論文　小型中性子源を利用したコンクリートの水測定方法の検討

吉村　雄一[*1]・水田　真紀[*2]・須長　秀行[*3]・大竹　淑恵[*4]

要旨：コンクリートの含水状態が，塩害を始めとした劣化要因の進行速度に与える影響は大きい。そこで水素に対して相互作用が強く，コンクリートを透過する能力を持つ中性子線をコンクリートに入射し，コンクリート中の水の検出を試みた。小型中性子源から放射される中性子線を入射しコンクリート中の水の厚さ変化を解析した。厚さ 10mm のコンクリートの中性子透過イメージを乾燥・飽水状態において撮影し，その差分を取ることにより，コンクリート内水分および内部骨材位置を鮮明にとらえた。50mm 厚以上のコンクリート中の水の観察にも取り組んでいる。

キーワード：中性子，小型中性子源，水，透過イメージ

1. はじめに

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，コンクリート内部の水分量を測定したいとの要求は多い。なぜなら，コンクリートへの水分浸透性状は，配合や養生の影響を受けるとの研究成果 [1)]にもあるように，水の動きはコンクリートの様々な物性を反映している可能性を秘めているためである。

従来はコンクリート内に湿度センサ等を埋設したり，供試体を割裂して内部の濡れた状況を目視したりすることで，コンクリートに浸透する水を確認していた。しかし, このような測定では①局所的な情報しか得られない，②乾湿が繰り返される実際の状況を同じ供試体で検討することができない等の課題があった。

そこで，コンクリート中の水を測定する一つの方法として，中性子の利用が考えられる。国内では，2004 年に中性子ラジオグラフィによるコンクリートのイメージが初めて発表され [2)]，その後も日本原子力研究開発機構の研究用原子炉 JRR-3 を利用し，厚さ 2cm 以下のモルタルに対して高分解能に水分を可視化測定する研究 [3)]が行われている。このようにコンクリート分野への中性子適用の有用性が示される一方で，実験時間の確保が難しい現状に直面している。

そのような研究の流れの中，小型中性子源 RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source（以下，RANS）が開発され, 2013 年 1 月に中性子線が取り出された [4-6)]。RANS は「手元で使える，役に立つプローブ」を基本理念とし，産業利用や人材育成への適用を目指して開発され，鋼橋に利用される鋼材内部の腐食の可視化に成功するなど新たな非破壊観察の可能性を広げている [7, 8)]。RANS の成功をもとに，さらにコンパクト化を目指した 2 号機 RANS2 の開発を開始しており, 将来は屋外での使用も見据えている。さらに，後方散乱中性子を検出する反射イメージングにより，床版の土砂化のような表層下で進行する劣化や欠陥を非破壊で観察できる技術を開発し [9)]，実験結果を蓄積しつつある。

本研究は，コンクリートの物性を評価できる手法の 1 つとして，中性子イメージングの技術確立を目指すものである。実験では，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，厚さの供試体を用い，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」を事前処理することなく非破壊で捉える方法を検討する。具体には，中性子の透過方向の水の厚さを要因とし，RANS による中性子イメージングの結果について考察する。

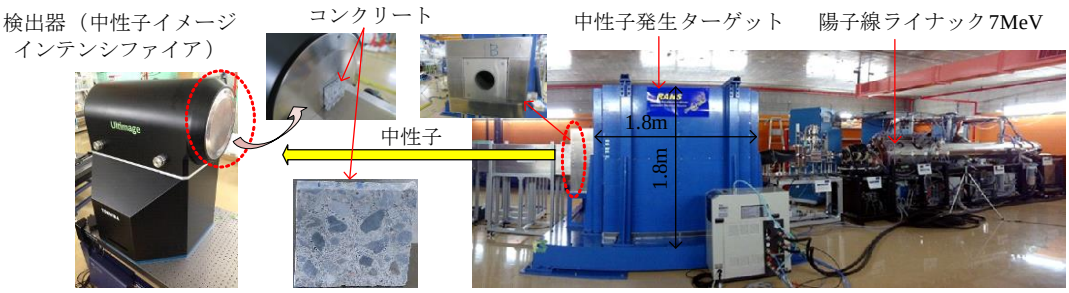
2. 小型中性子源によるイメージング技術

2.1 小型中性子源 RANS

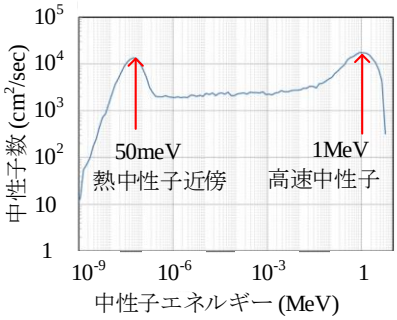
RANS の全体図を**図－1** に示す。加速器には陽子線ライナック 7MeV，中性子発生ターゲットにはベリリウムが採用されている。開発されたベリリウムターゲット [10)]を中性子発生から約 2 年後に検証したところ，表面に若干の変色が見られたのみで変形，ブリスタリング等はなく健全であり，長寿命化が実現されている。

放射線挙動を模擬する計算コードである PHITS コードを用いてターゲット表面から 5m 離れた測定位置での中性子エネルギースペクトルを評価した結果を**図－2** に示す。なお, 陽子線の平均加速電流は RANS の最大値 100 μA としている。**図－2** より，1MeV 付近にピークを持つ高速中性子と 50meV 付近にピークを持つ熱中性子が

*1 理化学研究所　中性子ビーム技術開発チーム　理修　(正会員)
*2 理化学研究所　中性子ビーム技術開発チーム　工博　(正会員)
*3 理化学研究所　中性子ビーム技術開発チーム　工博
*4 理化学研究所　中性子ビーム技術開発チーム　理博



図－1　RANS 全体図と実験セットアップ



図－2　ターゲットから 5m 距離での中性子スペクトル

それぞれ測定位置に到達することがわかる。いずれの成分もイメージングに利用することが可能であり，高速中性子は 60cm 以上の厚さのコンクリートを透過する能力がある。

なお，本研究では熱中性子を利用する。熱中性子は水に対して高感度かつ検出空間分解能も高いことより，コンクリート中の水の分布や時系列変化を捉える本研究に適していると判断したためである。そのため，熱中性子イメージング検出器による可視化評価を行う。

2.2 検出器（中性子イメージインテンシファイア）

本研究では，入力面が 9 インチの中性子イメージインテンシファイア（以下，中性子 I.I.）を中性子検出器として使用した。中性子 I.I.では，入力面に到達した中性子が電子に変換された後に電子レンズを通じて出力蛍光面に集束され，最終的に可視光になり，イメージセンサで画像化するイメージング装置である [11]。

入力面に天然ガドリニウム（Gd）あるいは濃縮ホウ素（^{10}B）が使われた 2 種類の中性子 I.I.が存在するが，検出感度に優れ，撮像視野の大きい Gd タイプを採用した。**表－1** にイメージング装置仕様を示す。

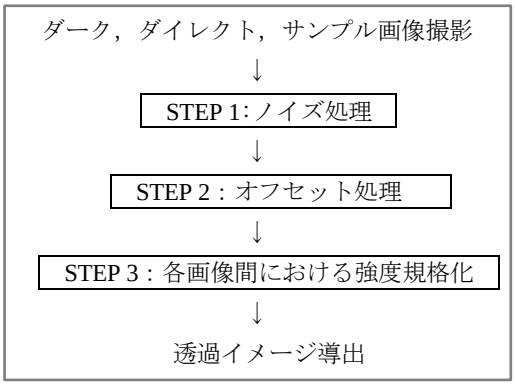
なお，中性子 I.I.のイメージセンサには CMOS センサが当初使用されていたが画像に映るオフセット成分の時間変動が大きいため冷却型 CCD カメラに変更して測定を行った。

2.3 透過イメージの導出方法

本研究では中性子線を照射しない状態で撮影する画像（ダーク画像）と試料を置かずに中性子線を照射した

表－1　イメージング装置仕様

項目	仕様
中性子束	5.0×10^4 n/cm^2/sec
中性子ビーム平行度 （平行からの拡がり角）	23mrad
解像度 （1 画素当りの寸法）	45μm/pixel
照射時間	3min./image
検出器視野	180×120mm

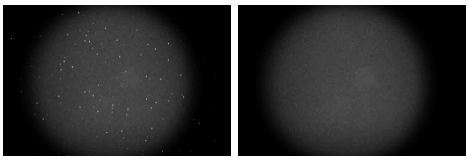


図－3　透過イメージ導出までの流れ

場合の画像（ダイレクト画像），試料を置いて照射した場合の画像（サンプル画像）の計 3 種類の 16 ビット画像を取得し，**図－3** に示すフローに沿って透過イメージの導出を行った。以下に各ステップについて説明する。なお，画像解析ツールには ImageJ を使用した。

STEP 1：ノイズ処理　周辺画素に比べて一定値以上の値が外れた画素に対して，周辺画素の中心値に置き換える空間フィルタを作成しノイズ除去を行った。この作業は，中性子線評価環境下では中性子と共に放射化した成分（ガンマ線）が発生するため，極端に値の外れた輝点ノイズがイメージに現れる影響を除去する目的で必要となる。**図－4** にノイズ除去前後のダイレクト画像を示す。

STEP 2：オフセット処理　ダーク画像を撮影し，中性子線照射前後におけるオフセットの変動を評価した。これは，中性子線を照射していない状態においてもオフセッ



(a) 除去前　　(b) 除去後

図－4　ノイズ除去前後のダイレクト画像

表－2　オフセット処理を行った各ダイレクト画像の画素値合計の比

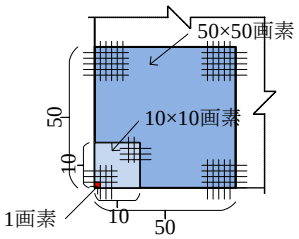
	画素値合計の比	
画像	方法 1	方法 2
1(基準)	1.000	1.000
2	1.015	1.015
3	1.037	1.038
4	1.034	1.035
5	1.002	1.004
6	0.978	0.979

トの値を CCD が持つため，中性子線照射後の画像からオフセットを差し引く際に必要となる。例えば，照射時間 3 分で撮影したダイレクト画像においては輝度値の約 15%がオフセットであった。この結果から，小型中性子源 RANS を用いたイメージングにおいては大きな中性子束を得ることは難しく，中性子照射後の画像に対するオフセットの占める割合は高いと予想される。そこで，ダーク画像とダイレクト画像を交互に 6 サイクル撮影し，各ダイレクト画像から 1 枚目のダーク画像を引算した場合（方法 1）と直前に撮影したダーク画像を引算した場合（方法 2）を比較してオフセットの変動を評価した。**表－2** に画像 1 を基準とした場合の画素値合計の比を示す。この結果より，オフセットの変動はおよそ 1%以下であることが確認でき，画像間にダーク画像を撮影する必要性が小さいことがわかった。

STEP 3：以上の作業により得られた画像に対し，中性子ビームの強度揺らぎによる変動を排除するため，画像間でサンプルのない部分における輝度比が 1 になるよう強度補正を実施した。そして，サンプル画像からダイレクト画像を除算し，透過イメージを導出した。

2.4 空間誤差の低減方法

2 枚のダイレクト画像を除算して中性子透過率=1 のイメージを作成し，空間誤差（標準偏差）を評価した。1 画素に入射する中性子の数は統計量に支配され，雑音成分が中性子量の平方根に比例するため [12]，S/N 比を低減するために統計量を増やす必要がある。同状態の画像を複数枚積算する方法も可能であるが，撮影時間が長くなってしまうため画素の結合を行うことで誤差低減を図った。**図－5** に画素の結合について示す。10×10 や 50×50 画素を 1 画素に結合して分布を作製し，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。



図－5　画素の結合

表－3　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

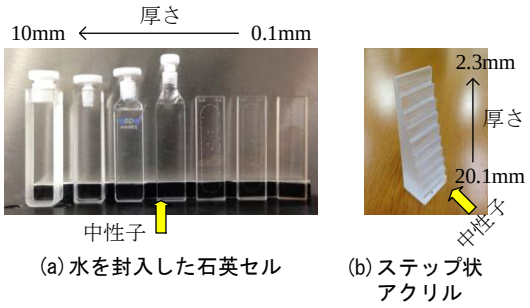
表－3 に結合した画素数と標準偏差の関係を示す。50×50 のエリアにある縦横合計 2500 画素を 1 画素に結合した結果, 標準偏差が 1%以下となることが確認された。これより，結合前の画素サイズが 45μm/pixel であることから，画素サイズを 2.25mm にすることで，空間誤差 1%以下の透過イメージの評価が可能になる。以降の透過率評価においては，50×50=2500 画素を結合後の結果を利用した。

3. 水およびアクリルの透過率測定

セメントとの水和反応後の結合水，あるいは空隙内の自由水のように，もともと水を含有するコンクリートを対象として，コンクリート内の水の移動を評価検討していくため，まずは水に対する検出感度や限界を把握する必要がある。そこで，中性子照射方向の水の厚さが異なる石英セル 7 種類とステップ状に加工されたアクリルを使用し，透過イメージを撮影した。

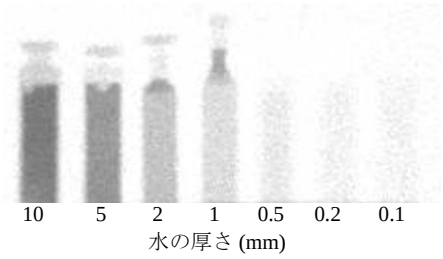
図－6 に石英セルとアクリルを示す。石英セル内の水の厚さは 0.1～10mm である。アクリル（幅 24×高さ 80mm）は最大 20mm まで約 2mm 間隔で厚くなるようステップ状に加工されている。なお，アクリルは水と同程度の水素密度（水:0.112g/cm^3，アクリル:0.095 g/cm^3）を持ち，測定の簡便性に優れることから試料として使用した。

図－7 に水を封入した石英セル，**図－8** にアクリルの透過イメージおよび透過率分布を示す。撮影時間は 3 分/枚である。透過イメージはサンプル画像からダイレクト画像を除算した透過率分布を示す画像である。中性子は水素原子によって強く散乱されるため，水は透過イメー

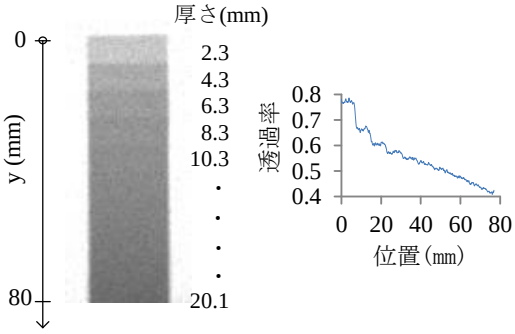


(a) 水を封入した石英セル　　(b) ステップ状アクリル

図－6　水の厚さの異なるサンプル



図－7　水を封入した石英セルの透過イメージ



図－8　ステップ状アクリルの透過イメージと透過率分布

ジにおいて影として映る。石英セル内の水は厚さ 0.1mm の水が薄い影となって可視化されており，水の厚さが増加するにつれて,影が濃くなっていることが確認できる。さらにアクリルにおいては，厚さが 10.3mm になる 5 段目のステップまで階調差が得られているが，10mm 以上の厚さになると 2mm の段差を見分けることが難しくなった。ただし，厚さ 10mm と 20mm の差であれば**図－8** の透過率分布において 10%程度の差が現れており，判別することは可能である。

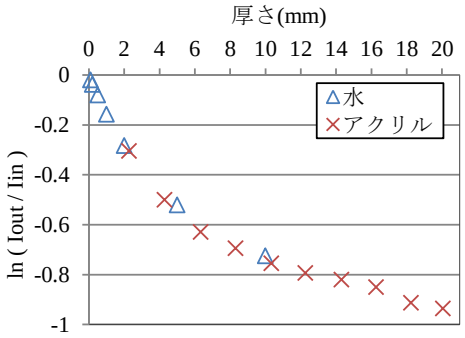
水およびアクリルに対する中性子の減衰係数を評価するため，それぞれの厚さに対する透過率を**図－9** に示す。

ここで，縦軸は透過率の対数を示す。

物質に対する中性子の減衰係数 a は一定と仮定すると，透過する中性子の強度 I_{out} は，

$$I_{out} = I_{in} exp(-ax) \tag{1}$$

である。ここで，I_{in} は入射中性子強度であり，サンプル画像との強度規格化を行ったダイレクト画像の輝度値を



図－9　水およびアクリルの厚さに対する透過率

用いた。よって透過率の対数 $ln(I_{out}/I_{in})$ は，

$$ln(I_{out}/I_{in}) = -ax \tag{2}$$

となり物質の厚さに比例する関数となる。

中性子と物質との相互作用を表す反応断面積はエネルギーによって変化するが，熱中性子を利用するイメージングではその変化が緩やかであるため減衰係数 a を一定とした [13]。

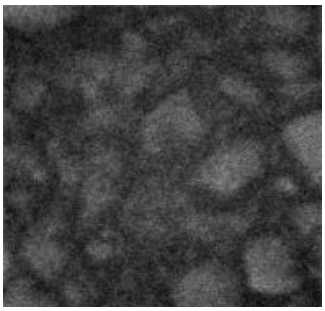
図－9 より，アクリルと水の透過率はほぼ同等であり，いずれの試料においても最大値まで厚さの増加に伴う透過率の低下が観察された。これは，透過イメージにおける影の濃淡に対応していると考えられる。さらに，厚さ 4mm 未満では線形の関係が得られたことから，コンクリート中の時間経過に対応した水分量の変化を細かく捉えられる可能性がある。一方，4mm 以上になると透過率の対数が線形に変化しないことが確認できる。これは，厚い試料になるほど散乱が顕著になるため，散乱中性子を透過成分として見積ったことが原因と考えられる。今後，コンクリートの厚さを要因とした実験では，ハニカム状の中性子コリメータを用いる手法 [13]等，散乱成分も検討する必要がある。

4. 乾燥・飽水状態におけるコンクリートの透過イメージ

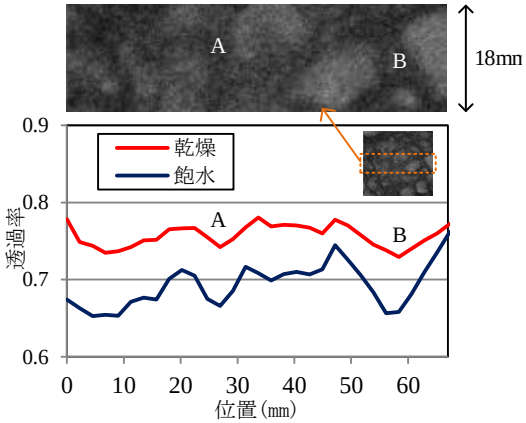
水およびアクリルに対する定量性が得られた。そこで乾燥・飽水状態のコンクリートの透過イメージを撮影し，コンクリート中の水の検出を行った。**表－4** に使用したコンクリートの配合を示す。セメントには普通ポルトランドセメントを用い，材齢は約 1 年である。供試体は 100×100×400mm コンクリートブロックであり打設面と全ての型枠面を切断した残りの部分を測定用とした。そして，断面寸法 73×67mm のブロックから長手方向に対して直角に厚さ 10mm の供試体を切り出した。実験におけるコンクリートの含水状態を 2 種類設定した。まず，温度 60℃に設定した恒温槽内に 12 日間静置させることにより,供試体を乾燥状態とした。また，1 週間浸水させた供試体を飽水状態とした。前述の水を封入した石英セルおよびアクリルの評価同様に中性子 I.I.の検出面に接し

表－4　コンクリートの配合

W/C (%)	Air (%)	G_{max} (mm)	s/a (%)	f'_c (N/mm^2)	単位量 (kg/m^3)				
					W	C	S	G	AE
50	4.5	20	45.1	30	184	368	779	973	4.05



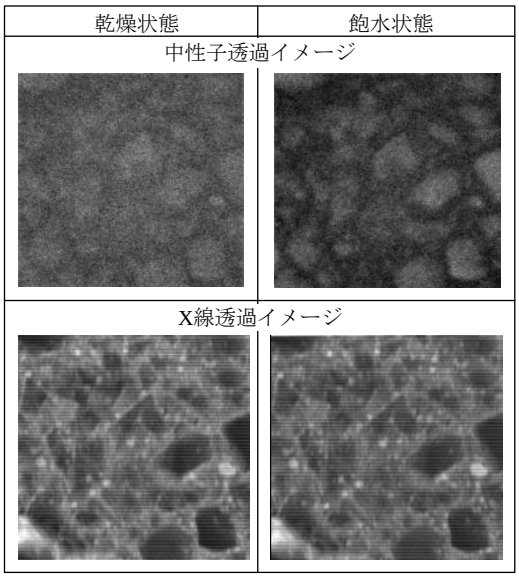
図－10　10㎜ 厚さコンクリート供試体の飽水状態の透過イメージ（撮像時間 3 分）



図－11　乾燥および飽水状態の透過率分布の比較

た状態で供試体を配置し，厚さ方向に対する透過イメージを撮影した。**図－10** に飽水状態における厚さ 10mm のコンクリート供試体の透過画像を示す。水を透過しない中性子の性質により，骨材部分の影が水をより多く含んでいる周辺部分に比べて薄くなっている。骨材周りやセメントペースト内の空隙に分布した水が影となって映り，骨材と他の部分の透過率に差が拡大するため骨材の分布が明瞭に識別できる。

図－11 に乾燥・飽水状態におけるコンクリート供試体の透過イメージ水平方向の透過率分布を示す。グラフ上のイメージに記した幅 18mm について示したものである。透過率は領域内縦方向 8 画素分の平均値である。なお，乾燥と飽水状態間で吸水量が 7g であった。コンクリートの面積は 50cm^2 であるので浸透した水の厚さは平均 1.4mm ということになる。乾燥状態に比べて飽水状態の透過率が小さくなったことが確認できる。つまり，透過イメージの差を透過率の差として評価することができた。



図－12　中性子および X 線透過イメージの比較

乾燥と飽水状態の違いは水分量の差のみであることから，透過率の差は水分量を反映している。透過イメージ上の A,B に対応する位置では透過率の差が大きくなっており，分布する水が多いことが示されている。平均 1.4mm の水の厚さが最大で 10%程度の透過率の差として分布しており，差の範囲内で水分量の分布を評価することが可能になる。厚さ 10mm のコンクリートの場合、水の厚さは最大で 2～3mm 程度であり、乾燥・飽水状態間の透過率差は図-9 に示した水に対する透過率評価において線形性が大きく崩れていない水の厚さでの評価に該当すると考えられる。これにより，RANS を利用した透過中性子のイメージングの透過率から，10mm 厚さのコンクリートへの水分浸透を評価できることが示された。

最後に中性子線と同様にコンクリートの透過イメージを取得できる手法として X 線イメージングを実施し，中性子線による透過イメージとの比較を行った。**図－12** に中性子線および X 線で撮影した乾燥・飽水状態の透過イメージを示す。なお，X 線源には産業用 X 線 CT 装置 YXLON 社 Y.CT compact を使用し，イメージングから水分量を評価した。撮影時の X 線管電圧は 450kV, 管電流 1.55mA, 解像度は 270μm/pixel である。X 線透過イメージでは骨材やセメントペーストに対する輝度の明暗が中性子線による透過イメージと比べて反転しており，原子番号が大きくなるほど透過率が低下する X 線の透過特性が現れている。そのため，軽元素である水に対して X 線

では相互作用が微弱であり，乾燥・飽水状態のイメージにほとんど差が見られない。本検討から，イメージングによるコンクリートへの水分量評価に対する小型中性子源の優位性が示された。

5. まとめ

本研究ではコンクリート中の水測定に対して小型中性子源RANSによるイメージングの適用可能性を検討した。水およびアクリル，乾燥・飽水状態のコンクリートの透過率評価を行い，以下の知見を得た。

①水・アクリルの評価においては最小0.1mmの厚さの水まで影として映ることを確認した。さらに最大20mmの厚さまで透過率が低下する傾向が得られた。

②水の厚さが 4mm 未満までは一定の減衰係数で中性子透過率が低下したが，厚くなるにつれて中性子線の減衰量が鈍化する結果となった。

③RANS を使った中性子イメージングの透過率から厚さ10mm のコンクリートへの水分浸透を評価できる。その際の撮影時間は3分である。

④透過イメージを取得できるX線と比較し，水分量の分布を評価するイメージング手法としての小型中性子源の優位性を示した。

小型中性子源を用いたコンクリートの透過イメージングの研究は緒に就いたばかりであり，本研究では試行錯誤して試験方法を検討した。一方で，このような実験の実施は，小型中性子源の利用しやすさというメリット故に可能となった。ある時点のコンクリートの物性を「コンクリート中の水の動き」で評価できれば，将来的にはある時点でのコンクリートの健全性を表す指標を構築することができると考えられる。信頼性の高い指標を示すためには，様々な種類，劣化程度のコンクリートの測定を続け，データベース化する必要があるが，小型中性子源はそれを可能にする性能と利便性を兼ね備えている。今後は試験方法の最適化を図るとともに，材料や配合の異なるコンクリートや劣化したコンクリートも対象とした研究を続ける予定である。

参考文献

1) 鈴木浩明，上田　洋：コンクリートの品質が水分浸透深さの時間依存性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，2014
2) Kawabata, Y., Nakano, T., Hino, M., Sunohara, H., Matsushima, U. and Takenaka, N.: High contrast neutron radiography with optical devices in Kyoto University reactor, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 529, pp.238-242, 2004
3) 例えば，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.1，2007
4) 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
5) 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
6) 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
7) 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
8) Taketani, A., Yamada, M., Ikeda, Y., Hashiguchi, T., Sunaga, H., Wakabayashi, Y., Ashigai, S., Takamura, M., Mihara, S., Yanagimachi, S., Otake, Y., Wakabayashi, T., Kono, K. and Nakayama, T.: Visualization of water in corroded region of painted steels at a compact neutron source, ISIJ International, Vol.57, No.1, DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-448, 2017
9) 池田義雅，大竹淑恵，柳町信三，橋口孝夫，水田真紀：小型中性子源による床版内部の水・空隙非破壊観察技術，第九回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp.93-98，2016
10) Yamagata, Y., Hirota, K., Ju, J., Wang, S., Morita, S., Kato, J., Otake, Y., Taketani, A., Seki, Y., Yamada, M., Ota, H., Bautista, U. and Jia, Q.: Development of a neutron generating target for compact neutron sources using low energy proton beams, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol.305, Issue 3, pp.787-794, DOI: 10.1007/s10967-015-4059-8, 2015
11) 日塔光一：中性子カラーI.I$_{TM}$で領域が広がる新しい検査技術，東芝レビュー，Vol.64，No.7，pp.70-71，2009
12) 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
13) 玉置昌義：中性子イメージングによる材料工学の研究，RADIOISOTOPES，Vol.56，pp.417-429，2007