

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 20 日現在

機関番号：32616

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01526

研究課題名(和文) 文化的遺産である熊本城石垣の耐震性能を備えた修復のための研究

研究課題名(英文) Study for repair with seismic performance of Kumamoto Castle stone wall which is a cultural heritage

研究代表者

橋本 隆雄 (HASHIMOTO, TAKAO)

国土館大学・理工学部・教授

研究者番号：40628814

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：2016年熊本地震では、これまで修復した熊本城石垣の8割以上が再び崩壊したが、その崩壊メカニズム及び補強対策も確立されていなかった。そこで、最先端の非破壊検査や物理探査の技術を用いて地盤の3次元モデル化し、高度な解析により石垣の崩壊メカニズムを明らかにした。また、既存及び新たな石垣復旧・補強対策工法の6タイプについて防災科学技術研究所の大型振動台で実物断面での実験や実物施工実験等により、熊本城で施工可能な効果的な補強対策が明らかとなった。この研究成果は、熊本城石垣の耐震対策を進めるにあたって推奨される標準的な手順と方法、補強方法を示す文化庁「熊本城石垣 耐震診断指針(案)」として採用された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、熊本城の石垣が2016年熊本地震により崩壊した原因について最先端技術を利用して地盤と石垣を3D化した解析により明らかにした。また、熊本城石垣が崩壊・孕み箇所を復旧する補強対策がなかったため、防災科学技術研究所で熊本城の実物大の断面構造で熊本栗石を用いた大型振動台実験・解析により効果的な工法を提案した成果を挙げた点に学術的意義がある。

また、本研究の成果が、熊本城の石垣の耐震対策を進めるにあたって推奨される標準的な手順と方法、補強を行うにあたって取り得る補強方法と留意点について示す文化庁「熊本城石垣 耐震診断指針(案)」として実際の熊本城修復工事に活用されたことに社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：In the 2016 Kumamoto earthquake, more than 80% of the Kumamoto castle stone walls that had been restored so far collapsed again. However, its collapse mechanism and reinforcement measures have not been established. Therefore, we made a three-dimensional model of the ground using the latest non-destructive inspection and geophysical exploration techniques, and clarified the collapse mechanism of the stone wall by advanced analysis. In addition, full-scale experiments were conducted on the large shaking table of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention for six types of existing and new stone wall restoration and reinforcement measures. As a result, effective reinforcement measures that can be constructed at Kumamoto Castle have been clarified. This research result was adopted as the "Kumamoto Castle Ishigaki Seismic Diagnosis Guideline" by the Agency for Cultural Affairs for earthquake resistance measures for Kumamoto Castle Ishigaki.

研究分野：地震工学、地盤工学、防災工学

キーワード：熊本地震 熊本城 石垣 補強 城壁 耐震対策 振動実験 非破壊検査

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

熊本城は加藤清正が17世紀初めに築城した「武者返し」と呼ばれる反り返った石垣が、優美な景観を生み出していた。だが、2016年熊本地震により、全石垣約79,000m²のうち、写真-1・写真-2に示すように全体の約3割に当たる約50箇所23,600m²で石垣の崩壊・はらみ出しなど熊本城内のほぼ全域で広範囲にわたって甚大な被害が発生した。また、1889年にも地震に襲われ約2,700m²の石垣が崩れ、その後、これまで昭和41年度～平成27年度まで35箇所の石垣の保存修復に長い時間とコストをかけたにも関わらず、今回の地震で約8割以上の修復箇所が再び崩壊した。今後、熊本城の石垣復旧は、積直し費用が約425億円にも上り、20年かけて修復する予定である。

石垣は、高度な解析技術を用いて造られたのではなく、試行錯誤に基づく経験と実績により構築されたものであり、近世まで世襲的に伝承されていただけで、その構造が科学的に解明されていない。今回の地震では、高さ4m程度の石垣が崩壊している一方で、高さ20m以上の石垣が安定性を保っているものもある。しかし、石垣の崩壊メカニズムの調査・分析は外側に「築石（つきいし）」、築石同士の隙間に差し込まれている「介石（かいいし）」、その裏側に「栗石」が詰まっており、背後地盤として「盛土」、さらに「地山」からなる五層構造となっているため、ほぼ未着手の状態である。

現在、天守閣は地震で瓦が落ちたが、昭和35年に復興され鉄筋コンクリート造の深さ47m、8本の深礎杭で支えられ、大天守に筋交いや壁を入れることで耐震性を増す最新工法で補強が行われている。しかし、石垣は文化的遺産であることから現状復旧が重視され耐震性能を兼ね備えていない状態で復旧されようとしている。さらに、研究代表者の先行的研究による電気探査の結果から、熊本城内の北側に熊本城内の北側にある百間石垣～熊本県護国神社北側の宮内まで立田山断層が存在していることが明らかとなった。もしこの活断層が動いたら、現状の修復対策では文化的遺産である熊本城の石垣全体が崩壊する危機的状況にある。



(a)地震前
写真-1 北十八間櫓石垣崩壊状況



(a)地震前
写真-2 飯田丸五階櫓石垣崩壊状況

2. 研究の目的

本研究では、石垣の美観を損なわずに耐震性を向上させ修復するために石垣の形状・地盤状況を非破壊検査や物理探査を用いて把握して崩壊メカニズムを解明し、復旧対策工法の実験及び解析手法を用いて最適な補強方法を提案し、熊本城修復工事に適用することを目的としている。

3. 研究の方法

熊本城の復旧対策箇所を優先して、以下の手順・方法で調査・実験・解析を行った。

- (1)最先端の非破壊検査や物理探査の技術を用いて、石垣の崩れた原因を把握する。
 - ① 熊本城石垣全体被害の把握
 - ② 熊本城モデル地区の選定
 - ③ 被害状況の把握
 - ④ 地盤状況の把握
 - ⑤ 石垣被害状況の整理・分析
- (2)2016年熊本地震を再現した石垣模型の振動台実験及び解析を行い、崩壊メカニズムを明らかにする。
 - ① モデル諸条件の設定
 - ② 石垣模型の振動実験
 - ③ 石垣の解析による検証
 - ④ 崩壊メカニズムの分析
- (3)石垣間に補強土を用いた石垣模型の振動台及び実物大施工・引抜きの実験、解析による修復工法の検証を行う。
 - ① 石垣補強工法の選定
 - ② 石垣補強工法の模型実験
 - ③ 石垣補強工法の解析
 - ④ 石垣補強対策工法マニュアルの策定
- (4)石垣の耐震性を診断し補強設計する手法が確立されていないため、これまでの熊本城での検証結果から診断・設計ができる基準化(案)を行う。
 - ① 石垣補強工法の選定
 - ② 石垣補強工法の模型実験
 - ③ 石垣補強工法の解析
 - ④ 石垣補強対策工法マニュアルの策定

4. 研究成果

本研究では、以下の手順で石垣の崩れた原因を非破壊検査や物理探査を用いて把握し現状と復旧対策工法の実験及び解析手法により最適な診断・補強方法を文化庁・熊本市に提案し、熊本

城修復工事に適用できるまでの十分な成果を上げることができた。

- (1) 最先端の非破壊検査や物理探査の技術を用いて、石垣の崩れた原因を明らかにした。
 - ① 熊本城石垣全体被害の把握：熊本城の石垣被害箇所について位置、形状（高さ・法面勾配）、被害形態（崩壊・はらみ・クラック・浮き）等について調査した。
 - ② 熊本城モデル地区の選定：熊本城の石垣被害全体から特に大きな被害を受けたモデルとなる地区を選定し、石垣修理履歴も考慮した調査を行った。
 - ③ 被害状況の把握：3D レーザー沈下・はらみ等の変位量をグラフィックにした。赤外線カメラを用いて石垣の沈下による隙間・はらみ・浮きの状態を把握した。
 - ④ 地盤状況の把握：微動アレイ探査により地山の固い地盤か盛土等の柔らかい地盤かが明らかとなった。表面波探査により、旧河川があることが明らかとなった。電気探査により、百間石垣付近に断層があることが明らかとなった。
 - ⑤ 石垣被害状況の整理・分析：石垣の被害原因について整理・分析を行い、図-1 のようになった。

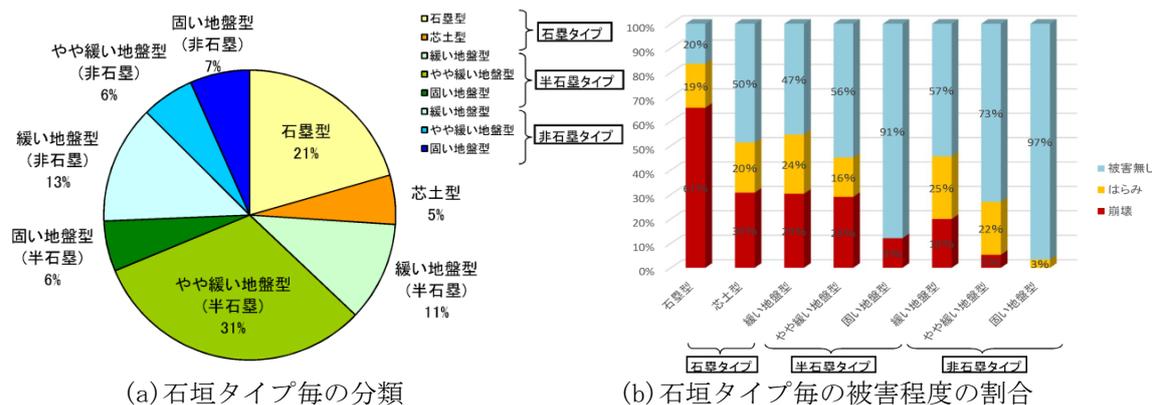
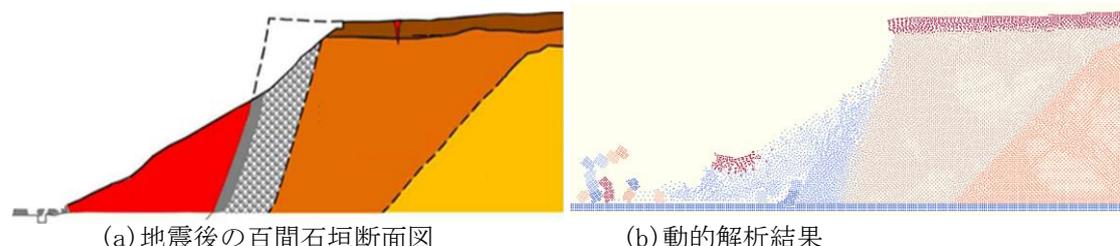
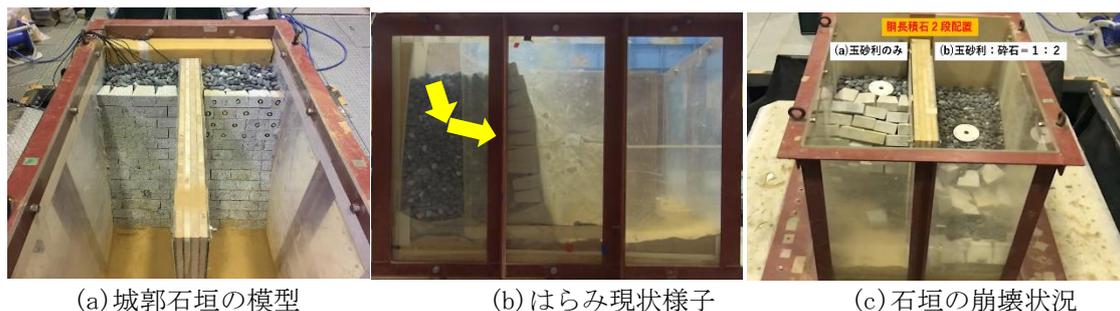


図-1 熊本城石垣被害分析結果¹⁾

(2) 石垣模型の振動台実験及び解析

2016 年熊本地震を再現した石垣模型の振動台実験及び解析を行い、崩壊メカニズムを明らかにした。

- ① モデル諸条件の設定：擁壁の形状、地盤の状況、入力地震動の推定を設定した。
- ② 石垣模型の振動実験：写真-2 に示すように崩壊箇所の石垣及び地盤構造の模型を作成し、振動実験を行い崩壊現象のメカニズムを検証した。
- ③ 石垣の解析による検証：先端の数値シミュレーション解析手法により再現できるかの検証を行った。解析は、図-2 に示すように石垣の形状・粒径・特質が異なる互層構造を先端の数値シミュレーション解析手法である個別要素法、三次元 FEM 法を用いて行った。
- ④ 崩壊メカニズムの分析：実験と解析を踏まえて崩壊原因となるメカニズムを明らかにした。



(3) 熊本城石垣の実物大断面模型を用いた大型振動台実験及び試験施工

文化庁、熊本市、防災科学技術研究所の協力により既存の石垣と新たな補強対策を行った石垣の比較のために石垣模型の大型振動台実験及び解析を行い、耐震性能を明らかにした。

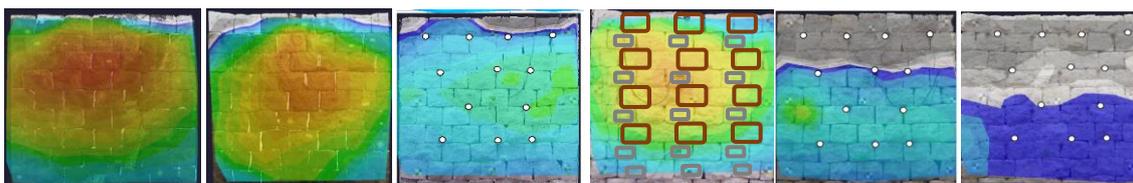
- ① 石垣の補強対策の振動台模型実験：写真-3 に示すように国立研究開発法人防災科学技術研

究所の大型振動台で 1) 手積みモデル、2) 粒度調整栗石モデル、3) ジオテキスタイル巻き込みモデル（アンカーあり）、4) 介石補強モデル、5) 鉄筋挿入モデル、6) 筒状固結工法モデル についての実物モデルを構築して石垣模型実験を行い、効果を検証した。図-3 は 650gal の正弦波（2 回目）による加振後の築石の累積変動コンターである。この実験結果から、石墨 1)~4) の内では 3) が効果的であり、非石墨 5) 6) では、6) が非常に効果的であることが明らかとなった。

- ② 石垣の施工法についての石垣模型施工実験：熊本城石垣の崩壊部及びはらみ部を想定して、具体的な模型を構築して各補強材料を用いた工法を開発または組み合わせながら最適な工法について現場施工引抜き試験等により、補強土の効果を確認する必要がある。そこで、岡部株式会社総合実験センターで、写真-4・写真-5 に示すように 1) 石墨崩壊部の補強対策であるジオテキスタイル巻き込みモデル（アンカーあり）、2) 石垣はらみ部の補強対策である筒状固結工法モデル（アンカーあり）の施工実験を行い、その効果の検証ができた。
- ③ 石垣の施工法についての現場試験施工：静岡県焼津市花沢伝統的建造物群保存地区のはらみ変状が生じ耐震性能が無い石垣を対象に、振動台実験以降検討を進めた「実用化仕様」の施工性・耐力等を確認するために試験施工を行った。この結果、各補強材料を用いた工法は、現場施工引抜き試験等により十分な補強材の極限引抜き抵抗力を確保できることが明らかとなった。



写真-3 大型振動台実験（防災科研）⁴⁾ 写真-4 石垣の削孔実験 写真-5 石垣固結工法の実験

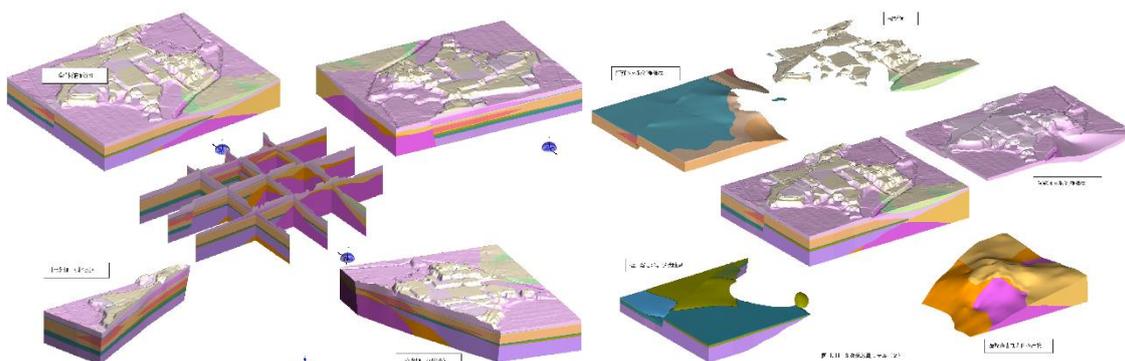


(a) 手積み (b) 粒度調整栗石 (c) ジオテキ巻き込み (d) 介石補強 (e) 鉄筋挿入 (f) 筒状固結
図-3 650gal の正弦波（2 回目）による加振後の築石の累積変動コンター⁴⁾

(4) 熊本城の耐震診断及び補強対策方法の提案

文化庁、熊本市から石垣の診断及びその後の補強対策の指針がないため、基準化作成の協力依頼があった。そこで、各石垣構造での地盤を考慮した地震動の検証後、妥当な設計水平震度を設定し、耐震診断及び補強対策方法の提案を行い、採用された。

- ① 石垣の挙動について解析：図-4 に示す熊本城全域の 3 次元地盤モデルの構築し、主に地震前の既存測量がある 32 箇所を対象に、図-5 に示す 2 次元 FEM 解析による地盤速度の関係、図-6 に示す崩壊・はらみ状況から石垣タイプの被害分析、図-7 に示す簡易な累積示力線法による耐震性能の検証を行った。
- ② 文化庁「熊本城石垣 耐震診断指針（案）」の策定：熊本地震による石垣の崩壊やはらみ量を分析して、全国で設計に用いる入力地震動 (k_h) の設定し、累積示力線・円弧滑り・FEM 解析を用いた転倒・滑動・支持力の安定性解析手法の開発を行った。



(a) 断面図の作成 (b) 地質分類

図-4 熊本城の地盤・石垣 3 次元モデル⁵⁾

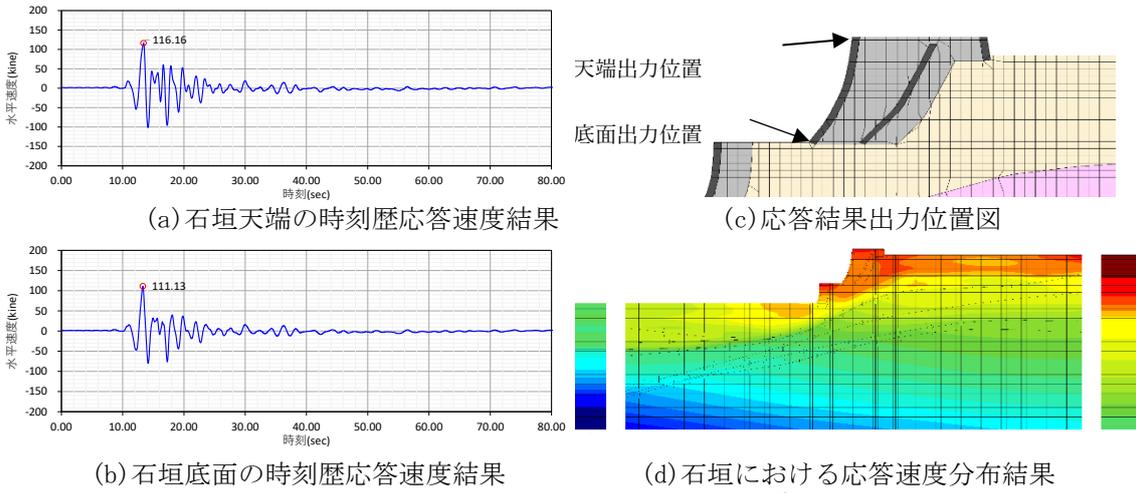


図-5 飯田丸五階櫓の応答速度分布⁵⁾

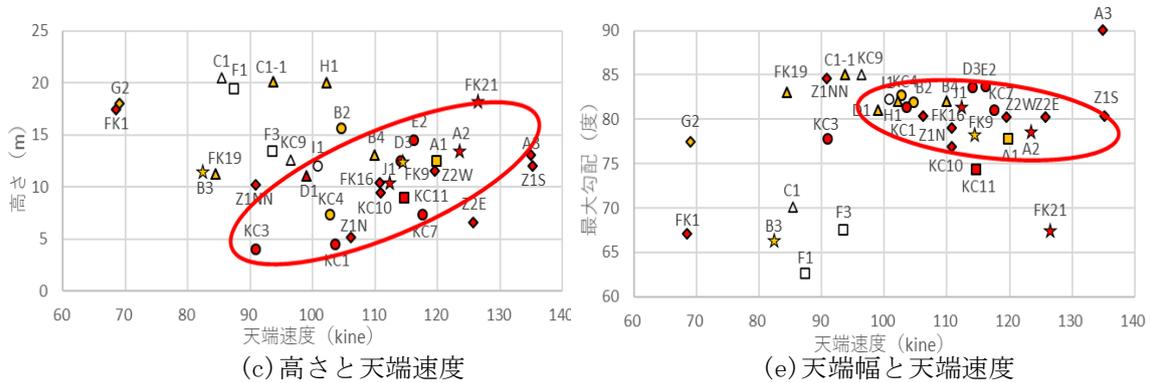


図-6 全石垣の被害分析結果⁶⁾

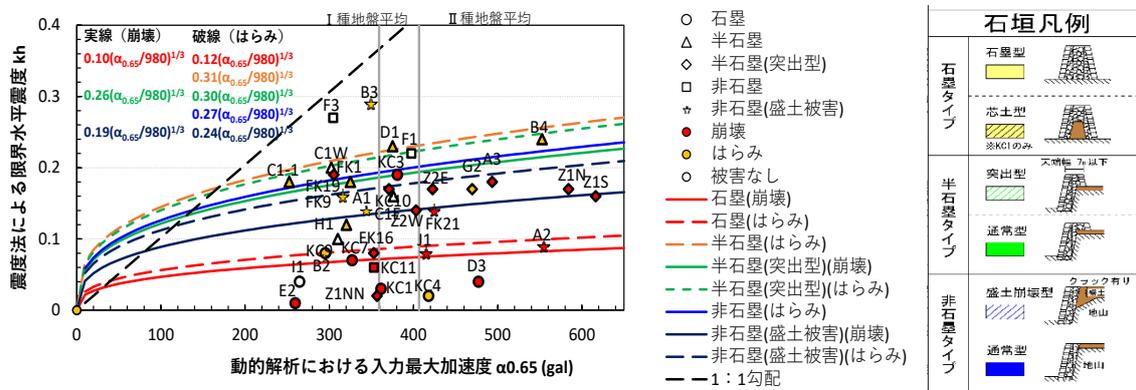


図-7 熊本城全域の累積示力線法による k_h と gal の関係⁷⁾

<引用文献>

- 橋本隆雄, 石作克也, 松尾拓: 熊本城の石垣タイプと被害の相関についての研究, 国土館大学理工学部紀要, 第12号(2019), pp. 247-259, 2019. 3.
- 恒川怜央, 影山亮太, 池本敏和, 宮島昌克, 橋本隆雄: 地震時における城郭石垣の対策工法に関する動的模型実験, 第39回地震工学研究発表会, D12-1525, 2019. 10
- 伊吹竜一, 小野祐輔, 酒井久和, 高柳剛, 湯浅友輝, 池田勇司: SPH-DEM法に基づく石積み擁壁の引き抜き模型実験に対する数値シミュレーション, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 74, No. 4, pp. I_606-616, 2018. 4.
- 橋本隆雄, 中澤博志, 池本敏和, 宮島昌克: 大型振動台実験による石垣補強技術の耐震性能評価, 第40回地震工学研究発表会, 第40回地震工学研究発表会講演論文集, C15-1617, 2020. 10
- 橋本隆雄, 磯部有作, 松尾拓, 石作克也: 熊本城内の石垣を対象とした3次元地盤モデルの構築と2次元地震応答解析, 国土館大学理工学部紀要, 第14号(2020), pp. 113-119, 2021. 3.
- 橋本隆雄, 磯部有作, 松尾拓, 石作克也: 動的FEM解析を用いた熊本城石垣の被害要因分析(その2), 第56回地盤工学研究発表会, 地盤工学会, DS-4-08, 2021. 7.
- 橋本隆雄, 磯部有作, 松尾拓, 石作克也: 熊本城石垣における累積示力線法を用いた耐震性能の検証, 第76回年次学術講演会, 土木学会, CS10-41, 2021. 9.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計29件（うち査読付論文 28件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 20件）

1. 著者名 橋本 隆雄, 中澤 博志, 池本 敏和, 宮島 昌克	4. 巻 77
2. 論文標題 大型振動台実験による石垣補強技術の耐震性評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1 (構造・地震工学)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 橋本 隆雄, 内田 秀明, 宗川 清	4. 巻 14
2. 論文標題 2018年北海道胆振東部地震による北広島市大曲地区の建物傾斜及び擁壁被害の分析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 国土館大学理工学部紀要	6. 最初と最後の頁 87 - 98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 橋本 隆雄, 磯部 有作, 松尾 拓, 石作 克也	4. 巻 14
2. 論文標題 熊本城内の石垣を対象とした3次元地盤モデルの構築と2次元地震応答解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 国土館大学理工学部紀要	6. 最初と最後の頁 113 - 119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 西川隼人, 野口竜也, 池本敏和, 梅田貴仁, 杉山敬亮, 宮島昌克	4. 巻 76
2. 論文標題 2018年、2019年に発生した地殻内地震の観測記録による木造建物の最大応答変形角の評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1 (構造・地震工学)	6. 最初と最後の頁 I_582 - I_595
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 西川隼人、高谷富也、池本敏和、宮島昌克	4. 巻 66B
2. 論文標題 小型MEMSセンサの単点測定による木造建物の固有振動数の評価について	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 315-322
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 R. Tsunekawa, T. Ikemoto, R. Kageyama, M. Miyajima, T. Hashimoto	4. 巻 17
2. 論文標題 Deformation and Countermeasure Analysis of Castle Stone Wall During the 2016 Kumamoto Earthquake	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The 17th World Conference on Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 M. Shinozaki, R. Kuwahara, R. Ibuki, D. Ishikawa, Y. Ono, H. Sakai, I. Suetomi, Y. Fukushima, T. Hashimoto	4. 巻 19
2. 論文標題 A collapse simulation based on SPH-DEM coupling method for the Kumamoto castle Hyakken masonry stone wall	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The 17th World Conference on Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 T. Hashimoto, T. Ikemoto, H. Nakazawa, H. Ikemoto, M. Miyajima	4. 巻 17
2. 論文標題 Verification of Restoration Method for Stone Wall of Kumamoto Castle by Large Shaking Table Experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The 17th World Conference on Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Miyajima, M., Hendra, S., Yoshida, M., Ono, Y., Kosa, K., Oktaviana, I.S., Martini, and Irdhiani	4. 巻 -
2. 論文標題 Geotechnical damage in the 2018 Sulawesi earthquake	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geoenvironmental Disasters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 西川隼人、高谷富也、池本敏和、宮島昌克	4. 巻 66B
2. 論文標題 小型MEMSセンサの単点測定による木造建物の固有振動数の評価について	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 315-322
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 T.Hashimoto, T. Ikemoto, H. Nakazawa, H. Ikemoto, M. Miyajima	4. 巻 17
2. 論文標題 Verification of Restoration Method for Stone Wall of Kumamoto Castle by Larage Shaking Table Experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The 17th World Conference on Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Miyajima, M., Hendra, S., Yoshida, M., Ono, Y., Kosa, K., Oktaviana, I.S., Martini, and Irdhiani	4. 巻 -
2. 論文標題 Geotechnical damage in the 2018 Sulawesi earthquake	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geoenvironmental Disasters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 NISHIKAWA Hayato, IKEMOTO Toshikazu, MIYAJIMA Masakatsu	4. 巻 75
2. 論文標題 A FUNDAMENTAL STUDY ON IMPACT OF SITE AMPLIFICATION EFFECT AND SOURCE SPECTRA FOR AMPLIFICATION OF SEISMIC INTENSITY	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE))	6. 最初と最後の頁 I_373~I_382
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Serikawa, Y., Miyajima, M., Yoshida, M. and Matsuno, K.	4. 巻 -
2. 論文標題 Inclination of Houses Induced by Liquefaction in the 2018 Hokkaido Iburu-tobu Earthquake	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geoenvironmental Disasters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 NISHIKAWA Hayato, NOGUCHI Tatsuya, MIYAJIMA Masakatsu, KAGAWA Takao	4. 巻 19
2. 論文標題 A Study on an Empirical Formula for Amplification Factor Based on Fundamental Peak Frequency and Amplitude of Microtremor H/V	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Japan Association for Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 7_41~7_55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Miyajima, M., Ikemoto, T., Fallahi, A., Yamaguchi, K. and Yoshida, M.	4. 巻 RDS-FS-0029
2. 論文標題 Seismic Diagnosis of St. Stepanos Monastery in Iran	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of 2019 Rock Dynamics Summit in Okinawa	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 大塚鎮, 酒井久和, 小野裕輔	4. 巻 Vol.75, No.4
2. 論文標題 3次元DEMによる地震時の組積構造に対する適用性の研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1 (構造・地震工学)	6. 最初と最後の頁 I_199-I_206
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejsee.75	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 山崎智大, 池本敏和, 小川福嗣, 高田良宏, 芹川由布子, 宮島昌克	4. 巻 R9392-97
2. 論文標題 徒歩避難時における位置情報共有アプリケーションの効果に関する実験的研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会第42回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 92-97
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 NISHIKAWA Hayato, NOGUCHI Tatsuya, NISHIMURA Isamu, MIYAJIMA Masakatsu, KAGAWA Takao	4. 巻 75
2. 論文標題 A STUDY ON EVALUATION FORMULA FOR MAXIMUM RESPONSE DEFORMATION ANGLE OF WOODEN BUILDING IN THE 2016 CENTRAL TOTTORI EARTHQUAKE	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE))	6. 最初と最後の頁 I_383~I_390
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 橋本隆雄, 斉藤猛	4. 巻 13
2. 論文標題 表面波・弾性波・地中レーダ探査による小峰城石垣の崩壊原因の分析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 国土館大学理工学部紀要	6. 最初と最後の頁 95-108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 橋本隆雄, 内田秀明, 宗川清	4. 巻 13
2. 論文標題 2018年北海道胆振東部地震による北広島市大曲並木地区の宅地被害の安定解析分析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 国土館大学理工学部紀要	6. 最初と最後の頁 77-94
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Takao Hashimoto, Katuya Ishizukuri, Taku Matsuo	4. 巻 RDS-FS-0029
2. 論文標題 Analysis of the stone wall damage of Kumamoto Castle by 2016 Kumamoto earthquake using 3D laser scanner and ground survey	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of 2019 Rock Dynamics Summit in Okinawa	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 恒川怜央, 池本敏和, 宮島昌克, 橋本隆雄	4. 巻 Vol. 12
2. 論文標題 2016年熊本地震における熊本城内の石垣被害および崩壊挙動解析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 歴史都市防災論文集	6. 最初と最後の頁 59-66
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 M. Miyajima, A. Fallahi, T. Ikemoto, M. Samaei, S. Karimzadeh, H. Setiawan, F. Talebi and J. Karashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Site Investigation of the Sarpole-Zahab Earthquake, Mw 7.3 in SW Iran of November 12, 2017	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Disaster Factsheets	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 該当する

1. 著者名 (2)Sadra Karimzadeh, Masakatsu Miyajima and Toshikazu Ikemoto	4. 巻 -
2. 論文標題 opographic characterization of seismic networks using topographic position index and Voronoitiles: A case of the Hokuriku region	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Arabian Journal of Geosciences	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 該当する

1. 著者名 池本敏和, A. H. Fallahi, 山口謙太郎, 宮島昌克, 吉田雅穂	4. 巻 Vol. 12
2. 論文標題 イラン・聖ステファノス修道院における建造物及び表層地盤の動特性評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 歴史都市防災論文集	6. 最初と最後の頁 75-82
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 橋本隆雄, 石作克也, 松尾 拓	4. 巻 第12号
2. 論文標題 熊本城の石垣タイプと被害の相関についての研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 国土館大学理工学部紀要	6. 最初と最後の頁 247-259
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 橋本隆雄, 斉藤 猛	4. 巻 第12号
2. 論文標題 熊本城の微動アレイ探査の解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 国土館大学理工学部紀要	6. 最初と最後の頁 231-246
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 橋本隆雄, 鈴木彩加, 石作克也	4. 巻 第11号
2. 論文標題 赤外線サーモトレーサ及び3Dレーザスキャナを用いた2016年熊本地震による熊本城石垣の被害調査に関する研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 国土館大学理工学部紀要	6. 最初と最後の頁 107-119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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22件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 堀謙 吾, 岩佐 直人, 橋本 隆雄
2. 発表標題 石垣・石積み構造物補強技術の安定性に関する模型実験
3. 学会等名 土木学会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 橋本 隆雄, 磯部 有作, 松尾 拓, 石作 克也
2. 発表標題 熊本城石垣における累積示力線法を用いた耐震性能の検証
3. 学会等名 土木学会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 磯部 有作, 橋本 隆雄, 松尾 拓, 石作 克也
2. 発表標題 動的FEM解析を用いた熊本城石垣の被害要因分析 (その1)
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 橋本 隆雄, 磯部 有作, 松尾 拓, 石作 克也
2. 発表標題 動的FEM解析を用いた熊本城石垣の被害要因分析(その2)
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年~2022年

1. 発表者名 橋本 隆雄, 中澤 博志, 池本 敏和, 宮島 昌克
2. 発表標題 大型振動台実験による石垣補強技術の耐震性評価
3. 学会等名 土木学会第40回地震工学研究発表会
4. 発表年 2020年~2021年

1. 発表者名 橋本 隆雄, 中澤 博志, 池本 敏和, 宮島 昌克
2. 発表標題 非石壘構造石垣における補強技術の耐震性評価に関する大型振動台実験
3. 学会等名 土木学会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年~2021年

1. 発表者名 橋本 隆雄, 中澤 博志, 池本 敏和, 宮島 昌克
2. 発表標題 石壘構造石垣における補強技術の耐震性評価に関する大型振動台実験
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年~2021年

1. 発表者名 Ikemoto, T.
2. 発表標題 Collapse behavior of the castle's stone masonry during the 2016 Kumamoto earthquake
3. 学会等名 ETH Zurich&Japan Joint Symposium on Earthquake Engineering 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 恒川怜央, 影山亮太, 池本敏和, 宮島昌克, 橋本隆雄
2. 発表標題 地震時における城郭石垣の対策工法に関する動的模型実験
3. 学会等名 第39回地震工学研究発表会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 許一鳴, 山口謙太郎, MISHRA Chhabi, 宮島昌克
2. 発表標題 煉瓦造建物から採取したコアの載荷試験による煉瓦組積体の力学特性評価
3. 学会等名 2019年度日本建築学会大会(北陸)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 篠崎将也, 酒井久和, 伊吹竜一, 小野祐輔, 栗原陸人
2. 発表標題 熊本本地震で被災した百間石垣に対するSPH-DEM法による崩壊シミュレーション
3. 学会等名 第39回地震工学研究発表会論文集
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 須田達，池本敏和
2. 発表標題 常時微動計測に基づく郡上八幡城の天守閣および石垣の振動特性
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Hashimoto, H.
2. 発表標題 Analysis of damage to stone walls in Kumamoto Castle by the 2016 Kumamoto earthquake, and results of large shaking table test
3. 学会等名 ETH Zurich&Japan Joint Symposium on Earthquake Engineering 2019
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 2016年熊本地震における熊本城百間石垣の被害状況および2D-DDAを用いた石垣崩壊挙動解析
2. 発表標題 恒川怜央、池本敏和、宮島昌克、橋本隆雄
3. 学会等名 土木学会地震工学研究発表会講演論文集
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Reo Tsuneawa, Toshikazu Ikemoto, Masakatsu Miyajima and Takao Hashimoto
2. 発表標題 Collapse behavior and Analysis of Stone Retaining Masonry's damage in Kumamoto castle during the 2016 Kumamoto earthquake
3. 学会等名 ISAIA(Proceedings of International Symposium on Architectural Interchanges in Asia) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 橋本隆雄, 石作克也, 松尾 拓
2. 発表標題 2016年熊本地震による熊本城石垣タイプ毎の被害原因の分析
3. 学会等名 土木学会第72回年次学術講演会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 橋本隆雄, 近藤和仁, 石作克也
2. 発表標題 熊本城石垣の示力線による安定性照査の適用性について
3. 学会等名 土木学会第72回年次学術講演会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 伊吹竜一, 酒井久和, 小野祐輔
2. 発表標題 個別要素法 (DEM) における簡易な接触力算定手法の提案
3. 学会等名 土木学会第72回年次学術講演会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 堀井 裕佳, 酒井 久和, 佐々木 尚
2. 発表標題 石積み擁壁の耐震性評価のためのFEMのモデル化に関する研究
3. 学会等名 土木学会第38回地震工学研究発表会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 大塚 鎮, 酒井久和, 小野祐輔
2. 発表標題 3次元DEMによる地震時の組積構造に対する適用性の研究
3. 学会等名 土木学会第38回地震工学研究発表会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 恒川怜央, 池本敏和, 宮島昌克, 橋本隆雄
2. 発表標題 2016年熊本地震における熊本城百間石垣の被害状況および2D-DDAを用いた石垣崩壊挙動解析
3. 学会等名 土木学会第38回地震工学研究発表会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Reo Tsunewa, Toshikazu Ikemoto, Masakatsu Miyajima and Takao Hashimoto
2. 発表標題 Collapse behavior and Analysis of Stone Retaining Masonry's damage in Kumamoto castle during the 2016 Kumamoto earthquake
3. 学会等名 ISAIA(Proceedings of International Symposium on Architectural Interchanges in Asia)
4. 発表年 2018年～2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計3件

産業財産権の名称 石垣又は石積み壁の補強工法及び補強構造並びに補強部材	発明者 堀謙吾, 岩佐直人, 橋本隆雄, 岩津雅 也, 前田和徳, 田中	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2020-034620	取得年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 石垣又は石積み壁の補強工法及び補強構造	発明者 堀謙吾, 岩佐直人, 橋本隆雄, 岩津雅 也, 前田和徳, 田中	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2020-034634	取得年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 石積み壁の補強構造及び補強工法並びに管状の補強部材	発明者 堀謙吾, 岩佐直人, 橋本隆雄, 岩津雅 也, 前田和徳, 田中	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2021-025239	取得年 2021年	国内・外国の別 国内

〔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	酒井 久和 (Sakai Hisakazu) (00360371)	法政大学・デザイン工学部・教授 (32675)	
研究分担者	池本 敏和 (Ikemoto Toshikazu) (60311677)	金沢大学・地球社会基盤学系・講師 (13301)	
研究分担者	宮島 昌克 (Miyajima Masakatsu) (70143881)	金沢大学・地球社会基盤学系・教授 (13301)	
研究分担者	若井 明彦 (Wakai Akihiko) (90292622)	群馬大学・大学院理工学府・教授 (12301)	

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