

# トライボロジーを活用した 設備診断技術に関する研究

研究第二部 研究員  
信澤 雄一郎



## 1 研究目的と研究体制

下水道施設における主要設備の保全管理業務は、予め定められた運転時間等を基準として分解整備を行う時間計画保全が標準的に実施されている。しかし、この保全方式は、機能に余裕がある健全な状態で分解整備が行われることが多く、結果的に高い保全管理費用を要することが多い。これに対し、機器の状態に応じて保全を行う状態監視保全は、機器を健全な状態に保ちつつ、維持管理コストの低減を図る有効な手段であることから、従来から温度や振動などを測定する手法が用いられてきた。このように計画的な修繕を行うためには、異常に至る兆候を早期に発見する必要があり、それを可能とする診断ツールが求められている。

本研究は、下水道施設において状態監視保全を取り入れる際に留意すべき事項を整理するとともに、状態監視保全の一技術であるトライボロジーを活用した設備診断技術（以下、「潤滑診断」という。）に着目し、その適用性や導入時の留意事項、分析項目等について基本的な考え方を示すものである。本研究は、トライボテックス(株)と本機構の2者で行った。

## 2 研究内容

### 2.1 潤滑診断の基本事項の整理

#### 2.1.1 本技術の対象と特徴

トライボロジーは、「摩擦する表面と潤滑に関する科学技術」とされ、機械の信頼性や耐久性に影響を及ぼす潤滑や摩耗を扱う技術分野である。

潤滑診断は、この技術分野のうち回転機器などの潤

滑油中の摩耗粒子等が、軸受や歯車（以下、「軸受等」という。）の表面損傷と表裏の関係にあることに着目して、潤滑油を詳細に分析することにより機械設備の健全性を評価する技術である（図-1参照）。

本技術は、機械に異常を発生させる原因の一つである軸受等の潤滑状態を直接分析することから、人の血液検査に例えられることがあり、他の診断手法に比べて異常を早期発見できるという特徴を有する（図-2）。

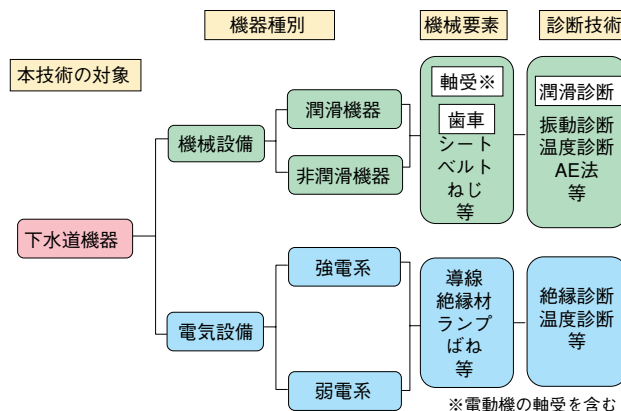


図-1 潤滑診断の対象

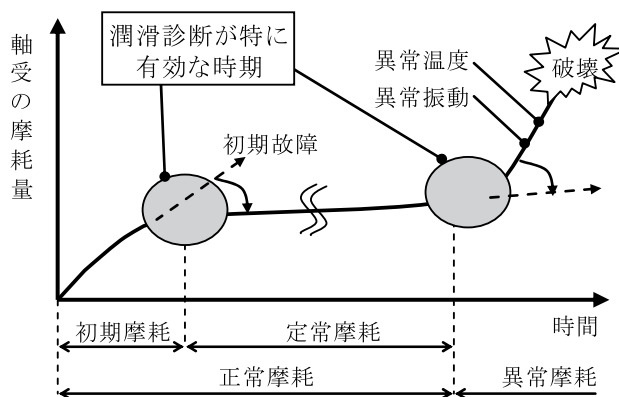


図-2 潤滑診断の特徴

### 2.1.2 潤滑診断の分析項目

回転機器の不具合の多くは、軸受等の潤滑状態に関係している。軸受等の潤滑状態は、潤滑油の劣化や異物混入のほか、軸の回転速度や荷重に影響を受けて変化する。つまり、機器が正常な運転状態であっても発停や負荷変動を生じることによって潤滑状態が変化し、それにより微量な摩耗粒子を生じさせる。潤滑診断は、そのような正常な運転状態における摩耗粒子の量や形状を基準として、その変化を捉えることにより異常の検知を行うものであり、摩耗の原因となる潤滑油の劣化状態、汚染状態とあわせて分析し、総合的な診断を行うものである。図-3に分析項目を示す。

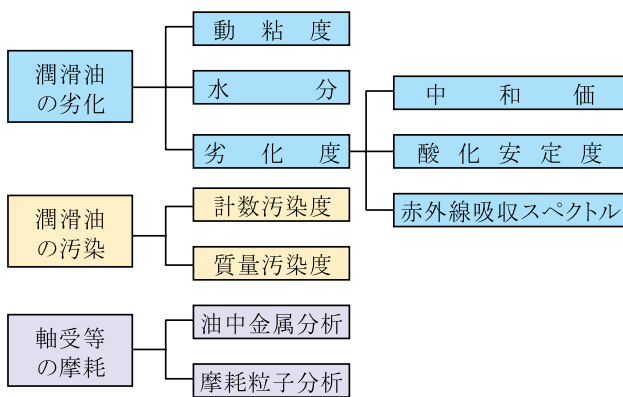


図-3 分析項目

以下に、各分析要素の概要を示す。

#### ①潤滑油の劣化

潤滑油の劣化は、機器使用中による発生する熱の影響や酸素、金属、水等の接触による影響が考えられ、劣化の測定は、大別して動粘度、水分、劣化度に分類することができる。

#### ②潤滑油の汚染

潤滑油の汚染は、摩耗粒子等によって生じる内部からの汚染と砂等の混入による外部からの汚染がある。汚染の測定は、粒子数を調べる計数汚染度と汚染物の質量を調べる質量汚染度の二種類がある。

#### ③軸受等の摩耗

軸受等の摩耗は、油膜厚さの不足や汚染物の混入によって引き起こされて発生する。摩耗の測定は、摩耗の進行の程度と発生箇所を特定する油中金属分析と、摩耗粒子の大きさ・形状・濃度等を分析・観察する摩耗粒子分析（フェログラフィー法）がある。

フェログラフィー法は、強力な磁力によって潤滑油中の摩耗粒子を分離配列させ、磁力線上に捕捉した摩

耗粒子を識別するものである。

図-4にフェログラフィー法の概念図を示し、図-5に同法によって観察できる代表的な摩耗粒子の顕微鏡写真を示す。

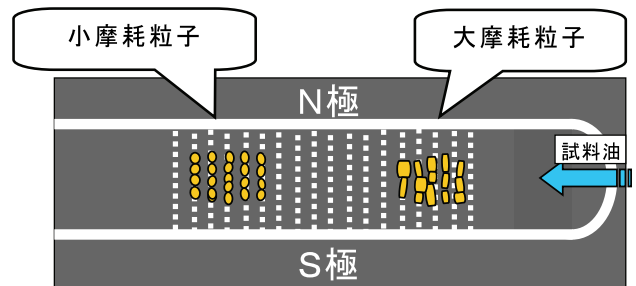


図-4 フェログラフィー法の概念図

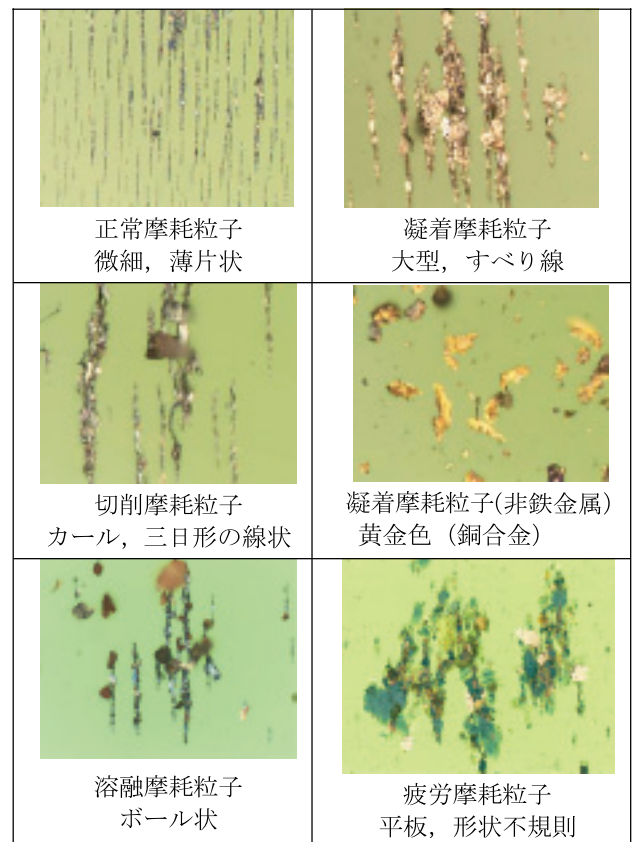


図-5 代表的な摩耗粒子

## 2.2 現状の設備保全手法の把握

設備の保全方法は、大別して事後保全と予防保全に分類され、予防保全は時間計画保全と状態監視保全に分類される。本技術は、状態監視保全を実施するための一技術であることから予防保全を行うべき機器に対して適用することが重要である。しかし、前提となる

設備保全方式の選定に関して体系的に解説されている技術資料がない状況にある。本研究では、このような状況を踏まえ、供用後15年を経過した処理場を有する全国の自治体にアンケートを実施し、現状の設備保全手法を調査することとした。アンケートの回答は246自治体、502処理場、機器数は5320機となった。以下に、アンケート調査の概要を示す。

①現状の保全方式・周期

時間計画保全が主として行われているが、主ポンプ

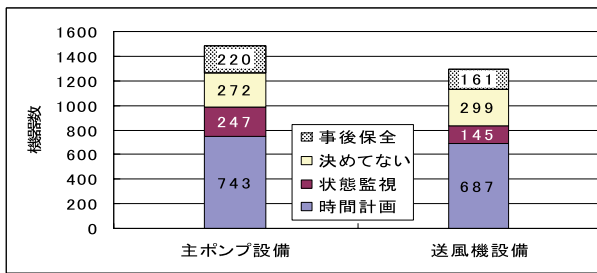


図-6 現状の保全方式

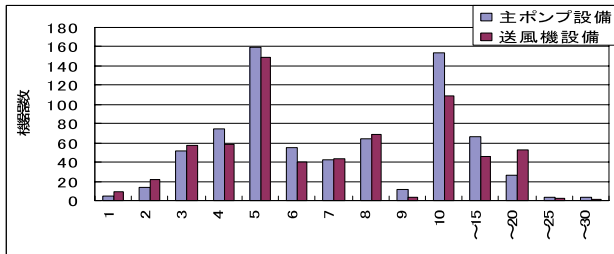


図-7 分解整備の周期

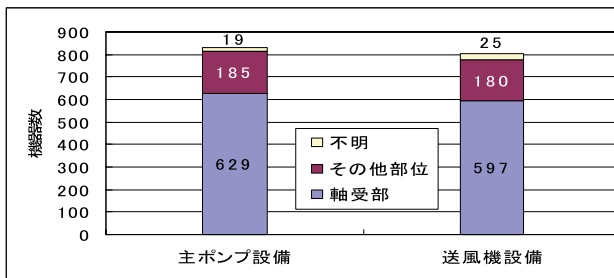


図-8 分解整備時の主要交換部品

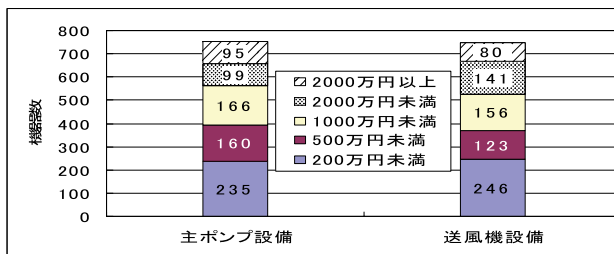


図-9 分解整備の費用

や送風機といった根幹を成す機器であっても、「予備機がある」「事後でも費用が変わらない」といった理由により事後保全が行われている例があった(図-6参照)。また、時間計画保全を実施している機器の分解整備周期は、自治体間での開きが大きく、中でも5年や10年で分解整備が行われている例が多かった。これは、本質的な劣化度合いと関係なく、いわゆる“きりのいい数字”で分解整備が行われていることを示唆するもので、このような機器に対して状態監視技術を導入し、保全周期を延伸することで保全費用の低減が図れる可能性があると考えられる(図-7参照)。

②整備の目的・費用

分解整備時の主要交換部品については、多くの場合において「軸受」とされており、本技術の適用性は高いと考えられる(図-8参照)。整備費用に着目すると、高額なものに関しては数千万円に及ぶものもあり、軸受の交換周期の延伸がライフサイクルコストの低減に寄与すると考えられる(図-9参照)。

2.3 実機実証試験の実施

潤滑診断の妥当性および適用性を検証するために、分解整備が予定されている送風機に対して潤滑診断を

表-1 分析結果

| 油名         |                 | FBKタービン32          | 新油値         |           |     |     |
|------------|-----------------|--------------------|-------------|-----------|-----|-----|
| 劣化         | 粘度40℃           | mm <sup>2</sup> /s | 32.97 32.23 |           |     |     |
|            | 水分              | ppm                | 12 26.6     |           |     |     |
|            | 全酸価             | mgKOH/g            | 0.07 0.09   |           |     |     |
| 汚染         | 計数汚染度           | 5~15 μ             | 個/100ml     | 336,390 — |     |     |
|            |                 | ~25 μ              | 個/100ml     | 28,903 —  |     |     |
|            |                 | ~50 μ              | 個/100ml     | 10,537 —  |     |     |
|            |                 | ~100 μ             | 個/100ml     | 1,220 —   |     |     |
|            |                 | 100 μ <            | 個/100ml     | 60 —      |     |     |
|            | 等級              | 級                  | 11 —        |           |     |     |
| 重量汚染度      | mg/100ml        | 0.35 —             |             |           |     |     |
|            | 等級              | 級                  | 104 —       |           |     |     |
| 定量フェログラフィー | 大摩耗粒子の量         | %/ml               | 3.15 —      |           |     |     |
|            | 小摩耗粒子の量         | %/ml               | 0.15 —      |           |     |     |
|            | 全摩耗量            | %/ml               | 3.3 —       |           |     |     |
|            | 摩耗程度            | %/ml               | 3 —         |           |     |     |
| 摩耗過酷度:ls値  | —               | 9.9 —              |             |           |     |     |
| 摩耗         | 油中金属分析 SAOP(T法) | イオン                | 固形分         | 合計        |     |     |
|            |                 | 鉄                  | 質量ppm       | 0         | 0.1 | 0.1 |
|            |                 | 鉛                  | 質量ppm       | 0         | 0.0 | 0.0 |
|            |                 | 銅                  | 質量ppm       | 2         | 0.1 | 2.1 |
|            |                 | クローム               | 質量ppm       | 0         | 0.0 | 0.0 |
|            |                 | アンチモン              | 質量ppm       | —         | 0.0 | 0.0 |
|            |                 | ニッケル               | 質量ppm       | 0         | —   | 0.0 |
|            |                 | 錫                  | 質量ppm       | 0         | 0.0 | 0.0 |
|            |                 | リン                 | 質量ppm       | 1         | 0.0 | 1.0 |
|            |                 | 亜鉛                 | 質量ppm       | 3         | 0.0 | 3.0 |
|            |                 | カルシウム              | 質量ppm       | 0         | 0.1 | 0.1 |
|            |                 | バリウム               | 質量ppm       | 0         | 0.0 | 0.0 |
|            |                 | アルミニウム             | 質量ppm       | 0         | 0.1 | 0.1 |
|            |                 | ケイ素                | 質量ppm       | 2         | —   | 2.0 |
|            |                 | ナトリウム              | 質量ppm       | 0         | 0.2 | 0.2 |
|            |                 | マグネシウム             | 質量ppm       | 0         | 0.0 | 0.0 |
| ホウ素        | 質量ppm           | 0                  | —           | 0.0       |     |     |

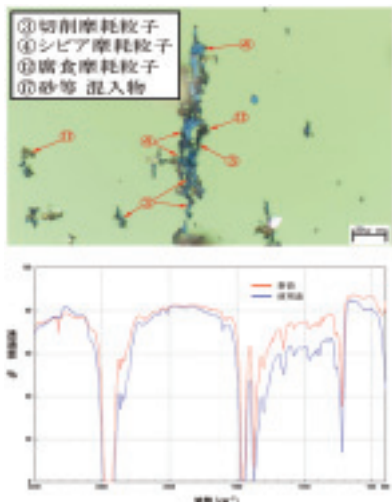


図-10 分析結果・分解した軸受

実施した。妥当性の検証に関しては、潤滑診断実施後に分解して軸受の損傷を直接確認して検証した。表-1, 図-10に分析結果および分解した軸受を示し、以下に診断結果を示す。

①摩耗

本軸受は、異物の噛み込みなどで発生する切削粒子がやや多く観察されたことから、今後の進行が懸念されるため、1年後の分析データの変化に注意し、傾向を確認することを推奨される。

②潤滑油の汚染

計数汚染度がNAS11級とやや汚染が進んでいるものの、重量汚染度はNAS104級と良好であったことから、1年後の分析データの変化に注意することが必要であると判断した。

③潤滑油の劣化

本潤滑油は劣化の進行に問題がなく、継続使用が可能であると判断した。

④総合評価

汚染、摩耗がやや進んでいるが、早急な対策が必要なレベルではなかった。軸受表面の状態は、汚染に伴う切削痕があるが、使用可能な状態にあると推定した。

2.4 潤滑診断の導入の効果

潤滑診断は、先に示したような「異常の早期発見」という優位性がある。それは「健全性の確認」という利点でもあり、当該機器が分解整備を実施すべき状態であるといった評価も可能である。つまり、多くの機器で行われている時間計画保全に代わり、本技術を導入することで、故障リスクの増大を回避しながら、本来不必要である分解整備を延伸し、保全費用の低減を図ることが可能となる。表-2にアンケート結果で多く見られた5年周期で時間計画保全を実施している機器に対して、潤滑油診断の導入効果(例)を示す。

表-2 潤滑診断の導入の効果(例)

|       | 現状(時間計画保全)    | 潤滑診断導入(状態監視保全)   |
|-------|---------------|------------------|
|       |               |                  |
|       | 現状(5年ごとに分解整備) | 潤滑油診断導入(8年ごとに延伸) |
| 分解整備費 | 5,000千円×6回    | 5,000千円×3回       |
| 潤滑診断費 | -             | 100千円×27回        |
| 合計    | 30,000千円      | 17,700千円         |

注1) 1回あたりの機器の分解整備費を5,000千円とし、潤滑油診断費を100千円とした場合の例  
注2) 費用は参考値

3 まとめ

本研究では、潤滑診断の適用性や留意事項および効果を検証し、これらをまとめて技術マニュアルとした。また、アンケート調査の結果を元に処理場の機械設備に対する保全方式の選定フローも示している。

近年、施設ストックの増大や下水道長寿命化支援制度の創設といった背景を受けて、処理場等の機械設備に対する状態監視保全が注目されつつある。今後、各自治体において維持管理計画や長寿命化計画を策定する際に、本書を参考としていただければ幸いである。