

38. 河川ポンプ設備における状態監視技術に関する研究

(潤滑油分析による診断)

(独)土木研究所

○ 上野 仁士
藤野 健一
山尾 昭

1. はじめに

排水機場などの河川ポンプ設備は、洪水被害防止を目的とした極めて重要な社会基盤施設であり、豪雨や異常出水時には確実に稼働することが要求される。

そのためには設備の万全な整備が不可欠であり、管理者は、定期的に整備する「時間計画保全」という考え方で維持管理をしている場合が多い。この手法は、日常的な点検で内部の詳細な劣化状況を把握することが困難な、大型かつ重要な主ポンプ設備や駆動設備（主原動機、減速機）では、確実な整備が行えるという点でメリットが大きい、内部劣化の有無によらずに定期的に整備を行うため、経済的で不利な場合がある。

河川用ポンプ設備においては、今後10年で約40%が設置後50年超となり、老朽化の進行による故障頻度上昇の懸念がある反面、整備予算は年々削減されている現状にあり、この相反する状況下でいかに効率的で的確な設備維持管理を行うかが課題となっている。

民間工場等の常用系設備では、設備状態の監視により劣化兆候を確認・診断し、それにより整備時期を判断する「状態監視保全」という考え方を導入するケースがあり、これにより保全費用の5%削減を可能とした例もある¹⁾。

したがって、河川ポンプ設備の維持管理においても状態監視保全を導入することはきわめて有効と考えられるが、高い信頼性が求められる待機系設備の状態監視技術は民間ではニーズは低く技術が確立していない。

よって、河川ポンプ設備の維持管理に適した状態監視保全（劣化予測）技術を確立し、不測の重大故障を回避し、無駄のない予防保全の実現を図る必要がある。

そこで独立行政法人土木研究所では、平成22年度より、排水機場ポンプ設備の原動機に関しては潤滑油分析、主ポンプについては振動法、減速機については両方式の併用による状態監視保全技術の確立について検討を重ねてきた。本稿では潤滑

油分析による排水機場ポンプ設備の状態監視保全技術の検討結果について報告する。

2. 潤滑油による設備診断技術

常用系の設備診断では、潤滑油分析のほか、振動法、音響、温度によるものがある。そのなかでも潤滑油分析は、図-1 に示すように異常の早期発見に有効であるとされている。

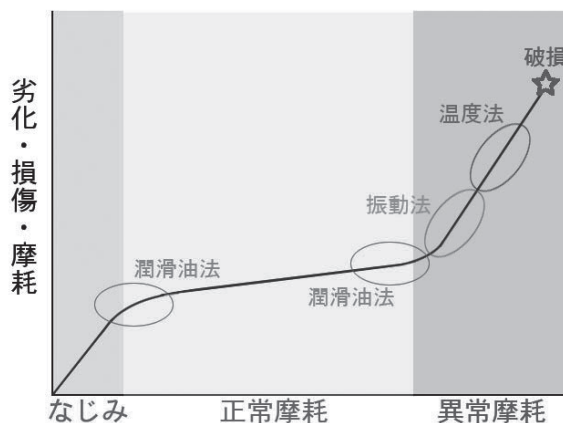


図-1 摩耗進行曲線と診断技術²⁾

潤滑油による診断技術は、混入している摩耗粉の状態から設備の状態を把握するもので、SOAP法とフェログラフィ法がある。

SOAP法は、元素毎に発光スペクトルが異なることを利用した分析法である。高周波誘導コイルによる電場によりプラズマ化したアルゴンガス中に、霧状に噴霧された試料（この場合は分析用に処理をした潤滑油）が熱エネルギーを受けて発光するので、それを分光分析することによって試料内に含有される金属元素成分とその濃度を測定して摩耗損傷箇所を推定する方法である。概念図を図-2に、摩耗損傷が想定される機器の材質、元素を表-1に示す。

この手法は10μm以下の小摩耗粒子の測定に適しており、ppm単位での検出が可能であることから極めて早い段階からの摩耗状態を検知できるが、

大摩耗粒子に対しては、それを発光させるほどのエネルギーを与えることは困難なので不向きとされている。

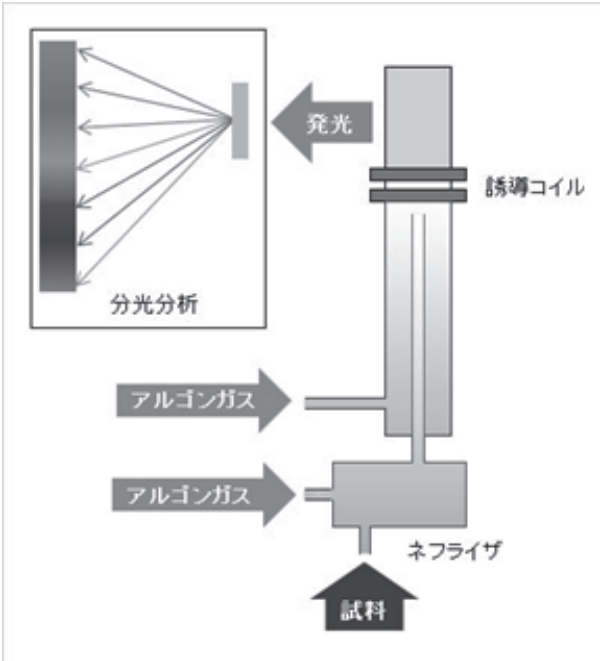


図-2 SOAP 法 概念図

表-1 各部品と材料・成分

機器	部品	材料	成分
原動機	スリーブ	特殊铸铁	Fe Ni Cr
	ピストンリング	特殊铸铁	Fe Ni Cr
		ステンレス鋼	Fe Ni Cr
	ピストンピン	炭素鋼	Fe
	クランクピン	クロムモリブデン鋼	Fe Ni Mo
		ホワイトメタル層	Sn Pb
減速機	ピストンピンメタル	ニッケル層	Ni
	クランクピンメタル	ケルメット層	Cu
	歯車	クロムモリブデン鋼	Fe Ni Mo
	軸受	高炭素クロム軸受鋼	Fe Cr Mo
		アルミ合金	Al
		高力黄銅鑄物	Cu Zn

フェログラフィ法は、金属摩耗分が含まれた潤滑油を、磁石を下に敷いたスライドガラス上または沈着チューブ内に流し、油中の摩耗粉を捕捉分離することで摩耗分を分析する方法で、分析フェログラフィと定量フェログラフィがある。それぞれの概念図を図-3,4 に、分析フェログラフィで見られる摩耗粉と主な発生原因を表-2 に示す。

定量フェログラフィは、沈着チューブ内に残留した大粒子（5μm 以上）と小粒子（2μm 以下）の各濃度を調べ、摩耗過酷度指数を算出することにより機械の診断を行う。

分析フェログラフィは、スライドガラスに定着した潤滑油中の粒子を顕微鏡で観察し、その色や形状により、機械設備の内部摩耗状態を診断する。

この技法は SOAP 法とは逆に、磁力による摩耗粉補足と目視が主体なので大摩耗粒子の分析に適している。

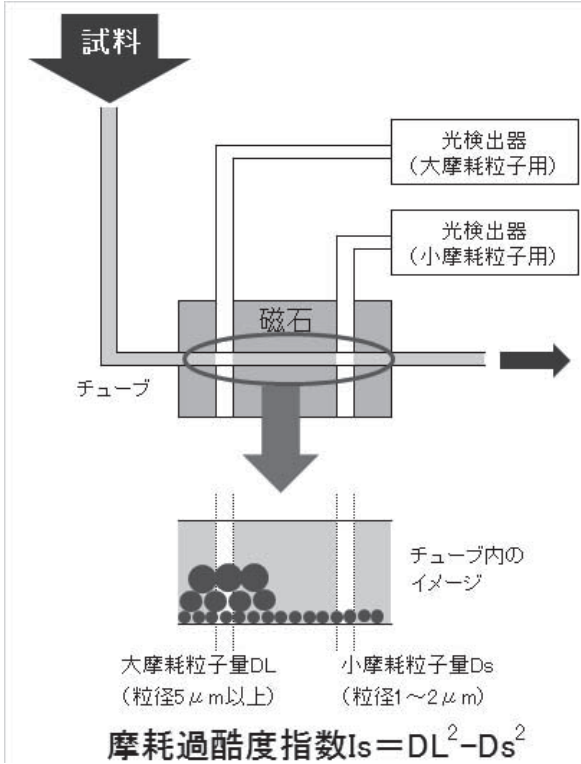


図-3 定量フェログラフィ 概念図

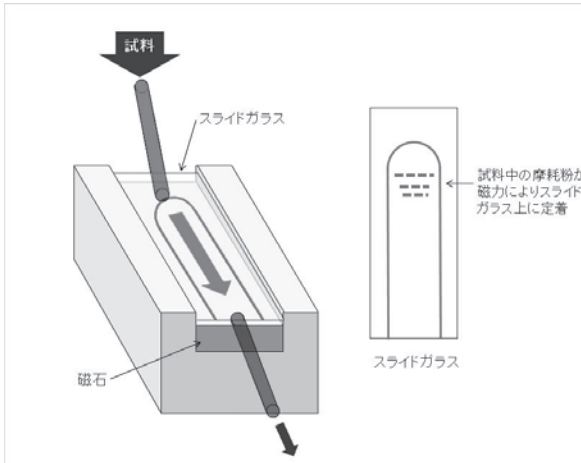
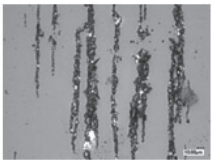
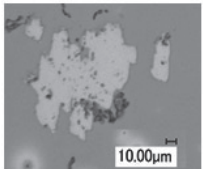
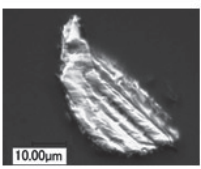
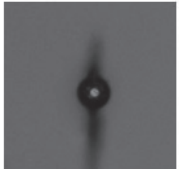
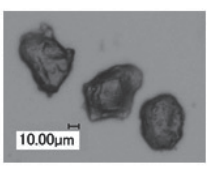
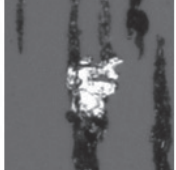
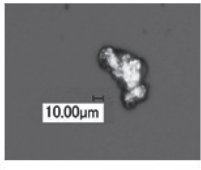
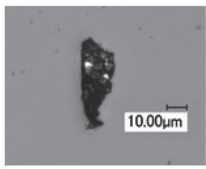
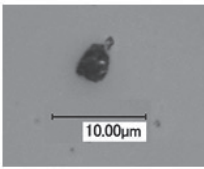


図-4 分析フェログラフィ 概念図

3. SOAP 法、フェログラフィ法の適用性³⁾

排水機場ポンプ設備は、駆動用動力源としてディーゼルエンジンまたはガスタービンエンジンが使用されている。また、ポンプへの動力伝達には、ポンプ形式が立軸の場合は直交軸歯車を、横軸の場合は遊星歯車もしくは平行軸歯車を用いた減速機が用いられている。排水機場ポンプ設備の、潤滑油分析による診断は、これらを対象に行う。横軸ポンプを写真-1 に、立軸ポンプを写真-2 に示す。

表-2 代表的な摩耗粒子

形状による分類	 正常摩耗粒子 10 μm以下の粒子が磁束線に沿って配列	 切削摩耗粒子 発生原因: 突起、異物による部材の切削
	 平板状摩耗粒子 発生原因: 転がり軸受の疲労摩耗	 シビア摩耗粒子 発生原因: 過剰応力による部材の損傷
	 球状摩耗粒子 発生原因: 軸受の疲労	 砂 発生原因: 異物の混入
	 非鉄粒子(ホワイトメタル) 発生原因: すべり軸受の摩耗・損傷	 非鉄粒子(銅合金) 発生原因: 軸受の摩耗・損傷
色・材質等による分類	 黒錆 発生原因: 摩擦面の過熱・潤滑不良	 赤錆 発生原因: 水分の混入による腐食

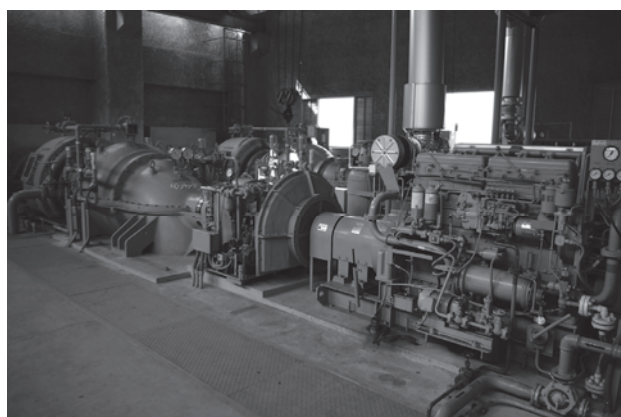


写真-1 横軸ポンプ



写真-2 立軸ポンプ

潤滑油による設備診断技術については前述の通りであるが、排水機場は、平時は停止しており潤滑油が機械内を循環していないため、これらの手法で的確に診断できるかについては未知数であり、ここが大きな課題となっている。

そこで、排水機場機械設備でも常用機械設備と同様に、これらの手法で設備内部の摩耗傾向が把握可能かどうかの調査を行った。

なお、潤滑油サンプリングは、排水機場の運転中または潤滑油が設備内を十分に循環した運転の停止直後が望ましいが、天候に左右される実排水運転は定期的がないため、設備の機能維持や異常の発見、運転操作員の習熟度向上を目的としておおむね月1回、ポンプ1台当たり30分程度行っている管理運転時に行うこととした。

3.1 同一仕様原動機での比較 (SOAP 法)

SOAP 法については、同一排水機場・同一仕様で、直近の分解整備年次のみ異なるディーゼル原動機2台(整備後4年経過の1号ポンプと14年未整備状態の3号ポンプ)について比較を行った。

その結果、図-5に示すように、鉄や銅のような摩耗すると増大する成分は、より長期にわたり継続使用している3号機の方が多く検出されている事が確認され、排水機場ポンプ設備でも、含有元素の変化を見て設備状態を予測する事が可能であることが示されている。

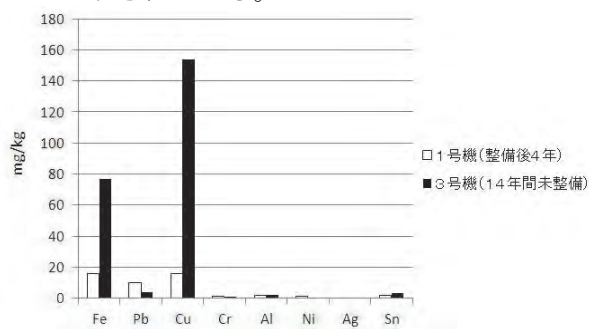


図-5 SOAP法の比較

3.2 同一仕様原動機での比較（フェログラフィ法）³⁾

定量フェログラフィでも、同一機場、同一仕様のディーゼル原動機2台を同時に分解整備した際の部品の摩耗量と摩耗過酷度指数の比較を行ったところ、表-3 に示すように、部品の摩耗量が大きいと推測できる原動機では、摩耗過酷度指数も高くなり、摩耗兆候は捉えることが可能と確認できた。

表-3 定量フェログラフィ 結果比較

	1号機	2号機	備考
シリンダライナ摩耗量(mm)	0.038	0.082	各気筒の摩耗量平均値の合計
大摩耗粒子量DL(%/mL)	40	45	
小摩耗粒子量DS(%/mL)	30	20	
摩耗過酷度指数	700	1625	DL ² -DS ² で算出

分析フェログラフィについても、実際にスライドガラスを確認したところ、特徴的な摩耗粉を捉えることが可能であることが確認された。前述の表-2 に示した写真は、実際の排水機場ポンプ設備の原動機、減速機で見られた摩耗粉である。

3.3 実際の劣化設備と分析結果の比較

以上より、排水機場ポンプ設備においても、常用設備と同様に特徴的な傾向が把握可能であることが確認された。

そこで今度は、実際の分析結果が設備状態を的確に反映しているかの確認を行った。

写真-3,4 に示すのは、それぞれ分解した別個の原動機のクランクピンメタルで、写真-3 のH排水機場のものはケルメット層まで露出するほど摩耗しており、写真-4 のN排水機場のものはほとんど摩耗していない。

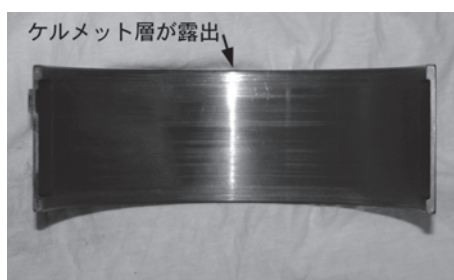


写真-3 H排水機場原動機 クランクピンメタル

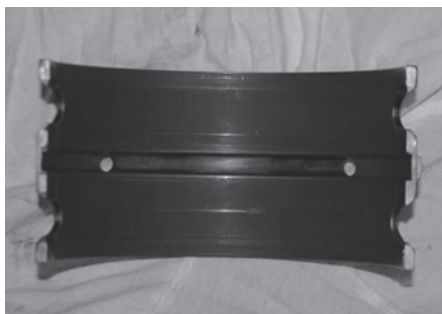


写真-3 N排水機場原動機 クランクピンメタル

これらの原動機の潤滑油分析結果を図-6,7、写真-5,6 に示す。

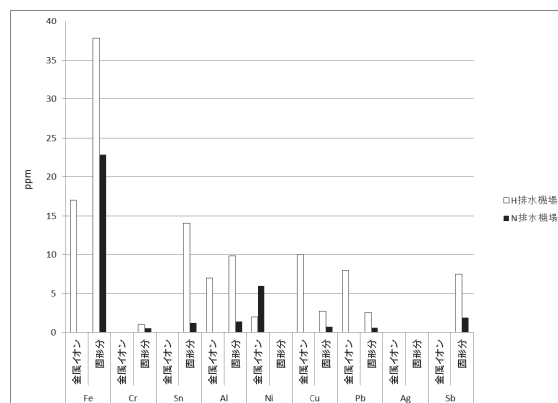


図-6 SOAP法による比較

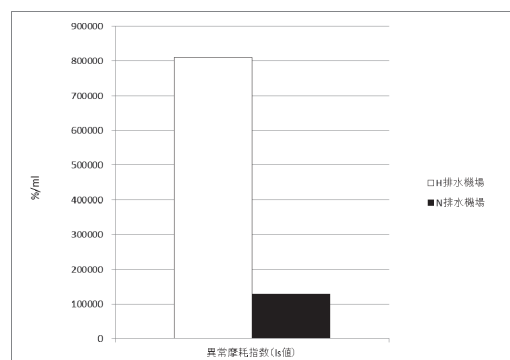


図-7 定量フェログラフィ法による比較

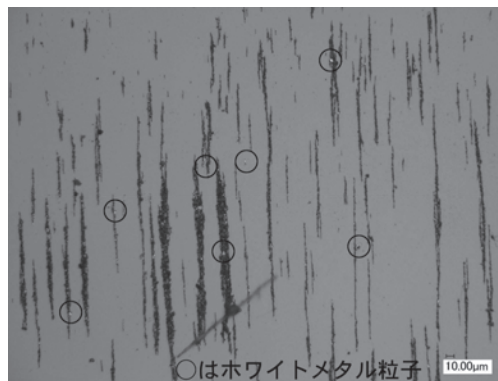


写真-5 H排水機場 分析フェログラフィ



写真-6 N排水機場 分析フェログラフィ

数値で示される SOAP 法、定量フェログラフィ法では、摩耗劣化が進行しているH排水機場の方が明らかに大きな数字が示されている。

また、分析フェログラフィでは、やはりH排水機場の方が摩耗粉量が多く、ホワイトメタルなども目立っている。

このことから、潤滑油分析による設備の摩耗劣化程度の診断も十分可能であると考ええる。

4. 傾向管理手法の検討

4.1 複数分析者間の分析結果比較

状態監視保全においては、定期的に分析し、その数値の変化傾向を確認する「傾向管理」が不可欠である。傾向管理の実施には、結果のばらつきの要因を可能な限り排除するため、可能な限り同一の条件による分析が求められる。

潤滑油分析は専門業者に依頼することになるが、河川管理者である国や地方自治体では契約制度上、同一の分析者で継続して実施することは難しい。

そこで、同一潤滑油サンプルを、複数の分析者で分析・設備診断結果を比較した。

その結果、設備診断結果（設備状態の良否）は同一の傾向を示すが、分析技術個々の結果、特に SOAP 法や定量フェログラフィ法など数値で示される分析結果については分析者毎に数値が異なっている。ある原動機における、SOAP 法での比較例を図-8 に、定量フェログラフィの例を図-9 に示す。

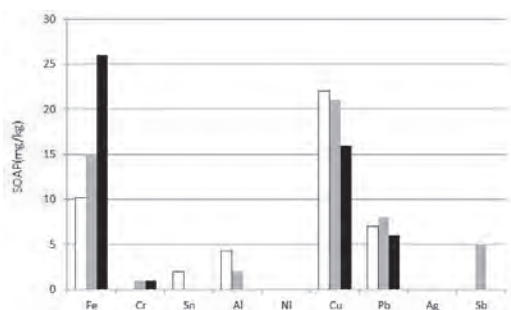


図-8 SOAP 法の分析者毎の比較

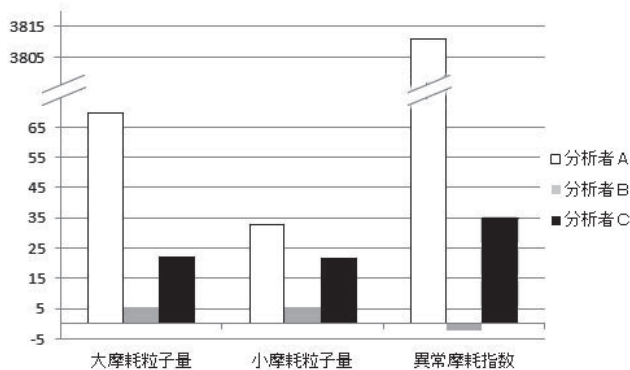


図-9 定量フェログラフィの分析者毎の比較

このような結果となったのは、分析者毎に有する知見等により分析・診断手法が異なるためと考えられる。分析者にとって各分析手法は設備診断をするためのツールでしかなく、そのツールによって示された数値を独自の知見と技術を用いて診断をする。そのツール自身も、それぞれの技術に適したものが用いられている。重要なのは診断結果であって、ツール個々の比較は意味をなさない。

したがって、異なる分析業者間の分析結果を横断した傾向管理は、困難と言わざるを得ない。

4.2 鉄粉濃度計の活用

このような結果となったが、前述したとおり、実際の設備維持管理には傾向管理が不可欠である。

そこで、一般の設備で傾向管理に用いられている鉄粉濃度計の活用が、排水機場ポンプ設備でも活用可能か否かを試みた。

鉄粉濃度計は電磁誘導法を利用したもので、鉄分を含んだ潤滑油を励磁コイルに挿入することにより変化する磁気抵抗率を検出することで鉄分濃度を測定するものである。10ppm 程度の測定誤差があるため、1度の測定値による診断ではなく、傾向管理に用いることが望ましいとされている。

これは、管理者自らが用意し計測することができるので、有用であれば傾向管理に大いに役立つものと考ええる。

鉄粉濃度計での実際の計測結果であるが、ディーゼルエンジンならびに減速機の潤滑油中の鉄粉濃度と SOAP 法での鉄濃度との関係を、それぞれ図-10,11 に示す（いずれも横軸はサンプル番号であり、すべて異なる設備である）。

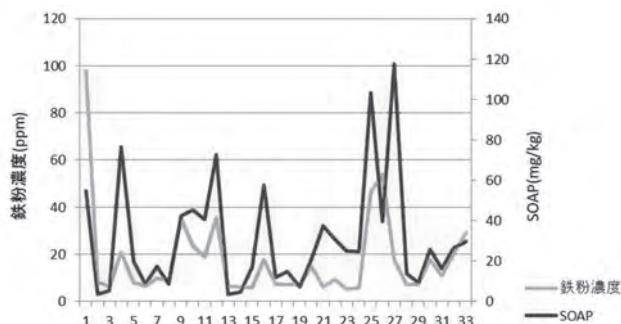


図-10 SOAP 法と鉄粉濃度計結果比較（原動機）

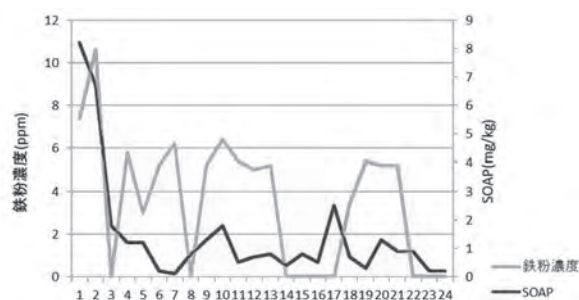


図-11 SOAP 法と鉄粉濃度計結果比較（減速機）
原動機では、一部に例外があるが、おおむね、

SOAP 法で高い数値のものは鉄粉濃度も高めに出る傾向にある。

減速機は、SOAP 法の結果に対して鉄粉濃度計の変動が激しい。しかし鉄粉濃度計の計測結果は誤差範囲である 10ppm 以内に集中しているので、このデータをもって一概に相関がないとはいえない。したがって、このレベルでは誤差の影響で傾向管理は困難ではあるが、原動機での結果を考慮すると、著しい摩耗が発生した場合にはその早期発見が期待できるものと考ええる。

また、先述したH排水機場とN排水機場での鉄粉濃度計計測結果を図-12 に示す。

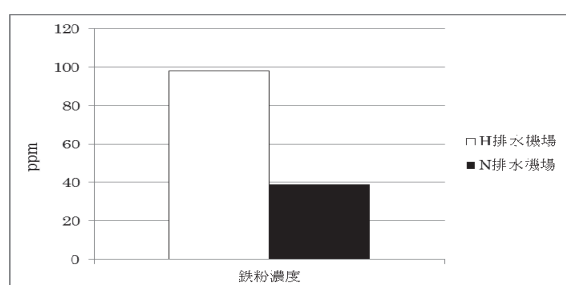


図-12 H排水機場とN排水機場 鉄粉濃度計結果比較

ここでも、摩耗進行しているH排水機場の方が大きな数値を示していることが確認された。

以上より、厳密性に欠けるが、傾向管理として鉄粉濃度計活用は有用と思われる。今後、同一設備の継続的な傾向ならびに減速機での異常兆候発生事例を調査し、さらなる適用性を確認したい。

5. サンプルング時の運転時間について³⁾

分析用潤滑油のサンプルングは管理運転時に行う、と先述したが、分析結果はサンプルング前の運転時間に影響される可能性がある。そこで、1台の原動機について、運転方法や運転時間を変えてサンプルングし、鉄粉濃度、SOAP 法による分析を行った。その結果を図-12 に示す。なお、原動機は運転各日の17時～翌8時の間は停止している。

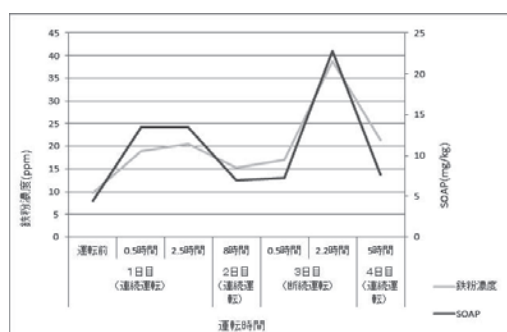


図-12 SOAP 法と鉄粉濃度計結果比較 (運転方法毎)

ここでは、鉄粉濃度と SOAP 法の大小は同一の

傾向にある事が示されており、ここでも鉄粉濃度計の有用性が示されていると考える。

運転1日目では、運転0.5時間と2.5時間の差はあまり無いが、2日目の運転8時間の結果が前日の運転2.5時間より低くなっている。

同じ運転0.5時間でも、1日目と3日目では結果は異なる (ただし鉄粉濃度は誤差範囲)。

これらから、分析結果は直近の運転状態により左右されるのではないかと考えられる。

また、3日目の運転2.2時間の結果が著しく高い。これは、直近で短時間に7回の起動停止の断続運転としたので、それが分析結果に影響したのではないかと考えられる。

この調査に用いた原動機はこの直後に分解し内部状態を確認したが、ほとんど摩耗劣化していなかったため、残念ながらどのような運転条件下でのサンプルングが設備状態をより反映しているのかは不明であるが、少なくとも、傾向管理のためには可能な限り同一条件での管理運転後にサンプルングすることと、管理運転の直前に運転があった場合は結果に影響が出る可能性があることに注意する、ということが言えると考えられる。

6. まとめ

「非」常用系である排水機場ポンプ設備においても、常用設備と同様に、潤滑油分析による状態監視保全技術による設備劣化傾向の把握が可能であることが、これまでの調査で示された。

しかし現段階では、時間計画保全により設備の劣化兆候が現れる前に整備が行われているため、本技術による設備の異常兆候の把握を実際に行った事例に乏しく、今後は状態監視技術の適応性向上のため、より多くの事例の調査を行い、診断精度向上を図る予定である。

このように、排水機場ポンプ設備の状態監視保全技術は現段階では発展途上の技術であるが、今後の排水機場ポンプ設備の効果的、効率的な維持管理に貢献しうる技術となりうるものと確信するものである。

参考文献

- 1) 振動技術研究会：ISO基準に基づく機械設備の状態監視と診断 (振動 カテゴリーⅡ) 第2.3版
- 2) 社団法人日本トライボロジー学会：ISO18436-4準拠 トライボロジーに基づくメンテナンス カテゴリーⅠ
- 3) 藤野健一・山尾 昭・上野仁士：排水機場設備の状態監視保全技術，月刊潤滑経済，pp.40～43，2014年6月号