

平成26年度

メンブランフィルターを用いた河川用機械設備の簡易劣化診断手法の検討

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地機械技術チーム ○平地 一典
 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地機械技術チーム 片野 浩司
 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地機械技術チーム 山口 和哉

本研究では、河川用機械設備である樋門開閉装置の潤滑油をメンブランフィルターにより、濾過したメンブランパッチ色相と計数汚染度との相関を分析した。その結果、樋門開閉装置に悪影響を与える計数汚染度の上昇をメンブランパッチ色相により、簡易に把握できたことから、有効な劣化傾向診断手法であることを確認したので報告する。

キーワード：健全度、長寿命化、維持・管理

1. はじめに

河川に設置されている樋門設備は、治水設備であり、設備が故障しその機能を失った場合、浸水被害により国民の生命、財産に影響を及ぼす恐れがあるため、社会的経済的影響が大きい。積雪寒冷地においては、寒暖差による劣化や凍結の影響などが懸念されるため、特に日頃の維持管理が重要となっている。

これまで建設されてきた樋門設備の多くが、建設後30年から40年を迎え、老朽化する設備が年々増加することで、維持管理費用の増加も懸念されており、設備の延命化や信頼性を確保しつつ効率的で効果的な維持管理が必要である。

そこで本研究では、摩耗や摩擦の低減、発熱の抑制、腐食の防止、動力の伝達など様々な役割を担っている樋門設備の潤滑油に着目した。潤滑油は使用時間や使用環境によって劣化し、機械の運転状態に大きな影響を与える。また、機械の故障を招く潤滑油の劣化要因は、油の酸化劣化による内的要因と金属摩耗粉やゴミなどの異物による外的要因の2つに大別されることがわかっている。

本稿では、積雪寒冷地の河川用機械設備のうち設置台数の多い樋門設備の開閉装置について、潤滑油分析による状態監視の可能性及び潤滑油のメンブランフィルターを用いた簡易劣化診断手法の検討を行ったので報告する。

2. 機械設備の維持管理と保全について

J I S (Z8115) において、保全とは「アイテムを使用及び運用可能状態に維持し、又は故障、欠陥などを回復するための全ての処置及び活動」と規定しており、機械設備の維持管理とはすなわち保全を意味することである。

Kazunori Hirachi, Koji Katano, Kazuya Yamaguchi

る。

また保全は、予防保全と事後保全に大別される(図-1)。

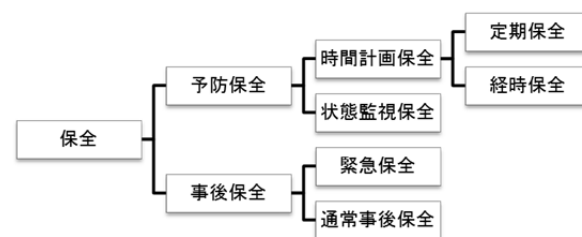


図-1 保全の分類

事後保全とは、設備が故障した後に使用可能状態に回復する保全をいう。通常事後保全と緊急保全に分類される。通常事後保全とは、管理上、予防保全を行わないと決めた機器の故障に対する処置をいい、緊急保全とは、管理上、予防保全を行う機器等が故障を起こした場合に対する緊急措置をいう。

予防保全とは、設備の使用途中で故障を未然に防止し、設備を使用可能状態に維持するために計画的に行う保全をいう。予防保全には時間計画保全と状態監視保全があり、時間計画保全は、予定の保全スケジュールに基づく予防保全の総称で、時間基準保全(TBM)とも言われる。計画的に実施する定期点検や定期整備は、時間計画保全となる。一方、状態監視保全(CBM)は、設備の劣化状態を把握し、管理・劣化基準に達したら修理、取り替えを行う保全を言い、機械設備が故障する前にメンテナンスを行うため、データの精度の問題もあるが、メンテナンスコストや故障損失を最小に抑えることが期待できる。

3. 樋門開閉装置の潤滑油診断

(1) 潤滑油の採油箇所及び採油方法

樋門開閉装置の代表的なものを図-2に示す。

採油箇所は、メインギヤボックス、可逆装置及びスタンドボックスの3箇所とし、給油口より真空式吸引ポンプを用い、概ね油槽の中層部から各箇所500ml程度採油した。

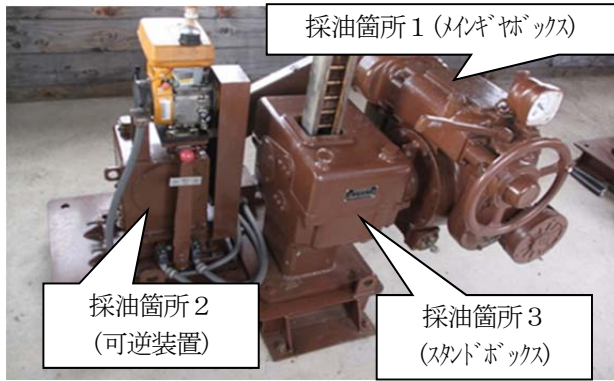


図-2 樋門開閉装置及び採油箇所

(2) 計数汚染度

潤滑油は、使用につれて様々な化学的変化をするとともに、金属摩耗粉や外部からの微小な混入物の影響によって汚染が進む。潤滑油管理では重要な管理項目の一つである計数汚染度（NAS等級）は、潤滑油に混入している粒子を一定の粒子径範囲ごとに計数し、その粒子数から汚染レベルを判定するものであり、12等級まで分類されている（表-1）¹⁾。

表-1 NAS等級表

粒径	等級							
	00	0	1	2	3	4	5	
5-15 μm	125	250	500	1,000	2,000	4,000	8,000	
15-25 μm	22	44	89	178	356	712	1,425	
25-50 μm	4	8	16	32	63	126	253	
50-100 μm	1	2	3	6	11	22	45	
100 μm超	0	0	1	1	2	4	8	

粒径	等級							
	6	7	8	9	10	11	12	
5-15 μm	16,000	32,000	64,000	128,000	256,000	512,000	1,024,000	
15-25 μm	2,850	5,700	11,400	22,800	45,600	91,200	182,400	
25-50 μm	506	1,012	2,025	4,050	8,100	16,200	32,400	
50-100 μm	90	180	360	720	1,410	2,880	5,760	
100 μm超	16	32	64	128	256	512	1,024	

NAS等級は、元々が高い清浄度が求められる工業や航空宇宙の流体動力用途などで使用されている。今回は、通常時は待機状態で出水時に確実に機能しなければならない樋門開閉装置に適用するものであり、採油した潤滑油の中には、計数汚染度の上限値となるNAS12等級を超過する潤滑油が確認された。

そこで、NAS12等級以上の検体について、汚染度を詳細に評価できるようにNAS等級を拡張した等級（以下「仮NAS等級」という。）を新たに定義し、NAS12等級以

上の潤滑油を仮NAS13~21等級に細分化した（表-2）。

表-2 仮NAS等級表

粒径	等級				
	13	14	15	16	17
5-15 μm	2,048,000	4,096,000	8,192,000	16,384,000	32,768,000
15-25 μm	364,800	729,600	1,459,200	2,918,400	5,836,800
25-50 μm	64,800	129,600	259,200	518,400	1,036,800
50-100 μm	11,520	23,040	46,080	92,160	184,320
100 μm超	2,048	4,096	8,192	16,384	32,768

粒径	等級			
	18	19	20	21
5-15 μm	65,536,000	131,072,000	262,144,000	524,288,000
15-25 μm	11,673,600	23,347,200	46,694,400	93,388,800
25-50 μm	2,073,600	4,147,200	8,294,400	16,588,800
50-100 μm	368,640	737,280	1,474,560	2,949,120
100 μm超	65,536	131,072	262,144	524,288

(3) 摩耗分析と計数汚染度の関係

計数汚染度の高い検体について、NAS等級、仮NAS等級に細分化した上で摩耗分析を実施した。

その結果、金属濃度（Fe値、Cu値）は、NAS等級、仮NAS等級の上昇に伴い上昇し、特に仮NAS15等級以上において大幅な上昇を確認した（図-3）。

潤滑油の汚染度の悪化は、ギヤやギヤボックスに使用されるベアリング（Fe）又はベアリング保持器（Cu）の摩耗状態へ影響を及ぼす。特に仮NAS15等級を境にFe値、Cu値が大幅に上昇していることから油中に混入した異物が一定の数量を超えた際には、機器の摩耗促進への大きな影響があると考えられる。

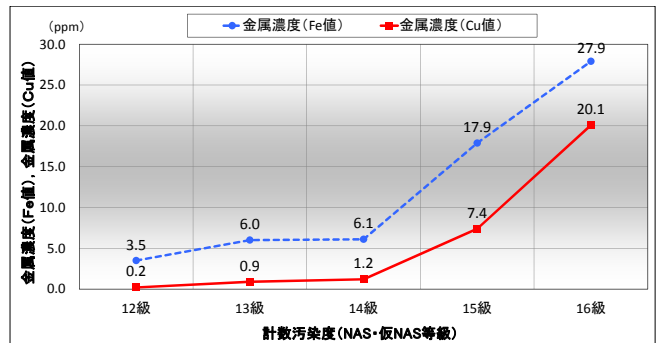


図-3 計数汚染度と金属濃度平均値

4. 開閉装置ベアリングと潤滑油分析

NAS等級の上昇に伴い、金属濃度も上昇することが確認されたので、潤滑油が仮NAS16等級であった樋門開閉装置に使用されているベアリングの各構成要素（内外輪、転動体、保持器）の表面状態を光学顕微鏡及び電子顕微鏡（SEM）により観察し、さらに潤滑油について、X線マイクロアナリシス（XMA）分析を実施し、ベアリング表面の状態との関係を調査した。

(1) ベアリング精密評価

代表例としてベアリングの内輪部の切断写真、光学顕微鏡による撮影写真を図-4, 5に示す。図中の番号は電子顕微鏡 (SEM) の撮影ポイントである。SEMによる内輪部の摩耗状態の観察を行った。その結果、切削摩耗によるとみられる10~20 μ m程度の切削痕及び剥離痕が多数みられた (図-6, 7)。



図-4 ベアリング内輪部



図-5 内輪部の光学顕微鏡写真

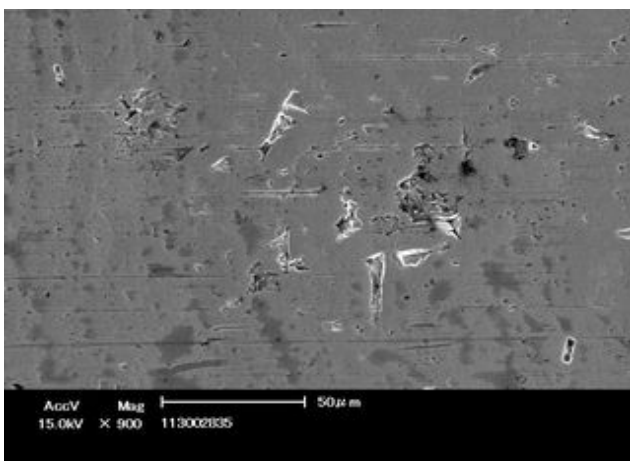


図-6 内輪部の電子顕微鏡による切削痕

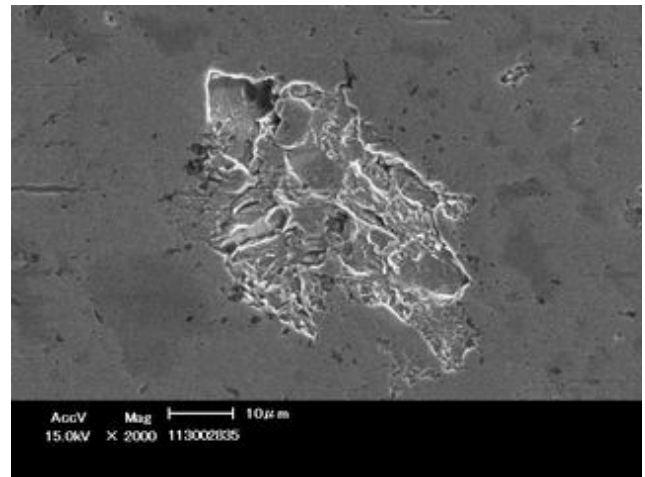


図-7 内輪部の電子顕微鏡による剥離痕

(2)潤滑油分析

次にベアリングに使用されていた潤滑油に混入している摩耗粒子の組成割合を分析するため、摩耗粒子を磁場により大きさ順に配列したフェログラフィーを行った (図-7)。フェログラフィーの結果より、X線照射ポイントを決定的上、X線マイクロアナリシス(XMA)分析を行った(表-3)。

その結果、ベアリング鋼を構成するステンレスの組成 (Cr、Mn、Fe、Ni) 割合に類似している粒子があったことから、これら摩耗粒子はベアリングの内外輪、転動体から発生したと考えられる。また、銅合金と推定される粒子も存在していることから、ベアリング保持器又はベアリング以外のギヤ等の部分からも摩耗粒子が発生していることも推測できる。²⁾

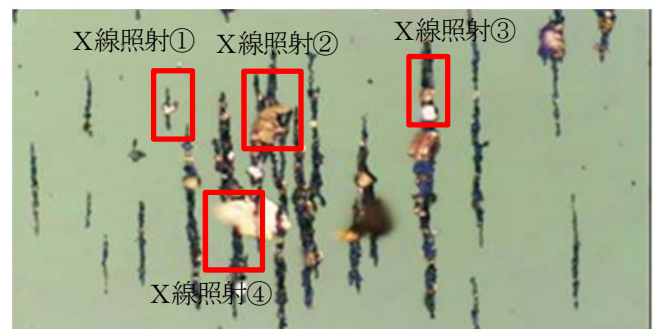


図-8 フェログラフィーによる摩耗粒子

表-3 主な混入元素組成割合

分析対象		組成割合 (%)			
		X線照射①	X線照射②	X線照射③	X線照射④
クロム	Cr	1.33	-	0.50	14.73
マンガン	Mn	16.50	1.76	1.68	1.40
鉄	Fe	82.17	-	97.97	74.65
ニッケル	Ni	-	-	-	9.22
銅	Cu	-	98.24	-	-

(3)考察

ベアリングの精密評価からベアリング表面に切削痕が

観察された。一方、潤滑油分析ではベアリングの材料に起因する切削粒子が多く確認され、潤滑油の汚染度が仮NAS16等級と高くなったのは、油中の切削粒子等が影響を与えたと考えられる。この状態で、ベアリングを使用し続けた場合、切削痕が起点となり、フレーキング（常に接触を受けて回転することにより、表面がうろこ状はがれる現象）に進展し、ベアリングの寿命が低下する可能性がある。ベアリングの寿命、さらには施設の寿命を延ばすためには、潤滑油の状態を適切に把握し、清浄に管理することが重要である。

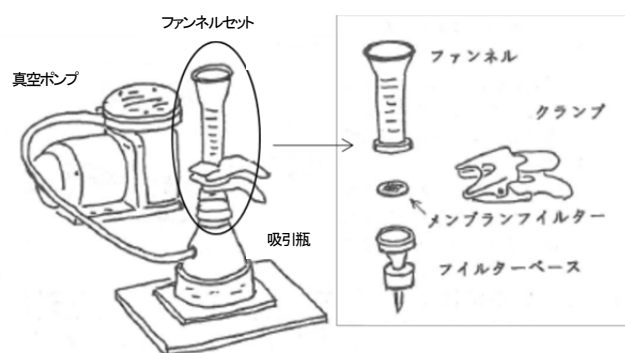


図-9 コンタミチェッカー

5. メンブランパッチ色相と計数汚染度

(1) 潤滑油とメンブランフィルタ

本田ら^{3,4)}は、新しい油中汚染物の判定法としてセルローズ・アセテートの白色フィルタ（メンブランフィルタ）を用いて、そのフィルタ上に捕集された汚染物を色で判別する手法を提案するとともに、色相判別装置（Colorimetric Patch Analyzer）を開発した。

本手法は、潤滑油をろ過したメンブランフィルタに白色光を投射し反射光と透過光を用いて、RGB値、最大色差（MCD）、 ΔE_{RGB} の各色パラメータを測定する。

RGB値は、各々256階調で表され、白で（255, 255, 255）、黒で（0, 0, 0）となる。最大色差（MCD）はRGB値の2色間の最大差を表したものである。最大色差（MCD）により劣化要因の識別がなされ、酸化劣化による場合は値が大きく茶系色の色合いが強くなり、固形粒子による場合は値が小さく灰系色の色合いが強くなる。また、 ΔE_{RGB} は白までの距離であり、次式で表される。この値が大きいほど濃色化していることを意味し、汚染程度を判定することができる。

$$\Delta E_{RGB} = \sqrt{(255 - R)^2 + (255 - G)^2 + (255 - B)^2}$$

(2) メンブランパッチの作成

潤滑油をメンブランフィルタにろ過する装置として、(株)クリーンテック製のコンタミチェッカー（図-9）を用いた。フィルタベース部に孔径0.8μmのメンブランフィルタをセットし、試料油5mlを注入後、真空ポンプにより吸引しろ過した。その後、石油エーテルにてメンブランフィルタの油分を除去し乾燥させた。作成したメンブランフィルタを色相判別装置で測定できるようにパッチ化し各色パラメータの測定を行った。

測定を行った潤滑油は、平成25年度までに採油した65検体とした。

(3) 測定結果

図-10に金属濃度（Fe+Cu値）と最大色差（MCD）との関係を示す。金属濃度（Fe+Cu値）が15ppm以上の場合、最大色差（MCD）が30以下となり金属濃度（Fe+Cu値）の上昇とともに減少することを確認した。

図-11に計数汚染度（NAS・仮NAS等級）と最大色差（MCD）及び ΔE_{RGB} の平均値の結果を示す。計数汚染度の上昇に伴い最大色差（MCD）は減少、 ΔE_{RGB} は上昇する傾向が確認できた。

図-12の計数汚染度と ΔE_{RGB} から計数汚染度の上昇とともにメンブランパッチ色相の濃色化が確認できた。特に、仮NAS14又は15等級を境界として色の濃色化が顕著であり、固形粒子が増えていることが予想される。

表-4に計数汚染度別のメンブランパッチ、潤滑油及びRGB、MCD、 ΔE_{RGB} 値の一例を示す。メンブランパッチと潤滑油の色相を比較してみると、潤滑油色相がメンブランパッチ色相と必ずしも一致しないことがわかる。

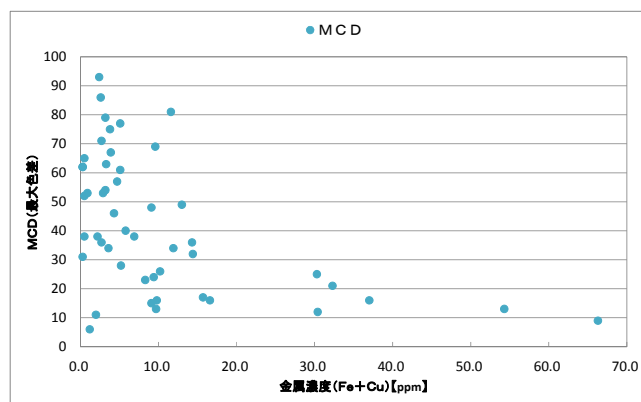


図-10 金属濃度と最大色差(MCD)

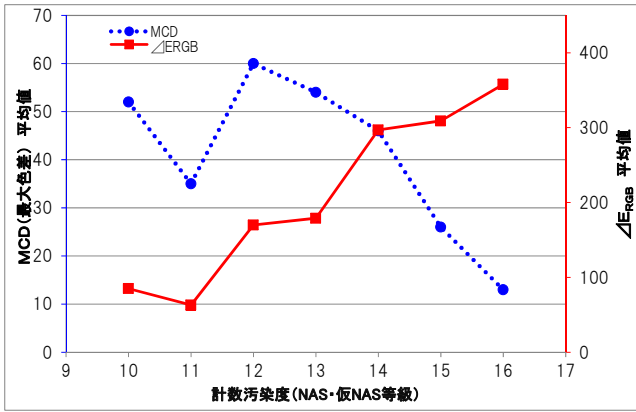


図-11 金属濃度と最大色差(MCD)

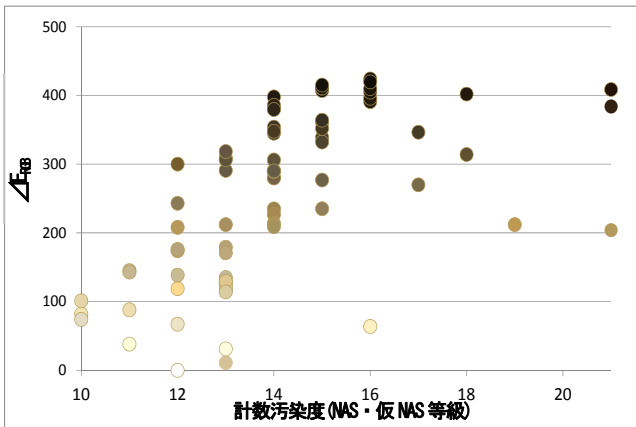


図-12 計数汚染度と ΔE_{rgb} (各プロットはメンブランパッチ色相を示す)

表-4 メンブランパッチとRGB値等

NAS・仮NAS等級	メンブランパッチ	潤滑油	R	G	B	MCD	ΔE_{rgb}
10			243	229	178	65	82
11			255	253	217	38	38
12			181	163	124	57	176
13			190	168	123	67	171
14			116	99	68	48	280
15			112	99	76	36	277
16			27	22	14	13	405

(4) まとめ

最大色差 (MCD) の値から汚染要因、 ΔE_{rgb} 値の値から汚染程度を判定することができることから、これらの数値を用いて樋門開閉装置の潤滑油の汚染状態を判定できることが示唆された。

5. おわりに

樋門開閉装置の潤滑油を利用した簡易劣化診断手法を確立するため、ギヤ、軸受 (ベアリング) の劣化状態と計数汚染度、金属濃度及びメンブランパッチ色相との相関関係の調査した。今後はメンブランパッチ色相の測定により、樋門開閉装置に使用される潤滑油の交換時期の適正な判断及び異常の早期発見ができるよう判定精度を高めていく。

参考文献

- 1) (社)日本トライボロジー学会：メンテナンストライボロジー，2006. 11
- 2) ジムフィッチ：油中元素の発生源 (日本語翻訳版)，2011. 2
- 3) 本田知己：潤滑油の劣化診断・検査技術，精密工学会誌，75, 3(2009)
- 4) 本田知己，田中清隆，岩井義郎，佐々木徹：メンブランパッチの色によるタービン油の酸化劣化診断法の開発，第10回評価・診断に関するシンポジウム，2012. 11