

令和元年6月10日現在

機関番号：12201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2018

課題番号：15K14062

研究課題名(和文)水分移動センシング機能を付与した建築材料の開発

研究課題名(英文)Development of building material having water movement sensing function

研究代表者

藤本 郷史(Fujimoto, Satoshi)

宇都宮大学・地域デザイン科学部・准教授

研究者番号：30467766

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：主に次の(1)～(5)の成果を得た。(1)水分検知機能の付与、特に浮遊静電容量から電極から離れた箇所にある水膜の存在の検知できることを示した。埋設条件、環境条件、水分移動の条件を検討して、本技術の適用範囲を示した。部材スケールアップや2次元化はできなかった。(2)ひび割れ内水移動現象の実験系を構築し、低水セメント比コンクリートで水の移動距離が長いという興味深い現象を発見した。(3)温度補正手法を提案し、実建築物で提案式を使用する手順も提案・検証した。(4)適切な等価回路モデルも検討した。(5)以上を総合して、維持管理の新しいあり方および開発要素技術を含む総合的な計測システムを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国の建築物ストックは膨大であり、効率的な維持管理が求められている。本研究は、効率的な維持管理を実現するために、従来の電子的センサに代わって、センシング機能付与型材料の開発という新たな技術に挑戦したものである。実建築物のような長期にわたって使用できる電子センサは入手困難であることを踏まえ、実建築物へ適用できる計測技術の要求条件を明らかにした点、また、分析を踏まえて劣化外力となる水の移動現象を計測できる要素技術を開発し、温度等の補正手法を構築した点で社会的な意義が大きい。また、付随的な成果としては、ある種の条件下でひび割れ内の水移動現象に特異な現象を発見した点も今後の学術的な発展に寄与する。

研究成果の概要(英文)：This research project aims to develop a new material having sensing function for water movement. In this project, following results are achieved; (1) By molding steel bars and measuring the AC impedance, a material having the function of detecting water movement on the surface or far from the bar is developed, (2) Interesting behavior inside crack of concrete is found dependent on the concrete absorption properties, (3) A procedure to estimate moisture content at different temperature of real concrete structure is developed, (4) equivalent circuit model to analyze different age and water content is investigated, and (5) holistic measurement system for water movement is proposed, including a developed water sensing function method as well as other measurement method developed by the author.

研究分野：建築材料

キーワード：モニタリング 維持管理 建築物 センシング 計測技術 移動現象 水 インピーダンス

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

我が国の建築物ストックは延床 72 億 m<sup>2</sup>にも上る。建設業就業者数がピーク時の 7 割まで減少する一方、維持管理工事の比率は年々上昇しており、建築物ストックの効率的で質の高い維持管理の実現が近年の最も大きな課題といえる。

申請当初、維持管理を効率化・高精度化するために、電子式センサを部材に埋設してモニタリングする手法が国内外で注目されていた。これらの研究開発では、電子式センサを用いるのが多くみられたが、電子式センサによる方法では、維持管理の効率化・高精度化に期待が高い一方、『センサの設置個所しか計測できない』、『センサの埋設が埋設箇所の強度や耐久性に影響する』、『センサを構成する電子部品の寿命が建築物寿命より短い』という共通した欠点が存在することが指摘されていた。そこで、本申請研究では、この欠点を解決する手段として、申請者は、建築材料自体にセンシング機能を付与する技術の着想に至ったものである。

### 2. 研究の目的

本研究では、水分移動センシング機能を有する建築材料の開発を目的としていた。具体的には、劣化外力媒体としての水分にセンシングの対象を絞り、耐久性のある導電体を建築材料の内部に埋設して一体化することで、材料表面における水分の存在、2 次元的な水分の流れや内部の含水率変化といった材料全体の水分移動を捉える技術を開発する。さらに、維持管理における劣化の早期検知・予防的検知の実現に向けて、この新材料を用いた維持管理のあり方・運用方法を提案することを目的としていた。

### 3. 研究の方法

本申請研究では、次の A～C の研究項目を計画していた。各項目の実施方法についての計画概要を以下に示す。

#### (1) 研究項目 A：水分移動センシング機能を付与する材料設計法

本研究項目では、A-1～A-3 の 3 項目を計画していた。項目 A-1「不具合事例分析に基づく要求条件設定」では、不具合事例を収集するなどの方法で、実際の建築物において水移動現象を検知するための計測システムの要求条件や制約を分析することにしていった。項目 A-2「センシング性能に対する影響因子分析」では、まず、各種の水分移動現象（流下・滞留、ひび割れへの流入、含水、吸水）やその条件（温湿度）などを模擬する実験システムを構築し、その各現象における交流インピーダンス（特に浮遊静電容量）との相関を分析することにしていった。また、さらには、これらの実験からセンシング性能を最大化するための諸条件（調合、厚さ、電極の配置等）を導出することにしていった。項目 A-3「機能付与がもたらす力学・耐久特性への影響把握」では、センシング機能付与のために埋設した導電体の影響を分析する計画だった。

#### (2) 研究項目 B：センシング機能材料のための 2 次元計測・可視化

本研究項目では、B-1、B-2 の 2 項目を計画していた。項目 B-1「センシング機能付与材料を用いた維持管理のあり方提案」では、項目 A-1 の分析および A-2、A-3 の開発技術を基に、維持管理のあり方の新しい全体像を提案することにしていった。項目 B-2 では、項目 A-1、A-2 の要素技術を基に、2 次元、3 次元の計測を実現するための実験を行い、さらに、内部含水率等のモデル化による分析手法を開発することにしていった。

#### (3) 研究項目 C：センシング機能材料のスケールアップ

本研究項目では、C-1、C-2 の 2 項目を計画していた。項目 C-1「センシング機能材料の大面積化」では、中規模な試験体を作製して、スケールアップした製造手法を開発することにしていった。項目 C-2「不具合事象を模擬した実験」では、不具合事象を模擬した実験等によって、センシング性能を検証する計画であった。

### 4. 研究成果

本申請研究は「3. 研究方法」に基いて実施し、主に次の (1)～(5) の成果を得た。

#### (1) コンクリートへの水分検知機能付与と 2 次元化・大規模化（研究項目 A-2、A-3、B-2、C-1）

本研究で基盤となる要素技術についての実験概要を図 1 に、成果の例を図 2 に示す。図 2 (左) 黒線に示すように、浮遊静電容量の変化を捉えることで、電極間では含水率が変化がなく、電極の上部でのみ変化（水膜が存在しない状態から存在する状態への変化）したのを、捉えることに成功した。このことから、本申請研究の基盤となる要素技術の成立を確認した（研究項目 A-2 の①）また、電極の形状、電極間距離、埋設深さ、配置などの条件を網羅的に検討して、これらの条件下において水膜の存在や含水率の変化を捉える実験も実施した。図 2 (左) は電極間の距離を比較した結果の一例であるが、電極間距離および深さが小さい条件のみ、水膜の存在については十分な性能が発揮できることが明らかとなった（研究項目 A-2 の②）。すなわち、大規模化のためには電極を密に配置することが必要であることが明らかとなった。そこで、電極種や配置を検討したが本研究期間中に大規模化を達成できなかった（項目 C-1）また、水分の移動現象ごと（例えば、吸水繰返し、液量、電極との相対位置、流速などの流れの有無、蒸発、吸水）のセンシング性能も実験的に検討した。（研究項目 A-2 の①）図 2 (中央) は吸水およ

び蒸発を検討した結果の例である。浮遊静電容量を含む交流インピーダンスの変化は、浮遊静電容量のみが変化した場合よりも大きく、また、吸水後の蒸発によって元の値に復帰することが明らかとなった。さらに、独自の定時計測モニタリングソフトを開発して温湿度が繰り返し変化する条件下における長期計測を行った（項目 A-2①および項目 A-3）。浮遊静電容量を含む交流インピーダンスは、環境湿度の影響は小さい一方、環境温度に影響を受けることが定性的に確認された。センシング性能は実験の範囲では繰り返しによって低下することはないと思われた。この結果を踏まえて、センシング性能の向上を図るために後述の温度補正法の開発を行うことにした。

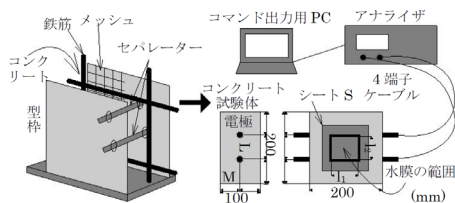


図1 実験時点での想定実用コンセプトと試験体の概要

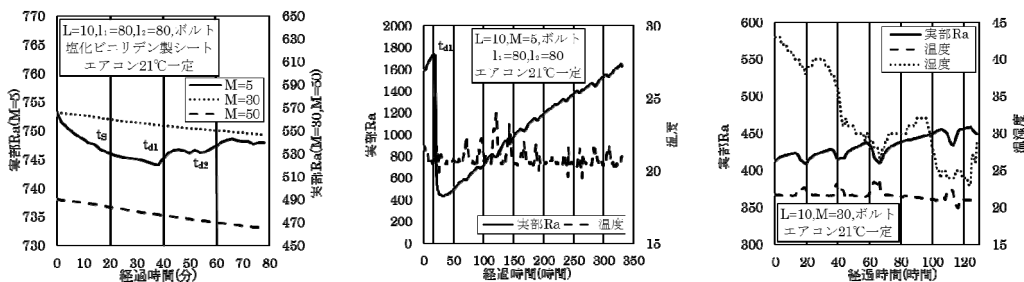


図2 水膜および吸水の検知結果の例

(左) 部材表面の水膜の存在検知, (中央) 吸水の検知, (右) 温湿度の影響 (定性的な傾向)

(2) 不具合事例調査に基づくひび割れ水移動現象の実験系構築とモデル化 (研究項目 A-1, A-2, C-2)

水分の移動は、典型的には漏水・結露などの不具合をもたらす。また、中性化・鉄筋の腐食等の (長期で発見まで時間のかかる) 不具合についても雨がかりが影響するとの他研究者の研究報告が研究期間中は盛んとなった。これらの文献・不具合事例を収集して分析し、ひび割れによるものが最も深刻で報告も多いことが分かった (研究項目 A-1)。そこで、ひび割れ内水移動の実験系を構築した (項目 A-2 の①)。図3(左)に構築した実験系を図4(左)に結果の一例を示す。予想に反して、高品質とされる低水セメント比コンクリートでひび割れ水移動距離が長いという興味深い現象を発見し、この現象を説明するひび割れ毛細管浸入モデル (図4右)を開発した。また、このモデルパラメータを実験的導出するために図3(右)の実験系を構築し、図5に示すように、調合・養生等の因子ごとに異なる空隙内部等の接触角を推定した (項目 A-2) また、不具合の生じた実建築物を計測する機会を得たので、貫通孔による観察および相対湿度計測により、ひび割れ近傍における毛細管浸入による移動現象の寄与を確認した (スケールアップできなかったため項目 C-2 を変更し実施)。以上の検討を通じて、後述の実建築物想定インピーダンス含水率センシングの提案に至った。

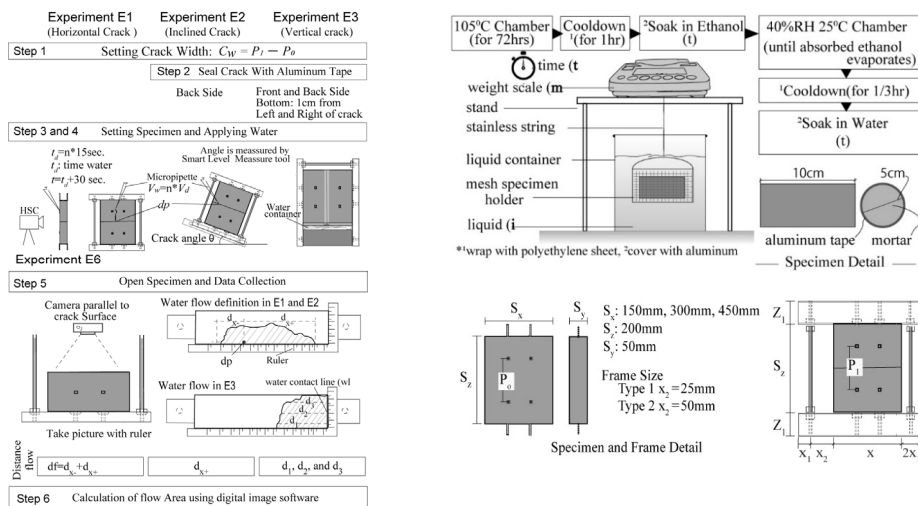


図3 ひび割れへの浸入・ひび割れ内流下の実験系の構築の概要

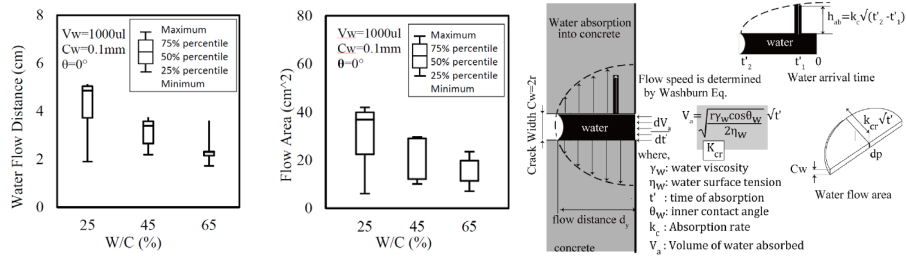


図4 (左) ひび割れ内の水分移動現象における発見, (右) 現象を説明する提案モデル

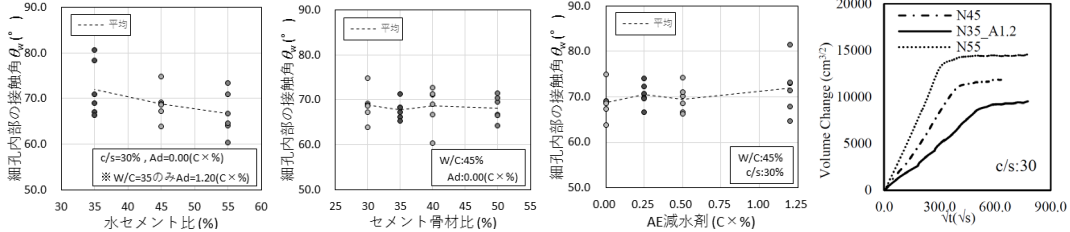


図5 ひび割れへの浸入に影響する空隙内部の接触角の推定結果

(3) 浮遊静電容量を含む交流インピーダンスに対する温度影響に対する補正法の開発(研究項目 A-2, B-1, B-2)

上述(1)では、湿度の影響は少ないもののセンシング性能を確保するには、温度変化に対する補正が必要であることが明らかとなった。そこで、温度補正手法(式1)を提案した。また、実建築物において式(1)を使用できるようにするために、図6(左)に示す手順を提案した。この方法は、申請者が実施した実建築物材内の温湿度モニタリング結果に基づいて制約条件を設定したものである(項目 B-1)。提案手順は、図6(右)の実験によって有効性を検証した。図7(左)に計測結果の例を示す。周波数・温度・含水率に依存してインピーダンスが変化することを確認した(項目 A-2)。図6(右)に式(1)の成立を検証した結果を、図8に提案手順に基づく含水率の推定結果を示す。温度と含水率の相互作用項を導入した式(1)により、図8に示すように、精度よく含水率を推定できることを示した(項目 A-2, B-2)。なお、以上の提案は、本申請研究の基本コンセプト(インピーダンス変化による水検知センシング機能付与)に基づいているが、後述の(5)に述べる新しい維持管理の在り方とそれに基づく実建築物計測法の構築に基づいて、新材料というよりは工法に近い提案となった。

$$\ln(Z) = a_1 + a_2 \cdot M + a_3/T \quad (1)$$

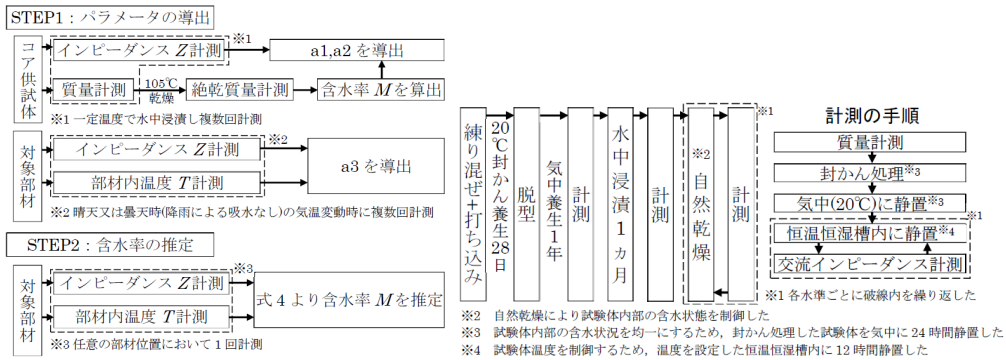


図6 (左) 実建築物への適用方法の提案手順, (右) 実験の手順

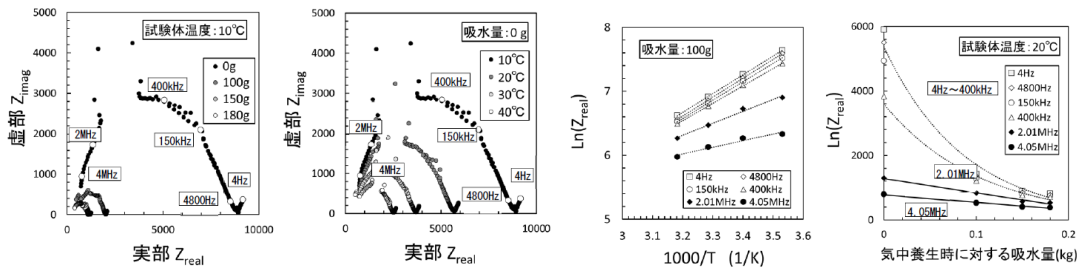


図7 インピーダンスの周波数・温度・含水率依存性 (左) ナイキストプロット, (右) モデルへの適合性の検討

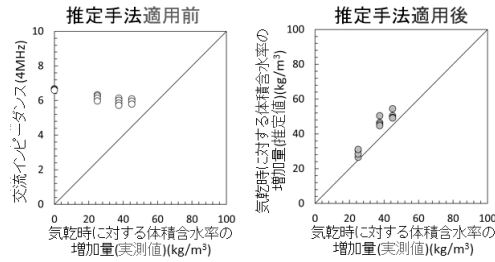


図8 任意の温度における含水率推定方法の提案（適用前後の比較）

(4) 材料組織構造と含水率の影響を識別するための適切な等価回路モデル化（研究項目 A-2, B-2）

前述の(1)では材料の空隙構造や品質も浮遊静電容量を含むインピーダンス成分に影響することが明らかとなった。したがって含水変化などを検知するには材料の組織構造を識別して評価する必要があることになる。そこで、図9(左)に示す実験を行い、水移動センシング性能を確保するための適切な等価回路モデルの選定・構築について検討した(項目 A-2, B-2)。図9(右)に選定したモデル計算値と実験値を比較して示す。このような比較によりモデルの適切さを確認したうえで、図10に示すように回路モデルの各要素を推定しその寄与度を分析した。定性的な寄与度を解明したもののセンシング性能の向上につながる定量的分析には至らなかった。

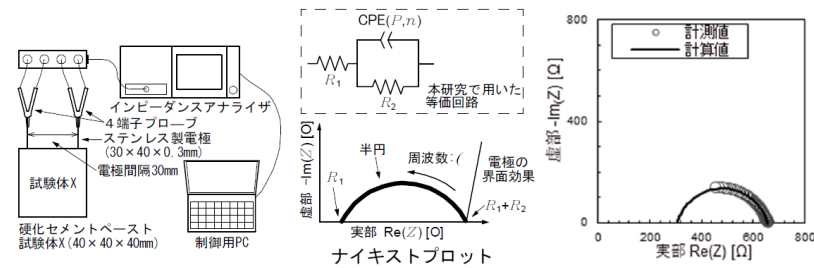


図9 (左) 実験とモデル化の概要, (右) 実験値とモデル計算値の比較

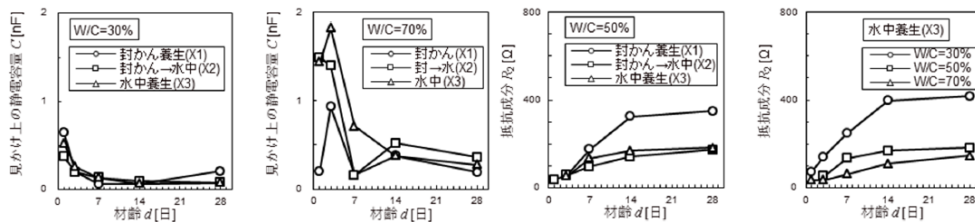


図10 モデル化に基づく各パラメータ寄与度の分析結果例

(5) 水分移動現象に対応する維持管理の在り方および計測システムの提案（項目 A-1, B-1）

不具合事例や実建築物における計測結果、ならびに本申請研究の開発技術の進捗、および別研究において開発した計測技術などを総合して、「計測できるように部材を設計する」という維持管理の新しい在り方を提案した。また、一方でこのようなあり方を現実のものとするために必要な総合計測システムを図11のように提案した(項目 A-1, B-1) 本申請研究の範囲では、(3)のように材料というより工法的な技術の方が実現性が高いとの成果も一部で得られた。これらの知見を反映したシステムとなっている。なお、本計測システムには本研究以外で開発済み・開発中の技術なども組み合わせて、構成されている。

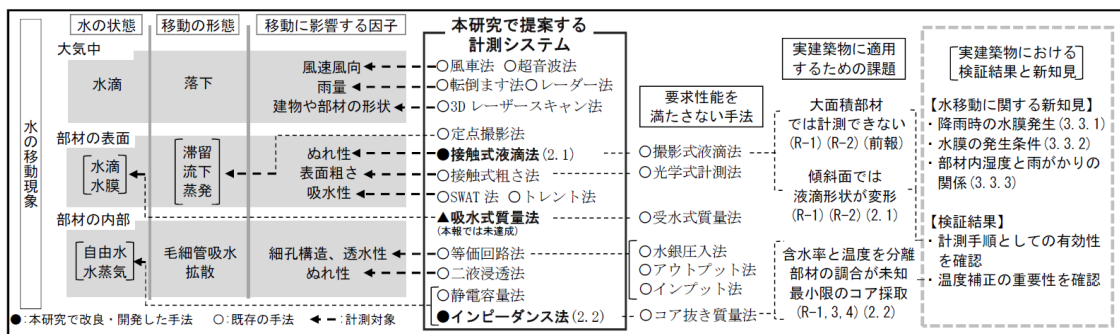


図11 新しい維持管理のあり方を実現する計測システムの提案

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- 1) 直井聡人, 藤本郷史, 原紳: コンクリートの交流インピーダンス計測における含水率と温度の相互作用に関する分析, 日本建築学会学術講演梗概集, 2019 (掲載頁未定)
- 2) 小口峻平, 藤本郷史: CPE を含む等価回路モデルを用いたセメントペーストの電気化学的特性の分析, 日本建築学会学術講演梗概集, 2019 (掲載頁未定)
- 3) Yifter Simon Seifu, Satoshi Fujimoto: Influence of absorption rate of concrete on rainwater flow inside inclined concrete cracks, Proc. AIJ Annual meeting, pp.789-790, 2018
- 4) Satoshi Fujimoto: Difference in mix proportion of concrete induces different water movement inside cracks, Proc of The 13rd Korea/Japan Joint Symposium on Building Materials and Construction, pp.299-303, 2018
- 5) Satoshi Fujimoto, Yifter Simon Seifu: Lower water-to-cement-ratio may induce higher deterioration when concrete is cracked -experimental investigation and mechanism, Proc. fib congress, 2018 (DVD)
- 6) Yifter Simon Seifu, Satoshi Fujimoto: Influence of various factors in mix design on pore structure and wettability inside mortar, proc. JCI annual meeting Tochigi, pp.1-2, 2018

[学会発表] (計 1 件)

直井聡人, 藤本郷史; 交流インピーダンス法を用いたセメントペーストの水和組織の形成と含水率の変化の観察, JCI 栃木支部研究発表会梗概集, 2017

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。