

資料3

赤外線サーモグラフィ法による腐食鋼矢板のスクリーニング 及び補修後施設の自主検査に関する報告書

平成 28 年 3 月

国立大学法人 新潟大学
藤村ヒューム管株式会社
株式会社 水倉組

1 概要

鋼矢板水路の防食対策を効率的かつ効果的に進めるには、定期的な機能診断調査による既存施設の腐食状態の把握が不可欠である。図-1 に機能診断調査の実施フローチャートを示す。機能診断調査は、施設の機能の状態、劣化の過程およびその原因を把握するための調査と定義されており、原則として専門的な知見を有する技術者が、調査を行う定点を設定し、現地における目視や計測により実施することを基本としている¹⁾。鋼矢板水路においても既存の調査手法は、鋼矢板表面の目視調査を前提としており、100 m 程度の一定距離を置いて鋼矢板の残存板厚を測定し、健全度ランクの評価が行われていた²⁾。一般的に鋼矢板の板厚は、超音波板厚計を用いて測定されることから、図-2 に示すように、湿潤な水路内に立ち入る必要があり、一回の測定でカバーできる範囲も狭く、長大で空間的な広がりを持つ鋼矢板水路においては極めて非効率であった。

一方、機能診断調査における健全度の判定で、対策工事が必要と判断された施設は、ストパネ工法や、有機系被覆工法などに代表される防食対策により補修される。一般的にこれらの防食対策は、腐食した鋼矢板表面を各種材料で被覆するため、補修後施設のはく離、空洞、ひび割れなどの構造欠損を把握することが困難であった。このため、既存施設の腐食状態や、補修後施設の構造欠損などを評価できる効率的かつ信頼性の高い非破壊検査法の確立が急務な課題である。そこで本技術開発では、非破壊検査法の一つである外線サーモグラフィ法に着目した。赤外線サーモグラフィ法は、対象施設の広範囲を非破壊かつ非接触で効率よく評価可能であること、複合材料や被膜材料などの表面下の欠陥を検出可能である³⁾ことから、鋼矢板水路の腐食状態および補修後の構造欠損を効率的に評価できると考えた。腐食状態の評価に関する既往の研究では、赤外線画像の2次元熱伝導解析と赤外線画像処理により、石油タンク底板の裏面腐食を評価する研究

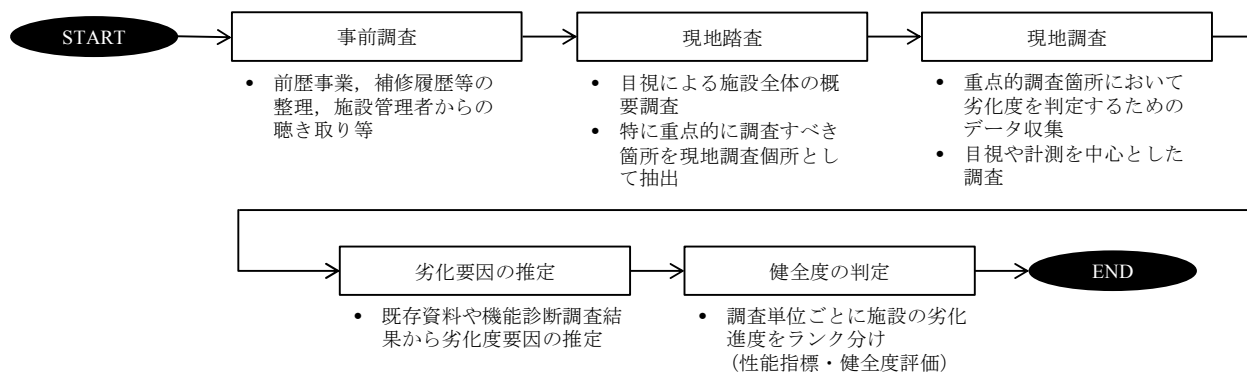


図-1 機能診断調査の実施フローチャート¹⁾



図-2 超音波板厚計による残存板厚調査

4), 赤外線サーモグラフィ試験と超音波厚さ試験を組み合わせ、プラントのガス配管の健全性を評価する研究⁵⁾, RC 構造物における鉄筋の腐食性状を、加熱むらを除去した赤外線画像処理により評価する研究⁶⁾, コンクリートに埋設された鉄筋を液体窒素で冷却し、腐食の程度を評価する研究⁷⁾などが挙げられる。また、施設補修後の構造欠損評価に関する既往の研究では、欠陥部とその周辺表面との放射温度差を計測して、欠陥を識別する研究⁸⁾, FRP シートとコンクリートとの間に存在する内部空洞を検出する研究⁹⁾, 表面被覆工法による補修後の施設で発生する浮き・剥離を検出する研究¹⁰⁾, 鋼・コンクリート合成床版の建設時のコンクリートの充填性を評価する研究¹¹⁾などが挙げられる。いずれの研究も、プラント設備やコンクリート構造物を対象としたもので、鋼矢板水路を対象とした研究は少ないのが現状である。

本報告では、赤外線サーモグラフィ法により得られた赤外線画像データを、空間統計学手法の一つであるセミバリオグラムモデル^{12), 13)}を用いて解析し、鋼矢板水路における腐食状態のスクリーニングを行った結果を報告する。次に、腐食した鋼矢板水路をストップパネ工法により補修した際に、内部の構造欠損（コンクリートの充填不良）を効率的に検出した結果を報告する。セミバリオグラムによる物性値の空間構造評価は、既往の研究^{14), 15)}でも示された通り面的な広がりを持つ水路構造物の評価には有効な手段である。

2 赤外線計測の原理

2.1 伝熱の三形態

熱エネルギーが物体間を伝わったり、移動したりする現象は伝熱と呼ばれ、伝導、対流、放射の三形態が基本である¹⁶⁾。このうち赤外線サーモグラフィによる温度計測の原理には、放射が関係しており、物体の放つ赤外線放射エネルギーを測定することで、物体の温度を測定する¹⁷⁾。また、物体の温度変化は、赤外線の吸収と放射が関係しており、全ての赤外線を吸収する物体は、黒体と呼ばれ、同じ温度の物体と比較した場合、放射する赤外線放射エネルギーは、最も多くなる。ある物体の赤外線放射エネルギー E と、その物体と同一温度である黒体の赤外線放射エネルギー E_b との比は放射率と呼ばれ、記号 ε で表わされる(式1)。

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \quad (1)$$

一般的に、放射率は、材質、温度、表面粗さ、表面汚れにより異なる¹⁸⁾ため、放射を利用した温度測定では、注意が必要である³⁾。単位面積で単位時間あたりに放射する全ての放射エネルギーは、全放射能と呼ばれ、黒体の全放射能 E_b は次式のように表される(式2)。この関係は、放射による伝熱では、最も重要でかつ基本的な関係である³⁾。

$$E_b = \sigma T^4 \quad , \quad (2)$$

ここで、 σ はステファン・ボルツマン定数、 T は絶対温度である。

2.2 赤外線サーモグラフィ法の計測原理

赤外線サーモグラフィ法による変状部可視化の原理は、対象構造物が放射している赤外線放射エネルギーを計測し、表面温度分布の異常部から変状部を抽出するものである¹⁸⁾。赤外線サーモ

グラフィ法による計測は、(1)被測定物に熱移動が生じている時の欠陥による断熱温度場を検出する方法、(2)欠陥部位における自己発熱（吸熱）による温度場を検出する方法、(3)空洞放射効果による見かけの温度変化部位を検出する手法の3種類に大別される¹⁹⁾。

(1)断熱温度場に基づく計測は、最も一般的な手法であり、本技術開発の対象である鋼矢板の腐食が進行した水路では、**図-3**に示すように腐食生成物が生成され、健全な鋼矢板と比較して熱伝導率は小さく、比熱は大きくなる。一方、補修後のコンクリート表層部に充填不良による内部空洞が存在する部分は、**図-4**に示すように健全部とは異なる温度分布となる。これにより、気温や太陽光による輻射熱の変化などに起因して表面温度差となって顕在化する²⁰⁾⁻²⁴⁾。また、(3)空洞放射効果による見かけの温度変化部位を検出する手法は、補修後施設のひび割れなどのコンクリート表面の変状部を検出することが可能である。ひび割れがある部位では、その周辺表面に比べて見かけ上の放射率が上昇し、開口部とその周辺面との間に放射温度差が発生する^{19), 25)}。既往の研究でも、欠陥内部での空洞放射に伴う放射温度の変化から欠陥を識別できることが報告されている²⁶⁾。

3 空間統計学手法を用いた熱特性評価

3.1 セミバリオグラム解析による空間分布特性評価^{14), 15)}

鋼矢板の腐食は、干満帯で局所的に進行するため、平均的な腐食部位と極度に腐食した部位が空間的に分布している。セミバリオグラムの特徴は、計測データの空間依存性を評価できることにあることから、赤外線サーモグラフィにより検出された平均的な物性値に加えて、局所的なばらつきを含む物性値の空間的分布特性を評価できる。一般的に、変状部などのばらつきを含む計測値は、「計測値全体としての散らばり」と「計測値の空間的分布」の2つの側面を持つ。前者は、

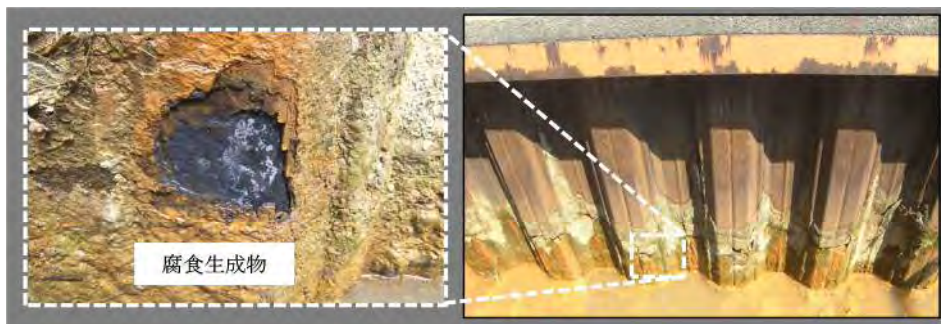


図-3 鋼矢板水路の腐食と腐食生成物

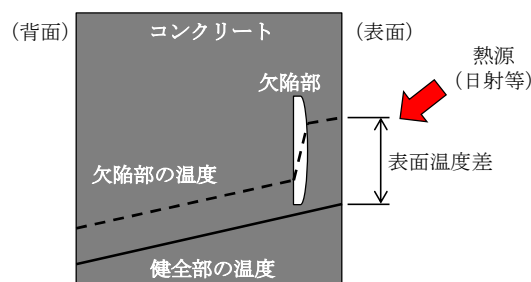


図-4 内部空隙検出の原理図²⁰⁾

推計統計学と度数分布により評価される。後者は、セミバリオグラム解析などを用いて空間的相関構造が評価される。また、コンクリート部材の充填不良による空洞化などの局所的な損傷度の評価には、平均的な物性値評価に加えて、局所的な損傷を計測データから抽出する必要がある。その際、物性値の空間構造を評価することは有効であり、セミバリオグラムを評価指標として用いることは有効な手法であると考えられる。

空間統計学では、データを確率場における実現値と見なし、領域 D 上の標本場 $Z(x)$ を考える。計測位置 x_1, x_2, \dots, x_n における確率変数 $Z(x_1), \dots, Z(x_n)$ を計測データとした場合、本手法を適用するには、以下の式 3、式 4 に示す仮定が成立する必要がある。

$$E[Z(x)] = \mu \quad (3)$$

対象とする領域で変数の期待値が一定であること。ここで、 E は期待値、 μ は平均である。

$$E\{[Z(x) - Z(x+h)]^2\} = 2\gamma(h) < \infty \quad (4)$$

ベクトル h だけ離れた2点間における変数値の差の期待値は有限であり、 h のみの関数である。 2γ がバリオグラム (variogram) であり、 γ がセミバリオグラムである。セミバリオグラムを用いた空間分布特性評価は、主に資源工学分野において進められてきたが、近年では環境科学などにおいても応用研究が取り組まれており、時・空間的に変動する物理量を定量的に評価する手法として用いられている。

3.2 セミバリオグラムモデル

空間統計学において物理量の空間依存性に関する解析には、一般的にセミバリオグラムが用いられる。モデルの概要を図-5 に示す。本モデルは、横軸にサンプリング間隔であるラグ (lag, h)、縦軸にセミバリエンス (semi-variance, $\gamma(h)$) をとり、その関係性を評価するものである。ラグ h のセミバリエンス $\gamma(h)$ は、距離 h だけ離れた全ての組み合わせ $N(h)$ の評価値間のばらつきの程度を表す (式 5)。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (5)$$

直線上を等間隔に n 点計測を行い、地点 x_i, x_i+h での計測値がそれぞれ $Z(x_i), Z(x_i+h)$ である場合

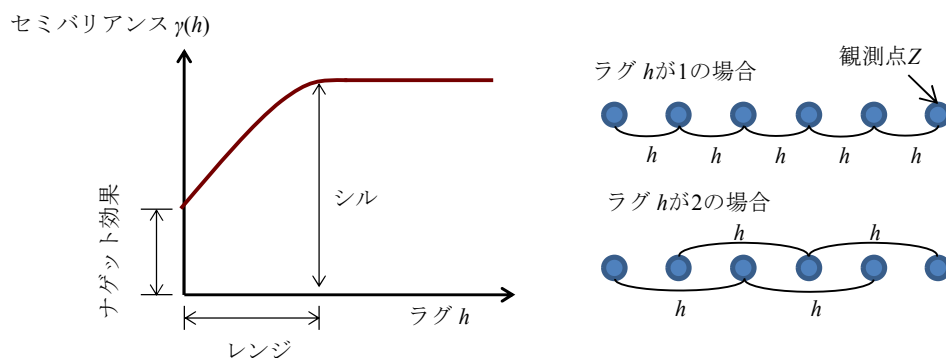



図-5 セミバリオグラムモデル

は、式 6 が得られる。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2(n-h)} \sum_{i=1}^{n-h} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (6)$$

本技術開発の対象である補修前後における鋼矢板水路では、局所的な損傷が無い限り、空間的に連続して物性値が分布すると考えられる。その際、セミバリオグラムは連続し、-5 のような形状となる。セミバリエンスは、ラグの増加に伴い上昇し、ある特定の距離で最大値に達する場合が多い。この最大値はシル (sill) と定義され、データの内在的なばらつきを示している。シルに達する時のラグはレンジ (range) と定義されている。レンジは、空間依存性の限界を示している。換言すると、データの内挿が可能な範囲を示すものである。ラグ 0 におけるセミバリエンスは、ナゲット効果 (nugget effect) と定義され、実験誤差などの偶然のばらつきを示している。ナゲット効果は、非常に近い計測点において計測されたデータの一定のばらつきを示しており、局所的な損傷が大きい場合ナゲット効果は増加するものと考えられる。



各パラメータは、ラグとセミバリエンスの関係から最小二乗法による回帰分析により解析的に評価される。一般的には、球形モデル、指数モデルおよびガウス型モデルなどが用いられている。本技術開発では、最も実測値との適合性が良好であり、既往の研究²⁷⁾で海面温度の時間・空間的な物理量を近似できることが確認された球形モデルを用いて解析を行った。球形モデルを式 7、式 8 に示す。

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[\frac{3}{2} \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad (0 < h \leq a) \quad , \quad (7)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \quad (h > a) \quad , \quad (8)$$

ここで、 C_0 はナゲット効果、 $C_0 + C$ はシル、 a はレンジである。

3.3 セミバリオグラムによる解析手順

-6、-7 は、赤外線サーモグラフィ法により取得した赤外線画像を用いて、既存施設の腐食状態と補修後施設の状態評価を行うための解析手順を示している。解析手順は以下の通りである。

まず始めに既存施設の赤外線画像データを取得し、数値統計処理をおこなう。得られたデータを基にセミバリオグラム解析により既存施設の腐食状態をスクリーニングし、補修工適用の可否を判断する。補修工が必要と判断された既存施設は、ストパネ工法により補修を行う。ストパネ工法施工後の施設を対象として赤外線画像データを取得し、数値統計処理をおこなう。得られたデータを基に施工不良の有無を判断し、必要な場合は再施工を行う。

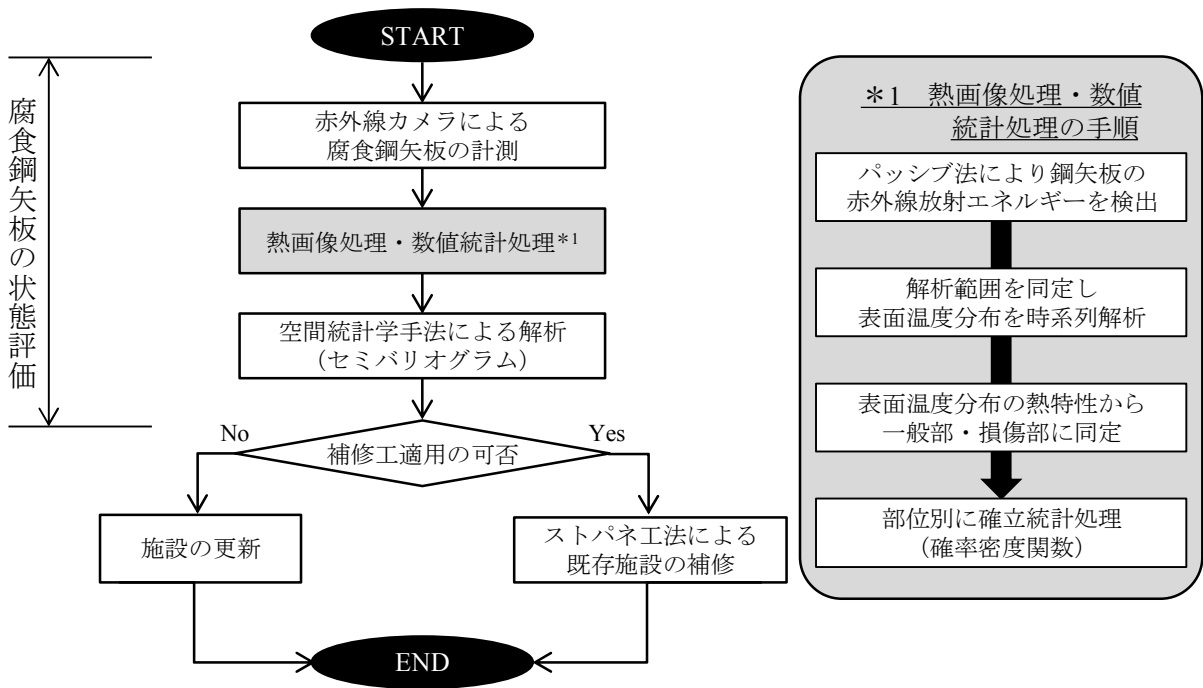


図-6 赤外線計測・解析フロー図（腐食鋼矢板の状態評価）

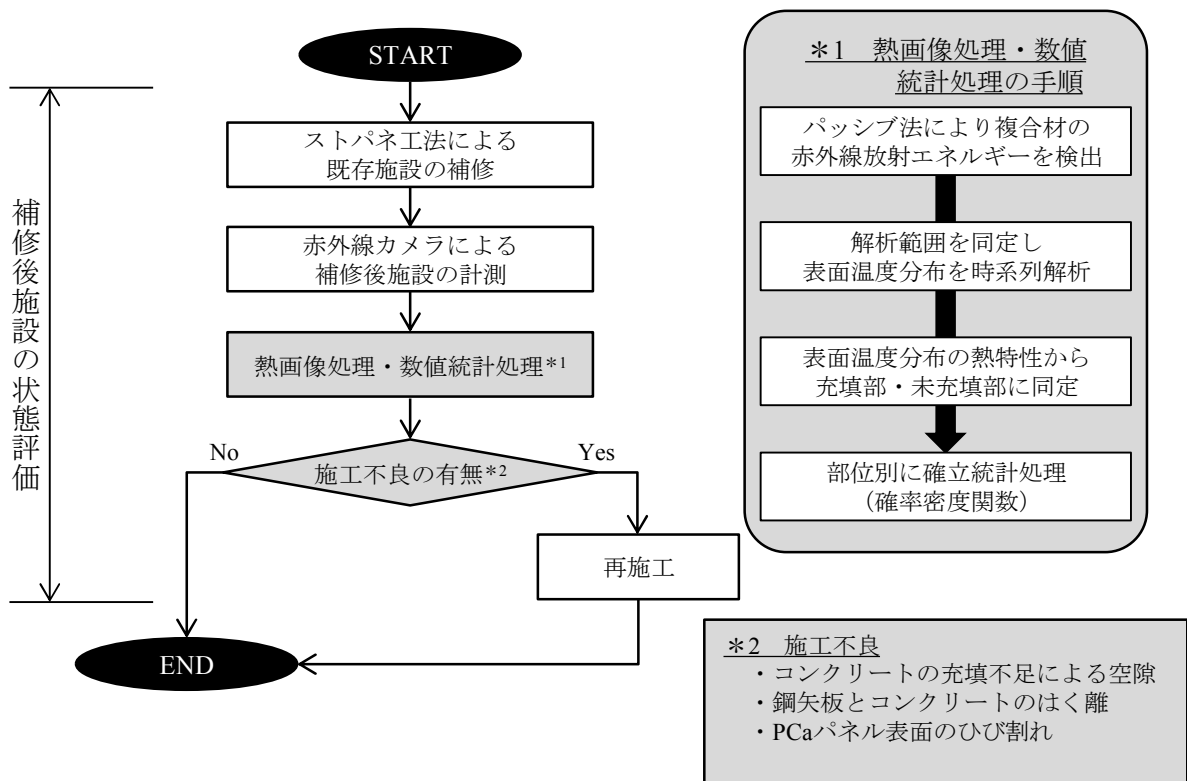


図-7 赤外線計測・解析フロー図（補修後施設の状態評価）

4 腐食鋼矢板のスクリーニングについて

4.1 対象施設の概要

施設の概要を図-8 に示す。施設は、新潟市西蒲区に位置する 1977 年に供用開始（調査時点で 39 年経過）された橋本排水路である。切梁護岸形式の農業用排水路で、水路幅は 2.0 m、水路渠底から笠コンクリート下端までの水路高は 1.9 m である。腐食の進行に伴い局所的に断面の減少や欠損が顕在化していることが確認された。図-9 に示すように対象施設において比較的腐食していない範囲（以後、「一般部」と記す）と、特に腐食が進行している範囲（以後、「損傷部」と記す）とを選定し、超音波板厚計を用いて既設鋼矢板の残存板厚を測定した。測定の結果、設計板厚 6 mm に対して、一般部では平均板厚 4.9 mm、残存率は 81.7%であった。これに対して、損傷部では平均板厚 4.1 mm、残存率は 68.3 %であった。腐食に伴う板厚減少は、河床から 700 mm の高さに位置する干満帯付近で卓越しており、最少板厚で 3.2 mm の結果を得た。以上の結果から、対象施設における鋼矢板の腐食状態は、既往の研究²⁸⁾と同様に、干満帯付近において、局所的に断面減少が顕在化していることが確認された。

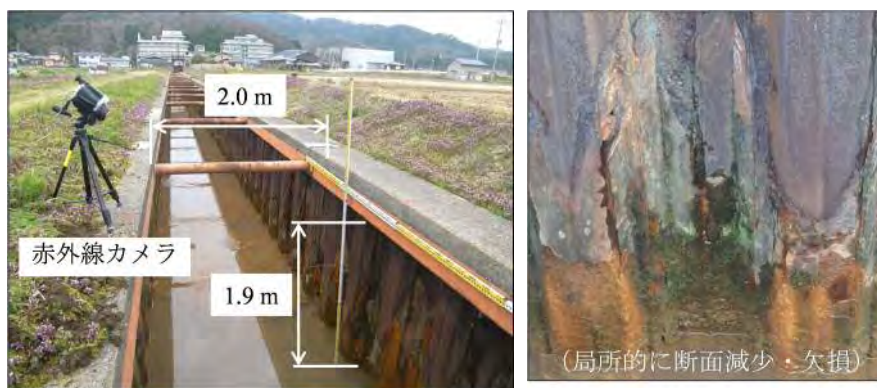


図-8 施設の概要

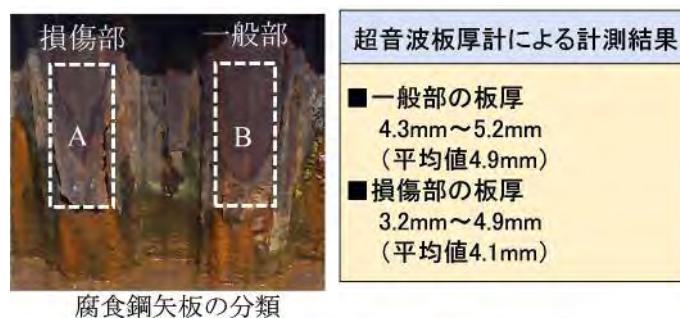


図-9 既設鋼矢板水路の残存板厚測定位置

4.2 調査・解析方法

現地調査では、腐食した鋼矢板表面を対象として、太陽光を熱源とした自然状態での加熱により赤外線画像を取得するパッシブ法を用いて赤外線画像を計測した。使用した赤外線サーモグラフィの仕様を表-1に示す。赤外線画像は、2015年4月22日の7:00から12:00までの12時間の時系列変化を30分に1枚の間隔で計測した。計測時の気象条件は、計測対象近傍で温湿度ロガー（日置電機（株）社製）により計測した。計測期間中の平均値は、気温 10.5℃、湿度 70.8%、水温 9.6℃である（図-10）。表面温度差は、図-11に見られるような日射や陰影の影響を考慮して、7時30分と11時30分の赤外線画像を用いて解析した。鋼矢板表面から4.5mの位置に赤外線サーモグラフィを設置し、損傷部と一般部の赤外線画像を横1.35m、縦1.80m（240×320 pixel）の範囲で取得し、表面温度差を解析し、空間特性をセミバリオグラムの球型モデルにより評価した（図-12）。

4.3 解析結果

腐食鋼矢板の温度変化特性は、損傷状況により異なる傾向が確認された（図-13）。損傷部では、平均温度 19.2℃（最大：23.8℃、最少 5.2℃）であった。一般部では、損傷部と異なり平均温度 14.0℃（最大：23.3℃、最少 9.6℃）であった。これは、既往の研究¹⁴⁾からも明らかにように熱容量の相違に起因しているものと考えられる。一般的に損傷が局所的に進行し、断面の減少や欠損が顕在化した鋼矢板では、熱容量が低いことから、温度変化が拡大する傾向にある。本調査対象においても、損傷部では通常部と異なる熱特性を顕在化させたものと考えられる。

表-1 赤外線サーモグラフィ仕様

型番	R300SR（日本アビオニクス社製）
測定範囲	-40℃～500℃
最小温度分解能	0.03℃～0.3℃
センサ	2次元非冷却マイクロボロメータ
センサ解像度	横320×縦240
測定波長	8～14μm
データ深度	14 bit
フレームタイム	60 Hz

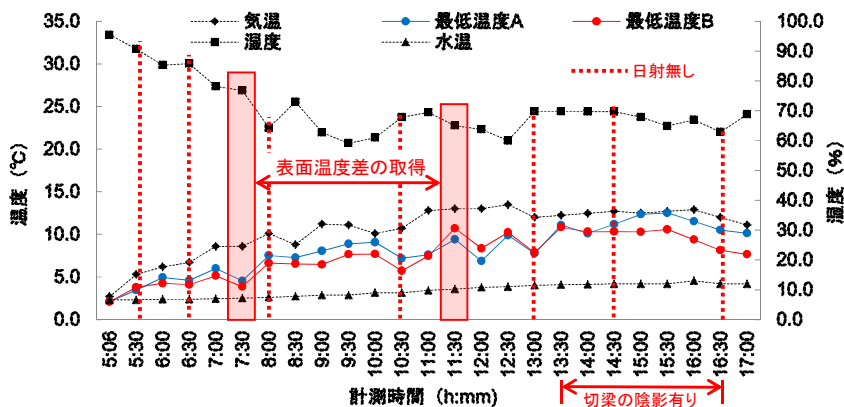


図-10 赤外線画像計測時の環境条件



可視画像（14：00）

図-11 切梁の陰影

鋼矢板の腐食状態をスクリーニングするには、赤外線画像による異常点の抽出と空間的分布構造の評価が重要になると考えられる。本技術開発では、セミバリオグラムを用いて計測データの空間的な特性評価を試みた。赤外線サーモグラフィ法により得られた赤外線画像をセミバリオグラムモデルにより検討した結果を図-14に示す。損傷部では、セミバリアンスの範囲は2.09~9.75であり、一般部では、0.23~1.56であることを確認した。損傷部では、物性値の空間的連続性が無くなることにより、ラグの低い段階でのセミバリアンスおよびナゲット効果の増加が確認された。

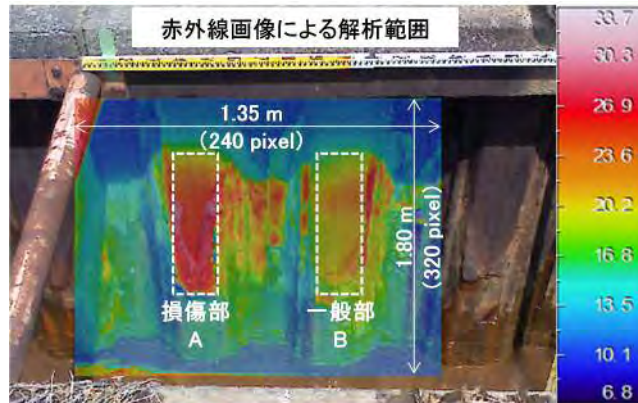


図-12 赤外線画像の解析範囲

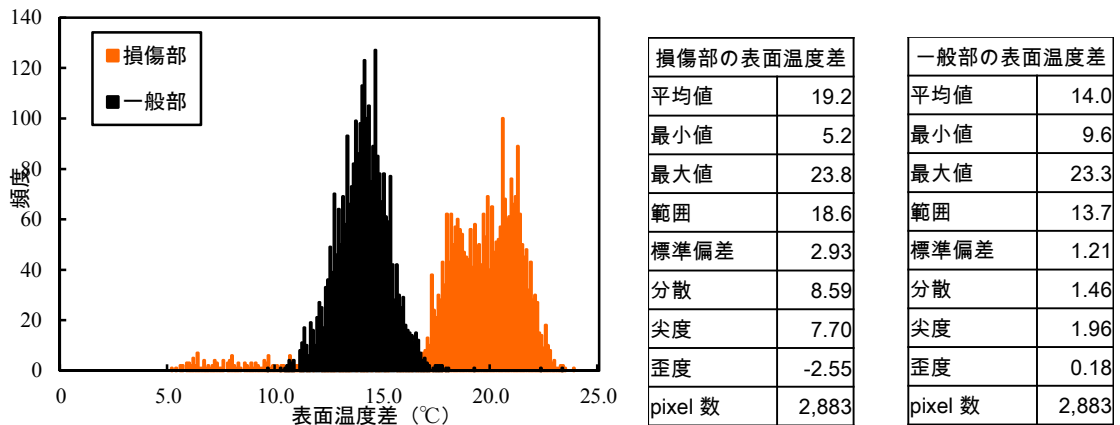


図-13 部位別表面温度差分布

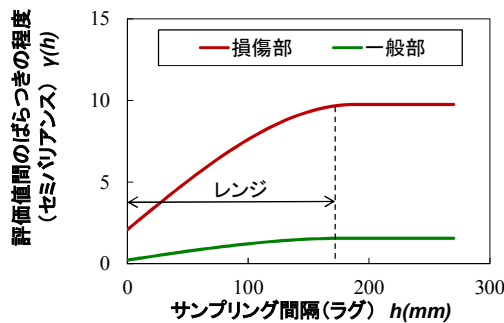


図-14 空間統計学手法（セミバリオグラムモデル）による解析結果

4.4 まとめ

腐食鋼矢板の熱特性について、空間統計学手法を用いた実証的に検討した結果、一般部と比較して損傷部では日射による温度上昇傾向の明らかな相違が確認された。また、セミバリオグラムモデルを用いて損傷部と一般部との相違に着目した比較検証が可能であった。これにより赤外線画像を空間統計学手法（セミバリオグラム解析）により定量化し、腐食状態をスクリーニングすることで既設鋼矢板の腐食状況の概況調査が可能になることを確認した。

5 補修後施設の自主検査について

5.1 対象施設の概要

施設の概要を図-15に示す。施設は、新潟市江南区に位置する1970年に供用開始（調査時点で45年経過）された新村排水路である。自立式護岸形式の農業用排水路で、水路幅は6.55 m、水路渠底から笠コンクリート天端までの水路高は2.6 mである。対象施設では、2015年9月～2016年年1月の期間においてストックマネジメント技術高度化事業の実証試験によりストパネ工法を用いた補修が行われた。補修延長は15m、補修高さは2mの左右両岸である（補修面積60 m²）。

5.2 調査・解析方法

ストパネ工法は、鋼矢板表面に接続金具を溶接して、プレキャストコンクリートパネルを設置し、内部にコンクリートを充填する。実証試験では、プレキャストコンクリートパネルと鋼矢板の間にコンクリートを充填する際に、コンクリート内部に厚さ1 cm～6 cmの発泡スチロール片を挿入し疑似的に人工欠損を発生させた（図-16）。各人工欠損部に対し、解析範囲を設定し未充填部とした。加えて、近傍の充填部から未充填部と同一の大きさで解析範囲を抽出し、赤外線画像を比較した。図-17に各解析範囲の概要図を示す。現地調査では、図-15に示すプレキャストコンクリートパネル表面の計測範囲を対象として、太陽光を熱源とした自然状態での加熱により赤外



図-15 施設の概要

線画像を取得するパッシブ法を用いた。使用した赤外線サーモグラフィの仕様は表-1と同一である。赤外線画像は、2015年12月2日の7:00から12:00までの12時間の時系列変化を20分に1枚の間隔で計測した。計測時の気象条件は、計測対象近傍で温湿度ロガー（日置電機（株）社製）により計測した。計測期間中の平均値は、気温8.9℃、湿度75.4%、水温8.7℃である（図-18）。

赤外線サーモグラフィは、図-19に示すようにプレキャストコンクリートパネル表面から7.0 m離れた東面に設置し、横320×縦240 pixel（横2.5 m、縦1.9 m）の範囲で赤外線画像を取得した。取



図-16 人工欠損用発泡スチロール（厚さ 1cm～6cm）の設置状況

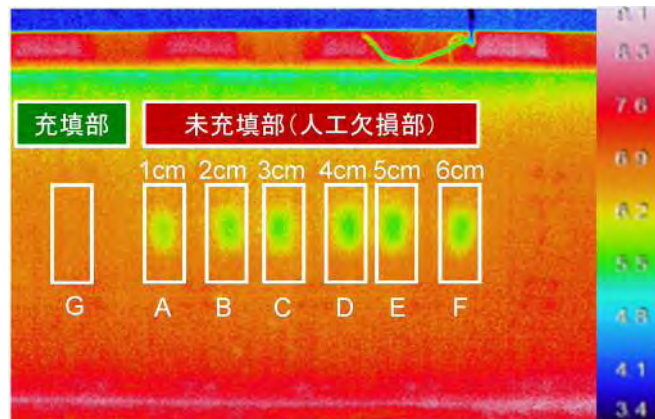


図-17 赤外線画像の解析範囲

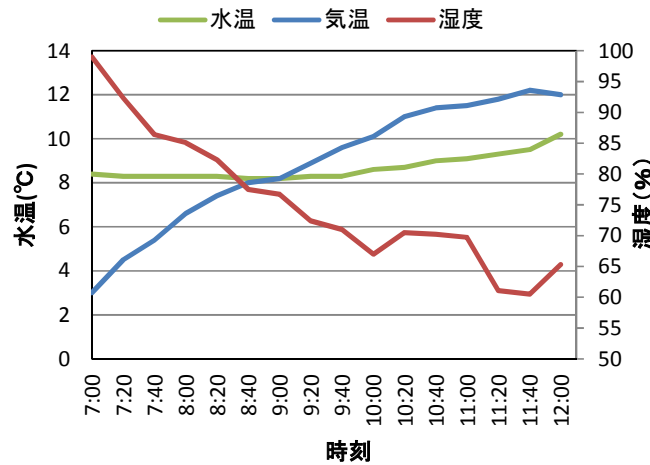
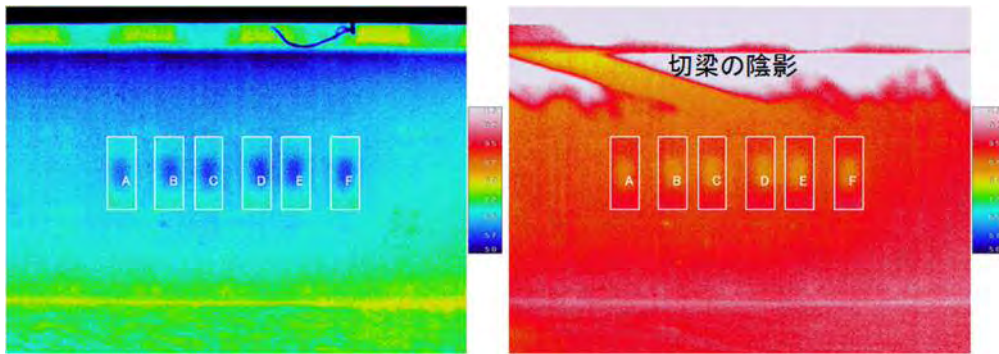


図-18 赤外線画像計測時の環境条件

得した赤外線画像を未充填部（人孔欠損部），充填部に分類し，それぞれ横21 pixel×縦51 pixelの範囲で表面温度分布の解析を行った．表面温度分布は，切梁の陰影の影響を考慮して，7：00，7：20，7：40における赤外線画像を合算して検討した（図-20）．本研究では，注目する箇所の変状を顕在化させる場合に効果が高いとされている赤外線画像の時系列変化を合算処理し擬似的に加熱する手法を採用した²⁹⁾．合算処理により解析を行うことで，7:00から12:00までの時間毎の実測値からだけでは明確化することが難しい微小な温度変化を明確化することを試みた．



図-19 赤外線カメラ設置状況



赤外線画像（7：00）

赤外線画像（7：40）

図-20 切梁の陰影による赤外線画像の相違

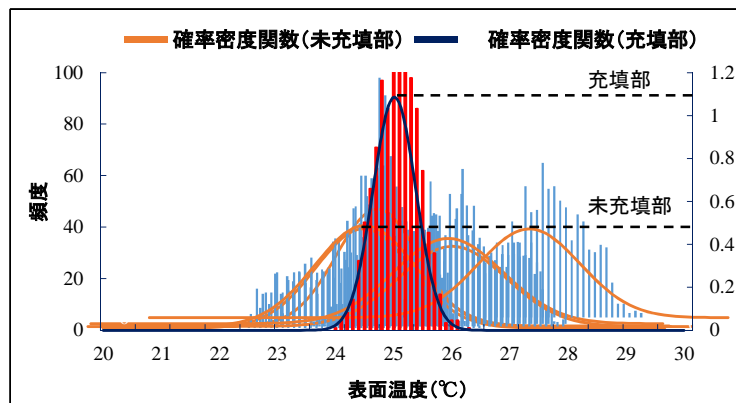


図-21 充填部と未充填部における確率密度関数比較結果

表-2 充填部と未充填部における表面温度分布の基本統計量

	未充填部A	未充填部B	未充填部C	未充填部D	未充填部E	未充填部F	充填部
平均値	24.9	24.6	24.6	26.1	26.3	26.6	25.0
標準偏差	0.721	0.849	0.829	0.948	0.959	0.879	0.368
分散	0.520	0.722	0.687	0.899	0.920	0.773	0.135
範囲	3.5	4.2	4.1	4.6	4.4	4.1	2.3
最小値	22.9	22.5	22.3	23.6	23.8	24.3	24.0
最大値	26.4	26.7	26.4	28.1	28.2	28.4	26.3

5.3 解析結果

図-21 に確率密度関数による充填部と未充填部における表面温度分布の比較結果を示す。解析の結果、確率密度関数の最大値が充填部では1.08、未充填部では平均0.47となった。また、充填部の表面温度の範囲は2.3℃（最大：26.3℃，最小：24.0℃）であった。一方、未充填部の表面温度の範囲は3.5℃～4.6℃（最大：28.4℃，最小：22.3℃）であった（表-2）。未充填部では、気温や太陽光による輻射熱の変化などに起因して表面温度分布が拡大し、確率密度関数が充填部と比べて異なることが示された。

5.4 まとめ

本技術は、腐食鋼矢板を被覆するコンクリートの充填性が品質を左右する。補修後のプレキャストコンクリートパネル表面からでは確認できない内部の不具合について、非破壊検査技術の一つである赤外線サーモグラフィ法を適用して実証的に検討した結果、充填部と比較して未充填部では日射による温度上昇傾向の明らかな相違が確認され、確率密度関数が異なることが示された。赤外線画像から表面温度差を定量化することにより、補修後施設のコンクリート充填状況の自主検査が可能になることを確認した。

参考文献

- 1) (一社) 農業土木事業協会：農業水利施設の機能保全の手引き，pp. 8-15，2015.
- 2) 羽田卓也，峰村雅臣，森井俊広，鈴木哲也：新潟県における鋼矢板水路の補修補強の取り組み，第69回農業農村工学会京都支部研究発表会講演要旨集，pp. 26-27，2012.
- 3) (一社) 日本非破壊検査協会：赤外線サーモグラフィによる設備診断・非破壊評価ハンドブック，p. 45，2007.
- 4) 橋川重郎，岩村純，橋本央季，関根和喜：赤外線サーモグラフィによる石油タンク底板裏面腐食の検査，圧力技術，40(1)，pp. 28-36，2002.
- 5) 遠藤秀樹，日下卓也，阪上隆英：赤外線サーモグラフィ試験による配管のスクリーニング技術，非破壊検査，59(2)，pp. 90-95，2010.
- 6) 今井嵩弓，根本早季，大下英吉，林祥悟：熱画像処理による鉄筋腐食性状評価の高精度化に関する研究，コンクリート工学年次論文集，35(1)，pp. 1705-1710，2013.
- 7) 高德類，新井淳一，野嶋潤一郎，溝渕利明：赤外線を用いたコンクリート中の鉄筋腐食状況の把握に関する研究，コンクリート工学年次論文集，36(1)，pp. 2032-2037，2014.

- 8) Toshimitsu, I. Motokuni, E. Yosizou, O.: Measurement of Radiosity Coefficient by means of an Infrared Radiometer, *Japanese Heat Transfer*, Vol.21, No.1, pp. 39-47, 1992.
- 9) 三井雅一, 福澤公夫, 沼尾達弥: 赤外線サーモグラフィ法を用いた FRP シート・コンクリート間の欠陥検出, 土木学会論文集, 655, pp. 107-117, 2000.
- 10) 西原正彦, 浅野勇, 渡嘉敷勝, 森充広: 赤外線サーモグラフィ法による表面被覆後の開水路に発生する剥離の診断方法, コンクリート工学年次論文集, 34(1), pp. 1708-1713, 2012.
- 11) 水野浩, 栗山浩, 和泉遊以, 阪上隆英: 赤外線サーモグラフィを用いた鋼・コンクリート合成床版の非破壊検査手法に関する研究, 土木学会構造工学論文集, 59A, pp. 317-322, 2013.
- 12) Wackernagel, H. (地球統計学委員会訳): 地球統計学, 森北出版, 2003.
- 13) 松岡俊文: 地球統計学, 物理探査, Vol.51, pp. 96-98, 1998.
- 14) 鈴木哲也, 青木正雄, 大津政康: バリオグラムによる表面被覆工を施したコンクリートの熱特性評価, コンクリート工学年次論文集, 30(2), pp. 763-768, 2008.
- 15) 鈴木哲也, 大津政康, 青木正雄: Kriging 処理を施した熱画像によるコンクリート欠損検出, 土木構造・材料論文集, 26, pp. 112-117, 2010.
- 16) 北村健三, 大竹一友: 基礎 伝熱工学, 共立出版, 1995.
- 17) (一社) 日本非破壊検査協会: 赤外線サーモグラフィ試験 I 2011, pp. 3-12, 2011.
- 18) (一社) 日本非破壊検査協会: 赤外線サーモグラフィ試験 II 2012, pp. 85-97, 2012.
- 19) 武山斌郎, 大谷茂盛, 相原利雄: 大学講義 伝熱工学, 丸善, 1987.
- 20) (一社) 日本非破壊検査協会: 赤外線サーモグラフィ法による建築・土木構造物表層部の変状評価のための試験方法, pp 7-13, 2009.
- 21) 白鳥正樹: 赤外線サーモグラフィによるき裂の評価, 第 1 回サーモグラフィによる非破壊評価技術シンポジウム講演論文集, pp. 91-96, 1995.
- 22) 阪上隆英, 久保司郎, 込山貴仁, 矢田聡, 鈴木宏信: 赤外線サーモグラフィによるコンクリート構造物の非破壊検査, 第 2 回サーモグラフィによる非破壊評価技術シンポジウム講演論文集, pp. 25-30, 1998.
- 23) 岡本芳三, 神永文人, 刑部真弘, 小川和彦, 大岡紀一, 金谷邦雄, 江藤芳丸: 赤外線放射温度計による表面微小線状欠陥の検出, 日本機械学会論文集, 55(514), pp. 1324-1327, 1989.
- 24) 岡本芳三, 大岡紀一, 金谷邦雄, 神永文人, 刑部真弘: 赤外線放射温度計による欠陥の検出 (1), 非破壊検査, 38(5), pp. 525-530, 1989.
- 25) 相原利雄: 機械工学選書「伝熱工学」, 裳華房, 1994.
- 26) Kamoi, A. Okamoto, Y. Ishii, T.: Study of Remote Sensing Nondestructive Test and Its Thermal Image Analysis by means of Infrared Radiometer, *Proceedings of VJS-SPIE*, 1998.
- 27) 小池克明, 劉春学, 田村綾子: 閉鎖性海域環境の経年変化抽出への時空間地球統計学の適用, 情報地質 16(1), pp. 3-15, 2005.
- 28) 鈴木哲也, 森井俊広, 原斉, 羽田卓也: 地域資産の有効活用に資する鋼矢板リサイクル工法の開発, 農業農村工学会誌, 80(10), pp. 21 - 24, 2012.
- 29) (公社) 土木学会: コンクリート構造物の非破壊評価技術の信頼性向上に関する研究小委員会 (339 委員会) (第 II 期) 報告書ならびにシンポジウム講演概要集, コンクリート技術シリーズ 100, pp. 114-117, 2012.