

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H03143

研究課題名（和文）「好不調の波」を抑える：身体表現の揺らぎ発現メカニズムの解明

研究課題名（英文）Investigation of mechanism for movement fluctuation

研究代表者

阿部 匡樹（Abe, Masaki）

北海道大学・教育学研究院・准教授

研究者番号：40392196

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、他者や環境など外的環境との相互作用に伴う動作揺らぎの特性や要因を同定することを目的とし、以下の成果を得た。1) 共同力調整課題において、他者との協調関係に重要な役割を果たす神経基盤を同定し、その領域への経頭蓋交流電気刺激が自閉症傾向の強い参加者の他者協調の度合を修飾しうることを示した。2) 個人の到達運動課題において、本来修正が不要な一過性の環境変化に対しても潜在的修正が引き起こされること、そのような修正の大きさが外乱のない通常時の揺らぎの大きさと関連していることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

(1) 共同力調整課題のような共同行為時における他者協調の神経基盤の同定はほぼ前例がなく、学術的に高い価値を有する。また、この領域への電気刺激による非侵襲的介入によって他者協調行為の修飾を示したことは、コミュニケーション障害等の改善に今後大きく貢献しうる可能性を秘めている。
(2) 到達運動課題において、修正不要な一過性外乱への潜在的修正が通常時の潜在的修正や揺らぎと関与していることは、これまでの運動学習研究に新たな知見を加えた。通常時の揺らぎが小さい程（不要な）外部環境の変動にも惑わされがたいという発見は、スポーツトレーニングや指導の現場においても有用な示唆を与える。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to identify the characteristics and factors of movement fluctuations associated with interactions with others and the external environment. We have shown the following results: 1) In a joint force coordination task, the neural substrate that plays an important role in cooperative relationships with others was identified, and transcranial alternate current stimulation to this region could modified the degree of cooperation with others in participants with stronger autistic traits. 2) In an individual reaching task, transient environmental changes that did not require modification induced implicit modifications, and that the magnitude of such modifications was related to the magnitude of fluctuations in the absence of external disturbances under normal conditions.

研究分野：運動制御

キーワード：運動制御 揺らぎ 共同行為 到達運動 Hyperscanning

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

個人や複数人でスポーツを行うとき、我々のパフォーマンスは常に揺らぐ。我々の神経系がノイズを含む以上、この揺らぎは不可避なものではあるが、環境の一時的な変化、パートナーとの関係性など、外界との相互作用によっても揺らぎは生じうる。この変化が一時的で、かつ意図的に修正できる類のものであればいいが、詳細なフィードバックがない場合は当人が気づかぬうちに最適なパフォーマンスから乖離している可能性がある。

多くのスポーツにおいては、パフォーマンスの正確性・安定性がその成否を左右する。複数人で協力する共同行為、事故等からの回復を目指したリハビリテーションにおいてもそれは同様である。したがって、このような揺らぎがどのような状況で生じるのか、そしてどのような特性・介入によってこの揺らぎを最小限に留めることができるのかを検討することは、個人・複数人を問わず、スポーツやリハビリテーションの成功や発展に大きな貢献をもたらさう。

2. 研究の目的

本研究では共同課題と個人課題について、それぞれ以下の点を研究目的とした。

- (1) 共同課題において、パートナー間の協調関係に不要な揺らぎをもたらさうる他者との相互作用に重要な役割を果たす神経基盤(脳領域)を同定し、その領域への経頭蓋電気刺激がその相互作用の度合を修飾しうるか否かを明らかにする。

共同課題においては、パートナーとの適切な協調がそのパフォーマンスの精度・安定性に大きな影響を及ぼす。たとえば、二者間の協調が不適切な場合、課題における最適な均衡状態を維持できず、一方に課題の負荷が大きくなる状態が生じ得る。この均衡状態の不要な揺らぎを抑制するひとつの方法として、他者との協調度合を調整することが挙げられる。そこで、本研究では、まず共同課題において他者との協調度合を規定する脳領域を同定し、その脳領域に非侵襲的な介入(経頭蓋電気刺激)を行うことでこのような調整が可能か否かを検討することを目的とした。

- (2) 個人課題において、実際に起こりうるような非予測的・一過性の環境変化に対し、潜在的な修正が引き起こされるのか否か、また引き起こされるとすればどのような特性がこの潜在的修正に関与しているのかを明らかにする。

個人課題においては、外界の環境変化との相互作用がパフォーマンスの揺らぎに影響を与える。我々の運動は身体内外の変動に常にさらされているため、それに対応するための自身および環境の内部モデルの修正が実は潜在的に、無意識のうちに行われている。この修正が実際の環境変化に即した適切なものであれば問題ないが、修正の必要のない環境の変化→道具の故障、一時的な突風など一対しても無意識の修正が生じると、それは適切な調整ではなく、不要な揺らぎとなってその後のパフォーマンスを乱しうる。本研究では、このような無意識の修正が実際に生じているのかを同定し、かつこの修正度合と関連する個人の運動特性を見極めることで、どのような人のパフォーマンスが外界の変化に対して不要に揺らいでしまうのかを明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1)-1: 共同課題時の他者協調を規定する脳領域の同定

二者の脳活動を同時に記録可能な特殊な機能的磁気共鳴画像装置(functional Magnetic Resonance Imaging: fMRI)とそれに対応する握力計測装置を用い、二人組の握力の平均値を標的力に一致させ続けるという共同課題実験(30秒間)を19組のペアに対して行った(図1A, B, C)。そしてこの共同課題中の脳活動を、個人で同様の課題を行った時の脳活動と比較した。また、共同課題中の握力変動が、どの程度相手の変動の影響を受けているかを、ノイズ寄与率(NCR)という統計手法によって定量化し、この影響(他者との協調の度合)と関連のある脳領域を調べた。

(1)-2: 経頭蓋電気刺激による共同課題時の他者協調の調整

近年、頭部に微弱な電気刺激を適用することで、適用領域の脳活動を賦活・もしくは抑制するという経頭蓋電流刺激法が注目されている。本研究では、上記(1)-1で同定された脳領域に10Hzの微弱な交流電流を適用し(経頭蓋交流電流刺激法:以下tACS)、それによって共同課題における他者協調の度合が修飾されうるか否かを検討した。共同課題は上記(1)-1と同じ課題で、小型のフォースセンサを利き手の人差指で押す形で実施し、その力のデータからノイズ寄与率(NCR)を算出した。この共同課題中にtACSを適用したが、実際に電流を流すtACS条件に加えて電流を流さないsham条件を設定し、この2条件間のノイズ寄与率の差($NCR_{tACS-sham}$)を算出した。なお、tACSの効果の個人差を検討するため、自閉症傾向を50問の質問により検査する自閉症スペクト

ラム指数も記録した。

(2)-1：個人到達運動課題における無視すべき外乱に対する揺らぎと運動適応率の関係

実験参加者は7cm先の目標位置への到達運動課題を、自身の利き腕を用いて行った。課題はデジタルタブレットとディスプレイを用いて行われ、参加者自身の実際の腕の動きは見せず、それを反映したカーソルの動きがディスプレイ上に提示された。到達課題には3つのブロックがあり(図3A)、適応ブロック1では120回の到達課題中、1回につき0.25°の視覚回転外乱が適用された(120回時に30°の回転外乱)。適応ブロック2ではその状態で60回の試技を行い、その後維持ブロック(200回)が行われた。このブロックにおいて、統制群(20名)は適応ブロック2と同じく30°回転外乱の状態を試技が続行されたが、クランプ群(20名)は4回に1回の割合でエラークランプ刺激が適用された(計50回)。この刺激では、実際の運動とは関係なく16°のエラーが生じた状態をフィードバックし、かつそれは偽のフィードバックであることを参加者に明示した。

解析においては、維持ブロックにおける到達運動の平均角度を算出した。また、クランプ群においてはエラークランプ刺激直後の平均角度と適応ブロック1における適応率の大きさ(角近似直線の傾きにより算出)の相関を調べた。

(2)-2：個人到達運動課題における無視すべき外乱に対する揺らぎと通常の揺らぎの関係

上記(2)-1と類似の到達運動課題を用いて実験が行われた。この研究においては主に2つの課題ブロックが適用された。実験参加者はまず外乱のない通常条件下で到達課題を200回行った(ベースラインブロック)。その後練習を挟んで、エラークランプ刺激を含む適応ブロックが実施された(448回)。このブロックで適用されるエラークランプ刺激には3種の角度があり(±3°、±6°、±12°)、刺激直後にはフィードバックを与えず、その後最低1回の通常条件試技を挟んで次のクランプ刺激が適用された。各クランプ刺激は合計16回行われた。この研究でもエラークランプ試技は偽のフィードバックであることを参加者に明示した。

解析においては、各エラークランプ刺激直後の応答の大きさとベースラインブロックにおける揺らぎの大きさ(分散)の関係が相関係数により算出された。

4. 研究成果

(1)-1：共同課題時の他者協調を規定する脳領域の同定(文献1)

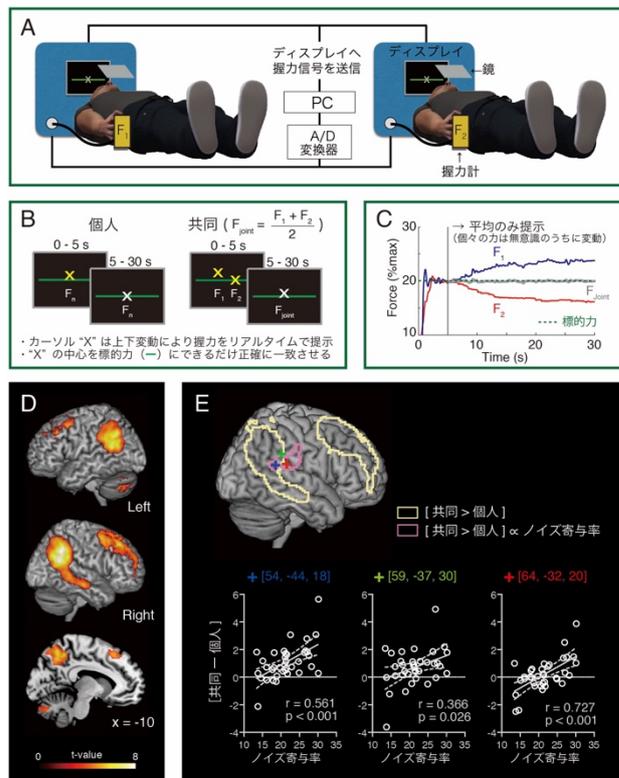


図1 A:2台のfMRIを用いた実験環境。B:個人および共同課題の概要。C:共同課題における握力変化の典型例。D:個人課題時と比べて共同課題時の活動が有意に大きい脳領域([共同>個人]、活動が大きいほど赤→白)。E:共同課題時のノイズ寄与率(グラフ横軸)と、rTPJ前方領域(+, +, +)の脳活動(共同課題時-個人課題時、グラフ縦軸)の関係。上段図の黄色枠は[共同>個人]の領域、紫色枠は[共同>個人]領域でかつノイズ寄与率との有意な相関を示した領域。

個人課題時と共同課題時の脳活動を比較した結果、内側前頭前皮質や楔前部、そして左右の側頭頭頂接合部(Temporo-parietal junction: TPJ)などの活動が共同課題時に有意に大きくなった(図1D)。これらの脳領域を伴う神経回路は他者の心情を思いやるような状況で活性化することが知られており、メンタライジングシステムと呼ばれている。この結果は、平均力を調整するという単純な運動課題においても、相手を思いやる高次の社会的な脳活動が生じていたことを示している。

また、ノイズ寄与率と脳活動の相関を調べた結果、相手からのノイズ寄与率が大きい(相手の変動の影響を大きく受けている)人ほど、共同課題時に右側の側頭頭頂接合部(rTPJ)前部の活動が大きいたことが明らかとなった(図1E)。すなわち、他者と共同行為を行うときにどの程度相手の動きと協調するかについて、この領域が非常に重要な役割を果たしていることが示唆された。また、この領域のペアの脳活動の相関は、非ペアのそれと比べて有意に大きいことも示され、共同行為特有の同期活動が生じていることが示唆された。

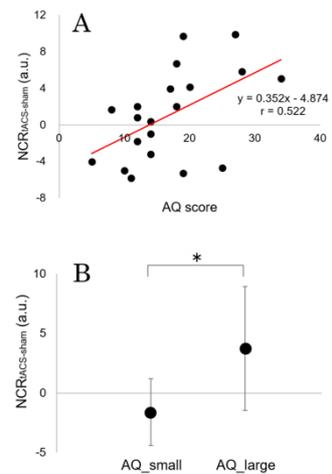
なお、rTPJは自己-他者の分別に重要な役割を果たすと考えられている。この分別がコミュニケーション能力に重要であることを追加検討するため、自己-他者の分別に有効な他者動作につ

られない訓練（模倣抑制訓練）を行わせた後に表情認識課題を行わせたところ、模様抑制訓練群は統制群に比べて表情認識能力だけでなく共感性も向上することが示唆された。この結果は自己-他者分別が対人コミュニケーションに重要な役割を果たすことを支持するものとなっている。

(1)-2：経頭蓋電気刺激による共同課題時の他者協調の調整

研究成果(1)-1によって同定された右側の側頭頭頂接合部（rTPJ）に10HzのtACSを適用した結果、その効果には個人差があり、全体としてはtACSによるノイズ寄与率の有意な増大は認められなかった。一方、tACS条件とsham条件におけるノイズ寄与率の差（ $NCR_{tACS-sham}$ ）と自閉症スペクトラム指数（AQ）の相関を調べたところ、有意な正の相関が示された（図2A）。また、AQの大小に基づいて実験参加者を2群に分け、各群の $NCR_{tACS-sham}$ を比較した結果、AQの大きい群において $NCR_{tACS-sham}$ が有意に大きかった（図2B）。AQは、その値が大きい程自閉症傾向が強いことを示している。このことから、rTPJへのtDCS適用は、自閉症傾向の強い参加者群において他者協調の度合を増大させることが示唆された。

図2 A: AQスコアと $NCR_{tACS-sham}$ の関係。B: AQ大小の2群における $NCR_{tACS-sham}$ の比較。



(2)-1：個人到達運動課題における無視すべき外乱に対する揺らぎと運動適応率の関係

統制群とエラークランプ群の到達運動角度を維持ブロックで比較したところ、エラークランプ群は有意に大きい角度を示した。このことは、無視すべき突発的なクランプ刺激のエラーに対しても、参加者が修正してしまっていることを示唆する。実際、エラークランプ群のクランプ刺激直後の運動角度はその前後に比べて有意に大きかった（図3B）。さらに、このクランプ刺激直後のエラー修正度合と適応ブロック1の適応率の関係を調べた結果、この二者には有意な正の相関が認められた（図3C）。適応ブロック1のような微小かつ段階的な適応には潜在的学習が関与しているため、この有意な相関はエラークランプ刺激に対する（不要な）応答が潜在的に行われていることを示唆した。

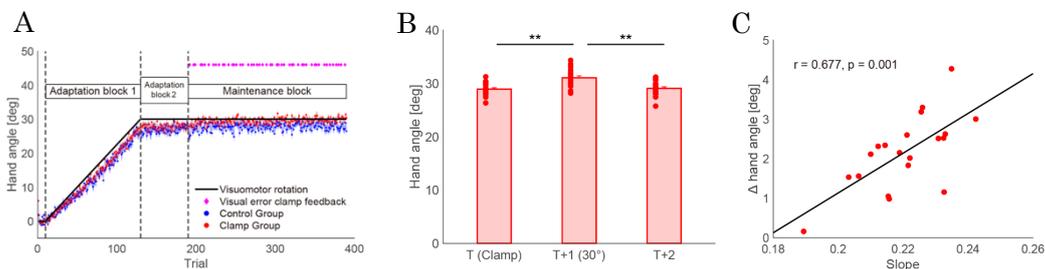


図3 A: 実験課題各ブロックと手の運動角度。B: クランプ刺激時(T)、刺激直後(T+1)、その後(T+2)の試技の角度変化。C: クランプ刺激直後のエラー修正度合(縦軸)と適応ブロック1の適応率(横軸)の関係。

(2)-2：個人到達運動課題における無視すべき外乱に対する揺らぎと通常の揺らぎの関係

ベースラインブロックでの揺らぎ（分散）とエラークランプ刺激直後のエラー修正度合の関係を調べた結果、 12° のクランプ刺激条件に関して、その修正度合の大きさとベースラインブロックでの揺らぎの大きさに有意な正の相関が示された（図4C）。この結果は、非外乱時の揺らぎが大きい参加者ほど、 12° のクランプ刺激に対して（不要に）応答してしまっていたことを意味し、通常時の揺らぎが環境変化に対する不要な揺らぎに関連していることを示唆した。

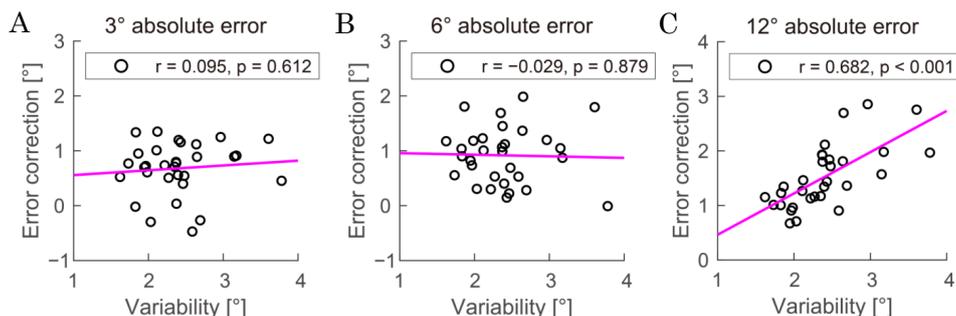


図4 通常時の分散（横軸）とエラークランプ刺激直後のエラー修正度合との関係。左から、 3° 条件（A）、 6° 条件（B）、 12° 条件（C）。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Matsuda N, Abe MO	4. 巻 1
2. 論文標題 Differences in the effect of transcranial direct current stimulation of the pre-supplementary motor area on imitation inhibition according to autism spectrum traits.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 PsyArxiv	6. 最初と最後の頁 1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.31234/osf.io/tdf58	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 Matsuda N, Abe MO	4. 巻 29
2. 論文標題 Imitation inhibition and facial expression recognition: imitation-inhibition training inhibits the impact of interference with facial mimicry.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Cognitive Studies: Bulletin of the Japanese Cognitive Science Societ	6. 最初と最後の頁 587-594
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11225/cs.2022.048	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 Abe MO, Koike T, Okazaki S, Sugawara SK, Takahashi K, Watanabe K, Sadato N	4. 巻 191
2. 論文標題 Neural correlates of online cooperation during joint force production	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 NeuroImage	6. 最初と最後の頁 150 ~ 161
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neuroimage.2019.02.003	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 Matsuda N, Abe MO	4. 巻 12
2. 論文標題 Error size shape relationships between motor variability and implicit motor adaptation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Biology	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/biology12030404	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 Matsuda N., Abe MO	4. 巻 177
2. 論文標題 Implicit motor adaptation driven by intermittent and invariant errors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Jxiv	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.51094/jxiv.177	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6件(うち招待講演 3件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 松田直祥, 阿部匡樹
2. 発表標題 模倣抑制トレーニングが表情認知に及ぼす影響
3. 学会等名 日本心理学会第85回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阿部匡樹
2. 発表標題 退くか, 担うか, 寄り添うか: 共同行為に潜む社会的意決定
3. 学会等名 北海道大学社会科学実験研究センター(CERSS)コロキウム(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Matsuda N, Abe MO
2. 発表標題 The effect of transcranial direct current stimulation of the pre-supplementary motor area on the imitation-inhibition task depends on the autism spectrum traits.
3. 学会等名 SfN Global Connectome(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阿部匡樹
2. 発表標題 共同行為における社会性：他者との協調を司る神経基盤を探る
3. 学会等名 日本心理学会認定心理士の会主催シンポジウム「社会関係を実証する心理学」（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 阿部匡樹
2. 発表標題 共同行為の神経基盤を探る：Hyperscanning fMRIによる挑戦
3. 学会等名 第63回日本社会心理学会ワークショップ「学際的な社会心理学の構築を目指して 若手研究者のための教育講演」（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Matsuda N, Abe MO
2. 発表標題 Implicit motor adjustment based on errors caused by external sources
3. 学会等名 NEURO2022（国際学会）
4. 発表年 2022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
研究分担者	小池 耕彦 (Koike Takahiko) (30540611)	国立研究開発法人理化学研究所・脳神経科学研究センター・ユニットリーダー (82401)	

6. 研究組織（つづき）

	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 分 担 者	野崎 大地 (Nozaki Daichi) (70360683)	東京大学・大学院教育学研究科(教育学部)・教授 (12601)	

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