

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04608

研究課題名（和文）宇宙線イメージングによる土木構造体の健全性評価技術の開発

研究課題名（英文）Development of assesment technology for the soundness of civil engineering structures using cosmic ray imaging

研究代表者

北川 暢子（KITAGAWA, Nobuko）

名古屋大学・未来材料・システム研究所・特任助教

研究者番号：20727911

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：近年、地球温暖化による集中豪雨やそれによる河川の洪水のニュースは国内でも耳にすることが多くなった。日本の河川の総距離は15万kmもあり、その全てを点検するのは困難である。また既存の技術では探査深度や範囲が限定されているなど、新たな点検手法が望まれている。そこで、原子核乾板という放射線に感度がある写真フィルムを用いて宇宙線イメージングにより堤体内部の観測を試みた。その結果、道路管理用のハンドホールの位置と大きさを特定し、本技術の有用性の実証をした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

堤防の高さなどの基準は河川ごとに決められており、それに合わせて増築が繰り返されてきた。古くから存在するものは履歴（土質、積層状態）が不明なものも多く、新しい技術として表面が護岸コンクリートで覆ったことによる盛土への影響など、開削しないと分からないことばかりである。堤防の維持管理において、堤体内部の状態を非破壊で調査出来る新技術が強く望まれており、本研究成果は、宇宙線イメージングが新技術として十分可能性があるものであると実証できたと考えている。今後は、様々な場所、条件での観測を可能にする手法の開発や詳細な解析による堤体内の密度分布の算出など、実装に向けた研究を進めていきたいと考えている。

研究成果の概要（英文）：In recent years, we have increasingly heard news about heavy rainfall and consequent river flooding caused by global warming even in Japan. With a total length of 150,000 km of rivers in Japan, it is difficult to inspect all of them. Additionally, existing technologies have limitations in terms of exploration depth and range, highlighting the need for new inspection methods. To address this, we attempted to observe the interior of levees using cosmic ray imaging with nuclear emulsion plates, which are photographic films sensitive to radiation. As a result, we successfully identified the position and size of handholes used for road management, demonstrating the effectiveness of this technology.

研究分野：宇宙線観測

キーワード：宇宙線イメージング ミューオン 土木構造体の健全性評価

1. 研究開始当初の背景

我が国のインフラ構造物の建設は高度成長期に一気に進み、その多くが建設から 50 年を経て、経年変化による老朽化への対応が必要不可欠である。近年、増加傾向にある集中豪雨などの影響により、堤防や盛土といった土木構造物の脆弱部を察知し補強工事を施工することは、人々の安全な生活を担保する上で重要な課題である。しかし、総距離何十万 km もある河川堤防や盛土の安全性を評価するには、既存のシステムでは検査箇所限定や探査深度の限界もあり、不十分な点が多い。そこで、これまでピラミッドの内部構造や原子炉の燃料溶融を検出してきた宇宙線イメージングの技術をインフラ点検に応用できないかと考え、本研究の提案に至った。

2. 研究の目的

近年は局所的に短時間に大雨が降るスコールのような雨の降り方が多く見受けられるようになった。また、温暖化の影響とも考えられる台風の強大化により、長時間の大雨をもたらし現象もよく耳にするようになった。このような気象の変化により、急峻な地形を持つ日本では河川の増水が短時間のうちにおこり、河川の氾濫の危険性もより高くなってきている。そのため、洪水の危険性がある箇所は予め検知して補強したいところであるが、効率よく探査できる手法がほとんどない。そこで、広い視野を持つ原子核乾板という素粒子の検出器を用いて、面的に物質の密度分布を測定出来る宇宙線イメージングの技術を堤防の安全性評価のために応用することを考え、試験的に樋管内部から堤体内部の観測を行い、応用の可能性を探った。

3. 研究の方法

本研究の技術の根幹となる宇宙線の検出器は、原子核乾板と呼ばれる荷電粒子の飛跡を三次元的に記録できる写真フィルムである。原子核乾板(以下、フィルムと呼ぶ)は、「電源不要、コンパクト」であり、一旦遮光性、密閉性が高いシートでパックすれば屋内外問わず水などがある場所でも容易に設置できる。堤体内部をイメージングするために、予めコンクリート製の樋管の天井に検出器の設置箇所(2m 間隔)にアンカーボルトを打ちこみ、フィルム(25cm×30cm)を複数枚積層して固定したアルミニウム製のカセット状のものをレールに沿わせて装着し、複数箇所でも観測を行った。1~4 か月毎にフィルムを取替え、季節ごとのデータを取得した。

観測を行った樋管は、信濃川の支流の川沿いに設置されたもので、昭和 50 年代に設置された旧樋管と、その横に 2019 年に設置された新樋管がある。2024 年春には旧樋管は撤去され、新樋管に取って代った。旧樋管では樋管に沿って 2m ごとに 16 か所設置し、新樋管では 7 か所設置して、土被り厚が異なる位置で宇宙線の観測データによりその厚さの変化(違い)が再現できるかを確かめた。

データ解析は、各観測期間が終了した時点でフィルムを取り出し、名古屋大学に持ち帰り、化学現像、読み取りのための下処理を経て、高速自動飛跡読み取り装置(HTS)によりフィルムに記録された宇宙線の三次元データを取得した。複数枚のフィルムを用いて再構成された宇宙線の飛跡情報から、単位時間・単位面積・単位立体角ごとに宇宙線の数(宇宙線のフラックス)を算出し、堤体内の(相対的な)密度分布を求めた。

4. 研究成果

(1) 防水性を高めたパック材の使用による検出器(フィルム)の性能確認の実験とその結果: 研究方法で述べた原子核乾板の特徴として、遮光性、密閉性が高いシートでパックすれば、検出器が浸水する場所でも観測可能である。しかし、これまでの実験で、従来使用していたアルミラミネートされたシートを用いた場合、硝酸イオンが存在する環境下では、アルミニウムの腐食が検出されると共に、中のフィルムにダメージが及び解析不可能な状態になる事があった。そのため、観測場所の水質を検査するとともに、二重にパックするなどの工夫も加え、約 1 か月間、新樋管内に設置したフィルムの解析を行い、検出器の性能の評価を行った。その結果、観測場所における水質に問題はなく、想定していた通りの結果が得られた。一重のパックでも問題が無いことが分かったが、生活用水と直結して化学物質が流れ込む可能性があるため、念のため二重パックをして観測を継続することにした。

(2) 約 1 か月分の新樋管のデータから示唆された低密度部分の詳細解析: 新樋管の約 1 か月分のデータから、土被り厚に応じた宇宙線フラックスの違いが検知され、さらに周辺部の付属節部の構造も再現できていることが分かった(図 1)。また、周辺部よりも宇宙線の数が多い、つまり低密度な部分が存在することが示唆された。しかし、この統計量では不十分なため、さらに、2 か月分、3 か月分のデータを確認し、どの期間でも低密度らしい部分を検知した。これらを積

算して約半年分のデータから、低密度部分の場所の特定を行い、天端（道路）の両脇の表面付近に3か所存在することが分かった（図2）。その大きさは、空洞だと仮定すると1立方メートルであった。後に国交省の河川担当者に問い合わせたところ、これらの場所と大きさは、樋門周辺に設置された管理用光ファイバーのハンドホールと一致することが判明した。この結果により、A4サイズの検出器で約1か月観測すると、10m級の土被り厚の中に約10%に相当する大きさの空洞の兆候を得られることが分かった。この結果は、ICRC2023のポスター発表、日本物理学会大78回年次大会(2023)のシンポジウム講演、地盤工学会誌2024年1月号などで発表した。

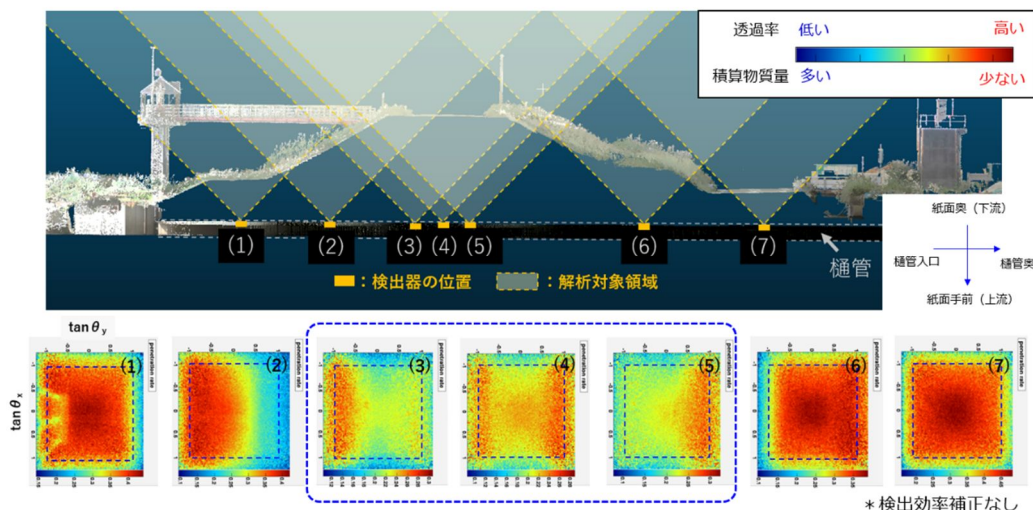


図1：新樋管内での約1か月間の宇宙線の観測データ（透過率に変換したもの）。（1）の検出器では、樋管入り口上部にあるコントロールルームの構造（支柱を含む）が再現されている。

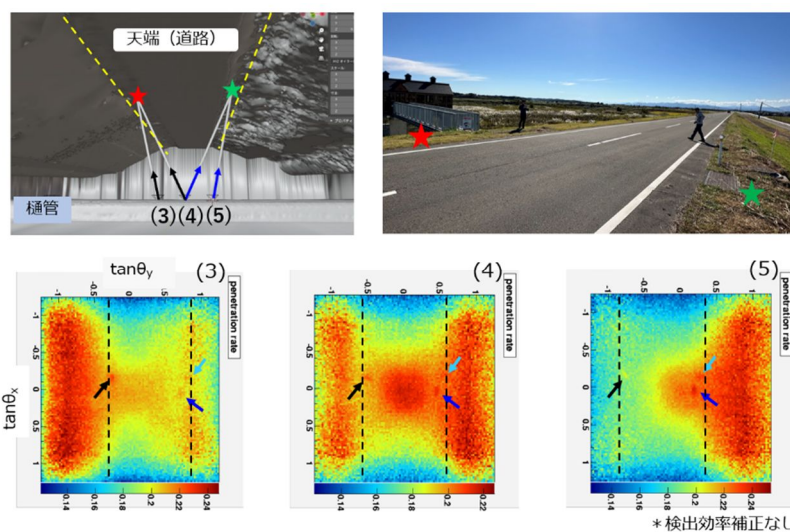


図2：約6か月分のデータから新樋管内の中央3つの検出器で検出した3か所の空洞（黒、青、水色の矢印が示す）の位置の推定（上左図）とハンドホールの位置を示した現場の写真（上右図）。

（3）従来よりも大きい粒子径乳剤を用いたフィルムの感度評価：フィルムの両面に塗布された原子核乳剤の中には臭化銀結晶がゼラチン中に充填されているが、従来の結晶サイズ（約200nm）よりも大きいサイズ（約300nm）の乳剤を用いたフィルムを堤防の観測に用いた。その結果、屋外観測における環境下で（特に気温の影響について）従来のフィルムに比べて感度が向上する事が分かり、今後の堤防の観測では標準的に使用していく見込みがたつた。

（4）旧樋管と新樋管のデータの比較：旧樋管と新樋管では、出来る限り土被り厚が同程度になるような場所に設置した。同観測期間で土被り厚が類似する部分で二つのデータを比較したところ、イメージング図（宇宙線フラックスの二次元的な分布）に僅かな違いが見られた。これは樋管上部に盛られた土の質が反映されたものである可能性が高い。研究期間は終了したが、今後、複数箇所のデータ、異なる観測期間のデータでも比較を行い、密度が異なる土の分布（積層構造）が推定していく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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 1件）

1. 著者名 北川暢子、森島邦博、福元豊、安田浩保	4. 巻 72
2. 論文標題 原子核乾板を用いた宇宙線イメージング技術による河川堤防の観測	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 地盤工学会誌	6. 最初と最後の頁 24-28
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 N. Kitagawa, K. Morishima, Y. Fukumoto, H. Yasuda, T. Imanishi, K. Kishimoto, H. Kodama, F. Miyata, K. Morii, K. Nakano, T. Nishigaki and K. Shimizu	4. 巻 444
2. 論文標題 Development of cosmic-ray imaging with nuclear emulsion films for safety assessments of levees	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of Science (ICRC2023) 540	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.22323/1.444.0540	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 児玉滉人、森島邦博、北川暢子
2. 発表標題 Blenderを用いた宇宙線イメージングによる未知空洞の3次元推定
3. 学会等名 日本写真学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森井健登、森島邦博、北川暢子
2. 発表標題 新調湿材料を用いた原核乾板の調湿手法の研究
3. 学会等名 日本写真学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 志水凱、北川暢子、森島邦博、桑原謙一、吉田哲夫、西垣豪人
2. 発表標題 大粒子原子核乾板の低温現像による粒子サイズ制御と読み取り装置による性能評価
3. 学会等名 日本写真学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 N. Kitagawa, K. Morishima, Y. Fukumoto, H. Yasuda, T. Imanishi, K. Kishimoto, H. Kodama, F. Miyata, K. Morii, K. Nakano, T. Nishigaki and K. Shimizu
2. 発表標題 Development of cosmic-ray imaging with nuclear emulsion films for safety assessments of levees
3. 学会等名 ICRC2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 北川暢子
2. 発表標題 宇宙線ミュオンを用いた河川堤防内部の可視化
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 志水凱、北川暢子、森島邦博、西垣豪人
2. 発表標題 大粒子原子核乾板の解析手法の開発
3. 学会等名 第84階応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中野健斗、北川暢子、森島邦博
2. 発表標題 宇宙線イメージングのためのGPUによる高速シミュレーションの開発
3. 学会等名 第84階応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 児玉滉人、森島邦博、北川暢子
2. 発表標題 Blenderを用いた宇宙線イメージングのシミュレーション手法の開発
3. 学会等名 第84階応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 北川暢子、森島邦博、福元豊、安田浩保、今西智也、宮田芙悠、児玉滉人、志水凱、森井健登、岸本和樹、中野健斗、西垣豪人
2. 発表標題 原子核乾板検出器を用いた河川堤防内部の宇宙線イメージング
3. 学会等名 2022年画像関連学会連合会 第8回合同秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 北川暢子、森島邦博、福元豊、安田浩保、今西智也、宮田芙悠、児玉滉人、志水凱、森井健登
2. 発表標題 原子核乾板を用いた河川堤防内部の宇宙線イメージング
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

〔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
---------	---------