

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04252

研究課題名（和文）礫質な河川堤防の内部浸食発生・進行メカニズムとそれに起因した破壊現象の可能性評価

研究課題名（英文）Study on characteristics and appearance conditions of internal erosion of gravelly river levees

研究代表者

神谷 浩二（Kamiya, Kohji）

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：50252119

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、主に礫質土によって構成された河川堤防を対象にして、洪水時の浸透流に伴う内部浸食現象の発生条件などについて究明したものである。まず、間隙構造のCT画像分析や間隙径分布の測定に基づいて、流体挙動の検討に有用とみられる間隙径指標を新たに提案した。そして、透水時に細粒子が移動し間隙内で堆積して透水性が低下する現象を実験的に認めて、この発生可能性は間隙径指標と粒度の関係によって推定できることなどを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、河川堤防の安全性に資する検討課題であり、特に透水性の高い礫質な河川堤防における内部浸食の可能性について基礎的に究明したものである。河川堤防の粒度条件によって内部浸食の発生する場合を確認し、それによって浸透現象に影響することを示した。即ち、礫質河川堤防において留意すべき現象とみられ、今後の河川堤防管理に寄与することが考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, the characteristics and appearance conditions of internal erosion associated with seepage flow during floods in gravelly river levees were investigated. The representative void size index for permeability in the soil was proposed based on the observation of void by X-ray CT scanner and the measurement of void size distribution. It was recognized that the permeability was reduced with the movement fine particles in the void by the permeability test. Furthermore, it was suggested that the appearance possibility of the internal erosion can be estimated by the relationship between the void size index and the particle size of the soil.

研究分野：地盤工学

キーワード：河川堤防 内部浸食 礫質土 粒度 間隙径分布

1. 研究開始当初の背景

礫質土層を主とした土層構成の河川堤防では、洪水時の飽和浸透流の発生に伴い、堤防内部の小さな土粒子が礫質土層の大きな間隙内を移動する内部浸食の進行が懸念され、それが空洞化等の局所的な破壊、更に堤防の弱体化に繋がる可能性がある。内部浸食には、礫質土層に含まれる小さな土粒子が分離するようにその間隙内を移動する場合、隣接する砂質土層等の土粒子が礫質土層の間隙内へ移動する場合がそれぞれ挙げられる。しかしながら、内部浸食に大きく影響する礫質土層の間隙構造の特性が未だ明らかにできていないためか内部浸食の発生条件や進行形態、そのメカニズムに不明な点が多く、礫質な河川堤防の安全性の検討とその対処が立ち遅れている現状にある。

2. 研究の目的

本研究は、内部浸食に影響する土の間隙構造の特性の観点から、内部浸食の発生・進行形態とそのメカニズムを究明して、内部浸食に伴う土の破壊現象の可能性の簡易的判定手法を見出すものである。なお、本研究では、礫質土層に含まれる小さな土粒子が分離するようにその間隙内を移動する現象について着目した。

3. 研究の方法

(1)土の間隙構造特性

浸透現象に支配的に影響する間隙構造の特性等进行分析したものである。粗粒土を対象に、X線CTスキャンを用いた画像解析によって間隙構造の特徴やその粒度による影響を考察するとともに、圧入法や水分法による間隙径分布との関係进行分析することによって、浸透問題に有用な間隙構造の表現指標を検討した。

①CT画像解析による間隙構造：図1に粒度を示した5種類の土試料(試料A～E)を用いた。所定の間隙率になるように充填して作製した乾燥状態の試料層について、X線CT装置によって測定し、画像処理ソフトを用いて土粒子部分と間隙部分を可視化した。そして、粒度の違いによる間隙部分の構造的な特徴等を観察し、また、間隙空間に内接する球体の直径として定義して求められる間隙径分布の特徴を調べた。

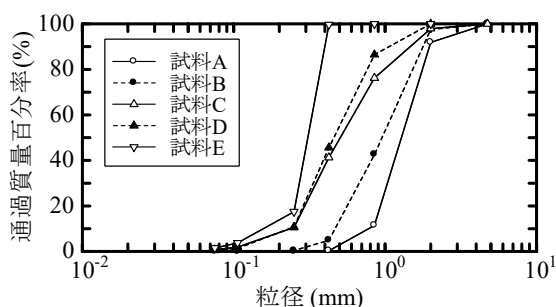


図1 粗粒土の粒度

②間隙径指標：図1の5試料について、空気圧入法と水分法の2つの方法によって間隙径分布を調べた。空気圧入法¹⁾は、飽和試料に空気圧入したときのその圧入圧力と空気透過量の関係を用いて、複雑な間隙構造を毛管の集合体とみなすモデルの仮定に基づき間隙径分布を求める方法である。一方、水分法²⁾は、間隙構造と水分特性曲線を関連付け、毛管モデルの仮定に基づき水分特性曲線から間隙径分布を推定する方法である。そして、X線CTスキャンによる間隙径分布と空気圧入法・水分法による間隙径分布を比較することによって、それぞれの間隙径分布の意味などを分析した。更に、透水などの浸透問題に有用と考えられる間隙径分布の代表径を特定して、それによる間隙径指標を検討した。

(2)礫質土の内部浸食の発生形態

礫質土で構成された河川堤防を想定して、洪水時等の浸透流によって礫質土の小さな土粒子が移動・流失する現象を対象に検討した。そのため、礫質土を対象にした一次元下向き流れの長時間の透水試験を実施して、粒度特性や間隙径指標に基づき土粒子移動の発生条件を調べ、また土粒子移動が透水性に与える影響を分析した。

①透水試験：図2に概要を示した装置を用いて定水位透水試験を実施した。装置は、試料層(内径φ0.1m、高さ0.1mの円柱)を作製するための試料容器(アクリル製)、試料層に水位差を与える給水・排水タンク、透水流量 Q (m³/s)を測定する流量計、試料層に生じる全水頭差 Δh (m)を測定する差圧計によって構成される。また、試料層底面にはナイロンメッシュ(開孔径0.063mm)と多孔板(直径φ3mm程度の孔が多く開いた厚さ8mmのアクリル板)を設置した。試料容器に湿潤試料を所定の乾燥密度に充填した後、試料層底面から排水タンク

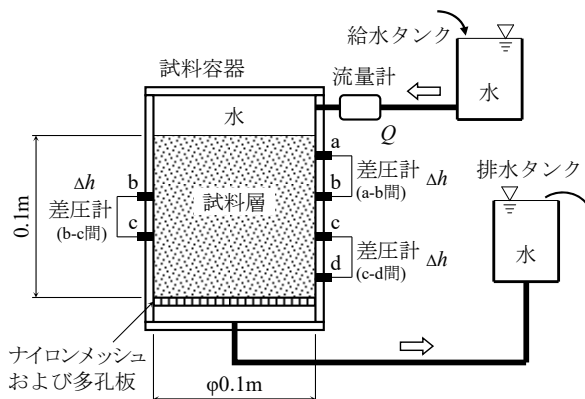


図2 定水位透水試験装置の概要

クによってゆっくりと浸水飽和させる。そして、給水タンクと排水タンクの水位差を一定に保ちながら与えて鉛直下向き流れで透水させた。透水時には、図1の a-b 間(資料上面からの深さ $z = 12.5 \sim 37.5\text{mm}$ 区間), b-c 間($z = 37.5 \sim 62.5\text{mm}$ 区間), c-d 間($z = 62.5 \sim 87.5\text{mm}$ 区間)の全水頭差 Δh (m), 流量 Q のそれぞれの経時変化を測定した。そして、ダルシー則に従って、 Δh と Q の値から透水係数 k (m/s) を求めた。

②試料とケース： 試料には、図3に粒度を示した4種類の礫質土(試料①～④)を用いた。試料層は、締固め度が90%になるように乾燥密度を設定して作製した。

透水試験では、試料層全体の動水勾配が0.4程度になるように一定の水位差を与え、96hr (= 5760min)の間に連続して透水させた。試験用水には水道水を用いた。

(3)内部浸食の発生可能性の簡易的判定

内部浸食としての土粒子の移動は、ある大きさの間隙径よりも小さな粒径の土粒子(特に移動可能な不安定構造にある土粒子)の存在割合が影響すると考えられる。上述の間隙径指標と粒度の関係を分析することによって内部浸食の発生条件を検討した。

4. 研究成果

(1)土の間隙構造特性

図4は、試料Aと試料Cを例に、試料層の断面のCT画像を示したものである。試料Aのように比較的均等な大きさの土粒子の集合体では、粒径の大きさに比例するように間隙部分の大きさも変化し、また、間隙の大きさは一様に分布する様子にある。一方、小さな土粒子群(試料Eなど)による間隙構造に対比して、試料Cのように、その粒子群に比較的大きな土粒子が少数個で点在した場合には間隙部分の大きさやその分布の様子にはほとんど差がみられない。即ち、間隙の大きさやその分布の形成には、土粒子の個数分布が主に影響することが確認される。

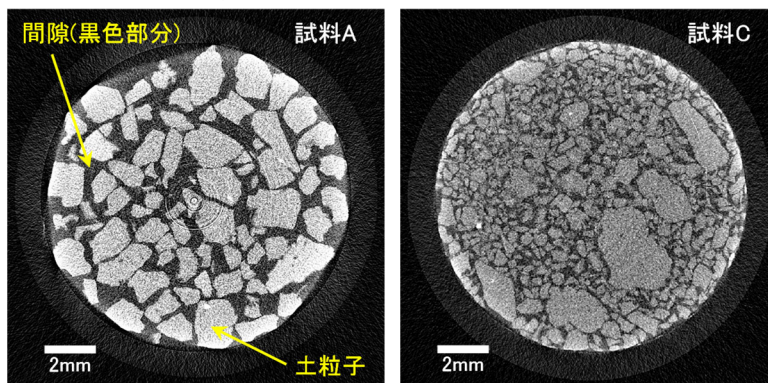


図4 試料層断面のCT画像(試料Aと試料C)

次に、図5は、試料Bと試料Cを例に、CT画像に基づく間隙径分布と空気圧入法と水分法による間隙径分布を比較して示したものである。CT画像と水分法による間隙径分布は類似した形状を示し、また、図1の粒度の粒径を2~3割程度の大きさに平行移動したような形状になり、均等係数の増加に伴い分布範囲は広がる傾向にある。これに対して、空気圧入法によるものは、粒度の均等係数の大きさに関係なく均等な分布を示す特徴にある。これは、空気圧入法では、圧入される空気透過に寄与する間隙部分を表し、その空気透過は小さめの間隙部分の抵抗をより受けるため、大きめの間隙部分の体積が小さめの間隙部分のものに評価に含まれることに起因する²⁾。ところで、空気圧入法と水分法による間隙径分布では、CT画像によるものに比べると、小さめの間隙径の評価が困難であり、2割程度の間隙量の部分が表現されなかった。これは、空気圧入法と水分法は間隙水と間隙空気の界面現象が関わるものであり、間隙水が土粒子の接触点付近でリング状に存在するなど間隙水の相互の連続性が失われる場合には両手法による間隙径の評価が困難であることによると考えられる。そして、空気圧入法による間隙径の最小値を $d_{c,min}$ (mm) とし、これが浸透問題に有用と考えられる間隙径分布の代表径としての間隙径指標とした。しかしながら、空気圧入法では、飽和試料に空気を圧入するものであるため、その圧入に伴う空気流動が生じるときに土粒子移動が生じ易く間隙構造が変化するような試料については間隙径分布の測定が困難であると考えられた。図6は、水分法による小さめの間隙径範囲での分布の曲率が大きいときの間隙径を d_{mp} (mm) として、空気圧入法の $d_{c,min}$ の大きさと比較して示したものである。 d_{mp} は $d_{c,min}$ に近い大きさにある。また、図7は、間隙径 d_{mp} に対して、飽和試料の透水係数 k_w (m/s), 乾燥試料の透気係数 k_a (m/s) をそれぞれ示したものである。 d_{mp} は、 k_w あるいは k_a との相関性が高い。即ち、間隙径分布の代表径の d_{mp} は、流

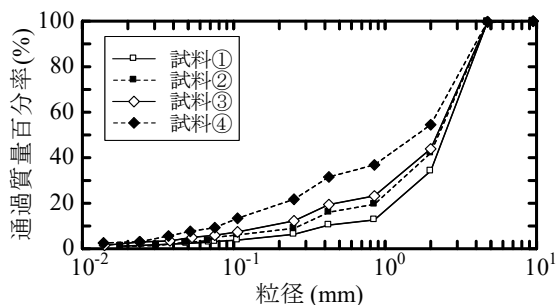


図3 礫質土の粒度

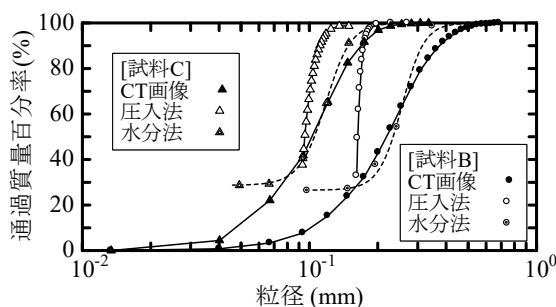


図5 各手法による間隙径分布(試料B, 試料C)

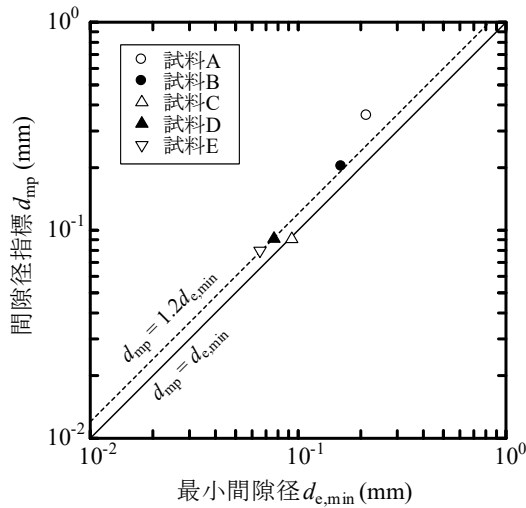


図6 間隙径 $d_{e,min}$ と間隙径 d_{mp}

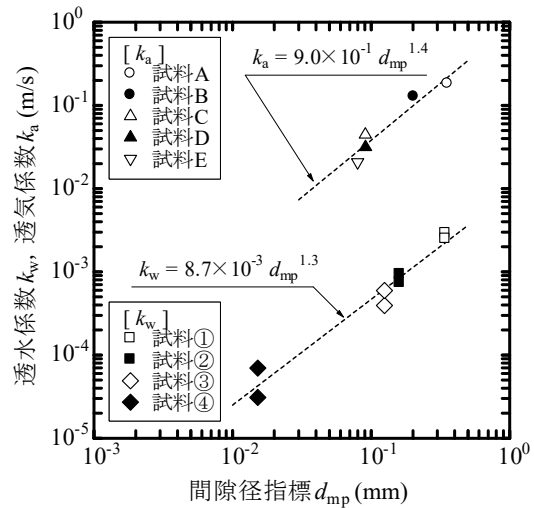


図7 間隙径 d_{mp} と透水係数・透気係数

体透過にかかわる間隙径指標とすることが可能であると考えられる。

(2) 礫質土の内部浸食の発生形態

図8は、全水頭差を測定した a-d の全区間について、全水頭差と流量の値を用いてダルシー則に従って算出した透水係数 k_w (m/s)(水温15°Cの場合に換算)の経時変化を示したものである(各試料で2回の透水試験の内の1回を例示)。試料②と試料④では、透水係数は時間経過に伴い若干増減するがほぼ横ばいの変化にある。これに対して、試料①と試料③では、透水開始後に時間が1440min経過するまでの間に透水係数が徐々に低下して、初期の透水係数の値に対して透水終了時のもの1/20程度の大きさに至っている。即ち、試料①と試料③では、透水の継続によって間隙径が減少するなどの間隙構造の変化が生じたことが想像される。

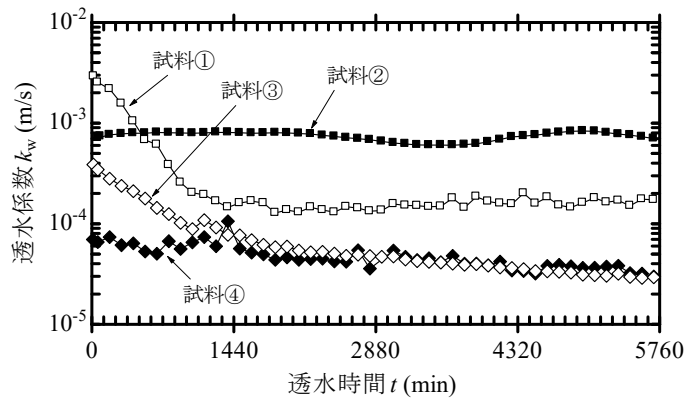


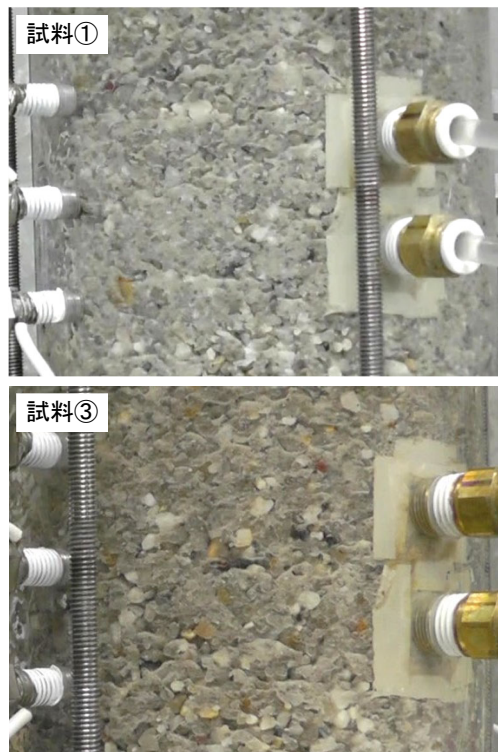
図8 透水係数の経時変化

透水係数の低下量が顕著であった試料①と試料③の場合について、透水試験時の試料層の側面を観察すると、写真1に示すように、透水開始時に比べると透水終了後には比較的小さめの土粒子が間隙内で堆積していて、その様子が筋状に現れた。上述の透水係数の減少は、小さめの土粒子の移動によって間隙が狭くなったりしたことによると考えられる。なお、移動し易い土粒子の粒径等は不明であり、これは今後の課題である。

(3) 内部浸食の発生可能性の簡易的判定手法

土粒子の移動は、ある大きさの間隙径よりも小さな粒径の土粒子(特に移動可能な不安定構造にある土粒子)の存在割合が影響すると考えられる。

図3と図5を参照して間隙径指標 d_{mp} と粒度を比較して、 d_{mp} に相当する粒径の通過質量百分率の値を調べると、試料①では通過質量百分率は8.7%、試料②で7.5%、試料③で8.3%、試料④で2.6%である。これら d_{mp} 相当粒径含有率に対して、試料層の全区間における透水開始時の透水係数 k_{w0} (m/s) と透水終了時の透水係数 k_{wf} (m/s) の比 k_{wf} / k_{w0} の値を示したものが図9である。 d_{mp} 相当粒径含有率が8%より小さい範囲では透水係数の変化は0.5~2倍程度にあるのに対して、8%より大きい範囲では0.03~0.2倍にあり透水係数のオーダーが変わるような大きさであった。即ち、 d_{mp} 相当粒径含有率が8%程度を超えるとときに土粒子移動と透水性低下



(小さめの土粒子が間隙内を移動・堆積して筋が現れた)

写真1 透水終了時の試料層の様子

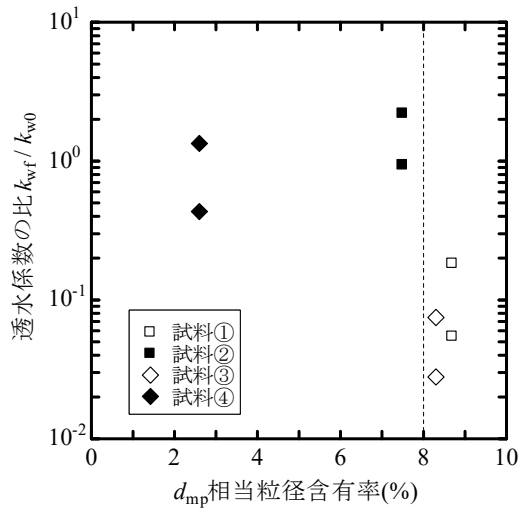


図9 d_{mp} 相当粒径含有率による透水性変化

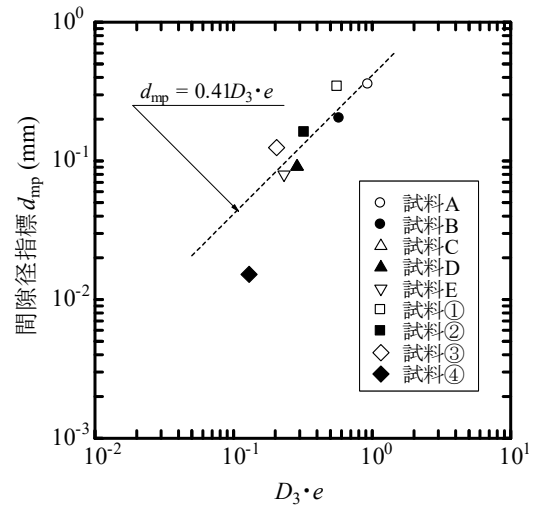


図10 平均粒径 D_3 と間隙径指標 d_{mp}

が著しくなる傾向にある。

ところで、粒度の平均粒径 D_3 (mm) ($= \sum m_i / \sum (m_i / D_i)$ 、ここで、 m_i (g)はある粒径範囲(粒度試験のふるい区分の範囲)の試料の質量、 D_i (mm)はその粒径範囲を代表する粒径である)³⁾と試料層の間隙比 e を乗じたものである $D_3 \cdot e$ の値に対して、間隙径指標 d_{mp} の値を示したものが図10である。図中に示したように d_{mp} は $D_3 \cdot e$ と良好な関係で表されることが認められ、 d_{mp} は粒度を用いて推定することも可能である。

<引用文献>

- 1) 神谷浩二, 宇野尚雄, 松島健之:「空気圧入法」による砂質土の間隙径分布の計測, 土木学会論文集, No.541/III-35, pp.189-198, 1996.
- 2) 宇野尚雄, 神谷浩二, 田中宏路:「空気圧入法」と「水分法」による砂の間隙径分布, 土木学会論文集, No.603/III-44, pp.35-44, 1998.
- 3) 三輪茂雄:粉体工学通論, 日刊工業新聞社, pp.1-30, 1981.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松本知之, 神谷浩二, 日下部裕紀, 小島悠揮
2. 発表標題 河川堤防の3次元浸透流解析による堤体漏水箇所の推定堤防
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 日下部裕紀, 神谷浩二, 小島悠揮
2. 発表標題 礫質な河川堤防を対象にした長時間透水に伴う細粒子移動現象と透水性変化
3. 学会等名 令和4年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 神谷浩二, 日下部裕紀, 小島悠揮
2. 発表標題 粒度と間隙径分布の関係からみた透水時における内部浸食現象の考察
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 入山皓介, 神谷浩二, 西田憲司, 三浦俊彦, 小島悠揮
2. 発表標題 汚染地下水拡散防止のために地盤注入する酸化鉄粒子の浸透特性
3. 学会等名 第59回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 入山皓介, 神谷浩二, 西田憲司, 三浦俊彦, 小島悠揮
2. 発表標題 汚染地下水拡散防止のために地盤注入する酸化鉄粒子の浸透性を判定する間隙指標
3. 学会等名 令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会
4. 発表年 2024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
---------	---------