43. 油圧作動油の粘度特性最適化による建設機械の燃費改善

デグサジャパン株式会社:○浜口 仁 RohMax USA Inc. - Douglas Placek RohMax Additives GmbH - Klaus Hedrich

1. はじめに

油圧ショベルのように油圧システムを多用する建設機械では、油圧ポンプの効率が機械全体の燃料消費に及ぼす影響が非常に大きい。油圧ポンプの効率は油圧作動油の粘度の影響を強く受けることも旧知の事実である。

作動油の主成分としては、鉱油系のベースオイルが通常用いられるが、油温が上昇すると粘度が低下するため、高負荷作業時にはポンプの内部漏れが増加し、効率は著しく低下する。一方、低温時には粘度が上昇するため、ポンプや配管部の流動抵抗が増加して燃費が悪化する。

作動油の粘度-温度特性を改善するために、粘度 指数向上剤と呼ばれる高分子化合物を添加する ことにより、高温時の粘度低下と低温時の粘度上 昇を抑制することができるが、運転中の負荷によ り高分子が機械的にせん断され、運転時間ととも に作動油の粘度が低下する問題があった。

本研究では、せん断安定性に優れた粘度指数向 上剤を適用することにより、長期にわたりポンプ 効率を大幅に改善できることを報告する。

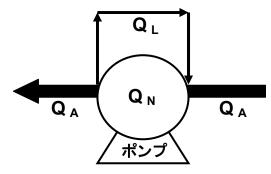
2. ポンプ効率

実用の油圧ポンプでは、図-1に示すように、作動油の内部漏れ(Q_L)により、実際の吐出流量(Q_A)は公称流量(Q_N)より少なくなる。

$$Q_A = Q_N - Q_L$$

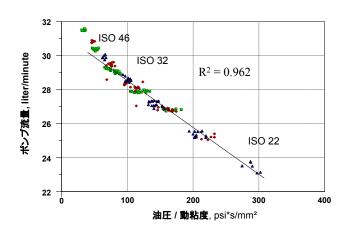
また、ポンプ効率 (V_E) は、下式で表される 1 。

$$V_E\% = 100 \times Q_A / Q_N$$



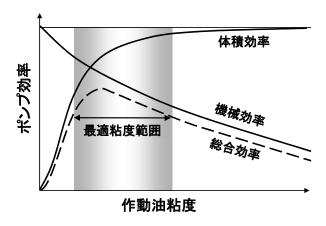
図―1 油圧ポンプの内部漏れと流量の関係

内部漏れはポンプの吐出圧力が高くなるほど、また、作動油の粘度が低くなるほど増加する。図 —2 にベーンポンプにおける吐出圧/作動油粘度とポンプ流量の関係の一例を示す。



図—2 ベーンポンプの吐出量と圧力/粘度 (Eaton-Vickers V20 ポンプ)

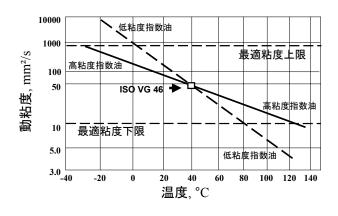
これより、油圧ポンプの体積効率は、作動油の 動粘度と比例関係にあり、動粘度が高くなるほど 効率は高くなり、動粘度が低くなるほど効率は低 下することがわかる。一方、ポンプの機械効率は、 作動油の粘性抵抗により、動粘度が高くなるほど 低下し、動粘度が低くなるほど向上する。ポンプの総合効率は、体積効率と機械効率の積で表わされるため、図—3に示すように、総合効率が高くなる最適粘度領域が存在する²⁾。



図―3 作動油粘度とポンプ効率の関係

3. 油圧作動油の粘度・温度特性

一般に知られているように、非水系の潤滑油は、低温では粘度が高く、高温では粘度が低下するという特性を有している。温度変化に対する粘度の変化の程度を表わす尺度として粘度指数が用いられ、図―4に示すように、粘度指数が小さいと温度変化に対する粘度の変化が大きく、粘度指数が高いと温度変化に対する粘度の変化が少ない³。



図―4 油圧作動油の粘度温度特性 (ISO VG 46 の例)

これより、高粘度指数油は、低粘度指数油と比較して、広い温度範囲で最適粘度領域に留まることがわかる。言い換えると、高粘度指数油は、低

温域で粘度が低く、高温域で粘度が高いことがわ かる。従って、高粘度指数油は、低温時の粘度増 加による機械効率の低下を防ぎ、同時に高温時の 粘度低下による体積効率の低下を抑制する効果 が期待できる。

4. ポンプ試験

上述した高粘度指数油のポンプ効率に及ぼす 影響を確認するために、ベーンポンプとピストン ポンプを用いてポンプ試験を実施した。試験に用 いた油圧回路を付図―1に、ポンプの仕様を表― 1に示す。

表―1 供試ポンプの仕様と試験条件

ポンプ形式	斜板型 ピストン ポンプ	ベーンポンプ
ポンプ押しのけ容積, cm³/rev	28.6	21.3
ポンプ回転数, min ⁻¹	2,100	1,500
圧力範囲, MPa	0~34.3	0~24.5
温度範囲,℃	60~100	20~100

次に、試験に用いた供試作動油を調製するに当たり、せん断安定性の異なる4種類の粘度指数向上剤(いずれもポリメタクリレート系)を使用した。その内容を表-2に示す。

表-2 供試油に用いた粘度指数向上剤

コード	平均分子量	KRL 試験*における 粘度低下率,%
A	約2万	6
В	約4万	1 1
С	約6万	1 6
D	約15万	2 0

*CEC L-45-A99 法 ⁴⁾ 20Hr 試験による

ポンプ試験に用いた供試油の粘度データをまとめて表一3に示す。各供試油は、鉱油系基油 (Group II) にデニソン HF-0 相当の主添加剤を加え、粘度グレードに応じて基油と粘度指数向上剤

の添加率を調整した。

供試油	ISO	用いた	40℃	100℃	粘度
コード	VG	VII	粘度	粘度	指数
P-0	46	なし	45.9	6.8	103
P-1	46	В	44.7	7.2	122
P-2	46	В	46.1	7.9	141
P-3	46	В	47.8	8.6	158
P-4	46	В	46.0	9.7	202
P-5	46	A	46.0	8.4	160
P-6	46	С	45.4	8.4	162
P-7	46	D	45.2	8.3	162
V-0	46	なし	42.7	6.6	100
V-1	46	A	43.3	7.8	151
V-2	46	В	44.9	8.1	153
V-3	46	C	45.5	8.1	153
V-4	46	D	44.1	7.9	153

50.3

46.2

45.4

45.3

9.9

9.6

9.6

9.9

189

198

205

212

表-3 供試油の内容と粘度特性

ポンプ効率の算定にあたっては、一定の温度・ 圧力条件におけるポンプ駆動モータの消費電力 ならびに吐出流量より求めた。本稿では割愛する が、ポンプ効率測定の繰り返し精度は±1%以内 であった。

В

C

D

5. 結果

V-5

V-6

V-7

V-8

46

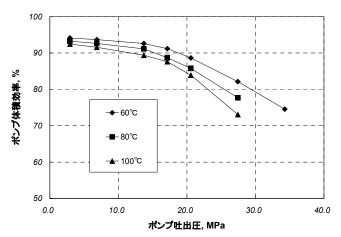
46

46

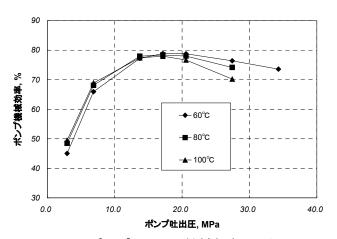
46

はじめに、斜板型ピストンポンプに供試油 P-0 (粘度指数向上剤を含まないシングルグレード油)を用いて、圧力および作動油の温度(粘度)がポンプの体積効率に及ぼす影響を検討した結果を図—5に示す。これより、ポンプの体積効率は、吐出圧が高くなるほど、また、温度が高くなるほど低下することがわかる。

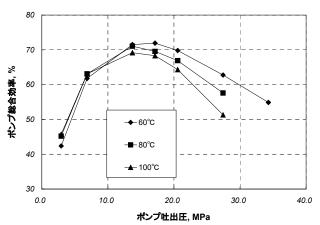
次に、同じく圧力と油温がポンプの機械効率に 及ぼす影響を図―6に示す。これより、吐出圧が 10 MPa 以下の低圧条件下では、油温が低いほど 機械効率が低下するが、これは、作動油の粘性抵 抗が大きくなるためであり、一方、吐出圧が 20 MPa 以上の高圧条件下では、油温が高いほど機械 効率が低下するが、これは、油温が高いほど機械



図―5 ポンプ吐出圧と体積効率の関係 (斜板型ピストンポンプ:シングルグレード油)

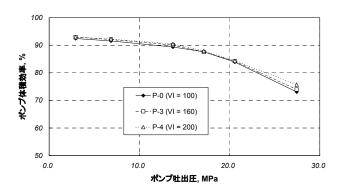


図―6 ポンプ吐出圧と機械効率の関係 (斜板型ピストンポンプ;シングルグレード油)

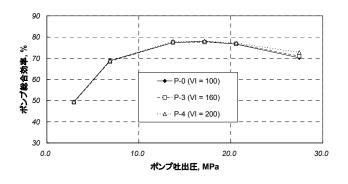


図―7 ポンプ吐出圧と総合効率の関係 (斜板型ピストンポンプ;シングルグレード油)

り、境界潤滑領域が増加するためと考えられる。 次に、ポンプ効率に及ぼす作動油の粘度指数の 影響を把握するために、斜板型ピストンポンプに 供試油 P-0, P-3 および P-4 を用いて実験を行った。 その結果を図—8から10に示す。



図―8 ポンプ吐出圧と体積効率の関係 (ピストンポンプ:マルチグレード油)



図―9 ポンプ吐出圧と機械効率の関係 (ピストンポンプ:マルチグレード油)

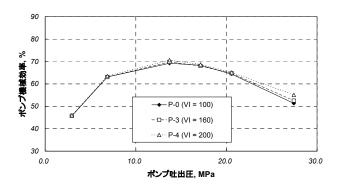


図-10 ポンプ吐出圧と総合効率の関係 (ピストンポンプ:マルチグレード油)

これらの結果から、高粘度指数作動油は、高温 時に粘度低下が抑制されるために、内部漏れを低 減し、油膜形成も容易になるため、ポンプ効率を 維持することがわかる。この傾向は、吐出圧が高 くなるほど顕著である。

マルチグレード作動油の粘度指数とポンプ総合効率の向上率を、シングルグレード油との比較で、まとめて図―11に示す。これより、高温高圧条件時には、粘度指数200の供試油で、最大で約8%の効率向上が認められた。一方、粘度指数120の供試油については、ポンプ効率はむしろ低下している。これは、粘度指数向上剤の一時的せん断により、ポンプ内での実効粘度がシングルグレード油よりも低くなるためと思われる。

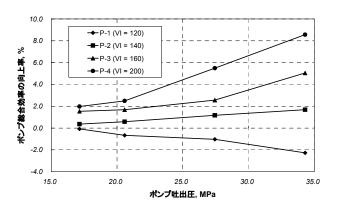


図-11 作動油の粘度指数とポンプ効率 (ピストンポンプ;油温=100℃; シングルグレード油P-0との比較)

上図で得られた高粘度指数油のポンプ効率向上効果は、適切なせん断安定性を有する粘度指数向上剤を用いた場合にのみ得られる効果である。この点を確認するために、せん断安定性の異なる粘度指数向上剤を用いて、粘度指数を160に調製した供試油P-3,5,6 および7 について同様の実験を行った結果をまとめて図一12に示す。

これより、せん断安定性に劣る粘度指数向上剤 を用いた場合、ポンプ効率の向上効果は著しく低 下することがわかる。

次に、ベーンポンプを用いてマルチグレード作 動油の粘度指数とポンプ総合効率の向上率との

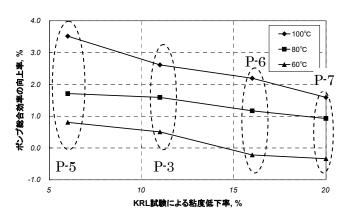


図-12 作動油のせん断安定性とポンプ効率 (ピストンポンプ;吐出圧 = 27.4 MPa)

関係を、シングルグレード油との比較でまとめて 図―13に示す。これより、ピストンポンプの場合と同様に、作動油の粘度指数が高いほどポンプ 効率は向上し、この傾向は吐出圧が高いほど顕著 となる。ベーンポンプの場合、ピストンポンプと 比較して、内部漏れが大きいため、粘度指数の影響が現れやすく、粘度指数190で最大約15%の効率向上が認められた。

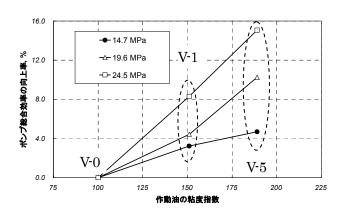


図-13 作動油の粘度指数とポンプ効率 (ベーンポンプ;油温=100℃)

次に、ベーンポンプにおける、作動油のせん断 安定性とポンプ効率との関係をまとめて図—14 に示す。ピストンポンプの場合と同様に、せん断 安定性の悪い粘度指数向上剤を用いると、ポンプ 効率は著しく低下することがわかる。

油圧作動油は、使用中にポンプの機械的せん断により粘度低下するが、適切な粘度指数向上剤を

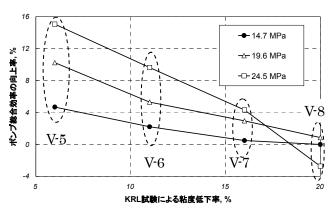


図-14 作動油のせん断安定性とポンプ効率 (ベーンポンプ: 粘度指数 200 油の比較)

選択することにより、ポンプ効率の低下を防止することができる。その一例として、ベーンポンプを300時間連続運転した場合の作動油の粘度推移と、ポンプ流量の関係を図一15に示す。

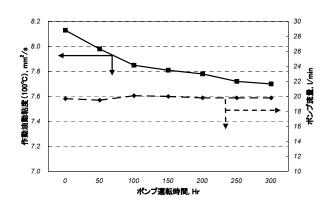


図-15 作動油の粘度とポンプ流量の推移 (ベーンポンプ;供試油 V-3;圧力=24.5 MPa)

これより、作動油粘度は運転時間の経過とともに徐々に低下するが、ポンプ流量はほぼ一定であることがわかる。これは、粘度指数向上剤の永久せん断により作動油の見かけ粘度は低下するが、ポンプ内の実効粘度は、粘度指数向上剤の一時的せん断の影響を受け、一定の値を保持しているためと考えられる。すなわち、永久せん断により分子量が低くなるため、一時的せん断が小さくなる現象により、両者の和がほぼ一定で推移するものと思われる。

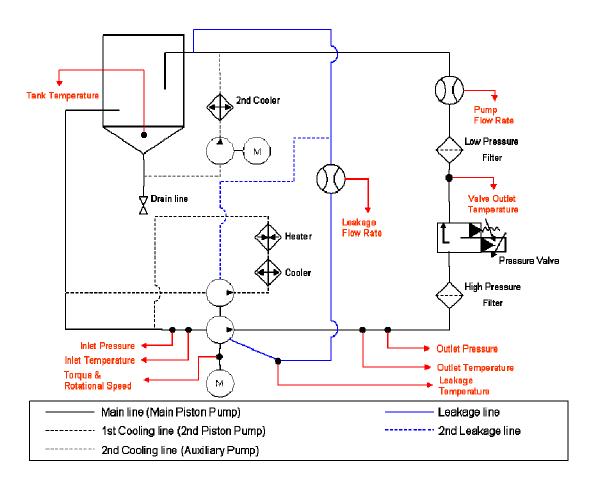
6. まとめ

ピストンポンプとベーンポンプを用いた一連 のポンプ効率試験結果から以下の知見が得られ た。

- 油圧作動油の粘度指数を高めることにより、 ポンプ効率は向上する。
- その効果は、高温・高圧条件になるほど顕著 となる。
- 粘度指数向上剤のせん断安定性を高めることにより、ポンプ効率はさらに向上するが、 せん断安定性の悪い粘度指数向上剤を用いると、効率は低下する。
- せん断安定性に優れた粘度指数向上剤を用いることにより、長期の使用において一定のポンプ効率を維持することができる。

[引用文献]

- P.W. Michael, S.N. Herzog, T.E. Marougy, "Fluid Viscosity Selection Criteria for Hydraulic Pumps and Motors". NCFP paper 100-9.12. International Exposition for Power Transmission and Technical Conference. 4-6 April 2000, Chicago, IL, USA.
- GE. Totten, Handbook of Hydraulic Fluid Technology, Marcel Dekker, New York, 2000, p. 27.
- S.N. Herzog, C.D. Neveu, D. Placek, "Boost Performance and Reduce Costs by Selecting the Optimum Viscosity Grade of Hydraulic Fluid". Lubrication and Fluid Power Expo, Indianapolis, IN, USA. May 4-8, 2003.
- CEC Test Method: CEC-L-45-A99. "Taper Roller Bearing Test". 1999.



付図―1 ポンプ試験油圧回路図(ピストンポンプ)