

# コンクリート中における塩化物イオン濃度の非破壊分析方法の開発

## Development of Non-Destructive Measurement Method on Chloride Iron Distribution in Concrete

氏家 勲<sup>1)</sup> 岡崎 慎一郎<sup>1)</sup> 松江 秀明<sup>2)</sup>  
 Isao UJIKE Shin-ichiro OKAZAKI Hideaki MATSUE

<sup>1)</sup>愛媛大学大学院理工学研究科 <sup>2)</sup>原子力機構

本研究は即発γ線分析を利用した非破壊でコンクリート内部の塩化物イオン濃度分布を測定する方法の開発に資するための基礎的な研究である。本研究では深さの影響を考慮した校正曲線を用い、さらにダミー板状試料を一枚ごと減らして即発γ線分析を行い、コンクリート内部の塩化物イオン濃度分布の形状を推定することを試みた。

キーワード：中性子、即発γ線分析、塩化物イオン濃度、非破壊検査

### 1. 目的

本研究は、非破壊で試料調整を必要とせず、さらに短時間の測定で分析が可能な即発γ線分析 (Prompt Gamma-ray Analysis : PGA) を、コンクリート中の塩化物イオン濃度分布の測定に適用することを目的として基礎的な検討を行ったものである。本研究では、所定の塩化物イオン濃度に調整したモルタル板を組み合わせた供試体を用いて、即発γ線計数比と塩化物イオン濃度の関係およびその関係に及ぼすモルタル板の深さ方向に関する位置の影響を調べ、さらにそれらの関係から、異なる塩化物イオン濃度のモルタル板を組み合わせた供試体の塩化物イオン濃度分布が推定できるのかを検討した。

### 2. 方法

即発γ線分析 (以下、PGA) は、以下の原理に従う。測定対象物中に含まれる元素の原子核に熱中性子が捕獲された際、核種は励起状態となる。励起状態から安定状態に戻る際に即発γ線が放射される。これを放射線検出器によって測定し元素分析を行う方法である<sup>1)</sup>。対象物中の多元素同時測定が可能であり、エネルギースペクトル中でのピークの位置とピークの面積 (即発γ線計数) から含有元素を定性・定量分析できることが特徴として挙げられる。この分析方法は対象物を非破壊で試料調整の必要性がなく、さらに少量の試料で比較的短時間に分析できるという利点がある。通常、かぶりコンクリートの塩化物イオン濃度を知るための試験は、コアリングによる破壊検査が一般的であり、これはコアリングおよび試料分析に要するコストが大きい。また採取後はモルタルを用いて埋め戻すために、一度試験を行うと同一箇所において検査を行うことができないという欠点を有する。この欠点を補うための非破壊試験のひとつとして PGA は将来期待されている手法である<sup>2)</sup>。

実験では、モルタル板を組み合わせた供試体とコンクリートコア供試体を測定試料とした。モルタル板は 30×30mm、厚さが 5mm, 3mm, 2mm, の3種類、水セメント比は 40%, セメント砂比は 1:1 とし、セメントには普通ポルトランドセメントを、細骨材にはカルシウムを含まない珪砂を使用した。モルタル板は塩化物イオンの質量がセメントの質量に対して 0~10%の範囲で所定の濃度となるようにフレッシュモルタル中に塩化ナトリウムを添加してそれぞれ作成した。供試体内部の濃度分布を非破壊測定によって推定するためには、どの程度の深さまで測定できるのかを知る必要がある。即発ガンマ線計数比の減少は中性子の減衰によるもので、中性子は減衰しながらコンクリートを透過していく。しかし、計測される即発ガンマ線計数比は塩化物イオンの位置が深くなるほど誤差が大きくなり、定量的な測定は困難となる<sup>3)</sup>。そこで本研究では、塩化物イオンを含んだモルタル板の前に塩化物イオンを含まないモルタル板の枚数を増やしなが測定し、塩化物イオン濃度と即発ガンマ線計数比が比例関係を保っている位置までを測定範囲と定めた。今回の測定条件ではモルタル板 5 枚、つまり、表面から 25mm までを測定範囲とした。供試体内部の塩化物イオン濃度分布の測定方法は、供試体の前に塩化物イオンを含まない 0wt%のモルタル板を 5 枚並べて測定し、そして 0wt%のモルタル板を 1 枚ずつ抜き、それを供試体の後ろに並べ

表-1 供試体内部の推定に用いた供試体の一覧

供試体名	位置				
	1st	2nd	3rd	4th	5th
A	0.5%	2%	3%	1.5%	1%
B	2%	3%	2%	1%	0.5%
C	1%	1.5%	3%	1%	0.5%

て測定する。測定に用いた供試体の一覧を表-1に示す。

3. 研究成果・考察

校正曲線を作成するための測定試料は、図-1に示すように、厚さ5mmのモルタル板を5枚組み合わせた供試体(厚さ25mm)と厚さ2mm, 3mm, 5mm×4枚、のモルタル板を組み合わせた供試体(厚さ25mm)である。各供試体は塩化物イオンを含むモルタル板1枚とその他は塩化物イオンを含まないモルタル板で構成されており、塩化物イオンを含むモルタル板の位置を移動させて測定する。尚、図-1の例で示す5/10-3rdは、10wt%の塩化物イオンを含む厚さ5mmのモルタル板が3枚目に存在することを表している。また、塩化物イオンを含んだモルタル板の厚さが5mmの場合と2mmの場合で校正曲線を比較した結果を図-2に示す。校正曲線は、測定によって得られた即発ガンマ線計数比を最小二乗法によって次式で回帰すれば得られる。

$$R = ac \cdot e^{-bh} \quad (1)$$

ここで、 $R$ は即発ガンマ線計数比(-)、 $c$ は塩化物イオン濃度(%),  $h$ は供試体表面からの深さ(mm)であり、表面から各モルタル板の厚さの中心までの距離である。 $a$ と $b$ は回帰係数である。係数 $a$ は $h=0$ (供試体表面)での即発ガンマ線計数比と塩化物イオン濃度の比例関係の勾配である。係数 $b$ に関しては、中性子の減衰によって即発ガンマ線計数比が減少する際の勾配であり、理論上塩化物イオン濃度とは関係なく一定となる。

実構造物の表面に対して垂直にコンクリートコア供試体を採取し、表面から所定の位置の側面に中性子を照射すれば、任意の深さにおける塩化物イオン濃度を測定することが既往の研究より明らかとなっている<sup>4)</sup>。本研究ではコア供試体などを採取せずに非破壊で実構造物での測定に適用するため、表面部分のみが測定範囲となるように斜めから照射すれば表面濃度は非破壊で測定できると考えた。

また、表面を削り取って採取された厚さ2mm程度の破片と2g程度の粉末試料の即発ガンマ線計数を測定した。これらの測定結果は、同じ形状のセメントペースト試料、すなわち2mmの破片および2gの粉体を用いて得られた即発ガンマ線計数比と塩化物イオン濃度の比例関係から塩化物イオン濃度に換算した。図-3に中性子の照射角度、表-2にモルタル板供試体およびコンクリートコア供試体の表面における塩化物イオン濃度の測定結果を示す。モルタル板供試体については、図-3に示すように1枚目に塩化物イオン濃度1%のモルタル板を配置しており、照射角度が表面と平行になるほど表面濃度が正確に測定されていることがわかる。コンクリートコア供試体については、どの測定結果もよく一致している。以上の結果から、②のように表面と平行に近い角度で中性子を照射すれば、非破壊で最も簡単に測定対象物の正確な表面濃度を測定できると言える。また、供試体の表面を破片もしくは粉体で削り取って測定する方法でも表面濃度を明らかにすることができる。

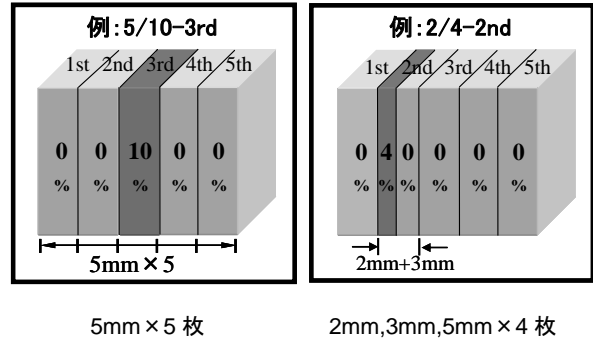


図-1 校正曲線作成用のモルタル板供試体の一例

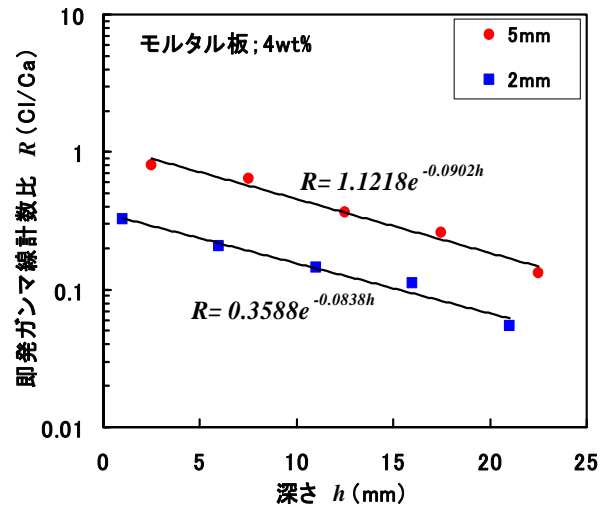


図-2 モルタル板の厚さによる校正曲線の違い

表-2 表面濃度の測定結果

モルタル板供試体		コンクリートコア供試体	
角度	濃度(wt%)	角度	濃度(wt%)
① 0°	0.997	① 0°	1.057
② 15°	1.188	② 15°	0.983
③ 30°	1.392	破片	1.015
④ 45°	1.626	粉末	0.901

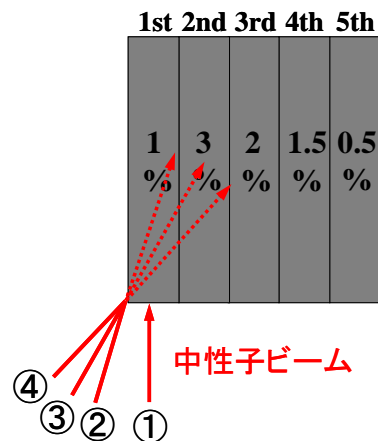


図-3 中性子ビームの照射角度

表-3 に、供試体 A を例にそれぞれの測定過程におけるモルタル板の配置および即発ガンマ線計数比を示す。推定は測定範囲の限界位置、つまり 5 枚目のモルタル板において行われる。過程 I の場合、すなわち測定対象物の前に 0wt% のモルタル板を 5 枚並べた場合、供試体（モルタル板で言うと 6 枚目以降）は測定範囲外であるので、即発ガンマ線計数比は正確な値を示さない。本研究ではこの値をノイズと呼ぶ。このノイズをそれぞれの測定過程において線形的に分配してその影響を検討する。すなわち、過程 II（0wt% のモルタル板が 4 枚）のとき、即発ガンマ線計数比は供試体の 1st とノイズによるものであるので、このときのノイズはモルタル板供試体の 2nd 以降の 4 枚によるものと考え、過程 I における即発ガンマ線計数比の 4/5 として過程 II で得られた即発ガンマ線計数比から差し引く。そして、残った値が供試体の 1st による即発ガンマ線計数比であり、校正曲線を用いて塩化物イオン濃度に換算される。過程 III（0wt% のモルタル板が 3 枚）のとき、即発ガンマ線計数比は供試体の 2nd までとノイズによるものである。ここで、校正曲線を用いてモルタル板供試体の 1st の位置（表面から 17.5mm）における即発ガンマ線計数比を求め、測定値から引く。また、この場合のノイズは、同様に考えて過程 I におけるその 3/5 として差し引き、残りの値を塩化物イオン濃度に換算する。過程 IV（0wt% のモルタル板が 2 枚）のとき、校正曲線を用いて 1st および 2nd さらにノイズ（過程 I の 2/5）の値を引く、濃度に換算する。過程 V（0wt% のモルタル板が 1 枚）および過程 VI（0wt% のモルタル板が 0 枚）のときも同様に推定する。図-4, 5, 6 にそれぞれ供試体 A, 供試体 B, 供試体 C の推定結果を示す。どの供試体の推定結果を見ても過程 VI までの段階で濃度分布は比較的対応した結果となっているが、濃度は全体的に過小評価となっており、その結果、過程 VI で 5th の塩化物イオン濃度を推定する際に差し引きで残った値が大きくなり、実際では生じない分布となってしまう。従って、今回の測定条件では 4 枚目までを推定値とする。なお、推定精度を高めるためにノイズの評価方法を今後とも検討していく必要があると考えている。

表-3 供試体 A の各測定過程における測定結果

測定過程	各モルタル板の配置および測定範囲	測定結果 R																				
I	<p>測定範囲</p> <table border="1"> <tr> <td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0.5</td><td>2</td><td>3</td><td>1.5</td><td>1</td> </tr> <tr> <td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td> </tr> </table> <p>ノイズの要因</p>	0	0	0	0	0	0.5	2	3	1.5	1	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	0.1098
0	0	0	0	0	0.5	2	3	1.5	1													
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%													
II	<p>測定範囲</p> <table border="1"> <tr> <td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0.5</td><td>2</td><td>3</td><td>1.5</td><td>1</td><td>0</td> </tr> <tr> <td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td> </tr> </table> <p>ノイズの要因</p>	0	0	0	0	0.5	2	3	1.5	1	0	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	0.1391
0	0	0	0	0.5	2	3	1.5	1	0													
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%													
III	<p>測定範囲</p> <table border="1"> <tr> <td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0.5</td><td>2</td><td>3</td><td>1.5</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td> </tr> <tr> <td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td> </tr> </table> <p>ノイズの要因</p>	0	0	0	0.5	2	3	1.5	1	0	0	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	0.1821
0	0	0	0.5	2	3	1.5	1	0	0													
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%													
IV	<p>測定範囲</p> <table border="1"> <tr> <td>0</td><td>0</td><td>0.5</td><td>2</td><td>3</td><td>1.5</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td> </tr> <tr> <td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td> </tr> </table> <p>ノイズの要因</p>	0	0	0.5	2	3	1.5	1	0	0	0	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	0.3121
0	0	0.5	2	3	1.5	1	0	0	0													
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%													
V	<p>測定範囲</p> <table border="1"> <tr> <td>0</td><td>0.5</td><td>2</td><td>3</td><td>1.5</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td> </tr> <tr> <td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td> </tr> </table> <p>ノイズの要因</p>	0	0.5	2	3	1.5	1	0	0	0	0	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	0.4053
0	0.5	2	3	1.5	1	0	0	0	0													
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%													
VI	<p>測定範囲</p> <table border="1"> <tr> <td>0.5</td><td>2</td><td>3</td><td>1.5</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td> </tr> <tr> <td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td><td>%</td> </tr> </table> <p>ノイズの要因</p>	0.5	2	3	1.5	1	0	0	0	0	0	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	0.6108
0.5	2	3	1.5	1	0	0	0	0	0													
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%													

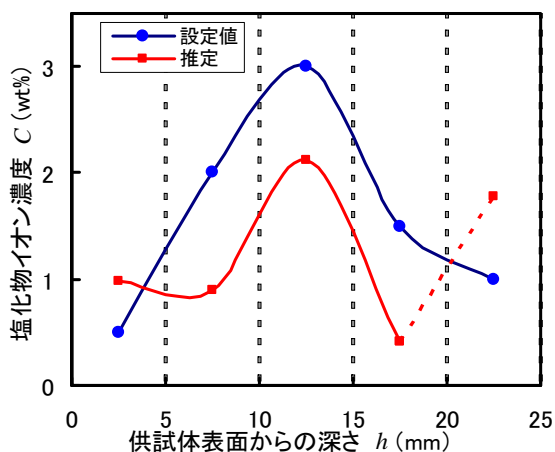


図-4 供試体 A の推定結果

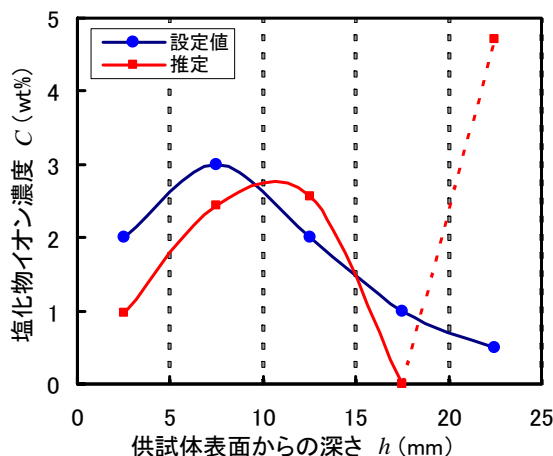


図-5 供試体 B の推定結果

#### 4. 結論

本研究の結果をまとめると次のようである。

- ① モルタル板の厚さに関わらず、同様に校正曲線を得ることができるので、塩化物イオン濃度分布を推定する際、より詳細な分布を得たい場合には、薄いモルタル板を用いて校正曲線を設定すればよい。
- ② 誤差関数に従うような分布を持つ測定対象物の場合には、誤差関数を用いて測定値と比較しながら浸透深さを仮定することにより、塩化物イオン濃度分布をよい精度で推定できる。
- ③ 中性子の照射角度を対象物の表面とほぼ平行にして測定すると、表面濃度を非破壊で測定することが可能である。
- ④ 対象物の前に 0wt% のモルタル板を並べて測定し、得られた即発ガンマ線計数比からノイズ等の余分な値を除き、校正曲線を用いて測定範囲の限界位置における塩化物イオン濃度を推定すれば、表面に濃度のピークがない分布の場合に、濃度は過小評価するが、分布形状は比較的よく把握することができた。

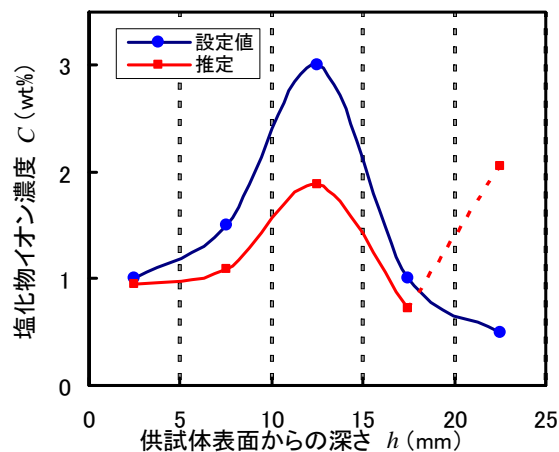


図-6 供試体 C の推定結果

#### 5. 引用(参照)文献等

- 1) 米沢仲四郎：原子炉中性子による即発 $\gamma$ 線分析，分析化学，51，pp.61-96，2002.
- 2) H.H Saleh and R.A. Livingston: Experimental evaluation of a portable neutron-based gamma- spectroscopy system for chloride measurements in reinforced concrete, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol.244, No.2, pp.397-371, 2000.2
- 3) 山田耕大ほか：コンクリート中の塩化物イオン濃度分布の非破壊測定に対する即発ガンマ線分析の適用性について，コンクリート工学年次論文集，Vol.30, No.2, pp.757-762, 2008
- 4) 荒居祐基ほか：コンクリート中の塩化物イオン濃度の測定(I)ー即発ガンマ線分析の適用ー，土木学会第62回年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM)，pp.93-94, 2007.9