

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H00264

研究課題名(和文) 偶発的マルチハザードに対する河川堤防のロバスト性評価の実現

研究課題名(英文) Realising robustness assessment of river levees against accidental multi-hazards

研究代表者

肥後 陽介 (Higo, Yosuke)

京都大学・経営管理研究部・教授

研究者番号：10444449

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,400,000円

研究成果の概要(和文)：巨大地震や近年激甚化の一途をたどる豪雨による大規模洪水などの偶発的自然ハザードに対して、壊滅的被害を回避する「ロバスト性(粘り強さ)」を有することが、土木構造物の重要な要求性能の一つとして認識されるようになった。本研究では、河川堤防を対象として、1) 地震時・越流時の堤防の経時的な破壊過程を精緻に記述する解析手法を開発すると共に、2) これらの解析手法の代替モデルを用いた地震時・越流時の統一的なロバスト性の評価手法を提示した。具体的には、地震時および越流時の大変形解析手法を確立すると共に、これらの解析法の代替計算手法を開発し、多数計算を可能とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

偶発荷重に対するロバスト性の評価のためには、堤防の破壊および破壊後の挙動までを精緻に表現可能な手法が必要であり、これを本研究で先駆的に整備した。さらに、外力やインプットの不確実性を考慮したあらゆるシナリオを生成する必要があるが、これに耐えうる代替解析法による多数計算スキームを確立した。これにより、地震と越流の同時発生までを考慮した、偶発的マルチハザードに対する河川堤防のロバスト性評価を実現し、インフラストラクチャの危機耐性の具備という、我が国の喫緊の課題の解決に寄与することができる。

研究成果の概要(英文)：It is now recognised as one of the important required performance for civil engineering structures to have "robustness" to avoid catastrophic damage from accidental natural hazards such as mega-earthquakes and large-scale floods caused by heavy rainfall, which have become more and more severe in recent years. In this study, the following two methods were developed for river levees: 1) a numerical method to precisely describe the failure process of levees during earthquakes and overtopping, and 2) a unified evaluation method for robustness during earthquakes and overtopping using alternative models of the numerical methods. Specifically, large deformation analysis methods for earthquake and overtopping were proposed, and an surrogate model for the numerical methods was developed to enable a large number of calculations.

研究分野：土木工学

キーワード：ロバスト性 河川堤防 マルチハザード 侵食 地震

1. 研究開始当初の背景

巨大地震や近年激甚化の一途をたどる豪雨による大規模洪水などの偶発的自然ハザードに対して、壊滅的被害を回避する「ロバスト性(粘り強さ)」を有することが、土木構造物の重要な要求性能の一つとして認識されるようになった。

地震および洪水のマルチハザードに対応した堤防の粘り強さの評価技術が求められるなか、以下の点が本研究課題の核心をなす学術的課題である。

【課題】地震・洪水時における、破堤に至るまでの進行的な水および土の力学的挙動を精緻に解析することができるか？(力学論)

【課題】「ロバスト性(粘り強さ)」という概念的尺度をいかに具体的な設計としてアウトプットするか？(設計論)

2. 研究の目的

本研究では、河川堤防を対象として、

- 1) 地震時・越流時の堤防の経時的な破壊過程を精緻に記述する解析手法を開発すると共に、
- 2) これらの解析手法の代替モデルを用いた地震時・越流時の統一的なロバスト性の評価手法を提示する。これにより、地震と越流の同時発生までを考慮した、偶発的マルチハザードに対する河川堤防のロバスト性評価を実現し、インフラストラクチャの危機耐性の具備という、我が国の喫緊の課題の解決に寄与することを目的とする。

3. 研究の方法

図-1 に示す流れで研究を進めた。具体的な研究の方法を以下に列挙する。

- A. 表面侵食のメカニズム解明とモデル化
- B. 地震・越流時における堤防破壊過程の数値解析技術の開発
- C. 堤防破壊過程の数値解析の代替モデル構築
- D. 越流侵食実験と実験の代替モデル構築
- E. マルチハザードに対する堤防のロバスト性評価手法の提示

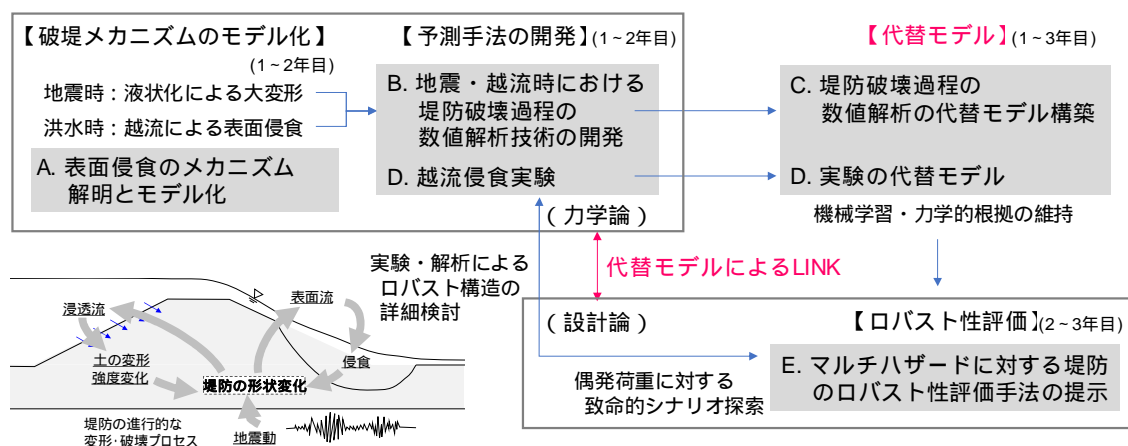


図-1 研究フロー図

4. 研究成果

A. 表面侵食のメカニズム解明とモデル化

近年、河川堤防の決壊によって堤内地に甚大な被害をもたらす事例が報告されている。こうした被害を軽減するためには、越流時、表面流がどのように堤防を流下し、侵食していかについて理解を深め、対策を検討することが必要である。本研究では、堤体材料を変化させ、基礎地盤を有する堤防侵食実験を行い、決壊プロセスについて考察するとともに、表面流と浸透流を同時に予測できる流れの3次元モデルと平衡流砂モデルを用いて再現解析を行った。その結果、浮遊砂の影響を考慮する場合としない場合で、裏法尻近傍の侵食特性や堤体形状の変化に違いが見られることを示した [1]。

B. 地震・越流時における堤防破壊過程の数値解析技術の開発

Material Point Method(MPM) は粒子法の一つであり，格子法に見られるメッシュの絡み合いを起こさないことから大変形解析に有利な解析手法である．多相系地盤解析においては，透水性の高い地盤の大変形時など固液相間の相対運動の大きな場合，相間の移流を考慮する必要がある．そこで本研究では固・液・気三相 2-PointMPM の定式化及びその離散化を新たに提案した．本手法を用いることで移流項を発生させず，固液相間の移流を考慮することができる．本定式化は u-U 定式化でありまた，固液二相のラグランジュ粒子に離散化することにより固液相間の移流項は発生しないといった特徴を持つ．次に数値解析を通して一相系及び二相系に対して微小変形・有限変形の検証を行った．最後に固・液・気三相における動的盛土液状化解析を行うことで固液相対運動の大きな現象に対する本手法の適用性を確認した [2]．

堤体表面を流れる越流水による侵食挙動を再現できる解析手法の確立を目的として，表面流と浸透流を同時に考慮できる三次元流体解析法と粒子法による土の弾塑性変形解析法を連成した [3]．表面流・浸透流における圧力，および表面流におけるせん断力を土の変形解析法に受け渡すアルゴリズムを提案し，裏法尻から侵食破壊が進行していく様子が定性的に再現できることを示した．

C. 堤防破壊過程の数値解析の代替モデル構築

河川堤防の越流侵食解析における材料不確実性の評価手法を提案した．実河川堤防の様々な粒度分布に対する近似多数解析を実現し，材料不確実性による越流侵食の影響評価を実現している．耐侵食性への粒度分布の影響を考慮した掃流砂および浮遊砂モデルの拡張による解析法の高度化，主成分分析を用いた次元縮減，ガウス過程回帰による代替解析法を提示し，実河川堤防への適用事例解析を通じて，提案法の有効性を示した [3]．

D. 越流侵食実験と実験の代替モデル構築

模型堤防の決壊時における堤体内の飽和度分布を求め，そのプロセスを考察するため，地盤工学の分野で利用されているトランスパレントソイルに着目し，越流水と堤体材料にヨウ化ナトリウム水溶液と石英を適用して，破堤の水理模型実験を行った．そして，得られた画像から画像解析を行うことで，堤体内の飽和度の可視化を試みた．その結果，トランスパレントソイルを用いることで，珪砂では示すことができなかった堤体内の飽和度分布の時間変化を可視化できることを示した [4]．実験での記録を出力とし，実験条件を入力として，C のアナロジーで代替モデルを構築した．この代替モデルにより，実施した実験条件の範囲内であれば，実験を実施せずに実験結果を出力として得ることができることを確認した．

E. マルチハザードに対する堤防のロバスト性評価手法の提示

入力パラメータを用い，時空間情報を最大限保存しながら数値解析結果を多次元情報として利用し，次元削減に基づくロバスト設計の開発を可能とする実践的な信頼性解析スキームを提案した．さらに，提案した設計スキームは，従来の信頼性解析手法である 1 次 2 モーメント法や 1 次信頼性法と同様の実用的な設計機能を有している．最後に，液状化砂地盤上の単純な盛土の時系列地震変形解析により，提案した設計スキームの有効性と土構造物の実用設計への大きな貢献を示した [5]．

参考文献

- [1] 音田慎一郎，清水皓一，山口凌大 (2021)，浮遊砂の影響を考慮した堤防の越流侵食に関する数値シミュレーション，土木学会論文集 B1 (水工学)，77(2)，pp. 1_703-1_708. https://doi.org/10.2208/jscejhe.77.2_1_703
- [2] 内山大智，竹川遊大，肥後陽介 (2021)，不飽和土の大変形解析のための多相連成 2-Point MPM，土木学会論文集 A2 (応用力学)，77(2)，pp. 1_285-1_296，https://doi.org/10.2208/jscejam.77.2_1_285
- [3] 音田慎一郎，木本康太，肥後陽介 (2021)，浸透による堤防裏法尻の破壊に関する数値シミュレーション，土木学会論文集 B1 (水工学)，77(2)，pp. 1_649-1_654. https://doi.org/10.2208/jscejhe.77.2_1_649
- [4] 音田慎一郎，加納隆伸，肥後陽介，山口凌大，高野大樹 (2021)，トランスパレントソイルを用いた堤防決壊プロセスの可視化に関する試み，土木学会論文集 B1 (水工学)，77(2)，pp. 1_643-1_648. https://doi.org/10.2208/jscejhe.77.2_1_643
- [5] Otake, Y., Shigeno, K., Higo, Y., and Muramatsu S. (2021), Practical dynamic reliability analysis with spatiotemporal features in geotechnical engineering, Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 16(4), pp.662-677. Published online: 29 Aug 2021. <https://doi.org/10.1080/17499518.2021.1971250>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 OTAKE Yu, SHIGENO Kyohei, WATANABE Shinya, HIGO Yosuke, MURAMATSU Shogo	4. 巻 76
2. 論文標題 DATA DRIVEN DYNAMIC RELIABILITY ANALYSIS BASED ON SPATIOTEMPORAL FEATURE EXTRACTION WITH MODE DECOMPOSITION: APPLICATION FOR EFFECTIVE STRESS DYNAMIC ANALYSIS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. C (Geosphere Engineering)	6. 最初と最後の頁 142 ~ 157
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejge.76.2_142	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 Kiryama Takatoshi, Higo Yosuke	4. 巻 60
2. 論文標題 Arbitrary particle domain interpolation method and application to problems of geomaterial deformation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 1422 ~ 1439
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2020.09.006	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 -
1. 著者名 SHOJI Taiga, OTAKE Yu, SHIGENO Kyohei, HIGO Yosuke, MURAMATSU Shogo	4. 巻 76
2. 論文標題 BASIC STUDY ON OPTIMIZATION OF SENSOR PLACEMENTS FOR REAL TIME ALTERNATIVE SIMULATION	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics (AM))	6. 最初と最後の頁 I_25 ~ I_33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.76.2_I_25	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 Otake Yu, Shigeno Kyohei, Higo Yosuke, Muramatsu Shogo	4. 巻 16
2. 論文標題 Practical dynamic reliability analysis with spatiotemporal features in geotechnical engineering	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards	6. 最初と最後の頁 662 ~ 677
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/17499518.2021.1971250	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 UCHIYAMA Daichi、TAKEGAWA Yudai、HIGO Yosuke	4. 巻 77
2. 論文標題 A MULTIPHASE COUPLED 2-POINT MPM FOR SIMULATING LARGE DEFORMATION OF UNSATURATED SOIL	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics (AM))	6. 最初と最後の頁 I_285 ~ I_296
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.77.2_I_285	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 ONDA Shinichiro、KIMOTO Kouta、HIGO Yosuke	4. 巻 77
2. 論文標題 NUMERICAL SIMULATION OF EMBANKMENT FAILURE AT THE BACK SIDE TOE DUE TO SEEPAGE FLOWS	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_649 ~ I_654
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.77.2_I_649	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 ONDA Shinichiro、KANOU Takanobu、HIGO Yosuke、YAMAGUCHI Ryota、TAKANO Daiki	4. 巻 77
2. 論文標題 TRIAL VISUALIZATION IN EMBANKMENT BREACHING PROCESS USING TRANSPARENT SOIL	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_643 ~ I_648
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.77.2_I_643	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 ONDA Shinichiro、SHIMIZU Koichi、YAMAGUCHI Ryota	4. 巻 77
2. 論文標題 NUMERICAL SIMULATION OF LEVEE BREACHING DUE TO OVERTOPPING FLOWS CONSIDERING SUSPENDED SEDIMENT	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_703 ~ I_708
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.77.2_I_703	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 Yoshida Ikumasa, Tomizawa Yukihisa, Otake Yu	4. 巻 136
2. 論文標題 Estimation of trend and random components of conditional random field using Gaussian process regression	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computers and Geotechnics	6. 最初と最後の頁 104179 ~ 104179
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compgeo.2021.104179	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 TOMIZAWA Yukihisa, YOSHIDA Ikumasa, OTAKE Yu	4. 巻 77
2. 論文標題 AUTOCORRELATION FUNCTION FOR SPATIAL DISTRIBUTION ESTIMATION OF GEOTECHNICAL PROPERTIES USING GAUSSIAN PROCESS REGRESSION	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics (AM))	6. 最初と最後の頁 I_485 ~ I_494
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.77.2_I_485	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 富澤 幸久、吉田 郁政、大竹 雄	4. 巻 2
2. 論文標題 ガウス過程回帰を用いた複数の地盤物性値間の相関を考慮した空間分布推定	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AI・データサイエンス論文集	6. 最初と最後の頁 617 ~ 625
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/jsceiii.2.J2_617	査読の有無 無
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 Kiryama Takatoshi, Higo Yosuke	4. 巻 62
2. 論文標題 Axisymmetric particle-element coupled method for deformation problems of geomaterial	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 101180 ~ 101180
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2022.101180	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 ONDA Shinichiro, YAMAGUCHI Ryota, KANAI Minoru	4. 巻 78
2. 論文標題 NUMERICAL SIMULATION OF LEVEE BREACHING DUE TO OVERTOPPING FLOWS CONSIDERING THE EFFECT OF PRESSURE GRADIENT NEAR A BED	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_1219 ~ I_1224
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.78.2_I_1219	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 Otake Yu, Honjo Yusuke	4. 巻 62
2. 論文標題 Challenges in geotechnical design revealed by reliability assessment: Review and future perspectives	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 101129 ~ 101129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2022.101129	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 Shioi Akihiro, Otake Yu, Yoshida Ikumasa, Muramatsu Shogo, Ohno Susumu	4. 巻 17
2. 論文標題 Data-driven approximation of geotechnical dynamics to an equivalent single-degree-of-freedom vibration system based on dynamic mode decomposition	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards	6. 最初と最後の頁 77 ~ 97
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/17499518.2023.2184479	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 OTAKE Yu, SHOJI Taiga, HIGO Yosuke, YOSHIDA Ikumasa	4. 巻 79
2. 論文標題 REAL-TIME RECONSTRUCTION SIMULATION BASED ON AUTONOMOUS BASIS FUNCTION SELECTION	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of JSCE	6. 最初と最後の頁 n/a ~ n/a
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.22-15013	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 TOMIZAWA Yuki-hisa, TSUDA Yuto, YOSHIDA Ikumasa, OTAKE Yu	4. 巻 79
2. 論文標題 3D SPATIAL DISTRIBUTION ESTIMATION OF GEOTECHNICAL PROPERTIES CONSIDERING NONSTATIONARY IN THE DEPTH DIRECTION AND IMPROVEMENT OF CALCULATION EFFICIENCY BY KRONECKER PRODUCT	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of JSCE	6. 最初と最後の頁 n/a ~ n/a
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.22-15056	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 -

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 金井 稔, 音田慎一郎, 肥後陽介, 清水皓一, 大竹 雄
2. 発表標題 堤体材料の混合比率が破堤過程に与える影響について
3. 学会等名 第76回年次学術講演会講演概要集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yusuke Fukunaga, Masafumi Miyata, Yu Otake, Naoki Sumioka, Noriki Sugahara, and Masahiro Takenobu
2. 発表標題 Applicability of ROM to Seismic Response Analysis of Caisson- Type Seismically Strengthened Quay Walls against Level 2 Ground Motion
3. 学会等名 Proceedings of the 8th International Symposium for Geotechnical Safety & Risk(ISGSR)2022, 17-008, Newcastle, Australia, 2022.12. (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akihiro Shioi , Yu Otake, and Shogo Muramatsu
2. 発表標題 A Study of Data-Driven Seismic Response Analysis Based on the Identification of Temporal Evolutionary Law in Dynamic Systems
3. 学会等名 Proceedings of the 8th International Symposium for Geotechnical Safety & Risk(ISGSR)2022, 17-008, Newcastle, Australia, 2022.12. (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
研究分担者	音田 慎一郎 (Onda Shinichiro) (50402970)	京都大学・工学研究科・准教授 (14301)	
研究分担者	大竹 雄 (Otake Yu) (90598822)	東北大学・工学研究科・准教授 (11301)	
研究分担者	高野 大樹 (Takano Daiki) (80626218)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・グループ長 (82627)	
研究分担者	糸井 達哉 (Itoi Tatsuya) (60393625)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授 (12601)	

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
---------	---------