

第7回 インフラメンテナンス大賞 国土交通大臣賞（技術開発部門）受賞

中性子によるコンクリート内塩分濃度 非破壊検査の技術開発

国立研究開発法人理化学研究所

研究員 若林 泰生

チームリーダー 大竹 淑恵

客員主管研究員 池田 裕二郎

客員研究員 高村 正人

研究員 福地 知則

研究員 福地 知則

オリエンタル白石株式会社

常務執行役員 大石 龍太郎

技術研究所 副所長 渡瀬 博

技師長 二井谷 教治

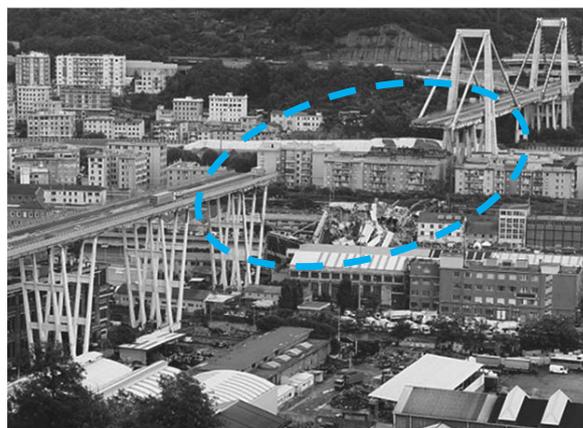
1. はじめに

コンクリート構造物の深刻な劣化要因の一つである塩害は、飛来塩分や凍結抑制剤に含まれる塩分（塩化物イオン）の浸透により、内部鋼材腐食を発生させる。近年、国内外の道路橋では塩害による落橋（死亡事故発生）（写真－1）や重篤な損傷（写真－2）による架替えが発生し、維持管理費にも膨大な予算を費やしている。

現状の塩害対策では、コンクリート表面に変状（ひび割れ、さび汁等）が現れてから対策を行う「事後保全対策」が一般的であり、近い将来、維持管理費の抑制に向けた「予防保全対策」への転換が求められている。

予防保全への転換には、早期に鋼材付近までの塩分浸透の状態を把握することが重要である。しかし、サンプリングが必要な微破壊での従来検査では、耐荷性能への影響や採取位置からの損傷拡大の懸念もあり、あまり行われていないのが実状である。

そこで我々は、早期に塩分浸透を把握し、塩害による被害を最小限に抑えることで社会インフラに投下される資本を低減させるため、「中性子塩分



イタリア・モランディ橋崩落事故
（出典：一般社団法人国際建設技術協会）

写真－1 塩害による落橋の例（飛来塩分）



国道18号妙高大橋で発見された鋼材の著しい腐食
（出典：国立研究開発法人土木研究所）

写真－2 塩害による鋼材破断の例（凍結抑制剤）

計 RANS- μ 」の開発を行い、実用化に至った^{1)~3)}。これは中性子技術を高度に活用し、完全非破壊で現地評価ができ、特別な資格も必要なく誰でも利用可能で、橋梁点検車にも搭載可能なポータブルな非破壊塩分検査装置である。

本稿では RANS- μ （マイクロ）の開発経緯や実用化、塩害対策の取り組みについて紹介する。

2. 中性子を用いた非破壊塩分計測の原理

中性子を対象物質に照射すると、中性子と対象物質中のさまざまな原子核（元素）が反応し、各原子核に応じた複数の特有のエネルギーを持ったガンマ線（即発ガンマ線）が、特有の量（ガンマ線強度）で放出される（図-1）。この特徴を利用した分析法を「中性子誘導即発ガンマ線分析法」と呼び、中性子誘導即発ガンマ線を検出し、そのガンマ線エネルギーおよび強度から、対象内に存在する元素の同定と定量を行う。RANS- μ では、中性子誘導即発ガンマ線の中でも、塩素（塩分）に関して、遅い中性子（熱中性子）との反応率が高い中性子捕獲反応を利用している。中性子およびガンマ線は共に物質中の透過力が高いため、コンクリート内部の塩分を非破壊で計測可能

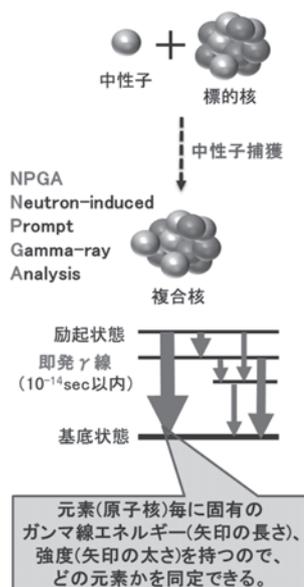


図-1 中性子誘導即発ガンマ線分析概要

である。

3. 中性子塩分計 RANS- μ の概要

RANS- μ は国土交通省の新道路技術会議⁴⁾における技術研究開発制度の助成（令和2～4年度）の下、東北地方整備局が担当、オリエンタル白石株式会社との共同研究、国立研究開発法人土木研究所とニュートロン次世代システム技術研究組合（T-RANS, 2020年9月国土交通省認可）による研究協力という体制で開発を行った。助成期間においては、①バケット式橋梁点検車に搭載でき、誰でも使用可能、②かぶりコンクリート7cm位置で塩分濃度 1 kg/m^3 が非破壊で計測でき、深さ方向に3分割で塩分濃度分布を計測可能、③令和5年度より装置の実用化を目指す、という命題であった。

RANS- μ は、中性子源として、使用に特別な資格が不要な表示付き認証機器である、放射性同位元素のカリフォルニウム線源（以下、「Cf線源」という）、中性子およびガンマ線遮蔽体、ガンマ線検出器から成る（図-2）。Cf線源から中性子がコンクリート構造物中に照射され、中性子との反応で生じたガンマ線を、Cf線源と同一平面に設置されたゲルマニウム半導体ガンマ線検出器で計測し、ガンマ線エネルギースペクトルを取得する。

ガンマ線エネルギースペクトルの例として、図-3に、塩を添加し作製したコンクリート供試体

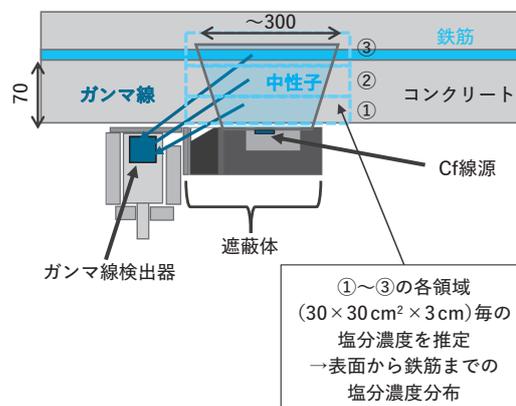


図-2 RANS- μ のコンクリート計測イメージ

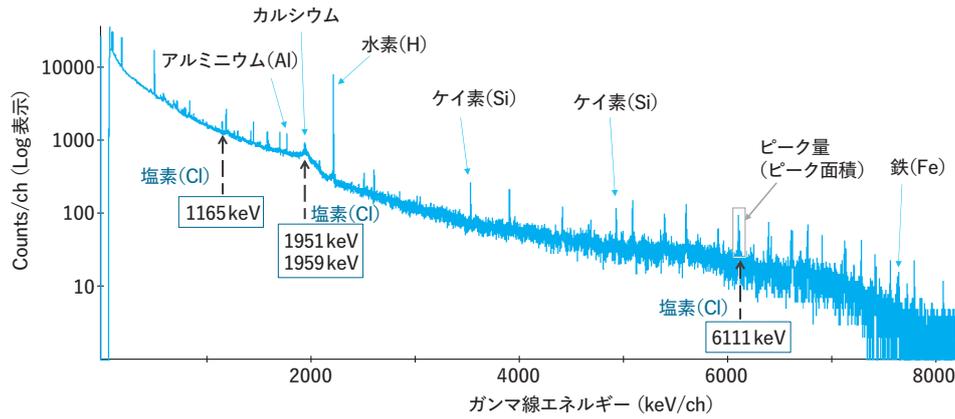


図-3 ガンマ線エネルギースペクトルの例

に、中性子を照射して得られたスペクトルを示した。塩分（塩素）由来のガンマ線以外にも、コンクリートの成分由来（カルシウム、ケイ素、水素、鉄）のガンマ線も確認できる。取得したガンマ線エネルギースペクトル中における塩素由来のガンマ線のピーク量（ピーク面積）から、深さ方向の塩分濃度分布を推定する。RANS- μ では、即発ガンマ線にさまざまなエネルギーのガンマ線が生じること、エネルギーの異なるガンマ線のコンクリート中における透過率の違いを利用し、図-2の①～③で示すように、塩分濃度分布を深さ方向に3 cm ごとに3深度で推定する⁵⁾。

4. 実橋梁などを用いた非破壊塩分計測

助成期間内において、塩分濃度を調整したコンクリート供試体を組み合わせた塩分検出感度の検

証など室内試験、土木研究所の屋外施設に設置された塩害撤去桁を用いた塩分計測や福島ロボットテストフィールド試験橋梁での橋梁点検車を用いた計測試験など屋外試験（表-1）を経て³⁾、綱木跨道橋（宮城県国道48号）や安家大橋（岩手県国道45号）にて、橋梁点検車を用いた非破壊塩分計測（図-4、5）を行った。RANS- μ での計測結果をドリル粉末採取など従来技術（JIS法）による塩分濃度推定と比較し、矛盾のない結果を得ており（表-1）、世界で初めて実橋梁の非破壊塩分計測に成功した^{1),2)}。

これら実績を基に、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3月31日に掲載された。また、株式会社ランズビューを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ことで、令和5年度からのRANS- μ の運用・実用化を実現した。

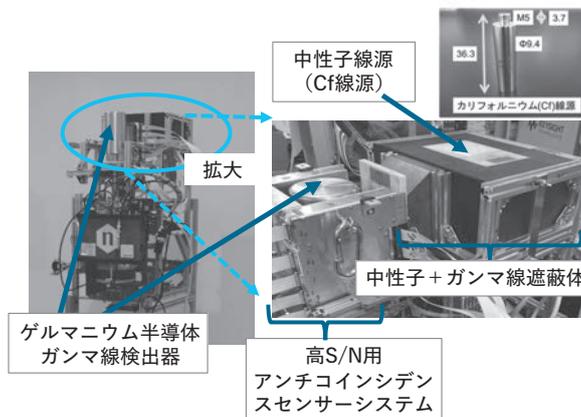


図-4 RANS- μ の構成写真

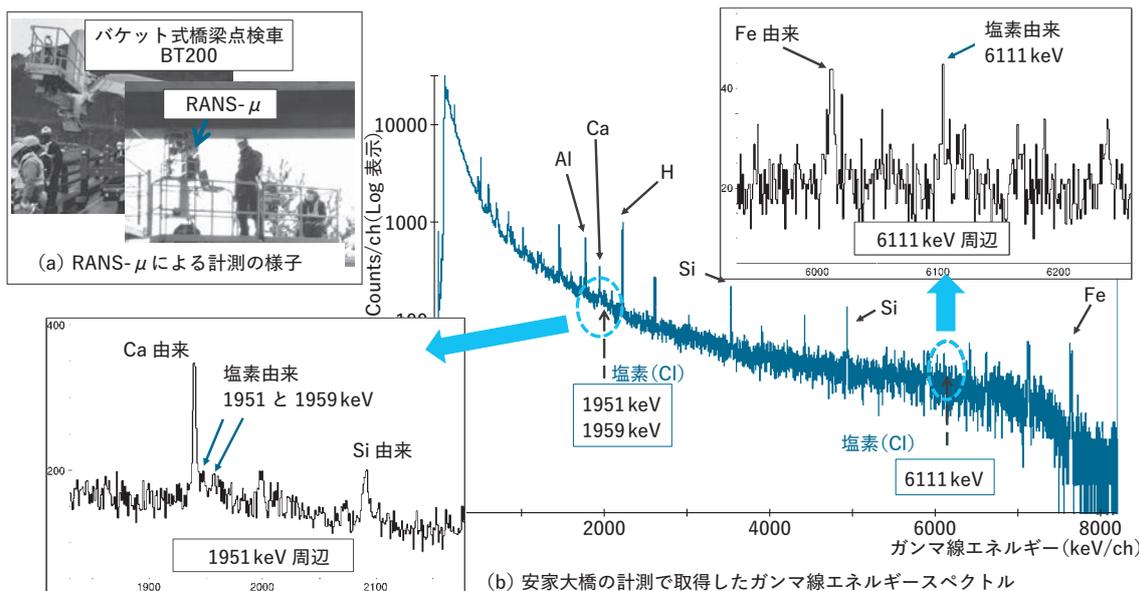


図-5 安家大橋におけるバケット式橋梁点検車を用いた RANS- μ による非破壊塩分計測

表-1 RANS- μ による塩分濃度計測結果と従来技術との結果比較の例 ※詳細は文献¹⁾参照

計測橋梁名 (実施場所)	測定部位	時期	RANS- μ 計測結果 [単位 kg/m ³]	計測 時間	電位差滴定 参照結果 [単位 kg/m ³]
秋田県荒磯大橋 (土木研究所敷地内)	桁下端の側面	2021/12	5.7	15分	5.72
福島 RTF 試験橋梁 (福島県南相馬市)	耳桁下面 (3 kg/m ³ 塩分含有サンプル貼り付け)	2021/12	2.9	60分	3.0
岩手県安家大橋 (岩手県九戸郡)	耳桁下面	2022/12	0 ~ 3 cm : 2.1 3 ~ 6 cm : 1.0 以下 6 ~ 9 cm : 1.0 以下	30分	0 ~ 3 cm : 1.5 3 ~ 6 cm : 0.35 6 ~ 7 cm : 0.34

5. おわりに

運用を開始した RANS- μ は、国や自治体、令和 2 年度より、中性子計測技術の標準化を目指し、理化学研究所、オリエンタル白石ら建設コンサルなどと協力体制をつくり設立した「ニュートロン次世代システム技術研究組合 T-RANS」の組合員などから、ランズビューにて実橋梁における塩分計測の実績を増やしており、令和 5 年度の運用開始から令和 6 年度 4 月までに 1 都 8 県 15 橋 54 カ所と、いくつかの橋梁とさまざまな部位の計測を行っている。RANS- μ の使用例として、自治体（大田区）が管理する感潮河川の橋梁

での使用例を図-6 に挙げた。

今後は、T-RANS が基になり、本装置を広く活用していく。また、計測精度（深さ分解能や塩分検出感度）や使いやすさの向上など、現場ニーズに合わせた改良開発も進め、落橋の防止、橋梁の長寿命化、膨大な維持管理費の縮減など予防保全への転換に貢献したい。

謝辞 本研究（の一部）は、国土交通省道路局が設置する新道路技術会議の技術研究開発制度により、国土交通省東北地方整備局の委託研究「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」によって実施されました。本研究の計測場所は土木研究所に提供いただきました。この実績を基に、第 7 回「インフラメンテナンス大賞」

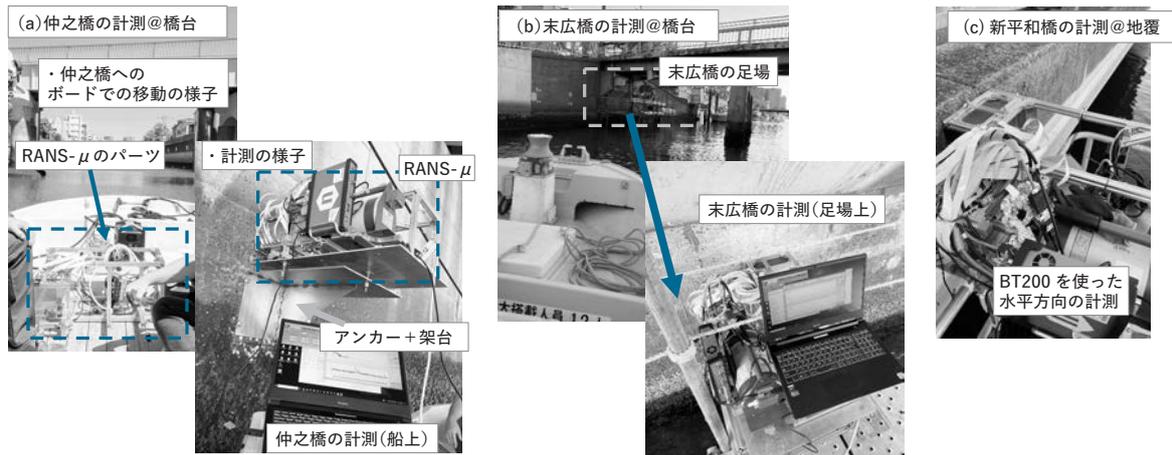


図-6 RANS- μ の使用例（大田区管理の感潮河川にて）

において、国土交通大臣賞という大変名誉ある賞をいただきました。ここに、深く感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 若林泰生ほか，“いよいよ始まる！壊さずに橋梁内部の塩分を観る -中性子塩分計-”，第4回北陸橋梁保全会議 技術報文集，pp.122-125，(2023)。
- 2) Y. Wakabayashi et al., “Development of the neutron salt-meter RANS- μ for non-destructive inspection of concrete structure at on-site use ”, J. Neutron Res. 24, pp.441-449 (2022).
- 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)。
- 4) <https://www.mlit.go.jp/road/tech/gijutu/outline.html>
- 5) 若林泰生ほか，“濃度検出装置と濃度検出方法”，特願 2020-084238。