

農業用鋼矢板護岸における腐食実態の
非破壊・非接触評価法の開発

萩原 大生

新潟大学大学院自然科学研究科博士後期課程

環境科学専攻

目次

第1章 研究背景と目的	1
1.1. 農業生産基盤における鋼矢板護岸	1
1.2. 鋼矢板護岸の腐食問題	3
1.2.1. 腐食環境	3
1.2.2. 腐食進行と性能低下	5
1.3. 鋼矢板腐食実態の非破壊・非接触検出法	7
1.3.1. 非破壊関連用語の定義	7
1.3.2. 非破壊・非接触計測の種類と特徴	8
(1) 画像処理	8
(2) 赤外線サーモグラフィ	8
(3) UAV (Unmanned Aerial Vehicle)	8
1.4. 本論文の構成と着眼点	9
引用文献	11
第2章 理論背景	13
2.1. 鋼矢板の梁理論	13
2.1.1. 梁のたわみの微分方程式	13
2.1.2. 弾性床における梁理論	13
2.1.3. 弾性床における無限長の梁	16
2.1.4. 弾性床における半無限長の梁	18
2.1.5. 設計に関する計算	20
(1) 地上部の鋼矢板護岸に作用する荷重	20
(2) 最大曲げモーメントの計算	20
(3) 変位量の計算	21
(4) 根入れ長の計算	24
2.2. 鋼材の腐食現象	25
引用文献	26
第3章 腐食鋼矢板護岸における板厚分布の空間特性	28
3.1. 地球統計学に基づく腐食現象の空間構造	28
3.2. 計測方法	29
3.2.1. 既設鋼矢板護岸の概要	29
3.2.2. 既設鋼矢板護岸の板厚計測	29
3.3. 解析方法	31

3.3.1. バリオグラム解析	31
3.3.2. 通常クリギング	32
3.3.3. leave-one-out 交差検証法	33
3.4. 結果および考察	33
3.4.1. 減厚値のプロファイル	33
3.4.2. 経験バリオグラムによる空間構造の評価	34
3.4.3. 干満帯のデータ群による理論バリオグラム	36
3.4.4. 交差検証法による空間補間の評価	36
3.4.5. 通常クリギングによる干満帯の腐食実態の評価	37
3.5. 板厚分布の空間特性のまとめ	38
引用文献	39
第4章 曲げ载荷試験による孔食を有する腐食鋼矢板の力学特性	41
4.1. 孔食を有する鋼矢板の変形挙動を捉える意義	41
4.2. 実験方法	41
4.2.1. 鋼矢板供試体	41
4.2.2. 曲げ载荷試験	44
4.3. 解析方法	46
4.3.1. Acoustic Emission (AE) 法	46
4.3.2. デジタル画像相関 (DIC) 法	47
4.4. 結果および考察	47
4.4.1. 曲げ载荷過程における AE パラメータの時系列	47
4.4.2. 孔食周辺における AE 源位置標定	50
4.4.3. DIC 法による孔食周辺における最大主ひずみの集中の検出	52
4.5. 腐食鋼矢板の力学特性のまとめ	54
引用文献	55
第5章 画像解析による鋼矢板護岸の座屈現象の非接触検出	57
5.1. 鋼矢板護岸の座屈現象を検出する意義	57
5.2. 計測方法	59
5.2.1. 対象鋼矢板水路の概要	59
5.2.2. 鋼矢板護岸の座屈現象の画像計測	59
5.3. 解析方法	60
5.3.1. デジタル画像のハフ変換の数理	60
5.3.2. デジタル画像の補正	62
5.3.3. 鋼矢板護岸の座屈現象の検出モデル	63

5.4.	結果および考察	66
5.4.1.	鋼矢板護岸の傾斜角度の実測値	66
5.4.2.	ハフ変換による鋼矢板護岸の直線検出	67
5.4.3.	傾斜角度の実測値とハフ変換による推定値の比較検証	71
5.4.4.	画像補正の結果	71
5.5.	座屈現象の非接触検出のまとめ	73
	引用文献	73
第6章	材料表面の熱収支に基づく鋼矢板厚の非接触検出	76
6.1.	鋼矢板厚の非接触検出の概説	76
6.2.	腐食鋼材の板厚に応じた熱伝導特性	76
6.2.1.	室内実験の概説	76
6.2.2.	実験方法	76
(1)	実験概説	76
(2)	鋼材供試体	77
(3)	実験装置	79
(4)	温度および熱流束の計測	81
6.2.3.	解析方法	82
(1)	熱伝導シミュレーション	82
(2)	鋼材層とビーズ層の境界における熱流束	85
(3)	熱物性値	87
6.2.4.	結果および考察	88
(1)	熱伝導シミュレーションによる実測値の再現	88
(2)	ビーズ層の乾燥条件および湿潤条件の影響	91
(3)	板厚に応じた鋼材層の熱流束の相違	93
(4)	板厚と温度変化量の関係	94
6.2.5.	室内実験のまとめ	96
6.3.	屋外環境での熱収支解析と赤外線計測による鋼矢板厚の非接触評価	98
6.3.1.	屋外実験の概説	98
6.3.2.	材料表面の熱収支と鋼矢板厚の関係	98
(1)	地表面における熱収支の概説	98
(2)	材料表面における熱収支解析モデル	99
(3)	材料温度を指標とした板厚評価	101
6.3.3.	実験および解析方法	102
(1)	鋼矢板供試体	102
(2)	屋外実験の条件	105

(3) 熱収支解析の計算条件	106
(4) 赤外線計測による熱画像処理	107
6.3.4. 結果および考察	108
(1) 気象データと熱電対による供試体温度の実測結果	108
(2) 熱収支解析による鋼矢板厚に応じた温度特性	110
(3) 熱画像より非接触検出される鋼矢板の表面温度	112
(4) 熱画像による表面温度と鋼矢板厚の関係	114
6.3.5. 屋外実験のまとめ	115
引用文献	116
第7章 画像情報に基づく腐食鋼矢板における表面状態の非接触検出	119
7.1. 腐食鋼矢板の可視画像におけるテクスチャ特徴の検出	119
7.1.1. 腐食鋼矢板の表面状態の検出	119
7.1.2. 計測方法	119
7.1.3. 解析方法	121
(1) 色空間変換	121
(2) 同時生起行列によるテクスチャ解析	122
(3) 解析方向に応じたテクスチャ特徴の検出	125
7.1.4. 結果および考察	126
(1) テクスチャの方向性の評価	126
(2) テクスチャの均質性の評価	128
7.1.5. テクスチャ特徴の検出のまとめ	130
7.2. 可視・熱画像を組み合わせた既設鋼矢板護岸における腐食領域の自動検出	131
7.2.1. 腐食領域の自動検出の概説	131
7.2.2. 計測方法	131
7.2.3. 解析方法	131
7.2.4. 結果および考察	134
7.2.5. 自動検出のまとめ	136
引用文献	136
第8章 結論	137

謝辞

第1章 研究背景と目的

1.1. 農業生産基盤における鋼矢板護岸

鋼矢板は、護岸における土砂の崩壊と水流による浸食を防ぐ役割を持った、鋼材からなる基礎資材である。鋼矢板工法は、盛土や掘削における土の法面の崩落を防ぐための仮設材として主に用いられているが、継手の水密度の高さから止水工として港湾の護岸や河川堤防のような永久構造物としても適用されている。鋼矢板は「水」と「土」を制御するための構造部材といえる。農業用排水路の場合、鋼矢板護岸は低平の排水不良地帯や軟弱地盤地帯での排水改良を主目的に建設されている(図1-1)¹⁾。農業水利ストック情報データベース(2017年時点)に登録されている全国の国営造成施設の開水路の中で排水路は約5,349 kmとされる。そのうち、鋼矢板水路は約6%の298 kmとされる。地域別の水路延長では、北陸が約4割、北海道が約3割を占めている²⁾。鋼矢板は水環境の構造物に適用されることから、その部材厚である板厚が腐食による劣化で薄くなることが問題である。板厚は鋼矢板の断面形状として、その断面二次モーメントに影響を与える。断面二次モーメントの低下は、鋼矢板の変形および強度に寄与する曲げ剛性および断面係数の低下につながる。腐食問題は、鋼矢板護岸が多用される港湾分野においても国内外問わずに議論がなされている³⁾⁵⁾。設計では、鋼矢板の表裏に合わせて2 mmの腐食代を確保し、腐食による板厚減少の対策としている⁶⁾。このような設計上の腐食対策を行っているものの、近年では、腐食代を超える鋼矢板の板厚減少が報告されている⁷⁾⁸⁾。極度に進行した腐食により鋼矢板の断面に孔が開く断面欠損が顕在化しており、護岸の倒壊・傾斜が報告されている⁹⁾。海外においても、極度の腐食による護岸の倒壊の事例が報告されている¹⁰⁾。農業農村分野では、農林水産省から腐食鋼矢板の補修に関するマニュアル¹¹⁾が公表されており、腐食問題への取り組みがなされている。

鋼矢板護岸は、鋼矢板と背面土の複合構造物であることから、その挙動は鋼矢板の応力-ひずみ特性と土の応力-ひずみ特性が組み合わされたものとなる¹²⁾。鋼矢板と地盤の関係について、図1-2に護岸における土圧分布と鋼矢板の曲げモーメントについて示す。なお、鋼矢板護岸の形式は主に自立式、切梁式およびアンカー式に分類できるが、ここでは自立式について記す。図1-2のように、鋼矢板には外力荷重として背面土の土圧や水圧が作用し、反力荷重として根入れ部の反力土圧が作用する。自立式護岸は鋼矢板そのものの剛性と土中の根入れ部の地盤反力により、横方向荷重の土圧とのつり合いを保つ仕組みとなっている。このとき、図1-2のたわみを示す点線のように、背面土の主働土圧により鋼矢板は水路の通水側へ傾く。腐食による板厚減少や断面欠損が生じると、断面性能の低下に伴い鋼矢板の剛性が低下し、安定を維持できなくなり通水側へ倒壊すると考えられる。腐食は水位変動の激しい干満帯で顕在化する傾向があるが、曲げモーメントは根入れ部において卓越する。このことから、腐食領域と最大曲げモーメントの作用位置は異なるが、護岸の座屈の現状から鋼矢板の断面性能の低下が安定性に与える影響が大きいと考えられる。

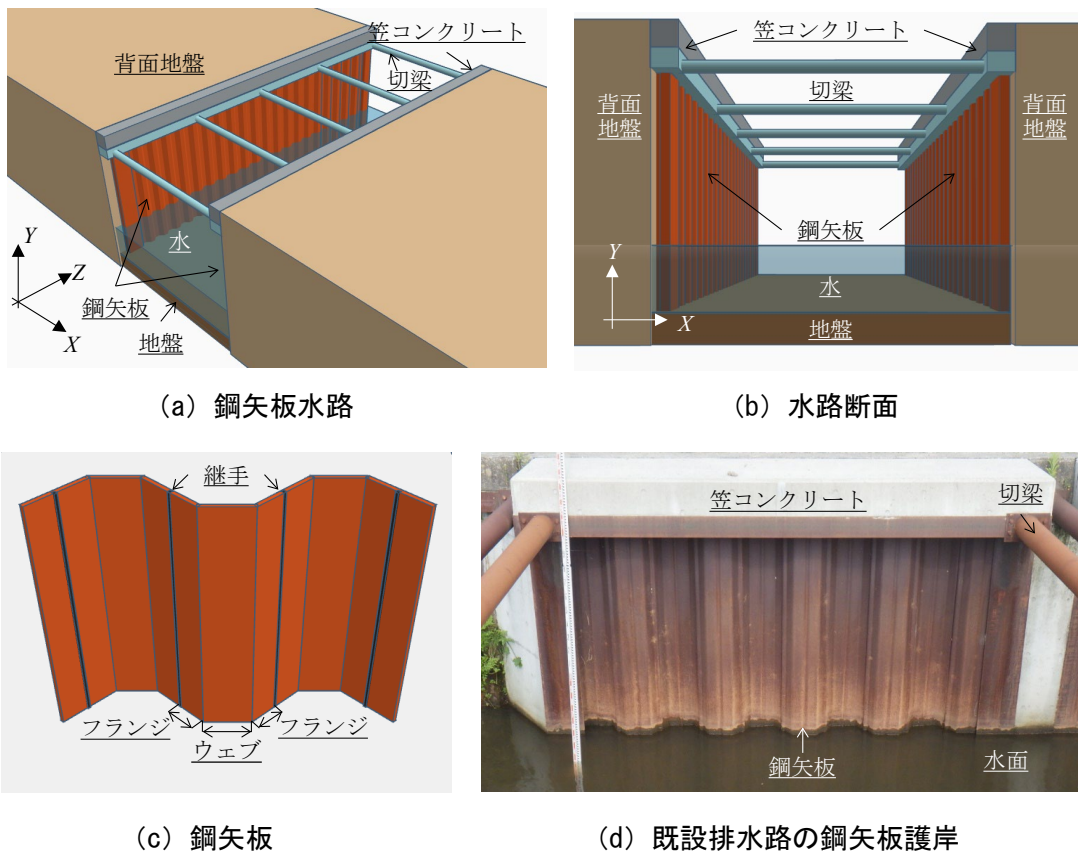


図 1-1 鋼矢板水路の模式図

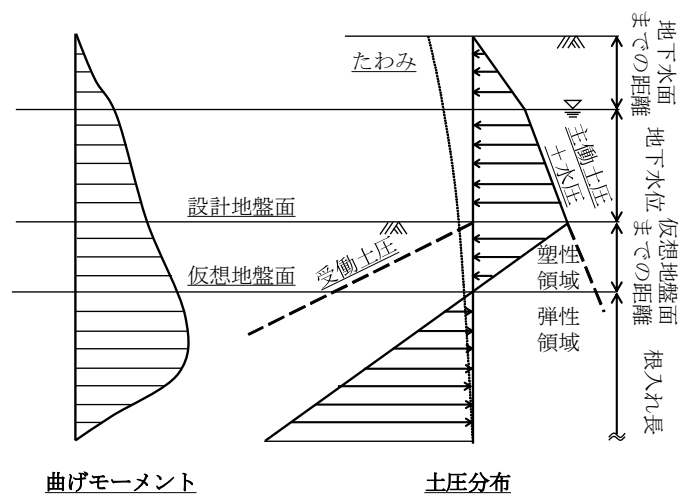


図 1-2 鋼矢板護岸に作用する荷重および地盤反力

1.2. 鋼矢板護岸の腐食問題

1.2.1. 腐食環境^{11), 13)}

既設鋼矢板護岸において生じる腐食は湿食であり、酸素や酸などの物質が存在する環境のもとで腐食が生じる。腐食が進行する速度や状況は水や酸素の供給状況に影響されるため、環境によって異なる。水路護岸として地盤に貫入して設置された鋼矢板は、鉛直方向に大気環境、水環境および土環境を隔てるという特徴がある。これは、ひとつの部材で異なる腐食環境を隔てることになる。供用条件を考慮して、腐食環境を気中部、干満帯、水中部および土中部の4つに分類する（図1-3）。

気中部は、過度な増水あるいは降雨を除いて水と接触しない部位とする。気中部の腐食要因としては、大気中の水分（湿度）、酸素、浮遊物質（亜硫酸ガス、飛来塩分）がある。腐食速度は他の部位に比べて小さい傾向がある。ただし、浮遊物質や矢板表面の濡れ状態に大きく影響を受ける。降雨や結露などで、乾湿が繰り返されることで、電気化学的反応の進行と酸素の供給が繰り返されて腐食が促進される。

干満帯は、営農に伴う灌漑・非灌漑あるいは日常的な降雨による通水量の増減で水位変動する部位である。乾湿繰り返しを受ける環境にあることから鋼矢板表面に水膜が形成されやすく、酸素供給量も多いため、腐食速度は大きい傾向がある。特に、灌漑期および非灌漑期の最頻水位付近では水膜が形成されやすいため、干満帯の上部および下部において腐食速度は大きくなる傾向がある。集中した腐食により孔食が発生し、鋼矢板の断面を貫通する場合がある。孔食が生じている場合、背面土側も腐食が進行し、孔食の範囲が拡大する可能性がある（図1-4）。

水中部は、常に水面以深にあり、大気に触れない部位とする。気中部および干満帯に比較すると供給される酸素量が少ないため、腐食速度は小さいとされる。水中に塩化物イオンが含まれる場合はその限りではなく、腐食速度が大きくなる可能性がある。

土中部は、土質や通気性を含む腐食要因が多く存在し、腐食メカニズムが十分明らかにされていない。水中部と同じく、供給される酸素量が少ないため腐食速度は小さい傾向にあるとされる。腐食性土壌の場合や、酸素と水の供給がある場合（笠コンクリート下部の背面土など）には腐食が進行する。

港湾分野における鋼矢板では、満潮と干潮の周期に応じた水位変動によりこれらの部位が分けられる。一方で、農業用排水路の場合、排水路内の水位変動の明確な周期や正確に記録された水位データがあるわけではないため、鋼矢板の表面状態の目視や板厚計測によりこれらの部位をおおよそ定めている。

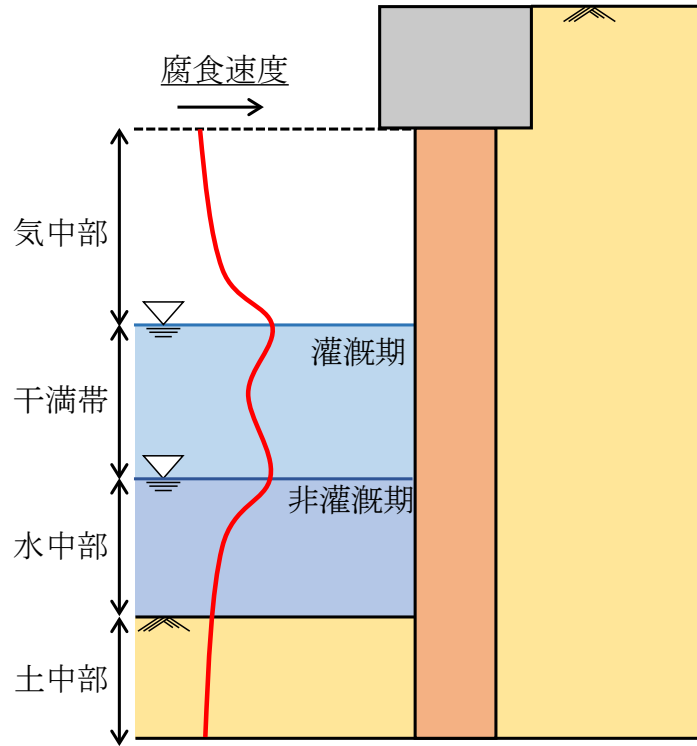


図 1-3 農業用鋼矢板護岸における腐食環境と腐食速度の模式図



図 1-4 農業用鋼矢板護岸における孔食

1.2.2. 腐食進行と性能低下

図 1-5 に農業用鋼矢板護岸の性能低下機構を示す。鋼矢板護岸では、営農の灌漑・非灌漑や降雨による水位変動の影響を最も受ける干満帯において、腐食が卓越し、板厚減少が集中する傾向にある。水位変動の激しい位置での腐食の顕在化は港湾構造物においても同様であり、港湾分野では集中腐食と呼ばれている¹³⁾。腐食が進行すると鋼矢板を貫通する孔として断面欠損が顕在化する。このとき、孔から背面土の吸出し(図 1-6 (a))や鋼矢板の剛性低下に伴う地盤のき裂(図 1-6 (b))が起こる場合がある。腐食孔による吸出しは護岸の安定性の低下を促進させることが報告されている^{14), 15)}。図 1-5 より、断面欠損による断面性能の低下により護岸の座屈破壊が起こる。これは、断面性能の低下により主働土圧による曲げに伴った鋼矢板面の背面土が圧縮力に耐え切れず座屈を引き起こしていると考えられる。加えて、腐食孔への応力集中が伴うことで、終局限界状態へ至る経過が促進されるものと推察される¹⁶⁾⁻¹⁸⁾。北海道のような寒冷地では、土圧の荷重外力に加え、積雪、雪庇および凍上が護岸の倒壊に影響を与えている可能性が報告されている⁹⁾。鋼矢板施工時の影響について、主な打撃工法、バイブロハンマ工法、オーガ併用圧入工法および油圧式圧入引抜工法のうち、打撃工法は鋼矢板頭部を圧壊する危険があるが¹⁹⁾、基本的には施工そのものが腐食や腐食起源の座屈現象に大きく関与しないものとする。鋼製部材の座屈破壊について、H 鋼における数値解析による力学挙動の評価は報告されているが^{20), 21)}、鋼矢板護岸については報告がほとんど見られないのが現状である。地震や津波のような災害による護岸の倒壊への影響評価^{22), 23)}が検討されているように、腐食起源の座屈機構について鋼矢板と背面土の複合構造物としての解析的検討から解明する必要がある。

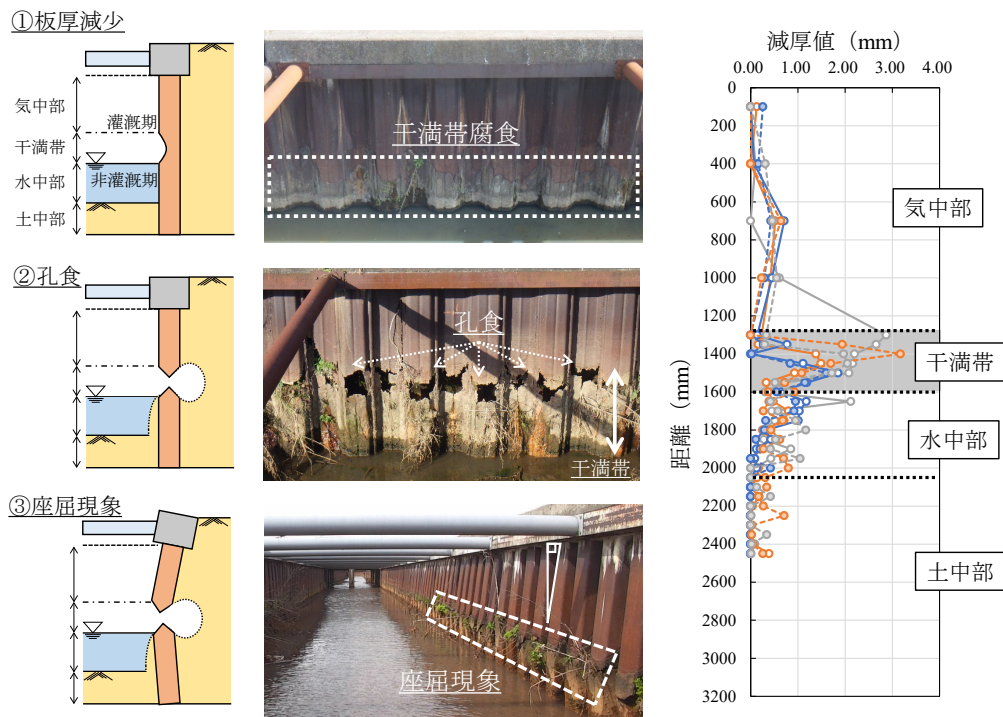


図 1-5 農業用鋼矢板護岸における性能低下機構



(a) 腐食孔からの背面土の吸出し



(b) 護岸の座屈による笠コンクリートの傾斜

図 1-6 鋼矢板の腐食による背面土への影響

1.3. 鋼矢板腐食実態の非破壊・非接触検出法

1.3.1. 非破壊関連用語の定義

本論文における非破壊関連用語の定義を記す。表 1-1 に用語の一覧とその定義を示す。

表 1-1 非破壊関連用語の定義²⁴⁾

用語	定義
非破壊試験 Non-Destructive Testing (NDT)	素材または製品を破壊せずに、品質またはきず、埋設物などの有無およびその存在位置、大きさ、形状、分布状態などを調べる試験。 欠陥検出手法を意味する、物理的な原理に基づいた各種の試験法。
非破壊検査 Non-Destructive Inspection (NDI)	非破壊試験の結果から、規格などによる基準に従って合否を判定する方法。 非破壊試験の結果と判定基準に基づいた、使用可能であるか否かの判断が行われる検査。
非破壊評価 Non-Destructive Evaluation (NDE)	非破壊試験で得られた情報を、試験体の性質または使用性能の面から総合的に解析・評価すること。 材料中の欠陥の有無や材料物性・構造検出などの評価。欠陥と強度の関係を定量的に理解するために用いられる。
劣化 degradation	材料または製品が、応力、熱、光などの使用環境によって、次第に本来の機能に有害な変化を起こすこと。 材料の物理化学的変質に伴う性能の低下。
損傷 damage	使用環境によって、物理的性質に永久変化が起こって性質が低下すること。 有効断面の減少に伴う力学性能の低下。

1.3.2. 非破壊・非接触計測の種類と特徴

本項では、非破壊試験での一般的な手法を述べるよりも、本論文に取りまとめられている研究で用いられた非破壊・非接触の計測手法を記述する。

(1) 画像処理^{25), 26)}

画像処理 (image processing) とは、画像を入力として、それに対し処理加工を行い、その結果の画像を出力とする変換である (画像→画像)。類似の用語として画像解析 (image analysis) があるが、これは画像を入力として、そこに写る対象に関する特徴を抽出し、対象に関する特定の記述を得るものである (画像→記述)。これは、画像認識、画像理解および画像計測とも呼ばれる。画像処理と画像解析の両者は画像を入力とするものの、出力の形態が異なる。ただ、上記の画像処理の説明は狭義の意味を表しており、画像解析まで含まれた意味で用いられることもある。

他の用語としてはコンピュータビジョン (computer vision) やコンピュータグラフィックス (computer graphics : CG) がある。コンピュータビジョンは、入力された画像から元の3次元の世界を復元したり、理解したりする処理のことである。これは、2次元空間から3次元空間への処理といえる。一方、コンピュータグラフィックスは、実際のカメラに代わり、コンピュータ内にある3次元の記述 (モデル) から画像を生成することである。これは、3次元空間から2次元空間への処理といえる。

以上をまとめると、画像による2次元空間において、入力画像の処理結果として出力形態の異なるものが画像処理と画像解析である。2次元空間と3次元空間をつなぐ処理がコンピュータビジョンとコンピュータグラフィックスである。

(2) 赤外線サーモグラフィ

赤外線サーモグラフィとは、物体表面から放射される赤外線放射エネルギーを検出して、見かけの温度に変換し、空間的な温度分布を画像表示する方法またはその装置である²⁴⁾。本手法の特徴としては、非破壊かつ非接触での検査が可能なこと、短時間に広範囲の検査が可能なこと、検査対象の材質による制限を受けないことなどが挙げられる²⁷⁾。計測における物理的背景には伝熱工学を基礎としている。鋼矢板の板厚に起因する熱特性を評価することを目的に適用している。

(3) UAV (Unmanned Aerial Vehicle)

無人航空機である UAV (Unmanned Aerial Vehicle) は、リモートセンシング技術のひとつとして、森林航測、公共測量および構造物の非接触計測等の場面で用いられる。UAV を用いる利点として、「再測の時間間隔を自分で決定できること」、「低高度飛行で対象物により近接でき、空間分解能の高いデータが取得可能なこと」および「運用コストを低く抑えられ

ること」の3点が挙げられている^{28),29)}。本章では、「長大な延長を有する水路構造物に対する調査・計測の効率化」および「人が直接的に調査・計測することの負担が大きいあるいは困難な場面に対する利便性」の観点から適用を試みている。

1.4. 本論文の構成と着眼点

本論文は、前述のような既設水路の鋼矢板護岸における腐食実態を検出する計測方法の提案をとりまとめる。このとき、梁構造物である鋼矢板護岸の曲げ剛性 (EI) に関わる板厚に着目する。構造物の安定性・安全性に関わる鋼矢板護岸の座屈・倒壊について、国内だけでなく国外（港湾分野）でも報告事例があるが、板厚に応じた力学特性までは議論されていない。このような終局限界状態に近い鋼矢板護岸に対して、板厚の減少や孔食が鋼矢板の力学特性に与える影響を踏まえ、座屈現象を既設護岸から検出する方法およびそれに至る前の減少した板厚を検出する方法を扱う。板厚の計測は超音波厚さ計を用いて接触的かつ点的に実施されるが、長大で面的な水路構造物に対して、水路内に入り計測を行うことは物理的・時間的に負担が強られる。既設鋼矢板の板厚に基づいて、曲げ応力度および頭部変位量の計算結果による照査を実施し、状態評価がなされる。本論文では、腐食した既設鋼矢板護岸の状態評価に資する画像解析を中心とした非破壊・非接触による計測技術をとりまとめる。

本論文の構成は、「第1章 研究背景と目的」以降、「第2章 理論背景」、「第3章 腐食鋼矢板護岸における板厚分布の空間特性評価」、「第4章 曲げ載荷試験による孔食を有する腐食鋼矢板の力学特性」、「第5章 画像解析による鋼矢板護岸の座屈現象の非接触検出」、「第6章 材料表面の熱収支に基づく鋼矢板厚の非接触検出」、「第7章 画像情報に基づく腐食鋼矢板における表面状態の非接触検出」および「第8章 結論」である。第2章では、梁理論に基づき成り立っている鋼矢板護岸について、たわみの微分方程式を用いて解説する。設計基準³⁰⁾で用いられる各種の式について、弾性床における梁理論から導出されることを示す。加えて、鋼材の腐食現象の機構を説明する。第3章では、既設鋼矢板護岸の板厚計測により、気中部、水中部および土中部にまたがる鋼矢板の実際の腐食の特徴を調査した結果を示す。それらのデータに基づき地球統計学のバリオグラムおよびクリギングの手法により、空間構造の評価を行う。第4章では、腐食による板厚の減少や孔食で曲げ剛性が変化した鋼矢板の力学特性について、曲げ載荷試験により評価を行う。第5章では、第4章のように板厚の減少や孔食により力学特性が低下したことで座屈現象が顕在化した鋼矢板護岸を対象に、画像解析の図形検出手法のハフ変換により、非接触で検出するモデルの提案と検討結果を示す。第6章では、鋼矢板護岸が第5章のような座屈現象に至る前に、現状の板厚を非接触検出する方法を提案する。板厚を熱容量に資するパラメータと捉えた場合に、板厚に応じて生じる温度の相違に基づいた評価を試みる。第7章では、第6章での手法を現地へ適用する際に板厚を評価するための腐食領域を特定するための画像解析による自動検出を提案する。第8章では、これまでの議論をまとめる。各章の関係を図1-7に示す。

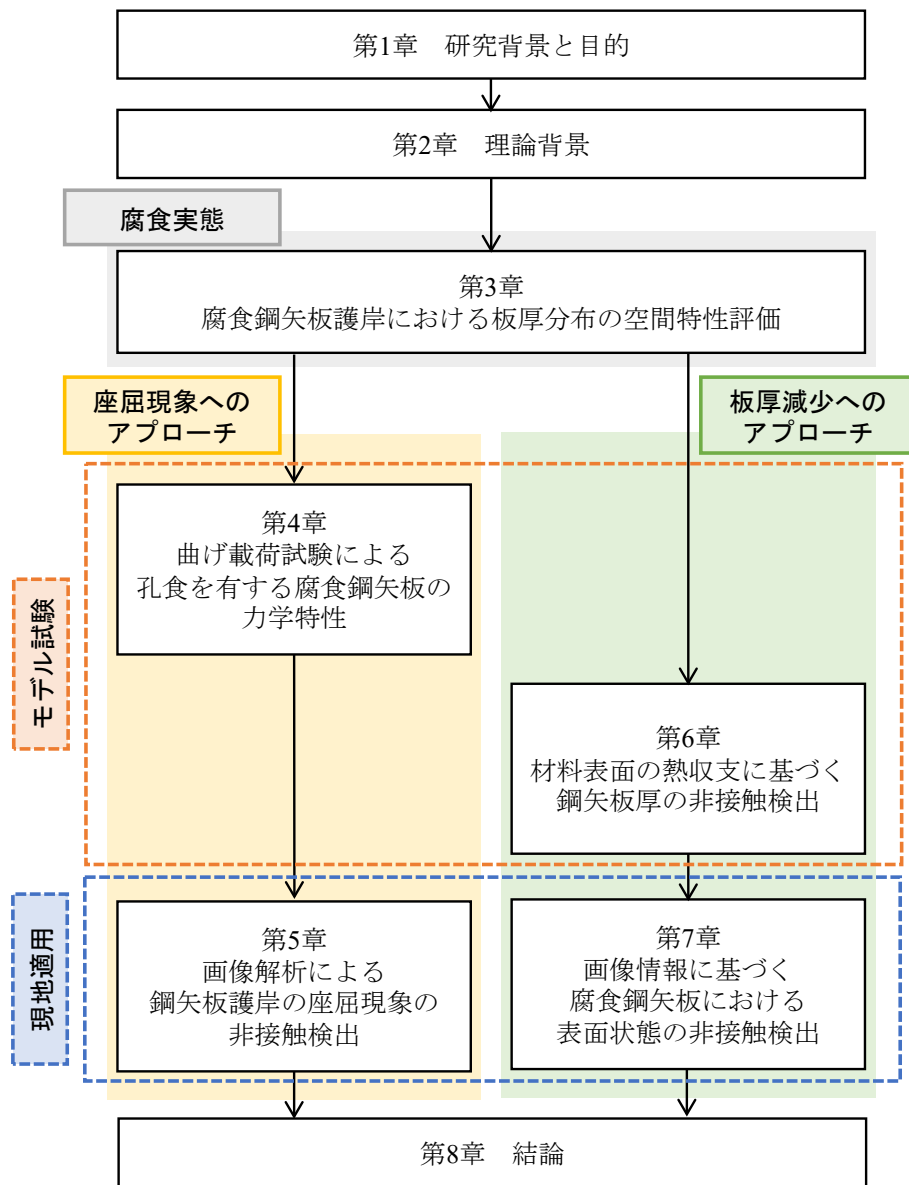


図 1-7 各章の関係

引用文献

- 1) 鈴木哲也, 浅野 勇, 石神暁郎 (2019): 農業用鋼矢板水路の腐食実態と長寿命化対策—補修・補強・更新への性能設計—, 養賢堂, pp. 42~61.
- 2) 石村英明, 高島功治, 中濱政文 (2017): 鋼矢板水路の保全対策における農林水産省の取り組み, 鋼矢板水路の腐食実態と補修・補強対策, 第一印刷, pp. 1-4.
- 3) Wall, H. and Wadso, L. : Corrosion rate measurements in steel sheet pile walls in a marine environment, *Marine Structures* 33, pp.21~32 (2013)
- 4) Melchers, R.E., Jeffrey, R.J., and Usher, K.M. (2014): Localized corrosion of steel sheet piling, *Corrosion Science* 79, pp. 139~147.
- 5) 山路 徹, 田土弘人, 川瀬義行, 小林厚史, 吉田倫夫 (2020): 海洋鋼構造物の集中腐食および電気防食に関する最近の知見, 港湾空港技術研究所資料 1369, pp. 1~70.
- 6) 農林水産省農村振興局整備部設計課 (2014): 土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「水路工」, pp. 457~479.
- 7) 鈴木哲也, 森井俊広, 原 斉 (2012), 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, *水土の知* 80 (10), pp. 21~24.
- 8) 萩原大生, 横堀聖佳, 島本由麻, 鈴木哲也 (2019): 地球統計学に基づいた鋼矢板における腐食実態の空間特性評価, *材料* 72 (3), pp. 188~195.
- 9) 石神暁郎, 星野香織, 工藤吉弘 (2018): 積雪寒冷地における鋼矢板排水路の性能低下特性, *水土の知* 86 (5), pp. 43~46.
- 10) Chaves, I.A., Melchers, R.E. Peng, L., and Stewart, M.G. (2016): Probabilistic remaining life estimation for deteriorating steel marine infrastructure under global warming and nutrient pollution, *Ocean Engineering* 126, pp. 129~137.
- 11) 農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室 (2019): 農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【鋼矢板水路腐食対策(補修)編】(案).
- 12) 石黒 健, 白石基雄, 海輪博之: 土木建設技術全書③鋼矢板工法(上巻), 山海堂, pp. 143~197 (1986).
- 13) (一財)沿岸技術研究センター (2009): 港湾鋼構造物防食・補修マニュアル.
- 14) 中村友昭, 福田 俊, 水谷法美 (2014): 矢板式岸壁の腐食孔からの土砂吸い出し現象に関する数値解析, *土木学会論文集 B3 (海洋開発)* 70 (2), pp. I_528~I_533.
- 15) 中村友昭, 福田 俊, 趙 容桓, 水谷法美 (2016): 矢板式岸壁の腐食孔からの埋立土砂の吸い出し機構に関する研究, *土木学会論文集 B3 (海洋開発)* 72 (2), pp. I_724~I_729.
- 16) Cerit, M., Genel, K., and Eksi, S. (2009): Numerical investigation on stress concentration of corrosion pit, *Engineering Failure Analysis* 16, pp. 2467~2472.
- 17) Bhandari, J., Khan, F., Abbassi, R., Garaniya, V., and Ojeda, R. (2015): Modelling of pitting

- corrosion in marine and offshore steelstructures - A technical review, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 37, pp. 39~62.
- 18) Balegh, B., Trouzine, H., and Houmadi, Y. (2018): Finite Element Simulation and Prediction of Mechanical and Electrochemical Behavior on Crevice Corrosion in Sheet Pile Steel, *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering* 12(1), pp. 23~31.
 - 19) (一社) 鋼管杭・鋼矢板技術協会 (2017) : 鋼矢板 Q&A 第 10 版, p. 107.
 - 20) Karagah, H., Shi, C. Dawood, M., and Belarbi, A. (2015): Experimental investigation of short steel columns with localized corrosion, *Thin-Walled Structures* 87, pp. 191~199.
 - 21) Bailey, B. and Osomo, S.A. (2020): Prediction of Nominal Compressive Strength in Steel Piles Subject to Corrosion Losses- A Finite Element Approach, *Journal of Civil Engineering and Construction* 9(1), pp. 24~30.
 - 22) Mitobe, Y., Adityawan, M.B., Roh, M., Tanaka, H., Otsushi, K., and Kurosawa, T. (2016): Experimental Study on Embankment Reinforcement by Steel Sheet Pile Structure Against Tsunami Overflow, *Coastal Engineering Journal* 58(4), 1640018.
 - 23) Gazetas, G., Garini, E., and Zafeirakos, A. (2016): Seismic analysis of tall anchored sheet-pile walls, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 91, pp. 209~221.
 - 24) JIS Z 2300 非破壊試験用語 (2020)
 - 25) 画像情報教育振興協会 (CG-ARTS) (2015) : デジタル画像処理 [改訂新版], pp. 10-11.
 - 26) 田村秀行 (2002) : コンピュータ画像処理, オーム社, pp. 3-5.
 - 27) 日本非破壊検査協会 (2004) : 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.
 - 28) Anderson K. and Gaston K. J. (2013): Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology, *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11 (3), pp. 138-146.
 - 29) 村上拓彦 (2018) : UAV を利用した森林リモートセンシング, *日本リモートセンシング学会誌*, 38(3), pp. 258-265.
 - 30) 農林水産省農村振興局整備部設計課 (2015) : 土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「水路工」基準, 基準の運用, 基準及び運用の解説, 技術書, 農業農村工学会, pp. 457-479.

第2章 理論背景

2.1. 鋼矢板の梁理論

2.1.1. 梁のたわみの微分方程式

鋼矢板の曲げが構造材料である鋼の弾性域において起こる場合、その曲げ挙動は梁のたわみ曲線（弾性曲線）に従う。たわみ y が位置 x を変数とする関数 $F(x)$ で表されると（ $y = F(x)$ ）、たわみ角 θ 、曲げモーメント M 、せん断力 Q は次の一連の微分方程式である式 (2-1) により示される。

$$\frac{dy}{dx} = \tan \theta \approx \theta, \quad \frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI}, \quad \frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{Q}{EI} \quad (2-1)$$

ここで、 E は弾性係数、 I は断面二次モーメントである。これらを解くことにより、鋼矢板の縦梁としての変形形状、応力状態および支承部の反力分布を求めることができる。

2.1.2. 弾性床における梁理論

鋼矢板護岸は地上部で受ける土圧や水圧の荷重を根入れ部における地盤反力により安定を保っている。根入れ部における鋼矢板に対して、弾性床における梁理論によりとりまとめられる（図 2-1）。ここでは、Hetenyi による理論¹⁾を参照し、式展開を行う。弾性床における梁の微小部分 dx における力のつり合いから式 (2-2) を得られる（図 2-2）。

$$Q - (Q + dQ) + kydx - q(x)dx = 0$$

$$\therefore \frac{dQ}{dx} = ky - q(x) = \frac{d^2M}{dx^2} \quad (2-2)$$

ここで、 $q(x)$ は分布荷重、 k は地盤反力係数である。式 (2-1) のたわみの微分方程式に式 (2-2) を代入すると式 (2-3) を得る。

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} = -ky + q(x) \left(\because EI \frac{d^4y}{dx^4} = -\frac{d^2M}{dx^2} \right)$$

$$\therefore EI \frac{d^4y}{dx^4} + ky = q(x) \quad (2-3)$$

式 (2-3) の特性方程式の解を m とすると、式 (2-4) を得る。

$$EI m^4 + k = 0 \quad \therefore m^4 = -\frac{k}{EI} \quad (2-4)$$

式 (2-4) より, 式 (2-5) で示す $m_1 \sim m_4$ の 4 つの値を得る.

$$\begin{cases} m_1 = -m_3 = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}(1+i) = \beta(1+i) \\ m_2 = -m_4 = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}(-1+i) = \beta(-1+i) \end{cases} \quad (2-5)$$

ここで, 特性値 β を式 (2-6) のように表す.

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \quad (2-6)$$

$A_1 \sim A_4$ を積分定数とすると, 式 (2-3) の一般解として, 式 (2-7) を得る.

$$y = A_1 e^{m_1 x} + A_2 e^{m_2 x} + A_3 e^{m_3 x} + A_4 e^{m_4 x} \quad (2-7)$$

ここで, 式 (2-8) の関係を提示する.

$$\begin{cases} e^{i\beta x} = \cos \beta x + i \sin \beta x \\ e^{-i\beta x} = \cos \beta x - i \sin \beta x \end{cases} \quad (2-8)$$

式 (2-7) に対して式 (2-5) と式 (2-8) の関係を用いて式を整理すると, 式 (2-9) を得る.

$$\begin{aligned} y &= A_1 e^{\beta(1+i)x} + A_2 e^{\beta(-1+i)x} + A_3 e^{-\beta(1+i)x} + A_4 e^{-\beta(-1+i)x} \\ &= e^{\beta x} (A_1 e^{i\beta x} + A_4 e^{-i\beta x}) + e^{-\beta x} (A_2 e^{i\beta x} + A_3 e^{-i\beta x}) \\ &= e^{\beta x} \{A_1 (\cos \beta x + i \sin \beta x) + A_4 (\cos \beta x - i \sin \beta x)\} \\ &\quad + e^{-\beta x} \{A_2 (\cos \beta x + i \sin \beta x) + A_3 (\cos \beta x - i \sin \beta x)\} \end{aligned}$$

$$= e^{\beta x}\{(A_1 + A_4) \cos \beta x + i(A_1 - A_4) \sin \beta x\} \\ + e^{-\beta x}\{(A_2 + A_3) \cos \beta x + i(A_2 - A_3) \sin \beta x\}$$

$$\therefore y = e^{\beta x}(C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x}(C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x) \quad (2-9)$$

ただし、式 (2-10) の新たな積分定数として $C_1 \sim C_4$ を定める。

$$C_1 = A_1 + A_4, \quad C_2 = i(A_1 - A_4), \quad C_3 = A_2 + A_3, \quad C_4 = i(A_2 - A_3) \quad (2-10)$$

式 (2-9) のたわみ曲線式から、1 階微分のたわみ角に関する式 (2-11)、2 階微分の曲げモーメントに関する式 (2-12)、3 階微分のせん断力に関する式 (2-13) を得る。

$$\frac{1}{\beta} \frac{dy}{dx} = e^{\beta x}\{C_1(\cos \beta x - \sin \beta x) + C_2(\cos \beta x + \sin \beta x)\} \\ - e^{-\beta x}\{C_3(\cos \beta x + \sin \beta x) - C_4(\cos \beta x - \sin \beta x)\} \quad (2-11)$$

$$\frac{1}{2\beta^2} \frac{d^2y}{dx^2} = -e^{\beta x}(C_1 \sin \beta x - C_2 \cos \beta x) + e^{-\beta x}(C_3 \sin \beta x - C_4 \cos \beta x) \quad (2-12)$$

$$\frac{1}{2\beta^3} \frac{d^3y}{dx^3} = -e^{\beta x}\{C_1(\cos \beta x + \sin \beta x) - C_2(\cos \beta x - \sin \beta x)\} \\ + e^{-\beta x}\{C_3(\cos \beta x - \sin \beta x) + C_4(\cos \beta x + \sin \beta x)\} \quad (2-13)$$

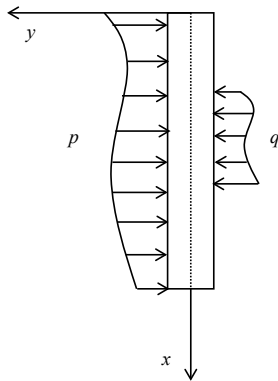


図 2-1 弾性床の梁の模式図

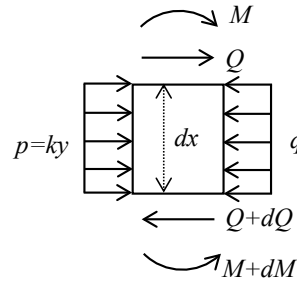


図 2-2 微小部分における力のつり合い

2.1.3. 弾性床における無限長の梁

2.1.2 で得られた弾性床の梁理論に基づくたわみの微分方程式に対して、無限長の梁を仮定して境界条件を定めることで、具体的な積分定数を求める。ここでは、Timoshenko による理論²⁾を参照し、式展開を行う。無限長の梁の中央 ($x = 0$) の位置に集中荷重が作用すると仮定する。無限長の梁では、 x が十分に大きい場合、たわみ y が 0 に近づくと仮定できる。これにより、式 (2-9) の $e^{\beta x}$ を含む項が常に 0 となるためには、 $C_1 = C_2 = 0$ である。このことから、式 (2-14) を得る。

$$y = e^{-\beta x}(C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x) \quad (2-14)$$

$x \geq 0$ の範囲の半分の梁を考えると、 $x = 0$ ではたわみ角の連続条件が式 (2-15) のようになる。

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=0} = 0 \quad (2-15)$$

これにより、積分定数を式 (2-16) のようにできる。

$$C_3 = C_4 = C \quad (2-16)$$

このとき、式 (2-14) は式 (2-17) となる。

$$y = Ce^{-\beta x}(\cos \beta x + \sin \beta x) \quad (2-17)$$

ここで、集中荷重と地盤反力が釣り合う条件として、式 (2-18) を満たす。

$$2 \int_0^{\infty} ky \, dx = P \quad (2-18)$$

式 (2-18) に式 (2-17) を代入すると式 (2-19) の積分定数を得る。

$$2 \int_0^{\infty} kCe^{-\beta x}(\cos \beta x + \sin \beta x) \, dx = P$$

$$2kC \left[-\frac{1}{\beta} e^{-\beta x} \cos \beta x \right]_0^{\infty} = P$$

$$\therefore C = \frac{P\beta}{2k} \quad (2-19)$$

式 (2-19) の積分定数を式 (2-17) に代入するとたわみ曲線式である式 (2-20) を得る. 式 (2-20) から, 1 階微分のたわみ角に関する式 (2-21), 2 階微分の曲げモーメントに関する式 (2-22), 3 階微分のせん断力に関する式 (2-23) を得る.

$$y = \frac{P\beta}{2k} e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x) \quad (2-20)$$

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{P\beta^2}{k} e^{-\beta x} \sin \beta x = \theta \quad (2-21)$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{1}{EI} \frac{P}{4\beta} e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x) = -\frac{M}{EI} \quad (2-22)$$

$$\frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{1}{EI} \left(-\frac{P}{2} e^{-\beta x} \cos \beta x \right) = -\frac{Q}{EI} \quad (2-23)$$

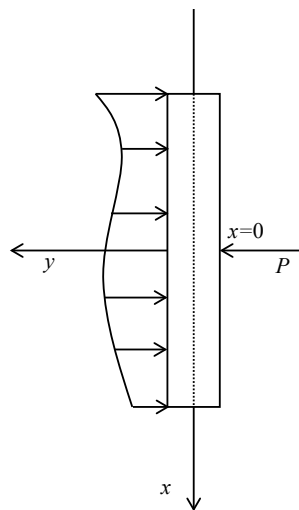


図 2-3 弾性床における無限長の梁の模式図

2.1.4. 弾性床における半無限長の梁

2.1.2 で得られた弾性床の梁理論に基づくたわみの微分方程式に対して、半無限長の梁を仮定して境界条件を定めることで、具体的な積分定数を求める。これは、鋼矢板護岸の根入れ部における設計で仮定される問題である。ここでは、Timoshenko による理論²⁾を参照し、式展開を行う。半無限長の梁の左側の端 ($x = 0$) の位置に集中荷重と偶力によるモーメント荷重が作用すると仮定する。このとき、式 (2-24) の条件となる。

$$\left\{ \begin{array}{l} EI \frac{d^2 y}{dx^2} \Big|_{x=0} = -M|_{x=0} = -M_0 \\ EI \frac{d^3 y}{dx^3} \Big|_{x=0} = -Q|_{x=0} = P \end{array} \right. \quad (2-24)$$

半無限長の梁でも無限長の梁と同様に、 x が十分に大きい場合、たわみ y が 0 に近づくと仮定できる。これにより、式 (2-9) の $e^{\beta x}$ を含む項が常に 0 となるためには、 $C_1 = C_2 = 0$ である。このことから、式 (2-14) をここでも用いる。式 (2-14) は $x = 0$ において式 (2-25) となる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 y}{dx^2} \Big|_{x=0} = -2\beta^2 C_4 \\ \frac{d^3 y}{dx^3} \Big|_{x=0} = 2\beta^3 (C_3 + C_4) \end{array} \right. \quad (2-25)$$

式 (2-24) と式 (2-25) から式 (2-26) の積分定数を得る。

$$\left\{ \begin{array}{l} EI(-2\beta^2 C_4) = -M_0 \\ EI \cdot 2\beta^3 (C_3 + C_4) = P \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_3 = \frac{P - \beta M_0}{2\beta^3 EI} \\ C_4 = \frac{M_0}{2\beta^2 EI} \end{array} \right. \quad (2-26)$$

式 (2-26) の積分定数を式 (2-14) に代入するとたわみ曲線式である式 (2-27) を得る。式 (2-27) から、1 階微分のたわみ角に関する式 (2-28)、2 階微分の曲げモーメントに関する式 (2-29)、3 階微分のせん断力に関する式 (2-30) を得る。

$$y = e^{-\beta x} \left(\frac{P - \beta M_0}{2EI\beta^3} \cos \beta x + \frac{M_0}{2EI\beta^2} \sin \beta x \right)$$

$$\therefore y = \frac{e^{-\beta x}}{2EI\beta^3} \{P \cos \beta x - \beta M_0 (\cos \beta x - \sin \beta x)\} \quad (2-27)$$

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{e^{-\beta x}}{2EI\beta^2} \{P(\cos \beta x + \sin \beta x) - 2\beta M_0 \cos \beta x\} = \theta \quad (2-28)$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{e^{-\beta x}}{EI\beta} \{-P \sin \beta x + \beta M_0 (\cos \beta x + \sin \beta x)\} = -\frac{M}{EI} \quad (2-29)$$

$$\frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{e^{-\beta x}}{EI} \{-P(\cos \beta x - \sin \beta x) - 2\beta M_0 \sin \beta x\} = -\frac{Q}{EI} \quad (2-30)$$

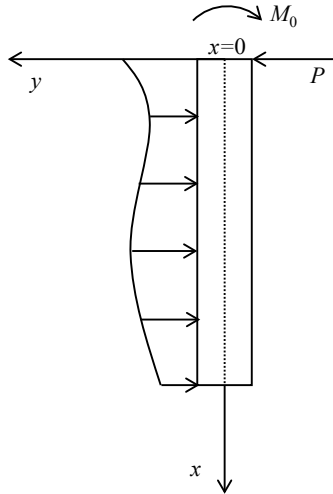


図 2-4 弾性床における半無限長の梁の模式図

2.1.5. 設計に関する計算

農業用の水路で建設される鋼矢板護岸の設計は、土地改良事業計画設計基準「水路工」³⁾に従って実施される。2.1.4に基づき、上記の設計基準に記載されている梁理論に関わる計算式を対象に、そこには詳細に記されていない式の導出過程を議論する。

(1) 地上部の鋼矢板護岸に作用する荷重

地上部に突出する鋼矢板には、背面地盤の土圧や水圧が分布荷重として作用する。2.1.4で記した地中部での弾性床における半無限長の梁理論は、地上部の鋼矢板に作用する荷重の反力に対するたわみの微分方程式を与える。地上部の設計では、鋼矢板護岸の天端における変位量を求めることが主な目的である。分布荷重を集中荷重による合力に置換することで、近似的に、集中荷重が作用する片持ち梁のたわみの微分方程式の解法に帰着させる手法が採用される。各種集中荷重の合力と地盤面まわりのモーメントは式(2-31)をとる。

$$P = \sum P_i, \quad M_0 = - \sum P_i l_i, \quad (2-31)$$

(2) 最大曲げモーメントの計算

地中部の鋼矢板において発生する最大曲げモーメントを求める。最大曲げモーメントの発生する位置は、せん断力が0となる位置である。これを l_Q とすると式(2-32)を得る。

$$0 = - \frac{e^{-\beta l_Q}}{EI} \{ -P(\cos \beta l_Q - \sin \beta l_Q) - 2\beta M_0 \sin \beta l_Q \}$$
$$P + (2\beta M_0 - P) \tan \beta l_Q = 0$$
$$\tan \beta l_Q = \frac{P}{P - 2\beta M_0} \quad (2-32)$$

式(2-32)より式(2-33)を得る。

$$\cos \beta l_Q = \frac{P - 2\beta M_0}{\sqrt{(P - 2\beta M_0)^2 + P^2}}, \quad \sin \beta l_Q = \frac{P}{\sqrt{(P - 2\beta M_0)^2 + P^2}} \quad (2-33)$$

式(2-33)を用いて、位置 l_Q における最大曲げモーメント M_{max} を求めると式(2-34)を得る。

$$\begin{aligned}
& -\frac{e^{-\beta l_Q}}{EI\beta} \{-P \sin \beta l_Q + \beta M_0 (\cos \beta l_Q + \sin \beta l_Q)\} = -\frac{M_{max}}{EI} \\
M_{max} &= -\frac{e^{-\beta l_Q}}{\beta} \{\beta M_0 \cos \beta l_Q + (\beta M_0 - P) \sin \beta l_Q\} \\
&= -\frac{e^{-\beta l_Q}}{\beta} \{\beta M_0 (P - 2\beta M_0) + (\beta M_0 - P)P\} \frac{1}{\sqrt{(P - 2\beta M_0)^2 + P^2}} \\
&= -\frac{e^{-\beta l_Q}}{2\beta} \{(H_0 - 2\beta M_0)^2 + P^2\} \frac{1}{\sqrt{(P - 2\beta M_0)^2 + P^2}} \\
\therefore M_{max} &= -\frac{1}{2\beta} \sqrt{(P - 2\beta M_0)^2 + P^2} e^{-\tan^{-1}\left(\frac{P}{P-2\beta M_0}\right)} \tag{2-34}
\end{aligned}$$

(3) 変位量の計算

地上部の鋼矢板壁体において分布荷重を置換した集中荷重 P が $x=-l_0$ 位置に作用する片持ち梁の問題と、地中部の鋼矢板において弾性床での半無限長の梁理論を適用した問題を組み合わせて考える。地中部の鋼矢板 ($0 \leq x$) では、地盤面において集中荷重 P と偶力荷重 $M_0(=-Pl_0)$ が作用する 2.1.4 の問題に帰着する。たわみとたわみ角は再掲する式 (2-27) と式 (2-28) で表される。

$$y = \frac{e^{-\beta x}}{2EI\beta^3} \{P \cos \beta x - \beta M_0 (\cos \beta x - \sin \beta x)\} \tag{2-27}$$

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{e^{-\beta x}}{2EI\beta^2} \{P (\cos \beta x + \sin \beta x) - 2\beta M_0 \cos \beta x\} \tag{2-28}$$

地盤面と地上部における集中荷重の作用位置までの鋼矢板 ($-l_0 \leq x \leq 0$) において、曲げモーメント、たわみ角およびたわみは式 (2-35) ~ 式 (2-37) で表される。

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{EI} P \{x - (-l_0)\} = \frac{1}{EI} P (x + l_0) \tag{2-35}$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{EI} \left\{ \frac{P}{2} (x + l_0)^2 + a_1 \right\} \tag{2-36}$$

$$y = \frac{1}{EI} \left\{ \frac{P}{6} (x + l_0)^3 + a_1 x + a_2 \right\} \quad (2-37)$$

集中荷重の作用位置から天端までの鋼矢板 ($-h \leq x \leq -l_0$) では、曲げモーメント、たわみ角およびたわみは式 (2-38) ～式 (2-40) で表される。

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = 0 \quad \therefore \frac{d^2 y}{dx^2} = 0 \quad (2-38)$$

$$EI \frac{dy}{dx} = b_1 \quad \therefore \frac{dy}{dx} = \frac{1}{EI} b_1 \quad (2-39)$$

$$EI y = b_1 x + b_2 \quad \therefore y = \frac{1}{EI} (b_1 x + b_2) \quad (2-40)$$

連続条件により、地盤面の $x=0$ においてたわみに関する式 (2-27) および式 (2-37) ならびにたわみ角に関する式 (2-28) および式 (2-36) は等しいことから、積分定数 a_1 と a_2 は式 (2-41) と式 (2-42) で表される。

$$-\frac{e^{-\beta \cdot 0}}{2EI\beta^2} \{P(\cos \beta \cdot 0 + \sin \beta \cdot 0) - 2\beta M_0 \cos \beta \cdot 0\} = \frac{1}{EI} \left\{ \frac{P}{2} (0 + l_0)^2 + a_1 \right\}$$

$$\therefore a_1 = -\frac{Pl_0^2}{2} - \frac{P - 2\beta M_0}{2\beta^2} \quad (2-41)$$

$$\frac{e^{-\beta \cdot 0}}{2EI\beta^3} \{P \cos \beta \cdot 0 - \beta M_0 (\cos \beta \cdot 0 - \sin \beta \cdot 0)\} = \frac{1}{EI} \left\{ \frac{P}{6} (0 + l_0)^3 + a_1 \cdot 0 + a_2 \right\}$$

$$\therefore a_2 = -\frac{Pl_0^3}{6} + \frac{P - \beta M_0}{2\beta^3} \quad (2-42)$$

同様に、地盤面の $x=-l_0$ においてたわみに関する式 (2-37) および式 (2-40) ならびにたわみ角に関する式 (2-36) および式 (2-39) は等しいことから、積分定数 b_1 と b_2 は式 (2-43) と式 (2-44) で表される。

$$\frac{1}{EI} \left\{ \frac{P}{2} (-l_0 + l_0)^2 + a_1 \right\} = \frac{1}{EI} b_1$$

$$\therefore b_1 = a_1 = -\frac{Pl_0^2}{2} - \frac{P - 2\beta M_0}{2\beta^2} \quad (2-43)$$

$$\frac{1}{EI} \left\{ \frac{P}{6} (-l_0 + l_0)^3 + a_1 \cdot (-l_0) + a_2 \right\} = \frac{1}{EI} \{b_1(-l_0) + b_2\}$$

$$\therefore b_2 = a_2 = -\frac{Pl_0^3}{6} + \frac{P - \beta M_0}{2\beta^3} \quad (\because b_1 = a_1) \quad (2-44)$$

よって、本問題での鋼矢板のたわみ曲線は以下の式 (2-45) ～式 (2-47) となる。

$$y = \frac{e^{-\beta x}}{2EI\beta^3} \{P \cos \beta x - \beta M_0 (\cos \beta x - \sin \beta x)\} \quad (0 \leq x) \quad (2-45)$$

$$y = \frac{1}{EI} \left\{ \frac{P}{6} (x + l_0)^3 - \left(\frac{Pl_0^2}{2} + \frac{P - 2\beta M_0}{2\beta^2} \right) x - \frac{Pl_0^3}{6} + \frac{P - \beta M_0}{2\beta^3} \right\} \quad (-l_0 \leq x \leq 0) \quad (2-46)$$

$$y = \frac{1}{EI} \left\{ -\left(\frac{Pl_0^2}{2} + \frac{P - 2\beta M_0}{2\beta^2} \right) x - \frac{Pl_0^3}{6} + \frac{P - \beta M_0}{2\beta^3} \right\} \quad (-h \leq x \leq -l_0) \quad (2-47)$$

鋼矢板壁の頭部 ($x=-h$ 位置) のたわみは、式 (2-47) に $x=-h$ を代入すると式 (2-48) を得る。

$$y|_{x=-h} = \frac{1}{EI} \left\{ -\left(\frac{Pl_0^2}{2} + \frac{P - 2\beta M_0}{2\beta^2} \right) (-h) - \frac{Pl_0^3}{6} + \frac{P - \beta M_0}{2\beta^3} \right\}$$

$$\therefore y|_{x=-h} = \frac{P - \beta M_0}{2EI\beta^3} + \frac{P - 2\beta M_0}{2EI\beta^2} h + \frac{P}{6EI} l_0^2 (3h - l_0) \quad (2-48)$$

ここで、式 (2-48) の右辺第1項は地盤面におけるたわみに等しいことが、式 (2-46) に $x=0$ を代入することに式 (2-49) で示される。

$$(2-49)$$

$$y|_{x=0} = \frac{1}{EI} \left\{ \frac{P}{6} (0 + l_0)^3 - \left(\frac{Pl_0^2}{2} + \frac{P - 2\beta M_0}{2\beta^2} \right) \cdot 0 - \frac{Pl_0^3}{6} + \frac{P - \beta M_0}{2\beta^3} \right\} = \frac{P - \beta M_0}{2EI\beta^3} = \delta_1$$

式 (2-48) の右辺第 2 項は地盤面におけるたわみ角に起因する鋼矢板壁の頭部のたわみに等しいことが、式 (2-46) の導関数に $x=0$ を代入した値と壁高位置 $-h$ (地上部は負) の積により式 (2-50) で示される。

$$\frac{dy}{dx} \Big|_{x=0} \cdot (-h) = \frac{1}{EI} \left\{ \frac{P}{2} (0 + l_0)^2 - \frac{Pl_0^2}{2} - \frac{P - 2\beta M_0}{2\beta^2} \right\} \cdot (-h) = \frac{P - 2\beta M_0}{2EI\beta^2} h = \delta_2 \quad (2-50)$$

式 (2-48) の右辺第 3 項は地上部の鋼矢板壁に対して地盤面を固定端とする片持ち梁と仮定したときの頭部のたわみに等しい。式 (2-36)、式 (2-37)、式 (2-39) および式 (2-40) の積分定数 a_1 , a_2 , b_1 および b_2 を a'_1 , a'_2 , b'_1 および b'_2 とし、地盤面を固定端としてこれらの値を求めると式 (2-51) のようになる。

$$a'_1 = b'_1 = -\frac{Pl_0^2}{2}, \quad a'_2 = b'_2 = -\frac{Pl_0^3}{6} \quad (2-51)$$

式 (2-40) および式 (2-51) を用いて、壁高位置 $-h$ におけるたわみは、式 (2-52) のようになる。

$$\frac{1}{EI} \left\{ -\frac{Pl_0^2}{2} \cdot (-h) - \frac{Pl_0^3}{6} \right\} = \frac{P}{6EI} l_0^2 (3h - l_0) = \delta_3 \quad (2-52)$$

以上より、鋼矢板壁の頭部のたわみは、 $\delta_1 \sim \delta_3$ の和である。

(4) 根入れ長の計算

根入れ長として、式 (2-53) で示される l よりも大きい値を設定する。

$$l = \frac{3}{\beta} \quad (2-53)$$

根入れ長として式 (2-53) の l よりも大きい値を与える理由には、次のことが考えられる。地中部の鋼矢板には、そもそも弾性床における半無限長の梁の理論が適用されている。このとき、 x の増大に伴いたわみと曲げモーメントが 0 に近づく必要がある²⁾。たわみについて $y =$

0となる x の値を l_y とすると式 (2-54) を得る.

$$0 = \frac{e^{-\beta l_y}}{2EI\beta^3} \{P \cos \beta l_y - \beta M_0 (\cos \beta l_y - \sin \beta l_y)\}$$

$$P - \beta M_0 + \beta M_0 \tan \beta l_y = 0$$

$$\tan \beta l_y = \frac{\beta M_0 - P}{\beta M_0}$$

$$\therefore l_y = \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \left(\frac{\beta M_0 - P}{\beta M_0} \right) < \frac{\pi}{\beta} \approx \frac{3}{\beta} \quad (2-54)$$

曲げモーメントについて $M = 0$ となる x の値を l_M とすると式 (2-55) を得る.

$$0 = -\frac{e^{-\beta l_M}}{EI\beta} \{-P \sin \beta l_M + \beta M_0 (\cos \beta l_M + \sin \beta l_M)\}$$

$$-P \tan \beta l_M + \beta M_0 + \beta M_0 \tan \beta l_M = 0$$

$$\tan \beta l_M = \frac{\beta M_0}{P - \beta M_0}$$

$$\therefore l_M = \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \left(\frac{\beta M_0}{P - \beta M_0} \right) < \frac{\pi}{\beta} \approx \frac{3}{\beta} \quad (2-55)$$

ただし, l_y および l_M は正の値 (地中方向) であるため, $\tan^{-1}(x)$ の値域を次のようにした.

$$[0, \pi/2) \text{ or } (\pi/2, \pi]$$

以上より, π/β よりも小さい値の範囲で l_y および l_M を得られることが確認できる. 安全側として根入れ長を $3/\beta$ よりも大きい値をとることで, 弾性床における半無限長の梁を仮定して鋼矢板護岸の設計を実施することができると考えられる.

2.2. 鋼材の腐食現象

金属の腐食は, 環境中に酸化剤 (酸素や水素イオンなど) が存在すること発生する⁴⁾. 金

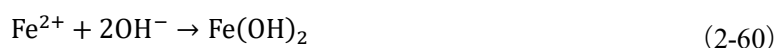
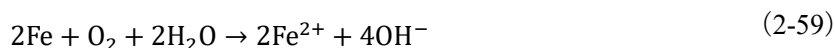
属表面でアノード反応とカソード反応が同時に起こることで進行する現象である⁵⁾。アノード反応は、金属表面の電子が放出されるにより金属がイオン化する反応である。これを式(2-56)に示す。



カソード反応は、アノード反応により放出される電子を受容し、酸性水溶液中では水素発生反応、中性およびアルカリ性溶液中では溶存酸素の還元反応となる。酸性溶液中と中性・アルカリ性溶液中のカソード反応を式(2-57)と式(2-58)に示す。



本研究で対象としている農業用排水路の鋼矢板護岸を含め、鋼構造物が設置される海洋の海水、河川の淡水、大気および土壌などのほぼ中性の環境では、水と溶存酸素が関わることで腐食が生じる⁶⁾。すなわち、カソード反応は式(2-58)となる。式(2-56)と式(2-58)を組み合わせると次の式(2-59)となり、その右辺は式(2-60)のように進行する。



式(2-59)までが腐食による金属の溶解および減肉を表し、式(2-60)により最初の腐食生成物として $\text{Fe}(\text{OH})_2$ が生成される⁷⁾。 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ は酸化されやすい物質であり、酸化や脱水を経て錆を形成していく。

引用文献

- 1) Hetényi, M. (1946): Beams on Elastic Foundation, The University of Michigan Press, pp. 1-9.
- 2) Timoshenko, S. (1930): Strength of Materials Part 2 Advanced Theory and Problems, D. Van Nostrand Company, pp. 1-25.
- 3) 農林水産省農村振興局整備部設計課 (2014) : 土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「水路工」, pp. 457~479.
- 4) 木村雄二 (2010) : 腐食概論, 溶接学会誌, 79(3), pp. 39-48.
- 5) 福山智子 (2023) : 微破壊電気化学的手法 (自然電位・分極抵抗), 非破壊検査, 72(3), pp. 95-101.

- 6) (一社) 鋼管杭・鋼矢板技術協会 (2011) : 【鋼管杭・鋼管矢板・鋼矢板】防食ハンドブック—設計・施工・維持管理—, p. 2-1.
- 7) 土井康太郎 (2020) : 金属材料腐食と電気化学測定法の基礎, 日本海水学会誌, 74(4), pp. 212-220.

第3章 腐食鋼矢板護岸における板厚分布の空間特性

3.1. 地球統計学に基づく腐食現象の空間構造

鋼矢板は営農地域や軟弱地盤地域の排水性を向上させるために、鋼製の排水路護岸として農業分野では適用される。その役割として、圃場だけでなく地域全体の排水も担っている。薄い鋼材の水インフラである鋼矢板護岸の腐食問題について、国内外を問わずに多くの議論がなされている^{1),2)}。特に、農業用排水路に用いられる鋼矢板では、設計の許容を超える極度の腐食³⁾や座屈による変形⁴⁾といった事例が報告されている。水路護岸として地盤へ貫入した鋼矢板は、鉛直方向に異なる腐食環境にさらされる。その腐食環境は、①大気にさらされる気中部、②水位変動に伴う乾湿繰返しを受ける干満帯、③水中に位置する水中部、④土中に位置する土中部の主に4種類に分類される（港湾分野では気中部と干満帯の間に飛沫帯が加わる）。鋼矢板は規格に則った様な板厚と断面で設計されるが、腐食速度の異なる環境を隔てて設置されることにより腐食が不均一に進行する。特に、農業用排水路では営農に伴う水利用と日常的な降雨により、水位変動が不規則である。腐食は水位変動が激しい干満帯に集中し、その進行には不確実性を伴う。この原因として、乾湿繰返しや酸素濃淡電池の形成の可能性が挙げられるが、既設構造物に即した詳細な腐食メカニズムは明らかにされていない。現状でこのことを物理化学的にモデル化することは困難と考えられる。本章では、腐食で減少した鋼矢板の板厚に対して、その空間分布を地球統計学により確率論的にモデル化し、異なる腐食環境を隔てる鋼材の腐食実態を空間特性の観点から評価する。

鋼矢板における腐食進行の指標はその板厚とされる。既設鋼矢板に対する板厚計測は、超音波厚さ計により実施されることが多い。この計測の課題として、計測箇所の前処理に時間を要することや連続的な計測が困難で点的なデータ取得しかできないことが指摘されている⁵⁾。限られた実測値により腐食実態を評価せざるを得ないことが現状である。地球統計学のひとつであるクリギングは、位置情報を有するデータ群の空間構造を空間的自己相関に基づきモデル化し、限られた実測値から確率論的な空間補間を可能とする。腐食による鋼材の寿命予測では、局部腐食を確率論的に議論することが多く、極値統計学により限られたデータからの腐食深さの推定が行われる⁶⁾⁻⁸⁾。鋼矢板に関しても、確率論的に腐食現象をモデル化する事例が報告されている^{9),10)}。これらの時間経過に対する腐食のモデル化に対して、面的に分布する腐食を空間統計的に検討することも妥当と考えられる。鋼矢板の腐食問題に対して、板厚データの空間分布予測や板厚計測間隔の最適化の検討に地球統計学が用いられている事例がある¹¹⁾。他の鋼材腐食に関しては、石油タンクの板厚分布をクリギングにより再現することの有用性が提示されている^{12),13)}。他分野では地球統計学の事例として、土壌の重金属¹⁴⁾や降水量¹⁵⁾の空間分布の推定に対しての適用が挙げられる。

これらを踏まえ本章では、既設鋼矢板よりサンプリングした板厚データに対して地球統計学を適用し、異なる腐食環境を隔てる鋼矢板の不均一な腐食実態を空間特性の観点から評価する。実験的検討では、農業用排水路の既設鋼矢板に対し、気中部、干満帯、水中部、

へどろ部および土中部の 5 種類の腐食環境を隔てる板厚データを計測した。解析的検討では、元厚からの減厚値を指標とし、バリオグラムによる空間構造のモデル化および通常クリギングによる空間補間を行う。検討の結果、減厚値が比較的大きい干満帯のデータ群の影響により、経験バリオグラムが極大を示した。通常クリギングを適用した空間補間により、干満帯において水中部よりも気中部に近い位置のフランジ部分にて、腐食が進行しやすい傾向が確認された。本研究の新規性は、既設鋼矢板の板厚データに対して、データ位置の離間距離に応じた空間的自己相関（位置が近いほど似た値となる）のモデル化を行い、確率論的に腐食の空間分布を評価することである。つまり、本モデル化は、腐食に影響する物理化学的な情報を含めず、データ位置の離間距離に伴う空間的自己相関に着目して腐食実態を表現する。有用性は、実測値が存在しない位置に対して、空間的自己相関に基づいて空間補間を行うことで連続データのような腐食分布を推定し、腐食実態の検出・把握が可能なことである。

3.2. 計測方法

3.2.1. 既設鋼矢板護岸の概要

農業用排水路の既設鋼矢板における板厚計測を実施した。対象施設は、新潟県亀田郷地区に位置する袋津排水路、山崎排水路、亀田排水路および亀田排水路（上流）とした。以下では、袋津排水路、山崎排水路、亀田排水路および亀田排水路（上流）における対象鋼矢板を鋼矢板 A, B, C および D と呼ぶ。表 3-1 に対象鋼矢板の諸元を示す。2021 年の板厚計測時点で、各施設の供用年数は 20 年以上であった。鋼矢板の型式は、各施設で軽量鋼矢板の LSP-5 である。元厚は、鋼矢板 A および D が 5 mm、鋼矢板 B および C が 6 mm である。本研究では、元厚からの残存板厚を減じた減厚値を腐食の指標とする。

表 3-1 鋼矢板諸元

検討ケース	排水路	建設年	供用期間 (2021年まで)	鋼矢板の型式	設計板厚
鋼矢板A	袋津排水路	1996年	25年	LSP-5	5 mm
鋼矢板B	山崎排水路	2001年	20年	LSP-5	6 mm
鋼矢板C	亀田排水路	1998年	23年	LSP-5	6 mm
鋼矢板D	亀田排水路（上流）	1984年	37年	LSP-5	5 mm

3.2.2. 既設鋼矢板護岸の板厚計測

各水路あたり 1 体の既設鋼矢板を対象に、板厚計測を実施した。対象鋼矢板の周囲に土のうを積み、水路内の流水を遮断して底土を掘ることで、水中部、へどろ部および土中部の板厚計測を行った。鋼矢板表面に付着する腐食生成物や汚れを取り除き、鋼材の素地を露出させる前処理をした後、小径用探触子（D798-J、オリンパス製）を取り付けた超音波厚さ計（38DL、オリンパス製）により板厚計測を行った。超音波厚さ計による計測は、JIS Z 2355-

1: 2016 に準拠した。計測値は小数点第 2 位までを求めた。鋼矢板断面における板厚計測点の位置を図 3-1 に示す。フランジ 4 列分（Ⅰ列，Ⅱ列，Ⅴ列およびⅥ列）とウェブ 2 列分（Ⅲ列およびⅣ列）の計 6 列分の計測列を設けた。鋼矢板 1 体あたりの板厚計測点全点の位置を図 3-2 に示す。計測は，腐食環境の異なる気中部，干満帯，水中部，へどろ部および土中部にて実施した（本研究では水路底に堆積するへどろを考慮した）。計測点は，鋼矢板 A で 168 点，鋼矢板 B で 174 点，鋼矢板 C で 192 点および鋼矢板 D で 204 点とした。図 3-2 (e) に，鋼矢板 B での計測状況を一例として示す。

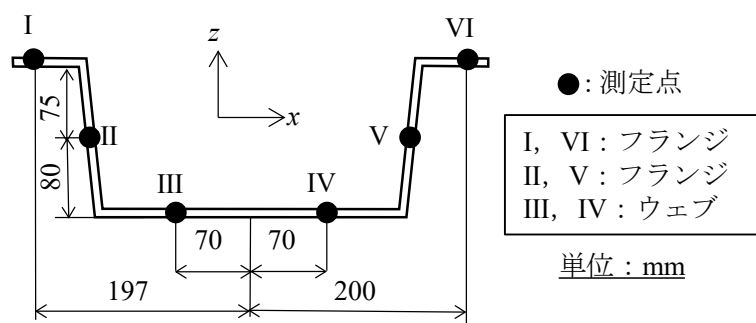


図 3-1 鋼矢板断面における板厚計測点位置

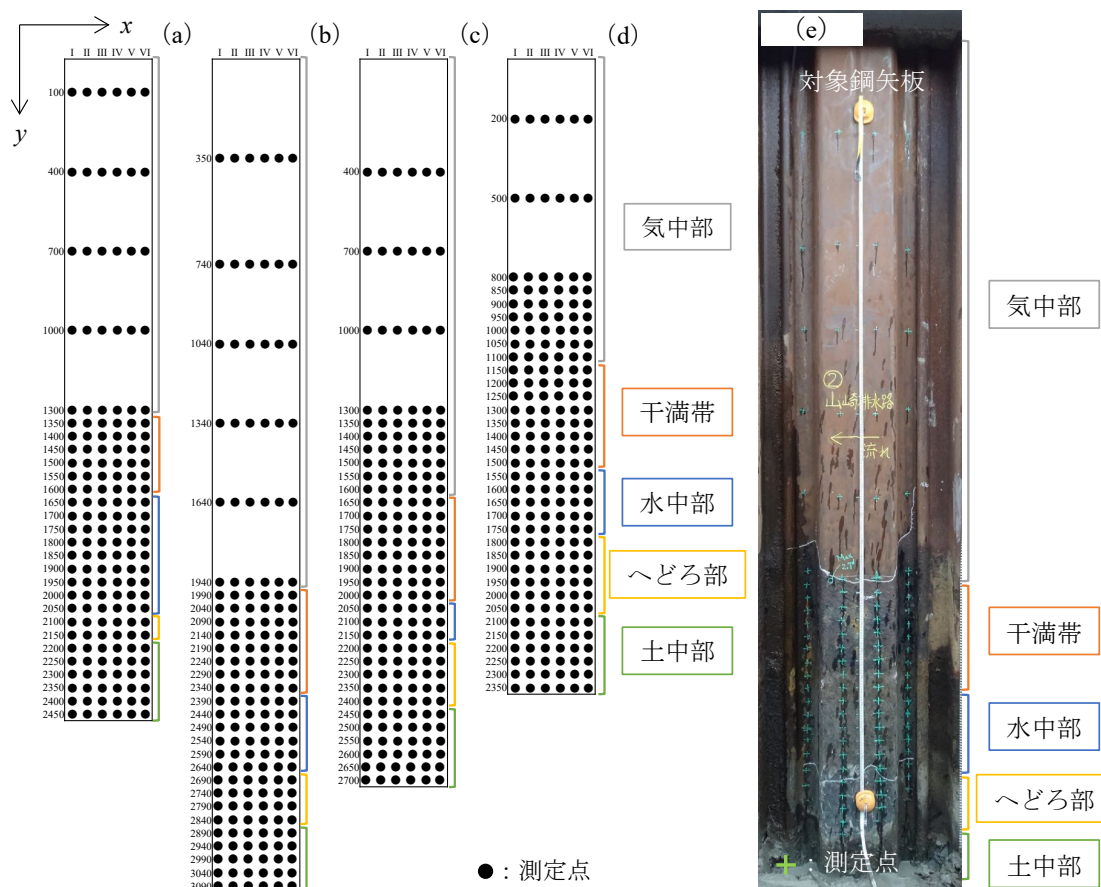


図 3-2 鋼矢板の板厚計測点位置 (a) 鋼矢板 A (b) 鋼矢板 B (c) 鋼矢板 C (d) 鋼矢板 D

3.3. 解析方法

3.3.1. バリオグラム解析

腐食により減厚した鋼矢板の板厚データを空間データと捉え、腐食実態の空間特性を地球統計学に基づき評価する。空間構造のモデル化にバリオグラムを適用する。このとき、以下の仮定が必要である。①対象領域の空間データにおける空間的自己相関を仮定することおよび②空間データを位置による確率変数とする場合の確率場の定常性を仮定することである。空間的自己相関は、位置が近いほど似た値となることである。確率場の定常性は、空間データが特定の位置から移動した場合、確率変数の特徴が不変となることである。定常性は、その程度の強い順番に強定常（特定の距離を移動した場合も確率変数は一定）、2次定常（位置の変数に対して1次および2次モーメントが定常）および固有定常（2点の差分値に対して1次および2次モーメントが定常）に分類される¹⁶⁾。バリオグラムは最も弱い定常性である固有定常に適用できる。ここでは、バリオグラムと3.3.2節の通常クリギングの適用につながるよう、確率場の固有定常を仮定する。

バリオグラムでは、空間的自己相関に基づきデータの空間的連続性を記述する。本手法では、空間データ位置の離間距離と非類似度（空間データの差分値の2乗に1/2を乗じた値）の関係を表現する。既知データより求める本関係を経験バリオグラムと呼ぶ。経験バリオグラム $\gamma^*(h_k)$ を式 (3-1) に示す。

$$\gamma^*(h_k) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} (z(\mathbf{x}_\alpha + \mathbf{h}) - z(\mathbf{x}_\alpha))^2, \quad (3-1)$$

ここで、 \mathbf{x}_α は位置ベクトル、 \mathbf{h} は離間距離ベクトル、 z は特定の位置における空間データ、 $N(\mathbf{h})$ は $z(\mathbf{x}_\alpha + \mathbf{h})$ と $z(\mathbf{x}_\alpha)$ のペアの個数、 h_k は離間距離ベクトルをもとにした k 番目 ($k=1, 2, \dots$) の階級値である。式 (3-1) は、 $\mathbf{h} \in h_k$ を満たす。本研究において、 h_k は離間距離ベクトルの大きさの平均値とする。空間的自己相関を有する空間データ群では、離間距離の増加に伴い非類似度の平均値（経験バリオグラム）が増加する。既知データより得られる経験バリオグラムに対して、連続値としてモデル化したものを理論バリオグラムと呼ぶ。球関数による理論バリオグラム $\gamma(|\mathbf{h}|)$ を式 (3-2) に示す¹⁷⁾。

$$\gamma(|\mathbf{h}|) = \begin{cases} c \left[1.5 \frac{|\mathbf{h}|}{a} - 0.5 \left(\frac{|\mathbf{h}|}{a} \right)^3 \right], & \text{if } |\mathbf{h}| \leq a, \\ c, & \text{if } |\mathbf{h}| \geq a, \end{cases} \quad (3-2)$$

ここで、 a はレンジ、 c はシルを示す。図 3-3 に経験バリオグラムと理論バリオグラムの模式図を示す（以降、 $h=|h|$ とする）。レンジ a は空間的自己相関が認められなくなる離間距離を表す。これを超えると非類似度は一定値のシル c に収束する。理論バリオグラムのパラメータとして、離間距離 0 における非類似度を表すナゲット b があるが、ここではナゲット $b=0$ として理論バリオグラムによるモデル化を行う。経験バリオグラムに対して最小二乗法により理論バリオグラムをフィッティングさせ、パラメータ a および c を求める。球関数の理論バリオグラムは、指数関数およびガウス関数とのフィッティングの誤差比較により、選定された。

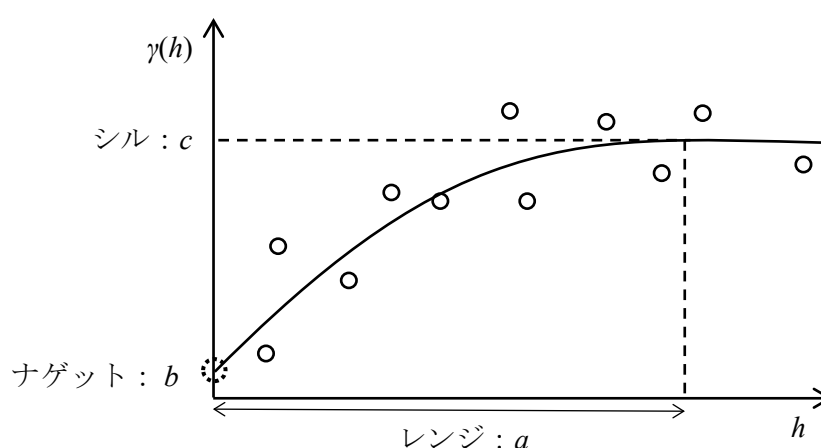


図 3-3 バリオグラムの模式図

3.3.2. 通常クリギング

クリギングは、既知データの線形結合により、未観測位置の推定値を求める補間法である。クリギングによる空間補間の特徴は、①未観測位置の真値と推定値の差の期待値が 0 である不偏の条件を満たすことおよび②真値に対する推定値の誤差分散を最小にする条件を満たすことである¹⁸⁾。真値と推定値の差を最小にする条件でなく、後者のようにばらつきである誤差分散を最小にする条件により、不確実性を許容した確率論的な推定が可能となる。これに加え、理論バリオグラムによりモデル化した空間構造を適用することで、未観測位置の推定を行う。

本章では、確率場の固有定常と対象領域における平均値が一定かつ不明であることを仮定し、通常クリギング法による補間を行う。推定値 z^* を式 (3-3) に示す。

$$z^* = \sum_{k=1}^n \omega_k z_k, \quad (3-3)$$

ここで、 ω_k はクリギング係数、 z_k は既知のデータである。ただし、クリギング係数 ω_k は式(3-4)を満たす。

$$\sum_{k=1}^n \omega_k = 1, \quad (3-4)$$

式(3-4)の下で、推定される誤差分散の最小化の条件を満たす場合、クリギング係数 ω_k は式(3-5)により求められる。

$$\begin{pmatrix} \gamma(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_1) & \cdots & \gamma(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_1) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_1) & \cdots & \gamma(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_n) & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \vdots \\ \omega_n \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_0) \\ \vdots \\ \gamma(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_0) \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (3-5)$$

ここで、 $\mathbf{x}_k (k=1, \dots, n)$ は既知データの位置ベクトル、 \mathbf{x}_0 は推定値を求める未観測位置の位置ベクトル、 μ はラグランジュの未定乗数である。式(3-5)に対して逆行列の計算からクリギング係数を求め、式(3-3)に当てはめることで推定値 z^* が得られる。

3.3.3. leave-one-out 交差検証法

クリギングによる空間補間の妥当性を交差検証法により評価する。本研究では、leave-one-out 交差検証法を適用する。本手法は、次のようになる。既知データに対してそのうちのひとつを検証用として除き、それ以外のデータを用いてバリオグラムおよびクリギングにより検証用のデータ位置における推定値を求める。これをすべての既知データで繰り返し行う。評価指標として、平均絶対誤差 MAE (mean absolute error) (実測値と推定値の差分の絶対値に対する平均値)を用いる。

3.4. 結果および考察

3.4.1. 減厚値のプロファイル

図 3-4 に既設鋼矢板の鉛直方向における減厚値のプロファイルを示す。鋼矢板の元厚から板厚計測による残存板厚を減じた減厚値を腐食の指標とする。各水路において、干満帯で減厚値が卓越し、その他の腐食環境では減厚値がそれより小さい傾向が確認された。営農や降雨に伴う水位変動により、干満帯に位置する鋼材は乾湿繰返しの影響を受け、腐食が他の腐食環境より進行したものと考えられる。気中部と干満帯の境界に着目すると、鋼矢板 C および D ではその境界より気中部側でフランジ部分の減厚値が卓越している (図 3-4 (c) および (d))。板厚計測では、図 3-2 (e) の気中部と干満帯の境界を示す白線のように、フランジ部分の境界のほうがウェブ部分よりも上側に位置する傾向が確認された。鋼矢板 B, C および D では、計測時における気中部と干満帯の境界をウェブ部分に定めている。鋼矢板 A ではその

上限をフランジ部分に定めている。このため、鋼矢板 C および D ではその境界より気中部側でフランジ部分の減厚値が卓越している。この結果から、乾湿繰返しを受ける腐食域の上限は、ウェブ部分よりもフランジ部分のほうが高くなることについて考察する。鋼矢板は図 3-1 のような台形に近い断面を有する。水路護岸は鋼矢板の連結により形成されることから、護岸は通水断面に対して凹凸状となる。フランジ部分は凹側の閉ざされた空間に位置することから、流水時にその水位が凸側に比べて高くなる可能性が考えられる。そのため、フランジ部分の腐食域の上限はウェブ部分よりも高くなると考えられる。これは計測結果から考えられる一考察に過ぎず、現象として確認されてはいないが、フランジ部分の腐食域の上限はウェブ部分よりも高いという事実は得られた。

以上より、減厚値のプロファイルから干満帯において腐食が卓越することが確認された。乾湿繰返しの影響を受けるフランジ部分の腐食域の上限は、ウェブ部分よりも鉛直上側に高くなることが確認された。

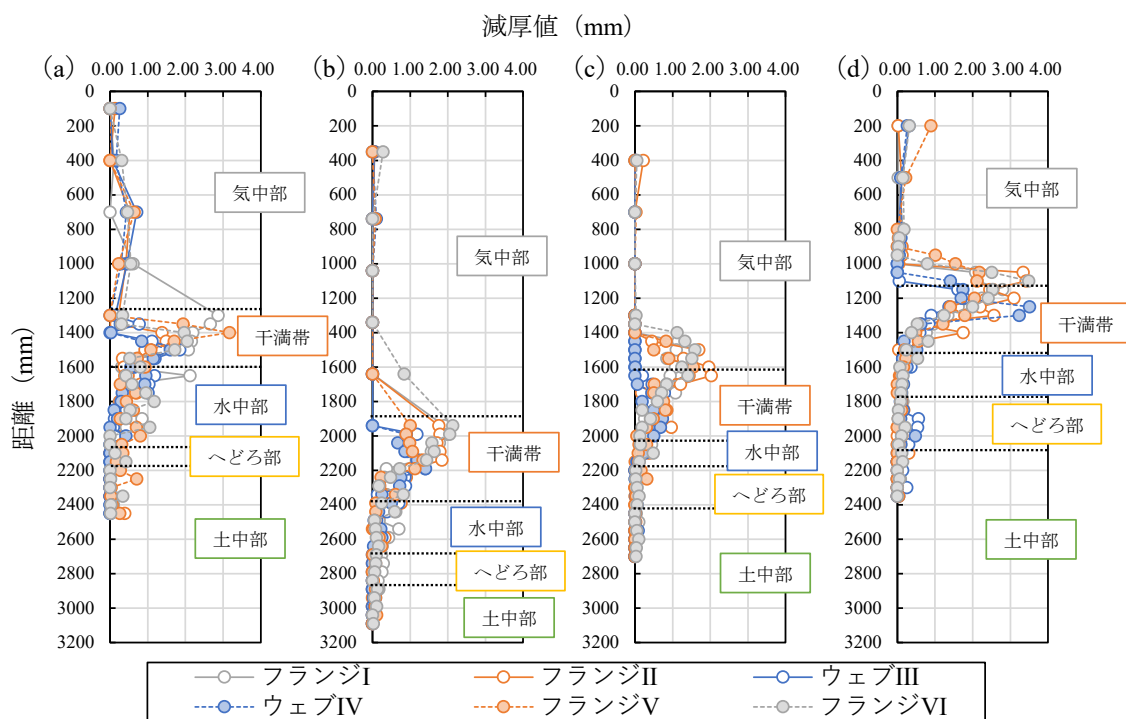


図 3-4 既設鋼矢板における減厚値のプロファイル
(a) 鋼矢板 A (b) 鋼矢板 B (c) 鋼矢板 C (d) 鋼矢板 D

3.4.2. 経験バリオグラムによる空間構造の評価

減厚値を用いた経験バリオグラムにより、腐食鋼矢板の空間構造を評価する。図 3-5 は、鋼矢板全体の減厚値による経験バリオグラムおよび 5 種類の腐食環境（気中部、干満帯、水中部、へどろ部および土中部）のうちいずれか 1 種類のデータ群を除いた減厚値による経験

バリオグラムを示す。鋼矢板全体のデータ群のうち各腐食環境のデータ群が空間構造に及ぼす影響を評価する。図 3-5 において、経験バリオグラムの縦軸のスケールを比較すると、鋼矢板 C で最小 (図 3-5 (c))、鋼矢板 D で最大 (図 3-5 (d)) となる。干満帯の減厚値に着目すると、4 水路のうち鋼矢板 C ではその値が最小で、鋼矢板 D では最大となるためと考えられる。(図 3-4 (c) および (d)) 鋼矢板全体の経験バリオグラム (黒色・破線) では、離間距離 1,000 mm 付近で極大となることが確認できる。これは、腐食が進行した干満帯の減厚値と他の腐食環境の減厚値の組み合わせで非類似度を計算するためだと考えられる。離間距離 h の増加に伴い経験バリオグラムが極大をとった後に減少する傾向について、特異な値を示すデータをまたいだデータの組でバリオグラムが計算されていることが原因と考えられる¹⁹⁾。

図 3-5 の場合は、減厚値が比較的大きい干満帯のデータを越えた気中部と水中部、気中部とへどろ部および気中部と土中部のデータの組が増えるためだと考えられる。気中部を除いた経験バリオグラム (灰色) では、離間距離 1,300 mm 付近で極大となる。離間距離が最も大きいデータの組が干満帯 (減厚値が最も大きい) と土中部の組になるためである。経験バリオグラムが他のデータ群より 2 倍近く増加するのは、離間距離 1,300 mm 付近のデータの組で干満帯と土中部による非類似度の増加を抑制するデータの組が存在しないためと考えられる。そのため、単調増加のような傾向を示す。

以上より、経験バリオグラムにより干満帯における減厚値のデータ群が他の腐食環境のデータ群より特異であることが確認された。3.4.3 節以降では干満帯のデータ群のみに着目し、その空間特性を評価する。

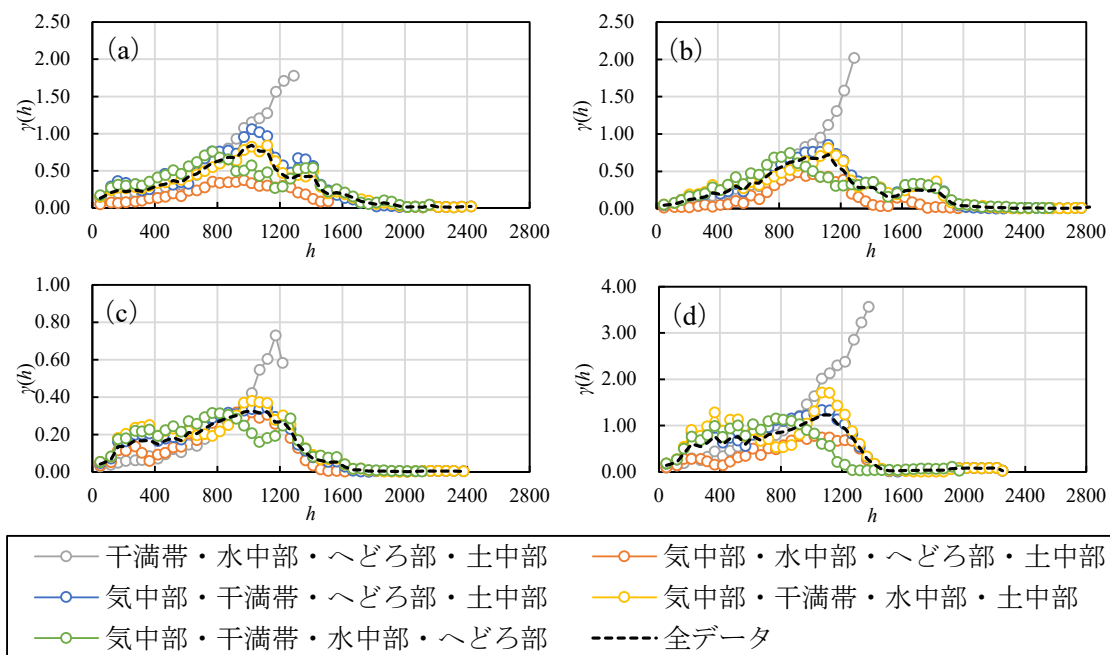


図 3-5 減厚値データを用いた経験バリオグラム
(a) 鋼矢板 A (b) 鋼矢板 B (c) 鋼矢板 C (d) 鋼矢板 D

3.4.3. 干満帯のデータ群による理論バリオグラム

干満帯のデータ群より得られる経験バリオグラムを理論バリオグラムによりモデル化する。図 3-6 に干満帯の空間データに対する球関数の理論バリオグラムによるモデル化の結果を示す。レンジ a に着目すると、鋼矢板 A のレンジ $a = 195 \text{ mm}$ が最小であることが確認できる (図 3-6 (a))。鋼矢板 A の空間データでは、空間的自己相関が認められる離間距離が最小となる。鋼矢板 B および C では、 $a = 758 \text{ mm}$ で最大を示すことが確認できる。この値は、両排水路の干満帯の空間データの組み合わせにおける最大の離間距離に等しい。つまり、実測値のデータ群間を内挿する空間補間であれば、いずれの位置に対しても空間的自己相関を考慮した補間が可能である。シル c に着目すると、鋼矢板 C では $c = 0.28 \text{ mm}^2$ で最小、鋼矢板 D では $c = 1.53 \text{ mm}^2$ で最大となる。シル c の大小は、減厚値の大小と同様の傾向を示した。

以上より、干満帯のデータ群に対して理論バリオグラムにより空間的自己相関の定式化を行った。これらの結果を用いて、通常クリギングによる空間補間を試みる。

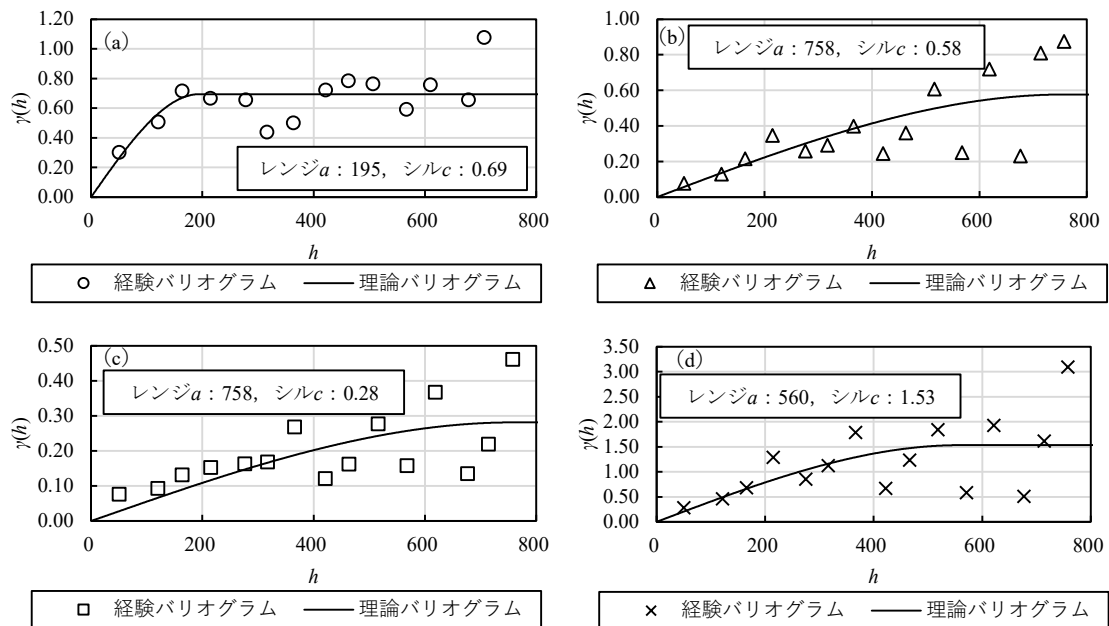


図 3-6 干満帯における減厚値データのバリオグラム解析結果

(a) 鋼矢板 A (b) 鋼矢板 B (c) 鋼矢板 C (d) 鋼矢板 D

3.4.4. 交差検証法による空間補間の評価

通常クリギングによる干満帯での空間補間を行うにあたり、その補間法の精度を leave-one-out 交差検証法により評価する。干満帯のデータ群に対する交差検証法の結果を図 3-7 に示す。鋼矢板 A, B, C および D の順番で MAE の値を示すと、0.43, 0.22, 0.26 および 0.37 である。各水路の干満帯のデータ群に通常クリギングを適用すると、0.00~4.00 mm の範囲の減

厚値に対して、実測値と推定値のずれは平均的に 0.2~0.4 mm 程度となることが確認された。これらの結果から、通常クリギングにより十分な精度で空間補間が可能と考えられる。ただし、ここでの交差検証法は実測値の空間位置に対して行われていることから、いずれの位置の補間も内挿となる。すなわち、内挿による空間補間では上記の精度を得られるが、外挿では精度が低下すると考えられる。

以上より、leave-one-out 交差検証法により、通常クリギングを用いた内挿における干満帯での空間補間で十分な精度が確認された。

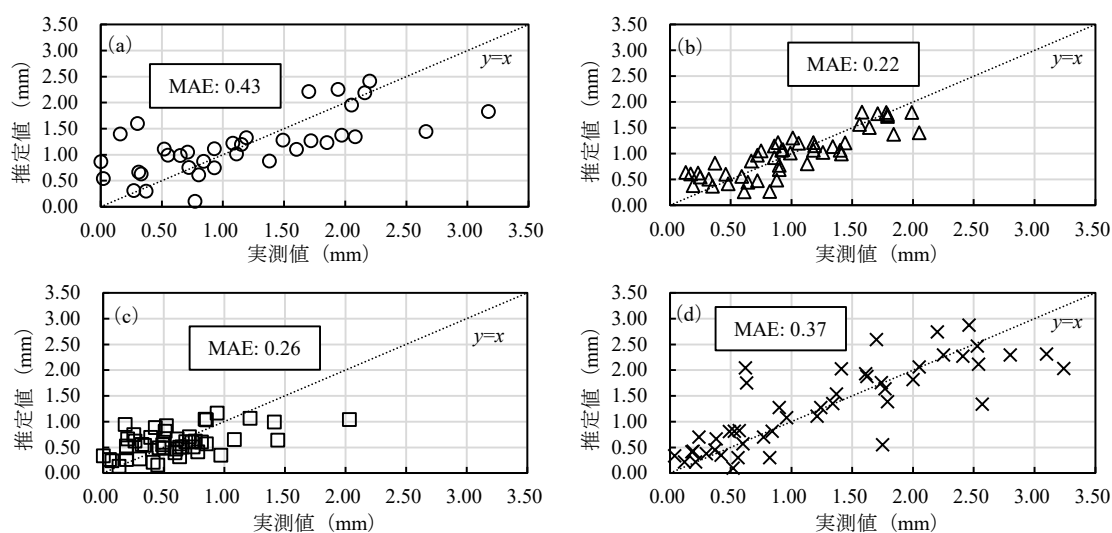


図 3-7 leave-one-out 法による通常クリギングの推定精度の交差検証
(a) 鋼矢板 A (b) 鋼矢板 B (c) 鋼矢板 C (d) 鋼矢板 D

3.4.5. 通常クリギングによる干満帯の腐食実態の評価

干満帯のデータ群を用いて、通常クリギングによる未観測位置の空間補間を行う。図 3-8 に通常クリギングによる干満帯での減厚値の補間結果を示す。干満帯の範囲は図 3-2 (a) ~ (d) に示す範囲で、計測点以外の空間補間を 2 mm 間隔で行った。各鋼矢板の補間結果を 3 方向から示している。減厚値のカラーバーでは、赤ほど減厚値が大きく、紫ほど減厚値が小さい。クリギングにより、離散的に計測されたデータから連続的に広がるような分布（実際は離散的である）が再現された。鋼矢板 C では減厚値の実測値が最も小さく、通常クリギングによる補間でも干満帯全体で減厚値が最も小さい結果となった。他の 3 水路では干満帯における気中部側のフランジ部分に減厚値が集中している傾向が確認された。図 3-4 に示す減厚値の実測値でも類似の傾向が確認されている。これより、排水路護岸の鋼矢板の腐食は干満帯上部のフランジ部分から進行し、その後ウェブ部分へと拡大していく傾向が示唆される。この物理化学的な原因をここで明確にすることは困難だが、腐食実態を検出・把握する上で、クリギングによる空間補間は有用と考えられる。

以上より、通常クリギングによる減厚値の空間補間から、干満帯上部のフランジ部分において腐食の進行が卓越する可能性が得られた。クリギングは鋼材における腐食実態の検出および把握に有用であることが示された。

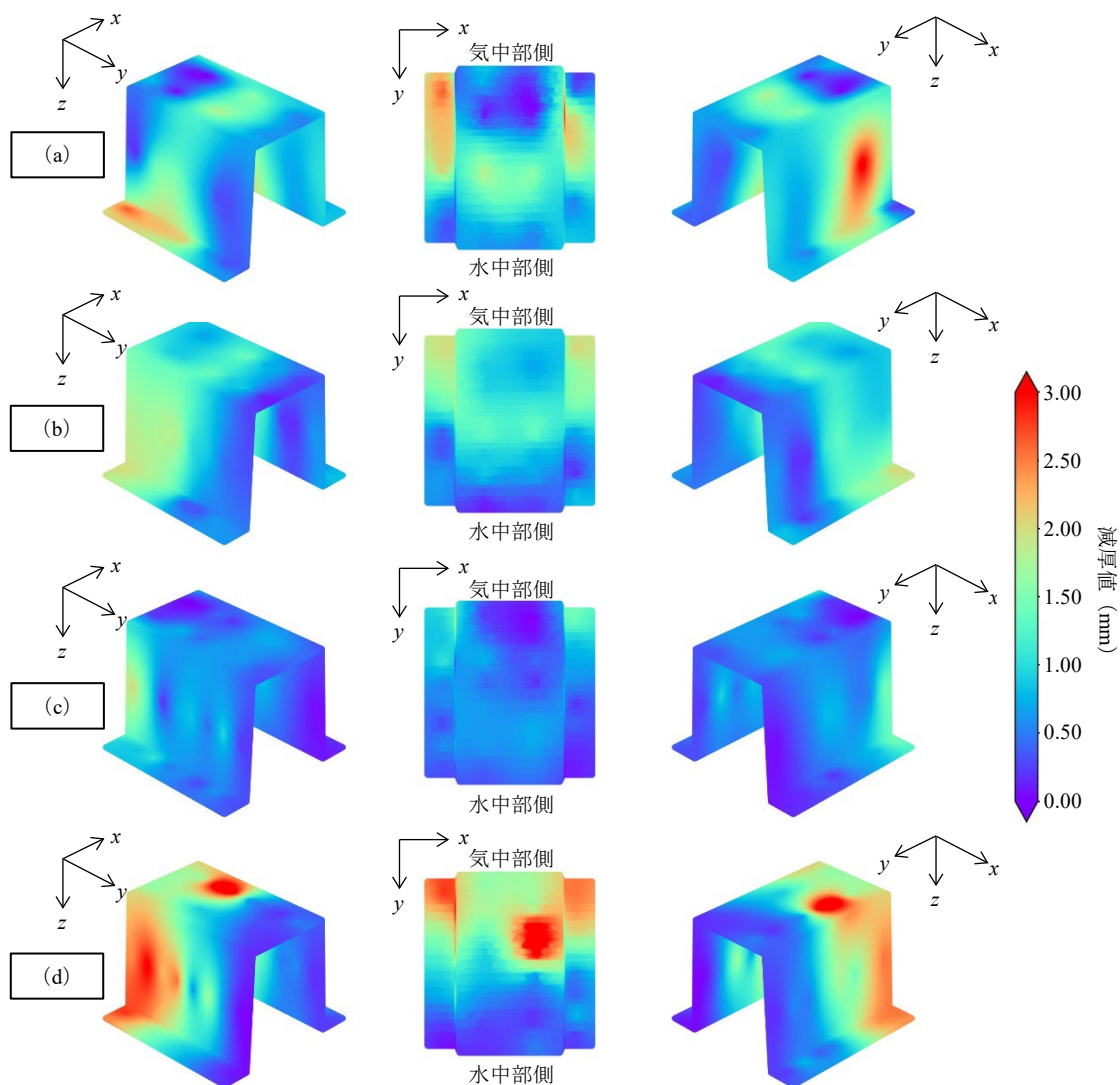


図 3-8 通常クリギングによる干満帯における減厚値の推定
 (a) 鋼矢板 A (b) 鋼矢板 B (c) 鋼矢板 C (d) 鋼矢板 D

3.5. 板厚分布の空間特性のまとめ

農業用排水路における鋼矢板の腐食実態を地球統計学により確率論的に評価した。実験的検討では、既設鋼矢板の板厚計測を行い、元厚からの減厚値を腐食の指標とした。解析的検討では、鋼矢板に分布する減厚値のデータ群を空間データと捉え、バリオグラムによる空間構造のモデル化と通常クリギングによる空間補間を行った。検討の結果を以下に列挙す

る。

- (1) 異種環境を隔てて設置される農業用排水路の鋼矢板では、干満帯で減厚値が卓越することが確認された。
- (2) 減厚値が比較的大きい干満帯のデータ群の存在により、経験バリオグラムは離間距離の増加に伴って極大とその後の減少を示すことが確認された。
- (3) 干満帯のデータ群に対して球関数の理論バリオグラムによるモデル化を行った。それを用いた通常クリギングによる干満帯における未観測位置の空間補間が可能であった。
- (4) 干満帯における空間補間の結果、鋼矢板の腐食は干満帯の中でも、気中部寄りである鉛直上側のフランジ部分にて腐食が進行しやすいことが示唆された。
- (5) 地球統計学に基づいて確率論的に鋼矢板の腐食実態を検出および評価できることが示された。

引用文献

- 1) Jeffrey, R. and Melchers, R. E. (2009): Effect of vertical length on corrosion of steel in the tidal zone, *Corrosion*, Vol. 65, No. 10, pp. 695-702.
- 2) Melchers, R. E., Jeffrey, R. J., and K. M. Usher (2014): Localized corrosion of steel sheet piling, *Corrosion science*, Vol. 79, 139-147.
- 3) 鈴木哲也, 森井俊広, 原 齊, 羽田卓也 (2012) : 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.
- 4) Hagiwara, T., Shimamoto, Y. and Suzuki, T. (2022): Non-contact detection of degradation of in-service steel sheet piles due to buckling phenomena by using digital image analysis with Hough transform, *Frontiers in Built Environment*, 172.
- 5) 白井一洋, 平林丈嗣, 松本さゆり (2015) : 超音波非接触式肉厚測定装置の計測精度向上と現地試験, *港湾空港技術研究所資料*, No. 1311.
- 6) 柴田俊夫 (1978) : 不均一腐食の確率的評価, *防食技術*, Vol. 27, pp. 23-35.
- 7) 腐食防食協会 60-1 分科会 (1988) : 極値統計手法による最大局部腐食深さ推定方法, *防食技術*, Vol. 37, pp. 768-773.
- 8) 柴田俊夫 (1998) : 局部腐食の確率統計的性質とその評価, *材料と環境*, Vol. 47, pp. 742-749.
- 9) Melchers, R. E. (2012): Modeling and prediction of long-term corrosion of steel in marine environments, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 22, No. 4, pp. 257-263.
- 10) Schoefs, F., Boéro, J., and Capra, B. (2020): Long-term stochastic modeling of sheet pile corrosion in coastal environment from on-site measurements, *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 8, No. 2, 70.
- 11) 田中 豊, 加藤絵万 (2016) : 鋼矢板の肉厚測定効率化に向けた地球統計学の適用に

- 関する検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 72, No. 2, pp. I_622-I_627.
- 12) Sadawy, M. M. and Elsharkawy, E. L. (2013): Prediction and modelling of corrosion in steel storage tank using non-destructive inspection, *Journal of Materials Science and Engineering*, Vol. B3, No. 12, pp. 785-792.
 - 13) Sadawy, M. M., Ismael, A. F., and Gouda, M. A. (2015): Geostatistical analysis for corrosion in oil steel tank, *American Journal of Science and Technology*, Vol. 2, No. 2, pp. 38-42.
 - 14) Liu, X., Wu, J., and Xu, J. (2006): Characterizing the risk assessment of heavy metals and sampling uncertainty analysis in paddy field by geostatistics and GIS, *Environmental Pollution*, Vol. 141, pp. 257-264.
 - 15) Ly, S., Charles, C., and Degré, A. (2011): Geostatistical interpolation of daily rainfall at catchment scale: the use of several variogram models in the Ourthe and Ambleve catchments, Belgium, *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 15, pp. 2259-2274.
 - 16) 地球統計学研究委員会 訳編 (Wackernagel, H. 原著) (2003) : 地球統計学, 森北出版, pp. 34-39.
 - 17) C. V. Deutsch and A. G. Journel, “GSLIB: Geostatistical software library and user’s guide second edition”, Oxford University Press, p.25 (1997).
 - 18) 坂田義隆 (2021) : クリギング入門—空間データ推定の確率論的アプローチ—, コロナ社, pp. 83-86.
 - 19) 正路徹也, 小池克明 (2007) : 「地球統計学」ヴァリオグラムデータの空間的連続性の解析, *日本地熱学会誌*, 29(3), pp. 125-140.

第4章 曲げ載荷試験による孔食を有する腐食鋼矢板の力学特性

4.1. 孔食を有する鋼矢板の変形挙動を捉える意義

既存施設では局所的に孔食が進行することから部位による腐食状況は異なる。同様の技術課題は港湾構造物においても指摘されており、腐食の局所化と早期劣化が報告されている¹⁾³⁾。残された技術課題は、各種応力場における孔食の進展が十分に明らかにされていない点である。既往研究では、有限要素法を用いて断面減少を踏まえた数値解析⁴⁾や確率論に基づくモデル化とその数値解析⁵⁾といった、腐食実態を踏まえた数値解析を中心に議論されている。いずれも孔食を有する鋼矢板の応力場における実挙動を精緻に計測・評価したものではない。この背景には、腐食が進行した鋼矢板に載荷することの困難性と共に、試料採取時に十分な規模での供試体が入手困難なことに起因していると考えられる。より詳細な分析には、既存施設から採取した鋼矢板を用いて、載荷過程における孔食の詳細な動態評価を行う必要があるものと推察される。そのことにより、孔食を有する鋼矢板の危険性や長期耐久性を具体的に議論できるものと考えられる。

農業農村工学分野では、2019年に農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【鋼矢板水路腐食対策（補修）編】（案）（以後、農水省マニュアルと記す）が出版され、既設鋼矢板水路の補修工に関する方向性が提示された⁶⁾。この第3章3.3では、鋼矢板水路の補修工法比較の表3.3-1 対策工法の対比表において、開孔・断面欠損の対応として「構造計算上かつ施工上支障がない開孔・断面欠損に対しては未処理で施工可能であるが、開孔部及び断面欠損が固定材にある場合は当て板溶接を行う。」と記述されている。しかし、その詳細な明確にされていない。既設鋼矢板水路の補修工では、施工実体として孔食を当て板溶接工法による断面修復が施されることが多い⁷⁾。孔食を有する鋼矢板の当て板サイズを試算し、一例として必要とされる溶接長を確保するための当て板サイズが孔食面積の約7倍にもなるものがあることを報告されている⁸⁾。現状では、腐食劣化の進行した鋼矢板護岸の断面性能を十分に評価することなく補修工が適用される事例が多く、補修後の長期耐久性の評価には留意が必要である。

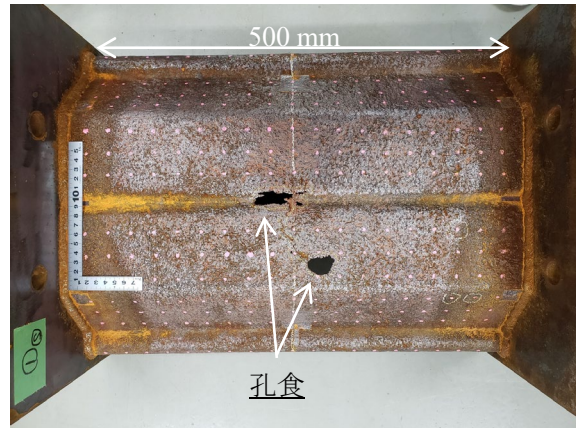
そこで本章では、既設鋼矢板護岸において発生した孔食を有する鋼矢板を対象に曲げ応力場における孔食の影響を3次元画像解析手法のひとつであるデジタル画像相関法（Digital Image Correlation Method；以下、DIC法と記す）により評価し、応力集中と変形挙動の検出を試みる。加えて、応力場で発生する弾性波を受動的に検出するAE（Acoustic Emission）法で計測した。DIC法とAE計測を組み合わせ、孔食を有する軽量鋼矢板の局所的な変形挙動の評価を試みる。

4.2. 実験方法

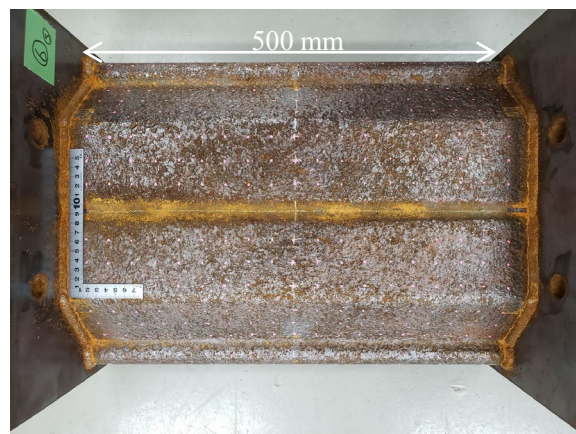
4.2.1. 鋼矢板供試体

供試体として既設護岸より引き抜かれた腐食鋼矢板を用いた。供試体は軽量鋼矢板の

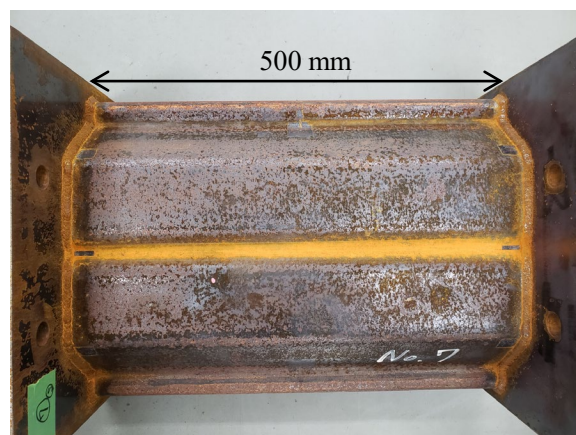
LSP-3D である。供試体の板厚に応じて 3 ケース (Case A~C) の検討を行った。供試体の外観を図 4-1 に示す。Case A は、板厚が不均一に減少し、孔食を有する腐食供試体である。Case A の板厚の平均値は 2.8 mm で、標準偏差は 0.7 mm である。Case B は、板厚が Case A より均一に分布した腐食供試体である。Case B の板厚の平均値は 3.9 mm で、標準偏差は 0.3 mm である。Case C は、5 mm の一様板厚の腐食を受けていない新設供試体である。曲げ載荷試験を実施するために、長辺を 500 mm に切断された鋼矢板の両端に幅 400 mm、高さ 250 mm および厚さ 50 mm の鋼製プレートを取り付けた供試体を用いた。



(a) Case A (腐食鋼矢板, 不均一な板厚減少, 孔食あり)



(b) Case B (腐食鋼矢板, 均一な板厚減少)



(c) Case C (非腐食鋼矢板, 板厚一定)

図 4-1 鋼矢板供試体の外観

4.2.2. 曲げ載荷試験

腐食鋼矢板の力学特性を評価するために、4点曲げ載荷試験を行った。曲げ載荷試験における鋼矢板供試体の設置の模式図を図4-2に示す。鋼材供試体の両端のプレートをH鋼に取り付け、H鋼に対して載荷を行った。曲げ載荷試験機（IP-200B-B1，前川試験機製作所）のレンジは0～200 kNが0～5 Vに対応するように設定した。2個のロードセル（KCM-10KNA，東京測器研究所）をそれぞれのH鋼の下に取り付けた。5個の変位計（SDP-200D，東京測器研究所）を鋼矢板供試体のウェブの直下に110 mm間隔で設置した。曲げ載荷過程では、載荷、停止および除荷を含んでいる。載荷速度は、Case Aで0.01 kN/s，Case BおよびCで0.03 kN/sに設定した。

曲げ載荷試験では、AEとデジタル画像の計測を同時に行った。AE計測の状況を図4-3に示す。150 kHz共振型のAEセンサ（R15 α ，PAC）を使用した。8個のAEセンサを鋼材供試体に設置した。AE計測装置（SAMOS，PAC）の設定では、検出波形の増幅値をメインおよびプリアンプを合わせて60 dB，しきい値を40 dB，周波数帯を5-400 kHzおよびサンプリングレートを1 MHzとした。曲げ載荷過程における鋼材供試体の表面のひずみ場を検出するために、デジタル画像相関法のための画像計測を行った。画像計測の状況を図4-4に示す。2台のCCDカメラ（Grasshopper 3 GS3-U3-60S6M，Point Grey）とレンズ（Xenoplan 2.0/28，Schneider KREUZNACH）を用いた。50×50 mm四方のランダムパターンの画像解析面を鋼材供試体の表面に作成した。Case Aでは、孔食の一部を含めるように作成した（図4-4参照）。計測条件として、絞り値を8，シャッタースピードを20 msおよびフレームレートを5 Hzに設定した。画像計測はソフトウェアVic-Snap（Correlated Solutions）により制御した。

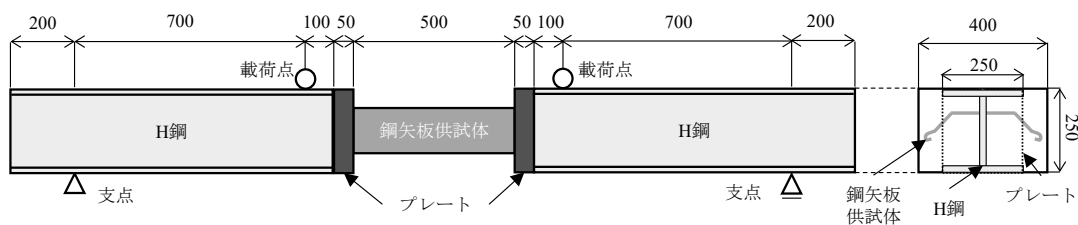
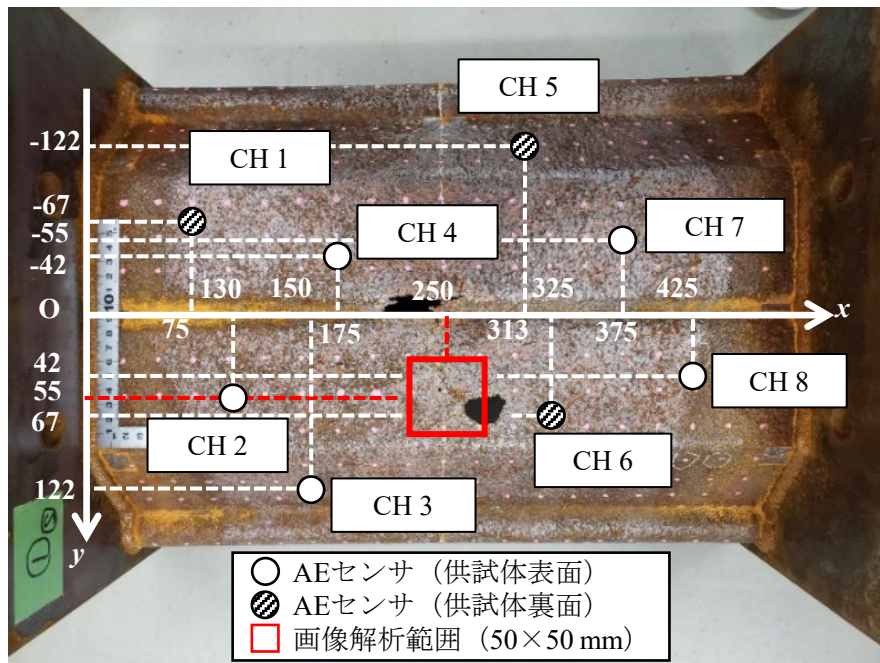
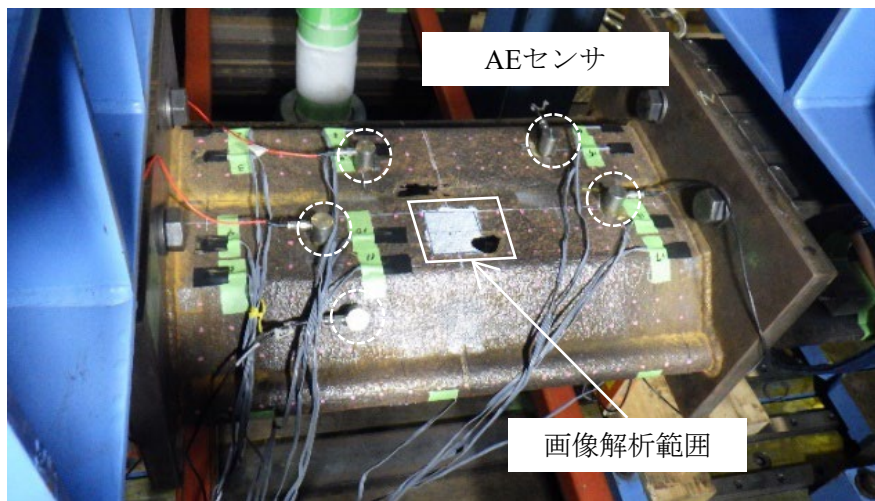


図4-2 鋼材供試体の設置の模式図



(a) AE センサの配置



(b) AE センサの設置状況

図 4-3 AE センサの配置

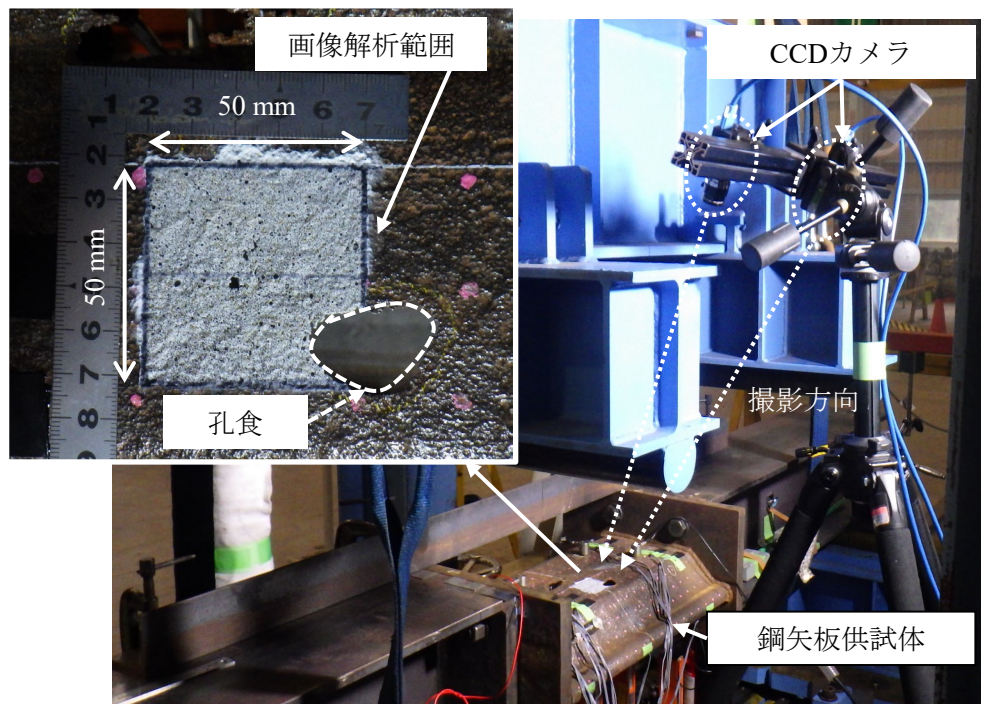


図 4-4 画像計測の状況

4.3. 解析方法

4.3.1. Acoustic Emission (AE) 法

曲げ載荷過程における変形に伴い発生する AE に対して AE パラメータ解析および AE 源位置標定を行う。

AE パラメータ解析では、1 分間に発生する AE ヒットおよび AE エネルギーの和の時系列を評価する。AE エネルギーは式 (4-1) により表わされる。

$$E_{AE} = a^2 \quad (4-1)$$

ここで、 E_{AE} は AE エネルギー (V^2)、 a は検出波の最大振幅値 (V) を示す。加えて、検出波の累積 AE エネルギーも評価する。

AE 源位置標定により、板厚減少および孔食の影響を評価する。AE 源位置標定では、式 (4-2) を用いる⁹⁾。

$$V\Delta t_{ij} = |\mathbf{x} - \mathbf{x}_i| - |\mathbf{x} - \mathbf{x}_j| \quad (4-2)$$

ここで、 V は弾性波速度 (m/s)、 Δt_{ij} はセンサ位置 \mathbf{x}_i (m) と \mathbf{x}_j (m) における弾性波の到達時間差 (s)、 \mathbf{x} は AE 源位置 (m) を示す。ここでは、実測に基づいて弾性波速度を $5,000 m/s$

として各ケースで与えた。解析では、鋼矢板供試体のウェブの6個のAEセンサ（CH1, 2, 4, 6, 7および8）を用いている（図4-3を参照）。

4.3.2. デジタル画像相関（DIC）法¹⁰⁾

DIC法により、曲げ載荷過程に伴う鋼矢板供試体の表面のひずみ場を検出する。DIC法では、CCDカメラで捉えたデジタル画像に写るランダムパターンの動きを追跡することで、材料の変形を決定する。最小の解析単位であるサブセットサイズを21×21 pixelsに設定し、5 pixelsのステップサイズで移動させることで、類似のランダムパターンの追跡を行う。ソフトウェアVic-3D（Correlated Solutions）により、本手法を実施する。DIC法により検出される最大主ひずみ場を指標に評価を行う。

4.4. 結果および考察

4.4.1. 曲げ載荷過程におけるAEパラメータの時系列

曲げ載荷過程における各ケースの荷重-変位曲線を図4-5に示す。ここでは鋼矢板供試体の中央で計測された変位の値を用いている。最大荷重はCase A, BおよびCにおいて、14.2, 46.8 および76.2 kNである。腐食した鋼矢板供試体であるCase AおよびBの荷重値は、腐食のない鋼矢板供試体であるCase Cの0.19 および0.61 倍の値である。Case A および B の荷重値は、載荷時において最大荷重に到達した後に低下することが確認された。最大変位はCase A, B および Cにおいて、30.1, 67.8 および84.1 mmである。Case A および B の変位値は、Case Cの0.36 および0.81 倍の値である。板厚減少量に応じた荷重-変位曲線の明確な相違が確認された。

荷重値とAEパラメータの関係を図4-6に示す。Case A, B および C の全AEヒット数は91,401 hits（3,841 s 時点）、144,853 hits（7,046 s 時点）および104,853 hits（9,156 s 時点）である。Case A, B および C の1分間の最大AEヒット数は3,847 hits（1,350 s 時点）、3,568 hits（3,570 s 時点）および1,700 hits（3,810 s 時点）である。Case A および B の最大AEヒット数は、Case Cの2.3 および2.1 倍の値である。Case A および B の最大AEヒット数に至るまでの時間は、Case Cの0.35 および0.94 倍の値である。Case A および B の板厚の平均値（2.8 mm および3.9 mm）は、5 mm 一定板厚のCase Cの0.52 および0.76 倍の値である（4.2.1 項参照）。板厚が1 mm 以上減少することにより、最大AEヒット数は2倍となることが確認された。板厚の減少は、鋼矢板の変形を引き起こしやすくなることが明らかになった。板厚が2 mm 以上減少することにより、最大AEヒット数に至るまでの時間は約3分の1倍となることが確認された。板厚の減少は、変形を引き起こす時間を短縮させることが明らかになった。

累積AEエネルギーについて、Case A, B および C の総計は5,409 V², 13,483 V² および10,520 V²である。Case A の累積AEエネルギーは徐々に増加していく傾向に対して、Case Cでは急激に増加する傾向が確認できる。Case B はそれらの中間の傾向が確認できる。板厚減少の

ない Case C の鋼矢板供試体では、腐食した鋼矢板供試体の Case A および B よりもより高い曲げ剛性を有している。これにより、Case C は曲げ荷重過程において高い AE エネルギーの放出が起こったと考えられる。Case A では、板厚減少により曲げ剛性がより低いため、なだらかな AE エネルギーの放出が起きたと考えられる。

以上より、板厚減少により、曲げ荷重過程における荷重－変位曲線、AE ヒットおよび累積 AE エネルギーに明確な相違が確認される結果となった。

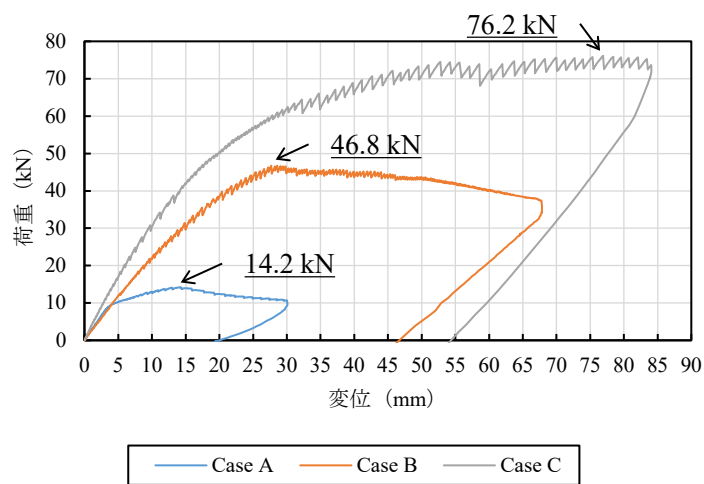
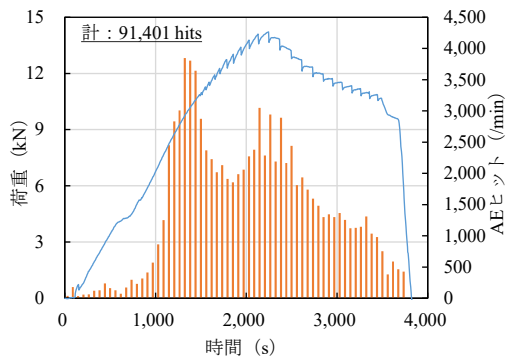
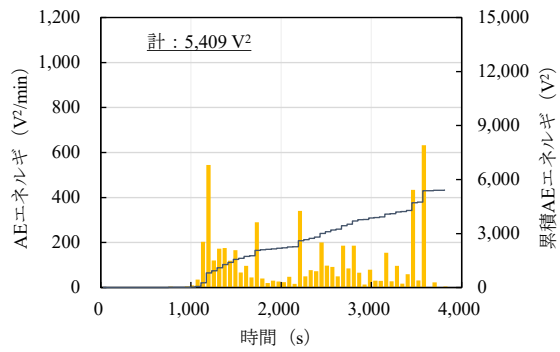


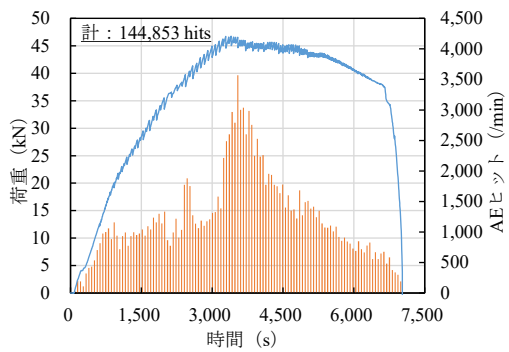
図 4-5 曲げ荷重過程における荷重－変位曲線



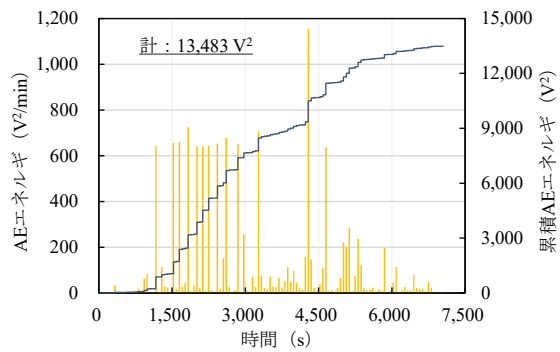
(a) 荷重と AE ヒットの関係 (Case A)



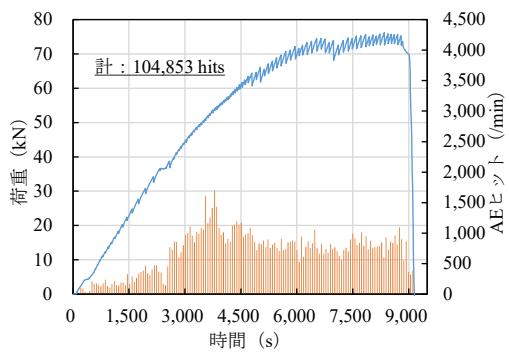
(b) AE エネルギー (Case A)



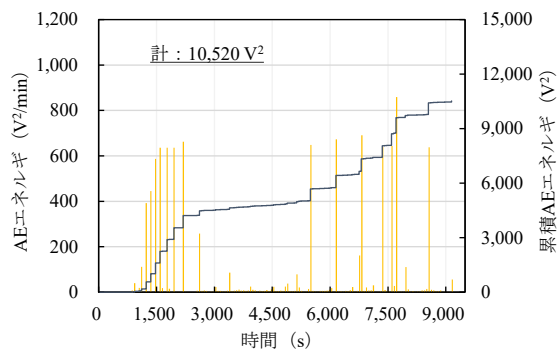
(c) 荷重と AE ヒットの関係 (Case B)



(d) AE エネルギー (Case B)



(e) 荷重と AE ヒットの関係 (Case C)



(f) AE エネルギー (Case C)

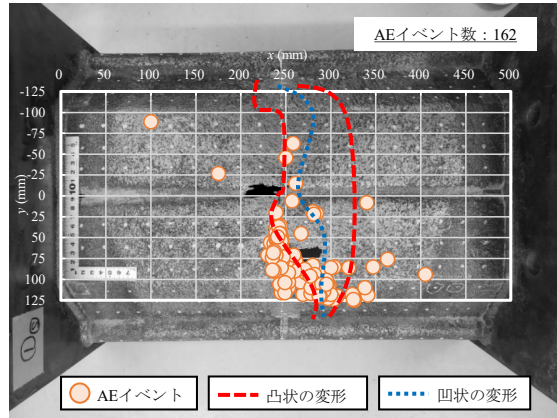


図 4-6 曲げ載荷過程における AE ヒットおよび AE エネルギーの時系列

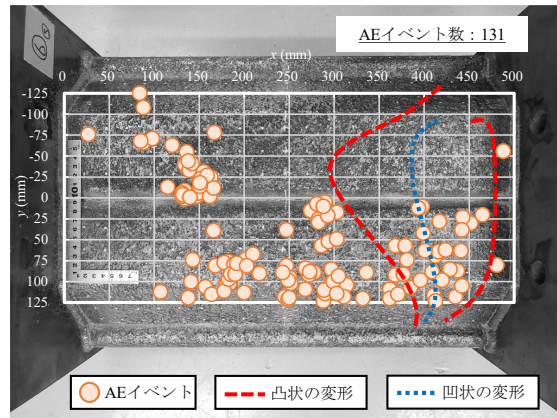
4.4.2. 孔食周辺における AE 源位置標定

曲げ載荷過程における AE 源位置標定の結果を図 4-7 に示す。本図では、水平右向きの x 軸における 0~500 mm, 水平下向きの y 軸における -125~125 mm の範囲を示す。AE 源位置標定では鋼矢板供試体のウェブを対象とする。Case A および B の鋼矢板供試体は曲げ載荷試験において変形を生じることが確認された。図 4-7 (a) および (b) の破線および点線は、凸状および凹状の変形を表している。Case A では、孔食周辺における AE 源の集中が確認された。孔食周辺は局所的な板厚減少の範囲 (1.7~2.4 mm) である。2 か所の孔食をつなぐ左側の破線に沿って変形が確認された (図 4-7 (a) 参照)。AE はこの変形に起因して発生したものと推察される。Case B では、Case A より板厚が厚いこと、板厚のばらつきが小さいことおよび孔食がないことから、AE 源の空間分布がばらついたものと考えられる (4.2.1 項参照)。均一な板厚減少により、AE 源の集中が起こらず、4.4.1 項における変形の時間を遅らせたものと考えられる。Case C において、AE 源は 2 か所に局所的に分布する結果となった (図 4-7 (c) 参照)。AE 源は鋼矢板とプレートの溶接部分における変形に基づき分布したものと推察される。

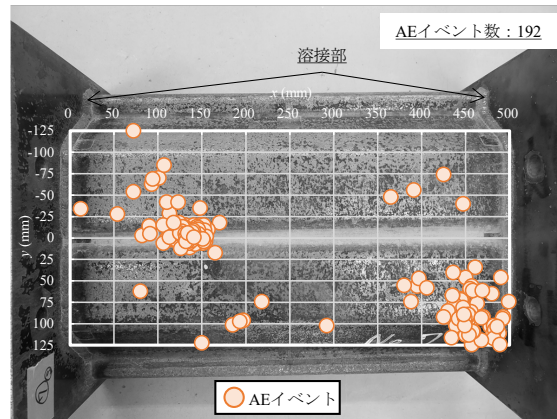
異なる板厚を有する鋼矢板供試体において AE 源位置の分布が異なることが明らかになった。



(a) Case A



(b) Case B



(c) Case C

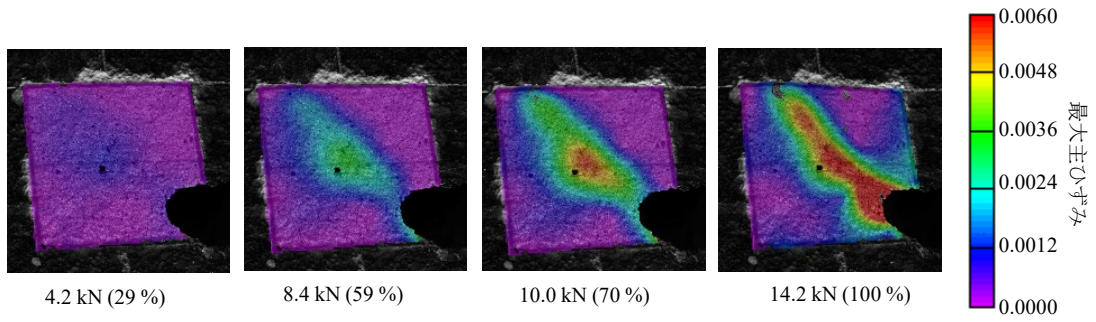
図 4-7 AE 源位置標定の結果

4.4.3. DIC 法による孔食周辺における最大主ひずみの集中の検出

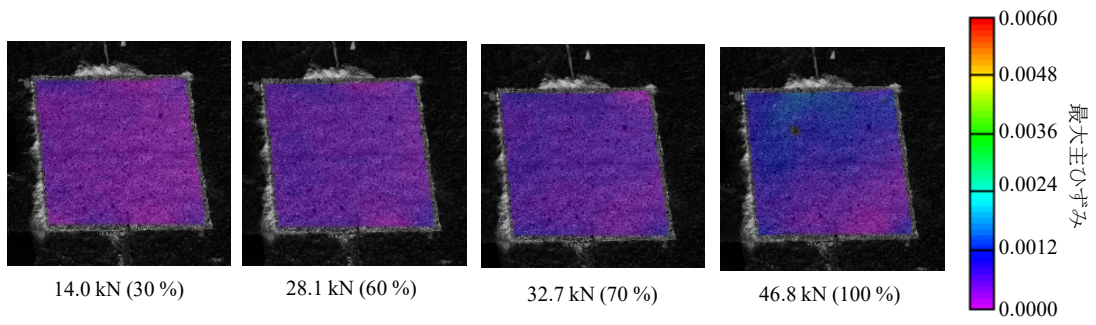
DIC 法により鋼矢板供試体の表面の最大主ひずみ場を検出する。DIC 法による検出結果を図 4-8 に示す。応力集中に伴うひずみの集中が Case A の孔食周辺では検出され、Case B および C では検出されない結果となった。60%の荷重レベルにおいて、Case A では 8.4 kN でひずみの集中が確認されたが、Case B および C の 28.1 kN および 45.7 kN ではそれが確認されなかった。このとき、Case A の荷重値は Case B および C の 0.3 および 0.2 倍の値であり、孔食周辺のひずみの集中がより低い荷重値で検出された。Case A の曲げ荷重試験では、ひずみの集中が解析面の中央から始まり、孔食周辺へ広がっていくことが確認された。これは、板厚が 1.7~2.4 mm と比較的薄い、2 か所の孔食の間に位置しているためであり、変形が生じやすいと推察される。Case A におけるひずみの集中は AE 源位置と対応していることが確認できる (図 4-7 (a) 参照)。既往研究ではひずみ場と AE 源位置の対応が報告されている¹¹⁾。

DIC 法で検出された最大主ひずみの時系列を AE ヒットの時系列と比較する。最大主ひずみと AE ヒットの時系列の関係を図 4-9 に示す。ここで、各ケースで解析面の中心における最大主ひずみの時系列データを用いている。図 4-9 において図 4-8 での各荷重レベルを図示している。Case A では、荷重過程において最大主ひずみ値が著しく増加しており (図 4-9 (a) 参照)、AE ヒットの増加と対応していることが確認できる (図 4-9 (b) 参照)。この荷重過程では、AE ヒットの最大値 (3,847 hits) が 1,350 s 時点で確認された後、最大主ひずみの最大値 (0.0065) が 1,433 s 時点で確認されている。DIC 法により局所的な変形に伴う AE ヒットの発生を捉える結果となった。Case B および C では、最大主ひずみ値の著しい増加は確認されなかった。最大主ひずみ値は Case B で約 0.0014 (図 4-9 (d) 参照)、Case C で 0.0008 (図 4-9 (f) 参照) と確認された。

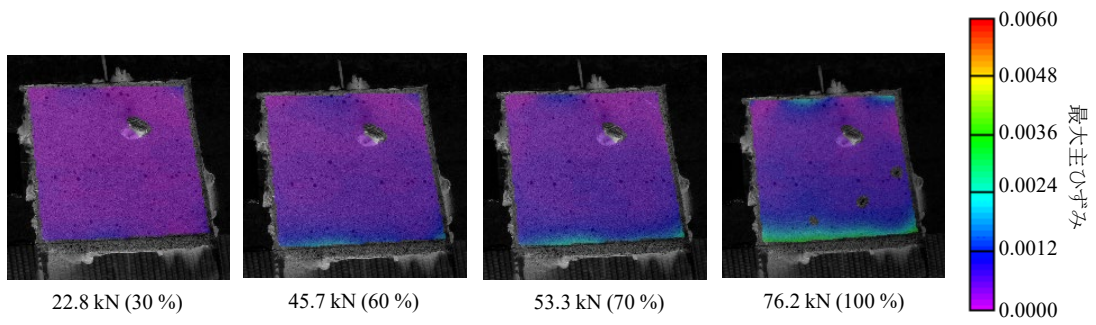
DIC 法と AE 法を組み合わせることで、孔食周辺における最大主ひずみの集中と AE 源位置の空間的分布および時系列での最大主ひずみと AE ヒットの増加が一致することが確認された。



(a) Case A

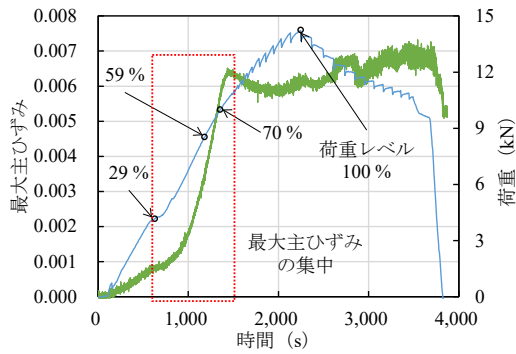


(b) Case B

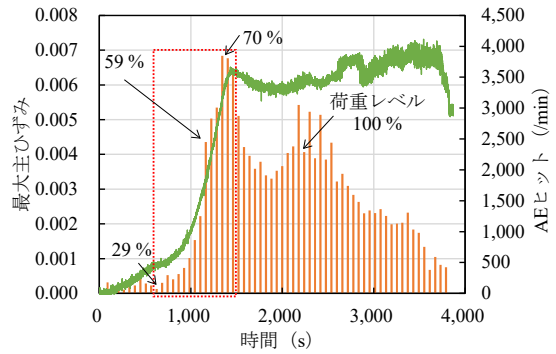


(c) Case C

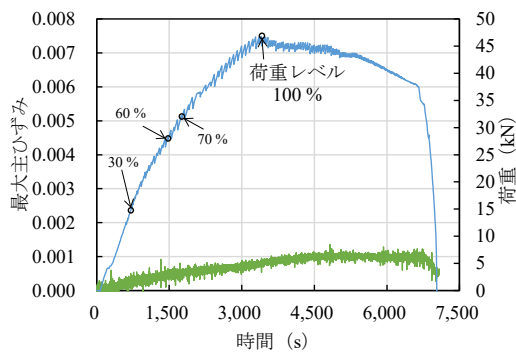
図 4-8 DIC 法により検出された最大主ひずみ場



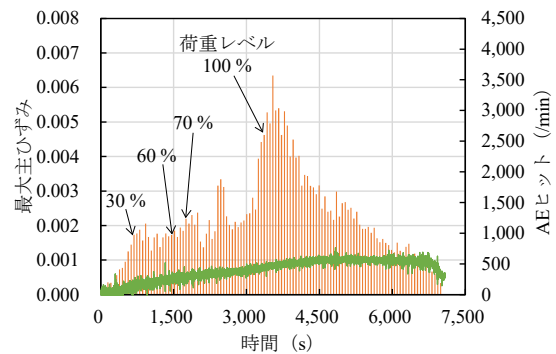
(a) 最大主ひずみと荷重 (Case A)



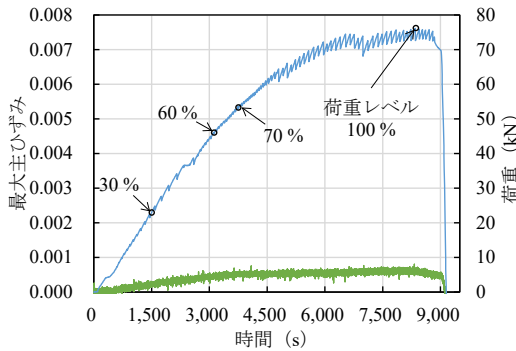
(b) 最大主ひずみと AE ヒット (Case A)



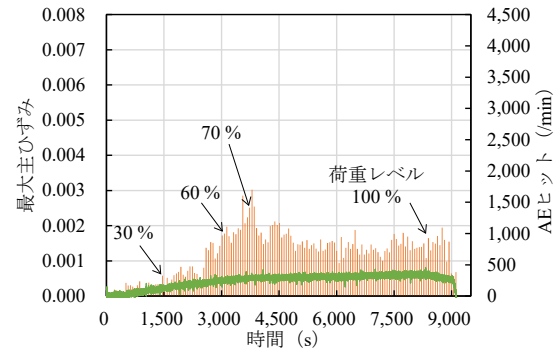
(c) 最大主ひずみと荷重 (Case B)



(d) 最大主ひずみと AE ヒット (Case B)



(e) 最大主ひずみと荷重 (Case C)



(f) 最大主ひずみと AE ヒット (Case C)

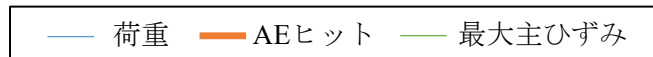


図 4-9 DIC 法により検出された最大主ひずみと AE ヒットの時系列の関係

4.5. 腐食鋼矢板の力学特性のまとめ

腐食した鋼矢板供試体に 4 点曲げ載荷試験を行い、AE 法および DIC 法により孔食周辺の応力集中に伴うひずみ場の検出を試みた。不均一な板厚と孔食を有する腐食した供試体、均

一な板厚を有する腐食した供試体および一定な板厚を有する腐食していない供試体を検討ケースとした。検討の結果、AE ヒット、AE 源位置および DIC 法により検出された最大主ひずみの関係を明らかにした。結論を以下に列挙する。

- 1) 鋼矢板供試体の板厚減少により、荷重-変位曲線、AE ヒットおよび累積 AE エネルギーの特性に影響を与えることが確認された。板厚減少に伴う変形により、1 分間における AE ヒットの最大値が増加し、その最大値に至るまでの時間が短縮することが確認された。
- 2) AE 発生源が孔食周辺に集中することが確認された。DIC 法により検出された最大主ひずみが孔食周辺に集中することが確認された。AE 発生源と最大主ひずみの分布が一致することが確認された。
- 3) AE ヒットと DIC 法による最大主ひずみの時系列における増加が一致することが確認された。両手法により、AE ヒットと主ひずみの集中の関係が検出された。

引用文献

- 1) Chaves, I. A., Melchers, R. E., Peng, L., and Stewart, M. G. (2016): Probabilistic remaining life estimation for deteriorating steel marine infrastructure under global warming and nutrient pollution, *Ocean Engineering*, 126, pp. 129-137.
- 2) Melchers, R. E., Jeffrey, R. J., and Usher, K. M. (2014): Localized corrosion of steel sheet piling, *Corrosion Science*, 79, pp. 139-147.
- 3) Wall, H. and Wadsö, L. (2013): Corrosion rate measurements in steel sheet pile walls in a marine environment, 33, pp. 21-32.
- 4) Balegh, B., Trouzine, H., and Houmadi, Y. (2018): Finite element simulation and prediction of mechanical and electrochemical behavior on crevice corrosion in sheet pile steel, *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 12 (1), pp. 23-31.
- 5) Schoefs, F., Boero, J., and Capra, B. (2020): Long-term stochastic modeling of sheet pile corrosion in coastal environment from on-site measurements, *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(2), 70.
- 6) 農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室 (2019) (参照 2020.4.30) : 農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【鋼矢板水路腐食対策(補修)編】(案), (オンライン), 入手先<<https://www.maff.go.jp/j/nousin/mizu/sutomane/attach/pdf/kouyaita-15.pdf>>
- 7) 鈴木哲也, 長崎文博, 小林秀一 (2022) : 鋼矢板水路に施工したパネル被覆工法の変状に関する実態調査, *農業農村工学会論文集*, 314, pp. II_19-II_28.
- 8) 阿部幸夫 (2022) : 第 5 章 5.3.2 水路施設における鋼矢板の腐食特性と当て板溶接, “鈴木哲也, 浅野 勇編, 農業用鋼矢板水路の機能診断に基づく保全対策—非破壊検査による実態解明と新たな材料開発の試み—”, 養賢堂, pp. 176-180.
- 9) Ohno, K., Shimozono, S., Sawada, Y., and Ohtsu, M. (2008): Mechanisms of diagonal-shear

failure in reinforced concrete beams analyzed by AE-SiGMA, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 2–4, pp. 462-472.

- 10) Sutton, M. A., Orteu, J. J., and Schreier, H. W. (2009): *Image correlation for shape, motion and deformation measurements*, Springer, pp. 81-117.
- 11) Flament, C., Salvia, M., Berthel, B., and Crosland, G. (2015): Local strain and damage measurements on a composite with digital image correlation and acoustic emission, *Journal of Composite materials*, 50–14, pp. 1089–1996.

第5章 画像解析による鋼矢板護岸の座屈現象の非接触検出

5.1. 鋼矢板護岸の座屈現象を検出する意義

農業用水路に用いられる鋼矢板護岸では、極度に進行した腐食劣化により、断面欠損が顕在化する場合がある。断面欠損は傾倒や倒壊を引き起こし、施設の性能低下へつながるとされる。北海道では、鋼矢板護岸における断面欠損の拡大と積雪による荷重の影響により、施設が倒壊する事例が報告されている¹⁾。本章で対象とした新潟県亀田郷地区の鋼矢板護岸においても同様の腐食劣化が問題となっており、長期供用を伴う板厚の減少が報告されている²⁾。

本章で対象とした新潟県亀田郷地区の切梁式鋼矢板護岸の変形を図5-1(a)に示す。鋼矢板護岸では水位変動部において腐食による断面減少および断面欠損が進行しやすい³⁾。ゆえに、図5-1(a)のように水位変動部で鋼矢板護岸の変形が引き起こされる。鋼矢板護岸の傾斜に応じて笠コンクリートでも、図5-1(b)のような傾斜が確認された。矢板型水路の設計では、設計内容のひとつとして矢板頭部の変位量が含まれている。農林水産省が定める自立式鋼矢板水路の矢板頭部における許容変位量の設計基準によると、壁高を H (m) とする水路内側への許容変位量 (m) は $H/40$ ($0 < H \leq 4.0$) あるいは 0.1 ($4.0 < H$) とされている⁴⁾。これには切梁式鋼矢板水路の許容変位量については明記されていない。切梁式矢板に関する記述が見られる日本道路協会の道路土工一仮設構造物指針では、仮設構造物の点から、掘削工事に伴う土留め壁の設計において弾塑性法により変形の算定を行うことが記されている⁵⁾。いずれも長期耐久性を必要とする構造物としての切梁式鋼矢板水路について、変形に関する具体的な設計基準は設定されていない。施設の長寿命化を図る維持管理の点から、自立式鋼矢板水路と同様に、その変形を把握することは不可欠である⁶⁾。農業農村工学分野での技術的課題は、設計段階で想定されない断面欠損を伴う鋼矢板護岸の変形が卓越する既存施設に対し、正確な調査・診断を実施することであると考えられる。

本章では、腐食劣化による断面欠損が卓越する切梁式鋼矢板水路を対象に、鋼矢板護岸の変形について検討する。鋼矢板護岸の変形に対して、UAVにより水路横断面方向のデジタル画像を取得し、画像解析により傾斜角度の簡易な評価を試みる。画像解析では鋼矢板の長辺方向における直線形状に着目し、ハフ変換を用いて直線検出およびその傾斜角度の推定を行う。ハフ変換とは、画像中から図形要素を検出する手法である。Houghにより直線を傾きと切片のパラメータで、DudaとHartにより直線を原点からの距離と角度のパラメータで表現し、検出する手法が提案された^{7),8)}。画像中の図形要素は、ノイズや物体同士の重なりにより連続的につながっているとは限らない。画像中の不完全な情報に基づく図形要素の検出にハフ変換は有用とされている。一例としては、材料におけるひび割れの検出にハフ変換が用いられている事例がある⁹⁾⁻¹¹⁾。農業分野では、農業機械における作物列の検出に応用されている¹²⁾⁻¹⁴⁾。本稿では、直線を表す角度パラメータにより鋼矢板護岸の傾斜角度の評価を行う。ハフ変換を用いた角度推定の事例には、光学文字認識(OCR)でのスキュー角

度推定に関する事例が挙げられる¹⁵⁾⁻¹⁷⁾。これらの先行研究を踏まえて、本章の新規性は、ハフ変換による角度推定を応用し、鋼矢板護岸の変形に伴う傾斜角度をデジタル画像で評価することにあると考えられる。検討結果は、変形に関する弾塑性解析へとつながる角度検証の一手法になり得ると考えられる。提案手法の有用性は、面的かつ長大な広がりをもつ鋼矢板護岸の維持管理を UAV により非破壊・非接触で行える可能性があることと考えられる。これらより、本稿では切梁式鋼矢板護岸の変形に対して、画像解析手法のハフ変換を用いた2次元のデジタル画像による簡易な角度推定の可能性について検討する。



(a) 鋼矢板護岸の傾斜

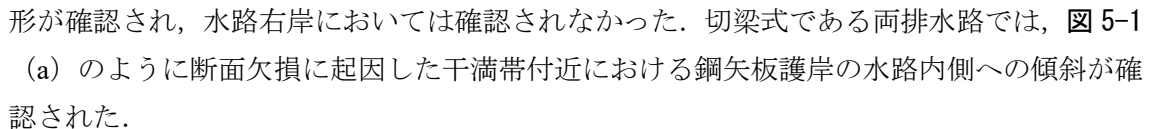


(b) 笠コンクリートの傾斜


図 5-1 切梁式鋼矢板護岸における座屈現象の例

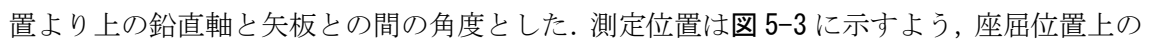
5.2. 計測方法

5.2.1. 対象鋼矢板水路の概要

新潟県亀田郷地区に位置する県営造成施設の H 排水路および S 排水路にて鋼矢板護岸の変形量の計測を実施した。H 排水路および S 排水路の水路構造はともに切梁式軽量鋼矢板水路で、造成年度はそれぞれ 1994 年度および 1998 年度である。調査区間において、H 排水路では水路両岸で鋼矢板護岸の変形が確認された。S 排水路では水路左岸で鋼矢板護岸の変形が確認され、水路右岸においては確認されなかった。切梁式である両排水路では、 5-1 (a) のように断面欠損に起因した干満帯付近における鋼矢板護岸の水路内側への傾斜が確認された。

5.2.2. 鋼矢板護岸の座屈現象の画像計測

調査施設において、鋼矢板護岸の変形を対象とした画像の撮影と笠コンクリートの傾斜角度の測定を行った。画像の撮影では、空撮カメラ (Zenmuse Z30, DJI 社製) を搭載した UAV (Matrice 210, DJI 社製) を水路横断面方向における中央位置に飛行させ、下流側を正面とした水路横断面の構図にて画像取得を試みた。 5-2 に UAV での撮影状況を示す。撮影条件として、カメラの撮影角度を鉛直方向および水平方向ともに 0°, 光学ズームを 1 倍とした。カメラは機体と同一方向、すなわち水路下流側を正面とした方向に向いている。撮影は、2020 年 3 月 30 日 13 時 46 分から 14 時 05 分の間に H 排水路にて、同日 14 時 33 分から 14 時 54 分の間に S 排水路にて実施した。

鋼矢板の傾斜角度は、デジタル角度計 (デジタルアングルメーター II 防塵防水 マグネット付, シンワ測定) を用いて測定した。角度計の分解能は 0.05° である。精度は、測定角度 0° と 90° で $\pm 0.05^\circ$ で、それ以外の場合は $\pm 0.15^\circ$ である。鋼矢板の傾斜角度は、座屈位置より上の鉛直軸と矢板との間の角度とした。測定位置は  5-3 に示すよう、座屈位置上の鋼矢板のウェブとした。測定点数は鋼矢板あたり 10 点とし、ウェブ中心から左右 5 点に分割した。垂直方向の測定間隔は 150 mm とした。H 排水路では 24 枚、S 排水路では 8 枚の鋼矢板を測定した。

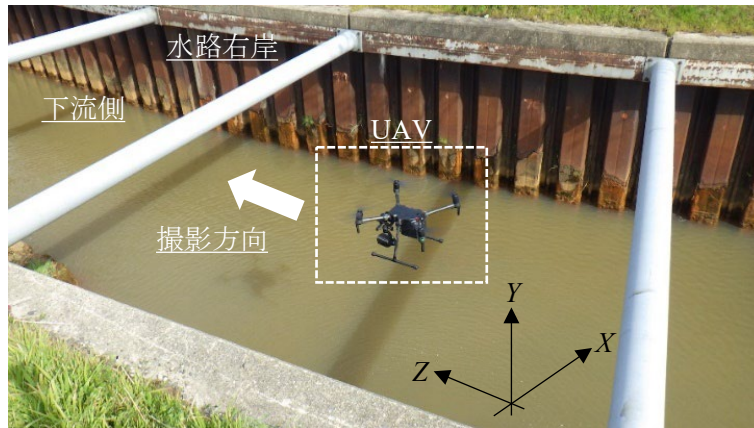


図 5-2 UAV を用いた水路内での画像計測状況

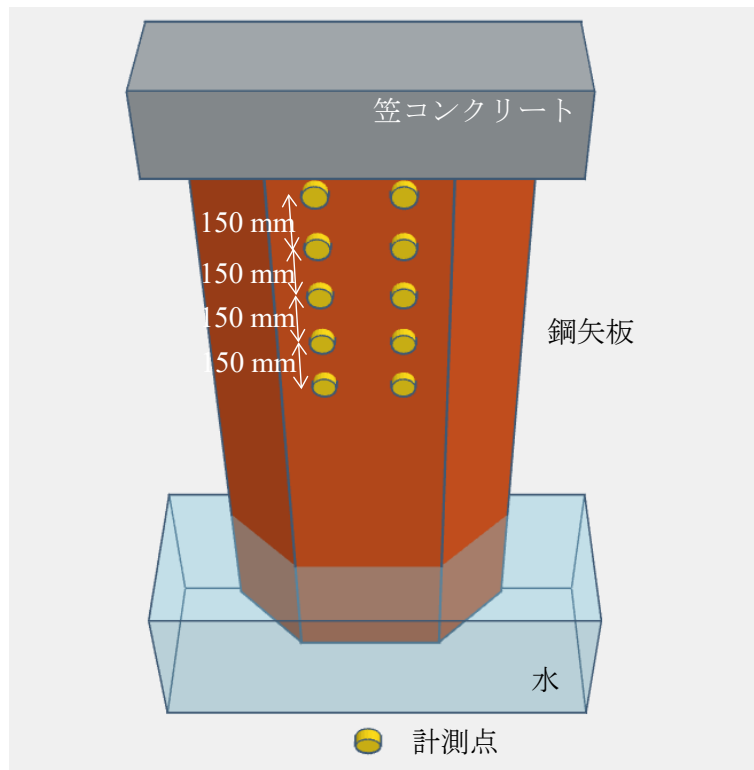


図 5-3 鋼矢板護岸の傾斜角度の計測状況

5.3. 解析方法

5.3.1. デジタル画像のハフ変換の数理

ハフ変換は、パラメータにより表現可能な図形を画像中から検出する方法である¹⁸⁾。xy

画像空間における直線は式 (5-1) により表される。

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (5-1)$$

ここで、 ρ は原点から直線までの符号付き距離、 θ は原点から直線へおろした垂線と x 軸のなす角である ($0 \leq \theta < \pi$)。図 5-4 にハフ変換の概念図を示す。座標については、 x が正かつ y が正を第 1 象限、 x が負かつ y が正を第 2 象限、 x が負かつ y が負を第 3 象限、 x が正かつ y が負を第 4 象限とする。 xy 画像空間の点に対応する軌跡について、 $\rho\theta$ パラメータ空間へと写像することによる投票を行い、特定の (ρ, θ) の組における投票度数が大きいほどそのパラメータにより表される直線が存在する可能性が高くなる。図 5-4 の場合、 xy 画像空間における直線 l 上の点 (x_i, y_i) (i は 0 以上の整数) は $\rho\theta$ パラメータ空間で正弦波に写像され、投票が行われる。各正弦波の交点 (ρ_0, θ_0) が存在し、その投票度数がしきい値より大きい値であれば、パラメータ (ρ_0, θ_0) となる直線が xy 画像空間にて検出される。なお、原点から直線へおろした垂線の足が y 軸方向で負の領域にあるとき、解析上、距離パラメータ ρ を $-\rho$ 、角度パラメータ θ を $\pi - \theta$ としている。

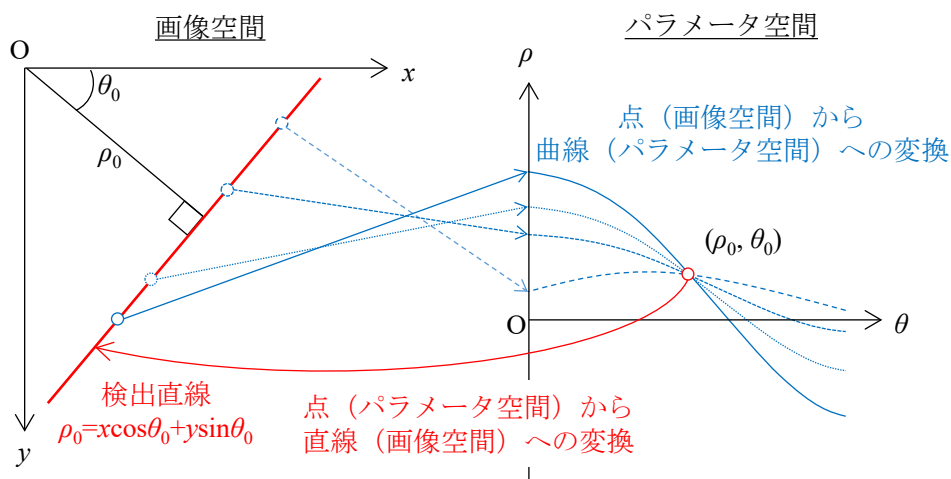
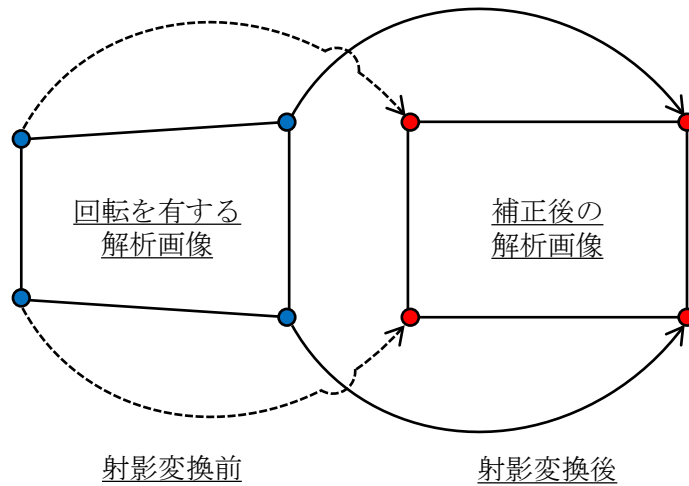


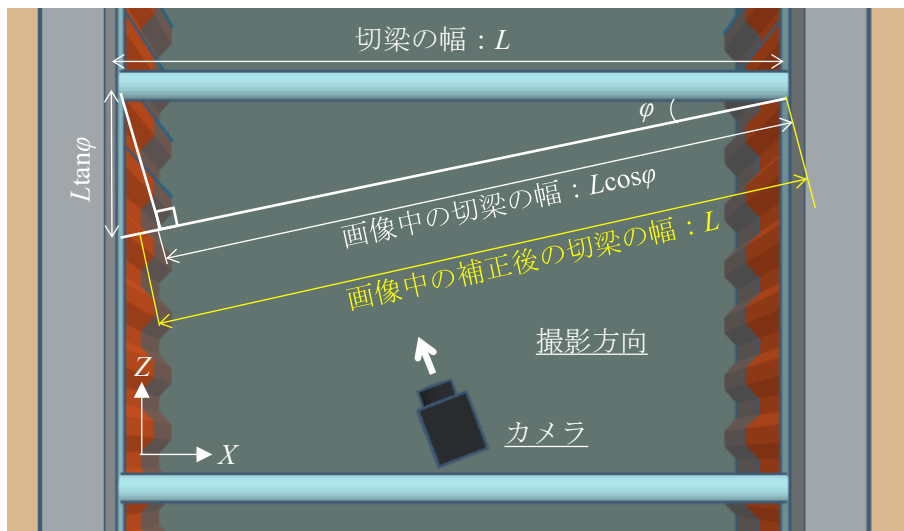
図 5-4 ハフ変換の模式図

5.3.2. デジタル画像の補正

画像の撮影方向が管路断面の法線方向からずれる場合、その画像回転は射影変換を適用することで補正する。射影変換とは、任意の四角形画像を別の任意の四角形画像に変換する方法である。画像補正の模式図を図 5-5 に示す。



(a) 射影変換の模式図



(b) 補正の概要

図 5-5 画像補正の模式図

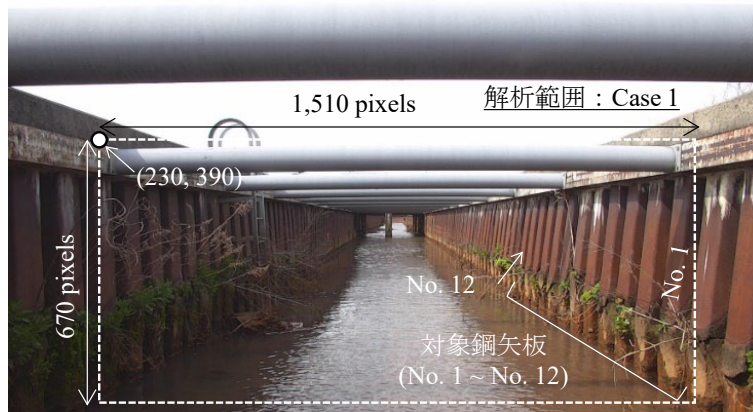
5.3.3. 鋼矢板護岸の座屈現象の検出モデル

鋼矢板護岸のデジタル画像を用いて変形による傾斜角度の推定を試みた。解析的検討では鋼矢板の有する長辺方向の直線形状に着目した。鋼矢板は型式に応じて断面形状に相違があるが、長辺方向には直線的な成形がなされている。鋼矢板の直線形状をデジタル画像より検出し、その傾斜角度について評価を行った。

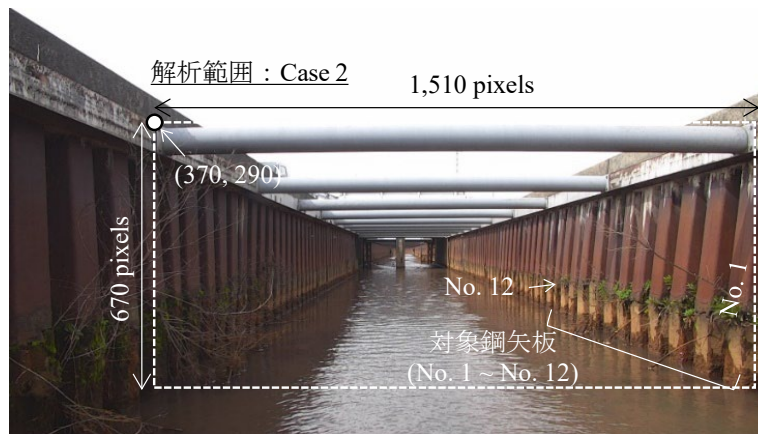
図 5-6 に解析画像を示す。各画像の対象は四角で囲まれた範囲である。解析領域のサイズは $1,510 \times 670$ ピクセルに設定されている。対象の鋼矢板は、画像の右側に位置する水路右岸である。解析は 3 ケースを設定している。Case 1 は H 排水路護岸の座屈条件である。対象の座標は左上の $(x, y) = (230, 390)$ で、No. 1 から No. 12 までの 12 枚の鋼矢板を評価する。Case 2 は画像回転を伴う座屈条件である。これらの鋼矢板は、Case 1 と同じ H 排水路だが設置位置が異なる。対象の座標は左上の $(x, y) = (370, 290)$ で、No. 1 から No. 12 までの 12 枚の鋼矢板を評価する。Case 2 では、射影変換による画像回転の補正の検討を行う。Case 3 は、S 排水路護岸の座屈ない条件である。対象の座標は左上の $(x, y) = (150, 390)$ で No. 1 から No. 8 までの 8 枚の鋼矢板を評価する。以下では図 5-6 の四角形の領域を解析画像の Case 1~3 として扱う。

図 5-7 に傾斜角度の評価手順を示す。取得した RGB (Red, Green, Blue) カラー画像に対して明るさを表す輝度信号のグレースケールへと変換した。変換後、Canny のエッジ検出により画像中のエッジを求めた。エッジとは画像中で明るさが急激に変化する場所のことであり、物体の輪郭上に現れることが多いとされる。これにより鋼矢板の輪郭線の検出を試みた。エッジ検出後の画像は二値画像であり、エッジを白、それ以外を黒とした。エッジ検出結果に対して、ハフ変換による直線検出を行った。

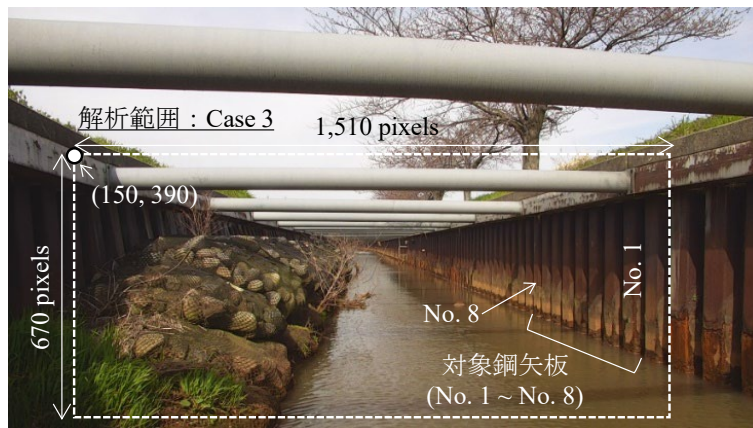
図 5-8 にハフ変換を用いた鋼矢板における直線検出の概念図を示す。図 5-8 (a) より、鋼矢板と笠コンクリートが直角となることを仮定すると、鋼矢板の直線形状における角度パラメータ (θ 解析) と笠コンクリートの傾斜角度 (θ 実測) は等しくなると考えられる。このとき、画像解析による角度 (θ 解析) は、鋼矢板の鉛直方向からの傾斜角度に等しいと考えられる。評価では、画像解析により推定した鋼矢板護岸の傾斜角度と実測による笠コンクリートの傾斜角度の比較検討を行う。図 5-8 (b) は解析画像を用いた例である。原点は画像の左上である。ハフ変換において $-\rho$ および $\pi - \theta$ で表される直線について、その角度を負の値で表すとすると、図 5-8 のように時計回りが正、反時計回りが負となる。画像中において水平の基準となる対象を設定し、基準の角度の分だけ解析角度の補正を行う。画像解析により鋼矢板護岸の傾斜角度を評価する場合、対象物の側方 (護岸に平行な位置) から撮影した画像を用いることが理想的であるが、面的かつ連続的に広がる護岸に対して上記の撮影は困難である。このことから、護岸に対して斜方向から投影された画像に対してモデル化を行った。



(a) Case 1 (座屈あり)



(b) Case 2 (座屈あり, 画像回転あり)



(c) Case 3 (座屈なし)

図 5-6 解析画像

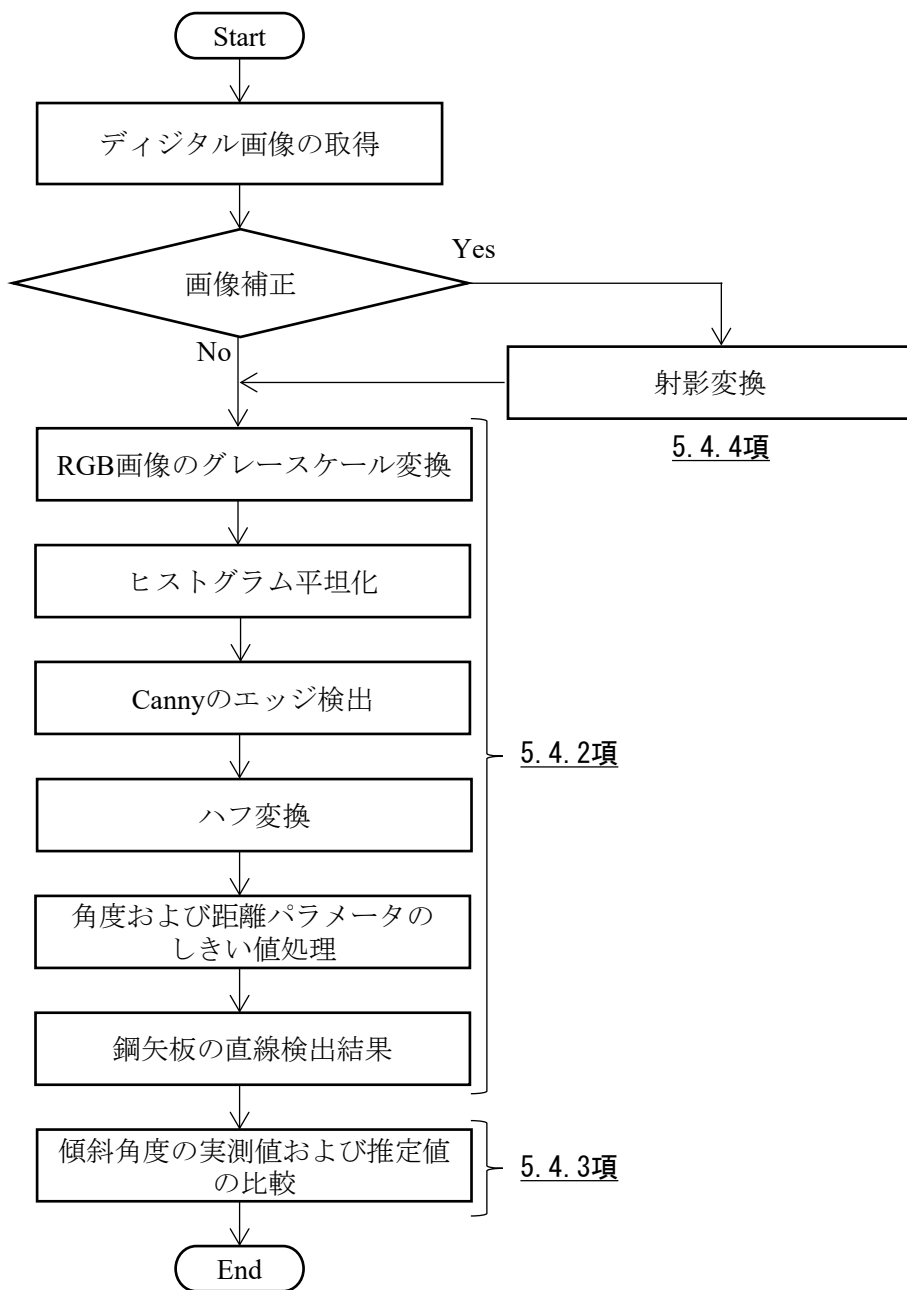


図 5-7 鋼矢板護岸の傾斜角度の検出手順

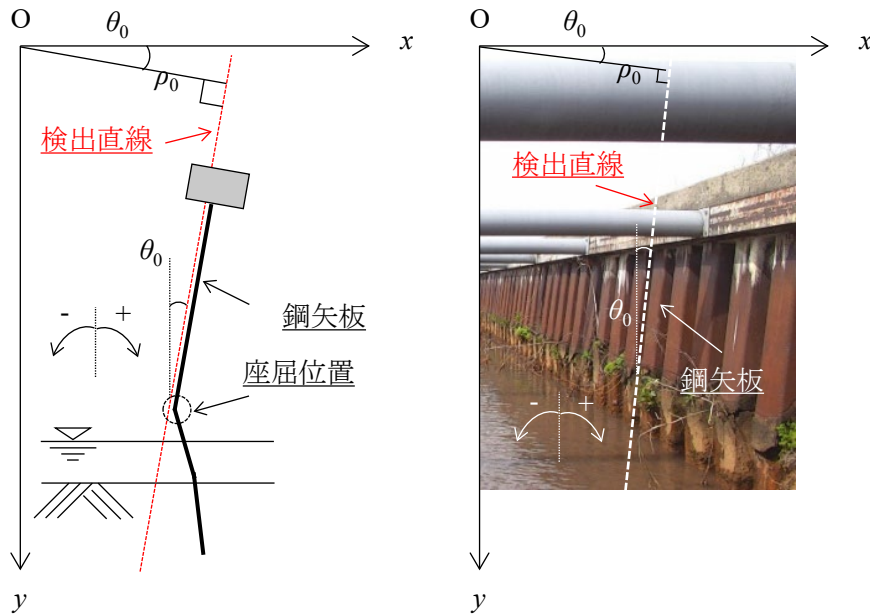


図 5-8 座屈現象の検出モデル

5.4. 結果および考察

5.4.1. 鋼矢板護岸の傾斜角度の実測値

デジタル角度計を用いて鋼矢板の傾斜角度を実測した結果を表 5-1 に示す。傾斜角度の平均値と標準偏差は、鋼矢板 1 枚あたり 10 点の測定点から算出している。計測した鋼矢板の枚数は、Case 1 (No. 1~12) で 12 枚、Case 2 (No. 1~12) で 12 枚、Case 3 (No. 1~8) で 8 枚である。角度の正符号は垂直方向から時計回りとして表され、負符号は垂直方向から反時計回りとして表す (図 5-8)。座屈条件の Case 1 では、平均値は 6.4° から 7.7° 、標準偏差は 0.1° から 0.2° となることが確認された。座屈条件の Case 2 では、平均値は 5.3° から 7.6° 、標準偏差は 0.1° から 0.2° となることが確認された。座屈のない条件の Case 3 では、平均値は -0.3° から 0.7° 、標準偏差は 0.1° から 0.4° となることが確認された。座屈条件状態 (Case 1 および Case 2) では、変形に伴う鋼矢板の傾斜角の増加が確認された。座屈のない条件 (Case 3) では、傾斜角は約 0.0° であり、護岸はほぼ直立しているといえる。表 5-1 の平均値は、5.4.3 でのハフ変換により検出された解析角度と比較する。

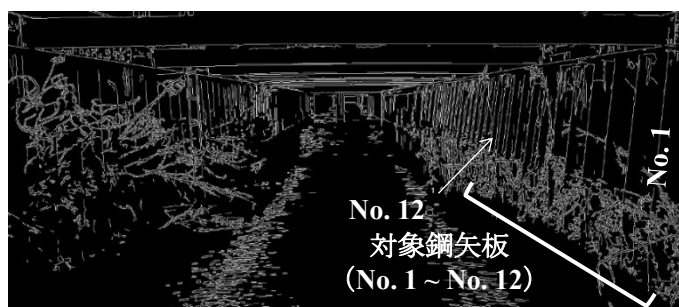
表 5-1 鋼矢板護岸の傾斜角度の実測値

		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10	No. 11	No. 12
Case 1 (座屈あり)	平均値	6.4	6.5	6.6	6.5	6.5	6.9	7.3	7.7	7.6	7.5	7.7	7.6
	標準偏差	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
	計測点数	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Case 2 (座屈あり, 画像回転あり)	平均値	7.6	7.5	7.4	7	6.7	5.8	5.3	6.1	6.9	6.5	6.2	5.6
	標準偏差	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1
	計測点数	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Case 3 (座屈なし)	平均値	0.4	0	0	-0.2	-0.3	0.3	0.7	0.1				
	標準偏差	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	-	-	-	-
	計測点数	10	10	10	10	10	10	10	10				

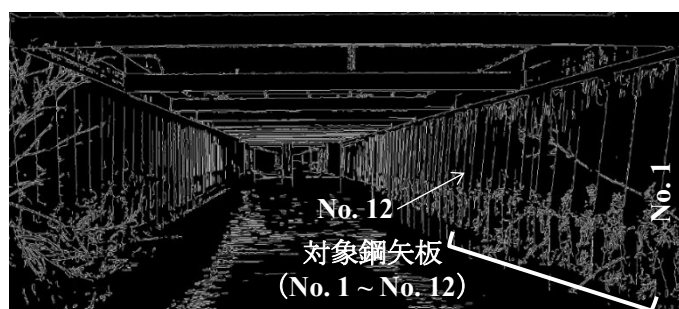
5. 4. 2. ハフ変換による鋼矢板護岸の直線検出

解析画像のエッジ検出とエッジに基づくパラメータ空間へのハフ変換の結果を図 5-9 と図 5-10 に示す。エッジ画像を図 5-9 に示す。エッジ画像は、グレースケール変換およびヒストグラム平坦化後に得られる。エッジ画像は二値画像である。エッジには白い要素が選択され、非エッジには黒い要素が選択されている。エッジは、鋼矢板、切梁、笠コンクリート、植生、水面の光の反射などを表現する。図 5-9 のエッジは画像空間内の点に対応する(図 5-4)。ハフ変換は、画像空間のエッジをパラメータ空間へ正弦曲線に変換する。パラメータ空間への投票の結果を図 5-10 に示す。パラメータ空間において、横軸は角度パラメータ、縦軸は距離パラメータである。カラーバーは、正弦曲線と特定の座標の交点にある交差の回数に対応する投票度数を示す。投票度数に対してしきい値処理を行い、検出される直線を制限する。角度パラメータと距離パラメータに対してしきい値処理を行い、直線を抽出する。Case 1 では、角度パラメータのしきい値は $0.0^{\circ} \sim 9.0^{\circ}$ 、距離パラメータのしきい値は 1,090 ~ 1,500 とする。Case 2 では、角度パラメータのしきい値は $0.0^{\circ} \sim 9.0^{\circ}$ 、距離パラメータのしきい値は 1,080 ~ 1,500 とする。Case 3 では、しきい値を 2 種類に設定する。角度パラメータのしきい値が $0.0^{\circ} \sim 9.0^{\circ}$ と距離パラメータのしきい値が 1,170 ~ 1,450 に設定される場合と、角度パラメータのしきい値が $171.0^{\circ} \sim 180.0^{\circ}$ 、距離パラメータのしきい値が -1,450 ~ -1,170 に設定される場合である。図 5-10 の赤い四角内の交点は、これらのしきい値を満たす鋼矢板の直線を示している。これらの直線の角度パラメータを傾斜角度として評価する。図 5-10 の赤い四角以外の交点は、他の物体の輪郭や輪郭ではないものとして分類されるノイズ直線を示している¹⁹⁾。ハフ変換は、画像内の様々な物体を表す不連続なエッジに基づいて線を検出できる。投票度数、角度パラメータ、距離パラメータの閾値処理により抽出された直線を図 5-11 に示す。検出直線を白線、角度パラメータを評価するための検出直線を黄色の丸で示す。鋼矢板ごとに複数の白線が検出され、黄色の丸の数は Case 1 で 12 個、Case 2 で 12 個、Case 3 で 8 個である。黄色の丸は、鋼矢板ごとに検出された複数の白線を示す。各鋼矢板の解析角度は、黄色の丸で示した検出直線の平均値とする。鋼矢板の傾斜角度を表す角度の解析結果を表 5-2 に示す。表 5-1 実測値と同様に、座屈条件の護岸では傾斜角度

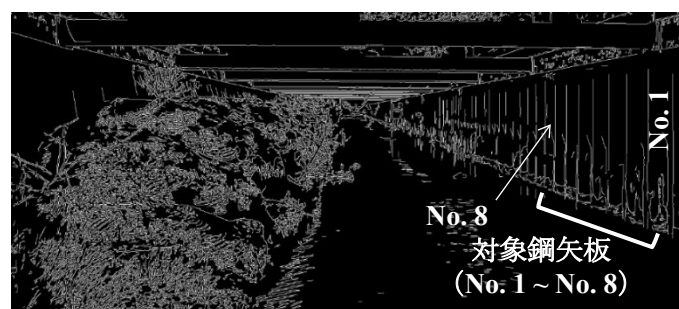
の増大が確認できる。座屈なし条件では、傾斜角度は約 0.0° である。実測角度とは異なり、解析角度のばらつき（標準偏差）の増加が確認できる。



(a) Case A

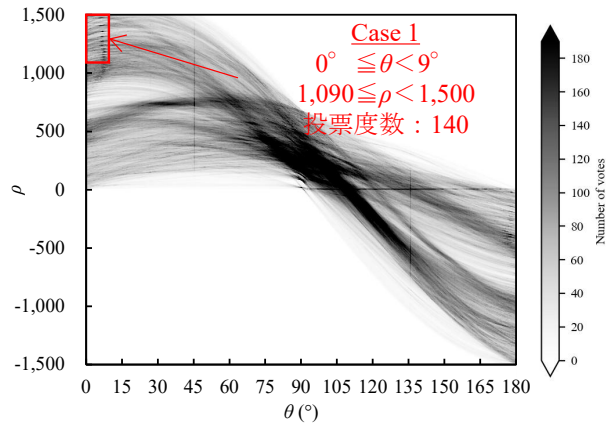


(b) Case B

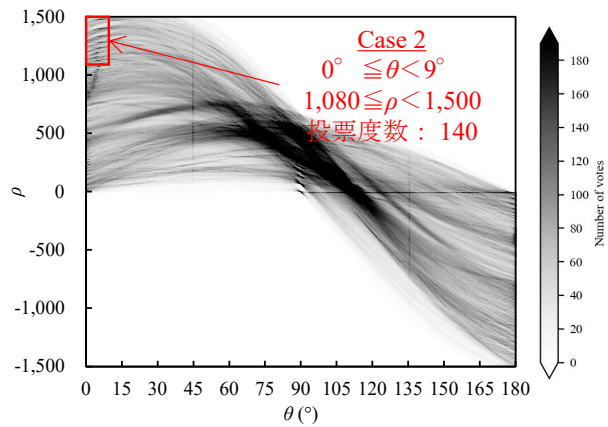


(c) Case C

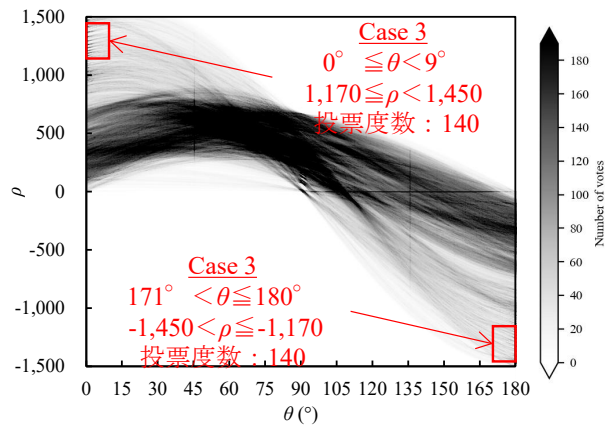
図 5-9 エッジ検出結果



(a) Case A



(b) Case B



(c) Case C

図 5-10 パラメータ空間への写像



(a) Case A



(b) Case B



(c) Case C

図 5-11 ハフ変換による鋼矢板護岸の直線検出結果

表 5-2 ハフ変換による鋼矢板護岸の傾斜角度の推定値

		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10	No. 11	No. 12
Case A (座屈あり)	平均値	6.6	6.4	6.6	6.3	7	7.1	7.4	7.7	7.3	7.3	7.4	7.9
	標準偏差	0.4	0.5	0.3	0.4	0.8	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	0.5	0.5
	検出直線数	2	4	3	3	7	2	2	3	2	3	4	3
Case B (座屈あり, 画像回転あり)	平均値	7.3	7.4	6.7	6.5	6.2	4.8	4.8	5.6	6.5	5.7	5.3	4.5
	標準偏差	0.5	0.5	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4
	検出直線数	4	12	4	4	5	4	5	5	6	4	4	5
Case C (座屈なし)	平均値	0.1	0.3	0.1	0	0.7	0.3	0.4	0.4				
	標準偏差	0.2	0.4	0.3	0.3	0.6	0.3	0.4	0.5	-	-	-	-
	検出直線数	5	7	7	5	6	5	6	6				

5.4.3. 傾斜角度の実測値とハフ変換による推定値の比較検証

実測角度と解析角度の比較を図5-12に示す。プロットは、実測角度の平均値と解析角度の平均値の関係を表す。Case 1~3の全体の結果を図5-12(d)に示す。Case 1では、座屈条件で実測角度と解析角度の関係が $y=x$ に沿った傾向が確認できる。Case 2では、座屈条件で解析角度は実測角度と比較して過小評価されている。これは、画像の回転が影響を与えていることを示唆している。Case 3では、座屈のない条件で、実測角度と解析角度の関係が $y=x$ に沿った傾向が確認できる。ハフ変換により、座屈による傾斜角度が検出できる可能性が示唆された。

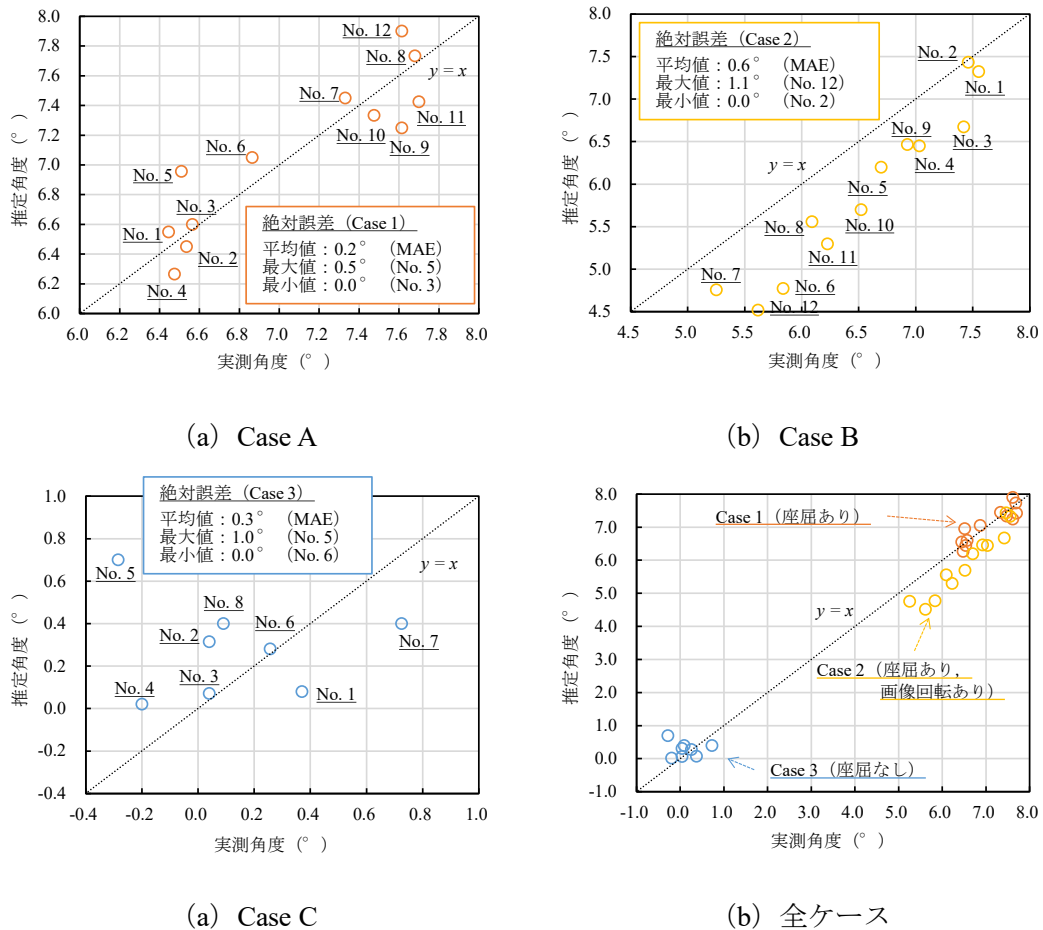


図5-12 傾斜角度の実測値とハフ変換による推定値の比較

5.4.4. 画像補正の結果

Case 2に対して射影変換を適用することで水平方向の画像回転を補正する。Case 2の解析画像に射影変換を適用した結果を図5-13に示す。Case 2の四隅の座標を(370, 290), (370,

959), (1,879, 959), (1,879, 290)とする。射影変換後の画像に対してハフ変換による角度検出の結果を表 5-3 に示す。補正前後で検出された実測角度と解析角度の比較を図 5-14 に示す。白抜きは画像補正前の解析角度, 塗りつぶしは画像補正後の解析角度を示す。画像の回転を補正すると, MAE は 0.2 °減少し, 最大の絶対誤差は 0.2 °減少し, 最小誤差は 0.1 °増加した。このことから, 画像補正後の解析角度の精度が画像補正前よりも向上していることが確認された。

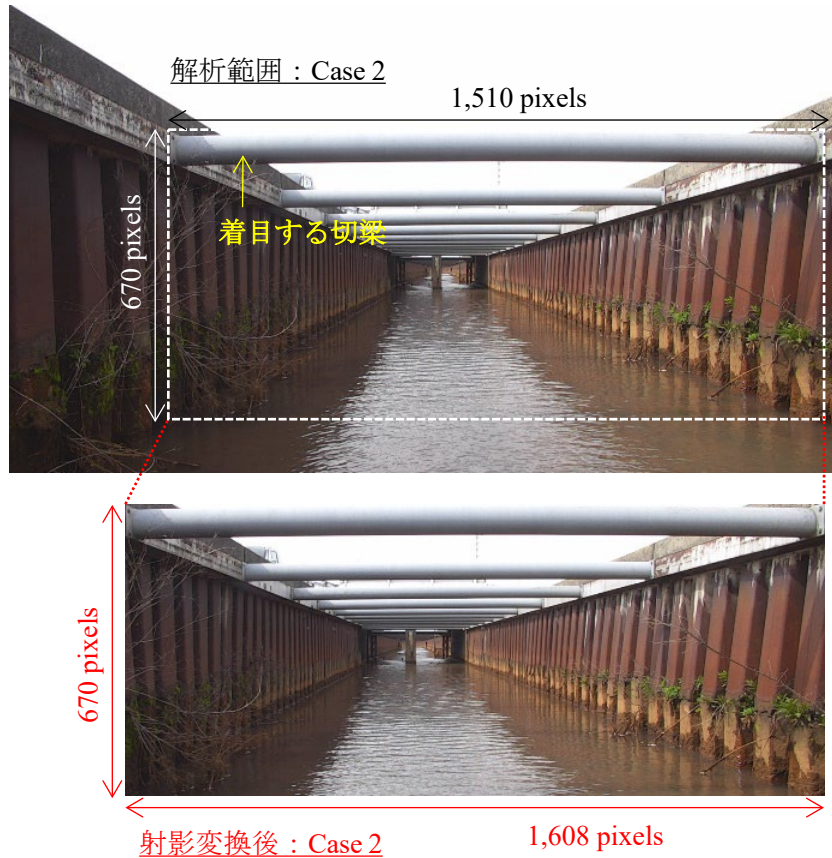


図 5-13 射影変換による画像補正

表 5-3 画像補正の実行前後における傾斜角度の推定値の比較

		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10	No. 11	No. 12
Case B (画像補正前)	平均値	7.3	7.4	6.7	6.5	6.2	4.8	4.8	5.6	6.5	5.7	5.3	4.5
	標準偏差	0.5	0.5	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4
	検出直線数	4	12	4	4	5	4	5	5	6	4	4	5
Case B (画像補正後)	平均値	8.0	7.8	7.1	6.7	6.6	5.2	5.1	5.9	6.7	6.0	5.7	4.7
	標準偏差	0.5	0.6	0.3	0.4	0.3	0.4	0.6	0.4	0.5	0.3	0.3	0.4
	検出直線数	4	5	3	4	4	5	7	4	6	4	4	5

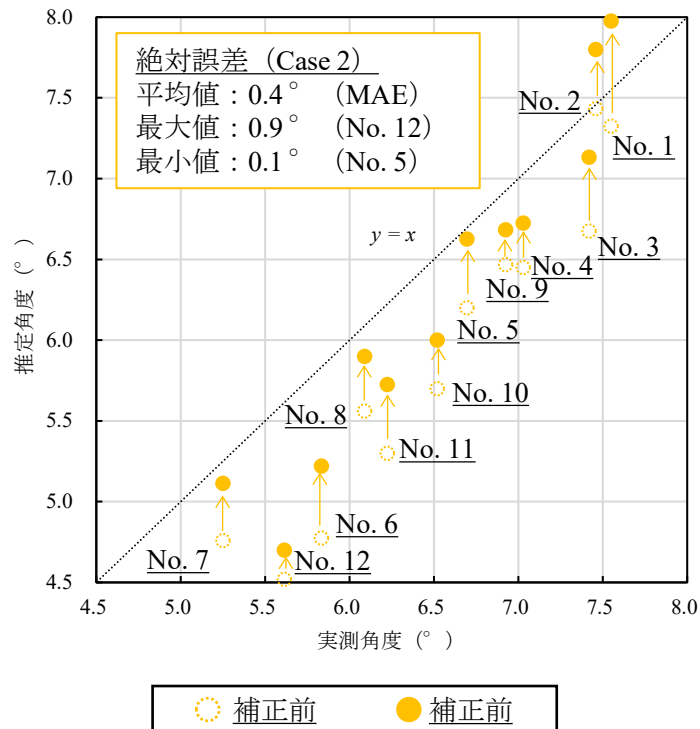


図 5-14 傾斜角度の実測値と画像補正後の推定値の比較

5.5. 座屈現象の非接触検出のまとめ

本稿では、極度に進行した腐食劣化による鋼矢板護岸の変形について、画像解析の図形検出手法のひとつであるハフ変換を用いることで、簡易な傾斜角度評価の可能性について検討した。解析的検討では、鋼矢板の長辺方向における直線形状をハフ変換により検出し、直線を表す角度パラメータについて評価した。検討結果を以下に列挙する。

- 1) ハフ変換によりデジタル画像から既設鋼矢板の直線を検出し、傾斜角度を定量的に評価できることが確認された。ノイズ直線から対象の直線を抽出するために、投票度数、距離パラメータ、角度パラメータのしきい値処理を行う必要がある。
- 2) デジタル画像による解析角度とデジタル角度計による実測角度には、座屈条件と座屈のない条件ともに相関関係を得られた。既設鋼矢板護岸の座屈現象の評価に、ハフ変換を用いたデジタル画像による非接触検出法が有用であることが確認された。
- 3) 回転を含む画像からの解析角度の精度は、射影変換を用いて補正できることが確認された。

引用文献

- 1) 石神暁郎, 星野香織, 工藤吉弘 (2018) : 積雪寒冷地における鋼矢板排水路の性能低下特性, 農業農村工学会誌, 86(5), pp. 43-46.

- 2) 鈴木哲也, 森井俊広, 原 齊, 羽田卓也 (2012): 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.
- 3) 佐藤嘉康, 萩原太郎, 小林秀一, 鈴木哲也 (2014): 鋼矢板水路の腐食特性を考慮した保護対策の実証的研究, 農業農村工学会誌, 82(12), pp. 7-10.
- 4) 農林水産省農村振興局整備部設計課 (2015): 土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「水路工」基準, 基準の運用, 基準及び運用の解説, 技術書, 農業農村工学会, pp. 457-479.
- 5) 日本道路協会 (1999): 道路土工—仮設構造物工指針, pp. 64-115.
- 6) 農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室 (2019) (参照 2020.4.30): 農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【鋼矢板水路腐食対策(補修)編】(案), (オンライン), 入手先<<https://www.maff.go.jp/j/nousin/mizu/sutomane/attach/pdf/kouyaita-15.pdf>>
- 7) Hough, P.V.C. (1962): Method and Means for Recognizing Complex Patterns, U.S. Patent, 3,069,654.
- 8) Duda, R.O. and Hart, P.E. (1972): Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures, Communications of the ACM, 15(1), pp. 11-15.
- 9) Sohn, H.G., Lim, Y.M., Yun, K.H., and Kim, G.H. (2005): Monitoring Crack Changes in Concrete Structures, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 20(1), pp. 52-61.
- 10) Quintana, M., Torres, J., and Menéndez, J.M. (2016): A Simplified Computer Vision System for Road Surface Inspection and Maintenance, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 17(3), pp. 608-619.
- 11) Mathavan, S., Vaheesan, K., Kumar, A., Chandrakumar, C., Kamal, K., Rahman, M., and Stonecliffe-Jones, M. (2017): Detection of Pavement Cracks using Tiled Fuzzy Hough Transform, Journal of Electronic Imaging, 26(5), 053008.
- 12) Ji, R. and Qi, L. (2011): Crop-Row Detection Algorithm Based on Random Hough Transformation, Mathematical and Computer Modelling, 54(3-4), pp. 1016-1020.
- 13) Jiang, G., Wang, X., Wang, Z., and Liu, H. (2016): Wheat Rows Detection at the Early Growth Stage Based on Hough Transform and Vanishing Point, Computers and Electronics in Agriculture, 123, pp. 211-223.
- 14) Winterhalter, W., Fleckenstein, F.V., Dornhege, C., and Burgard, W. (2018): Crop Row Detection on Tiny Plants with the Pattern Hough Transform, IEEE Robotics and Automation Letters, 3(4), pp. 3394-3401.
- 15) Amin, A. and Fischer, S. (2000): A Document Skew Detection Method Using the Hough Transform, Pattern Analysis & Applications, 3, pp. 243-253.
- 16) Yin, P.Y. (2001): Skew Detection and Block Classification of Printed Documents, Image and Vision Computing, 19(8), pp. 567-579.

- 17) Jundale, T.A. and Hegadi, R.S. (2015): Skew Detection and Correction of Devanagari Script using Hough Transform, *Procedia Computer Science*, 45, pp. 305-311.
- 18) 高木幹雄, 下田陽久 (2004) : 新編 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, pp. 1228-1260.
- 19) 萩原大生, 島本由麻, 鈴木哲也 (2021) : デジタル画像のハフ変換による切梁式鋼矢板護岸の変形検出, *農業農村工学会論文集*, 312, pp. I_1-I_9.

第6章 材料表面の熱収支に基づく鋼矢板厚の非接触検出

6.1. 鋼矢板厚の非破壊・非接触検出の概説

本章では、鋼矢板の曲げ剛性や断面係数に関係する断面二次モーメントに影響を及ぼす板厚の検出法を取りまとめる。板厚を熱容量に資するパラメータと捉えた場合に、板厚に応じて生じる温度の相違に基づいた評価を試みる。

6.2. 腐食鋼材の板厚に応じた熱伝導特性

6.2.1. 室内実験の概説

農業用排水路における鋼矢板護岸では、腐食対策として、腐食代による鋼矢板の表裏合わせて2mmの厚さが板厚に考慮されている。本研究では、護岸の終局状態へつながる断面欠損に至る前に板厚の実態を非破壊・非接触により検出し、腐食による鋼矢板の劣化の評価へつなげることを目的としている。板厚の評価は施設の維持管理だけでなく、施工環境に応じた性能設計へつながるものと考えられる。

面的に広がる鋼矢板のウェブおよびフランジにおいて垂直方向の特徴である板厚の評価について、既往研究では腐食に起因した金属材料における板厚の減少に対し、熱伝導現象を考慮し、赤外線サーモグラフィ法による非接触検出を行っている事例が挙げられる¹⁾⁴⁾。この手法は金属材料だけでなく、ポリプロピレン製パイプラインの厚さや構造物の表層を保護する被覆材料の厚さの評価にも適用の事例がある⁵⁾⁷⁾。これらを踏まえ、本項では平板における熱伝導に着目する。固体内の熱移動である熱伝導において、板厚は固体の大きさすなわち熱容量や熱抵抗に変化を与える。このことから、板厚は対象における温度変化や熱流束に相違を生じさせると考えられる。板厚を熱特性の観点から評価する利点としては、赤外線サーモグラフィ法による非接触評価につなげられることが挙げられる。

以上を踏まえ、本項では、実環境の気象条件下での鋼矢板の板厚の非接触検出につながる研究という位置付けの下、鋼材供試体における熱伝導の室内実験により、異なる板厚に起因して生じる温度変化量の相違を実験的に捉えることを試みた。室内実験では、鋼矢板を模擬した板厚の異なる腐食した鋼材供試体と、背面土を模擬したガラスビーズとの2層による1次元熱伝導モデルにより検討した。加熱過程と冷却過程を設け、温度の時間変化を生じさせた。背面状態としてガラスビーズが乾燥と湿潤の状態をそれぞれ設定し、影響を評価した。鋼材供試体における板厚が薄いほど温度変化量が大きくなるという作業仮説を立て、1次元熱伝導解析により推定される熱流束の観点からこれを実証した結果について報告する。

6.2.2. 実験方法

(1) 実験概説

鋼材供試体の板厚の相違による熱伝導特性を評価するため、伝熱実験を実施した。本実験では、既設の鋼矢板護岸における鋼矢板とその背面土での熱伝導現象を室内実験として模

擬することを試みた。鋼矢板を仮定した供試体の背面に、背面土を模擬したガラスビーズを充填した。背面土の模擬については、ガラスビーズの充填のみの乾燥条件とガラスビーズの充填に水を満水になるまで加えた湿潤条件の 2 ケースを設定した。熱源の運転による加熱と運転停止後の冷却を行った。加熱過程を 15 分間、冷却過程を 30 分間として計 45 分間の実験時間を設けた。伝熱実験の状況を図 6-1 に示す。赤外線ヒータを 2 台使用し、各消費電力を 400 W とした。各赤外線ヒータを供試体側に鉛直方向から 20° 傾けて設置した。供試体中央から赤外線ヒータまでの距離を 12 cm とした。

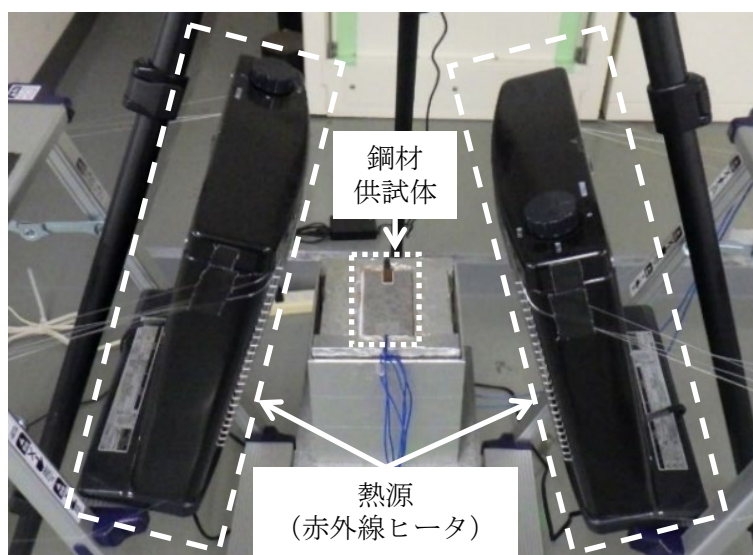


図 6-1 実験状況

(2) 鋼材供試体

鋼材供試体として、SS400 (JIS G3101) および SYW295 (JIS A5523) を用いた。既存施設にて、軽量鋼矢板では SS400、普通鋼矢板では SYW295 が主に使用されている。規格寸法としては、100 mm×50 mm×3.2 mm (長辺×短辺×板厚) のものを用いた。供試体の化学成分について表 6-1 に示す。供試体に対して、複合サイクル試験機 (CYP-90, スガ試験機製) によるサイクル腐食試験 (JIS K5600-7-9 サイクル A) を実施した。8 時間の工程を 1 サイクルとし、供試体ごとに 30 サイクル (240 時間)、60 サイクル (480 時間) および 120 サイクル (960 時間) の促進腐食を行った。SS400 においてサイクル数が 30 サイクルの供試体を 3 体 (S1, S2, S3)、60 サイクルを 3 体 (S4, S5, S6)、120 サイクルを 3 体 (S7, S8, S9)、計 9 体とした。SYW295 でも同様に、30 サイクルを 3 体 (Y1, Y2, Y3)、60 サイクルを 3 体 (Y4, Y5, Y6)、120 サイクルを 3 体 (Y7, Y8, Y9)、計 9 体とした。腐食生成物については 10 %塩酸水に浸漬後、ワイヤーブラシにより除去した。伝熱実験で用いた供試体の外観を図 6-2 に示す。ここでは一例として、SS400 と SYW295 それぞれの 30, 60 およ

び 120 サイクルの供試体を 1 体ずつ示している。腐食による板厚の変化を調べるために、ポイントマイクロメータ (MC200-25P, 新潟精機製) により供試体の板厚を測定した。1 体あたり 15 箇所の測定点にて測定した。板厚測定箇所を図 6-3 に示す。測定結果として板厚データの統計量を表 6-2 に示す。SS400 および SYW295 とともにサイクル数が多い供試体ほど板厚の平均値が小さく、標準偏差が大きい傾向となっている。

表 6-1 鋼材供試体の化学成分

鋼種	化学成分 (単位: %)					
	C	Si	Mn	P	S	フリー窒素
SS400	0.15	0.02	0.46	0.01	0.006	— ^{I)}
SYW295 ^{II)}	0.17	0.16	0.81	0.013	0.004	0.0028

I) 規定なしを表す II) 炭素当量: 0.32 %

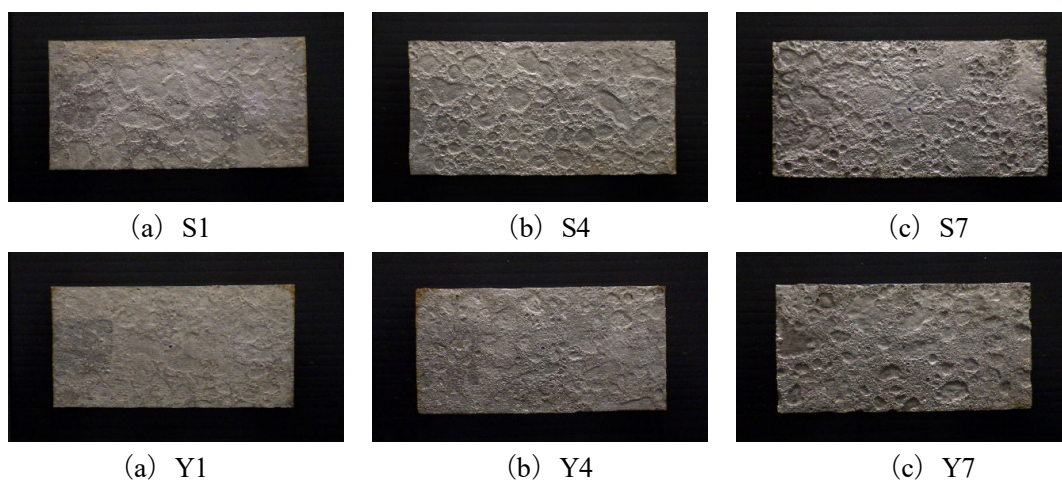


図 6-2 鋼材供試体の外観

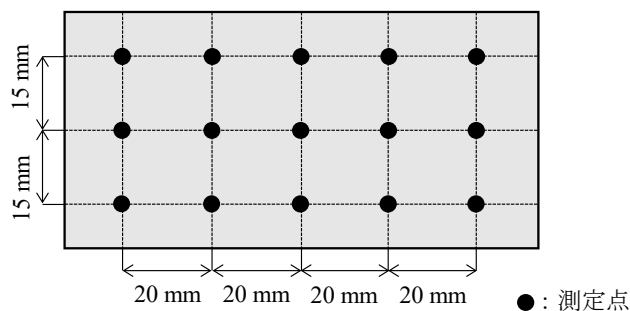


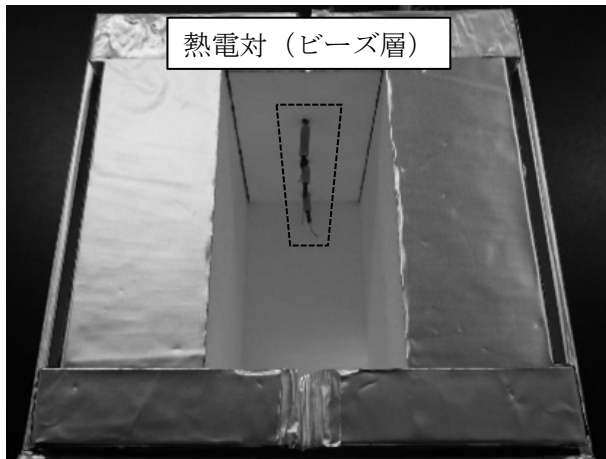
図 6-3 板厚測定箇所

表 6-2 板厚データの統計量

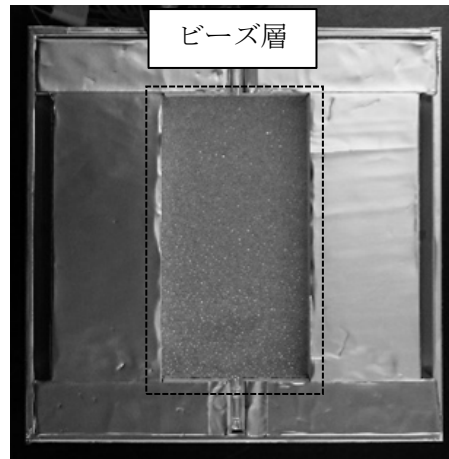
鋼材供試体	板厚 (mm)				測定点数
	平均値	標準偏差	最大値	最小値	
S1	3.00	0.07	3.09	2.89	15
S2	3.02	0.07	3.10	2.86	15
S3	2.99	0.09	3.10	2.84	15
S4	2.73	0.12	2.96	2.50	15
S5	2.79	0.14	3.01	2.57	15
S6	2.74	0.16	3.06	2.45	15
S7	2.33	0.17	2.54	1.89	15
S8	2.33	0.19	2.54	1.87	15
S9	2.35	0.23	2.72	1.77	15
Y1	3.07	0.04	3.17	3.00	15
Y2	3.05	0.05	3.14	2.97	15
Y3	2.98	0.06	3.11	2.89	15
Y4	2.82	0.12	3.06	2.64	15
Y5	2.83	0.12	2.98	2.49	15
Y6	2.86	0.08	3.00	2.68	15
Y7	2.43	0.17	2.63	2.10	15
Y8	2.50	0.15	2.73	2.20	15
Y9	2.25	0.21	2.59	1.85	15

(3) 実験装置

図 6-4 に実験装置の外観を示す。1 辺 150 mm で厚さ 3 mm の 1 面が開いているアクリルケースを外枠とし、その中にガラスビーズを充填するための発泡スチロールによる型枠を設置した。図 6-4 (a) のように発泡スチロールで囲んだ空間に、図 6-4 (b) のようにガラスビーズを充填し、その上に供試体を設置した。ガラスビーズを充填した空間については、105 mm×55 mm×100 mm (長手×短手×奥行) とした。本実験では、輻射伝熱および周囲流体 (空気) の対流熱伝達による熱の出入りを供試体表面に制限し、供試体とガラスビーズにおいては空間 1 次元の熱伝導を仮定できるような実験装置とした。型枠として熱伝導率が比較的小さく断熱材として利用される発泡スチロールを使用し、型枠の断面積を供試体の断面積とおおよそ等しくした。供試体を通過した伝導熱が型枠側方および底面から逃げることを抑えるようにした。ガラスビーズについては一般ソーダガラスを材料とする粒径 1.0~1.4 mm の製品 (コクゴ製) を使用し、乾燥重量として 810 g を充填した。発泡スチロールの型枠およびアクリルケースの外枠の表面については、輻射伝熱による加熱の影響を抑えるため、反射率が比較的高いアルミテープを巻いた。熱源としては赤外線ヒータ (DS-D086, 山善製) を用いた。



(a) ガラスビーズ充填前



(b) ガラスビーズ充填後

図 6-4 実験装置

(4) 温度および熱流束の計測

熱電対および熱流センサを用いて、温度および熱流束の計測を実施した。温度計測については、K 熱電対（型番：DVK，東洋熱科学製）を用いた。熱流束計測については、熱流センサ Z2015（日置電機製）を用いた。熱電対および熱流センサともに熱流ロガーLR8432（日置電機製）により 10 秒間隔でデータを取得した。熱電対については、供試体の表面，裏面，ビーズ層中の鉛直下向きに 30 mm 位置，60 mm 位置，および 90 mm 位置に設置した。熱流センサについては，供試体の裏面に設置した。供試体への熱電対の配置については，表面および裏面ともに供試体短手の辺より 20 mm の位置とした。熱流センサの配置については，熱電対を設置した反対側の短手より 70 mm の位置に配置した。供試体裏面に配置した熱電対および熱流センサの様子を図 6-5 に示す。供試体およびガラスビーズにおける熱電対および熱流センサの配置の模式図を図 6-6 に示す。供試体への熱電対の設置にはアルミテープ（型番：J3090，ニトムズ製），熱流センサの設置には熱伝導性両面テープ Z5008（日置電機製）および市販の両面テープ（ナイスタック TM 超強力タイプ NW-U15SF，ニチバン製）を用いた。

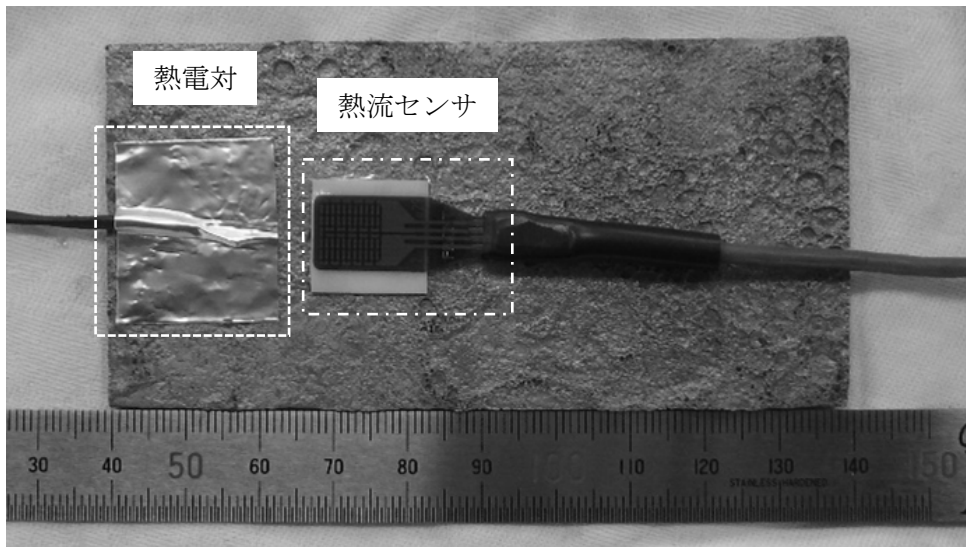


図 6-5 鋼材供試体の裏面に設置した熱電対および熱流センサ

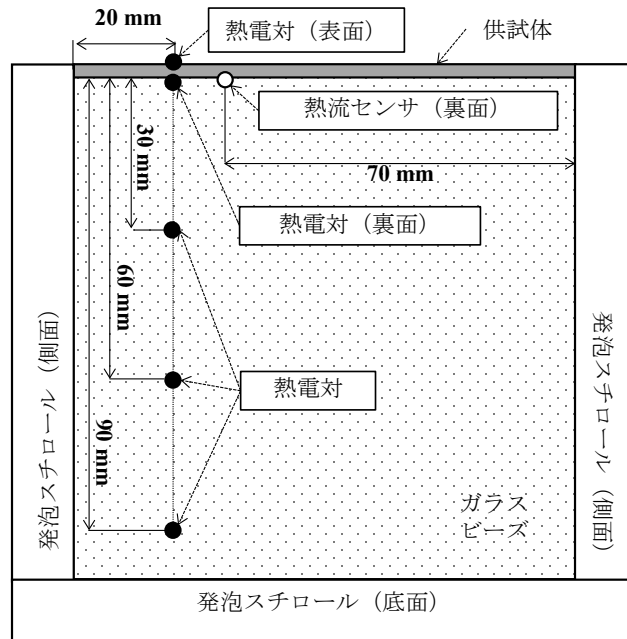


図 6-6 鋼材供試体およびガラスビーズにおける熱電対および熱流センサの配置

6.2.3. 解析方法

(1) 熱伝導シミュレーション

伝熱実験では、鋼材が比較的大きい熱伝導率を有する材料であり、赤外線ヒータ 2 台で両側より加熱していることから（ヒータ横幅 305 mm に対して供試体長手約 100 mm）、供試体の平面方向では均一に加熱されるものと考えた。ビーズ層の断面積については、6.2.2.3 目の通り、供試体とおおよそ同じ大きさとし、ビーズ層での平面方向での熱拡散を防いだ。これらを踏まえ伝熱実験における鋼材層からビーズ層への熱伝導を空間 1 次元と仮定した。1 次元熱伝導方程式は式 (6-1) で表せる。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (6-1)$$

ここで、 ρ は密度 (kg/m^3)、 c は比熱 (J/kg/K)、 k は熱伝導率 (W/m/K)、 T は温度 (K) である。式 (6-1) の離散化については、コントロールボリューム法を適用した⁸⁾。温度 T を位置 x と時間 t の関数とすると、 x について空間間隔を Δx (m)、空間格子点番号を i とし、 $x = i\Delta x$ ($i = 0, 1, \dots, imax$)とした。 t について時間間隔を Δt (s)、時間格子点番号を n とし、 $t = n\Delta t$ ($n = 0, 1, \dots, nmax$)とした。空間格子点を中心とするセルを考え、各セルにおける熱収支について計算を行った。熱物性値として必要となる比熱、密度、熱伝導率および温度の物理量についてはセル中心の格子点にて与え、セル内は均質な物質と仮定した。セル界面におけ

る熱量の流入および流出を考慮した熱伝導率について、鋼材層とビーズ層の境界となるセル界面では物性値が不連続になることから、セル界面での補間を行うことを考えた⁸⁾。セル界面 $i - 1/2$ における熱伝導率 $k_{i-1/2}$ について、熱抵抗が直列と考えると、 k_{i-1} と k_i の調和平均により式 (6-2) で表せる。

$$k_{i-1/2} = \frac{2k_{i-1}k_i}{k_{i-1} + k_i} \quad (6-2)$$

ここで、 k_i はセル i における熱伝導率 (W/m/K) である。以降、熱伝導率の調和平均については式 (6-2) に任意の i を代入したものとする。式 (6-2) を考慮し、式 (6-1) を離散化すると式 (6-3) を得る。

$$\begin{aligned} \rho_i c_i (T_i^{n+1} - T_i^n) \frac{1}{\Delta t} &= \{k_{i-1/2}(T_{i-1}^n - T_i^n) - k_{i+1/2}(T_i^n - T_{i+1}^n)\} \frac{1}{(\Delta x)^2} \\ \therefore T_i^{n+1} &= T_i^n + \frac{1}{\rho_i c_i} \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \{k_{i-1/2}(T_{i-1}^n - T_i^n) - k_{i+1/2}(T_i^n - T_{i+1}^n)\} \end{aligned} \quad (6-3)$$

ここで、添え字付きの T は格子点 $(i, n + 1)$, $(i + 1, n)$, (i, n) および $(i - 1, n)$ における温度 (K), ρ_i および c_i は格子点 (i, n) における密度 (kg/m³) および比熱 (J/kg/K) である。なお、式 (6-3) については陽解法を適用した。陽解法では方程式中の時間微分と空間微分の離散化において、時間発展の数値的安定性を考慮した時間間隔 Δt および空間間隔 Δx の設定が必要となる。各セルにおける熱物性値を考慮した上で、1次元熱伝導方程式への陽解法の適用における安定条件は式 (6-4) となる⁸⁾。

$$\frac{k_i}{\rho_i c_i} \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \leq \frac{1}{2} \quad (6-4)$$

式 (6-4) を満たす解析条件として空間間隔 $\Delta x = 0.0002$ m, 時間間隔 $\Delta t = 0.001$ s と設定した。空間格子点番号の最大値 i_{\max} については、供試体の板厚に応じて値を設定した。時間格子点番号の最大値 n_{\max} については、計測時間が 2,700 s であることから時間間隔 $\Delta t = 0.001$ s を考慮して、 2.7×10^6 とした。初期条件については、加熱開始時における各位置の熱電対による実測値を与えた。任意の位置の初期温度については、実測値の線形補間により与えた。境界条件については、鋼材層の表層 ($i = 0$) を温度境界、ビーズ層の最深層 ($i = i_{\max}$) を断熱境界とした。式 (6-5) に断熱境界の条件式を示す。

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (6-5)$$

本モデルでは、鋼材層とビーズ層のセル界面において接触熱抵抗の存在を仮定し、それ以外のセル界面では仮定しない計算を行った。図 6-7 に各セルでの熱伝導のモデル図を示す。接触熱抵抗を考慮しない計算の時間発展については式 (6-3) を適用した。これは、図 6-7 (a) で示すモデル図となる。接触熱抵抗を考慮したセルにおける温度計算の時間発展について概説する⁹⁾。これは、図 6-7 (b) で示すモデル図となる。鋼材層とビーズ層のセル界面 $l + 1/2$ における接触熱抵抗を R_{sb} ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)、セル界面 $l + 1/2$ における熱流束を $q_{l+1/2}$ 、時刻 t における空間格子点 l および $l + 1$ における温度を T_l^n および T_{l+1}^n (K)、時刻 $t + \Delta t$ における空間格子点 l および $l + 1$ における温度を T_l^{n+1} および T_{l+1}^{n+1} (K)、温度の不連続が生じる界面での時刻 t における鋼材層側の温度を T_s^n (K)、ビーズ層側の温度を T_b^n (K) とする。接触熱抵抗が存在するセル界面 $l + 1/2$ における熱流束 $q_{l+1/2}$ は、式 (6-6) で表せる。

$$q_{l+1/2} = -k_l \frac{T_s^n - T_l^n}{\Delta x/2} = \frac{T_s^n - T_b^n}{R_{sb}} = -k_{l+1} \frac{T_{l+1}^n - T_b^n}{\Delta x/2} \quad (6-6)$$

熱抵抗および接触熱抵抗が直列に結合すると考えると総括熱抵抗 R_{tot} は式 (6-7) で表せる¹⁰⁾。

$$R_{\text{tot}} = \frac{\Delta x/2}{k_l} + R_{sb} + \frac{\Delta x/2}{k_{l+1}} \quad (6-7)$$

式 (6-6) および式 (6-7) より、熱流束 $q_{l+1/2}$ は式 (6-8) となる。

$$q_{l+1/2} = \frac{T_l^n - T_{l+1}^n}{R_{\text{tot}}} = \frac{T_l^n - T_{l+1}^n}{\frac{\Delta x/2}{k_l} + R_{sb} + \frac{\Delta x/2}{k_{l+1}}} \quad (6-8)$$

接触熱抵抗 R_{sb} により、熱流束 $q_{l+1/2}$ についてセル界面温度 T_s^n および T_b^n を用いることなく表現できる。空間格子点 l および $l + 1$ における時間発展は式 (6-9) および式 (6-10) となる。

$$\begin{aligned} \rho_l c_l (T_l^{n+1} - T_l^n) \Delta x &= (q_{l-1/2} - q_{l+1/2}) \Delta t = \left(-k_{l-1/2} \frac{T_l^n - T_{l-1}^n}{\Delta x} - \frac{T_l^n - T_{l+1}^n}{R_{\text{tot}}} \right) \Delta t \\ \therefore T_l^{n+1} &= T_l^n + \frac{1}{\rho_l c_l} \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(\frac{T_{l-1}^n - T_l^n}{\Delta x/k_{l-1/2}} - \frac{T_l^n - T_{l+1}^n}{R_{\text{tot}}} \right) \end{aligned} \quad (6-9)$$

$$\rho_{l+1}c_{l+1}(T_{l+1}^{n+1} - T_{l+1}^n)\Delta x = (q_{l+1/2} - q_{l+3/2})\Delta t = \left\{ \frac{T_l^n - T_{l+1}^n}{R_{\text{tot}}} - \left(-k_{l+3/2} \frac{T_{l+2}^n - T_{l+1}^n}{\Delta x} \right) \right\} \Delta t$$

$$\therefore T_{l+1}^{n+1} = T_{l+1}^n + \frac{1}{\rho_{l+1}c_{l+1}} \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(\frac{T_l^n - T_{l+1}^n}{R_{\text{tot}}} - \frac{T_{l+1}^n - T_{l+2}^n}{\Delta x/k_{l+1}} \right) \quad (6-10)$$

接触熱抵抗 R_{sb} について乾燥条件では、鋼材層とビーズ層の界面の空気の影響が熱抵抗となっていると仮定し、解析の空間間隔 $\Delta x = 0.0002 \text{ m}$ を空気の熱伝導率 0.02614 W/m/K で除した $0.00765 \text{ m}^2\text{K/W}$ として計算を行った。湿潤条件では乾燥条件での値の2.1倍である $0.01610 \text{ m}^2\text{K/W}$ を仮定した。

(2) 鋼材層とビーズ層の境界における熱流束

乾燥条件と湿潤条件の相違について、ビーズ層を出入りする熱流束で説明するため、地表面の熱収支における地中温度の微分方程式および地中伝導熱の理論を参照し、定式化を行った¹¹⁾。式(6-1)における熱伝導方程式の下で、深さ x におけるビーズ層への伝導熱 $G(x)$ は式(6-11)となる。

$$G(x) = -k \frac{dT}{dx} \quad (6-11)$$

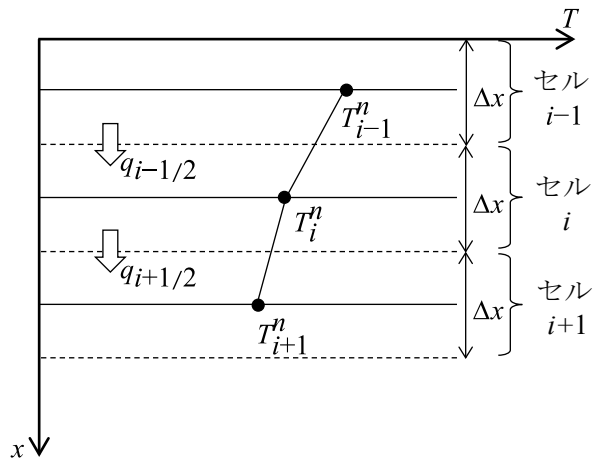
式(6-1)および式(6-11)より式(6-12)のように、

$$\frac{dG(x)}{dx} = \frac{d}{dx} \left(-k \frac{dT}{dx} \right) = -\rho c \frac{dT}{dt} = -\frac{d}{dt} (\rho c T) \quad (6-12)$$

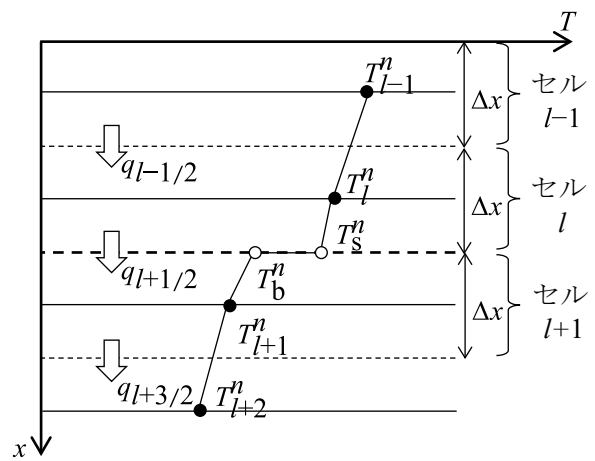
と表せ、ビーズ層表層(鋼材層とビーズ層の境界で、この説明では $x = 0$ とする。)における伝導熱 $G(x = 0)$ は式(6-12)を積分することにより、式(6-13)として表せる。

$$G \equiv G_{(x=0)} = \int_0^D \frac{d(\rho c T)}{dt} dx \quad (6-13)$$

ただし、 D は熱伝導がほぼ0となる深さである。深さ D については断熱境界と接するビーズ層のセル $\text{imax}-1$ と仮定した。式(6-12)のように、物質の熱容量と温度の時間変化量の積について空間位置の方向に積分した値を求めることで、ビーズ層を出入りする熱流束を表す。鋼材層とビーズ層における熱伝導モデルの全体図について図6-8に示す。



(a) 熱物性値が均質な場合



(b) 熱物性値が不均質な場合

図 6-7 熱物性値の分布に応じた熱伝導のモデル図

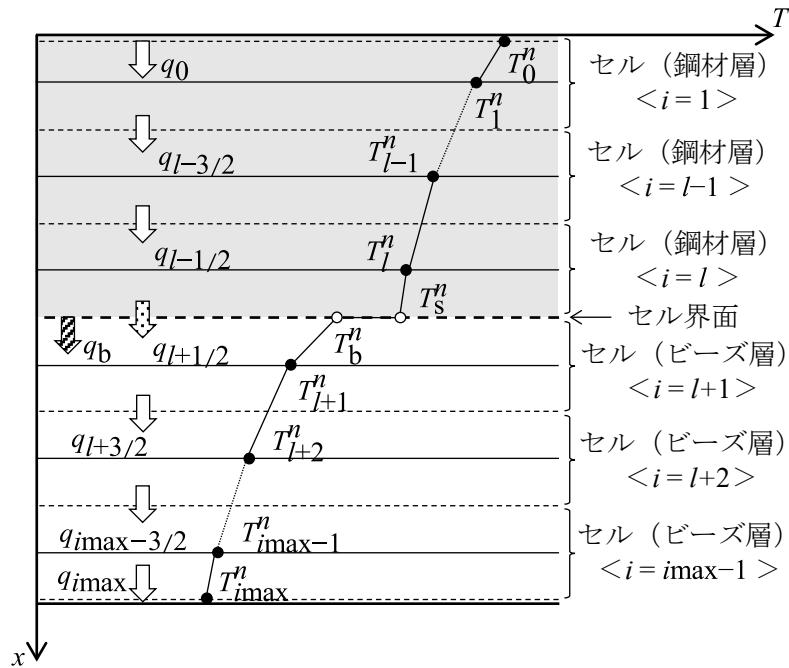


図 6-8 鋼材層およびビーズ層における熱伝導のモデル図

(3) 熱物性値

熱伝導解析で用いた熱物性値を表 6-3 に示す．鋼材の密度については SS400 および SYW295 の非腐食鋼材における実測値，比熱と熱伝導率については文献値を用いた．ガラスビーズについては粉粒体と考え，材料のソーダガラスと空気の粉粒体と仮定した．粉粒体や土壌において，固体である粒子の接触では熱伝導，空隙では対流熱伝達と輻射伝熱となり複数の伝熱形態が混在する^{12), 13)}が，本研究では熱伝導だけを仮定し，見かけの熱物性値をビーズ層に与えた．ビーズ層の見かけの比熱および密度について式 (6-14) および式 (6-15) より求めた¹⁴⁾．ビーズ層の見かけの熱伝導率については，乾燥条件の場合に式 (6-16) を用いた¹⁴⁾．

$$\rho_a = (1 - e)\rho_s + e\rho_f \quad (6-14)$$

$$c_a = \frac{(1 - e)\rho_s c_s + e\rho_f c_f}{(1 - e)\rho_s + e\rho_f} \quad (6-15)$$

$$\frac{1}{k_a} = \frac{1 - e^{1/3}}{k_s} + \frac{e^{1/3}}{k_s(1 - e^{2/3} + k_f e^{2/3})} \quad (6-16)$$

ここで、 e は空隙率（無次元）、 ρ は密度（ kg/m^3 ）、 c は比熱（ J/kgK ）、 k は熱伝導率（ W/mK ）である。添え字について、 a は見かけの熱物性値、 s は固体の熱物性値、 f は流体の熱物性値を意味する。本研究では、空隙率 e は実験条件とソーダガラスの密度より 0.4 を仮定した。添え字 s と f の固体と流体について、乾燥条件ではソーダガラスと空気、湿潤条件ではソーダガラスと水とした。ただ、湿潤条件では式（6-16）で求めた熱伝導率では実測値と計算値のフィッティングが良好ではなかったことから、表 6-3 に示す値の範囲において最適な値を与えた。

表 6-3 計算に用いた熱物性値

物質	密度 (kg/m^3)	比熱 (J/(kgK))	熱伝導率 (W/(mK))
鋼材	SS400: 7,840	473.0 ¹⁵⁾	51.60 ¹⁵⁾
	SYW295: 7,830		
空気	1.176 ¹⁵⁾	1,007 ¹⁵⁾	0.02614 ¹⁵⁾
水	996.62 ¹⁵⁾	4,179 ¹⁵⁾	0.6104 ¹⁵⁾
ソーダガラス	2,520 ¹⁵⁾	800.0 ¹⁵⁾	0.55 ¹⁶⁾
ガラスビーズ（乾燥条件）	1,512	800.1	0.3
ガラスビーズ（湿潤条件）	1,911	1505	0.5~1.3

6.2.4. 結果および考察

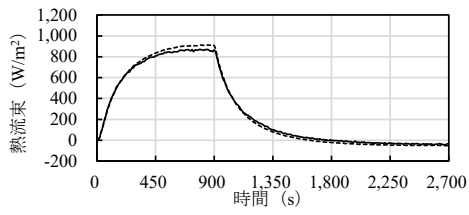
(1) 熱伝導シミュレーションによる実測値の再現

伝熱実験における熱伝導現象の再現を試みた。実測値と計算値を比較した結果の一例を図 6-9 に示す。ここでは、SS400 の S1（30 サイクル）におけるビーズ層の乾燥条件と湿潤条件の結果を示す。いずれも 900 s までが加熱過程で、それ以降が冷却過程である。乾燥条件の結果は図 6-9 (a), (c), (e), (g) および (i)、湿潤条件の結果は図 6-9 (b), (d), (f), (h) および (j) である。図 6-9 (a) および (b) では供試体裏面における熱流束の比較を示す。熱流束は正の値が鋼材層からビーズ層、負の値がビーズ層から鋼材層への伝熱を表す。熱流束は、加熱過程で鋼材層からビーズ層へ非減少で移動し、加熱終了後は減少傾向となり、1,800 s 付近でビーズ層から鋼材層への移動に変化する。図 6-9 (c) および (d) では供試体裏面における温度の比較を示す。裏面温度は、加熱過程で上昇を続け、冷却過程において低下傾向となる。図 6-9 (e) および (f) ではビーズ層 30 mm 位置における温度の比較、図 6-9 (g) および (h) ではビーズ層 60 mm 位置における温度の比較、図 6-9 (i) および (j) ではビーズ層 90 mm 位置における温度の比較を示す。各位置では温度上昇の立ち上がりが異なることが確認された。

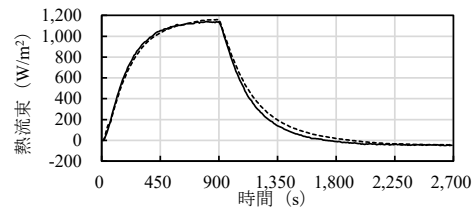
供試体裏面の熱流束と温度については乾燥条件と湿潤条件において計算により実測値の傾向を概ね再現できることが確認された（図 6-9 (a) ~ (d)）。ただ、他の供試体である乾

乾燥条件の 120 サイクルに関しては、供試体裏面の熱流束における実測値と計算値の相違が比較的大きくなる傾向が確認された。ビーズ層内 (30 mm・60 mm・90 mm) の温度については、湿潤条件と比較して乾燥条件において計算値と実測値の乖離が大きくなる傾向が確認された。これは S1 以外の供試体でも同様の結果となった。本解析では、鋼材層を伝わり、ビーズ層に流入・流出する熱流束の再現はできたが、ビーズ層内部の拡散の状況については再現に相違が生じた。本モデルではビーズ層の最深を断熱条件としていることから、鋼材層とビーズ層の境界を移動する熱流束はビーズ層全体に出入りする熱流束に等しいとすることができ、この熱流束の再現はできたものと考えられる。一方で、ビーズ層全体を出入りする熱流束のビーズ層内での伝わり方の詳細な再現については、粉粒体のモデル化を精緻に検討する必要があると思われる。

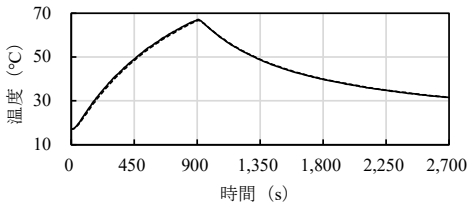
乾燥条件と湿潤条件の相違を比較すると、供試体裏面の熱流束では湿潤条件の方で鋼材層からビーズ層への熱流束が大きいことが確認された。供試体裏面の温度では乾燥条件の方で温度上昇が大きいことが確認された。供試体の温度変化に着目した検討を行っていることから、ビーズ層の乾湿が供試体の温度変化に及ぼす影響を熱流束の観点から以下にて検討する。



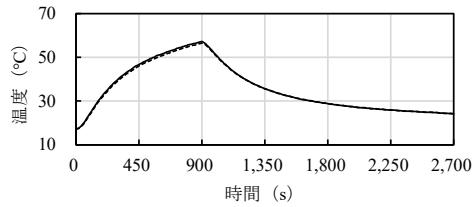
(a) 供試体裏面の熱流束 (乾燥条件)



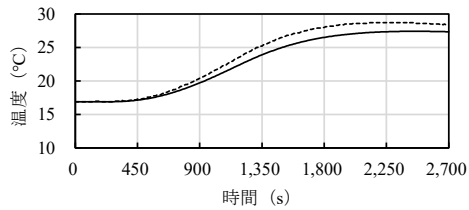
(b) 供試体裏面の熱流束 (湿潤条件)



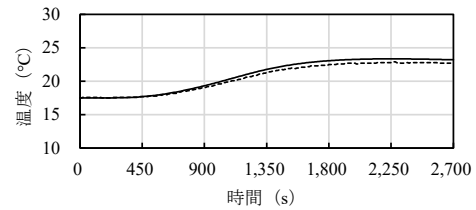
(c) 供試体裏面の温度 (乾燥条件)



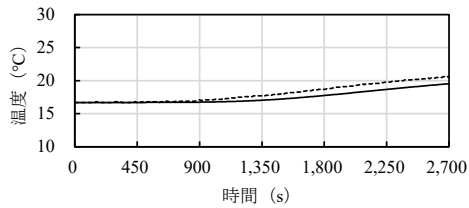
(d) 供試体裏面の温度 (湿潤条件)



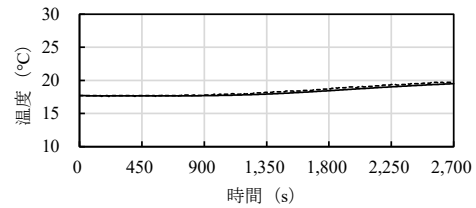
(e) ビーズ 30 mm 位置の温度 (乾燥条件)



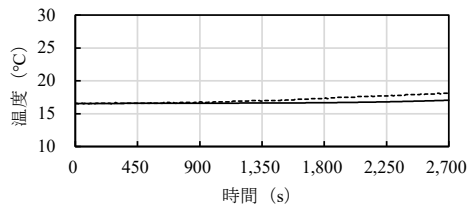
(f) ビーズ 30 mm 位置の温度 (湿潤条件)



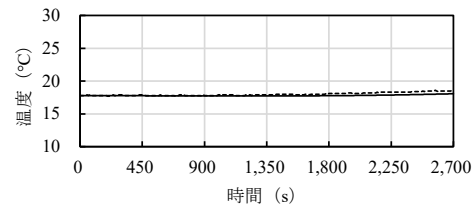
(g) ビーズ 60 mm 位置の温度 (乾燥条件)



(h) ビーズ 60 mm 位置の温度 (湿潤条件)



(i) ビーズ 90 mm 位置の温度 (乾燥条件)



(j) ビーズ 90 mm 位置の温度 (湿潤条件)

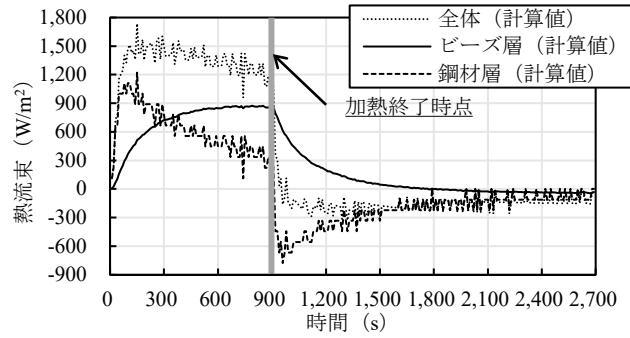
図 6-9 温度および熱流束に関する実測値と計算値の比較 (鋼材供試体 : S1)

(2) ビーズ層の乾燥条件および湿潤条件の影響

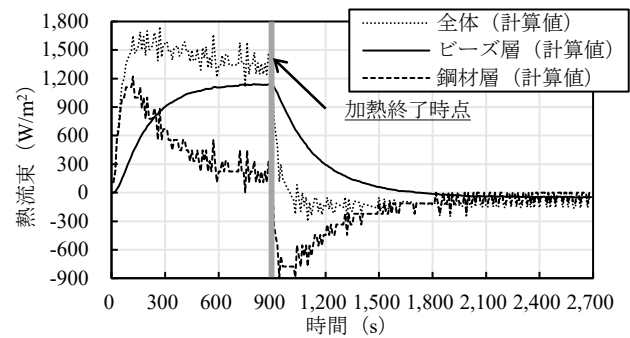
ビーズ層の乾燥条件と湿潤条件により供試体の温度変化に相違が生じる理由について熱流束の観点から考察を行う。図 6-10 に伝熱実験での鋼材層とビーズ層における熱流束の計算結果を示す。ここでも SS400 の S1 (30 サイクル) を例とする。図 6-10 (a) は乾燥条件、(b) は湿潤条件である。凡例における全体の熱流束は鋼材層表面においてモデルに出入りする熱流束を表す。ビーズ層の熱流束は図 6-9 (a) と (b) における計算値と同一で、鋼材層を移動し、ビーズ層へ出入りする熱流束を表す。鋼材層の熱流束は鋼材層表面を出入りする全体の熱流束とビーズ層を出入りする熱流束の差分値で、鋼材供試体の温度変化に寄与する熱流束である。図 6-9 より、ビーズ層を出入りする熱流束の実測値と計算値が一致することから、それに基づき算出された鋼材層と全体の熱流束を含め、いずれの熱流束も計算値を用いる。なお、正の値が鋼材層からビーズ層方向、負の値がビーズ層から鋼材層方向への伝熱を表す。

熱流束がほぼ常に正の値で、向きが鋼材層からビーズ層への一方向となっている加熱過程 (0~900 s) を対象に議論する。ビーズ層を出入りする熱流束について、乾燥条件と湿潤条件で 600~900 s における最大値を比較すると、湿潤条件で約 300 W/m² 程度大きいことが確認された。湿潤条件の方が、ビーズ層へ流入する伝熱量が大きいといえる。モデル全体に流入する熱流束に着目すると、両条件とも約 200 s 以降は 1,200 ~1,500 W/m² 程度を示すことが確認された。乾燥条件と湿潤条件では物性値が異なるためモデル全体への厳密な正味の伝導熱量は異なると考えられる。ただ、ここではモデル全体に流入する熱流束が乾燥条件と湿潤条件で概ね等しいと仮定すると、背面状態に応じた供試体の温度変化の相違は、流入する熱流束が鋼材層とビーズ層へ配分される割合に依存すると考えられる。図 6-11 に加熱過程における伝導熱の配分割合を示す。図 6-11 (a) はモデル全体に流入した熱流束に対してビーズ層へ流入した熱流束の割合を示し、(b) は鋼材層の温度変化に寄与した熱流束の割合を示す。縦軸の 1.0 に近いほど全体に対してその層へ分配される伝熱量が大きいといえる。図 6-11 (a) より、ビーズ層への時系列の配分割合について乾燥条件と比較して湿潤条件の方が大きい傾向が確認された。湿潤条件では乾燥条件のビーズ層より熱伝導率が大きい値となり熱移動が促進されること、熱容量もより大きい値となりビーズ層で温度変化が起こりにくくなるために鋼材層との温度勾配が拡大することが理由と考えられる。図 6-11 (a) の結果に伴う (b) では、鋼材層への配分割合について湿潤条件と比較して乾燥条件の方が大きい傾向が確認された。鋼材層における熱流束は供試体の温度上昇に寄与することから、配分割合のより大きい乾燥条件の供試体において温度上昇が大きくなると考えられる。

以上により、背面状態の異なる鋼材供試体の温度変化について、熱物性値の相違に起因する流入した伝導熱量の配分割合より説明することができた。

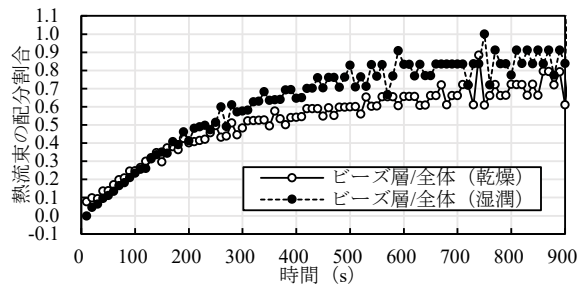


(a) 乾燥条件

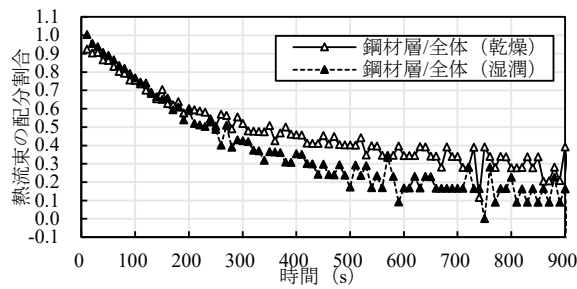


(b) 湿潤条件

図 6-10 鋼材層とビーズ層における熱流束の計算結果 (鋼材供試体 : S1)



(a) ビーズ層へ流入した熱流束の割合



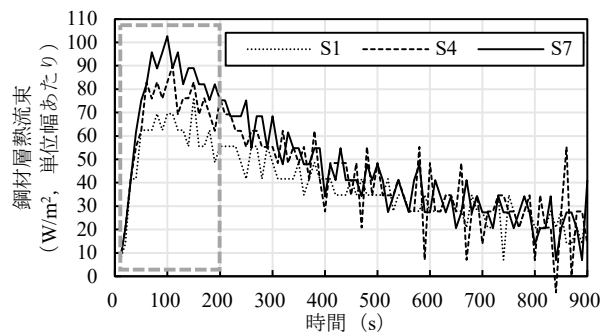
(b) 鋼材層の温度変化に寄与した熱流束の割合

図 6-11 加熱過程における伝導熱の配分割合 (鋼材供試体 : S1)

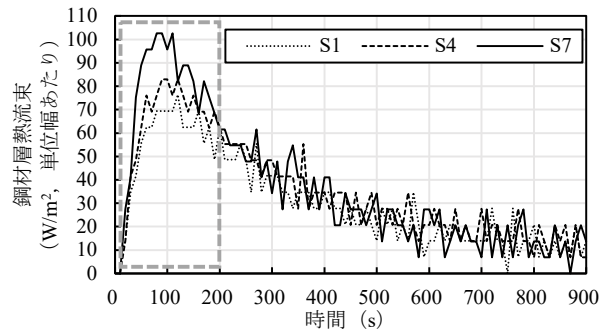
(3) 板厚に応じた鋼材層の熱流束の相違

鋼材供試体の温度変化には鋼材層熱流束が寄与する。板厚に応じた温度変化の相違を発生させる理由について、板厚に応じた鋼材層熱流束の相違の観点から検討を行う。図 6-12 に板厚の異なる供試体における単位幅あたりの鋼材層熱流束を比較した結果を示す。これまでの議論で用いてきた鋼材層熱流束は供試体の板厚全体における値となっていた。これは板厚に対応する供試体の熱容量に依存した値であることから、板厚の異なる供試体ごとの比較が困難である。そこで、一定の厚さにおける平均的な鋼材層熱流束の比較を行った。ここでの一定の厚さについては、熱伝導解析での空間間隔 (0.0002 m) とし、単位幅とした。

図 6-12 では加熱過程における単位幅あたりの鋼材層熱流束を表している。例として、S1 (30 サイクル)、S4 (60 サイクル) および S7 (120 サイクル) を示す。図 6-12 より、いずれの供試体、背面状態においても約 100 s あたりのピークまで熱流束の値が上昇し、その後次第に低下している。加熱直後は入力されたほぼすべての熱量が鋼材層の温度上昇に寄与し、次第にビーズ層への熱伝導が進むことで値が低下していくと考えられる。図中に四角で示した加熱開始から 200 s までの範囲に着目すると、乾燥条件と湿潤条件のいずれの場合も、板厚が小さい供試体ほど単位幅における鋼材層熱流束が大きくなる傾向が確認された。一定の幅すなわち一定の熱容量の下では、熱流束の増大に伴い温度の変化量も増大する関係になるものと推察される。



(a) 乾燥条件



(b) 湿潤条件

図 6-12 板厚の異なる供試体における単位幅あたりの鋼材層熱流束

(4) 板厚と温度変化量の関係

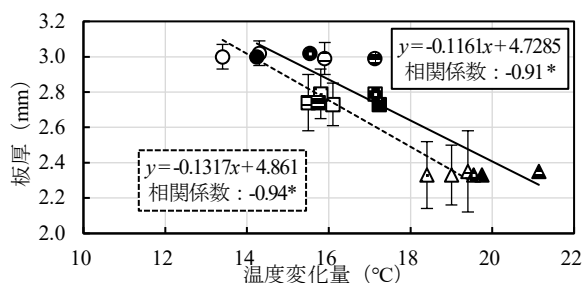
鋼材供試体の板厚と温度変化量の関係について議論する。図 6-12 より、供試体の温度変化に寄与する鋼材層熱流束について加熱過程の前半に最大値をとり、その値は板厚が薄いほど増加することが確認された。本節ではこの熱流束の傾向に着目し、加熱開始からピークとなるまでの時間において上昇した温度を温度変化量とし、板厚との相関関係について検討する。鋼材層熱流束が加熱開始から最大値をとるまでの時間は、各供試体の中で開始から 180 s 時点が最長であった。このことから、各供試体において開始から 180 s 時点までの温度変化量を求めた。

図 6-13 および図 6-14 に S1～S9 および Y1～Y9 における板厚と温度変化量の関係を示す。図 6-13 および図 6-14 の (a) は乾燥条件、図 6-13 および図 6-14 の (b) は湿潤条件での結果を表し、いずれの図も供試体裏面の実測値と計算値について比較している。いずれの板厚と温度変化量の関係においても、板厚の減少に伴い温度変化量が増大する負の相関の傾向が確認された。温度変化量は非接触による板厚の推定における指標のひとつになり得ると推察される。本実験結果では、実測値において図 6-13 および図 6-14 のいずれの場合も約 12～20 °C の温度変化量で 2.2～3.2 mm の板厚の相違を捉えることができた。乾燥条件と湿潤条件で温度変化量の範囲に比較的大きな差が生じなかった理由としては、加熱過程前半である開始から 180 s 時点までを対象としたからと考えられる。図 6-11 より、この時間帯は入力された熱流束がビーズ層へ配分される割合が少ないことが確認できる。すなわち、背面状態の影響を受けない時間帯での温度変化量の比較であったことから、乾燥条件と湿潤条件で温度帯に比較的大きな差が生じなかったものと考えられる。

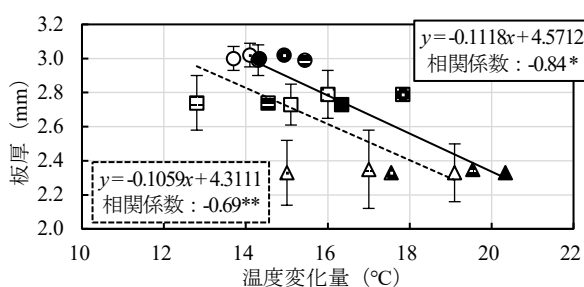
SS400 と SYW295 の鋼種による相違について、実測値の近似直線において SS400 の方が乾燥条件と湿潤条件のいずれにおいても傾きの絶対値が小さいことが確認された。これは、それぞれの鋼種の板厚の相違が影響しているものと思われる (表 6-2 参照)。同一の条件でサイクル腐食試験を実施し、鋼種により板厚に相違が生じた (SYW295 の方が SS400 より全体的に厚い) 理由として鋼材の化学成分が影響していると考えられる。表 6-1 より、SS400 と比較して SYW295 では Mn および P の割合が 76 % および 30 % 程度大きい値となっている。サイクル腐食試験では塩水を用いて腐食を促進させているが、海水腐食において Mn と P の増加は腐食減量を低下させるという報告がある¹⁷⁾。SYW295 の板厚が SS400 より全体的に厚くなった結果の考察のひとつとして、上記の理由が考えられる。つまり、図 6-13 および図 6-14 の相違では、鋼種による熱特性よりも鋼種による板厚の相違が影響した可能性が示唆される。ただ、軽量鋼矢板は元厚が 4～7 mm と普通鋼矢板と比べて薄い設計であることから、既設鋼矢板での非接触計測で普通鋼矢板より大きい温度変化になると考えられる。

以上のことから、加熱過程における鋼材層熱流束の時系列変化を踏まえた鋼材供試体の温度変化量とその板厚に負の相関関係があることが確認された。温度変化に着目する時間

帯については、鋼材層熱流束が最大値をとるまでの加熱による立ち上がりを対象とすることで、板厚の相違を捉えられる温度変化量となり得ることを同定した。既設鋼矢板に対して赤外線サーモグラフィ法での非接触による板厚推定に資するものと考えられる。



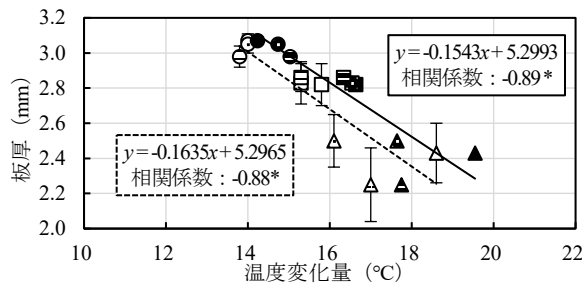
(a) 乾燥条件



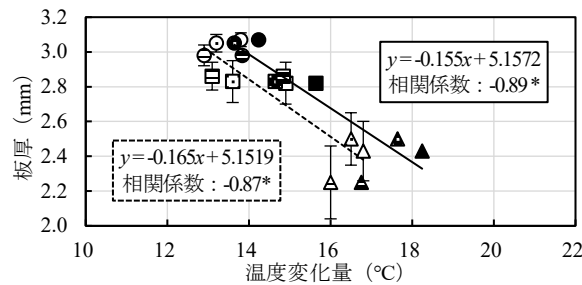
(b) 湿潤条件

○S1 (実測値)	○S2 (実測値)	○S3 (実測値)	□S4 (実測値)
△S5 (実測値)	□S6 (実測値)	△S7 (実測値)	△S8 (実測値)
●S1 (計算値)	●S2 (計算値)	●S3 (計算値)	
■S4 (計算値)	■S5 (計算値)	■S6 (計算値)	▲S7 (計算値)
▲S8 (計算値)	▲S9 (計算値)		

図 6-13 板厚と温度変化量の関係 (SS400)



(a) 乾燥条件



(b) 湿潤条件

○ Y1 (実測値)	○ Y2 (実測値)	○ Y3 (実測値)	□ Y4 (実測値)
□ Y5 (実測値)	□ Y6 (実測値)	△ Y7 (実測値)	△ Y8 (実測値)
△ Y9 (実測値)	● Y1 (計算値)	● Y2 (計算値)	● Y3 (計算値)
■ Y4 (計算値)	■ Y5 (計算値)	■ Y6 (計算値)	▲ Y7 (計算値)
▲ Y8 (計算値)	▲ Y9 (計算値)		

図 6-14 板厚と温度変化量の関係 (SYW295)

6.2.5. 室内実験のまとめ

腐食鋼矢板の板厚を温度変化から非接触推定していくための室内実験による検討を実施した。実験的検討では、鋼矢板を模擬した腐食鋼材の供試体と背面土を模擬したガラスビーズとの2層による熱伝導モデルにより、加熱過程と冷却過程における板厚に応じた温度変化の相違について熱流束の観点から評価を試みた。実験条件として背面土の水分状態を想定し、ガラスビーズの乾燥条件と湿潤条件の2ケースを設定し、比較した。板厚が薄くなるほど温度の時間変化は大きくなるという作業仮説の下、解析的検討を行った。検討の結果を以下に列挙する。

- 1) 本稿で設定した計算条件の下、1次元熱伝導解析による計算値において、鋼材層の温度およびビーズ層へ出入りする熱流束を概ね再現することができた。
- 2) 加熱過程での鋼材層とビーズ層への熱流束の配分割合から、ビーズ層の乾燥条件と湿潤条件により生じる鋼材層の温度帯の相違を説明することができた。
- 3) ビーズ層を出入りする熱流束の実測値に基づき計算された鋼材層の温度変化に寄与する熱流束について、特定の単位幅あたりの値に換算し比較すると、加熱過程において板厚が薄い供試体ほど大きい時間変化を示すことが確認された。

- 4) 3) の値はビーズ層への熱伝導が生じる前である加熱開始直後から 180 s までの間で最大値をとることが確認された。これにより、板厚による温度変化の相違が顕著となる時間帯が熱流束の観点から特定された。
- 5) 4) を考慮し、加熱開始直後から 180 s までに上昇した鋼材供試体の温度変化量とその板厚の間には高い負の相関を有することが確認された。この理由は 3) により説明される。
- 6) 実測値をもとに計算された鋼材層の熱流束を考慮することで、作業仮説が実験的に検証された。
- 7) 軽量鋼矢板は元厚が 4~7 mm と普通鋼矢板と比べて薄いことから、既設鋼矢板での非接触計測では普通鋼矢板より大きい温度変化量を示す可能性が考えられる。

6.3. 屋外環境での熱収支解析と赤外線計測による鋼矢板厚の非接触評価

6.3.1. 屋外実験の概説

鋼矢板護岸の板厚調査では超音波厚さ計により板厚測定が行われるが、接触的な測定方法であることから、時間的・物理的な負担が大きい。加えて、点的な測定であることから、取得できるデータは限定される¹⁸⁾。

ここでは鋼矢板の板厚を熱容量と考え、熱容量に応じて表出する温度の相違から板厚を評価することに注目している。鋼矢板の温度を赤外線サーモグラフィカメラによる熱画像で捉えることで、非接触により板厚を検出することを試みている。6.3.2(3)で詳述するが、腐食により板厚が薄いすなわち熱容量が小さいほど、板厚が厚いものと比較し、温度上昇過程ではより高温、温度低下過程ではより低温になると考えられる。計測対象の温度は設置されている周辺の気象条件に依存することから、地表面における熱収支の考えを応用して温度計算を行う。これは、地表面での熱フラックスの収支により、地表面温度を求めることである。農業気象の分野での研究¹⁹⁾を始め、水管理における水路内の水温の評価^{20),21)}、田面における水温の評価²²⁾⁻²⁴⁾、氷厚の計算^{25),26)}、および道路舗装における温度予測²⁷⁾と幅広い応用がある。本研究では、材料表面における熱収支から、気象条件に基づき鋼矢板の温度変動を計算する。赤外線サーモグラフィカメラによる非接触の表面温度計測と組み合わせることで、検出結果に対する理論的な根拠となり得る。

以上より本項では、熱収支解析と赤外線計測により、腐食を受けた鋼矢板厚の非接触評価を行う。鋼矢板における熱収支解析のモデル化と鋼矢板供試体を用いた気象条件下での実証実験により検討を試みる。本研究の新規性は、構造部材の厚さの情報について温度を指標に非接触で評価することである。有用性は、板厚を空間分布として検出することで、将来的に腐食鋼矢板の詳細な構造解析に資する実測データの計測手法につながるものとする。

6.3.2. 材料表面の熱収支と鋼矢板厚の関係

(1) 地表面における熱収支の概説

気象条件や地形を考慮して地表面におけるエネルギー保存である熱収支を適用することで、地表面温度、地温および水温の計算が可能となる。地表面における熱収支の模式図を図6-15に示す。地表面における各種フラックスのつり合いを考える。日射として、太陽光球面から地表面に直接到達する直達日射、大気中での散乱で地表面に到達する散乱日射、地表面で反射する反射日射がある。直達日射と散乱日射を合わせて全天日射という。これらの波長は3.0 μmまでの波長域に集中し、短波長放射とされる。大気中の水蒸気や二酸化炭素といった温室効果気体を起源とする放射として、赤外放射があり、特に大気起源のものを大気放射という。地表面からは地表面温度に応じた赤外放射を出している。これらの波長は3.0 μm以上の波長域に集中し、長波長放射とされる。地表面において空気や水蒸気に伴い輸送されるエネルギーを顕熱および潜熱という。地中への熱伝導によるエネルギーを地中伝導熱という。

次節では、このような気象条件に基づく熱収支を材料表面に適用し、温度の計算を実施するモデルを説明する。

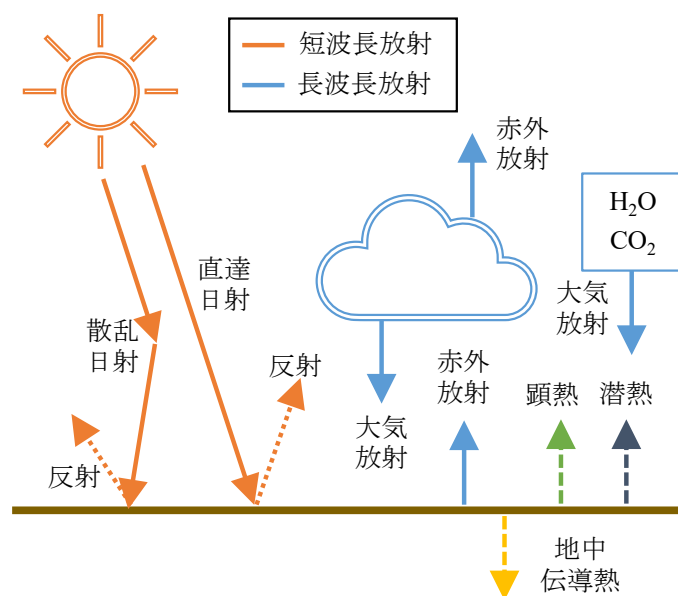


図 6-15 地表面における熱収支の模式図 (文献²⁸⁾を参照)

(2) 材料表面における熱収支解析モデル

実環境下における鋼矢板の温度変動は、気象条件に伴う鋼矢板表面での熱エネルギーの出入りすなわち熱収支に基づいていると考えられる。ここでは、気象データを用いて鋼矢板の温度変動を計算する熱収支解析について、構築したモデルと式展開の説明を行う。

熱収支解析のモデルの模式図を図 6-16 に示す。ここでは、鋼矢板において出入りする熱流束として、正味放射量、顕熱輸送量および鋼矢板内部の伝導熱を仮定した。正味放射量は輻射による熱流束で、鉛直下向きである日射量と大気放射量、鉛直上向きである日射量の反射分と赤外放射量をまとめたものとなる。顕熱輸送量は対流による熱流束で、主に風の影響により対象表面と大気との熱移動を行う。鋼矢板内部の伝導熱は熱伝導による熱流束で、固体内部における温度勾配に基づく熱移動を行う。 R_n を正味放射量 (W/m^2)、 H を顕熱輸送量 (W/m^2)、 G を鋼矢板の内部伝導熱 (W/m^2) とすると、これら熱流束による鋼矢板表面での熱収支は式 (6-17) で表される。

$$R_n = H + G \quad (6-17)$$

左辺の正味放射量 R_n は式 (6-18) で表される。

$$R_n = (1 - \alpha)S_d + L_d - \varepsilon\sigma T_s^4 \quad (6-18)$$

ここで、 α はアルベド、 S_d は日射量 (W/m^2)、 L_d は大気放射量 (W/m^2)、 ε は放射率、 σ はステファン・ボルツマン定数 ($=5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$)、 T_s は鋼矢板の表面温度 (K) である。

式 (6-17) の右辺第一項の顕熱輸送量 H は式 (6-19) で表される。

$$H = h(T_s - T_a) \quad (6-19)$$

ここで、 h は熱伝達率 ($\text{W/m}^2/\text{K}$)、 T_a は気温 (K) である。熱伝達率は次の式 (6-20) ~式 (6-22) により求める。

$$h = k \cdot Nu/L \quad (6-20)$$

$$Nu = \begin{cases} 0.664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \\ 0.037 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{1/3} \end{cases} \quad (6-21)$$

$$Re = UL/\nu \quad (6-22)$$

ここで、 k は空気の熱伝導率 (W/m/K)、 Nu はヌセルト数、 L は代表長さ (m)、 Re はレイノルズ数、 Pr はプラントル数、 U は風速 (m/s)、 ν は空気の動粘度 (m^2/s) である。平板に沿う流れの臨海レイノルズ数として、解析では 3.2×10^5 とし、これ以下の値では層流、これより大きい値では乱流とした。

式 (6-18) の右辺第二項の鋼矢板の内部伝導熱 G は式 (6-23) で表される¹¹⁾。

$$G = \int_0^D \frac{d(c_G \rho_G T_G)}{dt} dx \quad (6-23)$$

ここで、 c_G は鋼材の比熱 (J/kg/K)、 ρ_G は鋼材の密度 (kg/m^3)、 T_G は鋼矢板内部の温度 (K)、 D は熱伝導がほぼ0となる位置である。

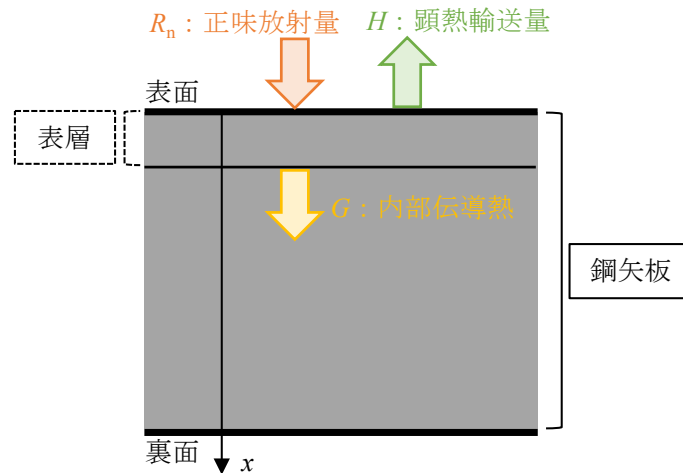


図 6-16 鋼矢板における熱収支解析モデル

(3) 材料温度を指標とした板厚評価

本研究では、腐食鋼矢板の温度に基づいてその板厚を評価することを試みている。材料の温度を指標とした板厚評価の概要について、図 6-17 に示す。気象の影響下における板厚に応じた鋼矢板の温度の日変化に着目している。板厚に伴う鋼矢板の質量の変化は、その熱容量の変化を表す。板厚により熱容量が変わる場合、板厚が厚いほど熱容量が大きいため、温度が上昇しにくくかつ低下しにくい。板厚が薄いほど熱容量が小さいため、温度が上昇しやすく、低下しやすい。このことから図 6-17 より、腐食を受けて板厚の薄い鋼矢板の温度はより板厚の厚い鋼矢板と比較して、温度の日変化における温度上昇時でその値が大きく、温度低下時にその値は小さくなると考えられる。板厚と温度の関係では、温度上昇時には板厚が薄いほど温度の値は大きいためその関係は負の相関、温度低下時には板厚が厚いほど温度の値は大きいため正の相関が得られると考えられる。

以上の考えに基づき、熱収支解析により実測した気象データから鋼矢板の温度を推定し、板厚に応じた温度の相違が生じる時間帯を特定し、赤外線サーモグラフィカメラで検出される熱画像の温度分布と板厚の関係を評価する。このような数値シミュレーションと赤外線計測による鋼矢板厚の非接触評価を実証実験に基づき検討する。

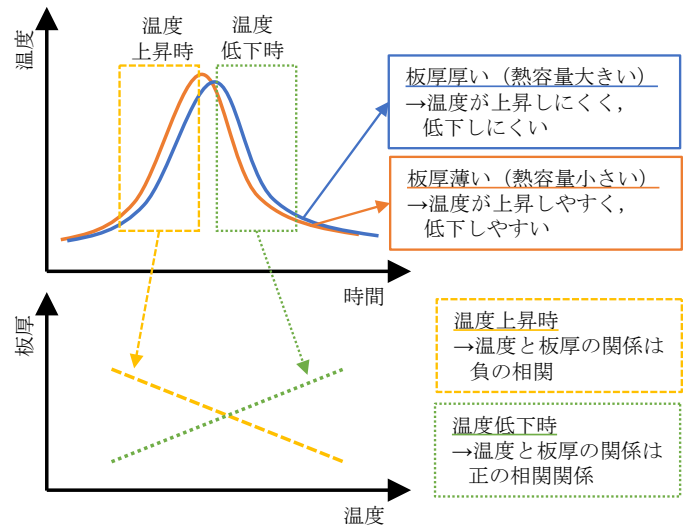


図 6-17 材料温度を指標とした板厚評価の概要図

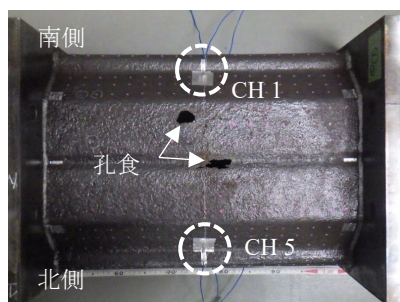
6.3.3. 実験および解析方法

(1) 鋼矢板供試体

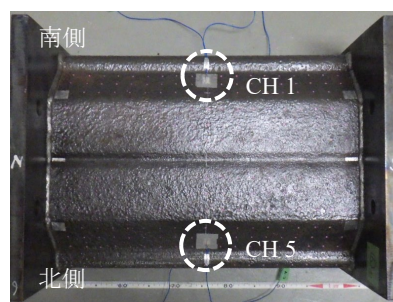
実験では、板厚の異なる鋼矢板の供試体を3体用いた。鋼矢板は軽量鋼矢板で、型式はLSP-3D、材質はSS400である。表6-4に検討ケースを示す。Case Aは新設の鋼矢板で、板厚は5mmで一定である。Case Bは開孔を含む腐食鋼矢板で、板厚は1~3mmの範囲（開孔を除いた位置）である。既設鋼矢板の水位変動部よりサンプリングしたものである。Case Cは開孔のない腐食鋼矢板で、板厚は3mm台を中心に3~5mmの範囲である。既設鋼矢板の土中部よりサンプリングしたものである。図6-18に供試体の外観を示す。長手方向において500mmの大きさに切断し、両端に自立用のプレート（400mm×250mm×25mm）を設置して用いた。図6-19に供試体の板厚分布を示す。

表 6-4 鋼矢板供試体の実験ケース

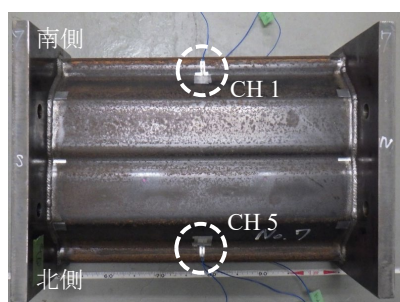
実験ケース	条件	諸元
Case A	腐食鋼矢板, 孔食あり	軽量鋼矢板C型 LSP-3D
Case B	腐食鋼矢板	軽量鋼矢板C型 LSP-3D
Case C	新設鋼矢板	軽量鋼矢板C型 LSP-3D



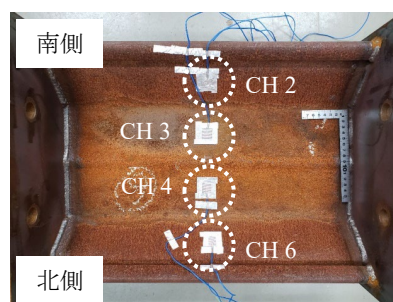
(a) Case A



(b) Case B

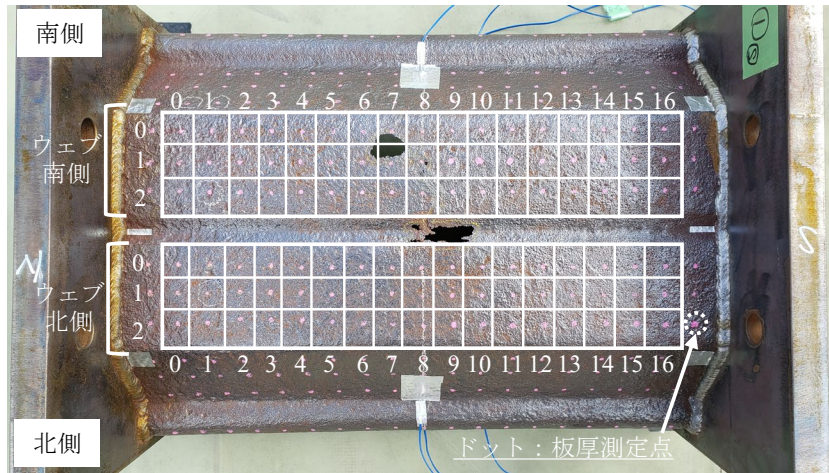


(c) Case C



(d) 供試体裏面の熱電対

図 6-18 鋼矢板供試体の外観と熱電対の設置



(a) 板厚測定位置

		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ウェブ南側	0	3.84	3.04	3.28	3.33	1.97	1.60	1.69	1.67	2.24	2.23	2.85	3.27	2.01	2.33	2.96	2.65	3.41
	1	3.31	3.44	2.96	3.12	1.50	2.14	2.01	1.70	2.06	2.14	1.99	2.97	2.70	2.83	2.48	2.85	2.97
	2	3.18	2.48	2.38	3.35	2.13	2.18	1.80	1.81	1.49	1.61	2.68	2.31	2.84	2.81	2.71	3.13	3.16
ウェブ北側	0	3.50	3.44	2.81	2.82	2.63	2.60	2.16	2.04	1.80	1.94	2.43	2.20	2.55	2.82	2.75	3.24	3.35
	1	3.30	1.99	2.64	2.95	2.29	1.79	2.17	1.66	1.81	2.17	2.60	2.25	1.83	2.95	2.82	3.31	3.16
	2	2.71	3.53	3.38	2.74	1.81	1.59	1.70	2.29	2.39	2.10	2.49	2.69	2.64	2.58	2.19	3.84	3.22

(b) Case A の板厚分布

		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ウェブ南側	0	3.45	3.67	3.40	3.51	3.47	3.51	3.83	3.78	3.95	4.01	4.11	3.79	4.04	3.76	3.82	3.58	3.83
	1	3.54	3.54	3.59	3.42	3.64	3.76	3.18	3.57	3.49	3.42	3.51	3.77	3.34	3.62	3.41	3.40	3.73
	2	3.47	3.53	3.48	3.49	3.72	3.65	3.65	3.45	3.52	3.62	3.82	4.07	3.96	3.87	3.73	3.56	3.95
ウェブ北側	0	3.67	3.75	3.51	3.71	3.86	3.85	4.08	3.67	3.65	3.91	4.10	4.00	3.56	3.94	3.87	3.69	4.10
	1	3.44	3.68	3.52	3.76	3.85	3.50	3.93	4.11	3.45	3.48	4.02	3.56	3.72	3.78	4.42	4.32	3.73
	2	4.13	4.24	3.89	3.45	4.03	3.48	3.74	4.03	3.66	4.02	3.77	4.02	4.14	4.02	4.05	4.21	4.41

(c) Case B の板厚分布

図 6-19 鋼矢板供試体の板厚分布

(2) 屋外実験の条件

実験状況を図 6-20 示す。場所は新潟大学農学部棟屋上、実験期間は 2021 年 5 月 4 日から 7 日とした。計測項目は、気象データ、熱電対による鋼矢板の温度データおよび赤外線サーモグラフィカメラによる鋼矢板の熱画像とした。計測間隔について、気象データと熱電対による温度データでは 10 分間隔、熱画像では 4 時から 19 時における 1 時間間隔（16 時点）とした。気象データの計測では ATMOS-41 複合型気象計測ユニット（METER 社製）を用いた。主な項目は気温、日射量、平均風速、最大瞬間風速、水蒸気圧、大気圧および降水量である。熱電対は K 熱電対（東洋熱化学社製）を用いた。熱電対の設置は供試体 1 体あたり 6 箇所とした。設置箇所は、フランジ南側の表面と裏面（CH 1 および 2）、ウェブ南側と北側の裏面（CH 3 および 4）、フランジ北側の表面と裏面（CH 5 および 6）とした（図 6-18 参照）。赤外線サーモグラフィカメラは InfRec R300SR（日本アビオニクス社製）を用いた。カメラは俯角が 90° となるように設置し、鋼矢板のウェブが正面となるようにした。カメラと対象表面の距離は 153 cm とした。熱画像の温度レンジの設定は -40~120 °C で、最小検知温度差は 0.08 °C とした。放射率は 1.0 で計測した。図 6-21 に計測状況を示す。

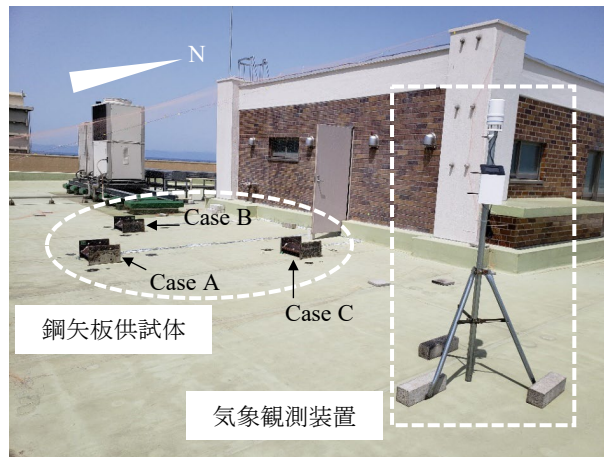


図 6-20 実験状況



図 6-21 赤外線計測の状況

(3) 熱収支解析の計算条件

計算においては、鋼矢板の板厚に対して空間 1 次元の離散化を行い、鋼矢板表層のセルにおける熱収支を考えた。境界条件として、鋼矢板表面にて正味放射量と顕熱輸送量を与えた。鋼矢板裏面については、断熱境界を仮定した。初期条件としては、2021 年 5 月 4 日の 0:00 時点における Case C のウェブ南側の熱電対 (CH3) による温度データである 12.7 °C を各セルに与えた。計算では、計測した気象データのうち気温、日射量、風速を用いた。

熱収支解析において、鋼矢板（鋼材）に関する物性値および周囲流体である空気に関する物性値を与えた。表 6-5 および表 6-6 に計算で与えた物性値を示す。アルベドと放射率はいずれも文献の範囲内の値を設定した。離散化における空間ステップは、表面と裏面の近傍では 2.5×10^{-4} (m)、それ以外では 5.0×10^{-4} (m) とした。時間ステップは、熱伝導計算における陽解法の安定条件を満たすように 2.0×10^{-3} (s) とした。代表長さは、熱伝達率の算出で用いて、鋼矢板のウェブ南側および北側の短辺を目安に 0.05 (m) とした。

表 6-5 鋼材に関する物性

熱伝導率 (W/m/K)	密度 (kg/m ³)	比熱 (J/kg/K)	アルベド (-)	放射率 (-)
51.6 ²⁹⁾	7,860 ²⁹⁾	473 ²⁹⁾	0.3 ³⁰⁾	0.8 ³⁰⁾

表 6-6 空気に関する物性

熱伝導率 (W/m/K)	動粘度 (m ² /s)	プラントル数 (-)
0.02614 ²⁹⁾	1.579×10 ⁻⁵ ³¹⁾	0.7128 ³¹⁾

(4) 赤外線計測による熱画像処理

赤外線サーモグラフィカメラにより取得した熱画像から供試体表面の見かけの温度を検出する。図 6-19 で示す供試体のウェブ上の各板厚測定点に対応するように、熱画像に対して解析セルを設定する。熱画像における解析セルの分割を図 6-22 に示す。各セルは図 6-19 で確認できる板厚測定点のドットがおおよそ中央に位置するよう設定している。セルの大きさは 11 画素×13 画素（縦×横）とした。板厚測定点と温度が 1 対 1 で対応するように、各セルにセル内の温度の平均値を代表値として与えた。ウェブ南側および北側のそれぞれにおけるセルの数は 3×17（縦×横）で 51 個（計 102 個）とした。ただし、西端と東端にある測定点の 1 列ずつは含めていない。この処理を各ケースかつ各計測時点の熱画像に対して実施し、各セルにおける時系列の温度変動を検出する。

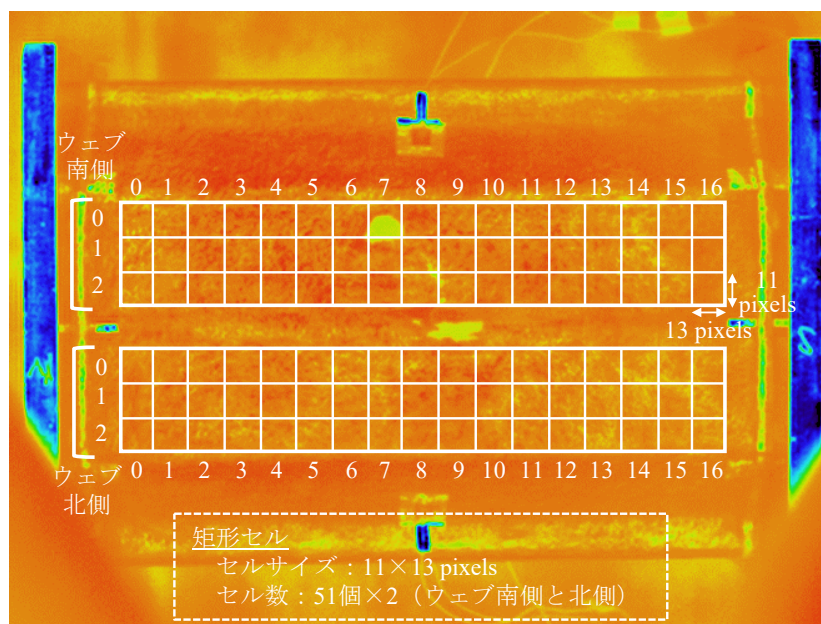


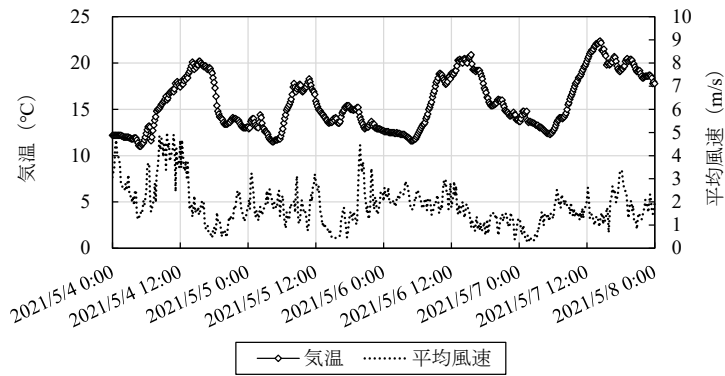
図 6-22 熱画像における解析セルの分割

6.3.4. 結果および考察

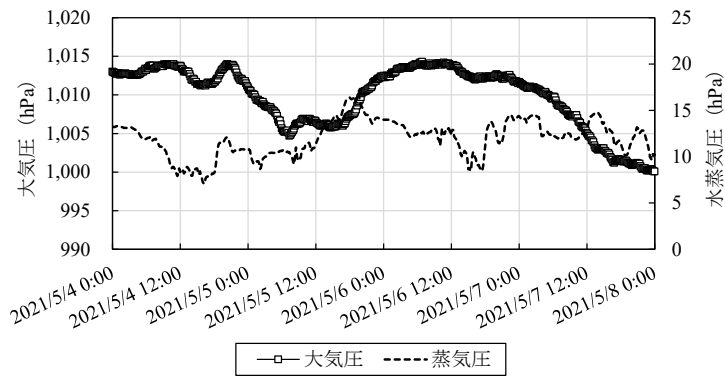
(1) 気象データと熱電対による供試体温度の実測結果

実験期間の2021年5月4日から7日の4日間の気象データについて、**図 6-23**に示す。天気としては熱画像の計測時間帯（4時から19時）において、4日は晴れ、5日は曇りのち雨、6日は晴れ、7日は曇りであった。

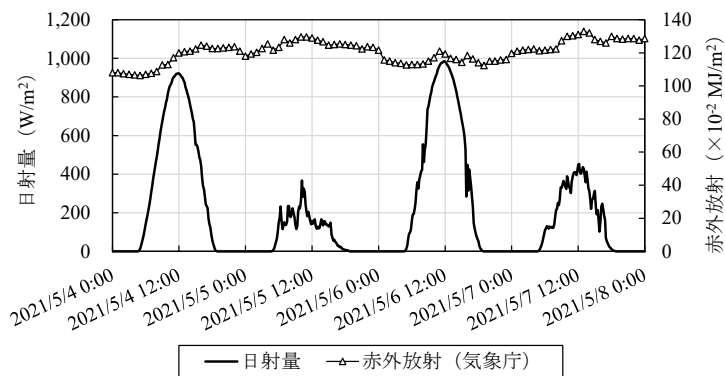
同期間における熱電対による鋼矢板の温度変動について**図 6-24**に示す。ここでは、ウェブ南側の裏面における熱電対（CH3）による温度変動を例として挙げる。いずれのケースにおいても、晴れの日（5/4・5/6）は曇りや雨の日（5/5・5/7）と比較して温度変動が大きいことが確認された。フランジ南側（CH 1および2）と北側（CH 5および6）のそれぞれで計測した両面の温度を用いて、表面温度と裏面温度はほぼ同じ値であることが確認された。これは、鋼材が比較的高い熱伝導率であるためと考えられる。このことから、表面と裏面の温度勾配については考慮しないこととした。ウェブについては熱画像の計測のため表面において熱電対による温度の計測を行わず、裏面のみとした。ウェブにおいては裏面の温度を代表の温度として用いることとした。



(a) 気温および平均風速



(b) 大気圧および蒸気圧



(c) 日射量および赤外放射³²⁾

* 赤外放射は気象庁から参照した網走、館野および福岡における平均値を記載

図 6-23 実験期間の気象データ

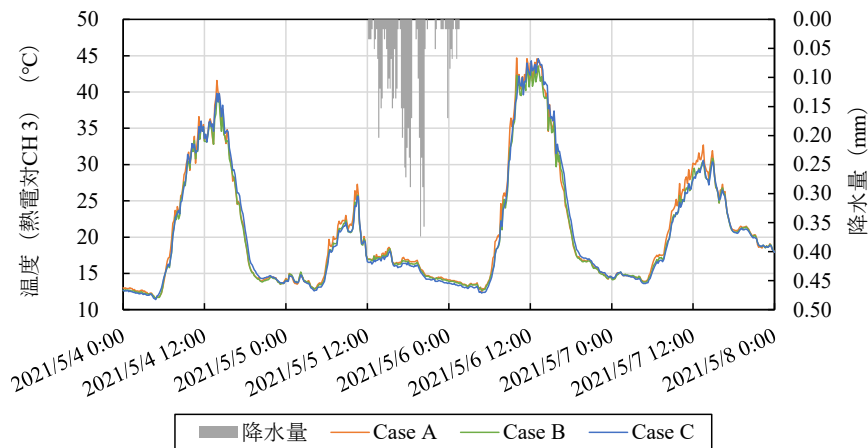


図 6-24 熱電対による鋼矢板供試体の温度

(2) 熱収支解析による鋼矢板厚に応じた温度特性

熱収支解析による温度変動の計算値について実験結果の再現を検証するため、熱電対による温度変動の実測値との比較を行った。板厚 5 mm を仮定した計算値と、腐食のない新設で板厚が 5 mm で一定な Case C におけるウェブ南側 (CH 3) の実測値を比較した。検討の結果を図 6-25 に示す。計算値は 4 日間における実測値を概ね再現できている結果となった。特に、曇りや雨の日 (5/5・5/7) と比較して、晴れの日 (5/4・5/6) において良好なフィッティングとなった。これは、供試体表面の水分状態の変化を正確に考慮できないことから、本研究での熱収支解析では潜熱の影響を考慮しなかったためと考えられる。熱収支解析により鋼矢板の温度変動が再現されたことから、解析で設定する板厚に応じた温度変動の相違について次で検討した。

熱収支解析において、仮定する板厚 (1~5 mm) に応じた温度変動の相違について比較を行った。ここでは、いずれも計算値を扱う。図 6-26 に板厚に応じた温度変動を示す。この図における温度変動の相違をより明確にするために相対温度による比較を行った。ここで、相対温度とは板厚 5 mm (腐食なし) の温度を分母に、より薄い板厚 1~4 mm (腐食による減肉を仮定) の温度を分子とする比率で表した温度である。板厚が薄い場合ほど温度上昇過程や低下過程における温度の変動がより大きくなる傾向が確認された。ここで、温度変動が比較的大きい晴れの日 (5/4・5/6) に着目し、詳細な検討をする。板厚に応じた温度変動と相対温度について、図 6-26 (a) 5/4 の場合、図 6-26 (c) に 5/6 の場合を示す。いずれの場合も午前の約 5 時から 11 時における温度上昇過程において板厚が薄いほど相対温度が高く、午後の約 15 時から 20 時における温度低下過程において板厚が薄いほど相対温度が低い傾向が確認された。これらの傾向から、板厚に応じた温度変動の相違が 1 日のうちのいずれの時間帯で生じるかが特定されたものと考えられる。同様の傾向が熱電対による温度の実測値においても確認されるか検証を行った。板厚に応じた熱電対による温度変動と相対温度

について、図 6-27 に示す。図 6-27 (a) に 5/4 の場合、図 6-27 (b) に 5/6 の場合を示す。ここでは、板厚 5 mm で一定の Case C の温度を基準とし、板厚 1~3 mm の Case A および板厚 3~5 mm の Case B の温度との比率をとった。いずれの図からも、実測値において計算値と同様の傾向が確認された。板厚は対象における熱容量を決定するパラメータであることから、熱容量が小さいすなわち板厚が薄いほど温度上昇過程では温度が高く、温度下降過程では温度が低くなる傾向が確認されたものと思われる。

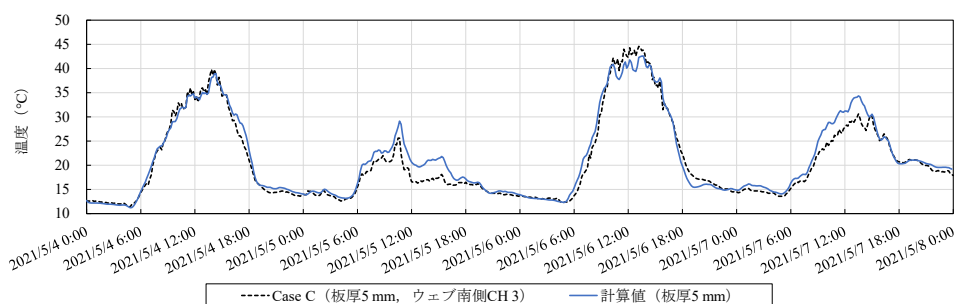


図 6-25 鋼矢板供試体における温度の実測値と熱収支解析によるの計算値の比較

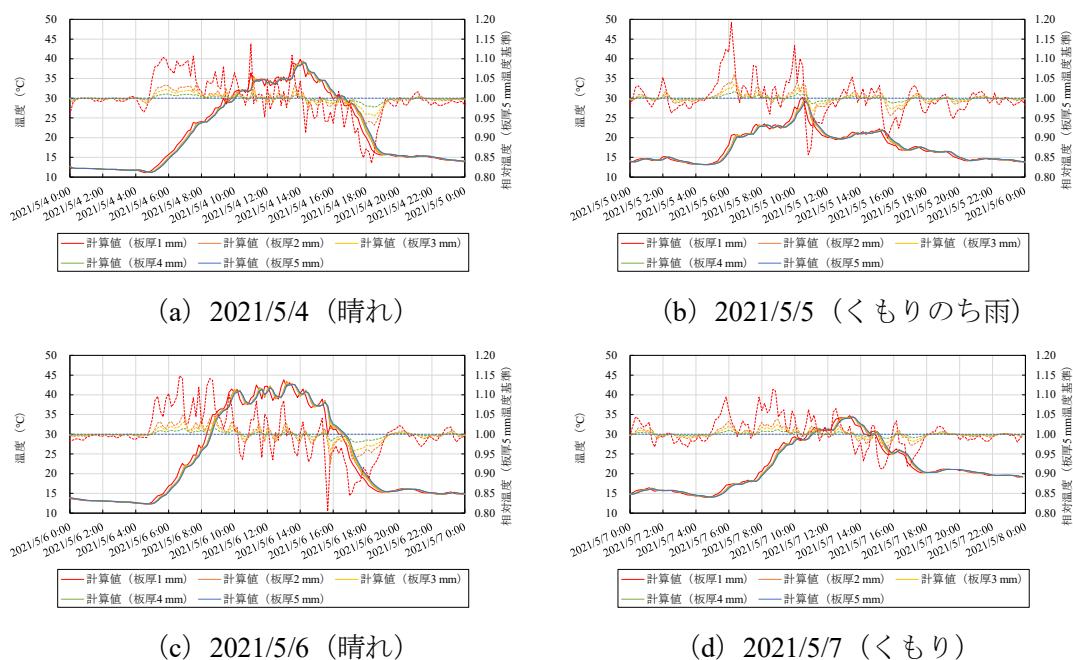


図 6-26 熱収支解析による板厚に応じた温度変動

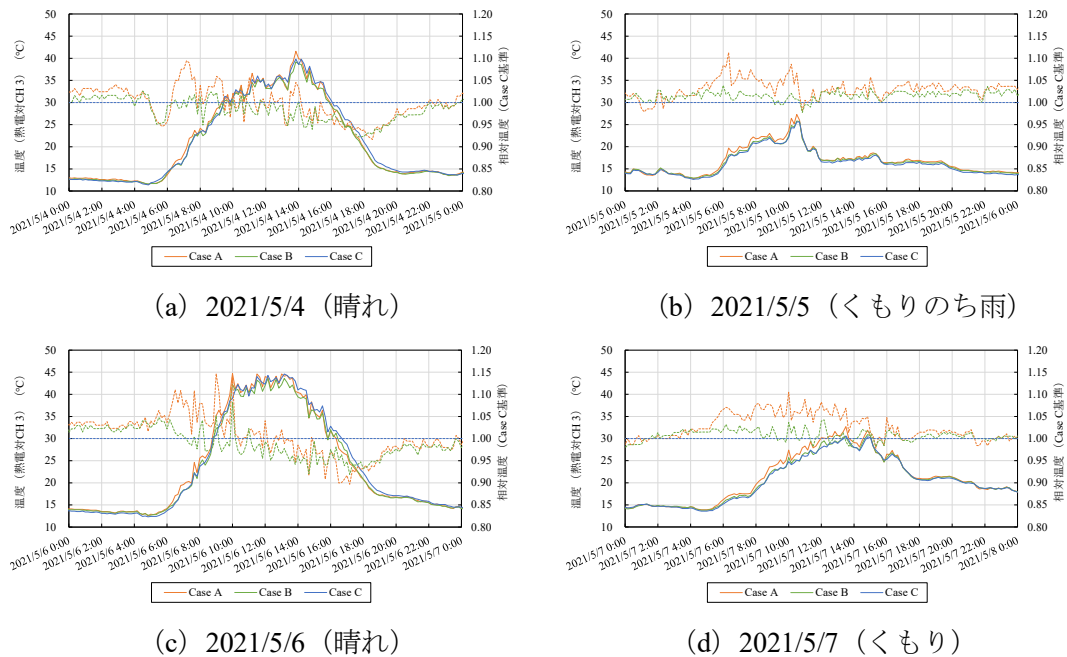
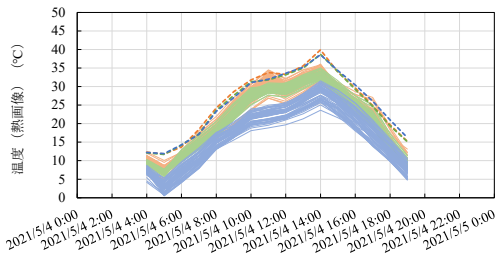


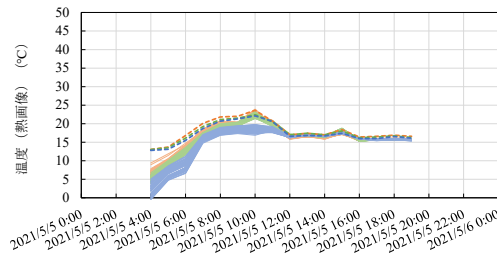
図 6-27 熱電対での実測値による板厚に応じた温度変動

(3) 熱画像より非接触検出される鋼矢板の表面温度

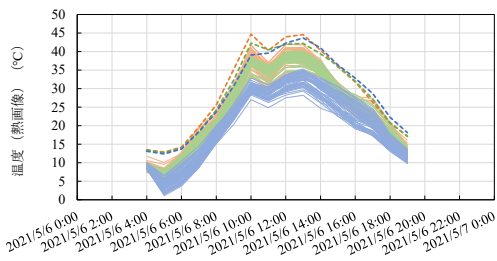
図 6-28 に熱画像におけるセル毎の温度変動を示す。ここではウェブ南側を例とする。なお、放射率補正は行っていない。熱電対による温度と比較して、熱画像による温度が低いことが確認された。特に Case C は Case A および B と比較して温度が低いことが確認された。これは、新設鋼矢板の Case C は錆を除去した腐食鋼矢板の Case A および B と比較して、放射率が低いと推察され、鋼矢板より低温の周囲環境の反射成分をより多く含んで検出されたことで特に温度が低くなったと考えられる。板厚による温度の相違ではないと考えられる。そこで、平均値 0、標準偏差 1 となるように温度データの標準化を行った。その結果を、図 6-29 に示す。標準化したことにより、熱電対による温度と熱画像による温度のフィッティングが良好となる傾向が確認された。



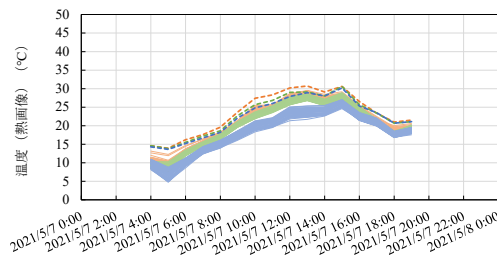
(a) 2021/5/4 (晴れ)



(b) 2021/5/5 (くもりのち雨)



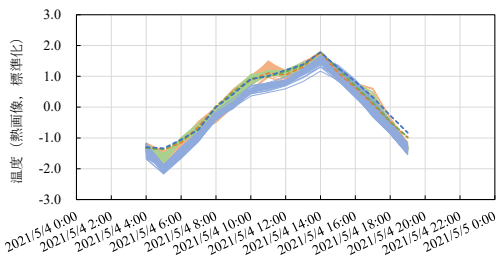
(c) 2021/5/6 (晴れ)



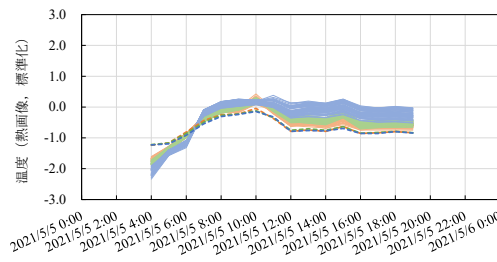
(d) 2021/5/7 (くもり)

<凡例> オレンジ：Case A, 緑：Case B, 青：Case C, 実線：熱画像, 破線：熱電対

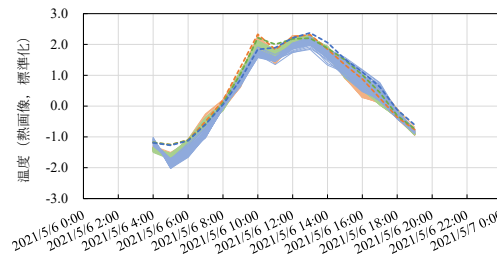
図 6-28 熱画像より検出された解析セルごとの温度変動



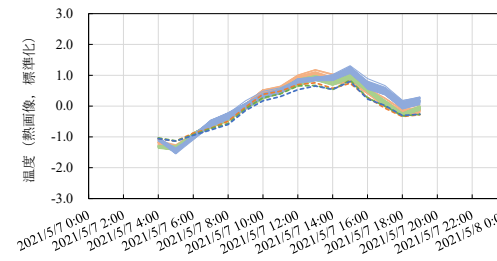
(a) 2021/5/4 (晴れ)



(b) 2021/5/5 (くもりのち雨)



(c) 2021/5/6 (晴れ)



(d) 2021/5/7 (くもり)

<凡例> オレンジ：Case A, 緑：Case B, 青：Case C, 実線：熱画像, 破線：熱電対

図 6-29 熱画像より検出された解析セルごとの標準化した温度変動

(4) 熱画像による表面温度と鋼板厚の関係

熱収支解析により特定された板厚に応じた温度の相違が比較的大きくなる時間帯において、熱画像で検出された表面温度と板厚の関係を求める。腐食した鋼板供試体である Case A および B を対象に、熱画像で検出された標準化した表面温度と板厚の関係を図 6-30 に示す。図 6-30 では、雨の日を除く 2021/4/4 の 11 時時点（温度上昇過程）、2021/4/6 の 16 時時点（温度低下過程）および 2021/4/4 の 11 時時点（温度上昇過程）での Case A および B におけるウェブ南側および北側の解析範囲の結果を示している。図 6-17 で示した概念図のように、表面温度と板厚の関係について、温度上昇過程である図 6-30 (a) および (c) では負の相関、温度低下過程である図 6-30 (b) では正の相関が検出された。図 6-30 (b) で決定係数の値が図 6-30 (a) および (c) と比べて低いのは、解析範囲の西側に、供試体の西側鋼板プレートの日陰が一部含まれているためと考えられる。熱画像の温度を標準化することで、異なる供試体で得られた実測データを平均値 0 かつ標準偏差 1 のデータとして比較した上で、板厚に応じた温度の相違を非接触で検出できることが確認された。ただ、熱収支解析で特定された板厚に応じて温度の相違が拡大する時間において、必ずしも図 6-17 の関係が熱画像より検出されるとは限らない結果となった（図 6-29 参照）。これは、上述と同様に、供試体の東西側の鋼板プレートの日陰が、日の出や日の入りの際に、解析範囲に含まれることが影響していると考えられる。本結果では、図 6-30 に示す 3 時点において仮説に沿う結果となることが確認された。

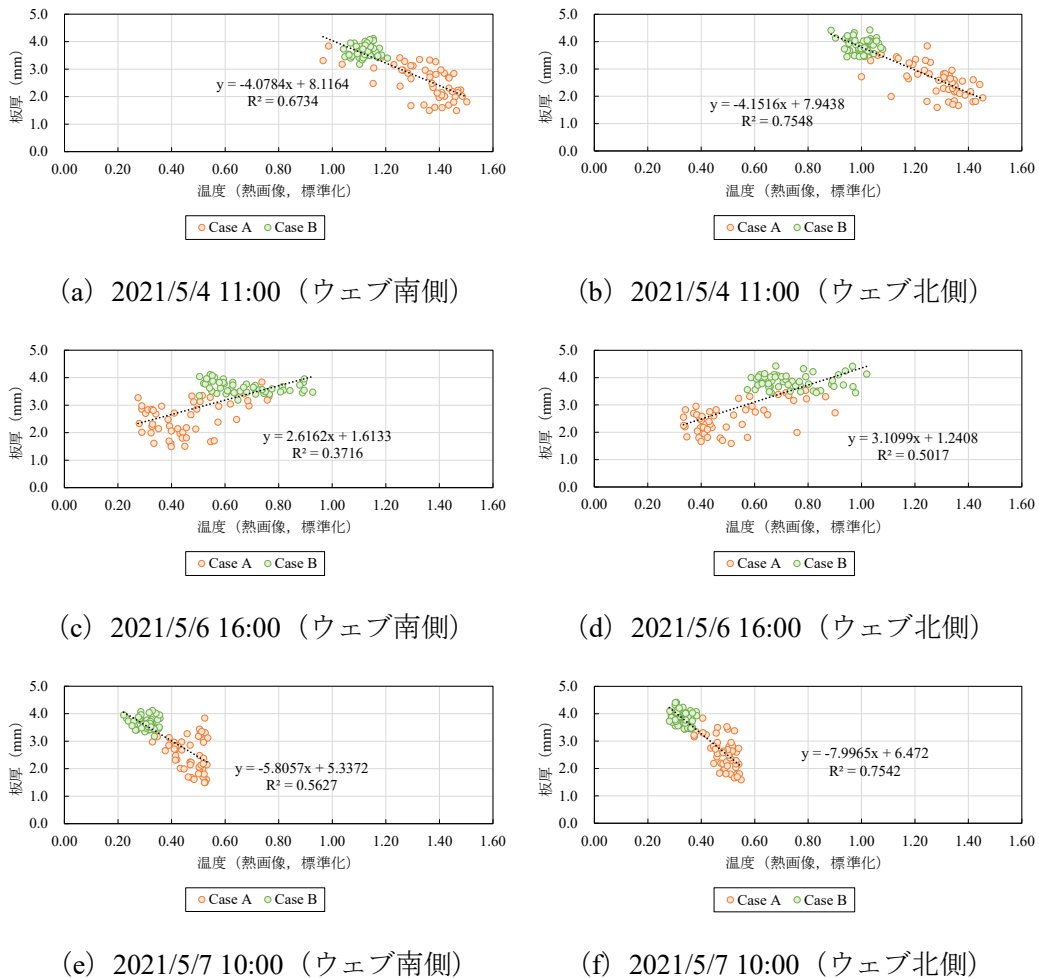


図 6-30 熱画像より検出された標準化した温度と板厚の関係

6.3.5. 屋外実験のまとめ

腐食により板厚が減少した鋼矢板に対して、熱容量に基づき表出する温度を指標に板厚を非接触で評価することを検討した。気象データに基づく熱収支解析により、鋼矢板の温度の時系列変動を計算し、板厚に応じて温度の相違が顕著となる時間帯を特定した。その時間帯において赤外線サーモグラフィカメラによる熱画像から非接触で温度を検出し、板厚と検出温度の関係を評価した。これらを、板厚の異なる鋼矢板供試体を用いた気象条件下での実証実験により検討した。検討結果を以下に列挙する。

- (1) 材料表面における熱収支解析により、気象データに基づいて 5 mm 一定の板厚を有する鋼矢板供試体の温度変動を概ね再現した。
- (2) 熱収支解析による板厚の異なる鋼矢板の温度変動の計算値から、温度上昇過程および低下過程において温度の相違が顕著となる時間帯を特定した。
- (3) 供試体自体による温度データのばらつきや放射率の相違を考慮し、熱画像により検出

される見かけの温度データを標準化した。板厚に応じた温度の相違が顕著となる時間帯を対象に、標準化した温度と板厚の関係において、温度上昇過程では負の相関、温度低下過程では正の相関となることが検出された。

- (4) 本検討では、6.3.2(3)で示す仮説の相関が得られるところまで確認された。今後の課題としては、検出精度の向上が挙げられる。農業用排水路における鋼矢板の設計で考慮される2 mmの腐食代に基づいて、腐食代以上に板厚が減少しているかどうかを検出することを目指す。既設護岸の場合、日差しによる反射に加えて、背面土の水分状態による鋼矢板と地盤の相互の熱伝導現象や排水路内の水温が検出に影響すると考えられ、これらによるばらつきを考慮した解析的検討を行う必要がある。

引用文献

- 1) Laaidi, N., Belattar, S., and Elbaloutti, A. (2011): Pipeline Corrosion, Modeling and Analysis, *Journal of Nondestructive Evaluation*, 30, 158-163, doi:10.1007/s10921-011-0103-y.
- 2) Vavilov, V.P. and Chulkov, A.O. (2012): Detecting Corrosion in Thick Metals by Applying Active IR Thermography, *Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXIV*, 835409.
- 3) Jin, G., Zhang, W., Shi, J., Yang, Z., Hu, Y., Huang, Z., and Tian, G. (2013): Numerical Analysis of Influencing Factors and Capability for Thermal Wave NDT in Liquid Propellant Tank Corrosion Damage Detection, *Measurement Science Review*, 13(4), pp. 214-222.
- 4) Chulkov, A.O. and Vavilov, V.P. (2015): Comparing Thermal Stimulation Techniques in Infrared Thermographic Inspection of Corrosion in Steel, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 81, 012100.
- 5) Kopeć, M., Chatzipanagiotou, P., De Mey, G., and Wićcek, B. (2017): Detection of Inner Defects in Industrial Pipelines using Transient IR Thermography, *Measurement Automation Monitoring*, 63(3), 115-118.
- 6) 遠藤英樹, 阪上隆英, 斉田圭佑, 久保司郎 (2017) : 熱風炉における逆解析の実験的検討 : 熱伝導逆問題解析による耐火物の厚さ測定に関する基礎的研究 第2報, *圧力技術*, 55(2), pp. 60-69.
- 7) Moskovchenko, A., Vavilov, V., Švantner, M., Muzika, L., and Houdková, Š. (2020): Active IR Thermography Evaluation of Coating Thickness by Determining Apparent Thermal Effusivity, *Materials*, 13(18), 4057, doi:10.3390/ma13184057.
- 8) Patankar, S.V. (1985) : コンピュータによる熱移動と流れの数値解析, 水谷幸夫, 香月正司訳, 森北出版, 45-48, pp. 56-61.
- 9) 藤本明宏, 渡邊 洋, 福原輝幸 (2007) : 路面雪氷層一舗装間の接触熱抵抗, *土木学会論文集 E*, 63(1), pp. 156-165.
- 10) 日本機械学会 (2005) : JSME テキストシリーズ 伝熱工学, pp. 18-19.
- 11) 近藤純正 (1994) : 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—, 朝倉書店, pp. 150-152.

- 12) 国井大蔵 (1961) : 粉粒体の伝熱, 化学工学, 25(12), pp. 891-898.
- 13) 粕渕辰昭 (1973) : 土壌の熱伝導機構に関する諸問題, 農業気象, 29(3), pp. 201-207.
- 14) 日本熱物性学会 (2008) : 新編 熱物性ハンドブック, 養賢堂, 189-190, p.195.
- 15) 日本機械学会 (1986) : 伝熱工学資料改訂第4版, p.317, 320, 329, 331.
- 16) 国立天文台 (2020) : 理科年表 2021 (机上版), 丸善出版, p.物 63 (429).
- 17) 小若正倫 (1973) : 鉄鋼の腐食におよぼす微量元素の影響, 日本金属学会会報, 12(8), pp. 533-545.
- 18) 白井一洋, 平林丈嗣, 松本さゆり (2015) : 超音波非接触式肉厚測定装置の計測精度向上と現地試験, 港湾空港技術研究所資料, No. 1311.
- 19) 近藤純正 (1992) : 地表面温度と熱収支の周期解及びその応用, 農業気象, Vol. 48, No. 3, pp. 265-275.
- 20) Kimura, M., Kobayashi, S., Mitsuyasu, M., Xie, W., and Iida, T. (2022): Simulation model of water temperature variation in dual-purpose canals considering return flow from upstream paddy fields, *Irrigation and Drainage*, Vol. 71, No. S1, pp. 138-154.
- 21) 木村匡臣, 飯田俊彰, 光安麻里恵, 久保成隆 (2013) : 掛流し 灌漑による高温障害対策時の用排兼用水路の水温形成, 水土の知, Vol. 81, No. 4, pp. 23-26.
- 22) Xie, W., Kimura, M., Asada, Y., Iida, T., and Kubo, N. (2022): The development of a hybrid model to forecast paddy water temperature as an alert system for high-temperature damage, *Irrigation and Drainage*, Vol. 71, No. S1, pp. 124-137.
- 23) Nishida, K., Yoshida, S., and Shiozawa, S. (2022): Numerical simulation on effect of irrigation conditions on water temperature distribution in a paddy field, *Paddy and Water Environment*, Vol. 20, pp. 199-214.
- 24) Maruyama, A., Nemoto, M., Hamasaki, T., Ishida, S., and Kuwagata, T. (2017): A water temperature simulation model for rice paddies with variable water depths, *Water Resources Research*, Vol. 53, No. 12, pp. 10065-10084.
- 25) Nuijten, A. D. W. and Høyland (2017): Modeling the thermal conductivity of a melting snow layer on a heated pavement, *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 140, pp. 20-29.
- 26) 吉川泰弘, 渡邊康玄, 早川博, 平井康幸 (2012) : 結氷河川における解氷現象と実用的な氷板厚計算式の開発, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 68, No. 1, pp. 21-34.
- 27) Ayasrah, U. B., Tashman, L., AlOmari, A., and Asi, I. (2023): Development of a temperature prediction model for flexible pavement structures, *Case Studies in Construction materials*, Vol. 18, e01697.
- 28) 近藤純正 (2000) : 地表面に近い大気の科学 理論と応用, 東京大学出版会, pp. 24-29.
- 29) 日本機械学会 (1986) : 伝熱工学資料改訂第4版, p. 317, p. 329.
- 30) 甲藤好郎 (1980) : 伝熱概論, 養賢堂, p. 341, p. 348.
- 31) 日本熱物性学会 (2008) : 新編 熱物性ハンドブック, 養賢堂, p. 67.

32) 気象庁：日射・赤外放射に関するデータ集，
https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/radiation/data_rad.html, 2023/06/18 参照.

第7章 画像情報に基づく腐食鋼矢板における表面状態の非接触検出

7.1. 腐食鋼矢板の可視画像におけるテクスチャ特徴の検出

7.1.1. 腐食鋼矢板の表面状態の検出

維持管理の観点では、施設管理者の多くは目視調査によりその実態を把握してきた¹⁾。目視調査の結果、より詳細な調査が必要な場合では板厚測定が行われている。鋼矢板は設計上、腐食による減厚を見込んだ腐食代を含む板厚により評価される。しかし、長大な延長を有する水路の管理において、目視による判断と接触型かつ点的な板厚測定の実施は、物理的かつ時間的な制約を受けやすいと考えられる。そこで、画像データを取り入れることで、非破壊かつ非接触の計測や空間的広がりを持つ面的な計測が可能となる。赤外線計測による熱画像では鋼矢板の板厚に関連した奥行方向の情報の評価、可視画像では鋼矢板の表面に顕在する腐食状況の評価に用いることを検討している。鋼矢板表面における腐食や孔食による変質を可視画像におけるテクスチャとして捉えることが、材料の劣化状況の評価に有用と考えられ、金属の腐食を対象とした事例はこれまでも報告されている²⁾⁴⁾。なおテクスチャとは、画像解析分野において要素がある規則に従い配列されてできる繰り返しパターンを意味し、その解析的検討は可視画像を構成する画素群の空間的特徴量を抽出することである⁵⁾。

本項において、腐食鋼矢板のテクスチャは解析方向により異なる特徴を有すると考え、空間的異方性に着目して検討を行った。本稿における解析としては、腐食状況の異なる鋼矢板の表面画像に対して、空間分布の統計解析手法のひとつである同時生起行列（GLCM；Gray Level Co-occurrence Matrix）を用いたテクスチャ解析を行った。解析方向として鋼矢板の長辺方向と短辺方向を設定し、各方向の濃淡配列における直線性と均質性に関する特徴量を用いて評価した。可視画像における空間的異方性を考慮し、腐食のない新設鋼矢板および腐食状況の異なる腐食鋼矢板のテクスチャ特徴の相違を明らかにした結果について報告する。

7.1.2. 計測方法

撮影は、2019年5月31日に、茨城県つくば市の農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究部門の敷地内にて実施した。撮影方法は、UAV（Matrice 210, DJI社製）に可視光カメラ（Zenmuse Z30, DJI社製）を搭載し、地面に設置した鋼矢板に対して上空から撮影を行った。可視光カメラの概要として、センサはCMOS 1/2.8、絞り値はF1.6～F4.7、電子シャッタースピードは1/6,000～1/30秒である。撮影画像の画像サイズは1,920画素×1,080画素である。鋼矢板は軽量鋼矢板（LSP-3D）で、鋼材はSS400である。撮影の状況を図7-1に示す。撮影対象は新設鋼矢板および農業用排水路より引き抜かれた既設鋼矢板である。既設鋼矢板の施工時期は1977年である。撮影条件として、カメラの撮影角度を水平方向より鉛直下向きに90度、飛行高度を5.0m、光学ズームを6.0倍とした。鋼矢板に対して正面から画像を取得した。本撮影条件で取得した画像のデジタル寸法は、1 pixelあたり約0.5 mm

を表している。取得した画像については、画像の上下方向が鋼矢板の長辺方向、左右方向が短辺方向である。画像上側が鋼矢板供用時における天端の方向、下側が土中へ埋設されていた方向である。

画像解析に用いた供試画像を図 7-2 に示す。供試画像は UAV による取得画像における 512 画素×512 画素の領域とし、画像中央がウェブ中央となるように抽出した。各供試画像の上側には鋼矢板断面図を示す。なお、各供試画像の解析面は断面図の上側の面である。Case 1 は非腐食の新設鋼矢板を示す。Case 2 は線状に分布する腐食を示す。鋼矢板長辺方向に対して腐食が線状に分布する様子が確認できる。これは腐食の初期段階で発生するものと考えられる。Case 3 は凹凸状に分布する腐食を示す。粗い質感の腐食生成物が画像一面に分布している。Case 4 は腐食による断面減少の状態を示す。画像の中央に断面減少部分が位置し、周辺と比較して腐食による剥離が確認できる。Case 5 は腐食による開孔の状態を示す。画像の中央付近に欠損部分が存在し、その周辺には腐食による変色が確認できる。

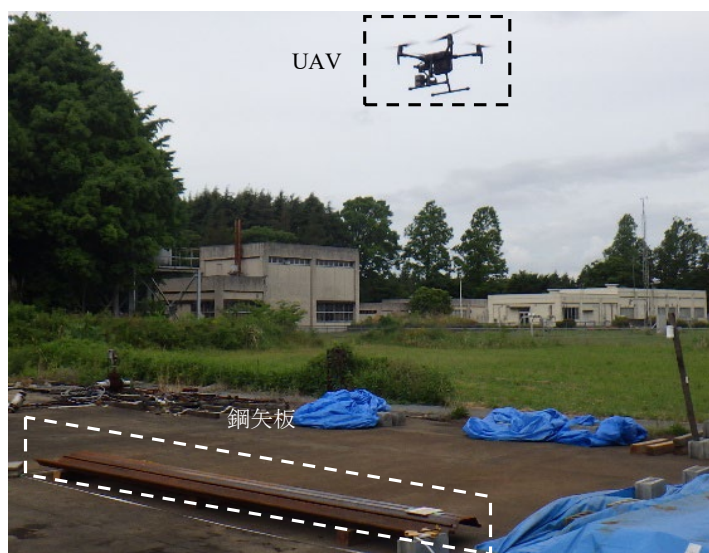


図 7-1 引き抜き後の既設鋼矢板の撮影状況

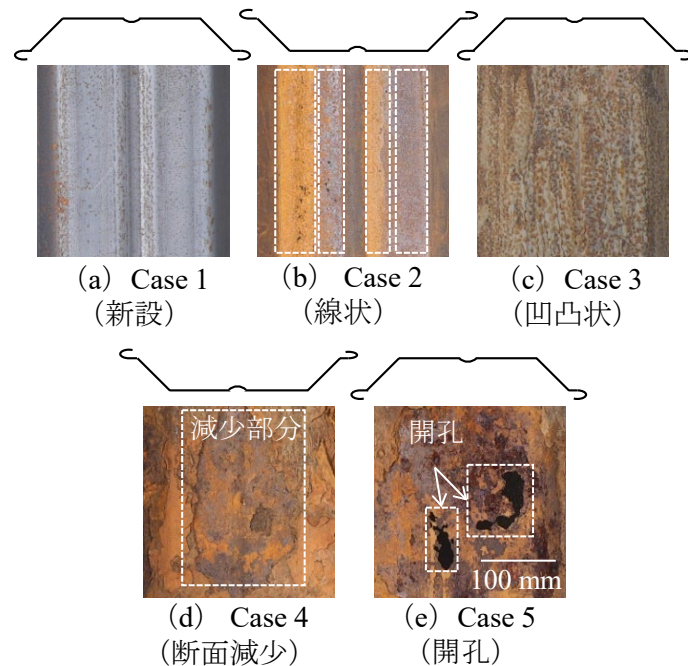


図 7-2 解析画像（可視画像）

7.1.3. 解析方法

(1) 色空間変換

RGB (Red, Green, Blue) カラー画像で用いられる RGB 値は、ある反射光に対して等色を行うために、赤、緑および青の原色光の強さを調整した割合のことである⁶⁾。そのため、同一の色であっても明るさが異なると RGB 値も変化する。明るさの影響を抑えた特定の色領域において画像の評価を行うために、RGB 空間から HSI (Hue, Saturation, Intensity) 空間モデルのひとつである 6 角錐モデルの HSV (Hue, Saturation, Value) 空間へと色空間変換を行った。HSV 空間は色相 (Hue)、彩度 (Saturation) および明度 (Value) で構成される。色相は色の違い、彩度は色の鮮やかさ、明度は色の明るさを示す。明るさの影響は明度に集中することから、色相および彩度では本来の色に近い情報を含むとされる。腐食の解析において、HSI 空間を用いる事例が報告されている^{2),4)}。本解析においては、彩度を評価指標として用いた。なお、本来、色相の範囲は $[0, 2\pi]$ 、彩度および明度の範囲は $[0, 1]$ であるが、本解析ではデータ処理において 8 bit 符号なし整数で表したため、色相の範囲は $[0, 179]$ 、彩度および明度の範囲は $[0, 255]$ となる。ゆえに、評価指標の彩度は、 $[0, 255]$ の 256 階調のグレースケールとなる。図 7-3 に、彩度で表示した供試画像を示す（各供試画像の上側に鋼矢板断面図を示す）。

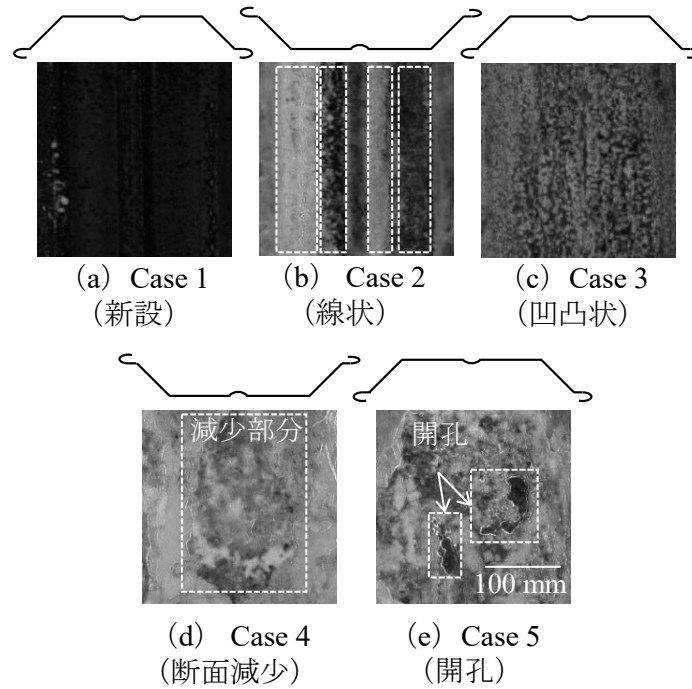


図 7-3 解析画像（彩度を抽出）

(2) 同時生起行列によるテクスチャ解析

テクスチャ解析では、画像の空間パターンを定量化することでテクスチャの特徴を抽出する。本稿では、テクスチャの統計的特徴量を求めるために同時生起行列を用いた^{7),8)}。

同時生起行列は、画像内におけるある一定の位置関係に存在する 2 点の濃淡の特徴に関する統計量を求める手法である。画像の濃淡 i の点から距離 d (pixel)、角度 θ (rad) とする相対位置 $\delta = (d, \theta)$ の点の濃淡が j である確率 $P_{\delta}(i, j)$ を求め、それを行列の (i, j) 成分とする。2 点の位置関係については点対称の関係も同一とみなし、同時生起行列は対称行列となる。濃淡の相対位置を図 7-4 に示す。 d を画素対間距離、 θ を解析方向と呼ぶ。解析条件は、 d の範囲を $[1, 100]$ 、 θ を $\theta=0, \pi/2$ とした。供試画像のデジタル寸法は 1 pixel あたり約 0.5 mm であるため、画素対間距離は 0.5 mm から 50 mm の範囲で解析した。

同時生起行列を用いて算出する特徴量は、濃淡の配列に基づく画像の性質を表す。本稿で用いた特徴量の式を式 (7-1) ～式 (7-6) に示す^{7),8)}。

$$\text{Correlation} = \left(\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} ijP_{\delta}(i, j) - \mu_x\mu_y \right) / \sigma_x\sigma_y \quad (7-1)$$

$$ASM = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} \{P_{\delta}(i, j)\}^2 \quad (7-2)$$

$$\mu_x = \sum_{i=0}^{n-1} i \sum_{j=0}^{n-1} P_{\delta}(i, j) \quad (7-3)$$

$$\mu_y = \sum_{j=0}^{n-1} j \sum_{i=0}^{n-1} P_{\delta}(i, j) \quad (7-4)$$

$$\sigma_x^2 = \sum_{i=0}^{n-1} (i - \mu_x)^2 \sum_{j=0}^{n-1} P_{\delta}(i, j) \quad (7-5)$$

$$\sigma_y^2 = \sum_{j=0}^{n-1} (j - \mu_y)^2 \sum_{i=0}^{n-1} P_{\delta}(i, j) \quad (7-6)$$

ここで、 μ_x 、 μ_y は平均値を示し、 σ_x^2 、 σ_y^2 は分散を示す。 n は濃淡レベル数を示し、本研究では $n = 256$ である。

Correlation は濃淡の組における直線的な相関関係を表す^{7),9)}。ある方向に対して値が増大する場合、その方向において同等の濃淡が直線的に分布する傾向を示す。本特徴量は、濃淡配列の直線性からテクスチャの方向性を評価する。**ASM (Angular Second Moment)** はテクスチャの均質性を表す^{7),9)}。同時生起行列の要素が少数で構成され、集中して分布する画像ほど、評価値が増加し、均質性が高いことを示す。上記の特徴量を用いて鋼矢板表面画像におけるテクスチャ特徴の定量評価を試みた。

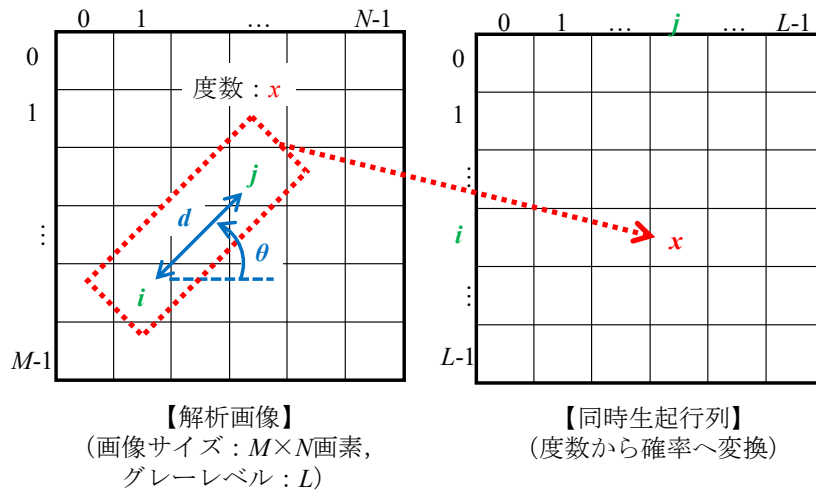


図 7-4 同時生起行列の概要

(3) 解析方向に応じたテクスチャ特徴の検出

テクスチャ解析における解析方向について説明する。図 7-5 に供試画像 Case 2 と各方向における彩度を示す。図 7-5 (a) の画像において矢印が示す長辺方向を $\theta=\pi/2$ 方向、実線矢印が示す短辺方向を $\theta=0$ 方向とする。図 7-5 (b) の方向に基づいて、図 7-5 (c) で画像の 256 列目（長辺方向）と 256 行目（短辺方向）の値における彩度を示す。方向は、それぞれ実線矢印の左から右向きと点線矢印の上から下向きである。腐食が分布している長辺方向の彩度と比較して短辺方向の彩度は変動が大きく、方向による相違が確認できる。同時生起行列を用いて濃淡配列を評価する際に、長辺方向と短辺方向に対して検討を行った。

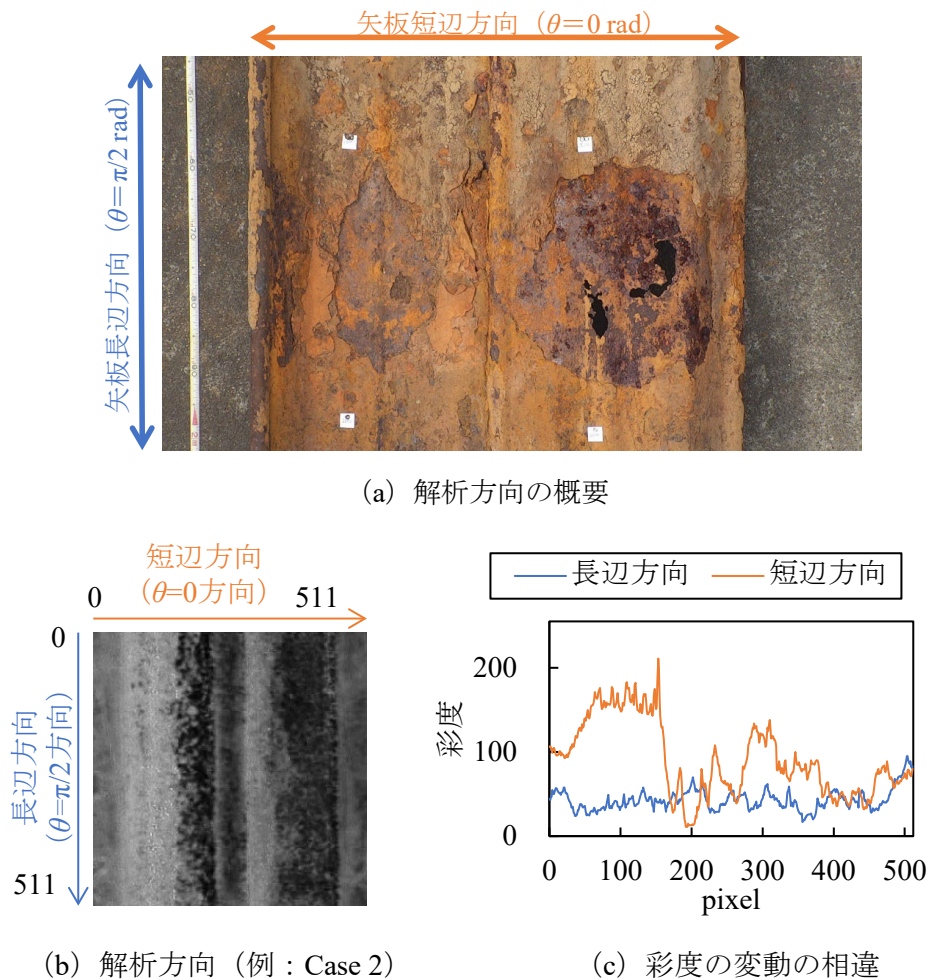


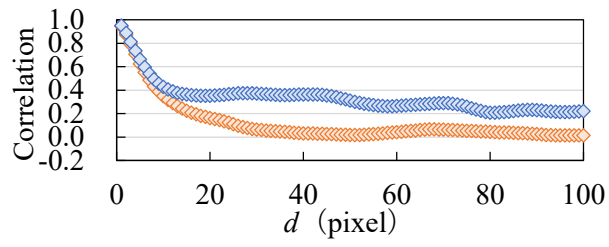
図 7-5 解析方向による彩度の変動の相違

7.1.4. 結果および考察

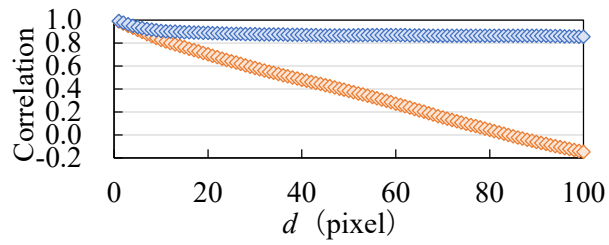
(1) テクスチャの方向性の評価

Correlation を用いて、腐食状況の異なる鋼矢板の表面画像におけるテクスチャの方向性について検討する。図 7-6 は、Case 1 から Case 5 における画素間の距離 d と Correlation の関係を示す。各供試画像において長辺方向と短辺方向の Correlation を比較した。いずれのケースも、距離 d の増加に伴い Correlation が低下する傾向および短辺方向と比較して長辺方向の Correlation が高い値を示す傾向が確認された。特に、Case 1（新設）では、鋼矢板におけるウェブとフランジの境界やウェブ中央における凹部が鋼矢板の長辺方向に位置することにより、同方向において直線的な濃淡配列のテクスチャとなり、図 7-6 (a) のように短辺方向と比較して長辺方向の Correlation が高い値を示すと考えられる。Case 2（線状）では、図 7-6 (b) より長辺方向の Correlation が 0.85 以上であり、他ケースと比較して最も相関が高いことが確認された。

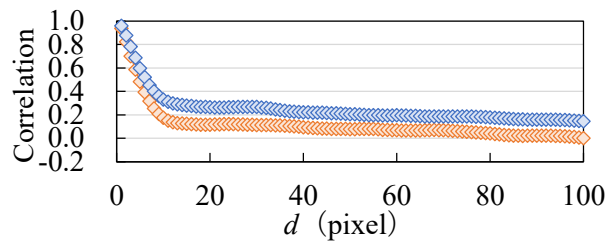
以上より、いずれのケースも短辺方向と比較して長辺方向において濃淡配列の直線性が高いことが確認された。すなわち、鋼矢板の長辺方向に直線的な濃淡配列によるテクスチャの方向性を有することが示唆されるものと考えられる。



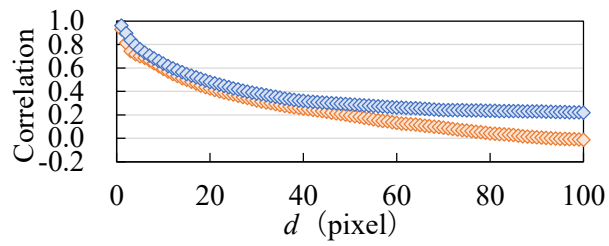
(a) Case 1 (新設)



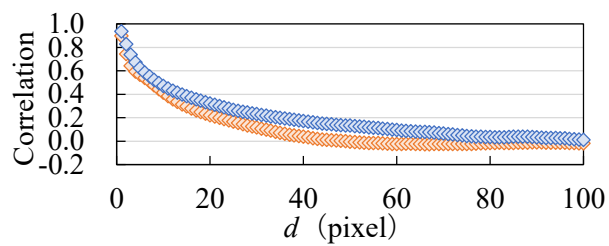
(b) Case 2 (線状)



(c) Case 3 (凹凸状)



(d) Case 4 (断面減少)



(e) Case 5 (開孔)

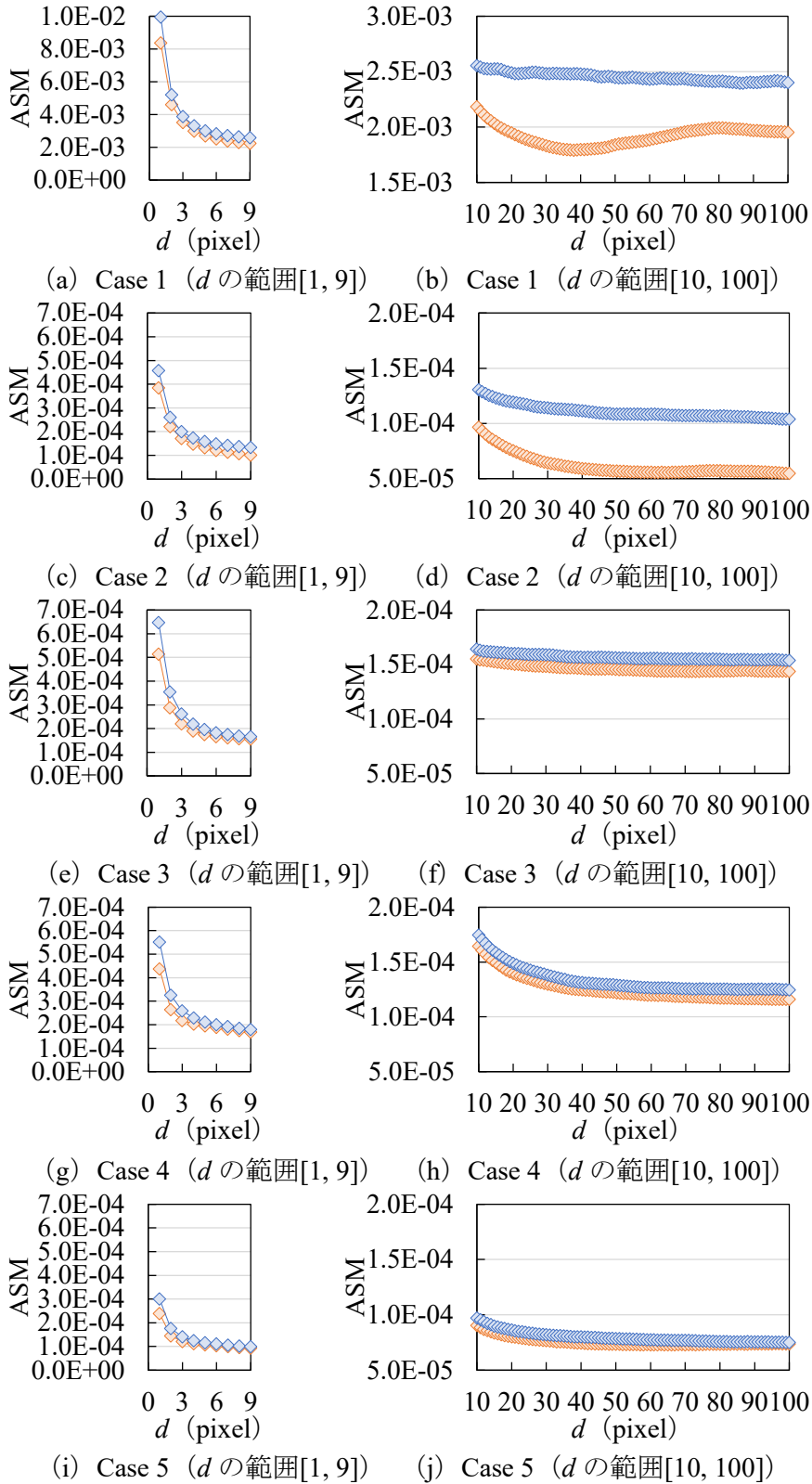
* 青：長辺方向，オレンジ：短辺方向を示す。
 図 7-6 画素間の距離と Correlation 指標の関係

(2) テクスチャの均質性の評価

ASMによりテクスチャの均質性について検討する。図7-7にCase1からCase5における画素間の距離 d とASMの関係を示す。図7-7では各ケースにおいて、 d の範囲を[1,9]と[10,100]でASMのスケールを変更してグラフを表示した。各ケースにおいて d の増加に伴いASMが低下する傾向が確認された。解析方向によるASMを比較した結果、いずれのケースも、短辺方向と比較して長辺方向のASMが高い値を示す傾向が確認された。

Case1(新設)のASMは、図7-7より他ケースと比較して最も高い値を示した。新設鋼矢板の均質性は腐食鋼矢板と比較して非常に高いといえる。解析方向による相違に着目すると、図7-7(a),(b)より短辺方向と比較して長辺方向におけるASMは高い値を示した。均質性は長辺方向においてより高いことが確認された。ウェブとフランジの境界やウェブ中央における凹部などの形状特徴が鋼矢板の長辺方向に位置することから、短辺方向と比較して長辺方向の同時生起行列ではより少ない種類の濃淡が集中して分布したと考えられる。Case2(線状)では、図7-7より同じく腐食鋼矢板であるCase3からCase5と比較すると、特に、 d の範囲が[10,100]において長辺方向と短辺方向のASMの相違が最も大きいことが確認された。Case2では、Case1と比較して長辺方向におけるCorrelationは高くなるが、ASMは低くなる結果となった。Case2はCase1と比較して長辺方向に直線的な濃淡配列となるが、異なる濃淡の直線が複数存在する。画像を構成する濃淡の種類が増加し、均質性は低くなったと考えられる。Case3(凹凸状)について、図7-7より同じく腐食鋼矢板であるCase2,Case4およびCase5と比較するとASMが全体的に高い値を示し、 d が[10,100]の範囲においては変動が比較的平坦で減少量が小さいことが確認された。Case4(断面減少)では、 $d=100$ で、特にCase3と比較するとASMの減少量がより大きいことが確認された。Case3とCase4では腐食の種類や程度は異なるが、Case4では一部分の断面減少によるテクスチャの変動がASMの減少量の大きさに影響していると考えられる。Case5(開孔)では、図7-7よりCase1からCase4と比較すると、長辺方向のASMは任意の d で最も低い値を示すことが確認された。Case5は開孔部分やその周辺の腐食による変色の影響で、他ケースと比較して濃淡の種類が増加したことにより、均質性が低くなると考えられる。

以上より、Case1の新設鋼矢板はCase2からCase5の腐食鋼矢板と比較してASMが高い値を示すことが確認された。このことから、テクスチャの均質性により、新設鋼矢板と腐食鋼矢板を分類できると考えられる。Case2からCase5の腐食鋼矢板における比較では、腐食の初期段階であるCase2(線状の腐食)において、長辺方向と短辺方向のASMの相違が最も大きいことが確認された。このことから、腐食の初期段階に発生する線状の腐食の特徴を、長辺方向と短辺方向における均質性の観点から捉えることで、より腐食が進行した状態と分類できる可能性が示唆された。最も腐食が進行しているCase5(開孔)では、均質性が最も低いことにより他の腐食状態と分類できると考えられる。初期段階の腐食と極端な腐食の間における腐食状態の評価が今後の検討課題である。



* 青：長辺方向，オレンジ：短辺方向を示す。

図 7-7 画素間の距離と ASM 指標の関係

7.1.5. テクスチャ特徴の検出のまとめ

実環境において腐食した鋼矢板を対象に，腐食状況の異なる表面状態を定量評価するために，可視画像の彩度の色領域に対して同時生起行列を用いたテクスチャ解析を行った．評価指標として，テクスチャの方向性を示す **Correlation** と均質性を示す **ASM** を用いた．解析方向の比較として，画像中の鋼矢板長辺方向 ($\theta=\pi/2$ 方向) と短辺方向 ($\theta=0$ 方向) の2方向における検討を行った．検討結果を以下に列挙する．

- (1) **Correlation** より，鋼矢板の長辺方向において，直線的な濃淡配列によるテクスチャの方向性を有する傾向が確認された．
- (2) **ASM** より，新設鋼矢板 (**Case 1**) は腐食鋼矢板 (**Case 2**～**Case 5**) と比較して均質性が高くなることが確認された．
- (3) **ASM** より，孔食による極端な腐食が存在する **Case 5** (開孔) では，供試画像において均質性が最も低くなる結果となった．

7.2. 可視・熱画像を組み合わせた既設鋼矢板護岸における腐食領域の自動検出

7.2.1. 腐食領域の自動検出の概説

鋼矢板護岸は、大気、水および土を鉛直方向に隔てるように建設されることから、部材あたりに異種の腐食が生じる。農業用排水路で用いられる鋼矢板護岸の場合、営農や降雨による水路内の水位変動が生じることで干満帯に腐食が集中するとされる。干満帯では腐食の影響で板厚の減少が激しくなる。腐食領域の特定および分類は既設構造部材における腐食の診断精度を向上させるうえで不可欠である。本研究では、デジタル画像を用いて、既設鋼矢板護岸における腐食領域の自動検出を試みている。解析的検討では、可視画像と熱画像を重ね合わせ、スーパーピクセル処理、主成分分析およびk-means法によるクラスタリングを適用する。本手法を第6章6.3節での赤外線計測で得られる熱画像による板厚の非接触評価と組み合わせることで、既設鋼矢板護岸の腐食領域ごとの板厚評価が可能になることが期待される。

7.2.2. 計測方法

農業用排水路における腐食が顕在化した既設鋼矢板護岸の可視画像および熱画像を取得した。デジタルカメラはDSC-WX800 (Sony)、赤外線サーモグラフィカメラはR300SR (日本アビオニクス) を使用した。図7-8に計測状況を示す。可視画像のサイズは4,896×3,672 pixel、熱画像のサイズは320×240 pixelとした。



図 7-8 計測状況

7.2.3. 解析方法

画像解析による腐食領域の自動検出の解析フローを図7-9に示す。可視画像の色情報および熱画像の温度情報を組み合わせた解析のために、両画像の重ね合わせを適用する。可視画像と熱画像に対してCannyのエッジ検出を行い、熱画像のエッジ画像をテンプレートと

したテンプレートマッチングにより最適な位置を算出する。特定位置において色情報と温度情報を与えることが可能となる。なお、熱画像の撮影範囲と可視画像の撮影範囲の一部の大きさを同じにするために熱画像のリサイズを行う。熱画像のリサイズの概要を図 7-10、マッチングの概要を図 7-11 に示す。次に、可視画像の HSV 空間の色情報に対してスーパーピクセル分割¹⁰⁾を行う。スーパーピクセル分割では、色情報の類似しているピクセル群を小領域にまとめている。小領域ごとの RGB 色空間の Red, Blue, Green, HSV 色空間の Hue, Saturation, Value, La*b*色空間の L, a*, b*および熱画像による温度の 10 種類の情報を用いて、主成分分析で第 1~3 主成分を求める。寄与率の大きい 3 種類の主成分に対して k-means 法を用いて、類似の特徴となる領域に分類する。

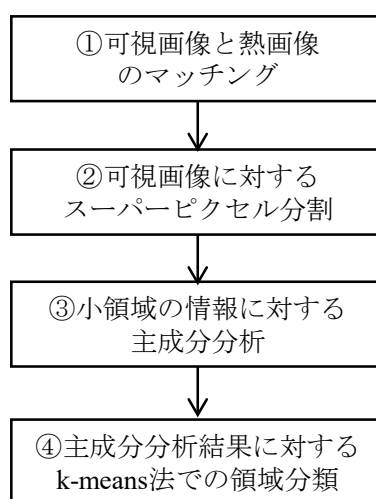


図 7-9 解析フロー

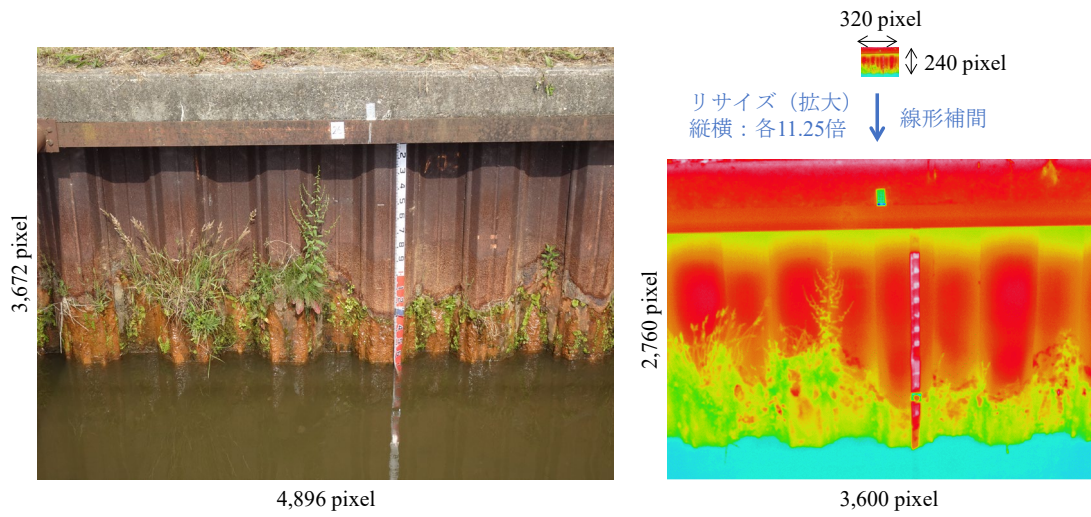
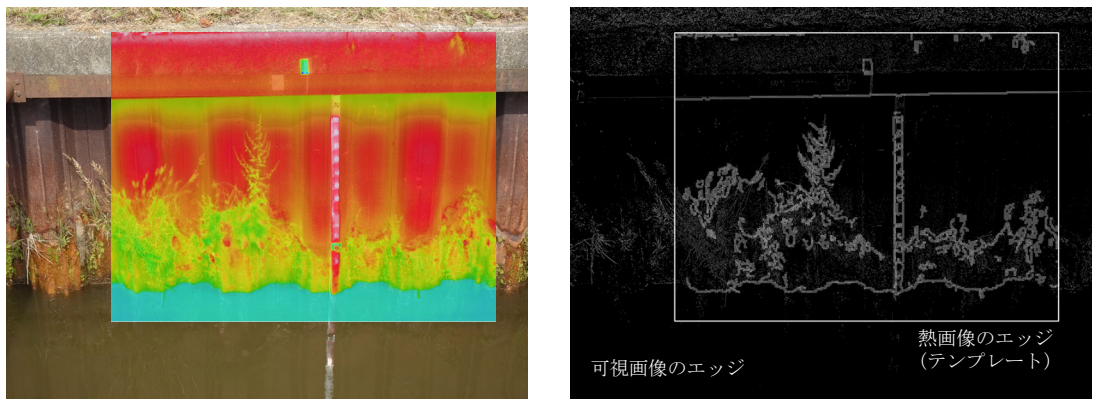


図 7-10 熱画像のリサイズの概要



(a) 可視画像と熱画像の位置関係

(b) エッジによるテンプレートマッチング

図 7-11 可視画像と熱画像のマッチングの概要

7.2.4. 結果および考察

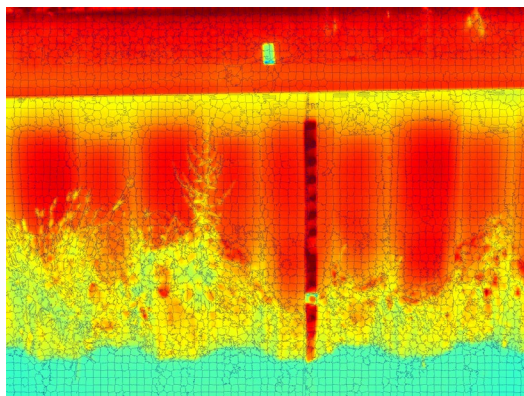
スーパーピクセルによる領域分割の結果を図 7-12 に示す。対象の形状に沿ってセル分割がなされていることが確認できる。なお、スーパーピクセル分割の解析は HSV 色空間に適用されているが、解析結果は RGB 画像上に表示している。各小領域における色情報・温度情報に対して主成分分析を行い、主成分を軸とする空間で k-means 法により分類した結果を図 7-13 に示す。これを画像表示した結果を図 7-14 に示す。分類は 8 種類としている。本結果から気中部と干満帯の異なる腐食領域が画像上で分類できることが確認された。鋼矢板以外の代表的なノイズである植生も分類することができた。今後は、検出された腐食領域ごとに、腐食量評価としての板厚推定につなげていくことを検討していく。



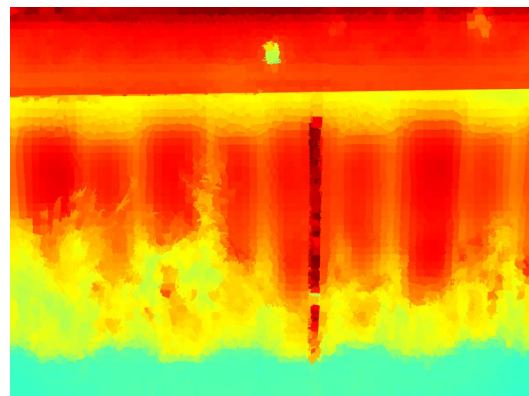
(a) 可視画像のスーパーピクセル分割



(b) スーパーピクセル内の平均値表示



(c) 熱画像のスーパーピクセル分割



(d) スーパーピクセル内の平均値表示

図 7-12 スーパーピクセル分割の結果

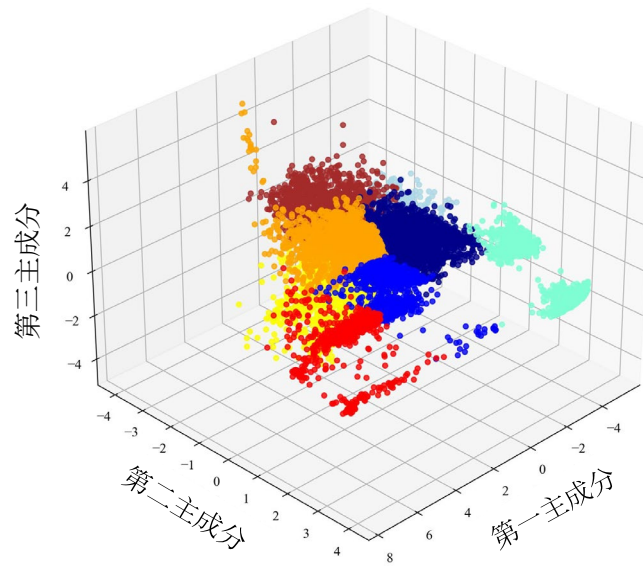


図 7-13 主成分分析の結果

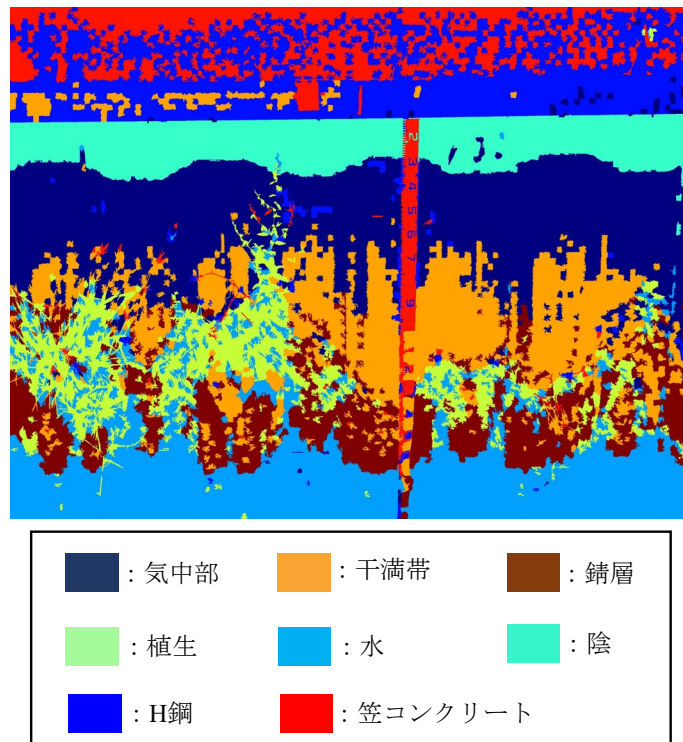


図 7-14 k-means 法によるクラスタリングの結果

7.2.5. 自動検出のまとめ

腐食の顕在化した鋼矢板護岸に対し、可視画像と熱画像を重ね合わせ、スーパーピクセル分割、主成分分析および k-means 法により、既設鋼構造部材における腐食域の自動検出が可能であることが確認された。今後は、本手法と第 6 章 6.3 節での赤外線計測で得られる熱画像による板厚の非接触評価と組み合わせることにより、現地の既設鋼矢板護岸における腐食領域に応じた板厚評価が可能になると考えられる。

引用文献

- 1) 土木学会 鋼構造委員会 鋼構造の残存耐荷性能評価と耐久性向上方策研究小委員会 (2009) : 腐食した鋼構造物の耐久性照査マニュアル (鋼構造シリーズ 18), 土木学会, pp. 3-10.
- 2) Choi, K.Y. and Kim, S.S. (2005): Morphological Analysis and Classification of Types of Surface Corrosion Damage by Digital Image Processing, Corrosion Science, 47, pp. 1-15.
- 3) Feliciano, F.F., Leta, F.R. and Mainier, F.B. (2015): Texture Digital Analysis for Corrosion Monitoring, Corrosion Science, 93, pp. 138-147.
- 4) Medeiros, F.N.S., Ramalho, G.L.B., Bento, M.P. and Medeiros, L.C.L. (2010): On the Evaluation of Texture and Color Features for Nondestructive Corrosion Detection, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2010, Article ID 817473.
- 5) 富田文明, 白井良明, 辻 三郎 (1978) : テクスチャの解析, 情報処理, 19(2), pp. 173-182.
- 6) 画像情報教育振興協会 (2015) : デジタル画像処理 [改訂新版], pp. 68-80.
- 7) Haralick, R.M., Shanmugam, K., and Dinstein, I.H. (1973): Textural Features for Image Classification, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-3(6), pp. 610-621.
- 8) 高木幹雄, 下田陽久 (2004) : 新編 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, pp. 1261-1267.
- 9) Baraldi, A. and Parmiggiani, F. (1995): An Investigation of the Textural Characteristics Associated with Gray Level Cooccurrence Matrix Statistical Parameters, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 33(2), pp. 293-304.
- 10) Achant, R., Shaji, A., Smith, K., Lucchi, A., Fua, P., and Süsstrunk, S. (2012): SLIC superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods, IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 34(11), pp. 2274-2282.

第 8 章 結論

本研究では、農業用鋼矢板護岸において極度の腐食により生じている諸問題に対する計測法を開発した。特に、鋼矢板の断面二次モーメントに影響する板厚に着目して検討を行った。腐食に伴い板厚が減少することは、梁部材である鋼矢板の曲げ剛性や断面係数に影響する断面二次モーメントの低下を起し、護岸の安定性や安全性の低下につながる。実際に既設護岸において、腐食代を超える板厚の減少、孔食の顕在化および座屈現象による倒壊が起きている。既設護岸の照査においては、実際の板厚に基づく曲げ応力度や頭部変位量が許容範囲を満たすかどうかの評価が行われる。状態評価のための板厚や変位量に関する指標を既設護岸から抽出することは不可欠である。このことに対して、画像解析を中心として非破壊・非接触検出法による実態把握を試みた。以下に、本研究で得られた結論を列挙する。

- (1) 既設排水路の鋼矢板護岸での気中部、水中部および土中部を隔てる一連の板厚のプロファイルを調査し、水位変動が見込まれる干満帯において板厚の減少が集中する傾向が確認された。離散的に計測された実測データを基に、地球統計学のクリギング手法により、面的に板厚減少の分布を再現することができた。
- (2) 鋼矢板供試体を用いた曲げ載荷試験から、腐食による板厚の減少や孔食を有する鋼矢板の力学特性が低下することが確認された。曲げ載荷過程において、AE の位置標と DIC 法による最大主ひずみの分布が孔食周辺に集中することが確認され、孔食の及ぼす影響を検出することができた。
- (3) 既設鋼矢板護岸における孔食に伴う座屈現象に対して、画像解析のハフ変換による検出モデルの構築と検証を行い、護岸の傾斜角度を検出できることが確認された。これは曲げ剛性の低下に伴うたわみ角や変形の検出が可能である。
- (4) 鋼矢板の温度を指標とした非接触の板厚評価に資する室内実験を実施した。熱伝導解析に基づき、板厚の異なる鋼材供試体に対する強制的な加熱と冷却による温度変動から、板厚が薄いほど鋼材供試体の温度変化量が大きいことが確認された。
- (5) 気象条件下に設置した鋼矢板供試体に対して、気象データに基づく熱収支解析から鋼矢板供試体の温度を推定することができた。赤外線計測により得られる熱画像での温度から板厚を非接触評価できることが確認された。
- (6) 可視画像と熱画像を組み合わせ、スーパーピクセル分割、主成分分析および k-means 法による一連の解析フローから、鋼矢板護岸における腐食領域の自動検出が可能となった。今後は、本手法と赤外線計測で得られる熱画像による板厚の非接触評価と組み合わせることにより、現地の既設鋼矢板護岸における腐食領域に応じた板厚評価が可能になると考えられる。
- (7) 今後は、第 5 章の座屈現象の検出や第 6・7 章の板厚および腐食領域の検出において、それらの検出結果に対するしきい値処理による判断が必要となる。検出手法における

画像を用いる利点として、数値データによる解析と蓄積を可能にすることであり、統計的手法による解析を取り入れることができる。ただ、本研究での検出手法は、梁の変形理論や伝熱現象といった物理現象を基礎としていることから、物理モデルによる検討が不可欠である。鋼矢板と地盤の連成現象を考慮した力学挙動や構造材料の腐食に対する物理モデルの構築と実験的・解析的検討を基本とした上で、画像データによる統計的解析を組み合わせ、検出結果に対するしきい値の判断を行うことを目指す。

謝辞

本博士論文は、たくさんの方々に支えていただいたことで、取りまとめることができました。ここに記して、心より感謝申し上げます。

新潟大学農学部の鈴木哲也教授には、学部4年生のころから現在に至るまでの約6年間のご指導をいただきました。大変お世話になりました。鈴木先生には研究のご指導だけでなく、悩みがちな私にとって日々の会話が精神的な支えとなりました。鈴木先生との会話から垣間見える研究の着眼点や発想はいつも新鮮で、非常に勉強になりました。研究室活動は大変なことが多かったですが、何かに打ち込めたり、成長を実感できたりする環境をいただけたことにはとても恵まれ、感謝しかございません。これまでに受けたあまりに大きな御恩に対して、どのように感謝の言葉で記せばいいのか難しいというのが正直なところです。ただ確かなことは、私にとって、鈴木先生と出会い、ご指導をいただいて一緒に研究をさせていただいたことは本当に幸せなことでした。心より感謝申し上げます。

博士後期課程在籍時には、寒地土木研究所寒地農業基盤研究グループ水利基盤チームに所属させていただきました。社会人経験が浅いにも関わらず、進学のご許可と多大なる支援をいただきました。佐々木悟グループ長、大久保天上席研究員、南雲 人主任研究員、石神 暁郎主任研究員に深く感謝申し上げます。入所と同時に進学するご機会をいただき、それに対して後押しをいただきました川口清美元グループ長に深く感謝申し上げます。未熟者の私に挑戦させていただく環境を整えていただき、そして多大なるご協力をいただき誠にありがとうございました。

東京農工大学大学院農学研究院の島本由麻助教には、学部4年生のころから現在に至るまで研究室の先輩として多大な助けをいただきました。研究室での在籍期間は重なっていませんでしたが、お会いできることは限られていましたが、遠くにいながらもいつも支えていただいたこと、気にかけてくださったことは十分に伝わっておりました。私がうまくいかず、島本先生にご迷惑をおかけしたことは多々あったかと思えます。島本先生の支えがなければ、ここまで来ることは間違いなく叶わなかったと思えます。深く感謝申し上げます。

本博士論文のご審査を引き受けていただきました、新潟大学農学部の長谷川英夫教授、工学部の佐伯彦彦教授、農学部の稲葉一成准教授、農学部の大橋慎太郎准教授には、大変貴重なご助言をいただきました。深く感謝申し上げます。

研究を実施する上での実験やサンプルのご提供に関しては、日鉄建材株式会社の阿部幸夫様、大高範寛様、原田剛男様、藤本雄充様のご協力に依るところが非常に大きいものでし

た。誠にありがとうございました。

研究室でともに過ごした先輩，同級生，後輩の皆様にはとても助けていただきました。一緒に実験や解析をしていただいたことはもちろん，日々の他愛ない会話が私の一番の支えでした。皆様がいなければ乗り越えることはできませんでした。誠にありがとうございました。

ここに記せなかった多くの方々にも支えていただきました。博士後期課程の際には，自分ひとりにできることはとても小さく，見えないところで多くの方々の支えや助けをいただいているからこそ，自分の今の環境があることを実感しました。これは社会人として博士後期課程に取り組んだからこそ気づけたことであり，この気づきを得られ本当に良かったと思います。このような周りの支えが当たり前だと思わず，感謝の心をもって自分のなすべきことを続けていこうと思います。最後に，いつも見守っていただいた両親に心からの感謝を申し上げます。