

修士論文

技能習得における
習熟度と脳血流変化の関心の検討

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 1005番

早川 温子

指導教授 廣安 知之教授

2015年01月23日

Abstract

Proficiency level for skill acquisition can't be judged only by score. Therefore, some indexes for judging the proficiency level objectively without using task score are required. Then, we have done some long-term experiments, and investigated about the proficiency level change using physiological index. The purpose of this study is to examine the CBF (cerebral blood flow) for an objective evaluation method for the proficiency level establishment.

We used stereopsis and mental rotation with the ability difference in these experiments as training tasks. The experimental purpose is examining the proficiency level by the progress of the training. We directed subjects to practice stereopsis or the mental rotation every day for three minutes for four or five weeks and measured CBF using fNIRS (functional Near-Infrared Spectroscopy) once a week.

When we examined results, We hypothesize that task score and CBF have relationship based on the results of previous studies. We examined the proficiency level using task performance, response time, and CBF. From these results, as task score increased and response time was shortened with training, the tendency of CBF became decrease. That is to say, we found that CBF decreased in accordance with proficiency.

目次

1	序論	1
2	fNIRS を用いた脳機能イメージング	2
2.1	fNIRS	2
2.2	fNIRS の基本原理	2
2.3	fNIRS を用いた習熟に関する研究	2
3	訓練課題と脳機能	4
3.1	立体視課題	4
3.2	メンタルローテーション課題 (Mental Rotation Test : MRT)	5
4	fNIRS により計測した脳血流変化による訓練に伴う習熟度変化の検討	6
4.1	先行研究の結果による仮説	6
4.2	立体視課題を用いた習熟度変化の検討	6
4.3	MRT を用いた習熟度変化の検討	11
5	考察	15
5.1	立体視課題を用いた実験 A における考察	15
5.2	立体視課題を用いた実験 B における考察	17
5.3	MRT を用いた実験における考察	17
5.4	習熟に伴う脳血流変化に関する考察	18
6	結論	19

1 序論

人間は訓練を通じて反復した動作を経験の情報として脳に蓄積することで、より高度なパフォーマンスを可能としている。経験の情報として脳に蓄積したものを技能と呼ぶ。この技能に関する記憶は手続き記憶と呼ばれ、言葉では表現しにくいが行為として記憶され、行為として表現される記憶である¹⁾。技能の習得には理解と習熟の2段階があると考えられており、特に手術や乗り物の操縦など人の命に直接関わる技能においては習熟段階に達していることが必須となる²⁾。現在、習熟度は課題の点数という一過性の値のみで評価していることが多いが、課題成績のみでの判断・評価は個人のレベルや習熟するまでの過程を測ることが困難である。そのため、習熟度を客観的に判断するための課題成績以外の指標が必要となる。そして、技能の習得には理解という段階が含まれていることから、脳が関係していることが分かる。そこで、生理的指標の一つである脳血流変化を用いて習熟段階までの過程を検討する。本研究の目的は生体情報を用いた客観的な習熟度評価方法の確立のための脳血流変化の検討である。客観的な習熟度評価方法を確立することで、教育や人材育成に活用することが可能となると考えている。脳血流変化の計測には、脳機能イメージング装置の一つであるfNIRS (functional Near-Infrared Spectroscopy) を使用した。本報告では、様々な技能習得のための課題の中から数値として課題成績を算出しやすく、訓練課題として適している立体視課題³⁾ 及びメンタルローテーション課題 (Mental Rotation Test: MRT)⁴⁾ を用いた。両課題とも空間認知に関係のある課題であるため、実験結果の比較も可能であると考えた。また、能力に個人差があり、訓練により習熟できる課題であるため使用した。そして、両課題とも課題による脳活動が視覚経路や空間認知に関係のある部位に活性が見られることが分かっているため^{3,5)}、技能習得にのみ活動している部位を特定しやすいと考えた。

本稿の構成を以下に示す。第2章でfNIRSの基本原理とfNIRSを用いた訓練による習熟に関する研究について述べる。第3章では訓練課題の説明及び各課題に関する脳機能の説明を行う。そして、第4章では、週を追った習熟変化による脳血流変化の検討を目的に、実験を行う。最後に第5章で結論を述べる。

2 fNIRS を用いた脳機能イメージング

2.1 fNIRS

fNIRS (functional Near-Infrared Spectroscopy) は、近赤外光を利用した非侵襲に脳機能を計測できる脳機能イメージング装置の一つである。大脳皮質内の神経活動に連動した脳血流変化に伴う酸素化ヘモグロビン (Oxy-Hb) と脱酸素化ヘモグロビン (Deoxy-Hb) の濃度変化量を計測している。

脳の神経活動時は、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、神経活動時の酸素代謝およびグルコース代謝の亢進に伴い、脳血管が拡張し脳血流が増加するメカニズムである。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、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变化量を計測する装置である⁶⁻⁸⁾。

2.2 fNIRS の基本原理

fNIRS は近赤外光の高い透過性と酸化状態により吸光度が異なるヘモグロビンの性質を利用して、頭皮上から照射した近赤外光を約 30 mm 離れた位置で検出し、時間変化に伴う大脳皮質のヘモグロビン濃度変化を計測できるとされている。

ヘモグロビン濃度変化はランベルト・ベール則 (Lambert-Beer law) を基礎として算出している。ランベルト・ベール則は、吸光物質を含む溶液に光を照射した際の光の減衰と吸光物質の濃度関係を示したものである。しかし、生体組織のように光散乱の強い媒質では、光は散乱を繰り返すために実際の光路長は媒質の厚みよりも長くなりランベルト・ベール則はこのままでは適用出来ない。そのため、式 (2.1) に示す拡張ランベルト・ベール則 (modified Lambert-Beer Law) が考案された⁶⁻⁸⁾。

$$A = \log \frac{\Delta I_{out}}{I_{in}} = \varepsilon \Delta C d + \Delta S \quad (2.1)$$

ここで、 d は光路長、 I_{in} は照射光強度、 ε は吸光係数 (単位: $M^{-1}cm^{-1}$)、 C は分子濃度 (単位: M) である。 ΔI_{out} は透過光量変化、 ΔC は濃度変化、 ΔS は散乱による光の減衰量を意味し、通常は定数として扱われる。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 $\varepsilon_{deoxy}(\lambda)$ 、そして 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 (2.2) が成り立つように fNIRS は設計されている。

$$A = \log \frac{\Delta I_{out}}{I_{in}} = (\varepsilon_{oxy}(\lambda) \Delta C_{oxy} + \varepsilon_{deoxy}(\lambda) \Delta C_{deoxy}) d + \Delta S \quad (2.2)$$

2.3 fNIRS を用いた習熟に関する研究

技能の習得に伴う習熟に関する脳活動の変化を検討した関連研究について以下に示す。

Dorsolateral prefrontal cortex : DLPFC

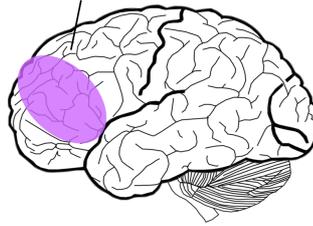


Fig. 2.1 前頭前野背外側部

fNIRS が発展する以前に行われていた研究で、fMRI (functional magnetic resonance imaging) を使用し運動学習時の脳活動を計測した研究がある⁹⁾。Sakai らは、視覚情報を伴ったシーケンシャルな運動学習時の脳活動を fMRI を使用し計測した。結果、学習が進むにつれ前頭前野背外側部と前補足運動野の活動が低下することを明らかにした。

西田らは、楽曲演奏能力を習得する際の前頭前野での脳血流変化を fNIRS を使用して計測した¹⁰⁾。結果、回数を重ねるごとに Oxy-Hb 変化量の減少が見られた。

渡部らは、バーチャルリアリティ訓練システムを使用した課題時の前頭部での脳血流変化を fNIRS を用いて計測した¹¹⁾。そして、習熟を評価するための新しい指標を提案した。結果、上記の研究と同様、前頭部の活動が減少することを示した。

長谷川らは、列車運転シミュレータを用い、被験者の習熟に伴う前頭前野背外側部の活動を fNIRS を使用して計測した¹²⁾。結果、停車時に前頭前野背外側部で Oxy-Hb 濃度変化の上昇が見られた。また、熟練者では初心者に比べて上昇が大きくないこと、初心者がブレーキ操作に習熟すると前頭前野背外側部の活動が減少することを報告した。

これらの関連研究は、立体視課題やメンタルローテーションを課題とした研究ではないが、習熟を検討しているものである。他にも関連研究があり、それらも習熟につれ、脳血流が減少するとしている^{13,14)}。また、部位として Fig. 2.1 に示す前頭前野背外側部に注目している。前頭前野背外側部は脳の中で最も進化した部位であり、他に気を散らさずに一つの仕事に集中する機能や情報を一時的に保ちながら操作する機能を担う¹⁵⁾。本研究では、前頭前野背外側部以外にも習熟に伴い変化が見られる部位の検討も行う。

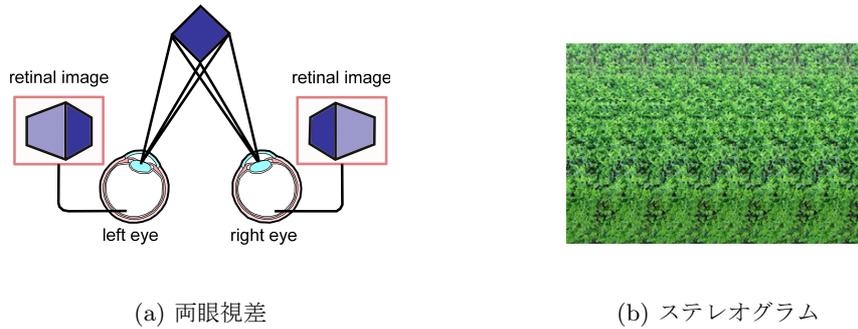


Fig. 3.1 両眼視差及びステレオグラム

3 訓練課題と脳機能

3.1 立体視課題

立体視とは、ステレオグラムと呼ばれる平面の画像を利用して両眼視差により立体像を知覚する方法である^{3,16,17)}。

3.1.1 両眼視差

人間は、単眼から得られる焦点距離、物体の大きさ、重なり、明瞭さ、移動速度と両眼から得られる両眼視差、輻輳（対象を右眼から見た時と左眼から見た時の角度の差）などの情報を脳が総合的に判断して立体を認識している。その中でも立体視において重要なのは、Fig. 3.1(a)に示す両眼視差である。物体を眺める際、左右の眼の網膜には位置の差によって異なった像が映し出されている。両眼視差によって知覚した像を総合的に判断することで、空間の再構築を行い、立体を認識している^{3,16,17)}。

3.1.2 ステレオグラム

両眼視差を原理としたものが本実験で使用しているステレオグラムと呼ばれる画像である。一例をFig. 3.1(b)に示す。同じ図形の繰り返しパターンを持つ画像で、目の焦点を意図的にずらすことで立体像を知覚出来る。

3.1.3 立体視に関する脳機能

人の脳内ではFig. 3.2に示すように、視覚刺激に対する情報は最初に一次視覚野 (V1) へ伝達され、それ以降の処理は、色、形などの情報は腹側経路と呼ばれる V1 から V4、そして TE 野において処理がなされる。一方、空間認知及び動きに関する情報は背側経路と呼ばれる V1 から V5 (MT 野)、そして頭頂葉において処理がなされる。背側経路では、頭頂葉において左右の眼からの入力の統合（視野統合）がなされ、その後は様々な高次処理が行われる。また、空間位置の認知はFig. 3.3に示した中前頭回 (Middle Frontal Gyrus : MFG) 及び下前頭回 (Inferior Frontal Gyrus : IFG) などの部位で行われると言われている^{3,16,17)}。

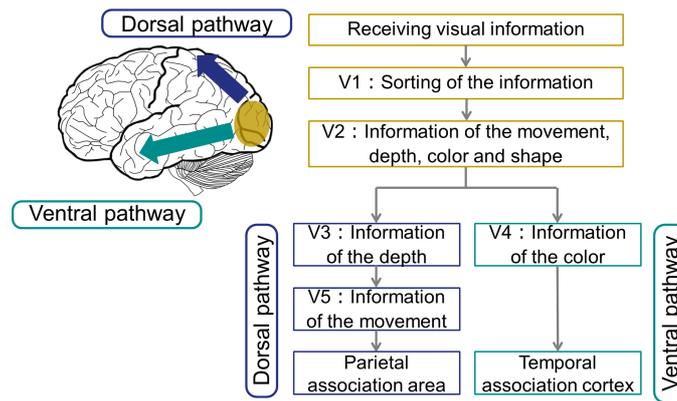


Fig. 3.2 視覚経路

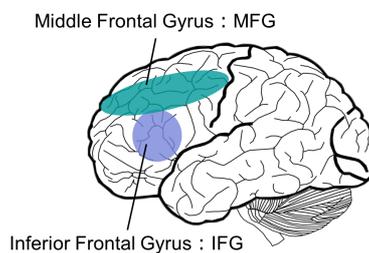


Fig. 3.3 空間位置の認知

3.2 メンタルローテーション課題 (Mental Rotation Test : MRT)

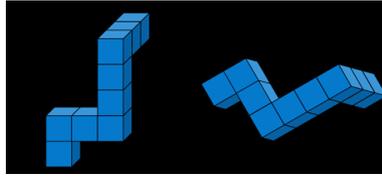
MRT とは、被験者に角度差のある 2 つの図形が正像か鏡像かの判断を課すものである。MRT は、被験者が判断するまでに要する時間が 2 つの 3 次元図形の角度差と相関があることが示されている⁴⁾。この課題において提示される図形には大きく以下の三種類がある。

- 3 次元ブロック図形を提示図形とするもの⁴⁾
- 文字 (平仮名やアルファベット) を提示図形とするもの⁵⁾
- 身体の一部 (手足など) を提示図形とするもの^{18,19)}

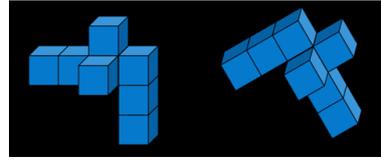
本実験では、これらの中でも最も基本的に用いられている 3 次元ブロック図形を使用した。Fig. 3.4(a) に正像の場合を、Fig. 3.4(b) に鏡像の場合を示した。

3.2.1 メンタルローテーションに関する脳機能

MRT 時の脳内メカニズムについて様々な研究がなされている。これらの研究において、メンタルローテーションには頭頂連合野が関与することが明らかにされてきた。また、頭頂連合野に加え運動前野は頭頂連合野と双方向性に連絡していることから、メンタルローテーションに関与するとされている²⁰⁾。



(a) 正像の図形



(b) 鏡像の図形

Fig. 3.4 メンタルローテーション課題：MRT

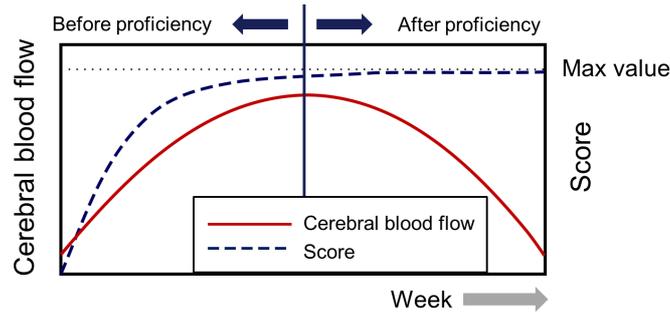


Fig. 4.1 仮説

4 fNIRS により計測した脳血流変化による訓練に伴う習熟度変化の検討

週を追った習熟変化による課題成績と脳血流変化の関係性を検討を目的に、実験を行った。

4.1 先行研究の結果による仮説

本稿の第 2.3 節において述べた先行研究によると、習熟に伴い脳血流変化は減少傾向となるとされている。そのため、この結果から「課題成績と脳血流変化に関係性がある」という仮説を立てた。習熟前においては、課題成績の増減に伴い脳血流にも変化があり、一方、習熟後では課題成績が定常状態となり、脳血流が減少傾向になると考えた。以降の実験結果・考察においては、Fig. 4.1 に示す仮説を踏まえて検討を行っていく。

4.2 立体視課題を用いた習熟度変化の検討

4.2.1 実験内容

本実験は訓練と計測から構成され、4 週間或いは 5 週間行われた。訓練・計測内容は以下の通りである。

- 訓練：4 週間或いは 5 週間毎日 3 分間（1 セット 1 分×3 セット）立体視の訓練
- 計測：訓練に伴う脳血流変化を fNIRS を用いて週に 1 度計測

立体視課題を用いた実験では以下の 2 つの実験設計で実験を行った。

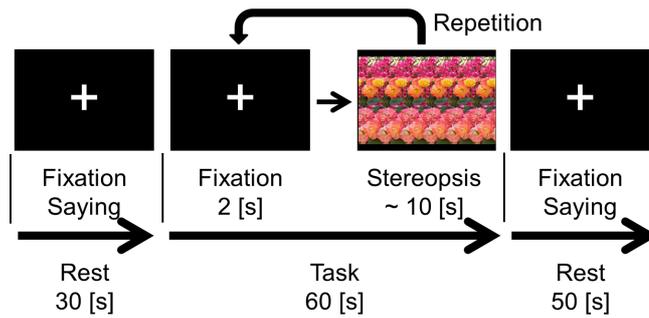


Fig. 4.2 実験 A の実験設計

(1) 実験 A

- 安静：画面中央の十字マークを注視, 「あ, い, う, え, お」を繰り返し発話
- 課題：画面中央の十字マークを注視 (2 [s]), 立体視 (~10 [s])

(2) 実験 B

- 安静：画像を注視 (文字知覚不可), 「あ, い, う, え, お」を繰り返し発話
- 課題：画面中央の十字マークを注視 (2 [s]), 立体視 (~10 [s])

実験 A では, ひらがな一文字を知覚出来るステレオグラム¹を使用した. 実験は, Fig. 4.2 に示す流れで行った. 最初に 30 秒間安静状態を保ちながら「あ, い, う, え, お」と繰り返し発話し, 画面中央の十字マークを注視する. 次に 60 秒間の課題時間に立体視を行う. 課題は立体視の状態を維持させないための 2 秒間の注視の画面と最長 10 秒間表示されるステレオグラムの画面で構成されており, この 2 画面が繰り返し表示される. ステレオグラムの画面では, 口頭での回答後, 次の画面へ進めるように設定した. 最後に安静の時間を 50 秒間設け, 最初の安静時と同様の注視, 発話を行った.

実験 B では, フリーソフトの「3DText for Windows2.00」を用いて自分で作成したステレオグラムを使用した. 実験は, Fig. 4.3 に示す流れで行った. 最初に 30 秒間安静状態を保ちながら「あ, い, う, え, お」と繰り返し発話し, 立体視をしても文字が知覚できないステレオグラムを注視する. 次に 60 秒間の課題時間に立体視を行う. 課題は立体視の状態を維持させないための 2 秒間の注視の画面と最長 10 秒間表示されるステレオグラムの画面で構成されており, この 2 画面が繰り返し表示される. ステレオグラムの画面では, 口頭での回答後, 次の画面へ進めるように設定した. 最後に安静の時間を 50 秒間設け, 最初の安静時と同様の注視, 発話を行った.

4.2.2 被験者及び実験環境

実験では, 日立メディコ製の fNIRS (ETG-7100) を使用し, 国際 10-20 法に準拠して両側頭部, 後頭部, 頭頂部, 前頭部に計測プローブを設置した.

実験 A における被験者は, 健常者 5 名 (男性:1 名, 女性:4 名, 年齢:22-23 歳) とした. そして, 実験を行った際の室温および湿度は 19.5~24.4 [°C], 28~41 [%] であった.

¹<http://stereogram.yokochou.com/gallery/hira1/index.htm>

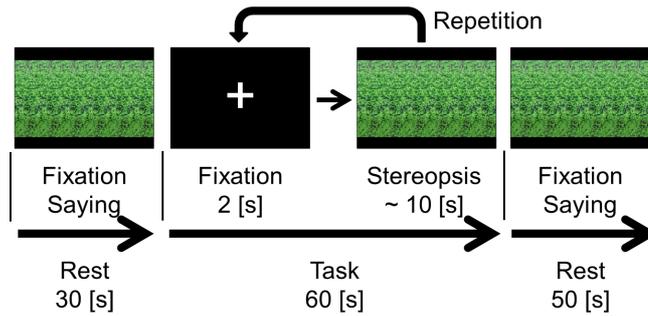


Fig. 4.3 実験 B の実験設計

また、実験 B における被験者は、健常者 8 名（男性：7 名，女性：1 名，年齢：22-24 歳）とした。そして、実験を行った際の室温および湿度は 21.9~25.1 [°C]，34~61 [%] であった。

4.2.3 fNIRS データの前処理

本実験での検討には、脳血流変化に伴う Oxy-Hb 濃度変化のデータを使用した。データ処理のパラメータは、脈波成分を取り除くためにローパスフィルタを 1.0 [Hz] とし、移動平均処理のサンプル時間は 5.0 [s] とした。

4.2.4 検討項目及び解析方法

課題成績，回答時間，脳血流変化について検討を行った。

課題成績は，60 秒間で立体視出来た画像枚数を評価し，回答時間は，画像提示からレスポンスまでの時間を平均し評価した。

次に，脳血流変化データの解析方法について述べる。最初に計測データを使用して課題開始の脳血流変化量を 0 点に補正し，グラフ化することで訓練前，訓練開始週，訓練終了週の変化を検討した。そして，t 検定と平均値を用いて活性チャンネル（以降 CH）を定義し，週を追った活性 CH の個数による領域の変移を検討するため領域の色分けを行った。前安静時と課題時のデータで t 検定 (N=30, p<.05) を行って有意差があり，かつ前安静時と課題時のデータの平均値を算出し，課題時の平均値が前安静時の平均値より大きい CH を活性 CH と定義した。

次に，データの比較を行い易くするために同一被験者内で Z-score を用いて課題区間データの正規化を行った後，課題開始の脳血流変化量を 0 点に補正した。Z-score を式 (4.1) に示す。

$$Norm.OxyHb = \frac{OxyHb - ave}{sd} \quad (4.1)$$

ここで，*Norm.OxyHb* は，正規化後の Oxy-Hb 濃度変化量を，*OxyHb* は，計測データを，*ave* は，Oxy-Hb 濃度変化量の平均値を，*sd* は，Oxy-Hb 濃度変化量の標準偏差を示している。*Norm.OxyHb* の値は各被験者，平均 0，分散 1 の形に正規化されている。

以降の検討には，正規化後の 0 点補正したデータを使用した。最後に，週を追った脳血流変化を確認するために Fig. 4.4 に示すように課題開始から課題終了までの近似直線の傾

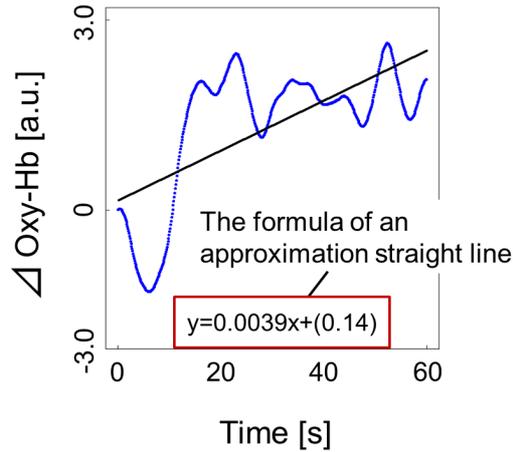


Fig. 4.4 近似直線を引く方法

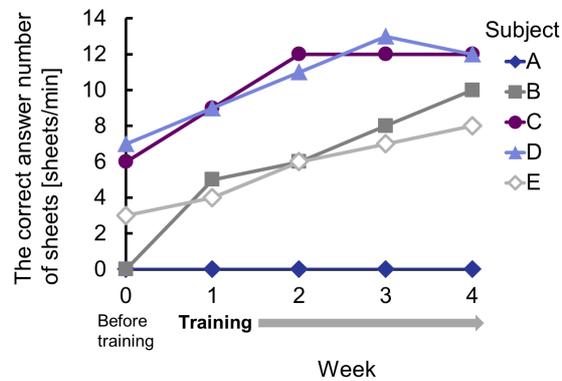


Fig. 4.5 実験 A の課題成績

きの値を算出し、傾きの符号（正負）、閾値（平均値）の大小により領域の色分けを行った。

4.2.5 実験 A における実験結果

4 週間の課題成績を Fig. 4.5 に示す。被験者 A 以外は課題成績が増加した。そのため、被験者 A 以外の被験者においては週を追うごとに課題に対し習熟しつつあることが確認出来た。また、課題成績が増加した被験者の中でも被験者 C は 2 週目以降定常状態の成績に達したため、技能習得者と考えて以降の検討を行った。次に、4 週間の平均回答時間を Fig. 4.6 に示す。課題成績が増加傾向の被験者においては、平均回答時間が短縮する傾向が見られた。この回答時間の結果からも被験者は週を追うごとに課題に対し習熟しつつあることが確認出来た。

次に脳血流変化の検討を行った。以降の検討は、課題成績で唯一技能習得したと考えられる被験者 C について行う。課題開始の脳血流変化量を 0 点に補正した計測データを使用した脳血流変化のグラフを Fig. 4.7 に示す。訓練前と訓練開始週を比較すると、訓練開始週の方が減少していることが分かり、訓練開始週と訓練終了週を比較すると、終了週の

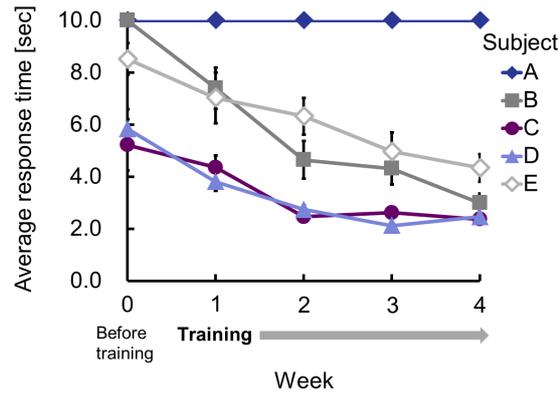


Fig. 4.6 実験 A の平均回答時間

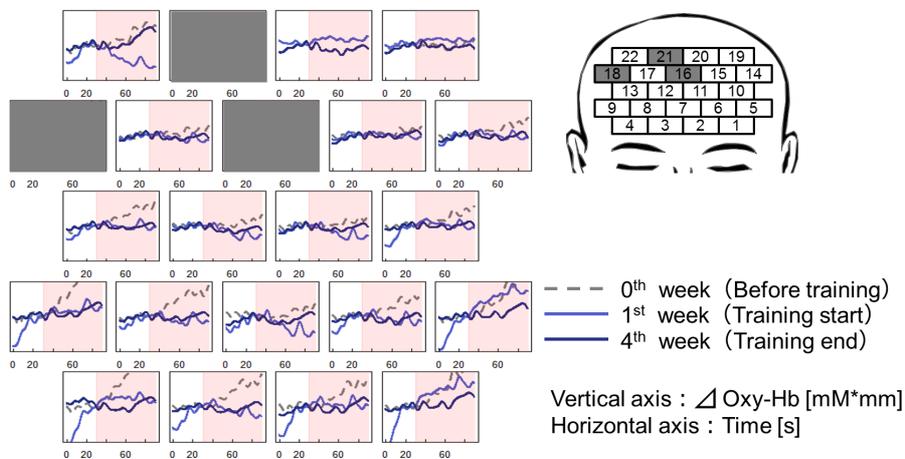


Fig. 4.7 実験 A における被験者 C の脳血流変化グラフ

方が減少していることが分かった。そして、活性 CH の個数による領域の変移を検討した結果を Fig. 4.8 に示す。訓練前・訓練開始週では、比較的活性 CH が多いことが分かった。そして、訓練終了時には減少することが分かった。また、被験者 C と他被験者を比較すると、被験者 C よりも習熟していない他被験者の方が活性領域が広域であったことが分かった。最後に、近似直線の傾きの値を使用した週を追った脳血流変化の結果を Fig. 4.9 に示す。この指標は、暖色系は脳血流が増加傾向であり、寒色系は脳血流が減少傾向であることを示している。課題成績が安定状態になった 2-3 週目では減少傾向となったが、訓練終了週である 4 週目において増加傾向が見られた。前頭部以外の部位においても同様の結果となった。課題成績が増加した他の被験者においては、被験者ごとで増減の変化が異なった。

4.2.6 実験 B における実験結果

4 週間或いは 5 週間の課題成績を Fig. 4.10 に示す。3 週目で課題成績が一時的に減少する被験者が多かった。しかし、一定期間安定した課題成績を示す被験者はいなかった。週を追った課題成績も増減する被験者が多かった。また、4 週間或いは 5 週間の平均回答時間を Fig. 4.11 に示す。そして、平均回答時間の結果においても長短の変化が大きかった。

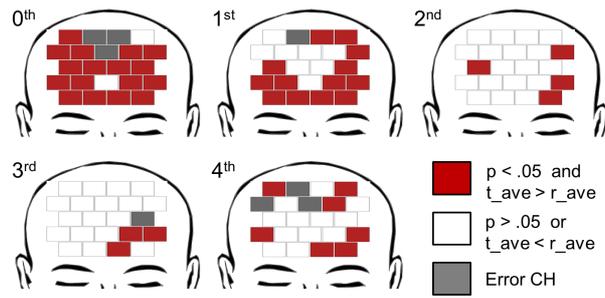


Fig. 4.8 実験 A における被験者 C の活性 CH の個数による領域の変移

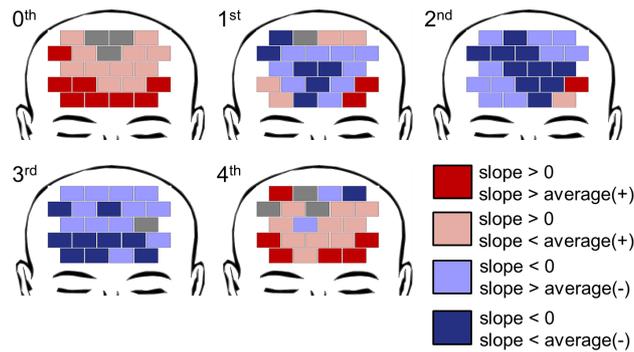


Fig. 4.9 実験 A における被験者 C の週を追った脳血流変化

次に脳血流変化の検討を行った。以降の検討は、唯一課題成績が右上がりの増加傾向にあった被験者 A について行う。課題開始の脳血流変化量を 0 点に補正した計測データを使用した脳血流変化のグラフを Fig. 4.12 に示す。訓練前と訓練開始を比較すると、訓練開始週の方が増加していることが分かり、訓練開始週と訓練終了週を比較すると、終了週の方が減少していることが分かった。そして、活性 CH の個数による領域の変移を検討した結果を Fig. 4.13 に示す。訓練前から訓練開始では増加、訓練終了時には減少していることが分かった。最後に、近似直線の傾きの値を使用した週を追った脳血流変化の結果を Fig. 4.14 に示す。この結果から、訓練を行うにつれ、減少傾向となっていることが分かった。他被験者においては、脳血流の増減の変化にバラつきが見られた。

4.3 MRT を用いた習熟度変化の検討

4.3.1 実験内容

本実験は訓練と計測から構成され、6 週間行われた。訓練・計測内容は以下の通りである。

- 訓練：6 週間毎日 2 分間（1 セット 1 分×2 セット）MRT の訓練
- 計測：訓練に伴う脳血流変化を fNIRS を用いて週に 1 度計測

実験は、以下の実験設計で計測を行い、その流れを Fig. 4.15 に示す。

- 安静：画面中央の十字マークを注視，タッピング
- 課題：MRT（～6 [s]）

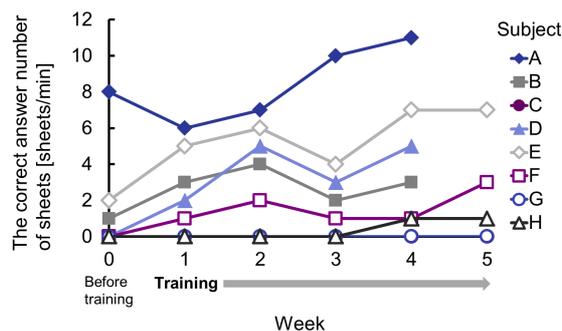


Fig. 4.10 実験 B の課題成績

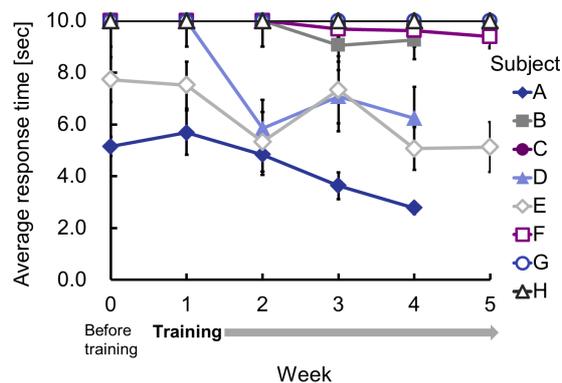


Fig. 4.11 実験 B の平均回答時間

最初に 30 秒間安静状態を保ちながら画面中央の十字マークを注視し、タッピングを行う。次に 60 秒間の課題では、1 枚の画面に並列した 2 つの 3 次元ブロック図形のメンタルローテーションを行う。課題では最長 6 秒間課題の画像が表示されるようになっている。課題画面では、クリックでの回答後次の画面へ進めるように設定した。最後に安静の時間を 50 秒間設け、最初の安静時と同様、注視、タッピングを行った。

4.3.2 被験者及び実験環境

実験では、日立メディコ製の fNIRS (ETG-7100) を使用し、国際 10-20 法に準拠して両側頭部、後頭部、頭頂部、前頭部に計測プローブを設置した。

被験者は、健常者 10 名 (男性: 5 名, 女性: 5 名, 年齢: 22-24 歳) とした。そして、実験を行った際の室温および湿度は 18.7~25.1 [°C], 22~55 [%] であった。

4.3.3 fNIRS データの前処理

本実験での検討には、脳血流変化に伴う Oxy-Hb 濃度変化のデータを使用した。データ処理のパラメータは、脈波成分を取り除くためにローパスフィルタを 1.0 [Hz] とし、移動平均処理のサンプル時間は 5.0 [s] とした。

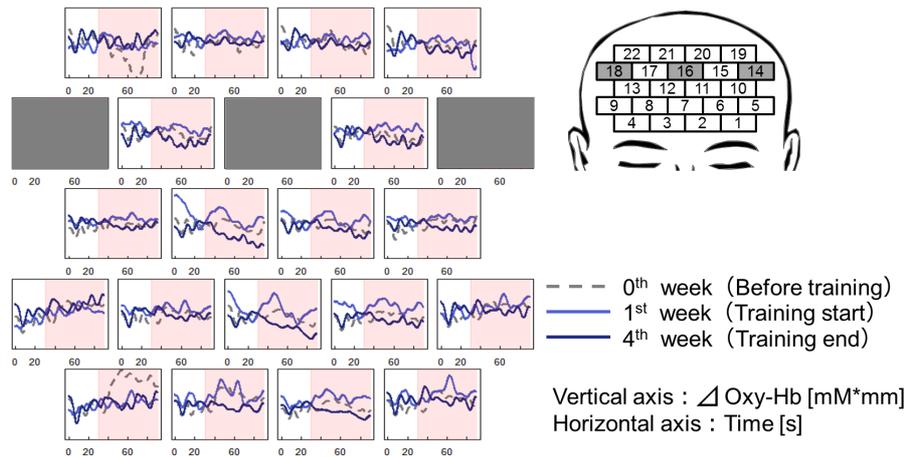


Fig. 4.12 実験 B における被験者 A の脳血流変化グラフ

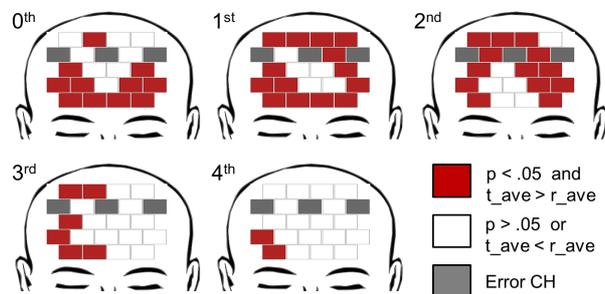


Fig. 4.13 実験 B における被験者 A の活性 CH の個数による領域の変移

4.3.4 検討項目及び解析方法

第 4.2 節の立体視課題で検討した項目と同様に課題成績，回答時間，脳血流変化について検討を行った。

課題成績は，60 秒間で回答した枚数のうちの正答枚数で，回答時間は，画像提示からレスポンスまでの時間を平均し評価した．脳血流変化データに対しては第 4.2 節の立体視課題と同様の方法での解析を行い，t 検定と平均値による領域の推移の検討，近似直線の傾きの値を用いた週を追った脳血流変化について検討を行った．さらに，活性量による検討を行うため，正規化された課題区間のデータを使用して，週ごとの積分値を算出し，8 色に色分けを行った．

4.3.5 実験結果

6 週間の課題成績を Fig. 4.16 に示す．Fig. 4.16 から 4 週目以降課題成績が定常状態となった被験者を目視で確認することができた．4 週目以降の 3 週間，課題成績の値に大きな変化のない被験者を習熟した被験者とする．次に，6 週間の平均回答時間を Fig. 4.17 に示す．平均回答時間の結果については週を追って右下がりの傾向，回答時間が短縮していく被験者が多かった．

次に脳血流変化の検討を行った．以降の検討は，課題成績が定常状態となった被験者を習熟したと考え，その中でも最も変化が顕著であった被験者 G について行う．課題開始の

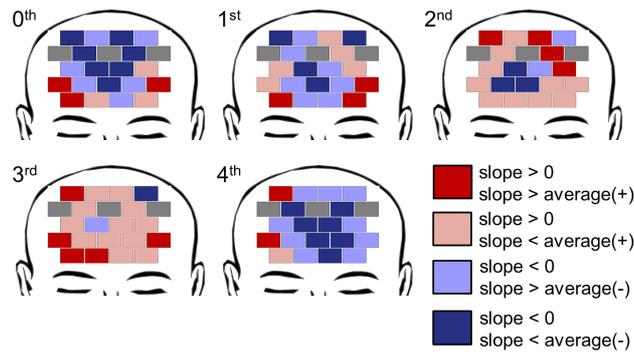


Fig. 4.14 実験 B における被験者 A の週を追った脳血流変化

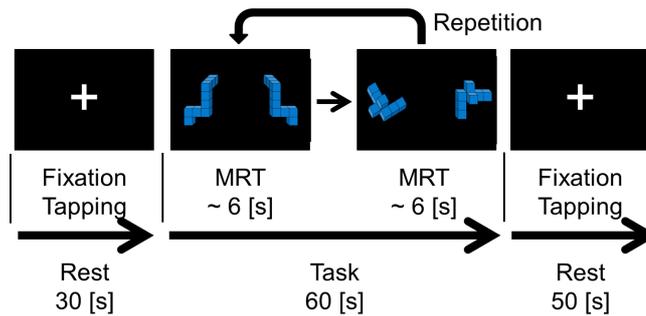


Fig. 4.15 MRT の実験設計

脳血流変化量を 0 点に補正した計測データを使用した脳血流変化のグラフを Fig. 4.18 に示す。訓練前は脳血流が減少傾向であり、それ以降は訓練前と比較すると増加したことが分かる。1 週目、3 週目では脳血流に増加・減少の変動が見られ、最終週で減少傾向が見られた。そして、活性 CH の個数による領域の変移を検討した結果を Fig. 4.19 に示す。訓練前から訓練開始週では増加し、減少傾向になりつつあり、一度増加、再度減少することを確認できた。課題成績の安定しない被験者においては、最終週にかけて増加傾向となった。次に、近似直線の傾きの値を使用した週を追った脳血流変化の結果を Fig. 4.20 に示す。この指標は、脳血流の増加を暖色系で示し、脳血流の減少を寒色系で示している。3 週目までで減少傾向となり、4 週目で増加、再度減少傾向となった。習熟に達していない被験者においては、比較的増加傾向を示している被験者が多かった。また、部位により変化は様々であった。

次に、週を追った変化を視覚的に分かり易くするため、積分値による検討を行った。被験者 G の前頭部における積分値により領域を色分けした結果を Fig. 4.21 に示す。習熟前にあたる 4 週目以前では、脳血流に増加・減少の変動が現れ、習熟後である 4 週目以降では減少傾向となった。部位としては、前頭部及び頭頂部に変化が見られた。

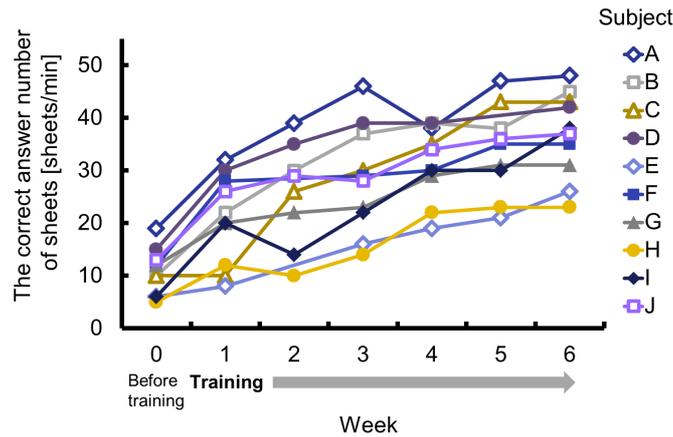


Fig. 4.16 MRT を用いた実験の課題成績

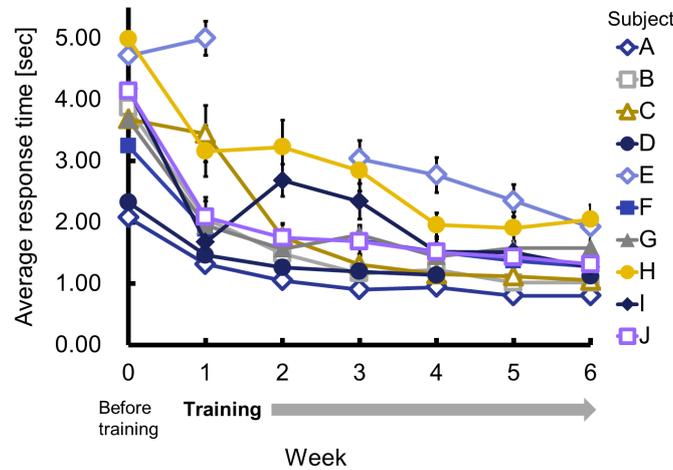


Fig. 4.17 MRT を用いた実験の平均回答時間

5 考察

5.1 立体視課題を用いた実験 A における考察

実験 A の課題成績結果においては 5 枚以上の成績を示し、かつ一定期間安定した課題成績を示した被験者は被験者 C のみであった。課題時に自動的に 5 枚は画像が変化するため最低枚数である 5 枚を基準とした。そして、課題成績が増加傾向である被験者において、平均回答時間は短縮した。これらの結果から被験者 C は習熟し、課題成績が増加傾向の被験者においては習熟に近づきつつあると考えられた。次に、脳血流変化の検討を行った。計測データのグラフからは、訓練開始週よりも訓練終了週の方が減少していることが分かった。そして、活性 CH の個数による領域の変移結果より訓練を行うにつれ減少傾向を示した。また、活性領域も被験者 C と他被験者を比較すると、習熟していない被験者の方が広域となると考えられた。近似直線の傾きの値を使用した週を追った脳血流変化結果では、訓練終了週である 4 週目のみ増加傾向となったが、課題成績が増加もしくは安定

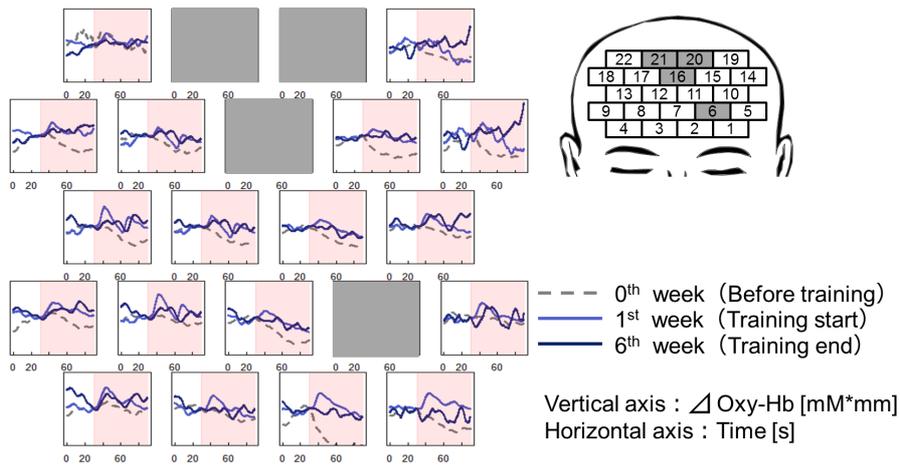


Fig. 4.18 MRT を用いた実験における被験者 G の脳血流変化グラフ

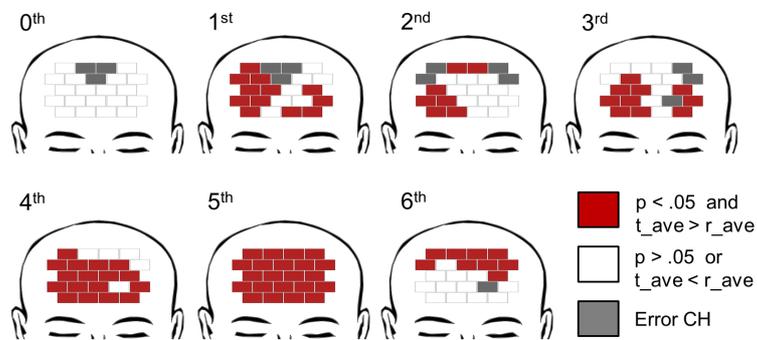


Fig. 4.19 MRT を用いた実験における被験者 G の活性 CH の個数による領域の変移

状態となった場合、減少傾向となることが示唆された。4週目のみ増加した理由としては、被験者 C は課題に慣れて習熟したが、その習熟状態がまだ安定せず脳血流変化として現れたと考えた。以上の結果から、訓練により課題成績が増加するにつれ、活性領域は狭まり、脳血流変化は減少傾向となると考えられる。課題成績が増加した他の被験者においては、被験者ごとで増減の変化が異なった。さらに、脳部位として Fig. 2.1, Fig. 5.1 に示す前頭前野背外側部にあたる CH において変化が見られた。これは先行研究と同様の結果である。脳機能の観点から考察すると、技能の習得には方法を理解したり試行錯誤することなど、学習が必要となる。その場合、高次脳機能を担う前頭前野が働く。また、その中でも集中、注意やワーキングメモリに関係のある前頭前野背外側部が技能の習得に関係していると考えた。そして、習熟過程にいる被験者は集中し課題に取り組み、方法を試行錯誤するため脳血流に変化が現れると考えた。一方、習熟した被験者は習熟過程の被験者よりも課題に慣れ、集中せずに課題に取り組むことができるため脳血流が減少していくと考えた。ワーキングメモリが存在する部位でもあることから、以前学習した方法を記憶として蓄え、次に行う際にはその記憶により無意識的に課題に取り組むことができたことが示唆される。

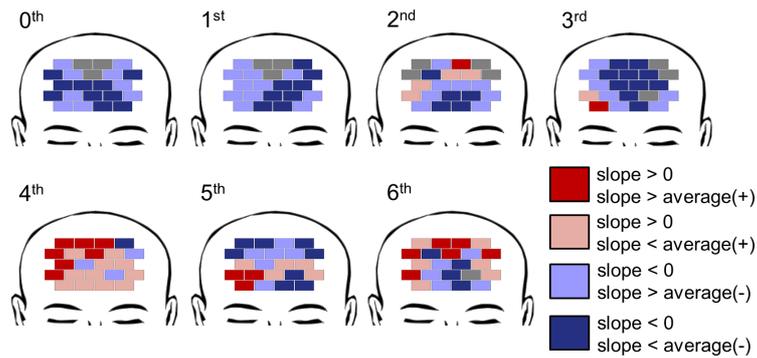


Fig. 4.20 MRT を用いた実験における被験者 G の週を追った脳血流変化

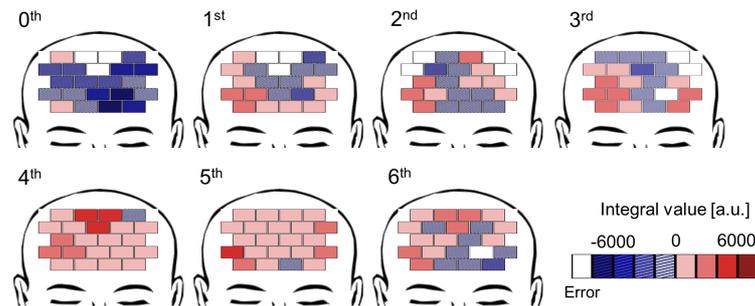


Fig. 4.21 MRT を用いた実験における積分値による領域の変移

5.2 立体視課題を用いた実験 B における考察

実験 B の課題成績結果においては 5 枚以上の成績を示し、かつ一定期間安定した課題成績を示した被験者はいなかった。そして、回答時間にもばらつきが見られた。これらの結果から本実験の被験者の中には習熟したと言える被験者はいなかったと考えられる。そして、課題成績及び回答時間、脳血流変化の結果から、習熟前の段階であるため立体視の方法について試行錯誤を繰り返しながら理解する段階であったと考えられる。また、脳血流が減少傾向を示す被験者もいたことから訓練効果があったこと、習熟しつつあったことも示唆される。実験 B においても、前頭前野背外側部において変化が見られた。

5.3 MRT を用いた実験における考察

課題成績の結果から 3 週目から 4 週目にかけて成績が上がり、その後安定した。そのため、被験者 G は、検討する上で立てた仮説からも習熟しつつある被験者であるといえる。他にも 2 名課題成績が安定した被験者がいた。また、脳血流変化の結果から、3 週目までは習熟前であり、脳血流は試行錯誤を繰り返すことで脳血流に増加・減少の変動が見られ、4 週目以降は習熟後であり、課題に習熟し、無意識的に課題に取り組むことができるようになったため脳血流が減少したと考えられる。被験者 G 以外の課題成績の安定した被験者においては、全週の傾向は同様の課題成績の向上に伴う増加・減少の変動の後、習熟後の減少という傾向が見られた被験者もいた。特に大きく脳血流が増加した週では、課題成績

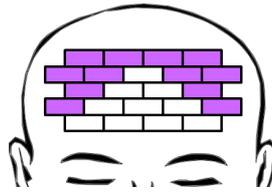


Fig. 5.1 前頭前野背外側部の CH 位置

も向上していた。このことから、課題成績を向上するために習熟前は試行錯誤することで脳血流に増加・減少の変動があり、方法を獲得し、習熟した際に脳血流が減少すると考えられる。以上の結果から仮説が正しく、脳血流変化と課題成績には関係性があることが示唆された。脳部位では、前頭部及び頭頂部において変化が見られる被験者が多かった。前頭部は、理解や集中に関係があると言われていたため学習に関係のある習熟過程において変化が見られ¹⁵⁾、頭頂部は、空間認知に関わるため、変化が見られたと考えられる²⁰⁾。

5.4 習熟に伴う脳血流変化に関する考察

立体視課題を使用した課題成績、回答時間の結果から一定期間安定した課題成績を示し、回答時間も短縮した場合に習熟したと考えられる。

そして、課題成績が増加・安定するに従い、脳血流変化は減少傾向となった。習熟前の被験者では、課題に対する自分の中で最も良い方法を試行錯誤し課題に取り組むため脳血流が増加し、習熟後の被験者では、その方法を考えること無く無意識的に課題に取り組むことができるため脳血流が減少すると考えられる。立体視、MRT での両者の結果とも、課題成績が定常状態となるに伴い、脳血流が減少傾向となることを確認することができた。これら全ての実験結果から、習熟するに伴い脳血流変化が減少していくことを確認できた。また、両者どちらの課題においても「課題成績と脳血流変化に関係性がある」という仮説が正しいことが示唆された。

6 結論

現在、習熟度は課題成績のみで評価されている。しかし、課題成績のみでは個人の習熟のレベルや習熟の過程を測ることは困難である。そこで、本研究では習熟による脳活動の検討を行うことで客観的な習熟度評価方法の確立のための脳血流変化の検討を目的とした。習熟を評価するための新たな指標とするため fNIRS を使用し、脳血流変化を計測した。

技能習得における習熟を検討するために、fNIRS を用いて訓練に伴う週を追った脳血流変化の検討を行った。訓練課題として、能力に個人差のある立体視課題及び MRT を用いた。

脳血流変化を検討する上で、習熟に関する先行研究より「課題成績と脳血流変化に関係性がある」という仮説を立てた。この仮説を踏まえて、課題成績、回答時間、脳血流変化を検討した。

以上の検討の結果、仮説が正しく、課題成績と脳血流変化に関係性があることが示唆された。そして、大きく変化した部位は先行研究の結果と同様、前頭前野背外側部であった。習熟過程にいる被験者は集中し課題に取り組み、方法を試行錯誤するため脳血流に変化が現れると考えた。一方、習熟した被験者は習熟過程の被験者よりも課題に慣れ、集中せずに課題に取り組むことができるため脳血流が減少していくと考えた。

謝辞

本研究に関して終始ご指導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致します。また、本研究を進める上で多くの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、同志社大学工学部田中美里特別任用助教に深謝致します。そして、研究を進める上で多くのご助言をくださり、本論文の修正に時間を割いてくださいました、同志社大学生命医科学研究科博士前期課程の後藤真櫻氏、関谷駿介氏に心より感謝致します。さらに、本研究を遂行するにあたり活発な議論をして頂いた NIRS 班 BMI グループの皆様、NIRS 班の皆様と医療情報システム研究室の皆様に心より御礼申し上げます。最後に、医療情報システム研究室の皆様の御陰で、私は充実した研究生生活を送ることができました。この場をかりて、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 橋本圭子. 運動スキル学習に関する考察—脳内経路の変化と記憶の固定をめぐって—. 新潟工科大学研究紀要, Vol. 12, pp. 133–147, 2007.
- 2) 柴田庄一, 遠山仁美. 技能の習得過程と身体知の獲得—主体的関与の意義と「わざ言語」の機能—. 名古屋大学大学院国際言語文化研究科 言語文化論集, Vol. 24, No. 2, pp. 77–93, 2003.
- 3) 田辺誠司, 藤田一郎. 両眼視差の脳内表現. 日本神経回路学会誌, Vol. 11, No. 2, pp. 64–73, 2004.
- 4) R.N. Shepard and J.Metzler. Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, Vol. 171, No. 3972, pp. 701–703, 1971.
- 5) L.A. Cooper and R.N. Shepard. Chronometric studies of the rotation of mental images. In *W.G. Chase(Ed.), Visual Information Processing. New York: Academic Press*, pp. 72–121, 1973.
- 6) 酒谷薫. NIRS-基礎と臨床-. 新興医学出版社, 2012.
- 7) 福田正人. 精神疾患とNIRS—光トポグラフィ検査による脳機能イメージング—. 中山書店, 2009.
- 8) 武田湖太郎. 近赤外脳機能計測のリハビリテーション領域への応用における信号処理. 国際医療福祉大学紀要, Vol. 12, No. 2, pp. 72–78, 2007.
- 9) Katsuyuki S., Okihide H., Satoru M., Ryousuke T., Yuka S., and Benno P. Transition of brain activation from frontal to parietal areas in visuomotor sequence learning. *The Journal of Neuroscience*, Vol. 18, pp. 1827–1840, 1998.
- 10) 西田史子, 岩坂正和, 下茂円, 杉田克生. 楽曲演奏習得における習熟度の客観的評価—NIRS計測による脳血流パターンを指標として—. 千葉大学教育学部研究紀要, Vol. 57, pp. 319–324, 2009.
- 11) 渡部直人, 永村慎吾, 齊藤泰範, 林雄太, 村山淳, 原田哲也. 実用的なVR訓練システムの習熟評価に関する一考察. *The Virtual Reality Society of Japan*, Vol. 15, No. 1, pp. 45–52, 2010.
- 12) 長谷川靖, 綱島均, 丸茂喜高, 小島崇. 機能的近赤外分光 (fNIRS) 装置を用いた列車運転時の高次脳機能計測 (習熟による脳活動の変化について). 第14回鉄道技術連合シンポジウム, pp. 409–412, 2007.
- 13) Kenoki O., Hajime K., Atsuyuki Y., Kazuya S., Takehito H., Kenichi M., Shinichiro T., Kozo K., Satoshi I., Kazuo T., Yukihide I., Masao T., and Makoto H. The frontal

cortex is activated during learning of endoscopic procedures. *Surgical Endoscopy*, Vol. 23, No. 10, pp. 2296–2301, 2009.

- 14) H. Lee, M.W. Voss, R.S. Prakash, W.R. Boot, L.T. Vo, C. Basak, M. VanPatter, G. Gratton, M. Fabiani, and A.F. Kramer. Videogame training strategy-induced change in brain function during a complex visuomotor task. *Behavioural Brain Research*, Vol. 232, No. 2, pp. 348–357, 2012.
- 15) S.E. Petersen and M.I. Posner. The attention system of the human brain: 20 years after. *Annu Rev Neurosci*, Vol. 35, No. 1, pp. 73–89, 2012.
- 16) 藤田一郎, 田辺誠司, 梅田和昌. 側頭葉視覚経路における両眼視差情報処理. 豊田研究報告, Vol. 56, pp. 97–102, 2003.
- 17) Tsuneo N., Shinji M., Tomoya H., Hiromi K., Mihoko T., Hiroaki H., Seiichi E., and Kazuo K. M pathway and areas 44 and 45 are involved in stereoscopic recognition based on binocular disparity. *Japanese Journal of Physiology*, Vol. 52, No. 2, pp. 191–198, 2002.
- 18) Kaoru S. 手のイメージの触運動感覚的操作—心的回転課題の刺激提示様式からの検討—. *The Japanese Journal of Psychology*, Vol. 57, No. 6, pp. 342–349, 1987.
- 19) 石橋遼. 手のメンタルローテーション課題における被験者自身の手の状態の影響. 電子情報通信学会技術研究報告. HIP, ヒューマン情報処理, Vol. 105, No. 358, pp. 125–129, 2005.
- 20) 楠元史, 今井亮太, 兒玉隆之, 森岡周. メンタルローテーション課題における脳活動と反応時間の関係—EEG を用いて—. *理学療法科学*, Vol. 29, No. 4, pp. 479–483, 2014.

付 図

2.1	前頭前野背外側部	3
3.1	両眼視差及びステレオグラム	4
3.2	視覚経路	5
3.3	空間位置の認知	5
3.4	メンタルローテーション課題：MRT	6
4.1	仮説	6
4.2	実験 A の実験設計	7
4.3	実験 B の実験設計	8
4.4	近似直線を引く方法	9
4.5	実験 A の課題成績	9
4.6	実験 A の平均回答時間	10
4.7	実験 A における被験者 C の脳血流変化グラフ	10
4.8	実験 A における被験者 C の活性 CH の個数による領域の変移	11
4.9	実験 A における被験者 C の週を追った脳血流変化	11
4.10	実験 B の課題成績	12
4.11	実験 B の平均回答時間	12
4.12	実験 B における被験者 A の脳血流変化グラフ	13
4.13	実験 B における被験者 A の活性 CH の個数による領域の変移	13
4.14	実験 B における被験者 A の週を追った脳血流変化	14
4.15	MRT の実験設計	14
4.16	MRT を用いた実験の課題成績	15
4.17	MRT を用いた実験の平均回答時間	15
4.18	MRT を用いた実験における被験者 G の脳血流変化グラフ	16
4.19	MRT を用いた実験における被験者 G の活性 CH の個数による領域の変移	16
4.20	MRT を用いた実験における被験者 G の週を追った脳血流変化	17
4.21	MRT を用いた実験における積分値による領域の変移	17
5.1	前頭前野背外側部の CH 位置	18