

連携記事

量子ビームによる橋梁等インフラ非破壊健全性診断システムの開発現状

Non-destructive Inspection System using Quantum Beam for Deteriorating Transportation Infrastructure

理化学研究所 光量子工学研究領域
光量子技術基盤開発グループ
中性子ビーム技術開発チーム チームリーダー

大竹淑恵
Yoshie Otake

理化学研究所 光量子工学研究領域
光量子技術基盤開発グループ
中性子ビーム技術開発チーム 研究員

須長秀行
Hideyuki Sunaga

1 はじめに

我が国には、高速道路から市町村道に至るまでの約120万kmの道路に、約15万の橋梁（橋長15m以上）が存在している¹⁾。これらの多くは昭和30年代に始まる高度経済成長期を中心に大量に建設され、我が国の経済成長と国民生活の向上に大きな役割を果たしてきた。

しかし、全国約15万の道路橋のうち建設後40年を超える橋梁が、2015年（平成27年）には約40%に相当する約6.4万橋になることが見込まれ、国土交通省直轄国道橋梁に関する点検結果では、40年以上経過した約5000橋の約半分に対して早急な補修が必要とされている²⁾。また、最近の中央道笹子トンネル天井崩落事故で見られるように、道路橋で重大な損傷が発生し、万が一でも崩落事故となれば国民の生命、財産に危険が及び、復旧にも長期間を要するなど大きな社会的損失が生じることとなる。

このように、疲労や劣化等による道路橋の損傷に対しては早期に適確な対応を行なうことが絶対不可欠である。また、道路橋の安全・安心の確保及び架け替え等による多額な投資を回避していくためにも我が国の道路橋の経年劣化に対する対策は喫緊の課題となっている。

現在、国が直轄する道路橋では、対象とする部位、部材に応じて近接目視を中心とする手法で定期点検が行われている³⁾。しかし、コンクリート中に埋め込まれた部材や、その構造から直接見ることでできない部分など、そもそも目視点検では確認できないところに重大な損傷が隠れていることがある。こうした目視点検での限界を補う上で、例えば内在する亀裂、空隙や鉄筋腐食など内在する損傷や劣化を科学的にかつ確実に発見し、的確に診断できる高度な非破壊検査手法の実用化が期待されている⁴⁾。

しかし、実際に非破壊検査として利用されている手法の大

半は、構造物の局所的な欠陥検出適用に限定されている。鉄筋コンクリートでは表面から十数cm程度の深さまでしか詳細な内部情報を取得できない。また、鉄筋間隔が狭い場合や、何層にも鉄筋が配筋されているような大型構造物（橋脚など）の場合には、表層の鉄筋しか非破壊では調べることができない⁵⁾。既存構造物の維持管理全体を考えると、本来の非破壊検査の役割としては、機能及び性能両面で未だ不十分であり、これらの問題を解消した新たな検査技術の開発が求められている。

本稿では、コンクリート内部数十センチに位置する鋼材の状況や水を識別できる新たな非破壊検査手法として注目されている中性子線について、理化学研究所（理研）が研究を進めている小型中性子源を使用した中性子イメージング技術の現状を紹介しながら、今後を展望する。

2 小型中性子源の適用事例

2.1 小型中性子源について

非破壊検査にはX線が広く用いられている。しかし、X線は重い元素ほど透過しにくくなる特性を持ち、産業用X線CT装置で鋼板厚さ1cm程度が限界となる等大型構造物を構成する鉄骨及びコンクリート内部の鉄筋部材を透過観察することは難しい。一方、中性子線は重い元素でも透過できる特性（図1参照）と水素等軽い元素の可視化に優れていることから、鉄骨や鉄筋の腐食に影響を及ぼす水の識別も可能である⁶⁾。

従来は、原子炉や大型加速器による大規模な施設でしか中性子線源を利用することができなかった。そのため、利用機会及び測定場所・環境が限られると共に試料もサイズ・重量・材料面でも制約されている。

理研では、イオン源で発生させた陽子を線形加速器で

7MeVまで加速させて軽金属ターゲットに照射することにより、核反応を介して効率的に中性子を発生させて試料を観察するシステムを全長約15mのコンパクトな装置 (RIKEN Accelerator-driven Neutron Source = RANS) として実現させた (図2参照)。

2.2 小型中性子源「RANS」による測定事例

図3にASTMの感度インジケータを小型中性子源「RANS」を使用して撮影した透過画像を示す。実際にインジケータを形成する樹脂材料の各部位における厚みの違いが、透過画像において明確に輝度差として検出されている。また、樹脂材料の隙間に配置された異なる厚みを有するアルミ板材 (箔) に対しては、厚さ25 μm 以上のアルミ箔で輝度差をもとに確認できる。

図4は、水を封入した奥行寸法の異なる合成石英製セル (容器) を並べて、容器奥行方向にX線または中性子線を照射することにより撮影した透過画像を示す。X線透過画像 (図

4 (b) 参照) では、容器の奥行寸法が異なっても濃淡差がほとんどなく水の量に対する透過性の違いが確認できない。小型中性子源「RANS」を使用した中性子線透過画像 (図4 (c) 参照) では、奥行寸法が大きい容器ほど水の量が多くなるのに従い、X線とは異なり中性子線では透過性の違いが発生することにより画像の濃淡差として示される。小型中性子源「RANS」では、構造物内部に潜む鉄の腐食に影響を及ぼす水の存在が透過画像の濃淡差として可視化できると考えられる。

2.3 コンクリート橋梁の観察例

橋梁は、鉄鋼部材で構成される鋼橋以外に、鉄筋コンクリートを主に使用したRC (Reinforced Concrete) 橋、コンクリート内部に埋設されたシース管内に鋼材を挿入して圧縮応力を付与した上でクラウト (コンクリート) にて密閉することで強度を維持するPC (Prestressed Concrete) 橋が多くを占める。RC及びPC橋では、コンクリートを補強する鋼材が橋梁の強度を維持する上で非常に重要となる。通常は、コンクリートによって鋼材が保護されているために鋼材が腐食することはないが、何等かの原因により鋼材が腐食すると強度の維持が難しくなる。しかし、鋼材は数十センチの厚みとなるコンクリートに遮られているために、非破壊検査は難しくコンクリートをはつる等微破壊を伴う検査が行われている。

図5 (a) (b) は、厚み50cmのPC橋梁構造をもとに中央部にシース管を模した空洞を配置して内部に鋼製ワイヤーを

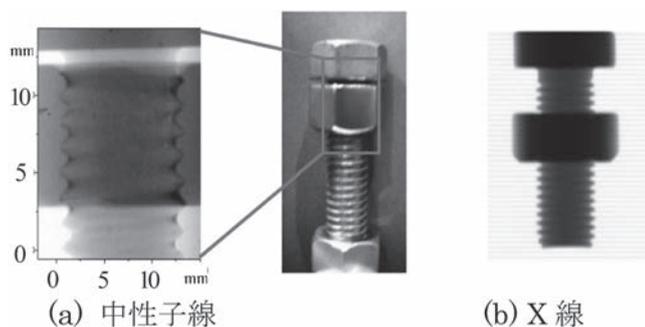


図1 ボルト・ナットの透視画像



図2 理研小型中性子源 (RANS) の全景

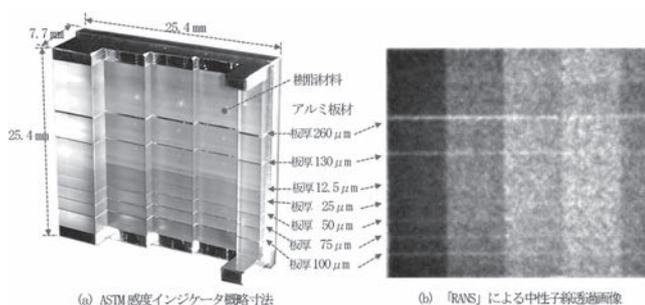
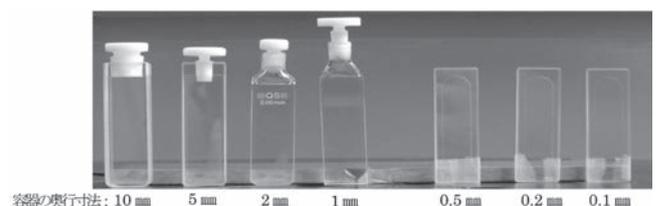


図3 ASTM感度インジケータの透過画像



(a) 水を封入した合成石英セルの外観写真



(b) 水を封入した合成石英セルのX線透過画像



(c) 水を封入した合成石英セルの「RANS」による中性子線透過画像

図4 水を封入した合成石英セルの透過画像

通し、中央部で鋼製ワイヤーが断裂した構造体モデルを示す。3MeVの中性子線をモデル側面から照射することにより得られる透過画像を放射線の挙動を模擬するモンテカルロ計算コードPHITS[®]により解析した結果を図5(c)(d)に示す。シース中央部の鋼製ワイヤー破断部が観察できる。解析結果では、構造部材を透過したビームに対して、3MeVのビーム領域のみを抽出して可視化処理を行った。シース管内部の空隙部とともに鋼製ワイヤー破断部が確認できる。また、鋼製ワイヤー破断領域に水が存在すると仮定して解析することで、同様の可視化結果にて水の有無による影響が確認できる。

セメントコンクリートで造形された小片に対して、出力1MWの実験原子炉を使用して中性子イメージングを行い、透過画像をもとにCT再構成により得られた断層画像を図6に示す。セメントコンクリート内部に埋め込まれた鉄筋及び水を含んでいるかの有無が確認できる。

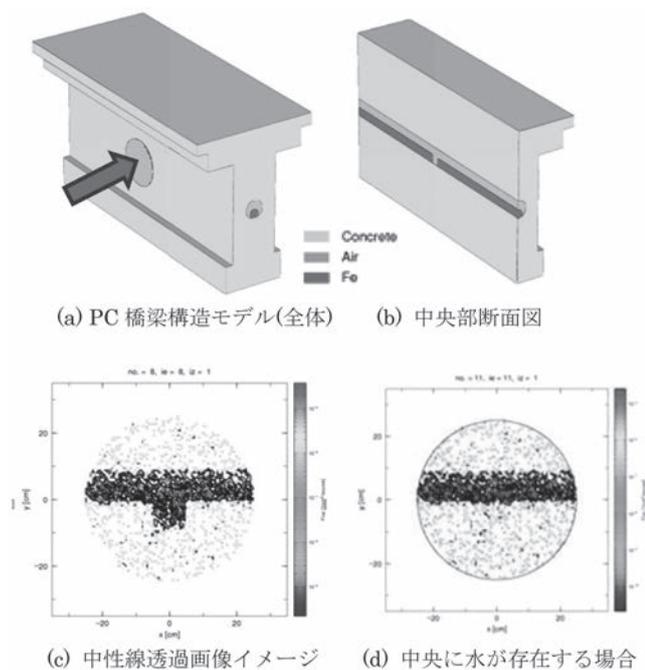


図5 PC橋梁構造モデルの中性子線透過観察シミュレーション結果

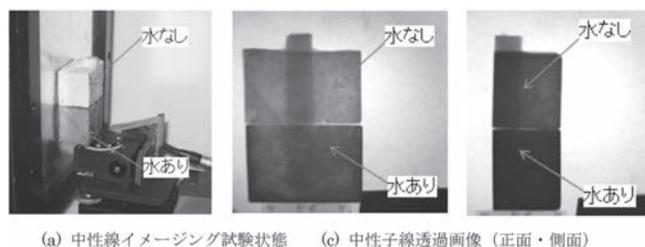


図6 セメントコンクリート部材の中性子線透過画像

3 可搬型中性子源実用化に向けた課題

現在の据置型小型中性子線源は放射線管理区域内に設置する必要があるが、既に装置全体に対して、鉛及びボロン入りポリエチレン等を組み合わせて遮蔽を施すことにより、線源周囲の安全性が十分確保できている。しかし、将来の可搬型中性子源として屋外で使用するには、放射線遮蔽材を含めた装置全体の小型化と同時に重量軽減、さらに移動体としての安全性を考慮した走行衝突時の放射性物質飛散の危険性回避に向けた対策等が必要となる。

さらに、高感度な検出器と画像解析技術の高度化を図り、中性子線源の更なる短パルス化を実現することにより、従来よりも鮮明な透過画像の取得が中性子線の出力を抑えても可能となる。これにより、発生する放射線量が飛躍的に低減でき装置全体のサイズ・重量も軽減できる。

シンチレータと光センサーより構成される検出器には、従来は高圧電源を必要とする光電子倍增管と可燃性の液体シンチレータが一般的に採用されている。しかし、著者らは、低電圧で安定的に動作するMPPCを採用し、新たにプラスチックシンチレータに用いることにより、屋外で安全に使用できる検出器を実現している。

効果的な橋梁の予防保全を実現するには、小型中性子源等による内部劣化情報の取得に併せて、観察されたコンクリート亀裂、鉄筋やPC鋼材の断面積減少や破断、空洞、錆等の存在が橋梁構造全体にどのように影響を及ぼすかを的確に診断できるシステム構築が必要不可欠である。しかし、従来のものづくり支援を主体とする情報技術(CAD/CAE/CAM)では、あくまでも設計形状、すなわちCADで表現された理想的な形状、及び均質な材質で構成されていることを前提としている。そのため、既に供用中の橋梁のように劣化等により実物が設計形状と異なり、内部欠陥や不均一な物性を持つ状態を考慮する必要がある事例では、計算力学的手法の適用は難しく、主に統計手法にもとづく健全性評価が試行されている⁹⁾。

理研では、X線CTイメージング断層画像をもとに空洞等欠陥形状を含めた実物の内部情報及び物性情報を保持した3次元モデルを創成し、熱流体や構造解析等さまざまな数値シミュレーションが使用できるシステムを構築している¹⁰⁾。

図7は、実際の鉄筋コンクリート構造部(住宅基礎部材)から切り出された部材のX線CTイメージングデータをもとに、部材を構成する粗骨材、セメントコンクリート部、鉄筋部材及び空洞ごとに異なる媒質として定義された3次元モデルを示す。さらに、住宅基礎部材に圧縮荷重が負荷された状態を想定した解析結果を図7を行った。粗骨材及び鉄筋部材

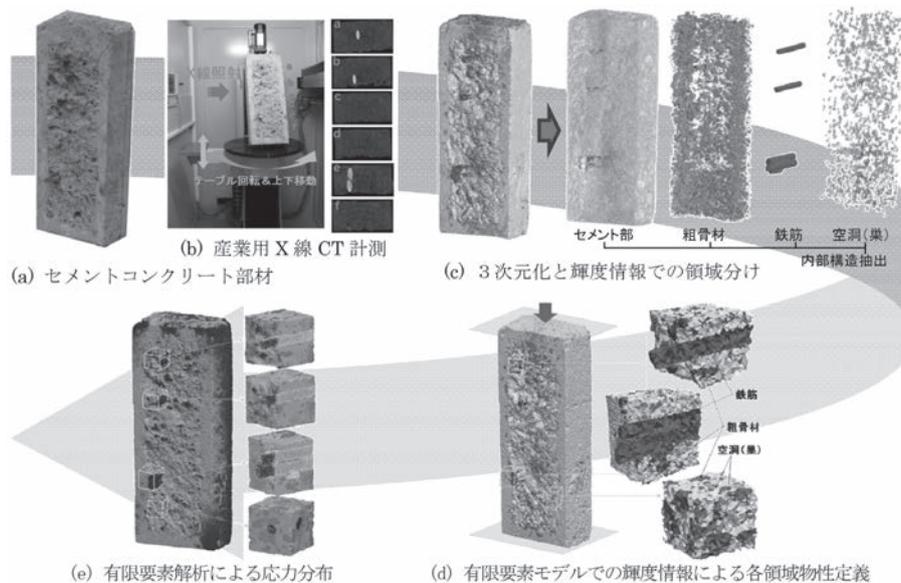


図7 現物にもとづく構造解析プロセスによる強度予測

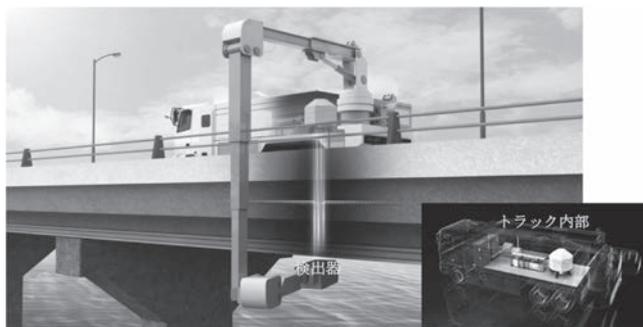


図8 中性子線による橋梁の非破壊検査システム予想図

が他の部分より大きい応力が発生しており、圧縮負荷に対して重要な役割を担っていることが観察できる。

前述のように解決すべき技術的課題はあるが、可搬型中性子源実用化に向けた研究開発を積極的に推進することで、車両内部に小型中性子源とデータ解析システム、橋梁の下部に大面積イメージング検出器が搭載された図8に示すような中性子源による橋梁の非破壊検査システムを実用化させることは可能である。

4 おわりに

供用中の国道の橋で最も古い橋は、1888年に建設された国道34号の湯野田橋、また、東京の日本橋は1911年建設で全国第3位の長寿命橋とされる。橋梁の長寿命化を実現するには、人間と同様に早期に損傷(病)を特定して適切な対策(手当て)を行うことが重要である。手当てが遅れると損傷が著しくなり、結果的に短い供用期間で架け替えが必要となる等

無駄な費用と時間を費やすこととなる。人間の病と同様に内在する損傷や劣化(老化)を定量的にかつ確実に発見し、的確に診断できることが必要不可欠である。こうした要求に応える新たな道具として、中性子線源による非破壊検査システム実用化の可能性について述べた。筆者らは、据置型の小型中性子源にてリチウム電池等ものづくりへの応用に向けた研究等行っている。いずれも従来の計測手法では入手できなかった有用な情報が得られており、小型中性子源の利便性も含めた大型加速器にはない有用性を痛感している。今後、さまざまな分野で小型中性子源の利用が発展していくと同時に、手軽な小型中性子源実用化に向けた研究開発が進展していくことに期待したい。

参考文献

- 1) 深澤淳志：橋梁と基礎，42 (2008)，14.
- 2) 国土技術研究センター，
www.jice.or.jp/jishu/t2/pdf/shiryo17.pdf
- 3) 小川篤生：コンクリート光学，47 (2009) 9, 33.
- 4) 村越潤：橋梁と基礎，42 (2008)，33.
- 5) NIKKEI CONSTRUCTION, 2011.12.12 (2011)，62.
- 6) 山形豊：理化学研究所/土木研究所 合同シンポジウム，(2010)，61.
- 7) T.Nakayama, et. al : Kobe Steel Eng. Rep., 51 (1999)，29.
- 8) 日本原子力研究開発機構，<http://phits.jaea.go.jp/>
- 9) 小林 潔司：土木学会誌，95 (2010) 12, 14.
- 10) 須長秀行，他：理研シンポジウム (VCAD システム研究 2010)，(2011)，74.

(2013年9月9日受付)