

# コンクリート中における塩化物イオン濃度の非破壊測定法の開発

Development of non-destructive measurement on distribution of chloride iron concentration in concrete

氏家勲<sup>1)</sup> 岡崎慎一郎<sup>1)</sup> 坂根仁<sup>2)</sup>、 松江秀明<sup>3)</sup>

Isao UJIKE Shin-ichiro OKAZAKI Jin SAKANE Hideaki MATSUE

<sup>1)</sup>愛媛大学大学院理工学研究科 <sup>2)</sup>住重試験検査(株) <sup>3)</sup>日本原子力研究開発機構

本研究は即発 $\gamma$ 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、さらに塩化物イオン濃度分布の形状を仮定することにより、塩化物イオン濃度をある程度の精度を持って非破壊で推定することができた。

**キーワード**：中性子，即発 $\gamma$ 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 $\gamma$ 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 $\gamma$ 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 $\gamma$ 線分析は、熱中性子が対象物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即発 $\gamma$ 線を、放射線検出器を用いて測定する分析方法である<sup>1)</sup>。即発 $\gamma$ 線は原子核固有のエネルギーを有しているため、エネルギー弁別測定を行うことによって対象物中の多元素同時測定が可能であり、透過力の大きい中性子を照射して $\gamma$ 線を測定するため、試料調整の必要がほとんどない。図-1は塩化物イオンを含んだコンクリートにおける即発 $\gamma$ 線のエネルギースペクトルの一例であり、エネルギースペクトル中でのピーク

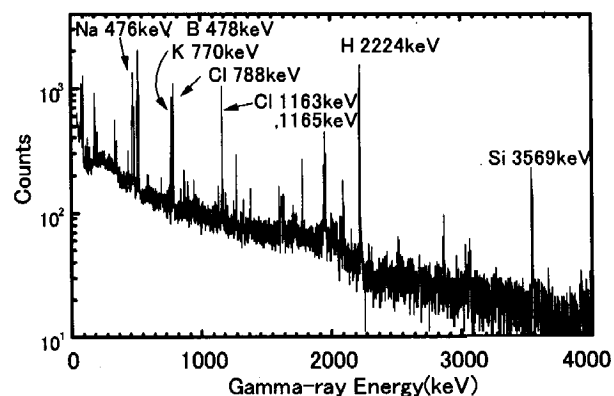


図-1 塩化物イオンを含んだコンクリートの即発 $\gamma$ 線スペクトル

ク的位置とピークの高さから元素を分析することができる。本研究で対象となる塩化物イオンの場合、熱中性子に対する感度が比較的高いため短時間で測定でき、数百 ppm 程度以上で測定が可能である<sup>2,3)</sup>。なお、今回の実験で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 $\gamma$ 線分析装置を用いて行った。また、本実験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準元素とし、カルシウムの即発 $\gamma$ 線計数に対する塩化物イオンの即発 $\gamma$ 線計数の割合 (以下、即発 $\gamma$ 線計数比 R と呼ぶ) を指標に用いた。測定試料は、30×30mm、厚さ 5mm のモルタル板を 5 枚組み合わせた供試体 (厚さ 25mm) である。セメントには普通ポルトランドセメントを、細骨材には珪砂を使用し、W/C=40%、S/C=70%である。モ

表-1 測定試料の組み合わせ一覧

均一な試料					位置をずらした試料					比較用の試料							
試料名	位置				試料名	位置				試料名	位置						
	i	ii	iii	iv		v	i	ii	iii		iv	v	i	ii	iii	iv	v
試料②	2%	2%	2%	2%	2%	試料*-i	*%	0%	0%	0%	0%	試料a	10%	8%	6%	4%	2%
試料④	4%	4%	4%	4%	4%	試料*-ii	0%	*%	0%	0%	0%	試料b	10%	6%	4%	2%	0%
試料⑥	6%	6%	6%	6%	6%	試料*-iii	0%	0%	*%	0%	0%	試料c	10%	4%	2%	0%	0%
試料⑧	8%	8%	8%	8%	8%	試料*-iv	0%	0%	0%	*%	0%	試料d	2%	10%	8%	6%	4%
試料⑩	10%	10%	10%	10%	10%	試料*-v	0%	0%	0%	0%	*%	試料e	6%	8%	6%	4%	2%

※ \*は2,4,6,8,10を表す

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2%間隔で0wt%~10wt%の6種類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5枚ずつ作製した。表-1には組み合わせの一覧を示す。

**3. 研究成果** 図-2は5枚のモルタル板から成る供試体の塩化物イオン濃度とそれに含まれる塩化物イオンとカルシウムから放出される即発ガンマ線の計数比の関係を示す。濃度が同じ5枚のモルタル板の供試体と1枚目のモルタル板のみ塩化物イオンを含む供試体どちらも塩化物イオン濃度が増加するにつれて直線的に増加しており、比例関係にある。従って、この関係を較正曲線として用いれば、即発γ線分析によってコンクリート中の塩化物イオン濃度を測定することができる。しかしながら、濃度が同じ5枚のモルタル板供試体の直線の勾配は1枚目のモルタル板のみ塩化物イオンを含む供試体の直線の勾配の約2.8倍で、5倍とはなっていない。これは塩化物イオン濃度が同じでも、中性子が照射される表面から深くなるにつれて、発生する即発γ線計数が小さくなるためである。従って、塩化物イオン濃度を求める較正曲線にこの位置の影響を考慮する必要がある。

図-3は塩化物イオンを含むモルタル板1枚と塩化物イオンを含まないモルタル板4枚を組み合わせ、塩化物イオンを含むモルタル板1枚を表面から一枚ずつ移動させて計測した即発ガンマ線計数比を対数表示したものである。図からわかるように、塩化物イオンを含むモルタル板を1枚目(表面)から後ろに移動することにより、モルタル板を組み合わせた供試体の即発γ線計数比は小さくなっている。この減少は中性子の一部が供試体内で吸収および散乱され、透過する中性子の数が減り、発生する即発ガンマ線が減少するためである。

図-4は均一な試料供試体の即発ガンマ線計数比と塩化物イオンを含むモルタル板1枚の位置をずらした

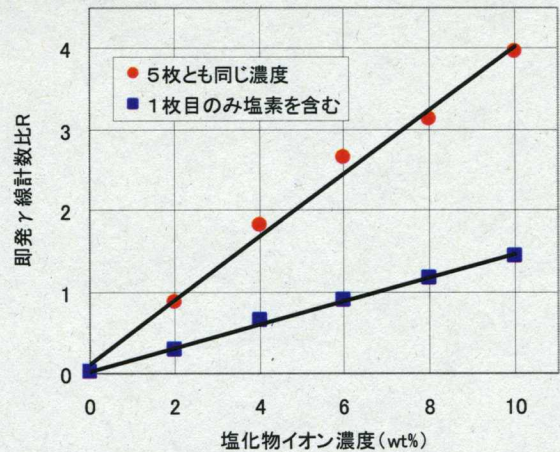


図-2 即発γ線計数比と塩化物イオン濃度の関係

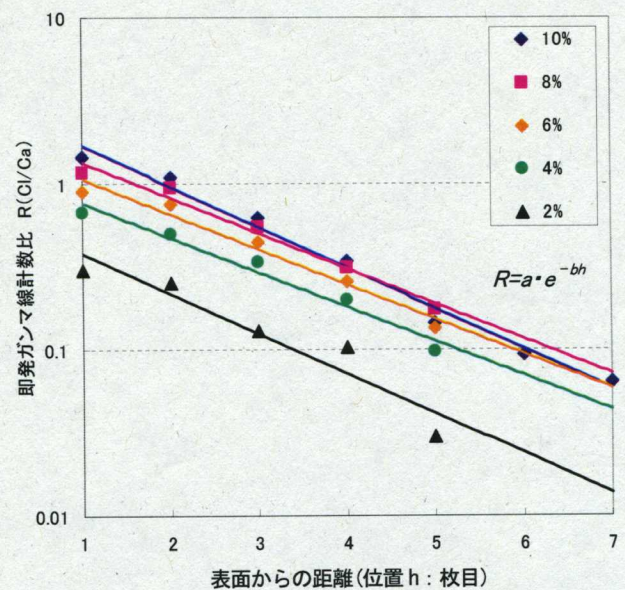


図-3 位置(深さ)と対数表示の即発γ線計数比の関係

試料供試体の即発ガンマ線計数比の合計との関係を示す。相関係数は 0.9953 と高く、両者はよく一致している。すなわち、試料に含まれる塩化物イオン濃度と位置に対応した即発ガンマ線が検出されているということである。

そこで、図-3中の直線は最小二乗法により、実測値を次式で回帰した結果である。

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

ここで、 $R$  は即発ガンマ線計数比、 $h$  は深さ方向の位置であり、 $a$  と  $b$  は回帰係数である。係数  $a$  は深さ方向の位置  $h=0$  (供試体表面) での即発ガンマ線計数比であるので、図-2と同じように係数  $a$  は塩化物イオン濃度に比例する。次に、係数  $b$  に関しては、図-3の結果から、塩化物イオン濃度が 10% と 2% においては少しばらついているが、塩化物イオン濃度によらず回帰直線どうしは平行であると思われる。

この点に関してはさらにデータを蓄積して確認する必要があるが、本論文では直線の勾配、すなわち係数  $b$  は塩化物イオン濃度によらず一定と仮定して、較正曲線に取り入れる。ここでは図-3の結果を平均して 0.51362 とする。以上をまとめて位置の影響を考慮した較正曲線は以下のようになる。

$$R = 0.290C \cdot e^{-0.51362h} \quad (2)$$

ただし、係数  $a$  および係数  $b$  は中性子源、測定装置や測定時間などによって変化するので、測定条件に応じて較正曲線を設定する必要があるが、図-3に示す直線が一本得られれば、係数  $a$  が塩化物イオン濃度に比例することおよび係数  $b$  が一定であることの仮定から、式(2)のような較正曲線を決定することができる。また、式(2)は厚さ 5mm のモルタル板を移動させて得られた式であるので 5mm 間隔で塩化物イオンを評価することとなるが、厚さ 1mm のモルタル板を所定の間隔で移動させて即発ガンマ線分析を行って較正曲線を設定すれば、1mm 間隔での塩化物イオンの評価が可能となる。

コンクリート構造物における塩化物イオンの侵入状況の予測はフィックの拡散方程式を基に推定するが、その解の一つである誤差関数による式を利用し、表面濃度を既知の値とし、塩化物イオン濃度分布の形状を仮定して、式(2)の校正曲線を用いて塩化物イオン濃度分布の推定を行う。

塩化物イオン濃度の推定は以下の手順で行われる。まず、塩化物イオン濃度の分布において、濃度が 0% と見なせる位置 (以下、浸透深さと呼ぶ) を仮定する。なお、塩化物イオン濃度が 0% は誤差関数に 2 を入力したときと見なした。そして、濃度が既知の表面部と浸透深さの間の塩化物イオン濃度分布を、誤差関数で仮定する。仮定された濃度分布から、所定の位置の塩化物イオン濃度を求める。得られた塩化物イオン濃度と位置から、式(2)を

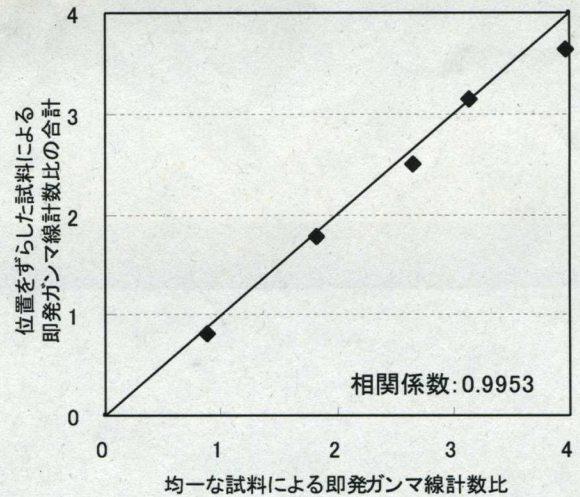


図-4 均一な試料の計数比と位置をずらした試料の計数比の合計の比較

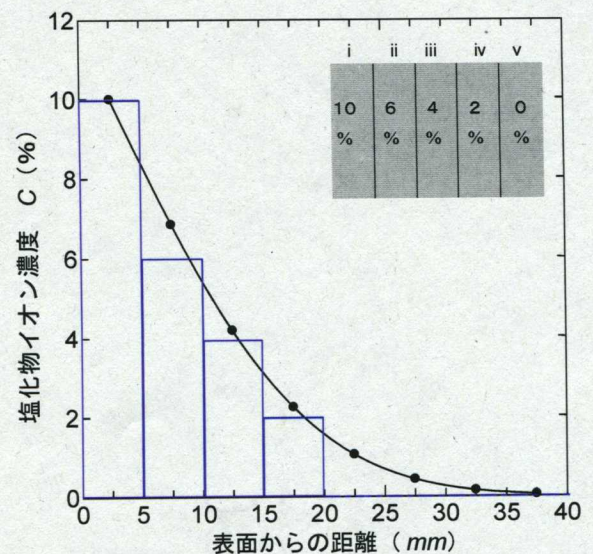


図-5 塩化物イオン濃度分布の推定結果 (試料b)

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、実測された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なおして、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および図-6は表-1 に示す試料 b および試料 c における塩化物イオン濃度を推定した結果を示す。試料 b に関して浸透深さを 40mm とすると、実測値 2.86 に対して計算値 2.73、試料 c に関して浸透深さを 20mm とすると、実測値 2.22 に対して計算値 2.23 であった。今回の実験で用いた較正曲線は 5mm 間隔であるので、浸透深さの仮定も 5mm 間隔で変更するため、即発ガンマ線計数比の計算値を

実測値とほぼ同じ値とすることは難しいが、図からわかるように、推定結果は実測値をある程度の精度で予測していると思われる。なお、図示はしていないが、表-1 の試料 d や試料 e のような中性化や雨水の影響によって表面付近の濃度が極端に低くなっているような分布に関しては浸透深さを過大評価することになる。また、内在塩化物イオンが存在する場合には過小評価となる。これらの点に関しては今後検討が必要である。

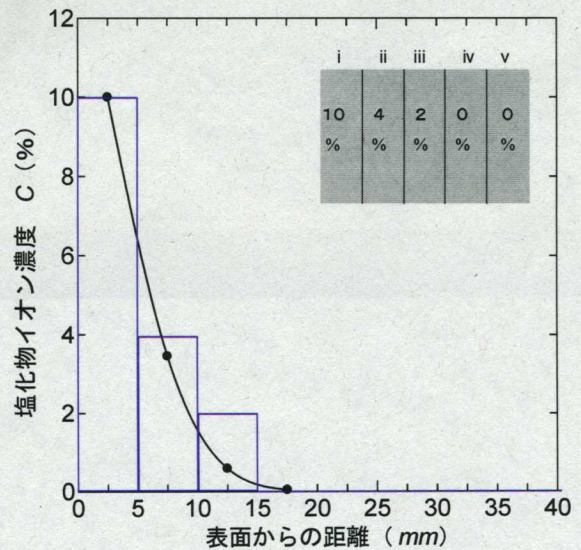


図-6 塩化物イオン濃度分布の推定結果 (試料 c)

#### 4. 結論 本研究の結果をまとめると次のようである。

- ① 即発ガンマ線計数比と塩化物イオン濃度は比例関係にあり、即発ガンマ線計数比は測定対象物が表面から深い位置になればなるほど指数関数的に減少する。
- ② 塩化物イオン濃度分布を推定するための位置の影響を考慮した即発ガンマ線計数比と塩化物イオン濃度の較正曲線を提案した。
- ③ 表面の塩化物イオン濃度を既知とし、塩化物イオン濃度分布を仮定することにより、即発ガンマ線分析を用いて非破壊で塩化物イオン濃度分布の推定が可能である。

#### 5. 参考文献

- 1) 米沢仲四郎：原子炉中性子による即発γ線分析、分析化学，51，pp.61-96，2002.
- 2) 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
- 3) 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