

36. 河川ポンプ設備における状態監視技術に関する研究

(独) 土木研究所

○ 上野 仁士
藤野 健一
竹田 英之

1. はじめに

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しきれない、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、経済性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確か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。

本研究は、常用系設備を対象として普及しつつある振動解析技術を参考に、河川ポンプ設備における振動計測、解析技術の開発と確立を図るものである。

当チームでは、平成22年度より河川ポンプ設備の振動解析に着手した。本報告は、渦電流式変位

計、超音波式振動計による計測方法の提案と適用性についてまとめたものである。

2. 振動による設備診断技術

回転機械において、主軸がどこの断面でも同径の完全な真円で、完全に均質で重心も中央にあり、軸心が直線であるならば、主軸に振動は生じない。しかし、これらの微妙な変位や、羽根車の摩耗、継手のずれや軸受、歯車の状態によって様々な振動が発生する。

振動を利用した精密診断では、振動波形、振幅に加え周波数分布を解析することで、劣化傾向を診断し、さらにその部位を特定することが可能である。

発生周波数分布と異状部位の関係は表-1に示す通りであり、常用系設備においてはこれに基づいて診断が行われている。

表-1 発生周波数と発生原因（主軸関係）

原因	発生周波数
水中軸受のゆるみ・かた	振動振幅 0 $n/2$ n $2n$ $3n$ $4n$ 周波数 n: 回転周波数 $\times 1/2$ or $3/2$ 回転周波数と、その1/2、1/3等の分数調波成分
主軸のアンバランス	振動振幅 0 $n/2$ n $2n$ $3n$ $4n$ 周波数 n: 回転周波数 $\times 1$ or 2 回転周波数成分が大きく卓越
主軸のミスアライメント	振動振幅 0 $n/2$ n $2n$ $3n$ $4n$ 周波数 n: 回転周波数 $\times 1$ or 2 回転周波数と、その2倍等の高調波成分
羽根車の摩耗	振動振幅 0 n $2n$ $3n$ $4n$ $5n$ $6n$ $7n$ $8n$ 周波数 n: 回転周波数 羽根数6 案内羽根8の場合 回転周波数 $\times$ 羽根数

計測した振動波形から周波数分布を解析する手法としては高速フーリエ変換（FFT）があり、FFTアナライザやソフトウェアを用いて行われる。

3. 振動計測手法の検討

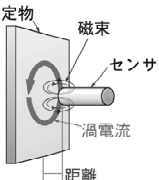
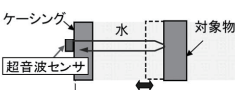
河川ポンプ設備ではこれまで、加速度センサにより主ポンプ等のケーシング振幅(P-P)を計測してきた。しかしこれは、故障状態で大きな値を示すことを利用した「運転支援」として活用しているもので、劣化傾向を把握することは難しい。また、本研究で対象としているポンプ設備は主軸回転周波数が2～5Hzの低速回転機械であり、本来加速度センサの適用が困難な領域である。

そこで、ポンプ主軸の振動に着目し、回転による変位を直接計測することがポンプ設備診断には有効であると考えた。

その手法として、①大型回転機械の主軸振動解析で実績のある「渦電流式変位計」と、②ポンプ内部の主軸振動を計測するために近年開発された「超音波式振動計」の2方式を採用した。

それぞれの方式の原理と、長所、短所を、表-2に示す。

表-2 変位計の比較

	渦電流式変位計	超音波式振動計
原理	センサ内のコイルに高周波電流を流すことにより、高周波磁束が発生する。この磁界内に測定対象物（金属）を置くと、対象物表面に渦電流が発生する。この渦電流が、コイルと測定対象物との距離が近いほど大きな性質を利用して変位を計測する ¹⁾²⁾ 。 	超音波を、ケーシング内で回転する主軸に向けて発信し、戻り時間を計測することで、センサと主軸との距離を計測する。連続的に計測することで、軸のふれ回りやその周波数が把握できる ³⁾ 。 
長所	・構造が簡単で堅牢、特性が安定しているため信頼性が高い	・ケーシング内の軸の動きを、分解せずに計測可能。 ・設備運転前の校正作業が不要なので、準備時間が渦電流式に比べて短い。
短所	・移送する毎に、設備運転前に校正作業を行う必要があるため、準備時間を要する（30分程度）。 ・主軸周りが狭い場合とセンサの取り付けが困難。	・主軸に保護管等があると、超音波の減衰が大きくなり計測できない事例が多い。 ・管内が完全に充水されていなければ計測できないため、横軸ポンプでは計測できない事例が多い。

双方の方式は、その計測原理の違いから、計測位置も自ずと異なる。渦電流式変位計での計測は、主軸が露出している箇所で行う。センサの固定はマグネットスタンドで行う。このとき、2つのセンサを用いて、主軸に対して90度向きの異なる2方向から計測することにより、軸の振れ周りを確認することができる。

超音波式振動計は、管内の主軸に垂直に超音波を照射できるケーシング外部にセンサを密着させて計測する。

それぞれの方式の計測位置、設置状況を図-1 および写真-1、写真-2に示す。

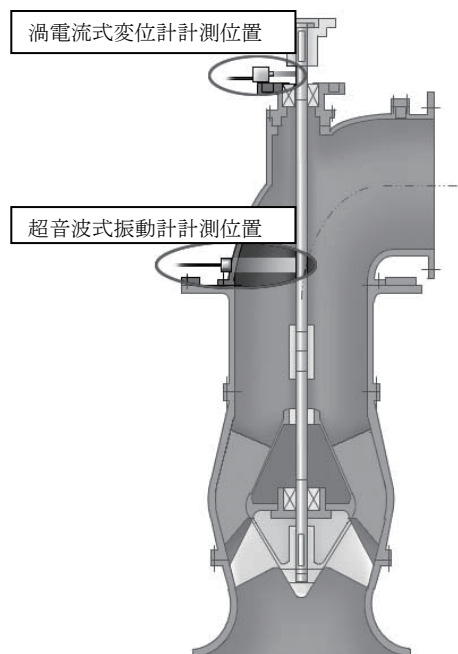


図-1 変位計計測位置



写真-1 渦電流式変位計

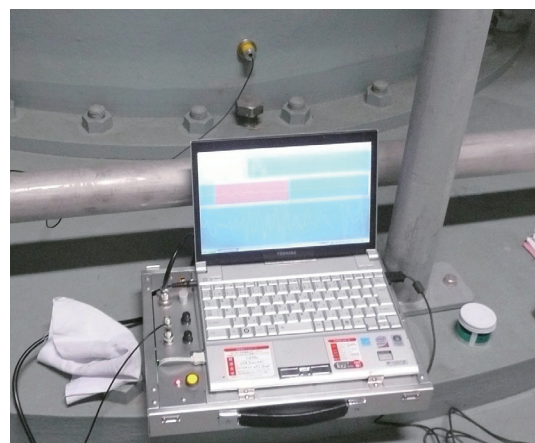


写真-2 超音波式振動計

渦電流式変位計は確実に計測できるが、軸封部で主軸の変位が抑制され、振れ回り量が小さく計測されると考えられる。また、超音波式振動計は管内が完全に充水されていなかったり主軸に保護管がある場合には、超音波が伝搬されず計測できないことがある。解析に当たっては、以上の点を十分考慮する必要がある。

なお、これらの計測の際には、主軸の回転に起因しない、原動機や減速機から発生する振動が伝搬して検出されることが考えられる。そのため、随時加速度センサにより、減速機及び原動機の振動計測を行うこととした。

解析においては、各々の計測波形の振幅及びRMS値より主ポンプ設備各部の劣化度を推測し、周波数分布よりその原因を特定する手法をとった。

4. 計測結果ならびに考察

本研究では、全国の排水機場のうち、時間計画保全による定期整備を予定している、のべ42機場103台のポンプ設備について調査を行ったが、ここでは振動計測の結果、特徴的な傾向が見られた3例について述べる。

この3例の設備要目を、表-4に示す。

表-4 対象設備 要目

	形式	口径 (mm)	回転数 (rpm)	羽根数
A排水機場	立軸斜流	1350	225	5
B排水機場	横軸斜流	1500	126.7	4
C排水機場	立軸軸流	2600	115	4

4.1 A排水機場

渦電流式変位計ならびに超音波式振動計で振動計測を行った。計測した振動の波形ならびに周波数解析結果を図-2～5に示す。

この結果から、当該設備の状態は以下の通り推定される。

- ・ 渦電流式変位計と超音波式振動計の波形、周波数分布は類似しており、振動の傾向はどちらも同様に把握できる。波高は超音波式の方が明らかに大きい。
- ・ 振動波形は、低周期の振動に高周波の振動がのこぎり状に乗る形であり、高調波成分が発生している事を示す。
- ・ 周波数解析より、回転数成分が突出しており、羽根車や主軸にアンバランスがあると考えられる。
- ・ 同様に、羽根車成分(5N)がやや大きく、摩耗等で羽根車の摩耗が生じている事が懸念される。波形で見られた高調波成分は、この成分と思われる。いずれの振動測定においても、回転数成分以下

の周波数がほとんど検出されていないので、水中軸受の摩耗は起きていないと考えられる。

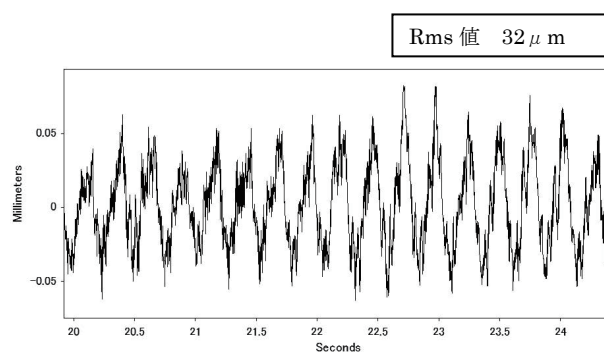


図-2 渦電流式変位計による振動波形

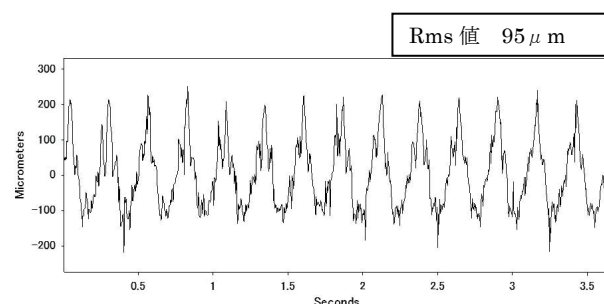


図-3 超音波式振動計による振動波形

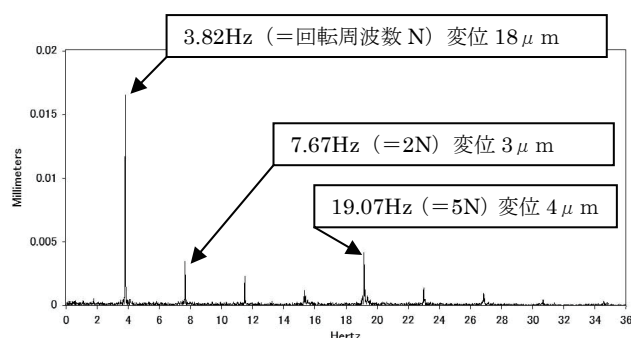


図-4 渦電流式変位計による振動解析結果

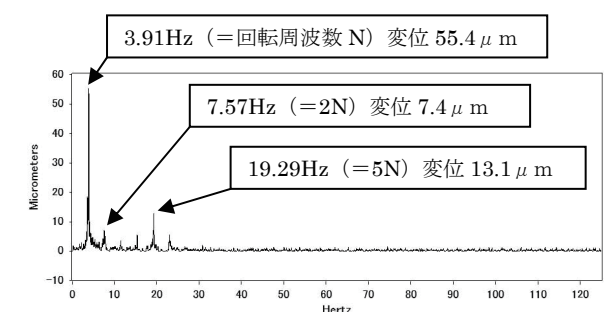


図-5 超音波式振動計による振動解析結果

当該ポンプ設備はこの計測の後に分解整備を行った。その際に行った羽根車の摩耗量計測結果を表-5に示す。

表-5 羽根車摩耗量計測結果

羽根	測定箇所	ボス部 設計値 27mm	ミン部 設計値 22mm	アイ部 設計値 17mm
A	入口側	24-28	25-31	0-23
	中央	29-29	25-28	21-25
	出口側	27-28	20-26	24-26
B	入口側	22-30	24-27	17-24
	中央	27-28	24-27	22-23
	出口側	23-30	25-26	21-23
C	入口側	23-25	18-24	16-24
	中央	25-28	24-25	24-26
	出口側	25-28	22-26	16-24
D	入口側	24-29	18-26	14-21
	中央	26-29	24-26	17-23
	出口側	27-30	25-27	22-24
E	入口側	22-29	19-25	12-21
	中央	27-30	25-26	19-20
	出口側	27-30	24-27	19-20

*太字は、設計肉厚不足を示す

これにより、診断の通り羽根車の摩耗が大きく、また、羽根 1 枚に穴が貫通していた事が確認された。その状況を、写真-3に示す。

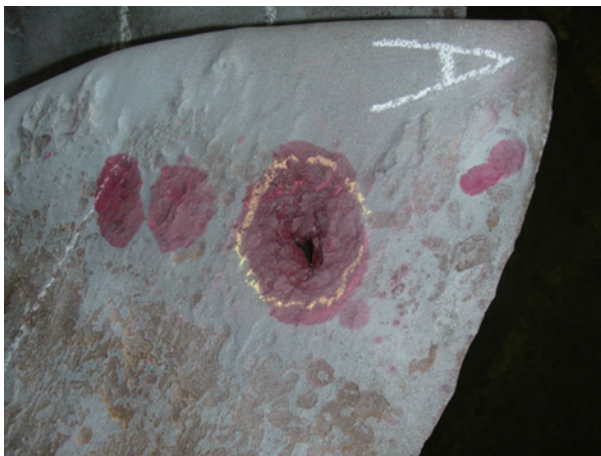


写真-3 羽根車の状況

以上より、本整備結果は、前述の診断との因果関係が明確であることを示していると考える。

渦電流式変位計の振幅値は超音波式振動計より小さく、やはり軸封部に変位が抑制されていると判断できる。渦電流式変位計のみで異常を判断する場合は、この変位の振幅の大きさや周波数変化を推定するため、データの蓄積により相関関係の調査を行う必要がある。

また、本設備においては、この分解整備後におい

ても、再度振動計測を行っている。その結果を図-6～9に示す。

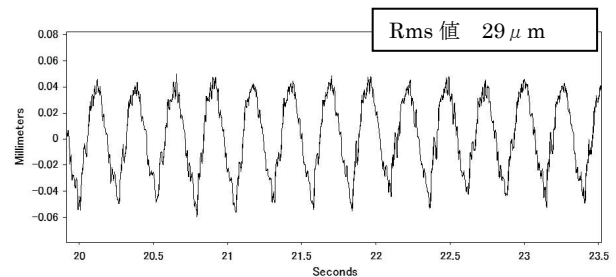


図-6 渦電流式変位計による振動波形 (整備後)

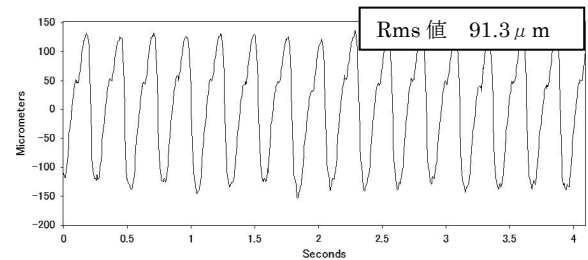


図-7 超音波式振動計による振動波形 (整備後)

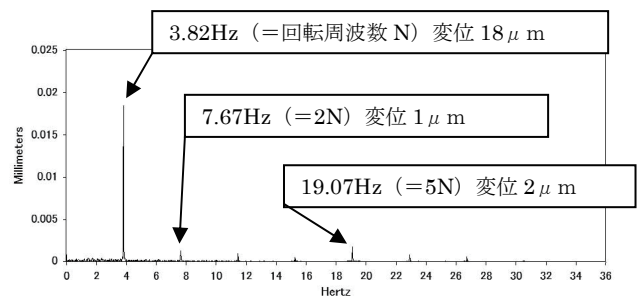


図-8 渦電流式変位計による振動解析結果 (整備後)

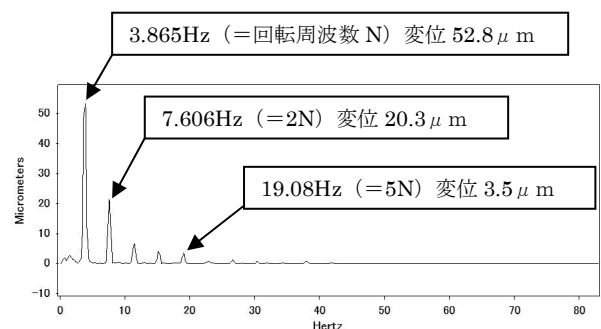


図-9 超音波式振動計による振動解析結果 (整備後)

渦電流式変位計、超音波式振動計の双方ともに波形がなめらかになり、羽根車の腐食修正により、周波数解析においても羽根車成分が見られなくなったと推定される。

ただし、超音波式振動計では、典型的な軸心ずれの波形を示し、周波数解析においても回転成分の 2 倍周波数が以前より顕著に見られるようになっている。これは整備による組立時に、水中軸受の軸心が若干ずれた可能性を示している。

4.2 B排水機場

渦電流式変位計ならびに超音波式振動計で振動計測を行った。計測した振動と周波数解析結果を図-10、図-11に示す。

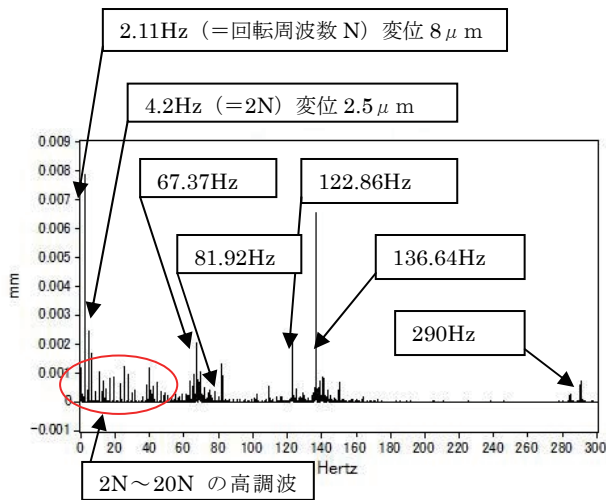


図-10 渦電流式変位計による振動解析結果

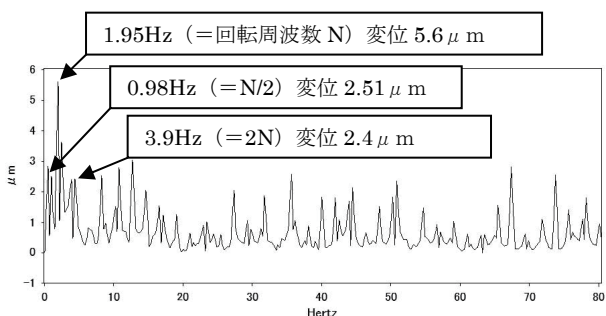


図-11 超音波式振動計による振動解析結果

この結果から、当該設備の状態は以下の通り推定される。

- ・ 回転数成分が高く検出されているので、回転系のアンバランスがある可能性が高い。
- ・ 2N成分及び20N間での高調波が現れており、芯ずれが疑われる。
- ・ 超音波式振動計による計測結果より、回転数成分以下のスペクトルが見られるため、水中軸受の摩耗が始まっている可能性がある。ただし、渦電流式変位計では兆候が確認できない。

このポンプ設備においても、振動計測後に分解整備を行った。

その際に水中軸受の摩耗量計測を行ったので、その結果を表-6に示す。

この整備結果より、水中軸受の摩耗が確認され、超音波式振動計でその兆候を捉えることができた事例であると考えられる。

表-6 水中軸受摩耗量計測結果

		プロペラ側	中心部	反プロペラ側	メーカー基準値
メタルすきま	測定値(mm)	0.26	0.25	0.21	0.145~0.249
	判定	やや広い	やや広い	適正	
水中メタルの振れ	測定値(mm)	-0.14	-0.08	-0.03	0.123以内
	判定	やや大きい	適正	適正	

しかし、その摩耗量はメーカー基準値を若干下回った程度であり、ポンプの性能確保の面では整備を延伸できたのではないかと考える。

このことから、状態監視技術の実用化に向けては、異常兆候を捉えるだけではなく、整備要否の判断を行う診断技術の整理が求められる。その診断においては、計測された波高や周波数分布と、その設備状態との関連性を十分に把握して判断する必要がある。

また、このような特性は設備毎に異なる傾向を示すと考えられる。

そのため、今後は「絶対値」ではなく「経時による変化量」に着目したデータの蓄積を行い、判断基準をとりまとめていきたい。

また、渦電流式変位計では水中軸受の異常兆候が見られないことについて、今後の調査においても同様の事例が見られるようならば、超音波式振動計の適用が困難な設備については従来通りの時間計画保全で整備を行うこととなると思われる。

4.3 C排水機場

渦電流式変位計で振動計測を行った。計測した振動と周波数解析結果を図-12、図-13に示す

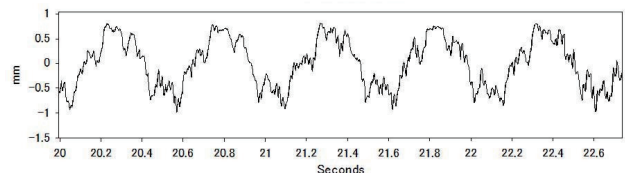


図-12 渦電流式変位計による振動波形

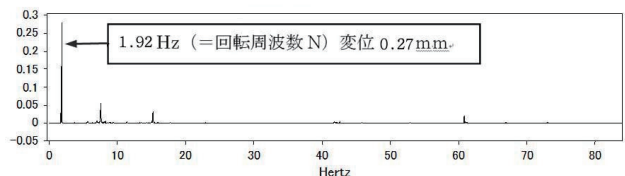


図-13 渦電流式変位計による振動解析結果

この結果から、当該設備の状態は以下の通り推定される。

- ・ 計測波形のp-p値が1.82mmと著しく高く、周波数成分Nが突出しているため、主軸のふれ回りが大きく発生している可能性がある。

このポンプ設備においては、この振動計測結果を

受け、後に分解整備を行った。その際に、軸曲がりの計測を行っているの、その結果を図-14に示す。

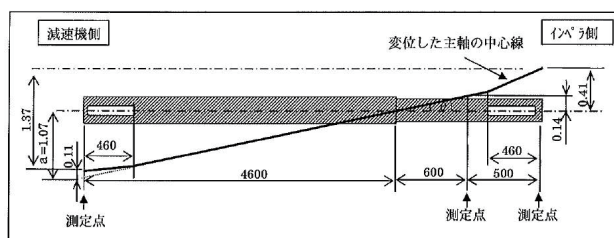


図-14 主軸変位

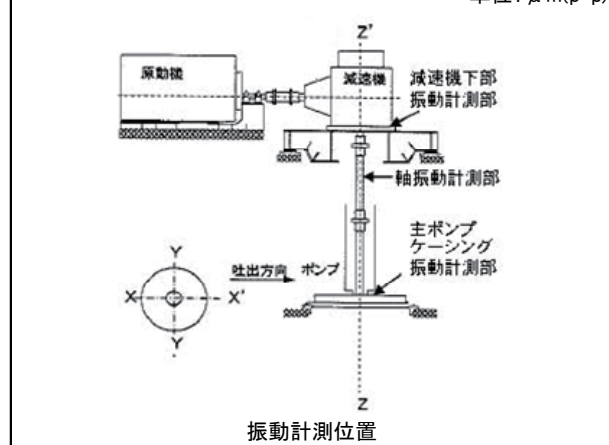
このことより、主軸の芯が1.37mmずれていることがわかり、本計測整備結果は、A排水機場の事例と同様、診断との因果関係が明確であることを示していると考ええる。

また、分解整備にあたり、その前後に減速機下部とケーシングの振動計測と、再度軸の振れ回りを計測している。その結果を表-7に示す。

表-7 振動計測結果

計測部位	計測条件	X方向	Y方向	Z方向
減速機下部	整備前	6	11	20
	整備後	5	10	15
主ポンプケーシング	整備前	5	6	18
	整備後	4	2	15
軸振動	整備前	600		
	整備後	100		

単位: $\mu\text{m(p-p)}$



このことから、減速機下部とケーシングの整備前後の振動はわずかな差しかなく、この計測方法では軸の振れ回りを捉えられるとは言い難い事がわかる。

対して軸変位の計測では整備前後では大きく異なるので、軸のふれ回りの把握には、軸変位の直接計測が有効である事が示されている。

5. まとめ

今回実施した振動解析から得られた各機場の知見をまとめると、以下の通りである。

- ・ A排水機場は、羽根車の腐食進行を捉えることができる事が示された。
- ・ B排水機場においては、超音波式振動計では水中軸受の異常兆候の把握が可能である反面、課題として整備要否の的確な判断を可能とする技術のとりまとめの必要性和、計測方法による適用範囲の設定の必要性があることが示された。
- ・ C排水機場は、軸の振れ回りについて、ケーシングの振動計測では捉えることができないが渦電流式変位計では捉えることができた事を示しており、本研究で採用した計測方法の有効性が示された。

以上より、振動計測・解析により河川ポンプ設備の状態を診断できることが確認され、有効性が認められたと考える。

しかし、河川ポンプ設備の構造は多様であることから、状態監視技術の適応性向上・実用化のためには、今後より多くの事例の調査を行い、劣化兆候と実際の設備状態との因果関係を把握し、技術資料・指針としてとりまとめる必要がある。

謝辞：本研究にあたり、調査対象設備の施設管理事務所には、資料提供や現地調査に当たり、多大な御協力を頂きました。この場を借りて、厚く御礼申し上げます。

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 pp49,2010年
- 2) 株式会社キーエンス：まるごとわかるsensor.co.jp (URL <http://www.sensor.co.jp>)
- 3) 株式会社東芝：機械設備の振動による状態監視の動向,2009年