

令和 3 年度
修士学位論文

技能獲得前の脳画像を用いた運動 学習能力の予測に関する検討

Study on Prediction of Motor Learning Ability Using
Brain Images before Skill Acquisition

1245137 横田 文

指導教員 門田 宏

2022 年 2 月 28 日

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻
情報学コース

要 旨

技能獲得前の脳画像を用いた運動学習能力の予測に関する検討

横田 文

ヒトは練習や経験といった運動学習の過程によって、あらゆる運動技能を獲得している。事前に個人の能力が予測できれば、効率的な運動学習につながる可能性がある。運動学習には様々な脳領域が関わっており、運動学習前の脳の状態が個人の運動学習能力を予測する判断材料になると考えられる。運動学習前や学習初期の脳の状態からの個人の運動学習能力の予測に関して、幾つかの研究で報告されているが、全脳を対象とした十分な調査はされていない。そこで本研究では、Magnetic Resonance Imaging (MRI) を用いて、全脳を対象とした脳機能と脳構造の観点から、運動学習課題の成績に関連する技能獲得前の脳領域を調査した。

本研究では運動学習課題として、まず到達運動課題での力場学習を扱い、課題による差異を検討するためにジャグリング課題でも同様の調査を行った。安静時脳活動の観点から運動学習課題の成績に関連する脳領域を調査するために安静時脳活動解析 (ALFF)、機能的結合の観点の調査のために機能的結合解析 (ROI-to-ROI/Seed-to-Voxel)、脳構造の観点の調査のために脳形態解析 (VBM) を実施した。

到達運動課題の初期から終期への変化率を示す指標 rateV の成績について、VBM の結果、目標地点の空間座標表現に関与するとされる楔前部の灰白質容積において正の相関が認められた。ジャグリング課題の全試行での成功数を示す指標 Sum の成績について、ALFF の結果、左運動前野／腹側運動前野に正の相関が認められた。また、Seed-to-Voxel の結果、V5/MT と左上頭頂小葉、小脳と左視覚連合野の結合にそれぞれ正の相関が認められた。VBM では、Sum と有意な相関のある脳領域は認められなかった。

これらのことから、技能獲得前の楔前部の灰白質容積が大きい人ほど到達運動課題におけ

る力場をより多く学習できること、技能獲得前の左運動前野/腹側運動前野の安静時脳活動、V5/MT-左上頭頂小葉および小脳-左視覚連合野といった視覚情報処理に関連する脳領域との結合が大きい人ほど、ジャグリング課題の学習度が高いことが示唆された。過去の研究[1]と本実験の比較から、技能獲得前の視覚処理に関わる領域の活動や結合を用いることで、ジャグリング課題の成績を予測できることが示唆された。一方で、灰白質容積の調査による予測の可能性は課題内容によって差が生じると考えられる。到達運動課題とジャグリング課題の動き方の差が、課題成績と脳の関係の差に影響したと考えられ、球技ではジャグリング課題と同様に視覚処理を中心とした脳の処理が運動学習の個人差につながる可能性がある。

キーワード MRI, 運動学習, 安静時脳活動, 機能的結合, VBM, 到達運動, ジャグリング

Abstract

Study on Prediction of Motor Learning Ability Using Brain Images before Skill Acquisition

Aya Yokota

Humans can acquire various motor skills by motor learning such as practices and experiences. If we can predict individual's abilities in advance, it may lead to more efficient motor learning. Since various brain regions are involved in motor learning, it is thought that the brain state before skill acquisition can predict an individual's motor learning ability. This has already been examined in several previous studies. However, these are not enough investigated in the whole brain. Therefore, in this study, I examined brain regions related to motor learning ability in term of brain activity and structure using MRI.

In this study, I first experimented using the reaching task, and then using the juggling task to find out the differences of the motor learning tasks. I conducted three types of analysis: resting state brain activity analysis (ALFF: Amplitude of Low-Frequency Function), functional connectivity analysis (ROI-to-ROI/Seed-to-Voxel) and brain morphology analysis (VBM).

The result of VBM about the reaching task demonstrated that a significant positive correlation was observed between rateV (dividing the last three average minus the first three average by the first three average), and the precuneus which is said to be related to the representation of the spatial coordinates the target point in reaching task. The results of ALFF about the juggling task demonstrated that a significant positive correla-

tion was observed between Sum (number of successful catches for all trials) and the rest state brain activity in the left motor area/the ventral premotor cortex. In addition, the results of Seed-to-Voxel about the juggling task demonstrated that a significant positive correlation was observed between Sum and the connection of the V5/MT-SPLl (left superior parietal lobe; involved in visual information processing) and the cerebellum-VA (visual associate cortex). However, there was no correlation between Sum and the volume of gray matter in the results of the VBM about the juggling task.

These results suggest that people with large the gray matter volumes in the precuneus before the motor learning are able to learn more about the force field in the reaching task, and people with large the rest state brain activity in the left motor area/the ventral premotor cortex and the functional connectivity in the V5/MT-SPLl and the cerebellum-VA before the motor learning are able to learn more about the juggling task. This could mean the motor learning abilities on the juggling task can predict using the activity and connectivity in the regions about visual processing before acquiring skill. From the comparison the past study [1] and this study, whether it is possible to predict learning ability using gray matter volumes before acquiring skill depends on content of the motor learning task. The difference in motions between the reaching task and the juggling task may have affected the relationship between the performance of the task and the brain. In ball sports as well as the juggling task, the brain function mainly visual processing would affect individual differences on motor learning.

key words MRI, motor learning, resting-state brain activity, functional connectivity, VBM, reaching task, juggling

目次

第 1 章	はじめに	1
第 2 章	実験・解析概要	3
2.1	実験方法	3
2.1.1	脳画像の撮像	3
2.1.2	運動学習課題	4
2.2	課題成績の評価	4
2.3	解析方法	4
2.3.1	機能画像	5
2.3.2	構造画像	6
第 3 章	実験 1	7
3.1	被験者	7
3.2	実験装置	7
3.3	実験方法	8
3.3.1	脳画像の撮像	8
3.3.2	運動学習課題：到達運動課題	8
3.4	到達運動課題の成績評価	10
3.5	解析方法：脳構造画像	11
3.5.1	脳形態解析	11
3.6	結果：脳構造画像	15
3.6.1	脳形態解析	15
3.7	考察	16
第 4 章	実験 2	17

目次

4.1	実施課題の検討	17
4.2	被験者	17
4.2.1	事前アンケート	18
4.3	実験装置	19
4.4	実験方法	19
4.4.1	脳画像の撮像	19
4.4.2	運動学習課題：ジャグリング課題	20
4.5	ジャグリング課題の成績評価	21
4.6	解析方法：安静時脳機能画像	23
4.6.1	安静時脳活動解析	23
4.6.2	機能的結合解析	25
4.7	解析方法：脳構造画像	28
4.7.1	脳形態解析	28
4.8	結果：安静時脳機能画像	28
4.8.1	安静時脳活動解析	28
4.8.2	機能的結合解析	29
4.9	結果：脳構造画像	32
4.9.1	脳形態解析	32
4.10	考察	32
第 5 章	総合考察	34
第 6 章	結論	36
	謝辞	37
	参考文献	38

目次

付録 A	脳機能画像と到達運動課題の成績	40
A.1	安静時脳活動と到達運動課題の関連性	40
付録 B	利き手の判別テスト	42
付録 C	球技経験と運動学習課題の成績の関連	43

目次

2.1	撮像した脳画像の例	3
2.2	MRI 装置内のディスプレイ	4
2.3	解析一覧	5
2.4	各ボクセルの関心領域との結合値の例	6
3.1	実験1で使用した装置	7
3.2	到達運動課題の課題環境	9
3.3	到達運動課題の制御環境	10
3.4	灰白質構造画像	13
3.5	前処理後の灰白質構造画像	13
3.6	VBM 解析の結果：(-2, -57, 15) の灰白質容積と rateV との相関	15
4.1	実験2で使用した実験装置	19
4.2	2 ボールジャグリング	20
4.3	ジャグリングの1 試行イメージ	21
4.4	各被験者のジャグリング課題でのキャッチ成功数の様子	22
4.5	atlas の分割	25
4.6	本実験で設定した Seed	27
4.7	ALFF 解析の結果：(-60, -9, 18) の安静時脳活動と Sum との相関	29
4.8	Seed-to-Voxel 解析の結果：(-24, -60, 48) の機能的結合値と Sum との相関	31
4.9	Seed-to-Voxel 解析の結果：(-28, -74, -12) の機能的結合値と Sum との相関	31
4.10	Seed-to-Voxel 解析の結果：(20, -74, -6) の機能的結合値と Sum との相関	32
A.1	到達運動課題の成績と関連のある安静時脳活動をもつ脳領域	41

図目次

C.1 球技経験歴とジャグリング課題成績との関係	44
C.2 運動経験歴とジャグリング課題成績との関係	45

表目次

3.1	脳画像の撮像パラメータ	8
3.2	到達運動課題の主な評価指標	11
3.3	構造の分類	12
3.4	分割化の設定	12
3.5	平均画像作成の設定	13
3.6	MNI 空間への標準化の設定	14
3.7	VBM 解析の結果	15
4.1	脳画像の撮像パラメータ	20
4.2	ジャグリング課題の成績の評価指標	23
4.3	DPARSF の設定	24
4.4	atlas の例	26
4.5	使用した Seed の一覧	26
4.6	ALFF 解析の結果	29
4.7	ROI-to-ROI 解析の結果	30
4.8	Seet-to-Voxel 解析の結果	30
A.1	到達運動課題の成績と関連がみられた安静時脳活動をもつ脳領域 ($N = 24$)	40
C.1	運動経験歴とジャグリング課題との相関	44

第 1 章

はじめに

ヒトは日常生活の中で、スポーツや自動車の運転、パソコンの操作などのあらゆる運動を行っている。これらは、練習や経験といった運動学習によって獲得した運動技能である。各個人が運動学習によって獲得できる技能の程度や獲得にかかる時間などは運動学習能力と表現される。この運動学習能力には、同じ期間や方法の課題で運動学習を行っても、すぐに上達する人とそうでない人がいるように、個人差がみられる。早さや精度の高い技能を獲得するためには個人差をもとに運動学習の計画を立てることが有用である。ただし、通常、個人の運動学習能力は実際の運動を通さないと把握することができないため、運動学習前に立てた運動計画は、学習者の能力を把握し、適した学習方法や必要な学習時間を反映させるには繰り返しの修正が必要なことが多い。もし事前に個人の能力や特徴が予測できれば、効率的な運動学習の計画を実現でき、リハビリテーションやスポーツトレーニングなどの運動学習を必要とするあらゆる場面に役立つと考えられる。

運動学習には、物体の認知や運動の計画、指令などの機能をもつ様々な脳領域が関与している。そのため、脳の情報を利用して、技能獲得前に運動学習能力を予測することができると考えられる。脳の情報には脳活動や脳構造等があり、electroencephalography (EEG) や magnetic resonance imaging (MRI) などで計測可能である。脳の情報からの運動学習能力の予測に関して、EEG で計測した脳波を用いて、課題前や課題初期の脳活動からその後の運動学習の改善度意を予測できることが報告されている [2]。しかしながら、EEG によって計測できるのは脳表部分の脳活動であり、先行研究では全脳を対象とした調査や脳活動以外の観点からの調査はされていない。また、運動学習によって課題の遂行に関連する灰白質の容積が増大することが報告されている [3]。これらの先行研究を踏まえて、EEG より

も空間分解能が高く、脳活動以外の脳の情報を計測できる MRI を用いて、全脳を対象に、脳活動や脳構造の観点から調査することによって、精度の高い予測に繋がると考えられる。

MRI による脳活動の測定手法（機能的磁気共鳴画像法; functional magnetic resonance imaging: fMRI）は、計測と同時に課題や刺激を行うことでこれらに関連した脳領域について調査するものが主流であった。最近ではこれ以外に、安静時にも自発的な神経活動に伴う脳の血流の変化がみられることから、課題や刺激を行わずに閉眼もしくは固視点を注視している状態（安静状態）の脳活動を計測する手法（resting-state fMRI: rs-fMRI）が取られている。rs-fMRI によって、課題に依存しない定常時の脳の状態であったり、解剖学的構造（空間的）とは関係のない脳領域間の機能的結合をみることができる [4][5]。そのため、本研究でも脳活動の観点では、rs-fMRI によって測定した安静時脳活動とそれをもとにした機能的結合について調査した。

MRI を用いた脳構造画像には T1 強調画像や T2 強調画像などが存在する。T1 強調画像は灰白質は灰色、白質は白色、脳脊髄液は黒色などといったように各組織の特徴からコントラストの差をみられるものである。特に、2 次元（2D）T1 強調画像よりも 3 次元（3D）T1 強調画像の方が高解像で優れた組織コントラストをもつため、各組織の定量化を利用した脳形態画像解析によく用いられている。本研究でも脳構造の観点では、3DT1 強調画像をもとに灰白質容積を調査した。

そこで、本研究では脳活動と脳構造の視点から、2 つの運動学習課題（到達運動課題とジャグリング課題）の成績に関連する技能獲得前の脳の情報を調査した。その上で、技能獲得前に撮像した脳画像からその後の課題の成績を予測できるのか、運動学習課題の違いによって成績と関連する脳領域に差異があるのか検討した。

第 2 章

実験・解析概要

2.1 実験方法

脳画像の撮像と運動学習課題の 2 つの実験を組み合わせて実施した。

2.1.1 脳画像の撮像

技能獲得前の脳の状態を計測するために，まず，脳画像の撮像を行った．脳画像の撮像には MRI を利用し，機能画像と構造画像を撮像した（図 2.1）．

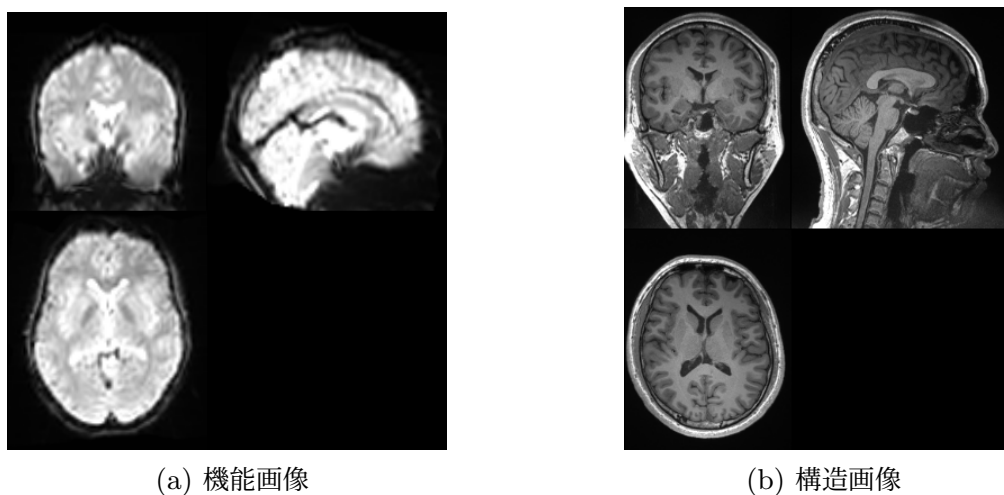


図 2.1: 撮像した脳画像の例

機能画像を撮像する際に，リラックスした状態で固視点（図 2.2）を注視するよう被験者に伝え，安静時脳活動（resting-state fMRI: rs-fMRI）を計測した．計測は MRI 装置内に設置された急速眼球運動解析装置（EyeLink fMRI/MEG，ゼロシーセブン製）を用いて被

2.2 課題成績の評価

験者が開眼状態であることを確認しながら行い、開眼での安静時脳機能画像を 10 分間撮像した。

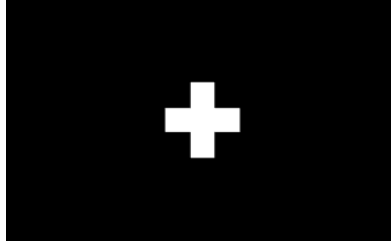


図 2.2: MRI 装置内のディスプレイ

撮像した脳画像は、医用画像に使用される DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) 形式で出力される。SPM12 を利用して、DICOM から NIfTI (Neuroimaging Informatics Technology Initiative) 形式へ変換した脳画像を実際の解析に使用した。

2.1.2 運動学習課題

脳画像の撮像後に、別室へ移動して運動学習課題を行った。課題は、実験 1 では到達運動課題、実験 2 ではジャグリング課題を行った。

2.2 課題成績の評価

運動学習課題の結果に対して、課題成績を評価するための指標を作成した。脳画像と運動学習課題に関する解析では、評価指標による課題成績を利用した。

2.3 解析方法

実験で得られたデータから 3 種類の解析を行った。機能画像を使用した解析として安静時脳活動解析、機能的結合解析、構造画像を使用した解析として脳形態解析を実施した（図 2.3）。

2.3 解析方法

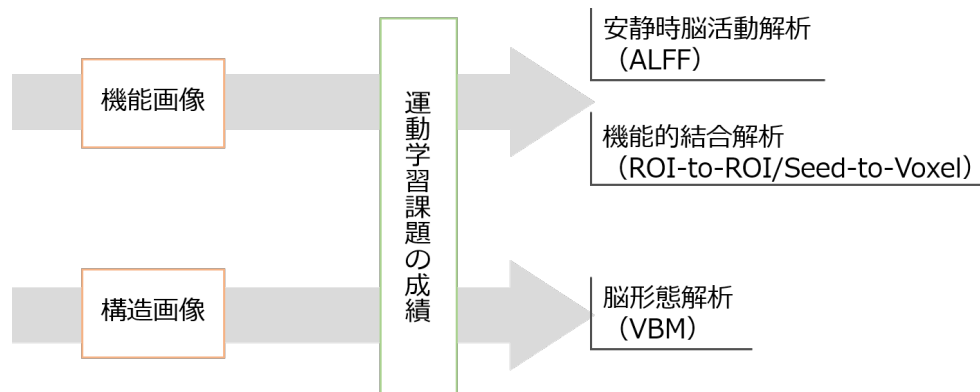


図 2.3: 解析一覧

2.3.1 機能画像

■**安静時脳活動解析** 安静時脳活動の視点から運動学習課題の成績と関連する脳領域を調査するために、安静時脳活動解析を実施した。本研究では、各ボクセルにおける神経活動を反映する低周波帯域（0.01～0.1Hz）の信号強度をもとにした安静時の脳賦活を評価する [6] 低周波振動振幅法（Amplitude of low-frequency fluctuations: ALFF）によって、運動学習課題の成績に関連する安静時脳活動をもつ脳領域を調査した。

■**機能的結合解析** 機能的結合の視点から運動学習課題の成績と関連する脳領域を調査するために、機能的結合解析を実施した。本研究では、ROI-to-ROI および Seed-to-Voxel という手法によって、運動学習課題の成績と関連する機能的結合を調査した。機能的結合解析では、領域間の安静時脳活動の時間的同期についての相関値から結合値を算出することで機能的結合を評価しており、各ボクセルがもつ結合値（図 2.4）と運動学習課題の成績との相関をみることで、運動学習課題の成績と機能的結合の関連を調査できる。

2.3 解析方法

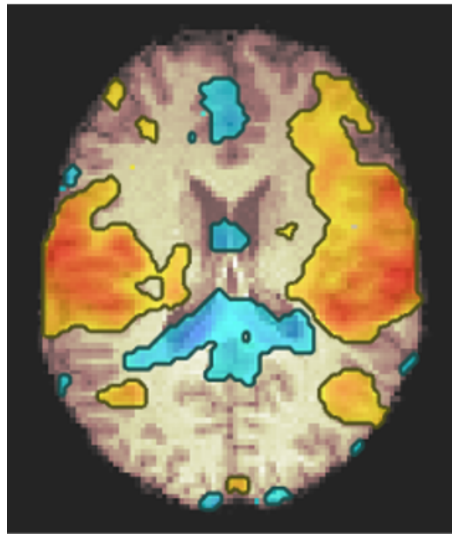


図 2.4: 各ボクセルの関心領域との結合値の例

ROI-to-ROI では、解析の対象とする関心領域（ROI）を設定し、分割された脳領域同士で機能的結合を探索しており、Seed-to-Voxel では、解析の対象とする固定領域（Seed）を設定し、Seed と他のすべてのボクセルとの間で機能的結合を探索している。

2.3.2 構造画像

■**脳形態解析** 脳構造の視点から運動学習課題の成績と関連する脳領域を調査するために、脳形態解析を実施した。本研究では、脳構造のうち、特に灰白質容積に注目して、運動学習課題の成績と関連する灰白質容積をもつ脳領域を調査した。解析は、各構造の容積の評価ができる Voxel-based morphometry（VBM）によって行った。

第 3 章

実験 1

3.1 被験者

本実験には、本学の学生 24 名（男性 18 名，女性 6 名，18～24 歳）が参加した．実験実施前に MRI 装置に入る際の注意点や安全性，個人情報保護について説明し，参加者からの同意を得た上で行われた．

3.2 実験装置

脳画像の撮像には 3T MRI 装置（MAGNETOM Verio, SIEMENS 製），運動学習課題の到達運動課題にはロボットマニピュランダム（Phantom Premium 1.5 HF, Geomagic 製）を使用した（図 3.1）．ロボットマニピュランダムは仮想空間での力覚を加えながらハンドルの位置や速度が計測できるデバイスである．



(a) MRI 装置



(b) ロボットマニピュランダム

図 3.1: 実験 1 で使用した装置

3.3 実験方法

3.3.1 脳画像の撮像

運動学習課題を実施する前の脳の状態を把握するために、MRI 装置を使用して脳画像を撮像した。撮像した脳画像は機能画像と構造画像（3 次元 T1 強調画像）である。機能画像と構造画像のそれぞれの撮像パラメータは下（表 3.1）の通りである。

表 3.1: 脳画像の撮像パラメータ

項目	機能画像	構造画像
Repetition Time (ms)	2500	2300
Echo Time (ms)	30	2.95
Total scans	244	
Matrix	64 * 64	240 * 256
Number of slices	38	176
flip angle (deg)	80	9
voxel (mm)	3.3 * 3.3 * 3.3	1.0 * 1.0 * 1.0
thickness (mm)	3.2	1.2
Slice order	ascending	ascending

機能画像を使用した実験に関してはすでに報告している [1] ため、本実験では脳構造画像を用いた実験について記述する。

3.3.2 運動学習課題：到達運動課題

実験 1 の運動学習課題には到達運動課題を設定した。この課題では、課題環境の力覚の制御が可能なロボットマニピュランダムを使用することで、被験者は課題環境での力場を学習し、環境に適した到達運動を行った。

被験者は椅子に座った状態でロボットマニピュランダムのハンドル部分を手で操作し、開始地点から 10cm 前方にある目的地点までの腕到達運動を行った。腕の動きや運動の開始地点と目的地点はプロジェクタを用いて投影された（図 3.2）。

3.3 実験方法

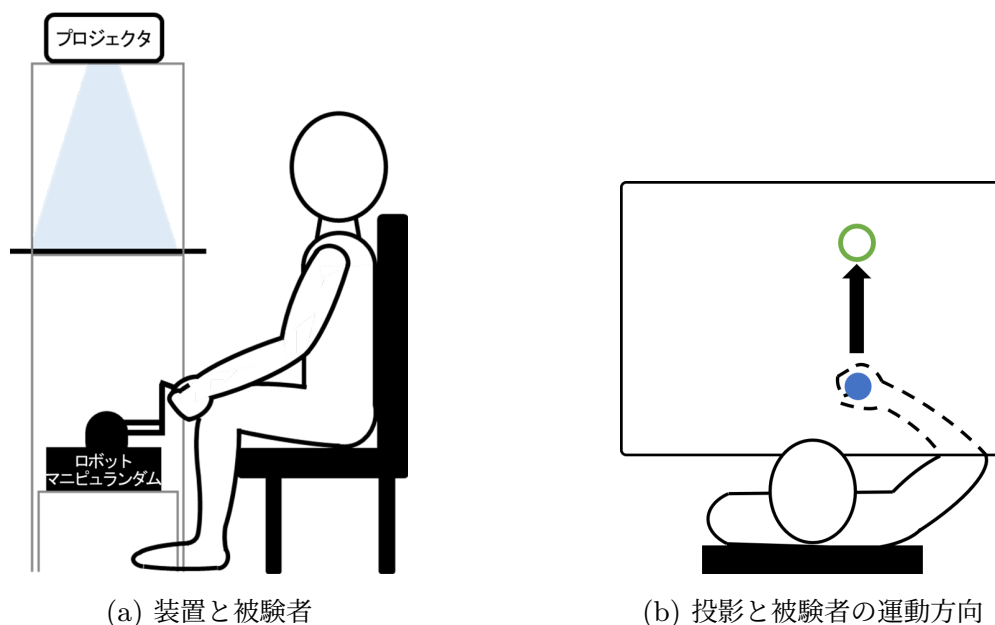


図 3.2: 到達運動課題の課題環境

課題では、ゆっくりとした運動での学習などを避けるため、移動速度はある程度一定になるように教示し、学習する力場はハンドルの動きに合わせて移動速度が速いほど強く右向きの外力がかかる（速度依存性時計回り）ようにした（図 3.3b）。被験者は到達運動の繰り返しによってこの力場を学習した。

課題は、最初の 50 試行を力場なしの Null ブロック、続く 250 試行を力場ありの Force Field ブロック、最後の 100 試行を力場なしの Wash Out ブロックとした。各ブロックには、Null ブロックのうち 10 試行、Force Field ブロックのうち 36 試行、Wash Out ブロックのうち 14 試行のエラークランプ試行を設定した。エラークランプとは、運動方向に対して垂直方向の力をかけることでたてられた「仮想の壁」によって開始地点から目的地点までの被験者の腕の軌道を直線上に制御した試行である（図 3.3c）。被験者が力場を学習している場合は左方向に力を加えることで目的地点までの真っすぐな到達運動を行おうとするため、Force Field ブロック内のエラークランプでも仮想の壁に対して左方向に力をかけるようになる。そのため、仮想の壁に対して被験者が横方向に加えた力の大きさ（Lateral Force: LF）を計測することで、その試行までの被験者の学習状態を把握できる。

本実験では、到達運動課題の結果として、エラークランプでの各試行中の最大速度での

3.4 到達運動課題の成績評価

LF を使用した.

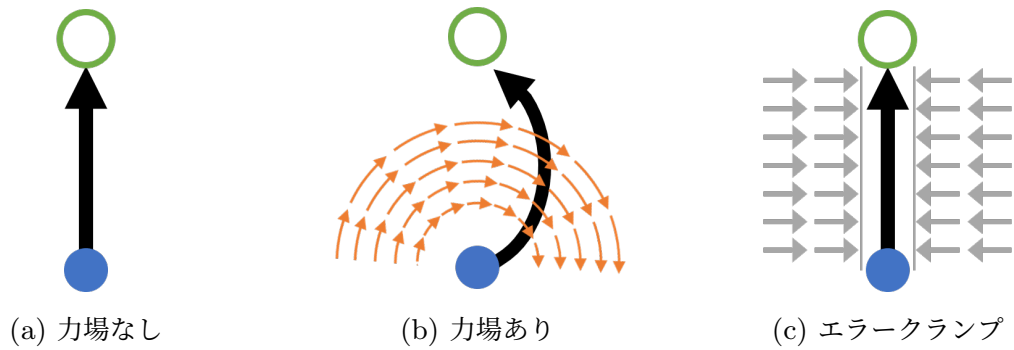


図 3.3: 到達運動課題の制御環境 (青色の円が開始地点, 緑色の白抜き円が目的地点, 黒色の矢印が被験者の運動, 橙色の矢印が力場, 灰色の矢印が外力による制御を示す.)

3.4 到達運動課題の成績評価

到達運動課題の結果に対して, 成績評価のために本研究で使用した主な評価指標は下 (表 3.2) の通りである. $rateV$ や $aveMax$ は到達運動課題における力場の学習度, $aveFin$ は最終的な学習量を示す.

3.5 解析方法：脳構造画像

表 3.2: 到達運動課題の主な評価指標

評価指標	
rateV	Force Field ブロック内の最初の試行（3 試行平均：aveSt）を基準とした最後の試行（3 試行平均：aveFin）への変化の割合. 計算式 $(\frac{aveFin-aveSt}{aveSt})$
aveMax	Force Field ブロック内の最大値（3 試行平均）.
aveMin	Force Field ブロック内の最小値（3 試行平均）.
difMaxMin	Force Field ブロック内の最大値（aveMax）と最小値（aveMin）の差. 計算式 $(aveMax-aveMin)$
aveSt	Force Field ブロック内の最初の値（3 試行平均）.
aveFin	Force Field ブロック内の最後の値（3 試行平均）.
difFinSt	Force Field ブロック内の最後の値（aveFin）と最初（aveSt）の値の差. 計算式 $(aveFin-aveSt)$

3.5 解析方法：脳構造画像

3.5.1 脳形態解析

到達運動課題の成績と関連する灰白質容積を持つ脳領域を調査するために、VBM による脳形態解析を行った。解析に使用したソフトウェアは下の通りである。

- 使用したソフトウェア
 - MATLAB 2018b
 - SPM12

■構造画像の前処理 3.5.1 節の脳形態解析を実施するために、3.3.1 節の MRI の撮像で得られた構造画像（図 2.1）に対して、以下のような前処理を行った。

3.5 解析方法：脳構造画像

AC-PC 位置合わせ 構造画像の原点を前交連（anterior commissure: AC）に，前交連-後交連（posterior commissure: PC）ラインが平衡になるように位置合わせを行った．位置合わせには，MATLAB スクリプトを用いた半自動 AC-PC 補正プログラム^{*1}を利用した．

分割化 構造画像に対し，構造ごとに分割化（segmentation）した画像を作成した（表 3.3）．設定パラメータは表 3.4 の通りである．

表 3.3: 構造の分類

c1	c2	c3	c4	c5
灰白質	白質	脳脊髄液	頭蓋骨	脳外軟部組織

表 3.4: 分割化の設定

Segment		
Data		
.Channel	..Volumes	構造画像（T1 強調画像）
	..Bias regularisation	light regularisation
	..Bias FWHM	60mm cutoff
	..Save Bias Corrected	Save Field and Corrected
Tissues（c3-c6 は省略）		
.Tissues	..Tissue probability map	spm12\TPM \TPM.nii, 1
	..Num. Gaussians	1
	..Native Tissue	Native + Dartel imported
	..Wrapped Tissue	None
.Tissues	..Tissue probability map	spm12\TPM \TPM.nii, 2
	..Num. Gaussians	1
	..Native Tissue	Native + Dartel imported
Wrapping & MRF		
.MRF Parameter		1
.Clean Up		Light Clean
.Wrapping Regularisation		1×5 double
.Affine Regularisation		EAST Asian brains

^{*1} http://www.nemotos.net/scripts/acpc_coreg.m

3.5 解析方法：脳構造画像

灰白質構造画像の前処理 分割化によって作成された灰白質構造画像（図 3.4）に対して，DARTEL（Diffeomorphic Anatomical Registration using Exponentiated Lie Algebra）という被験者間の位置合わせの手法により，解剖学的（MNI 空間への）標準化，セグメンテーション，平滑化を施した（図 3.5）。

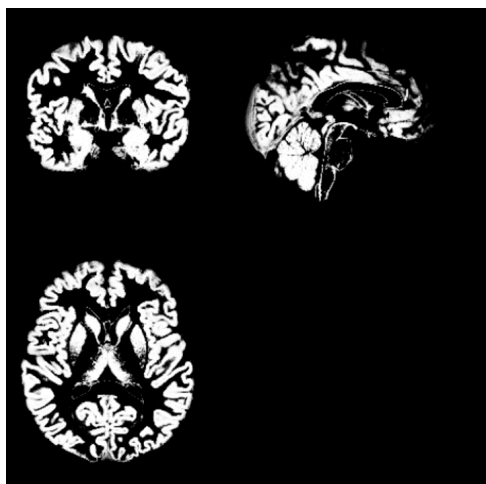


図 3.4: 灰白質構造画像

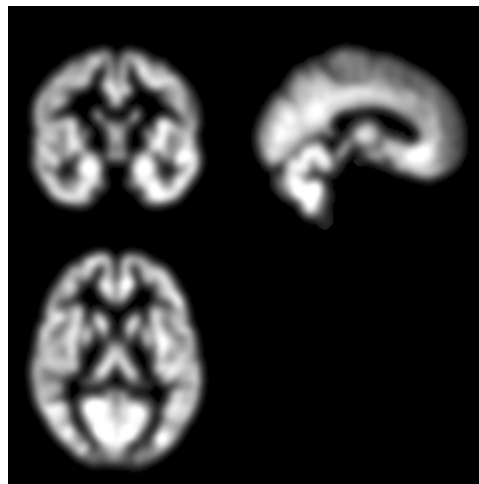


図 3.5: 前処理後の灰白質構造画像

被験者間の灰白質と白質の位置合わせのために，被験者間の平均画像の作成を繰り返すことでぼけの少ないテンプレート画像として作成する．また，同時に流れ場の計算した流れ場画像を作成し，テンプレート画像とともに，解剖学的標準化に使用する．DARTEL の設定は，SPM → Tools → Dartel Tools → Run Dartel (create Templates) を使用し，表 3.5 の通りパラメータを設定した．

表 3.5: 平均画像作成の設定

Run Dartel (create Templates)	
Images	
.Images	rc1
.Images	rc2
Setting	
すべてデフォルト設定	

脳構造は頭が大きい人と小さい人といったように差があり，こうした違いを取り除いたう

3.5 解析方法：脳構造画像

えて個人間の比較のために、解剖学的標準化によって各個人の脳画像（構造）を同じ形態に位置合わせをする処理を行った。解剖学的標準化による信号値の変化を考慮して、標準化によって小さくなった個人差を的確に検討するための処理をモジュレーションで行った。解剖学的標準化～モジュレーション～平滑化は、SPM → Tools → Dartel Tools → Normalise to MNI Space を使用し、表 3.6 の通りパラメータを設定した。

表 3.6: MNI 空間への標準化の設定

Normalize to MNI Space		
Dartel Template		Template_6.nii
Select according to		
..Many Subjects	..Flow fields	流れ場画像 (24 files)
	..Images	
	...Images	灰白質構造画像 (24 files)
Voxel sizes		[NaN NaN NaN]
Bounding box		[NaN NaN NaN; NaN NaN NaN]
Preserve		Preserve Amount("modulation")
Gaussian FWHM		8 8 8

この一連の処理によって、個人間の差を比較できるような灰白質容積の計算が行われた。VBM での容積の算出は、標準化によって得られた密度に信号値（ボクセル値）を掛け合わせて行われた。3.5.1 節の解析では一連の処理を施した灰白質構造画像（図 3.5）を使用した。

■**相関解析** 到達運動課題の成績と関連する灰白質容積を持つ脳領域を調査するために、前処理後の灰白質構造画像と表 3.2 の評価指標で評価した到達運動課題の成績を使用して、灰白質容積と到達運動課題における力場の学習度との相関解析を行った（ $p < 0.001$ uncorrected at voxel level, $p < 0.05$ uncorrected at cluster level）。

その際、画像の背景のボクセルによる統計エラーを減らすために、Making ツールボックス^{*2}を使用して、前処理後の灰白質構造画像から被験者間の平均画像（テンプレート画像）

^{*2} G.Ridgway による拡張プログラム (<http://www0.cs.ucl.ac.uk/staff/g.ridgway/masking>)

3.6 結果：脳構造画像

をもとにしたマスク画像を作成した.

3.6 結果：脳構造画像

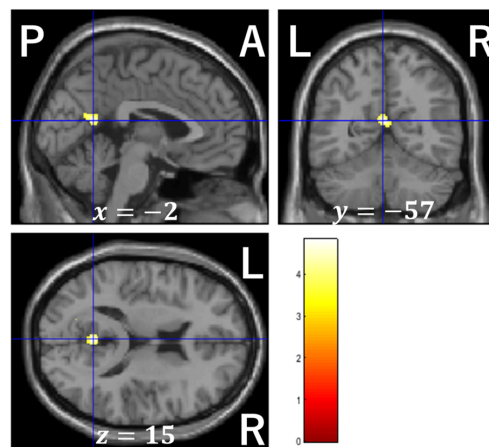
3.6.1 脳形態解析

解析の結果，到達運動課題の成績 rateV と有意な相関が認められる灰白質容積をもつ脳領域が存在した ($p < 0.001$ uncorrected at voxel level and $p < 0.05$ uncorrected at cluster level) (表 3.7) .

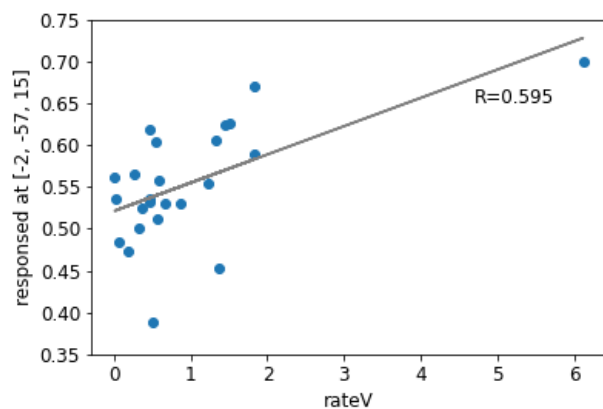
表 3.7: VBM 解析の結果

指標名	Contrast	x	y	z	脳領域	T	$p - \text{uncorr}$
rateV	Positive	-2	-57	15	楔前部	4.83	0.021
aveMax	Negative	24	-84	-33	小脳	5.69	0.010
difMaxMin	Positive	36	-24	44	中心後回	5.44	0.047
aveFin	Positive	-6	-72	36	楔前部	5.61	0.026
		-17	-66	15		4.50	0.006
difFinSt	Positive	-17	77	21	楔部	6.51	0.000

図 3.6 の通り， rateV と楔前部との間に特に有意な正の相関が認められた ($p < 0.001$ uncorrected at voxel level and $p = 0.021$ uncorrected at cluster level) .



(a) 相関が認められた脳領域



(b) ボクセルでの信号値と rateV との相関関係

図 3.6: VBM 解析の結果：(-2, -57, 15) の灰白質容積と rateV との相関

3.7 考察

力場環境下での学習量の変化を割合にした指標を用いて、脳形態解析を行った結果、正の相関が認められたことから、技能獲得前の楔前部の灰白質容積が大きい人ほど、到達運動課題における力場をより多く学習できることが示唆された。また、楔前部は目標地点の空間座標の表現に関与している領域である [7]。到達運動では目標地点の定位、座標変換、運動軌道の計画、運動指令、適応や学習といった一連の処理を脳で行っている。視覚情報として入力される目標地点の位置は網膜上の座標で表現されているため、実際の運動のために座標系の変換が必要であり、頭部を中心とした座標系、手先を中心とした座標系など身体や目標地点との関係を示す空間座標に変換されている [8]。このことから、到達運動の目標地点の空間座標表現が力場の学習量に影響する可能性があると考えられる。

第 4 章

実験 2

4.1 実施課題の検討

実験 1 の到達運動課題に関する検討の結果を踏まえ、別の運動学習課題を用いた同様の実験でも調査した。運動学習課題を新たに設定するにあたり、以下のような事柄を検討した上で、ジャグリング課題を運動学習課題に利用した。

- 到達運動課題と異なる運動特性をもつ課題である
- 運動学習の成績評価が容易である
- 学習程度に個人差がみられやすいと考えられる

到達運動課題と異なる運動特性をもつ課題であることを基準としたのは、運動学習課題の違いによって運動学習能力の予測に関連する脳領域が変化するのではないかと考えたためである。到達運動課題は前方に腕を動かす単調な運動による学習であった。一方で、ジャグリング課題は球技であり、自分自身の身体の動きと物の動きの両方を考慮した運動の調整が必要となり複雑な運動学習であるため、到達運動課題とは異なる運動特性をもっていると言える。また、運動学習の結果をボールをキャッチできたかできていないかで判断し、明確な成績評価をできる。

4.2 被験者

本実験には、本学の学生 53 名（男性 28 名、女性 16 名）が参加した（実験 1 に参加したかどうかは考慮していない）。被験者は事前アンケート「運動歴に関するアンケート」に回

4.2 被験者

答しており、右利きかつジャグリング未経験であることを確認した。本実験は、MRI 装置の注意事項や個人情報の取り扱いを含めて実験の説明を行い、被験者の同意の上で実施した。

4.2.1 事前アンケート

事前アンケートでは以下に関する内容の質問を設定した。

- 過去の運動経験歴に関する質問
- ジャグリングの経験程度に関する質問
- 利き手に関する質問

過去の運動経験歴に関する質問では、1 年以上の経験があるダンスや楽器演奏も含めた運動について小学校、中学校、高校、大学に分け、経験した運動とその期間についての質問を記述式で行った。

ジャグリングの経験程度に関する質問では、運動学習課題を実施するまでに課題内容の推測ができないようにするため、ジャグリング以外の運動や動作も含めて経験程度の質問を行った。

利き手に関する質問では、エディンバラ利き手テスト [9] を参考に 17 個の動作で使用する手を回答してもらった。質問の 1～10 番目の動作で「行わない（行ったことがない）」と回答したものがあった場合は、11～17 番目の質問の回答を利用して利き手の判別を行った。各選択肢を選んだ動作の数から右手の指標（R）と左手の指標（L）を求め、(4.1) 式に当てはめて各被験者の判別指数（Laterality Quotient: L.Q.）を算出した。

$$L = (\text{いつも左手を使う}) \times 2 + (\text{好んで左手を使う}) + (\text{両方使う})$$

$$R = (\text{いつも右手を使う}) \times 2 + (\text{好んで右手を使う}) + (\text{両方使う})$$

$$L.Q. = 100 * \frac{(R - L)}{(R + L)} \quad (4.1)$$

4.3 実験装置

L.Q. は左利きに偏るほど-100 に近く，右利きに偏るほど 100 に近い値を取る．本実験では，L.Q. が 70 以上の場合を右利きとして判定した．

4.3 実験装置

脳画像の撮像には 3T MRI 装置（MAGNETOM Prisma, SIEMENS 製），運動学習課題のジャグリングには異なる色の 2 つのボールを使用した（図 4.1）．ジャグリングボールは投げ上げがしやすいようある程度の重さがあり，手のひらに収まる大きさのものを用意した．



(a) MRI 装置



(b) ジャグリング用ボール

図 4.1: 実験 2 で使用した実験装置

4.4 実験方法

4.4.1 脳画像の撮像

撮像した脳画像は，脳機能画像と脳構造画像（3 次元 T1 強調画像）である．機能画像は実験 1 と同様，安静時脳活動の撮像を行った．撮像した機能脳画像のうち，1～4 枚目を捨てスキャンとし，残りの画像をその後の解析に使用した．機能画像と構造画像のそれぞれの撮

4.4 実験方法

像パラメータは下（表 4.1）の通りである．

表 4.1: 脳画像の撮像パラメータ

項目	機能画像	構造画像
Repetition Time (ms)	2500	2400
Echo Time (ms)	30	2.32
Total scans	244	
Matrix	64 * 64	240 * 256
Number of slices	40	176
flip angle (deg)	80	9
voxel (mm)	3.3 * 3.3 * 3.3	1.0 * 1.0 * 1.0
thickness (mm)	3.2	0.9
Slice order	ascending	ascending

4.4.2 運動学習課題：ジャグリング課題

実験 2 の運動学習課題にはジャグリング課題を用いた．この課題では，2 つのボールを利き手（右手）で交互に内回し（被験者から見て時計回り）にする 2 ボールジャグリングを設定した（図 4.2）．

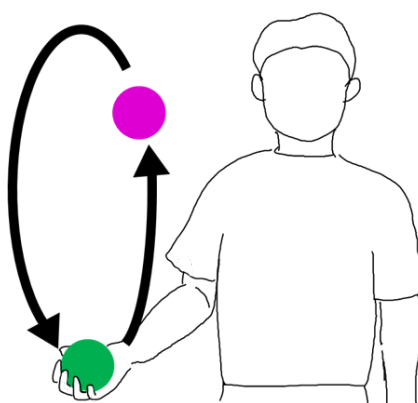


図 4.2: 2 ボールジャグリング

課題はボールが落ちるか，動作が止まるまでを 1 試行とした．図 4.3 のように，右手に 2 つのボールを持った状態（①）から，2 つのボールを交互に投げ上げ，キャッチする（②）．途中で，片方のボールを投げ上げる前にもう一方のボールをキャッチした場合か（③），ボー

4.5 ジャグリング課題の成績評価

ルを落とした場合（④）に失敗として1試行を終わる。

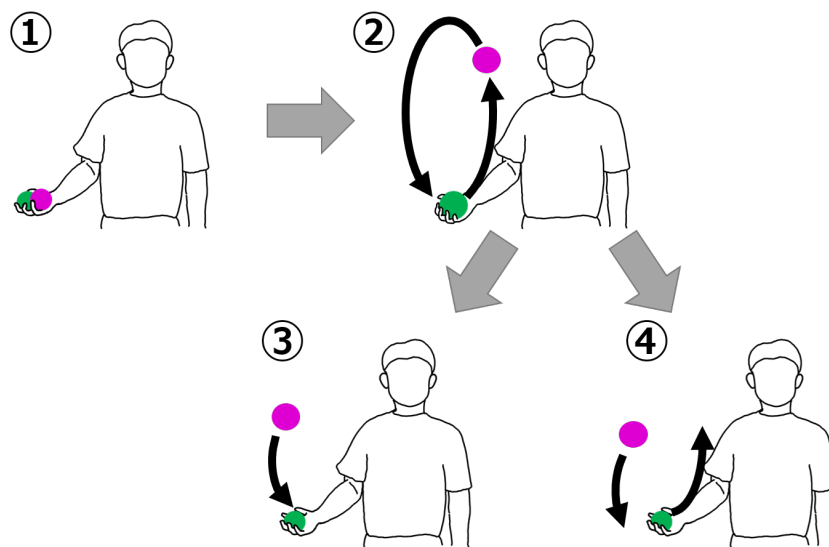


図 4.3: ジャグリングの1試行イメージ

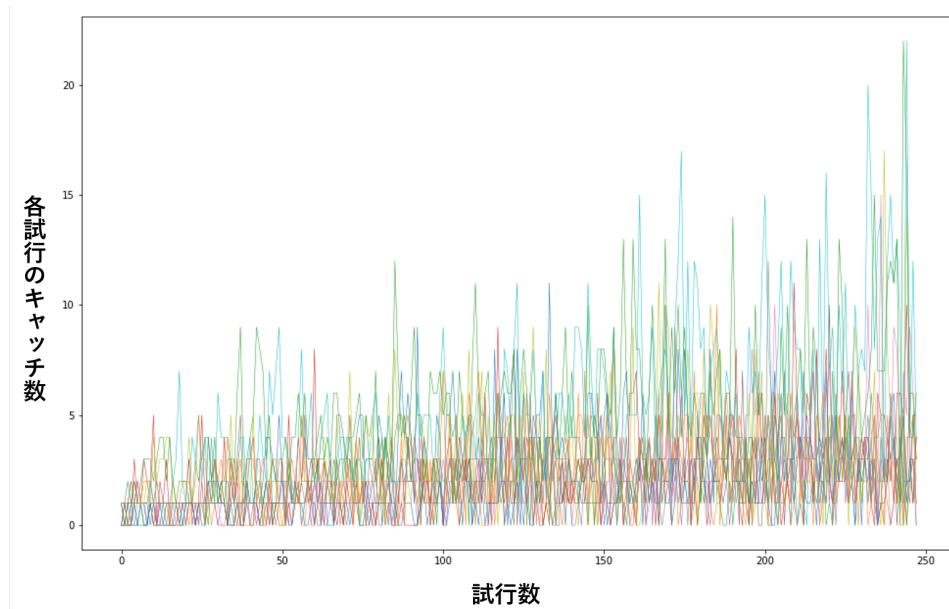
課題説明の際に 19 秒の見本動画を計 3 回提示してから計 250 試行を実施した。疲労の蓄積による成績低下を軽減するために、課題実施時間は計 10 分経過する毎に 3 分間の休憩を挟んだ。実験者は課題の結果として各試行の連続キャッチ数を記録した。実験後には課題中の様子を撮影した動画を使用し、課題結果の記録を確認した。

4.5 ジャグリング課題の成績評価

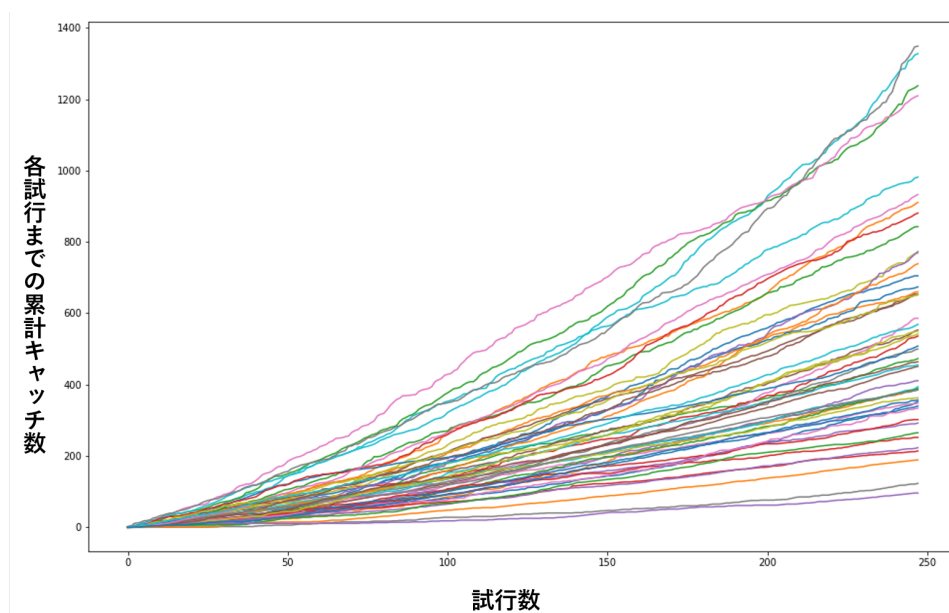
ジャグリング課題の結果、各被験者は 2 ボールジャグリングを学習し、その学習結果に差が出た（図 4.4）。

ジャグリング課題の結果から各被験者の課題成績を定義した。課題成績は、各試行のキャッチ成功数をもとに、評価指標 Sum で学習度を求めた（表 4.2）。ただし、被験者 1 名の実施した試行回数が 248 試行であったため、被験者間で全試行数を 248 試行に統一して処理した。

4.5 ジャグリング課題の成績評価



(a) 各試行でのキャッチ成功数



(b) 各試行までの累計キャッチ成功数

図 4.4: 各被験者のジャグリング課題でのキャッチ成功数の様子

4.6 解析方法：安静時脳機能画像

表 4.2: ジャグリング課題の成績の評価指標

評価指標	
Sum	全試行数（248 試行）のキャッチ数の累計

4.6 解析方法：安静時脳機能画像

技能獲得前の安静時脳機能画像を使用して、脳活動及び機能的結合とジャグリング課題の成績の関連を調査した。

4.6.1 安静時脳活動解析

ジャグリング課題の成績と関連する安静時脳活動をもつ脳領域を調査するために、ALFF による安静時脳活動を行った。解析に使用したソフトウェアは下の通りである。

- 使用したソフトウェア
 - MATLAB 2018b
 - SPM8（前処理でのみ使用）
 - REST v1.8^{*1}
 - DPABI v1.2^{*2}
 - SPM12

■機能画像の前処理 安静時脳活動を実施するために、機能画像をもとに fALFF（fractional ALFF）画像、さらに mfALFF（mean-fractional-ALFF）画像を作成した。fALFF 画像は各ボクセルの低周波帯域の信号強度と全周波数帯域の信号強度の比を反映したものである。これによって、個人の安静時における神経活動の特徴量を評価した。DPARSF では表 4.3 の通りに設定して前処理を行った。

^{*1} SPM8 の toolbox (<https://www.nitrc.org/projects/rest/>)

^{*2} SPM8 のパッケージ (<http://rfmri.org/dpabi>)

4.6 解析方法：安静時脳機能画像

表 4.3: DPARSF の設定

Template Parameters	Calculate in MNI Space (urap by DARTEL)
Time Points	240
TR (s)	3.0
Slice Timing	on
Slice Number	40
Slice Order	[1:1:40]
Reference Slice	40
Realign	on
Reorient Fun*	off
AutoMask	off
Crop T1	off
Reorient T1*	off
Bet	off
T1 Coreg to Fun	on
Segment	off
New Segment + DARTEL	on
Affine Regularisation in Segmentation	East Asian
Nuisance Covariates Regression	on
Head Motion model	Friston 24
Normlize	Normalize by DARTEL
Normlizeing > Voxel Size	[3 3 3]
Smooth by DARTEL	on
Smoothing > FWHM	[6 6 6]
Define ROI	AAL atlas
Starting Directory Name	Fun Img

■**相関解析** ジャグリング課題の成績と関連する安静時脳活動をもつ脳領域を調査するために、mfALFF 画像とジャグリング課題の成績 Sum を使用して、安静時脳活動とジャグリング課題の学習量との相関解析を行った ($p < 0.001$ uncorrected at voxel level and $p < 0.05$ uncorrected at cluster level)。

4.6 解析方法：安静時脳機能画像

4.6.2 機能的結合解析

ジャグリング課題の成績と関連する機能的結合をもつ脳領域を調査するために、ROI-to-ROI/Seed-to-Voxel による機能的結合解析を行った。解析に使用したソフトウェアは下の通りである。CONN では、脳機能画像の前処理、機能的結合性の計算、仮設検定の一連の処理を行った。

- 使用したソフトウェア
 - MATLAB 2018b
 - SPM12
 - CONN^{*3}

■機能画像の前処理/結合値の計算 機能的結合解析を実施するために、灰白質の神経活動由来の信号を取り出した rs-fMRI をもとに、ROI（関心領域）同士または Seed（固定領域）と各ボクセルの安静時脳活動の時間的同期から結合値を算出した。本実験では、大脳と小脳の全体を調査するため、解析対象の関心領域として、132 分割した atlas すべてを使用した（図 4.5, 表 4.4）。

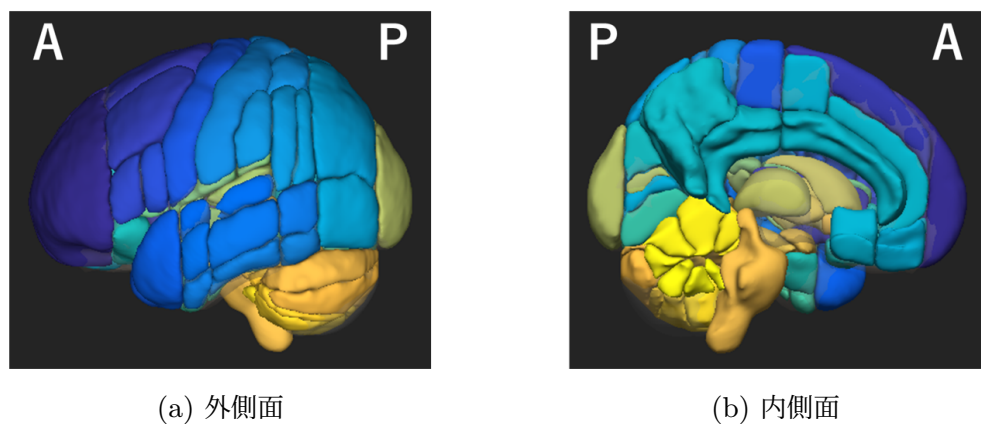


図 4.5: atlas の分割

^{*3} SPM12 の toolbox (<https://www.nitrc.org/projects/conn>)

4.6 解析方法：安静時脳機能画像

表 4.4: atlas の例

atlas	
FO	Frontal Operculum Cortex
OFusC	Occipital Fusiform Cortex
TOFusC	Temporal Occipital Fusiform Cortex
Ver 10	Vermis 10 (Cerebellum)
pSMG	Supramarginal Gyrus, posterior division
aMTG	Middle Temporal Gyrus, anterior division
pMTG	Middle Temporal Gyrus, posterior division

Seed には、運動やそれに伴う視覚処理の機能をもつ脳領域がジャグリング課題の成績に影響していると考え、一次運動野などの運動領域や視覚領域を設定した（表 4.5）。

表 4.5: 使用した Seed の一覧

Seed	
iLOC	Lateral Occipital Cortex, inferior division
Cereb	Cerebellum
SCC	Supracalcarine Cortex
FP	Frontal Pole
SFG	Superior Frontal Gyrus
Cuneal	Cuneal
toMTG	Middle Temporal Gyrus, temporooccipital part
MidFG	Middle Frontal Gyrus
IFG tri	Inferior Frontal Gyrus, pars triangularis
IFG oper	Inferior Frontal Gyrus, pars opercularis
PreCG	Precentral Gyrus
PosCG	Postcentral Gyrus
SPL	Superior Parietal Lobule
aSMG	Supramarginal Gyrus, anterior division
pSMG	Supramarginal Gyrus, posterior division
AG	Angular Gyrus
Precuneus	Precuneus Cortex
SMA	Juxtapositional Lobule Cortex -formerly Supplementary Motor Cortex
AC	Cingulate Gyrus, anterior division
PC	Cingulate Gyrus, posterior division

4.6 解析方法：安静時脳機能画像

特にその後の解析で関係がみられた Seed として、運動知覚に関与する V5/MT 周辺の脳領域である iLOC, 運動学習や認知に関与する小脳 (Cereb) があった (図 4.6) .

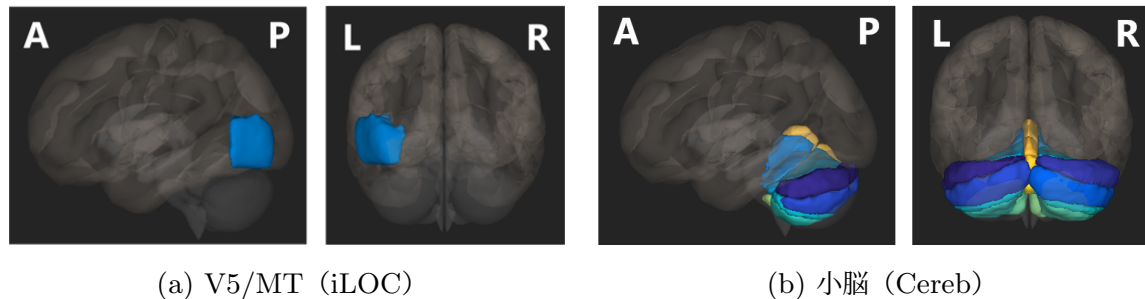


図 4.6: 本実験で設定した Seed

各被験者の結合値を算出するために first-level Analysis では、以下の通りにパラメータを設定して処理を行った.

- Analysis type
 - functional connectivity (weighted GLM)
 - ROI-to-ROI and Seed-to-Voxel analyses
- Analysis options
 - correlations (bivariate)
 - no weighting

■**相関解析** ジャグリング課題の成績と関連する機能的結合をもつ脳領域を調査するために、V5/MT または小脳との機能的結合値とジャグリング課題の成績 Sum を使用して、機能的結合とジャグリング課題の学習量との相関解析を行った ($p = 0.001$, CFT/CDT^{*4}; $p < 0.05$, FDR corrected) . 相関解析のパラメータは以下の通りに定した.

- Subject effects
 - All Subjects
 - Sum

^{*4} Cluster Forming Threshold / Cluster Defining Threshold

4.7 解析方法：脳構造画像

- Between-subjects contrast
 - 0 1
 - Simple main effect of Sum
- Conditions
 - rest
- Between-conditions contrast
 - 1
 - Effect of rest

4.7 解析方法：脳構造画像

4.7.1 脳形態解析

到達運動課題での脳構造画像に関する解析（3.5 節）と同様に VBM で脳形態解析を実施し、技能獲得前の灰白質容積とジャグリング課題の成績の関連を調査した。

■**相関解析** 灰白質容積とジャグリング課題の成績 Sum を使用して、灰白質容積とジャグリング課題の学習量との相関解析を行った（ $p < 0.001$ uncorrected at voxel level, $p < 0.05$ uncorrected at cluster level）。

4.8 結果：安静時脳機能画像

4.8.1 安静時脳活動解析

ALFF による解析の結果、有意な相関が認められる脳領域が存在した（ $p = 0.001$, CFT/CDT; $p < 0.05$, FWE corrected）（表 4.6）。

4.8 結果：安静時脳機能画像

表 4.6: ALFF 解析の結果

Contrust	x	y	z	脳領域	T	p -FWE	R
Positive	-60	-9	18	運動野/腹側運動前野	4.99	0.011	0.581
	-57	-3	27		3.92		
	-51	-9	18		3.82		
Positive	-39	-30	12	横側頭回	4.53	0.025	0.543
	-54	-24	12		3.14		

Sum と左運動野／腹側運動前野との間に有意な正の相関が認められた ($R = 0.58$; $p = 0.011$, FWE corrected) (図 4.7) .

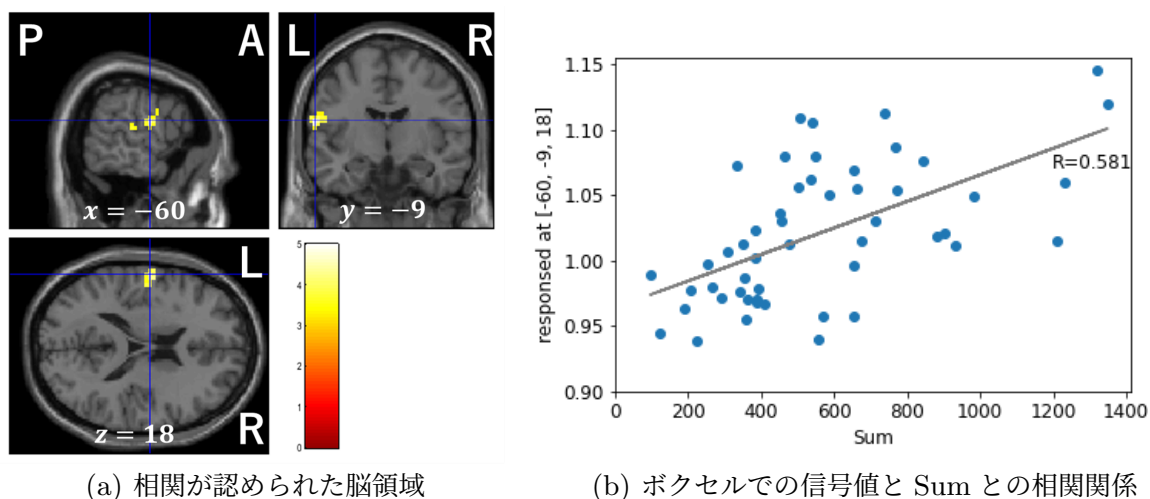


図 4.7: ALFF 解析の結果：(-60, -9, 18) の安静時脳活動と Sum との相関

4.8.2 機能的結合解析

ROI-to-ROI による解析の結果、ジャグリング課題の成績 Sum と有意な相関が認められる機能的結合が存在した (表 4.7) .

4.8 結果：安静時脳機能画像

表 4.7: ROI-to-ROI 解析の結果

Analysis Unit		T(49)	p-FDR
toMTG (L)	FO (L)	4.08	0.0220
Cereb 1 (L)	OFusC (L)	4.89	0.0015
	TOFusC (L)	3.86	0.0220
Ver 10	Cereb 7 (L)	4.10	0.0200
Putamen (R)	pSMG (R)		
SCC(L)	aMTG (L)	3.86	0.0322
	pMTG (L)	3.73	0.0322

Seed-to-Voxel による解析の結果、ジャグリング課題の成績 Sum と有意な相関が認められる機能的結合が存在した（表 4.8）.

表 4.8: Seed-to-Voxel 解析の結果

Seed	Voxel			
	x	y	z	L/R
iLOC (L)	-24	-60	48	L
Cereb 1	-28	-74	-12	L
	20	-74	-6	R
FP (L)	-12	-74	26	L
Cuneal (L)	2	-64	34	R
	24	-72	-30	R
	-60	-60	34	L
	-14	54	-12	L
SFG (L)	-36	-76	28	L
SCC (L)	-14	-52	38	L
	-64	-24	-16	L
	-6	56	-14	L
toMTG (L)	54	-46	22	R

Seed を V5/MT の領域に設定した際に左上頭頂小葉との結合は Sum と有意な正の相関が認められた ($R = 0.58$; $p = 0.003$, FWE corrected) (図 4.8) .

4.8 結果：安静時脳機能画像

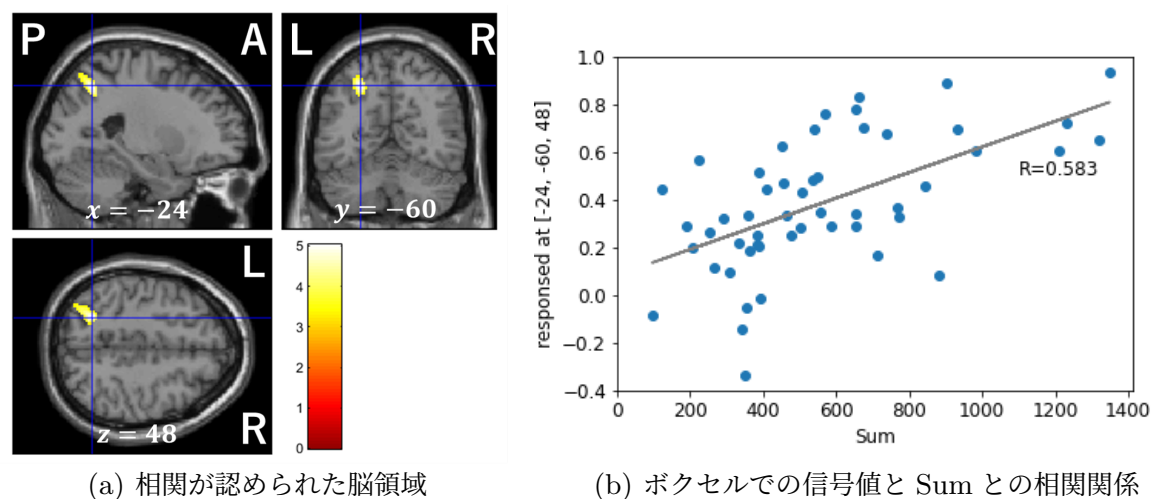


図 4.8: Seed-to-Voxel 解析の結果：(-24, -60, 48) の機能的結合値と Sum との相関

また、Seed を小脳に設定した際の視覚連合野との結合は Sum と有意な正の相関が認められた ($R = 0.6$; $p < 0.0005$, FWE corrected) (図 4.9-4.10) .

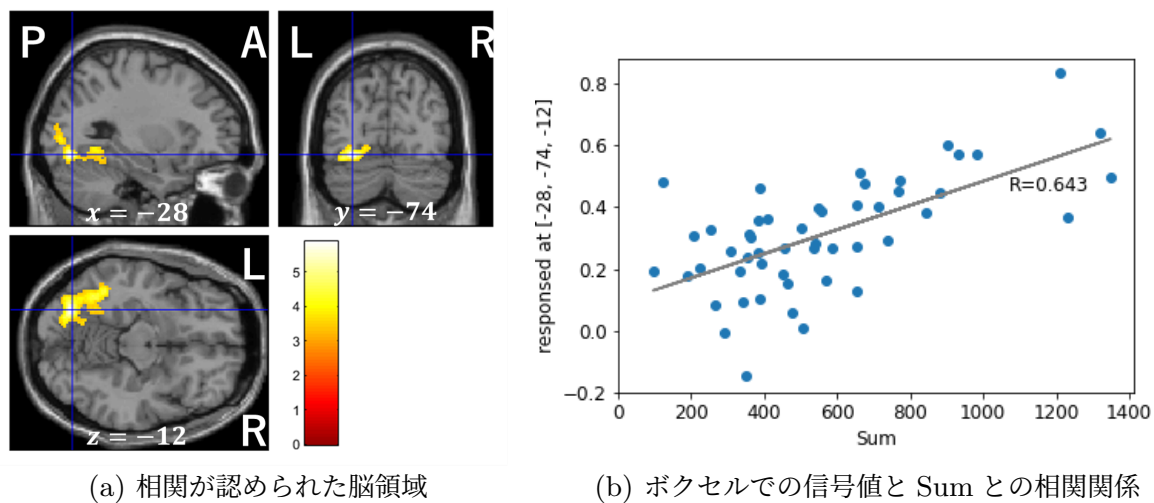


図 4.9: Seed-to-Voxel 解析の結果：(-28, -74, -12) の機能的結合値と Sum との相関

4.9 結果：脳構造画像

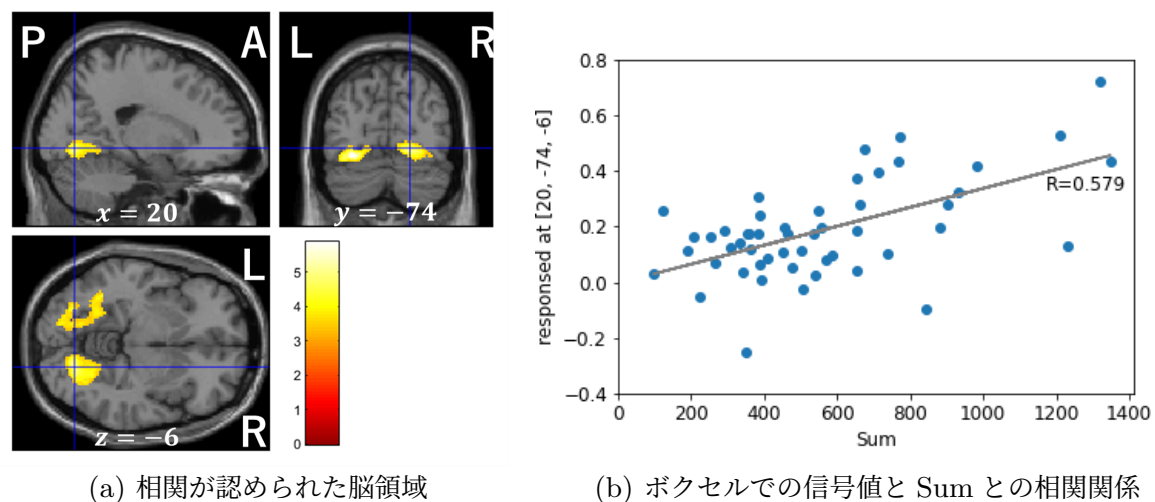


図 4.10: Seed-to-Voxel 解析の結果：(20, -74, -6) の機能的結合値と Sum との相関

4.9 結果：脳構造画像

4.9.1 脳形態解析

脳構造画像と到達運動課題の成績を用いた VBM 解析の結果，ジャグリング課題の成績指標 Sum と有意に関連する灰白質容積をもつ脳領域はみられなかった ($p > 0.05$ uncorrected at cluster level)。

4.10 考察

ジャグリングの学習量を示す指標を使った場合に，技能獲得前の安静時脳活動と正の相関が認められたことから，左運動野／腹側運動前野の安静時脳活動が大きい人ほど，2 ボールジャグリングをより多く学習できることが示唆された。また，腹側運動前野は視覚情報に基づいた運動に関連する領域であることから，視覚情報に基づく運動に関連する脳領域の活動がジャグリング課題の学習度に影響すると考えられる。

同様に，技能獲得前の機能的結合でも正の相関が認められたことから，左 V5/MT - 左上頭頂小葉，小脳 - 視覚連合野の結合が強い人ほど，2 ボールジャグリングをより多く学習できることが示唆された。左 V5/MT は運動視に関連する領域であり，ジャグリング課題後に

4.10 考察

灰白質容積が増大すること [10] が報告されている。

さらに，小脳は運動の強さや範囲の調節によって運動学習に関与しており，視覚に関連する領域を含んだ経路にも関わっている。これらのことから，視覚情報処理に関連する脳領域との機能的結合がジャグリング課題の学習度に関係していると考えられる。ジャグリング課題の成績と安静時脳活動，機能的結合の関連から，技能獲得前の脳活動からジャグリング課題の成績を予測できることが示唆された。

ジャグリングの学習量の指標と技能獲得前の灰白質容積との間に有意な相関が認められなかったことから，技能獲得前の脳構造からはジャグリング課題の成績は予測できないことが示唆された。

第 5 章

総合考察

過去の研究で安静状態で撮像した脳機能画像と到達運動課題の関連について、注意の維持に関わるネットワークを構成する下前頭回弁蓋部および帯状回の活動、運動の遂行や学習に関与する大脳基底核や視床、角回といった領域の結合が到達運動課題における力場の学習量に影響することを示唆した [1]。脳活動の観点について、到達運動課題とジャグリング課題との比較により、視覚処理に関わる領域の活動や機能的結合が学習量に影響することがジャグリング課題の特徴であることが示唆された。

脳構造について、到達運動課題では楔前部の灰白質容積が課題成績に影響することが示唆された一方で、ジャグリング課題では課題成績に影響する灰白質容積はみられなかった。このことから、運動前の灰白質容積からその後の運動学習課題の成績を予測可能であるかどうかは、課題内容で差が出ると考えられる。特に到達運動課題のように単純な運動ほど、学習には運動遂行に関わる領域の活動や構造の差が、運動学習能力の差につながる可能性がある。

本研究で扱った運動学習課題に関して、到達運動課題は固定範囲の視野での上肢の運動に伴う学習であったのに対し、ジャグリング課題は対象物の移動が大きく、全身の動きの協調が必要であった。こうした課題の特性が、課題成績と脳の関係の違いに影響していると考えられる。ジャグリング課題の特徴は他の球技にもみられるものであるため、ジャグリング課題と同様に視覚処理を中心とした脳の処理が運動学習の個人差につながる可能性がある。

MRI では、本研究で使用した機能画像や構造画像（3 次元 T1 強調画像）以外にも拡散強調画像の撮像が可能である。拡散強調画像では、ニューロンの水平方向の水分子の動きから神経線維の走行状態をみることで、物理的な神経のネットワークを把握できる。技能獲得前

の拡散強調画像を使用した運動学習能力の予測についても検討することで、脳画像からの運動学習能力の予測について画像の違いによる関連する脳領域について明らかにできる可能性がある。

本研究で報告した技能獲得前の脳領域の情報とその後の運動課題の成績に関して、実際の予測が可能であるかどうかは新たに検討する必要がある。本研究の成果をもとに、実際に脳の情報から個人の運動学習能力の予測や運動学習に関する特徴が事前に把握できれば、リハビリテーションやスポーツトレーニングにおける運動学習の計画に役立てられると考えられる。

第 6 章

結論

本研究では、技能獲得前に撮像した脳画像からその後の運動学習課題の成績を予測できるか検討した。到達運動課題における力場の学習量の割合は、技能獲得前に計測した運動遂行に関連する領域の脳活動や構造から予測できることが示唆された。また、ジャグリング課題の学習量は、技能獲得前に計測した視覚情報処理に関連する領域の脳活動から予測できることが示唆された。運動学習課題の違いによって、課題成績に影響する技能獲得前の脳領域に差があることが明らかになった。特に、視覚処理に関する脳機能がジャグリング課題の学習における特徴であることが示唆された。

謝辞

本研究の実施及び本論文の作成にあたり、ご指導を頂いた指導教員の門田宏准教授に心より深く御礼申し上げます。また、副査を務めていただいた繁榊博昭教授と妻鳥貴彦准教授に心より感謝致します。

参考文献

- [1] 横田文, “運動課題の成績に関連する安静時脳活動の検討”, 高知工科大学, 学士学位論文, 2022.
- [2] J. Wu, R. Srinivasan, A. Kaur and S. C Cramer, “Resting-state cortical connectivity predicts motor skill acquisition”, *Neuroimage*, 91: 84-90, 2014.
- [3] B. Draganski, C. Gaser, V. Busch, G. Schuierer, U. Bogdahn, A. May, “Changes in grey matter induced by training”, *Nature*, 427: 311-312, 2004.
- [4] 小野田慶一, 山口修平, “安静時 fMRI の臨床応用のための基礎と展望”, *日本老年医学誌*, 52(1): 12-17, 2015.
- [5] K. Smith 著, 船田晶子訳, “「何も考えていない」ときの脳活動”, *Nature ダイジェスト*, 9(12): 10-13, 2012.
- [6] Q.H. Zou, C.Z. Zhu, Y. Yang, X.N. Long, Q.J. Cao, Y.F. Wang and Y.F. Zang, “An improved approach to detection of amplitude of low-frequency fluctuation (ALFF) for resting-state fMRI: Fractional ALFF”, *Journal of Neuroscience Methods*, 172(1): 137–141, 2008.
- [7] M. Uchimura, T. Nakano, Y. Morimoto, H. Ando and S. Kitazawa, “Automatic representation of a visual stimulus relative to a background in the right precuneus”, *Eur J Neurosci*, 42: 1651-1659, 2015.
- [8] Y.E. Cohen and R.A. Andersen, “A common reference frame for movement plans in the posterior parietal cortex”, *Neuroscience*, 3(7): 553-614, 2002.
- [9] R.C. Oldfield, “The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory”, *Neuropsychologia*, 9(1): 97-113, 1971.
- [10] J. Driemeyer, J. Boyke, C. Gaser, C. Buchel and A. May, “Changes in gray matter induced by learning-revisited”, *PLoS ONE*, 3(7): e2669, 2008.

参考文献

- [11] B. Draganski, C. Gaser, V. Busch, G. Schuierer, U. Bogdahn, and A. May, “Changes in grey matter induced by training”, *Nature*, 427: 311-312, 2004.

付録 A

脳機能画像と到達運動課題の成績

過去の研究で報告した技能獲得前の脳機能画像を用いた到達運動課題の運動学習能力の予測の内容 [1] についてまとめる.

A.1 安静時脳活動と到達運動課題の関連性

安静時脳活動と到達運動課題に関する相関解析によって, 下 (表 A.1) のような結果が得られた ($p < 0.05$).

表 A.1: 到達運動課題の成績と関連がみられた安静時脳活動をもつ脳領域 ($N = 24$)

指標名	脳領域	x	y	z
rateV	下前頭回弁蓋部	57	9	3
		-51	12	0
	帯状回	0	6	33
		3	21	27

A.1 安静時脳活動と到達運動課題の関連性

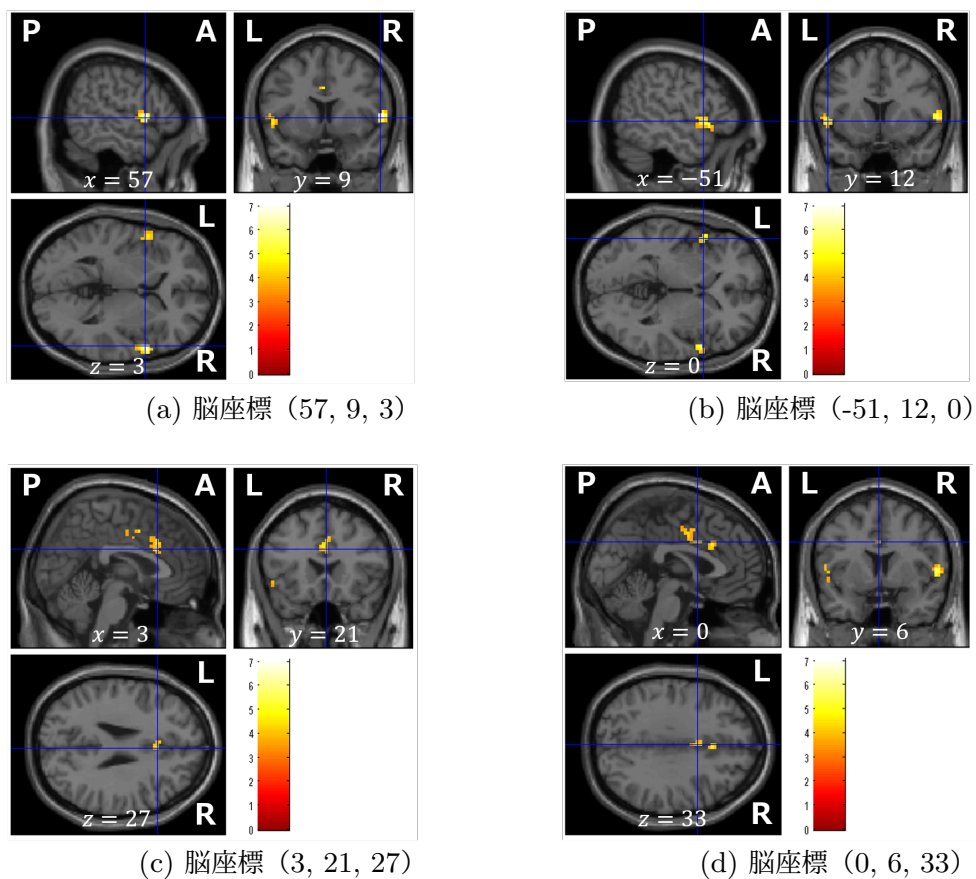


図 A.1: 到達運動課題の成績と関連のある安静時脳活動をもつ脳領域

指標 rateV で評価した到達運動課題の成績は、右下前頭回弁蓋部（表 A.1a）および左下前頭回弁蓋部（表 A.1b）、帯状回（表 A.1c-A.1d）と相関が認められた。

弁蓋部と帯状回は、主に注意（緊張）の維持に関与するネットワーク Cingulo-Opercular Network (CON) を形成していることから、CON の活動の強さが到達運動課題の成績に関連することを報告した。

付録 B

利き手の判別テスト

利き手に関する質問です。以下の 17 個の動作について答えて下さい。

- 動作

- | | |
|----------------|-------------------|
| 1. 字を書く | 10. ドライバー（ねじ回し） |
| 2. 絵を描く | 11. テニス |
| 3. 物を投げる | 12. ナイフ（フォークあり） |
| 4. はさみで切る | 13. ゴルフクラブ |
| 5. 櫛で髪をすく | 14. 箸（上の手） |
| 6. 歯磨き | 15. マッチ（マッチをする手） |
| 7. ナイフ（フォーク無し） | 16. 箱を開ける |
| 8. 箸やスプーン | 17. 針に糸を通す |
| 9. 金槌 | （針あるいは糸いずれでも動かす方） |

- 選択肢

- － いつも左手を使う
- － いつも右手を使う
- － 好んで左手を使う
- － 好んで右手を使う
- － 両方使う
- － 行わない（行ったことがない）

付録 C

球技経験と運動学習課題の成績の 関連

ジャグリング課題の学習において、過去の運動経験が学習度に関連するのではないかと考えられる。そこで、実験 2 の被験者のうち 27 名のジャグリング課題の成績と過去の運動経験歴との関係を調査した。過去の運動経験歴は「スポーツ歴に関するアンケート」で回答のあった過去の運動経験のうち、各種目の経験年数の最大値を利用した。

運動種目の球技と非球技の振り分けは以下の通りである。

- | | |
|------------|----------|
| ● 球技 | ● 非球技 |
| － バスケットボール | － バドミントン |
| － 野球 | － 水泳 |
| － 卓球 | － 陸上競技 |
| － バレーボール | － 器械体操 |
| － 水球 | － 剣道 |
| － サッカー | － 柔道 |
| － ドッチボール | － 弓道 |
| － テニス | － 空手 |
| | － 自転車競技 |

球技と非球技を合わせた運動種目全般（スポーツ）、球技種目、非球技種目の経験歴について、ジャグリング課題の成績 Sum との相関解析を求めた結果、下（表 C.1）のような結果が得られた。

表 C.1: 運動経験歴とジャグリング課題との相関

運動経験指標	総キャッチ数		
	R^2	$Cohen's f^2$	p
スポーツ経験歴（年）	0.008335	0.008405	0.650633
非球技経験歴（年）	0.02047	0.0209	0.47647
球技経験歴（年）	0.163092	0.194874	0.036701

球技種目の最長経験歴とジャグリング課題の成績との間には、有意な相関が認められた ($p < 0.05$) (図 C.1) .

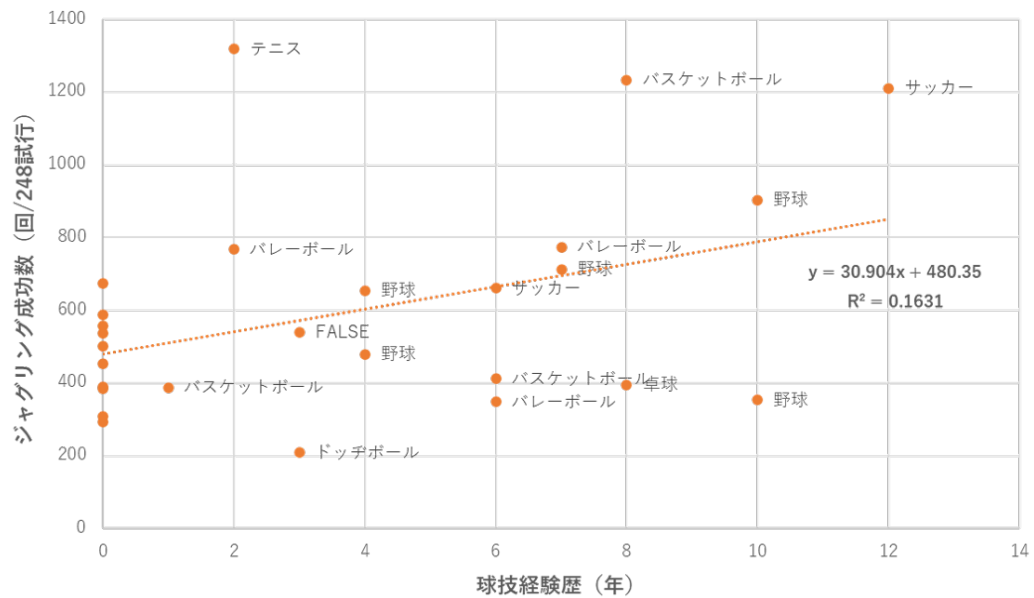


図 C.1: 球技経験歴とジャグリング課題成績との関係

一方で、球技と非球技を合わせた運動種目の最長経験歴などとジャグリング課題成績との間に関連性は見られなかった (図 C.2) .

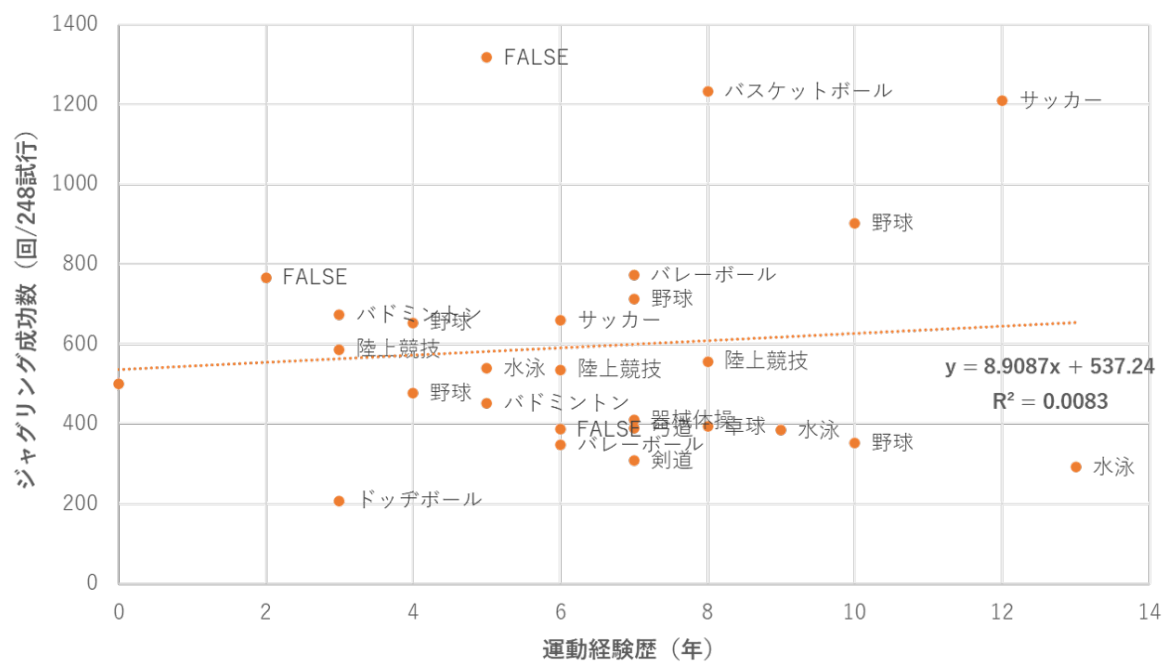


図 C.2: 運動経験歴とジャグリング課題成績との関係