

修士論文

教示の有無における長期学習前後の脳活動と行動データの関係性の解析
Analysis of the relationship between brain activity and behavior data before and after
long-term learning with instruction

報告者

学籍番号: 1215043

氏名: 佐野 友哉

指導教員

星野 孝総 准教授

平成 31 年 2 月 12 日

高知工科大学 大学院工学研究科

基盤工学専攻 電子・光システム工学コース

目次

第1章	序論	3
	1.1 研究背景.....	3
	1.2 研究の目的・概要.....	3
第2章	MRI	5
	2.1 MRIの仕組み.....	5
	2.2 fMRI の仕組み.....	6
	2.3 解析方法.....	6
第3章	遂行機能の学習	8
	3.1 遂行機能.....	8
	3.2 ハノイの塔.....	9
	3.3 個体学習.....	9
	3.4 社会学習.....	9
	3.5 学習の定義.....	10
	3.6 評価法の定義.....	12
第4章	予備実験	13
	4.1 実験課題.....	13
	4.2 実験方法.....	14
	4.3 実験装置.....	15
	4.3.1 fMRI 実験時の実験装置.....	15
	4.3.2 学習時の実験装置.....	16
	4.4 fMRI 解析結果.....	16
	4.5 パフォーマンス結果.....	18
	4.6 考察.....	18
第5章	本実験	21
	5.1 実験課題.....	21
	5.2 実験方法.....	22
	5.3 実験装置.....	24
	5.3.1 fMRI 実験時の実験装置.....	24
	5.3.2 学習時の実験装置.....	24

5.4	fMRI 解析結果.....	25
5.5	パフォーマンス結果.....	25
5.6	考察.....	32
第6章	結論.....	33
	謝辞.....	34
	参考文献.....	35
	研究業績.....	37

第 1 章 序論

1.1 研究背景

近年, 脳活動を測定するために脳に関するデータを取得可能な **Magnetic Resonance Imaging (MRI, 核磁気共鳴画像法)** などの計測機器が活用されている。これらの計測機器を活用して, 学習に関する様々な研究が行われている。その中で, 人間の認知機能に含まれる「遂行機能」を解明すべく研究が行われている[1][2][3]。遂行機能とは「将来の目標達成のために適切な構えを維持する能力」と定義されている。遂行機能は, 1) 目標設定, 2) 計画立案, 3) 計画実行, 4) 効果的遂行の 4 段階により成り立っている[4][5]。これらには, 人が感じるほとんどの感覚刺激に関して高次な処理を受けた後の情報が必要とされるため, それらが集まっている前頭前野は, 感情的な表出に大きな役割を果たしている。感情的な最終表出は, 学習プロセスにおける感情的フィードを補う役割があり学習プロセス時間と効率化に大きく影響する。また, 視覚情報を主とする空間感覚と指示決定を担っている頭頂葉は, 身体の様々な部位からの感覚情報の統合に関する知識, 対象の操作などに関する機能に重要な役割を持つ。このため, 認知判断の実施はここで行われている。小脳は細かな運動規則や精密な微調整をしており, 運動の正確性を維持する役目がある。小脳が損傷を受けると, 運動や平衡感覚に異常をきたすことが知られており, 精密な運動が難しくなり, 歩行においては酒に酔っているような千鳥足歩行になることが知られている。遂行機能は, 生活をするうえで重要な役割を担っているため, 遂行機能により賦活する脳部位を確認する重要性がある。遂行機能により賦活する脳部位を確認するための課題として, ハノイの塔を解く課題がよく利用される。

社会集団における学習の形式として自身の試行錯誤に基づく個体学習と, 他個体の模倣や他個体からの教示に基づく社会学習の 2 種類が考えられる[6]。そのため本研究では, 個体学習と合わせて, 社会学習に関するタスクについて考え, 実験・検証を行った。個体学習は, MRI 内で実験課題を行い, 社会学習では, 課題に対するコツを示した資料を用いて実験参加者に教示し, その後個体学習と同様の実験課題を行った。

1.2 研究の目的・概要

本研究では, 遂行機能により賦活する脳部位を確認するための課題として, ハノイの塔を解く課題を選定し, 実験を行った。ハノイの塔を解く課題は, 遂行機能を調べる上でよく使われており研究事例も多い[1][7][8][9]。本研究室ではこれまで, 遂行機能関連脳部位の学習による変化を解明すべく, ハノイの塔課題を用いた **functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI)** 計測をしており, 約二時間の学習前後の脳活動差の検証を行った[10]。fMRI 解析結果より, 前頭葉において活動が減衰する事が観測はされているものの, 被験者のパフォー

マンスのログから見た学習曲線からは学習の収束がまだ観測出来ていないことを問題点として挙げている。そのため本論文では、長期間の学習課題を行い学習の収束を確認して脳活動の解析を行う。

本研究では、脳機能マッピングの充実を目指している。脳機能マッピングを充実させることで、脳に損傷を受けた場合にどんな影響があるのかを調べられるとともに、学習に関する脳賦活を調べることで学習の効率化などの研究に役立てることができる。

本研究では学習を 1.5 か月にかけて（週 2 回の計 13 回）行い、実験参加者による課題遂行度合いを学習曲線として確認した。1, 4, 13 回目の学習の前に fMRI 計測を行い脳活動の解析を行った。本研究では、予備実験で個体学習のハノイの塔課題を行い、その結果を踏まえて本実験では社会学習と個体学習の 2 つの学習法で実験を行った。予備実験では、ハノイの塔の初期配置を固定して個体学習のみで実験を行った。本実験では、初期配置をランダムに配置して個体学習と社会学習で行った。社会学習は、課題に対するコツを示した資料を用いて実験参加者に教示した。学習時の操作回数に着目した学習曲線と fMRI 解析結果の関係性の解析を行った。

第 2 章 MRI

2.1 MRI の仕組み[11]

MRI とは、強い磁場を用いて体内の情報を画像化する手法やその装置のことである。MRI の原理について説明する。静磁場は MRI において磁気をもたらす。静磁場とは、強度が経時的に変化しない MRI 中心の強い磁場のことである。MRI は高磁場を用いて、体内にある原子核（ほとんどは水分子内にある水素原子核）を整列させることで、組織の特性をマッピングすることができる。画像を形成するために傾斜磁場と Radio Frequency (RF, ラジオ波) パルスの一連の変化を制御する手法が利用される。これをパルスシーケンスと呼ぶ。パルスシーケンスは、MRI 装置で特定の生理学的特性に感度をもつ画像が得られるように、傾斜磁場と RF パルスの一連の変動を制御するためのプログラムである。電磁場の周波数に依存してエネルギーは原子核に吸収される。MRI は水素原子に合うように調整されている。水素原子は水分子内にあり、人体で最も多い原子である。電磁場エネルギーは核にいったん吸収された後に放出されるが、放出されるエネルギー量は存在する核の数に依存する。

MRI には強い静磁場が必要だが、静磁場自体は MR 信号を発生することはない。MR 信号とは、サンプルにその共鳴周波数で電磁エネルギーを送る処理（励起）後の受信時に受信コイルにより計測される電流値のことである。電磁コイルを用いて、静磁場の中にある原子核の共鳴周波数で電磁場を発生させ、それを受信することで、MR 信号が作られる。電磁スペクトルのラジオ周波数帯域（MRI の典型的な磁場強度）に共鳴周波数を有しているため、こうした研究で用いられるコイルは RF コイルとも呼ばれている。

強磁場内に人が入ると、体内の原子核の磁気モーメントが磁場に沿って整列し、平衡状態になる。RF コイルから体内で共鳴が生じる特定の周波数（地場強度により決定される）で電磁波が送られると、平衡状態が破られる。この過程は励起と呼ばれる。原子核は励起する際にラジオ波パルスのエネルギーを放出する。ラジオ波パルスが止まると、原子核は平衡状態に戻り励起中に吸収していたエネルギーを放出する。その結果、放出されたエネルギーは RF コイルにより検出される。検出された電磁エネルギーが MR 信号である。

MR 信号は、空間情報を何も持っておらず、これだけでは画像を形成することができない。そこで、傾斜磁場コイルが静磁場内に傾斜磁場を導入することにより、画像に必要な空間情報を得る。傾斜磁場コイルの目的は、MR 信号に厳密に制御された空間的位置情報を与え、それぞれの部位で異なる信号を計測できるようにすることである。RF コイルと同様、傾斜磁場コイルは画像収集の際にのみ使用される。

2.2 fMRI の仕組み

一般的に、MRI 計測は脳の構造を計測するのに対し、fMRI は MRI を利用し、脳の機能、脳活動の変化を体に影響なく調べる方法である。血液中のヘモグロビンは、酸素を持っているとき「酸素ヘモグロビン」と呼ばれ、酸素を手放した後「脱酸素ヘモグロビン」と呼ばれる。「脱酸素ヘモグロビン」は、微小な磁性を持つことで MRI 内の磁場が僅かに乱されて、信号が弱められて返ってくる。神経細胞が活動すると、神経細胞に酸素を供給するために、「酸素ヘモグロビン」が流れてくる。これにより、磁場を乱していた脱酸素ヘモグロビンが減少し MR 信号が強くなることで脳活動を調べている。

脳部位の活動が活発になると、酸素が集まってくる。つまり脳が賦活すると、酸素ヘモグロビンの濃度が高くなることがわかっている。これらの酸素濃度に連動したヘモグロビン濃度の変化を計測することで、脳活動の活性度合を調べることが出来る。したがって、これらの酸素濃度に関連している血流量を計測することで、脳活動領域を時間変化とともに調べることが可能となる。

2.3 解析方法[12]

本論文の解析では、Math Works 社製の Matlab 上で動作する Statistical Parametric Mapping (SPM) を用いて行った。SPM ではデータの前処理、個人解析を行った。前処理の手順を以下に示す。

1. **Realign** : 頭の動きによる位置ズレの補正
2. **Slice timing** : スライス間の撮像時刻のズレの補正
3. **Coregister** : 異なった画像の位置合わせ
4. **Normalize** : MNI template への解剖学的標準化
5. **Smooth** : 空間的平滑化

Realign では、Echo Planar Imaging (EPI) により機能画像を連続して撮像すると、頭の位置がずれてくる。そこで、EPI 画像を回転と平行移動することにより、最初の画像の位置に後続の画像の位置を合わせ、ズレを補正する。

Slice timing では、機能画像を軸位断で下から上に撮像したとすると、一番下の画像と一番上の画像とでは最大でほぼ **Time of Repetition (TR)** の時間だけずれることになる。TR とは、一回の全脳をスキャンするのに掛かる時間である。しかし SPM では通常そのことを考慮せずにモデルを立てるため、実際の脳活動とモデルとの間に時間差が生じ、活動があるにもかかわらず統計的に有意な活動とならない場合がある。**Slice timing** はこのスライス間の撮像時刻のズレを補正するものである。

Coregister では、それぞれ撮像方法が異なる画像どうし (T2*強調画像;EPI, 高解像度 3D 画像などの T1 強調画像) の位置合わせを行う。通常詳細な構造画像 (3D) は AC-PCline に沿って撮像されていることが多いので、こちらを基準にして EPI 画像を動かす。

Normalize では、データの標準化を行っている。まず 3D 画像とテンプレートとなる標準脳画像 (SPM に付属) を用いて標準化パラメータを作成し、その値を用いて全 EPI 画像を標準化する。

Smooth は、1) Gaussian Random Field Theory の要件を満たす、2) ノイズを減少させる (S/N 比をあげる)、3) 解剖学的標準化により補正しきれない個人間の脳構造の違いを緩和する、などのために行う。重要な点は、「関心のある信号の広がりに見合い、かつノイズも十分に減らすことのできるような smoothing の大きさを設定すること」であるので、どのくらいの smoothing をかけるかは個々の実験に依存する。

次に、個人解析の手順を以下に示す。

1. Model specification & parameter estimation : モデルの作成と統計計算
2. Results : コントラストの作成と結果の表示

Model specification & parameter estimation では、デザインマトリクスを作成し、そのモデルによってどの程度脳の各ボクセルの信号変化を説明することができるかを推定する。

Results では、比較したい条件間のコントラストを作成し、その検定結果を表示する。本実験で行った検定は t 検定である。t 検定とは、帰無仮説が正しいと仮定した場合に、統計量が t 分布に従うことを利用する統計学的検定法の総称である。

集団解析をするにあたり、結果の信頼性の観点から、15~20 人のデータが必要とされている。そのため、今回は個人解析のみを行い、各個人の傾向について考察する。今後、実験参加者の人数を増やすことで、集団解析をしていく必要がある。

第3章 遂行機能の学習

3.1 遂行機能

遂行機能は、1) 目標設定、2) 計画立案、3) 計画実行、4) 効果的遂行の4段階により成り立っている[4][5]。これらには、人が感じるほとんどの感覚刺激に関して高次な処理を受けた後の情報が必要とされるため、それらが集まっている前頭前野は、感情的な表出に大きな役割を果たしている。感情的な最終表出は、学習プロセスにおける感情的フィードを補う役割があり学習プロセス時間と効率化に大きく影響する。また、視覚情報を主とする空間感覚と指示決定を担っている頭頂葉は、身体の様々な部位からの感覚情報の統合に関する知識、対象の操作などに関する機能に重要な役割を持つ。このため、認知判断の実施はここで行われている。小脳は細かな運動規則や精密な微調整をしており、運動の正確性を維持する役目がある。小脳が損傷を受けると、運動や平衡感覚に異常をきたすことが知られており、精密な運動が難しくなり、歩行においては酒に酔っているような千鳥足歩行になることが知られている。また、遂行機能は単一の脳機能ではなく、分割注意、複数課題の処理能力、思考セットの変換能力、思考スピード、帰納的推測といった下位脳機能から成り立つとされている[6]。Erik G. Willcutt らは Attention Deficit Hyperactivity Disorder (ADHD, 注意欠陥・多動性障害) 症状を持つ実験参加者群と、持たない実験参加者群の2群を対象に、遂行機能に関わる脳活動についてメタ解析を使って調査している。以前から認知科学的に脳の遂行機能部位に関連していることが指摘されてきたが、その症状の度合いによる違いについてワーキングメモリ、および行動計画に関連する部位を議論している。Erik G. Willcutt らによれば、重度の障害を持つ実験参加者には確かに関与は見取れるが、軽度の場合はそれが見られないことを示しており、さらに複雑な要因があると指摘している。遂行機能と計画には経験的かつ先験的な知識が必要であり、それらの欠落からの阻害が主な原因と考えられている。それらの要因と学習プロセスの違いについても論じられている[13]。人は遂行機能を獲得するときには、訓練などの学習が必要となる。一般的に補助による学習と単独での鍛錬を用いる学習に学習プロセスは大きく分けられる。近年では、これらをロボットやデータベースに置き換える研究が盛んにおこなわれている[14][15]。しかし、獲得する対象が変化すれば人によるサポートを必要とする。一方、単独での鍛錬を用いる学習は個人学習・個体学習とも呼ばれ、繰り返しのプロセスによって技能・機能を獲得していく。この場合は単純なプロセスレベルを繰り返す課題であることと、繰り返し時間(反復時間)が多くかかることが知られている[16]。これらの分野の研究は On-the-Job Training (OJT) によく用いられており、技能伝承・技能の保存に対して有効な手段として研究が行われている。

前頭前野、頭頂葉および小脳は、遂行機能の学習に関係するとされている[3]。RG Morris らの研究では、ロンドンの塔を用いて遂行機能を調査している。RG Morris らによればロンドンの塔課題中に実験参加者の前頭前野において、優位な局所脳血流量の増加が報告され

ている。これらの部位の賦活に変化があれば遂行機能の学習に関する結果だと考えることができる。

遂行機能により賦活する脳部位を確認するための課題として、ハノイの塔を解く課題がよく利用される。

3.2 ハノイの塔

ハノイの塔とは、パズルゲームの一種である。3本の塔と、中心に穴の開いた何枚かの異なる大きさの円盤で構成されている。基本的にゲームスタート時は一番左の棒に下から大きい順に円盤が積み重ねられており、所定のルールに従ってすべての円盤を一番右の棒に移動させるとクリアとなる。一手につき1枚しか円盤を動かすことができない、円盤の上にそれより大きい円盤を積むことができない、塔以外のところに円盤を移動させることができない等のルールがある。

3.3 個体学習

個体学習は試行錯誤などを経て個体が単独で成し遂げる方法であり、人や動物が持っている学習能力の1つである。一般的に学習が進むのに試行錯誤的な時間がかかり、作業プロセスに分解して検証できない場合に用いられる。巧の技や熟練者の技などのように洗練された技能の体得はこれらの部類に入り、達成・未達成の結果からしかフィードバックできない特徴を持つ。作業プロセスが長くなると学習が困難になる場合が多く、第3者による補助やマニュアルなどの補足的資料によって、これらを回避する場合が多い。

3.4 社会学習

観察学習 (observational learning) は、第3者の行動やしぐさを観察し、同様の行動やしぐさをマネしながら学習する手法であり、Miller らによれば、人間の模倣行動は模倣学習に分類されており、動因低減説で説明できるとしている[17]。動因低減説では、手がかり・反応・報酬 (強化学習) によって学習なり立つとされており、模倣学習には手ほどきをする第3者もしくは、それらを教示できるモデルが与えられ、同一的な行動反応によって受ける内部的報酬が不可欠である。外部からの強化・報酬が得られない、または必要でない場合でも観察するだけで学習が成立する場合がある。したがって、単純な個体学習に比べて社会的な構成要素を含めている学習仮説としてとらえ、「他個体からの教示もしくは他個体の行動の模倣による学習」を社会学習と定義することとした[18][19]。

3.5 学習の定義

本論文では、2つの学習法（個体学習と社会学習）を用いて実験を行った。個体トレーニング」を個体学習、「手ほどき資料+トレーニング」によって実施される学習を社会学習と定義する。予備実験では全実験参加者に個体学習を本実験では実験参加者を個体学習グループと社会学習グループに分けて実験を行った。社会学習では、自作した資料を用いて実験参加者に課題に対するコツを教示した。

課題のノウハウや解き方を学習する方法をノウハウ学習と定義する。本論文では、学習をプロセス学習ではなくノウハウ学習とする。プロセス学習とは、課題に対して解き方を学習するのではなく順番を学習する方法である。プロセス学習では、課題を解くときに考えて解くのではなく思い出して解くことになる。ノウハウ学習では、課題に対して解き方を考える。そのため、今回の実験ではノウハウ学習が遂行機能に関する学習について調べる事に合っていると考えられる。

学習を評価する指標として、学習の終了を Rasmussen の簡易モデル (SRK モデル) の Skill-base (熟練ベース) の行動レベルになることを想定するものがある[20]。図 1 に Rasmussen の SRK モデルを示す。SRK モデルとは、人間の行動を Skill-base (熟練ベース)、Rule-base (規則ベース)、Knowledge-base (知識ベース) の3段階に分けているモデルのことである。学習スキルの初期段階では、知識ベースの振る舞いとなり、おおくの時間を必要とする。多くの訓練を行うとルールが構築され、やがて規則ベースとなる。さらに成熟すると、目からの視覚情報のセンシングだけではなく、脳内でモデル化された推測状況に準じた行動を選択することになる。そのため、視覚情報の正確性に係らず瞬時に行動を選択するようになる。これが熟練ベースとなる。この場合は、視覚情報の変化に反応するため、もっとも短い時間で行動を選択・遂行することとなる。

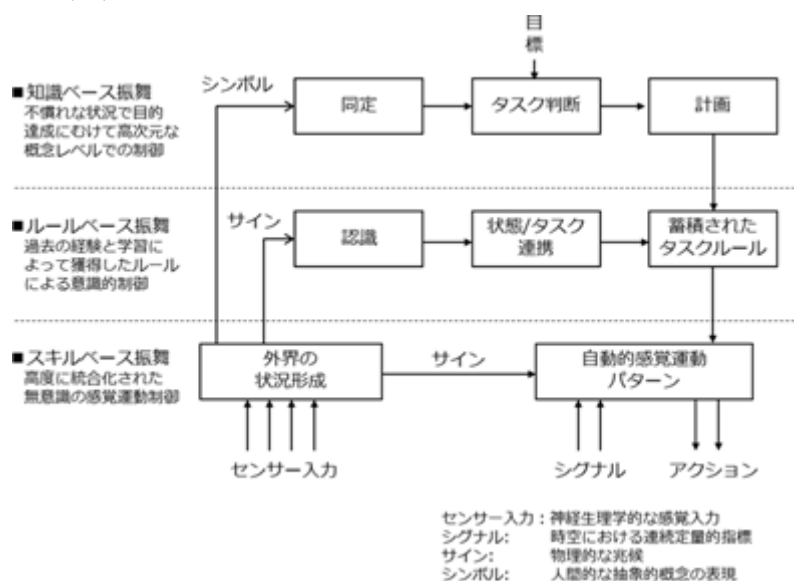


図1 Rasmussen の SRK モデル[2]

熟練ベースの行動レベルになると、見てから行動するまでにかかる時間は、眼球運動にかかる時間が 230ms なので、この 230ms が目安になる。Card らによるモデルヒューマンプロセッサによれば、人間の反応測度は眼球運動が基準となっている。目から入った情報を知覚・認知・ルール選択・運動の順番で行われている時、眼球の運動と連動して動作する。したがって、眼球運動が最も短い運動であり、手足の運動はこれらの時間(230ms)より短くなることはない。計測時間として、短くなった場合は、図 2 に示す脳内のプロセスのうち、学習記憶や連想記憶によってプロセスが省かれ、その結果運動測度が早くなることになる。

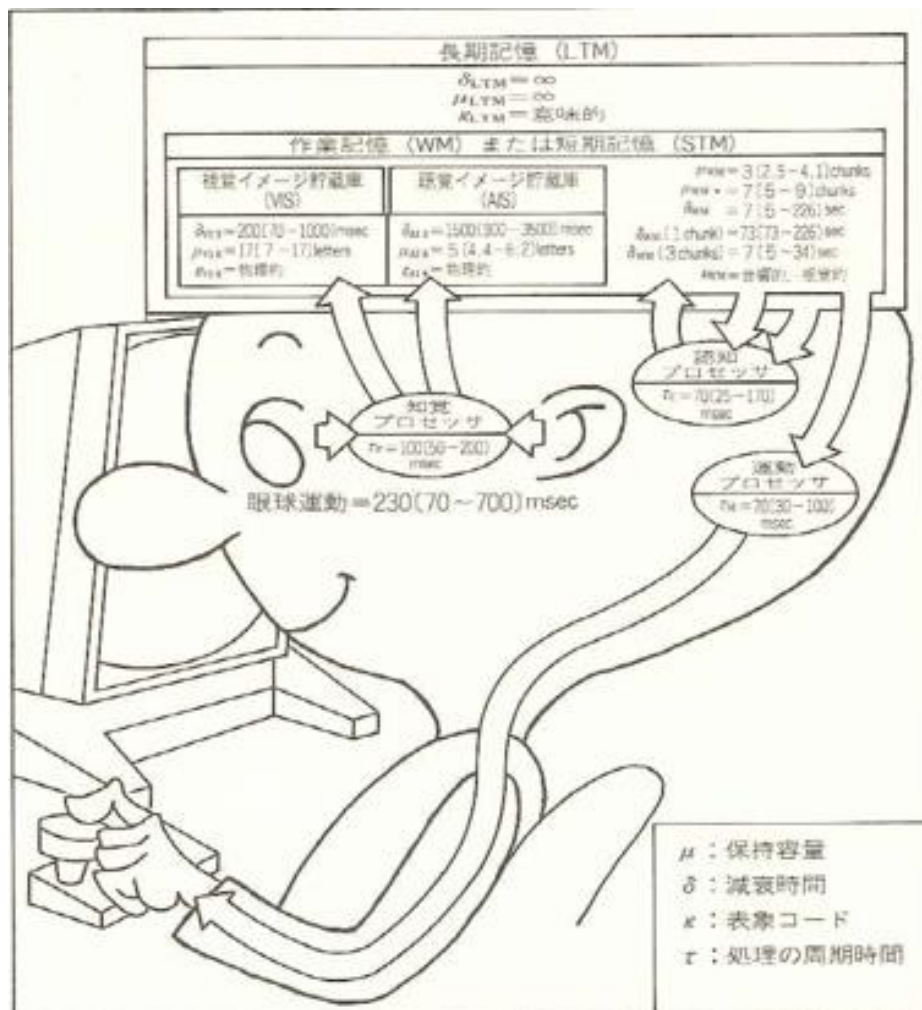


図 2 モデルヒューマンプロセッサ[2]

3.6 評価法の定義

本研究では、パフォーマンスを進んだ手数と手順評価の2種類の評価法で評価した。図2に進んだ手数の増減についてのルールを示す。進んだ手数とは、ハノイの塔を(1回クリアするのに最短31手 × クリア回数)+(最短31 - 終了時の塔の円盤の配置のクリアまでの最短手数)のことである。進んだ手数を計算することで何手先に進めることができたかを知ることができる。図3に手順評価の増減についてのルールを示す。手順評価とは、1手ごとに行った手を評価して最短手数の手(最適手)を打てば+1, それ以外(残り手数が変わらない手, 残り手数が増える手)は-1とした。

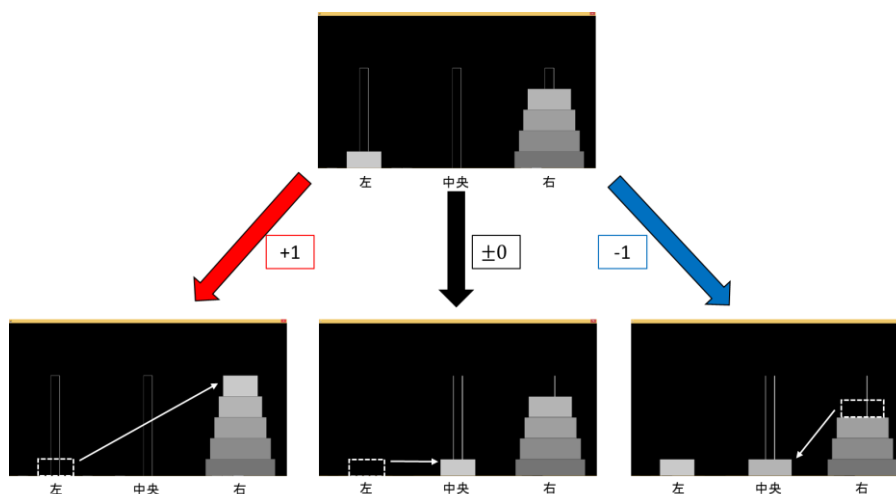


図2 進んだ手数の増減

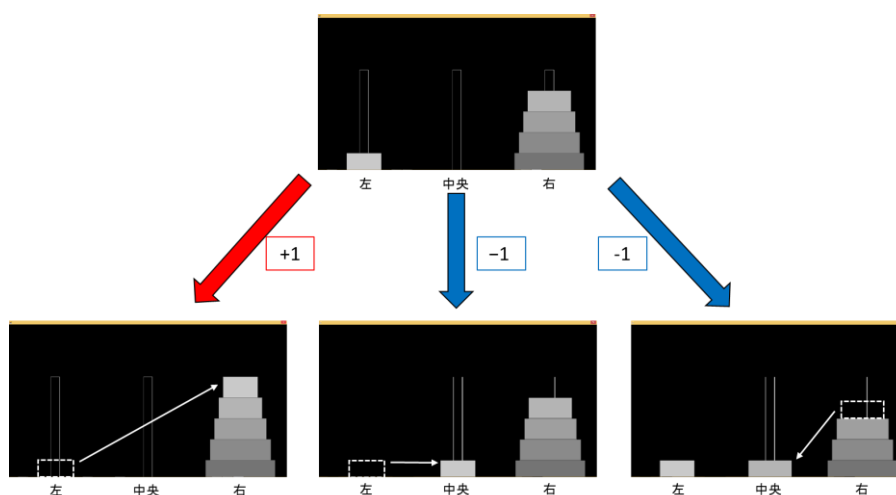


図3 手順評価の増減

第4章 予備実験

予備実験では、本実験に向けて実験にかかる期間や fMRI 計測を行うタイミングなどを調査するために、実験を行った。

4.1 実験課題

ハノイの塔を解く課題は、遂行機能を調べる上でよく使われており研究事例も多い [1][7][8][9]。そのため、本実験ではハノイの塔を実験課題として選定した。実験参加者は図 4 に示すように左側に積まれた円盤を 1 つずつ移動させ、最終的に全ての円盤を右側に移動させる。この課題のルールを次に示す。

- ・ 3本の塔と、大きさの異なる複数の円盤から構成される。
- ・ 初期配置は、円盤が左の塔に下から大きい順に重ねられている。
- ・ 円盤の移動は1手につき1枚ずつである。
- ・ 円盤の上にはそれより大きな円盤を乗せることは出来ない。
- ・ 全ての円盤を右の塔に重ねることが出来れば完成となる。

n 枚の円盤における完成までの最短手数は $2^n - 1$ 回であり、本実験で用いる 5 段の塔では 31 手が最短手数となる。ハノイの塔では、試行錯誤的に円盤を移動して展開される個々の状態（個別的事象）に基づいて、完成形を再現させる最終的方法（一般的方法）を編み出していく。

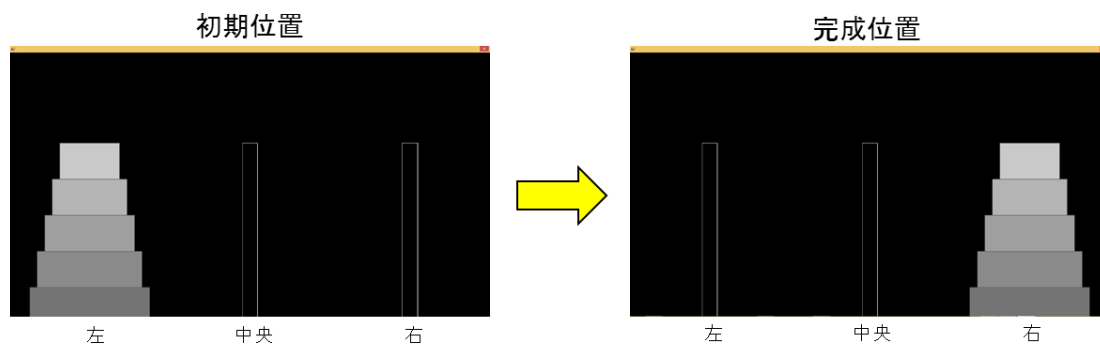


図 4 予備実験時のハノイの塔の初期位置と完成位置

4.2 実験方法

予備実験での条件を次に示す.

- ・ 実験参加者 (20代, 男性3名, 女性1名)
- ・ 期間は約 1.5 か月間, 学習は週 2 回の計 13 回
- ・ 学習は約 40 分間の個別学習 (必要に応じて休憩をとる)
- ・ fMRI 計測は 1 回目, 4 回目, 13 回目の学習の前に行う
- ・ 最後の fMRI 計測は実験参加者の学習が十分に進んでいることを確認して行う

fMRI 画像の撮像には, SIEMENS 社製の MAGNETOM Verio 3T を用いた. 撮像パラメータを以下に示す.

- ・ TR/TE = 2500/30ms, FoV = 192mm², Voxel size = 3.0mm³, slice thickness = 3.0mm
- ・ 1セッションにつき 136 スキャン撮像
- ・ 撮像開始から数スキャンは組織の縦磁化が非常定であるため解析では 2 スキャン分除外
- ・ 位置情報を得るために, 1.0mm³ の解像度の解剖画像を T₁ 強調画像で撮像

実験デザインには「休みと課題を交互に行うタスク形式」を組み合わせたデザインであるブロックデザイン方式を採用した[21]. 指定した時間・間隔で実験参加者に課題を遂行してもらうために, このブロックデザイン方式を採用した. fMRI 計測で得られた fMRI 画像の学習経過による脳活動の推移の確認を行った. 課題内容は, MRI 内で専用のコントローラを用いた 5 段のハノイの塔を解く課題 (各 40 秒) を実施した. 図 5 に実験課題の流れを示す.

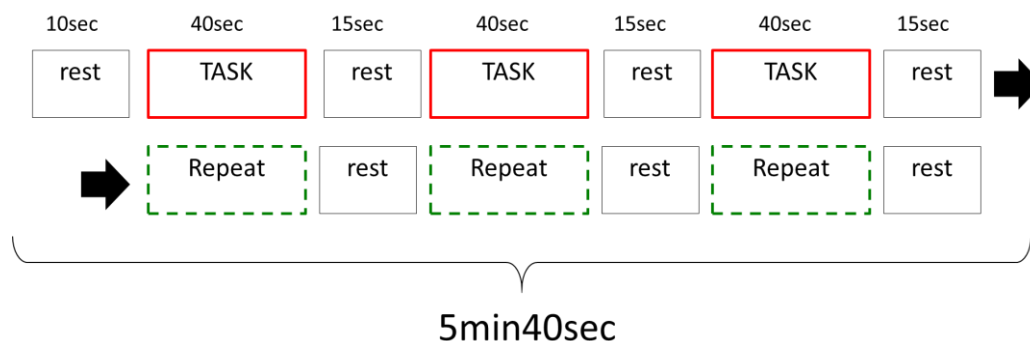


図 5 実験課題のタスク

Task ブロックと Repeat ブロックでは 5 枚の円盤によるハノイの塔課題を 3 ブロックずつ行った。各ブロックの内容について以下に述べる。

- Task :** ハノイの塔課題を実施する。課題が完成した場合、円盤は初期位置に戻る。実験参加者には課題が完成しても時間内であれば繰り返し解くように教示する。
- Repeat :** 実験参加者が Task ブロックで実際に動かした課題の再現映像を投影し、その動きに合わせてコントローラの下ボタンを押すよう教示した。この時のボタン押下は課題に影響しない。したがって、Repeat ブロックにおいてスキャンした画像には、視覚野と運動野の賦活情報のみが含まれていることになる。つまり、Task ブロックの賦活画像から Repeat ブロックの賦活画像の差分をとることで、遂行機能に関する賦活情報のみ取り出すことができる。
- Rest :** スクリーン中央に表示される十字記号を注視するように教示した。

学習では fMRI 計測で行う課題を計 5 試行実施した。課題間では必要に応じて休憩をとる。1 回の学習で課題 1 回 5 分 40 秒を 5 回+休憩や準備で約 40 分間の個体学習を行った。個体学習の間隔は週に 2 回で可能な限り等間隔になるよう（月→木、火→金など）実施した。

学習時に、実験参加者のタスク時の押したボタンの種類（上下左右）とその時間、終了時の塔の円盤の配置、課題達成回数や開始から終了までの円盤の配置の記録を行った。終了時の塔の円盤の配置と課題達成回数から進んだ手数を計算している。開始から終了までの円盤の配置から手順評価を行っている。

4.3 実験装置

本研究では、fMRI 実験時は MRI、学習時は疑似 fMRI 実験用インターフェースを用いて実験を行った。実験課題の提示および反応取得はマイクロソフト社製のソフトウェア、Microsoft Visual Studio Express 2015 を用いて c# で実験プログラムを作成および実行し制御した。

4.3.1 fMRI 実験時の実験装置

実験参加者は MRI 装置に仰向けに横たわった状態で、右手に持ったコントローラを用いてハノイの塔課題を遂行した。fMRI 実験時の課題映像は、MRI 室外に設置したプロジェクタから望遠レンズを通して、MRI 装置の頭部側開口部に設置した樹脂製スクリーン上に投射した。実験参加者は頭部上方のヘッドコイル外部に固定した鏡を介してスクリーン上の映像を視認した。図 6 に示す MRI 装置内にて操作可能な片手用 4 ボタンコントローラを右

手親指で操作することにより課題を遂行した。

4.3.2 学習時の実験装置

本実験の学習は自作した疑似 fMRI 実験用インターフェースを用いて行った。図 7 に実際に使用した疑似 fMRI 実験用インターフェースの全体図を示す。疑似 fMRI 実験用インターフェースとは、実際の fMRI 計測と同様な環境を構築するために必要な同期信号発生器、コントローラ、ディスプレイを置く台を作成し、ベッドを用意したものである。高知工科大学で使用されている MRI から送られてくる実験課題用の信号は、すべて USB キーボードプロトコル信号である。同期信号は「t」、コントローラのボタンの赤は「r」、青は「b」、緑は「g」、黄は「y」である。そのため、疑似 fMRI 実験用インターフェースのコントローラは fMRI 実験で使用されているコントローラと寸法を合わせ、送られる信号を USB キーボードプロトコル信号の赤は「r」、青は「b」、緑は「g」、黄は「y」に設定したものである。また、同期信号発生器は USB キーボードプロトコル信号の「t」を、設定した時間間隔で等間隔に信号を送るものである。コントローラと同期信号発生器は、1つの Arduino Uno を用いて制御を行ったものである。実際の MRI 内で Task を行うときは、仰向けに横たわった状態で行うため学習時も簡易ベッドの上で実験を行った。Task 画面はディスプレイを設置する台の上に置き、実験参加者に見えるようにして行った。

4.4 fMRI 解析結果

fMRI 画像の解析を行い、各実験参加者の個人解析を行った。fMRI 画像データについて、標準的な時間的・空間的な前処理を施した後、各実験参加者の画像データを取得する。前処理や個人解析には、MATLAB 上で動作する解析用ソフトの SPM8 (<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>) を用いた。

脳領域は解剖学的に定義され、Anatomy toolbox に従って標識された。統計的な閾値は脳の Peak level が Uncorrected ($p < 0.001$)、Cluster level が Corrected ($p < 0.05$) に設定した。本項では fMRI 解析結果として、実験ごとの脳活動の平均の脳活動度合をとった。図 8 は左前頭極、図 9 は右前頭極における実験ごとの脳活動の平均の脳活動度合の推移についてのグラフである。エラーバーは、実験 1 回ごとの標準偏差である。左右前頭極における脳活動推移を実験ごとに調査したところ、全実験参加者で脳活動が減衰するような傾向が見られた。

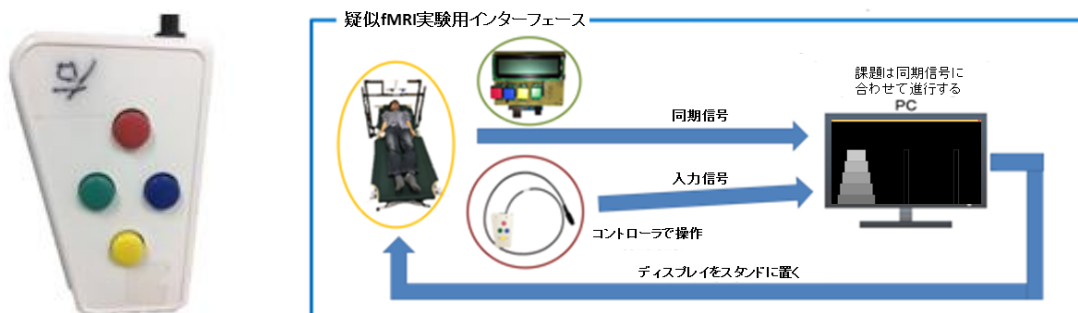


図6 実験に使用したコントローラ

図7 疑似 fMRI 実験用インターフェースの全体図

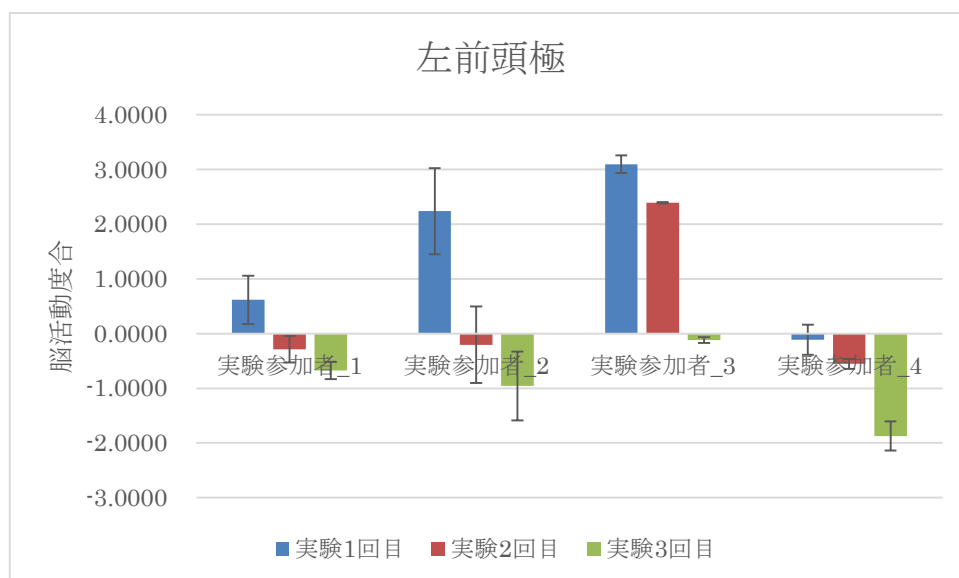


図8 左前頭極における実験ごとの脳活動の平均の脳活動度合の推移

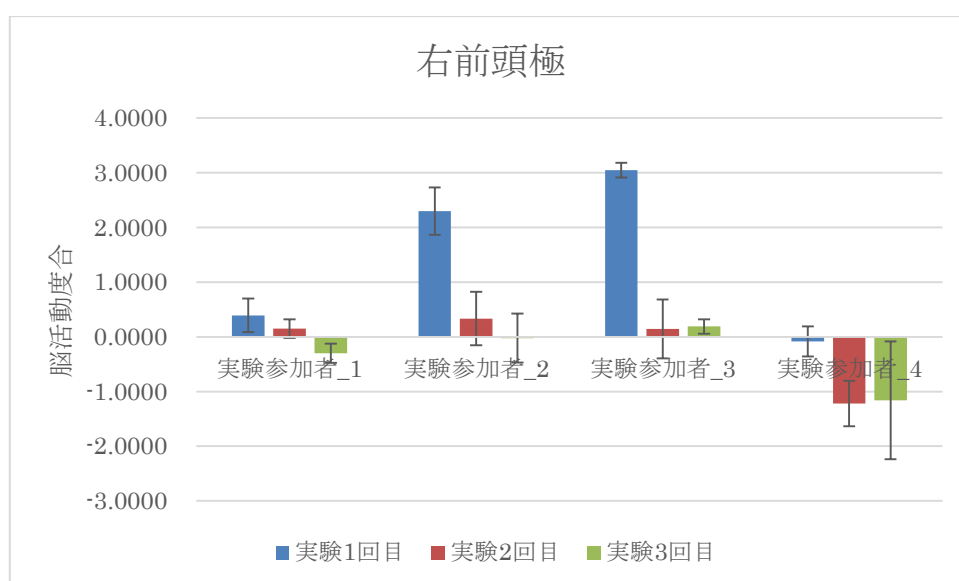


図9 右前頭極における実験ごとの脳活動の平均の脳活動度合の推移

4.5 パフォーマンス結果

図 10, 11, 12, 13 は進んだ手数, 図 14, 15, 16, 17 は手順評価とタスク回数のグラフである. この2つのグラフを学習曲線として, パフォーマンス結果を評価した. 実験の結果, タスク 100 回目頃から, 全実験参加者また両学習曲線の推移が横ばいになり始め, 少し上昇はしているがほぼ収束していると考えられる. どちらの評価方法の学習曲線も概ね同じ傾向を示している. 実験参加者ごとに何点か飛び値になっている. この原因として, タスク終了後に実験参加者にインタビューを行ったところ, 円盤のサイズが分からなくなり (3 段目と 4 段目の円盤) 大きいほうの円盤を小さいほうに乗せようとして進まなくなり, 手数の進みが少なくなってしまう. 最高到達点はそこまで差はないが実験参加者 3 のみ少し低くなっている.

4.6 考察

fMRI 解析の結果より, それぞれの被験者から共通して左右前頭極で, 脳活動が減衰するような傾向が得られた. また, 三谷らの研究でも同じ部位で減衰傾向が得られたので遂行機能に関与すると考えられる. このことより, 学習による認知処理が進んだと考えられる.

個体学習の結果より, 実験参加者ごとに学習曲線が収束するまでにかかるタスク数に大きな差が見られなかった. どの実験参加者の学習曲線も 100 回目のタスク (実験 7 回目) 以降は両学習曲線が収束しているため学習が済んだと考えられる. 飛び値は, 連続でタスクを行うことにより認識力の低下が起こったと考えられる.

どちらの結果でも, 学習が終了したと考えられる. その結果, 学習が進むと前頭極の脳活動が減衰すると考えられる.

予備実験では, ハノイの塔の初期位置を固定して実験を行った為, 実験参加者がハノイの塔を解く方法を学習したのではなく, ハノイの塔をクリアするために動かす順番を覚えてしまっている可能性がある. そのため, 実験参加者がプロセス学習をしている可能性がある. このことから本実験では, プロセス学習をしないようにするために初期位置を課題のルール内でランダムに配置した.

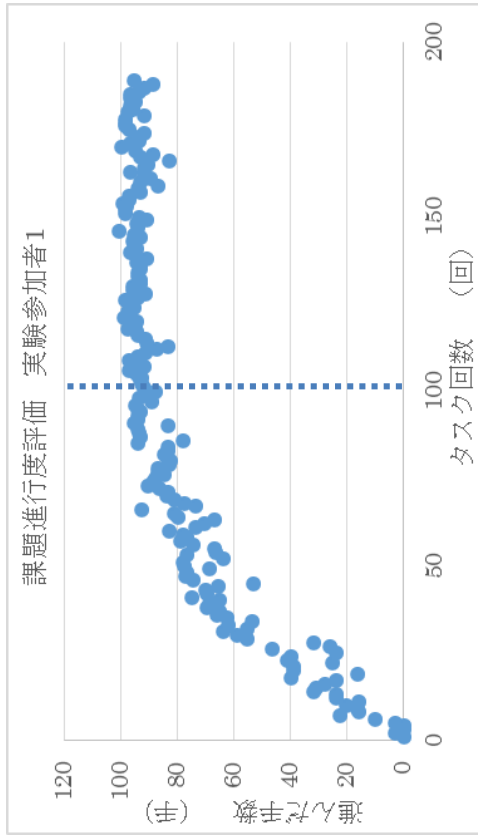


図 10 実験参加者 1 の進んだ手数 of 学習曲線

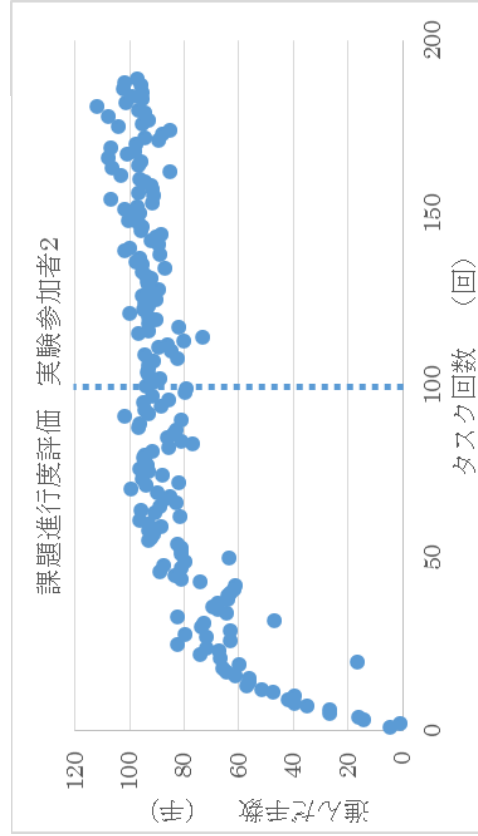


図 11 実験参加者 2 の進んだ手数 of 学習曲線

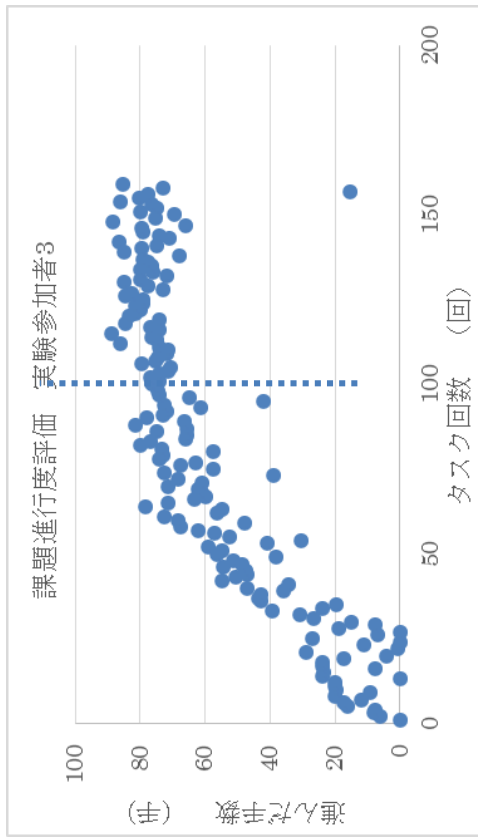
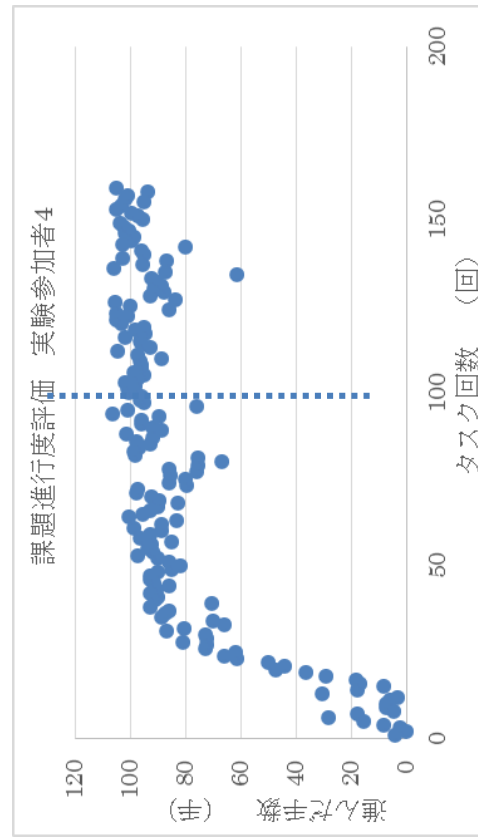


図 12 実験参加者 3 の進んだ手数 of 学習曲線



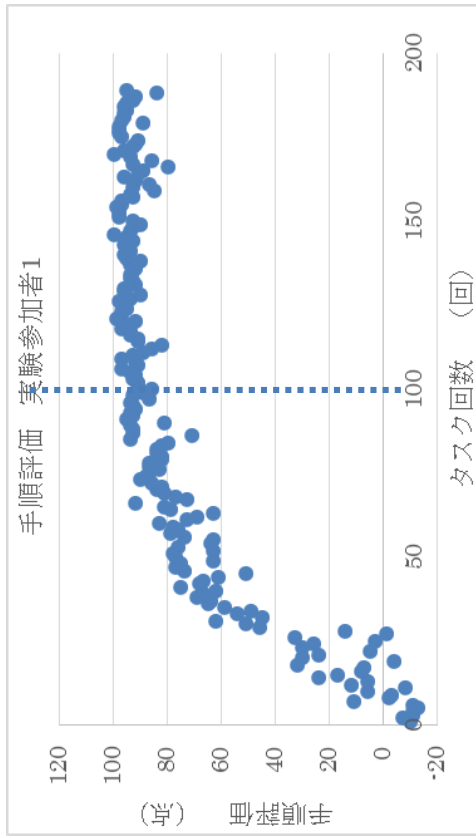


図 14 実験参加者 1 の手順評価の学習曲線

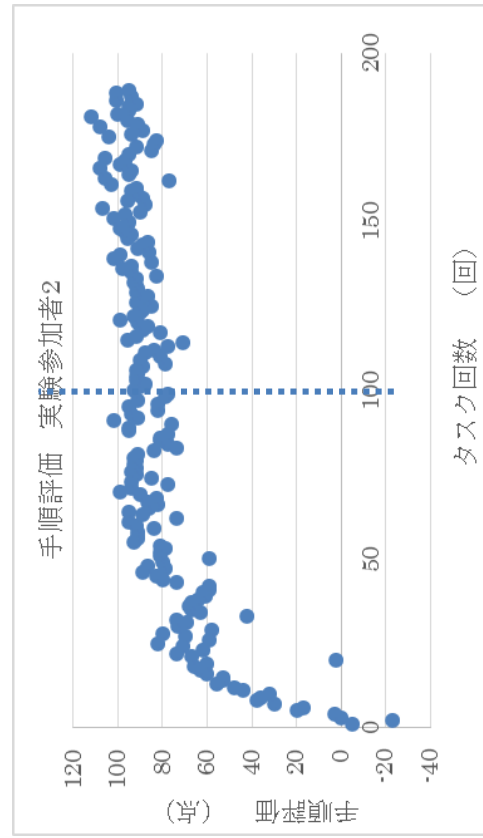


図 13 実験参加者 4 の進んだ手数の学習曲線

図 17 実験参加者 4 の手順評価の学習曲線

ハノイの塔の初期配置の選択方法は、課題の難易度を一定に保つために課題達成までの最短手数が5段のハノイの塔の最短手数である31手の配置から選択している。5段のハノイの塔の配置で31手の配置は32種類ある。この31手の配置の中から、fMRI実験時用を3種類、学習時用を15種類、計18種類を選択した。このとき、選択した配置が前後に選んだ配置と近すぎないようなものを選んだ。最短手数が31手の配置は、左の塔に円盤を5段積んである配置から、不正解の移動をした場合の配置である。そのため、1手分しか変わらない配置などがありその配置を連続で課題の初期配置として選んでしまうと、課題達成までの手順が被ってしまいプロセス学習してしまう可能性がある。本研究では、プロセス学習ではなくノウハウ学習を目指しているため課題達成までの手順ができるだけ被らない初期配置の順番になるように選択している。

5.2 実験方法

本実験での条件を次に示す。

- * fMRI計測ありの実験参加者（20代、男性2名）、
fMRI計測なしの実験参加者（20代、男性3名、女性3名）
- 期間は約1.5か月間、学習は週2回の計13回
- * 学習は約40分間の個体学習と社会学習（必要に応じて休憩をとる）
- fMRI計測は1回目、4回目、13回目の学習の前に行う
- 最後のfMRI計測は実験参加者の学習が十分に進んでいることを確認して行う

本実験では、*の実験条件を変更している。本実験では、実験参加者2名のほかに6名の実験参加者でfMRI実験を行わず学習のみで実験を行っている。学習のみの実験では、学習時のパフォーマンス結果から学習曲線等の傾向を確認するために行っている。fMRI実験を行ったのが社会学習者1と個体学習者1で、fMRI実験を行わなかったのが社会学習者2, 3, 4と個体学習者2, 3, 4である。

学習は個体学習と社会学習の2つの学習方法を行った。fMRI計測ありで1名ずつ、fMRI計測なしで3名ずつそれぞれの学習方法に振り分けて行った。2種類の学習法を行うことで、学習法による結果の違いも調べることができる。

fMRI画像の撮像には、SIEMENS社製のMAGNETOM Prisma 3Tを用いた。本実験では、fMRIが別の機種で実験を行っている。撮像パラメータを以下に示す。

- TR/TE = 2500/30ms, FoV = 192mm², Voxel size = 3.0mm³, slice thickness = 3.0mm
- * 1セッションにつき138スキャン撮像
- * 撮像開始から数スキャンは組織の縦磁化が非常定であるため解析では5スキャン分

除外

- ・位置情報を得るために、 1.0mm^3 の解像度の解剖画像を T_1 強調画像で撮像

本実験では、* の撮像パラメータを変更している。解析から取り除くスキャン数を多くすることで、撮像初期の組織の縦磁化が非常定であるスキャンを確実に除外することができる。

実験デザインには「休みと課題を交互に行うタスク形式」を組み合わせたデザインであるブロックデザイン方式を採用した[21]。指定した時間・間隔で実験参加者に課題を遂行してもらうために、このブロックデザイン方式を採用した。fMRI 計測で得られた fMRI 画像の学習経過による脳活動の推移の確認を行った。課題内容は、MRI 内で専用のコントローラを用いた5段のハノイの塔を解く課題（各40秒）を実施した。

Task ブロックと Repeat ブロックでは5枚の円盤によるハノイの塔課題を3ブロックずつ行った。

各ブロックの内容について以下に述べる。

- Task :** ハノイの塔課題を実施する。課題が完成した場合、円盤は初期位置に戻る。実験参加者には課題が完成しても時間内であれば繰り返し解くように教示する。
- Repeat :** 実験参加者が Task ブロックで実際に動かした課題の再現映像を投影し、その動きに合わせてコントローラの下ボタンを押すよう教示した。この時のボタン押下は課題に影響しない。したがって、Repeat ブロックにおいてスキャンした画像には、視覚野と運動野の賦活情報のみが含まれていることになる。つまり、Task ブロックの賦活画像から Repeat ブロックの賦活画像の差分をとることで、遂行機能に関する賦活情報のみ取り出すことができる。
- Rest :** スクリーン中央に表示される十字記号を注視するように教示した。

学習では fMRI 計測で行う課題を計5試行実施した。本実験ではスキャン数を増やした関係上、課題1回の時間が5秒伸びている。課題間では必要に応じて休憩をとり、1回の学習で課題1回5分45秒を5回+休憩や準備で約40分間の学習を行った。また、社会学習は約40分間の学習の前にハノイの塔の解き方のコツを示した資料を毎回5分間教示した。学習の間隔は週に2回で可能な限り等間隔になるよう（月→木、火→金など）実施した。

学習時に、実験参加者のタスク時の押したボタンの種類（上下左右）とその時間、終了時の塔の円盤の配置、課題達成回数や開始から終了までの円盤の配置の記録を行った。終了時の塔の円盤の配置と課題達成回数から進んだ手数を計算している。開始から終了までの円盤の配置から手順評価を行っている。

5.3 実験装置

本実験では、MRI が別の機種に変更されているがパラメータや使用方法に特に変更はなく疑似 fMRI 実験用インターフェースも同じものを使用している。

本研究では、fMRI 実験時は MRI，学習時は疑似 fMRI 実験用インターフェースを用いて実験を行っている。実験課題の提示および反応取得はマイクロソフト社製のソフトウェア、Microsoft Visual Studio Express 2015 を用いて c# で実験プログラムを作成および実行し制御した。

5.3.1 fMRI 実験時の実験装置

実験参加者は MRI 装置に仰向けに横たわった状態で、右手に持ったコントローラを用いてハノイの塔課題を遂行した。fMRI 時の実験課題映像は、MRI 室外に設置したプロジェクタから望遠レンズを通して、MRI 装置の頭部側開口部に設置した樹脂製スクリーン上に投射した。実験参加者は頭部上方のヘッドコイル外部に固定した鏡を介してスクリーン上の映像を視認した。P.17 の図 6 に示す MRI 装置内にて操作可能な片手用 4 ボタンコントローラを右手親指で操作することにより課題を遂行した。

5.3.2 学習時の実験装置

本実験の学習は自作した疑似 fMRI 実験用インターフェースを用いて行った。P.17 の図 7 に実際に使用した疑似 fMRI 実験用インターフェースの全体図を示す。疑似 fMRI 実験用インターフェースとは、実際の fMRI 計測と同様な環境を構築するために必要な同期信号発生器、コントローラ、ディスプレイを置く台を作成し、ベッドを用意したものである。高知工科大学で使用されている MRI から送られてくる実験課題用の信号は、すべて USB キーボードプロトコル信号である。同期信号は「t」、コントローラのボタンの赤は「r」、青は「b」、緑は「g」、黄は「y」である。そのため、疑似 fMRI 実験用インターフェースのコントローラは fMRI 実験で使用されているコントローラと寸法を合わせ、送られる信号を USB キーボードプロトコル信号の赤は「r」、青は「b」、緑は「g」、黄は「y」に設定したものである。また、同期信号発生器は USB キーボードプロトコル信号の「t」を、設定した時間間隔で等間隔に信号を送るものである。コントローラと同期信号発生器は、1 つの Arduino Uno を用いて制御を行ったものである。実際の MRI 内で Task を行うときは、仰向けに横たわった状態で行うため学習時も簡易ベッドの上で実験を行った。Task 画面はディスプレイを設置する台の上に置き、実験参加者に見えるようにして行った。

5.4 fMRI 解析結果

fMRI 画像の解析を行い、各実験参加者の個人解析を行った。fMRI 画像データについて、標準的な時間的・空間的な前処理を施した後、各実験参加者の画像データを取得する。前処理や個人解析には、MATLAB 上で動作する解析用ソフトの SPM12 (<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>) を用いた。

脳領域は解剖学的に定義され、Anatomy toolbox に従って標識された。統計的な閾値は脳の Peak level が Uncorrected ($p < 0.001$)、Cluster level が Corrected ($p < 0.05$) に設定した。それぞれの実験参加者ごとのパフォーマンス結果を重みとしてそれぞれの実験ごとの Task 引く Repeat の結果にかけて脳賦活を確認した。社会学習者 1 の fMRI 実験 1 回目のパフォーマンス結果を 1 として 2, 3 回目のパフォーマンス結果を計算すると、2 回目が 9, 3 回目が 13 となった。個体学習者 1 の fMRI 実験 1 回目のパフォーマンス結果を 1 として 2, 3 回目のパフォーマンス結果を計算すると、2 回目が 31.4, 3 回目が 201 となった。また、それぞれの fMRI 実験 3 回目の値を 1 とした逆数をとると、社会学習者 1 は 2 回目が 4, 1 回目が 13, 個体学習者 1 は 2 回目が 169.6, 1 回目が 201 となった。これらを重みとした脳賦活の結果を図 19~22 に示す。また、それぞれの脳活動のピーク座標を表 1, 2, 3, 4 に示す。表の脳部位名 (Region Label) は aal によってラベリングを行いました。Cluster Size は有意に賦活がある集合のボクセル (MRI 画像の最小単位) の数である。Peak MNI Coordinates は、MNI 座標系の x, y, z の座標である。t-value は、個人解析により t 検定によって求められた統計的な値である。

個体学習者 1 は、fMRI 実験 1 回目を 1 として重みを設定して賦活を確認した結果と、逆に 3 回目を 1 として逆数をとって重みを設定して賦活を確認した結果を比較すると、1 回目のほうが 3 回目と比較して小脳全体で有意な賦活が見られた。次に社会学習者 1 は fMRI 実験 1 回目を 1 として重みを設定して賦活を確認した結果と、逆に 3 回目を 1 として逆数をとって重みを設定して賦活を確認した結果を比較すると、視覚野のみで有意な賦活が見られた。

5.5 パフォーマンス結果

図 23~30 は進んだ手数、図 31~38 は手順評価とタスク回数のグラフである。これらのグラフを学習曲線として、パフォーマンス結果を評価した。実験の結果、予備実験と同様にタスク 100 回目頃からは、ほとんどの実験参加者また両学習曲線の推移が横ばいになり始め、少しばらつきがあるがほぼ収束していると考えられる。

図 23~26, 31~34 が社会学習、図 27~30, 35~38 が個体学習のグラフである。この 2 つのグループを比較すると、例外もあるが社会学習のほうが後半のパフォーマンスのばらつきが少なくなっている。また、手数が増え始める時期が社会学習のほうが早くなっている。

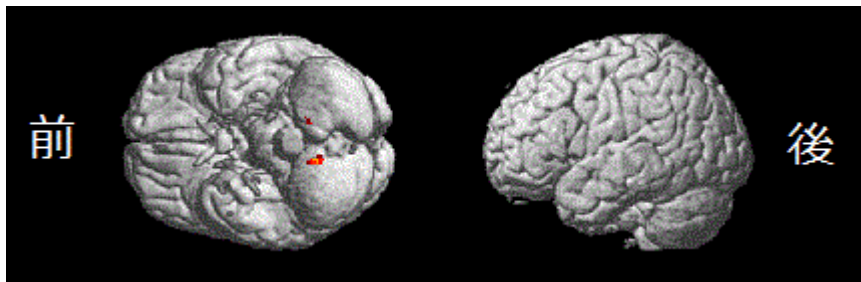


図 19 パフォーマンス結果に正の相関がある有意な脳活動領域（社会学習者 1）

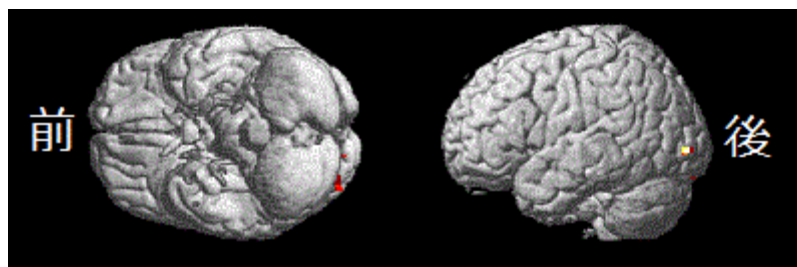


図 20 パフォーマンス結果に負の相関がある有意な脳活動領域（社会学習者 1）

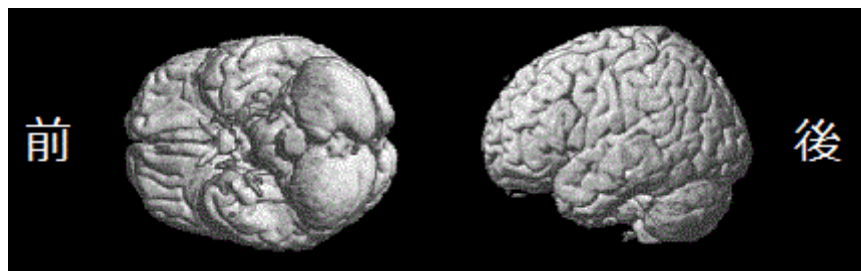


図 21 パフォーマンス結果に正の相関がある有意な脳活動領域（個体学習者 1）

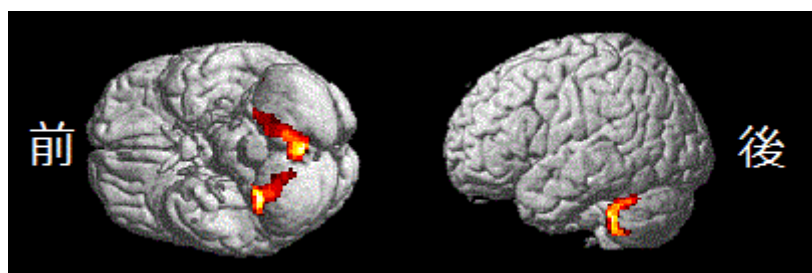


図 22 パフォーマンス結果に負の相関がある有意な脳活動領域（個体学習者 1）

表1 パフォーマンス結果に正の相関がある脳活動のピーク座標（社会学習者1）

Region Label	Cluster Size	Peak MNI Coordinates			t-value
		x	y	z	
Temporal_Mid_R	37	68	-56	-10	7.39
Cerebelum_9_L	24	-10	-54	-50	5.51
Cerebelum_9_R	5	14	-52	-56	4.81

表2 パフォーマンス結果に負の相関がある脳活動のピーク座標（社会学習者1）

Region Label	Extent	Peak MNI Coordinates			t-value
		x	y	z	
Precentral_R	22	52	-12	60	5.27
Occipital_Mid_L	34	-32	-90	-2	5.12
Lingual_L	3	-14	-96	-20	4.83

表3 パフォーマンス結果に正の相関がある脳活動のピーク座標（個体学習者1）

Region Label	Extent	Peak MNI Coordinates			t-value
		x	y	z	
No suprathreshold clusters					

表4 パフォーマンス結果に負の相関がある脳活動のピーク座標（個体学習者1）

Region Label	Extent	Peak MNI Coordinates			t-value
		x	y	z	
Cerebelum_7b_L		-28	-38	-42	7.07
Cerebelum_8_L	579	-28	-48	-50	5.99
Cerebelum_8_L		-15	-50	-45	5.02
Cerebelum_9_R		12	-58	-48	6.87
Vermis_8	467	0	-55	-40	5.51
Cerebelum_8_R		22	-44	-52	5.72
Cerebelum_6_R	197	22	-66	-18	6.62
Cerebelum_6_R		24	-54	-20	5.85
Cerebelum_6_L	59	-14	-66	-18	5.59
Cerebelum_4_5_R	2	8	-50	-4	4.83
Cerebelum_Crus1_R	1	48	-44	-34	4.77
Cerebelum_6_R	1	30	-46	-26	4.77

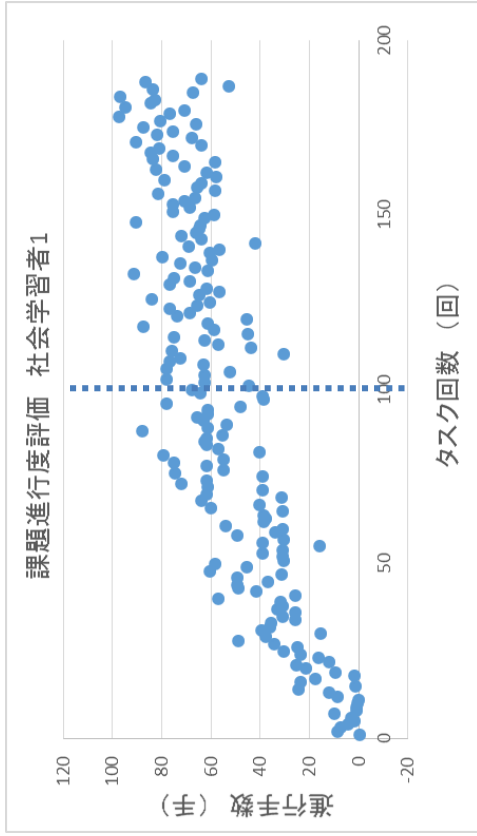


図 23 社会学習者 1 の進んだ手数の学習曲線

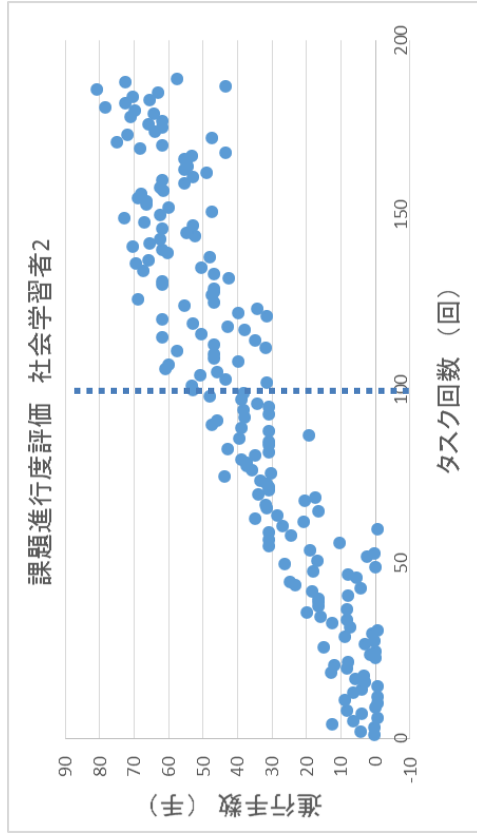


図 24 社会学習者 2 の進んだ手数の学習曲線

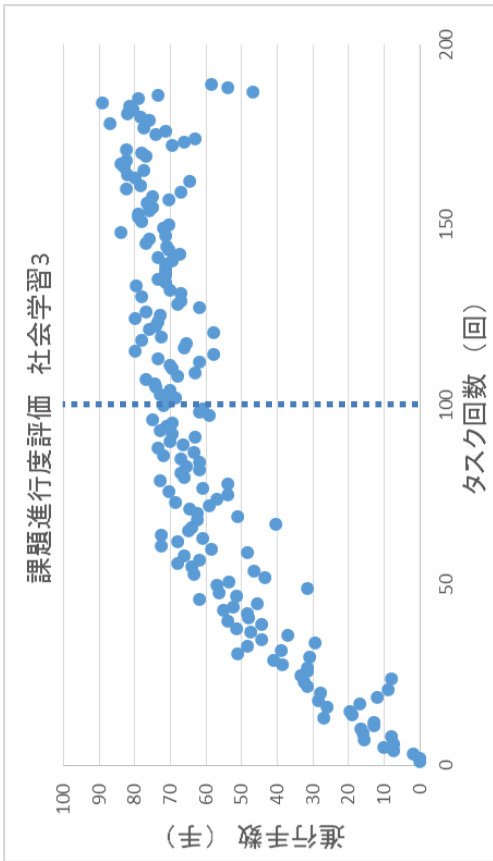


図 25 社会学習者 3 の進んだ手数の学習曲線

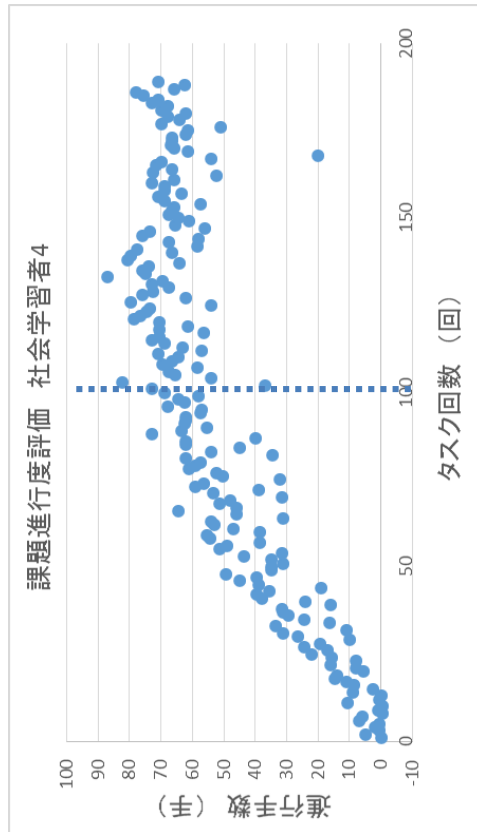


図 26 社会学習者 4 の進んだ手数 of 学習曲線

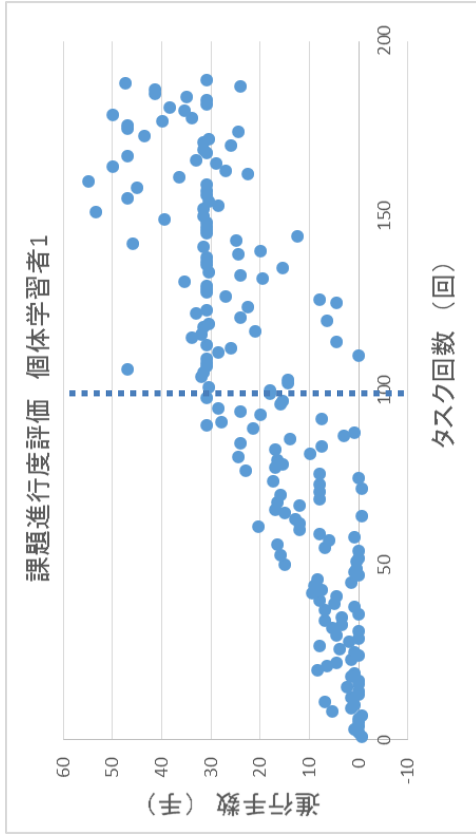


図 27 個体学習者 1 の進んだ手数 of 学習曲線

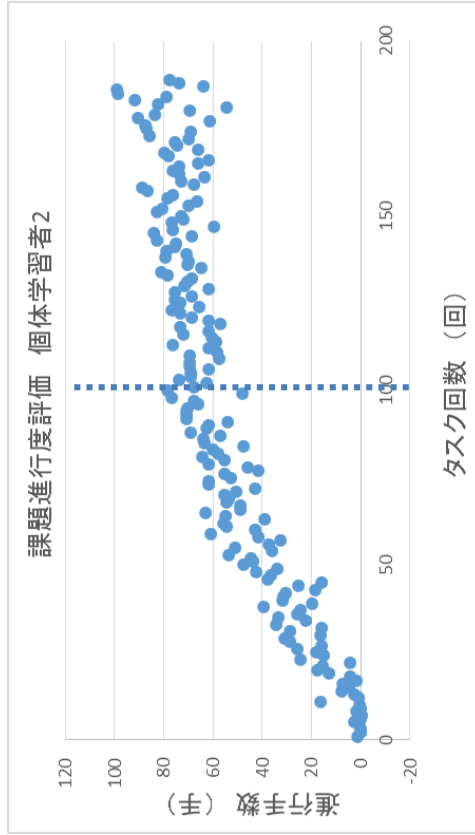


図 30 個体学習者 4 の進んだ手数の学習曲線

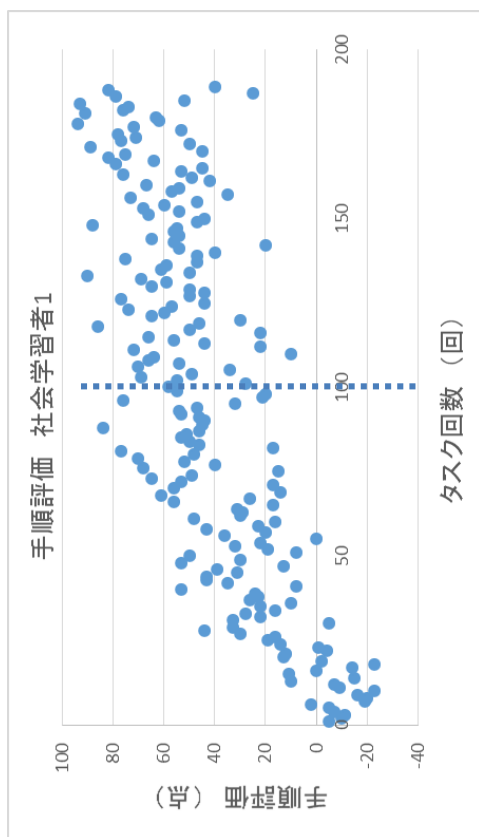


図 31 社会学習者 1 の手順評価の学習曲線

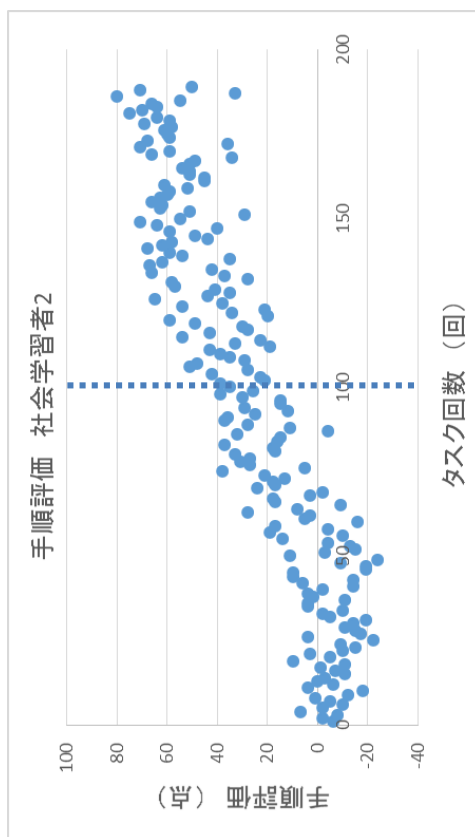


図 34 社会学習者 4 の手順評価の学習曲線

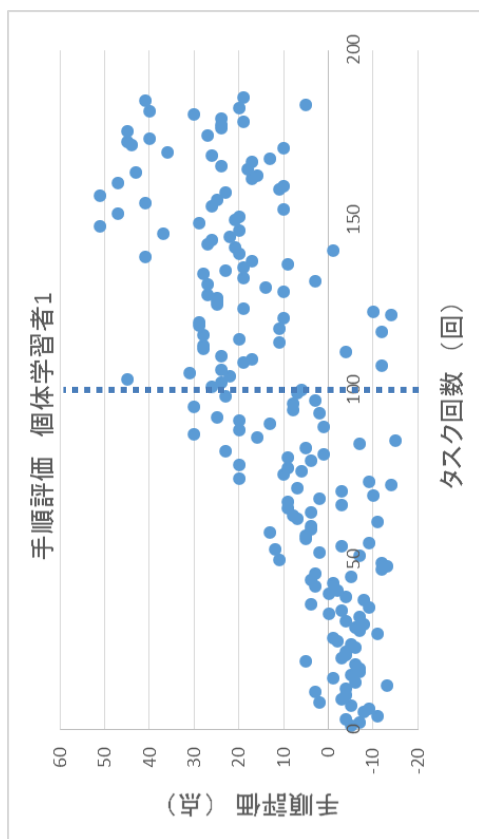
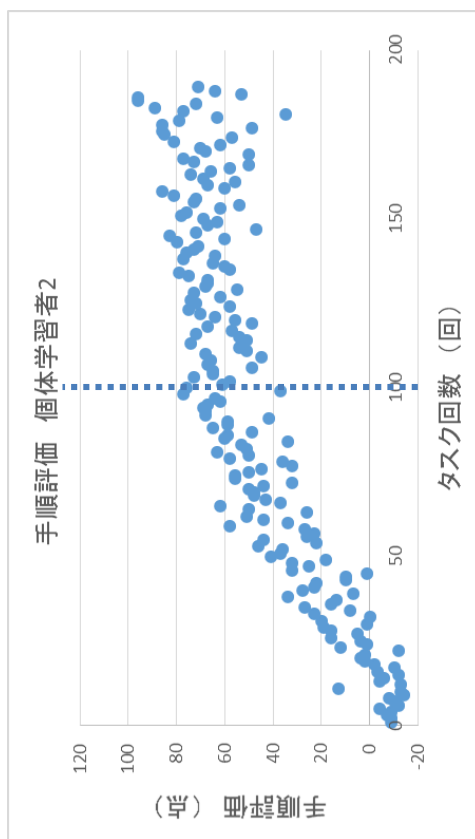


図 35 個体学習者 1 の手順評価の学習曲線



5.6 考察

fMRI 解析の結果より、個体学習者 1 の結果では、小脳全体に有意な賦活が見られた。小脳が遂行機能に関係しているという報告はされている[22]。次に、社会学習者 1 の結果では、視覚野のみで有意な賦活が見られている。実験参加者数が少ないため、今回社会学習で前頭前野や頭頂葉など遂行機能に関係しているといわれている部位で有意な賦活が出なかったのか分からなかった。今後も調査を続ける必要がある。

パフォーマンス結果より、全実験参加者で学習が収束していると考えられる。個体学習のグループより、社会学習のグループの結果ではばらつきが少なく、手数が増え始める時期が早くなっている。このことから、社会学習時に教示している資料での効果が出ていると考えられる。

今回パフォーマンスの結果より、全実験参加者で学習が収束していることが分かる。本研究室で行ってきた研究では、前頭前野や頭頂葉などの部位の有意な賦活が確認されていたが、今回の本実験では確認することができなかった。長期間の学習では、前頭前野や頭頂葉ではなく小脳の働きが大きいのではないかと考えられる。

第6章 結論

本研究では、学習を1.5か月にかけて行い学習前後の脳活動とパフォーマンス結果の解析を行った。

fMRI 結果より、個体学習を行った実験参加者に小脳に有意な賦活が見られた。短期間の学習では前頭葉の有意な賦活が見られていたが、長期間の学習では小脳で有意な賦活が見られた。

パフォーマンスの結果より、全参加者の学習曲線で学習の収束が確認することができた。また、個体学習より社会学習のほうがパフォーマンスのばらつきが少なく、手数が増え始めるまでの期間が短くなっていた。このことから、社会学習時に提示している資料での効果が出ていると考えられる。

今後の課題としては、実験参加者数が少なく集団解析をすることができていないので、集団解析するにあたり、結果の信頼性の観点から必要な15~20人にデータを増やすために、実験参加者を増やしていく必要がある。

謝辞

本研究と論文の執筆にあたり，終始丁寧にご教示賜りました高知工科大学 システム工学群 准教授 星野孝総先生に深く感謝いたします。

また，多岐にわたり本研究の遂行にご助力いただきました，高知工科大学 システム工学群 Soft Intelligent SoC 研究室一同に深く御礼申し上げます。

疑似 fMRI 実験用コントローラの試作にあたり，ご助力いただきました，高知工科大学 教育講師 山本利水先生に深く御礼申し上げます。

最後に，大学生活を送るにあたり，学費及び生活費用など不自由しない援助をしていただき，温かく見守ってくれた家族に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Grafman J, Litvan I, Massaquoi S, Stewart M, Sirigu A, Hallett M, "Cognitive planning deficit in patients with cerebellar atrophy," *Neurology*, Vol.42, pp.1493-1496, 1992.
- [2] Newman S. D., Carpenter P. A., Varma S., Just M. A., "Frontal and parietal participation in problem solving in the Tower of London : fMRI and computational modeling of planning and high-level perception," *Neuropsychologia*, Vol.41, pp.1668-1682, 2003.
- [3] Morris R. G., Ahmed S. Syed G. M., Toone B. K., "Neural correlates of planning ability: frontal lobe activation during the Tower of London test," *Neuropsychologia* 31.12, pp.1367-1378, 1993.
- [4] Lezak Muriel D., "The problem of assessing executive functions," *International Journal Psychology*, Vol.17, No.1-4, pp.81-297, 1982.
- [5] 福井俊哉 : "遂行(実行)機能をめぐって," *認知神経科学会*, Vol.12, No. 3-4, pp.156-164, 2010.
- [6] 平賀健太郎, 鈴木麗壘, 有田隆也 : "凹凸した適応度地形における個体学習と社会学習の共進化," 第 76 回全国大会講演論文集, pp.625-626, 2014.
- [7] Anderson J. R., Albert M. V, Fincham J. M., "Tracing problem solving in real time: fMRI analysis of the subject-paced Tower of Hanoi," *Journal of Cognitive Neuroscience*, Vol.17, pp.1261-1274, 2005.
- [8] Zook N. A., Davalos D. B., Delosh E. L., Davis H. P., "Working memory, inhibition, and fluid intelligence as predictors of performance on Tower of Hanoi and London tasks," *Brain and cognition* 56.3, pp.286-292, 2004.
- [9] Fincham J. M., Carter C. S., van Veen V., Stenger V. A., Anderson J. R., "Neural mechanisms of planning: A computational analysis using event-related fMRI," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol.99, pp.3346-3351, 2002.
- [10] 三谷慶太, 星野孝総 : "計画ゲームを用いた遂行機能タスクに関する脳賦活の検証," 第 31 回ファジィシステムシンポジウム, Vol.31, pp.733-736, 2015.
- [11] Scott A. Huettel, Allen W. Song, Gregory McCarthy: "fMRI 原理と実践," 福山秀直, メディカル・サイエンス・インターナショナル, 東京, 2016.
- [12] 菊池吉晃, 妹尾淳史, 安保雅博, 渡邊修, 米本恭三 : "SPM8 脳画像解析マニュアル—fMRI, 拡散テンソルへの応用," 医歯薬出版, 東京, 2012.
- [13] Willcutt E. G., Doyle A. E., Nigg J. T., Faraone S. V, Pennington B. F., "Validity of the executive function theory of attention-deficit/hyperactivity disorder: a meta-analytic review," *Biological Psychiatry*, Vol.57, pp.1336-1346, 2005.
- [14] Muller K. R., Tangermann M., Dornhege G., Krauledat M., Curio, G., Blankertz B., "Machine

- learning for real-time single-trial EEG-analysis: From brain-computer interfacing to mental state monitoring," *Journal of Neuroscience Methods*, Vol.167, pp.82-90, 2008.
- [15] Ernst M., Nelson E. E., McClure C. S., Monk C. S., Munson S., Neir Eshel, Eric Zarah, Ellen Leibenluft, Alan Zametkin, Kenneth Towbin, James Blair, Dennis Charney, Daniel S. Pine," Choice selection and reward anticipation: an fMRI study," *Neuropsychologia*, Vol.42, pp.1585-1597, 2004.
- [16] Barron John M., Mark C. Berger, Dan A. Black," In *On-the-Job Training*," Kalamazoo, MI: W. E. Upjohn Institute for Employment Research, pp.1-3, 1997.
- [17] Neal E. Miller, John Dollard," *Social learning and imitation*," Yale University Press, 1962.
- [18] 寺嶋秀明, 早木仁成, 林耕次: "狩猟採集民の調査に基づくヒトの学習行動の特性の実証的研究—環境・学習・進化," *生態人類学会*, No.17, pp.33-35, 2011.
- [19] 高橋伸幸: "創造性, 試行錯誤, 模倣能力の間の関係を探る," *Replacement of Neanderthals by Modern Humans*, Vol.5, pp.54-55, 2012.
- [20] 田村博: "ヒューマンインターフェース," オーム社, 東京, 1998.
- [21] 杉下守弘: "機能的 MRI における心理的課題," *認知神経科学会*, Vol.1, No.1, pp.56-59, 1999.
- [22] Koziol Leonard F., Deborah Ely Budding, Dana Chidekel," From movement to thought: executive function, embodied cognition, and the cerebellum," *The Cerebellum* 11.2, pp. 505-525, 2012.

研究業績

1. Yuya Sano, Keita Mitani and Yukinobu Hoshino. “Improve and verification of pseudo experimental interface using Arduino,” The 18th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, Korea, 2017.10. 口頭発表
2. Yuya Sano, Keita Mitani and Yukinobu Hoshino. “Improve and verification of pseudo experimental interface using Arduino,” International Workshop on Human-Engaged Computing, Japan, 2017.11. ポスター発表
3. 佐野友哉, 早坂涼佑, 三谷慶太, 星野孝総. “ハノイの塔課題における操作回数に着目した学習収束時間の検討,” 平成 30 年度 日本知能情報ファジィ学会中国・四国支部大会, 2017.12. 口頭発表
4. 佐野友哉, 早坂涼佑, 三谷慶太, 星野孝総. “ハノイの塔課題の長期的作業学習における学習曲線の推移と fMRI 解析,” 2018 IEEE SMC Hiroshima Chapter 若手研究会, 2018.7. 口頭発表
5. Yuya Sano, Ryosuke Hayasaka, Keita Mitani, Yukinobu Hoshino. “Transition in Long-term Learning Curves and fMRI Analysis on Tower of Hanoi Task,” SCIS&ISIS2018 in conjunction with ISWS2018, 2018.12. 口頭発表