

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01584

研究課題名（和文）ばらまき型センサー観測に基づく自然成層斜面内の降雨水浸透と崩壊機構の実証的可視化

研究課題名（英文）Practical study on rainfall water infiltration and slope failure mechanism in natural stratified slopes based on distributed sensor observations

研究代表者

若井 明彦（Wakai, Akihiko）

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号：90292622

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）：斜面の安定性評価と監視手法を高度化させる要素技術を検討した。すなわち、俯瞰調査に基づく斜面状態の把握、観測伝送技術の効率化、の二点である。研究を進めるための実斜面の観測サイト（愛媛県の興居島と熊本県の阿蘇山域）を選定した。俯瞰調査として地形解析とそれを補うUAV航空測量を試みた。観測伝送技術の効率化については、センサーから得られる観測データのリアルタイム伝送の要素デバイスを改良した。最後に、地下水および表流水シミュレーションモデル(TAG_FLOW)を用いた解析を行った。解析対象地の地下水位、安全率、表流水の深さを時刻歴ごとに算出し、崩壊箇所における危険度評価の妥当性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ばらまき型センサーによらなければ実現しなかった、従来にない安価な全斜面的監視システムの構築に向けた斜面観測と再現解析、さらには観測データに基づく解析モデル自身の高精度化、といった総合的な斜面研究を実施した。こうした多点観測システムは、発生箇所を事前予測しにくい自然斜面の広域予測に応用でき、将来のセンサー単価のさらなる低下がこの潮流を強く後押しすることが期待される。観測に基づいて信頼性が向上した力学モデルは、斜面監視の実務において早期に応用可能である。土質力学に適った斜面安定指標を新たに導入することで、例えば、現行の土壌雨量指数のような定性的な指標を精密な力学的観点から補強することに役立つ。

研究成果の概要（英文）：Elemental technologies to improve slope stability evaluation and monitoring methods were examined in this study. Our focus was placed on two points: understanding the slope condition based on aerial surveys, and improving the efficiency of observation and transmission technology. Observation sites for actual slopes (Gogoshima Island in Ehime Prefecture and the Aso Mountains in Kumamoto Prefecture) have been selected to advance our research. As an aerial survey, topographical analysis and supplementary UAV aerial surveys were performed. To improve the efficiency of observation and transmission technology, the elemental devices for real-time transmission of observation data acquired from sensors were improved. Finally, numerical analyses using a groundwater and surface water simulation model (TAG_FLOW) were conducted to simulate the time histories of the groundwater level, safety factor, and surface water depth during rainfall, which were verified the validity for the risk assessment.

研究分野：地盤工学

キーワード：斜面 降雨 崩壊 地下水位 観測

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

申請者らはこれまで、飽和 - 不飽和浸透流 FEM 解析をもとに、砂質土斜面の水圧変動予測のための高精度かつ計算負荷の低い予測手法を提案した。また、火山灰被覆斜面での調査を進める中で、崩壊前兆現象としてクリープ変形が生ずることを明らかにした。さらに、水圧上昇がクリープ変形に与える影響を、斜面観測と数値解析の両面からモデル化することに成功している。斜面内部の詳細な力学状態を把握できれば、斜面崩壊に関する危険度評価を高度化できる道筋がついた。

一方、近年の MEMS センサーの低廉化は目覚ましく、従来のような少数精鋭の観測機器による斜面監視に代わり、安価で多数の分散配置型の観測網が現実味を帯びてきた。申請者らは、高速道路沿いの直立岩盤の亀裂監視に MEMS 傾斜計 (加速度計) を多数ばらまいて観測するとともに、センサー間の連関性を弾塑性 FEM によりモニタリングすることを提案した。また、地すべり観測用の MEMS 孔内傾斜計を表層崩壊用に改良した試作機を製作し、同手法が有効であることをすでに確認している。以上より、ばらまき型 MEMS センサー観測を斜面内部の力学状態に反映させた機構解析が実現すれば、警戒避難の高度化が実現すると考えた。以上が本研究の着想に至った経緯と準備状況である。

本課題においては、ばらまき型センサーによらなければ実現しなかった、従来にない安価な全斜面的監視システムの構築に向けた斜面観測と再現解析、さらには観測データに基づく解析モデル自身の高精度化、といった構成要素からなる総合的な斜面研究を実施することにした。こうした多点観測システムは、発生箇所を事前予測しにくい自然斜面の広域予測に応用でき、将来のセンサー単価のさらなる低下がこの潮流を強く後押しすることも強く期待された。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ばらまき型センサーによる安価な全斜面的監視システムの開発であるが、同システムを実現するための基礎的理論の確立には、実際の自然斜面におけるリアルタイムかつ網羅的な長期観測が欠かせない。申請者らは具体的な観測候補地を想定して、実証的観測を開始するための計画を立案した。ばらまき型センサー観測による斜面内部の立体可視化システムにおいては、多様な MEMS センサーを多数配置してデータロガーを無・有線の通信網で繋ぎ、ここからは携帯回線でリアルタイムに研究室へ伝送する。

安価なセンサーの多点観測を行うにしても、将来これを応用して実務的に有効なシステムを構築できる可能性が低いならば、研究成果で得られるメリットは大いに損なわれてしまう。本課題の有する学術的独自性として強調すべき点は、多様な専門性を有する研究者 (地盤工学、地形・地質学、森林学、計測技術、電子技術、情報工学) が協働することによる総合科学としての新規性と創造性である。すなわち、本研究は、斜面監視を「総合システム」として保証するための関連要素技術の集積・高度化を連携して推進する基軸のもとに運用される。これは要素技術それぞれの課題を各分野の専門知識により克服することと、要素技術同士を統合した時のシステムとしての合理性を絶えず担保していくことの両輪である。

3. 研究の方法

本課題は独特の研究方法を採用する。すなわち、単なる専門技術の学際化ではなく、学術的に卓越した独自性・新規性を有する理由を挙げるならば、それは地盤工学に立脚した斜面安定性評価と監視手法を飛躍的に高度化させる可能性をもたらす二つの要素技術の新たな進化を前提とする点、すなわち、俯瞰調査に基づく斜面状態 (植生含む) の事前把握、観測伝送技術の効率化、の二点である。

まず、俯瞰調査の主軸を成すのは、地形解析とそれを補う新たな UAV 航空測量である。最初から地盤工学の知識だけを頼りに危険箇所を抽出することに比べ、地形判読による予備調査を含めることで、相対的に崩壊が発生しやすい斜面を効率的に抽出することが可能である。近年、航空機に搭載された Light Detection and Ranging (LiDAR) を用いた測量技術が進み、研究者自らがオンデマンドで精密測量をすることが可能となってきた。本研究では UAV 搭載型 LiDAR を用いて、従来実施することができなかった超精密標高データから表層崩壊ポテンシャルの高い斜面を抽出するための地形分類図を作成することに挑戦する。また、関連した課題として、植生条件の問題がある。三次元点群データを用いた樹木の単木レベルでの樹高・樹冠サイズ、分布密度の測定を行う手法を検討する。地表下にある根系の量の推定から Iwahashi ら (2014) の根系強度指数 (Root Strength index; RST) を算出し、その空間分布をもとに表土層に加わる粘着力に換算して斜面安定解析に反映させる。こうした解析は森林計測の分野で様々な手法が提案されているが、その結果を用いて樹冠被覆による雨水の遮断効果、樹木サイズや粗密による表土層の根系緊縛効果の空間分布を定量的に見積り、斜面安定解析や崩壊危険度評価を行った研究は

ほとんどなく、卓越した新規性がある。

もう一つの観測伝送技術の効率化については、センサーから得られる観測データのリアルタイム伝送の各過程における要素デバイスの新たな改良を計画している。例えば、間隙水圧計の信号は有線でデータロガーに伝送する一方、安価な土壌水分計を多数垂直方向につなぎ合わせた観測アレイを自作し、LPWAN を用いてデータロガーに伝送する仕様とする。土壌水分計にはそれぞれにマイコン(1個 1000 円以下)を付け、このマイコンから LoRa 等を用いて伝送する。また、将来の実用性を大きく左右する省電力性の向上のため、現地の雨量計が雨を感知してから各センサーの観測を開始するなどの新たな電子的仕組みを構築する。

4. 研究成果

ケーススタディを通じて、山林の植生状況等を調査するための空中写真判読による把握の基礎技術の高度化を試みた。過去数十年間の植生被覆変遷を類型化して航空レーザー測量データによる樹高 - 樹木密度分布の解析結果(図-1)と比較した結果、植生被覆変遷から推定される森林の発達度は推定樹高と調和的で、長期間人為的改変を受けていない区域ほど樹高の高い樹木個体が多くなっていることが確かめられた(図-2)。

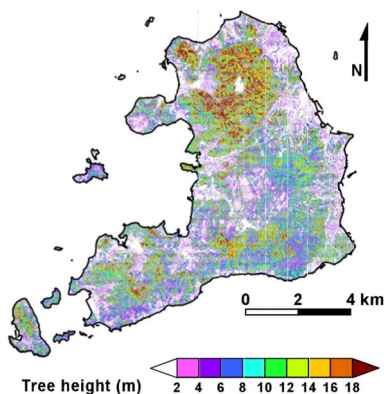


図-1 航空レーザー測量データによる樹高 - 樹木密度分布の解析結果(測量データの表層高度と地盤高度を分離して両者の高度差より推定した樹高(植生高)より0.5m 格子の数値樹高モデル(DCHM)を構築した。このDCHMにおける高度の空間分布の特徴をもとに任意の地点、領域における樹高および立木密度を推定した。Kimura et al. (2023) Water の図を加筆修正。)

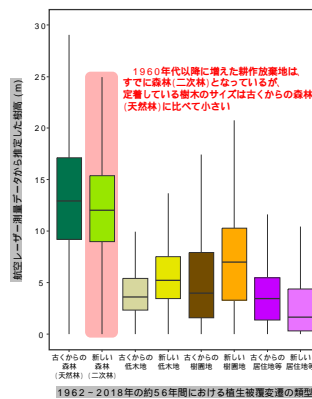


図-2 植生被覆変遷の類型ごとに推定した樹高の分布(箱ひげ図の箱の上下が75パーセンタイル値と25パーセンタイル値を、箱中央の太線が中央値を、ひげの上下端が最大値と最小値を表す。Kimura et al. (2023) Water の図を加筆修正。)

次に、実斜面での観測を通じて得られた研究成果の一部をまとめる。平成30年(2018年)7月豪雨は、西日本を中心に記録的な降水量をもたらした(図-3)。愛媛県松山市の離島である興居島では、開析谷沿いに表層崩壊が多発した。この豪雨により表層崩壊が発生した谷壁斜面に伸縮計を設置し、斜面変動観測を2022年6月4日から開始した(図-4)。松山市では2023年6月30日からの48時間累積雨量が262.5mmとなる降雨があった(図-5)。この降雨により7月1日午前1時21分から斜面がクレープし始め、午前3時13分には崩壊した。崩壊時の推定湿潤前線は崩壊深とほぼ同じ値を示していることも確認された。以上の知見に基づいて、降雨による斜面崩壊機構とその前兆として観察される事象が詳細に整理された。



図-3 平成30年(2018年)7月豪雨によって興居島で発生した表層崩壊と2022年に設置した伸縮計の位置。



図-4 2022年に設置した伸縮計の設置状況と崩壊発生後の状況(斜面上部の伸縮計設置位置で崩壊)。

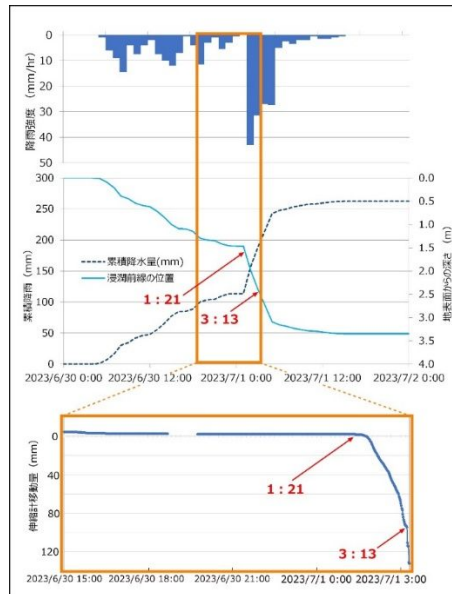


図-5 崩壊発生時の降雨強度，累積雨量および浸潤前線，および伸縮計の計測結果．

以上に加えて，もう一つの実観測斜面地である熊本阿蘇の現場においては，本科研費で購入したLiDAR ドローン(図-6)による航空測量の地形データを整理することで，より詳細かつ効率的な空間把握技術の実用化を検討した(図-7)．



図-6 航空測量の地形データを取得するためのLiDAR ドローン．

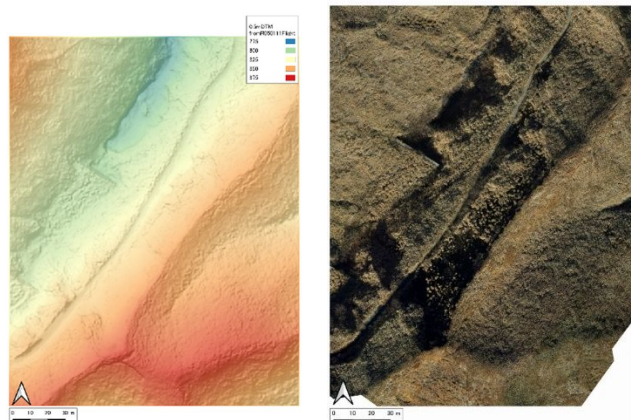


図-7 LiDAR ドローンで取得した0.5mDTM+陰影図(Zenmuse L1)(左)と空中写真画像(Zenmuse P1 カメラ)(右)．

同現場においては、斜面観測技術の検証も実施した。多数の土壌水分センサを自然斜面に3次元的にばらまいて計測するセンサネットワークシステムを試作した。200m四方の領域の土壌の体積含水率を1分おきに計測し、測定値をクラウドに送信することによりリアルタイムで観測できることを目標とした。

図-8はクラウド上で計測結果を表示している様子である。2022年12月14日に、本センサシステムの計測結果に異常値が検出された。現地調査の結果、センサを設置した斜面表層が最上部を除いて崩壊していることが判明した。原因として、連続した雨と当日の寒波の影響で斜面に霜柱が発生し、これが崩壊を引き起こしたと推測される。本事象は、斜面崩壊メカニズムとしてこれまで知られていない現象である。今回の崩壊現象により、斜面の異常検知において本研究で開発されたセンサシステムの有効性が確認された。

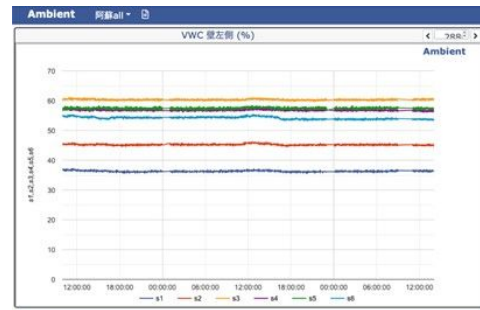


図-8 クラウド上で計測結果を表示している様子 (Ambient) .

最後に、申請者らが開発した地下水および表流水シミュレーションモデル (TAG_FLOW) を用いて、実際の地すべり発生地を対象として解析を行った。解析対象地として前出の愛媛県興居島で発生した表層崩壊を対象とした。TAG_FLOW を用いて解析対象地の地下水位、安全率、表流水の深さを時刻歴ごとに算出し、崩壊箇所における危険度評価の妥当性を検証した。

図-9は地下水位の結果と同様の3つの時間帯における半無限斜面を仮定した斜面の局所安全率 F_s の結果である。6月30日9時00分の時点では地すべり範囲で安全率が1.0を下回っている箇所はほぼ存在しなかったが、時間の経過に伴い安全率が1.0を下回る範囲が増加した。地すべり発生推定時刻の7月1日2時00分には地すべり箇所において安全率が1.0を下回る結果が得られた。一方、地すべりが発生していない場所で安全率が1.0を下回った箇所も存在した。これは本稿では考慮していない植生による影響であると考えられる。地すべり発生箇所は裸地であったが、崩壊箇所以外は森林である。そのため、地すべり発生箇所と比較すると植生の影響が大きいことが考えられる。根系によって土壌の粘着力が高まることはいくつかの研究 (例えば Masi et al (2021)) や Tran et al (2016)) で議論されており、ゆえに根系が斜面の安定性に影響していることが考えられる。このような植生の違いが影響し、地すべり発生箇所よりも不安定な斜面で地すべりが発生しなかったことが考えられる。

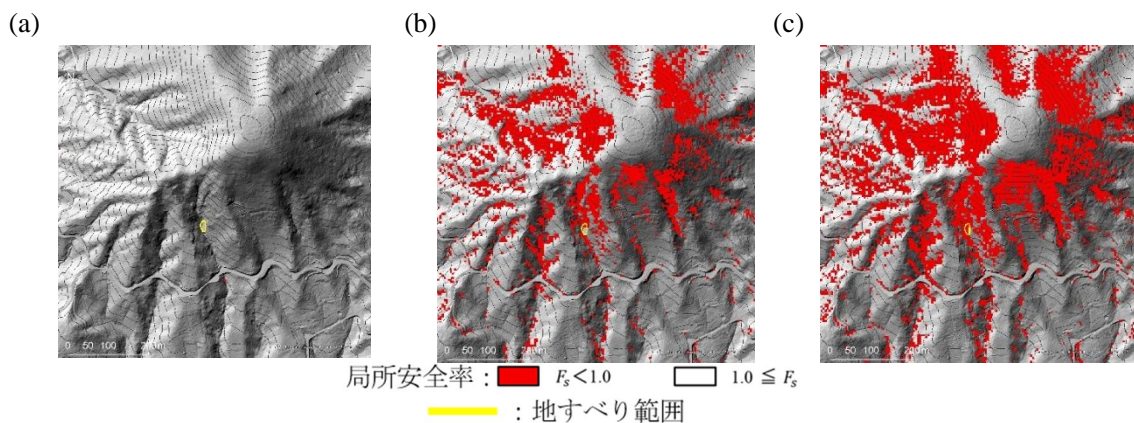


図-9 斜面の局所安全率の解析結果 (a)6/309:00 (b)7/10:00 (c)7/12:00 .

地すべり範囲では、地下水位の上昇が早く、表流水の水位も高いことが確認された。解析結果より集水しやすい場所において地下水位の上昇や表流水の影響により地すべりの危険性が特に高いことが示唆された。植生による緊縛効果、樹冠遮断や土砂の流送や侵食による侵食抑制などを考慮することで、植生を有する斜面の災害リスクをより適切に評価できそうである。

本科研の研究全体を通じて、集中豪雨時の自然斜面の崩壊監視に係る種々の基礎技術の高度化を実現した。新たな“ばらまき型センサー配置手法”を基本として、成層する自然斜面内部の降雨水浸透と帯水、水圧上昇、せん断変形の増加、そして斜面崩壊に至る過程を観測値に基づいてリアルタイムで安価に可視化するとともに、斜面の三次元的力学機構を解析的に再現するための数理モデル改良プロセスを、データ同化の手法等を援用して実現した。

以上

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Takashi Kimura, Go Sato, Takatsugu Ozaki, Nguyen Van Thang and Akihiko Wakai	4. 巻 15
2. 論文標題 Land Cover Trajectories and Their Impacts on Rainfall-Triggered Landslide Occurrence in a Cultivated Mountainous Region of Western Japan	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Water	6. 最初と最後の頁 4211
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/w15244211	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 Kimura T.	4. 巻 14(3)
2. 論文標題 Effects of land cover changes and rainfall variation on the landslide size frequency distribution in a mountainous region of western Japan	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Geosciences	6. 最初と最後の頁 59
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/geosciences14030059	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 Thang, N.V., Ozaki, T., Wakai, A., Kimura, T., Sato, Go. and Kitamura, N.	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Simulation of shallow landslides induced by typhoon in July 2018 in Gogoshima, Ehime Prefecture, Japan based on a simple model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Materials Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 N/A
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1757-899X/1289/1/012106	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7件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 須藤皓介, 若井明彦, 佐藤 剛, 尾崎昂嗣, 蜂屋孝太郎, 木村 誇, 林田 昇, 恵 悠貴, 高橋 啓, Nguyen Van Thang, 磯川遼汰, 浅井 信行
2. 発表標題 豪雨時崩壊の早期警戒システム検討のための実斜面モニタリング事例
3. 学会等名 第61回日本地すべり学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤 剛・尾崎昂嗣・横山 修・山崎孝成・若井明彦・北村七葉・木村 諤
2. 発表標題 タイ・チェンマイ県Homong村落を対象とした地形分類に基づく土砂災害ハザードマップの作成
3. 学会等名 第61回日本地すべり学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村諤・佐藤剛
2. 発表標題 平成30年7月豪雨により芸予諸島大三島で発生した造成農地斜面の崩壊とその要因
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akihiko Wakai, Nguyen Van Thang, Go Sato, Takashi Kimura, Takatsugu Ozaki, Kensaku Matsumoto, Nanaha Kitamura and Shota Fukushima
2. 発表標題 Simple Prediction of Rainfall-induced Slope Failures Based on Digital Elevation Model and Geological Information
3. 学会等名 Construction Resources for Environmentally Sustainable Technologies (CREST 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kimura T, Sato G, Ozaki T, Thang NV, Wakai A.
2. 発表標題 Landslide susceptibility in a highly-cultivated hilly region: artificial slope construction in 1963;1979 and subsequent 2018 landslide event in Omishima western Japan
3. 学会等名 Construction Resources for Environmentally Sustainable Technologies (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sato, G., Wakai, A., Jesada, K, Peerapong, J., Yokoyama, O., Ozaki, T. Kitamura, N
2. 発表標題 Landslide Hazard mapping in Dui Pui Village, Chiang Mai, Thailand
3. 学会等名 6th World Landslide Forum (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 豎谷 駿, 福田蒼太, 若井明彦
2. 発表標題 樹木根系による斜面安定効果と表層厚さの関係を検討するための遠心模型実験
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 高橋啓他	4. 発行年 2022年
2. 出版社 ニュートンプレス	5. 総ページ数 208
3. 書名 Newtonプレミア保存版 統計	

〔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
研究分担者	佐藤 剛 (Sato Go) (00468406)	東京都市大学・環境学部・教授 (32678)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	木村 誇 (Kimura Takashi) (90758559)	愛媛大学・農学研究科・助教 (16301)	
研究分担者	蜂屋 孝太郎 (Hachiya Kotaro) (40540381)	帝京平成大学・人文社会学部・准教授 (32511)	
研究分担者	高橋 啓 (Takahashi Kei) (70595280)	福岡工業大学・情報工学部・准教授 (37112)	

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			
ベトナム	Thuyloi University			