

分光分析法による実橋梁の診断システムの開発

倉田 孝男 *
Kurata Takao

戸田 勝哉 **
Toda Katsuya

コンクリート製橋梁の健全性評価指標の一つに塩化物イオン濃度がある。

塩化物イオン濃度の計測は、コア抜きによる試験体やコンクリートドリルによる粉末試料を用いて行うのが一般的であるが、結果が出るまでに時間がかかることや破壊検査であり広範囲の測定が困難である。これらの課題を解決するために、表面塩化物濃度を非破壊で計測できる近赤外線分光方式による装置を開発してきた。今回センサー部にエンコーダ付の車輪を設けて広範囲を効率的に計測できる装置を開発し、橋梁の表面塩化物イオン濃度分布マップが作成できたので報告する。

キーワード：分光分析、小型分光器、コンクリート、塩化物イオン濃度、橋梁

1. はじめに

コンクリート表面に近赤外線を当てて反射光を分光したところ、波長 2257nm 付近に塩化物イオン濃度に影響される吸収ピークが見つかったことによりコンクリート診断に近赤外線分光法が適用できることは、金田らの研究によって報告されている⁽¹⁾。

しかし、2257nm 付近の吸収は硬化直後または切断直後の面に現れるが、空気に触れて時間が経つと小さくなることから、実際の構造物の表面の計測には使用できないことがわかった。

2257nm の吸収の減少はコンクリートの中性化の度合いと相関があることから、観察している吸収は水酸化物イオンによる吸収であること、塩化物イオン濃度の大小により水酸化物イオンの吸収の大きさが変化していると考えられる。

これは、水溶液中の溶解塩分濃度や糖分などの近赤外線分光で観察される現象に類似している。果物等も近赤外線分光により糖度が計測されているが、糖度の大小により水の吸収の大きさが変化することを利用している。しかし、伝統的な一つの吸収波長での濃度計算では、水の吸収の温度による変化や他成分の混入に影響されるため、ケモメトリックス法と呼ばれる多変量解析が使われている。そこで、筆者らは、コンクリートの塩化物イオン濃度計算においてケモメトリックス法を試したところ、中性化の影響を受けずに計算できることを確認した⁽²⁾。

その後、実際の橋梁で計測できることが確認できた⁽³⁾ので、本装置をどのように活用すべきかを検討した。

実際のコンクリート構造物は巨大であり、劣化箇所も分散していることから、広大な範囲を短期

* 研究開発事業部 基盤技術部 光応用・プロセスグループ 次長
** 株式会社 IHI インフラシステム 技術本部 開発部 博士 (工学)

間に計測できることが望まれている。既存の計測手法は、コア抜きやドリルによるポイント計測であるため広範囲を短時間に計測するのは困難である。

一方、近赤外線分光法は非破壊非接触で計測時間も比較的速い。また、プローブヘッドと呼んでいるセンサー部分を測定面に接触させることにより簡単に計測できる。そこで、プローブヘッドに車輪をつけて、プローブヘッドを移動しながら、ライン上を一度に計測できれば、広範囲を効率的に計測できるものと考えた。隣り合った複数本のラインを計測すれば、対象面の濃度分布が得られる。

今回、車輪のついた試作装置を製作して、実際の橋梁で計測して、測定面の塩化物イオン濃度分布が得られた。一部のポイントで、既存の計測法で計測した濃度と比較して、計測結果の妥当性を得ることができた。

近赤外線はコンクリート内部にはほとんど浸透しないことから、計測濃度は表面の濃度である。またコンクリート種類・表面処理、測定条件で測定値が影響されることなどの課題もあるが、構造物全体の劣化傾向の把握、初期診断、コア抜き検査のスクリーニングなどの用途として有望であると考えている。

2. 測定装置

装置の構成は、図1に示すようにプローブヘッド（センサー部分）と制御ボックス、パソコンから構成される。

プローブヘッドの拡大図を図2に示す。プローブヘッドは太陽光など外乱光が入らないように箱になっており、内部に近赤外光を照射するハロゲンランプと対象コンクリート表面から反射した光を受光する光ファイバの端面が設置されている。測定対象コンクリート表面に密着させて走査できるように車輪がついている。車輪にはエンコーダ

が内蔵されており、走行距離をカウントする。プローブヘッドの上面にはハンドルがついており、この部分を手でもって走査する。ハンドル部分は長さを延長することができるので、手の届かない高い床版下面の計測も可能である。

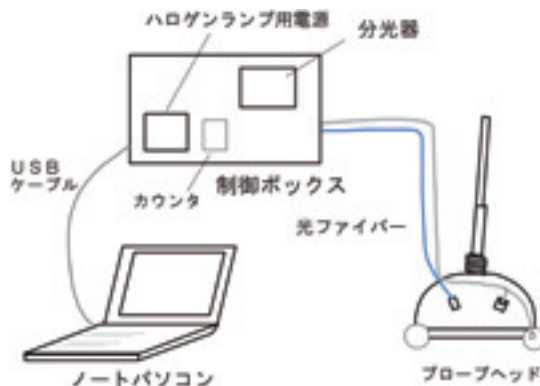


図1 装置の構成図

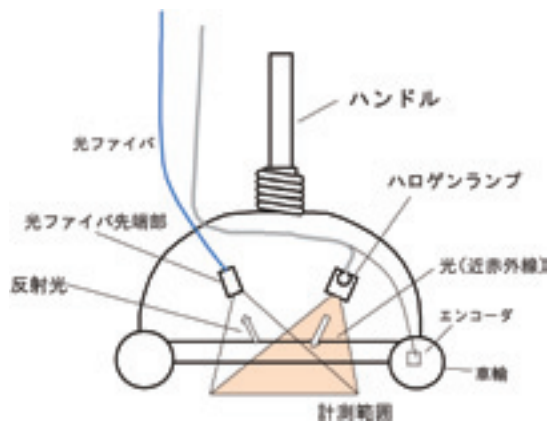


図2 プローブヘッドの図

制御ボックスには分光器とカウンタ、ハロゲンランプ用電源が内蔵されている。コンクリート表面を反射した光は光ファイバを通して分光器に送られ、分光スペクトルが走行距離のカウント値と一緒にノートパソコンに保存される。ノートパソコンには、本装置の制御、データの保管、濃度計算を行うための専用ソフトウェアがインストールしてあり、分光器の設定、測定開始終了などの制御はパソコンで行う。

測定中は、5cm 間隔でスペクトルを採取するように設定している。1 個のスペクトルから対象成分の濃度が求められる。プローブヘッドを走査すれば、移動したライン上の濃度分布が計測できる。本装置は、1つのスペクトルの採取から保存までに約 0.05 秒ほどであり、1m を最速で約 1 秒程度の速度で走査することができる。ラインの長さは、パソコンの保存できる範囲まで可能だが、データ処理の効率を考えると 10m 程度が限度である。

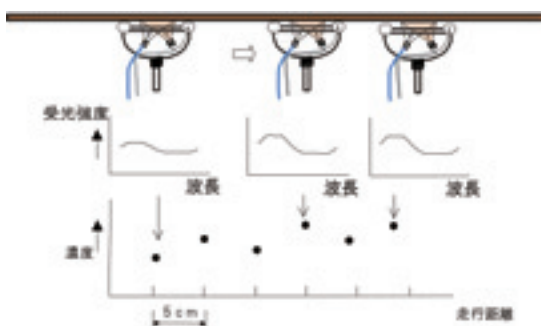


図3 ライン上の測定

また、並んだ複数ラインを計測して、面的な濃度分布を計測することができる。プローブヘッドの幅が約 100mm なので、通常は 100mm 間隔でラインを走査する。測定面の格子状の各区画で濃度が算出されるので、これより等高線図（コンターマップ）が作成できる。

橋梁の形や測定条件にもよるが、標準で 1 日に 200m² 程度計測が可能である。

3. 検量線の作成

コンクリートの近赤外線吸収スペクトルと塩化物イオン濃度を対応させるために、既知の濃度の試験片を全部で 54 体を製作して、検量線を作成した。図 4 にコンクリート試験片の計測状況を示す。

条件 塩化物イオン濃度： 6 種類 (0、1、3、5、10、20kg/m³)
水 セメント比： 3 種類
中性化促進日数： 3 種類



図4 コンクリート試験片の計測

各試験片は、化学分析にて塩化物イオン濃度、炭酸カルシウム濃度を計測した。

採取したスペクトルを用いてケモメトリックス法で検量線を作成した。図 5 は、横軸は化学分析法で得られた塩化物イオン濃度、縦軸は近赤外線スペクトルから計算で得られた塩化物イオン濃度である。プロットの■▲●は、中性化促進日数の違いである。■は硬化直後のコンクリート試験片。▲は中性化促進 2 週間、●は中性化促進 13 週間の試験片である。中性化促進日数が長くなると、コンクリートが中性化して、コンクリート主成分の Ca(OH)₂ が CaCO₃ に変化していくため、コンクリート中の水酸化物イオンが減少していく。塩化物イオンの吸収の大きさは、水酸化物イオンの吸収に影響される。中性化の進行が進むと水酸化イオンの吸収も小さくなり、同時に塩化物イオンの吸収の大きさも小さくなるため、一般的な方法だと塩化物イオン濃度は低濃度として算出される。しかしケモメトリックス法による計算では中性化の進行状況に影響されずに濃度計算できることが示された。

図 6 は、横軸に化学分析法で得られた炭酸カ

ルシウムの濃度、縦軸は近赤外線スペクトルからケモメトリックス法により計算した炭酸カルシウム濃度である。使用した近赤外線スペクトルは塩化物イオン濃度を求めたときと同じものである。この結果、横軸の炭酸カルシウム濃度に比例した計算値が得られていることから、近赤外線吸収スペクトルから、炭酸カルシウムの濃度が計算できることが示された。

中性化促進日数と、炭酸カルシウム濃度の関係は、■の硬化直後のコンクリート試験片では、炭酸カルシウム濃度4～6%で、中性化促進13週のもの9～10%となっている。▲の中性化促進1週間の試験片が、炭酸カルシウムの測定値が7～10%とばらついているが、これは水セメント比の違いで中性化の速度が違っているためである。今回使用のコンクリートの中性化が完了したときの炭酸カルシウム濃度は10%程度であると推測される。

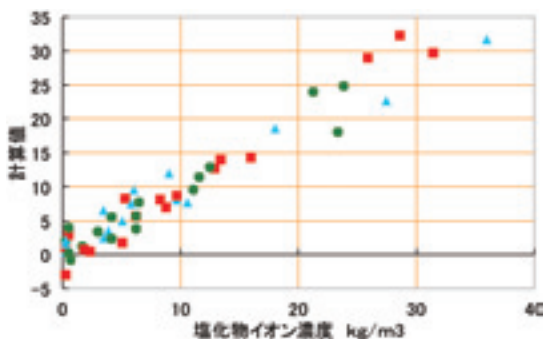


図5 塩化物イオン濃度の検量線

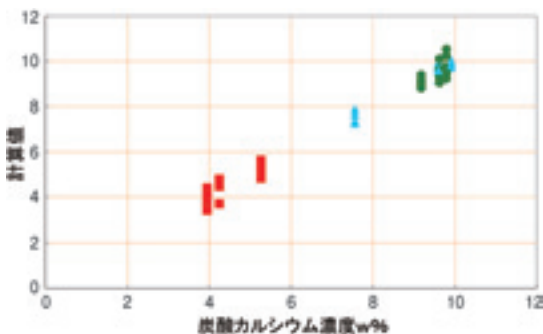


図6 炭酸カルシウム濃度の検量線

4. 実橋梁の測定

北陸地方の海岸に近い橋梁で、本装置を用いて塩化物イオン濃度を計測した。図7は床版下部の測定の例、図8は橋脚部の測定の例である。

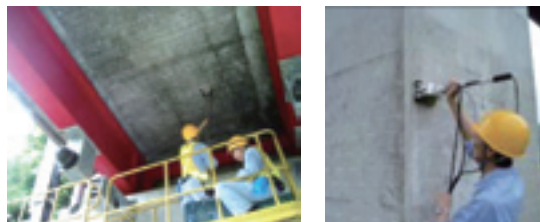


図7 床版下部の計測風景 図8 橋脚部の測定

10cm 間隔でプローブヘッドを走査してスペクトルデータをパソコンに蓄積する。測定終了後に、専用のソフトウェアで濃度計算を行い、濃度分布のコンターマップを作成する。

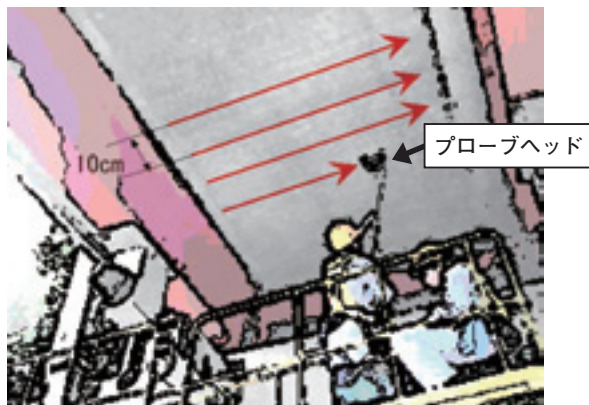


図9 測定ラインの例

4.1 A橋 (PC桁) の計測

A 橋は、海岸に面した31 径間単純ポステンT 桁で、供用36 年、橋長991.6m、全幅員11.25m である。測定は、A 橋のうち陸上部分の1 径間(30m) の桁下面と桁側面と床版の一部で実施した。

外観は、飛来塩分や融雪剤の影響を受けているため桁端部に塩害による断面剥離が生じていた。図10に本装置による測定結果を示す。最も塩化物

イオン濃度が高い箇所は 8.44kg/m^3 であり、海側から二番目に入った桁下面（図 10 の G5）であった。

最大濃度近傍で表面のコンクリートをグラインダーで採取して、塩化物イオン濃度を測定した。結果は 6.30kg/m^3 であった。同位置での分光分析による結果では、 6.80kg/m^3 であり、ほぼ同等の値であった。

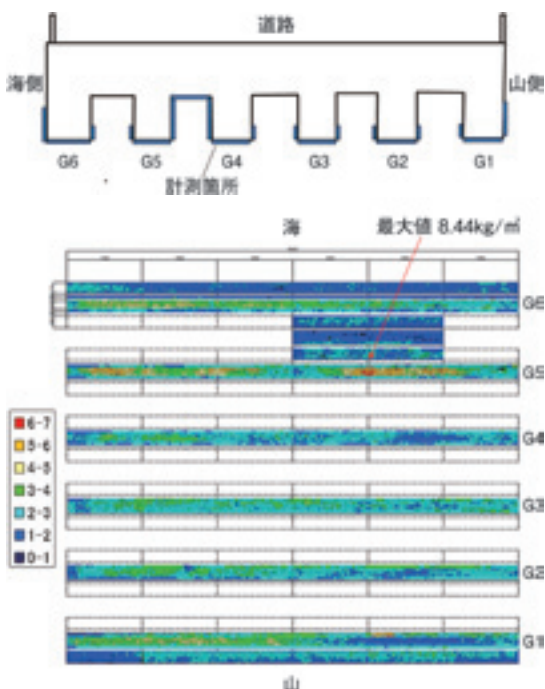


図 10 A 橋（PC 桁）測定結果

4.2 B橋の床板コンクリート部の測定

B 橋は、海岸より 1km 離れた 2 径間連続箱桁および 3 径間連続鋼桁で、供用 27 年、橋長 264.6m、全幅員 26.0m である。今回は、1 径間（60m）の床版下面を計測した。外観は、張出しや桁間に軽微なひび割れが見られるが、大きな損傷は生じていなかった。図 11 に本装置による測定結果を示す。最も塩化物イオン濃度が高い箇所は 4.76kg/m^3 であり、コンクリートの打継ぎ付近であった。しかし、その箇所以外は 3kg/m^3 以下であり、飛来塩分の影響はあまり受けていないことが確認された。A 橋と同様にコア抜きにより塩化物イオン濃度を測定した結果、 0.70kg/m^3 であった。同位置での分光分析による測定結果では、 2.00kg/m^3 であった。測定値の違いは従来測定法が表面から内部に入った部分の分析であったため、誤差が出たものと考えられる。分光分析による分布のマップは、濃度の高い点の位置、低い点の位置が把握に役立つことがわかった。

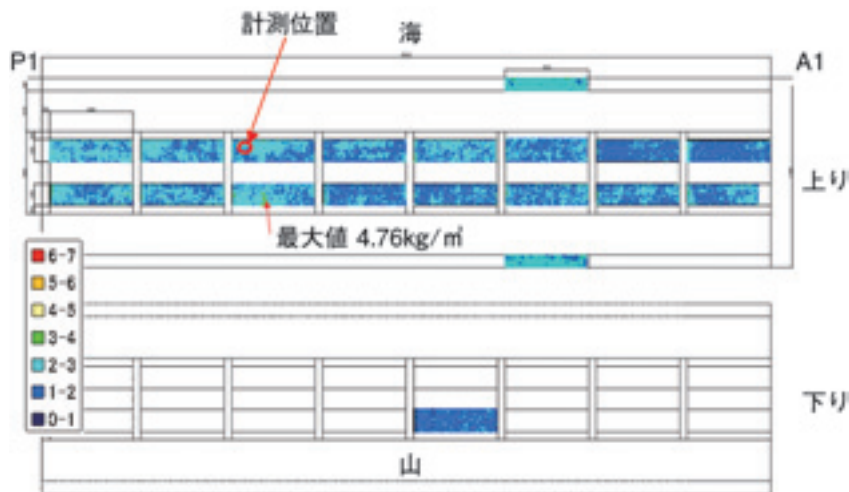


図 11 B 橋測定結果

5. まとめ

近赤外線分光分析法によって、実橋梁のコンクリート表面の塩化物イオン濃度分布を、非破壊かつ短時間で計測できることを示すことができた。計測された濃度は、既存の計測手法の値とはほぼ一致し、計測方法や計測装置の実用性が検証できた。本装置は構造物全体の劣化傾向の把握、初期診断、コア抜き検査のスクリーニングなどの用途として有望であると考えられる。

参考文献

- (1) 金田尚志 マルチスペクトル法によるコンクリートの劣化物質検出手法の開発、東京大学学位論文、2004年9月
- (2) 倉田孝男 戸田勝哉 ケモメトリックス手法を用いた近赤外線小型分光器によるコンクリート診断装置開発 IIC REVIEW 39巻 2008年4月 pp.36-42
- (3) 戸田勝哉、中村善彦、倉田孝男 分光分析法を用いた非破壊コンクリート診断システムの開発、土木学会第65回年次学術講演会 2010年 pp.521-522



研究開発事業部 基盤技術部
光応用・プロセスグループ
次長
倉田 孝男
TEL. 045-759-2121
FAX. 045-759-2155



株式会社 IHI インフラシステム
技術本部 開発部 博士(工学)
戸田 勝哉
TEL. 03-3769-8604
FAX. 03-3769-8608