高含水作動液中のキャビテーション損傷と発生ノイズ*

辻野 智二^{*1}, 島 章^{*2}, 及川 裕一^{*3}

Cavitation Damage and Generated Noise in High Water Base Fluids

Tomoji TSUJINO, Akira SHIMA and Yuichi OIKAWA

Cavitation damage tests in high-water-base-fluids (HWBF) are carried out with an ultrasonic vibratory cavitation test apparatus, and cavitation noise spectra are measured. The results are compared with those for other fire resistant fluids (water-glycol fluid and phosphate ester), petroleum oil, and water. The mass loss in HWBF is about one-half of that in water, which is triple or quadruple of that in the water-glycol fluid, and several decuple in phosphate ester. For the tested liquids, the mass loss in petroleum oil was the lowest. Sound pressure levels in the frequency domain 40 kHz in HWBF are lower, compared with that in water. The values of SPL and mass loss in 0.3% HWBF are smaller than those in 5% and 20% HWBF and water. Harmonic resonance and subharmonic components in noise spectra detected in the water-glycol fluid, phosphate ester and petroleum oil may be caused by nonlinear oscillation of bubbles induced by pressure variation with resonant frequency.

Key Words: Cavitation Damage, Cavitation Noise, High Water Base Fluids, Fire-Resistant Fluids, Ultrasonic Vibration

1. 緒 言

各種難燃性作動油の中でも高含水作動液(以下HWBFと略す)は, 経済性, 安全性, 冷却性に優れ, かつ廃液処理も容易なため環境保全の面からも支持されており, その需要は年々増加しつつある⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾。しかしながら, 一方ではHWBFの開発における問題点として, 潤滑性能, 腐食性, 漏れ, 防錆性, キャビテーションなども指摘されている^{(1),(5),(6)}。特にキャビテーションに関しては, 油圧機器の高速・高性能化ともに密接に関連するためより重要な課題となっている。しかし, HWBF中のキャビテーション損傷に関する実験的研究が, 著者らも含めこの数年の間に行われてきており, ジェット形および振動形のキャビテーション損傷試験法によって損傷量に及ぼす流速, 液温, 材質およびその表面粗さなどの影響が明らかにされつつある⁽⁷⁾⁻⁽¹¹⁾。通常, キャビテーション現象の解明の手段の一つとして, 高速度カメラによるキャビティの様相の観察がなされるが, HWBFの場合には液体が白濁し

ているため, このような光学的方法是採用出来ない。そこで, 本報では, HWBF中のキャビテーション場で発生するノイズスペクトラムを計測することにより, キャビテーション損傷に対する音響学的考察を行った。また, 実機の油圧システムで作動油を選定する場合, 同一の実験条件下でのキャビテーション損傷データの比較が重要な資料となることから, ここでは供試液体として, 水・グリコール, リン酸エステル, 難燃性作動油, 鉱油系作動油, さらに水の場合との比較検討も行った。

2. 実験装置と方法

使用した実験装置は, 既報⁽¹⁰⁾で用いた振動式キャビテーション損傷試験装置[図1(a)]にノイズ計測システム⁽¹²⁾[図1(b)]を組み合わせたものである。供試液体は高含水作動液(HWBF)の原液を水道水で希釈したO/Wエマルションであり, その希釈率C(原液/水の体積比)は現在常用されている5%および20%を標準とし, 他に低希釈率の場合について試験した。また, 比較のために代表的な難燃性作動油として水・グリコール, リン酸エステル, さらに鉱油系作動油, 水中におけるキャビテーション損傷量とノイズの測定を行った。供試液体の物性値は表1に示す。試験

* 原稿受付 平成2年4月1日。

*¹ 正員, 熊本大学教育学部 (〒860 熊本市黒髪2-40-1)。*² 正員, 東北大学流体科学研究所 (〒980 仙台市青葉区片平2-1-1)。*³ 正員, 元東北大学大学院 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)。

条件は、共振周波数 $f_0=19.5$ kHz, 全振幅 $A=38$ μm , 液温は $t_f=313\pm 1$ K. 試験片は直径 15.9 mm ϕ , 高さ 12 mm の円柱で、その材質はアルミニウムである。試験槽は内径 94 mm ϕ , 高さ 120 mm, 肉厚 3 mm のアクリル製円筒であり、その周囲は液温制御のため恒温槽で一定温度にされた水を循環させている。ノイズを受波する水中マイクロフォンはその水中に置かれ、試験表面中心部から水平方向 55 mm, 垂直下方向 32 mm に位置している。

表 1 供試液体の物性値

Liquids	Density ρ_f [kg/m ³]	Surface tension $\sigma \times 10^2$ [N/m]	Viscosity $\eta \times 10^3$ [Pa·s]
Water	992.2	6.75	0.655
5% HWBF	992.2	3.44	0.713
20% HWBF	992.2	3.31	1.106
Water-glycol fluid	1033.2	3.45	53.0
Phosphate ester	1112.1	3.68	46.6
Petroleum oil	855.3	3.16	37.8

(a) キャビテーション損傷試験装置

(b) ノイズ計測システム

図 1

3. 実験結果と考察

図2には、5%および20% HWBF中のキャビテーション損傷量 M_L と試験時間 t との関係を示し、他の難燃性作動油並びに鉱油系作動油、水の場合との比較を示す。図に示すごとく、本試験の範囲内では、損傷量 M_L は潜伏期からの立ち上り領域を除き、時間と共にほぼ直線的に増大する。損傷量は水、20% HWBF, 5% HWBF, 水・グリコール, リン酸エステル, 鉱油系作動油の順に小さくなる。大略的に見ると、HWBFにおける $t=60$ min 時の損傷量は水の場合の約 1/2, 水・グリコールの 3~4 倍, リン酸エステルの数 10 倍にも達する。供試液体の中では、鉱油系作動油中の M_L 値が最も小さくリン酸エステルの約 1/2 である。

図3には、試験時間 $t=60$ min における試片表面の損傷状態を示す。HWBF中の損傷状態は水のそれと類似している。すなわち、試片縁より約 1.5 mm 内側に比較的大きなピットが同心円状に作られ、さらに中心部に向ってほぼ均一なピットが集積した損傷面となり、試片縁は損傷されない。もちろんこれらピットの径、深さ共、水の場合よりも小さい。一方、水・グリコールおよびリン酸エステルの場合には、試片縁に損傷が集中していることが特徴的であり、HWBF および水の場合とは著しく異なる。表1に示した供試液体の特性値の比較から、このような損傷パターンの差異を

図 2 損傷量 M_L と時間 t との関係

生ずる主因は液体の粘度差によると思われる。著者ら⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾は先にポリマー水溶液中のキャビテーション損傷を明らかにしてきたが、そこでも比較的高濃度のポリマー水溶液中において試片縁の局所的損傷パターンが見られ、キャビテーションの発生も試片縁に沿った皿形状クラウドの形成を確認している。このようなことから、水・グリコールおよびリン酸エステル中においても、試片縁近傍でキャビテーション気泡の発生と崩壊が行われ、図3(d), (e)のような損傷パターンが作られたものと考えられる。

図4～9にはそれぞれ5% HWBF, 20% HWBF 水・グリコール、リン酸エステル、鉱油系作動油および水中で発生するキャビテーションノイズスペクトラムの計測結果を示す。試験時間の変化に対するノイズレベル SPL の有意な差異は認められなかったため、ここでは $t=60$ min の結果を代表例とした。各図共、 $f \sim 20$ kHz の SPL 値が卓越しているが、これは主に本実

図3 試片表面の損傷状態

図4 5% HWBF 中のノイズスペクトラム

図5 20% HWBF 中のノイズスペクトラム

図6 水・グリコール中のノイズスペクトラム

図7 リン酸エステル中のノイズスペクトラム

験条件である共振周波数に依存しており、ここでは省略するがコヒーレントの測定結果からも明らかである。5%および20% HWBF のスペクトラムには主共振に基づく高調波成分および3/4次分数調波成分の SPL のピークが見られる。この傾向は水の場合と類似しているが、 $f \geq 40$ kHz の周波数領域における SPL 値は水の場合よりも低下している。このような高周波数領域におけるノイズレベルの低下が、水に比べて HWBF 中の損傷量の減少をもたらしている。零モードの固有振動数⁽¹⁵⁾が40~100 kHz となる気泡の直径は約0.2~0.07 mm となるので、HWBF 中ではこのような微細気泡の生成および運動が抑制されていることも考えられる。

図6の水・グリコール中では1/2次分数調波、 n 次高調波($n=2, 4, \dots$), $n/2$ 次超分数調波($n=3, 5, \dots$)成分の SPL 値が急峻な立上りを示しており、鉱油系

作動油のスペクトラム図8と類似している。ただし、鉱油系作動油の SPL 値は大略的に低位であり、損傷量が最も小さいことと符合する。リン酸エステル中のノイズスペクトラム図7には n 次高調波成分($n=2, 4, \dots$)が顕著に現われる。水・グリコール、リン酸エステルおよび鉱油系作動油に特徴的に見られる高調波および分数調波成分の出現の要因として次のようなことが考えられる。これらの液体はいずれも高粘性であるため、試片近傍で発生したキャビテーション気泡の移動は、水および HWBF に比べてかなり緩慢である。従って、これらの気泡は約20 kHz の周期的な強制振動を受けやすく、結果として、高調波共振、分数調波共振を伴うことになる。なお、このような気泡の非線形振動現象は、著者らの理論的結果⁽¹⁵⁾からも予測される。

既報⁽¹⁰⁾でも述べたが、HWBF 中の損傷量は希釈率によってかなり変動する。図10には、 $t=60$ min での損傷量 M_L と HWBF の希釈率 C との関係を示す。損傷量は $C=0.3\%$ で最小となり、 C を増すごとに図のような傾向で M_L 値は増加する。0.3% HWBF 中の試片表面の損傷状態は、5%、20% HWBF のそれらと似ているが、ピットの径および深さは明らかに小さい。図11には0.3% HWBF 中で得られたノイズスペクトラムを示す。図4、5、9に示した5%、20% HWBF、水の場合に比べて、ノイズレベル SPL は有意に低下しており、この傾向は、図10に示した損傷量

図8 鉱油系作動油中のノイズスペクトラム

図9 水中のノイズスペクトラム

図10 HWBF 中の損傷量 M_L に及ぼす希釈率 C の影響

図 11 0.3% HWBF 中のノイズスペクトラム

の結果と定性的に一致する。

希釈率が0.3%程度の HWBF は実機への適用範囲から外れているが、このような希薄な HWBF 中におけるキャビテーション損傷軽減のメカニズムの解明は、今後の HWBF の開発において重要になると思われる。HWBF 中には、添加剤として防腐剤、高分子脂肪酸塩、乳化剤等が含まれている。液体へのポリマーの添加はキャビテーション気泡の運動時に生ずる衝撃圧力を低下せしめること⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾、またキャビテーション損傷を軽減させること⁽¹³⁾を考えれば、高分子脂肪酸塩が損傷を低下させる要因の一つになっていることも予想されるが、詳細な検討は今後の課題としたい。

4. 結 言

HWBF、水・グリコール、リン酸エステル中のキャビテーション損傷量および発生するノイズスペクトラムを明らかにし、鉱油系作動油、水の場合との比較検討を行い次の結果を得た。

(1) 5%、20% HWBF 中における損傷量は水の場合の約 1/2 であるが、水・グリコールの 3～4 倍、リン酸エステルの数 10 倍となる。供試液体の中では鉱油

系作動油中の損傷量が最も小さい。

(2) 5%、20% HWBF 中のノイズスペクトラムレベル (SPL) は $f \geq 40$ kHz で水の場合よりも低下しており、この差異が水の場合に比して、HWBF 中の損傷量の低下を招く。HWBF の希釈率 C を変化させた場合、 $C=0.3\%$ で損傷量が最小となるが、SPL 値も $C=5, 20\%$ HWBF、水の場合に比べて有意に低下している。

(3) 水・グリコール、リン酸エステル、鉱油系作動油中のノイズスペクトラムに特徴的に現われる高調波並びに分数調波成分は主共振の周波数の圧力変動に誘起された気泡の非線形振動によると考えられる。

終わりに臨み、供試作動液を御提供して戴いた松村石油研究所前田陸三氏に深謝する。また、本論文および図面作成にご助力いただいた本研究所三浦紀重君および門馬美和君に謝意を表す。

文 献

- (1) 山田, 潤滑, **27**(1982), 635.
- (2) 前田, 油空圧化設計, **19**(1981), 25.
- (3) Hoffmann, N. M., *Lubric. Eng.*, **35**(1979), 65.
- (4) Ratty, B. R., *Des. Eng.*, (1982), 37.
- (5) 浦田, 機誌, **89**(1986), 1387.
- (6) 岡田, 潤滑, **32**(1987), 546.
- (7) Backé, W. and Berger, J., *Ölhydraul. Pneum.*, **28**(1984), 288.
- (8) Yamaguchi, A. and Shimizu, S., *Proc. Jets Cavities-Inter, Symp.*, (1985), 35.
- (9) 山田・清水, 第5回キャビテーションに関するシンポジウムプロシーディングス, (1987), 101.
- (10) 辻野・ほか2名, 機論, **53**-496, B(1987), 3493.
- (11) 島・ほか2名, 文献(9)の111ページ.
- (12) Tsujino, T., *Ultrasonics*, **25**(1987), 67.
- (13) Shima, A. ほか3名, *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, **107**(1985), 134.
- (14) Tsujino, T. ほか2名, *Proc. Instn. Mech. Eng.*, **200**C 4(1986), 231.
- (15) Tsujino, T. ほか2名, *J. Sound Vib.*, **123**(1988), 171.
- (16) Shima, A. and Tsujino, T., *Appl. Sci. Res.*, **38**(1982), 255.
- (17) Tsujino, T. and Shima, A., *Rep. Inst. High Speed Mech., Tohoku Univ.*, **46**(1983), 153.