

## 論文 中性子ラジオグラフィによるコンクリート中の水分定量に関する研究

土屋 直子<sup>1</sup>・兼松 学<sup>2</sup>・野口 貴文<sup>3</sup>・飯倉 寛<sup>4</sup>

**要旨:** 本研究では、中性子ラジオグラフィを用いたコンクリート中の水分非破壊定量技術の開発を目的に、装置精度の検証を行った後、物質特有の値である質量吸収係数を実測し、コンクリート中のペースト体積の導出手法を提案した。さらに、ペースト体積あたりの相対含水率を求め、吸水プロセスにおけるコンクリート中の水分挙動について測定を行った。また、既往の研究に基づき、細孔半径と吸水速度の関係から相対含水率の経時変化を算定し、実測した結果と比較し、本装置による水分定量化技術の整合性を確認した。

**キーワード:** 非破壊, 水分定量, コンクリート, 水分挙動, 中性子ラジオグラフィ

## 1. はじめに

コンクリートは多孔質透水性材料であり連続した空隙中を水分が移動することで耐久性などに影響を及ぼす。これまで、コンクリート中の水分移動現象については、多くの研究が行われてきた。

非破壊測定手法として知られる中性子ラジオグラフィは、中性子線が物質を透過した際におこる吸収・透過特性が元素核種によって異なることを利用して物質の透過像を取得する技術である。特に、水素及び水、合成樹脂などの水素化合物に対して強い遮蔽性を示すことから、水分の検出に適していることが知られている<sup>1)</sup>。

著者らはこれまで、中性子ラジオグラフィを用いたコンクリートのひび割れ中の水分移動の可視化および定量化に向けた研究<sup>2)</sup>を行ってきたが、コンクリートに適用した場合の測定精度の検討、散乱効果による誤差の除去など、より精緻な定量手法の検討が必要であることが明らかになっていた。

そこで本研究では、より精緻な中性子ラジオグラフィを用いたコンクリート中の水分非破壊定量化技術の開発と、本手法によるコンクリート中の水分挙動の定量化を目的とした以下に示す一連の実験的研究を実施した。

## 1) 中性子ラジオグラフィによるコンクリート中の水分定

## 量精度の検証

- 2) 水分定量に関わる各種物性値確認
- 3) 毛細管吸収による水分浸透現象の定量化

## 2. 中性子ラジオグラフィによる測定の概要

## 2.1 装置概要

本研究における中性子ラジオグラフィの測定は全て(独)日本原子力開発機構 JRR-3M 内 TNRF 第2撮影室で行った。本装置の仕様を表-1に、装置概要を図-1に示す。図に示されるとおり、原子炉から入射した中性子線は試料体によって減衰・散乱し、蛍光コンバータにより可視光に変換され2枚のミラーを通して冷却型 CCD カメラによって撮影される。可視光を利用しているため、通常の光学系カメラやビデオカメラによる撮影が可能であり高時間分解・空間分解能を実現できる。

表-1 装置仕様

中性子束	$1.2 \times 10^8$ 個/cm <sup>2</sup> ・s
CCD カメラ取得画素数	1008×1024 pixel(14bits)
空間解像能	約 100 μm/pixel
撮影時間	1.2 s
転送時間	約 8 s

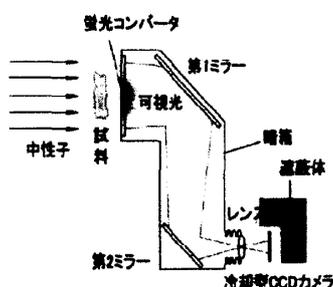


図-1 中性子ラジオグラフィ装置概要

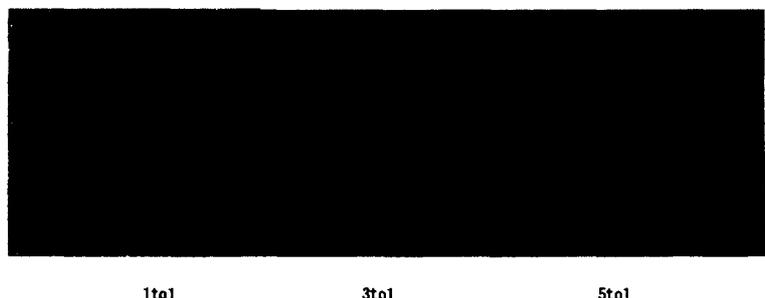


図-2 フレーム処理による画像の違い

\*1 東京理科大学 理工学研究科建築学専攻 (正会員)

\*2 東京理科大学 理工学部建築学科講師 工博 (正会員)

\*3 東京大学大学院 工学系研究科准教授 工博 (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 研究員 農博

しかしながら、得られた画像を定量解析しようとした場合、もともと CCD カメラが持っている暗電流値が撮画像に影響を及ぼすことや、実際に得られた画像には CCD 素子の放射線感受性が強いために生じる図-2 のようなホワイトスポットというノイズが発生することなどが問題となることが知られている。そのため、前者には、撮画像から暗電流分の値を差し引くオフセット処理が行われ、後者には、各地点（各画素）ごとに複数枚の画像の値の平均値や最小値を取ることでノイズを除去し定量精度の向上が図られる。以上の画像処理を行うことで得た透過中性子強度を、入射中性子強度で除すことで中性子透過率が得られる。

## 2.2 測定精度検証

### (1) 概要

中性子ラジオグラフィによる画像解析では、2.1 で述べたような画像解析が行われることが一般的であるが、より精緻な水分定量のためには、我々が念頭としている測定系において上記画像処理手法の定量誤差におよぼす影響を明かにしておく必要がある。例えば、原子炉から取り出される入射中性子強度は時間・空間ごとに常に完全一定ではないため、時間的、空間的誤差が生じる。また、ホワイトスポットノイズ除去のためのフレーム処理は、複数枚の画像を用いるため、処理に用いる画像の増加は、時間分解能の低下を意味する。こうした理由から、中性子ラジオグラフィを利用してコンクリート系材料の撮影・定量化を行う際の測定精度を、空間的精度および時間的精度の2つの観点から検証した。

### (2) 精度検討方法

まず、ホワイトスポットノイズ対策として採用したミニマムフィルタ処理について検討した。ミニマムフィルタ処理は、ホワイトスポットノイズは値としては極めて大きな値をとることから、撮影時刻の異なる同じ点の値の最小値をとるフレーム処理である。

通常3枚から5枚の画像を用いてミニマムフィルタ処理を施すが、1枚の撮像に8秒を要することから、1枚の

測定画像を得るのにおおよそ24秒から40秒程度を要する。

そこで、まずはミニマムフィルタ1回に用いるフレーム枚数を1枚、3枚、5枚と変化させた

場合の精度検証を行った。ここではそれぞれのフレーム処理方法を1to1, 3to1, 5to1と呼ぶものとする。このように処理枚数を変化させたフィルタ処理で、連続25枚撮影した画像中の同じ地点1画素における透過率の測定値を観察することで、本手法の経時的な定量誤差を検証した。

続いて、空間定量精度を捉えることを目的として、フレーム全体と図-3のように1フレームを4分割し、それぞれの空間について透過率の値をヒストグラム化し、全体空間と個々の空間のヒストグラム図を比べることで空間的な定量誤差を検証した。

尚、中性子ラジオグラフィの測定においては、試料で散乱された中性子が他の地点に飛来し、各点における中性子カウント数の誤差となる散乱効果が知られていることから、本実験においては、試料と蛍光コンバータ間距離を10cm離して撮影し散乱効果による誤差の低減を図った。また、測定には、水セメント比65%のコンクリート供試体から20×100×100mmの試験体を切り出し、それを105℃乾燥して蒸発性水分を除去して用いた。

## 2.3 測定結果および考察

### (1) 経時誤差

図-4は画像中のある1画素の経時変化と透過率の変化の様子をミニマムフィルタ処理ごとに示したものである。図より、1to1ではホワイトスポットのノイズの影響により、3to1や5to1に比して透過率のばらつきが大きい

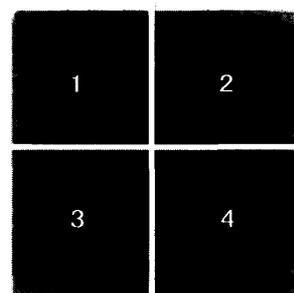


図-3 測定方法

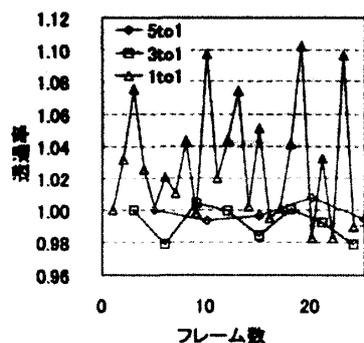


図-4 1画素における経時変化

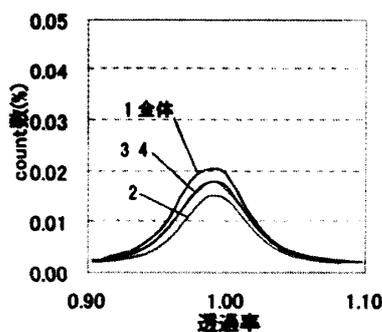


図-5 1to1における空間誤差

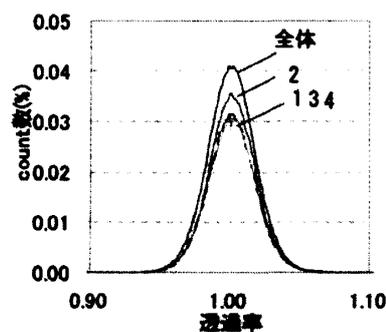


図-6 5to1における空間誤差

ことがわかる。また、3to1と5to1を比較すると、5to1のほうが若干であるが値のばらつきが少なく安定しており、それぞれ誤差は±2%、±1%程度といえる。

## (2) 空間誤差

図-5および図-6に、1to1と5to1とミニマムフィルタ処理を変化させた場合の、4分割した画像中の透過率のヒストグラムを示す。また、表-2に、ミニマムフィルタ処理方法の違いと、4分割した測定空間の違いを水準とした透過率の標準偏差を示す。

1to1および5to1でヒストグラムの概形は若干異なる結果となったが、標準偏差の値から大きな空間誤差は認められなかった。

また、3to1と5to1の処理では、ホワイトスポットノイズの影響はほぼ見られず、CCDの感度などに起因する試験機誤差のみが観測されているものと考えられ、その誤差はそれぞれ±2%、±1%程度である。

以上を踏まえ、3to1処理と5to1のミニマムフィルタ処理が精緻な定量化処理に適していることが明らかとなった。それぞれの撮影時間は24秒と40秒である。

## 3. 中性子ラジオグラフィを用いたコンクリート中の水分定量化

これまでの研究<sup>2)</sup>では、水の質量吸収係数<sup>3)</sup>およびコンクリートの質量吸収係数とコンクリート中のペースト体積比率の関係を明らかにすると、中性子ラジオグラフィによりコンクリート中の水分状態を試験体の種類や水分状態によらず安定して定量可能であることを示してきた。そこで、本稿2章の誤差に関する考察を踏まえ、水分定量化に必要な、基礎物性値である質量吸収係数 $\lambda$ を実験を通して定める。

そこで、中性子ラジオグラフィによる水分定量化方法を述べ、その定量に必要な、液状水の質量吸収係数の決定およびコンクリートの質量吸収係数とコンクリート中のペースト体積比率の関係が明らかとなるように実験を行った。

### 3.1 定量化方法

測定した中性子強度と、試料中元素の密度や厚さの関係は式(1)および(2)のように表され、質量吸収係数 $\lambda$ や密度や厚さによって入射中性子は吸収される。

$$I = I_0 e^{-(\Sigma c \delta_c + \Sigma w \delta_w)} \quad (1)$$

$$\Sigma = \lambda \cdot \rho \quad (2)$$

ここに、 $I$ : 透過中性子強度、 $I_0$ : 入射中性子強度、 $\Sigma$ : 巨視的断面積、 $\delta$ : 厚さ、 $\lambda$ : 質量吸収係数、 $\rho$ : 密度であり、添え字については、 $c$ : コンクリートもしくは試験体マトリクス、 $w$ : 蒸発性水分、 $p$ : ペーストをそれぞれ表す。

表-2 測定空間とヒストグラムの標準偏差のまとめ

測定空間	1to1	3to1	5to1
1	0.139	0.023	0.017
2	0.129	0.022	0.017
3	0.142	0.024	0.017
4	0.134	0.023	0.017
全体	0.136	0.023	0.013

このとき、 $I/I_0$ は中性子透過率を示し、透過率の対数をとった減衰率 $P$ は下式で表される。

$$P = -\ln(I/I_0) = \lambda_c \rho_c \delta_c + \lambda_w \rho_w \delta_w \quad (3)$$

ここで、時刻 $t=0$ から時刻 $t$ で水だけ変化すると $\Delta P$ は次式で表される。

$$\Delta P_w = -\ln(I_t/I_{t=0}) = \lambda_w \rho_w \delta_w \quad (4)$$

ここに、 $\lambda_w$ : 水の質量吸収係数 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )、 $\rho_w$ : 水のコンクリート体積中のかさ密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )、 $\delta_w$ : 水のかさ厚さ=マトリクス厚さ ( $\text{cm}$ ) である。

質量吸収係数とは、放射線が物質を通過するとき放射線が減衰する割合を示すもので、物質が定まれば一定となる。

そこで $\lambda_w$ =定数、 $\delta_w = \delta_c$  (試験体厚さ) とし、中性子ラジオグラフィから得られた水分強度 $\Delta P_w$ から、以下の式(5)において水のかさ密度 $\rho_{w/c}$ がコンクリート体積 ( $\text{cm}^3$ ) あたりの水重量 ( $\text{g}$ ) として求まる。

$$\rho_{w/c} = \frac{\Delta P_w}{\lambda_w \delta_c} \quad (5)$$

また、式(6)のように、コンクリート体積におけるペースト体積比 $V_p$ を用いて、ペースト体積あたりの水重量 $\rho_{w/p}$ が得られる。

$$\rho_{w/p} = \frac{\Delta P_w}{\lambda_w \delta_c V_p} \quad (6)$$

従って、水かさ密度 $\rho_{w/p}$ が定まれば、ペースト体積 ( $\text{cm}^3$ ) あたりの水重量 ( $\text{g}$ ) が求まる。

さらにペースト体積中に入りうる水重量を $\varepsilon$ とすると相対含水率 $c$ は下式で求まる。

$$c = \frac{\rho_{w/p}}{\varepsilon} = \frac{\Delta P_w}{\lambda_w \delta_c V_p \varepsilon} \quad (7)$$

### 3.2 マトリクス中の蒸発性水分の質量吸収係数

#### (1) 実験概要

マトリクス中に蒸発性水分の質量吸収係数 $\lambda_w$ を算出するために、式(4)において $\Delta P_w$ は飽水状態および絶乾状態の水分強度の差分値、 $\rho_w$ は含水量(飽水状態および絶乾状態の重量の差分)を試験体体積で除した水分かさ密度とした。

試験体はコンクリートおよびペースト試験体で、28日

表-3 試験体水準

マトリクス	W/C (%)	寸法 (cm)
ペースト	30	φ5×2
	50	
	65	
コンクリート	30	10×10×2
	65	10×10×1
	50	10×10×2
	50	10×10×3

表-4 コンクリート調査

水セメント比 W/C (%)	空気量 air (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
65	4	49	185	285	870	925	2.85
50	4	49	175	350	856	911	2.45
30	4	42.8	175	583	665	911	2.33

水中養生を行った直後に飽水状態で中性子ラジオグラフィによる測定を行った後、105℃にて24時間乾燥させ、絶乾状態で再度測定した。この際、失われた水量を測定し  $\rho_w$  を得た。

用いた試験体水準を表-3に、調査を表-4に示す。

(2) 実験結果

測定結果を図-7に示す。横軸が単位面積あたりの水分量  $\rho_w \delta_c$  (g/cm<sup>2</sup>)、縦軸が差分水分強度であり、傾きが質量吸収係数  $\lambda$  となる。水セメント比やマトリクスの違いによらず、差分水分強度とかさ面積あたりの水分量に線形性が見られた。

図より、マトリクス中の蒸発水の質量吸収係数  $\lambda_w = 1.39$  となり、この値は試験体水準によらず普遍的に使用できる。ただしコンクリート厚さは3cm、ペースト厚さは2cmまでの結果であり、厚さがさらに大きくなると、減衰量が入射中性子量を上回るため、線形性が得られないことが兼松らの実験により明らかになっている<sup>4)</sup>。

3.3 コンクリート中のペースト体積比率および  $\lambda$

続いて、調査によりペースト量と骨材量の比率を調整したコンクリート試験体を作成し、中性子ラジオグラフィにて水分強度を実測し、コンクリート中のペースト体積比率と骨材とペースト部分を含めた質量吸収係数を測定した。このとき、式(3)において、 $\lambda_{a+p}$  : 骨材とペーストの質量吸収係数 (cm<sup>2</sup>/g)、 $\rho_c$  : コンクリートの密度 (g/cm<sup>3</sup>)、 $\delta_c$  : コンクリートの厚さ (cm) とし、蒸発性水分はないものとする。

(1) 測定概要

W/Cを30%、50%、65%とし、s/aを一定で骨材体積比率が30%、50%、68%の試験体を作製し、水準ごとのコンクリート中のペースト体積比率と骨材とペースト部分を含めた質量吸収係数を測定した。

骨材体積比率68%のコンクリート調査を表-4に示す。この調査を基にコンクリート中の骨材体積比を変化させた。試験体は打設後28日水中養生を行い、その後7日間の105℃乾燥にて絶乾状態とした。

また、ペースト体積比0%試験体(すなわち骨材のみ)としては、内寸法が10×10×2.5cmである透過率の高い純アルミ製容器に粗骨材と細骨材をs/aがコンクリート試験体と同じとなるように詰めたものを用いた。このと

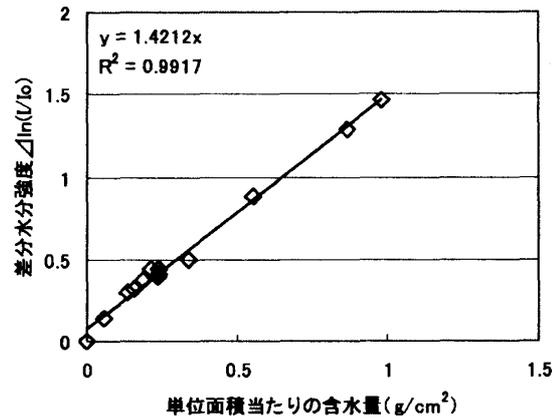


図-7 水分強度と試験体の面積あたりの自由水量

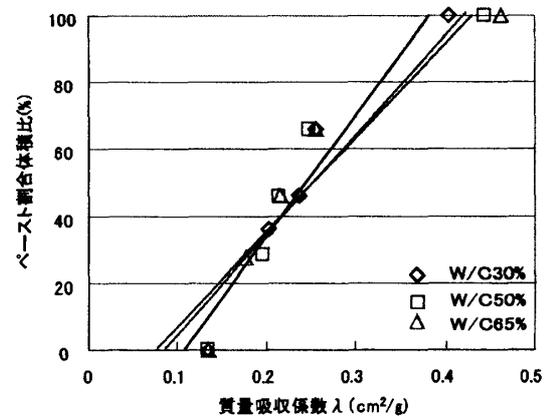


図-8 ペースト体積比率と質量吸収係数  $\lambda_{a+p}$  の関係

表-5 質量吸収係数に関するパラメータの測定結果

W/C (%)	a	b	R <sup>2</sup>
30	3.63	-0.40	0.95
50	3.04	-0.27	0.89
65	2.81	-0.22	0.89

き、骨材は105℃乾燥にて絶乾させたものを使用した。ペースト体積比100%試験体としては、セメントペースト試験体φ5×2cmの絶乾試験体を用いた。

(2) 測定結果

図-8にペースト体積比率と  $\lambda_{a+p}$  の関係を示す。この

キャリブレーションにより、各試験体の各面素ごとに骨材とペーストを含むコンクリートの $\lambda_{a,p}$ からペースト体積 $V_p$ が求まる。(式(8))

$$V_p = a\lambda_{a,p} + b \quad (8)$$

また、表-5に式(8)を仮定した場合のaとbおよび相関係数の2乗値 $R^2$ を示す。

$R^2$ は0.994と高い相関を示したことから、式(8)を用いることで各試験体の各面素ごとの中性子透過率からペースト体積 $V_p$ が求まる。

#### 4. コンクリート中の水分浸透現象の定量化

以上で述べた中性子ラジオグラフィによる定量化手法を用い、コンクリートの吸水現象における水分挙動の定量化を試みた。試験方法は試験体下部を水槽に浸し、毛細管吸水による水分浸透試験を実施した(図-9)。

中性子ラジオグラフィにより連続画像として得られた撮画像に式(7)を適用することで各時刻における水分量を定量した。また、既往の吸水モデルを多孔質材料に応用することで、各時刻における相対含水率の空間分布を求め、相対含水率、空間配置実測値と比較・検討した。

##### 4.1 既往文献値からの水吸収モデル

ポアズイユ式より、まっすぐな1本の毛細管の吸水速度は、下式により表される。

$$\frac{dx}{dt} = \frac{4r^2 2\pi r\gamma}{32\mu \pi r^2 x}$$

$$x = \sqrt{\frac{r\gamma}{2\mu} t} \quad (9)$$

ここに、 $\mu$ ：水の粘性、 $r$ ：毛細管半径、 $\gamma$ ：表面張力である。さらに、屈曲した毛細管モデルの場合には $x$ に屈曲率 $f$ を乗じる<sup>5)</sup>。また、式(9)のパラメータは、文献<sup>5)</sup>より下式により得られる。

$$\gamma = 72 \times 10^{-5} \text{ (n/cm)}$$

$$\mu = 8.90 \times 10^{-8} \text{ (n/cm}^2\text{)} \quad (10)$$

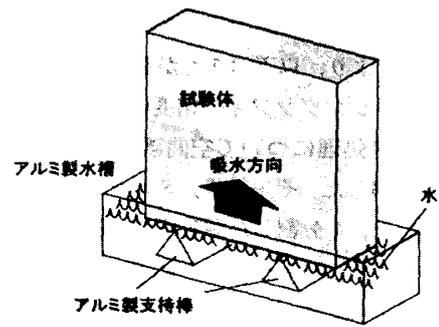


図-9 水分浸透試験概要

以上を踏まえ、同水セメント比のペーストの細孔容積を水銀圧入法により実測し(図-10)、式(9)を空隙径で積分することで全細孔容積に吸水していく水体積(水重量)と時間の関係を得た。

##### 4.2 中性子ラジオグラフィによる実測値

実験 3.2 および 3.3 より得た $\lambda_w = 1.42$  および a, b を用いて、コンクリートに吸水される水を相対含水率として定量を行い、時間 10 分ごとに 60 分まで、吸水方向 x - 相対含水率の関係を得た。また、 $\epsilon$  については、 $\phi 50 \times 20\text{mm}$  ペースト試験体を用い、湿潤状態と絶乾状態の重量の差分(=含水量)を試験体体積で除することで得、値は $\epsilon = 0.43$ であった。吸水面から x 方向 20mm $\times$ 幅 9 画素(=約 1mm)の範囲について、横幅方向の 9 画素分の相対含水率を平均し測定を行った。

使用したコンクリート試験体の調合は表-2 と同じである。W/C50%、打設後 28 日水中養生後、7 日間 105°C 乾燥にて絶乾状態にした。寸法は 10 $\times$ 10 $\times$ 2cm である。

##### 4.3 実験結果

図-11 に中性子ラジオグラフィを用いて得られた実測値の結果を示す。これらの結果を基に、感度解析を行い、屈曲率 $f=7$ を得た。図-12 に今回採用・提案した吸水モデルにおいて $f=7$ の場合の解析結果を示す。解析結果は実験結果を良好に表現できていることから、本手法により適切な屈曲率を導出することで浸透水の挙動の精緻な解析を可能であることが示唆された。

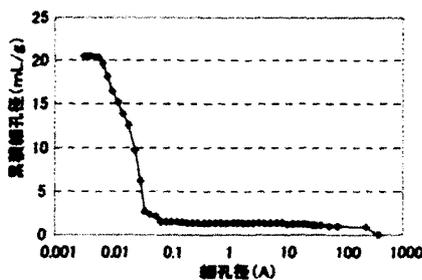


図-10 細孔径分布 (W/C = 50%)

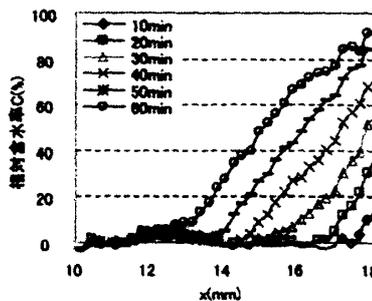


図-11 中性子ラジオグラフィ  
実測値

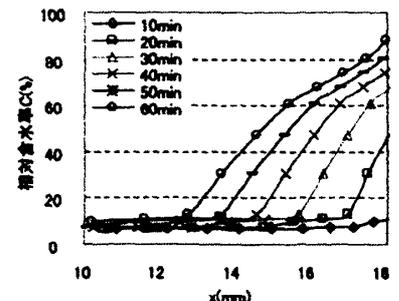


図-12 モデル解析結果

## 5. まとめ

本研究により、以下の3点が明らかとなった。

- (1)中性子ラジオグラフィの精度の確認を行い、ミニマムフィルタ処理について空間誤差および時間誤差について考察した。その結果、ミニマムフィルタ処理方法の違いと、4分割した測定空間の違いを水準とした標準偏差より、3to1と5to1の処理では、ホワイトスポットノイズの影響はほぼ見られず、CCDの感度などに起因する試験機誤差のみが観測されているものと考えられる。  
3 to 1 処理と 5 to 1 のミニマムフィルタ処理が精緻な定量化処理に適していることが明らかとなった。それぞれの撮影時間は24秒と40秒である。
- (2)マトリクス中の蒸発性水分の質量吸収係数 $\mu$ およびコンクリート質量吸収係数 $\mu$ とコンクリート中のペースト体積比率の関係を実験的に求めた。これらの値を用いることで、コンクリート中の水分をペースト体積あたりの水分量として、水分定量可能であることが示された。
- (3)中性子ラジオグラフィをもちいて、コンクリート中に吸水する水について、時間と相対含水率と空間配置の関係を既往の吸水モデルと比較し、本装置での水分

挙動の精緻な定量が可能であることが示唆された。

謝辞) 本研究は、名古屋大学 丸山一平准教授、東京大学 辻埜真人氏、長井宏憲氏らの協力を得て実施した。ここに感謝の意を記す。

## 参考文献

- 1) 兼松学：文献調査 中性子ラジオグラフィのコンクリート工学分野への適用に関する研究動向，コンクリート工学，vol.45，No.11，pp.48-54，2007.11
- 2) 兼松学，丸山一平，野口貴文，飯倉寛：中性子ラジオグラフィによるコンクリートのひび割れ部における自由水挙動に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.61，pp.160-167，2007
- 3) 中性子ラジオグラフィ写真集，日本非破壊検査協会，1995
- 4) 兼松学，丸山一平，野口貴文，飯倉寛，松林政仁：中性子ラジオグラフィによるコンクリートのひび割れ部の水分挙動の可視化，セメント・コンクリート研究討論会論文集，pp.17-22，2006.11
- 5) 近藤連一：多孔材料，技報堂出版株式会社，p 71-72，1978.9