論文　熱画像データを用いた鋼矢板‐コンクリート複合材のひび割れ検出

小林　秀一[*1]・鈴木　哲也[*2]・森井　俊広[*3]

要旨：近年，農業水利施設の補修効果を検証するため，効率的で信頼性の高い非破壊検査手法の開発が急務な課題となっている。本研究では，鋼矢板水路の補修に適用した鋼矢板‐コンクリート複合材表面のひび割れ検出の可能性を熱画像データの空間的分布構造の観点から評価した。空間統計学手法を用いた実証的検討の結果，鋼矢板‐コンクリート複合材表面における熱特性は，ひび割れの有無により明確なラグとバリアンスの関係が得られることが確認された。鋼矢板‐コンクリート複合材表面のひび割れ検出には，セミバリオグラム特性の違いによる評価が可能であることが示唆された。

キーワード：赤外線サーモグラフィ法，セミバリオグラム，空間統計学，鋼矢板‐コンクリート複合材

1. はじめに

戦後から高度経済成長期に集中的に整備された鋼矢板を護岸とした農業水利施設は，長期供用に伴い矢板材の腐食が進行し，断面減少や欠損が顕在化している。このような鋼矢板水路は，水利機能の低下が懸念されることから，腐食特性を踏まえた適切な補修が必要である。補修が行われる鋼矢板水路は，空間的な広がりを持っているため，補修の適用性や有効性などの検証には，効率的で信頼性の高い非破壊検査手法の開発が急務な課題である。一般的に鋼矢板水路の設計段階においては，供用期間中の腐食による肉厚減少を考慮した腐食代が設定され，腐食後も水利機能が確保できるように構造設計が行われている。農業水利施設の場合，腐食代は一般環境において表裏あわせて 2 ㎜である。施工後 10 年から 40 年経過した鋼矢板水路を対象に腐食状況調査を行った既往の研究では，供用から 20 年程度経過した施設において，設計水深付近における水位の変動域での腐食の顕在化が報告されている [1)]。したがって，この部位において腐食代が消失する前に，適切に補修する必要がある。既存の補修工法には，腐食した鋼矢板表面の錆や付着物をブラスト除去した後，防錆剤を塗布しウレタン樹脂などで被覆する有機系被覆工法が挙げられるが，多くの施設で被覆層の剥離や紫外線による再劣化が顕在化している。これらの点を踏まえて，筆者らは，**写真-1** に示すコンクリートを被覆材とした補修工法を提案している [2)]。被覆材にコンクリートを選定した理由は，既存の補修工法と比較して，LCC（Life Cycle Cost）低減の観点から優位にあることと，鋼矢板‐コンクリート複合材による既設鋼矢板の補強効果が期待できることにある。

本研究では，腐食の進行した鋼矢板水路に鋼矢板‐コンクリート複合材による補修工法を適用する際に問題となる施工不良や，表層部の変状（はく離，内部空洞，ひび割れ，漏水など）を非破壊かつ非接触で効率的に検出する非破壊検査手法を検討することを目的としている。熱画像データを用いることにより，可視画像だけでは検出が困難なはく離や内部空洞を検出することができる。しかし，ひび割れについては測定対象物の表面に開口していても，その幅が測定視野に対して小さいため，可視画像に比べて直接的に検出することは難しい。そのため本研究では，熱特性の空間的分布構造を評価することにより，表層部の内部空洞やひび割れを比較的簡易に検出することを目指している。鋼矢板‐コンクリート複合材における熱特性の空間的分布構造を評価するための基礎的検討として，赤外線サーモグラフィ法により計測した熱画像データを用いて，鋼矢板‐コンクリート複合材表面におけるひび割れ部位の熱特性を検討した。熱画像データはパッシブ法（太陽光を熱源とした自然状態での加熱）により計測した。赤外線サーモグラフィ法による変状部可視化の原理は，対象構造物の熱画像データを計測し，表面温度の異常部から変状部を抽出するものである。既往の研究でも示されている通り，空間的な広がりを持

写真-1　鋼矢板‐コンクリート複合材による保護工法の適用例

*1 （株）水倉組　営業本部技術営業課長　学士（農学）　（正会員）
*2 新潟大学　自然科学系（農学部）准教授　博士（工学）（正会員）
*3 新潟大学　自然科学系（農学部）教授　博士（農学）（非会員）

つコンクリート水路構造物での面的な変状部可視化には有効である[3]。しかし，温度異常部を変状部として評価するための判断基準や判断のためのデータ処理方法については，確立していないのが現状である[4]。本報では，熱画像データに基づく変状部の評価手法を確立するための先駆的な試みとして，空間統計学手法の一つであるセミバリオグラム[5),6)]を用いて評価した結果を報告する。

2. 解析手法

2.1 セミバリオグラムを用いた空間構造評価

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 上の確率場 $Z(x)$を考える。計測位置 $x_1,x_2,\cdots,x_n$ における確率変数 $Z(x_1),\cdots,Z(x_n)$を計測データとした場合, 本手法を適用するには, 以下の（A),（B）に示す仮定が成立する必要がある。

（A）$E[Z(x)] = \mu$

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：期待値，μ：平均である。

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

ベクトル h だけ離れた 2 点間の変数値の差の期待値は有限であり，h のみの関数である。

2 γ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構造評価は，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。

2.2 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-1** に示す。本モデルは，横軸にラグ（lag，h：サンプリング間隔），縦軸にセミバリアンス（semi-variance，$\gamma(h)$）をとり，その関係を評価するものである。ラグ h のセミバリアンス $\gamma(h)$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。

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

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 $Z(x_i)$，$Z(x_{i+h})$である場合は，式(2)が得られる。

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

本研究対象である鋼矢板‐コンクリート複合材では，局所的な損傷が無い限り，空間的に連続して物性値が変化すると考えられる。その際，セミバリオグラムは連続し，**図-1** のような形状を示す。セミバリアンスは，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 におけるセミバリアンスは, ナゲット効果（nugget effect）と定義され，実験誤差等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と考えられる。

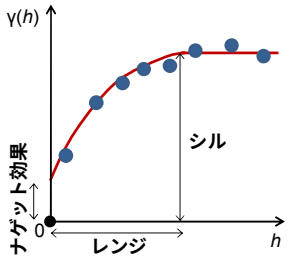


図-1　セミバリオグラムモデル概念図

各パラメータは，ラグとセミバリア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，球型モデル，指数モデルおよびガウス型モデル等が用いられている。本研究では，最も実測値との適合性が良好であった球形モデルを用いて解析を行った。球形モデルを以下に示す。

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

$$\gamma(h) = C_0 + C \qquad (h > a) \qquad (4)$$

ここで，C_0：ナゲット効果，C_0+C：シル，a：レンジである。

3. 計測施設の概要

計測施設は，新潟県新潟市南区に位置する施工後 15 年が経過した白根郷地区新村排水路である。自立式護岸形式の農業用水路で，水路幅 5.5 m，水路高 1.7 m（水路渠底～笠コンクリート天端）である。既設鋼矢板の板厚について，超音波厚さ計を用いて鋼矢板 1 枚につき 15 点の測定を実施した。その結果，設計板厚 10.3 mm に対して, 平均板厚は 9.9 mm, 板厚減少率は 6.5 %であった。腐食に伴う板厚減少は，河床から 50 ㎝の高さに位置する部位で卓越しており，最少板厚で 9.3 mm の結果を得た。以上から，本施設における鋼矢板の腐食は，既往の研究[1)]と同様に設計水深付近における水位の変動域にお

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，平成 23 年 11 月～平成 24 年 1 月の期間に鋼矢板 - コンクリート複合材による補修工法を適用した。適用後に行ったモニタリング調査の結果，供用開始 11 ケ月後（平成 24 年 11 月）に鋼矢板 - コンクリート複合材表面にひび割れによる変状を確認した。ひび割れ発生個所は，既存の笠コンクリート目地部の直下であり，ひび割れ幅は 0.2mm である（**写真-2**）。

4. 計測方法・条件

本研究では，モニタリング調査の結果ひび割れが確認された箇所を対象として，赤外線サーモグラフィにより熱画像データを計測した（**写真-3**）。赤外線サーモグラフィの仕様を**表-1** に示す。セミバリオグラムモデルを用いた空間構造評価は，ひび割れが発生した鋼矢板 - コンクリート複合材（以後，“ 損傷部 ”と記す）と未発生の鋼矢板 - コンクリート複合材（以後，“ 未損傷部 ”と記す）を選定し，両者の比較により行った（**図-2**）。現地調査では，2013 年 6 月 13 日の 5 時から 17 時までの 12 時間の時系列変化を定点計測した。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 30.6 ℃（最大：37.4 ℃，最小：25.0 ℃），湿度 53.5 %（最大：63.0 %，最小：37.0 %），水温 23.2 ℃（最大：27.0 ℃，最小：19.5 ℃）である。熱画像データの計測は，30 分に 1 枚の間隔で行った。赤外線サーモグラフィは，鋼矢板 - コンクリート複合材表面から 5.5 m 離れた地点に設置し，南面に位置する縦 240 pixel×横 320 pixel（縦 1.70 m，横 2.25 m）の範囲で熱画像データを計測した。計測した熱画像データを，損傷部と未損傷部に分類し，それぞれ縦 71 pixel×横 16 pixel（縦 0.50 m，横 0.11 m）の範囲で表面温度を検討した。損傷部の検討範囲は，全体に対するひび割れ占有率が小さいとひび割れの影響は非常に小さくなり，未損傷部と変化が無くなることが考えられたため，可能な限り限定し縦 71 pixel×横 16 pixel とした。**図-3** に損傷部・未損傷部における表面温度の時系列変化を示す。**図-3（A）**は，最高温度と最低温度の温度差の時系列変化を示しており，損傷部の温度差範囲は，最大 5.2℃～最小 2.2 ℃，未損傷部の温度範囲は，最大 4.5 ℃～最小 1.9 ℃であった。**図-3（B）**は，最高温度の時系列変化から求めた変動値を示しており，本研究では，30 分毎の最高温度と，その 30 分前の最高温度との差分を変動値と定義した。最高温度と最低温度の温度差や，変動値等の差分データを活用することで，ひび割れを含む損傷部における微小な温度変化を明確化することを試みた。損傷部の変動値は，最大 5.7 ℃（8 時 30 分）～最小-5.8 ℃（15 時 30 分）であり，未損傷部の変動値は，最大 4.9 ℃（8 時 30 分）～最小

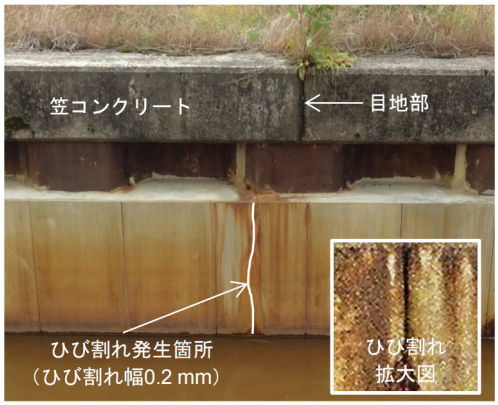


写真-2　鋼矢板 - コンクリート複合材表面の変状

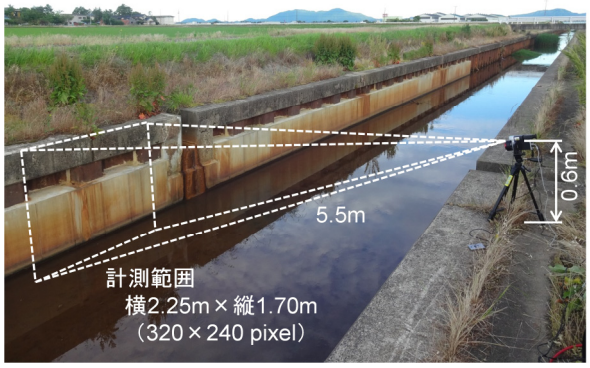


写真-3　赤外線サーモグラフィ計測概要

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

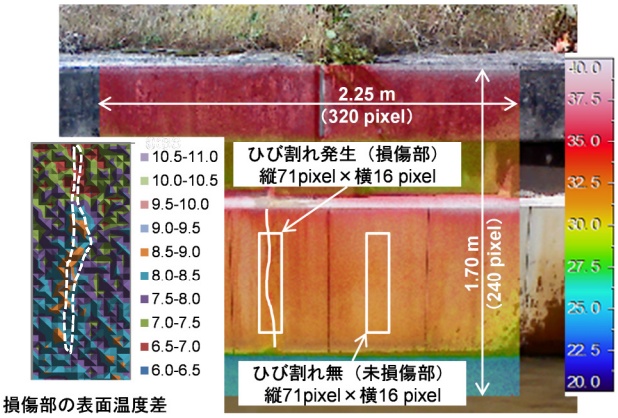


図-2　解析範囲の合成画像（熱画像+可視画像）

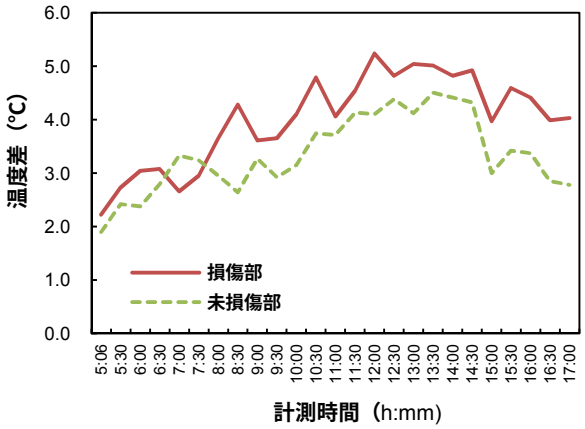
-6.0 ℃（15 時 30 分）であった。統計量は，変動値の最大値を記録した 8 時 30 分の熱画像データから最小値を記録した 15 時 30 分の熱画像データを減算処理し，表面温度差として算出した。本研究では，未損傷部と比較して損傷部における表面の色むらが大きいことから，表面の

色むらなど見掛けの温度差がある場合に効果が高いとされている熱画像データの時系列変化を減算処理した。

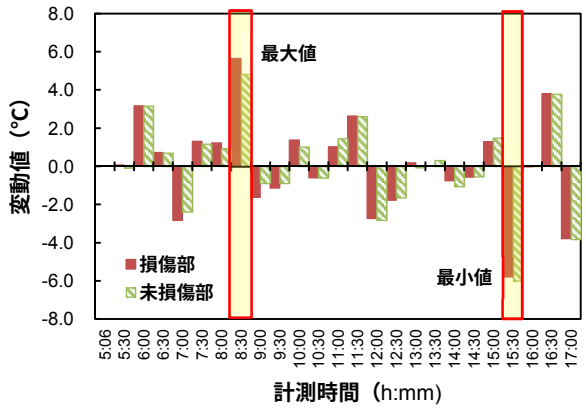
5. 結果および考察

5.1 鋼矢板‐コンクリート複合材表面の熱特性

検討の結果，鋼矢板‐コンクリート複合材表面の熱特性は，損傷度の違いにより異なる傾向が確認された（**図-4（A）～図-4（F）**）。8 時 30 分における損傷部の表面温度は，平均値 32.8 ℃（最大：35.0 ℃，最小：30.7 ℃），範囲 4.3 ℃であり（**図-4（A）**），未損傷部の表面温度は，平均値 32.7 ℃（最大：34.0 ℃，最小：31.4 ℃），範囲 2.6 ℃であった（**図-4（B）**）。一方，15 時 30 分における損傷部の表面温度は，平均値 24.7 ℃（最大：26.5 ℃，最小：21.9 ℃），範囲 4.6 ℃であり（**図-4（C）**），未損傷部の表面温度は，平均値 24.7 ℃（最大：26.4 ℃，最小：23.0 ℃），範囲 3.4 ℃であった（**図-4（D）**）。また，8 時 30 分と 15 時 30 分の表面温度差を検討した結果，損傷部では平均値 8.2 ℃（最大：10.8 ℃，最小：6.3 ℃），範囲 4.5 ℃であり（**図-4（E）**），未損傷部では，平均値 8.0 ℃（最大：9.8 ℃，最小：6.2 ℃），範囲 3.6 ℃であった（**図-4（F）**）。これら表面温度の熱特性の違いは，空洞放射効果によるものと考えられる。損傷部では，ひび割れの進行に伴い空隙量が増加し，空洞放射によって放射率が上昇する。このため，ひび割れ部において見掛けの温度が高くなり，未損傷部と異なる熱特性を顕在化させたものと考えられる [7]。その際，計測施設表面の色むらの特性を考慮する必要がある。



（A）温度差（最高温度－最低温度）の時系列変化



（B）変動値（最高温度）の時系列変化

図-3　鋼矢板‐コンクリート複合材表面の温度変化

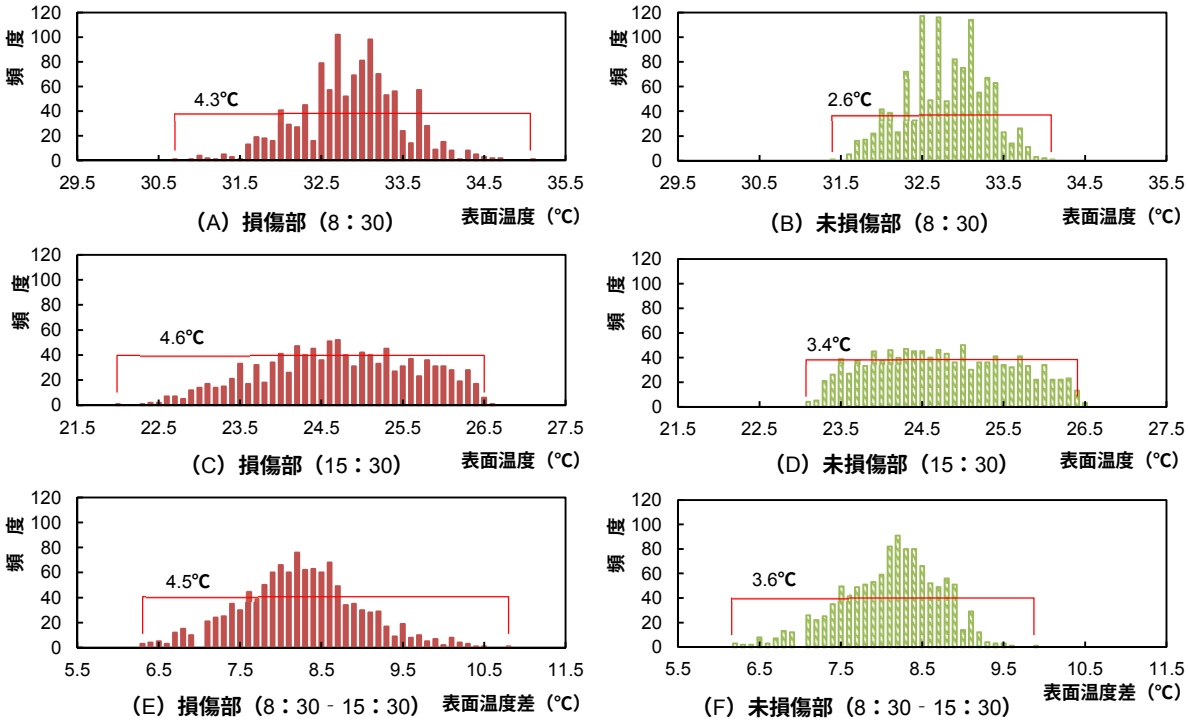


図-4　表面温度の熱特性

5.2 熱特性の統計的特性

計測対象である鋼矢板‐コンクリート複合材表面の熱特性が損傷度の違いにより異なることが**図-4（A）～図-4（F）**から明らかになったことから，表面温度の面的な相違を統計的特性から考察する。

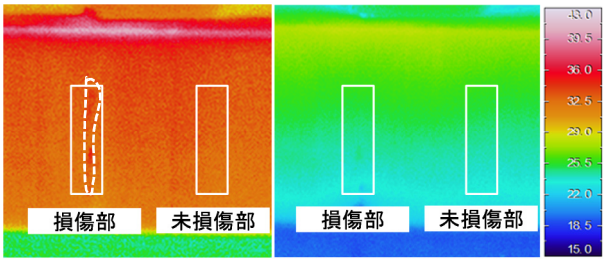
8 時 30 分の熱画像データを**図-5（A）**，15 時 30 分の熱画像データを**図-5（B）**に示す。8 時 30 分の熱画像データでは，損傷部において表面温度の高温化によりひび割れ部位が顕在化しているが，15 時 30 分の熱画像データでは，若干の違いはあるものの明確な差は確認できなかった。本研究では，熱画像データのスパン（温度表示幅）や温度レンジ（表示温度の中心値）の調整だけでは可視化できない差異の少ない熱画像データの特性を検討するため，確率分布の一つであるワイブル分布を用いて確率密度関数を求め，局所的な熱特性を評価した。ワイブル分布とは，信頼工学の分野で物体の体積と強度との関係を定量的に記述するための確率分布として用いられている [8]。一般的に，物体の破壊現象は，材料の最も弱い部位に生じた損傷が拡大する現象としてモデル化されている。本研究では，ひび割れ等の損傷による表面温度分布の変化を，対象とするデータの特性により分布形状を変化させるワイブル分布を採用して検討を試みた。ワイブル分布の確率密度関数 $f(t)$は，

$$f(t) = \frac{m}{\eta}\left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{m}\right] \qquad (5)$$

ここで，t：表面温度または表面温度差，m：形状パラメータ，η：尺度パラメータである。

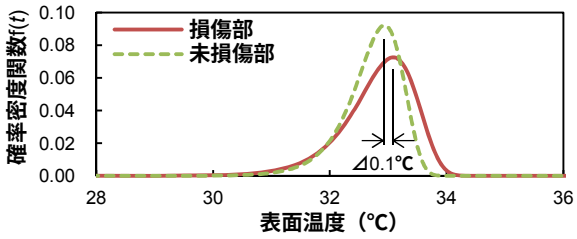
ワイブル分布を**図‐6(A)～図‐6(C)**に示す。検討の結果，8 時 30 分における損傷部の確率密度関数の極大値は 0.073（33.1 ℃）であり，未損傷部は 0.092（33.0 ℃）であった（**図-6（A）**）。一方，15 時 30 分における損傷部の確率密度関数の極大値は 0.047（25.1 ℃）であり，未損傷部は 0.052（25.1 ℃）であった（**図-6（B）**）。確率密度関数の極大値における損傷部と未損傷部の表面温度は**図-6（A）**では⊿0.1℃であり，**図-6（B）**では⊿0.0℃であることが確認された。また，8 時 30 分と 15 時 30 分の表面温度を減算処理した表面温度差について検討した結果，損傷部では確率密度関数の極大値は 0.060（8.4 ℃）であり，未損傷部は 0.074（8.2 ℃）であった。確率密度関数の極大値における損傷部と未損傷部の表面温度差は**図-6（A）**，**図-6（B）**と比較して⊿0.2℃に拡大することが確認された（**図-6（C）**）。このことから，熱画像データを減算処理することにより，ワイブル分布から求めた確率密度関数の極大値における損傷部と未損傷部の分布範囲の相違を検出できる可能性が示唆されたものと考えられる。

以上の結果から，鋼矢板‐コンクリート複合材表面の

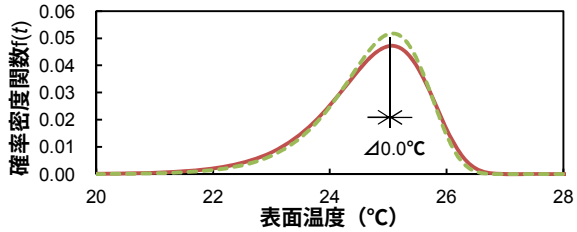


（A）8：30　　（B）15：30

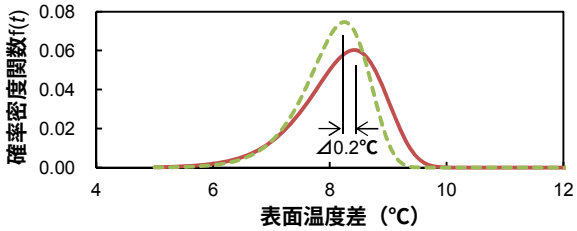
図-5　熱画像データの比較



（A）8：30



（B）15：30



（C）8：30‐15：30

図-6　ワイブル分布

ひび割れを検出する際に，表面温度の熱特性を活用できる可能性が示唆されたものと考えられる。本研究では，差異の少ない熱画像データのより詳細な評価を行うために，熱分布の空間的特性を空間統計学のセミバリオグラムモデルにより検討した。本モデルは，異常点（本論ではひび割れ部位）の空間位置をセミバリアンスで評価し，その特性からデータの空間構造を評価するものである。本論では，セミバリオグラムのセミバリアンスとラグの関係を用いて空間的な特性評価を試みた。

5.3 熱画像データのセミバリオグラムモデル特性

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。損傷部のセミバリオグラムを**図-7**，未損傷部のセミバリオグラムを**図-8** に示す。セミバリアンス $\gamma(h)$は，式(2)を用いて算出した。本研究では，損傷部における空洞放射効果による温度上昇を明確化す

るため，表面温度差の実測値は，**図**-6（C）の確率密度関数の極大値より高温部にあるデータを対象として評価した。解析値は，球形モデル（式(3)および式(4)）を用いて評価した。算出したセミバリアンス $\gamma(h)$は，特定距離（例えばラグ h=10cm など）における評価値間のばらつきの程度を表す指標である。つまりセミバリアンス $\gamma(h)$が大きいほど計測値のばらつきも拡大することになる。

検討の結果, 損傷部では, ラグ h=0～6cm において 0.12～0.23 のセミバリアンス $\gamma(h)$を記録し, ひび割れなどの局所的な高温部の影響により物性値間の空間的依存性が低下することが示唆された。これに対して未損傷部では, セミバリアンス $\gamma(h)$は 0.05～0.09 の範囲にあり, 明確なレンジ範囲は確認されなかった。

空間統計学におけるセミバリオグラムを鋼矢板‐コンクリート複合材表面の熱特性の評価に適用した結果，損傷部では，明確なレンジに基づくセミバリオグラムが確認された。ひび割れなどの熱特性が他の部位と比較して明らかに変質する変状部では，物性値の空間的連続性が無くなることにより，ラグ h の低い段階でのセミバリアンス $\gamma(h)$の増加が確認された。未損傷部では，レンジの明確なセミバリオグラムは確認できないが，ラグ h の増加に伴いセミバリアンス $\gamma(h)$が増加する傾向が確認された。このことから，セミバリオグラム特性を用いて損傷部と未損傷部との相違に着目した比較検証が可能であることが，示唆されたものと考えられる。

6. まとめ

本研究では，赤外線サーモグラフィ法により計測した熱画像データを用いて鋼矢板‐コンクリート複合材表面における損傷度の違いを，熱特性の空間的分布構造の観点から評価した。評価手法には，推計統計学指標（ワイブル分布）に加えて，空間データの評価手法の一つである空間統計学におけるセミバリオグラムを用いた。以下に，本研究から得られた結果を列挙する。

(1) 鋼矢板‐コンクリート複合材表面における損傷度の違いは，空洞放射効果を考慮した熱特性の観点から評価可能である。ひび割れが顕在化した損傷部では，未損傷部と比較して表面温度の熱特性が変質する可能性が示唆された。その際，計測施設表面の色むらの特性を考慮する必要がある。

(2) 熱画像データを減算処理することにより，ワイブル分布から求めた確率密度関数の極大値における損傷部と未損傷部の分布範囲の相違を検出できる可能性が示唆された。

(3) 損傷部におけるセミバリオグラムでは，明確なレンジ範囲が確認されたことから，空間統計学におけるセミバリオグラム特性を用いた損傷部と未損傷部との相違に着目した熱特性の比較検証が可能であることが示唆された。

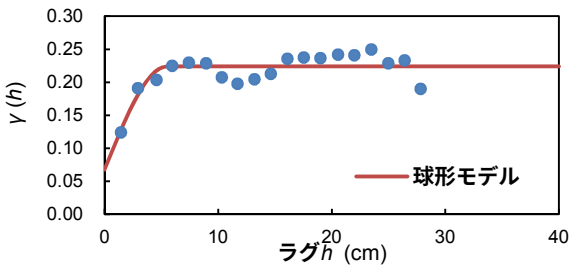


図-7　セミバリオグラム
（損傷部：8：30‐15：30）

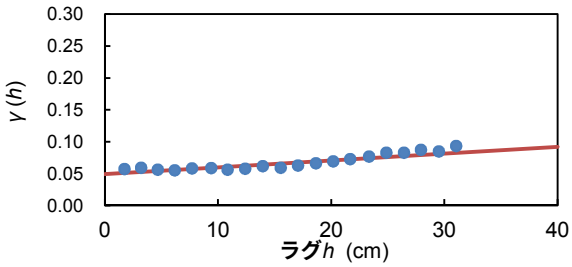


図-8　セミバリオグラム
（未損傷部：8：30‐15：30）

参考文献

1) 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. 21‐24，2012.10.
2) 小林秀一，鈴木哲也，長崎文博，佐藤弘輝，山岸俊太朗：矢板水路の腐食実態を踏まえた保全対策，土木学会論文集 F4（建設マネジメント），Vol.69，No. 4，pp. I_129-I_136，2013.12.
3) 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，Vol.30，No.2，pp.763-768，2008.
4) 土木学会　コンクリート技術シリーズ No.100：コンクリート構造物の診断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，pp.114-117，2013.11.
5) Hans Wackernagel 著（青木謙治監訳）：地球統計学，森北出版，2004.3.
6) 松岡俊文：地球統計学, 物理探査, 第 51 巻, pp.96-98, 1998.5.
7) 日本非破壊検査協会：赤外線サーモグラフィ試験 II，p.85，2011.2.
8) 蓑谷千凰彦：統計分布ハンドブック，朝倉書店，2010.