

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	小型加速器中性子源を利用した 定量イメージングによるコンクリートの水分浸透評価に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	吉村雄一
Author(English)	Yuichi Yoshimura
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11312号, 授与年月日:2019年9月20日, 学位の種別:課程博士, 審査員:林崎 規託,小林 能直,片渕 竜也,吉田 克己,二羽 淳一郎
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11312号, Conferred date:2019/9/20, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

小型加速器中性子源を利用した
定量イメージングによるコンクリートの
水分浸透評価に関する研究

環境・社会理工学院 原子核工学コース

吉村雄一

内容

第1章 序論.....	1
1.1 小型加速器中性子源.....	1
1.2 コンクリート定量イメージングの必要性.....	2
1.3 本研究の目的と課題.....	3
1.4 本論文の構成	3
参考文献	5
第2章 原理.....	7
2.1 中性子イメージング	7
2.2 イメージングシステム概要	9
2.3 イメージング検出器.....	11
2.3.1 中性子カメラ.....	11
2.3.2 中性子イメージインテンシファイア ²⁻⁹⁾	12
2.4 理研小型中性子源 RANS.....	14
2.5 物理量の定量化に向けた課題.....	17
参考文献	19
第3章 イメージングシステムの構築.....	21
3.1 冷却型イメージングカメラの導入	21
3.2 検出器の入出力に対する直線性評価	22
3.3 解像度に関連する因子の評価.....	25
3.3.1 中性子のコリメータ比 L/D の測定	25
3.3.2 検出器の解像度評価	31
3.4 中性子線に混入する γ 線の評価.....	38
3.4.1 ブランキング機能を使用したイメージング	38
3.4.2 水分検出感度に γ 線の混入が及ぼす影響	42
参考文献	43
第4章 中性子イメージングによる コンクリート内浸透水分の定量化.....	45
4.1 画像処理方法	45
4.1.1 ノイズおよびダーク処理.....	45
4.1.2 シェーディング補正および画像間輝度の規格化.....	48
4.1.3 画素結合による標準偏差の低減	49
4.2 コンクリート内浸透水分の可視・定量化.....	51
4.2.1 水分浸透試験の方法	51
4.2.2 水分浸透試験の中性子イメージング方法	52
4.2.3 コンクリートに浸透する水分の画像抽出と定量化方法	53

4.2.4	コンクリート水分浸透試験の中性子イメージング結果	54
4.2.5	アクリル試料の中性子イメージング結果との比較	56
	参考文献	57
第5章	小型加速器中性子源による コンクリートの水分浸透性評価	58
5.1	劣化コンクリートの水分浸透性評価	58
5.1.1	劣化コンクリート水分浸透過程の中性子イメージング	58
5.1.2	隣接する試験片の比較	64
5.1.3	水分浸透性状の再現性	67
5.2	配合の異なるコンクリートの評価	69
5.2.1	水セメント比と単位セメント量の異なるコンクリートの評価	69
5.2.2	配合が水分検出感度に与える影響	72
5.2.3	水セメント比および単位セメント量の異なるコンクリートにおける水分浸透性状 ...	74
5.3	コンクリートへの浸透水分流束評価	80
5.3.1	異なる水セメント比および単位セメント量と水分流束の関係	82
5.3.2	吸水速度と流束分布の関係	82
5.3.3	深さ 10, 30, 50 mm を通過する水分量と含水率の関係	83
5.4	まとめ	84
	参考文献	85
第6章	大型中性子施設でのコンクリートのイメージングとの比較および小型加速器中性子源の 今後の展開	86
6.1	大型中性子施設とのイメージング仕様の比較	86
6.2	小型加速器中性子源によるイメージングの展望	89
	参考文献	92
第7章	結論	94
7.1	本研究の成果	94
7.2	今後の課題	96

第 1 章 序論

1.1 小型加速器中性子源

中性子は金属を透過し、水素やリチウム、ホウ素など軽元素に反応する性質を持つことから、Li イオン電池における Li イオンの挙動観察¹⁻¹⁾や、カーエアコンに使用される冷媒挙動の可視化¹⁻²⁾など、ものづくりにおける基礎研究のための非破壊検査ツールとして、また、航空機の機体構造¹⁻³⁾やロケット用火工品の検査¹⁻⁴⁾など実用もされている。

中性子利用における課題のひとつとして、その規模に関わらず、利用可能な施設が少ないことがあげられる。我が国の大型中性子施設としては、日本原子力研究開発機構の研究炉 JRR-3 と大強度陽子加速器施設 J-PARC、京都大学複合原子力科学研究所の研究炉 KUR が中心的存在であったが、2011 年 3 月に発生した東日本大震災により、JRR-3 と KUR が運転停止となった。その後、KUR は 2018 年 8 月に運転を再開したが、JRR-3 は 2021 年 2 月の再開予定となっている。

また、大型の共同利用施設では利用申し込みからマシンタイムが得られるまでに数ヶ月を要するのが通常であり、長期間連続的な利用は難しいことが多い。さらに X 線イメージング装置と比べると、ユーザー自らが測定からデータ分析まで行わなければならない、オートメーション化やユーザビリティの点でも遅れている。

研究炉の運転停止や廃炉が続く一方で、陽子線ベースの小型加速器中性子源が続々と登場し始めている^{1-5,6,7)}。そのトップランナーであり、本研究でも実際に利用している理化学研究所小型加速器中性子源 RANS では、これからの産業用ツールとして、イメージング^{1-8,9)}、構造解析¹⁻¹⁰⁾、元素分析¹⁻¹¹⁾などの多岐にわたる技術開発が進められている。

1.2 コンクリート定量イメージングの必要性

現在、コンクリート内部の水分測定は、構造物壁面に 1 cm 程度の孔を設けて電極棒を挿入して含水率によって変化する電気抵抗を計測する手法や、コンクリート試料を切断して質量を計測することで含水率を求める質量法が、局所的かつ破壊的な測定であるものの簡便であることから広く実施されてきている。

その一方で、コンクリート内部において水分は 3 次元的に挙動していることから中性子による非破壊イメージングが考案され、実際に大型中性子施設を利用した中性子ラジオグラフィなどが行われている。しかし、前述したようにマシンタイムの制約、研究炉については運転停止期間の長期化などの問題があり、近年普及が進んできている小型加速器中性子源を利用した定量イメージングへの期待が高まっている。

我が国では高度経済成長期にコンクリート構造物が大量に建設され、近年になって長期供用に伴う老朽化に起因した、トンネルのコンクリート崩落や落橋といった事故が発生している。そのため、鉄筋腐食や道路のひび割れなどの劣化を観察、補修や補強することにより構造物のパフォーマンスを維持するべく定期点検が実施されている。しかし、コンクリート構造物は共通して打音検査や近接目視といった方法で検査が行われており、非常に大きなコストと時間が掛かっているのが現状であり、維持管理の効率性の観点から計測精度の向上や劣化予測を可能にする定量評価手法の開発は重要である。

また現在、コンクリート構造物の耐久性は鉄筋腐食の原因となる、水や塩分などの劣化因子に対するコンクリートの物質移動抵抗性（浸入抵抗性）により評価されている。例えば、沿岸部の橋梁では水面下の橋脚部に比べて浸水していない上部工（桁や床版）において塩害による鉄筋腐食の進行が早く、水がかりのある箇所では含水状態が大きく変化する表面側でコンクリートの剥離や鉄筋の腐食が顕著にみられる。このようにコンクリートの含水状態は様々な劣化の進行速度に影響を与えているため、コンクリート工学的な観点からも、コンクリート内の水の動きを定量的に評価する手法の開発は重要である。中性子ラジオグラフィによるコンクリート内水分の観察は構造物に対する現場評価にて用いられる

前述の（電気抵抗を計測する）電気的手法と異なり，室内におけるコンクリートの分析評価の位置づけになると考えられる．

1.3 本研究の目的と課題

本研究は，小型加速器中性子源の産業応用に向けて，物質内部の非破壊イメージングによる物理量の定量分析手法を新たに開発することで，中性子イメージング装置としての性能を実証することを目的とする．

具体的には，①国立研究開発法人理化学研究所の小型加速器中性子源 RANS を利用した中性子イメージングシステムの構築，②画像解析ソフトウェアによる定量分析画像解析手法の開発，③空間分解能に関連する検出器の解像度と中性子線の発散角の測定を行い，そしてその応用分析として，④コンクリート構造物の劣化において重要なコンクリート内部に浸透する水の挙動を非破壊イメージングにより定量化することで，本研究が提案する定量分析手法を実証した．

とくに最後のコンクリート定量イメージングでは，不均質な複合材料であるコンクリートの平均的な物性を評価できる可能性のある「コンクリート中の水の動き」を，一般的なコンクリートの物性試験で用いられる程度のボリュームの供試体を利用し，かつ事前処理することなく非破壊で捉える方法を探求した．

1.4 本論文の構成

本論文は全 7 章より構成される．図 1-1 に各章の位置づけを示す．

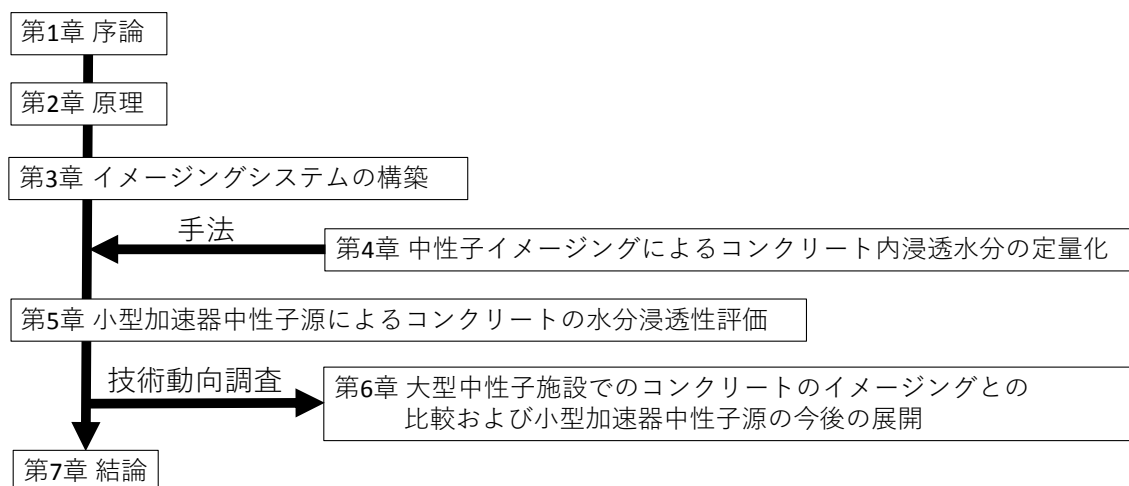


図 1-1. 本論文における各章の位置づけ

第 1 章では，大型中性子施設と小型加速器中性子源の動向と，コンクリート構造物の維持管理が社会的な問題となっており，中性子を利用してコンクリート内部の水分を非破壊検査することの必要性を概説するとともに，本論文研究の目的について述べる。

第 2 章では，中性子イメージングの原理，本論文研究において実際に利用した 2 種類の検出器と理化学研究所小型中性子源 RANS の構成や動作原理について述べるとともに，定量測定にあたっての課題を提示する。

第 3 章では，定量測定に向けて構築した中性子イメージングシステムについて述べる。

第 4 章では，イメージングシステムに加えて開発した中性子透過像の画像処理法とコンクリートの水分量の定量解析法について述べる。

第 5 章では，複数のコンクリート試験体に対して行われた，本研究論文で構築した中性子イメージングシステムによる水分浸透の挙動測定の結果を述べるとともに，コンクリートの劣化度や空隙構造との相関について考察する。

第 6 章では，JRR-3 や J-PARC などの大型中性子施設を利用した場合の技術動向について調査し，イメージング結果と比較評価した結果とともに，小型加速器中性子源の今後の展開について述べる。

第 7 章では本論文の結論と今後の課題について述べる。

参考文献

- 1-1) Kazuhiro Mori, Keigo Enjuji, Shun Murata, Kaoru Shibata, Yukinobu Kawakita, Masao Yonemura, Yohei Onodera and Toshiharu Fukunaga, "Direct Observation of Fast Lithium-Ion Diffusion in a Superionic Conductor : Li₇P₃S₁₁ Metastable Crystal", *Physical Review Applied*, 4 (2015) 054008.
- 1-2) 布施卓哉, 岡村徹, 井上誠司, 松野孝允, 岩田隆一, 山内崇史, 志満津孝, 松本吉弘, 篠原武尚, 甲斐哲也, 上田健, 村尾浩二, “中性子イメージングを活用した蒸発器内における冷媒沸騰挙動の解明”, 第 14 回日本加速器学会年次大会プロシーディング pp.172-175 (2017)
- 1-3) 池田泰, “中性子イメージングの航空・宇宙, 自動車, 防衛産業への応用”, *RADIOISOTOPES*, Vol.56, pp.339-350, 2007
- 1-4) 日本非破壊検査協会編, 中性子ラジオグラフィ写真集, pp.18-19 (1995)
- 1-5) 広田克也, 大竹淑恵, 山形 豊, 王 盛, “理研陽子加速器中性子源 RANS”, *Isotope News*, No.717, pp.36-38, 2014
- 1-6) 大竹淑恵: 理研小型中性子源 RANS と鉄鋼材料解析, 第 227 回・228 回西山記念技術講座「鉄鋼の製造プロセスを革新し続けるセンシング技術」, pp.103-125, ISSN 1344-0934, 2016
- 1-7) Otake, Y. (as a partial author of following chapter), Uesaka, M. and Kobayashi, H.: Compact Neutron Sources for Energy and Security, *Reviews of Accelerator-Science and Technology ‘Accelerator Applications in Energy and Security’*, Vol.08, pp.196-198, 2015
- 1-8) 山田雅子, 大竹淑恵, 竹谷 篤, 須長秀行, 山形 豊, 若林琢己, 河野研二, 中山武典, “小型中性子源を使った塗膜下腐食鋼材の非破壊イメージング観察”, *鉄と鋼*, Vol.100, pp.429-431, 2014
- 1-9) Ikeda, Y., Otake, Y. & Mizuta, M. “Nondestructive Measurement Method to Detect Water/Void inside Slabs using Compact Neutron Source by Backscattered Neutrons” *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.15(10): pp.603-609, 2017.
- 1-10) Y. Ikeda, M. Takamura, A. Taketani, H. Sunaga, Y. Otake, H. Suzuki, M. Kumagai, Y. Oba, "Prospect for application of compact accelerator-based neutron source to

neutron engineering diffraction ", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Vol.833, pp.61-67, 2016.

- 1-11) Y. Wakabayashi, Y. Yoshimura, M. Mizuta, Y. Ikeda, T. Hashiguchi, T. Kobayashi, A. Taketani, S. Yanagimachi, M. Goto, H. Sunaga, Y. Ikeda and Y. Otake: "A Study on the Non-Destructive Detection of Salt in Concrete Using Neutron-Captured Prompt-Gamma Rays at RANS", Plasma and Fusion Research, Vol.13(2018.3) pp.2404052-1~4

第 2 章 原理

2.1 中性子イメージング

放射線を照射して、材料や形状（厚さ）の違いによって変化する透過度の 2 次元分布を画像化する手法は放射線イメージングと呼ばれ、古くからラジオグラフィとして知られている。その代表的なものである X 線イメージングは健康診断や工業製品の非破壊検査に広く利用され、1972 年に世界で初めてイメージング装置が実用化²⁻¹⁾された。現在は医療やものづくりの現場で高精細な単純 X 線（2D）画像および CT（3D）画像をユーザーが手軽に取得し、画像データを利用した診断・分析技術が既に確立されている。

中性子イメージングは、X 線と同様に中性子線を照射して物質内部を可視化する非破壊検査手法である。X 線や γ 線などの高エネルギー放射線と比較して材料に対する透過特性が大きく異なり、X 線や γ 線では観察困難な重金属中の水滴の観察²⁻²⁾や、樹脂と金属の共存するマルチマテリアルの非破壊検査として自動車の接着接合部（金属同士の接着）における接着剤の可視化²⁻³⁾に適用されている。

中性子と物質との相互作用は物質内部の原子核に中性子が直接吸収もしくは散乱されることによって行われ、物質を透過する際に減衰が生じることからその減弱度によって材料の種類や体積を評価することができる。原子と中性子との間の作用の大きさは、中性子線の透過方向における単位長当りの減弱程度（巨視的断面積 Σ [cm^{-1}]) を密度 ρ で除した質量減弱係数 [cm^2/g] で表される。巨視的断面積 Σ [cm^{-1}] は、X 線における線減弱係数に相当する。厚さ x を持つ巨視的断面積 Σ が一様な材料を透過する際、入射する中性子強度 I_{in} と透過する中性子強度 I_{out} の関係は指数的に減衰する関数で表される²⁻⁴⁾（式 2-1）。

$$I_{\text{out}} = I_{\text{in}} \exp(-\Sigma x) \quad \text{式 (2-1)}$$

熱中性子と X 線（エネルギー 125keV）に対する各元素の質量減弱係数²⁻⁵⁾を図 2-1 に示す．実線は X 線の質量減弱係数であり，●印が熱中性子の質量減弱係数を示している．質量減弱係数が高い値を示すほど，放射線が透過する際に減衰が大きく，高い感度を以ってその元素を検出できることを表している．X 線に関しては（水素とヘリウムを除いて）原子番号の大きい元素であるほど質量減弱係数が大きく，原子を構成する電子数の増加に伴って，質量減弱係数が増加する傾向が現れている．一方，中性子は水素，リチウム，ホウ素，カドミウム，ガドリニウムといった特定の元素に関して質量減弱係数が著しく大きく，とりわけ水素やリチウム，ホウ素といった軽元素は質量減弱係数が他の元素に比べて桁違いに高いため，密度を乗じた線減弱係数においても上記の軽元素は顕著な減衰特性を示す．また，大半の重元素に対して質量減弱係数は X 線よりも中性子の方が小さいことから中性子は重金属材料などの物質に対して物理的に優れた透過力を示すことがわかる．

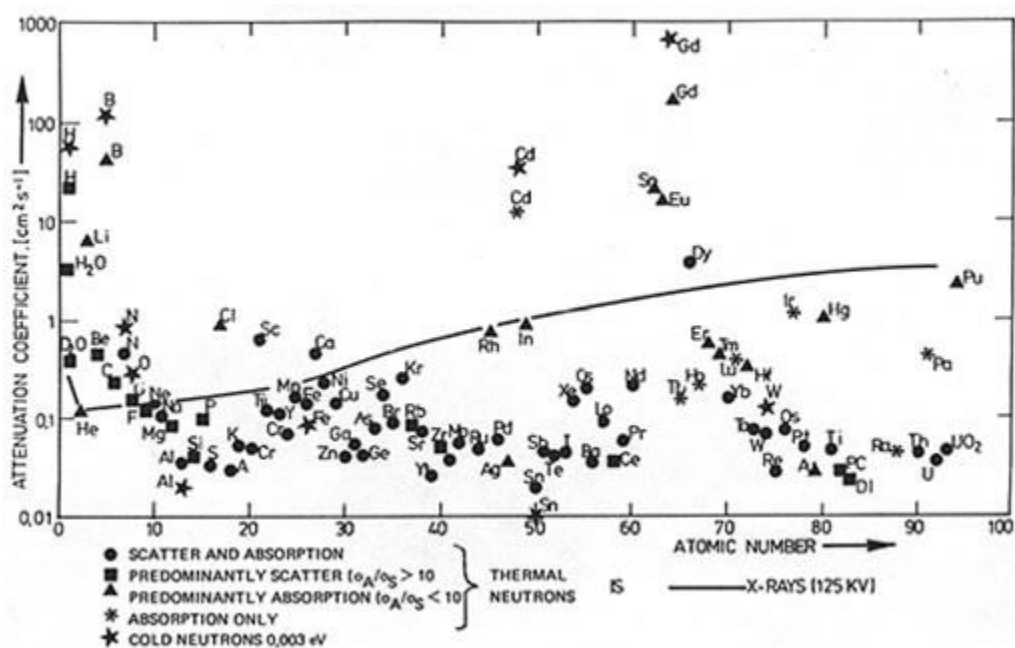


図 2-1 熱中性子と X 線（エネルギー 125keV）に対する質量減弱係数²⁻⁵⁾

2.2 イメージングシステム概要

中性子イメージング検出器は中性子を光や電子線に変換するコンバータと、カメラやフィルム、イメージングプレート (IP) ²⁻⁶⁾といった記録媒体から構成され、物質を透過した中性子の 2 次元分布が画像に変換されて出力される。1980 年代までは記録媒体にフィルムを利用した中性子ラジオグラフィが広く行われてきたが 1990 年代以降デジタルカメラの登場により、電子計算機を用いてデジタル画像解析を行う中性子イメージングが広く普及した。

文献 2-7 において紹介されている、ポールシェラー研究所の熱中性子イメージング施設 NEUTRA の特性値を用いてまとめられた、時間分解能と空間分解能による各種 2 次元中性子検出器の性能比較を図 2-2 に示す。また、IP を含むフィルムタイプの検出器とカメラタイプの検出器の特徴比較を表 2-1 に示す。

イメージングプレートやフィルムによる撮像は空間分解能 (解像度) に優れる一方、時間分解能が劣っており (中性子の照射時間が長く)、画像データを数十分程度の時間をかけて間接的に読み出す必要がある。一方、CMOS や CCD センサを搭載したデジタルカメラを利用したイメージングにおいては、シンチレータや光学系の影響により解像度がイメージングプレートやフィルムに比較して低下するものの、シンチレータの高い変換効率と CCD カメラの高感度特性により、数秒～分のオーダーで画像を直接取得できる。また、コンバータ部分に信号増倍 (インテンシファイア) 機能を付加することでより短時間で高輝度の画像を得られ、大型中性子施設では動画や中性子 CT 撮影が実現している。

これらを考慮して、本研究では、①シンチレータとデジタルカメラの組み合わせによる検出器 (中性子カメラ) と、②信号増倍機能を持つ検出器 (中性子イメージインテンシファイア) という定量解析に適した 2 種類の検出器を採用して、効率的なイメージングを行うことにした。

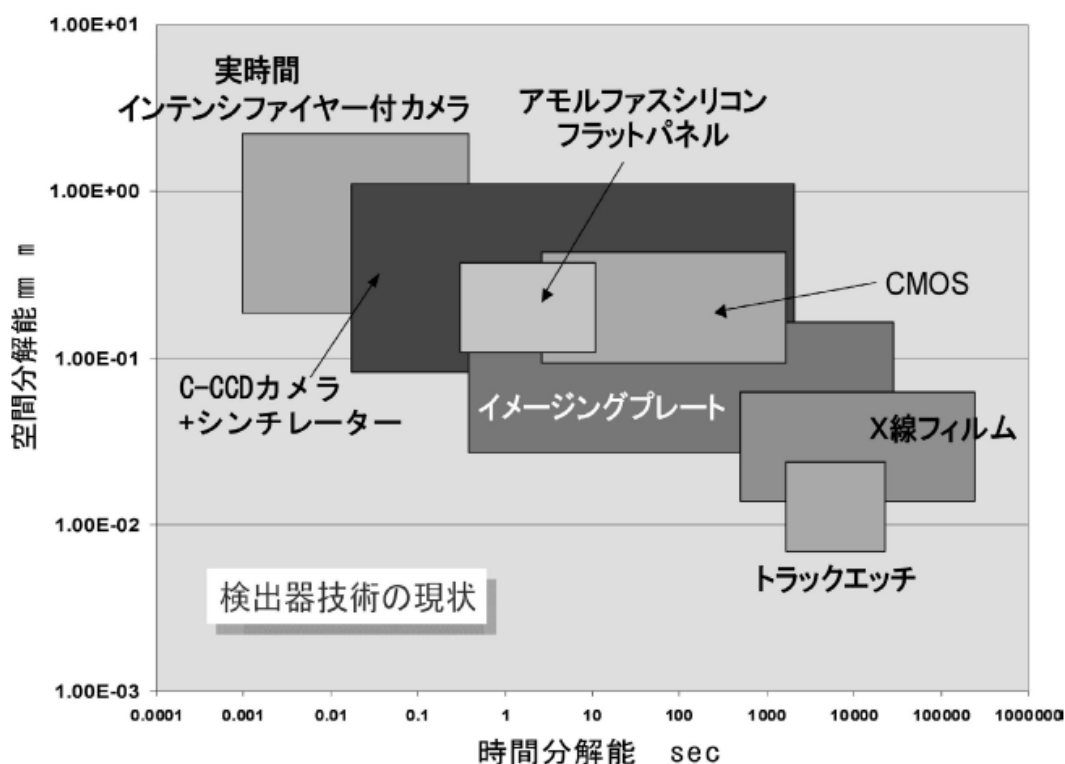


図 2-2 各種 2 次元中性子検出器の特性比較²⁻⁷⁾

表 2-1 フィルム（IP）とカメラタイプの検出器の特徴比較

検出器タイプ	長所	短所
フィルム (IP含む)	・小型(20×40cm程度)で可搬性に優れる ・解像度に優れる	・撮り直し不可 ・読出時間長い(Typ.1時間程度) ・ON/OFFスイッチがない (撮影後～読出の間に画質低下恐れあり)
カメラ	・連続撮影可能(失敗できる) ・画像の読出しが速い(Typ.数秒)	・フィルムに比べて低解像度である ・筐体の寸法が1m程度あり、可搬性に欠ける ・放射線照射による画素損傷の可能性あり

2.3 イメージング検出器

2.3.1 中性子カメラ

中性子カメラの外観と構成を図 2-3 に示す．筐体内における光の拡散を防止する目的でマットブラックに塗装されたアルミニウムの暗箱の中に，シンチレータと全反射ミラー，単焦点レンズと冷却型 CCD カメラが配置されている．中性子が入射する部分には LiF/ZnS(Ag)シンチレータ（寸法:150×150×0.4 mm）が中性子コンバータとして使用されている．

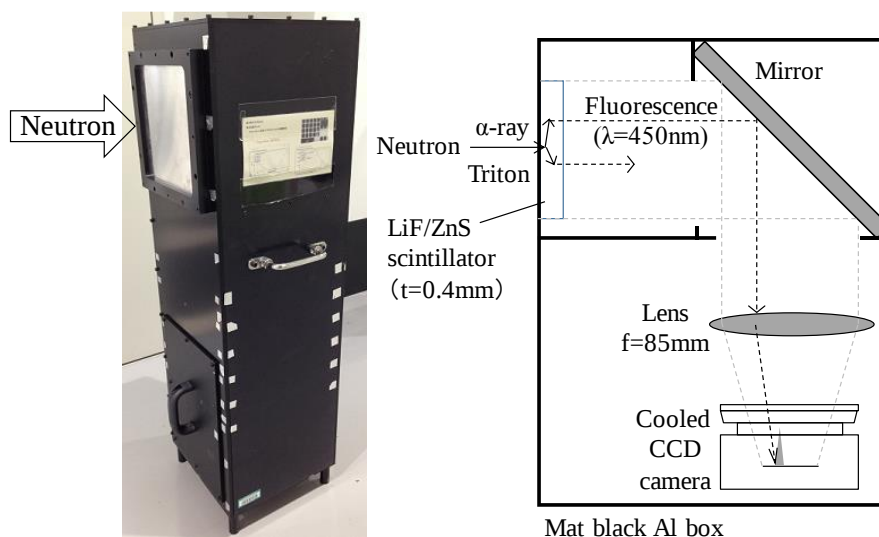
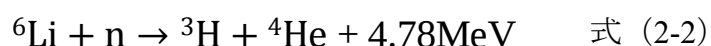


図 2-3 中性子カメラの外観と構成

中性子線から可視光線への変換は， ${}^6\text{Li}$ による中性子捕獲反応（式 2-2）によって放出される α 線（エネルギー 2.727 MeV）と三重水素（エネルギー 2.055 MeV）が ZnS を励起して，中心波長 450 nm に分布する青色の蛍光を発生させることで行われる²⁻⁸⁾．



発生した蛍光はミラーで中性子照射方向に対して直角に反射されたのち，単焦点レンズ（焦点距離 85 mm）によって集光され，冷却型 CCD カメラ（BITRAN

BU-53LN) によって記録される。レンズの焦点距離は CCD センサに映る視野の大きさ (Field of View : FOV) を決定することから、シンチレータ約 150×100 mm の視野が 36×24 mm サイズの CCD センサに収まるように、焦点距離 85mm のレンズを選択して撮像を行った。なお、CCD や CMOS といったイメージセンサには中性子線やガンマ線が照射される環境において画素損傷 (デッドピクセル) が生じる (表 2-1 参照) 恐れがあるため、センサ保護の観点から、中性子の照射方向とセンサの受光方向は基本的に直交関係にある。

2.3.2 中性子イメージインテンシファイア²⁻⁹⁾

本研究において中性子カメラとともに中性子イメージインテンシファイア (中性子 I.I.) を使用した理由は以下の 2 点である。

- ①高感度検出器のため画像 1 枚あたりの中性子照射時間を短縮できる (高輝度の中性子透過像が得られる)。
- ②パルス中性子が検出器に到達するタイミングに応じて、検出時間を制御できる「時間ゲート動作 (ブランキング機能)」の利用によるイメージングの高度化が期待できる

現在、中性子 I.I.としては 2 種類の製品が市販されており、本研究では中性子に対する感度の優れる図 2-4 の Gd コンバータータイプを使用した。検出面に到達した中性子は Al を通過して入力面の Gd₂O₃ (厚さ 10~12 μm 程度) において、初めに γ 線 (エネルギー 7.9 MeV) と電子線 (エネルギー 60 keV) に変換され (式 2-3), CsI (厚さ 50 μm 程度) に入射する。



そして、電子線は CsI によって可視光 (最大発光波長:420nm) となった後、光電変換膜を通じて電子線に再変換され電子レンズに入射する。電子レンズによ

って加速・収束された電子線は出力蛍光面の $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Eu}$ によって可視光線に変換され、光学系（ミラーとレンズ）を経由してデジタルカメラで記録される。電子レンズの作用によって $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Eu}$ から出力される蛍光強度が増加することから、明るい中性子透過像が得られる。

本研究において使用した 2 種類のイメージング検出器の仕様を表 2-2 に示す。コンクリートの水分評価は主に中性子 I.I. を使用して行われた。また、中性子 I.I. については、2 種類のイメージセンサ（CMOS および CCD）を利用したことから、各々の 1 画素あたりの解像度（画素サイズ）も示した。

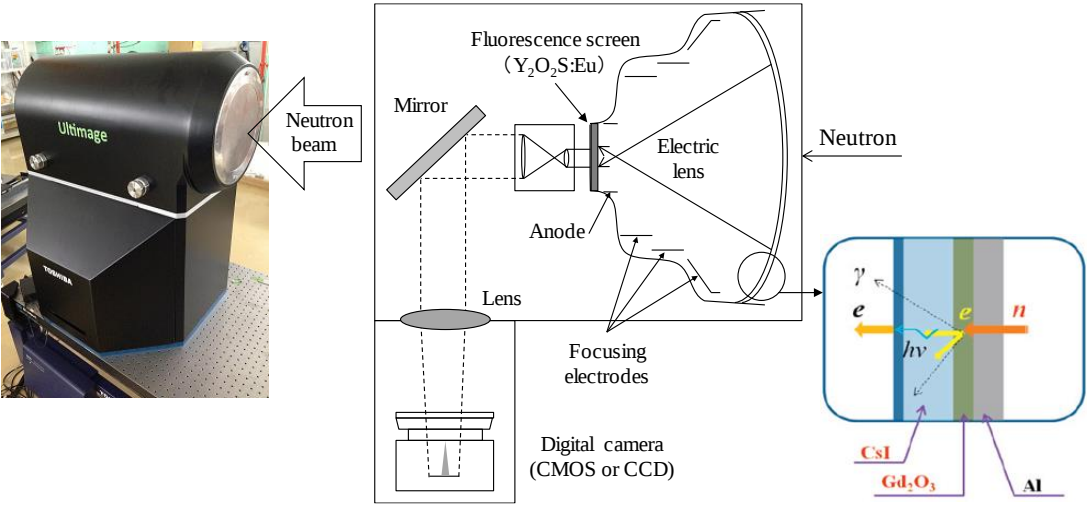


図 2-4 中性子 I.I.（東芝製 9 インチ Gd タイプ）の外観，構成および入力面の概略図²⁻⁹⁾

表 2-2 イメージング検出器仕様一覧

仕様	検出器	
	中性子カメラ	中性子 I.I
視野サイズ (Field of View)	150 × 100mm	180 × 120mm
撮影時間	5分/shot	3分/shot
解像度	43 μm/pixel	①24 μm/pixel ②45 μm/pixel
イメージセンサ	冷却型 CCD	①CMOS (非冷却型) ②冷却型 CCD
特徴	シンチレータ交換可能	増感機能 時間ゲート動作

2.4 理研小型中性子源 RANS

本研究では，2013 年 1 月に初めて中性子を取り出された普及型の小型中性子源システムである，理研小型中性子源（RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source : RANS）を中性子イメージングに利用した²⁻¹⁰⁾．その緒元を表 2-3 に，外觀と構成を図 2-5 に示す．デュオプラズマイオン源において生成された陽子ビーム（エネルギー30 keV）は，高周波四重極線形加速器（Radio-Frequency Quadrupole Linac : RFQ）とドリフトチューブ線形加速器（Drift Tube Linac : DTL）によって光速の約 1/10 となる 7 MeV まで加速され，さらに高エネルギービーム輸送系（High Energy Beam Transport : HEBT）のビーム収束用四重極磁石を通過することで適切に収束されながら，中性子発生用 Be ターゲットが内蔵されるターゲットステーションに入射する．陽子ビームはパルス出力であり，最大デューティ 1.3 %までの範囲内で繰り返し周波数（10～200 Hz）とパルス幅（10～180 μ s）が調整可能となっている．

表 2-3 理研小型中性子源 RANS 緒元

Particle	Proton
Proton Energy	7MeV
Proton Beam current	100 μ A
Reaction	Be(p,n)B
Weight (Accelerator)	5t
Weight (Target station)	20t
Length (Accelerator + Target Station)	10.8m
Ion source	Duo-plasma
Accelerator	RFQ+DTL
Neutron flux around the target	$\sim 10^{12}\text{sec}^{-1}$
Thermal neutron flux @5m from target	$10^4 \text{ n/cm}^2/\text{s}$
Drive mode	Pulse
Pulse repetition rate	10-200Hz
Pulse width	10-180 μ s

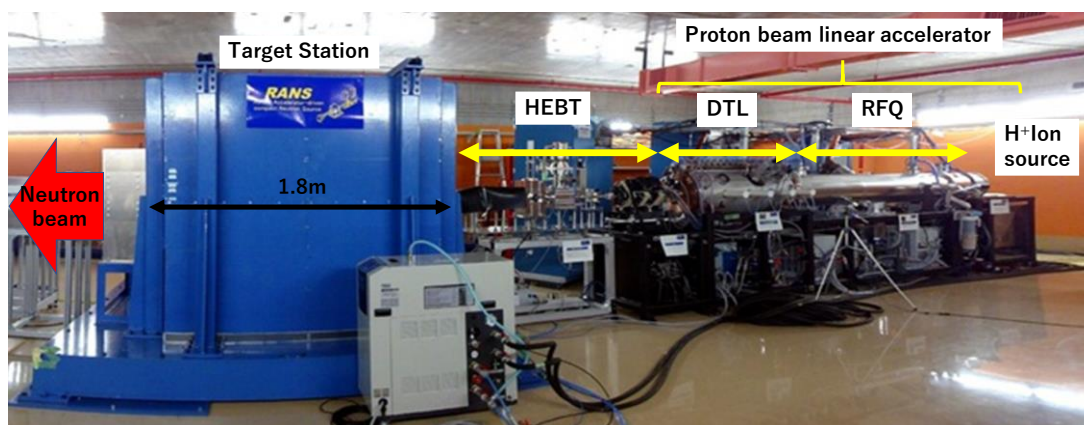


図 2-5 理研小型中性子源 RANS の外観と構成

ターゲットステーション内部の断面図を図 2-6 に示す. 7 MeV に加速された陽子ビームはステーション内部の Be ターゲットに衝突し, $\text{Be}(p,n)\text{B}$ 反応によって中性子を発生する. Be ターゲットは, 陽子ビーム照射時に生じる水素脆化 (水素の吸収による脆性破壊) を防止するように設計されており, ターゲット背面に水素を拡散する V がバッキングプレートとして使用され, 冷却用 Ti キャビティに保持されている²⁻¹²⁾. Be ターゲットで発生した中性子は最下流に配置された PE モデレータ (厚さ 4 cm) を経由して取り出される.

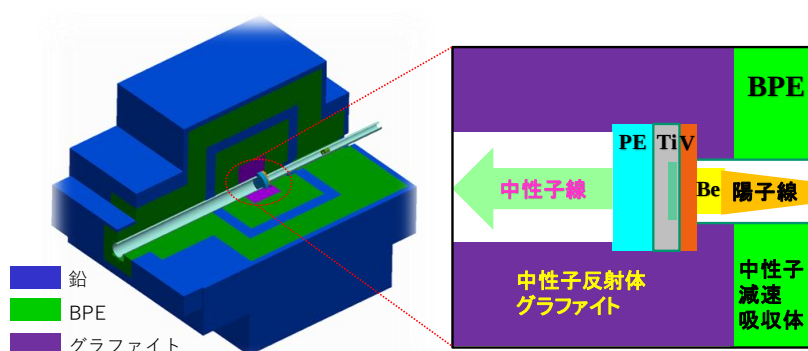


図 2-6 RANS ターゲットステーションの内部構成と断面図²⁻¹¹⁾

Be : ベリリウム, V : バナジウム, Ti : チタン,
PE : ポリエチレン, BPE:ホウ素ポリエチレン

ターゲットステーションは前述した中性子発生部と遮蔽体から構成されてお

り、陽子ビームの入射部と中性子の取り出し部が、遮蔽材で囲まれた矩形状の中性子導管（160×160 mm）を介して同軸上に配置されている。発生ターゲットの周囲には中性子の出力を最大化するために反射材であるグラファイトが配置されており、さらにその外周部は中性子を吸収・遮蔽する BPE と二次 γ 線を遮蔽する Pb が取り囲んでいる。

放射線輸送計算コード GEANT4²⁻¹³⁾と理化学研究所が開発した陽子エネルギー7 MeV の場合の中性子角度分布²⁻¹⁴⁾を組み合わせで計算された、ターゲットステーションの中性子取り出し部から 3.5 m 下流の位置における中性子のエネルギースペクトルを図 2-7 に示す。線形加速器によって加速された 7 MeV の陽子ビームが Be ターゲットに衝突することで高速中性子が発生し、PE モデレータによる減速後、1 meV から 5 MeV まで分布をもつ白色スペクトルとなり、熱中性子のピークは 50 meV の位置に生じる。

熱中性子は試料との相互作用が大きいことから、中性子イメージングにおいて汎用的に利用される。本研究においては、この熱中性子の透過度を評価して、コンクリートに浸透する水分の定量化を実施した。

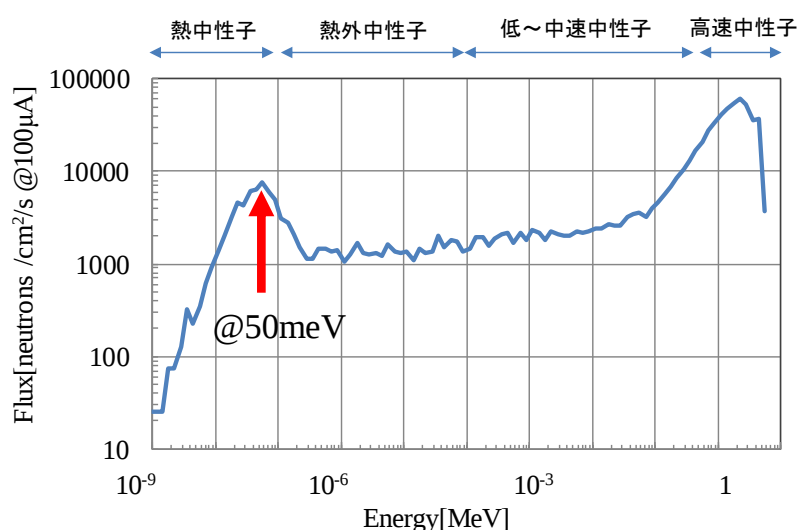


図 2-7 ターゲットステーションの中性子取り出し部から 3.5 m 下流の位置における中性子エネルギースペクトル計算値²⁻¹⁰⁾

2.5 物理量の定量化に向けた課題

中性子イメージングの画質を表す、解像度（空間分解能）、コントラスト、S/N（Signal-Noise Ratio）の因子に対して影響を及ぼす、中性子源、検出器および試料のシステム要因を表 2-4 に示す

表 2-4 中性子イメージング画質に影響を及ぼすシステム要因

システム要素	画質に関する因子		
	解像度(空間分解能)	コントラスト(明暗の差)	S/N
中性子源	・ビーム平行度(L/D)	・中性子エネルギースペクトル ・ γ 線 ・ビーム平行度(L/D)	・中性子束
検出器	・画素サイズ ・固有分解能	・中性子コンバータの 反応断面積 ・ γ 線感度	・画素サイズ (1画素当りの視野) ・信号変換効率
試料	・厚さ (コンバータ～入射面の距離)	・散乱中性子線 ・放射化成分	・厚さ ・含有元素

中性子発生は確率的な事象であることから出力にゆらぎを伴っていることから中性子測定における計測精度は、検出器の測定精度と統計量に依存する。中性子イメージングにおいても同様に画像の S/N は統計量の影響を受けるため、中性子源から出力される中性子束、透過度を決定する試料厚さと含有元素、検出器の中性子から出力信号への変換効率と画素サイズ（1 画素に入射する中性子束）が定量化を行う際の精度に影響するものと考えられる。

本研究では、中性子イメージング画像を用いた物理量の定量化に向けて、①安定なイメージングシステムの構築と、②画像処理方法の開発という 2 つの課題の解決に取り組む。その具体的な条件と研究内容を以下に示す。

①安定した定量イメージングシステムの構築

【条件 1】異なる時刻に撮影する画像との比較が可能になること

⇒イメージセンサの暗電流ノイズ変動の安定化

【条件 2】検出器の入出力に対する直線性が得られていること

⇒検出器の I/O 直線性誤差評価

②画像処理法の開発

【条件 1】 検出器由来の誤差要因の除去

⇒放射線入射によるイメージセンサのランダムノイズ処理

【条件 2】 中性子源由来の誤差要因の除去

⇒強度分布のムラ補正（シェーディング補正）

⇒出力ゆらぎによる標準偏差の低減（画素結合による統計量増加）

参考文献

- 2-1) G. N. Hounsfield, “Computerized transverse axial scanning (tomography): Part I. Description of system” , British Journal of Radiology, 46, 1973, 1016-1022
- 2-2) 竹中信幸, 安田良, 齊藤泰司, 呉田昌俊, “中性子イメージングの原子力工学への応用”, RADIOISOTOPES, Vol.56, pp.699-707, 2007
- 2-3) S. Zheng, J. Vanderstelt, J.R.McDermid, J.Kish “Non-destructive investigation of aluminum alloy hemmed joints using neutron radiography and X-ray computed tomography”, NDT & E International Vol. 91, (2017)p.32-35.
- 2-4) Harms,A.A., Principles of Nuclear Science and Engineering, Research Studies Press (1987)
- 2-5) Von der Hardt, P. and Röttger, H.(eds), “Neutron Radiography Handbook”, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, The Netherlands (1981)
- 2-6) N. Niimura, Y. Karasawa, I. Tanaka, J. Miyahara, K.Takahashi, H. Saito, S. Koizumi, and K. Hidaka, “An imaging plate neutron detector”, Nucl.Instrum & Methods, A349, 521 (1994).
- 2-7) 玉置昌義：中性子イメージング技術の原理, RADIOISOTOPES, Vol.56, pp.329-337,2007
- 2-8) G.J Sykora, E.M.Schooneveld, and N.J.Rhodes “ZnO:Zn/6LiF scintillator-A low afterglow alternative to ZnS:Ag/6LiF for thermal neutron detection”, Nucl.Instrum & Methods, 883, 75-82 (2018)
- 2-9) K.Nittoh, C.Konagai, M.Yahagi, Y.Kiyanagi, and T.Kamiyama, “Development of Neutron Color Image Intensifier for Pulsed Neutron Source”, Phys. Procedia, 69, 177-184 (2015).
- 2-10) Otake, Y. (as a partial author of following chapter), Uesaka, M. and Kobayashi, H. “Compact Neutron Sources for Energy and Security, Reviews of Accelerator-Science and Technology ‘Accelerator Applications in Energy and Security’, Vol.08, pp.196-198, 2015
- 2-11) 大竹 淑恵 小型中性子源により広がる応用－理研 RANS －「加速器」 Vol. 13, No. 4, p.229－233, 2016
- 2-12) Y. Yamagata, K. Hirota, J. Ju, S. Wang, S. Morita, J.Kato, Y. Otake, A. Taketani,

- Y. Seki, M. Yamada, H. Ota, U. Bautista and Q. Jia, “Development of a neutron generating target for compact neutron sources using low energy proton beams”, J. Radioanal. Nucl. Chem. Vol. 305, 3 (2015) p.787.
- 2-13) Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., Asai, M., Axen, D., Banerjee, S., Barrand, G., Behner, F., Bellagamba, L., Boudreau, J., Broglia, L. and Brunengo, A., (2003). “Geant4, A Simulation Toolkit.” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 506(3), 250-303.
- 2-14) Y. Wakabayashi, A. Taketani, Y. Ikeda, T. Hashiguchi, T. Kobayashi, S. Wang, M. Yan, M. Harada, Y. Ikeda and Y. Otake, “A function formation of source neutron production by the $^9\text{Be} + p$ reaction at 7 MeV at RANS”, JAEA-Conf 2016-004, p.135.

第3章 イメージングシステムの構築

本章では小型加速器中性子源を利用した定量分析技術の実証に向けて構築したイメージングシステムの概要と、取得する画像の空間分解能に関連する中性子線の発散角および検出器の解像度を測定した結果について述べる。また、中性子線に混入する γ 線の評価を行い、検出動作の制御により中性子による透過像のコントラストを得る手法について説明する。

3.1 冷却型イメージングカメラの導入

本研究で使用した検出器である中性子 I.I.（東芝製、検出面サイズ9インチ、Gd タイプ）は透過した中性子線を可視光線に変換したのち、デジタルカメラのイメージセンサによって記録した2次元画像を、中性子透過像として出力する。デジタルイメージセンサは中性子束に比例する輝度に、発熱により変動する暗電流ノイズが加わった画像を出力する。そのため、中性子を照射しない状態で暗電流に該当する画像を撮影し、中性子を照射して取得した画像から暗電流を差し引く暗電流補正を行う必要がある。

画像解析によって物理量を定量化するにあたり、暗電流ノイズの変動の小さい、入出力の直線性に優れたシステムの構築が要求される。暗電流ノイズの抑制にはイメージセンサを低温で駆動する冷却型カメラの利用が有効³⁻¹⁾であることが知られている。中性子 I.I.に搭載されるデジタル一眼レフカメラ（NIKON D800E）には非冷却型 CMOS センサ（SONY IMX094AQP）が使用されており、暗電流が中性子を照射した際の画像輝度に対して3%以上の変動を生じていることが確認された。また、中性子の照射前後や照射時間の違いによって暗電流の変動が顕著であったことから冷却型 CCD カメラ（BITRAN BU-53C）への変更を実施した。

冷却型 CCD 使用時における中性子照射時と非照射時（暗電流）の輝度の推移

を図 3-1 に示す．中性子照射の ON/OFF を繰り返して計 12 枚の画像を取得し，中性子照射時および非照射時の輝度の推移を比較した．画像 1 枚あたりの撮影時間は 3 分/枚である．照射時の輝度値はいずれも 12000 超であるのに対して非照射時の輝度値は 1156～1180 の間で推移している．暗電流が中性子照射時の輝度値に及ぼす変動度は $\pm 0.1\%$ 程度であり，暗電流に相当する画像を逐次撮影しなくとも，1 度撮影した暗電流画像を使用して，暗電流補正を誤差 0.1%の精度で行うことができることを確認した．

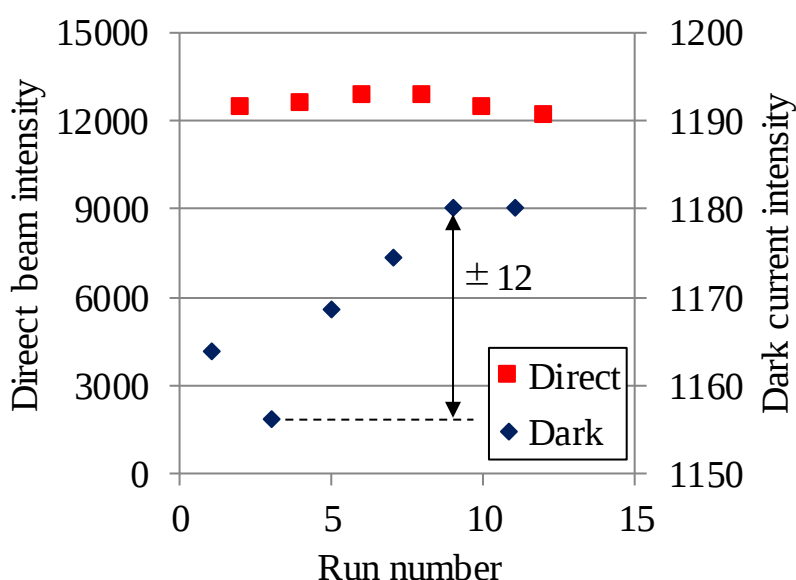


図 3-1 冷却型 CCD 使用時における中性子照射時と
中性子非照射時（暗電流ノイズ）の輝度の推移

3.2 検出器の入出力に対する直線性評価

冷却型 CCD カメラによって暗電流ノイズの変動が抑制された後，照射する中性子束に対する画像の輝度値の関係を測定し，検出器の入出力に関する直線性評価を行った．入力信号には線源側で中性子束をモニタリングした数値が妥当であるが，中性子を部分的に遮る必要があることや，中性子数をカウントする検出器（高圧ガスを封入した比例計数管）には「数え落とし」の問題³⁻²⁾があるため，そのまま入力値として取り扱うことは困難であった．そこで，本研究では Be

ターゲットに照射される陽子の数が中性子束に比例すると仮定し、陽子ビーム電流量の測定値を入力値として、照射時における画像の輝度値との関係性を評価した。陽子ビーム電流量の測定方法を図 3-2 に示す。Be ターゲットを冷却する Ti キャビティに接続された $50\ \Omega$ 抵抗線による電圧降下を 3 分間測定し、その平均値と抵抗値の関係から陽子ビーム電流量を算出した。

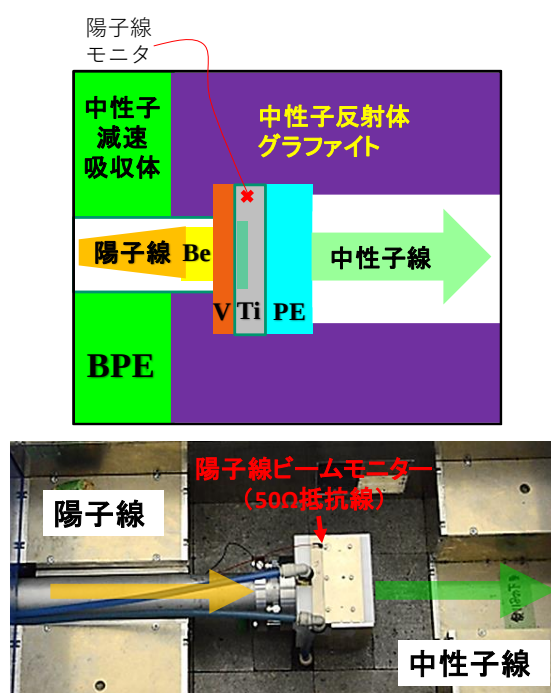


図 3-2 陽子ビーム電流モニターの概略図と写真

検出器に中性子カメラおよび中性子 I.I. を各々使用した際の、陽子電流値と画像の輝度平均値（画像全体にわたる平均値）の関係性を図 3-3 に示す。両方の検出器において画像の輝度値平均値は陽子ビーム電流量に比例して線形増加している。その関係を線形近似して理想値を求め、さらに実測値と理想値の差を理想値で除したものを直線性誤差として算出した結果を図 3-4 に示す。直線性誤差における最大値（絶対値）は中性子カメラで 1.46 %、中性子 I.I. で 1.32 % であり、入射する中性子数に比例して入出力の直線性が得られていることが確認された。撮像素子を冷却型 CCD カメラに変更した中性子 I.I. において直線性誤差は中性子カメラ同様であり内蔵する電子レンズが直線性誤差に与える影響は確認されな

かった.

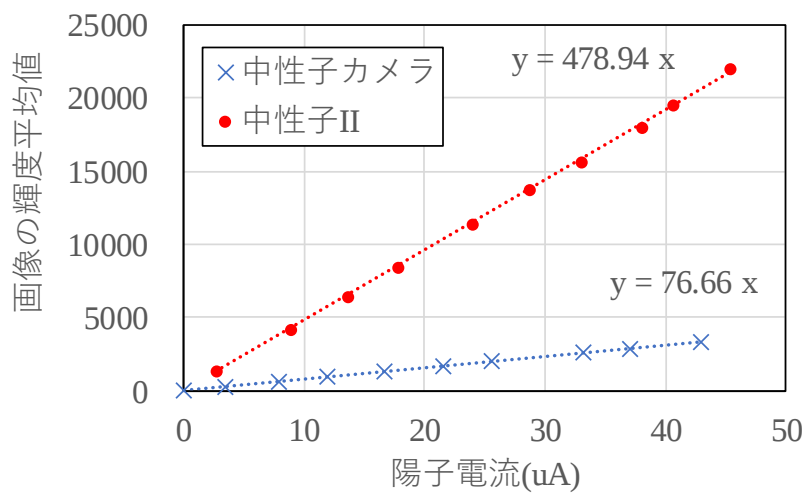


図 3-3 陽子ビーム電流量と画像の輝度平均値の関係

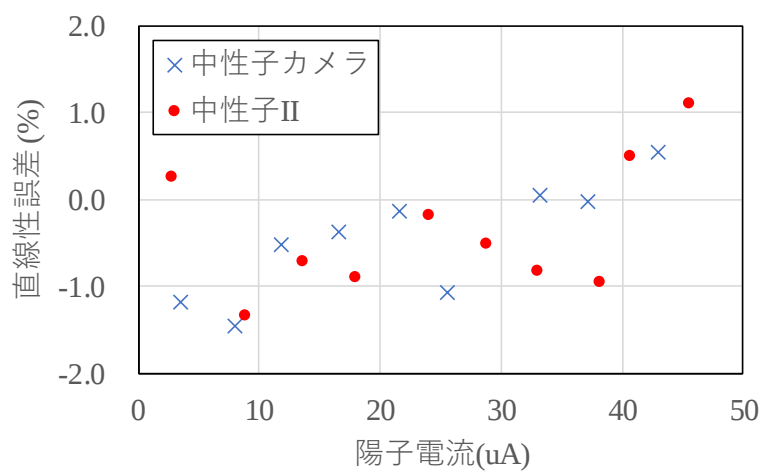


図 3-4 陽子ビーム電流量と直線性誤差の関係

3.3 解像度に関連する因子の評価

中性子イメージングにおける空間分解能に関連する 2 つの重要な因子である、①中性子のコリメータ比 L/D と、②検出器の解像度について、その規格^{3,3)}や既報^{3,4,5)}を参照して、RANS での実測をもとに評価した結果を述べる。

3.3.1 中性子のコリメータ比 L/D の測定

RANS における発生中性子は、図 3-5 に示すように Be ターゲットの下流部に位置する減速材 (PE) と直線状の導管部を通じて外部に取り出され、反射材 (グラファイト) と中性子吸収材および減速材 (BPE) により導管以外の方向には遮蔽されている。すなわち、導管より取り出されて検出器に到達した中性子が透過像を形成することになる。

中性子導管の出射口は比較的大きく面光源であることから、図 3-6a に示すように試料の透過像には中性子線の拡がりによる幾何学的誤差 (ボケ) が生じる。例えば、板状の中性子吸収材に中性子線を照射する場合、吸収材の端部は半影という幾何学的誤差を持って検出される。これに対して、図 3-6b に示すように点光源の場合にはシャープな像が形成される。幾何学的誤差は出射面から検出面までの距離 L が長く、出射口サイズ D が小さいほど縮小することから、中性子線の平行度 (直進性) を表す指標としてコリメータ比 L/D がよく用いられる。また、試料と検出面までの距離 l も長いほど半影が拡大することから、実際には中性子源の拡がり角と試料の厚さによって幾何学的誤差は決定される。

そこで本研究では、コリメータを製作して矩形の中性子出射口に取り付けることでコリメータ比 L/D を測定した。コリメータは、直径 $\phi 30$ mm の円孔を開けた長さ 100 mm の PE ブロックを直列に 5 個並べたもので、その外観を図 3-7 に示す。

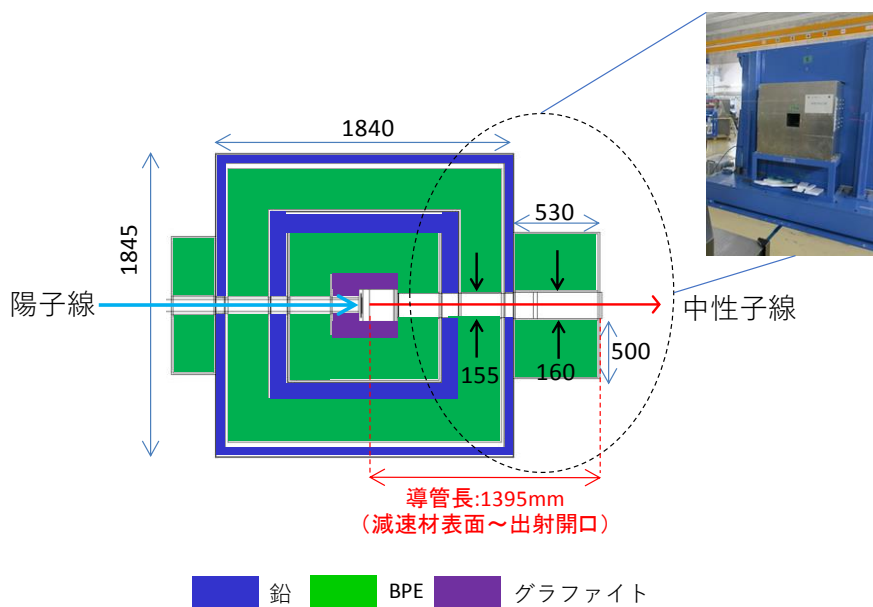


図 3-5 ターゲットステーション断面図および中性子出射口 (160×160mm)

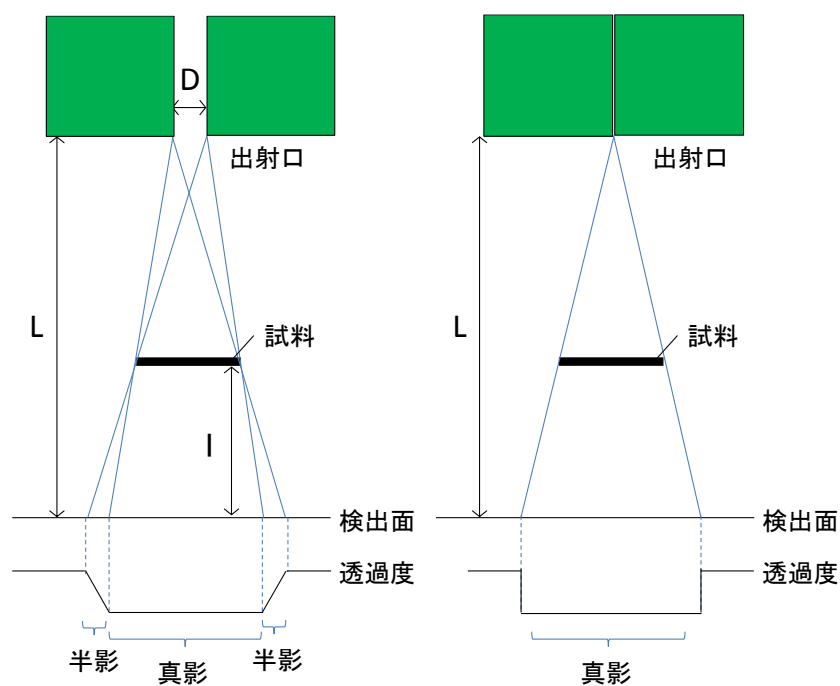


図 3-6 面光源と点光源による幾何学的誤差の違い

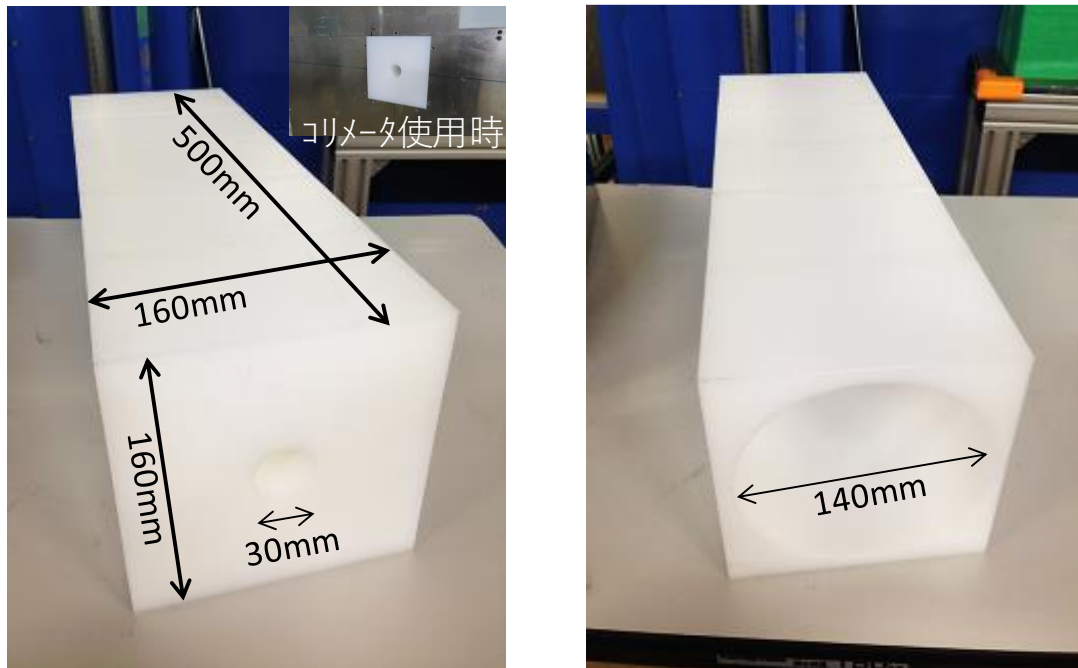


図 3-7 本研究のために製作した PE コリメータ
(左) コリメータ比 L/D 測定用, (右) コンクリート評価用

中性子イメージングにおけるコリメータ比 L/D の評価方法には、日本非破壊検査協会規格 NDIS³⁻⁴⁾、日本工業規格 JIS³⁻⁶⁾、米国試験材料協会規格 ASTM³⁻⁷⁾が存在し、いずれもフィルムに撮影された画像を濃度計（デンシトメーター）で読み取り、記録した透過度のプロファイルから L/D を算出する手法が示されている。本評価においては CCD カメラの出力画像から画像処理を行い算出した透過像に NDIS の L/D 決定方法³⁻⁴⁾を適用して L/D を求めた。

透過像撮影には、厚さ 0.5 mm のカドミウムプレートに対して 10 mm 間隔で最小 0.5～最大 5.5 mm の直径を持つ孔が十字状に並んだ、L/D plate と呼ばれる専用器具を用いた³⁻³⁾。その外観と寸法図を図 3-8 に示す。安全面を考慮してカドミウムに直接触れないように、中性子に対して透明な（反射や吸収、散乱のない）2 枚のアルミ板（厚さ 1mm）でカドミウムをサンドイッチした構造となっている。検出器には中性子カメラを使用し、出射開口から 2100 mm の位置に検出面をセットした。そして、検出面から線源側に 200 mm 離れた位置に L/D plate を配置して中性子を 10 分間照射して透過像を撮影した。

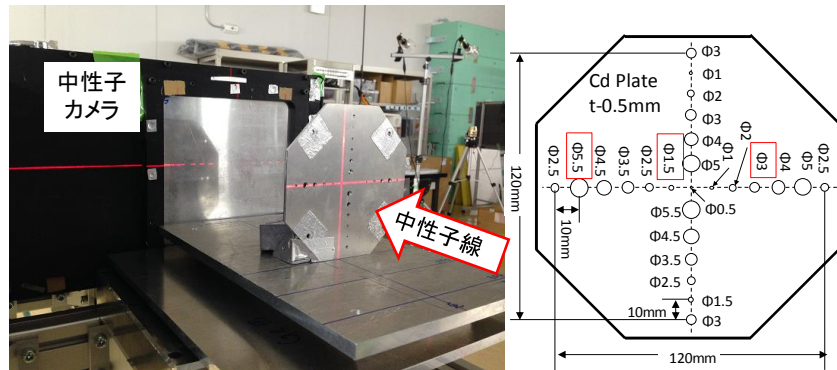
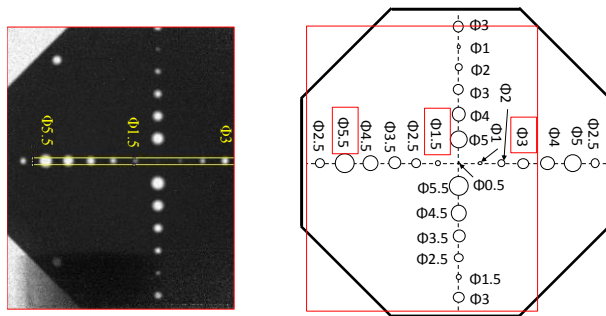


図 3-8 L/D plate の光軸合わせの様子と寸法図³⁻³⁾

L/D plate の透過像および透過度のプロファイルを図 3-9，その解析における位置関係図を図 3-10 に示す．出射面～検出面の距離 L は図 3-10a に示すように，ビーム中心軸から等しい距離を隔てた 2 つの孔の中心間距離を用いて求める．透過像における 2 つの孔の中心間距離 X は透過度のプロファイルから求め，L/D plate の中心間距離 X_o と L/D plate から検出面までの距離 l を式 3-1 に代入することで L が導出される．

$$L = \frac{l \cdot X}{X - X_o} \quad \text{式 (3-1)}$$

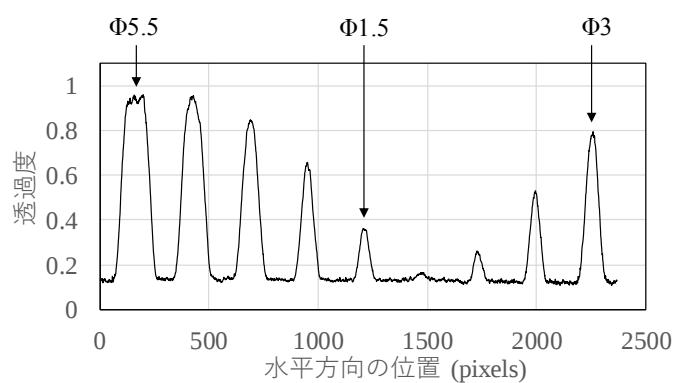
孔の中心は透過度プロファイルの半値幅中点とし，中点間の間隔として X を決定する．2 つの孔の中心間距離 X_o を長くとるほど分母 ($X - X_o$) は増加することから，測定精度が向上し誤差が小さくなる．そのため，検出器の視野に収まる範囲で中心間距離がなるべく遠い 2 つの孔を選択し，中心間距離 $X_o : 80\text{mm}$ を隔てた直径 $\phi 3\text{mm}$ と $\phi 5.5\text{mm}$ の孔（図 3-9 の赤囲み直径）について，透過像から間隔 X を求め， L を導出した．なお，L/D plate を透過する中性子が 10 % を超えて存在することから，間隔 X を求めるにあたり半値幅は透過度のピークとボトム部分（透過率 12 % 付近をボトムとした）の半値を利用した．



(a)中性子透過像

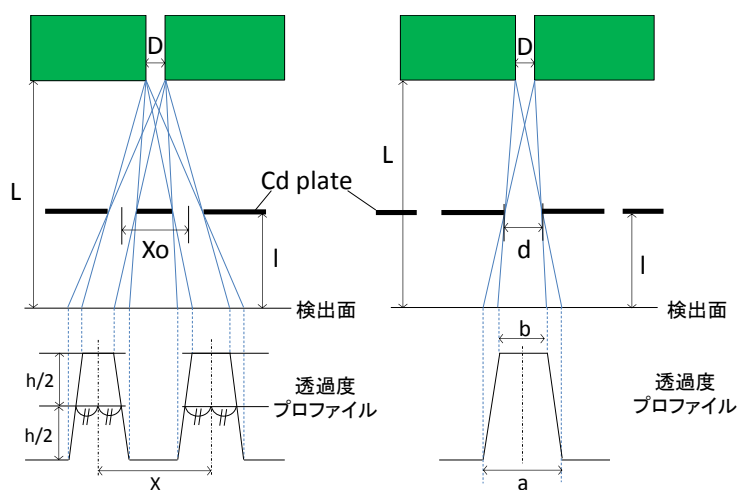
(b) L/D plate 寸法図

(赤枠部分が撮影範囲)



(c)水平方向の中性子透過度プロファイル

図 3-9 L/D plate の中性子透過像と水平方向の透過度プロファイル



(a)距離 L の解析

(b)コリメータ比 L/D の解析

図 3-10 測定結果の解析における位置関係図³⁻⁴⁾

次にコリメータ比 L/D はビーム中心が透過する孔における透過度のプロファイルから求められる。台形状のプロファイルが示す基底線の長さ a と上底線の長さ b を用いて式 3-2 により導出される。

$$L/D = \frac{l}{d} \frac{a-b}{a+b} \quad \text{式 (3-2)}$$

当初は L/D Plate 中心部にある $\phi 0.5$ mm の孔に中性子線の軸中心が一致するようレーザ墨出し器で光軸合わせを行い、透過像を撮影した。しかし、 $\phi 0.5$ mm の孔では台形状の透過度プロファイルが得られず（これは開口面から孔を通して検出面を見た場合に開口面内の位置によっては検出面が見えない場合があるとプロファイルは三角状になる）、 L/D の導出が不可能であったため、 L/D Plate を水平方向に 10 mm 移動させ、直径 $\phi 1.5$ mm の孔にビーム中心をアライメントして再度撮影を行った。

その測定結果を表 3-1 に示す。透過像から得られたコリメータ比 L/D は 74.73, L は 2210 mm, D は 29.6 mm となった。それぞれコリメータ出口～検出面までの距離 2100 mm とコリメータの開口径 30 mm に近い値となり、PE コリメータでコリメートされた中性子線の拡がり角が、透過像における幾何学的誤差を概ね決定していることを確認した。また、 $L/D=70$ ($L: 2100$ mm, $D: 30$ mm) を真値とした場合、約 7% 弱の誤差であった。

上記の結果よりコリメータによる中性子線の拡がり角の制御を確認し、 $\phi 140$ mm×長さ 500 mm のコリメータを利用し $L: 2100$ mm, $D: 140$ mm, $L/D=15$ の設定でコンクリート透過像を撮影することにした。

表 3-1 コリメータ比 L/D と出射面～検出面の距離 L の測定結果

	$L(\text{mm})$	L/D	$D(\text{mm})$	$l(\text{mm})$
設定	2100	70	30	200.5
結果	2210	74.73	29.6	-
誤差(%)	5.2	6.8	-1.3	

3.3.2 検出器の解像度評価

中性子イメージング画像の解像度は、中性子線のコリメータ比 L/D により生じる幾何学的誤差に加えて、検出器自身を持つ解像度によって決定される³⁻⁸⁾。本研究では、中性子吸収材である Gd に微細パターンニングを施した解像度測定用チャート³⁻⁵⁾を使用し検出器の解像度を評価した。解像度測定用チャートの外観を図 3-11、パターンデザインを図 3-12 に示す。厚さ 1cm のアルミフレームに $90 \times 90 \times$ 厚さ 1 mm の溶融ガラスが貼り付けられており、ガラスには膜厚 3 μm の Gd がコーティングされている。Gd は中性子の質量減弱係数が最も大きいため、厚さ数 μm の薄膜で中性子の遮蔽が可能であり、解像度測定用チャートとして使用されている³⁻⁹⁾。

今回使用した解像度測定用チャートには 7 種類のパターンが描かれており、明暗の線対であるラインペアが 4 種類 (図 3-12a1~a4)、放射状に明暗の縞模様をつくるジメンススターチャート (図 3-12b)、正方格子状のグリッド (図 3-12c) および J-PARC のロゴマーク (図 3-12d) となっている。図 3-13 にラインペアとジメンススターチャートの寸法を示す。



図 3-11 解像度測定用チャートの外観

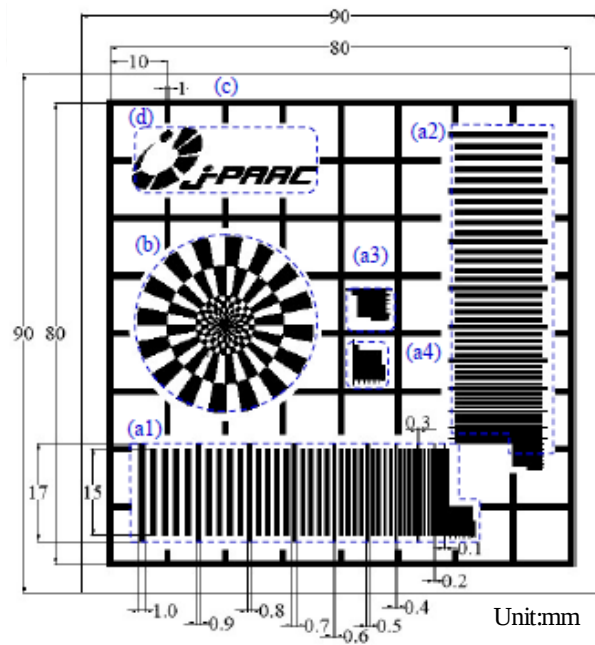
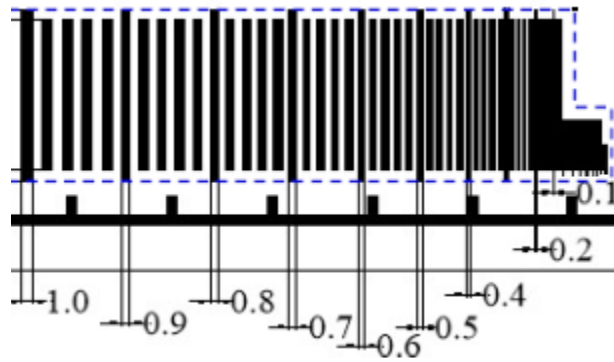
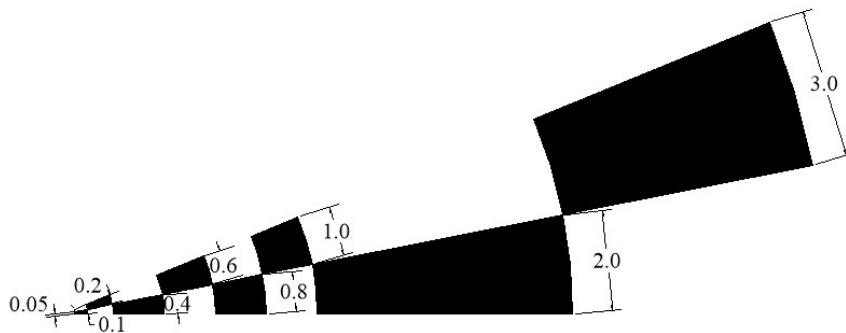


図 3-12 解像度測定用チャートのパターンデザイン³⁻⁵⁾



ラインペアチャート (単位 : mm)



ジーメンススターチャート (単位 : mm)

図 3-13 解像度測定用チャートのパターン寸法図 (抜粋)³⁻⁵⁾

ラインペアチャートは水平および鉛直方向の解像度評価に使用され、5 周期ごとに線幅が最大 1 mm から 0.1 mm まで変調するパターンとなっている。ジームンスターチャートは直径 $\phi 30$ mm の円内に 32 のスポークが存在し、全方向に対する解像度評価に使用される。円内中心付近は最小周期 0.05 mm のパターンが形成され、外側の最大周期 3.0 mm に至るまで段階的に周期が変化する。

2 種類のイメージング検出器（中性子カメラおよび中性子 I.I.）に対して検出器表面に解像度測定用チャートを密着して貼り付けて中性子線のコリメータ比 L/D による幾何学的誤差（ボケ）が生じないように、透過像の撮影を行った。中性子カメラにて解像度測定用チャート撮影時の様子を図 3-14 に示す。

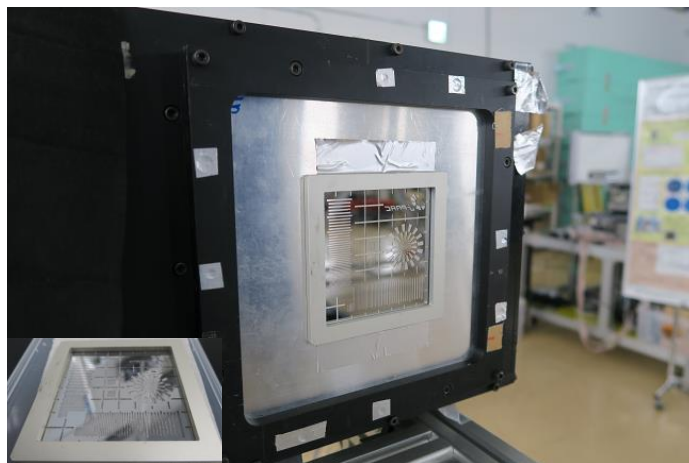


図 3-14 中性子カメラによる解像度評価用チャート撮影時の様子
(左下写真：チャート裏面の様子)

測定用チャートはチャート表面に対して中性子を照射した場合にアルミフレームによる約 6 mm のギャップがチャート表面から検出器表面の間に生じ、解像度が低下することからチャート裏面を中性子照射面とし、得られた透過像を水平方向に反転させて透過像を出力し、解像度の評価を実施した。チャートはアルミテープで検出器表面に貼り付け、中性子を照射して撮影を行った。

なお、検出器の解像度評価において中性子のコリメータ比 L/D の影響がないことを検証するため、出射開口に中性子コリメータ（開口径 $\phi 140$ mm および $\phi 30$ mm）を挿入し、 $L/D=15$ ($L: 2100$ mm, $D: 140$ mm) および $L/D=70$ ($L: 2100$ mm,

D : 30mm) の 2 つの照射条件で撮影を行った．コリメータの使用によって照射する中性子束は異なる為，各々の検出器で画像の輝度が等しくなるよう撮影時間を調整した．図 3-15 に中性子カメラおよび中性子 I.I.における解像度測定用チャートの透過像を示す．

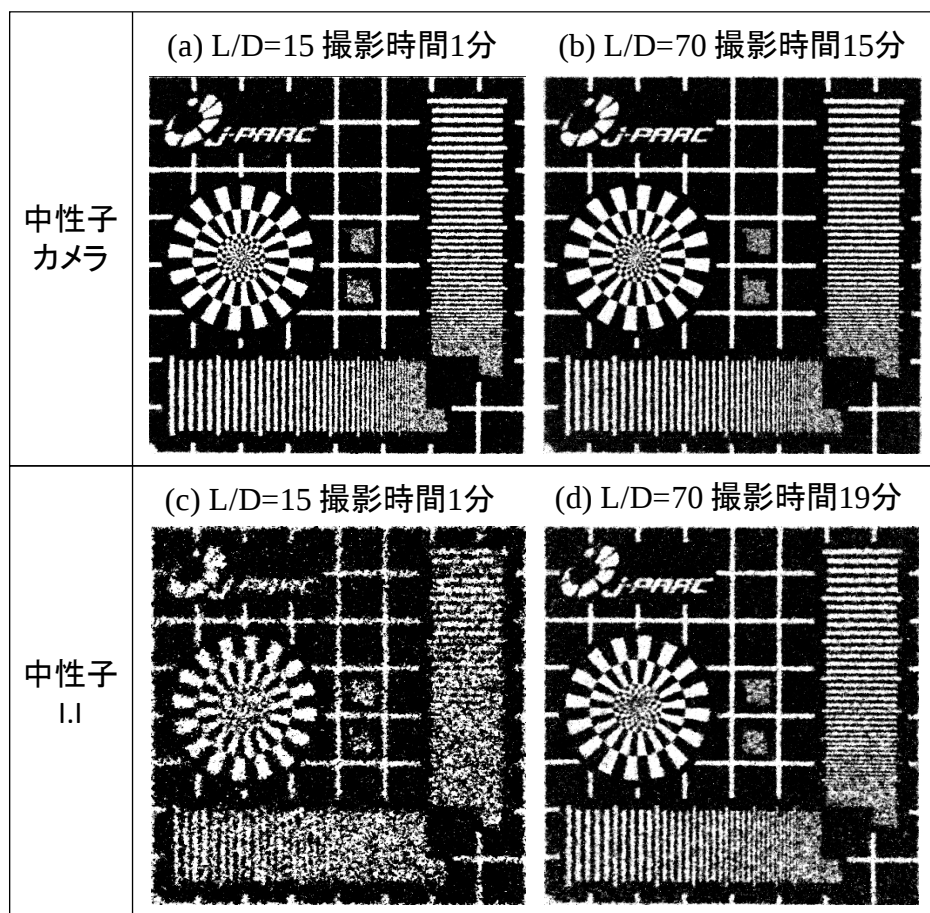


図 3-15 解像度測定用チャートに対する中性子透過像

中性子カメラの解像度が中性子 I.I.よりも高く，ラインペアやジーメンススターチャートのパターンが精細に可視化されていることがわかる．また中性子カメラでは中性子のコリメータ比 L/D による解像度の違いは現れていない．これは中性子コンバータ (LiF/ZnS(Ag)シンチレータ) が検出器表面のアルミ薄板 (厚さ 0.5 mm) の裏に配置されていることから L/D によるボケの影響は軽微であったためと考えられる．

一方、中性子 I.I. については L/D によってラインペアやスターチャートの解像度が異なっており $L/D=15$ の透過像においてロゴの視認性も大きく低下している。それぞれの検出器の解像度を比較するため、水平方向ラインペアの透過度プロファイルを図 3-16 に示す。

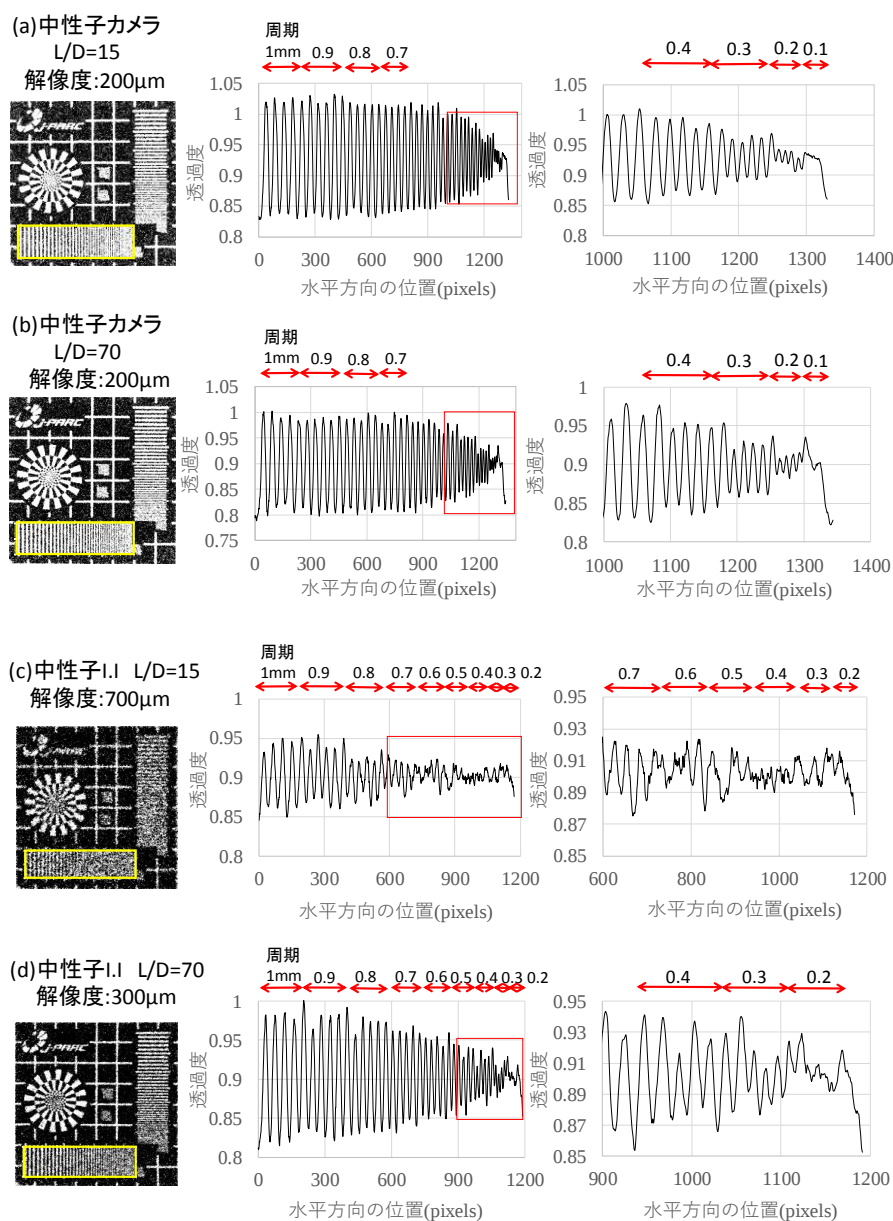


図 3-16 水平方向のラインペアに対する、(左) 中性子透過像、(中) 透過像黄色枠内部分の水平方向透過度プロファイル、(右) プロファイル赤枠部分の拡大図

中性子カメラにおいては L/D によらず、水平方向のラインペアは最小 $200\ \mu\text{m}$ の線幅まで忠実に透過度のプロファイルが得られたことから解像度は $200\ \mu\text{m}$ 程度であると決定される。一方、中性子 I.I. では $L/D=15$ の際は解像度が $700\ \mu\text{m}$ 程度であり $L/D=70$ とすると解像度が $300\ \mu\text{m}$ まで改善することが明らかになった。

次にジーメンススターチャート部分の透過像を図 3-17 に示す。中性子カメラでは、 $0.6\ \text{mm}$ 周期で円周方向に周期が変調するパターン（外周から 5 番目のスポーク）について識別可能である。ゆえに円周方向の分解能は $0.6\ \text{mm}$ 付近であることが確認できる。中性子カメラにおける円周方向の解像度は、水平方向の解像度を評価した結果と同様にビームの拡がり角 L/D に依存していないことがわかる。一方、中性子 I.I. においては、 $L/D=15$ のとき円周方向の分解能は $2\ \text{mm}$ 、 $L/D=70$ のときに分解能は $0.8\ \text{mm}$ となった。

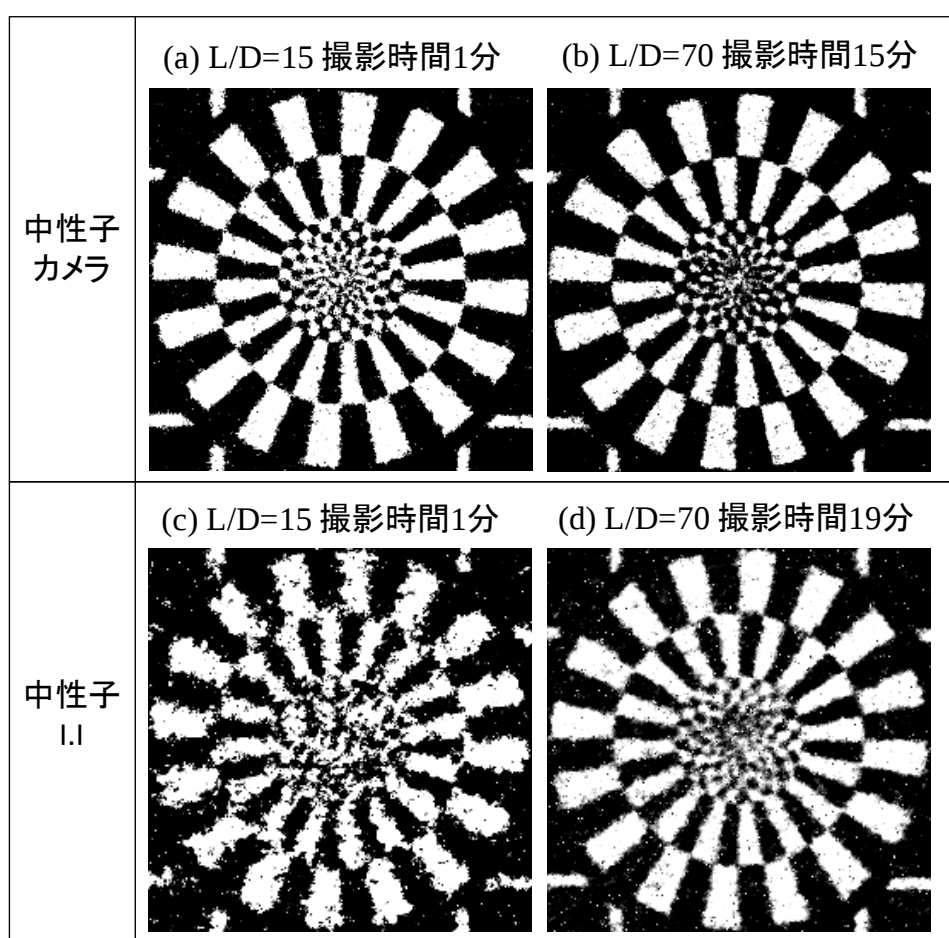


図 3-16 ジーメンススターチャート透過像

中性子 I.I.についてはコリメータ比 L/D の違いによってラインペアおよびジーマンススターチャートの解像度が変化したことから、中性子コンバータの位置が検出器表面から内側にあり、中性子線の拡がりによって幾何学的誤差が増加したものと考えられる。そこで中性子 I.I.のボロン樹脂から成る筐体を取り外し中性子コンバータの位置の確認作業を行った。

筐体を取り外した後の中性子 I.I.を図 3-18 に示す。図面が開示されていないため、検出器表面からコンバータまでの距離は不確かであるが、中性子コンバータの位置は検出器表面から少なくとも 3 cm 以上内部にあり、中性子の拡がりによって検出器内部でボケが増大するものと思われる。図 2-4 に示した入力面の概略図においては、中性子コンバータ (Gd_2O_3) の手前に Al の保護層が存在し、コンバータは検出器内部の入射面から更に奥側に位置する。また、内部入射面の表面形状は球面状であることから、検出器中心部と外周部で解像度が異なる可能性があることがわかった。

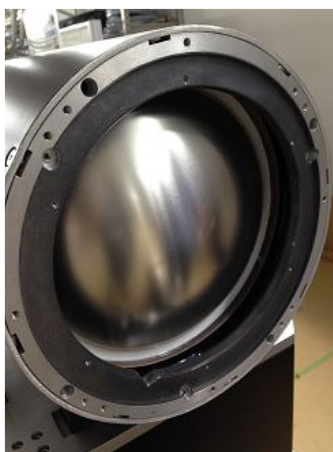


図 3-18 筐体を取り外した後の中性子 I.I

3.4 中性子線に混入する γ 線の評価

3.4.1 ブランキング機能を使用したイメージング

空間分解能とともに透過度の明暗の差を示すコントラストはイメージングにおける画質を示す重要な因子である。試料の厚さによって透過度は変化するため、コントラストが高い（明暗の差が大きい）ほど、厚さの違い（透過像の奥行方向に存在する物理量）を精度よく定量することが可能になる（定量精度、検出感度が向上する）。

しかし、中性子イメージングで得られる透過像には試料を透過する中性子だけでなく、照射室内で散乱される中性子や試料内で異なる方向に散乱される中性子、中性子線に付随する γ 線などのバックグラウンド成分³⁻⁸⁾が含まれる結果、バックグラウンドが重畳した透過度として出力され、明暗の差が縮小する。したがって、バックグラウンドの要因を低減してコントラストの向上（明暗の差を拡大する）を図ることでイメージングの更なる画質向上が期待できる。

本研究におけるバックグラウンドとして中性子源から中性子線とともに出力される γ 線が挙げられる。RANS から出力される γ 線スペクトルを中性子線エネルギースペクトルとともに図 3-19 に示す。0.1～5 MeV 付近のエネルギーを主とする γ 線が中性子線とともに出射され、検出器に到達するため、エネルギーが MeV 領域の γ 線に対する検出器の感度によって、透過像のコントラストが変化する可能性がある。検出器に使用した中性子 I.I. は入力面に γ 線シンチレータの材料である CsI が使用されており、高エネルギー γ 線にも感度を示すことが既に報告されている³⁻¹²⁾。本研究で使用した中性子 I.I. には、外部からパルス信号を入力して検出動作の ON/OFF をスイッチするブランキング機能^{3-13,14)}が備わっている。例えば、線源から検出器に到達する時間の異なる中性子線と γ 線を弁別する場合や、特定のエネルギー範囲の中性子線を選択してイメージングを行う場合に使用される。中性子 I.I. のブランキング機能を使用した際のタイミングチャートを図 3-20 に示す。したがって、この機能を利用して中性子線に混入する γ 線の評価を行った。

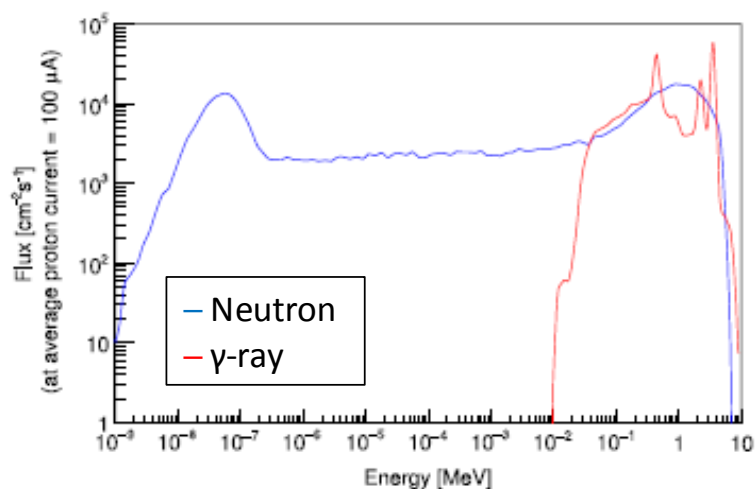


図 3-17 RANS から生じる γ 線と中性子線のエネルギースペクトル^{3-10,11)}
(中性子発生ターゲット表面から 5.0m 下流の位置)

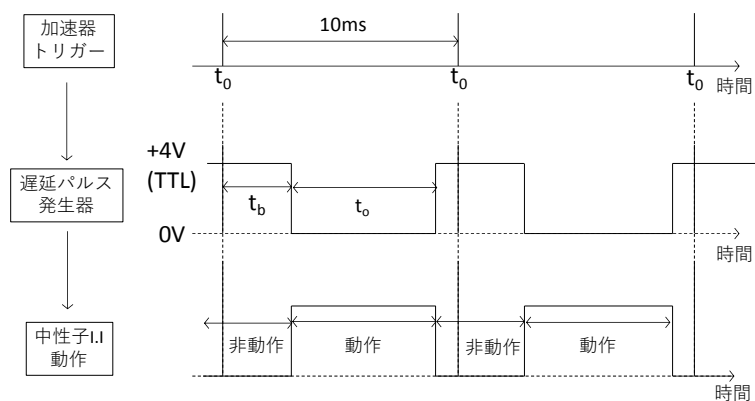


図 3-18 中性子 I.I ブランキング動作時のタイミングチャート

RANS における陽子線加速器の運転条件は繰り返し周波数 100 Hz (周期 10 ms), パルス幅 65 μ s, 陽子ビーム電流量 45 μ A であった. 加速器から繰り返し出力されるトリガー信号を遅延パルス発生器 (ファンクションジェネレータ等) に入力し, トリガータイミング t_0 に対して遅延したパルスを生じて中性子 I.I. に入力する. トリガータイミングからパルスの立下りまでの遅延時間 (以下, t_b とする) には検出動作が行われず, その後パルスの立下がりにて検出動作が開始され, 立上りの時間 (以下, t_o とする) まで動作が継続される. 以後, 上記の動作

が繰り返し行われ、トリガーから一定のタイミングで検出器に到達する成分が選択的に検出されることとなる。

中性子 I.I.を中性子発生位置より 3.5m 下流に配置し、ブランキング機能を利用して γ 線と中性子線を弁別したイメージングを行った。 γ 線と中性子線（エネルギー1,50,6400 meV）の検出器までの到達時間を表 3-2 に示す。図 3-19 におけるエネルギーピークを示す 50 meV の熱中性子線は 1.1 ms 後に、エネルギー1 meV の熱中性子線は 8 ms 後に検出器に到達する一方、エネルギーによらず光速で伝搬する γ 線は 12 ns 後と非常に短時間で到達することから、トリガーから 0.1 ms 程度遅延して検出動作を開始することにより、 γ 線の混入を低減した中性子イメージングが可能である。また、トリガーから 0.1 ms 以内の時間に検出動作を行うと γ 線を主成分としたイメージングになる。

表 3-2 熱中性子および γ 線が検出器に到達する時間
(中性子発生位置から検出器までの距離 3.5m の場合)

	エネルギー(meV)	速度 (m/s)	到達時間(ms)
熱中性子	1	438	8.00
	50	3095	1.13
	6400	35019	0.10
γ 線	MeV領域	$3.0 \cdot 10^8$ (光速)	11.7ns

本評価では試料に ASTM の中性子イメージング用の線質計 BPI^{3-15,16)} (Beam Purity Indicator) を使用しブランキング機能による γ 線および中性子のイメージングを実施した。線質計 BPI を図 3-21 に示す。ポリテトロフルオロエチレンの中心に直径 15.9 mm の貫通孔が設けてあり、BN ($\phi 4 \times 2$ mm) と Pb の円板 ($\phi 4 \times 2$ mm)、Cd の棒が表裏面に各 1 組、左右に埋め込まれている。中性子線は Pb に対する γ 線に比べて質量減弱係数が非常に小さく、透過性に優れることから透過像における Pb の円板部分のイメージから中性子線に混入する γ 線の影響を観察することができる。

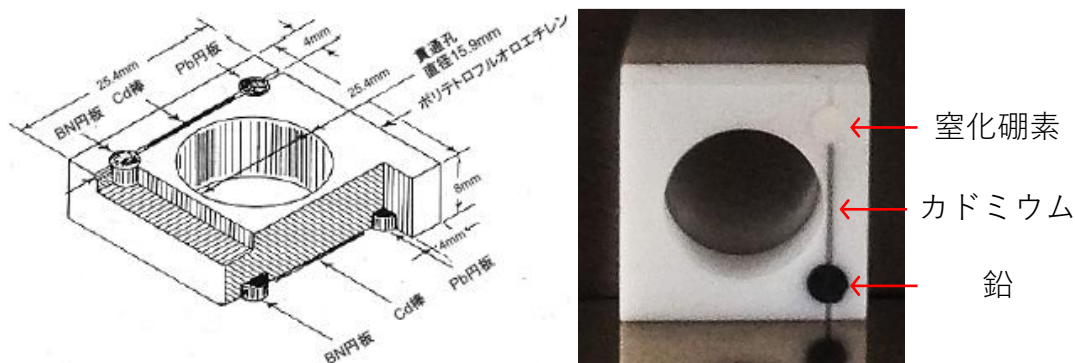
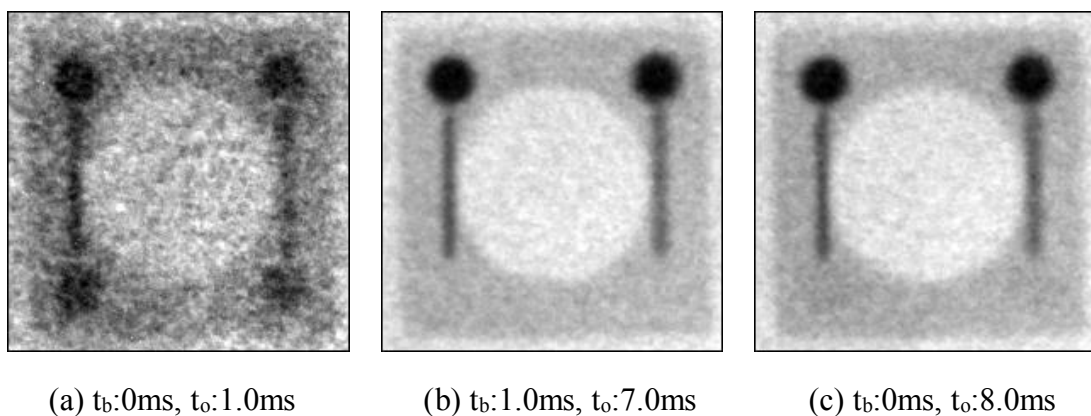


図 3-19 ASTM の中性子イメージング用の線質計 BPI³⁻¹⁶⁾

図 3-20 にブランキング機能を利用して撮影した線質計 BPI の透過像を示す。トリガーから 1.0 ms 後までの時間において検出動作を実施した（熱中性子線が到達する前に検出動作を停止した）図 3-20a においては、ポリテトロフルオロエチレンを透過して表裏にある BN と Pb の円板、Cd の棒を確認できる。一方、1.0 ms～8.0 ms 後まで検出動作を行った図 3-20b においては Pb の円板に対して陰影がつかないことから、ブランキング機能により γ 線の混入を避けたことで中性子線が Pb を透過した結果となったことと考えられる。 γ 線と中性子線をともに検出する条件(c)においては Pb の円板にわずかに影が映っていることから、本研究において中性子 I.I. で撮影される透過像には γ 線の混入があることが確認された。



(a) $t_b:0ms, t_o:1.0ms$

(b) $t_b:1.0ms, t_o:7.0ms$

(c) $t_b:0ms, t_o:8.0ms$

図 3-20 ブランキング機能を利用して撮影した
線質計 BPI の透過像（撮影時間 3 分/枚）

3.4.2 水分検出感度に γ 線の混入が及ぼす影響

本研究で定量対象とする水分に対して γ 線の混入が検出感度に及ぼす影響を評価する目的で、熱中性子の反応断面積（透過度）が水と近似するアクリル³⁻¹⁷⁾を使用してブランキング機能の有無による透過率の比較を行った。ブランキングの条件として γ 線除去が可能な遅延時間 t_b : 0.2 ms, 駆動時間 t_d : 7.8 ms を設定した。試料として中性子透過方向の厚さが階段状に最大 20 mm まで変化するステップ状のアクリル試料を用意して透過像の撮影を行った。

図 3-23 にステップ状のアクリル試料の透過率を示す。縦軸に透過率、横軸にステップ的に変化する厚さをプロットして片対数グラフに示した。透過率はアクリルを透過後の中性子線強度を、アクリルを使用せず撮影した画像の中性子線強度で除して出力している。アクリルの厚さが増加するにつれて透過率が低下し、厚さ 6 mm を超えたあたりからその傾きが緩やかになる。ブランキング機能を使用しない場合にアクリル厚さ 20 mm における透過率は約 60 % であることに対し、ブランキング機能を利用した際の透過率は 37 % 程度であった。このように水等価材料の場合でブランキング機能により透過率が 23 % 程度拡大されたことから、実際の水分測定においても、水量の増分に応じて中性子透過率の差をより大きく捉えられることが期待される。

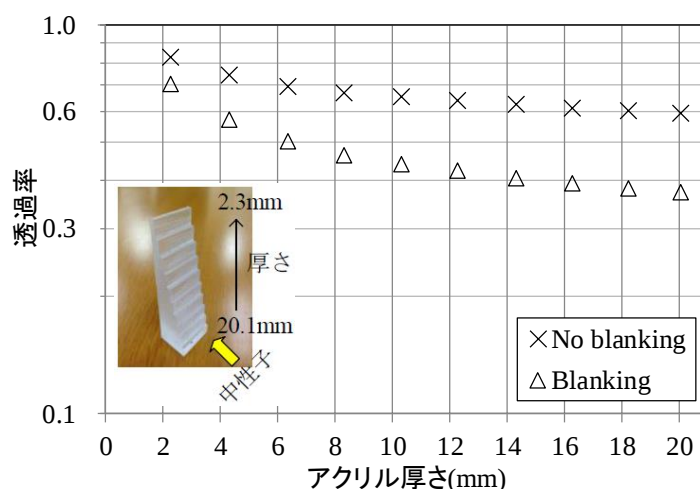


図 3-23 使用したアクリル試料の写真と中性子線透過率分布

参考文献

- 3-1) M. Matsubayashi, A. Tsuruno, T. Kodaira, H. Kobayashi, “High resolution static imaging system using a cooled CC camera”, Nucl.Instrum & Methods, A377, 107-110 (1996).
- 3-2) 飯本 武志, 上蓑 義朋, 河野孝央 放射線計測の基礎 J.Plasma.Fusion.Res. Vol.89 No.9 629-634 (2013).
- 3-3) H.Kobayashi, H.Wakao, “Accurate measurement of L,D, and L/D for divergent collimators”, Neutron Radiography, Proc.3rd World Conf. Neutron Radiography Osaka 1989 p.885-892
- 3-4) 社団法人 日本非破壊検査協会規格 “中性子ラジオグラフィの L/D 比決定方法” NDIS 1402(1996)
- 3-5) M.Segawa, K.Oikawa, T.Kai, T.Shinohara, H.Hayashida, Y.Matsumoto, J.Parker, T.Nakatani, K.Hiroi, Y.SU and Y.Kiyanagi, “Spatial Resolution Test Targets Made of Gadolinium and Gold for Conventional and Resonance Neutron Imaging”, JPS Conf. Proc. 22, 011028 (2018)
- 3-6) ISO12721:2000 “非破壊検査-熱中性子ラジオグラフィ検査-L/D 比決定法”
- 3-7) ASTM E803-91 “Standard Test Method for Determining the L/D Ratio of Neutron Radiography Beams” (2002)
- 3-8) 小林久夫 中性子イメージング技術に関する基本因子, RADIOISOTOPES, Vol.56, pp.403-416, 2007
- 3-9) A.Kaestner, D.Mannes, N.Kardjilov, “Samples to Determine the Resolution of Neutron Radiography and Tomography “, Physics Procedia Volume 88, 2017, Pages 258-265
- 3-10) Y. Wakabayashi, A. Taketani, Y. Ikeda, T. Hashiguchi, T. Kobayashi, S. Wang, M. Yan, M. Harada, Y. Ikeda and Y. Otake, “A function formation of source neutron production by the $9\text{Be} + p$ reaction at 7 MeV at RANS”, JAEA-Conf 2016-004, p.135.
- 3-11) Y.Seki, A.Taketani, T.Hashiguchi, S.Wang, M.Mizuta, Y.Wakabayshi, Y.Otake, Y.Yamagata, H.Baba, K.Kino, K.Hirota, S.Tanaka, “Fast neutron transmission imaging of the interior of large-scale concrete structures using a newly developed

- pixel-type detector”, Nucl.Instrum & Methods, A870, 148-155 (2017)
- 3-12) K.Hara, H.Sato, T.Kamiyama, T.Shinohara, “Measurement and simulation for a complementary imaging with the neutron and X-ray beams” EPJ Web of Conferences 146, 03032 (2017)
- 3-13) T.Kamiyama, Y.Kiyanagi, “Time-of-flight Neutron radiography with a blanking-type image intensifier”, Physics Procedia Vol.26 2012, pp.231 – 237
- 3-14) 日塔光一, “中性子カラーイメージンテンシファイア” 日本中性子科学会誌「波紋」 Vol.22, No.4, pp.322-328, 2012
- 3-15) ASTM E545-14 “Standard Method for Determining Image Quality in Direct Thermal Neutron Radiographic Examination”
- 3-16) 池田泰, “非破壊検査における中性子と X 線のイメージング画像の評価方法”, RADIOISOTOPES, Vol.56, pp.283-290, 2007
- 3-17) Kobayashi,H, “A correlated study between effective total macroscopic cross sections and effective energies for neutron beams with continuous spectra”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A Vol.424 pp.151-157, 1999

第4章 中性子イメージングによる コンクリート内浸透水分の定量化

本章は中性子イメージングで取得した画像に適用した画像処理方法とコンクリート内に浸透する水分の定量化に至るまでの解析方法について述べる．具体にはコンクリートの水分浸透過程の観察にあたり実施した水分浸透試験，中性子イメージングの概要を説明する．そして，コンクリート内における吸水量の分布を出力するプロセスを示し，その定量法について考察を行う．

4.1 画像処理方法

4.1.1 ノイズおよびダーク処理

定量化解析に使用する中性子透過像の出力作業は，①中性子線を照射しない状態で撮影する画像（ダーク画像），②試料を置かずに中性子線を照射した場合の画像（ダイレクトビーム画像），③試料を置いて照射した場合の画像（サンプル画像）および画像解析ツール ImageJ を使用して行われる。その画像例と手順を図 4-1 と図 4-2 に示す。

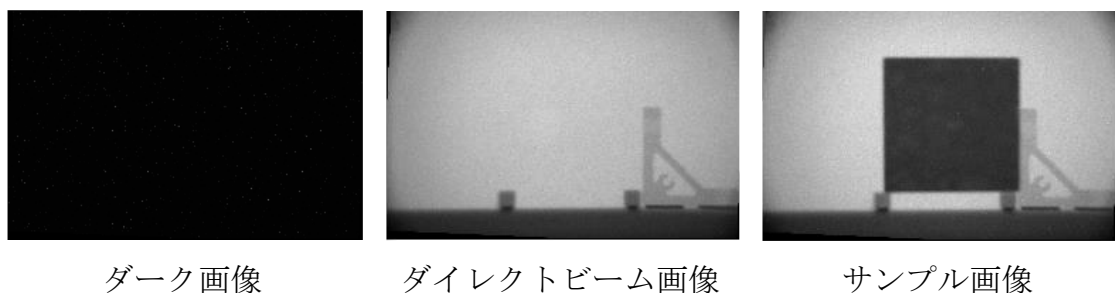


図 4-1 中性子透過像の出力のために取得する 3 種類の画像

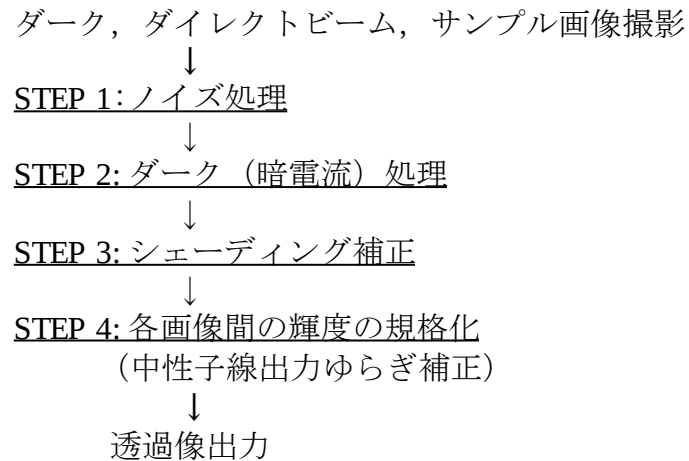


図 4-2 中性子透過像出力までのフロー

中性子イメージングにおいては線源，試料および周辺物から放射化した環境由来の γ 線が CCD センサに直接入射することで，大きく値の外れた輝点ノイズ（ホットピクセル）が画像内にランダムに生じる⁴⁻¹⁾．輝点ノイズの除去には複数枚撮影した画像から最小値を画素毎に選択してノイズ除去を行う「ミニマムフィルタ」⁴⁻²⁾や，輝点ノイズを周辺画素の中間値に置換する「メディアンフィルタ」⁴⁻³⁾といった様々な画像フィルタが提案されている．

本評価における中性子 I.I. 使用時の撮影時間は 3 分/枚であり，ミニマムフィルタを採用した場合，1 枚のノイズ除去に 10 分弱の撮影が必要となることから，メディアンフィルタを採用して輝点ノイズの処理を行った．メディアンフィルタは中間値を選択する周辺画素の範囲と，輝点ノイズと見なす画素値との差（しきい値）を条件として最適なフィルタを作成する．ノイズ除去前後における画像のヒストグラム（輝度値の分布）を比較し，メディアンフィルタのノイズ除去性能と信号成分への影響を評価した．ノイズ除去前後のダイレクトビーム画像とヒストグラムの比較を図 4-3 に示す．

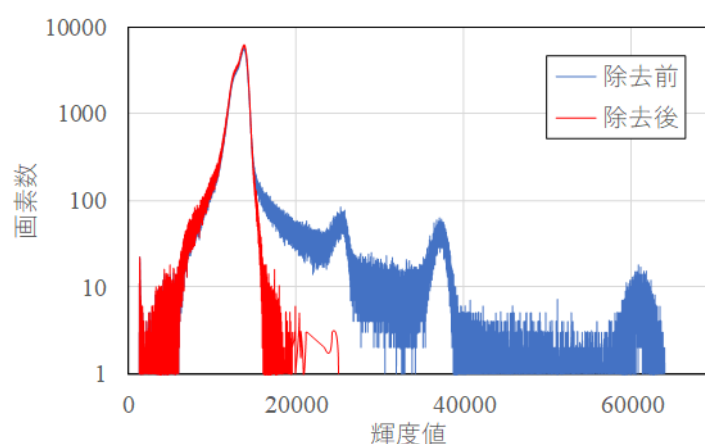
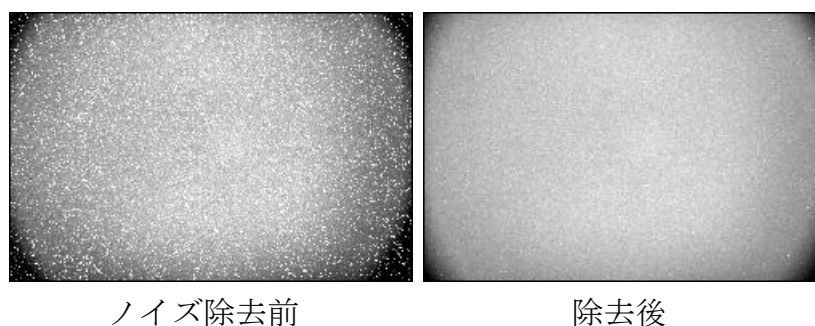


図 4-3 ノイズ除去前後におけるダイレクトビーム画像とヒストグラムの比較

横軸は 16 ビット画像の輝度値（範囲：0～65535 の整数値），縦軸はその輝度値を示す画素数を表している．輝度値 14000 付近のピークが中性子に由来する信号成分を示しており，ピークから最大輝度値 65535 にかけて広範囲に分布する成分がノイズに対応する．画像比較により，輝点ノイズがメディアンフィルタによって除去されていることを確認できる．

本評価では，メディアンフィルタの適用範囲を周囲 36 画素の中間値として，輝度値の差が 1500 を超える画素値を置換する条件を作成しノイズ処理を行った結果，信号成分のヒストグラムを維持した状態でノイズ成分を選択的に除去する能力を確認した．全ての画像に対して上記のノイズ処理を行った後，ダーク画像が示す CCD カメラの暗電流を全ての画像から引き算し，暗電流の補正を行った．

4.1.2 シェーディング補正および画像間輝度の規格化

図 4-1 に示したダイレクトビーム画像は、中性子の強度分布や検出器の光学系（レンズ）の影響もあり、中心部分の輝度値が高い凸型の強度分布を示すことから、サンプル画像に対して強度分布を平坦化する「シェーディング補正」を実施した。補正にあたりダイレクトビーム画像を予め取得し、サンプル画像からダイレクトビーム画像を除算することで強度分布を平坦化し、入射中性子に対して試料を透過した中性子の強度比を出力した。解像度測定用チャートを撮影した画像についてシェーディング補正前後における水平方向のラインペア（矩形状黄色枠内）の輝度比に関するプロファイルの比較を図 4-4 に示す。輝度分布の偏りが補正され、平坦な強度分布のもと、ラインペアによる周期的なプロファイルが表示されている。

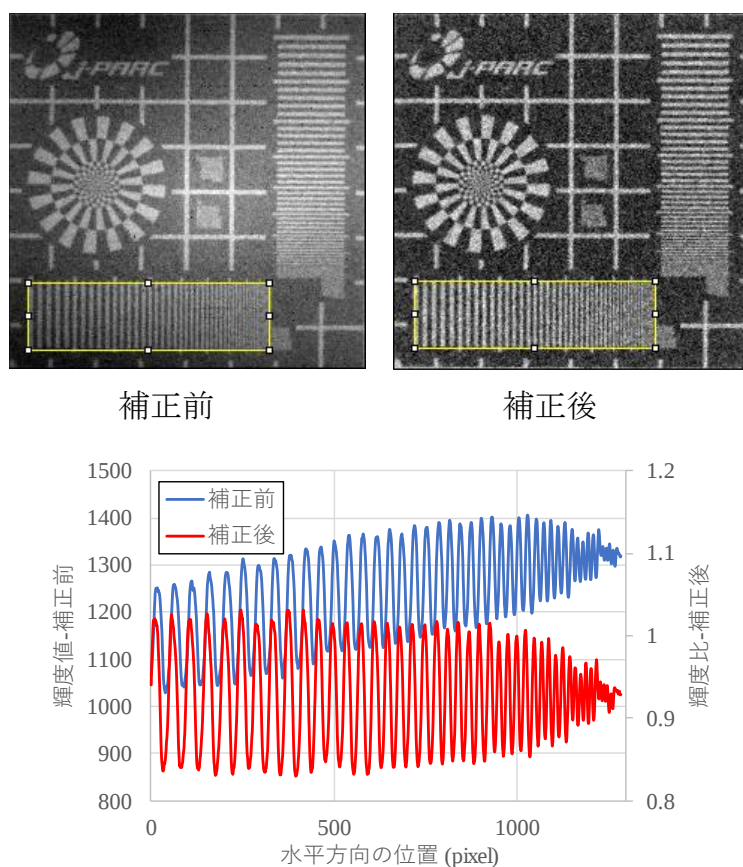


図 4-4 シェーディング補正前後の解像度測定用チャート画像と
水平方向ラインペアのプロファイル比較

本評価で使用した理研小型加速器中性子源は少なからず出力変動があり，異なる時刻に撮影した画像間で輝度の差が生じることから，中性子源のモニター値である陽子ビーム電流量を使って画像間の輝度の規格化を実施し，線源強度由来による輝度の差を補正した．上記のフローを行い，中性子透過率（入射中性子に対する透過中性子の強度比）の分布に相当する中性子透過像を出力した．

4.1.3 画素結合による標準偏差の低減

中性子の発生が確率事象であることから画像 1 フレームあたりに検出される中性子数はランダムであり，ポアソン分布に従う統計的性質を持つ⁴⁴⁾．検出される中性子数の平均値を N とすると分散 σ^2 も等しく N であり，分散 σ^2 の平方根である標準偏差 σ は $\sqrt{N}$ となることから，1 枚の画像に計測される中性子数は $N \pm \sqrt{N}$ となる．平均値 N に対して中性子数の比は $\pm 1/\sqrt{N}$ の統計誤差を持つことから，中性子数が 2 桁増すと統計誤差は 1 桁小さくなる．統計量を稼ぐ（誤差を低減する）方法としては，以下の 3 つの方法が挙げられる．

- ①中性子線の照射時間を延ばし，統計量を増やす．
- ②複数枚画像を撮影した後に，画像を積算⁴⁵⁾し，統計量を増やす．
- ③画素サイズを拡大して 1 画素当りの統計量を増やす．

中性子 I.I.の画素サイズ $45 \mu\text{m}/\text{pixel}$ に対して解像度測定用チャートを撮影した透過像における解像度は， $L/D=15$ の場合に $700 \mu\text{m}$ ($L/D=70$ の場合には $300 \mu\text{m}$) であった．画素サイズと解像度は直接対応せず，画素サイズを $700 \mu\text{m}$ 程度まで拡大するに至っては解像度の低下は避けられることから統計量を稼ぐ方法として③を採用し，統計誤差の低減を図った．

本研究では，コンクリートに対する中性子透過像が示す透過率の変化から浸透水分を定量化するため，同一状態におけるコンクリートの透過像を 2 枚撮影し，画素結合が透過率の比（理想的には 1）に付随する統計誤差を評価した．画素サイズの拡大にあたり実施した画素の結合について図 4-5 に示す． 10×10 や

50×50 画素を 1 画素に結合して分布を作成し、デジタル画像化する作業を画素の結合プロセスとして行った。結合した画素数と標準偏差の関係およびヒストグラムについて表 4-1 と図 4-6 に示す。

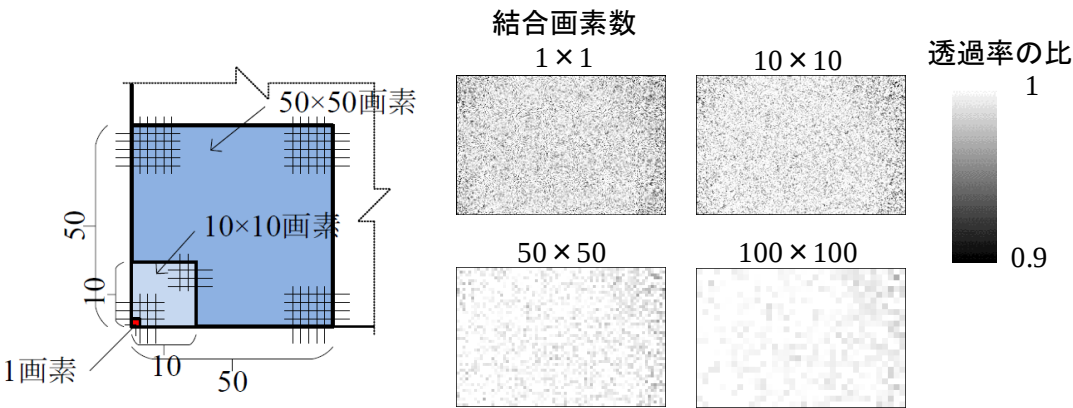


図 4-5 画素の結合および 2 枚の画像の輝度比（平均値=1）
における結合画素数の比較

表 4-1 結合した画素数と標準偏差の関係

結合した画素数	標準偏差
1×1	0.0381
10×10	0.0279
50×50	0.0098
100×100	0.0055

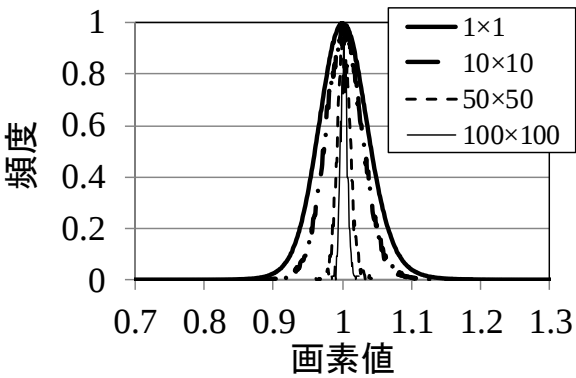


図 4-6 画素結合時のヒストグラム比較

50×50 のエリアにある縦横合計 2500 画素を 1 画素に結合した結果、標準偏差が 1 %以下となることが確認された。これより画素サイズを 45 μm から 2.25 mm に結合することで、透過度の比を 1%以下の標準偏差で評価することが可能となった。以後の評価においては 50×50=2500 画素を結合した後の結果を利用した。

4.2 コンクリート内浸透水分の可視・定量化

4.2.1 水分浸透試験の方法

コンクリートに浸透する水分の観察にあたって、プラスチック容器に水を張り、図 4-7 に示すように、アルミ角材を介してコンクリート試料の下部 2 mm を水に浸け、水分の浸透が鉛直上向きに進む水分浸透試験を行った。



図 4-7 水分浸透試験

この試験は降雨によってコンクリート構造物に水がかかった箇所で内部の鉄筋に向かって水分浸透が進む過程を模擬したものである。試験方法の簡便さに優れており、米国 ASTM⁴⁻⁶⁾、欧州 RILEM⁴⁻⁷⁾、国内では土木学会規準の試験⁴⁻⁸⁾において採用されている。これらの規格では水分浸透に影響を及ぼすと思われるコンクリートの表面乾燥を防ぐよう、樹脂や養生テープで側面を全てシーリングし、一面を浸水させる方法が示されているが本評価では試験の簡易性を重視し、シーリングを行わず水分浸透試験を実施した。

試料の準備として水分浸透試験前に電気炉にて 40 °C の温度下で約 3 ヶ月コンクリート試料を乾燥させ、1 日後の質量変化が 0.1 %以下となった状態を乾燥状態として水分浸透試験を開始した。

4.2.2 水分浸透試験の中性子イメージング方法

最初の中性子イメージングは水分浸透試験の開始前（試料乾燥時）に行い，試験開始後には5，24，48，72時間後および1週間後に繰り返した．その方法と中性子イメージングシステムの性能仕様を図4-8と表4-2に示す．

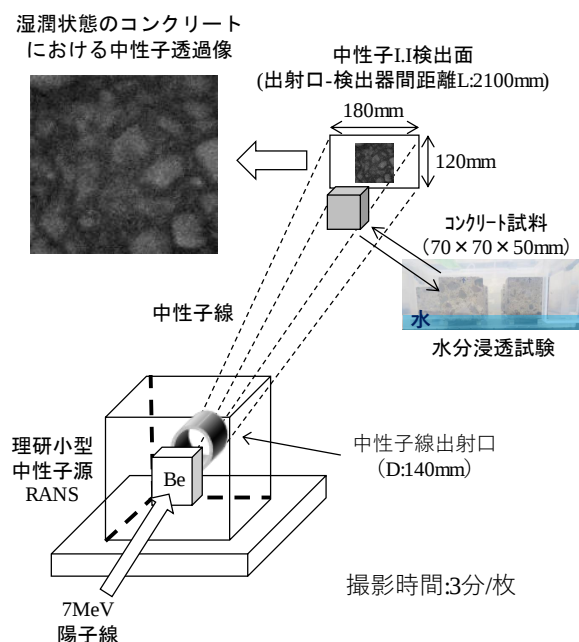


図 4-8 コンクリートの水分浸透試験の中性子イメージング方法

表 4-2 中性子イメージングシステムの性能仕様

中性子源	理研小型中性子源RANS
中性子束	$10^4 \text{ neutrons/cm}^2/\text{s}$
コリメータ比 L/D	15
検出器	Gdタイプ中性子イメージインテンファイア
解像度	700 μm
視野	180 $\times$ 120mm
画素サイズ	45 μm
撮影時間	3分/枚

中性子イメージングにあたっては，中性子線の出射口に開口径 140 mm の中性子コリメータを置き，出射口から 2100 mm 離れた位置に中性子 I.I.の検出器表面

を配置した．そして，容器からコンクリート試料を取り出して電子天秤（最小単位 0.1 g）で質量を測定後，検出器前に試料を設置して中性子を 3 分間照射した． γ 線の混入を避ける目的から，前章で述べた中性子 I.I. のブランキング機能を活用し，遅延時間 t_b : 0.2ms，駆動時間 t_o : 7.8 ms を設定した．撮影終了後，試料を再び容器に戻して水分浸透試験を再開する．なお，イメージングにより水分浸透試験は約 10 分間中断されるが，その前後における質量の低下は 0.1 g 程度であったことから，イメージングの所要時間が水分浸透に与える影響は少ないものと考えられる．

4.2.3 コンクリートに浸透する水分の画像抽出と定量化方法

得られたイメージング画像に対して 4.1 節で述べた画像処理を施し，ダイレクトビーム画像に対するサンプル画像の輝度比である透過度を示す透過像（解像度：2.25 mm，空間内誤差 <1 %）を作成する．中性子イメージングにおいては試料を構成する原子核が中性子に独立に作用して透過像を形成するため⁴⁻⁹⁾，水分が浸透するコンクリートに対する透過中性子強度 I は，次式のようにコンクリートと浸透水分に対する透過強度の重ね合せとして表される．

$$I = I_0 \exp[-(\Sigma_c t_c + \Sigma_w t_w)] \quad \text{式 (4-1)}$$

ここで， I_0 ， Σ_c ， Σ_w ， t_c ， t_w は中性子強度，コンクリートおよび水の巨視的断面積，透過方向に存在するコンクリートおよび水の厚さを意味する．また， Σ_c はセメント（粉体），骨材（砂，砂利），水和反応によってセメントに結合する水（結合水）の巨視的断面積の和であり，主には水素を大量に含む結合水によるものである．抽出したい浸透水分 ΔT は試験前後の透過中性子強度 $I_{t=0}$ ， I_t を用いて式 4-2 より得られる．実際に得られたコンクリートの透過像と水の透過像 ΔT の例を図 4-9 に示す．そして試料全体にわたる ΔT の総和（ W_{image} とする）が吸水量に相当することになる．

$$\Delta T = -\ln\left(\frac{I_t}{I_{t=0}}\right) = \sum_w t_w \quad \text{式 (4-2)}$$

$$I_{t=0} = I_0 \exp[-(\sum_c t_c)] \quad \text{式 (4-3)}$$

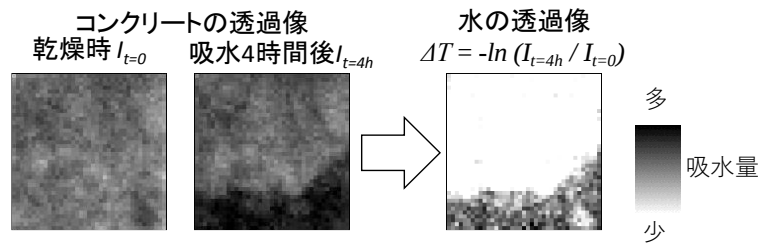


図 4-9 実際に得られたコンクリートの透過像と水の透過像 ΔT の例

4.2.4 コンクリート水分浸透試験の中性子イメージング結果

本研究では，水セメント比 42 %の PC シリーズと 60 %の RC シリーズのコンクリート試料を用意して，水分浸透試験と中性子イメージングを行った．

表 4-3 コンクリート試料の配合表

名称	配合								
	W/C (%)	s/a (%)	G _{max} (mm)	单位量(kg/m ³)				AE 減水剂 (g/m ³)	AE 助剂 (g/m ³)
				W	C	S	G		
PC	42	48	15	184	438	743	869	1095	1752
RC	60	51		189	315	891	866	787	1259

W/C：水セメント比（セメントに対する水の質量比）

s/a：細骨材率（全骨材質量に対する細骨材質量の比）

$G_{\max}$ ：粗骨材の最大寸法

W：単位水量

C：単位セメント量

S：単位細骨材量

G：単位粗骨材量

AE：空気連行剤（独立気泡を作り，流動性を与える界面活性剤の一種）

セメント：早強ポルトランドセメント

圧縮強度：PC シリーズ=44.5N/mm²（材齢 3 週間），

RC シリーズ=33.1 N/mm²（材齢 2 週間）

保管方法：コンクリート打設後 30 日間水中養生した後に常温保管

各シリーズともに，本研究用に製作した $100 \times 100 \times 400$ mm のコンクリートブロックから $70 \times 70 \times 50$ mm の試料を 2 個ずつ切り出して水分浸透試験に使用した．試料 PC-1 に対する水分浸透試験の水の透過像 ΔT を図 4-10 に示す．均一に水位が上昇し，73 時間後には上面まで水が及んでいることがわかる．各試料の水の透過像 ΔT より導出した吸水量 W_{image} と電子天秤で測定した吸水量の関係を図 4-11 に示す．水分浸透試験の水の透過像 ΔT が示す W_{image} と秤量した吸水量との間には試料固有の線形性が得られており，コンクリートに浸透する水の水透過像 ΔT が定量性を有していることを確認した．

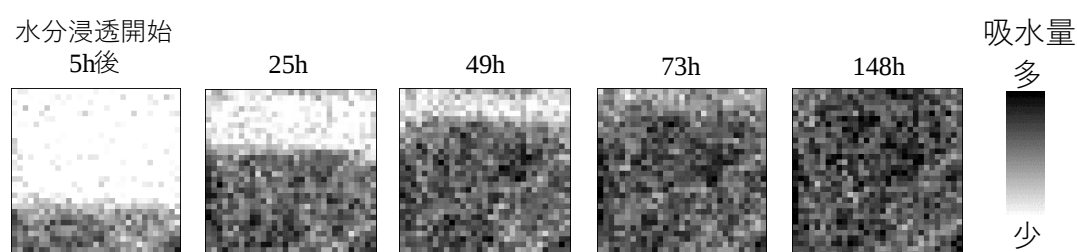


図 4-10 試料 PC-1 に浸透する水の水透過像 ΔT

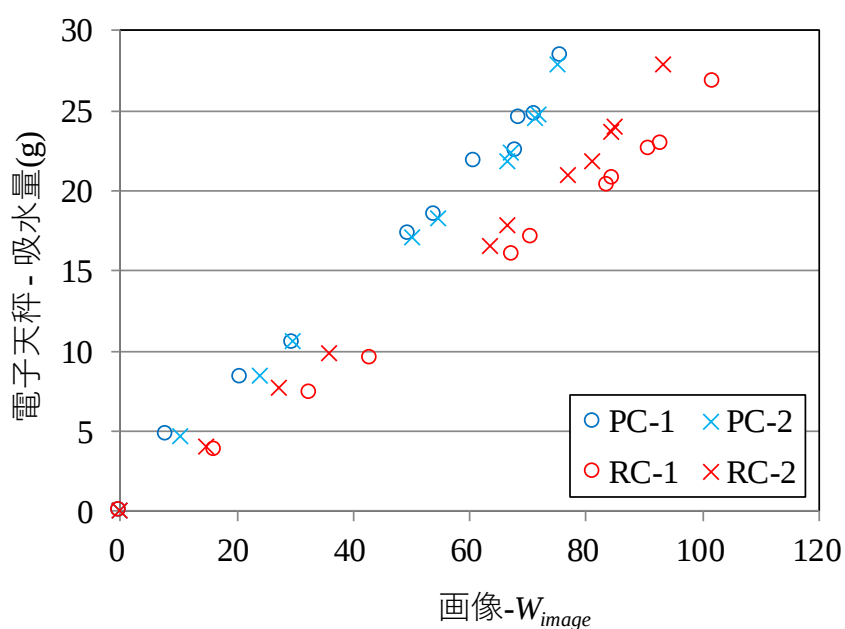


図 4-11 水の水透過像 ΔT が示す吸水量 W_{image} と実際の吸水量の関係

4.2.5 アクリル試料の中性子イメージング結果との比較

コンクリートへの浸透水分を示す水の透過像 ΔT は乾燥時と吸水時の透過像の比から得られ、共通する成分である骨材やセメントがキャンセルされているため、浸透水分による透過率の差はコンクリートが乾燥時に持つ水分に加わった水による透過率の差に相当すると考えられる。その定量性について、3.4.2 節で述べたアクリル試料の中性子イメージング結果と対比しながら考察する。

セメントが水和反応に使用する水量は、一般的にセメント質量の 30 %程度であると言われており、表 4-3 に示した単位セメント量を踏まえると、厚さ 50 mm のコンクリートの厚さ 5~7 mm に相当する部分は乾燥状態の時点で含まれている水分になる。図 4-11 で示された試料の最大吸水量は 30 g 弱であり、試料の浸漬面から上面まで水が均一に浸透したと考えれば、中性子線が入射するコンクリート表面の面積 (70×70 mm) で吸水分の体積を割ると、平均約 6 mm 厚の水が透過方向に対して分布していることになる。

すなわち、乾燥状態のコンクリート中に存在する水の厚さ 7 mm 程度に吸水分による厚さ 6 mm を加えた、約 13 mm の厚さまでの水に対する透過率変化が、3.4.2 節で述べたアクリル試料の厚さ 7 mm 以上における線形な透過率変化と対応していることになる。

浸透水分による透過率変化は、コンクリート内部の骨材や空隙、ひび割れの分布によって中性子透過方向 (コンクリートの厚さ方向) における水分の分布がばらつくことから、均一に水素が分布するアクリルの透過率変化と異なる結果が予想された。これは試料内でのビーム平行度の変化や散乱中性子線の影響により中性子線が入射する試料表面付近と検出器側に近い試料部分のコントラストが変化することがその理由であるが、本研究の水分浸透試験では同様の変化を示し、定量性が維持された。

その理由として、コンクリート試料の厚さを粗骨材最大寸法の 2 倍強の厚さにしたことにより、水が浸透しない骨材の分布が試料内で均一となり、結果厚さ方向の水分布の均一性を確保できたことが考えられる。

参考文献

- 4-1) M. Matsubayashi, A. Tsuruno, T. Kodaira, H. Kobayashi, “High resolution static imaging system using a cooled CCD camera”, Nucl.Instrum & Methods, A377, 107-110 (1996).
- 4-2) 土屋直子, 兼松学, 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中の水分定量に関する研究”, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.769-774, 2008.
- 4-3) J.C. Russ, The Image Processing Handbook, 2nd Ed.(CRC Press, Boca Raton, 1994) p. 165.
- 4-4) 持木幸一, “中性子イメージングにおけるエレクトロニクス画像取得と処理・解析”, RADIOISOTOPES, Vol.57, pp.77-86, 2008
- 4-5) 浅野等, “減圧沸騰を伴う管内気液二相流の流動特性に関する研究” 神戸大学博士論文 pp.134
- 4-6) ASTM C1585-04 “Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes”
- 4-7) RILEM TC 116-PCD, “Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability”, Materials and Structures, Vol. 32, April 1999, pp 174-179
- 4-8) 土木学会： 短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法（案） JSCE-G 582-2018
- 4-9) H.Pleinert, H. Sadouki and F.H.Witmann, “Determination of moisture distributions in porous building materials by neutron transmission analysis, Materials and Structures”, vol.31, pp.218-224, 1998

第 5 章 小型加速器中性子源による コンクリートの水分浸透性評価

本章では小型加速器中性子源による中性子イメージングから取得されるコンクリートの中性子透過像を用い、水分量を画像解析することにより得られる水分の分布、時間に伴う動きから、コンクリートの特性を評価する手法を検討する。コンクリートの使用材料は時代の要求とともに変遷し、そのため顕在化する劣化現象も変化している。本研究ではアルカリシリカ反応による劣化を有するもの、強度を左右する水とセメントの配合比率（水セメント比）を調整したものなど多岐に及ぶコンクリート試料の水分浸透の様子を中性子イメージングで捉え、各コンクリートの特性を評価する。

5.1 劣化コンクリートの水分浸透性評価

5.1.1 劣化コンクリート水分浸透過程の中性子イメージング

本評価を行うにあたり、劣化を有するコンクリートとしてアルカリシリカ反応（Alkali Silica Reaction : ASR）を示すコンクリート試料を準備した。アルカリシリカ反応は骨材（砂、砂利）に水と反応する反応性骨材を使用した場合に生じる劣化であり、アルカリ性の水溶液が骨材と反応して膨張性のゲルを生じ、反応が進んでゲルが膨らむことで、内部に歪みが生じてひび割れが発生する現象⁵⁻¹⁾である。反応は比較的ゆっくり進行するものの、ひび割れによってより内部へ水分浸透が進み、劣化の進行が速くなることから、一般的にはひび割れ幅や膨張ひずみを計測することにより構造物のメンテナンスが行われている。

今回用意した各コンクリート試料の配合を表 5-1 に示す。反応性細骨材を使用した ASR シリーズと普通骨材を使用した試料 N がある。前者は反応性細骨材（砂）を使用して作製したコンクリートブロックを湿布で包んで温度 70～80 °C

の高温多湿な環境下で養生することで、アルカリシリカ反応を促進したものであり、劣化度を示す膨張量を試料名称として ASR310, 350, 875, 930 とした。

表 5-1 コンクリート試料の配合表

名称	試験時 膨張量 (μ)	配合								
		W/C (%)	s/a (%)	G _{max} (mm)	アルカリ り量 (kg/m ³)	単位量(kg/m ³)				
						W	C	S	G	AE
ASR310-1,2	310	55	44.5	20	3	168	305	786 (30kg)	980	0.16
ASR350	350				5					
ASR875	875				8			786 (30%)		
ASR930-1,2	930									
N	-	50	45.1		-	184	368	779	973	4.05

W/C：水セメント比（セメントに対する水の質量比）

s/a：細骨材率（全骨材質量に対する細骨材質量の比）

G_{max} ：粗骨材の最大寸法

アルカリ量：アルカリシリカ反応促進のために添加する NaOH の量

各材料の単位量：コンクリート $1m^3$ あたりの質量

W：単位水量

C：単位セメント量

S：単位細骨材量

G：単位粗骨材量

AE：空気連行剤（独立気泡を作り，流動性を与える界面活性剤の一種）

反応性骨材：ASR310, 350：人工クリストバライト

SR875：北海道産安山岩砂

ASR930-北海道産安山岩砕砂

ASR310 および 350 は単位細骨材量のうち 30 kg を反応性鉱石である人工クリストバライトに置換した。ASR875 は反応性を示す北海道産の砂，ASR930 は北海道産の砕砂（岩石を砕いた砂）に単位細骨材量の 30 % (236 kg) を置換した。そして表 5-1 に示すアルカリ量になるよう NaOH を添加し，アルカリシリカ反応を促進した。ASR シリーズは $75 \times 75 \times 400$ mm の型枠で試料を作製し，試料長手方向の両端に予め測定ピンを埋設し，のちに測定ピンの間の長さ変化量を基長 400 mm で除すことで膨張量を算出した。全ての試料の材齢は 1 年以上であり ASR シリーズの膨張量は促進試験終了から中性子イメージングを行うまで，変化が無いことを確認した。

ASR シリーズは長軸方向の中央付近から厚さ 50 mm 程度に切り出して $75 \times 75 \times 50$ mm の寸法として実験に使用した。膨張量が最小の ASR310 と最大の

ASR930 については隣接する部分も切り出し，試料を各 2 個とした．試料 N は $100 \times 100 \times 400$ mm のブロックから全ての面を 10 mm 程度切り取り，残った $75 \times 75 \times 400$ mm のブロックから厚さ 50 mm ($75 \times 75 \times 50$ mm) を取り出した．水分浸透を評価するにあたり，試験開始時のコンクリートの含水率が水分の浸透速度に影響を及ぼす⁵⁻²⁾ことから，水分浸透が開始される前の含水率が試料間で全て同一となるように 50 °C の炉に入れることで質量変化が 24 時間以内に 0.1 % 以下となる乾燥状態を作成した．

水分浸透試験及び中性子イメージングセットアップを図 5-1 に示す．初めに試料が容器に触れないようアルミ角棒を底面に配したプラスチック容器を用意し，試料底面から 2 mm 程度の高さまでの水を張り，供試体を角棒上にセットして水分浸透試験を開始した．なお，型枠にコンクリートを流し込んだのちにコンクリート上面（打設面）に比重の小さな水が浮き，上面の空隙量が増加するブリーディング⁵⁻³⁾の影響を避けるため打設面を上面とした．これは，打設面を底面や側面にした場合に水分浸透性状が異なることが報告されており⁵⁻⁴⁾，試料の違いを比較するうえで浸水させる向きを統一する必要があると考えたためである．

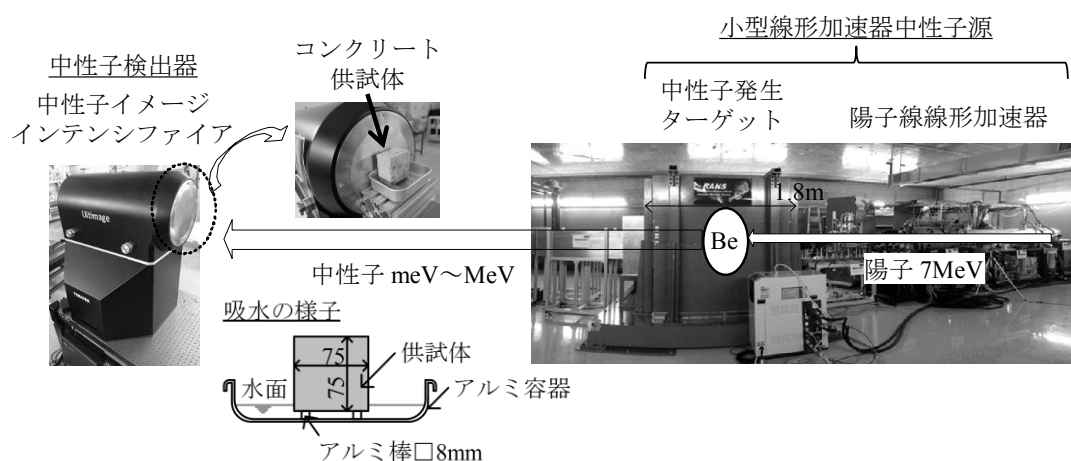


図 5-1 水分浸透試験と中性子イメージングのセットアップ

水分浸透過程の中性子イメージングは，試料を容器から取り出して計量後，検出器前に設置して中性子を 3 分間照射することで行った．終了後は再び水を張

った容器に試料を戻して水分浸透試験を再開した。ブランキング機能は使用しなかった。中性子透過像から吸水前後の画像間の差分として導出した、浸透する水の透過像 ΔT の結果を図 5-2 に示す。 ΔT のグレースケール階調表示のレンジは全試料で統一表示している。画素結合により解像度（1 画素あたりの寸法）は $1.8 \times 1.8 \text{ mm}$ となっている。

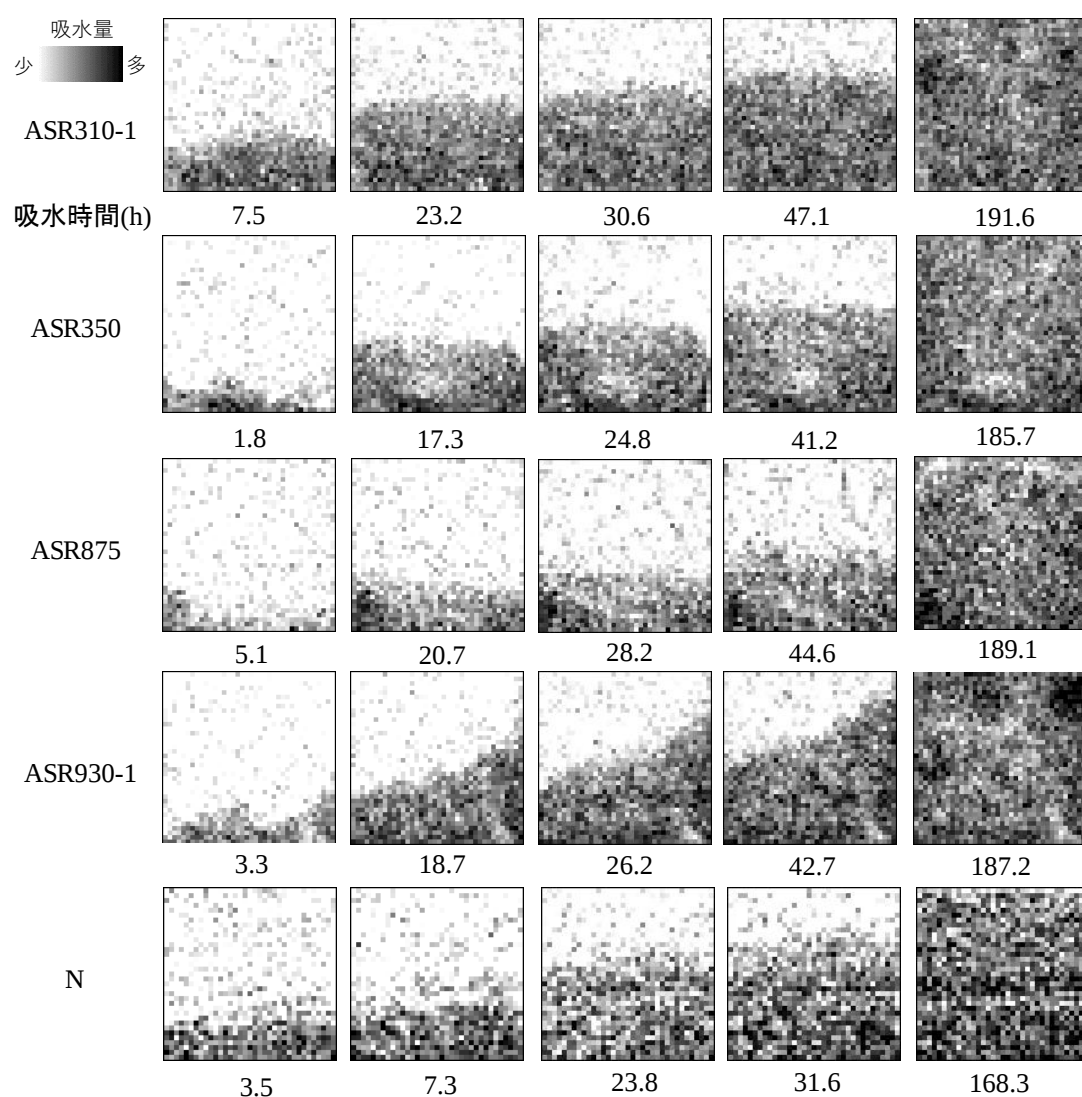


図 5-2 各種コンクリート試料に浸透する水の透過像 ΔT

図 5-2 の影に該当する部分が浸透した水であり、影の濃さが増すほど存在する水の量が多いことを示している。透過率の低い画素が離散的に分布しているが、

これは中性子の統計誤差によって 2 画像を除算した場合に水の有無に関わらずバラつきとして生じたものである。これより，吸水時間の経過につれて水の浸透範囲が広がる様子を図 5-2 から確認することができる。

水分浸透試験を実施して 6 日以上経過した場合には，すべての試料で試料全体に水分が浸透していることがわかる。ASR350 では粗骨材（石）の分布影響と思われる水の浸透が進んでいない部分が底面近くの中心部に一部見られる。また，ASR930-1 においては，水分浸透面が浸漬面（底面）にほぼ平行に上昇している他の試料に比べ，不均一な水の分布を以って浸透が進んでいく様子が確認できる。

浸透する水の透過像 ΔT の定量性を確認するために，コンクリート全体にわたる ΔT の総和 W_{image} と，電子天秤で測定した吸水量との関係性を評価した。その結果を図 5-3 に示す。なお，0.1 g 精度で計量可能な電子天秤を使用している。これより ASR シリーズおよび試料 N に関して画像が示す吸水量 W_{image} と秤量値の一定の線形関係を確認することができる。したがって，この関係を用いることで画像の示す値を吸水量に変換することができ，吸水量分布の出力が可能となる。

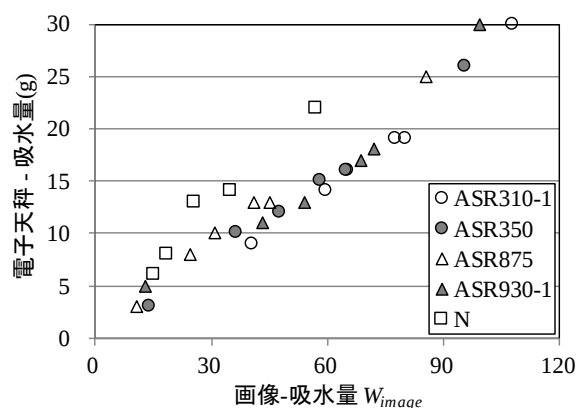
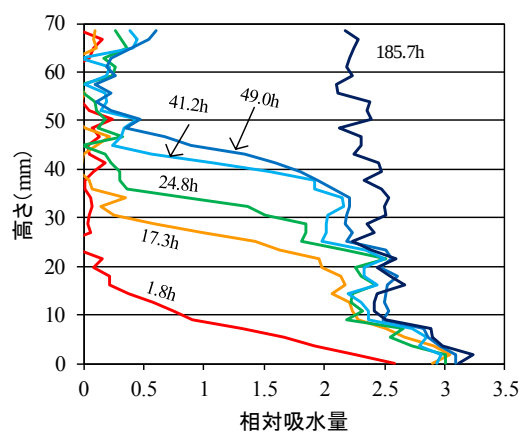
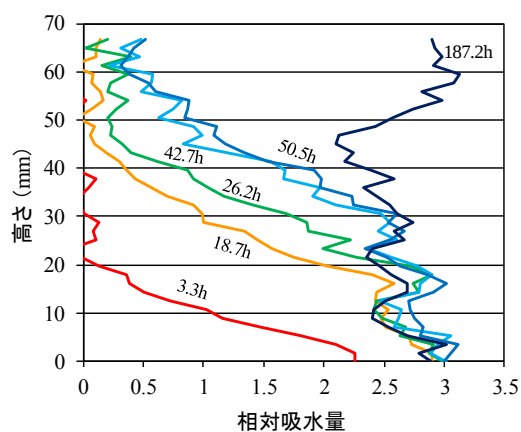


図 5-3 画像が示す浸透水分と吸水量（秤量値）の関係

ΔT の値を水平方向に積算した相対吸水量を横軸として，1 画素の高さ 1.8 mm 毎に値をプロットした高さ方向に対する相対吸水量の分布（水の浸透度合）を評価した。ASR350，930-1 に関する水の浸透度合の経時変化を図 5-4 に示す。



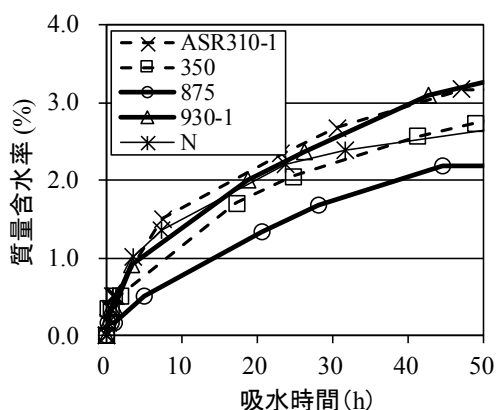
(a) ASR350



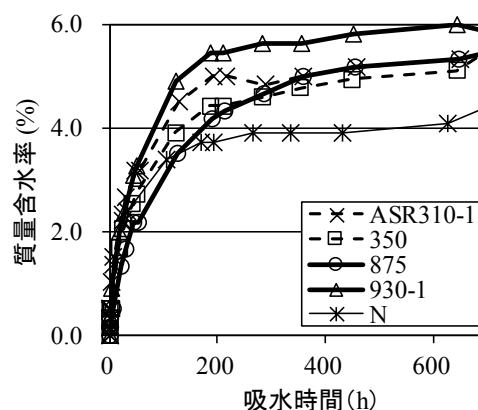
(b) ASR930-1

図 5-4 高さ方向に対する相対吸水量分布（水の浸透度合）

縦軸はコンクリートの高さ、横軸は水平方向にわたる吸水量の総和を示しており、縦軸と横軸の積が浸透した水の量に相当する。いずれも高さ 20 mm 以下の部分では約 25 時間経過すると水の浸透度合は 8 日間浸透した場合と同等であり既に飽和している様子が見られる。また、ASR930-1 は ASR350 と比べて浸漬面（高さ 0）に対する高さ方向の吸水量分布の傾きが急になっており、図 5-2 の水の透過像 ΔT で見られる不均一な浸透性状が定量的に可視化されたものと考えられる。上記の水分浸透過程について電子天秤での測定した吸水量から乾燥状態における試料の重量で除した質量含水率の経時変化を図 5-5 に示す。



(a) 試験開始～50 時間後



(b) 試験開始～700 時間後

図 5-5 水分浸透試験における質量含水率の経時変化

吸水を開始してから 50 時間経過時には質量含水率の変化量は ASR 930 > 310 > 350 > N > 875 の順となり膨張量が 900 μ 程度を示す供試体 ASR875 と 930 では、含水率変化が最小と最大を示す両極端な結果となった。ASR875 は他の供試体に比べて吸水量が少なく、図 5-2 で示される浸透性状において浸透範囲が狭い結果となっている。

700 時間経過時に測定した質量含水率は ASR930 > 875 > 310 > 350 > N の順であった。予想通り健全な試料 N は最も質量含水率の低い結果となった。ASR875 は 50 時間以降、他の 4 種に比べて大きな質量含水率変化を示し 700 時間経過後には供試体 ASR930 に次ぐ質量含水率に至った。ASR930 が吸水開始時からの質量含水率変化が最大であることや不均一な浸透性状を示すことは劣化程度や配合、使用材料といったパラメータの違いがマクロな水の動きとなって現れていることが考えられ、膨張量が同等であっても水の浸透性状が異なる可能性が示された。5 種の供試体の結果から、膨張ひずみが 900 μ 程度になると、内部に発生したミクロなひび割れが空隙構造を変化させることにより、質量含水率の経時変化や浸透する水の分布に差異が現れたものと推察される。

5.1.2 隣接する試験片の比較

アルカリシリカ反応によって生じる膨張量が 310 μ の ASR310、930 μ の ASR930 について 75×75×400 mm のブロックから厚さ 50 mm の試料 (75×75×50 mm) をそれぞれ 2 体ずつ取出して水分浸透性状を比較した。隣接する試験片に対する水分浸透性状の比較として浸透する水の透過像 ΔT を図 5-5、秤量値より算出した質量含水率の推移について健全な試料 N も含めて図 5-6 に示す。

図 5-5 より、隣接する試験片でも水分浸透性状に差があり、水分浸透速度や水分分布が異なる様子が観察される。また、図 5-6 から、ASR 劣化した試料では、水分浸透試験の開始時から隣接する試験片との間には含水率に大きな差が生じており吸水時間 100 時間以内にてその差が著しく、中性子イメージングの結果と同様に測定場所によって異なる傾向があることがわかる。

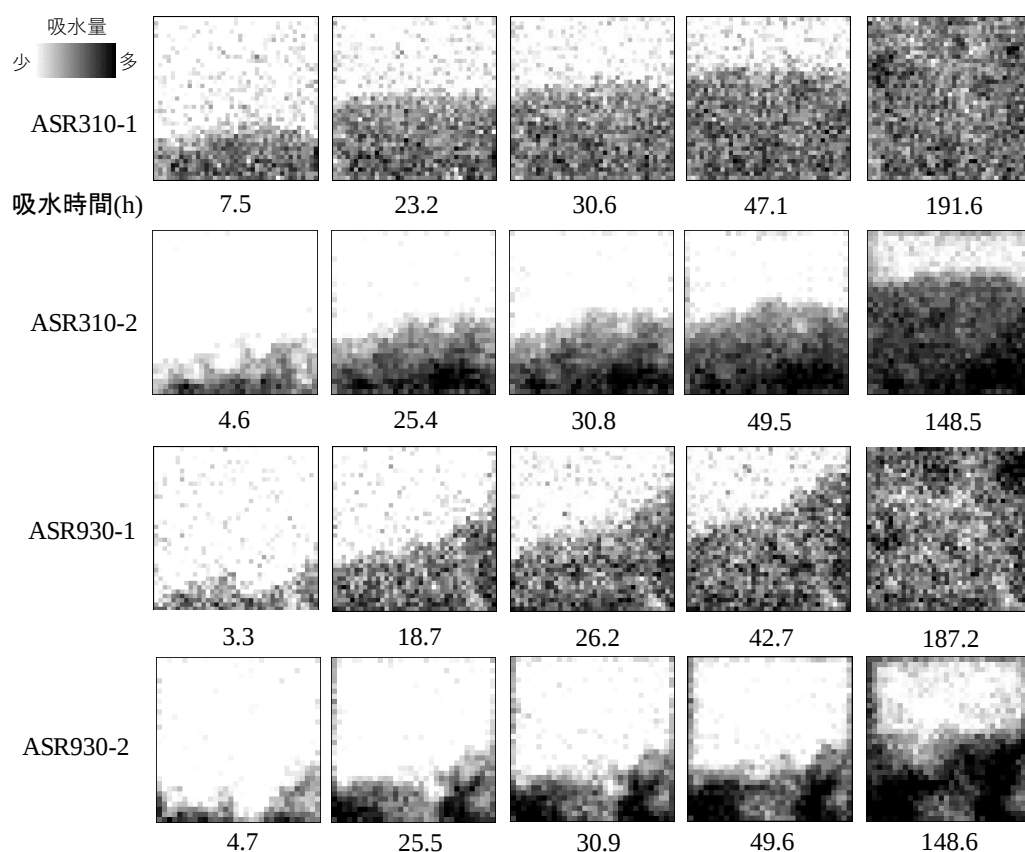


図 5-5 隣接する試験片に対する水分浸透性状の比較

ブランキング動作なし : ASR310-1, 930-1

ブランキング動作あり : ASR310-2, 930-2

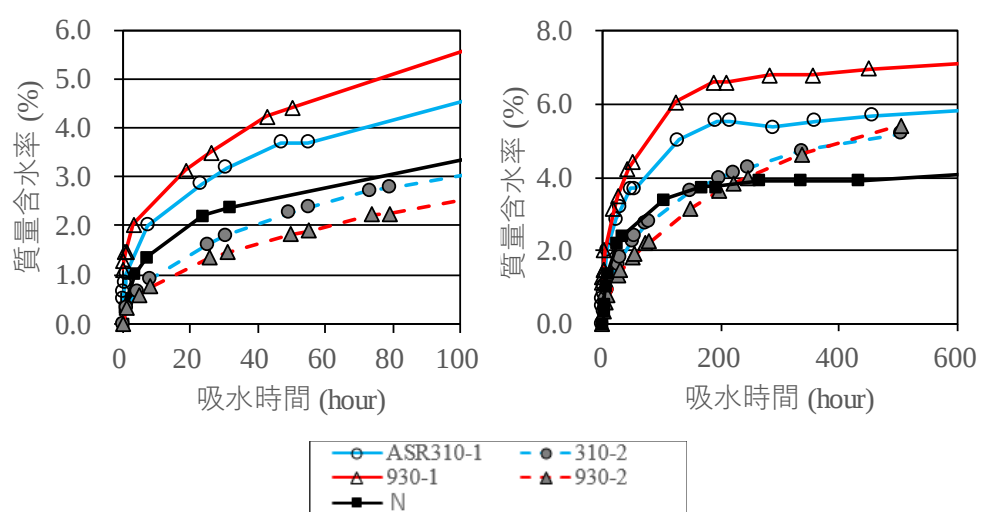


図 5-6 質量含水率の推移に関する隣接試験片の比較

左 : 吸水時間 0~100 時間, 右 : 0~600 時間

また、吸水 100 時間以内は低含水率で推移する ASR310-2, 930-2 では 100 時間以降も水分浸透が継続して進み、含水率が飽和傾向にある ASR310-1, 930-1 との差が徐々に縮小していることがわかる。一方、健全な試料 N は吸水 200 時間以降の質量変化は見られない。

なお、中性子イメージングによる隣接する試験片の評価において ASR310-2, 930-2 については中性子 I.I. が持つブランキング機能（検出開始時間 t_b : 0.2ms, 検出時間 t_o : 7.8ms）を利用し、中性子線に混入する γ 線の低減を行った。そのため、同じ配合の試料 310-1, 930-1 に比べて水の透過像における明暗の差（コントラスト）が異なる。前章にて述べたとおり画像が示す吸水量と実際の吸水量（秤量値）の関係は配合が等しい場合、一様となるがブランキング機能によって水分の検出感度が向上した結果、陰影が強くなったものと考えられる。

透過像 ΔT が示す吸水量と秤量した吸水量の関係を図 5-7 に示す。ブランキング動作の有無で比較すると、ブランキング機能を利用した ASR310-2, 930-2 は少ない吸水量をより大きな W_{image} で示しており、 γ 線の低減によって水に対する中性子透過率の差（コントラスト）が拡大している。

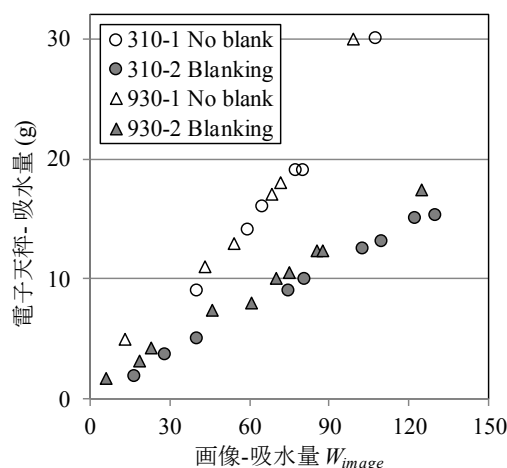


図 5-7 ブランキング機能の有無による吸水量と秤量値の関係比較

それゆえ図 5-5 で示した浸透した水の透過像 ΔT について ASR310-2, 930-2 では離散的に分布する統計誤差の影響が低下している。水分に対する検出感度が

低い（透過率の差が小さい）透過像に対して検出感度の向上（透過率の差を拡大する）に寄与するブランキング機能は、透過像における浸透水分の視認性を向上させる有効な手段である。

5.1.3 水分浸透性状の再現性

劣化を有するコンクリートについて、水分浸透の再現性を評価した。1回目の水分浸透試験終了後、温度 50℃の電気炉で試料 ASR310-1 および ASR930-1 を再び乾燥して1回目と同じ乾燥状態とし、2回目の水分浸透試験を実施した。図 5-8 に2回の水分浸透試験における質量含水率の推移を示す。

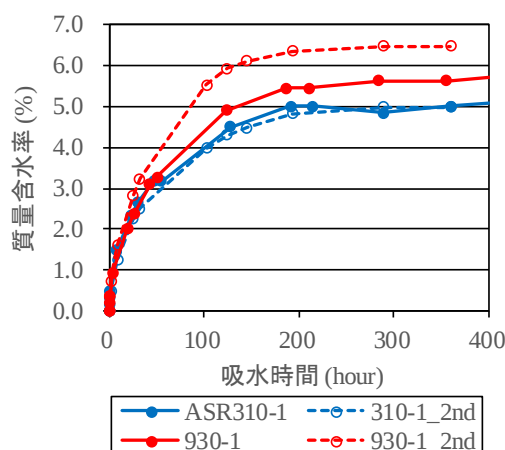
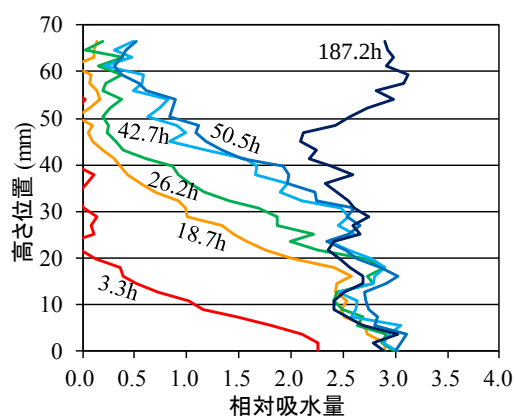
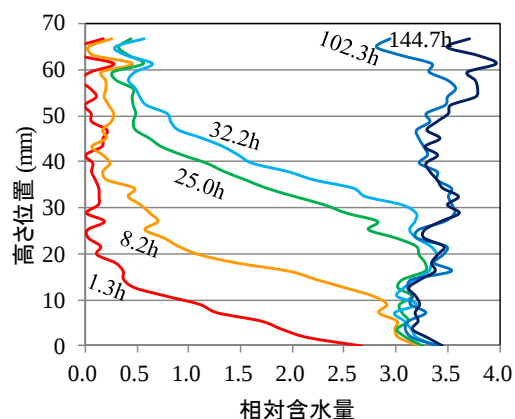


図 5-8 2 回の水分浸透試験における質量含水率の推移

ASR310-1 においては質量含水率の推移に大きな違いは確認されなかったが、ASR930-1 では2回目の質量含水率の割合が増加した。増加した質量含水率の差は約 1.0 %であり、ASR930-1 に関して水分浸透の再現性が得られないことが確認された。この結果を受けて ASR930-1 について 1～2 回目の水分浸透試験にて中性子イメージングによって取得した吸水量分布の推移を図 5-9 に出力し、比較を行った。縦軸はコンクリートの底面からの高さ位置を示し、横軸は高さ位置での吸水量を示している。いずれの場合も底部から高さ 20 mm 以下の部分は吸水時間 25 時間後には吸水量が飽和した状態になっているものの、1 回目より 2 回



(a) 水分浸透試験 1 回目



(b) 水分浸透試験 2 回目

図 5-9 2 回行われた水分浸透試験における高さ方向に対する吸水量分布の推移

目の方の吸水量が多い。試験 1 回目における吸水時間 42.7 時間での吸水量分布は試験 2 回目の 25 時間経過時の吸水量分布に近い状態であり、2 回目の試験の方が水分浸透の進展が速くなっている。また、高さ方向に対する吸水量分布の形状も変化している。1 回目の試験を終えて乾燥させ、同条件で 2 回目の試験を行った結果、水分を蓄える能力が 2 回目の試験において向上している。これは、水分が浸透する箇所が 1 度目から変化することによると考えられ、ASR により 900 μ 程度膨張したコンクリートでは、湿潤と乾燥を繰り返すことで水分が浸透しやすくなる可能性があることを示唆している。また、ASR310 と ASR930 の水分浸透の傾向が異なっていたことから、膨張ひずみやひび割れの進展長さを測定する従来法に加え、水分浸透試験を繰り返す方法でも ASR による劣化程度を推定できる可能性がある。

本結果はコンクリートの水分浸透性状の再現性を検討した新しい知見である。今後、中性子イメージングにより浸透した水分分布を確認する必要があるが、本研究から ASR による劣化程度の違いは水分浸透の再現性及び隣接する部分の水分浸透性状（前項）を変化させることが明らかとなった。これは、コンクリートの劣化程度を評価するだけでなく、劣化メカニズムを追究する上でも、小型中性子源による中性子イメージングの利用価値が高いことを示している。

5.2 配合の異なるコンクリートの評価

コンクリートに対する水のふるまいは打設・養生時から構造物供用後にわたってコンクリートの品質や耐久性に大きく関わる要因である。構造物の維持管理においてはコンクリートの水分浸透に着目した鋼材腐食に対する照査が土木学会コンクリート示方書〔設計編〕に導入された。そこでは、水分浸透過程のコンクリートを割裂し、割裂面の濡れを目視で確認する浸透深さから算出される水分浸透速度係数（浸透深さの進行速度）が、コンクリート構造物のかぶり厚さ（表面から内部鉄筋までをカバーするコンクリートの厚さ）の設計パラメータとして採用されている。

しかし、コンクリート内部の水分移動はコンクリート材料や配合、材齢、養生および環境条件等の相違に左右されると考えられ、水分浸透速度係数はその詳細を説明できる十分な実験データの上に成り立ったものではなく、より一層のデータ蓄積が必要であることが土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書改訂資料⁵⁻⁵⁾に示されている。これはコンクリート中の水分移動の重要性は従来から認識されていたものの、水分が時間とともに移動する連続的なデータを取得する方法がなかったことに因る。

したがって、今後、多種多様なコンクリートの水分移動に関するデータベースを構築することにより、水分浸透速度係数をコンクリートの品質や耐久性を特徴付ける根拠あるパラメータとして進化させることが極めて重要であり、そのための簡易かつ精緻な手法の開発が求められている。そこで、配合の異なるコンクリートの水分浸透性状を比較する手法として小型加速器中性子源を室内分析装置として利用し、コンクリートにおける水分の浸透速度を表す新たなパラメータを検討する。

5.2.1 水セメント比と単位セメント量の異なるコンクリートの評価

本評価では、コンクリートの水分浸透性状への影響が想定される配合要因として、水セメント比と単位セメント量を変化させたコンクリートを取り扱う。

単位セメント量と単位水量の比である水セメント比はコンクリートの圧縮強度と強い相関のある因子であり、水セメント比の低下に比例してコンクリートの圧縮強度は増加する。コンクリート構造物は、基本的には外力に対して抵抗できる耐荷力を有するように設計されるため、コンクリートにとって圧縮強度は最も重要な物性値の一つである。また、耐久性の面においても、できる限り水の量を少なくすることが肝要であり、コンクリートの配合設計において水セメント比の選定は重要である。水セメント比の違いによってコンクリート内部の空隙構造が変化し、浸透速度に差が生じることが予想されることから、水セメント比を配合要因の一つとする。

コンクリート作製時に練り混ぜた水は水和（硬化）反応を生じる際にセメント粒子と結合する結合水と、それ以外の水分である自由水に大別され、自由水は乾燥が進むと蒸発して空隙となることから、水セメント比が高い場合にポーラスな空隙構造を形成し空隙を通じて水分浸透が進むことが考えられる。一般には、セメント量の約 30 %の水が硬化する際の水和反応に使用されると言われ、残りの水分（余剰水）は空隙の多少に影響する。したがって、余剰水の量を左右する単位セメント量も配合の要因とする。

コンクリート試料の配合を表 5-2 に示す。水セメント比 50 %の配合（試料名：50-1, 2）を基準として、単位水量 W を一定として水セメント比が 40 %および 60 %とした場合 2 種類（試料名：40c-1, 2, 60c-1, 2）と、単位セメント量を一定として水セメント比を 40 %および 60 %に変化させた場合 2 種類（試料名：40-1, 2, 60-1, 2）の計 5 種類の試料を用意した。セメントには普通ポルトランドセメントを使用してスランプは $12 \pm 2.5 \text{ cm}$ 、空気量 $4.5 \pm 1.5 \%$ となるよう混和剤（AE 剤）で調整を行った。骨材の最大寸法は 20 mm である。

表 5-2 水セメント比と単位セメント量の異なるコンクリート配合表

名称	W/C (%)	s/a (%)	G _{max} (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	単位量(kg/m ³)					
							W	C	S1	S2	G	AE
40c-1,2	40	43.9	20	10.0	3.8	73.6	132	330	577	252	1057	8.25
40-1,2	40	41.9		14.5	5.3	62.5	165	413	506	220	1005	3.10
50-1,2	50	43.9		10.0	4.5	47.6	165	330	551	239	1010	3.63
60-1,2	60	45.4		10.0	5.5	35.1	165	275	585	254	1007	3.03
60c-1,2	60	53		13.5	5.4	36.7	198	330	632	276	805	-

W/C：水セメント比

s/a：細骨材率

G_{max}：粗骨材の最大寸法

W：単位水量

C：単位セメント量（普通ポルトランドセメントを使用）

S1, S2：単位細骨材量（S1：川砂，S2：砕砂を使用）

G：単位粗骨材量（G：砕石を使用）

AE：空気連行剤（独立気泡を作り，流動性を与える界面活性剤の一種）

高性能 AE 減水剤（W/C：40 % の場合）

高機能 AE 減水剤（W/C：50，60 % の場合）

試料の採取方法を図 5-10 に示す．まず，角柱状コンクリートブロック（100×100×400 mm）を打設し，打設翌日に脱型後，28 日間水中養生を行った．その後，軸方向の周囲 4 面を 1 cm 程度切り落とし，さらにその中央付近から軸直角方向に幅 50 mm を切り出して，実験用試料を作製し，乾燥開始まで約 110 日間水中，その後 40 日間乾燥環境下で保管した．試料寸法は 70×70×50 mm であり，1 体のコンクリートブロックから 2 つの試料を採取し，名称に 1, 2 を付けて表した．水分浸透試験は打設面を上面，その反対面を浸透面として実施する．

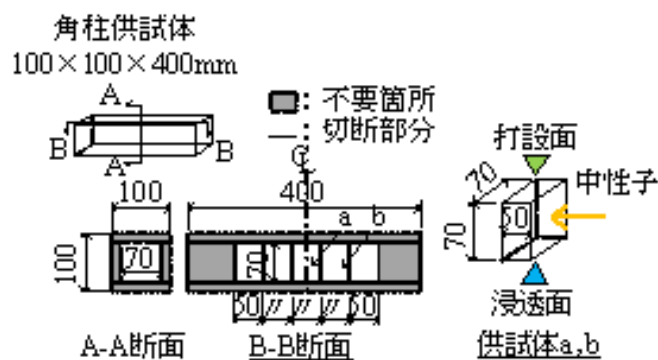


図 5-10 コンクリート試料の採取方法

水分浸透の評価にあたって 40 °C の電気炉に 40 日間保管し 24 時間以内の質

量変化が0.1%以下となった乾燥状態を初期状態として水分浸透試験を開始した。試験は5-1節と同様に試料底面を浸水させて2 mm 程度の高さまで水を張り、8日間継続して水分浸透の観察を行った。

5.2.2 配合が水分検出感度に与える影響

得られた中性子透過像に対して4.2節で示した画像処理法を行い、浸透する水の透過像 ΔT の画像出力を行った。解像度は 50×50 画素を1画素に結合して透過率の標準偏差が1%以下となる 2.25×2.25 mmとした。まず、画像が示す浸透水分と吸水量（秤量値）の関係を出力し、各配合における浸透する水の透過像 ΔT の定量性を図5-11にて確認した。透過像が示す吸水量と秤量値の一致な線形関係が示されており、また線形関係が示す傾きが試料40、試料40c、50、60c、試料60の3種類に分かれており、単位セメント量の違いにより分類可能なことがわかる。

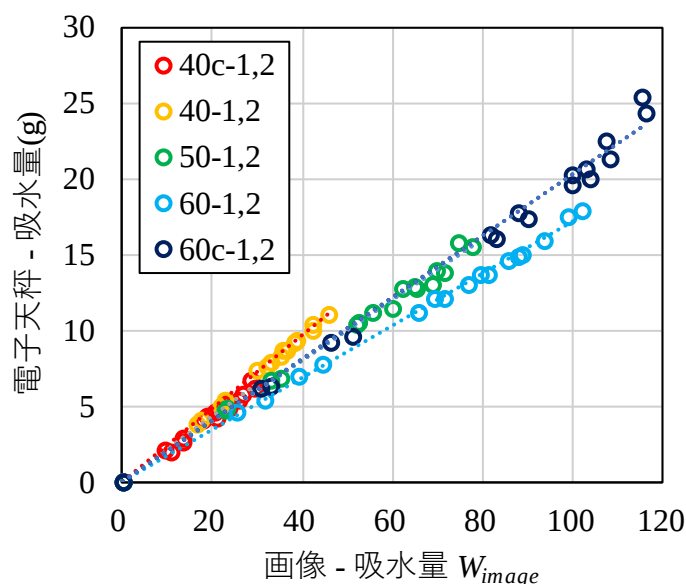


図 5-11 水セメント比と単位セメント量の異なるコンクリートにおける水の透過像が示す吸水量 W_{image} と吸水量（秤量値）の関係

図 5-7 においても触れたように、この関係が示す勾配は緩やかなほど吸水量の

変化をより大きな W_{image} の違いで捉えられることを示しており、水分の検出感度が高いことを表している。また、3.4.2 節においては、水と透過率が同等であるアクリルについて厚さが増加した際に単位厚さ当りの透過率の差が減少し、検出感度が低下することに言及した。ここでは、単位セメント量の違いにより W_{image} と吸水量（秤量値）の関係の勾配が変化したことから、乾燥状態のコンクリート中の水分量が異なっていることがわかる。つまり、最も勾配の小さい試料 60 は、乾燥状態でコンクリートが保有する水分量が他の試料より多く、浸透水分に対する透過率差が減少したと考えられる。

一方、試料の厚さが異なる場合も同様に W_{image} と吸水量（秤量値）の関係の勾配が変化する。本検討では全ての試料の厚さは統一されているが、同じ配合の試料でも、中性子線の透過方向に対する厚さが増すほど、浸透水分に対する透過率差が小さくなるため、透過率差によって評価可能なコンクリートの厚さが決定されることとなる。

以上より、小型加速器中性子源による中性子イメージングは、50 mm 厚さのコンクリートの水分浸透を十分な検出感度で定量評価できることが示された。本評価では供試体の厚さは全て 50 mm であり、さらにコンクリートの乾燥時における水分量に影響する材齢と養生条件も等しいことから、検出感度の違いは乾燥状態の試料に残存している水分量によるものと予想される。

そこで乾燥時に残存する結合水量の多少と相関があると推測される単位セメント量が W_{image} と秤量値の関係における傾き（水分検出感度）に及ぼす影響を図 5-12 にて評価した。その結果、単位セメント量が少ないほど傾きは小さくなり、より高い水分検出感度を有していることが確認された。上記の内容から、この関係を以って乾燥時の試料における水分量を相対的に比較できる可能性があることがわかった。

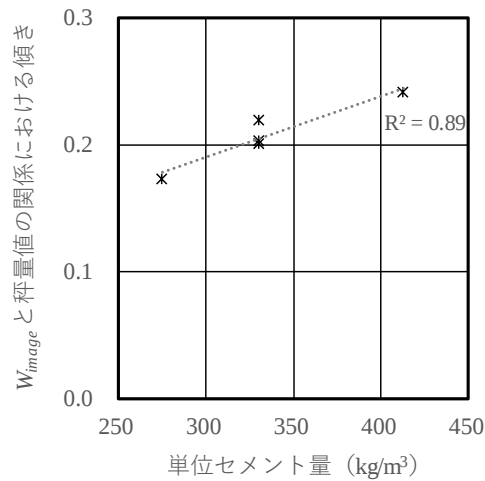


図 5-12 単位セメント量が W_{image} と秤量値の関係における傾き（水分検出感度）に及ぼす影響

5.2.3 水セメント比および単位セメント量の異なるコンクリートにおける水分浸透性状

透過像が示すコンクリート中の吸水量 W_{image} と秤量値の関係（図 5-11）から、最小二乗法による線形近似を各配合に対して行い、浸透する水の透過像 ΔT について各画素の値を吸水量に換算した。浸透する水の透過像 ΔT から定量化した吸水量分布を図 5-13 に示す。1 画素あたり $2.25 \times 2.25 \times$ 厚さ 50 mm, 最大含水量 62.5 mg であることから、0～62.5 mg の水量がグレースケールで階調表示されている。影部分が浸透した水、影の濃さが透過方向に分布する水量に対応する。底面を浸水させた試料が上向きに吸水を開始し、時間の経過とともに水の浸透範囲が広がる様子を確認することができる。

この水の動きと含水率の推移の対応を比較するため、図 5-14 に水分浸透試験における質量含水率の推移を示す。質量含水率は、吸水量を乾燥状態における試料の質量で除した値である。吸水時間に拘わらず、 $60c > 60 > 50 > 40 > 40c$ の順で質量含水率は小さくなり、水セメント比の低下に伴って水分の浸透が抑制されていることがうかがえる。図 5-13 の吸水量分布に着目すると、水セメント比が等しい場合でも、試料 60 および 60c（水セメント比 60 %）と 40 および 40c

(水セメント比 40 %) の間において浸透範囲 (水位) や浸透量 (影の濃さ) が異なっており, それぞれセメント量の多い試料 40 と 60c の方が, 浸透速度が速くなる傾向が見られ, 図 5-14 の質量含水率の経時変化と合致する. また, 試料 40 および 40c においては試料側面付近に比べて中心近くの含水量が少なく (影が薄く), 凹型の水位になっていた.

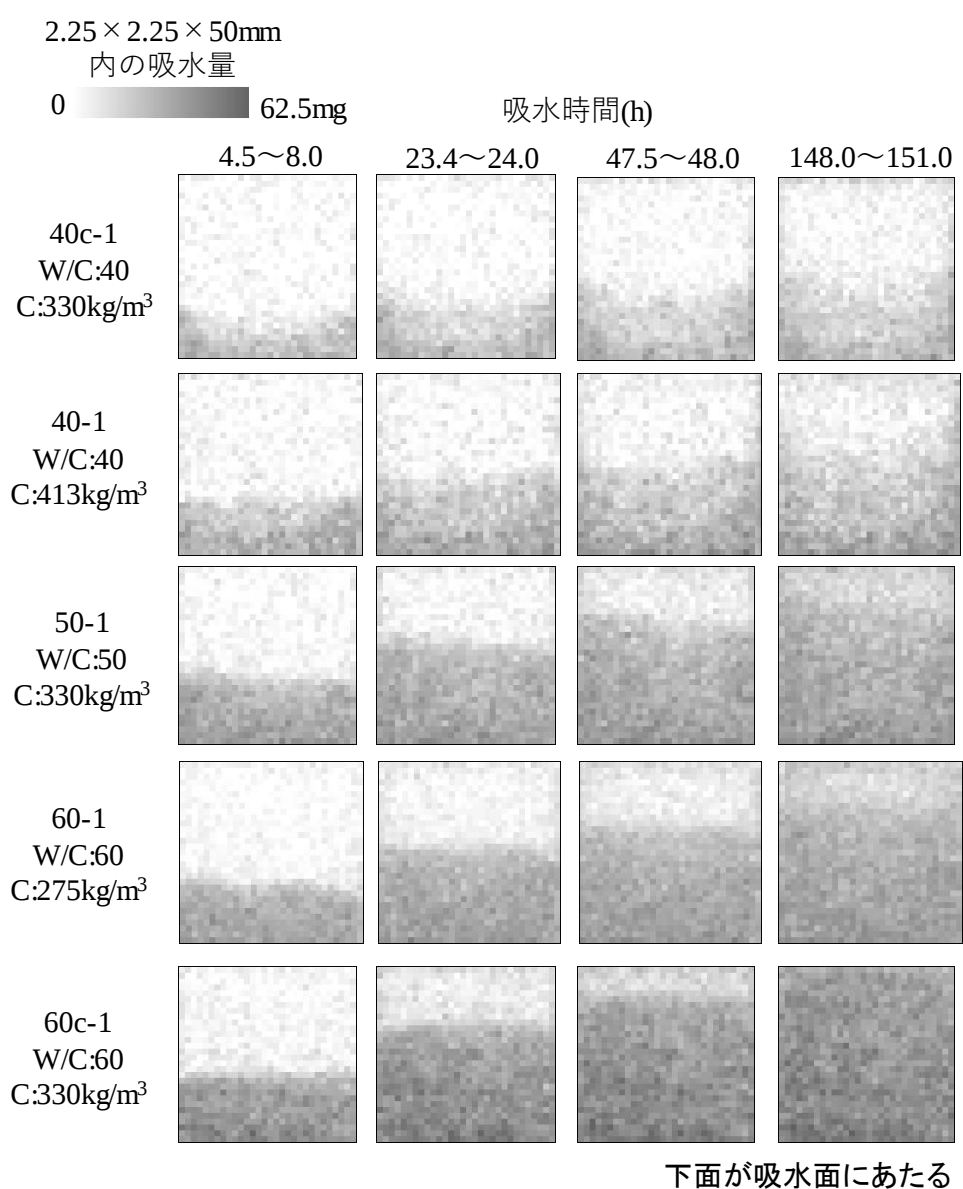


図 5-13 (a) 水分浸透試験における吸水量分布を可視化した水の透過像 ΔT

試料番号 : 40c-1, 40-1, 50-1, 60-1, 60c-1

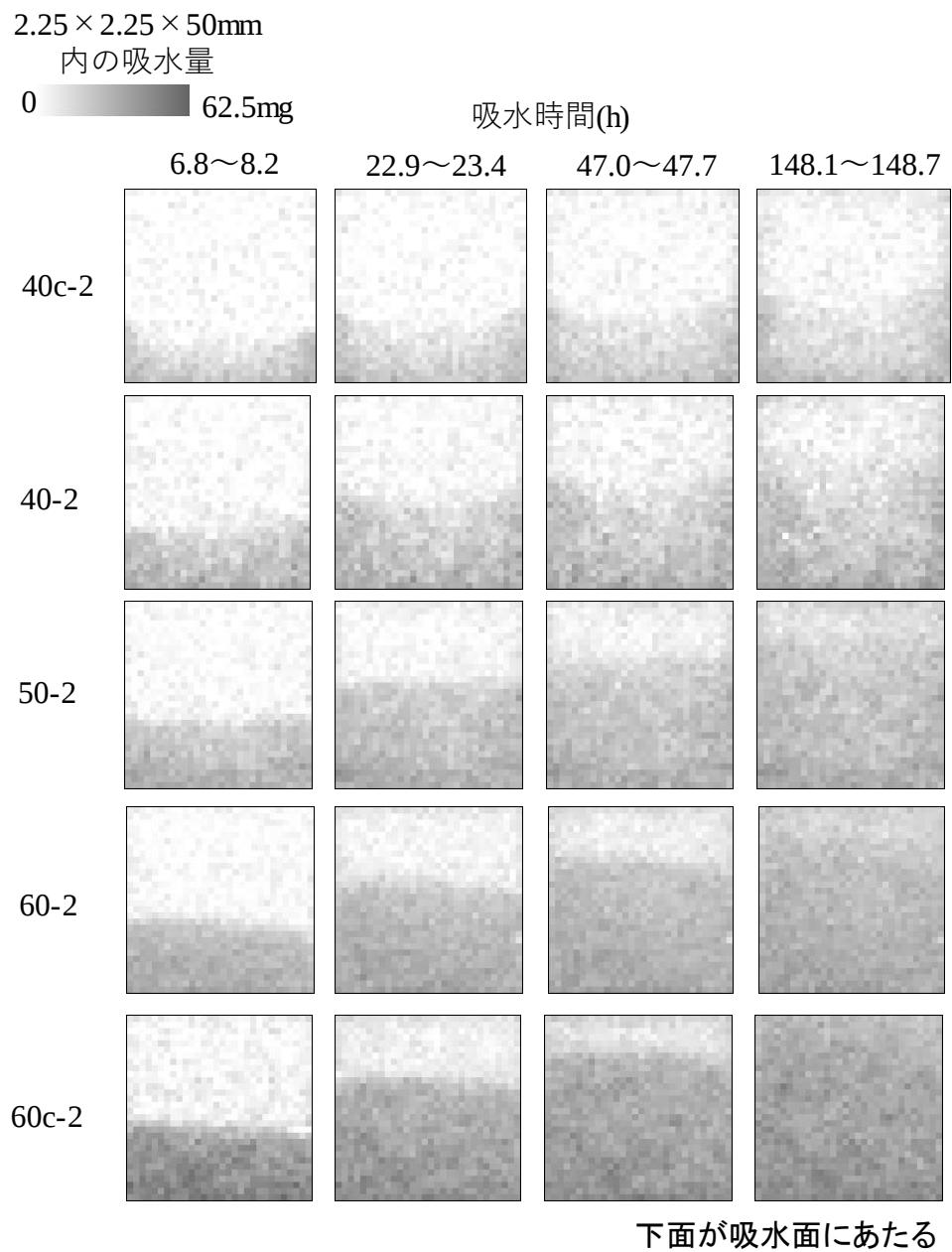


図 5-13 (b) 水分浸透試験における吸水量分布を可視化した水の透過像 ΔT
試料番号 : 40c-2, 40-2, 50-2, 60-2, 60c-2

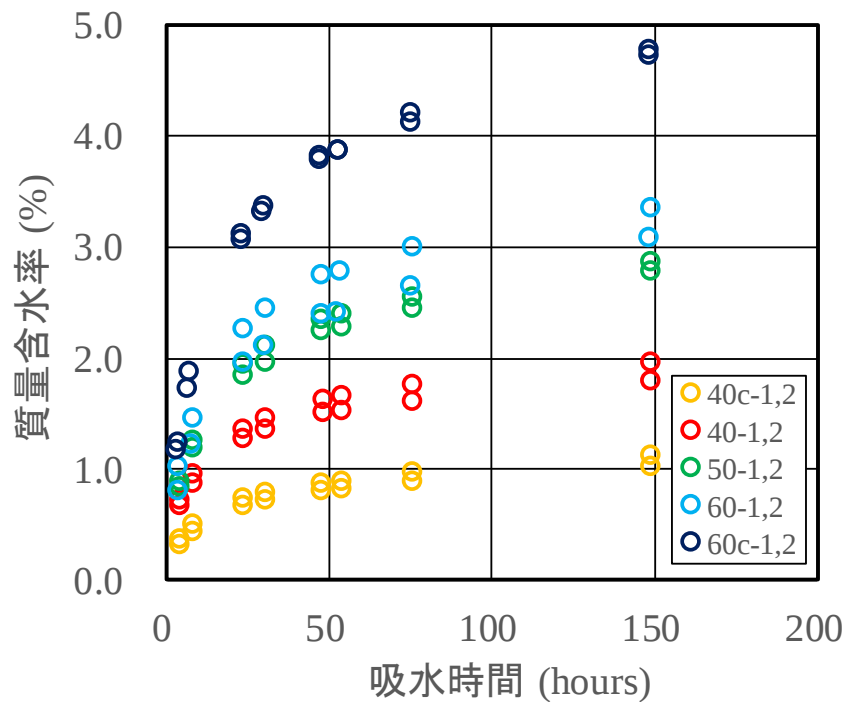


図 5-14 質量含水率の推移

そこで試料全幅を解像度と同じ 2.25 mm 間隔で分割し、分割された領域（幅 2.25 mm×高さ 70 mm×厚さ 50mm）内の吸水量を試料ごとに比較した．図 5-15 に吸水 3～4 時間後と 148～151 時間後の吸水量分布を示す．横軸である試料水平位置における吸水量を鉛直方向に足し合わせたものを縦軸としてプロットしている．

図 5-15a より吸水 3～4 時間後においては吸水量の多い試料 60c-1 を除いて、幅中央付近（位置 20～50 mm）の吸水量が側面近く（位置 0～20, 50～70 mm）に比べて少なく、内部への水分浸透が進みにくい傾向にあることが確認できる．また、図 5-15b より吸水 148～151 時間後には水セメント比 50 %以上の試料（60c-1, 60-1, 50-1）では水平方向にわたる吸水量がほぼ均一な分布を示しているのに対し、水セメント比の低い試料 40-1, 40c-1 では中央（位置 20～50 mm）付近と側面近く（位置 0～20, 50～70 mm）の吸水量の差が大きい状態を維持している．この事象の原因として、試験中に表面乾燥の影響を受けている結果、吸水量の少ない試料 40, 40c では乾燥した側面部分への水分浸透が卓越し凹型の分布とな

ったことや、電気炉で乾燥させた後に試験を開始する際、試料内外で含水率のムラが生じ、幅中央と側面付近で浸透速度が異なったことが考えられる。

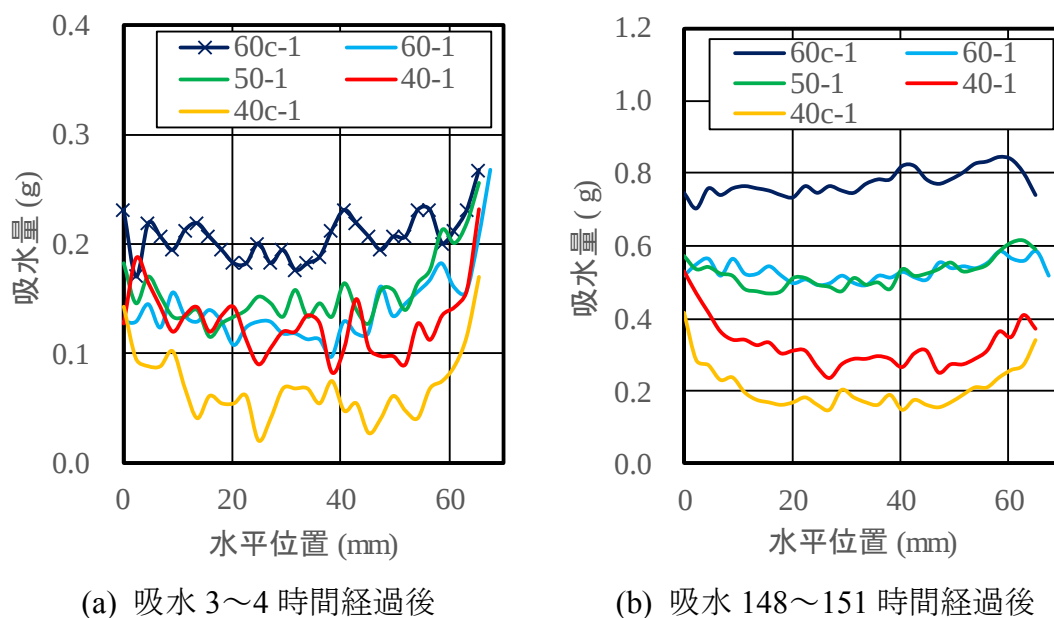
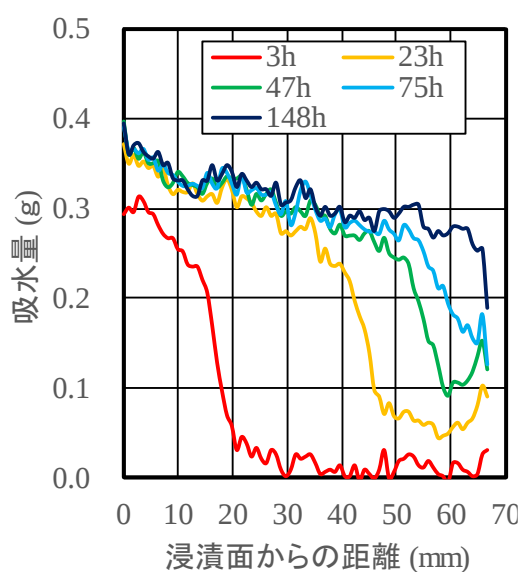


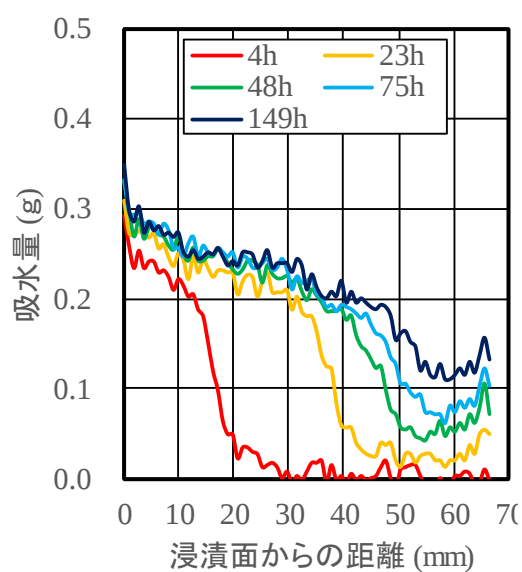
図 5-15 試料水平方向の吸水量分布

次に浸透水位の経時変化について考察を行った。図 5-16 に水分浸透試験において質量含水率が最大・最小を示す試料 60c-1 および 40-1 さらに基準である試料 50-1 について深さ方向の吸水量分布を示す。縦軸は 2.25 mm 間隔で分布する吸水量を深さ方向にプロットした値であり、分割した領域（幅 70 mm×高さ 2.25 mm×厚さ 50 mm）の中に含まれる吸水量を示している。時間が経過しても吸水量が変わらなければ、その部分は水分で飽和された状態と考えられる。すべての試料で試験開始後 23 時間経過時に浸漬面から 15 mm 程度は水分飽和状態となっており、図 5-14 の質量含水率の傾向と同様に、飽和時の吸水量は水セメント比が高いほど増加した。さらに、時間が経過すると試料ごとに特徴的な吸水量分布を示すようになった。すべての試料において、浸漬面から距離が離れるにつれて飽和に至る吸水量が減少しており、とりわけ試料 40-1 は深さ方向の吸水量分布における勾配が大きくなった。これは、水セメント比が低い場合、水分が浸透する一様な空隙組織が形成されにくいことから、深さ方向の水分の進入経路が

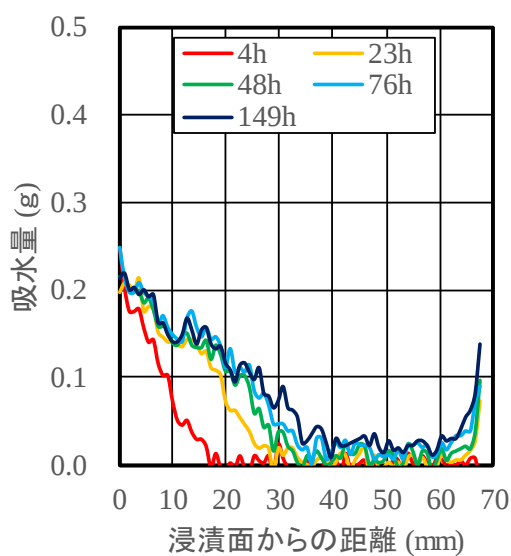
限られている可能性が示唆される。また、各試料について吸水量が急激に低下する、もしくは増加するといった特異的な箇所を示さなかったことから、浸透水位を一意に定義して浸透水位の上昇速度を求めることが困難であった。上記の背景から吸水量分布により浸透流束の導出を行い、コンクリートの水の動きを評価した。



(a) 試料番号：60c-1



(b) 試料番号：50-1



(c) 試料番号：40-1

図 5-16 深さ方向の吸水量分布

5.3 コンクリートへの浸透水分流束評価

深さ方向の吸水量分布（図 5-16a）より試料 60c-1 について深さ d に対する吸水量の累計（ M' とする）を図 5-17 に示す．深さ方向に吸水量を順々に加えて浸漬面から該当する深さまでの累計を出力した．浸漬面から深さ d にわたる範囲に浸透した水分量の飽和度を定量的に把握することができ，23 時間後には深さ 20 mm あたりまで水で飽和されていることを良く理解できる．

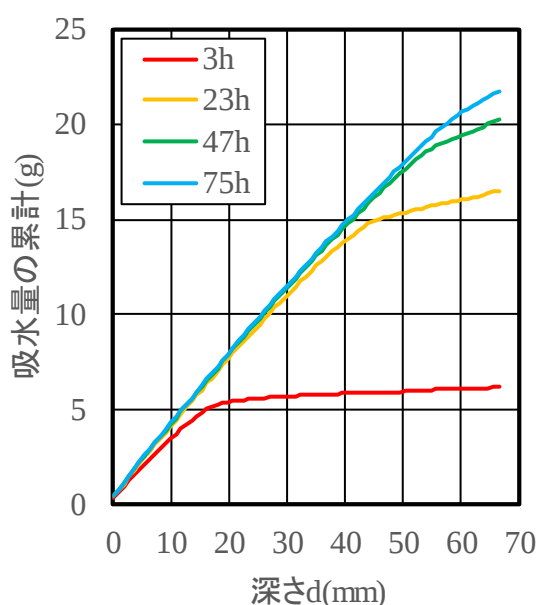


図 5-17 試料 60c-1 における深さ d に対する吸水量の累計

吸水量の累計から水分流束（ $\Phi(d)$ とする）を導出し，本評価における水分浸透を 1 次元の水の流れとして定量化した．ここで深さ d の断面を図 5-18 に示したように単位時間当りに通過する水量を水分流束と定義した．よって，水分流束を断面積で除すと平均流速となる．試験時間 t_n ($n=0\sim 4$) における流束 $\Phi(d)$ は全吸水量 Mt_n と深さ d における吸水量の累計 $M't_n(d)$ を用いて次式で示される．

$$\Phi(d) = \frac{\{M_{t_{n+1}} - M'_{t_{n+1}}(d)\} - \{M_{t_n} - M'_{t_n}(d)\}}{t_{n+1} - t_n} \quad \text{式 (5-1)}$$

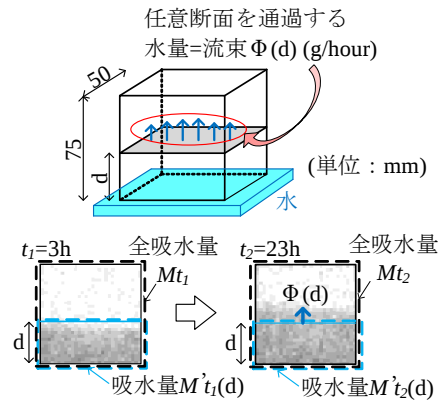


図 5-18 水分流束の定義

試験開始(t_0)から 3, 23, 48, 75 時間 ($t_1 \sim t_4$) 後の吸水量分布を出力し, 試験開始から 3 時間後, 3~23 時間後, 23~48 時間後, 48~75 時間後の水分流束を算出した. 各試料の流束分布を図 5-19 に示す.

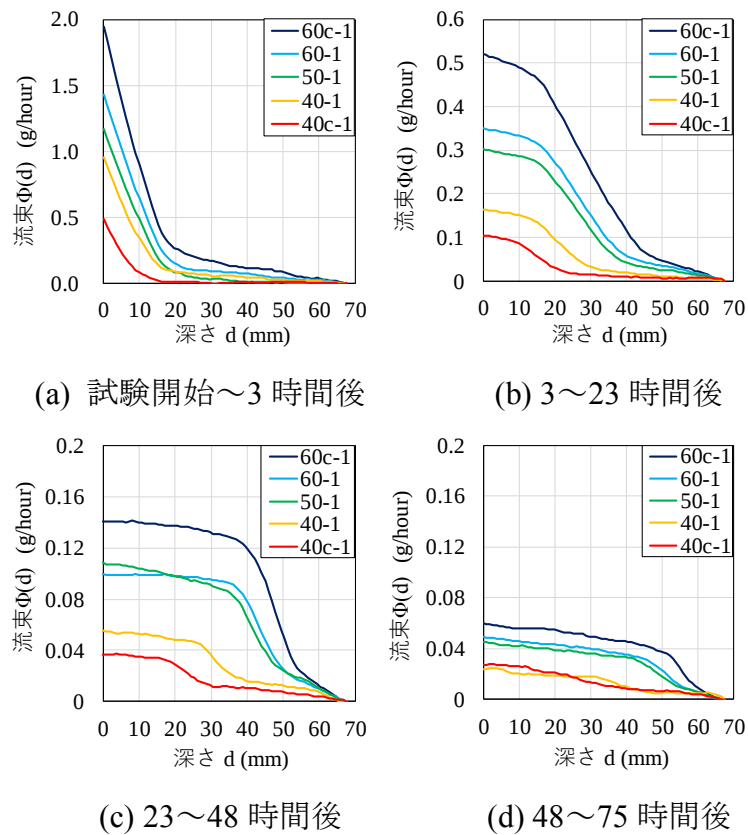


図 5-19 水分浸透試験における流束分布

5.3.1 異なる水セメント比および単位セメント量と水分流束の関係

試験開始～3 時間後は急峻な流束分布を以って試料内部へ水分が浸透し、試験時間が経過するにつれて水分流束が低下している。吸水量の多い浸漬面近くから吸水量の少ない内部へ向かって水分の浸透が進んでおり、早期に吸水量が飽和に至る浸漬面に近い部分は試験開始 3～23 時間後には流束分布が徐々に平坦になることから浸漬面で吸収された水がそのまま速度を保ったまま鉛直方向に吸い上げられている様子が確認された。

次に異なる水セメント比および単位セメント量と流束分布の関係を考察すると、水セメント比が高い場合に流束が大きく、水分が浸透しやすいことが確認できる。また、水セメント比 60%および 40%において単位セメント量(単位水量)が多い場合に流束が増大する傾向にある。同じ水セメント比においても単位セメント量(単位水量)が異なる場合に水分流束は一樣ではない結果が示される理由として「水みち」となるセメントペースト内の空隙が増加し、水分の浸透が促進される可能性が考えられる。今後、水分浸透に対する評価にあたっては支配的な水セメント比のみならず、単位セメント量(単位水量)の多少についても考慮する必要があると考えられる。

5.3.2 吸水速度と流束分布の関係

各配合における浸漬面の流束(吸水速度)に対する試料内部の流束の関係を出力し、浸漬面からの吸水量が上向きの流束に与える影響を評価した。吸水速度 $\Phi(0)$ (単位時間当りの吸水量) に対する深さ d の流束 $\Phi(d)$ の比 $(\Phi(d)/\Phi(0))$ と深さ d の関係を図 5-20 に示す。同じ深さ d で吸水速度に対する流束の比を比較すると、水分浸透抵抗性が高いと予想される水セメント比の低い試料ほど上向き(深さ)方向に浸透する水分流束の比 $\Phi(d)/\Phi(0)$ は浸漬面から試料内部に向かって低下しており、吸水量の割合に対しても深さ方向に浸透が進みにくい傾向が現れている。一般的に水セメント比が低い場合においては空隙径の縮小や空隙量の低下、空隙の不連続性などの影響によって吸水速度(吸水量)が低下することが予想されるが、吸水量の多少に加えて深さ方向に進行する吸水量の割合に

も水分浸透を抑制する性質（抵抗性）が反映されているものと推察される。

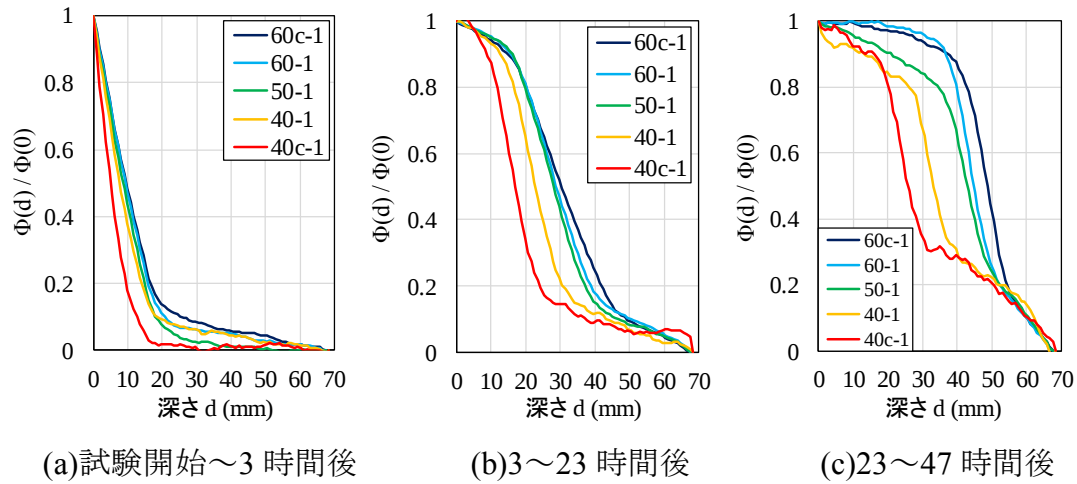


図 5-20 吸水速度（単位時間当りの吸水量）に対する流束の比（ $\Phi(d)/\Phi(0)$ ）

5.3.3 深さ 10, 30, 50 mm を通過する水分量と含水率の関係

前述のとおり，水分流束の時間積分は浸漬面から深さが d 離れた試料内部断面を通過する水量に相当する。そこで，内部を通過する水の移動をコンクリート内部の深さ 10, 30, 50 mm に存在する鉄筋に水が到達し通過する事象と同様と仮定して，鉄筋位置を通過する水量とその位置の含水率を評価した。図 5-21 に試験開始から 75 時間以内の深さ 10, 30, 50mm（鉄筋位置に相当）における含水率と通過する水量の関係を示す。含水率は深さ d の断面における幅 70 mm×深さ 0.9 mm×厚さ 50 mm 内の水量を体積含水率として算出した。

各試料の結果を比較すると 60c, 60, 50, 40, 40c の順に含水率と通過する水量がともに高い値で分布している。図 5-19 の流束分布に示すように深さ 70 mm 程度であれば，いずれの試料でも水分浸透試験開始後まもなく上縁まで水分が供給される。そのため浸漬面と上部の含水率差が縮小することから，浸漬面からの距離が長くなるにつれて徐々に通過する水量の変化が鈍化したものと考えられる。そして，ほとんど水が通過しない深さ 50 mm では通過する水量の変化はあまり明確ではないが，深さ 30 mm までであれば，含水率 6 %あたりから含水率の上昇に伴って通過する水量の増加が著しくなる様子がうかがえる。これは，水分浸

透が進みやすい状況と捉えることもでき、鉄筋腐食を促進する雰囲気を中性子イメージングで定量評価できる可能性を示唆している。

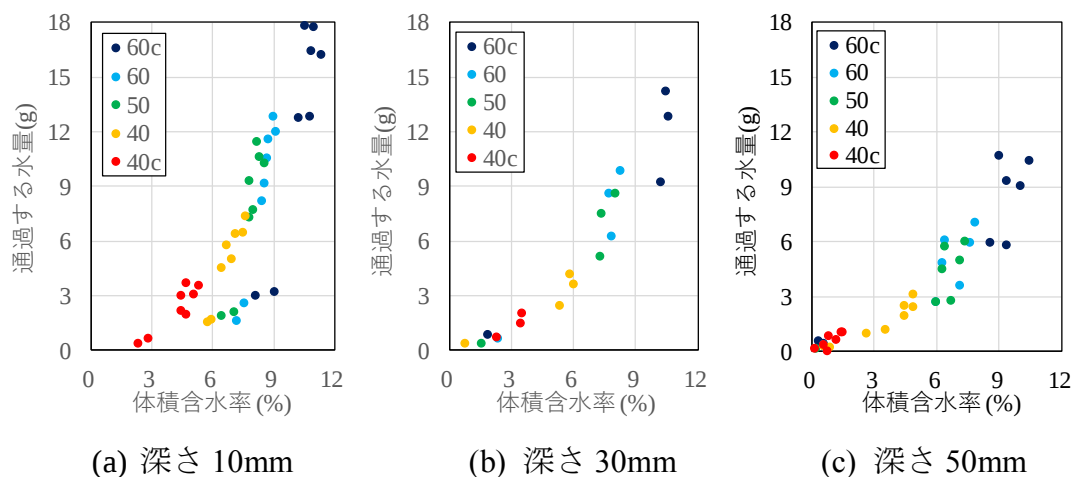


図 5-21 水分浸透試験における体積含水率と

深さ 10, 30, 50mm の内部断面を通過する水量の関係

5.4 まとめ

水セメント比やコンクリート打設時の養生条件がコンクリート（表面から深さ 2cm 程度までの）表層の水分浸透に与える影響や⁵⁻⁴⁾、水とともに浸透する塩化物の移動を評価した結果⁵⁻²⁾が報告されている。いずれもコンクリート試料を割裂して局所的に水の浸透範囲や吸水量を測定した内容であり、劣化を有する試料や同一試料を非破壊手法により継続的に観察することが困難であった。

水や塩分、二酸化炭素の浸透は鉄筋腐食、ひび割れなどのコンクリート構造物の劣化に対して強く影響を与え、水の浸透は劣化の進行に強く関係している⁵⁻⁶⁾ことから水の動きを評価することが劣化の進行をより正確に把握することにつながる。

本章では、劣化程度の診断や劣化の進行のしやすさを評価する可能性を探ることを目的に、RANS を利用して劣化を有するコンクリートや配合の異なるコンクリート試料に対して、水分浸透性状を中性子イメージングによって捉え、定

量評価を実施した。これらの結果は小型加速器中性子源への優れたアクセシビリティによる分析例であり、水の観察を通じて、多種コンクリートの特性に対する更なる理解の発展が期待できる。

参考文献

- 5-1) 野村昌弘, 青山實伸, 平俊勝, 鳥居和之: 北陸地方における道路構造物の ASR による損傷事例とその評価手法, コンクリート工学論文集, Vol. 13, No. 3, pp. 105-114, 2002
- 5-2) 池田伊輝, 町田直輝, 直町聡子, 加藤佳孝: 初期飽和度を変化させたモルタル供試体を用いた塩化物イオン浸透に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No. 1, pp. 837-842, 2016
- 5-3) 石垣邦彦, 胡桃澤清文, 名和豊春: ブリーディングがセメントペースト硬化体の微細構造に及ぼす影響評価, Cement Science and Concrete Technology, Vol. 66, pp. 111-118, 2012
- 5-4) 鈴木浩明, 玉井譲, 上田洋: コンクリート表層における水分浸透深さの時間依存性及び水セメント比と養生の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 751-756, 2013
- 5-5) 土木学会: 2017 年制定コンクリート標準示方書改訂資料 pp.54-66
- 5-6) 岸利治, 上田洋: 水の理解とその制御・活用に向けて, セメント・コンクリート, No. 812, pp. 1-7, 2014.10

第6章 大型中性子施設でのコンクリートのイメージングとの比較および小型加速器中性子源の今後の展開

本章では研究炉や大型加速器施設で実施されてきたコンクリートの中性子イメージングに関する報告をもとに，小型加速器中性子源の適した役割について考察を行う．さらに，現在開発中の超小型陽子線加速器をベースとした中性子源の仕様と超小型中性子源を利用したイメージング装置の可能性について述べる．

6.1 大型中性子施設とのイメージング仕様の比較

これまで国内では日本原子力研究開発機構の研究炉 JRR-3 と大強度陽子加速器施設 J-PARC，京都大学複合原子力科学研究所の研究炉 KUR において，コンクリートに対する中性子イメージングが実施され，各施設の特徴を反映した研究成果が報告されてきた．各施設の中性子イメージング設備の性能一覧を表 6-1 に，コンクリートに対する測定結果を図 6-1 に示す。

表 6-1 国内の中性子イメージング施設の性能

施設名	中性子束 @ 試料位置 (n/cm ² /sec)	照射時間 (秒)	解像度 (mm)	L/D	視野 (W×H mm)
J-PARC RADEN ^{1,2)}	9.8×10^7	900	0.05	1000	300×300mm
JRR-3 TNRF ³⁾	1.2×10^8	1.2	0.1	176	255×305mm
KUR B-4 ⁴⁾	5.0×10^7	5	0.1	100	75×10mm
KUR E-2 ⁵⁾	3.0×10^5	60	0.1	100	Φ150mm
RANS	1.0×10^4	180～3600	0.2	15～70	160×160mm

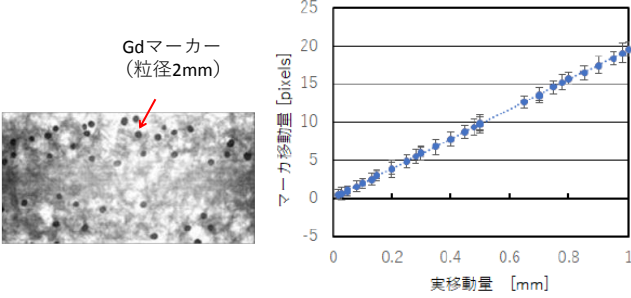
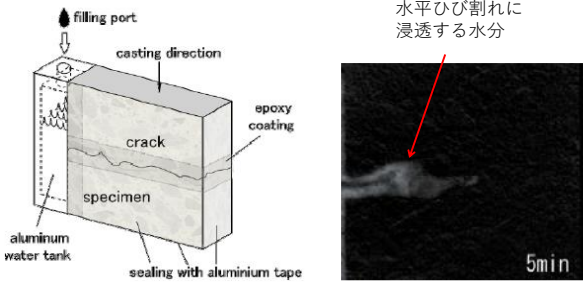
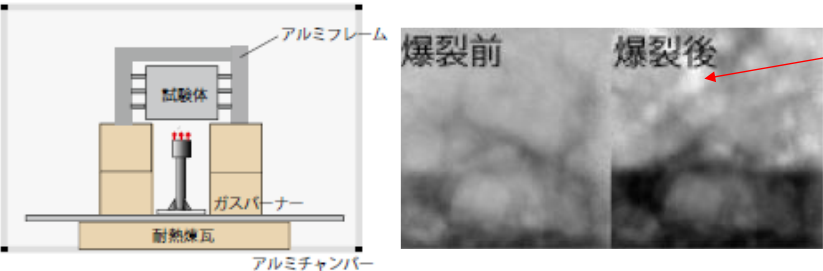
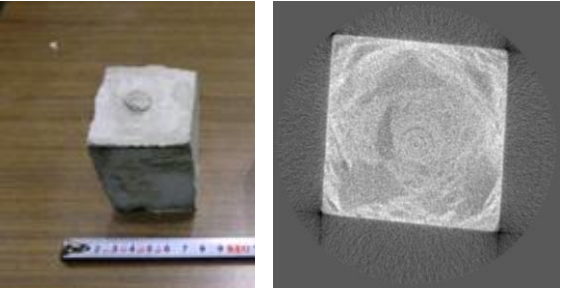
J-PARC RADEN	 左：Gd を散布したコンクリート透過像， 右：Gd マーカーにおける実際の移動量と画像上の移動量の関係
JRR-3 TNRF	 左：水平ひび割れを有するコンクリート試料概要， 右：ひび割れに浸透する水分に対する中性子透過像
KUR B-4	 左：コンクリート加熱試験の概要図 右：爆裂前後のコンクリートの透過像
KUR E-2	 左：5×5×5cm 鉄筋コンクリート 右：CT 画像

図 6-1 国内の大型中性子施設で行われたコンクリートのイメージング

国内最大規模の中性子施設である J-PARC のイメージングポート RADEN では極めて高い中性子のコリメータ比 L/D を利用して高解像度（解像度 $50\ \mu\text{m}$ ）のイメージングを実現している．2018 年に上野らは鉄筋コンクリートに引張載荷を加えた際の変形挙動を，コンクリート内部に埋め込んだ粒状の Gd の移動量から計測する手法⁶⁻²⁾を提案している．結果，Gd の移動量が $\pm 50\ \mu\text{m}$ の精度で測定され，外観では捉えられないコンクリート内部の変形を 1 pixel 程度の解像度で捉える可能性を示している．

JRR-3 における熱中性子ラジオグラフィ装置 TNRF では高い中性子束を利用して短時間での中性子イメージングを行っている．2006 年に兼松らはコンクリートに水平方向のひび割れを設け，側面からひび割れを介して水分が浸透していく様子を撮影時間 1.2 秒/枚のリアルタイムに迫るイメージングによって観察を行い，水分挙動の可視化⁶⁻³⁾に成功している．また，高い中性子束を短時間照射した際の中性子透過率の測定精度を評価し，標準偏差が 1 % 以下となる結果が示されている．

KUR にはイメージングに利用可能な 2 つのポート（B-4，E-2）が存在する．J-PARC や JRR-3 に比べてやや中性子束が低いものの，中性子発生部と試料室間の遮蔽が簡便になるため広く自由な空間を利用したイメージングが実施可能な環境が構築されている⁶⁻⁶⁾．2012 年に榎村らは B-4 ポートにてガスバーナーで高温加熱したコンクリート内部の水分移動⁶⁻⁴⁾を中性子イメージングによって測定し，局所的に水分が分布する水分溜りといった爆裂後の特徴的な水分分布を得ることに成功した．また，E-2 ポートでは 2011 年に小型加速器中性子源同等の 10^5 程度の少ない中性子束を利用し，約 15 時間（撮影時間 3 分/枚 $\times$ 300 枚）をかけて 5 cm 角の鉄筋コンクリートブロックの CT 画像の撮影⁶⁻⁵⁾を山形らが実施している．

以上より，解像度 $100\ \mu\text{m}$ 程度もしくはそれ以下の高い空間分解能や動画撮影が必要となる短時間で進展する観察対象に対しては J-PARC や JRR-3 などの大型施設の利用が有効である．また，中・小型施設においては中性子束が低下することで照射時間の長期化や解像度の低下傾向がある一方，施設の利用頻度の増

加, 実験環境の自由度というメリットが存在する. 各中性子イメージング施設の利用受付の頻度と特徴を表 6-2 にまとめた.

表 6-2 各施設の利用頻度とイメージング利用における特徴

施設名	利用頻度	イメージング利用における各施設の特徴
J-PARC RADEN ^{1,2)}	年1回 利用申請	・解像度100 μ m以下の高分解能イメージング
JRR-3 TNRF ³⁾	停止中	・秒単位の挙動観察 (リアルタイムイメージング)
KUR B-4 ⁴⁾	年2回 利用申請	・自由度の高い実験環境 ・視野が狭く試料サイズ限られる ・分単位の挙動観察
KUR E-2 ⁵⁾		・大きいビーム径での観察に有効 ・CT撮影 数時間
RANS	随時可能	・実用的にラジオグラフィが可能 ・分解能0.2mm以上のマクロなイメージング ・数時間単位の挙動観察可能

6.2 小型加速器中性子源によるイメージングの展望

理化学研究所においては, 普及型小型加速器中性子源として図 6-2 に示す RANS-II と, 可搬型加速器中性子源 RANS-III の開発が現在進められている.

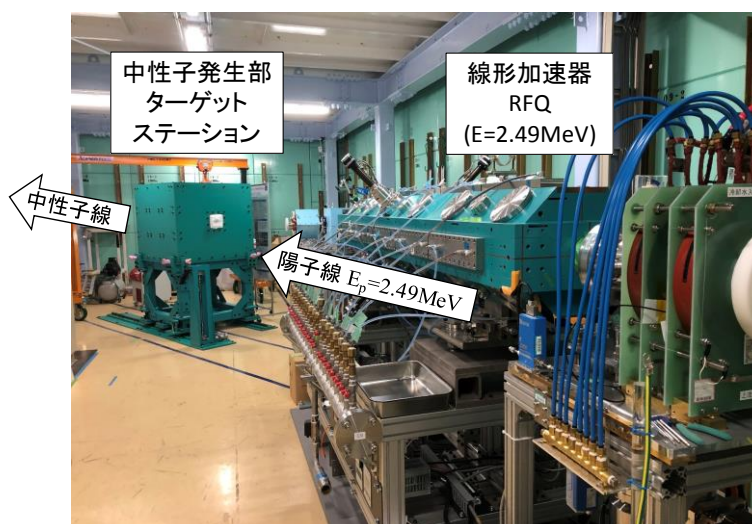


図 6-2 普及型加速器中性子源 RANS2

RANS は 2 台の線形加速器 (RFQ と DTL) を通じて陽子をエネルギー 7 MeV まで加速して Be ターゲットに衝突させていたが, RANS-II は 1 台の線形加速器 (RFQ) で陽子をエネルギー 2.49 MeV まで加速して Li ターゲットに衝突させて中性子を得る仕組みとなっている. 中性子の発生効率はターゲット材料と陽子線のエネルギーに依存し, RANS-II の中性子発生ターゲットには発生に必要なしきい値エネルギーが低い Li が採用されている⁶⁻⁷⁾.

RANS-II では加速器および遮蔽の大幅な軽量化が進み, 総重量が RANS の 1/5 以下となっている⁶⁻⁸⁾. また, 陽子エネルギーが RANS よりも小さいので, その中性子束は RANS より 1 桁小さい 10^{11} n/s となるが, 発生する中性子束の角度分布が前方性を持つため⁶⁻⁹⁾, イメージング性能は大きく低下することはないものと考えられている. RANS および RANS-II の中性子源システムの比較表を表 6-3 に示す.

表 6-3 RANS と RANS-II の性能比較⁸⁾

Power	Neutron yield at the target	Size of Target station shielding	Beamline length	Neutrons at the sample	
RANS: 7MeV 700W	10^{12} n s ⁻¹	<2m	1.5m	$*10^5$ n cm ⁻² s ⁻¹	RANS 1.3% (RF Duty cycle)
			5m	$*10^4$ n cm ⁻² s ⁻¹	
RANS-II 2.49MeV 250W	$*10^{11}$ n s ⁻¹	<1m	0.5m	$*10^4 \sim 10^5$ n cm ⁻² s ⁻¹	RANS-II 3% (RF Duty cycle)
			1.5m	$*10^4$ n cm ⁻² s ⁻¹	

RANS では, 中性子発生ターゲットから出射口までの距離が 1.395 m あり, 中性子束は距離の 2 乗に反比例するので, 高い中性子束を利用する際にはターゲットに可能な限り近づくよう検出器を配置している⁶⁻¹⁰⁾. しかし, 出射口から検出器までの距離が長く取れなくなるため中性子のコリメータ比が低下し, 幾何学的誤差の大きい低解像度のイメージングになる.

RANS-II では, 遮蔽の軽量化によってターゲットステーションが小型化されたため, ターゲットにより近接した位置でのイメージングが可能になり, ターゲットから検出器までの距離が RANS と同じ場合でも, 出射口から検出器までの

距離 L を長く取れ、限られた空間の中でより解像度の優れたイメージングを実現することが期待できる。

本研究で使用した長さ 50 cm のポリエチレンコリメータを RANS-II の中性子発生ターゲット直後に配置することを仮定し、前章で評価したコンクリートの寸法 ($70 \times 70 \times$ 厚さ 50 mm) がビーム径に収まるように 0.1 m の開口径を設定すると、中性子のコリメータ比 $L/D=15$ を得るには 1.5 m の長さが必要となり、RANS-II ターゲットから検出器までの距離は、ポリエチレンコリメータの長さ 0.5 m を加えて約 2 m となる。

RANS-II ターゲットから 2 m 位置での中性子束は、表 6-3 に示した 1.5 m 位置での中性子束の $9/16$ 倍の $5.6 \times 10^3 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ となる。これは本研究で利用した RANS ターゲットから 3.5 m 位置での中性子束の 27 % に相当する。RANS を利用したイメージングの撮影時間は 3 分/枚であることから RANS-II では撮影時間を約 11 分とすることで解像度を損なわず、RANS 利用時と同等の中性子数を利用したイメージングが可能となる。

参考文献

- 6-1) 甲斐哲也, 篠原武尚 : J-PARC エネルギー分析型中性子イメージング装置 RADEN の現状, Isotope News 2016 年 8 月号 No.746 pp.20-24
- 6-2) 上野一貴, 鈴木裕士, 小山拓, 西尾悠平, 兼松学 : 中性子ビーム技術を用いた鉄筋コンクリートの変形破壊挙動の評価, 第 18 回コンクリート構造物の補修,補強,アップグレードシンポジウム論文報告集 Vol. 18, No. 1, pp. 647-650, 2018
- 6-3) 兼松学, 野口貴文, 丸山一平, 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水分挙動の可視化および定量化に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp. 981-986, 2007
- 6-4) 榎村剛, 兼松学 : 高強度コンクリートの爆裂時の水分挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp. 1108-1113, 2012
- 6-5) 山形豊, 広田克也, 森田晋也, 朱正明, 世良俊博, 横田秀夫, 大竹淑恵, 須長秀行, 川端祐司, 日野正裕, 北口雅暁, 目時直人, 篠原武尚 : KUR E-2 ポートにおけるラジオグラフィと VCAD システムへの適応, 中性子イメージング専門研究会 2011.1.6
- 6-6) 齊藤泰司, 川端祐司 : 京大炉 (KUR) における中性子イメージング利用研究, 精密工学会誌 Vol.79, No.9, pp.822-825, 2013
- 6-7) M.R. Hawkesworth: Neutron radiography. Equipment and methods, Atomic Energy Review 15, pp.169-220, 1977
- 6-8) 大竹淑恵:理研小型中性子源システム RANS,RANS-II,普及へ向けた展開, 理研シンポジウム安全・安心を未来に繋ぐ小型中性子源 RANS・RANS-II 2019.2.20
- 6-9) 小林知洋:可搬型中性子源プロトタイプ RANS-II の開発, 理研シンポジウム安全・安心を未来に繋ぐ小型中性子源 RANS・RANS-II 2019.2.20
- 6-10) (社) 日本アイソトープ協会理工学部会中性子イメージング専門委員会 : 中性子イメージング技術の基礎と応用, 2009
- 6-11) Yoshimasa Ikeda, Yoshie Otake, Maki Mizuta: Nondestructive Measurement

Method to Detect Water/Void inside Slabs using Compact Neutron Source by
Backscattered Neutrons, Journal of Advanced Concrete Technology Vol.15, No.10,
pp.603-609, 2017

第 7 章 結論

7.1 本研究の成果

本研究は、小型加速器中性子源の産業応用に向けて中性子イメージング装置としての可能性を実証することを目的に小型加速器中性子源 RANS を利用して中性子イメージング実験を行い、定量分析システムの構築と画像解析手法の開発、空間分解能に関連する検出器の解像度および中性子線の発散角の測定を行った。そして、コンクリート構造物の劣化において重要なコンクリート内部に浸透する水分の評価を応用分析として行い、水の動きを非破壊イメージングにより定量化することに成功し、小型加速器中性子源を利用した定量分析技術を実証した。以下に本研究の主な成果を示す。

「小型加速器中性子源を利用した中性子イメージングにおける定量分析システムおよび画像解析手法の構築」

- ・本研究では、小型加速器中性子源を利用した定量分析技術の実証にあたり理研小型中性子源 RANS を利用し、検出器に冷却型カメラを組み込んだ中性子イメージインテンシファイア（中性子 I.I.）を使用した。冷却型 CCD の導入により経時変化する暗電流ノイズを安定化し、入出力に対する中性子 I.I. の直線性は最大でも 1 % 程度の直線性誤差となったことから高精度な定量分析システムが構築された。
- ・画像解析手法としてノイズ処理の最適化と強度分布の補正を行い、中性子透過像から対象物を定量化するフローを確立した。中性子の統計量が影響する透過率の測定誤差について評価を実施し、画素を結合して解像度を 2.25 mm に調整することで標準偏差が 1 % 以下になることが確認された。また、中性子 I.I. の動作時間を制御し、熱中性子線よりも早く検出器に到達する γ 線の除去を試みた結果、水分検出感度（コントラスト）が向上した。

「解像度および中性子線の拡がり角測定」

- 小型加速器中性子源を使用したイメージングにおける実効的な空間分解能を把握する目的で検出器固有の解像度と中性子線の拡がり角（コリメータ比 L/D ）の実測を行った。検出器の解像度評価には周期的なパターンが Gd のレイヤーに描かれた解像度測定用チャートを使用し中性子 I.I.では 300 μm 周期で変調するラインペアを忠実に記録できることが確認された。
- 中性子線の拡がり角（コリメータ比 L/D ）について、厚さ 0.5 mm の Cd の板に複数の丸孔を開けた器具 L/D plate を使用して評価した結果、出射開口から検出器までの距離 L と出射開口径 D によって表される中性子線の並行度が透過像の幾何学的誤差を実際に決定していることがわかった。

「コンクリートに浸透する水分の評価」

- インフラ構造物の劣化は社会問題となっており、コンクリートに浸透する水の影響は劣化の進展や構造物の品質を評価する上で重要なパラメータである。しかし、水の分布を評価できる非破壊手法が不足しておりコンクリートに作用する水の影響は明らかではないことからコンクリートの特性を水の動きによって定量的に評価する目的で、アルカリシリカ反応による劣化を有するコンクリートならびに強度を左右する水とセメントの配合比率（水セメント比）を調整したコンクリート（70×70×50 mm）試料の水分浸透の様子を中性子イメージングで捉えた。
- 劣化を有するコンクリート試料では劣化（膨張ひずみ）の程度によって不均一な水の分布を示すことや水分浸透性状の再現性が得られないことなど、同じ試料を継続して観察できる非破壊手法の特徴を活かした評価結果が得られた。
- また、水とセメントの配合比率（水セメント比）を調整したコンクリートについては配合により内部の空隙構造が変化することで水分浸透に差が出るものと予想された為、浸透速度にあたる水分流束を吸水量分布より出力し、定量的な水分浸透速度の比較を実現した。

7.2 今後の課題

本研究から得られた更なる高度化へむけた今後の課題を述べる.

「小型加速器中性子源を利用した中性子イメージングにおける定量分析システムおよび画像解析手法の構築」

- ・システムとして採用した中性子 I.I. は γ 線感度を有するために水分検出感度が低下したため、ブランキング機能を用いて感度の向上を図る必要があった. 今後は γ 線影響の小さい中性子コンバータを採用し、ブランキング機能を併用することで更なるコントラストを得る可能性が挙げられる. その際、本研究で採用した中性子 I.I. とは異なる装置を使用することから暗電流の安定性や解像度など仕様評価が必要である.

「解像度および中性子線の拡がり角測定」

- ・解像度測定用チャートを利用した解像度評価は 1 日間の評価であったことから検出面内の解像度の違いや矩形開口から中性子線を出力した際の解像度の異方性などの詳細評価を行うことができなかったため、今後の評価項目となる.
- ・中性子のコリメータ比 $L/D=70$ における拡がり角の測定は、小型加速器中性子源では拡がり角が比較的小さい条件下の測定であった. コリメータ比が更に低い場合の実測には L/D plate について孔径の拡大や 2 つの孔の間の距離の調整が別途必要であり、小型加速器中性子源の仕様にマッチする測定方法を実測結果から習得する必要がある.

「コンクリート内への浸透水分の評価」

- ・本研究ではコンクリート内への水の動きとして水分流束（水分浸透速度）の導出に成功した. コンクリート工学におけるコンクリートの水分浸透評価に関しては、コンクリートを割裂した面における濡れの範囲を目視により計測し、浸透深さやその経時変化である浸透速度を求める手法が昨年、土木学会規

の試験方法として示された。

- 含水率，浸透深さ等水分に関する既存の計測手法と，中性子透過像として可視化した水の動きの違いについて比較検討を行い，整合性と異なる特徴を明らかにすることでコンクリートにおける水の動きの更なる理解と，中性子利用の有用性はより増加することが期待される。

謝辞

本論文は、筆者が東京工業大学大学院環境・社会理工学院融合理工学系原子核工学コース博士後期課程に3年間在籍した研究成果をまとめたものです。

指導教官である林崎規託教授には、入学時から課程修了に至るまで多大なご指導、ご鞭撻を頂戴いたしました。理研小型加速器中性子源 RANS という最先端の装置をベースにした研究に集中する機会を与えていただき、大変貴重な経験をさせていただきました。ここに深く感謝の意を表します。

国立研究開発法人理化学研究所光量子工学研究センター中性子ビーム技術開発チーム大竹淑恵チームリーダーには RANS、中性子物理を主として、研究全般にわたって様々なご指導、ご助言をいただきました。ここに感謝いたします。同じく須長秀行上級研究員には研究計画の作成や進捗管理につきまして貴重なご助言をいただきました。ここに感謝いたします。同じく水田真紀研究員には土木・コンクリートの知見をはじめとして、実験から論文投稿に至るまで幅広くご指導いただきました。ここに感謝いたします。同じく、竹谷篤副チームリーダー、高村正人上級研究員、小林知洋専任研究員、若林泰生研究員、池田翔太特別研究員、橋口孝夫氏、見原俊介氏には理研での研究生活において大変お世話になりました。ありがとうございました。

国立大学法人金沢大学の久保善司准教授には試料の提供や計測結果の解析、理解における議論を通じて有意義なご助言をいただきました。ここに御礼申し上げます。東京都市大学の持木幸一名誉教授には中性子ラジオグラフィの基礎、歴史について貴重なご指導をいただきました。ここに感謝いたします。

本研究の実験成果は理研小型加速器中性子源 RANS で得られました。中性子発生装置を常時利用可能な状態で運転いただいた柳町信三氏、後藤誠氏に心より感謝致します。

また、林崎研究室の皆様には大変お世話になりました。御礼申し上げます。

株式会社トプコンの福間康文取締役、熊谷薫執行役員には企業に勤務する身

でありながら大学院への入学を許可いただき、本研究を遂行する機会をいただきました。厚く御礼申し上げます。また R&D 開発部先端技術課永野繁憲課長には数々の温かい激励をいただきました。ここに感謝致します。

最後に 3 年間にわたって応援してくれた両親と妻，子どもたちに感謝致します。本当にありがとう。

令和元年 8 月

吉村 雄一