ハイブリッド油によるギヤ増速ポンプの 高周波騒音低減の研究*

吉川 英夫^{*1}, 坂上 克之^{*2}, 松井 愼^{*1}
小西 義昭^{*3}, 高木 貞治^{*3}

Study on the Reduction of High-Frequency Noise for an Accelerated Gear Pump

Hideo YOSHIKAWA, Yoshiyuki SAKAGAMI, Hiroshi MATSUI,
Yoshiaki KONISHI and Teiji TAKAGI

In this study, we show that hybrid oils including dispersed graphite whiskers, graphite fibers and natural graphite powders show marked effects in the reduction of the sound power level of high-frequency noise which is caused by teeth sliding against each other under a high-pressure condition in an accelerated gear pump. Furthermore, the source of this noise is analyzed and evaluated on the kind of materials used as solid lubricants in this study.

Key Words: Fluid Machine, Hydraulic Machine, Gear Pump, Hybrid Oil, Accelerated Gear Pump, Noise Reduction, Graphite Whisker, Carbon Fiber

1. ま え が き

従来, ギヤ増速ポンプの高周波騒音の低減の研究はかみあう歯の剛性, 表面粗さおよび種々の歯面誤差の精度を向上させて解決する方向で, その製造および管理技術などの改善について行われている⁽¹⁾.

しかし, ギヤのかみあう面は一般に浸炭加工を用いるので, 歯面誤差の大幅な改善は加工機械の開発を必要とするため, 時間と経費に問題がある. 本ポンプは水を昇圧移送するポンプ室と潤滑油槽でモータの回転数をギヤを用いて増速するギヤ室からなり, それぞれがシールにより分離されている. ここで着目したのは人体に不快に感ずる 4 ~ 8 KHz の高周波のキーン音低減の問題である.

本研究では騒音発生原因に水ポンプの吸入や吐出し脈動音による流体発生音よりも, ギヤ室からの約 10 dB 高い固体発生音の低減をとりあげた. 現在ギヤの設計および加工精度に用いられている範囲内で, かみあう面のいくつかの固体接触を含む境界潤滑状態で発

生する高周波キーン騒音を固体潤滑剤をディスペーズさせたハイブリッド油を用いて大幅に低減させた.

その方法は一般のギヤ油に固体潤滑剤のグラファイトウイスカ, ピッチ系炭素繊維および天然炭素粒子などをノニオン系分散剤とともにディスペーズさせたハイブリッド油を使用し, 騒音レベル(SPL)および周波数分析により騒音低減効果を確認した. また, 試験後採取したハイブリッド油中の固体潤滑剤は ESCA または SEM 写真の結果より破壊していたことから, 高周波騒音はギヤのかみあう面における金属の接触に起因し, そのかみあう滑り面に固体潤滑剤粒子が介在するため緩衝剤となって SPL を低下させていることがわかった. 本ハイブリッド油は滑り摩擦損失も低下させるので, やや省エネルギー効果も得られたので, 以下にその内容を報告する.

2. 試験装置および方法

2・1 供試ハイブリッド油 本試験に用いた固体潤滑剤は, グラファイトウイスカ(GW), ピッチ系炭素繊維(CF)および天然炭素粒子(NC)などで, それぞれを適当な焼成温度で焼鈍し, 圧縮強度などを調節したものを用いた. それぞれをノニオン系分散剤とともに約 0.125 wt% 濃度にしたものを GW ハイブリッド

* 平成 5 年 3 月 31 日 第 70 期通常総会講演会において講演, 原稿受付 平成 5 年 7 月 15 日.

^{*1} 正員, 千葉工業大学 (〒275 習志野市津田沼 2-17-1).

^{*2} 学生員, 千葉工業大学大学院.

^{*3} 正員, 日機装(株) (〒421-04 静岡県榛原郡榛原町静谷 498-1).

油, CF ハイブリッド油および NC ハイブリッド油という。

表 1 は焼成温度を変えて圧縮強度を調整した GW ハイブリッド油の主要要目を示す。また, 図 1 に示すように両端がほぼ球形をして, その軸中心部に約 3 ~ 5 nm の小孔がある。その GW は炭化水素を遷移金属の微粒子の中で熱分解させ, その後不活性ガス中で 2 200 ~ 2 800 °C で焼鈍して圧縮強度を調整したものをを用いた。

表 2 は CF の焼成温度を 1 000 °C および 2 000 °C にして, 炭素化過程にある炭素と黒鉛化過程の初期で配向性の構造をもつものの主要要目を示す。

また, NCBP は天然黒鉛中の灰分を約 3.2% 以下になるように焼成し, 固定炭素分を約 96%, 平均粒度を約 2 μm としたものである。NCSG はさらに焼成温度を約 3 000 °C にして灰分を約 1.6% にし, 固定炭素分を約 97.5%, 平均粒度を約 2 μm にして前者より焼鈍したものである。

本ハイブリッド油のベースになる潤滑油はマルチグレード油の 5 W 30 油である。本試験に用いた各種ハイブリッド油は 5 W 30 油にノニオン系分散剤を約 10% と固体潤滑剤 0.05 ~ 0.125 wt% にして超音波かくはん機を用いて懸濁させたものである。

表 1 の圧縮破壊力および弾性率は微小圧縮機(島津 MCTM 500)を用いて軸に直角方向を 10 個計測して, 平松らの式で圧縮強度を計算し, その範囲を示し

表 1 グラファイトウイスカの主要要目

Symbol		GWV	GWM	GWH
Diameter	μm	0.8	0.8	0.8
Aspect ratio		15	15	15
Baking temp	°C	No Bake	2200	2800
Density	g/ml	1.8	1.95	2.0
Compression stress	MPa	110 ~ 320	450 ~ 820	160 ~ 690
Modulus of elasticity	GPa	250	320	300

図 1 グラファイトウイスカの SEM 写真⁽²⁾

た⁽³⁾。

表 2 の弾性率は文献より参考値として記載した⁽⁴⁾。

2・2 供試ギヤ増速ポンプ 表 3 は本試験に用いられたギヤ増速ポンプの主要要目である。

図 2 はそのポンプの断面図を示し, 潤滑油を図に示す位置まで入れた浸油自己スプレ方式である。

2・3 試験装置および方法 供試ポンプは据付けレベルから約 3 m の位置に設けたヘッドタンクにより押込ヘッドを確保し 5 ~ 37 l/min で運転し, ギヤ室の音圧レベルを図 2 に示す a ~ j 位置で容器にマイクロホンを 1 mm 以下に接近させて計測した。

また, 空間分布および音のケーシングへの伝ばの影響をみるため一部を被覆した試験も行った。本試験はギヤのかみあいに基づく SPL を, ハイブリッド油と 5 W 30 油の相対値を比較することおよびかみあい面

表 2 CF および NC の主要要目

Symbol		CF 1000	CF 2000	NCBP	NCSG
Diameter	μm	14	14	2	2
Aspect ratio		1.0	1.0	—	—
Baking temp	°C	1000	2000	2000	3000
Density	g/ml	2.13	2.17	1.6	1.8
Modulus of elasticity	GPa	~ 80	~ 120	~ 110	~ 90

表 3 ギヤ増速ポンプの主要要目

	Shaft pinion helical	Gear helical
No. of teeth	22	195
Pitch diameter (mm)	19.3(0.76")	171(6.74")
Width of tooth (mm)	19.3(0.76")	15.7(0.62")
Module of perpendicular tooth	0.79	
Helix angle	25.3°	25.3°
Pressure angle	20°	20°
Regular contact ratio	1.31	
Contact ratio	2.99	
Total contact ratio	4.30	
Rared flow/Out put (l/min/kW)	37/4.5

図 2 ギヤ増速ポンプの音圧レベル測定位置

に固体潤滑剤の介在することによる影響を調べるのを目的とした。また、試験後、ハイブリッド油中の固体潤滑剤はフィルタを用いて抽出後洗浄し、SEM 写真によりその健全性を比較した。

本試験の SPL は精密騒音計(JIS K 1505)および FFT(小野測器製 C 240)を用いて計測した。

3. 試験結果

3.1 測定点における SPL 図 3 は 5 W 30 油についての周波数と SPL の計測結果である。なお、点 c はギヤのかみあい位置にもっとも近い点であるが、容器のリブの影響が入るので、点 i をもって代表とした。また、本図より点 i が他の測定点よりも高い SPL を示している。

3.2 GW ハイブリッド油の濃度と SPL の比較

図 3 各測定点の SPL と周波数の関係

図 4 GW ハイブリッド油の周波数と SPL(点 i)

図 4 は 5 W 30 油を標準油としたとき、GW ハイブリッド油を代表にして、濃度 0.05~0.15 wt% までの周波数と SPL の関係を示した。本試験結果より、GWM ハイブリッド油による SPL の低下は 0.05 wt% と極めて希薄であっても SPL を低下させることができた。しかし、その効果は約 0.125 wt% 程度で最大を示し、0.15 wt% においては 0.125 wt% とほぼ同じ結果を示した。また、0.175 wt% および 0.2 wt% の試験も行った。

3.3 ポンプ負荷と SPL の関係 表 4 は GW ハイブリッド油の種類と流量を変えたときの SPL (Overall) を示した。ポンプの負荷は電圧調整器によりポンプの回転数を変更した。本表より、GWM すなわち圧縮強度のもっとも高いものが SPL 低下により効果を示した。

濃度は本結果より 0.125 wt% がよい結果を示した。また、ポンプ負荷の上昇にしたがって、SPL の変化はごくわずかであった。この傾向はいずれのハイブリッド油でも同じであった。

図 5 はポンプの流量を 5~37 l/min のときのかみあい周波数付近と高周波数領域の SPL について 5 W 30 油および GW ハイブリッド油を代表して示す。本図より、400 Hz 付近では流量変化による影響はほとんどないが、4 kHz と 8 kHz では約 15 l/min 付近

表 4 GW ハイブリッド油を用いたときのポンプ負荷と SPL

		(unit dB(A))				
i point	Flow rate	5W30	GWM	GWM	GWV	GWH
	l/min	0%	0.05wt%	0.125wt%	0.125wt%	0.125wt%
	10	103.1	99.0	97.7	99.5	98.6
	20	103.5	99.5	98.0	100.3	99.5
i point	37	103.8	100.1	98.5	100.9	99.8
	10	103.5	99.8	98.5	100.7	99.1
	20	103.9	100.9	99.2	101.9	99.6
	37	104.1	101.1	99.5	102.7	100.0

図 5 GW ハイブリッド油の周波数と流量変化

より高い SPL を示している。そこでハイブリッド油を用いると、低周波で約 5.2 dB、高周波で約 4 dB 低下し、とくに 8 kHz の 5~10 l/min の SPL は 5 W 30 油のときキーン音が極めて低かった 2 kHz とほぼ等しい値を示すまで低下していた。このことはギヤのかみあい負荷の増加による相互の固体接触によるものであると考えられる。

3.4 高周波騒音と振動および流体的加振音の関係

図 6 の試験結果より、ポンプ室のみとポンプ室およびギヤ室を遮音材で被覆したときに 0.8 kHz まではほとんど差がなかった。このことはケーシングへの音の伝ばおよびそれに伴う放射音(1 m で計測)もキーン音の除去と区別して考えることができる。

水ポンプ室を被覆しても、2 kHz 以上の高周波音の低下が非常に少ないことから、水ポンプに起因する流体音のキーン音評価に与える影響が少ないことになる。

図 7 は潤滑油量を図 2 に示すレベルとほぼ軸心の位置に増加したときの SPL を比較したが、各周波数にわたって変化がみられなかった。図 6 と図 7 の結果から、水ポンプとギヤ室の流体音の高周波キーン騒音に与える影響が非常に少ないと考えた。

本供試ポンプのギヤのかみあい周波数は表 3 より 440 Hz で、その整数倍において SPL が卓越している。FFT 試験結果によると、ハイブリッド油は共鳴周波数付近において、図 5 より SPL を大幅に低減させる。また、1.6 kHz 以上では図 6 に示すようにケーシングより 1 mm および 1 m 離れた場所においても卓越している。ここで、ギヤ増速ポンプ共振がキーン音に与える影響をみるためギヤ増速ポンプに振動ピックアップを取付けて、運転状態においてハンマリング試験により固有振動数を求めた。その値は、1.9 kHz でかみあい周波数とはなれていた。

3.5 黒鉛化度と SPL の関係 図 8 にはポンプ

図 6 遮音試験による空間分布の周波数分析

負荷最大のときの黒鉛化度の高い CF 2000 が CF 1000 のような炭素化材より SPL をより低下させていることを示す。

NCBP は NCSG のように焼成温度を高くして焼鈍しても SPL 低減の効果は減過させている。図 4 および図 8 ならびに表 4 より、GW ハイブリッド油では GWM, GWH, GWV と圧縮応力および弾性率の順で高周波 SPL が低下した。また、添加 GW の濃度は 0.125 wt% において最大効果を示し、それ以上添加しても向上は認められなかった。また、CF および NC ハイブリッド油においても同様の結果を示した。

3.6 ハイブリッド油と摩擦損失 表 5 は GW ハイブリッド油を代表してギヤの摩擦損失の影響をみるため、消費電力量の計測結果を示す。

本表より、各 GW ハイブリッド油の摩擦損失は低下し、約 4.3% 消費電力が低下している。他の種類においても同様の結果になった。

3.7 長時間運転と安定度 図 9 は運転初期と 100 h 経過中の SPL の変化を OA および高周波領域ならびに直接かみあいからくる周波数 400 Hz 付近を代表して示した。試験結果より、ハイブリッド油を使用すると約 50 h 程度で安定し、いずれも高周波領域で SPL が 5 W 30 油より低下している。

3.8 運転前後における固体潤滑剤の変化 図 10

図 7 潤滑油量変化による周波数分析

図 8 37 l/min の点 i における周波数分析

は GW ハイブリッド油を用いて 100 h 運転後、固体潤滑剤を洗浄後抽出して ESCA および SEM の写真撮影を示す。GWM, GWV および GWH とも 10 l/min と 37 l/min の負荷で運転したときも破損しているが、高負荷の破壊が著しいように見える。図 11 は CF および NCBP の同様の結果を示すが、高負荷のとき破損している。

3・9 摩耗量比較試験 図 12 は GWM ハイブリッド油を代表し油中に浮遊している摩耗細片を濾紙で採取乾燥後、その中の Ni および Fe の量を蛍光 X 線により計測し、経過時間とその増加率の関係を示した。

GWM ハイブリッド油は運転経過時間に対し 5 W 30 油に比較し、増加率が緩やかである。ハイブリッド油はかみあい歯の摩耗速度を大幅に低下させている。

3・10 摩擦係数の変化 運転によるハイブリッド油と標準油のオイル性状の変化をみるため、前者に混合されている固体潤滑剤を濾紙で除去した後、四球式摩擦試験機を用いて摩擦係数の変化を計測した。そのとき、試験油の温度を 90°C および 120°C にして、それぞれボール速度 750 rpm および 1500 rpm について

表 5 GW ハイブリッド油濃度と消費電力量
(単位: kW)

Flow rate	Hybrid oil	GW content (w%)				
		0	0.05	0.075	0.10	0.125
10 l/min	GWV	3.458	3.339	3.331	3.328	3.314
	GWM	3.458	3.294	3.284	3.280	3.277
	GWH	3.458	3.366	3.359	3.350	3.346
37 l/min	GWV	4.534	4.395	4.386	4.379	4.361
	GWM	4.534	4.366	4.355	4.346	4.340
	GWH	4.534	4.426	4.417	4.404	4.400

図 9 長時間運転による SPL の安定度

図 10 GW ハイブリッド油運転前後の SEM 写真

図 11 CF および NC ハイブリッド油運転前後の SEM 写真

図 12 蛍光 X 線試験による摩耗量の相対比較

図 13 ハイブリッド油運転前後の摩擦係数の変化の比較

図 15 PV 値と摩擦係数

 図 14 摩擦係数と $\eta N/P$ 値

の摩擦係数を図 13 に示す。本図では GWM と GWH ならびに CF 2000 と NCBP ハイブリッド油を代表して示した。

本結果より、ハイブリッド油の最大摩擦係数の変化速度は 5 W 30 油に比べ緩やかである。図 12 によると、5 W 30 油とハイブリッド油の摩耗量の差は時間経過とともに広がっている。

両ギヤの接触点が作用線上を等速運動するとしてそのかみあい長さを求め、弾性変形をするとして求めた接触面積から接触面圧を求めると 37 l/min および 10 l/min のときは 475 MPa と 316 MPa になる。

この値を用いて、粘度 η [Pa·s]、回転数 N [rpm] の積を接触圧で除した無次元数 $\eta N/P$ を横軸に、摩擦係数を縦軸にとると図 14 のようになる。図 14 に 37 l/min および 10 l/min の無次元値を記載すると、供試ギヤ増速ポンプのかみあい歯面の潤滑状態は境界潤滑領域になり部分的に固体接触が起こり得ることを示唆し

ている。

また、図 10 および図 11 の SEM 写真の結果から GW、CF および NC が破損しているのかみあい歯面に潤滑油をキャリアとしてそれらが介在し、耐圧縮応力を上回る圧力になっていることから境界潤滑領域にあるといえる。本ギヤ増速ポンプの異常高周波音はかみあい面における境界潤滑領域において、部分固体接触によって発生していて、ハイブリッド油中の固体潤滑剤が緩衝剤として作用し、その圧縮エネルギーを自らの破壊によって吸収したと考えられる。

ハイブリッド油の 100 h 運転後の効果を見るため、図 15 に四球式摩擦試験の結果を用いて、 PV (Pa × m/s) と摩擦係数の関係をまとめた。この結果から、ハイブリッド油は摩擦係数を低下させ、省エネルギーにも貢献して摩耗量も低下させている。

4. ま と め

GW、CF および NC ハイブリッド油はかみあい面において高い面圧をもつような境界潤滑領域において発生する高周波のキーンという騒音を抑制するか、または消去することができた。また、同時に摩擦損失および摩耗量の低減ならびに潤滑油の変化速度の遅延などが現状程度の設計や工作で達成することができた。

本試験に際し、千葉工業大学大学院生の安道俊次君の協力を得たことに謝辞を表す。

文 献

- (1) 河本, 自動車技術, 45-12(1991), 94.
- (2) Tech Instorm., (1991).
- (3) 平松・岡・木山, 日本鉱業誌, 81-10(1965), 24.
- (4) 持田, 炭素材の化学と工学, (1990), 5, 朝倉書店.