

修士論文

計算課題および記憶課題における
脳血流変化のfNIRSによる測定

同志社大学大学院 工学研究科 情報工学専攻
博士前期課程 2009年度 754番

田邊 竜也

指導教授 三木 光範教授

2011年1月21日

Abstract

When a person improves the intellectual productivity, it is thought that the region of his brain which is relevant to intellectual work is changed. Our goal is to clarify the process of this change.

In this study, we measured the amount of change of oxygenation hemoglobin concentration in each frontal lobe and temporal lobe with functional near infrared spectroscopy (fNIRS). We carried out the calculation task and the picture memory task to the subjects repeatedly. As the result, in the calculation task, the amount of change of oxygenation hemoglobin concentration decreased gradually. On the other hand, in the memory task, Increase of it was on the rise.

目次

1	序論	1
2	近赤外分光法による脳機能イメージング (fNIRS)	1
2.1	fNIRS の概要	2
2.2	fNIRS の計測原理	3
3	大脳皮質の構造	4
3.1	前頭葉	4
3.2	側頭葉	5
4	繰り返し作業による脳血流量変化	5
4.1	概要	5
4.2	繰り返し作業による脳血流量変化の検証	6
5	計算課題	6
5.1	概要	6
5.2	実験結果	7
5.3	考察	8
6	記憶課題	8
6.1	概要	8
6.2	実験結果	9
6.3	考察	9
7	結論	9

1 序論

脳活動を体外から計測する手法として1980年代にPET (positron emission tomography) が開発されて以降、非侵襲脳機能イメージング法とよばれる一群の新しい手法が急速に現実化し始めた。非侵襲脳機能イメージング法とは、脳機能局在性つまり脳の各部位がいつ、どのような働きをしているかを可視化する手法である¹⁾。これにより脳の各部位ごとの機能を明らかにすることを目的とする。PET に次いで脳磁図 (magnetoencephalography:MEG) や、現在では脳研究の強力なツールとなった機能的磁気共鳴画像 (functional MRI :fMRI) など次々に新しい手法が開発された。その中でも、近年 fMRI に並ぶ新たな手法として注目を集めているのが近赤外分光法による脳機能イメージング (functional near-infrared spectroscopy :fNIRS) である。

fNIRS は fMRI と比較して、空間分解能が脳表面の大脳皮質程度であり、脳深部が測定できない点では劣る。しかし、装置を移動でき、座位や立位での検査が可能であるため、脳機能を自然な状態で検討できる点で fMRI より優れる²⁾。このような点で精神疾患における有用性の基盤となっている³⁾。また、心理学分野の研究において精神活動時の生体情報取得装置として用いられるなど⁴⁾ 幅広い分野で利用されている。

自然な状態での計測が可能という利点から、fNIRS を用いた研究の中には日常作業時の脳活動に着目したものも広く扱われている。Richter らの研究では、日常生活で扱う人間の基礎的技術として算術計算をあげ、計算処理における大脳皮質の活性度が問題形式の困難さに依存することを明らかにしている⁵⁾。また宮城らの研究では、記憶能力や文章理解力などの、オフィスにおける知的作業の生産能力を評価する独自のタスクセットを開発し、その客観的な評価手法に fNIRS を用いている⁶⁾。これらの研究は、人間の日常的知的作業から脳機能を明らかにするものである。しかし、日常的に行われる作業は、繰り返すにつれて効率、生産性が向上する。この要因の1つとして、作業の繰り返しによる慣れの影響が大きく働いていることが考えられる。またこのとき、作業に関連する脳の活動に変化が生じていると考えられる。局在性の観点から、知的作業と脳の活動部位との関連に関する研究は行われているが、繰り返し作業による知的生産性改善と脳活動の変化の過程については十分に検討されていない。

本研究では作業の繰り返しによる脳活動の変化を fNIRS でとらえることにより、知的生産性向上の要因を明らかにすることを目的としている。対象とする知的作業に計算課題および記憶課題を用い、同一被験者に繰り返し実施した。そして、作業の繰り返しによる知的生産性の変化と、その時の脳血流の関連について示した。

以降、2章で fNIRS の概要と計測原理、3章で fNIRS の計測対象である大脳皮質の機能、4章で作業への慣れによる脳血流の変化について述べる。そして5章、6章で用いる対象課題とその際の実験結果について述べ、7章でまとめる。

2 近赤外分光法による脳機能イメージング (fNIRS)

近赤外分光法による脳機能イメージング (fNIRS) は、非侵襲の脳機能イメージング装置の一種であり、近赤外光を用いて血中ヘモグロビンの相対的变化量を多点で計測することで脳の活動を画像化

することができる．本章では fNIRS の概要および fNIRS の計測原理について述べる．

2.1 fNIRS の概要

人間が知的機能を活用する場合，その機能に応じた大脳皮質の部位が活性化することが知られている．このため，大脳皮質には機能の局在性があると言われている⁷⁾．さらに活性状態にある脳の周辺部では，神経血管カップリングにより脳血管が拡張し脳血流が増加する．神経血管カップリングとは，神経活動による酸素代謝の亢進に伴い脳血管が拡張し脳血流が上昇する仕組みのことを示す⁸⁾．これに従い毛細血管も拡張するため組織に含まれる血液量が増加し，赤血球の中で酸素を運搬する働きを持つヘモグロビンの酸化還元率も変化する．fNIRS はこの毛細血管におけるヘモグロビンの相対的変化量を計測するものである．

fNIRS には，以下のような長所と短所が挙げられる⁸⁾．

- 長所

- 非侵襲性

光を用いた測定であるため生体への有害な影響はなく，幼児に対しても反復して測定することが可能である．

- 高時間分解能

市販の装置でも 0.1 秒ごとの測定が可能であり，脳機能の変化の時間経過を検討することが可能である．

- 可搬性

装置が小型で移動可能であり，診療室やベッドサイドをはじめとする様々な臨床現場で場所を選ばず検査を行うことが可能である．

- 低拘束性

座位や立位などの自然な姿勢で，発声や運動を行いながら検査が可能である．臥位で無動を保たなければならない他の脳機能イメージング法と比較すると，より自然な状態での検査が可能となる．

- 短所

- 低空間分解能

測定に散乱光を用いるため，空間分解能は 10 ～ 30 mm 程度の大きさである．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決定することは困難である．

- データの不確実性

得られるデータがヘモグロビン濃度の相対的変化量であり，絶対量を求めることはできない．そのため頭皮や頭蓋骨板間など，脳以外に流れる血流の影響を受ける．fNIRS を用いて脳の活動に応じた変化を測定する場合，脳活動変化後のデータから変化前のデータを除外できるよう留意する必要がある．

2.2 fNIRS の計測原理

fNIRS で用いる近赤外光は、血液中のヘモグロビンによって吸収、散乱される。光の吸収、散乱の度合いは酸素と結び付いた酸素化ヘモグロビン (Oxy-Hb) と酸素が外れた脱酸素化ヘモグロビン (Deoxy-Hb) の量により変化する。これを利用すれば、Oxy-Hb と Deoxy-Hb の濃度変化量は脳組織を通過した光の量を計測することで得られる連立方程式を解いて求めることができる⁸⁾(詳細は 2.2.2 項に示す)。Fig. 1 に計測原理の概略図を示し、以下に計測の流れについて述べる。

- (1) 頭皮上に設置された照射点から、波長の異なる 2 種類の近赤外光を光ファイバを用いて頭蓋内に向け照射する。
- (2) 近赤外光は、頭部の組織内で吸収、散乱を繰り返し、約 20mm の深部 (大脳皮質) にまで到達する。
- (3) 照射点から約 30mm 離れた検出点で散乱光を検出する。このとき 30mm より短い場合は、大脳皮質を通過する光量が減り、また 30mm より長い場合は検出用の光ファイバで検出される光量と S/N 比が低下する。
- (4) 検出された光から大脳皮質の Oxy-Hb, Deoxy-Hb の濃度変化を算出する。

2.2.1 近赤外光を用いた生体測定

生体組織の光測定には波長が 700 ~ 900nm の近赤外光が使用される。この理由は、近赤外光よりも波長の短い可視光ではヘモグロビンによる吸収が大きく、また長い波長では水による吸収が大きくなり、光が生体内を進めないためである。これに対し、近赤外光の波長領域は生体を透過しやすいため、生体の窓とも呼ばれる。光の生体組織への浸透深さはおよそ Fig. 2 のように表せる⁹⁾。

この波長域での光の吸収は Oxy-Hb と Deoxy-Hb によって生じるが、両者は異なる吸収スペクトルを持ち、Fig. 3 に示すように 805nm 近傍が等吸収点となっている。このため Oxy-Hb と Deoxy-Hb の吸光係数が既知であれば、2 波長以上での吸光量変化を計測することで Oxy-Hb と Deoxy-Hb の濃度変化を算出することができる¹⁰⁾。

2.2.2 分光学に基づいた生体測定

fNIRS を用いてヘモグロビン濃度の変化を測定する方法は、分光学に基づいて設計されている。この設計とは吸収量を計測することによって物質濃度を定量するものであり、波長の異なる複数の光を用いなければならない。その基礎となっているのがランベルト・ベールの法則 (Lambert-Beer law) である¹¹⁾。

Fig. 4 のような一直線に向かい合わせた光源と検出器の中間にサンプルを置くことを想定した場合、サンプルの距離 d とサンプルに含まれる物質濃度 C との積によって、入射した光は指数的に減少する。サンプルに入射する光量を I_{in} 、濃度 C の物質を均一に含むサンプル溶液を距離 d だけ透過した後には検出される光量 I_{out} とおくと式 (4) が成立する。

$$-\text{Log} \frac{I_{out}}{I_{in}} = \epsilon C d \quad (2.1)$$

式(4)より、予め特定波長での溶液の吸光係数 ε が求められていれば、 I_{in} 、 I_{out} 、 d を測定することで対象とする溶液の濃度 C を求めることができる。

しかし、ランベルト・ベールの法則は透明な液体に適用されるものである。透明とは吸収のみを示すものである。実際には、生体に照射された光は吸収と散乱による減衰を受けつつ伝播する。また生体測定では、光源と検出器が一直線上に向かい合う位置よりも、光源と検出器が同じ方向の位置で測定することのほうが多い。このような背景の中で、ランベルト・ベールの法則を拡張して散乱のある媒体に適用したのが式(2.2)のモディファイド・ランベルト・ベールの法則(modified Lambert-Beer Law)である。

$$-\text{Log} \frac{\Delta I_{out}}{I_{in}} = \varepsilon \Delta C d + \Delta S \quad (2.2)$$

式(2.2) ΔI_{out} は透過光量変化、 ΔC は濃度変化、 ΔS は散乱による影響変化を示すものである。生体に入射される波長 λ の光量を $I_{in}(\lambda)$ 、生体内で吸収と散乱を受けて外に戻ってきた光の変化量を $\Delta I_{out}(\lambda)$ 、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 ΔC_{oxy} 、Deoxy-Hb の濃度変化を ΔC_{deoxy} とすると以下の式(2.3)が成り立つよう fNIRS は設計されている。

$$-\text{Log} \frac{\Delta I_{out}}{I_{in}} = (\varepsilon_{oxy}(\lambda) \Delta C_{oxy} + \varepsilon_{deoxy}(\lambda) \Delta C_{deoxy}) d + \Delta S \quad (2.3)$$

式(2.3)より変数が ΔC_{oxy} および ΔC_{deoxy} の2つである。よって、2種類の異なる波長の近赤外光を用いることで連立方程式を立て、これらを求めることができる。

3 大脳皮質の構造

fNIRSによって計測される大脳皮質は情動、認知、運動、意欲などの高次神経活動が営まれる部位である。しかし、大脳皮質の機能は一様ではなく、その部位によって異なる機能を果たしている。このため大脳皮質には機能の局在性が存在するといわれている⁷⁾。

大脳半球は表面から見ると多数の溝があり、これを脳溝と呼ぶ。そして、脳溝と脳溝に囲まれたふくらみを脳回と呼ぶ。中でも大脳半球を外側面から見たとき、前方から後方に伸びる外側溝(シルヴィウス溝)と、縦に伸びる中心溝(ロランド溝)はよく目立ち、解剖的区分の目安として重要である。これらを用いて大脳半球はFig. 5に示すように大きく、前頭葉、側頭葉、頭頂葉、後頭葉の4つの領域に区分される¹²⁾。本研究で測定対象とする前頭葉、側頭葉について以下に述べる。

3.1 前頭葉

外側溝より上側で、中心溝より前側の部位を示す。実行機能と呼ばれる機能を持ち、これは状況にふさわしい行動の選択し、不適切な行動を抑制しつつ目の前の作業に集中する一連の能力である。実行機能の判断に基づく行動をとるため、運動指令を生み出す、言葉をつくるといった領域も前頭葉に含まれる⁷⁾。前頭葉の領域は機能別に以下のように区分される。

- 前頭前野

行動計画に必要な情報を周囲の連合野から受け取り、複雑な行動計画を組み立て、その実行

の判断を行う。思考や認知といった高次元の機能を行うことから、人格の形成にも大きく影響する。また、言葉を理解する、推論するなど情報を操作する間、一時的にその情報を保持する能力を作業記憶と呼び、前頭前野は作業記憶に関する重要な部位であるとされている。

- 運動前野

体を動かすための意志を起こす部位である。視覚情報や聴覚情報などを元に運動野に指令を出す。

- 運動野

運動前野などからの情報を元に、筋の動きを調整する。

- ブローカ野

運動性言語中枢とも呼ばれる。話す言葉を形成し、発音する際に運動野にある唇や舌などの運動を司る部位に指令を出す。ブローカ野には大脳半球における左右局在性がある。つまり、ブローカ野を含めた言語機能を担当する側を優位半球、他方を劣位半球としたとき、右利きの人の約96%、左利き・両利きの人の約70%が左側に優位半球を持つ。

3.2 側頭葉

外側溝より下側で、角回あたりより前側の部位を示す。耳のすぐ上の位置に存在し、聴覚処理に関与する。音声や文字の意味など言葉を理解する領域を含み、学習、記憶、情動反応に重要な働きをしている。側頭葉の領域は機能別に以下のように区分される。

- 聴覚野

耳からの音の感覚情報を解析する。聴覚的な対象の同定や分離、空間における音源の位置の同定などに関わっている。

- 補助聴覚野

聴覚情報を他の感覚情報や記憶、情動などと統合する。

- ウェルニッケ野

知覚性言語中枢とも呼ばれる。耳からの聴覚情報を入力し、言語を解析する。話された言葉を理解する役割を持つ。大脳半球における左右局在性があり、ブローカ野と同じ側の半球に存在する。

4 繰り返し作業による脳血流量変化

4.1 概要

生産性を向上させる1つの要因として、作業の繰り返しや慣れによる影響が大きく働いていることが考えられる。またこのとき、作業に関連する脳の活動に変化が生じていると考えられる。局在性の観点から、作業と脳活動の関連に関する研究は行われているが、繰り返し作業による脳活動の変化の

過程については十分に検討されていない．本研究はこの脳活動が変化していく過程を fNIRS によって明らかにすることを目的としている．

4.2 繰り返し作業による脳血流量変化の検証

4.2.1 実験概要

作業の繰り返しが脳活動に与える影響を調査するため，後述の計算課題および記憶課題を用いて被験者実験を実施した．被験者は男性健常者 6 名（年齢 22 歳-26 歳，全員右利き）である．被験者全員に各課題を 4 回ずつ繰り返し行い，その際の Oxy-Hb の変化量に着目する．なお，実験デザインには Fig. 6 に示すブロックデザインを用いる．

fNIRS は機器の設計上，血液中に含まれるヘモグロビンの相対的変化量しか計測できない．そのため，目的とする脳活動を検出するための作業（以下タスク）の他に，タスクに対する参照状態となる作業（以下レスト）を検討する必要がある．タスクに応じて設定したレストは，タスクタイム前後のウェイトタイムおよびリラックスタイムで実施する．

4.2.2 実験機器

本実験では脳血流の計測に日立製作所製の fNIRS，ETG-7100 を用いた．本装置は Fig. 7 と Fig. 8 に示す 3 × 5 プローブホルダと 4 × 4 プローブホルダを組み合わせることさまざまな部位・タスクに応じてデータを計測することが可能である．

実験では 3 × 5 プローブホルダ（22ch）を用いて前頭葉を，4 × 4 プローブホルダ（24ch）を用いて左右の側頭葉をそれぞれ計測する．また，それぞれの設置位置と計測されるチャンネルの番号を Fig. 9 および Fig. 7 に示す．なおプローブの設置は再現性を保つために国際 10-20 法の Fpz, T4, T3 を参照点として用いる⁸⁾．具体的には，前頭葉のプローブにおける 2ch-3ch の間を Fpz, 右側頭葉のプローブにおける 2ch を T4, 左側頭葉における 2ch を T3 とした．参照点とプローブの配置を Fig. 9 および Fig. 7 に示す．

5 計算課題

人間が行う高度な情報処理は脳の左半球または右半球のどちらかに偏って行われることが知られている．3 章で述べたブローカ野，ウェルニッケ野の言語機能が集中している左半球では，言葉や四則演算などの情報を局所的，分析的，順序推理的に処理する¹³⁾．この特徴を元に，本研究では脳機能計測のための課題の 1 つとして計算課題を用いる．

5.1 概要

本課題は，計算作業時における側頭葉と頭頂葉の関連に着目した Richter らの研究で使用されたものを参考にしている⁵⁾¹⁴⁾．本課題では，被験者にコンピュータの画面上に表示される計算問題を時間内により多く解いてもらう．計算問題 1 問あたりの手順を概略図 Fig. 12 と共に以下に示す．

STEP 1 注目点の正視

黒い背景のコンピュータ画面には注目点である白い十字が 0.5 秒間表示される．被験者は，計算を

行う以外の場合この注目点を正視する。

STEP 2 暗算

計算問題が 6.0 秒間表示される。被験者は暗算により計算問題を解く。本課題で表示される問題は 2 桁同士また 3 桁同士の加減算である。難易度を統一するため、用いる計算は以下の条件を満たすものとした。

- 1 桁目が 0 の数値は用いない。
- 1 桁目の加算が $5+5$ にならない。
- 和および差で桁数は変わらない。
- 繰り上がり、繰り下がりが少なくとも 1 回ある。

STEP 3 解の選択

問題の解候補となる 3 つの数値が 2.5 秒間表示される。被験者は正解だと思う数値を 1 つ選択し、口頭で答える。ここで表示される解候補は以下のいずれかがランダムに選択される。

- 「解」, 「解+10」, 「解+20」の 3 つの値が表示される
- 「解-10」, 「解」, 「解-10」の 3 つの値が表示される
- 「解-20」, 「解-10」, 「解」の 3 つの値が表示される

STEP 4 次の問題への遷移

STEP1 に戻り、次の問題に取り掛かる。

なお、上記の STEP 2 および STEP 3 では制限時間を満たす前にマウスのボタンをクリックすることで次状態に移ることができる。

上記の課題を用い、作業の繰り返しが脳血流の変化に与える影響の調査実験を行った。予備実験の結果からウェイトタイムを 30 秒、タスクタイムを 100 秒、リラクスタime を 50 秒に設定した。また、本実験ではレスト中、十字を正視しながら 1 から 9 の数字を繰り返し数える。本実験の時間経過を Fig. 13 に示す。

5.2 実験結果

計算課題を用いた作業の繰り返し実験の結果を Fig. 14 に示す。なお、Fig. 14 は横軸には実験の回数、縦軸には Oxy-Hb の変化量を折れ線グラフで、計算問題の正解数を棒グラフで示す。ここで述べる Oxy-Hb の変化量とは、fNIRS により得られた Oxy-Hb の相対的变化量にベースライン処理を施した後、タスクタイム中に含まれる値を積分したものである。Fig. 14 に示したのは、各計測プローブ別（前頭葉、右側頭葉、左側頭葉）に 1 チャンネルあたりの平均値を求めたものである。

また、Fig. 14 に示した Oxy-Hb の変化量の推移に対して自然対数近似曲線式 (5.1) をとった。

$$y = a * \log(x) + b \quad (a, b \text{ は定数}) \quad (5.1)$$

Fig. 5.1における定数 a が正の値をとるときは Oxy-Hb が増加傾向にあるものとし、負の値をとるときは減少傾向にあるものとする。Oxy-Hb の変化量の推移に対する自然対数近似曲線を、被験者全員分計測プローブ別に Table 1 に示す。

Table 1 より、計算課題における Oxy-Hb 変化量は、被験者全員、全プローブで減少傾向にあることが明らかになった。

5.3 考察

計算課題の繰り返しにより Oxy-Hb 変化量の減少傾向が見られた。この要因としては、作業の繰り返しによって計算への慣れが表れたものであると考えられる。Fig. 14 において、計算問題の正解数が1回目の計測（被験者6名の平均：15.0）から4回目の計測（被験者6名の平均：20.2）までに平均正解数が5.2上昇していることから、より効率的に計算が行えるようになったことが示唆される。

6 記憶課題

4章でも述べたように、人間が行う高度な情報処理は脳の左半球または右半球のどちらかに偏って行われることが知られており、右半球では、空間認知、図形認知、音楽的能力などを総合的、全体的、感覚的に情報をとらえて処理する¹³⁾。この特徴を元に、本研究では脳機能計測のための課題の1つとして記憶課題を用いる。

6.1 概要

本課題は、被験者にコンピュータの画面上に表示される画像を記憶し、後に出題される実験者からの質問に回答してもらう。本課題の手順を概略図 Fig. 15 と共に以下に示す。

STEP 1 画像の記憶

白い背景のコンピュータ画面に複数の動物が描かれたイラストが10秒間表示される。被験者は提示された画像から動物の種類、数、色などの情報を記憶する。

STEP 2 記憶の保持

注目点となる黒い十字が10秒間表示される。被験者はこの注目点を正視しながら、STEP 1 で得た記憶情報を保持する。

STEP 3 質問への回答

STEP 1 で提示された画像に関する質問が実験者から口頭で出題される。被験者はその質問に対して口頭で答える。質問は6秒に1問のペースで出題され、30秒間で5問の質問に答える。なお、視点は2で表示された黒い十字にあわせたままにする。

上記の課題を用い、作業の繰り返しが脳血流の変化に与える影響の調査実験を行った。予備実験の結果からウェイトタイムを30秒、タスクタイムを50秒、リラクスタimeを50秒に設定した。本実験ではレスト中、十字を正視しながら安静無心状態を保つ。本実験の時間経過を Fig. 16 に示す。

6.2 実験結果

記憶課題を用いた作業の繰り返し実験の結果を Fig. 17 に示す．なお，Fig. 14 は横軸には実験の回数，縦軸には Oxy-Hb の変化量を折れ線グラフで，記憶問題の正解数を棒グラフで示す．ここで述べる Oxy-Hb の変化量とは，計算課題で用いたものと同様の処理を行ったものである．

また，計算課題の時と同様，Fig. 14 に示した Oxy-Hb の変化量の推移に対して自然対数近似曲線式 (5.1) をとり，Fig. 5.1 における定数 a を用いて Oxy-Hb の増加減少傾向を検討した．Oxy-Hb の変化量の推移に対する自然対数近似曲線を，被験者全員分計測プローブ別に Table 1 に示す．

Table 2 より，記憶課題における Oxy-Hb 変化量は，被験者別にそれぞれ異なるプローブで増加および減少傾向が見られた．

6.3 考察

記憶課題の繰り返しにより Oxy-Hb 変化量の増加および減少傾向が見られた要因として，記憶の方法が一意に決定できないためであると考えられる．Table 2 より，被験者によって Oxy-Hb 変化量の増加傾向が確認できた部位はそれぞれ異なる．例えば，被験者 A, C は言語処理に長けた左側頭葉で増加傾向が現れている．このため，被験者 A, C は画像を数値や言葉に置き換えて記憶したと考えられる．また被験者 D, F は図形や空間認識に長けている右側頭葉で増加傾向が現れている．このため，被験者 D, F は画像そのものを記憶しようとしたと推測できる．前頭葉および左右側頭葉で増加傾向が現れた被験者 E は前述の両方法を用いたと考えられる．記憶問題の正解数に上昇が見られないことから，これら Oxy-Hb 変化量の傾向は，各々が最適な手法を模索する過程で現れたものと考えられる．

7 結論

本研究では，作業の繰り返しによって知的生産性が向上する際の，脳活動の変化を検討した．脳活動の計測には，自然な状態での計測が可能な fNIRS を用い，脳活動の様子を脳血流に含まれる Oxy-Hb の変化量でとらえた．また，対象とする作業には計算課題と記憶課題を用い，各課題の正答数を知的生産性向上の指標とした．

被験者実験の結果，計算課題においては，繰り返しによって知的生産性が向上するとともに，Oxy-Hb の変化量が減少していることが被験者全員から確認できた．また，記憶課題においては，繰り返しによる知的生産性の向上が見られず，Oxy-Hb の変化量は計測部位によって減少または増加していることが被験者 6 名中 5 名から確認できた．

計算課題において Oxy-Hb の変化量が減少した要因には，作業に対する慣れが考えられる．計算課題の成績が 1 回目の計測時よりも，4 回目の計測時の方が良好であることから，効率的に作業をこなすことで Oxy-Hb の変化量への影響を小さくするといえる．一方，記憶課題において，Oxy-Hb の変化量が脳部位によって減少または増加した．この要因には，作業に対する慣れが不十分であったことが考えられる．これは記憶課題の成績が 1 回目の計測時と 4 回目の計測時で差がないことから示唆される．また，Oxy-Hb の変化量の増加が確認できる部位は被験者によって異なる．これは，記憶

作業を効率的に行おうとした際、被験者によってその手法が異なったためと考えられる。例えば、画像・空間認識機能を持つ右側頭葉で増加が見られた被験者は、提示された画像そのものを記憶したとかがえられる。また、言語処理機能を持つ左側頭葉で増加が見られた被験者は、画像を数値や言葉に置き換えて記憶したと考えられる。このことから、算術計算のように問題の解法が一意に決定する課題は慣れやすく、効率化を図りやすいが、画像記憶のように問題の回答方法が一意に決定しない課題に対しては、最適な解法を模索する過程で効率化が困難であるといえる。

なお、本実験の記憶課題 1 回で被験者に行う質問は全部で 5 問である。問題数が少なく、効率的に作業が行なえたとしてもその差が確認しづらい。今後、記憶課題の問題数を増やすなど、記憶作業が効率的に行われる様子を明確に示せるよう、実験設計を検討する必要がある。また、今回は作業の繰り返しを 4 回としたが、回数をさらに増やすことで、作業効率がどのように変化するか、その際 Oxy-Hb の変化量にどのような影響が現れるかを調査する。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、2年間に渡って熱心なご指導、多くのご協力を頂きました、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、様々なご指摘、助言をしていただきました、同志社大学理工学部の三木光範教授、吉見真聡助教に心より感謝いたします。

本研究を進める上で、多くの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横内久猛教授に心より感謝いたします。

本研究を進める上で多くの助言をいただき、本論文の修正に時間を割いてくださいました光トポグラフィグループの大西佑奈氏に心より感謝いたします。

また、本研究を進める上で多くの議論の場に参加し、私を支えていただきました、光トポグラフィグループの皆様心より感謝いたします。

さらに、本論文の修正に時間を割いていただき、多くの助言をいただきました笠原佳浩氏に心より感謝いたします。

そして、本研究を進める上で多くの被験者実験に参加していただきました知的システムデザイン研究室、ならびに、医療情報システム研究室の皆さまに心より感謝いたします。

最後に、私の研究活動を理解し、経済的や精神的な面で支え続けてくれた家族と、3年間の研究生生活を友に送る中で私を励まし続けてくれた友人に深く感謝し、修士論文とします。

参考文献

- 1) 飛松省三. 非侵襲的脳機能計測法の進歩と臨床神経生理学. 福岡医学雑誌, Vol. 99, No. 1, pp. 7–12, 2008.
- 2) 江田秀雄, 佐瀬一郎, 高槻玲, 精山明敏, 柳田敏雄, 宮内哲. fmri による bold 信号と光計測による hb 信号との比較検討. 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 101, No. 406, pp. 95–99, 2001.
- 3) Tomohiro Suto, Masato Fukuda, Makoto Ito, Toru Uehara, Masahiko Mikuni. Multichannel near-infrared spectroscopy in depression and schizophrenia: cognitive brain activation study. *Biol Psychiatry*, Vol. 55, pp. 501–511, 2004.
- 4) Miho Suzuki, Jiro Gyoba, Yuiko Sakuta. Multichannel nirs analysis of brain activity during semantic differential rating of drawing stimuli containing different affective polarities. *Neuroscience Letters*, Vol. 375, pp. 53–58, 2005.
- 5) Thomas Dresler Michael M. Plichta Ann-Christine Ehlis Kristina Reiss Reinhard Pekrun Melany M. Richter, Kathrin C. Zierhut and Andreas J. Fallgatter. Changes in cortical blood oxygenation during arithmetical tasks measured by near-infrared spectroscopy. *Journal of Neural Transmission*, Vol. 116, No. 3, pp. 267–273, 2009.
- 6) 宮城和音, 近藤佑樹, 榎本健治, 石井裕剛, 下田宏, 岩川幹生, 寺野真明. パフォーマンステストによる知的生産性改善評価時の nirs を用いた脳活動計測. 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 108, No. 26, pp. 149–154, 2008.
- 7) 新井康允. 脳のしくみ. 日本実業出版社, 1997.
- 8) 福田正人. 精神疾患とNIRS 光トポグラフィー検査による脳機能イメージング. 中山書店, 2009.
- 9) Michael.S.Patterson, Brain.C.Wilson, Douglas.R.Wyman. The propagation of optical radiation in tissue. 2: Optical properties of tissues and resulting fluence distributions. *Lasers in Medical Science*, Vol. 6, pp. 379–390, 1991.
- 10) Koizumi Hideaki Yamamoto Tsuyoshi, Maki Atsushi. Brain function measurement system, near-infrared light optical topography. *Nippon Butsuri Gakkaishi*, Vol. 59, No. 10, pp. 675–681, 2004.
- 11) Eda Hideo. Near infrared spectroscopic measurement of brain activation and its limitations. *IEIC Technical Report*, Vol. 106, No. 328, pp. 63–66, 2006.
- 12) Steve Parker. *The Human Body Book*. Dk Publishing, 2007.
- 13) Mark Brown. *Left Handed : Right Handed*. David & Charles PLC, 1979.

- 14) Thomas Dresler, Andreas Obersteiner, Martin Schecklmann, A. Carina M. Vogel, Ann-Christine Ehlis, Melany M. Richter, Michael M. Plichta, Kristina Reiss, Reinhard Pekrun, Andreas J. Fallgatter. Arithmetic tasks in different formats and their influence on behavior and brain oxygenation as assessed with near-infrared spectroscopy (nirs): a study involving primary and secondary school children. *Journal of Neural Transmission*, Vol. 116, No. 12, pp. 1689–1700, 2009.

付 図

1	fNIRS の計測原理	1
2	体組織による光吸収・散乱の波長特性	1
3	ヘモグロビンの吸収スペクトル	2
4	ランベルト・ベールの法則	2
5	外側から見た大脳皮質の解剖的区分	2
6	ブロックデザイン	3
7	3 × 5 プローブ	3
8	4 × 4 プローブ	3
9	前頭葉のプローブ設置位置	3
10	右側頭葉のプローブ設置位置	3
11	左側頭葉のプローブ設置位置	3
12	計算問題の手順	4
13	計算課題実験の時間経過	4
14	計算課題実験の被験者別実験結果	5
15	記憶課題の手順	6
16	記憶課題実験の時間経過	6
17	記憶課題実験の被験者別実験結果	7

付 表

1	計算課題における対数近似曲線の式	8
2	記憶課題における対数近似曲線の式	8

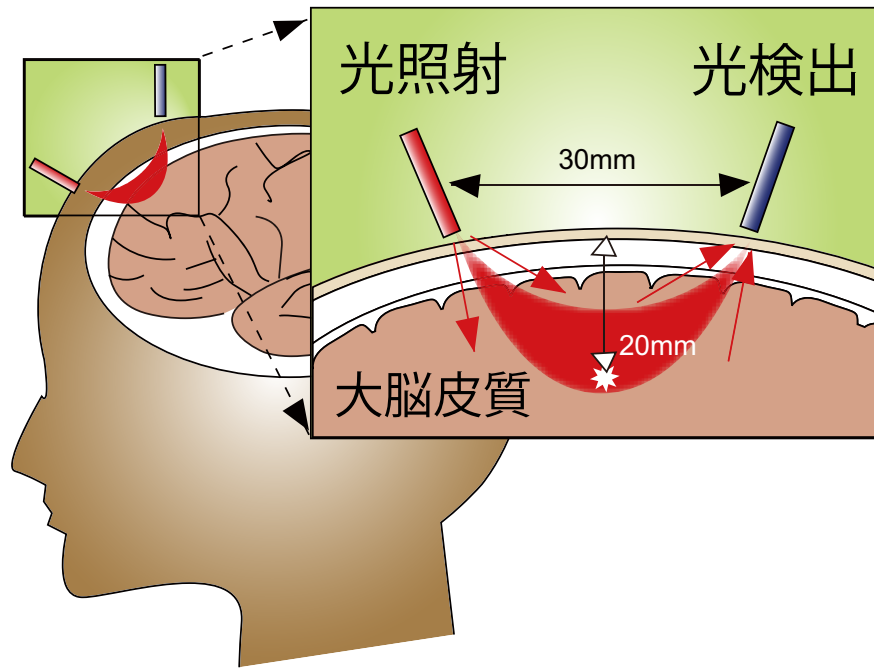


Fig. 1 fNIRS の計測原理

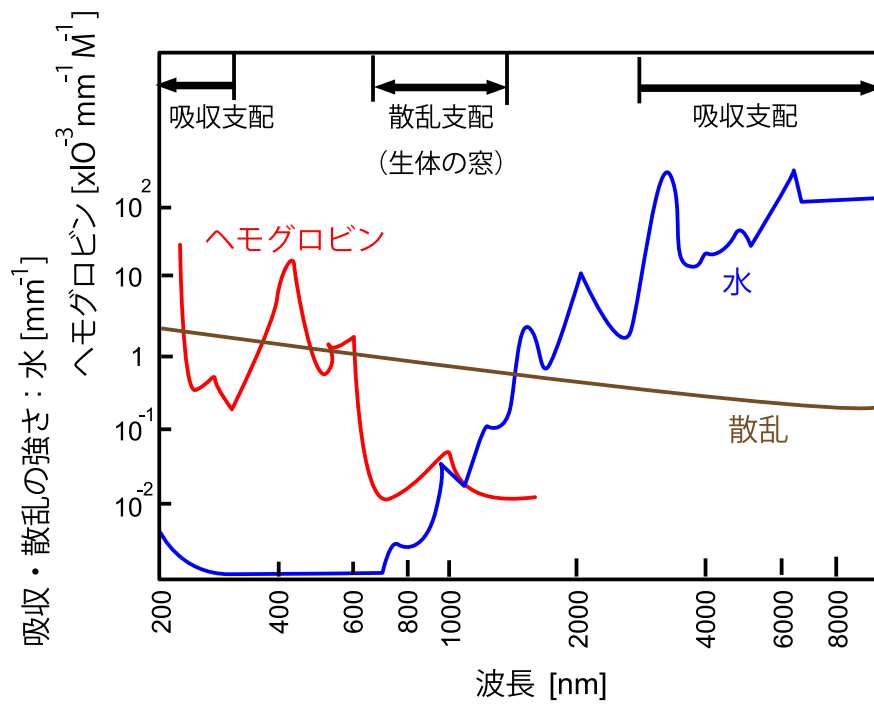


Fig. 2 体組織による光吸収・散乱の波長特性

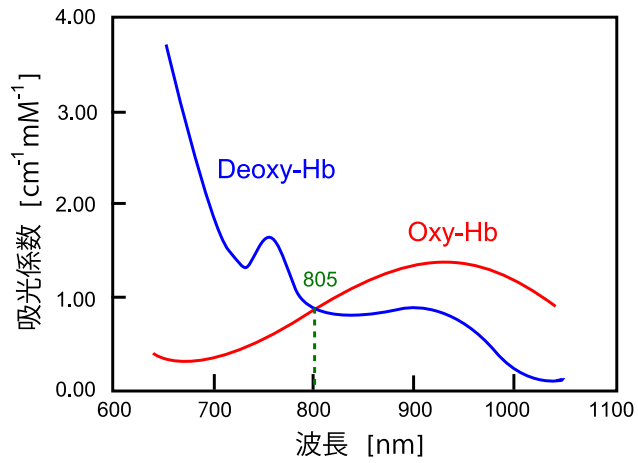


Fig. 3 ヘモグロビンの吸収スペクトル

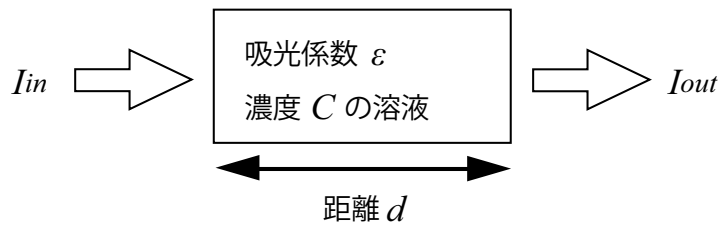


Fig. 4 ランベルト・ベールの法則

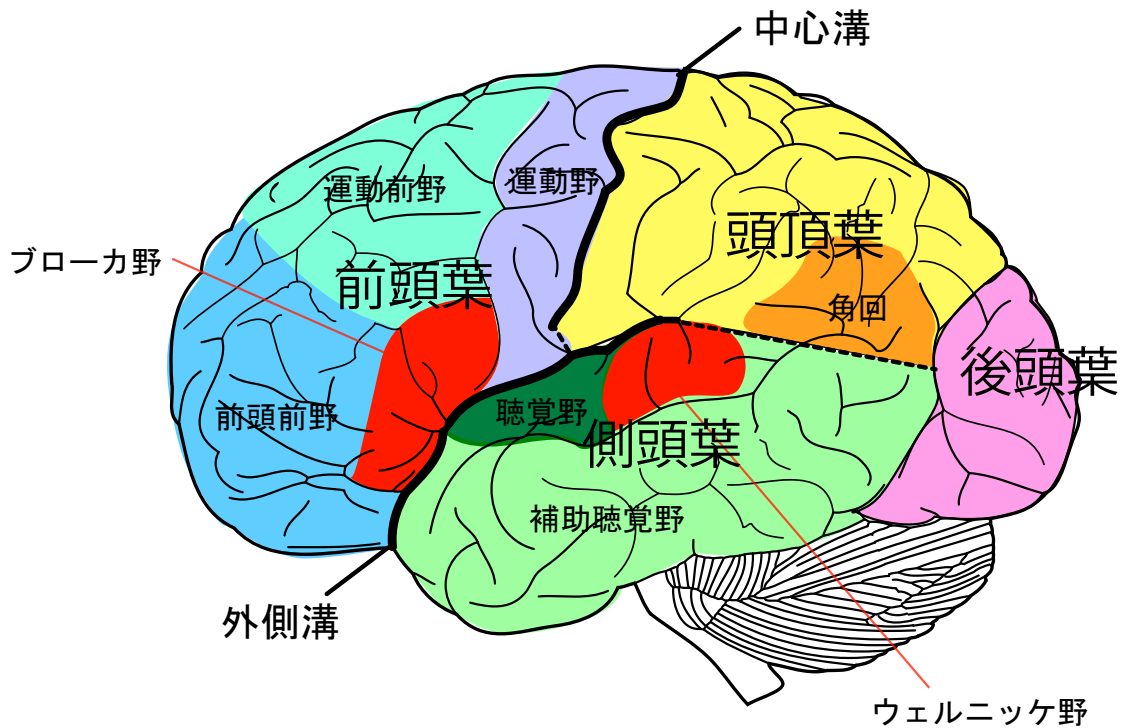


Fig. 5 外側から見た大脳皮質の解剖的区分

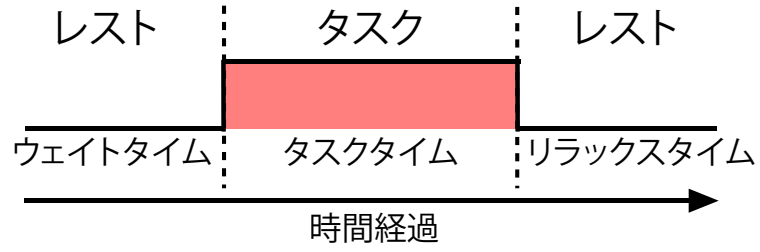


Fig. 6 ブロックデザイン

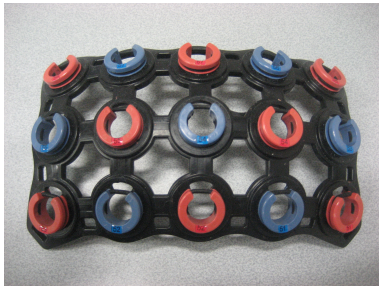


Fig. 7 3 × 5 プローブ



Fig. 8 4 × 4 プローブ

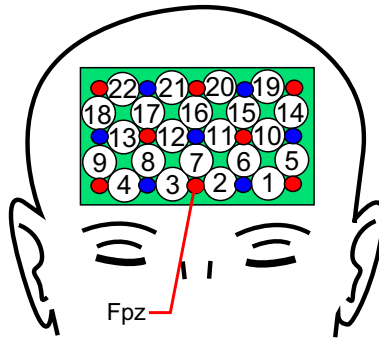


Fig. 9 前頭葉のプローブ設置位置

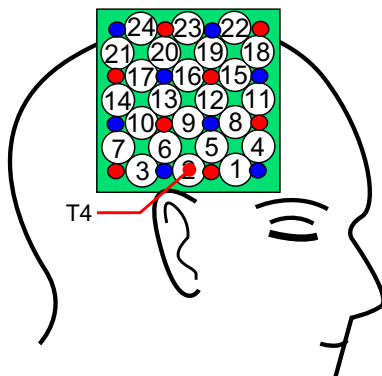


Fig. 10 右側頭葉のプローブ設置位置

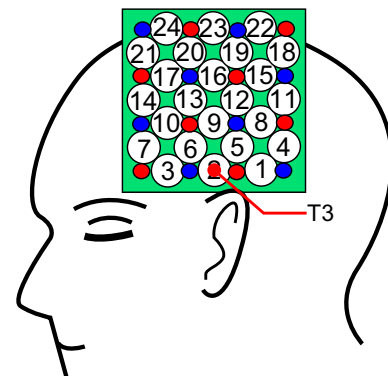


Fig. 11 左側頭葉のプローブ設置位置

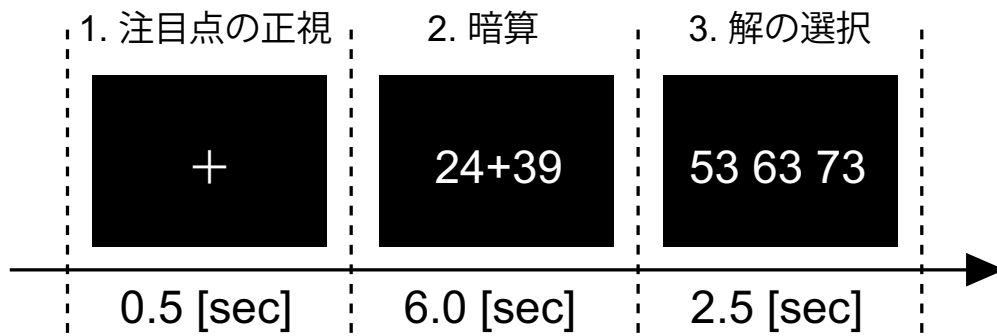


Fig. 12 計算問題の手順

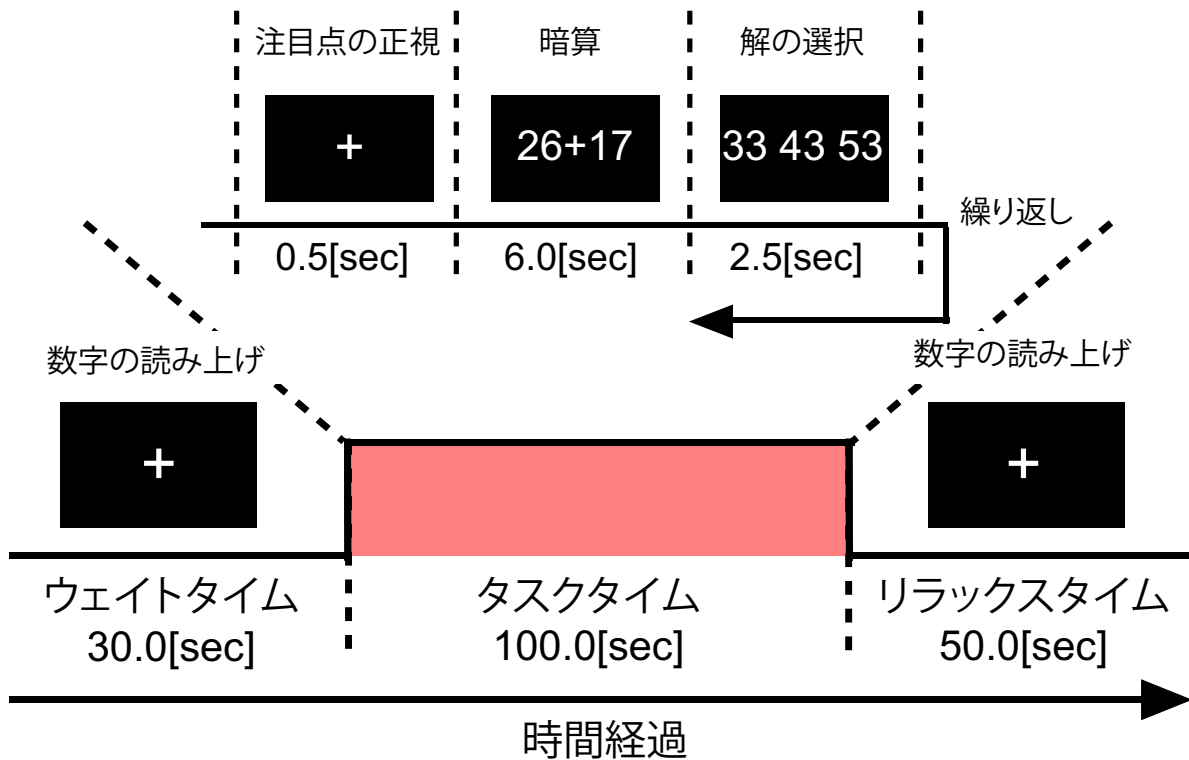


Fig. 13 計算課題実験の時間経過

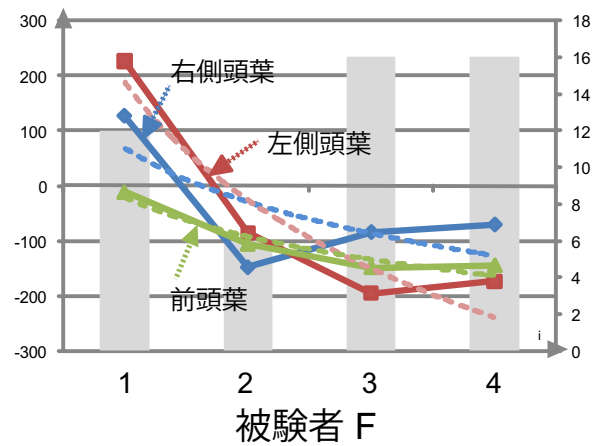
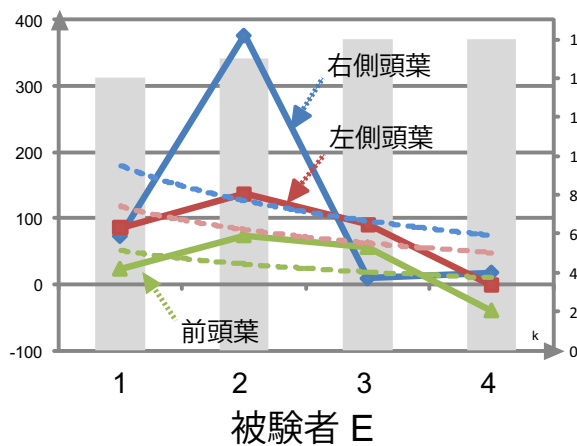
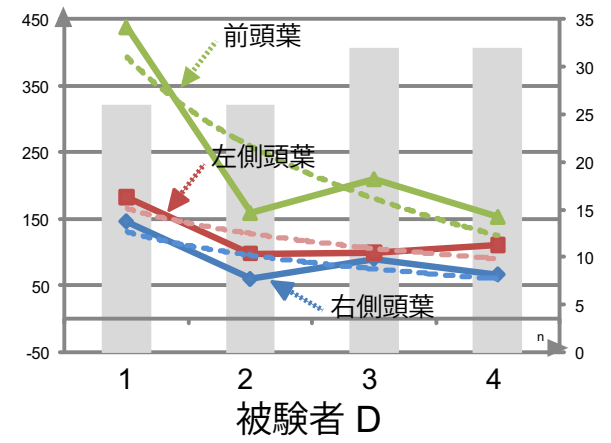
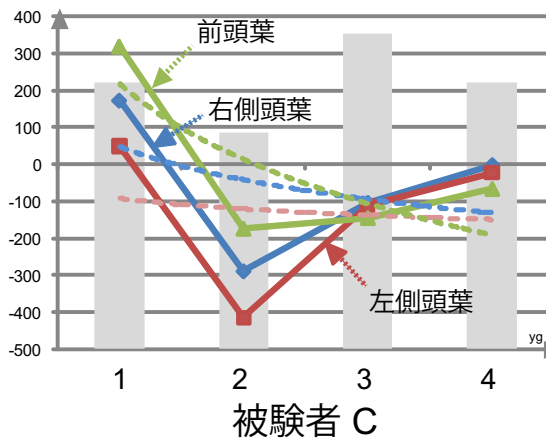
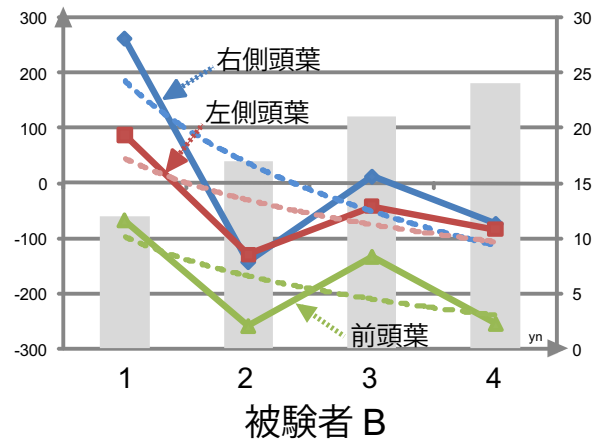
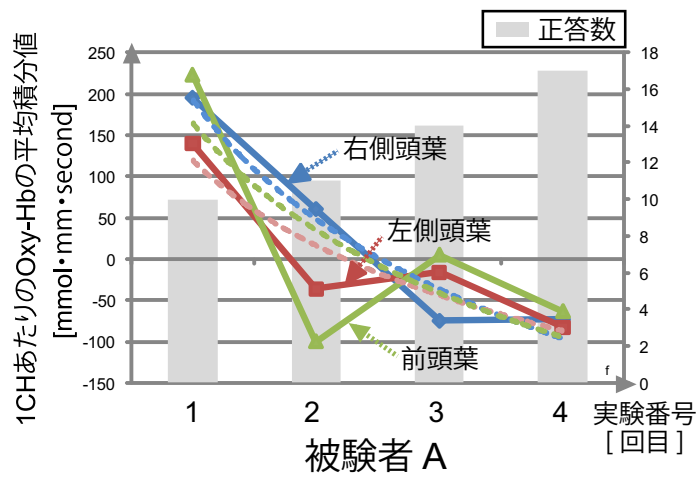


Fig. 14 計算課題実験の被験者別実験結果

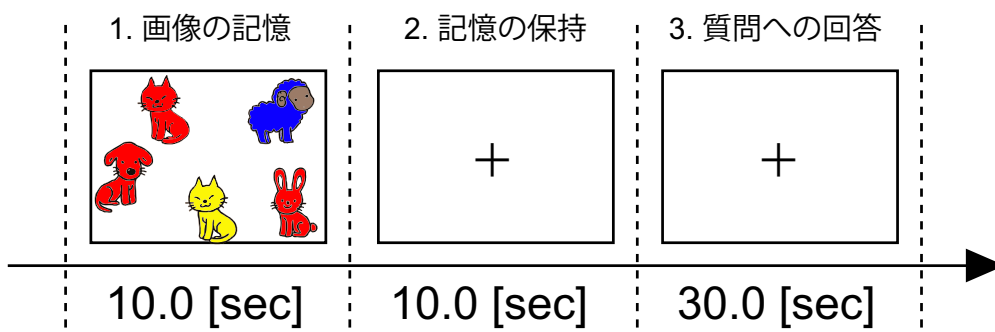


Fig. 15 記憶課題の手順

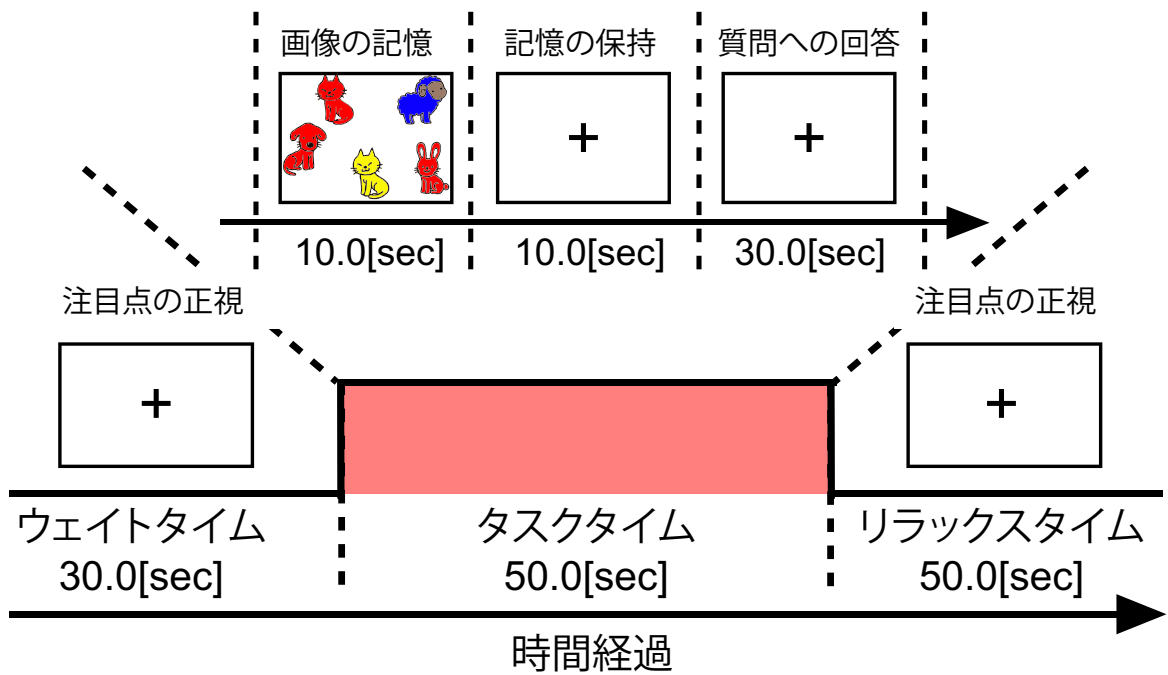


Fig. 16 記憶課題実験の時間経過

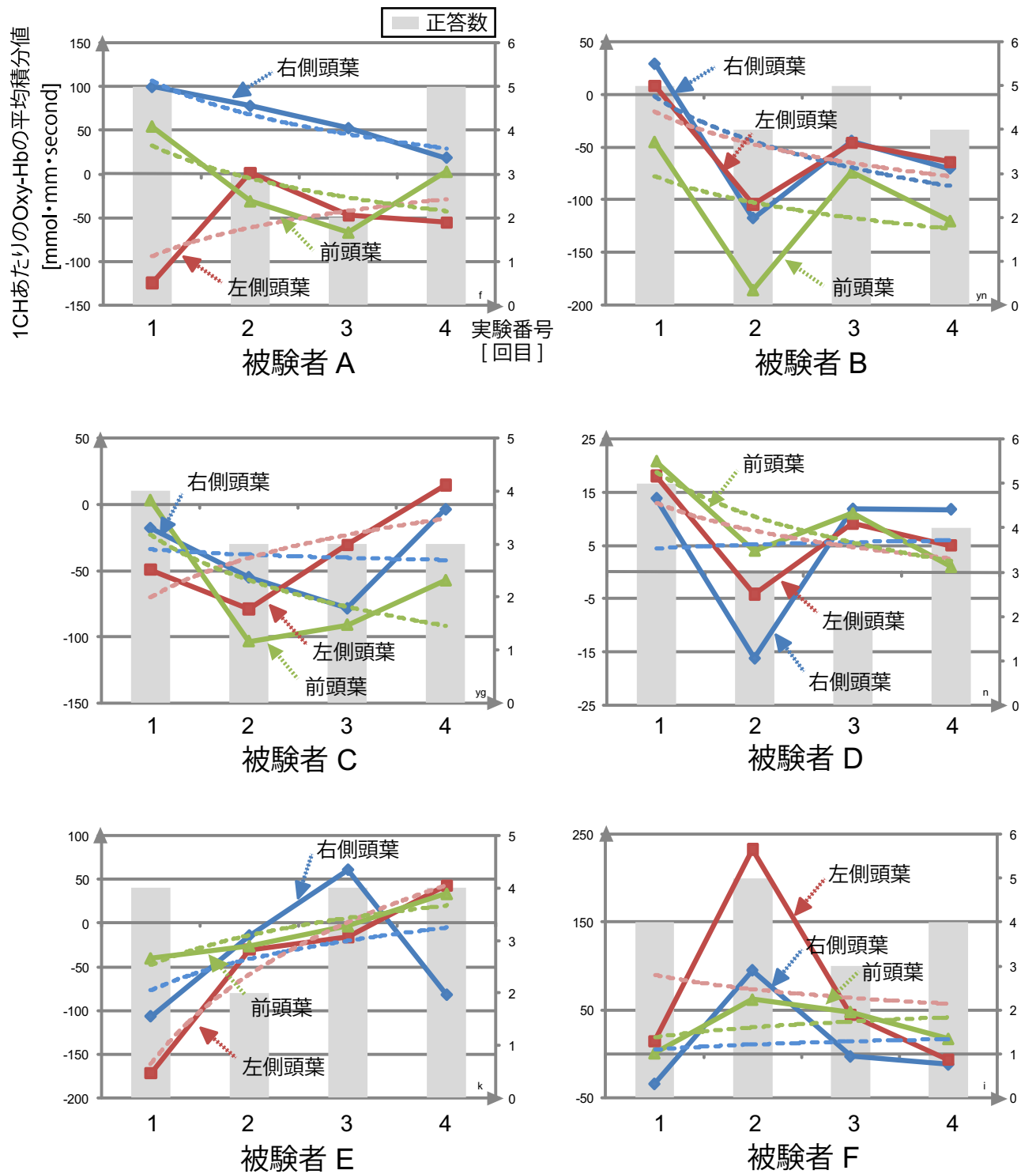


Fig. 17 記憶課題実験の被験者別実験結果

Table 1 計算課題における対数近似曲線の式

	Frontal Lobe	Right Temporal Lobe	Left Temporal Lobe
被験者 A	$y = -186.80\log(x) + 164.26$	$y = -208.8\log(x) + 192.92$	$y = -148.6\log(x) + 119.11$
被験者 B	$y = -102.80\log(x) - 97.21$	$y = -214.7\log(x) + 184.80$	$y = -108.9\log(x) + 44.48$
被験者 C	$y = -294.80\log(x) + 217.54$	$y = -129.7\log(x) + 47.94$	$y = -41.21\log(x) - 92.27$
被験者 D	$y = -193.50\log(x) + 393.44$	$y = -50.83\log(x) + 130.94$	$y = -54.49\log(x) + 165.99$
被験者 E	$y = -29.91\log(x) + 51.66$	$y = -76.38\log(x) + 179.84$	$y = -50.64\log(x) + 118.12$
被験者 F	$y = -102.80\log(x) - 20.88$	$y = -140.90\log(x) + 68.24$	$y = -307.50\log(x) + 187.34$

Table 2 記憶課題における対数近似曲線の式

	Frontal Lobe	Right Temporal Lobe	Left Temporal Lobe
被験者 A	$y = -54.29\log(x) + 32.71$	$y = -55.81\log(x) + 106.65$	$y = 47.46\log(x) - 94.29$
被験者 B	$y = -35.92\log(x) - 77.73$	$y = -61.40\log(x) - 1.97$	$y = -108.9\log(x) + 44.48$
被験者 C	$y = -49.57\log(x) - 22.88$	$y = -5.81\log(x) - 33.94$	$y = 42.99\log(x) - 70.25$
被験者 D	$y = -12.05\log(x) + 18.81$	$y = 1.12\log(x) + 4.41$	$y = -7.57\log(x) + 13.03$
被験者 E	$y = 49.307\log(x) - 48.18$	$y = 51.85\log(x) - 77.10$	$y = 147.72\log(x) - 161.23$
被験者 F	$y = 16.50\log(x) + 18.64$	$y = 8.71\log(x) + 4.52$	$y = -23.82\log(x) + 89.97$