

機関番号：16401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03154

研究課題名(和文) 斜面内の変形と土壌水分の同時モニタリングに基づく斜面崩壊発生予測

研究課題名(英文) Prediction of an onset of a rainfall-induced landslide based on monitoring of shear deformation and groundwater in a slope

研究代表者

笹原 克夫 (Sasahara, Katsuo)

高知大学・教育研究部自然科学系理工学部門・教授

研究者番号：90391622

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：地下水位と地表面変位の同時計測に基づく崩壊発生時刻の予測手法を確立するため、模型実験を実施し、計測データを用いて予測手法の検討を行った。時々刻々の地下水位と地表面変位の計測データより、非線形回帰分析により予測式を作成する予測法を提案し、それが模型斜面の崩壊発生時刻をよく再現することを示した。次に実斜面の安定解析に必要な地下水位の予測のために必要な、降雨浸透過程を表すタンクモデルの定数を、AI等による逆解析で定めることを行った。最後に斜面崩壊発生前の前兆として、地下水位また斜面内の初期疑似飽和体積含水率が斜面の不安定度の指標になることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により現地斜面の計測データに基づく斜面崩壊発生予測のアルゴリズムが確立されれば、この手法を用いて、ICT機器を用いた現地斜面のモニタリングに基づく土砂災害発生予測システムの構築が可能となる。これにより土砂災害警戒情報により市町村単位でしか土砂災害に対する予警報ができない現状を変えることが可能であり、より細かい単位で、具体的には「俺んちの裏山」単位で、土砂災害の発生の予測が可能となる。これにより現状より時間的にも、空間的にも大幅にきめの細かい土砂災害の危険度情報を地域に提供することが可能となり、地域防災の質の向上に資する。

研究成果の概要(英文)：Model experiments were implemented to get measured data for the establishment of time-prediction method of an onset of rainfall-induced landslide based on the monitoring of groundwater level and surface displacement. Combination of regression equation for groundwater level - surface displacement to that for time - groundwater level produced good prediction of failure time of model slope. Secondly, constants in tank model for simulation of rainfall infiltration were identified by back analysis such as AI to predict groundwater level for slope stability analysis. Finally, it was shown that measured volumetric water content could be an indicator for the instability of model slope and deformation of model slope started when it exceeded initial quasi-saturated volumetric water content.

研究分野：斜面動態モニタリングによる斜面崩壊発生予測 セン断変形予測 降雨による斜面崩壊

キーワード：斜面崩壊 予測 モニタリング 地下水 セン断変形

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

1. 研究開始当初の背景

近年の ICT 技術の進歩に伴って、簡便で安価な計測機器の開発が進んでいる中で、斜面防災のあめのモニタリングへの活用が進んでいない。その理由として「モニタリング結果から斜面の崩壊発生予測を行うアルゴリズムが確立されていない」ことも主要な一因であると考えられる。

2. 研究の目的

斜面の動態モニタリング結果に基づいて、斜面崩壊発生予測を行うアルゴリズムを提案する。特に斜面の変形と土壌水分の同時計測に基づく、力学的に合理的な方法に主眼を置く。そのため、(1) 地下水位と地表面変位の計測に基づく模型斜面の崩壊発生予測手法の提案、(2) 体積含水率に着目した模型斜面の雨水浸透挙動の検討、(3) タンクモデル定数を現地計測データから逆解析で同定する方法、の3種類の検討を実施した。

3. 研究の方法

3.1 地下水位と地表面変位の計測に基づく模型斜面の崩壊発生予測手法の提案

(国研)防災科学技術研究所の大型降雨実験施設内で、まさ土より成る幅 1.5m、長さ 6m、土層厚 0.5m の地表面と底面が平行な直線型の模型斜面を作製し、斜面勾配 30 度に設定した。そして降雨強度 30mm/h の人工降雨を与えて、模型斜面の崩壊まで、斜面内の土壌水分や地下水位、そして斜面の変形を計測した。

3.2 体積含水率に着目した模型斜面の雨水浸透挙動の検討

長さ 1540mm×幅 300mm×高さ 890mm の斜面をまさ土により作製し、表土層厚は 450mm、斜面勾配は 30°とした。表土層の底部をすべり面と仮定し、基盤土層の表面に粘性土により不透水層を設け、非排水条件とした。深度方向および斜面方向の浸透挙動を把握するため、7 地点に土壌水分計(EC-5)を設置した。散水には霧状の雨を降らすことが可能な噴霧装置を用い、散水強度は 96mm/h とした。

3.3 タンクモデル定数を現地計測データから逆解析で同定する方法

まさ土が広く分布する地域の国道沿いのある斜面において、2014～2018 年の間に計測された土壌水分、間隙水圧、地下水位のデータを用いて、タンクモデルのパラメータ(浸透係数、流出係数、流出孔の高さ)を、データ同化手法の一つであるアンサンブルカルマンフィルタを用いて逆解析的に決定した。タンクモデルとして、斜面の上部、中部、下部にそれぞれ3段のタンクモデルを配置した3連3タンクモデルを採用した。

4. 研究成果

4.1 地下水位と地表面変位の計測に基づく模型斜面の崩壊発生予測手法の提案

(1) 計測結果

斜面下端から 3m の位置において計測した地表面変位と地下水位のデータ¹⁾を今回の検討に用いる。計測結果を図-1 に示す。11,500 秒頃から地下水位が急増し、それと共に地表面変位も微増を開始し、その後 12,000 秒から地表面変位は急増する。12,700 秒頃から地下水位は頭打ちとなり、小さな増減を示しながらもほぼ一定とみなせる状態であるが、その間も地表面変位は急増し、14,400 秒に崩壊に至った。地表面変位増加には地下水位発生と増加が大きく寄与することを示す結果と考える。

(2) 地表面変位と地下水位の計測データを用いた崩壊発生時刻の予測

図-1 で示した任意の時点までの地下水位と地表面変位の計測データから、その時点における崩壊発生時刻の予測を以下のように行った。この予測法を GLDIS 法と呼ぶ。

「地下水位～地表面変位」の予測式の導出

任意の時刻までの地下水位と地表面変位の計測値を用いて、双曲線関数を用いた非線形回帰分析により、その時刻における「地下水位～地表面変位」の予測式を導く。なお式中 ds : 地表面変位、 GWL : 地下水位、 G_{sur} : 実験定数、 GWL_{max} : 崩壊時の地下水位(定数)とする。これによりその時刻までの計測データを用いて GWL_{max} を求める。

$$ds = \frac{1}{G_{sur}} \frac{GWL_{max} \cdot GWL}{GWL_{max} - GWL} \quad (1)$$

図-2 が様々な時刻までの計測データを用いて作成した予測式の比較である。地表面変位が急増を開始する直前である 12,360 秒までのデータを用いた場合は、予測された地下水位が実測よりやや低いものの、それ以降の時刻までのデータを用いた場合は、予測された地下水位は良好に実測の地下水位を表すといえる。

「時間～地下水位」の予測式の導出

同様に様々な時刻までの地下水位計測データより、「時間～地下水位」の回帰式も作成した。非線形回帰には以下の式(2)のような対数関数を用いた。式中 t : 時刻、 a_1, a_2 : 定数、である。

$$GWL = a_1 \cdot \ln(t) - a_2 \quad (2)$$

様々な時刻までのデータを用いて作成した予測式を図-3 に表す。早い時刻までのデータを用い

た場合でも、遅くまでのデータを用いた場合と同様な回帰式が得られた。

(2) GLDIS 法による「崩壊予想時刻」算出と他の予測法との比較

式(1)の関数形を用いた非線形回帰により求めた GWL_{max} を、同じ時刻までのデータを用いて求めた「時間～地下水位」予測式(式(2))に代入して t について解くと、それが「崩壊予想時刻」 t_r を意味する。これが GLDIS 法の崩壊予想時刻の算出方法となる。このようにして任意の時間までのデータを用いて求めた崩壊予想時刻 t_r と、地表面変位の計測データを用いる既存の方法による予測結果を比較する。既存の方法としては、福園の精密予測法³⁾と土屋・大村の三点予測法⁴⁾を用いた。これらはいずれも地表面変位データのみを用いる方法であり、崩壊発生前の地表面変位速度と変位加速度の間に、両対数軸上で線形関係にある、という実験事実に基づくモデルである。図-7 に GLDIS 法、精密予測法と三点予測法により求めた「崩壊予想時刻」を比較する。精密予測法は常にほぼ現在の時刻付近を崩壊予想時刻と算出しているため、予測としては意味が無い。三点予測法の結果は非常にばらついており、予測の信頼性が低い。それらに対して、GLDIS 法による崩壊予想時刻は、12,000 秒までは非常に小さいものの、12,000~12,610 秒までは時間とほぼ線形に増加し、その後は滑らかに減少する。図-8 に3つの方法により求めた崩壊予想時刻 t_r から「崩壊予想時刻 t_r - 現在の時刻 t 」を算出し、それらを示した。これを見ると GLDIS 法による $(t_r - t)$ は、12,610 秒からは滑らかに減少していく。崩壊発生時刻に近づくにつれて、崩壊予想時刻が現在の時刻に近づくという意味であり、これは予測としては信頼できる挙動である。

4.2 体積含水率に着目した模型斜面の雨水浸透挙動の検討

図-6～図-8 は、上部(地点 A)、中部(地点 B)、のり尻(地点 C)の深度ごとの体積含水率の変化と、それに対応する地表面変位の結果を示している。全ての図において共通する結果として、地表面変位の発生開始が28分であるの

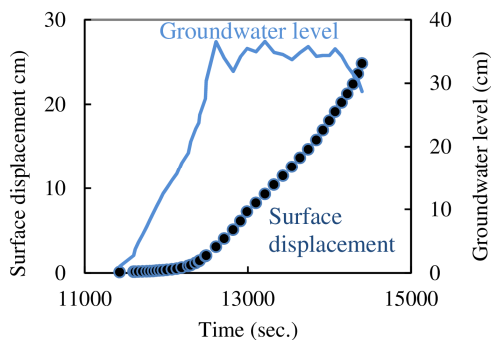


図-1 地表面変位と地下水位の経時変化

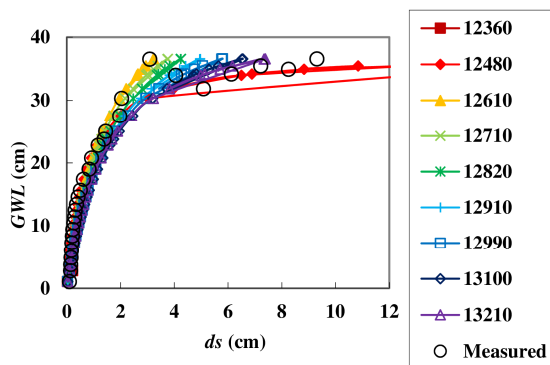


図-2 「地下水位～表面変位」の予測の比較

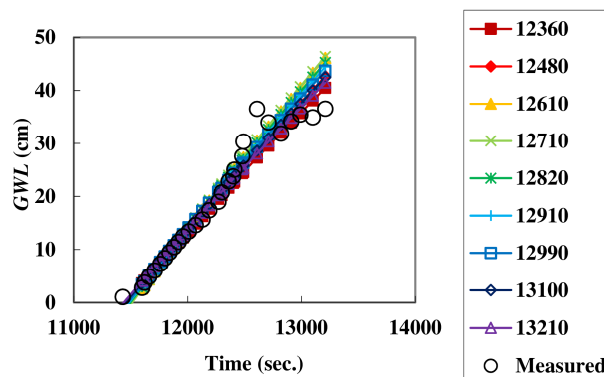


図-3 「時間～地表面変位」の予測の比較

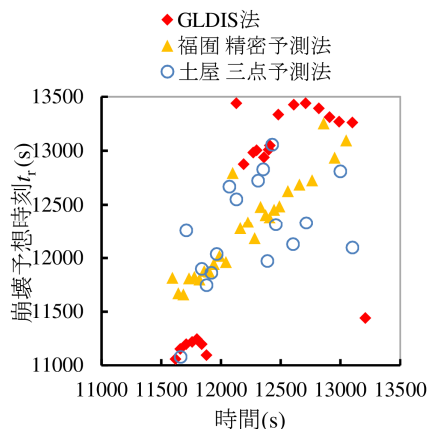


図-4 3つの予測法による崩壊予想時刻

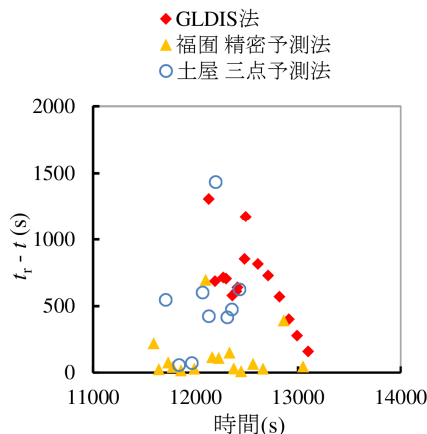


図-5 3つの予測法により求めた「崩壊予想時刻 t_r - 現在の時刻 t 」の比較

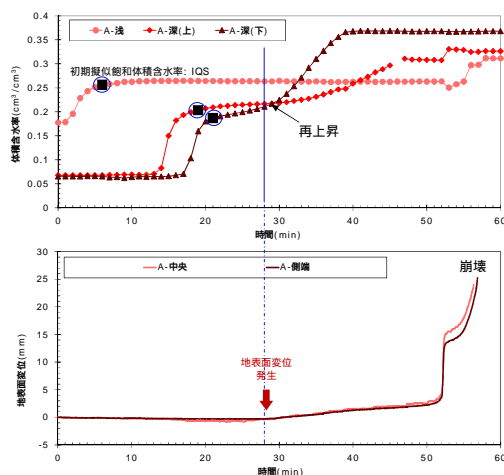


図-6 体積含水率と変位の経時変化（上部）

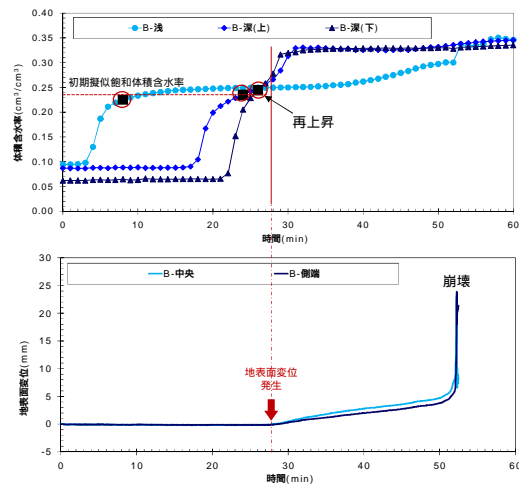


図-7 体積含水率と変位の経時変化（中部）

に対し、いずれの地点の初期擬似飽和体積含水率もそれより前に発現している。このことから、初期擬似飽和体積含水率を超えなければ変形は発生しないという既往の結果と整合することが確認された。図-6、図-7において、散水開始後、浅部から深部の順に体積含水率が上昇しているが、これは不飽和状態下での降雨浸透が重力方向の流れに影響を受けるためであると考えられる。これに対し、初期擬似飽和からの再上昇は深部から順に発生しており、深（下）が深（上）を上回るタイミングと地表面変位の発生時刻が26分～29分頃でほぼ一致する。これは、地点A、地点Bにおいて、地下水位の形成に伴い、深部から順に体積含水率が再上昇したことを示しており、それと共に間隙水圧の増加に伴う土のせん断強度の低下によって変位が進展し始めたと推察される。以上のことから、模型実験スケールではあるが、深度方向の体積含水率の挙動を把握することで、変形の誘因となる浸透挙動を把握できることが確認された。

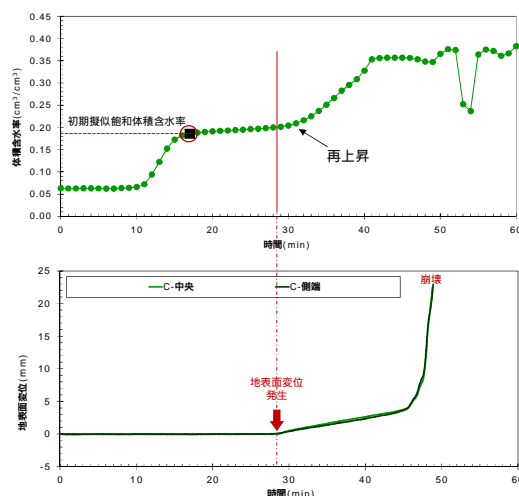


図-8 体積含水率と変位の経時変化（のり尻）

4.3 タンクモデル定数を現地計測データから逆解析で同定する方法

図-9に2014年8月1～13日の雨量データおよび現場計測結果を用いてタンクモデルのパラメータを同定し、それを用いた解析値と、間隙水圧(サクシオン)の実測値を比較したものを示す。本図より、表層付近の比較的浅いところで観測されたサクシオンの降雨に伴う経時変化は、中央部の1段目(表層)のタンクの飽和度から水分特性曲線を用いて算出したサクシオンとよく一致し、アンサンブルカルマンフィルタを用いたデータ同定の妥当性が検証された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

渡邊聡, 岩田直樹, 中井真司, 笹原克夫: 砂質模型斜面における崩壊検知のための計測機器の精度について, 地盤工学ジャーナル, Vol.13, No.2, pp.111-121, 2018.

<https://doi.org/10.3208/jgs.13.111>. 査読有.

笹原克夫, 岩田直樹: 地表面変位と地下水位のモニタリングに基づく斜面崩壊発生予測 - 既存の予測法との比較 -, 地盤工学ジャーナル, Vol.12, No.4, pp.425-438, 2017.

<https://doi.org/10.3208/jgs.12.425>. 査読有.

Katsuo Sasahara, Naoki Sakai: Shear and compression strain development in sandy model slope under repeated rainfall, Soils and Foundations 57, pp.920-934, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.08.021>. 査読有.

Katsuo Sasahara: Prediction of the shear deformation of a sandy model slope generated by rainfall based on the shear strain and the pore pressure in the slope, Engineering Geology 224, pp.75-86, 2017.

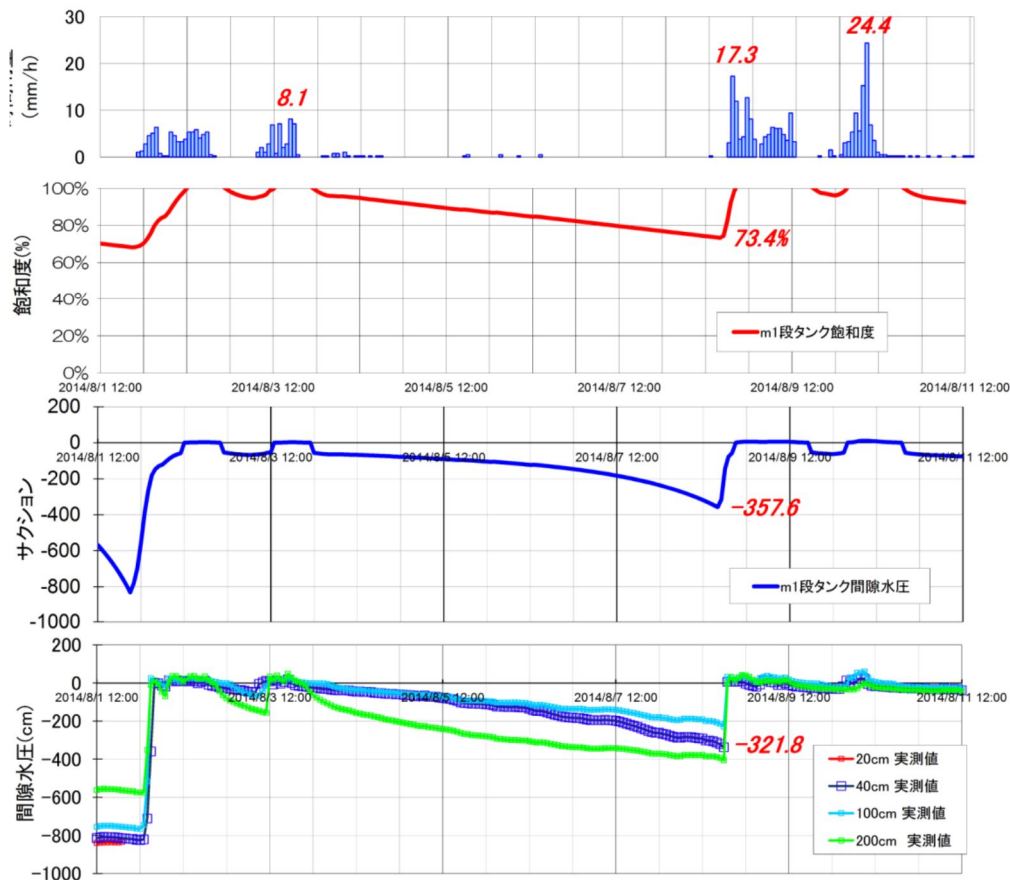


図-9 斜面内のサクシヨンの経時変化の比較 (3 段目：解析値 4 段目：実測値)

<http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.05.003>. 査読有 .

櫻谷慶治, 小田和広, 伊藤真一, 福田芳雄, Maria Q. FENG, 竹本将: 降雨時の表層崩壊に対する高速道路通行規制基準の高度化に向けた基礎的研究, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.73, No.1, pp.93-105, 2017. DOI: <http://doi.org/10.2208/jscejge.73.93>. 査読有 .

中井真司, 渡邊聡, 笹原克夫, 岩田直樹: 降雨時のまさ土斜面表層部におけるせん断変形挙動と土壌水分の関係, 地盤工学ジャーナル, Vol.11, No.2, pp.115-125, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3208/jgs.11.115>. 査読有 .

[学会発表](計8件)

小山倫史, 近藤誠司, 小林泰三, 芥川真一, 佐藤毅, 中田勝行, 下嶋一幸: 山間地域における住民参加型斜面監視・モニタリングシステムの構築. 第 61 回地盤工学シンポジウム, 2018.

藤本彩乃, 伊藤真一, 小田和広, 小泉圭吾, 横川京香, 鳥居宣之, 藤本将光, 小山倫史: サクシヨンの現地計測結果に基づく粒子フィルタによる土壌水分特性パラメータの推定. 第 53 回地盤工学研究発表会, 2018.

岡崎滉大, 小泉圭吾, 小田和広, 櫻谷慶治, 山本健史: 擬似飽和体積含水率に着目した散水強度と斜面崩壊に関する実験的研究, 第 53 回地盤工学研究発表会, 2018.

KATSUO SASAHARA: Time-prediction of an Onset of a Rainfall-induced Landslide Based on the Hybrid Monitoring of Surface Displacement and Groundwater Level. 5th Italian Workshop on Landslides, 2018.

小泉圭吾, 櫻谷慶治, 小田和広, 小橋俊也, 伊藤真一, 小松満, 笹原克夫: 斜面動態モニタリングデータの解釈を目的としたモデル斜面実験, 第 52 回地盤工学研究発表会, 2017.

Katsuo Sasahara: Time-Prediction Method of the Onset of a Rainfall-Induced Landslide Based on the Monitoring of Shear Strain and Pore Pressure, 4th World Landslide Forum, 2017.

中井卓巳, 越智稔, 岸本英明, 藤本将光, 小山倫史: 豪雨時の斜面表層流発生に関する課題研究 - 斜面表層流監視カメラの開発 -. 第 51 回地盤工学研究発表会, 2016.

笹原克夫: 降雨による斜面崩壊発生予測のための地下水位と変位の計測位置に関する検討, 第 51 回地盤工学研究発表会, 2016.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：笹原 克夫
ローマ字氏名：Katsuo Sasahara
所属研究機関名：高知大学
部局名：教育研究部自然科学系理工学部門
職名：教授
研究者番号（8桁）：90391622

研究分担者氏名：小泉 圭吾
ローマ字氏名：Keigo Koizumi
所属研究機関名：大阪大学
部局名：工学研究科
職名：助教
研究者番号（8桁）：10362667

研究分担者氏名：小山 倫史
ローマ字氏名：Tomofumi Koyama
所属研究機関名：関西大学
部局名：社会安全学部
職名：准教授
研究者番号（8桁）：20467450

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。