

令和 4 年 6 月 25 日現在

機関番号：24402
 研究種目：若手研究(A)
 研究期間：2017～2020
 課題番号：17H04935
 研究課題名（和文）宅地の液状化判定のための地盤調査中に土中で生じる音を利用した土質判定技術の実用化

研究課題名（英文）Development of soil classification evaluation technique for liquefaction potential assessment in residential property based on Soil-Metal friction sound generated during ground surveying test.

研究代表者
 山田 卓 (yamada, suguru)
 大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：70451789
 交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,500,000円

研究成果の概要（和文）：経済的な宅地の液状化判定の実現のために、地盤調査中に地中で生じる音を利用した土質判定の実用化を目標として、実地盤における大型動的コーン貫入試験（HDCPT）による摩擦音計測実験結果を基に10%の範囲を与えた細粒分含有率の簡易推定方法を開発した。その結果、約75%の確率で液状化判定対象層を推定可能であること、細粒分含有率の深度分布の概形を推定可能であることを示した。また、摩擦音を利用して推定した細粒分含有率を用いて本研究で地盤調査を実施した地点を対象に液状化判定を行った結果、サンプリングと標準貫入試験結果に基づいた液状化判定（道路橋示方書の方法）に近い液状化安全率（FL値）を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、大型動的コーン貫入試験実施中に地中で生じる摩擦音を利用した細粒分含有率の簡易推定法および液状化判定対象土層の推定方法を構築した。これは、従来サンプリングとサウンディングの両方が必要であった土質判定をサウンディングのみで可能とするものである。また、主に費用の問題で詳細な地盤調査が困難であった戸建て住宅地盤において、本研究の成果を応用することで経済的に液状化判定を実施することができるようになる。

研究成果の概要（英文）：To achieve an economic liquefaction assessment in the residential properties, a simplified method for evaluating the fines content of strata was developed using the friction sound measured during Heavyweight Dynamic Cone Penetration Test (HDCPT) operating. It was achieved, as an outcome of the current work, that the developed method can evaluate the outlines of the depth distribution of fines contents and can estimate the target soil stratum for liquefaction assessment with around 75% of probability. Further, case studies of liquefaction assessments employing fines contents estimated by the developed method were carried out on the investigated grounds then it was concluded that liquefaction safety rates (FL) estimated using friction sound were reasonably agreed with evaluated values from the FL method (Japan Road Association) based on SPT-N value.

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤調査 土質判定 液状化判定 動的コーン貫入試験 サウンディング 細粒分含有率

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地盤の液状化危険度の判定を行うためには、対象地盤を構成する土の分類(粒度)に関する情報が必要である。土の粒度を求めて土を分類することを「土質判定」という。また、土質判定で砂質土と判定された土層に対して、想定した地震動によって液状化が発生するか否かを判定することを「液状化判定(液状化危険度判定)」という。土質分類はボーリングマシンを使って実地盤から土試料を採取して判別するのが一般的である。しかしその費用は高額であり、個人が負担することは難しいため、個人宅地でボーリング調査が行われることは殆どない。また、宅地向けの地盤調査は安価ではあるが、簡易な方法であり、通常は土試料を採取しないため土質分類の判定ができない。このような理由によって、個別の宅地に対する液状化の危険判定ができないのが現状である。2011年東北沖太平洋地震による住宅地の液状化被害を受けて宅地の液状化対策のニーズが高まっている。また、想定大地震から国民の財産である宅地を護るためにも個別の住宅地を対象とした液状化判定技術を開発することは緊急の課題である。そこで、上記の課題を解決するために従来の宅地向けの簡易な地盤調査技術に土質判定機能を付与することを発想し、実地盤から土試料を採取せずに調査中に土中で生じる「音」を利用して土質分類を判定する技術の一連の開発に取り組んできた¹⁾。

2. 研究の目的

宅地向けの地盤調査方法である SRS 試験の調査中に地中で生じる貫入コーンとその周囲にある土との摩擦で生じる音を計測・評価し、住宅地盤の液状化判定に必要な土の粒度特性値を推定する(土質判定)技術を構築し、その技術の実用化を目的として研究を実施した。

3. 研究の方法

本研究では、宅地向け地盤調査の従来技術のうち、大型動的コーン貫入試験(Heavy weight Dynamic Cone Penetration Test, HDCPT)を対象とした。HDCPTでは、調査の過程で地盤の硬さを表す指標である N_d 値を計測する深度毎にロッドの周面摩擦を補正するためにトルク力を計測する。トルク計測時は貫入打撃音がしないので音の計測に最適なタイミングである。したがって、本研究ではマイクを内蔵した貫入コーンを用いて、HDCPTのトルク力計測時にコーンと土の摩擦音を計測することを前提として、HDCPT実機を用いた実地盤における摩擦音計測実験およびHDCPTによる摩擦音計測状態を再現した模型装置実験を実施し、摩擦音の音圧レベル(Sound pressure level, SPL)と地盤の粒度の関係を調べた。本研究で用いたHDCPT装置およびマイク内蔵型HDCPT貫入コーンを図-1, 2にそれぞれ示す。



図-1 HDCPT 装置



図-2 マイク内蔵コーン

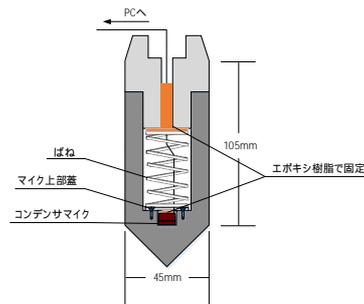


図-3 コーンの構造模式図

4. 研究成果

(1) HDCPT 実機を用いた実地盤の摩擦音計測実験の概要

摩擦音計測実験は表-1に示す国内9地点の沖積層や埋立土層、盛土層、有機質土層等の性状や堆積環境が多様な地盤で実施した。各調査地点の地盤性状の詳細は参考文献^{2)~8)}に記されているので参照されたい。HDCPTにおいて貫入深さ0.2m毎に実施されるトルク計測中にコーンと地盤の摩擦で生じる音をコーンに内蔵したコンデンサマイクで記録した。摩擦音の音圧波形から実効値(RMS値)を求め、その2乗である2乗音圧 p^2 を摩擦音の大きさと定義した。本研究では、貫入深さ0.2m当たりの打撃回数 N_{dm} 値と2乗音圧 p^2

表-1 調査実施地点とデータ数

調査地点	データ数 ¹⁾	
	N_{dm}	p^2
熊本県益城町 ²⁾	237	233
大阪府大阪市北区(梅北) ²⁾	125	117
長野県諏訪市湖南 ³⁾	110	108
長野県諏訪市豊田 ³⁾	105	105
(2回実施)	110	104
兵庫県尼崎市築地 ⁴⁾	55	55
大阪府大阪市港区弁天町 ⁵⁾	90	89
埼玉県越谷市新川町 ⁶⁾	100	88
茨城県稲敷市浮島 ⁷⁾	102	100
大阪府東大阪市瓜生堂 ⁸⁾	93	93
計	1127	1092

をパラメータとして同地点で実施された SPT のペネ試料から得られた細粒分含有率 F_c との相関を分析した。ここで、 N_{dm} 値は地盤の硬さを表すパラメータであり、密度や土被り圧の影響を受ける。そこで、簡易的に土被り圧の影響を考慮するために N_{dm} 値を計測深度 z で正規化した N_{dm}/z を採用した。また、本研究では N_{dm}/z 、 p^2 および F_c の深度 1m 区間の移動平均である $(N_{dm}/z)_A$ 、 p^2_A および F_{cA} を結果の分析に用いた。調査地点毎の N_{dm} 値と p^2 のデータ数およびデータ総数を表-1 に示す。

(2) 細粒分含有率 F_c の簡易推定方法

表-1 に示した 9 地点で実施した HDCPT による摩擦音計測実験から得られた全データ (1092 個) を用いて図-4 に p^2_A と F_{cA} の関係を、図-5 に $(N_{dm}/z)_A$ と F_{cA} の関係を示す。両図より、 F_{cA} が大きいほど p^2_A と $(N_{dm}/z)_A$ が小さい値を示す全般的な傾向が認められることから、本研究では p^2_A と $(N_{dm}/z)_A$ を F_c 推定のためのパラメータに採用した。ここで、 $F_{cA}=0 \sim 100\%$ の範囲を 10 等分し、各 $F_{cA}=10\%$ 範囲にある p^2_A を抽出して昇順 5 ~ 100% まで 5% 毎に対応する p^2_A の値を求め、これを F_c の推定に用いる閾値として設定した。図-4 には昇順 50% (中央値) に対応した各 $F_{cA}=10\%$ 範囲の p^2_A の閾値 s_{pfc} を例示しており、ここでは $F_{cA}=10 \sim 20\%$ の閾値を s_{p20} 、 $F_{cA}=20 \sim 30\%$ では s_{p30} と表記している。また、 $(N_{dm}/z)_A$ についても同様に各 $F_{cA}=10\%$ 範囲においてデータ昇順 5% 毎に閾値 s_{nfc} を設定した。図-5 中には昇順 50% (中央値) に対応した閾値を例示している。

図-6 は任意のデータ昇順で設定した p^2_A と $(N_{dm}/z)_A$ の閾値で区分される p^2_A と $(N_{dm}/z)_A$ の関係を描いたものである。本研究では、同一深度の p^2_A と $(N_{dm}/z)_A$ がプロットされる図-6 中の閾値の範囲に応じて 10% の幅を与えた F_c の推定値を求めた。例えば、 $s_{p30} < p^2_A$ かつ $s_{n30} < (N_{dm}/z)_A$ で、 p^2_A s_{p20} または $(N_{dm}/z)_A$ s_{n20} の場合には図-6 のハッチングされた範囲にプロットされ、 $F_c=20 \sim 30\%$ と推定した。また、 p^2_A s_{p90} または $(N_{dm}/z)_A$ s_{n90} の場合は $F_c=90 \sim 100\%$ と推定した。

液状化判定対象層⁹⁾の推定に最適な p^2_A と $(N_{dm}/z)_A$ の閾値を決定するために、1092 個の p^2_A と $(N_{dm}/z)_A$ の組合せに対して昇順 5% 毎に設定した閾値を用いて F_c の推定範囲を求め、液状化判定

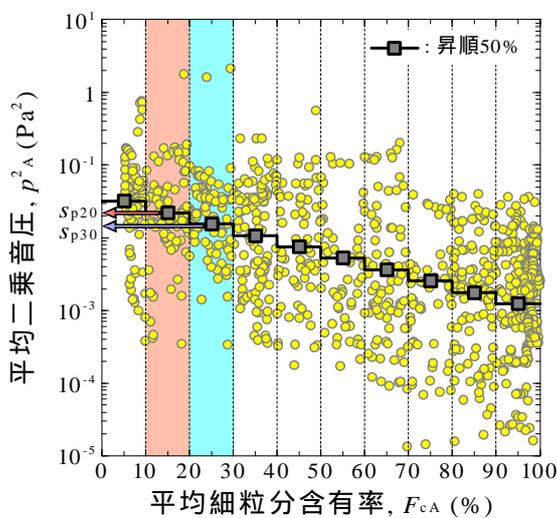


図-4 p^2_A と F_{cA} の関係

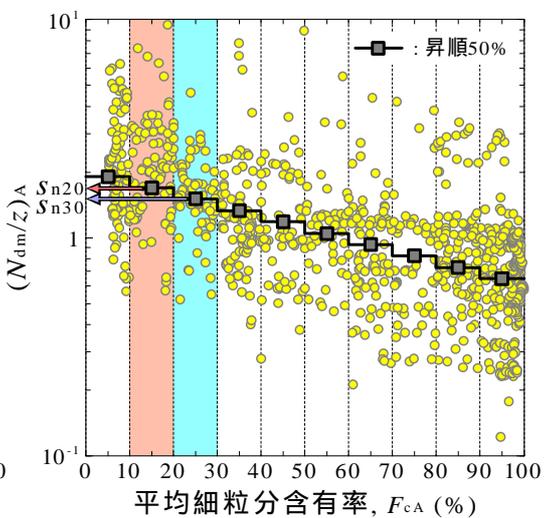


図-5 $(N_{dm}/z)_A$ と F_{cA} の関係

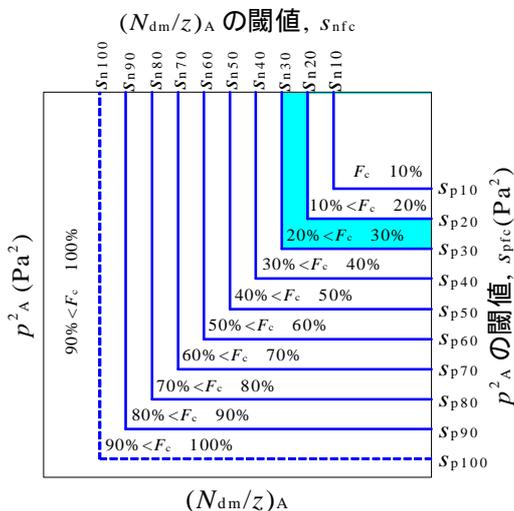


図-6 F_c 範囲の推定方法

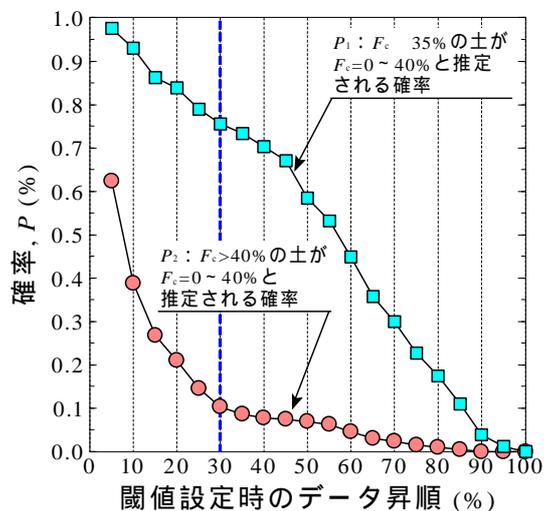


図-7 F_c 推定に用いる閾値の決定

対象層を正しく推定できる確率 P_1 と液状化判定対象外の層を誤って対象層と推定する確率 P_2 を算出した。ここで、 $F_c=10\%$ の範囲を与えて F_c を推定していることから、 P_1 を「実測 F_c 35% の土が $F_c=0 \sim 40\%$ と推定される確率」、 P_2 を「実測 $F_c > 40\%$ の土が $F_c=0 \sim 40\%$ と推定される確率」と定義した。データ昇順 5% 毎の P_1 と P_2 は図-7 に示すとおりであり、小さいデータ昇順に対応した閾値を選択することで高い P_1 が得られる一方で、 P_2 も高くなることがわかる。ここで、 P_2 がデータ昇順 30% 以下で急増することに着目し、本

研究では P_1 75% と P_2 10% となるデータ昇順 30% に対応した p^2_A と $(N_{dm}/z)_A$ の閾値を採用した。

(4) 細粒分含有率 F_c の推定結果

摩擦音計測実験を実施した地点うち、稲敷、尼崎、梅北の3地点について、実測 F_c および推定 F_c 範囲の深度分布を図-8(a),(b),(c)に示す。図より、 F_c の推定範囲が実測値と合致しない箇所が少なくないが、両者の深度方向の変動傾向には一定の整合が認められる。しかし、稲敷の深度 1.5 ~ 3.0m、尼崎の深度 3.5 ~ 5.0m、梅北の深度 6.0 ~ 9.0m における F_c の推定範囲が実測値と大きく異なる等、 F_c の推定精度に改善の必要性が認められる。

摩擦音計測実験を実施した地盤を対象に道路橋示方書⁹⁾による液状化判定(レベル1地震動)を行った。 F_L の算定に際して、 N 値と F_c の組合せを次の3通りに変化させた。標準貫入試験による N 値とペネ試験から求めた F_c (実測 F_c)、標準貫入試験による N 値と推定した F_c の範囲(推定 F_c)、HDCPT による N_d 値と推定した F_c の範囲(推定 F_c)。 F_L の算定結果の例として、稲敷と尼崎の N 値、 N_d 値および F_L の深度分布を図-9 および図-10 に示す。ここで、推定 F_c は $F_c=10\%$ の範囲を有するので、推定 F_c を用いた と では F_L の上下限值が算定される。したがって、図-9(b) および図-10(b) では と による F_L の範囲をエラーバーで示し、その平均値をシンボルで記している。道路橋示方書による標準の方法で求めた の F_L と推定 F_c を用いて求めた および の F_L の深度分布を比較すると、その概形にはある程度の一致が認められることから、摩擦音計測に基づく推定 F_c を用いて一定の精度で地盤の液状化判定が可能であると考えられる。しかし、現状では全体的に両者が一致する割合は低く、推定 F_c を用いた場合に液状化判定対象である層を対象外と誤って推定される層もある。

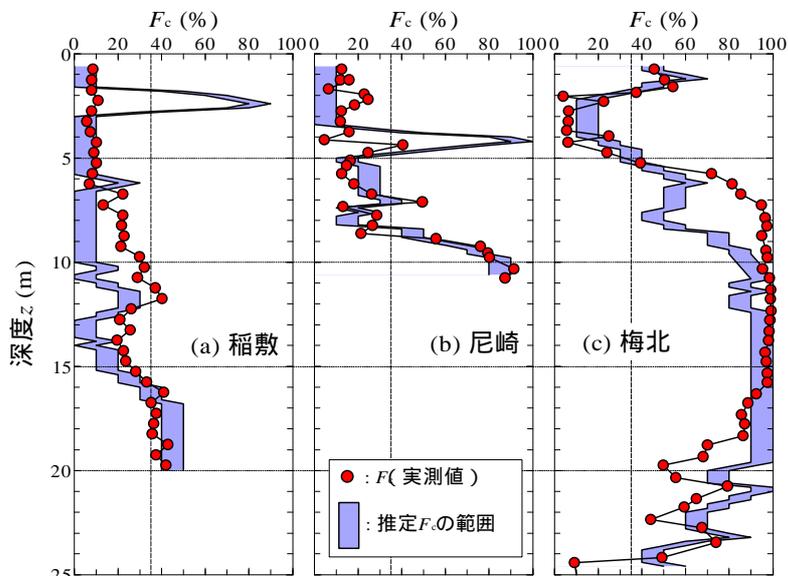


図-8 実測 F_c と推定 F_c 範囲の深度分布

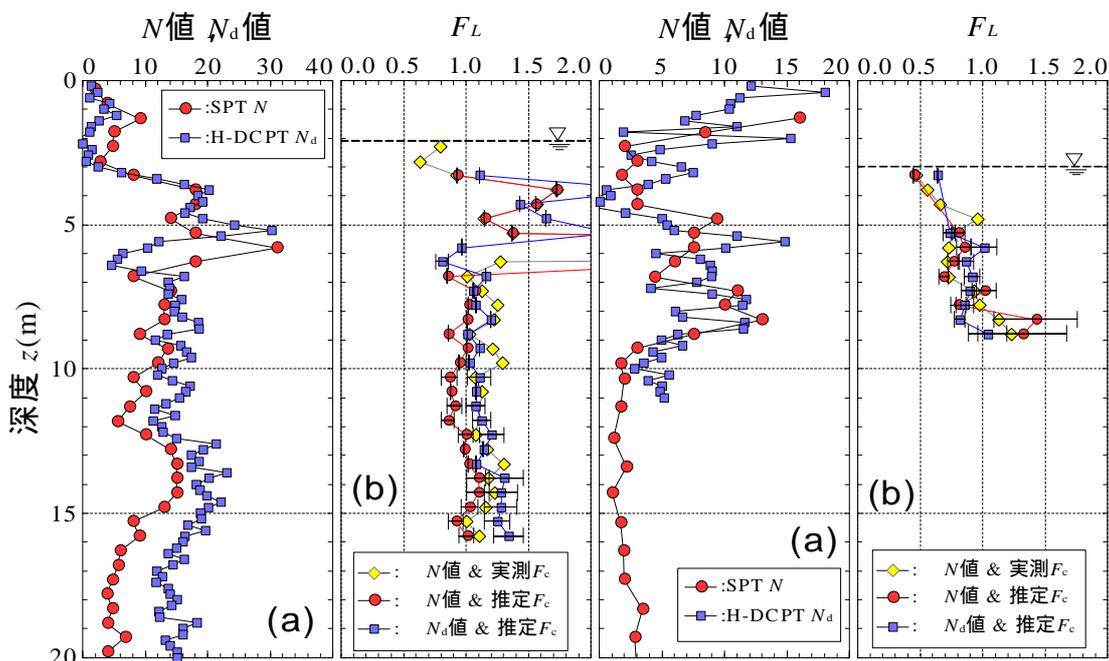


図-9 F_L 判定結果 (稲敷)

図-10 F_L 判定結果 (尼崎)

(5)まとめと今後の課題

実地盤における HDCPT による摩擦音計測実験結果を基に $F_c=10\%$ の範囲を与えた F_c の推定方法を構築し, 調査地盤を対象に液状化判定を実施した。その結果, 約 75% の確率で液状化判定対象層を推定可能であること, F_L 値の深度分布の概略を推定可能であることを示した。ただし, 現状では F_c の推定精度は十分でなく, 摩擦音の波形やスペクトルに関するパラメータを F_c 推定に導入することで, F_c 推定程度が改善されることが期待される。

< 引用文献 >

- 1) Yamada et al.: Evaluation of grain-size properties using Soil-Metal fricative sound for liquefaction assessment by Swedish Ram Sounding, Proc. of 6th IC on Earthquake Geotechnical engineering, Christchurch, No. 572, 2015.
- 2) 山田 他: 大型動的コーン貫入試験による摩擦音を利用した細粒分含有率の評価と液状化判定の試み, Proc. of Kansai Geo-Symposium 2017, pp.290-295, 2017.
- 3) 久保田 他: 諏訪市豊田・湖南での地盤調査(その1:調査概要とボーリング結果), 土木学会年次学術講演会公演概要集(CD-ROM), Vol.73, 2018.
- 4) 久保田 他: 尼崎市築地での地盤調査結果(その1:調査概要とボーリング結果), 第53回地盤工学研究発表会(高松市), pp.229-230, 2018.
- 5) 久保田 他: 大阪市港区弁天町地区での地盤調査結果(その1:調査概要とボーリング結果), 第54回地盤工学研究発表会(大宮市), pp.115-116, 2019.
- 6) 中井 他: 埼玉県越谷市新川町での地盤調査結果(その1:調査概要とボーリング結果), 第54回地盤工学研究発表会(大宮市), pp.109-110, 2019.
- 7) 田中 他: 茨城県稲敷市浮島での地盤調査結果(調査概要とボーリング結果), 第54回地盤工学研究発表会(大宮市), pp.223-224, 2019.
- 8) 段 他: 東大阪市西岩田地区での地盤調査結果(調査概要とボーリング結果), 第55回地盤工学研究発表会(京都), 2020(投稿中)
- 9) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 第7章, pp.161-164, 2017.

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 渡辺大貴
2. 発表標題 大型動的コーン貫入試験による摩擦音計測に基づく液状化判定対象層の簡易推定
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会（京都府京都市）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横山功基
2. 発表標題 大型動的コーン貫入試験のトルク計測を再現した摩擦音計測模型実験
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新大樹
2. 発表標題 大型動的コーン貫入試験による摩擦音計測結果を用いた粗粒土と細粒土の判別
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新大樹，山田卓，大島昭彦，横山功基，平田茂良，市村仁志，柴田芳彦
2. 発表標題 大型動的コーン貫入試験による摩擦音計測結果を用いた粗粒土と細粒土の判別
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会（香川県高松市）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横山功基, 山田卓, 新大樹, 大島昭彦
2. 発表標題 大型動的コーン貫入試験のトルク計測を再現した摩擦音計測模型実験
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会 (香川県高松市)
4. 発表年 2018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