

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04951

研究課題名（和文）中性子線源を用いた新しい地中空洞探査法に関する研究

研究課題名（英文）Study on a new detection method for underground cavity using a neutron source

研究代表者

米田 政夫（Komeda, Masao）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・研究主幹

研究者番号：90469817

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：道路・トンネル等の社会インフラの老朽化は、現在のみならず今後の日本にとっても非常に重要な課題であり、それらを調べる非破壊測定手法の開発は重要である。本研究で提案した新たな空洞探査法は、回転照射装置と呼んでいる装置を使用し、この装置は中性子線源を取付けた円盤を数千rpmで回転させることが可能である。中性子線源を低速及び高速回転させた時の中性子カウントの時間変化を比較することで空洞探査を行う。シミュレーションを用いて対象物内の中性子挙動を調べ、本手法による空洞探査を基礎的な原理を明らかにした。さらに、ポリエチレンブロックを用いた実験によって、本手法の基礎原理を実証することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地中を構成する多くの物質は水分を含むため、水分に対して感度の高い中性子はそれを観察するのに非常に適している。中性子照射を行うには、中性子線源を用いることがコスト面等からも現実的であるが、中性子線源は連続ビームであるため、単純な照射だけでは、空洞を調べるのが難しい。本研究の学術的な意義は、円盤に取り付けた中性子線源を回転させながら対象物に照射し、中性子カウントの時間変化から空洞有無を調べるといった新たな探査方法を提案したことである。老朽化した道路・トンネル等の社会インフラは今後も増加していくことが予想され、本研究成果はそれらの探査に貢献できる可能性がある点において、社会的意義を有する。

研究成果の概要（英文）：The deterioration of social infrastructure such as roads and tunnels is a very important issue not only for the present but also for the future of Japan, and the development of non-destructive measurement methods to investigate them is important. The new cavity exploration method proposed in this study uses a device called a rotating irradiation device, which is capable of rotating a disk with a neutron source at several thousand rpm. Cavity exploration is performed by comparing the time change in neutron counts when the neutron source is rotated at low and high speeds. Simulations were used to investigate the behavior of neutrons inside the target object, and the basic principles of cavity exploration using this method were clarified. Furthermore, the basic principles of this method were demonstrated through experiments using polyethylene blocks.

研究分野：放射線測定技術開発

キーワード：空洞探査 中性子 回転照射 低コスト 中性子線源

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

道路・トンネル等の社会インフラの老朽化は、現在のみならず今後の日本の国家的課題の一つであると言える。今後の人口減少に伴う労働力の減少を考慮すると、今後も増加していく高齢化した膨大なインフラを効率的に維持管理することが肝要である。特に道路やトンネルの内部に発生する空洞は、陥没や崩落といった重大な被害に繋がることから、それを非破壊で探査する手法が重要となる。

現在、地中の空洞探査法として主に地中レーダを用いたものが使用されている。この方法は装置がコンパクトであるという特長がある一方で電磁波を用いていることから、原理的に比誘電率の高い物質(金属等)の影響を強く受けるという大きな欠点がある。近年、中性子を用いたインフラ検査法に関する研究開発が世界中で進められている。地中を構成する多くの物質は水分を含むため、水分に対して感度の高い中性子はそれを観察するのに非常に適している。さらに、電磁波による探査で問題となる金属の影響もほとんど受けない。

中性子を用いた手法には、主に加速器を用いた中性子発生装置(以下、加速器中性子発生装置)が用いられるが、その装置は大型かつ高価であることが大きな欠点となっている。特に、地中レーダ装置のように手押し台車で運べるような加速器中性子発生装置は存在しない。中性子源には加速器中性子発生装置以外に **Cf-252** 等の線源(以下、中性子線源)がある。中性子線源は、ボールペンのキャップ程度と小型であるうえ、表示付認証機器である中性子源を用いれば **RI** 許認可申請も不要であり、価格も加速器中性子装置に比べて大幅に廉価である。しかしながら、中性子線源は連続ビームであるため、基本的に単純な反射率しか分からず、パルス照射が可能な加速器中性子発生装置とは異なり、対象物内部について詳しく調べることは困難である。つまり、中性子線源を用いた地中の空洞探査には、これまでにない新しい原理による測定が必要である。さらに社会実装までを見据えると装置は、低コストで可搬性に優れていなければならない。

### 2. 研究の目的

本研究で取り組む新たな空洞探査手法は、地面近傍で中性子線源を高速で回転させ、その回転動作に同期させた計測によって地面から反射する中性子を測定し、その時間分布から地面中の空洞を検査する方法である。本手法では、地面近傍で中性子線源を(回転軸を地面と平行にして)回転させる。この手法は、中性子線源をアルミニウム製円盤の外周部近傍に取り付け、その円盤を回転させることで実現できる。主に円盤及び回転駆動部で構成される回転照射装置は、廉価な汎用部品で製作可能である。円盤と地面の間に中性子検出器を取付け、回転と同期した中性子カウントの時間変化を求める。回転照射装置を用いた新たな空洞探査法の基礎原理について実験で実証することが本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

#### (1) シミュレーションによる解析

測定データのイメージを図1(右)に示す。図1(左)にある回転円盤上のA、B、C点を用いて測定データを説明する。各点において、一瞬だけ中性子を発生させた場合の測定データのイメージは、図1(右)のA、B、Cのような破線(注:縦軸は対数)となる。

各線とも、照射直後に急激に減少し、その後、比較的緩やかに減少する。この比較的緩やかに減少する部分は、地中内部の物質の影響を反映している。非常に高価な加速器中性子発生装置で得られるパルス中性子を用いれば、この緩やかな成分を直接観測することも不可能ではないが、中性子線源を用いた方法では照射中性子は連続ビームとなり、本手法において観測されるデータのイメージは、図1(右)の曲線(実線)となる。中性子線源の回転速度が遅い場合、観測されるデータは、照射直後の値と緩やかに減少する部分はほぼ同時に観測される。しかし、回転速度が速くなると、緩やかに減少する部分の影響が大きくなり、例えば、C点での測定データにおいて、B点で発生した緩やかに減少する部分の影響が大きくなる。この緩やかに減少する部分の影響は、中性子線源が高速で回転し、かつ、地中に物質が詰まっている場合に現れる。このような現象を確認するため、**PHITS** コードを用いたシミュレーションを実施する。図1に示すような体系の計算モデルを作成し、実際と同じように中性子線源を回転させた計算を実施する。中性子検出器の時間応答だけでなく、物理現象を視覚的に確認するために、中性子束分布の時間変化についても調べる。

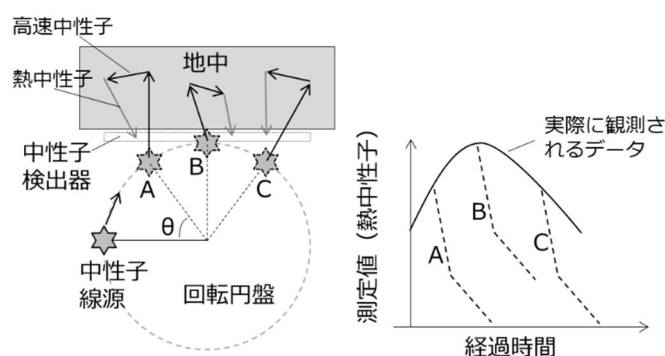


図1 中性子源回転照射法の体系イメージ(左)と測定データのイメージ(右)

## (2) 実証実験

中性子線源の回転照射は、核物質検知装置用に開発された回転照射装置を用いて実施した。回転照射装置は、外形寸法が幅 50cm、奥行き 80cm、高さ 70cm であり、直径 41cm の円盤を最大 5000rpm で回転させることが可能である。なお、この回転照射装置は、地面や台に載せられた対象物を測定するものであるため、円盤は地面に水平に取り付けられている。そのため、本研究の実証実験では、地面を模擬した対象物を台の上に乗せて、水平方向に中性子照射を行う。

図2に実験体系例を示す。左側の白い物体が測定対象物であるポリエチレンブロックである。実証実験では、基礎原理の確認に適しているポリエチレンブロックを用いた。ポリエチレンブロックの内部のブロックを取り外すことにより空洞を模擬した。ポリエチレンブロックの右側にある四角い箱型のものが回転照射装置であり、その内部には図に示すように円盤が格納されており、円盤の外周部に中性子線源(Cf-252)を取

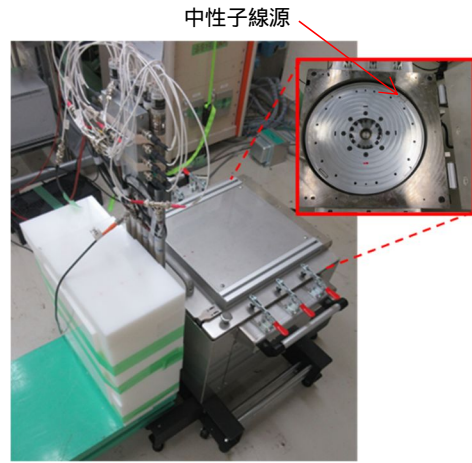


図2 実験体系例

付ける。測定対象物と回転照射装置の間に中性子検出器として He-3 検出器を 6 本配置している。検出器の先端部にディスクリ機能を有するアンプを取付けている。中性子検出信号は TTL 信号で MCS(Multi Channel Scaler) に送られ、回転信号と同期したカウント推移が記録される。本実証実験では、空洞有無を調べるために、低回転速度(300rpm)と高回転速度(4000rpm)の測定を実施し、両者を比較検討した。

## 4. 研究成果

### (1) シミュレーション結果

シミュレーション体系及び中性子束分布の結果を図3に示す。シミュレーションでは、計算コードとして PHITS コードを、核データライブラリとして JENDL-4.0 を使用した。200x200x100cm のコンクリート層の内部に 50x50x20cm の空洞を設けた。アルミニウム製円盤の外周部に中性子線源(Cf-252)を取りつけており、本計算では中性子挙動を簡単に理解するために、円盤を回転させず、線源がコンクリート表面に最も近づく位置に固定した。コンクリート層と円盤の間に、中性子検出器として He-3 検出器(直径 2.5cm、長さ 100cm)を 6 本配置している。図3では、中性子を一瞬発生した場合の発生直後(0~0.2ms)と 1.8~2.0ms での中性子束分布(水平断面)を示している。

中性子の発生直後、表面近傍の中性子束分布は、空洞が無い方が明らかに高くなっている。これは空洞が無い場合の反射効果が高くなるため、自明とも言える。一方、照射後しばらく時間が経過(1.8~2.0ms)すると、照射直後とは反対に、空洞有りの方が表面近傍の中性子束は高くなることが分かった。これは空洞が存在すると、深部で散乱した中性子が表面に近傍に到達するためと考えられる。このような一瞬の中性子照射を行うことで空洞有無を調べる方法が考えられるが、そのような中性子を発生させるためには加速器が不可欠であり、前述の通り、加速器は非常にコストが高く、機器も大型となるという問題がある。そこで、本研究では中性子線源を回転させる手法を考案した。中性子線源を回転させることにより、中性子強度は連続的に変化する。中性子線源を回転照射した場合、中性子検出器カウントの時間変化のシミュレーション結果を図4に示す。ここで、角度は円盤の回転角度を示し、角度 270° は中性子線源が最もコンクリート層に近づく角度となる(図3の赤星位置)となる。中性子線源の回転速度は、低速回転は 60rpm、高速回転は 4000rpm とした。He-3 検出器は、高速中性子に対する断面積は小さく、主に熱中性子と反応を起こす。そのため、中性子カウントに寄与する主な中性子は、中性子線源から発生した高速中性子ではなく、コンクリート層で減速した熱中性子によるものとなる。図4において、空洞無しの方が中性子の反射率が高くなるためである。空洞の有無にかかわらず、低速回転時のピークは 270° であることが分かる。これは、回転速度が低速であるため、ある回転位置において発

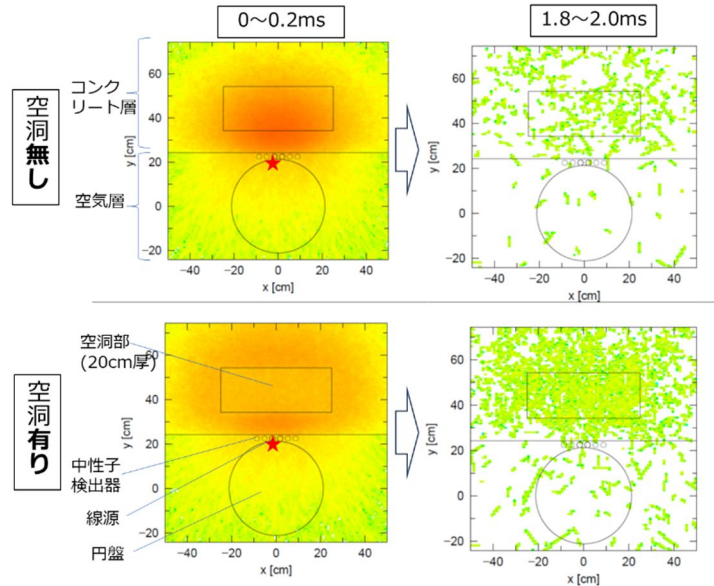


図3 空洞有無時の中性子束分布

射を行うことで空洞有無を調べる方法が考えられるが、そのような中性子を発生させるためには加速器が不可欠であり、前述の通り、加速器は非常にコストが高く、機器も大型となるという問題がある。そこで、本研究では中性子線源を回転させる手法を考案した。中性子線源を回転させることにより、中性子強度は連続的に変化する。中性子線源を回転照射した場合、中性子検出器カウントの時間変化のシミュレーション結果を図4に示す。ここで、角度は円盤の回転角度を示し、角度 270° は中性子線源が最もコンクリート層に近づく角度となる(図3の赤星位置)となる。中性子線源の回転速度は、低速回転は 60rpm、高速回転は 4000rpm とした。He-3 検出器は、高速中性子に対する断面積は小さく、主に熱中性子と反応を起こす。そのため、中性子カウントに寄与する主な中性子は、中性子線源から発生した高速中性子ではなく、コンクリート層で減速した熱中性子によるものとなる。図4において、空洞無しの方が中性子の反射率が高くなるためである。空洞の有無にかかわらず、低速回転時のピークは 270° であることが分かる。これは、回転速度が低速であるため、ある回転位置において発

生した中性子は、ほとんど回転角度が変化しないうちに収束するためと考えられる。一方、高速回転時は、ある角度で発生した中性子は、少し前の角度で発生した中性子の遅延分と合算されたものが観測される。そのため、低速回転時に比べて、右側（角度が進む方向）に少しシフトしている。なお、注意点としては、低速回転と高速回転での中性子照射量は同じであることから、グラフ形状が異なっても、両者の積分値は同じになることである。図4の結果では、空洞の有無によってピーク高さが明らかに異なり、その高さから空洞有無を判断することができそうであるが、実際は困難である。線源の高さや対象物組成によって反射率は変動するため、中性子カウントの高さだけで空洞の有無を判断することはできない。更に、高速回転時はグラフが右側に少しシフトするが、この傾向は空洞有無に関係なく現れるため、この特徴だけから空洞有無を判断することはできない。

本研究では、ピーク前後のカウント値の比を比較する方法を提案した。ピーク位置の角度が  $270^\circ$  であることから、“ $(270+X)/(270-X)$ ” の値を求めた。ここで、この値を前後比と呼ぶことにし図5に前後比の計算結果を示す。この結果から、低速回転の時は、空洞有無に関係なく前後比がほぼ1であることが分かる。これは図4の結果からも推測されるものである。一方、高速回転時は、低速回転時とは傾向が大きく異なり、空洞有無の両結果とも1より高くなった。更に、角度  $330^\circ$  辺りまでは、空洞無い場合の値が高くなったが、それ以降は逆に空洞有りの値が高くなるという結果となった。これは、角度が進むほど、空洞の奥側の中性子による中性子カウントの寄与が大きくなるためと考えられる。

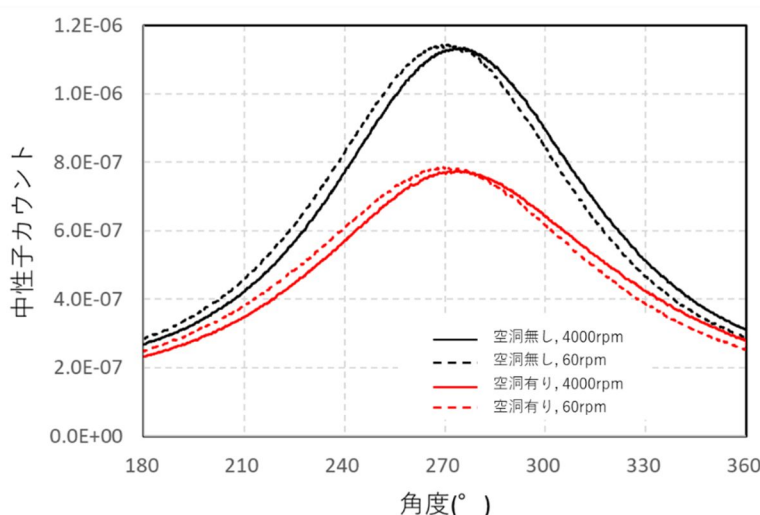


図4 回転速度毎の中性子カウントの推移

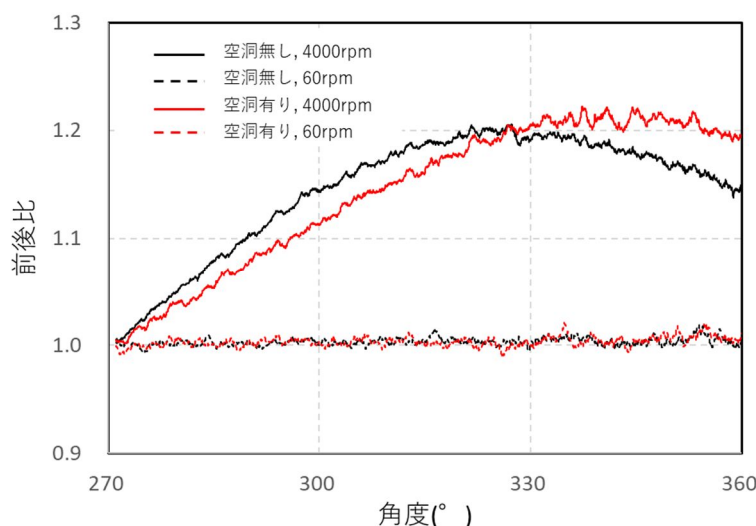


図5 前後比の結果

## (2) 実験結果

前項のシミュレーション結果において、中性子カウントの前後比を用いた空洞検知法の可能性を示した。この方法を実証するため、回転照射装置を用いた基礎実験に取り組んだ。対象物組成としては、扱いが容易で基礎実験に適しているポリエチレンブロックを用いた。ポリエチレンブロックの寸法は、約  $60 \times 60 \times 22(\text{cm})$  である。空洞時は、この内部から約  $60 \times 60 \times 7(\text{cm})$  のブ

ロックを撤去して空気層に置き換えた。回転速度は、**300rpm**（低速回転）と**4000rpm**（高速回転）とした。中性子線源(**Cf-252**)の強度は約**1.6MBq**であり、測定時間は各速度それぞれ**10分**である。角度位置について、線源が対象物に最も近付く角度は**180°**となる。

実験結果例を図6に示す。シミュレーション結果と同様に、低速回転時は空洞有無にかかわらず前後比は約1となっていることが分かる。前後比の値が1から若干離れているのは、対象物及び検出器配置の幾何学的な影響によるものと考えられる。シミュレーションと条件が異なるが、高速回転の結果についてもシミュレーションと同じ傾向が得られた。前後比は1よりも高くなっており、前半(**320°** 辺りまで)は空洞無しが高くなっており、後半は逆に空洞有りが高くなっている。この実験結果により、前後比を用いた空洞探査法に関する基礎的な実証を達成することができた。本研究では、基礎的な研究のために簡単な体系を用いたが、今後の課題としては、様々な材質や空洞サイズについても調べていく必要がある。

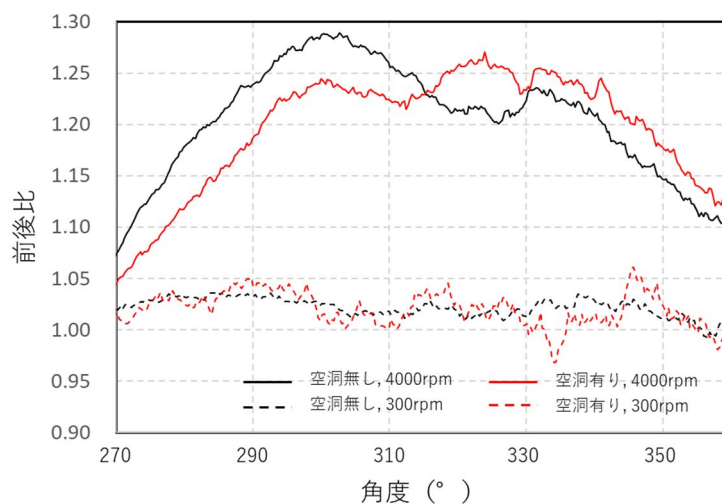


図6 実験結果例

### (3) まとめ

本研究では、回転照射装置を用いた新たな空洞探査法を提案し、その基礎原理について実験で実証することができた。回転照射装置は、中性子線源を取付けた円盤を回転させるものであり、加速器を用いた中性子発生装置に比べて大幅に廉価であり、かつ、可搬性を有する。空洞有無及び回転速度によって、対象物から反射する中性子の時間変化は異なる傾向を示し、その傾向を調べることで空洞有無を判断できる可能性があることが分かった。なお、本研究で用いた回転照射装置は、核物質検知用途で開発されたものであり、本研究成果と合わせることで核物質検知と空洞探査の両用途に対応可能な装置も期待できる。本研究では基礎的な研究のため、ポリエチレンを用いた簡単な体系による実験に取り組んだが、今後は、より多様な組成・空洞条件についても検討していく必要があると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Masao Komeda, Yosuke Toh	4. 巻 188
2. 論文標題 New data processing method for nuclear material measurement using pulsed neutrons	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Radiation and Isotopes	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.apradiso.2022.110391	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0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------