

河川用ゲートにおける腐食環境評価

EVALUATION OF CORROSIVE ENVIRONMENT FOR RIVER GATES

貝沼 重信 *・井手 隆幸 **・木村 裕幸 **・加藤 禎洋 ***

Shigenobu KAINUMA, Takayuki IDE, Hiroyuki KIMURA and Sadahiro KATO

At present, there is strong need to reduce infrastructure investment in Japan. Since huge numbers of gates have been installed in rivers in Japan, life extension and rationalization of maintenance for the gate equipment are issues for the reduction of social capital investment.

Corrosion is the main factor of deterioration of gate equipment because of its steel structure. In order to achieve the rationalization of maintenance it is essential to grasp the corrosion status of the gate equipment.

In this paper, we report on survey of actual conditions of corrosion of the river gate equipment, and examine proposals to rationalize maintenance based on the survey results.

Keywords : water gate, gate, aging, corrosion, maintenance, diagnosis technology, atmospheric exposure test, atmospheric corrosion monitor sensor, ACM- type corrosion sensor, mean corrosion depth, monitoring steel plate, steel plate

1. はじめに

河川用ゲートにおいて、ゲート扉体の劣化の大きな要因は腐食であり、維持管理、特に扉体等の鋼構造物の保全方策としては、塗替塗装等が有効であり、局部的な劣化が見られる場合は補修塗装のような部位ごとの対策も行っているものの、健全な部位を含めた当該鋼構造物全体を一律で塗替える事例が多く見られる。

また維持管理のみならず鋼構造物の新設・更新時における防食塗装仕様や構造部材板厚等の設計仕様は、当該鋼構造物の設置環境を考慮するものの、部位ごとの腐食環境に差異がある点は考慮せず、当該鋼構造物全体に対して想定される最悪条件として考慮している。

このことは、安全性を確保する上では有効だが、当該鋼構造物のうち腐食環境が穏和な部位については過剰な設計となり、当該鋼構造物の維持管理コストの増大につながる可能性がある。このため、維持管理および新設・更新時の設計検討等において、鋼構造物の部位ごとに腐食環境が異なることが想定される場合、部位ごとの設計仕様（塗装仕様や板厚等）を変化させることで維持管理の合理化が実現すると考えられる。

本稿においては、国土交通省九州地方整備局筑後川河川事務所管内の江見手水門を対象設備とし、扉体構造や扉体の高さ方向および径間方向による腐食環境の差異を評価することで、近年、重要な社会的要求事項の一つとなっているイン

フラストラクチャの長寿命化対策における一助といたく、より効率的な維持管理に関わる提言を作成した。

江見手水門は、洪水時等の本川から支川への逆流防止を目的とした鋼製 2 段式プレートガーダ構造のローラゲートであり、2016 年時点で設置から既に 50 年が経過している。また、江見手水門は常時開状態で大気中に待機している非常用のゲートであり、河口から近い汽水域に位置しているため、汽水域での運転や海からの飛来塩分による腐食が懸念される。表－1 に江見手水門の設備諸元を示し、図－1 に江見手水門の一般図、写真－1 に江見手水門の周辺状況を示す。

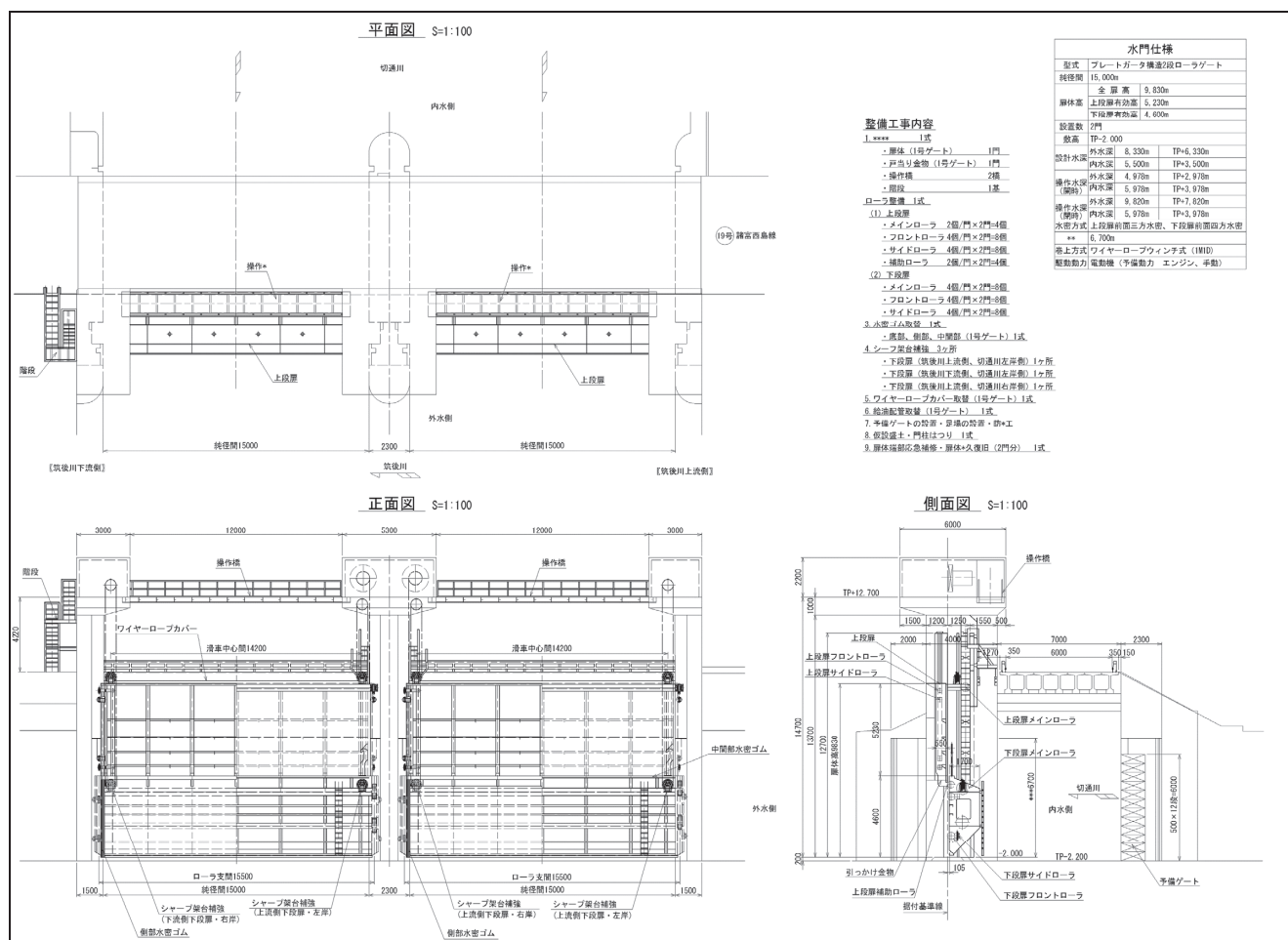
表－1 江見手水門 設備諸元

項目	諸元
ゲート形式	鋼製 2 段式ローラゲート (プレートガーダ構造)
開閉装置形式	電動ワイヤロープウインチ式 (1M1D)
純径間	15.0m
扉高	9.83m
門数	2 門
河川位置	筑後川(右岸 14k980)切通川河口
建設年	昭和 41 年(1966 年)
材質	SS41、SM50A
塗装仕様 (平成元年塗替時)	下塗り:塩化ゴム系(2 回) 中塗り:塩化ゴム系(1 回) 上塗り:塩化ゴム系(1 回)

* 九州大学 大学院 工学研究院 社会基盤部門

** 国土交通省 九州地方整備局 九州技術事務所 施工調査・技術活用課

*** 電力事業本部 プラント事業部 機械技術部



図－1 江見手水門一般図



写真－1 江見手水門（本川側より見る）

2. 腐食環境の評価手法

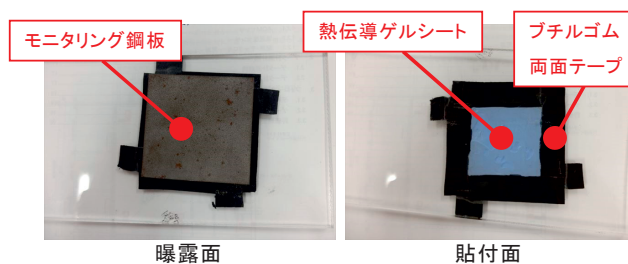
前述のように、江見手水門は河口から近い汽水域に位置しているものの、常時全開であるため、汽水の影響に加えて海からの飛来塩分等による腐食の促進が懸念される。また、プレートガーダ構造であるため、水没を伴う開閉操作および降雨等により水が滞留し易い部位があり、かつ全閉時は下段扉のみが水没する状況が多く、腐食環境が部位ごとに異なる。

上記より、大気中を前提に、ゲート扉体の部位ごとの環境に

よる腐食要因の影響度合を明確にする手法が必要であったことから、鋼構造物における部位ごとの腐食環境の概況が評価可能であるモニタリング鋼板および腐食環境の定量的な評価が可能であるACMセンサーを評価手法として採用した。

(1) モニタリング鋼板

小形の無垢の鋼板を鋼構造物に貼り付け大気中に曝露し、曝露面の表面性状から、鋼板を取り巻く腐食環境の概況を評価する手法である。小形の鋼板を使用することで、多測定の簡易的な評価が可能であり、かつ曝露面の腐食生成物層の厚さを測定することで、腐食深さの経時性を評価することができる。写真－2に実際のモニタリング鋼板を示す。

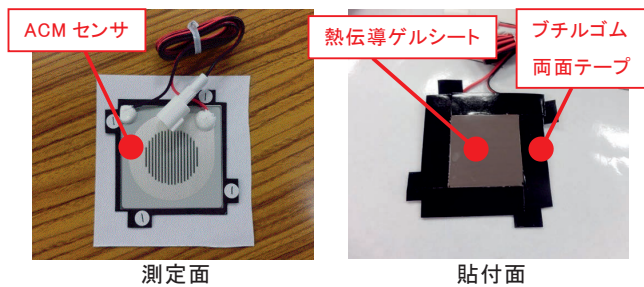


写真－2 モニタリング鋼板

(出典：九州大学大学院工学府都市環境システム工学専攻建設設計工学研究室)

(2) ACM センサー

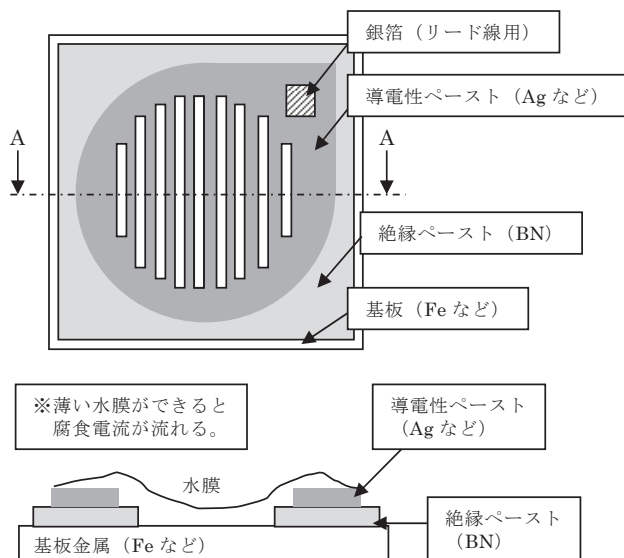
ACM (Atmospheric Corrosion Monitor) 型腐食センサーは、環境因子により電気化学的に発生する金属の腐食電流を直接計測できるセンサーである。ACM センサーを鋼構造物に貼り付け大気中に曝露し、降雨や結露により発生する腐食電流から、腐食が起こる大気環境（濡れ時間、電気量、海塩付着量、腐食速度）を定量的に算出・評価・モニタリングする。また付着塩分についても、相対湿度と腐食電流から表わされる材料特有の校正曲線により推測が可能である。写真－3 に実際の ACM センサーを示す。



写真－3 ACM センサー

1) ACM センサーの測定原理¹⁾

ACM センサーは互いに絶縁された二つの異種金属（Fe-Ag）で構成されており、センサーを大気中に曝露すると、降雨や結露により両金属間（Fe-Ag）に水膜ができ、金属間が連結されて腐食電流が流れる。この電流は卑な金属（Fe）の腐食速度に反応するため、そのセンサーとして利用できる。また、この腐食電流を他機器で測定・解析することで腐食が起こる大気環境を評価・モニタリングすることが可能となる。ACM センサー概略図を図－2 に示す。



図－2 ACM センサー概略図²⁾

2) ACM センサーの使用方法

鋼構造物に ACM センサーを貼り付けることによって、大気中に曝露し、降雨や結露により発生する腐食電流の測定を実施する。ACM センサーは、下記の機器と併用することで、大気環境の腐食性能を評価・モニタリングすることができる。

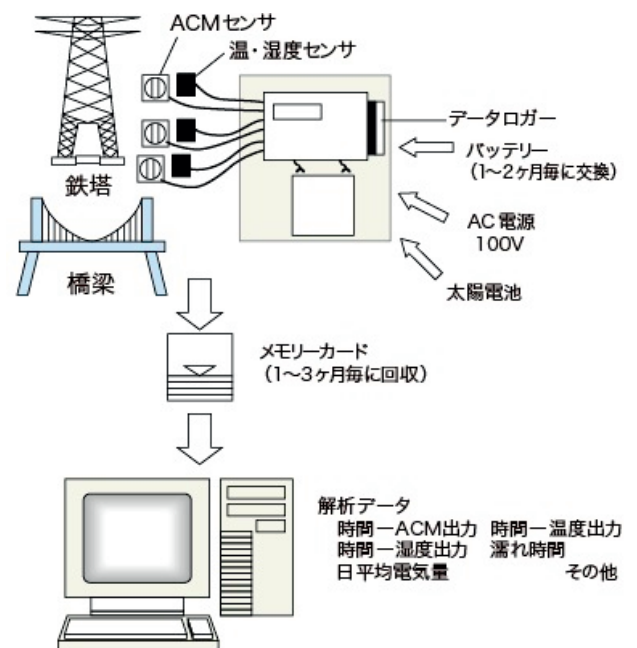
ACM センサーの機器接続例を図－3 に示す。

データロガー（記録計）：計測したデータを記録

温湿度センサー：温度・湿度を計測

解析ソフト：ぬれ時間、電気量、海塩付着量、腐食速度を算出

ACM センサーの電源：バッテリー、AC 電源、太陽電池等



図－3 ACM センサーの機器接続例³⁾

3. 腐食環境現場評価

(1) 評価期間

1) モニタリング鋼板の評価期間

平成 27 年 3 月より 10 ヶ月程度（平成 27 年 3 月 6 日～平成 28 年 1 月 27 日）暴露し分析を行った。

2) モニタリング鋼板の腐食状況の調査時期

平成 27 年 10 月、12 月、平成 28 年 1 月の 3 回実施した。

3) ACM センサーの評価期間

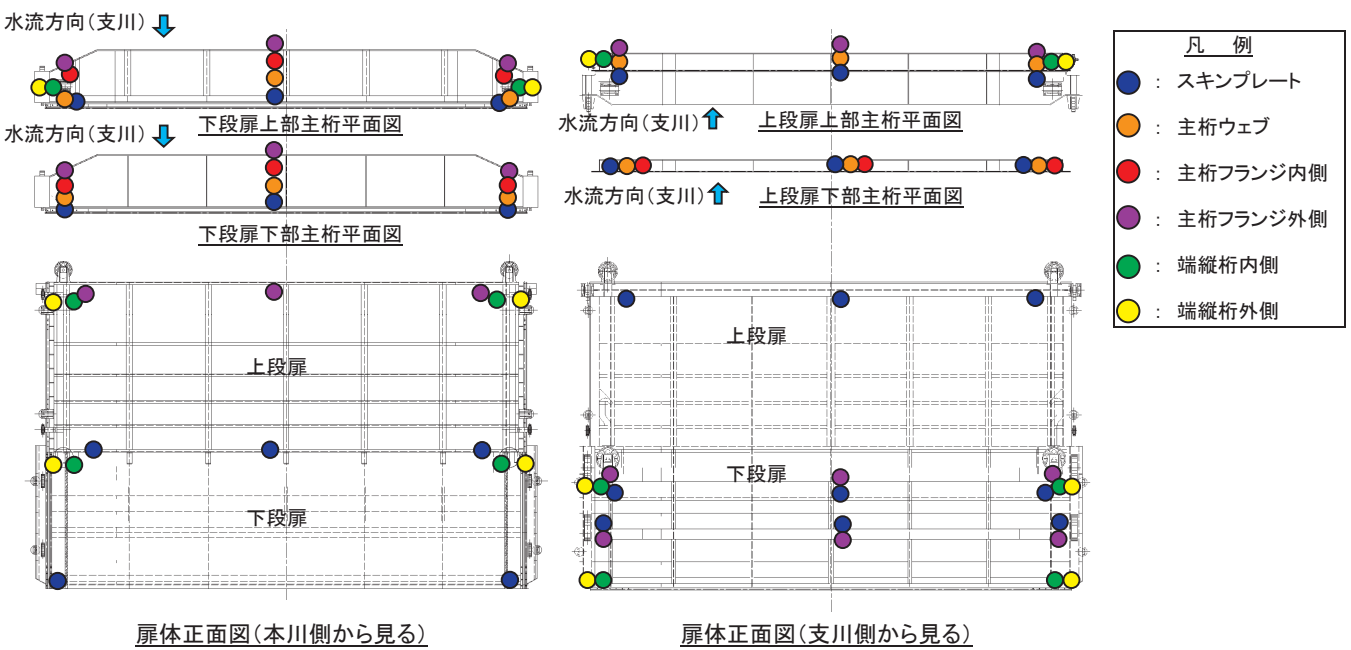
平成 27 年 12 月より 1 ヶ月程度（平成 27 年 12 月 10 日～平成 28 年 1 月 27 日）実施した。

(2) モニタリング鋼板による腐食環境評価

1) モニタリング鋼板の設置位置

モニタリング鋼板（60 枚）の設置位置を図－4 に示す。

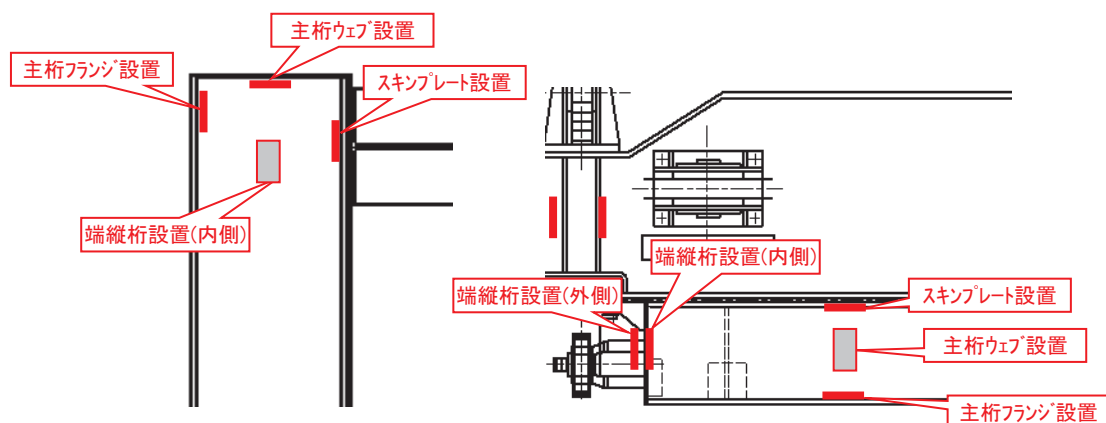
また、モニタリング鋼板の詳細な設置イメージを図－5 および図－6 に示す。



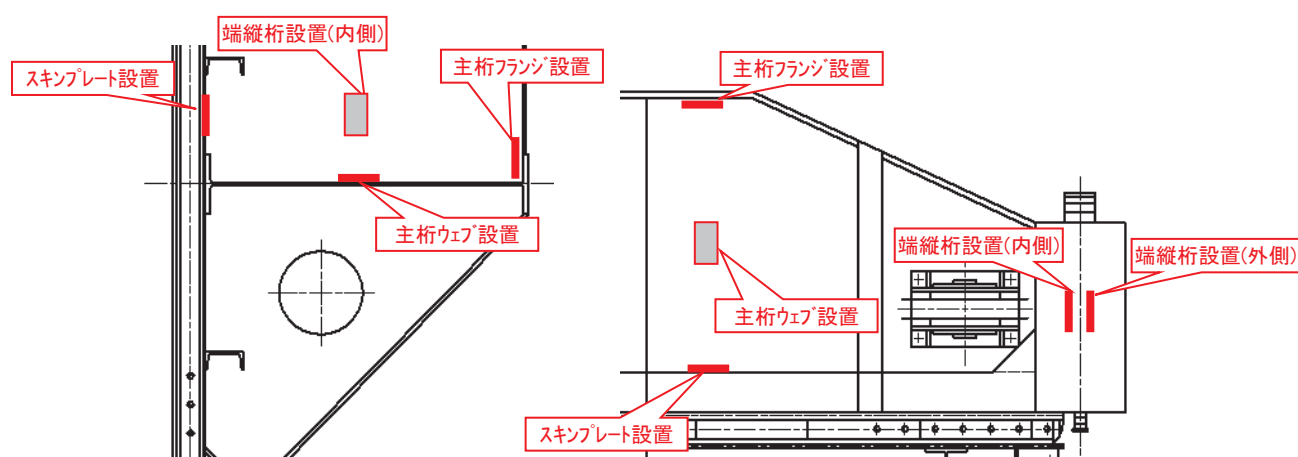
図－4 モニタリング鋼板設置概略位置図

● 主桁フランジ（外側）上段扉	各 1 ヶ所×3 エリア（右岸、中央、左岸）＝	合計 3 ヶ所
● 主桁フランジ（内側）上段扉	各 1 ヶ所×3 エリア（右岸、中央、左岸）＝	合計 3 ヶ所
● 主桁フランジ（外側）下段扉	各 1 ヶ所×6 エリア＝	合計 6 ヶ所
● 主桁フランジ（内側）下段扉	各 1 ヶ所×6 エリア＝	合計 6 ヶ所
● 主桁ウェブ	各 1 ヶ所×12 エリア＝	合計 12 ヶ所
● スキンプレート（内水側）上段扉	各 1 ヶ所×3 エリア（右岸、中央、左岸）＝	合計 3 ヶ所
● スキンプレート（外水側）上段扉	各 1 ヶ所×3 エリア（右岸、中央、左岸）＝	合計 3 ヶ所
● スキンプレート（内水側）下段扉	各 1 ヶ所×6 エリア＝	合計 6 ヶ所
● スキンプレート（外水側）下段扉	各 1 ヶ所×2 エリア（右岸、左岸）＝	合計 2 ヶ所
● 端縦桁ウェブ（内側）	各 1 ヶ所×8 エリア＝	合計 8 ヶ所
● 端縦桁ウェブ（外側）	各 1 ヶ所×8 エリア＝	合計 8 ヶ所

総計 60 ヶ所



図ー 5 モニタリング鋼板設置詳細イメージ（上段扉）



図ー 6 モニタリング鋼板設置詳細イメージ（下段扉）

2) モニタリング鋼板の評価内容

下記 4 点を調査することにより、江見手水門を取り巻く腐食環境の厳しい箇所の特定を行った。

- モニタリング鋼板の腐食状況（表面性状）
- 腐食生成物層の厚さ測定
- モニタリング鋼板の平均腐食深さ算出
- 腐食生成物層厚さ、平均腐食深さの関係

(3) ACM センサーによる腐食環境評価

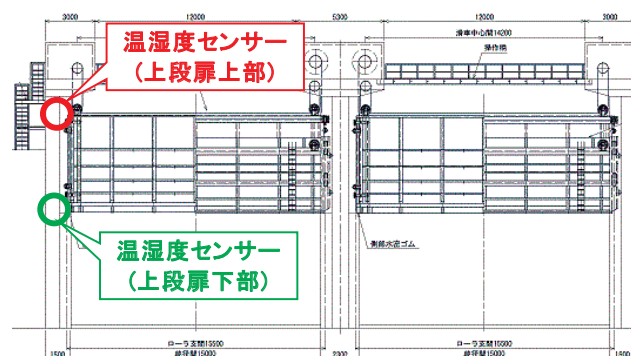
1) ACM センサーの設置位置

ACM センサー（8 枚）は、モニタリング鋼板による腐食環境の評価結果を受けて、特に腐食環境の厳しい箇所に設置した。また、ACM センサーと併せて写真－4 に示す温湿度センサーを図－7 のように、江見手水門全開時の上段扉上部近傍および上段扉下部近傍に設置した。

2) ACM センサーの評価内容

下記 2 点を調査することにより、江見手水門を取り巻く腐食環境の定量的な評価を行った。

- 腐食電流と大気環境との比較
- ACM センサーによる腐食電流の測定（濡れ時間算出）



図ー 7 温湿度センサー設置位置



写真－ 4 温湿度センサー

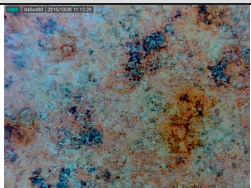
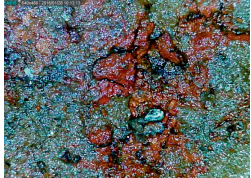
4. 腐食環境の評価結果

(1) モニタリング鋼板による評価

1) モニタリング鋼板の腐食状況（表面性状）

設置したモニタリング鋼板 60 枚について、3 回にわたり現地にそれぞれ色見本と対比しながらデジタルカメラで外観（鋼板全体）を撮影し、USB タイプのマイクロスコープにて、モニタリング鋼板の中心付近の詳細状況を撮影した。表－2 に表面性状の事例を示し、写真－5 に調査にて使用したマイクロスコープ（USB タイプ）を示す。

表－2 表面性状撮影結果事例

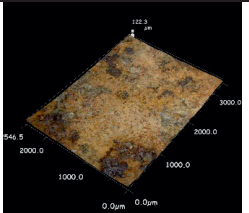
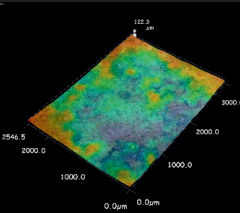
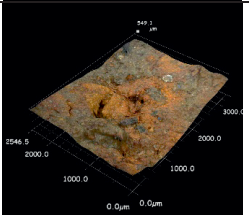
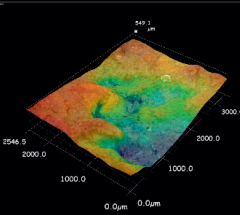
設置位置	鋼板全体	詳細
下段扉 右岸上部 スキプレート 内水側		
下段扉 右岸下部 主桁ウェブ		



写真－5 マイクロスコープ（USB タイプ）

また、3 回の現地調査終了後、回収したモニタリング鋼板のより詳細な表面性状を高性能マイクロスコープにて撮影するとともに、3D 画像も取得した。表－3 に表面性状の事例、写真－6 に使用したマイクロスコープ（高性能タイプ）を示す。

表－3 表面性状撮影結果事例

設置位置	表面詳細	表面詳細 3D
下段扉 右岸上部 スキプレート 内水側		
下段扉 右岸下部 主桁ウェブ		

（出典：九州大学大学院工学府都市環境システム
工学専攻建設設計工学研究室）



写真－6 マイクロスコープ（高性能タイプ）

表面性状の撮影および 3D 化により、主桁ウェブ部がその他の部位と比較して、モニタリング鋼板の腐食が進行していることが視覚的に判り、また、腐食生成物層の厚さの変化を色で捉えることで、より腐食状況の差異を確認した。

2) 腐食生成物層の厚さ測定

設置したモニタリング鋼板 60 枚を対象に、腐食生成物層の厚さを 3 回にわたり電磁式デジタル膜厚計にて測定した。使用した電磁式デジタル膜厚計を写真－7 に示す。



電磁式デジタル膜厚計外観



測定状況

写真－7 腐食生成物層の厚さ測定（膜厚計と測定状況）

また、電磁式デジタル膜厚計の仕様を表－4に示す。

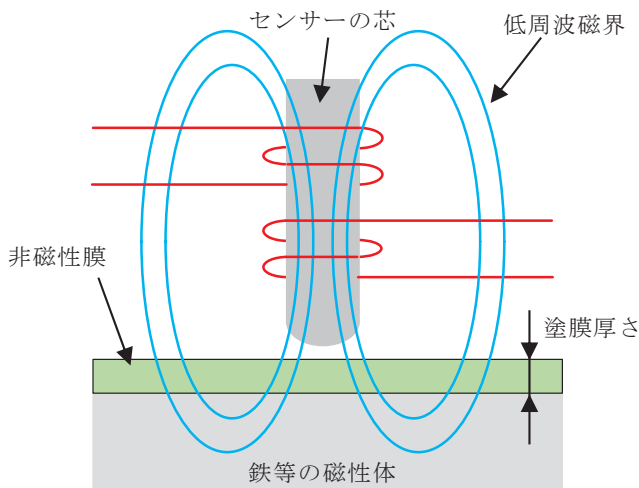
表－4 電磁式デジタル膜厚計 仕様

項目	諸元
測定範囲	0 μm ～2000 μm
分解能	100 μm 未満 : 0.1 μm 100 μm 以上 : 1 μm
測定精度	50 μm 未満 : $\pm 1 \mu\text{m}$ 50 μm ～1000 μm 未満 : $\pm 2\%$ 1000 μm 以上 : $\pm 3\%$
使用温度	0 $^{\circ}\text{C}$ ～40 $^{\circ}\text{C}$
寸法	W82 × H32 × D99.5 mm

3) 電磁式膜厚計の測定原理

低周波交流電磁石の入ったセンサーの先端に磁性体を近づけると、磁性体を引き付けることに対する反作用（電磁誘導）が発生し、塗膜の厚み等のわずかな変化に対応した2次コイルの電圧変化を利用し、塗膜の厚さ等を測定する。

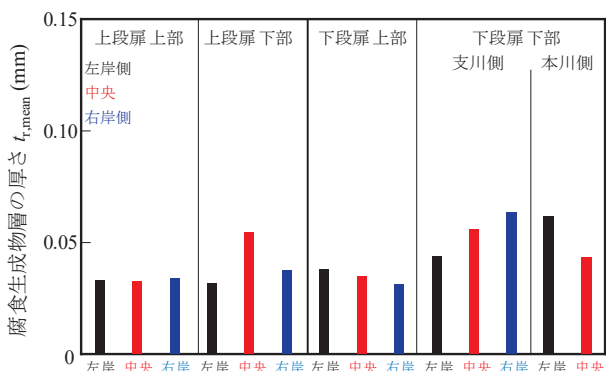
電磁式は、母材が鉄などの磁性体のみ使用できる。電磁式膜厚計の測定原理概念図を図－8に示す。



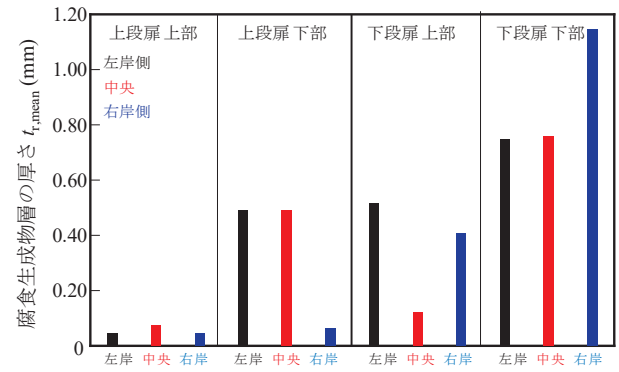
図－8 電磁式膜厚計測定原理概略図⁴⁾

4) 腐食生成物層の厚さ測定結果

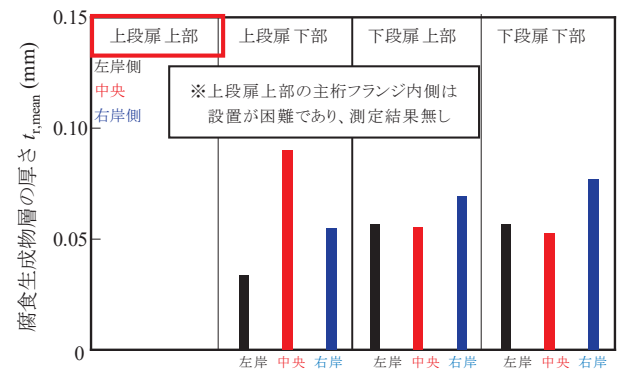
図－9～図－14に3回目の厚さ測定結果を示す。



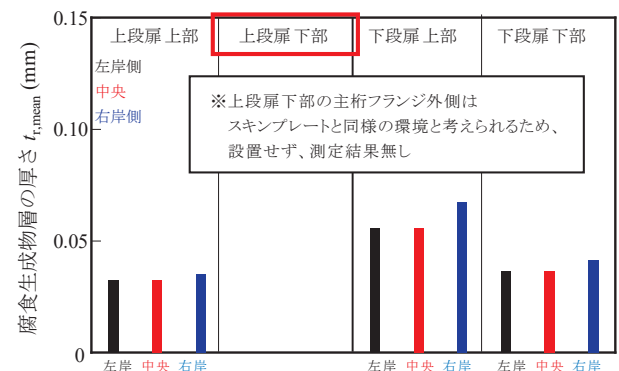
図－9 腐食生成物層の厚さ（スキンプレート）



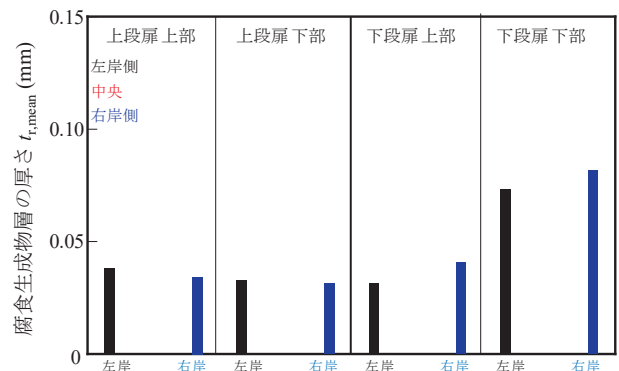
図－10 腐食生成物層の厚さ（主桁ウェブ）



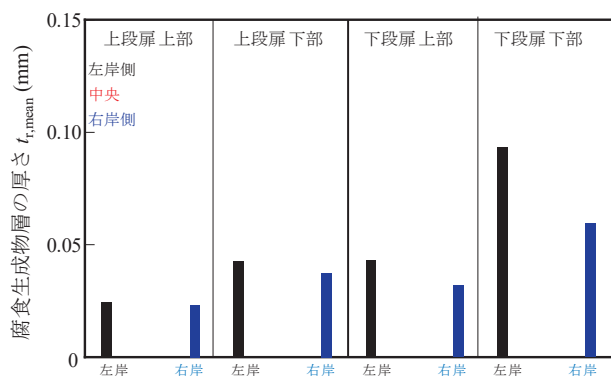
図－11 腐食生成物層の厚さ（主桁フランジ内側）



図－12 腐食生成物層の厚さ（主桁フランジ外側）



図－13 腐食生成物層の厚さ（端縦桁内側）



図－14 腐食生成物層の厚さ（端縦桁外側）

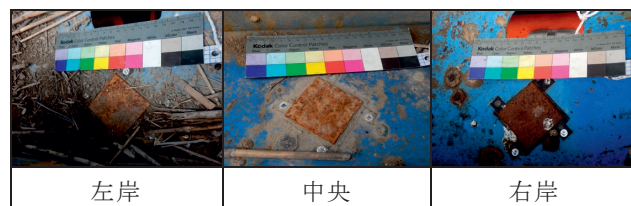
腐食生成物層は、より厳しい腐食環境において腐食が進行し、厚さを増すことから、腐食生成物層の厚さを測定することにより、腐食環境の厳しさを定量的に比較できる。図－9～図－14に示した腐食生成物層の厚さ測定結果において、図－10の主桁ウェブの測定結果のみ、他の部位の測定結果と比較して、グラフの目盛が約10倍になっていることから、主桁ウェブの腐食生成物層の厚さが突出していることが判る。また、表－5に示すように、腐食生成物層の厚さ上位8位が全て主桁ウェブ部であることから、主桁ウェブ部がその他の部位と比較して、より厳しい腐食環境であることが判った。

表－5の中で経時的に腐食生成物層の厚さが減少している事例があるが、これは風雨等に曝されたことにより、腐食生成物層の表層が削られたものと考えられる。

表－5 膜厚計による腐食生成物層の厚さ測定結果（厚い順）

順位	据付位置				有効値11点厚さ平均値(μm)		
	上段扉/下段扉	上部/下部	径間方向	部位	第1回測定結果	第2回測定結果	第3回測定結果
1	下段扉	下部	右岸	主桁ウェブ	820.8	692.4	1144.4
2	下段扉	下部	左岸	主桁ウェブ	806.2	619.1	748.0
3	下段扉	下部	中央	主桁ウェブ	925.5	941.5	744.9
4	下段扉	上部	左岸	主桁ウェブ	688.2	745.4	517.7
5	上段扉	下部	左岸	主桁ウェブ	316.7	412.6	492.2
6	上段扉	下部	中央	主桁ウェブ	419.3	538.5	491.1
7	下段扉	上部	右岸	主桁ウェブ	313.9	273.0	408.8
8	下段扉	上部	中央	主桁ウェブ	59.4	105.6	117.5
9	下段扉	下部	左岸	端縦桁外	131.2	104.8	93.7
10	上段扉	下部	中央	主桁フランジ内	54.9	75.0	92.9

また、主桁ウェブ部の中でも上段扉下部の右岸側のように、同じ上段扉下部に設置している他の主桁ウェブ部（左岸、中央）より、腐食生成物層の厚さが低い値を示す箇所について、モニタリング鋼板周辺の状況（写真－8参照）を確認すると、右岸以外のモニタリング鋼板周辺は、土砂等が堆積しているのに対し、右岸モニタリング鋼板周辺は土砂等の堆積が見られないことから、腐食の進行に差異が生じたと考えられる。



写真－8 モニタリング鋼板周辺状況比較

5) モニタリング鋼板の平均腐食深さ算出^{5),6)}

モニタリング鋼板表面の不安定錆（赤錆）を除去し、不安定錆の下にある安定錆（黒錆）を酸溶液で溶解除去した後に、モニタリング鋼板の重量を測定し、江見手水門設置前の鋼板重量と比較することで、減少重量より、モニタリング鋼板の平均腐食深さを算出した。

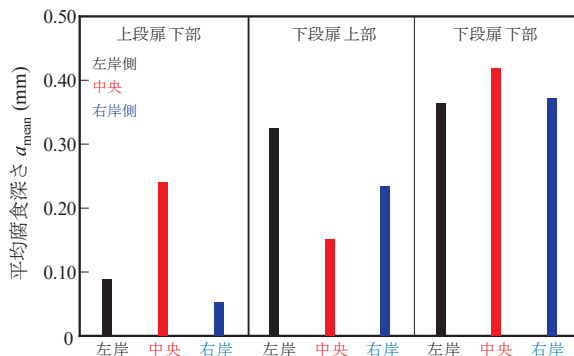
平均腐食深さの算出にあたり、腐食生成物を除去する鋼板を全60枚から20枚選出した。以下に選出理由を示す。

- 主桁ウェブ：7枚
→腐食生成物層の値が他の部位と比較して著しく大きいため。但し、腐食生成物層の値の小さい上段扉上部は除いた（7枚）
- 下段扉上部：4枚
→部位レベル（設置角度）の検討のため（4枚）
- 下段扉下部：4枚
→部位レベル（設置角度）の検討のため（4枚）
- 下段扉下部：3枚
→本川側と支川側の比較検討のため（3枚）
- 上段扉：2枚
→高さ方向の比較検討のため（2枚）

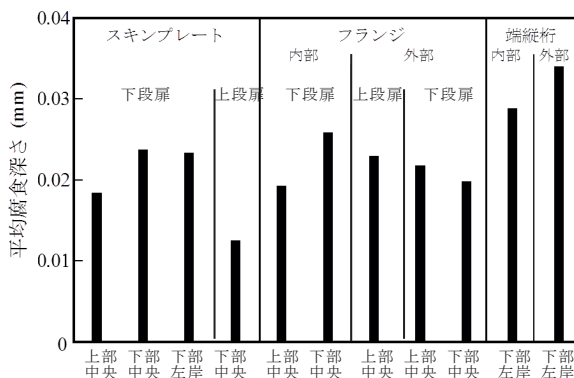
選出したモニタリング鋼板20枚の重量変化より算出した平均腐食深さを表－6に示す。また平均腐食深さの比較を主桁ウェブと主桁ウェブ以外に分け、図－15、図－16に示す。

表－6 重量変化による平均腐食深さ算出結果

モニタリング鋼板設置位置				[mm]
上段扉/下段扉	上部/下部	径間方向	部位	
上段扉	下部	左岸	主桁ウェブ	0.089
上段扉	下部	中央	主桁ウェブ	0.241
上段扉	下部	右岸	主桁ウェブ	0.052
下段扉	上部	左岸	主桁ウェブ	0.325
下段扉	上部	中央	主桁ウェブ	0.151
下段扉	上部	右岸	主桁ウェブ	0.233
下段扉	下部	左岸	主桁ウェブ	0.364
下段扉	下部	中央	主桁ウェブ	0.419
下段扉	下部	右岸	主桁ウェブ	0.371
下段扉	上部	中央	スキンプレート	0.018
下段扉	下部	中央	スキンプレート	0.024
下段扉	下部	左岸	スキンプレート	0.023
上段扉	下部	中央	スキンプレート	0.013
下段扉	上部	中央	主桁フランジ内	0.019
下段扉	下部	中央	主桁フランジ内	0.026
上段扉	上部	中央	主桁フランジ外	0.023
下段扉	上部	中央	主桁フランジ外	0.022
下段扉	下部	中央	主桁フランジ外	0.020
下段扉	下部	左岸	端縦桁内	0.029
下段扉	下部	左岸	端縦桁外	0.034



図－15 平均腐食深さ（主桁ウェブ）



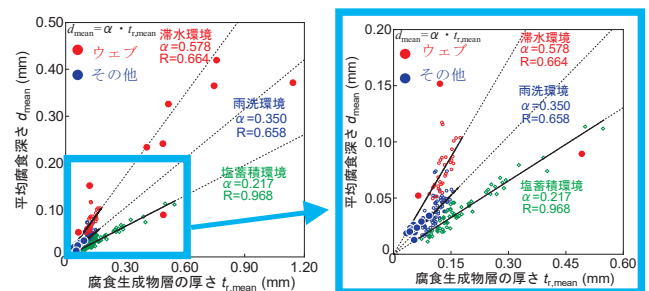
図－16 平均腐食深さ（主桁ウェブ以外）

重量による平均腐食深さの変化を分析したところ、腐食生成物層の厚さ測定等と同様に、主桁ウェブ部がその他の部位と比較して、モニタリング鋼板の腐食が進行しており、より厳しい腐食環境であることが判った。

図－16 に示した平均腐食深さの平均値は、スキンプレートが 0.020mm、フランジ内部が 0.023mm、フランジ外部が 0.024mm となった。主桁ウェブ部の平均腐食深さの平均値が 0.250mm であるのに対し、それぞれの値が 1/10 程度であり、主桁ウェブ部の腐食の進行が、その他の部位と比較して著しいことが分かる。

6) 腐食生成物層厚さ、平均腐食深さの関係

腐食生成物層厚さと平均腐食深さの関係グラフ⁷⁾に、今回の評価結果をプロットしたものを図－17 に示す。本グラフは、既往の検討^{7),8)}における無塗装普通鋼板の暴露試験から得られた滞水環境、雨洗環境および塩蓄積環境のプロットおよび回帰線と、今回の評価にて得られたデータとの比較である。また、表－7 に滞水環境、雨洗環境および塩蓄積環境における腐食生成物のイメージを示す。



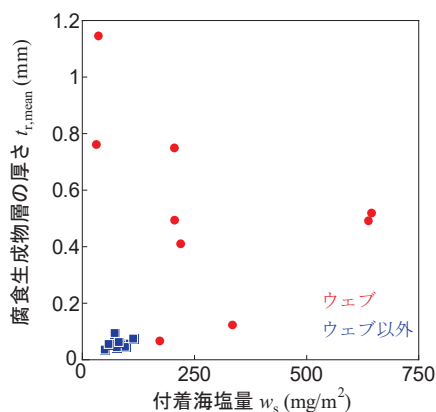
図－17 腐食生成物層の厚さと平均腐食深さの関係

表－7 各環境における腐食生成物のイメージ

滞水環境	雨洗環境	塩蓄積環境
	降雨による削り	腐食生成物
腐食生成物	腐食生成物	塩や砂等が蓄積
母材	母材	母材

ウェブ部はばらつきがあるものの滞水環境の回帰線に、その他の部位は雨洗環境の回帰線と類似する傾向にある。これは、ウェブ部での設置角度が 0° (水平) であるため滞水環境が影響し、その他の部位はすべて 90° (垂直) であるため降雨や水没によって鋼板が濡れるが滞水しない環境であることに起因すると思われる。また、ウェブ部におけるばらつきは、滞水環境に加え、泥の付着により濡れ時間が長くなることに起因し、泥の付着し易さの影響と考えられる。

また、モニタリング鋼板の表面塩分を超音波洗浄により抽出し、当該溶液より測定した付着海塩量と平均腐食厚さの比較結果を図－18 および表－8 に示す。付着海塩量は主桁ウェブ部がその他の部位と比較して大きな値を取る傾向にあるが、腐食生成物層の厚さと付着海塩量との間に相関関係はみられなかった。



図－18 付着海塩量と腐食生成物の厚さ

表－8 表面付着海塩量測定結果

モニタリング鋼板設置位置				[mg/m ²]	[mm]
上段扉/下段扉	上部/下部	径間方向	部位		
上段扉	下部	左岸	主桁ウェブ	206	0.089
上段扉	下部	中央	主桁ウェブ	639	0.241
上段扉	下部	右岸	主桁ウェブ	173	0.052
下段扉	上部	左岸	主桁ウェブ	645	0.325
下段扉	上部	中央	主桁ウェブ	336	0.151
下段扉	上部	右岸	主桁ウェブ	220	0.233
下段扉	下部	左岸	主桁ウェブ	206	0.364
下段扉	下部	中央	主桁ウェブ	32	0.419
下段扉	下部	右岸	主桁ウェブ	37	0.371
下段扉	上部	中央	スキンプレート	51	0.018
下段扉	下部	中央	スキンプレート	96	0.024
下段扉	下部	左岸	スキンプレート	82	0.023
上段扉	下部	中央	スキンプレート	59	0.013
下段扉	上部	中央	主桁フランジ内	96	0.019
下段扉	下部	中央	主桁フランジ内	87	0.026
上段扉	上部	中央	主桁フランジ外	96	0.023
下段扉	上部	中央	主桁フランジ外	77	0.022
下段扉	下部	中央	主桁フランジ外	77	0.020
下段扉	下部	左岸	端縦桁内	114	0.029
下段扉	下部	左岸	端縦桁外	73	0.034

7) モニタリング鋼板による扉体腐食環境の分析結果まとめ

設置したモニタリング鋼板の腐食生成物層の厚さ平均値を部位ごと、径間方向および高さ方向に分けて分析した結果、以下の傾向が見られた。

- 部位ごとの平均値では、主桁ウェブが 0.409mm、その他部位が 0.047mm であった。主桁ウェブの値が他の部位と比較して大きくなるのは、主桁ウェブ部が滞水環境となることに起因すると考えられる。
- 径間方向では、左岸 0.116mm、右岸 0.110mm、中央部 0.138mm となり、差異は無いと考えられる。
- 高さ方向では、ゲート全閉位置で高い順に上段扉上部 0.038mm、上段扉下部 0.115mm、下段扉上部 0.103mm、下段扉下部 0.196mm となり、水没する確率の高い順に腐食生成物層の厚さが大きい傾向にある。

- 腐食生成物層厚さと平均腐食深さの関係グラフ⁷⁾より、主桁ウェブ部が他の部位に比して、より厳しい腐食環境であると考えられる。
- 腐食生成物層の厚さと付着海塩量との間に相関関係はみられなかった。

(2) ACM センサーによる評価

モニタリング鋼板の評価結果を受け、江見手水門の特に腐食環境の厳しい部位に ACM センサーを設置し、腐食環境の定量的な評価を実施した。腐食環境は、①滞水、②降雨の影響、③塩分蓄積の 3 要因が考慮され、ACM センサーを鋼構造物に貼り付けることで、降雨や結露により発生する腐食電流から、腐食に関わる大気環境を定量的に評価した。

1) ACM センサーの設置

モニタリング鋼板による評価結果に基づき、以下の 8 ヶ所に ACM センサーを設置した。具体的な設置位置を表－9 に示し、写真－9 に実際の設置状況を示す。

表－9 ACM センサー設置位置

ACMセンサーNo.	据付位置
1	下段扉/右岸側/上部/主桁ウェブ
2	下段扉/左岸側/上部/主桁ウェブ
3	下段扉/右岸側/下部/主桁ウェブ
4	下段扉/中央/下部/主桁ウェブ
5	下段扉/左岸側/下部/主桁ウェブ
6	上段扉/右岸側/下部/主桁ウェブ
7	上段扉/中央/下部/主桁ウェブ
8	上段扉/左岸側/下部/主桁ウェブ



写真－9 ACM センサーおよびデータロガー設置状況

2) 腐食電流と大気環境との比較

図－19 および図－20 の各部位に設置した ACM センサーの出力（腐食電流）結果を上段扉下部、下段扉上部および下段扉下部に分類し、図－21～図－23 に示す。ACM センサーの設置期間は、平成 27 年 12 月 10 日～平成 28 年 1 月 27 日の約 1 ヶ月半であり、既往の検討⁹⁾より、ACM センサー設置初期の出力不整を考慮して、設置後 10 日間を検討外とした。ACM センサーの経時劣化による出力低下については、設置期間が短いことから、問題ないものとした。

また、図-24に温湿度センサー（上段扉上部・下部2ヶ所）のデータを示し、図-25にはACMセンサー設置期間における降水量（出典：気象庁）のデータを示す。

測定された腐食電流は、各設置した部位において、同様の変動傾向が見られた。また、腐食電流は、降雨の観測されていない日についても、ほとんどの期間において濡れの閾値（既往の研究⁹⁾より、 $0.01\mu\text{A}$ 以上で結露等の「濡れ」、 $1\mu\text{A}$ を超えると「降雨」としている。）を超えており、主桁内の高湿度環境および泥付着による濡れ時間の増加、また表面海塩付着による付着海塩潮解現象（物質が空気中の水分を取り込み水溶液となる現象）等が考えられる。

また、ACMセンサー設置期間における温湿度の変動傾向は、上下で差異は見られなかったが、下部に設置した温湿度センサーが上部に設置した温湿度センサーと比較して低温かつ高湿となっていた。

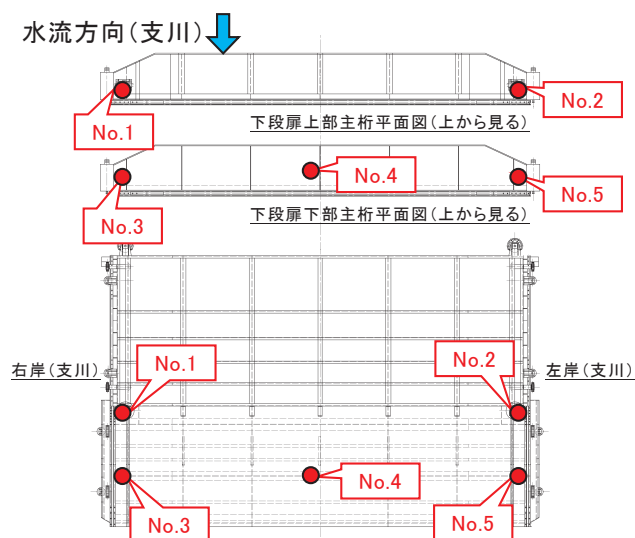


図-19 ACMセンサー設置位置（本川側から見る）

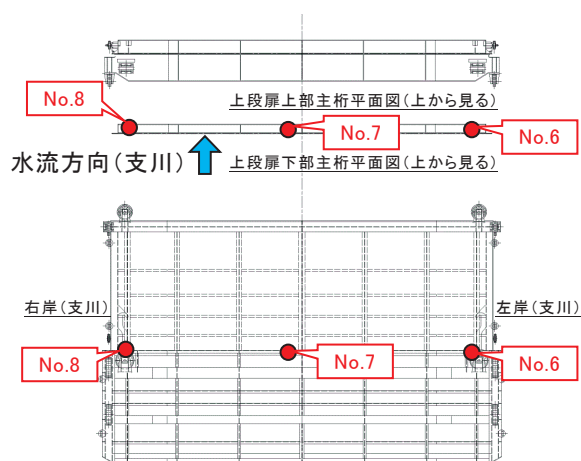


図-20 ACMセンサー設置位置（支川側から見る）

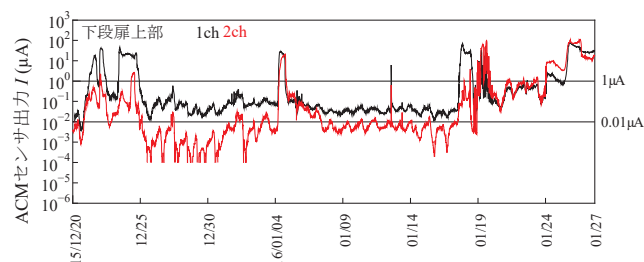


図-21 ACMセンサー出力（腐食電流）（下段扉上部）

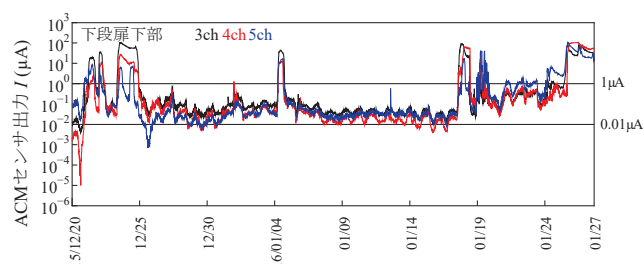


図-22 ACMセンサー出力（腐食電流）（下段扉下部）

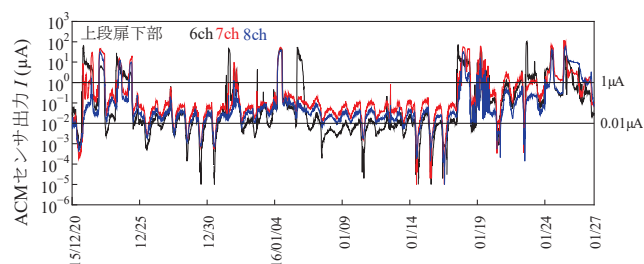


図-23 ACMセンサー出力（腐食電流）（上段扉下部）

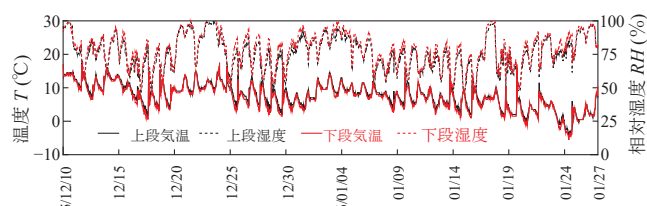


図-24 ACMセンサー設置位置周辺の温度と湿度

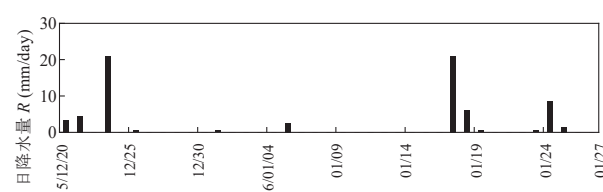


図-25 ACMセンサー設置期間中の降水量（出典：気象庁）

3) ACM センサーによる腐食電流の測定（濡れ時間算出）

濡れ時間とは「ISO9223 大気環境の分類」において「気温 0℃以上かつ相対湿度 80% 以上の時間」と定義されている。前述 2) の ACM センサーの出力結果と温湿度センサーの測定結果を用いることで ACM センサーの濡れおよび降雨時間を算出することができる。

江見手水門においては、下段扉の濡れ時間が上段扉と比較して長い傾向が見られた。これは、上段扉と比較して下段扉が水没する確率が高く、日照を浴びる時間が少ないため、湿潤状態となっており、滞水時間の増加等の影響を受けやすいためであると考えられる。各 ACM センサーの濡れ時間結果を表 10 に取りまとめた。

表 10 ACM センサーの濡れ時間

ACMセンサーNo.	1	2	3	4	5	6	7	8
設置位置(支川側から)	下段扉 上部右	下段扉 上部左	下段扉 下部右	下段扉 下部中	下段扉 下部左	上段扉 下部右	上段扉 下部中	上段扉 下部左
月濡れ時間(h/月)	1086	537	1088	934	1108	706	936	892
月降雨時間(h/月)	213	137	176	139	223	188	178	119
降雨以外の濡れ時間(h/月)	873	400	912	795	885	517	757	774

4) ACM センサーによる扉体腐食環境の分析結果まとめ

ACM センサーにて測定した腐食電流の結果より、以下の傾向が見られた。

- 腐食電流は、降雨の観測されていない日についても、濡れの閾値を超えており、主桁内の高湿度環境および泥付着による濡れ時間の増加が考えられる。
- 江見手水門においては、下段扉の濡れ時間が上段扉の濡れ時間と比較して長い傾向となっており、扉体下部側がより厳しい腐食環境であると考えられる。これは、上段扉と比較して下段扉が水没する確率が高く、日照を浴びる時間が少ないため、湿潤状態となっており、滞水時間の増加等の影響を受けやすいためであると考えられる。

5. 扉体腐食環境評価結果より得られた事項

(1) モニタリング鋼板から得られた事項

- 水没する確率の高い順に、扉体上部より下部が、より厳しい腐食環境であると考えられる。
- 径間方向における腐食環境には差異はないと考えられる。
- 主桁ウェブ部は、その他の部位に対し、より腐食が進行し易い部位であると考えられる。

(2) ACM センサーから得られた事項

- 扉体下部側の方がより厳しい腐食環境である。
- 水門を境界とした本川側と支川側での腐食挙動および付着海塩量の差異はみられなかった。
- 腐食生成物層厚さおよび平均腐食深さ共に、付着海塩量との相関関係はみられなかった。
- 設置した全ての ACM センサーにて、降雨の観測されていない日についても、ほとんどの期間において濡れ環境にあった。

(3) 考察まとめ

江見手水門では、水門の径間方向および本川側と支川側（支川上下流方向）での腐食環境の大きな違いは無いが、水門の高さ方向に腐食環境の違いがみられる。特に、扉体下部は腐食が進行し易い環境であることが確認できたと考えられる。

また主桁ウェブ部はその他の部位と比較して腐食が進行し易いと判断される。これは主桁ウェブ部が水や泥を滞留し易い形状となっていることに起因していると考えられる。

6. 評価結果からの提言

上記考察より、江見手水門扉体の長寿命化方策に関し、維持管理にあたっては、高さ方向にメリハリをつけた塗替塗装等の検討をすること、水を溜めない形状に扉体を改造すること等の対応が重要であり、以下のような提案が可能と考えられる。

(1) 塗装仕様（防食仕様）

- 同じ扉体の中でも、塗替塗装を実施するエリア（面積）を腐食環境が厳しい最小限のエリアに留める。
- 同じ扉体の中でも、塗替塗装を実施する間隔を腐食環境の強弱により変化させる（例：腐食環境が厳しいエリアは 1 回 / 10 年とし、他は 1 回 / 20 年とする（部分塗替 1 回 / 10 年 + 全体塗替 1 回 / 20 年））。
- 同じ扉体の中でも、塗替塗装の仕様を腐食環境の強弱により変化させる（例：腐食環境が厳しいエリアは重防食仕様とする）。
- 補修塗装等も、腐食性の高い部位については、腐食前、軽微な腐食状態で早期に手厚く実施する。
- 塗替塗装時の鋼材の素地調整グレードを腐食環境の強弱により変化させる。
- めっき、溶射、ステンレス鋼等の防食被膜、耐食材等を採用する。

(2) 扉体改造

- 扉体の主桁ウェブ部に勾配をつけ、滞水等による濡れ時間が極力短くなる構造にする（腐食性の高い部位の入隅部（内壁同士が接する角部）を無くす等）。

- 水門をトラス形状とし、主桁ウェブ部を設けない。
- 扉体の上部と下部で材質を変える。
- 主桁の上下方向を変える等、構造を改良する（主桁の凹を下にする等）。
- 腐食環境が厳しいと想定される部位は板厚（余裕厚）を増加させる。
- 腐食環境が厳しいと想定される部位は部分取り替えが可能な構造にする。

7. 今後の展開

今回対象とした水門は江見手水門の1設備のみであったが、モニタリング鋼板およびACMセンサーの定量的な評価により、水門設備の維持管理手法および設計方針につながる有益な提案が可能であることが分かった。

(1) 全国規模での現場実証

今回現場実証を行った江見手水門は河口より14km上流だったが、更に河口付近の近傍にあるゲートや河川上流に設置されているゲートのように、設置箇所・環境の異なる同構造のゲートでの現場実証を行うことが不可欠と考えられる。また、対象水門等を全国的に増やし、データを蓄積していくことで、水門等の新たな維持管理方針あるいは設計における指針として活用していくことが可能と考えられる。

更に、その評価結果をデータベース化し、ゲート形式ごとに部位レベルの評価結果を活用することが考えられる。

(2) 水没するゲートへの展開

江見手水門は常時大気中で待機しているゲートであったが、堰ゲートやダムゲートのように常時水没しているゲートについても現場実証を行い、その腐食環境の差異を評価する展開が考えられる。その評価結果をデータベース化し、ゲート形式ごとに部位レベルの評価結果を活用することが考えられる。常時水没しているゲートでは、点検時に不可視になってしまう部位もあり、データベース化による部位レベル評価は、非常に有効な維持管理手法となり得る。

謝辞：本稿に記載した評価手法の実施にあたり、国土交通省九州地方整備局九州技術事務所ならびに筑後川河川事務所関係各位より、種々の情報提供を始め、多大なご指導・ご配慮を賜りました。またモニタリング鋼板およびACMセンサーによる腐食環境の評価については、九州大学大学院工学府都市環境システム工学専攻建設設計工学研究室関係各位より、現場での設置手法のご指導ならびに取得データの分析等格別のご配慮を賜りました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 篠原正、元田慎一、押川渡：ACM センサによる環境腐食性評価、材料と環境 Vol.54、pp.375-382、2005
- 2) 株式会社シュリンクスホームページ
<http://www.syrinx.co.jp/acm-spec/about-acm.htm>
- 3) JFE テクノリサーチ株式会社ホームページ
<http://www.jfe-tec.co.jp/tech-consul/fushoku16.html>
- 4) 株式会社フィッシャー・インストルメンツホームページ
http://makuatsu.com/index.php?option=com_content&view=article&id=43&Itemid=79
- 5) 貝沼重信、山本悠哉、伊藤義浩、押川渡：Fe/Ag 対 ACM 型腐食センサーを用いた降雨を受ける無塗装普通鋼板の平均腐食深さの予測方法、材料と環境、Vol.60、pp.497-503、2011
- 6) 林秀幸、貝沼重信、山本悠哉、伊藤義浩：腐食生成物が鋼板さび厚の電磁膜厚計による測定精度に及ぼす影響、鋼構造年次論文報告集、2013
- 7) 貝沼重信、山本悠哉、伊藤義浩、林秀幸、押川渡：腐食生成物層の厚さを用いた無塗装普通鋼材の腐食深さとその経時性の評価方法、材料と環境、Vol.61、No.12、pp.483-494、2012
- 8) 林秀幸、貝沼重信、山本悠哉、今村壮宏：飛来塩環境における上路トラス橋の構造部位のミクロ腐食環境、鋼構造年次論文報告集、2012
- 9) 貝沼重信、山本悠哉、伊藤義浩、押川渡：Fe/Ag 対 ACM 型腐食センサーを用いた大気環境における無塗装普通鋼板の経時腐食深さの評価方法、土木学会第 67 回年次学術講演会、2012