

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：54601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2020

課題番号：16K00114

研究課題名（和文）生体データと作業履歴に着目したプログラム理解過程の分析

研究課題名（英文）An analysis of program comprehension process from biometrics and activity history

研究代表者

上野 秀剛（Uwano, Hidetake）

奈良工業高等専門学校・情報工学科・准教授

研究者番号：70550094

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：ソースコードや設計書などを読みプログラムを理解する過程における視線移動と脳活動を分析した。実験では指定の動作を実現するソースコードの実装戦略を考えるタスクや、ソースコードや設計書を元にプログラムの動作を理解するタスク、バグの有無を判断するタスクを被験者に与え、脳波と視線移動を記録する。

4種類の実験の結果、実装戦略の推定や、プログラム動作の理解、バグ有無の判断ができたときに脳波の周波数成分である波や波の強さが異なることが明らかになった。また、脳波やソースコードに対する視線移動の時系列変化を特徴とした機械学習によってプログラム理解の有無を高精度で予測できる可能性が明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非侵襲で、作業者の訓練を必要とせず、開発者の理解過程を計測できる脳活動計測と視線計測の組み合わせは、プログラミング作業を構成する知的活動をより詳細に理解することで、開発支援手法や支援ツール、教育法の開発に役立てることができる。また、機械学習によってリアルタイムな状態の推定が可能になれば、開発者の作業を妨害しないタイミングで適切な支援を行う手法の開発も可能になると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The author analyzed eye movements and brain activity during program comprehensions, such as source code reading and design document reading. In the experiment, participants were given a task to estimate the implementation strategy that realizes the specified requirement, a task to understand the program's operation based on the source code and the design document, and a task to judge the presence/absence of failures. During each task, the authors recorded brain waves and eye movements. As the result of four experiments shows that the power spectrum of alpha and beta waves differs when a programmer succeeds in estimating implementation strategy, understood a program operation, and determines the program contains the failure or not. Also, the authors found that the success/failure of program comprehension can estimate with high accuracy by machine learning that uses time-series changes of alpha wave and eye movement toward source code as features.

研究分野：ソフトウェア工学

キーワード：プログラム理解 生体計測 脳波 脳活動 視線移動

## 1. 研究開始当初の背景

ソフトウェア開発の現場において、ソースコードや設計書を元にプログラムを理解することは開発行程のみならず、保守や拡張など様々な行程で必須の基本的な作業である。プログラム理解の効率化は開発工程全体の効率化に繋がるため、開発者の行動分析に基づいた教育方法や支援手法の開発が行われている。また、プログラム理解を対象として、開発者の脳活動を計測する研究も近年盛んに行われている[1][2]。脳活動を非侵襲に計測する装置である NIRS や fMRI(いずれも脳血流計測装置)、EEG(脳波計測装置)を用いることで、既存の脳機能研究の結果に基づいたプログラム理解に重要な能力の分析や作業支援手法の開発が可能になると期待される。

## 2. 研究の目的

本研究はこれまでの研究を統合・発展させ、視線移動と脳活動、行動履歴を組み合わせた時系列情報(理解過程データと呼ぶ)から、レビューやデバッグにおけるプログラム理解過程を分析する手法を開発する。理解過程データは開発者がどんな作業をしているときに、何を見て、どのタイミングでどれだけ脳活動が変化したかを統合的に判断するための有用な情報になると考えられる。理解過程データとプログラム理解の達成度や混入された不具合の検出数、検出効率との関係进行分析することで開発者のプログラム理解戦略を顕在化させ、教育や支援に活用する。また、開発する手法を容易に利用できるように、比較的安価な計測装置を用いた際にも信頼性の高い分析が可能な手法を目指す。

## 3. 研究の方法

本研究では以下の 4 つの実験でプログラム理解に関するタスクを被験者に与え、タスク中、およびタスク後の脳波を計測する。

- ・実験 1. 実装戦略の推定
- ・実験 2. 動作理解とバグの有無の判断(脳波)
- ・実験 3. 動作理解とバグの有無の判断(脳波と視線)
- ・実験 4. 動作理解タスクの結果推定(脳波と視線)

### (1) 脳波計測

本研究ではプログラマの状態を把握する方法として脳波を計測する。脳波は他の脳活動計測装置と比べて時間分解能が高い上に、測定が手軽で低コストなため、プログラム作業時の脳活動計測に適している。また、脳波は人間の心理状態と関連があり、ストレスの影響計測やユーザビリティ評価など人の心理状態を測る手法として有用性があると考えられている[3]。同様にプログラマがどのような処理手順でソースコードを書けばよいか(以降、実装戦略)を推定できたかどうかは心理状態に影響を与え、脳波にその特徴が現れると考えられる。

本研究では  $\alpha$  波と  $\beta$  波を用いる。 $\alpha$  波は安静状態にあるときに強く表れる周波数帯域で、リラックスし、何かに没頭しているときに出現する。 $\beta$  波は緊張や不快な感情を抱いているときや日常の思考状態で出現する。 $\alpha$  波と  $\beta$  波はリラックス状態や精神活動状態によって変動するとされており、さまざまな作業における人間の心理状態の計測指標に用いられている[4]。また、 $\alpha$  波と  $\beta$  波の比率( $\alpha/\beta$ )は脳の活動を計測するための指標としてよく用いられている。

### (2) 実験 1

不足部分のあるソースコードを読み、不足部分にどのような処理を書けば良いか(実装戦略)を考えるタスクを被験者に与える。タスク中(60秒)とタスク後(120秒)の脳波を計測し、実装戦略を推定できたタスクと、できなかったタスクにおける脳波の周波数成分の差を分析する。被験者は奈良工業高等専門学校 情報工学科の学生 17 人で、年齢は 16 歳から 20 歳、全員が Java によるプログラミングの基礎講義を受講済みである。

プログラム問題は 5 段階の難易度を用意する。問題に対する解法を考える時間は 1 問につき 60 秒間とする。被験者が口頭で解答した実装戦略の正否は実験者が評価する。解答が誤っている場合であっても、なんらかの実装戦略を回答した場合には実装戦略を推定できたと評価する。

脳波は個人差が大きいいため分析時には各被験者の脳波を正規化する。タスク中、およびタスク後の各周波数成分のパワースペクトルを各被験者の全タスクにおける平均値で正規化する。

### (3) 実験 2

仕様とソースコードを対象にした動作理解ステップとバグ判断ステップからなるタスクを被験者に与える。被験者は奈良工業高等専門学校の学生 5 人で、年齢は 19 歳から 20 歳、全員が Java によるプログラミングの基礎講義を受講済みである。

動作理解ステップでは被験者にプログラムの仕様とソースコードに加え、ソースコードの動作を理解できているか確認するための質問を提示する。回答内容が事前に用意した解答と一致していればソースコードの動作を理解しているとみなす。回答が一致しないか、制限時間を超過した場合、動作を理解していないとみなす。バグ判断ステップでは、被験者にプログラム動作理

解ステップで見たソースコードの一部を改変したソースコードを見せる．被験者には改変後のソースコードが仕様を満たすかどうか判断し口頭で回答してもらう．改変部分を探す作業に時間がかからないよう、改変部分には色付けをして表示する．

タスク中に計測した脳波はプログラム動作理解ステップとバグ判断ステップそれぞれについて、各被験者の各タスクにおける中央値で正規化し、タスク中の各時間帯においてパワースペクトルがどのように変化するか分析する．

#### (4) 実験 3

実験 2 と同様にプログラム理解タスク・デバッグタスクを被験者に与え、視線移動と脳波を同期して計測する．提示するプログラムや仕様は実験 2 と同様とし、被験者は奈良工業高等専門学校 の学生 5 人で、年齢は 19 歳から 20 歳全員が Java によるプログラミングの基礎講義を受講済みである．本実験では Tobii 社の視線計測装置 4C を用いて視線を計測する．4C は 90Hz で視線を計測でき、約 200USD と安価な装置である．計測した視線を元に、被験者が閲覧している文書（ソースコード、仕様、問題文）を識別する．

#### (5) 実験 4

視線と脳波の時系列変化に着目し、値が大きく変化したタイミングを特徴として学習器を作成することで、タスクの成否を予測できるか分析する．視線移動、および脳波は実験 3 で計測したプログラム理解タスクのデータを用いる．分析では各被験者のアルファ波とソースコードに対する注視割合を 5 秒ごとの区間に分割し、前区間からの差分が大きい時間帯を求める．さらに注視割合が大きく変化した上位 5 区間と、アルファ波が大きく変化した上位 5 区間について、全組み合わせ(合計 25 個)の区間番号の差（すなわち時間差）を特徴としてランダムフォレスト（leave-one-out 交差検証法）でモデルを作成し、タスクの成否を予測する．

### 4. 研究成果

#### (1) 実験 1

実装戦略を推定できた問題(Idea)と、想定できなかった問題(NoIdea)の 2 グループの計測結果について、タスク中の  $\alpha$  波、 $\beta$  波、 $\beta/\alpha$  の値を図 1 に示す．すべての指標で外れ値が多いものの、 $\alpha$  波の中央値、平均値ともに Idea のほうが大きい． $\beta$  波についても同様に中央値、平均値の両方で Idea のほうが大きい． $\beta/\alpha$  については、中央値は Idea が高く、平均値は NoIdea が高く、違いが見られた．検定の結果、 $\alpha$  波と  $\beta$  波で有意差が見られたが、 $\beta/\alpha$  波では有意差は見られなかった． $\alpha$  波は日常の思考状態で多く出現する指標であるため、実装戦略を推定できていない状態と推定できた状態いずれの状態においても出現したと考えられる．タスク後の  $\alpha$  波、 $\beta$  波、 $\beta/\alpha$  についてもタスク中と同様に  $\alpha$  波で有意差が見られたが、 $\beta$  波と  $\beta/\alpha$  波では有意差は見られなかった．これらの結果から、実装戦略を推定できたプログラマはタスク中とタスク後の

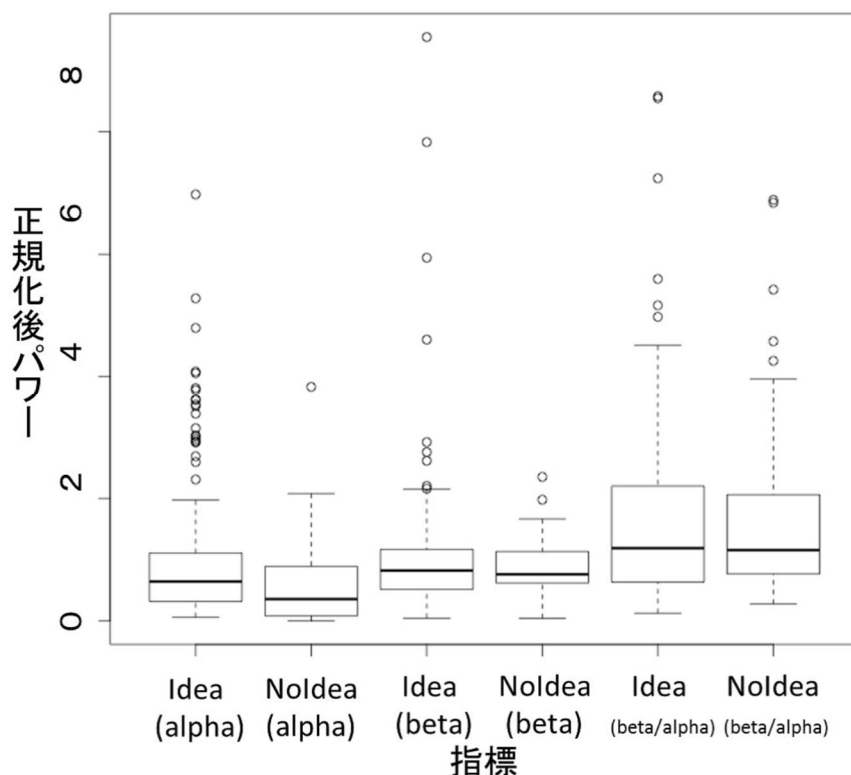


図 1. 実験 1 タスク中の周波数成分

両方において 波が実装戦略を推定できたかどうかの指標として有用であると考えられる。

## (2) 実験 2

図 2, 3 に各ステップにおけるタスク開始時と終了時の脳波を示す。図の左側は 波, 右側は 波を表しており, 縦軸は正規化後のパワースペクトル, 横軸は **start** がタスク開始直後の 5 秒間, **end** がタスク終了直前の 5 秒間を表す。値は各群に分類されたタスクの平均値を表す。

動作理解ステップ(図 2)の開始時と終了時を比べると **success**, **failure** の両方で 波と 波ともに上昇しているが, **success** のほうがより大きく上昇している。開始時と終了時のパワースペクトルについて **Welch** の **t** 検定を行った結果, **success** の 波と 波に有意な差が見られ, **failure** の 波と 波には有意な差は見られなかった。これは, プログラムの動作理解が成功した時には脳活動が活発な状態であるためと考えられる。

バグ判断ステップ(図 3)についても開始時と終了時を比べると **success**, **failure** の両方で 波と 波ともに上昇しているが, **success** の 波がより大きく上昇しているのに対して, 波は **success**, **failure** の両方で大きく上昇している。検定の結果, **success** の 波と 波, **failure** の 波に有意な差が見られ, **failure** の 波には有意な差は見られなかった。この結果は動作理解ステップと同様に脳波を計測することでバグ判断の正否が判別できる可能性を示している。

タスク開始時と終了時の差がタスク開始から何秒で現れるのか調べるためにタスク開始から 5 秒の区間とそれ以降の区間で差の検定を行う。動作理解ステップの **success** は後半になるほど値が大きくなる傾向が見られ, 41 秒以降のすべての区間において 1-5 秒の区間と有意差が見られた。**failure** も同様に後半になるほど値が大きくなる傾向が見られたが, **success** と比較すると値が低かった。**failure** においても 106 秒以降のすべての区間において 1-5 秒の区間と有意差が見られた。この結果はプログラムの動作理解に成功した時には, タスク開始から早い段階で脳活動が活発になることを示しており, 作業途中であっても判別が可能であることを示唆している。

バグ判断ステップにおいても同様に **success** が後半になるほど値が大きくなり 11 秒以降のすべての区間において 1-5 秒の区間と有意差が見られた。**failure** は一度値が大きくなった後に, 開始時点よりも値が低くなっており, 41 秒以降のすべての区間において 1-5 秒の区間と有意差

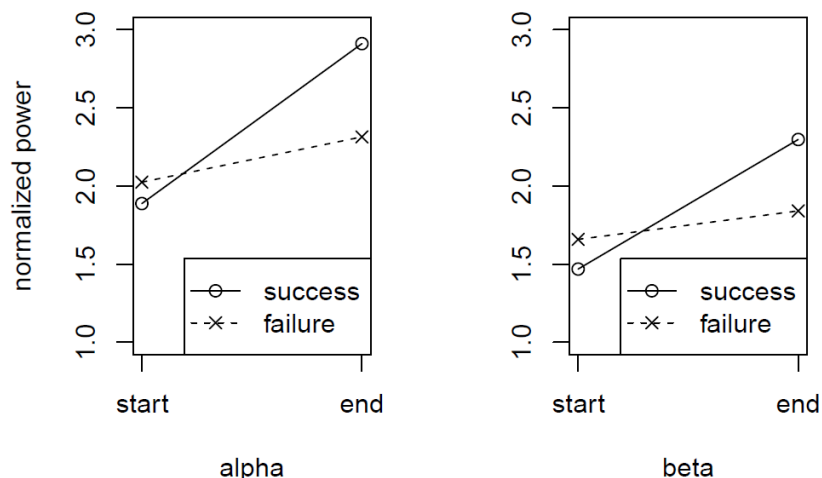


図 2. 実験 2 動作理解ステップの脳波

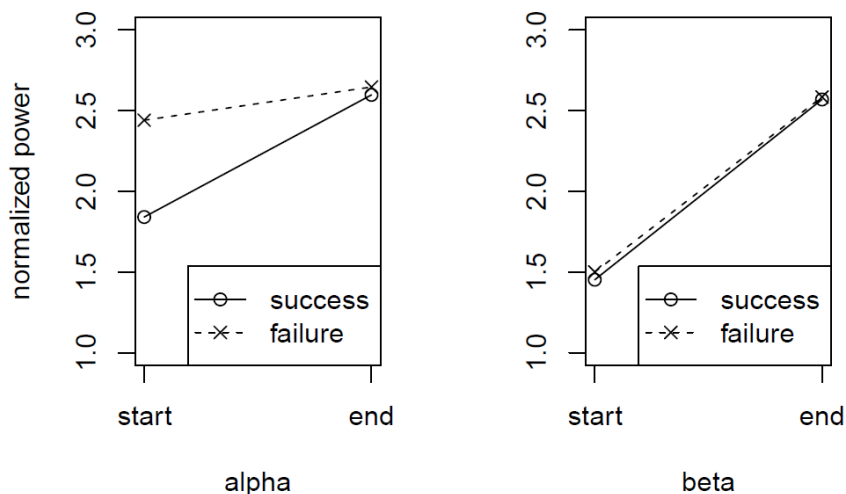


図 3. 実験 2 バグ判断ステップの脳波

が見られた。この結果は動作理解と同様にバグ有無の判断に成功した事をタスク開始から早い段階で判別できる可能性を示している。

### (3) 実験 3

実験の結果、すべての被験者でタスク開始と同時に問題文を注視し、その後、仕様とソースコードを交互に注視する動作が確認された。一方で、タスクの正否で比較すると正しく理解した被験者は仕様に対する注視の割合が早い時間で低下するのに対して正しく理解できなかった被験者は長時間にわたって仕様を注視する傾向が見られた。加えて注視割合と脳波の変化を時系列で並べると、ソースコードに対する注視割合が一定以上に達した時点からアルファ波が上昇を始めていることが確認された。この結果は、脳波のパワースペクトルの変化がプログラム理解のプロセスと連動していることを示しており、変化の開始点を見ることで、プログラム理解の段階を外から推定できる可能性を示している。

### (4) 実験 4

結果として、予測精度が全体(all)で **85.2%**、成功タスク(success)で **88.0%**、失敗タスク(failure)で **82.8%**とランダム試行と比べて明らかに高い精度でタスク成否を推定することができ、視線と脳波を組み合わせることでプログラム理解の様子を自動で判別できる可能性が示唆された。失敗タスクの精度が低い原因として、失敗タスクのうち **58%**が時間切れで終了しており、残りの時間内に回答したが誤っていたタスクと混在したためと考えられる。被験者ごとの精度を見ると予測精度 **100%** (被験者 **D, E**) から **63.6%** (被験者 **C**) と幅がある。この原因としてタスク成功率の違いや失敗タスクのうち、時間切れで終了したタスクの割合などが考えられる。

#### <参考文献>

- [1] S. C. Muller, and T. Fritz, “Stuck and Frustrated or In Flow and Happy: Sensing Developers’ Emotions and Progress,” 37th International Conference on Software Engineering (ICSE2015), 2015.
- [2] J. Siegmund, C. Kastner, S. Apel, C. Parnin, A. Bethmann, T. Leich, G. Saake, and A. Brechmann, “Understanding Understanding Source Code with functional Magnetic Resonance Imaging,” In Proceedings of the 36th International Conference on Software Engineering (ICSE2014), 2014.
- [3] 水野由子, 田中康仁, 林拓世, 岡本永佳, 西村治彦, 稲田紘, “精神作業時における作業効率と関連した脳波・脈波の定量解析”, 生体医工学 Vol. 48, No. 1 pp.11-24, 2010 .
- [4] Oohashi, T., Nishina, E., Honda, M., Yonekura, Y., Fuwamoto, Y., Kawai, N., Maekawa, T., Nakamura, S., Fukuyama, H., Shibasaki, H., “Inaudible High-frequency Sounds Affect Brain Activity: Hypersoniceffect,” Journal of Neurophysiology, Vol.83, No.6, pp.3548-3558, 2000 .

表 1. 実験 4 分類精度

	精度	タスク 時間 (秒)	タスク 成功率(%)	時間切れ タスク(%)
<b>all</b>	<b>0.852</b>	<b>88.8</b>	<b>46.3</b>	<b>0.315</b>
<b>success</b>	<b>0.880</b>	<b>81.1</b>	-	-
<b>failure</b>	<b>0.828</b>	<b>104.8</b>	-	<b>0.586</b>
<b>easy</b>	<b>0.813</b>	<b>66.7</b>	<b>87.5</b>	-
<b>difficult</b>	<b>0.868</b>	<b>105.6</b>	<b>28.9</b>	<b>0.447</b>
被験者 A	<b>0.875</b>	<b>92.8</b>	<b>37.5</b>	<b>0.375</b>
被験者 B	<b>0.727</b>	<b>85.1</b>	<b>27.3</b>	<b>0.273</b>
被験者 C	<b>0.636</b>	<b>94.1</b>	<b>45.5</b>	<b>0.273</b>
被験者 D	<b>1.000</b>	<b>79.1</b>	<b>61.5</b>	<b>0.385</b>
被験者 E	<b>1.000</b>	<b>94.4</b>	<b>54.5</b>	<b>0.273</b>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 上野 秀剛	4. 巻 58
2. 論文標題 プログラミング・エクスペリエンスの新潮流 -言語設計から産業応用まで- : 7. 生体情報を用いたプログラミング活動の測定	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 情報処理	6. 最初と最後の頁 1024 - 1025
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 中川 尊雄, 亀井 靖高, 上野 秀剛, 門田 暁人, 鷓林 尚靖, 松本 健一	4. 巻 33
2. 論文標題 脳活動に基づくプログラム理解の困難さ測定	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 コンピュータソフトウェア	6. 最初と最後の頁 78-89
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11309/jssst.33.2_78	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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Toyomi Ishida, Hidetake Uwano
2. 発表標題 Combining Biometric Data with Focused Document Types Classifies a Success of Program Comprehension
3. 学会等名 28th IEEE/ACM International Conference on Program Comprehension (ICPC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石田 豊実, 上野 秀剛
2. 発表標題 プログラム理解時における脳波特徴の把握を目的とした時系列分析の試み
3. 学会等名 情報処理学会研究報告 ソフトウェア工学研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toyomi Ishida, Hidetake Uwano
2. 発表標題 Time Series Analysis of Programmer ' s EEG for Debug State Classification
3. 学会等名 In Proceedings of the 5th Edition of the Programming Experience Workshop (PX 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toyomi Ishida, Hidetake Uwano
2. 発表標題 Synchronized Analysis of Eye Movement and EEG during Program Comprehension
3. 学会等名 Eye Movements in Programming workshop 2019 (EMIP2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本 愛子, 上野 秀剛
2. 発表標題 プログラムの実装戦略推定時における脳波の時系列分析
3. 学会等名 ソフトウェアエンジニアリングシンポジウム2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石田 豊実, 上野 秀剛
2. 発表標題 生体データと作業履歴に着目したプログラム理解過程の分析
3. 学会等名 第23回電子情報通信学会関西支部学生会予稿集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Aiko Yamamoto, Hidetake Uwano, Yoshiharu Ikutani
2. 発表標題 Programmer's Electroencephalogram who Found Implementation Strategy
3. 学会等名 4th International Conference on Applied Computing & Information Technology (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 山本 愛子, 上野 秀剛
2. 発表標題 実装戦略を推定できたプログラマの脳波
3. 学会等名 情報処理学会研究報告 ソフトウェア工学研究会
4. 発表年 2016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