

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 06 月 08 日現在

機関番号 : 14401
研究種目 : 特別推進研究
研究期間 : 2012~2016
課題番号 : 24000012
研究課題名 (和文) 神経ダイナミクスから社会的相互作用に至る過程の理解と構築による
構成的発達科学
研究課題名 (英文) Constructive Developmental Science Based on Understanding the
Process from Neuro-Dynamics to Social Interaction
研究代表者
浅田 稔 (ASADA, Minoru)
大阪大学・工学研究科・教授
研究者番号 : 60151031
交付決定額 (研究期間全体) (直接経費) : 390,500,000 円

研究成果の概要 (和文) : 構成的発達科学の確立を目指し, 脳発達シミュレーションでは, 身体との相互作用により, 多様な行動を生成する情報神経構造を明らかにした. そこには学習手法が盛り込まれていないが, 学習規範として, 予測誤差最小化を導入することで, 情動や利他的行動の創発モデルが構築された. 方や, イメージング研究では, 大人と子どもで, 使われる脳の領野が異なり, 脳の発達が長く続くことが分かった(fMRI). また, 世界初親子同時測定可能な脳磁図(MEG)では, 親子ペアの自閉症の度合いにより, コミュニケーション能力に関連する脳部位の活動に差が観られた. さらに, 自閉症児と定型発達児の脳信号複雑性の差を脳発達シミュレーションで再現し, また, 構築したロボットプラットフォームを用いた養育者との言語相互作用実験を行うなど, ミクロからマクロへの道筋の可能性を示し, 構成的発達科学の礎を築いた.

研究成果の概要 (英文) : Aiming at the establishment of constructive developmental science, brain development simulation revealed information neural structure which generates diverse behavior through interactions with body. There is no learning method included therein, but emergent models of emotion and altruistic behavior were constructed by introducing prediction error minimization as learning principle. In humans imaging studies, it was found that the brain regions activated are different between adults and children, and the development of the brain continues for a long time (fMRI). In addition, in the hyperscanning magnetoencephalogram (MEG) which can be measured simultaneously in the world at first time, there was a difference in the activity of the brain region related to the communication ability depending on the degree of autism of the parent and child pair. In addition, we reproduced the difference in brain signal complexity of autistic children and typically developed children using brain development simulation, and we conducted a language interaction experiment with a caregiver using the constructed robot platform. These show the possibility of micro - to - macro pathway, and lay the foundation of constructive developmental science.

研究分野 : 総合領域

キーワード : 構成的アプローチ, 自他認知, 脳-身体カップリング, 予測学習, 情動と共感, 長期脳発達, 親子同時測定 MEG, 筋骨格ロボット

1. 研究開始当初の背景

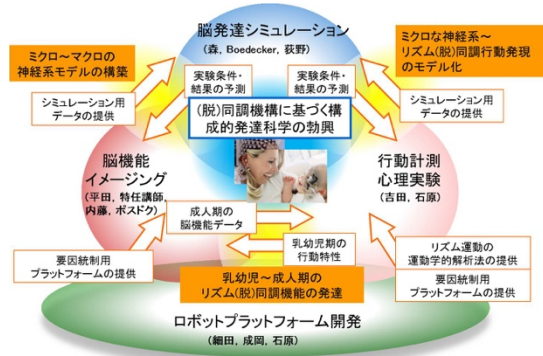
ニューロンレベルのミクロな活動がいかに人間レベルのマクロな行動に反映されるかは分野を超えた大基本課題だが、理解の程度が既存分野の域に留まっている現状がある。全体像を把握するには、学際融合が必須である。

代表者はこれまで、脳神経科学や心理学などで蓄積された知見に基づき、様々なレベルの構造を有した計算機シミュレーションやロボットによる実現を通じて、メカニズムの詳細から実際の挙動までの系全体を見ながら新たな理解を得ようとする試みを行ってきた。

2. 研究の目的

本研究では、人間の認知発達の大基本問題である「**自己認知**」の課題に焦点をあて、(1)リアルな身体を備えた脳の発達の大規模計算機シミュレーション、(2)ニューロンの集団活動を脳波や脳領域の賦活として捉えるイメージング研究、(3)人間に酷似した筋骨格系ロボットの構築、(4)ロボットを持ち込んだ二者間の相互作用の心理/社会実験を融合的に行いながら、(5)自己認知に関わる一連の発達過程の構成的理解を得、神経ダイナミクスから社会的相互作用に至る過程の理解と構築による構成的発達科学を確立することを目的とする。

3. 研究の方法



各グループの連携イメージ

(1)の計算モデル構築グループでは EEG, MEG 等で観測されるマクロな脳波レベルの反応が現れる神経系モデルを構築し、イメージング研究グループのタスクに合わせる。(2)イメージング研究グループでは、ミラーニューロンシステムや身体表象を中心とした MEG や fMRI などのイメージング研究を進め、自己認知の発達に絡む脳内機序のモデルを構築し、計算モデルにフィードバックする。(3)のロボット開発グループでは、イメージング機器内に入れられるロボットや、より実際の乳幼児に近いロボットを開発し、実験に持ち込む。(4)の心理社会実験グループでは、乳幼児のリズム運動の行動学的解析や養育者との情緒的相互作用のモデル化と実験的検証を進める。乳幼児の代わりに脳の計算モデルを実装したロボットを用いることで、そのモデルの動作も検証する(Asada, 2014)。

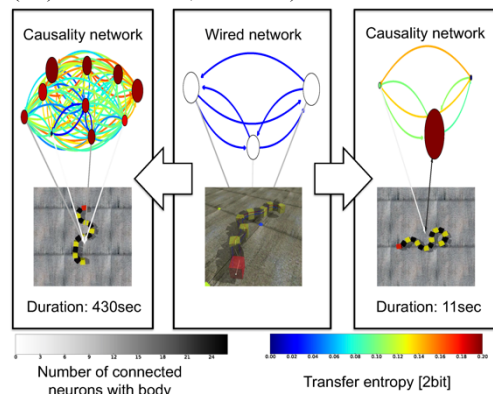
4. 研究成果

(1) 脳発達シミュレーショングループ

本グループは、発達を脳と身体のカップリングシステムの時間発展と捉え、神経と身体の相互作用により創発する行動の多様性や社会的能力を解析した。

Park et al. (2015) は神経振動子ネットワークをヘビ型の身体に接続したシミュレータを開発した。入出力神経振動子は筋へ信号を送り、その筋張力を感覚情報として受け取る。このような神経と身体ダイナミクスの相互作用により、複数の行動パターンがカオス的に遍歴することが明らかとなった。さらに、この多様な行動は脳と身体の緩やかなカップリングにより発生し、複雑な神経ネットワーク構造によりこのパターン数が増加する傾向にあることが示された。

また、パターン化された安定な行動中と、パターン化されていない過渡的な行動中の神経振動子間の情報の流れ(因果ネットワーク)を解析し、その結果、安定(過渡的)な行動中では、脳-身体間を流れる情報が少な(多)く、互いに独立(連結)して駆動しており、そのときの神経振動子は分散(集中)的に活動していた(下図左(右), Park et al., 査読中)。



そのような身体運動の特性を反映した脳神経活動を獲得することで、バイオロジカルモーション(生体らしい動き、以下BM)の識別といった社会的な認知が可能になることを計算論的に示した(Kawai et al., 2017)。自身の滑らかな動きの運動指令信号を神経ネットワークが予測学習し、その学習済み神経ネットワークに他者の運動の視覚情報を入力する。その予測誤差が小さければ、自分の運動と同質のBMと判断できる。このようなBM識別は新生児でも可能であるという報告があるが、胎児期・新生児期の運動経験により脳が自身の運動表現を獲得することで、このような社会的な知覚能力が形成されると考えられる。

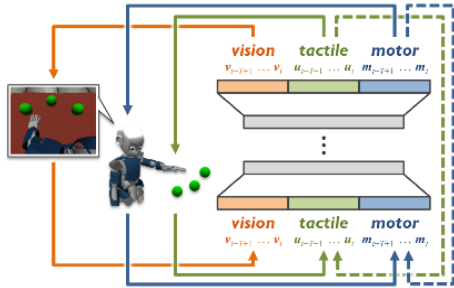
(2) 行動実験・モデリンググループ

① 予測学習理論に基づく社会的認知機能の発達モデル

乳幼児の多様な社会的認知機能の発達を統一的に説明する理論として、感覚・運動信号の予測学習に基づく計算モデルを提案した(Nagai & Asada, 2015; 長井, 2016)。予測学習とは、身体や環境からのボトムアップな信号と、

脳が内部モデルをもとにトップダウンに予測する信号の誤差を最小化するように内部モデルの更新や行動生成することである。

ミラーニューロンシステムの発達に着目した研究では、予測学習を具現化した深層型神経回路モデルを用いて、自己運動の生成経験が他者運動の認識に与える影響を検証した



(上図, Copete et al., 2016). 自己の運動生成時に得られる複数感覚信号を同一の予測モデルで統合学習することで、他者運動の観察時に対応した自己運動の想起が可能となり、他者運動の予測が促進することを明らかにした。

動作模倣に関する研究では、乳幼児に観察される模倣対象(目標と手段)の発達の変化が、予測誤差の相対的差によって生じることを明らかにした(Park et al., 2017)。

情動発達に着目した研究では、複数感覚信号の空間的予測学習が、他者の内部状態の推定とそれに基づく情動模倣を可能にすることを示した(Horii et al., 2016)。階層型確率的神経回路モデルを用いて、他者が表出する視覚・聴覚信号を予測学習することで、モデルの上位層に情動に対応する空間が形成され、さらにその空間を介して未観測信号の推定も可能になることを明らかにした。

さらに、他者運動に起因する予測誤差の最小化が、援助行動の創発につながることも明らかにした (Baraglia et al., 2016)。

以上の成果は、これまで異なるメカニズムで説明されていた認知機能が、予測学習という共通原理に基づいて発達しうることを構造的に示したものであり、人間の認知発達原理の理解に重要な示唆を与えている。

②身体運動の同期が及ぼす心理・神経科学的影響の考察

個体間の運動同期がどのように我々の心理、神経活動に影響を与えるのかを調べるために、人間と共にドラミングを行うロボットを開発し、このロボットを用いた心理実験、fMRI 実験を行ってきた。結果として、主に下記の二つの結果を得ることができた。

1. 人間はロボットのドラミングのリズムが滑らかに変動する場合、そのリズムに無意識的に追従し、ロボットが自分にリズムを合わせてくれているように錯覚をする
2. このような錯覚を感じた際の脳活動を fMRI を用いて計測したところ、腹側線条体などの報酬関連領域の脳活動が生じることが示された。これは相手が自分に合わせてくれているという感覚は、我々にとって報酬と同じような作用を与えることを示唆する(H.

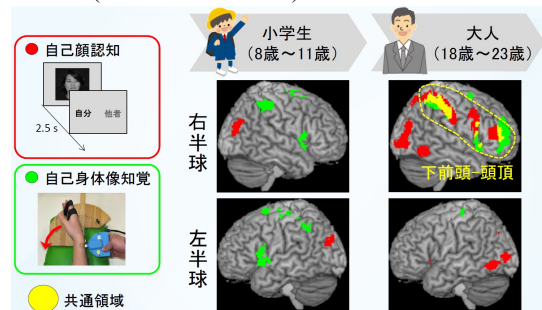
Takahashi et al., 2016)。

(3) 脳機能イメージンググループ

①fMRI サブグループ

大阪大学吹田キャンパスにある情報通信研究機構脳情報通信融合研究センターにおいて、倫理・安全委員会からの承認を受けて、6歳以上の子供の脳計測ができる研究環境を確立した。現在までに延べ110名の小中学生の脳を計測している。

fMRIチームは、主に自他認知を支える神経メカニズムの発達過程に着目し(Morita et al. 2016; 守田・内藤, 2016), 自己意識の形成に深く関わる、自己顔認知と自己身体像認知課題を用いた研究を行った。その結果、大人の脳では、これらの情報が、右半球優位に、上縦束第3ブランチ(SLFIII)と呼ばれる神経線維で結合される下前頭-頭頂ネットワークで共通して(下図右の黄色領域)処理されていることを示した(Morita et al. 2017)。



このような共通の神経基盤が出現するのは、中学生以降であり、小学生の脳では、自己顔認知(上図左赤色領域)と自己身体像認知(同緑色領域)は、完全に異なる脳内ネットワークで処理されていることがわかった。さらに、個々の課題を詳細に解析すると、小学生の自己顔認知は、下前頭-頭頂ネットワークを動員せず主に視覚領野のみで行っていること(Morita et al. 投稿準備中), また、自己身体像認知は、左右両半球の下前頭-頭頂ネットワークを動員して行っており、成人様の右半球優位性はまだみられないことを明らかにした(Naito et al. 査読中)。

SLFIII神経線維で結合される下前頭-頭頂ネットワークはミラーニューロンシステム(MNS)を包含している(Naito et al. 2016)。以上の結果は、右半球下前頭-頭頂SLFIIIネットワークが、自己に投影した他者の理解(MNS)のみならず、他者とは異なる自己という意識の形成に関与していることを示唆している。行動学的にはマークテストをパスできる2-3歳児ですでに自己意識が萌芽するとされる。一連のfMRI研究成果は、成人様の脳内ネットワークの出現や機能分化(機能側性化)は極めてゆっくりと成熟し、中学生になってみられはじめることを示している。成人とは異なる脳内神経機序の存在は、小学生の自己意識が大人とは質的に異なることを示唆するものであり、右半球下前頭-頭頂SLFIIIネットワークの活動度合いが成人様の自己意識のバイオマー

カーとなりうる可能性を示した。

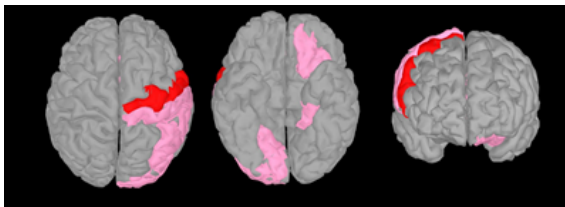
②MEG サブグループ

世界初「親子同時測定が可能な脳磁計システム (Magnetoencephalography: MEG) が開発され、金沢大学に設置された(下図:Hirata et al., 2014)。



このシステムを活用し、4歳から7歳の自閉スペクトラム症幼児13人とその母親13人を対象に、母子が見つめ合っている間の脳の神経活動を記録した。その結果以下の3つのことが明らかになった(Hasegawa et al., 2016)。

1. 症状が重い自閉スペクトラム症では、見つめ合うことで生じる脳の反応が低下している。(下図:赤色の部分が低下)



2. 自閉スペクトラム症幼児の脳の反応が低下している場合、母親の脳の反応も低下している。

3. 見つめ合い中の母親が子どもに合わせてうなずくといった動作をした場合、母親の脳の反応が強い。

模倣の脳内処理過程を明らかにするため、12名の健常被験者を対象として、指のタッピングを模倣する課題を行わせ、これを脳磁計測・解析した。その結果、模倣運動時には、low γ 帯域にて、前頭葉と頭頂葉との間に機能的結合を認め、感覚運動野と中前頭回に脱同期反応を認めた。このことから、low γ 帯域における感覚運動野と中前頭回の脱同期反応は、模倣に関連する観察-実行のマッチングシステムに大きな役割を果たすと考えられた(Sugata et al., 2017)。

(研究成果の意義) 親と子どもが見つめ合っている間、無意識の間にも、膨大な量の社会的な情報のコミュニケーションがなされている。親子が見つめ合っている間の双方向性の交流は、子どもの社会性の成長において、とても重要である。今回、親子が見つめ合う状態で脳機能を同時測定できたことにより、子どもの社会脳の発達を解明する一つのステップになった。

(4) ロボットプラットフォームグループ

以下の要素や全体の技術開発を実施した。

①子供アンドロイドロボットの要素開発: 肉厚柔軟な素材を壊れにくい高感度の触覚センサとする技術の開発(川節他, 2016), 空気圧駆動装置を高密度で人型関節機構に組み込む設計を実施し、小型且つしなやかに動く骨格を実現(Ishihara & Asada, 2015), 人の顔の網羅的な変形パタンの主成分分析により、多様な表情表出を単純な機構で実現するための皮膚点毎の動作方向を推定(Ohta et al., 2016)。

②柔軟素材を用いた乳児様発話ロボット要素開発: 圧縮した空気流の振動周波数を調整する声帯部及び口唇、舌部など(Kojima et al., 2015)

③強磁場環境下で動作する外骨格ロボット開発(瓜野他, 2015)。

(5) 脳発達シミュレーショングループと MEG グループの融合研究

金沢大学での幼児の脳機能計測グループと大阪大学での脳シミュレーショングループの分野融合的な研究を実施した。

金沢大学の幼児用脳磁計を用いた自閉スペクトラム症児と定型発達児の脳磁計測から、自閉スペクトラム症児の脳信号の複雑性(マルチスケールエントロピー)が定型発達児のものとは異なることが明らかとなった(Takahashi et al., 2016)。その複雑性の特異性のメカニズムを探るため、大阪大学で脳神経シミュレータを開発し、脳構造の特異性が脳活動に与える影響に関して調査した。その結果、局所的な結合が過剰な自閉スペクトラム症の脳構造を模した神経モデルの活動の複雑性は、適度に長距離結合を持つ定型発達モデルのものよりも低下することがわかった(Ichinose et al., 2017)。

さらなる解析から、他の神経細胞からの入力を多く受け、かつ、それが閉ループを作る場合に、その神経活動が単調な高周波信号となり、その複雑性が低下することが明らかとなった (Jihoon et al., 投稿準備中)。

この脳神経シミュレーション研究により、自閉スペクトラム症における脳構造と脳活動の関係を明らかにすることができた。現在、これらの特異性が、自閉スペクトラム症の症状を引き起こすメカニズムの解明を目指して、モデル拡張に取り組んでいる。将来的には、自閉症スペクトラム症者に対する投薬や電気刺激の効果を予測できるシミュレーションの開発を目指す。

(6) 子供アンドロイドによる子供向け発話の誘起

子供アンドロイドの動作や外見を適切に調整することで、音声印象上、親が子供に向けた特徴的な発話 (IDS: Infant-directed Speech) と差のない発話を人から引き出せることを確認した (Nakamura et al., 2015)。これは、発達心理学において未解明であった IDS の生起条件の解明に子供アンドロイド有効であることを示す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 90 件)

- ① Minoru Asada. Development of artificial empathy. *Neuroscience Research*, Vol.90, pp.41--50, 2014.
DOI:10.1016/j.neures.2014.12.002
- ② Sugata, H. et al., Frequency-dependent oscillatory neural profiles during imitation. *Sci Rep.*, 査読有, Vol.7, 2017, 45806.
DOI:10.1038/srep45806
- ③ J.-C. Park et al., Learning for Goal-directed Actions using RNNPB: Developmental Change of “What to Imitate”, *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 査読有, 2017, pp. 1-1.
DOI:10.1109/TCDS.2017.2679765
- ④ Y. Kawai et al. Prediction error in the PMd as a criterion for biological motion discrimination: A computational account. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 査読有, Vol. PP,m No. 99, 2017, pp. 1-1.
DOI:10.1109/TCDS.2017.2668446
- ⑤ H. Takahashi et al., Semantic differential scale method can reveal multi-dimensional aspects of mind perception, *Frontiers in Psychology*, 査読有, Vol. 7, 2016, 1717.
DOI:10.3389/fpsyg.2016.01717
- ⑥ 長井志江, 認知発達の原理を探る: 感覚・運動情報の予測学習に基づく計算論的モデル, *ベビーサイエンス*, 査読無, Vol. 15, 2016, pp. 22-32.
- ⑦ T. Horii et al., Imitation of human expressions based on emotion estimation by mental simulation, *Paladyn, Journal of Behavioral Robotics*, 査読有, Vol. 7, No. 1, 2016, pp. 40-54.
DOI:10.1515/pjbr-2016-0004
- ⑧ J. Baraglia et al., Emergence of Altruistic Behavior Through the Minimization of Prediction Error, *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 査読有, Vol. 8, No. 3, 2016, pp. 141-151.
DOI:10.1109/TCDS.2016.2562121
- ⑨ Morita T et al., Contribution of neuroimaging studies to understanding development of human cognitive brain functions, *Front Hum Neurosci.*, 査読有, Vol. 10, 2016, 464.
DOI:10.3389/fnhum.2016.00464
- ⑩ 守田知代, 内藤栄一「Neuroimaging から見た発達研究」*児童心理学の進歩* 金子書房, 査読有, Vol. 55, 2016, pp. 274-298.
- ⑪ Naito E et al., Body representations in the human brain revealed by kinesthetic illusions and their essential contributions to motor control and corporeal awareness, *Neurosci Res.*, 査読有, Vol. 104, 2016, pp. 16-30.
DOI:10.1016/j.neures.2015.10.013
- ⑫ Hasegawa, C. et al. Mu rhythm suppression

reflects mother-child face-to-face interactions: a pilot study with simultaneous MEG recording, *Sci. Rep.*, 査読有, Vol. 6, 2016, 34977.
DOI:10.1038/srep34977

- ⑬ 川節拓実他, 磁性・非磁性エラストマを積層した磁気式触覚センサの基礎特性解析. *日本 AEM 学会論文誌*, 査読有, Vol.24, No.3, 2016, pp.204-209.
DOI:10.14243/jsaem.24.204
- ⑭ H. Ishihara and M. Asada, Design of a 22 DOF pneumatically-actuated upper body for a little child android ‘Affetto’, *Advanced Robotics*, 査読有, Vol.29, No.18, 2015, pp.1151-1163.
DOI:10.1080/01691864.2015.1045923
- ⑮ Hirata, M. et al. Hyperscanning MEG for understanding mother-child cerebral interactions, *Front. Hum. Neurosci.*, 査読有, Vol. 8, 2014, 118
DOI:10.3389/fnhum.2014.00118

〔学会発表〕(計 446 件)

- ① J. L. Copete, Motor development facilitates the prediction of others’ actions through sensorimotor predictive learning, 6th IEEE International Conference on Development and Learning and on Epigenetic Robotics, Sept. 19, 2016, Cergy-Pontoise (France).
- ② N. Ota, Principal Component Analysis of Two-dimensional Flow Vector Fields on Human Facial Skin for Efficient Robot Face Design, 5th International Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems, Living Machines, July 18, 2016, Edinburgh (Scotland).
- ③ J. Park, Analysis of causality network from interactions between nonlinear oscillator networks and musculoskeletal system, European Conference on Artificial Life 2015, July 20, 2015, York (United Kingdom).
- ④ T. Kojima, Development of Vocal Cords of an Infant-like Vocal Robot based on Anatomical Structure, 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, August 25, 2015, Milano (Italia).
- ⑤ 瓜野他, 強磁場環境下で動作可能なマスタ・スレーブ型手指外骨格の開発, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会, 2015年11月18日, 函館アリーナ(北海道函館市)。

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: 変形測定装置

発明者: 川節拓実, 堀井隆斗, 石原尚, 仲田好宏, 浅田稔, 細田耕, 宮下敬宏

権利者: 株式会社国際電気通信基礎技術研究所

種類: 特許

番号：特願 2016-146070
出願年月日：平成 28 年 7 月 26 日
国内外の別：国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

浅田 稔 (ASADA, Minoru)
大阪大学・工学研究科・教授
研究者番号：60151031

(2)研究分担者

細田 耕 (HOSODA, Koh)
大阪大学・基礎工学研究科・教授
研究者番号：10252610

内藤 栄一 (NAITO, Eiichi)
国立研究開発法人情報通信研究機構・脳情報通信融合研究センター・研究マネージャー
研究者番号：10283293

平田 雅之 (HIRATA, Masayuki)
大阪大学・医学系研究科・助教
研究者番号：30372626

荻野 正樹 (OGINO, Masaki)
関西大学・総合情報学部・准教授
研究者番号：00397639

(平成 26 年 3 月 13 日研究分担者から削除)

森 裕樹 (MORI, Hiroki)
大阪大学・工学研究科・助教
研究者番号：80610849

(平成 28 年 3 月 25 日研究分担者から削除)

成岡 健一 (NARIOKA, Ken-ichi)
大阪大学・情報科学研究科・特任助教
研究者番号：30588356

(平成 25 年 9 月 11 日研究分担者から削除)

長井 志江 (NAGAI, Yukie)
大阪大学・工学研究科・特任准教授
研究者番号：30571632

菊知 充 (KIKUCHI, Mitsuru)
金沢大学・子どものこころの発達研究センター・教授
研究者番号：00377384

宮崎 美智子 (MIYAZAKI, Michiko)
大妻女子大学・社会情報学部・助教
研究者番号：90526732

(平成 26 年 3 月 13 日研究分担者から削除)

石原 尚 (ISHIHARA, Hisashi)
大阪大学・工学研究科・助教
研究者番号：90615808

(平成 26 年 3 月 13 日研究分担者として追加)

高橋 英之 (TAKAHASHI, Hideyuki)
大阪大学・基礎工学研究科・特任講師 (常勤)

研究者番号：30535084
(平成 26 年 3 月 13 日研究分担者として追加)

岡田 浩之 (OKADA, Hiroyuki)
玉川大学・工学部・教授
研究者番号：10349326
(平成 26 年 3 月 13 日研究分担者として追加)

池本 周平 (IKEMOTO, Shuuhei)
大阪大学・基礎工学研究科・助教
研究者番号：00588353
(平成 27 年 5 月 8 日研究分担者として追加)

遠藤 信綱 (ENDO, Nobutsuna)
東京電機大学・未来科学研究科・助教
研究者番号：30535844
(平成 28 年 3 月 25 日研究分担者として追加)

池田 尊司 (IKEDA, Takashi)
金沢大学・子どものこころと発達研究センター・特任助教
研究者番号：80552687
(平成 28 年 6 月 3 日研究分担者として追加)

横山 裕樹 (YOKOYAMA, Hiroki)
玉川大学・脳科学研究所・研究員
研究者番号：70722304
(平成 28 年 6 月 3 日研究分担者として追加)

高橋 哲也 (TAKAHASHI, Tetsuya)
福井大学・保健管理センター・准教授
研究者番号：00377459
(平成 28 年 6 月 3 日研究分担者として追加)

(3)連携研究者 (3 名)
吉村 優子 (YOSHIMURA, Yuko)
金沢大学・子どものこころの発達研究センター・助教
研究者番号：70597070

長谷川 千秋 (HASEGAWA, Chiaki)
金沢大学・子どものこころの発達研究センター・博士研究員
研究者番号：40644034

平石 博敏 (HIRAISHI, Hirotoishi)
金沢大学・子どものこころの発達研究センター・研究員
研究者番号：40643789