

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02239

研究課題名(和文) 斜面表層崩壊の前兆変位の検出と崩壊予測、早期警報

研究課題名(英文) Detecting precaution, prediction, and early warning for surface landslides

研究代表者

内村 太郎 (Uchimura, Taro)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：60292885

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,660,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、豪雨時の崩壊前兆のメカニズムを考慮した斜面の状態把握の方法と警報基準の検討、弾性波を用いた斜面表層の状態変化と初期変位の検出を目的としている。多層せん断土槽などを用いた模型実験では、特に雨水の浸透過程と、それに伴うせん断の進行に注目し、現場での観測データの解釈について考察した。また、その過程での土層内の弾性波速度の変化も観察した。実斜面での人工降雨による崩壊実験を高知県で行い、崩壊前の微小変位と、表層内の弾性波速度の変化の計測を試みた。また、不飽和土の基本的な特性の把握として、三軸圧縮試験において、不飽和土の締固め時の水分量がせん断強度に与える影響について検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

豪雨による斜面災害に対する予兆検知と早期警報は、近年のセンサー、無線、情報の技術の急速な発達もあり、重要な防災手法になっている。本研究は、模型と実斜面で斜面表層に雨水が浸透し変形し崩壊する過程を観察した。また、より安価で合理的に斜面の異常を検知する方法として、斜面地盤内の弾性波伝播の変化を監視する方法を検討した。実斜面で人工的に崩壊を起こす実験での観測も試みており、貴重な研究機会となった。これらをもとに、崩壊前に観測される現象の特徴と、それを予兆検知に活かす方法について考察した。

研究成果の概要(英文)：This research aims at 1) detection of precautions for slope failure under heavy rainfall considering its mechanism, and 2) use of elastic wave through slope ground to monitor the behavior of slope. Model tests are conducted using a multi-layered shear box, etc., and infiltration of rainwater and resulting shear deformation was observed. Concept of understanding the monitored data onsite is discussed. Changes in propagation properties of elastic wave through the model were also observed during their prefailure process. A slope failure test was also conducted on a real slope on site, and prefailure small displacement and changes of elastic wave velocity were observed. In addition, triaxial tests were conducted to understand the shear strength of unsaturated soils, specially related to its conditions for compaction.

研究分野：地盤工学

キーワード：斜面防災 モニタリング 早期警報 崩壊予測 不飽和土

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

豪雨などによる斜面災害は、国内外で毎年のように多数発生している。国内においても毎年、斜面崩壊が発生しており、1972年から2007年の間に発生した19,035件の地すべり(斜面崩壊)の事例を整理した結果、93%は降雨によるもので、その大半は崩壊土層の平均厚さ1.2m程度の表層崩壊であることが報告されている。潜在的な危険箇所を含めると斜面崩壊の危険区域は、52万箇所以上あると言われている。このような斜面崩壊による災害を防止するためには、素早い警報発令や避難、さらには二次災害の防止や復旧工事における安全性の確保などが重要であるが、そのためには崩壊の前兆現象をいち早く捕捉する必要がある。

斜面崩壊の前兆現象を捉える既往の研究として、変位速度(クリープ速度)と崩壊までの残余時間との関係、表面移動速度の逆数を用いた降雨による斜面崩壊発生時刻の予測法などがあり、当該研究者らは崩壊に至る時の斜面表層部の傾斜角(挿入した鋼棒の回転角)の速度限界値や傾斜角速度と継続時間との関係を提案してきた^{文献1),2)}。

2. 研究の目的

本研究は、豪雨時の崩壊前兆のメカニズムを考慮した斜面の状態把握の方法と警報基準の検討、弾性波を用いた斜面表層の状態変化と初期変位の検出を目的としている。

降雨による斜面崩壊には、雨水が斜面地盤内に浸透する機構と、斜面地盤内の水分量の増加によりせん断強度を失って安全率が下がる機構が働く。これは、従来からよく知られている概念だが、実際に両者がどのように進行して、斜面崩壊の前兆としてどのように観測されるのか、よく分かっていない。本研究では、多層せん断土層や斜面の小型模型などを用いて、雨水の浸透とそれに伴うせん断変形、最終的な崩壊の過程を観察し、仕組みを理解して、実斜面での観測データの解釈について考察することを目的とした。

また、地盤内の弾性波の伝播速度は、水分量の増加およびせん断変形に伴って、有意に低下することがこれまでの研究で分かっていた。本研究では、一面せん断試験器、多層せん断土層を用いてこの現象を観察し、斜面の変状を、弾性波を用いて監視する方法を検討した。

3. 研究の方法

(1) 多層せん断土槽による雨水浸透、せん断変形、弾性波伝播の観察

図1のような多重せん断土層(厚さ5cm×20段)に細粒分を含む砂質土(江戸崎砂)を詰めて、斜面表層の模型とした。土槽は水平であるが、斜面の傾斜を考慮して、各層のせん断面に設置した空圧シリンダで、深さに応じた一定のせん断応力をかけ続け、天端から人工降雨を長時間与えて雨水を鉛直に浸透させた。この間、各層の水分量、せん断変位を測定した。また内部に加速度計および上部に加振装置を埋めてあり、土層内の弾性波速度も計測した。

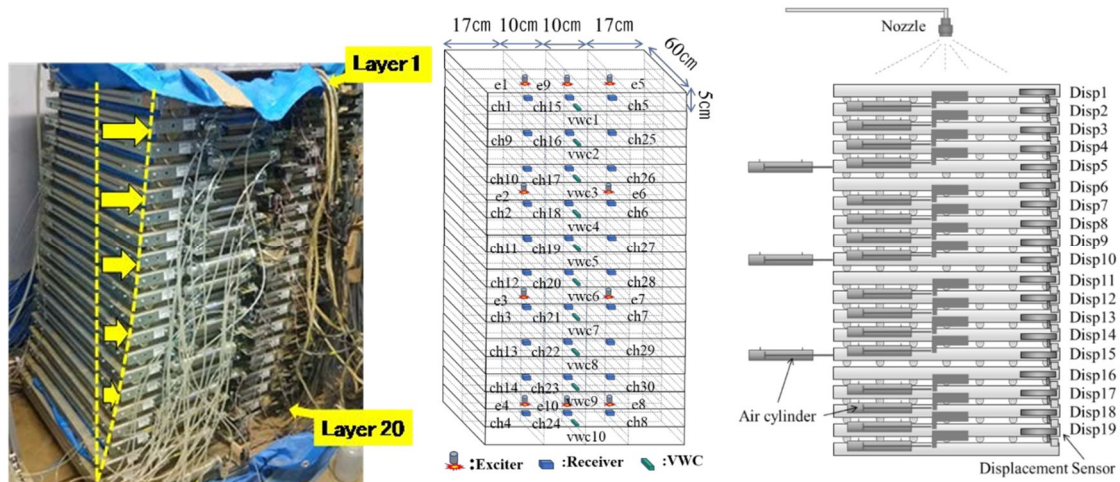


図1 多重せん断土槽による斜面表層崩壊の再現

(2) 小型一面せん断試験器による不飽和土の浸水、せん断過程の弾性波速度の変化

多層せん断土槽と同様の目的で、より精密に条件を制御し測定ができる一面せん断試験器(直径6cm、厚さ2cm)を用いて、一定のせん断応力下で注水したときの変位の推移を観察した。さらに、供試体の上下に圧電素子し、サクシオンと弾性波速度を同時に測りながら一連の過程を観察できるようにした。

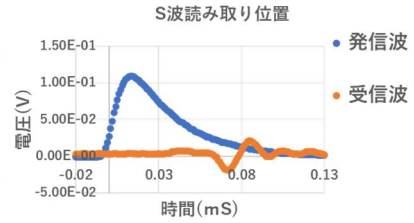
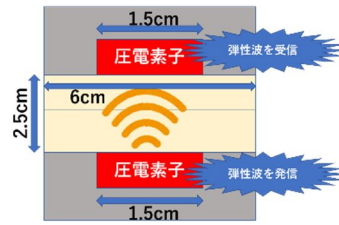
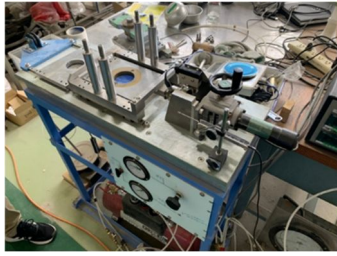


図2 小型一面せん断試験器による斜面表層崩壊の再現と弾性波速度の測定

(3) 小型不飽和土試料による雨水浸透の均一性の確認

上記のような水分量の変化を伴う実験で常に問題となる、精確な実験の前提となる試料への注水の均一性について、詳細に調べた。試料には、上下端面から注水、排水を行うが、せん断は試料の中央で行われ、せん断面での実際の水分量を直接測ることはできない。そのため、崩壊前の水分量の増加と変形の進行の関係を検討する本研究では、精度の高いデータを得るための障害になっている。そこで、図3のように、直径6cm、厚さ2cmの砂質土試料に、底面から青色に着色した水を注入した。上部から2mmずつ試料を剥ぎ取って、表面の斜面の色から画像解析で水分超の分布を推定して、浸透した水の均一性を確認した。

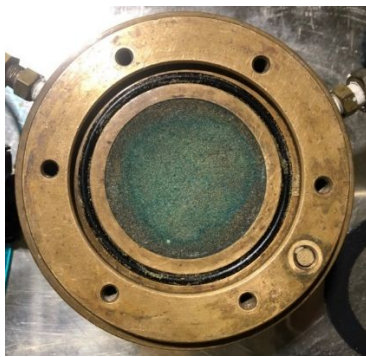


図3 小型試料に対する底面からの注水実験

(4) 多層斜面地盤の雨水浸透の観察

斜面崩壊前の現象を理解する方法の一つとして、斜面地盤が土質の異なる複数の地層で構成される場合に、浸透した雨水がどのように浸透し、斜面崩壊を起こすかを、模型実験で観察した。図4のように、細かい硅砂7号の斜面模型の中に、粗い硅砂1号の層を挟み、地表から降雨を与えると、粗い層に浸透するときにキャプラリバリアが働き、雨水が滞留する。この様子を、斜面内に埋めた青色の染料の動きと水分センサーの値から観察し、斜面崩壊の形態やタイミングなどを合わせて検討した。



図4 多層斜面地盤の雨水浸透の観察 (左から、単一層傾斜、3層水平、3層傾斜の場合)

(5) 実斜面の人工降雨および掘削による崩壊実験

実斜面での人工降雨による崩壊実験に参加する機会を得て、崩壊前の微小変位と、表層内の弾性波速度の変化の計測を試みた。実験2022年3月に予定されていたが、実験用地を提供する協力者の事情により、用地取得が遅れて2022年5月~6月に実施することになった。変位に関

しては、共同 で実施した協力機関による変位計、傾斜計の計測のデータを分析したほか、高分解能のカメラおよびステレオカメラを用いた連続撮影で、画像解析による変位の検出を試みた。また、弾性波速度については、実斜面で深さ 1m 程度まで弾性波が伝わるような加振装置を開発し、崩壊の危険のある斜面の表層を、遠隔操作で安全に加振して、弾性波の伝播を測定した。



図5 実斜面の崩壊実験（左から、人工降雨実験、堀削実験、弾性波の発振器）

(6) 三軸圧縮試験による締め固められた不飽和土の強度の評価

不飽和土の基本的な特性の把握として、三軸圧縮試験において、不飽和土の締め固め時の水分量がせん断強度に与える影響について検討した。

4. 研究成果

(1) 多層せん断土槽による雨水浸透、せん断変形、弾性波伝播の観察 および

(2) 小型一面せん断試験器による不飽和土の浸水、せん断過程の弾性波速度の変化

(1)(2)については、一連の実験を行い、従来の崩壊予測式（斎藤・福園らの方法）に当てはめる試みをした。これらの予測式に当てはめようとすると、例えば図6のように式のパラメタが2段階に変化する傾向があることが見られ、その視点で過去に観測した実斜面のデータなどを見直しても、同様の傾向があることに気づいた。

また、これに加えて、これまでの斜面の観測事例を収集し、斜面表層に挿した鋼棒の傾斜（表層のせん断変形）と崩壊までの残余時間の関係を整理した。斜面表層の変状を地面に挿した鋼棒の傾斜（表層のせん断変形）で測定した場合、その速度と崩壊までの残余時間の間に明確な関係が見られた。さらにその関係は、地すべり、表層すべり、崖崩れなどの形態に応じて、異なる傾向を示した。

弾性波に関しては、弾性波速度は、載荷開始からせん断応力がピークを迎えるまでは低下し、その後、せん断応力が残留強度に落ちるまではほぼ横ばい、その後の残留状態では、減少するという傾向が見られた。試料のせん断応力～変位の関係からは、残留状態は状態が変わらずに滑り続けていくと考えられているが、弾性波速度が減少を続けるのは、何か変化し続けている未知の要因があることを示唆している。

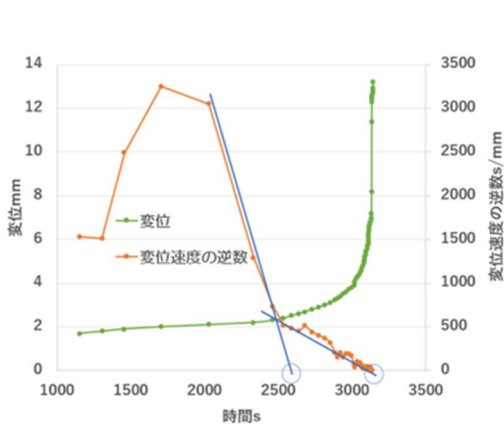


図6 せん断変形、せん断速度の逆数の推移

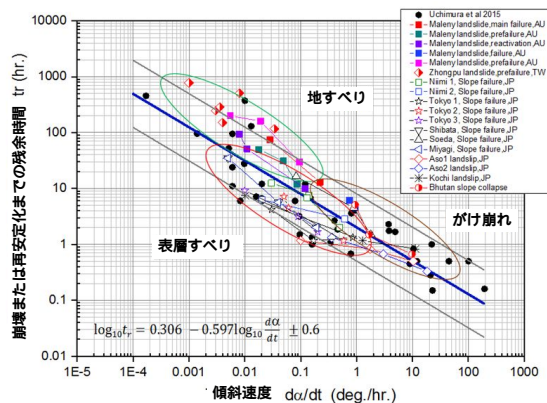


図7 残余時間と傾斜角速度の関係

(3) 小型不飽和土試料による雨水浸透の均一性の確認

青く着色した水を使い、各高さで撮影した画像から、平面的な水分量分布を観察した(図8)。結果として、試料が最初からいくらかの水を含んだ状態から始めれば、ほぼ均一に水が入ることが確認された。

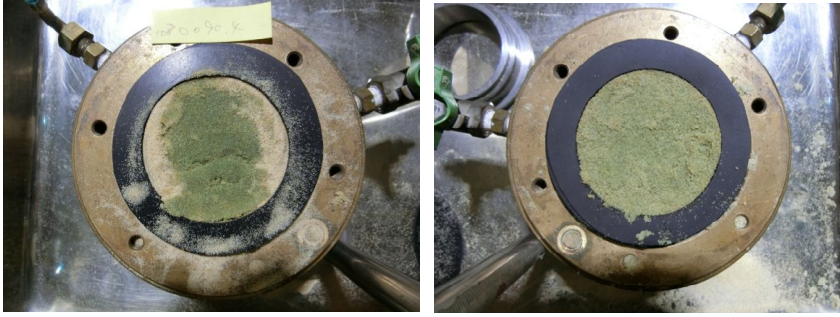


図8 小型試料に対する底面からの注水実験（左：乾燥砂の場合、右：初期含水比3%の場合）

(4) 多層斜面地盤の雨水浸透の観察

地層境界でキャピラリバリアが生じる条件の場合に、雨水が滞留した。実施例は図4の写真の通りである。層が水平の場合、雨水は地表から鉛直に粗い層まで到達し、その場に滞留して、水分量がキャピラリバリアの限界に達すると、粗い層に侵入して下部層に流れていった。一方、層が傾斜している場合、粗い層に入れなかった水は、層の境界に沿って斜面の裏面へ向けて流下する。法面の近くは、奥から流れてきた滞留水が大量にたまり、キャピラリバリアが破れたとたんに一気に下部層に流入して、パイピングを起こして大きな崩壊になる。これは、従来の知見でもあまり認識されず、また実験を行うまでは予想しなかった現象であり、斜面の挙動監視に基づく崩壊予測においても、斜面地盤内部の構造の影響を考慮することの必要性を示した。

(5) 実斜面の人工降雨および堀削による崩壊実験

斜面に1日かけて多量の人工降雨を与えたにもかかわらず、斜面が崩壊しなかった。このため、日を改めて法尻部の堀削によって崩壊を誘発する方法をとることになった。図9、図10のように、ステレオ画像、弾性波とも、取得することができた。ステレオ画像は初めての試みだったが、崩壊前の微小な変位を捉えるほどの精度で測定することができておらず、今後、分析の方法を検討する必要がある。また、弾性波の測定装置群は、堀削の途中段階で撤去する必要があったため、最後の崩落時のデータはとれていない。今後、崩壊に至らない堀削初期のデータを詳しく分析して、堀削による微小な地盤の緩みなどが捉えられていないか、検討する。



図9 実斜面の堀削時のステレオ画像

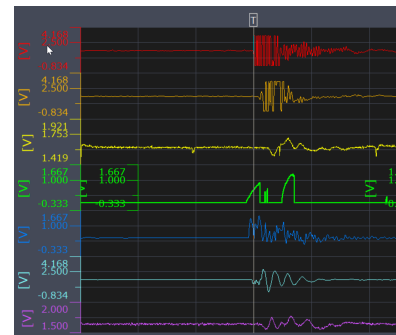


図10 実斜面の弾性波の測定例

(6) 三軸圧縮試験による締め固められた不飽和土の強度の評価

不飽和土を、適度に湿った最適含水比の状態と乾燥状態で締め固めたものの2種類の供試体を作成し、それぞれ湿潤の状態、乾燥した状態でのせん断強度を比較した。同じ乾燥密度に締め固めた場合、乾燥状態で締め固められた方が、乾燥時の強度は高めになるという結果になった。降雨で斜面崩壊するときの高含水比の状況とは異なるが、粒子骨格の違いが不飽和土のせん断挙動を変えるひとつの例を観察できた。

< 引用文献 >

- (1) Taro Uchimura, Ikuo Towhata, Lin Wang, Shunsaku Nishie, Hiroshi Yamaguchi, Ichiro Seko, Jianping Qiao (2015): Precaution and early warning of surface failure of slopes by using tilt sensors, *Soils and Foundations*, Vol.55, No.5, October 2015, pp. 1087-1100. (Doi: 10.1016/j.sandf.2015.09.010)
- (2) Wang Lin, Ichiro Seko, Makoto Fukuhara, Ikuo Towhata, Taro Uchimura, Shangning Tao (2022): Risk evaluation and warning threshold of unstable slope using tilting sensor array, *Natural Hazards*, Vol. 114, pp. 127-156 <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05383-y>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Gallage, Chaminda, Abeykoon, Tharindu, & Uchimura, Taro	4. 巻 Vol. 61, No. 1
2. 論文標題 Instrumented model slopes to investigate the effects of slope inclination on rainfall-induced landslides	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 160-174
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.sandf.2020.11.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Wang Lin, Ichiro Seko, Makoto Fukuhara, Ikuo Towhata, Taro Uchimura, Shangning Tao	4. 巻 114
2. 論文標題 Risk evaluation and warning threshold of unstable slope using tilting sensor array	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Natural Hazards	6. 最初と最後の頁 127-156
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11069-022-05383-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shangning Tao, Taro Uchimura, Junfeng Tang and Makoto Fukuhara	4. 巻 Vol.18, Issue 70
2. 論文標題 Estimation of the instability of slope surface layer by elastic wave attenuation changing with soil moisture and deformation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of GEOMATE	6. 最初と最後の頁 pp. 81-87.
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21660/2020.70.9243	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Tang Junfeng, Uchimura Taro, Tao Shangning, Huang Dong, Xie Jiren	4. 巻 Vol.19, Issue 71
2. 論文標題 Water movement and deformation in unsaturated multi-layered slope under heavy rainfall	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of GEOMATE	6. 最初と最後の頁 pp. 174-181
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21660/2020.71.9268	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Junfeng Tang, Uchimura Taro, Dong Huang, Jiren Xie, Shangning Tao	4. 巻 10(10)
2. 論文標題 Physical model experiments on water infiltration and failure modes in multi-layered slope under heavy rainfall	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 3458
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app10103458	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Waqar Ahmad, Uchimura Taro and Muhammad Umar	4. 巻 24(101)
2. 論文標題 COMPARISON OF THE SHEAR STRENGTH OF UNSATURATED SANDY SOILS AT OPTIMAL AND RESIDUAL MOISTURE CONTENTS	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of GEOMATE	6. 最初と最後の頁 pp. 43-51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21660/2023.101.3645	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Waqar Ahmad, Uchimura Taro and Muhammad Umar
2. 発表標題 Evaluation of Soil Water Characteristics Curve Estimation and Prediction Techniques
3. 学会等名 16th International Conference on Geotechnical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福原誠・内村太郎・Tao Shangning・Tang Junfeng
2. 発表標題 挟在する礫層のキャピラリバリアが降水時の変形に及ぼす影響
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tang Junfeng, Tao Shangning, Taro Uchimura, Makoto Fukuhara
2. 発表標題 Experimental investigation on effects of capillary barrier on slope stability under rainfall unsaturated soil slope stability capillary barrier
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shangning Tao, Taro Uchimura, Makoto Fukuhara, Junfeng Tang
2. 発表標題 Factors affecting elastic wave velocities in rainfall-induced shallow slope failure
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 市村祐哉・内村太郎・福原誠
2. 発表標題 降雨による斜面崩壊を模した一面せん断試験への速度逆数法の適用
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Waqar Ahmad, Uchimura Taro and Muhammad Umar
2. 発表標題 Evaluation of Soil Water Characteristics Curve Estimation and Prediction Techniques
3. 学会等名 16th International Conference on Geotechnical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------