

平成 21 年 5 月 25 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007 -2008

課題番号：19700480

研究課題名（和文） 意志決定を反映する前頭皮質の脳波に関する研究

研究課題名（英文） Research concerning human frontal EEG reflecting decision making

研究代表者

氏名（アルファベット） 山中 健太郎（KENTARO YAMANAKA）

所属機関・所属部局名・職名 東京大学・大学院教育学研究科・助教

研究者番号 90359662

研究成果の概要：本研究は、準備していた行動をこらえる・我慢する、という、ヒトが社会生活を円滑に行う上で重要な意志決定機能を反映する前頭皮質活動を、おもに Go/NoGo 課題遂行中に記録した脳波から同定することを試みた。その際に、従来から行われている事象をトリガとした多数試行の加算平均波形（事象関連電位）だけでなく、単一試行脳波におけるパワーと位相のダイナミクスを詳細に検討した。その結果、NoGo 試行における前頭皮質において、 θ 帯域の脳波には試行間で位相の一致したパワーの増大が、 α 帯域の脳波には背景振動の位相の急激な変化が、それぞれ確認された。NoGo 試行の出現確率を操作して、「NoGo の意志決定」を行う確率を変化させると、 α 帯域の脳波の位相の変化のみが影響を受けることから、NoGo の意志決定は、 α 帯域の位相の急激な変化に反映されていることが示唆された。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,300,000	0	2,300,000
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	300,000	3,600,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学 身体教育学

キーワード：教育生理学

1. 研究開始当初の背景

身体教育学において教育に関わる「こころ」と「からだ」の問題を取り扱うためには、「こころ」の動きをヒトの脳活動から推定し、それらが「からだ」によってなされる行動とどう関係するか、を明らかにすることが重要な課題のひとつといえる。近年、授業中にじっとしてられない子供、すぐにキレる子供の増加が社会問題となっているが、こうした

問題にも「こころ」（脳活動）と「からだ」（行動）の関連という視点からのアプローチが重要といえる。本研究は、準備していた行動をこらえる・我慢する、という、ヒトが社会生活を円滑に行う上で重要な意志決定機能を反映する前頭皮質の活動を脳波（electroencephalogram: EEG）から同定することで、こうした問題の生じる脳内機序を明らかにし、さらにそこから簡便かつ有効な、前頭皮

質機能評価のための指標を確立することを試みるものであった。

呈示された刺激に反応するかしないかという課題 (Go/NoGo 課題) は、あらかじめ計画していた反応 (行動) を素早く遂行するか取りやめるといふ、単純ではあるが前頭皮質機能が深く関わる認知反応課題である。そのため様々な脳機能計測手法を用いた数多くの先行研究があり、それらにおいては一般に、前頭皮質の NoGo 試行 > Go 試行となる活動が「反応の抑制」に関わるものであると解釈されてきた。しかしながら、この「反応の抑制」には、「準備していた反応をしないと意志決定する (NoGo の意志決定)」ことと、その結果として「運動出力を抑制する (NoGo の実行)」ことの両方の意味が含まれており、この二つの側面は混同されたままであった。しかしながら、この両者を分けて考えることはきわめて重要であると考えられる。なぜなら、Go/NoGo 課題におけるパフォーマンス低下が、前頭皮質の損傷患者や前頭皮質機能障害が疑われる精神・神経疾患患者においてみられることが報告されており、それが「NoGo の意志決定が出来ない」ことに起因しているのか、「NoGo の実行が出来ない」ことに起因しているのか、を分けて考えることがきわめて重要であると考えられるためである。

そこで我々は、先行研究 (Yamanaka et al. 2002) において通常の Go/NoGo 課題 (Push-Go 条件) だけでなく、運動の入出力関係を逆転させた (あらかじめ遂行中の動作を停止するかしないかを課す) Go/NoGo 課題 (Release-Go 条件) を設定し、この 2 種類の Go/NoGo 課題遂行中のヒトの脳活動の測定を行った。経頭蓋磁気刺激 (transcranial magnetic stimulation: TMS) に対する運動誘発電位 (motor evoked potential: MEP) でみると、NoGo 試行では表面的な筋活動には変化がないにもかかわらず、計画していた運動を打ち消す方向、すなわち Push-Go 条件では出力を抑制し、Release-Go 条件では出力を維持する方向に、MEP が変化することが示された。一方で、NoGo 試行に特徴的な前頭皮質の事象関連電位 (event-related potential: ERP) には、Push-Go・Release-Go 条件間で差異はみられなかった。そこから、反応そのものの運動出力に関係する活動とは別の、Go/NoGo の意志決定に関わる活動が前頭皮質中央部の EEG に表れていることが示唆された。しかし残念ながら、多数回試行の EEG を加算平均する ERP では、「NoGo の意志決定が出来ない」のか、「NoGo の実行ができない」のかを試行毎に評価することは難しい。

近年、試行毎の EEG を周波数帯域ごとに位相と振幅に分解することで、脳内のどの領域の、どの周波数帯域に、どのような形で認知活動を反映する活動が出現するかを詳細に

調べる手法が用いられている。こうした手法は、ERP ではなく試行毎の EEG からでも認知活動を反映する脳活動を抽出できる可能性を示唆している。すなわち、こうした解析手法を Go/NoGo 課題中の EEG の試行毎の評価に用いることが重要であると考えられた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ヒトが Go/NoGo 課題遂行中の「NoGo の意志決定」を反映する EEG が、いつどこに、どのような形で出現するのかを明らかにすることであった。とくに、NoGo 刺激の呈示確率を操作することで、動作として表出されない NoGo 試行における脳内過程を変化させて、EEG 活動との関係をより詳細に検討することを試みた。

3. 研究の方法

被験者はすべて、同意を得た右利き健康成人男性であった (実験 1: 15 名 (28.3±3.4 歳)、実験 2: 9 名 (28.4±3.7 歳))。被験者は薄暗いシールド・ルーム内のイスに腰掛け、反応に用いる右あるいは左の示指を反応ボタンの上に置いた。各試行において、警告刺激 (ピープ音) の 1.8-2.2 秒後に指示刺激が 500ms 間呈示された。被験者には、警告信号が呈示されたら LED を注視し、指示信号として緑の LED (Go 信号) が呈示されたらできるだけ早くボタンを押し、赤の LED (NoGo 信号) が呈示されたら押さないよう指示した。試行間隔は 1.5-4.5s とした。全被験者が、50 試行×4 セッション (実験 1) または 8 セッション (実験 2) 行った。反応はセッションごとに右手、左手とちょうど半分ずつになるようランダムな順序で指示した。Go/NoGo 刺激の呈示順序もランダムとした。Go/NoGo の刺激呈示確率は、実験 1 では 50%-50%、実験 2 では 30%-70% と 70%-30% とした。

EEG は国際 10-20 法に基づく全頭 19 ケ所から Electro-Cap (ECI) を用いて導出した。基準電極として両側耳朶を使用した。さらに、眼球運動と瞬目をモニターするため左眼の上下から EOG を、運動に伴う筋活動を記録するため左右の FDI から EMG を記録した。電極抵抗は 10 kΩ 以下を保った。バンドパス設定は、EEG、EOG が 0.5-50Hz、EMG が 50-3000Hz とした。EEG、EOG、EMG および LED・ボタンからの信号を EEG 記録システム (Neurofax EEG-2100 および EEG-1100, 日本光電) を用いて 500Hz で記録した。反応時間 (reaction time: RT) は指示刺激開始から EMG 開始までとした。Go 試行における見逃し試行 (RT>450 ms)、NoGo 試行における間違い反応試行についてはエラー試行として以下の EEG 分析から除外した。さらに、明らかな瞬目や眼球運動が確認された試行も EEG 分析から除外した。ERP は刺激前 100ms

を baseline として 700ms 間を加算平均して作成した。

次に、刺激呈示前後 1100ms 間の単一試行 EEG を取り出し、4Hz ~ 28Hz に相当する Morlet wavelet をかけ、刺激呈示前後 600ms 間の瞬時パワーと瞬時位相を算出した。そこから、事象関連パワー (event-related power: ERPow) と位相同期指標 (phase-locking index: PLI) を算出した (Tallon-Baudry et al., 1996)。これらの指標の時間-周波数マップについて、baseline (刺激呈示前 600 ~ 100ms) からの変化と、Go 試行と NoGo 試行における差異を評価した (Delorme & Makeig 2004)。また、位相情報の保持指標 (phase preservation index: PPI: Mazaheri & Jensen 2006) を用い、5Hz・10Hz・20Hz の EEG 振動における各時点からの位相散逸時間 (dephasing time) を算出して、その変化を比較した。

4. 研究成果

実験 1 における Go 試行の反応時間は 228.6 ± 28.5 ms であった。ERP は図 1 に示した。ERP ピークとして Go 試行では後頭 N1 と中央-頭頂 P3 が、NoGo 試行では後頭 N1 と前頭 N2・前頭 P3 が確認された。

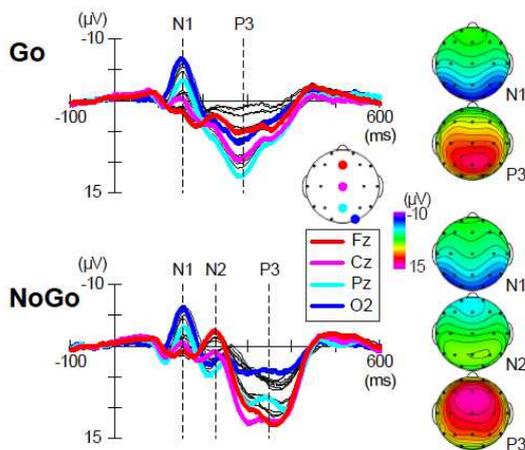


図 1 Go/NoGo 試行中の事象関連電位 (ERP)

ERPow は図 2 に示した。まず、Go 試行・NoGo 試行ともに baseline から帯域のパワーが大きく、背景振動の存在が確認された。次に帯域では Go 試行では中央-頭頂部、NoGo 試行では中央-前頭部を中心として刺激後 200-400ms をピークとして増大した。一方、帯域では RT 付近から Go 試行では減少し NoGo 試行では増大した。

PLI は図 3 に示した。baseline での顕著な位相の試行間一致は認められなかった。帯域では、Go 試行・NoGo 試行ともに ERPow とよく似たパターンで増大した。一方、帯域では Go 試行・NoGo 試行で共通して後頭 N1 付近で増大し、さらに NoGo 試行のみで前頭

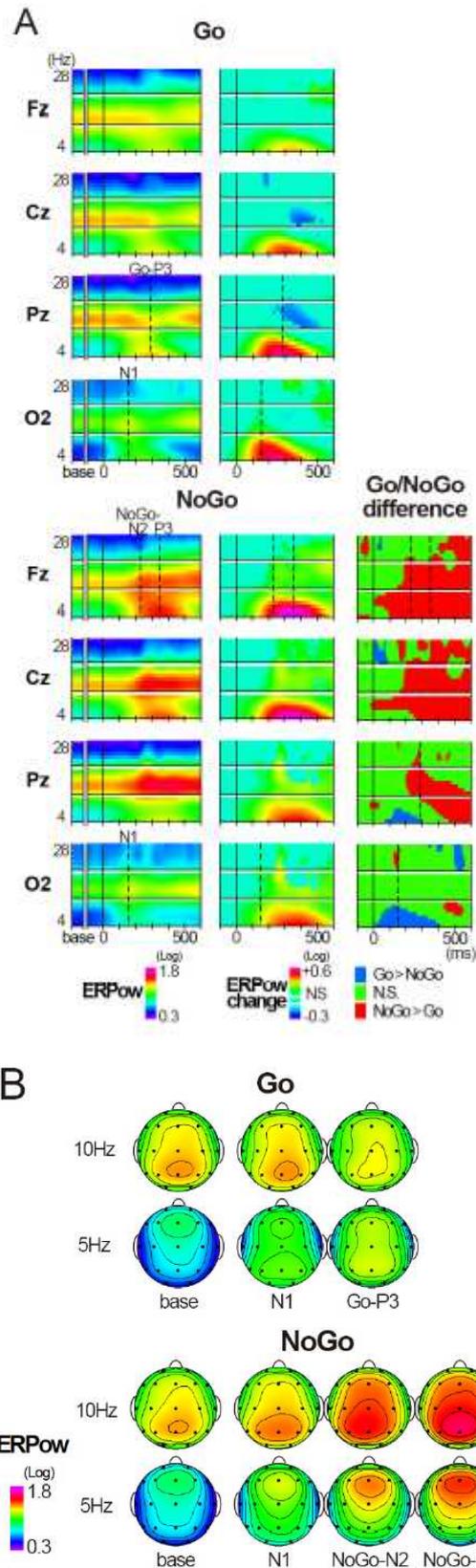


図 2 Go/NoGo 試行中の事象関連パワー (ERPow)
 (A) 主要な 4 電極の時間-周波数マップ
 (B) ERPow の頭蓋上マップ

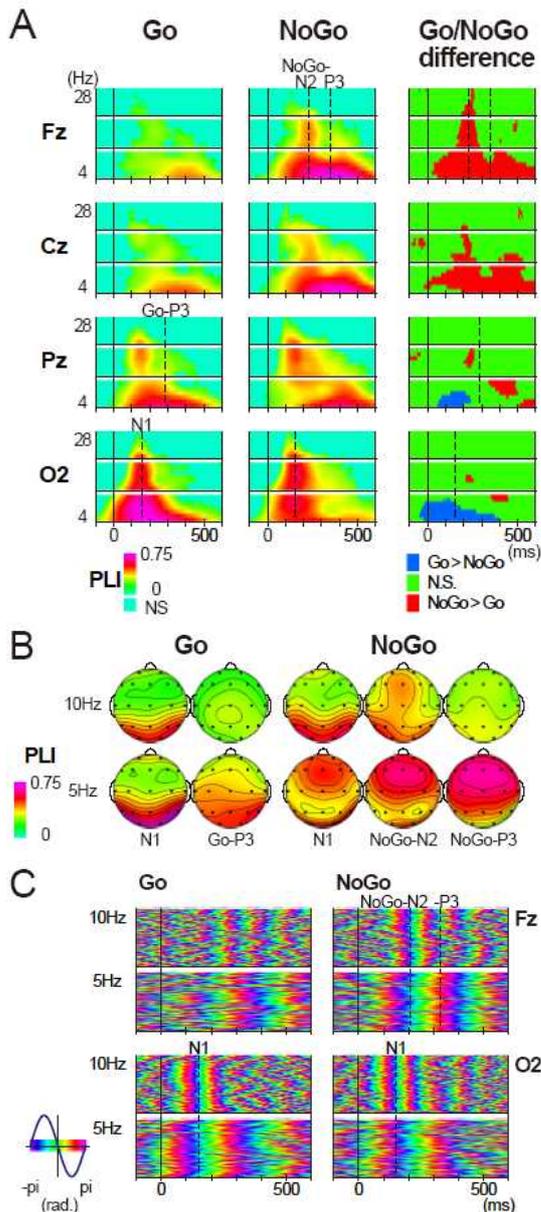


図3 Go/NoGo 試行中の位相同期指標 (PLI)
 (A) 主要な4電極の時間-周波数マップ
 (B) PLIの頭蓋上マップ
 (C) ある被験者の全試行の位相の例

N2付近で増大した。

位相散逸時間を図4に示した。帯域(5Hz)の位相散逸時間はERPowと同様のパターンでの増大を示した。一方、帯域(10Hz)の位相散逸時間はERPowとは異なり、刺激呈示後にNoGo試行のみで減少することが示された。これは、NoGo試行中の前頭皮質において帯域の位相情報が刺激呈示後185ms前後で急激に喪失していることを示していた。この時間帯はGo試行のRTの直前に相当し、「NoGoの意志決定」を行っていると考えられる時間帯によく一致するものであった。これらの結果をまとめると、帯域のパワ

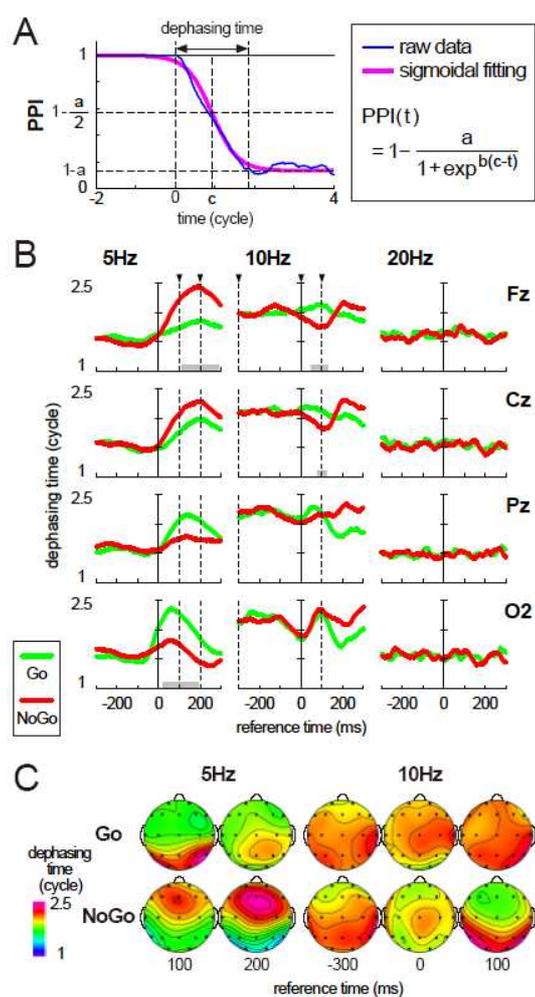


図4 Go/NoGo 試行中の位相散逸時間

- (A) 位相散逸時間の概念図
 (B) 主要な4電極の位相散逸時間の変化
 (C) 位相散逸時間の頭蓋上マップ

ーと位相に平行して生じる変容は、背景振動に帯域に相当するタイミングで増減する神経活動が付加されたことを反映していると考えられた。一方、帯域のパワーと位相の変容の不一致には背景振動の存在が関係し、Go試行・NoGo試行の後頭N1およびNoGo試行の前頭N2にはおもに位相の変化が関係していることが示唆された。

実験2では同じ分析を、Go/NoGo刺激呈示確率を変えて行った。反応時間は70%Go試行(230.4 ± 28.0ms)のほうが、30%Go試行(259.6 ± 38.3ms)より早く、NoGo試行での間違い反応は30%NoGo試行(7.6 ± 8.1%)のほうが70%NoGo試行(2.1 ± 2.1%)よりも多かった。

図5には実験2の結果をまとめて示した。ERPにおいては、前頭N2ピークは30%NoGo試行のほうが70%NoGo試行よりも大きかったが、他のピークには刺激呈示確率による差異は認められなかった(図5A)。

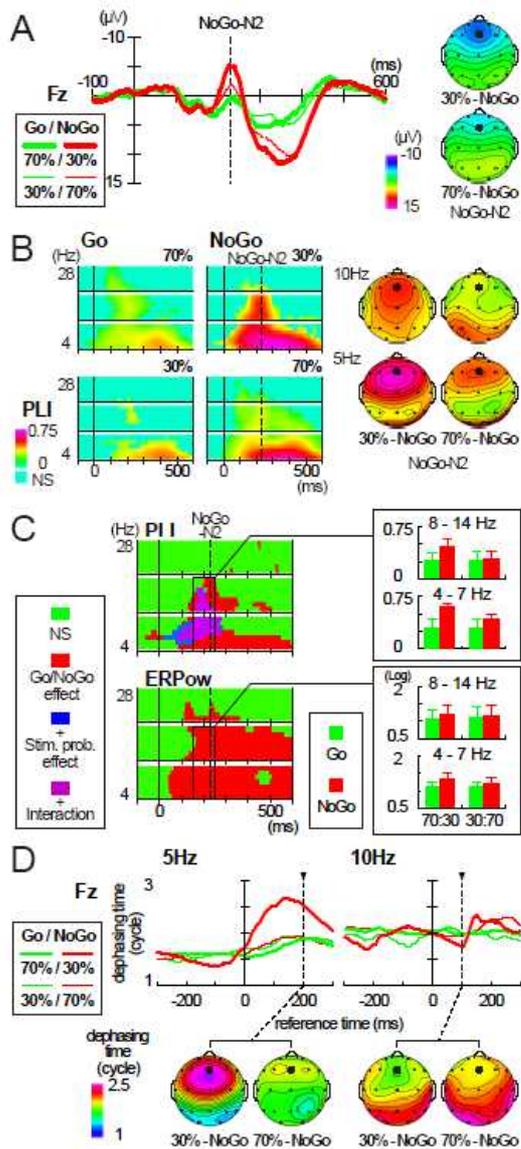


図5 刺激呈示確率を変えた Go/NoGo 試行中の EEG のダイナミクス

- (A) 前頭皮質の ERP
- (B) 前頭皮質の PLI の時間-周波数マップと頭蓋上マップ
- (C) 前頭皮質の PLI と ERPow における課題と刺激呈示確率の影響
- (D) 前頭皮質における位相散逸時間の変化と頭蓋上マップ

刺激呈示確率の影響は NoGo 試行中の前頭皮質の ERPow には認められなかったが、帯域における前頭皮質の PLI にのみ認められ、30%NoGo 試行で試行間の位相一致度が大きくなった(図 5B, C)。位相散逸時間の変化をみても、30%NoGo 試行で位相情報の喪失が顕著に見られた(図 5D)。

実験 2 の結果は、NoGo 刺激呈示確率の減少に伴う ERP の前頭 N2 ピークの増大、さらには「NoGo の意志決定」と前頭皮質脳波の

帯域の位相と関連することを示唆していた。

本研究では、ヒトの Go/NoGo 課題遂行中の「NoGo の意志決定」が、単一試行の帯域の脳波の位相ダイナミクスに反映されている可能性を示唆した。今後のさらなる詳細な単一試行脳波の研究と、指標としての応用が望まれるであろう。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3 件)

Yamanaka K., Yamamoto Y. Single-trial EEG power and phase dynamics associated with voluntary inhibition. *Journal of Cognitive Neuroscience* 2009 (印刷中) 査読有

Takeda Y., Yamanaka K., Nozaki D., Yamamoto Y. Extracting a Stimulus-unlocked Component from EEG during NoGo Trials of Go/NoGo Task. *NeuroImage* 41(3): 777-788, 2008 査読有

Takeda Y., Yamanaka K., Yamamoto Y. Temporal decomposition of EEG during a simple reaction time task into stimulus- and response-locked components. *NeuroImage* 39 (2) 742-754, 2008 査読有

[学会発表](計 6 件)

武田祐輔 佐藤雅昭 山中健太郎 野崎大地 山本義春 刺激に同期及び非同期した脳波成分の抽出手法の一般化. ニューロコンピューティング研究会 2009.3.11-13, 玉川大学, 町田市(東京都)

Kitajo K., Miyota R., Shimono M., Yamanaka K., Yamaguchi Y. Manipulation of synchronous neural oscillations and cognitive processes by transcranial magnetic stimulation. *Dynamic Brain Forum*, March 3 2009, Atami, Shizuoka, Japan

Yamanaka K., Yamamoto Y. Lateralized power and phase dynamics in single-trial EEG related to the motor response. *Society for Neuroscience 38th Annual Meeting*, November 15-19, 2008, Washington DC, USA

Yamanaka K., Yamamoto Y. NoGo-specific shortening of dephasing time in midline-frontal alpha-band ongoing EEG oscillation. *Society for Neuroscience 37th Annual Meeting*, November 3-7, 2007, San Diego, California, USA

Takeda Y., Yamanaka K., Nozaki D., Yamamoto Y. Extraction of covert response-locked EEG component in NoGo trials of Go/NoGo tasks. *Society for Neuroscience 37th Annual Meeting*,

November 3-7, 2007, San Diego, California, USA

Iizuka T. Yamanaka K. Yamamoto Y.
Context-dependent modulation of low beta-band EEG activity during continuous Stroop task. Society for Neuroscience 37th Annual Meeting, November 3-7, 2007, San Diego, California, USA

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕

特になし

6 . 研究組織

(1)研究代表者

山中 健太郎 (KENTARO YAMANAKA)
東京大学・大学院教育学研究科・助教
研究者番号 90359662

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし