水産研究・教育機構 機関リポジトリ
FRA Japan Fisheries Research and Education Agency Institutional Repository

すべり摩擦条件下における生分解性潤滑油露の潤滑性能

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 水産大学校 公開日: 2024-10-11 キーワード (Ja): キーワード (En): lubricans; friction; biodegradable oil; food machine oiles; four ball test 作成者: 永尾, 公壮, 江副, 覚 メールアドレス: 所属:
URL	https://fra.repo.nii.ac.jp/records/2011830

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

Journal of National Fisheries University 54 (4) 167－174 (2006)

すべり摩擦条件下における生分解性潤滑油の潤滑性能

永尾公壮*1・江副　覚*1

Lubricating Performance of Biodegradable Oil under Sliding Frictional Condition

Koso Nagao*1, Satoru Ezoe*1

Although the conventional oils that based on mineral oil have used widely in the current industry fields, the waste of the oils has induced the severe pollution in ocean. Recently, biodegradable oils that could be disposed by bacteria have been developed to decrease the pollution because these biodegradable oils have based on synthetic esters or vegetable oils. However, it has been seldom carried out to estimate the lubrication performance of these oils that developed for conventional machine oils, engine oils, hydraulic fluids and cutting oils, etc. To estimate summary a fundamental lubrication performance of biodegradable oils and lubricants for the food machines of commercial oils, a four-ball test was carried out in this study. Consequently, the effects of oiliness and/or additives of biodegradable oils on contribution of lubricating performance were discussed and also it was clarified that biodegradable oil had better lubricating performance under low sliding condition than conventional mineral oils.

Key words : Lubricans, Friction, Biodegradable oil, Food machine oiles, Four-ball test

1．はじめに

鉱油を基油とした潤滑油は，現在工業界において広く使用されているが，自然界に廃棄された場合には分解されにくいため，重大な環境破壊を招く。また，厳しい潤滑条件下で使用される潤滑油などには，潤滑性能を向上させるためにリンやイオウといった極圧添加剤が添加されているので[1]，これらが環境に与える影響は大きい。そこで近年，バクテリアで分解されやすく環境負荷の小さな生分解性油が開発され，工業用潤滑油，2サイクル用エンジンオイル，油圧作動油，切削油等として使用されるようになってきた。また食品機械用潤滑油には，従来よりも厳しい食品衛生管理基準を満たすことが求められている。

鉱油を基油とした潤滑油に植物油の主要成分である脂肪酸などを添加した場合には潤滑性能が向上することが知られている[2]。生分解性潤滑油の多くは合成エステルや植物油を基油としており，極性基をもつ脂肪酸が主要成分の一つであるが，合成エステルや植物油を基油とした潤滑油の潤滑性能に関する詳細な報告は少ない。

生分解性潤滑油の性能向上や新しい概念に基づく製品開発のためには，従来の潤滑油の基本的な潤滑性能を的確に把握しておく必要がある。そこで，本研究では最近開発された合成エステルや植物油を基油とする生分解性潤滑油や食品機械用潤滑油，および従来の鉱油を基油とする潤滑油を試料油として用いて四球試験による純すべり摩擦条件下で比較実験を行い，これらの基本的な潤滑性能を調べた。

2．実験方法および試料油

2.1　試料油

本研究には，合成エステルや植物油を基油とする7種類の生分解性潤滑油と，比較のために，従来の鉱油や合成油を基油とする8種類の潤滑油を試料油として用いた。以後，鉱油や合成油を基油にした試料油は生分解性の低い潤滑油と総称する。Table 1に，本研究で使用した潤滑油をまとめて示す。なお，Oil A から Oil G は生分解性潤滑油

2006年3月3日受付．Received March 3，2006.

＊1　水産大学校海洋機械工学科（Department of Ocean Mechanical Engineering, National Fisheries University, 2-7-1 Nagata-honmachi, Shimonoseki, Yamaguchi 759-6595, Japan）

Table 1. Oils used in this study

Kinds of oils	Classification		
	Utilization	Base oil	Biodegradability
Oil A	For food product machine	Vegetable oil	Biodegradable oil
Oil B	For hydraulic fluid	Synthetic ester	
Oil C			
Oil D	For roll working oil		
Oil E	For 2-stroke engine oil		
Oil F	For cutting oil	Vegetable oil	
Oil G		Synthetic surfactant	
Oil H	For food product machine	Liquid paraffin	No-biodegradable oil
Oil I			
Oil J			
Oil K			
Oil L		Polyalphaolefin	
Oil M			
Oil N	For conventional machine (without EP additives)	Mineral oil	
Oil O	For conventional machine (with EP additives)		

で，Oil H から Oil O は生分解性の低い潤滑油である。

生分解性潤滑油のなかで，Oil A は植物油を基油とした食品機械用潤滑油である。また，Oil B と Oil C はそれぞれ合成エステルを基油とした油圧作動油である。Oil D および Oil E は，同じく合成エステルを基油にした圧延加工用潤滑油と 2 サイクル用エンジンオイルである。Oil F と Oil G は切削油であるが，それぞれ植物油と合成界面活性剤を基油とした潤滑油である。

一方，比較のために用いた生分解性の低い潤滑油のなかで，Oil H から Oil K までは鉱油を高度に精製した流動パラフィンを基油とした食品機械用潤滑油で，Oil L と Oil M は合成油を基油とした食品機械用潤滑油である。また，Oil N と Oil O は鉱油を基油とした一般的な工業用潤滑油である。

Table 2 に本研究に用いた潤滑油の代表的な性状を示す。生分解性潤滑油は，生分解性の低い潤滑油より粘度が低い傾向にあることがわかる。Table 3 に潤滑性能に影響を及ぼすと考えられる代表的な成分元素の分析結果と電話等で問い合わせた会社の公表結果をまとめて示す。試料油の中で，Oil K には油性向上剤が添加されているとのことだった。そのほか，Oil B, D, L, M, O には代表的な極圧添加剤であるリンとイオウが添加されていた。とくに，Oil O にはイオウが多量に添加されていた。

2.2 実験方法

潤滑油の基礎的な性能は，潤滑性能を把握するために一般的に行われる焼付試験で行った。試験機には，コンピュータ制御により試験荷重や回転数を自由に設定できる S社製の四球試験機を用いた。Fig. 1 に，試験機の概要を示す。図中，右側が試験部で左側がコントロール部である。

試験片（試験球）には 3 / 4 inchの鋼球を用いた。一回の実験には 4 個の鋼球を用い，そのうちの 3 個は下部試験片として試験片容器に固定した（以後，固定試験片と呼ぶ。）。また残りの 1 個は上部試験片として試験機のスピンドルに固定した（以後，回転試験片と呼ぶ。）。

3 個の固定試験片はすり鉢状の底板に上部から押さえつけられることで，正三角形の位置に精密に配置される。回転試験片は，固定試験片に対して正四面体の頂点になるように配置される。その結果，固定試験片と回転試験片はそれぞれ点接触し，回転試験片の荷重は 3 個の固定試験片に均等に負担される。Fig. 2 に，試験片を試験機に取り付け

Table 2 . Typical properties of test oils

Kinds of oils	Density (g/cm^3)	Viscosity (mm^2/s)		Viscosity index
		40 ℃	100 ℃	
Oil A	0.953	13.09	3.309	125
Oil B	0.92	65	12	184
Oil C	0.904	29	6	146
Oil D	0.932	68	8.7	100
Oil E	0.8858	47.8	9.09	175
Oil F	0.92	38.13	7.77	124
Oil G	0.94	14.24	3.06	-
Oil H	0.847	12.68	3.107	104
Oil I	0.876	23.52	4.3	100
Oil J	0.853	67.61	8.99	107
Oil K	0.8726	87.2	10.24	<100
Oil L	0.849	1000	80.6	160
Oil M	0.845	148.4	18.48	140
Oil N	0.876	68	8.7	103
Oil O	0.886	148.3	14.58	97

Table 3 . Contained chemical composition of test oils

Kinds of oils	Pb mass ppm	Si mass ppm	P mass ppm	Zn mass ppm	S mass %
Oil A*	0	0	0	1	< 0.01
Oil B*	< 1	< 1	234	< 1	0.049
Oil C*	< 5	< 1	< 5	< 1	< 0.001
Oil D*	< 5	< 1	185	< 1	0.237
Oil E*	< 5	< 1	< 5	< 1	0.0089
Oil F*	< 5	< 1	< 5	< 1	< 0.001
Oil G*	< 5	< 1	6	< 1	< 0.001
Oil H*	0	0	0	0	< 0.01
Oil I**	0	0	0	0	< 0.01
Oil J*	0	0	0	0	< 0.01
Oil K**	0	0	0	0	0
Oil L*	< 5	2	529	1	0.050
Oil M*	0	4	547	1	0.042
Oil N**	0	0	0	0	0
Oil O*	0	0	182	1	1.173

表中，*は定量分析した結果で，**は会社の公表データによる。

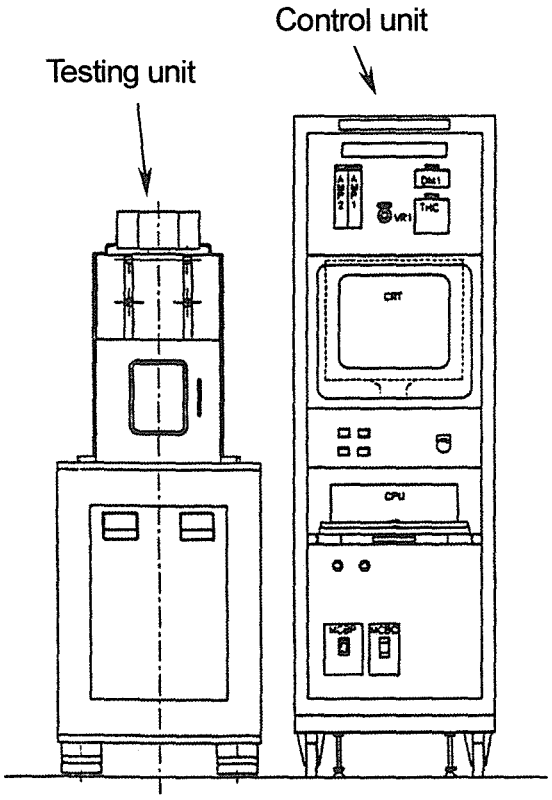


Fig. 1. Schematic view of Four-ball tester

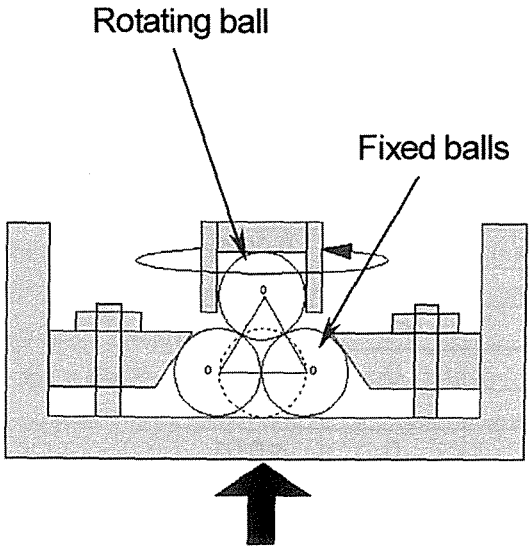


Fig. 2. Test balls setting configuration

た状態を示す。回転試験片を回転させると，回転試験片と固定試験片との間には純すべり摩擦が生じる。

荷重は，固定試験片を固定する軸に取付けられているネジをコンピュータで制御されたサーボモータで回転させることにより，負荷される。また回転数は，回転試験片を取付けるスピンドルを駆動するサーボモータで制御される。

試験片や試験片容器は，表面の吸着物や潤滑油の残渣等が実験結果に影響を及ぼさないよう，ヘキサンやアセトンで十分に洗浄した。そして，試験片をスピンドルおよび試験片容器にそれぞれ固定し，容器内の試験片を試料油で浸潤させた。その後，回転試験片のスピンドルを停止させた状態で荷重を懸架し，回転試験片を回転させることにより実験を開始した。

実験中は摩擦係数を記録し，試験片に焼付きが生じて摩擦係数が0.3を超えた場合はその時点で実験を停止した。なお焼付きが生じなかった場合は，最高設定荷重に達するまで実験を継続した。実験中，摩擦係数が急激に増加した荷重，すなわち試験片の接触部に微小焼付きが生じ，接触部が点接触から面接触へ拡がったと考えられる荷重を微小焼付き荷重として潤滑性能を評価した。実験は同一の実験条件で最低2回行い，実験結果にばらつきがある場合は，数度同じ実験を行った。実験は，80rpmと750rpmの回転で，荷重を階段的に増加させながら行った。各荷重段階の試験時間は45秒とし，試験開始時の試料油温度は25℃とした。

3．実験結果および考察

3.1 潤滑性能の比較

Fig. 3に80rpmにおける四球試験により得られた摩擦係数の変化の代表的なデータを示す。四球試験では，試験中の摩擦係数の変動を計測するとともに，焼付きが生じ，摩擦係数が低い状態（図中A段階）から急激に上昇（図中B段階）したときの直前の荷重から潤滑性能を評価した。なお，運転開始直後に摩擦係数が上昇した試料油については，運転開始時の荷重を微小焼付きが生じた荷重として整理した。Fig. 4 (a), (b), (c) にA, B, Cの各段階における代表的な摩耗痕の状態をそれぞれ示す。

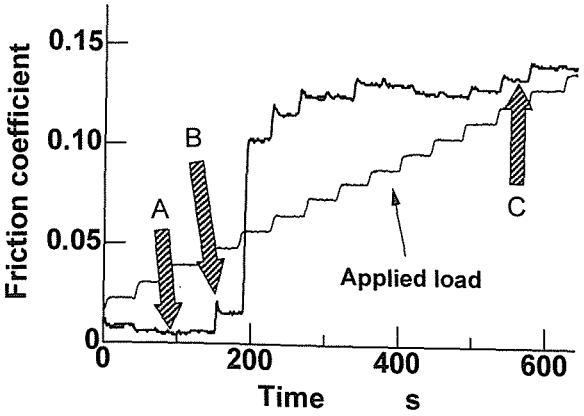


Fig. 3. Change in friction coefficient

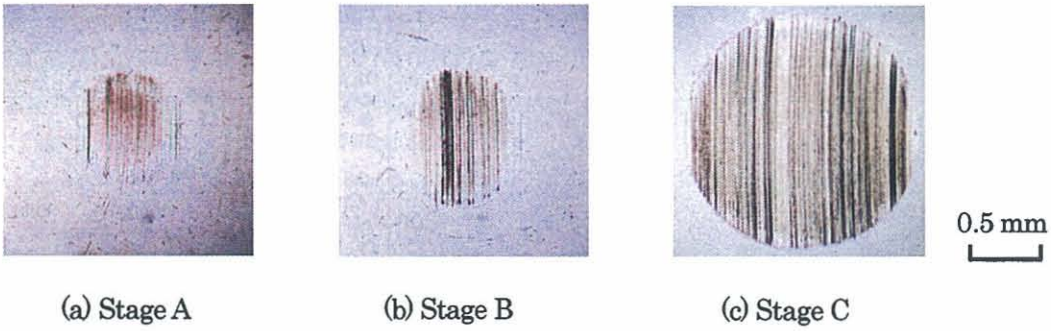
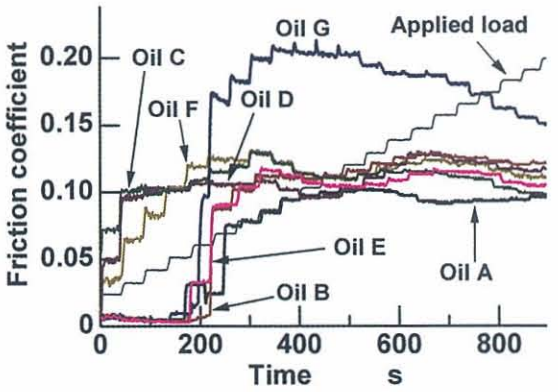


Fig. 4 . Wear scars occurred in each friction stage

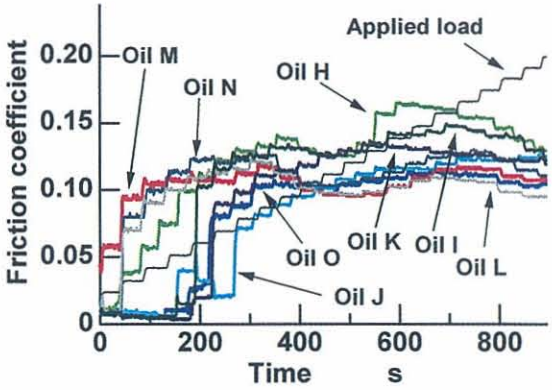
摩擦係数が小さい状態で推移している，すなわちFig. 3に示すA段階（負荷荷重；約350N）での摩耗痕の状態を知るために運転を中断した時は，Fig. 4 (a)に示すように溝も浅く大きな傷も見られないことから比較的良好な潤滑状態にあったことが伺える。摩擦係数が急激に上昇するFig. 3に示すB段階（負荷荷重；約750N）で摩耗痕の状態を知るために運転を中断した時は，Fig. 4 (b)に示すように中央付近に深い溝状の傷が見られることから焼付きが生じたと考えられる。また，摩擦係数が急上昇した後，変化が緩やかになり，最終的な負荷荷重である3000Nまで運転した時の状態であるFig. 3に示すC段階ではFig. 4 (c)に示すように摩耗痕自体も大きく，摩耗痕全体に深い傷が刻まれていたので，接触部全体で金属接触が生じたことが推測される。摩擦係数の急激な上昇後も運転を停止することなく最終的な負荷荷重である3000Nまでいたったのは（C段階），微小焼付きが発生したことにより点接触が面接触へ移行し，面圧が低下したためであると考えられる。

Fig. 5に80rpmで実験を行った場合の摩擦係数の変化を示す。Oil A, B, E, G, I, J, K, Oにおいては運転開始後，摩擦係数が低い値で推移し（A段階），その後急激に上昇している（B段階）。なお，A段階における摩擦係数は約0.01程度であった。ほとんどの試料油は微小焼付き発生後，摩擦係数が0.1付近で推移したが，Oil Gは0.2程度まで上昇した。その他の潤滑油では，摩擦係数は運転開始直後に上昇したが，その後は0.1から0.15付近で推移した。

Fig. 6に80rpm, 750rpmで試験を行った場合の微小焼付き発生時の荷重を整理した結果を示す。生分解性潤滑油であるOil A, B, Gの潤滑性能は粘度がほぼ同程度の鉱油を基油とした食品機械用潤滑油Oil H, I, Jよりも高く，80rpmにおいては従来の極圧剤を含む工業用潤滑油であるOil Oとほぼ同程度であった。また，鉱油を基油とした食品機械用潤滑油であるOil H, I, J, KにおいてOil Kが最も高い潤滑性能を示した。次に，試験条件がより厳しい750rpmでは，80rpmの結果と比較するとOil B, D, E, J, N, Oの潤滑性能が増加したのに対し，Oil A, G, H, I, Kの潤滑性能は低下した。これは80rpmの場合よりも試験条件が

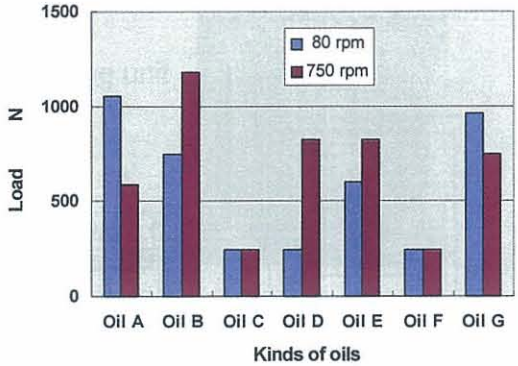


(a) Oil A to G (Biodegradable oil)

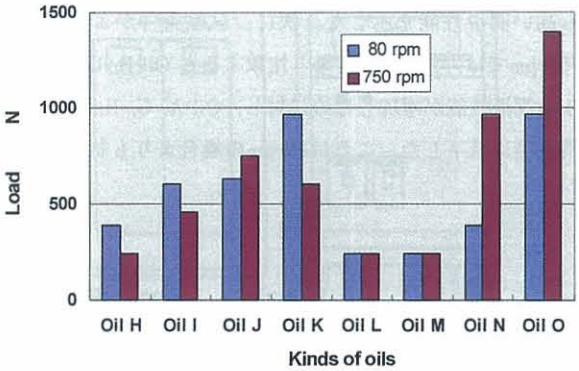


(b) Oil H to O (No-Biodegradable oil)

Fig. 5 . Changes in friction coefficient obtained from 80rpm test

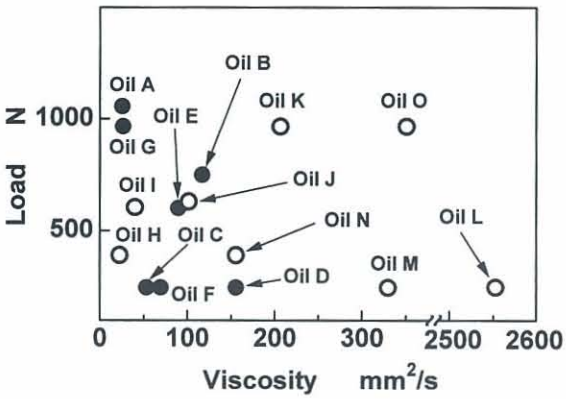


(a) Oil A to G (Biodegradable oil)

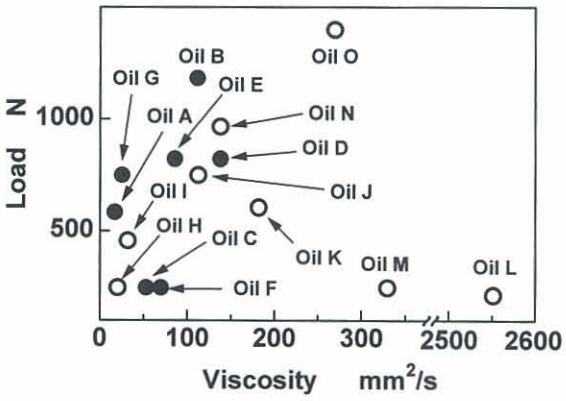


(b) Oil H to O (No-Biodegradable oil)

Fig. 6 . Results obtained from Four-ball test



(a) 80rpm



(b) 750rpm

Fig. 7 . Relationships between viscosity and seizure load

厳しくなるため，Oil B, D, E, J, N, O の粘度が比較的高いことや試料油中に含まれるリンやイオウ分が極圧剤として作用したためであると考えられる。なお，Oil C, F, L, M は80rpm，750rpmどちらの条件においても低い潤滑性能を示しているが，これは運転開始直後に摩擦係数が急激に上昇したため，運転開始時の荷重を微小焼付き発生荷重として整理した結果である。Oil L, M が極圧剤を含んでいるにも関わらず低い潤滑性能を示したのは，これらの潤滑油が極性基を持たない合成油であり，効果的な油膜の形成がなされなかったなど，基油自身の潤滑性能が低かったことが原因であると推測できる。しかし，今回得られたデータから原因を明らかにすることはできなかった。

3.2 潤滑性能に及ぼす要因

一般に，粘度が高い油ほど油膜形成能力が高く，潤滑性能も高いことが知られている。そこで，Fig. 7 に80rpm，750rpmで試験を行った場合の微小焼付き発生時の荷重と粘度の関係を整理してそれぞれ示す。なお，微小焼付発生時の粘度は，JIS規格に規定された計算方法を用いて微小焼付発生時の試料油温度から (1) 式[3] により推定した。

$$loglog\,(\nu+0.7)=A-B\,(273.1+t) \quad (1)$$

ここで，Aは定数（切片を表す数値），Bは定数（勾配を表す数値），tは温度（℃），νは動粘度（mm²/s）である。本研究ではTable 2 に示した各試料油の40℃と100℃における動粘度を計算に用いた。

図中，黒丸は生分解性潤滑油を，白丸は生分解性の低い潤滑油をそれぞれ示している。80rpmでは，生分解性潤滑油は粘度が比較的低いにも関わらず，潤滑性能は生分解性の低い潤滑油と同程度かまたはそれ以上であった。また，生分解性が低い潤滑油の中で，鉱油を基油とした粘度の異なる食品機械用潤滑油である Oil H, I, J は粘度の増加にともない潤滑性能が高くなる傾向を示したが，粘度が同程度の生分解性潤滑油よりも潤滑性能は低かった。特に植物

油を基油としたOil Aは粘度が鉱油を基油としたOil Oの1/10程度であるにも関わらず，Oil Oと同程度の潤滑性能を示した。また，粘度がほぼ同じ鉱油を基油とした食品機械用潤滑油であるOil Hの2倍以上の潤滑性能を示した。このことから，低すべり条件下における生分解性潤滑油の潤滑性能は粘度に依存しないことがわかった。

生分解性潤滑油は合成エステルを基油としている場合が多く，同様に生分解性が高い植物油も脂肪酸とグリセリンのエステルである。エステルは極性のあるエステル基を有しており，金属表面に吸着膜を形成するために潤滑性能が向上することが知られている[4,5]。つまりエステルは金属表面に吸着する油性に優れており，流体潤滑膜を形成しにくい低いすべり速度の下では油性が潤滑性能に大きく寄与していると考えられる。ゆえに合成エステルや植物油を基油とした生分解性潤滑油は鉱油を基油とした潤滑油よりも粘度が低いにも関わらず，比較的高い潤滑性能を示したと推測できる。

鉱油を基油とした食品機械用潤滑油であるOil Kの潤滑性能が他の鉱油を基油とした食品機械用潤滑油よりも高かったのは，他の食品機械用潤滑油よりも粘度が高いことに加え，油性向上剤が添加されているためであると考えられる。また，Oil Gは界面活性剤を基油としているために吸着膜の形成能力が高く[6]，粘度が低いにも関わらず比較的高い潤滑性能を示したと推測できる。

すべり速度が高い750rpmでは，80rpmの結果と比較して，粘度の増加に伴い潤滑性能が高くなる傾向が見られた。これは，すべり速度が増すことで粘度が高いほうが油膜形成により有利となり，油性よりも粘度が潤滑性能に大きな影響を及ぼした結果であると考えられる。

次に摩擦面に形成される油膜について考える。一般に，点接触のように高い接触圧力が集中するような場合は接触面の弾性変形の影響が非常に大きくなる。このような場合，圧力による粘度の増加と接触面の変形を考慮した弾性流体潤滑理論（EHL）が用いられる[7]。点接触する2面間の最小油膜厚さはEHL理論に基づいた（2）式[8]に示すHamrock-Dowsonの式より推定することができる。

$$h_{min}=3.24R\left(\frac{U}{W}\right)^{2}\left(\frac{GW^{3}}{U^{2}}\right)^{0.49}\left(\frac{W^{\frac{8}{3}}}{U^{2}}\right)^{0.17}\left(1-e^{0.68K}\right) \quad (2)$$

式中の U, W, G は速度，荷重，圧力による粘度増加の無次元表示量をそれぞれ示しており，以下の(3)，(4)，(5)式によってそれぞれ表される。

$$U=\frac{\eta_0 u}{E'R} \quad (3)$$

$$W=\frac{P}{E'R^2} \quad (4)$$

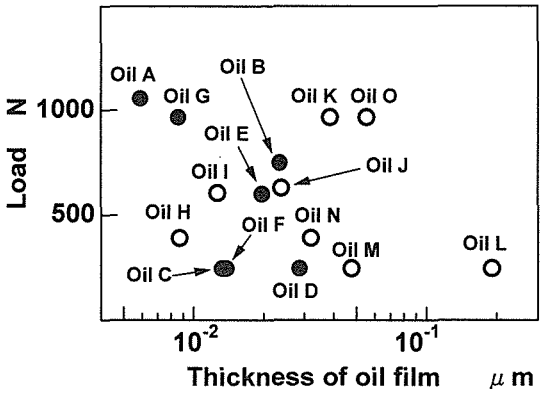
$$G=\alpha E' \quad (5)$$

ここで，h_{min}：最小油膜厚さ[mm]，R：等価曲率半径[mm]，η_0：大気圧下の粘度[kgf・s/mm^2]，P：荷重[kgf/mm^2]，α：圧力粘度係数[mm^2/kgf]，k：直角方向および運動方向に対する接触楕円半径の比，u：平均速度[mm/s]，E'：等価弾性係数[kgf/mm^2]である。

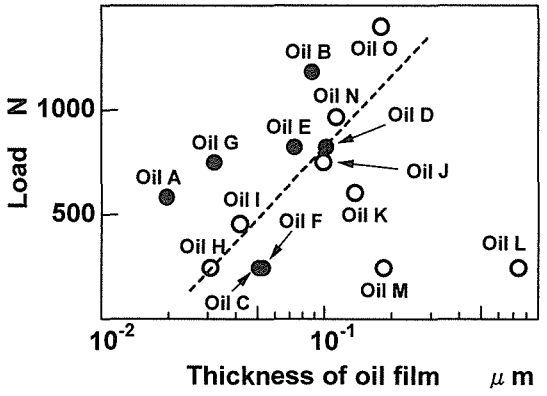
植物油を基油とする生分解性潤滑油には生分解性潤滑油の平均的な圧力粘度係数と推定される[9] $\alpha=10\mathrm{GPa}^{-1}$を使用し，エステルをベースとする潤滑油は$\alpha=16\mathrm{GPa}^{-1}$を，鉱油を基油とする潤滑油では[10] $\alpha=20\mathrm{GPa}^{-1}$を使用した。なお，すべり速度が増すことで，試料油温度の上昇による粘度の低下が考えられるが，ほとんどの試料油において運転前に対する微小焼付発生時の試料油温度の上昇は3℃以内であった。

Fig. 8に80rpm，750rpmで試験を行った場合について，(2)式より算出した最小油膜厚さと微小焼付発生時の荷重の関係を整理してそれぞれ示す。なお，大気圧下の粘度：η_0は微小焼付発生時の試料油温度から(1)式により推定した値を用いた。図中，黒丸は生分解性潤滑油を，白丸は生分解性の低い潤滑油をそれぞれ示している。また，Fig. 8 (b)中の破線は生分解性の低い潤滑油（白丸）に関して最小油膜厚さと微小焼付発生時の荷重の関係を最小自乗法により近似したものである。なお，運転開始直後に摩擦係数の急激な上昇を示し，潤滑性能を把握できなかった合成油を基油としたOil LおよびOil Mの値は除いた。つまり，この破線は鉱油を基油とした潤滑油の最小油膜厚さと微小焼付発生時の荷重の関係を示している。

80rpmの場合には生分解性潤滑油であるかどうかに関わらず，プロット点がばらついており，最小油膜厚さと微小焼付発生時の荷重の間に相関は見られなかった。最小油膜厚さが薄いと推定されるOil Aが全試料油中において比較的高い潤滑性能を示した。一方750rpmの場合では，最小油膜厚さが増加すると微小焼付発生時の荷重が増加するという傾向が試料油全体に見られ，特に油性が小さい鉱油を基油とした潤滑油において破線で示すように，この傾向が強かった。このことから，すべり速度が高くなると潤滑性能に及ぼす油性の影響は小さくなることがわかった。これは摩擦面における温度上昇の違いが影響を及ぼしている



(a) 80rpm



(b) 750rpm

Fig. 8. Relationships between EHL oil film thickness and seizure

と推測される。摩擦面では試料油全体の温度上昇とは別に極めて短い時間で著しく温度が上昇する（せん光温度上昇）が，吸着膜は著しい温度上昇が生じると，金属表面から脱離して有効性を失う[11]。このため，高いすべり速度の下ではせん光温度上昇が大きくなることで油性の影響が小さくなり，油膜形成に寄与する粘度の影響が大きくなったと考えられる。つまり，Fig. 8 (b) に示す750rpmにおけるデータは，油性の小さな鉱油を基油とした潤滑油において，潤滑性能に及ぼす粘度の影響が顕著に表れた結果であるといえる。また，鉱油を基油とした極圧剤を含む従来の工業用潤滑油である Oil O が高い潤滑性能を示したのは，粘度が大きいことで形成される油膜が厚いことに加え，せん光温度の上昇により摩擦面において表面層を形成する極圧剤の効果が大きく影響していると考えられる。次に，植物油を基油とした生分解性潤滑油である Oil A と粘度が同程度の鉱油を基油とした生分解性の低い Oil H を比較した場合，80rpm，750rpmのどちらにおいても Oil A の潤滑性能は Oil H よりも高かった。

これらのことから，すべり速度が増すと，油性よりも粘度が潤滑性能に及ぼす影響が大きくなり，同程度の粘度であれば油性に優れているほうが高い潤滑性能を示すことがわかった。

4. まとめ

最近開発された生分解性潤滑油および食品機械用潤滑油の基本的な潤滑性能を明らかにするために，15種類の試料油について四球試験を行った。その結果をまとめると以下のようになる。

(1) 生分解性潤滑油は油性に優れており，低いすべり速度の下では高い潤滑性能を示した。
(2) 生分解性潤滑油は同程度の粘度を有する鉱油を基油とした潤滑油よりも潤滑性能が優れていた。
(3) 純すべり摩擦条件下では粘度のみならず，基油の性状や添加剤が生分解性油の潤滑性能に大きな影響を及ぼす。

文　献

1）小西誠一・上田亨：潤滑油の基礎と応用，コロナ社，東京，1992，pp. 57-60
2）桜井俊男：新版　潤滑の物理化学，幸書房，東京，1978，pp. 236-238
3）JIS K2283：原油及び石油製品－動粘度試験方法及び粘度指数算出方法
4）黒崎富裕，八木和久：油脂化学入門，産業図書，東京，1995，p. 16
5）鈴木洋：界面と界面活性物質，産業図書，東京，1990，p. 190
6）竹内節：吸着の化学，産業図書，東京，1955，pp. 113-122
7）田中久一郎：摩擦のおはなし，日本規格協会，東京，1985，p. 197
8）B.J.Hamrock and D. Dowson：Proc. 5 th Leeds-Lyon Symp. on Tribology, 22, (1987).
9）柴田純一：潤滑油の基本特性，日石レビュー，39-2，pp. 46-56，(1997)
10）上野拓，ほか4名：歯車工学，共立出版，東京，1997，p. 186
11）潤滑ハンドブック：日本潤滑学会編，養賢堂，東京，1987，p. 109