

道路政策の質の向上に資する技術研究開発  
成果報告レポート  
No. 2020-9

研究テーマ

中性子によるコンクリート塩分濃度非破壊検査の  
技術研究開発

研究代表者：理化学研究所 チームリーダー 大竹 淑恵  
共同研究者：理化学研究所 上級研究員 高村 正人  
理化学研究所 研究員 若林 泰生  
理化学研究所 特別研究員 Yan Mingfei  
オリエンタル白石 常務執行役員 大石 龍太郎  
オリエンタル白石 技術研究所長 渡瀬 博

令和5年5月

新道路技術会議

## 目次

研究概要（様式 3 を挿入） .....	1
第 1 章 はじめに .....	3
1. 1 研究の名称 .....	3
1. 2 研究の背景 .....	3
1. 3 研究の目的 .....	3
1. 4 研究項目 .....	3
1. 5 研究実施体制 .....	3
1. 6 役割分担 .....	4
第 2 章 研究実施報告 .....	5
2. 1 Cf 線源およびアンチコンプトンシールド法の開発 .....	5
2. 2 中性子ポータブル塩分計の試作 .....	11
2. 3 塩分濃度分解能の検証 .....	29
2. 4 点検支援技術性能カタログ掲載に向けた検討 .....	34
2. 5 道路管理者等との意見交換 .....	34
第 3 章 今後の課題や展望 .....	35
第 4 章 成果発表 .....	36
4. 1 成果発表 .....	36
4. 2 その他特記事項など .....	37
第 5 章 まとめ .....	38
5. 1 今後の道路政策への提案など .....	38
5. 2 まとめ .....	38
付録 .....	39

**「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(令和2年度採択)  
研究概要**

番号	研究課題名	研究代表者
2020-9	中性子によるコンクリート塩分濃度非破壊検査の技術研究開発	国立研究開発法人理化学研究所 チームリーダー 大竹 淑恵

橋梁など多くのインフラコンクリート構造物が、沿岸からの海風や山間部で散布される凍結抑制剤に含まれる塩分の浸透により鉄筋が腐食する塩害を受けており、その鉄筋腐食に直接結びつくコンクリート中の塩分濃度を、鋼材腐食開始塩分濃度  $1.2\text{kg/m}^3$  といった必要な精度で計測することは極めて重要であるが、従来のコア採取法やドリル粉採取では、構造物を傷める、採取箇所に制限があるなど問題点がある。本研究では、それらを解消すべく、カリフォルニウム中性子線源、および、中性子誘導即発ガンマ線元素分析を利用した、非破壊で現場で塩分濃度を定量評価可能な、ポータブル(橋梁点検車両に搭載可能な)中性子塩分濃度計の開発を目的とし、実橋梁の計測業務を行うなどの実用化を図る研究開発である。

### 1. 研究の背景・目的 (研究開始当初の背景・動機、目標等)

橋梁など多くのインフラコンクリート構造物が、沿岸からの海風や山間部で散布される凍結抑制剤に含まれる塩分の浸透により鉄筋が腐食する塩害を受けており、海外で甚大な被害をもたらしている落橋などの重大事故が日本でも懸念されている。そのため、鉄筋腐食に直接結びつくコンクリート中の塩分濃度を、鋼材腐食開始塩分濃度  $1.2\text{kg/m}^3$  といった必要な精度で計測することは極めて重要であるが、従来のコア採取法やドリル粉採取では、構造物を傷める、採取箇所に制限がある、その場で分析出来ないなど問題点がある。本研究では、それらを解消すべく、カリフォルニウム中性子線源(Cf線源)、および、中性子誘導ガンマ線元素分析を利用した、非破壊で、現場で塩分濃度を定量評価可能な、ポータブル(橋梁点検車両に搭載可能な)中性子塩分濃度計(以降、塩分計)の開発を目的とする。本研究期間内(R2~R4)では、実橋梁に対して、 $3.7\text{MBq}$ 以下のCf線源を使用し、表面から深さ7cmにおいて塩分濃度  $1.0\pm 0.2\text{kg/m}^3$ を1時間で検出可能な塩分計の実現を目標とする。

### 2. 研究内容 (研究の方法・項目等)

目標を達成するための研究として、

- (1) Cf線源およびアンチコンプトンシールド法の開発 (内容①アンチコンプトンシールド法の構築、および、Cf線源の遮蔽体構造の最適化(小型・軽量化含む)によるガンマ線計測におけるS/N比高度化、②塩分計測システムの小型・軽量化)、
- (2) 中性子ポータブル塩分計の試作 (内容: ①橋梁点検車に搭載可能な試作機を製作し、搭載試験や塩分計測試験の実施、②現場で塩分濃度が評価できる塩分濃度検査システムの構築)
- (3) 塩分濃度分解能の検証 (内容: ①塩分調整したコンクリートプレートを用いた塩分検出感度の検証、②塩分濃度分布導出手法の開発、③実橋梁における塩分検出の検証)、
- (4) 点検支援技術性能カタログ(以下、カタログ)掲載に向けた検討 (内容: カタログへの申請)、
- (5) 道路管理者等との意見交換 (内容: カタログ掲載や実橋梁での計測試験に向けた検討や調整)、を行った。

### 3. 研究成果 (図表・写真等を活用し分かりやすく記述)

塩分濃度を調整したコンクリートプレートを組み合わせた塩分検出感度の検証実験、放射線輸送シミュレーションコードを用いた塩素ガンマ線収量やS/N比最適化のためのCf線源に対する遮蔽構造計算、福島ロボットテストフィールドの試験橋梁にて、塩分計モックモデルを用いた橋梁点検車への搭載試験などを行った。

その後、屋外での塩分測定試験として、土木研究所の屋外施設に設置された塩害撤去橋梁に対する塩分測定試験や、福島ロボットテストフィールドの試験橋梁にて塩分濃度を調整したコンクリートプレートを貼り付け、バケット式橋梁点検車を用いた測定試験を行った。塩分計での測定結果と従来技術との比較の為、塩分計で測定した領域をドリル粉末採取および電位差滴定による塩分濃度測定も行い、矛盾のない結果を得た。

屋外施設での試験を経て、実橋梁である、仙台市の綱木跨道橋（国道48号）や岩手県九戸郡の安家大橋（国道45号）にて、高所作業車やバケット式橋梁点検車を用いた測定試験を行った。塩分計で測定した領域を従来技術であるドリル粉末採取および電位差滴定による塩分濃度測定と比較し、矛盾のない結果を得ており、実橋梁において塩分計を用いた非破壊での塩分検出に成功した。



ただし数値目標については、計測した実橋梁に深さ 7cm に塩分濃度  $1.0\text{kg/m}^3$  が存在するケースが無かったため、塩分濃度を調整したコンクリートプレートを、濃度分布を模擬した組み合わせの室内試験による検証で、 $7.5 \pm 1.5\text{cm}$  (深さ 7cm 相当) における塩分濃度  $1.0\text{kg/m}^3$  を 1 時間で検出可能なことを確認した。

これらの測定実績を基に 2022 年度に申請した点検支援技術性能カタログ（橋梁・トンネル）に関して、2023 年度の選定が決まり、2023 年 3 月 31 日に掲載された。また、(株)ランズビュー（理研ベンチャー）を 2023 年 4 月 3 日に設立し、実橋梁の計測業務を行える体制を整えることで、2023 年度からの塩分計の運用・実用化に着手した。

#### 4. 主な発表論文（研究代表者はゴシック、研究分担者は下線）

- ① Y. Wakabayashi, M. Yan, M. Takamura, R. Ooishi, H. Watase, Y. Ikeda, and Y. Otake, “Development of neutron salt-meter RANS- $\mu$  for non-destructive inspection of concrete structure at on-site use”, Journal of Neutron Research 24, pp. 441-449, (2022).
- ② Y. Wakabayashi, M. Yan, M. Takamura, R. Ooishi, H. Watase, Y. Ikeda and Y. Otake, “Conceptual study of salt-meter with  $^{252}\text{Cf}$  neutron source for on-site inspection of bridge structure”, Journal of Neutron Research, Vol. 23, No. 2-3, pp.207-213, (2021).
- ③ 若林泰生, Yan Mingfei, 岩本ちひろ, 藤田訓裕, 水田真紀, 高村正人, 大石龍太郎, 渡瀬博, 池田裕二郎, 大竹淑恵, “小型中性子源 RANS ならびにカリフォルニウム線源を利用したコンクリート構造物の塩害に対する非破壊検査装置の開発”, 日本コンクリート工学会「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, pp.202-209, (2021).

#### 5. 今後の展望（研究成果の活用や発展性、今後の課題等）

本課題の目標であった、片側車線規制を伴うバケット点検車を用いた塩分計測を安家大橋にて行い、実橋梁における塩分検出に成功し、開発した塩分計の「点検支援技術性能カタログ（橋梁・トンネル）」への掲載も、2023 年 3 月 31 日に掲載されたことで達成した。また、塩分計の実用化に関しても、(株)ランズビュー（理研ベンチャー）を 2023 年 4 月 3 日に設立したことで、実橋梁の計測業務を行える体制を整えた。

今後、実橋梁における塩分計測の実績を増やし、ニュートロン次世代システム技術研究組合の協力を得て、従来技術での計測結果との比較を行いながら、道路の予防保全に貢献するため、更なる計測精度（深さ分解能や塩分検出感度）の向上、使いやすさの向上、防水・防塵による全天候型への改良、現場ニーズに合わせた改良開発を行っていく予定である。今後の展望として、中性子を利用した RC 床板の土砂化の非破壊検知、コンクリート構造物の内部の劣化損傷の可視化への研究開発、実用化を目指して引き続き、研究開発を継続していく予定である。

#### 6. 道路政策の質の向上への寄与（研究成果の実務への反映見込み等）

本研究で開発した塩分計のような、塩分濃度非破壊検査法の確立及び実用化装置開発により、従来のコアドリル法による破壊検査によるインフラ構造物を傷つけることが無くなり、測定場所の制限もなくなり、橋梁の各部位ごとの塩分濃度が測定でき、検査時間も大幅に短縮され、安全で、効率的、効果的な塩害対策が実現できるようになる。更に、現状は塩分濃度検査が破壊検査のため殆ど塩分濃度検査が行われておらず、塩害が生じてからの措置が一般的であり、事後保全対策となっている。この状況を、塩分計の活用により、塩害が生じる前に措置を行う予防保全対策への転換が可能となる。それらにより、塩害による落橋の防止、橋梁の長寿命化、大幅な維持管理費の縮減が可能となる。

#### 7. ホームページ等（関連ウェブサイト等）

- ① 国交省「点検支援技術性能カタログ」<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/inspection-support/pdf/06.pdf>
- ② (株)ランズビュー <https://ransview.co.jp/>

# 第1章 はじめに

本成果報告レポートは、「道路政策の質の向上に関する技術研究開発」令和2年度ハード分野採択課題である、「中性子によるコンクリート塩分濃度非破壊検査の技術開発」の成果報告レポートである。

日本の社会インフラ劣化、維持管理、予防保全に資することを旨とし、中性子線を利用した非破壊塩分計測装置の実用化へ向けた技術研究開発について報告する。

## 1.1 研究の名称など

研究テーマ：「中性子によるコンクリート塩分濃度非破壊検査の技術開発」

履行期間：令和2～令和4年度

履行場所：東北地整整備局管内

受託額：

R2年：2549万円

R3年：3199万円

R4年：2999万円

委託者：東北地方整備局

担当者：東北地方整備局 道路交通課

受託者：国立研究開発法人理化学研究所

担当責任者：大竹淑恵（光量子工学研究センター 中性子ビーム技術開発チーム）

## 1.2 研究の背景

橋梁など多くのインフラコンクリート構造物が、沿岸からの海風や山間部で散布される凍結抑制剤に含まれる塩分の浸透により鉄筋が腐食する塩害を受けており、海外で甚大な被害をもたらしている落橋などの重大事故が日本でも懸念されている。そのため、鉄筋腐食に直接結びつくコンクリート中の塩分濃度を、鋼材腐食開始塩分濃度 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ といった必要な精度で計測することは極めて重要であるが、従来のコア採取法やドリル粉採取では、構造物を傷める、採取箇所に制限がある、その場で分析出来ないなど問題点がある。

本研究では、それらを解消すべく、カリフォルニウム中性子線源(Cf線源)、および、中性子誘導即発ガンマ線元素分析を利用した、非破壊でその場で塩分濃度を定量評価可能な、ポータブル(橋梁点検車両に搭載可能な)中性子塩分濃度計の開発を目的とする。

## 1.3 研究の目的

本研究は、中性子捕獲即発ガンマ線を用いた塩分濃度分布測定手法に基づき、コンクリート構造物中の塩分濃度を現場において非破壊で測定する技術を開発するとともに、コンクリート構造物の定期点検の高度化・効率化に資することを目的とする。

また、最終的には開発した技術の活用促進を図るため、国土交通省道路局がとりまとめている「点検支援技術性能カタログ(橋梁・トンネル)」に技術掲載を目指すとともに、本技術が広く活用されるための運用方法について提案する。

## 1.4 研究項目

本研究期間内の研究項目は、項目(1) Cf線源およびアンチコンプトンシールド法の開発、項目(2) 中性子ポータブル塩分計の試作、項目(3) 塩分濃度分解能の検証、項目(4) 点検支援技術性能カタログ掲載に向けた検討、項目(5) 道路管理者等との意見交換、である。

## 1.5 研究実施体制

- ① 理化学研究所とオリエンタル白石(株)との共同研究協定締結
- ② 定期的な理化学研究所とオリエンタル白石(株)との研究推進会議
- ③ 定期的な道路局、東北地整、理化学研究所、オリエンタル白石(株)での研究会議
- ④ 土木研究所との共同研究協力協定による連携
- ⑤ ニュートロン次世代システム技術研究組合との連携

## 1.6 役割分担

理化学研究所とオリエンタル白石での役割分担は以下とする。

### ○理化学研究所

- ①中性子ポータブル塩分濃度計の試作、動作検証、コンクリート供試体での精度検証、精度向上方策の検討、現場での操作可能な装置の検討
- ②Cf線源およびアンチコンプトンシールド法の開発
- ③実験およびシミュレーションを用いた遮蔽構造のコンパクト化・軽量化
- ④土木研究所撤去橋梁による屋外試験による検証及び改良
- ⑤福島ロボットテストフィールド試験橋梁でのバケット式および歩廊式橋梁点検車への塩分計搭載試験、ならびに、塩分測定試験における検証及び改良
- ⑥バケット式および歩廊式橋梁点検車への搭載・組立時間短縮に向けた塩分計筐体の製作ならびに搭載方法の検討
- ⑦塩分濃度検査システム（機器操作・データ解析ソフトウェア含む）の製作
- ⑧点検支援技術性能カタログの記載情報の検討

### ○オリエンタル白石(株)

- ①中性子ポータブル塩分濃度計の実用上の要求水準

（数値目標（かぶり、塩分濃度、計測精度、計測時間）、装置サイズ・重量）の検討

- ②ドリル粉末採取による塩分濃度分析
- ③塩分濃度実験コンクリート供試体の製作及び実験結果の評価
- ④試験橋梁における塩分測定のためのコンクリート設置方法の検討
- ⑤土木研究所撤去橋梁による屋外試験及び実橋梁での測定トライにおける検証結果の評価及び改善
- ⑥現場での操作可能な装置の検討
- ⑦実用化へ向けての方策検討
- ⑧点検支援技術性能カタログの記載情報の検討

## 第2章 研究実施報告

### 2.1 Cf線源およびアンチコンプトンシールド法の開発

本研究では、カリフォルニウム線源（Cf線源）より発生する中性子と、その中性子をコンクリートに照射し、コンクリート中の物質と中性子との反応により生じるガンマ線を利用した元素分析である、中性子誘導即発ガンマ線分析を用いる。図1にその概念図を示した。図では、中性子捕獲反応を例として挙げている。反応により生じた励起状態が基底状態へと落ちる際に、即発ガンマ線を放出する。この即発ガンマ線のエネルギーや強度、本数が原子核毎に決まっているため、ガンマ線スペクトルを取得し、そのガンマ線ピーク量から、元素分析と定量分析を行うことができる。

中性子との反応により生じた即発ガンマ線のガンマ線スペクトルの例として、図2に、塩分を含ませたコンクリートプレートに中性子を照射し、得られたガンマ線スペクトルを示す。横軸はガンマ線のエネルギー、縦軸はエネルギー毎のカウントを表す。数十本のガンマ線ピークが存在している。図中の<sup>35</sup>Clは塩分、つまり、塩素由来の即発ガンマ線を示す。このピーク量、つまり、ピーク面積を分析することにより、定量分析が可能となる。ここで、同位体の分析、例えばカルシウムであれば、<sup>40</sup>Caなのか<sup>42</sup>Caなのか、は可能であるが、化学状態、例えば、CaOなのかCaCO<sub>3</sub>なのか、を判断することは出来ない。

本研究におけるガンマ線計測において、Cf線源が3.7MBqの放射能を持つ場合、全方向4πで約4x10<sup>5</sup>(n/sec)程度と中性子発生量が少ないため、本

#### 中性子誘導即発γ線分析

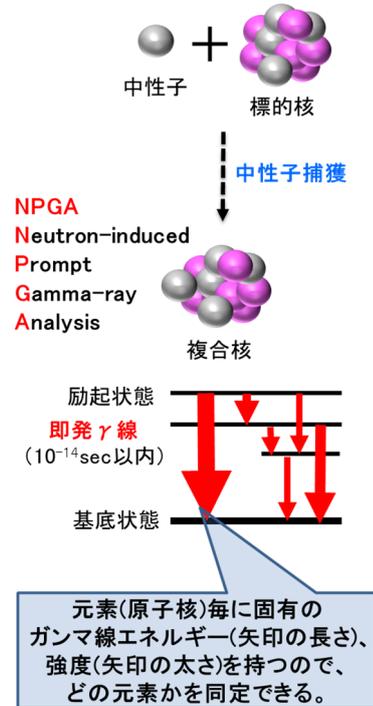


図1 中性子誘導即発ガンマ線分析の概念図。この図では中性子捕獲反応を例として挙げている。

研究で目指す塩分濃度1kg/m<sup>3</sup>（コンクリート中だと約0.5wt%）を検出し、計測時間を短縮し、精度よく計測するためには、ガンマ線スペクトルにおけるS/N

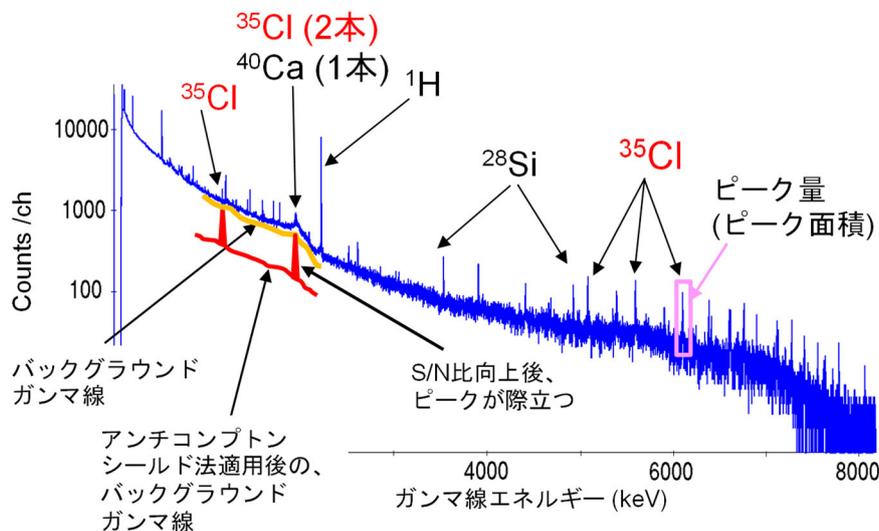


図2 ガンマ線スペクトルの例と、S/N比向上の概念。

比の向上、および、目的とする元素由来のガンマ線収量の増加による、ガンマ線計測における高感度化が必須となる。

通常、ガンマ線スペクトルに現れるガンマ線ピークは、ピーク+バックグラウンドガンマ線、となっているので、定量分析に必要なガンマ線のピーク面積を求めるためには、バックグラウンドガンマ線を差引く必要がある。つまり、このバックグラウンドガンマ線を減少させることで、ピーク面積を求める際に誤差伝播で減少し、ピーク面積の精度は向上する。また、バックグラウンドガンマ線が減少することで、ガンマ線発生量が少ない、つまり、ピーク面積が少なく、バックグラウンドガンマ線に埋もれるようなガンマ線ピークを認識する（際立たせる）ことが可能となる。その概念は、図2に示した。このように、S/N比が向上することで、ガンマ線計測における感度や精度が向上し、計測時間短縮にもつながる。

塩素由来のガンマ線を増やすことで、塩素に関するガンマ線の高感度化が可能である。そのため、Cf線源周りの遮蔽体構造を最適化することで、コンクリート中に照射される中性子を増やし、塩素由来のガンマ線を増やすことが可能となる。

また、ガンマ線を検出する検出器を、高い検出効率のものを使用することで、ガンマ線自体の検出効率を高くする高感度化が可能である。それにより、単位時間あたりのガンマ線収量が増えることで、精度が向上し、計測時間短縮につながる。

そこで本研究期間内では、S/N比の高度化、および、ガンマ線計測の高感度化として、(a)アンチコンプトンシールド法の適用、(b)Cf線源遮蔽体構造の最適化、(c)高検出効率のGe検出器の導入を行った。

### a) アンチコンプトンシールド法

S/N比向上のためのアンチコンプトンシールド法の原理を説明する。図3にアンチコンプトンシールド法の概要図を示した。図3中の図の左半分は、アンチコンプトンシールド法を用いていない、通常のガンマ線検出を示す。

計測したガンマ線スペクトル上に現れるのは、Ge検出器内(Ge結晶内)で、あるガンマ線が全吸収と呼ばれる全エネルギーを落とした信号A、例えば本研究では、中性子を照射したコンクリート中からのガンマ線であり、またそのガンマ線がコンプトン散乱を起こし、元々のエネルギーの一部Bだけ落とした信号B、周辺からのバックグラウンドガンマ線の信号D、例えば本研究では、コンクリート中から以外のガンマ線、および、Ge検出器の周辺物質で起こったコンプトン散乱ガンマ線を含んだ信号を足し合わせたものである。

ガンマ線スペクトル上では、信号Aはピークとして、信号Bは連続スペクトルとして、信号Dは”連続部+コンクリート中から以外のガンマ線ピーク”として現れる。信号Bおよび信号Dは必要のない信

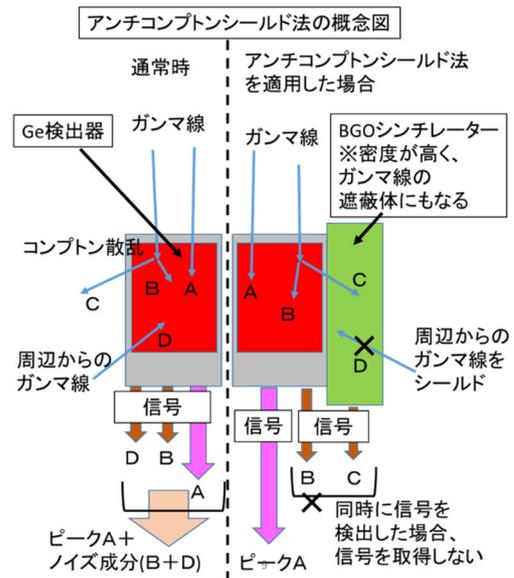


図3 アンチコンプトンシールド法の概念図

号であるので、ノイズ成分と呼ぶ。信号Aの数が少ない場合、このノイズ成分に埋もれてしまい、検出感度が低くなってしまいます。

そこで、できるだけ信号Aの成分のみをガンマ線スペクトルにしたい場合、このノイズ成分を排除することで、ピークが際立つことになり、S/N比が向上する、つまり、信号Aの検出感度が上がる。アンチコンプトンシールド法はこのノイズ成分を排除する手法である。

具体的には、図3の右側に示すGe検出器の周りにシンチレーターなどガンマ線検出器を置く事で、外に逃げてしまった信号Cを検出する。

ここで、Ge検出器の信号Bとシンチレーターの信号Cを同時に検出した場合は、連続部を作ってしまう信号Bだと判断し、信号を取得しないという反同時計測法やアンチコインシデンス法と呼ばれる手法をとることで、信号Bはガンマ線スペクトルに現れなくなる。アンチコインシデンス法を用いる目的がコンプトン散乱事象に対するものを、アンチコンプトン法と呼ぶ。

また、Ge検出器周りに設置するシンチレーターに密度が高い物質のシンチレーターを使用する事により、周辺からのガンマ線である信号Dも遮蔽(シールド)ができる。このように、遮蔽もガンマ線検出も兼ねるものをアクティブシールドと呼ぶ。アンチコンプトン法とアクティブシールドを組み合わせ、アンチコンプトンシールド法と呼ぶ。

図4に、本研究において、アンチコンプトンシールド法に用いた回路・装置などの概要図を示した。図4中に数字をふっている装置類について、以下に説明する。

- ①相対効率50%Ge検出器1台：ガンマ線検出器
- ②BGOシンチレーター25本：ゲルマニウム酸ビスマス(化学式： $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ )の結晶。密度 $7.13\text{g/cm}^3$ 。

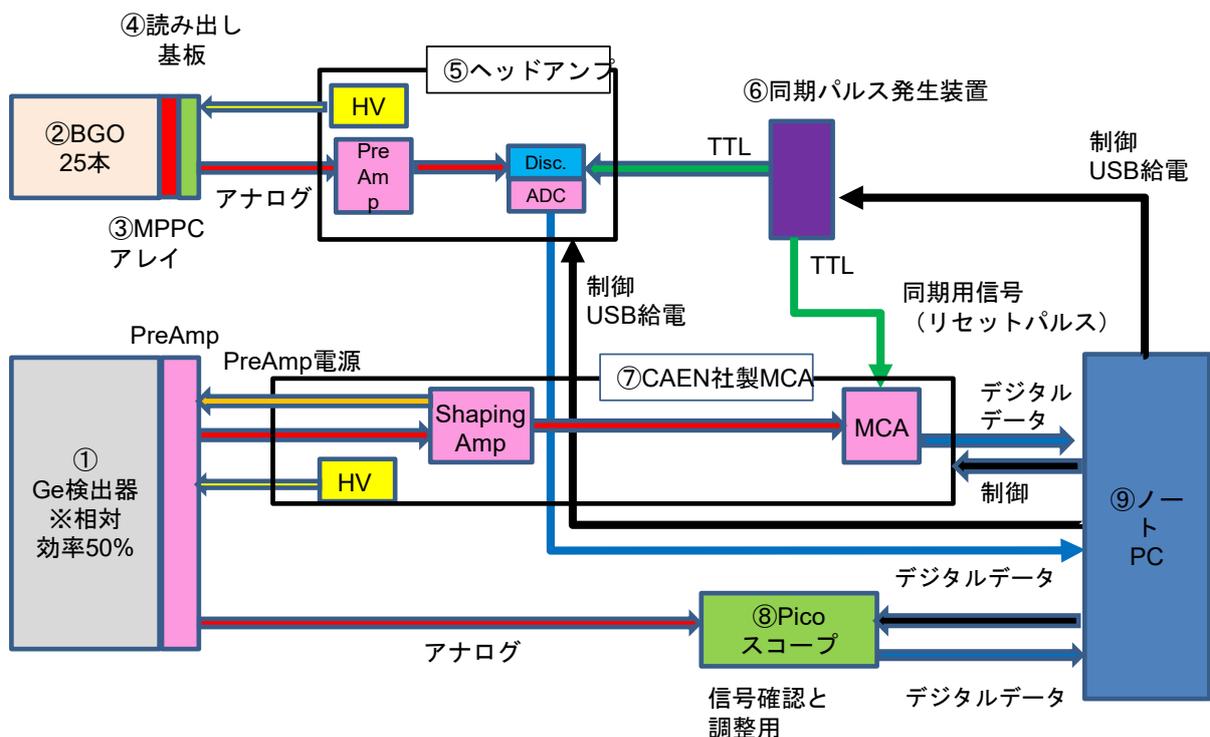


図4 アンチコンプトンシールド法に用いた回路概要図

サイズ25x25x60~150mm。ガンマ線検出器。アンチコンプトンシールドと使用。

- ③MPPCアレイ25個：BGOシンチレータで生じたシンチレータ光の検出のためのフォトセンサー
- ④読み出し基板25個：フォトセンサーからの電流を読み出すための基板
- ⑤クリアパルス社製ヘッドアンプ1台：MPPCアレイに電圧を印加し、読み出し基板からの電流を増幅→電圧変換→デジタルデータ変換→PCに転送を行う。電圧変換後、一定の値を超えた信号をトリガー信号として排出。
- ⑥クリアパルス社製同期パルス発生装置1台：周期的に信号を発生する装置。Ge検出器とBGOシンチレータとの同期を取り、アンチコインシデンスを行うためのリセットパルス発生装置。

- ⑦CAEN社製MCA1台：Shaping Amp（信号増幅&整形）、Timing Filter Amp（TFA, 信号微分積分回路）、Discriminator（TFA信号で一定の値を超えた信号をデータとして取り込むための閾値判別回路）、Multi Channel Analyzer（MCA, 増幅後の波高値をデジタルデータとして排出）、GATE回路（同時計測や反同時計測用回路）、リストデータ取得（タイムスタンプ付き波高値データの取得）、リセット回路（タイムスタンプのゼロリセット）、Ge検出器への高電圧印加回路が一体となった装置。
- ⑧Picoスコープ1台：PC上で操作するデジタルオシロスコープ。回路調整用。
- ⑨ノートPC1台：CAEN社製MCA、クリアパルス社製ヘッドアンプ、Picoスコープの制御の制御やデータ取得を行う。

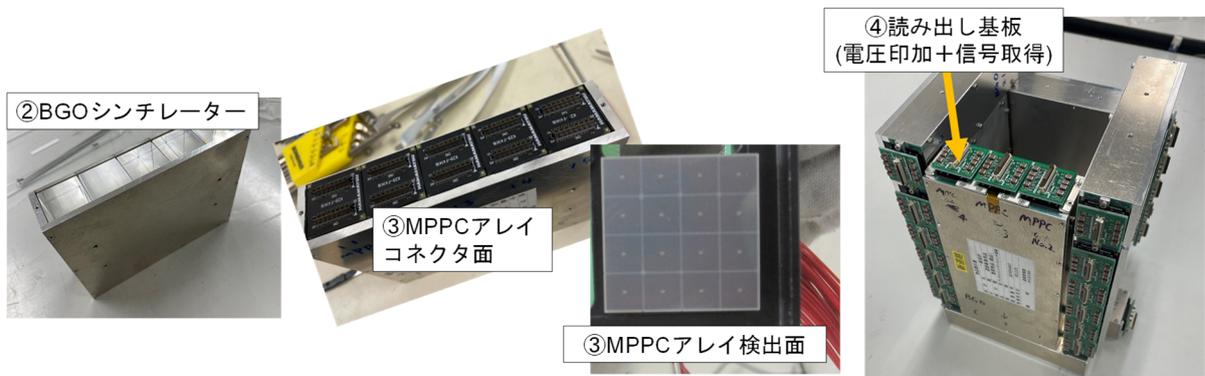


図5 アンチコンプトンシールド法に使用するBGOシンチレータとMPPCの写真

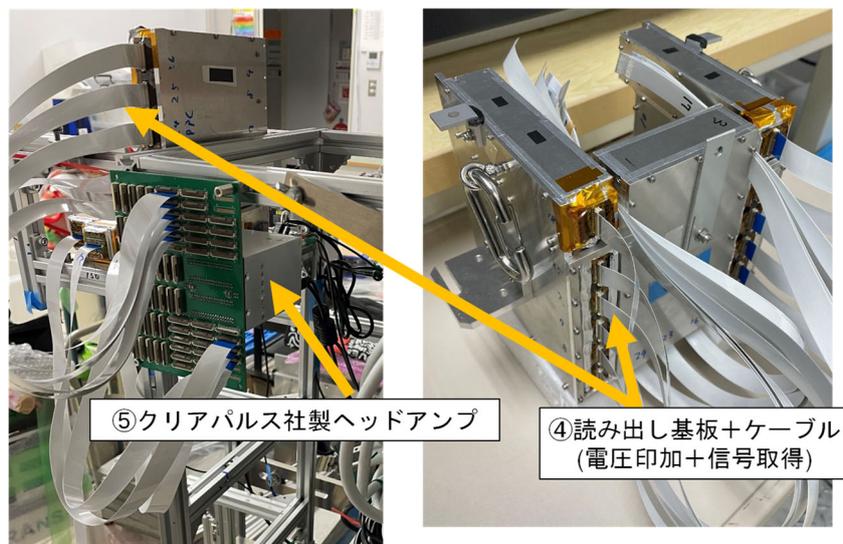


図6 アンチコンプトンシールド法に使用する装置の写真

図5に概要図に記した番号に対応した装置である②BGOシンチレータ、③MPPCアレイ、④読み出し基板の写真を示した。②のBGOシンチレータは透明な結晶である。③のMPPCアレイは、光検出面と基板を取り付けるコネクタ面があるタイプである。光検出面をBGOシンチレータに接面させる。コネクタ面に④の読み出し基板を取り付ける。

図6に概要図に記した番号に対応した装置である④読み出し基板と⑤クリアパルス社製ヘッドアンプの写真を示した。④の読み出し基板はMPPCで生じた信号を、ケーブルを通して、⑤のヘッドアンプに送る。⑤のヘッドアンプは読み出し基板を通して、

MPPCに電圧を印加したり、MPPCからの信号を取りこんだり、その信号をデジタルデータに変換する装置である。ヘッドアンプの電源はUSBケーブルを通して供給されるが、ノートPCのUSBポートからも可能な、低電力で動作が可能な装置となっている。

図7に概要図に記した番号に対応した装置である①相対効率50%Ge検出器とその液体窒素デュア一部分、②～④を組み込んだもの、⑦CAEN社製MCA、⑨ノートPCの写真を示した。①のGe検出器は定量分析を行うためのガンマ線検出器、⑦はGe検出器からの信号を取り込み、デジタルデータに変換し、取得する装置。Ge検出器の電圧もこの装置より供給さ

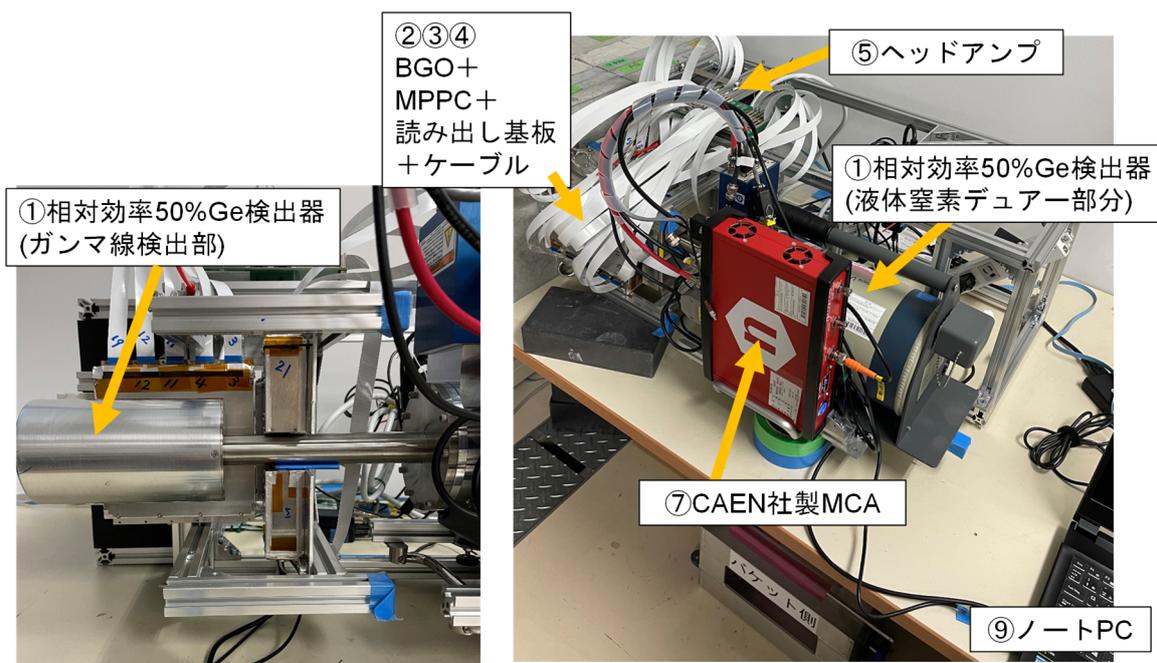


図7 アンチコンプトンシールド法に使用する装置。全て組み込んだ写真。

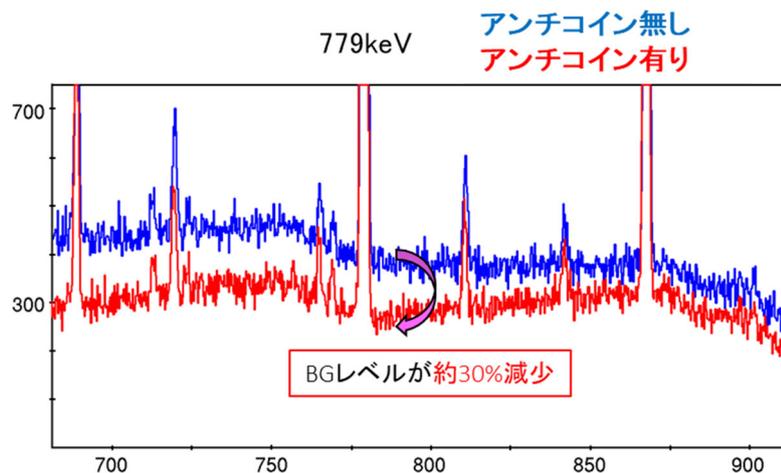


図8 アンチコンプトンシールド法を適用したガンマ線スペクトル例

れる。⑤のヘッドアンプ、および、⑦のMCAはUSBケーブルとノートPCにより通信し、操作やデータ取得を行う。

このように、本研究期間内（R2～R4年度）で、アンチコンプトンシールド法の開発に必要な装置や回路、また、小型・軽量化のための設計・調達を行った。

開発を行ったアンチコンプトンシールド法を適用したガンマ線スペクトルを図8に示す。図8は、<sup>152</sup>Eu標準ガンマ線源を用いて得られたガンマ線スペクトルである。青線はアンチコンプトンシールド法を適用していないスペクトル、赤線はアンチコンプトンシールド法を適用したスペクトルとする。図8のように、アンチコンプトンシールド法の適用前後で、バックグラウンドガンマ線が約30%減少することを確認した。

以上のように、本研究期間内において、アンチコンプトンシールド法を構築した。

### b) Cf線源遮蔽体構造の最適化

ガンマ線計測の高感度化として、Cf線源を囲う遮蔽体構造の最適化を行った。

最適化は、

- ①なるべくコンクリート中に中性子を照射することで塩素由来のガンマ線を増やす、
- ②なるべく軽量、小型化する、
- ③Cf線源から発生するガンマ線がGe検出器に入らないようにする、
- ④水素由来のガンマ線2223keVのコンプトン散乱成分が塩素由来のガンマ線近辺のバックグラウンドガンマ線となるため、C/H比をなるべく良くする、

というコンセプトのもと行った。

Cf線源遮蔽体構造の最適化を行うため、放射線輸送シミュレーションコードを用いた検証を行った。ここで、上記のコンセプト④にあるC/H比という、

Ge検出器位置における、塩素由来のガンマ線1165keVの収量に対する水素由来のガンマ線収量の比を定義した。その結果得られた遮蔽体構造を図9、および、図10に示す。

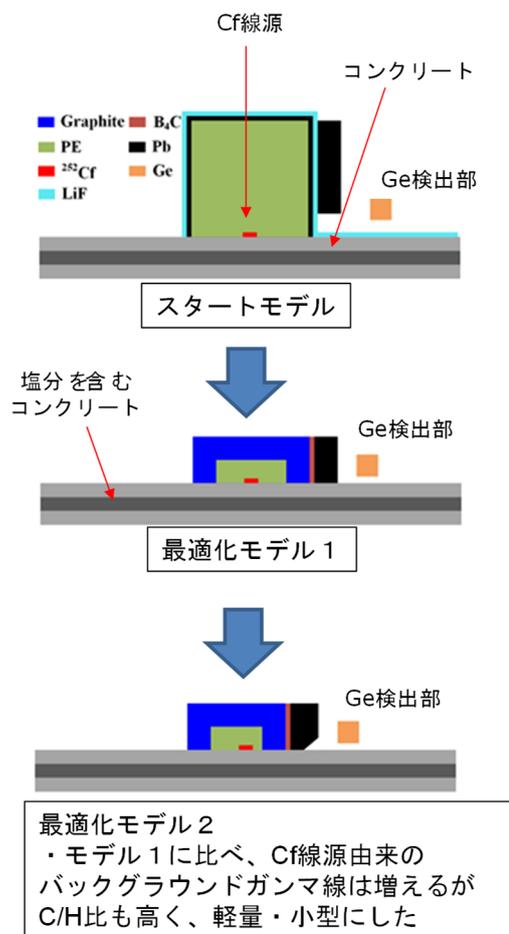


図9 Cf線源の遮蔽体構造最適化による遮蔽体構造の断面図。

スタートモデルでは、Cf線源遮蔽体として、ポリエチレン、鉛、フッ化リチウム (LiF) タイルを使用し、Ge検出器に対するCf線源の遮蔽体からのガンマ線遮蔽として鉛ブロックを使用した。これは本研究当初に、Cf線源を用いた塩分検出感度の試験に用いた構造である。この構造では、ポリエチレンの量が多いため、中性子のコンクリート中への照射量が多いという利点はあるが、水素由来のガンマ線が多く、塩素ガンマ線ピーク周辺のバックグラウンドガンマ線となっていた。また、サイズも、27x27x27cmと大きく、鉛ブロックもいくつか使用したため、約88kgと重かった。

R2年度において、このスタートモデルから最適化モデル1への改良を行った。最適化モデル1では、Cf線源由来のガンマ線遮蔽のみに鉛を使用することで、また、図9の奥行方向、図10では垂直方向にガンマ線検出部のみを遮蔽する長さにするすることで、大幅に軽量化した。ポリエチレンの量を減らし、中性子の反射材としてグラファイトを使用することで、水素由来のガンマ線を減らし、コンクリート中に照射される中性子をスタートモデルと同等にできた。これにより、大幅に小型し、C/H比も約2倍と大幅に

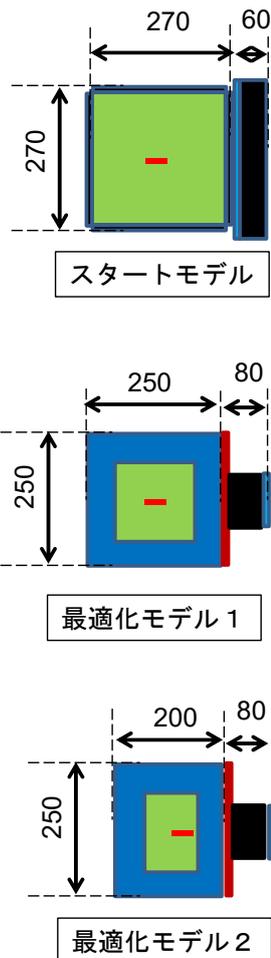


図10 Cf線源の遮蔽体構造最適化による遮蔽体構造。コンクリート設置面から見た構造。

向上した。遮蔽体の総重量は、約20kgとなった。しかしながら、Ge検出器における塩素由来のガンマ線収量は、約20%程度の減少が見られた。

R3年度において、さらに最適化モデル1から最適化モデル2への改良を行った。ポリエチレンを水平方向に更に短くすることで、Cf線源をGe検出器に近づけることで、また、鉛にテーパ加工を施すことで、また、Cf線源由来のガンマ線を抑えつつ、Ge検出器における塩素由来のガンマ線収量を増やした。これにより、さらに軽量・小型化し、遮蔽体の総重量は、約16kgとなった。C/H比は最適化モデル1から約20%、塩素由来のガンマ線収量は約70%増加した。

以上のように、本研究期間内において、Cf線源の遮蔽体構造の最適化開発を行い、軽量・小型化に成功した。

### c) 高検出効率のGe検出器の導入

ガンマ線計測における高感度化のため、本研究では、相対効率50%のGe検出器を導入した。Ge結晶のサイズを大きいものにする事で、全吸収効率上がり、ガンマ線に対して高検出効率を得られる。また、コンプトン散乱により、Ge検出器外に飛び出るガンマ線も減少するため、S/N比の向上も得られる。

図11に、比較のため、相対効率10%のGe検出器と相対効率50%のGe検出器で取得したガンマ線スペクトルを示した。

このガンマ線スペクトルは、図9に示すような、塩分を含ませたコンクリートに中性子を照射し、得られたガンマ線スペクトルの例である。

このガンマ線計測では、塩素由来のガンマ線1165keVの計数率は、相対効率10%Ge検出器では0.018 cps (counts per second)、50%Ge検出器では0.082 cpsと約4.6倍になっている。

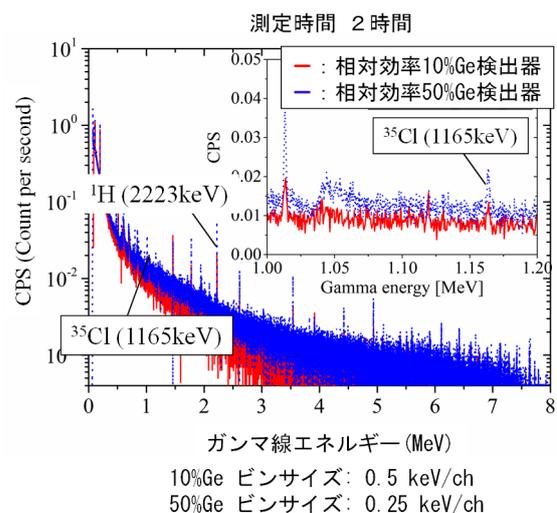


図11 アンチコンプトンシールド法の概念図

## 2.2 中性子ポータブル塩分計の試作

本研究期間内での最終目標として、車線規制という時間制限があるなかで、バケット式橋梁点検車を用いた実橋梁での塩分計測がある。それを達成するために塩分計は、軽量・小型で、組立時間の短縮のために組立易い構造にする必要がある。図12(1)は、橋梁点検車による塩分測定イメージである。

そこで、本研究で使用が想定されるバケット式橋梁点検車BT400のバケット内サイズと荷重制限を考慮し、

- ・全重量は100kg以下、
- ・面サイズは80cmx100cm以内、

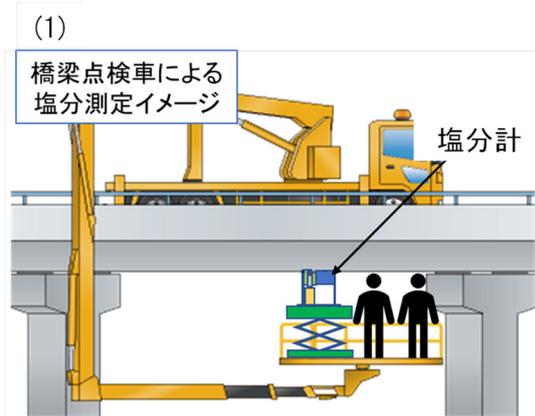


図12 (1)橋梁点検車による塩分測定イメージ  
(2) バケット式橋梁点検車  
(3)バケット

・桁下面へアクセスするため高さ180cm程度で、30cm程度の上下位置の調整が可能、  
・組立時間は30分以内、  
という目標で設計・開発を行った。ここで図12(2)と(3)は、R2年度において、東北地方整備局にご協力いただき、橋梁の点検終了後の橋梁現場とバケット式橋梁点検車の見学させていただいた際の写真である。以下、本研究期間内で行った、塩分計の試作機による橋梁点検車の搭載試験について報告する。

R2年度では、福島ロボットテストフィールドにて、バケット式および歩廊式橋梁点検車を用いた、塩分計モックモデルを用いた搭載試験を行った。図13に搭載試験に用いた、塩分計モックモデルを示した。

塩分計モックモデルは、アルミフレームを用いて、Cf線源+ガンマ線検出部、装置部の筐体を作り、手動リフター台車に乗せられるようにした。各パーツはネジ止めを出来るようにした。

Cf線源遮蔽体は、鉛とポリエチレンを使用し、ガンマ線検出部は、Ge検出器のモックとアンチコンプトンシールドの重さを想定した鉛の小片を使用し、合計重量が70kg弱になるように調整した。また、装置部は10kg以下、リフター台車は約20kgと、塩分計モックモデルの総重量を100kg以下で製作した。リフター台車の荷重制限は120kg、上下駆動幅は40cmである。

上記の塩分計モックモデルを、図14に示すようなワンボックスタイプの乗用車に積み込み、福島ロ

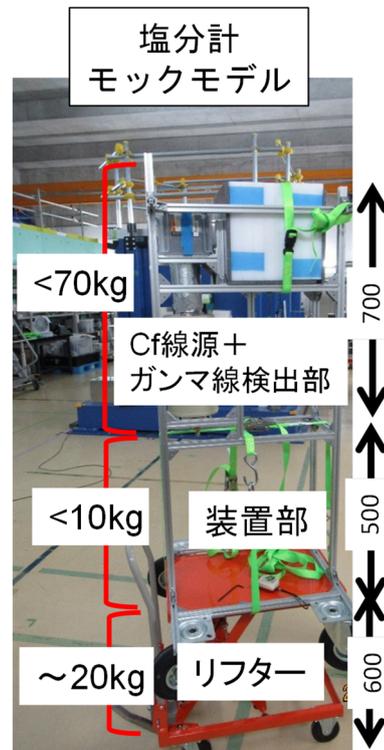


図13 塩分計モックモデル



図 1 4 (1)塩分計モックモデルをパーツ毎に分解し、全パーツを乗用車に乗せた写真  
 (2)塩分計を乗せた乗用車  
 (3)福島ロボットテストフィールドの試験橋梁の外観

ロボットテストフィールドまで運び、福島ロボットテストフィールド内の試験橋梁にて、橋梁点検車を用いた搭載試験を行った。図 1 4 (3)は、福島ロボットテストフィールドの試験橋梁の外観写真である。

図 1 5 に搭載試験の写真を示した。用いたバケット式橋梁点検車はBT400で、バケットの荷重制限は300kgである。塩分計モックモデルの組立は、パーツ毎に試験橋梁の道路側からバケット内へ手渡しで行い、バケット内で組み立てた。図 1 5 (1)および(2)は、組立途中の様子である。図 1 5 (3)は組立完了後の塩分計モックモデルの写真である。このように、バケット内にて組立を行うことができ、サイズも問題ない事が分かった。

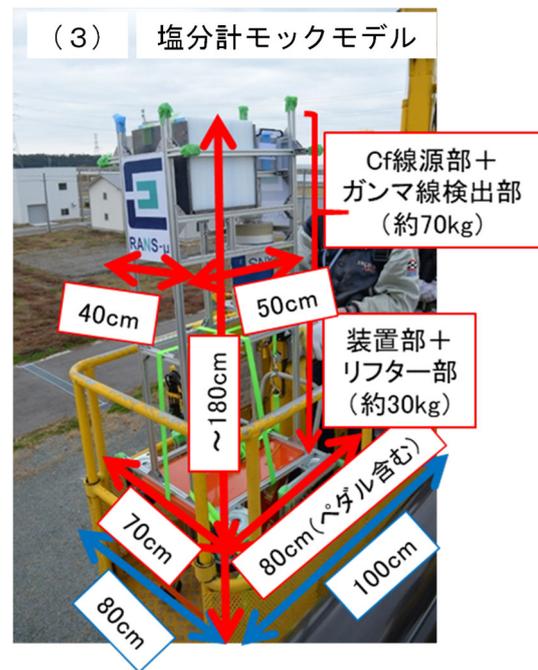


図 1 5 (1)塩分計モックモデルの組立途中1  
 (2)塩分計モックモデルの組立途中2  
 (3)塩分計モックモデルの組立完了後

次に橋梁下の床版裏面までアクセス可能かどうか

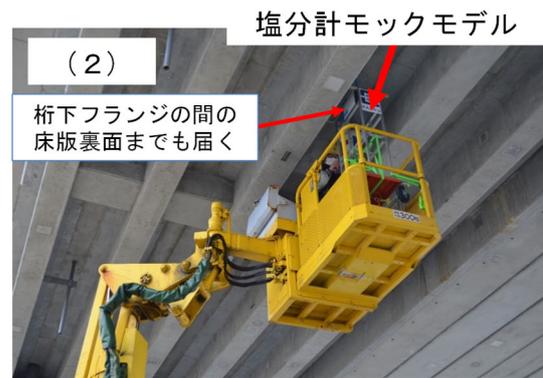


図16 (1) 橋梁下までバケットを移動。(2) 床版裏面近くまでバケットを移動。

の試験を行った。図16(1)に示すように、バケットを橋梁下まで移動し、塩分計モックモデルが桁下フランジの間に入るようにバケットを移動。その後、図16(2)に示すように、リフター台車を上昇させることで床版裏面まで到達可能なことを確認した。

次に、実橋梁の測定では、バケット内にあるACコンセントを使用するので、使用した場合の電子機器

のノイズ状況の確認を、図17のように、ヘッドアンプとオシロスコープを用いて行った。実験室内で使用するACコンセントとノイズ環境が異なるかどうかの確認である。

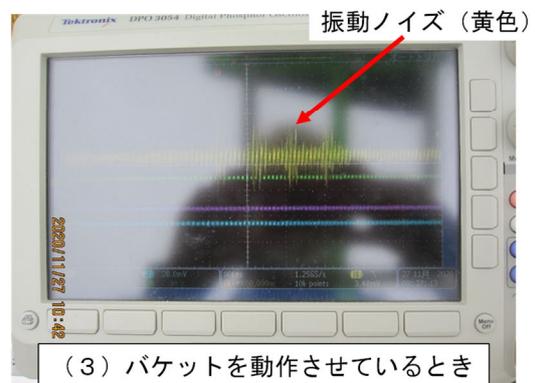


図17 オシロスコープを用いたバケット内ACコンセントを使用した場合のノイズ確認。(1) オシロスコープとヘッドアンプをバケット内に設置。(2) バケットが静止しているとき。(3) バケットを移動や切り返しなど動作させたとき。

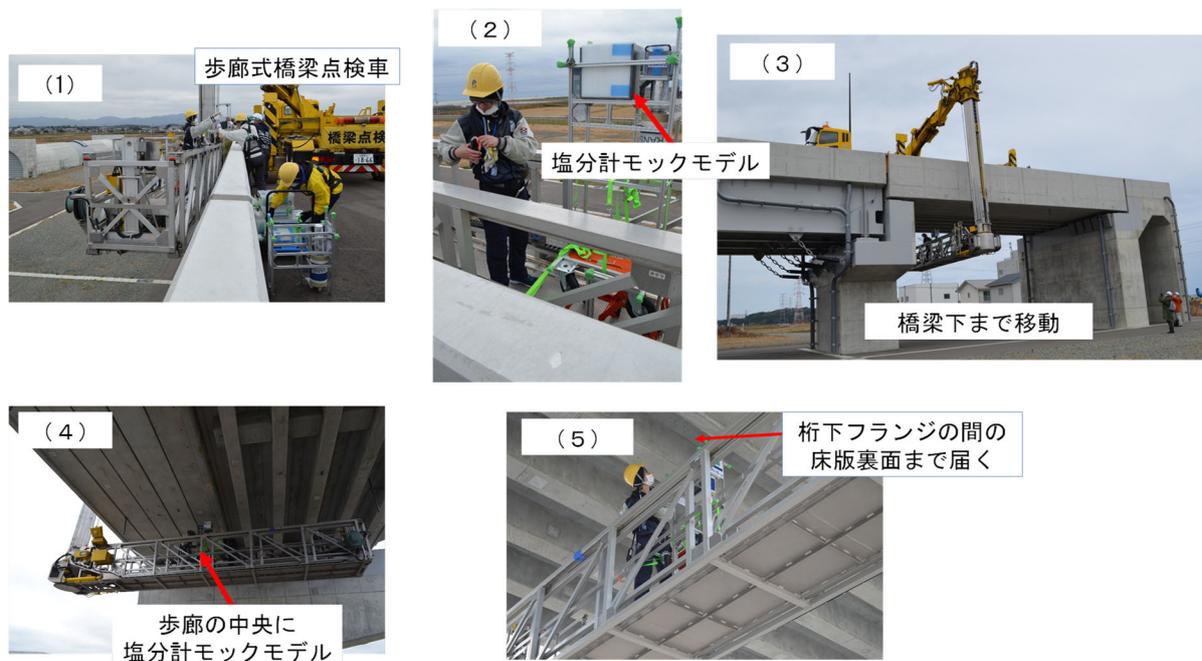


図18 歩廊式橋梁点検車を用いた搭載試験。(1)組立の様子。(2)組立完了後。(3)橋梁下まで歩廊を移動。(4)塩分計モックモデルは歩廊の中央あたりに設置してある。(5)バケット式と同様に床版裏面まで届くことを確認。

図17(1)のように、信号確認用のオシロスコープとヘッドアンプを設置した。図17(2)と(3)はそれぞれバケットが静止しているときと、バケットが移動、もしくは切り返しなどの動作をしたときのオシロスコープの画面である。バケットが静止しているときは特にノイズは乗っていない。室内試験と同じである。バケットを移動させた際や、切り返し動作などで大きく揺れた際に、振動ノイズが乗ることが確認できた。橋梁点検車のエンジンや、風でバケットゆっくり揺れる程度では、ノイズが乗らないことが確認できた。

最後に、歩廊式橋梁点検車への搭載試験を行った。歩廊の先端にある点検者用のリフターは荷重制限が100kg程度で、またサイズが小さいので使用せず、荷重制限が400kgである歩廊の真ん中あたりで搭載試験を行った。図18に搭載試験の様子を示す。バケット式と同様に、図18(1)のように、道路側から歩廊内へパーツ毎に手渡しで行い、組み立てた。図18(2)は組立完了後である。その後、図18(3)のように歩廊を橋梁下まで移動した。図18(4)のように、塩分計モックモデルは荷重制限が400kgある、歩廊部の中央あたりに設置してある。図18(5)のように、歩廊式においても、バケット式と同様に床版裏面まで届くことを確認した。

以上のように、R2年度において、塩分計モックモデルによる橋梁点検車への搭載試験を行い、目標であった、全重量100kg以下、バケットに収まる大きさ、

桁下面に届く上下リフト、バケット内AC電源からのノイズ確認を達成できた。



図19 土木研究所屋外施設と撤去橋梁



図20 (1) 土木研究所での屋外塩分計測試験に用いた塩分計試験機。(2) 運搬に用いた軽ワゴン車。(3) 軽ワゴン車に機材を全て積み込み。

R3年度においては、実際にカリフォルニウム線源を用いた塩分計測を行える塩分計試験機を製作し、また、歩廊式のように電源がない場合はポータブル電源などを利用し、装置類に電源を供給する必要があるため、その対策も行ったので、以降に、土木研究所の屋外施設の塩害撤去橋梁を(図19参照)用いた塩分計測試験、福島ロボットテストフィールドにて、バケット式および歩廊式橋梁点検車を用いた塩分計測試験機の搭載試験、および、塩分計測試験とともに報告する。図20(3)に、機材全てを積み込んだ場合の様子を示す。

図20(1)に土木研究所の屋外施設にて、塩害撤去橋梁に対する塩分計測を行うために製作した、塩分計測機水平バージョンである。屋外で電源がない場所で行うため、ポータブル電源を用意した。図20(2)に塩分計測機の運搬に使用した軽ワゴン車を示す。

図21の上部はカリフォルニウム線源(Cf線源)、図21の下部はCf線源を計測の直前に、Cf線源遮蔽体の中央にセットした写真である。

図22の左図は、塩害撤去橋梁である荒磯大橋の桁下フランジ側面を計測した際の塩分計測機のセ



図21 Cf線源を計測直前にセットした写真

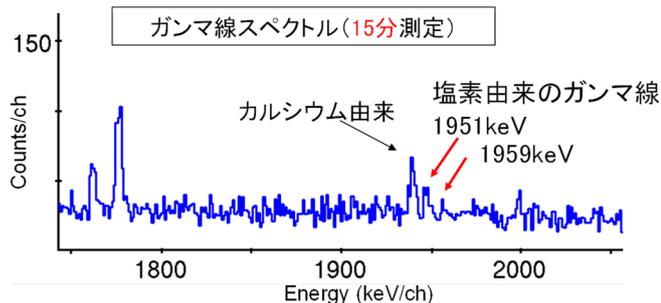
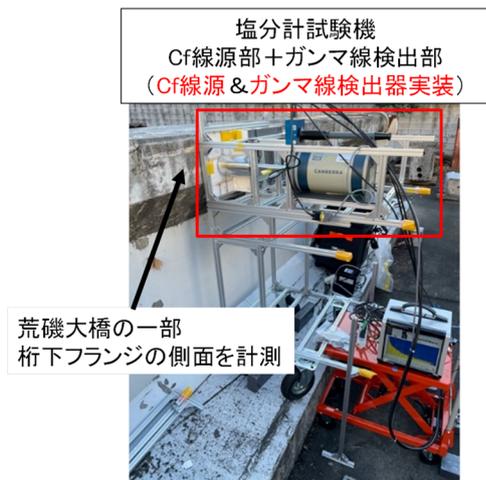


図 2 2 (左図) 塩分計試作機のセットアップ写真。(右図) 塩分計試作機による塩分計測で得られたガンマ線スペクトル。

ットアップ写真である。電源供給は市販のポータブル電源（700Wh程度、重量8kg程度）を用いて行った。塩分計に稼働に必要な電力は、操作用のノートPC（100W程度）を除けば、30W程度である。単純に計算すれば、ノートPCをポータブル電源に繋いだ状態でも、5時間程度は継続して、塩分計試作機を稼働することができる。

図 2 2 の右図は、塩分計試作機による非破壊塩分計測で得られたガンマ線スペクトルである。計測時間は15分である。図中の赤矢印で示したように、塩素由来のガンマ線のピークが観測できた。

この塩素由来のガンマ線ピーク面積より、塩分濃度を推定した。塩分濃度を深さ方向に分割して推定する手法は、この時点では開発中であったため、深さ方向9cmまでに一定で塩分が存在すると仮定し

て、塩分濃度を推定した結果、 $5.7 \pm 1.5 \text{ kg/m}^3$ の塩分濃度が得られた。

塩分計試作機による計測後、塩分計試作機で測定した面内を従来技術であるドリル削孔+電位差滴定法による塩分濃度推定を行った。ドリル粉末の採取は3ヶ所、15mmステップで深さ45mmまで行った。図 2 3 は、ドリル粉末採取を行った箇所と、ドリル削孔の様子、採取したドリル粉末を示した。得られた粉末を用いた電位差滴定法による塩分濃度推定の結果を表 1 に示した。塩分計試作で推定した塩分濃度が深さ方向に一定と仮定しているため、電位差滴定法で得られた結果も深さ方向に平均した値を算出した。その結果、 $5.72 \text{ kg/m}^3$ が得られた。

この結果から、塩分計試作機の計測で得られた塩分濃度は矛盾の無い結果であることが分かる。

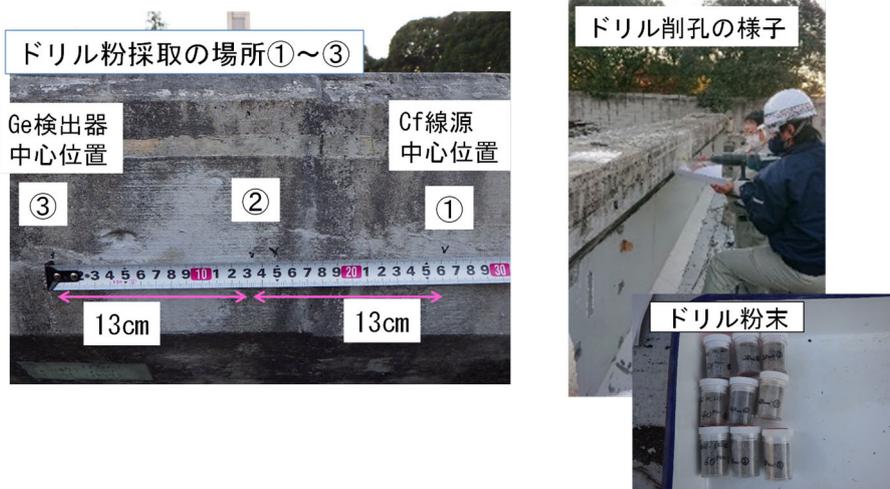


図 2 3 (左図) 塩分計試作機のセットアップ写真。(右図) 塩分計試作機による塩分計測で得られたガンマ線スペクトル。

表 1 ドリル粉末採取での電位差滴定法による塩分濃度の分析結果

採取箇所と深さ(mm)	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
荒磯①-15	6.56	①平均 4.72
荒磯①-30	3.67	
荒磯①-45	3.93	
荒磯②-15	8.84	②平均 7.51
荒磯②-30	4.97	
荒磯②-45	8.72	
荒磯③-15	5.90	③平均 4.94
荒磯③-30	5.35	
荒磯③-45	3.57	
<b>全平均→</b>		<b>5.72</b>

しても、塩分計試作機を用いた塩分計測を行った。これは30分の計測で、塩分濃度3.1±1.1kg/m<sup>3</sup>が得られ、同様にドリル削孔による分析を行い、塩分濃度3.27kg/m<sup>3</sup>が得られた。これも荒磯大橋のケースと同じように、矛盾の無い結果を得ている。

これは、撤去橋梁ではあるが、実橋梁を非破壊で塩分計測に成功し、塩分濃度を推定した世界初の事例である。

また、同様に、塩害撤去橋梁である能生大橋に対



〈塩分計実機モデル〉  
実用化に向けたコンセプト検証機。  
水平・垂直に対応可能。  
写真は筐体のみで、  
垂直方向に向けている。



〈塩分計試作機〉  
水平・垂直に対応可能。  
写真は水平バージョン。  
福島ロボットテストフィールドでは、  
塩分消し置くにおける  
実機モデルの予備機とした。



当日朝のGe検出器の液体窒素補給作業

図 2 4 (左上) 塩分計実機モデル。(右上) 塩分計試験機。(中央下) Ge検出器への液体窒素補給作業。

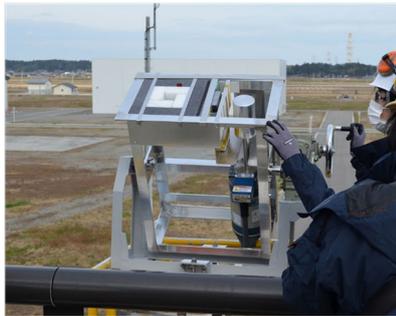


図25 福島ロボットテストフィールドの試験橋梁における、バケット式橋梁点検車を用いた塩分計実機モデルの搭載試験時の組立作業の様子。

次に塩分計試作機を使用した、福島ロボットテストフィールドでの試験橋梁における橋梁点検車への搭載試験、および、塩分計試験機について報告する。ここで、福島ロボットテストフィールドの試験橋梁は塩害を受けた橋梁ではなく、塩分計試験用の試験パネルもないため、室内試験において使用した塩分濃度を調整したコンクリートプレートを耳桁に貼り付けて、塩分計測を行い、室内試験との比較を行う。また、バケットおよび歩廊への搭載試験、および、塩分計測は、土木研究所の屋外施設で用いた塩分計試験機（図24（右上））ではなく、塩分計実機モデル（図24（左上））により行う。図2

4（中央下）は、試験当日の朝に行った、Ge検出器の液体窒素補給作業である。本研究で使用しているGe検出器は、1日1回の液体窒素補給が必要である。そのため、移動日や測定日が二日以上に渡る場合は、10リットル液体窒素保存瓶などに液体窒素を入れて、装置類とともに運搬する必要がある。



図26 組立作業完了後のGe検出器など、装置類の立ち上げ作業の様子



図 2 7 塩分計測試験を実施する耳桁フランジ付近までバケットを移動

図 2 5 に、福島ロボットテストフィールドの試験橋橋梁における、バケット式橋梁点検車を用いた塩分計実機モデルの搭載試験時の組立作業を示した。図 2 6 に、組立作業完了後のGe検出器など、装置類の立ち上げ作業を示した。図 2 7 に、装置類の立ち上げ作業の完了後、塩分計測に用いる塩分濃度  $3\text{kg}/\text{m}^3$  のコンクリートプレートをバケット内に積み込み、塩分計測試験を実施する耳桁付近までバケットを移動した際の写真を示す。図 2 8 にバケット上での塩分計測試験の様子を示した。図 2 8 (左下) は、試験橋梁に塩分が含まれていないか確認するた

め、コンクリートプレートを設置しない場合、図 2 8 (右下) はコンクリートプレートを設置した場合の塩分計測試験の様子である。

塩分計測の結果、コンクリートプレートを設置しない場合は、塩素由来のガンマ線ピークは確認できなかった。コンクリートプレートを設置した場合の塩分計測により得られたガンマ線スペクトルを図 2 9 に示した。測定時間は1時間である。結果として、塩素由来のガンマ線ピークを観測することができた。また、このコンクリートプレートは塩分濃度  $3\text{kg}/\text{m}^3$  と分かっているので、塩分濃度の推定の結果、 $3\text{kg}/\text{m}^3$



図 2 8 バケット上での塩分計測試験の様子。(中央上) 塩分計測試験を実施する耳桁フランジ。(左下) コンクリートプレートを設置しない場合の塩分計測。(右下) コンクリートプレートを設置した場合の塩分計測。

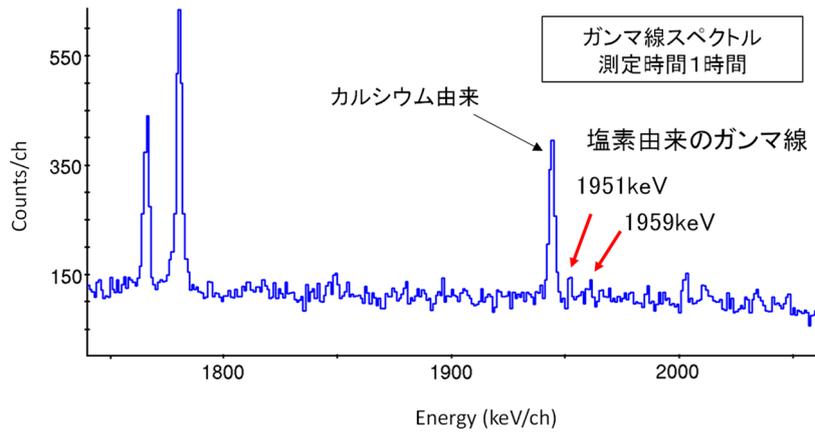


図29 コンクリートプレートを設置した場合の塩分計測により得られたガンマ線スペクトル

に誤差内で一致するはずである。しかしながら、推定の結果、 $4.3 \pm 1.5 \text{ kg/m}^3$ となり、実験室測定より約40%、高めにしている。これは、室内と条件が異なる部分(図30中の※1)があるためだと思われる。異なる条件を以下に挙げた。

- ・コンクリートとの隙間の有無
- ・隙間の傾きの有無
- ・テーパ付き鉛の有無
- ・鉛サイズの違い
- ・コンクリートプレートより、福島RTFでの測定

の方が、カルシウム&水素由来のガンマ線が多く、コンクリートの成分が異なる可能性、である。

この異なる条件に関して、放射線輸送シミュレーションコードを用いて検証を行った。

図31(上図)は、室内試験の条件をモデル化し、塩素由来のガンマ線収量を計算した深さ方向の収量マッピング、図31(下図)は、福島ロボットテストフィールドでの試験条件をモデル化し、塩素由来のガンマ線収量を計算した深さ方向の収量マッピングである。福島ロボットテストフィールドでの

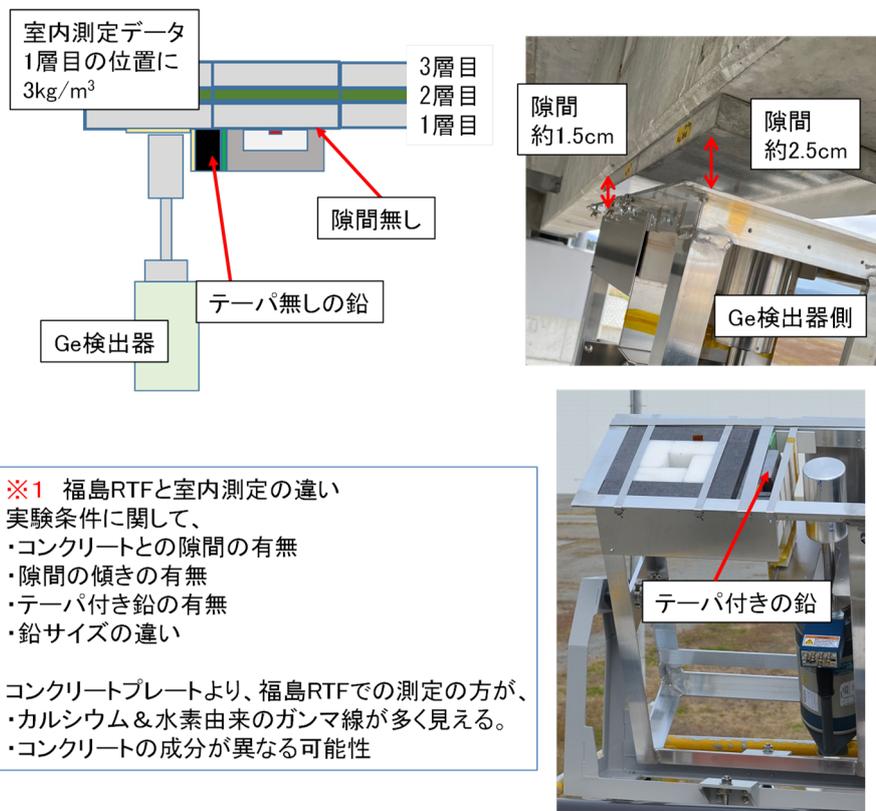


図30 コンクリートプレートを用いて行った室内試験時の条件と、福島ロボットテストフィールドで行った試験時の条件の違い

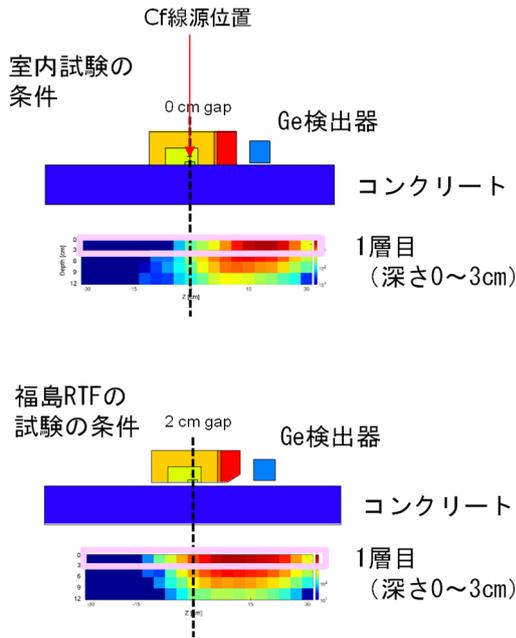


図3-1 放射線輸送シミュレーションコードを用いた、福島ロボットテストフィールドでの塩分計測試験で塩分濃度が高く出たことの検証

試験では1層目にコンクリートプレートを設置したので、図3-1の収量マッピングにおける深さ0~3cmに相当する。この部分のGe検出器位置でのガンマ線収量(カウント数)を、室内試験と福島ロボットテストフィールドでの試験とで比較した。その結果を表2に示した。約46%の増加が見られた。

これを図2-9の塩分計測に得られたガンマ線スペクトルから推定した塩分濃度に適用した場合、 $2.9 \pm 1.0 \text{ kg/m}^3$ となり、コンクリートプレートの塩分濃度と矛盾の無い値となった。

従って、コンクリート表面と塩分計との間に隙間ができた場合の測定であっても、補正することが可能であることが分かった。

ここで、福島ロボットテストフィールドではバケット式橋梁点検車を用いた試験を実施した翌日に、歩廊式橋梁点検車を用いた搭載試験を行ったが、雨が降っており、塩分計実機モデルは防水対策はなさ

表2 Ge検出器位置における塩素由来のガンマ線カウントの比較

	隙間	1層目の塩素由来ガンマ線のカウント
室内試験 鉛にテープ無し	0 cm	21807
福島での屋外試験 鉛にテープ有り	2 cm	31915

46%増加

れていなかったため、装置類は一切乗せず、筐体みの搭載試験となったため割愛させていただいたが、R2年度の搭載試験と同様、歩廊式においてもバケット式同様、設置し、桁下フランジに到達することは確認できた。

以上、R3年度における搭載試験、および、塩分計測試験において成功した。試験橋梁の耳桁にコンクリートプレートを貼り付けた塩分計測であったが、橋梁点検車を用いた非破壊塩分計測により、コンクリート中の塩分濃度を推定したのは世界初である。

R4年度においては、R3年度の搭載試験や塩分計測における課題点について、対策・改良を行い、本研究の最終目標である、車線規制を伴う、バケット式橋梁点検車を用いた実橋梁の非破壊塩分計測を行ったので、報告する。

R3年度の搭載試験の課題点として、組立手順や固定方法などが確立されていなかったため、組立時間が長い(1時間程度)、バケット内での塩分計の固定が不十分、手渡しするには重いパーツがある、などが挙げられた。

そのため、

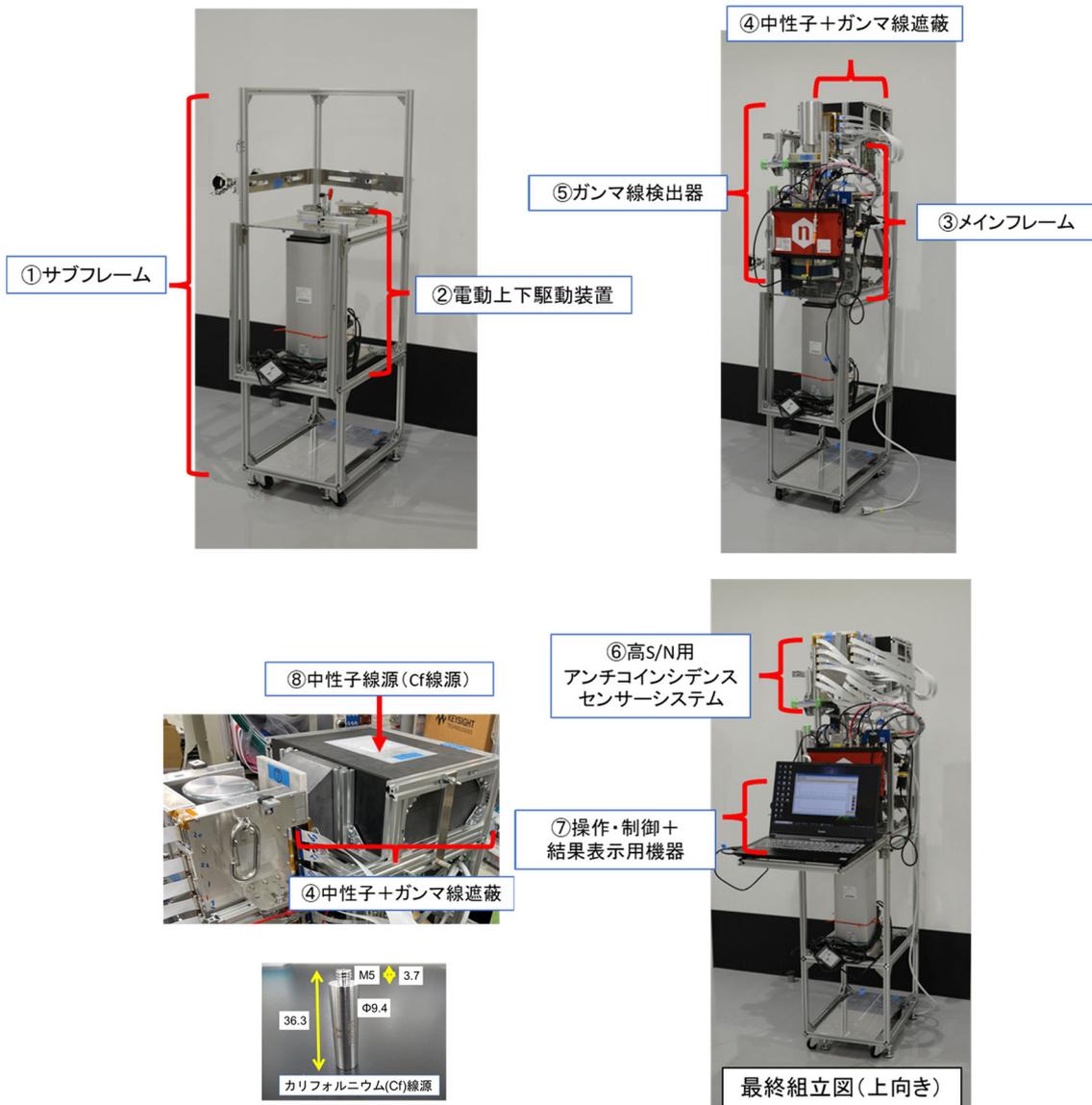
- ・更なる軽量化、
- ・組立易さの向上、
- ・1パーツの重さを10kg程度に抑える、
- ・バケット内での固定を十分に行う、
- ・落下防止のため、工具不要で組立可能、
- ・組立時間は15分以内を目指す、

というコンセプトで、塩分計の筐体などを設計し、改良更新を行った。

軽量化に関しては、第2章2.2-b)のCf線源遮蔽体構造の最適化計算で行ったように、R3年度の搭載試験で用いた遮蔽体構造から約4kgの軽量化に成功した。また、塩分計の上下駆動に、リフター台車を利用していましたが、電動上下駆動装置を導入することで、そのコントローラーも含め、約10kgの軽量化に成功した。塩分計筐体にバケットの手すりに固定するクランプを導入することにより、十分な固定をすることが可能となった。組立に関して、1パーツの重さを、重いパーツで13kg程度と、10kg程度の重さにすることで、また、取っ手を付けるなど、持ちやすくすることで、手渡しをしやすくした。組立には、パッチン錠や、蝶ネジを利用することで、工具不要で、全て手締めで組立・固定可能にした。

図3-2に、バケット内への手渡しの順番①~⑧に沿った、パーツ名称と写真を記載した。

- ①サブフレーム
- ②電動上下駆動装置
- ③メインフレーム
- ④中性子+ガンマ線遮蔽
- ⑤ガンマ線検出器
- ⑥高S/N用アンチコイシデンスセンサーシステム
- ⑦操作・制御+結果表示用機器(PC)



※水平方向の組立も可能

図3 2 塩分計の軽量化、および、パーツ分け。

#### ⑧中性子線源 (Cf線源)

である。

塩分計測を行うために必要なパーツは、③～⑧である。重量は約55kg。図3 2は、バケット上で桁下フランジを計測するための、上方向（垂直方向）の計測を想定している。水平方向の測定を行う場合は、①のサブフレームを、水平用サブフレームにして使用する。②の上下駆動装置も、適宜、必要な上下駆動装置を使用する。

上述のような改良を行い、室内での組立試験では15分以内をクリアできた。

次のステップとして、実橋梁における、車線規制を伴わない高所作業車のデッキへの塩分計試作機の搭載試験、および、塩分計測試験を行った。この試

験は、車線規制を伴う、バケット式橋梁点検車を用いた塩分計測に向けた、デッキへの固定、組立時間短縮化がメインの目的である。

搭載試験は、宮城県仙台市青葉区折立にある国道48号線の綱木跨道橋下にある駐車帯（もしもしピット）で行った。駐車帯での試験のため、車線規制は伴わないが駐車帯を使用するため、道路使用許可申請を行い、立ち入り規制を行った。図3 3に、駐車帯、塩分計の運搬の様子、搭載試験に使用した高所作業車を示した。

塩分計はR3年度から軽量・小型化されているので、ワゴン車が3列シート状態の荷室に積み込めた。高所作業車は、駐車帯から桁下フランジ面までの高さが約10メートル程度だったので、12メートル



図 3 3 綱木跨道橋下の駐車帯で行った搭載試験

まで対応可能なタイプを使用した。

図 3 4 に、デッキ上での搭載試験の様子を示した。デッキを地上付近まで降ろし、地上から手渡しでデッキ内に渡し、組み立てていく。結果として、

組立が完了するまで約14分であった。目標としていた15分以内を達成することができた。報告が前後するが、塩分計測後の解体については約12分で完了した。



図 3 4 塩分計の搭載試験。組立の様子。



図 3 5 綱木跨道橋下の桁下フランジ下面の塩分計測試験

次に、デッキを移動させ、桁下フランジ下面の塩分計測を行った。その様子を図 3 5 に示した。塩分計に使用するノートPC上で、検出器の操作、データ取得、解析を行う、現場評価可能な塩分濃度検査システムを開発中であり、本試験においては、屋外および実橋梁で初の使用であった。また、本計測に関しては、ポータブル電源を使用し、デッキ内にAC電源がない橋梁点検車においても計測可能なことを示した。

測定時間は30分で、塩素由来のガンマ線ピークを観測することができなかったため、少なくとも今回計測を行った範囲において、塩分濃度は塩分計の検出限界である $1\text{kg}/\text{m}^3$ 以下という判断を行った。

塩分計による塩分計測後、土木研究所の屋外施設で行ったように従来技術との比較のため、ドリル削孔を行った。また、ハンディタイプの蛍光X線検査装置により、コンクリート表面に関する塩分計測も行った。その様子を図 3 6 に示した。



図 3 6 ドリル削孔と蛍光X線検査装置による計測の様子



図 3 7 安家大橋。計測箇所はA2付近の耳桁下面。撮影は計測試験の事前現場調査時。

ドリル粉末の採取後、電位差滴定法による塩分濃度推定を行ったが、 $0.1\text{kg}/\text{m}^3$ 前後と、ほとんど塩分が含まれていないことが分かった。蛍光X線検査装置による表面の塩分についても、未検出 ( $0.5\text{kg}/\text{m}^3$ 以下)であり、塩分計による結果と矛盾しないことが分かった。

以上の試験により、組立時間も短縮化し、橋梁点検車を用いた非破壊塩分計測の実施に成功した。この成功を受けて、本研究期間内の最終目標である、車線規制を伴う、バケット式橋梁点検車を用いた実橋梁における塩分計測試験を行ったので報告する。

バケット式橋梁点検車を用いた塩分計測試験は、岩手県九戸郡野田村の国道45号線の安家大橋にて行った。本試験では車線規制を行うため、道路使用許可申請を行い、片側車線規制を行った。使用したバケット式橋梁点検車はBT200である。

図 3 7 に安家大橋と計測を行うA2付近の写真を示した。この写真は、計測試験を行う日より前の、現場の事前調査時に取った写真である。

図 3 8 に使用したバケット式橋梁点検車BT200と、片側車線規制の様子を示した。塩分計の搭載の



図 3 8 (左図) バケット式橋梁点検車BT200。(右図) 片側車線規制の様子

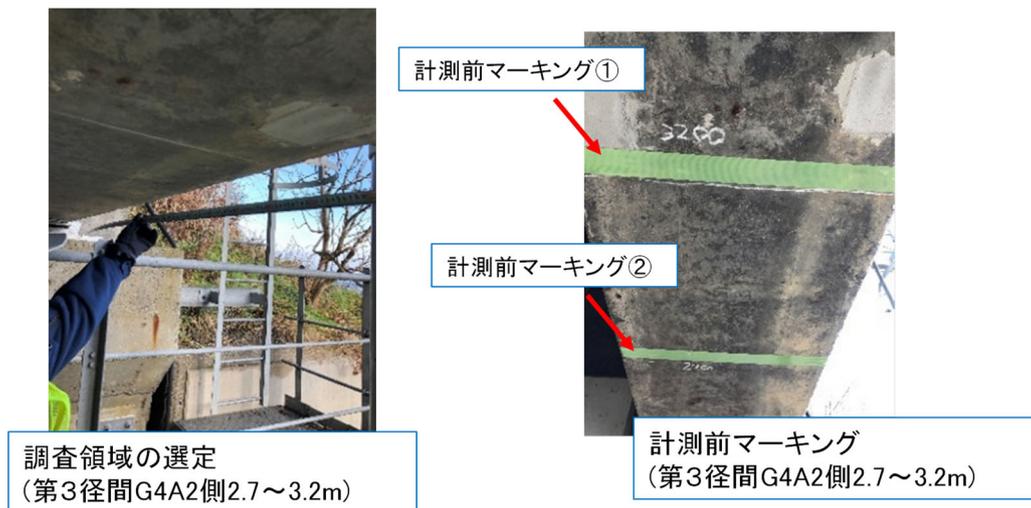


図39 計測箇所を選定

前に、塩分計で計測する調査領域の選定を行った。図39は、選定の様子とマーキングを施した写真を示した。塩分計による計測は、なるべく、このマーキング領域で行うこととした。

図40は、塩分計の搭載作業の様子である。綱木跨道橋では、地面に塩分計のパーツを並べて、搭載していったが、本試験日においては、小雨と雪が降る天候であったため、運搬に使用したワンボックスタイプ乗用車の荷室から直接、バケット上へ手渡しを行った。また、試験日は雨、もしくは雪が降る予報であったので、試験前日に、電子機器にラップを

巻くことで、雨に対処した。塩分計のパーツを手渡す際の、落下防止用に、フック付きロープを使用することで対処した。

雨が降っていない日や、綱木跨道橋のような雨が入っていない場所であれば、組立完了後に、Ge検出器とMPPCに電圧印加を行い、電圧印加しながらバケットを移動し、計測箇所へ到達する間に、Ge検出器の電圧印加が終了する、という手順で、計測までの時間短縮化を行っているが、本試験においては、ラップによる応急手当的な対策であったため、電圧印加は、橋梁下へ移動し、雨が当たらない場所で行っ



図40 車両の荷室からバケット上へ手渡しで組み立てた。電子機器にはラップで防水対策。パーツの落下防止にフック付きロープを使用した。

測定場所(A2付近)への移動



RANS-μ (測定風景)



図 4 1 A2付近への移動と塩分計による計測の様子

た。  
図 4 1 は、組立終了後、A2付近へ移動し、測定を行っている様子である。測定時間は30分。この間に、塩素由来のガンマ線ピークを確認できたので、当初の予定では、1時間の測定であったが、午後から大きく天候が崩れるとのことで、塩分計による測定時間を短くし、この後に行う、ドリル削孔も予定を早めて行った。

図 4 2 は、バケット内から撮影した、塩分計測時の写真と、塩分計での計測後に、ドリル削孔を行うための、塩分計が測定した範囲を示すマーキングを行った。

塩分計による計測が終了後、解体を行い、上述のように予定を早めて、ドリル削孔を行った。ドリル

削孔は、深さ方向に15mm間隔で、深さ70mmまでの粉末を採取した。

図 4 3 は、塩分計による非破壊計測により得られたガンマ線スペクトルである。赤矢印で示したように、塩素由来のガンマ線ピークを観測することができた。これは、実橋梁において、コンクリート内部の塩分を非破壊で計測した初の事例である。

また同時に、鉄由来のガンマ線も観測することができた。鉄筋やシースを入れていないコンクリートプレートを用いた室内試験でも、装置などに含まれる鉄由来と思われるガンマ線が少量見えていたが、それに比べ明らかに高い計数率であった。これは、コンクリート内部の鋼材の観測に成功したことを示す。従って、塩分濃度と同じく、非破壊による、か

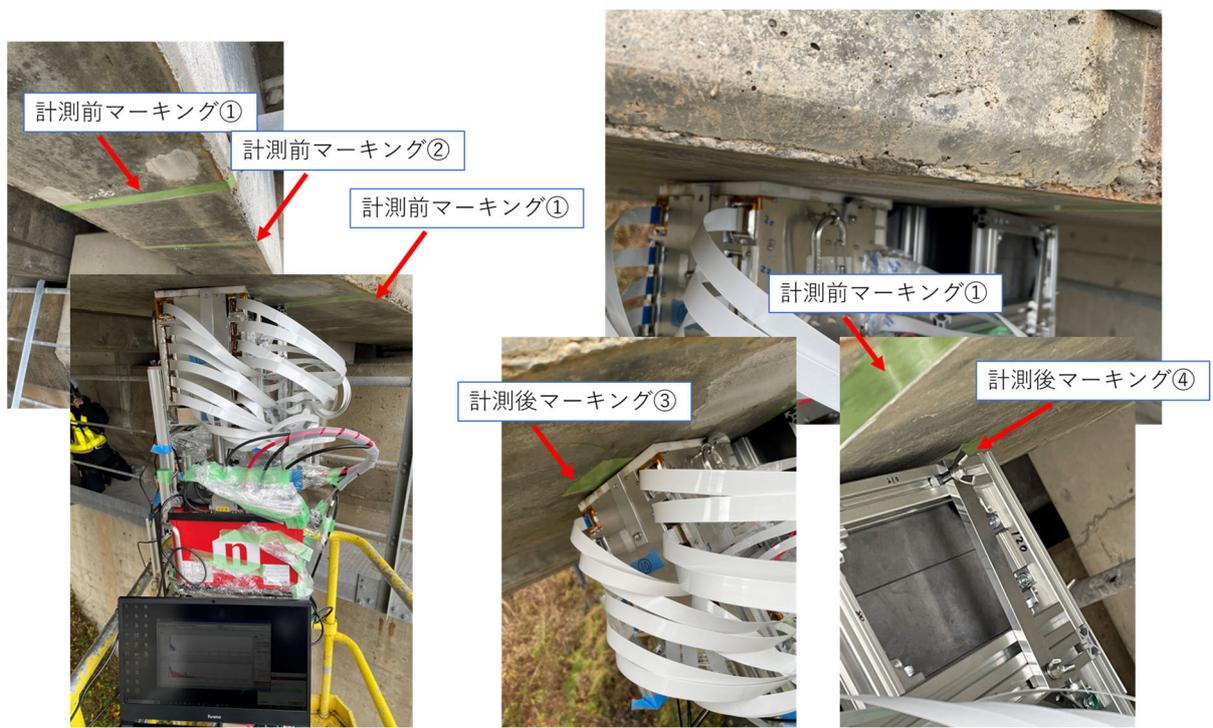


図 4 2 バケット内から撮影した塩分計による計測の様子と、ドリル削孔のための計測後マーキング。

より厚検証法を今後、検討していることをここに述べておく。

表3に、塩分計の計測により得られた塩分濃度分布とドリル削孔により得られた塩分濃度分布を比較したものを示した。

塩分計による計測結果に関して、塩素由来の3本のエネルギーの異なるガンマ線ピークの面積より、深さ方向に3分割した塩分濃度分布を推定する手法により、推定した。その結果、コンクリート表面から3cmまでの塩分濃度が $2.1 \pm 0.7 \text{ kg/m}^3$ 、3~6cm、6~9cmは塩分計の検出限界である $1 \text{ kg/m}^3$ 以下と推定した。一方、ドリル削孔による結果は、ドリル粉末は15mm間隔の取得であったので、0~3cmの平均、3

~6cmの平均、6~7cmの値を示した。0~3cmの塩分濃度は $1.5 \text{ kg/m}^3$ 、それ以降は $0.35 \text{ kg/m}^3$ 、 $0.34 \text{ kg/m}^3$ と、低い塩分濃度であった。

塩分計による計測はドリル削孔と比較して、矛盾の無い結果が得られた。また、表3内で参考と記したが、参考値として、これまでの塩分計による計測で行ってきた、塩分濃度が深さ9cmまで一定だと仮定して推定した塩分濃度も記載した。これに関しても、塩分計では $1.1 \text{ kg/m}^3$ 、ドリル削孔では $0.8 \text{ kg/m}^3$ と、矛盾の無い結果を得ている。

図44は、開発した塩分濃度検査システムの成果品イメージである。指定時間の計測後に、得られたガンマ線スペクトルの分析を行い、塩分濃度が自動

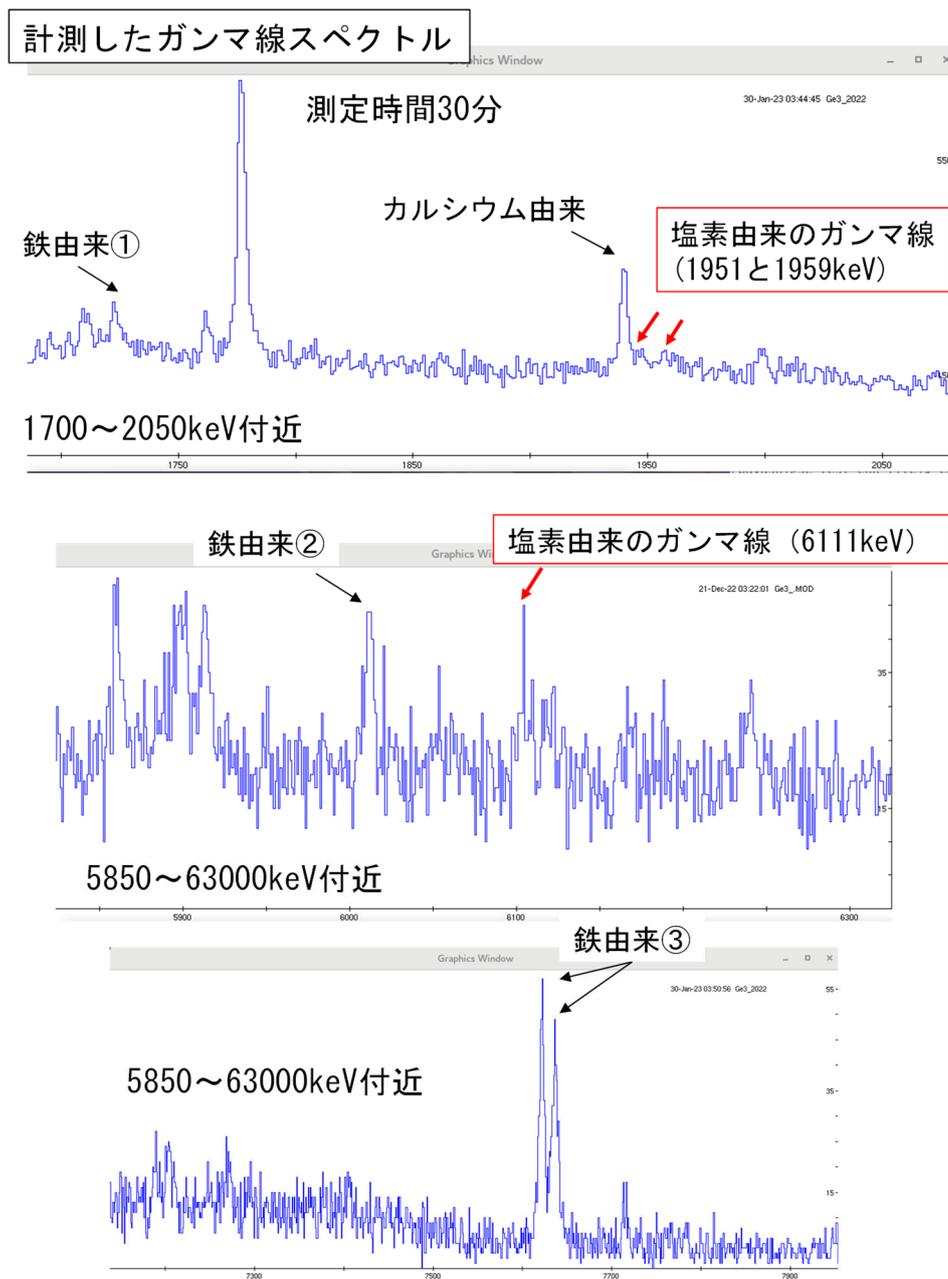
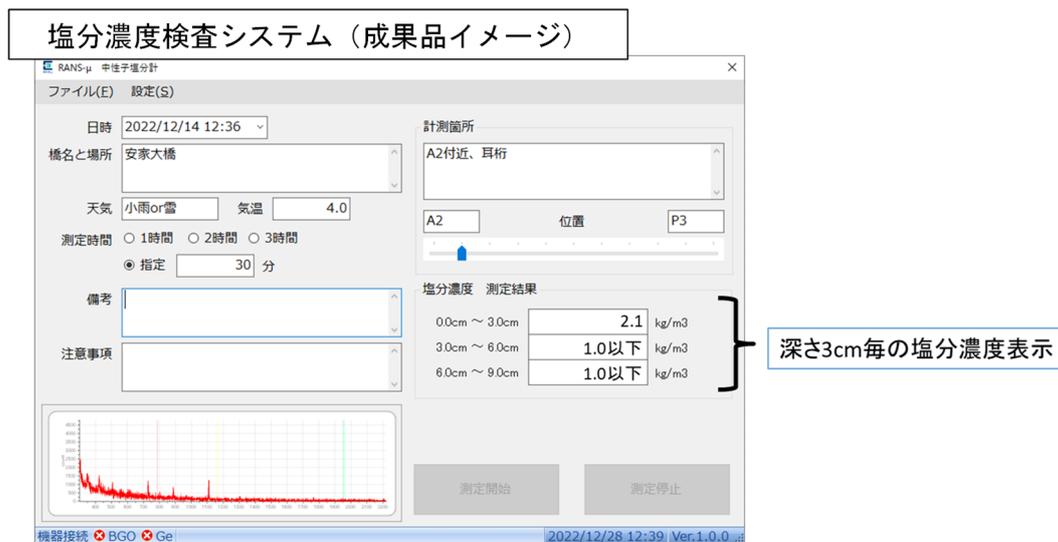


図43 塩分計による非破壊計測により得られたガンマ線スペクトル

表3 塩分計による計測で得られた塩分濃度分布とドリル削孔により得られた塩分濃度分布との比較

実施場所	測定部位	時期	塩分計による計測結果	測定時間	参照結果 (電位差滴定)
岩手県安家大橋 (岩手県九戸郡)	耳桁下面	12月	0～3cm: 2.1kg/m <sup>3</sup> 3～6cm: 1kg/m <sup>3</sup> 以下 6～9cm: 1kg/m <sup>3</sup> 以下  (参考 1.1kg/m <sup>3</sup> )	30分	0～3cm: 1.5kg/m <sup>3</sup> 3～6cm: 0.35kg/m <sup>3</sup> 6～7cm: 0.34kg/m <sup>3</sup>  0.80kg/m <sup>3</sup> (0～70mm)



※通常モードで立ち上げると自動的に検出器に電圧印加。  
測定時間経過後、自動的に解析が行われ、深さ3cm毎の塩分濃度が表示される。

図4-4 塩分濃度検査システムの成果品イメージ

で表示されるシステムである。ただし、安家大橋の計測では、システムの調整中、および、トラブルがあったので、成果品イメージを示した。

以上、安家大橋での試験により、世界で初めて、実橋梁において、車線規制を伴う、バケット式橋梁点検車を用いて、非破壊塩分計測を行い、塩分検出、および、塩分濃度推定に成功した。

またこの結果は、第77回セメント技術大会（5月19日）にて口頭発表を行った。契約期間終了後であったので、第4章の成果などには記載していない。

### 2.3 塩分濃度分解能の検証

本研究期間内の塩分濃度計測に関する数値目標である、深さ7cm、塩分濃度1kg/m<sup>3</sup>、精度20%、計測時間1時間以内、を検証するため、塩分濃度を調整したコンクリートプレートを用いた塩分検出感度の検証を行った。

図4-5に塩分検出感度の検証を行った際の塩分計の写真を示した。図3-2にも示したが、塩分計測に必要な③～⑧までのパーツを室内試験用のテーブルの上で組み立てた。図4-6にテーブルの上で組み立てた塩分計の写真を示す。

塩分検出感度の検証用に、塩分濃度を調整した30x30cm<sup>2</sup>で、3cm厚のコンクリートプレートを使用した。調整した塩分濃度の種類は、0、1、1.8、3、6kg/m<sup>3</sup>の5種類である。ただし、0kg/m<sup>3</sup>は、コンクリートプレートを製作する際に、塩分を添加していないものである。

深さ7cmでの塩分濃度1kg/m<sup>3</sup>の塩分が検出可能かの検証のため、図4-6に示す、1層目と2層目には、0kg/m<sup>3</sup>のコンクリートプレートを設置し、3層目(7.5±1.5cm)に、6kg/m<sup>3</sup>から低い塩分濃度へと順次測定し、最終的に1kg/m<sup>3</sup>までのコンクリートプレートを設置した際に、ガンマ線スペクトルで塩素由来のガンマ線ピークが観測できるかの測定を行っ

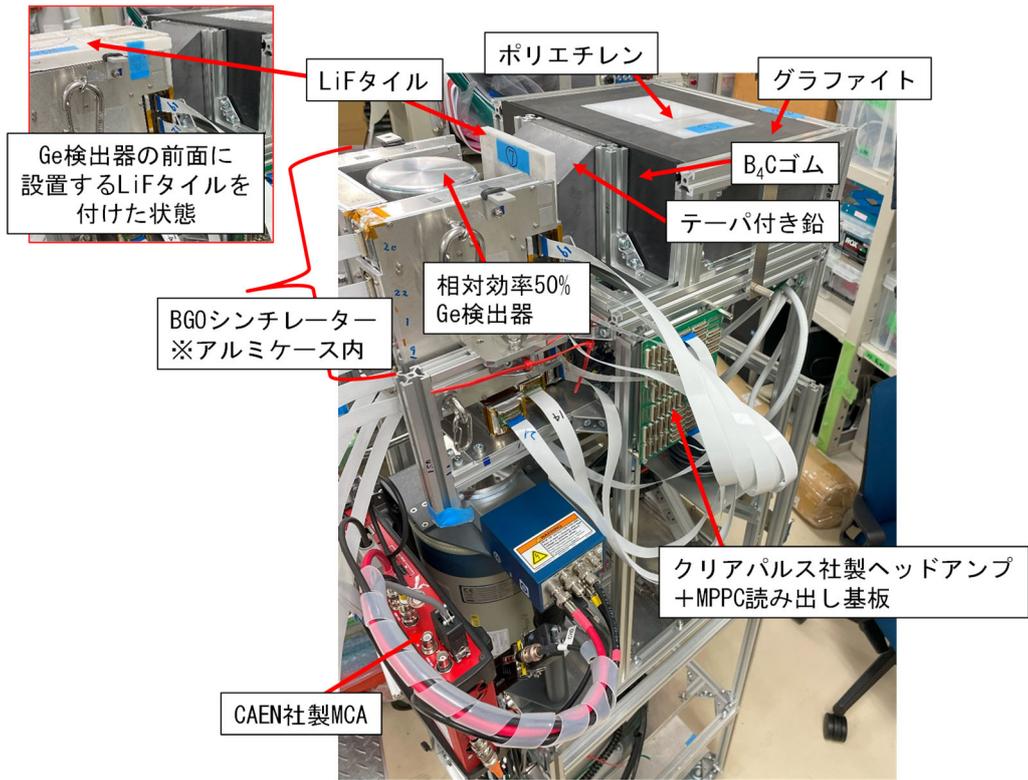


図 4 5 塩分計の写真

た。また3層目より後ろに関しては、塩分を含まない6cm厚と10cm厚のコンクリートプレートを設置した。これは放射線輸送シミュレーションコードに

よる計算上、この程度の厚さがないと、コンクリート中の中性子分布に影響が出てしまうためである。また、実橋梁で測定する部位に関しても、この程度

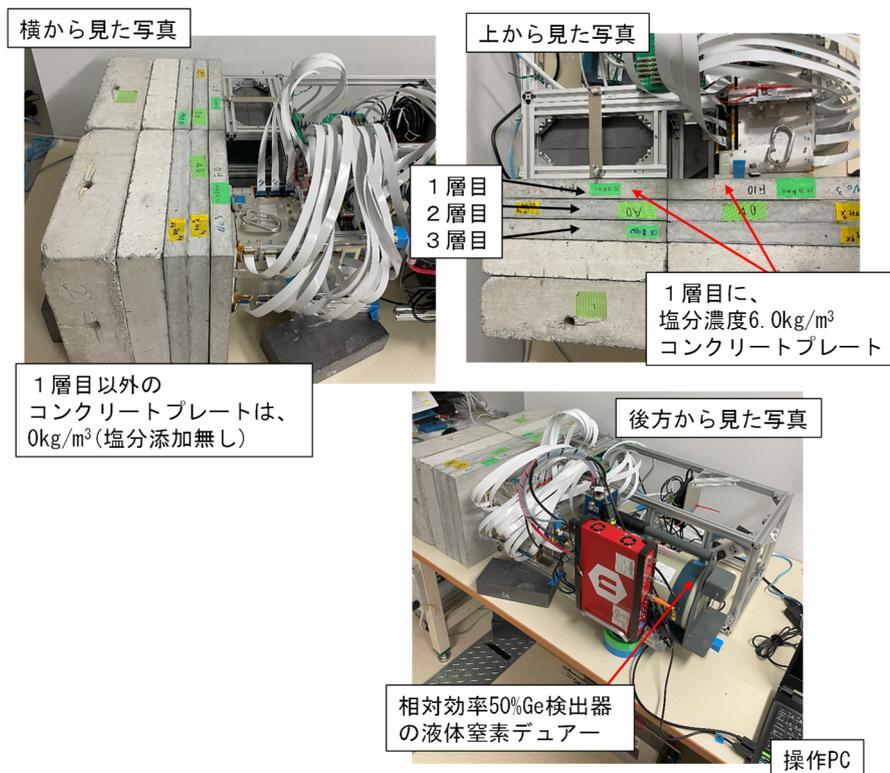


図 4 6 塩分計の室内試験の写真

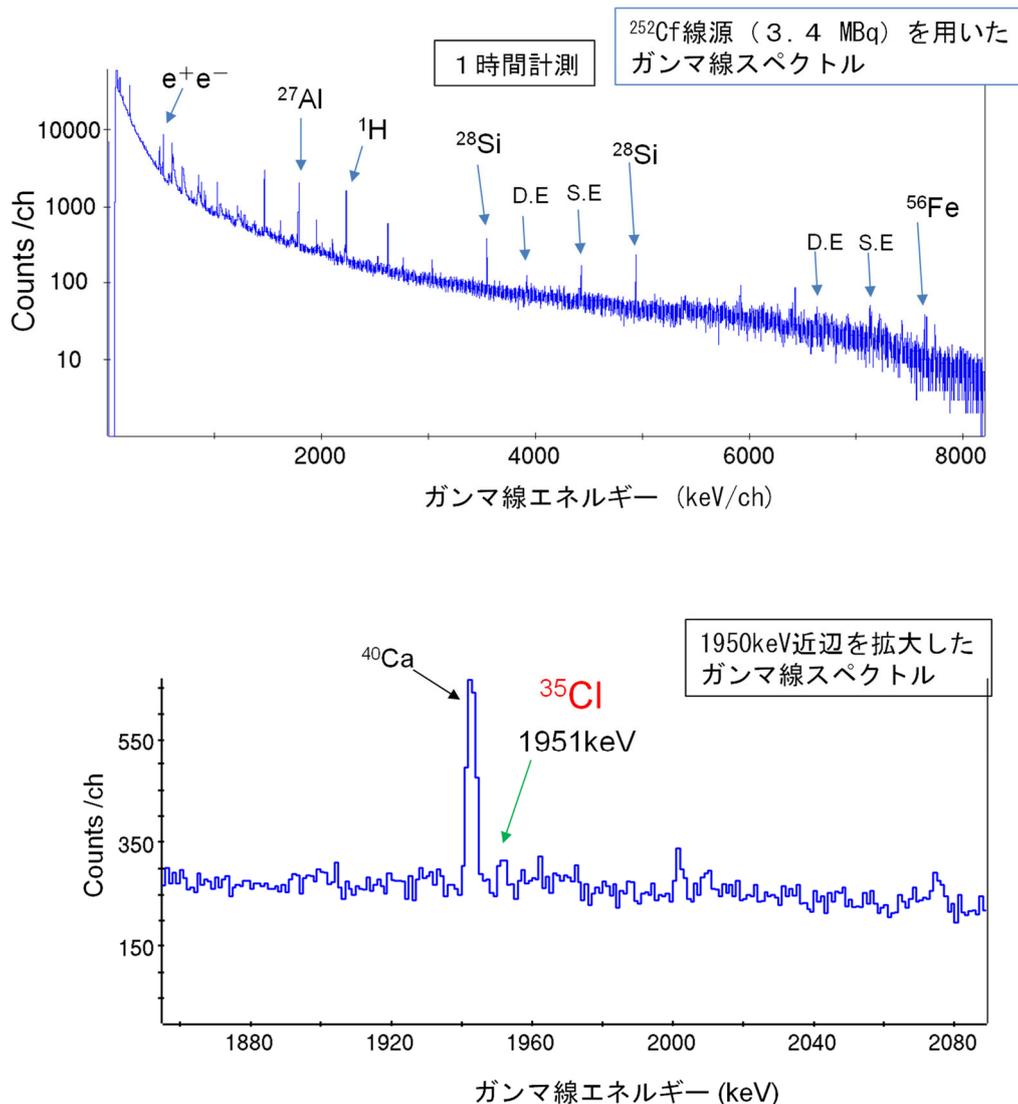


図 4 7 3 層目に  $1\text{kg}/\text{m}^3$  を設置した際に得られたガンマ線スペクトル

の厚さ以上のコンクリートが存在するためである。

図 4 7 に、検証結果の 1 例として、3 層目に塩分濃度  $1\text{kg}/\text{m}^3$  のコンクリートプレートを設置した際に得られたガンマ線スペクトルを示した。測定時間は 1 時間である。また、試験時のカリフォルニウム線源の線源強度は  $3.4\text{MBq}$  であった。塩素由来のガンマ線が存在する  $195\text{keV}$  付近を拡大したガンマ線スペクトルも図 4 7 に示した。

結果として、塩素由来のガンマ線を観測でき、深さ  $7\text{cm}$  における塩分濃度  $1\text{kg}/\text{m}^3$  を 1 時間で計測可能なことを示した。

最後に実橋梁において、深さ  $7\text{cm}$ 、 $1\text{kg}/\text{m}^3$  を計測する、という目標であるが、本研究期間内で計測を行った実橋梁 2 橋では、それに該当する塩分濃度を持った橋梁はなかったため、安家大橋の計測試験後、

土木研究所の屋外施設にて、塩害撤去橋梁に対する計測試験を実施した。これは、塩分計の水平方向の計測試験、また、同じ橋梁中での異なる箇所での塩分計測試験も目的である。

試験体とした撤去桁は、北陸地方の沿岸部に 1970 年に建設されていた PCT 桁橋である。その撤去桁の桁下フランジ側面部（海側と山側）、および、ウェブ側面部（海側）の箇所を測定したので、図 4 8 に計測の様子を示す。

綱木跨道橋や安家大橋で行った計測は垂直方向であったので、サブフレームを水平用にし、高さ調整には、R2~3 年度に使用していた、手動リフター台車を使用した。また、屋外で電源のない環境であるため、ポータブル電源を使用した。ここで、R3 年度では対策がまだであった、ポータブル電源由来のノイズを除去するための対策を行っている。

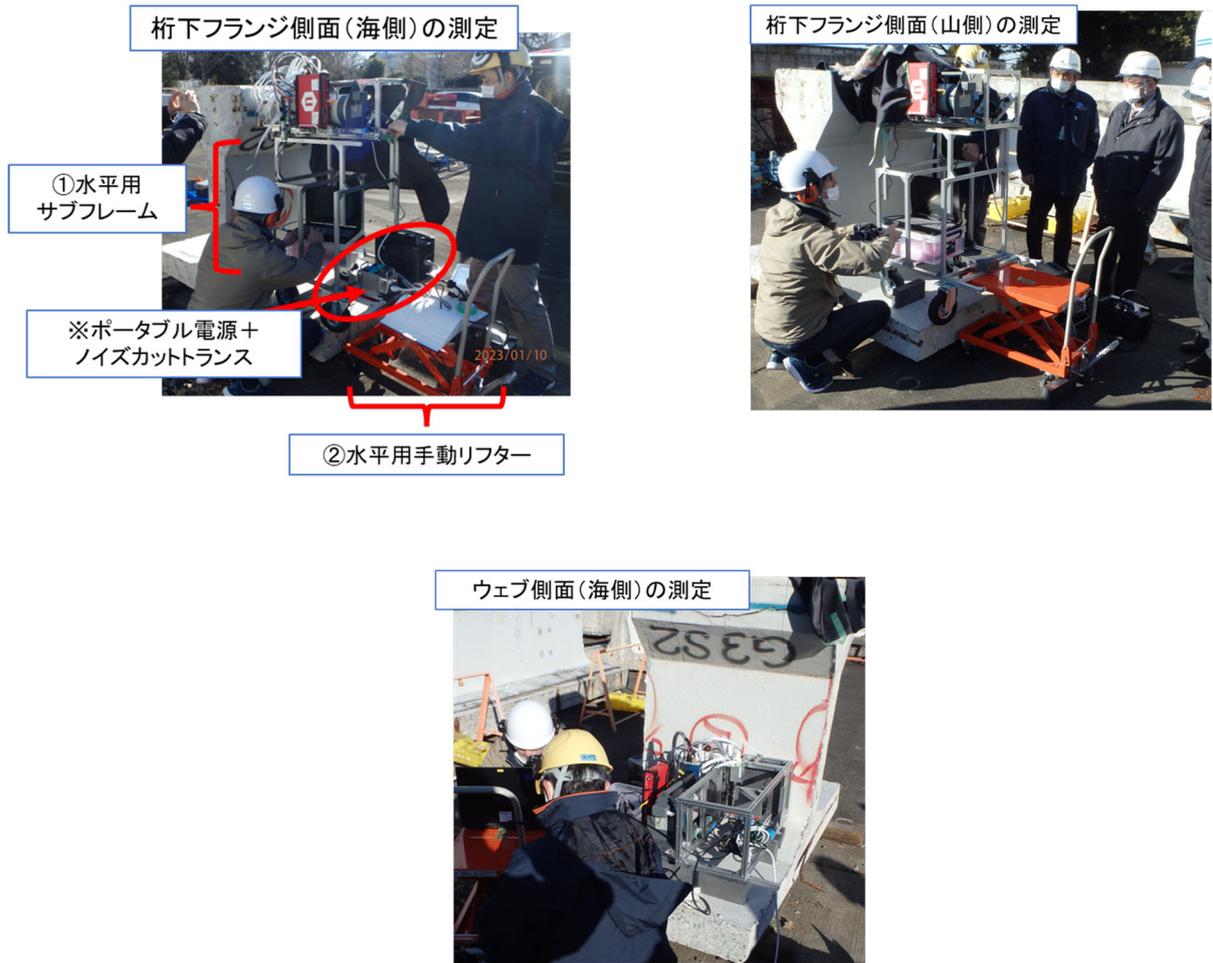


図 4 8 塩分計の水平方向の計測試験、および、同じ橋梁桁の異なる部分に関する計測試験

図 4 9 に、桁下フランジ側面海側の計測で得られたガンマ線スペクトルで1950keV付近を示した。同

様に、図 5 0 と図 5 1 にそれぞれ、桁下フランジ側面山側の計測、ウェブ側面海側の計測により得られ

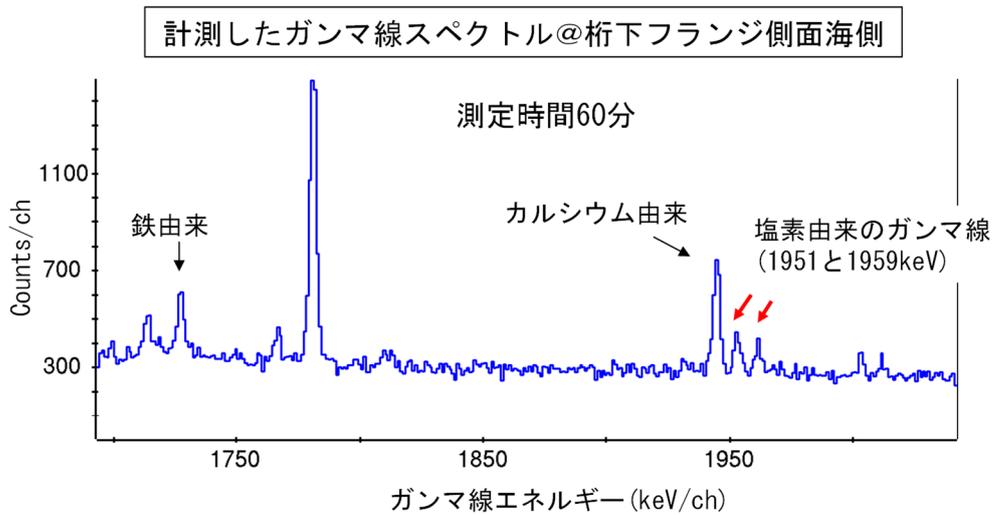


図 4 9 桁下フランジ側面海側を計測して得られたガンマ線スペクトル

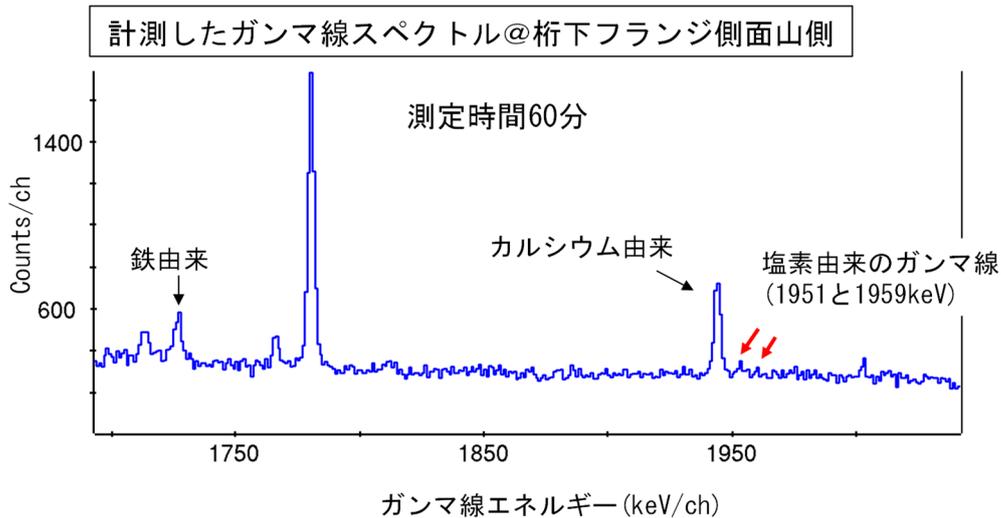


図 5 0 桁下フランジ側面山側を計測して得られたガンマ線スペクトル

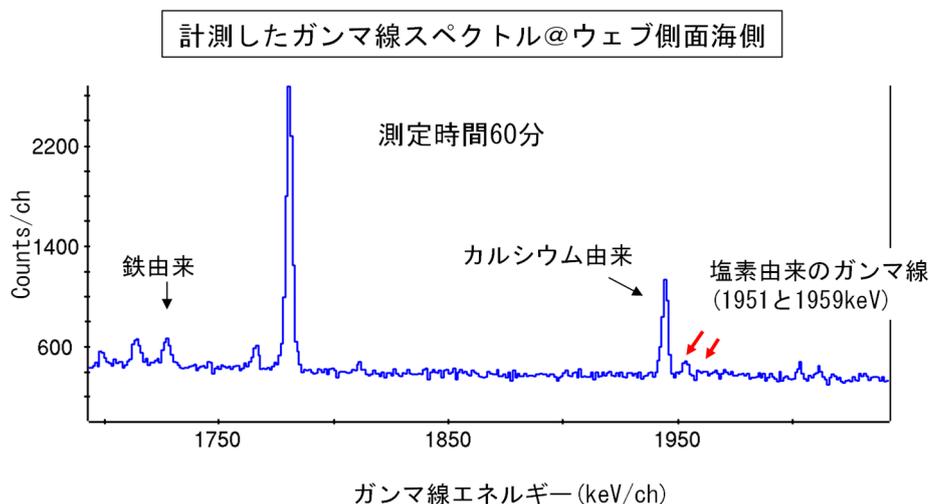


図 5 1 ウェブ側面海側を計測して得られたガンマ線スペクトル

たガンマ線スペクトルで1950keV付近を示した。

結果として、3ヶ所全てにおいて、塩素由来のガンマ線を観測した。詳細は後述するが、桁下フランジ側面海側の塩分濃度が一番高く、桁下フランジ側面山側の塩分濃度が一番低かった。

また、この撤去桁に関して、塩分計で計測した箇所をコア採取し、電位差滴定法による塩分濃度推定を行うことで、塩分計による計測と従来技術による計測の比較を行った。

表4に、それぞれの計測により得られた塩分濃度分布を示した。また、表3の安家大橋での計測結果と同様に、参考値として、塩分濃度が深さ9cmまで一定であると仮定した塩分濃度も記載した。

桁下フランジ側面海側の計測において、コア採取による結果と矛盾の無い結果が得られている。コア採取の結果に、4cmより深いものが無いのは、途中

に鋼材のようなものがあり、これ以上深く、採取できなかったことによる。ここで、塩分計による計測に関して、深さ $7.5 \pm 1.5\text{cm}$ において、 $2.6\text{kg/m}^3$ という結果が得られている。これは、 $1\text{kg/m}^3$ では無いが、塩分計による実橋梁に対する非破壊塩分計測において、初めて、深さ $7.5 \pm 1.5\text{cm}$ という深さの塩分を検出に成功したことになる。

桁下フランジ側面山側の結果については、0~3cmにおいて、 $1.6\text{kg/m}^3$ とコア採取と矛盾の無い結果が得られている。また、3cmより深い箇所では塩分計の検出限界以下( $1\text{kg/m}^3$ )という結果であり、これもコア採取の結果と矛盾しない。

ウェブ側面海側の結果については、3cmより深い箇所については検出限界以下と、コア採取の結果と矛盾が無い。0~3cmにおいては、大きくなっている。これは、R3年度において行った福島ロボットテスト

表3 塩分計による計測で得られた塩分濃度分布とドリル削孔により得られた塩分濃度分布との比較

測定部位	塩分計による計測結果	コア抜き 電位差滴定の結果
桁下フランジ側面 海側	0～3cm : 5.2 kg/m <sup>3</sup> 3～6cm : 4.0 kg/m <sup>3</sup> 6～9cm : 2.6 kg/m <sup>3</sup>  参考 5.2 kg/m <sup>3</sup>	0～3cm : 4.0 kg/m <sup>3</sup> 3～4cm : 4.6 kg/m <sup>3</sup>  参考 4.2kg/m <sup>3</sup> (0～40mm)
桁下フランジ側面 山側	0～3cm : 1.6 kg/m <sup>3</sup> 3～6cm : 検出限界以下 6～9cm : 検出限界以下  参考0.72 kg/m <sup>3</sup>	0～3cm : 1.3 kg/m <sup>3</sup> 3～6cm : 0.5 kg/m <sup>3</sup> 6～7cm : 0.2 kg/m <sup>3</sup>  参考 0.9kg/m <sup>3</sup> (0～60mm)
ウェブ側面 海側	0～3cm : 5.9 kg/m <sup>3</sup> 3～6cm : 検出限界以下 6～9cm : 検出限界以下 ※再計測を行う予定 参考3.1 kg/m <sup>3</sup>	0～3cm : 1.1 kg/m <sup>3</sup> 3～6cm : 0.6 kg/m <sup>3</sup> 6～9cm : 0.1 kg/m <sup>3</sup>  参考 0.8kg/m <sup>3</sup> (0～60mm)

フィールドでの計測試験で、塩分計とコンクリート表面が離れた場合に、0～3cmからのガンマ線収量が増えるという現象があったが、このウェブ側面海側の測定においても、同様に、コンクリート表面と塩分計は離れていた。この計測については再検討が必要なため、再計測を行う予定である。

この撤去桁に関する結果は、2023年度土木学会全国大会にて発表予定である。

以上、塩分濃度分解能の検証を行ったが、深さ方向3分割での塩分濃度の推定に成功し、室内試験にて、深さ7cmの1kg/m<sup>3</sup>の計測にも成功した。

## 2.4 点検支援技術性能カタログ掲載に向けた検討

点検支援技術性能カタログ掲載に向けた取り組みとしては、東北地整、国総研、国交省本省の意見をうかがった上で、オリエンタル白石を含めたニュートロン次世代システム技術研究組合所属の建設コンサルタント会社（パシフィックコンサルタンツ、大日本コンサルタント、福山コンサルタント）の協力を得ながら準備を進め、R4年9月に申請した。その後、橋梁調査会との意見交換会を通じて掲載内容をブラッシュアップするとともに実橋梁における計測実績を蓄積し、R5年3月31日のカタログ掲載につながった。

## 2.5 道路管理者等との意見交換

研究を実施するにあたり、道路管理者等との意見交換を行った。

R2年度については、東北地方整備局、国総研、国交省本省等と計7回の意見交換会を行い、本課題の目標値についての議論、福島ロボットテストフィールドにおける橋梁点検車搭載テストについての議論等を行い、目標値を決定するとともに、橋梁点検車搭載テストの実現につなげた。

R3年度については、東北地方整備局、国総研、国交省本省等と計8回の意見交換会を行い、福島ロボットテストフィールドにおける塩分計測試験、RANS- $\mu$ の実橋梁適用の際の組立・解体時間短縮等について議論し、短時間組み立て可能な構造につなげることができた。

R4年度については、東北地方整備局、国総研、国交省本省等と計9回の意見交換会を行い、宮城県綱木跨道橋、岩手県安家大橋での実橋梁塩分計測試験等について議論を行い、上記実橋梁試験での目標達成につなげることができた。

## 第3章 今後の課題や展望

片側車線規制を伴うバケット点検車を用いた塩分計測を安家大橋にて行い、実橋梁における塩分検出に成功し、本課題の目標を達成した。同じく目標であった、本課題で開発した塩分計の「点検支援技術性能カタログ（橋梁・トンネル）」への掲載も、2023年3月31日に掲載されたことで達成した。また、開発した塩分計の実用化に関しても、(株)ランズビュー（理研ベンチャー）を2023年4月3日に設立したことで、実橋梁の計測業務を行える体制を整えた。

今後、実橋梁における塩分計測の実績を増やし、ニュートロン次世代システム技術研究組合の協力を得て、従来技術での計測結果との比較を行いながら、道路の予防保全に貢献するため、更なる計測精度（深さ分解能や塩分検出感度）の向上、使いやすさの向上、防水・防塵による全天候型への改良、現場ニーズに合わせた改良開発を行っていく予定である。今後の展望として、中性子を利用したRC床板の土砂化の非破壊検知、コンクリート構造物の内部の劣化損傷の可視化への研究開発、実用化を目指して引き続き、研究開発を継続していく予定である。

## 第4章 成果発表、その他特記事項など

### 4.1 成果発表

#### <プレスリリース>

- ①“超小型非破壊検査装置「中性子塩分計RANS- $\mu$ 」を開発”，2021年10月14日 理化学研究所 オリエンタル白石 ※2021年12月24日現在の掲載誌：JIJI.COM (Web)、建設通信、日経クロステック (Web)、橋梁新聞、検査機器ニュース、産経新聞、しんぶん赤旗
- ②”理研発、中性子線でインフラ非破壊検査を実現する「株式会社ランズビュー」の設立について”，2023年4月28日，株式会社ランズビュー，ニュートロン次世代システム技術研究組合，オリエンタル白石株式会社，大日本コンサルタント株式会社，株式会社福山コンサルタント，株式会社理研鼎業、※2023年5月21日現在の掲載：橋梁新聞、日刊建設工業新聞、日刊建設通信新聞、施工の神様、日テレNEWS

#### <特許>

”非破壊検査装置”，発明者：若林泰生，大竹淑恵，高村正人，池田裕二郎，出願日：2023年3月3日，出願番号：特願2023-032620

#### <原著論文>

- ①Y. Wakabayashi et al., “Development of neutron salt-meter RANS- $\mu$  for non-destructive inspection of concrete structure at on-site use”, Journal of Neutron Research 24, pp. 441-449, (2022).
- ②Y. Wakabayashi et al., “Conceptual study of salt-meter with  $^{252}\text{Cf}$  neutron source for on-site inspection of bridge structure”, Journal of Neutron Research, Vol. 23, No. 2-3, pp.207-213, (2021).
- ③若林泰生 ほか，“小型中性子源 RANS ならびにカリフォルニウム線源を利用したコンクリート構造物の塩害に対する非破壊検査装置の開発”，日本コンクリート工学会「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，pp.202-209, (2021).

#### <口頭発表>

- ①若林泰生 ほか，“塩害予防保全を目指した中性子非破壊検査装置RANS- $\mu$ の開発現状V”，ニュートロン次世代システム技術研究組合，第3回研究会，真岡 栃木，12月22日，(2022).
- ②若林泰生 ほか，“橋梁の塩害を非破壊で見つける！橋梁点検車で使える中性子塩分計RANS- $\mu$ ”，理研シンポジウム:第10回「光量子工学研究」，和光 埼玉，12月21日，(2022).
- ③Y. Wakabayashi et al., “Progress for on-site chloride measurement using RANS- $\mu$ ”，The 6th RAP-JCNS Joint Workshop, 和光 埼玉 (オンライン開催)，12月2日，(2022).
- ④若林泰生 ほか，“塩害に対する非破壊検査装置—中性子塩分計RANS- $\mu$ —の開発と取り組み”理研シンポジウム「ついに始まった中性子現場利用 -中性子のものづくり・インフラ産業での利用とサイエンスへの挑戦-」，和光 埼玉，11月30日，(2022).
- ⑤若林泰生 ほか，“カリフォルニウム線源を利用したコンクリート構造物の非破壊塩害検査装置—中性子塩分計RANS- $\mu$ —、ならびに、現地評価のための塩分濃度検査システムの開発”，日本中性子科学会，第22回年会，千葉 千葉，10月27日，(2022).
- ⑥若林泰生 ほか，“塩害予防保全を目指した中性子非破壊検査装置RANS- $\mu$ の開発現状IV”，ニュートロン次世代システム技術研究組合，第2回研究会，目黒 東京，8月5日，(2022).
- ⑦若林泰生 ほか，“塩害予防保全を目指した中性子非破壊検査装置RANS- $\mu$ の開発現状III”ニュートロン次世代システム技術研究組合，第1回研究会，和光 埼玉，6月23日，(2022).
- ⑧Y. Wakabayashi et al., “**Development of neutron salt-meter RANS- $\mu$  for non-destructive inspection of concrete structure at on-site use**”, 9th International Meeting of Union for Compact Accelerator-Driven Neutron Source (UCANS9), Saitama, Japan, Online, Mar. 28, (2022).
- ⑨若林泰生 ほか，ニュートロン次世代システム技術研究組合，第3回研究会，大洗 茨城，11月12日，(2021).
- ⑩若林泰生 ほか，日本コンクリート工学会，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, 千代田 東京 (Web開催), 9月27日, (2021).

⑪Y. Wakabayashi et al., The 5th RAP-JCNS Joint Workshop, 和光 埼玉 (Web開催), 6月10日, (2021).

⑫若林泰生 ほか, 理研シンポジウム「小さいよ見えてきた小型中性子源の現場利用と拓けて来たさらなる応用 -コンクリート反射イメージングから宇宙へ-」, 和光 埼玉 (Web開催), 5月13日, (2021).

⑬Y. Wakabayashi et al., “RANS- $\mu$  salt-meter of bridge inspection for on-site use”, Union for Compact Accelerator-Driven Neutron Source WEB seminar (UCANS-web 2020), Online, Dec. 3, (2020).

#### <ポスター発表>

若林泰生 ほか, 放射線プロセスシンポジウム実行委員会, 第18回放射線プロセスシンポジウム, 高崎群馬 (オンライン開催), 11月16日, (2021).

#### <学術表彰など>

若林泰生 ほか, 第18回放射線プロセスシンポジウムポスターセッション 最優秀賞, 11月17日, (2021).

#### <著書・解説など>

若林泰生 ほか, 月刊検査技術, Vol.27, No.5, 5月号, pp.16-22, (2022).

## 4.2 その他特記事項など

(1) 土木研究所の屋外施設での塩分測定や、綱木跨道橋、安家大橋にて橋梁点検車を使用した塩分測定を行い、塩分検出が可能であることを示し、実橋梁での塩分計測を実現した。

(2) R5年度の技術支援性能カタログ（橋梁・トンネル）の掲載が決定した。

(3) ニュートロン次世代システム技術研究組合にて研究会や見学会を行い、塩分計を含め、中性子を用いた非破壊検査の標準化を目指した活動を行っている。

## 第5章 まとめ

### 5.1 今後の道路政策への提案など

本制度を用いて開発した塩分計は、2022年度に募集があった「点検支援技術性能カタログ（橋梁・トンネル）」に申請し、採択され、2023年3月31日に掲載された。また、2023年3月31日付けの道路局国道・技術課より各地方整備局道路管理課長宛ての事務連絡における「トンネル、橋梁、舗装の定期点検における点検支援技術活用の原則化について」の中に、令和5年度より、2. 原則化の具  
体内容の6) コンクリート構造の鋼材位置のコンクリート中に含まれる塩化物イオン量計測、又はかぶりコンクリート内の塩化物イオン量の深さ方向の把握（塩害の影響地域に位置する橋梁）【今回追加】とされ、本塩分計が直轄橋梁の塩分濃度検査に原則活用されるようになった。※上記 6)については、「コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領(案)平成16年3月 国土交通省道路局」に基づく点検を実施する場合に対象とする。それらの需要に対して業務実施を行うために、新会社として、(株)ランズビュー（理研ベンチャー）を2023年4月3日に設立（オリエンタル白石、大日本コンサルタント、福山コンサルタント、パシフィックコンサルタンツ、理研鼎業等）し、実橋梁の計測業務を行える体制を整えた。

更に、コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領（案）（国土交通省：平成16年）の改定を提案中（現在は破壊検査のみ記載を非破壊検査技術も活用できる内容に改訂）併せて、塩害に苛まれている自治体への適用を目指して、道路橋定期点

検要領の参考資料としての位置づけを提案中。

このような塩分濃度非破壊検査法の確立及び実用化装置開発により、従来のコアドリル法による破壊検査によるインフラ構造物を傷つけることが無くなり、測定場所の制限もなくなり、橋梁の各部位ごとの塩分濃度が測定でき、検査時間も大幅に短縮され、安全で、効率的、効果的な塩害対策が実現できるようになる。更に、現状は塩分濃度検査が破壊検査のため殆ど塩分濃度検査が行われておらず、塩害が生じてからの措置が一般的であり、事後保全対策となっている。この状況を、塩分計の活用により、塩害が生じる前に措置を行う予防保全対策への転換が可能となる。それらにより、塩害による落橋の防止、橋梁の長寿命化、大幅な維持管理費の縮減が可能となる。

### 5.2 まとめ

研究開発は3年間の計画通り進み、3年目においては、実橋梁にてバケット式橋梁点検車を用いた非破壊で塩分計測に成功し、また技術支援性能カタログ（橋梁）への掲載（2023年3月31日掲載）が決まった。

また、業務実施を行うために、新会社として、(株)ランズビュー（理研ベンチャー）を2023年4月3日に設立し、実橋梁の計測業務を行える体制を整えた。

R5年度より、公知の技術・装置として、実用化し、広く使用される見込みである。

## 付録 用語説明

・元素・・・陽子数（原子番号）により決まる。例えば、陽子が1個であれば、水素。2個であればヘリウム。塩素は17個である。

・安定同位体、放射性同位体・・・陽子数（元素）が同じで、中性子数が違う原子核を同位体という。その中で、崩壊して別の原子核になるものを放射性同位体、崩壊しないものを安定同位体と呼ぶ。記載の仕方は、塩素であれば、 $^{35}\text{Cl}$ 、 $^{37}\text{Cl}$ というように元素名の左肩に陽子数と中性子数を足した数を記す。ちなみに塩素に関しては、この2種が自然に存在している安定同位体である。

・核分裂・・・原子核が分裂して別々の原子核になる崩壊モード。中性子とガンマ線が放出される。

・カリフォルニウム（Cf）線源・・・ $^{252}\text{Cf}$ が核分裂をして崩壊する際に中性子を放出するため、中性子線源として使われる。

・熱中性子、高速中性子・・・10meV～100meV程度のエネルギーの中性子を熱中性子、500keV以上のエネルギーのものを高速中性子と呼ぶ。が、明確なエネルギーの境界はない。

・光電効果、コンプトン散乱、電子対生成・・・ガンマ線が物質内で起こす反応。光電効果は、電子に全てのエネルギーを与える反応。コンプトン散乱は、エネルギーの一部を電子に与える反応。電子対生成は、1022keV以上のガンマ線で起こる反応で、電子と陽電子を生成する反応。生成された陽電子が消滅する際に、2本の511keVガンマ線が放出する。そのうちの1本が検出器の外に逃げたものをSingle escape (SE)、2本とも逃げたものをDouble escape (DE) と呼ぶ。

・S/N比・・・Signal to Noise ratioの略称。本研究においては、ガンマ線のピークとその付近の連続的ガンマ線部分との比を言う。

様式5(背表紙)

道路政策の質の向上に資する技術研究開発 成果報告レポート No.2020-9 研究テーマ名 中性子によるコンクリート塩分濃度非破壊検査の技術研究開発 2023.5