

# 潤滑油診断結果に基づく保全手法の選定と コスト縮減の効果

瀧内 泰博<sup>1</sup>・〇戸崎 浩輔<sup>2</sup>

<sup>1</sup>利根川下流総合管理所 機械課 <sup>2</sup>長良川河口堰管理所 機械課

## 論文要旨

長良川河口堰は管理開始から 19 年が経過し、ゲート設備構成機器の大規模な更新時期を迎えている。長良川河口堰では、設備の信頼性を確保しつつ、更なる管理コストの縮減を図るための一つの手法として、潤滑油診断を用いた設備保全に取り組んでいる。診断の結果から、油自体の劣化はわずかであり、油中の汚染物質（金属摩耗片、砂など）を取り除くことで、再使用が可能なが確認された。これにより、油ろ過による交換期間の延伸が可能となり、潤滑油交換のコスト縮減につながった。

本論文では、潤滑油診断を保全手法として選定する利点と、潤滑油ろ過によるコスト縮減の効果を報告する。

キーワード：トライボロジー、潤滑油診断、傾向管理、コスト縮減

## 1. はじめに

長良川河口堰は、堰総延長 661m、可動部 555m と施設規模が大きく、設備数も多い施設である。施設の外観を写真-1 に示す。

平成 7 年の管理開始から 19 年が経過し、ゲート設備構成機器の大規模な更新時期を迎えており、ゲート 1 門に数千万円にもおよぶ更新費用が必要となっている。

一方で、管理コストの縮減は必要不可欠であり、設備の信頼性を確保しつつ、延命化を図ることが課題となっている。

ゲート設備の更新では、水密ゴムやワイヤロープは既に 2 回目の更新を進めている。これらは外観上の劣化状態が把握し易く、更新計画にも反映し易いため、適切な時期に更新がなされているといえる。一方で、開閉装置構成機器の減速機や動力切替装置などは、密閉構造であるため、外観上から内部の劣化状態を把握することが難しく、経験的な時間経過によって更新計画を立てなければならないため、必ずしも最適な時期に更新がなされているとは限らない。

このような理由から、「機械設備管理指針」では傾向管理による状態監視保全を推奨しているが、長良川河口堰のような大規模施設では、従前の状態監

視保全では多額の更新費用がかかるため、新たな傾向管理の手法として潤滑油診断による状態監視保全に取り組んでいる。



写真-1 長良川河口堰

## 2. 潤滑油診断

### 2.1 トライボロジー<sup>1)</sup>

潤滑油の診断は、トライボロジーの技術を活用したもの

である。トライボロジーとは、潤滑、摩耗、摩擦などを「相対運動しながら互いに影響を及ぼしあう二つの表面の間におこるすべての現象を対象とする科学と技術」と英国で定義された用語である。近年では、省資源、省エネルギーの観点から、部品交換、

1. 論文執筆時 長良川河口堰管理所 機械課所属

2. 長良川河口堰管理所 機械課所属

潤滑油交換費用の縮減など、トライボロジーに関連する技術が期待されている。

## 2.2 潤滑油の役割

減速機や動力切替装置などの歯車装置には、一般的にギヤ油と呼ばれる潤滑油が使用されている。このギヤ油は、ギヤ歯面の摩耗防止や、摩擦の低減、高い衝撃荷重から歯面を保護するなどの役割がある。同じギヤ油でも、ギヤの種類や、材質、負荷などの使用条件によって、それぞれの機器に合った規格の油が選定されている。

## 2.3 潤滑油診断の有用性<sup>1)</sup>

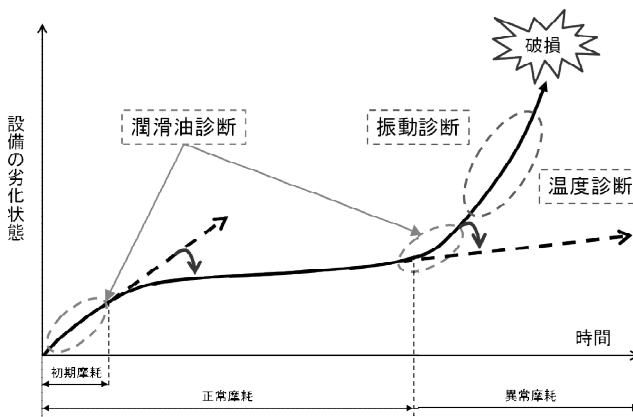


図-1 設備診断と設備劣化の関係

機械設備の診断には、潤滑油診断のほかにも振動診断、温度診断などの様々な方法がある。特に、機械設備の振動診断は有効な診断手法として知られているが計測の条件として運転状態でなければ診断できないことや、低速回転機器の計測には不向きであることなど、すべての設備に適しているとは限らない。図-1に、代表的な設備診断と、設備の劣化の関係を示す。

潤滑油診断は振動診断や温度診断では発見できない機器の軽微な摩耗状態を把握できることから、早期に異常摩耗を発見できるなどの特徴があり、長良川河口堰においても、潤滑油診断の有用性を既に確認している。

## 2.4 潤滑油の診断項目

表-1に潤滑油の分析法を目的別に整理している。潤滑油の診断は、油の劣化状況、油の汚染状況、機器の摩耗状況の3項目に分類され、各項目から数種類の分析を行い、得られた結果から総合的に設備の劣化度を判定する。

表-1 潤滑油の分析項目

油の劣化状況の診断	・粘度、水分、全酸価 ・赤外線吸収スペクトル法（IR法）
油の汚染状況の診断	・計数汚染度（NAS等級）
機器の摩耗状況の診断	・フェログラフィー（定量・分析） ・発光分光分析（SOAP・T-SOAP）

## 3. 潤滑油診断の対象ゲートと対象機器

### 3.1 診断対象ゲート

潤滑油診断を実施しているゲートは、長良川河口堰の右岸側に設置されている開門兼ロック式魚道ゲート（上流・中間・下流）と左岸側に設置されているロック式魚道ゲート（上流・下流）である。各ゲートの諸元を表-2~3、外観を写真-2~3に示す。長良川河口堰の開門ゲートは年間約8,000隻の船舶が利用し、夜間は自動運転で魚道操作を行っている。そのため、設備の稼働回数は非常に多く、管理開始からの累計稼働回数は平成26年3月時点で、約13万回に及ぶ。また、左岸側のロック式魚道ゲートも24時間365日、自動運転で魚道操作を行っているため、累計稼働回数は平成26年3月時点で、約15万回に及び、長良川河口堰のゲート施設の中でも特に稼働回数の多いゲート設備であり、潤滑油診断の対象設備とした。

表-2 開門ゲート設備諸元

ゲートの名称	開門ゲート(魚道兼用)		
	上流	中間	下流
ゲート形式	シェル構造2段式ローラーゲート		
純径間×有効高	上段 15m×2.8m		上段 15m×3.6m
	下段 15m×2.7m		下段 15m×3.5m
扉体重量	上段/47t, 下段/51t		上段/40t, 下段/52t
開閉方式	1M2D ワイヤロープウインチ式		

表-3 ロック式魚道ゲート設備諸元

ゲートの名称	ロック式魚道ゲート	
	上流	下流
ゲート形式	シェル構造2段式ローラーゲート	
純径間×有効高	上段 30m×3.2m	上段 30m×2.7m
	下段 30m×3.1m	下段 30m×2.6m
扉体重量	上段/112t, 下段/132t	上段/109t, 下段/133t
開閉方式	2M2D×2 ワイヤロープウインチ式	

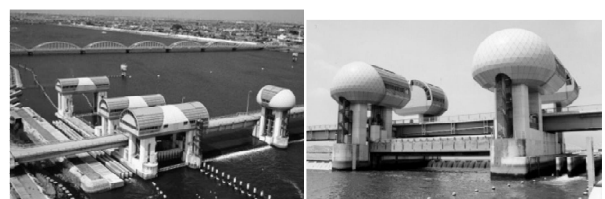


写真-2 開門ゲート 写真-3 ロック式魚道ゲート

### 3.2 診断対象機器

潤滑油診断が有効な機器としては、分解点検が困難、または分解点検費用が高額であることを条件として、ゲート設備構成器機の中から、減速機、動力切替装置を選定した。

表-4に各機器の油種と油量、外観を写真-4~5に示す。

表-4 対象機器の油種と総油量

設備名	台数	油種	総油量[L]
減速機	54	ギヤ油 VG68	22,400
動力切替装置	54	油圧作動油 VG22	4,420



写真-4 減速機



写真-5 動力切替装置

## 4. 診断結果

閘門下流ゲート上段扉の減速機に使用されている潤滑油の分析結果を代表例として報告する。この減速機は、平成19年度の点検整備時に潤滑油交換を実施し、1回目の診断を平成21年12月、2回目の診断を平成24年6月に実施したものである。

### 4.1 油の劣化状況の分析結果

#### 4.1.1 潤滑油性状分析の分析結果

潤滑油の性状分析とは、一般的に油の劣化状況を診断するものである。各分析結果を表-5に示す。限界値とは各分析項目における管理限界値(許容値)であり、一般的に、潤滑油交換の目安となる値である。動粘度の低下は歯面における油膜切れを発生させ、水分と全酸価の増加は機器の腐食を促進させる原因となる。

診断の結果を見ると、動粘度の分析結果は67.42mm<sup>2</sup>/sであり、新油値67.67mm<sup>2</sup>/sと比較してわずかに低下している。また、水分の分析結果は58.90ppmであり、これも新油値の53.90ppmと比較してわずかに増加している程度である。両分析項目ともに限界値に対して大幅に余裕があり、良好であると判断できる。酸化についての項目となる全酸価は0.48mgKOH/gであり、新油値0.41mgKOH/gと比較してわずかに増加しているが、図-2に示すIR法の

分析結果チャートの波数1700cm<sup>-1</sup>の透過率低下(カルボン酸による赤外線吸収)が認められないため、基油の酸化は確認できず、良好と判断できる。

表-5 潤滑油性状分析の結果

	単位	限界値	新油値	平成21年	平成24年
動粘度	[mm <sup>2</sup> /s]	57.52	67.67	67.60	67.42
水分	[ppm]	500.00	53.90	47.10	58.90
全酸価	[mgKOH/g]	--	0.41	0.43	0.48
I	R	カルボン酸吸収無し	カルボン酸吸収無し	カルボン酸吸収無し	カルボン酸吸収無し

#### 4.1.2 赤外線吸収スペクトル法(IR法)の分析結果

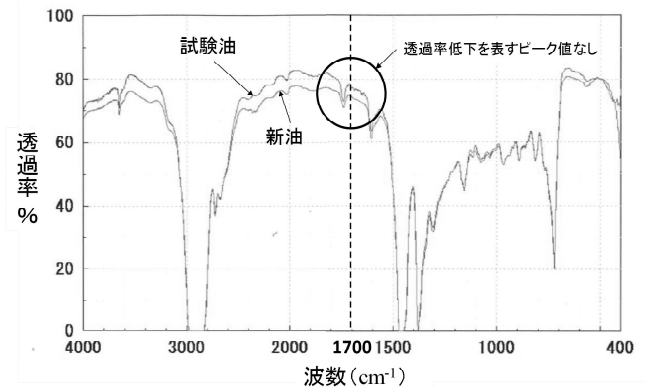


図-2 赤外線吸収スペクトル法(IR法)の分析結果

赤外線吸収スペクトル法(IR法)とは、基油の酸化に伴って発生するカルボン酸から劣化状況を判断するものである<sup>1)</sup>。ここで基油とは、さび止めや酸化防止剤などの添加物を含まない、潤滑油のベースとなる油のことである。潤滑油に含まれる酸化防止剤は、基油の酸化によりカルボン酸へと置き換わる。一般的に、分子は特定の波数(カルボン酸の場合は1700cm<sup>-1</sup>)の赤外線を吸収する特性を持っている。そのため、潤滑油中に含まれるカルボン酸が増加すると、分析結果チャート中の波数1700cm<sup>-1</sup>の透過率が著しく低下する。

よって、チャート中の波数1700cm<sup>-1</sup>付近に透過率の低下を示すピーク値を確認すれば、基油が酸化していると診断することができる。

### 4.2 油の汚染状況の分析結果

#### 4.2.1 計数汚染度(NAS級)の分析結果

表-6 計数汚染度基準

粒径 [μm]	NAS等級					新油	H21	H24
	8	9	10	11	12			
5~15	64,000	128,000	256,000	512,000	1,024,000	185,150	2,619,103	3,576,076
15~25	11,400	22,800	45,600	91,200	182,400	266	29,873	29,110
25~50	2,025	4,050	8,100	16,200	32,400	114	5,454	4,404
50~100	360	720	1,440	2,880	5,760	16	800	370
100以上	64	128	256	512	1,024	0	163	43

計数汚染度（NAS 等級）とは、表-6 の計数汚染度基準より粒径サイズを 5 段階に分け、100mL 中の各サイズの粒子数を測定して NAS 等級を決定し、潤滑油の汚染状態を判定する手法である<sup>1)</sup>。

計測に使用したフィルター写真（200 倍）を写真-6 に示す。診断結果は NAS 等級 12 であり、平成 21 年度から等級に変化はないが、フィルター表面の異物観察では、表面が茶褐色で、金属片や鉄錆、砂などが観察された。このことから、汚染度が高い原因は、摩擦とスラッジ、外部混入異物の影響が考えられる。

新油が NAS 等級 10 であることから汚染が進んでいることが確認できる。

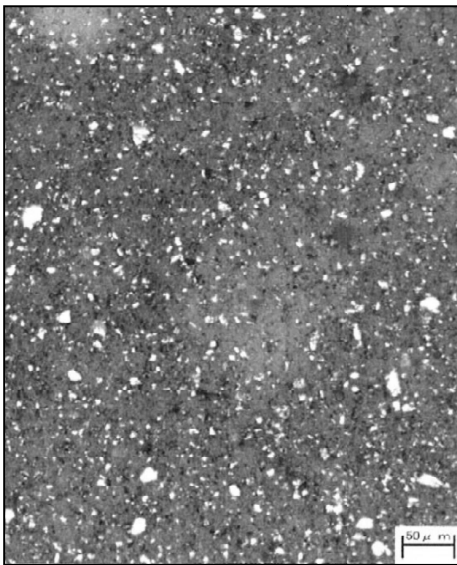


写真-6 フィルター写真（200 倍）

### 4.3 機器の摩耗状況の分析結果

#### 4.3.1 分析フェログラフィーの分析結果

分析フェログラフィーとは、強力な磁石によって潤滑油中の摩耗粒子を分離、配列して観察する手法である<sup>1)</sup>。磁気により捕獲された摩耗粒子を光学式顕微鏡で分析し、粒子の「大きさ」、「形状」、「材質」などから潤滑部分の摩耗状態を診断するものである。

分析結果を表-7、フェログラフィー写真を写真-7 に示す。摩耗粒子の形態で最も多く観察された粒子は、正常な摩耗時に発生する摩耗粒子であった。その他、少量であったが片当たりやすべりなどシビア摩耗により発生する粒子や、水分の混入や酸化など腐食摩耗により発生する赤褐色の粒子、潤滑不足や焼き付きにより発生する灰褐色の粒子が確認されて

いる。

表-7 分析フェログラフィーの分析結果

摩耗の形態		形状	量	備考
正常摩耗	表面薄層の剥離、境界潤滑	15μ以下の薄片	中	写真-7①
シビア摩耗	片当たり、すべり、高加重	15μ<表面に条痕	少	
腐食摩耗	水分の混入、酸化	赤褐色の多結晶	少	
腐食摩耗	潤滑不足、焼き付き	灰褐色の多結晶	少	
汚染	天然砂、鋳物砂の混入	砂	少	

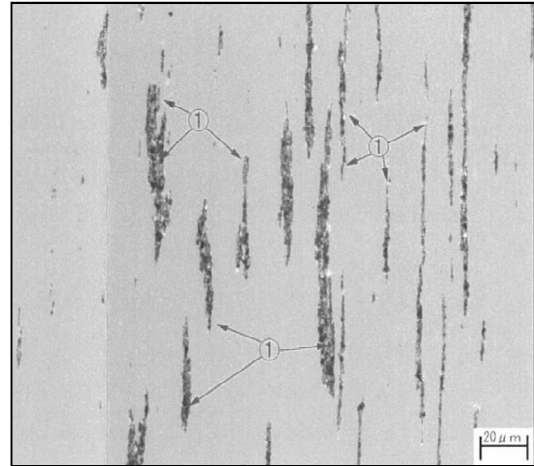


写真-7 フェログラフィー写真

#### 4.3.2 発光分光分析（SOAP 法）の分析結果

発光分光分析（SOAP 法）は、油中の金属分子を発光させ、この光を波長毎に分光することで金属元素を分析する方法である<sup>1)</sup>。摩耗粒子の金属元素の構成などから金属材料を知ることができるため、摩耗粒子の発生箇所を特定できる。

表-8 発光分光分析（SOAP 法）の分析結果

採油日	SOAP-T 重量 ppm						
	H21.12.24			H24.6.26			
金属イオン+固形分	金属(μ)	固形分	合計	金属(μ)	固形分	合計	
主軸・ギヤ等	鉄 (Fe)	1.0	2.0	3.0	1.0	4.2	5.2
軸受	鉛 (Pb)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	銅 (Cu)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	クロム (Cr)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	アンチモン (Sb)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	ニッケル (Ni)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	錫 (Sn)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	リン (P)	69.0	0.0	69.0	50.0	0.0	50.0
添加剤	亜鉛 (Zn)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	カルシウム (Ca)	0.0	0.1	0.1	0.0	0.2	0.2
	バリウム (Ba)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
砂等	アルミニウム (Al)	4.0	0.2	4.2	4.0	0.3	4.3
	ケイ素 (Si)	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
	ナトリウム (Na)	1.0	0.2	1.2	1.0	0.2	1.2
	マグネシウム (Mg)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ボロン (B)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
モリブデン (Mo)	152.0	0.3	152.3	140.0	0.4	140.4	

分析した結果の一覧を表-8 に示す。検出された元素から発生箇所を推定すると、鉄はギヤ歯面や主軸



の摩耗によって発生し、リン及びモリブデンはオイル添加剤の成分であると推定できる。また、カルシウム、アルミニウム及びナトリウムは、外部から混入した砂などの異物であると思われる。ギヤの材質である鉄の元素が、平成 21 年度の分析結果 3.0ppm から平成 24 年度の分析結果 5.2ppm まで増加していることから、ギヤ歯面の摩耗の進行を示す結果となっている。

#### 4.4 分析結果のまとめ

油の劣化状況の分析結果は、潤滑油性状分析及び IR 法により、劣化状況は良好であり、管理限界値の範囲に収まることを示していた。ゲート設備構成機器には荷重に伴う熱が発生し、閘門ゲートのように使用頻度の高い設備では、潤滑油の温度変化が頻繁に生じるため、機器のみならず潤滑油の劣化の進行が早まると考えられていたが、過度な劣化は観察されなかった。

油の汚染状況の分析結果は、潤滑油交換などの対策を考慮すべきとの結果を示していた。計数汚染度の分析結果では、平成 21 年度の時点で管理限界値を超えていた。主な原因は、正常摩耗によって生じる粒径 5~15 $\mu\text{m}$  の粒子が増加である。

機器の摩耗状況の分析結果は、ギヤ歯面の摩耗が進行していることを示していた。しかし、摩耗によって発生した粒子は大半が正常摩耗による粒子であり、軸受の損傷を示す粒子や、異常摩耗によって発生する粒子はほとんど検出されなかった。

これら結果から、機器の摩耗状況は正常であるため、今後も継続して機器を使用することは可能であるが、潤滑油の場合は、劣化状況が良好であっても、汚染状況が芳しくないため、潤滑油の交換などの対策を必要としていることがわかった。

以上のように、潤滑油診断の活用によって、分解点検を行うことなく設備の状態を診断することができた。この技術を活用すれば、減速機や動力切替装置など、通常時は密閉構造であるため設備の状態を把握し難い機器であっても、機器の摩耗状況を調べることができ、更新計画へと反映する際の判断材料を得られる。

### 5. コスト縮減の取り組み

#### 5.1 潤滑油ろ過装置の導入の検討

潤滑油は長期間使用すると劣化や汚染が進行す

るため、潤滑性能が劣化して機器の寿命低下や破損など、設備機能に支障をきたすことが懸念される。そのため、設備メーカーや潤滑油メーカーは定期的な潤滑油の交換を推奨している。これは、自動車のエンジンオイルを定期的に交換することと同様であると考えられる。

潤滑油の交換には、油の購入費や交換の労務費、廃油としての処分費などの交換コストが必要となる。長良川河口堰のように設備数が多い施設では、潤滑油の交換だけでも多額の費用が必要であるため、コスト縮減の方策として、潤滑油の交換回数を見直しを実施した。

今回の診断結果では、油中の摩擦粒子や異物などの汚染物質の増加により、油の汚染状況が悪化していることがわかった。しかし、水分、動粘度、全酸価などの劣化度の進行はわずかであり、管理限界値の範囲内に余裕をもって収まっていた。

これらのことから、潤滑油中の汚染物質を除去すれば、新油に交換する必要がなくなり、潤滑油を再使用することが可能であると判断した。



写真-8 潤滑油ろ過装置

そこで、汚染物質を取り除くために潤滑油ろ過装置を導入し、潤滑油を再使用することで交換期間を延伸して交換コストの縮減を試みた。

長良川河口堰に存在する全 15 門のゲート設備で共用できるように可搬式とし、ろ過器本体、送油装置、配電盤を分割可能な構造、各開閉装置室に人力で搬入搬出できるように軽量化などの設計を図っている。潤滑油ろ過装置の外観を写真-8 に示す。

#### 5.2 潤滑油ろ過装置の導入によるコスト縮減の効果

潤滑油ろ過装置の導入によるコスト縮減の効果を検討する。例として、長良川河口堰のゲート設備

開閉装置の構成器機である減速機 54 台において使用している潤滑油 22,400L を全て新油へ交換した場合と、潤滑油ろ過を行って交換期間を延伸した場合についてコストを試算・比較した。

積算基準をもとに概算金額を試算した結果、潤滑油 22,400L の交換に必要な費用は、交換の労務費、潤滑油の購入費、廃油としての処分費などを合わせて約 27,500 千円となった。一方で、潤滑油ろ過に必要な費用は、潤滑油ろ過の労務費、潤滑油ろ過装置の機器単体費(1,200 千円/台)、フィルターなどの消耗品費などを合わせて約 12,500 千円となった。

次に、試算を行う条件として、以下の状況を想定する。過去の潤滑油交換の実績から、5 年毎に潤滑油を交換して 10 年間で 2 度の交換を行った場合と、潤滑油ろ過によって交換期間を延伸し、10 年間で 1 度だけ交換した場合を比較する。

5 年毎に潤滑油を交換した場合、10 年間の交換回数は計 2 回、交換に必要な費用は、55,000 千円となる (27,500 千円×2=55,000 千円)。これに対して、5 年目に潤滑油ろ過を実施し、10 年間潤滑油を交換せずに再使用し続けた場合、交換回数を 1 回に抑えることができ、必要な費用は 40,000 千円となる (12,500 千円+27,500 千円=40,000 千円)。

両者の差は約 15,000 千円であり 10 年間で約 27% のコスト縮減となる。図-3 にコスト縮減の効果を図示する。

また、潤滑油ろ過装置の導入によって潤滑油が再使用され、廃油となる潤滑油の量も縮減できることから、コストの縮減のみならず、廃棄物の縮減という形で、環境に対する負荷の軽減にも貢献できる。特に、長良川河口堰のように施設規模が大きく、使用している潤滑油の油量が多いほど、コスト縮減の効果も高くなると考えられる。

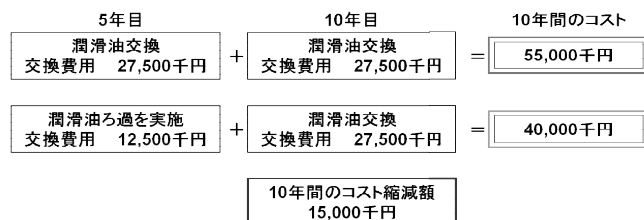


図-3 コスト縮減の効果

## 6. おわりに

従前の潤滑油などの交換は、基本的には、経験的な経過時間や、メーカーが推奨する期間を目安に定期的な交換を実施してきた。しかし、潤滑油診断の結果から、潤滑油中の汚染物質を除去することによって、潤滑油の再使用が可能であることが確認された。

潤滑油ろ過を実施して潤滑油中の汚染物質を取り除き、交換期間を見直した結果、長良川河口堰では、10 年間で約 15,000 千円分のコスト縮減が期待できる。

長良川河口堰では、平成 25 年度から可搬式潤滑油ろ過装置を導入し、潤滑油ろ過を点検整備の中で実施しており、引き続きコスト縮減の効果を検証する予定である。

また、汚染物質である金属摩耗片や砂などは歯車の摩耗や異常摩耗の要因となり得るため、それらを除去することで摩耗量の減少や異常摩耗の抑制などによる設備本体の延命も期待できる。

本論文で紹介した潤滑油診断による設備管理手法は、製造や発電などの現場でも実施されており<sup>1)2)</sup>、今後も診断技術の発展が期待できる。今後は、ゲート設備開閉機器のみならず、扉体のローラ軸やシーブ軸などの他の設備へと潤滑油診断を活用するとともに、点検整備において潤滑油診断及び潤滑油ろ過を実施して、最適な潤滑油の交換期間を検討し、コスト縮減に努めていく。

## 参考文献

- 古川修司：トライボロジーを活用した設備診断技術，東京都下水道局 下水道技術年報 2004 年 事業の効率化維持管理技術，2004.
- 川畑雅彦：発電設備におけるメンテナンストライボロジービジネス，トライボロジスト 第 49 巻 第 3 号，2004.