

平面ひずみ押し出し加工実験による パーム油の潤滑特性の検討

シャルライル サミオン* 上谷 俊平** 中西 賢二**

An Experimental Investigation of Tribological Performance of Palm Oil for Cold Metal Forming
by Plane Strain Extrusion Test

Samion SYHRULLAIL*, Shumpei KAMITANI **and Kenji NAKANISHI**

The performance of palm olein as a lubricant in two different work temperatures was investigated by using a plane strain extrusion apparatus with aluminum billet. The experiments were carried out at room temperature 30°C and 15°C. The state of palm olein at 30°C is liquid but it becomes a solid state at 15°C by crystallization. Paraffin mineral oil was tested for comparison of tribological performance of palm olein. The metal flow characteristic, velocity and effective strain in the deformation zone of billet were calculated by using viscoplasticity method. The results show that low extrusion load, increment of relative velocity and effective strain along the sliding plane of billet can be achieved by applying palm olein, which mean it is capable to reduce frictional constraint between tool and billet, in comparison with paraffin mineral oil.

Keywords: palm olein, extrusion, relative velocity, effective strain, crystallization

1. 緒言

植物油が潤滑に利用された歴史はかなり古い。ピラミッドや古代建設現場に重いものを運ぶ時の潤滑には植物油が用いられたと考えられている¹⁾。パーム油は1860年代までは、鉄道車両用グリースとして多く用いられている。ブリキ工場では鋼板の酸化防止にも使用された²⁾。

1970年代のオイル危機以降、化石資源の変わりに植物油脂を利用するための研究が拡大している。植物油脂の資源は再生可能であり、環境負荷の低減につながる³⁾。例として、現在のディーゼル燃焼の場合、二酸化炭素(CO₂)を発生して環境汚染になり、地球温暖化の原因にもなるが、植物燃料を利用すると発生し

た二酸化炭素(CO₂)を減らすことができる^{4,5)}。

工業用潤滑剤としての使用を考える場合には、鉱油は使用後の潤滑剤廃棄が環境汚染につながるため、廃油処理が問題となるが、植物油の場合は土に埋めると微生物によって分解され、高い生分解度を示す。OECD 301C修正MITI法により試験した生分解度の試験結果によると、試験日数28日で鉱油が30%以下であるのに対して、植物油脂は60%を超え、生分解性に優れている⁶⁾。

パーム油は20°C以下の温度で結晶化を起こし、乳白色に固化する。しかし、物理状態が液体から固体に変わっても食品用途としての品質は変わらないとの報告がなされている^{7,8)}。しかし、工業用潤滑油としての利用においてはその影響は明確でない。

本報では、工業用純アルミニウムJIS-A1050焼鈍済材をピレットとして用いるとともに平面ひずみ押し出し加工実験装置⁹⁾を用い、物理状態が変わったパーム油の潤滑評価を検討するため、加工温度30°Cと加工

2005年8月31日受理

* 博士後期課程物質生産工学専攻

** 機械工学科

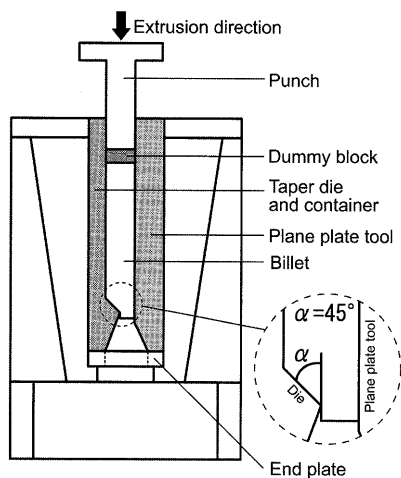


図-1 平面ひずみ押し加工実験装置

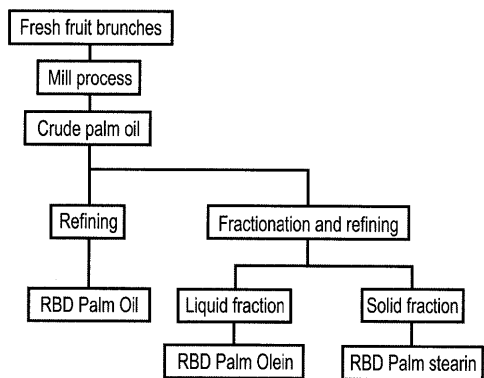


図-2 パームオレインの生産工程

表-1 パームオレインとパラフィン系鉱油の潤滑油特性

Specification of Palm Olein (PO)		
FFA (m.w.256, Palmitic)	max 0.1%	
M & I	max 0.1%	
Slip melting point	max 24°C	
IV	min 56	
Color 5 1/4" Lovibond	max 3 red (optional 6R)	
Kinematic viscosity(mm ² /s)	40°C	34 (measured)
	30°C	46 (measured)
	15°C	—

Specification of Paraffin mineral oil (P1)		
Viscosity grade	VG7	
Flash point	138°C	
Melting point	-20°C	
Kinematic viscosity(mm ² /s)	40°C	7
	30°C	13
	15°C	34

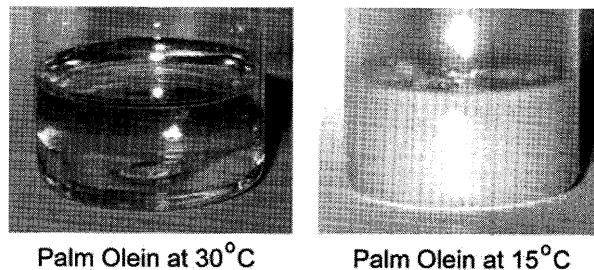


図-3 液体状態と固体状態のパームオレインの写真

温度 15°C (共に室温) で平面ひずみ冷間押し加工実験を行なった。この中で定常押し加工状態における被加工材 (ビレット) の試験面上の相対すべり速度と被加工材内部の相当ひずみを格子線解析法¹⁰⁾を用いて計算した。なお、実験では、パーム油の潤滑油特性を比較するために、パラフィン系無添加鉱油による実験もあわせて行なった。パーム油の潤滑特性が鉱油と比較して遜色ないことを上記の実験解析により明らかにしたので報告する。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

図-1 に本実験で使用した平面ひずみ押し加工実験装置を示す。装置の主な構成はテーパダイ (Taper die)、平面工具 (Plane plate tool) と被加工材 (Billet) からなる。テーパダイはコンテナおよびダイス半角 45° の金型が一体構造の工具になっている。ビレットは押し加工過程でテーパダイ側では強制的に塑性流れの方向を変えて、せん断変形と摩擦拘束を受ける。一方、平面工具側では真直ぐな工具面を持ち、工具面の摩擦拘束だけを受ける。

2.2 潤滑油

本実験では試験用潤滑油としてパームオレイン (RBD Palm Olein) を使用した。パームオレインの生産工程を図-2 に示す。アブラヤシから採油工程でパーム原油 (crude palm oil) を得る。その後、脱酸・脱色・脱臭の精製工程 (Refined, bleached and deodorized process) を経て、分別工程 (fractionation) に入る。分別工程では、融点でパーム原油が結晶化を起こし、固体と液体パーム油成分に分けられる。液体成分はパームオレインで固体成分はパームステアリンである¹¹⁾。本実験で使用するパームオレインは融点 24°C であるため、気温 24°C 以下の場合には物理状態が液体から

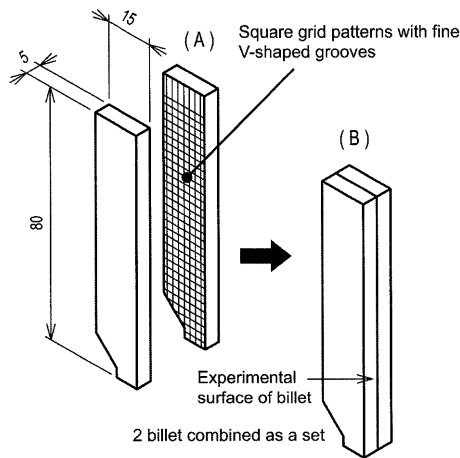


図-4 ビレットの寸法 (A) とビレット組立概略図 (B)

表-2 実験条件

Work temperature	30°C		15°C	
	PO	P1	PO	P1
Lubricant	PO	P1	PO	P1
Kinematic viscosity (mm ² /s)	46	13	—	34
Applied quantity	5 mg (0.48mg/cm ²)			
Lubricant applied on the container wall: Paraffin mineral oil (VG460)				
Extrusion ratio : 2				

結晶化して白い固体に変化する。図-3に液体状態と固体状態のパームオレインの写真を示す。以後、パームオレインをパーム油 PO と表記する。

パーム油 PO の塑性加工用潤滑剤としての有効性を検討するために、鉱油のパラフィン系無添加基油 VG7 を使用して、パーム油 PO と同様の実験を行ない、比較検討を行なった。以後、パラフィン系無添加基油 VG7 をパラフィン系鉱油 P1 と表記する。パーム油 PO とパラフィン系鉱油 P1 の潤滑油特性を表-1 に示す。

2.3 実験条件

平面工具とテーパダイの材質は冷間金型用合金工具鋼 SKD11 で焼入れ、焼戻しを施した。それぞれの実験前のビッカース硬さは 680HV である。ビレットと平面工具面の接触する面を試験面とした。平面工具側の試験面は耐水研磨紙を用いて算術平均粗さ Ra = 0.05μm に仕上げた。平面工具と相対するテーパダイ表面粗さは算術平均粗さ Ra 約 0.6±0.2μm に仕上げ

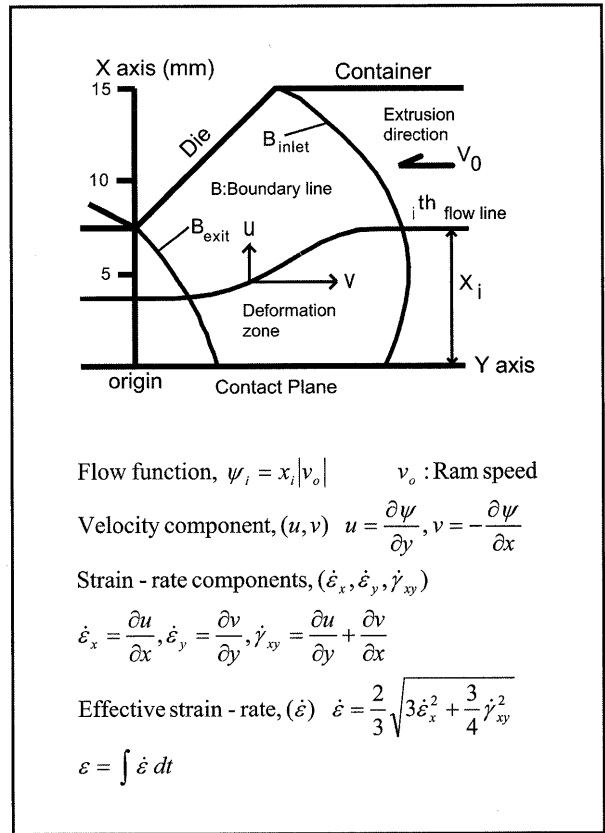


図-5 格子線解析で使した座標系と基礎式

た。金型開口部は押し比2に設定した。

ビレットの材質は工業用純アルミニウム JIS-A1050 で、焼鈍を行い、ビッカース硬さを 22HV にそろえた。平面工具面に接触する面をビレット試験面と呼び、ビレット試験面は耐水研磨紙で算術平均粗さ Ra=0.3μm に仕上げた。図-4に示すように、ビレットの寸法は 80×15×5mm (図-4A) のものを2枚合わせて使用した (図-4B)。金型内部のビレット塑性変形機構を調べるため、ビレットの合わせ面 (分割面) の一方に 1mm 間隔で幅 0.1mm、深さ 0.05mm の V 字溝による正方格子模様をけがき加工をした。

試験用潤滑油は工具試験面に分析用電子天秤を用いて 5mg (0.48mg/cm²) を塗布した。加工温度は室温で 30°C (鹿児島市の夏季節) と 15°C (鹿児島市冬季節) である。それぞれの実験条件を表-2 に示す。ビレットに接触した試験面以外の金型面にはパラフィン系無添加基油 VG460 を毎回の実験でほぼ同じ塗布量になるよう塗布して実験を行った。

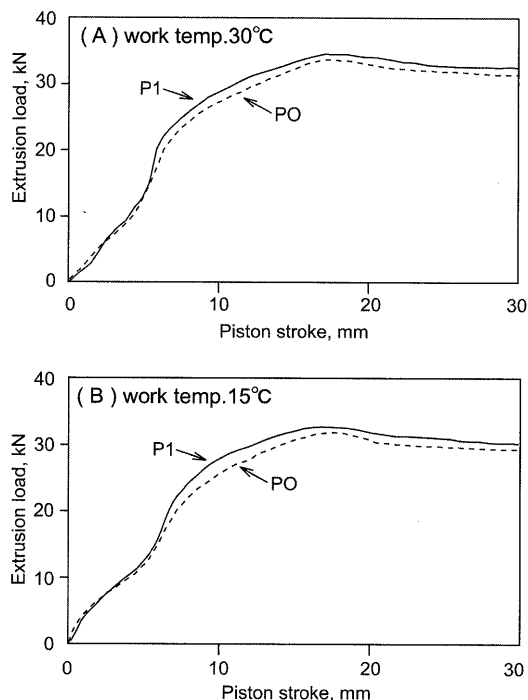


図-6 加工温度 30°Cの押し出し荷重 - 変位曲線 (A)、加工温度 15°Cの押し出し荷重 - 変位曲線 (B)

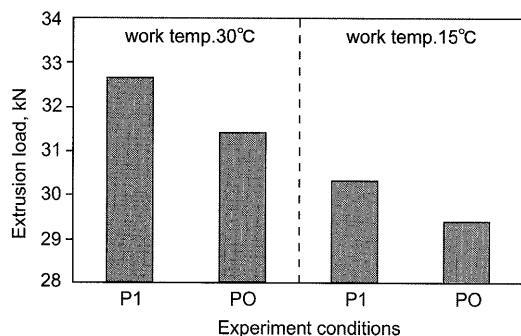


図-7 押し出し荷重の定常状態 (押し出し変位 30mm) における平均荷重値

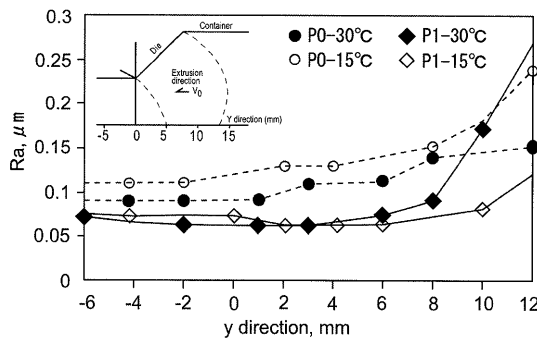


図-8 各実験条件におけるビレット試験面の算術平均粗さ R_a

2.4 実験方法と解析手順

平面ひずみ押し出し加工実験装置を用いて、30 トン複動油圧プレスによる冷間押し出し加工実験を行った。押し出し速度が一定になり、材料の変形が定常状態になった後、実験を停止し (本実験の場合は押し出し変位が 30mm にて停止)、実験装置を分解してビレットを取出した。

押し出し実験中の押し出し荷重と押し出し変位は荷重変換器と変位センサーにて測定し、動ひずみ増幅器で増幅した後、アナライジングレコーダーで記録した。実験装置から取出したビレットの分割面に加工した格子線のゆがみを解析に使用するため、ビレット格子面の写真を撮り、10 倍に拡大して流れ線をデジタル化をしてコンピュータに取込み、格子線解析法¹⁰⁾によって塑性変形機構解析を行なった。また、実験後のビレット試験面の表面粗さ (算術平均粗さ R_a) を測定した。格子線解析で使用した座標系と基礎式は図-5 に示す。

3. 実験結果および考察

3.1 押し出し荷重

図-6 A は加工温度 30°Cの押し出し荷重 - 変位曲線、図-6 B は加工温度 15°Cの押し出し荷重 - 変位曲線を示す。それぞれの実験条件において、押し出し変位 25mm から押し出し荷重がほぼ一定になり、押し出し加工状態が定常変形状態になったことを確認した。なお、定常押し出し加工状態におけるプレスラム速度 (押し出し速度) は 5.1mm/s であった。押し出し荷重の定常状態における平均荷重値を図-7 に示す。各実験の加工温度において、パーム油 PO の押し出し荷重がパラフィン系鉱油 P1 より低くなっていることが図-6 と図-7 よりわかる。

3.2 表面粗さ R_a

各実験条件におけるビレット試験面の算術平均粗さ R_a を図-8 に示す。測定は、押し出し方向に直交する方向に行った。図の横軸において、 $y=0\text{mm}$ は、金型出口部であり、負の部分は製品側、正の部分は金型内部になる。パラフィン系鉱油 P1 は加工温度に関係なく実験後の算術平均表面粗さ R_a ($y=6\text{mm}$ から $y=-6\text{mm}$ までの R_a の平均値) は約 $0.07\mu\text{m}$ になっている。パーム油 PO の場合は、加工温度 30°Cの時、平均表面粗さ R_a は約 $0.09\mu\text{m}$ 、加工温度 15°Cの時に、約 $0.11\mu\text{m}$ になった。

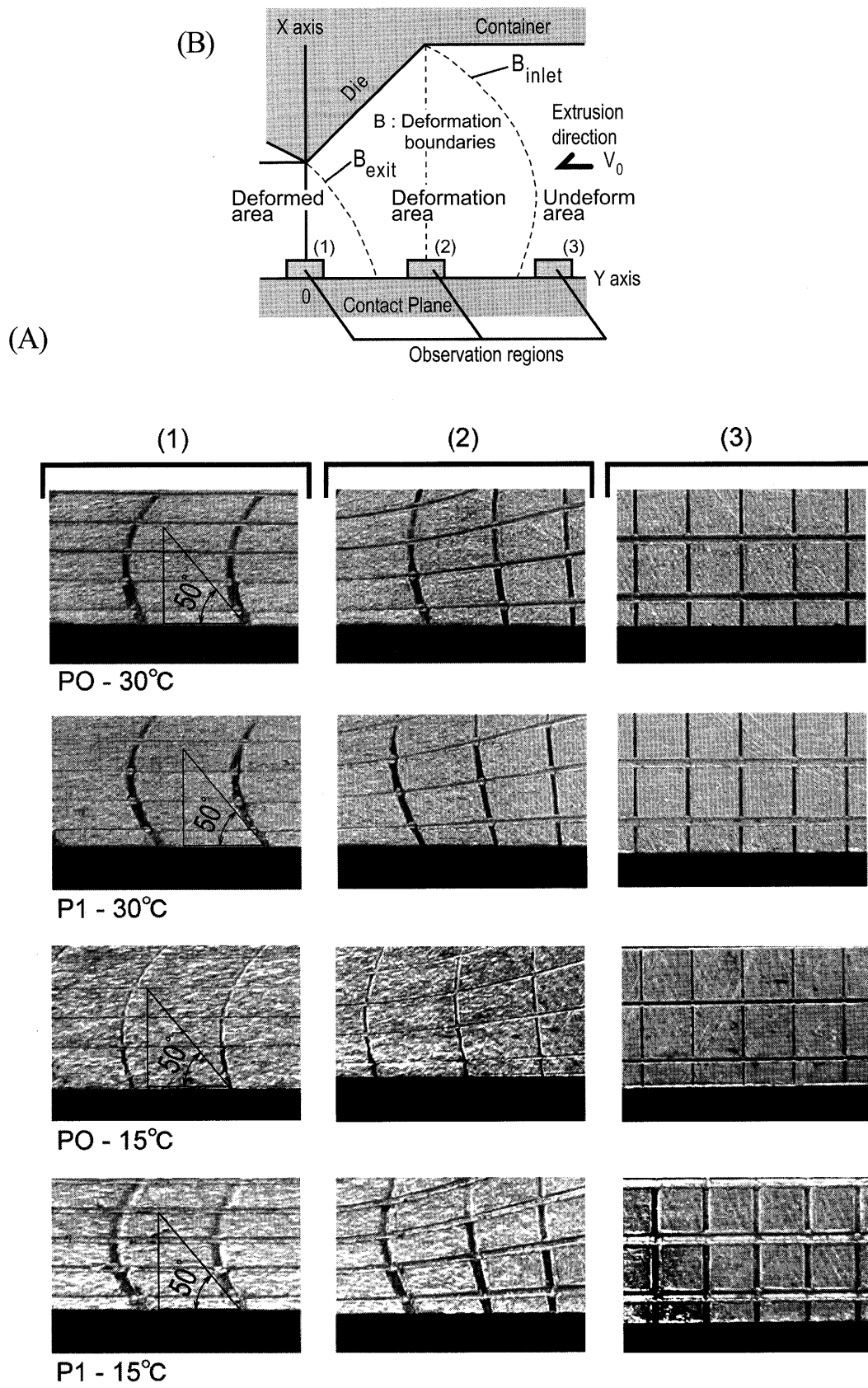


図-9 ビレット試験面近傍の格子線写真 (A) と格子線写真撮影位置 (B)

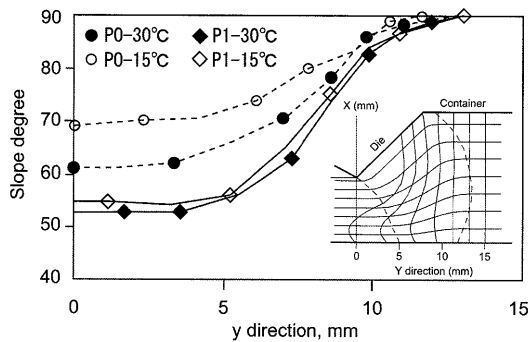


図-10 ビレット試験面近傍の格子縦線の傾き角度分布

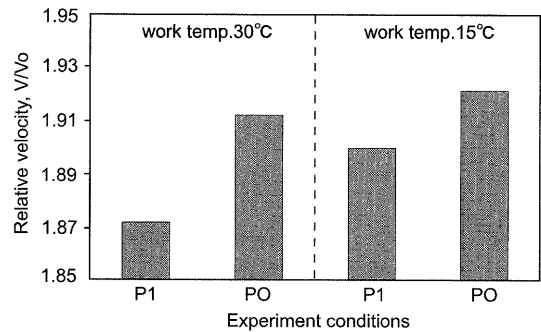


図-12 変形領域出口部 (y=5mm) における相対すべり速度値の比較

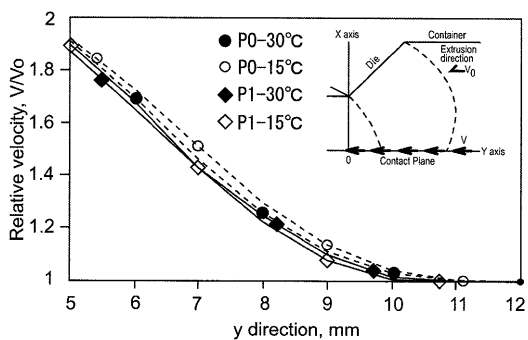


図-11 変形領域内のビレット試験面における相対すべり速度分布

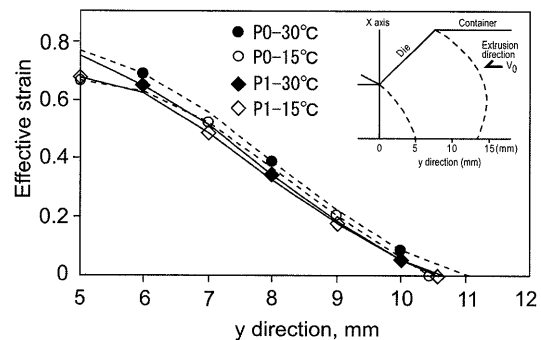


図-13 変形領域内のビレット試験面上の相当ひずみ分布

パラフィン系鉱油P1は低粘度 (30°Cの時: 13mm²/s, 15°Cの時: 34mm²/s) で、30°Cと15°Cでの粘度差が小さいため、油膜が薄く形成され、かつ差もほとんど生じなかったものと考えられる。パーム油POの場合は加工温度15°Cで固体になっているが、加工温度の違いによる粘度差が生じたこと、固体に変化したことによる流動性の低下などによって、15°Cでは試験面間の油膜が30°Cの場合よりも厚く形成され、平均表面粗さRaが加工温度30°Cより大きくなったと考えられる。いずれの実験においても、実験後のビレット表面粗さRaは、実験前のビレット試験面の表面粗さRaよりも小さくなっており、試験面の潤滑状態は混合潤滑状態にあることが推定される。このことから、前述の押し出し荷重比較において、パーム油POの押し出し荷重が、パラフィン系鉱油P1よりも小さくなったのは、パーム油POの方が試験面においてやや厚めの潤滑油膜を形成したこと、混合潤滑状態では金属同士の接触も部分的に生じると考えられるが、パーム油POに含まれる脂肪酸の境界潤滑膜としての効果によると考えられる^{12),13)}。

3.3 ビレット格子線観察

図-9に未変形領域(3)、変形領域(2)および変形領域を通過した試験面出口付近(1)の試験面近傍の格子線写真を示す。ビレットの格子線のゆがみから試験面における摩擦抵抗の影響を予想できる。すなわち、図に示す格子線の縦線の試験面近傍の傾きが小さいほど、試験面において押し出し方向と逆方向に摩擦拘束を大きく受けていたことになる。

パラフィン系鉱油P1は加工温度30°Cと15°Cで比較すると、試験面出口付近の格子線の縦線の傾きはほぼ同じであるが、パーム油POの場合は、加工温度15°Cの方が30°Cの時より傾きが大きくなっている。パラフィン系鉱油P1とパーム油POを比較すると、同一加工温度においてパーム油POの方が傾きが大きくなっていることがわかった。

図-10はビレット試験面近傍の縦線の傾き角度を実験条件ごとに、試験面の各位置に対してプロットしたものである。押し出し出口部分で、変形領域を出た付近の傾き角 (y=0mm~4mm 付近) を見ると、パラフィン系鉱油P1の場合は、加工温度30°Cと15°Cの時、ほぼ同じく水平面より約54°である。パーム油POの

場合は、加工温度 30℃の時、約 60° で加工温度 15℃の時、約 68° になっている。これらの結果から、試験面における摩擦拘束の程度が、パーム油 PO はパラフィン系鉱油 P1 よりも小さいと考えられる。

3.4 ビレット相対すべり速度

変形領域内のビレット試験面における相対すべり速度 (V/V_0) 分布を図-11に示す。ここで V は $y(\text{mm})$ における塑性流れ速度、 V_0 は定常押しプレスラム速度 (押し出し速度) を意味する。

各加工温度において、パーム油 PO の方がパラフィン系鉱油 P1 より相対すべり速度が大きくなっていることがわかる。変形領域出口部 ($y=5\text{mm}$) における相対すべり速度値 (V/V_0) を各実験条件で相互に比較した結果を図-12に示す。

3.5 相当ひずみ分布

各実験条件における変形領域内のビレット試験面上の相当ひずみ分布を図-13に示す。各加工温度において大きな差が見られないが、わずかにパーム油 PO の相当ひずみが大きくなっている。

4. 結論

パラフィン系鉱油 P1 とパーム油 PO を利用して、加工温度 30℃と 15℃における平面ひずみ冷間押し出し加工実験を行い、以下の結果を得た。

1. パラフィン系鉱油 P1 とパーム油 PO の押し出し荷重はパーム油 PO の方が低くなる。
2. パラフィン系鉱油 P1 の粘度はパーム油 PO の粘度より低いため、ビレット試験面の平均表面粗さ R_a はパラフィン系鉱油 P1 の方が小さくなった。
3. ビレット試験面近傍格子縦線の傾きの観察および試験面上の相対すべり速度の比較から、パーム油 PO はパラフィン系鉱油 P1 よりも試験面近傍の塑性流れに対する摩擦拘束が小さいことがわかった。
4. ビレット試験面付近の相当ひずみはパラフィン系鉱油 P1 とパーム油 PO では大きな違いが見られなかった。

参考文献

- 1) R.H.V.Corley and P.B.Tinker, World Agricultural Series – The Palm Oil, Blackwell Publishing, Fourth Edition, p 1.

- 2) J.Henderson and D.J.Osborne, The Palm Oil in our Lives: How This Came About, Endeavour, Vol.24-2, pp 63-68 (2002)
- 3) W.B.Wan Nik, F.N.Ani and H.H.Masjuki, Thermal Performances of Bio-Fluid as Energy Transport Media, 6th Asia Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization, Kuala Lumpur, pp 558-563 (2002)
- 4) H.H.Masjuki, M.A.Kalam, M.A.Maleque, T.Suhaimi, and N.Mokhtar, Performance and Exhaust Emissions of Compression Ignition Engine Fuelled with Coconut Oil and Palm Olein, Proceeding of the 1998 PORIM International Biofuel and Lubricant Conference, pp 75-83 (1998)
- 5) E.Kinoshita, K.Hamasaki and C.Jaqin, Diesel Combustion of Palm Oil Methyl Ester, SAE Paper, No.2003-01-1929 (2003)
- 6) 小宮 広志, 植物油系生分解性グリースの現状と技術動向, 月刊トライボロジー, 216 (8), pp 28-31 (2005)
- 7) W.L.Siew and W.L.Ng, Crystallisation Behaviour of Palm Olein, Elaeis, Vol.8, No.2, pp 75-82 (1996)
- 8) Y.Basiron, B.S.Jalani and K.W.Chan, Advances in Palm Oil Research – Volume II, Malaysian Palm Oil Board, p 976.
- 9) 上谷 俊平, 中西 賢二, 郭 永明, バルク塑性変形とすべりを伴うアルミニウム加工表面近傍の塑性流動と表面粗さの検討, トライボロジスト 47, 1, pp 52-60 (2002)
- 10) 中西 賢二, 岡村 俊一, 中村 正久, 格子法と流動応力推算の数値計算法を用いたアルミニウムの軸対称熱間押し出し加工の解析, 塑性と加工, 18, 203, pp 990-998 (1977)
- 11) Pocketbook of Palm Oil Uses – Fifth Edition, Malaysian Palm Oil Board, p 15-19 (2000)
- 12) F.P.Bowden and D.Tabor (訳: 曾田 範宗), 固体の摩擦と潤滑, 丸善, p 169 (1994)
- 13) (社)日本塑性加工学会編: 塑性加工におけるトライボロジー, コロナ社, p 127 (1998)