

論文 即発ガンマ線分析による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関する研究

山田耕大^{*1}・氏家 勲^{*2}・岡崎慎一郎^{*3}・松江秀明^{*4}

要旨：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 線分析で計測されるカルシウムと塩化物イオンの計数による即発 γ 線計数比を指標として用いた供試体表面からの深さの影響を考慮した校正曲線を作成した。その校正曲線を用いて、著者らの既往の研究において課題となった表面濃度の非破壊測定方法および塩化物イオン濃度のピークが測定対象物の表面にない場合の濃度分布を推定する方法について検討した。

キーワード：中性子、即発ガンマ線分析、校正曲線、非破壊測定

1. はじめに

近年、コンクリート構造物における維持管理技術が大変重要になっており、特に重要な技術としてコンクリート構造物の耐久性診断が挙げられる。コンクリート構造物の劣化現象の中で最も関心が高いものは塩害による鉄筋腐食であり、塩害による劣化は腐食ひび割れが生じるまでは、外観観察のみでは劣化の進行を評価できない。

コンクリート構造物における塩害では、主に外部からコンクリート中へ侵入した塩化物イオンの影響により不動態皮膜が破壊され、鋼材の腐食時期が著しく早まる。従って、鋼材が腐食するまでの塩害の進行を評価するには、鉄筋周辺におけるかぶりコンクリート中の塩化物イオン濃度の分布状況を知る必要があるが、コア供試体による一般的な手法は、試料採取や試験に手間と費用を要し、さらに構造物に損傷を与え、同じ位置で何度も測定できない。

本研究は、非破壊で試料調整を必要とせず、比較的短時間の測定で分析が可能な即発ガンマ線分析（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。既往の研究では¹⁾、即発ガンマ線計数比と塩化物イオン濃度が比例関係にあり、即発ガンマ線計数比は測定対象物が表面から深くなるほど指数関数的に減少すること、および測定対象物全体の即発ガンマ線計数比は、それぞれの深さにおける即発ガンマ線計数比の合計に等しいことを明らかにした。そして、その影響を考慮した校正曲線およびそれを用いて非破壊で塩化物イオン濃度分布を推定する方法を提案した。しかしながら、提案した推定方法において、供試体表面

の塩化物イオン濃度を既知の値としているが、表面濃度の測定方法については具体的には提案していない。また、中性化や雨水による影響で表面に塩化物イオン濃度のピークがない分布に関して、この推定方法を用いることは困難であった。

そこで本研究では、既往の研究と同様に、即発ガンマ線計数比が深さに依存する影響を考慮した校正曲線を作成した。そして、即発ガンマ線計数比と塩化物イオン濃度の比例関係を利用し、非破壊で表面濃度を測定する方法を提案した。さらに、中性化や雨水の影響を受けた測定対象物についても対応できるように、表面部分の濃度が低く、ピークが奥に存在するような分布形状を持つ場合について検討を行った。

2. 実験概要

(1) 即発ガンマ線分析

即発ガンマ線分析は、熱中性子が対象物中に含まれる元素の原子核に捕獲された際に放出される特徴的な高エネルギーガンマ線、つまり即発ガンマ線を、放射線検出器を用いて測定する分析方法である²⁾。

今回の実験は、日本原子力研究開発機構の研究用原子炉 JRR-3 に設置されている即発ガンマ線分析装置を用いて行った。分析装置の体系図を図-1 に示す。炉心からの熱中性子を中性子ガイド管により導くことによって中性子をビーム状で用いることができる。ビーム形状は約 $2.0 \times 2.0 \text{ cm}^2$ であり、中性子束は約 $10^8 \text{ (n/cm}^2\text{/s)}$ である。中性子ビームは直径 5mm の円形に絞って使用した。中性子ビームの照射により試料から放出される即発ガンマ線を、ビーム入射方向に対して垂直方向に設置された高

*1 愛媛大学大学院 理工学研究科 (正会員)

*2 愛媛大学大学院 理工学研究科教授 博士(工学) (正会員)

*3 愛媛大学大学院 理工学研究科助教 博士(工学) (正会員)

*4 日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門 理学博士

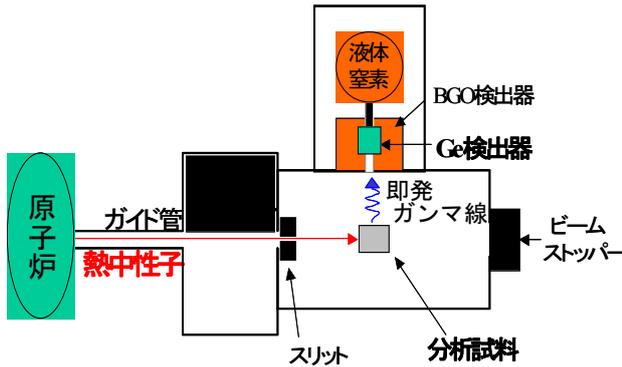


図-1 分析装置の体系図

純度ゲルマニウム (High Purity Germanium : HPGe) 検出器を用いて検出する。なお、将来的には既往の研究のように³⁾、オンサイトで実構造物での塩化物イオン濃度の計測に使用できる中性子源と検出器で検討する予定である。

(2) 即発ガンマ線計数比

本研究では塩化物イオンを定量分析するために内標準法を採用し、セメントに多く含まれているカルシウムを内標元素とし、即発ガンマ線計数比 R を指標に用いた。測定の際に着目した即発ガンマ線エネルギーの大きさは、塩化物イオンが 1951keV、カルシウムが 1942keV である。即発ガンマ線分析においては試料に含まれる骨材量を調整しなくても、骨材が多い場合にはセメント量が少ないので、カルシウムのピークの計数が減少し、セメント中に含まれる塩化物イオンのピークの計数も減少する。したがって、カルシウムと塩化物イオンの即発ガンマ線計数比で評価すれば、骨材量の影響を排除することができる。ただし、石灰石系の骨材を用いている場合には、塩化物イオンのみのピークで評価することになるので、照射位置を変えてデータを多く取得する必要があると考えられる。図-2 は着目したエネルギー周辺の濃度が異なるコンクリートの即発ガンマ線スペクトルを示す。塩化物イオン濃度が高くなるにつれて、エネルギーの大きさ 1951keV と 1959keV の塩化物イオンの計数が増加している。しかしながら、エネルギーの大きさが 1942keV におけるカルシウムの計数はほとんど変化していない。カルシウムの計数の変化は試料に含まれるセメント量の違いによるものである。

(3) 測定試料

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硅砂を使用した。モルタル板は塩化物イオンの

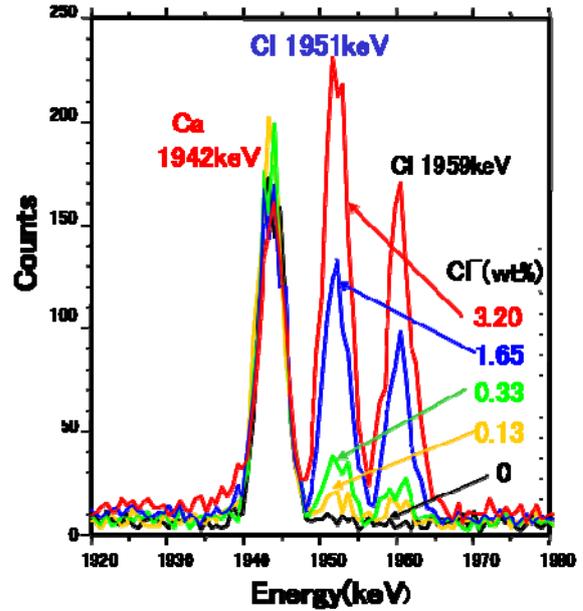


図-2 着目したエネルギー付近の即発ガンマ線スペクトル

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。尚、これらのモルタル板において調整した塩化物イオン濃度を設定値と呼ぶ。

コンクリートコア供試体は、海上のブイを固定するためのアンカーとして約 10 年間用いられているコンクリートブロックの表面に対し垂直に切削して円柱供試体を採取したものである。その供試体の側面に中性子を照射することで得られる即発ガンマ線計数比は、即発ガンマ線計数比と塩化物イオン濃度との比例関係を利用して塩化物イオン濃度に換算することができる。この方法によって得られた 5mm 間隔の塩化物イオン濃度分布は、後述の推定結果との比較に用いた。モルタル板供試体とコンクリートコア供試体は気乾状態で使用した。

(4) 校正曲線の作成

即発ガンマ線計数比が供試体に含まれている塩化物イオンの深さに依存して指数関数的に減少することを考慮

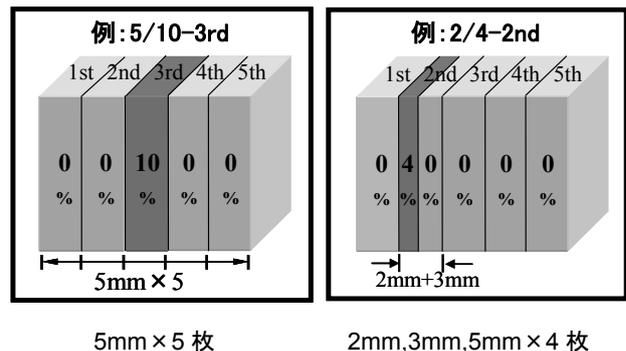


図-3 校正曲線作成用のモルタル板供試体の一例

し、測定から得られた即発ガンマ線計数比を回帰して求められる校正曲線を利用すれば、任意の深さにおける塩化物イオン濃度を求めることができる。

校正曲線を作成するための測定試料は、図-3 に示すように、厚さ 5mm のモルタル板を 5 枚組み合わせさせた供試体（厚さ 25mm）と厚さ 2mm, 3mm, 5mm×4 枚、のモルタル板を組み合わせさせた供試体（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-3 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-4 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。

(5) 表面濃度の非破壊測定

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⁴⁾。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。

(6) 供試体内部の非破壊測定

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

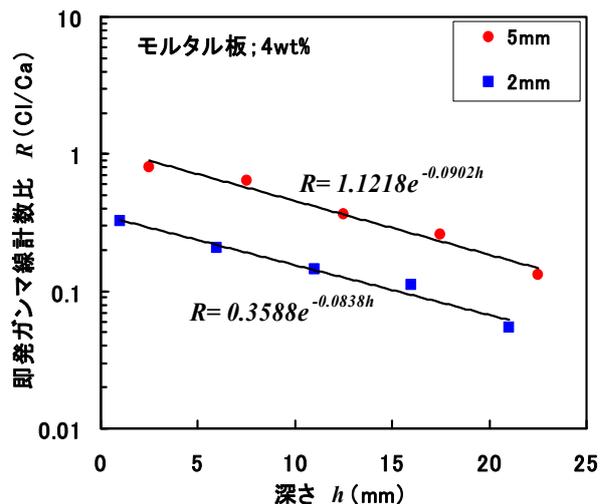


図-4 モルタル板の厚さによる校正曲線の違い

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%

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。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て測定する。測定に用いた供試体の一覧を表-1 に示す。

3. 実験結果および考察

(1) モルタル板の厚さによる校正曲線への影響

図-4 は塩化物イオンが含まれるモルタル板の位置が表面から深くなるにつれて即発ガンマ線計数比がどのように減少するかを表した校正曲線であり、塩化物イオン濃度が 4wt% のモルタル板に関して厚さが 5mm および 2mm の場合について示す。表面部分 ($h=0$) について相違が見られるが、これは供試体全体に含まれる塩化物イオン量の違いによるものである。これら 2 本の直線の傾きを見ても分かるように、塩化物イオンを含むモルタル板の位置に対する即発ガンマ線計数比の減少はほぼ同程

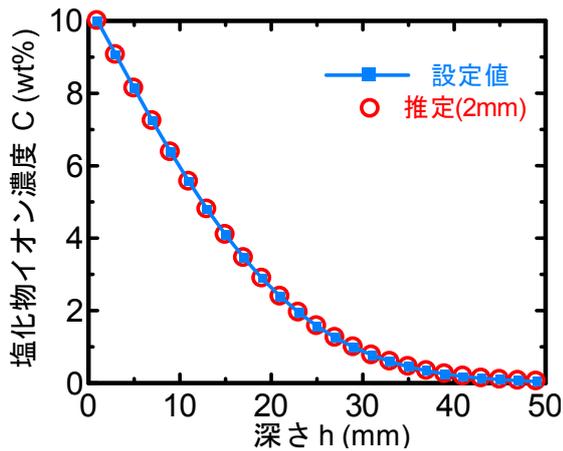


図-5 誤差関数に従う分布を有した供試体の推定

度であり、モルタル板の厚さによる校正曲線への影響はほとんどないと言える。また、本論文では示していないが、他の濃度についても同じ結果が得られた。したがって、モルタル板の厚さに関わらず同じように校正曲線を引くことができる。すなわち、塩化物イオン濃度分布を推定する際、より詳細な分布を知りたいければ、より薄いモルタル板で校正曲線を得ればよい。

(2) 誤差関数に従う濃度分布を有する供試体の推定

所定の塩化物イオン濃度に調整した厚さ 2mm のモルタル板を 25 枚組み合わせることによって、誤差関数に従う塩化物イオン濃度分布を有する厚さ 50mm の供試体を作成し、測定した。誤差関数に従う分布を持つ供試体であれば、既往の研究で提案した推定方法がどの程度の精度で推定できるのかを考察するためである。推定には、著者らが提案したフィックの拡散方程式に基づく誤差関数を利用した手法を用いた。その手順は以下のようである。

まず、これから推定する塩化物イオン濃度分布において、濃度が 0wt%と見なせる位置（以下、浸透深さ）を仮定する。なお、浸透深さは誤差関数に 2 を入力したときと見なす。そして、濃度が既知の表面部と浸透深さの間の分布を、誤差関数で仮定する。仮定された濃度分布において、所定の位置の塩化物イオン濃度から、式(1)を用いて即発ガンマ線計数比を計算する。それぞれの位置での即発ガンマ線計数比を合計し、測定によって得られている供試体全体の即発ガンマ線計数比と比較する。即発ガンマ線計数比の合計が実測値より大きい場合は浸透深さを小さく、実測値より小さい場合は浸透深さを大きくそれぞれ仮定し直して、計算された即発ガンマ線計数比の合計が実測値と一致するまで繰り返す。

図-5に厚さ2mmのモルタル板によって得られた校正曲線を用いて推定した結果を示す。推定された濃度分布はモルタル供試体の分布と非常によく一致しており、測

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	

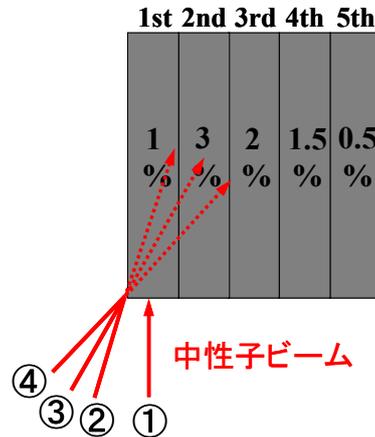


図-6 中性子ビームの照射角度

定された即発ガンマ線計数比が 2.194 であるのに対し、推定結果から求めた計数比の合計値が 2.200 とほぼ一致している。よって、誤差関数に従うような分布を持つ測定対象物であれば、塩化物イオン濃度分布が高精度で推定できることがわかった。

(3) 表面濃度の測定結果

図-6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-6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することができる。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。

(4) 濃度のピークが表面にない分布の推定

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（モルタル板と言うと 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。本論文では、

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</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><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	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	0.1391
0	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															
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%															

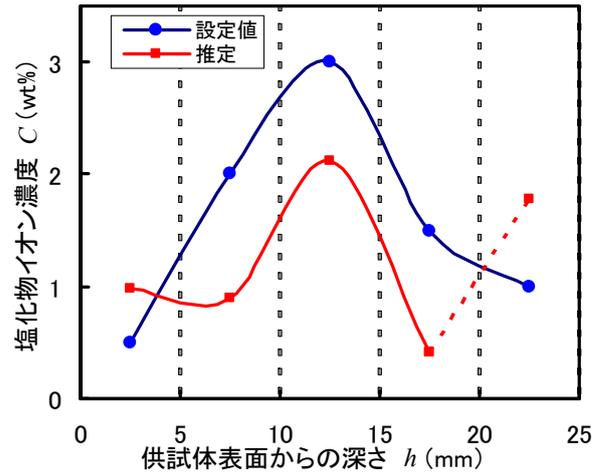


図-7 供試体 A の推定結果

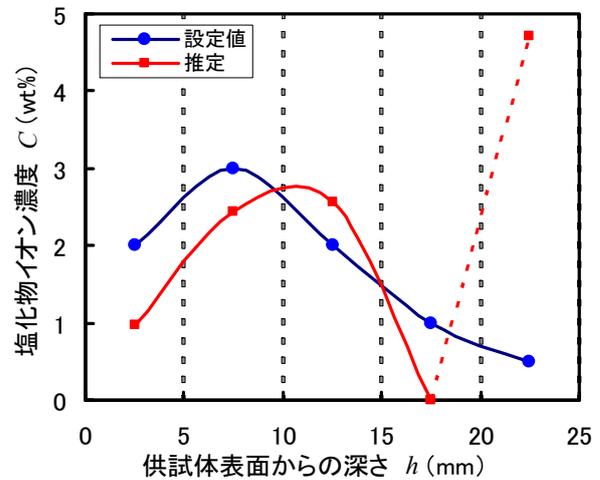


図-8 供試体 B の推定結果

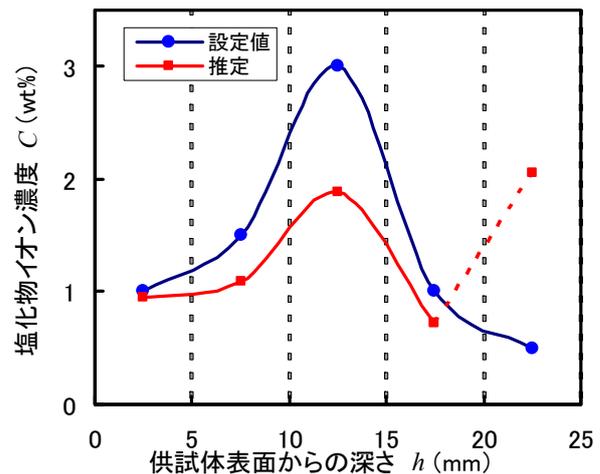


図-9 供試体 C の推定結果

この値をノイズと呼ぶ。本研究では、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。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

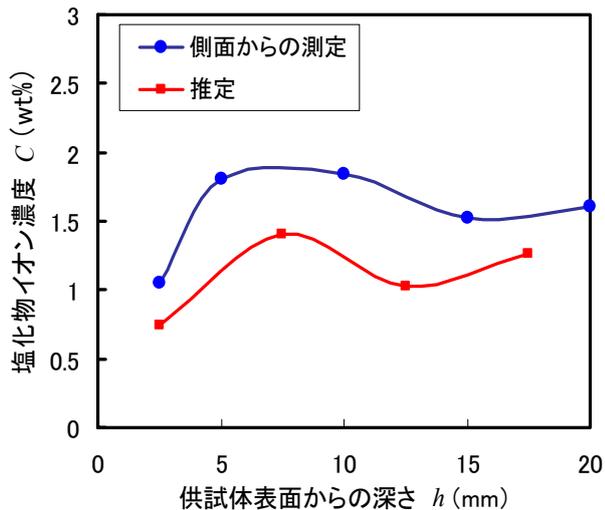


図-10 コア供試体の測定結果および推定結果

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) の値を引き、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-7, 8, 9 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对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。図-10 はコンクリートコア供試体の推定結果と中性子を側面から照射して得られた測定結果を示す。推定結果はモルタル板の場合と同様に、濃度は過小評価しているが、分布のピーク位置を捉えており、ある程度の精度で分布形状を評価していると言える。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。

4. 結語

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、分布形状は比較的良好に把握することができた。

謝辞：本研究は科学研究費補助金（萌芽的研究，課題番号：19656108，代表者：氏家勲 愛媛大学大学院教授）によるものである。さらに本実験は日本原子力研究開発機構の施設共用制度にて行った。また日本原子力研究開発機構の関谷祐二氏および住重試験検査（株）坂根仁氏に多大なご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 米沢伸四郎：原子炉中性子による即発 γ 線分析，分析化学，51，pp.61-96，2002.
- 3) 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
- 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
- 5) 松江秀明，坂根仁：中性子即発ガンマ線分析法を用いたコンクリート防波堤の塩化物イオン濃度の非破壊分析，コンクリートテクノ，Vol.27, No.2, pp.9-12, 2008.2
- 6) Glenn F. Knoll (木村逸郎，阪井英次共訳)：放射線ハンドブック (第 3 版)，日刊工業新聞社，2001