油圧ポンプの汚染感度試験法に関する研究*

第3報 試験法の検討

岩 泉 洋 一** 浦 田 暎 三***

Study on Contaminant Sensitivity Test for Hydraulic Pumps * (3rd Report, Examination of the Test Method)

Yoichi Iwaizumi ** Eizo Urata ***

Pump contaminant sensitivity tests were performed using the test facility described in the first report and the classified test dust described in the second report.

Three types of pumps, namely vane, gear and piston pumps, were used as test pumps. The following results were obtained through experimental verification of the test method using the above mentioned pumps;

- (1) The repeatability of the NFPA recommended standard can be approved in its present state; however, it could be improved.
- (2) The reproducibility of the test results at different laboratories is not satisfactory. A more strict definition on the particle distribution of the test dust shall be suggested to obtain better reproducibility. The item defining ability of filter circuit, or in other words, the time for filtration, should be added to the standard.

1. はしがき

本報告では、汚染感度試験法¹⁾の試験法としての妥当性を、実験結果にもとづいて検討する。試験法及び試験装置は第1報¹⁾に記載したものであり、試験用分級ダストは第2報に記載したものである。実験に供したポンプは合計31台であって、ポンプの仕様及び実験条件をまとめてTable 1, Table 2にそれぞれ示す。

2. 試験法の検討

本来、試験法というものは、

- (1) 繰り返し精度(同等の物品を試験したとき、同等の結果が得られること、原則として試験装置と試験者は同じとする)

- (2) 再現性(異なった装置によっても同等の結果が得られること)
- (3) 弁別性(異なった試験対象品の相違が識別できること)
- (4) 実現可能性(実施が難しすぎないこと)
- (5) 結果の有用性(試験により得た情報が工業・工学的に有用であること)

という五つの性格を保持していなければならない。本報は、NFPA/T3.9.18-1976¹⁾に記載されているポンプ汚染感度試験法を上述の観点から検討する。

(1)については3章で詳述するとく、満足な結果を得てはいるが、なお改良の余地があることを知った。

(2)についてはオクラホマ州立大学(以下OSUと略記する)にポンプを送って試験を依頼してデータ比較を行った。日本で行った結果とくらべると、よく一致しているとはいえない。この問題については4章で取り扱う。

(3)については、各種ポンプの汚染感度曲線がそれぞれ特徴ある形を示し、試験方法の有効性を支持する結

* 昭和55年4月1日 原稿受付

** (財)機械振興協会技術研究所

*** 東京工業大学工学部

**** 油圧と空気圧Vol.12, No.1

Table 1 Dimensions of Tested Pumps

Pump Type	Displacement (ml/rev)	Shaft Speed (rev/min)	Rated Pressure (bar)
Vane	25.8	1200	70
Gear	23.4	1800	175
Piston	28.2	1800	250

Table 2 Pump Test Conditions

Pump No.	Test Item	Pressure (bar)	Initial Flow Rate (l/min)	Shaft Speed (rpm)	Temp. (°C)	Inject Level (mg/l)	Test Dust	Pump Type
P1	Examina- tion of Test Method	70	29.2	1200	50	300	ACFTD	Vane
P2		70	29.5	1200	50	300	ACFTD	Vane
P3		70	29.3	1200	50	300	ACFTD	Vane
P4		175	39.6	1800	50	300	ACFTD	Gear
P5		175	39.0	1800	50	300	ACFTD	Gear
P6		175	38.7	1800	50	300	ACFTD	Gear
P7		250	47.0	1800	50	300	ACFTD	Piston
P8		250	48.7	1800	50	300	ACFTD	Piston
P9		250	46.7	1800	50	300	ACFTD	Piston
P10	Influence of Dust Material	105	42.9	1800	50	300	JIS 3	Vane
P11		175	38.7	1800	50	300	JIS 3	Gear
P12		250	49.0	1800	50	300	JIS 3	Piston
P13		105	43.1	1800	50	300	JIS 8	Vane
P14		175	38.3	1800	50	300	JIS 8	Gear
P15		250	49.2	1800	50	300	JIS 8	Piston
P16	Tested at OSU	70	30.3	1200	50	300	ACFTD	Vane
P17		175	36.8	1800	50	300	ACFTD	Gear
P18		250	49.3	1800	50	300	ACFTD	Piston
P19	Influence of Pressure	90	28.7	1200	50	300	ACFTD	Vane
P20		105	28.4	1200	50	300	ACFTD	Vane
P21		125	26.8	1200	50	300	ACFTD	Vane
P22	P10 Repeat	105	42.7	1800	50	300	JIS 3	Vane
P23	Influence of Shaft speed	105	35.5	1500	50	300	ACFTD	Vane
P24		105	43.2	1800	50	300	ACFTD	Vane
P25	Influence of Temperature	105	44.1	1800	35	300	ACFTD	Vane
P26		105	41.5	1800	65	300	ACFTD	Vane
P27		105	39.7	1800	80	300	ACFTD	Vane
P28	Influence of Injected Level	105	43.0	1800	50	100	JIS 3	Vane
P29		105	43.0	1800	50	200	JIS 3	Vane
P30		105	43.5	1800	50	100	ACFTD	Vane
P31	P9 Repeat	250	49.4	1800	50	300	ACFTD	Piston

果となった。この項は議論の必要性が少ないが、曲線の形と摩耗形態に関連する部分について、次報で取り扱う。

(4)については、(1)、(2)と関連する部分につき、それぞれ3章、4章で述べるが、試験用分級ダストの入手などに問題があることを指摘しておく。ここに研究結

果をまとめるに至ったことは、実現可能性を証明したことに通じるわけである。

(5)については次報でも取り扱うが、ここでは情報を受け取る側も、相当の専門的知識を持つ必要があることを指摘しなければならない。ポンプのユーザー側から見れば、この試験法による試験結果は、より汚染耐

久性の強いポンプを選定すること、除去すべき粒子状汚染要因物の粒径下限を知るなどの、直接的な情報が得られる。メーカーとしては自社のポンプに対して適正なフィルタの指定、運転条件の指定などがより適切に行えるようになる一方、分解点検、寸法・質量測定などを適宜に行えば、製造しているポンプの弱点を明確に知ることができるわけである。

汚染感度試験法にはいろいろの拘束条件があるが、それらの条件のうちで、運転条件はある程度任意のものである。運転条件は、ポンプメーカーの指定する定格条件を標準とするが、使用者はその条件を守らなければならないというものではない。使用者は用途に応じて、最も有利な条件で使用してよい。ポンプの汚染感度に影響する物理的なパラメータとして、運転条件、すなわち温度、圧力、回転数などが、いかなる影響をもたらすかは、ユーザーにとっても関心の集まることである。これらのパラメータの影響をしらべることは、上記の(1)～(4)が確認されてから実行できるので、取り扱うことにする。

汚染要因物によってポンプ性能が劣化する要因の主なるものは、アブレーション摩耗とみることができる。本試験法はアブレーション摩耗の影響を短時間に評価することを目的としている。この場合には、汚染要因物のかたさに注意が集まる。試験法自体としては、標準的な入手しやすいものを、試験用ダストに選ぶべきである。しかしフィールドにおいて観測される粒子状汚染要因物にはいろいろなかたさのものがあリ、試験用ダストによって得た結論がすべてに通用するものではない。軟らかいダストであれば、多量であってもポンプの摩耗は少ないはずである。この点を明確にするためには、異なった試験用ダストを用いた同様の試験を行う必要がある。本研究では標準としたACFTDのほかに、けい砂粉及び関東ローム粉を分級して、V104C形ベーンポンプを用いる試験を行った。結果から見ると、ダストのかたさの影響は明確である。けい砂粉を試験用ダストに用いる場合は、ポンプの摩耗が早く、測定に困難を生じる場合があった。逆に関東ローム粉では流量低下が少なく、アブレーション摩耗を明確化し難い場合がある。

この試験法全体の手続に対してはACFTDが最も適合しているといえる。このことは主として試験法の開発がACFTDを用いたことによるのであって、他の試験用ダストの一般性能の良否とは関係のないことである。

本試験法ではシステムの汚染濃度を300mg/lとしている。これは加速試験という意味合いもあるが、フ

ィールドでの条件との相関が明らかでないことに注意すべきである。上記汚染濃度が試験法として適切な濃度といえるかどうかは検討の余地があるので、システム内ダストの分散性が、目標値の±10%以内となることを条件として、汚染濃度を下げた実験をも行ったが、その結果については次報で述べる。

実験に使用した油圧油は耐摩耗性添加剤を含まないタービン油90番相当品(JIS K2213-1980, 2種, ISO VG32)1銘柄である。

3. 繰り返し精度

ベーンポンプ、歯車ポンプ及びピストンポンプを各一機種試験用ポンプとして選定し、各種ポンプの同一ロットから3台ずつとり出し、第1報記載の汚染感度試験を行った結果を、それぞれFig.1, Fig.2及びFig.3に示す。

Fig.2に示す歯車ポンプにあっては、他の二形式のポンプに比べてデータのばらつきが若干目につく。この原因に関しては後に述べる。研究当初においては、この繰り返し精度に関して多大な危うが抱かれていたが、実験結果は図示のごとく、一応満足できるものであった。

これを数値的に見るには、流量比 Q_t/Q_0 の観測値の、各粒径に應ずる平均値のまわりの分散を求めてみればよい。

Fig. 1 Repeatability on Vane Pumps

Fig. 2 Repeatability on Gear Pumps

Fig. 3 Repeatability on Piston Pumps

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum \left\{ \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (m_i - f_{bi})^2 \right\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$m_0 = (f_{01} + f_{02} + f_{03}) / 3$$

において、 D は粒径上限、 f_{bi} は観測した Q_i/Q_r の値を示す。

各機種について σ を求めると、ベーンポンプにおいては $\sigma = 4.6 \times 10^{-2}$ 、歯車ポンプにおいては $\sigma = 3.3 \times 10^{-2}$ 、ピストンポンプにおいては $\sigma = 1.6 \times 10^{-2}$ である。 Q_r を基準量として、ベーンポンプでは0.46%、歯車ポンプでは3.3%、ピストンポンプでは1.6%のばらつきが出たと考えられる。本試験法での各測定量は $\pm 2\%$ 以内となっているが、仮に圧力にその程度の変動があっても影響は微小である。実際は流量とポンプ回転数については、誤差の測定値への重みが1で、他のパラメータの重みは0とみなしてよいであろう。本実験では流量や回転数の測定は十分正確に行っているので、誤差が1%をこえることはない。したがって Q_i/Q_r の誤差は大きくみても $\sqrt{(0.01)^2 \times 4} = 0.02$ 、すなわち2%以内のものでなければならない。

こうしてみると、ベーンポンプ及びピストンポンプにおける結果は、この試験法の繰り返し精度が容認できる程度のものであることを示す。歯車ポンプでの実験結果は、試験法になんらかのばらつきの要因があるか、もしくは歯車ポンプの製造から据付までの取扱いまでの間になんらかの問題があったかの、いずれかを疑わせる。

各ポンプにおける流量変化の経過の測定例をFig. 4～Fig. 6に示す。ベーンポンプの場合は、Fig. 4のように、流量の時間にもなう降下は比較的一様であるために、流量変化を認識することが容易である。ピス

Fig. 4 Operating Diagram on Vane Pump P2

Fig. 5 Operating Diagram on Gear Pump P5

Fig. 6 Operating Diagram on Piston Pump P8

トンポンプでは一度流量が下がってから上昇に転ずることがあるが、流量変化がある限り、そのこう配は比較的大きい。歯車ポンプでは、各粒径ごとの試験用ダストのもとでの運転において、初期における流量低下

は顕著であるが、その後の流量変化は $e^{-T/T}$ (t : 時間, T : 時定数) に似た形になる。したがって流量が一定になってから 10 分間流量が一定になったときにポンプを停止するという、本試験の規定を正確に実施することは困難で、運転時間のばらつきが大きくなる。運転時間が長くなると、摩耗量も増加してしまい、汚染感度も見かけ上大きく出る。歯車ポンプの場合のような流量低下曲線の場合に対して、本試験法の運転停止基準は、結果をばらつかせる要因となる。したがって、運転時間は常に 30 分とするというような規定の方が、より好ましいと考える。

ベーンポンプ V104C 形は、特性が安定していることに定評があり、他の試験、たとえば油圧油の摩耗防止性能試験の試験機材としても使用されているもので、本試験においても、優れた繰り返し精度を示した。

ベーンポンプでの流量低下の経過は Fig. 4 に示したように、流量変化が認識しやすく、運転時間が 12~14 分または 30 分となる場合がほとんどであったことが、ばらつきを小さくすることを助けたとも考えられる。

同様にピストンポンプでも運転打切時間は比較的そろっていて、汚染感度試験の結果も、ばらつきが小さい。

以上を総合すると、試験法の規定 (NFPA/T 3.9.18-1976 及び本研究第 1 報付録の 10.15) の運転停止条件は、一律に 30 分あるいはその他の一定時間に定めたほうが、繰り返し精度の点からは、良いと結論できる。

従来のこの種の試験の感覚からいえば、3.3% という値もきわめて優れた繰り返し精度である。しかし最終的には、試験法自体の中にある測定技術上の不安定性は排除すべきであろう。

4. 異なる試験所間での再現性

本章で問題にする性質は、同じ装置によるものではなく、異なった試験機関、研究所などにおいて、NFPA 規格の記述に従って、試験を行った場合に、同一機種のパンプについて、同一の結果が得られるかどうかという性質である。

本試験法は OSU において研究・開発され、NFPA 推奨規格に採用されているとはいえ、OSU 以外において実験的に検討を行ったという報告や発表がない。

規格として技術者一般が容認できるものは、前述のような意味での異なった実験空間での再現性のあるものでなければならない。そこで本研究において、すでに繰り返し精度を確かめた 3 機種のパンプを OSU に送付し、同様の実験条件で汚染感度試験を行うことを

依頼した。実験に関する条件として、油の種類、運転条件を等しくするものとした。異なりうる点は3章で述べた運転打ち切り時間のほか、回路の清浄化のための運転時間及び試験用の分級ダストの粒径分布である。

ベーンポンプの試験において、試験所間で差異が出る場合には、それは分級ダストの粒径分布の差異によるものと考えらるべきである。OSUのダストの方が細かいならば、試験結果は本研究において観測した流量比よりも大きく出るであろう。Fig.7はベーンポンプに対するOSUと本研究(試験所は(財)機械振興協会技術研究所、TRIと略記)との試験結果を比較して示す。分級ダストは前報²⁾に図示してあるが、粒径範囲0-5 μ m、0-10 μ mにあつてはOSUの方が粗いが、このあたりではいずれも流量低下は、流量測定精度をはるかに下回るので議論は無意味である。粒径範囲0-20 μ mにおいて両者はほぼ同等であるが、それ以上の粒径範囲では、OSUの分級精度は劣化し、大きな粒径では粒径範囲を大きくしたことの実質的な効果がない。すなわち0-40 μ m以上の粒径範囲に広がるOSUの分級ダストは粒径の小さいほうに偏り、したがって流量低下を生じさせる効果が少ない。このことはFig.7の実験結果と符号している。このことから引き出される一つの重要な結論は、分級ダストの分布を試験法の中に規定すべきであるということである。

歯車ポンプの場合の比較はFig.8に示す。明らかに

実験室間の差異があるので、数値的に評価してみる。TRIにおける3台のポンプでの平均流量比を m_0 、OSUでの測定流量比を m_1 として、平均的な測定値の差を次式によって求める。

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum (m_0 - m_1)^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

共通の測定値は粒径範囲0-60 μ mまでであるから、 $N=7$ である。上式により数値を求めると $\sigma=0.078$ であつて、これは前章で求めた $\sigma=0.033$ の2倍以上である。このような差異を生じてくる原因は二通り考えられる。一つは送付した機種自身の問題である。すなわち試験前流量 Q_0 はTRIでの値とOSUでの値では、すでに5%近く異なっている。

次は試験実施上の問題である。このポンプにも流量回復現象はあるが、それはここでは大きな問題でないと思われる。すなわち流量変化の経過曲線中で、流量回復を示しているものは、一例のみである。TRIの場合、各粒径範囲の試験後に清浄流体のもとで、ポンプの吐出し量特性を調べている。このことは実効的にはアブレーション摩擦により生じた凹凸を減少させる効果を持つと考えられ、以後の粒径範囲のもとでの流量低下に影響を及ぼすと考えられる。

ピストンポンプの場合の比較はFig.9に示す。この機種においては、粒径分布の影響が顕著であることが、本研究において明らかとなっている。OSUの分級ダス

Fig. 7 Reproducibility on Vane Pumps

Fig. 8 Reproducibility on Gear Pumps

Fig. 9 Reproducibility on Piston Pumps

トは0-40 μm 以上の粒径範囲では実質的差異が小さいので、呼称粒径範囲を大きくしても流量低下はさほど著しくない。Fig. 9はこの見解を裏付けている。流量回復はこのポンプの場合、流体の清浄化や流量測定の間にも顕著に進む。したがって今回のTRIの結果とOSUの結果の比較から多くのことを結論づけない方が良いであろう。これは試験法の規定に問題があると思すべきである。

フィルタ回路を用いて流体の清浄化を行う時間は、この種のポンプが実在する以上、実験室間で統一すべきであり、試験法に記載すべきものであろう。また、本研究では、ポンプ特性を汚染感度試験の間には自分で測定しているが、これは除去した方が良くであろう。

以上を総合して実験室間の再現性に関しては、満足な状態になっていないと結論する。実験室間の相違を生じさせる原因には、次の三つがある。

- (1) 分級ダストの粒径分布が規格中に正確に記されていないこと。
- (2) 流体清浄化に要する時間も規定すべきであって、到達する清浄度だけの規定では不十分であること（フィルタの能力をもっと具体的に指定する）。
- (3) 運転打切り条件の規定が、実施手順から見ると不明確である。

5. 試験法に関する補遺的実験

NFPA規格では0-5, 0-10, …… , 0-80 μm の

Fig. 10 Influence of Test Method (Vane Pump)

Fig. 11 Influence of Cooling Method (Piston Pump)

分級ダストを順次投入することを規定している。このうちでダスト投入を適当に省いた場合に、汚染感度曲線が異なったものとなるかどうかを検討する。

Fig. 10においてポンプP10は0-50 μm のダストを投入せず、他は一般条件と同じである。標準的な試験の結果はP22が示す曲線であって、これら2曲線の

相違は顕著である。すなわちダスト投入が異なるときに汚染感度曲線は変る。しかし $0-5\mu\text{m}$ のような粒径の小さい区間での省略がこのように大きな差異をもたらすとは考えにくい。この点については、さらに実験を進めて、可能な限り試験法の簡素化を図るべきである。

ピストンポンプにおいては、ケースドレーン流量が予想外に多かったため、試験装置を一部改造して、ケースドレーン流量をも冷却できるようにした。第1報¹⁾の回路図は改造後のものである。Fig.11はケースドレーン冷却の有無による差異を示す。この場合の差異は顕著ではなく、流量変化の経過曲線においても、見るべき差異はなかった。この処置は吐出し量に対する冷却が十分に強力に行われる場合には必要でなくなるが、一般的にはあった方がよい。装置製作上の一つの注意事項となるであろう。

6. むすび

NFPA 汚染感度試験法の検討を行った本報における研究の結論をまとめると次のとおりである。

(1) NFPA 方式による汚染感度試験法による繰り返し精度は、使用可能な程度であるが、試験時間の統一規

定を行えば、さらに向上できる。

(2) NFPA 方式による汚染感度試験法において、実験室間の再現性を保証するには、フィルタ回路の性能をさらに詳しくするか、もしくはろ過に要する時間を一定とする規定を加える必要がある。

また分級ダストの粒径分布の規定は現在のものでは不正確で、より確定的な規定に改める必要がある。

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52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、通産省当局の指導、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、関係各位に厚くお礼を申しあげる。

参 考 文 献

- 1) 岩泉ほか3名：油圧ポンプの汚染感度試験法に関する研究。第1報、油圧と空気圧、11-7(1980-11)、P. 435-442
- 2) 岩泉・山下：同上、第2報、油圧と空気圧、12-1(1981-1)

(62ページよりつづく)

を分級した試験用ダストを、ロジン・ラムラ(Rosin-Rammier)線図上にプロットしたものである。ここで縦軸 R_0 はふるい上質量比である。このようにすると粒径分布は直線で表示されるから、分級の公差なども与えやすくなる。

4. むすび

本報告は、汚染感度試験の結果に重要な影響をもたらす試験用ダストの分級方法と、分級した結果の粒径分布の測定結果について述べた。

その結果、(1)鋭い分級を行うためには単一の分級機だけでは不十分で、いくつか異なる方法を組み合わせなければならないこと、(2)試験用ダストの原料は特定

すべきこと(ACFTDでよい)、(3)汚染感度試験を再現性(実験室間)よく行うためには、粒径分布の測定法及び粒径分布の公差を定める必要があること、などがわかった。

NFPA 推奨規格は現在ISOへの提案規格となっているが、上記の(1)及び(2)に関連する記述は不十分なので、関係者の注意をうながしたい。

本報告は、昭和52年4月から同53年3月までの1年間、(財)機械振興協会技術研究所と(社)日本油圧工業会との共同研究プロジェクトとして実施された研究の一部をまとめたものである。通産省当局及び日本自転車振興会の指導・援助ならびにプロジェクト参加企業のご協力を特記し、関係各位に厚くお礼申しあげる。