

ボイラ給水ポンプに用いる流体継手用作用油の性能

Performance of Working Fluids for Adjustable-Speed Fluid Coupling Used for Boiler Feed Water Pump

火力発電所でのボイラ給水ポンプなどの省電力運転に有用な増速歯車内蔵形可変速流体継手に使用する作用油には、歯車に対する十分な潤滑性、高速運転による温度上昇に対応できる優れた酸化安定性、消泡性が要求される。そこで国内油メーカー5社と共同のもとに専用作動油の開発を進め、一般性状、組成の検討、加速劣化試験、1年間にわたる実機による評価を行なった。その結果、専用作動油の優れた消泡性を確認し、酸化安定度試験でのライフが運転時間に対し指数関数的に低下することをもとに実用寿命を予測し、いずれの作用油も目標とする2万時間の運転に耐えるとの見通しを得た。

本間吉治* Yoshiharu Homma

高村友恵* Tomoe Takamura

田中賢作** Kensaku Tanaka

1 緒言

近年、省資源、省エネルギーの気運から、従来、ダンパや弁による制御であった風水力機械に対して、流体継手を用いた回転数制御方式が評価され、普及しつつある。

その一環として火力発電所で多量の電力を消費するボイラ給水ポンプの省電力運転のために、この流体継手が注目されている¹⁾。ボイラ給水ポンプの場合、小形でしかも高性能であることが要求され、このニーズに応じるため増速歯車を内蔵したコンパクトな流体継手の開発を進めた結果、十分な信頼性、制御性と期待どおりの省エネルギーが可能な流体継手を完成させることができた²⁾。

ところでこの流体継手は、歯車内蔵に加えて、高速で運転されることから、油温が最高90℃程度に上昇することが予想され、これに使用する作用油には、優れた潤滑性と酸化安定性が要求され、特別仕様の作用油が必要になった。そこで国内油メーカーの協力を得て、新たな専用作動油を開発し、机上的な酸化安定性、潤滑性、その他の性状、加速劣化試験、更には実機による評価を行なった。

その結果、目標とする2万時間の運転に耐えられるとの見通しを得たので、本稿ではこれらの経緯を取まとめて報告する。

2 流体継手の構造と動作

流体継手の構造を図1に示す。この流体継手は、増速歯車と可変速流体継手を一つのケース内に組み込み、電動機の回転(1,500rpm)を歯車で被動機とほぼ同じ回転数(5,000rpm)まで増速し、流体継手を駆動する。このとき電動機の出力は、2個の羽根車で構成された流体継手内で流体の運動エネルギーに変換され、被動機のボイラ給水ポンプに伝達される。

作用油の流れとして、まず油圧ポンプにより油タンクから汲み上げられた作用油は、流体継手のある作動室に供給される。すくい管の位置制御で室内の油面を変化することにより、被動機の回転数を無段階に変えることができる。このとき作用油は、羽根車による激しい攪拌を受け最高90℃程度に加熱される。作動室内の油は、すくい管によってすくわれ、油冷却器で50℃程度に冷却された後、再び作動室内に供給される。その際一部の油は、そのまま油タンクに戻る。

一方、増速歯車、軸受の潤滑は、別系統で供給される同じ種類の油で行なわれ、この際の供給油温は約45℃である。

なお歯車の過酷度は、一般にPVT値で表わされ、流体継手に内蔵しているピニオンの回転数を1,500rpm、ギヤの回転数を5,000rpmとしたとき、

ヘルツ応力、 $P: 70\text{kg/mm}^2$

相対滑り速度、 $V: 12,500\text{mm/s}$

かみ合い長さ、 $T: 13.9\text{mm}$

となり、PVT値は、 $12.2 \times 10^6 (\text{kg/mm}^2 \cdot \text{mm/s} \cdot \text{mm})$ となる。

通常のタービン油で潤滑できるPVT値は 8×10^6 程度が上限といわれており、増速歯車の潤滑条件はかなり過酷といえる。

3 作用油に対する要求性能

流体継手の構造、運動条件などから、作用油の性状として、
(1) 最高油温が90℃程度になるので、優れた酸化安定性をも

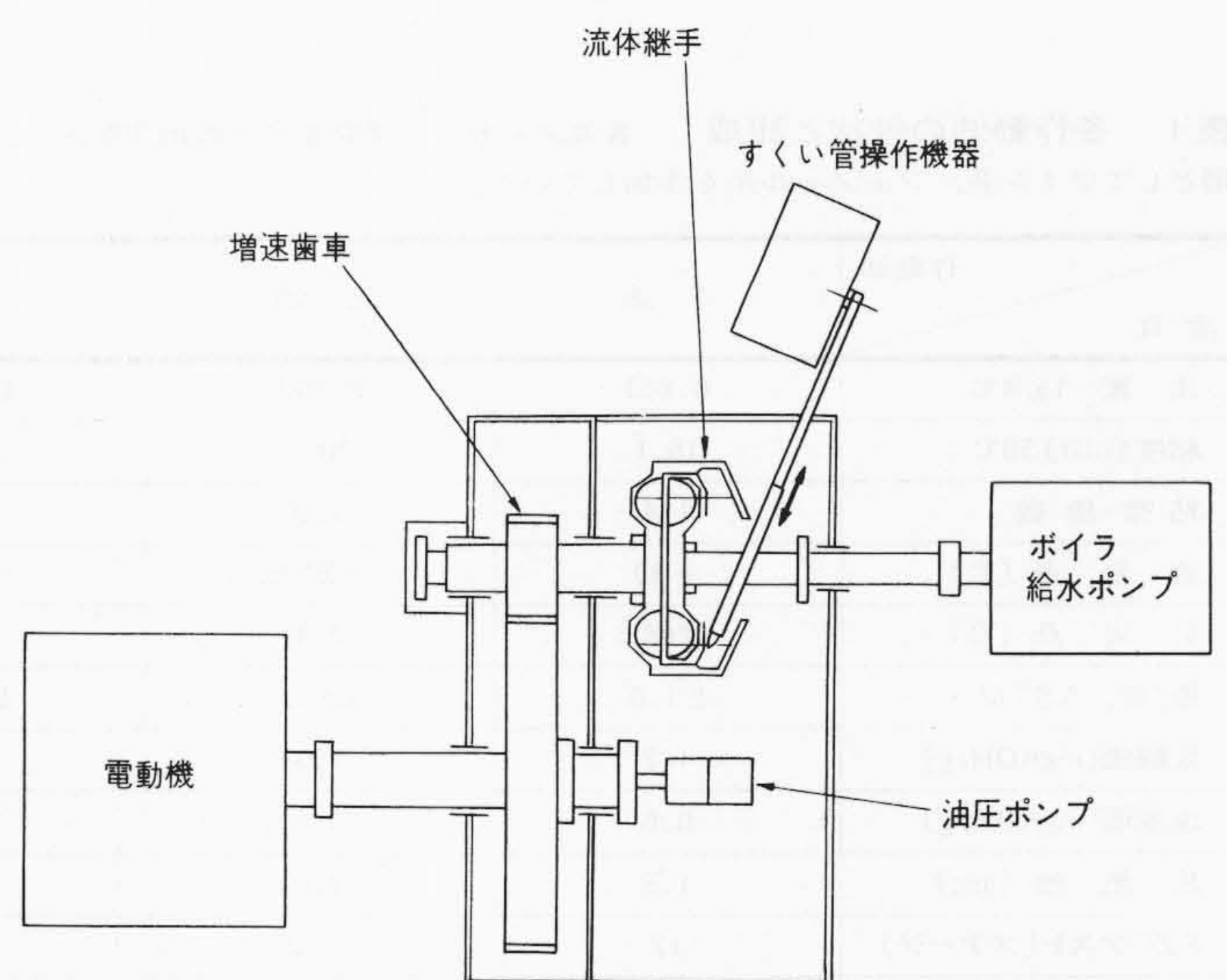


図1 流体継手の構造 ボイラ給水ポンプに用いる流体継手は、電動機とポンプの間に設置される。この継手は、増速歯車と流体継手が一つのケース内にセットされている。

* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所土浦工場

っていること。通常の火力タービンでの運転油温は50～60℃である。

(2) 作動室内では、激しい攪拌を受け、気泡を巻き込むので、消泡性、放気性に優れていること。

(3) 増速歯車の潤滑条件を十分カバーできる潤滑性をもっていること。

などが要求されることから、後出の表1中に掲げた目標性能を設定した。

この中で放気性は、DIN51381に規定された方法を採用した。すなわち、試料油180mlを試料容器に採り、50℃に加熱し、細管から150mmHgの加圧空気を7分間激しく吹き込み泡立てた後、比重てんびんを用いて油中気泡量を測定し、気泡量0.2 vol%到達時間を放気性として表わす。

通常のタービン油の放気性は5～6分であり、流体継手用作動油には、これよりも厳しい3分以下を目標とした。

潤滑性については、現在西欧で広く適用されているDIN 51334に規定されたギヤテストを採用した。このギヤテストは、回転数4,350rpm、油温90℃のもとに歯車に荷重を漸増していったときスコアリング(引っかき摩耗)を発生する荷重ステージで、油の耐荷重性を評価する。なおFZG9ステージでのPVT値は約20×10⁶であり、対象とする増速歯車のPVT値(12.2×10⁶)を十分に上回っている。

酸化安定性については、最高油温90℃の条件下で、火力発電所での他の一般の機器に対する油交換期間といわれている2万時間以上の運転に耐える必要がある。ところで火力タービンの軸受潤滑に用いる通常のタービン油は、高度精製のパラフィン系鉱油にフェノール系酸化防止剤と防錆剤、消泡剤を添加した単純な組成である。火力タービンの場合、運転油温は50～60℃程度であり、この組成油で長時間にわたり使用することができる。

しかし流体継手では、最高油温が90℃になることに加えて、極圧性が要求されるので、通常のタービン油をそのまま使用することはできない。特にタービン油に添加されている酸化防止剤のDBPC(ジ・tert-ブチルパラクレゾール)は、80℃以上になるとその一部が昇華し、長寿命が期待できない³⁾。

更に極圧剤は、一般に高面圧の摺動部で摩擦熱により金属と反応して極圧膜を形成できる比較的活性な化合物が使用される。したがって、極圧剤を単にタービン油に添加しただけでは、酸化安定性が著しく低下する。

このように厳しい酸化安定性と潤滑性を両立させた作動油を新たに開発するため、国内油メーカーと共同で検討を進めた。

4 専用作動油の性状と組成

4.1 一般性状

各油メーカーから提供された作動油の一般性状を、表1に示す。ここで銘柄のA、B、Cは油メーカーの別を示している。これら作動油は、いずれも粘度-温度特性を表わす粘度指数が高く、流動点が低く、かつ放気性も2分以下で優れており、潤滑性を表わすFZGテストでも目標の9ステージを満足している。なお銘柄によって全酸価、塩基価がかなり異なっているが、これは油中の添加剤の種類と量がそれぞれ異なっているためと思われる。特に塩基価の高いC油には、塩基性の清浄分散剤が高濃度に配分されている。

4.2 組 成

作動油の性能評価では、組成との関連を検討することが不可欠である。そこで出来得る範囲の組成分析を試みた。分析結果を前出の表1の下段に示した。

シリカゲルのクロマト分析で得られる芳香族成分は、一般に酸化防止剤の添加効果を向上させるための精製度と対応している。D油はこの芳香族成分が非常に少なく、この点を強調した油といえる。これに対しA油、C油は芳香族成分が多く、これらは色度も大きい傾向にある。

次に赤外線吸収スペクトル分析を行なった。詳細については省略するが、いずれの作動油もアルキル基、CH₃(CH₂)_{n=5}に帰属される720cm⁻¹の吸収が非常に強いことから、典型的なパラフィン系鉱油であり、3,640cm⁻¹にOH基の吸収が認められるので、DBPCで代表されるフェノール系酸化防止剤が存在し、このほか1,735cm⁻¹には粘度指数向上剤として添加しているポリメタクリレート、1,010cm⁻¹には極圧剤、酸化防止剤として働くZn-DTP(ジアルキルジチオリン酸亜鉛)に基づく吸

表1 各作動油の性状と組成 各油メーカーに開発させた専用作動油は、高粘度指数、低流動点で、しかも放気性、潤滑性に優れている。また、酸化防止剤としてアミン系、フェノール系を添加している。

作動油		A 油	B 油	C 油	D 油	E 油	目 標 値
項 目							
比 重	15/4℃	0.863	0.862	0.867	0.864	0.861	>0.86
粘度(cSt)	50℃	16.1	20.8	17.4	22.8	23.4	16~29
粘 度 指 数		114	110	111	110	105	>100
流 動 点(℃)		-30	-27.5	-32.5	-32.5	-30.0	<-25
引 火 点(℃)		208	214	212	232	212	>175
色 度, ASTM		L1.0	L0.5	L1.5	L0.5	L0.5	—
全酸価(mgKOH/g)		1.2	1.3	1.5	1.7	1.0	—
塩基価(mgKOH/g)		0.6	0.2	1.3	0.4	0.1	—
放 気 性(min)		1.8	2.0	1.7	2.1	1.1	<3
FZGテスト(ステージ)		12	>12	10	9	9	>9
RBOTライフ(min)		550	270	380	509	310	—
組 成	油中芳香族成分(wt%)	14.1	6.8	15.9	0.9	9.3	—
	酸化防止剤	アミン系	フェノール系	フェノール系	アミン系	フェノール系	—
	極 圧 剤	Zn-DTP, TCP	Zn-DTP	Zn-DTP	Zn-DTP, TCP	Zn-DTP, TCP	—
	粘度指数向上剤	ポリメタクリレート系	左 同	左 同	左 同	左 同	—
	そ の 他	消泡剤, 防錆剤	左 同	左 同	左 同	左 同	—

収, 970cm^{-1} にはリン系の極圧剤であるTCP(トリクレジルホスフェート)による吸収が認められた。

4.3 酸化安定性

各作用油の酸化安定性を評価するために、タービン油、コンプレッサ油などに多用されているロータリーポンプ法を採用した。この試験は、実稼働タービン油の残余寿命を予想する方法として考案され、ASTM(アメリカ材料試験協会)D1270に規定されている。

油50g、水5g及び触媒としての銅線をガラス容器にとり、これを高圧ポンプに収め、自記圧力計のついた外蓋を取り付け、 6.3kg/cm^2 の酸素を圧入した後、 150°C に保った油槽中で回転しながら加熱する。油の酸化劣化により酸素が消費され、ある時点で急激な圧力降下を示す。このときの時間をRBOT(Rotary Bomb Oxidation Test)ライフとして、その長短により酸化安定性を評価する。

各作用油のRBOTライフを表1に示した。酸化防止剤としてフェノール系とアミン系を用いた作用油に違いがみられ、アミン系酸化防止剤添加油のほうがかなり優れたRBOTライフを示している。なお通常のタービン油のRBOTライフは200分程度であり、これら作用油、特にA油、D油の酸化安定性は非常に優れている。

5 加速劣化試験

5.1 試験方法

開発した専用作動油が、実際にどの程度の使用に耐えられるかを評価する必要がある。そこで流体継手の運転を模擬した油圧装置を用いて、経時的な性状変化の把握を行なった。運転条件として油温を 100°C 、 120°C としたほか、空気との接触を激しくするために吐出油を鋼板に当て飛沫化させて油

タンクに戻すようにした。運転の過程で200時間ごとに作用油の性状を分析し、それぞれ1,000時間まで運転した。なお性状分析項目として、色度、全酸価、塩基価、粘度、放気性、油中コンタミナント、RBOTライフなどを取り上げた。

5.2 各作用油の性状変化

各性状の経時変化を図2、3に示す。当然の結果として、油温 120°C で着色が著しく進行している。特にアミン系酸化防止剤を添加しているA油、D油の色度増加が大きい。アミン系の代表的なフェニルナフチルアミンの場合、酸化劣化により黒色のデヒドロダイマを作るといわれており⁴⁾、この着色もアミン化合物の変色に起因していると思われる。

粘度の変化は、C油を除いてわずかである。C油の場合、5%粘度低下しているが、これが粘度指数向上剤として添加したポリメタクリレートの機械的剪断に基づくものかははっきりしない。放気性は、A油、C油、D油がわずかに増加(泡が消えにくい方向に変化)している。これに対し清浄分散剤を添加していないとみられるB油、E油の放気性はほとんど変化していない。

他の性状の中で、塩基価は経時的に低下する傾向が認められるが、全酸価はほとんど変化していない。

5.3 RBOTライフの変化

RBOTライフは、時間に対し指数関数的に低下する傾向が認められるので、各作用油のデータの外挿から長時間の推定を行なった。結果を図4に示す。銘柄によって低下傾向が異なり、アミン系酸化防止剤添加のA油、D油は先の色度増加と同様に 120°C でのRBOTライフが大きく低下している。当初フェノール系よりもアミン系のほうが、高温条件で安定していると予想していた。しかし結果的には逆の傾向であり、他の添加剤であるZn-DTP、清浄分散剤との相互作用とも考

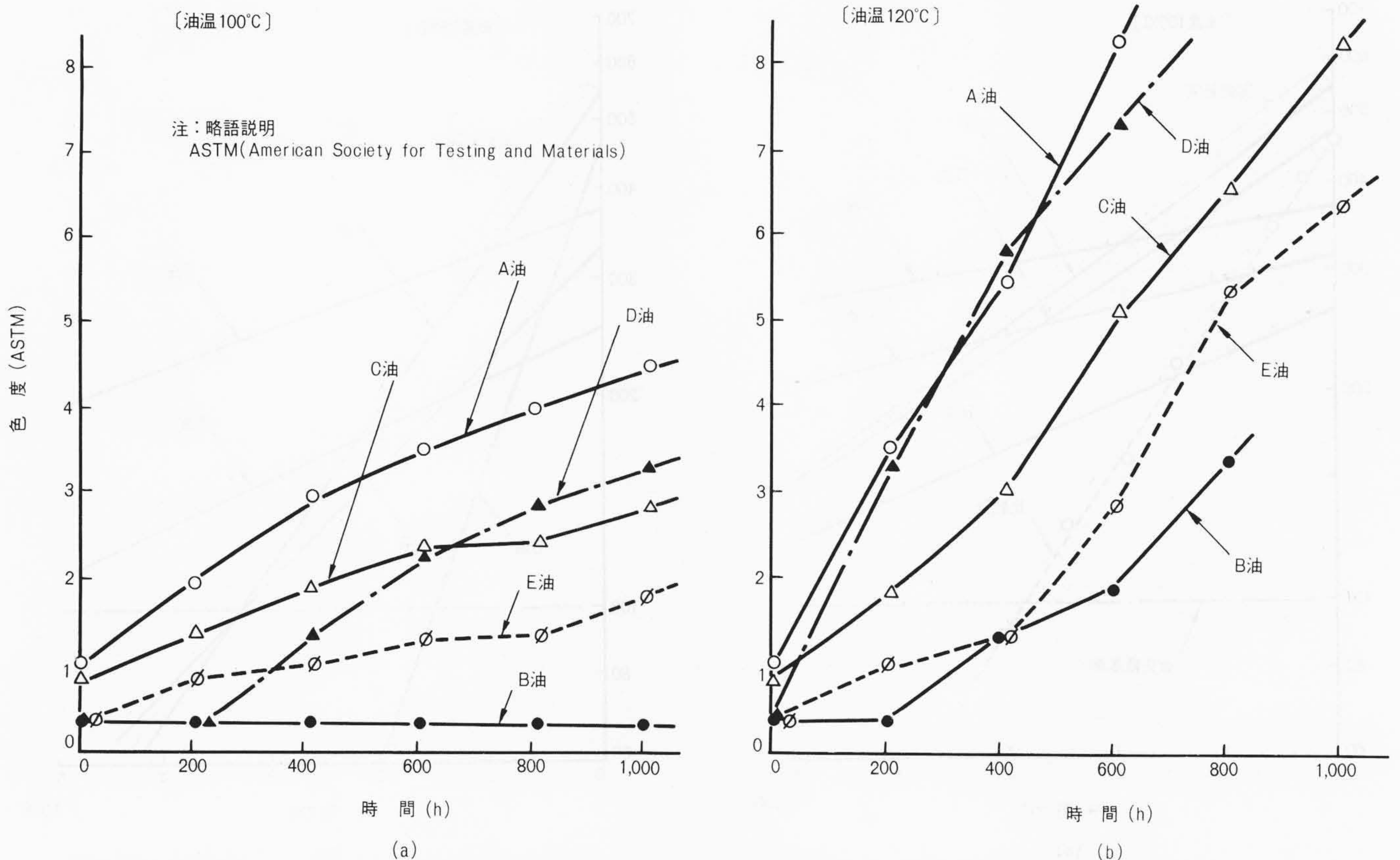


図2 色度の変化傾向 加速劣化試験での作用油の色度増加は、アミン系酸化防止剤を添加したA油、D油が大きい。

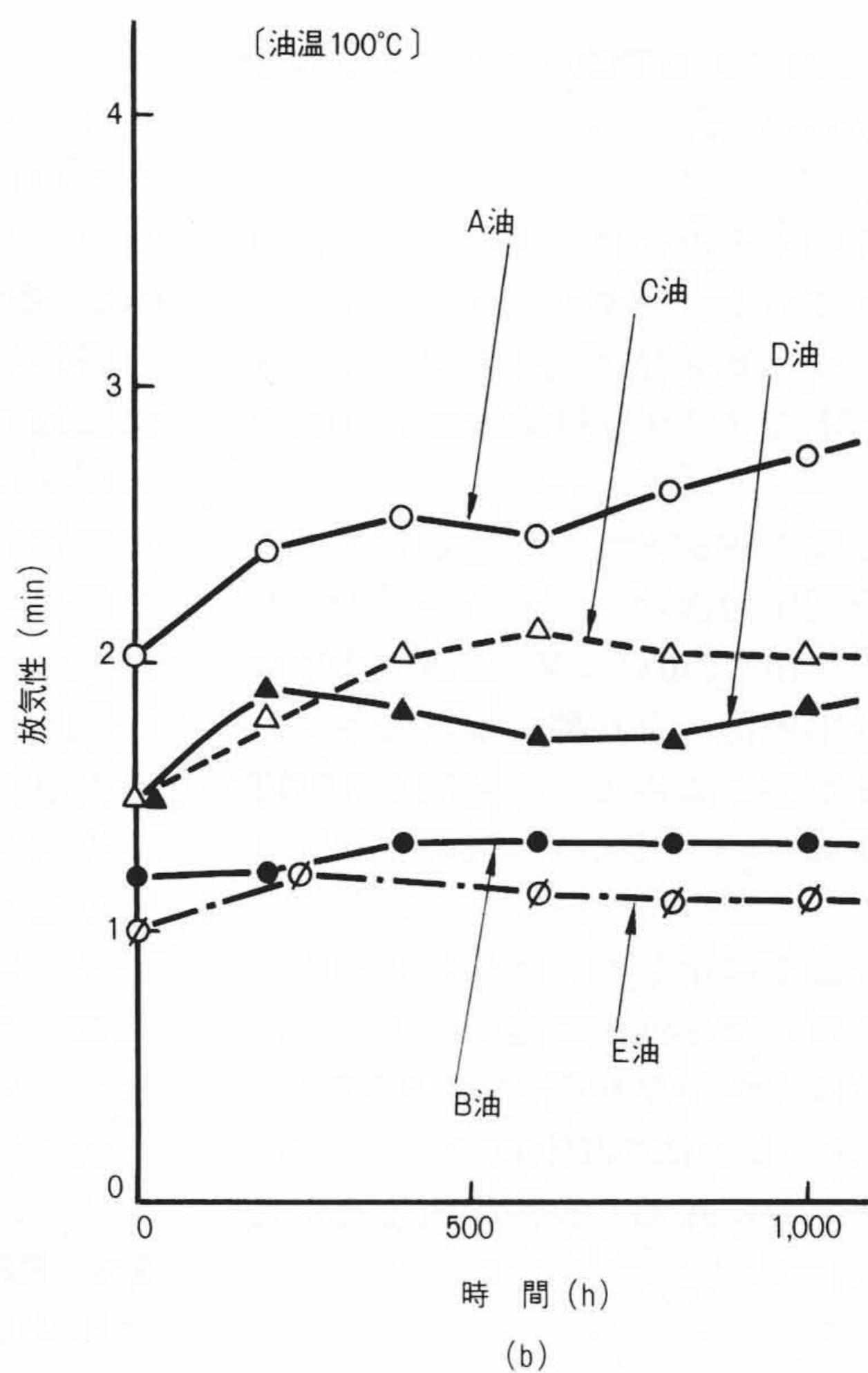
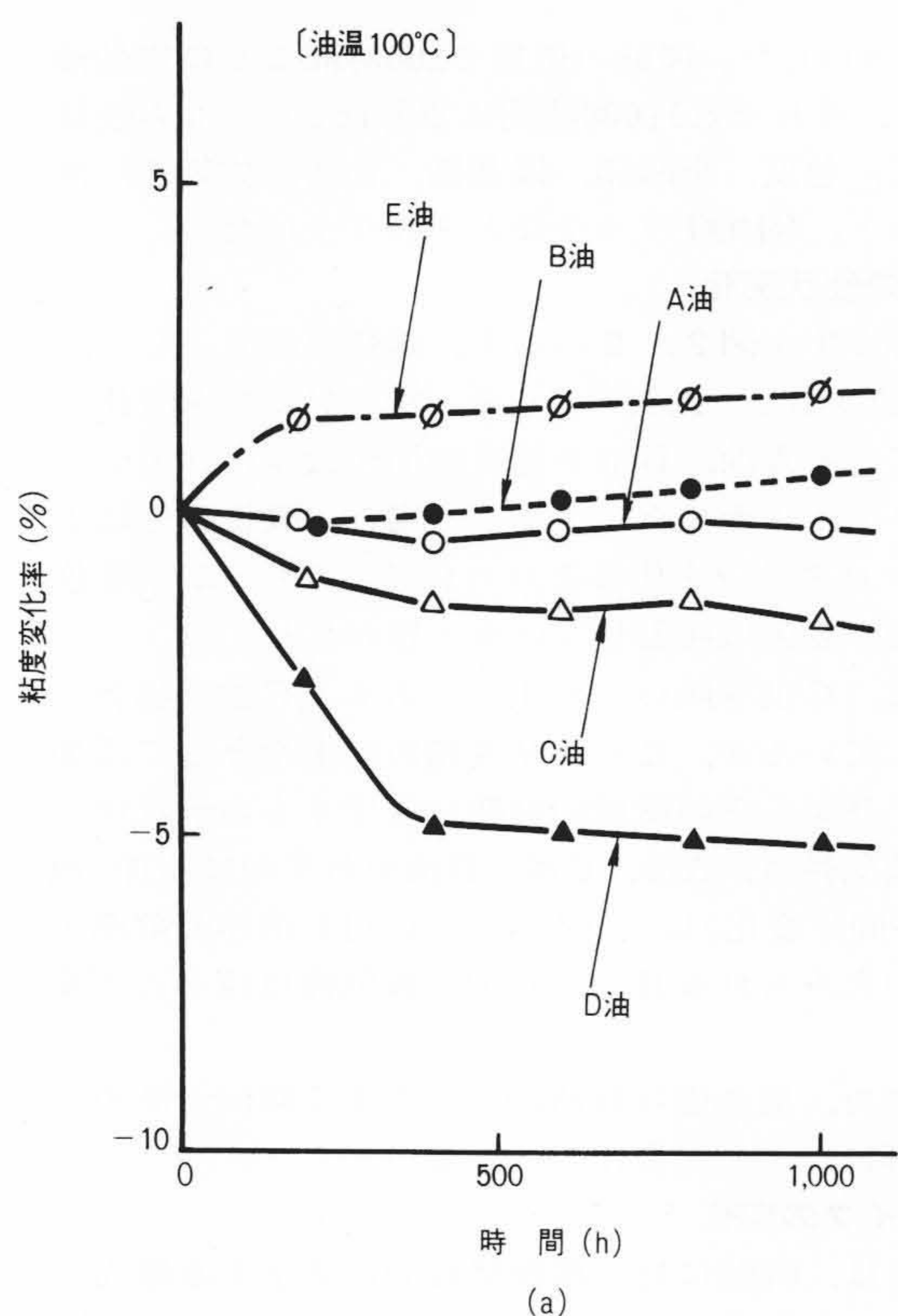


図3 粘度、放気性の変化傾向 加速劣化試験での各作動油の粘度、放気性はほとんど変化していない。

えられるが、この理由は目下のところはっきりしない。

次に作動油の交換基準と設定したRBOTライフ100分到達時間を求め、アルレニウスプロットすると図5のように整理することができる。D油、E油は10度則、他は大体20度則に相当している。この結果から、流体継手で予想される最高油温

90°Cでのライフは、7,000時間以上と推定できる。

ただし、流体継手で90°Cにさらされる油量は、全油量の10%程度であり、また、90°Cで運転される時間は短いので単純計算で10倍、少なく見積っても5倍程度延長されると考えられるので、いずれの作動油も目標とした2万時間の実用に十分

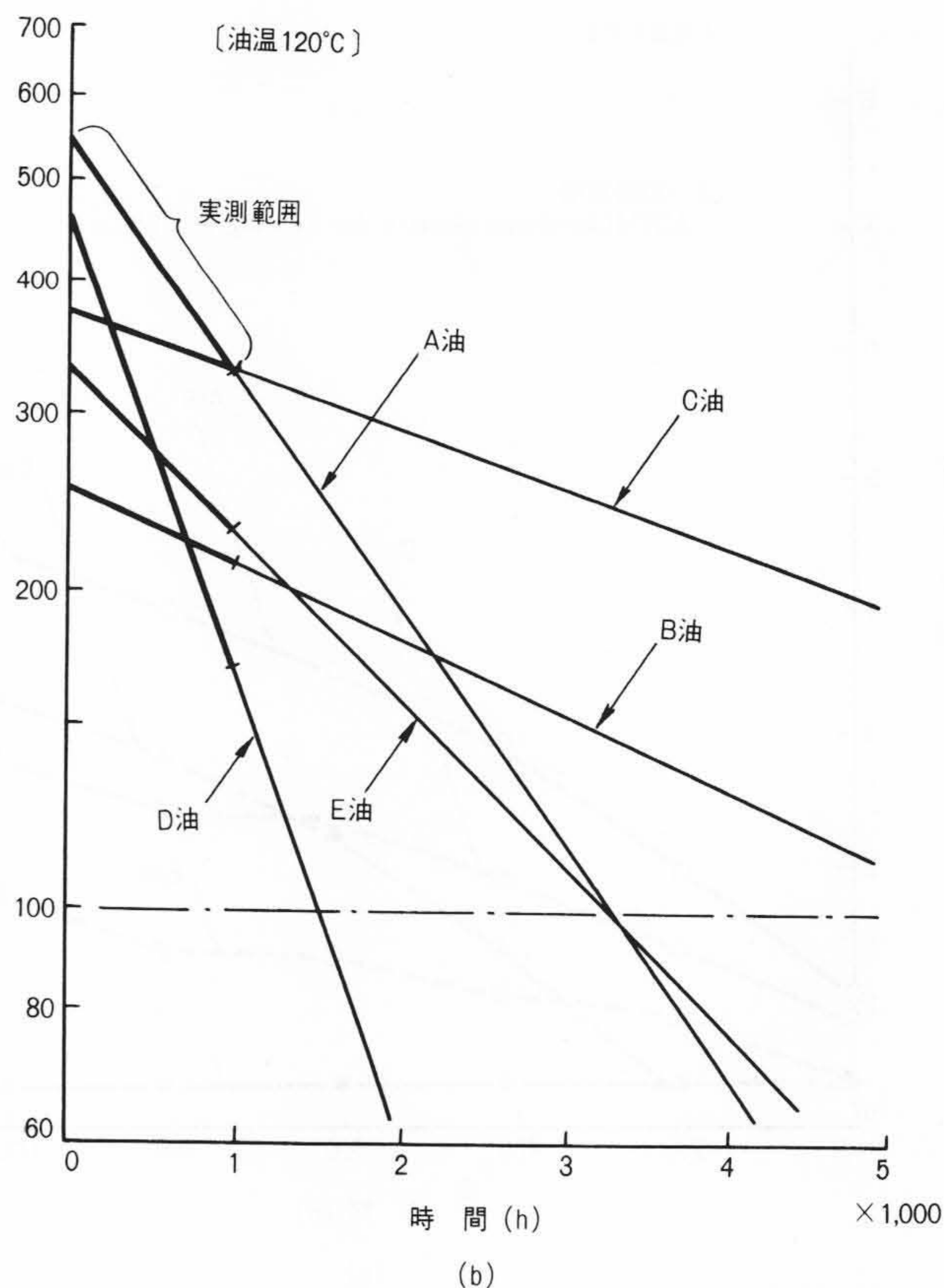
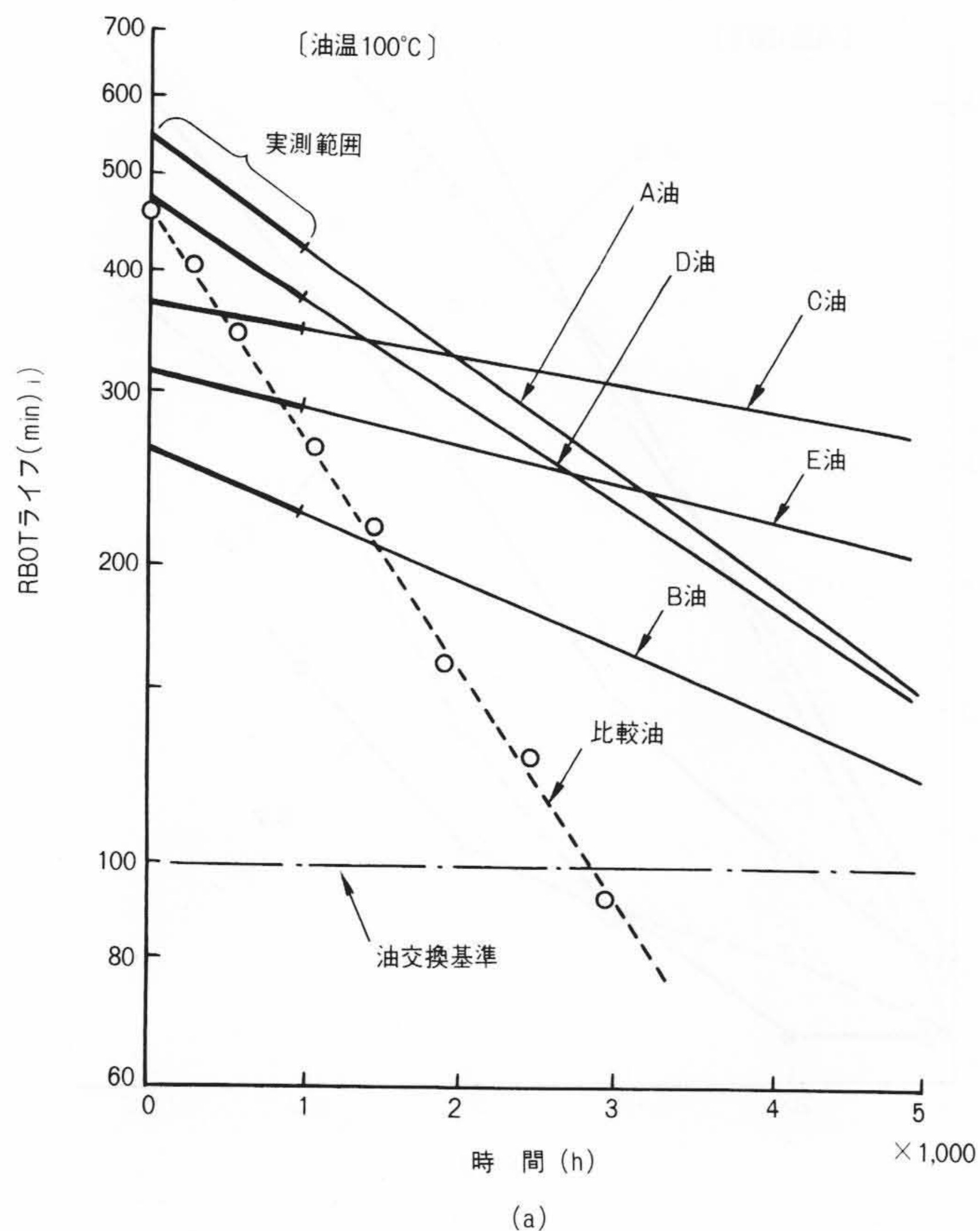


図4 RBOTライフの変化傾向 加速劣化試験でのRBOTライフ(酸化劣化寿命)は、時間に対し指数関数的に変化する。B油、C油が長寿命を示している。

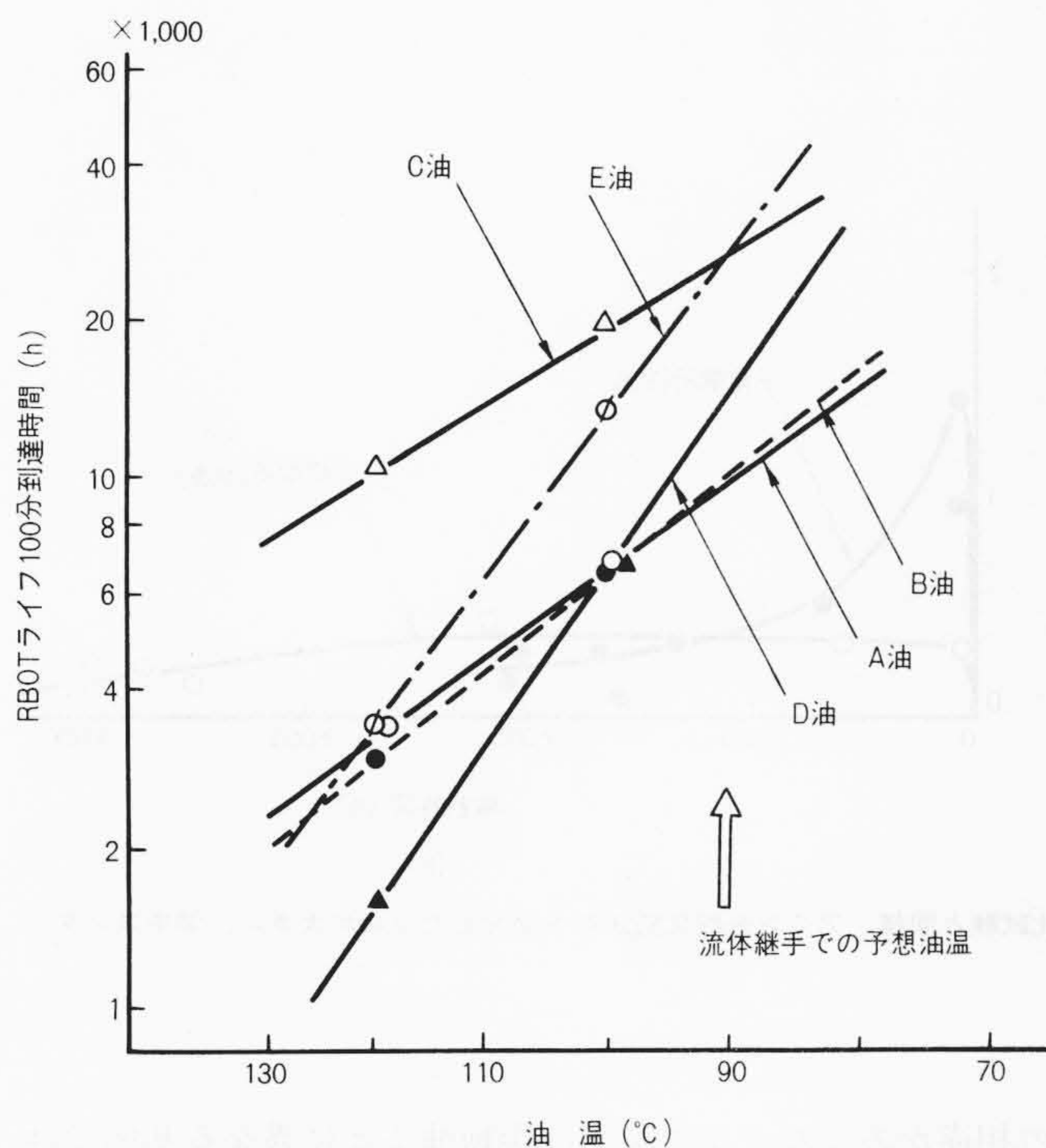


図5 油温とRBOTライフの関係 加速劣化試験での油温とRBOTライフの関係から、流体継手の油温90°Cの寿命を予測した。

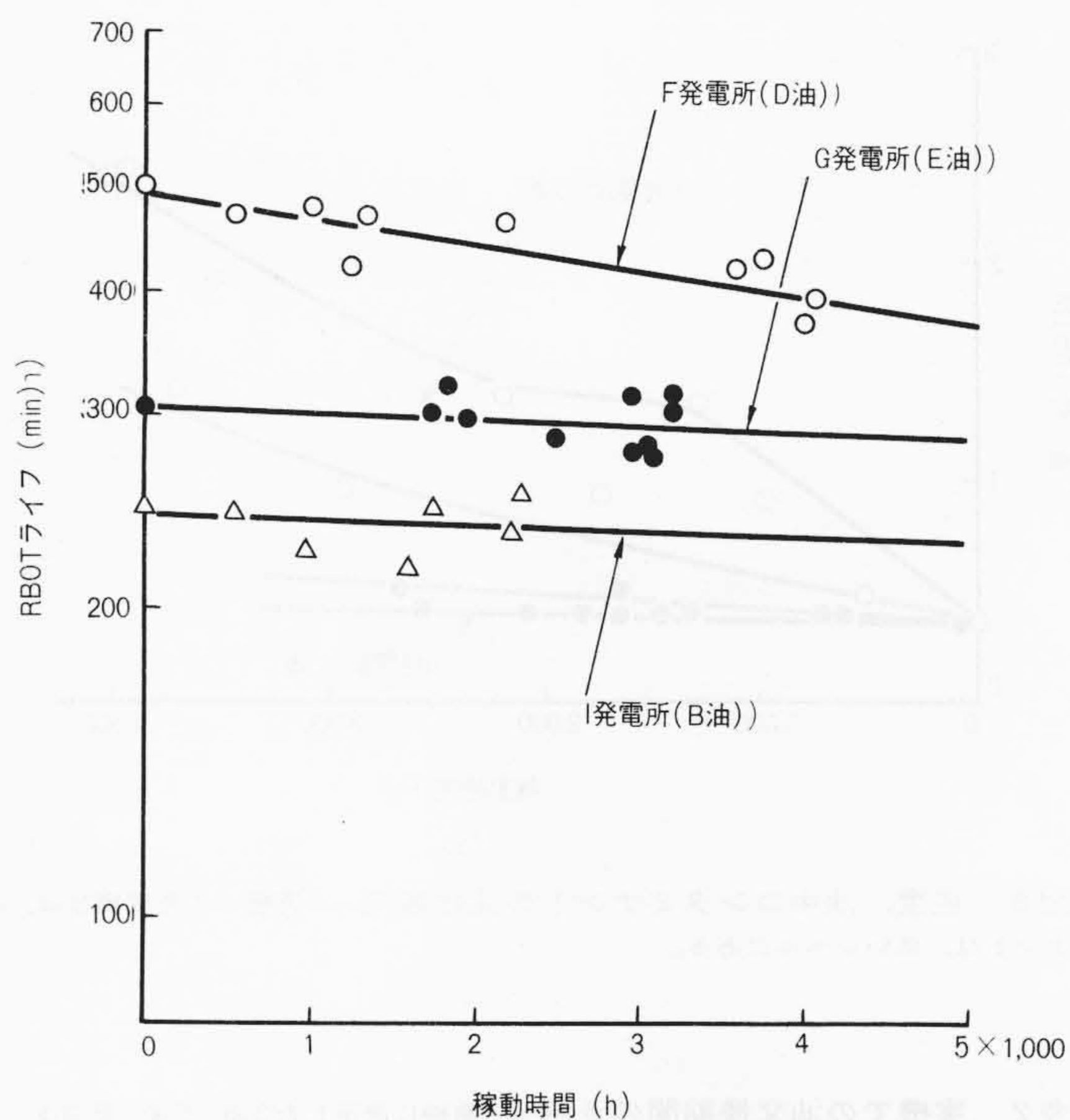


図7 稼動時間とRBOTライフとの関係 実機運転での稼動時間に対するRBOTライフは指数関数的に変化している。その低下は大きくない。

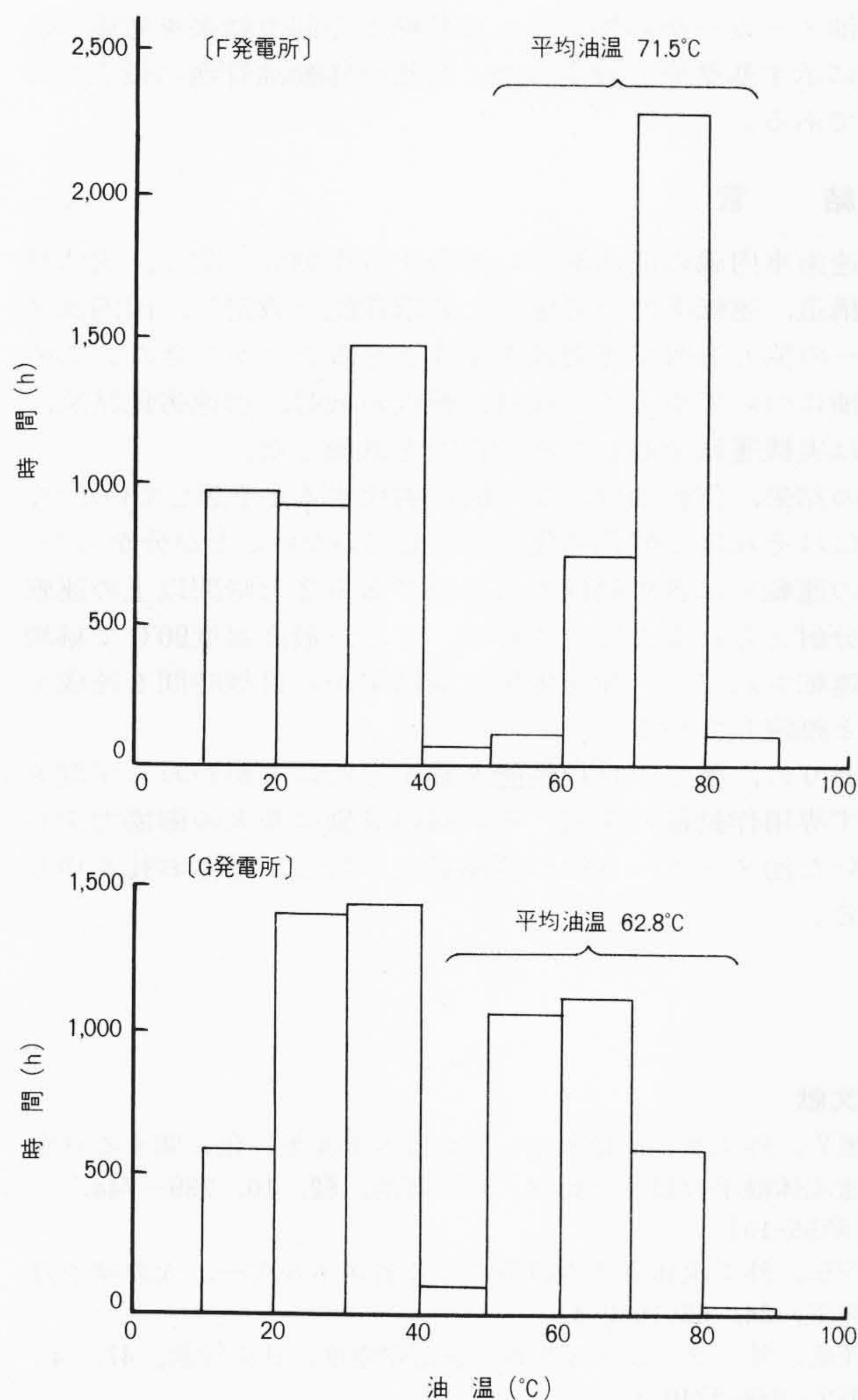


図6 油温測定結果 実機を運転した際の油温は、62.8°C、71.5°Cで、90°Cの運転時間はほとんどない。

耐えられると判断できる。

6 実機での油性状変化

作動油の開発と並行して、流体継手の製作が進み、4発電所に納入されることになり、この作動油としてB油、D油、E油が採用された。そこで電力会社、油メーカーと共同で3箇月ごとに運転油を採取し、先の加速劣化試験と同じ項目について1年間にわたり追跡調査を行なった。

この間の流体継手のすくい管出口での油温を測定した結果を図6に示す。45°C以上の領域が稼動状態での油温であり、平均油温として62.8°C、71.5°Cで、最高温度90°Cよりもかなり低温で運転されていた。したがって、劣化はそれほど進行しなかった。各試験項目ごとの変化傾向は次のとおりである。

6.1 RBOTライフ

稼動時間とRBOTライフとの関係を図7に示す。この中でE油を用いたF発電所でのRBOTライフの低下が若干大きい。この図からRBOTライフ100分到達時間を計算すると表2に示したようになる。これまでの運転状態で継続されるものと仮定すると、それぞれの油交換時間は2万7,300～10万時間以上と推定することができる。

ところで表2には、この油交換期間と先の加速劣化試験で得た油交換期間との対比をみたが、D油は2倍、E油は3.8倍、B油は10.4倍と明瞭な相関性は得られなかった。運転油温の違い、油補給量などが微妙に異なっているためと思われる。

6.2 その他の性状

各性状のうち色度、油中コンタミナントの変化傾向を図8に示す。先の加速劣化試験と同様に、アミン系酸化防止剤を添加したD油の色度増加が、フェノールを用いたE油に比較して大きい。

増速歯車の初期摩耗により、運転初期での油中コンタミナントが増加すると考え注目していたが、ごくわずかな増加にとどまり、汚れによる油汚過、油交換の必要性は生じな

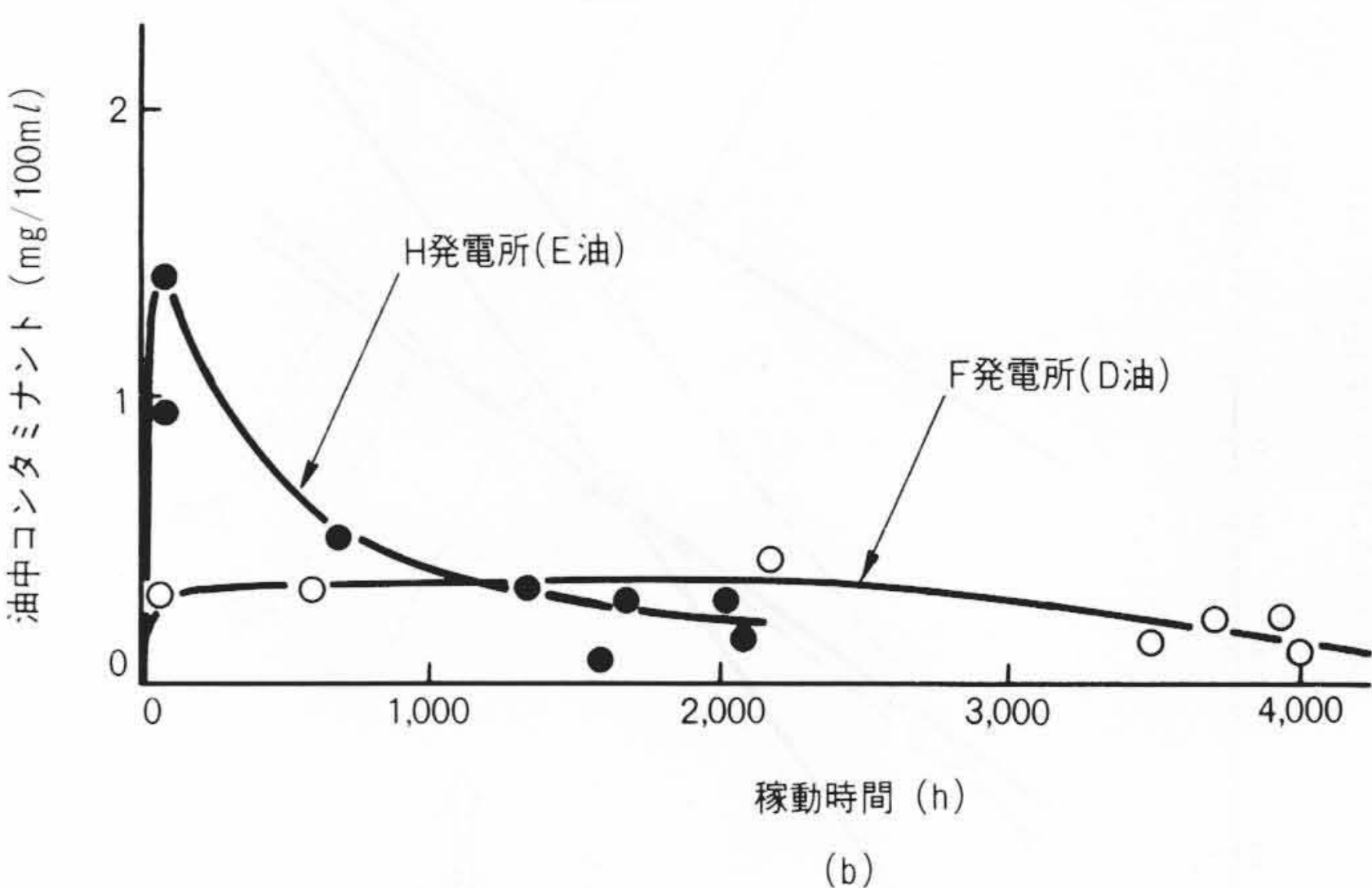
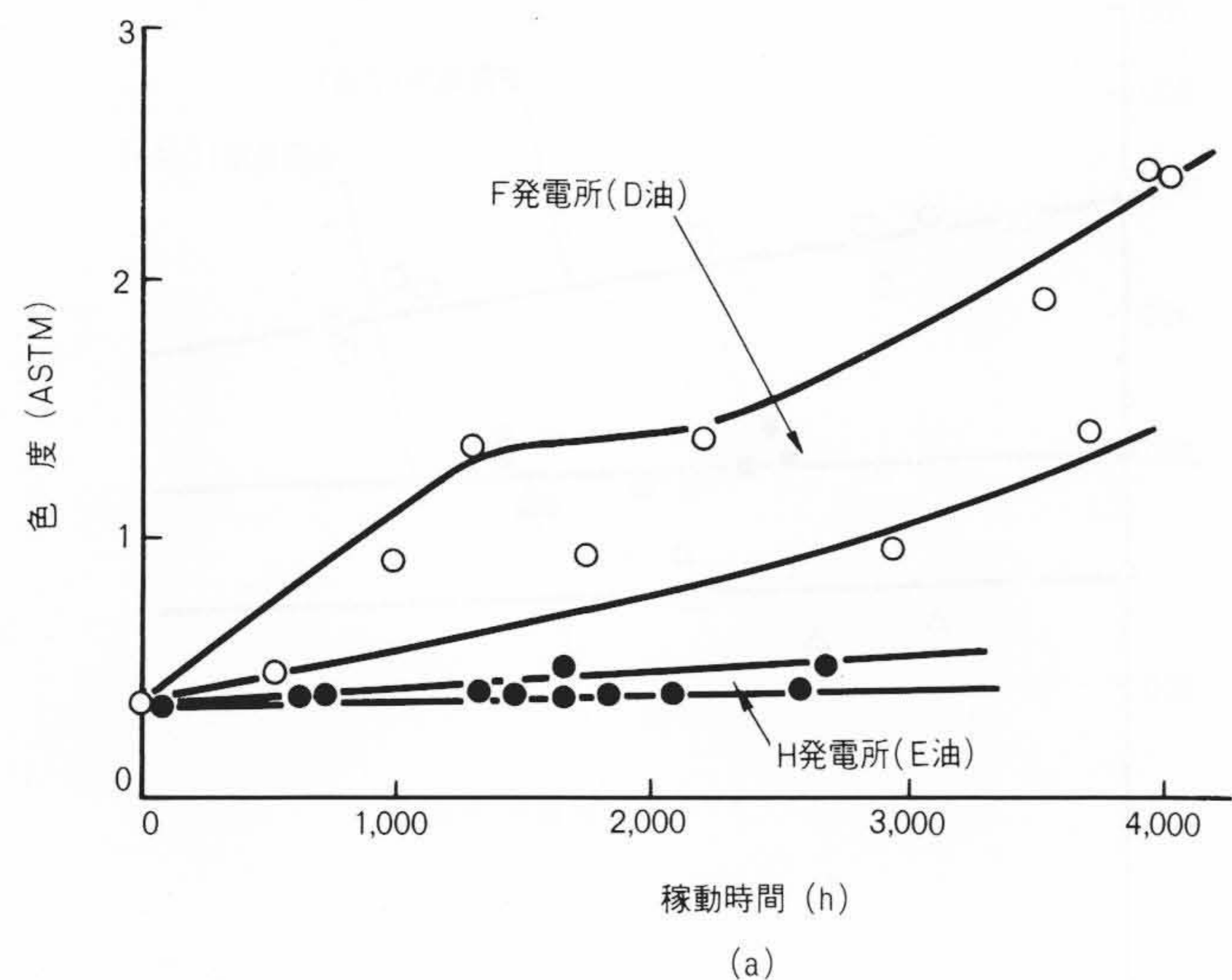


図8 色度，油中コンタミネントの変化傾向 実機での色度増加は，加速劣化試験と同様，アミン系酸化防止剤を添加したD油が大きい。油中コンタミネントは，低いレベルにある。

表2 実機での油交換期間の予測 実機に適用したD油，E油，B油は共に目標である2万時間の運転に耐えられると予測することができた。

発電所	作動油	RBOTライフ100分到達時間(h)	
		実機	加速劣化試験(at 90°C)
F	D油	27,300	14,000
G	E油	100,800	26,500
H		100,000以上	
I	B油	99,000	9,500

表3 作動油の交換基準 各油メーカーからの提案，今回の検討をもとに決定した交換基準で，今後の作動油管理に役立つ。

No.	試験項目と内容		基準値
1	RBOTライフ(min)	残余寿命の推定	100以上
2	色度(ASTM)	油の特性として測定	8以下
3	全酸価(mgKOH/g)	"	±0.3以下
4	粘度(cSt) 40°C	"	±10%以下
5	油中コンタミネント(mg/100ml油)	摩耗粉発生のチェック	10以下
6	放気性(min)	泡立ちの傾向	6以下

った。
他の性状については省略したが，全酸価，塩基価，粘度，潤滑性はほとんど変化せず，放気性もわずかな変化にとどまっていた。

このように予想していたよりも20～30°C程度低い油温で運転されたこともあって，約1年間の運転での油の酸化劣化は極めて軽微であり，RBOTライフの低下傾向からみて，目標とした2万時間の運転には十分耐えられると判断できる。

7 油交換のための管理基準の設定

運転油の性状分析に先立ち，各油メーカーから油交換基準の提示を受けた。しかし，それらは作動油個々の組成，特性を考慮した独自の設定であり，項目によっては設定値にかな

りの相違があった。このように作動油ごとに異なる基準では混乱を招くので，統一化を図る方向で管理基準を検討した。
今回の性状変化の調査結果から，特にRBOTライフを中心に色度，油中コンタミネント，放気性などの定期的な分析により作動油の管理が可能と思われる。その際の油交換基準として油メーカーから提示された基準と今回の結果を考慮し，表3に示す基準値を設定した。今後の作動油管理に役立てる考えである。

8 結 言

増速歯車内蔵の流体継手に適合する作動油に関し，流体継手の構造，運転条件を考慮した要求性能を設定し，国内油メーカーの協力を得て専用油を完成させることができた。この専用油について机上的な性状，組成の検討，加速劣化試験，更には実機運転を通してその性能を評価した。
その結果，作動油はかなり酸化劣化すると予想していたが，実際にはそれほど酸化劣化は進行していないことが分かった。通常の運転では各作動油共に目標である2万時間以上の運転に十分耐えられると推定される。また，最高温度90°Cで継続的に運転されても，加速劣化試験結果から目標時間を達成できると推定している。
終わりに，厳しい目標性能を提示したにもかかわらず期を失せず専用作動油の開発，その後の評価に多大の御協力をいただいた油メーカー各社の関係各位に対し，厚くお礼を申し上げる。

参考文献

1) 黒岩，外：ボイラ給水ポンプの省エネルギー化に関する可変速流体継手の最近の動向，日立評論，62，10，739～744，(昭55-10)
2) 芦田，外：流体継手の設置による省エネルギー，火力原子力発電，34，55(1982-4)
3) 茂庭，外：タービン潤滑油の酸化安定度，日立評論，47，4，682～688(昭40-4)
4) J. Rehner：Oxidation of N-phenyl-2-naphthylamine J. Am. Chem. Soc., 65，605(1945-9)