

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月22日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K15006

研究課題名（和文）浸透流のダイナミクスを利用した地中の水みち探査

研究課題名（英文）Identification of preferential water flow under the ground through dynamic response of seepage water

研究代表者

藤澤 和謙 (Fujisawa, Kazunori)

京都大学・農学研究科・准教授

研究者番号：30510218

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、浸透流の動的挙動を利用した土中の局所的な空洞（例えば、水みち等）の形状を非破壊で推定する方法の開発を行った。得られた成果には二つあり、一つは水みちを有する浸透水の流れを首尾よく計算できる予測手法（順解析手法）を構築したことであり、もう一つとして、ベイズ推定による逆解析により、局所的な空洞形状を明確なインターフェース（空洞の境界）を維持しながら向定する方法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

上記の二つ研究成果はその汎用性の広さに特徴がある。水みちを有する浸透水の流れの計算では、水だけで占められた流体領域と土中の不飽和・飽和浸透流を同時計算できる。これは、地上に存在するほとんどの形態の水の流れを連続的に予測できる方法となる。また、局所的な空洞形状の逆解析法は、ベイズ推定に形状微分を取り入れた新規なものであるだけでなく、これまで困難であった明確なインターフェースを推定することが可能である。そのため、明瞭な境界形状を必要とする多くの形状推定問題に適用できる。

研究成果の概要（英文）：This research project has developed a method for detecting localized cavities or voids under the ground, such as crack and soil pipe, through the dynamic response of seepage flow. The following two main results were obtained in the project: We developed a numerical method which achieve the coupled analysis of saturated/unsaturated seepage flows in porous media and Navier-Stokes flows in fluid domain, and proposed a new method identifying the clear interface of spatial domains, such as subsurface cavities via Bayesian inference.

研究分野：農業農村工学、地盤工学、応用力学

キーワード：パイピング ベイズ推定 Darcy/Navier-Stokesカップリング ハミルトニアンモンテカルロ法

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

農業用水の貯水を目的とするため池等の土構造物にとって、漏水は極めて重要な問題である。漏水の原因は、土質材料から成るため池堤体が水の浸透を受け、堤体内部の亀裂拡大や土粒子の流亡が進むことにある。漏水が問題となる堤体では、その内部に浸透水が集中する水みちが存在するが、現在の技術ではその経路を発見することは極めて難しく、許容量以上の漏水が生じたため池堤体には、全面的な改修が施される。しかし、もし水みちの経路を探索できる技術があれば、堤体の部分的な改修が可能となり、低コストかつ効率的な農業基盤施設の整備が実現される。このような背景のもと、本研究は水みちを非破壊で推定する新技術の開発に取り組んだ。

2. 研究の目的

水みちを非破壊で推定する手法を開発するにあたり、浸透流の動的な変化を観測することで、水みちの経路推定を試みた。そのための具体的な研究課題として、以下の課題を設定した。

(1) 動的な浸透挙動を実験と数値解析の両面から調査し、そのシミュレータを開発する。

(2) 実験室レベルにおいて、動的な浸透挙動の計測結果から土の内部にある水みちを推定する探査手法を構築・実践する。

水みちの推定は、その形状を同定する逆問題となる。上記の(1)は逆解析に必要とする順解析に対応するものであり、その順解析手法に基づいて、水みちを同定する作業が(2)の課題に対応する。

3. 研究の方法

(1) 動的浸透挙動の数値シミュレーション

動的な浸透挙動を数値的にシミュレートするには、浸透水の加速度を考慮した支配方程式を解く必要がある。そのため、動的な浸透流を記述できる慣性項を含む方程式として Darcy-Brinkman 方程式 (Navier-Stokes 式を多孔質領域で積分した平均化方程式) を支配方程式に利用し、その数値解法の構築を図る。

(2) 水みち探査解析法の開発

水みちの探査は、地盤内部の透水係数や間隙率の分布を推定することである。しかし、水みちの推定にはそれらの分布を知ることよりも、「水みちが存在するか否か」といった水みちの有無に焦点を絞った探査技術が求められる。この目的のため、形状最適化に利用される解析法を参考にしながら、「計測値との誤差を最小にする水みちの形状」を同定することで、水みちの経路推定を実践する。

4. 研究成果

研究申請当初では、動的な浸透挙動を測定する実験も考えていたが、直接経費の削減により、実験的研究には制限を受けたが、動的浸透挙動の数値シミュレーション、水みち探査解析法の開発、に関して以下の研究成果を報告する。

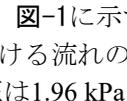
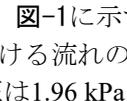
(1) 水みちを有する飽和・飽和浸透流シミュレーション

不飽和領域における Darcy-Brinkman 式は以下のように与えられる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{u_i u_j}{\theta} \right) = -\frac{\theta}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\theta g}{k} u_i \quad (2)$$

ここに、 v_i 、 ρ 、 μ 、 θ 、 k 、 g は浸透流速、流体の密度、粘性係数、体積含水率、不飽和透水係数、重力加速度であり、 t と x_i は時間と直行座標を意味する。

式(1)及び(2)の数値解析手法を発展させ、に示す水頭差を与えた長方形領域に対して、飽和・不飽和浸透流に加えて、流体領域における流れの同時計算を行った。初期条件には、すべての領域において流速をゼロとし、ピエゾ圧は1.96 kPaとした。この設定は、に示す通り、底面から0.2 mの高さまでは飽和しており、それ以上の領域で不飽和の状態にある。また、境界条件としては、左側面では0.3 mに対応するピエゾ圧 (2.94 kPa) を与え、右側面では、下面から0.2 mの位置に水面があると想定し、それに対応するピエゾ圧 (1.96 kPa) を与えた。また、それ以外の境界では、ノンスリップ条件を課した。解析領域を占める多孔質体として、砂地盤を想定し、

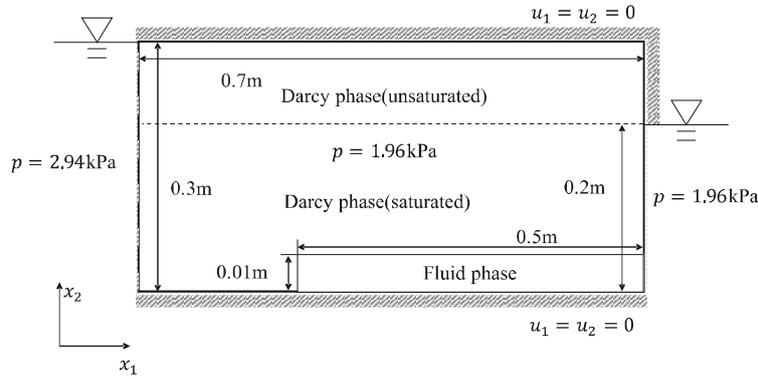


図-1 解析領域と境界条件

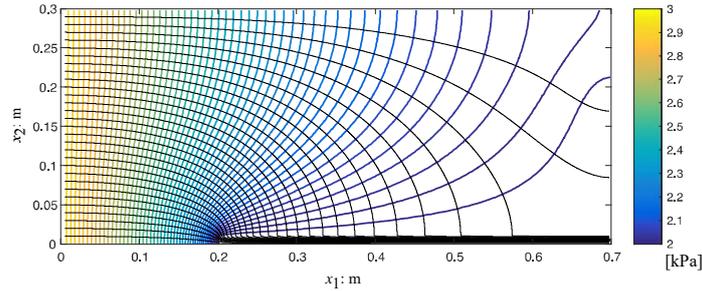


図-2 ピエゾ圧の分布と流線

飽和透水係数は $k_s = 0.002 \text{ m/s}$ を与え、不飽和特性を記述する材料定数には、 $\theta_s = 0.45$ 、 $\theta_r = 0.04$ 、 $\alpha = 3.22$ 、 $n_v = 3.678$ を仮定した。

数値計算結果は飽和領域と不飽和領域の境界である浸潤面に位置が滑らかに計算されていることを示した。図-2には、定常状態のピエゾ圧の分布と流線（図中の黒線）を示す。ピエゾ圧の等圧線と流線は、多孔質領域では垂直の交わっており、Darcy流が計算できていることを示す。また、左側からのびる流線は流体領域へと向かうものがほとんどであり、左側から浸透した水のほとんどが流体領域へと集中する様子がシミュレートされた。

(2)HMC法に基づく水みち探索法

水みちのような局所的な空洞領域（以下、局所空洞と呼ぶ）を推定するにあたり、順解析として飽和浸透流解析を採用した逆解析手法を提案した。一般的な状況に対応するには、不飽和領域も含めた飽和・不飽和浸透流解析を順解析として行うことが望ましいが、上述の逆解析手法をシンプルな支配方程式に適用するため、飽和浸透流を対象とする。

局所空洞を推定するため、まずはその形状をパラメータ θ によって記述する。ここに、 θ は長さや幅といった物理量を成分に持つベクトルであり、以下では形状パラメータと称する。順解析である浸透流解析は有限要素法（FEM）によって実行されるが、この形状パラメータ θ の値によって有限要素メッシュが変化する点に注意する。FEMの節点水頭ベクトルを $\mathbf{h} \in \mathbb{R}^d$ 、節点流量ベクトルを $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^d$ とすれば、全体透水係数マトリックス $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{d \times d}$ は θ の関数となり、順解析では以下の方程式を解く（ d は節点数を意味し、解かれる変数の次元に対応する）。

$$\mathbf{K}(\theta)\mathbf{h}_t = \mathbf{q}_t \quad (3)$$

ここに、下付きの添え字 t は、観測の時間ステップ（ $t=1, \dots, T$ ）を意味する。ベイズ推定に基づく逆解析では、観測方程式（観測値と計算値の関係を記述する方程式）が必要であり、以下の形で与える。

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{H}\mathbf{x}_t + \mathbf{w}_t, \quad \mathbf{w}_t \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{R}_t) \quad (4)$$

ここに、 $\mathbf{y}_t \in \mathbb{R}^m$ は観測値ベクトル（ m は観測値の次元）、 $\mathbf{x}_t \in \mathbb{R}^{\bar{d}}$ は状態変数ベクトル（ \bar{d} は状態変数の次元）、 $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{m \times \bar{d}}$ は観測行列、 $\mathbf{w}_t \in \mathbb{R}^m$ は平均が $\mathbf{0}$ 、分散共分散行列が $\mathbf{R}_t \in \mathbb{R}^{m \times m}$ で与えられる正規分布に従う観測誤差ベクトルである。本論文で扱う問題では、状態変数 \mathbf{x}_t は \mathbf{h}_t と \mathbf{q}_t を合わせた以下のベクトルとなる。

$$\mathbf{x}_t^T = (\mathbf{h}_t^T, \mathbf{q}_t^T) \quad (5)$$

θ の事後確率 $p(\theta | \mathbf{y}_{1:T})$ は

$$p(\theta | \mathbf{y}_{1:T}) = \frac{p(\mathbf{y}_{1:T} | \theta) p(\theta)}{p(\mathbf{y}_{1:T})} \propto p(\mathbf{y}_{1:T} | \theta) p(\theta) \quad (6)$$

と表され、HMC 法では、分子にある尤度 $p(\mathbf{y}_{1:T} | \theta)$ と事前確率 $p(\theta)$ を与えることで、事後確率 $p(\theta | \mathbf{y}_{1:T})$ に従うサンプルが生成される（分母の $p(\mathbf{y}_{1:T})$ は、全体の確率を1にする正規化定数であり、HMC 法において計算不要である）。事前確率は、 θ に関する確率の初期条件に対応するものであり、計算開始時に既知として与えられる。尤度 $p(\mathbf{y}_{1:T} | \theta)$ については、各観測ステップにおいて \mathbf{x}_t が与えられたとき、観測値 \mathbf{y}_t は平均が $\mathbf{H}\mathbf{x}_t$ 、分散共分散行列が \mathbf{R}_t の正規分布に従うことから、

$$p(\mathbf{y}_{1:T} | \theta) = \prod_{t=1}^T N(\mathbf{y}_t | \mathbf{H}\mathbf{x}_t, \mathbf{R}_t) \quad (7)$$

と計算できる。このように、形状パラメータ θ の値に応じて変化する水頭 \mathbf{h}_t 及び流量 \mathbf{q}_t を式(3)から算出し、式(4)の観測方程式によって観測値と計算値をつなげることで、 θ に関する事後確率が評価できる。この事後確率に従って、実現値（サンプル）を発生させることでベイズ推定が可能となり、HMC 法は与えられた確率分布に従うサンプルを生成する役割を担う。

上述の逆解析手法の性能を調べるため、図-3のような単純化された問題を設定した。同図は、後退侵食（Backward erosion）のように、浸透流の出口から、土粒子流出が生じたことよって、局所的に空洞化が進行した例を想定したものである。計算領域は、平面2次元の長方形領域であり、長さ（ x 軸方向）10 m、幅（ y 軸方向）5 m の大きさを持つ。右側面は浸透流の出口であることから、そこでの水頭は 0 m とし、左側面には時間変化する正の水頭値が境界条件として与えられる。局所空洞の形状としては、細長い長方形を仮定し、この形状を記述するパラメータとして長さ l 、幅 w 、局所空洞の左端の鉛直位置 y_d を選定した。つまり、この問題では形状パラメータは3つの成分を有し、

$$\theta = (l, w, y_d)^T \quad (8)$$

となる。また、観測値には、出口から流出する流量 Q に加え、図-3 に●印で示す固定された2地点の水頭（ h_1 及び h_2 ）を想定した。

式(8)の形状パラメータの変化に応じて、有限要素メッシュを構成する節点座標は連続的に変化する必要がある。有限要素メッシュは、 θ の値と一対一対応する連続関数として与えることができればどのような方法を利用してよい。境界条件としては、上下面は不透水とし、右側の水頭には 0 m、左側には時間とともに変化する水頭を与えた。

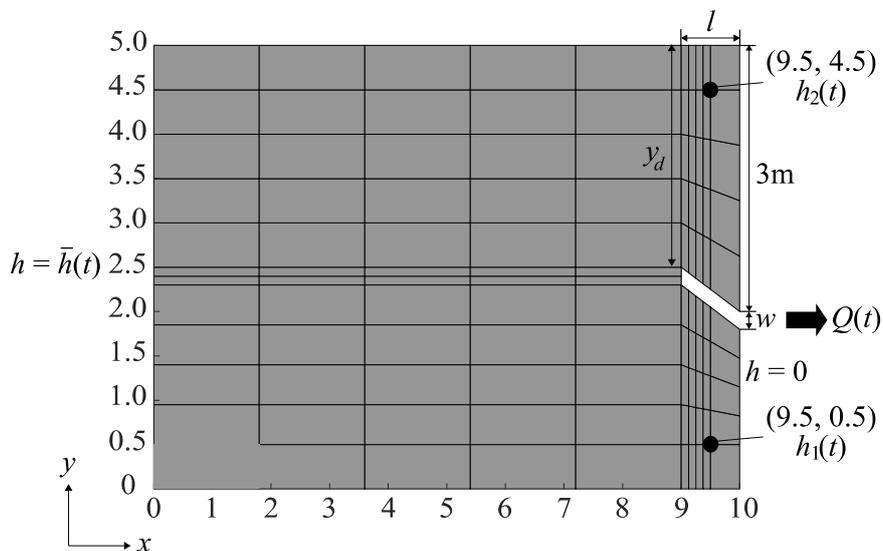


図-3 解析領域、境界条件、観測点

表-1 解析条件と HMC 法に必要なパラメータ

解析条件及びパラメータ	数値 (または範囲)
総観測時間ステップ T	30
透水係数	1.0×10^{-5} m/s
サンプリング数 N	2000
l の範囲	$0 < l < 9.5$
w の範囲	$0 < w < 0.5$
y_d の範囲	$0.5 < y_d < 4.5$
θ の初期値 θ^i	$(5.0, 0.3, 1.0)^T$
観測誤差の 分散共分散行列 \mathbf{R}	$\begin{pmatrix} 1.0 \times 10^{-12} & 0 & 0 \\ 0 & 1.0 \times 10^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & 1.0 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$

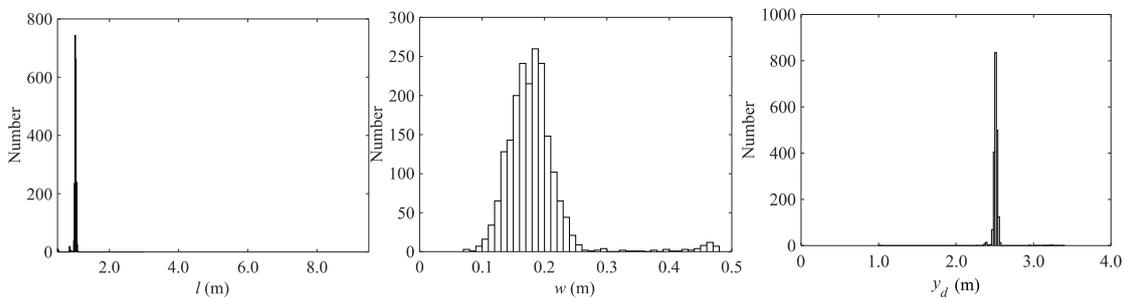


図-4 形状パラメータのヒストグラム (上:長さ l , 中央:幅 w , 下:鉛直位置 y_d)

領域全体の透水係数は既知として、水みちの形状パラメータである l , w , y_d を推定する. 表-1 に解析条件をまとめる

図-4 は推定された形状パラメータのヒストグラムを示す l 及び y_d の分布については、真値に近い値で 800 個近くサンプリングされ、分散も小さく鋭いピークを持つ. 一方、 w の分布では 0.14~0.20 付近で約 250 個サンプリングされ、その分布は l 及び y_d のものと比較すると緩やかな分布形状 (分散の大きな形状) となる. この理由としては、幅 w は水みちの狭い範囲 (小さな面積部分) を規定するパラメータであり、観測データの流出量 Q と水頭 h_1 と h_2 は、 w よりも l , y_d に大きく影響を受けるためと考えられる. また、同様の理由により、 l 及び y_d の推定値は精度あるものとなったと考える.

本研究課題では水みちの形状推定を目的として、浸透挙動を観測しながら、HMC 法を利用して、連続的に有限要素メッシュを变形させることで形状のベイズ推定を可能にする逆解析手法の提案に至った. 単純化された問題を提案手法のパフォーマンスを調べる例題として設定し、その中では、形状を表すパラメータとしては、長さ、幅、傾きに関するものを与えた. 提案手法を適用した結果、いずれのパラメータについても高精度な推定が可能であった. 計算結果では、観測データへの感度の違いによって推定精度や探索範囲に差が生じたものの、水みちのような局所的な空洞形状に対して、明確なインターフェース (土と空洞の境界) を保つ形状推定手法となる.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① 藤澤和謙, 杉野公亮, 村上 章: 鉛直上向き浸透流を受ける非粘着性材料の限界掃流力測定, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.73, No.2, I_535-I_540, 2017. (査読有)
- ② S. Arimoto, K. Fujisawa and A. Murakami: Coupled analysis of Navier-Stokes and Darcy flows by the Brinkman equations, Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, Vol.48, No.4, pp.40-49, 2017. (査読有)
- ③ 岡田紘明, 福元 豊, 藤澤和謙, 村上 章: 3 次元粒子-流体連成計算モデルによる土中の

水みち拡大過程のシミュレーション, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.73, No.2, pp.I 429-I 438, 2017. (査読有)

- ④ K. Fujisawa and A. Murakami: Numerical analysis of coupled flows in porous and fluid domains by the Darcy-Brinkman equations, Soils and Foundations, Vol.58, No.5, pp.1240-1259, 2018.
- ⑤ 藤澤和謙, 村上 章: Darcy-Brinkman 式の不飽和領域への拡張, 農業農村工学会論文集, No. 308 (87-1), pp.I 27-I 36, 2019. (査読有)
- ⑥ J. Park, K. Vilayvong, Y. Son, K. Fujisawa and A. Murakami: Slope stability evaluation of an agricultural embankment by statistically derived rainfall patterns, Paddy and Water Environment, 2019. DOI:10.1007/s10333-019-00725-2 (査読有)
- ⑦ Y. lee, J. Park, K. Fujisawa, A. Murakami and D. Lee: Experimental study on seepage characteristics of reservoir embankment considering interval of horizontal filter, Paddy and Water Environment, 2019. DOI:10.1007/s10333-019-00720-7 (査読有)

[学会発表] (計 10 件)

- ① K. Fujisawa, A. Murakami and S. Nishimura : Estimation of hydraulic conductivity in an embankment using particle filter, 6th Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications (上海 (中国), 5 月 28 日~5 月 30 日)
- ② 佐藤真理, 藤澤和謙, 村上 章: Darcy-Brinkman 式を用いた乱流数値解析手法, 第 21 回計算工学講演会 (新潟市, 5 月 31 日~6 月 02 日)
- ③ 藤澤和謙, 村上 章, 福島直子: 浸透流と表面流が作用する時の限界掃流力測定, 平成 28 年度農業農村工学会大会講演会 (仙台市, 8 月 30 日~9 月 02 日)
- ④ 藤澤和謙, 村上 章, 藤巻真由: 上向き浸透流によって運ばれる砂粒子の移動速度測定, 第 51 回地盤工学研究発表会 (岡山市, 9 月 13 日~9 月 15 日)
- ⑤ 佐藤真理, 藤澤和謙: 外部応力による地中空洞崩落・道路陥没発生メカニズムの解明, 第 51 回地盤工学研究発表会 (岡山市, 9 月 13 日~9 月 15 日)
- ⑥ K. Fujisawa, A. Murakami and K. Sakai : Numerical analysis of backward erosion by soil-water interface tracking, The 6th Japan-Korea Geotechnical Workshop (岡山市, 9 月 12 日)
- ⑦ 藤澤和謙, 村上 章, 福元 豊: コヒーレント構造モデルを導入した Navier-Stokes/Darcy 流の同時解析, 第 22 回計算工学講演会 (さいたま市, 2017 年 5 月 31 日~6 月 2 日)
- ⑧ 藤澤和謙, 村上 章, 杉野 公亮: 上向き浸透流作用下での限界掃流力測定, 第 52 回地盤工学研究発表会 (名古屋市, 2017 年 7 月 12~15 日)
- ⑨ 藤澤和謙, 村上 章, 福元 豊: Darcy-Brinkman 式による浸透流解析と LES のカップリング計算, 平成 29 年度農業農村工学会大会講演会 (藤沢市, 2017 年 8 月 29 日~9 月 1 日)
- ⑩ 藤澤和謙, 村上 章: Darcy-Brinkman 式の不飽和領域への拡張とその数値解法, 第 23 回計算工学講演会 (名古屋市, 2018 年 6 月 6 日~6 月 8 日)

[図書] (計 1 件)

- ① K. Fujisawa: Numerical analysis of backward erosion of soils by solving the Darcy-Brinkman equations. In Y. Bazilevs and K. Takizawa (Eds.), Advances in Computational Fluid-Structure Interaction and Flow Simulation: New Methods and Challenging Computations (pp. 193-201). Springer, 2016.

[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

<http://www.agrifacility.kais.kyoto-u.ac.jp/staff/fujisawa/index.html>

6. 研究組織

研究分担者, 研究協力者ともになし.

※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。