

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04656

研究課題名（和文）反射中性子によるコンクリート内欠陥の3次元計測

研究課題名（英文）3D imaging of concrete structure by neutron scattering

研究代表者

藤田 訓裕 (Fujita, Kunihiro)

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・研究員

研究者番号：60532364

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：インフラ構造物で使用されるコンクリート構造物、特に道路橋の床版の劣化や破損を舗装を剥がすこと無く、3次元的に検知するための計測システム開発を行った。従来の高速中性子の散乱を用いたイメージング法では、検査対象物で散乱された後の熱中性子のみを計測していたため、深さ方向の情報を得ることが難しかったが、高速中性子を計測し、熱中性子との収量比を求めることで、深さ情報を得ることが出来ることが本研究で明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

社会的問題となっているインフラ構造物の老朽化の対策として、破壊が起こってから修理する事後保全から、定期診断を行い、破損が小さいうちで補修を行うことでトータルコストを下げる予防保全が提唱されているが、道路橋に対しては高コストであることや、計測の信頼性が十分でないことから、実質的に定期診断は行われていない。本研究成果は道路橋の損傷を低コストで定量的に評価できる非破壊検査システムの核となる技術である。

研究成果の概要（英文）：A three-dimensional measurement system for detecting deterioration and damage of concrete structures used in infrastructure structures, especially road bridge slabs without removing the pavement was developed. In the conventional imaging method using fast neutron scattering, it was difficult to obtain depth information because only thermal neutrons scattered by the inspected objects were measured. From this study, it was found that depth information can be obtained by measuring fast neutrons and determining the yield ratio with thermal neutrons.

研究分野：応用物理

キーワード：非破壊検査装置 中性子

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

国内において高度成長期に整備されたインフラ構造物の劣化が社会問題となっており、2033年には日本全国に存在する40万以上の橋の67%、トンネル1万本の50%が建設後50年を経過する見込みである。2012年の笹子トンネル事故の様な重大な破壊だけでなく、全国各所で起こる損傷や劣化による交通規制なども増加傾向にあり、インフラ構造物の定期診断による予防保全が重要視されてきている。道路橋を構成する部材の一つであるコンクリート床版は道路利用者を直接支える重要な構造物である。道路の舗装下で起こる層状ひび割れや土砂化の原因となるのは、このコンクリート床版の内部に生じる滞水や空隙であるため、これらの進行を定期的に診断することが重要である。しかし、床版はその上に舗装がされており、従来の舗装を剥がして行う診断では行うための場所や時間的な制約が大きい他、金銭コストも多大なものとなるため、現状では十分な定期点検が行われていない。

そのため、コンクリート床版に生じた欠陥について舗装を含めた測定対象を破壊すること無く、迅速にその場で診断できる計測システムの確立は社会的にも早急に行うべき課題であると考えられている。しかし、屋外においてインフラ構造物に使用可能な非破壊検査システムとしては、中性子水分計等の1次元的に水分量を測定できる製品が存在するのみで、内部の構造を定量的に評価できるものは存在しない。また、実験室内で行われるイメージング手法においては、メートル規模の大きな構造物について内部の3次元構造を知ることは、これまでになされたことは無い。これらを解決する新たな測定システムの開発は、応用物理の研究者が解決すべき重要な課題として認識されているところである。

2. 研究の目的

本研究は橋梁等の舗装下で進行する、コンクリート床版の滞水や空隙といった劣化具合を路面側から非破壊で可視化できるイメージング法を開発し、実用化に向けた原理実証を行う。実用化には、床版中の水分位置を検知するだけでなく、溝が出来て漏水しているのか、もしくは大きな欠陥に水が溜まっているのかを識別できる3次元情報が必要不可欠である。そのため、本研究では欠陥の有無や位置だけでなく、欠陥の大きさ、深さ方向の情報を定量的に決定することを目的とする。

3. 研究の方法

非破壊検査には音、光そして放射線を利用した様々な手法が存在しているが、その中でも巨大なインフラ構造物について内部の欠陥を検査する事の出来る手法としては、透過力の高い高速中性子ビームを用いる事が必要不可欠である。しかしながら、高速中性子を用いた3次元のイメージングの確立の為に以下の問題が存在する。一つは、従来のイメージング装置に使われている中性子源はカリフォルニウム等の放射性同位元素を使用したものがほとんどである。空間、時間的に一様等方に放出する中性子を用いるため、測定精度が悪いことや、長い計測時間が必要という欠点であり、もう一つは従来の3次元イメージングのほとんどは、測定対象全体をスキャンするため周囲にセンサーを複数配置するか、対象を移動・回転させる必要がある。しかし、大型のインフラ構造物においては測定対象物を動かすことが不可能であり、また放射線源と測定システムの間に対象物を挟み込む事も非常に困難、もしくは不可能であるということである。

上記の問題点を解決するために、平行度が高く、時間的にパルス構造を持つ中性子ビームを用いる。それに加えて、中性子の後方散乱粒子のみを測定し構造物の内部情報を再構築する。という解決策を採る。すなわち加速器駆動型中性子ビームを用いること、かつ透過や前方への散乱ではなく後方に反射した中性子を用いてイメージングを行う。これによって、位置情報の精度向上が見込めるとともに、飛行時間情報の取得が可能となりシグナルノイズ比の向上を達成する。ここに本研究の独自性がある。

反射中性子を用いて2次元位置、深さ方向を別々に検知した先行研究は存在するが、1つの測定で3次元イメージを得られた先行研究は存在しない。この難題を解決する手法として、本研究では2次元位置情報、および飛行時間情報を取得することの出来る2台中性子検出器を組み合わせ、内部構造を再構築する事を考える。

反射中性子は欠陥を構成する元素によって固有の角度広がりを持ってコンクリート表面から放出されるため、2面の検出器で得られる位置広がり差および収量の比から深さ情報を得ることが可能となる。

4. 研究成果

中性子ビームを用いたコンクリート内部劣化の3次元非破壊可視化技術について、測定方式の可能性について検討した後、計算機を用いたシミュレーション、および物品の調達を行った。また、既存のヘリウム3比例計数管を用いた2次元のコンクリート内部劣化計測実験を行い、従来では不可能であった1cm以下の厚さの滞水や空隙の検出が可能であることを確認した。この反

射中性子を用いてコンクリート内部の劣化を測定する技術をとりとまとめ、特許出願を行った。また、シミュレーション開発については論文発表およびシンポジウム発表を行った。

3次元イメージング手法としては、高速中性子を入射し、コンクリート内部から反射で戻ってきた高速中性子と熱中性子について別々のイメージング検出器を用意し、それぞれの比を取ることで、水分が存在する深さ(かぶり)に関する情報が得られるということが判明した。このシミュレーションによる結果を受けて、高速中性子を2次元イメージング出来る、シンチレーションカウンターを用いた検出器の制作を行うことに決定した。

熱中性子については既存のヘリウム3 比例計数管を用いたイメージング装置を用いて、それと組み合わせる事とした。シンチレーションカウンターとしては米国Eljen社製EJ-270を用い、光検出器としては浜松ホトニクス社製MPPCのS13360シリーズを用いることとし、それぞれを組み合わせた検出器テスト測定を行うために素子サイズについて3パターンの調達を行った。3次元イメージングを達成するための新しい計測手法についての検討は、当初想定以上に時間がかかったが、高速中性子測定を行うことで可能であることが、シミュレーション開発により明らかとなったため、開発方針が定まった。

コンクリートを劣化させる原因となる滞水がコンクリート内部にある場合について、非破壊で3次的にイメージングを行うことが目標である。加速器駆動型の中性子源と中性子検出器を用いた計測システムの開発を進めている。コンクリートに高速中性子ビームを照射して内部で散乱・減速を繰り返して、最終的に表面まで戻ってきた熱中性子を計測することで、内部の情報を引き出すという手法である。

これまでの研究ではヘリウム3を用いた2次元位置検出器を用いて、2次的に水の分布を計測することは可能であったが、本研究では中性子のエネルギー帯によって感度が違う2種類の検出器を用いることで、深さ方向の分布を計測可能とする計画である。光速の1%程度の速度を持つ高速中性子用と、音速程度の速度を持つ熱中性子用の2種類の検出器を用いることを考えている。熱中性子検出器については既存のヘリウム3を用いた検出器を使用するため、今回は高速中性子を2次元イメージングできる検出器の開発を行う。

高速中性子を計測できる水素を多く含んだプラスチックシンチレータで、かつガンマ線のバックグラウンドを効率的に除去するため、放射線の種類によって出力される光信号の波形が異なるシンチレータを採用した。光検出にはシリコンフォトマルチプライヤーを採用し、出直された電気信号はプリアンプで増幅された後、デジタイザによってデータ収集される。これらイメージング検出器を製作後、理研小型中性子源RANS-IIを用いて、性能評価実験を行う。コンクリート内部の水分について3次元計測が可能であるかどうかの、実現可能性評価を行う。

現在は少量の検出器素子と読み出し系を調達して、測定の準備を整えた。また、従来使われてきた熱中性子検出器を用いたイメージング技術の開発も進めており、論文、シンポジウム発表を行ったほか、特許出願も行った。

研究代表者が2022/9に転出にしたことにより、研究は当初計画より早期に終了した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 藤田訓裕, 岩本ちひろ, 高梨宇宙, 大竹淑恵	4. 巻 1
2. 論文標題 小型加速器を用いた中性子散乱イメージングによる橋梁構造物の非破壊検査	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 中性子線を用いたコンクリートの検査・診断に関するシンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 196-201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 藤田訓裕, 岩本ちひろ, 高梨宇宙, 大竹淑恵, 野田秀作	4. 巻 21
2. 論文標題 散乱中性子イメージング法を用いた道路橋床版の滞水・土砂化検知システム	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第21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集	6. 最初と最後の頁 484-489
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 藤田 訓裕, 岩本 ちひろ, 高梨 宇宙, 大竹 淑恵, 野田 秀作, 井田 博之	4. 巻 1
2. 論文標題 散乱中性子を用いた床版内欠陥の非破壊検査システム	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 第11回道路橋床版シンポジウム論文報告集	6. 最初と最後の頁 47, 52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 藤田訓裕, 岩本ちひろ, 高梨宇宙, 大竹淑恵
2. 発表標題 現場実証機RANS-IIによるインフラ構造物内部劣化の非破壊可視化の成功
3. 学会等名 2021理研シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤田訓裕, 岩本ちひろ, 高梨宇宙, 大竹淑恵
2. 発表標題 RANS-11によるインフラ非破壊計測
3. 学会等名 茨城県中性子利用研究会 第2回iMATERIA研究会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤田訓裕, 岩本ちひろ, 高梨宇宙, 大竹淑恵
2. 発表標題 小型加速器を用いた中性子散乱イメージングによる橋梁構造物の非破壊検査
3. 学会等名 中性子線を用いたコンクリートの検査・診断に関するシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤田訓裕, 岩本ちひろ, 高梨宇宙, 大竹淑恵, 野田秀作
2. 発表標題 散乱中性子イメージング法を用いた道路橋床版の滞水・土砂化検知システム
3. 学会等名 第21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
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kunihiro Fujita, Chihirolwamoto, TakaokiTakanashi, YoshieOtake
2. 発表標題 Defect detection for bulk samples via neutron scattering imaging
3. 学会等名 4th Joint RIKEN/HBS Workshop(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤田 訓裕
2. 発表標題 小型中性子源RANS, RANS-II を用いたインフラ構造物の散乱イメージング
3. 学会等名 理研シンポジウム:第8回「光量子工学研究」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤田 訓裕, 岩本 ちひろ, 高梨 宇宙, 大竹 淑恵, 野田 秀作, 井田 博之
2. 発表標題 散乱中性子を用いた床版内欠陥の非破壊検査システム
3. 学会等名 第11回道路橋床版シンポジウム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計5件

産業財産権の名称 合成床版の非破壊検査装置と非破壊検査方法	発明者 藤田訓裕, 岩本ちひろ, 高梨宇宙, 大竹淑恵, 野田秀作, 井田博	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2021-159483	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 高周波四重極線形加速器、中性子源システム及び高周波四重極線形加速器の製造方法	発明者 池田翔太, 若林泰生, 藤田訓裕	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2021-160864	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 観察装置と断面画像取得方法	発明者 藤田訓裕, 岩本ちひろ, 高梨宇宙, 大竹淑恵	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2021-190288	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 非破壊検査装置と非破壊検査方法	発明者 藤田訓裕, 岩本ちひろ, 高梨宇宙, 大竹淑恵	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、JP2021/038273	出願年 2021年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 非破壊検査装置と非破壊検査手法	発明者 藤田 訓裕, 岩本 ちひろ, 高梨 宇宙, 大竹 淑恵	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-175252	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

プレスリリース(理化学研究所)：橋梁の床版内部土砂化・滞水の新たな検知法
https://www.riken.jp/press/2021/20211201_2/index.html

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------