

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：13801

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2018～2023

課題番号：17KK0004

研究課題名（和文）運動特異性に応じた事前分布の学び分け：時間知覚におけるその一般性と神経基盤の検証

研究課題名（英文）Motor specific learning of multiple prior distributions: Generality in time perception and the neural basis

研究代表者

宮崎 真（Miyazaki, Makoto）

静岡大学・情報学部・教授

研究者番号：30392202

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,000,000円

渡航期間： 1ヶ月

研究成果の概要（和文）：脳は感覚-運動課題の標的の事前分布を学習してベイズ推定を行い、課題精度を向上している。スポーツのような日常の課題では、複数の事前分布の学び分けが必要となる。本研究は、運動特異性（Roach et al. & Heron, 2017）に基づき、心理物理学実験を行った。その主な成果として、運動効果器特異性を発見した。短時/長時（速球/遅球）の2つの事前分布に異なる運動効果器を割り当てると、それらの事前分布の学び分けが可能となった。さらに運動効果器間の解剖学的距離を大きくすると、より早く事前分布が学び分けられた。この心理物理学発見は、事前分布の学び分けの神経基盤についても有力な仮説を提供した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

タイミング/時間知覚におけるベイズ推定は、国際的な重要研究課題の一つとなった。スポーツのような日常の課題でベイズ推定が有効に機能するためには「複数の事前分布の学び分け」が必要である。本研究は、上述の運動効果器特異性をはじめ、「複数の事前分布の学び分け」を可能とする条件を複数明らかにした。これらの成果は、有力な神経基盤の候補を矛盾なく示し、さらにスポーツ技能の向上法の提案やスポーツ選手の技能メカニズムの解析をするための基盤知見となることが期待される。

研究成果の概要（英文）：The brain learns a prior distribution of sensorimotor tasks to generate Bayesian estimation, which improves the task precision. In our daily tasks such as sports, the brain should learn multiple prior distributions. Based on “motor specificity (Roach et al. & Heron, 2017),” we conducted psychophysical experiments. As one of main research outcomes, we found “motor-effector specificity.” When the short and long priors (i.e., fastballs/slowballs) were assigned to different motor effectors, participants concurrently learned the two independent priors. Moreover, the two priors were learned faster when the priors were assigned to anatomically distant body parts. These psychophysical findings also provided an effective hypothesis for the neural basis of learning of multiple prior distributions.

研究分野：身体教育学，スポーツ科学，認知神経科学

キーワード：ベイズ推定 タイミング 事前分布 学習 運動特異性 運動効果器特異性 補足運動 スポーツ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

私たちは変動 (ノイズ) に満ちた環境に身を置きながら、精緻で安定した認識と行動を生成している。それは如何なる脳の仕組みによって実現されているのか? 理論上、課題標的の事前分布 (平均・分散) を学習し、それをベイズ則に従って感覚情報と統合することにより変動の影響が最小化された最適推定が得られる (ベイズ推定, Körding & Wolpert. 2004, *Nature*; 式 1).

$$X_{\text{estimated}} = \frac{\sigma_{\text{prior}}^2}{\sigma_{\text{prior}}^2 + \sigma_{\text{sensed}}^2} X_{\text{sensed}} + \frac{\sigma_{\text{sensed}}^2}{\sigma_{\text{prior}}^2 + \sigma_{\text{sensed}}^2} \mu_{\text{prior}} \quad (1)$$

$X_{\text{estimated}}$ : 標的の最適推定,  $X_{\text{sensed}}$ : 標的の感覚信号の平均,  $\sigma_{\text{sensed}}^2$ : 標的の感覚信号の分散,  $\mu_{\text{prior}}$ : 標的の事前分布の平均,  $\sigma_{\text{prior}}^2$ : 標的の事前分布の分散

代表者は、世界に先駆けて、タイミング課題や時間順序判断においてベイズ推定が行われていることを報告した ([Miyazaki et al. 2005, \*J Neurophysiol\*](#); [Miyazaki et al. 2006 \*Nat Neurosci\*](#)). これらの報告以降、人間の脳の時間処理でベイズ推定が機能していることが多くの研究によって明らかにされてきた (e.g., [Jazayeri & Shadlen. 2010, \*Nat Neurosci\*](#); [Cicchini et al. 2012, \*J Neurosci\*](#)).

従来の研究の多くでは、一定の期間内で単一の事前分布のみを参加者に学習させていた。のちに本研究の共同研究者となる James Heron 博士 (英国・ブラッドフォード大学) らの研究グループは、時間再生課題にあたって、2つの異なる事前分布 (短時/長時) を参加者に呈示した ([Roach et al. & Heron. 2017, \*PNAS\*](#)). その結果、事前分布の違いに依らず、単一の運動応答 (キー押し) のみで応答すると、参加者は、それら2つの分布を統合した単一の分布を学習した (“汎化”). しかし、それらの事前分布のそれぞれに異なる運動応答 (キー押し/発声) を割り当てると、参加者は、それら2つの事前分布を学び分けることができた (“運動特異性”).

### 2. 研究の目的

野球で相手投手が速球/遅球を投げ分けてくるように、日常の課題には多様な事象が生じ、それぞれに特有の統計分布を有している。ベイズ推定が実環境で効果的に機能するためには、「複数の事前分布の学び分け」が必要である。本研究は、Heron 博士らのグループが発見した運動特異性を手がかりに、その効果の心理物理学的一般性の検証と神経基盤の特定を行うことを目的とした。

### 3. 研究の方法

当初の研究計画では、心理物理学の実験に加えて、経頭蓋磁気刺激による実験も実施し、複数の事前分布の学び分けの神経基盤を特定していくことを予定していた。しかし、2020年2月下旬に代表者が英国の Heron 博士のもとに渡航し、本研究を始動した直後に新型コロナウイルスのパンデミックが起こった (同年3月末に緊急帰国)。経頭蓋磁気刺激による実験は、実験者と参加者の一定時間以上の近接/接触が不可避なため、その実施が困難となった。そのため、心理物理学の実験を拡充/拡張して本研究を推進した。

心理物理学の実験で得た参加者の応答を検証するにあたっては、Körding & Wolpert (2004) のベイズ推定モデル (式 1) をタイミング課題に適用し、さらにスカラー変動の影響を含めたモデル (式 2) を用いた。

$$\bar{T}_R = \frac{\sigma_{\text{prior}}^2}{\sigma_{\text{prior}}^2 + w^2 T_S^2} T_S + \frac{w^2 T_S^2}{\sigma_{\text{prior}}^2 + w^2 T_S^2} \mu_{\text{prior}} \quad (2)$$

$\bar{T}_R$ : 応答時間間隔の試行間平均,  $T_S$ : 刺激時間間隔,  $w$ : ウェーバー比,  $\mu_{\text{prior}}$ : 刺激時間間隔の事前分布の平均,  $\sigma_{\text{prior}}^2$ : 刺激時間間隔の事前分布の分散

スカラー変動とは、刺激時間間隔が長くなるほど、その時間長知覚の変動が大きくなる現象のことである ([Gibbon et al. 1984, \*Ann NY Acad Sci\*](#)). この影響をベイズ推定モデルに含めることで、理論的予見を参加者の応答により良く当てはめることができた。

式 2 に従えば、タイミング課題において、2つの事前分布 (短時/長時) の学び分けができなかった場合 (左) とできた場合 (右) の参加者の応答は、図 1 のようになる。この理論的予見に基づき、参加者が2つの事前分布の学び分けをできたかどうかを判定した。

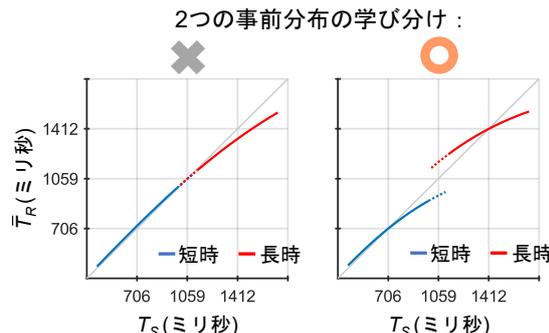


図 1. 参加者の応答の理論的予見.  $\bar{T}_R$ : 応答時間間隔 ( $T_R$ ) の試行間平均,  $T_S$ : 刺激時間間隔.

#### 4. 研究成果

主な成果として、以下の (1)–(3) が得られた。

##### (1) 運動効果器特異性 (身体部位特異性) による複数の事前分布の学び分け<sup>1-4</sup>

一致タイミング課題にあたって、2つの事前分布 (短時/長時) に異なる運動効果器 (右手/左手) を割り当てると、単一タイプの運動応答 (キー押し) のみで課題を行っても、それら2つの事前分布の学び分けが可能となった。一方、事前分布の違いによらず、単一の運動効果器 (利き手) のみで応答した場合は、汎化が生じ、2つの分布を統合した単一の事前分布が学習された [図 2 (a)].

また、2つの事前分布に近接した運動効果器 (人差し指/中指) を割り当てた場合、初期の試行 (1-160 試行) では、汎化が生じ、その後の学習を経てから2つの事前分布が学び分けられた [図 2 (b)]. 一方、2つの事前分布に遠隔の運動効果器 (e.g., 手/足) を割り当てた場合、初期の試行から2つの事前分布が学び分けられた [図 2 (c)].

##### (2) 補足運動による複数の事前分布の学び分けの促進<sup>5,6</sup>

利き手で一致タイミング課題を行っているときに、一方の事前分布に対して選択的に非利き手による補足運動を加えると、参加者は2つの事前分布を学び分けができるようになった。

##### (3) 補足発声による複数の事前分布の学び分けの促進<sup>7-9</sup>

補足運動として発声を用いても、成果 (2) と同様の効果が認められた。すなわち、利き手で一致タイミング課題を行っているときに、一方の事前分布に対して選択的に発声を加えると、参加者は2つの事前分布を学び分けができるようになった。

上記の成果 (1) では、一致タイミング課題を用いた実験により、時間再生課題を用いた Roach et al. & Heron (2017) の実験で発見された汎化の一般性を確認し、さらに運動特異性を拡張した運動効果器特異性を明らかにした。なお、運動効果器特異性の存在は、必ずしも、事前分布が運動応答のための処理過程で表象されていることを意味するものではない。これまでの心理物理学的研究 (Zimmermann & Cicchini, 2020, *Sci Rep*) や心理生理学的研究 (Damsma et al. 2021, *J Neurosci*) により、事前分布の影響は知覚の段階で生じていることが示されている。運動応答が知覚に影響することが多く報告されており、成果 (1) は、むしろ、運動応答が時間知覚の事前分布の学習過程にも影響することを示唆しているものと考えられる。

また、成果 (1) と (2) により、事前分布の学び分けの神経基盤についての有力な示唆も得られた。Roach et al. & Heron (2017) は、補足運動野 (SMA) がタイミング調整 (Merchant et al. 2013, *J Neurosci*) と動作選択 (Fujii et al. 2002, *J Neurophysiol*) の双方に関与していることから、運動特異性の神経基盤の候補として提案していた。その SMA は、体部位再現性も有する (Zeharia et al. 2012, *PNAS*) ことに着目し、運動効果器特異性の存在を予見し、これを検証するための実験を行った結果、成果 (1) が得られた。さらに、SMA には、対側の手足の運動に対応して活動するニューロンだけでなく、両手運動/片手運動 (i.e., 補足運動の有/無) に対して選択的に活動するニューロンが存在する (Tanji et al. 1987, *Nature*)。この知見に基づいて実験を行った結果、成果 (2) が得られた。すなわち、成果 (1) と (2) により、複数の事前分布の学び分けの神経基盤を SMA とする仮説が支持された。

以上の成果は、ベイズ推定理論をスポーツ等の日常行動に応用していくための基盤知見となることも期待される。Roach et al. & Heron (2017) の運動特異性の発見により、2つの事前分布に手の応答と発声を割り当てることで、それらの事前分布の学び分けが可能となることが明らか

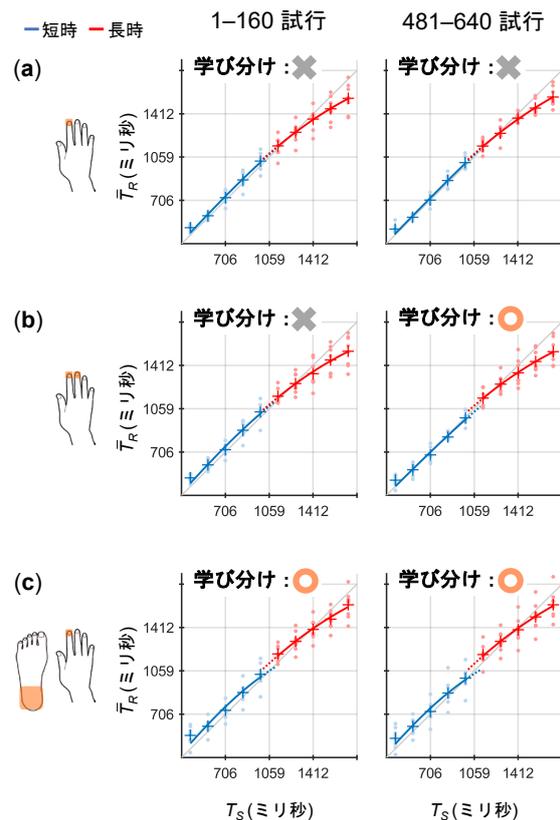


図 2. 運動効果器特異性 (Matsumura et al. 2024, *npj Sci Learn*<sup>1</sup> から改変). (a) 事前分布の違いに依らず、利き手の人差し指のみで応答した場合 (論文中実験 1). (b) 事前分布の違いに応じて利き手の人差し指/中指で応答した場合 (実験 2), (c) 事前分布の違いに応じて右/左の人差し指と左/右の足で応答した場合 (実験 4). そのほか、右/左の人差し指 (実験 3) や利き手の人差し指と同側の足 (実験 5) で応答した場合も、参加者は、1-160 試行から2つの事前分布を学び分けた。

となったが、発声では、飛んでくるボールや対戦相手の身体を直接捕らえることはできない。さらに野球のバッティングで球速や球種に合わせてバットを振る手を切り替えることが難しいように、日常行動の多くでは、同一の運動効果器を用いながら複数の事前分布を学び分けられることが望ましい。成果 (2), (3) により、それを可能とする条件 (補足運動/補足発声) が明らかとなった。これらの知見は、スポーツ技能の向上法の提案やスポーツ選手の技能メカニズムの解析に利用できる可能性がある。

上記の主要成果に加えて、次のような成果も得られた。腕交差法を利用した実験の結果、運動効果器特異性によって獲得した事前分布は、身体外部座標ではなく、身体内部座標に基づき表象されていることが示唆された<sup>10</sup>。また、時間再生課題では、単一の運動効果器のみで応答すると、ごく初期の試行 (1-80 試行) では、式 2 で表されるようなスカラー変動の影響を含めた応答が認められず、式 1 で表されるような線形の応答が認められた<sup>11</sup>。つまり、成果 (1) では時間再生課題と一致タイミング課題との共通性 (一般性) が示されたが、これらの課題間の差異を示す結果も得られた。この結果は、ベイズ推定へのスカラー変動の影響の形成過程を検討していく手がかりとなることが期待される。

#### <引用成果>

1. Matsumura Y, Roach NW, Heron J, & Miyazaki M. Body part specificity for learning of multiple prior distributions in human coincidence timing. *npj Science of Learning* 9: 34 (pp.1-11), 2024.
2. Matsumura Y, Sato R, Heron J, Roach NW & Miyazaki M. Testing motor-effector specificity for acquisition of multiple prior distributions in human coincidence timing. The 12th FENS Forum of Neuroscience, Glasgow, UK (Online), July 11-15, 2020.
3. 松村圭貴, 佐藤良, James Heron, Neil W Roach, 宮崎真. 一致タイミング課題における身体部位特異性による複数の事前分布の獲得. 第 44 回日本神経科学大会, 神戸, 2021 年 7 月 28-31 日.
4. 松村圭貴, 佐藤良, James Heron, Neil W Roach, 宮崎真. 速球と遅球を効果的に打ち分ける — 一致タイミング課題における複数の事前分布の学び分け —. 日本スポーツ心理学会第 48 回大会, 東京 (オンライン), 2021 年 11 月 20-28 日.
5. 夏目柊, James Heron, Neil W Roach, 宮崎真. 一致タイミング課題における複数の事前分布の学習 — 随伴運動を利用した速やかな事前分布の学び分け —. 日本スポーツ心理学会第 49 回大会, 新潟, 2022 年 9 月 30 日-10 月 2 日.
6. Natsume S, Heron J, Roach NW & Miyazaki M. A supplementary motor response enables acquisition of multiple prior distributions in human coincidence timing. Neuroscience 2022 (The 51st annual meeting of Society for Neuroscience), San Diego, USA, November 12-16, 2022. (Selected as a presentation in the nano-symposium)
7. Okumura Y, Natsume S, Miwa H, Heron J, Roach NW & Miyazaki M. Selective assignment of supplementary vocalization facilitates the acquisition of multiple prior distributions in human coincidence timing. Neuroscience 2023 (The 52nd annual meeting of Society for Neuroscience), Washington DC, USA, November 11-15, 2023.
8. 奥村侑也, 三輪春菜, Neil W Roach, James Heron, 宮崎真. 選択的直前発声は一致タイミング課題における複数の事前分布の獲得を促進する. 第 47 回日本神経科学大会, 福岡, 2024 年 7 月 24-27 日.
9. Okumura Y, Miwa H, Roach NW & Miyazaki M. Supplementary vocalizations prime the acquisition of multiple prior distributions in human coincidence timing. Neuroscience 2024 (The 53rd annual meeting of Society for Neuroscience), Chicago, USA, October 5-9, 2024.
10. Matsumura Y, Shimada N, Sato R, Heron J, Roach NW & Miyazaki M. Testing the crossed-hands effect on motor-effector specificity for learning of multiple prior distributions in human coincidence timing. Neuroscience 2021 (The 50th annual meeting of Society for Neuroscience), Chicago, USA

(online), November 8–11, 2021.

11. 夏目柊, 佐藤良, 松村圭貴, James Heron, Neil W Roach, 宮崎真. 一致タイミング課題において複数の事前分布の汎化を妨げる要因の検証. 第45回日本神経科学大会, 宜野湾, 2022年6月30日–7月3日.

#### <研究成果<sup>1</sup>の報道>

- 1) 読売新聞 2024年5月8日朝刊 21面『タイミングのコツ 解明 静大・宮崎教授 脳の仕組み 研究発表』
- 2) マイナビニュース 2024年5月8日配信『静岡大、ヒトの脳が行っている「ベイズ推定」のより有効な活用方法を発表』 <https://news.mynavi.jp/techplus/article/20240508-2941818/>
- 3) 科学新聞 2024年5月24日4面『「タイミングを学習する脳 静岡大が解明 ボールの速い遅いで身体部位使い分け 野球上達に応用可能? 指と足利用で早く習熟』
- 4) Science Japan 2024年6月19日配信『The brain learns timing, uses different body parts depending on how fast or slow a ball is: Findings from Shizuoka University』 <https://sj.jst.go.jp/news/202406/n0619-01k.html>

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Matsumura Y, Roach NW, Heron J, & Miyazaki M	4. 巻 9
2. 論文標題 Body part specificity for learning of multiple prior distributions in human coincidence timing	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 npj Science of Learning	6. 最初と最後の頁 34 (1-11)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41539-024-00241-x	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

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Matsumura Y, Sato R, Heron J, Roach NW & Miyazaki M
2. 発表標題 Testing motor-effector specificity for acquisition of multiple prior distributions in human coincidence timing
3. 学会等名 The 12th FENS Forum of Neuroscience（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松村圭貴, 佐藤良, James Heron, Neil W Roach, 宮崎真
2. 発表標題 一致タイミング課題における身体部位特異性による複数の事前分布の獲得
3. 学会等名 第44回日本神経科学大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松村圭貴, 佐藤良, James Heron, Neil W Roach, 宮崎真
2. 発表標題 速球と遅球を効果的に打ち分ける 一致タイミング課題における複数の事前分布の学び分け
3. 学会等名 日本スポーツ心理学会第48回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Matsumura Y, Shimada N, Sato R, Heron J, Roach NW & Miyazaki M
2. 発表標題 Testing the crossed-hands effect on motor-effector specificity for learning of multiple prior distributions in human coincidence timing
3. 学会等名 Neuroscience 2021 (The 50th annual meeting of Society for Neuroscience) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 夏目柁, 佐藤良, 松村圭貴, James Heron, Neil W Roach, 宮崎真
2. 発表標題 一致タイミング課題において複数の事前分布の汎化を妨げる要因の検証
3. 学会等名 第45回日本神経科学大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 夏目柁, James Heron, Neil W Roach, 宮崎真
2. 発表標題 一致タイミング課題における複数の事前分布の学習 随伴運動を利用した速やかな事前分布の学び分け
3. 学会等名 日本スポーツ心理学会第49回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Natsume S, Heron J, Roach NW & Miyazaki M
2. 発表標題 A supplementary motor response enables acquisition of multiple prior distributions in human coincidence timing
3. 学会等名 Neuroscience 2022 (The 51st annual meeting of Society for Neuroscience) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Okumura Y, Natsume S, Miwa H, Heron J, Roach NW & Miyazaki M
2. 発表標題 Selective assignment of supplementary vocalization facilitates the acquisition of multiple prior distributions in human coincidence timing
3. 学会等名 Neuroscience 2023 (The 52nd annual meeting of Society for Neuroscience) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 奥村侑也, 三輪春菜, Neil W Roach, James Heron, 宮崎真
2. 発表標題 選択的直前発声は一致タイミング課題における複数の事前分布の獲得を促進する
3. 学会等名 第47回日本神経科学大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Okumura Y, Miwa H, Roach NW & Miyazaki M
2. 発表標題 Supplementary vocalizations prime the acquisition of multiple prior distributions in human coincidence timing
3. 学会等名 Neuroscience 2024 (The 53rd annual meeting of Society for Neuroscience) (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

2020年2月下旬に代表者が英国のJames Heron 博士のもとに渡航し、本国際共同研究を始動した直後に新型コロナウイルスのパンデミックが起こった。そのため、同年3月末に緊急帰国した。その後、毎年度、予め授業代行のための非常勤講師を手配する等の事前準備を行い、再渡英に備えたが、新型コロナウイルスの影響により再渡英ができなかった。令和5年度は、新型コロナウイルスが十分に収束したが、先方の事情により渡英ができなくなった。これ以上の本研究の期間延期ができず、結局、再渡英はできなかった。しかし、緊急帰国以降、オンラインでの打ち合わせを重ねて、実験、分析、学会発表、論文投稿を推進し、本報告書に記した国際共同研究成果を得た。今後は、基礎研究の推進を通じて国際共同研究を継続し、未刊行の成果を論文として刊行していく。

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
ヘロン ジェームス  (Heron James)	ブラッドフォード大学・検眼・視覚科学部・准教授	

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
ローチ ニール  (W. Roach Neil)	ノッティンガム大学・心理学部・教授	

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		
	英国	University of Bradford	University of Nottingham