

油中水滴形作動油の特性

Properties of Water-in-oil-emulsion Type Hydraulic Fluids

本 間 吉 治* 茂 庭 喜 弘*
Yoshiharu Honma Yoshihiro Moniwa

要 旨

内外各種の油中水滴形難燃性作動油について耐火性、粘度特性、防錆(せい)能力、乳化安定性および摩耗特性などを検討した。これらの結果からこの種の難燃性作動油の初期特性がかなり明らかになった。この検討範囲において特に注目すべきは耐火性、乳化安定性、耐摩耗性であるが、これらの特性を満足しているものはまだ少ないと考えられる。

1. 緒 言

熱間圧延設備、火力タービン、そのほか火気に近接した場所で使用される作動油として火災防止の見地から油-水系、あるいはリン酸エステル油系の難燃性作動油が注目されている。リン酸エステル油については別報⁽¹⁾したように火力タービンの電子油圧式ガバナ用作動油として検討を進めている。圧延機関係ではこれまで難燃性作動油を使う場合、たとえば水中に数%の鉱油を乳化剤により分散させた水中水滴形作動油を使用することが多い。このようなものでは低粘度油のため油もれ、潤滑性の面で問題があり、防錆上も難点がある。このため最近では油中水滴形作動油を使う例が多くなったようである。

油中水滴形作動油は低粘度鉱油の連続相に約40%の水を直径1~2 μ 程度の細かい水滴の形で分散させた乳化系である^{(2)~(4)}。この種の作動油はまだ市場に出現してから歴史が浅くその特性について不明の点が多く、管理の要点が必ずしも明かにされていない。したがって実用上問題になる各種の特性を検討中であるが、本稿では耐火性、防錆能力、粘度特性、乳化安定性、耐摩耗性につきこれまで得られた知見をまとめ大方の参考に供したいと思う。

2. 試料とその一般的性状

ここにとり上げた試料、およびその一般的性状を表1に示した。試料の項で内は国産品、外は輸入品の別を示し、A、Bなどのアルファベットはメーカーの別を示したものである。また試と記したのは試作を依頼したものである。現在の油中水滴形作動油(以下にはW/O油と記す)の潤滑性はまだ鉱油系作動油に及ばず、ポンプの寿命でみたとき鉱油系の1/2、1/3程度といわれている。これを改善するためにはまず水分の影響を明かにする必要がある。上記試作油はこの観点から試作してもらったものである。なおこの問題には水分のみならずいわゆる極圧添加剤を検討する必要がある。

市販油は一般に40%の水を含有している。比重は0.917~0.951、粘度は83~108 cSt (at 37.8°C)の範囲にある。この粘度は#200タービン油と同等かそれ以上の値であり、鉱油系作動油として一般的な#120タービン油よりかなり高粘度である。しかしW/O油は非ニュートン流体であり後述するように機械的なせん断が加わると約1/2に粘度が低下するので、実際に使用している条件では#120タービン油の粘度に相当することになる⁽⁵⁾。表1には基油の粘度を示したが、W/O油として高粘度の内B-3、低粘度の内B-1を除けば16~23 cSt (at 27.8°C)の範囲にある。粘度指数は140~146である。

中和価は銘柄によって0.2~2.5 mg KOH/gと異なっている。これは油中の乳化剤、その他の添加剤に起因していると思われる。

* 日立製作所日立研究所

表1 油中水滴形作動油の一般的性状

試 料	水分含有量 (% Vol)	外 観	比 重 (15/4°C)	粘度(cSt) at 37.8°C		粘 度 指 数	流動点 (°C)	中和価 (mg KOH/g)
				W/O油	基 油			
内 A-1	40	乳白色	0.926	84.4	17	—	-25	0.7
内 A-2	40	乳白色	0.929	88.2	17	—	-27.5	—
内 A-試	20	乳白色	0.900	55.2	21	—	-32.5	—
内 B-1	40	乳白色	0.951	56.7	11	—	-40	1.5
内 B-2	40	乳白色	0.940	116.5	23	—	-20	2.4
内 B-3	40	乳白色	0.917	148.0	30	—	-15	2.5
内 C-1	40	乳白色	0.927	87.9	19*	—	-20以下	2.1
内 C-試1	30	乳白色	—	85.1	—	—	-27.5	2.0
内 C-試2	20	乳白色	—	74.7	—	—	-27.5	1.9
内 D-1	40	乳白色	0.930	107.4	23*	145	-10	0.6
内 D-試1	30	乳白色	0.938	80.0	23	146	-17.5	0.4
内 D-試2	20	乳白色	0.933	67.3	25	142	-20	0.5
内 E	44	乳白色	0.938	107.3	27*	—	-12.5	0.7
外 A	40	乳灰白色	0.920	96.0	21*	140	-10以下	—
外 B	40	乳黄色	0.918	80.0	16	145	—	0.3
外 C	43	乳白色	0.948	108.0	21	—	-29	1.4
外 D	40	乳白色	0.927	83.0	20*	145	-9.5	0.2

(注) 基油粘度の項、*印は実測値、その他は本文の式4による計算値
W/O油……油中水滴形作動油

3. 耐 火 性

難燃性作動油として耐火性は最も重要な特性である。W/O油は水による耐火性を期待したもので、火気に近接、あるいは接触した場合、水分の蒸発による冷却効果で耐火性を発揮する。

この種の難燃性作動油の耐火性試験として、たとえばアメリカのBureau of Mines Fire Test, Under Writers Labo. Fire Test, MIL Spec. などが知られている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。試験法としては自然発火温度、パイプクリーン発火試験、ホットマニホールド発火試験、熔融金属発火試験、高圧スプレー発火試験などがおもにとり上げられている。ここでは紙数の関係から自然発火温度とホットマニホールド発火試験について述べる。

3.1 自然発火温度

ASTM D-2155に準拠した試験器を自製し大気圧下の空気中における自然発火温度を検討した。図1は各W/O油の自然発火温度一着火おくれ線図を示したものである。この場合の最低温度がいわゆる最低自然発火温度である。自然発火は酸化の激しい現象で、着火おくれは試料が発火容器に滴下されてから加熱による蒸発-酸化反応の進行-発火にいたるまでの時間である。発火する温度領域において絶対温度(T)と着火おくれ(τ)との関係は鉱油について一般に次式により表わされる⁽⁸⁾。

$$\ln \tau = E/RT + \text{Constant} \dots\dots\dots (1)$$

図1の(a)に示した試料はいずれもスムーズな曲線で上式に大体

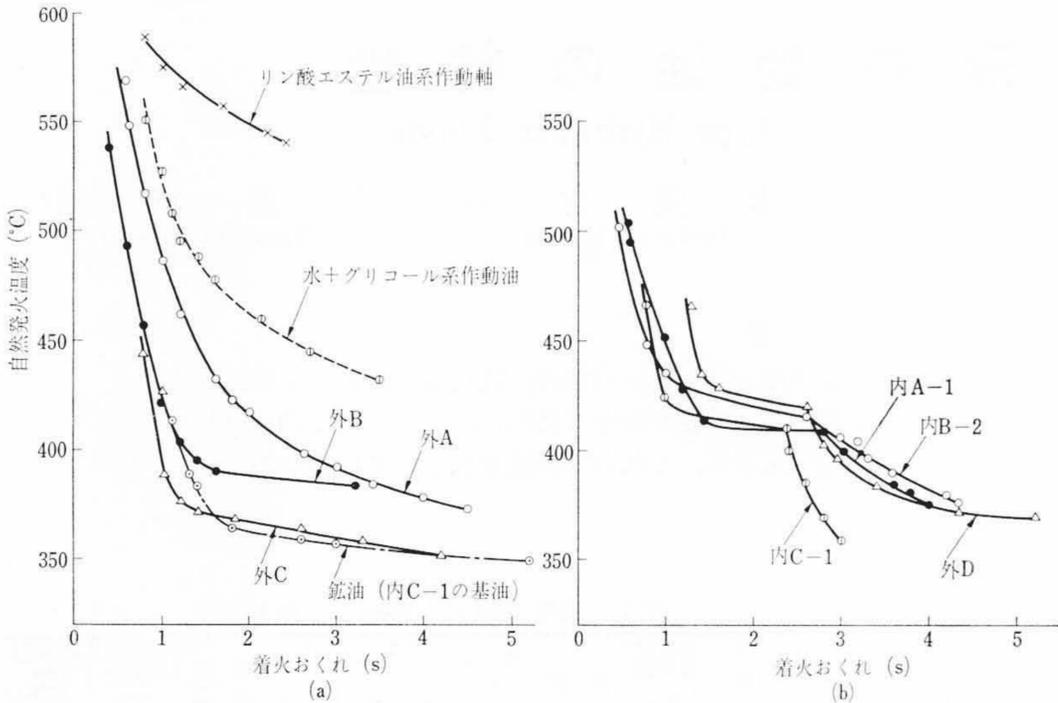


図1 自然発火温度と着火おくれとの関係

したがっている。しかし(b)の試料は着火おくれ2.4~2.8秒のところで屈曲した椅子形の曲線となっている。この違いが何によるかは目下明確でない。

それぞれの最低自然発火温度は曲線の形にかかわらず350~380°Cの範囲にある。これは純鋳油自身の発火温度に近似する。測定条件からみて滴下する油量が0.03 ml程度と少ないので油中の水分は短時間に蒸発し、鋳油のみと似た発火温度を示すものと思われる。最低発火温度における着火おくれは3~6秒でこれも純鋳油並である。

アメリカ Bureau of Mines における自然発火温度の評価基準は316°C以上となっている⁽⁶⁾。この基準からみるといずれのW/O油も合格する。したがって上記の基準は難燃性作動油については大分ゆるやかなものと思う。図1の(a)には比較のためリン酸エステル油、水+グリコール系に対する結果を併記したが、W/O油よりかなり高い発火温度を示している。

3.2 ホットマニホールド発火試験

MIL-F-7100に準拠し図2に示す試験装置を製作した。この試験は開放された系で加熱鋼管に油を流下し、発火の有無をみる。鋼管表面には油の留まる時間を長くする目的でシリコン油を塗布し、これを赤熱してSiO₂膜を形成させた。

W/O油の場合この方法による評価基準はないようであるが、リン酸エステル油の規格であるMIL-F-7100には鋼管温度704°Cで発火しないことが規定されている。この温度でW/O油は外Dを除いていずれの市販油も発火する。

次に鋼管の温度を変えて発火温度を検討した。すなわち720°C付近から5°C間隔に温度を下げていき各温度で試料油を10 ml/minの流速で流下し始めてから発火するまでの時間を測定した。図3はその結果を示したものである。先の自然発火温度と同様に温度が低くなると発火にいたる時間が長くなり、ある温度以下では発火が認められなくなる。この温度を最低発火温度とすると水分40%を含む通常の市販W/O油は640~710°Cの範囲にある。純鋳油の発火温度は440°Cで前者より200~270°C低い。また発火にいたる時間も純鋳油の場合はかなり短くなっている。

図3には水分30%、20%の試作W/O油の発火温度も示したが、水分40%の場合に比較して約100°C低い。図4には水分含有量と最低発火温度との関係を示した。両者間には直線的な関係がある。

ホットマニホールド発火試験はその設定条件から自然発火温度試験よりはかなり実際的な試験法の一つであるといえよう。しかし現実の発火条件は種々考えられるので他の試験方法も考えなければなら

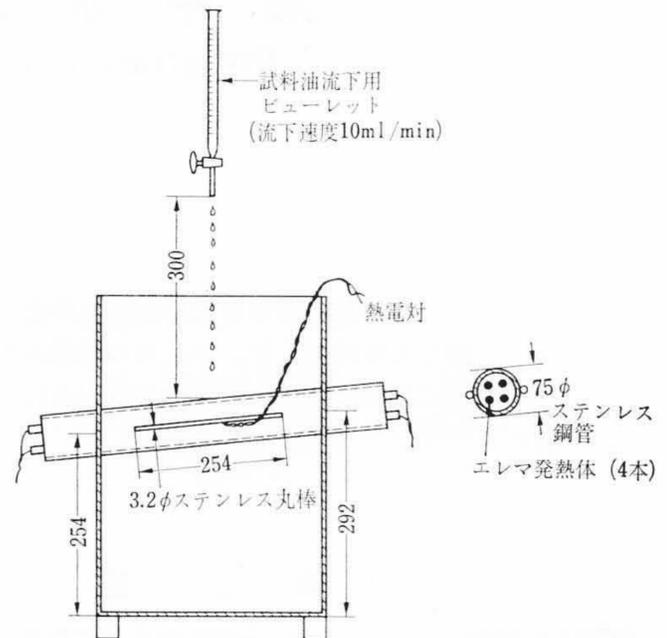


図2 ホットマニホールド発火試験装置

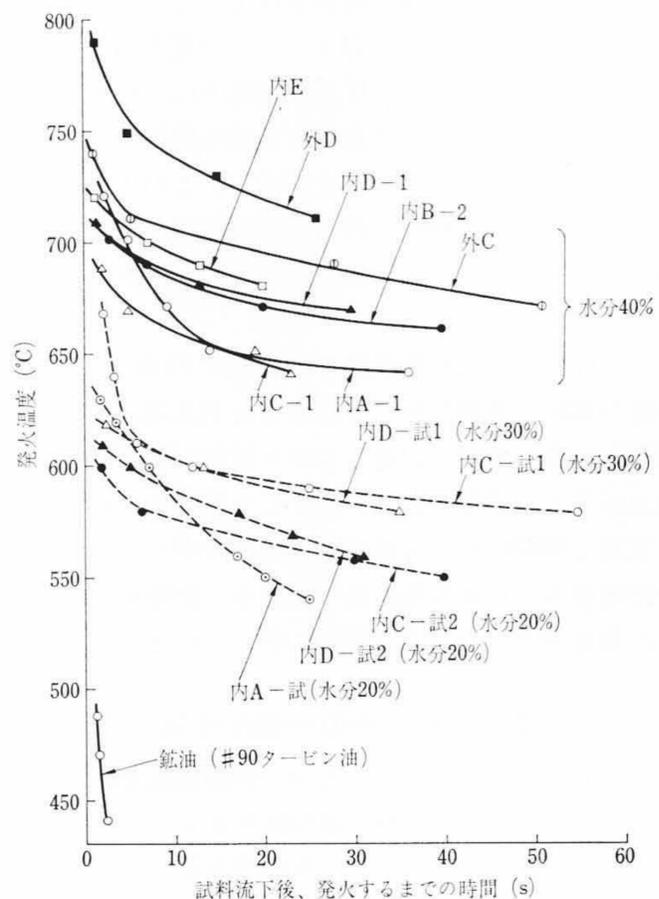


図3 ホットマニホールド発火試験における発火温度

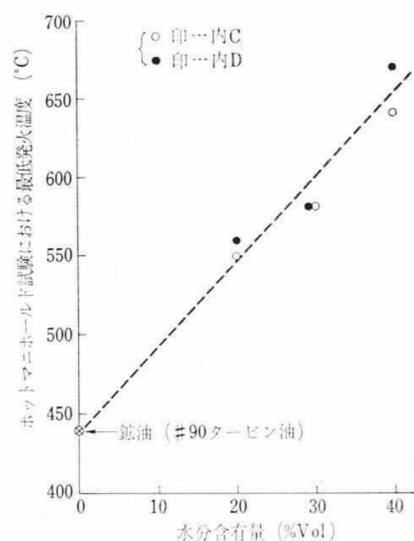


図4 ホットマニホールド発火試験における水分含有量と最低発火温度との関係

らないと思う。われわれもこのほかに高圧スプレー発火試験、パイプクリーナ発火試験、延焼性などについて実施している。

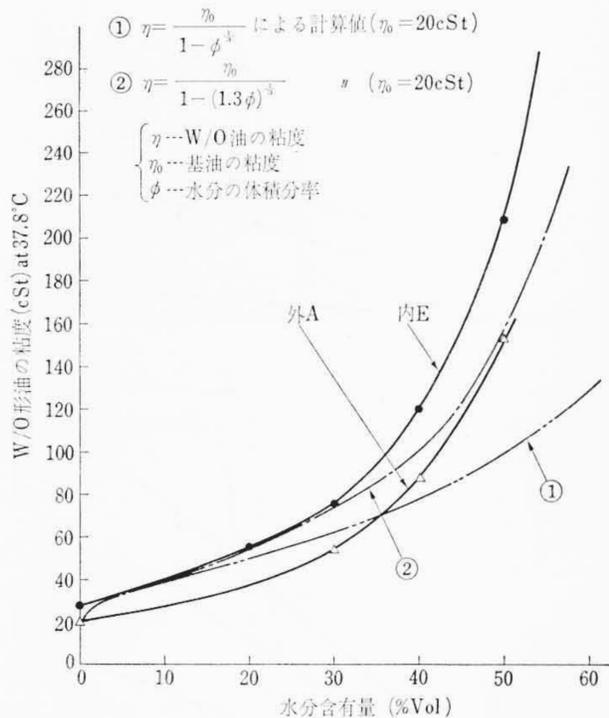


図5 水分含有量と W/O 形作動油の粘度との関係

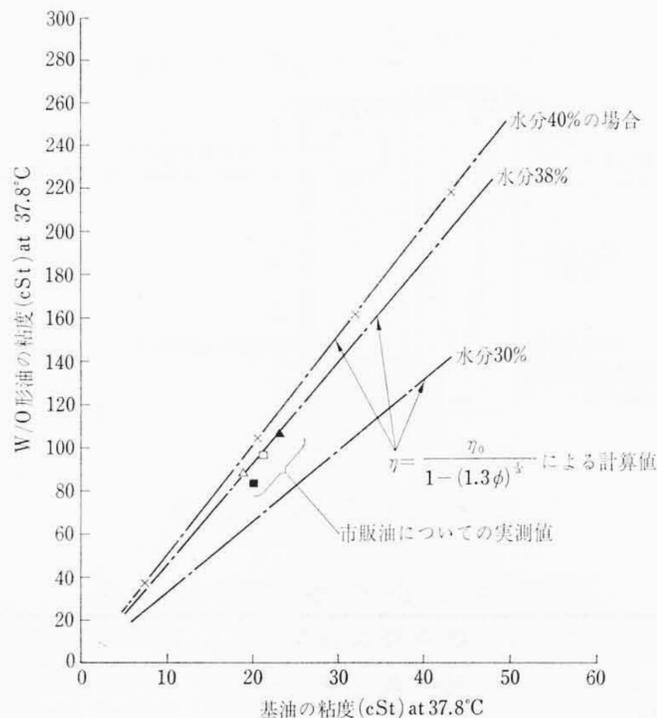


図6 基油粘度と W/O 形作動油の粘度との関係

4. 粘 度 特 性

W/O 油の粘度は基油の粘度，水分含有量，水粒子の分散状態，乳化剤の種類によって決定され，このうちで基油粘度，水分含有量が支配的であるといわれている⁽³⁾。

4.1 水分含有量と W/O 油の粘度

図5に市販油2種の水分含有量と粘度との関係を示した。水分含有量の増加に伴い W/O 油の粘度は増大している。W/O 油の粘度と基油粘度，水分含有量との関係については，たとえば次の Hatschek の式が W/O 油には比較的合うといわれている。

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 - \phi^3} \dots\dots\dots (2)$$

ここに η: W/O油の粘度 (cp)
η₀: 基油の粘度 (cp)
φ: 水分の体積分率

この式による計算値を図5の①に併記したが，市販油の粘度線図とは大分異なっている。このほかに(2)式の改良式としては次の式が知られている⁽⁹⁾。

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 - (h\phi)^3} \dots\dots\dots (3)$$

ここに h: Constant (多くの実験から h=1.3 が妥当であるとしている)

この式による計算値は図5の②に示すようになり，(2)式の場合より実測結果に近似する。

4.2 基油粘度と W/O 油の粘度

前出式(3)において水分含有量を一定とした場合，基油粘度との関係は次式により表わされる。

$$\eta = \alpha \eta_0 \dots\dots\dots (4)$$

ここに α=1/1-(1.3φ)³ で水分40%では α=5.13

すなわち W/O 油の粘度は基油粘度に比例し，水分40%における W/O 油の粘度は基油粘度の約5倍となる。図6には式(4)による計算値，および市販 W/O 油より基油を分離し実測した結果を示した。実測値は(4)式による計算値より若干下まわり，水分含有量38%に相当している。また水分40%，h=1.3として計算したが，図6からみると h>1.3ともみられる。しかし水分の測定精度，あるいは h の値をさらに検討しなければ両者の関係ははっきりしない。ここでは(4)式をそのまま利用し各試料の基油粘度を算出し，表1に示しておいたが，大部分は16~23 cSt (at 37.8°C) の範囲にある

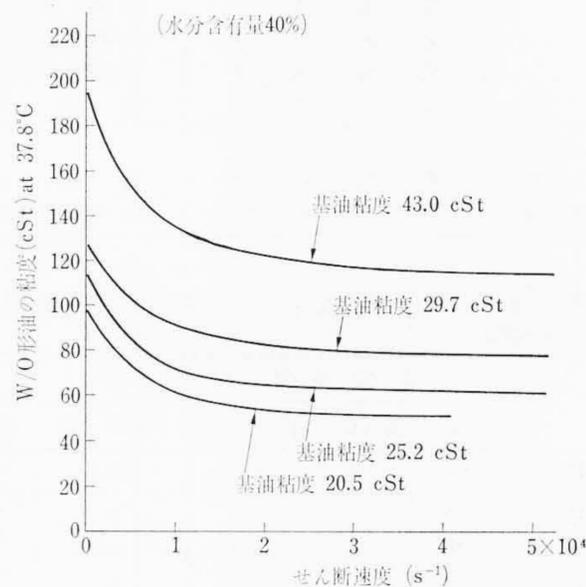


図7 せん断速度と粘度との関係⁽⁵⁾

ことがわかる。

4.3 せん断による粘度変化

図7は L. E. Coleman 氏ら⁽⁵⁾の測定結果を示したもので，せん断速度の増加に伴い粘度は低下し，1~2×10⁴ s⁻¹ 以上ではほぼ一定値を示している。基油粘度20.5 cSt の W/O 油に着目すると低せん断速度において W/O 油の粘度は100 cSt であるが，高せん断速度下では50 cSt 付近に低下している。

前記表1に示した粘度は通常の粘度計によるものでせん断速度0.5~10 s⁻¹ 程度の静的系における値であるが，実際の運転系では約1/2に低下し，多分 #120 タービン油程度の粘度に相当していると思われる。

5. 防 錆 能 力

W/O 油は約40%の水分を含んでいるが，連続相は鉱油であり防錆剤の添加によって鉱油系作動油と同等の防錆能力を有しているといわれる⁽²⁾。しかし作動油と直接接触しない油タンク上部などの気相部分では油中の水分が蒸発一凝縮し錆(さび)を発生するおそれが多分にある。

そこで JIS K2515 に規定されたさび止め能力試験器を用い，液中には通常の丸鋼試片を浸漬し，さらに気中には図8に示す位置に油を塗布しない研摩鋼試片をつり下げて60°Cに24時間加熱して，液中，気中における防錆能力を検討した。表2はその結果である。

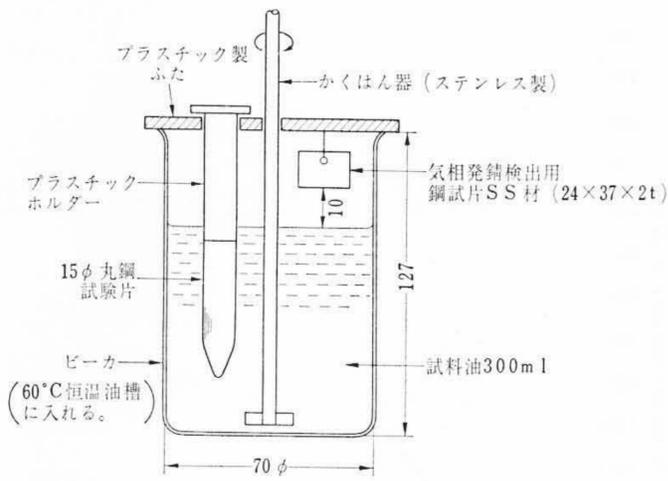


図8 さび止め能力試験器

表2 さび止め能力試験結果

試料	液中浸漬試験片*	気中つり下げ試験片**
内 A-1	発 錆 せ ず	約 40% の表面に発錆
内 B-2	発 錆 せ ず	約 30% の表面に発錆
内 C-1	発 錆 せ ず	約 10% の表面に発錆
内 D-1	発 錆 せ ず	約 20% の表面に発錆
内 E	発 錆 せ ず	約 20% の表面に発錆
外 A	発 錆 せ ず	約 60% の表面に発錆
外 B	発 錆 せ ず	約 40% の表面に発錆
外 C	発 錆 せ ず	約 30% の表面に発錆
外 D	発 錆 せ ず	発 錆 せ ず
鉱油(#90タービン油) 単 味 10% の水を添加	発 錆 せ ず 発 錆 せ ず	発 錆 せ ず 約 40% の表面に発錆

表3 油メーカーで行なっている乳化安定性試験

(1) 各温度静置試験

測定者	試料	測定条件		結果	
		温度(°C)	時間	油分離(%)	水分離(%)
外 B	外 B	常 温	48h	2以下	—
内 E	内 E	常 温	33日	1	1.5
	外 D			0.5	0
	外 C			4	Tr
外 A	外 A	常 温	6ヶ月	—	Tr
内 D	内 D-1	80	300h	2以下	0
外 C	外 C	85	72h	3	0
内 C	内 C-試1,2	100	3h	0	Tr

(2) 温度サイクル試験

測定者	試料	測定条件		結果	
		温度×時間	Hz	油分離(%)	水分離(%)
内 A	内 A-2 内 A-試	100°C×8h)	7	2	0
		常温×16h)		2	0
外 C	外 C	-17.8°C×18h) 239°C×6h)	4	1	0.05
内 E	内 E 外 D 外 C	-10°C×23h) 65°C×1h)	33	0.5	10
				0.5	2
				1	34

(3) 遠心分離試験

測定者	試料	測定条件		結果	
		回転数(rpm)	時間(h)	油分離(%)	水分離(%)
内 C	内 C-試1,2	1,700	1	1	Tr
内 D	内 D-1	1,800	1	0	0
内 A	内 A-試	20,000	1	—	0

液中に浸漬した試片はいずれの試料も発錆せず、防錆剤の効果が認められる。しかし気中につり下げた試片は外Dを除いていずれも発錆しており、ほとんどが気相防錆能を有していない。他方作動油としてかなり多用される防錆剤入りタービン油も水分が混入すると気相における防錆は満足されない。鉱油系作動油を使用する場合、一

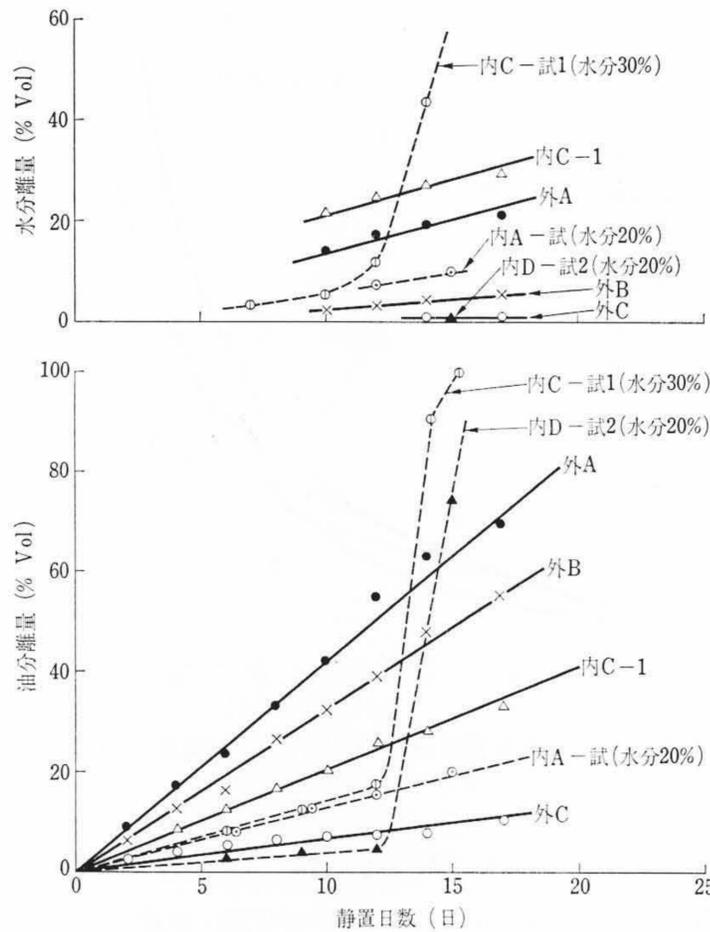


図9 70°C 静置試験における油分、水分の分離傾向

般には内面塗装を行なってこれに対処している。

W/O 油も鉱油系と同様な内面塗装が可能であれば一応問題ないと思われるが、乳化剤がはいっているので使用する塗料は制約を受ける。したがって W/O 油を使用する場合、適合しうる塗料を選択するか、あるいは外Dのように気相防錆能にすぐれる油が望まれる。

6. 乳化安定性

W/O 油の乳化安定性は長期間の運転、あるいは貯蔵を考えると重要な性質である。運転中に油-水 2 相に分離したり、相の反転を生ずると分離した水によるポンプの潤滑不良、系統の発錆などが懸念される⁽³⁾。W/O 油の乳化安定性に関して規定された方法はなく、油メーカーでは表3に示すようにそれぞれ独自の方法で検討しているのが実情のようであり、大別すると次のようである。

(1) 常温、または 80~100°C の一定温度に W/O 油を静置したときの油-水の分離傾向

(2) 温度サイクルを与えたときの分離傾向

(3) 遠心力を与えたときの分離傾向

しかし個々に測定条件が異なるので銘柄の異なる油を比較することはできない。そこで以下には常用温度より若干高い 70°C と常温における静置試験、遠心分離試験を試みた。

図9に70°C 静置試験における油分、水分の分離傾向を示した。実線は水分40%を含むものに関する結果で、100 ml 目盛りつきシリンドラに100 ml の試料をとり、これを70°C 恒温槽に静置したときの分離傾向である。油の分離は静置時間に対しほぼ直線的に増加している。また銘柄によってかなり傾向が異なる。点線は水分20, 30%を含む試作油の結果であるが、内A-試を除いて他のものは9~10日静置後に急激な油分離を起こしている。特に内D-試1は油分離に伴って水の分離も激しく、15日後には完全に油と水に分離している。

次に静置試験における油分離傾向について、分散粒子の沈降速度に関する Stokes の式との関連性を検討すると次のようである。

$$v = \frac{2r^2(ds-dl)g}{9\eta} \dots\dots\dots (5)$$

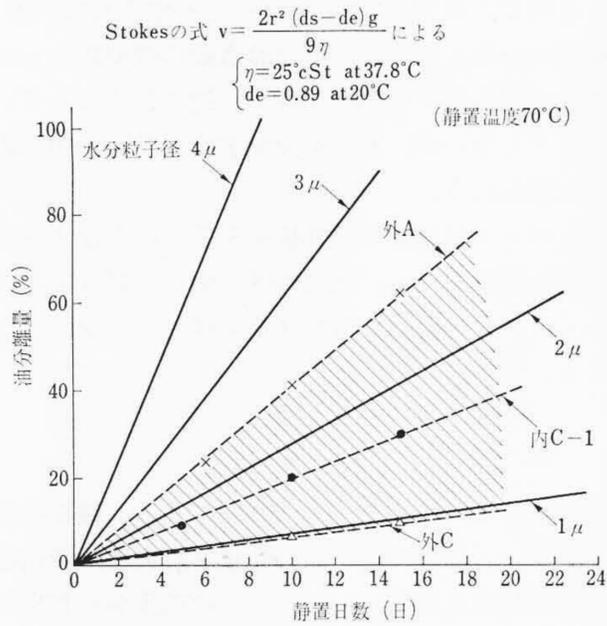


図 10 Stokes の式により計算した油分離傾向

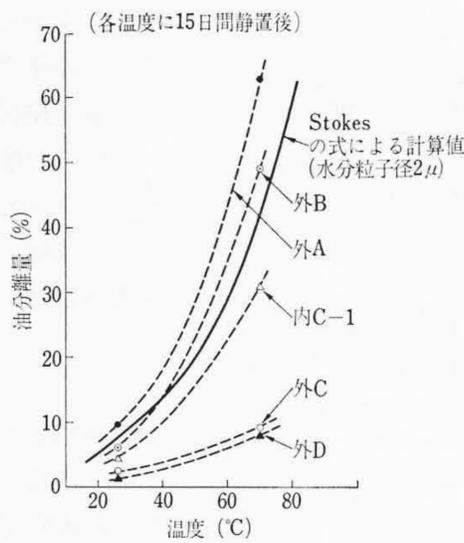


図 11 静置温度と油分離量との関係

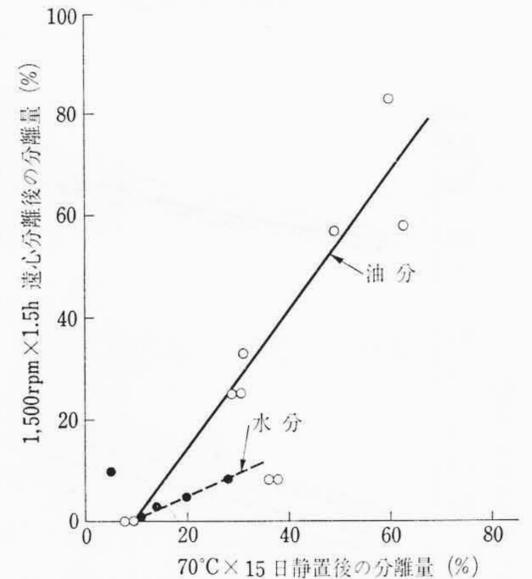


図 12 70°C 静置試験と遠心分離試験との関係

ここに W/O 油の場合、

- v : 水粒子の沈降速度 (cm/s)
- r : 水粒子の半径 (cm)
- ds : 水の密度 (g/cm³)
- dl : 分散媒たる鉱油の密度 (g/cm³)
- η : 鉱油の粘度 (g/cm³・s)
- g : 重力の加速度

この Stokes の式を用いて、まず水分粒子大きさ 1~6 μ 、温度 20~80°C における水分粒子の沈降速度を計算した。ただし $\eta=25$ cSt (at 37.8°C), $dl=0.89$ (at 20°C) とし、乳化剤による interaction はないと仮定した。沈降速度を内径 26 mm ϕ の 100 ml シリンダにおける油分離量と静置時間との関係に換算すると図 10 の実線のようなのである。先の実測結果を図中に点線で示した。Stokes の式で説明できるとは限らないが、水分の粒子大きさが支配的であるとすれば油分離の多いものは水分粒子が 2.4 μ 付近、油分離の少ないものは 1 μ 付近と推定される。

図 11 は静置温度と油分離量との関係を示したものである。測定したのは 26°C と 70°C の 2 点であるが、併記した Stokes の式による計算値からみて傾向的には点線のようになると思われる。次に 1,500 rpm \times 1.5 時間の遠心分離による油-水の分離傾向を検討した。この場合沈殿価測定用の目盛りつき試験管を用い、相対遠心力 f は 680 である。図 12 は 70°C 静置試験と遠心分離試験における分離傾向の関係を示したものである。油分、水分ともに両者間には直線関係が認められる。

実際に運転する系では攪拌(かくはん)が行なわれるので相の分離は起こりにくい条件にあり、簡単には分離しないと思われるが、休止の状態、あるいは貯蔵を考えると乳化安定性にすぐれたものが必要である。

7. 摩 耗 特 性

W/O 油の潤滑性は鉱油系作動油に及ばず、ポンプの寿命でみたとき鉱油系の 1/2~1/3 程度といわれている。現在市販されている製品の潤滑性がこのように悪いのか、また水分を減少することによって改善しうるのかについて、ここでは 4 球試験機により検討した。この種の机上試験の場合、作動油であればポンプしゅう動部の摩耗との関連性が問題になる。Shell 4 球試験における 1,800 rpm, 55°C, 全荷重 7.5 kg, 1 時間の摩耗痕(こん)大きさとポンプの摩耗とはある程度の相関性があるといわれている⁽¹⁰⁾。そこでまず高速 4 球試験機による実験を行なった。

図 13 は各試料の摩耗-時間特性を示したものである。純鉱油では

試験条件 { 全荷重 50.2kg, 回転数 1,200rpm, すべり速度 460mm/s
試験開始時 油温 50°C

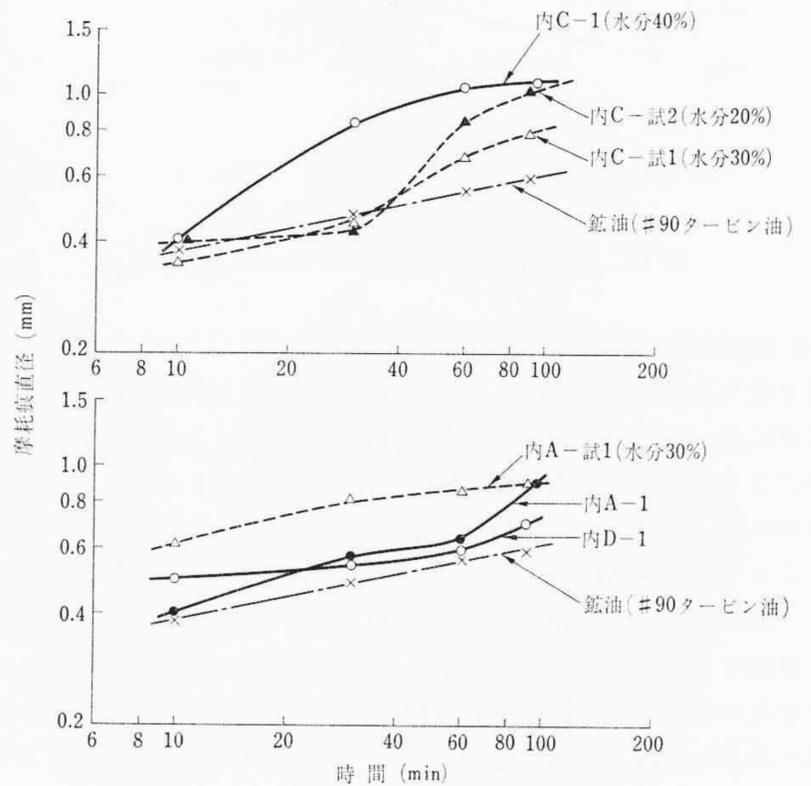


図 13 高速 4 球試験機による摩耗-時間特性

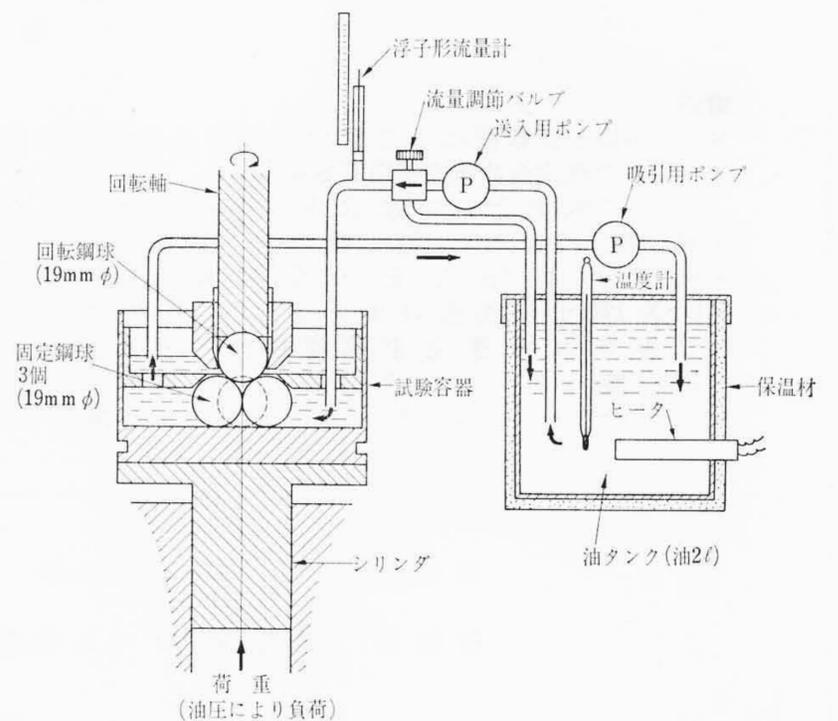


図 14 曾田 4 球試験機の摩擦試験部および油循環機構

試験条件 全荷重42.6kg, 回転数800rpm, すべり速度460mm/s
油循環方式, 油温50°C

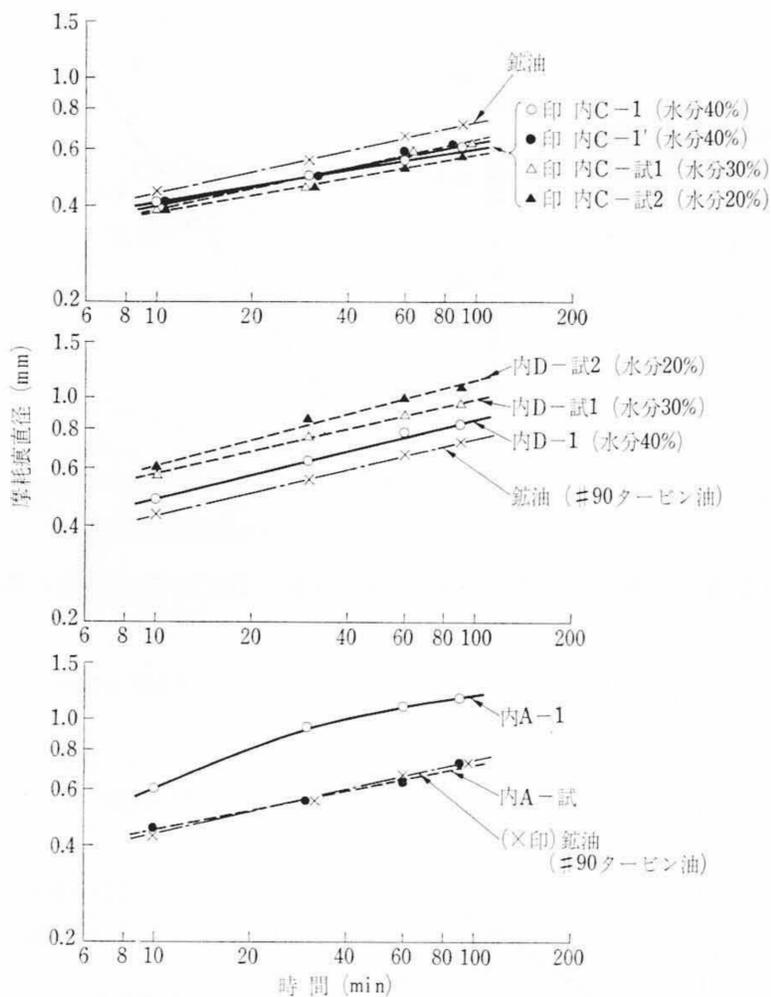


図15 曾田4球試験機による摩耗-時間特性

log-log 線図において直線で表わされるが, W/O 油はいずれも直線とならない。この原因として試験荷重が高すぎ異常摩耗を生ずる領域にあったというよりは, 試料油量が約 12 ml と少ないので摩擦熱による温度上昇から摩擦面付近では組成が変化し, 水分粒子が断続的に摩擦面にはいり込むのでこのような線図になると思われる。

そこで次に図14に示すような油循環機構を備えた4球試験機により検討した。1l/minで試料油を循環し, 均一組成の油を摩擦面に供給することができる。油循環式による摩耗-時間特性は図15に示すとおりである。高速4球試験のような複雑な曲線は示さず, 摩耗の大きい内A-1, 内Eを除いていずれも直線で表わされる。また

純鉱油と比較したとき内Cの各W/O油などはむしろすぐれている。これは油中の耐摩耗剤の効果と思われる。なお水分の減少によって摩耗が少なくなったのは内Aのみで他は同等か, 逆に悪くなっている。この原因ははっきりしないが, 水分を減少するよりも油中の耐摩耗剤の検討が重要と思われる。

これらの摩耗特性とポンプ試験との関連性をみるため各油メーカーで行なっている結果を調査したが, 試験条件が個々に異なっているのでは握できなかった。今後機会を得て同一条件でのポンプ試験を実施したいと考える。

8. 結 言

W/O 油は鉱油中に約40%の水分を含む作動油であり, 純鉱油系と同一に扱えない点が多い。本稿では一般的性状, 耐火性, 防錆能力, 乳化安定性および摩耗性を検討した。これらの結果から初期特性についてはいかにあるべきか, 一応の見解をもつことができた。しかしポンプに使用した状態を考えた場合, 酸化劣化特性, バクテリアの影響, 実働状態における諸問題を検討しなければならない。これらについては油製造者, あるいはポンプ製造者の研究に期待すべき点も多く, 今後の検討が望まれている。

終わりに本研究に対し多大のご便宜をいただいたわが国石油各社の関係者に厚くお礼申し上げます。またご指導, ご激励いただいた日立製作所日立工場原口設計部長, 日立製作所日立研究所第4部長中牟田昌治博士, その他関係各位に深甚なる謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) 安元: 油圧技術 8 No.2 60 (1969)
- (2) R. T. Holmes: Machine Design 32 180 (1960)
- (3) 佐藤: 石油学会誌 10 804 (1967)
- (4) C. E. Francis, R. T. Holmes: Lub. Eng., 14 385 (1958)
- (5) L. E. Coleman: J. Inst. Pet., 50 334 (1964)
- (6) C. L. Early, R. E. Hatton: ASTM STP 406 (Fire-Resistance Hydraulic Fluids) 105 (1966)
- (7) S. P. Polack: Iron & Steel Eng., 41 105 (1964)
- (8) M. G. Zabetakis, et al.: Research of the Flammability Characteristics of Aircraft Hydraulic Fluids, WADC Tech. Rep. 57-151 (1957)
- (9) P. Becher: Principle of Emulsion Technology (1955) Reinhold Pub. Corp.
- (10) W. M. Shrey: Lub. Eng. 15 64 (1959)

Vol. 51

日立評論

No. 9

目 次

■ 論 文

- ・制御用電子計算機による電力系統事故後自動操作
- ・中国電力株式会社新成羽川P S納
- ・ポンプ水車ならびに水車専用機の運転結果
- ・配電線の絶縁と保護強調
- ・塵埃の同定とその化学成分の分析
- ・DEX-1電子交換機のオンラインプログラム
- ・改善された複光束真空遠赤外分光光度計
- ・装飾メッキ品の耐食性
- ・大形オープンショーカーの諸特性

- ・架空送電線の不均一着雪時の張力決定法
- ・エポキシ樹脂含浸紙絶縁物の耐電圧特性
- 絶縁材料強度特集
- ・ピーニングによる鋳鋼品の補修, 肉盛溶接部の残留応力緩和
- ・原子炉圧力容器ノズル端溶接部の低サイクル疲れ強さ
- ・タービン発電機エンドブラケットの曲げ剛性
- ・化学機器用多管式固定管板熱交換器の強度
- ・金属材料の延性に及ぼす応力状態の影響
- ・実働荷重を受ける金属材料の疲れ強さ

発行所 日立評論社

東京都千代田区丸の内1丁目4番地
郵便番号 100

取次店 株式会社 オーム社書店

東京都千代田区神田錦町3丁目1番地
郵便番号 101
振替口座 東京20018番