

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月6日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2015～2018

課題番号：15H04523

研究課題名（和文）放射性炭素で解き明かす下層土壌における炭素ダイナミクスの実態と環境変化応答

研究課題名（英文）Carbon dynamics in subsurface soil layers and its response to environmental changes, revealed by radiocarbon analysis

研究代表者

小嵐 淳（KOARASHI, Jun）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・研究主幹

研究者番号：30421697

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,500,000円

研究成果の概要（和文）：下層土壌に貯留する炭素が地球規模の炭素循環に果たしている役割は未解明である。本研究では、核実験によって生成した放射性炭素（ ^{14}C ）の土壌中での動きを追跡することで、下層土壌における炭素ダイナミクスの実態を調査した。核実験前と現在の土壌中の ^{14}C 同位体比を比較し、核実験起源 ^{14}C が下層土壌に供給されていることが明らかになった。また、土壌から放出される CO_2 の ^{14}C 同位体比を分析し、核実験以降に供給された有機炭素が分解されていることがいくつかの土壌において確認された。以上より、下層土壌において数十年スケールで循環する炭素が存在していることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、全土壌炭素の50%以上が下層土壌に貯留していることを考慮すると、下層土壌が地球上の炭素循環において重要な役割を担っていることを意味しているとともに、下層土壌における炭素の貯留は安定的ではなく、将来の地球環境の変化に対して影響を及ぼされうことを示唆している。下層土壌における炭素ダイナミクスの解明は、地球炭素循環を正しく理解する上で極めて重大なインパクトを持つことが明らかになったことから、下層土壌に関する研究の飛躍的な進展につながることを期待できる。

研究成果の概要（英文）：The role of subsurface soil layers in the global carbon cycle remains poorly understood. In the present study, dynamic nature of soil organic carbon in subsurface soil layers was investigated by using the bomb-derived radiocarbon (^{14}C) as a tracer of carbon in the soils. Comparing the ^{14}C isotope ratio between the present and pre-bomb soil profiles showed an addition of bomb-derived ^{14}C into the subsurface soil layers. Measuring the ^{14}C isotope ratio of CO_2 released from subsurface soils showed that for some soils, the CO_2 has originated from the microbial decomposition of soil organic carbon that was fixed since the bomb period. These results support our hypothesis that a significant amount of carbon in subsurface soil layers can turn over on decadal timescales.

研究分野：生物地球化学

キーワード：土壌炭素動態 土壌有機物 炭素循環 気候変動 放射性炭素

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

全球の土壌が有機物として貯留している炭素は1兆5000億トンを超えると推定され、植物体が保持している炭素量の3倍以上、大気中に二酸化炭素(CO₂)として存在する炭素量の2倍以上に相当する。土壌は炭素を貯える巨大な貯蔵庫としての役割を果たし、その炭素貯留能をもって大気中のCO₂濃度の安定化に貢献している。しかし、近年急速に進行する温暖化をはじめとした地球環境の変化は、土壌がもつ炭素貯留能に影響を及ぼし、その結果、バランスを保ってきた地球上の炭素循環に急激な変化がもたらされ、温暖化や環境変化がさらに進行する可能性が危惧されている。

近年、土壌炭素の50%以上が表層土壌(表面から20cm程度まで)よりも深い下層土壌に貯えられていることが明らかになってきた。大気と活発に炭素を交換している表層土壌と比較して、下層土壌に貯留する炭素は、一般的に、その放射性炭素(¹⁴C)年代が数百年~数千年前と古いことから、土壌中で長期にわたって安定な状態で固定・隔離され、大気との炭素の交換、すなわち炭素循環においてそれほど大きな役割は果たしていないと考えられてきた。そのため、下層土壌に着目した研究は乏しく、下層土壌における炭素ダイナミクスは未解明のままである。しかしながら、下層土壌が土壌炭素の50%以上を貯留しているという知見を考慮すると、下層土壌における炭素ダイナミクスの実態やその環境変化に対する応答を正しく理解することは極めて重要であり、地球炭素循環の全容を解明し将来の地球環境を予測するうえで必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、1950~1960年代前半に行われた大気圏核実験に由来する¹⁴C(核実験起源¹⁴C)が、土壌炭素の数十年スケールの動きを捉えるための有効なトレーサーとなりうることに着目し、核実験起源¹⁴Cの土壌中での動きを追跡することにより、下層土壌における炭素ダイナミクスを解明することを目的とした。これは、核実験前の1950年における大気中CO₂の¹⁴C同位体比(¹⁴C値)を基準(¹⁴C=0‰)としたときに、核実験以降に植物の光合成によって固定された有機物(有機炭素)は核実験起源¹⁴Cを豊富に含むことから、その¹⁴C値は正の値をとり、一方で、土壌中に長期にわたって滞留する有機炭素は¹⁴Cの放射性壊変により、滞留する時間の長さにともなってその¹⁴C値が低下し、負の値をとるという現象を利用するものである。本研究では、「下層土壌において数十年スケールで大気と交換している炭素が存在する」という仮説を立て、それを検証する。そのために、以下の2つの研究アプローチを考案し、仮説の検証を試みた。

ひとつは、核実験以前から現在までの土壌有機炭素の¹⁴C同位体比(¹⁴C値)の変化を調べる方法である。この方法は、仮に土壌有機炭素の¹⁴C年代が数千年前と古くても、それはより古い有機炭素と新しい有機炭素(すなわち数十年スケールで代謝回転する炭素)の混合によって起こりうる、という着想に基づくものである。そこで、核実験前と現在において、下層土壌における有機炭素の¹⁴C値(または¹⁴C年代)を測定・比較し、現在の土壌中の¹⁴C値が例え古い年代を示していても、核実験前よりも増加していれば(すなわち、¹⁴C年代が相対的に新しくなっていれば)1950年以降に光合成によって固定された有機炭素が下層土壌に供給されていることを証明できると考えた(アプローチ1)。

もうひとつは、有機炭素の分解によって下層土壌から実際に放出されるCO₂の¹⁴C値を調べる方法である。1950年以降に固定された有機炭素が下層土壌に存在し、さらにその有機炭素が微生物によって分解されることでCO₂が放出されているならば、放出されたCO₂の¹⁴C値は核実験起源¹⁴Cの影響を反映した値をとるはずであると考えた(アプローチ2)。

さらに、温度が土壌有機炭素の分解に強く影響を及ぼす環境要因であることに着目して、下層土壌における炭素ダイナミクスの温度変化に対する応答の解明を目指した。

3. 研究の方法

(1) 調査地の選定と土壌採取

アプローチ1による研究を実現するためには、核実験が終了した1963年より以前に採取した土壌アーカイブ試料の入手が必要である。本研究では、森林総合研究所が保有する、1949~1963年の期間において表層から50cm以深までを土壌層位ごとに採取した土壌アーカイブ試料を活用した。アーカイブ試料の保管状況や保管量、採取方法や土壌層位等の情報、採取地点の正確な位置情報の有無、現在までの土地利用変化の有無、現地へのアクセス可能性などを考慮して、計10地点(高知県内3地点、香川県内2地点、北海道内5地点)を調査地として選定した。選定した調査地の位置情報をもとに、2015~2017年にこれらの調査地を再訪し、土壌の断面調査を行うとともに、アーカイブ試料採取時の土壌記載情報を参照しながら土壌試料を深さごとに採取した。

アプローチ2による検証を実施するために、国内の気候、土壌特性、植生などが異なる様々な森林土壌から下層土壌(深さ40-60cmの層)試料を採取した。採取地は、上述の高知県、香川県、北海道内のいくつかの地点に加え、愛知県、茨城県、福島県、青森県内の複数の地点に及んだ。

(2) 土壌試料の分析

採取した土壌試料は、乾燥後に2mmメッシュの篩にかけ、試料中に残存する細根をピンセットにより除去した。試料を粉砕して均質化した後、炭素含有量を元素分析装置により測定した。安定同位体比 (^{13}C) の測定は、安定同位体比質量分析装置を用いて行った。土壌試料の一部を燃焼・ガス化した後、 CO_2 のみを分取・精製してグラファイトに変換し、日本原子力研究開発機構の加速器質量分析装置 (AMS) を用いて放射性炭素同位体比 (^{14}C) の分析を行った。

(3) 放出 CO_2 の分析

最大保水容量の60%に相当する水分量に調整した土壌試料を、ガス採取ポートのある容器に封入し、 20°C の条件下で培養した。容器内のヘッドスペースの CO_2 濃度をガスクロマトグラフィにより定期的に測定した。測定した CO_2 濃度に基づいて容器内に CO_2 として存在している炭素量を算出し、AMSを用いた ^{14}C 分析が可能となる炭素量に達した時点で、容器内のガスを採取した。採取したガスから CO_2 のみを分取・精製し、上述と同様に ^{14}C の分析を行った。

(4) 温度変化に対する応答の調査

最大保水容量の60%に相当する水分量に調整した土壌試料を容器に封入し、 20°C 及び 30°C の条件下でそれぞれ培養した。容器内のヘッドスペースの CO_2 濃度をガスクロマトグラフィにより測定し、 CO_2 濃度の増加に基づいて土壌からの CO_2 放出量を算出した。容器内のヘッドスペースを CO_2 フリーの空気で置換し、再度容器を封入した。この手順を繰り返し、それぞれの温度に対して、培養日数と CO_2 放出の積算量の関係を調べた。

4. 研究成果

(1) アプローチ1による下層土壌炭素ダイナミクスの実態解明

核実験前と現在の下層土壌における有機炭素の ^{14}C を比較する上で、まず土壌炭素含有量の深さプロファイルと比較しておくことが、この期間において大きな土壌擾乱や顕著な森林の更新がなかったという前提を確認するうえで重要である。図1に、いくつかの地点における核実験前と現在の土壌炭素含有量の深さプロファイルの比較結果を示す。高知2においては、深さ20-60 cmあたりで炭素含有量の減少が見られるものの、他の地点では核実験前と現在の炭素含有量の深さ分布はよく一致しており、土壌炭素貯留量の変化が少なく、土壌への有機炭素の供給と有機炭素の分解による炭素放出がおおむね釣り合った状態であったことが示された。また、炭素含有量とその深さプロファイルが土壌によって異なることも明らかになった。

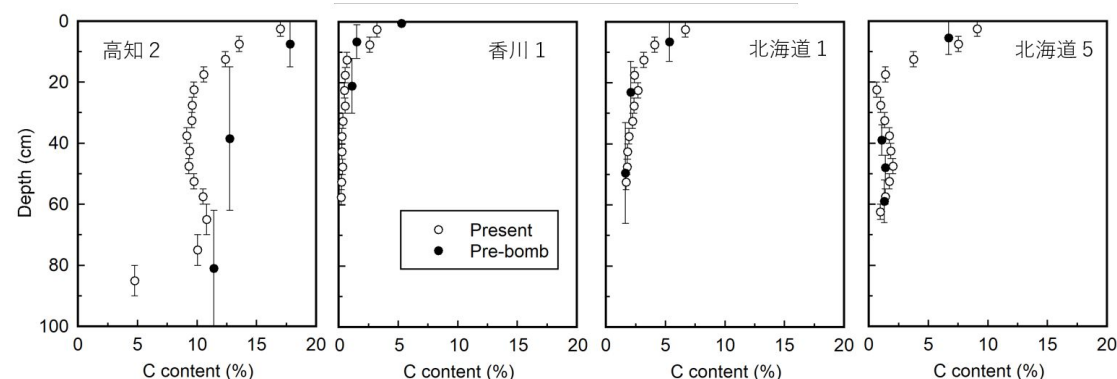


図1. 核実験前と現在の土壌炭素含有量の深さプロファイル
(エラーバーは、土壌試料を採取した深度範囲を示す。)

核実験前と現在の土壌中の ^{14}C 値を比較した結果の例を図2に示す。高知2 (左図) の核実験前の土壌では、すべての深さにおいて ^{14}C 値が負の値 ($< 0\text{‰}$) であり、 ^{14}C 年代は1300~3600年前と推定され、深さとともに古くなっていった。現在の土壌では、 ^{14}C 値は同様に負の値であり、この土壌に貯留する炭素は全体として古く、土壌中に長く滞留していること、すなわち全体として有機炭素の入れ替わりが乏しいことが示唆された。表層土壌では、核実験前から現在の間 ^{14}C 値の増加が認められることから、1963年以降に光合成によって固定された炭素が表層土壌に供給されていること、つまり、表層土壌において数十年スケールの炭素循環が生じていることがわかる。一方で、下層土壌 (20 cm 以深) では、60 cm 以深において核実験前から現在にわたり ^{14}C 値のわずかな増加傾向が見られるものの、20-40 cm 層においては ^{14}C 値が低下しており、下層土壌における数十年スケールの炭素循環の存在を示す結果とはならなかった。一方、香川1 (右図) では、核実験前の土壌中の ^{14}C 値は分析実施中ではあるものの、高知2とは対照的に、現在の土壌中の ^{14}C 値のみで、下層土壌における数十年スケールの炭素循環の存在を示す結果が得られた。現在の土壌の20-25 cm 層における有機炭素の ^{14}C 値は正の値であり、核実験以降に光合成によって固定された有機炭素を豊富に含んでいること、すなわち、数十年スケールの炭素循環が存在していることを示している。深さ40-45 cm における有機

炭素の ^{14}C 値は負の値であったものの、 ^{14}C 年代は 540 年前程度と高知 2 の土壌と比較して若く、核実験起源 ^{14}C の影響を受けている可能性が考えられる。このように、土壌によって下層土壌における炭素ダイナミクスの実態が大きく異なっていることは興味深い。他の地点の土壌炭素の ^{14}C 値の分析を引き続き実施し、どのような下層土壌が炭素循環に寄与しているのかを明らかにしていくことが重要である。

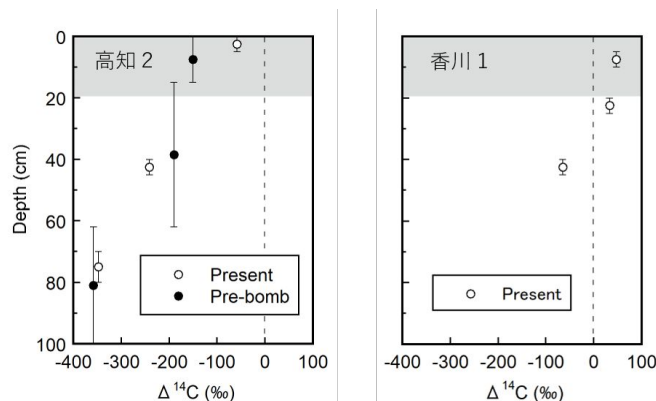


図 2 . 核実験前と現在の土壌プロファイルにおける有機炭素の ^{14}C 値の比較
(エラーバーは、土壌試料を採取した深度範囲を示す。)

(2) アプローチ 2 による下層土壌炭素ダイナミクスの実態解明

国内の様々な地点で採取した下層土壌 (40-60 cm) 中の有機炭素の ^{14}C 値と、その土壌から有機炭素の分解によって放出される CO_2 の ^{14}C 値を比較した結果を図 3 に示す。まず、すべての土壌において、有機炭素の ^{14}C 値と放出 CO_2 の ^{14}C 値は異なっており、放出 CO_2 の ^{14}C 値のほうが高い値を示した。有機炭素の ^{14}C 年代は約 700 ~ 4300 年前と推定されたのに対して、放出 CO_2 の ^{14}C 年代はもっとも古い 1 地点 (約 700 年前) を除くと、150 年前 ~ 現代と推定された。これは、下層土壌に貯留する有機炭素には土壌に供給された年代が大きく異なるものが含まれており、そのうち、分解によって放出される CO_2 の起源となっているのは比較的若い有機炭素であることを示唆している。もっとも重要な点は、いくつかの土壌において、放出 CO_2 の ^{14}C 値が正の値 ($>0\text{‰}$) を示したことである。これは、その放出 CO_2 が、主に核実験起源 ^{14}C を含む有機炭素の分解によって生成していることを意味しており、核実験以降に下層土壌に供給された有機炭素が分解されていること、すなわち、下層土壌において数十年スケールで循環する炭素が存在することを証明している。有機炭素の ^{14}C 値と放出 CO_2 の ^{14}C 値の間に相関関係が見られないことは興味深く、有機炭素の平均年代が古い土壌であっても、その土壌に速く循環する炭素が存在していることが明らかになった。

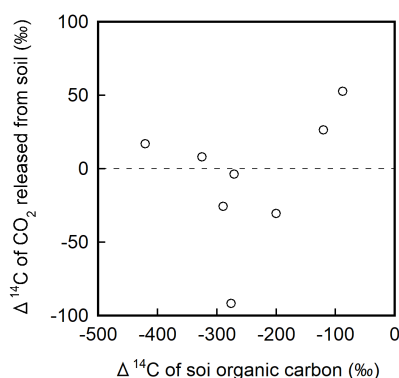


図 3 . 下層土壌の有機炭素の ^{14}C 値とその分解によって発生する CO_2 の ^{14}C の比較

(3) 下層土壌の温度変化に対する応答

土壌を 2 つの温度 (20、30) 条件下で培養した際に放出された CO_2 の量を、土壌有機炭素量あたりの放出炭素量の割合として、培養時間に対して累積した結果の例を図 4 に示す。いずれの土壌においても、20 条件下と比較して、30 条件下でより多くの有機炭素が分解放出されたことから、 ^{14}C 年代に基づいて長期にわたって固定・隔離されていると考えられてきた下層土壌の有機炭素もまた、表層土壌の有機炭素と同様に、温度変化に対して応答していることが明らかになった。これは、下層土壌において、有機炭素を分解する微生物が存在し活動していることを示しており、下層土壌における炭素循環の存在を支持する結果であると言える。しかしながら、温暖化に伴う気温の上昇は、表層土壌と比較して、下層土壌への影響は小さいことが想定される。したがって、温暖化に伴って起こりうる温度以外の環境要因の変化 (例えば、

降雨量や降雨パターンの変化に伴う土壌水分量の変動など) に対する下層土壌炭素ダイナミクスの応答の解明が重要であると考えられ、今後調査が必要である。

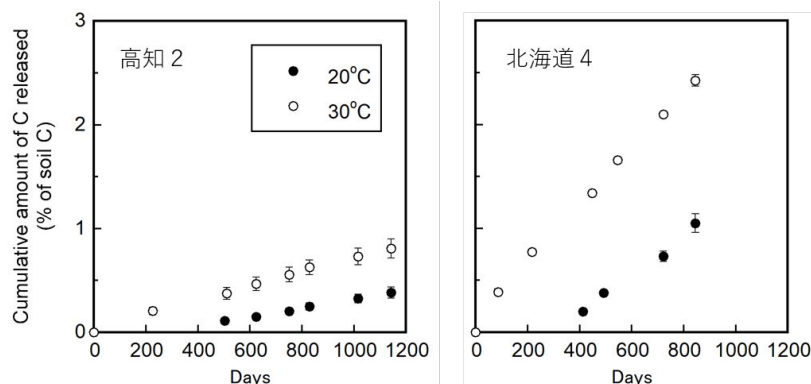


図4. 異なる温度条件下で土壌から CO₂ として放出された炭素量の比較

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 1 件)

Koarashi, J., Atarashi-Andoh, M., Amano, H., Matsunaga, T., Vertical distributions of global fallout ¹³⁷Cs and ¹⁴C in a Japanese forest soil profile and their implications for the fate and migration processes of Fukushima-derived ¹³⁷Cs, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 査読有, 311 巻、2017、473-481
DOI:10.1007/s 10967-016-4938-7

[学会発表](計 13 件)

永野 博彦、安藤 麻里子、小嵐 淳、乾燥 - 湿潤サイクルが CO₂ 放出速度の温度依存性に及ぼす影響：火山灰土壌に着目して、第 66 回日本生態学会大会、2019

Koarashi, J., Atarashi-Andoh, M., Ishizuka, S., Hiradate, S., Saito-Kokubu, Y., Quantitative understanding of the heterogeneity of soil organic carbon degradability for predicting long-term response of soil carbon to warming, ILTER Annual Coordinating Committee Meeting side-by-side with ILTER EAP scientific conference, 2018 (招待講演)

永野 博彦、安藤 麻里子、小嵐 淳、乾燥 - 湿潤サイクルが火山灰土壌の二酸化炭素放出に及ぼす影響、日本土壌肥料学会 2018 年度大会、2018

Koarashi, J., Stability and degradability of soil organic carbon in Japanese forest soils revealed by radiocarbon analysis, The 8th EAFES (East Asian Federation of Ecological Societies) International congress, 2018 (招待講演)

永野 博彦、小嵐 淳、安藤 麻里子、国内の森林土壌における団粒サイズと有機物特性の関係、第 129 回日本森林学会大会、2018

小嵐 淳、土の分解のしやすさを調べて、その将来を予測する、北海道大学天塩研究林公開シンポジウム「地球の温暖化と森林土壌からの炭素の放出」2017 (招待講演)

平館 俊太郎、土壌への炭化物施用が農業生産および環境にもたらす効果、第 14 回木質炭化学学会大会、2016

西村 周作、平館 俊太郎、安藤 麻里子、小嵐 淳、土壌中での植物炭化物の炭素および窒素同位体組成と化学構造、日本ペドロロジー学会 2016 年度大会、2016

竹内 絵里奈、小嵐 淳、國分 陽子、安藤 麻里子、西尾 智博、大脇 好夫、松原 章浩、グラファイト化のための硫黄不純物除去法における ¹⁴C 混入汚染の評価、第 18 回 AMS シンポジウム (JAMS-18)、2016

平館 俊太郎、火山灰土壌のエッセンス：その分布、特性、生成、分類、生物地球化学研究会、2015

鈴木 静男、永井 勝、小嵐 淳、安藤 麻里子、横沢 正幸、原 登志彦、日浦 勉、渡邊 博史、波松 香苗、多胡 靖宏、中村 裕二、久松 俊一、森林の炭素動態モデル構築に向けて リター及び土壌有機物分解サブモデルのパラメータ推定、富士学会 2015 年秋季学術大会、2015

竹内 絵里奈、安藤 麻里子、小嵐 淳、西村 周作、武藤 琴美、都築 克紀、中西 貴宏、松永 武、森林溪流における有機炭素の流出特性、第 59 回放射化学討論会、2015

小嵐 淳、放射性炭素で見る土壌有機物の動態と多様性、日本腐植物質学会第 31 回講演会、2015 (招待講演)

〔図書〕(計 3 件)

平舘 俊太郎、共立出版、森林科学シリーズ「森林と土壌」、第 3 章 広域風成塵と火山噴出物が土壌生成に及ぼす影響、2018、264

平舘 俊太郎、養賢堂、シリーズ 21 世紀の農学：国際土壌年 2015 と農学研究：社会と命と環境をつなぐ、2016、163

小崎 隆、波多野 隆介、伊ヶ崎 健大、田中 壮太、山本 定博、高田 裕介、前島 勇治、平舘 俊太郎、他、農山漁村文化協会、世界の土・日本の土は今：地球環境・異常気象・食糧問題を土から見ると、2015、128

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：安藤 麻里子

ローマ字氏名：ATARASHI-ANDOH, Mariko

所属研究機関名：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

部局名：原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター

職名：研究主幹

研究者番号 (8 桁)：20354855

研究分担者氏名：石塚 成宏

ローマ字氏名：ISHIZUKA, Shigehiro

所属研究機関名：国立研究開発法人森林研究・整備機構

部局名：森林総合研究所

職名：主任研究員

研究者番号 (8 桁)：30353577

研究分担者氏名：平舘 俊太郎

ローマ字氏名：HIRADATE, Syuntaro

所属研究機関名：九州大学

部局名：農学研究院

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：60354099

研究分担者氏名：國分 陽子

ローマ字氏名：SAITO-KOKUBU, Yoko

所属研究機関名：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

部局名：核燃料・バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター

職名：研究副主幹

研究者番号 (8 桁)：10354870

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。