブール密度などに依存する初期接触率の他、 μ_f とともに工具粗さや材料の初期粗さによって決まる表面近傍の余剰塑性仕事率などによっても影響を受ける。

5. 4. 5 板の低速引抜/しごき加工における摩擦係数の挙動解析への応用

(1) 摩擦係数の挙動の C. J. M. に基づく解釈

板の低速引抜/しごき(以下、しごき加工と略す。)加工の場合、これまでも多くの実験によって示してきたように、ダイス面の平均摩擦係数はある程度のミクロブールの存在する条件のもとでは、潤滑の大気圧粘度や加工速度の増大にともなって増大する。このような現象を C. J. M. に基づくつぎのようなモデルによって説明を試みよう。

- ① 低速加工であるから、動圧的に潤滑油が工具と材料との摩擦界面に供給されない。
- ② 潤滑は、被加工材表面の凹凸によって持ち込まれた潤滑油によって、工具表面と被加工材表面の凹凸が形成したミクロブール中の潤滑油の加工中の振舞いによって支配される。
- ③ ミクロブールが加工中に加圧され、チャンネルに潤滑油が押し込まれ、さらにチャンネルにも圧力が発生する。
- ④ ミクロブールに加えて、潤滑油に圧力が発生しているチャンネルが、工具荷重を支え潤滑に寄与する。

(2) C. J. M. 及び時間則に基づく摩擦係数の数式モデル

しごき過程における摩擦係数の数式モデルを C. J. M. 及び、それに基づく(7)式の指数時間則によって求めることにする。その準備のため実験条件や実験データの表現を改めておくことが必要である。まず(9)式で表現される規格化平均摩擦係数偏差 $\Delta \mu_N$

を導入する。

$$\Delta \mu_N = (\mu_m - \mu_f) / (\mu_b - \mu_f) \dots \dots \dots (9)$$

被加工材が工具との接触部に存在する時間 t_d が t_a より大きい場合、 $0 \sim t_d$ までの $\Delta \mu_N$ は、

$$\Delta \mu_N = \frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} (1 - t/t_a) \exp(-t/t_a) dt$$

となる。(6') 式により t_a を η_a , γ 及び a で表して計算すると

$$\Delta \mu_N = \frac{2 \eta_a \gamma a}{t_d e}, \quad 2 \eta_a \gamma a < t_d \dots \dots \dots (10)$$

と求められる。ここで e は自然対数の底である。

$2 \eta_a \gamma a > t_d$, すなわちダイス出口になっても固体支持状態が残存する場合は、

$$\Delta \mu_N = \frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} (1 - t/t_a) \exp(-t/t_a) dt$$

となって、同様に t_a を η_a , γ 及び a で表して計算すると

$$\Delta \mu_N = \exp\{-t_d / (2 \eta_a \gamma a)\}, \quad 2 \eta_a \gamma a > t_d \dots \dots (11)$$

と求められる。

チャンネルにブールからの潤滑油の圧入が始まってからの、固体支持部の平均摩擦係数 μ の時間変化を、指数時間則によって表し、(10) と (11) 式のようにしごき条件と規格化平均摩擦係数偏差との関係式を得たが、これらの式の実験式としての信頼性が C. J. M. の確からしきの評価となる。

(10) 及び (11) 式の a は、 $2 \eta_a \gamma a = t_d$ のとき、

$$\Delta \mu_N = 1/e$$

となることを利用し、実験データを参考にして決定する。すなわち、

$$a = t_d / 2 \eta_a \gamma \dots \dots \dots (12)$$

と a が求められる。これは等価平方アスペクト比であるから、その値の物理的妥当性を吟

味することによって、ここで提案しているC. J. M. の妥当性と摩擦係数変化の時間則の妥当性とを併せて評価できる。

(3) 実験データに基づく検討

Fig.5 は、前章までにおいて行った実験結果、すなわち被加工材表面にエッチングによってマイクロブールを形成したエッチング材を用い、ラッピングあるいは研削加工によって工具の表面粗さを変化させてしごき加工を行った場合の、規格化平均摩擦係数偏差 $\Delta\mu_N$ を、 $\eta_a V \gamma$ に対してプロットしたものである。本実験に使用した潤滑油（ポリブテン）の粘度の圧力係数を $\gamma = 3.0 \text{ GPa}^{-1}$ とし⁹⁾、また、実験温度における潤滑油の粘度は、第3章の Table 1 の値から実験温度を 25°C として、Walter の式より求めた。しごき率は 30% で $L_d = 3.5 \text{ mm}$ としている。

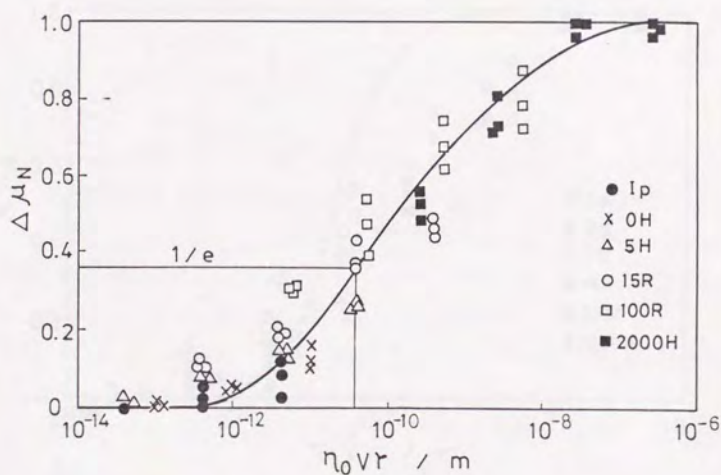


Fig.5 Relation between $\eta_a V \gamma$ and $\Delta\mu_N$

$\eta_e V \gamma$ が $10^{-13} \sim 10^{-6}$ m の間で $\Delta \mu_N$ が $0 \sim 1$ の変化をしている．指数時間則を適用するため， $\Delta \mu_N$ が $1/e$ の時に $\eta_e V \gamma$ 値が 3.8×10^{-11} m に対応するとして (12) 式より a を決定すると，

$$a^{1/2} = 6800$$

と求められる．この値はモデルの概念と矛盾しないと評価することができる．

Fig.6 は，この a の値に基づいて得られる計算式と実験のデータとをプロットしたものである．実験データ自身かなりばらついているが，この a の値に基づいて得られる計算式は，定量的には十分現象をシミュレートするものとは言えない．とくに $\eta_e V \gamma > 10^{-10}$ m において，実験データからのずれが生じる．

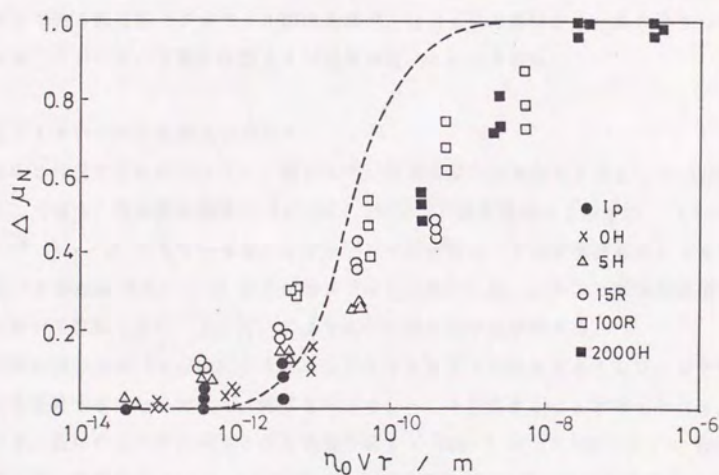


Fig.6 Relation between calculated value and experimental value.

ずれの主な原因は二つあると考えられる。その一つは、塑性変形の進行にともなう材料表面形態の変化を、すべての実験条件に対して一様に生じていると仮定して取り扱ったことであり、他の一つはそれにしたがって時間則も一様に与えたことである。すなわち、加工の進展にともなう被加工材の変形の進展により表面変化が生じ、そこに新たなチャンネルが生成して、チャンネルジャッキングの進展を促進するという効果を挙げることでもあるであろう。もしこのような効果が存在するならば、これを、ナノ塑性静圧液体潤滑機構と称することができよう。

$\eta_a V \gamma > 10^{-10}$ m の条件において、解析の際に以上のようなことを考慮すれば、低速しごき加工の場合、平均摩擦係数がある範囲の $\eta_a V \gamma$ に対して単調増加する現象を、C. J. M. によって説明できる可能性は大いにありと判断できる。

以上のように、簡単な解析の手法と摩擦係数の時間変化則を適用して、低速しごき加工における複雑な現象を少なくとも定性的にはシミュレーションすることに成功したと言える。したがって、チャンネルジャッキング効果、すなわち、本章で提案した潤滑機構のモデルである静圧的マイクロボール潤滑機構が、被加工材表面粗さの比較的大きな場合のしごき加工において、実際に作動する可能性は高いと結論される。

(4) ミクロボールの消失について

本節の序文でも触れたように、第3章で工具表面粗さを研削加工によって $3\mu\text{mRmax}$ 程度にした場合、低粘度の潤滑油 1p, 0H (25 °Cでの粘性係数はそれぞれ 1.7×10^{-3} , 4.3×10^{-3} kg·s/m²) を用いると、マイクロボールが消失し、平均摩擦係数がしごき加工速度の減少とともに 0.1 ~ 0.15 までに増大することを示した。このような現象に関して、本章において提案した C. J. M. により説明可能か否かを検討する。

工具表面粗さが $3\mu\text{mRmax}$ と大きくなるとチャンネルの径も大きくなり、マイクロボール同士を径絡するばかりでなく、外部とマイクロボールを径絡することが考えられる。

いま、仮にチャンネルの太さが工具表面粗さ (R_{max}) の $1/100 \sim 1/10$ 程度であると考え、第3章の Fig.5 (c) において、低粘度油 0H を用いて加工速度 0.1 mm/s のときに摩擦係数が若干増加するのに注目して、この場合の $\eta_a V \gamma$ より等価アスペクト比 a を見積ると、

$$a^{1/2} = 1.17 \times 10^8$$

となる。この時のチャンネルの長さは $3.5 \times 10^6 \sim 35 \times 10^6 \mu\text{m}$ となり、これは試験片の幅よりも 100 倍以上の値となる。

以上のことから、C. J. M. に従えば、工具粗さが大きく、潤滑油粘度が低く、さらに加工速度が小さいときに、摩擦界面から潤滑油が系外へ流出し、ミクロブールが消失することによって乾燥摩擦が増加し、摩擦係数が大きくなることが考えられる。

5. 5 結 言

前章までの実験結果を基にして、低速塑性加工でも摩擦界面にミクロブールが形成されるような条件において、その潤滑状態を支配している可能性のある塑性静圧ミクロブール潤滑機構のモデルを示した。さらにこのモデルを Butler の試験体を用いた据込み加工による実験と、簡単な手法による定量的解析によって確認した。このモデルにおける各パラメータの役割や影響について整理し、まとめると以下の通りである。

被加工材表面粗さは、大きくなるにつれて摩擦界面で捕捉する潤滑油の量を増加させる。工具表面粗さは、材料の流れの方向に垂直な粗さが意味があり、大きくなるにつれて摩擦界面で捕捉する潤滑油の量を増加させるとともに、ミクロブールの周囲に形成されるシール部の欠陥を増して、潤滑油にミクロブールからの浸透流出の自由度を与える。加工速度は、大きくなると全加工時間を減少させて潤滑油の浸透流出量を減少させる。圧下率を大きくすると、ミクロブールの収縮を促し、潤滑油の浸透流出量が多くなる。潤滑油の動粘度が大きくなると、ミクロブールの周囲に形成されるシール部の欠陥への浸透抵抗が大きくなり、したがって浸透流出量が減少する。

このような、被加工材の表面粗さの凹部に潤滑油が捕捉され、工具と材料との摩擦界面に機械的に持ち込まれ、そこでミクロブールを形成するという場合の潤滑機構は、流体力学的な作用による摩擦界面への潤滑油の供給が期待できないような塑性加工、例えば低速引き抜き加工やしごき加工、鍛造圧縮加工等の加工において効果的に利用できると考えられ、今後の実用化が期待される。また、このような潤滑機構の理解は、低摩擦と潤滑油の低粘度化とによって製品の表面品質の制御の可能性を検討する上で重要なものとなろう。

<参考文献>

- 1) 春日保男・山口勝美：塑性と加工，6-51 (1965)，189.
- 2) J.A.Schey：Tribology in Metalworking, (1983), Amer. Soc. Metals.
- 3) D.D.Ratnagar, H.S.Cheng, J.A.Schey：Trans. ASME, Journal of Lubrication Technology (1974), 591.
- 4) Butler, L., H.: Metallurgia, 58-4 (1960), 167.
- 5) Aizawa, T., Kihara, J., Kataoka, S.: Proc. 5th Int. Congress Tribology (EUROTRIB-89), Vol.2, 155.
- 6) 木原諄二・相澤龍彦・片岡征二：昭63塑性加工春季講演会講演論文集.(1988), 383.
- 7) P.W.Bridgman：The Physics of High Pressure, G.Bell & Sons. Ltd.(1931), 346.
- 8) 村木正芳：潤滑，33-1 (1988)，36.

第6章 総 括

塑性加工において、潤滑剤は加工中に工具と材料との摩擦界面の入口近傍に供給されるか、あるいは加工の前の段階で二面間に与えられるかであって、実際に潤滑剤を必要とする加工中の摩擦界面に直接与えられることはない。したがって、摩擦界面に、どのような機構で潤滑剤を供給できるのか、あるいは潤滑剤を保持できるのかということが重要な問題となる。

塑性加工における液体潤滑剤、すなわち潤滑油の作用機構を、いわゆる流体潤滑理論の基に成り立っているすべり軸受や歯車の潤滑機構と比較して理解する試みが、多くの研究者によってなされてきた。このことによって、材料及び工具の運動によって摩擦界面に潤滑油が供給される機構、及びこれらの機構によって摩擦界面に供給された潤滑油の量が大きい場合の潤滑挙動に関しては、少なくとも定性的に理解することができる状況にある。すなわち、これまでに行われた多くの研究において示されるような、高粘度油ほど、また加工速度の大きいほど、さらに工具粗さの小さいほど摩擦係数が減少するという現象は、これら流体潤滑理論に沿ったものとして受け入れられてきた。

しかし、低速加工でも被加工材の表面粗さが大きい場合には、むしろ逆に低粘度油ほど加工力あるいは摩擦力が小さくなる現象が、実際の加工においてもしばしば認められる。これらは流体潤滑理論では十分説明し得ないものである。この原因となるものに、摩擦界面に形成されるマイクロプールの効果が考えられるが、このマイクロプールのメカニズムに関しては未だ不明な点が多い。なかでも、マイクロプール中に封じ込められた潤滑油が、境界潤滑状態にあるとされている工具と材料との直接的な接触面間に入り込めるのかどうか、さらに入り込めるとしたらそれは如何なる機構なのかは、未だよく分かっていないと言えるところであった。

このような塑性加工におけるマイクロプールのメカニズムを究明するため、これまでも多くの研究が行われて来た。その一部を第1章において示したが、これらの研究によって提案されたモデルでは、マイクロプール中で高い静水圧を発生した潤滑油が、主として、潤滑油の粘度 η と加工速度 V の増加にともなって、マイクロプールから接触面上に入り込むとしている。一方、潤滑油の粘度と加工速度の増加にともなって摩擦係数が増加する現象を

認め、これらは摩擦界面において、高圧のために著しく粘度の増加した潤滑油自体の粘性抵抗に起因するとしている。これらの潤滑モデルにおいては、第1章でも指摘したが、何れのモデルも工具の表面粗さの影響は考慮していない。

本研究は、このような状況を踏まえ、ミクロプールの形態と使用する潤滑油の流体力学的特性、すなわち粘度などとの関連の下で、工具表面粗さに注目しながら、これらミクロプールのメカニズムについて検討を加え、ミクロプール潤滑機構の解明を図ることを目的とした。

以下においては、各章の概要と、得られた結論あるいは知見に付いて要約する。

第1章においては、まず、塑性加工の潤滑機構を理解する上で必要な基礎知識である摩擦・摩耗に関して、これまで行われてきた研究の歴史を振り返り、さらにこれらの研究によって明らかにされた、現在における摩擦・摩耗に対する概念を示した。つぎに摩擦・摩耗を減少させるために潤滑油は如何なる役割を演じているのか、また、そこで必要となる流体潤滑機構の概念に付いて述べた。その後、これらの摩擦・摩耗と流体潤滑理論を基にして考えられ、また発展してきた、現段階で議論されている塑性加工の潤滑機構、及びミクロプール潤滑機構に関する研究の一部を示した。最後に、本研究の位置づけと目的を明確にした。

第2章においては、ミクロプール中に封じ込められた潤滑油の工具と材料との接触面間への流出挙動を観察するため、平板しごき型摩擦試験装置を試作した。実験では、あらかじめエッチングによって大きめのミクロプールを形成した平板にしごきを加え、使用する潤滑油の粘度との関連の下で、ここから潤滑油の流出する挙動に付いて観察した。また、本装置によって摩擦係数も測定した。

顕微鏡観察の結果から、低粘度油はミクロプールの周囲の工具と材料の平坦部との接触面間に、等方的に浸入し、一方、高粘度油はあたかも固体状の膜となって、ミクロプールの後端部を塑性変形させながら平坦部へと引きずり込まれるような状態が確認できた。また、これらは、 0.01mm/s の極低速加工条件においても観察された。

摩擦係数を測定した結果、被加工材の表面粗さが小さく、かつ加工速度の小さい条件においては、低粘度油ほど摩擦係数が大きくなるのが観察された。しかし、エッチングによって形成した、一つ一つが閉じた形状となるミクロプールが摩擦界面に入り込むと、低粘

度油の場合には広範囲わたって潤滑状態が著しく改善され、むしろ低粘度油ほど摩擦係数が小さくなることが明らかとなった。

これらの結果は、何れも、塑性加工における潤滑機構を究明する上で、重要な手がかりとなり得るものであった。

第3章においては、ミクロブール中の潤滑油が、ミクロブールの周囲の工具と材料との接触によって形成されるシール部を通して流出するという潤滑機構において、その工具表面粗さと潤滑油粘度、加工速度がその流出挙動に及ぼす影響について検討を加えた。実験には板厚 1 mm の黄銅板を用い、その表面状態を、圧延面及びエッチング面に変化させた。

加工速度を 1.5 mm/s 一定にして行った実験から、圧延面の試験片では、潤滑油の粘度が低いほど、また工具表面粗さが大きいほど摩擦係数は増大すること、逆に、エッチング材では、低粘度油ほど、さらに、工具表面粗さが大きいほど摩擦係数が小さくなることが明らかとなった。

一方、加工速度を $0.01 \sim 10 \text{ mm/s}$ まで変化させて行ってしごきの実験から、 1 mm/s 以上の加工速度においては、何れの工具粗さにおいても低粘度油ほど摩擦係数は小さくなる。しかし、極低速の 0.01 mm/s においては、工具粗さの大きい場合に、低粘度油の摩擦係数は急激に増加するのが認められた。この場合、加工後の表面を顕微鏡で観察すると、エッチングによって形成したミクロブールが消滅しているのが確認された。

このことは、摩擦界面に形成されたミクロブール中の潤滑油は、工具表面粗さの凹凸によって形成されるチャンネルを通して工具と材料との接触面間へ流出していること、またこの場合、低粘度油ほど流動性が良く、流出する際の抵抗が小さいために、工具粗さのチャンネルを通して接触面間へと浸透流出し易いということ、さらに加工速度の低下にともなってその流出量が多くなることを示すものである。

また、接触面上の潤滑状態を添加剤の効果によって評価する実験において、添加剤である高濃度の塩化ステアロイルをそのままの状態で被加工材表面にブリコートした場合には、高粘度油でも低粘度油のレベルにまで摩擦係数が低下すること、また速度の増加に対しても一定の値を示すようになることが確認できた。

このことから、境界潤滑膜が十分形成され、工具と材料との凝着を防ぐことができれば、高粘度油でも摩擦係数は著しく低下し得ることを示すものであって、無添加の高粘度油を用いた場合には、その摩擦界面は、メタルコンタクトを含む境界潤滑が支配的な潤滑状態

となっていることが裏付けられた。

第4章においては、ミクロブール潤滑機構に及ぼす圧下率の影響を検討するために、圧下率を2%から40%に変化させてしごき実験を行った。

エッチング材を用いた場合、何れの潤滑油においても摩擦係数は圧下率の増加にともなって低下するのが認められた。さらに、工具への被加工材の移着量は、圧下率の増加にともなって減少するが、この場合、高粘度油を用いた時の移着の量は低粘度油のものよりも、かなり多くなることを確認した。

このことから、圧下率の増加にともなってミクロブールから潤滑油が流出し易くなることが明らかとなった。また、高粘度油においても、圧下率が大きくなると流出するようになるものの、一方低粘度油に比べれば、高粘度油ほどミクロブールから流出し難いということが確認できた。ここで、凝着部のせん断抵抗が摩擦の原因であるとする摩擦の理論からすると、高粘度油ほど摩擦係数が大きくなるのは当然であり、これまでの実験に示される高粘度油ほど摩擦係数が大きくなるのは、粘性抵抗によるものではないということが改めて裏付けられた。

第5章においては、ミクロブールから潤滑油が流出することに関して、他の研究者の提案する動圧効果による流出というモデルでは説明できない現象を整理して示した。さらに、前章までに示したしごき実験の結果を基にして、静圧効果によるミクロブール潤滑機構のモデルを示した。

すなわち、ミクロブール中で高い静水圧を発生した潤滑油は、工具と被加工材との接触面間に形成されたミクロンオーダー以下の微細なチャンネルを通して接触面間に浸透流出し、つぎにはこのチャンネルを流路として広がり、そこで再び静水圧を発生する。これらの潤滑油は、工具と材料との直接接触を防ぎ、摩擦を低減する。この場合、被加工材表面粗さは、大きくなるにつれて摩擦界面で捕捉する潤滑油の量を増加させる。工具表面粗さは、材料の流れの方向に垂直な粗さ意味があり、大きくなるにつれてミクロブールの周囲に形成されるシール部の欠陥を増して、潤滑油にミクロブールからの浸透流出の自由度を与える。加工速度は、大きくなると全加工時間を減少させて潤滑油の浸透流出量を減少させる。圧下率を大きくすると、ミクロブールの収縮を促し、潤滑油の浸透流出量が多くなる。潤滑油の動粘度が大きくなると、ミクロブールの周囲に形成されるシール部の欠陥への浸透

抵抗が大きくなり、したがって浸透流出量が減少する。

またこの塑性静圧潤滑機構は、Butler の試験体を用いた据込みによる実験と、Channel Jacking Mechanism モデルによる理論解析によっても定量的に裏付けられた。

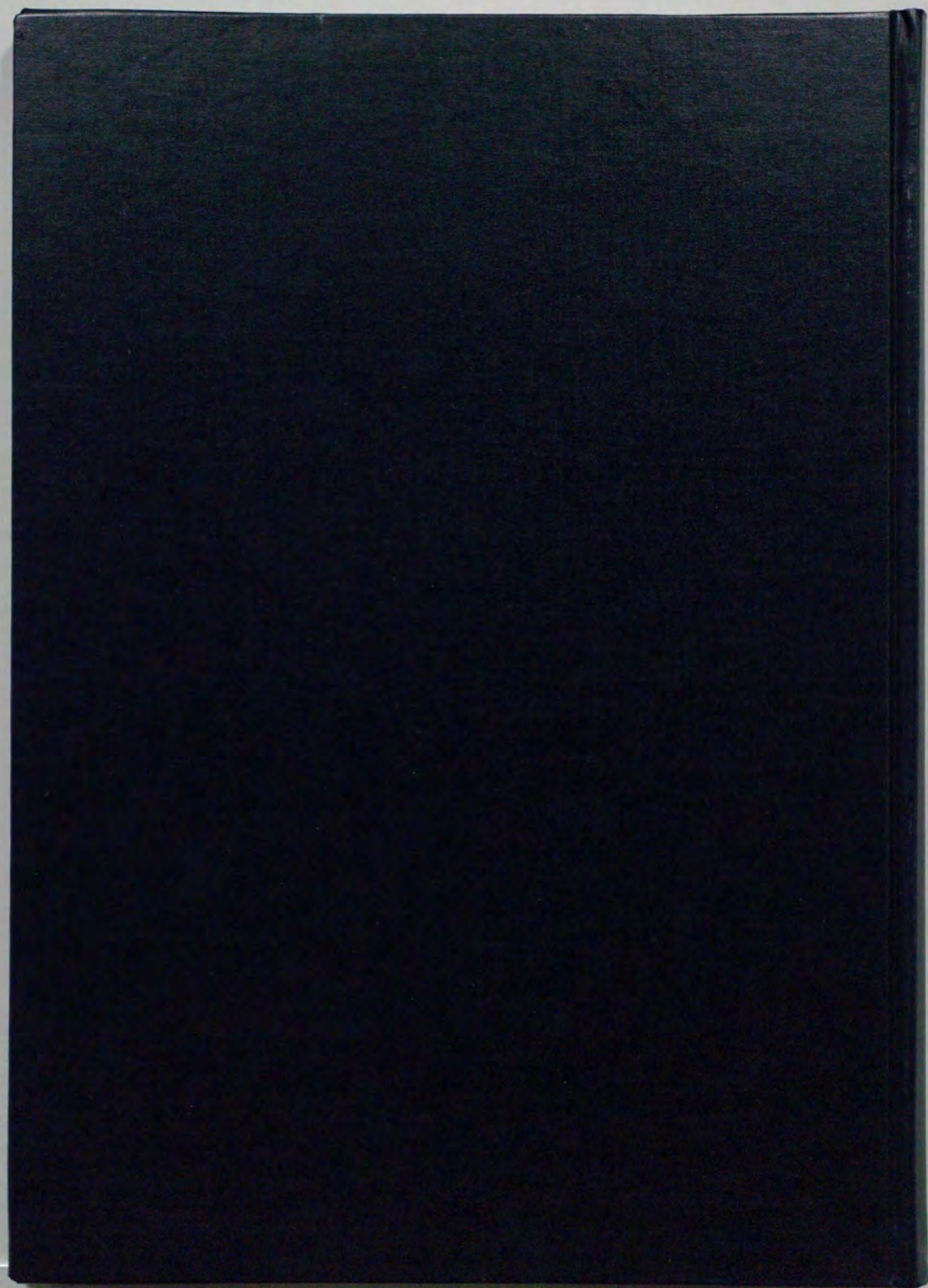
第6章は、本研究によって得られた結果及び知見について総括している。

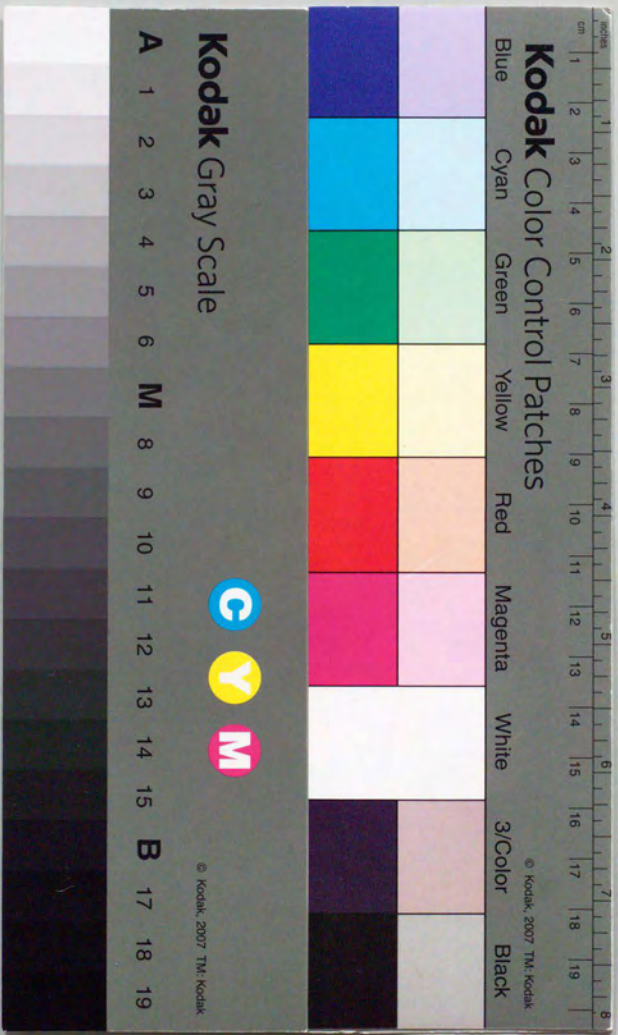
謝 辞

本研究の終わりに臨み、長年にわたって懇切なる御指導、御教示を賜りました東京大学工学部教授木原諄二博士、助教授相澤龍彦博士に心より感謝致します。また、本論文をまとめるにあたり、多大な御教示と御助言を賜りました東京大学生産技術研究所教授木村好次博士に厚く御礼申し上げます。ならびに、御査読頂き御助言を賜りました東京大学工学部教授梅田高照博士、鈴木俊夫博士に厚く御礼申し上げます。

また、本研究を遂行するにあたり、終始深い御理解と御鞭達を頂きました田中益夫元東京都立工業技術センター副参事研究員、菅野恵介機械加工部長、ならびに町野欣一元機械加工部長、内藤建元機械加工部長に感謝致します。さらに、実験を遂行するにあたり御便宜と御協力を頂きました東京都立工業技術センターの諸兄に対して厚く御礼申し上げます。

最後に、実験に御協力頂いた日本大学生産工学部、芝浦工業大学金属工学科、東京電気大学工学部の各大学卒研究生に対して厚く御礼申し上げます。





Kodak Color Control Patches

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black

© Kodak, 2007 TM: Kodak

Kodak Gray Scale

C Y M

© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19