

# 塑性加工における焼付き防止のための 最適加工条件の設定と工具及び潤滑剤の選定

阿南工業高等専門学校 機械工学科  
教授 吉川 勝幸  
(平成6年度研究開発助成 AF-94028)

キーワード：焼付き防止、最適加工条件、工具、潤滑剤、接触面温度、焼付き限界、凝着

## 1. 緒言

塑性加工において焼付きは非常にやっかいな問題であり、焼付きが発生すると製品表面に傷が付き、製品の品質の低下を招くとともに、焼付きが成長すると工具破損、ひどいときには生産ラインをストップしなければならない。このため焼付きを防止することは大切である。この焼付きを防止するためには焼付き防止のための最適な加工条件の設定および実際の加工においては焼付き防止のための工具および潤滑剤の適切な選択がとて重要となってくる。

焼付きは機械的あるいは熱的因子によって影響されると考えられる。河合<sup>1)</sup>らは素材の表面積増加率が増加すると、限界すべり距離は短くなることを示している。熱的影響に関連して、木村<sup>2)</sup>らは、圧延におけるヒート・ストロークは一定限界温度に達すると発生することを報告している。著者らは接触面温度と焼付きが発生する限界すべり距離との定量的関係について以前に報告<sup>3)</sup>した。これより、焼付きの発生限界が接触面温度と焼付き限界すべり距離との関係において定量的に評価しうるが見出されるとともに、実験的にも裏付けられた。つづいて、著者は焼付きの発生および成長に及ぼす影響因子を考慮して、凝着理論を展開し、焼付き限界を定量的に評価する評価モデル式<sup>4), 5), 6)</sup>を提案した。

本研究では、提案された上記の焼付き限界評価モデルを参考にして、焼付き防止あるいは焼付き限界すべり距離を向上させるための最適な加工条件の設定および工具および潤滑剤の適正な選定について検討することを目的とする。

本研究では焼付きの発生、成長に影響する因子として工具面圧、接触面温度を取り上げ、これらの因子が焼付きの発生し始める焼付き限界すべり距離にどのように影響し、その焼付き限界を定量的に評価あるいは推定が可能かを示している。さらに、焼付き性を試験する試験法として押込み・すべり試験法と引抜き試験を用いて、工具と素材との組合せおよび潤滑剤の耐焼付き性能を定量的に評価できることを実験的にも示している。

## 2. 焼付き発生限界評価モデル

塑性加工において工具と被加工材としての素材が相対的にすべっている時、工具と素材表面での接触面での相対運動が生じる。そのとき、工具表面と素材表面との接触部において、相互に原子の拡散が生じる。この原子の拡散に

より接触表面の成分状態が変化し接触面での凝着すなわち、焼付きの発生および成長がもたらされると考えられる。これらの原子的拡散を考慮した凝着理論が著者により展開<sup>4), 5), 6)</sup>されている。つぎに、加工が進行し素材の表面粗さがあるすべり距離で急激に増加し、その後表面粗さが増加するという現象が実験により確認されている。この現象により次の説明を導くことができる。素材が加工表面に対して相対的にすべっているとき、工具表面と素材表面の一部に原子的拡散が生じ、素材表面の一部が工具表面に凝着し、そしてそれが成長する。すると凝着した素材表面の一部が移着層として移着し、その移着層が寸法においても量においてもある限界を越えると工具表面の荒れも増加する。ここで焼付きはマクロ的に発生すると考えられる。工具の焼付きによる荒れを評価する量として焼付き発生に寄与する状態量Gを考える。そしてdGを状態量の変化、dLをすべり距離の変化とする。すると、著者が提案した凝着理論より次式が導かれる。

$$dG = K \exp(-\alpha/T) dL \quad (1)$$

dG：状態量の変化

K：潤滑剤などに依存する定数

$\alpha$ ：工具と素材の組合せに依存する定数

T：平均接触面温度

dL：素材のすべり距離の変化

ここで焼付き発生に影響する表面積増加率及び表面接触長さは定数Kに含まれている。ここで、Gaを焼付き発生を表す状態量とし、Laは焼付き発生するすべり距離とする。平均接触面温度が一定として、式(1)の方程式を積分して整理すると次のようになる。

$$La = C \exp(\alpha/T) \quad (2)$$

$$\ln La = \ln C + \alpha/T \quad (3)$$

ここで、CはGa/K

以上より、焼付き限界すべり距離が接触面温度との関係で定量的に推定あるいは評価することが可能であることが導かれ、焼付きが発生するまでの限界すべり距離を定量的に評価できることを示している。

ここでは、簡単のため、焼付きに影響する因子として接触面温度を考慮したが他の影響因子についての展開は文献<sup>4), 5), 6)</sup>にて検討されている。

## 3. 実験方法

### 3.1 工具押込み・すべり試験機

#### 3.1.1 実験装置

焼付き発生をシミュレートする押込み・すべり試験の原理の概略図を図1に示す。この試験装置は工具圧力を任意に変化させることができる。これより、焼付き発生に及ぼす工具圧力の影響を試験することができる。この試験装置は旋盤と図1に示す旋盤の工具取り付け台に取り付けられた工具から成り立っている。ここで、工具表面は素材と接触する部分は円柱状に仕上げられている。試験用素材は丸棒であり、素材は旋盤に取り付けられ、素材丸棒は旋盤により回転させられ、任意の速度で回転させられる。

焼付き発生をシミュレートする試験は以下のように実験する。工具を素材表面に押込み、それと同時に工具を回転させ、素材丸棒の軸方向に送ることによって行う。種々の工具圧力は工具先端の円柱形状をなす直径を変化させることによって得た。工具圧力を変化させるときにはもちろん表面積増加率も一定に保つ必要がある。この表面積増加率を一定に保つために、工具先端の直径にしたがって、工具押込み深さを変えて調節した。

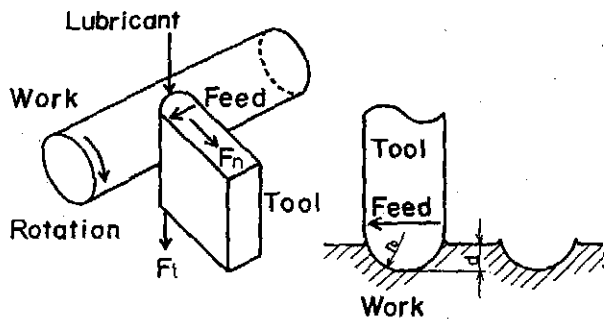


図1 押込み・すべり試験の概略図と被加工材の断面

### 3. 1. 2 工具及び素材

工具材料はSKD11 (JIS 合金工具鋼) を用い、焼入れ、焼なまし処理をした。そして、工具先端角度が異なるものを4種類用意した。それぞれの工具直径は4mm、3.5mm、3mm、および2mmであった。工具表面は0.5μm Rmax以下に仕上げられた。素材にはステンレス鋼 (JIS SUS 304) の丸棒を用い、その直径は25mmであり、市販のまま実験に共した。この素材表面粗さは1μm (Rmax) 以下であった。

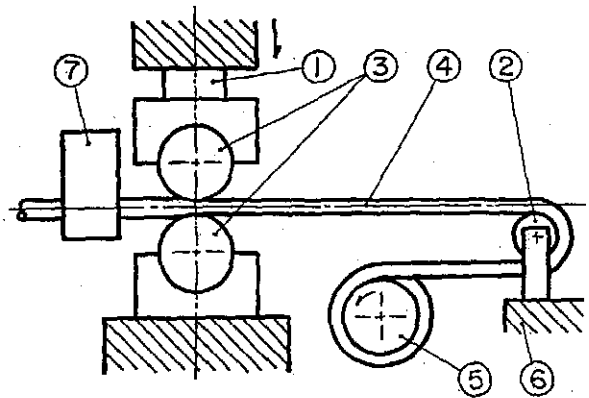
## 3. 2 引抜き試験

### 3. 2. 1 実験装置

線材の引抜き試験の概略図を図2に示す。引抜き試験は以下のようにして実施された。図2の線材④は対になった工具と工具の間に挿入され、線材を工具により圧縮した状態で引抜く。この引抜きは線材を巻棒⑤により巻き上げることによって実施した。ここでこの巻棒は旋盤に取り付けられ、任意の速度により回転させることができ、線材は任意の速度により引抜くことができる。

### 3. 2. 2 工具および素材

引抜き試験用工具としてSKD11 (JIS 合金工具鋼) を用いた。この工具は円柱状であり、その直径は50



①: 圧縮力測定用ロードセル ②: 引抜き力測定用ロードセル ③: 一对の工具 ④: 素材 ⑤: 素材巻き取り用棒 ⑥: 旋盤工具送り台 ⑦: 潤滑剤用容器

図2 引抜き試験装置の概略図

mmであった。工具の表面仕上げは0.5μm (Rmax) 以下に仕上げられた。引抜き用線材としては直径1.2mmのステンレス線材 (JIS SUS 304) と直径2.0mmの工業用純アルミニウム線材が市販のまま用いられた。

### 3. 2. 3 潤滑剤

試験に用いられた潤滑剤を表1に示す。6種類の成分の異なる潤滑剤を用いた。潤滑剤の基油としてシリンダ油を用い、それに添加剤として極圧添加剤および油性向上剤を加えて潤滑剤とした。引抜き試験において、潤滑剤の注入方法は以下のようにした。押込み・すべり試験において、潤滑剤をポットに蓄え、そのポット内に線材を通過させて線材表面に潤滑剤を塗布する方法によった。この潤滑剤入りポットは工具の直前におかれ、潤滑剤が線材に塗布された直後に線材が工具間に挿入されることになる。

表1 使用潤滑剤

番号	潤滑剤	番号	潤滑剤
No. 1	C. L. O. (AR) 商業製品	No. 2	Cy. 90+Cl+OA
No. 3	Cy. 90+E	No. 4	Cy. 90+Cl
No. 5	Cy. 90+Cl+SA	No. 6	Cy. 90+S+OA

(注) Cy. 90: シリンダ油 No. 90

Cl: 塩素化パラフィン (5wt% 塩素含有量 40%), S: 硫化ラード油 (5wt% 硫黄含有量 10%), OA: オレイン酸 (5wt%)

SA: ステアリン酸 (wt5%), E: エステル (5wt%)

### 3. 3 接触面温度の測定方法

工具と素材表面での接触面における接触面温度は工具と素材を熱電対とする方法で測定された。接触面での平均温度は種々のすべり速度のもとで測定された。接触面の温度上昇は短いすべり距離で定常状態になった。そしてここでは、この定常状態での温度を平均接触面温度とした。以下この定常状態での温度を平均接触面温度とする。

#### 4. 結果と考察

はじめに、加工の進行につれて素材の表面粗さが焼付きの発生と成長によりどのように変化するかを実験的に示す。これより、焼付き発生と焼付き限界すべり距離との関係を示す。そして、加工条件として焼付きにおよぼす影響因子を考慮して焼付き限界を評価し、焼付きを防止あるいは向上させる加工条件の適正な選定について検討する。加工条件として、工具と素材との組合せ、工具圧力を取り上げその影響を検討する。つぎに、焼付きを防止および耐焼付き性を向上させるためにどのような潤滑剤を選定すれば良いかを、種々の潤滑剤と焼付き限界すべり距離との関係において述べる。

##### 4. 1 加工後の表面粗さと焼付き発生との関係

図3にすべり距離の長さ $L$ と引抜き試験後の工具および素材の表面粗さを示す。すべり距離 $L$ が長くなるとあるすべり距離において工具および素材とも表面粗さが急に大きくなっている。図3より素材の表面粗さはすべり距離が約8m以下では $0.3\mu\text{m} \sim 0.7\mu\text{m}$ の範囲にある。そしてその後、素材の表面粗さは急激に上昇している。図3には焼付きによる工具表面への素材の移着層厚さの指標となる工具の表面粗さの変化も示されている。素材表面粗さが急激に増大するすべり距離は加工後の工具の急激に上昇する表面粗さとは異なっている。本研究では試験後の素材の表面粗さを焼付き発生の評価指標とする。そして焼付き発生を試験後の素材表面粗さが素材の初期粗さを越えるとき焼付き発生したと定義する。焼付きの発生の点を越えた焼付き領域を焼付きの成長領域と定義する。この定義は押し込み・すべり試験においても用いられる。そして焼付き発生は焼付きが発生し始めようとするすべり距離 $L_a$ によって評価される。ここでは素材表面粗さに着目し $R_{\text{max}} = 1\mu\text{m}$ を越えたところを焼付き発生とした。

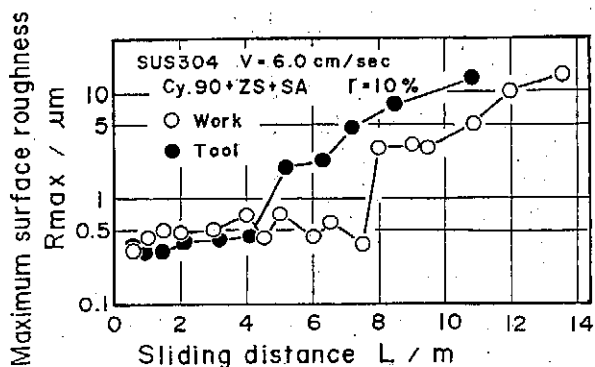


図3 すべり距離に応じての工具と素材の表面粗さの変化(引抜き試験)

##### 4. 2 加工条件と焼付き限界

ここでは、加工条件として工具と素材の組合せ、工具圧力を取り上げこれらの焼付きに影響する因子と焼付き限界との関係について述べる。

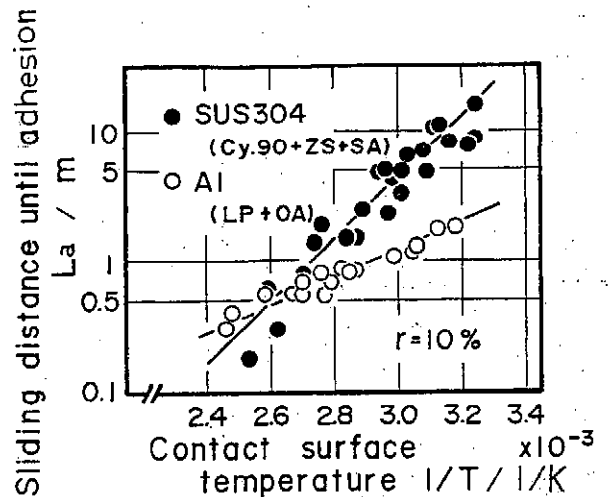


図4 工具と潤滑剤の異なる組合せにおける焼付き限界

まず、はじめに素材と工具との異なる組合せにおける焼付き限界について説明する。図4に引抜き試験において、工具と素材との組合せを変えたときの焼付き限界すべり距離と接触面温度との関係を示している。工具としてSKDを用い、素材としてステンレス鋼(SUS304)とアルミニウムを用いている。焼付き限界モデル式で評価した関係と一致し、工具と素材との組合せが同じ時には図中の限界線の傾きは一定でかつ工具と素材との組合せによってその傾きの値が異なっていることが分かる。ここで、潤滑剤が異なっているが、潤滑剤の影響はこの限界曲線においては工具と素材との組合せが一定の時にはその傾きが異なるだけで、その限界曲線の傾きに影響しないことから明らかである。

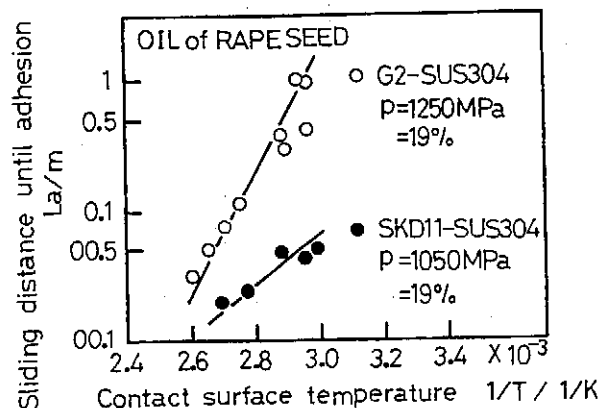


図5 工具と素材の組合せが異なるときの焼付き限界すべり距離と接触面温度との関係

図5は試験法を変えて、台形ねじ山の押しつぶし法によるものである。台形ねじ山押しつぶし法とは図1において素材側の円柱表面に台形状のねじ山を造り、それに平坦な押しつぶし面を持つ工具によって押しつぶしながら工具

を送り工具と素材との間に相対的すべり速度を与えてつ塑性変形を生じさせて、焼付き性を試験する方法である。図5においては工具と素材との組合せとして二種類、すなわち、超硬工具(G2)とステンレス鋼(SUS304)および合金工具鋼(SKD11)とステンレス鋼(SUS304)との組合せのときの焼付き限界が示されている。これより、工具と素材の組合せが異なれば焼付き限界線の傾きが異なることが図4と同様に示されている。工具と素材との組合せを変えた場合の焼付き限界すべり距離と接触面温度との関係より、加工条件として工具と素材との適切な組合せによって焼付きを防止したり、焼付き限界を向上させることが理解できる。たとえば図5において、ステンレス鋼を引抜こうとするとき、引抜き時の接触面温度が同じであればSKD11を用いるよりは超硬工具を用いるほうが焼付くまでのすべり距離を大きく取れることが分かる。また、焼付きが発生するまでのすべり距離を大きくするための工具と材料の適正な組合せの選択が可能であることを示している。

つぎに、加工条件として工具圧力を取り上げ、焼付き限界と工具圧力との関係について述べる。

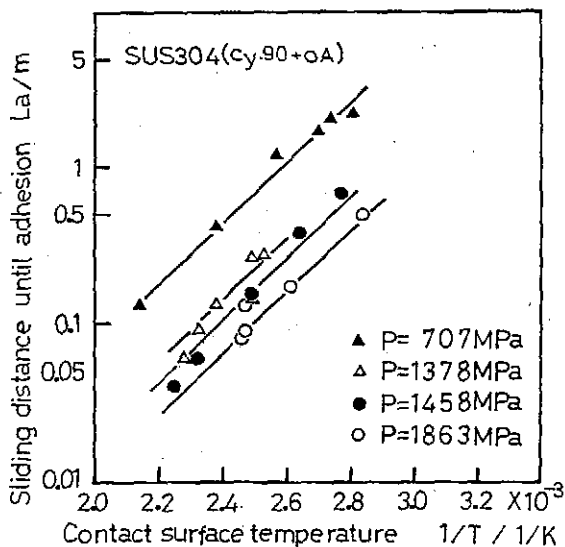


図6 工具圧力と焼付き限界

引抜き試験では工具圧力を大きく変化させることができない。しかし、押し込み・すべり試験を用いることにより工具圧力を幅広く変えることが出来る。種々の異なる工具圧力を発生するには、異なる直径を有する工具(図1参照)を素材に押し込むことによって得ることが出来る。工具圧力を独立的に変化させるために、工具の押し込み深さを適当に調整することによって表面積増加率が一定に保てるようにした。このようにして工具圧力を独立に変化させ、工具圧力の焼付き発生に及ぼす影響を検討した。工具はSKD11を、素材としてステンレス鋼(SKD11)を用いている。図6に工具圧力をパラメータとして、平均接触面温度により焼付き限界すべり距離がどのように影響されるかが示されている。工具面圧力が増加すると同じ接触面温度では焼付き限界に達するすべり距離は小さくなっていることが

分かる。また、工具面圧力が変化しても、焼付き限界曲線の傾きは同じであり、工具と素材との組合せが同じであれば焼付き限界曲線の傾きに影響しないことも示している。これらの関係は焼付き限界評価モデルにより導かれた焼付き限界評価式の接触面温度と焼付き限界すべり距離との関係とも一致していることが理解できる。これらのことから、焼付きを防止あるいは焼付き発生までのすべり距離を選定するための最適な工具圧力を定量的に設定できる。

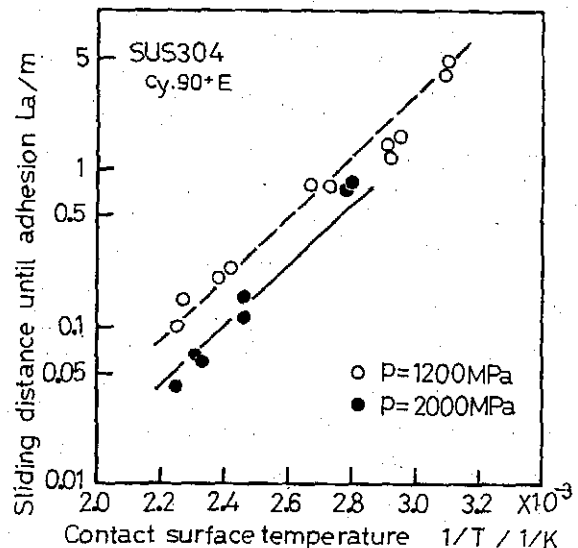


図7 異なる加工法による工具圧力の違いと焼付き限界

つぎに、異なる加工法によって工具圧力が異なるときの焼付き限界について述べる。耐焼付き性能を評価するためには、種々の加工方法においても耐焼付き性能を評価しうるかどうかを検討する必要がある。異なる加工法として引抜き試験と押し込み・すべり試験を実施し、それぞれの加工法の違いによる工具圧力と焼付き限界を調べた。図7にその結果を示す。図7において○は引抜き試験を示し、●は押し込み・すべり試験を示している。引抜き試験で測定された工具圧力は1200MPa、押し込み試験での工具圧力は2000MPaであった。図7において加工法の違いによる工具圧力をパラメータとして、平均接触面温度と焼付きが発生し始めるすべり距離すなわち焼付き限界すべり距離との間には線形関係があることがわかる。また、このときの焼付き限界曲線の傾きは加工法の違いによる工具圧力が異なっても、この焼付き限界曲線の傾きは同じであることが示されている。この結果は加工法が異なっても焼付き発生を評価することができる可能性を示している。

#### 4.3 潤滑剤の耐焼付き性能

潤滑剤の耐焼付き性能の定量的評価を検討する。そのために引抜き試験を実施し、表1に示す六種類の潤滑剤を準備し、潤滑剤の耐焼付き性能の試験を試みた。潤滑剤とし極圧添加剤を添加した潤滑剤、油性向上剤を添加した潤滑剤と焼付き限界との関係を実験的に求め、焼付き限界を向

上させる潤滑剤の評価とそのような潤滑剤を選定する方法について述べる。試験法としては引抜き試験を用い、工具はSKD11、素材はSUS304を使用し、このときの引抜き試験の断面減少率Rを10%とし、試験時の工具圧力は一定であった。使用した潤滑剤の内、5種類の潤滑剤はシリンダ油No.90に極圧添加剤および油性向上剤を混合することにより準備された。もう一つの潤滑剤は市販品でありその成分は知らされていない。

一般的に鉱物油の耐焼付き性能は良くないと言われている。そこで鉱物油はしばしば極圧添加剤を混ぜることによって用いられる。はじめに、極圧添加剤を加えた潤滑剤焼付き限界に及ぼす影響について検討する。基油としてのシリンダ油No.90にオレイン酸を混合したものに極圧添加剤としての塩素と硫黄を別々に加えて潤滑剤とした。これらの二種類の極圧添加剤を混合した潤滑剤の焼付き限界に及ぼす影響が図8に示されている。焼付き限界曲線の傾きは極圧添加剤が異なっても同じであることが分かる。しかし、添加剤が異なることによって、接触面の平均温度が同じ時には、硫黄を添加したときと比較して塩素を添加した潤滑剤を用いた方が焼付き限界すべり距離を大きく取れることが分かる。これらのことより、焼付き限界曲線の傾きは工具と素材との組合せによって決定され、極圧添加剤を添加した潤滑剤の焼付き限界におよぼす影響を定量的に評価することが可能であることが分かる。

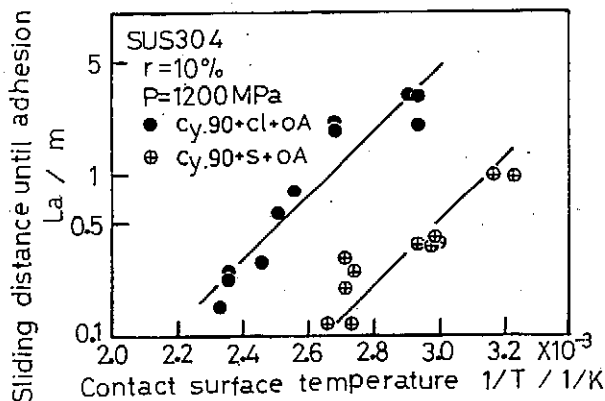


図8 焼付き限界と極圧添加剤を含む潤滑剤との関係

つぎに、油性向上剤の耐焼付き性におよぼす影響を検討する。潤滑剤としてシリンダ油No.90に極圧添加剤としての塩素を加えた潤滑剤を準備した。この準備された潤滑剤とこれに油性向上剤としてのオレイン酸を加えた潤滑剤を作成し、油性向上剤の有無が焼付き限界にどのように影響するかを検討した。図9において油性向上剤としてのオレイン酸を含む潤滑剤と油性向上剤が入っていない潤滑剤の焼付き限界すべり距離におよぼす影響が示されている。これより、油性向上剤としてオレイン酸を含んでいる潤滑剤が耐焼付き性能が優れていることがわかる。油性向上剤を添加することによって、耐焼付き性能が改善され、焼付き限界すべり距離を大きく取れることになったと思われる。また、油性向上剤の有無の違いがあっても焼付き

限界曲線の傾きは一定であり、工具と素材の組合せが同じであれば凝着モデルより推察されるように一定と考えられる。これらのことより、油性向上剤の有無の違いによる潤滑剤の耐焼付き性能を定量的に評価し得るし、また焼付き限界を向上させる潤滑剤の選定が可能であることを示している。

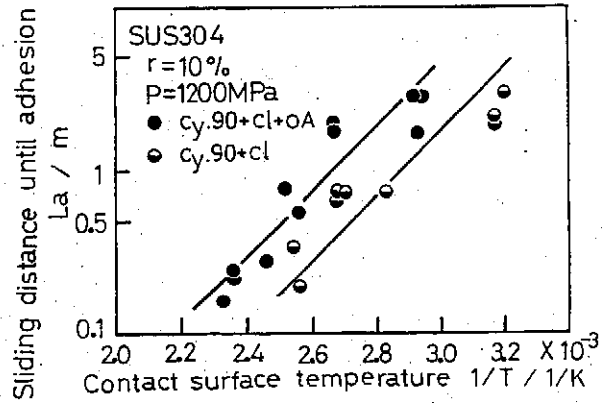


図9 焼付き限界と油性向上剤の有無との関係

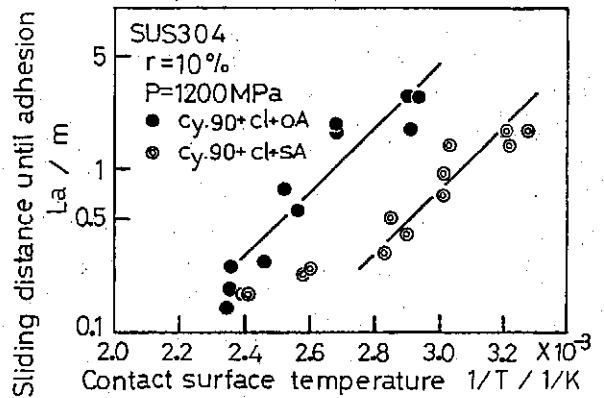


図10 焼付き限界と油性向上剤を含む潤滑剤との関係

つぎに、異なった油性向上剤を含む潤滑剤を用いて、油性向上剤の違いによる焼付き限界への影響について検討する。潤滑剤としてシリンダ油No.90を基油に添加剤として塩素を添加した潤滑剤を準備する。この準備された潤滑剤に油性向上剤としてオレイン酸を加えた潤滑剤とステアリン酸を加えた潤滑剤を用意した。図10に油性向上剤の違いによる焼付き限界すべり距離に及ぼす影響について示す。オレイン酸を含む潤滑剤よりステアリン酸を含む潤滑剤のほうが焼付き限界を向上させる効果があることが示されている。油性向上剤の違いによって焼付き限界曲線の傾きは変化が無く、一定である。これらのことより、油性向上剤の違いによる焼付き限界時でのすべり距離を定

量的に評価できるとともに、より良い耐焼付き性能を示す油性向上剤の選定が定量的に可能であることが分かる。

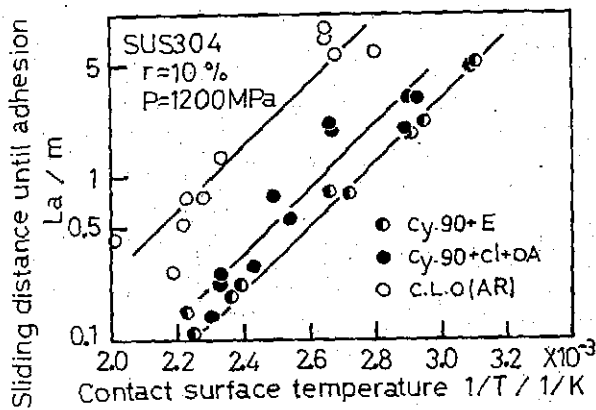


図1 1 焼付き限界と種々の潤滑剤との関係

続いて、市販の潤滑剤、シリンダ油 No. 90 に極圧添加剤の塩素と油性向上剤のオレイン酸を含んだ潤滑剤、シリンダ油 No. 90 にエステルを含んだ潤滑剤の三種類を準備し、耐焼付き性能を比較した。市販の潤滑剤の成分は不明である。その結果を図 1 1 に示す。エステルを含む潤滑剤よりは極圧添加剤の塩素と油性向上剤のオレイン酸を含む潤滑剤が焼付き限界を向上させ得ることがわかる。また、これら三種類の潤滑剤を比較すると、それぞれの耐焼付き性能は市販の潤滑剤、シリンダ油 No. 90 に極圧添加剤の塩素と油性向上剤のオレイン酸を含んだ潤滑剤、シリンダ油 No. 90 に合成エステルを含んだ潤滑剤の順に良いことが示されている。市販の潤滑剤の耐焼付き性能を向上させるならぬかの処置がなされていることが伺える。また、図より、それぞれ異なる潤滑剤において工具と素材の組合せが同じであれば焼付き限界曲線の傾きは同じであり、接触面温度の変化に対して焼付き限界すべり距離の変化は同じ値をとることが示されている。また、接触面での温度が同じ時にはそれぞれの潤滑剤の違いにより焼付き限界時のすべり距離を定量的に評価できることも示されている。接触面での温度は工具と素材との相対的なすべり速度によって影響されると考えられるが、相対速度と接触面での温度とが関連付けられていれば相対速度と焼付き限界との関係を得ることが可能と考えられる。

以上の試験結果より、潤滑剤の耐焼付き性能を総合的に比較して、順位付けした結果を図 1 2 に示す。このように本研究で提案した焼付きモデルあるいは試験方法により耐焼付き性能の順位付けが可能であり、種々の潤滑剤に対して潤滑剤の耐焼付き性能に対する定量的評価がなされることが示されている。

以上のことより、工具と素材の組合せが選定され、工具圧力などの加工条件が一定の時には凝着理論において予測されるように、工具と素材が決定されれば焼付き限界曲線の傾きは一定となり、接触面温度に応じて焼付き限界すべり距離を定量的に評価できる。以上のことより、潤滑剤の焼付き防止あるいは焼付き発生までの限界すべり距離

を向上のためのより良い潤滑剤の選定が定量的に可能であり、耐焼付き性を示す潤滑剤の順序付けも可能であることが示された。

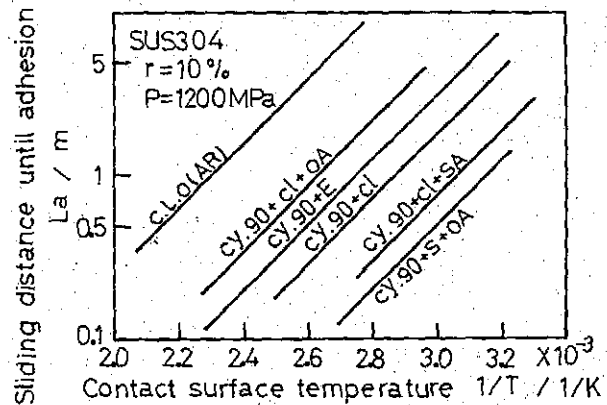


図1 2 潤滑剤の耐焼付き性能の評価

#### 4. 4 提案された焼付きモデルの簡便さと有用性

提案された凝着評価モデルを考慮して焼付きが発生する焼付き限界を定量的に評価できることが示され、実験的にもその信憑性が確認された。そして、この提案された凝着モデルより得られた焼付き限界評価式は接触面温度と焼付き限界すべり距離との定量的な関係を示している。そのため、工具・素材間の接触面での温度を少なくとも二点知ることが出来れば、焼付き限界曲線の傾きを近似的に求めることが出来る。このことは、少ない実験で、接触面の温度が異なるときの焼付き限界すべり距離を定量的に容易に推定あるいは評価できる。このことは現場的に焼付きを防止したいとか、より良い耐焼付き性能を有する潤滑剤を選定したい時にも、とっても便利でかつ有利であると考えられる。

#### 謝辞

天田金属加工機械技術振興財団からは本研究に対する助成を頂き研究が遂行できたことを心から感謝申し上げます。

#### 5. 結論

- (1) 凝着評価モデルによる焼付き限界の定量的評価が可能なることを実験的にも確認した。
- (2) 加工条件として工具と素材の組合せ、工具圧力を考慮し、焼付き防止あるいは耐焼付き性を向上させることが可能な加工条件の最適設定法を示した。
- (3) 種々の潤滑剤を用いて焼付き限界を評価し、焼付き防止および耐焼付き性を向上させることが可能な潤滑剤の定量的評価法を示した。

#### 参考文献

- (1) 木村ら, 潤滑, 30-4(1985), 274
- (2) 河合ら, 日機論(C), 48-433(1982), 1473-1481
- (3) 吉川, 佐藤, 村上塑性加工, 25-285(昭59), 942
- (4) 吉川ら, 平6 春塑性加工講演論文集(1994), 197-200
- (5) 吉川, 平6 春塑性加工講演論文集(1994), 201-204
- (6) 吉川, 第4 5 回塑性加工連講演論文集(1994), 837-840