

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：63905

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K20103

研究課題名（和文）運動のばらつきの特性とその脳内神経基盤の包括的理解

研究課題名（英文）Characteristics of motor variability and network-based neural flexibility

研究代表者

上原 一将 (Uehara, Kazumasa)

生理学研究所・システム脳科学研究領域・助教

研究者番号：90746661

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）：本研究は、運動のばらつきの原因と考えられている神経系ノイズを脳活動のばらつきや脳内ネットワークのゆらぎの観点からヒト皮質脳波（EEG）を用いて定量化し、運動のばらつきの運動制御機構における機能的意義について運動学習実験を通して理解することが狙いである。

20-80歳代の健康成人を対象とし、運動学習実験とEEG計測を用いて学習能力と脳活動を記録した。また、ネットワークコミュニティ抽出法を用いて脳ネットワークのflexibilityを定量化した。若年者は高齢者と比較して脳ネットワークのflexibilityが高いことが明らかとなり、flexibilityは運動学習に関する指標と関係がみられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、これまで計測ノイズとして考えられていた神経活動のばらつきの機能的意義を明らかにし、かつライフスパンにおいて脳機能結合のflexibilityが変化することを明らかにした。また、この脳機能結合のflexibilityが運動学習指標と密に関係することが明らかとなった。これは、新規運動学習手法の開発や高齢であつても加齢に打ち勝ち、新たな運動技能を効率的に学ぶ手法の提案に繋がると考える。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study was to quantify the neural noise that is thought to cause motor variability using human cortical electroencephalography (EEG) from the perspective of brain activity variability and fluctuations in brain networks, and to understand the functional significance of motor variability in the motor control mechanism through motor learning experiments. We recorded learning ability and brain activity using motor learning experiments and EEG measurements in healthy adults in their 20s to 80s. We also quantified the flexibility of the brain network using the network community extraction method. We found that the flexibility of the brain network was higher in younger subjects than in older subjects, and this flexibility was related to the index of motor learning.

研究分野：神経科学

キーワード：運動学習 加齢 脳波 Flexibility

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

楽器演奏あるいはスポーツ動作において反復して行う慣れ親しんだ動作であってもその瞬間瞬間 (i.e., 試行内) あるいは試行間で運動として表象される軌道は同一にはならず, これは“運動のばらつき”として捉えることができる。ミクロスケールレベルすなわち単一ニューロンレベルでは, 神経活動のノイズが運動のばらつきの原因として挙げられている。しかしながら, マクロスケールレベルでの神経ダイナミクスすなわち脳活動, 脳内ネットワークが運動のばらつきに与える影響は未だ明らかになっていない。本研究の目的は, 運動のばらつきの原因と考えられている神経系ノイズを脳活動のばらつきや脳内ネットワークのゆらぎの観点からヒト皮質脳波 (EEG) を用いて定量化し, 運動のばらつきの運動制御機構における機能的意義について運動学習実験を通して理解することである。本研究の仮説として脳内ネットワークのゆらぎすなわち flexibility は運動学習度と相関があり, flexibility が高い者ほど運動学習度が高いという仮説のもと研究を進めた (図 1)。

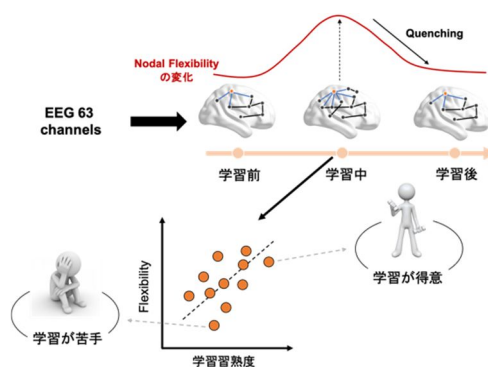


図 1: 本研究の仮説

### 2. 研究の目的

- (1) 本研究の目的は, 運動のばらつきの原因と考えられている神経系ノイズを脳活動のばらつきや脳内ネットワークのゆらぎの観点からヒト皮質脳波 (EEG) を用いて定量化し, 運動のばらつきの運動制御機構における機能的意義について運動学習実験を通して理解する。
- (2) 脳内ネットワークのゆらぎが加齢によってどのように変化し運動学習に影響を及ぼすかを明らかにする。

### 3. 研究の方法

20-80 歳代の健常成人 56 名を若年者群と高齢者群 (それぞれ 28 名ずつ) に分け研究を行なった。学習課題は, 視覚追従誤差を学習する課題であり, モニタの前に座った被験者はフォースセンサを用いて, 右示手指と小指で発揮された合成

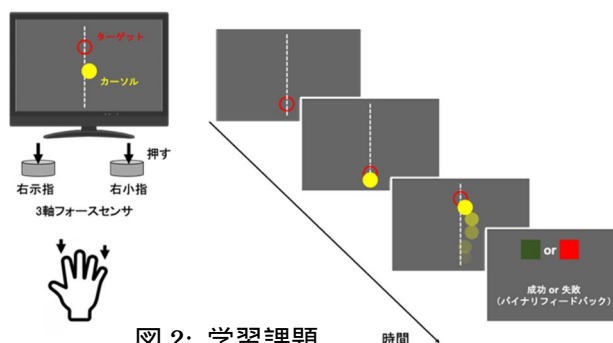


図 2: 学習課題

成フォース ( $F_{Total}$ ) により, モニタ下部から上部に垂直方向に移動するターゲットを合成フォースで駆動するカーソル (図 2) を用いて追従する課題とした。運動学習は学習効果をより顕著にするために誤差修正学習課題を採用した。右示指と小指のフォースの感度を 1:1 から 1:3 に変更しこの状況下に適用するように学習を促した。また, 各試行後に課題の成功/失敗をバイナリーフィードバックする強化学習要素も課題に加えた。被験者はベースラインセッション 50 試行 (誤差なし), 1 学習セッション 100 試行 (誤差あり), 学習後セッション 50 試行 (誤差なし) の合計 200 試行課題を実施した。試行中は 63 チャンネルの頭皮脳波を計測し, 得られた時系列脳波データからウェーブレット変換を用いて位相情報を抽出

しその位相情報をもとに脳波電極間位同期を算出した。電極間位同期はスライディングウィンドウ法を用いて細分化し、細分化された各ウィンドウで脳内ネットワークの flexibility 指標についてネットワークコミュニティ抽出法である Louvain 法を用いて算出した。運動学習指標に関しては、試行毎にカーソルとターゲットの時系列距離を算出し、平均値化した。この値は学習が進むほどカーソルとターゲットの距離は近くなり正確に追従ができるようになるため低値を示す。被験者個々の学習能力を定量化するために exponential function model を用いて運動学習指標をフィティングし、学習効率や学習継続度、学習保持能力を算出した。

#### 4. 研究成果

図 3 に運動学習成績を示す。若年者(青),高齢者(赤)ともにフォースセンサの感度に誤差を与えた初期にエラー (displacement) が増加し,その後 100 回の試行を通してエラーは徐々に減少し

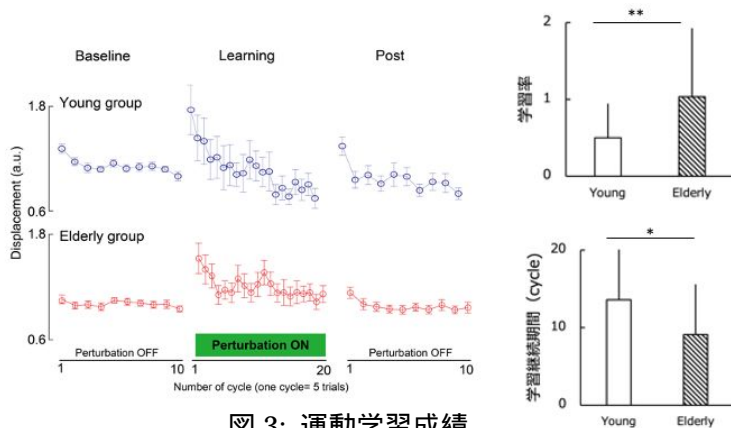


図 3: 運動学習成績

学習が行われた。Exponential function model によるフィティングから算出した学習率は若年者の方が高齢者よりも有意に低値を示した。これは、後半の試行まで学習し続ける継続性が高いことを意味する。また、学習がプラトーに達する cycle は若年者の方が有意に長いことが明らかとなった。これらの結果から高齢者は早期に学習がプラトーに達するのに対して若年者は長い期間かけて学習を継続できることが示唆された。

脳波位同期をもとにした脳波全チャンネル機能結合から算出した flexibility の結果に関しては、グループ (若年 vs 高齢), Time (課題前 vs バイナリフィードバック後), 脳波周波数 (Theta, alpha, beta) の 3 要因による Mixed-design repeated-measures three way ANOVA の結果から、Time, 脳波周波数の主効果とグループ × Time, グループ × 脳波周波数, グループ × Time × 脳波周波数の交互作用で有意差が認められた。事後比較検定の結果から、若年者と高齢者では alpha (8-12Hz) 帯域に有意な差がみられ、若年者の方が高齢者と比較して脳内ネットワークの flexibility が高いことが明らかとなった。

脳波 flexibility の周波数, Time がどのように運動学習指標と関連するかその特徴量を選択するために脳波 flexibility のパラメータを説明変数とし、統計学的機械学習のひとつである LASSO 回帰を実施した。表 1 に結果を示す。若年者では課題開始前の alpha 帯域の flexibility が学習の保持 (retention) や学習継続性に関連し、高齢者では、毎試行後に与えられたバイナリフィードバック直後の beta 帯域の flexibility が学習率と関連することが明らかになった。

表1: LASSO解析の結果

|         | Learning rate  | Retention      | Learning duration |
|---------|----------------|----------------|-------------------|
| Young   | ×              | Alpha band pre | Alpha band pre    |
| Elderly | Beta band post | ×              | ×                 |

以上、本研究結果から、脳機能結合の flexibility は運動学習を支える神経基盤であり、高齢者と若年者では運動学習と flexibility の関係性が異なることが明らかとなった。若年者では各試行前の準備期での flexibility が重要であり、高齢者はフィードバック直後の flexibility が学習に参与することが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>上原一将                         | 4. 巻<br>93          |
| 2. 論文標題<br>非侵襲的脳刺激から紐解く運動機能を支える神経メカニズム | 5. 発行年<br>2021年     |
| 3. 雑誌名<br>心理学ワールド                      | 6. 最初と最後の頁<br>13-16 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>なし          | 査読の有無<br>無          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>上原一将, 萩原淳, 北城圭一  |
| 2. 発表標題<br>Age-related changes in flexible brain networks: how network flexibility influences aging effects on error-based motor learning |
| 3. 学会等名<br>Neuro2022（国際学会）  |
| 4. 発表年<br>2022年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|