

前頭前野外側部のヘモグロビン濃度解析による課題非依存性思考状態の客観的評価

小濱 剛¹, 吉田 久¹, 山脇伸行², 濱野友紀³, 清水達央³

要旨

従事すべき作業とは関係の無い考え事に注意が奪われている状態では、覚醒水準とは無関係に判断や応答といった認知パフォーマンスが低下するため、判断ミスなどのヒューマンエラーによる事故をもたらす危険性が高くなるが、作業者がそうした状態に陥っていることを客観的に評価することは極めて困難である。本研究では、課題とは無関係な考え事をしている状態を課題非依存性思考状態と定義し、このような課題非依存性思考状態が、認知パフォーマンスに与える影響の客観的な評価を目的として、あらかじめ提示された8桁の数字の記憶を維持しつつ、同時に課せられた視覚探索課題を遂行する際の、目標探索時間や前頭前野外側部の近赤外線スペクトロスコピー (Near-Infrared Spectroscopy: NIRS) 信号を解析した。実験の結果、複数の視覚属性の組み合わせにより定義された視対象の中から唯一の特徴を持った目標を探索する場合においてのみ、課題非依存性思考の有無により目標探索時間が影響されることが示された。また、この条件においてはNIRS信号から推定された前頭前野外側部の賦活度が高まることも示唆された。これらのことから、課題非依存性思考によって前頭前野の情報処理リソースが消費されることが示唆され、こうした状況下では、認知タスクのパフォーマンスが影響を受ける可能性が示された。

キーワード: 課題非依存性思考, 前頭前野外側部, 近赤外線スペクトロスコピー, 視覚探索, 視覚的注意

1. 緒論

我々は、時々刻々と変化する環境の中から膨大な感覚情報を同時並列的に取得し、その時点での周辺環境に最も適合する行動を選択するための認知処理を行っている。このような中枢神経系における感覚情報の取捨選択機能を「注意」と呼び、その研究の端緒は、19世紀のHelmholtzによる実験にまで遡るとされる⁽¹⁾。聴覚刺激の弁別を対象としたBroadbentの報告⁽²⁾などから近代的な注意研究が進められ、Posnerらによって、あらかじめ注意を向けた空間的位置に対する視覚情報の取得と応答の促進効果が定量的に計測されたことから⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾、視覚に関する注意（視覚的注意）研究が盛んとなり、様々な方面からの研究がなされてきた。

こうした注意のプロセスが生じる前の段階を「前注意過程」といい、脳の情報処理リソースを消費することなく、異なる視覚属性ごとに並列で処理される。これに対し、周辺状況に応じて詳細な情報処理を加える過程を「注意過程」と呼ぶ。前注意過程で並列的に処理された情報は、注意が向けられた場所において、統合がなされるとの説が有力であり、特徴統合理論として知られている⁽⁶⁾。このような逐次的かつ系列的な情報処理や統合には注意のリソースが必要とされるが、注意リソースの総量が一定であることや、注意の範囲が狭くなると処理の深さは深くなり、逆に注意の範囲が広がると処理の深さが浅くなるといった関係がある⁽³⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

一般に、何らかの作業を行う際は、認知、判断、行動が繰り返されるが、前注意過程のみで認知や判断が行えるケースは稀であり、多くの場合は注意過程を伴った周辺状況の認知の後に、判断や行動が行われている。

原稿受付 2013年7月16日

本研究は、近畿大学生物理工学部戦略的研究 NO.11-I-3 2012, および, JSPS 科研費 24560534 の助成を受けた。

1. 近畿大学生物理工学部 システム生命科学科, 〒649-6493 和歌山県紀の川市西三谷 930

2. 近畿大学生物理工学部 医用工学科, 〒649-6493 和歌山県紀の川市西三谷 930

3. 近畿大学生物理工学部 電子システム情報工学科, 〒649-6493 和歌山県紀の川市西三谷 930

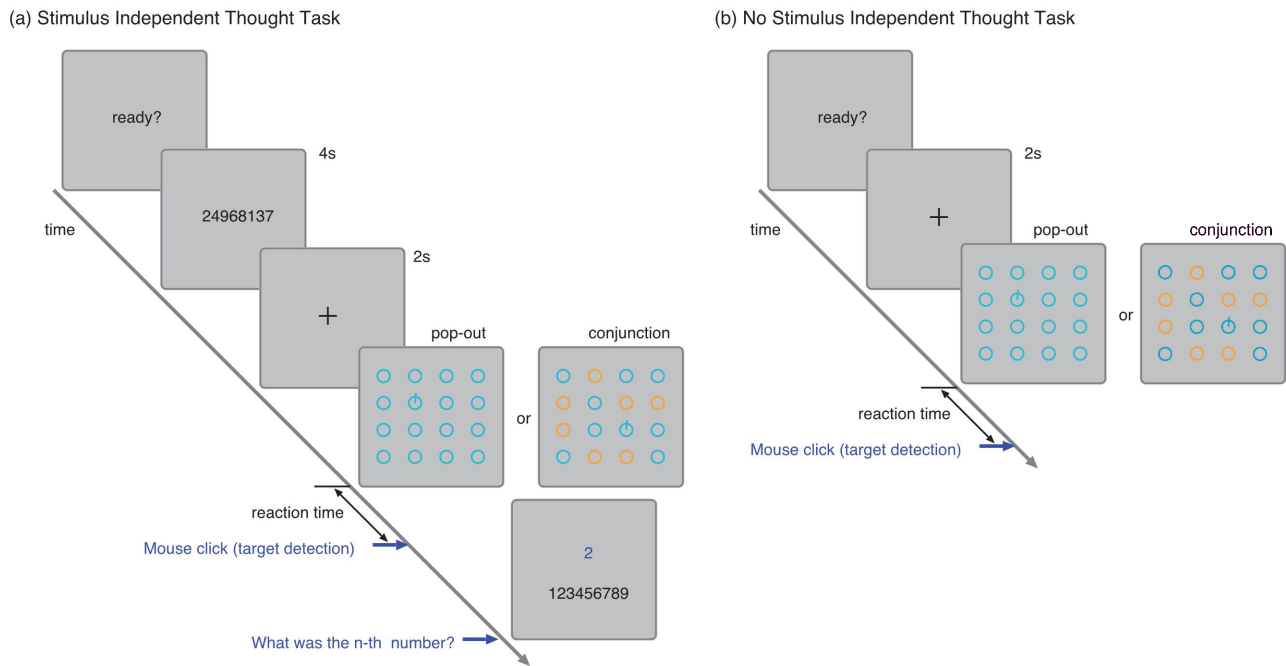


図1 実験プロトコル： (a) SIT 条件 (b) No-SIT 条件

と考えられる。ところが、認知的な負荷の小さい単純な作業を繰り返す場合では、徐々にその課題に慣れ、課題遂行のための注意が必要とされなくなってしまう、余剰の注意リソースによって、作業とは無関係な考え事 (Stimulus-Independent Thoughts: SIT) が生じやすくなり、覚醒水準とは無関係に判断や応答などの認知パフォーマンスが低下するとされる⁽⁹⁾。

ある種の作業を行なう際は、その負荷に応じて注意リソースが消費され、総量の制限の中で作業ごとにリソースが適切に分配されると考えられるが⁽³⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾、SIT 時のような作業以外のイベントに注意が奪われてしまうと、作業を遂行するために本来必要とされる注意のリソースが十分に確保できない状態となり、作業の精度や効率が低下し、いわゆるヒューマンエラーを引き起こす原因にもなりうる。しかしながら、このような SIT 状態に陥ることによって生じる危険性の検出や予測はきわめて難しく、実効性のある対策技術は未だ確立されていない。

ヒトの思考や意思決定の中核は、前頭前野の外側部にあるとされる⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。課題とは無関係な考え事においても、前頭前野の機能が関与すると考えられることから、この領域の活動を定量的にモニタリングすることにより、SIT 状態に陥っているか否かの判断が可能となることが予想され、ヒューマンエラーのリスクを評価するための判断基準になりうるものと思われる。

そこで本研究では、注意が奪われている状態が認知パフォーマンスに与える影響をとらえることを目的として、課題とは無関係な考え事を行っている状態を注意が奪われている状態と定義し、あらかじめ提示された 8 桁の数字を記憶させ、同時に課した視覚探索課題における目標探索時間および近赤外線分光鏡 (Near-Infrared Spectroscopy: NIRS) による前頭前野外側部のヘモグロビン濃度変化を計測して解析を行い、認知パフォーマンスへの影響を客観的に評価した。

2. 実験

2.1. 実験プロトコル

本研究では、視覚探索課題を遂行している間、あらかじめ提示された 8 桁の数字の記憶を保持させた場合と、視覚探索課題のみに従事させた場合との比較を行い、課題とは無関係な脈絡のない考え事に相当する認知的負荷の影響がタスクパフォーマンスおよび脳活動に及ぼす影響について定量的に評価した。実験のタイムチャートを図 1 に示す。

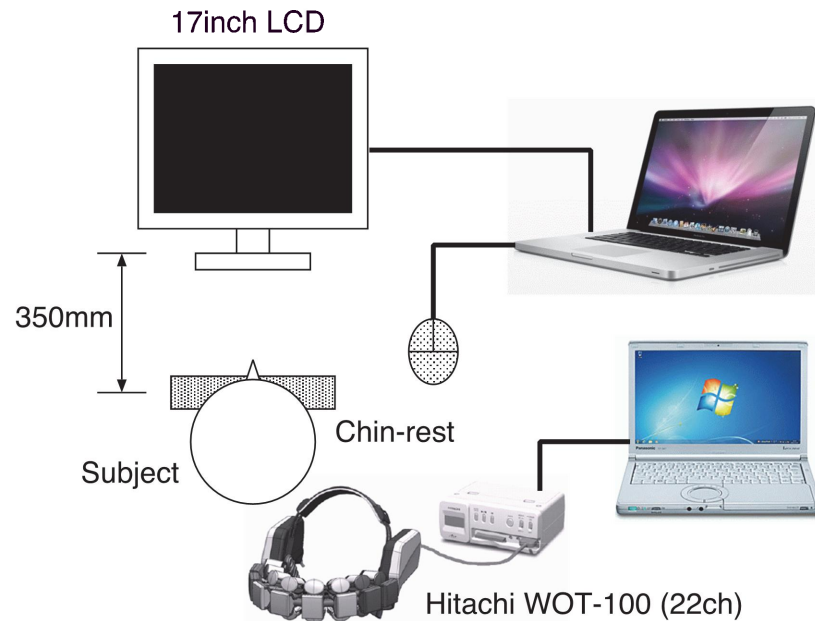


図 2 実験環境の概要

視覚探索課題は、(1) pop-out 課題、(2) conjunction 課題の 2 つに分類し⁽¹²⁾、さらに、それぞれの課題において、あらかじめ提示された 8 桁の数字を記憶させた (a) 考え事あり条件 (SIT 条件) と (b) 考え事なし条件 (No-SIT 条件) の 2 つの条件を設けた。pop-out 課題では、目標刺激を極めて容易に発見することができるが、conjunction 課題では視線を移動させながら唯一の特徴を持ったアイテムを探索する必要があるために、そのための注意リソースを要することになる。

視覚刺激は、直径 1.64deg の円からなる複数の妨害刺激と、これに 1.30deg の直線を加えた目標刺激 1 つから成り、刺激数 (アイテム数) を 25, 36, 49 とすることで課題の難易度を統制した。pop-out 課題では、目標刺激、妨害刺激ともに青か橙のいずれかの色で提示した。conjunction 課題では、半数の刺激を青、残りの半数を橙とし、重複するもののない唯一のアイテムを目標刺激とした。また、被験者が目標刺激を発見する前に反射的に反応してしまうのを避けるために、約 20% の割合で目標刺激が存在しない試行を含めた。

被験者には、目標刺激を発見すると同時にマウスをクリックすること、目標刺激がない場合が含まれていることを教示し、視覚刺激の提示開始からマウスクリックまでの時間を反応時間として記録した。視覚探索課題終了と同時に回答セッションが開始され、試行開始前に提示された数字に対して、指定された桁の数字を報告させた。被験者には回答の正誤をフィードバックし、可能な限り正確に想起するように教示した。これを 1 試行として 60 試行繰り返し、この間の前頭前野外側部の NIRS 信号を計測した。

被験者は、健康な 22 歳の男性 1 名 (HM) と女性 2 名 (KA, YI) の合計 3 名であった。KA と YI は、予備実験を含めて同様の実験に参加した経験を有する、良く訓練された被験者であった。

2.2. 実験環境

図 2 に実験環境の概要を示す。NIRS 計測器には、日立製作所のウェアラブル光トポグラフィ WOT-100 にブローブユニットを追加し、22 チャンネル計測が可能なものを使用した。各チャンネルのサンプリング周波数は 5Hz であった。ヘモグロビン濃度変化への身体動作によるアーチファクトの混入を抑えるため、被験者の頭部を顎台で固定した。視覚刺激の提示には、17 インチの汎用液晶ディスプレイを用い、被験者と実験用ディスプレイ

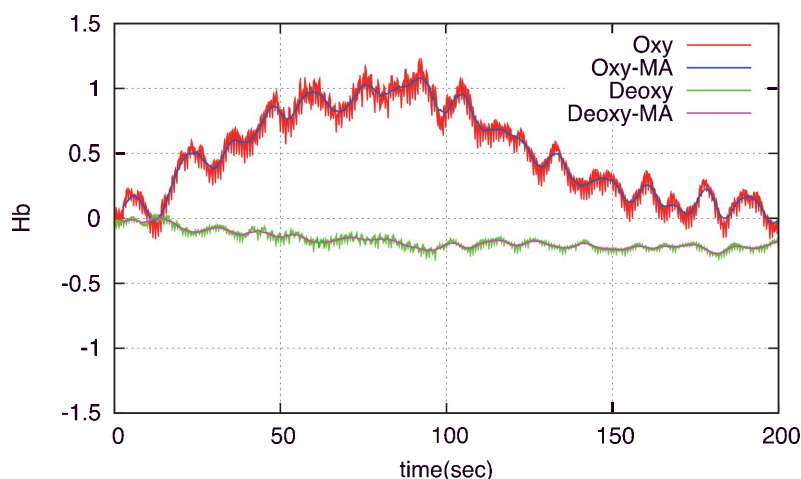


図 3 NIRS 信号の一例

の間の視距離を 350mm に設定した。視覚刺激の制御と被験者の応答の計測には Apple 製 MacbookPro 13inch を、NIRS 計測器用ホスト PC には Panasonic 製 Let's note CF SX を用いた。本研究では、精緻な時間同期を取る必要がなかったために、視覚刺激提示用 PC と NIRS 計測器用ホスト PC の内部時計を同一の時間サーバに一致させ、計測時刻を記録することで両者を同期させた。計測された NIRS 信号の例を図 3 に示す。赤線と青線は酸素化ヘモグロビン (oxy-Hb) 濃度の測定データとその移動平均を、緑線とマゼンタ線は脱酸素化ヘモグロビン (deoxy-Hb) 濃度の測定データとその移動平均を示している。

2.3. データ解析

局所的な脳活動が生じた領域には、酸素およびグルコースの代謝が亢進し、これに伴って脳血管が拡張して脳血流が上昇する。これを神経血管カップリングという。このとき、神経細胞を取り巻く毛細血管も拡張し、血管内のヘモグロビンの酸化還元率が上昇するが、自律神経系による血管の収縮拡張など、動静脈の拍動によるヘモグロビン濃度も同時に変動する。このように、NIRS により計測された毛細血管および動静脈の由来の血流成分の変動が混在する状況は、次のように定式化される⁽¹³⁾。

$$\begin{bmatrix} \Delta HbO \\ \Delta HbR \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta HbO_F \\ \Delta HbR_F \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta HbO_S \\ \Delta HbR_S \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \Delta HbR_F \\ \Delta HbR_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_F & 0 \\ 0 & k_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta HbO_F \\ \Delta HbO_S \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 ΔHbO および ΔHbR は、計測データにおける oxy-Hb と deoxy-Hb の時間変化を表す。添字の F と S は、それぞれ毛細血管由来の脳機能成分 (functional component) と動静脈由来の全身性成分 (systemic component) を意味する。Yamada らによると、oxy-Hb、deoxy-Hb 変化量に含まれる脳機能成分と全身性成分は、ごく単純な比例関係で表されるとされ⁽¹³⁾、この比例定数をそれぞれ k_F 、 k_S とする。このことから、脳機能成分および全身性成分の oxy-Hb、deoxy-Hb の変化量は、以下のように表される。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta HbO_F \\ \Delta HbR_F \end{bmatrix} &= \frac{1}{k_F - k_S} \begin{bmatrix} -k_S & 1 \\ -k_F k_S & k_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta HbO \\ \Delta HbR \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} \Delta HbO_S \\ \Delta HbR_S \end{bmatrix} &= \frac{1}{k_F - k_S} \begin{bmatrix} k_F & -1 \\ k_F k_S & -k_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta HbO \\ \Delta HbR \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

脳機能成分および全身性成分に由来する血流量の時間変化は、互いに高い独立性を示すと考えられる。このことから、 k_F および k_S は、次式により定義される両成分間の相互情報量 $I(k_F, k_S)$ を最小化する値の組み合わせとして定められる。

$$I(k_F, k_S) = \sum_{\Delta HbO_F} \sum_{\Delta HbO_S} p(\Delta HbO_F, \Delta HbO_S) \cdot \log \frac{p(\Delta HbO_F, \Delta HbO_S)}{p(\Delta HbO_F) \cdot p(\Delta HbO_S)} \quad (3)$$

ここで、 $p(X)$ は変数 X の確率密度関数、 $p(X, Y)$ は変数 X, Y の同時確率密度関数である。

脳神経活動に伴う局所的な血流変化の特性は、従事する課題には依存しないものと考えられることから、 k_F は特定の値に定まると仮定できる。本研究では、Yamada らの定義に従い、これを $k_F = -0.6$ とした。他方、全身性成分の定数 k_S は、身体動作の向きや大きさによって変動することから、計測データ毎に相互情報量 $I(k_F = -0.6, k_S)$ を最小化する k_S の値を算出した⁽¹³⁾。得られた分離信号から、脳機能成分のみを評価対象として用いた。

図 3 の計測データに対して、上記の手法により NIRS 信号を脳機能成分と全身性成分に分離した結果を図 4 に示す。図 4 (a) は脳機能成分、(b) は全身性成分であり、赤線は oxy-Hb 濃度変化を、緑線は deoxy-Hb 濃度変化を表している。

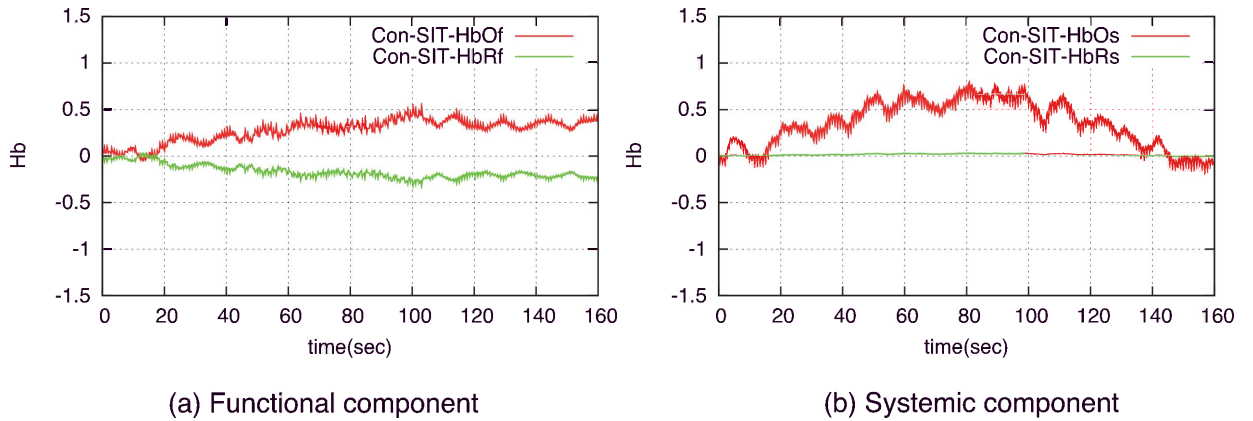


図 4 NIRS 信号の分離処理結果： (a) 脳機能成分 (b) 全身性成分

分離して得られた脳機能成分信号の oxy-Hb 信号 $HbO_F(t)$ と、deoxy-Hb 信号 $HbO_R(t)$ は、基本的に逆位相の変動を持つ。そこで、これらの差分信号 $D_{od}(t)$ を以下のようにして求め、これを脳活動量の評価指標として用いる。すなわち、 $D_{od}(t)$ の値が正の方向に大きいほど、その領域の賦活度が高いことを表し、値が小さければ安静に近い状態にあることを意味する。

$$Dod(t) = HbO_F(t) - HbR_F(t) \quad (4)$$

図5に、conjunction課題において計測されたデータから得られた $D_{od}(t)$ の一例を示す。緑線はSIT条件、赤線はNo-SIT条件のデータであり、マゼンタと青線はそれぞれの移動平均を取ったものである。この例では、SIT条件の方がNo-SIT条件よりも、脳活動の賦活動度が高いことがわかる。

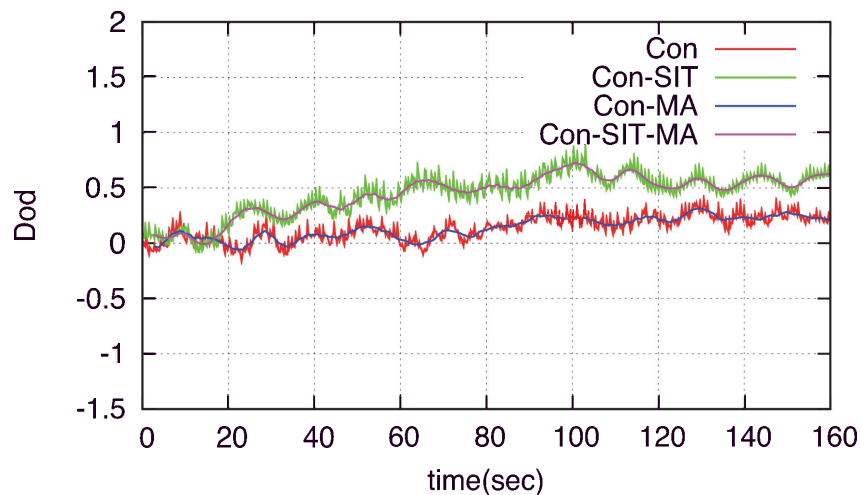


図5 oxy-Hb と deoxy-Hb の差分信号の一例

3. 実験結果

3.1. 目標探索時間

各被験者における目標探索時間を図6に示す。縦軸は目標探索時間、横軸は左から順に conjunction 課題の SIT 条件, No-SIT 条件, pop-out 課題の SIT 条件, No-SIT 条件である。アスタリスクは、Wilcoxon 検定による中央値の有意差を求めた結果であり、**は1%、*は5%の有意水準で差が認められたことを表している。

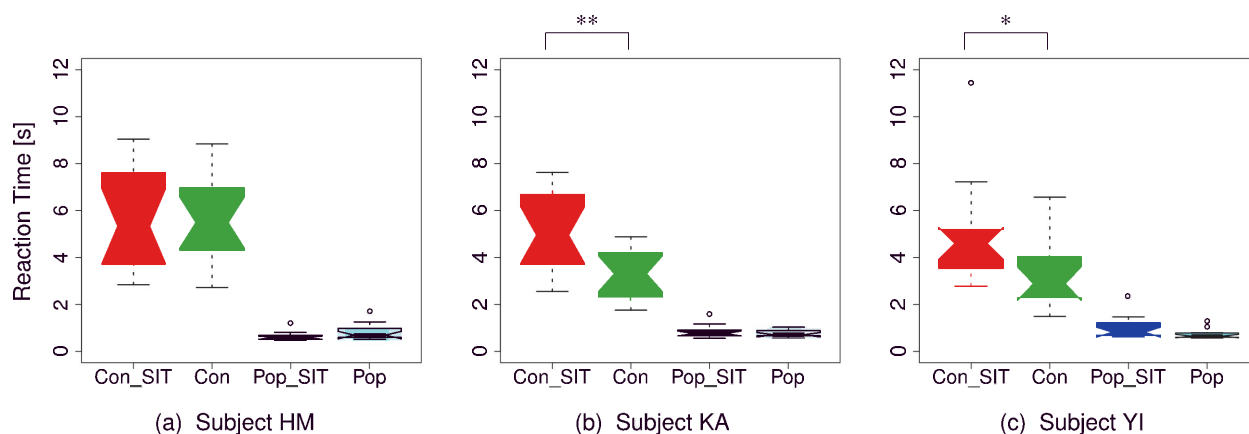


図6 各実験条件における目標探索時間の比較

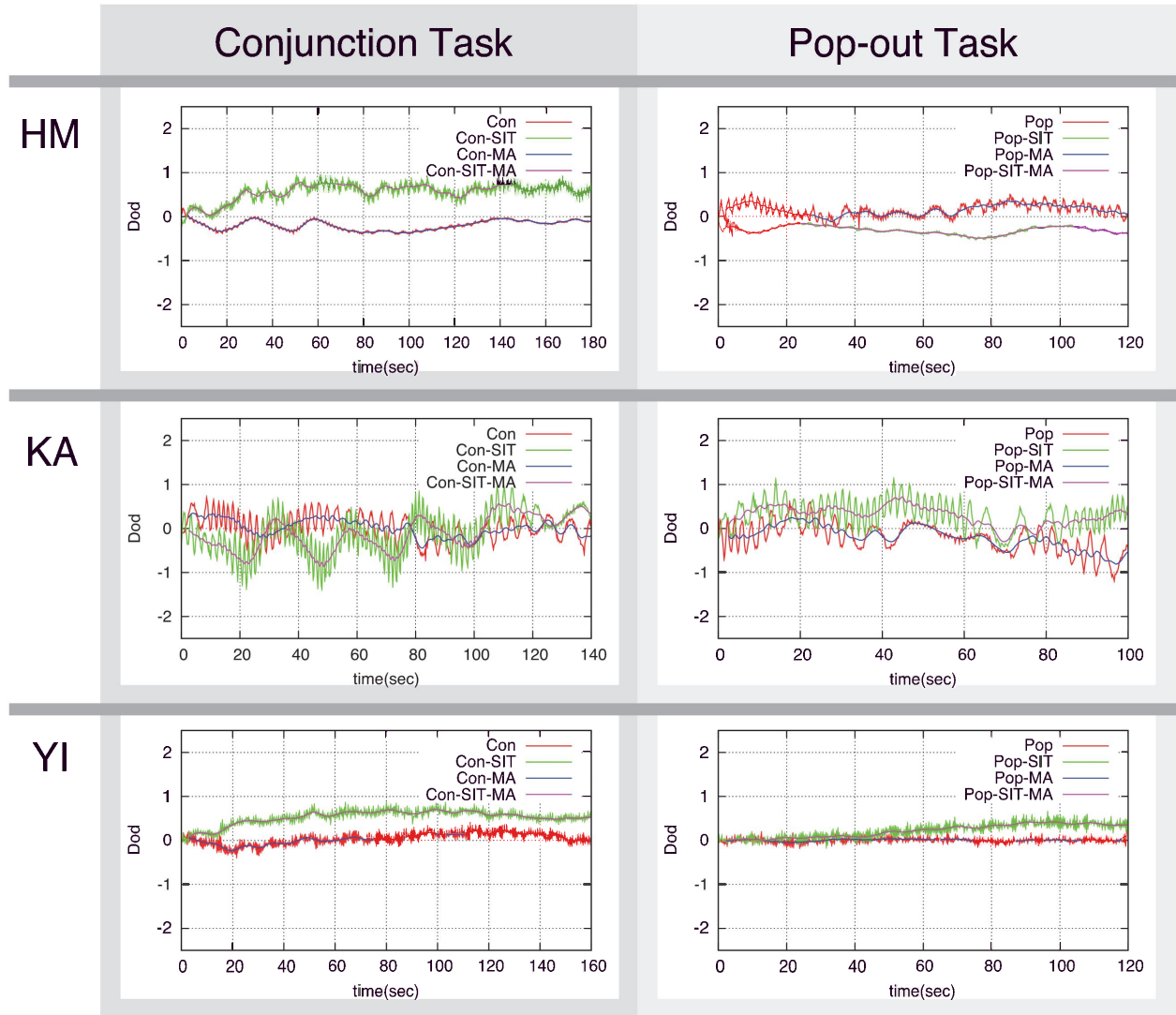


図7 各実験条件における脳機能成分 D_{od} の比較

3.2. 前頭前野ヘモグロビン濃度変化

各被験者の前頭前野から計測されたNIRS信号に対して、脳機能成分を抽出し、oxy-Hbとdeoxy-Hbの差分 D_{od} を求めた結果を図7に示す。前頭前額部の中心に位置するプローブから得られたNIRS信号について脳機能成分を求めた。緑線はSIT条件、赤線はNo-SIT条件の D_{od} を示しており、マゼンタおよび青線はそれぞれの移動平均を取った結果である。図中、左列はconjunction課題、右列はpop-out課題の結果を示している。

4. 考察

図6に示した目標探索時間の比較において、conjunction課題、pop-out課題のそれぞれについて、SIT条件とNo-SIT条件間で中央値の差の検定を行った結果、conjunction課題についてのみ、被験者KAでは $p < 0.01$ で、被験者YIでは $p < 0.05$ で有意差が示された(Wilcoxon test)。一方、実験への参加経験が無く、特別な訓練も受けたことのない被験者HMでは、いずれの課題においても有意な差は認められなかったが、conjunction課題のSIT条件においてばらつきが大きくなった。以上の結果から、目標の探索に注意を要するconjunction課題において、課題とは無関係な考え事が課されたことにより、探索効率に劣化が生じたものと思われる。

次に、図7の脳機能成分 D_{od} の比較を見ると、被験者 HM と YI では、conjunction 課題において、No-SIT 条件に比べて SIT 条件の方が正の大きな値で推移していることから、SIT 条件の方が実験中の前頭前野の賦活度が高まっていたことがわかる。この両被験者の pop-out 課題の結果における賦活度の変動が小さいことから、pop-out 課題では、SIT の負荷が前頭前野の活動に及ぼす影響は弱いものであることが示唆される。

被験者 KA の結果には、conjunction 課題の SIT 条件では大きな振幅の変動が生じている。被験者 KA は、8桁の数字の記憶の負担が大きく、数字の提示直後に小声で復唱する必要があったために、ささやく程度の発話による頭部の振動がアーチファクトとして混入している可能性がある。平易な pop-out 課題では、他の被験者の conjunction 課題の結果と同様に、SIT 条件での前頭前野の賦活度が高くなっていることから、被験者 KA には課題の難易度が高すぎたものと思われる。

これらのことは、数字を記憶しつつ比較的複雑な作業に従事していると、前頭前野の活動が活性化されることを示唆しており、課題非依存性思考によって前頭前野の情報処理リソースが消費され、認知タスクのパフォーマンスが影響を受ける可能性があることを意味している。日常生活では、本研究で用いた課題よりも複雑な処理を同時に遂行しているが、数字を記憶するだけのような僅かな負荷であっても、作業のパフォーマンスが影響を受ける可能性があり、このような負荷がヒューマンエラーの原因にもなりうると考えられる。

被験者 KA で特に顕著であるが、いずれの被験者においても D_{od} 信号には明確な周期性を持った振動が混入している。DFT により周波数解析した結果、これらは 0.07Hz 近辺にピークを持つ成分であり、conjunction 課題の SIT 条件において大きなピークを成すことが示された。この周波数は、心拍変動における Mayer 波⁽¹⁴⁾ に一致する。Mayer 波は自律神経による血圧調整と関与することが知られていることから⁽¹⁵⁾、SIT 課題時のストレスによる動静脈由来の成分がアーチファクトとなっている可能性も推察される。このように、Yamada らの手法⁽¹³⁾ では脳機能成分を完全に分離することが困難であると考えられることから、例えば独立成分分析⁽¹⁶⁾ などの信号処理手法の適用についても検討する必要がある。

5. 結論

本研究では、課題とは無関係な考え事をしている状態（課題非依存性思考状態）を生体信号から客観的に評価することを目的として、あらかじめ提示された8桁の数字の記憶を維持しつつ、同時に課せられた視覚探索課題を遂行する際の、目標探索時間や前頭前野の NIRS 信号を解析した。

実験の結果、複数の視覚的特徴の組み合わせにより定義されたオブジェクトの中から唯一の特徴を持った目標を探索する conjunction 課題において、課題非依存性思考状態が目標探索時間に影響を及ぼすことが示された。

課題遂行中に観測された前頭前野外側部の NIRS 信号から、毛細血管由来の脳活動の変動成分だけを抽出し、得られた酸素化ヘモグロビンと脱酸素化ヘモグロビンの差分信号により前頭前野外側部の賦活度を評価した結果、目標探索に注意を要する conjunction 課題において、課題非依存性思考状態が前頭前野の賦活度を高めることが示唆された。

本研究の結果から得られた知見は断片的なものではあるものの、課題非依存性思考によって前頭前野の情報処理リソースが消費されることが示唆しており、こうした状況下では、認知タスクのパフォーマンスが影響を受ける可能性があることを示すものである。今後、実験手法の改善や精密な解析手法の考案により、新たな知見が得られるものと考えている。

参考文献

- (1) Helmholtz H. von (1925) Treatise on physiological optics (translated from the 3rd German edition, 1867). New York: Dover
- (2) Broadbent D. (1954) The role of auditory localization in attention and memory span. *Journal of Experimental Psychology*, 47, 191–196
- (3) Posner M.I. (1980) Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32, 3–25
- (4) Posner M.I. Snyder C.R.R. Davidson B.J. (1980) Attention and the detection of signals. *Journal of Experimental Psychology: General*, 109, 160–174
- (5) Posner M.I. Cohen Y. (1984) Components of visual attention. *Attention and Performance*, 10, 531–556
NJ: Erlbaum
- (6) Treisman A. Gelade G. (1980) A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, 12, 1, 97–136
- (7) LaBerge D. (1983) Spatial extent of attention to letters and words. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 9, 371–379
- (8) Eriksen C.W. St James J.D. (1986) Visual attention within and around the field of focal attention: A zoom lens model. *Perception & Psychophysics*, 40, 225–240
- (9) Mason M.F. Norton M.I. Horn J.D. van Wegner D.M. Grafton S.T. Macrae C.N. (2007) Wandering minds: The default network and stimulus-independent thought. *Science*, 315, 393–395
- (10) Miller E.K. Cohen J.D. (2001) An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*, 24, 167–202
- (11) Coutlee C.G. Huettel S.A. (2012) The functional neuroanatomy of decision making: Prefrontal control of thought and action. *Brain Research*, 1428, 3–12
- (12) Treisman A. Souther J. (1985) Search asymmetry: A diagnostic for preattentive processing of separable features. *Journal of Experimental Psychology: General*, 114, 285–310
- (13) Yamada T. Umeyama S. Matsuda K. (2012) Separation of fNIRS signals into functional and systemic components based on differences in hemodynamic modalities. *PLOS ONE*, 7, 11, 7–16
- (14) Penáz J. (1978) Mayer waves: History and methodology. *Automedica*, 2, 135–141
- (15) Madwed J.B. Albrecht P. Mard R.G. Cohen R.J. (1989) Low-frequency oscillation in arterial pressure and heart rate: A simple computer model. *American Journal of Physiology, Heart and Circulatory Physiology*, 256, H1573–H1579
- (16) Hyvärinen A. Karhunen J. Oja E. (2001) Independent component analysis. John Wiley & Sons

英文抄録

An objective assessment of stimulus-independent thoughts by analyzing
near-infrared spectroscopy (NIRS) signals of lateral prefrontal cortex activity.

Takeshi Kohama¹ Hisashi Yoshida¹ Nobuyuki Yamawaki² Yuki Hamano³ and Tatsuo Shimizu³

Working with stimulus-independent thoughts (SITs) often causes the decline of cognitive performances, such as judgments of signals or response times to certain tasks. It might lead to fatal accidents called "human errors" independently of arousal level. The detection and prediction of these errors is extremely difficult, and the measurement technology of inattentiveness has not yet been established. In this study, we investigate the effect of SITs on the performance of visual search tasks. SITs are the streams of thoughts that are unrelated to immediate situations. The subjects memorized the numeral of eight digits as an SIT while carrying out visual search tasks. The reaction time and the near-infrared spectroscopy signals from the lateral prefrontal cortex (PFC) were analyzed to evaluate the effect of SITs objectively. As a result, the average reaction time for searching targets from distracters only in terms of their feature conjunctions increased when having SITs during the tasks. Also, the SITs in these tasks enhance the activity of the lateral PFC. These results suggest that the SITs occupy the resource of attention and it might affect the performances of certain cognitive tasks under these conditions.

Keywords:

Stimulus-independent thoughts, Prefrontal cortex, Near-infrared spectroscopy, Visual search, Visual attention.

1. Department of Computational Systems Biology, Faculty of Biology-Oriented Science and Technology, Kinki University, Kinokawa, Wakayama 649-6493, Japan

2. Department of Biomedical Engineering, Faculty of Biology-Oriented Science and Technology, Kinki University, Kinokawa, Wakayama 649-6493, Japan

3. Department of Electronic Systems and Information Engineering, Faculty of Biology-Oriented Science and Technology, Kinki University, Kinokawa, Wakayama 649-6493, Japan