作動流体の摩耗防止性能試験法に関する研究

・ 第 2 報 ・ 作動流体の摩耗防止性能 ・

浦 田 暎 三** 岩 泉 洋 一***

内 田 良 裕*** 白 井 浩 臣***

Study on the Test Method for Anti-Wear Property of* Hydraulic Fluids

Part 2 Anti-Wear Property of Hydraulic Fluids

Eizo Urata ** Yoichi Iwaizumi,***
Ryosuke Uchida *** and Hirotaka Shirai ***

Abstract

Experiments on vane pump wear test following the newly submitted test method were reported. Tests were performed on mineral oils and fire resistant fluids HFA, HFB, HFC and HFD. Wear of the cam ring and vanes of the Vickers vane pumps show wide variety by fluid types and pressure.

Three types of wear progress in the vane pump test was recognized by the experiments: the first is, saturation in a certain running time; the second is, linear increase of wear with time; and the third is, immediate increase of wear rate after a certain running time.

Wear by R&O mineral oil (HM) increases linearly with running time of at least 300 hours when the pump is rotated at 1500 rev/min with a pressure of 70 bar. In contrast to this, the wear by phosphate ester (HFD) at 140 bar saturates in 100 hours and the worn mass itself is fairly small.

1. はしがき

第 1 報¹⁾で示した作動流体の摩耗防止性能を評価する試験法によって得られた、難燃性流体 (O/W エマルジョン), HFB (W/O エマルジョン), HFC (水ブリコール) および HFD (合成流体) の摩耗防止性能の特徴について述べる。

2. 摩耗試験結果

本章ではビッカース製ベーンポンプ V 104 C 形を用いた、流体の摩耗防止性能試験の結果を述べる。試験法検討の過程では ASTM / D 2882 や ISO / TC 131 / SC 6 - 128E などによる実験も行った。これらの実験を通じて得られた、各種流体の摩耗防止性能試験結果を、流体別に述べる。実験条件および結果の略記一覧表を、Table 1 に示す。実験に使用した流体は Table 2 に示す。

2.1 O / W エマルジョン (HFA)

ポンプ A 19 と A 20 および A 35 は O / W エマルジョン

* 昭和 58 年 4 月 8 日 原稿受付

** 神奈川大学工学部

*** (財)機械振興協会技術研究所

の試験に用いた。A 19とA 20の摩耗量は1点、すなわち250時間において測定した。A 35の摩耗経過はFig. 1に示す。この流体は切削油剤として製造されているものであり、油圧駆動用としては欠点があっても、当面は問題にしない。摩耗量は著しく多く、100時間で約1390 mgに達した。A 19の100時間推定値は990 mg、A 20の100時間推定値は1410 mgとなる。ただしA 19およびA 20の試験圧力は35 bar、A 35の試験圧力は15 barである。カムリングはいずれのポンプにおいても著しいすり跡があり、また段付き摩耗となっている。また内周全体が焼鉄色となっている。カムリングの縁は大きなばりが出ている。このばりは摩耗質量が多いときには常に出るものである。ベーン先端は原形をとどめないまでに摩耗している。

A 35では軸側ブッシングに若干のすり跡が見られ、両ブッシングとも、吸込み穴の内縁近くにピッチングがある。キャビテーションエロージョンの疑いがある。

A 19およびA 20のブッシング面はさび色となり、ロータが接触しなかったことがわかる。ロータ側面は3つのポンプとも研磨目がそのまま残っており、バランス良く保持されていたといえる。

Fig.1 Pump Wear by O/W Emulsion

O/W エマルションは、将来高含水流体の特性改善をはかるうえで、その特性を注目することになる。しかし切削油剤の程度では、上記のごとく短時間で著しい摩耗を生じ、高速摺動するベーンを保持することができない。

2.2 W/O エマルション (HFB)

ポンプA 17, A 18, A 32, A 33およびA 34の合計5台をW/O エマルションの試験に用いた。このうちA 17およびA 18は連続運転、他の3台は経時変化を測定した。Fig. 2は経時変化を示す。

A 17およびA 18は圧力105 barで運転した。カムリングに著しい段付き摩耗を生じ内周全面に焼鉄色を発生した。すり跡も激しい。ベーン先端はいずれも摩耗により原形を失っている。ブッシングは茶色に変色しているがきずは無く、ロータも研磨目を良く残し、バランス良く保持されていたことがわかる。

Fig.2 Pump Wear by W/O Emulsion

250時間での摩耗量は約1860 mgおよび1300 mgであり、ここまで直線の変化を仮定すると、100時間では744 mgおよび518 mgである。A 32以下の経過に見えるように、直線の変化を仮定することに無理はない。

圧力を70 barに下げたA 32の結果は、Fig. 2に示したように、摩耗量自体はさほど低下していない。カムリングに段付き摩耗が生じており、全周にすり跡がある。焼鉄色がほとんど出なくなっていることが、105 barに下げた効果といえる。ロータのバランスが良いことは、ブッシングにすり跡がないこと、およびロータ側面の研磨目が良く残っていることから推定できる。圧力を下げたことにより、カムリング摩耗量はあまり変らなかったが、ベーンの摩耗量は105 barのときにくらべ、70 barでは半分以下になっている。

A 33はさらに圧力を下げて35 barとし、A 34はもっと下げた20 barで運転した。これらの圧力のもとでのカムリング摩耗は、若干飽和に向かう傾向を示しているが、ほぼ直線的に増加している。A 33ではまだ段付

Table 1. Anti-wear characteristic of Hydraulic Fluids,
Measured using Vickers Vane Pump Test.

Test No.	Fluid	Pump cartridge No.	Test Condition						Run-ning Time h	Pump Flow l/min			Wear mass (mg)		
			Kin. Visc St	Temp °C	Pressure bar	Number of revolutions rpm	Bushing	Clamp Torque N·m		Initial Qi	final Qf	Qf/Qi	vane (12 R)	cam ring	total
A1	Polyol Ester	912014	13	75	140	1500	cone	5.4	7.0	28.85	(rotor broken)				
A2	"	"	"	"	"	"	"	"	250.0	20.06	30.00	1.032	14.5	76.9	91.4
A3	"	"	"	"	"	"	"	3.5	250.0	29.13	30.30	1.040	23.7	268.4	292.1
A4	"	"	"	"	"	"	"	5.0	250.0	28.85	29.48	1.022	29.0	57.1	86.1
A5	"	"	"	"	"	"	"	4.2	250.0	28.74	29.41	1.023	23.5	569.5	593.0
A6	"	711628	"	"	105	"	plain	1.5	250.0	28.28	28.76	1.017	3.0	27.5	30.5
A7	"	"	"	"	"	"	cone	2.0	250.0	28.24	27.22	0.964	3.0	302.4	305.3
A8	"	"	"	"	140	"	plain	3.3	225.0	29.27	28.08	0.959	32.7	219.8	252.5
A9	"	"	"	"	"	"	"	3.0	250.0	28.71	27.00	0.940	9.4	518.6	528.0
A10	"	"	"	"	"	"	cone	4.5	250.0	28.41	28.06	0.988	6.4	1025.5	1031.9
A11	"	"	"	"	"	"	"	3.8	250.2	28.40	28.40	1.000	4.4	1022.7	1027.1
A12	"	"	"	"	"	"	"	3.4	250.0	28.38	28.14	0.992	7.3	187.4	194.7
A13	Anti-wear mineral oil	711628	13	65	140	1500	cone	4.0	250.0	28.30	28.54	1.008	5.0	83.8	88.8
A14	"	"	"	"	"	"	"	4.3	250.0	28.21	28.21	1.000	6.5	87.7	94.2
A15	"	"	"	"	"	"	"	4.5	250.0	28.18	28.20	1.001	5.2	80.7	85.9
A16	"	"	"	"	"	"	"	4.0	250.0	28.36	28.45	1.003	4.1	65.8	69.9
A17	W/O Emulsion	711628	60	48	105	1500	cone	1.0	250.0	30.17	30.49	1.011	55.1	1863.7	1918.8
A18	"	"	"	"	"	"	"	1.2	250.0	30.09	30.44	1.012	24.3	1295.1	1319.4
A19	O/W Emulsion	711628	① 40°C 0.765	50	35	1500	cone	1.0	253.5	29.78	29.10	0.977	56.8	2421.8	2478.6
A20	"	"	"	"	"	"	"	6.5	253.5	30.12	28.82	0.957	60.0	3473.9	3533.9
A21	Polyol Ester	711628	30	50	140	1500	cone	6.5	250.0	33.30	33.54	1.007	7.0	633.3	640.3
A22	"	"	"	"	"	"	"	6.5	250.0	33.00	(33.24)(1.007)		4.4	73.7	78.1
A23	"	"	"	"	"	"	"	6.5	250.0	33.41	(33.63)(1.007)		2.7	45.2	47.9
A24	Water Glycol	711628	34	50	105	1500	cone	6.5	256.0	34.82	35.21	1.011	11.5	729.0	740.5
A25	"	"	"	"	"	"	"	6.5	256.0	34.74	(35.17)(1.012)		18.1	507.1	515.2
A26	"	"	"	"	"	"	"	6.5	329.0	34.92	(35.55)(1.018)		17.1	745.5	762.6
A27	"	"	"	"	"	"	"	8.0	254.0	35.21	35.69	1.014	19.4	589.2	608.6
A28	"	"	"	"	"	"	"	8.0	254.0	35.82	(36.14)(1.009)		20.5	620.8	641.3
A29	"	"	"	"	140	1200	"	9.0	100.0	30.50	30.90	1.013	33.8	944.6	978.4
A30	"	"	"	"	"	"	"	8.0	166.0	30.70	(30.90)(1.007)		53.3	1918.7	2002.0
A31	"	"	"	"	105	1500	"	8.0	310.0	35.74	(35.93)(1.005)		16.1	798.1	814.2
A32	W/O Emulsion	711628	60	50	70	1500	cone	8.0	250.0	36.10	(36.76)(1.018)		20.7	1429.6	1450.3
A33	"	"	"	"	35	"	"	8.0	310.0	37.34	(37.41)(1.002)		7.0	399.6	396.6
A34	"	"	"	"	20	"	"	8.0	310.0	37.71	(37.71)(1.000)		4.5	230.5	235.0
A35	O/W Emulsion	711628	① 40°C 0.765	48	15	1500	cone	8.0	200.0	33.52	(32.52)(0.970)		83.3	1954.5	2037.8
A36	Mineral, R&O	711628	21	50	140	1500	cone	8.0	90.0	31.09	(27.96)(0.899)		10.7	510.4	521.1
A37	"	"	"	"	105	"	"	8.0	310.0	33.71	(32.35)(0.960)		17.4	687.1	704.5
A38	Phosphate Ester	711628	21	50	140	1500	cone	8.0	310.0	32.47	(32.63)(1.005)		2.6	32.8	35.4
A39	"	"	"	"	"	"	"	8.0	272.0	33.06	(33.22)(1.005)		1.3	4.7	6.0

Note: Qf and Qf/Qi in bracket were for pumps disassembled between running interval.

Table 2. Tested Fluids.

Category	Name	Viscosity/Normal operating temp.
HFA	Oil in Water Emulsion	0.75/48
HFB	Water in Oil Emulsion	60/48
HFC	Water Glycol	34/50
HFD	Phosphate Ester	23/50
	Polyol Ester	13/75, 30/50
HL	Turbine oil (R40), VG32	21/50
HM	Mineral oil with anti-wear additive	13/65

き摩耗があり、A 34ではこれがほとんど無くなる。このときの段はむしろ吐出し側にあり、吸込み側にはほとんど無い。内周のすり跡は浅くなり、光沢を保つ。いずれもブッシングはさび色ですり跡なく、ロータはバランス良く支持されていたと考えられる。カムリング内周は、35bar, 20barのいずれにおいても焼鉄色を発生していない。摩耗量は70barから35barに圧力を下げたことにより著しく減り、20barではさらに下がる。70barのもとでの摩耗率は5.8 mg/hであるが、35barではこれが1.28 mg/h、20barでは0.76 mg/hとなる。35barと20barの間では摩耗量と圧力が比例しているが、70barではその関係がくずれる。摩耗形態も段付きとなるなど様相を異にするようになる。

Fig.3 Pump Wear by Water Glycol

この一連のデータは、圧力を3段階くらい変えて実験を行うと、流体の摩耗防止性能がかなり明確にとらえられることを証拠立てている。

2.3 水グリコール (HFC)

水グリコールに対して使用してポンプは、A 24からA 31までの8台である。このうちA 29およびA 30は、ASTM / D 2882と同じ1200 rpm, 140 barで実験を行った。この流体に対して圧力140 barは高すぎる値であり、くり返し性が悪くなる。回転数を1200 rpmに下げてもくり返し性を向上させる効果は認められなかった。

A 24およびA 27は連続運転、A 28は100時間まで連続運転後、経時変化を調べた。他の3台は本研究による試験方式で経時変化を調べている。摩耗量の経時変化をFig. 3に示す。水グリコールでの顕著な傾向は、短時間で摩耗量が飽和することである。

A 24~A 28およびA 31は同一条件 (105 bar, 1500 rpm, 50°C) で運転したので、これらと比較すると、約20時間で飽和したA 25、170時間で飽和したA 31、320時間でも完全には飽和していないA 26など、経過曲線はまちまちであるが、250時間あたりでは、いずれも総摩耗量は600~800 mgの中に入っている。平均値697 mg、分散σは72 mgである。複雑な機構での摩耗量としては良い繰返し性といえよう。

カムリングはどれも内周が焼鉄色となり、ばりも出ているが、段付き摩耗にはなっていない。すり跡がはっきり見えるものが多い。これに対するペーンの摩耗はさほど変形をともしない。ロータやブッシングにはほとんどすり跡がない。この流体は適当な圧力 (105 bar) で試験を行ったといえる。作動流体としては、このような摩耗量に飽和特性を示すものが望ましいが、飽和したときの摩耗量をもっと少ないことが要求されるかも知れない。

A 28は流体体積を200 l (本研究での標準は50 l) として、流体体積の影響をしらべたが、摩耗飽和値は641 mgであり、50 lの場合に対して有意差は生じていない。

2.4 合成流体 (HFD)

2.4.1 リン酸エステル

ポンプA 39およびA 38を用いてリン酸エステルに対する試験を行った。

A 38は運転初期にカムリング内周の4つの頂点付近に強い傷を受けた。原因ははっきりしないが始動時に何らかの不具合があったと考えなければならない。このことによりカムリングは、この流体としてはかなり多い初期摩耗を示した。その後310時間までの摩耗量

は少なくなく、最終でも 32.8 mg にすぎない。

A 39 は再試験に相当する。2 台のポンプの摩耗経過は Fig. 4 に示す。A 39 の摩耗質量は 272 時間運転後において、総量で 6.0 mg である。カムリングは吸込み側小径部から半径増加に移る始点に表面剥離（フレーキング）を生じ、その 1 mm 手前にビッチングが出ており、キャビテーションを疑わせる。それ以外はベンカムリングとも新品同様の滑らかさと光沢を有する。

試験法としては、A 38 の場合のように部品の傷を発見したときは、原則的に試験をやめてカートリッジ交換をすべきである。

Fig. 4 Pump Wear by Phosphate Ester

この流体の例に見るように、摩耗質量が 140 bar のもとで 200 時間経過しても、なお 10 mg を超えず、かつそれが飽和値である場合には、摩耗防止性能について定量的評価をすることは困難である。長時間（たとえば 4000 時間²⁾）運転するという考え方もあるが、実用的な流体評価法としては、より高圧を考えるべきであり、本研究で用いた V 104 C 形ベンポンプでは十分評価しきれないとすべきである。

2.4.2 脂肪酸エステル

本研究で使用した脂肪酸エステルは、飽和とは逆にある時間後から急激にカムリングの摩耗量を増加させた。流体の特性は前報(1)の Table 1 に示したようにほとんど変化していない。また添加剤を加えていないので、添加剤の減失による摩耗防止性能の劣化でもない。Fig. 5 に摩耗量の時間経過例を示す。

現象として、ある時間後から摩耗量が急激に増すこ

とは異常とはいえない。³⁾ 本試験の場合には、ポンプ運転による摩耗面の劣化、すなわち面の凹凸の増加や表面疲労のような変化に対する保護能力が乏しい流体であったために、Fig. 5 のような現象が生じたと考えられる。

このような特性を示す流体に対しては、特に経時変化の追跡が大切であって、フィールドでの使用においても、機器の監視が必要になる。

一点測定による摩耗評価では、比較的短時間（たとえば 100 時間）で行われるならば、ばらつきも比較的少ないであろう。流体メーカーのデータでは ASTM / D 2882 にしたがった試験での摩耗質量は 19.2, 33.4, 37.3, 22.0 mg であって、Fig. 5 に示した経過中での値と、ばらつきの範囲内で一致している。しかし問題はそれ以後の時間で生じており、この種の流体に対して ASTM / D 2882 は適切な試験法といえないことがわかる。

Fig. 5 Wear by Polyol Ester

脂肪酸エステルに対しては A 2～A 12, A 21～A 23 の計 14 台のポンプを使用した実験を行った。このうち A 2～12 の計 11 台は、試験法検討のために使用しており、試験条件をいろいろに変更している。

140 bar, 1500 rpm で試験をした A 21～A 23 のカムリング面は、周方向にすり跡はあるが凹凸の少ない光沢面の場合が多い。摩耗量が増すにしたがって条痕

を示すようになる。A 2～A 12の運転時間は250時間であるが、500 mg以上摩耗しているものがある。それらにおいては必ず条痕が深く、ピッティングを伴っており、疲労摩耗の特徴が示されている。ペーンは圧力が105 barのもの（A 6およびA 7）では摩耗が少ない。Table 1でペーンの摩耗量の多い(20mg以上)ものでは先端の凹凸も激しい。この流体のもとでは、カムリングはほとんど段付き摩耗をしていない。

締付けトルクの小さいA 2～A 12におけるブッシングを調べると、多くはすり跡があり、ロータ側面の研磨目が完全に消えているものもある。ロータが遊動したことになるわけで、この状態での摩耗試験に再現性を求めることはむずかしい。CETOP案などの方式はこの点に問題がある。本研究の試験では、カバーボルト締付けを強く、かつ一定とすることにしたので、ロータのアンバランスはかなり良く防げるようになった。

2.5 鉱油

難燃性流体の特性を論評する基準を、従来用いてきた鉱油に求めることが多い。鉱油が本研究の試験法のもとで、どんな摩耗特性を示すかを明らかにしておく必要がある。

耐摩耗性作動油に関する実験結果は、前報に述べたように、良い繰り返し精度を示したので、これは装置や試験手順の検定に利用すると良い。

耐摩耗性添加剤を含まない作動油HL（添加タービン油）における、ポンプ部品摩耗量の経時変化をFig. 6に示す。

Fig.6 Wear by Mineral Oil (R and O)

図においてAXは本試験法ではなく、ASTM/D 2882にしたがって行った実験である。A 36は圧力140 bar 50°C、1500 rpmとして摩耗経過を求めた。摩耗量は90時間まで時間に比例して増加していたが、114時

間目では急増して約5倍の2.5 gとなった。90時間までの摩耗率自体は大きい、段付きなどの徴候はなかった。114時間時点ではカムリング全周にすり跡が著しく、原始面は全く失われ、ペーン先端も原形を失っていた。ロータ側面研磨目は消え、ブッシングに著しいすり跡が出た。試験記録を見ると、夜間自動運転中に圧力制御系に異常を生じて160 barまで圧力が上り非常停止をしていた。したがって90時間までの特性だけで判断をすると、摩耗率が高い直線変化ということになる。A 37では圧力を下げて105 barとした。この場合も摩耗量は時間に比例し、310時間でなお飽和特性を示さない。A 37のカムリングは全周に小さなすり傷がある。ペーン先端の摩耗は少なく、ブッシング面もすり跡がかすかにある程度である。ロータ側面は明瞭な研磨目を残している、バランス良く保持されているといえる。

3. 本研究による試験法の利用方法

本研究ではピッカースペーンポンプV 104-C形を運転したときに生じるカムリングおよびペーンの摩耗質量によって、流体の摩耗防止性能を評価する方法に改良を加えた。異なる流体の比較を行うこともできるし、同一の流体について、摩耗防止性能の温度依存性を調べることもできる。また試験流体の推奨使用圧などを求めることにも、この試験法を適用することができる。

ペーンおよびカムリングの摩耗量は、流体により3つの異なった時間経過を示す。その第1はある時間で飽和するもの、第2は時間と摩耗量が比例するもの、第3はある時点以後において摩耗が急増するものである。

流体の相互比較は、これら3つの分類の中で行うと良い。流体の物質上の分類（HFA, HFB, …… , HL HMなど）は、摩耗の性質を決定するものではない。たとえば本研究で用いたW/OエマルジョンとFBKタービン油32（添加タービン油）とは、ともに直線的摩耗を示したから、同じ圧力、同じ回転数のもとで比較することができる。しかしこれらのいずれとも、試験をした水グリコールとを直接的に数値比較することはできない。実験をした水グリコールは、飽和特性を示したからである。

摩耗防止性能は、多くの流体において、ある圧力以上では急激に悪くなる。流体の推奨使用圧力をペーンポンプ試験によって決定できるとは限らないが、流体間の相対比較は常に可能である。

本研究の試験法によると、繰返し性の良い結果が得

られ，流体の摩耗防止性能の性質をも知ることができる。

4. むすび

本研究の成果を要約すると次の如くである。

- (1) ベーンポンプの運転によって流体の耐摩耗性を，繰返し精度良く（変動係数10%）測定できる。
- (2) 上記の結果を得るためには，試験装置，試験方法に関して不可欠の条件があるので，これらをまとめた新しい試験法を提案した。
- (3) ベーンポンプの摩耗量には，流体の種類およびポンプ運転条件の組み合わせによって，(a)飽和する場合，(b)時間に比例した増加をする場合，(c)運転後しばらく経って後に摩耗が急増する；の3つの場合があるので，これらを弁別しなければならない。したがって従来の試験法のように，一時点での摩耗量測定は不十分である。
- (4) 難燃性流体の摩耗防止性能に関し，本研究の試験法を通じて得た著者らの知見を簡単にまとめると次のようである。(a)HFA (O/Wエマルジョン) では，ごく低圧 (15bar) においても摩耗は大きく (100 時間で 1.5 g)，油に代りうる特性をいまだ備えていない。(b)HFB (W/Oエマルジョン) の摩耗率はHFAより小さいが，時間と摩耗量が比例して増加し，この点で耐摩耗性添加剤のない鉱油 (R & O) と類似する。水滴の存在が耐摩耗性添加剤の作用を妨害するのであろう。(c)HFCでの摩耗量は 600～800 mg と大きい，比較的短時間で飽和し，鉱油に代りうる特性をいちおう備えている。(d)HFD (合成流体) のうち，りん酸エステル (ストレート) は優れた摩耗防止性能があるが，脂肪酸エステルにはポンプ運転時間がある程度進んだ時点で急激な摩耗増加に転ずるものがある。

参 考 文 献

- 1) 浦田，岩泉ほか：作動流体の摩耗防止性能試験法に関する研究，第1報，試験法及び試験装置，油圧と空気圧（投稿中）
- 2) W. Kleinbreuer : Verschleißerscheinungen an Flügelzellenpumpen beim Einsatz von schwerentflammenden Drückflüssigkeiten, o + p. , 23-2, 73/79 (1979)
- 3) M. B. Peterson: Boundary Lubrication (ed. by F. F. Ling et al.), 19P, ASME (1969).

本研究は（財）機械振興協会技術研究所と（社）日本油圧工業会が，昭和53～55年度に行った共同研究プロジェクトの結果の一部をまとめたものである。上記プロジェクトの実施に際しては，通商産業省の指導，日本自転車振興会の援助，研究プロジェクト参加企業の協力を受けたことを記し，関係された各位に厚く御礼申し上げる。