

河川用ゲート設備の点検・診断手法に関する調査試験

1. 調査目的

河川用ゲート設備は、水門・樋門・樋管における逆流防止・水流制御などを行うことで国民の生命・財産を守る重要な社会資本であるが、河川ポンプ設備と同様に高度成長期以降急速に整備され、今後老朽化施設の増大が想定されている。

国土交通省では、平成20年度より「河川用ゲート設備点検・整備・更新検討マニュアル(案)」の運用を開始し、設備の整備・更新の優先度決定プロセスの合理化を図ってきた。しかし、設備の健全度をより効果的に把握する必要性が高まっている現状に鑑み、平成26年度に当該マニュアルを状態監視型予防保全の推進を主たる目的とした「河川用ゲート設備点検・整備・更新マニュアル(案)」として改訂し、平成27年度より運用している。

しかし、ゲート設備は稼働する時間が少ない待機系設備が多く、稼働する部分の速度も低いことなどから、常用系設備の診断技術として一般的な振動解析等も実施されておらず、状態監視保全を行うための(計測データによる)傾向管理及び診断手法は確立されていないのが実態である。

本調査は、①河川用ゲート設備の故障傾向の分析(リスク分析)、②対応策としての状態監視項目の抽出、③新たな診断技術による計測・診断マニュアル(案)のとりまとめを行うものである。

本年度は、過年度調査により抽出された新たな診断技術について、関東地整管内3箇所ゲートのゲート設備を対象に試行を実施し適用性の検証を行った。また、それらの技術について、ゲート設備の構成機器に対する適用性と有効性に関するアンケートを点検業者及びゲートメーカーを対象に実施し、診断技術の課題を明確にした。

2. 過去の経緯

本調査は、新たな診断技術による計測・診断マニュアル(案)のとりまとめを行うものであり、平成27年度は下記について実施した。

①故障情報の整理・分析

構成設備・機器の故障傾向を把握することを目的として、河川用ゲート設備748件の故障情報を収集し、「装置名称」「機器名称」「発生時の状態」「故障モード」「故障原因」「故障の程度」等に区分して整理した。

②ゲート設備の新たな状態監視技術の調査

ゲート設備の点検・診断において標準的に使用されていない新たな状態監視技術を対象として、どの機器にどのような技術が適用できそうか、幅広く調査を行った。

③適用性の評価

前項にて幅広く収集した点検・診断技術について、適用できるゲート設備の構成機器を明確にし、実際箇ゲート設備にて試行を実施し、ゲート設備への適用性について評価した。

3. 調査概要

3.1 新たな診断方法の検討

平成27年度に調査結果より抽出した有用な診断技術を、関東地整管内のゲート設備（3施設）を対象として試行する。試行診断技術は、次の6技術とする。

- ①赤外線サーモグラフィ
- ②漏電測定器
- ③超音波厚さ計
- ④簡易潤滑油診断器
- ⑤グリス鉄粉濃度計
- ⑥高調波診断器

3.2 ゲート設備における「診断技術」のとりまとめ

ゲート設備を次の①から④の区分に分類し、前項の試行結果に基づく考察を行うとともに「診断技術」としての有効性をとりまとめる。

- ①扉体・戸当り：超音波厚さ計
- ②開閉装置：赤外線サーモグラフィ、漏電測定器、簡易潤滑油診断器、グリス鉄粉濃度計
高調波診断器
- ③制御機器（主に機側操作盤）：赤外線サーモグラフィ、漏電測定器、高調波診断器
- ④センサ類：漏電測定器

また、考察においては以下の事項を考慮する。

- ・機器に関する測定環境、使用方法等の特性
- ・判定基準・しきい値の考え方

4. 調査結果

本年度調査結果を次に示す。なお、本報告における施設名は仮称である。

4.1 新たな診断方法の検討

(1) 試行対象施設

比較的供用年数が高い下記の河川用ゲート設備3設備において試行を実施した。

- | | | |
|-----------|-------|---------------------------|
| 1) W47水門 | ：供用年数 | 45年 |
| | 設備形式 | 鋼製ローラゲート |
| | 扉体構造 | プレートガード構造 材質 SMA400A |
| | 寸法 | 純径間 20.000m × 有効高 10.300m |
| | 開閉装置 | ワイヤーロープウィンチ式 (2M2D) |
| | 電動機 | 常用電動機 (7.5kW 6P 50Hz) 2台 |
| 2) AJ59樋門 | ：供用年数 | 43年 |
| | 設備形式 | 鋼製ローラゲート |
| | 扉体構造 | プレートガード構造 材質 SS400 (推定) |
| | 寸法 | 純径間 8.000m × 有効高 4.500m |
| | 開閉装置 | ワイヤーロープウィンチ式 (1M2D) |

	電動機	常用電動機(5.5kW 6P 50Hz)1台
3) A J 8 極門	: 供用年数	25年
	設備形式	鋼製ローラゲート
	扉体構造	プレートガーダ構造 材質 SUS304
	寸法	純径間 5.400m × 有効高 4.100m
	開閉装置	ワイヤーロープウィンチ式 (1M2D)
	電動機	常用電動機(1.5kW 6P 50Hz)1台

(2) 現地試行

1) 赤外線サーモグラフィ

赤外線サーモグラフィは、測定箇所の画像範囲において、機器が発する赤外線を面的に捉え温度分布を可視化する技術である。機器の電氣的な異常あるいは摺動異常による部分的な発熱などを把握し、異常を検出することを目的として試行するものである。

試行において、ゲート開閉装置の電動機、切換装置、減速機の温度分布を測定した。



写真-1 赤外線サーモグラフィの例



写真-2 赤外線サーモグラフィ測定状況



写真-3 表面温度計測定状況

また赤外線サーモグラフィによる温度測定とあわせて、表面温度計（熱電対方式）による測定も行い、測定精度の確認を行った。サーモグラフィも2機種（以後「A」及び「B」と称する）を用いて、機種による違いについても確認を行った。「A」「B」双方の基本的な仕様は以下のとおりである。

【「A」及び「B」の特性】

- ・測定範囲：-20℃～350℃
- ・温度分解能：0.1℃以下
- ・測定精度：±2℃又は±2%

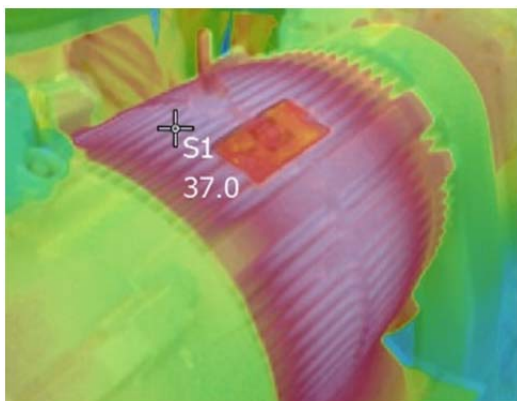


図-1 サーモグラフィによる測定結果（電動機）

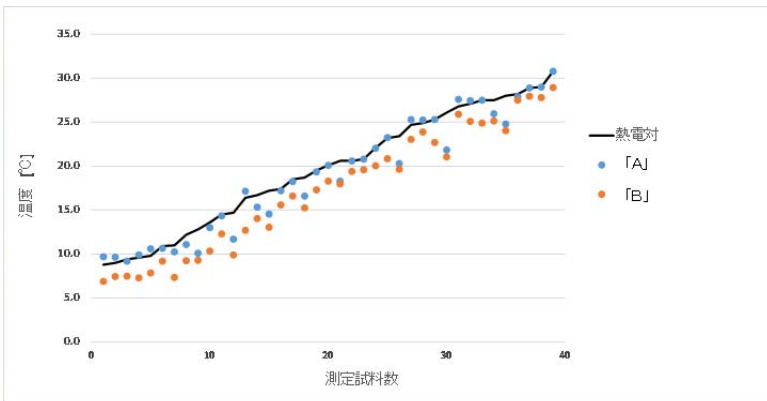


図-2 サーモグラフィ及び熱電対の計測温度差

平成27年度の調査より、被計測対象の放射率あるいは直射日光などの現場条件に精度が左右されることが分かっているため、各機種とも計測箇所を合わせ、また、機種規定の設定を行った上で実施した。試行結果の概要は次のとおりである。

- ①いずれの機種も温度分布を「面」で把握することができ、測定後の解析においては、任意点の温度も個別に把握することができた。
- ②表示色濃度設定を変更できるので、電動機など表面温度に対する管理基準値が設定されている場合、それに合わせて変更でき、全体的な色彩から漏れなく機器の温度分布を把握することができた。
- ③図-2に示すとおり、2機種の赤外線サーモグラフィによる測定温度結果と、接触式の表面温度計による測定温度結果を比較したところ、10～30℃の常温範囲においては、サーモグラフィによる計測値がほぼ2～3℃程度の範囲に収まった。

2) 漏洩電流測定

漏洩電流とは、電路の静電容量に起因する本来危険な成分ではない電流（以後「 I_{gc} 」という）と、抵抗成分によって発熱や発火など故障原因となる電流（以後「 I_{gr} 」という）のベクトル合力（以後「 I_o 」とする）である。漏電測定器は、漏洩電流「 I_o 」のうち、機器に影響を及ぼす抵抗漏洩電流成分「 I_{gr} 」のみを検出できる技術であり、ゲート機側操作盤から電動機につながるまでの電気系統における漏洩電流量を活線状態で測定することができる。携帯用計測器については複数社販売しているが、計測技術は各社競っている状況であり、特徴が異なる。

常用系設備のモニタリング技術において、抵抗漏洩電流成分「 I_{gr} 」の計測方法は主に I_{or} 方式と I_{gr} 方式に区分けできる。 I_{or} 方式は、ZCTによって計測する電流値と電源電圧の位相を考慮し計算で求めるのに対し、 I_{gr} 方式は、回路に低周波の電圧を印加し、当該電圧に基づく漏洩電流を検出する。一般的に、 I_{gr} 方式は精度が高いがモニタリング設備も高価であると言われている。しかし近年、回路に電圧を印加しなくても I_{gr} を I_o から演算で求めることができる携帯機器（以後「 C 」とする）が開発されているため、本試行においては、 I_{gr} 検出方式の「 C 」を主体として I_{or} 方式の携帯機器（以後「 D 」とする）を併用し、①ゲート設備の稼働時に絶縁状態を表す漏洩電流を検出できるか、②診断に採用できるか、を視点に評価を行うものとした。以下に試行機器の基本的な仕様を示す。

【「 C 」（ I_{gr} 方式）の特性】

- ・電源：単相2線100V及び3線200V、三相3線200V
（トランスを用いて400V計測可）
- ・漏洩電流量： I_o において最大300mA

【「 D 」（ I_{or} 方式）の特性】

- ・電源：単相2線及び3線、三相3線において最大500V
- ・漏洩電流量： I_o において最大400mA

基本的に、ゲート機側操作盤内の主幹遮断器直下、電動機配線用遮断器直下の2ヶ所において、「停止状態」「閉操作」「開操作」の各状態における漏洩電流を測定するものとした。



写真-4 漏電測定器の例

「C」
「D」



写真-5 漏電測定状況 1



写真-6 漏電測定状況 2

「C」を用いた測定結果を表-1～4に示す。

表-1 W47 水門左岸開閉装置系統 漏電測定結果

測定タイミング/ 測定箇所		測定箇所①	測定箇所②
		動力電源主幹直下 のケーブル	電動機用配線遮断器 のケーブル
停止状態(閉操作前)	Igr	0.00mA	-
	Io	0.00mA	
	絶縁抵抗	10MΩ	
閉操作時	Igr	1.66mA	0.18mA
	Io	1.53mA	1.63mA
	絶縁抵抗	0.117MΩ	1.093MΩ
開操作時	Igr	1.25mA	0.66mA
	Io	1.16mA	2.65mA
	絶縁抵抗	0.153MΩ	0.291MΩ
停止状態(開操作後)	Igr	0.00mA	-
	Io	0.00mA	
	絶縁抵抗	10MΩ	

表-2 W47 水門右岸開閉装置系統 漏電測定結果

測定タイミング/ 測定箇所		測定箇所①	測定箇所②
		動力電源主幹直下 のケーブル	電動機用配線遮断器 のケーブル
閉操作時	Igr	左岸側と共通	0.92mA
	Io		1.85mA
	絶縁抵抗		0.215MΩ
開操作時	Igr		0.62mA
	Io		1.52mA
	絶縁抵抗		0.304MΩ

表-3 AJ59 排水樋管 漏電測定結果

測定タイミング/ 測定箇所		測定箇所① 動力電源主幹直下 のケーブル ^(注1)	測定箇所② 電動機用配線用遮断器のケーブル	
			遮断器の上側	遮断器の下側
停止状態(閉操作前)	Igr	4.82mA	-	-
	Io	5.97mA		
	絶縁抵抗	0.04MΩ		
閉操作時	Igr	5.25mA	1.75mA	0.32mA
	Io	6.78mA	2.57mA	0.68mA
	絶縁抵抗	0.036MΩ	0.112MΩ	0.566MΩ
開操作時	Igr	5.02mA	1.75mA	0.00mA(0.03mA)
	Io	6.33mA	2.40mA	0.00mA(0.03mA)
	絶縁抵抗	0.039MΩ	0.113MΩ	10MΩ
停止状態(開操作後)	Igr	4.56mA	-	-
	Io	5.77mA		
	絶縁抵抗	0.043MΩ		

表－４ AJ8 排水樋管 No1 号扉体 漏電測定結果

測定タイミング/ 測定箇所	測定箇所① 動力電源主幹直下 のケーブル ^(注1)		測定箇所② 電動機用配線用遮断器直下 のケーブル ^(注2)
停止状態(開操作前)	Igr	0.40mA	-
	Io	0.60mA	
	絶縁抵抗	0.49MΩ	
閉操作時	Igr	0.34mA	0.40mA
	Io	0.55mA	0.76mA
	絶縁抵抗	0.572MΩ	0.47MΩ
開操作時	Igr	0.44mA	0.00mA(0.03mA以下)
	Io	0.62mA	0.00mA(0.03mA以下)
	絶縁抵抗	0.438MΩ	10MΩ
停止状態(閉操作後)	Igr	0.41mA	-
	Io	0.60mA	
	絶縁抵抗	0.479MΩ	

「C」による試行結果の概要は以下のとおりである。

- ①いずれのケースでも Io 計測用クランプが装着できれば、mA 単位での Io 及び Igr 計測が可能であった。
- ②ゲート停止状態においても、AJ59 及び AJ8 においては Io 及び Igr が計測されているので、主電動機以外の回路に起因する電流である可能性がある。
- ③開閉操作時における Igr 値は、供用年数が長い W47 及び AJ59 が AJ8 より大きい傾向が認められる。
- ④管理運転時には、開操作が閉操作より主回路の電流値が高くなるが、漏洩電流値は逆の場合もあり、相関は認められない。
- ⑤Igr > Io となるケースがある。(表－1 参照)
- ⑥計測時において、指示値はかなり敏感に変動する。

また、「D」と計測値を比較した結果を表－5～6に示す。「D」は、機種毎にクランプ径が決まっているため、現場によってはケーブルを挟めず計測できない箇所があった。

表－５ W47 水門左岸開閉装置系統 漏電測定結果 (「C」「D」比較)

測定タイミング/ 測定箇所	測定箇所① 動力電源主幹直下 のケーブル		測定箇所② 電動機用配線遮断器 のケーブル		
	「C」	「D」	「C」	「D」	
閉操作時	Igr/Ior	1.66mA	0.92mA	0.92mA	0.30mA
	Io	1.53mA	1.40mA	1.85mA	1.30mA
	絶縁抵抗	0.117MΩ	-	0.215MΩ	-
開操作時	Igr/Ior	1.25mA	1.10mA	0.62mA	0.75mA
	Io	1.16mA	1.85mA	1.52mA	1.53mA
	絶縁抵抗	0.153MΩ	-	0.304MΩ	-

表－６ AJ59 排水樋管 漏電測定結果 (「C」「D」比較)

測定タイミング/ 測定箇所	測定箇所① 動力電源主幹直下 のケーブル		測定箇所② 電動機用配線遮断器 のケーブル		
	「C」	「D」	「C」	「D」	
停止状態(開操作前)	Igr/Ior	4.36mA	3.84mA	-	-
	Io	5.46mA	4.78mA		
	絶縁抵抗	0.045MΩ	-		
閉操作時	Igr/Ior	4.82mA	3.57mA	0.31mA	1.21mA
	Io	5.80mA	4.76mA	0.64mA	1.84mA
	絶縁抵抗	0.040MΩ	-	0.679MΩ	-
開操作時	Igr/Ior	4.75mA	3.63mA	0.00mA	0.67mA
	Io	5.85mA	4.84mA	0.00mA	1.07mA
	絶縁抵抗	0.040MΩ	-	10MΩ	-
停止状態(閉操作後)	Igr/Ior	4.09mA	4.04mA	-	-
	Io	5.18mA	5.42mA		
	絶縁抵抗	0.048MΩ	-		

2 機種と比較については次のことが言える。

①Io の計測値は、概ね 1mA 程度以内の差異に収まっている。

②AJ59 においては、「D」においても閉操作時の方が開操作時より Io 及び Ior が大きい。

③「D」においては、全ての計測結果で $I_{or} < I_o$ である。

（「C」は、W47 水門の測定箇所①において $I_{gr} > I_o$ となっている）

3) 超音波厚さ計

超音波厚さ計は、検体に探触子から超音波を当て、境界面（塗膜と板、板と空気など）からの反射波を検出することで厚さを計測するものである。主に塗膜厚や鋼材の板厚を計測する機種が多いが、昨年度の技術調査により、1 台で塗膜厚と板厚を同時に計測できる機種が複数存在することが分かっている。このような機種では、塗膜厚を計測できるだけでなく、塗膜を傷つけずに板厚の計測ができるメリットがある。ゲート設備の主要構造体の板厚が分かれば、設計値と比較した強度評価が可能となり、また塗膜厚がわかれば、目視状況と合わせて塗り替え時期の評価ができる。

本年度は、下記の仕様を有する超音波厚さ計（以後「E」とする）を用いてゲート設備の扉体主桁の測定を行い、適用性を評価した。

【「E」の特性】

- ・探触子：二振動子型（周波数 5MHz）
- ・測定範囲：1.0 mm～37.0 mm
- ・分解能：0.01 mm
- ・測定精度：板厚 ± 0.05 mm（当該機器校正後実績値）
塗膜厚 ± 0.025 mm（メーカー公称値）
- ・使用温度：-10℃～50℃



写真-7 超音波厚さ計の例



写真-8 板厚測定状況

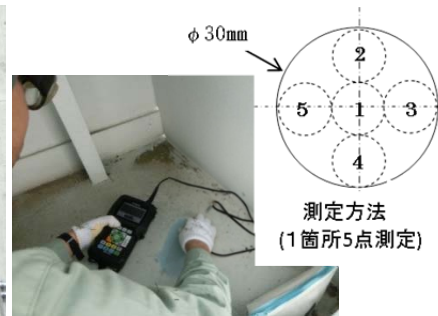


写真-9 板厚測定状況

試行では、ゲート扉体主桁のウェブとフランジの板厚を複数点測定した。各測定箇所においては、 $\phi 30$ mm の範囲で 5 点実測しその平均値を求めた。3 施設を代表して AJ59 の結果を表-7 に示す。

「E」による計測結果は、比較すべき正しい値が不明であるためそのまま検証を行うことは難しい。よって、別途、実績のある類似技術である超音波厚さ計（塗膜厚+板厚の総厚を計測するもので精度は板厚の $\pm(5\%+0.01)$ mm、以後「F」とする）および電磁・渦電流兼用膜厚計（精度は塗膜厚の $\pm 2\%$ 、以後「G」とする）で塗膜厚を計測し、その差（母材の板厚を示す）も比較した。その結果を表-8 に示す。本検証においても、各測点において 5 点実測しており、その平均値を「F」及び「G」欄に記載している。検証値となる「E」欄については、表-7 平均

値欄から引用した数値である。また、「測定精度最大幅」は、使用した機器の測定精度を足し合わせた数値であり、理論的には「G」の計測値と、「F」及び「G」を使用して算出した計測値の差はこの値を超えないことになる。

表－7 AJ59 樋管 板厚・塗膜厚測定結果

測定点		設計厚	実測値					平均値	減少量	腐食代	
			①	②	③	④	⑤				
主桁	左岸ウェブ	母材板厚(mm)	9.00	8.93	8.97	8.75	9.05	8.75	8.89	0.11	0.50
		塗膜厚さ(mm)	0.355	0.18	0.13	0.21	0.18	0.16	0.17	0.18	—
	中央ウェブ	母材板厚(mm)	9.00	8.75	8.75	8.74	8.73	8.76	8.75	0.25	0.50
		塗膜厚さ(mm)	0.355	0.16	0.17	0.16	0.16	0.18	0.17	0.19	—
	右岸ウェブ	母材板厚(mm)	9.00	8.93	8.93	8.62	8.92	8.77	8.83	0.17	0.50
		塗膜厚さ(mm)	0.355	0.15	0.16	0.25	0.15	0.20	0.18	0.17	—
	左岸フランジ	母材板厚(mm)	25.00	24.99	24.69	24.63	24.66	25.00	24.79	0.21	0.50
		塗膜厚さ(mm)	0.355	0.16	0.18	0.17	0.28	0.21	0.20	0.16	—
	中央フランジ	母材板厚(mm)	25.00	25.10	25.17	24.76	25.12	24.72	24.97	0.03	0.50
		塗膜厚さ(mm)	0.355	0.35	0.24	0.18	0.17	0.16	0.22	0.14	—
	右岸フランジ	母材板厚(mm)	25.00	24.74	24.73	24.75	24.73	24.72	24.73	0.27	0.50
		塗膜厚さ(mm)	0.355	0.13	0.17	0.19	0.18	0.16	0.17	0.19	—

表－8 AJ59 樋管 試行結果比較

測定点		設計厚	「E」	「F」及び「G」	差分	測定精度最大幅	判定	
主桁	下段左岸ウェブ	母材板厚(mm)	9.00	8.89	8.80	0.09	0.10	OK
		塗膜厚さ(mm)	0.355	0.17	0.22	-0.05	0.03	NG
	下段中央ウェブ	母材板厚(mm)	9.00	8.75	8.83	-0.09	0.10	OK
		塗膜厚さ(mm)	0.355	0.17	0.22	-0.06	0.03	NG
	下段右岸ウェブ	母材板厚(mm)	9.00	8.83	8.98	-0.15	0.10	NG
		塗膜厚さ(mm)	0.355	0.18	0.24	-0.06	0.03	NG
	下段左岸フランジ	母材板厚(mm)	25.00	24.79	24.98	-0.18	0.19	OK
		塗膜厚さ(mm)	0.355	0.20	0.24	-0.04	0.03	NG
	下段中央フランジ	母材板厚(mm)	25.00	24.97	24.97	0.00	0.19	OK
		塗膜厚さ(mm)	0.355	0.22	0.18	0.04	0.03	NG
	下段右岸フランジ	母材板厚(mm)	25.00	24.73	25.08	-0.34	0.19	NG
		塗膜厚さ(mm)	0.355	0.17	0.24	-0.07	0.03	NG

表－7より、「E」の計測結果については、以下のとおりである。なお、塗装の設計厚は、基礎データがないため、「機械工事塗装要領（案）H22年4月」に基づいて推定している。

①板厚計測値は、各箇所における5点のデータを比較すると、0.45mm以内の階差に収まっている。階差の最小値は、0.03mmであり、余裕厚の0.5mmよりいずれも小さい。

②ウェブとフランジの板厚比は2.5倍以上あるが、計測値のばらつきとの因果関係は明確には

認められない。

③塗膜厚計測値は、各箇所における5点のデータを比較すると、0.02～0.19 mmの階差がある。これは、想定した設計厚 0.355 mmの 5.6～53.5%に該当し、小さいとは言えない。

また、表－8における「F」又は「G」との比較結果は次のとおりである。

①板厚を計測した6箇所のうち、4箇所は理論上の誤差範囲に収まったが、2箇所は超過している。（超過した場合は判定欄に「NG」、範囲内の場合は「OK」を記載）

最も大きく差が出た箇所は、下段右岸側フランジ部で、「E」が0.34 mm薄くなっている。

②塗膜厚については、6箇所のうち5箇所において、膜厚計測に特化した機能を有する「G」の計測値に比べ「E」の計測値が薄くなっており、最大0.07 mmの差がある。その他の施設における塗膜厚計測値においても同様の傾向であった。

これらのデータを基に、ゲート扉体の診断に対する適用性を技術特性に鑑みて考察することとした。

4) 簡易潤滑油診断器

潤滑油の分析技術は既に確立しており、待機系の設備管理においても動粘度、水分、酸価、アルカリ価などの計測を行っている事例は多いが、設備診断を目的としたものではない。今回使用した簡易潤滑油診断器は、採油をしなくても潤滑油給油口などからセンサを挿入することによって潤滑油の透過度を検出するものである。測定原理は、光の透過度から潤滑油の汚濁度を測定するものである。測定方法は、潤滑油にプローブを浸し、プローブの発光部より投射された光が油中を進み、発光部と対面する鏡で反射して受光部に入る光の透過度を測定し、潤滑油の汚濁度を判断するものである。判定基準は計測器メーカーが独自に定めており表－9に示す。透過度が大きいほど汚濁度が大きいことを示している。

表－9 簡易潤滑油診断器判定基準

判定	判定基準（透過度）
GOOD	0～29
CAUTION	30～49
BAD	50以上

本技術は、直接的に設備診断を行う技術ではないが、不純物が機械要素の劣化に起因することもあるため、同潤滑油の分析フェログラフィも実施し、双方の結果について比較を行った。



写真－10 簡易潤滑油診断器の例



写真－11 潤滑油診断状況



写真－12 潤滑油診断状況

試行では、ゲート開閉装置の減速機の潤滑油を診断した。対象機器の給油口部分に診断器プローブを差込み診断した。3施設の測定結果を表－10に示す。

表－１０ 簡易潤滑油診断器による診断結果

対象設備		運転前	運転後
W47 水門	右岸	BAD (59)	GOOD (21)
	左岸	GOOD (19)	GOOD (22)
AJ59 樋管		BAD (56)	BAD (66)
AJ8 樋管		GOOD (20)	BAD (51)



写真－１３ フェログラフィ用に採油した潤滑油

W47 水門右岸の運転前では「BAD」であったが、運転後「GOOD」に変化している。逆に AJ8 樋管では、運転前に「GOOD」であったものが運転後は「BAD」に変化した。写真－１３は、フェログラフィに供するために採油した 3 施設の潤滑油である。計測した透過度と潤滑油の目視状況を比較すると、運転後のデータと定性的相関がある。

運転後に「BAD」評価となった AJ59 樋管と AJ8 樋管の潤滑油について、分析フェログラフィによって評価した結果、双方とも正常摩耗粒子が多く含まれてはいるが、軸受のフレーキングやギアのピッチングで発生するといわれる $15\mu\text{m}$ 以上のシビア粒子は確認されず、「異常なし」と判定された。また「GOOD」と判定された W47 水門の分析フェログラフィ結果も異常はなかった。3 施設の診断においては、簡易潤滑油診断の汚損度合いと分析フェログラフィの結果に直接的な関係は見られなかった。

5) グリス鉄粉濃度計

ドラム部などの低速回転ギア・ピニオンはグリスで潤滑されているが、ピッチングなどの異常摩耗による鉄粉がグリスに含まれる可能性がある。グリス鉄粉濃度計はグリス内の鉄粉濃度を計測するものであり、産業用機械の維持管理では一般化している。測定手法の異なる複数の機種が販売されているが、試行に適用したグリス鉄粉濃度計は、鉄粉を含むグリス中のコイルリアクタンスが変化することに着目し、周波数を検出することで鉄粉濃度を測定するタイプである。採取した少量のグリスのサンプルを測定機器に挿入し、センサ部とグリスが接触することにより、簡易にグリスの鉄粉濃度を測定する。

本技術においては、軸受に関して計測器メーカーの定める判定基準があり、「1.0wt%以上」で「注意」、「1.5wt%以上」で「保全推奨」とされている。



写真-14 グリス鉄粉濃度計の例



写真-15 グリス鉄粉濃度診断状況



写真-16 診断対象ドラムギア

試行では、ゲート開閉装置のドラムギア、中間ギア等の開放歯車のグリスを診断した。

表-11 鉄粉濃度診断結果

対象設備	左岸 (ドラムギア)	左岸 (中間ギア)	右岸 (ドラムギア)
W47 水門	経過観察 (0.5wt%)	経過観察 (0.4wt%)	経過観察 (0.3wt%)
AJ59 樋管	経過観察 (0.8wt%)	—	経過観察 (0.8wt%)
AJ8 樋管	詳細診断を検討 (1.9wt%)	—	詳細診断を検討 (2.7wt%)

3施設のうちでは、AJ8 樋管のグリスの鉄粉濃度がメーカー判定基準の「保全推奨」段階にあるが、対象が軸受ではなくギアであることに鑑み、「詳細診断を検討」と標記した。

6) 高調波診断器

高調波診断器は、電流より発生する高調波を測定することで、測定する電源ケーブルにつながる機器（主に電動機）の電氣的不具合および負荷側の機械的不具合を診断するものである。高調波は電流の基本周波数の整数倍の周波数であり、設備機器に劣化や異常が起こると熱・音・振動と同時に電流に高調波が発生する。この高調波を測定・数値化し分析することで、設備機器の異常である絶縁劣化や異常振動、軸受損傷等を非接触かつ活線状態で検知・診断することが可能な技術である。過去の実績を蓄積し分析・検証することから確立された経験的な診断技術であり、専門技術者による計測と解析が必要となる。



写真-17 高調波診断器

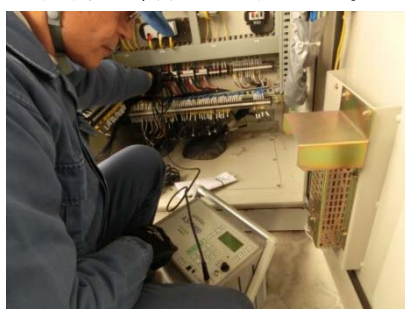


写真-18 高調波診断状況



写真-19 高調波診断状況

試行では、ゲート運転時に診断器センサを機側操作盤内の主電動機電源ケーブルに近接させることで、当該電源ケーブルとつながっている電動機の状態を診断した。

当該技術の判定基準は、実績に基づく帰納的指標であるためその考え方を表－12に示す。判定指標は、ストレス診断と総合的な劣化診断（知的劣化診断）であり、各々A～Cの5段階で判定する。ストレス診断は、高調波の出方などから劣化率を求めた判定であり、劣化診断は、劣化率に合わせて関連する不具合事象を総合的に考慮した判定指標である。従って、ストレス診断結果と劣化診断結果（知的劣化診断）は一致するとは限らない。

表－12 高調波診断の判定基準

判定レベル	判定内容		劣化率
A	ストレス診断：正常	劣化していない	40%以下
	劣化診断：正常		
B1	ストレス診断：軽度なストレス	約1年は運転に支障なし	40~60%
	劣化診断：軽度な劣化		
B2	ストレス診断：中度なストレス	約6ヶ月は運転に支障はないが、傾向管理が必要	60~80%
	劣化診断：中度な劣化		
B3	ストレス診断：重度なストレス	約3ヶ月の運転は可能だが、部品交換や修理の準備が必要	80~90%
	劣化診断：重度な劣化		
C	ストレス診断：不良	異常状態	90%以上
	劣化診断：不良		

診断結果を表－13～14に示す。

表－13 ストレス診断による判定結果

施設名 電動機の場所 異常箇所又は種別 操作状態	W47水門				AJ59樋管		AJ8樋管	
	左岸側		右岸側		—		—	
	閉	開	閉	開	閉	開	閉	開
回転軸・軸受・据付	B1	B1	B1	B1	A	A	A	A
巻き線の絶縁、振動	B1	B1	A	B1	B1	A	B1	A
軸受・ハウジングの損傷	B1	B1	B1	B1	A	A	A	A
エアギャップ不均一・振動	B1	B1	A	B1	B2	B1	B2	B1
継手異常、軸アンバランス（負荷側）	B1	B1	B1	B1	A	B2	B1	A
軸受損傷、異物付着（負荷側）	B1	B1	B3	B1	B1	B1	B1	B1
回転軸異常、バルブ摩耗（負荷側）	B1	B1	B3	B1	A	A	A	B1
歯車・ベルト系損傷（負荷側）	B1	B1	B3	B1	A	A	A	B1

表－14 劣化診断（知的劣化診断）による判定結果

施設名 電動機の場所 異常箇所又は種別 操作状態	W47水門				AJ59樋管		AJ8樋管	
	左岸側		右岸側		—		—	
	閉	開	閉	開	閉	開	閉	開
回転軸・軸受・据付	B2	B1	B2	B1	B1	A	B1	B1
巻き線の絶縁、振動	B1	B1	A	B1	B2	A	B2	A
軸受・ハウジングの損傷	B2	B2	B1	B2	B2	B1	B1	B3
エアギャップ不均一・振動	B1	B2	A	B2	B3	B3	B3	B3
継手異常、軸アンバランス（負荷側）	B2	B1	B1	B1	A	B2	B1	A
軸受損傷、異物付着（負荷側）	B1	B1	B3	B1	B1	B1	B1	B1
回転軸異常、バルブ摩耗（負荷側）	B1	B1	B3	B1	A	B1	B1	B1
歯車・ベルト系損傷（負荷側）	B1	B1	B2	B1	A	B1	B1	B1

今回の試行では、各設備にて B2 及び B3 の判定箇所があった。劣化診断においては、AJ59 樋管と AJ8 樋管において、開操作、閉操作の双方で「エアギャップ不均一・振動」項目が B3 判定となっており、診断実施業者より「回転子と固定子間及び巻線等に埃等の堆積が考えられるため、エアブロー等によるクリーニングを推奨する」とのコメントを得ている。

4. 2 診断技術のマニュアル（素案）作成

(1) 診断技術のマニュアル（素案）作成

試行を実施した 6 技術（①赤外線サーモグラフィ、②漏電測定器、③超音波厚さ計、④簡易潤滑油診断器、⑤グリス鉄粉濃度計、⑥高調波診断器）につき、将来のマニュアル及びガイドライン類の策定を念頭においた診断技術の整理・とりまとめを行い、診断技術のマニュアル(素案)を作成した。

マニュアル（素案）は、発注者より提示された下記の骨子（項目立て）に準じて、技術毎に整理・取りまとめを行った。

- ・総則（目的、適用範囲、測定・診断フロー）
- ・当該技術による診断
- ・測定の対象
- ・測定（測定箇所、測定のタイミング）
- ・測定条件（性能要件、測定の留意事項）
- ・判定基準
- ・報告書
- ・技術的課題

(2) 診断技術に関するヒアリング

診断技術を現場に適用していくにあたり、河川用ゲート設備点検・整備・更新マニュアル(案)等の「精密診断」の考え方を踏まえた診断技術の選定とその標準化が重要となるため、実際に現場で精密診断を実施すると想定される点検業者及びゲートメーカ（10 社）に対し、目的別にヒアリング（アンケート調査）を実施した。

第 1 回アンケートでは、診断技術のニーズに関する事項と試行した 6 技術の適用性についてヒアリングを実施した。

試行 6 技術について「精密診断として発注仕様に含まれた場合、対応は可能か？」という問いに対し以下の回答が得られた。

表－15 各診断技術が発注仕様に含まれた場合の対応の可否

診断技術	対応可能	条件によっては対応可能	対応不可	判らない
赤外線サーモグラフィ	0	7	1	2
漏電測定	1	6	0	3
超音波厚さ計	6	3	0	1
簡易潤滑油診断	1	6	0	2
グリス鉄粉濃度計	0	6	0	3
高調波診断	2	6	0	2

- ・超音波厚さ計を除く 5 技術については、「条件によっては対応可能」とする回答が多くを占めた。また、超音波厚さ計については「対応可能」とする回答が多かった。
- ・超音波厚さ計が「対応可能」とされたのは、既の実施している企業が多いことが理由として挙げられる。

各診断技術の「技術の位置付け（点検技術／診断補助技術／診断技術）」についての問いに対しては、以下の回答が得られた。

表－１６ 各診断技術の「技術の位置付け」

診断技術	点検技術	診断補助技術	診断技術
赤外線サーモグラフィ	0	8	0
漏電測定	1	5	4
超音波厚さ計	2	5	2
簡易潤滑油診断	3	5	1
グリス鉄粉濃度計	4	4	0
高調波診断	0	2	7

- ・高調波診断を除く 5 技術については、「診断補助技術」とする回答が多くを占めた。高調波診断では、専門検査機関が結果に基づいて不具合のある箇所を特定するのに対し、その他の技術では、どの機器がどの程度劣化しているのか判断指標が確定していないことに起因すると考えられる。
- ・「診断補助技術」とされる技術の中でも、「簡易潤滑油診断」及び「グリス鉄粉濃度計」については、「点検技術」との回答数と拮抗しており、診断技術よりも簡易で補助的な面での期待が大きいと考えられる。

第 2 回アンケートでは、試行結果に基づく判定指標や将来のマニュアル化に関する考え方を示した上で再度意見聴取を実施した。

各種診断技術について、設備管理者が業務委託することを想定した場合の対応の可否について、以下の回答を得た。※()内の数字は第 1 回アンケート結果

診断技術	対応可能	ある程度対応可能	対応不可
赤外線サーモグラフィ	3 (0)	7 (7)	0 (1)
漏電測定	5 (1)	5 (6)	0 (0)
超音波厚さ計	6 (6)	4 (3)	0 (0)
簡易潤滑油診断	4 (1)	5 (6)	1 (0)
グリス鉄粉濃度計	2 (0)	7 (6)	1 (0)
高調波診断	2 (2)	7 (6)	1 (0)

表－１７ 各診断技術を業務委託する場合の対応可否

- ・第 1 回同様、超音波厚さ計及び漏電測定を除く 4 技術については、「ある程度は対応可能」とする回答が多くを占めた。また、超音波厚さ計については「対応可能」とする回答が多かった。
- ・漏電測定に関しては、「対応可能」及び「ある程度は対応可能」とする回答が同数であった。第 1 回アンケートでは、漏電測定を「対応可能」とする回答数は 1 件のみだったが、

マニュアル（素案）を作成し、測定方法等を具体化したことにより、対応可能とする回答が増えたものと考えられる。

5. 考察

5. 1 各技術の評価

(1) 赤外線サーモグラフィ

原理的に日照の影響を受けるため、操作室環境及び計測時の天候に合わせて計測器のキャリブレーションが精度確保のために必要である。図-2に示すとおり、計測値は数度の誤差が起こりえるため、表面温度分布の評価及び傾向管理（短期的には、停止状態から運転後に至るまでの温度変化、長期的には年点検時など同条件における温度分布の変化）を主体とした診断が有効であると考えられる。高温となる箇所を特定できることから、具体的な劣化箇所の特定も可能であり、振動測定等の他の診断結果とつきあわせることでより具体的な診断を行っていくべきである。

特にゲート設備においては、電動機及び減速機が発熱対象として想定される。現状では、メーカーによる温度の管理基準値以外に評価指標がないため、これらに異常傾向が発生したときの温度分布の特徴について試験等を通じて今後把握する必要がある。試験の実施にあたっては、試験方法について電動機メーカーあるいは診断に関する専門技術者と意見交換を行うとともに、結果に関する評価を実施して判断指標を定めていくべきであると考えられる。

(2) 漏電測定器

漏洩電流については、「電気設備の技術基準の解釈」（平成28年 経済産業省発行）第58条解説において、技術基準に定める低圧電路の絶縁抵抗値 $0.1\text{M}\Omega$ の根拠として「低圧電路に 1mA 程度の漏れ電流（対地電圧 100V 回路において絶縁抵抗値 $0.1\text{M}\Omega$ は漏れ電流値 1mA に相当する。）があっても人体に対する感電の危険はなく、この程度の漏れ電流では、仮にこれが1箇所に集中したとしても過去の経験に照らして火災の発生のおそれはない」という記載があるだけである。しかし、絶縁抵抗測定は非通電状態で行われるものであり、また、漏洩電流の測定においては、通電状態で行ううえ測定方法もいろいろなものが開発されている段階であることなどから、 1mA という値を状態監視保全のしきい値とすることは慎重に検討しなければならない。

計測技術「C」の専門技術者に、漏洩電流値（ I_{gr} 値）が 1mA を超える場合の機器の状態について確認したところ、次のような回答を得た。

- ・ I_{gr} 値が 1mA を超えるような漏洩電流が対象の機器から検出されたとしても、早急に取替・更新が必要な状態（機器が故障している状態や著しく劣化した状態）とは断言できない
- ・ 過去の実績では、 10mA を超える漏洩電流値が検出された場合に、機器が故障・著しく劣化していることが多い

以上より、当面本技術を適用する場合の暫定指標として、次のとおり考え方をまとめた。

表－１８ 暫定指標の考え方

漏洩電流 (Igr) の測定値	判断内容	参考基準
$10\text{mA} < \text{Igr} (\text{Ior})$	保全措置要す (×又は△1)	機器メーカー実績
$1\text{mA} < \text{Igr} (\text{Ior}) \leq 10\text{mA}$	機器が劣化傾向にある (△2又は△3)	機器メーカー実績
$\text{Igr} (\text{Ior}) \leq 1\text{mA}$	健全な状態 (○)	電気設備技術基準

「C」の Igr と「D」の Ior では計測原理が異なるため、特に 3 相 3 線式負荷及び電路の評価では一致しない可能性が高い。よって、Ior については参考値としている。「C」においては、静電容量による見かけの漏洩電流成分を抵抗成分による漏洩電流 Igr の算出に使用していないため、W47 水門の計測値で見られたように $\text{Igr} > \text{Io}$ というケースがあり得る。表－１８に示す暫定指標は、メーカー見解を参考として設定したものであるため、継続的に漏洩電流の測定を行う中で、計測対象となる機器の整備や修繕結果などと照らし合わせながら、閾値の改訂を行って精度を高めていく必要がある。

赤外線サーモグラフィと同様に漏電計測技術においても、電動機を対象として劣化要因と漏洩電流の関係を試験等で把握することができれば診断の有効性がさらに明確になる。

本技術適用の要件としては、基本的な電気機器への技術的理解がまず必要である。さらに「C」については、電圧位相取得時の感電や短絡を避けなければならない。しかし、測定方法そのものは非常に簡易であり、現場で即時かつ通電状態で機器の状態を確認できるという観点からも有用な技術であると考えられる。

(3) 超音波厚さ計

超音波厚さ計は、原理的に計測対象物の音速によって測定値が異なる。母材となる SS 材及びオーステナイト系ステンレス材については音速の指標があるが、塗膜については、下塗りから上塗りまで材料が様々であり、なおかつオーソライズされた音速データがない。従って、母材の鋼材部分については、音速の設定により計測精度が高まるが、塗膜厚の精度を高めるためには、各塗膜に対するキャリブレーションが必要となる。

具体的には、電磁式あるいは渦電流式の膜厚計を用いて一部の塗装で数値を合わせるように超音波式厚さ計の音速設定を行う等の方法がある。同じ塗装系の扉体を計測する場合は、塗膜にて 1 回キャリブレーションを行えばそのまま各所の測定を実施できる。

ただし、塗膜の劣化評価は目視による判定が重要であり、塗膜厚は診断の参考として考慮すべき数値である。本技術の優位性は、塗膜を剥離せずに母材の板厚を計測できることにある。

また、本試行結果より、計測箇所が塗膜に不陸があるとプローブが安定して密着せず計測値が全般的に安定しにくかった。しかし、母材の板厚を強度評価に用いることを想定すれば、余裕厚以下の精度があれば十分であり、測定結果と設計値との対比において減肉量が余裕厚を下回る箇所が多数確認された場合、施設設計時の技術基準と現行技術基準の相違にも配慮して強度計算を実施し、扉体の健全度を評価すべきであると考えられる。

超音波を用いた板厚測定は、従来から実施されている診断手法でもあり、複数社が塗膜を含めた厚さ計測を可能とする機種を販売している。塗膜厚に関する一般的な配慮事項が明確になれば適用できる機種も選定できると考える。

(4) 潤滑油及びグリスによる診断

1) 簡易潤滑油診断器

試行結果としては、診断基準がメーカー独自の基準であり、潤滑油の正常・異常を簡易的に判定できるが、本技術単独では機器の診断技術として活用することは難しい。メーカー等の意見にあるように、本機器の実際の運用としては、点検技術あるいは診断補助技術として位置付け、①潤滑油の定期的な性状確認および傾向管理による潤滑油の更油時期の予測、②他診断技術との組み合わせによる診断、に活用できると考えられる

AJ59 樋管及び AJ8 樋管では、サイクロ減速機内での異常摩耗等機械的な不具合は発生していないものの、潤滑油の劣化が進行している可能性が高いため、更油を行うことで機器の長寿命化に資することができ、また分析フェログラフィなどを実施する場合の信頼性を向上させることができる。なお、計測タイミングは、フェログラフィにおける採油と同様に、潤滑油が十分に攪拌され不純物が均一化される機器の運転後に実施することが適切である。

2) グリス鉄粉濃度計

本技術も点検技術あるいは診断補助技術として位置付けることが得策であると考えられる。本技術によって、正常状態にあるグリスの鉄粉濃度を測定しておき、定期的に測定した鉄粉濃度を時系列で傾向管理することで、他の傾向管理項目と合わせて必要となる保全タイミングを判断するための補助的な指標となりうる。

本試行において、「詳細診断を検討する」と判定した AJ8 樋管（2号門扉）のドラムギアについて、近年のバックラッシの傾向を確認した。その結果を図-3に示す。

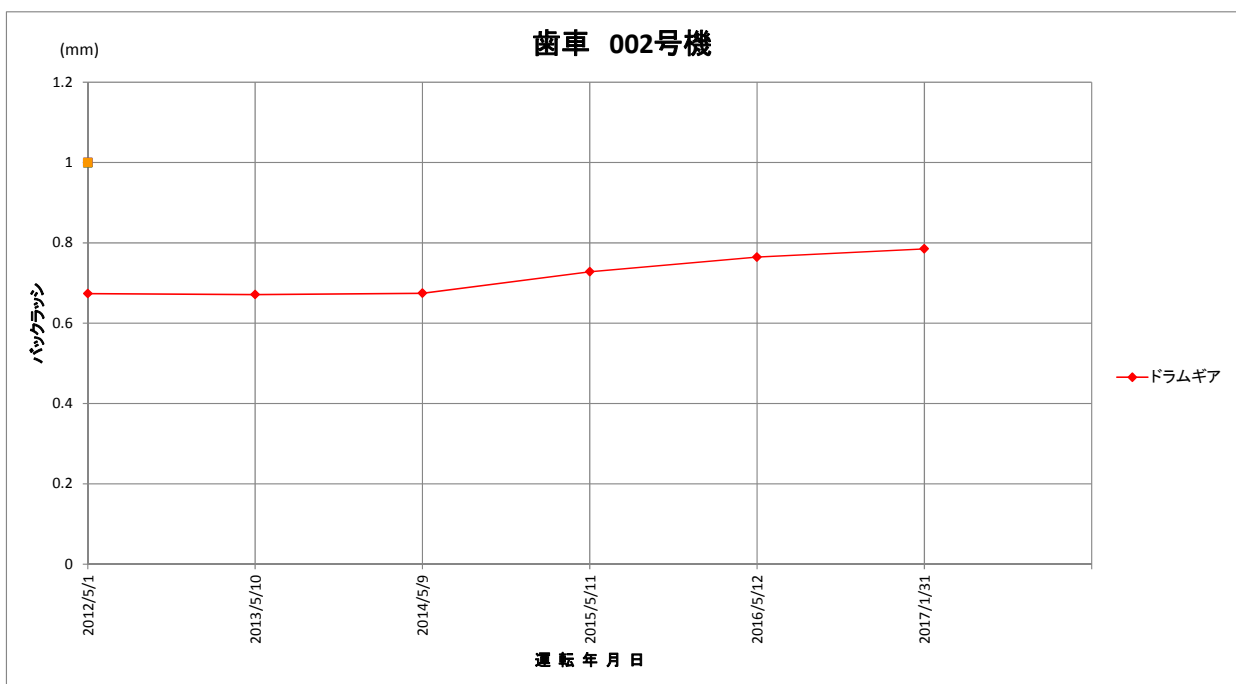


図-3 AJ8 樋管 2号門扉のドラムギアバックラッシ

この3年間で約0.1mmバックラッシが増加している。この事例では、今後測定面を定めたバックラッシの傾向管理を継続するとともに、年点検時の歯面グリス交換において歯面全般に異常がないか十分に確認していく必要がある。

近年の故障実績において、短時間のうちにピニオンギアが摩耗して使用不能となった事例がある。一般的に、ドラムギアに対してピニオンギアは硬度が高い材質を採用することとされて

いるが、潤滑不良が発生すれば、短時間のうちに歯面は損傷を受ける。歯面や軸受など鉄鋼部品が摩耗すれば鉄粉がグリスに混入する可能性は高いことから、本技術を採用することは大きな意味があると考えられる。

(5) 高調波診断器

高調波診断は専門検査機関に実施を依頼する必要があるが、比較的簡易に実施可能で、かつ短期間で様々な箇所の不具合検知が可能であるため、河川用ゲートへの適用は可能であり、予防保全として有効な技術であると考えられる。ただし、専門検査機関にヒアリングを行ったところ、現状の劣化診断結果にて提示している故障対策は、様々な機器を想定した最大公約数のものであり、基本的には提示した故障対策から設備状況等を考慮した対策をユーザーに判断・選択してもらうことを想定しているとのことである。このため、ゲート設備に特化した原因及び故障対策項目の絞り込みを行うためには、予め診断時に対策項目等の絞り込みを行う等の対応が必要であり、これにはゲート設備に対する知見が必要となる。

本技術の試行にあわせて振動計測も実施し、高調波診断技術と振動の診断結果について検証を実施した。振動診断では、高調波診断で診断された「エアギャップ不均一」が生じた場合、電源周波数（関東圏は50Hz）の2倍、電源周波数とスロット数の積などの周波数成分が顕著に表れるといわれている。今回試行を行った3設備の電動機の振動解析結果を図-4に示す。

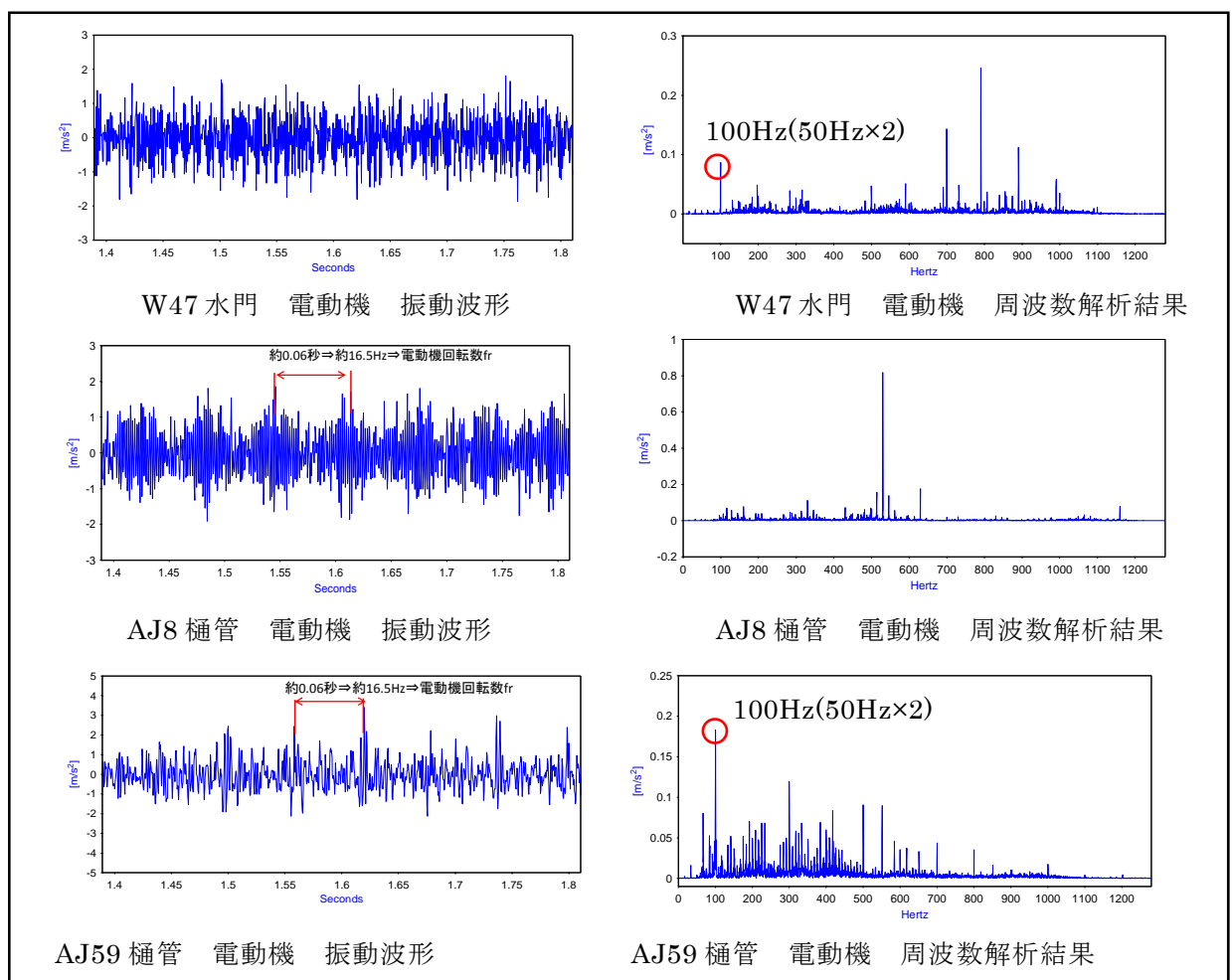


図-4 電動機 振動波形及び周波数解析結果

W47 水門や AJ59 樋管では、100Hz の周波数が顕著に発生し、その高調波も認められることから、「エアギャップ不均一」と同様の見解を示すことができるが、AJ8 樋管については、100Hz の周波数が発生しておらず、明確な結果を得ることができなかった。ただし、AJ8 樋管の振動波形においては、電動機回転数と同じ周期で振幅が脈動しており、回転子側を含め何らかの異常シグナルであることも考えられる。また、AJ59 樋管の振動波形では、電動機の回転数に合わせて周期的なピークを認めることができることから、回転軸の異常シグナルである可能性もある。高調波診断結果とこのような一般的振動解析結果との比較は、実績の積み上げという点においても重要であると考えられる。

高調波診断は、実績に基づく帰納的な診断手法であり、電動機の負荷側も判定対象となることから、老朽化が進む設備において劣化している箇所を抽出するスクリーニングに適した技術であり、異常傾向が認められた要素について振動法や漏電計測などによる精密診断を採用するなどの活用方法が考えられる。

5. 2 今後の課題

本業務にて作成した診断マニュアル（素案）については、点検業者及びゲートメーカー等からの意見聴取結果も考え合せ、精密診断として技術的な知見をブラッシュアップするとともに、現場における適用方法および評価・判断手法を明確にしていく必要がある。

以下に今後の課題について要点を示す。

1) 不具合（故障）事象に対する判断指標の明確化

本年度試行した技術のうち、赤外線サーモグラフィと漏電測定については、定量的計測は可能であるが判定指標が明確ではないため、「診断技術」として認知されにくいことがわかった。

これまで全く現場で適用実績がなかったことから、判断指標については長期的課題となるが、短期的に実現可能な方法として、開閉装置の主要機器である電動機を対象とし、不具合事象を模擬的に再現できる装置を用いた試験を行い、正常時と異常時の違いを明確にするなどの方法が考えられる。

また、現場においては、老朽化した施設を主体として試行を継続し、診断データを蓄積していく。

2) 点検結果に基づく診断実施フローの検討

供用年数及び年点検・月点検等の結果（定性的評価、計測データの傾向管理等）に基づく精密診断実施のフロー、対象機器に対する適用技術の選定を明確に行えるよう検討を進める。

3) 診断マニュアル（案）の作成

前 2 項の取組を行った上で、点検業者等の専門技術者が実施することのできる内容のマニュアル（案）を作成する必要がある。

担当課 施設技術課