

# 排水機場における状態監視診断手法の検討

(国研) 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  
澤口 重夫  
小林 勇一

排水機場は、洪水被害の防止を目的に設置されている重要な社会基盤設備である。しかしながら、近年、老朽化の進行により重大な故障の発生が懸念されており、効率的で、効果的な設備の維持管理が求められている。そこで、非常用設備である排水機場における状態監視診断技術の適用性を検討するため、ローター試験機を製作し、振動加速度、SPM、AE、それぞれの計測結果を分析したので、実機における計測結果とあわせて報告を行う。

キーワード：排水機場、減速機、状態監視診断、非常用設備

## 1. はじめに

排水機場ポンプ設備は、洪水被害防止を目的に河川に設置され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、これまで管理者は、定期的に整備する「時間計画保全」の考え方で維持管理を実施している。この手法は、確実な整備が行えるという点でメリットが大きいですが、内部劣化の有無によらずに定期的に整備を行うため、経済性で不利な場合がある。さらに排水機場においては、今後10年で約40%が設置後50年を超えることから、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。そこで、この相反する状況下で効率的で適確な設備維持管理を行うため、土木研究所先端技術チームを中心として、常用系設備で導入されている「状態監視保全」を非常用設備である排水機場ポンプ設備の維持管理に導入するための研究を進めている<sup>1)</sup>。これまで、振動、超音波、潤滑油、サーモグラフィ等による状態監視の適用について検討を実施してきており、本稿では、低回転である横軸ポンプ設備減速機の状態監視診断の検討について報告する。

## 2. 減速機の診断手法の検討

排水機場ポンプ設備の減速機(図-1)は、故障が発生すると排水機場の運転ができなくなるため、「河川ポンプ設備点検・整備・更新検討マニュアル(案)」では致

命的な設備に分類されている。これまでは、目視による点検や時間計画保全による取り替え等の維持管理が行われてきた。排水機場で稼働している減速機は入力1000回転程度、出力120回転程度と非常に低回転であり、加速度計による振動計測が困難な設備であった。そこで、本研究では加速度計、SPM(ショックパルスメソッド)、AE(アコースティックエミッション)の3つの計測器による計測結果の比較を行い、減速機の軸受の状態監視に最適な診断手法の検討を行った



図-1 排水機場ポンプ設備(左)と減速機(右)

### (1)減速機の診断

減速機は軸受や歯車で構成される機械であり、特に軸受は精度の高い精密部品である。軸受に損傷を受けると、一定の回転数で回転している場合、周期的な振動が発生することが分かっている。損傷箇所別による周波数は次式で与えられる。

- ・外輪の傷が転動体と接触する周波数

$$f_o = \frac{Z}{2} \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \times fr \quad (1a)$$

- ・転動体の傷が内輪又は外輪に接触する周波数

$$f_b = \frac{ZD}{2d} \left( 1 - \left( \frac{d}{D} \cos \alpha \right)^2 \right) \times fr \quad (1b)$$

・内輪の傷が転動体と接触する周波数

$$f_i = \frac{Z}{2} \left( 1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \times f_r \quad (1c)$$

ここで、 $Z$ : 玉数、 $d$ : ボール径、 $D$ : ピッチ径、 $\alpha$ : 接触角、 $f_r$ : 軸回転数とする。

上記で得られた周波数を基本周波数として、整数倍の高調波成分等を見ることにより軸受の診断が可能である<sup>2)</sup>。

### (2) ローター試験機での計測器比較

計測器の比較を行うため、図-2のローター試験機を製作して加速度、SPM、AEの3つの計測器で計測した。ローター試験機はインバータ制御機能によるモータ駆動で、A、B、2つの軸受の間におもりを着脱できるフライホイールを有する構造であり、軸受Aに金属接触による異常状態を再現した。

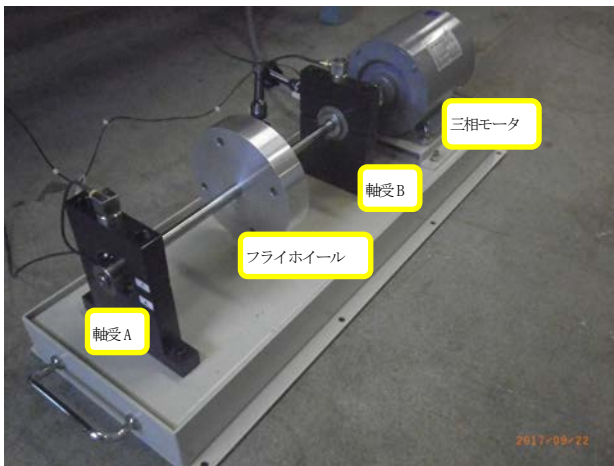


図-2 ローター試験機

### (3) 加速度計による計測結果

はじめに、図-3に示す電子応用社製の圧電式3次元加速度計で計測した。計測結果を図-4に示す。



図-3 圧電式3次元加速度計

回転数 1200rpm の周波数解析では、式(1c)より求めた内輪傷に起因する周波数 65.1Hz に近似した 63Hz とその2倍の卓越周波数が現れている。しかし回転数が減るに従い卓越周波数があまり見られなくなり、回転数 200rpm では正常な軸受との違いが判断できない結果となった。

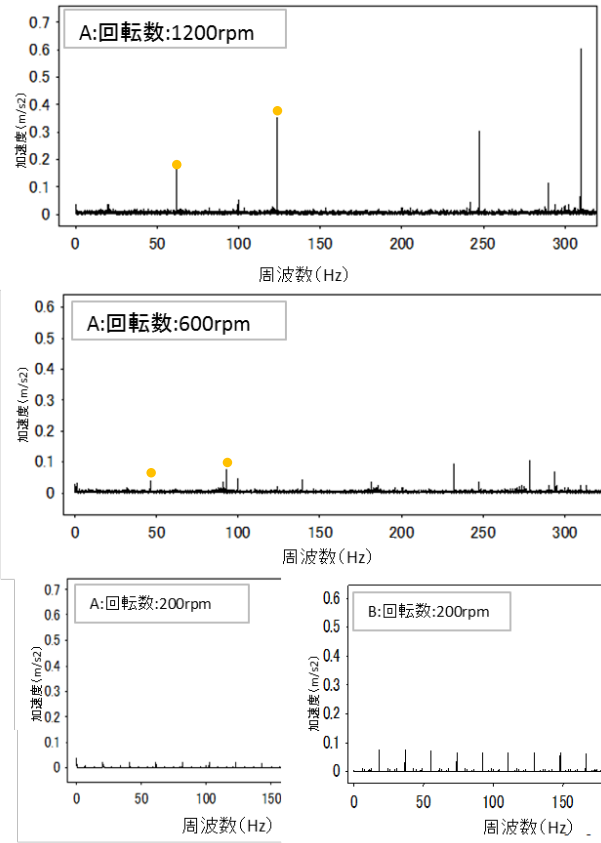


図-4 加速度計による周波数解析結果

### (4) SPMによる計測結果

次に同様の条件で図-5に示す SPM instrument japan 社製の SPM計測器で計測を行った。



図-5 SPM計測装置

SPMは、軸受の内外輪と転動体の接触面から生じる衝撃波（ショックパルス）を検知し、状態を診断する技術である。計測には、発生するショックパルスの周波数と共振するように設定した加速度センサーを用いる。図-6に示すようにショックパルスは金属の接触部から発生し、振動周波数に比べて高い周波数のため、低い回転数であっても接触面が存在するとショックパルスが生じることが分かっている<sup>3)</sup>。

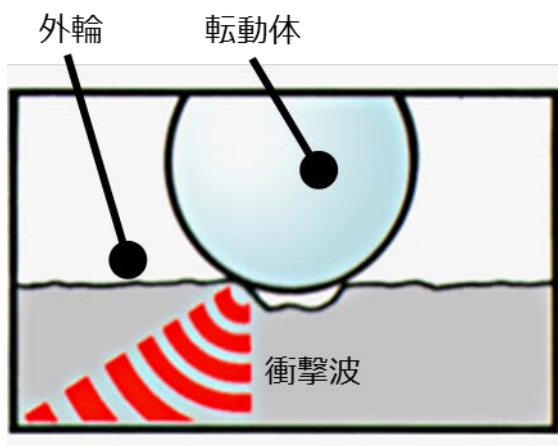


図-6 ショックパルスの発生

SPM計測器により回転数1200rpmから200rpmまで計測し、周波数解析した結果を図-7に示す。周波数解析の結果から、回転数を減少させても内輪傷に起因すると思われる卓越周波数が確認できる結果となった。

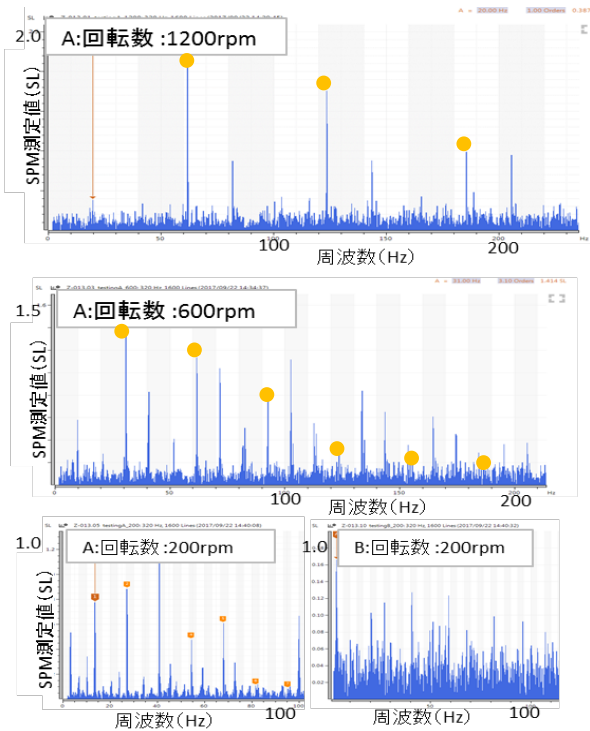


図-7 SPMによる周波数解析結果

### (5) AEによる計測結果

AEセンサーでの計測では、図-8に示す簡易型のFirst AE社製AEセンサーを用いて、ノイズが主な原因となる2mv以下のAEをカットして計測を行った。AEとは、微小破壊を始めとする材料内部の動的な変形、変態、転移、破断などにより弾性波が発生する現象であり、数百kHz～数MHzと非常に高い周波数である<sup>4)</sup>。



図-8 AEセンサー

今回の計測では、AEの発生の有無を確認することが目的であるため、計測のみ可能なAE計測システムを用い、その結果を図-9に示す。横軸は時間、縦軸はAEの実効値（RMS値）を表している。回転数1200rpm及び600rpmでは多くのAEを計測している。更に回転数200rpmであっても正常な軸受Bと違いが分かる結果となった。ただし、台座の振動やセンサーのズレなどでも大きなノイズが発生するため、大きな騒音や振動がある排水機場では、解析する際のノイズ除去方法の検討が必要である。

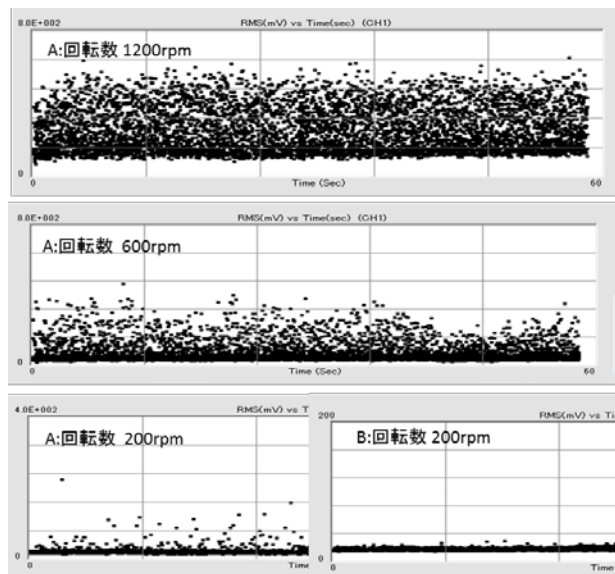


図-9 AE計測結果

## (6)軸受の精密評価

計測を行ったローター試験機の軸受Aを分解し、光学顕微鏡（500倍）及び電子顕微鏡（10000倍）で撮影し、内輪、外輪、転動体の表面状態の観察を行った。目立つ損傷が見られた内輪の様子を図-10に示す。

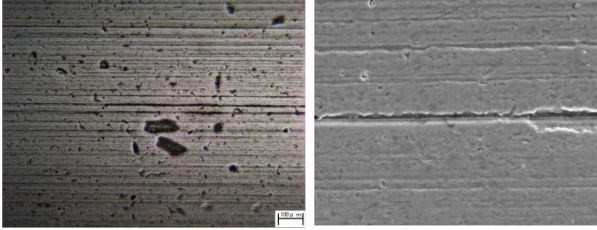


図-10 内輪の光学顕微鏡(左)及び電子顕微鏡(右)写真

光学顕微鏡では $100\mu\text{m}$ 程度の圧痕が確認でき、電子顕微鏡では切削摩耗と考えられる傷跡が確認できた。計測結果の周波数解析からも内輪傷に起因する卓越周波数が確認できた事から解析結果と軸受の表面状態が一致する結果となった。

## 3. 現場での診断事例

### (1) SPMによる計測結果

ローター試験機の結果を基に、北海道内の設置後40年近くが経過した排水機場において、遊星歯車減速機の診断を実施した。遊星歯車減速機の仕様を表-1に示す。

対象の減速機は出力側が150rpmと低い回転数となっており、これまでの加速度計における診断では加速度の値が小さく、周波数解析に苦慮していた設備である。

表-1 遊星歯車減速機の仕様

	主原動機形式	ディーゼル機関
	主原動機出力	228Kw
	減速機型式	遊星歯車
	減速比	1/6.27
	出力側回転速度	159rpm
	入力側回転速度	1000rpm

計測の様子を図-11に、計測結果を図-12に示す。



図-11 SPMによる計測

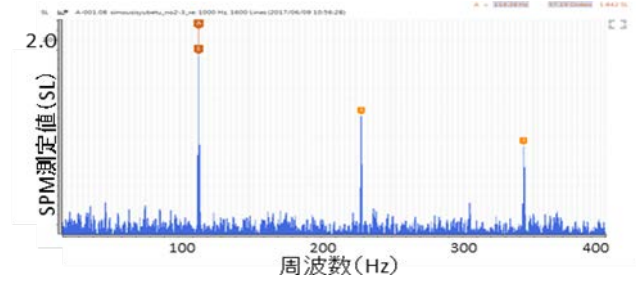


図-12 減速機の出力側周波数解析結果

この減速機で発生したショックパルスの周波数解析からは、低回転であっても特徴的な周波数成分が得られた。この軸受の仕様を元に得られた内輪傷に起因する損傷周波数の基本成分と、その2倍3倍の周波数成分があることから軸受の内輪に傷がある可能性が見受けられ、今後の変化を注視する必要がある。ただし、計測ポイントの違いにより解析結果が変わることがあり、特に排水機場は設置場所により設備の形状が異なるため、計測ポイントの選定方法の確立が必要である。

### (2) AEによる計測結果

同じ減速機の出力側及び入力側の軸受を、AEセンサーで計測した結果を図-13に示す。

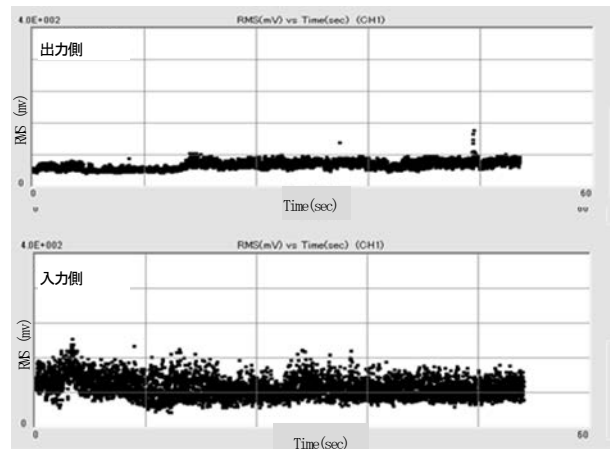


図-13 減速機のAE計測結果

ローター試験機に比べ、ノイズ信号が多く、AEは検出できているが、このままでは評価できないデータとなっているため、フィルタのかけ方や解析手法も検討していく必要がある。

## 4. まとめ

非常に単純な構造であるローター試験機を用いて、加速度、SPM、AEの3つの計測器による計測結果と軸受表面の精密評価の比較を行うことで、計測器それぞれ

の特徴を把握することができた。また、現場での減速機診断においても、加速度計が苦手とする低速回転での異常診断が、SPMでは可能であることが分かった。

今後、AEも含め様々な診断手法を組み合わせることで、排水機場等の非常用設備における総合的な状態監視診断手法を検討していく予定である。

#### 参考文献

- 1) 中島淳一, 梶田洋規, 藤野健一: 河川ポンプの多様な診断, 土木技術資料第 59 巻・第 8 号, 2018
- 2) 豊田利夫: 回転機械診断の進め方, 日本プラントメンテナンス協会, pp.213-215, 1991
- 3) 亀井稔: 転がり軸受の稼働状態における的確評価の実現, (社)日本プラントメンテナンス協会, 第 46 回設備管理全国大会講演, 2006
- 4) 日本非破壊検査協会: アコースティックエミッション試験 II, 2008