

修士論文

色温度環境が選択的注意時の課題成績  
および脳活動に及ぼす影響の検討

同志社大学大学院 生命医科学研究科  
医工学・医情報学専攻 医情報学コース  
博士前期課程 2013年度 1031番

大西 夏子

指導教授 廣安 知之教授

2015年1月23日

## Abstract

In recent years, intellectual productivity and comfort are required in an office. Prior research showed that improvement of light environment in an office which is one of office work condition brings about getting a better work for office worker. In some office, indirect illumination is used for not only getting a better work, but also relieving stress of worker. On the other hand, illumination is too bright for working in offices. Therefore, some prior research showed that color temperature which is one of component factor of illumination affect intellectual productivity and psychological states. However, these researches did not consider the psychological states and brain activity. Therefore, we evaluated psychological state using VAS (Visual Analog Scale). After that we investigated influence of color temperature on performance and brain activity. In this research, we used fNIRS (functional near infrared spectroscopy) to measure a change in cerebral blood flow. That equipment has characteristics noninvasive, low restrictive, and portability. The equipment measure cerebral blood flow changes during neural activity in the cerebral cortex using near-infrared light which easily passes through the living body. In this paper, we demonstrate that the affect of color temperature on working efficiency differ in task performance and psychological states.

# 目次

<b>1</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>fNIRS による脳機能イメージング法</b>	<b>2</b>
2.1	概要 . . . . .	2
2.2	fNIRS の原理 . . . . .	3
2.3	データ処理 . . . . .	4
<b>3</b>	<b>色温度環境が視覚探索課題時に及ぼす影響</b>	<b>5</b>
3.1	光環境と注意 . . . . .	5
3.2	視覚探索と脳機能 . . . . .	5
3.3	実験概要 . . . . .	6
3.4	課題成績の評価 . . . . .	8
<b>4</b>	<b>色温度が及ぼす影響の被験者間の差異</b>	<b>9</b>
4.1	課題成績による差異 . . . . .	9
4.2	心理状態と課題成績の関係性 . . . . .	9
<b>5</b>	<b>考察</b>	<b>10</b>
5.1	色温度環境が脳活動に及ぼす影響 . . . . .	10
5.2	実験前の課題成績が及ぼす影響 . . . . .	10
<b>6</b>	<b>結論</b>	<b>11</b>

# 1 序論

近年、オフィスにおける知的生産性及び快適性の向上が求められている。先行研究により、オフィス照明の色温度が執務者の作業効率および快や疲労などの心理的要因、脈拍などの生理的要因に影響を与えることが報告されている<sup>1)</sup>。また、近年では、知的照明システムの導入により、執務者の嗜好に合わせた快適な作業環境の提供が進められている<sup>2)</sup>。照明と作業パフォーマンスにおける研究が進められている一方、色温度が脳にどのような影響を及ぼすのかは未解である。

また、作業内容により適切な色温度環境は異なるとされている。本研究では、膨大な情報の中から必要な情報を素早く取り出す際に必要とされる脳機能である選択的注意に着目し、その機能をはかることが出来るとされる視覚探索課題を用いて検討を行う。本稿では、色温度環境間の課題成績、心理状態の変化および脳活動の比較検討を目的とする。

脳機能を計測する装置として、非侵襲的に計測することができる脳機能イメージング装置がある。代表的な脳機能イメージング装置として、PET(Positron Emission Tomography)、fMRI(functional Magnetic Resonance Imaging)、MEG(Magneto Encephalo Graphy)がある。しかし、これらの装置は高額であること、操作には専門的な知識が必要であること、被験者の拘束性が高いことなどの課題があり、日常生活で用いられる脳機能の計測には適していない。そこで本研究では、脳活動の調査に、非侵襲性、低拘束性、可搬性を備えたfNIRS(functional near-infrared Spectroscopy)を用いて神経活動時の脳血流量変化の計測を行う。fNIRSは、近赤外分光法を用いて、大脳皮質における神経活動の際の脳血流量変化を計測する装置である。またfNIRSは、脳血流量変化から脳活動を調査し、脳機能の研究に用いられている。

本研究では、色温度環境が脳活動に及ぼす影響を被験者の課題成績に基づいて検討を行う。また、実験前の心理状態および各色温度環境下での心理状態が課題成績に及ぼす影響についての検討も行う。

本論文では、2章でfNIRSの概要と解析手法について述べる。3章では、色温度環境が選択的注意時に及ぼす影響の検討のための被験者実験の概要とその検討手法について具体的に述べる。4章および5章では、色温度環境が及ぼす影響に関して、課題成績と脳活動および心理状態との関係性においての検討結果について述べる。最後に6章で、検討結果における結論を述べる。

## 2 fNIRSによる脳機能イメージング法

### 2.1 概要

fNIRSは、近赤外光を照射することにより、酸素化ヘモグロビン(以下 Oxy-Hb)と脱酸素化ヘモグロビン(以下 Deoxy-Hb)の相対的変化量を計測する非侵襲的脳機能イメージング装置である<sup>3)4)5)</sup>。近年では脳活動の変化を測定し、精神疾患のパターンを健常な脳活動と比較することにより、うつ症状の鑑別診断補助として先進医療に認可されている。fNIRSの長所および短所を以下に示す。

#### 長所

- 非侵襲性  
近赤外光を用いた計測のため、生体への有害な影響がなく、乳幼児から高齢者まで幅広い年代において反復計測が可能である。
- 低拘束性  
被験者の体位や向きに制約を課さないため、発話や運動を行いながら計測可能である。また、日常生活に近い自然な状態で計測できるため、情意機能や認知機能の脳機能計測に適している。
- 可搬性  
装置が小型で移動可能なため、臨床現場で場所を選ばず計測可能である。
- 高時間分解能  
0.1秒ごとの計測が可能であるため、脳機能の変化の時間経過が検討可能である。

#### 短所

- 低空間分解能  
近赤外光の散乱などにより、空間分解能は10~30mm程度である。そのため、脳の部位と機能の対応関係をそれ以上の精度で特定することが不可能である。
- 深部計測が不可能  
近赤外光は頭皮下20~30mmまでの生体内を透過するため、大脳皮質より深部の計測は不可能である。
- データの不確実性  
fNIRSでは光路長を測定することができず、絶対量を求めることは不可能である。そのため、得られるデータはヘモグロビン濃度の相対変化量である。また、頭皮の血液変化など、脳活動以外の血液変化量も含まれるため、脳活動後のデータからベースラインとなる変化前のデータを除く必要がある。

## 2.2 fNIRS の原理

fNIRS における生体組織の計測には、波長が 700~900 nm の生体を透過しやすい近赤外光が用いられている。近赤外光よりも長い波長では水の吸収が大きくなり、近赤外光よりも短い波長ではヘモグロビンの吸収が大きくなるため、生体内を進むことができない。生体組織への光の吸収および散乱特性を Fig. 1 に示す。照射された近赤外光は、頭皮、頭蓋骨、くも膜などの異なる組織で、散乱・吸収されながら伝播する。散乱光は脳組織に達すると、その一部が再び散乱・吸収されながら体表へと戻る。fNIRS では、近赤外光が通過する組織中のヘモグロビン酸素化状態の変化による、近赤外光の強度変化を計測している<sup>6)</sup>。また、Fig. 2 に示すように、Oxy-Hb と Deoxy-Hb の吸収係数は異なり、等吸収点は 805 nm 付近である。吸光量変化を計測することにより、それぞれの濃度変化を算出する<sup>7)</sup>。

ヘモグロビン濃度変化量は Beer-Lambert 則を基礎として算出している。Beer-Lambert 則は、吸光物質を含む溶液に光を照射したときの光の減衰と吸光物質の濃度関係を示した法則である。同一直線上に、波長が  $\lambda$  の光源、光路長が  $L$  の媒質、検出器の順で並べたとき、物質の吸光度  $A'$  は式 (2.1) で表される<sup>7)</sup>。

$$A' = \log \frac{I_0}{I} = \varepsilon CL \quad (2.1)$$

なお、 $I_0$  は媒質への入射光量、 $I$  は透過光量、 $\varepsilon$  (単位:  $M^{-1}cm^{-1}$ ) は吸光係数、 $C$  (単位:  $M$ ) は吸光物質の分子濃度である。散乱のない媒質中では、光は直進するため、光路長は物質の厚み (光の入射点と出射点の距離) と一致する。Beer-Lambert 則は、光の吸収はあるが散乱のない媒質中の吸光度を表すことができ、生体組織のように散乱の強い媒体には適用できない。生体組織では、光の散乱を繰り返すため、実際の光路長は媒体の厚みより大きくなる。散乱による光の飛行距離の延長を考慮したものが、modified-Beer-Lambert 則であり、式 (2.2) で表される。

$$A = \log \frac{\Delta I_{out}}{I_{in}} = \varepsilon \Delta C d + \Delta S \quad (2.2)$$

なお、 $\Delta I_{out}$  は透過光量変化、 $\Delta C$  は吸光物質の濃度変化、 $\Delta S$  は散乱による影響変化を示すものである。

ここで、生体に入射される波長  $\lambda$  の光量を  $I_{in}(\lambda)$ 、生体内で吸収と散乱を経て体表へ戻った光の変化量を  $\Delta I_{out}(\lambda)$ 、Oxy-Hb の吸光係数を  $\varepsilon_{oxy}(\lambda)$ 、Deoxy-Hb の吸光係数を  $\varepsilon_{deoxy}(\lambda)$ 、Oxy-Hb の濃度変化を  $\Delta C_{oxy}$ 、Deoxy-Hb の濃度変化を  $\Delta C_{deoxy}$  とすると、fNIRS では、以下の式 (2.3) が成り立つように設計されている。

$$\begin{aligned} A &= \log \frac{\Delta I_{out}}{I_{in}} \\ &= (\varepsilon_{oxy}(\lambda) \Delta C_{oxy} + \varepsilon_{deoxy}(\lambda) \Delta C_{deoxy}) d + \Delta S \end{aligned} \quad (2.3)$$

式 (2.3) より Oxy-Hb 濃度変化量及び Deoxy-Hb 濃度変化量を求めることが可能となる。

## 2.3 データ処理

fNIRSによる計測では、心拍や呼吸などの脳活動に伴う脳血流変化以外の成分も含まれる<sup>8)</sup>。また、姿勢の変化や顎の噛締めによる体動および光ファイバーの動きによる脳血流変化も含まれる。これらのことを考慮した上で、脳活動の特徴を捉える必要がある。そこで、fNIRS計測により得られたデータに対してフィルタ処理を行う。フィルタ処理とは、信号の中に含まれる不要な成分を取り除き、目的とする周波数成分を取り出し、データを明確化することである。fNIRSでは、ローパスフィルタ (Low-Pass Filter : LPF)、ハイパスフィルタ (High-Pass Filter : HPF)、それら2つを組み合わせたバンドパスフィルタ (Band-Pass Filter : BPF) を用いる。フィルタ処理の手順は、まず元のデータを時系列データから周波数データに変換を行う。データを周波数領域に変換することにより、心拍成分や体動などの周波数領域を取り除くことが可能になる。

## 3 色温度環境が視覚探索課題時に及ぼす影響

### 3.1 光環境と注意

近年、オフィスにおける知的生産性及び快適性の向上が求められており、光環境が人体に与える影響の研究が進められている<sup>9)10)</sup>。先行研究において、光環境の改善により、オフィスにおける作業効率の向上効果が示されている<sup>11)12)</sup>。また、色温度が高い環境において、持続的注意課題の成績の向上<sup>1)</sup>や覚醒度の向上が確認されている<sup>13)14)</sup>。

これらの関連研究から、色温度環境の差異が作業成績に影響を与えることが分かる。これより、色温度が脳活動にも何らかの影響を及ぼすことが示唆される。本稿では、異なる色温度環境の下で、選択的注意時の課題成績の差異の検討に加え、fNIRSを用いて脳血流量の変化を検討する。

色温度とは、光源が発する光の色の数値的な尺度であり、単位はK(ケルビン)で表される。完全黒体の加熱により放射される光の波長を、そのときの黒体の温度と対応させたものである。完全黒体とは、全ての波長の光、幅射を吸収する理想的な物体である。黒体の幅射能は吸収能に等しいため、低温では黒であるが、高温では輝いて見える。色温度の概略図を Fig. 3, UV 色度図上における完全黒体幅射の色軌跡を Fig. 4 に示す。色温度が低いと光色は暖色、高いと寒色に近い色になる。

### 3.2 視覚探索と脳機能

#### 3.2.1 視覚探索課題

視覚探索課題とは、複数の妨害刺激 (distractor) の中からある特定の目標刺激 (target) の有無を判断する実験課題である<sup>15)16)</sup>。視覚情報処理過程は、特徴統合理論より、基本的特徴の抽出段階とそれら基本的特徴の統合段階に分割して考えられる。基本的特徴とは、線分、方向、色、弧などのことである。基本的特徴の抽出段階では、ポップアウトと呼ばれる現象がある。ポップアウトとは、目標刺激との差異が一つの属性であるために、妨害刺激から非常に目立ち、目標刺激が飛び出して知覚される現象のことである<sup>17)</sup>。この段階では、注意を必要としない過程であると考えられており、一般的に前注意過程と呼ばれている。Fig. 6 に示すように、同じ2つの刺激提示を行っても、ターゲットを入れ替えると左図はポップアウトするが、右図はポップアウトしない。右図に示されるような、特徴の統合段階(集中注意過程)では、個々の探索対象に注意を系列的に向けていくことで探索が遂行される。判断の際に様々な特徴を統合して探索を行う必要性があり、探索対象数に応じて反応時間が増加するような場合を系列探索と呼ぶ。これらの探索過程は、前注意過程においては「ボトムアップ」の注意制御、集中注意過程においては「トップダウン」の注意制御とされている<sup>18)</sup>。各注意段階における脳内過程に関する詳細を次項に示す。

#### 3.2.2 視覚探索時の脳内過程

視覚探索時の脳内過程においては、ボトムアップとトップダウンの注意制御に大別され、それらは独立ではなく、互いの情報処理過程を反映しているとされている<sup>18)19)20)</sup>。ボト



ムアップでは、視覚野から前頭野などの高次領域へ、トップダウンでは前頭野の高次領域から視覚野へのネットワークが形成されている。トップダウンでは、空間中の特定の位置に選択的に注意が向けられ、系列的に視覚情報を処理していくことから、「選択的注意」と呼ばれる注意機能が関与するとされている<sup>21) 22)</sup>。

トップダウン信号の供給源となる部位が、前頭前野である。中でも、前頭眼野、ワーキングメモリの機能を担う背外側前頭前野等の部位が関連していることが報告されている<sup>23) 24) 25)</sup>。これらの信号は、頭頂間溝野で統合される。この統合段階は、視覚的グルーピングと呼ばれ、視野上の複数の離散的要素をつなぎ合わせて一つのまとまった群として捕らえる役割を担い、特徴統合において重要な役割を果たしている<sup>26)</sup>。頭頂間溝からの情報を視覚野で受け取り、視覚情報としてターゲットが認知される。

選択的注意の過程では、特徴一つ一つに対して注意を移動させて特徴の統合を行うため、反応時間は特徴の個数に比例して増加するとされている<sup>27)</sup>。一方、前注意段階であるボトムアップの場合では、特徴や妨害刺激の個数に関わらず、反応時間はほぼ一定であることが報告されている。

トップダウンの注意制御において、ターゲットをより早く認知するためには選択的注意機能を担う前頭前野の働きを促進させることが必要であると考えられる。これらのことは、日常生活においては、膨大な情報の中から必要な情報をより早く抽出することを可能にし、作業効率の向上に繋がると考えた。

そこで本稿では、選択的注意を必要とする視覚探索課題を用い、課題成績向上のための色温度環境の検討を行った。3.3 と 3.4 に本実験の概要と検討方法の詳細を示す。

### 3.3 実験概要

本実験の目的は、視覚探索課題を 3 種類の色温度環境下で行い、各環境下での課題成績、脳活動および実験前後の心理状態の関連性の検討である。実験は、13~17 時の時間帯で統制し、光環境を制御するため知的オフィス環境創造システム「D-SOL(Doshisha University Smart Office Laboratory)」にて行う。被験者は健康な成人 10 名（男性 5 名、女性 5 名、年齢：23.7 ± 0.4 歳）である。実験環境の詳細を Table 1 に、実験風景を Fig. 5 に示す。色温度環境の影響を調査するため、被験者は各色温度環境下の実験前に 10 分間その環境で安静にし、その後視覚探索課題を行う。

選択的注意をはかる課題として、文字を用いた視覚探索を実験課題とする<sup>28)</sup>。実験は、10 分間安静状態で各環境下で露光した後、Fig. 8 に示す流れで、被験者は課題前後に 30 秒間、+を安静状態で注視し、視覚探索課題を 90 秒間行う。本実験では distractor を「L」、target を「T」とし、40 個の distractor から target を素早く探索し、target の向きを回答させる内容である。distractor の L は、0°、90°、180°、270°、target の T は 90° もしくは 270° に回転させたものをランダムに表示させる。被験者には、T が 90° であれば m キー、270° であれば n キーを素早く押すように指示する。各課題は Presentation により、最大 3 秒間表示され、被験者が回答すると次の問題が提示されるように設定する。

### 3.3.1 心理状態の評価

心理状態の計測には、Fig. 9 に示す、VAS (Visual Analog Scale) のアンケートを用いて調査した。実験前および実験後の各色温度下での作業時に感じた快・不快、集中および眠気の3項目についてアンケートを行った。実験前および各色温度環境下での実験後の感情を調査し、アンケート内容は快・不快、集中および眠気の3項目であった。10cmの直線上に左右対象となる項目を設定し、被験者は直線上に×印をつけて回答した。各項目は左端を0点、右端を10点とし、左端からの長さをその項目の点数として算出した。

### 3.3.2 脳活動の評価

本研究では、視覚探索時の脳の活性を調査するため、OEG-16(Spectratech 製) を用いて脳血流変化を計測した。サンプリング間隔は0.65秒で、計測部位はFig. 7に示す前頭部16CHであり、国際10/20法を参考に設置した。データ解析には脳の神経活動の際に増加するとされるOxy-Hb<sup>29)</sup>を用いて検討を行った。Oxy-Hbデータは、課題中の脳血流量変化を明確にするため、課題開始時点を基準とし、ゼロ点補正を行った。その後、被験者間および色温度環境間での脳活動を比較するため、各被験者においてOxy-Hbの相対値の標準化を行い、z-scoreを算出した。z-scoreは、時間*i*でのOxy-Hbの値を*x<sub>i</sub>*、タスク区間のOxy-Hbの平均値を $\bar{x}$ 、タスク区間の標準偏差を*s*として式(3.1)により算出される。

$$z = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad (3.1)$$

課題中の脳血流増加量を色温度間で比較するため、タスク区間90秒間の血流変化量の積分値を算出し、AUC (Area under the curve) とした。課題中の脳血流上昇量が大きいほど、AUCの値は大きくなり、減少傾向を示す場合はAUCは負の値をとる。本検討では、AUCの値を用いて、課題中の脳活動を被験者間および色温度間での定量的な比較を行った。またAUCの値より、前頭部における脳活動のカラーマップを作成し、課題中の脳活動を視覚的に評価する。

さらに、課題中の脳血流の時系列変化および活性判定のために、血流モデルを作成し、計測データとの類似度を用いて評価する。モデルはFig. 10に示すように、血流動態反応関数 (Hemodynamic response function : HRF) と選択的注意時に活性すると仮定した矩形関数を畳み込み積分し作成する<sup>30)31)</sup>。HRFは式(3.2)で表される<sup>30)</sup>。

$$y(t) = A1 \left( \frac{x(t) - \delta_1}{\tau_1} \right)^2 \frac{e^{-\left( \frac{x(t) - \delta_1}{\tau_1} \right)^2}}{\tau_1} + A2 \left( \frac{x(t) - \delta_2}{\tau_2} \right)^2 \frac{e^{-\left( \frac{x(t) - \delta_2}{\tau_2} \right)^2}}{\tau_2} \quad (3.2)$$

本研究では、血流動態関数とのサンプル数を揃えるため、課題中のfNIRSデータ数を33にリサンプリングしモデルを作成した。HRFのパラメータは先行研究<sup>30)</sup>を参考に決定した。

本研究では、モデルと計測データの類似度評価に相互相関関数を用いた。相互相関関数とは、二つの時系列データにおいて一方の時間軸を相対的にずらしながら、それぞれの時点においての重なり強度を内積により算出するものである。ある時系列を  $X(t)$ 、一方を  $Y(t)$  としたとき、区間  $N$  における相互相関  $C_{XY}$  は式 (3.3) のように定義される。

$$C_{XY}(\tau) = \sum_{t=0}^N X(t)Y(t+\tau) \quad (3.3)$$

相関係数は-1.0~1.0の範囲で算出され、0.7以上の相関があればモデルと計測データの高い相関があるとする。

### 3.4 課題成績の評価

課題成績の評価に平均反応時間を用いた。エラーは、反応時間が3秒以上のもの（画像提示時間以内に回答できなかったもの）および誤って回答したものとした。反応時間は、刺激が提示されてから被験者が反応するまでの時間とした。平均反応時間は、エラーの場合を除く反応時間の平均値とした。本稿では、作業パフォーマンスの評価として、各被験者の各色温度環境下での平均反応時間を用いて検討を行う。

本研究では、課題成績により被験者を高成績群と低成績群に分けて検討を行った。平均反応時間を算出し、各被験者の各色温度において偏差値を算出した。偏差値が3環境共に50以上であった被験者を高成績群、3環境共に50未満であった被験者を低成績群とし、検討を行った。

## 4 色温度が及ぼす影響の被験者間の差異

### 4.1 課題成績による差異

高成績群と低成績群の各色温度環境における平均反応時間を Fig. 11 に示す。視覚探索課題では、選択的注意機能が働くと、課題成績の向上に結びつくと言われている<sup>18)</sup>。Fig. 11 より、両成績群において Blue, Red, White の順に課題成績が良いことが分かった。また、低成績群においては、反応時間が色温度環境間で有意に差があることが認められた ( $F(2,12)=4.26, p<.05$ )。

課題成績による視覚探索時の脳の活性化量を Fig. 12 に示す。Fig. 12 より両群において Blue の環境下で脳活動が促進されていることが分かる。また、高成績群においては、Blue の環境で、背外側前頭前野や下前頭回が含まれる両側での活性が大きいことが認められた。低成績群においては、Red と White の環境下で前頭部中心の前頭極付近において活性が見られ、右前頭領域においては脳血流変化が減少傾向であることが示された。

Fig. 11 より、高成績群も低成績群も Blue の環境下で課題成績の向上が見られたことより、Blue の照明環境では、選択的注意機能が促進されることが示唆される。Blue の照明環境は眠気が多い被験者に対して覚醒効果があり、注意課題における反応時間が早くなることが報告されている<sup>32)</sup>。本実験での選択的注意を必要とする課題成績の向上は、これらの先行研究結果を支持するものとなった。課題中の脳活動の指標である AUC に関して、AUC の値が大きい上位 3 位の CH を両群の各色温度で抽出した。Fig. 13 より、高成績群では Blue と White の環境下で、背外側前頭前野付近、Blue では下前頭回付近が抽出された。一方で、低成績群では、すべての色温度環境で前頭部中心の前頭極付近であることが分かる。

### 4.2 心理状態と課題成績の関係性

実験前および各色温度環境下での実験後の心理状態と課題成績の偏差値の相関関係の検討を行った。各色温度環境下での実験後の VAS の各項目と課題成績の相関関係を Spearman の順位相関係数より、快不快、集中、眠気のすべての項目において、どの色温度環境間でも相関関係は認められなかった。同様に、実験前の心理状態に関して相関関係を求めたところ、「眠気」の項目のみで Red の環境下において強い負の相関関係が認められた ( $\rho = -0.75, p<.01, S=288.75$ )。眠気に関する VAS の得点と課題成績の相関図を Fig. 14 に示す。このことより、実験前の眠気の状態により、Red の照明環境が課題成績に大きな影響を及ぼすことが考えられる。

## 5 考察

### 5.1 色温度環境が脳活動に及ぼす影響

両群ともに最も高成績を示した Blue の環境下での脳活動に着目する。高成績を示したにも関わらず、群間の反応時間に有意差が生じた要因をモデルとの類似度および脳血流の時系列変化を用いて検討を行う。

高成績群の AUC 上位 3CH として CH3,4,16 が抽出された。これらはそれぞれ、右下前頭回 (right-Inferior frontal gyrus : r-IFG), 右背外側前頭前野 (right-Dorsolateral prefrontal cortex : r-DLPFC), 左下前頭回 (left-Inferior frontal gyrus : l-IFG) 付近である。Fig. 15 にモデルおよび各群の計測データを示す。相互相関より、l-IFG において両群ともにモデルと高い正の相関が得られた (高成績群 :  $\rho = 0.86$ , 低成績群 :  $0.71$ )。r-IFG および r-DLPFC においては、高成績群では両 CH で高い相関が得られたものの (r-IFG :  $\rho = 0.72$ , r-DLPFC :  $\rho = 0.76$ )、低成績群では高い相関が得られなかった (rIFG :  $\rho = 0.68$ , rDLPFC :  $\rho = 0.60$ )。これらの結果から、高成績群ではすべての部位で、低成績群においては l-IFG において課題時に活性していることが確認できた。両群共通で活性が確認された l-IFG は記憶の認知制御に関わり、能動的な想起や注意を担う部位であり、課題開始直後に血流増加が見られる。高成績群では、r-IFG および r-DLPFC において、課題直後に血流の上昇が見られ、課題終了時にピークを迎えている。r-IFG は抑制機能を司り、視覚探索では復帰抑制に関わる部位であるとされている<sup>33)34)</sup>。復帰抑制とは、一度注意を向けた位置またはオブジェクトに対して再び注意を向けようとしたときに抑制が生じる現象である<sup>33)</sup>。この機能は、場面内を注意によって走査する際に注意の移動を効率的に行うことに貢献していると考えられる。r-DLPFC は注意機能を担う部位であるとされている。高成績群は、l-IFG の活性により、課題に対して能動的注意が働き、その後の r-IFG および r-DLPFC の活性により、効率よく探索することができ、素早い目標探索に繋がったことが示唆された。

これらのことから、課題成績と r-IFG および r-DLPFC の活性に関係性があると考えられる。r-IFG および r-DLPFC の AUC 値の色温度環境間の比較を Fig. 16 に示す。Fig. 16 より、課題成績の低下とともに AUC 値の減少が見られる。以上のことから、選択的注意課題の成績向上のために rIFG および rDLPFC の活性が重要であり、Blue の環境下でそれらの脳活動が促進されることが示唆された。

### 5.2 実験前の課題成績が及ぼす影響

Fig. 14 より、Red の環境下において眠気と課題成績で負の相関関係が見られた。先行研究より、Red の照明は眠気を誘発する作用があることが報告されている<sup>35)</sup>。また、作業時における創造性の向上も報告されている。本研究では、注意を必要とする課題内容であったため、Red の照明環境が成績向上に結び付かなかったことが示唆される。実験前の眠気の大きい被験者は、他の環境下で高成績を示していても、Red の環境下で成績が低下することより、Red の照明が眠気に及ぼす影響は大きいことが考えられる。

## 6 結論

本稿では、色温度環境が選択的注意時の課題成績、心理状態および脳活動に及ぼす影響の検討を目的とした。本実験では、実験課題に選択的注意機能をはかる視覚探索課題を用い、fNIRSを用いて課題中の脳血流変化を計測した。各被験者で標準化を行い、課題中の脳活動の指標としてAUCを用いて検討を行った。課題成績の偏差値に基づき、高成績群と低成績群に分け、各群の色温度環境毎にAUCの値に基づいて前頭部の脳活動をカラーマップにより視覚化した。AUCより、高成績群においてはBlueで両側で、低成績群においてはどの環境下でも前頭部中心において大きな活性が見られた。また、AUC上位3CHの結果を群間で比較したところ、Blueの環境下でDLPFC付近のCHで高成績群のAUC値が有意に大きいことが示された。さらにモデルとの類似度比較より、高成績群ではBlueの環境下で効率よく探索を行う復帰抑制の機能を担うrIFGおよび注意機能を担うrDLPFC付近で大きな活性が見られた。これらの結果から、Blueの照明環境下で、高成績群は注意機能および効率よく探索を行う復帰抑制の機能を担う脳部位の活性の相乗効果により、課題成績の向上に結びついたことが示唆された。

また、実験前の心理状態と課題成績の検討結果より、Redの環境下では、実験前の眠気と課題成績は強い負の相関関係があることが示された。このことから、Redの照明は被験者の眠気に大きな影響を及ぼし、結果的に課題成績にも影響を及ぼすことが示唆された。

以上の結果より、色温度環境が選択的注意時の課題成績および脳活動に影響を及ぼすことが示された。選択的注意課題においては、rIFGおよびrDLPFCの活性が課題成績の向上に重要であると考えられた。色温度環境の影響の検討では、Blueの環境下で、注意および復帰抑制を司るこれらの脳部位の賦活が促進され、課題成績の向上が導かれたことが示唆された。

## 謝辞

本研究の遂行にあたり、3年間に渡って熱心なご指導、多くのご鞭撻を頂きました、同志社大学生命医科学部の廣安知之教授に心より感謝いたします。また、本研究を進める上で多大なるご助言と丁寧なご指導を頂きました、同志社大学生命医科学部の山本詩子助教に心より感謝いたします。本実験を行うにあたり、素晴らしい照明環境の実験施設を提供して下さいました、三木光範教授に心より感謝いたします。学部時代から3年間、fNIRSに関して様々なご指導を頂き、研究の基盤を支えていただきました横内久猛氏にこの場をお借りしてお礼申し上げます。また、研究を進める上で多くのご助言を頂き、本論文の修正に多くの時間を割いて下さいました同志社大学大学院生命医科学研究科前期博士課程の將積彩芽さんと大村歩さんに心より感謝いたします。さらに、本研究の遂行にあたり、活発な議論をして頂いたNIRS研究グループの皆様に心よりお礼申し上げます。最後に、研究生活を経済的、精神的に支えてくれた家族、心の支えとなった研究室の皆様に深く感謝し、修士論文とします。

## 参考文献

- 1) S.L. Chellappa, R. Steiner, P. Blattner, P. Oelhafen, T. Gotz, C. Cajochen, “Non-visual effects of light on melatonin, alertness and cognitive performance: can blue-enriched light keep us alert?,” *PLoS ONE*, Vol.6, No.1, pp.1–11, 2011.
- 2) 三木光範, “知的照明システムと知的オフィス環境,” 人工知能学会論文誌, Vol.22, No.3, pp.399–410, 2007.
- 3) I. Yokoi, H. Komatsu, “Near - infrared topographic measurement system: Imaging of absorbers localized in a scattering medium,” *Rev. Sci. Instrum.*, Vol.67, No.730, pp.730–732, 1996.
- 4) A. Maki, Y. Yamashita, Y. Ito, E. Watanabe, Y. Mayanagi, H. Koizumi, “Spatial and temporal analysis of human motor activity using noninvasive nir topography,” *Medical physics*, Vol.22, No.1997, pp.1997–2005, 1995.
- 5) A. Obata, K. Morimoto, H. Sato, A. Maki, H. Koizumi, “Acute effects of alcohol on hemodynamic changes during visual stimulation assessed using 24-channel near-infrared spectroscopy,” *Psychiatry research: Neuroimaging*, Vol.123, pp.145–152, 2003.
- 6) F. Marco, V. Quaresima, “A brief review on the history of human functional near-infrared spectroscopy (fnirs) development and fields of application,” *Neuroimage*, Vol.63, No.2, pp.921–935, 2012.
- 7) 酒谷薫, 岡田英史, 星詳子, 宮井一郎, 渡辺英寿, *NIRS-基礎と臨床-*, 新興医学出版社, 2012.
- 8) M.N. H. Obrig, M.K. R. Wenzel, J. Steinbrink, K. Einhaeupl, A. Villringer, “Spontaneous low frequency oscillations of cerebral hemodynamics and metabolism in human adult,” *NeuroImage*, Vol.12, pp.623–639, 2000.
- 9) P. Badia, B. Myers, M. Boecker, J. Culpepper, J.R. Harsh, “Bright light effects on body temperature, alertness, eeg and behavior,” *Sleep Medicine Reviews*, Vol.50, pp.583–588, 1991.
- 10) A.-M. Chang, N. Santhi, M.S. Hilaire, C. Gronfier, D.S. Bradstreet, J.F. Duffy, S.W. Lockley, R.E. Kronauer, C.A. Czeisler, “Human responses to bright light of different durations,” *The Journal of Physiology*, Vol.590, pp.3103–3112, 2012.
- 11) Y. Hattori, M. Kawauchi, F. Obayashi, “A study on environmental control,” *Human Interface Symposium*, Vol.16, No.1322, pp.33–37, 2006.



- 12) A.D. Galasiu, J.A. Veitch, "Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylight offices: a literature review," *Energy and Buildings*, Vol.38, pp.728–742, 2006.
- 13) K.C.H.J. Smolders, Y.A.W. deKort, P.J.M. Cluitmans, "A higher illuminance induces alertness even during office hours: Findings on subjective measures, task performance and heart rate measures," *Physiology and Behavior*, Vol.107, pp.7–16, 2012.
- 14) C. Cajochen, "Alerting effects of light," *Sleep Medicine Reviews*, Vol.11, pp.453–464, 2007.
- 15) J.M. WOLFE, "Asymmetries in visual search: An introduction," *Perception and Psychophysics*, Vol.63, No.3, pp.381–389, 2001.
- 16) J.-M. Hopf, K. Boelmans, M.A. Schoenfeld, S.J. Luck, H.-J. Heinze, "Attention to features precedes attention to locations in visual search: Evidence from electromagnetic brain responses in humans," *The Journal of Neuroscience*, Vol.24, No.8, pp.1822–1832, 2004.
- 17) N.P. Bichot, J.D. Schall, "Priming in macaque frontal cortex during popout visual search: Feature-based facilitation and location-based inhibition of return," *The Journal of Neuroscience*, Vol.22, No.11, pp.4675–4685, 2002.
- 18) V. Navalpakkam, L. Itti, "Modeling the influence of task on attention," *Vision Research*, Vol.45, pp.205–231, 2005.
- 19) C.E. Connor, H.E. Egeth, S. Yantis, "Visual attention: Bottom-up versus top-down," *Current Biology*, Vol.14, pp.850–852, 2004.
- 20) T. Ogawa, H. Komatsu, "Target selection in area v4 during a multidimensional visual search task," *The Journal of Neuroscience*, Vol.24, No.28, pp.850–852, 2004.
- 21) A. Gazzaley, A.C. Nobre, "Top-down modulation: bridging selective attention and working memory," *Trends in Cognitive Sciences*, Vol.16, pp.129–135, 2011.
- 22) L. Chelazzi, C.D. Libera, I. Sani, E. Santandrea, "Neural basis of visual selective attention," *Cognitive Science*, Vol.2, No.28, pp.392–407, 2011.
- 23) C.N. Olivers, J. Peters, R. Houtkamp, P.R. Roelfsema, "Different states in visual working memory: when it guides attention and when it does not," *Trends in Cognitive Sciences*, Vol.15, No.7, pp.327–334, 2011.
- 24) P.M. Bays, M. usain, "Dynamic shifts of limited working memory resources in human vision," *Science*, Vol.321, pp.851–854, 2008.

- 25) C.N.L. Olivers, M. Eimer, “On the difference between working memory and attentional set,” *Neuropsychologia*, Vol.49, pp.1553–1558, 2011.
- 26) I. Yokoi, H. Komatsu, “Relationship between neural responses and visual grouping in the monkey parietal cortex,” *Journal of Neuroscience*, Vol.29, No.42, pp.13210–13221, 2009.
- 27) G.A. Talland, R.S. Schwab, “Performance with multiple sets in parkinson’s disease,” *Neuropsychologia*, Vol.2, pp.45–53, 1964.
- 28) S.C. Mednick, D.C. T. Makovski, Y.V. Jiang, “Sleep and rest facilitate implicit memory in a visual search task,” *Vision Research*, Vol.49, pp.2557–2565, 2009.
- 29) 福田正人, 精神疾患とNIRS, 第1版, 中山書店, 2009.
- 30) D.A. Handwerker, J.M. Ollinger, Mark D’Esposito, “Variation of bold hemodynamic responses across subjects and brain regions and their effects on statistical analyses,” *NeuroImage*, Vol.21, pp.1639–1651, 2004.
- 31) J.C. Ye, S. Tak, K.E. Jang, J. Jung, J. Jang, “Nirs-spm: Statistical parametric mapping for near-infrared spectroscopy,” *NeuroImage*, Vol.44, pp.428–447, 2009.
- 32) P.R. Mills, S.C. Tomkins, L.J. Schlangen, “The effect of high correlated colour temperature office lighting on employee wellbeing and work performance,” *Journal of Circadian Rhythms*, Vol.5, No.2, pp.1–9, 2007.
- 33) R. KLEIN, “Inhibitory tagging system facilitates visual search,” *Nature*, Vol.334, pp.430–431, 1988.
- 34) H. Ogawa, Y. Takeda, A. Yagi, “Inhibitory tagging on randomly moving objects,” *Psychological science*, Vol.13, No.2, pp.125–129, 2014.
- 35) T. Katsuura, X. Jin, Y. Baba, Y. Shimomura, K. Iwanaga, “Effects of color temperature of illumination on physiological functions,” *Journal of PHYSIOLOGICAL ANTHROPOLOGY and Applied Human Science*, Vol.24, No.4, pp.321–325, 2005.

## 付 図

1	生体組織による光吸収および散乱の波長特性 . . . . .	1
2	Oxy-Hb と Deoxy-Hb の吸収スペクトル . . . . .	1
3	色温度の概略図 . . . . .	1
4	色度図上の黒体輻射 . . . . .	2
5	実験環境 . . . . .	2
6	ポップアウトと系列探索 . . . . .	3
7	OEG-16 のチャンネル配置 . . . . .	3
8	実験設計 . . . . .	3
9	VAS のアンケート . . . . .	4
10	脳血流モデル作成過程の概略図 . . . . .	4
11	被験者群別の平均反応時間 . . . . .	4
12	課題中の脳活動のカラーマップ . . . . .	5
13	AUC の上位 3CH . . . . .	5
14	実験前の眠気の度合いと課題成績の相関 . . . . .	6
15	モデルと着目領域の脳血流変化の比較 . . . . .	7
16	rIFG および rDLPFC の AUC . . . . .	8

## 付 表

1	実験環境 . . . . .	2
---	----------------	---

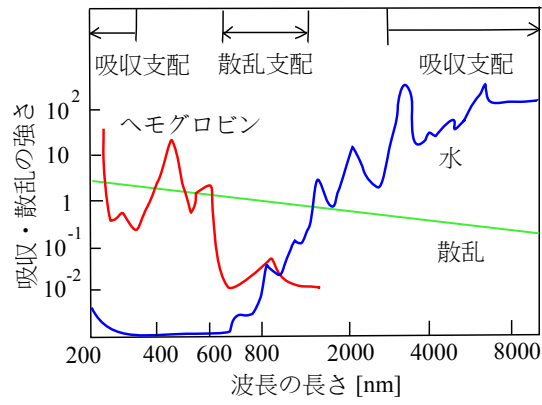


Fig. 1 生体組織による光吸収および散乱の波長特性

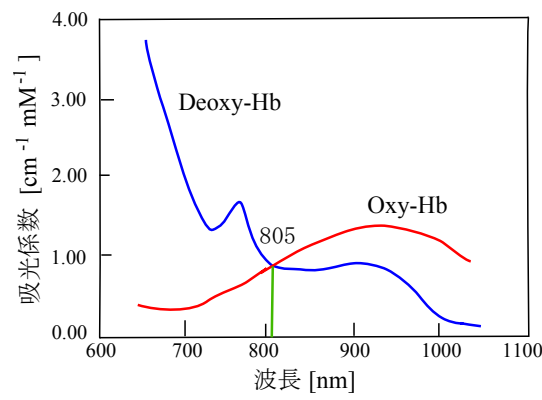


Fig. 2 Oxy-Hb と Deoxy-Hb の吸収スペクトル



Fig. 3 色温度の概略図

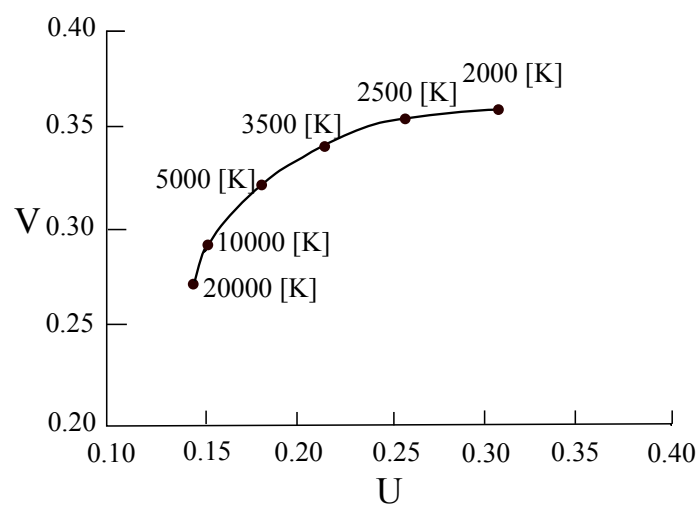


Fig. 4 色度図上の黒体輻射

Table 1 実験環境

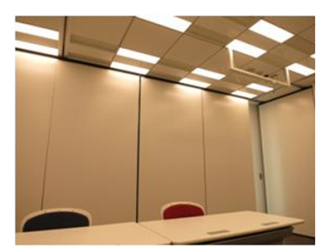
光環境	色温度 [K]	照度 [lux]
White	4535 ± 32.1	639 ± 11.4
Blue	7056 ± 20.9	971 ± 26.6
Red	3053 ± 31.4	305 ± 1.7



(a) White



(b) Blue



(c) Red

Fig. 5 実験環境

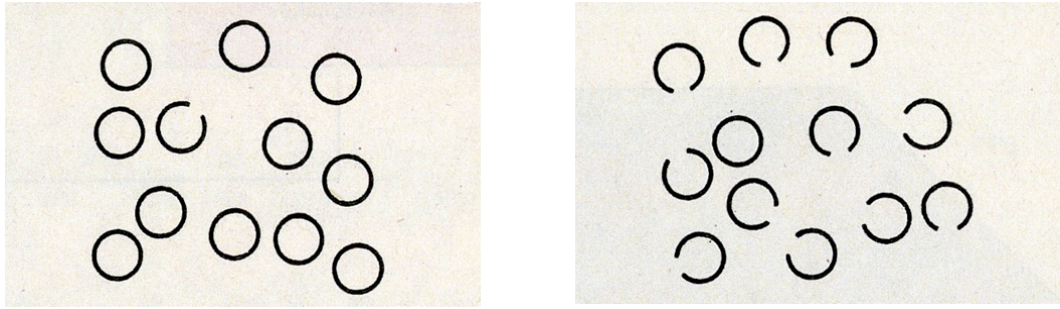


Fig. 6 ポップアウトと系列探索

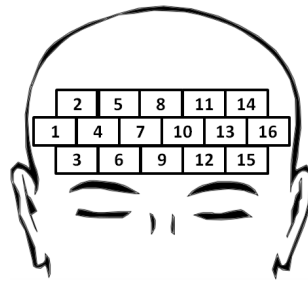


Fig. 7 OEG-16 のチャンネル配置

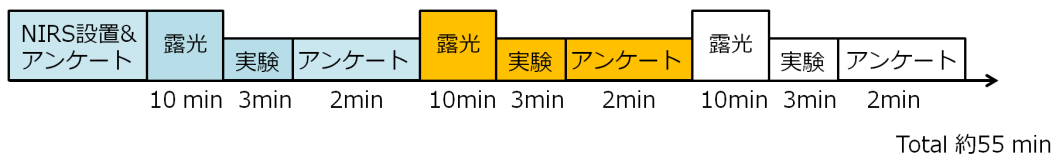


Fig. 8 実験設計

- あなたが光環境下での作業で感じた感覚を、直線の左右両端に示した感覚を参考に直線上に×で示してください。（線や枠の外に×をつけることはできません）



Fig. 9 VAS のアンケート



Fig. 10 脳血流モデル作成過程の概略図

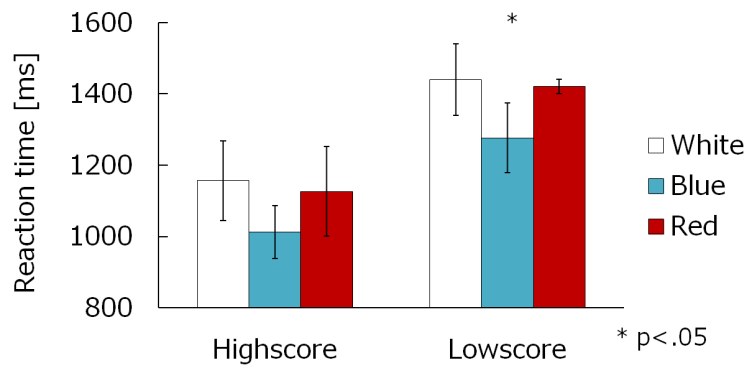
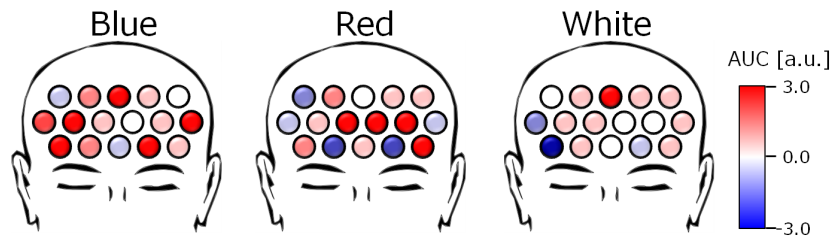
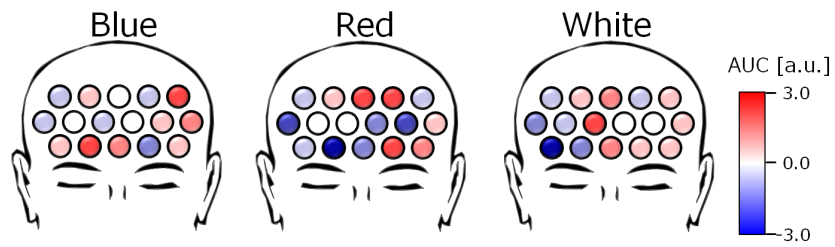


Fig. 11 被験者群別の平均反応時間

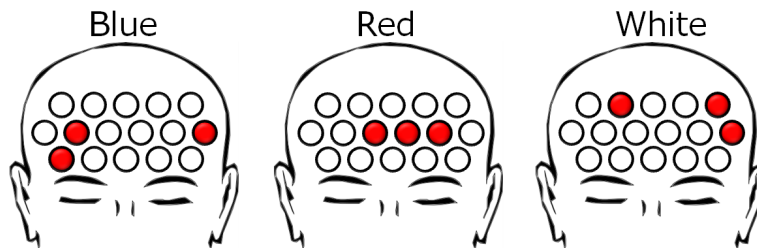


(a) 高成績群

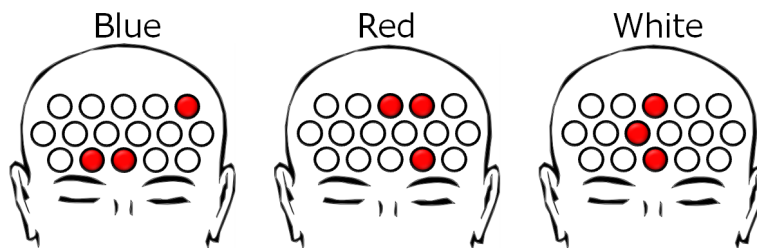


(b) 低成績群

Fig. 12 課題中の脳活動のカラーマップ



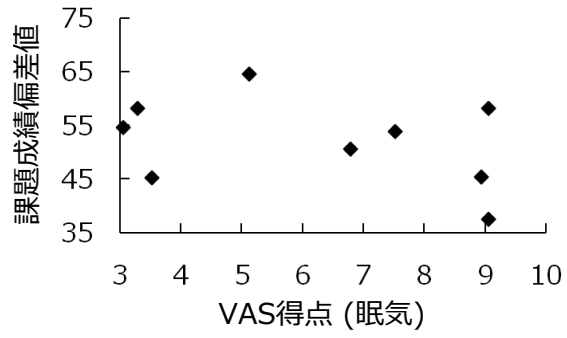
(a) 高成績群



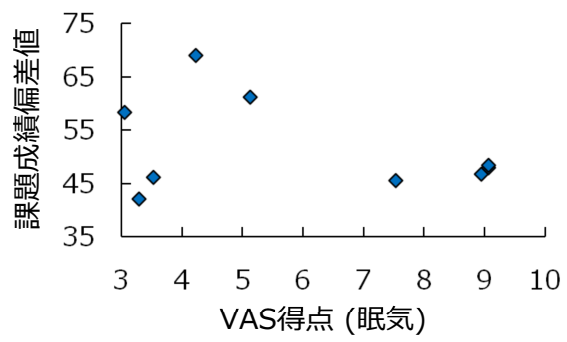
(b) 低成績群

Fig. 13 AUC の上位 3CH

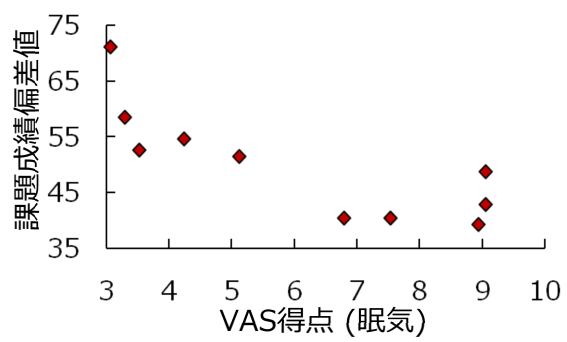




(a) White

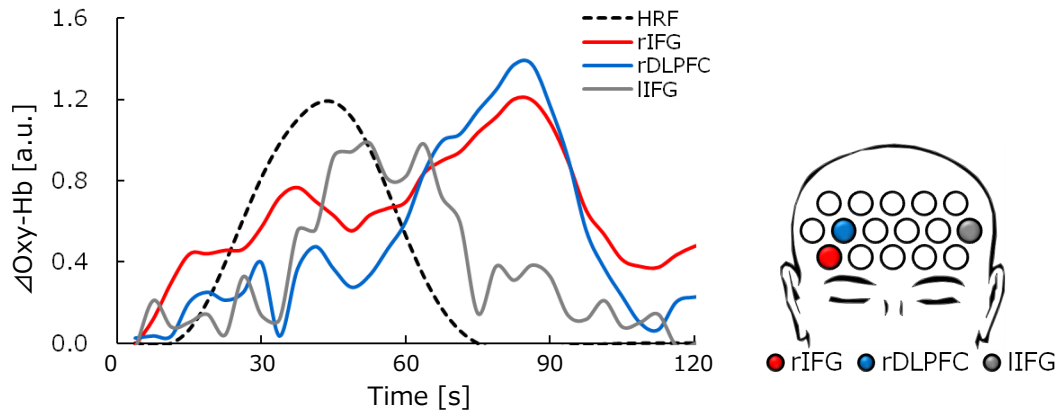


(b) Blue

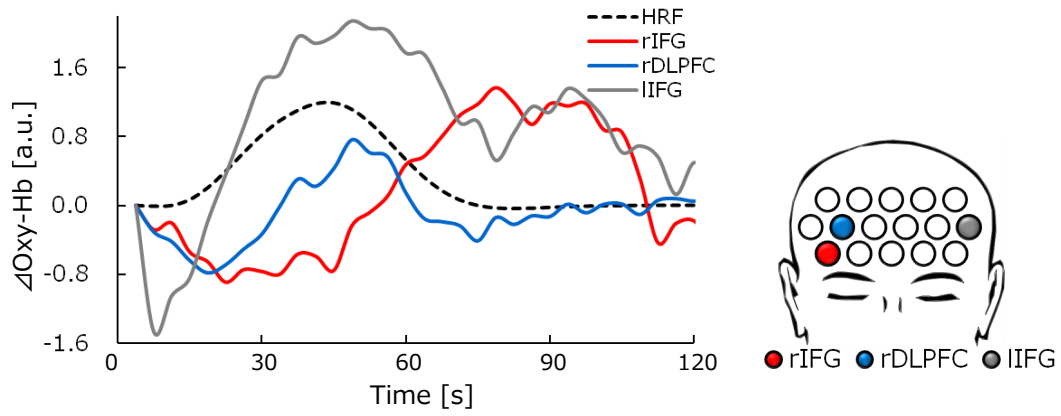


(c) Red

Fig. 14 実験前の眠気の度合いと課題成績の相関



(a) 高成績群



(b) 低成績群

Fig. 15 モデルと着目領域の脳血流変化の比較

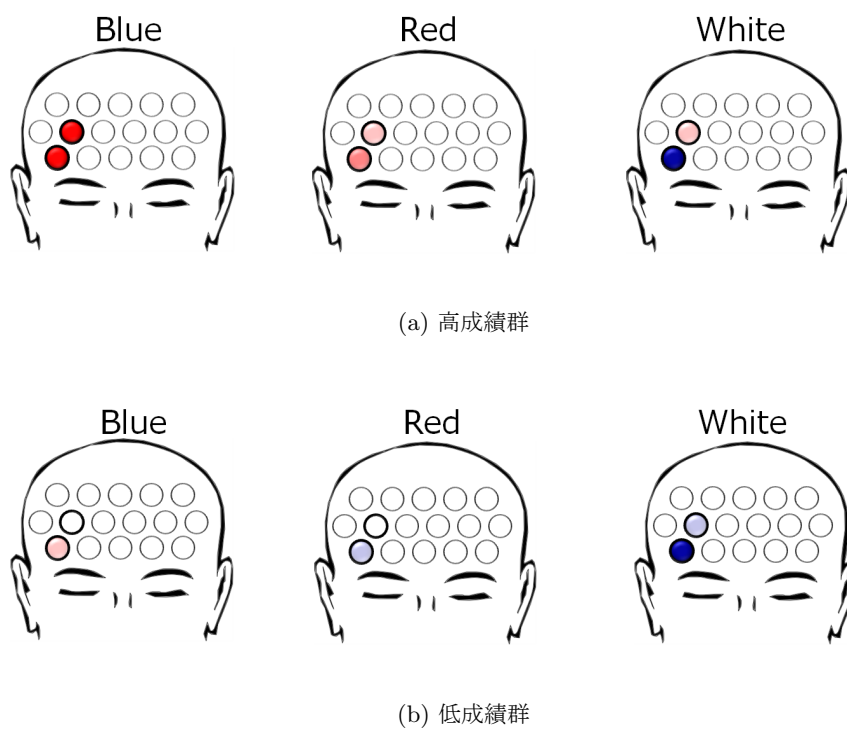


Fig. 16 rIFG および rDLPFC の AUC