

28. 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

(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

国や自治体などが管理する河川には、大雨や融雪などの出水による内水被害を軽減するため、河川ポンプ施設や水門などの河川管理施設が設置されている。近年の大雨や集中豪雨の頻発により¹⁾、これらの施設の重要性は非常に高まっているが、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⁾。浸水被害を軽減し地域の安全を守るためには、これらの設備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。

救急排水機場は、河川ポンプ施設の一つであり、可搬式のコラム形着脱式縦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。)により、支川の水を本川へ排水することで、支川(堤内)の水位上昇を軽減する施設である(写真-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、定置式のパイプ(以下、「コラムパイプ」という。)の内部に設置するため、直接目視や触診ができず、稼働中の異音や変調などの確認が困難である(図-1)。そのため、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。

電動機や減速機などの回転機械に使用されている状態監視技術としては、振動診断、潤滑油診断、AE診断、サーモグラフィーなどがある⁴⁾。しかし、これらの技術を適用するためには、ポンプ本体へのセンサーの設置や、クレーン車等によるコラムパイプからの引き上げが必要となり、容易ではない。

一方、誘導電動機電流徴候解析(Motor Current Signature Analysis; 以下、「MCSA」という。)は、使用する電流センサーがクランプ式であり、コラム形水中ポンプの動力配線への取り付けが非常に容易である(図-2)。また、ポンプを引き上げる必要もないため、適用しやすい技術である。

そこで、コラム形水中ポンプの稼働状態を的確

に判断できる技術の提案を目的として、MCSAによる計測試験を実施し、適用性を検証した。



写真-1 救急排水機場外観(北海道滝川市)

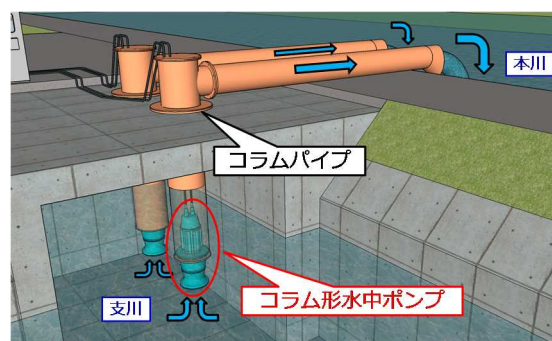


図-1 コラム形水中ポンプ設置概要図

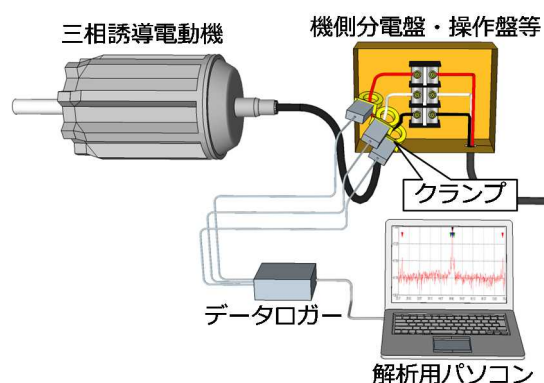


図-2 MCSAによる計測方法

2. MCSAによる状態監視手法

MCSAとは、三相誘導電動機に発生する逆起電力を解析することで、機械の異常を検出する技術である⁵⁾。逆起電力の解析は、電流波形を周波数分析することにより行う。

三相誘導電動機の模式図を図-3に示す。固定子に三相交流電流が流れると、位相差により回転磁界が発生し、回転子バーに電流が誘起され、回転子が回転する。そのため、回転子軸の回転速度は回転磁界よりやや遅くなる。この差をすべり周波数という。

また、回転子バーが回転磁界を通過すると、発電機と同じ原理(フレミングの右手の法則)で固定子に電流が誘起される。これを逆起電力という。

仮に、回転子バーの1本が損傷した場合、その回転子バーには電流が誘起されにくくなり、固定子への電流誘起に影響を及ぼす。この影響を受ける周波数は、回転子バーが磁極を通過する周波数であり、すべり周波数と電動機極数の積となる。この場合の電流波形を周波数分析すると、図-4に示すとおり、電源周波数の両端に側帯波 L_{pole} が現れる⁵⁾⁶⁾。

また、回転子軸に異常な負荷が生じた場合、電源周波数の両端に側帯波 L_{shaft} が現れる⁷⁾。 L_{shaft} は、回転子軸につながる被駆動装置の異常に起因した異常負荷にも影響を受けるため、軸受やインペラなどの異常を検知できる可能性がある。

以上より、側帯波 L_{pole} 及び L_{shaft} の大きさを監視することで、状態監視を行うことができる。

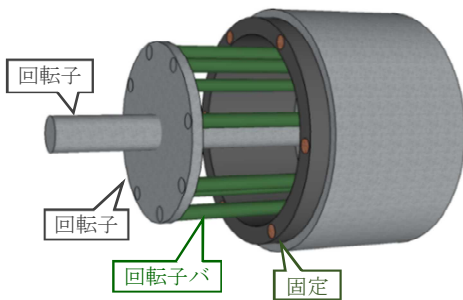


図-3 三相誘導電動機(かご形)模式図

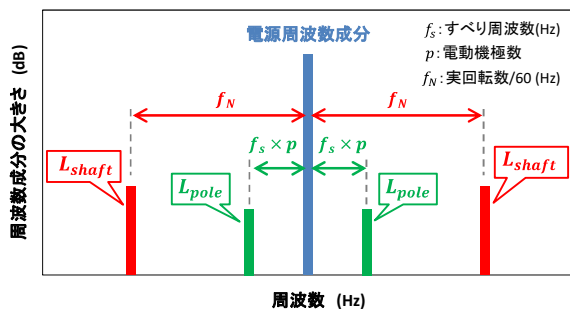


図-4 電流波形の周波数分析結果 模式図

3. 計測試験

計測試験は、モーターキット、救急排水機場、ポンプメーカー工場での計測試験、及び小型水中ポンプによる異常模擬試験を実施した。

3.1 モーターキットによる計測試験

実験用のモーターキットを製作し、計測試験を実施した(写真-2)。

試験条件は、フライホイールにボルトを取り付けない状態、ボルトを1本及び2本取り付けた状態の3条件とした(図-5)。

ボルトを取り付けない状態で計測した電流波形を周波数分析し、側帯波を解析したものを図-6に示す。側帯波 L_{pole} 及び L_{shaft} はそれぞれ緑及び赤色で着色している。ボルトを取り付けない状態においても、側帯波は検出されることがわかった。

各条件の側帯波の大きさを図-7に示す。 L_{pole} に大きな変動は見られないが、 L_{shaft} はボルトを取り付けることで上昇した。これは、ボルトによりフライホイールが偏芯し、振れ回りが生じ回転子軸へ異常な負荷が発生するためと考えられる。

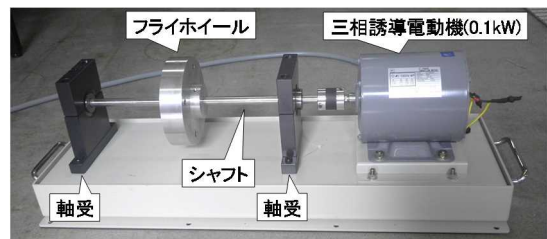


写真-2 実験用モーターキット



図-5 フライホイールへのボルト取り付け状況

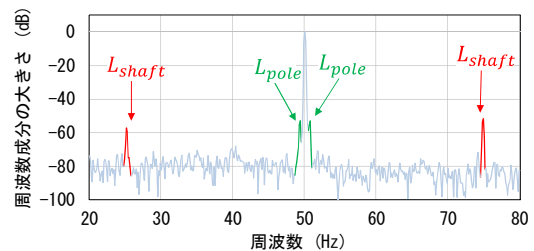


図-6 側帯波の解析結果(ボルト無し)

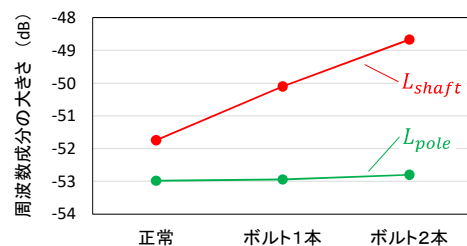


図-7 側帯波の大きさ

3.2 救急排水機場における現地計測試験

国土交通省北海道開発局が管理する救急排水機場において、定期点検時に行われる試運転にあわせ、現地計測試験を実施した。

試験の概要を表-1に示す。試験は5機場で計6台のコラム形水中ポンプについて実施した。コラム形水中ポンプの仕様は全て「救急排水ポンプ設備技術指針」³⁾に規定されている「高揚程型」であり、製作メーカーに違いはあるが、口径、吐出量、全揚程等の仕様は同一である。試運転は1台ごとの単独運転で行われ、ポンプ吸水槽の水位が低かった救急排水機場B、C及びDでは、吐出弁開度を5～15%に絞って実施された。

表-1 現地計測試験の概要

救急排水ポンプ設備				試験条件		
機場名称	電源	コラム形水中ポンプ		計測台数	ポンプ呼称	吐出弁開度
		仕様	設置数			
A	ディーゼル式 発動発電機 3相交流 400V 50Hz	高揚程型 口径：700mm 吐出量：1m ³ /s 全揚程：9m 定格回転数 ：980rpm	5台	1台	A1	50%
B			7台	1台	B1	10%
C			1台	1台	C1	5%
D			3台	1台	D1	15%
E			5台	2台	E1	100%
					E2	100%

計測に使用した機器は、株式会社高田工業所製の電流情報量診断システム T-MCMA である。計測設定は、サンプリング周波数を 16,384Hz、サンプリングデータ数を 131,072、1 回あたりの計測時間は 8 秒、計測間隔を 1 分とし、計測回数は試運転の状況にあわせ 5～10 回とした。

計測した電流波形を周波数分析し、側帯波を解析した結果を図-8に示す。側帯波 L_{pole} 及び L_{shaft} はそれぞれ緑及び赤色で着色している。なお、グラフはアベレージングによりノイズを除去したものである。

まず、 L_{pole} は、視認に注意を要したが、すべての計測結果で側帯波が認められた。

次に、 L_{shaft} は、A1、E1 及び E2 では卓越した側帯波が現れたが、その一方で、B1、C1 及び D1 では卓越した側帯波は認められなかった。これらの救急排水機場では、吐出弁開度を絞って試運転を実施したことから、吐出弁による吐出量の調整が周波数分析結果に影響を及ぼす可能性があることがわかった。

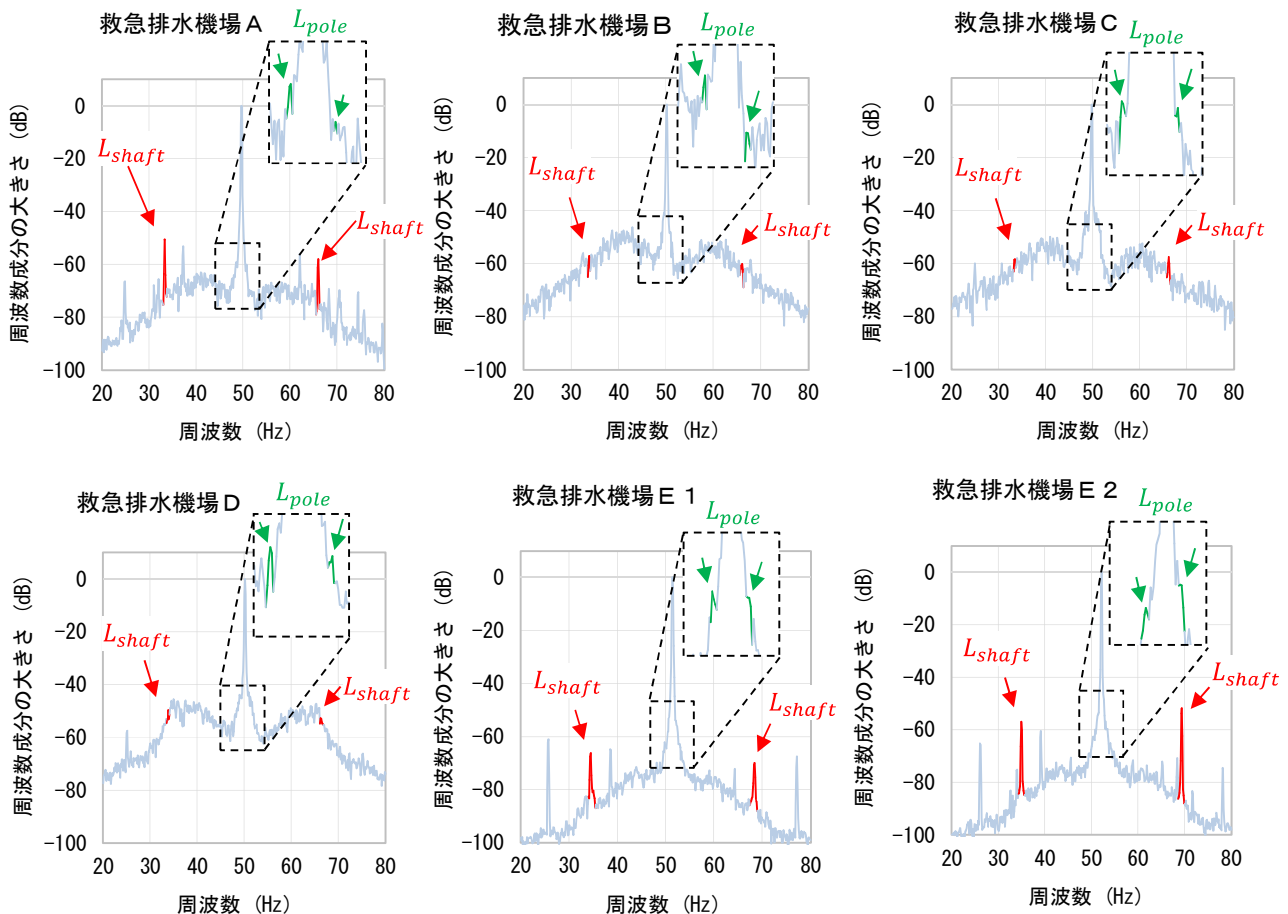


図-8 側帯波解析結果（救急排水機場）

3.3 ポンプメーカー工場における現地計測試験

ポンプメーカー工場で行われた性能試験にあわせ、計測試験を実施した。

試験条件を表-2に示す。電源は商用電源、コラム形水中ポンプの規格は高揚程型である。計測条件は、計画吐出量 1m³/s (60 m³/min) を基準とし、吐出量割合 30%、60%、100%及び 120%の4条件とした。吐出量及び全揚程は、性能試験による測定結果である。

表-2 試験条件 (ポンプメーカー工場)

電源	コラム形水中ポンプ規格	吐出量割合	吐出量 (m ³ /min)	全揚程 (m)	吐出弁開度 ※参考
商用電源 3相交流 400V 50Hz	高揚程型	30%	18.73	14.641	16%
		60%	37.71	12.772	27%
		100%	60.24	9.139	45%
		120%	72.99	4.335	56%

周波数分析結果より側帯波を解析した結果を図-9に示す。アベレージングによりノイズを除去したものである。

まず、 L_{pole} は、すべての条件で卓越した周波数成分が現れており、吐出量を調整した影響は確認できなかった。また、前項の救急排水機場に比べ明瞭に現れており、これは、発動発電機に比べて商用電源の電源周波数が安定していたことが、要因の一つとして考えられる。

次に、 L_{shaft} は、吐出量割合 30%ではほぼ現れないが、吐出量割合 60%では小さく現れ、吐出量割合 100%及び 120%では、大きく卓越した側帯波が現れた。吐出弁により吐出量を絞るほど、管内の水圧が上昇することから、この水圧がインペラに作用し、正常な回転を妨げ、実回転数が細かく変動した可能性がある。

このことから、吐出弁を開放した状態では、側帯波の検出が可能となり、MCSAによる状態監視を適用できる可能性が高いことがわかった。

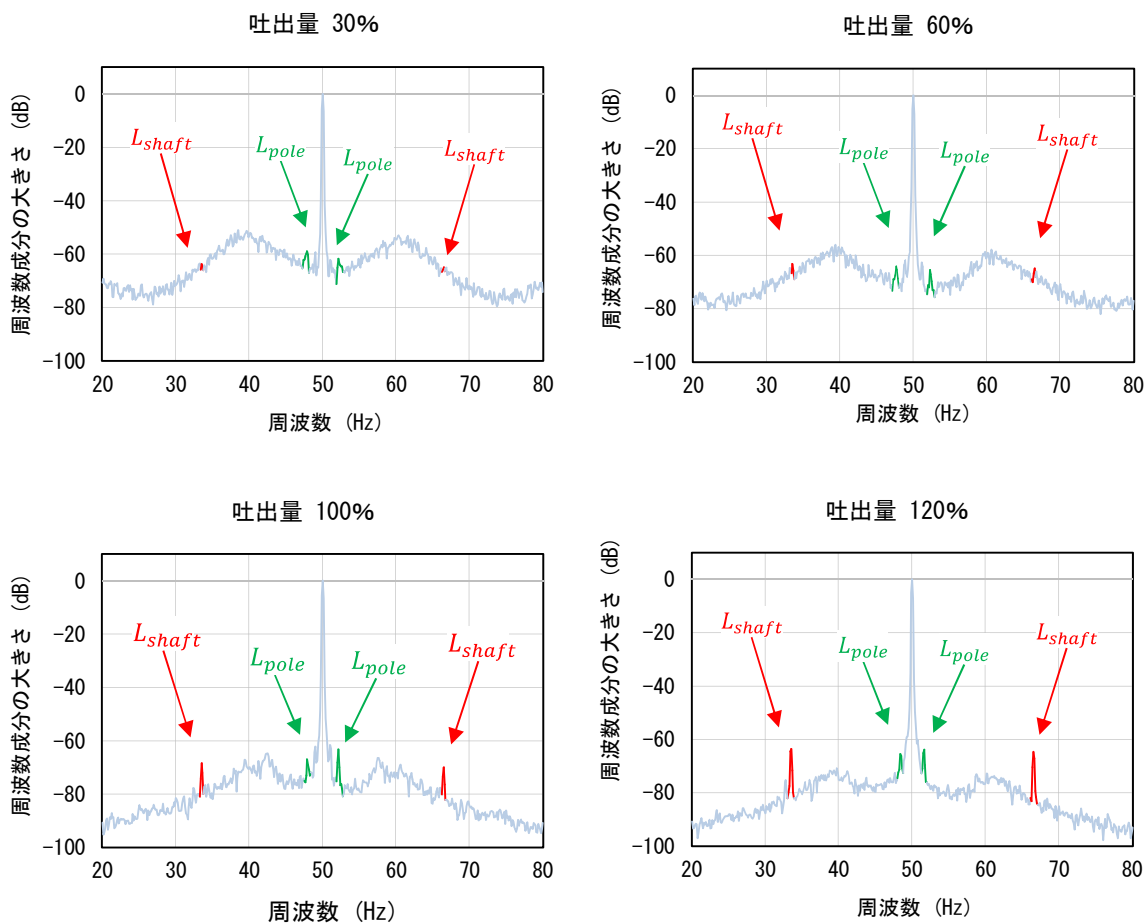


図-9 側帯波解析結果 (ポンプメーカー工場)

3.4. 小型水中ポンプによる異常模擬試験

ポンプの異常が解析結果に及ぼす影響を確認するため、小型水中ポンプによる異常模擬試験を実施した。

(1) 試験の概要

試験状況を写真-3に示す。試験は実験用水槽で実施し、使用したポンプはステンレス製水中渦巻きポンプ（出力 0.4kW）である。配管は延長 7.0m とし、吐出量を確認するため流量計を取り付けた。

計測条件を表-3に示す。今回の試験では、インペラの損傷による吐出量の低下を想定し、損傷を加えたインペラによる計測試験を実施した。損傷の種類は切損と圧潰の 2 種類とし、損傷の程度はそれぞれ 3 段階とした（図-10）。また、流量計により吐出量を計測し、損傷の種類ごとに、損傷の程度に伴う吐出量の変化を確認した。

ポンプはインペラ交換後に 60 分間運転し、最終 10 分間（50～60 分）の電流波形を解析した。

(2) 解析結果

各条件の側帯波の大きさを図-11に示す。左はインペラを切損した場合、右は圧潰した場合のもので、10 分間の最大値である。

解析の結果、インペラを切損した場合には L_{shaft} が上昇したが、圧潰した場合は L_{pole} 、 L_{shaft} 共にほぼ変化は見られなかった。

次に、電流の RMS 値（以下、「電流値」という。）及びポンプの実回転数について確認した。ここで、実回転数は、ポンプ主軸がケーシングで覆われており実測が困難であるため、 L_{pole} が検出された周波数からの逆算により求めた。

電流値は、インペラを切損した場合は上昇し、圧潰した場合はやや低下した。また、実回転数は、インペラを切損した場合は低下し、圧潰した場合はやや上昇した。

(3) 解析結果の考察

インペラを切損した場合、電流値が上昇したことから、ポンプ電動機の負荷は上昇したとみられるが、吐出量は低下しており、ポンプ効率は低下したと考えられる。電動機の負荷の上昇は、インペラ切断面へかかる水圧や、アンバランスによる振れ回りなどが要因と考えられ、この振れ回りにより L_{shaft} が上昇したと考えられる。また、吐出量の低下は、羽根車の欠損のほか、ポンプ回転数の低下も要因になっていると考えられる。

一方、圧潰の場合、電流値が低下したことから、ポンプ電動機の負荷が低下したとみられる。これは、インペラの吐出口が潰れ正常に吐出できなくなったことで、吐出量が低下し、ポンプ効率が低下したためと考えられる。また、実回転数は微増していることから、インペラはほぼ正常に回転しており、アンバランス等による異常負荷はほぼ発生していないと考えられる。

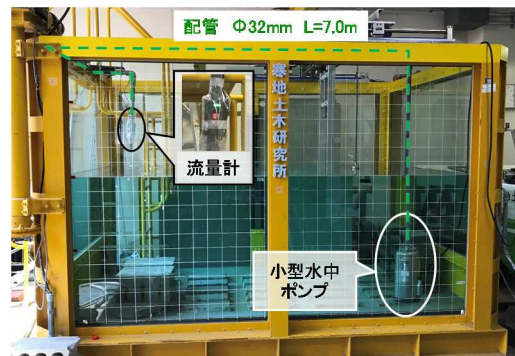


写真-3 異常模擬試験状況

表-3 試験条件（異常模擬試験）

電源	小型水中ポンプ規格	損傷の種類	損傷の程度	吐出量 (L/min)	
商用電源 3 相交流 200V 50Hz	ステンレス製 水中渦巻き ポンプ 0.4kW 200V 3.2A 2P 口径 32mm	正常	—	183	
			切損	1/6	157
				2/6	138
		3/6		125	
		圧潰	1/5	168	
			2/5	160	
			3/5	145	



図-10 インペラの損傷状況

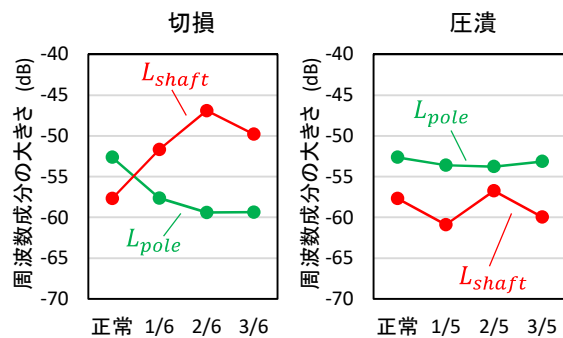


図-11 側帯波の大きさ（左：切損，右：圧潰）

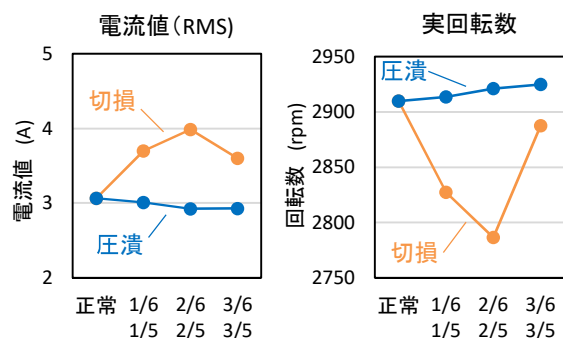


図-12 電流値 (RMS) 及び実回転数

(4) 決定木による解析

状態監視を行うにあたり、側帯波 L_{pole} 、 L_{shaft} の大きさ、電流値及びポンプの実回転数から、インペラの状態を判別する手法を検討するため、「決定木 (Decision Tree)」による解析を試行した。

「決定木」とは機械学習の手法の一つであり、解析結果を図表化することで、学習結果の分析を行うことが可能である。

機械学習の方法は教師あり学習とし、教師データは、異常模擬試験で取得した 70 データ (正常 10 データ、圧潰 30 データ及び切損 30 データ) とした。

決定木による教師データの解析結果を図-13 に示す。出力結果から、今回の試験データは、電流値、実回転数及び L_{shaft} により順次分類することで、インペラの状態ごとに分類できることがわかった。

4. 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、MCSA による計測試験を実施した。得られた知見を以下に示す。

1) 救急排水機場及びポンプメーカー工場での計測試験の結果、吐出弁を開放した状態で電流波形を計測することで、側帯波の検出が可能となり、MCSA による状態監視を適用できる可能性が高いことがわかった。

2) 小型水中ポンプによる異常模擬試験の結果、インペラに損傷を加えた場合、側帯波 L_{pole} 、 L_{shaft} の大きさのほか、電流値及びポンプの実回転数に影響が見ることがわかった。また、「決定木」による解析を試行し、インペラの状態を判別できるこ

とがわかった。

今後は、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、ポンプ異常時のデータについて検証するほか、機械学習による解析手法について、他手法との比較などの精査を行い、より精度の高い診断手法について検討する予定である。

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、山本英明氏、救急排水機場における現地計測試験にご協力いただいた国土交通省北海道開発局、工場における計測試験にご協力いただいた株式会社電業社機械製作所、及び小型水中ポンプ試験にご協力いただいた株式会社荏原製作所に感謝する。

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, 1994.
- 4) 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), p6, p287 (2010)
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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

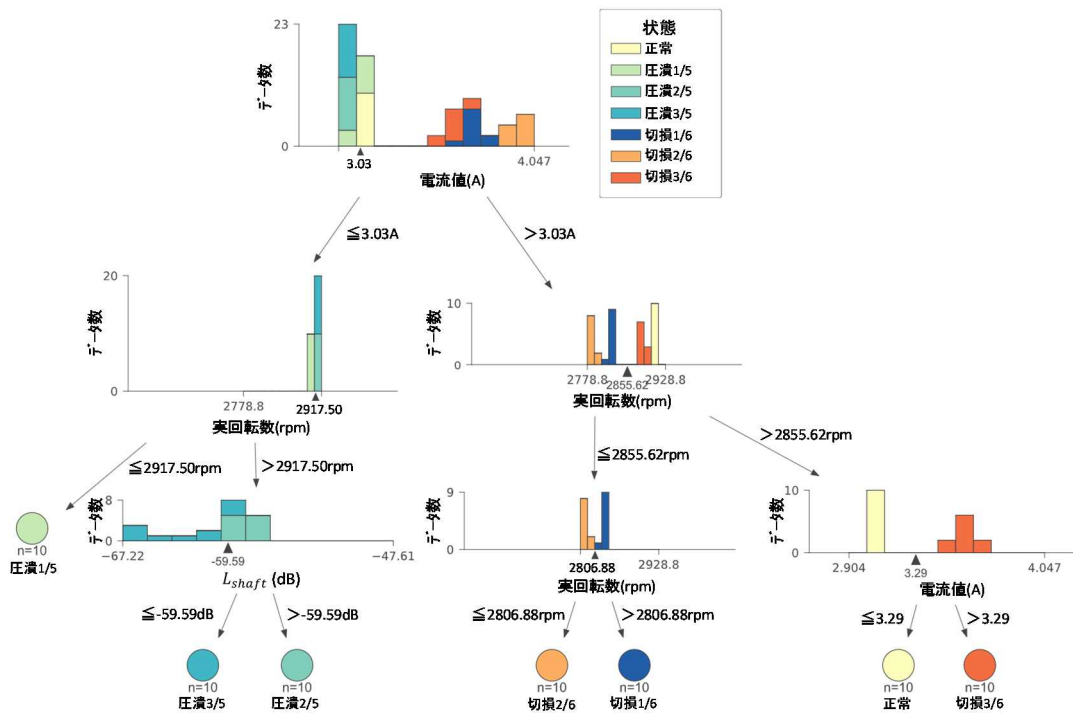


図-13 決定木による教師データの解析結果