

コラム形水中ポンプの実機による異常模擬試験

(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地機械技術チーム ○小林 勇一
永長 哲也

救急排水機場で使用されるコラム形水中ポンプは、非常時に確実に稼働させるため、異常や故障の兆候を的確に把握し、適切な整備や更新を行う必要がある。しかし、コラムパイプ内部に設置するため、直接目視や触診ができず、異常や変調など稼働状態の確認が極めて困難である。そこで、コラム形水中ポンプの異常兆候が把握できる状態監視技術を提案するため、実機による異常模擬試験を実施し、異常に伴う各種計測値の変動傾向を分析した。その結果、羽根車に異常を加えた場合には、側帯波 L_{shaft} 及び電流値が上昇するほか、振動波形の周波数分析結果に影響が現れることがわかった。

キーワード：維持・管理、健全度、長寿命化、状態監視

1. はじめに

近年、台風や前線、ゲリラ豪雨等による大雨の発生頻度が増加傾向にあり、出水による内水被害の危険性が高まっている¹⁾。この内水被害を軽減するため、水門、ダム、排水機場などの河川管理施設の重要性が非常に高まっているが、これらの施設は高度経済成長期以降の1970年から1990年頃にかけて集中的に設置されたことから、老朽化の急激な進行が課題となっている²⁾。内水被害を軽減し地域の安全を守るためには、これらの施設が非常時に確実に機能するよう、故障を未然に防ぐための対策が必要である。

河川管理施設の一つである救急排水機場(写真-1)では、支川の水を本川へ排水するため、可搬式のコラム形着脱式立軸斜流水中モータポンプ³⁾(以下、「コラム形水中ポンプ」という)を使用している。非常時には、救急排水機場に設置されているポンプ設置用のパイプ(以

下、「コラムパイプ」という)の内部にコラム形水中ポンプを設置し、排水作業を行う(図-1)。

コラム形水中ポンプは、非常時に確実に稼働させるため、異常や故障の兆候を的確に把握し、適切な整備や更新を行う必要がある。しかし、設置後は直接目視や触診ができないため、異常や変調など稼働状態の確認が極めて難しい。維持管理予算が厳しい中、状態基準予防保全を進めていくためには、コラム形水中ポンプの稼働状態を的確に把握できる状態監視技術が求められている。

寒地機械技術チームでは、コラム形水中ポンプへの適用性が高い状態監視技術として、電流情報診断による状態監視を提案したほか、劣化部位の推定に向けた検討として、小型水中ポンプの異常模擬試験のデータをもとに異常状態の推定を試行した⁴⁾。しかし、異常模擬試験に使用した小型水中ポンプは、口径や吐出量、ポンプ形式等がコラム形水中ポンプとは異なるため、異常模擬試験の結果をコラム形水中ポンプへ適用できるかどうかは不明である。

そこで、コラム形水中ポンプの異常兆候が把握できる状態監視技術を提案するため、コラム形水中ポンプの実機による異常模擬試験を実施し、異常に伴う各種計測値の変動傾向の分析を行った。



写真-1 救急排水機場 (北海道滝川市)

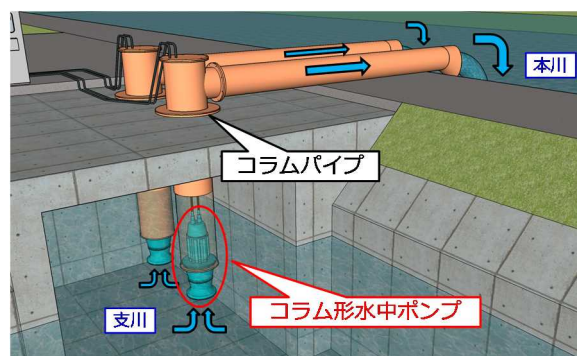


図-1 コラム形水中ポンプ設置概要図

2. 実機による異常模擬試験

(1) 試験用設備の概要

実機による異常模擬試験を実施するため、寒地土木研究所石狩吹雪実験場（北海道石狩市）に試験用設備の仮設を行った。

試験用設備の概要図を図-2に示す。試験用設備は、水槽、コラム形水中ポンプ、ポンプ操作盤、コラムパイプ、コラムパイプ用架台、H形鋼梁、吐出配管、レジューサ及び発動発電機により構成される。それぞれの主要諸元を表-1に示す。

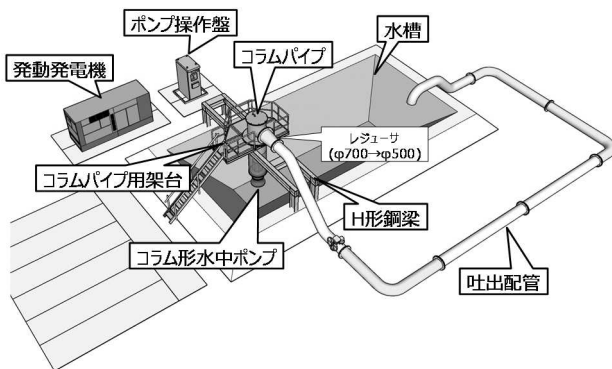


図-2 試験用設備概要図

表-1 試験用設備の主要諸元

水槽	寸法	L19.2×W11.2m×D2.5m
	貯水量	125t（水深2.3m）
	遮水シート	軟質塩化ビニルシート1.5mm 保護マット10mm
コラム形水中ポンプ	メーカー型式	三菱重工業 MPO-SM70
	規格	φ700mm 吐出力1.0m ³ /s 低揚程型
	質量	約2.0t
ポンプ操作盤	メーカー	三菱重工業
	質量	約0.8t
コラムパイプ	メーカー	西島製作所
	規格	標準床下長2.5m
	質量	約2.0t
コラムパイプ用架台	寸法	L2.3m×W3.9m
	材質	SS400
	質量	約0.8t
H形鋼梁	寸法	L8.4m×W1.4m×H2.5m
	規格	主梁 400×200×8×13
	材質	SS400
	質量	約3.0t
吐出配管	寸法	φ500 L=42m（6m×7本）
	材質	STK400
	質量	約4.2t（0.6t×7本）
発動発電機	メーカー型式	Denyo DCA-400ESK
	出力	350/400kVA
	質量	約6.0t

試験用設備の仮設状況を写真-2、仮設後の試運転状況を写真-3に示す。

水槽は、床掘り、築堤のうえ、遮水シートを敷設し造成した。水槽の寸法、水深及び貯水量は、コラム形水中ポンプ運転時に、運転に必要な最低水深である1.6mを下回らないものとした³⁾。

コラムパイプ用架台及びH形鋼梁は、本試験のために製作したものである。コラムパイプ用架台は、コラムパイプをボルトにより固定するための台座を有しており、ポンプの設置、撤去を行うため、縞鋼板による足場と転落防止用の手摺りを取り付けた。H形鋼梁は、コラム形水中ポンプ、コラムパイプ及びコラムパイプ用架台の重量に耐えうるものとし、転倒防止のため脚部の下に基礎ブロックを埋め込み、アンカーボルトで固定している。

吐出配管の延長は、後述する超音波流量計の設置にポンプから35m以上の延長が必要であるため、水槽部への吐出口を含め42mとした。また、配管の呼び径は、コラム形水中ポンプの口径と同じφ700mmの配管が非常に高価であったため、レジューサにより口径を落とし、φ500mmの配管とした。

発動発電機は、コラム形水中ポンプ1台を運転するために必要な発電機容量及び原動機出力を満たす、350kVAのものを選定した。

設備の仮設には、クレーン装置付トラック（4t、2.9t吊）及びラフテレーンクレーン（25t吊）を使用した。



写真-2 試験用設備の仮設状況



写真-3 試験用設備仮設後の試運転状況

(2) 試験条件

本試験では、羽根車の異常による吐出量の低下を想定し、羽根車に異常を加えて計測試験を実施した。

羽根車の状態を図-3に示す。羽根車は5枚羽根である。羽根車の状態は、正常な状態（図-3中A）、羽根車の1枚に鉛のウェイト（4kg）を取り付けた状態（図-3中B）、及びウェイトを取り外し先端部を切断した状態（図-3中C）の3条件とした。なお、ポンプの個体差による影響を排除するため、試験はすべて1台のポンプで実施した。

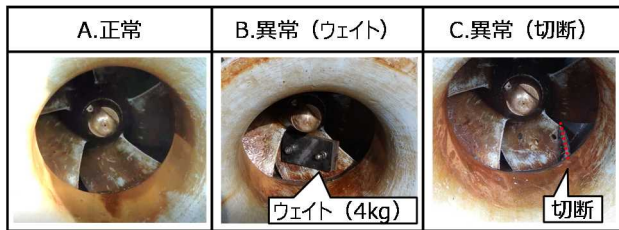


図-3 羽根車の状態

(3) 計測項目

計測機器の設置状況を写真-4に示す。計測項目は電流波形、吐出量及び振動とし、使用した計測機器はクランプ式電流計、超音波流量計及び振動加速度計である。

電流波形は、コラム形水中ポンプへの適用性が高い状態監視技術である電流情報診断を行うために計測した。クランプ式電流計の設置箇所は、コラム形水中ポンプからポンプ操作盤へ繋がる動力配線とした。

吐出量は、羽根車の異常がコラム形水中ポンプの性能に影響を与えているかを確認するために計測した。超音波流量計の設置箇所は、日本電気計器工業規格JEMIS 032に準拠し、ポンプから50D（Dはポンプ口径700mm）以上となる約36mの位置とした。

振動は、同じく河川管理施設である排水機場において、減速機や原動機の状態監視に活用しており、今回、羽根車異常の影響が現れるかどうかを確認するために計測した。振動加速度計の設置箇所は、コラムパイプの側面及び基礎部の2箇所とした。



写真-4 計測機器の設置状況

(4) 計測結果

a) 超音波流量計

超音波流量計による吐出量の計測結果を表-2に示す。吐出量は計測時間（115分）の平均値である。

コラム形水中ポンプの計画吐出量は $1.0\text{m}^3/\text{s}$ であることから、条件Aは、ほぼ計画吐出量通りの吐出量となった。しかし、条件B及びCでは吐出量の低下が見られ、条件Aと比較し、条件Bでは約5%、条件Cでは約3%の低下となった。

このことから、羽根車に異常を加えたことで、ポンプの性能が低下していることがわかった。

表-2 吐出量の計測結果

A.正常	B.異常(ウェイト)	C.異常(切断)
$1.011\text{m}^3/\text{s}$	$0.960\text{m}^3/\text{s}$	$0.979\text{m}^3/\text{s}$

b) 電流波形

クランプ式電流計による電流波形の計測結果を図-4に示す。縦軸は電流値、横軸は時間であり、波形のサンプリング周波数は $10,000\text{Hz}$ である。図は波形の形状を確認するため、0~0.2秒を抜粋したものである。電流情報診断を適用するため、これらの電流波形の周波数分析（FFT：Fast Fourier Transform）を行い、電源周波数の両端に現れる側帯波を解析した。

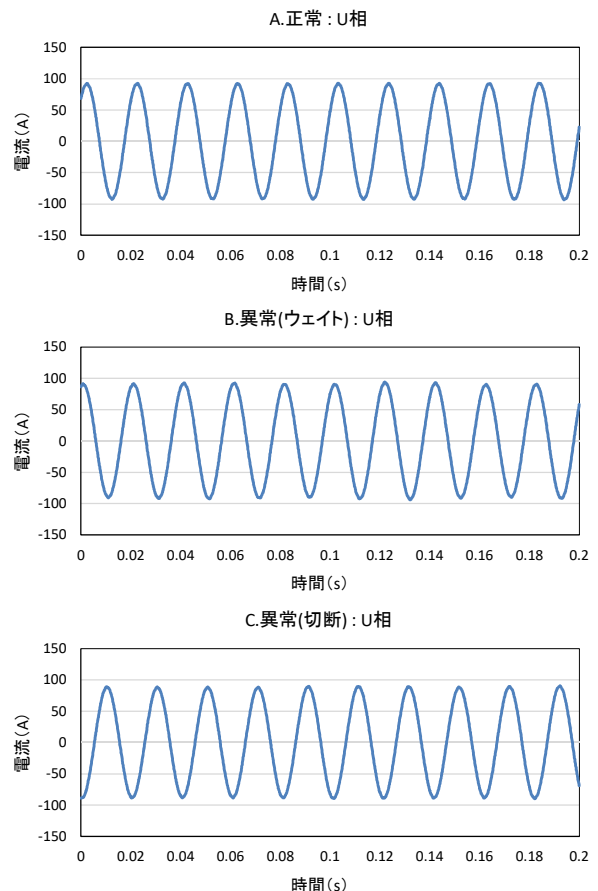


図-4 電流波形の計測結果

側帯波の解析方法を図-5に示す。電流情報診断では、電流波形の周波数分析結果から電源周波数の両端に現れる側帯波 L_{pole} 及び L_{shaft} を特定し、その大きさを確認する。 L_{pole} は、電動機内部の回転子バーの損傷により大きくなる側帯波であり、また L_{shaft} は回転子軸の異常負荷により大きくなる側帯波である⁶⁷⁾。

電流波形を周波数分析し、側帯波を解析した結果を図-6に示す。縦軸は周波数成分の大きさ、横軸は周波数である。なお、本解析結果は計測時間のうち最終10分間のデータについてU相を解析したものである。

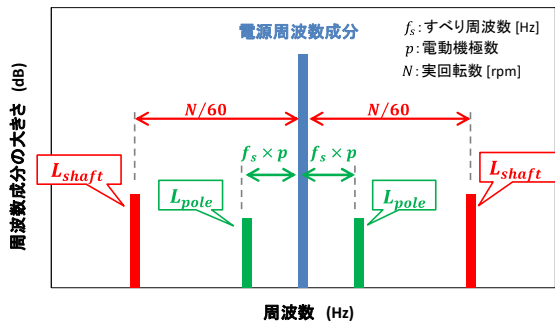


図-5 側帯波の解析方法

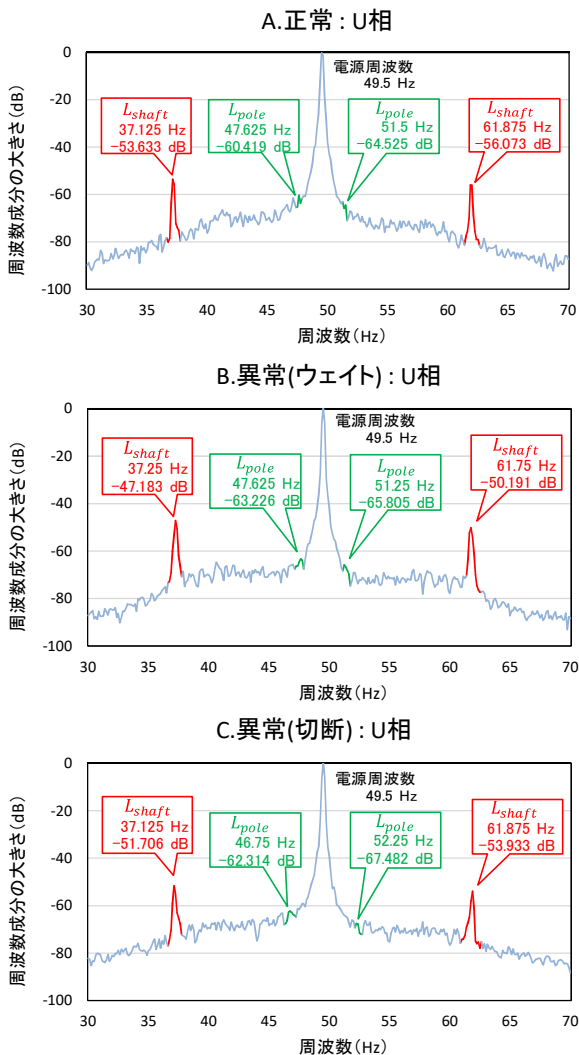


図-6 側帯波の解析結果

側帯波 L_{pole} 及び L_{shaft} の大きさの変化を図-7に示す。各側帯波は電源周波数の両端に現れるが、ここでは値の大きい方を側帯波の大きさとした。

大きさを確認した結果、異常に伴い L_{shaft} の値が上昇し、また条件Bが一番大きい値となることがわかった。これは、羽根車の異常により振り回りが発生し、ポンプ主軸にかかる異常負荷が大きくなった影響が現れたものと考えられる。

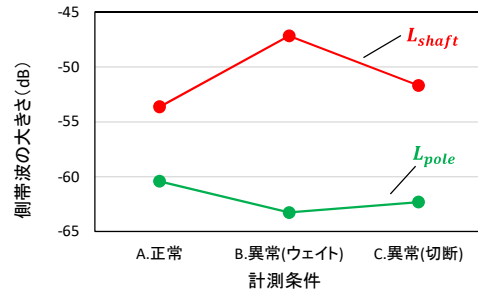


図-7 側帯波の解析結果

また、計測した電流波形から電流値及び始動電流値について確認した。

電流値を図-8に示す。電流値は計測時間(115分)の平均値である。電流値は、異常に伴い上昇することがわかった。これは、アンバランスによる振り回りや、羽根車切断部への水圧などにより、ポンプ電動機へかかる負荷が大きくなったためと考えられる。

始動電流値を図-9に示す。羽根車の異常に伴いポンプの始動トルクが増加し、始動電流に影響を与える可能性があると考えたが、確認した結果、始動電流値の上昇は見られなかった。

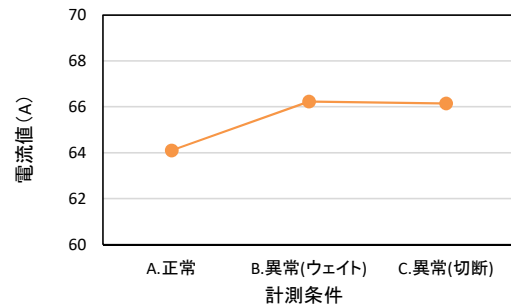


図-8 電流値 (実効値)

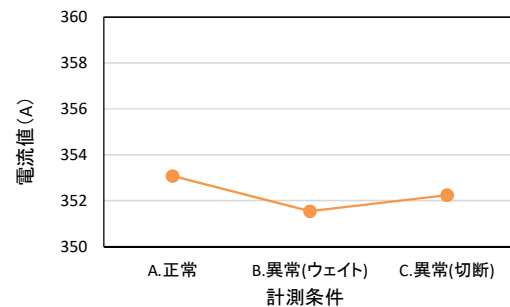


図-9 始動電流値 (実効値)

c) 振動

振動加速度計による振動の計測結果を図-10に示す。縦軸は振動加速度、横軸は時間であり、サンプリング周波数は電流波形と同じく10,000Hzである。図は波形の形状を確認するため、0~0.2秒を抜粋したものである。

加速度計の計測軸を図-11に示す。使用した振動加速度計は3軸加速度計であり、X、Y及びZ軸方向の加速度を計測することができる。

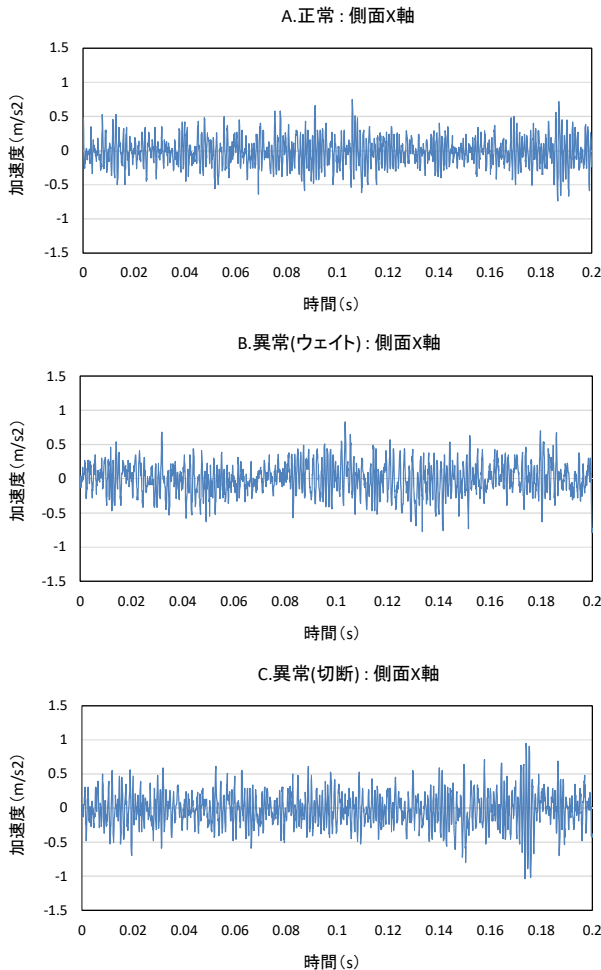


図-10 振動の計測結果

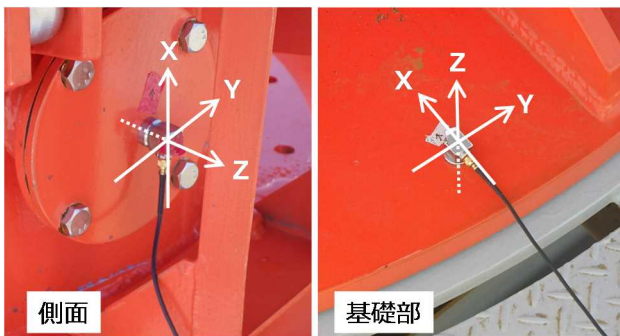


図-11 振動加速度計の計測軸

計測した振動の大きさを表-3に示す。大きさはP-P (peak-to-peak) 値で、計測時間 (115分) の平均値である。

コラムパイプ側面、基礎部共に、条件Cの場合にやや大きな値となったが、条件AとBではほぼ同じ値となり、振動の大きさから異常の判別を行うのは難しいと考えられる。

表-3 振動の大きさ (P-P値)

部位	軸	A.正常	B.異常(ウェイト)	C.異常(切断)
側面	X	2.65 m/s ²	2.71 m/s ²	3.09 m/s ²
	Y	2.78 m/s ²	2.77 m/s ²	3.12 m/s ²
	Z	2.79 m/s ²	2.68 m/s ²	3.04 m/s ²
基礎部	X	1.06 m/s ²	1.02 m/s ²	1.46 m/s ²
	Y	1.22 m/s ²	1.13 m/s ²	1.82 m/s ²
	Z	1.95 m/s ²	1.97 m/s ²	2.20 m/s ²

ここで、振動による状態監視を行う際には、振動波形を周波数分析スペクトルを確認する手法がとられることから⁹⁾、図-10の計測結果を周波数分析し、スペクトルを確認した。周波数分析結果を図-12に示す。図はアベレーシングによりノイズを除去したものである。

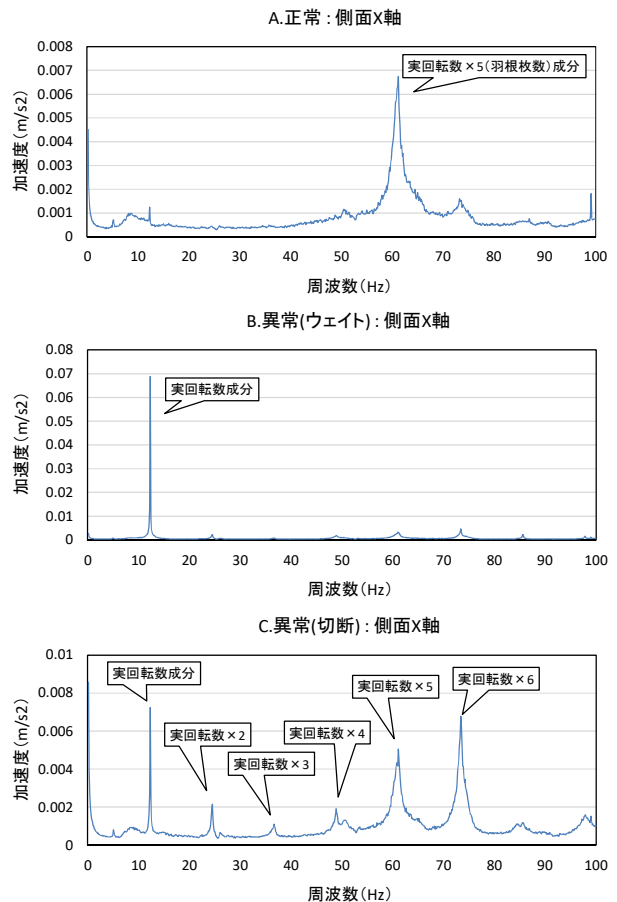


図-12 振動加速度の周波数分析結果

試験に使用したコラム形水中ポンプの実回転数は、ポンプの仕様から約728rpmと考えられ、実回転周波数は約12.1Hzとなる。

周波数分析の結果、条件Aではポンプの実回転数と羽根車の羽根枚数の積の周波数成分が大きくなった。これは、ポンプの回転状態は正常であり、羽根車の各羽根に負荷が均等にかかっているためと考えられる。

条件Bでは、実回転数の周波数成分が大きくなった。これは、ウェイトによるアンバランスが大きく、ウェイトを取り付けた羽根が通過するタイミングの周波数成分が大きくなったためと考えられる。

条件Cでは、実回転数の等倍となる周波数成分が大きくなった。これは、羽根の切断によりインペラのバランスが崩れ、羽根車にかかる負荷や回転数が不安定になったことが要因として考えられる。

以上より、振動波形を周波数分析した結果、羽根車の異常ごとに異なる特徴が現れることがわかった。

3. まとめ

コラム形水中ポンプの異常兆候が把握できる状態監視技術を提案するため、コラム形水中ポンプの実機による異常模擬試験を実施し、異常に伴う各種計測値の変動傾向の分析を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 電流波形を電流情報診断により解析した結果、羽根車の異常により側帯波 L_{shaft} の値が上昇することがわかった。これは、羽根車の異常により振れ回りが発生し、ポンプ主軸にかかる異常負荷が大きくなったためと考えられる。
- 2) 羽根車の異常に伴い電流値が上昇することがわかつ

た。これは、羽根車の異常によりポンプ電動機へかかる負荷が大きくなったためと考えられる。しかし、始動電流値には上昇は見られなかった。

3) 羽根車の異常に伴い、振動値には顕著な上昇は見られなかったが、振動波形を周波数分析することで、羽根車の異常ごとに異なる特徴が現れることがわかった。

今後は計測結果の解析を進めるとともに、AI技術を活用することで、データの傾向から異常の状態を判断し、劣化部位を推定する技術について検討を行う。

謝辞：異常模擬試験にご協力いただいた国土交通省北海道開発局に感謝する。

参考文献

- 1) 気象庁：気象変動レポート2019, p39, 2020.
- 2) 国土交通省ホームページインフラメンテナンス情報：
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html
- 3) 一般社団法人河川ポンプ施設技術協会：救急排水ポンプ設備技術指針・解説, pp. 7-8, 16, 1994.
- 4) 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所：電流情報診断によるコラム形水中ポンプ状態監視ガイドライン(案), 2019.
- 5) 小林勇一, 永長哲也：コラム形水中ポンプの劣化部位推定に向けての検討, 第64回北海道開発技術研究発表会, pp. 498-503, 2020.
- 6) 豊田利夫：電流徴候解析 MCSA による電動機駆動回転機の診断技術, 高田技報, Vol. 20, pp. 3-5, 2010.
- 7) 豊田利夫：電機設備診断の進め方, 日本プラントメンテナンス協会, pp. 130-145, 1993.
- 8) 劉信芳：誘導電動機の電流信号による回転機械系の監視診断, 第15回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集, pp. 72-75, 2016.
- 9) 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III), 2010.