

ポンプ設備状態監視における渦電流式変位計の導入について

木戸口 充

¹ 関東地方整備局 関東技術事務所 施設技術課 (〒270-2218 千葉県松戸市五香西6-12-1)

洪水被害防止を目的とした河川ポンプ設備は、普段休止にありながら必要時に確実な稼働が要求される待機系設備である。維持管理では「予防保全」を採用する必要があるが、内部のポンプ本体や水中にある軸受などは普段の点検では劣化を目視確認できないため、「時間計画保全」である定期整備方式を採用してきた。しかし、近年の緊縮予算や老朽化施設の増大に鑑み、信頼性と経済性の両立を追求するため、劣化状態を診断して整備を行う「状態監視保全」の採用が有効であるが、待機系設備では技術が未確立である。本報告では、渦電流式変位計を用いた主軸振動計測に着目し、現場に即した解析方法について発表するものである。

キーワード 機械設備, 維持管理, 状態監視保全, 振動, 渦電流式変位計

1. はじめに

河川ポンプ設備は、洪水時における確実な稼働が求められるため、維持管理は非常に重要である。河川ポンプ設備に採用される保全方式を図-1に示す。

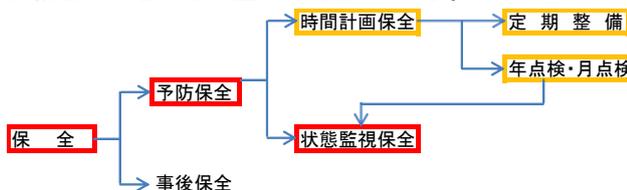


図-1 河川ポンプ設備の保全方式

故障を許容しない「予防保全」では劣化を把握して適切な処置を採用する「状態監視保全」(赤枠で示す方法)が効率的かつ経済的であるが、現状では「揚排水機場点検・整備指針(案)」で規定される年点検・月点検を行い、その中で目視や運転時の稼働データを見て判明できる範囲の「状態監視保全」が行われている。「時間計画保全」のうち、「定期整備」は年点検等では劣化状態を完全に把握できない主ポンプ、水中軸受、減速機、主原動機など大型機器を対象としているため、多額な予算が必要であり、年点検等の結果と過去の整備データを参考に維持管理計画を立て実行していくことになる。しかし時間計画保全では、確実に整備を行うことができる利点がある反面早めの整備実行となりがちであり、設備内部の劣化が進んでいない場合には経済面において不利になる。

また、関東地方整備局では、維持管理費に限られるなか老朽化による信頼性低下の懸念を抱えている設備も多く、このまま従来通りの時間計画保全に頼っていると、予想外に劣化が進んだ故障を見逃すリスクも高まる。

関東技術事務所施設技術課は、技術管理業務として維持管理情報のデータベース化や有効活用、新しい状態監視保全の推進を担う新しい課であり、私は主担当としてこれらの業務にあたっている。現在、当事務所において有効な手段と考えている技術に、主ポンプ主軸振動を渦電流式変位計を用いて解析する技術がある。

この技術は、民間の常用系プラントでは活用が進みつつあるが、平成22年度から土木研究所によって待機系設備の河川ポンプ設備における主ポンプ・水中軸受・減速機の劣化診断に対する適用性が示された。

現状の年点検・月点検では主軸自体の振動は計測されておらず、当該方法を当所において各機場に普及させることができれば、設備の状態により整備時期を判断する「状態監視保全」の導入範囲を拡大できる。その結果、劣化の進む設備の早期対処や不急な定期整備の回避を行うことによって、設備毎の維持管理計画にメリハリをつけることが可能となり、維持管理予算の削減にもつながると考えている。

本報告では、関東地方整備局管内の河川ポンプ設備に対して実施した渦電流式変位計を用いた計測事例を基に、現場に即した効率的な測定方法とデータ解析について発表する。

なお、当事務所では土木研究所の指導・協力を得ながら、職員自ら測定・解析技術を身につけ、管内の主要な揚排水ポンプ機場37施設に対して、平成25年度から可搬式の渦電流式変位計を用いて振動測定・解析を実施していく予定である。

2. 振動計測による設備状態監視技術

(1) 年点検で実施されている設備診断方法と課題

従来から年点検等で行われている診断方法は、ポンプ等のケーシング部の振動を加速度センサーを用いて計測する方法である。写真-1に、この方法を示す。



写真-1 振動加速度計による計測方法

この方法は、加速度値を計器の内部で2度積分し変位に変換するもので、容易に計測でき広く普及している。

計測した数値は、ポンプメーカーが設定した閾値を睨みながらグラフ化してデータの経年変化を観察することにより、設備の異常等を推定する。これは、通常簡易診断と言われる手法である。ただし、この手法には2つの課題がある。1つは、河川ポンプ設備の主軸の回転周波数は2~10Hz程度までの低速回転が殆どであり、加速度センサーの精度が高い数百Hz以上に比べ低い適用範囲であること。2つめは、ケーシングを介しているため、主ポンプや水中軸受の挙動を示す主軸自体の振動を計測していないことである。本方法だけでは、設備内部の劣化傾向を完全に把握することは困難であり、計測値が異常(閾値)を示す前でも、既に故障状態に進んでいることもあり得る。

本来振動計測する物理量としては、周波数が高い方から低い方へ「加速度」「速度」「変位」の順に採用される。そこで、主ポンプの羽根車の異状や水中軸受の摩耗状況を把握するためには、低い周波数に適している「変位」を直接を計測し、なおかつその変位量の時系列波形から振動の周波数を詳細に解析する診断方法を選択する必要がある。

(2) 渦電流式変位計を用いた設備診断方法

本報告で紹介する渦電流式変位計を用いた診断方法は、振動波形及びその周波数分布を解析することにより、設備異常の把握とともに異常個所と劣化程度の推定を可能とするものである。

ポンプ等の回転機械においては、主軸のアンバランスや、羽根車の摩耗、軸受のゆるみ等によって、さまざまな振動が発生するため、これらの性質を利用した振動解析手法となる。発生周波数と発生原因の関係は、民間の常用系設備に採用されている指標を基に、土木研究所が表-1のとおり示した。

表-1 発生周波数と発生原因¹⁾

原因	発生周波数
水中軸受のゆるみ・かた	<p>振動振幅</p> <p>0 n/x n 2n 3n 4n 周波数</p> <p>n: 回転周波数 $\times 2\pi r_3$</p> <p>回転周波数と、その$1/2$、$1/3$等の分数調波成分</p>
主軸のアンバランス	<p>振動振幅</p> <p>0 n/x n 2n 3n 4n 周波数</p> <p>n: 回転周波数 $\times 2\pi r_3$</p> <p>回転周波数成分が大きく卓越</p>
主軸のミスアライメント	<p>振動振幅</p> <p>0 n/x n 2n 3n 4n 周波数</p> <p>n: 回転周波数 $\times 2\pi r_3$</p> <p>回転周波数成分が大きく卓越</p>
羽根車の摩耗	<p>振動振幅</p> <p>0 n 2n 3n 4n 5n 6n 7n 8n 周波数</p> <p>n: 回転周波数 羽根数\times 葉内羽根数の場合</p> <p>回転周波数\times 羽根数</p>

また、渦電流式変位計の原理及び特徴を、それぞれ表-2及び表-3に示す。

表-2 渦電流式変位計の原理¹⁾

渦電流式変位計	
原理	<p>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くなる性質を利用して変位を計測する。</p>

表-3 渦電流式変位計の特徴¹⁾

長所	・構造が簡単で堅牢、特徴が安定しているため信頼性が高い
短所	・移設する毎に、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) ・主軸周りのスペースが狭い場所では、センサの取り付けは困難

この渦電流式変位計は非接触で振動を計測できることが加速度センサーと大きく異なる。

渦電流式変位計を用いた場合の計測位置と設置状況を図-2、写真-2に示す。計測は、主ポンプ主軸が露出している箇所で行い、平面的な主軸の動きを把握するため2つのセンサを用い2軸計測(設置角90°)を行う。

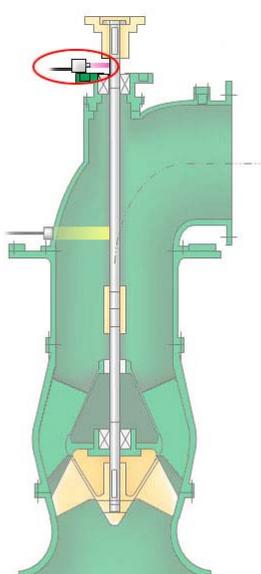


図-2 計測位置¹⁾



写真-2 渦電流式変位計(設置角90°)

3. 現場に即した効率的な測定方法

(1)現場作業時間の短縮

渦電流式変位計による計測は原則として管理運転時に立会い実施している。特性は主軸の材質により変化するので材質毎の校正が必要となる。土研では計測精度を優先し、変位計を現場で設置する際毎に校正作業を行っているが、移設毎に通常30分程度の準備時間を要している。実際の現場での計測は、特に主軸周りのスペースが狭い場合等は変位計設置や校正作業に手間取り、点検作業への影響が大きい。

よって当所では、管内ポンプ設備の主軸材質を調査した結果、90%以上がJIS規格によるSUS403及びS45Cであることが解ったため、同材料による校正金具を用意し、事前に校正作業を行うことが可能となる簡易的な装置を作成した。簡易装置を写真-3に示す。この簡易装置を使用し、事前に校正作業をしておくことにより、現場での準備時間をポンプ設備1台当たり約10分短縮することが可能となった。

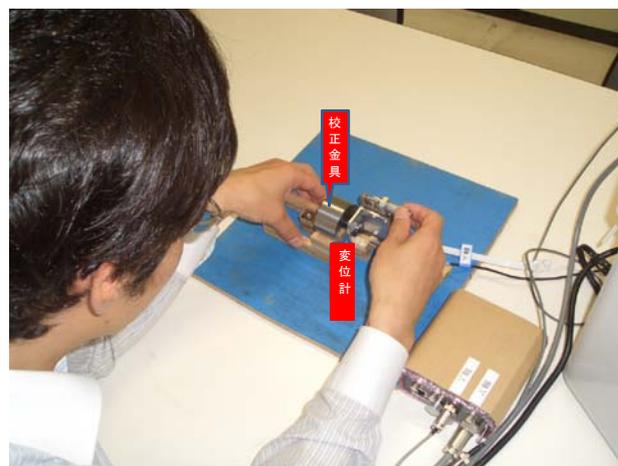


写真-3 事前に校正作業を行うための簡易装置

(2)現場における波形モニタリングの実現

土研では研究用に可搬式のユニット(変位計ユニット+データ記録器(ログ-)を用いており、現場で測定したデータを持ち帰って解析に当たる。当所では現場において測定波形をリアルタイムに把握し、ノイズの有無、可搬式ユニットの振動による「ずれ」の有無等を確認できるようにした。このモニターは、パソコンと市販アプリケーションを用いて安価に組み上げた。

4. データ解析結果及び考察

渦電流式変位計を用いて振動測定を行った関東地方整備局管内の排水ポンプ設備について、2例を紹介する。この2例の設備概要を表-4に示す。

表-4 対象設備概要

	型式	吐出量 m ³ /s	口径 mm	回転数 rpm (Hz)	羽根数
A排水機場	立軸渦巻斜流	5	1,500	195 (3.25)	7
B排水機場	立軸渦巻斜流	25	3,300	96 (1.6)	5

(1) A排水機場

このA排水機場には、土木研究所の研究に基づき固定式の渦電流式変位計が導入されている。よって、当所では仮設（可搬式）の渦電流式変位計を用いて計測したデータと固定式変位計との計測データを比較を含めて評価を行った。設置状況を写真-3、図-3に示す。計測した振動波形及び周波数分析結果（吐出方向）は図-4～7に示す。

この結果から、次の事項がわかった。

- ・片振幅の最大値は100μm程度である。ケーシングで計測する加速度計による変位量は数μm～十数μm程度であり、遙かに大きい。
- ・固定変位計はアングルでしっかり固定されているので、ポンプ回転と関係のない高周波を拾いにくい。よって仮設センサによるものより波形のはっきりしている。仮設センサはマグネットスタンドを用いて固定しているためと考えられるが、解析上の周波数フィルタ等で対応が可能である。
- ・周波数分析結果については、仮設センサでも固定センサでもほぼ同様の傾向を示している。
- ・主ポンプ主軸回転数の2倍成分が確認できるので、主ポンプ主軸に芯ずれが存在していると推定できる。
- ・主ポンプ主軸回転数(3.25Hz)×羽根車枚数(7枚)の成分が顕著なので、羽根車の影響が考えられる。

このように、通常の点検時に行うポンプケーシング部における加速度計による計測だけでは得られない情報を得ることができるが、当所では芯ずれや羽根車成分が今後どのように変化していくか、振動波形と周波数分布の経年変化を追っていき、設備の健全度評価指標とすることを考えている。

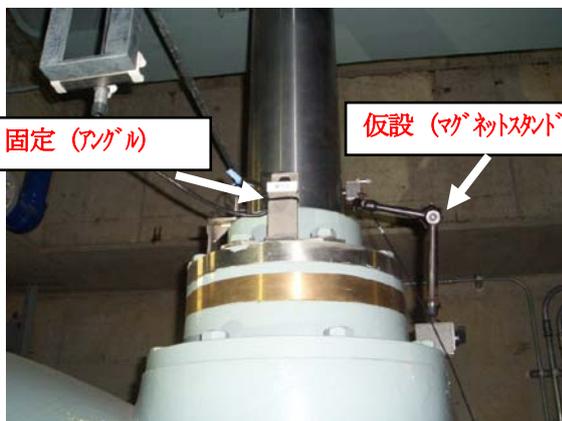


写真-3 渦電流式変位計設置状況

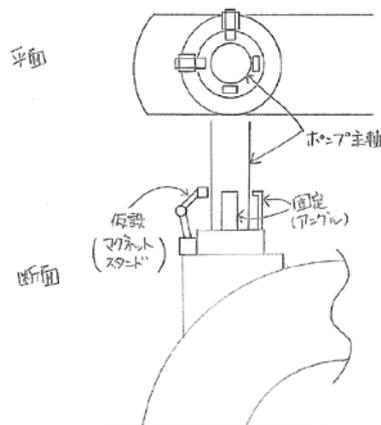


図-3 設置状況（イメージ図）

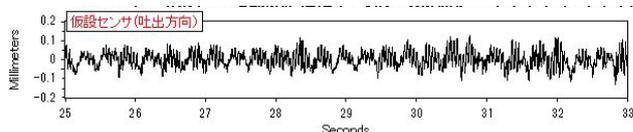


図-4 仮設センサによる振動波形（吐出方向）

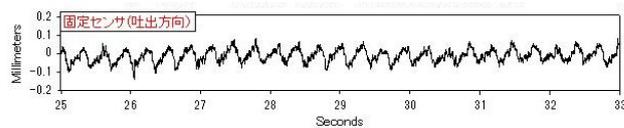


図-5 固定センサによる振動波形（吐出方向）

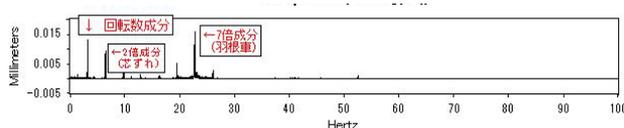


図-6 仮設センサによる周波数分析結果

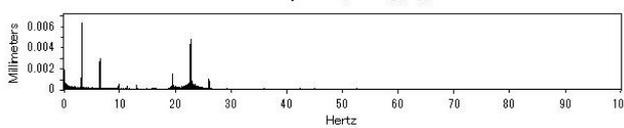


図-7 固定センサによる周波数分析結果

(2) B排水機場

このB排水機場において計測した1号及び2号ポンプの振動波形及び周波数分析結果を図-8～10に示す。なお、1号及び2号ポンプの基本スペックは同じである。

この結果から、当該設備の状態は以下の通り推定することができる。

- ・片振幅の最大値は100μm以下であり、大型ポンプではあるがA機場と同程度である。

・回転が遅いにも関わらず振動波形が細かい。これはケーシングの形式がダブルボリュートになっているからと考えられる。ダブルボリュートの場合は、水の吐き出し口が2箇所あるため、シングルボリュートの場合よりも羽根車が汲み上げる水がケーシングにぶつかる箇所が多くなり振動波形も細かくなると考えられる。ダブルボリュートの例を、写真-4に示す。

・1号ポンプの周波数分析結果においては、一般的に主軸のアンバランスを示すと言われている回転数成分と羽根車の摩耗を示すと言われている羽根車成分（及びその2倍成分）が顕著になっている。ただし、土木研究所の過去の解析事例によると、これらの傾向は設備の劣化に関係なく、ケーシングがダブルボリュートのときに認められることが分かっている。

・2号ポンプの周波数分析結果においては、回転数成分が低くなっているのに対して、羽根車成分及びその2倍成分が顕著になっている。こうした特徴は、土木研究所の過去の解析事例によると、羽根車が摩耗しているときに発生する傾向があることが分かっている。また、回転数成分の2倍も顕著に現れていることから、主ポンプ主軸の芯ずれの懸念もある。

B機場についてもA機場と同等のスタンスで今後の変化傾向に着目し追跡解析する。

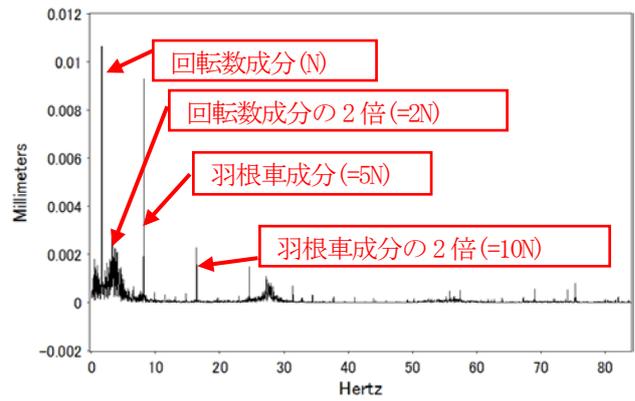


図-10 仮設センサによる周波数分析結果(1号ポンプ)

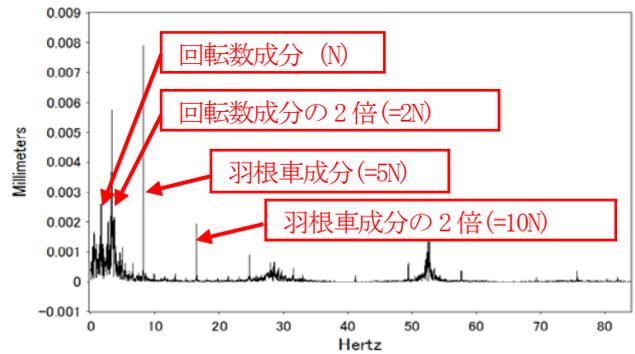


図-11 仮設センサによる周波数分析結果(2号ポンプ)

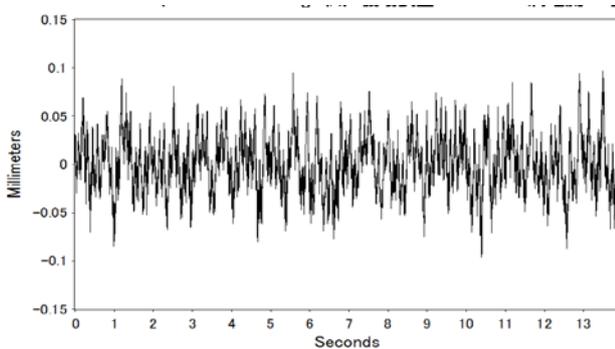


図-8 仮設センサによる振動波形（1号ポンプ）

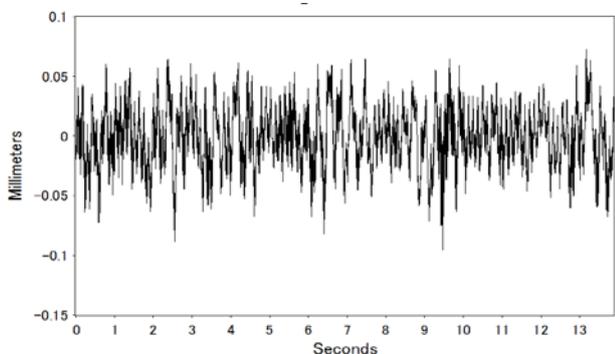


図-9 仮設センサによる振動波形（2号ポンプ）



写真-4 ダブルボリュートのポンプケーシングの例

5. まとめ

- ・河川ポンプ設備のような待機系設備に対しても、渦電流式変位計を用いた振動波形及び周波数解析から異常箇所を推定できる可能性がある。
- ・振動波形の変化を継続して確認することで、適切な整備時期を判断できる可能性がある。
- ・変位計を固定式及び可搬式で比較した場合、主ポンプ主軸以外の外部振動の影響を受けやすい可搬式よりも固定式の方がノイズを低減でき評価しやすい。

・周波数分析結果によっては、先の表-1に示した一般的な発生周波数と発生原因に当てはまらないケースもある。これは河川ポンプ設備の構造が多様であることが影響している。

・今後は振動解析データから予測した劣化状態と、実際の分解整備時の設備状態等との因果関係を把握することや、分解整備前後の振動解析データの変化を確認することにより、解析方法の精度自体も高めることも重要。

・当所では、可搬式渦電流式変位計による調査を積み重ねていくが、変位計・記録器や解析ソフトを含めても300万円程度で主ポンプ2台分程度の導入が可能であることから、ポンプ設備毎に固定式変位計の導入を促す重要性も高い。より早い状態監視保全の推進には、固定式変位計の導入も急務である。

渦電流式変位計を用いた振動解析技術は、設備の合理的な維持管理に有効な手段と考えるが、現時点では、振動（波形・周波数）の変化と劣化要素の全てを把握したとは言えないため、今後も解析データを蓄積し土木研究所及び管理事務所と協力して解析技術の精度を高めるとともに、固定設備の普及にも尽力していきたい。

謝辞：本資料をまとめるにあたり、土木研究所技術推進本部先端技術チームには現場での測定指導にあたり、多大なご協力を頂きました。この場を借りて、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1)独立行政法人土木研究所：上野 仁士，藤野 健一，竹田 英之：36. 河川ポンプ設備における状態監視技術に関する研究，平成24年度 建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集
- 2)独立行政法人土木研究所：藤野 健一，田中 義光，山元 弘，林 輝，河北 憲治：河川ポンプ設備の信頼性と経済性を考慮したマネジメント手法に関する研究，2011, 2 No. 217, pp67～119