

プログラム名：脳情報の可視化と制御による活力溢れる生活の実現

PM名： 山川 義徳

プロジェクト名：携帯型 BMI

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平成 29 年度

研究開発課題名：

脳状態推定と誘導

研究開発機関名：

国際電気通信基礎技術研究所

研究開発責任者

今水 寛

# I 当該年度における計画と成果

## 1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

### 機械学習推定チーム

ステージ1から引き続き、様々な年齢の被験者のリクルートを行い、認知機能の低下を特徴づける結合パターンを特定することを行う。ステージ2までに特定した、認知機能の低下を特徴づける結合パターンをニューロフィードバックトレーニングで変更することを行う。

また、平成28年度に成功した恐怖記憶の消去を基礎とし、社会応用の1つ「ストレス社会における健康な脳の実現」を視野に入れた、安全性の確保のための追加検証実験を実施する。

### 時空間脳情報解析チーム

EEG-fMRI同時計測の第2期実験を行い、情動性脳活動の推定モデルの開発及びEEG Fingerprintを用いた情動状態・特性の予測技術を確立する。

ステージ2で取得したEEG-fMRI同時計測データまたはEEGデータから関心脳領域またはネットワークの脳活動の変化を予測するモデルに基づき、ストレス状態やうつ状態の改善するEEGニューロフィードバックトレーニング法の開発を行う。

### NIRSニューロフィードバックによる認知機能の低下の防止と回復チーム

ステージ1での成果をもとに、より解析処理を簡単に行なえるようにNIRS脳機能結合解析ソフトウェアを開発する。NIRSによる機能結合がどの程度fMRIで計測される機能結合を反映しているか評価するために、レスティング拡散光トモグラフィ法によるレスティング実験データの解析・評価を行う。

### 個人特性予測チーム

脳状態推定法の開発では、H28年度に作成した予測モデルに基づくNIRSによるモニタリングシステムの開発を行う。高密度NIRSによる精確な脳結合計測法の開発では、レスティング高密度NIRSとレスティング従来NIRSの性能をレスティングfMRIを基準として評価検証を行う。

## 2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

### 2-1 進捗状況

#### 機械学習推定チーム

36人の被験者を対象として、認知機能（作業記憶課題）の行動訓練を5日間行った。このうち、作業記憶成績に顕著な変化が見られなかった6名を対象として、ニューロフィードバック（NF）訓練を行った。NF訓練による、作業記憶成績の向上には個人差が見られたが、NF訓練による機能的結合の変化が大きい被験者ほど、作業記憶成績が向上する傾向が見られた。

恐怖記憶を消去するニューロフィードバックに関して、二重盲検を用いたデコーディッドニューロフィードバック法により被験者に一切苦痛を与えず恐怖反応を減弱することに成功し、ニューロフィードバック法で得られる効果はプラセボでは説明できないことを示した（PNAS, 2018）。

#### 時空間脳情報解析チーム

安静時およびワーキングメモリ課題中のEEG-fMRI同時計測データ6名分と、情動喚起課題中の

EEG-fMRI 同時計測データ 4 名分を取得した。これを用いて、fMRI 研究の知見に基づく EEG 特徴量として、SPLICE (Hirayama et al., 2017)を開発し、 $\alpha$  帯域の電極間共分散も有望であることを示した。SPLICE 成分を用いた EEG ニューロフィードバックの予備実験を 2 名分完了し (1 名途中中止)、課題の洗い出しとともに、本実験のプロトコルについて多方面から検討した。

### NIRS ニューロフィードバックによる認知機能の低下の防止と回復チーム

fMRI で得られている知見を NIRS に適用するために、引き続き安静状態での脳活動計測を、fMRI と NIRS の同時計測により 36 例実施した。また、NIRS から予測する認知機能の指標として、作業記憶課題を実施した。

### 個人特性予測チーム

1. ひらめき課題の成績 (ひらめきスコア)と相関する脳領域・脳結合をレストイング fMRI および構造 MRI データから特定した。
2. fMRI データに基づきバーチャル NIRS データを生成し、ひらめきスコア予測モデルを作成した。
3. 20 名のレストイング高密度 NIRS データを解析し、レストイング拡散光トモグラフィ法を用いて計算した機能結合の評価を、レストイング fMRI 機能結合との一致度・ラン間の再現性という観点から評価を行った。

## 2-2 成果

### 機械学習推定チーム

図 1 A に 36 人の被験者を対象とした作業記憶課題の行動レベルの訓練結果を示す。作業記憶成績に顕著な変化が見られなかった 7 名のうち、6 名から NF 訓練への参加の同意を得られた。6 名を対象として、前頭-頭頂ネットワーク内の機能的結合を高める NF 訓練を 4 日間行った。訓練日数とともに、機能的結合値の分布が増加の方向へ移動する様子が確認できた (図 2)。NF 訓練の前後で調査した作業記憶成績の変化には、個人差が見られたが、平均としては直前から直後にかけて、増加傾向が見られた (図 1 B)。NF 訓練による機能的結合の増加が大きい被験者ほど、作業記憶成績が向上する傾向が見られた (図 1 C)。

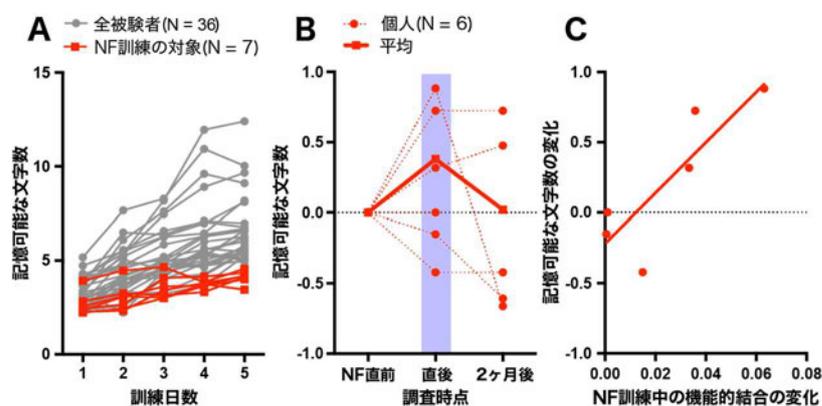


図 1 行動レベルの作業記憶訓練とニューロフィードバック (NF) 訓練の効果

(A) 行動レベルの訓練による作業記憶成績 (記憶可能な文字数) の向上。行動訓練で顕著な向上が見られなかった 7 名 (赤線) のうち、6 名から NF 訓練に参加する同意を得た。(B) 6 名の NF 訓練の前後における作業記憶成績の変化。NF 訓練直前の成績を基準 (0) として、直後と 2 ヶ月後の変化を、記憶可能な文字数で示す。(C) NF 訓練による前頭-頭頂ネットワーク内の機能的結合の変化 (横軸) と、

NF 訓練直前から直後への作業記憶成績の変化（縦軸）. 機能的結合の増加が大きい被験者ほど、記憶可能な文字数が増加する傾向が見られた。

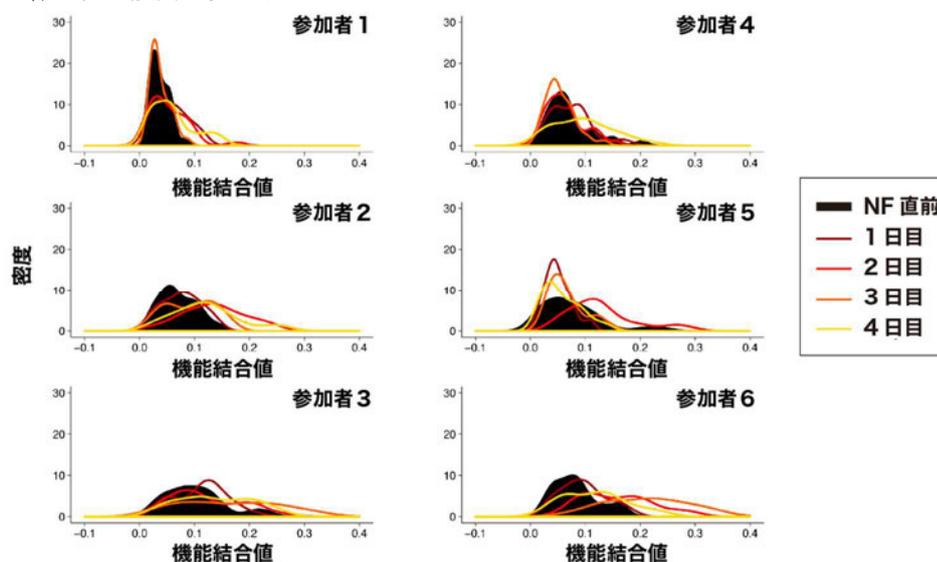


図2 NF 訓練による機能的結合値（前頭-頭頂ネットワーク内）の変化  
ネットワーク内の全ボクセル間で計算した時間相関値を機能的結合値とした。結合値の分布を参加者ごとに示す。NF 直前の分布（黒塗り）から、訓練日数が増えるにつれて（赤→オレンジ）、増加の方向に結合値の分布が移動する様子を確認できた。

#### 時空間脳情報解析チーム

fMRI 安静時脳機能ネットワークの状態を推測するのに適した、階層型の EEG 脳情報表現法 SPLICE を提案した (Hirayama et al., ICML2017)。今年度取得した安静時 EEG-fMRI 同時計測データに適用したところ、そのうち1名でうつめの fMRI ニューロフィードバックで用いられている領野間結合と相関する SPLICE 成分が発見された (Ogawa et al., rtfin2017)。また、 $\alpha$  帯域の EEG 電極間共分散を用いて、情動喚起課題中の扁桃体活動がある程度予測できることを示した (Moriya et al., rtfin2017)。

#### NIRS ニューロフィードバックによる認知機能の低下の防止と回復チーム

fMRI と NIRS の同時計測および作業記憶課題を 36 例実施した。同時計測については、10 分間の安静時脳活動を 1～2 回（プローブを取り付けるのにかかった時間による）と構造画像を計測した。作業記憶課題については、1) 数唱 (Digit Span) :画面に次々に提示された数字を順番通り、もしくは、逆の順番で復唱する、2) 図形特徴の短期的な記憶と再生：画面に提示された線分の色と傾きを正確に再現する、3) 空間的作業記憶：画面に提示された複数のドットの位置を再現する、ことを行ってもらった。

#### 個人特性予測チーム

個人特性予測チームでは上記 3 つの実施項目に対応して次のような成果を得た。

1. 約 150 人についてひらめき課題の成績（ひらめきスコア）と相関する脳結合を調べたところ、右楔前部と右中側頭部、左小脳と右中眼窩前頭皮質、左小脳と左補足運動野の 3 つの結合が同定された (図 3)。比較的大きなデータセットを使って、データドリブンにひらめきと相関する結合を調べた世界初の研究として研究成果を、Scientific reports 誌に投稿した。
2. fMRI データに基づき 150 人に対応するバーチャル NIRS データを生成し、バーチャルひらめきスコア予測モデルを作成し予測精度を評価した。全頭計測・頭皮血流なしという理想的な計測条件で評

価したが、予測精度はチャンスレベルにとどまった。この結果は、NIRS で計測可能な脳表領域だけではひらめき予測が難しいことを示唆している。

3. レスティング拡散光トモグラフィ法を用いて計算した機能結合とレスティング fMRI 機能結合との一致度の評価をおこなったところ、結合パターンの類似度(脳表領域に限る)として  $R=0.3\sim 0.4$  程度、2つのラン間の DOT 結合の再現性として  $0.6\sim 0.7$  程度のスコアを得ることが分かった。NIRS では計測が難しい連合野のネットワークを評価した初めての結果である。

## 2-3 新たな課題など

特になし

## 3. アウトリーチ活動報告

### 機械学習推定チーム

恐怖刺激を見せることなく、恐怖記憶を消去するニューロフィードバックの基礎技術開発に関して報道発表（二重盲検により恐怖記憶緩和の効果を証明 ～レディメード脳情報解読によるニューロフィードバック法～平成 30 年 3 月 6 日）、新聞、インターネット等で広く報道された。

### 時空間脳情報解析チームと個人特性予測チーム

幅広い情報工学の研究者向けに、情報処理学会誌 2018 年 1 月号の特集「脳情報科学が拓く AI と ICT」に解説記事「人を理解するための BMI 技術」（川鍋、山下、森本著）を寄稿し、当プロジェクトにおいても関連する研究開発を実施していることを紹介した。また、2 月 4 日の NHK スペシャル「人体 神秘の巨大ネットワーク」のための取材協力として、fMRI データから得られる脳内ネットワークの解析を行い、その結果が放映された。