

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¹ ・ ○戸崎 浩輔²

概要：

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。当該施設は規模の大きさと数の多さから、今後も多額の更新費用がかかるため、設備の信頼性を確保しつつ、さらなる管理コストの縮減を図る必要がある。その解決方法の一つとして、長良川河口堰では潤滑油診断を用いた設備保全に取り組んでいる。

この取り組みでは、開閉装置の減速機などに使用されている潤滑油が長期間使用することで劣化し、ギヤ歯面の摩耗防止や摩擦低減などの効果が低下するため、潤滑油診断を定期的実施し、診断結果より潤滑油を再生することで、交換期間（回数）を延ばすことができ、交換コストの縮減につながる事が分かった。

本論文では、診断結果に基づいて新たな保全手法を選定した結果と、それによるコスト縮減の効果について検討した結果を報告する。

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、施設規模が非常に大きく、設備数も多い。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、ゲート設備の大規模な更新時期を迎え、1 回の更新費用に数千万円単位の金額が必要となる。一方で、近年の社会情勢から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、ワイヤロープは既に 1 回目の更新工事を進めている。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、適切な時期に更新工事がなされている。一方で、開閉装置の減速機や動力切替装置などは、密閉構造の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。

この様な理由から、「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に規模が大きい施設では、従前の傾向管理では多

額の更新費用がかかるため、その解決策の一つとして、潤滑油に着目し、新たな傾向管理の手法として潤滑油診断による設備保全に取り組んでいる。

2. 潤滑油診断

2.1 トライボロジー¹⁾

潤滑油の診断は、トライボロジーの技術を活用したもの



写真-1 長良川河口堰

1. 長良川河口堰管理所 機械課
2. 長良川河口堰管理所 機械課

である。ここで、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1966年にイギリス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、潤滑油交換費用の節減など、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を使用している。この潤滑油には、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粘度の油種が選定されている。

2.3 潤滑油診断の有用性¹⁾

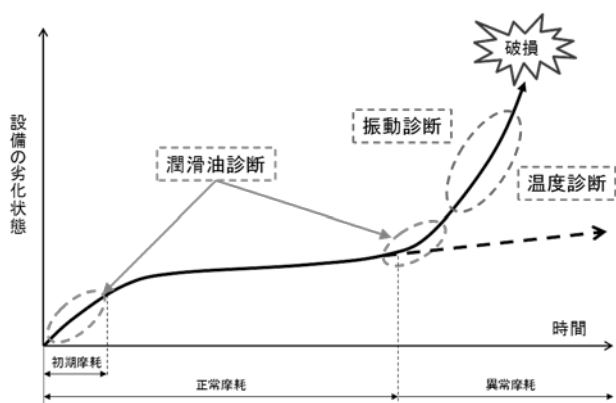


図-1 設備診断と設備劣化の関係

機械設備の診断には、潤滑油診断のほかに振動診断、温度診断などの様々な方法がある。特に振動を計測する方法は、有効な手法として知られている。しかし、計測の条件として運転状態でなければならないことや、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言えない。図-1に、代表的な設備診断と、設備の劣化の関係を示す。潤滑油分析による診断法は、振動計測や温度計測では発見できない軽微な機器の摩耗状態を把握できることから、早期に異常を発見できるなどの特徴がある。長良川河口堰においても、トライボシステム診断の有用性は既に確認されている。

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対象ゲートは、当施設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、通船の少ない夜間は自動運転で魚道操作を行っている。そのため、設備の利用回数は非常に多く、管理開始からの累計運転回数は平成25年8月現在、約12万回に及ぶ。また、ロック式魚道ゲートも1年24時間365日自動運転で魚道操作を行っているため、開門ゲートと並んで設備の使用頻度は多く、これまでの累計運転回数は平成25年8月現在、14万回に及ぶ。当施設の中でも特に使用頻度が多いゲート設備を対象に、潤滑油診断を用いた傾向管理を行っている。

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 閘門ゲート 写真-3 ロック式魚道ゲート

3.2 診断対象機器

診断対象機器は、

1. 潤滑油脂を使用していること
2. 分解整備が困難、または分解整備費用が高額であること

を条件として、ヘリカル減速機、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]
ヘリカル減速機	54	ギヤ油VG68	22,400
動力切替装置	54	油圧作動油VG22	4,420

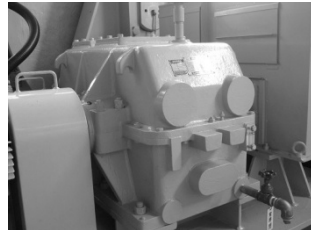


写真-4 ヘリカル減速機 写真-5 動力切替装置

4. 診断結果

閘門下流ゲート上段扉のヘリカル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。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、粘度の分析結果は67.42mm²/sと、新油値67.67mm²/sと比較してわずかに低下しているが、良好だと判断できる。水分の分析結果は58.90ppmと、これは限界値500ppmの12%程度であり、良好だと言える。全酸価は0.48mgKOH/gと、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法の分析結果より、カルボン酸による赤外線の吸収が無いことから、良好だと判断できる。

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
粘 度	[mm ² /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

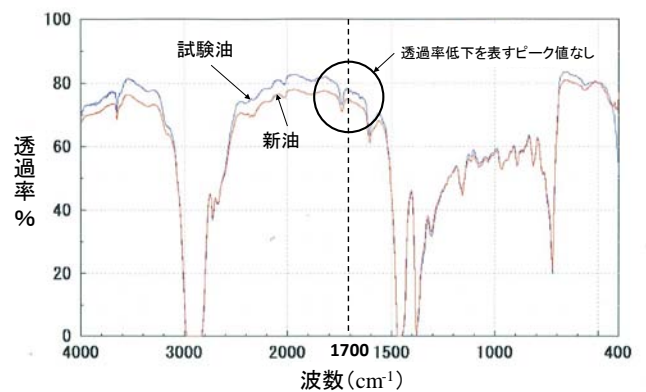


図-2 赤外線吸収スペクトル法 (IR法) の分析結果

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¹⁾。潤滑油に含まれる酸化防止剤は、酸化によりカルボン酸へと置き換わる。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。基油が酸化すると、チャート中の波数1700cm⁻¹付近の赤外線を、カルボン酸が吸収することが分かっている。このカルボン酸は、特定の波長(1700cm⁻¹)の赤外線を吸収する特性を持っている。油中にカルボン酸が含まれると、チャート中の波長1700cm⁻¹の透過率が著しく低下するため、赤外線の吸収は透過率の変化から判断できる。よって、チャート中の波数1700cm⁻¹付近に透過率の低下を表すピーク値を確認すれば、基油が劣化していると診断する。

新油と試験油のチャートを比較した結果、新油からの変化はなく、カルボン酸による赤外線の吸収が確認され

ないことから、試験油は劣化しておらず、良好と判断できる。

4.2 油の汚染分析結果

4.2.1 計数汚染度 (NAS 等級) 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

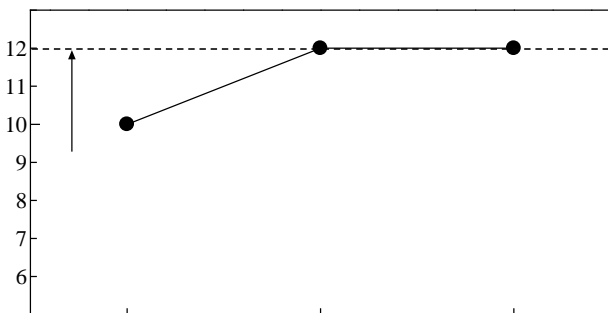


図-3 計数汚染度 (NAS 等級) の結果

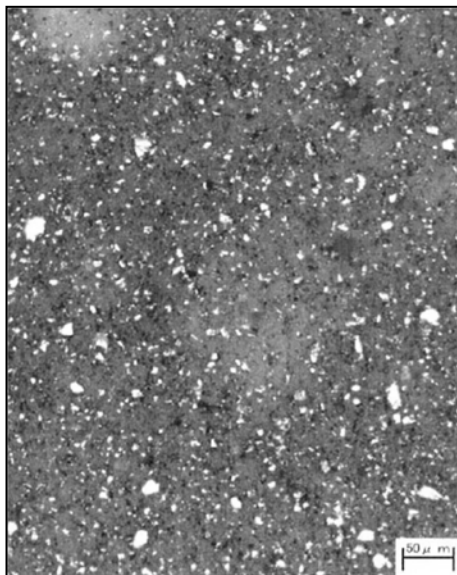


写真-6 フィルター写真 (200 倍)

計数汚染度 (NAS 等級) とは、表-6 の計数汚染度基準から粒径サイズにより 5 段階に分け、100ml 中の粒子数から 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¹⁾。

分析結果を図-3、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 NAS12 級と、平成 21 年度から等級に変化はないが、管理限界値であった。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。

4.3 機器の摩耗分析結果

4.3.1 分析フェログラフィーの分析結果

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、配列する手法である¹⁾。分析フェログラフィーは、磁気により捕獲された摩耗粒子を学式顕微鏡で分析し、粒子の「大きさ」、「形状」、「材質」などから潤滑箇所で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	

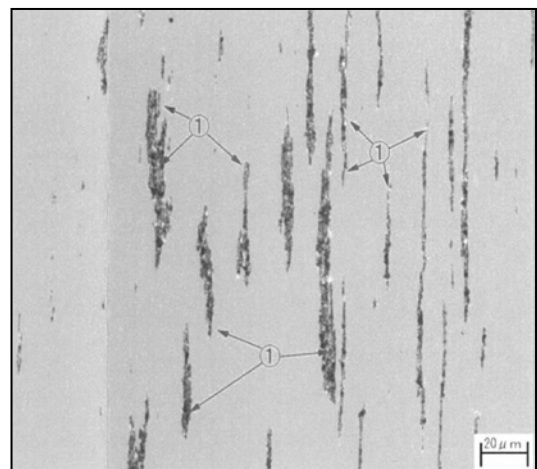


写真-7 フェログラフィー写真

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¹⁾。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

		SOAP-T 重量 ppm					
採油日		H21.12.24			H24.6.26		
金属イオン+固形分		金属イオン	固形分	合計	金属イオン	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
	添加剤	リン (P)	69.0	0.0	69.0	50.0	0.0
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
アルミニウム (Al)		4.0	0.2	4.2	4.0	0.3	4.3
砂等	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・軸受けなど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、前回の分析結果 3.0ppm から 5.2ppm に増加していることから、ギヤ歯面の摩耗を裏付ける結果となっている。

4.4 分析のまとめ

油の劣化分析結果は、潤滑油性状分析、IR 法により、油の粘度、水分、酸価の劣化状況は良好だった。ゲート設備の構成機器には荷重に伴う高熱が発生するため、閘門ゲートのように使用頻度の多い設備では、潤滑油の温度変化が頻繁に生じ、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る。しかし、前回の診断結果から大きな進行はみられず、管理限界値と比較しても許容の範囲内だった。

油の汚染分析結果は、前回の結果から進行していた。計数汚染度の分析結果では、NAS 等級に変化はないものの、平成 21 年度の結果と同様に管理限界値を超えていた。その主な原因は、正常摩耗によって生じる粒径 5~15 μ m の粒子が増加したためである。汚染の主な原因は、ギヤ歯面の摩耗や異物の混入が考えられる。

機器の摩耗分析結果は、ギヤ歯面の摩耗が進行していたが、増加量はごく僅かであり、摩耗量も許容範囲であ

った。

これら結果から、今後も継続して機器の使用は可能だが、潤滑油は新油に交換するなど何らかの対策が必要だと診断された。

潤滑油診断の活用によって、分解整備を行わなくても設備の状態を把握できた。この技術を活用すれば、減速機や動力切替装置など、通常は密閉状態のため設備の状態把握が難しい歯車装置も、歯面の摩耗状態などから劣化具合を調べることができ、機器の更新計画に反映させることができる。

5. コスト削減の取り組み

5.1 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し、潤滑油本来の役割が果たせなくなり、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ため、機械メーカーやオイルメーカーでは、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のと同じことといえる。

潤滑油の交換には、潤滑油の価格や交換の労務費、廃油としての処分費などの交換コストが掛かり、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となるため、コスト削減方策として交換回数を見直した。

今回の分析結果では、油中の摩擦粒子や異物などの増加により油の汚染度は進行していたが、水分、粘度などの劣化度の進行は少なく、管理限界値を大きく下回っていた。この結果から、油中の不純物さえ取り除けば、新油に交換する必要がなくなり、潤滑油を再利用できることが分かった。



写真-8 可搬式油ろ過装置

そこで、不純物を取り除くために可搬式油ろ過装置を導入し、潤滑油を再生することで交換期間を延ばし、交換コストの縮減ができると考えた。

可搬式油ろ過装置の外観を写真-8に示す。可搬式とするため、ろ過器本体、送油装置、配電盤を分割可能な構造とし、各ピア間を人力で搬入、搬出できるように軽量化とサイズ設計を行っている。

5.2 油ろ過装置の導入によるコスト縮減の効果

油ろ過装置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で使用されているヘリカル減速機54台分に必要な潤滑油22,400Lを新油へ交換した場合と、油ろ過した場合について必要なコストを試算する。

積算基準をもとに概算金額を試算すると、潤滑油22,400Lの交換に必要なコストは約27,500千円で、油ろ過に必要なコストは、約12,500千円(油ろ過装置の機器単体費1,200千円/台を含む)となる。

次に、試算を行う条件として、過去の実績から通常の5年毎と、油ろ過による延命を用いた10年間の交換期間とする。

5年で潤滑油を交換した場合、10年間の交換回数は計2回となるため、必要なコストは27,500千円+27,500千円=55,000千円となる。これに対して、5年目に油ろ過を1度実施し、10年間油を交換せずに使用できた場合、交換回数は計1回に抑えることができるため、必要なコストは12,500千円+27,500千円=40,000千円となり、両者の差は約15,500千円、よって10年間に約28%のコスト削減ができると考えられる。図-4にコスト縮減の効果を示す。

この様に、潤滑油の交換期間を延ばすことにより材料費や労務費などのコストを削減できるため、ろ過装置導入による効果は大きいと考えられる。また、長良川河口堰のように施設規模が大きく、必要な潤滑油量が多いほど、コスト縮減の効果が大きいと言える。

6. おわりに

これまでの潤滑油交換は、経験値やメーカーが推奨する期間を目安に行ってきた。しかし、分析の結果から、油中の不純物をろ過することによって、これまで定期的に交換してきた潤滑油は継続して使用できることが分かった。

交換期間の見直しによるコスト削減の効果を検討した結果、長良川河口堰のように設備数の多い施設では、10年間に約28%のコスト縮減が期待できる。長良川河口堰では、今年度から可搬式油ろ過装置を導入し、潤滑油のろ過を点検整備の中で実施している。引き続き潤滑油診断を継続的に実施し、更なるコスト縮減の効果を検討していく予定である。また、装置でろ過した潤滑油の診断結果は、追って報告する予定である。

本論文で紹介した潤滑油診断による設備管理手法は、大手製造会社や電力会社でも実施されており¹²⁾、今後も発展していくと考えられる。しかし、潤滑油診断を用いた状態監視保全をゲート設備に適応させる取り組みは当該設備の他に例を見ないため、今後この技術をより一層生かしていくためには、多くの現場で取り入れられ、ゲート設備の効率的な保全に向けてデータの蓄積や、ノウハウが構築されることを期待する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.

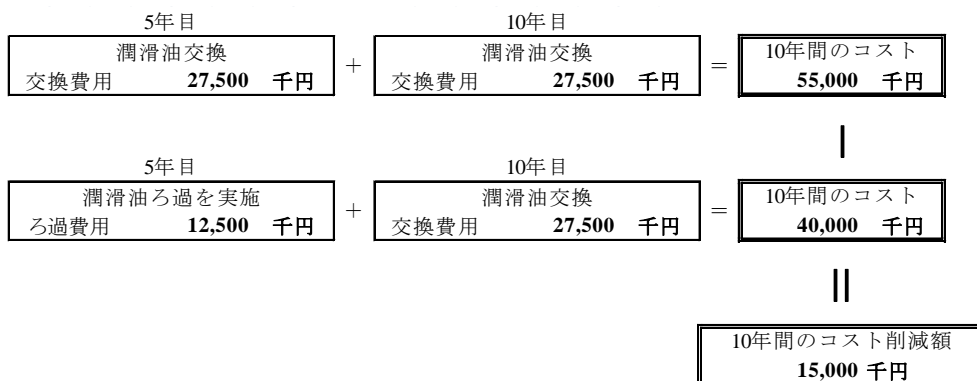


図-4 コスト縮減の効果