

2020 年度 博士後期課程 学位論文

近赤外分光法を用いた脳機能計測に基づく
見まねによる動作学習メカニズムの解析

指導教員

埼玉大学大学院 理工学研究科 人間支援・生産科学部門

水野毅教授

2021 年 3 月学位授与

埼玉大学大学院 理工学研究科 理工学専攻 連携先端研究コース

15DR001 浅賀裕介

論文要旨

神経科学者である David Marr によれば、情報処理装置を理解するためには、三つの水準があるという。すなわち、計算理論、表現とアルゴリズム、ハードウェアによる実現である。こうした考えは、神経科学だけではなく、工学にも影響を与え、ヒトの情報処理機能の理解と、その知見の工学的応用が、相互に影響を与えながら今日まで発展してきたと考えられる。

また、現代においては、脳機能計測技術が発達し、様々な計測原理、技術に基づいた脳機能イメージングが可能となった。そのため、ヒトの脳機能についての実験データが蓄積され、その知見や議論を深めている。また脳機能計測を応用することで、脳活動に基づいてロボットやコンピュータの操作を行うといった試みや、ヒトの感性や情動、学習といった、定量化が困難である情報を解析しようとする試みも行われている。

本研究では、近赤外分光法 (NIRS: Near-infrared spectroscopy) を用いて脳機能計測を行い、その計測に基づいて見まねによる動作学習メカニズムの解析をすることを目的とする。NIRS による計測結果については、大域平均基準を用いて解析を行う。また、統計解析ソフトである NIRS-SPM は、NIRS 計測結果の解析に広く用いられており、本論文では、この NIRS-SPM も解析に使用する。NIRS による脳機能計測を行い、見まねによる動作の学習について、脳活動と作業習熟との関連性を考察する。見まねによる学習は、模倣行為の一種であると考えられ、見まねにおける相手の意図の理解やアフォーダンスの理解といったことも含まれるが、本研究においては、他者の行為の形式を真似ることに重点を置いている。

NIRS による脳機能計測は、非侵襲であり、被験者に対して拘束性が比較的低いため、実験時の被験者への負担が少ない。また、NIRS は他の脳機能計測機に比べてサンプリング周波数が高く、被験者は自然体で実験に臨めるため、何らかの動作を行う実験に比較的適すると考えられる。被験者の筋肉や関節の動きといった運動情報の発露ではなく、被験者が見本となる人物の動きを見て学ぶという、視覚情報から自らの運動情報へ変換する過程に着目して、動作学習へのアプローチを行うことで、新たな知見を得られることが期待される。

キーワード： 脳機能計測, NIRS, 見まね, 動作学習, 模倣

目次

第1章	緒言.....	1
1.1	1章参考文献リスト.....	2
第2章	見まねによる学習.....	4
2.1	記憶の貯蔵庫モデル.....	4
2.2	ワーキングメモリー.....	5
2.3	学習の枠組み.....	6
2.4	見まね学習におけるワーキングメモリー機能との仮説.....	8
2.5	解析対象とする学習, 記憶について.....	9
2.6	2章の参考文献.....	9
第3章	近赤外分光法による脳機能計測の利用.....	10
3.1	NIRS 概要.....	10
3.2	計測原理.....	11
3.3	FOIRE-3000 の仕様.....	14
3.4	プローブの設置基準.....	16
3.5	3章の参考文献.....	17
第4章	見まねによる動作学習実験における前頭葉の脳機能計測.....	18
4.1	実験の目的.....	18
4.2	実験デザイン.....	18
4.3	大域平均基準.....	21
4.4	実験結果.....	21
4.5	動作学習における前頭葉の脳活動傾向.....	30
4.6	動作学習実験の結言.....	33
4.7	4章の参考文献.....	33
第5章	見まねによる動作学習実験における前頭葉, 頭頂葉の脳機能計測.....	34
5.1	実験の目的.....	34
5.2	実験デザイン.....	34
5.3	実験結果.....	37
5.4	動作学習における前頭葉及び頭頂葉の脳活動傾向.....	40
5.5	5章の参考文献.....	40
第6章	見まねによる作業学習実験.....	41
6.1	実験の目的.....	41
6.2	実験デザイン.....	41
6.3	被験者及び計測部位.....	43
6.4	組み立て作業の習熟度の評価.....	43
6.5	被験者の習熟度の変化.....	44

6.6	習熟度による脳賦活反応傾向の変化について計測域全体の傾向.....	45
6.7	動作再現性と脳賦活反応における関係性の局所的な考察.....	49
6.8	作業学習実験の結言	59
6.9	6章の参考文献	59
第7章	結言.....	60
謝辞	60	
付録	61	
	口頭命題による暗算実験	61
	実験デザイン.....	62
	実験結果, 考察	63
	暗算実験の結言	77
	業績リスト.....	78

第1章 緒言

ヒトの学習というものは、どのように行われているのだろうか。学習という行動・現象は、古くから心理学、工学、神経科学といった様々な分野で扱われている。歴史の深さとその様々な分野からのアプローチは、多くの科学者を駆り立てた、魅力的なテーマであることを伺わせる。

現代においては（執筆時 2020 年）、学習するのは人間だけではない。2012 年 10 月、コンピュータによる画像認識技術に関する世界的な競技会形式の研究会、ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge (ILSVRC) において、当時初参加であったカナダのトロント大学が開発した Super Vision が圧倒的な勝利を収め、人工知能という分野に大きな影響を与えた。また、2015 年 10 月、コンピュータ囲碁プログラムである AlphaGo がプロの囲碁棋士に勝利し、現代人工知能の驚異的な能力が広く知れ渡り、世界に衝撃を与えた。人工知能である Super Vision と AlphaGo に採用された学習手法は、ディープラーニングと呼ばれる技術である。そしてその基本的なアイデアは、心理学者である Rosenblatt が 1957 年に発表したパーセプトロンと呼ばれる、視覚と脳の機能をモデル化した人工ニューロンに基づいている。

人工知能の進化がもたらした恩恵は、これだけに留まらない。2010 年代より、人工知能の性能は飛躍的に向上し、多様な課題がコンピュータにより実行可能となった。内閣府は 2016 年から第 5 期科学技術基本計画として、Society5.0 を提唱している（内閣府, 2020）。科学技術が先導し、サイバー空間とフィジカル空間（現実社会）が高度に融合した、情報社会に続く新たな社会を生み出すことを取組の目標としている。機械が人間社会に深くかかわり、人の生活空間で機能することは、社会的に求められており、これからもその需要は増加すると考えられている（富士経済, 2020; 今井他, 2020; 尾崎, 2020）。ヒトの生活圏においてロボットが社会的に浸透し、機能するためには、ヒトとの円滑なコミュニケーションや、変化する多様な人間の生活空間に、継続的に適応し続ける能力を有することが望ましい。その適応を学ぶ手法として、見まね学習が有効な手段のひとつであると考えられる。

他者の振舞いを介して学ぶという行為は、有用な学習手法のひとつであり、学術的にも広く興味の対象となっている。観察学習や模倣学習は心理学において研究の対象となっており、生後 9 か月の乳児においても遅延模倣の能力が存在し、子供の社会的な発達に重要な役割を果たしている可能性が示されている（Meltzoff, 1988）。1992 年にはマカクザルによる実験でミラーニューロンが発見され（Pellegrino, et al., 1992）、ヒトにおいてもその存在が示唆されており（Fadiga et al., 1995）、他者を真似るという行為の重要性が明らかになった。ロボット工学においては、ロボットの学習手法として、見まね学習の研究が行われている（田淵他, 2006）。先行研究においては、ヒトの脳機能や学習理論を背景とした研究アプローチも行われており（鮫島他, 2001; 稲邑, 中村, 2005; 清水, 久保田, 2006）、ロボットの学習手法としてだけでなく、ヒトの見まね学習についても知見を与えている。神経科学の研究者である Marr は、情報処理を実行する機械を理解するのに必要な三つの水準として、(1) 計算理論、

(2) 表現とアルゴリズム, (3) ハードウェアによる実現を挙げており (Marr 他, 1987), 見まね学習におけるヒトの情報処理システムの理解とロボット工学における学習の発達は, 相互補完的に発展可能であると考えられる.

また感性工学の分野においては, ヒトの脳賦活反応を計測することで, 感性や習熟といった数値化が困難である情報を評価するといった試みがなされてきた (鳥山他, 2020; 相原他, 2019). 脳機能計測技術が発達したことで, 脳賦活反応を生理的な指標として, 工学的な応用が可能となりつつある.

本研究では, 近赤外分光法 (NIRS: Near-infrared spectroscopy) を用いて脳機能計測を行い, その計測に基づいて見まねによる動作学習メカニズムの解析をすることを目的とする. NIRS による計測結果については, 大域平均基準 (野澤, 近藤, 2009) を用いて解析を行う. また, Tak らによって開発された統計解析ソフトである NIRS-SPM は, NIRS 計測結果の解析に広く用いられ, 多くの知見を与えている (Ye et al., 2009; Jang et al., 2009; Tak et al., 2010; Tak et al., 2011; Li et al., 2012). 本論文では, この NIRS-SPM も解析に使用する. NIRS による脳機能計測を行い, 見まねによる動作の学習について, 脳活動と作業習熟との関連性を考察する.

1.1 1章参考文献リスト

- 相原啓人, 清水涼, 高仲隆太郎, 網島均, ウェアラブル NIRS を用いた鉄道運転中の脳活動計測と評価, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.871 (2019), DOI: 10.1299/transjsme.18-00116.
- di Pellegrino, G., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V. and Rizzolatti, G., Understanding motor events: a neurophysiological study, *Experimental Brain Research*, Vol.91, No.1 (1992), pp.176-180.
- Fadiga, L., Fogassi, L., Pavesi G. and Rizzolatti, G., Motor Facilitation During Action Observation: A magnetic Stimulation Study, *Journal of Neurophysiology*, Vol.73, No.6 (1995), pp.2680-2683.
- 富士経済, パワーアシストスーツ、ドローン・無人ヘリなどの需要が急増: 業務・サービスロボット関連の世界市場を調査 (online), available from < https://www.fujikeizai.co.jp/market/detail.html?cid=18036&view_type=2>, (参照日 2020年10月11日).
- 今井雅子, 高橋礼恵, 戸田智美, 三沢岳志, 源栄克則, 先端技術トピックにおける技術動向予測 — 家庭用ロボットの将来像を俯瞰した投資技術選定 —, *情報の科学と技術*, Vol.70, No.1 (2020), pp.34-40.
- 稲邑哲也, 中村仁彦, ミメシス理論に基づく見まね学習とシンボル発達の統合モデル, *日本神経回路学会誌*, Vol.12, No.1 (2005), pp.74-80.
- Jang, K. E., Tak, S., Jung, J., Jang, J., Jeong, Y. and Ye, J. C., Wavelet-MDL detrending for near-infrared spectroscopy (NIRS), *Journal of Biomedical Optics*, Vol. 14, No. 3 (2009) pp.1-13.
- 内閣府, 内閣府の政策: 科学技術政策: Society5.0, (online), available from <https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/>, (参照日 2020年10月11日).
- Li, H., Tak, S., and Ye, J.C., Lipschitz Killing curvature based expected Euler characteristics for p-value correction in fNIRS, *Journal of Neuroscience Methods*, Vol. 204 (2012), pp.61-67.
- Marr, D., 乾敏郎, 安藤広志訳, ビジョン—視覚の計算理論と脳内表現— (1987), pp.26-29, 産業図書.
- Meltzoff, A., N., Infant Imitation and Memory: Nine-Month-Olds in Immediate and Deferred Tests, *Child development*, Vol.59, No.1 (1988), pp.217-225.
- 野澤孝之, 近藤敏之, NIRS 脳計測データのオンライン分析のためのアーティファクト除去

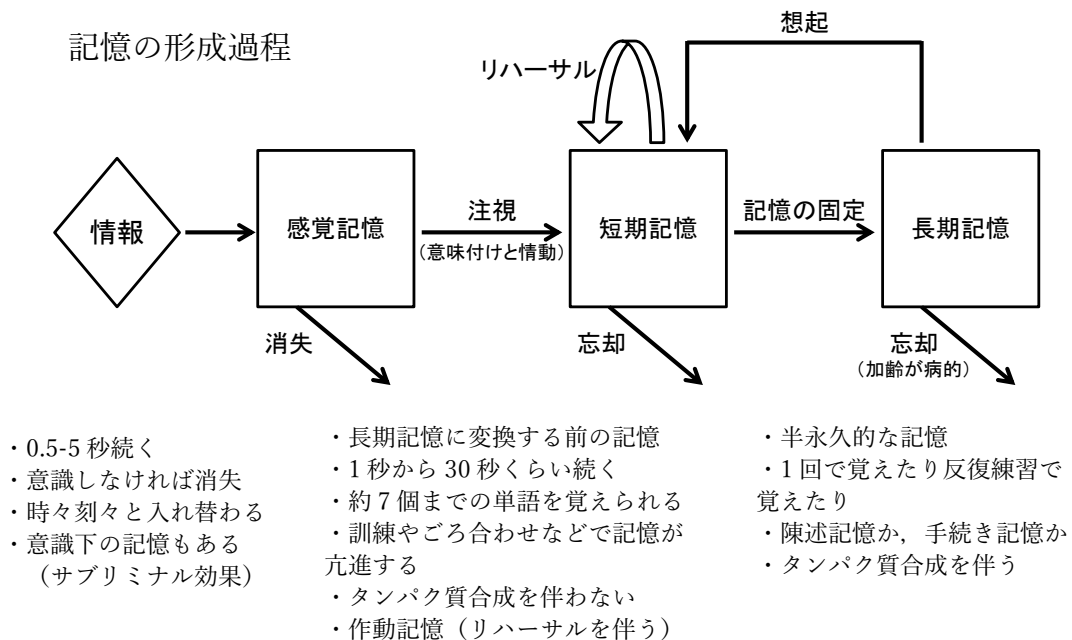
- 手法の比較, 第24回生体・整理工学シンポジウム論文集 (2009).
- 尾崎文夫, 高齢者生活支援ロボットの現状, 日本老年医学会雑誌, Vol.57, No.3 (2020), pp.224-235.
- 鮫島和行, 銅谷賢治, 川人光男, 強化学習 MOSAIC: 予測性によるシンボル化と見まね学習, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.5 (2001), pp.551-556.
- 清水俊之, 久保田直行, 見まね学習における SSGA と MNN を用いた軌道学習, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集 (2006).
- 田淵一真, 谷口忠大, 榎本哲夫, 模倣学習と強化学習の調和による効率的行動獲得, 第20回人工知能学会年次大会論文集 (2006).
- Tak, S., Jang, J., Lee, K. and Ye, J. C., Quantification of CMRO₂ without hypercapnia using simultaneous near-infrared spectroscopy and fMRI measurements, *Physics in Medicine & Biology*, Vol.55, No.11 (2010), pp.3249-3269.
- Tak, S., Yoon, S. J., Jang, J. Yoo, K., Jeong, Y. and Ye, J. C., Quantitative analysis of hemodynamic and metabolic changes in subcortical vascular dementia using simultaneous near-infrared spectroscopy and fMRI measurements, *NeuroImage*, Vol.55 (2011), pp.176-184.
- 鳥山悟, 佐達秀敏, 中村純二, 近赤外分光法を用いた顔肌への自己接触時の脳活動計測, 日本感性工学会論文誌 (2020), DOI: 10.5057/jjske.TJSKE-D-20-00001.
- Ye, J.C., Tak, S., Jang, K.E., Jung, J.W., Jang, J.D., 2009. NIRS-SPM: Statistical parametric mapping for near-infrared spectroscopy, *NeuroImage*, Vol.44 (2009), pp.428-447.

第2章 見まねによる学習

2.1 記憶の貯蔵庫モデル

神経学者である Kandel らによると，学習（learning）とは，世界に関する知識を得たことにより行動が変化することを意味し，記憶（memory）とは，知識が符号化され，貯蔵され，その後，検索される過程のことを意味する（Kandel 他, 2014）．ここで，知識とは主体にとって何らかの価値を持つ情報のまとめりであると仮定すると，学習とは，情報を得た主体が，その情報を意味付けして保持し，それによって行動が変化することであると考えられる．

また記憶は短期記憶と長期記憶に分類される．1968 年に Atkinson らが提唱した二重貯蔵モデルを図 2.1 に示す（Atkinson and Shiffrin, 1968; Atkinson and Shiffrin, 1971; 甘利, 田中, 2008）．このモデルでは，情報の保持時間によって記憶が感覚記憶と短期記憶，長期記憶の 3 つに分かれている．感覚より短期，短期より長期，という順序で保持できる時間が長くなり，貯蔵庫のサイズが大きくなるとされる．（ただし長期記憶は感覚記憶から直接作られるのであって，短期記憶は長期記憶から独立しているかどうか，という問題には結論が出ていない．）



情報はまず感覚登録器に一時的に保持され，そこで注意などにより選択された情報が短期貯蔵庫に入力され，一定期間保持される．そしてリハーサルを受けた情報は長期貯蔵庫へ転送され，永続的に貯蔵されることになる．

図 2.1 記憶の二重貯蔵モデル

2.2 ワーキングメモリー

認知心理学者である Alan Baddeley は、長期記憶とは質的に異なる短期記憶を重要と見なし、短期記憶の意義について独自のモデルを提示した。Baddeley は短期記憶の一種として、ワーキングメモリー（作動記憶または作業記憶）を提唱した。ワーキングメモリーは、日常生活における認知活動において、情報の一時的な保持に使用される（甘利，田中，2008）。

短期記憶とは従来、情報の保管場所によって一時的な情報の保持を説明する概念であった。しかしワーキングメモリーと呼称する短期記憶の場合、情報の保持や操作といった情報処理機能としての記憶という意味合いを強調している。

また、心理学者、経済学者である Daniel Kahneman は、短期記憶の容量は、処理資源としての注意（attention）の量で決定されるとした、注意容量モデル（capacity model）を提唱した（Kahneman, 1973）。Baddeley はこれに着目し、人が認知課題を効率的に遂行できるか否かは、認知課題に必要な処理資源（注意）の需要と、その課題を実行する人物の処理資源（注意）の供給との兼ね合いによってきまると考えた。したがって、その人物の処理資源としての注意力に対して、余りに大きな注意を要求する課題や、複数の課題を同時に行うことなどは、処理資源が不足することが原因で、課題実行が困難であると整理できる。こうした考えによって、リハーサル機能を持つ短期記憶は、ワーキングメモリー機能の一部であるとされた。

以上から、ここでは、ワーキングメモリーは、ヒトが何らかの認知的作業を行う際に必要とする情報を、一時的に利用可能な状態で保持し、かつ操作する仕組みのことである、と考えられる。この時に保持及び操作する情報は、新たに覚えた情報と、長期記憶から想起した情報がある。図 2.2 に Baddeley の提唱したワーキングメモリーモデルを示す（Baddeley, 2000）。

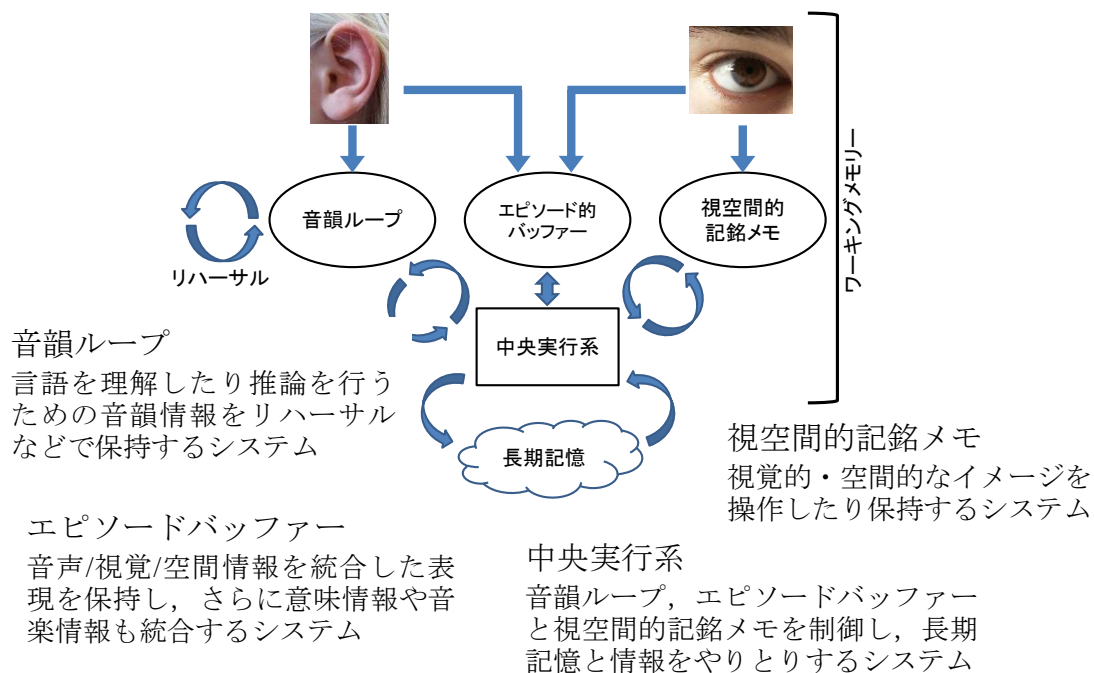


図 2.2 Baddeley のワーキングメモリーモデル

2.3 学習の枠組み

“学習”という言葉は、非常に多岐な定義を持っている。前述の通り心理学、神経科学等の分野でも研究対象となっており、その明確な定義をすることは困難である。そのため本研究では、学習とは情報を得た主体が、その情報に対して意味付けして保持し、それによって行動が変化することと仮定している。ロボット工学の分野においても学習の方法や過程に、様々な構造が存在する。下の図 2.3 に学習の理論的研究で扱われる、3つの主な学習パラダイムを示す(銅谷,2007)。これらの学習パラダイムについて概略を述べると、(A) 教師あり学習は、目標となる出力、すなわち教師データや正解が存在し、出力はその目標値との誤差に基づいて出力を調整、学習を行う。(B) 強化学習では、教師データや正解が存在しない代わりに、望ましい出力には報酬が与えられ、その報酬が最大になる様に学習を行う。(C) 教師なし学習は、入力データは存在するが、教師や正解、報酬は存在しない。与えられた入力を基に、可能な限り最適な方法で入力データを分類する、といったことが行われる。

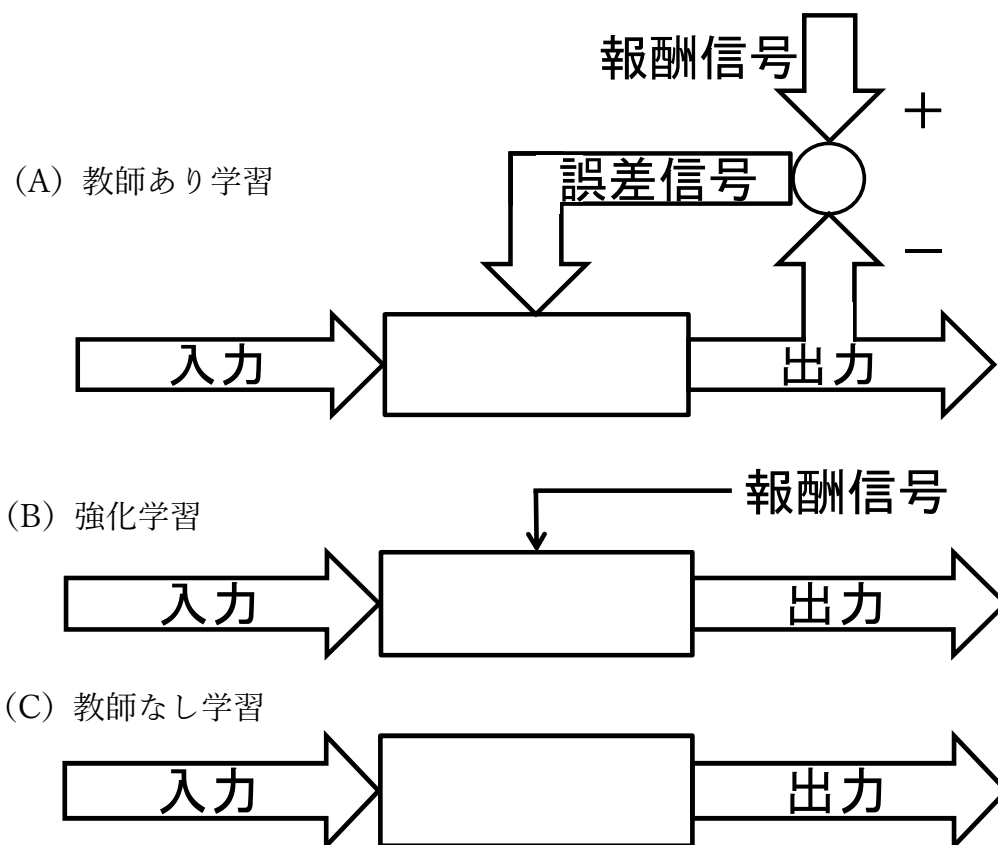


図 2.3 学習の枠組み

これらの学習枠組みの内、本研究において研究対象とする見まね学習は、(A)の教師あり学習に相当すると考えられる。この教師なし学習の内的構造については、図 2.4 ように表すことが出来る。見まねは模倣行為の一種であり、自身の行為を見本である他者の行為と比較し、より『最適な』行為に修正を行と考えられる。この時、何をもって最適と見なすのか、すなわち何を教師データとするのかは、学習のレベルによって異なると考えられる。

例えば、相手の意図を読み取り、その意図も含めて模倣するのか、相手の動きの形式を重視し、その様式を模倣するのかによって、誤差情報は異なる。また、社会的学習としての模倣行為として拡張して考えれば、何をもって最適と見なすかは、社会的価値観にまでその背景が及ぶ。

このような模倣の多義性に関して、類人猿の社会的学習に関する論文の中で、模倣行為に関する研究の難しさは、どのような信頼できる研究データを収集したかというよりも、模倣の定義が困難な点にあるとの指摘がなされている (Whiten et al., 2004)。そこで、本研究では、他者の行為における形式を真似ることを重視し、他者の意図やアフォーダンス理解等については扱わないものとする。

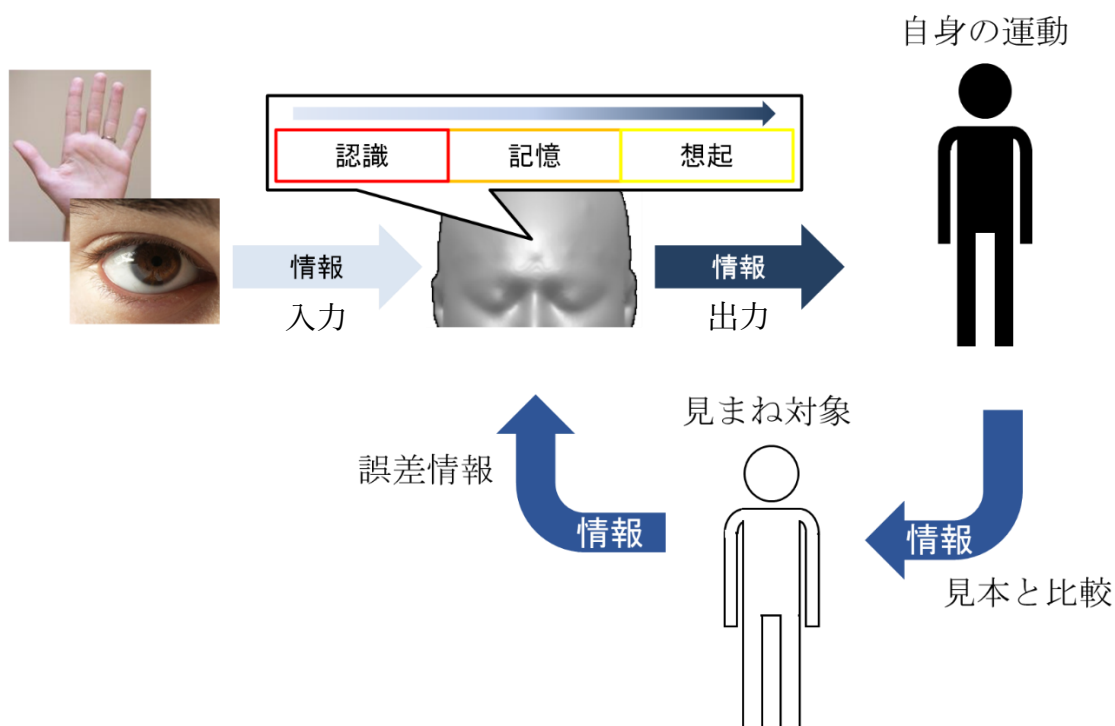


図 2.4 本研究において仮定する学習の枠組み

2.4 見まね学習におけるワーキングメモリー機能との仮説

学習が、情報を得た主体が、その情報を意味付けして保持し、それによって行動が変化する（させる）機能とすると、ワーキングメモリーに対する教師あり学習は図 2.5 のように表すことが出来る。学習過程は感覚器官から入力された情報を認識（意味づけ）し、それを記憶として保存する。ワーキングメモリーの場合はその保存期間は長期記憶と比較して短いため、保持した記憶と過去の長期記憶とを想起し、また観察した手本との比較を行い、情報のやり取りをすることで、意図した出力を行う。これが教師あり学習の過程、特にワーキングメモリーを使用した記憶獲得過程であると仮定する。同様の作業においてこの過程を何度も繰り返すことで、長期記憶にその経験が蓄積されると考えられる。つまり動作学習は、この長期記憶の蓄積と中央実行系と各機能との精度、速度の向上によって増強されるものだと考えられる。

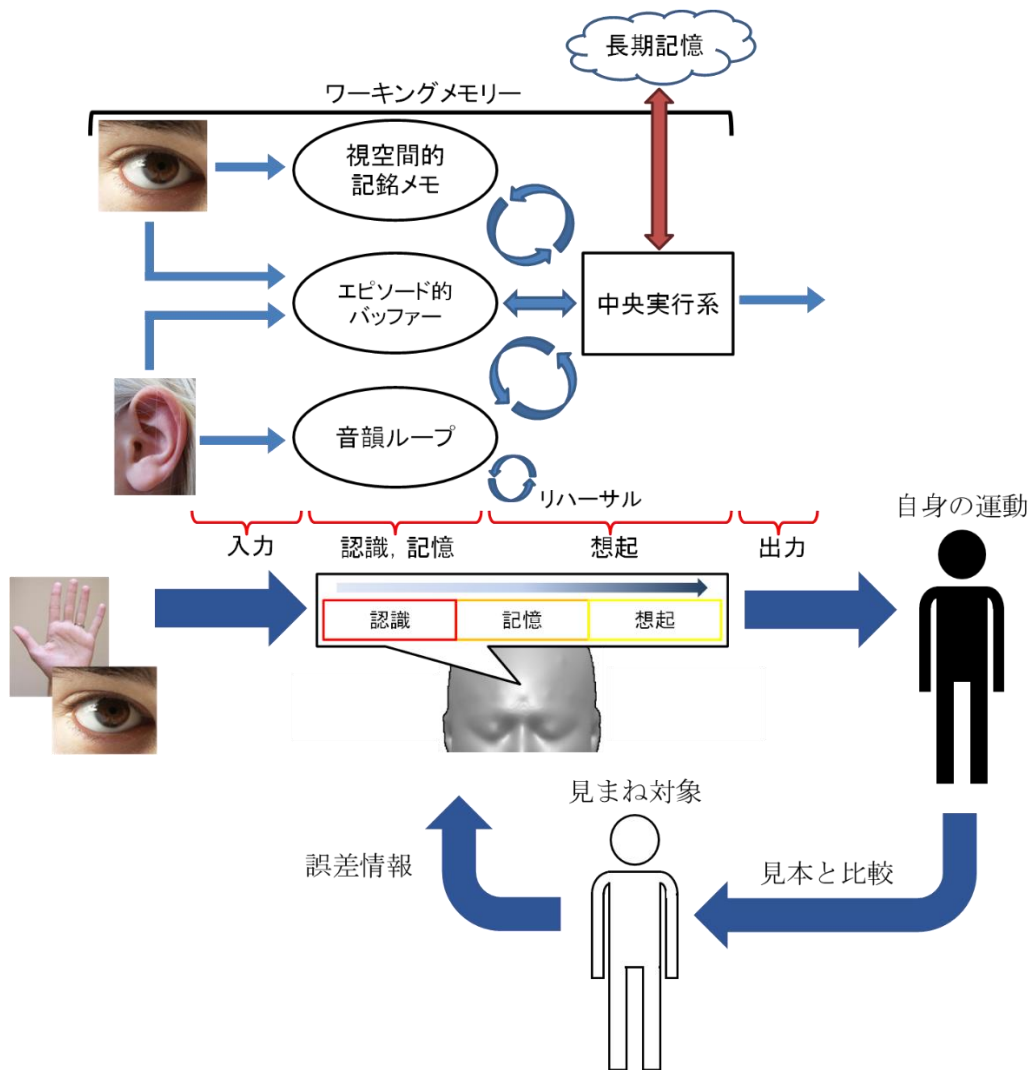


図 2.5 ワーキングメモリーと見まね学習との対応の仮定

2.5 解析対象とする学習, 記憶について

以上のことから, 本研究で対象とする学習過程は, 教師あり学習におけるワーキングメモリー及び短期記憶の獲得と保持, そして想起とする.

前述の通り, 長期記憶は感覚記憶から直接作られるのであって, 短期記憶は長期記憶から独立しているかどうか, という問題には結論が出ていない. しかし繰り返し作業を行うことでその精度や作業速度が向上することは自明である. すなわち同様の目的で繰り返し作業を行えば記憶が蓄積し, より効率的な作業が出来るようになる.

また実際の見まね学習を行うケースにおいては, 動作の学習中に思わぬ外乱が生じる可能性もあり, 柔軟な対応をするために経験の積み重ねが重要であると言える.

そこで見まねによる動作学習を想定し, どのように学習がなされているのかを脳機能計測によって解析することで, より広範囲に解析結果を応用, 解釈できる可能性があると考えられる. またその解析結果が, 効率的な動作学習支援の一助になることが期待される.

2.6 2章の参考文献

- 甘利俊一, 田中啓治, 認識と行動の脳科学, (2008), pp.135-136, pp.134-137, 東京大学出版会.
- Atkinson, R., C. and Shiffrin R., M., Human memory: A proposed system and its control processes, the psychology of learning and motivation, Vol.2 (1968), pp.89-195, London: Academic press.
- Atkinson, R., C. and Shiffrin R., M., The control of short-term memory. Sci Am, Vol.225 (1971), pp.82-90.
- Baddeley, A, D, The episodic buffer: a new component of working memory?, Trends Cognitive Sciences, Vol.4, No.11 (November, 2000), pp.417-423.
- 銅谷賢, 計算神経科学への招待, 2007, サイエンス社.
- Kahneman, D., Attention and Effort, 1973, Prentic Hall.
- Kandel, E. R., Schwartz J. H., Jessell T. M., Siegelbaum S. A., Judspeth A. J. 編, 金澤一郎, 宮下保司 日本語版監修, カンデル神経科学 (2014), pp.1411-1412, メディカル・サイエンス・インターナショナル.
- Whiten, A., Horner, V., Litchfield, C., A. and Marshall-Pescini S., How do apes ape?, Learning & Behavior Vol.32, No.1 (2004), pp.36-52.

第3章 近赤外分光法による脳機能計測の利用

3.1 NIRS 概要

NIRS (Near-Infrared Spectroscopy) は、近赤外光の生体内を透過しやすいという性質を利用し、被験者脳内の酸素化ヘモグロビン (Oxy-Hb, HbO) 変化[mmol/L・cm]と、脱酸素化ヘモグロビン (Deoxy-Hb, HbR) 変化を計測する装置である。また、これらの加算を総ヘモグロビン (Total-Hb, HbT) と呼称する。計測の際、被験者の頭部に特殊な装具を取り付け、その装具を介して被験者に送光器と受光器の機能を持つプローブを装着する。プローブを取り付ける際には国際 10-20 法に準拠し、脳構造に対応づけた位置に取り付ける。これらのプローブから送られる送光量と受光量とを比較し、その減少量から計測領域における Oxy-Hb と Deoxy-Hb の変化量を測定する (島津製作所, 2020; 田村, 1992; 尾崎, 河田, 1996)。

脳の情報処理においては神経活動が担う情報伝達系と神経活動を支えるエネルギー供給系の2つの系が密接に関係していると考えられている。ある場所で神経活動が起こると、その周囲にある血管が拡張し、神経活動のエネルギー源となる酸素やグルコースを含む動脈血を供給する。すると活動している神経の近傍組織では、血流量と血液量が増大し、血液の酸素化状態が変化すると仮定されている。このような神経活動と脳血液反応の関係は、ニューロバスキュラーカップリングと呼ばれる。すなわち NIRS が計測した Oxy-Hb と Deoxy-Hb の変化量が、その計測領域における神経活動の指標となる。

NIRS 計測では fMRI による計測と異なり、小血管よりも毛細血管における血流変化を強く反映することが示唆されており、また Oxy-Hb の変化量については BOLD 信号との相関が示唆されている (福田, 2003; 灰田, 2002)。また血流速度変化の影響を受けないという報告も存在する (斉藤他, 2011)。よって本研究においては、Oxy-Hb の変化に着目して解析を行う。

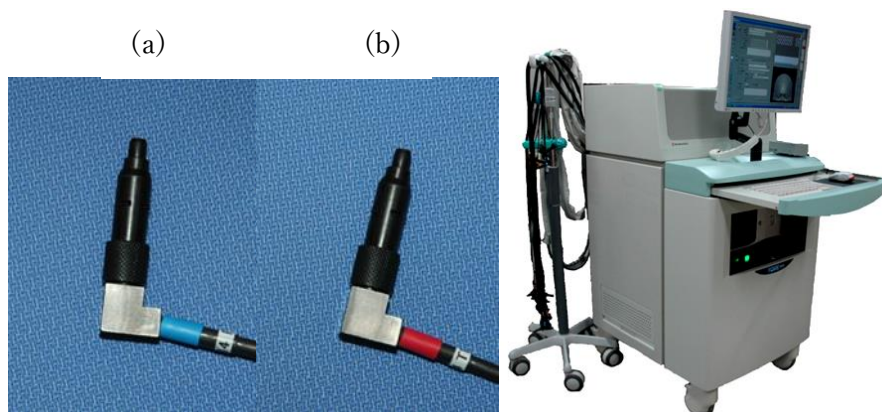


図 3.1 NIRS 外観 (a)受光プローブ. (b)送光プローブ. 近赤外光は光ファイバーを通り、被験者の頭皮上に設置された送光プローブから照射される。被験者の皮質を散乱しながら透過し、再び頭皮上に戻る近赤外光を受光プローブで受ける。

3.2 計測原理

血液成分中のヘモグロビンは光を散乱させることが知られている。また、ヘモグロビンは酸素と結合すると、光の吸収及び散乱の度合いが変化する。NIRS ではその性質を利用し、近赤外光の光密度変化を計測することで、Oxy-Hb と Deoxy-Hb の変化量を導出する。

透明な物質に対して、平行に入射する光の強度を I_0 とし、物質を通過した後の強度を I_t とする。この物質の長さ（平均光路長）を d と考えると、次の関係式が成立する。

$$I_t = I_0 \exp(-\epsilon Cd)$$

C : 物質の濃度, ϵ : モル分子吸光係数

となる。図 3.2 にこれらの関係の概略を示す。ここで対数変換を行うと、

$$O.D. = -\log\left(\frac{I_t}{I_0}\right) = \epsilon Cd$$

と表すことができる。ここで、O.D.は吸光度を示す。

このような、光が物質により吸収される法則は Lambert-Beer の法則と呼ばれ、NIRS においては、基本的な計測原理はこの法則に基づいている (江田,2009)。しかし、生体を通る光は、吸収と散乱による減衰を受け伝播することになるため、Lambert-Beer の法則をそのまま生体計測に適応することは困難であり、修正が必要である。

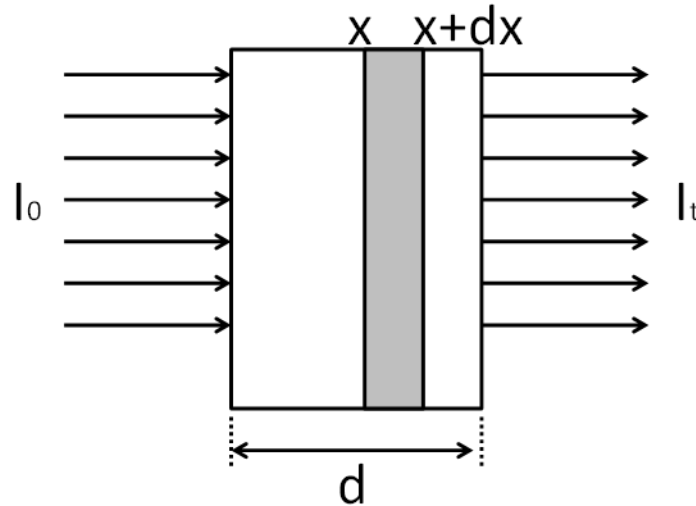


図 3.2 Lambert-Beer の法則の概略

また、生体においては、ヘモグロビンは散乱体である赤血球内に存在し、赤血球のヘマトクリット値（濃度）と吸光度の間において、直接関係は成立しないことが知られている。ただし、吸光度変化とヘマトクリット値との間に、直線性があることが示されており、生体のような強散乱体においてもヘマトクリット値の生理範囲内ならば、見かけ上 Lambert-Beer の法則が適用できるとして、

$$\Delta O.D.(\lambda) = K(\lambda)\Delta[\text{Oxy-Hb.}] + K'(\lambda)\Delta[\text{Deoxy-Hb.}]$$

$\Delta O.D.(\lambda)$: 波長 λ における吸光度変化

$K(\lambda)$: 波長 λ における Oxy-Hb の比例定数

$K'(\lambda)$: 波長 λ における Deoxy-Hb 比例定数

と表せる（田村, 1992）。

上式は、計測している生体において、ヘモグロビンが Oxy-Hb 及び Deoxy-Hb の 2 成分系であると仮定して考えている。したがって、Oxy-Hb 及び Deoxy-Hb について、特定の波長における比例定数 $K(\lambda)$, $K'(\lambda)$ を定めて、二つ以上の波長に関する式を立てれば、上式を解くことが出来る。比例定数の決定には、文献値や試験管系、生態系での実測等が必要である。

以上から、送光プローブから照射された近赤外光が大脳皮質を透過して受光プローブで検出され、吸光度変化が計測される。その値を基に、Oxy-Hb と Deoxy-Hb に関する連立方程式を設定する。本研究にて使用する NIRS は、3 波長を使用しており、計測された吸光度変化値を基に、三つの方程式を立てて、解を求める。よって、受光プローブにより検出した吸光度変化から、対象計測部位における Oxy-Hb と Deoxy-Hb の変化値が導出できる。

本研究で使用する FOIRE-3000 では、精度を高めるために、2 波長からさらに 1 波長を追加して、3 波長により計測している。図 3.3 に示すように 780nm, 805nm, 830nm の 3 つの波長である (株式会社島津製作所, 2020)。

生体組織の光計測は波長が 700~900nm の近赤外光が使用される。可視光 (400~700nm) はヘモグロビンやその他の生体構成物質の吸収が大きく、また、近赤外光よりも長い波長では水の吸収が大きくなるため生体内を透過し難い。これに対して近赤外光の波長領域は生体を透過しやすいという特徴を持っている。

頭皮上から近赤外光を照射すると、骨や皮膚を透過して脳組織内に拡散し、頭皮上から約 20~30mm 深部にある、大脳皮質に到達する。また照射点からおよそ 30mm 離れた点で計測すると乱反射して戻ってきた光成分を検出することが出来る。

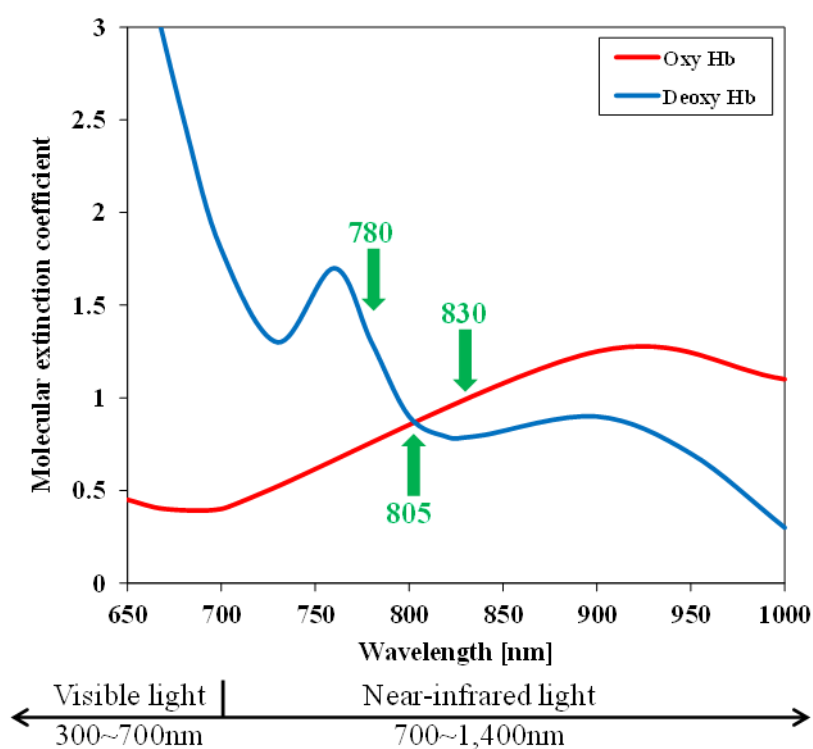


図 3.3 酸素化ヘモグロビン及び脱酸素化ヘモグロビンの分子吸光係数

3.3 FOIRE-3000 の仕様

同様に、FOIRE-3000 のブロック図を図 3.4 に、仕様を表 3.1 に示す。図及び表は、島津製作所 FOIRE-3000 の説明書より引用している。

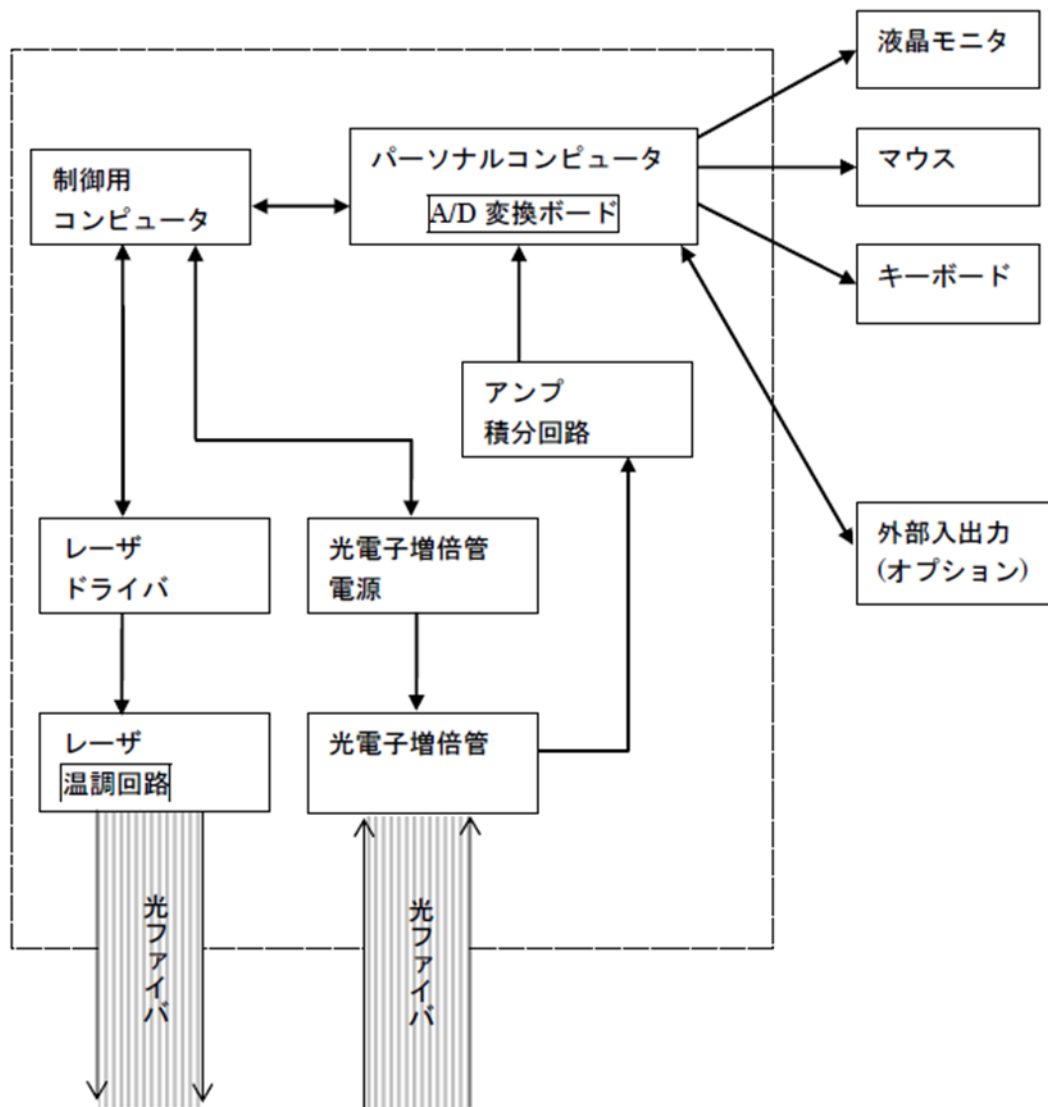


図 3.4 FOIRE-3000 のブロック図

表 3.1 FOIRE-3000 の仕様

測定方法	3 波長吸光度演算法
測定項目	酸素化ヘモグロビン (Oxy-Hb.), 脱酸素化ヘモグロビン (Deoxy-Hb.), 総ヘモグロビン (Total-Hb.) の初期値からの相対変化量
光源	近赤外半導体レーザー 3 波長 クラス 1M (JIS-C6802(2005)) λ_1 780 \pm 5nm λ_2 805 \pm 5nm λ_3 830 \pm 5nm
光源数	16 セット (FOIRE-3000/16)
検出器	マルチアルカリ光電子増倍管 (ホトマルチプライヤ)
検出器数	16 個 (FOIRE-3000/16)
ファイバ	多成分ガラスバンドルファイバ
送受光ファイバペア数	16 組 (FOIRE-3000/16)
外部入出力 (オプション)	デジタル入力端子(BNC) 8 TTL レベル (非絶縁) デジタル出力端子(BNC) 7 アナログ入力端子(BNC) 8 0-10V
PC	CPU:Pentium4 2GHz 相当以上 OS: Windows XP Professional
使用温度	15~30°C ただし, 測定時は 5°C/h 以内
使用湿度	45~85%RH (結露しないこと)
保管温度	-10~+60°C
電源	AC100V 50, 60Hz 750VA
外形寸法 (W×H×D)	610×1164×746
重量	170kg

3.4 プローブの設置基準

近赤外分光法を用いた，脳表面のトポグラフィックな画像を得る光トポグラフィ脳機能計測では，直接的に脳構造を計測することはできない．そこで頭部の解剖学的な特徴から，頭部構造と脳構造とを対応づける．図 3.5，表 3.2 に国際 10-20 法における電極の設置箇所とその対応を示す（奈良県臨床衛生検査技師会, 2020）．国際 10-20 法は脳波計測の国際的基準として提案されたものである．その有用性から，近赤外分光法による脳機能計測においてもプローブの設置基準とされている．図の鼻根部（nasion），後頭結節（inion），左右の耳介前点（Right/ Left pre-auricular point）から Cz, Fpz といった基準点を定める．

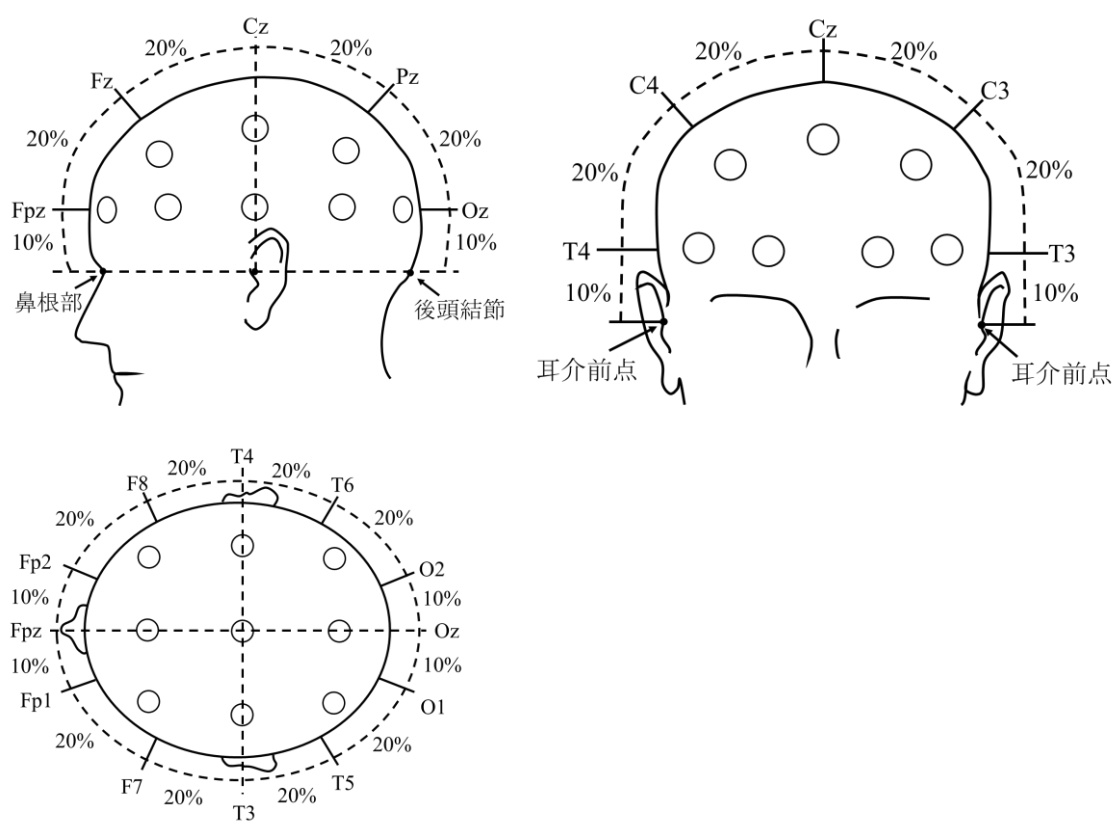


図 3.5 国際 10-20 法に基づく電極設置基準

表 3.2 国際 10-20 法と解剖学的位置の対応

部位名称	電極記号	解剖学的部位
前頭極 (Front polar)	Fp1, Fp2	前部前頭葉
前頭部 (Frontal)	F3, F4	運動野
中心部 (Central)	C3, C4	中心溝
頭頂部 (Parietal)	P3, P4	感覚野
後頭部 (Occipital)	O1, O2	視覚野
前側頭部 (Anterior-temporal)	F7, F8	下部前頭部
中側頭部 (Mid-temporal)	T3, T4	中側頭葉
後側頭部 (Posterior-temporal)	T5, T6	後側頭葉
耳朵 (Auricular)	A1, A2	
正中前頭部 (Midline frontal)	Fz	
正中中心部 (Vertex)	Cz	
正中頭頂部 (Midline parietal)	Pz	

3.5 3章の参考文献

- 江田英雄, NIRS の問題点と今後の展開, システム/制御/情報 (システム制御情報学会誌), Vol.53, No.4 (2009), pp.155-161.
- 福田正人, 精神疾患の診断・治療のための臨床検査としての NIRS 測定, MEDIX, Vol.39 (2003), pp.4-10.
- 灰田宗孝, 脳機能計測における光トポグラフィ信号の意味, MEDIX, Vol.36 (2002), pp.17-21.
- 株式会社 島津製作所 SHIMADZU CORPORATION, 分野&データ: ライフサイエンス: 脳機能イメージング, (online), available from <<https://www.an.shimadzu.co.jp/apl/lifescience/invivo.htm>>, (参照日 2020年12月1日).
- Nara Association of Medical Technologist. “脳波におけるモニタージュ”. 社団法人奈良県臨床衛生検査技師会, (online), available from <http://naraamt.or.jp/Academic/kensyuukai/2005/kirei/nouha_mon/nouha_mon.html>, (参照日 2020年12月2日).
- 尾崎幸洋, 河田聡, 近赤外分光法, 1996, 学会出版センター.
- 斉藤直, 深見忠典, 柳田裕隆, 高橋龍尚, 新関久一, 近赤外分光法によるヘモグロビン濃度測定は血流速度変化の影響を受けない, 生体医工学, Vol.49, No.1 (2011), pp.185-190.
- 田村知己, 近赤外分光法による脳代謝モニター, Med. Imag. Tech., Vol.10, No.5 (December 1992), pp.496-501.

第4章 見まねによる動作学習実験における前頭葉の脳機能計測

4.1 実験の目的

近赤外分光法による脳機能計測を利用して、被験者が動作を学習、模倣する際の脳活動を計測する。被験者は直立の姿勢で目の前のスクリーン上に視線を固定し、課題が始まるとそのスクリーン上に人物が単純動作をする映像が呈示される。被験者はその動作を記憶し、その後、その動作と同様になるように被験者自身が動くことで再現を行う。

見まねによる動作学習では、学習者は観察することで得られる情報を、模倣するために自らの運動情報へと変換する必要がある。本実験では、そうした視覚情報から運動情報へと変換する脳機能を計測することを目的とする。

4.2 実験デザイン

測定部位は図 4.1 のように前頭前野と視覚野とする。背外側前頭前野において、長期記憶をする際のワーキングメモリーとの関連が、fMRIを使用した実験により既に報告されている（甘利, 田中, 2008; Blumenfeld and Ranganath, 2006; Hasselmo and Stern, 2006）。そこで前頭前野に着目し、NIRS計測においても背外側前頭前野または前頭前野において賦活反応が見られるか、動作を記憶し、模倣する課題を行うことで計測を行う。測定部におけるプローブの配置は 10-20 法に基づき、図 4.2 に示すようにFpzとOzを基準とする。

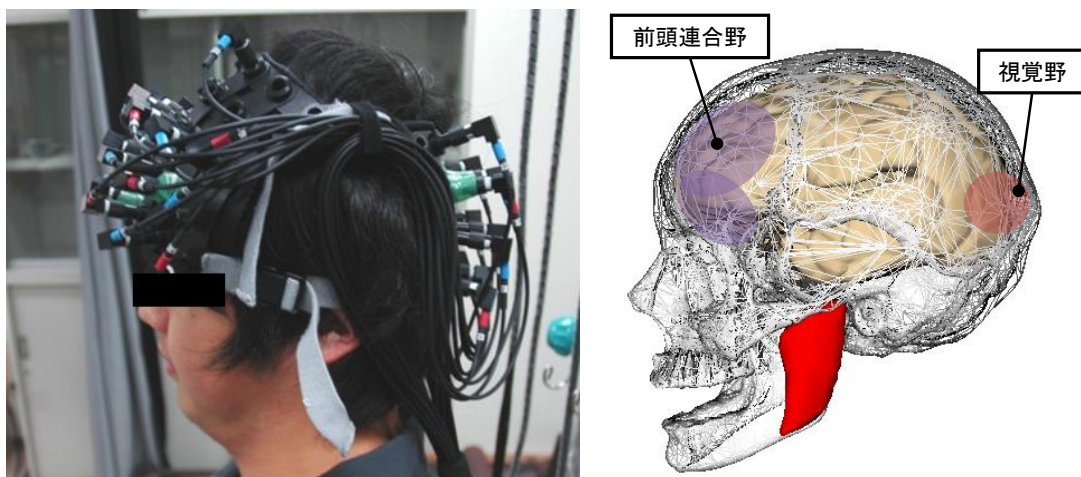


図 4.1 実験時のホルダ装着の様子と前頭前野及び視覚野の位置

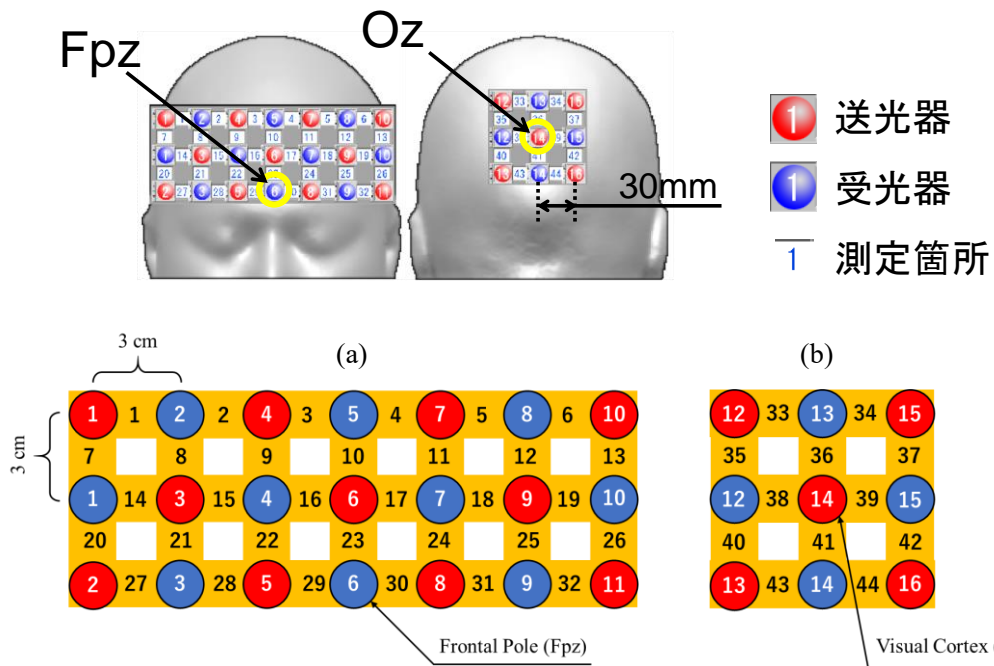


図 4.2 動作学習実験におけるプローブの配置 上図は計測部の概略。(a)前頭前野の計測チャンネル。(b)視覚野の計測チャンネル。赤い円は送光プローブ、青い円は受光プローブである。黄色で示したプローブ間は計測チャンネルを、数字はその番号を示す。6番の受光プローブは国際10-20法のFpzの位置に対応する。

図 4.3 に示すように、実験中において被験者は直立し、目の前のスクリーンをみる。被験者は健康な 20 代前半の男性 5 名である。

実験 1 試行は、被験者が課題を実行する課題期間を 50sec とし、その前後に安静にする安静期間をそれぞれ 30sec と設定する。本実験では各被験者に対して 3 回試行する。安静期間では、被験者は何も考えずにスクリーンをみる。スクリーンには図中の 1 試行目に示すような、人物の直立した静止画を呈示する。1 試行目の課題期間では、スクリーン上の映像は切り替わらず、被験者は課題期間も通して安静状態を保つ。2 試行目の課題期間では、課題期間開始と同時に映像を切り替え、人物が単純動作を行う映像を呈示する。被験者はこの間この人物の動作を観察し、記憶する。3 試行目の課題期間では、課題期間開始と同時に被験者に口頭で指示をし、被験者は 2 試行目の課題期間に呈示された映像の人物と、同じ動作をする。3 試行目の課題期間では、1 試行目と同様にスクリーンの映像は切り替わらない。課題期間においても人物の直立した静止画を呈示する。また、各試行における課題については、事前に被験者に説明する。ただし人物の動作内容については言及しない。

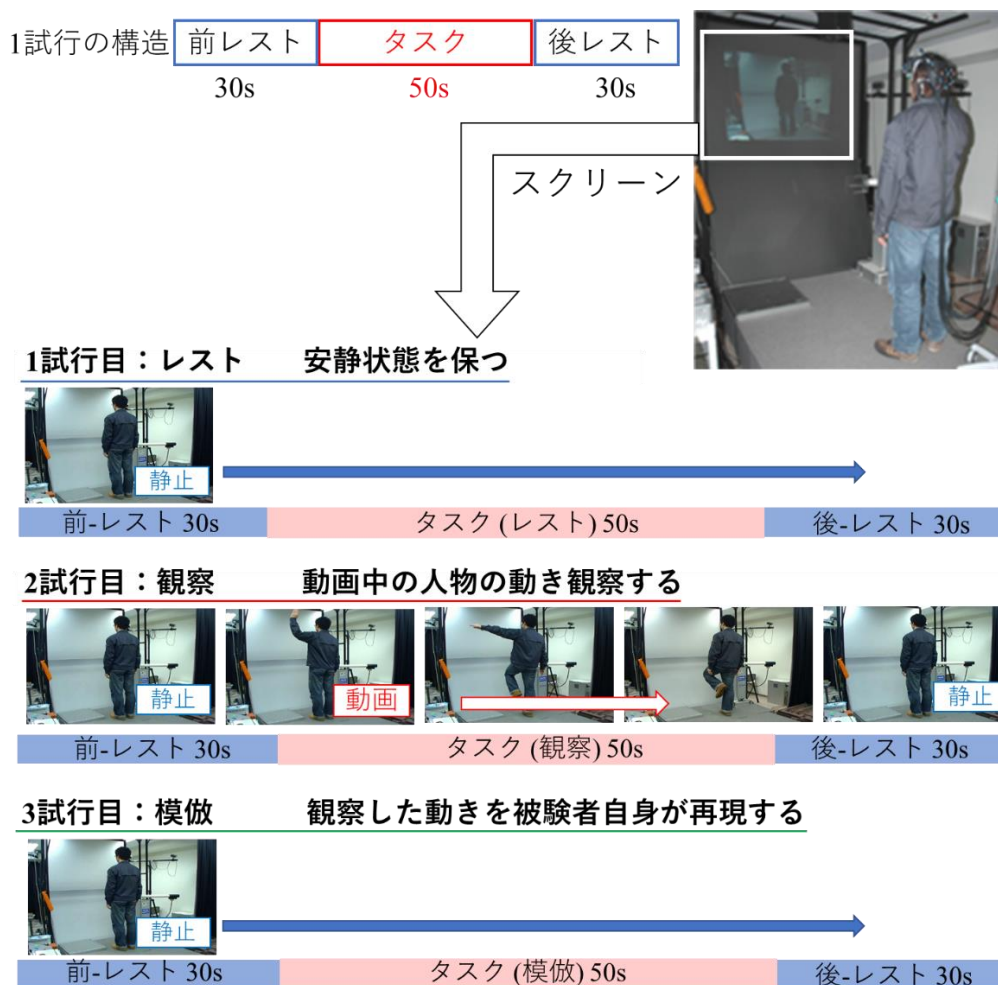


図 4.3 動作学習実験の実験デザイン

4.3 大域平均基準

被験者の体幹変化や代謝，呼吸によるアーティファクト成分（ノイズ）は，局所的な脳機能によるヘモグロビン変化とは異なり，広い領域に一様に作用すると仮定することができる．すると，各計測チャンネルにおける信号から全計測チャンネルの大域的平均（ある計測時における，全計測チャンネルにおける平均）を差し引くことで，計測域全体に一様に影響を及ぼす変化を，低減できると考えられる（野澤，近藤，2009）．以下に，計算過程を示す．

計測するヘモグロビン変化は相対的な濃度変化であるため，各チャンネルからの生信号をあらかじめ標準化する．ここでは，前レスト期間を基準とした標準化を行う．

まず，前レスト期間における各チャンネルからの信号の平均と標準偏差を求める．これらの値を用い，解析対象である各計測部（チャンネル） j のデータについて，各時刻 t の信号を

$$\Delta Hb_j(t) := \frac{\Delta Hb_j(t) - \mu_j^{\Delta Hb}}{\sigma_j^{\Delta Hb}}$$

ΔHb_j : チャンネルのヘモグロビン（Oxy-Hb, Deoxy-Hb）変化

$\mu_j^{\Delta Hb}$: 前レスト期間におけるチャンネルのヘモグロビン（Oxy-Hb, Deoxy-Hb）変化の平均

$\sigma_j^{\Delta Hb}$: 前レスト期間におけるチャンネルのヘモグロビン（Oxy-Hb, Deoxy-Hb）変化の標準偏差

のように変換し，そのうえで

$$\Delta Hb_j(t) := \Delta Hb_j(t) - \sum_{l=1}^n \Delta Hb_l(t)$$

のように大域平均基準を適用する．ここで n はチャンネル総数を表す．

前レスト期間における平均および標準偏差の z スコア変換への利用が正当化されるためには，前レスト期間が十分に長く，かつ前レスト期間と課題期間における被験者の実験課題が質的に同じである必要がある．

本実験結果については，前頭前野に着目し，前頭前野の 32 チャンネルを総チャンネルとし，その内の Ch.20, Ch.23, Ch.26 について大域平均基準の分析を行う．

4.4 実験結果

前頭前野における Oxy-Hb 変化を図 4.3.1 に示す．カラースケールの単位は[mmol/L・cm]であり色調の変化は Oxy-Hb 変化を表す．図中の縦軸は時間[sec]であり，各マッピングは 10 秒間隔で提示している．時間変化はタスク開始時を基準とし，0 秒としている．

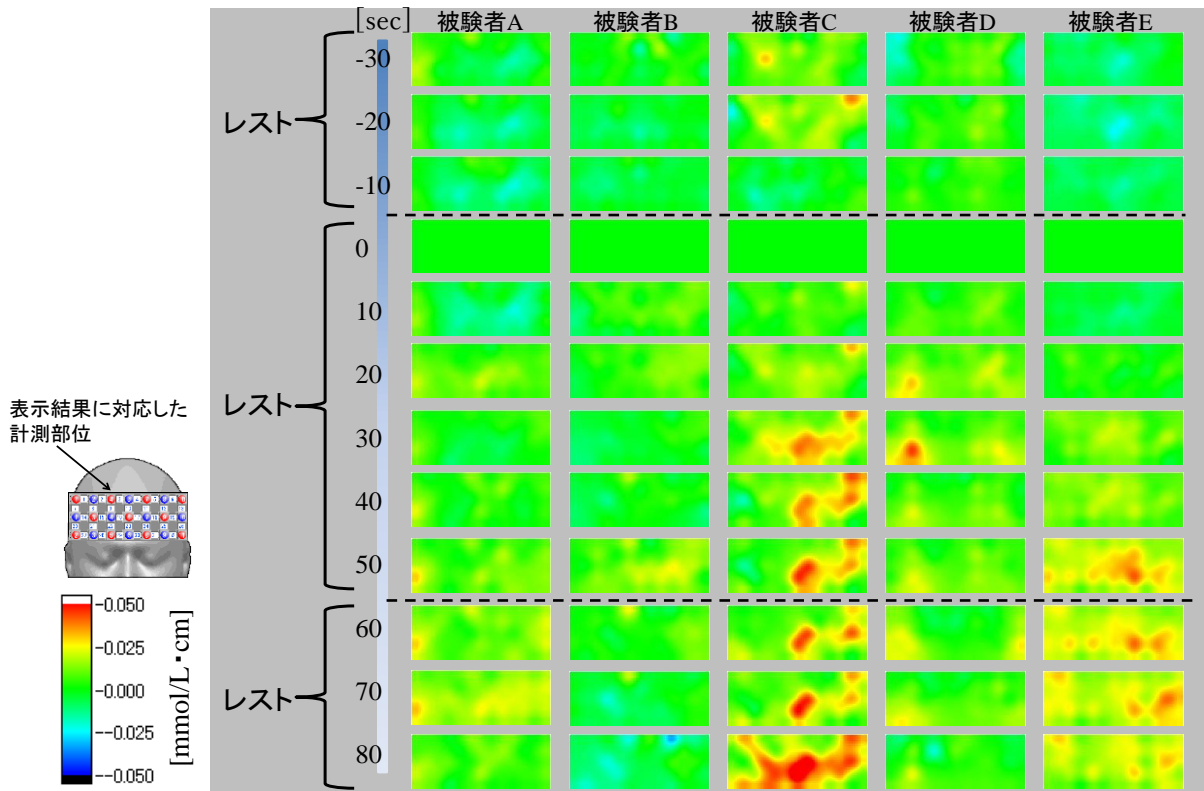


図 4.4 レスト課題（1 試行目）における実験結果

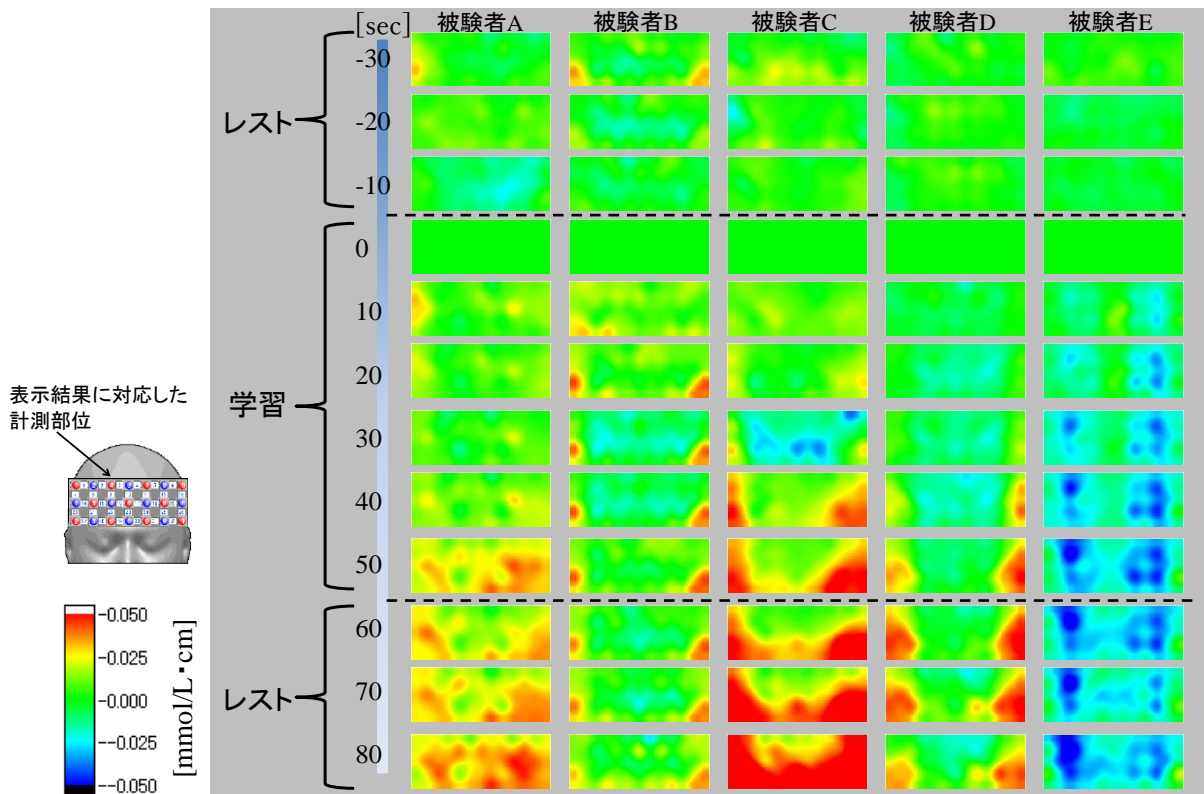


図 4.5 学習課題（2 試行目）における実験結果

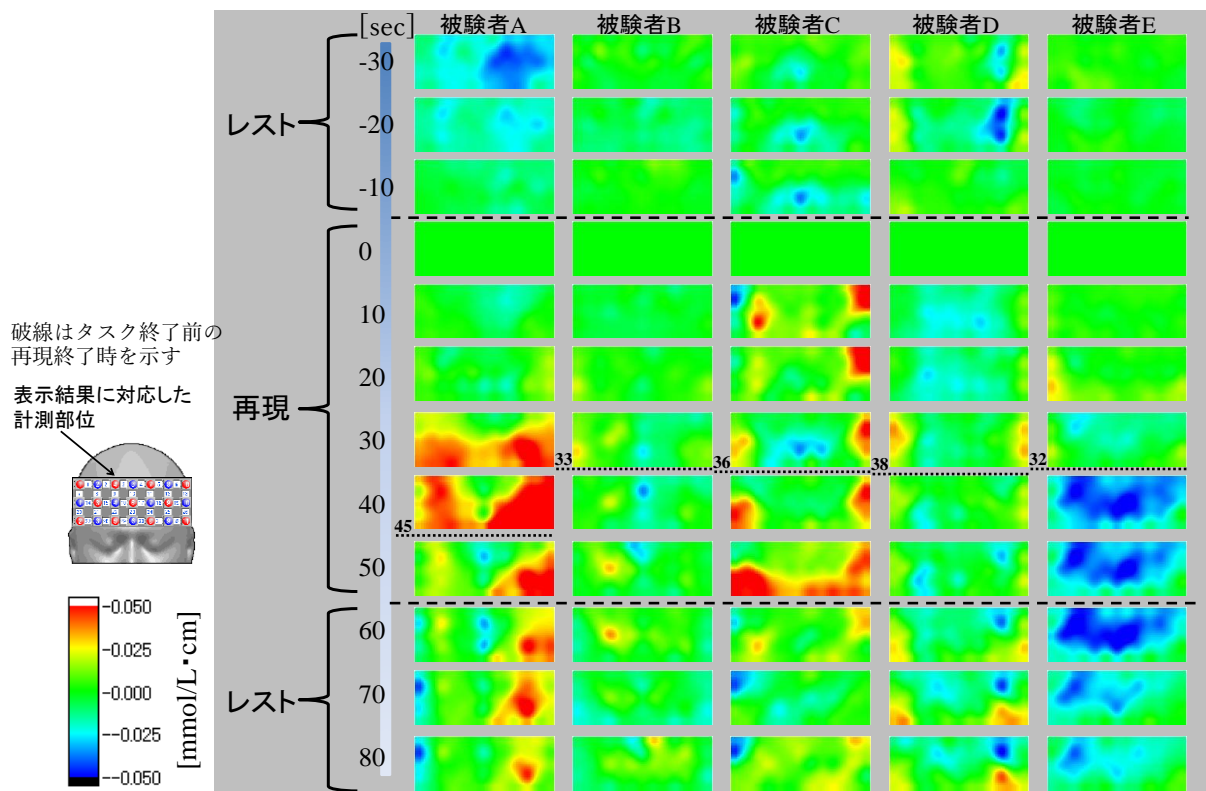


図 4.6 模倣課題 (3 試行目) における実験結果

1 試行目の安静状態を保つ課題においては、被験者C, EのOxy-Hbが乱れているものの、他3人についての変化は見られなかった。2 試行目における映像中の人物の動作を記憶するという課題においては、被験者Eを除いた被験者4名について背外側前頭前野におけるOxy-Hbの上昇傾向が観察された。また内側前頭前野ではOxy-Hbの低下傾向が観察された。3 試行目における動作を模倣する課題においては全被験者が同様に、背外側前頭前野ではOxy-Hbの上昇傾向が、内側前頭前野ではOxy-Hbの低下傾向が見られた。

背外側前頭前野におけるOxy-Hbの上昇傾向は、背外側前頭前野と長期記憶をする際のワーキングメモリー機能との関与を示したfMRIを使用した実験結果（Blumenfeld and Ranganath, 2006）と関連するものと考えられる。つまり動作を学習し、長期記憶として保存する際の脳機能、そして同様の動作を行うためにその長期記憶を想起するという脳機能に、背外側前頭前野が関与している可能性が示された。

また前頭葉において、手を使用した遅延視覚フィードバックへの適応過程に関連してOxy-Hbが低下することが報告されており（嶋田, 開, 2003）、自己身体イメージと前頭葉におけるOxy-Hbが低下傾向の関連性が示唆されている。本実験結果においても、自己身体イメージと関連して内側前頭前野においてOxy-Hbが低下した可能性が考えられる。この結果から、内側前頭前野におけるOxy-Hbの低下が、全身の身体イメージと関連している可能性が示唆された。

この結果は、内側前頭前野も観察した運動を自分の運動表現に直接マッピングするという脳機能仮説（Direct Matching Hypothesis）に基づいて行われた実験結果とは反応領域が異なる。Marcoらが行った実験においては、被験者がお手本となる映像を見ている時と、お手本を見ながらその通りに手を動かした時との両者の場合において、左前頭葉下部（弁蓋部）と右上頭頂小葉の一部の賦活が観察されたとある（Iacoboni, et al., 1999）。本実験結果においては、被験者がお手本となる映像を観察している時と、お手本を見ずにお手本の動きを思い出して同じように動作する時とで、両者の場合ともに、前頭前野の内側部でOxy-Hbの低下傾向が見られた。再現を行うときの条件が異なるが、観察・学習をする際と再現をする際の両者において反応するという点は同様である。したがって、これらのOxy-Hb 変化傾向はDirect Matching Hypothesisに関連しており、何らかの役割を果たしていると考えられる。一方で、前頭前野の両外側部のOxy-Hb上昇傾向は、ヒトにおけるミラーニューロンの先行研究にて、下前頭回において神経活動が認められたことから、その結果を支持していると考えられる。前頭前野の両外側部は観察時と模倣時のどちらの場合にも賦活傾向を示しており、ミラーニューロンの機能の解釈と一致する。

以上から、前頭前野両外側部における Oxy-Hb 上昇傾向がワーキングメモリーとの関連を、前頭前野背側内側部における Oxy-Hb 低下傾向が自己身体イメージ（認識、保持）との関連を示唆していると考えられる。

次ページより、考察において着目した ch.20, ch.23, ch.26 における各被験者ごとの Oxy-Hb 変化を図に示す。

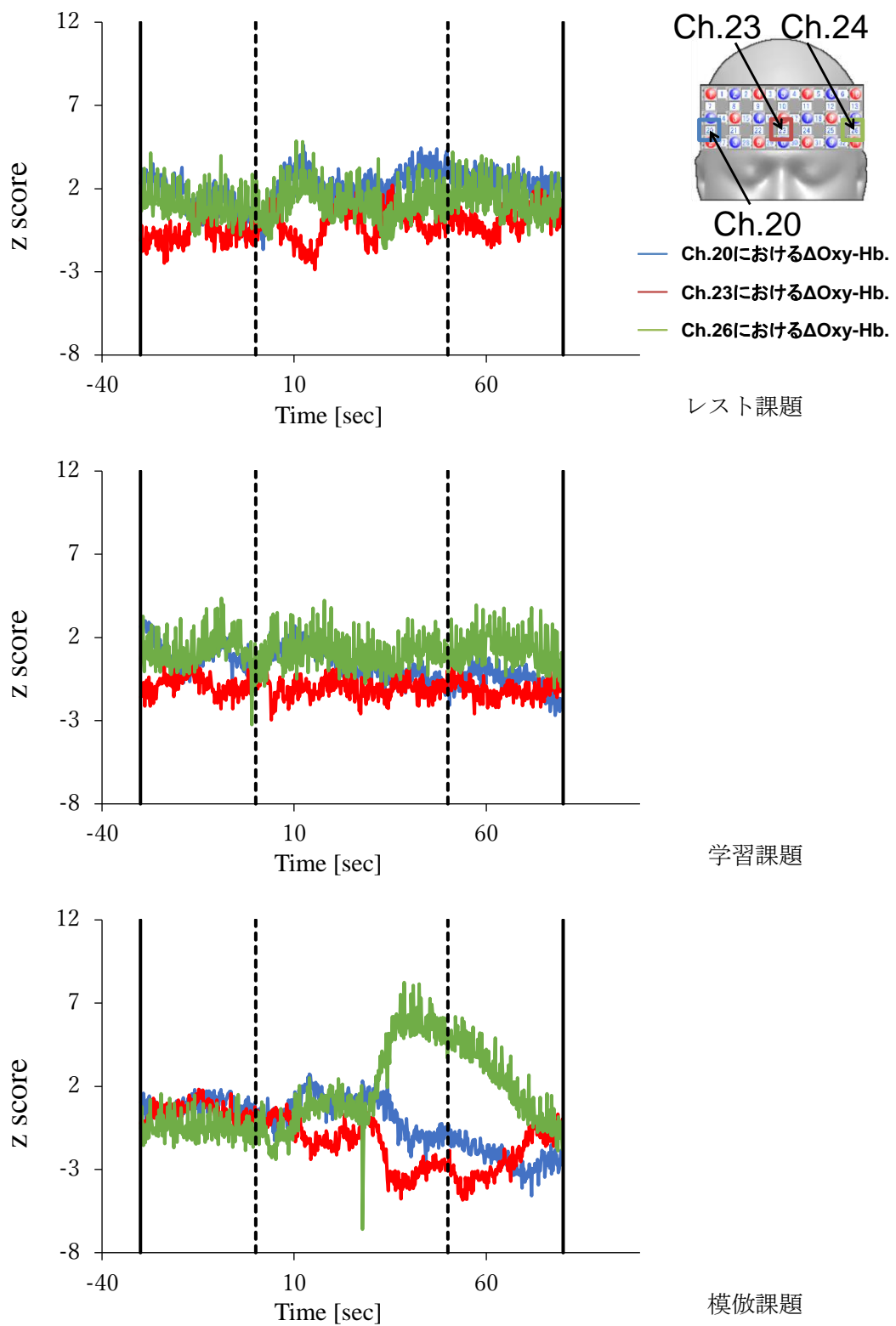


図 4.7 被験者 A 各課題における Ch.20, 23, 26 の Oxy-Hb 変化比較

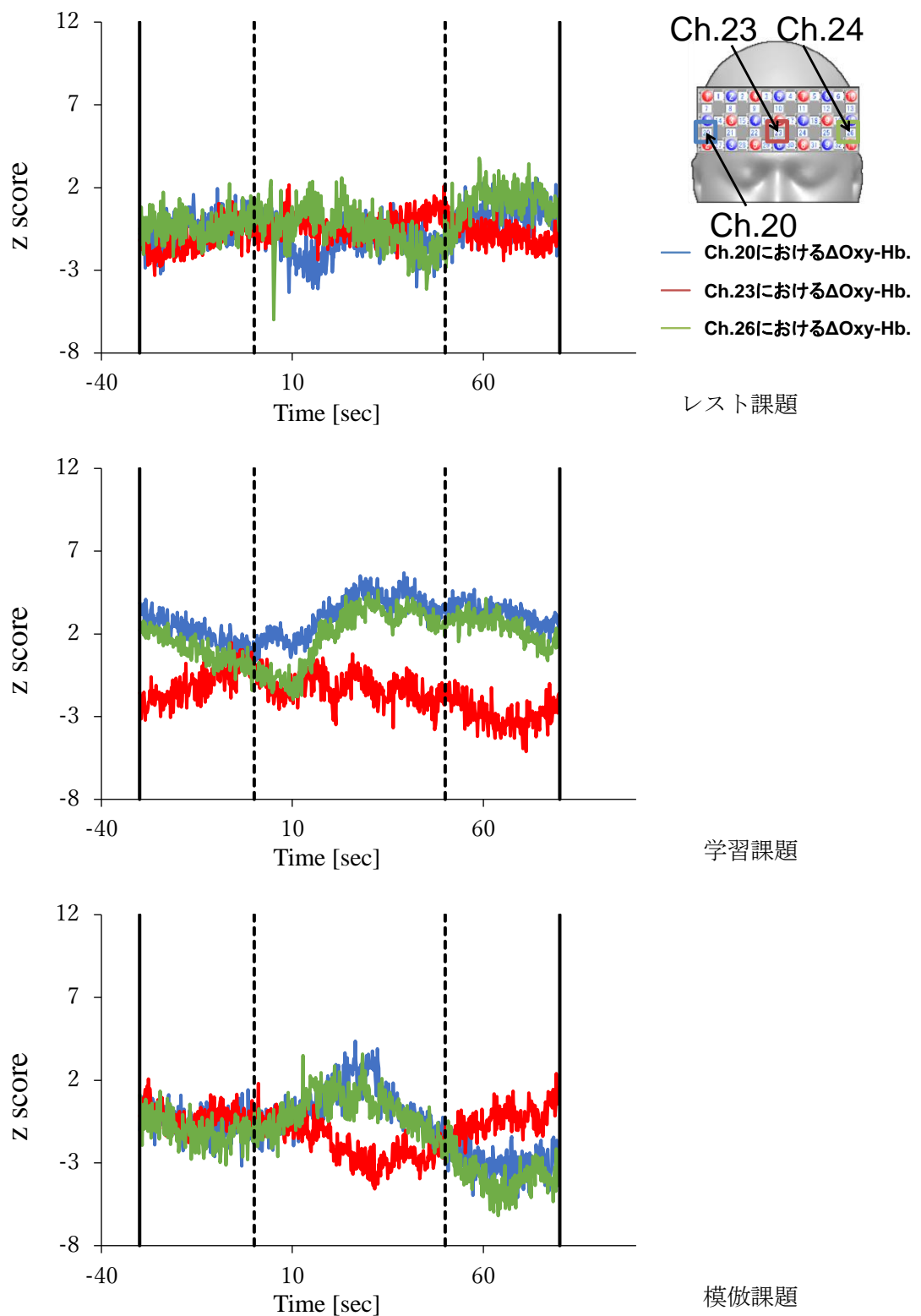


図 4.8 被験者 B 各課題における Ch.20, 23, 26 の Oxy-Hb 変化比較

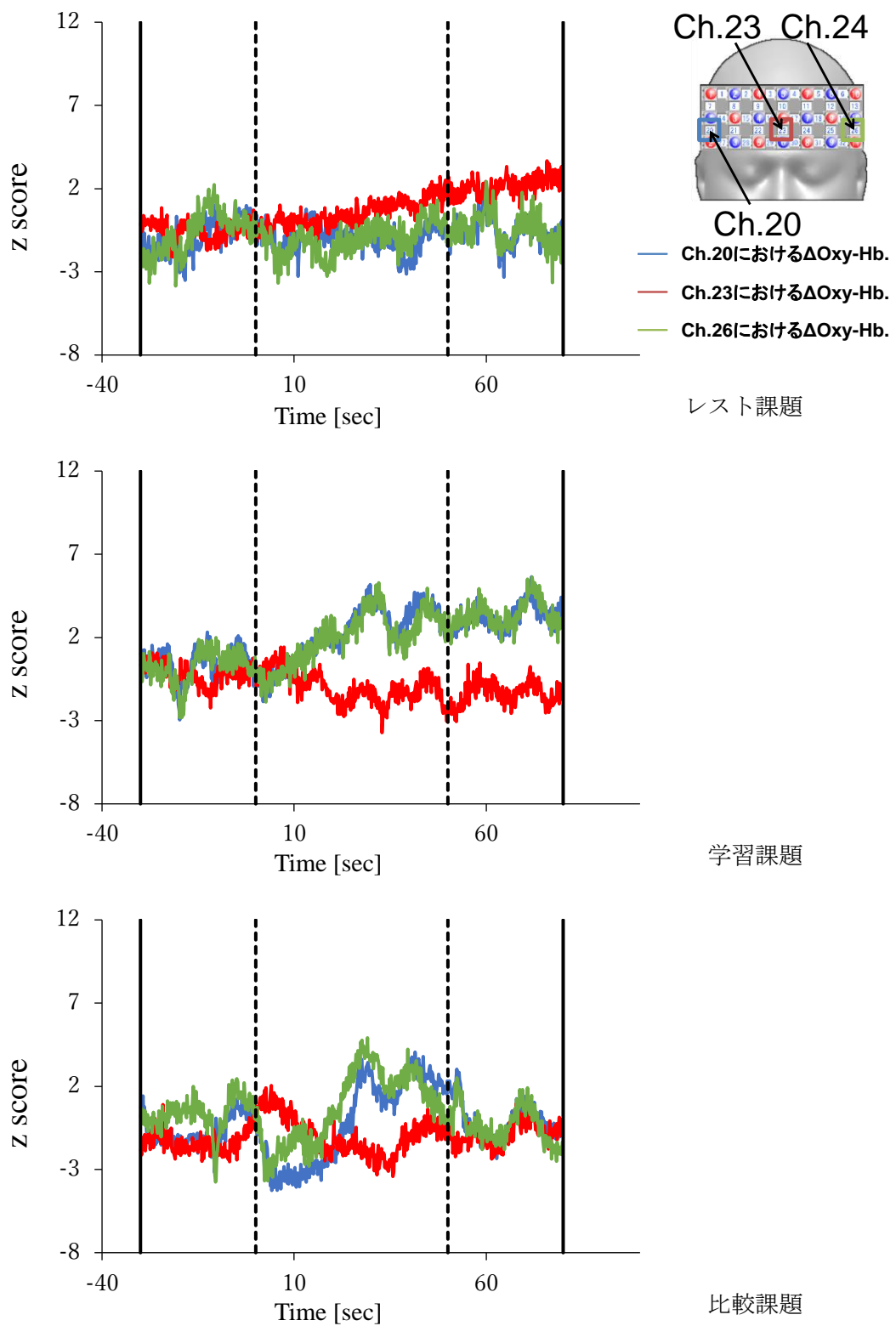


図 4.9 被験者 C 各課題における Ch.20, 23, 26 の Oxy-Hb 変化比較

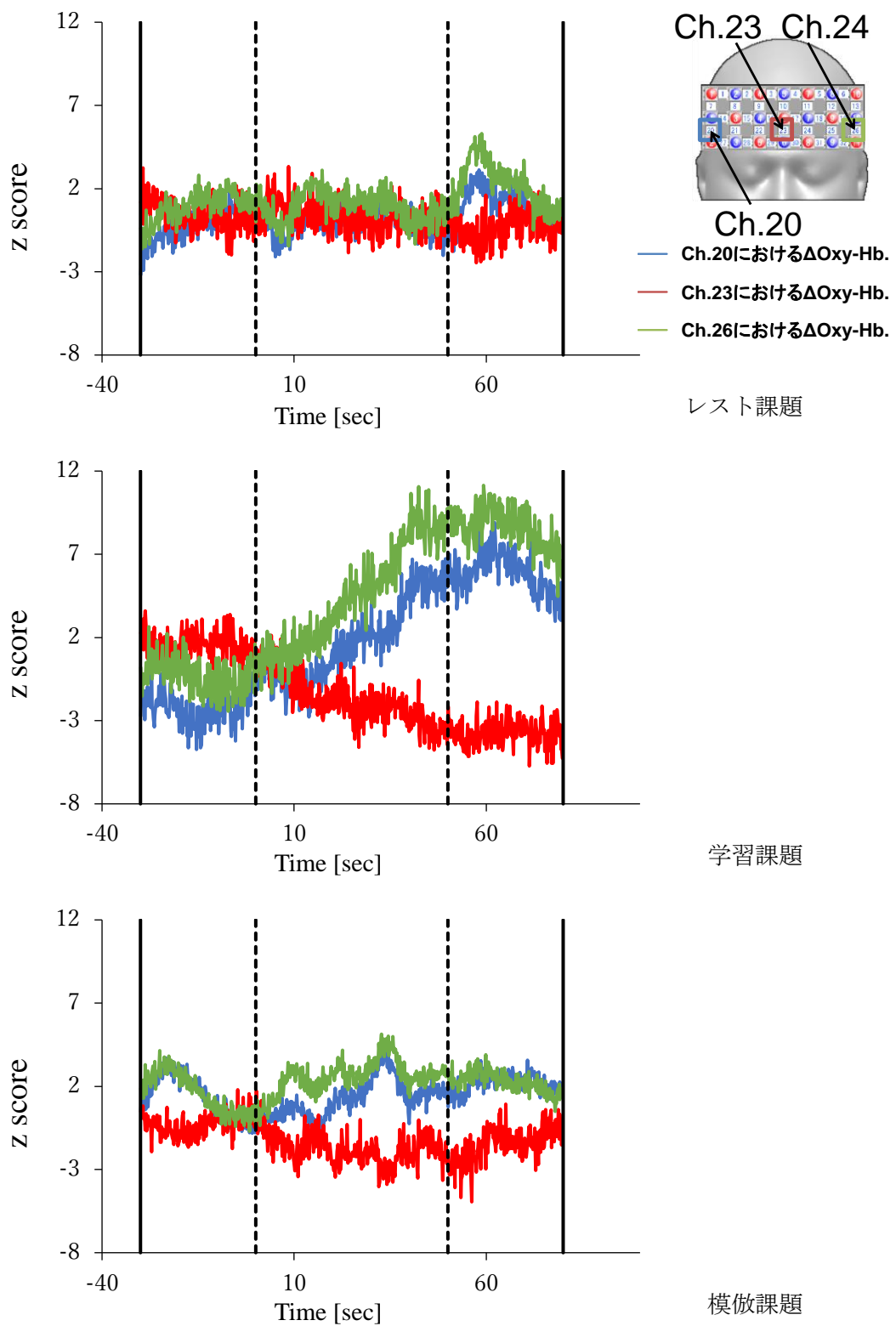


図 4.10 被験者 D 各課題における Ch.20, 23, 26 の Oxy-Hb 変化比較

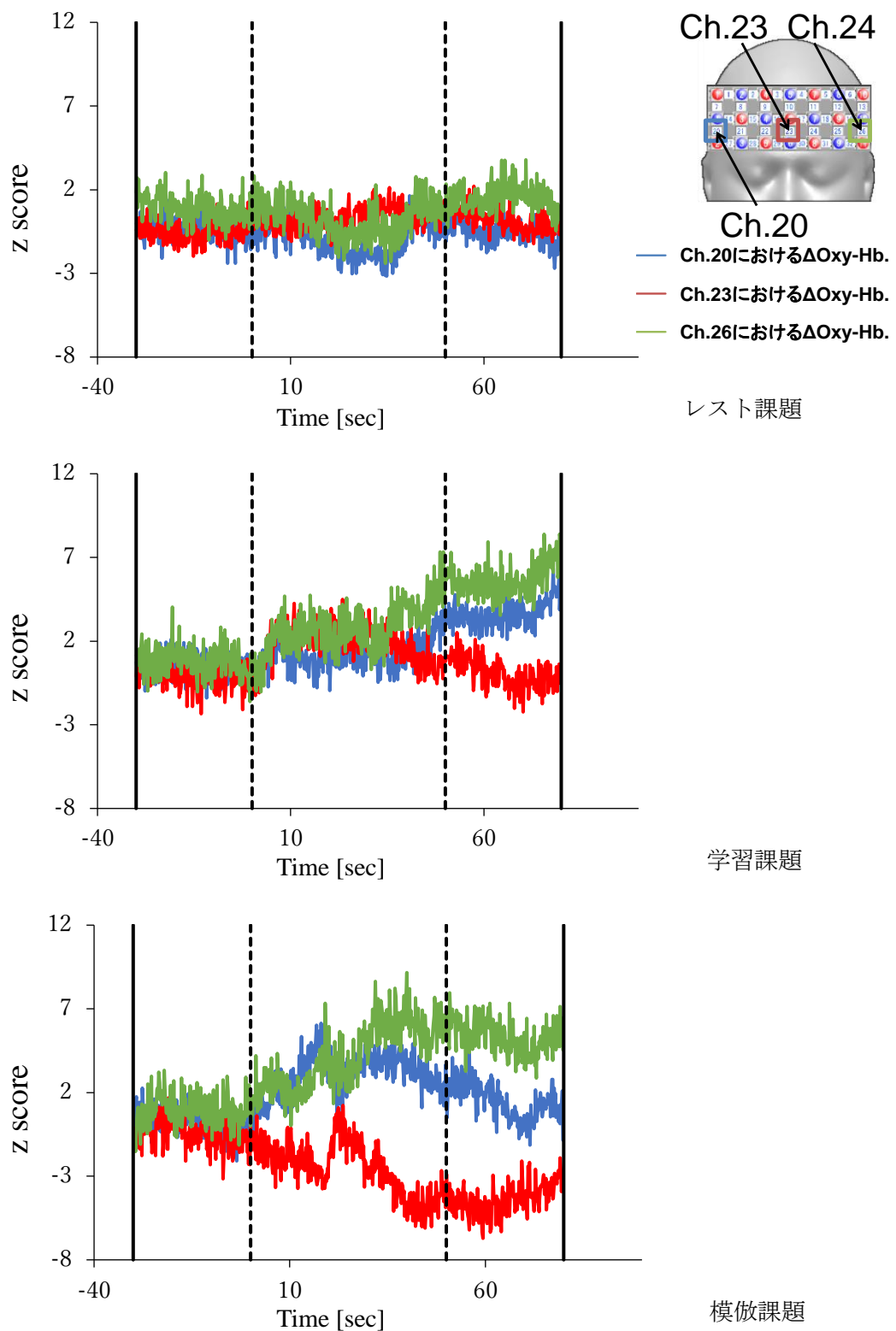


図 4.11 被験者 E 各課題における Ch.20,23,26 の Oxy-Hb 変化比較

4.5 動作学習における前頭葉の脳活動傾向

被験者それぞれについて、各課題時の Ch.20, Ch.23, Ch.26 における Oxy-Hb 変化を比較した。被験者 A を除くすべての被験者において、レスト課題においては Oxy-Hb 変化を示さず、学習課題と模倣課題においては Ch.23 (前頭前野内側部) で Oxy-Hb の低下傾向を、Ch.20 と Ch.26 (前頭前野の外側部) では Oxy-Hb の上昇傾向を示した。

次に、大域平均基準により補正した実験結果のマッピングを示す。大域平均基準において前頭前野の計測部を大域としている。そのため前頭前野全体のヘモグロビン変化はアーティファクトと見なされ、全体の平均により補正される。本実験結果においては被験者 E についてその大域平均による全体傾向の補正の影響が顕著である。補正前と比べるとヘモグロビンの変化傾向ではなく、全体の変化傾向とは異なる変化傾向を表示している、ということが分かる。

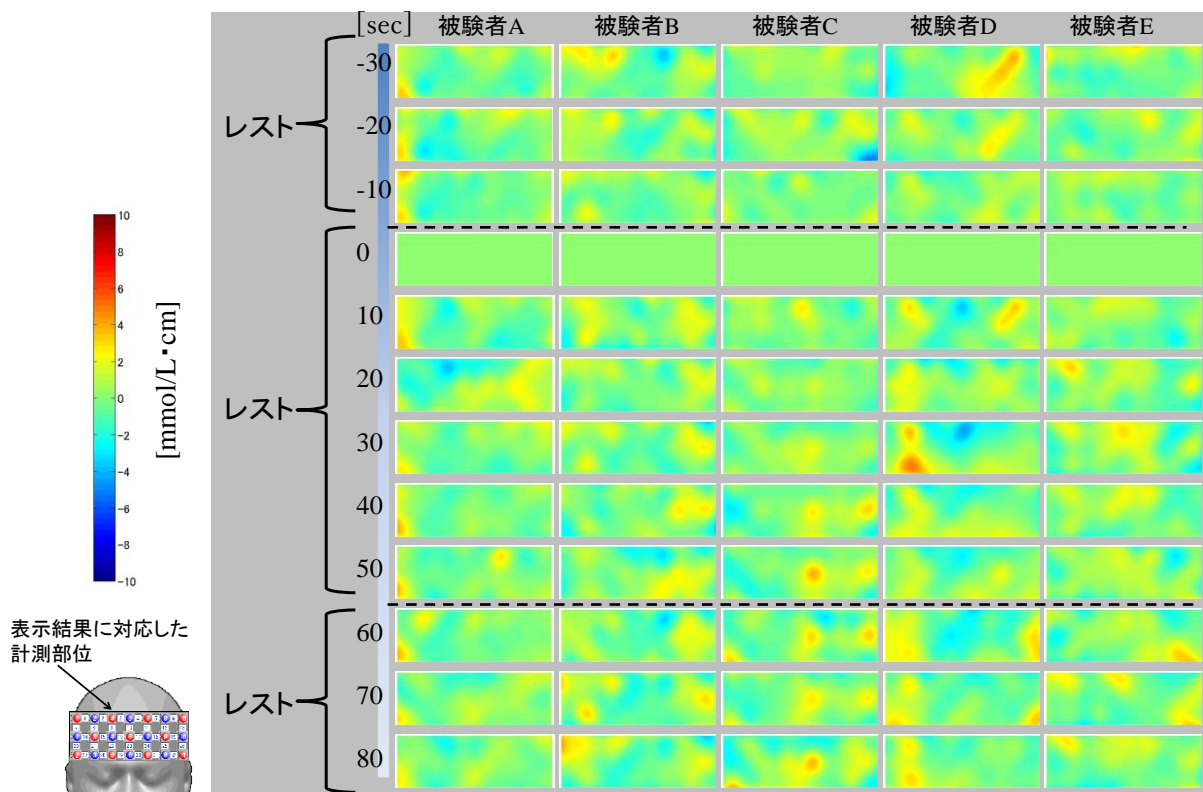


図 4.12 レスト課題 (1 試行目) における実験結果

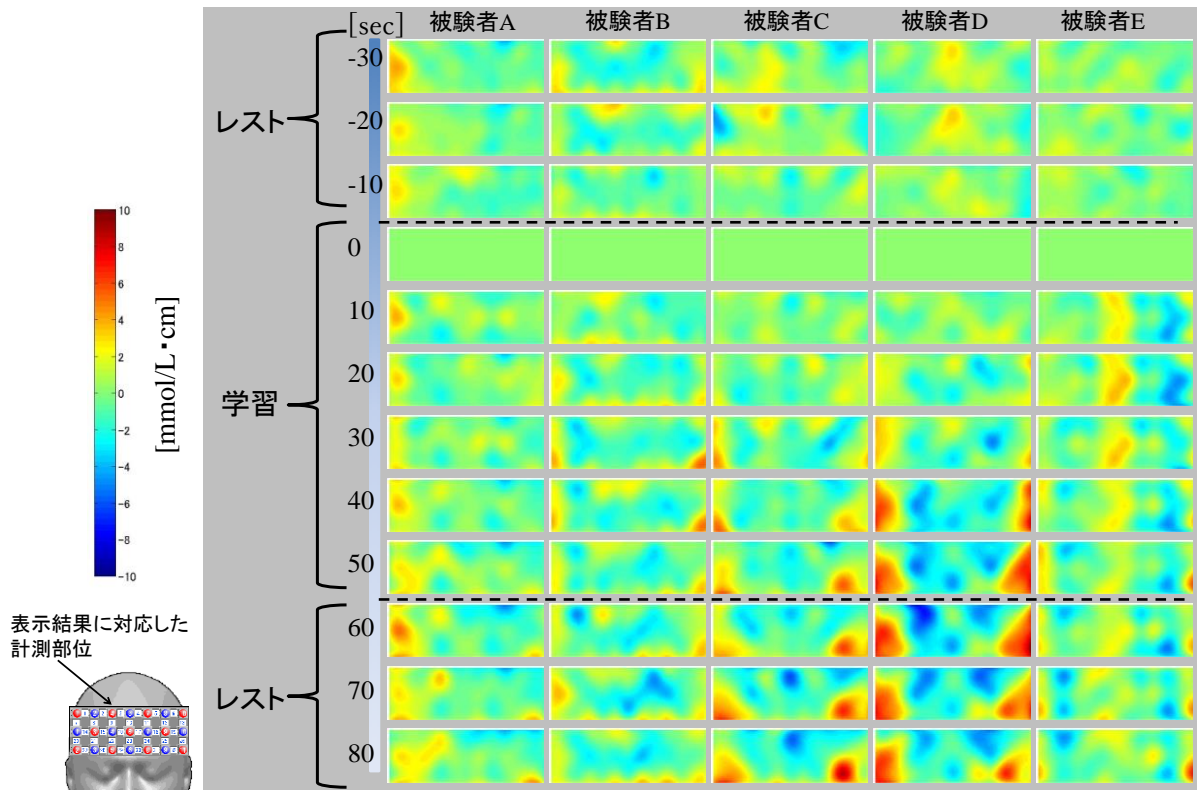


図 4.13 学習課題 (2 試行目) における実験結果

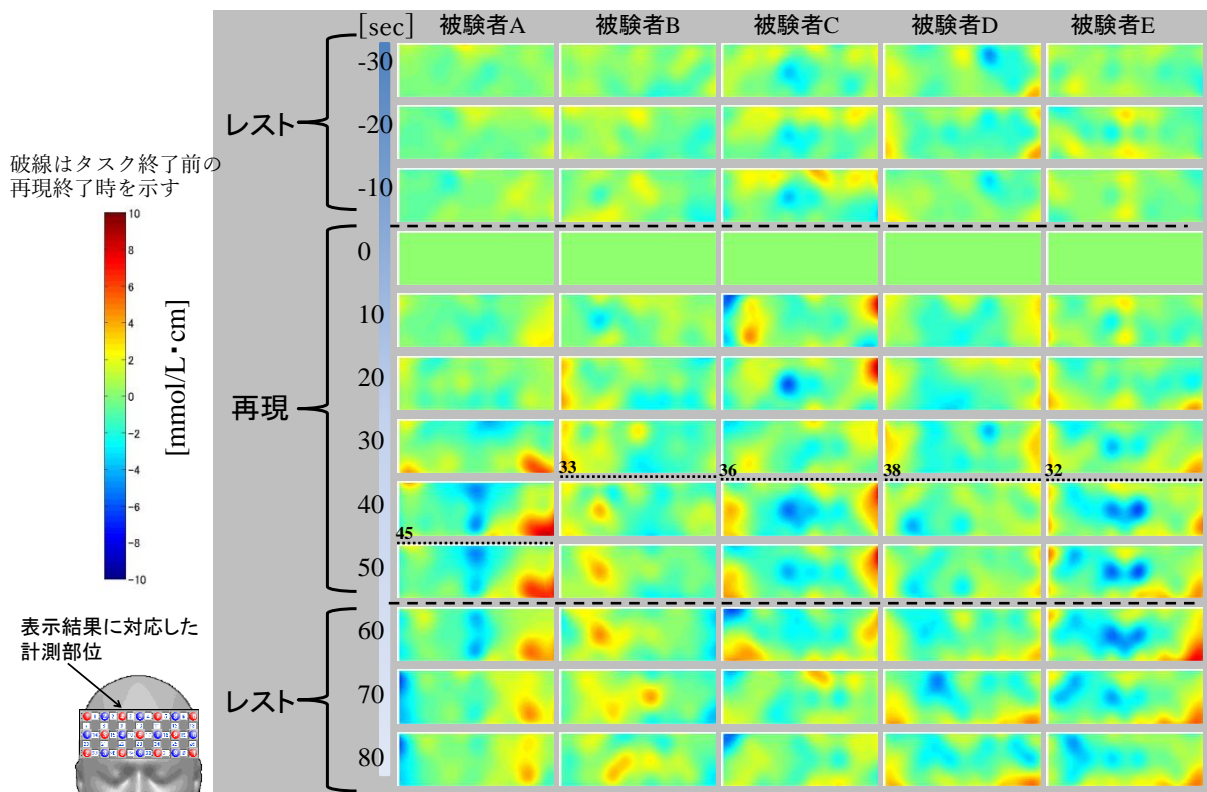


図 4.14 模倣課題 (3 試行目) における実験結果

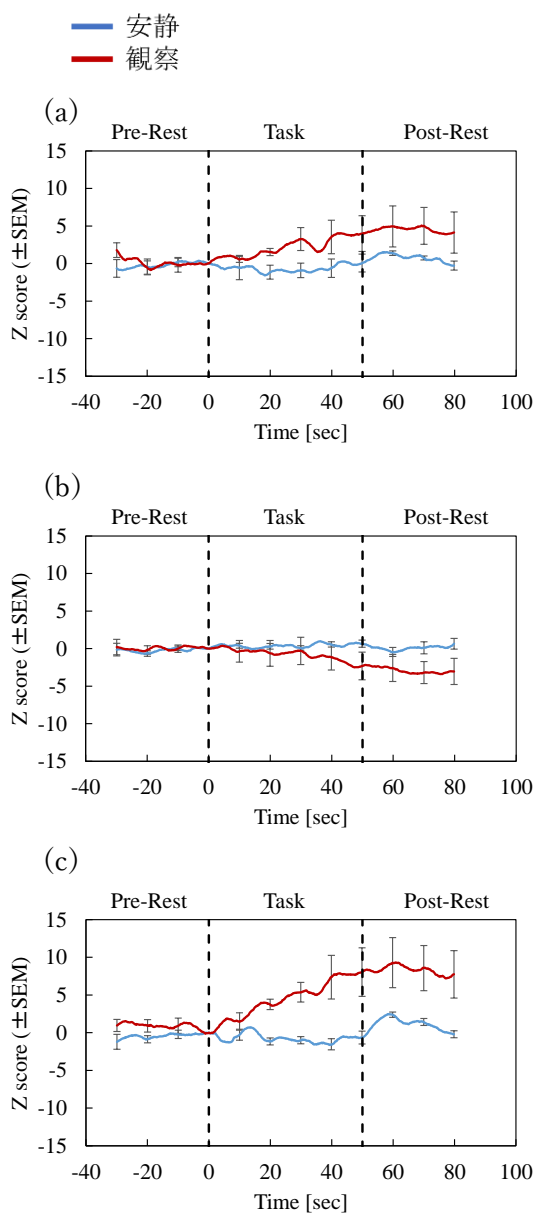


図 4.16 標準化した Oxy-Hb 変化の加算平均 (安静課題と観察課題の比較) (a) Channel 20 (F8) の Oxy-Hb の変化加算平均. (b) Channel 23 (Fpz) の Oxy-Hb の変化加算平均. (c) Channel 26 (F7) の Oxy-Hb の変化加算平均.

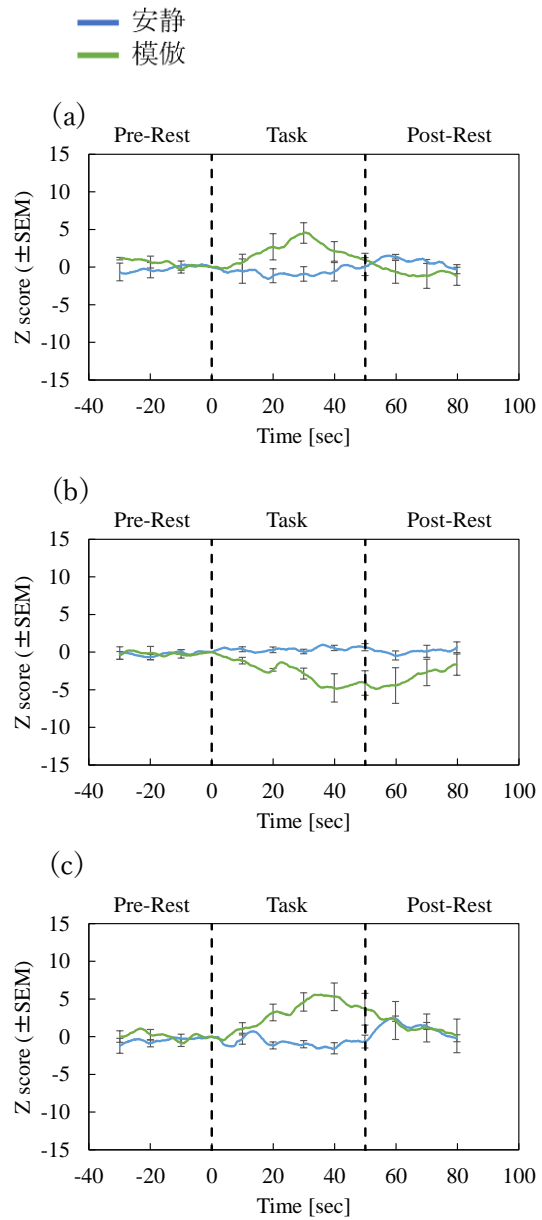


図 4.15 標準化した Oxy-Hb 変化の加算平均 (安静課題と模倣課題の比較) (a) Channel 20 (F8) の Oxy-Hb の変化加算平均. (b) Channel 23 (Fpz) の Oxy-Hb の変化加算平均. (c) Channel 26 (F7) の Oxy-Hb の変化加算平均.

4.6 動作学習実験の結言

本実験では、被験者に対して人物が単純な動作をする映像を呈示し、それを学習、模倣する際の被験者の脳活動をNIRSにより計測した。その結果、観察する際と模倣する際、外側前頭前野におけるOxy-Hbの上昇傾向、内側前頭前野におけるOxy-Hbの低下傾向が見られた。この結果を図 4.17 に示す。背外側前頭前野領域におけるワーキングメモリー機能との関連が示唆され、観察時と模倣時に賦活傾向を示したことから、ミラーニューロンとの関連が考えられる。また内側前頭前野領域が視覚情報から運動情報へと変換する脳機能と関連している可能性も示唆された。

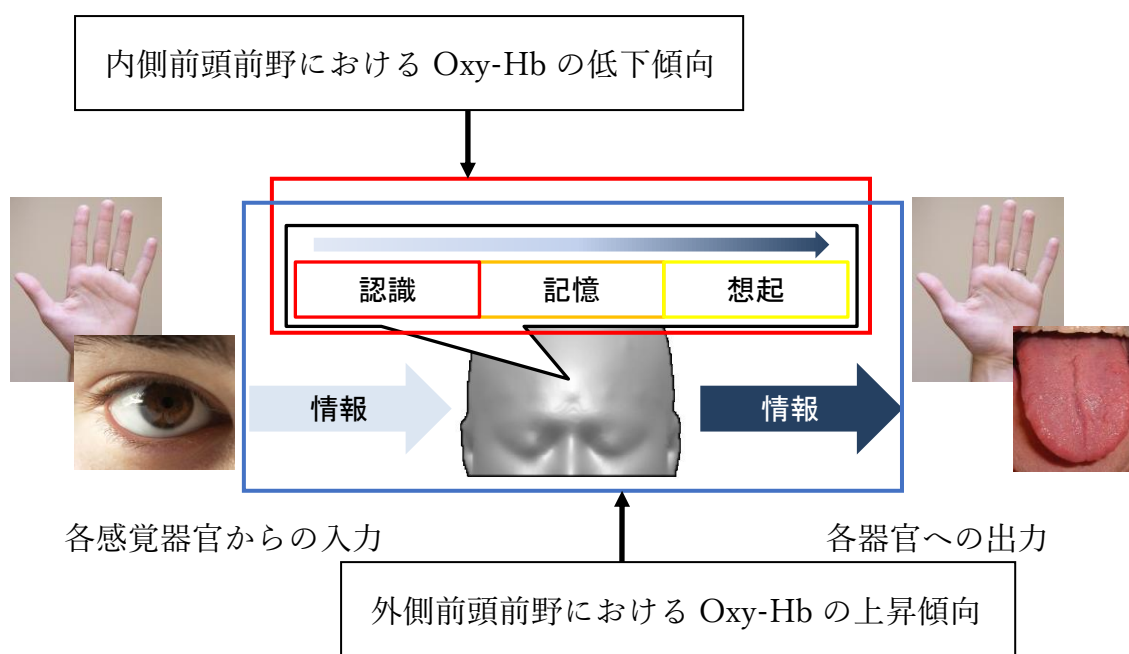


図 4.17 学習構造と実験結果との比較

4.7 4章の参考文献

- 甘利俊一, 田中啓治, 認識と行動の脳科学, 2008, 東京大学出版会.
- Iacoboni M., Woods, R., P., Brass, M., Bekkering, H., Mazziotta, J., C., Rizzolatti, G., Cortical Mechanisms of Human Imitation, Science, Vol.286, (24 December 1999), pp.2526-2528.
- Michael E. Hasselmo, Chantal E. Stern, Mechanisms underlying working memory for novel information, TRENDS in Cognitive Sciences, Vol.10, No.11 (2006), pp.487-493.
- 野澤孝之, 近藤敏之, NIRS 脳計測データのオンライン分析のためのアーティファクト除去手法の比較, 生体・生理工学シンポジウム論文集, (2009).
- Robert S. Blumenfeld, Charan Ranganath, Dorsolateral Prefrontal Cortex Promotes Long-Term Memory Formation through Its Role in Working Memory Organization, Neuroscience, Vol.26, January 18 (2006), pp.916-925.
- 嶋田総太郎, 開一夫, 自己身体イメージにおける遅延自己映像の影響 - NIRS を用いた脳活動計測 -, 信学技報, Vol.133, pp.31-36, (2003).

第5章 見まねによる動作学習実験における前頭葉，頭頂葉の脳機能計測

能計測

5.1 実験の目的

前頭前野における動作学習実験とは学習する動作，計測部位が異なる。

近赤外分光法による脳機能計測を利用して，被験者が動作を学習，模倣する際の脳活動を計測する。前章の動作学習実験と同様に，被験者は直立の姿勢で目の前のスクリーンに視線を固定する。そのスクリーン上に，人物が単純動作をする映像が呈示される。被験者はその動作を記憶し，その後，映像中の人物が行っていた動作と同様になるよう，被験者自身が動作を行う。

見まねによる運動の学習では，学習者は視覚から得た情報を自らの運動情報へと変換する必要がある。前章の実験では，ワーキングメモリーに焦点を当て，前頭前野を計測した。本実験では，前頭極，運動野及び視覚野の脳機能を計測することを目的とする。

5.2 実験デザイン

測定部位は図 5.1 のように前頭前野から頭頂連合野にかけての領域とする。前頭前野はブロードマンの分類により高次脳機能を担うことが知られている。視覚システムにおいては，背側路と腹側路の二つの経路があることが知られている。背側路は，位置や動き，速さといった空間についての情報を処理しており，頭頂連合皮質に出力される。また腹側路は，色，形状及びテクスチャーといった形態に関する情報を処理し，側頭連合皮質に出力する (Kandel et al., 2014; 甘利, 田中, 2008)。そこで前頭前野と背側皮質視覚路に着目し，動作を学習，模倣する際の脳活動を計測する。測定部におけるプローブの配置は 10-20 法に基づき，図 5.2 図に示すように Cz が基準である。また耳介前点と正中中心部を結ぶ直線を Cz ライン (Cz Line) と本稿では呼称し，考察の際に対応領域の参考とする。国際 10-20 法における C3, C4 は共に Cz Line 上に存在し，解剖学的部位として中心溝に対応する。

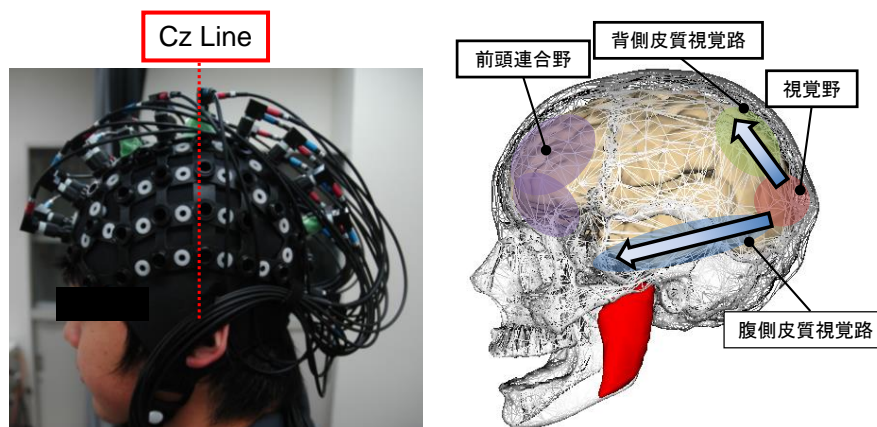


図 5.1 前頭前野，視覚野の位置

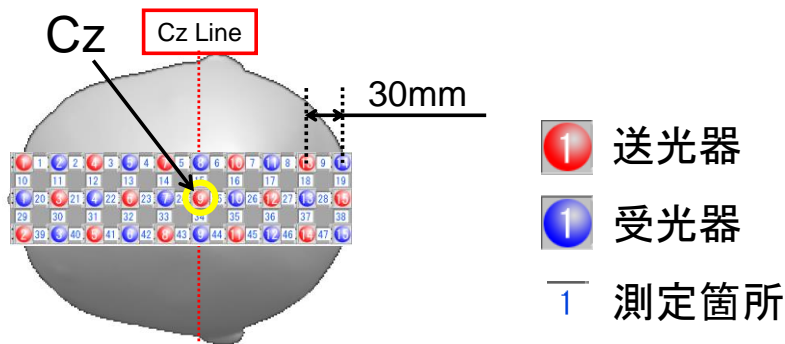


図 5.2 前頭葉及び頭頂葉計測実験におけるプローブ配置

前述の通り，前頭前野における動作学習実験とは，学習する動作が異なる。

図 5.3 に示すように，実験中において被験者は直立し，目の前のスクリーンをみる．被験者は健康な 20 代前半の男性 6 名である。

実験構成については，前頭前野における動作学習実験と同様である．実験 1 試行は，被験者が課題を実行する課題期間を 50sec とし，その前後に安静状態を保つ安静期間を各 30sec と設定する．本実験では各被験者に対して 3 回試行を行う．安静期間では，被験者は何も考えずにスクリーンに視線を固定する．スクリーンには図の 1 試行目に示すような，人物の直立した静止画を呈示する．1 試行目の課題期間では，スクリーン上の映像は切り替わらず，被験者は課題期間も通して安静状態を保つ．2 試行目の課題期間では，課題期間開始と同時に映像を切り替え，人物が単純動作を行う映像を呈示する．被験者はこの間この人物の動作を観察し，記憶する．3 試行目の課題期間では，課題期間開始と同時に被験者に口頭で指示をし，被験者は 2 試行目の課題期間に呈示された映像の人物と，同じ動作をする．3 試行目の課題期間では，1 試行目と同様にスクリーンの映像は切り替わらない．課題期間においても人物の直立した静止画を呈示する．被験者は課題期間中に，2 試行目で観察した動作を，自ら動作をすることで模倣する。

また，各試行における課題については，事前に被験者に説明する．ただし人物の動作内容については言及しない。

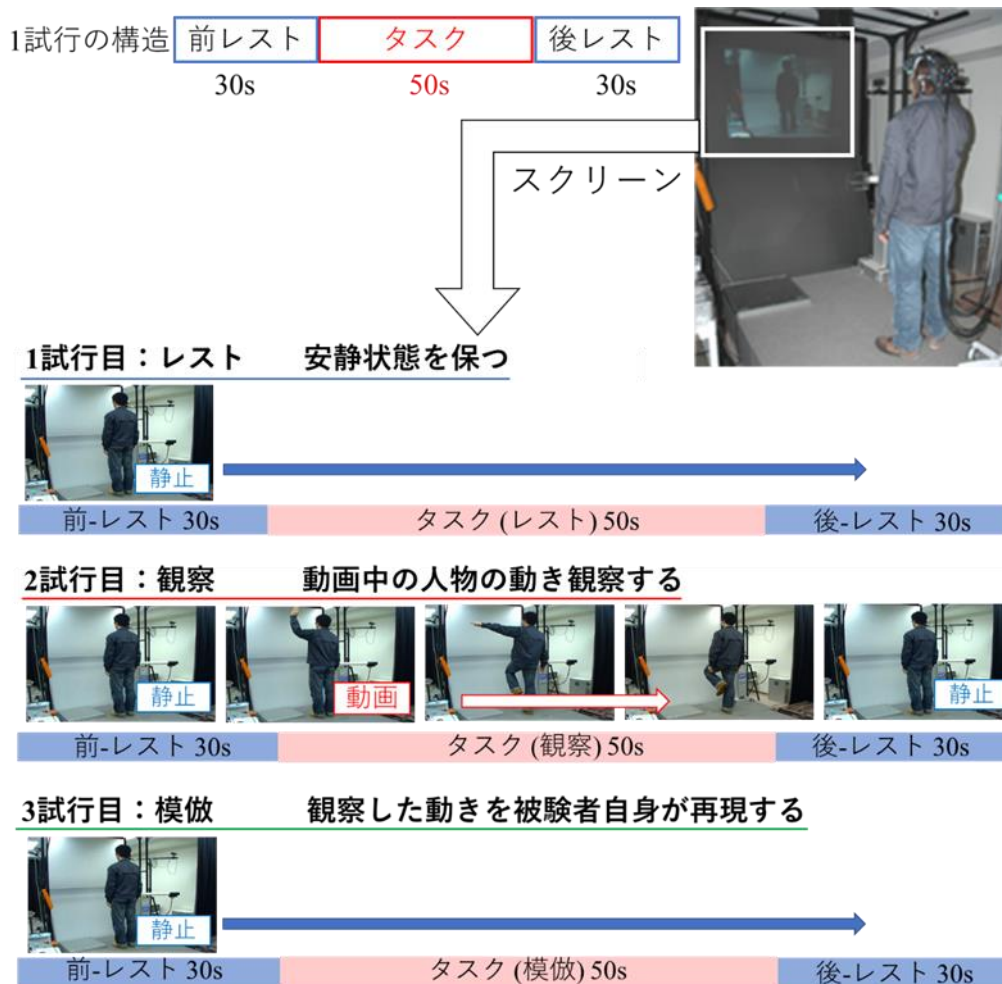


図 5.3 動作学習実験の前頭葉及び頭頂葉計測における実験デザイン 実験構造は、前頭前野における動作学習実験と同様であり、見まねを行う動作の内容は異なる。

5.3 実験結果

前頭葉，頭頂葉における Oxy-Hb 変化を以下の図に示す．カラースケールの単位は [mmol/L・cm] であり色調変化は Oxy-Hb 変化を表す．図中の縦軸はタスク開始時を基準とした時間[sec]であり，各マッピングは 10 秒間隔で提示している．

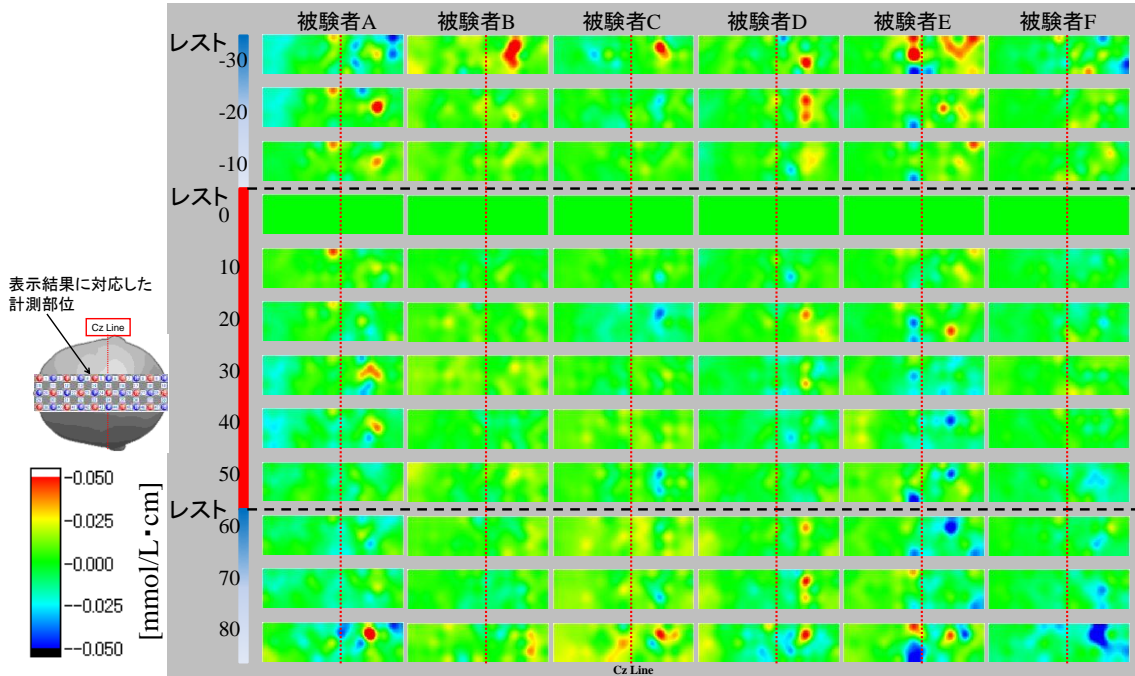


図 5.4 安静課題（1 試行目）における実験結果 赤い縦の破線は Cz Line を示す．

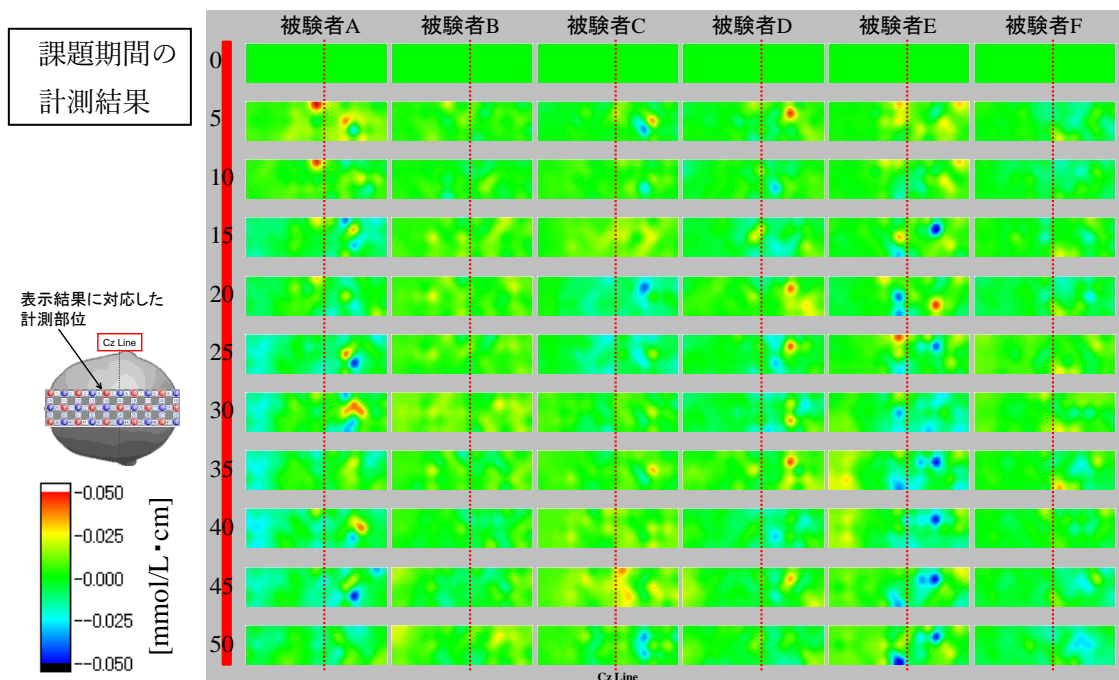


図 5.5 安静課題（1 試行目）の課題期間における計測結果 赤い縦の破線は Cz Line を示す．

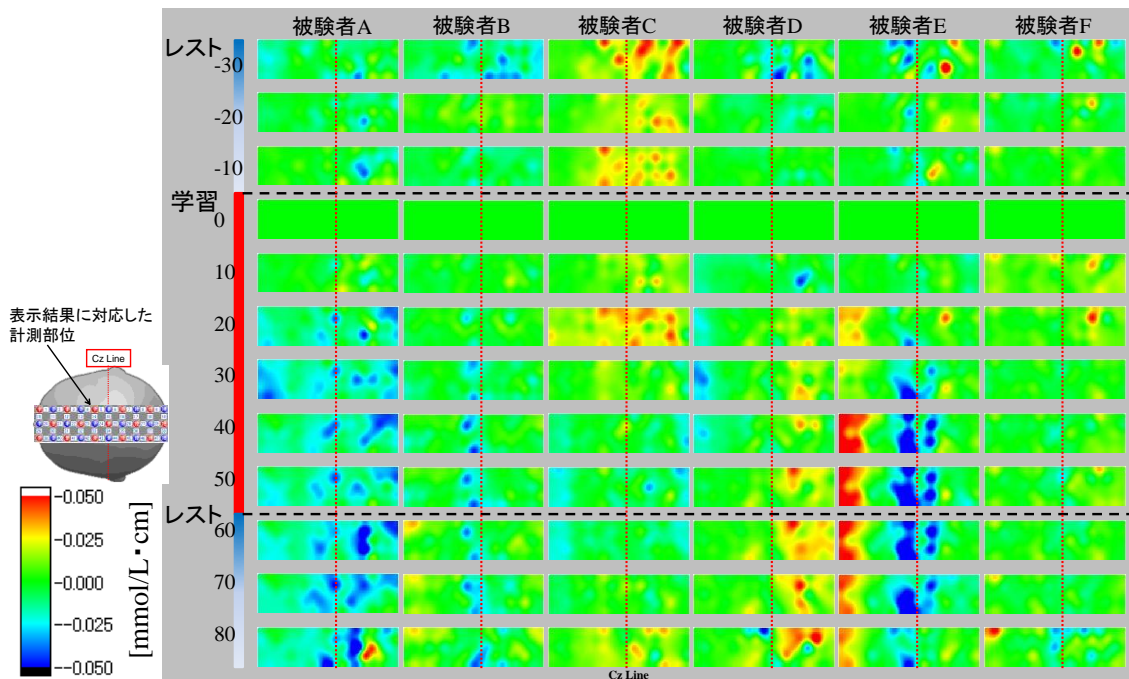


図 5.6 観察課題（2 試行目）における実験結果 赤い縦の破線は Cz Line を示す。

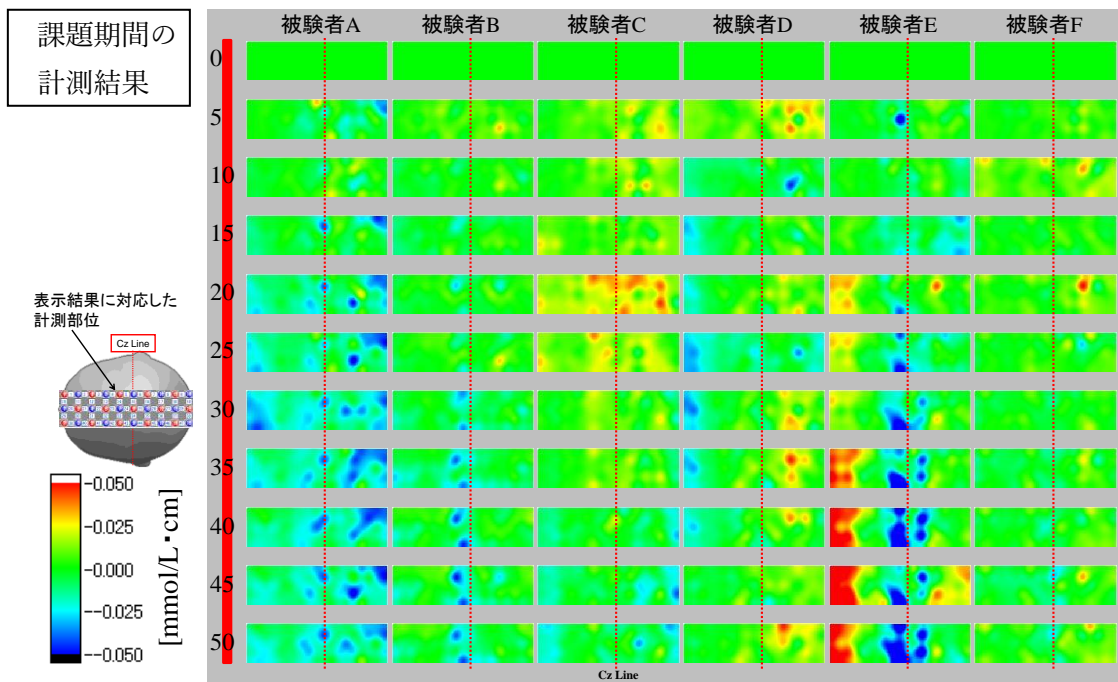


図 5.7 観察課題（2 試行目）の課題期間における計測結果 赤い縦の破線は Cz Line を示す。

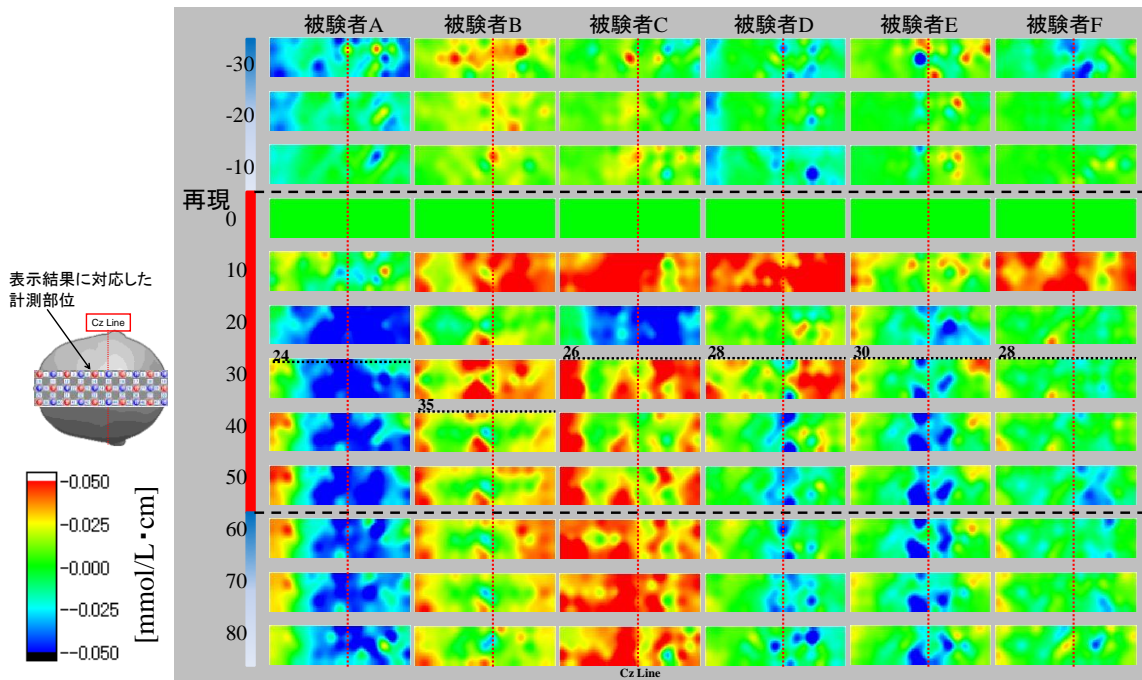


図 5.8 模倣課題（3 試行目）における実験結果 赤い縦の破線は Cz Line を示す。

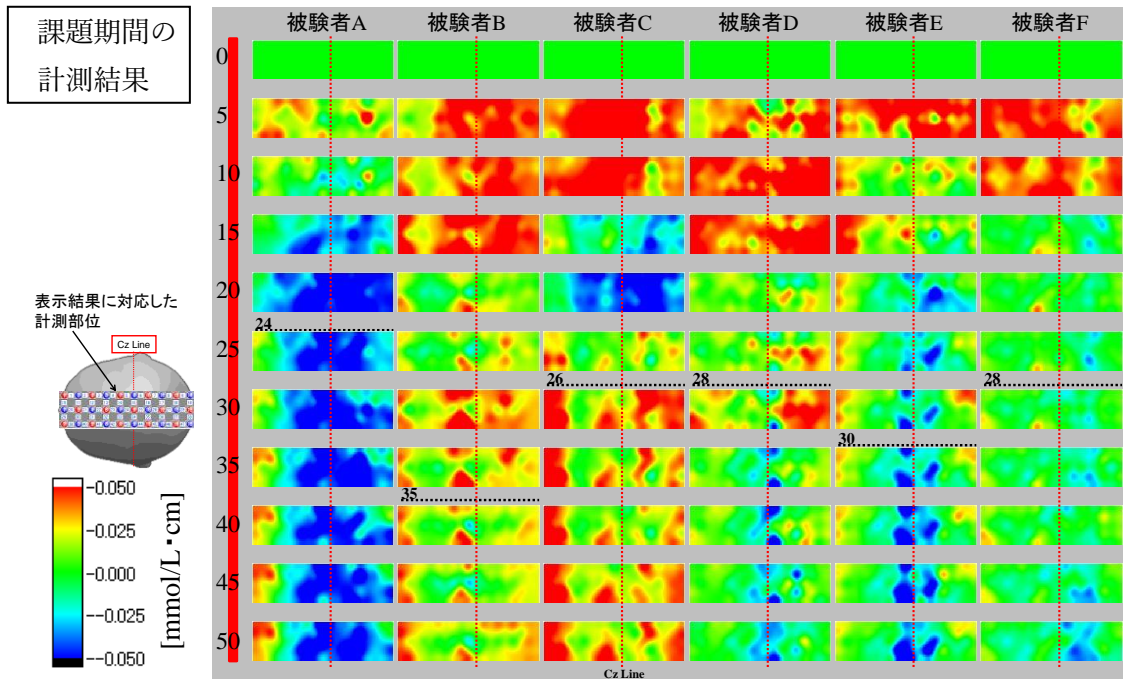


図 5.9 模倣課題（3 試行目）の課題期間における計測結果 赤い縦の破線は Cz Line を示す。

5.4 動作学習における前頭葉及び頭頂葉の脳活動傾向

1 試行目の安静状態を保つ課題においては、各被験者に共通する変化傾向がなく、どの被験者についても顕著な変化は見られない。2 試行目における映像中の人物の動作を記憶するという課題においては、被験者 E, F を除く被験者 4 名について、前頭前野における動作学習実験の時と同様に前頭前野内側部において Oxy-Hb の低下傾向が観察された。被験者 E, F では Oxy-Hb が上昇する傾向にある。3 試行目における動作を模倣する課題においては、課題開始時に計測部全域で Oxy-Hb 上昇が見られ、前頭前野内側部においては Oxy-Hb が再度上昇する傾向がある。

2 試行目の観察課題時における前頭前野内側部の Oxy-Hb の低下傾向について、これは前頭葉における動作学習実験と同様の傾向を示しており、視覚情報を運動情報に変換する際の自己身体イメージと前頭前野内側部における Oxy-Hb の低下傾向を示すこととの関連性を支持する結果であると考えられる（嶋田，開，2003）。しかし前頭前野を計測した動作学習実験とは異なり、模倣課題においてはこの傾向が見られない。この結果に関しては、視覚情報を運動情報に変換する Direct Matching Hypothesis に関連するものではなく、他人の身体操作を認識することに関連がある可能性を示唆している。

模倣課題における課題開始時の計測部全域での Oxy-Hb 上昇傾向は、体幹の変化による影響を考慮しなければならない。また、模倣課題中の前頭前野内側部における Oxy-Hb 上昇傾向は、前頭前野内側部で Oxy-Hb が低下傾向を示した前頭前野における動作学習実験の結果とは異なる。これらの違いは、学習する動作の違い、模倣課題ではいずれも身体操作（体幹変化）による血流変化の影響を受ける、といった要因が考えられる。C3, C4 は中心溝に対応するため本実験における Cz Line も中心溝近傍であると推測できる。中心溝の前部は運動皮質であり、後部は体性感覚皮質である。Cz Line 近傍の賦活は、被験者自身の動作によって起因したものであると考えられる。

以上から、観察時の前頭前野内側部における Oxy-Hb 低下傾向は再現性が得られ、Oxy-Hb 低下傾向と自己身体イメージとの関連が本実験においても支持された。

5.5 5章の参考文献

- 甘利俊一，田中啓治，認識と行動の脳科学，(2008)，pp.135-136, pp.137-138，東京大学出版会。
嶋田総太郎，開一夫，自己身体イメージにおける遅延自己映像の影響 - NIRS を用いた脳活動計測 -，信学技報，Vol.133，pp.31-36，(2003)。
Kandel, E. R., Schwartz J. H., Jessell T. M., Siegelbaum S. A., Judspeth A. J. 編，金澤一郎，宮下保司 日本語版監修，カンデル神経科学 (2014)，pp.1411-1412，メディカル・サイエンス・インターナショナル。

第6章 見まねによる作業学習実験

6.1 実験の目的

本研究では、見まねによる動作獲得程度を、脳賦活反応に基づいて評価することを目的としている。NIRSは低拘束性であり、被験者への負担も少ないため、継続的な実験が比較的容易である。そこで本実験では、製造業における見まね学習を想定し、二日間の組み立て作業を行う。見まね学習による作業習得前後の脳活動を計測し、計測部全体の脳賦活反応傾向と作業習熟との関連性を考察する。

6.2 実験デザイン

被験者は机の前の椅子に座り、机よりも前方に設置されたディスプレイを見つめる。実験は3試行で1組とする。1試行は30秒間の安静状態を保ち、実験課題を180秒間行い、再び30秒間の安静状態を保つ、という構造である。1試行目の実験課題では、安静状態を保つ課題（安静課題）であり、被験者は1試行目の全体を通して安静状態を保つ。この安静課題は、他の課題における脳賦活反応と比較する目的で設定する。2試行目はディスプレイに表示された作業の見本となる映像を観察する課題（観察課題）である。課題開始後の5秒間は、被験者に指示をする映像を呈示し、課題終了前の5秒間は、課題終了を伝える映像を5秒間呈示する。3試行目では、実験開始前に、机の上に2試行目の映像で呈示した組み立て作業の部品を設置する。課題開始後の5秒は、2試行目と同様に被験者への指示が映像で呈示される。被験者は2試行目で観察した作業と同じ作業を見本と同様の手順に則り、再現をする課題（模倣課題）を行う。課題終了5秒前には、被験者に終了を伝える映像を呈示すると同時に、ブザーによって合図を行う。実験前には被験者に実験構成の説明と、実験中に見本として呈示される映像により、作業手順を覚えるように指示をする。実験の構成を図6.2に、実験における組立作業の内容を、図6.1に示す。

実験1日目の終了後、被験者は2試行目の課題と、3試行目の課題を再度行う。2日目の実験前には、2試行目の課題と3試行目の課題を2回連続で行い、その後に実験を行う。表6.1に、練習を含めた被験者の行う課題の全体を示す。

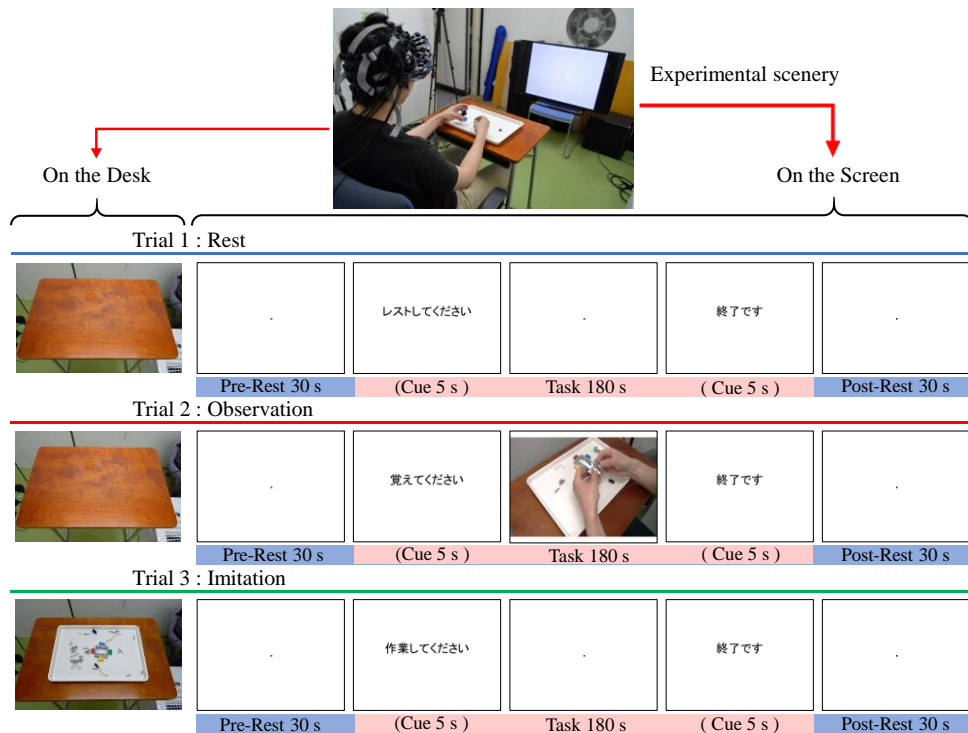


図 6.2 見まねによる作業学習実験の実験デザイン 実験は 3 つの試行から構成される。最初は安静課題であり、2 回目は観察課題、3 回目は模倣課題である。安静課題では、被験者は安静状態を保ち続ける。観察課題では、タスク期間に映像が提示される。被験者はこの映像中の組み立て作業を観察して覚える。模倣課題においては、観察課題で覚えた組立作業を、実際に再現する。

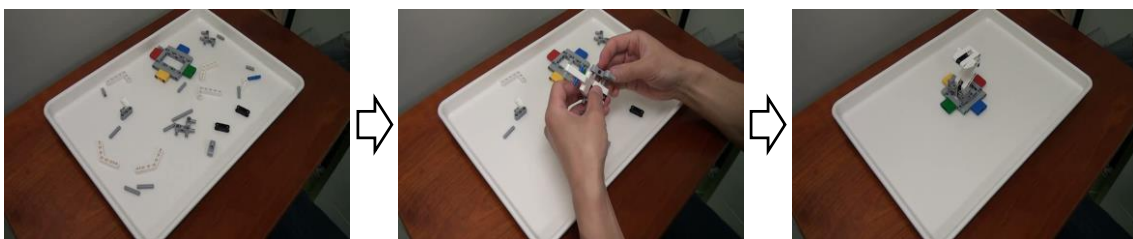


図 6.3 実験における組立作業内容 被験者は、無作為に置かれた組み立て部品を、観察した見本の手順に従って、時間以内に組み立てる。本実験では、相手の意図やアフォーダンスを理解することではなく、作業の過程を真似ることを重視した実験であるため、完成品は左右非対称であり、形や機構に特別な意味を成さないものを選定した。

表 6.1 実験スケジュール 表の数字は被験者の課題実行回数を示す。

	実験 1 日		実験 2 日目	
	NIRS 計測	計測後の練習	計測前の練習	NIRS 計測
1 試行目 安静課題	1	-	-	1
2 試行目 観察課題	1	1	2	1
3 試行目 模倣課題	1	1	2	1

6.3 被験者及び計測部位

被験者は 20 代の男性 5 名（被験者 A, B, C, D, E であり，平均年齢 22.2 ± 1.2 歳）である。全員右利きであり，実験当日は健康状態に問題のないことを事前に確認した。実験は 2 日間行う。見まね学習による作業習得前に計測を行い，後日，作業内容の習得後に再び計測を行う。サルを用いた実験では背外側前頭前野でワーキングメモリ機能との関与が示されている（甘利，田中，2008）。また，被験者が後に思い出せた単語を学んでいるときには，左下前頭前皮質の一部において脳活動が高まったことが示唆されている（Wagner et al., 1998）。そのため，脳賦活反応の計測部位は前頭前野とした。図 6.4 のように測定位置のチャンネル（Ch.）は，国際 10-20 法に基づいて Fpz：前頭極に対応するように設置する。

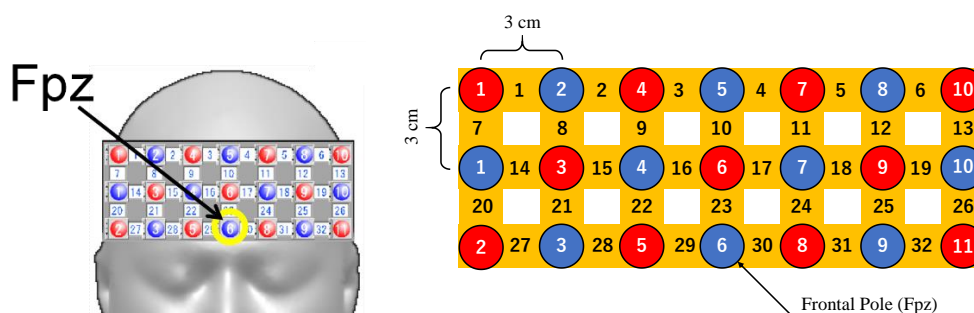


図 6.4 見まねによる作業学習実験のプロブ配置図 赤い円は送光プローブ，青い円は受光プローブである。黄色で示したプローブ間は計測チャンネルを，数字はその番号を示す。6 番の受光プローブは国際 10-20 法の Fpz の位置に対応する。

6.4 組み立て作業の習熟度の評価

本実験においては，見まねによる作業習得前後の脳活動を計測する。2 回の実験において，被験者は 1 回目の実験後と 2 回目の実験前に，同様の作業内容について見まね学習を行う。実験時の模倣課題における習熟程度の評価は，加算方式により行う。見本として提示した作業内容について，手順を 12 の過程に分割し，その過程に沿って被験者が作業を行ってい

ば、点数を加算する。作業手順を遡った場合には、分割された過程において正しく作業を行っていても、加点はしないものとする。評価は11点満点となる。組立作業における部品については、形状及び色の左右非対称は区別する。本実験においては、模倣課題の習熟度がこの点数で示される。

この習熟度によって実験結果を分類し、習熟度の低い条件の脳賦活反応と、習熟度の高い条件の脳賦活反応において、別の傾向が見られるのか解析する。脳賦活反応において別々の傾向が見られるのであれば、より高度で複雑な作業習得についても、脳賦活反応によって、習熟度を評価できる可能性が考えられる。

6.5 被験者の習熟度の変化

表 6.2 に被験者の実験初日と練習後の2回目の実験における、見本となる動作手順との比較に基づいた、習熟度の評価結果を示す。初日の実験においては、0点から2点であったのに対し、練習を経験した2回目の実験においては、10点という結果になった。初見で観察した作業を模倣した際には再現できなかった作業が、練習後には作業作業に習熟したことが分かる。

表 6.2 模倣課題実行結果についての正確性評価

被験者	実験日程	実行された手順 (数字は実行された手順番号を示す)											評価得点	
A	1日目	1	4	2	-	-	-	-	-	-	-	-	1	
	2日目	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	-	10
B	1日目	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
	2日目	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	-	10
C	1日目	1	4	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
	2日目	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	5	12	10
D	1日目	1	2	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
	2日目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	-	10
E	1日目	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
	2日目	1	2	3	4	5	6	7	8	10	9	11	12	10

6.6 習熟度による脳賦活反応傾向の変化について計測域全体の傾向

本実験では安静課題、観察課題及び模倣課題を行った。安静課題は他の課題と比較する目的で設定した。しかし本論文においては計測域全体の脳賦活反応に着目するため、局所的な計測チャンネルにおける各課題の脳賦活反応傾向の比較を行わない。したがって、安静課題は解析対象から除外することとした。また脳賦活反応には個人差があり、より厳密な傾向を分析するためには、被験者を増やすこと、また実験データの蓄積が必要であると考えられる。

本稿2章で述べた通り、認知心理学者である Alan Baddeley は、短期記憶の一種としてワーキングメモリーを提唱した。Baddeley が提案したワーキングメモリーのモデルでは、言語を推測、理解するためにリハーサルを伴って音韻情報を一時的に保持する音韻ループと、視空間的情報を操作や保持を行う視空間的スケッチパッド、そしてこれら二つを統合したり調整したりするエピソードバッファの三つの要素が存在し、これらのサブシステムをメインの中央実行系というシステムが調整している (Baddeley, 2000)。長期記憶は、短期記憶から選択的に変換されることが知られており、見まね学習によって作業習熟するに伴い、ワーキングメモリーにおける視空間的スケッチパッドの活動は低下し、長期記憶の想起機能の役割が増加すると考えられる。また、ワーキングメモリーの視空間的サブシステムは、対象の物体情報と空間的情報という二つの要素から成るという見解があり、サルを用いた実験では、物体情報に関する神経は腹外側前頭前野に多く、空間的情報に関する神経は背外側前頭前皮質に多い (Rainer, et al., 1998; Kandel 他, 2014)。したがって組立作業の見まね学習を行う本実験においては、外側前頭前野の賦活傾向が重要であると考えられる。

図 6.5 に各実験の観察課題及び模倣課題における Oxy-Hb の t-map を示す。また図 6.6 に各実験の観察課題及び模倣課題における Deoxy-Hb の t-map を、図 6.7 に総ヘモグロビン (Total-Hb) の t-map を示す。先行研究では、Oxy-Hb が局所脳血流と関連し、脳の賦活を最も反映するとされている (Hoshi et al., 2001)。また Oxy-Hb は MRI の BOLD 信号と相関性があることが示されており (Okamoto et al., 2004)、Oxy-Hb について考察を行う。解剖学的位置と計測チャンネルの対応付けは、NIRS-SPM により推定を行った。

作業習熟前の観察課題においては、背外側前頭前野に賦活傾向が見られ、前頭極を含む前頭前野の広範囲において賦活は見られない。背外側前頭前野が賦活するという結果は先行研究と一致し、被験者が視空間的情報の操作及び保持を行っていたことが示唆される。作業習熟後においては、習熟前と比較して、前頭極の一部である Ch.10 近傍を除いて、計測チャンネル全体で賦活傾向を示している。被験者は、表 1 の通り実験前にも同様の課題を行っており、表 2 の通り習熟後は高い精度で作業を再現していた。実験後のアンケートにおいて、手順を正確に記憶できたか、実験後のアンケートにおいて、手順を正確に記憶できたか、という問いに対して、1 が悪い評価で 5 が良い評価という 5 段階で評価したところ、被験者 4 人は 5、被験者 1 人は 4 の評価であった。このことから被験者は作業習熟に自覚的であり、見まね学習時は映像に対して習熟前に比べて注視していなかったと推測できる。したがって、広範囲な賦活傾向はデフォルトモードネットワークによる影響である可能性が考えら

れる。デフォルトモードネットワークは、個人が外部環境に集中していない時に優先的に活動が高まる脳のネットワークであり、自己の記憶検索や未来の想像、他者の視点を考えるといった、内的に焦点を当てた課題を行っているときに活性化される。中心となる領域は、内側前頭前野、前部帯状皮質、膨大後部皮質、下頭頂葉、外側側頭葉など広範囲に及ぶ (Buckner, et al., 2008)。したがって、習熟後の観察課題における前頭極の広範囲な脳賦活傾向は、被験者が既に内容を把握しており観察に集中しなくなったこと、また被験者がこれまでの学習で得た情報の確認や、模倣課題を想像するなど、自身の内的な思考を行ったことによる影響であると考えられる。

模倣課題の作業習熟前では、左背外側前頭前野の一部である Ch.5 近傍に局所的な賦活傾向が見られる。この賦活傾向も先行研究と同様に、ワーキングメモリーによる記憶の保持に関わる賦活と考えられる。また習熟前の模倣課題において実際に作業を正確に再現することのできた被験者はおらず、被験者は実際の作業を行うために組立部品に注意を向けているが、保持した記憶による動作の再現には対応できていないという状況が想定される。デフォルトモードネットワークの影響よりも、外部環境へ集中していることにより、局所的な賦活であった可能性が考えられる。これに対して、作業習熟後では背外側前頭前野において賦活傾向が見られ、前頭極および下前頭回の一部においても局所的な賦活傾向が見られた。既に作業手順を理解している被験者は、ワーキングメモリーにより、視空間的情報の保持と操作、そしてこれまでの作業の記憶をエピソードバッファにより想起するといった状況が推察される。また実際に被験者が作業を行うため、作業のために視空間的情報の保持及び操作も必要となる。模倣課題では、作業に習熟するほどワーキングメモリーの機能が必要となり、背外側前頭前野において賦活傾向を示したと考えられる。

ワーキングメモリーでより深く情報処理をした方が、前頭前野外側部や側頭葉内側部において強い賦活が見られ、長期記憶の成績が良いという先行研究の結果が報告されている (甘利, 田中, 2008; Blumenfeld, Ranganath, 2007)。また、見まね学習ではワーキングメモリーの視空間的スケッチパッドが重要であり、本実験においても背外側前頭前野が賦活傾向を示した。作業習熟後の観察課題においては、背外側前頭前野を含めた、広範囲な賦活傾向が見られた。脳賦活傾向と作業習熟を考察する上では、賦活の範囲だけではなく、賦活強度についても考慮する必要があると考えられる。

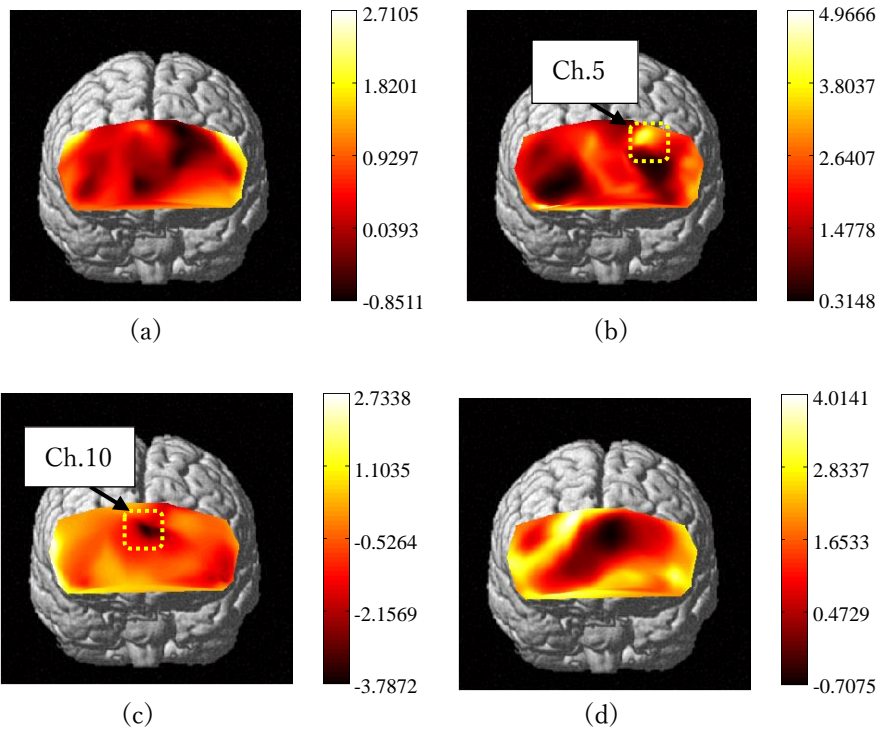


図 6.5 観察課題及び模倣課題における Oxy-Hb の t マップ (a)習熟前の観察課題. (b)習熟前の模倣課題. (c)習熟後の観察課題. (d)習熟後の模倣課題.

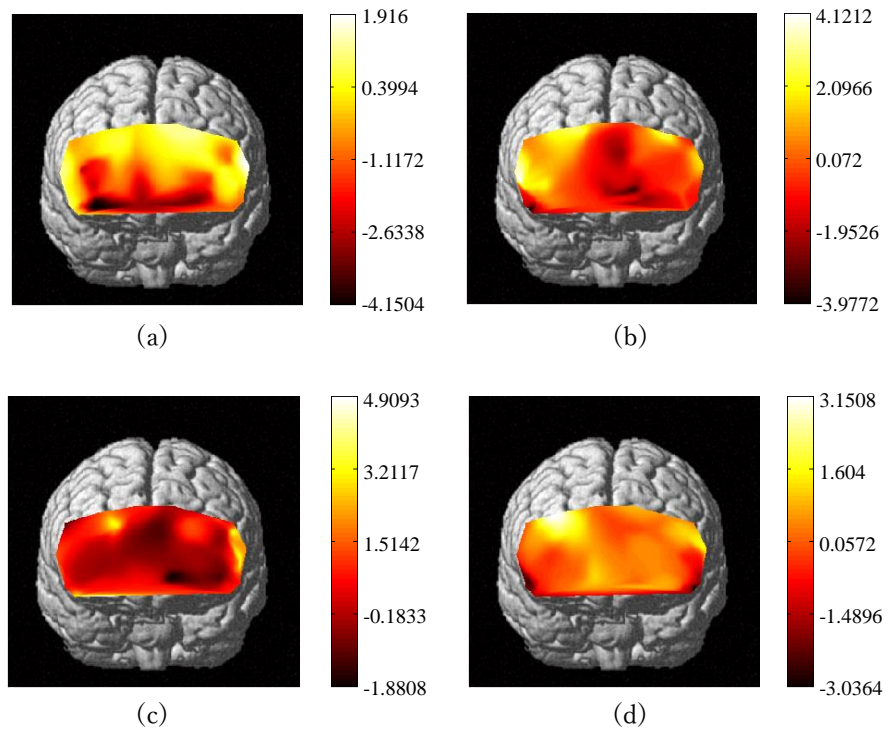


図 6.6 観察課題及び模倣課題における Deoxy-Hb の t マップ (a)習熟前の観察課題. (b)習熟前の模倣課題. (c)習熟後の観察課題. (d)習熟後の模倣課題.

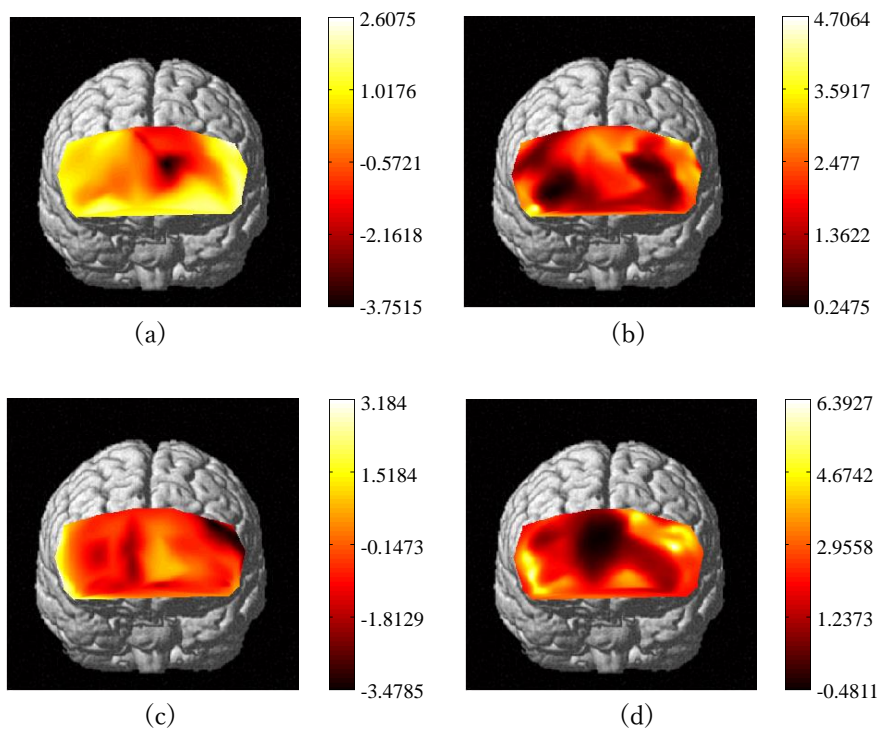


図 6.7 観察課題及び模倣課題における Total-Hb の t マップ (a)習熟前の観察課題. (b)習熟前の模倣課題. (c)習熟後の観察課題. (d)習熟後の模倣課題.

6.7 動作再現性と脳賦活反応における関係性の局所的な考察

図 6.8 に実験 1 日目の安静課題と観察課題を比較した Oxy-Hb の計測結果を示す。観察課題について、Channel 26 (F7) , Channel 20 (F8) においては上昇傾向が見られ、Channel 23 (Fpz) においては下降傾向が示された。図 6.9 は実験 2 日目における Oxy-Hb 計測結果である。練習前の結果と比較すると F7, F8 の上昇傾向および Fpz の低下傾向は緩和している。また、練習前の観察課題における結果に比べ、練習後の結果においては標準誤差が縮小した。作業に習熟することで、各被験者における脳賦活反応が、一定の傾向に集約する傾向があることが示された。

図 6.10 に実験 1 日目の安静課題と模倣課題を比較した Oxy-Hb の計測結果を示す。Fpz, F7, F8 においては、安静課題と類似した傾向であり、その差異は見られない。図 6.11 は実験 2 日目における Oxy-Hb 計測結果である。F7 においては安静課題と比べて上昇を示している。また F8 においては上昇傾向を示し、Fpz においては、下降傾向を示している。練習前と比較すると、F7, F8 は習熟することで上昇傾向となり、Fpz においては下降傾向となることを示している。練習後では 2 試行目の観察課題において提示された情報を、被験者が練習前に比べて豊富に保有しており、このような傾向の変遷は、記憶した情報を引き出す脳機能と、それを実行する作業に関連した反応であると推察できる。模倣課題においては被験者が実際に作業を行うため、動作の想起、組立部品の認知など身体知の要素が、複合的に脳活動へ影響することが考えられる。随意運動を含まない観察課題に対し、模倣課題における結果は身体知の複合的な要素も含めた結果であると捉える必要がある。

図に示す通り、練習前と練習後の結果について t 検定を試みた。安静課題と観察課題および模倣課題をそれぞれ比較した。練習前の安静課題と観察課題における結果では、両外側部において有意差および有意な傾向が示された。練習後では、両外側部と内側部において、有意差および有意な傾向を示した。これは図に示す通り、練習により各被験者における Oxy-Hb の標準誤差が変化した影響であると考えられる。見まね学習においては、学習を繰り返すことで Oxy-Hb はある一定の値に収束する可能性が示された。安静課題と実行課題における結果では、練習を行うことで実行課題の傾向が変化し、練習後では両外側部と内側部において有意差および有意な傾向を示している。

練習前と練習後を比較し、組立作業の再現性は上昇し、見まね学習は効果を示している。身体知獲得の過程を手続き記憶の獲得に限定した場合、初期段階においては観察および記憶における F7, F8 の Oxy-Hb が上昇傾向を示し、Fpz の Oxy-Hb は下降傾向を示す。記憶する情報が減少するにつれて傾向は緩和する。初期段階における手続きの模倣では、Fpz, F7, F8 の Oxy-Hb は課題に依存した変化傾向を示さず、模倣する情報が増加するにつれて F7, F8 の Oxy-Hb が上昇傾向を示し、Fpz の Oxy-Hb は下降傾向を示す。3 章における単純動作の学習および再現を行う実験においては、記憶する手続きが 1 度観察することで覚えられ程度の情報であり、1 回の実験において観察課題で Oxy-Hb が F7, F8 で上昇傾向を、Fpz

で下降傾向を示し、模倣課題においても Oxy-Hb が F7, F8 で上昇傾向を、Fpz で下降傾向を示したと考えられる。

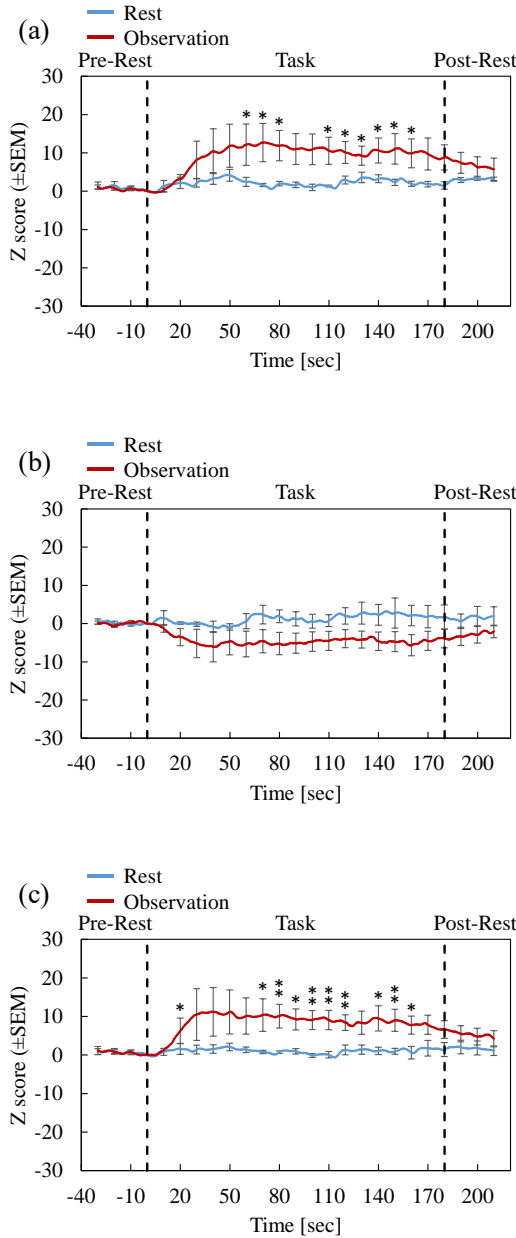


図 6.8 標準化した Oxy-Hb 変化の加算平均（実験 1 日目における安静課題と観察課題の比較） (a) Channel 20 (F8) の Oxy-Hb の変化加算平均. (b) Channel 23 (Fpz) の Oxy-Hb の変化加算平均. (c) Channel 26 (F7) の Oxy-Hb の変化加算平均. (* $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$)

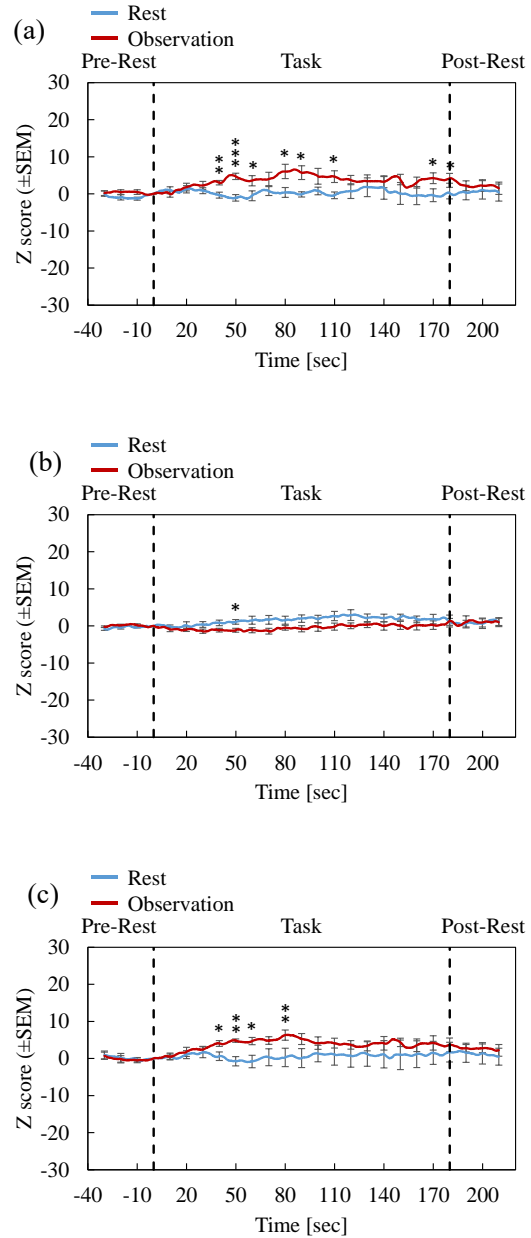


図 6.9 標準化した Oxy-Hb 変化の加算平均（実験 2 日目における安静課題と観察課題の比較） (a) Channel 20 (F8) の Oxy-Hb の変化加算平均. (b) Channel 23 (Fpz) の Oxy-Hb の変化加算平均. (c) Channel 26 (F7) の Oxy-Hb の変化加算平均. (* $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$)

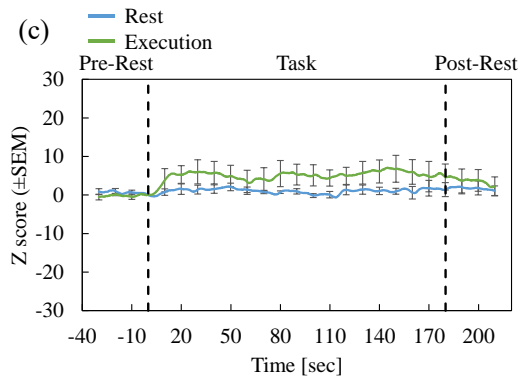
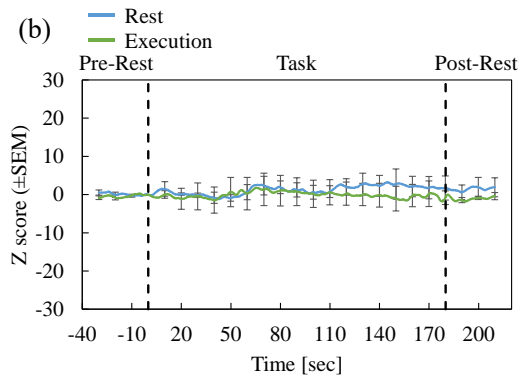
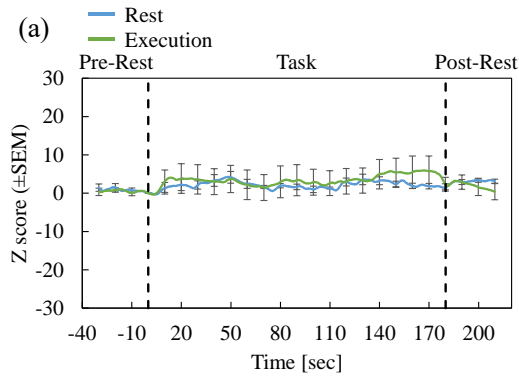


図 6.10 標準化した Oxy-Hb 変化の加算平均 (実験 1 日目における安静課題と模倣課題の比較) (a) Channel 20 (F8) の Oxy-Hb の変化加算平均. (b) Channel 23 (Fpz) の Oxy-Hb の変化加算平均. (c) Channel 26 (F7) の Oxy-Hb の変化加算平均. (* $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$)

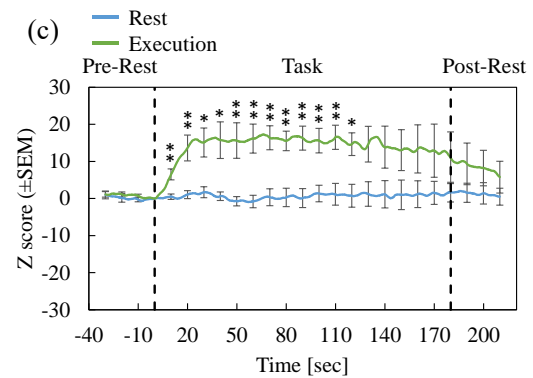
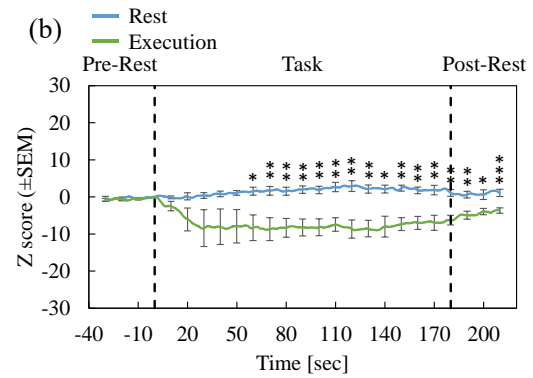
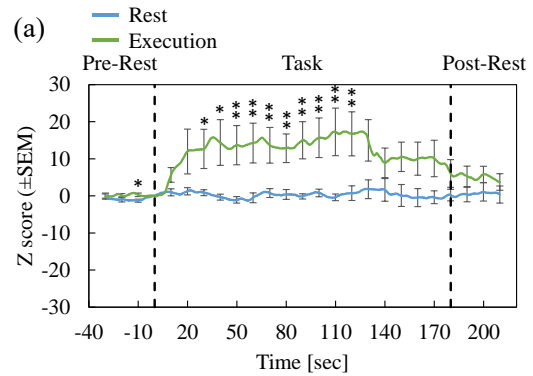


図 6.11 標準化した Oxy-Hb 変化の加算平均 (実験 2 日目における安静課題と模倣課題の比較) (a) Channel 20 (F8) の Oxy-Hb の変化加算平均. (b) Channel 23 (Fpz) の Oxy-Hb の変化加算平均. (c) Channel 26 (F7) の Oxy-Hb の変化加算平均. (* $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$)

さらに、ノイズの除去方法を大域平均基準から変更し、多重解像度解析により行った。元信号を分解し、ノイズとみなした波長成分を除去した様子を図 6.12 に示す。0.4 - 1.6 秒周期の変動は、測定装置のノイズと心拍による影響、1.6 - 6.6 秒周期の変動は呼吸による影響、6.6 - 13.1 秒の変動は血圧変動や体温調整などの生体のゆらぎに由来するものと考え、除去した (柳沢他, 2012)。その後、信号を再構成して標準化し、安静課題である 1 試行目との比較を行った。

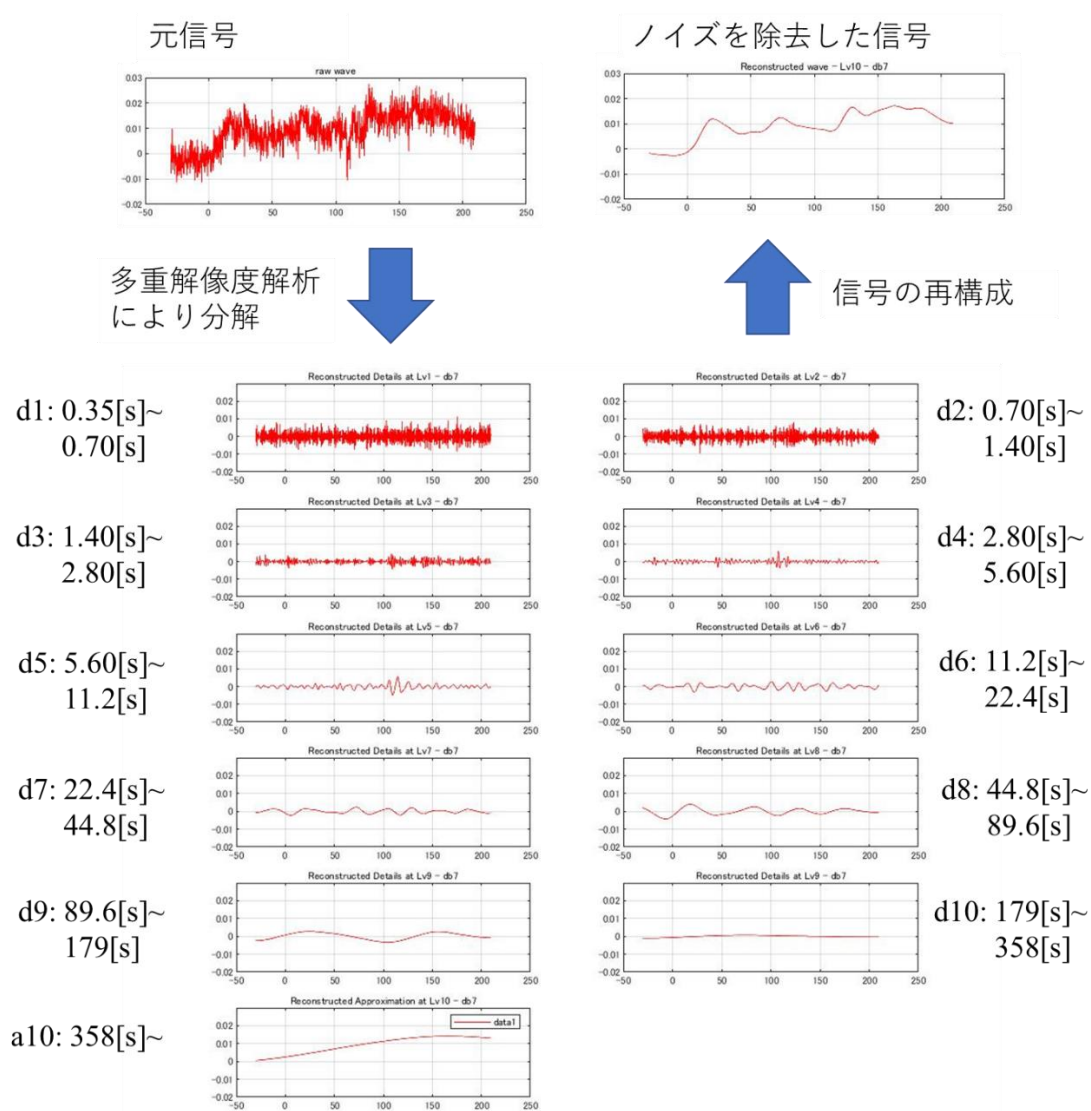


図 6.12 本実験における多重解像度解析適応の概略

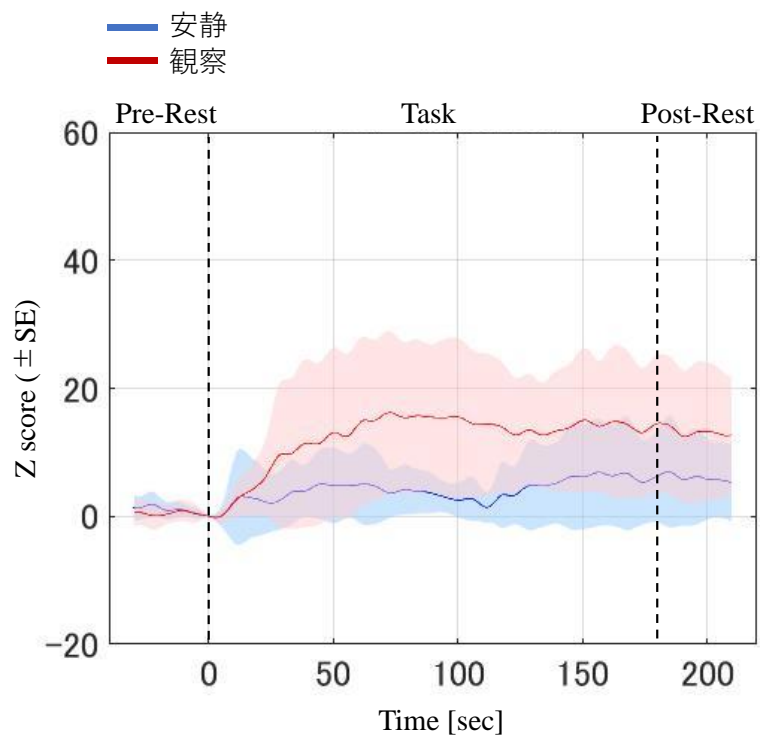


図 6.13 Ch. 20 における標準化した Oxy-Hb 変化の加算平均 (実験 1 日目における安静課題と観察課題の比較)

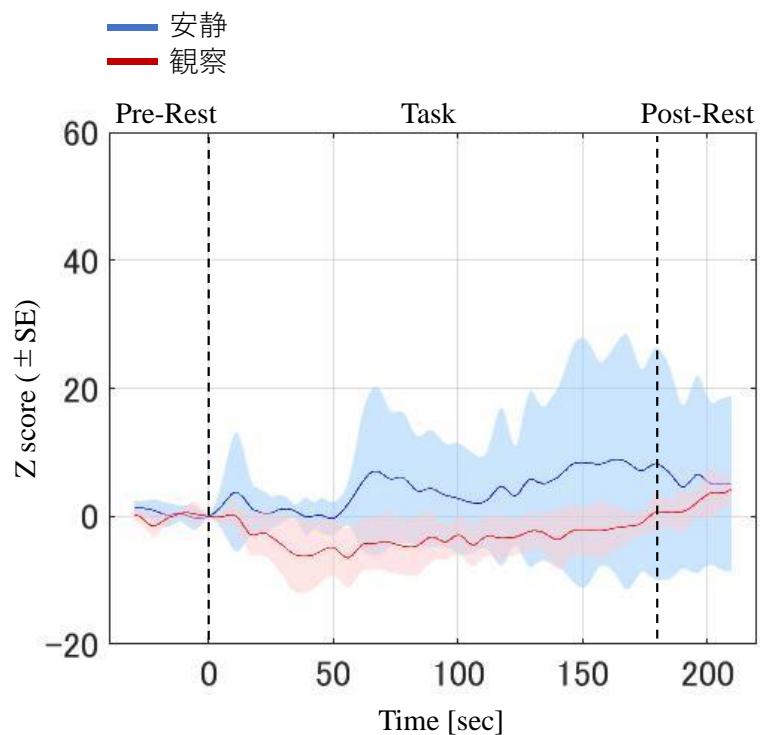


図 6.14 Ch. 23 における標準化した Oxy-Hb 変化の加算平均 (実験 1 日目における安静課題と観察課題の比較)

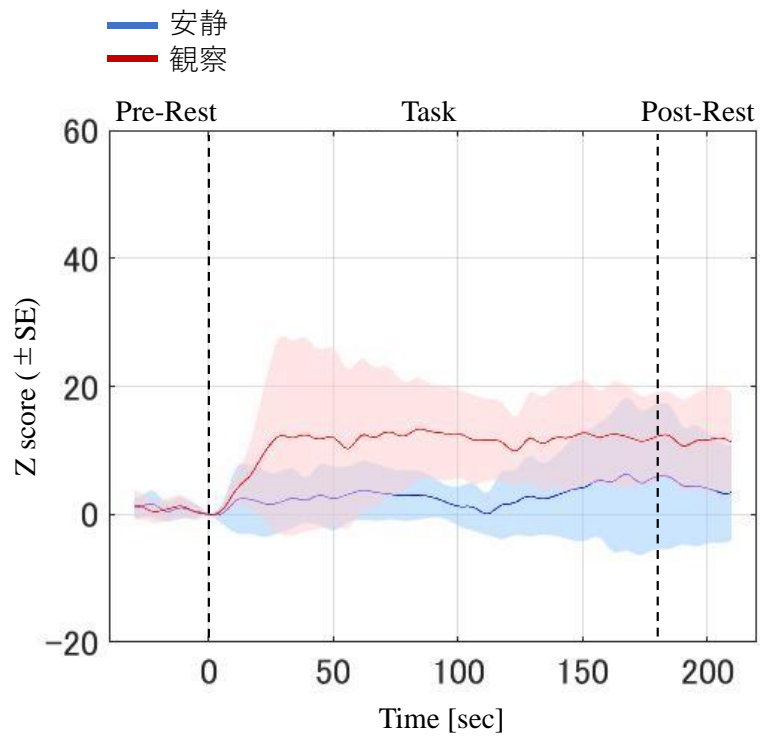


図 6.15 Ch. 26 における標準化した Oxy-Hb 変化の加算平均 (実験 1 日目における安静課題と観察課題の比較)

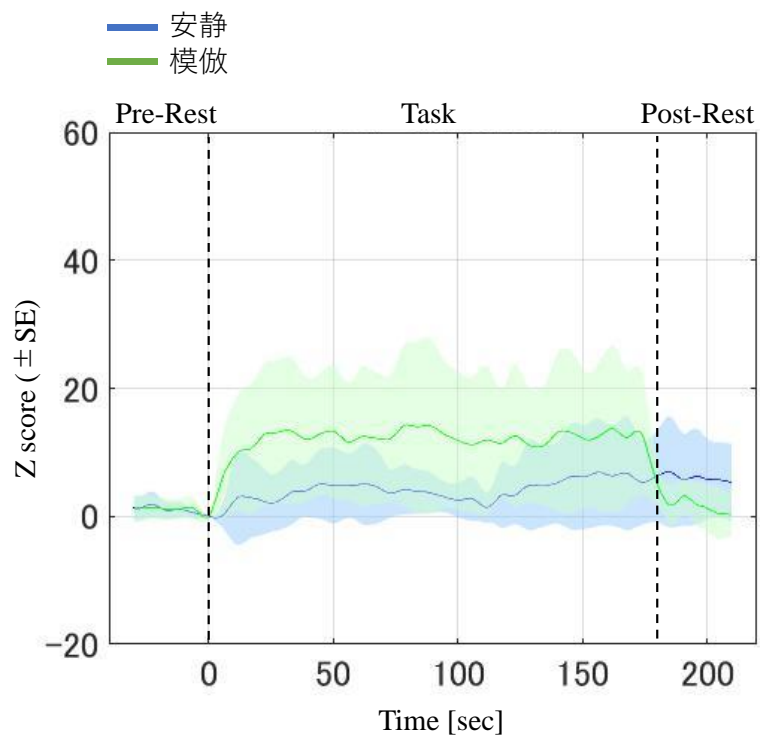


図 6.16 Ch. 20 における標準化した Oxy-Hb 変化の加算平均 (実験 1 日目における安静課題と模倣課題の比較)

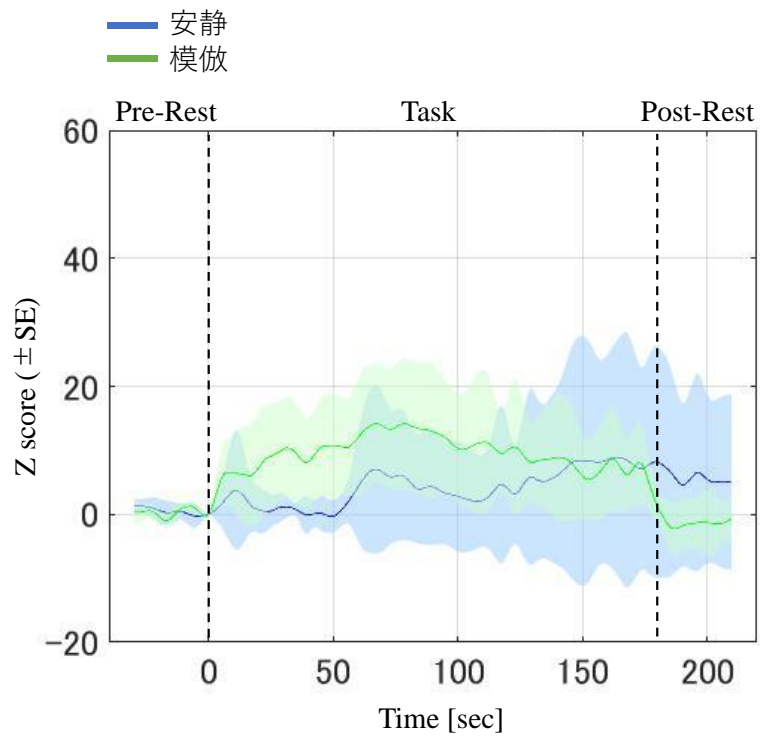


図 6.17 Ch. 23 における標準化した Oxy-Hb 変化の加算平均 (実験 1 日目における安静課題と模倣課題の比較)

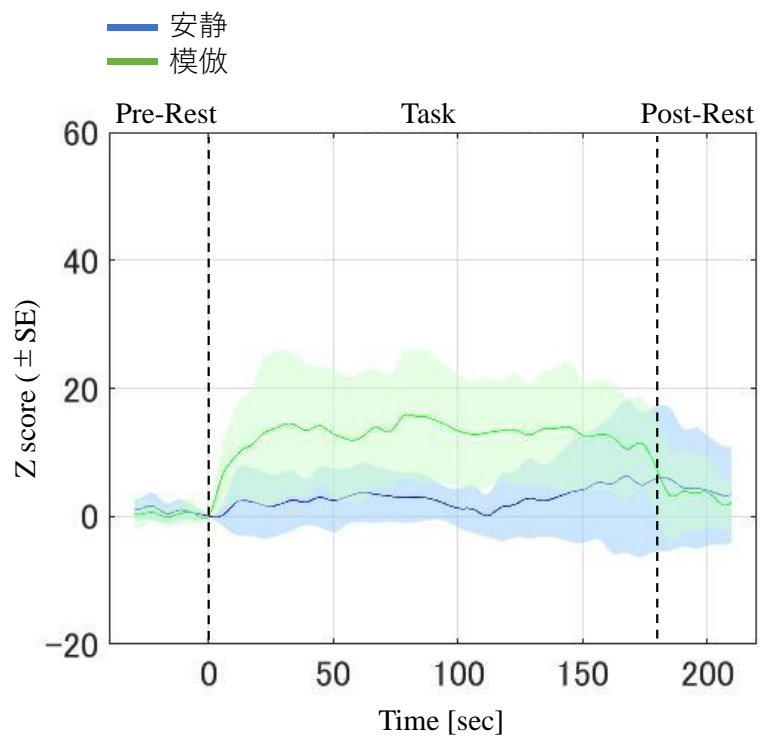


図 6.18 Ch. 26 における標準化した Oxy-Hb 変化の加算平均 (実験 1 日目における安静課題と模倣課題の比較)

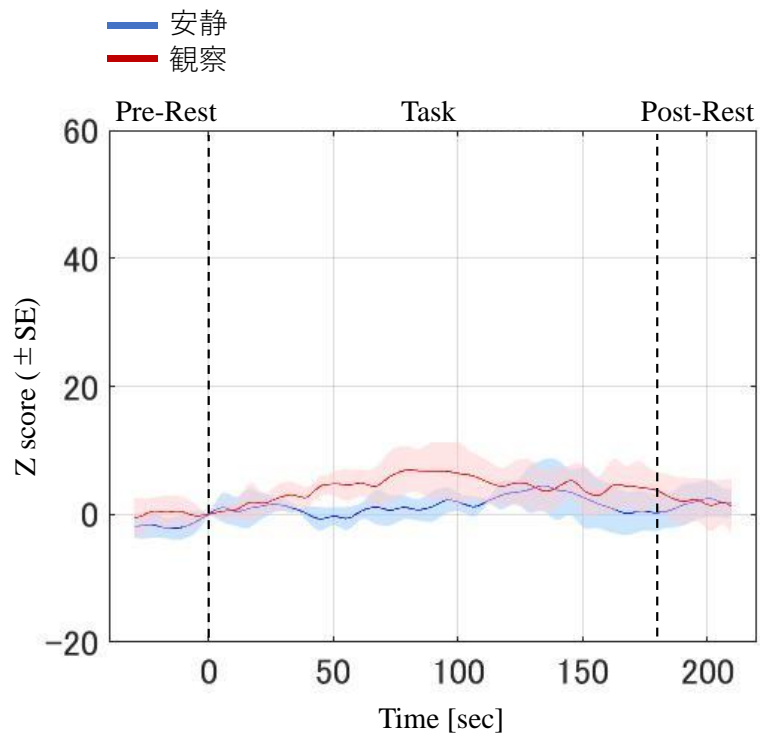


図 6.19 Ch. 20 における標準化した Oxy-Hb 変化の加算平均 (実験 2 日目における安静課題と観察課題の比較)

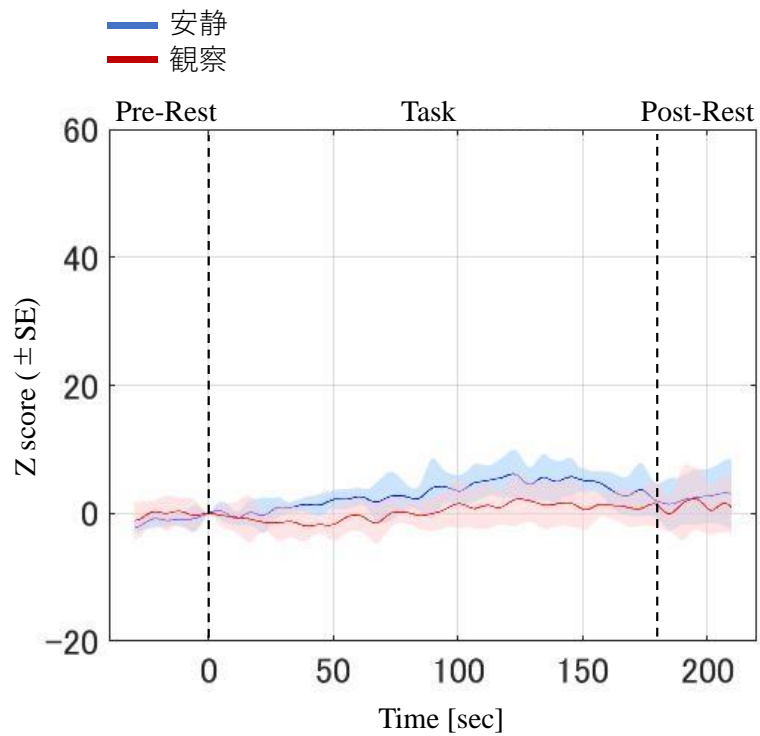


図 6.20 Ch. 23 における標準化した Oxy-Hb 変化の加算平均 (実験 2 日目における安静課題と観察課題の比較)

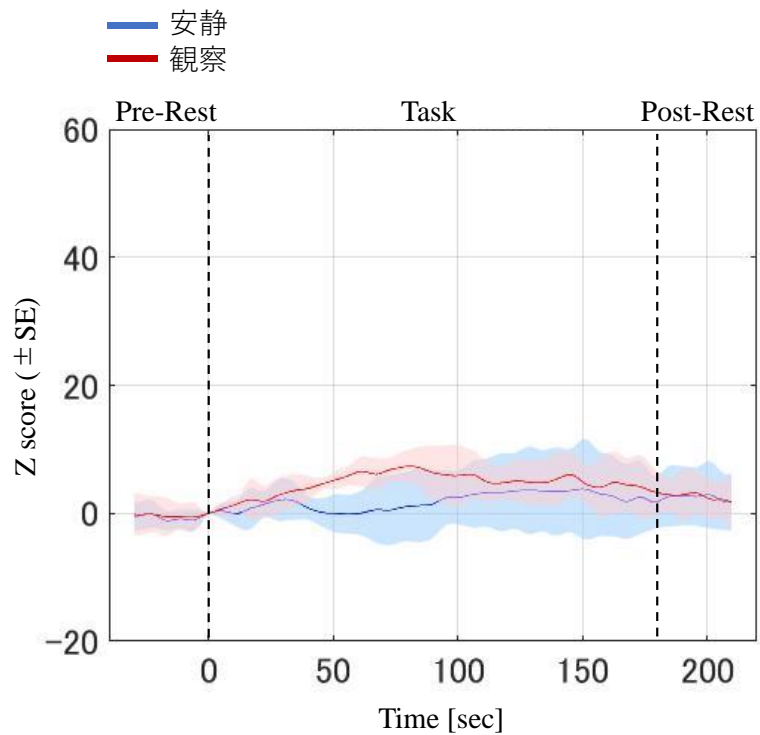


図 6.21 Ch.26 における標準化した Oxy-Hb 変化の加算平均 (実験 2 日目における安静課題と観察課題の比較)

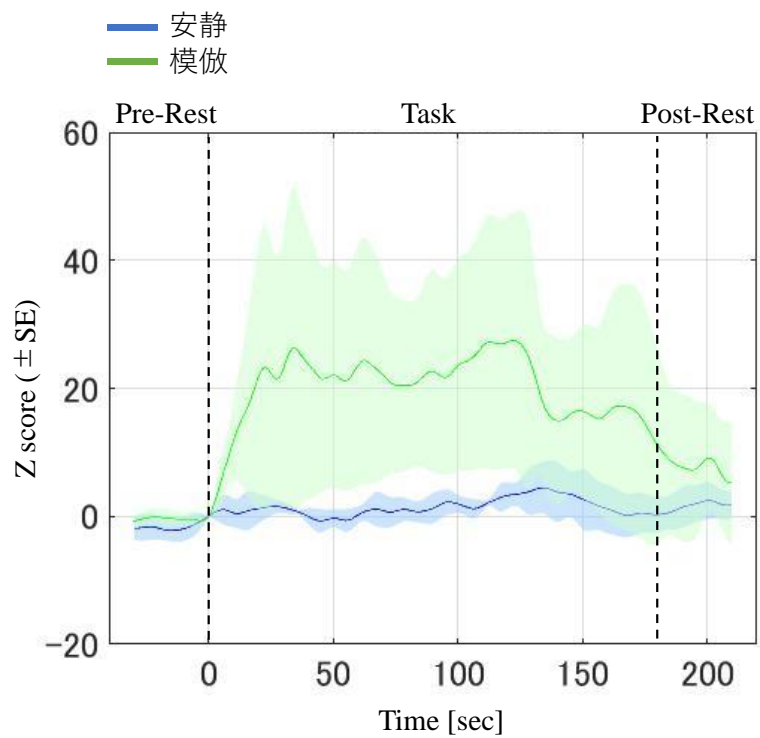


図 6.22 Ch.20 における標準化した Oxy-Hb 変化の加算平均 (実験 2 日目における安静課題と模倣課題の比較)

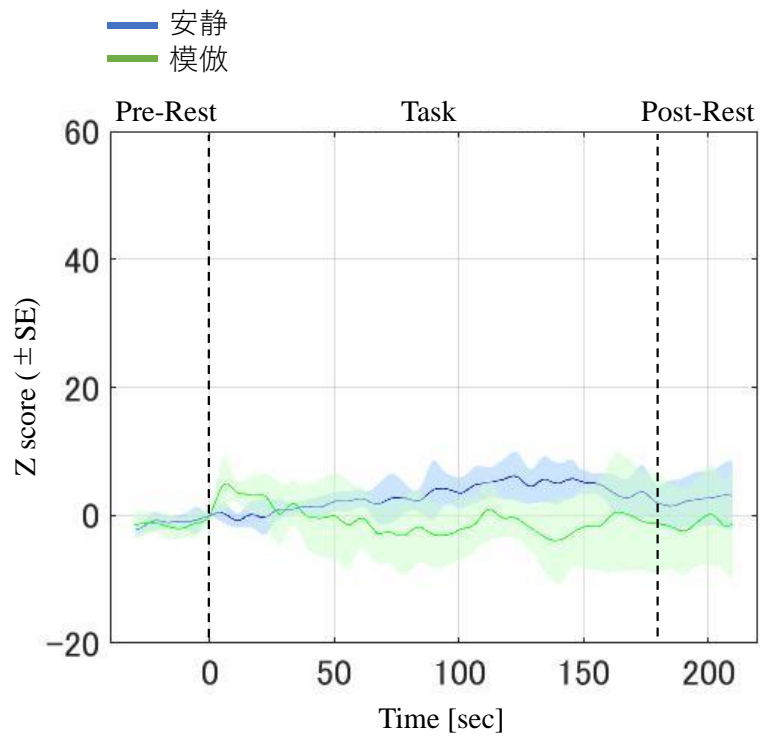


図 6.23 Ch.23 における標準化した Oxy-Hb 変化の加算平均 (実験 2 日目における安静課題と模倣課題の比較)

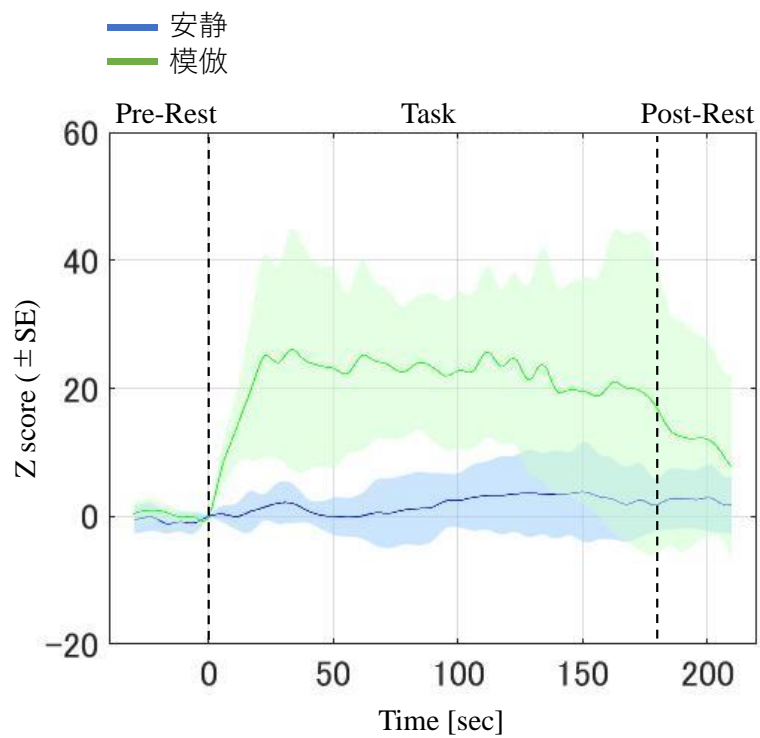


図 6.24 Ch.26 における標準化した Oxy-Hb 変化の加算平均 (実験 2 日目における安静課題と模倣課題の比較)

6.8 作業学習実験の結言

まず計測部位全体の脳賦活反応傾向について述べる。見まね学習ではワーキングメモリの視空間的スケッチパッドが重要であり、本実験において背外側前頭前野が賦活傾向を示した。また作業習熟後の観察課題における広範囲な賦活傾向は、デフォルトモードネットワークの影響と考えられる。脳賦活反応に基づいて見まね学習の習熟程度を評価するためには、背外側前頭前野の賦活傾向が重要であり、デフォルトモードネットワークの影響を考慮する必要があることが示唆された。模倣課題においては、習熟した後においても、局所的な脳賦活傾向を示すことが示唆された。

局所的な賦活傾向をについては、全体の脳活動から顕著な活動変化が見られた ch.20 (右外側前頭前野), ch.23 (前頭極), ch.26 (左外側前頭前野) に着目して考察を行った。課題練習前の、動作の再現性が低い場合では、観察および記憶の過程において、右外側前頭前野と左外側前頭前野で Oxy-Hb の上昇傾向と前頭極で Oxy-Hb の下降傾向を示し、動作を再現する際には、安静状態と同様の傾向を示した。練習を行った後、動作の再現性が高い場合では、観察および記憶する際に、安静状態と同様の傾向を示し、動作再現の過程においては、右外側前頭前野と左外側前頭前野で Oxy-Hb の上昇傾向と前頭極で Oxy-Hb の下降傾向が示された。

6.9 6章の参考文献

- 甘利俊一, 田中啓治, 認識と行動の脳科学, (2008), pp.135-136, pp.137-138, 東京大学出版会.
- Baddeley, A., The episodic buffer: a new component of working memory?, Trends in Cognitive Sciences, Vol.4, No.11 (2000), pp.417-423.
- Blumenfeld R., S., and Ranganath C., Prefrontal Cortex and Long-Term Memory Encoding: An Integrative Review of Findings from Neuropsychology and Neuroimaging, Neuroscientist, Vol.13 (2007), pp280-291.
- Buckner, R., L., Andrews-Hanna, J., R. and Schacter, D., L., The Brain's Default Network: Anatomy, Function, and Relevance to Disease, Annals of the New York Academy of Sciences, Vol.1124 (2008), pp.1-38.
- Hoshi, Y., Kobayashi, N. and Tamura, M., Interpretation of near-infrared spectroscopy signals: a study with a newly developed perfused rat brain model, Journal of Applied Physiology, Vol. 90 (2001), pp.1657-1662.
- Kandel, E. R., Schwartz J. H., Jessell T. M., Siegelbaum S. A., Judsperth A. J. 編, 金澤一郎, 宮下保司 日本語版監修, カンデル神経科学 (2014), pp.1411-1412, メディカル・サイエンス・インターナショナル.
- Okamoto, M., Dan, H., Shimizu, K., Takeo, K., Amita, T., Oda, I., Konishi, I., Sakamoto, K., Isobe, S., Suzuki, T., Kohyama, K. and Dan, O., Multimodal assessment of cortical activation during apple peeling by NIRS and fMRI, NeuroImage, Vol.21 (2004), pp.1275-1288.
- Rainer, G., Asaad, W., F., and Miller, E., K., Memory fields of neurons in the primate prefrontal cortex, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Vol.95 (1998), pp.15008-15013.
- Wagner, A., D., Schacter, D., L., Rotte, M., Koutstaal, W., Maril, A., Dale, A., M., Rosen, B., R., and Buckner, R., L., Building memories: remembering and forgetting of verbal experiences as predicted by brain activity, Science, Vol.282 (1998), pp.1188-1191.
- 柳沢一機, 綱島均, 丸茂喜高, 伊藤誠, 稲垣敏之, NIRS を用いた自動車運転時の脳機能計測

(運転支援システムによるドライバの負担軽減の評価) , ヒューマンインターフェイス学会論文誌, Vol.14, No.2 (2012), pp.209-218.

第7章 結言

本研究では、近赤外分光法 (NIRS: Near-infrared spectroscopy) を用いて脳機能計測を行い、その計測に基づいて見まねによる動作学習メカニズムの解析をすること目的として実験を行った。NIRS による脳機能計測を行い、見まねによる動作の学習について、脳活動と作業習熟との関連性を考察した。

見まねによる動作を学習する際、前頭前野の両外側部において Oxy-Hb が上昇することが示された。この賦活傾向は、背外側前頭前野におけるワーキングメモリー機能との関連と、下前頭回におけるヒトのミラーニューロンとの関連が考えられる。前頭前野を計測した動作学習実験においては、観察時と模倣時においてこの傾向が見られた。また、前頭前野の内側部において、Oxy-Hb の低下傾向が観察された。

作業学習実験においては、被験者の作業習熟前後の二つの状態で脳機能計測を行った。その結果、作業学習実験においても、前頭前野の両外側部と内側部において Oxy-Hb の上昇及び低下傾向を示すことが示された。また、この傾向は観察時と模倣時のどちらについても、作業習熟によって傾向が変化する可能性が示された。

これらの結果から、見まねによる動作の学習においては、ワーキングメモリー及びミラーニューロンが重要であり、作業習熟に伴い、観察時にはこれらの神経活動のレベルが低下し、模倣時にはこれらの神経活動が活発化する可能性が示唆された。

謝辞

博士課程の研究を進めるにあたり、主指導教員である埼玉大学大学院理工学研究科人間支援・生産科学部門の水野毅教授にご指導を頂きました。貴重なご助言を頂き、深く感謝申し上げます。

副指導教員である、理工学研究科連携先端・重点研究部門の高崎正也教授、理工学研究科戦略的研究部門の原正之准教授、理工学研究科連携先端・重点研究部門の楓和憲准教授にも、感謝申し上げます。研究に対して、貴重なご指導、ご助言を頂きました。

また、本稿における実験は、埼玉大学大学院理工学研究科戦略的研究部門の綿貫啓一教授の統括するヒューマンインターフェイス研究室において実施したものであり、記して感謝致します。

最後に、実験に協力して頂いた同研究室学生諸氏にも、厚く感謝申し上げます。

付録

口頭命題による暗算実験

動作学習実験と比較する目的で実験を行う。動作を記憶するには、映像中の人物の動作という視覚情報の認識が重要であった。そこで認識ではなく、一時的な記憶と長期記憶からの想起が重要である暗算課題中の脳活動を計測することで、動作学習実験結果との比較考察を行う。

近赤外分光法による脳機能計測を利用して、被験者に口頭で命題を伝え、暗算を行う際の脳活動を計測した。その結果、前頭前野外側部において Oxy-Hb の上昇傾向が観察された。この結果から前頭前野外側部は、学習結果を適応する脳活動に関与する可能性が示唆された。

被験者に暗算命題を口頭で伝えることで、被験者は計算の命題を聴覚情報から認識する。そして、暗算命題はある値から値を引き続けるという連続的な課題である。つまり命題を認識した後は、その認識から得た視覚、あるいは聴覚イメージを記憶及び保持、操作し、口頭あるいはイメージすることでその解答を行う。そして再び自らの回答を認識、記憶及び保持し、情報を操作することで解答を導き出す。

この課題では命題と自らの結論付けた計算過程を覚えておくことが重要となる。また、記憶を操作し、これまでの計算過程と学習経験（長期記憶）と情報をやり取りして、正しい記憶あるいは情報の操作を行わなければならない。これは図 0.1 に示す学習過程の想起に相当すると考えられる。

つまりこの課題では、学習過程における記憶と想起という機能が重要であると言える。外部から情報が呈示されるのは命題を伝える聴覚情報が一度だけである。この課題における被験者の脳活動を計測することで、学習過程における記憶と想起に特に関わる脳領域、活動変化を計測する目的である。

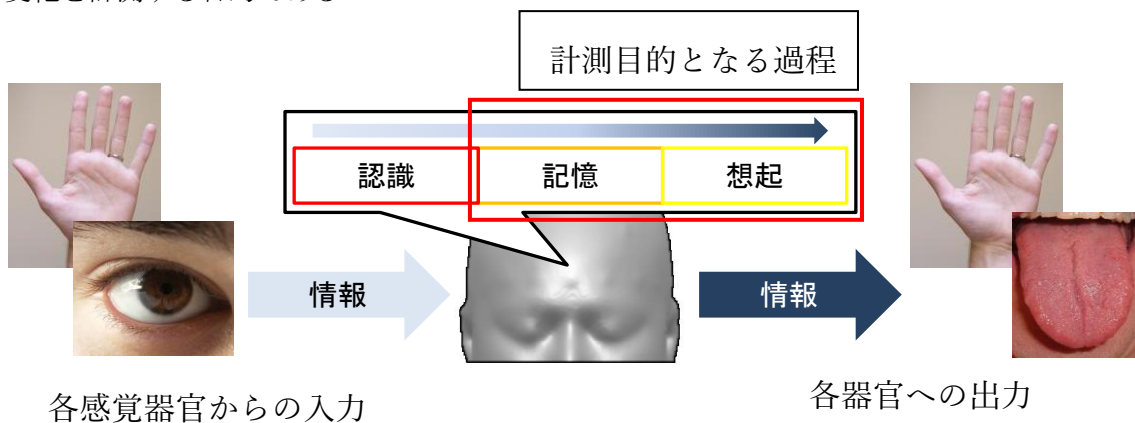


図 0.1 学習構造における計測対象過程

実験デザイン

図 0.2 に示すように、被験者は椅子に座り、実験中は目隠しを付ける。被験者は健康な 20 代前半の男性 4 名（以下 A, B, C, D とする）であり、その内 A, B については後日同じ課題の実験を行う。ただし各課題の順序は無作為とする。

本研究では図 0.2 のように、前頭前野と視覚野を計測部位とする。記憶と脳領域の関係は非常に多岐にわたるが、本稿にて説明した通り、前頭前野外側部は長期記憶から想起した過去の情報のワーキングメモリに関与している可能性がある。そこで前頭前野に着目し、fNIRSにより前頭前野を計測することで暗算課題を行う際の被験者の脳活動を調査する。測定部におけるプローブの配置は 10-20 法に基づき、図 0.3 に示すように Fpz と Oz を基準とする。



図 0.2 実験風景

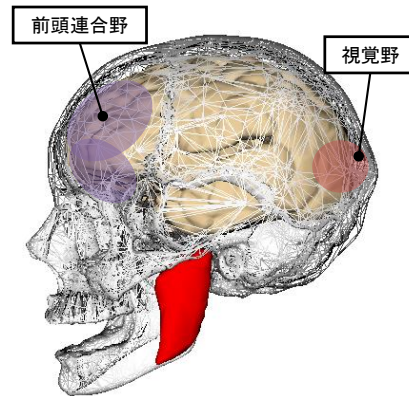


図 0.2 計測部位

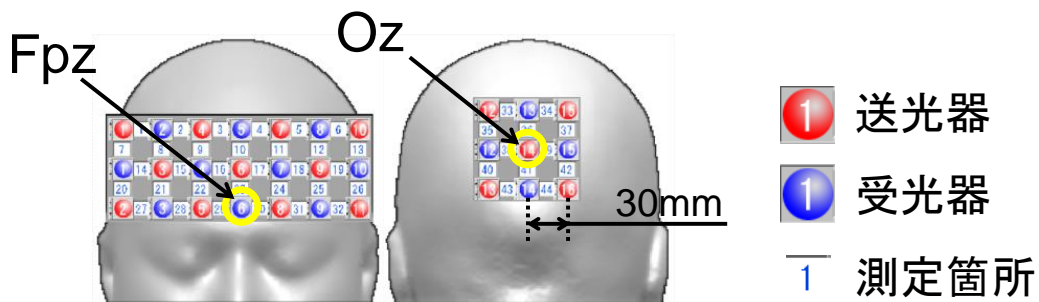


図 0.3 計測部位におけるチャンネル配置

図 0.4 ように、被験者が課題を実行する課題期間（タスク）を 30sec とし、その前後に安静期間（レスト）をそれぞれ 30sec と設定し、これを 1 試行とする。本実験では各被験者に対して 4 回試行する。安静期間では、被験者は何も考えずにリラックスした状態を保つ。課題期間では、開始と同時に実験者が口頭で指示する命題に対して暗算により回答する。ただし被験者の緊張状態持続による安静期間への影響を考慮し、実験は 1 試行ごとに休憩を設けている。

本実験で回答する命題は表 0.1 に示す 4 種である。それぞれの命題に合わせて回答方法も指定する。回答を口頭により行う、回答を口頭により行うが暗算はせずに適当な数字を答える、回答を頭の中で行う、という計 3 種類の回答方法である。口頭による回答は命題を変えて 2 回行う。命題と回答方法の組み合わせは全ての実験において同一である。実験 1 回につき被験者は 4 つの課題を行うものとし、課題の提示順は無作為である。ただし回答方法については実験前に予め被験者に対して説明をする。

暗算命題はタスク開始時に被験者に対して口頭で指示し、終了の指示を受けるまで被験者は暗算をし続ける。命題の難易度については難易度の差異による脳活動への影響がないように考慮し、4 桁の数から 2 桁の数を引き続けるという形式に統一する。

回答を口頭により行う課題と回答を口頭により行うが適当な数字を答える課題を比べることにより、暗算による脳活動変化の考察を行う。また回答を口頭により行う課題と回答を頭の中で行う課題とを比べることにより、口頭で回答することによる脳活動への影響を考察する。また後日同様の実験を行った被験者 A, B については、各被験者において脳活動変化の再現性が見られるか検討を行う。

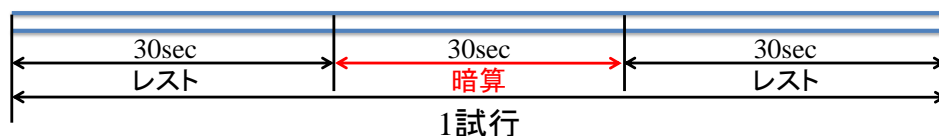


図 0.4 試行 1 回の構造

表 0.1 回答形式と暗算命題の組み合わせ

回答形式	暗算命題
口頭 (1)	2000 から 21 を引き続ける
口頭 (2)	1000 から 23 を引き続ける
口頭、計算をせずに適当に回答	2000 から 18 を引き続ける
イメージ(声に出さない)	1500 から 17 を引き続ける

実験結果, 考察

前頭前野における Oxy-Hb 変化を以下の図に示す。カラースケールの単位は[mmol/L・cm] であり色調変化は Oxy-Hb 変化を表す。図中の縦軸はタスク開始時を基準とした時間[sec]であり、各マッピングは 10 秒間隔で提示している。

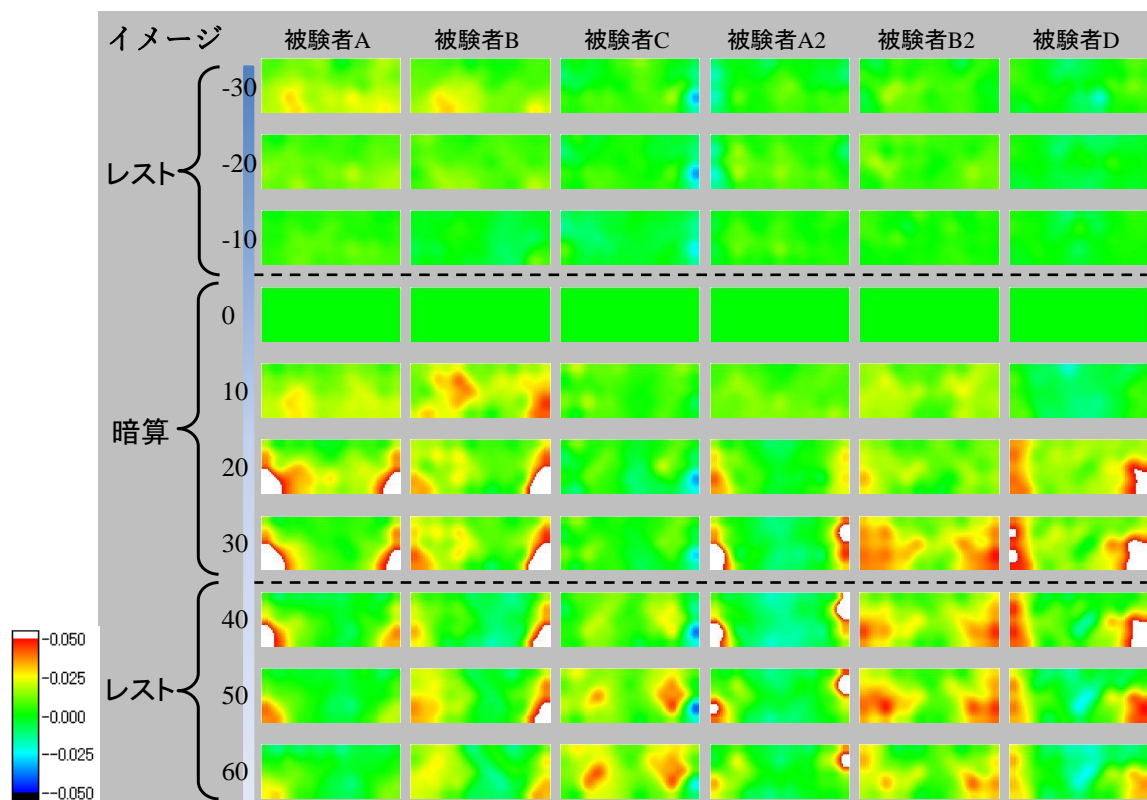


図 0.5 暗算実験（イメージングにより解答）における実験結果

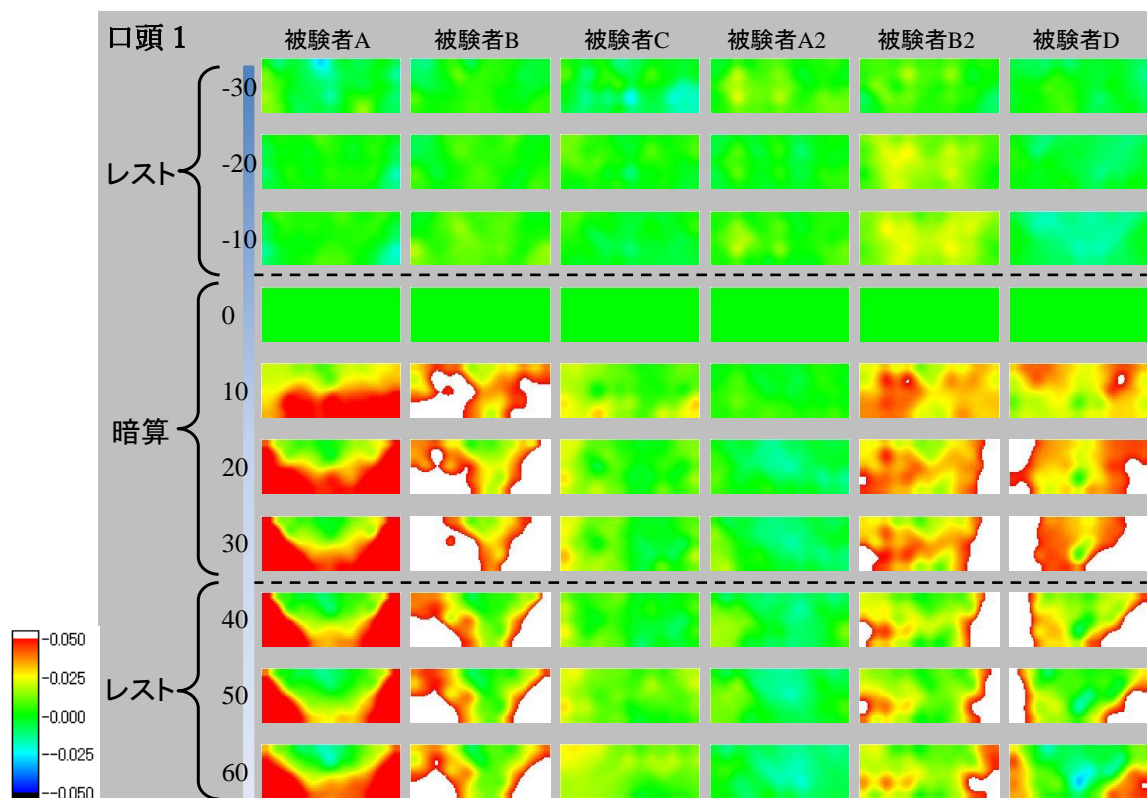


図 0.6 暗算実験（口頭により解答1）における実験結果

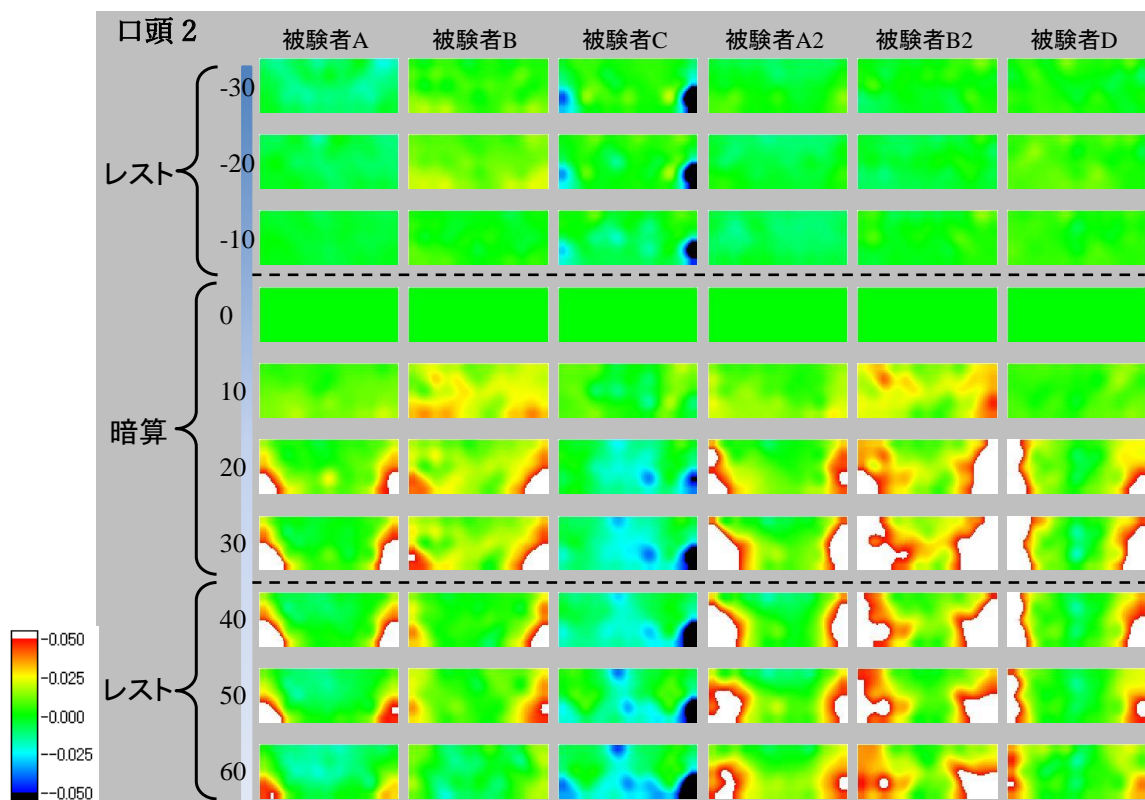


図 0.7 暗算実験（口頭により解答 2）における実験結果

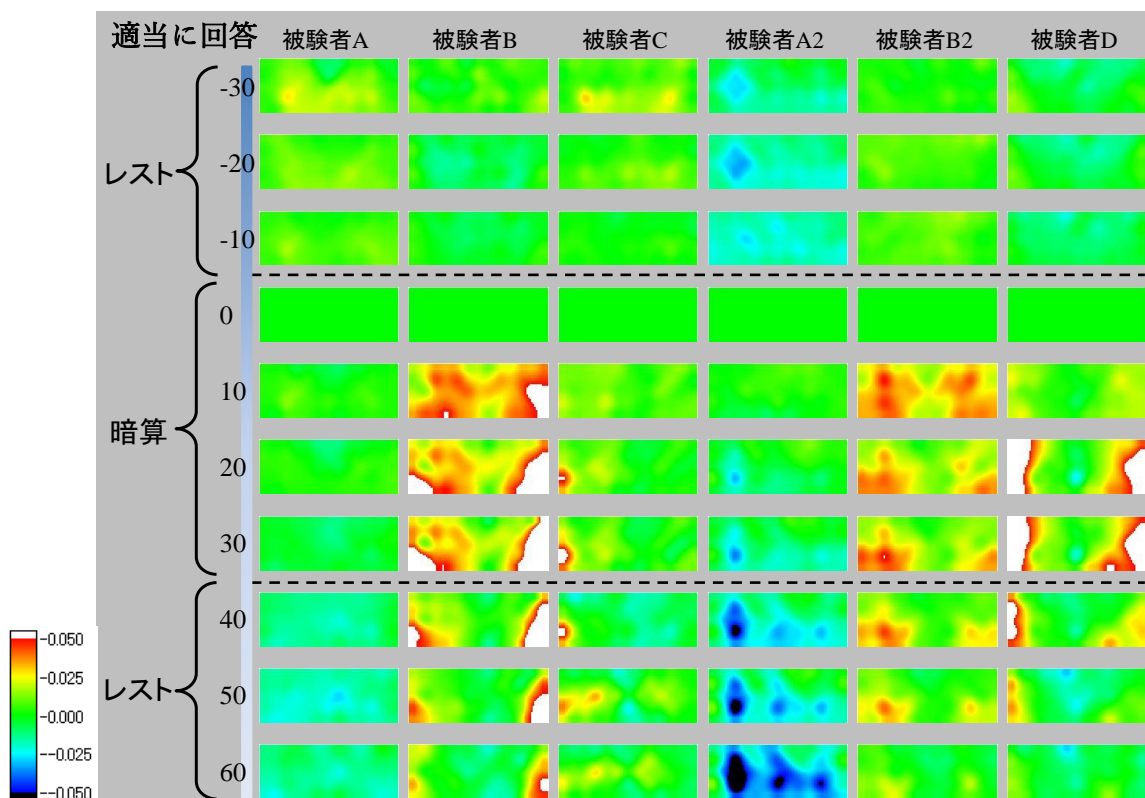


図 0.8 暗算実験（適当に回答）における実験結果

前頭前野内側部については課題開始直後に一時的な上昇がみられる。一時的な反応であることから、実験者からの指示の理解、指定された回答方法を思い出すといった所作が原因である可能性が考えられる。また被験者Bに関しては課題期間中に継続した上昇傾向が見られる。しかし各回答方法において反応傾向に差異は見られない。

前頭前野外側部に関して、被験者A、Bについては課題期間中に上昇し続ける傾向が多くみられた。まず被験者Aについては口頭で暗算を回答する方法と、イメージングによって回答する方法について、どちらも課題期間中に上昇し続ける傾向を示している。ただし、2回目の実験における口頭による回答 2 回目については上昇傾向を示していない。また回答を口頭により行うが適当な数字を答える方法に対してはどちらも反応が見られない。よって被験者Aに関してはワーキングメモリに関する脳活動が前頭前野外側部で計測できたと考えられる。一方で被験者Bに関しては左外側部のほうが右外側部よりも比較的大きな上昇傾向を示している。また実験 1 回目では度の回答方法に対しても上昇傾向を示しており、各回答方法による傾向の差異は見られない。続く 2 回目の実験では、回答を口頭により行うが適当な数字を答える方法とイメージングによって回答する方法については課題期間開始後の上昇傾向が見られない。また口頭で回答を行う課題に対して、被験者Aの 2 回目の実験における結果、被験者Cの結果の一部では反応を示さない、それ以外の結果では上昇を示している。これに関して前者の反応を示さない結果については、被験者が課題期間において他の被験者に比べ多く回答をしている点で共通点が見られた。よって暗算課題においても、慎重に行う場合と、より多く回答する場合といった回答方法の傾向により、賦活反応の傾向も変化するという可能性が考えられる。

次にワーキングメモリを考慮し左前頭前野外側部と右前頭前野外側部を、イメージングを考慮し前頭前野内側部としてOxy-Hb変化について行った。

以下の図は島津製作所製 FOIRE-3000 の解析ソフトにより、スムージング点数 39, スムージング回数 1, スプライン補間によって補正した。以降に、前頭前野内側部 (Ch.23) の Oxy-Hb 計測結果を示す。

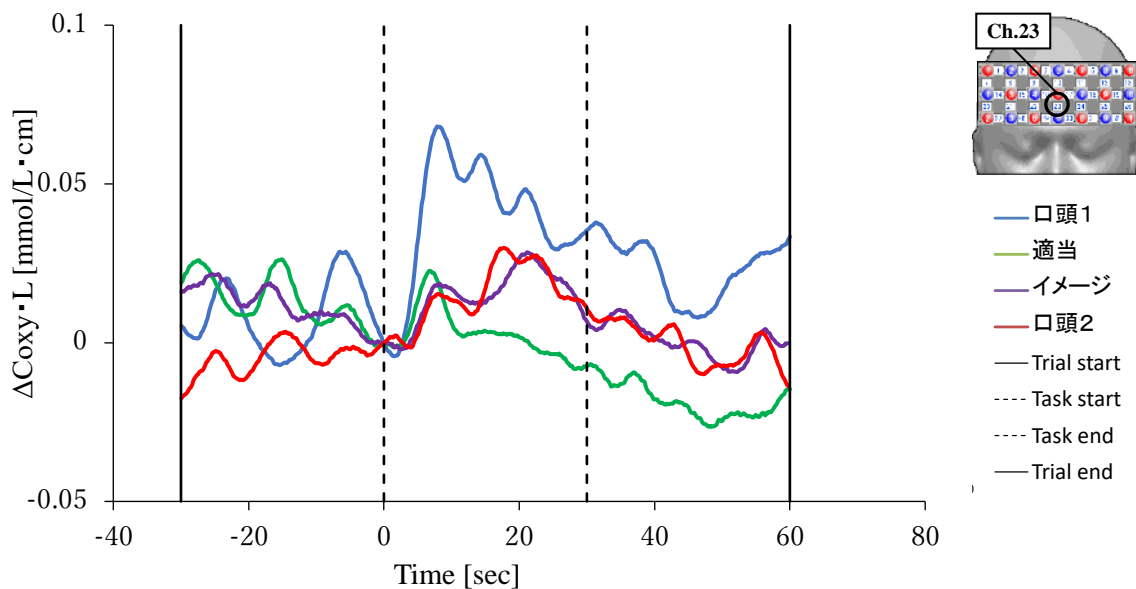


図 0.9 前頭前野内側部 (Ch.23) の Oxy-Hb 変化 被験者 A

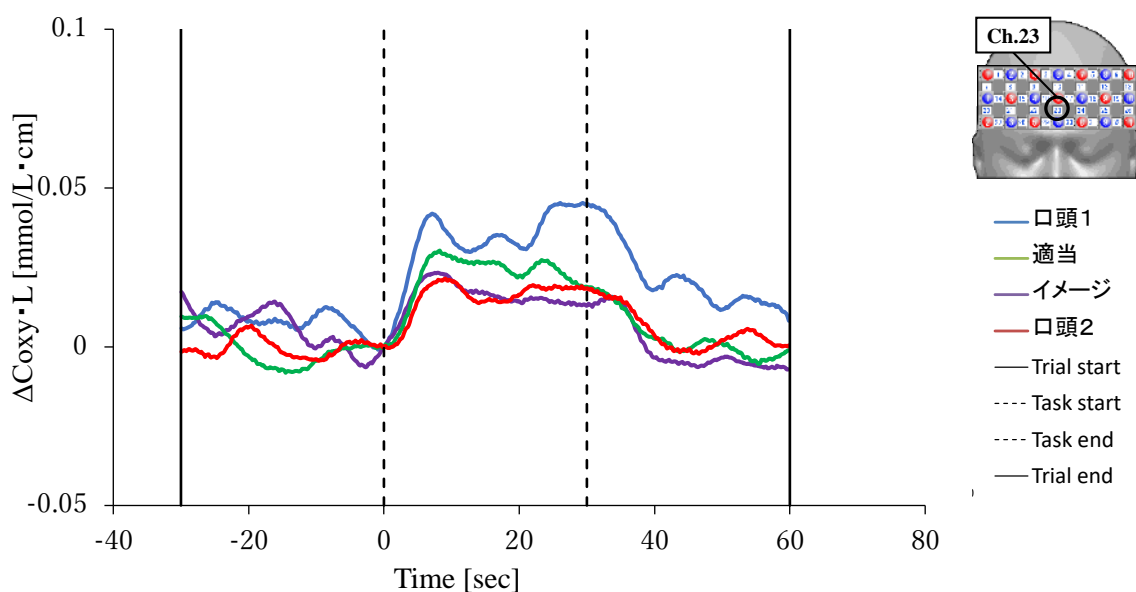


図 0.10 前頭前野内側部 (Ch.23) の Oxy-Hb 変化 被験者 B

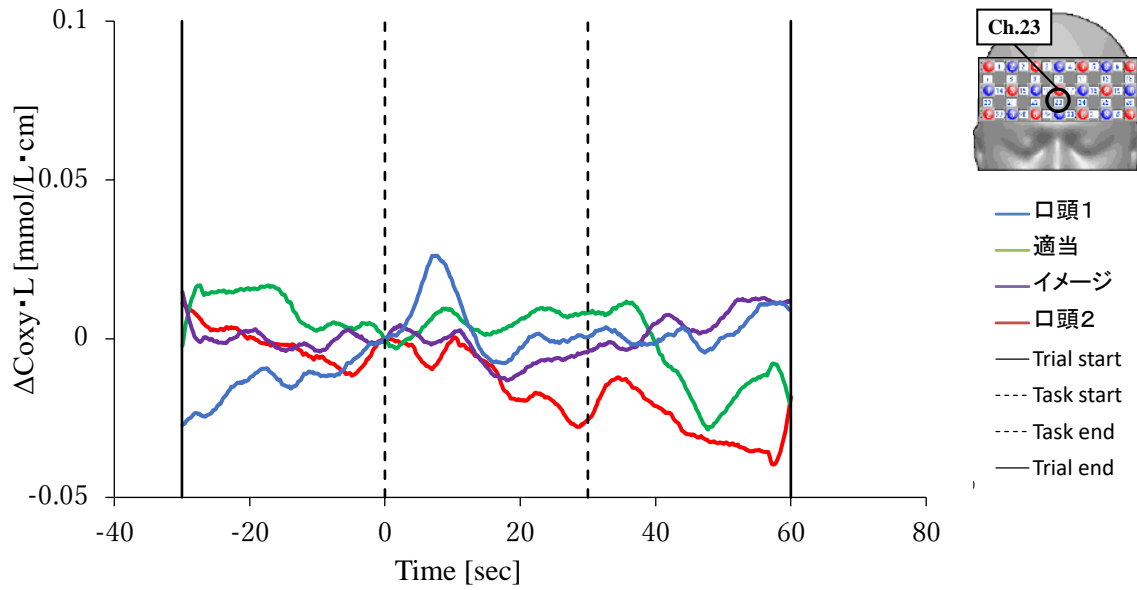


図 0.11 前頭前野内側部 (Ch.23) の Oxy-Hb 変化 被験者 C

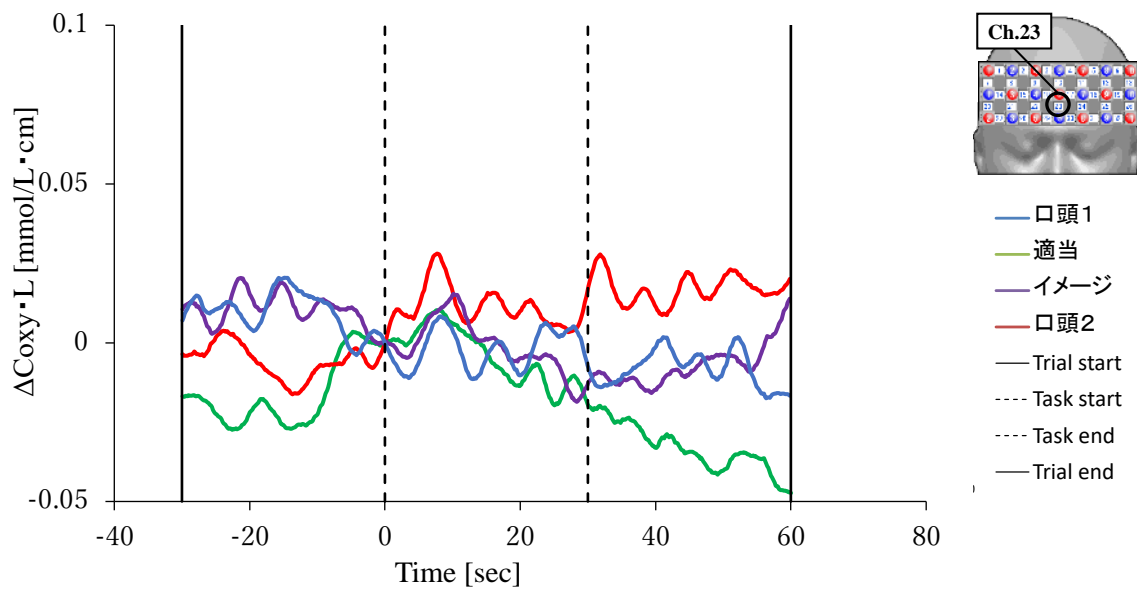


図 0.12 前頭前野内側部 (Ch.23) の Oxy-Hb 変化 被験者 A 2 回目

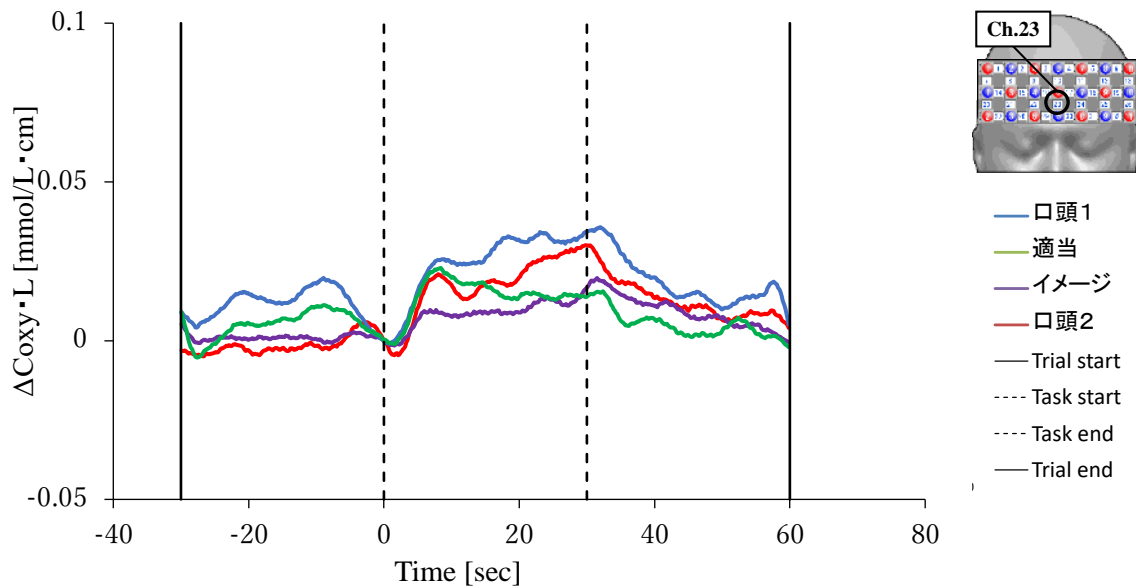


図 0.13 前頭前野内側部 (Ch.23) の Oxy-Hb 変化 被験者 B 2 回目

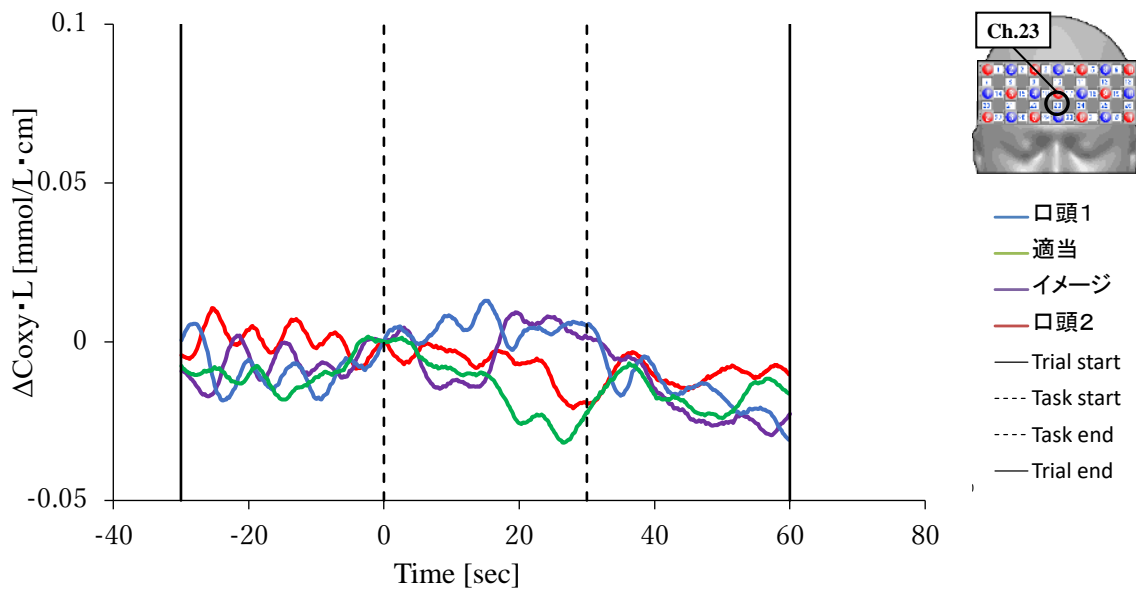


図 0.14 前頭前野内側部 (Ch.23) の Oxy-Hb 変化 被験者 D

前頭前野内側部 (Ch.23) については課題開始直後に一時的な上昇がみられる。一時的な反応であることから、実験者からの指示の理解、指定された回答方法を思い出すといった所作が原因である可能性が考えられる。また被験者 B に関しては課題期間中に継続した上昇傾向が見られる。しかし各回答方法において反応傾向に差異は見られない。次に、前頭前野右外側部 (Ch.20) の Oxy-Hb 計測結果を示す。

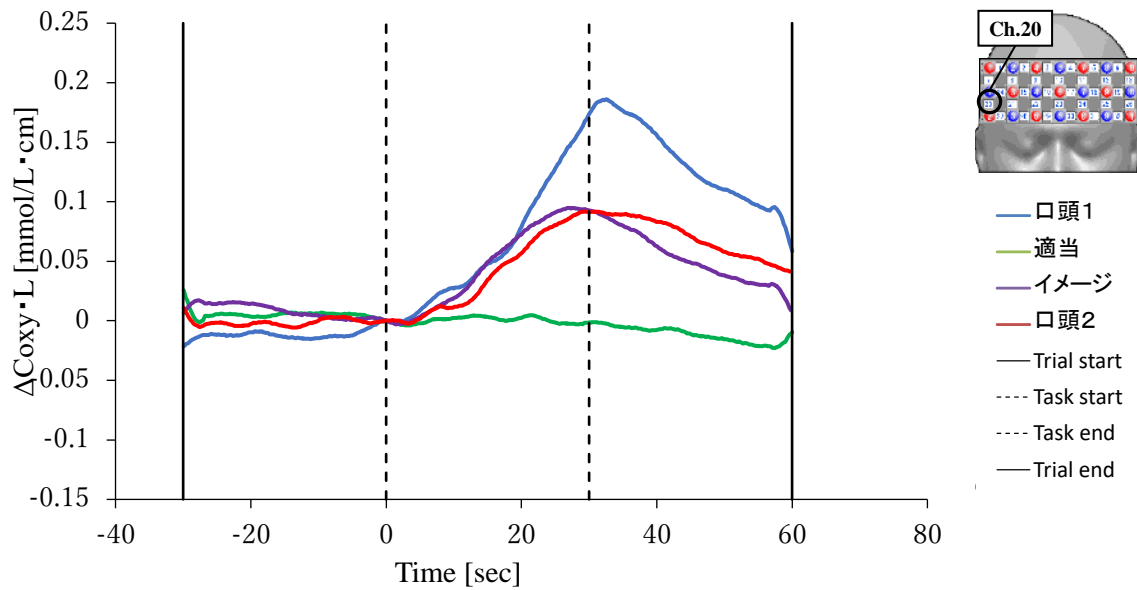


図 0.15 前頭前野右外側部 (Ch.20) の Oxy-Hb 変化 被験者 A

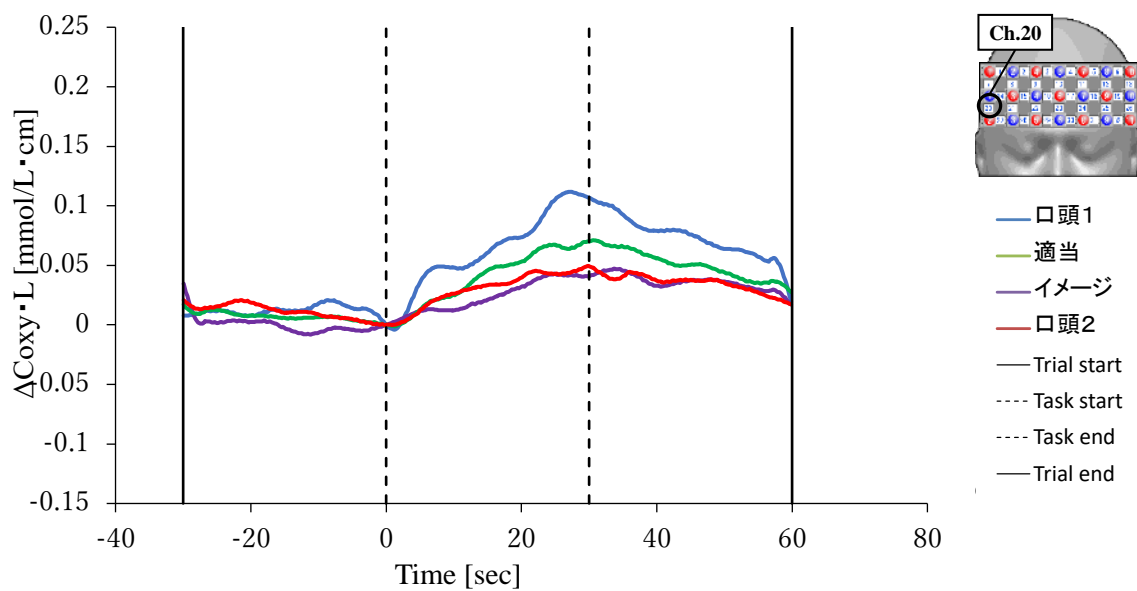


図 0.16 前頭前野右外側部 (Ch.20) の Oxy-Hb 変化 被験者 B

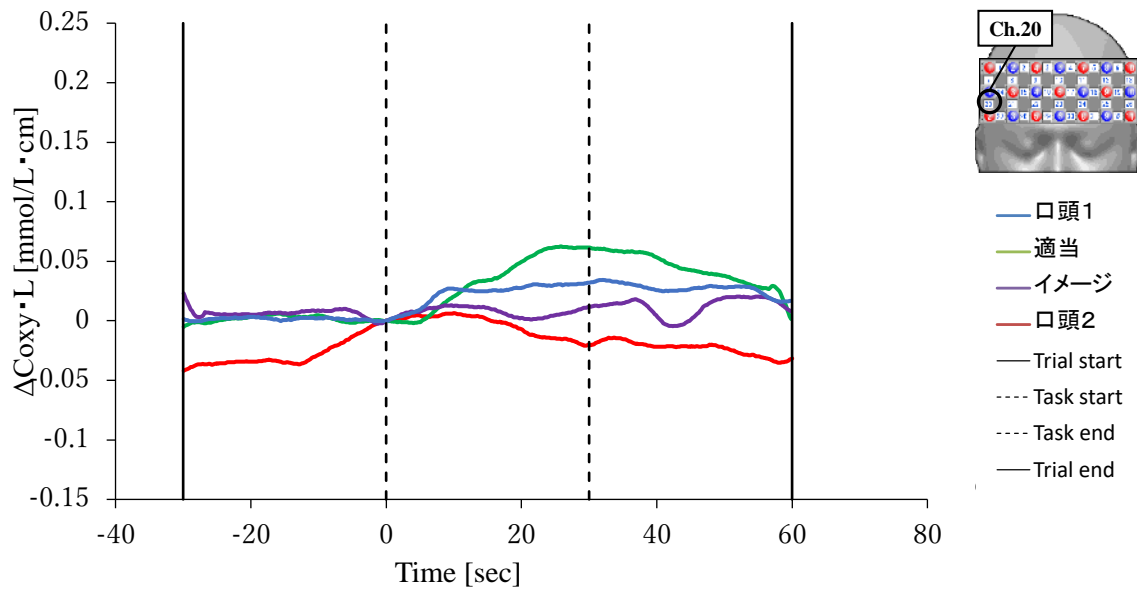


図 0.17 前頭前野右外側部 (Ch.20) の Oxy-Hb 変化 被験者 C

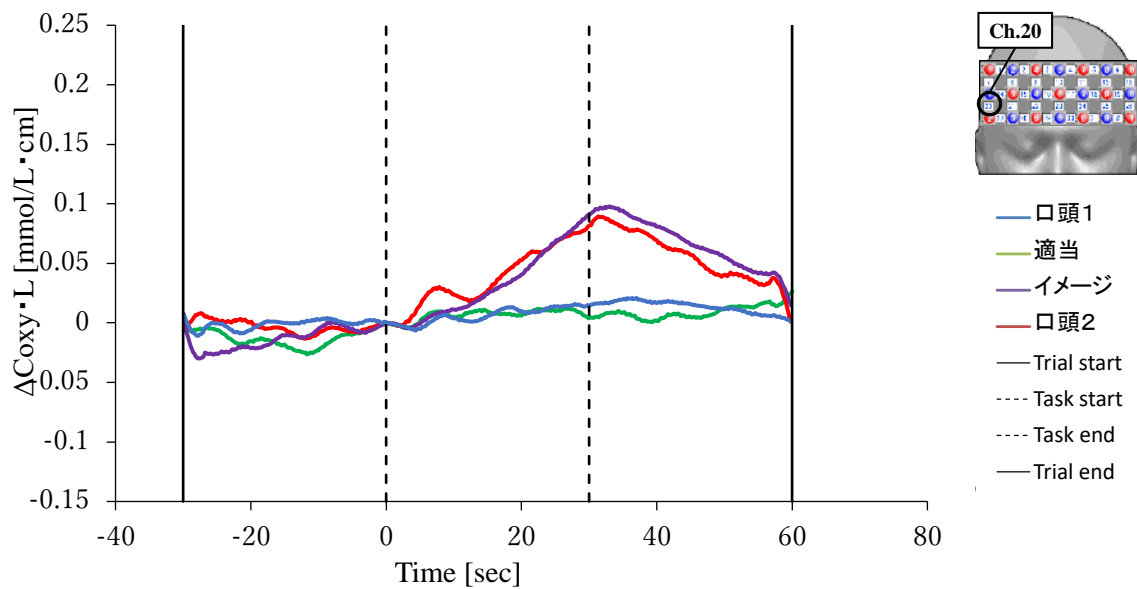


図 0.18 前頭前野右外側部 (Ch.20) の Oxy-Hb 変化 被験者 A 2 回目

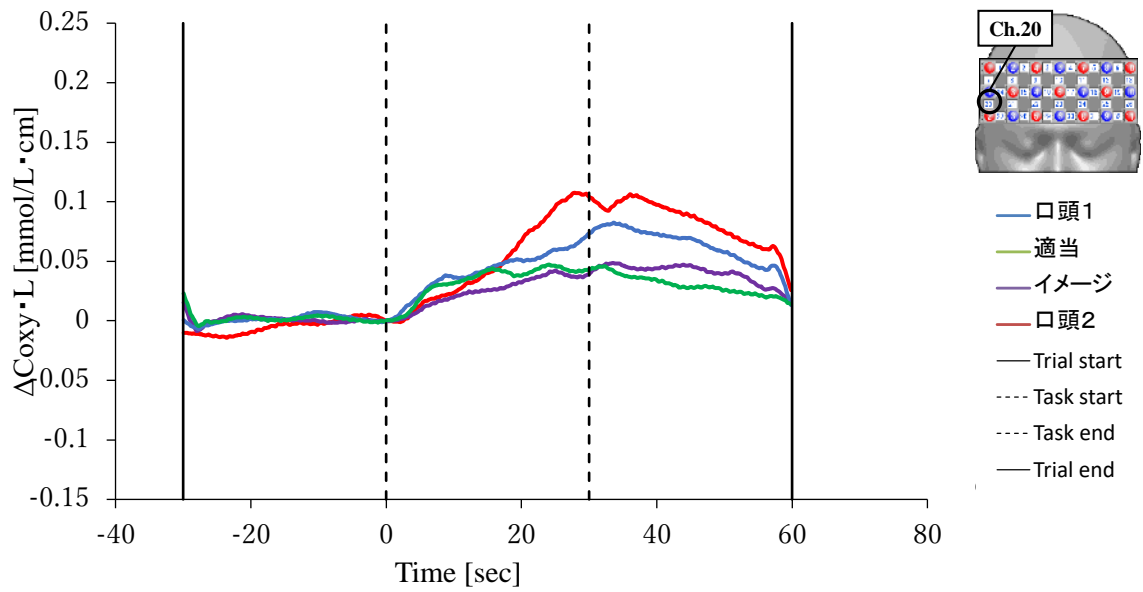


図 0.19 前頭前野右外側部 (Ch.20) の Oxy-Hb 変化 被験者 B 2 回目

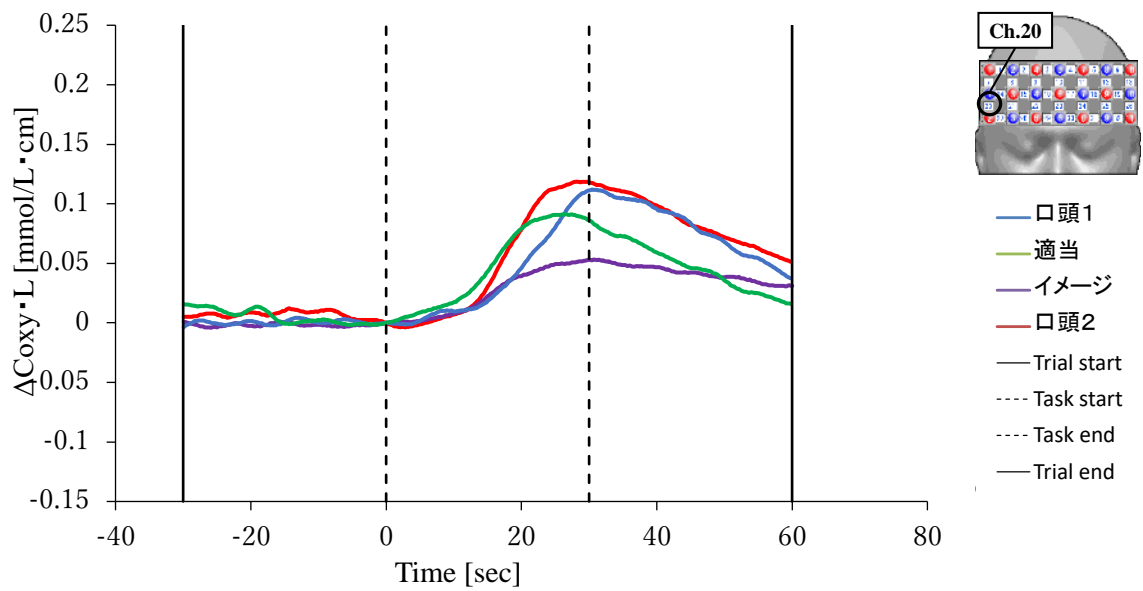


図 0.20 前頭前野右外側部 (Ch.20) の Oxy-Hb 変化 被験者 D

最後に、前頭前野左外側部（Ch.26）の Oxy-Hb 変化を示す。

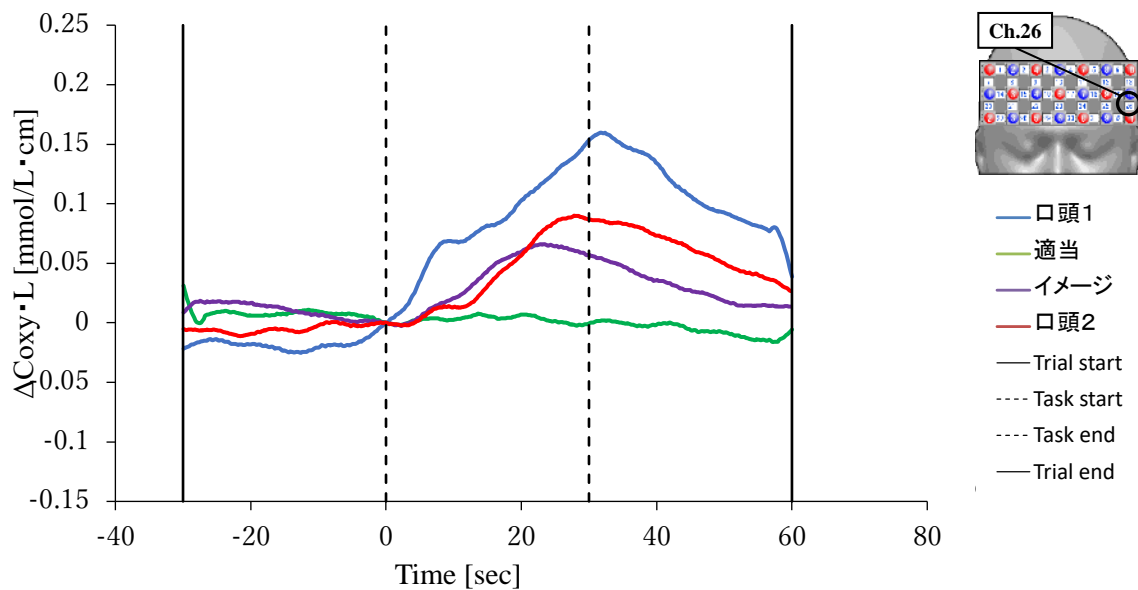


図 0.21 前頭前野左外側部（Ch.26）の Oxy-Hb 変化 被験者 A

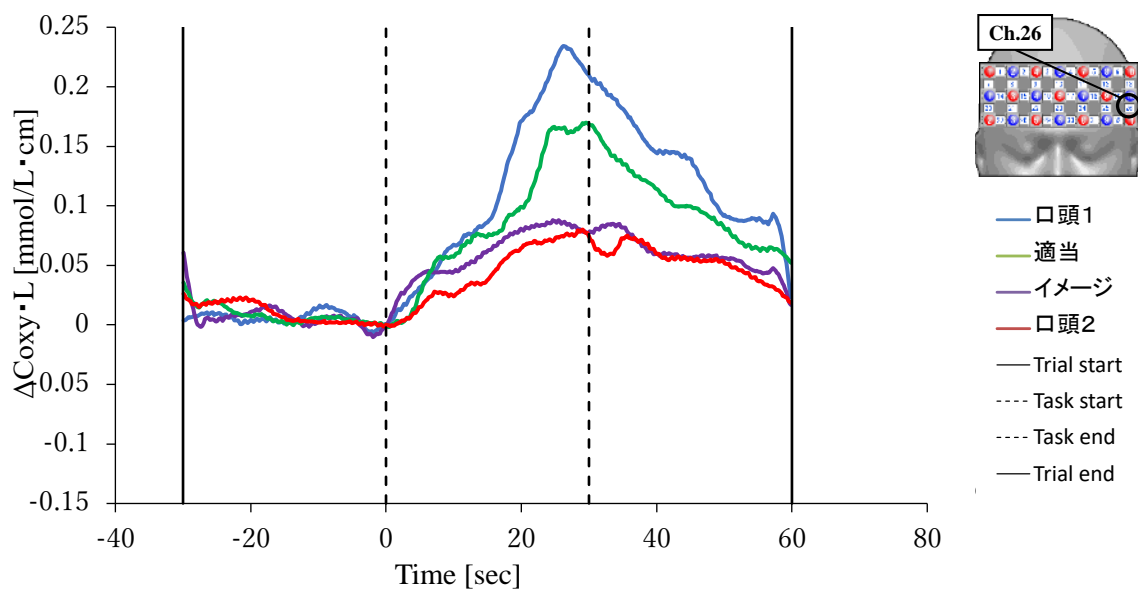


図 0.22 前頭前野左外側部（Ch.26）の Oxy-Hb 変化 被験者 B

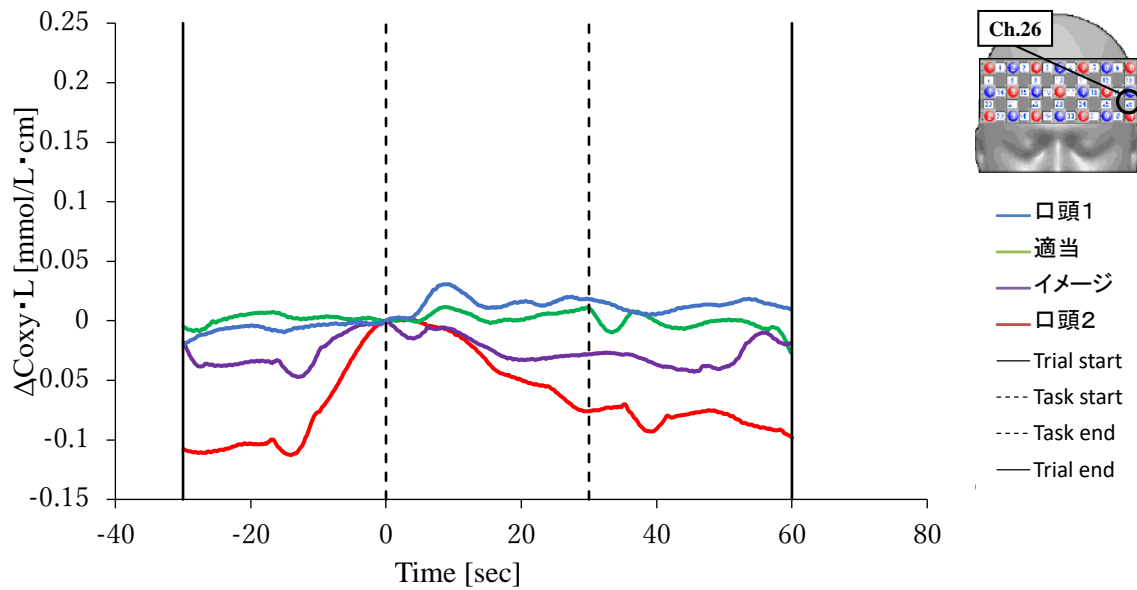


図 0.23 前頭前野左外側部 (Ch.26) の Oxy-Hb 変化 被験者 C

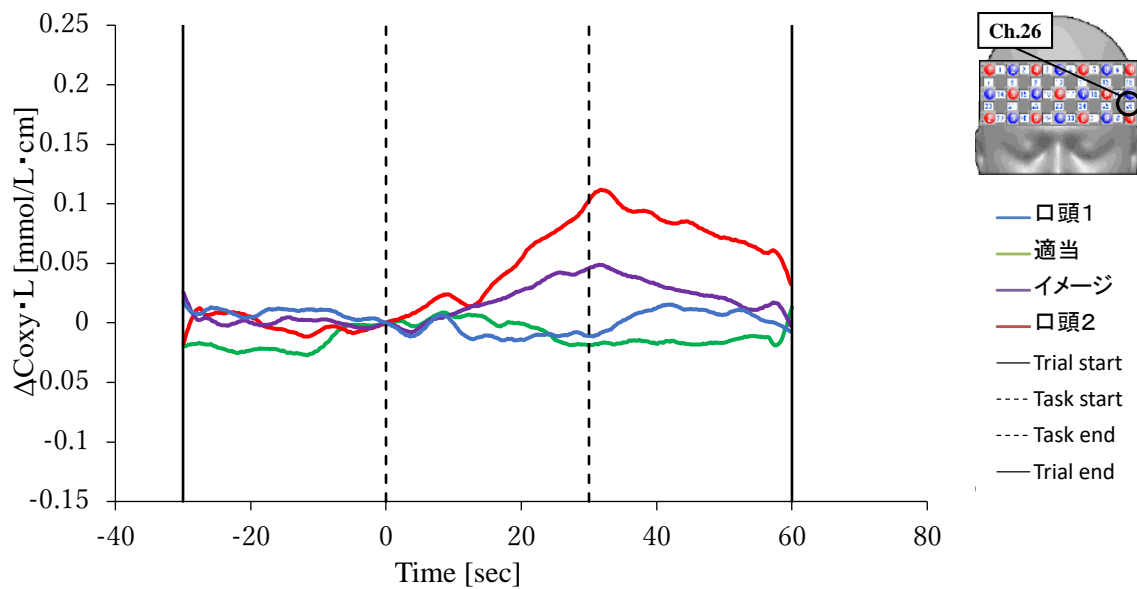


図 0.24 前頭前野左外側部 (Ch.26) の Oxy-Hb 変化 被験者 A 2 回目

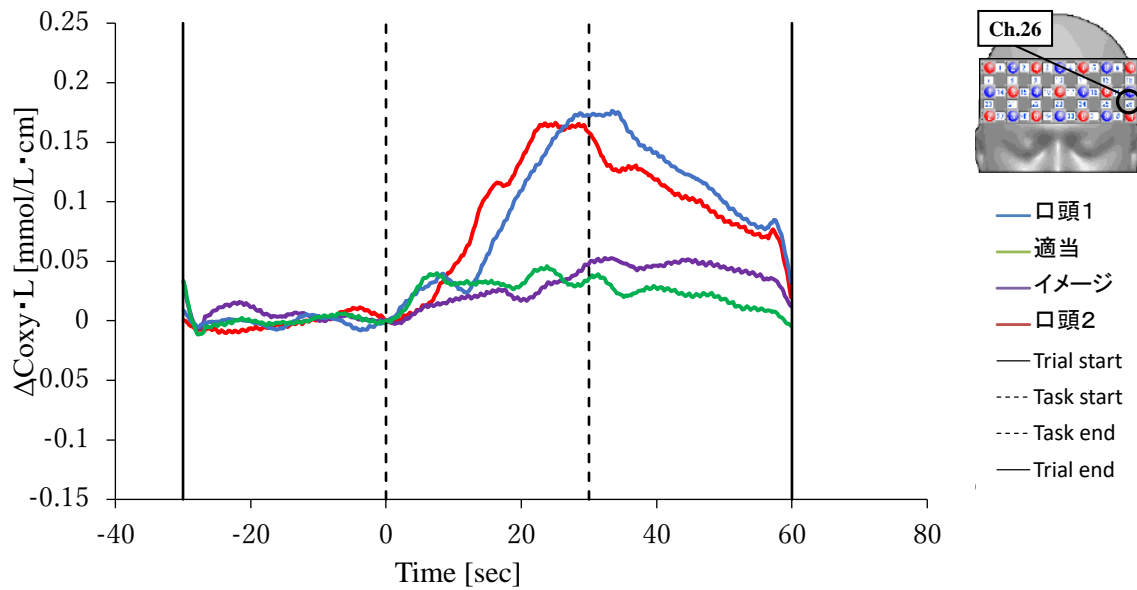


図 0.25 前頭前野左外側部 (Ch.26) の Oxy-Hb 変化 被験者 B 2 回目

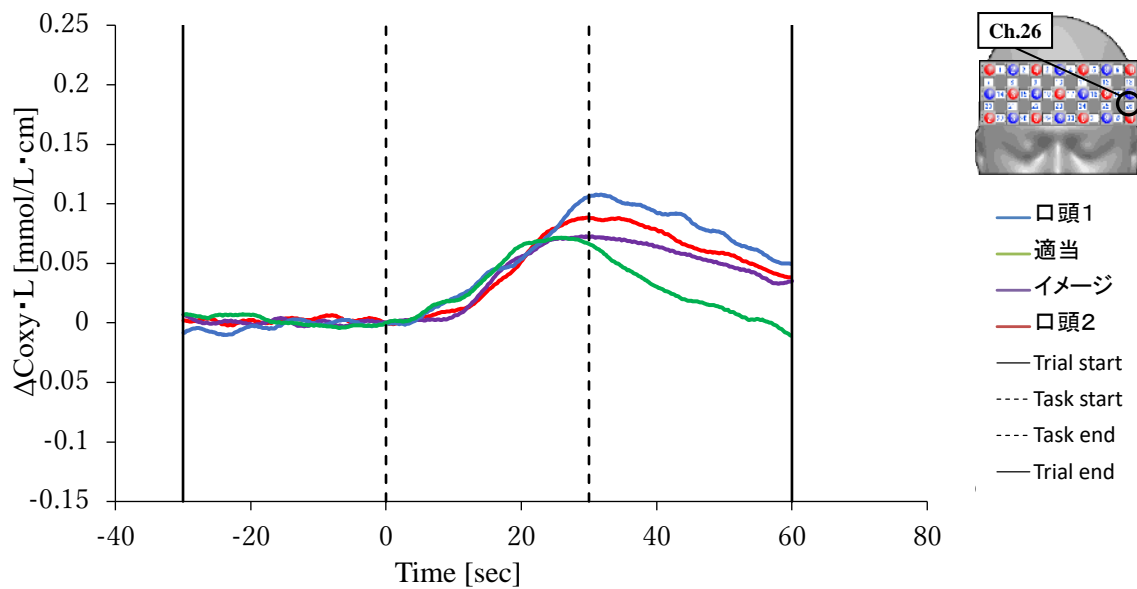


図 0.26 前頭前野左外側部 (Ch.26) の Oxy-Hb 変化 被験者 D

前頭前野外側部 (Ch.20, Ch.26) に関して、被験者 A, B, D については課題期間開始直後に Oxy-Hb が上昇する傾向がみられた。まず被験者 A の 1 回目について、適当な回答をする課題以外、課題期間中に Oxy-Hb が上昇する。被験者 B の 1 回目 2 回目、被験者 D に関してはどの課題においても、課題期間中に Oxy-Hb が上昇する。被験者 C については、他の被験者ほど課題期間の Oxy-Hb 上昇傾向は見られない。被験者 A の 2 回目では口頭 1 の課題と適当に回答する課題において Oxy-Hb 変化が見られず、他の課題では上昇傾向が見られる。被験者 A, B については、前頭前野外側部における Oxy-Hb が上昇傾向を示すという点において、再現性が見られると言える。

回答を口頭により行う課題と、回答を口頭により行うが適当な数字を答える課題を比べることにより、暗算による脳活動変化の考察を行うという目的であった。しかし平滑化及び信号の初期位置調整のみを行った、生データにより近い状態での本データ結果においては、適当に回答する場合、前頭前野外側部において Oxy-Hb が上昇を示さなかったのは被験者 A のみである。この結果から暗算をしない課題においても Oxy-Hb が上昇傾向を示すため、この上昇は命題を理解するという脳活動、あるいは脳活動ではなくあごの動き、あるいは言語の発音機能に関連する可能性を考慮する必要がある。また、あごの動きに着目するために設定した適当な数字を答える課題であるが、被験者が数字の選定を行う際の脳機能が影響している可能性もある。

しかし一方で、回答を頭の中で行う課題においても前頭前野外側部における Oxy-Hb 上昇傾向が見られる。そのためこの反応については、暗算課題を遂行するワーキングメモリの脳機能、回答を行う際のあごの動き、発音機能、命題を理解する脳機能のそれぞれが関与していると考えられる。

暗算実験の結言

本実験では動作学習実験に続き、被験者に対して暗算命題を口頭で呈示し、それを計算する際の被験者の脳活動をNIRSにより計測した。その結果、前頭前野外側部におけるOxy-Hbの上昇傾向が見られた。この前頭前野外側部におけるOxy-Hbの上昇傾向は、暗算を口頭で回答する場合、適当に回答する場合、暗算をイメージで回答する場合、どの課題においても見られる傾向である。そのためこの反応については、暗算課題を遂行するワーキングメモリの脳機能、回答を行う際のあごの動き、発音機能、命題を理解する脳機能のそれぞれが関与している可能性が考えられる。ただしこれまでの動作学習実験の結果を考慮すると、動作学習実験においても前頭前野外側部におけるOxy-Hbの上昇傾向は見られていたため、ワーキングメモリに関与した反応である可能性が高い。

本実験では、被験者が命題を受け、その記憶を保持して計算を続けるという課題に対して、動作学習実験では、対象を観察し続けること、また組み立てている手順が記憶と一致しているかといった認識も重要な要素である。一方で本実験と動作学習実験における前頭前野外側部の賦活傾向に同傾向が見られることから、ワーキングメモリに関する脳機能の中でも、これらの実験で設定した課題の共通点、すなわち情報を記憶・保持し、これまでの経験（長期記憶）と組み合わせて出力するという機能に関与していると考えられる。図 0.27 にこれらの考えをまとめた概略を示す。

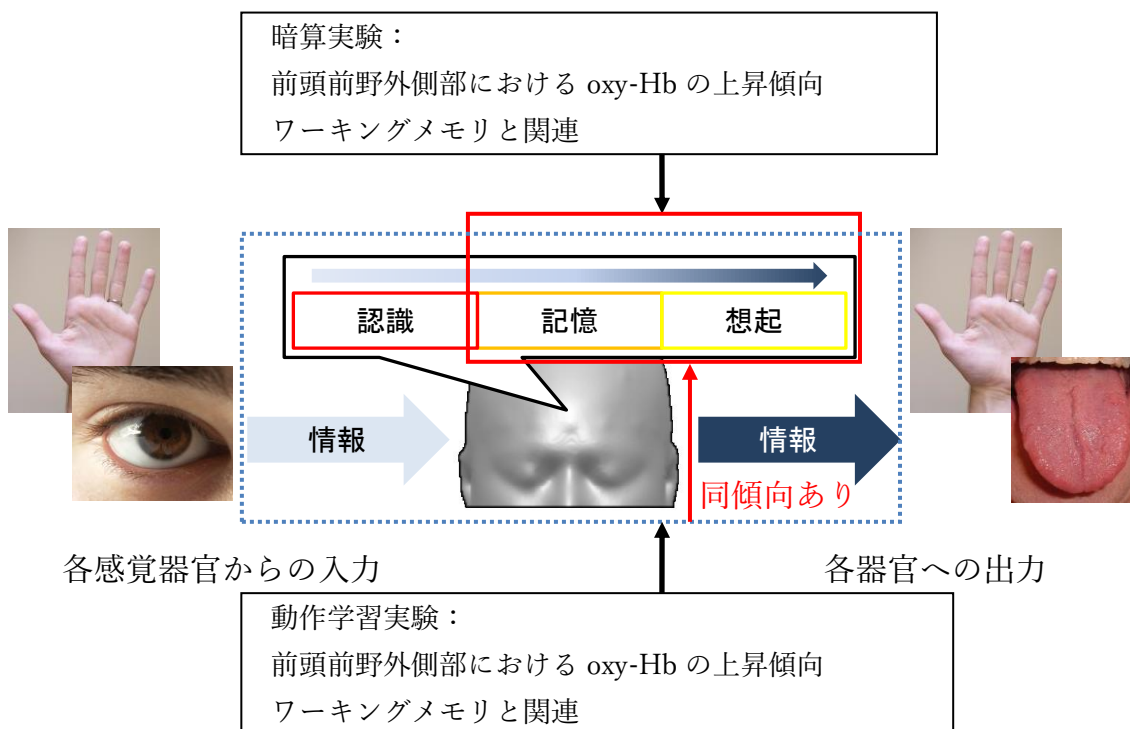


図 0.27 学習構造と実験結果との比較考察の概略

業績リスト

1. 投稿論文 [査読あり]

1. Keiichi Watanuki, Yusuke Asaka : Analysis of the Process of Embodied Knowledge Acquisition Using Near-infrared Spectroscopy, Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, pp.2693-2699, 2012
2. Yusuke Asaka, Keiichi Watanuki, Lei Hou : The Trend in the Frontal Area Activity Shift with Embodied Knowledge Acquisition during limitation Learning of Assembly Work, Springer Lecture Notes in Computer Science, New Frontiers in Artificial Intelligence, pp.485-498, 2015
3. 浅賀裕介, 綿貫啓一 : 身体知獲得過程における動作の再現性と脳賦活反応との関係, 日本機械学会論文集, Vol.83, No.842, 2016
4. 浅賀裕介 : 近赤外分光法を用いた見まねによる動作学習時における脳賦活反応計測, 日本機械学会論文集, (2021年3月掲載決定済)

2. 国際会議における発表 [査読あり], [口頭]

1. Yusuke Asaka, Keiichi Watanuki, Lei Hou : The Trend in the Frontal Area Activity Shift with Embodied Knowledge Acquisition, Second International Workshop on Skill Science, Associated with JSAI International Symposia on AI 2015 (IsAI-2015), SKL-Lec.2, Yokohama-si, Kanagawa, Japan, November 2015
2. Yusuke Asaka, Keiichi Watanuki, Shuichi Fukuda, Keiichi Muramatsu, Kazunori Kaede : Human action modeling and application to a control system using the Mahalanobis-Taguchi System, ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC 2016, Charlotte, North Carolina, United States of America, August 2016
3. Yusuke Asaka, Keiichi Watanuki, Shuichi Fukuda, Keiichi Muramatsu, Lei Hou : Analysis of brain activity influenced by replication accuracy in imitation learning in manufacturing industries, ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC 2016, Charlotte, North Carolina, United States of America, August 2016

3. 国内学会・シンポジウム等における発表 [査読なし], [口頭]

1. 浅賀裕介, 綿貫啓一 : 近赤外分光法を用いた脳能計測による製品の定量的印象評価法の提案, 日本機械学会 (2010年度年次大会), S1108-3-1, 愛知県名古屋市, 2010年9月
2. 浅賀裕介, 綿貫啓一 : 身体知獲得過程における動作の再現性と脳賦活反応との関係,

日本機械学会 第 25 回設計工学・システム部門講演会, 1310, 長野県長野市, 2015 年 9 月

3. 浅賀裕介, 綿貫啓一: ものづくり模倣学習における身体知獲得過程の脳賦活反応解析, 第 16 回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, 3L2-5, 愛知県名古屋市, 2015 年 12 月
4. 浅賀裕介, 綿貫啓一, 福田収一, 楓和憲, 村松慶一: 制御システムへの応用を目的とした MT システムによる身体動作のモデル化 (一枚概要), 日本機械学会, 2016 年度年次大会, J1210105, 福岡県福岡市, 2016 年 9 月