

23. 救急排水機場ポンプの実機を用いた異常模擬試験について

羽根車に模擬的な異常を発生させた計測試験

(国研)土木研究所寒地土木研究所 ○小林 勇一
(国研)土木研究所寒地土木研究所 永長 哲也

1. はじめに

河川ポンプ施設の一つである救急排水機場では、口径 700mm、吐出量 1.0m³/s、質量約 2.0t の大型水中ポンプ（以下「コラム形水中ポンプ」という）が使用されている。このコラム形水中ポンプは、設置用のパイプ（以下「コラムパイプ」という）の内部に設置するため、稼働状態の確認が難しく、故障兆候の把握が難しいという課題がある（図-1）。

小林ら¹⁾²⁾は、コラム形水中ポンプの稼働状態を的確に把握できる技術を提案するため、誘導電動機電流徴候解析（Motor Current Signature Analysis; 以下「MCSA」という）に着目し、現地計測試験及び小型水中ポンプによる異常模擬試験を実施した。その結果、コラム形水中ポンプの状態監視に MCSA を適用できる可能性が高いことがわかったが、実際に不具合が発生したコラム形水中ポンプの診断実績はまだ無いため、実機による検証が必要である。

そこで、コラム形水中ポンプに模擬的な異常を発生させ、計測試験を実施した。

2. 試験概要

2.1 試験用設備

コラム形水中ポンプの計測試験を実施するため、北海道石狩市の寒地土木研究所石狩吹雪実験場に試験用設備を仮設した（写真-1）。

まず、長さ 19.2m、幅 11.2m、深さ 2.5m の水槽を造成し、コラムパイプ設置用に製作した H 型鋼梁及びコラムパイプ架台を設置のうえ、コラムパイプ、吐出配管、ポンプ操作盤及び発動発電機を設置した。コラム形水中ポンプは、ラフテレーンクレーン（25t 吊）によりコラムパイプ上部より挿入し設置した（写真-2）。

2.2 模擬異常

異常は羽根車の偏心及び欠損を想定し、羽根車に鉛のウェイトを取り付けた状態（以下「異常（ウェイト）」という）と、羽根車の先端を切断した状態（以下「異常（切断）」という）の 2 種類とした（図-2）。

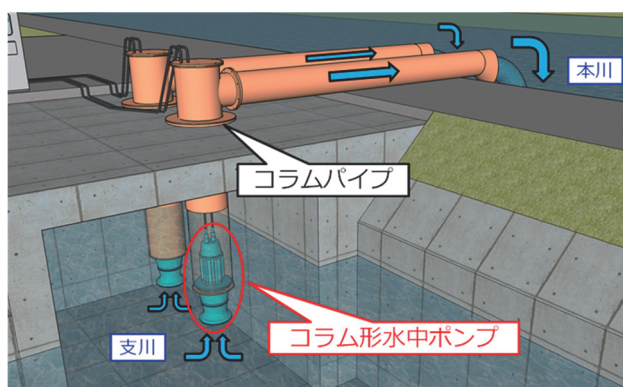


図-1 コラム形水中ポンプ設置概要図

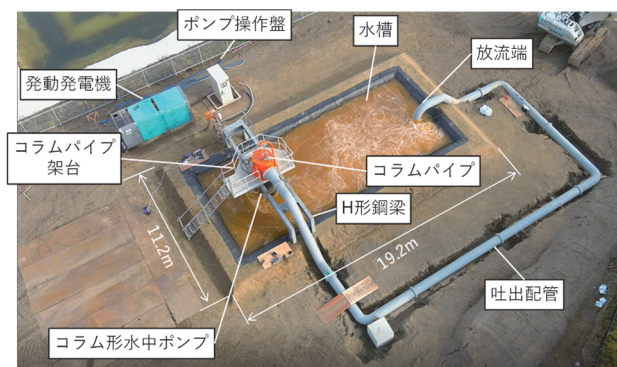


写真-1 コラム形水中ポンプ試験用設備



写真-2 コラム形水中ポンプ設置状況

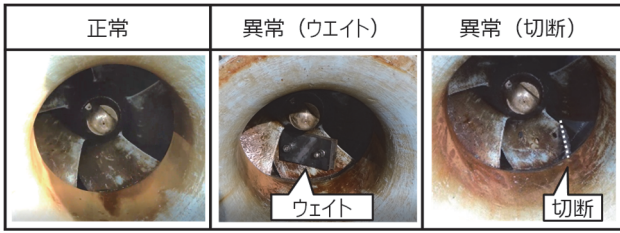


図-2 羽根車の状態

2.3 計測項目

計測項目は吐出量、電流波形及び振動加速度の3項目とした(写真-3)。吐出量は羽根車の異常がポンプ性能に与える影響を確認するため、電流波形はMCSAによる解析を行うために計測した。また、振動加速度は排水機場の原動機や減速機の診断に活用された実績があることから、今回、計測項目として追加した。なお、計測時間は、各状態で約120分とした。

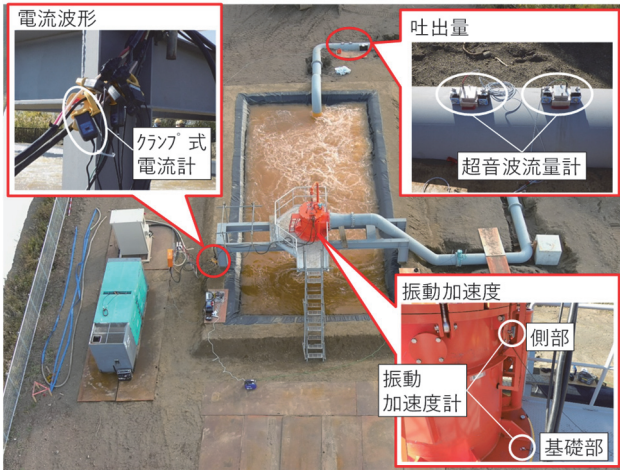


写真-3 計測状況

3. 試験結果

3.1 吐出量

吐出量の計測結果を図-3に示す。吐出量は、正常時と比較し、異常時には若干低下していることを確認した。

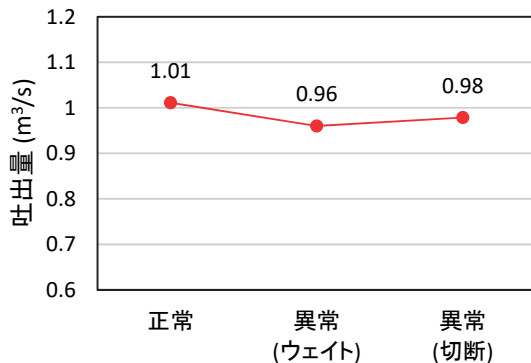


図-3 吐出量の計測結果

3.2 電流波形

MCSAでは、電流波形をFFT(Fast Fourier Transform)により周波数分析し、各異常に対応するスペクトルの大きさを確認することで、異常を検知する³⁾⁴⁾。今回、異常箇所が羽根車であることから、ポンプ主軸の回転に異常が生じると考えられるため、電動機回転子軸への異常負荷により上昇するスペクトル(以下「 L_{shaft} 」という)に着目した⁵⁾(図-4)。スペクトルの解析結果を図-5示す。横軸は周波数、縦軸はスペクトルの大きさであり、アベレージングによりノイズを除去したものである。 L_{shaft} はすべての状態で明瞭に現れた。

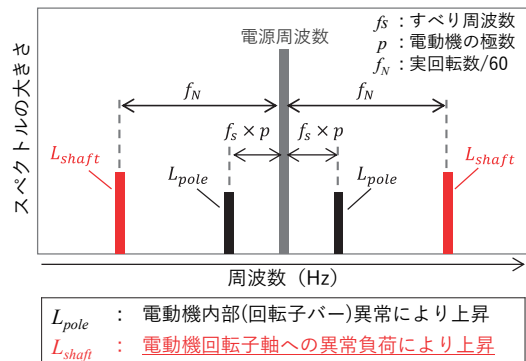


図-4 着目したスペクトル

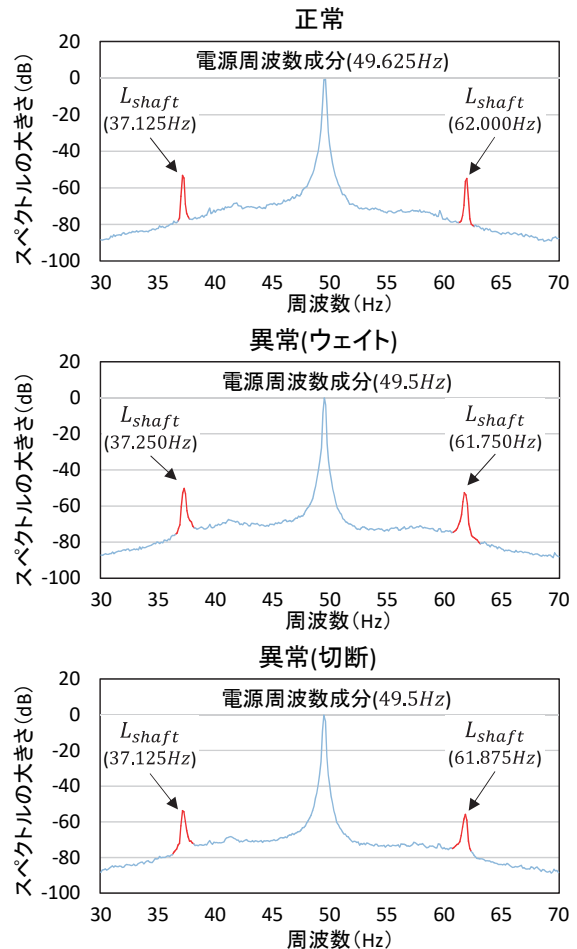


図-5 スペクトル解析結果

L_{shaft} の大きさの時間推移を図-6示す。横軸は時間、縦軸は大きさである。なお、 L_{shaft} は電源周波数の両端に現れており、図は低周波数側のものであるが、高周波数側も同様の傾向を示している。

L_{shaft} の大きさは、正常時は約-53dB付近で比較的安定したが、異常時は約-60dB~-40dBとなり、大きさにばらつきが生じ不安定となった。

L_{shaft} の大きさのばらつき度合いを確認するため、標準偏差を確認した(図-7)。標準偏差は、正常時に比べ異常時は上昇しており、異常によりばらつきが大きくなったことがわかった。

L_{shaft} の大きさは、ばらつきが大きいと平均値では変動を捉えられないことから、最大値を確認した(図-8)。最大値は、正常時に比べ異常時は上昇しており、これは、羽根車の異常によりポンプ主軸に生じた異常負荷が原因と考えられる。

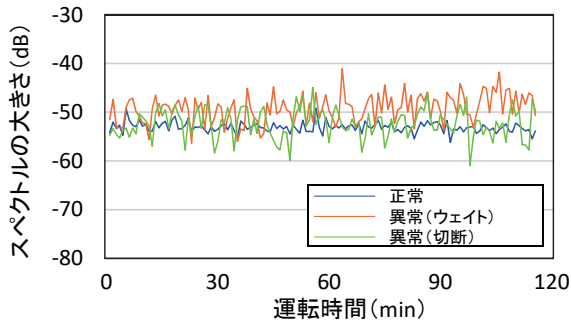


図-6 L_{shaft} の大きさ(低周波数側)

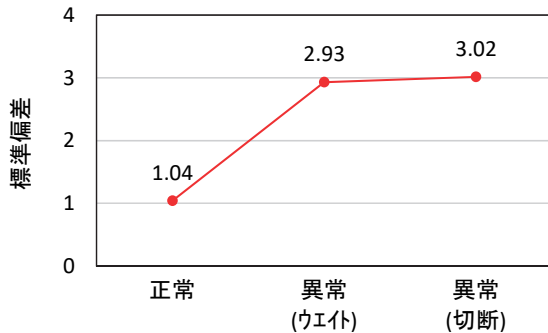


図-7 L_{shaft} の標準偏差

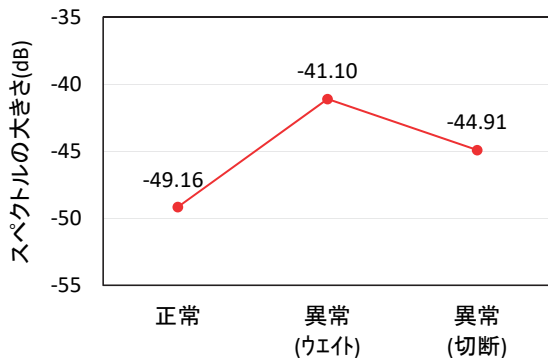


図-8 L_{shaft} の最大値

次に、 L_{shaft} が現れた周波数から、図-4に基づき実回転数を推定した。推定のための算定式を式(1)に示す。

$$N = |f - f_{Lshaft}| \times 60 \quad \dots(1)$$

ここで、 N : 実回転数 (rpm)

f : 電源周波数 (Hz)

f_{Lshaft} : L_{shaft} が現れた電源周波数 (Hz)

式(1)により算出した実回転数(以下「推定実回転数」という)を図-9に示す。推定実回転数は、正常時に比べ異常時には若干低下した。これは、羽根車の異常が正常な回転を阻害したためと考えられる。

また、電流波形とあわせて計測した電流値を確認したところ、正常時に比べ異常時には若干上昇したことがわかった(図-10)。これは、羽根車の異常により、ポンプ電動機の負荷が増大したためと考えられる。

以上より、羽根車の異常により、 L_{shaft} の標準偏差、 L_{shaft} の最大値、推定実回転数及び電流値に影響が現れることがわかった。

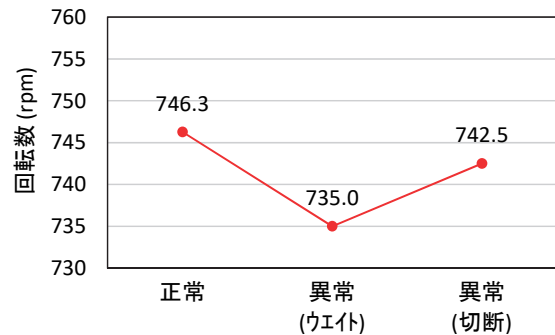


図-9 推定実回転数

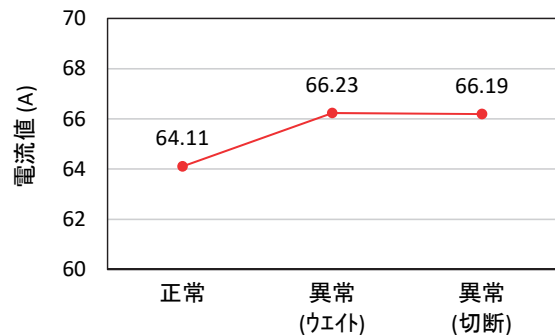


図-10 電流値

3.3 振動加速度

振動加速度計の計測結果を図-11に示す。使用した加速度計は、3軸加速度計である(写真-4)。

計測結果からは、羽根車の異常による大きな変化はみられなかった。

しかし、振動加速度を周波数分析したところ、羽根車の状態により異なる特徴が現れることがわかった(図-12)。

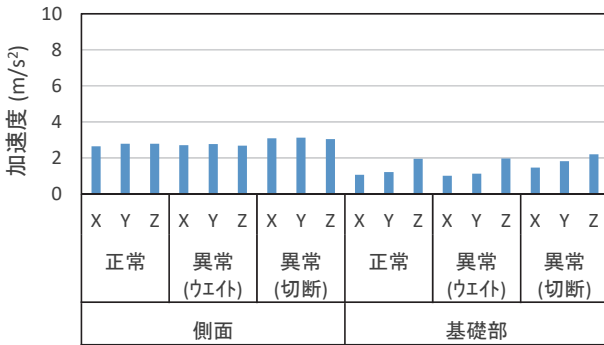


図-11 振動加速度の計測結果(peak-to-peak 値)

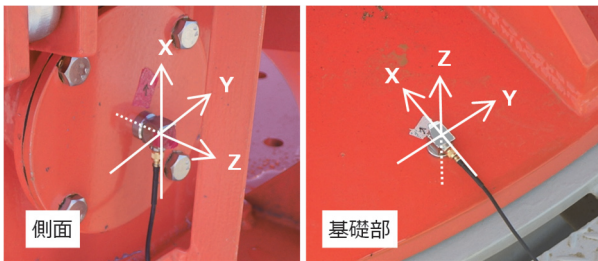


写真-4 振動加速度計の計測軸

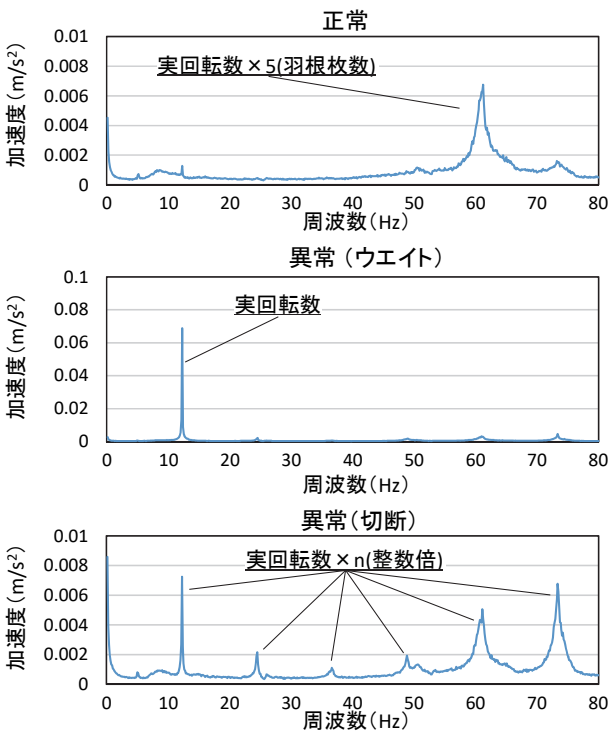


図-12 振動加速度の周波数分析結果

(アブレーションによりノイズ処理済み)

まず、正常時は、実回転数と羽根枚数の積のスペクトルが上昇した。これは、羽根車の各羽根に均等に負荷がかかったためと考えられる。

次に、異常(ウエイト)では、実回転数のスペクトルが上昇した。これは、ウエイトが付いた羽根が回転するタイミングで大きな振れ回りが発生したためと考えられる。

最後に、異常(切断)では、実回転数の等倍成分のスペクトルが上昇した。これは、羽根車のバランスが崩れたことで各羽根にかかる負荷が不均等となったためと考えられる。

以上より、羽根車の状態によって振動加速度に大きな違いはみられなかったが、振動加速度の周波数分析結果には違いが現れることがわかった。

3.4 データの変動傾向の分析

試験により得られた各解析データについて、羽根車の異常に伴う変動傾向を分析した。

正常時をベースに、各解析データの変動傾向を整理したものを表-1に示す。変動傾向は上昇、低下の2項目に分類し、上昇は赤着色、低下は青着色とした。なお、振動加速度を周波数分析して得られたスペクトルの大きさ(以下「振動周波数成分」という)は、実回転数成分及びその2倍、3倍、4倍、5倍成分を抽出した。

変動傾向は、異常(ウエイト)と異常(切断)で同じ傾向となった。この変動傾向を定量的に分析するため、ロジスティック回帰分析による分析を行った。ロジスティック回帰分析は、主に二項分類に用いられるアルゴリズムであり、出力される係数を確認することで項目毎の影響の大きさを確認することができる。

表-1 各解析データの変動傾向

項目		羽根車の状態	
		異常(ウエイト)	異常(切断)
電流波形			
L_{shaft} (低周波数側)	標準偏差	↗	↗
	最大値	↗	↗
L_{shaft} (高周波数側)	標準偏差	↗	↗
	最大値	↗	↗
電流値		↗	↗
推定実回転数		↘	↘
振動加速度			
振動周波数成分	実回転数	↗	↗
	実回転数×2	↗	↗
	実回転数×3	↗	↗
	実回転数×4	↗	↗
	実回転数×5	↘	↘

ロジスティック回帰分析により求める係数は、式(2)による。

$$\theta^T x = \sum_{i=0}^n \theta_i x_i \quad \dots(2)$$

ここで、 θ : 係数
 x : 入力項目
 n : 入力項目数

入力項目は表-1 と同じ 11 項目とし、入力項目と係数は表-2 のとおり対応している。

まず、正常時をベースとし、羽根車異常時の係数を算出した (図-13)。

表-2 入力項目と係数

i	入力項目	係数
0	x_0 : 1 (定数)	θ_0
1	x_1 : L_{shaft} (低周波数側) 標準偏差	θ_1
2	x_2 : L_{shaft} (低周波数側) 最大値	θ_2
3	x_3 : L_{shaft} (高周波数側) 標準偏差	θ_3
4	x_4 : L_{shaft} (高周波数側) 最大値	θ_4
5	x_5 : 電流値	θ_5
6	x_6 : 推定実回転数	θ_6
7	x_7 : 実回転数成分	θ_7
8	x_8 : 実回転数×2 倍成分	θ_8
9	x_9 : 実回転数×3 倍成分	θ_9
10	x_{10} : 実回転数×4 倍成分	θ_{10}
11	x_{11} : 実回転数×5 倍成分	θ_{11}

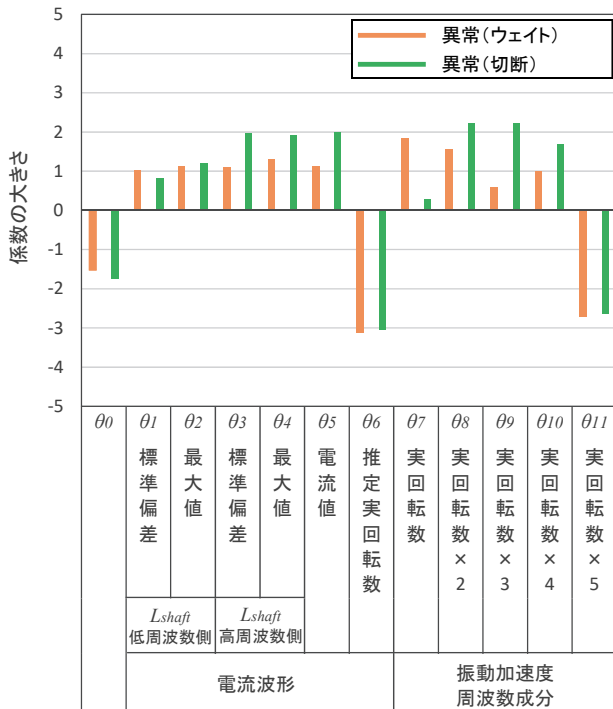


図-13 ロジスティック回帰分析による係数の算出結果 (正常時ベース)

なお、各入力項目については、スケールを統一するため、式(3)による標準化を行った。

$$x_M = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad \dots(3)$$

ここで、 x : 入力データ
 x_M : 標準化した x
 x_{min} : x の最小値
 x_{max} : x の最大値

図-13 より、係数の大きさは表-1 と同じ傾向となることを確認した。また、係数の絶対値が大きいほど、式(2)の計算結果へ与える影響が大きいことから、影響が最も大きい項目は θ_6 の推定実回転数であることがわかった。

次に、羽根車の異常毎の違いを確認するため、異常(ウエイト)をベースとし、異常(切断)の係数を算出した (図-14)。その結果、 θ_7 の実回転数成分の影響が最も大きく、 θ_6 の推定実回転数、 θ_9 の実回転数の3倍成分及び θ_{11} の実回転数の5倍成分の影響が大きいことがわかった。 θ_7 、 θ_9 及び θ_{11} は振動加速度の周波数成分であることから、異常毎の違いを確認するためには、振動加速度の分析が有用であると考えられる。

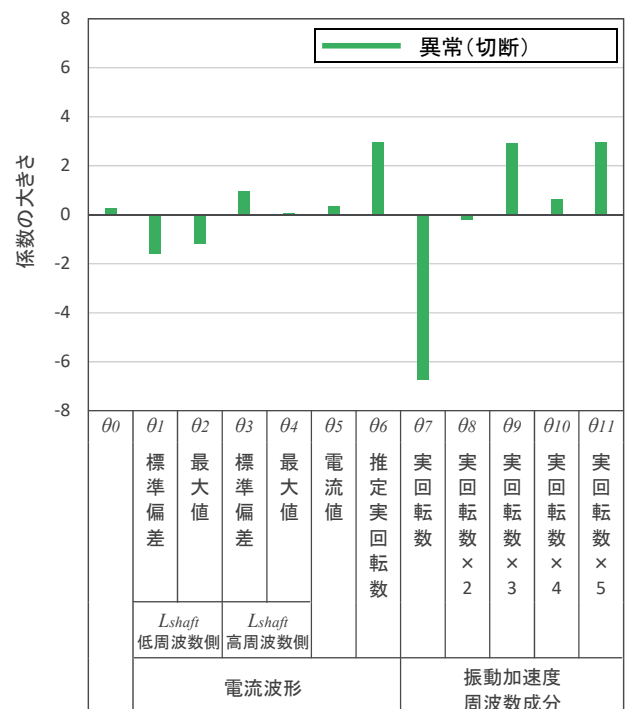


図-14 ロジスティック回帰分析による係数の算出結果 (異常(ウエイト)ベース)

3. まとめ

コラム形水中ポンプの稼働状態を的確に把握できる技術を提案するため、コラム形水中ポンプの羽根車に模擬的な異常を発生させ、計測試験を実施した。得られた知見を以下に示す。

(1) MCSAに基づき電流波形を分析した結果、羽根車の異常により、 L_{shaft} の標準偏差、 L_{shaft} の最大値、推定実回転数及び電流値に影響が現れることがわかった。

(2) 振動加速度の計測結果、羽根車の異常による大きな変化はみられなかった。しかし、振動加速度を周波数分析した結果、羽根車の状態により異なる特徴が現れることがわかった。

(3) 各解析データについて、ロジスティック回帰分析により変動傾向を分析した。その結果、正常時をベースに異常（ウエイト）及び異常（切断）を分析した結果、影響が最も大きい項目は推定実回転数であることがわかった。また、異常（ウエイト）をベースに異常（切断）を分析した結果から、異常毎の違いを確認するためには、振動加速度の分析が有用であると考えられる。

今後は、軸受異常について検証を実施する予定であるほか、AI 技術を活用した劣化部位の推定技術について検討を行う。

謝辞：MCSA に関してご協力いただいた株式会社高田工業所 劉信芳氏に感謝する。

参考文献

- 1) 小林勇一・永長哲也：誘導電動機電流徴候解析による救急排水機場ポンプの状態監視手法について、令和3年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集，pp.117～122,2022
- 2) 小林勇一・平地一典：誘導電動機電流徴候解析によるコラム形水中ポンプの状態監視に向けた計測試験，日本設備管理学会誌，Vol.32，No.3，pp.55～64,2020
- 3) 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
- 4) 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, 1993.12
- 5) 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, 2016.12