

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：32639

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K16477

研究課題名（和文）社会秩序形成の神経基盤：垂直罰による協力行動の促進

研究課題名（英文）The neural basis of social order formation: Promoting co-operative behaviour through vertical punishment

研究代表者

飯島 和樹 (IIJIMA, Kazuki)

玉川大学・脳科学研究所・研究員

研究者番号：60743680

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）：当初は、fMRI計測と集団実験による垂直罰仮説の検証を予定していたが、新型コロナウイルス感染症の影響により対面実験が不可能となり、代替研究を進めることとなった。そこで、自由な意思決定の神経基盤に関する研究を実施し、新奇なオプションを生成する創造性課題を開発、行動実験とfMRI実験を行った。オプション生成の独自性の指標の妥当性を確認し、オプション生成の流暢性が発達とともに増大することを明らかにした。また、BCI技術の倫理的懸念について、英語圏と日本語圏で調査を行い、人格性と結果に関連する懸念が共通し、日本語話者のみ内集団の道徳基盤が結果関連懸念に関与することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人間のウェルビーイングを構成する重要な機能である自由の神経基盤については、これまで十分な調査がなされてきていなかった。自由な意思決定を計測するための新規の課題開発により、その神経基盤に迫ることが可能となった。また、新規の神経科学技術に関する倫理的懸念について、専門家による検討のみならず、一般の人々に対して大規模な経験的調査を行うことが重要であることを示した。これらの成果は当初の研究目標であった神経法学についても大きな示唆を与えるものである。

研究成果の概要（英文）：The original plan was to test the vertical punishment hypothesis using a combination of fMRI measurements and group experiments, but as face-to-face experiments were no longer possible due to COVID-19, alternative research was pursued. First, we conducted research on the neural basis underlying free decision-making, developed a new creativity task to generate novel options, and conducted behavioural and fMRI experiments. The results confirmed the validity of the uniqueness measure of option generation and showed that fluency in option generation improves with development. Ethical concerns about BCI technology were also investigated in English-speaking and Japanese-speaking populations. The results showed that concerns about personhood and consequences were common, and that the moral foundation of ingroup was implicated in consequence-related concerns only in Japanese speakers.

研究分野：認知神経科学

キーワード：自由意志 創造性 BCI ECoG fMRI 随伴発射 生命倫理 ELSI

1. 研究開始当初の背景

懲罰は社会秩序を支える重要な基盤である。近年、直接利害のない第三者から利己的な行為者に対して与えられる「第三者罰」が協力行動の維持に重要であることが示されている。本研究では、第三者罰の中でも、集団メンバーから与えられる「水平罰」ではなく、権威者から下される「垂直罰」こそが、集団内の懲罰量の一貫性の源を与え、協力行動を促進し、さらには安定した社会秩序の基盤となるとする応募者自らの仮説（「垂直罰仮説」）を検証し、社会秩序形成の起源とその神経基盤を解明する。本研究は、近代社会についての根源的な理解をもたらすとともに、制度設計や紛争への介入法にまで至る広範な波及効果を持つと期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、第三者罰の中でも、集団メンバーから与えられる「水平罰」ではなく、集団メンバーよりも上位の権威者から下される「垂直罰」こそが、集団内の量刑判断の一貫性の源を与え、より協力行動を促進し、さらには安定した社会秩序の基盤となるとする応募者自らの仮説（「垂直罰仮説」）を検証し、社会秩序形成の起源とその神経基盤を機能的磁気共鳴画像法 (functional magnetic resonance imaging: fMRI) と経頭蓋直流刺激 (transcranial direct current stimulation: tDCS) を用いて脳内の因果メカニズムのレベルまで解明することを目的とする。

3. 研究の方法

fMRI 被験者は、他者と何度もインタラクトしながら、金銭をめぐる信頼ゲームと非協力行為に対する懲罰課題とを交互に繰り返す。水平罰のみが与えられる条件（水平条件）と、水平罰または垂直罰が下される条件（垂直条件）との間で、メンバー間の量刑判断の収束の速度と、協力行動の頻度の変化を比較する。「垂直罰仮説」が正しければ、垂直条件ではより早く量刑判断の収束が見られ、協力行動も促進されると考えられる。また、こうした垂直罰の効果は、権威者による垂直罰を表象する前頭前野背外側部が、水平罰の神経基盤へと影響を与えることで生じるとする仮説を検証する。

4. 研究成果

当初の研究計画では、機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) 計測と集団実験を組み合わせ、垂直罰仮説の検証と、量刑判断の収束と協力行動の促進に関わる脳領域の同定を行う予定であったが、数年にわたる新型コロナウイルス感染の影響により、対面での集団実験が実施不可能となった。そのため、研究計画前半では、オンラインで実施可能な、神経倫理学に関する代替的研究に取り組んだ。また研究計画後半には、他者に対する懲罰の前提となる、自由意志に基づく意思決定について取り上げ、その神経基盤に関する fMRI 研究を実施した。さらに、自由な行為の神経基盤をより詳細に調べるため、自発的な発声を行なっている際のマーモセットの神経活動を皮質脳波 (ECoG) によって計測する研究も推進した。

(1) Brain-computer interface (BCI) に関する懸念についての実験生命倫理学的研究

Brain-computer interface (BCI) は、脳と外部機器との直接的なコミュニケーションを容易にし、ヘルスケア、支援技術、教育などの分野に革命をもたらしている。しかし、その急速な進化は、**倫理的、法的、社会的な問題 (ELSI)** をもたらしている (Burwell, Sample, and Racine 2017; Pham et al. 2018)。本研究では、英語圏と日本語圏の一般人の BCI 使用に対する懸念を、道徳理論に示唆される戒律に対する選好尺度 (PPIMT; Dubljević, Sattler, and Racine 2018; Dubljević, Cacace, and Desmarais 2022) と道徳的基盤に関する質問票 (MFQ; Graham et al. 2011) を用いて、文化的差異と個人の道徳的特性を明らかにしながら検討した。

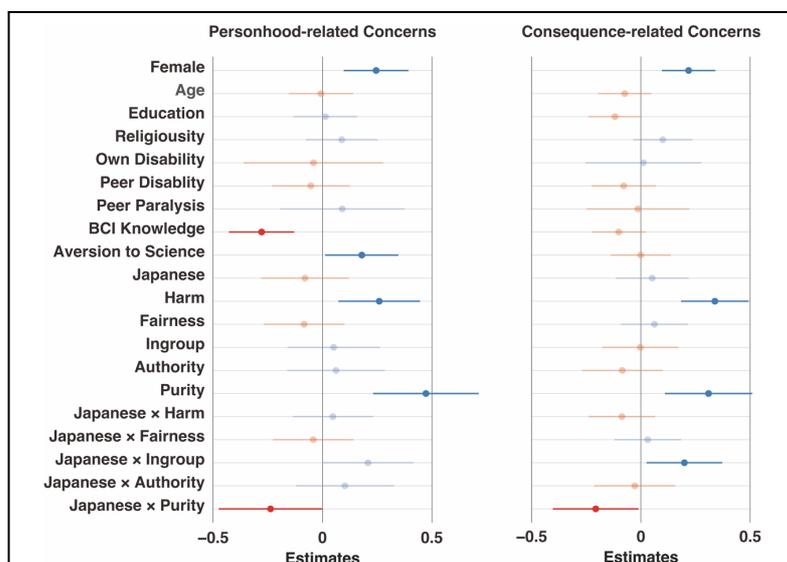


図 1. MFQ と「人格性関連」および「結果関連」の懸念との関連についての標準化回帰係数 (β) と信頼区間。ゼロより右の係数は正の関連を示し、左の係数は負の関連を示す。

分析の結果、両グループに共通する懸念は、**人格性と結果**に関連する懸念の2つに大別された。モデル比較の結果、MFQはPPIMTよりもこれらの懸念をよく説明することがわかった。MFQの**危害／ケア**と**純潔／神聖**は、両方のタイプの懸念と関連していた（**図1**）。興味深いことに、日本語話者においてのみ、**内集団／忠誠**の道徳的基盤も結果に関連する懸念と関連していた。

これらの結果は、BCIへの懸念に対処する際、道徳観の文化的・個人的差異を考慮する必要性を強調するものである。このような懸念を引き起こす心理的メカニズムを理解することは、公平なBCI受容のために極めて重要である。本研究は、BCI使用に関する懸念に影響を及ぼす要因に光を当て、BCIのELSIという複雑な状況を乗り切るための洞察を提供するものである。以上の成果は、論文としてまとめ、現在投稿中である（Iijima et al., Submitted）。

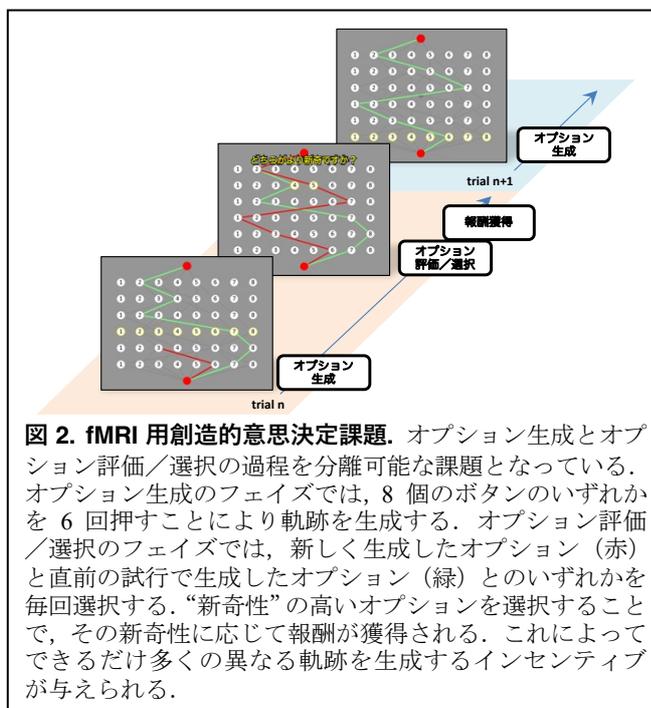
また、並行して懲罰の前提となる自由な行為に関する基礎的な研究をUnityによるVRを利用してオンライン実験で行なった。解析結果によれば、人々は複数の選択肢から制限のない選択を行う際に、他行為可能性および源泉性を伴う経験をしている。しかし、そうした経験を、決定論的な世界では錯覚として見なせるような非両立論的な性格を有するものとして人々は捉えているということが分かった。我々の結果は、行為の他行為可能性について人々が非両立論的な経験をしている先行研究を超えて、行為の源泉性やコントロール可能性についても人々が非両立論的な経験をしていることを明らかにしたものである。さらに報告された経験の非両立論的な性格は、自由意志や決定論に関する信念の差異に応じて異ならなかった。この結果は先述の認知的侵入可能性に関する予測に反するものであり、経験の非両立論的な性格は信念による影響を排除する程度にロバストであることが示唆された。この結果は日本科学哲学会第54回大会で発表された。

さらに、ヒトと動物のキメラ脳の生命倫理的問題に対する一般人の意識の調査も行ない、人々の倫理的懸念は、脳のキメラ化が動物を人間化するという認識と関連して生じていること、キメラ脳研究は不自然であるという認識など、いくつかの心理的要因が、動物の人間化に対する認識と、キメラ脳の作成・使用に対する倫理的懸念との関係を媒介することを示した。この成果はNeuroethics誌に出版された（Tanibe et al., 2024）。

(2) 創造的意思決定の神経基盤

今世紀に入り、脳機能イメージング技術の発展や数理モデルの整備によって、意思決定過程やその神経基盤について飛躍的な理解の進展が見られたが、こうした研究では、意思決定で選択される対象となる**オプション**（選択肢）は所与のものとしてされ、そうしたオプションの評価／選択の側面にもつばら焦点が当てられてきた。しかし、日常の意思決定においては、オプションが明示的に与えられることは稀である。例えば、休暇の過ごし方から、大学卒業後の進路決定に至るまで、人間は幅広いオプションを随時生み出しながら、選択をおこなっている。こうした自由なオプション生成をも包含した「**創造的意思決定**」については、いまだほとんど理解が進んでいない。こうした自由な意思決定は、個人に責任を帰属するための前提となっているため、その神経基盤の解明は神経法学に与える示唆も大きいものと考えられる。

Ang et al. (2018) は、シンプルな描線課題を用いて、オプション生成に対するドーパミンの寄与を行動薬理的に明らかにしているが、その脳内機構は不明である。また、この課題は腕の運動成分の統制が難しいため、脳機能イメージングによってオプション生成の神経基盤に迫るのには不適切である。本研究では、共同研究者であるAng et al. (2018)の線描課題をベースにしてfMRI計測中に実行可能な創造的意思決定課題を開発した（**図2**）。



我々はまず、AYA (思春期) 世代の 41 名から、線描課題による創造性の指標を取得した。参加者は**流暢性**と**独自性**の二つの指標で評価された。流暢性は参加者が生成されたオプションの数を意味し、独自性は、ある参加者の創造したオプションが、他の参加者の創造したオプションとどれだけ異なっているかを示す。年齢が流暢性と独自性に与える影響を検討したところ、発達とともに流暢性は有意に向上するが、独自性は減少する傾向を持つことが判明した。また、流暢性は運動実行機能や運動計画機能と有意な相関を示したが、独自性はそれらの運動機能とは相関を持たない、独自の指標であることが明らかになった (図 3)。この行動実験の結果は、並行して撮像された構造的脳画像と併せて現在解析中である。さらに、24 名を対象に創造的意思決定課題の fMRI データを取得しており、解析を進めている。

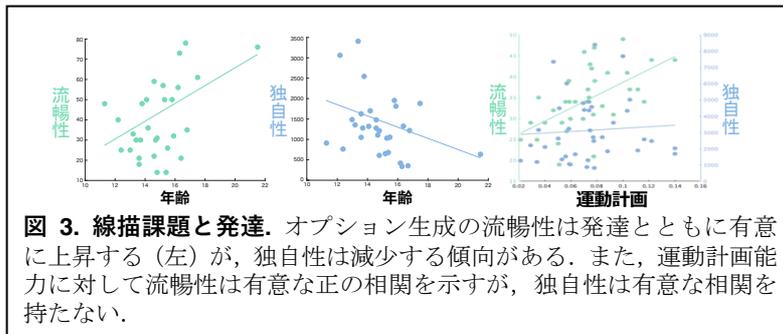


図 3. 線描課題と発達。オプション生成の流暢性は発達とともに有意に上昇する (左) が、独自性は減少する傾向がある。また、運動計画能力に対して流暢性は有意な正の相関を示すが、独自性は有意な相関を持たない。

(3) 自発的発声の神経基盤

また、並行して自由な行為の神経基盤をより詳細に明らかにするために、自発的に鳴き交わし発声行動を行なっている最中のマーモセットの神経活動を**皮質脳波 (ECoG)** で計測する研究も進めた。マーモセットは「フィー」コールと呼ばれる発声を特徴としており、これによって視界から遮られた同種の動物とコミュニケーションをとる。バーチャル・インタラクティブ・パラダイム (Miller & Wang, 2006) を取り入れることで、マーモセットとコンピュータで生成した同種の動物との間で双方向の音声コミュニケーションを可能にし、自然な社会的相互作用をシミュレートした。フィーの鳴き声を聞くと、マーモセットは同じ種類の鳴き声を出して反応する。この性質を利用して、コンピュータ (バーチャル・マーモセット) とマーモセットの自然な社会的相互作用をシミュレートしながら、96 チャンネルの ECoG によって、マーモセットの片半球の表面の広い領域から脳活動を計測した。

我々は、まず、発声に伴って聴覚皮質を修飾する予測的活動である**随伴発射**を調べるため、一次聴覚野の**高周波ガンマ・パワー (HGP)** に注目した。自らの発した音声を受動的に聴く聴取条件では、動物が自分の発声を聞いたときに HGP が有意に増加することがわかった (図 4)。一方で、自発的な発声条件では、HGP はベースラインより有意に低下した。この抑制は発声開始前から始まった。また、2 つの条件間で HGP に有意差があった。したがって、自発発声に伴う随伴発射の観察に成功したと言える。さらに、前頭前野からは発声に伴うベータ周波数帯の活動減少も記録した。これらの領域間の相互作用についても解析を加えながら、現在、この成果は、第 51 回北米神経科学大会や第 45 回日本神経科学大会などで発表され、論文として取りまとめ中である (Iijima et al., *in prep*)。

この研究と並行して行われた、自閉症モデル・マーモセットにおける予測的音声処理の異常に関する計算論的研究についても、現在論文を投稿中である (Chao et al., 2023)。

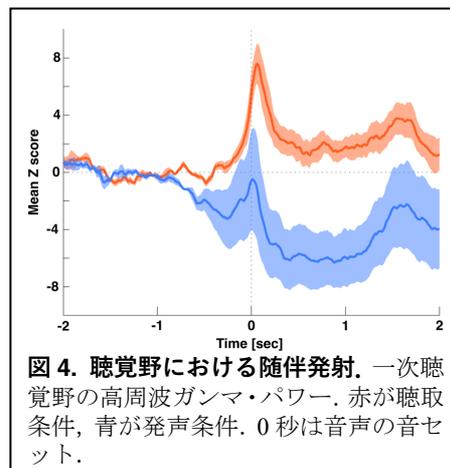


図 4. 聴覚野における随伴発射。一次聴覚野の高周波ガンマ・パワー。赤が聴取条件、青が発声条件。0 秒は音声の音セット。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4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 3件）

1. 著者名 Tanibe Tetsushi、Watanabe Takumi、Oguchi Mineki、Iijima Kazuki、Ota Koji	4. 巻 17
2. 論文標題 The Psychological Process Underlying Attitudes Toward Human-Animal Chimeric Brain Research: An Empirical Investigation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Neuroethics	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） 10.1007/s12152-024-09552-7	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 松森 嘉織好、飯島 和樹、松元 健二	4. 巻 289
2. 論文標題 脳機能イメージングによる効用の個人間比較と再分配政策への応用	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 医学のあゆみ	6. 最初と最後の頁 149 ~ 153
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.32118/ayu28902149	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 Chao Zenas C.、Komatsu Misako、Matsumoto Madoka、Iijima Kazuki、Nakagaki Keiko、Ichinohe Noritaka	4. 巻 -
2. 論文標題 Diverse Configurations of Erroneous Predictive Coding Across Brain Hierarchies in a Non-Human Primate Model of Autism Spectrum Disorder	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 bioRxiv	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） 10.1101/2023.11.19.567773	査読の有無 無
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 Matsumori Kaosu、Iijima Kazuki、Yomogida Yukihiro、Matsumoto Kenji	4. 巻 -
2. 論文標題 Interpersonal Comparison of Utility by Measuring Neural Activity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 bioRxiv	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） 10.1101/2021.06.04.447048	査読の有無 無
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16件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 飯島和樹, 小口峰樹, 谷辺哲史, 太田紘史
2. 発表標題 常識機能主義を探る：心の拡張の実験哲学
3. 学会等名 応用哲学会第15回年次研究大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Matsumori, K., Iijima, K., Yomogida, Y., & Matsumoto, K.
2. 発表標題 Neural utility signal has not only ordinal but also interval scale information
3. 学会等名 第7回ヒト脳イメージング研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 飯島和樹
2. 発表標題 BCI への懸念の文化差とその心理的基盤
3. 学会等名 新潟マシン・エシックスセミナー
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 飯島和樹
2. 発表標題 BCI への懸念の文化差と道徳的個人特性
3. 学会等名 脳神経倫理研究会（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 飯島和樹, 小口峰樹, 谷辺哲史, 太田紘史
2. 発表標題 常識機能主義を探る: 心の拡張の実験哲学
3. 学会等名 応用哲学会 第15回年次研究大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Iijima, K., Komatsu, M., Suzuki, W., Narita, Z., Yamamori, T., Ichinohe, N., Matsumoto, M.
2. 発表標題 Cortical dynamics of efference copy revealed by large-scale cortical ECoG during marmoset vocalization
3. 学会等名 The 51st Annual Meeting of the Society for Neuroscience
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Iijima, K., Komatsu, M., Suzuki, W., Narita, Z., Yamamori, T., Ichinohe, N., Matsumoto, M.
2. 発表標題 Large-scale cortical ECoG reveals cortical dynamics of corollary discharge during spontaneous vocalization in marmosets.
3. 学会等名 第6回ヒト脳イメージング研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松森嘉織好, 飯島和樹, 蓬田幸人, 松元健二
2. 発表標題 脳計測に基づく社会のウェルビーイング最大化
3. 学会等名 日本科学振興協会第1回総会・キックオフミーティング(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 飯島和樹
2. 発表標題 道徳判断と行為樹：行為の意図性をめぐって
3. 学会等名 道徳と未来の学際的研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Iijima, K., Komatsu, M., Suzuki, W., Yamamori, T., Ichinohe, N., Matsumoto, M.
2. 発表標題 Cortical dynamics of efference copy: Large-scale ECoG during marmoset vocalizations
3. 学会等名 The 45h Annual Meeting of Japan Neuroscience Society ((国際学会))
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Matsumori, K., Iijima, K., Saheki, Y., Hirabayashi, K., Tagai, K., Matsumoto, K.
2. 発表標題 Trends in experienced utility determine decision utility
3. 学会等名 The 45h Annual Meeting of Japan Neuroscience Society (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Iijima, K., Matsumori, K., Saheki, Y., Hirabayashi, K., Tagai, K., Matsumoto, K.
2. 発表標題 Trends in instant utilities determine decision through remembered utility
3. 学会等名 The 50th Annual Meeting of the Society for Neuroscience (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hirabayashi, K., Saheki, Y., Iijima, K., Matsumori, K., Matsumoto, K., Tagai, K.
2. 発表標題 Investigation of decision-making process during cosmetics purchasing
3. 学会等名 The 50th Annual Meeting of the Society for Neuroscience (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯島和樹
2. 発表標題 拡張する自己についての実験哲学：BMI技術で自己はどこまで拡張するか
3. 学会等名 先端神経倫理学ワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 太田紘史, 飯島和樹
2. 発表標題 リハビリアンの経験の範囲を探る：中間報告
3. 学会等名 日本科学哲学会第54回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯島和樹
2. 発表標題 自己の源泉としての脳の探求
3. 学会等名 世界脳週間2020
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 青山拓央（監修），柏端達也（監修），山口尚（翻訳），小草泰（翻訳），高田敦史（翻訳），尾形まり花（翻訳），飯島和樹（翻訳），源河亨（翻訳）	4. 発行年 2020年
2. 出版社 岩波書店	5. 総ページ数 390
3. 書名 名著精選 心の謎から心の科学へ：自由意志 スキナー / デネット / リベット	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>researchmap - Kazuki Iijima https://researchmap.jp/kijijima ResearchGate - Kazuki Iijima https://www.researchgate.net/profile/Kazuki_Iijima UTCP Members - Kazuki Iijima http://utcp.c.u-tokyo.ac.jp/members/data/ijijima_kazuki/ Google Scholar - Kazuki Iijima https://scholar.google.com/citations?user=1mF44MIAAAAJ</p>
--

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
研究協力者	松元 健二 (MATSUMOTO Kenji)		
研究協力者	松森 嘉織好 (MATSUMORI Kaosu)		

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

シンガポール	IHPC, A*STAR			
--------	--------------	--	--	--