

道路政策の質の向上に資する技術研究開発
成 果 報 告 レ ポ ー ト
N o . 2023-4

研究テーマ

劣化イメージング技術と磁気・電気化学的技術の融合による
コンクリート橋梁の維持管理システムの開発

研究代表者：	香川大学教授	岡崎	慎一郎
共同研究者：	香川大学教授	石丸	伊知郎
	香川大学教授	吉田	秀典
	阿南高専准教授	角野	拓真
	コニカミノルタ PM	手嶋	克智

令 和 7 年 6 月

新道路技術会議

目次

研究概要（様式 3 を挿入）	1
第 1 章 はじめに	3
第 2 章 中赤外分光イメージングデバイス塩化物イオン計測計測手法の構築	4
2. 1 要素技術	4
2. 2 非冷却マイクロボロメータアレイセンサーによる中赤外パッシブ分光イメージング	5
2. 3 アレイセンサー放射光のマルチスリット遮光部からの反射による鮮明度劣化	5
2. 4 デバイスの試作	5
2. 5 コンクリート中の塩化物イオンのスペクトルの検討	6
2. 6 定性分析	11
2. 7 部分最小二乗法 PLS による相関解析	14
2. 8 定量分析	16
第 3 章 電気化学的手法によるコンクリート中の鋼材の腐食速度を定量化する技術開発	19
3. 1 はじめに	19
3. 2 真の分極抵抗評価手法の構築	19
3. 3 塩害劣化進行モデルの構築	23
3. 4 真の分極抵抗値の測定値と腐食量推定	29
3. 5 塩害劣化進行予測の検証および余寿命予測の事例	30
第 4 章 3 軸磁気計測装置による鋼材破断検知の現場適用性の検討	32
4. 1 はじめに	32
4. 2 使用する機器	32
4. 3 新たな着磁法の提案	34
4. 4 AI による破断検知アルゴリズムの開発	37
第 5 章 統合システムの構築	43
第 6 章 まとめ	44
6. 1 研究の総括	44
6. 2 本研究における特記事項	44
6. 3 今後の展望	45

【様式 3】

「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」（令和 6 年度採択）
研究概要

番号	研究課題名	研究代表者
No. 2023-4	劣化イメージング技術と磁気・電気化学的技術の融合によるコンクリート橋梁の維持管理システムの開発	香川大学 教授 岡崎慎一郎

持続可能で的確な橋梁の維持管理を実現するため、非破壊検査によりコンクリート表面の劣化イメージング技術と、磁気・電気化学的技術を融合させたシステムの構築を研究目的として、それぞれの要素技術の精度検証とこれらの技術をシステムとして統合させる研究開発。

1. 研究の背景や動機、目的および目標等

国内外で橋梁の老朽化は深刻であり、橋梁の崩壊や、崩壊に伴う 2 次被害が懸念されている。RC および PC 橋梁の内部の状態は、鋼材腐食が進行し腐食ひび割れが生じないと近接目視では把握できない。構造物表面の劣化因子の評価による劣化進行の評価や、内部鋼材の腐食や、腐食による破断の有無を容易に迅速に評価する手法が求められている。

1. 中赤外分光イメージング機によりコンクリートの表面の塩化物イオン濃度を定量化する手法
 2. 劣化懸念箇所付近における内部鋼材の腐食速度を分極抵抗法に基づき非破壊で評価する手法
 3. 磁気センシング技術に基づくデバイスで鋼材破断を検知する手法
- という 3 手法を融合した方法の適用性を検討するとともに、国内外の実装を目標とする。

RC や PC 橋梁等コンクリート構造物の劣化懸念箇所のイメージング技術、内部の鋼材の腐食速度評価、鋼材の破断の有無の検知といった 3 つの手法を融合させることで橋梁の高度な維持管理システムを開発する。

2. 研究内容

A 中赤外分光イメージングデバイス塩化物イオン計測計測手法の構築

香川大学は、独自に開発した赤外分光イメージングデバイスにより、室内でのコンクリート表面の塩化物イオン濃度のイメージングに成功した。本研究では屋外における本手法の適用性を検討する。

目標：①屋外用のデバイス試作、②屋外にあるコンクリート試験体の表面塩化物イオン濃度の精度確認を行う。コンクリートの表面塩化物イオン濃度を精度±10%で計測する。

B 電気化学的手法によるコンクリート中の鋼材の腐食速度を定量化する技術開発

真の分極抵抗を評価するため、香川大学が開発した電流分散範囲を特定できるアルゴリズムを基に、種々の条件を考慮できる手法を開発する。現場での適用性を評価する。

目標：①コンクリート中の含水率一様でない場合における真の分極抵抗の評価アルゴリズムの開発、②試作機の完成、③鋼材腐食が懸念される屋外にある試験体および実橋梁においての適用性の検討。目標は、室内試験における測定精度に対して、鉄筋腐食速度精度を±20%とする。

C 磁気センシングに基づく鋼材破断検知デバイスの高度化

コニカミノルタ社の研究グループが開発した磁気センシング技術は、スターラップの存在や、格子状の配筋により判定精度が低下する。そこで、現状の漏洩磁束法の着磁にパルス着磁法を適用し、破断の検知に最も適した機械学習アルゴリズムを選択する。

目標：鋼材腐食が生じ、破断が懸念される屋外にある試験体および実橋梁において、本手法の適用性を検討する。特に実構造物においては、スターラップ間隔が一様ではない等設計図とは大きく異なるケースが生じるため、①この影響を考慮できるアルゴリズムを構築する。目標は、かぶり15cm まで評価可能であり、スターラップが存在しても鋼材の破断の検知精度を90%とする。

D 統合システムの開発

目標：橋梁の点検結果に項目 A～C の内容を取り込み、劣化予測を行うシステムを構築する。

3. 研究成果

項目 A に関し、屋外用のデバイスを試作した。屋外にあるコンクリート試験体の表面塩化物イオン濃度を精度 $\pm 10\%$ で計測できた。

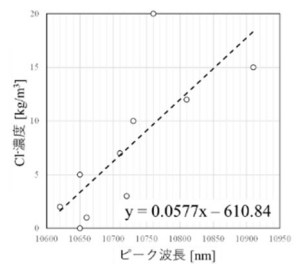
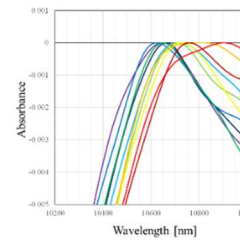


図 試作機

図 測定の様子

図 取得スペクトル

図 検量線

項目 B に関し、電流分散性状を考慮し、真の分極抵抗値を算定する手法を構築した。塩害劣化モデルを構築し、項目 A の結果と分極抵抗値の測定結果により、鋼材破断時期を推定できた。

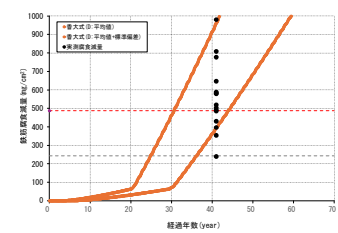
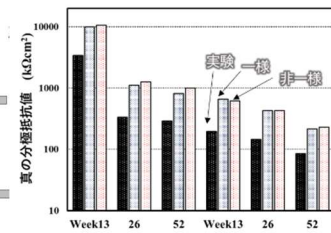
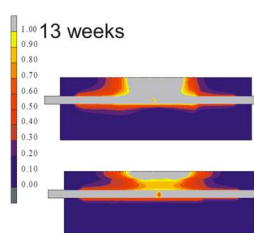


図 電流分散性状

図 真の分極抵抗の算定値

図 対象構造物

図 測定に基づく劣化予測

項目 C に関し、3 軸磁気計測装置に加え、着磁に開発したハルバツハ式磁石を用い、取得波形に AI を援用することで、スターラップが存在しても 15cm までのかぶり厚さまで検知可能となった。

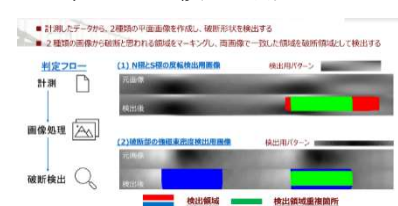
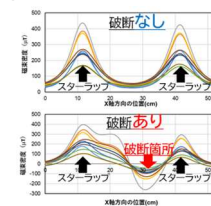
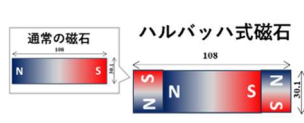


図 計測装置

図 開発した磁石

図 取得波形

図 AI による破断検知

項目 D に関し、民間企業と共同で橋梁台帳システムにデータを格納する枠組みを構築している。

4. 主な発表論文

手嶋, 岡崎ら：漏洩磁束法で取得された波形に基づく PC 鋼材破断に対する自動判別技術の構築, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, 1657-1662, 2024

角野, 岡崎ら：鋼材腐食の進行がコンクリート表面の変形状態に与える解析的検討, 第24回 コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム, Vol.24, 617-622, 2024

K.Teshima S. Okazaki et al. : Establishment of Technology to Automatically Determine the Presence or Absence of Steel Wires by Magnetic Data of Pre-tensioned Girder PC Steel Using Non-destructive Testing Device, RILEM Bookseries 144-152, 2024

岡崎ら：材料や曝露環境が塩化物イオン拡散モデルの予測結果に与える影響要因分析, 土木学会論文集, Vol.80, No.10, 2024

5. 今後の展望

国土交通省四国地方整備局, 地方自治体, 建設会社, 建設コンサルタント等と協力し, 現場での計測結果を蓄積しつつ, 国外への実装を試みる。

6. 道路政策の質の向上への寄与

本研究の成果は, 橋梁の安全性向上, 維持管理コストの削減, 道路予算の効率的活用、そして持続可能な道路インフラの実現に貢献し, 国民の安全・安心な生活を支える道路政策の質の向上に大きく寄与するものと考えられる。

7. ホームページ等

項目 C に関して, <https://bic.konicaminolta.jp/hihakai/> にて紹介する。

第1章 はじめに

国内外で橋梁の老朽化は深刻であり、橋梁の崩壊や、崩壊に伴う二次被害が懸念されている。RCおよびPC橋梁の内部の状態は、鋼材腐食が進行し腐食ひび割れが生じないと近接目視では把握できない。そこで、構造物表面の劣化因子の評価による劣化進行の評価や、内部鋼材の腐食や、腐食による破断の有無を容易に迅速に評価する手法が求められている。

そこで本研究では、図1.1の手法を提案する。本申請ではRCおよびPC橋梁を対象に、

- ① 香川大学で独自に開発した中赤外分光イメージングデバイスによりコンクリートの表面の塩化物イオン濃度および含水率分布を二次元イメージングし、劣化懸念箇所を抽出する手法
- ② 劣化懸念箇所付近における内部鋼材の腐食

速度を分極抵抗法に基づき、香川大学で開発した独自のアルゴリズムにより非破壊で評価する手法

- ③ コニカミノルタ社が独自に開発した磁気センシング技術に基づくデバイスで鋼材破断を検知する手法

以上の3手法を融合した方法の適用性を検討するとともに、国内外の実装を目標とする。

RCやPC橋梁等コンクリート構造物の劣化懸念箇所のイメージング技術、内部の鋼材の腐食速度評価、鋼材の破断の有無の検知といった3つの手法を融合させることで橋梁の高度な維持管理システムを開発し、国内外の実装を目標とする。

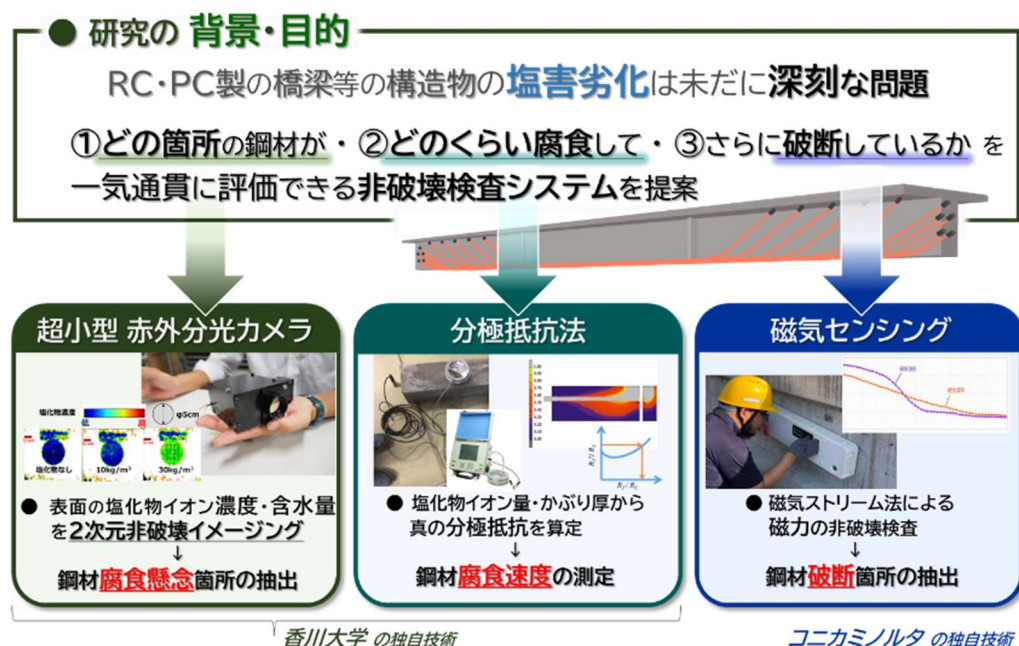


図 1.1 本研究の全体像

第2章 中赤外分光イメージングデバイス塩化物イオン計測計測手法の構築

2.1 要素技術

波長が $10\mu\text{m}$ (波数: $1,000\text{cm}^{-1}$) 近傍の中赤外分光法は, FTIR (フーリエ変換赤外分光光度計: Fourier Transform Infrared spectrometer) を用いた香川大学の研究室内での成分同定技術として用いられてきた. 図2.1に示す, 香川大学チームが考案した結像型2次元フーリエ分光法は, 機械振動に高い頑健性を有する准共通路型位相シフト干渉計である. そのため, 従来のFTIRに必須であった機械的な除震機構が不要であることから, 手のひらサイズの可搬型分光イメージング装置の開発に成功している.

さらに図2.2に示すように, 我々は輝点間の打ち消し合いによる干涉鮮明度の劣化を発見している. 物体面は輝点が無数に分布している光学モデルとして考える事ができるが, 各輝点はレンズによる回折現象により結像面上に於いてエアリーパターンと呼ばれる同心円状の明暗である干涉縞を生じる.

そこで, 結像面上の無数に存在するエアリーパターンを, いわゆるレイリーの基準と呼ばれる2つのエアリーディスクの組み合わせに分解して考える. レイリーの基準とは, 隣り合うエアリーディスクの中心と第一暗帯が互いに接する状態であり空間解像度の定義に用いられる. 例えば単一波長を光源にした場合について述べると, 位相可変フィルターにより位相差 π の光路長差を与えることにより, エアリーディスクの中心は明から暗へと変化する. しかし, 第一暗帯はその逆に暗から明へと, エアリーディスク中心とは位相が π ずれて干涉強度が変化する. そのため, 図2.2中A点に示すように, エアリーディスク中心が暗くなるのに反して, 第一暗環は明るくなることから干涉強度が面



図 2.1 結像型 2 次元フーリエ分光法

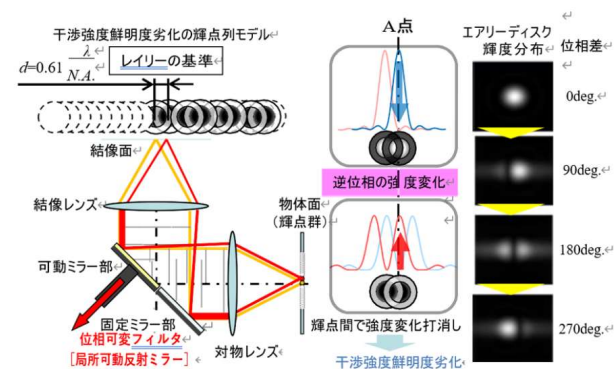


図2.2 干涉鮮明度の劣化

内で打ち消し合うことになる. これにより, 位相可変フィルターにより光路長差を付与しても, 計測面内では干涉強度変化は観察されず, 高い鮮明度のインターフェログラムを取得することはできない.

そこで, 図2.3に示すように, 共役面に開口部と遮光部を理論空間解像度(=画素ピッチ)で周期的に設けたマルチスリットを設置する事にした. これにより, 隣り合う輝点間の干涉強度の打ち消し合いを防止して, 計測面内でインターフェログラムを高い鮮明度で取得することに成功した. 本光学系では, 交換レンズにより物体像を一旦結像し, このいわゆる共役面に理論空間解像度の間隔で輝点を間引くマルチス

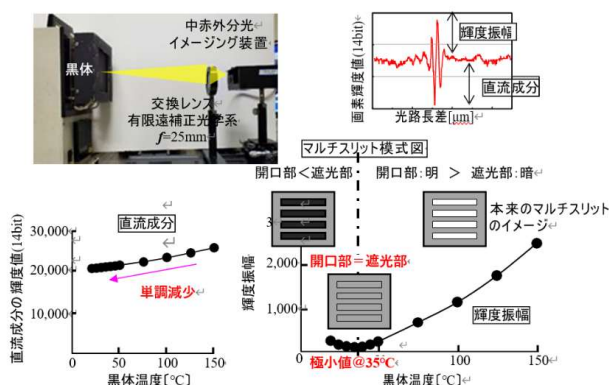


図2.3 マルチスリットによる効果

リットを設けることにした。これにより輝点間の打ち消し合いを防止して、図2.3右に示すように、テクスチャーの無い黒体表面においても高い鮮明度のインターフェログラムを取得することに成功してパッシブ分光の可能性を示した。

本研究では、当初は冷却装置による高感度化を目指していたが、実務に不向きであるため、以下の技術による研究遂行を行った。

2.2 非冷却マイクロボロメータアレイセンサーによる中赤外パッシブ分光イメージング

2次元で中赤外領域のパッシブ分光イメージングが可能であるFTIRは数少なく（メーカー：Bruker, 型式:HI90, メーカー：Telops, 型式:HyperCam）検出器には液体窒素冷却を必要とする超高感度で高価格（2千万円程度）のMCT（テルル化カドミウム水銀：Mercury Cadmium Telluride, HgCdTe）を用いている。これは、FTIRのマイケルソン干渉計においても輝点の打ち消し合いを生じるが、我々のマルチスリット法の発明に至っていないからである。そのため、2次元でインターフェログラムを取得すると干涉鮮明度が低くなってしまいう理由から、高感度な検出器に頼らざるを得ない結果に至っている。我々は、20万円程度で購入できる非冷却マイクロボロメータアレイセンサーによる、手のひらサイズの可搬型パッシブ中赤外分光イメージング装置により“その場分析”と言う新たな学術分野を創出する。

2.3 アレイセンサー放射光のマルチスリット遮光部からの反射による鮮明度劣化

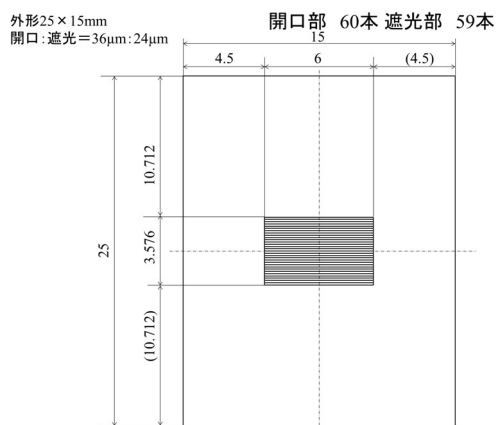
図2.3に示すように、測定対象に黒体を用いて温度を室温よりも高い条件から低くし、更に保冷剤も用いた。インターフェログラムの直流

成分は物体温度に比例して単調減少したが、交流成分である輝度振幅は室温程度（35°C）で極小値を持つ事を発見した。本来は、輝点の打ち消し合いを防止するためにマルチスリットの開口部が明るくて、遮光部が暗くなることを想定していた。しかし、室温程度（ $\approx 300\text{K} = 35^\circ\text{C}$ ）では開口部と遮光部が同等の輝度値になり輝点の打ち消し合いを防止できなかったのが理由である。この室温程度で鮮明度が劣化してしまう現象は、室温程度の皮膚やインフラ構造物パッシブ分光法により計測する“その場分析”を実現するには、極めて都合の悪い現象であり対策を講じる必要があった。遮光部が明るくなってしまうのは、アレイセンサーが裏面に設けられた電子回路により常に室温程度の温度（35°C）を維持している事が主たる要因だと考えた。また更に、結像面であるアレイセンサーとマルチスリットを設置している面が共役である事に着目した。つまり、手鏡で自分の顔を映して見るように、アレイセンサーの熱から生じる放射光が遮光部で反射して再度アレイセンサーに戻って結像する事で遮光部が明るくなったと考えられた。

2.4 デバイスの試作

（I）ステルスマルチスリットによる温度依存性の無い中赤外パッシブ分光イメージング図5に示すように3つの条件、①マルチスリット温度からの放射光防止、また母材のSiは赤外光を透過してしまうので②物体からの放射光の遮光、更に③カメラ温度からの放射光の遮光部からの反射防止を同時に満たさなくてはならない。①と②を同時に満たすためには、自由電子を有する例えば金を蒸着する事で反射率が大きくなるので①を、また放射率は小さくなるので②を満たすことができる。しかし、この反射率の高さが“諸刃の剣”であり、③を満たす事が出来なかったのが前述の問題であった。そこで、反射率が大きく放射率の小さな金を用いながらも、カメラ側の反射率だけを選択的に小さくできる構造的な反射防止膜のサブ波長構造（SWC：SubWave-length Structure Coating）を設ける事にした。本研究では、①②③の全ての光学（電磁波）条件を満たすマルチスリット（ステルスマルチスリット）を実現する事により、温度依存性の無い中赤外パッシブ分光イメージング装置を開発する。

図2.4に、今回試行錯誤を経て試作を行ったスリットを示す。本スリットを実装したデバイ



スリット寸法 (単位: mm)

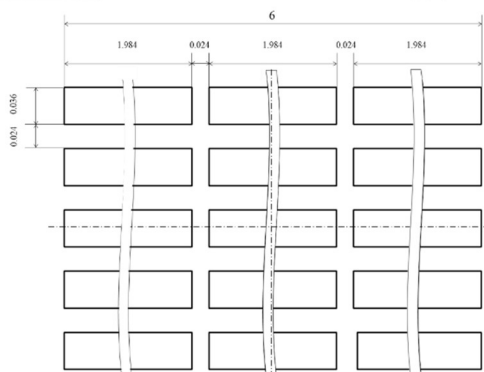


図2.4 マルチスリットによる効果

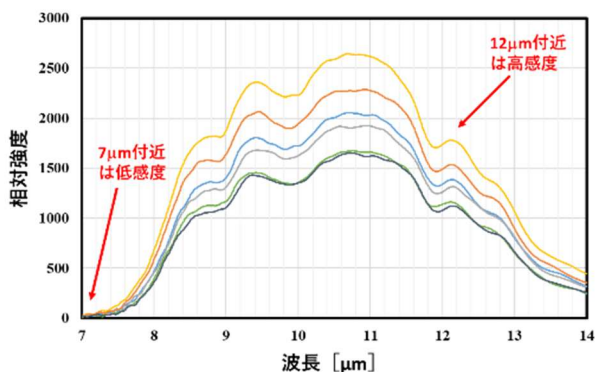


図2.5 ステルスマルチスリットによる結果

スにより得られた波形を図2.5に示す. 十分な感度で計測できていることを確認することができた.

2.5 コンクリート中の塩化物イオンのスペクトルの検討

(1) セメント供試体の作製

本研究では, コンクリート中の塩分濃度評価を最終的な目標としているが, 現時点では中赤外域における評価手法が確立されておらず. 粗骨材や細骨材を含むコンクリートでは計測結

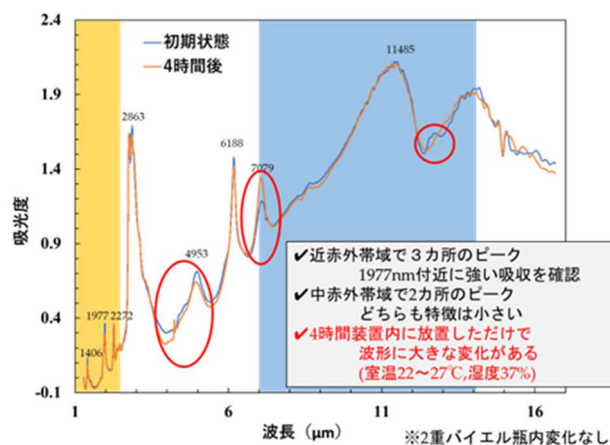


図2.6 フリーデル氏塩に関するFTIR計測の結果

果の解釈がより複雑になるため, 基礎研究の一環としてセメント供試体を対象に実験を行った. 以下, 水をW, セメントをC, 水セメント比をW/Cと表記する. 供試体の配合を表2.1に示す. 全ての供試体で, セメント密度は3.15 kg/m³, W/Cは50%である. 塩化物ナトリウム混入量は, 塩化ナトリウムのモル質量を58.5 g/mol, 塩化物イオンのモル質量を35.5 g/molとし, モル比が1:1であることから, 塩化物イオン混入量より算出した.

表2.1 試験体の配合

単位重さ (kg/m ³)		CL ⁻ (g)		NaCl (g)	
W	C	0	0.00	7	11.54
611.7	1223.3	1	1.65	10	16.48
単位体積 (L/m ³)		2	3.30	12	19.77
W	C	3	4.94	15	24.72
611.7	388.3	5	8.24	20	32.96



図2.7 打設時の風景



図2.8 養生, 保管の様子

作製手順としては、初めに配合設計を基に塩化ナトリウム水溶液を作製する。その後、セメントペーストを1Lの容積で用意し、ボウルの中で5分間練り混ぜを行う。練り混ぜが完了したセメントペーストは直径5 cm、高さ10 cmの円柱供試体型枠に打設し、ブリーディング防止のために5分おきに2回ずつ型枠内で攪拌を行う。打設時の風景を図2.7に示す。

養生条件としては、円柱供試体型枠にラップを被せて封緘状態にし、室温20℃の環境で10日間養生を行った。脱型後は供試体が空気中の二酸化炭素と反応し中性化が進行することを防ぐため、計測時まで密閉袋に入れて保管した。養生、保管の様子を図2.8に示す。

提案する分光器による塩害評価では供試体内部からの情報が重要となるため、切断面の計測を目的として、複数の供試体で石用切断器による切断を行った。切断は供試体中央を目安に、摩擦熱の影響を最小限に抑えるために流水を使用し、切断後に軽く表面の水を拭き取った。作製した供試体の表面と断面の様子を図2.9に示す。表面に、練り混ぜ時に溶け切らなかったセメント粒子の塊であったものの、特段測定に影響しないと推測されるため、問題は無いと判断しそのまま使用した。



図2.9 供試体の様子

表2.2 全計測データ

ALPHA II [FR]									
データ名	試験体名	計測対象	計測方法	出力条件	積算回数	平均点数	脱型後	自然乾燥	
FR_B1_S	B1	表面	Front Reflection	Reflectance	16回	5測点	3日	5時間	
FR_B3_S	B3	表面	Front Reflection	Reflectance	16回	20測点	162日	5時間	
FR_A1_S	A1	表面	Front Reflection	Reflectance	16回	20測点	4日	5時間	
FR_A2_S	A2	表面	Front Reflection	Reflectance	16回	20測点	4日	5時間	
FR_A3_S	A3	表面	Front Reflection	Reflectance	16回	20測点	5日	0時間	
FR_B1_C	B1	断面	Front Reflection	Reflectance	16回	15測点	9日	5時間	
FR_B3_C	B3	断面	Front Reflection	Reflectance	16回	20測点	162日	5時間	
FR_A1_C	A1	断面	Front Reflection	Reflectance	16回	20測点	4日	5時間	
ALPHA II [ATR]									
データ名	試験体名	計測対象	計測方法	出力条件	積算回数	平均点数	脱型後		
ATR_B2_P	B2	粉体	ATR	Absorbance	16回	15測点	155日		
ATR_A1_P	A1	粉体	ATR	Absorbance	16回	15測点	5日		
右丸分光器 [IS]									
データ名	試験体名	計測対象	計測方法	出力条件	積算回数	平均点数	脱型後	計測温度	備考
IS_B3_S	B3	表面	右丸分光器	Absorbance	4回	100x100	169日	約45℃	恒温恒湿槽50℃,60%,24時間
IS_A1_S	A1	表面	右丸分光器	Absorbance	4回	100x100	18日	約45℃	恒温恒湿槽50℃,60%,24時間
IS_A2_S	A2	表面	右丸分光器	Absorbance	4回	100x100	18日	約45℃	恒温恒湿槽50℃,60%,24時間
IS_A3_S	A3	表面	右丸分光器	Absorbance	4回	100x100	40日	約45℃	恒温恒湿槽50℃,60%,24時間
IS_B3_C	B3	断面	右丸分光器	Absorbance	4回	100x100	169日	約45℃	恒温恒湿槽50℃,60%,24時間
IS_A1_C	A1	断面	右丸分光器	Absorbance	4回	100x100	18日	約45℃	恒温恒湿槽50℃,60%,24時間
IS_A2_OS	A2	表面	右丸分光器	Absorbance	4回	100x100	18日	約45℃	ホットプレート60℃,5分間

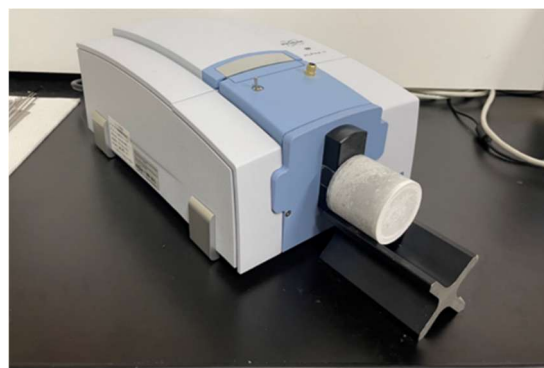
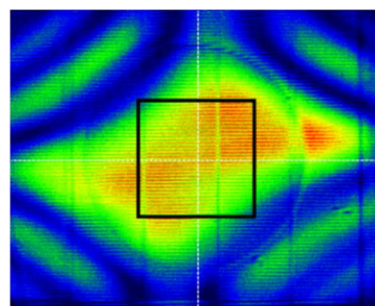


図2.10 正反射法での計測風景

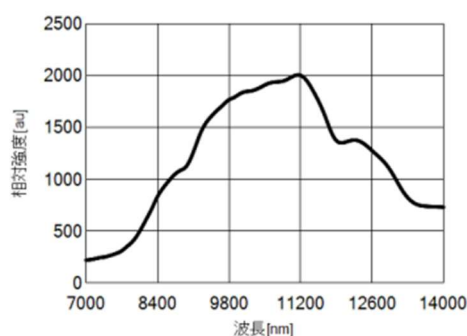
(2) 計測データ一覧

研究では、得られたデータの妥当性を保証するため、提案分光器に加えて、ALPHA II (FT-IR 分光計、図2.10)を用いた正反射法 (FR) と全反射測定法 (ATR) による計測を実施した。二種類の機器と三種類の計測手法を用いることで、提案分光器による計測結果の信頼性および、塩化物イオン混入量に伴うスペクトル変化傾向の再現性を確認する。なお、提案分光器では屋外にて計測を行った。

本研究における全ての計測データを表2.2に示す。A1, A2, A3とB1, B2, B3はそれぞれ別の時期に打設された供試体であり、一回の打設時に三つの型枠を用いて、三種類の供試体を作



(a) 振幅画像



(b) 相対強度スペクトル

図2.11 相対強度スペクトルの取得画面

製している。データ名は、左から「計測手法_供試体名_計測対象」の順で構成されており、計測対象において表面はS (Surface), 断面はC (Cross-section), 粉体はP (Powder), 計測方法において正反射法はFR (Front Reflection), 全反射測定法はATR (Attenuated Total Reflection), 提案分光器はIS (Ishimaru) と省略して記述する。

(3) 提案分光器による吸収スペクトル算出

a) 相対強度スペクトルの取得

日進機械社製のソフトウェアSpectro Viewerを使用して、提案分光器で計測されたインターフェログラムをフーリエ変換し、波長1 nmごとの相対強度データを取得する。データの取得画面を図2.11に示す。ソフトではデータを取得する範囲（黒枠）を指定することが可能であり、指定範囲の全画素における放射強度の平均が相対強度スペクトルとして算出される。

本研究では、全ての計測データにおいて指定範囲を中心から100×100 pixelに統一しており、振幅画像から感度の高い範囲を広く選択することで、安定したスペクトルの取得を目指した。

b) 黒体回帰モデルの作成

黒体計測データ（図2.12）より、指定温度における黒体の相対強度スペクトルを予測する回帰モデルを作成する。作成にはMicrosoft ExcelのLINESET 関数を使用し、二次の多項式 $y=ax^2+bx+c$ （相対強度 $=a \times \text{温度}^2 + b \times \text{温度} + c$ ）における係数を、単回帰の最小二乗法により算出した。この回帰式を全波長に対して作成することで、指定温度の相対強度スペクトルが取得可能となる。精度検証のために 45℃を除いてモデルを作成し、実測値との誤差率を計算したものが図2.13であり、全波長において誤差率がおよそ1%以下であることを確認した。

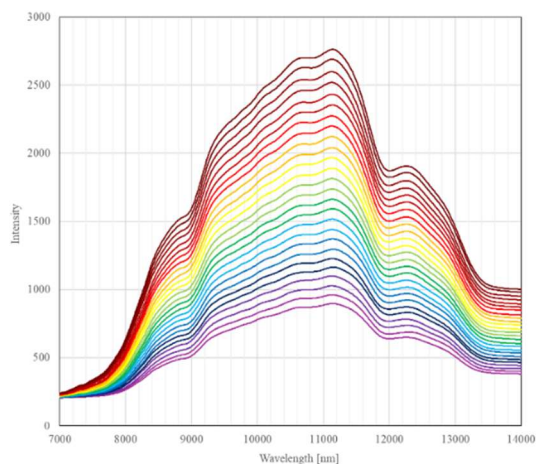


図2.12 黒体計測データ

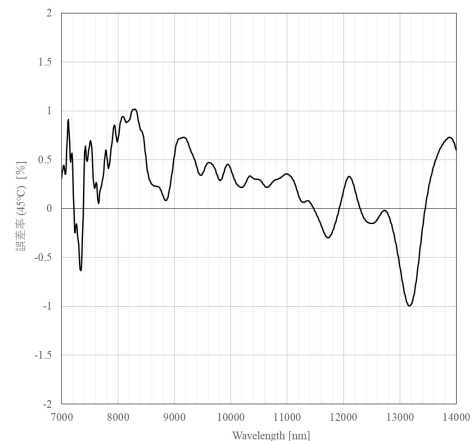


図2.13 45℃における予測誤差

c) 提案分光器での吸収スペクトルに関する算出方法 [IS]

提案分光器では、リファレンスとなる黒体から発せられた輻射熱の相対強度と、セメント供試体から発せられた輻射熱の相対強度から吸光度を求め、吸収スペクトルを取得する。ここで、黒体の相対強度を I_0 、供試体の相対強度を I とすると、吸光度 A は次式で表される。

$$A = -\log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

黒体と供試体の相対強度を図2.14に示し、吸収スペクトルを図2.15に示す。このとき、リファレンスとなる黒体の相対強度が常に供試体の相対強度よりも高くなるように、フィッティングと呼ばれる作業が行われる。これは黒体が完全放射体であることから、理論上どの物質よりも強い相対強度を示すためである。フィッティングにはMicrosoft Excelのソルバー機能を使用しており、波長8~14 μmの範囲において、黒体

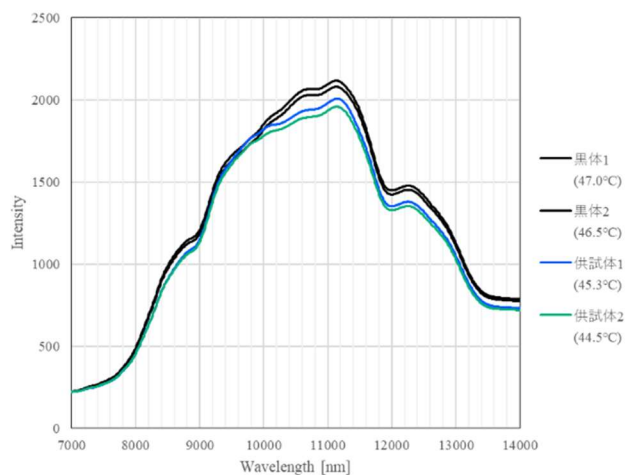


図2.14 黒体と供試体の相対強度

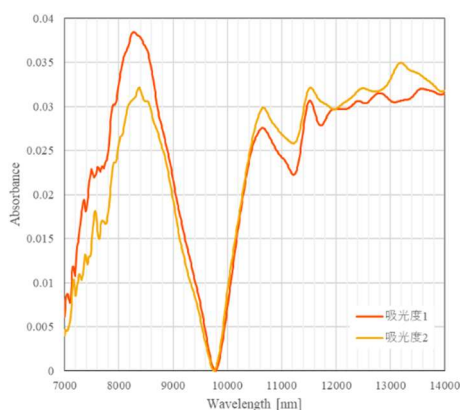


図2.15 吸収スペクトル

の相対強度—供試体の相対強度が0以上となる条件を満たす最小の黒体温度を、前項の回帰モデルにより逆算することで、各供試体の計測データに対応した黒体の相対強度スペクトルを算出している。

図2.14の相対強度スペクトルは、計測対象からの放射特性および提案分光器の感度特性として解釈することが可能であり、上式で除算することにより感度特性の項が取り除かれる。しかし、提案分光器の感度特性は計測対象の温度によって変化する性質があり、計測時の供試体温度を完全に統一させることは不可能であるため、各供試体に対して感度特性の最も近い黒体データをフィッティングすることで、計測温度のばらつきによる影響を補正している。

提案分光器はパッシブ分光法を用いることから、植数によって求められるスペクトルはアクティブ分光法の吸収スペクトルを上下反転させた波形になると考えられるが、図2.15におけるスペクトルの向きが他の計測手法と一致していたため、本研究では吸収スペクトルとして扱うこととした。この原因と妥当性については今後の研究で検証する必要がある。

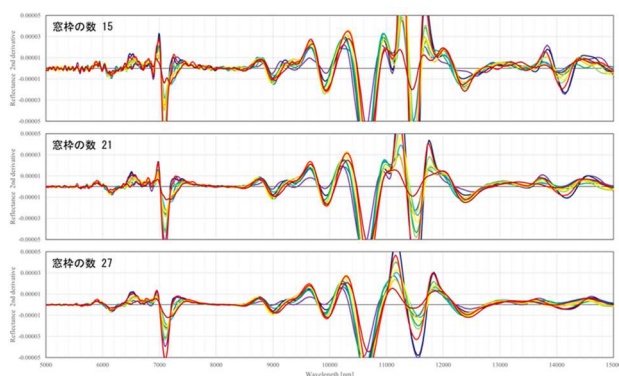


図2.16 二次微分スペクトルの変化
[窓枠の数15, 21, 27]

(4) 計測結果の比較検証

本章では、塩化物イオン混入量に伴うスペクトルの変化傾向を定性分析する前段階として、前章で説明した方法により取得されたスペクトルの比較検証を行う。具体的には、三種類の計測手法によるスペクトルの比較、既往研究のデータベースを用いたピークの同定、諸条件の比較である。これらの検証を行うことで、提案分光器による計測結果の信頼性を確認する。

a) 二次微分処理 [Savitzky-Golay法]

比較検証の際、元データだけでは得られる情報が限られるため、SG法 [Savitzky-Golay法]による二次微分処理を行う。SG法はスペクトル解析の前処理として一般的に用いられる手法であり、平滑化によるノイズの低減、微分処理によるベースライン補正とピークの分離が可能である。処理には解析ソフトVEKTOR DIREKTORを使用しており、窓枠の数と呼ばれる $(2m+1)$ のデータ点数を指定し、指定範囲のデータで近似された多項式によって平滑化と微分が行われる。このとき、多項式の次数と窓枠の数の条件は処理後のスペクトルを見て決定する必要があるため、ソフト内で少しずつ値を変えながら最適な条件を検討した。例として、正反射法による計測結果に対して多項式の次数2、窓枠の数15, 21, 27の条件でSG法を適用した結果を図2.16に示す。枠の数が大きくなるにしたがってノイズは低減されているが、同時に小さなピークが消滅していることが確認できる。これは平滑化の影響が強くなりすぎると元データにおけるピーク情報が失われるためであり、両方のバランスと、検討したいピークの幅を基に条件を決定する必要がある。以上より、ALPHAIIによる計測データに対しては窓枠の数21、提案分光器による計測データに対しては窓枠の数45を採用した。

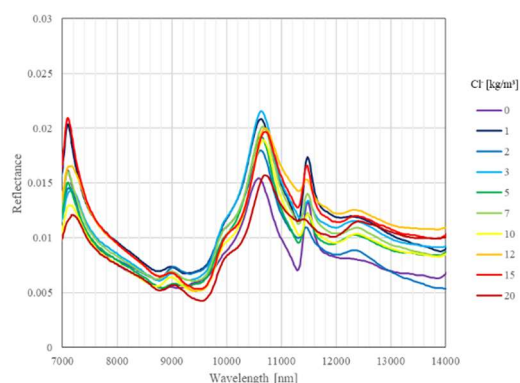


図2.17 正反射法による計測結果 [FR]

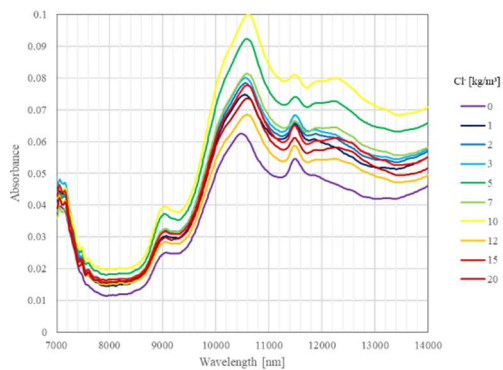


図2.18 全反射測定法による計測結果 [ATR]

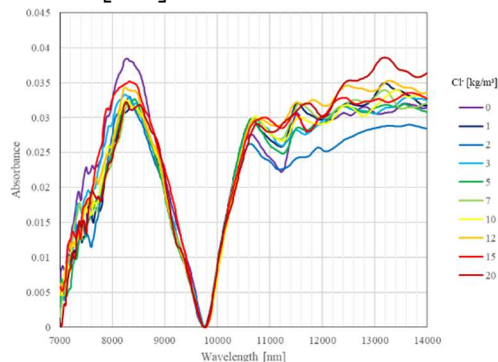


図2.19 提案分光器による計測結果 [IS]

b) スペクトルの概形比較

三種類の計測手法によるスペクトルを比較することで、提案分光器による計測の信頼性を確認する。正反射法による計測結果を図2.17、全反射測定法による計測結果を図2.18、提案分光器による計測結果を図2.19に示す。計測対象はすべて供試体A1の表面である。

以上に示した計測結果を、より比較に適した形にするためにデータの前処理を行う。計測手法ごとの比較検証では濃度条件による変化を検討対象としないため、全10種類の濃度条件におけるスペクトルを平均し、ランダムなノイズ成分を可能な限り低減させた。また、計測手法により縦軸の絶対値が異なるため、SNV処理によりスペクトルのスケールを統一させる。SNV処理は次式によって表され、各スペクトルの平均を0、標準偏差を1に変換している

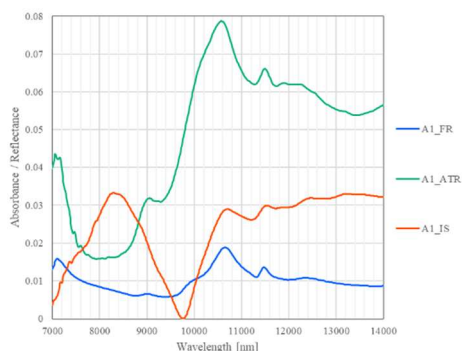


図2.20 スペクトルの比較 [平均]

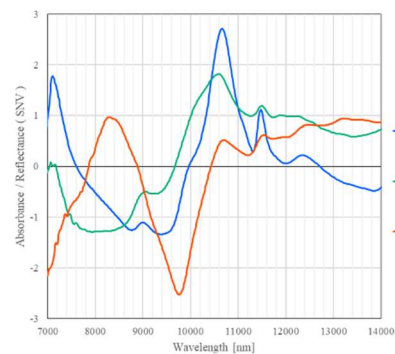


図2.21 スペクトルの比較 [平均+SNV]

$$y_{SNV} = \frac{y - \bar{y}}{\sigma} = \frac{\text{各波長の値} - \text{各スペクトルの平均値}}{\text{各スペクトルの標準偏差}}$$

前処理を行ったデータを比較する。平均後のスペクトルを比較した結果を図2.20に示し、ベースラインとスケールをSNV処理によって補正した結果を図2.21に示す。図2.20より、元データを比較すると、提案分光器の計測感度の高い9μm以降において、スペクトルの大まかな形状が一致していることが確認できる。上の結果より、提案分光器で既存製品であるALPHA IIと同様なスペクトルが取得可能であり、計測結果に一定の信頼性があると言える。

元データを比較すると、提案分光器の計測感度の高い9μm以降において、スペクトルの大まかな形状が一致していることが確認できる。上の結果より、提案分光器で既存製品であるALPHA IIと同様なスペクトルが取得可能であり、計測結果に一定の信頼性があると言える。

(5) 吸収ピークの同定

セメント供試体のスペクトルが正しく計測されていることを確認するために、吸収ピークの同定を行う。データベースとして参照するのは、セメント含有成分のスペクトルと各ピークに対応する振動モードの波長がリスト化され

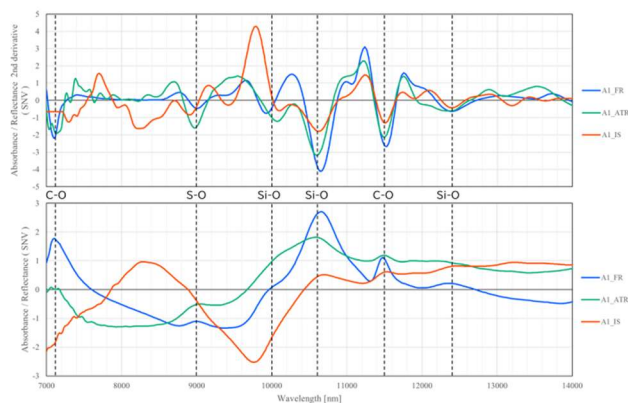


図2.22 吸収ピークの同定

たHorgniesらの論文である⁸⁾。前項の比較検証に用いた図2.21にみられたピークの波長を論文と比較することで、各ピークがどの成分に由来しているのかを可能な限り特定する。分析の結果を図2.22に示す。ピークの同定を行った結果、7100 nm, 11450 nm付近は炭酸カルシウムCaCO₃のC-O結合、9000 nm付近はエトリンガイトのS-O結合、10000 nm, 10600 nm, 12400 nm付近はケイ酸カルシウム水和物 [C-S-H]のSi-O結合に由来するピークであることが確認された。以上より、提案分光器によりセメント供試体の正確なスペクトルが計測可能であると言える。

2.6 定性分析

本章では、塩化物イオン混入量とスペクトルの相関を解析することで、セメント供試体に固定された塩化物に由来する特徴波長を検討する。解析の方針としては、近赤外域のようにF氏塩固有の吸収ピークが特定されることが望ましいが、中赤外域においてF氏塩が検知可能である保証はないため、塩化物イオンの固定によるセメント成分の副次的な変化も検討対象としている。相関解析にはMicrosoft Excelと部分最小二乗法PLSを使用した。また、三種類の計測手法で得られたデータに対して同様の解析を行うことで、相関の再現性を保証する。

(1) 表計算ソフトウェアによる相関解析

Microsoft Excelによる相関解析では、計測結果にみられた各ピークに対して個別に検討を行い、塩化物イオン混入量との相関の有無を確認した。三種類全ての計測手法で相関が見られた箇所は、元データにおける10600 nm付近のピークシフトと、二次微分データにおける10000 nm付近のピーク高さであり、それぞれ最大値波長と差スペクトルにより相関を算出している。差スペクトルとは図2.23に示すように、ピークの

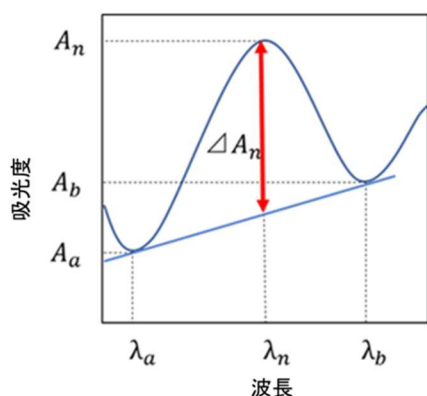


図2.23 差スペクトルの算出方法

表2.3 変数の値を求めるINDEX関数の条件

変数名	算出条件 [INDEX関数]
左側波長 [λ _a]	9.5 μm ~ 9.9 μm 最大値波長
左側値 [A _a]	9.5 μm ~ 9.9 μm 最大値
右側波長 [λ _b]	10.1 μm ~ 10.6 μm 最大値波長
右側値 [A _b]	10.1 μm ~ 10.6 μm 最大値
ピーク波長 [λ _n]	9.8 μm ~ 10.2 μm 最小値波長
ピーク値 [A _n]	9.8 μm ~ 10.2 μm 最小値

※石丸分光器ISでは10.2μm ~ 10.6μm [右側]

前後2点を結んだ直線とピーク値の差であり、次式で表される¹⁾。各変数の値は表2.3に示す条件でINDEX関数により求めた。

$$\Delta A_n = A_n - \left(A_a + \frac{A_b - A_a}{\lambda_b - \lambda_a} \times (\lambda_n - \lambda_a) \right)$$

(2) 10600 nm付近のピークシフト

波長10 ~ 11 μmにおける最大値の波長をINDEX関数によって算出し、最大値波長と塩化物イオン混入量の相関を解析する。解析方法のイメージを図2.24に示し、正反射法での相関を図2.25、全反射測定法での相関を図2.26、提案分光器での相関を図2.27に示す。

(3) 10000 nm付近のピーク高さ

二次微分データにおける波長10000 nm付近のピーク高さを差スペクトルによって算出し、差スペクトルと塩化物イオン混入量の相関を解析する。差スペクトルの変数の値は前項の表2.3の条件に基づいて算出する。解析方法のイメージを図2.28に示し、正反射法での相関を図2.29、全反射測定法での相関を図2.30、提案分光器での相関を図2.31に示す。

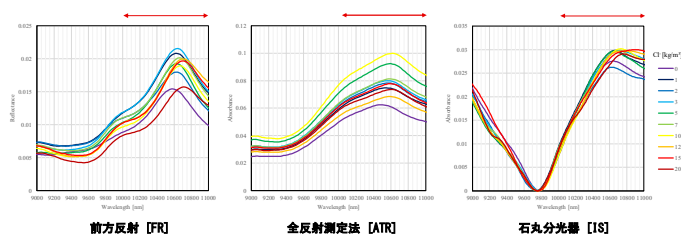


図2.24 解析方法のイメージ [最大値波長]

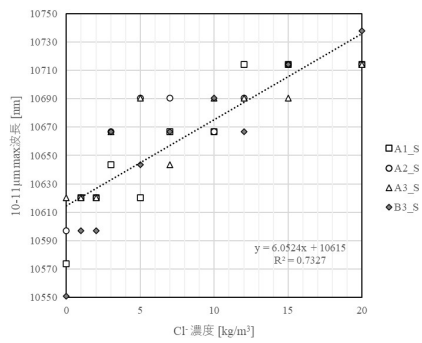


図2.25 正反射法での相関 [FR]

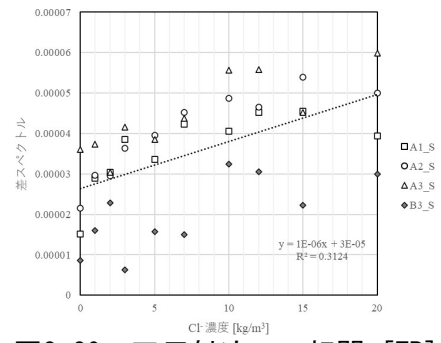


図2.29 正反射法での相関 [FR]

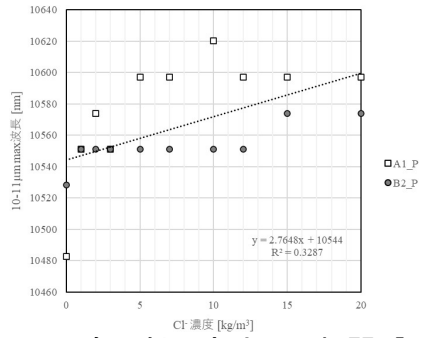


図2.26 全反射測定法での相関 [ATR]

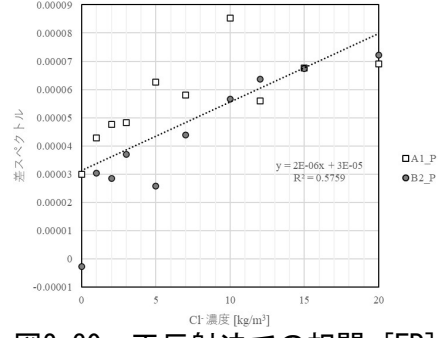


図2.30 正反射法での相関 [FR]

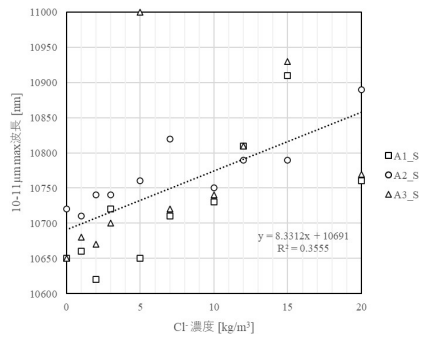


図2.27 提案分光器での相関 [IS]

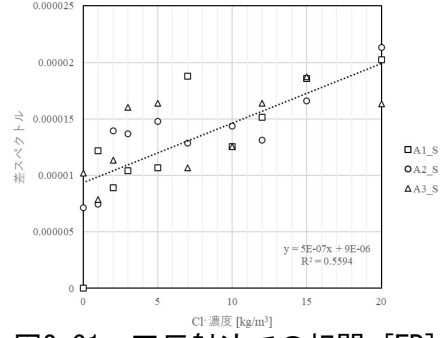


図2.31 正反射法での相関 [FR]

(4) 考察

本研究で図2.25, 図2.26, 図2.27より, 塩化物イオン混入量と最大値波長に正の相関があり, 塩分濃度が高くなるにしたがって10600 nm付近のピークが長波長側にシフトしていることが確認できる. また, 図2.29, 図2.30, 図2.31では, 塩化物イオン混入量と差スペクトルの値に正の相関があり, 塩分濃度が高くなるにしたがって10000 nm付近のピークが増大していることが確認された. 相関係数の値から判断する

と, いずれも強い相関が認められるとは言い難いが, 異なる計測手法による複数のデータで同じ傾向が表れていることから, ある程度の再現性を有すると考えられる. さらに, 波長10000 nmと10600 nm付近は, 前章のピーク同定でケイ酸カルシウム水和物 [C-S-H]のSi-O結合に由来すると確認された箇所であるため, 塩化物イオンの混入によってC-S-Hの化学組成に何らかの影響が与えられたと推測される.

ピークシフトの原因について文献調査を行

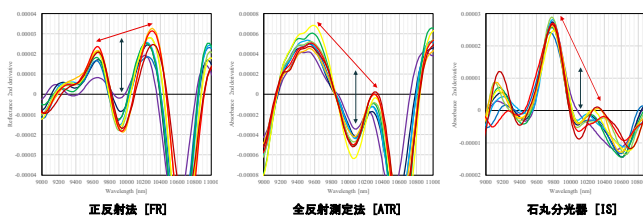


図2.28 解析方法のイメージ [差スペクトル]

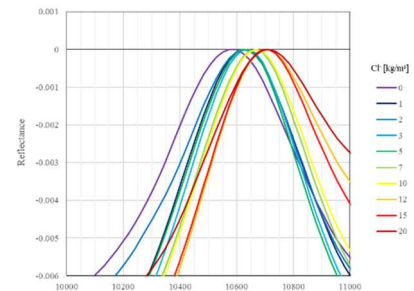


図2.32 FR_A1_S [表面]のピークシフト

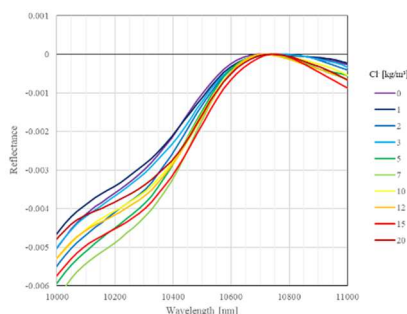


図2.33 FR_A1_C [断面]のピークシフト

った結果、Ping Yuら (*J. Am. Ceram. Soc.*, 2004)の研究では、Ca/Si比の低下に伴ってSi-O結合のピーク波長がシフトすることが確認されており、塩化物イオン混入量の多いセメント供試体ほど、計測時にCa/Si比が高い状態にあった可能性が示唆された。ここで、表面と断面におけるスペクトルの変化傾向を比較するために、正反射法による計測データに対して波長10~11 μm の最大値でベースライン補正した結果を図2.32および図2.33に示す。図より、断面では表面のような10600 nm付近のピークシフトが発生していないことが確認できる。この傾向は他の計測データにおいても同様であり、ピークシフトの原因がCa/Si比の低下であると仮定した場合、表面では外部の影響によってカルシウムの溶脱が進行し、反対に外部の影響を受けない断面では成分が一定に保たれていたと考えることで説明可能である。具体的な外的要因としても、養生時の表面は常に水と触れている状態であるため、この間に溶脱が進行した可能性は十分考えられる。さらに、シフト量が濃度順になっている理由に関しても、ケイ酸カルシウムが高い塩化物イオン吸着能力を持つことが分かっているため(中村ら, 日本化学会誌, 1999), 吸着量が多くなることでカルシウム溶脱の速度が抑制されたと仮定することで説明可能である。しかしながら、これらの考察は仮定に基づくため、今後の研究で実験的に検証を行う必要がある。

(5) 特定のデータでのみ確認された相関

三種類の計測手法での再現性は確認されなかったが、特定のデータでのみ相関が確認された箇所を以下で説明する。また、以降の解析対象は全てALPHA IIによる計測データであり、相関の有無を概形から判断した箇所も含まれる。現行の提案分光器ではノイズの影響で検討出来なかった範囲についても、感度や手法の改善によって検討可能になることを期待する。

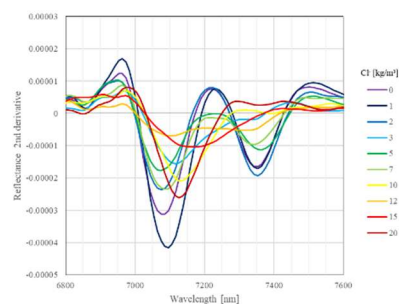


図2.34 FR_A1_S [表面]のピーク検計

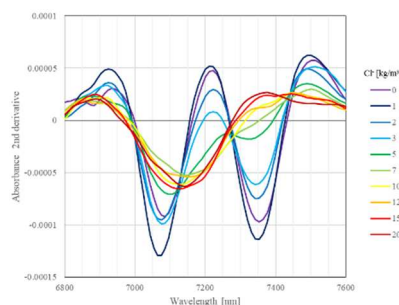
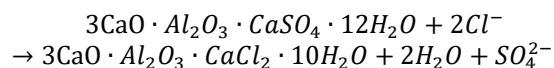


図2.35 ATR_B2_P [全反射測定法]のピーク検計

a) 7300 nm 付近のピーク [FR, ATR]

FR_B1_S, ATR_B2_Pの二次微分データでは、7300 nm付近のピークに負の相関が見られた。正反射法と全反射測定法による計測結果を図2.34および図2.35に示す。図より、塩分濃度が高くなるほど7300 nm付近のピークが減少していることが確認できる。これは、橋本らの論文で確認された傾向と一致しており、二種類の計測手法で再現性が得られていることから高い信頼性を有する。しかし、二つ以降の計測データではノイズによりこの範囲を検討することが出来なかったため、今後の研究で検討可能なデータ数を増やし、再現性を保証する必要がある。フリーデル氏塩の生成過程は次式によって表され、モノサルフェート水和物と塩化物イオンの置換反応によって生成する。塩化物イオン混入量が多い供試体ほどモノサルフェート水和物の量が少なくなると考えられることから、7300 nm付近における負の相関はモノサルフェート水和物の減少に由来していると推測される。また、モノサルフェート水和物の吸収ピークは炭酸カルシウムよりも長波長側の7240 nm付近に存在することが分かっているため(M. Horgnies, et. al., WIT Trans. Eng. Sci., 2013), 波が分離された可能性は高いと考えられる。



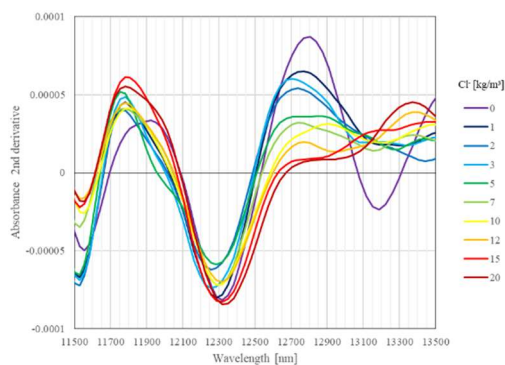


図2. 36 12700nm付近のピーク検討[ATR_B2_P]

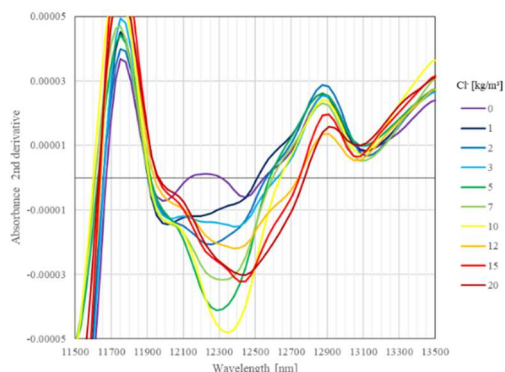


図2. 37 12700nm付近のピーク検討[ATR_A1_P]

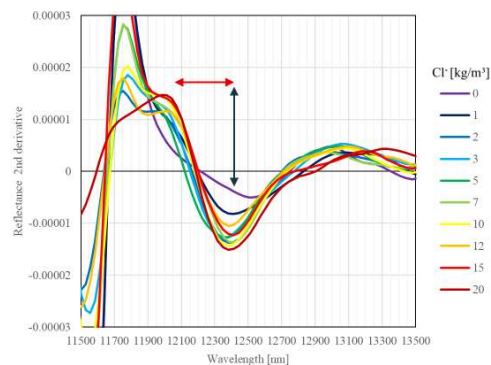


図2. 38 解析方法のイメージ [ピーク差]

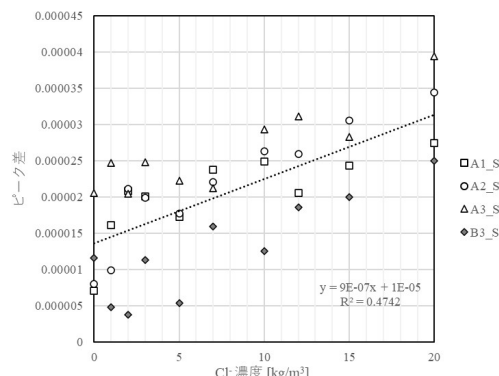


図2. 39 正反射法での相関 [FR]

b) 12.7 μm 付近のピーク [ATR]

ATR_B2_P, ATR_A1_P の二次微分データでは、12700 nm 付近のピークに相関が見られた。全反射測定法による計測結果を図 2. 36, 図 2. 37 に示す。図より、塩分濃度が高くなるほど 12700 nm 付近の値が減少していることが確認できる。この傾向が現れたのは全反射測定法のみであり、全体的なスペクトルの形状が一致していないため信頼性は低いと推測される。しかし、Yanfei らの研究では、人工的に生成されたフリーデル氏塩のピークが 12700 nm 付近に存在することが確認されているため (Yanfei *et. al.*, *Cement Concrete Comp.*, 2018), フリーデル氏塩固有の吸収が現れている可能性は否定できない。

c) 12.4 μm 付近のピーク [FR]

正反射法の二次微分データでは、12400 nm 付近のピークに正の相関が確認された。相関は塩化物イオン混入量と、12073 nm と 12412 nm における値の差から算出している。解析方法のイメージを図 2. 38, 正反射法での相関を図 2. 39 に示す。図 2. 38 より、塩分濃度が高くなるほど 12400 nm 付近のピーク差が大きくなっていることが確認できる。12400 nm 付近は、ピークの同定でケイ酸カルシウム水和物の Si-O 結合に

由来すると確認された箇所であるため、前項での考察と同様に、C-S-H の変化に由来している可能性が高いと推測される。

2.7 部分最小二乗法PLSによる相関解析

部分最小二乗法 PLS による相関解析では、塩化物イオン濃度とスペクトルの相関をローディング重みから検討する。PLS は多変量解析手法の一つであり、多変量データにおける説明変数と目的変数の関係性を解析する際に用いられる。本研究の場合、説明変数はスペクトルデータ、目的変数は塩化物イオン濃度であり、説明変数と目的変数の関係を最大に引き出すような潜在変数を抽出することで、データの次元削減が行われる。次元削減のイメージを図 2. 40 に示す。ローディング重みとは、抽出された潜在変数がどの波長によって特徴づけられるかを示す指標であり、ローディングスペクトルを確認することによって濃度変化と強い相関を持つ波長を特定することが可能である。また、潜在変数を用いて回帰モデルを作成する部分最小二乗回帰 PLSR が同時に行われることが多いが、現段階では塩化物イオンの混入に伴うスペクトルの変化傾向が解明されておらず、データ数も少ないため本研究では省略する。

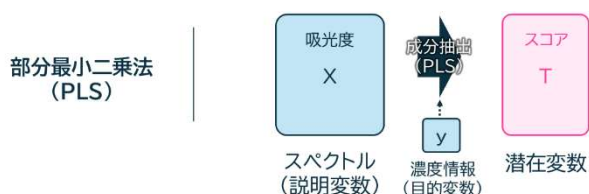


図2.40 次元削減のイメージ

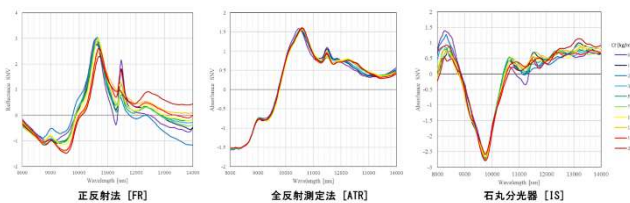


図2.41 SNV処理後のスペクトル [A1_S]

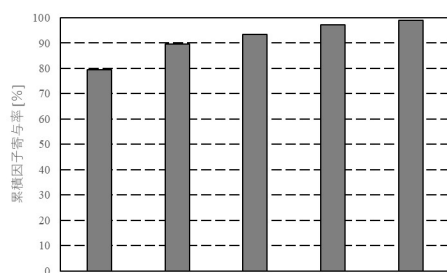


図2.42 累積因子寄与率 [FR]

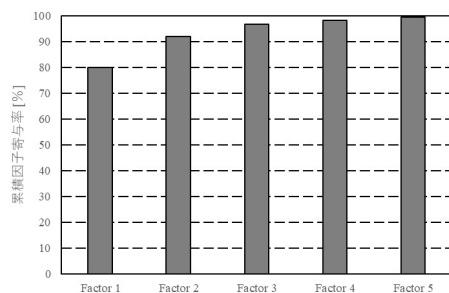


図2.43 累積因子寄与率 [ATR]

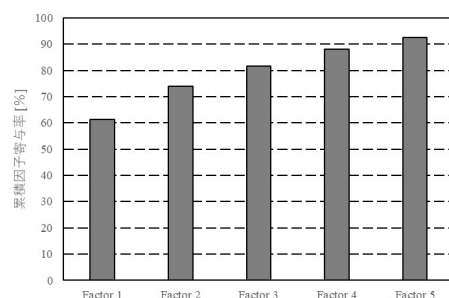


図2.44 累積因子寄与率 [AS]

(1) 解析手順

解析手順について説明する。解析ソフトには VEKTOR DIREKTOR を使用しており、最初に部分最小二乗法 PLS の適用範囲を指定する。提

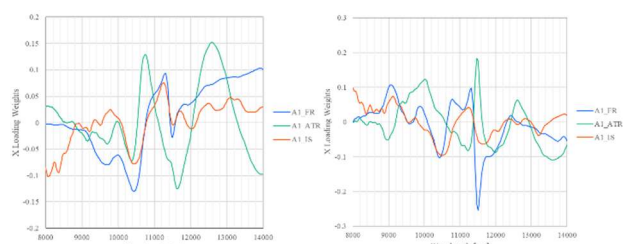


図2.45 ローディング重みの比較 [A1_S]
(左：第一成分, 右：第二成分)

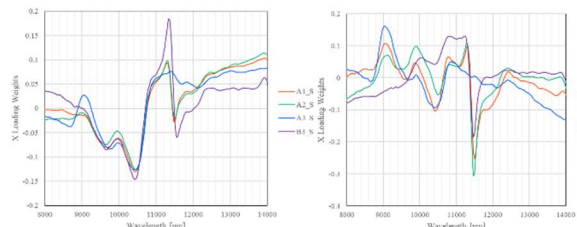


図2.46 ローディング重みの比較 [正反射法]
(左：第一成分, 右：第二成分)

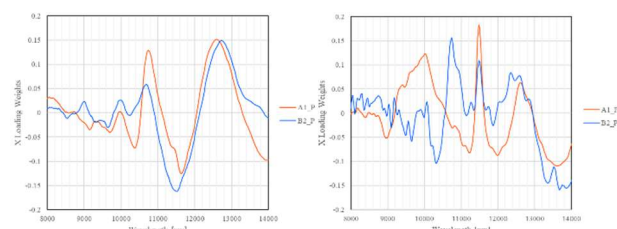


図2.47 ローディング重みの比較 [全反射法]
(左：第一成分, 右：第二成分)

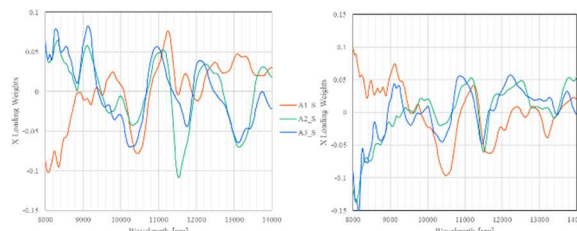


図2.48 ローディング重みの比較 [石丸器]
(左：第一成分, 右：第二成分)

案分光器では 7~8 μm の範囲における計測感度が著しく低いため、今回は 8~14 μm を適用範囲として統一した。次に、データの前処理として SNV 処理を行う。各計測手法で A1 の表面を計測したデータに対して SNV 処理を行った結果を図 2.41 に示す。前処理を行うことで測定回ごとのベースラインのばらつきが補正され、塩化物イオン濃度に伴うスペクトルの変化を捉えることが容易となる。解析後は、抽出された変数の累積因子寄与率 (Total Explained Variance) とローディング重み (Loading Weights) の値を出力し、グラフにより可視化することで濃度変化への寄与度が高い波長を検討する。

(2) 解析結果

各計測手法における抽出成分の累積因子寄与率を以下に示す。図 2.42 は正反射法、図 2.43 は全反射測定法、図 2.44 は提案分光器での解析結果であり、解析対象は A1_S である。

第一成分、第二成分のローディング重みを計測手法で比較した結果を図 2.45 に示す。

A1_S 以外の計測データに対しても PLS 解析を行い、ローディング重みを比較する。図 2.46 に正反射法、図 2.47 に全反射測定法、図 2.48 に提案分光器における解析結果を示す。

図 2.42、図 2.43 より、正反射法と全反射測定法による計測データでは、第一成分のみで約 80%、第二成分までで約 90% の累積因子寄与率が確認できる。また、図 2.44 より、提案分光器による計測データでは第一成分のみで約 60%、第二成分までで約 70% の累積因子寄与率が確認された。以上より、全ての計測手法において、説明変数であるスペクトルデータの 70% 以上の分散が第一成分と第二成分で説明されていることが分かる。

図 2.45 より、計測手法によるローディング重みの差異を検討した結果、第一成分では、9~12 μm の範囲において、正反射法と提案分光器のスペクトル形状が一致していることが確認できる。以上より、塩化物イオンの混入に伴う全体的な変化傾向に再現性があり、提案分光器では正反射法による計測と同じ傾向を把握可能であることが推測される。また、全反射測定法によるローディング重みが大きく異なる理由としては、試料状態が他の二手法と異なる粉末状であったためと考えられる。第二成分ではスペクトルの一致箇所が確認されなかった。第一成分におけるローディング重みの解釈として、10.4 μm ~11.2 μm にかけての負から正への急な変化は、前項の Microsoft Excel による相関検討で確認されたケイ酸カルシウム水和物のピークシフトに由来すると考えられる。解析対象である SNV 処理後のスペクトルを示した図 2.41 では、10.6 μm 付近の範囲においてスペクトルの大きな変動を確認することが出来る。

図 2.46、図 2.47、図 2.48 より、各計測手法で複数の計測データにおけるローディング重みを比較した結果、第一成分、第二成分ともに概ね一致したスペクトルが得られていることが確認できる。以上より、同じ計測手法であれば、計測対象となる供試体の種類が異なっても、PLS 解析で抽出される成分の順番とローディング重みは変わらないと推測される。

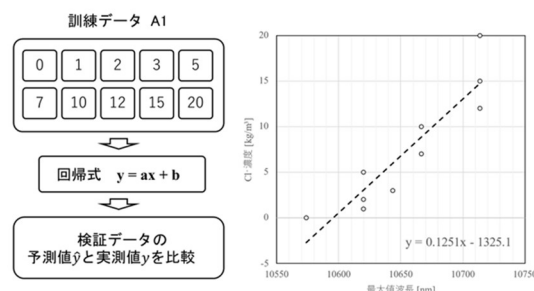


図 2.49 検量線作成手順のイメージ

2.8 定量分析

本章では、前節の Microsoft Excel による相関解析で塩化物イオン濃度との相関が確認された変数を使用して、変数の値から塩化物イオン濃度を予測する検量線を作成する。これにより、定性分析で特定されたスペクトル変化傾向の塩害検知への適用可能性を検討する。

(1) 検量線作成

検量線の作成に使用する変数は、10~11 μm における最大値波長と、10 μm 付近における差スペクトルである。三種類の計測手法で再現性が得られていたことから、この二変数を採用した。また、検量線の作成には Microsoft Excel の回帰分析機能を使用しており、単回帰分析により一次の回帰式 ($y=ax+b$) を構築する。このとき、訓練データを供試体 A1、検証データを供試体 A1 以外とすることで、未知の供試体に対する予測精度の検証を可能としている。予測精度の評価手法には二乗平均平方根誤差 (RMSE) を採用した。RMSE は予測精度が高いほど小さな値を示し、 y を真値、 $\hat{y}$ を予測値、 n をデータ数とした場合に次式で表される。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

検量線作成手順のイメージを図 2.49 に示す。訓練データは供試体 A1 のスペクトルから算出された最大値波長あるいは差スペクトルであり、各変数 10 点のデータから回帰式を構築する。そして、検証データにおける変数の値を回帰式に代入し予測値を算出する。最後に、算出した値から実測値 vs 予測値のグラフを作成し、RMSE の値とともに予測精度の検証を行う。

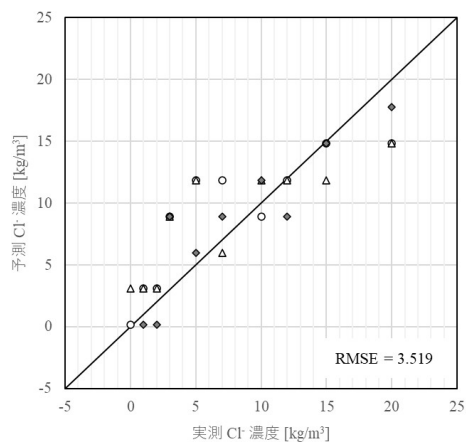


図2.50 実測値vs予測値 [FR]

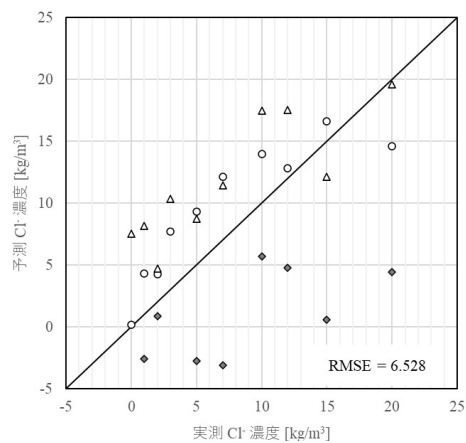


図2.53 実測値vs予測値 [FR]

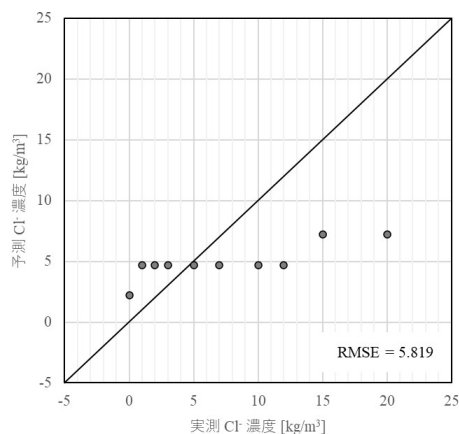


図2.51 実測値vs予測値 [ATR]

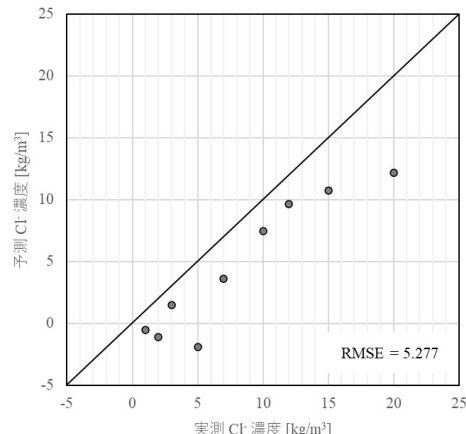


図2.54 実測値vs予測値 [ATR]

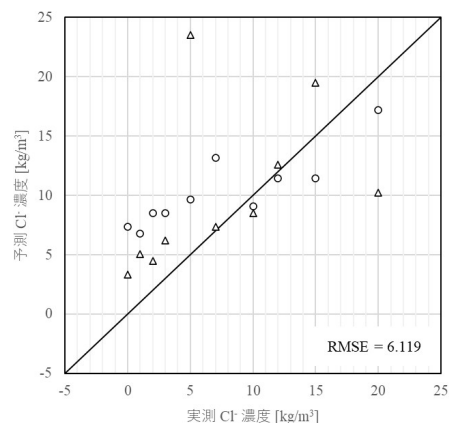


図2.52 実測値vs予測値 [IS]

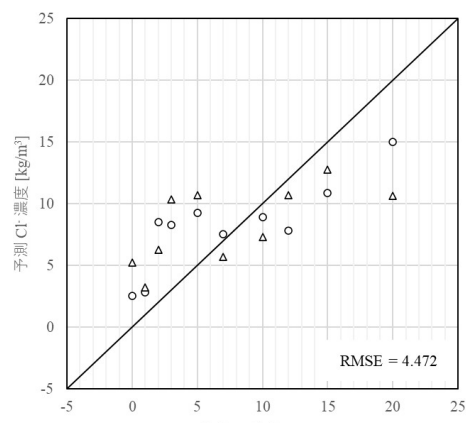


図2.55 実測値vs予測値 [IS]

(2) 最大値波長による検量線

a) 単回帰分析の結果

訓練データである供試体A1の、波長10~11 μm における最大値波長から検量線を作成した。

正反射法での検量線を以下に示す。

$$\text{塩化物イオン濃度} = 0.1251 \times \text{最大値波長} - 1325.1$$

全反射測定法での検量線を以下に示す。

$$\text{塩化物イオン濃度} = 0.1096 \times \text{最大値波長} - 1151.2$$

提案分光器での検量線を以下に示す。

$$\text{塩化物イオン濃度} = 0.0577 \times \text{最大値波長} - 610.8$$

b) 予測精度検証

検証データの最大値波長から塩化物イオン濃度を予測する。図2.50に正反射法，図2.51に全反射測定法，図2.52に提案分光器での実測値vs予測値グラフを示す。

(3) 差スペクトルによる検量線

a) 単回帰分析の結果

訓練データである供試体A1の、10 μm付近における差スペクトルから検量線を作成した。

正反射法での検量線を以下に示す。

$$\text{塩化物イオン濃度} = 506071 \times \text{差スペクトル} - 10.702$$

全反射測定法での検量線を以下に示す。

$$\text{塩化物イオン濃度} = 305032 \times \text{差スペクトル} - 9.808$$

提案分光器での検量線を以下に示す。

$$\text{塩化物イオン濃度} = 878772 \times \text{差スペクトル} - 3.704$$

c) 予測精度の検証

検証データの差スペクトルから塩化物イオン濃度を予測する。図2.53に正反射法、図2.54に全反射測定法、図2.55に提案分光器での実測値vs予測値グラフを示す。

(4) 考察

a) 最大値波長から作成した検量線

実測値と予測値の差を検討した結果、低い精度ではあるが、検証データの最大値波長から塩化物イオン濃度を予測可能であることが確認された。以上より、波長10~11 μm付近における最大値波長は塩害検知に適用可能であると推測される。

正反射法での予測精度が三種類の計測手法の中で最も高いことが分かる。また、密閉袋の中で4ヶ月経過した供試体B3の塩化物イオン濃度についても問題なく予測出来ていることから、打設後の時間経過による影響を受けにくい変数であると推測される。

全反射測定法では波長10~11 μm付近におけるピークシフトが顕著ではないため、予測が限定的になっていることが確認できる。前説ではピークシフトの原因がカルシウム溶脱であると考察されたため、表面付近から採取した粉体についても検討が必要である。

提案分光器においても大まかな予測が可能であることが確認された。提案分光器による予測が本研究の最終的な目標であるため、精度をさらに向上させる必要がある。

b) 差スペクトルから作成した検量線

実測値と予測値の差を検討した結果、低い精度ではあるが、検証データの差スペクトルから塩化物イオン濃度を予測可能であることが確認された。以上より、波長10 μm付近における差スペクトルは塩害検知に適用可能であると推測される。

正反射法においても予測は可能であるが、供試体B3における予測精度が著しく低下していることから、打設後の時間経過に影響を受けやすい変数であると推測される。

全反射測定法では、全体的に予測値が実測値よりも低くなっているが、順番のばらつきが小さく、直線的に変化していることから適用可能性は高いと推測される。

提案分光器では差スペクトルにより最大値波長よりも高い精度で予測が可能であることが確認された。しかし、どちらが予測に適するかについては検討が必要である。

c) まとめ

定性分析により自ら選択した変数を使用して、塩化物イオン濃度の大まかな予測を実現した。しかし、予測精度が十分に高いとは言えないため、今後の研究では訓練データと検証データの数を増やすことで、検量線の改良を行う必要がある。また、本研究で使用したセメント供試体は、打設時に塩化物イオンを混入したものであり、実際の塩害状況を再現したものではないため、塩水に浸漬させた供試体の計測データに対しても同様の検証が必要である。

改良を加えたステルスマルチスリットを試作・実装することで、ノイズとなりうる干渉縞の除去に成功し高い感度を得ることができた。それにより、温度差がほとんどない系においても計測できることを確認した。さらに、塩分濃度をコントロールした種々のコンクリート試験体による計測の結果、10.6 mm付近において塩分濃度の増加に伴い長波長側にピークがシフトすることを確認した。これにより、従来の波長のピークから濃度に換算する方法よりも格段に頑健な計測が行えるようになった。これにより温度の影響を排除でき、屋外での計測を行えるようになった。目標は、室内試験での測定精度に対して±10%であるが、おおむね達成できた。

第3章 電気化学的手法によるコンクリート中の鋼材の腐食速度を定量化する技術開発

3.1 はじめに

わが国では戦後の高度経済成長期に集中的に建設されたコンクリート構造物が既に50年以上を経過しており、耐用年数を超過しているものも多い。これらの構造物を所有者がすべて更新することは財政的に難しいため、点検・診断とともに、補修・補強などを行いながら適切な維持管理を実施する必要がある。鉄筋コンクリート構造の劣化診断では、コンクリート中の鉄筋の有無や程度を評価する。しかし、鉄筋の腐食が目立たない限り、コンクリートの外観から鉄筋の腐食を判断することは一般的に困難である。コンクリート亀裂や錆汁等が顕著に発生し、鉄筋の腐食が進行したり、コンクリートの破損等の損傷後に劣化が見られたりすることが多く、多くの場合取り扱われることが多い。補強鋼の腐食が進行すると、補修や補強などの効果的な対策が難しくなる。長期間にわたり構造を維持するためには、早期に鉄筋の腐食を検出することが望ましい。非破壊検査は、コンクリート構造の内部状態を評価するのに有効である。特に、鉄筋の腐食に関しては、自然電位法や分極抵抗法が提案されている。自然電位法は腐食の有無のみを検出する方法であり、分極抵抗法は腐食速度も評価できるという特徴がある。分極抵抗法では、鉄筋の両端に微弱な電流を流し、自然状態からの鉄筋の電位変化を測定することにより、鉄筋の腐食速度を定量的に評価することができる。分極抵抗法によって得られるのは、見かけの分極抵抗である。したがって、真の分極抵抗を得るためには、見かけの分極抵抗に電流の流れる範囲である被測定面積を掛ける必要がある。しかし、分極抵抗面積、鉄筋の腐食やコンクリート中の含水率等

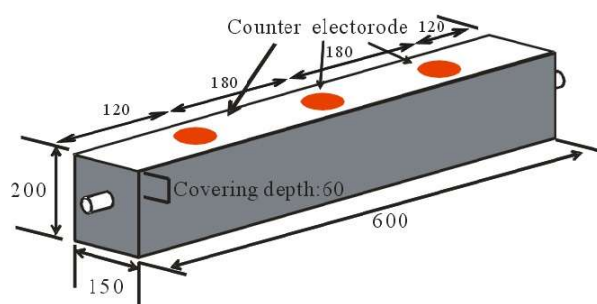


図3.1 電圧印加箇所

の影響を受け、現在の分散特性に大きな影響を与えている。したがって、分極抵抗法による電流分散特性を正確に把握することにより、鉄筋の腐食速度の評価精度が大幅に向上する。

本研究では、鉄筋コンクリート部材の現在の分散特性と養生期間の観点から、鉄筋で部分的に腐食されている分極抵抗法の適用性を検討する。実験的調査では、鉄筋コンクリート試験体を準備した。見かけの分極抵抗、真の分極抵抗および試料のコンクリート抵抗を測定した。解析では、実験で用いた試験片のコンクリート抵抗を用いて部分電解腐食を再現して導電率解析を行った。次に、解析的検討から得られた結果から、養生期間が電氣的分散特性に及ぼす影響を把握し、実験的検討により得られた真の分極抵抗値と比較する。

3.2 真の分極抵抗評価手法の構築

(1) 実験的検討

本研究では、作製した鉄筋コンクリート試験片を空气中、20℃、相対湿度40%で硬化させ、分極抵抗、見かけの分極抵抗、コンクリート抵抗を測定した。測定には、四国総合研究所の携帯型鉄筋腐食診断器（CM-V）を用いた。試験体

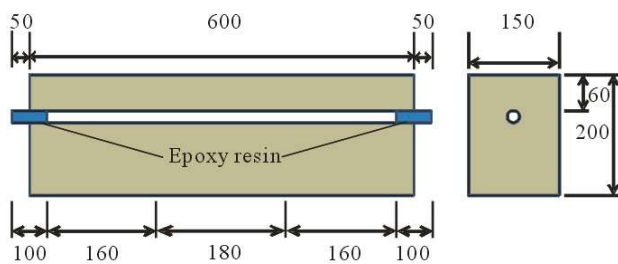


図3.2 試験体寸法

表3.1 試験ケース

Curing time	W/C (%)
13weeks	40
	60
26weeks	40
	60
52weeks	40
	60

表3.2 示方配合

(%)	(kg/m ³)			
W/C	Water	Cement	Sand	AE water reducing agent
40	240	603	1506	0.121
60	309	515	1289	-

中央 (図3.1の円領域) のコンクリート表面に電圧を印加し、ガード機能ありの状態 で電流を分散させないように見かけの分極抵抗とコンクリート抵抗を図3.1のA, B, Cの3箇所を測定し、真の分極抵抗を算出した。

本研究では、部分的な鉄筋腐食の有無が電流分散性状に与える影響に焦点を当てており、電流の流れる場であるコンクリート自体の不均一性を極力排除するため、粗骨材を用いずに、モルタルを使用した。鉄筋コンクリート試験体寸法を図3.2、実験条件を表3.1に、コンクリート配合を表3.2に示す。セメントは普通ポルトランドセメント (密度3.15g/cm³)、細骨材は香川県三豊市財田町砕砂 (表乾密度2.65g/cm³, 粗粒率2.61) を用いた。水セメント比40%の試験体 へのみワーカビリティ向上のため混和剤を用いた。鉄筋のかぶり厚さは60mmとし、鉄筋D25の異形鉄筋を使用し、鉄筋の両端100mm にエポキシ樹脂を塗布して絶縁加工を施した。

本研究で使用した腐食診断器による電流の印加を行う前に、十分に水で濡らしたウエスをかぶりコンクリートに1時間覆って、分に湿潤させた。本機器を用いた場合、電流は分散を極力抑えられると考え、文献を参考に、図3.2.3に

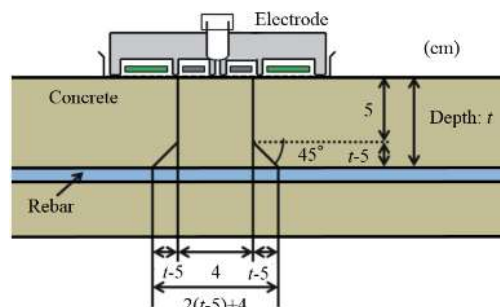


図 3.3 デバイスが仮定している被測定面積

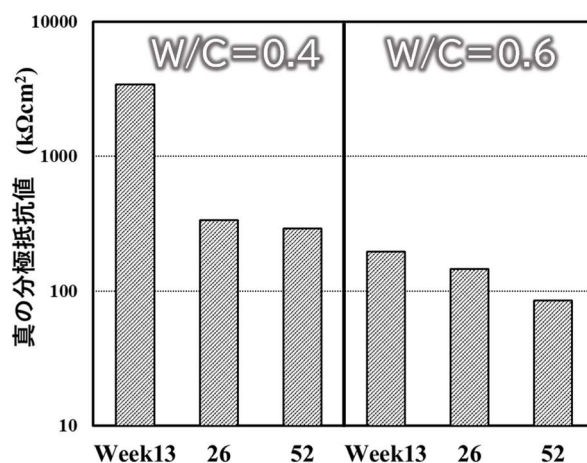


図 3.4 デバイスが仮定している被測定面積

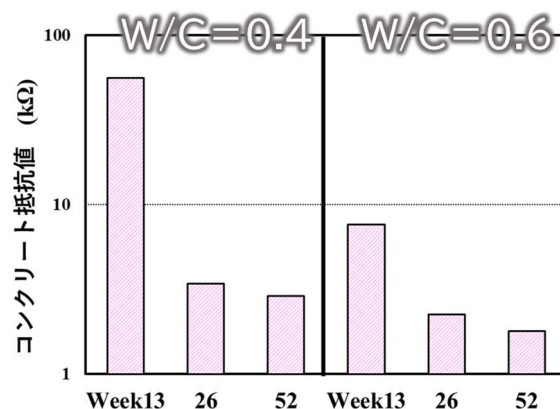


図 3.5 デバイスが仮定している被測定面積

示すとおり、かぶり厚さを t とすると、 $t > 5\text{cm}$ のときには機器の直下 $\{2(t-5)+4\}\text{cm}$ 内の鉄筋の上半分の表面積を被測定面積と仮定できる。実験で用いた試験体のかぶり厚さ t は6cm、鉄筋はD25であるためCM-Vでの被測定面積は、6cm内の鉄筋上半分の表面積23.6cm²となる。真の分極抵抗 R_p は、以下の式(1)を用いて計測で得られた 見かけの分極抵抗 R_p' に被測定面積 A を乗じて算出した。

$$R_p = R_p' \times A$$

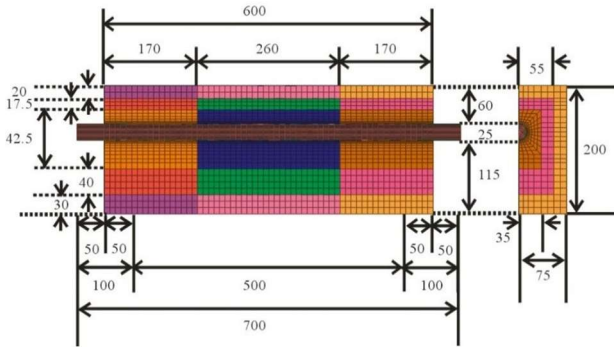


図3.6 有限要素メッシュ

(2) 実験結果

図3.4, 図3.5に測定値A,B,Cにおける養生期間ごとの R_p とコンクリート抵抗 R_s を示す. 養生期間が長くなると分極抵抗が小さくなっている. CEBによると真の分極抵抗が $130k\Omega cm^2$ を下回ると腐食が進んでいるとされていることから, 腐食が進んでいる試験体も見られる. また, コンクリート抵抗についても養生期間が長くなるにつれて比較的高くなっている.

(3) 解析的検討

鉄筋コンクリート試験体の部分電食が, 電気分性状, 被測定面積および真の分極抵抗値に与える影響に関して解析的検討を行う. 基礎方程式には, マクスウェル方程式を用い, 有限要素スキームにより検討を行った.

静電場が満たす方程式は, ここでは定常状態と考え, マクスウェルの方程式の時間の項を省略した次式となる.

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{D} &= q \\ \nabla \times \mathbf{E} &= 0\end{aligned}$$

ここで, $\mathbf{D}$ は電束密度, $\mathbf{E}$ は電場の強さ, q は電荷密度である. 物質中では

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$$

の関係がある. ここで, ϵ は誘電率で, 等方的な物質と考えるとスカラー量として取扱うことができる. 式(3)より電場 $\mathbf{E}$ はスカラーポテンシャル ϕ を用いて表せられる.

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi$$

ここで,

$$q = \nabla \cdot \mathbf{D} = \nabla \cdot \epsilon \mathbf{E} = -\nabla \cdot (\epsilon \nabla \phi)$$

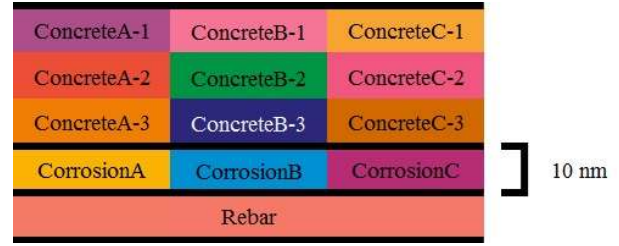


図3.7 各要素の設定

表3.7 各要素の設定

Uniformity	Heterogeneity	Area	Curing time	W/C (%)
case1-A	case7-A	A	13weeks	40
case1-B	case7-B	B		
case1-C	case7-C	C		
case2-A	case8-A	A	26weeks	60
case2-B	case8-B	B		
case2-C	case8-C	C		
case3-A	case9-A	A	52weeks	40
case3-B	case9-B	B		
case3-C	case9-C	C		
case4-A	case10-A	A	52weeks	60
case4-B	case10-B	B		
case4-C	case10-C	C		
case5-A	case11-A	A	52weeks	40
case5-B	case11-B	B		
case5-C	case11-C	C		
case6-A	case12-A	A	52weeks	60
case6-B	case12-B	B		
case6-C	case12-C	C		

以上の関係を整理すると,

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \phi) = -q$$

となる. 等方的な物質とし, 誘電率 ϵ は一定とすると,

$$\nabla^2 \phi = -q/\epsilon$$

となる. これは, ポアソン方程式と呼ばれ, 計算する領域内に電荷がない場合は

$$\nabla^2 \phi = 0$$

となる. 本研究ではこの基礎方程式を離散化し, 有限要素解析を行う.

図3.6に本解析で用いた鉄筋コンクリートモデルを示す. なお, モデル自体は実験で用いたものと等価となるように設定しており, 計算負荷軽減のため対称性を考慮し, 全体領域の2分の1を解析対象領域とした.

また, 各要素に関する情報を図3.7に示す. 凡例のConcreteはコンクリート要素を, Rebarは鉄筋要素を, Corrosionはコンクリートと鉄筋の境

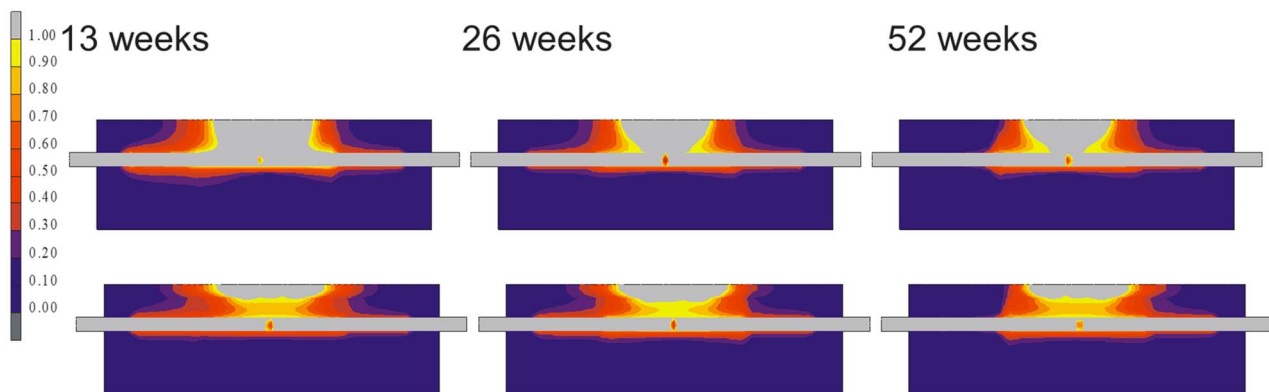


図 3.8 電流の分散状況（上：一様，下：非一様）

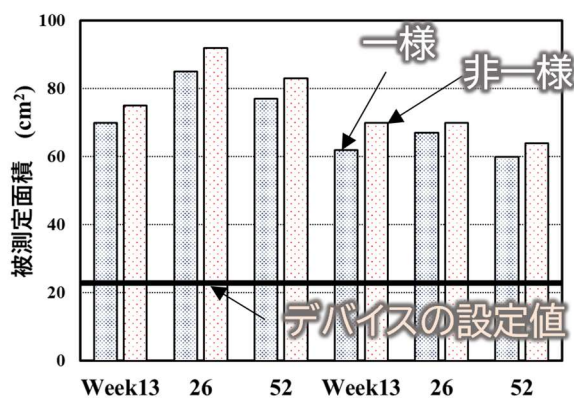


図3.9 被測定面積

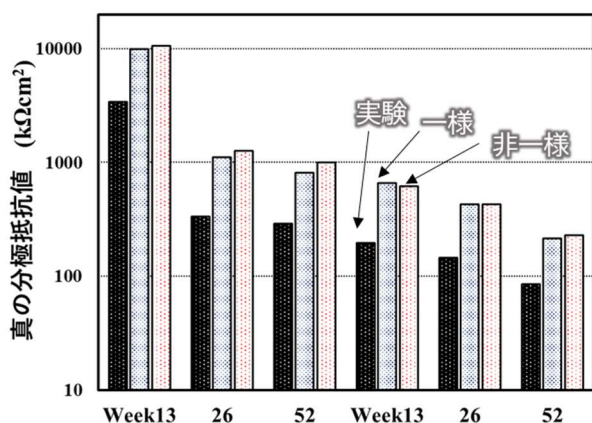


図3.10 真の分極抵抗値

境界要素である不動態皮膜部を図3.7の下部に、Isolationには絶縁要素を、そしてElectrodeは電圧印加領域を表した。コンクリートと鉄筋の境界部付近を拡大した図に示すように、鉄筋要素、境界部要素、そしてコンクリート要素を配置し、図3.6に示す通り、コンクリートと鉄筋の境界部のうち鉄筋端から100mmを絶縁部（図中、両端部絶縁要素）とした。鉄筋の抵抗率は理科年表より0°Cのときの抵抗率 $8.9 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}$ を使用した。絶縁要素は、この要素の電気抵抗率を極めて大きくする（ $1.0 \times 10^{16} \text{ k} \Omega \text{cm}$ ）ことで表現した。なお、要素はすべて8節点六面体要素（ア

イソパラメトリック要素）で、総節点数は35,020、総要素数は31,304であった。図3.7のように界面皮膜を10nmと仮定し、以下の式のように分極抵抗を界面被膜の厚さで割ることで抵抗率に換算して入力した。

$$\rho = \frac{R_p}{l}$$

ここに、 ρ : (Ωcm)、 l : 不動態被膜の厚さ(cm)、 R_p : 真の分極抵抗(Ωcm^2)である。

また、測定箇所のA,B,Cの測定値を考慮すること、今後、局所的な鉄筋腐食の研究のために図3.1のようにA, B, Cを設定した。コンクリート抵抗がかぶり厚さごとに均一の解析と、測定するときにコンクリート表面を湿潤するためコンクリート抵抗がかぶり厚さごとに不均一になることを考慮する解析を行う均一の解析については図3.4の値を使用した。不均一の解析に関しては、測定値をConcreteA,B,C-2とし、ConcreteA,B,C-1は測定値の0.5倍、ConcreteA,B,C-3は測定値の1.5倍とし、ConcreteA,B,C-1, ConcreteA,B,C-2とConcreteA,B,C-3の平均が測定値となるように設定した。

境界条件は以下のとおりである。試験体上部（図3.3におけるElectrode）に電圧10mVを印加し、鉄筋端の電圧を0Vとした。なお、実際の測定器のセンサ部は図3.1における上面中央の円領域B（断面積：約72cm²）であるが、解析メッシュは直方体を基本としていることから、解析におけるセンサ部（印加箇所）の領域については、実際の機器の面積と同じ面積になるように矩形領域に設定した。

試験体中央の印加部中央に位置する鉄筋の位置から、鉄筋表面に流れる全電流量のうち、25%の電流が流れる範囲が被測定面積とみなせる¹²⁾。各メッシュの電流の代表値は、メッシュ1面が4節点を有する長方形であるため、4節点で

の平均値を採用した。被測定面積は、本研究では、上述した鉄筋要素の不動態被膜に流れる電流が全メッシュの25%に達するまで加算したメッシュの数にメッシュの面積を乗じた値と定義した¹²⁾。

電流分散状況の一例を図3.8に示す。コンクリートの抵抗値が一樣の場合と、非一樣の場合で電流の分散状況が大きく異なることが分かる。また、コンクリートの電気伝導解析で算出した被測定面積と実験での被測定面積の比較を図3.9に示す。非一樣の場合の被測定面積は、一樣の場合よりも若干小さい。また、デバイスで設定された値に対しては、被測定面積は大きいことが判明した。この値を用いて算出した新の分極抵抗値を図3.10に示す。一樣の場合と非一樣の場合では真の分極抵抗値はほとんど変化が見られない。一方、実験値と比較すると、解析値は実験値を過大評価する。したがって、デバイスで事前に設定された被測定面積では真の分極抵抗値を過度に過小に評価することが判明した。なお、実験値を3.1倍すると、誤差の平均値は5%以内に収まることから、この補正方法を採用する。

3.3 塩害劣化進行モデルの構築

配筋の異なる種々のスラブおよび梁試験体を対象に電食試験を行い、一次ひび割れおよび二次ひび割れが発生するときの鉄筋腐食減量を算定した。

本研究では、力学モデルにより一次ひび割れおよび二次ひび割れ発生時の鉄筋腐食減量を算定する手法を構築するとともに、実験結果と比較検証を行い、有用性を評価した。さらに進展期から加速期前期・加速期前期から加速期後期への移行起点を一次ひび割れおよび二次ひび割れの発生と考え、力学モデルによるひび割れモードを考慮した塩害劣化進行予測モデルを構築した。

(1) 電食試験によるひび割れ発生・進展時の鉄筋腐食減量の算定

a) 試験体

試験体の概要を図3.11に示す。試験体の寸法は900×180×400(mm)のスラブ試験体6体と330×180×400(mm)の梁試験体3体、290×180×400(mm)の梁試験体1体を作製した。すべての試験体を電気腐食減量 $\Delta e=300\text{mg}/\text{cm}^2$ まで腐食させた。主筋は異形鉄筋D19とし、せん断補強筋が腐食しないよう、主筋と接しないよう設置した。

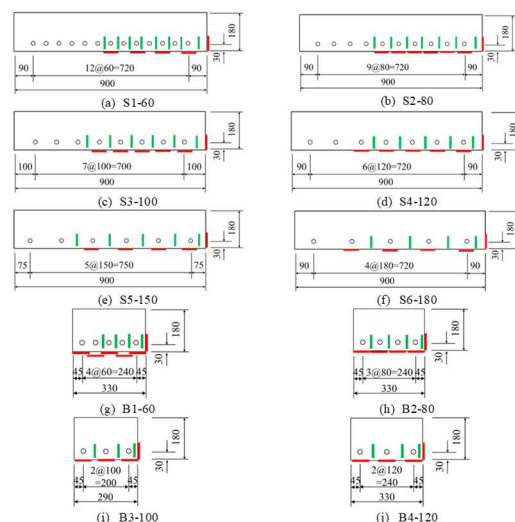


図3.11 試験体の概要

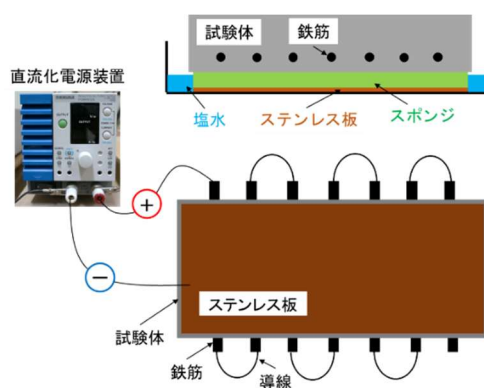


図3.12 電食の概要



図3.13 電食試験時の実施状況

せん断補強筋は異形鉄筋Φ16を採用し、かぶりは30mmとした。ひび割れモードの影響を検証するため、スラブ試験体の鉄筋間隔は60mmから180mm、梁試験体は60mmから120mmとした。すべての試験体に埋め込み型と防水型のひずみゲージを設置した。試験体一覧を表3.2.6に示す。

b) 電食の方法

図3.12に電食試験の概要を、図3.13に実際の電食試験状況を示す。試験体を海水と同じ塩分濃度3%の塩水に浸し、直流化電源装置を用いて

表3.7 試験体一覧

試験体名	鉄筋間隔 l_0 (mm)	鉄筋間隔の無次元量 l_0/Φ	かぶり D(mm)	かぶりの無次元量 D/ Φ	鉄筋径 Φ (mm)	電気腐食量 Δ_e (mg/cm ²)
S1-60	60	3.14	30	1.57	19.1	300
S2-80	80	4.19				
S3-100	100	5.24				
S4-120	120	6.28				
S5-150	150	7.85				
S6-180	180	9.42				
B1-60	60	3.14				
B2-80	80	4.19				
B3-100	100	5.24				
B4-120	120	6.28				

鉄筋側を陽極，ステンレス板側を陰極につなぎ，アノード反応とカソード反応を起こすことにより腐食を発生させる．水槽にステンレス板を敷き試験体との間にスポンジを挟む形でセットした．スポンジで塩水を浸透させ，飛沫帯の環境を模擬した．試験体の鉄筋すべてが腐食対象なので，導線を直列につなぎ，鉄筋を腐食させる．鉄筋全てに電流が正常に流れる必要があるため，鉄筋は磨いてから導線を巻き，上からビニールテープを巻いて，通電を確認してから試験を開始した．なお，塩水が直接流れ込まないように，ビニールテープの上をクイックメンダーで覆い，防水効果を付与した．腐食電流密度，腐食減量は以下の式で算定した．

$$I_{\text{corr}} = \frac{I}{L \cdot \Phi}$$

ここで， I_{corr} ：腐食電流密度(mA/cm²)， L ：鉄筋長さ， Φ ：公称周長であり，

$$m = \frac{I_{\text{corr}} \cdot t \cdot a}{n \cdot F}$$

m ：単位表面積あたりの腐食減量(mg/cm²)， I_{corr} ：腐食電流密度(mA/cm²)， t ：時間(s)， a ：鉄の原子量(55.845 g)， n ：溶解した鉄イオンの等量(2 moleq.)， F ：ファラデー定数(96500 C/moleq.)である．

電食試験終了後のスラブ試験体を図3.14～図3.16に示す．スラブ試験体の代表例として，鉄筋間隔60mm (S1-60)と180mm (S6-180)の試験体を挙げる．いずれの試験体も電気腐食減量 $\Delta_e=300\text{mg/cm}^2$ まで腐食させた．スラブの場合，外端部の鉄筋は横方向の拘束力が小さいため，外端部の鉄筋に沿ったひび割れのひび割れ幅だけが顕著に大きい．鉄筋間隔が狭いと，中央部の鉄筋は横方向の拘束力が大きいので，鉄筋に沿ったひび割れがみられない．対して，鉄筋間隔が広いと，横からの拘束力は小さいため鉄筋に沿ったひび割れはみられた．鉄筋間隔が狭

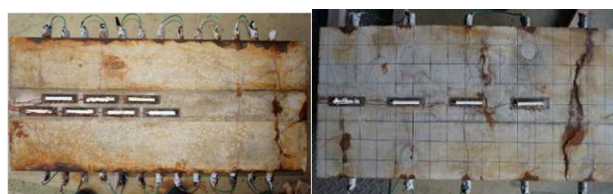


図3.14 スラブ試験体底面のひび割れ状況



図3.15 スラブ試験体側面のひび割れ状況



図3.16 梁試験体のひび割れ状況

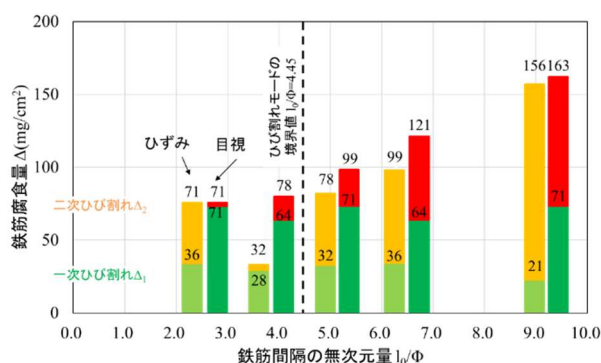


図3.17 ひび割れ発生時の鉄筋腐食減量の比較

いと瞬時に水平ひび割れが発生する．そのため，鉄筋同士を結ぶようにきれいにひび割れが生じる．対して，鉄筋間隔が広いと，水平ひび割れは逐次的に発生する．

梁試験体の代表例として，鉄筋間隔60mm (B1-60)と120mm (B4-120)の試験体を挙げる．どちらの試験体も電気腐食減量 $\Delta_e=300\text{mg/cm}^2$ まで腐食させた．図3.16に見られるように，梁の場合，スラブよりも幅が狭いため横方向の拘束力が小さい．よって，鉄筋に沿ったひび割れのひび割れ幅はスラブよりも大きい．B1-60，B4-120ともにかぶりコンクリートが剥離した．梁もスラブと同様に，図3.2.28に見られるように，鉄筋間隔が狭いと瞬時に水平ひび割れが発生する．そのため，鉄筋同士を結ぶようにきれいにひび割れが生じる．これに対して，鉄筋間隔が広いと，水平ひび割れは逐次的に発生する．水平ひび割れのひび割れ幅は鉄筋間隔が広いほど大きくなる傾向があった．

目視によるひび割れ発生時の鉄筋腐食減量、ひずみ測定によるひび割れ発生時の鉄筋腐食減量を図化したものを図3.17に示す。緑線は一次ひび割れ、黄線は二次ひび割れ発生時の鉄筋腐食減量を表す。鉄筋間隔の無次元量が小さいとかぶりと鉄筋間隔がほぼ等しいため、一次ひび割れと二次ひび割れの鉄筋腐食減量の差は小さい。電食試験を行った試験体はすべてかぶりが同じであるため、一次ひび割れ（鉄筋に沿ったひび割れ）の発生時の鉄筋腐食減量はほぼ等しい。二次ひび割れ（水平ひび割れ）の場合、鉄筋間隔の無次元量が大きいほど、鉄筋腐食減量も大きい。コンクリート内部で発生したひび割れをひずみ測定は把握できているため、ひずみ測定は目視観察よりもひび割れ発生時の鉄筋腐食減量は小さい。完全にひび割れが発生している時を対象としているため、本研究では、目視によるひび割れ観察の結果を用いた。

(2) 塩害劣化進行予測モデル

a) 塩化物イオンの浸透（潜伏期～）

○ Fickの拡散方程式

一般に塩化物イオンの拡散の予測にはコンクリート表面の塩化物イオン濃度が一定であるとした式を用いられている。塩害環境下でのコンクリート部材の劣化は、塩化物イオンの浸透による鉄筋の不導体被膜の破壊が発端と考えられ、境界条件を一定とすれば、浸透は式以下で表される。経過時間 t を変化させたときの塩化物イオンの浸透の例を図3.18に示す。表面の塩化物イオン濃度は一定であり時間の経過とともに内部では塩化物イオン濃度が大きくなっていることがわかる。図2.3.2では初期含有塩化物イオン量が存在しているため深い位置でも塩化物イオン濃度はゼロとならない。

$$C(x,t) = \gamma_{cl} \cdot \left[C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right] + C_i$$

ここで、 $C(x,t)$ ：かぶり深さ x (cm)、経過年数 t (年)における塩化物イオン濃度(kg/m^3)、 C_0 ：表面塩化物イオン濃度(kg/m^3)、 D_{ap} ：拡散係数(cm^2/sec)、 C_i ：初期塩化物イオン濃度(kg/m^3)、 erf ：誤差関数、 γ_{cl} ：予測の精度に関する安全係数(一般に1.0としてよい)である。

○ 拡散係数

竹田らの拡散係数の経時変化に関する検討結果を図に示す。塩化物イオンの拡散係数は経年とともに小さくなり、経過年数が5年を過ぎ

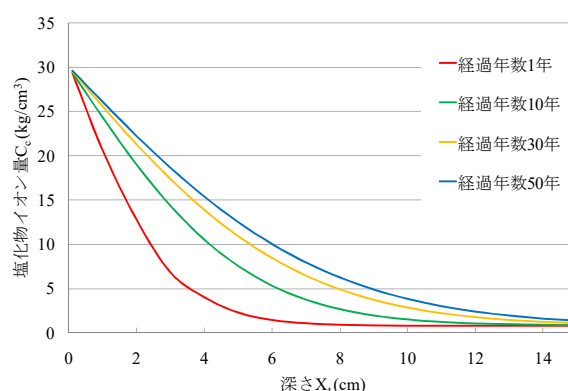


図3.18 モデルによる塩分拡散性状

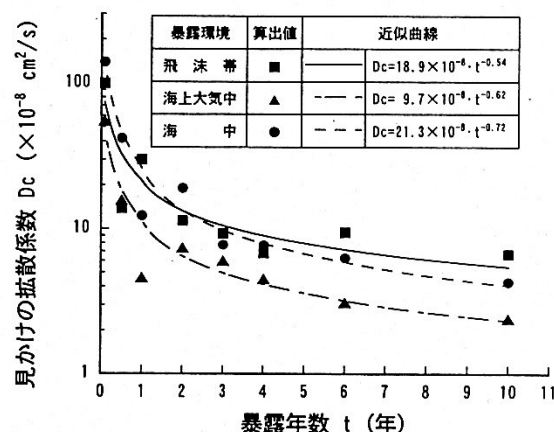


図3.19 拡散係数の経年変化モデルによる算定

るとほぼ横ばいになっていることがわかる。飛沫帯での見掛けの拡散係数を用いて算定した。調査用のコアの採取時期とその調査時点での拡散係数から回帰して、係数 D_t^* を求め、調査位置での拡散係数の経時変化を求める。

$$D_t(t) = D_t^* \cdot t^{-\beta}$$

ここで、 $D_t(t)$ ：構造物完成後 t 年経過時点での見掛けの拡散係数(cm^2/sec)、 D_t^* ：係数、 β ：係数であり0.54、 t ：調査経過年数あるいは暴露期間(年)

また、青山らは、実構造物の調査結果より、調査箇所近傍(300mm程度)における拡散係数のばらつきは、変動係数(平均)で約30%であるとしている。

○ 腐食発生限界塩化物イオン濃度

鉄筋近傍の塩化物イオンが一定の濃度に達すると、鉄筋の被膜が破壊されて腐食が生じる。この時の塩化物イオン濃度を腐食発生限界塩化物イオン濃度 C_{cr} と定義される。鉄筋の腐食は、鉄筋のかぶり深さ X における塩化物イオン濃度 $C(X,t)$ が、腐食発生限界塩化物イオン濃度 C_{cr} を超えたとき発生すると考える。

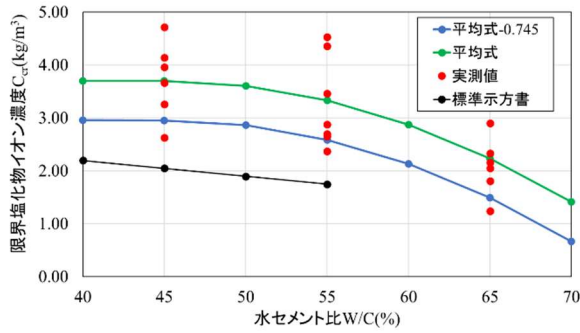


図3.20 水セメント比と腐食発生限界塩化物イオン濃度の関係

$$C(X,t) > C_{cr}$$

ここで、 $C(X,t)$: かぶり深さ $X(\text{cm})$, 経過年数 $t(\text{年})$ における塩化物イオン濃度 (kg/m^3), C_{cr} : 腐食発生限界塩化物イオン濃度 (kg/m^3) である。

前項目で述べた既往の研究と 2022 年制定コンクリート標準示方書維持管理編の内容に基づいて腐食発生限界塩化物イオン濃度を設定した。

$$C_{lim} = -3.0 \left(\frac{W}{C} \right) + 3.4$$

ここで、 C_{lim} : 腐食発生限界塩化物イオン濃度 (kg/m^3), W/C : 水セメント比 ($0.30 < W/C < 0.55$) である。

堀口らの普通ポルトランドセメントを用いた実験結果をもとに、水セメント比と腐食発生限界塩化物イオン濃度との関係式を以下に示し、これらの関係を図化したものを図 3.19 に示す。

W/C が 0.45 以上の場合

$$C_{cr} = 3.7 \times \left(1.0 - 9.87 \left(\frac{W}{C} - 0.45 \right)^2 \right) - 0.745$$

W/C が 0.45 未満の場合

$$C_{cr} = 2.96$$

堀口ら¹⁰⁾の試験では、水セメント比が 0.45 以下の場合、腐食発生限界塩化物イオン濃度には変化が見られなかったことから、水セメント比 0.45 未満は $C_{cr}=2.96$ で一定としている。

金谷ら¹²⁾の乾湿繰り返しと浸漬試験結果をまとめた腐食発生限界塩化物イオン濃度の分布を図 3.2.66 に示す。平均値 3.17kg/m^3 で標準偏差 1.09kg/m^3 であった。しかし、実際の環境下では、 3.0kg/m^3 よりも小さい値で腐食が発生していると考えられる。そこで、かぶり位置での塩化物イオン濃度 C_{cr} が 2.5kg/m^3 に達した時に鉄

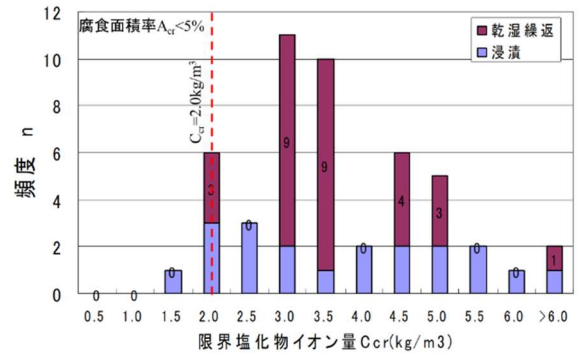


図 3.21 腐食発生限界塩化物イオン濃度の分布

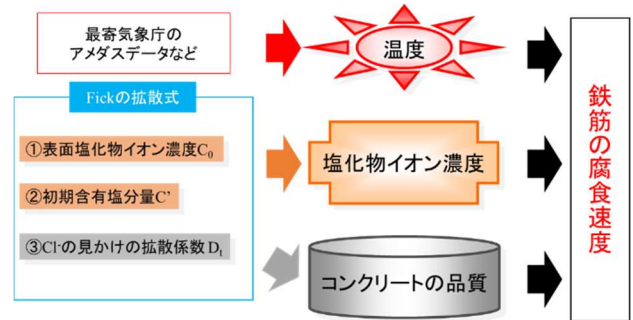


図 3.22 腐食速度と影響因子

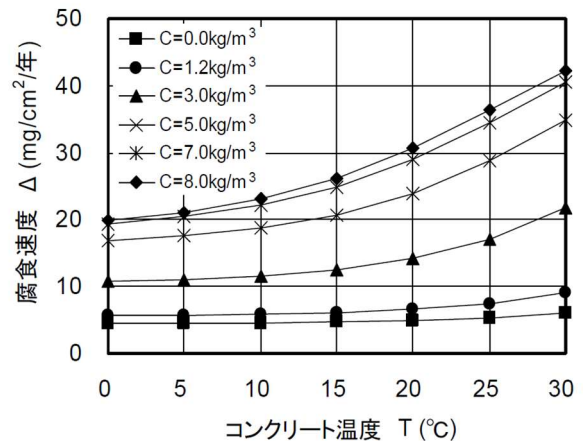


図 3.23 コンクリート温度と腐食速度の関係

筋は腐食を開始すると仮定している。

示方書の式、提案式、金谷らの試験結果を比較のうえ下限値を採用し、腐食発生限界塩化物イオン濃度を水セメント比に関わらず $C_{cr}=2.0\text{kg/m}^3$ の一定とした。

b) 進展期から加速期前期までの腐食速度

腐食速度と影響する因子との関係を図 3.22 に示す。鉄筋の腐食速度は鉄筋位置での温度、塩化物イオン濃度、コンクリートの品質の 3 つの因子に影響される。一般的に、温度が高く、塩化物イオン濃度が高く、拡散係数が大きい場合に腐食速度が増大することが知られている。

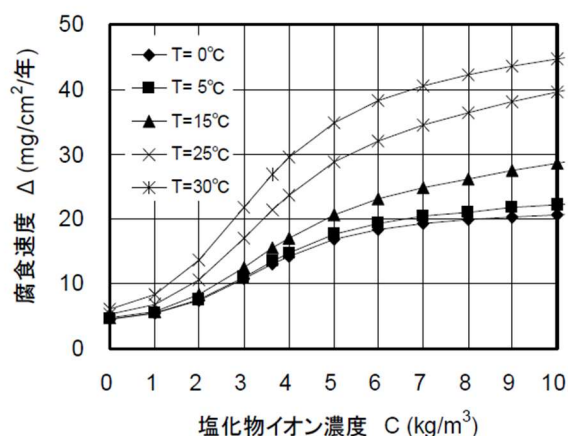


図 3.24 塩化物イオン濃度と腐食速度の関係

○ 温度の影響

鉄筋の腐食は化学反応プロセスであるため、外気温およびそれに伴うコンクリート内部温度の影響を受ける。外気温が高い夏季と低い冬季では鉄筋の腐食速度に差があり、季節の変化に伴い腐食速度は周期的に変化することが分かっている。塩化物イオン濃度をパラメータとして、温度とニューラルネットワーク解析から得られた推定値との関係を図 3.23 に示す。温度が高くなると腐食速度は指数関数的に増大する。また、温度が一定であれば塩化物イオン濃度が高いほど腐食速度は大きい。鉄筋の腐食速度に対する温度の影響は下式で表される。

$$C_T(T) = \exp \left[-2.593 \times \left(1000 \times \frac{1}{K} \right) + 8.695 \right]$$

ここで、 $C_T(T)$ ：腐食速度推定式における温度の影響を表す項、 K ：年平均気温(K)である。

○ 塩化物イオン濃度の影響

鉄筋の腐食は塩化物イオンによる不動態被膜の破壊によって引き起こされるとともに、その腐食速度は塩化物イオン濃度に影響される。進展期に移行後もコンクリート中への塩分の浸透は続き、塩化物イオンが蓄積されて濃度が高くなるほど腐食速度は増大する。温度をパラメータとして、塩化物イオン濃度とニューラルネットワーク解析から得られた腐食速度推定値との関係を図3.24に示す。塩化物イオン濃度が高くなると腐食速度は増大するが、収束する傾向がある。塩化物イオン濃度が一定であれば温度が高いほど腐食速度は大きい。鉄筋の腐食速度に対する塩化物イオン濃度の影響は下式で表される。

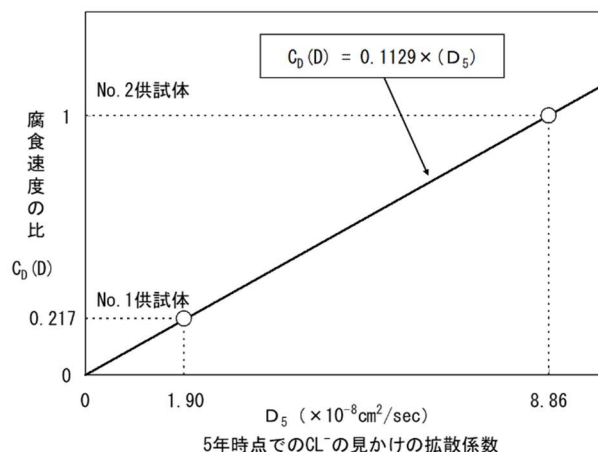


図 3.25 拡散係数による腐食速度の違い

$$C_C(C) = 1.93 \sqrt{1 - \frac{(C - 12.0)^2}{(12.0 - C_{cr})^2}}$$

ここで、 $C_C(C)$ ：腐食速度推定式における塩化物イオン濃度の影響を表す項、 C ：かぶり位置での塩化物イオン濃度(kg/m³)、 C_{cr} ：腐食発生限界塩化物イオン濃度(kg/m³)である。

○ コンクリート品質の影響

鉄筋の腐食要因は、酸素、水、塩化物イオン濃度である。このような劣化因子の侵入には、コンクリートの緻密性や品質が影響する。松田らは、品質が異なるコンクリート供試体を用いて腐食速度とコンクリート品質(拡散係数で代表)の関係を求めている。まず、十分に養生したコンクリート品質が良い供試体(No.1供試体)と、一般的な養生による品質が普通の供試体(No.2供試体)を作製した。これらの供試体の上にNaCl水溶液を貯留し、4~6年間屋外暴露することで塩害劣化を再現した。鉄筋の腐食速度はコンクリート中に埋設した電極によって求めている。実験結果から、腐食速度と拡散係数には図中に示すような線形関係があることが分かった。以上より、腐食速度に対するコンクリート品質の影響は下式で表される。

$$C_D(D) = 0.1129 \left(D_t \frac{0.419}{t^{-0.54}} \right)$$

ここで、 $C_D(D)$ ：腐食速度推定式におけるコンクリート品質の影響を表す項、 D_t ：経過年数 t 年時点での塩化物イオン濃度の拡散係数(cm²/sec)、 t ：調査時点の経過年数(年)である。

供用年数に対する拡散係数を用いて経過年数5年時点での拡散係数を求めることにより、腐食速度に対するコンクリート品質の影響が

求められる。

○ 腐食速度推定式

以上に述べた腐食速度への温度，塩化物イオン濃度，コンクリート品質による影響をまとめた鉄筋の腐食速度の推定式は下式で表される。

$$R(D, C, T) = R(C, T) \cdot C_D(D)$$

$$R(C, T) = 0.27R_0(C, T)^{1.38}$$

$$R_0(C, T) = 21.33C_C(C) \cdot C_T(T)$$

ここで， $R(D, C, T)$: 腐食速度($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年}$)， $C_D(D)$: コンクリート品質の影響を表す項， $C_C(C)$: 塩化物イオン濃度の影響を表す項， $C_T(T)$: 温度の影響を表す項

○ ひび割れの影響

鉄筋の腐食が進行し，腐食膨張圧によって生じたコンクリート内部のひび割れが表面に達すると，劣化過程は加速期前期に移行する。加速期前期では表面ひび割れから溶存酸素量の多い水が直接鉄筋に供給されるために，鉄筋の腐食速度は劇的に増加する。松田ら²²⁾²³⁾の試験では，ひび割れ発生後の腐食速度はひび割れが生じる前(進展期)の約3.9倍となっていることから ()，加速期前期の鉄筋の腐食速度は下式で表される。

$$R'(D, C, T) = 3.9R(D, C, T)$$

ここで， $R'(D, C, T)$: 加速期前期の腐食速度($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年}$)， $R(D, C, T)$: 進展期の腐食速度($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年}$)である。

c) ひび割れ発生時の鉄筋腐食減量

塩害劣化予測モデルを構築するためにひび割れ発生時の鉄筋腐食減量を求める必要がある。進展期から加速期前期に移行する時に発生するひび割れを一次ひび割れ，加速期前期から加速期後期に移行する時に発生するひび割れを二次ひび割れと定義する。ひび割れモードには鉄筋に沿ったひび割れと水平ひび割れの2つがある。鉄筋間隔が小さいと先に水平ひび割れが発生し，その後鉄筋に沿ったひび割れが発生する。鉄筋間隔が大きいと先に鉄筋に沿ったひび割れが発生し，その後水平ひび割れが発生する。形状が異なることで一次ひび割れと二次ひび割れのひび割れモードは変わる。鉄筋腐食の進展過程を図3.2.72のように考えた。コンクリ

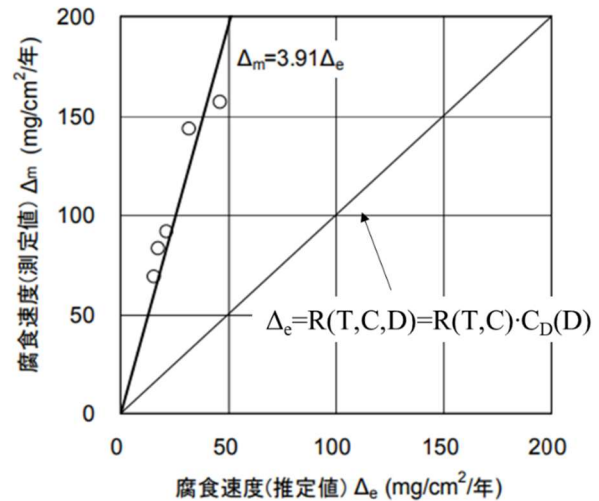


図 3.26 ひび割れ発生後の腐食速度モデル

ート中に浸透した塩分は鉄筋近傍に蓄積され，腐食発生限界塩化物イオン濃度を超えると鉄筋の不動態被膜が破壊され鉄筋に腐食が生じる。腐食生成物は膨張し，ブリーディングによる空隙を埋める。埋め終わると鉄筋とコンクリート間の隙間は無くなり，腐食生成物の膨張圧はコンクリートに直接伝達される。腐食生成物の膨張圧=内圧が増大し，コンクリートの引張強度を超えると，一次ひび割れが発生する。そこで一次ひび割れ発生によるゆるみが生じる。このゆるみを拘束するまで内圧はかからない。ゆるみが拘束されたら，内圧は増大し，ある一定まで大きくなると二次ひび割れが発生し，最終的にはかぶりコンクリートが剥離する。塩害劣化進行予測モデルは加速期後期までを考慮しているため，二次ひび割れ発生までの鉄筋腐食減量を求める。

○ ブリーディングによる空隙を充填する鉄筋腐食減量

鉄筋に腐食が生じるとブリーディングによる空隙を充填するように腐食生成物は膨張する。このとき，腐食生成物による膨張圧はコンクリートに伝達しないため，内圧は0となる。これにより，腐食膨張量は以下のとおりとなる。

$$(n-1)\Delta t = r_0$$

$$\Delta t = \frac{10\Delta}{1000\rho}$$

$$\Delta_0 = \frac{100pr_0}{(n-1)}$$

ここに， u : 腐食膨張量(mm)， n : 腐食生成物の膨張率(=2.5)， Δt : 腐食生成物の腐食前の厚さ(mm)， Δ : 鉄筋腐食減量(mg/cm^2)， ρ : 鉄筋の比

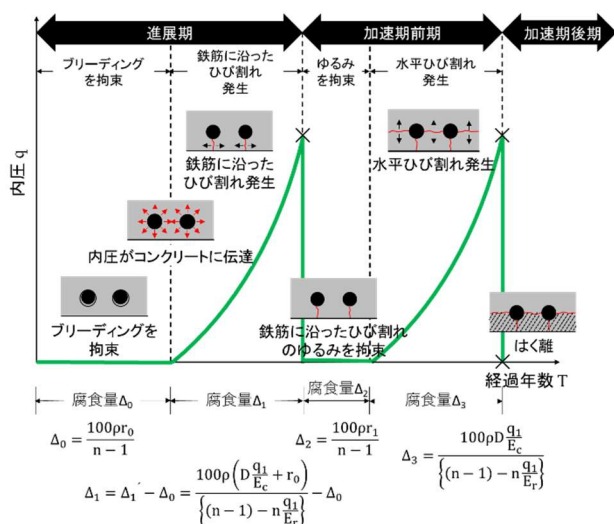


図3.27 鉄筋腐食による損傷モデル

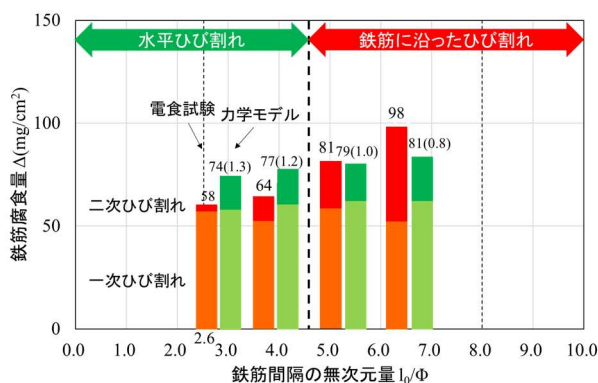


図3.28 力学モデルと電食試験によるひび割れ発生時の鉄筋腐食減量の比較

重(g/cm³), r_0 : ブリーディングによる空隙(=0.1mm), Δ_0 : ブリーディングによる空隙を充填する鉄筋腐食減量(mg/cm²)である. 本モデルを, 鋼材腐食によるひび割れ発生に関する力学モデル(図3.27)に組み込む. 本モデルは, 腐食が開始してから, ブリーディング箇所の充填埋過程, 一次ひび割れが発生する過程, 一次ひび割れによるゆるみを拘束する過程, 二次ひび割れが発生する過程の4つの過程をシミュレートする.

力学モデルと電食試験より算出したひび割れ発生時の鉄筋腐食減量を比較したものを図3.28に示す. グラフ上の数値は二次ひび割れ発生時の鉄筋腐食減量を示し, ()内は力学モデルと電食試験の比率を表す. 力学モデルでは, 鉄筋間隔に関わらず鉄筋腐食減量が概ね同値であり, 感度が弱い傾向にあったものの, 図3.2.79に示す通り, 鉄筋間隔の無次元量範囲2.6 ≤ l_0/Φ ≤ 8.0では, 力学モデルと電食試験によるひび割れ発生腐食減量は概ね一致した. よって,

提案した力学モデルを用いて, 一次・二次ひび割れ発生腐食減量を推定し, 塩害劣化進行予測への適用が可能であると判断した. なお, これまでに示した鉄筋間隔180mm($l_0/\Phi=9.4$)試験体のひび割れ発生腐食減量については, 力学モデルよりも高い値を示すものの, 塩害劣化進行予測を行う上では, 力学モデルを適用する方が安全側の評価となることから, l_0/Φ の適用範囲は設けないこととした.

3.4 真の分極抵抗値の測定値と腐食量推定

真の分極抵抗値の測定値から, 鋼材の腐食量の推定と, 将来予測の方法について述べる.

鉄筋の腐食量は, 真の分極抵抗値の測定値を用いて以下の式により算出される.

$$\Delta = K \frac{M}{wF_a} \int \frac{1}{R_p} dt$$

Δ : 鉄筋の腐食減量(=g/cm²), M : 鉄の原子量(55.8), F_a : ファラデー数(=96500 C), R_p : 真の分極抵抗(Ωcm²), K : 比例定数(=0.0030V)である.

ここで, 腐食減量を評価するためには, 鉄筋腐食時からの R_p の値の履歴が必要であり, それらを時間方向に積分して算出する. ただし, 検査対象橋梁では過去の履歴については得られていないケースが大半である. そこで, 前節で構築したモデルを援用することで, 現在の腐食量を推定することとした. 次節では, 実構造物に対する検討結果を示す.

3.5 塩害劣化進行予測の検証および余寿命予測の事例

(1) A市通路橋

瀬戸内海側に位置するA市の通路橋は, 1970年頃に建設された鉄筋コンクリート橋であり, 供用後約42年で撤去された. 主筋には異形鉄筋D22が配筋されており, 鉄筋ピッチは200mm, 実測の平均かぶりは58mmである. 計算に用いた見かけの拡散係数と表面塩化物イオン濃度は, 測定結果と提案モデルにより算定されたものを用いた. なお, 見かけの拡散係数は変動係数30%程度でばらつきを有するとした. このため, 塩害劣化予測時には, 回帰計算により同定した拡散係数に加え, 変動係数30%を考慮した見かけの拡散係数を用い, ばらつきを考慮した. 以上の塩分関連パラメータを纏めると, 表面塩化物イオン濃度は6.54kg/m³, 見かけの拡散係数

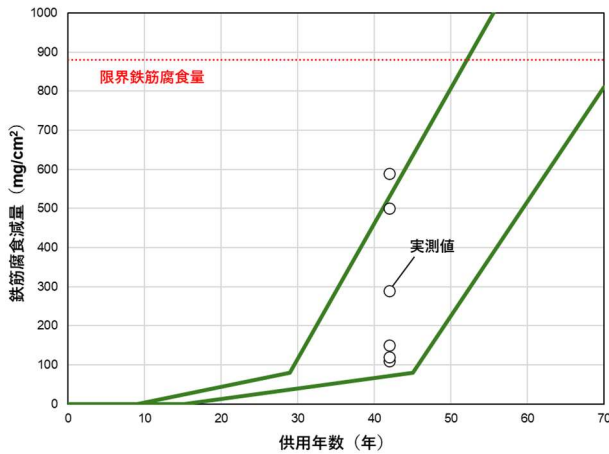


図3.29 限界状態に対する将来予測

は $1.21 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ 、変動係数30%を考慮した見かけの拡散係数は $1.57 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ である。

塩害劣化に対する予測結果を図3.29に示す。提案式の拡散係数平均値を用いた予測結果および平均値＋標準偏差を用いた予測結果より、限界鉄筋腐食減量に達するまでの期間は、供用42年から約8年～31年後と予測された。

(2) B市RC栈橋

瀬戸内海側に位置するB市RC栈橋は、1964年頃に建設された鉄筋コンクリート橋であり、供用後約58年が経過している。主筋には丸鋼φ16が配筋されており、鉄筋ピッチは200mm、実測の平均かぶりは24mmである。

計算に用いた見かけの拡散係数と表面塩化物イオン濃度は、前述のケースと同様に測定結果と提案モデルにより算定されたものを用いた。塩分関連パラメータを纏めると、表面塩化物イオン濃度は $2.21 \text{kg}/\text{m}^3$ 、見かけの拡散係数は $1.19 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ 、変動係数30%を考慮した見かけの拡散係数は $1.55 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ である。

塩害劣化に対する予測結果を図3.30に示す。より、限界鉄筋腐食減量に達するまでの期間は、供用8年から約17年～49年後と評価された。

(3) C市通路橋側壁

瀬戸内海側に位置するC市沿岸部通路橋は、1973年頃に建設された鉄筋コンクリート橋であり、供用後約51年が経過している。今回調査の対象とした通路橋側壁部の主筋には異形鉄筋D13が配筋されており、鉄筋ピッチは300mm、実測の平均かぶりは30mmである。

供用年数は41年である。塩分関連パラメータを纏めると、表面塩化物イオン濃度は $5.00 \text{kg}/\text{m}^3$ 、見かけの拡散係数は $1.24 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ 、変動係数30%を考慮した見かけの拡散係数は、

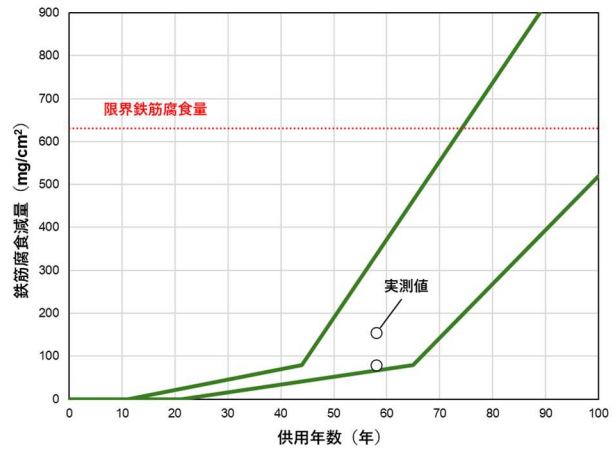


図3.30 限界状態に対する将来予測

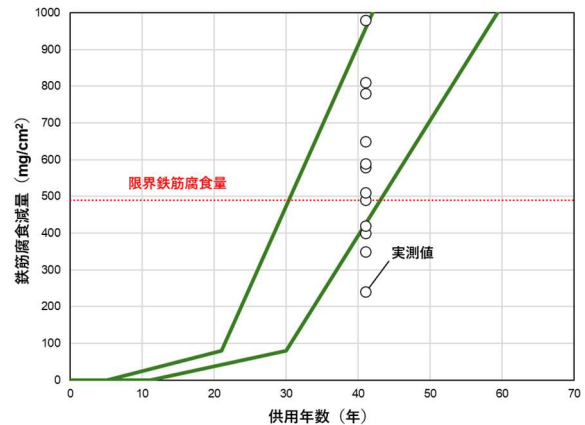


図3.31 限界状態に対する将来予測

$1.61 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ である。塩害劣化に対する予測結果を図3.31に示す。すでに実測鉄筋腐食減量が限界鉄筋腐食減量を超過している箇所もあり、速やかな修繕対応が望まれる。限界鉄筋腐食減量に達するまでの期間を算出すると、調査時経過年数の41年から遅くとも約3年後と予測された。

3.6 本章のまとめ

鉄筋コンクリート試験体を用いて、電気分散性状が、被測定面積および真の分極抵抗値の相違に関する実験的および解析的検討を行った。実験的検討では、解析的検討を行うために必要なコンクリート抵抗の計測と、見かけの分極抵抗および、真の分極抵抗を測定した。各種抵抗値には、従来の指摘通りの傾向が得られたことを確認した。実験で得られたコンクリート抵抗値を用いて、有限要素法による電気伝導解析を行い、電流密度分布図の作成をし、実験で得られたコンクリート抵抗値を用いて、有限要素法による電気伝導解析を行い、電流密度分布図の作成をし、コンクリートの水セメント比や鉄筋の分極抵抗がコンクリート中の電気分散性状

に影響を与えることを把握することができた。電気伝導解析ではコンクリートの電気分散性状によって被測定面積が決定される。分極抵抗の値が小さくなるほど、鉄筋に電流が集中し、被測定面積が小さくなる。また、コンクリート内に分散されると被測定面積が小さくなる。そこで、実験から得た見かけの分極抵抗と電気伝導解析から求めた被測定面積を基に見かけの分極抵抗を算出し、両者を比較した。その結果、いずれの試験体も実験値の方が見かけの分極抵抗は大きくなった。これは実験で用いたCM-Vはかぶり深さと鉄筋径から被測定面積を決定していることから、同じ寸法の試験体では被測定面積は一定となることに起因し、そのため、実験値と解析値に差が生じていると考える。正しい被測定面積を算出するため、実験値の見かけの分極抵抗と解析で出た被測定面積から真の分極抵抗を求め、再び電気伝導解析を行い被測定面積と見かけの分極抵抗を算出した。その

結果1度目に解析した結果に比べて再び解析して求めた見かけの分極抵抗の方が実験値に近くなった。

本章の検討により、正しい被測定面積と被測定面積を算出することにより、鉄筋の真の分極抵抗を正確に算出し、鉄筋腐食を判断することができると考えられる。

また、本研究では、進展期から加速期前期への移行起点となるひび割れ発生腐食減量、および加速期前期から加速期後期への移行起点を配筋の異なる種々のスラブ試験体を用いた電食試験結果を基に算出し、新たな塩害劣化進行予測手法構築した。

これら塩害劣化進行予測手法と非破壊検査結果を援用することで、鋼材破断に至るまでの時刻を予測することが可能となった。

第4章 3 軸磁気計測装置による鋼材破断検知の現場適用性の検討

4.1 はじめに

塩害や中性化等の要因で鉄筋コンクリート構造物内部の鋼材が腐食すると、その破断のリスクが生じ、構造性能を大きく損なうことが懸念される。内部鋼材の破断状況を非破壊で確認する方法として、一般にX線透過撮影法、漏洩磁束法等が挙げられる。

X線透過撮影法は、コンクリート内部を実体に近い状態で確認でき、透過写真によって破断の有無を容易に判別できる一方、放射線防護のための安全管理上の制約と、また検査資材の準備および検査現場への装置配置にも制約があるため、極めて高コストな計測となっている。

漏洩磁束法は、内部鋼材が強磁性体であることを利用し、コンクリート表面から永久磁石で内部鋼材を着磁させ、その後測定された磁束密度の波形から鋼材破断箇所を検知するものである。鋼材破断箇所における波形による位置の特定に一定の知識と経験を要するものの、取り扱いが容易で、人体への影響がない本手法は広く普及しつつある。この一方で、構造物の診断技術者が不足する現状において、磁束密度に関する波形から破断の有無の判別を自動化することが強く求められている。

本研究は、漏洩磁束法に基づき3軸方向を一度に計測可能な磁気計測装置で得られた波形から、鋼材の破断の有無を自動的に判別する手法を提案するものである。

4.2 使用する機器

本研究ではコニカミノルタ社製の3軸磁気計測装置SenrigaNを使用する(図4.1参照)。本機器は、長軸方向54cmに1cm間隔、短軸方



図4.1 使用するデバイス

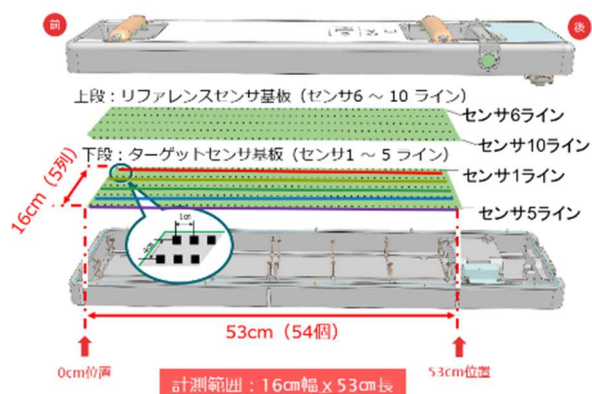
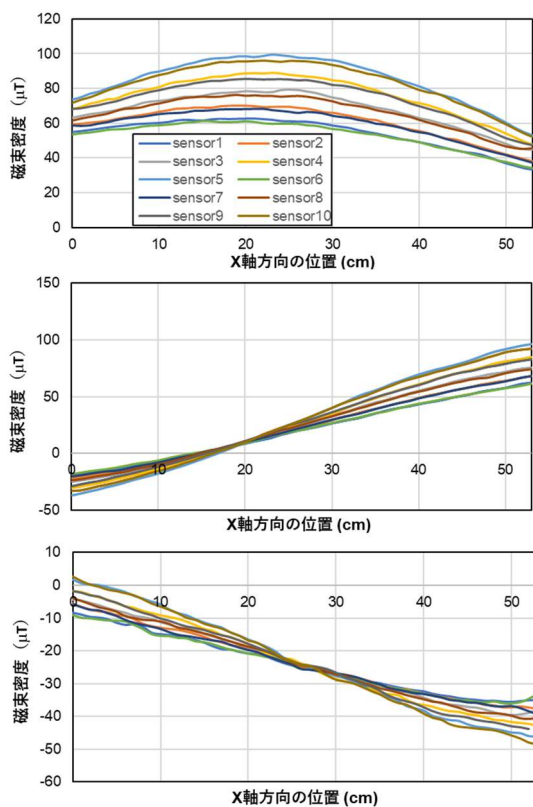


図4.2 測定器に内蔵するセンサの位置

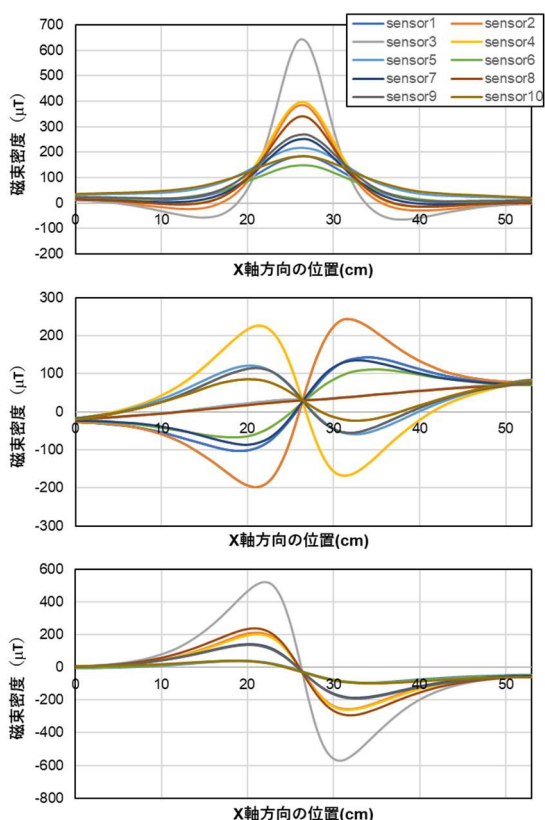
向16cmに4cm間隔の3軸磁気センサが上下2段に内蔵されている(図4.2参照)。この装置を用いて面的な磁束密度分布を計測した。

漏洩磁束法の計測は、まず強力な永久磁石をコンクリート表面に軽く押し当てた状態を維持しつつ、幾度か動かすことで内部の鋼材を着磁させる。本機器では、S極をコンクリート表面に押し当て、計測器の原点から図4.2の前後方向に永久磁石を動かす。

鋼材破断がない場合、磁石を移動させた範囲の両端がそれぞれS極とN極に分極する一方で、鋼材破断が生じた場合は破断箇所の左右N極とS極が同時に生じる。図4.3に破断のない場合における波形を、図4.4に破断のある場合におけ



(上 : X 方向, 中 : Y 方向, 下 : Z 方向)
図 4.3 破断が生じていないケースの波形



(上 : X 方向, 中 : Y 方向, 下 : Z 方向)
図 4.4 破断が生じたケースの波形

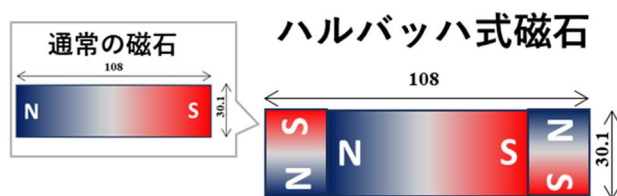


図4.5 ハルバツハ式磁石

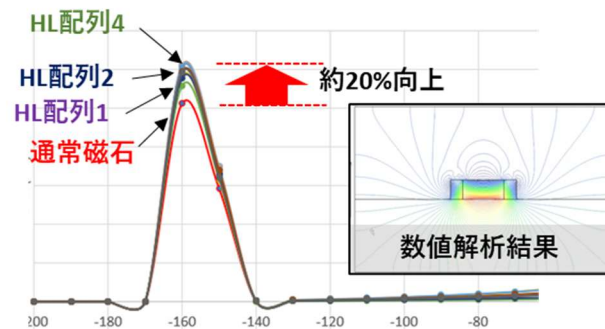


図 4.6 各磁石による減衰波形

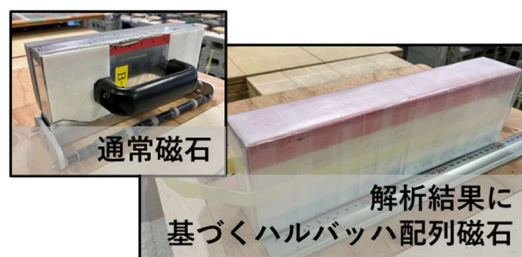


図 4.7 試作した磁石

るそれらの波形を示す．使用したPC鋼材の種類はSWPR7Bの7本より，径は12.7mmのもので，かぶりは5cm，破断の離隔は5mmで実施した．破断が生じていない場合には，波形の挙動が概ね単調的である一方，破断が生じている場合には，X軸方向に1つの極大値，Y軸方向には破断箇所の上側のセンサと下側のセンサによる波形が交差（図4.4中のセンサ3下に破断がある場合，センサ2とセンサ4の波形同士の交差），Z軸方向には1つの極大と極小が検知されている．本計測結果は，極めて単純な系におけるものであり，この2種類の図の相違を容易に判別可能であるが，スタースラップが存在する場合や，PC鋼材が複数本存在する場合には，それらの影響がノイズとなり，診断結果に影響を与えうることには留意する必要がある．

4.3 新たな着磁法の提案

本研究の課題に関して，特にかぶりが15cm程度といったかぶりが大きい場合において，破断の検知精度が著しく低下していた．そこで新た

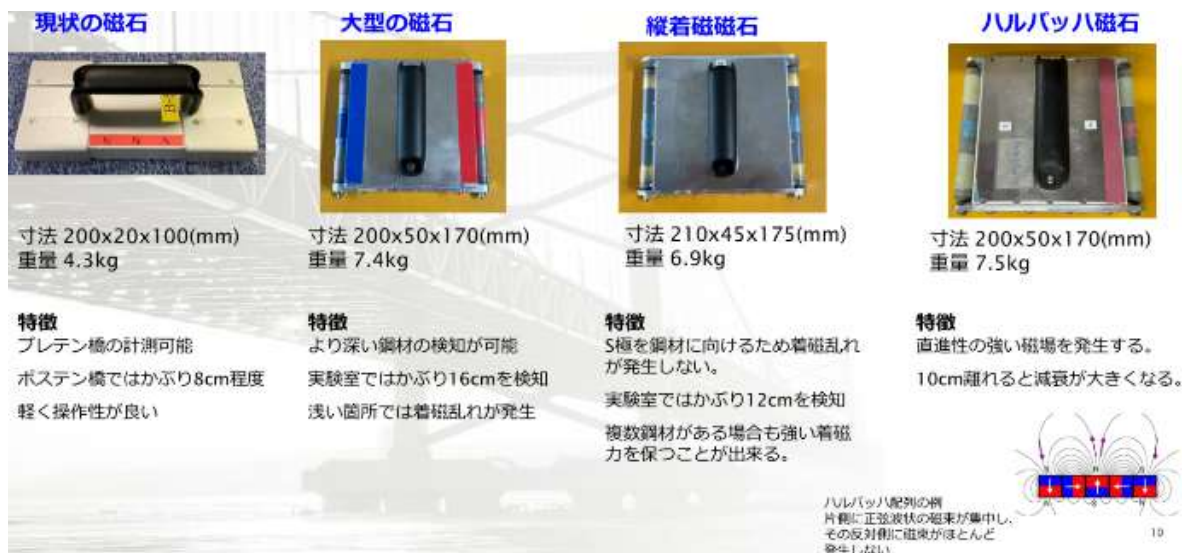


図 4.8 開発した磁石の種類と特徴

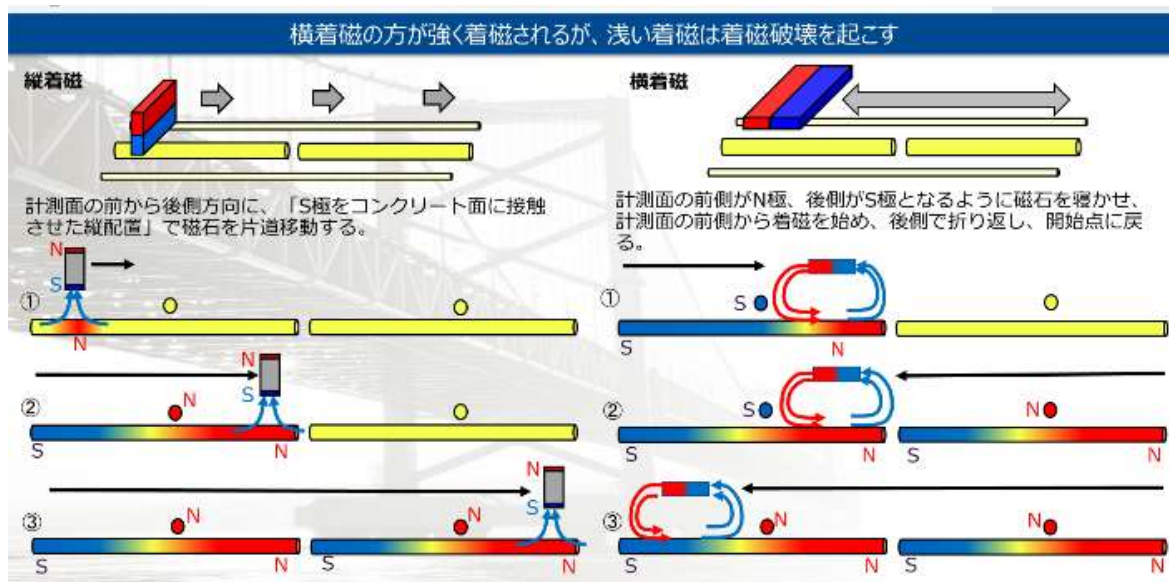


図 4.9 縦着磁磁石が有利な点

な着磁方法を提案することとしていた。当初目標としては、パルス着磁法を用いることとしていたが、その場合、かぶりが大きい場合には、過電流によるノイズが発生するため、数値解析によりノイズ発生条件を把握することとしていた。ただし、感度解析の結果、ノイズの低減を可能とすることができなかった。

そこで、図4.5に示すハルバツハ配列に基づく漏洩磁束法に特化した着磁用磁石を独自に開発し、かぶり深部における計測精度の向上をはかった。図4.6に、通常磁石およびハルバツハ配列磁石による着磁後の減衰波形の比較結果を示す。なお、ハルバツハ配列においては、構成する磁石のアスペクト比および厚みを順次変化させた複数の結果に対する感度解析を実施した。その結果、両極間の距離が251mm、磁

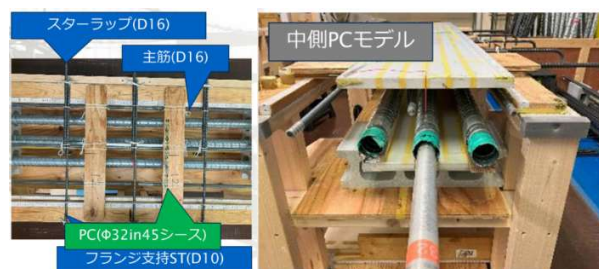


図4.10 ポストテンション方式PCコンクリート模擬試験体

石の厚み30mm、幅90mmの場合において通常の磁石よりも約20%の磁力を得た。この磁石を図4.7のとおりに試作した。

一方、改良後においても然程破断検知の性能が向上しなかったため、図4.8に示すように磁

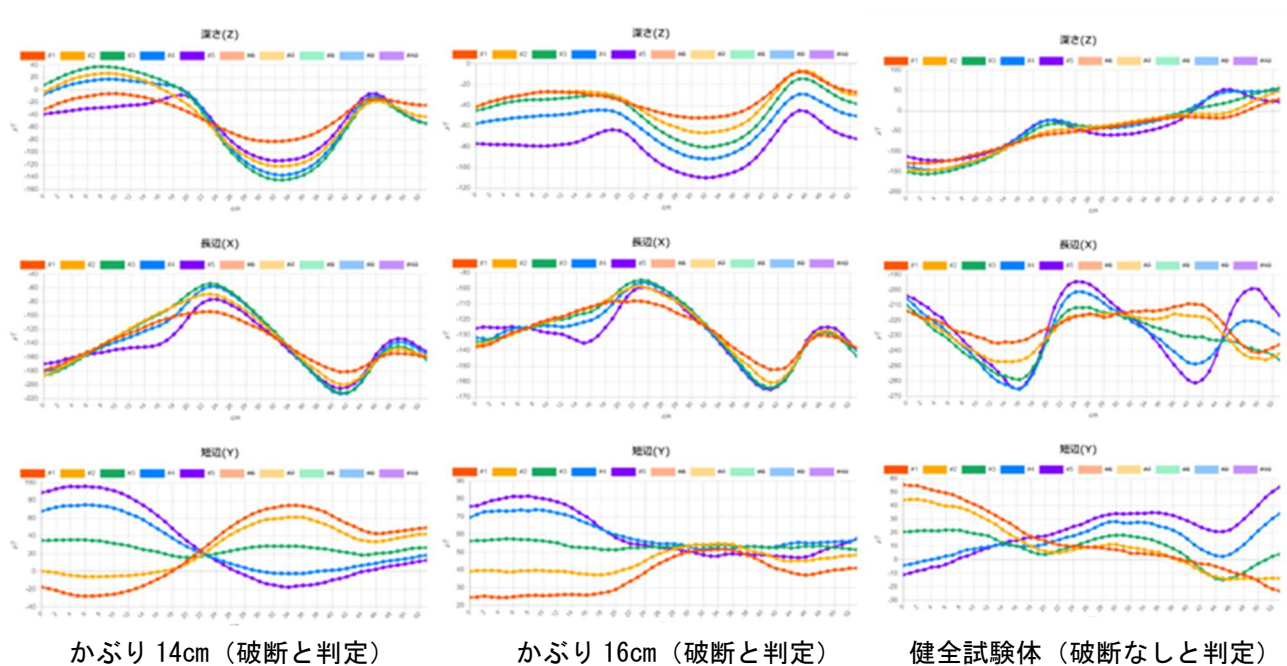


図 4.11 大型磁石による計測結果

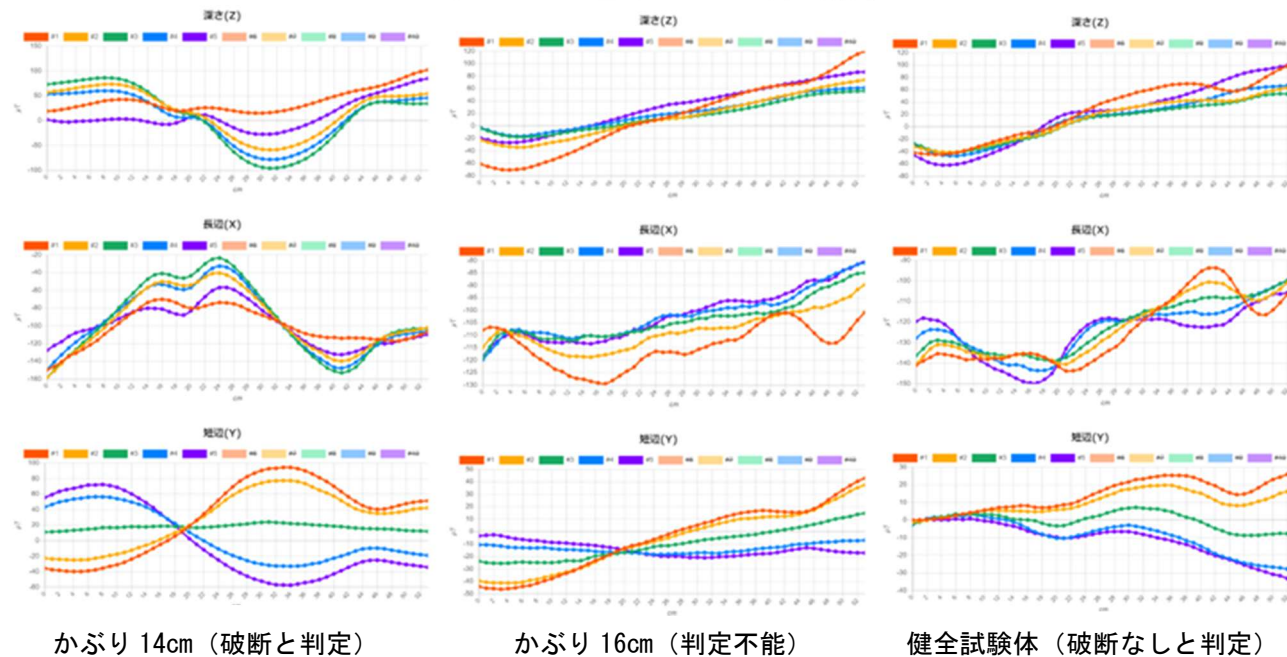


図 4.12 ハルバツハ式磁石による計測結果

石の大型化に加えて、縦着磁磁石の構築も行った。ここで、縦着磁磁石を採用した経緯を図4.9に示す。横着磁の場合、鋼材に対して強く着磁し深部にまで計測できる可能性があるが、浅い着磁の場合には結果的に着磁破壊に至る可能性があるため、縦着磁により計測を行うことでそれを回避することとした。

各磁石における破断検知精度の検証のため、図4.10に示すポストテンション方式PCコンクリート模擬試験体を対象に試験を実施した。か

ぶりは12cm, 14cm, 16cmとした。

まず、大型磁石とハルバツハ式磁石との比較を行った。その結果を図4.11および図4.12に示す。ハルバツハ式磁石よりも大型磁石のほうが破断判定を正確に行えるほどの波形の変化を得た。

さらに、図4.13に示す鋼材のシース管の中にある12本で撚っている鋼材を1本ずつ破断させることで生じる波形の変化から破断検知の性能を検証した。図4.14に、撚線の破断本数と、



図 4.13 ポストテンション方式 PC コンクリート
模擬試験体

それぞれの波形および、破断に対する診断精度に関する結果を示す。3本程度の破断では、大型磁石および縦着磁磁石ともに検知できなかったが、それ以上の破断では、縦着磁磁石のほうが、大型磁石よりも鋼材の撚線の破断による変化が見られ、適切に破断の検知ができることが判明した。かぶりは10cm程度しか評価できないものの、実際のほとんどのPC構造物のかぶりの大きさには対応可能と思われることから、本磁石を計測に採用する。

4.4 AIによる破断検知アルゴリズムの開発

(1) スターラップを有する系における自動検知

スターラップを有する系においてPC鋼材の破断が波形に与える特徴を把握するため、コンクリートを用いないPC中空モデル試験体を対象とした試験を実施した。コンクリートと空気は比透磁率が共に1であるため、磁気としては



図 4.15 中空桁における PC 鋼材破断なしの波形
(上 : X 方向, 中 : Y 方向, 下 : Z 方向)

等価とみなした。図4.15に試験体の外観を示す。使用したPC鋼材の種類はSWPR7Bの7本よりであり、径は12.7mm、長さは2mのものを使用し、鋼材同士の間隔を4cm、かぶり5cmとした。また、スターラップはD13のものを30cm間隔で配置した。

図4.16に、PC鋼材に破断が無い場合における測定波形の一例を示す。スターラップは、図中横軸における11cmと41cmの位置にある。PC鋼材のみならずスターラップへの着磁の影響があるため、X軸では1つの極小値ののちに1つの極大値が、Y軸、Z軸の波形においては磁気の1つの極大値がちょうどスターラップの位置に生じている。この波形のパターンは、図4.4に示すような、破断時における波形の特徴とは異なっていることがわかる。

図4.17に、PC鋼材が破断した場合における測定波形の一例を示す。なお、破断の箇所はグラ

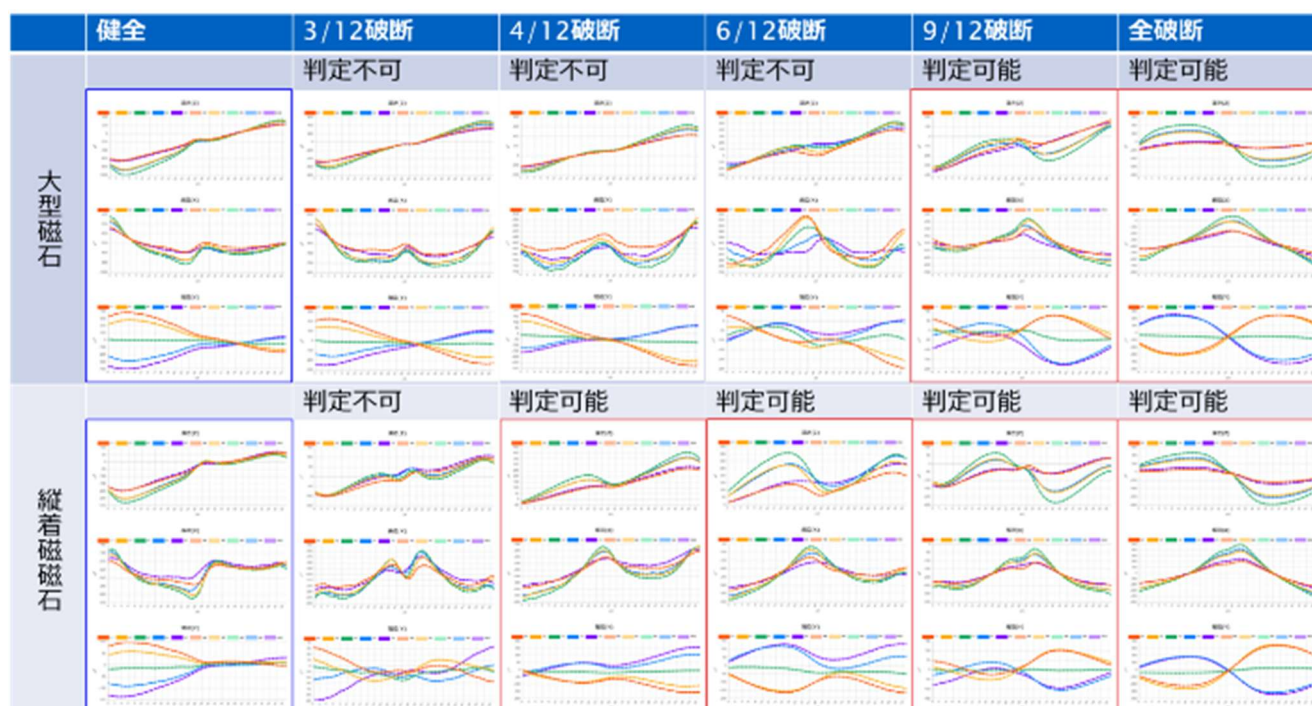


図 4.14 撚線の破断本数と検知性能

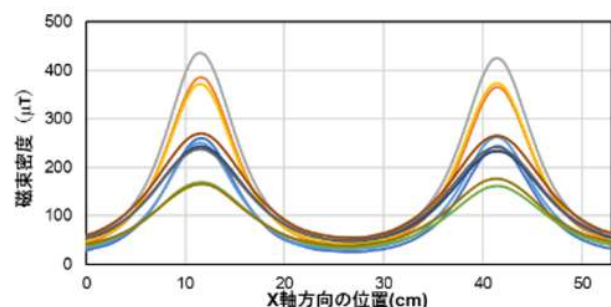
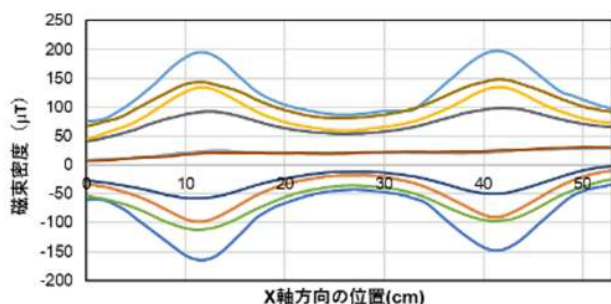
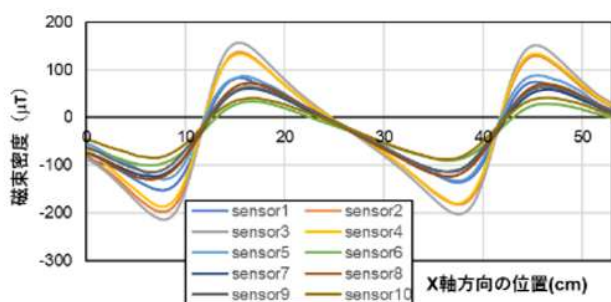


図 4.16 中空桁における PC 鋼材破断なしの波形
(上 : X 方向, 中 : Y 方向, 下 : Z 方向)

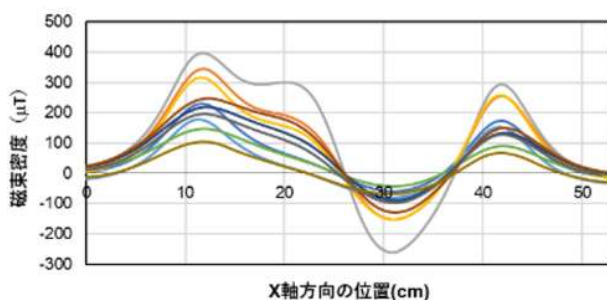
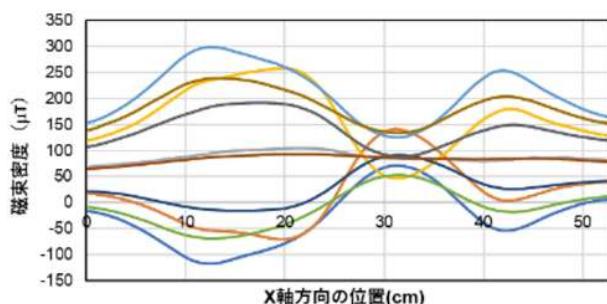
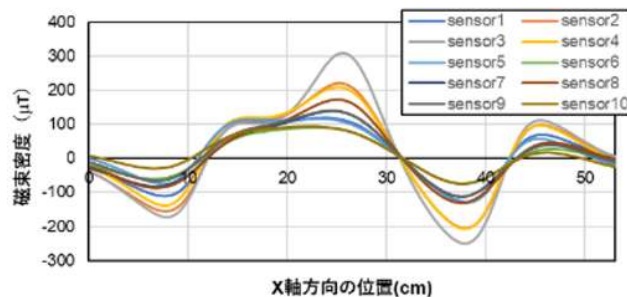


図 4.17 中空桁における PC 鋼材破断なしの波形
(上 : X 方向, 中 : Y 方向, 下 : Z 方向)

フ横軸の25cmにあり、スターラップは図4.155の場合と同じ位置にある。スターラップの無い波形に、図4.4に示すような破断時での波形を足し合わせたような波形を呈した。実際のPC部材の状況に近い波形であり、スターラップのような連続した鋼材がY軸方向に沿って鋼材が存在するケースによる波形と、PC鋼材のような、X軸に沿った鋼材が破断したケースにおける波形のそれぞれの特徴を念頭において診断を行うことが必要であることを示唆している。

(2) 自己相関性に着目した自動判別アルゴリズム

実験室の中空部材を対象に機械学習アルゴリズムを援用した自動検知手法を構築する。図4.17に示す波形のままでは、波形の特徴を機械学習等により機械的に抽出することが困難であり、仮に抽出できたとしても破断判別を精度高く行えないことが事前の検討より判明したため、可能な限り波形に対する前処理を施すこ

ととした。PC鋼材に破断が生じていない場合、図4.5に示すとおり、磁場のZ軸成分においてスターラップの存在する箇所につき1つずつの極大値が周期的に存在することは前節での検討で判明している。また、PC鋼材に破断が生じた場合に磁場が反転することから、グラフ上では「S」の文字を反転させたような波形が付加されることから、上記の周期性を呈する波形に対しては負の相関が生じていると言える。これらの特徴から、破断の無い場合において、スターラップの存在がもたらす周期的な波形を参照波形とすると、その波形と同じような形状が存在することをもって自己相関性を確認すれば、例えば自己相関性が高い場合にはスターラップの箇所であると判別でき、また参照波形とは異なり負の相関がみられる場合には鋼材が破断した箇所と判別することが可能であろうと考えられ、本章ではその考え方に基づいて自動判別手法を構築する。

磁場のZ軸成分に対して、自己相関処理を適

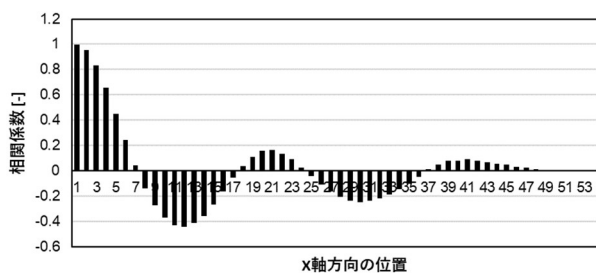


図4.18 中空桁におけるPC鋼材破断ありのコレログラム

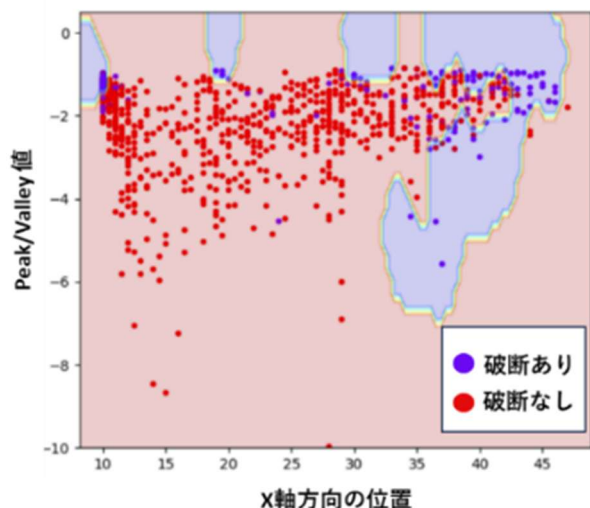


図4.19 SVMにより構築された判別モデル

用したコレログラム（高瀬，土木学会論文集，1957）を計算した．コレログラムとは，図4.18のZ成分のような周期性のあるデータに対し，1つ目の起伏を元データの参照波形とした場合，元データをずらしたデータとの相関係数を計算し，1次元の棒グラフで表現したものである．

図4.18に対して作成したコレログラムの一例を図4.19に示す．横軸の値は初期の起伏波形に対して，X軸方向にずらした量を示し，縦軸は相関係数を示す．定義上，図4.19の横軸が0の場合，参照波形と一致し相関係数は必ず1.0になるため，この周辺の正の相関係数を呈する領域は考慮しない．このケースの場合，縦軸の値がはじめて0以下となる，X軸方向の位置が10cm以上の場合に着目した．このドメインにおいて相関係数が最小(Valley値)および最大(Peak値)となる座標を算出する．最後に，X軸方向の位置と最大値と最大値の比であるPeak/Valley値に関する2次元プロット空間を可視化し，そのプロット群に対して機械学習アルゴリズムを用いて判別モデルを構築する．なお1本の直線によって，破断のプロットと破断なしのプロットを分離できるのであれば，線形モデルによる判別分析を行うが，今回は直線では十分に分割できなかつ

表4.1 中空部材における結果

	破断あり(予測)	破断なし(予測)
破断あり(実際)	65	28
破断なし(実際)	27	163

Accuracy	Precision	Recall
正解率	適合率	再現率
80.6%	70.7%	69.8%

表4.2 中空部材における結果

名称	所在県	橋梁形式	架設年	橋長(m)	鋼材種類	かぶり(mm)
A	広島	PC単純床版	1967	8.65	Φ2.9 2本	30
B	富山	T桁	1972	305	7本より 12.7mm	45
C	沖縄	単純PCI桁	1982	10.4	Φ2.9 2本	30
D	新潟	PC単純床版	1973	30.1	7本より 10.8mm	40



図4.20 PC実橋梁から切り出した桁部材

たため，カーネル法によりプロット群を高次元の特徴空間に写像し，SVM（サポートベクターマシン）（Bishop, C. M., Springer, 2006）による判別を行った．また，破断した鋼材および破断していない鋼材における波形，計848における波形を機械学習させた．なお，機械学習モデルの性能検証には5分割交差検証を採用した．

図4.19に判別モデルによる算定結果を示す．図のプロットは実際に破断がある場合および破断がない場合を示しており，プロット以外の赤色領域と紫色領域はSVMにより構築されたモデルであり，赤色領域は破断なしと判別され

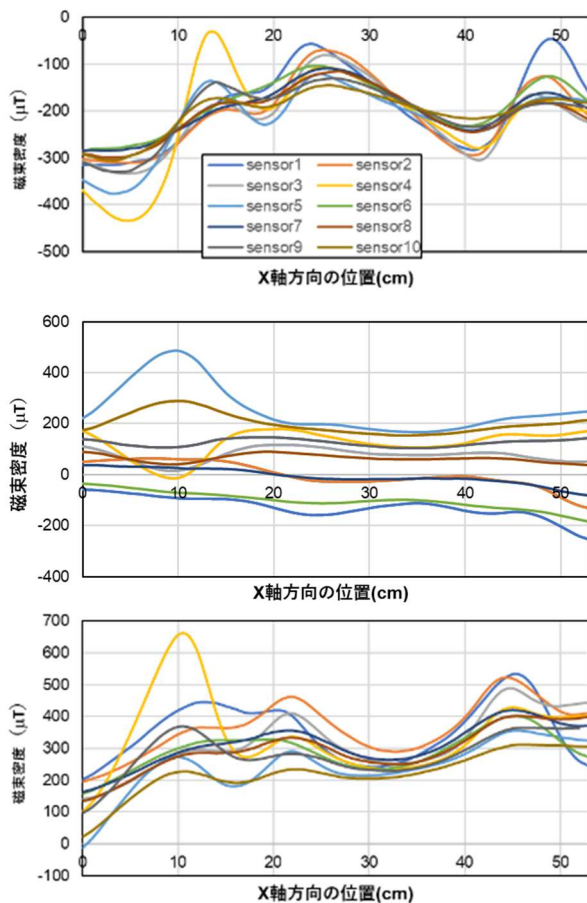


図4.20 PC実橋梁の切り出し桁における波形
(上：X方向，中：Y方向，下：Z方向)

る領域で、紫色領域は破断ありと判別される領域であって、今後新たに計測値がプロットされた場合には、この領域に含まれる色によって破断の有無を判別する。

(3) PC実桁に対するモデル検証

PC実橋梁に対する計測を行うとともに、今回、中空桁を例題として構築したモデルによる精度検証を行った。表4.2に、今回対象としたプレテンション方式の実橋梁の一覧を示す。また、図4.20に計測を行った実橋梁のうち、切り出しを行い桁のみ設置した表中の橋梁Cを示す（田邊ら，令和4年度土木学会全国大会概要集，2022）。また、漏洩磁束法により波形を取得した後、手練の技術者によって破断の有無を判別し、その結果を以降の検討における正解とした。判別には破断が生じている場合の各軸の特徴（X軸方向に極大値をとり、Y軸方向に破断箇所の上側と下側のセンサによる波形が交差し、Z軸方向に1つの極大値と極小値が発生するといった特徴）が現れているか分析を行い判定している。なお、技術者による判別結果の妥当性は、PC実橋梁のうち、各橋梁の数か所におけるかぶ

表4.3 中空部材における結果

	破断あり (予測)	破断なし (予測)
破断あり (実際)	768	732
破断なし (実際)	2	328

Accuracy 正解率	Precision 適合率	Recall 再現率
59.9%	99.7%	51.2%

りコンクリートをはつり、破断を確認したことで検証されている。

PC鋼材が破断したケースにおける波形の一例を図4.21に示す（C橋梁で計測）。なお、破断箇所は、概ね13cm（奥行方向でセンサ4に該当する箇所）付近と48cm付近（奥行方向でセンサ1に該当する箇所）の2箇所であった。中空部材の結果と異なり、スターラップの存在（22cm，45cm付近）および破断したPC鋼材の影響のみならず、コンクリートの存在による磁束密度に対するノイズの影響や、鋼材に生じた腐食生成物に由来する磁場の影響等で、波形に乱れが生じた。

(4) テンプレートマッチングによる判別モデルの構築

前章までの検討では、各方向の一次元方向の磁束密度の波形から破断の有無を判別したが、多次元的な波形の特徴を一度に勘案することも重要である。そこで今回、Z軸成分の波形をX軸およびY軸成分で微分した2次元画像に対し、事前に用意した破断時の両画像に対する類似度から、破断の有無を自動判別するテンプレートマッチングと呼ばれる手法を利用した（酒井幸市，森北出版，2006）。具体的には、磁気センサで計測されたZ軸のデータをグレースケールに画像化し、破断画像とテンプレートマッチングさせ、その類似度より破断の有無を類推するものである。

テンプレートマッチングでは、あらかじめ用意したテンプレートと呼ばれる、診断しようとする画像に比べてサイズが小さい画像を用意し、診断しようとする画像の中からテンプレートに一致する箇所を探索することを行う。つまり、サイズ $M \times N$ （ M および N は自然数）の入力画像 $f[i, j]$ の中から、サイズが $m \times n$ （通常は $m < M$ かつ $n < N$ ， m および n は自然数）のテンプレート $t[i, j]$ の画像に一致する位置を検出する方法である。図3.3.20に示すようにテンプレートの中心を入力画像のある点 (i, j) に置き、点

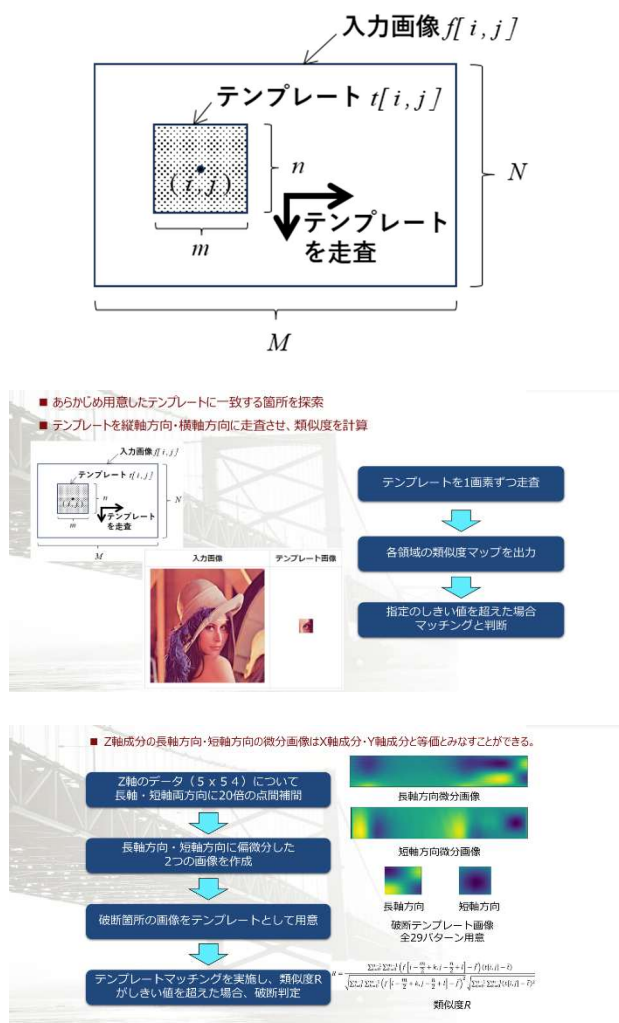


図4.21 テンプレートマッチング工程の概念図

(i, j) をラスタ走査と呼ばれる、座標の成分 i もしくは j の一方を固定して一方を走査させる方法をさせながら、重なっている局所領域の類似度を計算し、この値が最大になる位置を決定する。類似度 R の計算には、以下の相関係数の算出に用いられるものを用いる。なお、各文字の直上に付随した「-」の記号は平均値を意味する。

$$R = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{k=0}^{m-1} (f[i - \frac{m}{2} + k, j - \frac{n}{2} + l] - \bar{f})(t[i, j] - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{k=0}^{m-1} (f[i - \frac{m}{2} + k, j - \frac{n}{2} + l] - \bar{f})^2} \sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{k=0}^{m-1} (t[i, j] - \bar{t})^2}}$$

53cm×16cmのエリアで計測したZ軸方向の波形に対して、長軸であるX軸方向および短軸であるY軸方向の変化量の可視化のため、センサが捉える磁界におけるZ軸成分をXおよびY軸成分それぞれ微分し、2次元化された画像を2種類作成する。なお、センサの数が少なく解像度が低いため20倍に線形補完してアップスケーリングさせる。この画像を8bitに正規化した上で $dZ(z)/dx$ と、 $dZ(z)/dy$ の値をグレースケール画

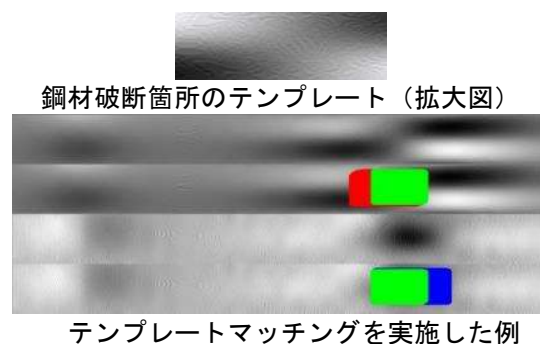


図 4.22 テンプレートマッチングを実施した例

(上段 2 段は長軸方向に、下段 2 段は短軸方向に微分した画像。上下段の 2 段は同一の画像。赤：長軸方向が一致、青：短軸方向が一致、緑：長短両軸方向で一致)

像として2枚生成する。ここに、 $Z(z)$ はZ方向における磁束密度の値、 x , y , z は各軸の方向である。

中空部材での鋼材破断箇所を測定し、破断箇所を含む画像に対して前節に示した前処理を施し、破断箇所の周辺を切り取って画像化してテンプレートとしたものを図4.22に示す。次にこのテンプレートを、判別対象画像に対してラスタ走査させることで類似度をそれぞれ算出し、閾値を両画像ともに超過した場合を破断として判別することとした。図4.23に、実際にPC実橋梁を測定した波形から構築された画像に対して、テンプレートを走査させ、事前の感度分析の結果、X軸方向で R が0.65以上、Y軸方向で R が0.90以上と判別された箇所を図示したものの一例を示す。今回は、長軸方向と短軸方向で上述の閾値を超過した箇所を破断箇所と判断することとした。

ここで、一部計測結果の精度が低下する領域が見られたので考察を加える。図4.24に、鋼材破断の箇所において計測を行った一例を示す。センサ1および5においては、着磁不良や、オーバーラップが少ないことが起因する着磁不具合により精度が低下することが判明した。また、

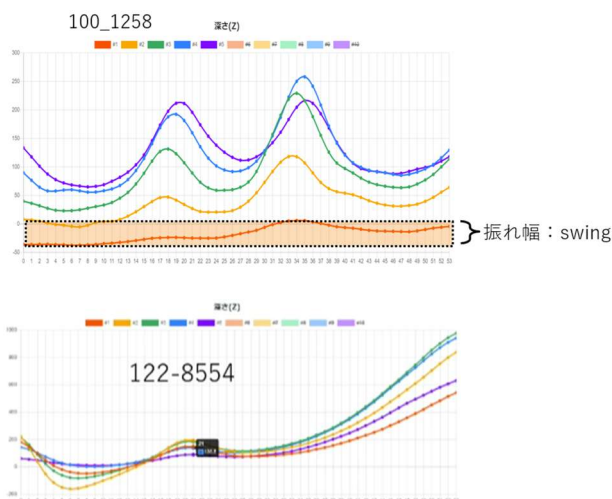


図 4.24 センサ1および5に不良が見られる場合

センサ1および5のみ破断信号を検知した場合、特に先頭5cmにおいて破断がある場合に精度が低下することが判明した。

以上の結果に基づき、着磁不良に関するロジックをアルゴリズム化した内容を図4.25に示す。このアルゴリズムを画像ヒートマップマッチング手法に導入することで、さらなる精度向上を実現した。

表4.4に、表4.2に示したPC実橋梁（スターラップを含む箇所）を対象に漏洩磁束法の波形を2次元画像化したものに対する破断の判別結果と、実際の破断の有無との結果を比較したものを示す。なお、誤検知アルゴリズムについては導入していない。モデルの正解率は約91%、適合率は約98%、再現率は約74%となって

おり、自己相関に関する判別モデルと比較して

表4.3 中空部材における結果

	破断あり (予測)	破断なし (予測)
破断あり (実際)	525	182
破断なし (実際)	13	1520

Accuracy 正解率	Precision 適合率	Recall 再現率
91.3%	97.6%	74.3%

いずれも高い精度での診断が可能となっている。再現率が若干低く、破断箇所の見逃しの可能性が4箇所1箇所程度生じるリスクは生じるが、今後可能な限り再現率を向上させたモデルの構築することに加え、類似度Rが閾値付近である診断結果に対しては技術者による診断結果を追加で実施するなどの対応を加えたい。誤検知アルゴリズムを導入し、再度、検証した結果を検討したところ、精度に変化が見られなかったが、今後の測定においては、このような誤検知が生じる可能性があるため、引き続き検討を継続したい。

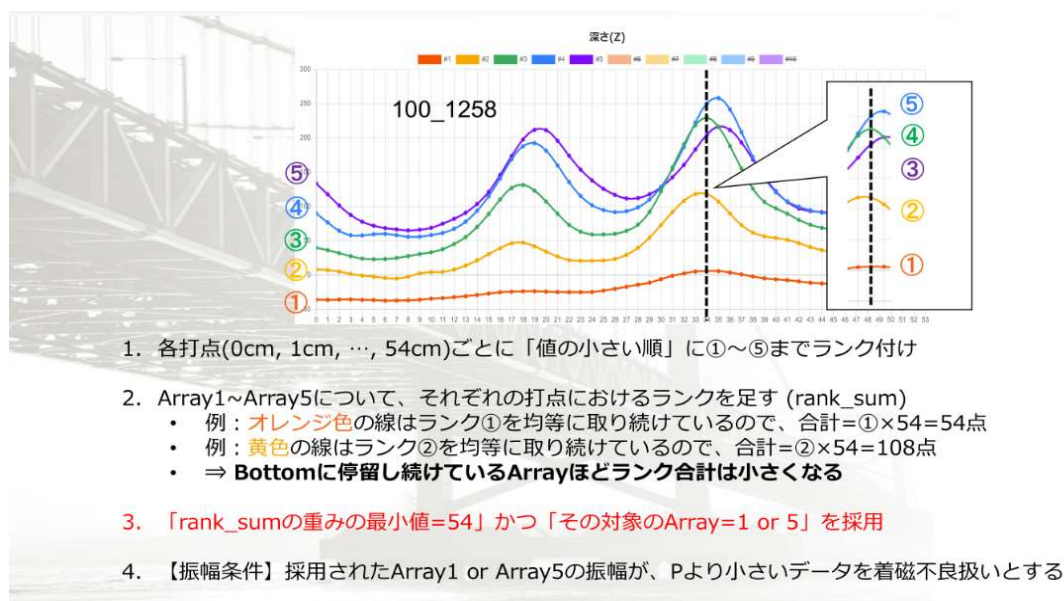


図 4.24 端部センサによる誤検知回避アルゴリズム

第5章 統合システムの構築

本章では、

- ① 香川大学で独自に開発した中赤外分光イメージングデバイスによりコンクリートの表面の塩化物イオン濃度および含水率分布を2次元イメージングし、劣化懸念箇所を抽出する手法
- ② 劣化懸念箇所付近における内部鋼材の腐食速度を分極抵抗法に基づき、香川大学で開発した独自のアルゴリズムにより非破壊で評価する手法
- ③ コニカミノルタ社が独自に開発した磁気センシング技術に基づくデバイスで鋼材破断を検知する手法

という3手法を融合した統合システムを検討する。具体的には、3つのデバイスで計測された一連のデータ群をクラウドで保存する。また、デ

ータ管理を容易にするUIを開発するものである。

検討の結果、統合的維持管理システムのソフトウェアの開発、保守、運用の一連の作業には今後も継続的に高額な費用が生じる。そこで現在、株式会社KMC（兵庫県神戸市）が開発したRSAシステムに、今回のデータを導入させ、さらに申請者が開発した橋梁劣化予測AIシステムを組み込むことで対応を進めている。

今回対象とした橋梁に対してはクラウドに保存しているが、近日中の一般へのリリースに向けて引き続き開発を行っている。

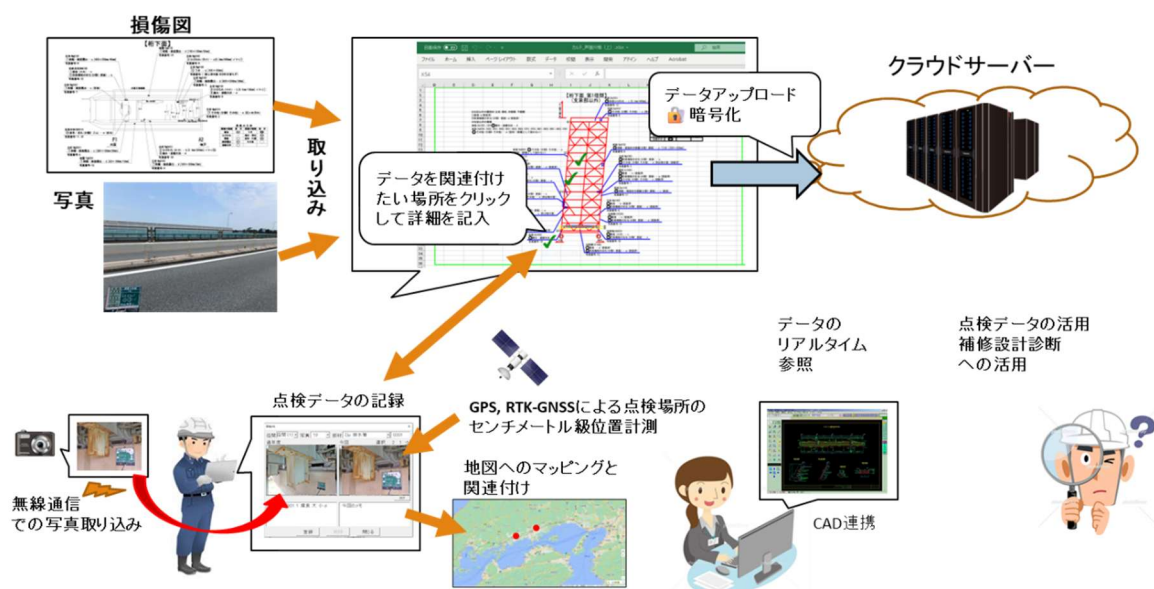


図5.1 統合システムの概要

第6章 まとめ

6.1 研究の総括

本研究では、

- ①香川大学で独自に開発した中赤外分光イメージングデバイスによりコンクリートの表面の塩化物イオン濃度および含水率分布を2次元イメージングし、劣化懸念箇所を抽出する手法
 - ②劣化懸念箇所付近における内部鋼材の腐食速度を分極抵抗法に基づき、香川大学で開発した独自のアルゴリズムにより非破壊で評価する手法
 - ③コニカミノルタ社が独自に開発した磁気センシング技術に基づくデバイスで鋼材破断を検知する手法
- という3手法を融合した統合システムを検討するものである。

項目①に関し、屋外用のデバイスを試作した。屋外にあるコンクリート試験体の表面塩化物イオン濃度を計測できた。

項目②に関し、電流分散性状を考慮し、真の分極抵抗値を算定する手法を構築した。塩害劣化モデルを構築し、項目①の結果と分極抵抗値の測定結果により、鋼材破断時期を推定できた。

項目③に関し、3軸磁気計測装置に加え、着磁に開発した磁石を用い、取得波形にAIを援用することで、スターラップが存在しても15cmまでのかぶり厚さまで検知可能となった。また、統合システムについては、民間企業と共同で橋梁台帳システムにデータを格納する枠組みを構築している。

6.2 本研究における特記事項

特記事項に関して、項目①における中赤外分光イメージングデバイスによる測定結果を吟味すると、従来の据え置き機であるFTIR機の

中でも反射法に基づく機器では計測されなかったスペクトルが、本機器では計測された。これはコンクリート表層のみならず、内部の情報に関するスペクトルをも同時に計測できている可能性が高く、この事象は放射光積算効果モデルにより説明可能ではないか、という検証作業に取り掛かっている。当該機器はこれまで、コンクリートの表層のみを計測していたと香川大学チームは考えていたが、この検証が妥当であれば、トモグラフィに関するアルゴリズムを組み合わせることにより、コンクリート内部の任意の位置におけるスペクトルが取得できる、機器の感度等の諸性能が向上されれば、鉄筋付近の塩化物イオン濃度を非破壊で推定できる可能性があることを示唆している。さらには、コンクリートのみならず、地盤や岩盤内部といった地球内部の検査も非破壊で可能であり、物理化学探査の超高度化といった破壊的イノベーションが期待できる。

項目②における腐食診断では、項目①のデバイスにより塩化物イオン濃度が高い領域において、その直下の領域の鉄筋において一様に腐食が生じているといった仮定を設けることができれば、上述の電流の偏りを考慮しなくてよいことになるため、これらの方法を組み合わせることにより、真の分極抵抗および腐食速度を正しく評価できるものと考えている。分極抵抗の測定結果に対して、適切に電流分散性状を考慮できたこと、測定範囲が真の分極抵抗値に与える影響は限定的であり、簡易な形で既存機による測定結果を補正することができることを提示した。

項目③における破断検知では、国内での検証に加え、国外における検証が進んでいる。イタリアではボルチェベラ高架橋の事故を受け、鋼材破断に対する計測に対するニーズが高ま

っており、国内外のデータの大量取得とそれに基づいて機械学習モデルがより高性能化している点は特筆すべきである。また、韓国においては、軍事関連車両といった超重量車両の通行による橋梁へのダメージが問題となっており、そのような事例に対する検査結果も多く取得できている。橋梁に対する海外の国特有の問題に対しても解決できるポテンシャルを有している。破断検知アルゴリズムに自然言語処理 AI モデルを搭載するといった試みも行っており、技術者に対して非常にフレンドリーなシステムが構築で来ている点も評価している。

これらの株式会社 KMC と共同で橋梁点検システムを開発している。表面塩化物イオン濃度や分極抵抗等の計測値を柔軟に取り込むことができ、さらに、それらの測定結果に基づいて既存の構造物の寿命予測まで行うことができる。

6.3 今後の展望

今後の展望は以下の通りである。

分光イメージング技術の革新と応用展開：

現在検証中の「放射光積算効果モデル」を確立し、コンクリート内部の情報を非破壊で取得する技術を確認する。さらに、トモグラフィアルゴリズムとの融合により、内部の任意の位置における塩化物イオン濃度を定量的に推定する技術開発を加速させる。これにより、従来不可能であった鉄筋位置での腐食リスクを非破壊で評価することを目指す。

将来的には、この技術を地盤や岩盤内部の調査にも応用し、物理化学探査分野における破壊的イノベーション創出を視野に入れる。

腐食診断と破断検知技術の高度化：

中赤外分光イメージングで得られる高濃度領域の情報を活用し、分極抵抗法の評価精度を飛躍的に向上させる複合評価手法を確立する。また、国内外で多様な条件下（事故後、超重量車両通過等）のデータを継続的に取得し、機械学習モデルの精度と汎用性をさらに高める。自然言語処理 AI の機能を拡張し、技術者がより直感的に劣化状況を判断できるユーザーフレンドリーなシステムの完成を目指す。

統合橋梁点検システムの完成と社会実装：

KMC社と共同開発中の橋梁点検システムに、上記で高度化した各技術の最新成果を随時実装する。各計測データを統合的に解析し、劣化要因の特定から構造物の残存寿命予測までを一貫通貫で行える、高精度な統合診断ソリュー

ションを完成させる。

最終的には、この統合システムを国内外の橋梁維持管理の現場へ社会実装し、点検の高度化・効率化を通じて、予防保全型のインフラマネジメントの実現に貢献する。

6.4 研究成果の道路行政への反映

研究成果の道路行政への反映については以下のように考える。

1. 効率的かつ早期の劣化進行評価による予防保全の推進：

中赤外分光イメージングによるコンクリート表面の塩化物イオン濃度および含水率分布の可視化は、従来の近接目視では困難であった劣化の初期段階を非破壊かつ広範囲に把握することを可能とする。これにより、従来は発見が遅れることが多かった塩害劣化の兆候を早期に捉え、適切な予防措置を講じることが可能となる。

劣化懸念箇所を特定することで、その後の詳細な調査や対策を効率的に実施できるようになり、点検・補修にかかるコストや時間を大幅に削減できる。早期の劣化発見と予防保全の実施は、橋梁の長寿命化に繋がり、結果として維持管理費の抑制、ひいては道路予算の効率的な活用に貢献する。

2. 内部鋼材の腐食状態の非破壊評価による安全性向上：

分極抵抗法に基づいた腐食速度の非破壊評価は、コンクリート内部の鋼材腐食の進行度合いを定量的に把握することを可能にする。これにより、構造物の耐荷性能に影響を与える可能性のある腐食の程度を正確に評価し、早期の補修や補強の必要性を判断することができる。

磁気センシング技術による鋼材破断の検知は、重大な事故に繋がりにかぬ鋼材の破断を早期に発見し、迅速な対応を可能にする。

これらの非破壊評価技術の導入により、従来のような一部破壊を伴う調査を減らし、供用中の橋梁の安全性と信頼性を高めることができる。

3. データに基づいた合理的かつ持続可能な維持管理戦略の策定：

本研究で得られるコンクリート表面の劣化情報、内部鋼材の腐食速度、破断の有無などのデータは、橋梁の健全度を客観的に評価するための重要な指標となる。これらのデータを蓄積・分析することで、地域や環境条件に応じた劣化の進行傾向を把握し、よりの確な維持管理計画の策定に役立てることができる。

非破壊検査による効率的な点検とデータに基づいた維持管理戦略の実施は、ライフサイクルコストの最適化を図り、持続可能な道路インフラの維持に貢献する。

国内外への実装による波及効果：

本研究で開発された技術は、国内のみならず、同様の課題を抱える海外の橋梁維持管理においても応用が期待される。技術の国際展開を通じて、日本の先進的な橋梁維持管理技術を示すとともに、国際的な安全基準の向上にも貢献す

る可能性がある。

以上の点から、本研究の成果は、橋梁の安全性向上、維持管理コストの削減、道路予算の効率的活用、そして持続可能な道路インフラの実現に貢献し、ひいては国民の安全・安心な生活を支える道路政策の質の向上に大きく寄与するものと考えられる。