

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究終了報告書】

①研究代表者	氏名 (ふりがな)		所属		役職	
	大竹淑恵		国立研究開発法人理化学研究所		チームリーダー	
②研究 テーマ	名称	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				
	政策 テーマ	[主テーマ] 領域8 道路資産の保全		公募タイプ	タイプII	
		[副テーマ]				
③研究経費 (単位:万円)	令和2年度	令和3年度	令和4年度	総合計		
※端数切り捨て。実際の研究期間に応じて記入欄を合わせる こと	2549万円	3199万円	2999万円	8748万円		
④研究者氏名	(研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)					
氏名	所属・役職 (※令和5年3月31日現在)					
高村正人	国立研究開発法人理化学研究所・上級研究員					
若林泰生	国立研究開発法人理化学研究所・研究員					
Yan Mingfei	国立研究開発法人理化学研究所・特別研究員 (本課題雇用)					
大石龍太郎	オリエンタル白石(株)・常務執行役員					
渡瀬博	オリエンタル白石(株)・技術研究所長					
⑤研究の目的・目標	(提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)					
<p>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1.2kg/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、<u>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(以降、塩分計)の開発を目的とする</u>。本研究期間内(R2~R4)では、実橋梁に対して、3.7MBq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。</p>						

⑥これまでの研究経過・目的の達成状況

研究者名	研究における役割
大竹淑恵	研究代表者、研究総括
高村正人	カタログ記載情報の検討、運用・実用化に向けた検討
若林泰生	装置設計、検出手法、解析手法開発、実験実施および結果解析
Yan Mingfei	放射線輸送シミュレーションによる放射線抑制システム計算
大石龍太郎	運用・実用化に向けた検討、カタログ記載情報の検討
渡瀬博	ドリル削孔による塩分濃度分析、カタログ記載、橋梁点検車搭載方法検討

本研究期間内では、非破壊でその場で塩分濃度を定量評価可能な、橋梁点検車両に搭載可能なポータブルな塩分計の開発を行い、実橋梁に対して、3.7MBq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（数値目標）で検出可能な塩分計の開発を行った。また、R5年度からの実用化に向けた取り組みも行った。

具体的に行った研究項目は、「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。

項目(1)に関しては、塩分濃度 $1.0\pm 0.2\text{kg/m}^3$ を測定するため、ガンマ線計測におけるS/N比高度化および高検出効率化が必須である。そのため、BG0シンチレーター＋相対効率50%Geガンマ線検出器を組み合わせた、アンチコインシデンスセンサーシステムをR2～R4年度にかけて構築し、30%のS/N比向上を確認した。→**目標達成**

項目(2)に関しては、橋梁点検車に搭載可能で、実橋梁に対して塩分計測が可能な塩分計試作機を製作する。R2～R3年度において、屋外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を行い、矛盾のない結果を得た。

R4年度に実橋梁である、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。また、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と比較し、矛盾のない結果を得た。→**目標達成**

項目(3)に関しては、数値目標の達成のための塩分検出の検証を行う。R2～R4年度において、塩分濃度を調整したコンクリートプレートをを用いた塩分検出の室内試験を行い、R4年度において、 $7.5\pm 1.5\text{cm}$ に存在する 1kg/m^3 の塩分を1時間で検出したことで数値目標を達成した。ただし、実橋梁での検証であるが、本研究期間内で行った実橋梁に、深さ7cmに塩分濃度 1.0kg/m^3 というケースが無かったので、塩分濃度を調整したコンクリートプレートをを用いて屋内試験にて検証を行い、数値目標を達成することを確認した。→**目標達成**

項目(4)に関して、上記(1)～(3)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)に関して選定が決まり、2023年3月31日に掲載された。→**目標達成**

項目(5)に関して、4者会議（国土交通省道路局国道・技術課、東北地整道路管理課、国総研道路構造物研究部、理化学研究所、オリエンタル白石）による意見交換を**毎年3～4回定期的**に行い、研究を進めた。→**目標達成** **特記事項**：ニュートロン次世代システム技術研究組合が組織的に研究推進活動した。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、運用・実用化に向けた、実橋梁の計測業務を行える体制を整えた。

⑦中間・FS評価で指摘を受けた事項への対応状況

<1年目中間評価意見>

中間評価：B

コメント「研究開発は順調に進んでいるが、実現場での省力化・適用条件等を含めた実用化に向けた研究開発を進める必要があることから、指摘事項に留意しながら推進することが妥当であると評価する」

<指摘事項・コメント>

- ・順調だが、Cf線源およびアンチコンプトンシールド法、あるいは塩分濃度分解能の検証に未検討の部分がある」→⑥の項目(1)および(3)を達成したことで対応。
- ・屋外用のポータブル計測器の試作等の面では、引き続き、現場での詳細な検討が不可欠であり、不透明な部分もある。→⑥の項目(2)を達成したことで対応。
- ・今後塩分計を開発するにあたり解決すべき点(近づけられる距離、振動など)を具体的に示し、それぞれの解決の見通しを立てていただきたい。→⑥の項目(2)を達成したことで対応。
- ・点検支援技術性能カタログへの掲載を目指すとともに、掲載後に広く点検に使われるための運用方法についても検討いただきたい。→カタログ掲載(2023年3月31日に掲載)および(株)ランズビュー設立(2023年4月3日)により、運用・実用化の体制を整えることで対応
- ・引き続き道路管理者と十分に意見交換を行い、計測時間、計測箇所の選定、計測精度などの実務上必要となる条件を常に明確にしながら開発を進めていただきたい。→4者会議にて意見交換を行うことで対応。最終的に、橋梁点検車を用いた実橋梁での測定を行えた。

<2年目中間評価意見>

中間評価：A

コメント「データ計測システムの軽量化や、土木研究所の橋梁施設での塩分測定結果等、実用化に向けた取り組みが進められており、現行のとおり推進することが妥当であると評価する。」

<指摘事項・コメント>

- ・1年目中間評価意見も踏まえて予定通り進捗している。
- ・研究成果の活用方針に検討の余地がある。→カタログ掲載(2023年3月31日に掲載)および(株)ランズビュー設立(2023年4月3日)により、運用・実用化の体制を整えることで対応。7ページの⑪および⑫の記載内容も参照ください。
- ・点検支援技術性能カタログの掲載に向けた検討を開始する等、実用化に向けて進めており、期待できる。
- ・実橋梁での測定に向けた具体的な対処方法、特に現地での計測システムの組立手順の確立、あるいは測定時間短縮など、実用面での課題は多い。→⑥の項目(2)を達成したことで対応。組立手順を確立し、組立時間14分(解体は12分)まで短縮した。
- ・実橋梁での試験実施に向けた検討を早期に具体化し、関係各署との調整を早い時期に行い、適用上の問題点の把握とそれに関する注意点を明確にしていきたい。→⑥の項目(2)を達成したことで対応。車線規制を伴う実橋梁での測定を行えた。
- ・実装のためには、「モニタリング技術も含めた定期点検の支援技術の活用について(参考資料)」や点検支援技術性能カタログの公募要件やカタログの1章の内容に対応する成果取りまとめが必要。たとえば、国総研資料30号、31号のように、同種原理の検査方法全般に当てはまる、検査結果の信頼性を保証するための仕様や実証実験方法(キャリブレーション方法)などの試案をまとめるのがよい。→カタログ掲載(2023年3月31日に掲載)により対応。橋梁調査会と非破壊装置を用いた塩分濃度の実証実験方法について意見交換を行った。

⑧研究成果

本研究期間内の塩分計の開発として、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。また、屋外施設での試験と同様に、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、実用化の実現可能性を示した。

こういった測定実績を基に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、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たことで、2023年度からの塩分計の運用・実用化を実現できた。

本研究に関するインパクトであるが、⑨研究成果の発表状況に記載する、理研・オリエンタル白石共同でプレスリリース「“超小型非破壊検査装置「中性子塩分計RANS- μ 」を開発”，2021年10月14日」に伴う記者発表を行った際、10社以上のマスコミが会見に参加し、その後、複数社（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 ※2021年12月24日時点）で記事掲載いただいた。同様に⑨に記載する、「第18回放射線プロセスシンポジウム（オンライン開催）11月16日, (2021).」にてポスター発表を行った際、ポスター最優秀賞をいただくなど、インパクトの強い研究開発である。

⑨研究成果の発表状況

<プレスリリース>

若林泰生 ほか，“超小型非破壊検査装置「中性子塩分計RANS- μ 」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

<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- μ 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 252Cf 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- μ の開發現状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- μ ”，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- μ ”, 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- μ —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- μ —、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- μ の開發現状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- μ の開發現状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- μ 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- μ 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).

⑩研究成果の社会への情報発信

①国交省「点検支援技術性能カタログ」への掲載
<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/inspection-support/pdf/06.pdf>

<プレスリリース>

②若林泰生 ほか, “超小型非破壊検査装置「中性子塩分計RANS- μ 」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日時点の掲載誌: 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

<展示会>

③CEATEC2022 (2022/10/18~21、<https://www.m-messe.co.jp/event/detail/7051>)

④メンテナンスレジリエンス大阪2022 (2022/12/7~9、

<https://www.jma.or.jp/mente/visit/index.html>)

⑪研究の今後の課題・展望等

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。

⑫研究成果の道路行政への反映

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。

⑬自己評価

本研究では、カリフォルニウム中性子線源、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し、本研究期間内(R2~R4)では、実橋梁に対して、3.7MBq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、中性子ポータブル塩分濃度計の実現を目標とした。

研究成果として、実橋梁(岩手県九戸郡 国道45号 安家大橋)にて、片側車線規制を伴うなかで、バケット式橋梁点検車に塩分計を搭載、塩分計測を行い、塩分検出に成功したことで、本期間内に目標を達成した。(ただし、実橋梁に対する表面から深さ7cmにおいて塩分濃度 $1.0 \pm 0.2 \text{ kg/m}^3$ を1時間で検出に関しては、本期間内で計測した実橋梁にその状況(深さ7cmにおいて塩分濃度が 1 kg/m^3)の橋梁がなかったため、塩分濃度を調整したコンクリート供試体を用いた室内試験により確認した。)

本課題で開発した塩分計のR5年度からの運用・実用化に向けて、「点検支援技術性能カタログ」への掲載も達成(2023年3月31日掲載)し、2023年4月3日に(株)ランズビューを設立したことで、計測業務を行える体制も整えた。これらにより、塩分計を用いた非破壊検査の実績を増やすことが可能となり、道路の予防保全に対して、大きく貢献できると考えている。

以上、本課題でいただいた研究費により、目標や実用化を達成できた。