

メンタルローテーションにおける
脳内情報処理機構の研究

川道拓東

目次

まえがき	4
1. 序論	7
2. メンタルローテーションに関する心理学的な知見	10
2.1. メンタルローテーションに関する心理学的な先行研究[1]	10
2.1.1. 実験方法.....	10
2.1.2. 結果と考察.....	11
3. 身体の一部(手)のメンタルローテーション時の脳内処理過程[7][8][9][10].....	13
3.1. 実験方法.....	13
3.1.1. 被験者	13
3.1.2. 視覚刺激.....	14
3.1.3. MEG 計測実験.....	16
3.1.4. MEG データ解析方法.....	17
3.2. 結果	18
3.3. 考察	23
3.4. 結論	25
4. 文字のメンタルローテーション時の脳内処理過程[12][13][14][15][17][18].....	27
4.1. 実験方法.....	27
4.1.1. 被験者	27
4.1.2. 視覚刺激.....	27
4.1.3. 解析を行う視覚刺激の選定	28
4.1.4. MEG 計測実験.....	29
4.1.5. MEG データ解析方法.....	30
4.2. 結果	32
4.2.1. 正立文字に対する反応 (表 6、表 7、表 8、表 9、表 10、表 11、表 12 左側参照) 39	
4.2.2. 倒立文字に対する反応 (表 6、表 7、表 8、表 9、表 10、表 11、表 12 右側参照) 41	

4.2.3. 正立文字と倒立文字に対する反応の比較	42
4.3. 考察	43
4.4. 結論	48
5. 3次元物体のメンタルローテーション時の脳内処理過程[19][20][21]	49
5.1. fMRIによる実験	49
5.1.1. 実験方法.....	50
5.1.2. 結果.....	54
5.1.3. 考察.....	58
5.1.4. 結論.....	62
5.2. MEGによる実験	62
5.2.1. 実験方法.....	62
5.2.2. 結果.....	66
5.2.3. 考察.....	68
6. 結論	70
謝辞.....	72
研究業績	74
参考文献	77

まえがき

ヒトの認知過程は、ボトムアップ的な情報処理とトップダウン的な情報処理の相互作用によって遂行されている。しかしながら、こうした処理機構に関する知見のコンピュータなどの情報処理システムへの工学的な応用は、ボトムアップ的な知見に基づくものが主であった。これは、工学的に応用可能なトップダウン的な処理機構に関する知見が十分得られていなかったことに起因すると考えられる。よって、ヒトのトップダウン的な処理機構に関する知見を得ることは、コンピュータの処理の高度化に繋がり、工学上重要な意味を持つと考えられる。

こうした、ヒト認知過程におけるトップダウン的な処理には、無意識下で、認知した外界の情報に基づいて、複数のモダリティの機能を活用しているものがある。このようなものの中で、その情報処理機構についてよく研究されているものにメンタルローテーションがある。

メンタルローテーションタスクとは、被験者に角度差のある2つの物体が鏡像か同一かを判断することを課すものである。このタスクにおいては、被験者が判断するまでに要する時間と2つの物体間の角度差との間に相関があることが心理実験によって示され、心的シミュレーションを行う脳内情報処理機構の存在が示唆されてきた。さらに、近年の非侵襲的脳機能計測手法を用いた研究により、手のメンタルローテーションにおける心的なシミュレーションに、大脳皮質の運動前野(PM: Premotor Area)領域と頭頂連合野の活動が重要であることが示され、視覚刺激の認識およびその処理において運動系の領域を賦活するという複数のモダリティの活用が示唆されている。特に運動系の活動においては刺激に応じて左右手いずれかを動かす際に賦活される領域の活動が見られることから、提示された手に関して左右いずれかであるとの仮説をたてて心的シミュレーションを行っているというトップダウン的な処理の存在が示唆される。

一方で、こうした脳内情報処理機構の解明に必要な情報には(1)脳活動の空間的な情報、(2)脳活動の時間的な情報、(3)刺激と脳活動との因果関係がある。ここで、現在、メンタルローテーション時の脳内活動の計測に利用されている機器は、機能的磁気共鳴イメージング(fMRI: functional Magnetic Resonance Imaging)、ポジトロン断層法(PET:

Positron Emission Tomography)が多い。fMRI や PET は空間分解能に優れる一方で、その時間分解能には制限がある。そうしたことから、賦活部位の時系列的な情報についてはあまり得られていない。さらには、3次元物体のメンタルローテーションでは運動系の領域の活動に関して異なる知見が見られるなど、トップダウン的な処理を誘発する因子がどういったものであるかといった知見も十分には得られていない。こうしたことから、メンタルローテーションにおける脳内の情報処理機構については、未だ不明な点が多い。これに対して、脳磁気計測(MEG: Magnetoencephalography)はミリ秒オーダーの優れた時間分解能、および、ミリメートルオーダーの空間分解能を持ち、高次脳機能の研究に用いられている。しかしながら、MEG によるメンタルローテーションの研究はほとんどなされていない。

本論文は、メンタルローテーションにおける脳内のトップダウン的な処理機構について、MEG と fMRI 計測を中心とした非侵襲的な脳機能計測手法を用いて実験的考察を行ったもので、6章からなる。

第1章は序論で、本研究の歴史的な背景と研究の目的を述べた。

第2章では、メンタルローテーションに関する種々の心理学的な知見の中で、最も基本となる2つの3次元物体を用いたメンタルローテーションタスクの心理的実験の概要、および、その結果について述べた。

第3章では、PET での先行研究により脳内活動の空間的情報が得られている、手を提示刺激として用いたメンタルローテーションタスクに関する脳内の時間的な活動を、MEG により調べた。結果として、視野と対側の視覚野(VC: Visual Cortex)(100~200ms)と下頭頂小葉(IPL: Inferior Parietal Lobule)の早い成分(200~300ms)の活動が見られた。その後、左 PM と IPL の遅い成分の活動が見られた。この結果から視野と対側の VC、IPL にて身体図式の認識を行った後で左 PM、IPL で心的シミュレーションを行っているという処理の流れが示唆された。

第4章では、第3章で得られた結果がメンタルローテーションに共通的なものかどうかを検討した。手のメンタルローテーションと同様に、被験者が内的にモデルを持つ提示刺激の内、身体以外の刺激であるアルファベットを使ったメンタルローテーションタスク遂行時の脳内の時系列的な活動を MEG により評価した。結果として、視野と対側の右 VC

の活動(100~200ms)が見られた後に、文字の音韻的な処理に関係する左上側頭後部領域 (STR: posterior part of Superior Temporal Region)(約 300ms)の活動が見られた。その後 に PM、IPL、上頭頂小葉領域(SPR: Superior Parietal Region)の活動が続く。これらの PM、IPL、SPR の活動は心的シミュレーションに関与していると考えられる。但し、PM に関しては、両条件で活動が見られた被験者数が同程度だったことから他の二つの領域と 比較して、文字の回転角度と活動量の相関がそれほど高くない可能性がある。第3章およ び第4章に述べた2つの実験の結果から、外部刺激が何かを認識した後で心的シミュレー ションを行うという処理の流れが、メンタルローテーションに共通である事が示唆された。

続いて第5章にて、運動系の活動と関係のある提示画像の因子を調べるために実験デザ インを詳細化して脳内活動を調べた。2種類(3次元的な回転、2次元的な回転)の3次元 物体のメンタルローテーションを遂行する際の、被験者の脳活動を fMRI/MEG により計 測した。ここで、3次元的な回転は被験者がタスク中に視覚刺激の見えない部分を想起す る必要があるものであり、2次元的な回転はそうでないものである。fMRI の計測結果と して、3次元的な回転のみが右 PM の活動と相関があるという結果を得た。こうした結果 から、視覚刺激の3次元的な要素がトップダウン的な心的シミュレーション処理の遂行に 関与していることが示唆された。さらに、3次元的な回転において、回転角度との相関が あまり見られなかった頭頂連合野については、その活動時間を調べるために MEG にて計 測を行った。結果として、2次元的な回転と3次元的な回転において、400~500ms の右 頭頂連合野の活動に有意差を見出した。この時間帯は他のメンタルローテーションの実験 において、同領域に活動が見られる時間帯と一致することから3次元的な回転においても 右頭頂連合野の活動が重要であることが示唆された。

最後に第6章に、結びとして、本論文を統括した。

1. 序論

人類によって発明された技術のうち最も優れたものとしてコンピュータが挙げられる。しかし、このコンピュータも人間が決めた範囲の中でのみ、優れた能力を発揮するにすぎない。特に、創造的な課題の遂行においては、ヒトの持つ能力の足元にも及ばない。これは、ヒトの脳の処理機構のすばらしさによるところが大きいといえる。そうしたことに着目して、ヒトの脳の処理機構を解明するためのさまざまなアプローチが今まで行われてきている。

こうしたアプローチには、大きく分けて生理学的なもの、心理学的なもの、工学的なもの三種類がある。まず、生理学的なものは脳の持つ機能などの面からアプローチしている。すなわち、神経細胞における信号伝達などのマイクロな面からの研究とロボットミキサー手術の際に見られるように大脳の機能局在の推定などのマクロな面からの研究が進められている。心理学的アプローチでは、ヒトの行動面から脳の働きを解明するといった研究が進められている。工学的アプローチではこれら二つのアプローチからの知見をもとに脳をモデル化し情報処理システムに応用するといった手法が代表的である。

脳機構の中でヒトに特有な高次脳機能は、ボトムアップ的な情報処理とトップダウン的な情報処理の相互作用によって遂行されている。しかしながらコンピュータなどの情報処理システムへの工学的な応用がなされてきたものは、主にボトムアップ的なものであった。これは工学的に応用可能なトップダウン的な知見が十分でないということに起因すると考えられる。しかしながら、工学的な応用があまりなされていないトップダウン的な処理は創造的な課題遂行に必要不可欠なものである。よって、そうした知見を得ることはコンピュータの処理の高度化につながると考えられ、工学的に重要な意味を持つ。こうしたことから、本研究ではトップダウン的な情報処理機構の知見を得ることを目的とする。

ヒトが認知過程において行うトップダウン的な処理においては、認知した外界の情報に基づきたた仮説により、複数のモダリティの機能を活用しているものがある。そのような処理を行っていると考えられる認知過程の中でもその情報処理過程がよく調べられているものの一つにメンタルローテーションがある。

メンタルローテーションタスクとは、被験者に角度差のある2つの3次元図形が鏡像か

同一かを判断することを課すものである。本タスクにおいては、被験者が判断するまでに要する時間は2つの3次元図形の角度差と相関があることが心理実験によって示されている[1][2]。特に、左右手を提示画像として用いるメンタルローテーションにおいては、PETによりPM領域と頭頂連合野の活動が重要であることが示されている[26]。すなわち、視覚刺激の認識およびその処理において、運動系の領野を賦活するという複数のモダリティの利用が示唆されている。特に運動系の活動においては刺激に応じて左右手いずれかを動かす際に賦活される領域の活動が見られることから、提示された手を左右いずれかであるとの仮説をたてて心的シミュレーションを行うというトップダウン的な処理の存在が示唆される。

一方で、こうした脳内情報処理機構の解明に必要な情報には(1)脳活動の空間的な情報、(2)脳活動の時間的な情報、(3)刺激と脳活動との因果関係がある。このようなヒト認知過程における脳内情報処理機構の解明のために、脳内活動を計測する非侵襲的脳機能手法としては、EEG(脳波計測: Electroencephalography)、MEG、NIRS(光トポグラフィ: Near Infrared Spectrometer)、PET、fMRIなどがある。EEG、MEGに関しては、時間分解能は数msと非常に優れるが、空間分解能はPET、fMRIと比較すると劣る。NIRSは計測の簡便性は優れているが、時間分解能はEEG、MEGに、空間分解能はPET、fMRIに劣る。PET、fMRIに関しては、空間分解能が数mm程度と非常に優れるが、時間分解能はEEG、MEGに劣る。

ここで、メンタルローテーションのような認知タスク遂行時の脳内活動の計測に利用されている機器は現状ではPET、fMRIが多い。これらの機器には前述したように時間分解能に制限があるため、メンタルローテーションにおける賦活部位の時系列的な情報についてはあまり得られていなかった。さらには、3次元物体のメンタルローテーションにおいては、PMの活動が見られるとするもの[23][87][89][98][99]と見られないとするもの[22][30][38]がある。すなわち、トップダウン的な処理を誘発する因子がどういったものであるかといった知見も十分には得られていないといえる。こうしたことから、メンタルローテーションにおける脳内の情報処理機構については、未だ不明な点が多い。

本研究では、まず、メンタルローテーションタスクにおける脳内の時系列的な活動を調べることを狙いとした。その目的を達成するために、非侵襲的な計測手法の内、時間分解

能に優れ、かつ、EEGと比較して空間分解能もよいMEGを利用してメンタルローテーションタスク遂行時の脳内活動について調べる。具体的には、PETでの先行研究で脳内活動の空間的情報が得られている、手を提示刺激として用いたメンタルローテーションタスクに関する脳内の時系列的な活動を計測した。さらには、こうして得られた結果がメンタルローテーションに共通的なものかどうかを検討した。すなわち、手のメンタルローテーションと同様に内的にモデルを持っている提示刺激の内、身体以外の刺激であるアルファベットを使ったメンタルローテーションタスク遂行時の脳内の時系列的な活動をMEGにより評価した。最後に、メンタルローテーションにおいて被験者が採る戦略の決定というトップダウン的な処理がメンタルローテーションのどういった側面に影響を受けるのかということ調べることを狙いとした。具体的には、3次元物体のメンタルローテーション遂行時の戦略決定に寄与する要因を調べることを狙いとしてfMRI、および、MEGを用いて実験を行った。

なお、本論文の構成は以下の通りである。まず、第2章において本研究の対象とする認知タスクであるメンタルローテーションの心理実験の概要とその結果について述べる。続いて第3章、第4章でメンタルローテーションにおける時系列的な処理についての知見を得るために行った、MEGを用いた手（身体の一部）のメンタルローテーション課題遂行時の脳内処理過程の研究、および、文字（身体以外）のメンタルローテーション課題遂行時の脳内処理過程の研究について示す。第5章では、メンタルローテーションタスクにおいてトップダウン的な処理遂行に寄与する要因についての知見を得るために行ったfMRI、および、MEGを用いた3次元物体のメンタルローテーション課題遂行時の脳内処理についての研究について示す。最後に第6章にて、本研究をまとめる。

2. メンタルローテーションに関する心理学的な知見

メンタルローテーションにて提示される図形には大きく以下の三種類がある。

- ・ 身体の一部以外のもののペア（3次元図形など）を提示図形として利用するもの[1][2]
- ・ 身体の一部以外のもので標準的なイメージがあるもの（文字など）を提示図形として利用するもの[3]
- ・ 身体の一部（手、足など）を提示図形として利用するもの[4][5][6]

被験者はこれらの画像についてペアが同一のものか鏡像のものか、あるいは、標準の図形と提示図形が同一のものか鏡像のものかを判断することを要求される。これらにおいては、ペア間、あるいは、標準のものと提示図形との間の角度差に応じて判断する時間が伸びることが知られている。本章では、こうした心理実験において、もっとも基本的な知見である2つの3次元図形のメンタルローテーションについて説明する。

2.1. メンタルローテーションに関する心理学的な先行研究[1]

Shepard と Metzler は、被験者に遠近法を用いて描画した2つの3次元物体（同一のもの、あるいは、鏡像のもの）のペアが同一か否かを判断させた。この研究により、2つの提示図形間の角度差によって、線形的に反応時間(RT: Response Time)が伸びることを示した。さらに、2つの物体が鏡像か同一かを判断する際に、面上の回転を要するものと面の深さ方向の回転を要するものには差がないことを示した。

2.1.1. 実験方法

提示図形の構成要素は、10個の立方体からなり、かつ、3個の直角の角を持つ5種類の3次元図形である。5種類の3次元図形から鏡像のものとのペアと同一なものとのペアが同数ずつ存在する1600組の提示図形を用意する。なお2つの3次元図形間の角度差は0°、20°、40°、60°、80°、100°、120°、140°、160°、180°とした。

この実験の参加者は8名からなる。被験者には、試行開始を意味する警告音提示後0.5秒後に、提示図形が表示される。これらの提示図形のサイズは4～5cmで被験者から60cm前方の丸い穴の中に提示する（図1参照）。被験者は提示図形が同一であれば右のレバーを、そうでない場合には左のレバーを引くように指示される。なお、この際に、被験者は正確かつ迅速に反応するように指示される。

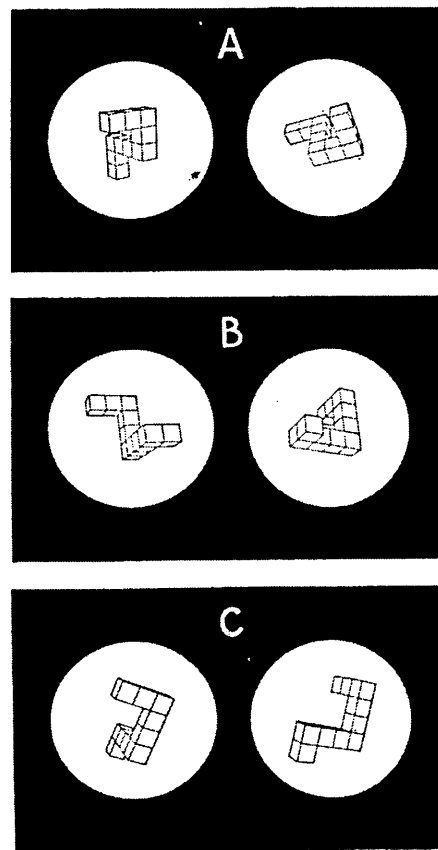


図1 Shepard&Metzlerの実験[1]での刺激画像

2.1.2. 結果と考察

誤差率は個々の被験者で0.6%～5.7%（平均3.2%）であった。RTは0°で約1s、180°で3～6sかかった（図2参照）。図2は上図が提示された平面内での回転を、下図は深さ方向の回転の結果を示したもので、横軸が角度差を縦軸はRTを示している。16例（被験者（8例）×鏡像／同一（2例））でRTと角度差に線形性の関係があることが示唆された。これらの結果から、同一のペアの判断においては60°角度差が

広がると1秒判断時間が長くなることが示された。

これらの結果から提示した画像が同一のもののペアか鏡像のもののペアかという判断においては、単純なパターンマッチングを行っているのではないことが推定される。すなわち、判断時にアナログ的な心的シミュレーションを行う処理機構があると考えられる。

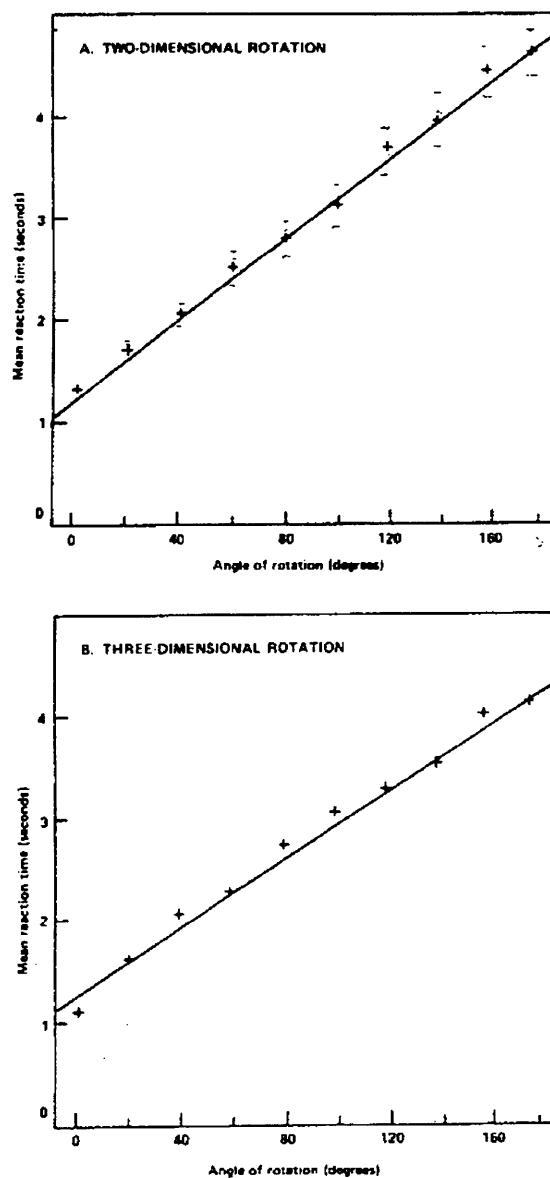


図 2 Shepard&Metzler の実験結果[1]

3. 身体の一部(手)のメンタルローテーション時の脳内処理過程[7][8][9][10]

さまざまな向きの手の画像を提示し被験者にその左右を判断させる手のメンタルローテーションタスクを行うと、RT は刺激の手の向きから標準の位置までの距離に依存する[5][6][51]ことが知られている。さらには、被験者が実際に手を動かす際の制約条件と同等の制約条件があることを示唆する結果も示されている。こうしたことから手のメンタルローテーションにおいては、被験者がタスク遂行中に心的に運動を行っている可能性が示唆されてきた。さらに、近年のいくつかの PET での実験[26][52]により、運動の企画や実行において重要な役割を果たすことが知られている頭頂葉後部と PM を含む多くの領域が、こうした手のメンタルローテーションタスク時に活動していることが示された。これらの結果は、視覚刺激の認識およびその処理において運動系の領野を賦活するという複数のモダリティの活用を示唆するものである。特に運動系の活動においては、刺激に応じて左右手いずれかを動かす際に賦活される領域の活動が見られることから、被験者が提示された手を左右いずれかであるとの仮説をたててから心的シミュレーションを行うというトップダウン的な処理の存在が示唆される。

しかしながら、PET や fMRI は血流に基づく計測手法であることから時間分解能がどんなに優れていても、数 100 ms ~ 1 s のオーダーにとどまってしまう。そのため、こうしたメンタルローテーションの認知プロセスにおける神経活動はいまだよくわかっていなかった。一方で MEG の時間分解能は非常に優れており、数 ms のオーダーである[53]。そこで、本研究では手のメンタルローテーション遂行時の脳内の活動の時空間パターンを調べるために、全頭型 SQUID システムを利用し実験を行った。

3.1. 実験方法

3.1.1. 被験者

被験者は 4 人の右利きの男性の健常者である(S1~S4)。なお、被験者に対しては実験前に実験内容・目的などの説明を行い、同意を得た。被験者の年齢は 22 ~ 23 歳(平均 22.5 歳)である。

3.1.2. 視覚刺激

10種類の右手および左手の組の画像(右手と左手はそれぞれ鏡像となっている)を視覚刺激として利用した。これらの10組のペアは、先行研究[5][6]の72組のペア(形×傾き=6(図3参照)×12(0°、30°、60°、90°、120°、150°、180°、210°、240°、270°、300°、330°))の中から、左右の判断に要する時間が同一であると想定される画像を選択した。実験に参加した被験者に対して、実験前に10種類の右手画像の判断に要するRTを計測し、RTに有意差がある画像0~2種類($p < 0.05$; one-way ANOVA)を除いた8~10種類の右手画像とそれに対応する左手画像をMEG計測にてデータを蓄積する視覚刺激として選択した(表1参照)。すなわち、MEG計測実験においては、10組の手の画像を表示し、データ計測には上記で選択した8~10種類の刺激画像に対する反応の計測データのみを利用した。

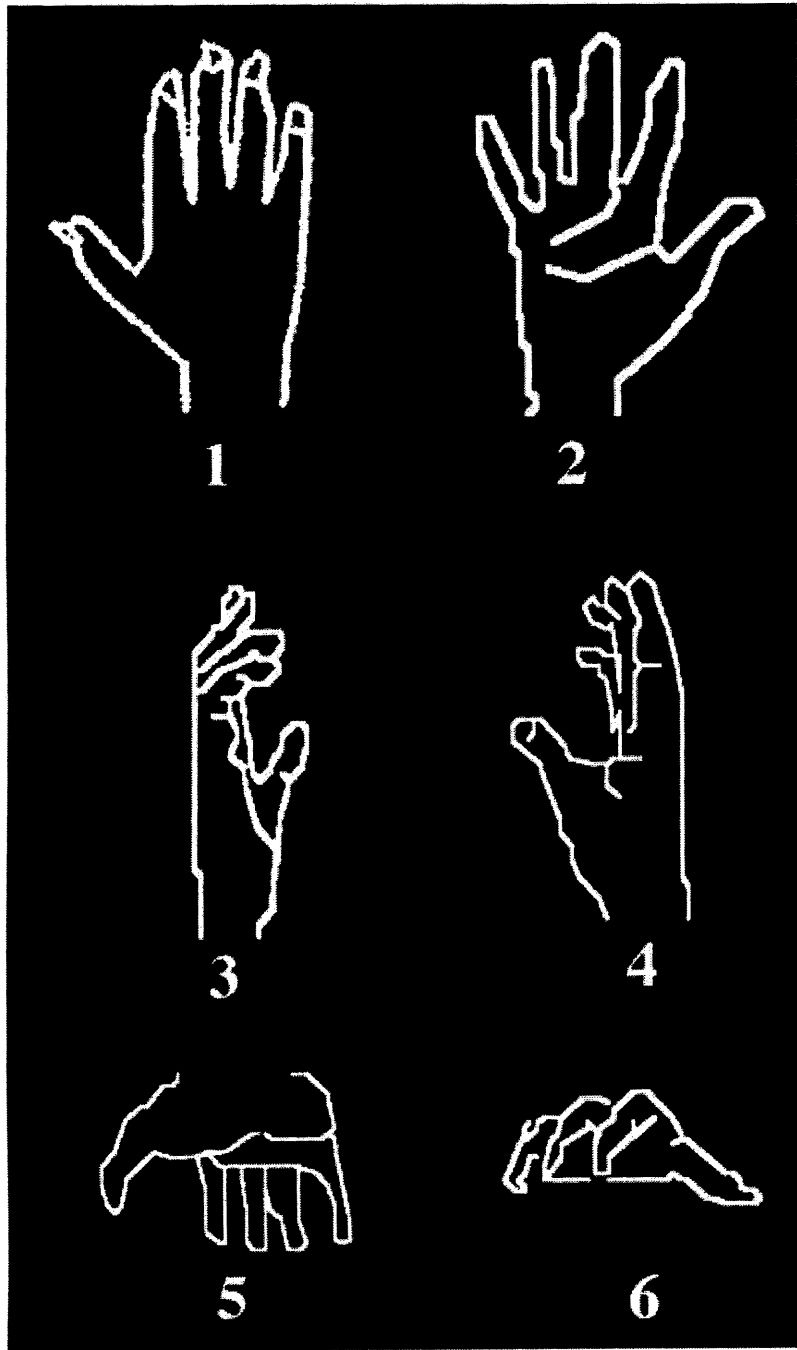


図 3 視覚刺激として利用した手の線画

表 1 MEG 計測実験にてデータ計測を行う視覚刺激として採用した画像の傾き

	1	2	3	4	5	6
S1	150	0 180	90 150	0 150	90 270	0
S2	150	0 180	90 150	0 150	90 270	0
S3	150	0 180	90	0 150	270	0
S4	150	0 180	90 150	0	90	0

3.1.3. MEG 計測実験

本実験のタスクは、先行研究[26]と同様なものとした。具体的には、左視野に視覚刺激が提示されるタスク(LVF: left visual field)と右視野に視覚刺激が提示されるタスク(RVF: right visual field)の2種類を実施し、その際の脳活動をMEGにより計測した。LVFタスクでは刺激の80%が右手で20%が左手となる。一方でRVFタスクでは80%が左手で20%が右手となる。視覚刺激は150msの間表示され、そのサイズは固視点から1.1°~6.1°の間におさまるサイズである。視覚刺激表示終了時刻から次の視覚刺激表示の開始時刻(刺激間隔)までは平均3.5sである。刺激間隔は被験者が刺激提示タイミングを予期できないようにランダム化した。

なお、MEG計測実験において、被験者は提示された視覚刺激が右手か左手かという判断をし、体動(ボタン押しも含む)をせずに判断結果を思い浮かべることが求められる。さらには、被験者は視覚刺激が提示されている際もスクリーンの中心にある十字を固視することが求められる。

図4に本実験のシステム構成を示す。本実験においては、視覚刺激を磁気遮蔽室の外側に設置した液晶プロジェクタ(シャープ社製、XV-E400)から磁気遮蔽室内のスクリーンに投影する。なお、これらの視覚刺激はPCによって生成されたものである。実験では、64チャンネル全頭型SQUIDシステム(カナダCTF社製)を用いた。実験時における被験者の頭部のMEGセンサからの相対位置は3つのランドマーク(鼻の付け根1箇所、耳の前2箇所)に貼付したコイルによって決定した。実験中、MEGは1.6ms毎に12bit値にデジタル化した上で、刺激提示前200msから2000ms間計測した。

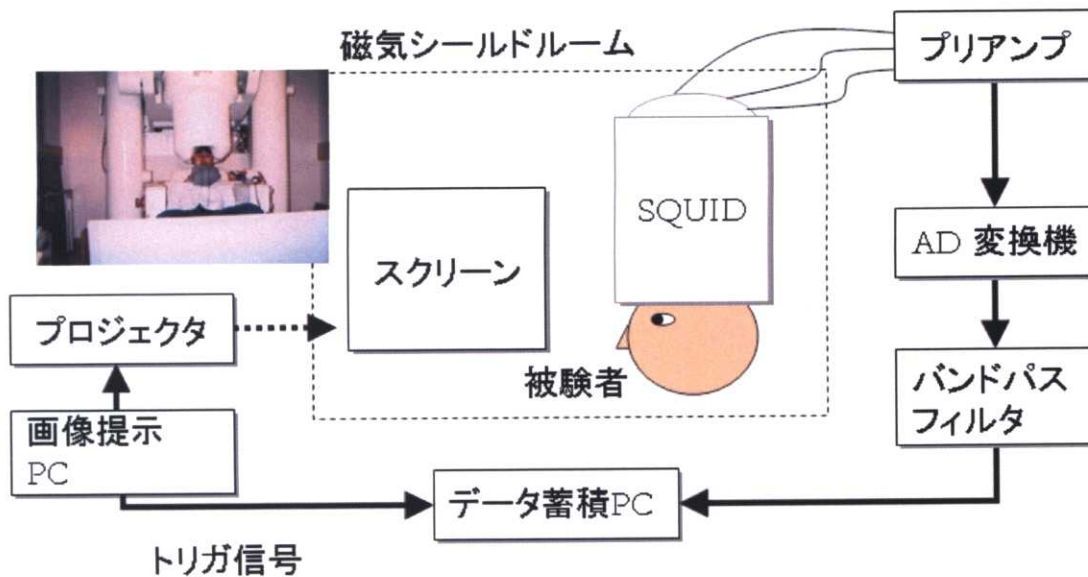


図 4 実験システム構成

3.1.4. MEG データ解析方法

解析においては、まず、計測されたデータから、眼球運動や瞬きなどによるアーチファクトの混入しているデータを取り除き、36 試行以上の左手 (RVF の場合)、あるいは、右手 (LVF の場合) に対する波形の加算平均を取った。その後、空間的なノイズをキャンセルするソフトウェア的な 3 次微分処理を行い、0.5 Hz、40 Hz のバンドパスフィルタをかけた。さらに、脳磁界の零点を、刺激に対する背景脳磁界と考えられる -200 ms ~ 0 ms (時刻の基点は全て刺激提示時とする) としてオフセット処理を行った。

こうして得られた波形に対し、以下の Grynszpan-Geseleowitz のモデル[32]に基づく誤差 e を最小化する、脳を近似球とみなしたマルチダイポール信号源推定を行った。

$$e = \frac{\sum_{n=1}^{64} (X_n - Y_n)^2}{\sum_{n=1}^{64} X_n^2}$$

なお、ここで、 X_n は n 番目のセンサの計測された信号強度を示し、 Y_n は n 番目のセンサの、推定した信号源からの計算された信号強度を示す。近似球は、日立製作所製 MRH-500 (0.5 テスラ) により事前に撮影した MRI (Magnetic Resonance Imaging) の T1 強調画像に基づいて、その形状(サイズ・位置)を決定した。なお、近似球の形状の決定

は、被験者毎に行った。マルチダイポール信号源推定によって得られたダイポールは、MRIの3断面（矢状断面、冠状断面、横断面）にプロットすることで、当該ダイポールの脳内での位置を判定した。

信号源推定は64チャンネルから得た信号に基づき、80～500msの間のSN比がよいと思われる時間帯において10ms間隔で行った。信号源推定における、初期値(ダイポール数、位置)はERF(Event Related Field)の陽性および陰性のピークのペアの分布から判断した。こうして推定した信号源に関して、以下の信号源推定のエラー率と推定されたダイポールの位置に関する条件をクリアした中で最もダイポールの数が少ないものを信頼性の高い信号源と判断した。

信号源推定のエラー率

- ・ 1ダイポール：20%
- ・ 2ダイポール：15%
- ・ 3、4ダイポール：10%

ダイポールの位置

- ・ 10msの間に1cm以上ダイポールの位置がずれないこと
- ・ 脳表面から遠い場所にあると考えられる近似球の中心付近に推定されていないこと。

3.2. 結果

LVFタスク（表2表3表4表5左）では、視覚刺激が提示された視野と対側の右半球のVC（120～180ms）、および、IPL（200～300ms）にそれぞれ100%、75%（S1、S2、S4）の被験者で活動が見られた（図5左参照）。なお、300ms以降のIPLでは75%（S1、S2、S3）の被験者で右半球に活動が見られた。

表2 手のメンタルローテーションタスク遂行時に推定された信号源(被験者S1)

LVF		RVF	
右半球		右半球	
領域	場所	領域	場所
	time(ms)		time(ms)

	中側頭回	120-130		楔前部 / 上頭頂小葉	130-140
VC	後頭葉	120-150		楔部	200-210
VC	後頭葉	160-180		帯状回	200-210
IPL	下頭頂小葉 / 上側頭回	230-270		島 / 上側頭回	250-270
IPL	下頭頂小葉	280-400	IPL	下頭頂小葉	320-340
			IPL	島 / 下頭頂小葉	350-370
			IPL	下頭頂小葉	390-400
			PM	運動前野	410-420
				上頭頂小葉	420-430
左半球			左半球		
領域	場所	time(ms)	領域	場所	time(ms)
	下側頭回 / 紡錘状回	120-150	VC	後頭葉	120-150
	後頭葉	210-250	VC	後頭葉	180-190
	上側頭回	210-220	VC	後頭葉	200-220
	後頭葉	290-320		下側頭回	230-240
	後頭葉 / 下側頭回	330-360		後頭葉	270-290
PM	運動前野	380-390	IPL	上側頭回 / 下頭頂小葉	280-290
				中側頭回	340-350
				後頭葉	350-370
			PM	運動前野	390-400
				後頭葉	390-410
			IPL	下頭頂小葉	420-430

表 3 手のメンタルローテーションタスク遂行時に推定された信号源(被験者 S2)

LVF			RVF		
右半球			右半球		
領域	場所	time(ms)	領域	場所	time(ms)

VC	後頭葉	130-140		中心傍小葉 / 中心後回	200-210
VC	後頭葉	160-180	IPL	下頭頂小葉	200-210
IPL	下頭頂小葉	220-230		楔前部 / 楔部	230-260
	楔前部	290-300		上頭頂小葉	270-280
IPL	下頭頂小葉	310-330		中心傍小葉	300-350
				中心後回/ 中心前回/ 頭頂 弁蓋	320-350
			IPL	下頭頂小葉	370-390
左半球			左半球		
領域	場所	time(ms)	領域	場所	time(ms)
	帯状回	160-170		楔部 / 楔前部	110-130
	楔前部	290-300	VC	後頭葉	150-180
	中心傍小葉	310-330	IPL	下頭頂小葉	200-210
				中心傍小葉	300-310
			IPL	頭頂弁蓋 / 中心後回 / 下 頭頂小葉	320-360
			IPL	下頭頂小葉	370-390

表 4 手のメンタルローテーションタスク遂行時に推定された信号源(被験者 S3)

LVF			RVF		
右半球			右半球		
領域	場所	time(ms)	領域	場所	time(ms)
VC	後頭葉 / 楔部	160-170		舌状回	220-230
	舌状回 / 紡錘状回	220-230		後頭葉	330-340
	中側頭回 / 上側頭回	280-290		中心溝 / 中心前回	350-370
	紡錘状回	330-340		海馬傍回	390-400
	舌状回	370-380			

左半球			左半球		
領域	場所	time(ms)	領域	場所	time(ms)
	頭頂後頭溝 / 楔部	160-170		紡錘状回	110-120
PM	運動前野	270-290		楔部	130-140
			VC	後頭葉 / 楔部	150-180
			IPL	下頭頂小葉	240-250
				後頭葉	280-290
				中側頭回	280-290
			PM	運動前野	330-340
				後頭葉 / 下側頭回	340-350
				楔部	380-400

表 5 手のメンタルローテーションタスク遂行時に推定された信号源(被験者 S4)

LVF			RVF		
右半球			右半球		
領域	場所	time(ms)	領域	場所	time(ms)
VC	後頭葉	120-160		下頭頂小葉	120-130
	紡錘状回	180-190	VC	後頭葉	140-160
IPL	後頭葉 / 下頭頂小葉	200-210		中心後回 / 中心前回	180-190
	楔部 / 後頭葉	270-290		後頭葉 / 下頭頂小葉	180-200
	紡錘状回 / 海馬傍回 / 中側頭回 / 上側頭回	300-350		海馬傍回	240-250
	後頭葉	380-400		帯状溝辺縁枝	260-270
IPL	中心後回 / 下頭頂小葉	380-400		上頭頂小葉	320-340
左半球			左半球		
領域	場所	time(ms)	領域	場所	time(ms)
	中心溝 / 下頭頂小葉	120-130	VC	後頭葉 / 楔部	110-130

	中側頭回 / 後頭葉 / 紡錘状回	190-230		中心後回 / 中心溝	210-220
	中心前回 / 中心溝	260-270	PM	中心前回 / 運動前野	230-260
PM	運動前野	280-290		上頭頂小葉	320-340
	後頭葉 / 下側頭回 / 紡錘状回	320-330		中心後回 / 中心後溝	360-380
	舌状回	340-350		舌状回	420-440
IPL	下頭頂小葉	360-370			
IPL	下頭頂小葉	380-400			

左 PM では 75% の被験者 (S1(腹側)、S3(背側)、S4(背側)) で活動が見られた (表 2 表 3 表 4 表 5 図 6 左側参照)。一方で右の PM では活動が見られなかった。右 IPL と左 PM にダイポールが推定される時間帯はそれぞれ 200~400 ms、270~390 ms であった。

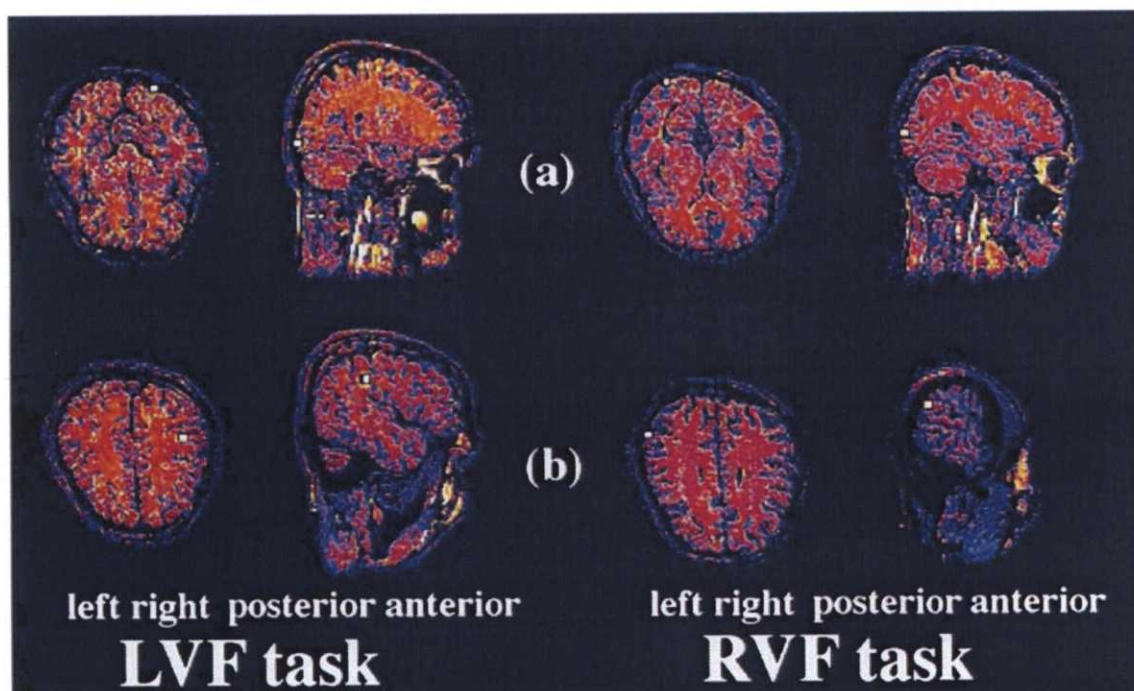


図 5 両タスクにおける VC(a)および IPL(b)に推定された信号源(被験者 S1)

一方で、RVF タスク(表 2 表 3 表 4 表 5 図 5 右参照)では、刺激提示視野と対側の左の VC(110~220ms)に全ての被験者で活動が見られる。また左の IPL (200~430ms) では75%の被験者 (S1、S2、S3) で活動が見られた。一方で右の IPL (200~400ms) では50% (S1、S2) で活動が見られた。さらに、ダイポールは左の背側 PM(S3、S4)と両側の腹側 PM(S1)で230~400ms の間に活動が見られた(表 2 表 3 表 4 表 5 図 6 右参照)。ここで、S1 では右の PM の活動は左のそれよりも20ms 遅く見られた。

さらに、両条件において、IPL および PM に活動が見られた全てのケースで、IPL の活動が PM の活動よりも早く見られた。また、両条件の IPL の活動は早い成分(200~300ms)と遅い成分(300ms 以降)に分けることができる。早い成分に関しては、視覚刺激の提示視野と同側の活動は見られないか、対側の活動が早く見られるものが8ケース(タスク×被験者=2×4)中7ケースであった。

加えて、上頭頂小葉(SPL: Superior Parietal Lobule)に活動が見られた例は16ケース(タスク×被験者×半球=2×4×2)中3ケースであり、1次運動野に活動が見られたケース(260~380ms)は16ケース中6ケースであった。

3.3. 考察

全ての被験者において、提示刺激と対側の後頭葉の活動が同側の後頭葉の活動より早い、あるいは、同側の後頭葉の活動が見られなかった。この結果は視覚処理を行う後頭葉領域における視野対側優位性と一致するものである。さらに後頭葉の活動が見られた後に側頭葉の活動が見られた被験者もいた。こうした結果は、形状認識を行う際に活動する視覚腹側経路[33][34]上の処理と関連があると考えられる。

本実験においては、被験者は提示された視覚刺激との比較ができるように想像の中で手を暗示的に動かすことを求められると考えられる。こうしたプロセスは視覚情報に基づくリーチングタスクや把持行動に似ている。把持行動においては、把持対象物の特質(サイズ、形など)を所望の手や腕の形状に変換することが必要となる。頭頂葉後部の障害はリーチング中の手の動きや把持行動中の指の動きの障害となる[54][55][56]。これらの場所はサルに

において網膜上に投影された情報を身体中心の座標に変換する際に賦活されるニューロンの場所[43][44][45]と一致する。さらに、腹側 PM(F5)と IPL 周辺のニューロンの活動パターンと物体の把持をするときに必要な情報である握り方、物体の向き、形、大きさといった属性情報の内容に関係があることが示されている[47][48]。本実験において見られた PM と IPL の活動は、これらの知見と合致するものであり、メンタルローテーションにおける心的シミュレーションと関係すると考えられる。さらに IPL の活動が早く見られることから、IPL で身体図式の認識を行った上で、これらの心的シミュレーションを行っていること示唆される。

今回の実験において PM に推定されたダイポールは、PM で活動が見られなかった S2 以外の被験者において左半球優位性を示した。すなわち右の PM の活動が、左の PM の活動と比較すると遅れる (S1 の RVF タスク)、あるいは、左の PM の活動のみ見られる(他の 5 ケース)といった結果である。さらに、4 ケース (S3、S4 の両タスク)において左背側 PM に活動が推定された。この結果は PET による先行研究[26]において、視野、あるいは、手の左右によらず、背側 PM にて左半球優位性が見られた結果に一致する。さらに、運動の想起を右利きの被験者に対して行わせるタスクにおいて左の PM が優位であることを示した fMRI の研究結果がある[57]。こうした結果から運動系の領野の活動において、右利きの被験者においては左優位性があることを示していると考えられる。

一方で、運動の想起に関する研究では、1 次運動野が活動するかどうかということに関し、矛盾する結果が示されている。PET を利用した研究[26][58][59]では、運動の想起は運動の実行に必要なさまざまな領野を賦活するが 1 次運動野は賦活されないとの結果を示している。対照的に、fMRI を用いた研究[57][60][61]では 1 次運動野近傍や体性感覚野に弱い活動を見出している。本実験においては、1 次運動野近傍や体性感覚野にいくつかのケースでダイポールが推定されている。加えて、電気生理的な研究[62]では、遅延がある運動タスクで遅延期間中に 1 次運動野のニューロンの活動が見られている。こうしたことから、多くはない被験者において 1 次運動野あるいは体性感覚野に活動が見られることはリーズナブルであると考えられる。

本実験にてダイポールが推定された領域は、1 次運動野、体性感覚野を除いて、手のメンタルローテーションに関する PET での実験結果[26][52]とよく一致した。これらの先行

研究の結果に加えて、本実験はこれらの活動が見られた領域の活動時間に関する情報を明らかにした。すなわち、視野と対側の VC および IPL の早い成分が 100～200 ms、200～300 ms に見られた。その後、IPL の遅い成分と左 PM の活動が続いた。こうした結果からメンタルローテーションにおける神経活動のプロセスは VC→IPL←→左 PM となっていることが推定された。

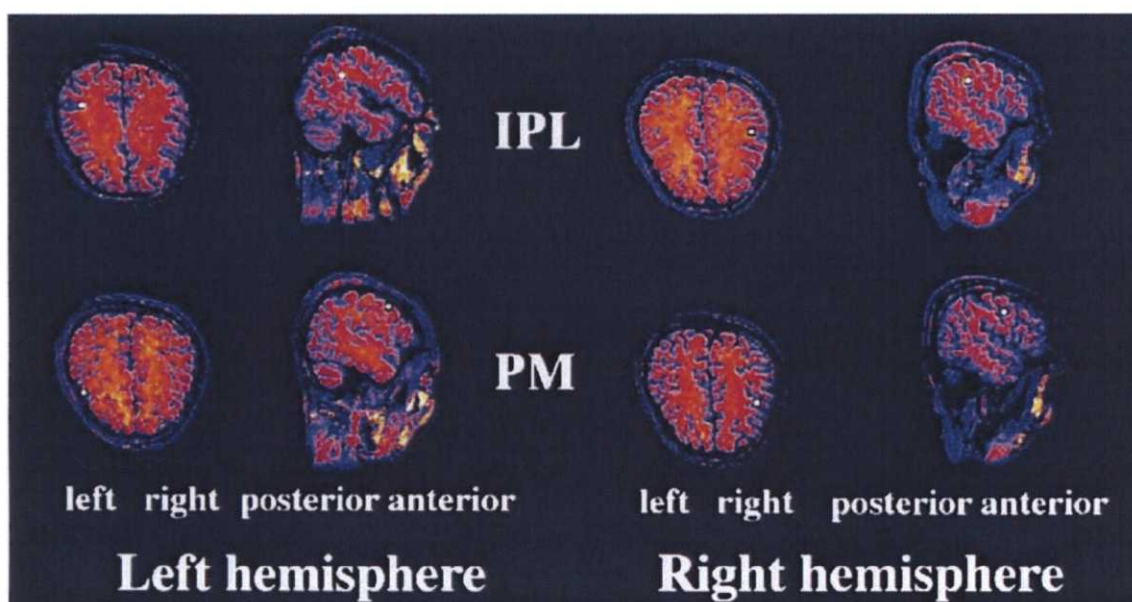


図 6 S1 (RVF タスク)における IPL と PM に推定されたダイポール(左 IPL: 420 ms ; 左 PM: 400 ms ; 右 IPL: 400 ms ; 右 PM: 410 ms)

3.4. 結論

我々は、本研究において全頭型 SQUID システムにより、手の左右の判別をすることが必要なメンタルローテーションタスクに関係する脳内の時空間的な活動を数 ms のオーダーで調べた。本実験においては、視野と対側の VC (100～200 ms) と IPL の早い成分の活動(200～300 ms)が見られた。その後、左 PM と IPL の遅い成分の活動が見られた。すなわち、手のメンタルローテーションにおいては、VC と IPL により身体図式を認識した後に、左 PM と IPL により心的に運動を構成し手の操作を行っている事が示唆される。本研究により、手のメンタルローテーションにおける、提示刺激に基づき左右いづれかとの仮説を立て心的シミュレーションを行うという、トップダウン的な処理の時間

情報が明らかとなった。

4. 文字のメンタルローテーション時の脳内処理過程[12][13][14][15][17][18]

前章にて手のメンタルローテーション時の脳内情報処理過程が明らかとなった。しかし、こうして得られた脳内情報処理過程がメンタルローテーションに共通のものかどうかは分かっていない。こうした処理過程がメンタルローテーションに共通か否かを検討するために、身体の一部以外の刺激を提示刺激とした際のメンタルローテーションに関して、実験を行った。

そこで、本研究では前章と同様に、被験者が、一つの刺激が与えられた場合に内的に持っているモデルと比較することで判断可能な刺激の内、身体の一部でない視覚刺激として、アルファベットを利用した。実験中は、被験者にアルファベットが通常の文字か鏡像の文字かを判断することを課した。我々は、この文字のメンタルローテーションタスク遂行中の時空間的な脳内の活動を、全頭型の SQUID システムにより計測した。

4.1. 実験方法

4.1.1. 被験者

本実験には、6人の右利きの健常者が参加した。なお、被験者に対しては実験前に実験内容・目的などの説明を行い、同意を得た。被験者には5名の男性と1名の女性があり、年齢は22～35歳（平均25.2歳）である。このうちの1名の男性は、二度実験に参加した。

4.1.2. 視覚刺激

視覚刺激には、5種類の大文字のアルファベット（R、P、F、L、J）を利用した。実験中に提示する画像はこれらの5種類のアルファベットから4種類以上とした。これらの画像を6種類の角度（0°、60°、120°、180°、240°、300°）で提示した。すなわち、刺激画像は通常の文字およびその鏡像の30組（24組）である（文字の種類×角度=5(4)×6）（図7参照）。

これらの刺激画像は150ms間、スクリーンに提示される。提示位置は、スクリーンの中心にある固視点から1.8°の位置である。なお、提示刺激の大きさは1.8°×1.

8° である。

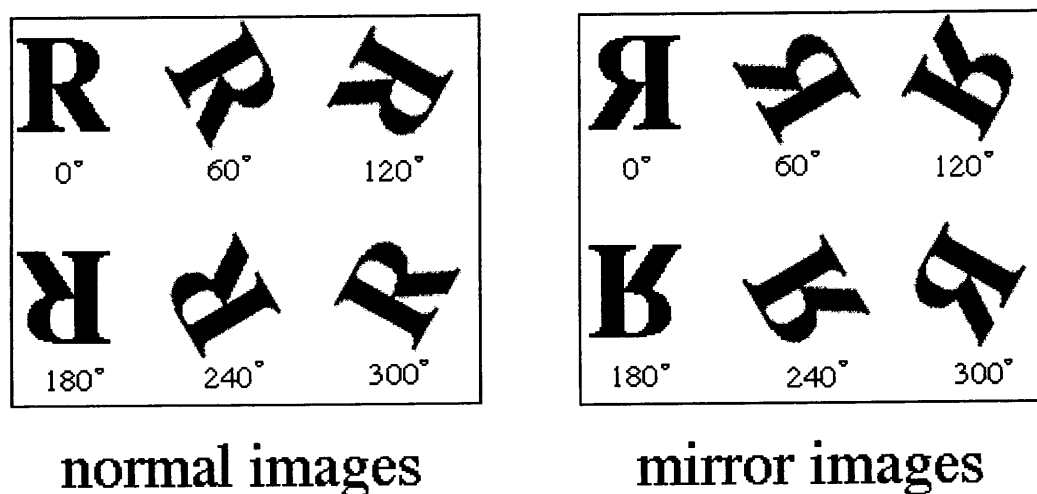


図 7 提示画像例

4.1.3. 解析を行う視覚刺激の選定

ERF の解析を行う刺激を選定するために、われわれは事前に反応時間を計測する実験を行った。反応時間計測実験には 3 人の被験者が参加した。この実験において、被験者には PC のモニタの中央に表示される固視点を注視し、判断内容に応じてキーボードのボタンを押すことを求めた。すなわち、被験者は提示刺激が通常の文字だと判断した場合には”P”ボタンを右の人差し指で押し、鏡像文字だと判断した場合には”Q”ボタンを左の人差し指で押すこととなる。

刺激提示のタイミングは、被験者が次の提示刺激に対して混乱しないようにボタン押しをしてから 500ms 経過した時とした。また、総刺激提示回数は 480 回で各提示刺激の提示確率は同一とした。われわれは被験者毎に、12 種類（角度×通常文字／鏡像文字 = 6 × 2）の刺激に対する反応時間を計測した（図 8 参照）。こうして得られた結果の内、0° の通常の文字(正立文字)に対する反応時間と 180° の通常の文字(倒立文字)に対する反応時間について paired t 検定を実施したところ有意差 ($p < 0.05$) がみられた。この結果に基づき、MEG を計測する際には、30 (24) ペアの刺激を提示し、それぞれの被験者において通常の文字の場合の、正立文字と倒立文字に対する ERF のみ（両者とも 5

(4) 種類の刺激に対応)を解析した。

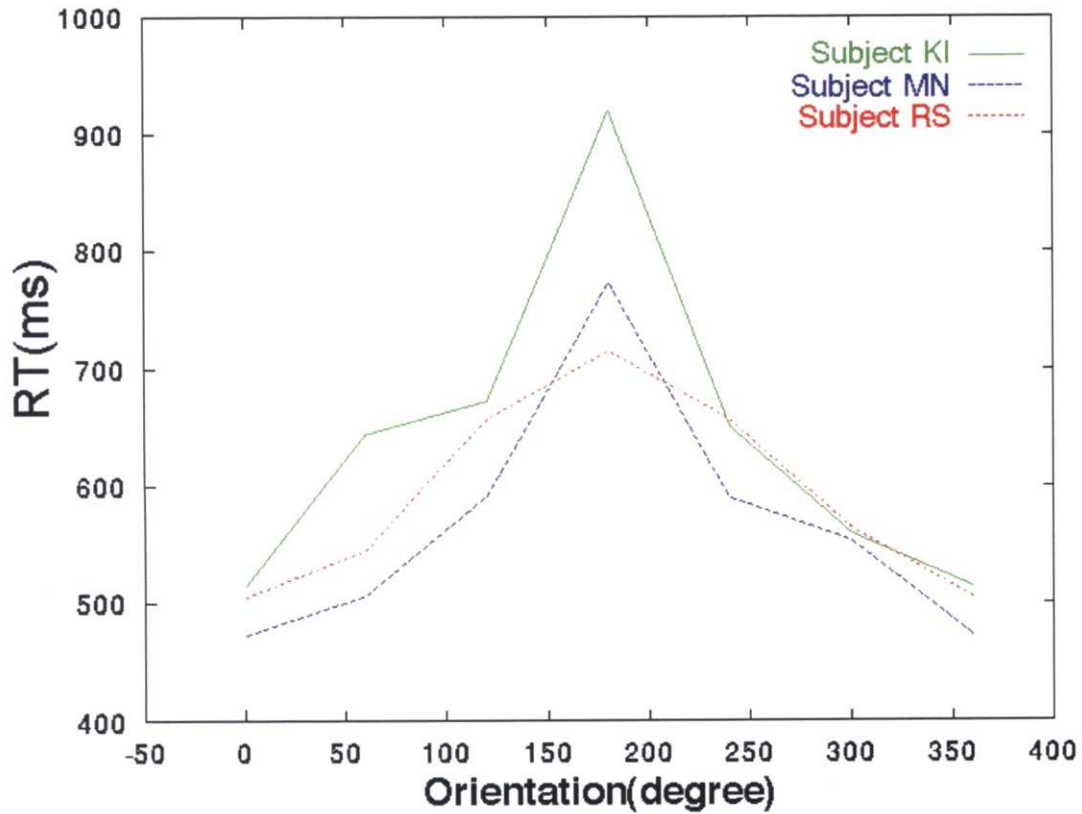


図 8 予備実験における反応時間

4.1.4. MEG 計測実験

実験では、被験者が刺激提示タイミングを予期することを避けるために、刺激間隔は 2.5～3.5 s の間でランダムな値を取るようにした。この刺激間隔は、事前に行った反応時間計測実験結果から十分長い時間とした(図 8 参照)。また、この実験において、提示する画像は予備実験と同一とした。

MEG 計測実験には 6 人の被験者全てが参加した。なお、被験者には、実験中スクリーンの真ん中の十字の固視点を注視することと、瞬き・体動(ボタン押しを含む)を行わないことを要求した。さらに、判断結果(提示刺激が通常の文字か、鏡像文字か)を頭の中で思い浮かべることが求めた。反応時間計測実験に参加しなかった被験者に対しては、パラダイムをよく理解するまで、練習するセッションを設けた。なお、実験後、全ての被験者は

実験において、頭の中で判断結果を思い浮かべる際に文字を心的に回転させたと報告した。

実験においては、磁気遮蔽室に設置された64チャンネルの全頭型 SQUID システム(カナダ CTF 社製) を利用した。実験時における被験者の頭部の MEG センサからの相対位置は3つのランドマーク(鼻の付け根1箇所、耳の前2箇所)に貼付したコイルによって決定した。提示刺激は磁気遮蔽室の外に設置した液晶プロジェクタ(シャープ社製 XV-E400)から磁気遮蔽室内のスクリーンに投影した(図4参照)。なお、提示刺激である通常文字および鏡像文字のパターンはPCによって生成した。MEGは1.6ms毎に12bit値にデジタル化し、刺激提示前200msから1500ms間計測した。

4.1.5. MEG データ解析方法

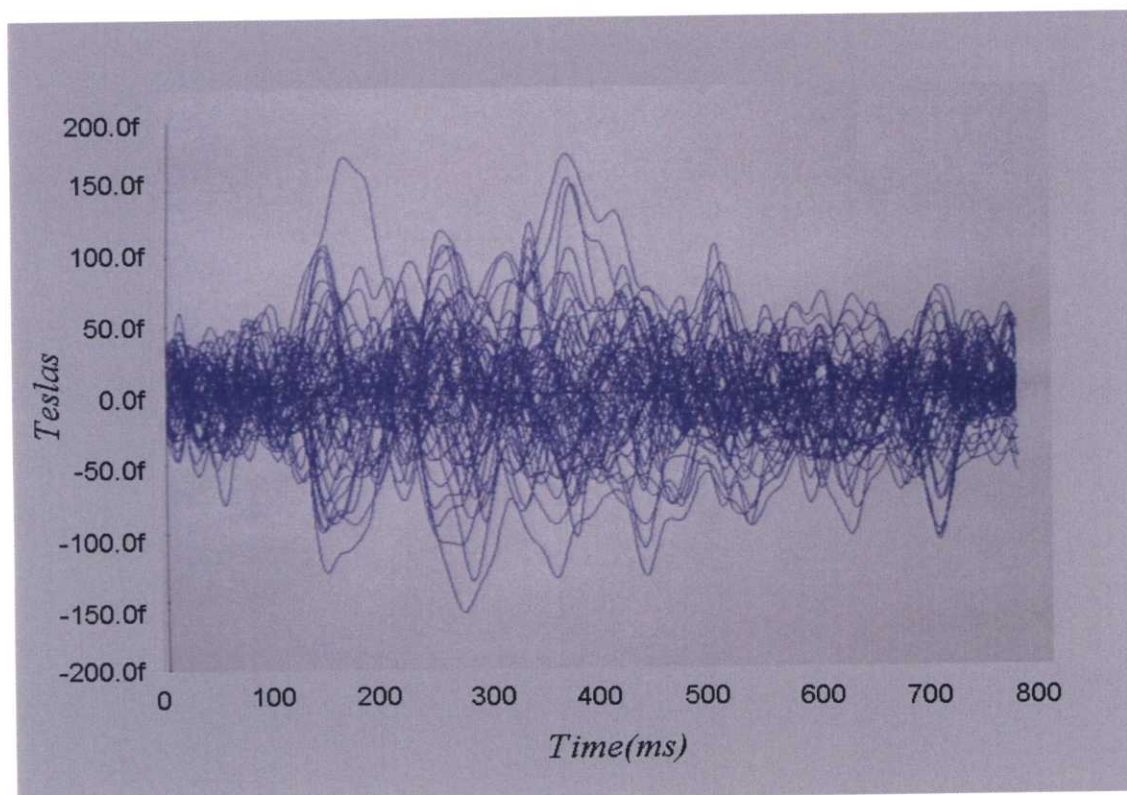


図9 文字のメンタルローテーション課題遂行時の波形例

解析においては、まず、計測されたデータから眼球運動や瞬きなどによるアーチファクトの混入しているデータを取り除き、48試行以上の加算平均を取った。その後、ソフト

ウェア的な3次微分処理を行い、0.5 Hz、40 Hzのバンドパスフィルタをかけた。さらに、脳磁界の零点を、刺激に対する背景脳磁界と考えられる-200ms~0ms(時刻の基点は全て刺激提示時とする)としてオフセット処理を行った。図9に得られた波形の例を示す。

こうして得られた波形に対し、以下の Grynszpan-Geseleowitz のモデル[32]に基づく誤差 e を最小化する、脳を近似球とみなしたマルチダイポール信号源推定を行った。

$$e = \frac{\sum_{n=1}^{64} (X_n - Y_n)^2}{\sum_{n=1}^{64} X_n^2}$$

なお、ここで、 X_n は n 番目のセンサの計測された信号強度を示し、 Y_n は n 番目のセンサの、推定した信号源からの計算された信号強度を示す。近似球は、日立製作所製 MRH-500(0.5テスラ)により事前に撮影した各被験者のMRIのT1強調画像に基づいて、その形状(サイズ・位置)を決定した。マルチダイポール信号源推定によって得られたダイポールは、MRIの3断面(矢状断面、冠状断面、横断面)にプロットすることで、当該ダイポールの脳内での位置を判定した。

信号源推定は64チャンネルから得た信号に基づき、100~600msの間の中でSN比がよいと思われる時間帯において8ms間隔で行った。信号源推定における、初期値(ダイポール数、位置)はERFの陽性および陰性のピークのペアの分布から判断した。こうして推定した信号源に関して、以下の信号源推定のエラー率と推定されたダイポールの位置に関する条件をクリアした中で最もダイポールの数が少ないものを信頼性の高い信号源と判断した。

信号源推定のエラー率

- ・ 1ダイポール：20%
- ・ 2ダイポール：15%
- ・ 3、4ダイポール：10%

ダイポールの位置

- ・ 8msの間に1cm以上ダイポールの位置がずれないこと
- ・ 脳表面から遠い場所にあると考えられる近似球の中心付近に推定されないこと。

4.2. 結果

本実験に参加した被験者にて計測された信号源を以下の表 6、表 7、表 8、表 9、表 10 表 11、表 12 に示す。

表 6 文字のメンタルローテーションタスク遂行時に推定された信号源(被験者HE・予備実験参加せず)

0°			180°		
右半球			右半球		
領域	場所	time(ms)	領域	場所	time(ms)
VC	後頭葉	160-176	VC	後頭葉	120-136
VC	舌状回 / 鳥距溝	184-192	VC	後頭葉 / 楔部 / 鳥距溝	160-184
	下側頭回 / 後頭葉	248-256	VC	後頭葉	192-200
	帯状回 / 帯状溝	376-424		小脳	216-224
	紡錘状回	392-400		鳥距溝	240-248
	側副溝	408-416		中心溝	240-248
	紡錘状回	424-432		小脳	344-352
				側副溝 / 紡錘状回	360-384
				後頭葉	400-408
			PM	中心前回 / 中心溝	432-440
左半球			左半球		
領域	場所	time(ms)	領域	場所	time(ms)
VC	後頭葉	152-168		上側頭回	160-168
	中心溝	224-232		中心前回	216-224
PM	中心溝 / 中心後回	288-296		上頭頂小葉	240-248
STR	中側頭回 / 紡錘状回	368-392	PM	中心溝 / 中心前溝 / 中心後溝	312-320
	海馬傍回	400-416	STR/	上側頭回 / 下頭頂小葉	344-352

IPL		
STR/	上側頭溝 / 下頭頂小葉	360-368
IPL		
SPR	頭頂後頭溝	376-384

表 7 文字のメンタルローテーションタスク遂行時に推定された信号源(被験者AK・予備実験参加せず)

0°			180°		
右半球			右半球		
領域	場所	time(ms)	領域	場所	time(ms)
VC	後頭葉	120-144	VC	後頭葉 / 横後頭溝	136-144
VC	後頭葉	152-168	VC	後頭葉	152-160
	楔前部 / 頭頂下溝 / 带状溝 / 中心傍小葉	152-168		頭頂下溝 / 带状溝	152-176
	紡錘状回 / 側副溝 / 舌状回	280-296		頭頂後頭溝	184-200
	眼窩回	288-296		島	184-200
	後頭葉	352-360		中心後回	240-248
	紡錘状回 / 頭頂後頭溝 / 後頭葉 / 舌状回	368-456		紡錘状回 / 後頭葉	272-280
			STR	中側頭回 / 後頭葉	288-304
				前後頭溝 / 後頭葉	352-392
				舌状回 / 頭頂後頭溝	400-440
			PM	中心溝 / 中心前溝	424-440
				紡錘状回 / 海馬傍回	448-456
			IPL	前後頭溝 / 下頭頂小葉	544-560
左半球			左半球		

領域	場所	time(ms)	領域	場所	time(ms)
	中心後溝 / 帯状溝	120-144		帯状溝	240-248
	紡錘状回	280-296		舌状回 / 紡錘状回	288-304
PM	中心前溝	344-360	STR	上側頭溝	328-336
PM	中心溝	368-376		中心後回 / 中心後溝	368-376
PM	中心溝	384-392		中心後溝 / 下頭頂小葉	384-392
	島 / 上側頭回 / 外側溝	400-456		上側頭回	400-408
	/ 上側頭溝				
			STR	中側頭回	416-440
			STR	中側頭回	456-464
				帯状溝 / 中心前溝	552-560
				舌状回	568-576
				帯状溝	568-584
				紡錘状回	592-600
			SPR	楔前部	600-608

表 8 文字のメンタルローテーションタスク遂行時に推定された信号源(被験者YY・予備実験参加せず)

0°			180°		
右半球			右半球		
領域	場所	time(ms)	領域	場所	time(ms)
	小脳	152-160		小脳	152-160
VC	小脳 / 後頭葉	184-192		上側頭回 / 島	176-184
	下側頭回	200-224		下頭頂小葉	240-248
	帯状溝辺縁枝 / 中心傍小葉	216-224	IPL	下頭頂小葉	280-288
STR	下頭頂小葉 / 外側溝	232-240	PM	中心溝 / 中心後回	360-368

PM	中心溝	328-360	SPR	上頭頂小葉	360-368
	中心傍小葉	392-400	PM	中心前溝	392-400
	楔部	408-440			
左半球			左半球		
領域	場所	time(ms)	領域	場所	time(ms)
	後頭葉	232-240		後頭葉	232-240
STR	上側頭回	232-240		後頭葉	344-352
	舌状回 / 後頭葉	328-360	SPR	後頭葉 / 上頭頂小葉 /	360-368
				頭頂後頭溝	
STR	上側頭回 / 外側溝	344-360		後頭葉 / 楔部	392-424
	中心傍小葉	352-360		帯状回	408-416
SPR	楔前部 / 楔前溝	368-376			
	頭頂弁蓋	368-376			
	側副溝	368-376			
	後頭葉	392-400			
	中心傍小葉 / 帯状溝	408-440			

表 9 文字のメンタルローテーションタスク遂行時に推定された信号源(被験者K I・予備実験参加済み)

0°			180°		
右半球			右半球		
領域	場所	time(ms)	領域	場所	time(ms)
	中心前溝 / 中心溝	120-144	VC	楔部 / 舌状回	112-136
VC	後頭葉	160-168	STR	上側頭溝	200-208
VC	後頭葉	168-184	STR	上側頭溝	224-240
VC	後頭葉	208-216		頭頂下溝	304-312
	頭頂後頭溝	224-232	SPR	楔前部	304-312

STR	上側頭回	264-272	SPR	頭頂後頭溝	320-328
			SPR	頭頂後頭溝	344-352
				前頭頭頂弁蓋 / 外側溝	384-400
左半球			左半球		
領域	場所	time(ms)	領域	場所	time(ms)
	島	160-168		外側溝 / 下頭頂小葉	200-208
	島	176-184		島	216-224
STR	上側頭回 / 外側溝 / 下頭頂小葉 / 中心後溝	256-288	STR	下頭頂小葉 / 上側頭回	232-240
SPR	上頭頂小葉 / 頭頂間溝	296-304	STR	上側頭回	248-256
PM	中心溝	296-304	PM	中心溝 / 中心前溝	320-336
IPL	下頭頂小葉	312-328	PM	中心前溝	360-368
SPR	頭頂後頭溝	312-320	IPL	中心後溝 / 下頭頂小葉	376-400
PM	中心前溝	336-344			

表 10 文字のメンタルローテーションタスク遂行時に推定された信号源(被験者 R S・予備実験参加済み)

0°			180°		
右半球			右半球		
領域	場所	time(ms)	領域	場所	time(ms)
	中心前回 / 中心後回	120-136	VC	楔部	152-160
VC	楔部	128-136	VC	後頭葉	184-192
	紡錘状回	200-232		楔部 / 紡錘状回	192-232
	後頭葉	304-344		後頭葉 / 楔部	400-408
PM	中心前回	336-344	IPL	下頭頂小葉 / 中心後回	416-424
			PM	中心前回 / 中心後回	480-520
				楔部	496-520

左半球			左半球		
領域	場所	time(ms)	領域	場所	time(ms)
	中心傍小葉	272-280		中前頭回	336-344
STR	下側頭回 / 中側頭回	304-312	STR	中側頭回 / 後頭葉	336-344
	下側頭回	320-328	STR	中側頭回	400-416
			SPR	楔前部	400-408
				海馬傍回 / 海馬	432-456
			SPR	楔前部	432-456
				上側頭回	480-488
			SPR	上頭頂小葉 / 楔前部	480-520
			SPR	楔前部	480-488

表 11 文字のメンタルローテーションタスク遂行時に推定された信号源(被験者MN・予備実験参加済み・1回目)

0°			180°		
右半球			右半球		
領域	場所	time(ms)	領域	場所	time(ms)
VC	後頭葉	152-200	VC	後頭葉	152-184
	後頭葉 / 楔部	264-280		後頭葉	232-240
PM	島 / 前頭頭頂弁蓋 / 中心溝	280-296		楔部	248-256
	後頭葉	288-328		後頭葉	272-288
	後頭葉	344-408		後頭葉	304-320
SPR	頭頂間溝 / 上頭頂小葉	352-392		海馬 / 海馬傍回	344-352
				後頭葉 / 楔部	344-384
				前頭頭頂弁蓋 / 島	360-384
			SPR	頭頂間溝 / 上頭頂小葉	424-472

左半球			左半球		
領域	場所	time(ms)	領域	場所	time(ms)
	下頭頂小葉	168-176		紡錘状回	272-280
STR/	下頭頂小葉	296-304	STR	上側頭回	296-304
IPL					
PM	中心後回 / 中心溝	312-328		後頭葉 / 楔部	424-440
PM	中心後回 / 中心溝	344-360		後頭葉 / 楔部	448-480
			PM	中心溝 / 中心後回	472-480

表 12 文字のメンタルローテーションタスク遂行時に推定された信号源(被験者MN・予備実験参加済み・2回目)

0°			180°		
右半球			右半球		
領域	場所	time(ms)	領域	場所	time(ms)
VC	後頭葉	144-152	VC	後頭葉	160-184
VC	楔部	160-168		中心後溝	168-184
STR	下頭頂小葉 / 中心後溝	256-280		下前頭回	248-256
SPR	頭頂下溝	296-328		後頭葉	336-384
	後頭葉 / 楔部	336-384			
	中心傍小葉	336-368			
	帯状溝	376-384			
	楔部	400-408			
	中心後回	448-464			
左半球			左半球		
領域	場所	time(ms)	領域	場所	time(ms)
VC	後頭葉	160-168		中心後回 / 下頭頂小葉	160-176
SPR	楔前部 / 帯状回 / 頭頂	296-328	PM	中心溝	328-344

下溝					
PM	中心前回	344-352	PM	中心前回 / 中心溝	360-376
			IPL	下頭頂小葉	384-392
				上側頭溝	408-424

4.2.1. 正立文字に対する反応 (表 6、表 7、表 8、表 9、表 10、表 11、表 12 左側参照)

100～約200ms(166.3 ± 22.2 ms (平均 ± 標準偏差))の間に提示刺激の視野(左)と対側の右 VC に7回の実験全てで活動が見られた。一方で同じ時間帯における左 VC には7回中2回の実験でしか活動が見られなかった。さらに、200～300ms の間に下側頭回(ITG: Inferior Temporal Gyrus)もしくは後頭側頭底部領域にて14ケース(半球×計測回数 = 2 × 7)中5ケース(右: 4ケース、左: 1ケース)で活動が見られた。

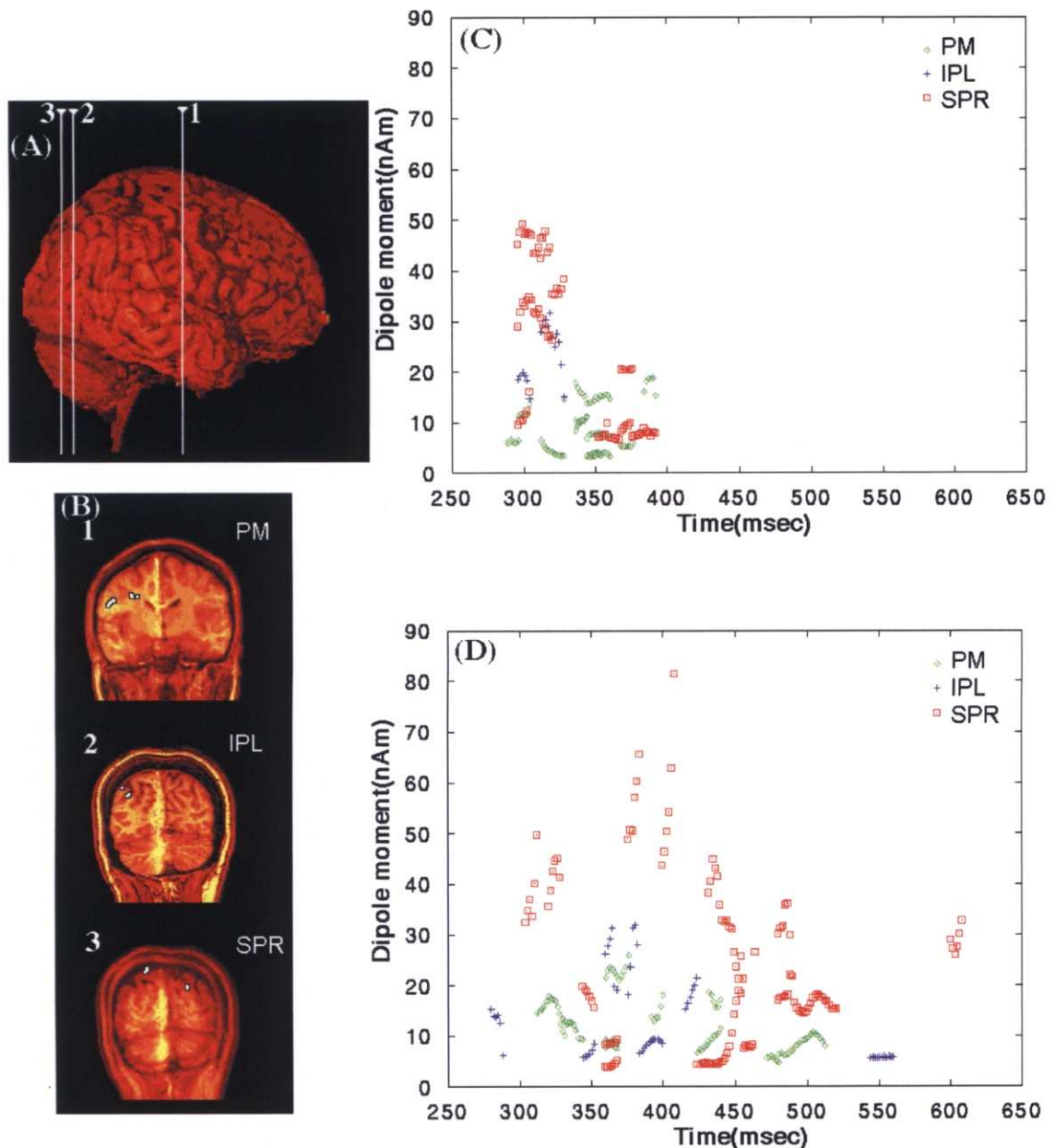


図 10 メンタルローテーションに関する3つの領域(PM、IPL、SPR)の推定されたダイポール(A、B)と推定された時間(C：正立文字；D：倒立文字)

右の上側頭領域(STR: Superior Temporal Region)においては、約300ms以降に7回の実験中3回の実験で活動が見られた。一方で左STRでは、同一時間帯に7回中5回活動が見られた(313.3 ± 49.9ms)。PMにおいては、約300ms以降(335.5 ± 32.9ms)に7回の実験全てで活動が見られた(図10C参照)(右：2ヶ

ース、左：5 ケース)。上頭頂小葉周辺の領域(SPR: Superior Parietal Region)では約 300 ms 以降に 7 回中 4 回の実験で活動が見られた(図 10C 参照)。PM で活動が見られたケースにおいて、同一時間帯の PM と同側の IPL の活動は右半球では見られず、左半球では 5 ケース中 2 ケース(312.9 ± 10.8 ms)で活動が見られた。一方で、PM で活動が見られたケースにおいて、同一時間帯の PM と対側の IPL の活動は全く見られなかった。

我々は、こうして得られた結果に基づき、活動が推定された 5 つの領域(右 VC、左 STR、PM、IPL、SPR)の活動時間に関して Bonferroni の多重検定を行った。結果として、右 VC と他の 4 領域の活動時間間に有意差($p < 0.05$)を見出した。さらに、左 STR と IPL 以外の他の 3 領域の活動時間間に有意差($p < 0.05$)があった。こうした結果から正立文字が提示された場合にまず右の VC の活動が見られ、その後左 STR の活動、続いて、PM、IPL、SPR の活動となることが示唆された。

4.2.2. 倒立文字に対する反応 (表 6、表 7、表 8、表 9、表 10、表 11、表 12 右側参照)

100 ~ 200 ms (158.5 ± 23.0 ms (平均 ± 標準偏差))の間に提示刺激の視野(左)と対側の右 VC に 7 回の実験中 6 回で活動が見られた(図 11 上部参照)。一方で同じ時間帯における左 VC にはいずれの実験においても活動が見られなかった。さらに、200 ~ 300 ms の間に ITG もしくは後頭側頭底部領域にて 14 ケース(半球 × 計測回数 = 2 × 7)中 4 ケース(右：2 ケース、左：2 ケース)で活動が見られた。

STR においては、約 300 ms 以降に右半球では 7 回の実験中 2 回の実験で活動が見られ、左半球では 5 回の実験で活動が見られた(368.7 ± 67.0 ms)。PM においては、300 ms 以降(402.3 ± 64.9 ms)の時間帯において、7 回の実験全てで活動が見られた(図 10B、図 11 下部参照)(右：4 ケース、左：4 ケース)。SPR では 300 ms 以降(435.5 ± 70.9 ms)に 7 回中 6 回の実験で活動が見られた(図 10B、D 参照)。PM で活動が見られたケースにおいて、同一時間帯の PM と同側の IPL の活動は右半球、左半球ともに 4 ケース中 3 ケース(407.4 ± 85.1 ms)で見られた。一方で、PM で活動が見られたケースにおいて、同一時間帯の PM と対側の IPL の活動は右半球では見られず、左半球では 4 ケース中 1 ケースで見られたのみであった。

我々は、こうして得られた結果に基づき、活動が推定された5つの領域(右 VC、左 STR、PM、IPL、SPR)の活動時間に関して Bonferroni の多重検定を行った。結果として、右 VC と他の4領域の活動時間間に有意差($p < 0.05$)を見出した。さらに、左 STR と残りの3領域の活動時間間に有意差($p < 0.05$)があった。こうした結果から倒立文字が提示された場合にまず右の VC の活動が見られ、その後に左 STR の活動が、続いて PM、IPL、SPR の活動が見られることが示唆された。

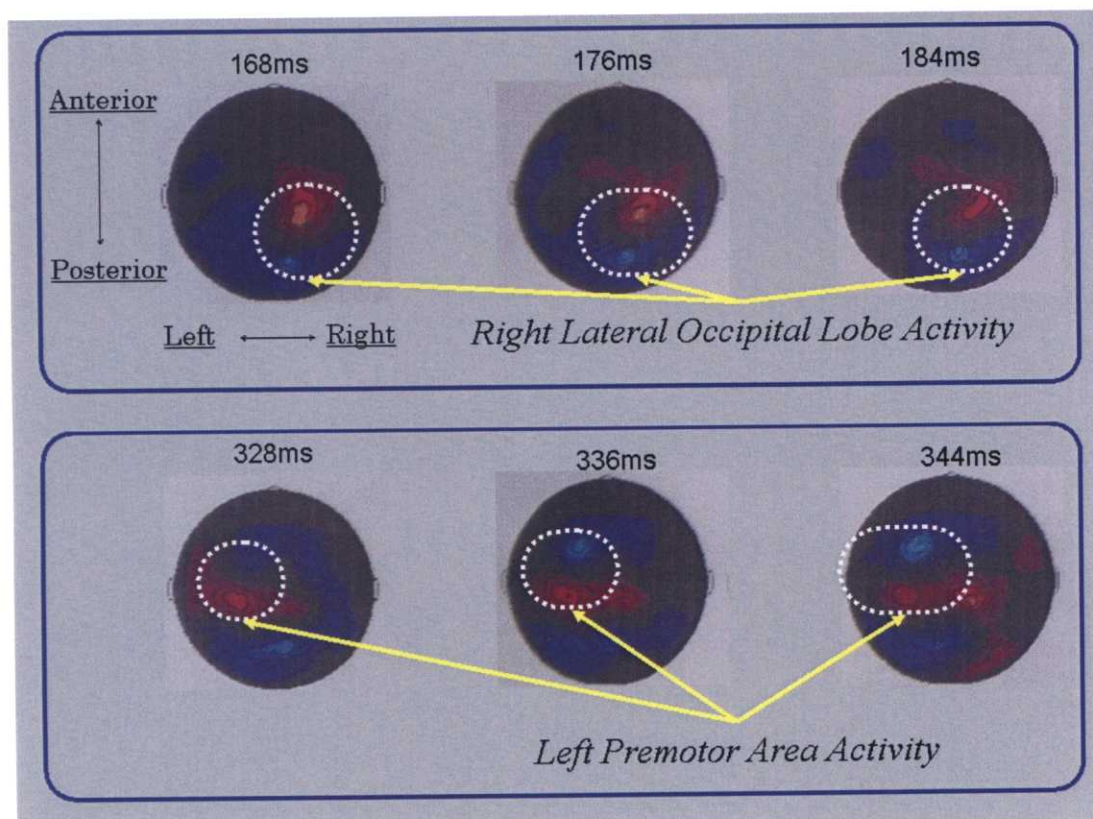


図 11 右 VC および左 PM に信号源が推定された際の ERF

4.2.3. 正立文字と倒立文字に対する反応の比較

正立文字と倒立文字が提示された際にダイポールが推定された5つの主要な脳内の領域(右 VC、左 STR、PM、IPL、SPR)の活動時間を比較するために、それぞれの領域ごとの活動時間に関して t 検定を実施した。t 検定の結果、PM、IPL、SPR の3つの領域で有意差 ($p < 0.05$) が見られた。加えて、図 10、図 12 に示されるように、倒立文字が提示された際のこれらの3領域(PM、IPL、SPR)の活動が遅い時間まで見られる。これらの結

果から、倒立文字が提示された場合には、正立文字と比較して、3領域の活動が開始する時間が遅い、あるいは、活動時間が長くなっていることが示唆される。

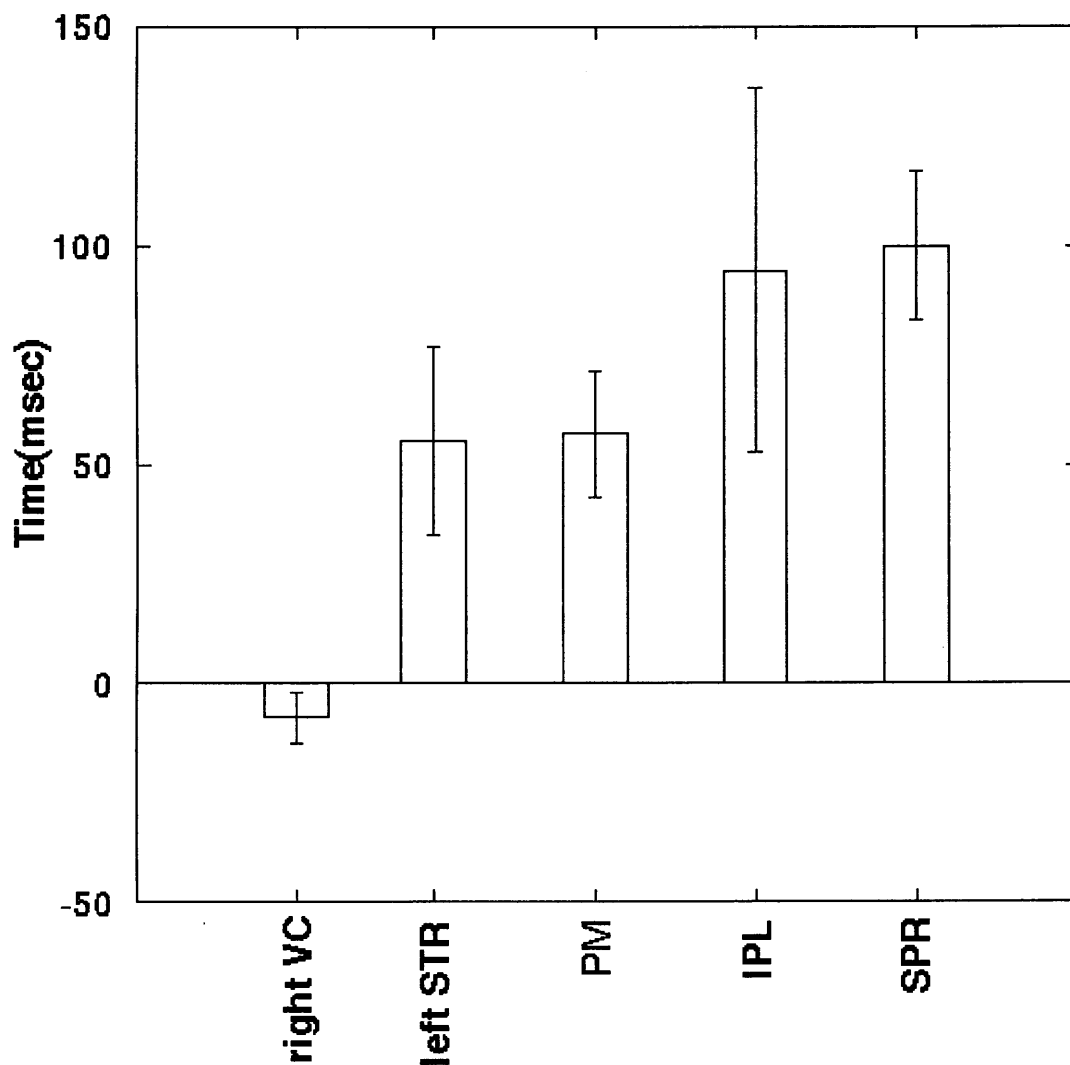


図 12 倒立文字が提示された際の5つの領域（右 VC、左 STR、PM、IPL、SPR）での活動時間と正立文字での活動時間の差分(縦軸の正は倒立文字の活動時間が正立文字と比較して遅いことを、負は倒立文字の活動時間が正立文字と比較して早いことを示す)

4.3. 考察

100～約200msの間に視覚刺激提示視野(左視野)と対側である右 VC において1

4 ケース(角度(0°、180°)×実験回数=2×7)中13 ケースで活動が見られた。一方で同時間帯の左 VC で活動が見られたのは2 ケースのみであった。さらに13 ケースで右 VC の活動は左 VC より早い、あるいは、左 VC の活動が見られなかった。こうした結果は視覚野における視野対側優位性と一致する結果である。

さらに、右 ITG、あるいは、右後頭側頭底部領域に200～300ms (右 VC の活動が見られた後) の時間帯でダイポールが推定された実験は6 回であった。一方、同時間帯で左 ITG、あるいは、左後頭側頭底部領域で活動が見られた実験は3 回であった。こうした活動は形状認識を行う際に活動する視覚腹側経路[33][34]上の処理と関係があると考えられる。

本研究では、STR の活動が左優位性を示した(左半球では10 ケースで活動が見られ、右半球では5 ケースで活動が見られた)。PET の研究では無意味な単語を読ませるタスクにおいて左 IPL の活動が見られた[95]。さらに、単語、および、単語となっていない文字列を読ませるタスクでは左上・中側頭領域の活動が他の PET での研究により報告されている[96]。他の PET を用いた研究では単語を聞いている際に左の頭頂側頭領域の活動が見られた[97]。本研究の被験者は視覚刺激の意味的な処理は要求されていないことから文字の音韻処理が今回のメンタルローテーションプロセスに含まれており、左 STR の活動につながっていると考えられる。

本研究においては、提示画像が倒立文字の場合の反応において、PM、IPL、SPR の活動時間は、正立文字の場合と比較して、遅く、かつ、長いものであった。すなわち、ダイポールが推定された領域の中でこれらの3 領域が心的シミュレーションに最も関係があると考えられる。さらに、倒立文字が提示されると、鏡像文字か通常文字かを判断する際に必要なメンタルローテーション処理における難易度が増加するために、PM、IPL、SPR の活動が遅くなり、かつ、長引くと考えられる。一方で、正立文字における PM、IPL、SPR の活動が見られることは、本実験における正立文字の傾きは被験者が通常文字として記憶しているものと必ずしも同一ではないと考えられることによることが示唆される。

正立文字が提示された場合に、SPR にダイポールが推定されたのは7 回中4 回であった。一方で倒立文字の場合には6 回となる。ここで、頭頂葉は注意や運動視などを含む空間認識処理に重要な役割を果たしていることが知られており[34][35][36]、今回見られた活動も

メンタルローテーションに必要なこうした処理に関係があると考えられる。特に SPR は近年の fMRI の研究結果によりメンタルローテーションの際のエラー率[23][27]や判断時間[37]に関係があることが知られている。加えて、PET の研究結果[29]により提示される文字の回転角度の平均値が増大する(メンタルローテーションの難易度が増す)と右の頭頂間溝周辺の活動が見られることが示されている。さらに、文字、あるいは、3次元物体のメンタルローテーション遂行時に両側の頭頂葉の活動が見られるといういくつかの先行研究[30][31][38]の結果もある。こうした先行研究の結果から本研究における倒立文字に対する SPR の活動は正立文字と比較して難易度が高くなっていることと関係があると考えられる。

さらに、TMS(Transcranial Magnetic Stimulation)により右頭頂間溝に400～600msの間に刺激を与えると、メンタルローテーションのパフォーマンスが遅くなることを示した例[39]や両側の頭頂葉後部への刺激がメンタルローテーションと関係があることを示した例[40]がある。さらに、EEGにより400～800msの後部の陰性の波形が提示された文字の角度により体系的に変わることが示されている[41]。こうしたメンタルローテーションタスク遂行時の頭頂葉の活動のみにフォーカスを当ててその活動時間を推定した先行研究と、本研究の SPR の活動時間の結果は一致するものである。

一方で、PM と IPL は視覚情報に基づく運動を行う際に活動が見られることが知られている。先行研究[7][8][9][10][11][26]によって、視覚情報に基づく運動の想起を行うと考えられる、左右手判別タスクの間に PM と IPL の近傍の領域が活動することが示されている。さらに、TMS を用いた研究[42]では、手のメンタルローテーションタスクの際に左の1次運動野を刺激すると判断に必要な時間が長くなることが示されている。

これらの領域は運動の想起だけでなく運動の実行にも重要な役割を示すことが知られている。具体的には、頭頂後部の障害により、把持行動の際の指の動きが損なわれるのと同様にリーチングタスクの際の腕の動きが損なわれる[54][55][56]。これらの場所はサルにおいて網膜上に投影された情報を身体中心の座標に変換する際に賦活されるニューロンの場所[43][44][45]と一致する。また、ヒトでも網膜上に投影された情報を身体中心の座標に変換する際に同様の場所の活動が見られることが知られている[46]。さらに、サルにおいて、腹側 PM (F5) と IPL 周辺のニューロンの活動パターンと物体の把持をするときに必要

な情報である握り方、物体の向き、形、大きさといった属性情報の内容に関係があることが示されている[47][48]。今回の SPR や IPL の活動はこれらの研究結果からも、PM との関連性が強いと考えられる。

正立文字においては、PM と同側の IPL の活動が PM の活動と同時間帯（300ms 以降）に見られるケースは8ケース中2ケースのみであったが、倒立文字では8ケース中6ケースとなった。さらに対側の IPL では活動がほとんど見られなかった。この結果は PM と同側の IPL のつながりが対側のものより強いということを示している。ここで、PM と IPL の活動が見られる時間帯が重なるという点は従来の手のメンタルローテーションの際の結果[7][8][9][10][11]とも一致するものである。さらに、猫では視覚情報に基づいて運動を行うタスクにおいて、頭頂葉の活動と運動野の活動が同期することが知られている[49]。

一方で、fMRI、PET などでの文字のメンタルローテーションにおいては、PM の活動が見られないもの[64]がある。本研究では、PM の活動が見られる被験者数が正立文字と倒立文字で同等であることから、両条件での活動の強さが同程度となっている可能性がある。こうしたことから、本研究は PM の活動が見られない先行研究の結果と矛盾するものではない。すなわち、文字のメンタルローテーションにおいては、PM が他の SPR、IPL と比較して、活動の強さに関してはそれほど回転角度の影響を受けていない可能性がある。

本研究では、先行研究で得られていたこうした主要な信号源が見られた領域の位置情報に加えて、活動時間についての情報を新たに得た。すなわち100～200ms の間に右 VC の活動が見られ、その後左 STR の活動がみられ、約300ms 以降に PM、SPR、IPL の活動が続くということである。これは、手のメンタルローテーションと同様に、メンタルローテーションについての処理を行う前に、まず視覚刺激を認識するための処理(手：右 IPL(LVF タスクの場合)、文字：左 STR)を行っていると考えられる(図 13 参照)。こうしたことからメンタルローテーションにおいては、視覚刺激が何であったかの仮説を立てた後に、シミュレーションを行うという処理の流れが共通的であることが示唆された。なお、図 13 は、刺激提示視野を同一(手は LVF タスク)にし、かつ、メンタルローテーションが要求されるもの(文字は倒立文字)にして、手のメンタルローテーションと文字のメンタルローテーションの際の処理の流れを比較したものである。

一方で、文字のメンタルローテーションでは、PM の活動が見られる半球は左、右とも

に7回中4回ずつであり優位半球が見られなかった。PM の活動に関して研究したものとしては、提示された物体を、力をこめて握るタスクである Power-grip タスクと物体のバランスを保ち正確性を重視して握るタスクである Precision-grip タスクの際のヒト脳活動を fMRI にて計測した研究[72]がある。この研究の結果、Power-grip タスクでは左の PM の活動が見られ、Precision-grip タスクの場合には、右の PM の活動が見られる。こうしたことから、文字のメンタルローテーションタスクにおいては、被験者によって、暗示的に採用しているメンタルローテーションの戦略が異なることが示唆される（図 13”character”参照）。手のメンタルローテーション(右手を左視野に提示した場合)の際には、前章に述べたように PM の活動が左側に限局される(図 13”hand”参照)。これは手のメンタルローテーションは手の操作を暗示的に要求するものであり、被験者がイメージしやすいために、左 PM を賦活し、処理していると考えられる。

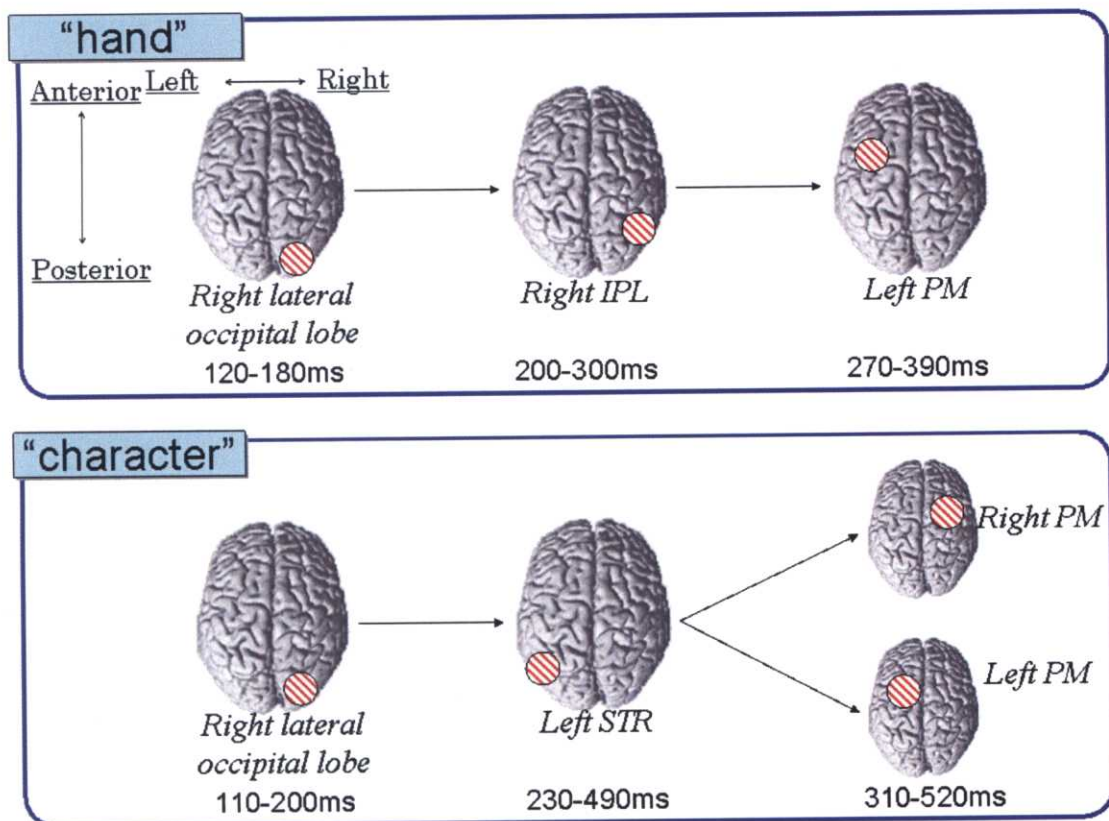


図 13 手のメンタルローテーションと文字のメンタルローテーションを比較した場合の活動

4.4. 結論

本研究において、我々は身体の一部ではない視覚刺激（アルファベット）を利用したメンタルローテーションタスク遂行時の脳内の時系列的な活動を評価した。結果として、右 VC の活動が見られ、その後に左 STR の活動が見られ、続いて PM、IPL、SPR の活動が見られることが示された。さらに、PM、IPL、SPR の活動は倒立文字が提示刺激として与えられた場合に正立文字に対する活動と比較して長引くことが示された。こうしたことから従来よりメンタルローテーションタスクに重要とされるこれらの3領域においては、活動時間が長くなっていることを示すことができた。こうした結果は手のメンタルローテーションと同様に、メンタルローテーション処理を行う前に、視覚刺激を認識するための処理(手：右 IPL、文字：左 STR)を行っているということを示唆する。すなわち、視覚刺激を認識し、仮説(手の場合は左右いずれか、文字の場合はいずれの文字か)をたてた後に心的シミュレーションを行うという処理の流れが、メンタルローテーションにおいて共通である事が示唆された。

上記に加えて、文字のメンタルローテーションでは、PM の活動と同側の IPL の活動が主に倒立文字の反応において見られた。一方で対側の IPL の活動は両条件ともにあまり見られなかった。こうしたことから、PM は同側の IPL と連携してメンタルローテーションに必要な空間情報の処理を行っていることが示唆された。さらに、文字のメンタルローテーションでは、手のメンタルローテーションと異なり、高次運動系の活動に半球優位性は見出せなかった。こうしたことは手のメンタルローテーションでは、被験者が心的に回転させることに慣れているため左半球優位性が示されるが、文字のメンタルローテーションでは、被験者には回転に慣れていない者が存在し試行錯誤的に行っていることを示唆するものであると考えられる。

5. 3次元物体のメンタルローテーション時の脳内処理過程[19][20][21]

5.1. fMRIによる実験

メンタルローテーションタスクに関する近年の非侵襲的計測手法による知見（fMRI[22][23][24][27][28][30][38][64][65][83][88][89][92]、PET[26][29][94]、MEG[7][86]、EEG[81][84][85][93]）により、PM、および、頭頂葉での活動がメンタルローテーションに重要であることが示されてきた。これらの研究結果においては、提示刺激により賦活する領野に差が見られる。これらの研究には、大きくわけて、提示刺激の種類として身体の一部を利用するものとそれ以外のものがある。前者では運動系の領野(主には左[7][26][52]、あるいは、両側[84][65]のPM)を活動させるが、後者では運動系の領野の活動が見られる場合と見られない場合がある。特に、身体の一部以外のメンタルローテーションで内的にモデルをもっていないもの場合にはこうした運動系の領野の活動に関して、先行研究の結果の間に矛盾が見られる。運動系の領野の活動が見られるものとしては、手で操作することが可能なツールを提示刺激として利用した Vingerhoets らの実験[65]、3次元物体上に記載した模様を利用したメンタルローテーション[89]や正答率の低い被験者による3次元物体のメンタルローテーション[92]があり、これらにおいては両側のPMの活動が見られる。また3次元物体のメンタルローテーションにおいては、右PMの活動が正答率に関係があるという知見[23]もある。一方で[22][30][38]は3次元物体のメンタルローテーションにおけるPMの活動を示すことができなかった。

こうした矛盾点に関して、Kosslyn ら[24]や Wraga ら[25]は事前に手で物体を回転させた後に3次元物体のメンタルローテーションを行わせると運動系の領野が賦活し、物体の回転を事前に見せるのみでは運動系の領野が賦活しないことを示した。この結果は、トップダウン的な処理の決定にバイアスがかかることを示している。すなわち、提示図形の種類に応じて被験者が戦略を決定することに加えて、作業履歴によって適応的に戦略を選択している可能性を示唆している。こうしたことから、3次元物体のメンタルローテーションでは、経験により2つの適応的な処理(mogor strategy(運動系を利用して心的回転を行う)、visual strategy(運動系を利用せずに心的回転を行う))を行う[24][25][50][90][91]と考えられている。

しかしながら、同じ状況におかれた被験者に対する同様の提示刺激であっても、提示方法により、被験者は動的に戦略を変える可能性が考えられる。リーチングタスクでは外界モデル(外部モデル)と身体イメージ(内部モデル)を構築し、その空間内での関係を把握することが重要であり、PM と頭頂葉後部の領野の間の Visuo-motor network の重要性が認識されている。そこで、我々はメンタルローテーションにおいて運動系を活用する際には、提示刺激の3次元的な属性に応じて、Visuo-motor network に関係する運動系の領野が賦活されるという仮説を立てた。本研究では、2種類の提示方法(2次元的な回転:回転をする際に提示画像の隠れた部分を想起する必要がない。3次元的な回転:回転をする際に提示画像の隠れた部分を想起する必要がある。)により刺激画像を提示し、その際の脳活動を fMRI を用いて計測した。

5.1.1. 実験方法

5.1.1.1. 被験者

本実験においては、18～33歳の正常な視力を持つ男性12名が参加した。全ての被験者はEdinburghテスト[66]により右利きであることを確認した。なお、被験者に対しては実験前に実験内容・目的などの説明を行い、同意を得た。

5.1.1.2. 反応時間計測実験

fMRI計測の前に、fMRI実験の参加者がメンタルローテーションタスク遂行中に心的な回転による判断を実際に行っているかどうかを確認する反応時間計測実験を実施した。

5.1.1.2.1. 視覚刺激

反応時間計測実験の提示画像としては、3種類の3次元物体を基本画像とした。これに対して2次元的な回転(回転によって見える部分が変わらないもの)、あるいは、3次元的な回転(回転によって見える部分が変わるもの)を行い、回転画像とした。なお、回転角度は6種類(0°、60°、120°、180°、240°、300°)である。回転画像については基本画像と鏡像のもの、および、鏡像でないもの(同一のもの)を作成した。鏡像のものの表示確率は鏡像でないものの1/4である。

5.1.1.2.2. 反応時間計測実験

被験者には判断結果に応じたボタン押しを行わせることで反応時間を計測した。ボタン押しと同時に次の画像を表示すると、被験者が混乱し次の画像に対して迅速に反応する事が難しくなる。よって、ボタン押しから500ms経過後に次の画像を提示した。回転方法、角度ごとにそれぞれ回転画像が鏡像でないものを16回以上提示するまで実験を行った。

5.1.1.3. fMRI 計測実験

fMRI 計測の際には、被験者がメンタルローテーションに集中するために、ボタン押しをせず、判断結果を想起するのみとした。

5.1.1.3.1. 視覚刺激

本実験にて提示する刺激画像は、6種類の3次元物体を基本画像とした。これらの基本画像に対して2次元的な回転と3次元的な回転を行い、回転画像を作成した。回転角度は8種類(20°、60°、120°、160°、200°、240°、300°、340°)である。回転画像については基本画像と鏡像のもの、および、鏡像でないものを提示した。鏡像のペアと同一のペアの表示確率は同確率とした。なお、本実験の実験デザインは、複数以上ある課題タスクと比較対象タスクをそれぞれブロックとしてまとめてそれらを一連のセッションとして実施し、両者の差をとり課題に関連した脳賦活部位を測定するブロックデザインである。そのため、1ブロックの中に同等の刺激がまとまって提示される方式となる。こうしたことから、被験者が刺激画像に慣れないようにするという配慮が必要なため、これらの画像、および、角度は反応時間計測実験に提示しなかったものとした。提示画像例を図14に示す。

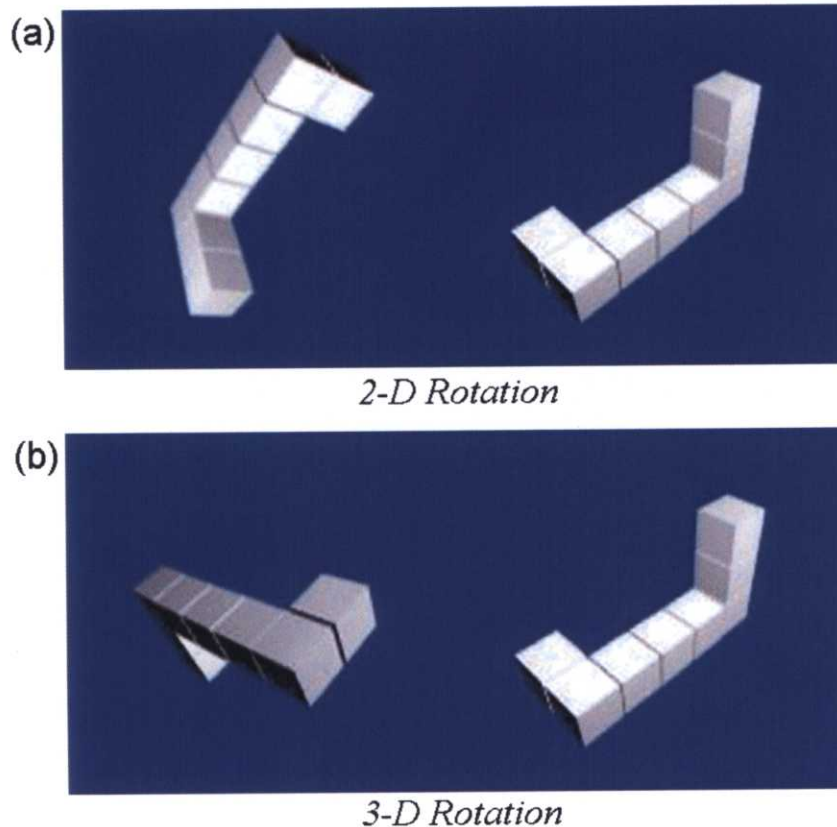


図 14 視覚刺激例

5.1.1.3.2. fMRI 計測実験

本実験では GE 社製 1.5 テスラ MRI 装置 (Signa Horizon LX) を使った。撮像パラメータは、TR: 4000ms、TE: 32.1ms、FA: 80°、FOV: 240×240mm、マトリクスサイズ: 128×128、スライス厚: 7mmであった。実験中、被験者は頭部を固定され、gradient-echo EPI により撮像を行った。

全ての被験者は5種類の異なる条件を含むセッションに参加した。5種類の条件とは以下の通りである。なお、角度差が大きいものは平均140° (120°、160°、200°、240°の角度差があるペアを1ブロック中に2回ずつ提示)の角度差があり、小さいものは平均40° (20°、60°、300°、340°の角度差があるペアを1ブロック中に2回ずつ提示)の角度差がある。

- ・ 3DL: 3次元の回転が要求されるもので、2つの3次元物体の間の角度差が大きいもの

- 3DS：3次元の回転が要求されるもので、2つの3次元物体の間の角度差が小さいもの
- 2DL：2次元の回転が要求されるもので、2つの3次元物体の間の角度差が大きいもの
- 2DS：2次元の回転が要求されるもので、2つの3次元物体の間の角度差が小さいもの
- REST：何もしない状態で、脳活動をベースラインに戻すことを目的とするもの

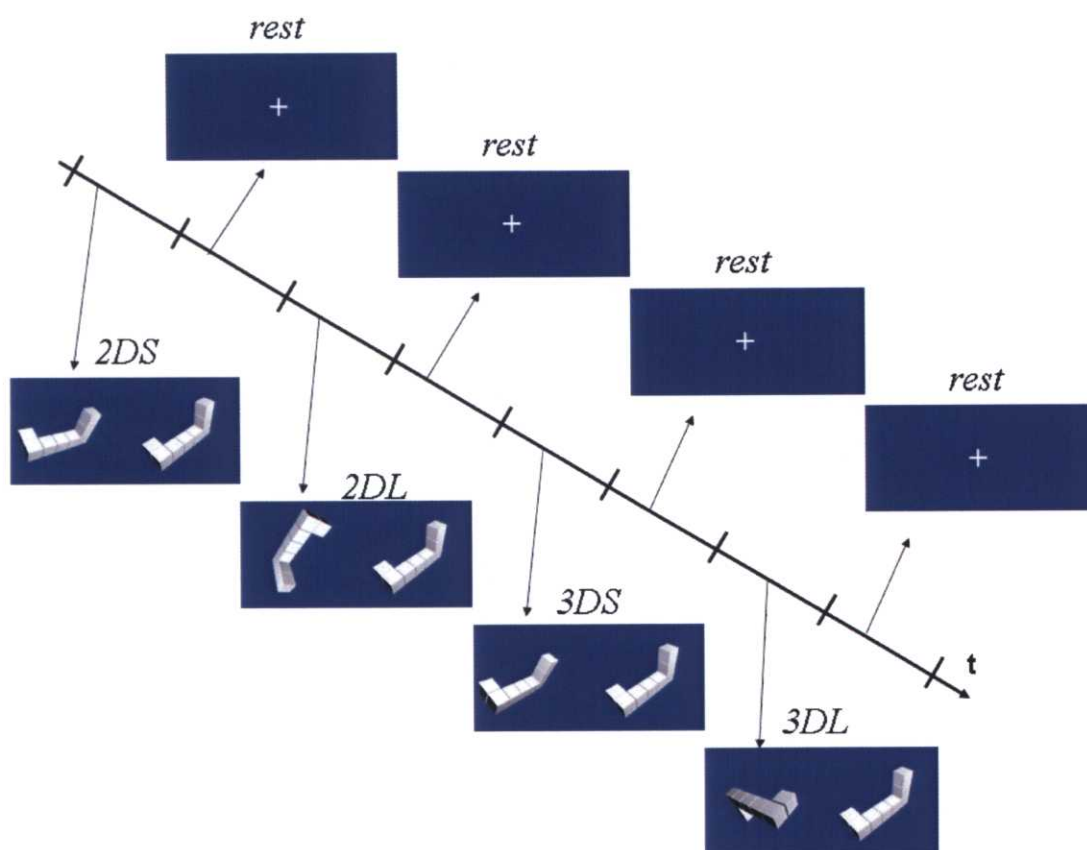


図 15 実験デザイン

1つのセッションは3DL、3DS、2DL、2DSが1ブロックずつとRESTが4ブロックからなっている。RESTは1セッションの中で2、4、6、8回目のブロックであり、他のブロックの順番はランダムである(図15参照)。1ブロックには24sかかり、1回の実験は5セッションからなるため、fMRI計測にはトータルで16分かかる。なお、REST

以外の 3DL、3DS、2DL、2DS の 1 ブロック中には、提示刺激を 8 回表示した。

5.1.1.4. fMRI データ解析方法

解析においては SPM99 を用いた。実験中の頭部の動きによる位置変化の補正、Montreal Neurological Institute (MNI) 標準脳にあわせる線形・非線型変換、半値幅 5 mm の空間フィルター (ガウシアン) 処理を行った。これらの前処理の後、実験デザインから各ブロックの刺激提示時刻情報に基づいて、それぞれの条件(3DL、3DS、2DL、2DS)で有意に活動している領域を解析した。

解析の際には、各被験者から得られたデータを重ね合わせ、グループでの解析を実施した。グループでの解析においては (1) 比較解析: 2 つの回転 (3D-2D: (3DL+3DS) - (2DL+2DS)、2D-3D: (2DL+2DS) - (3DL+3DS)) の影響を調べた。その後、(2) 分離解析: 2 次元の回転、3 次元の回転に分けて回転角度と相関のある活動部位 (3DL-3DS、2DL-2DS) を調べた。なお、影響がある、あるいは、回転角度と相関があると判断した条件は以下である。

- ・ ボクセルの活動値が有意差を示していること ($p < 0.001$, uncorrected)
- ・ 有意差を超えている領域が少なくとも 8 ボクセル以上あること

5.1.2. 結果

5.1.2.1. 反応時間結果

図 16 に被験者のパフォーマンス結果を示す。この結果より角度が増すと RT が長くなるというメンタルローテーション特有の傾向がわかる。得られた RT に対して二つの条件での角度に対する回帰分析を行った。回帰分析の結果 (2 次元的な回転: $F(1, 46) = 23.759$, $R = 0.584$; 3 次元的な回転: $F(1, 46) = 28.282$, $R = 0.617$)、両条件ともに RT と角度差の間に相関があることが示された。なお、両条件ともに正答率 94% 以上であった。

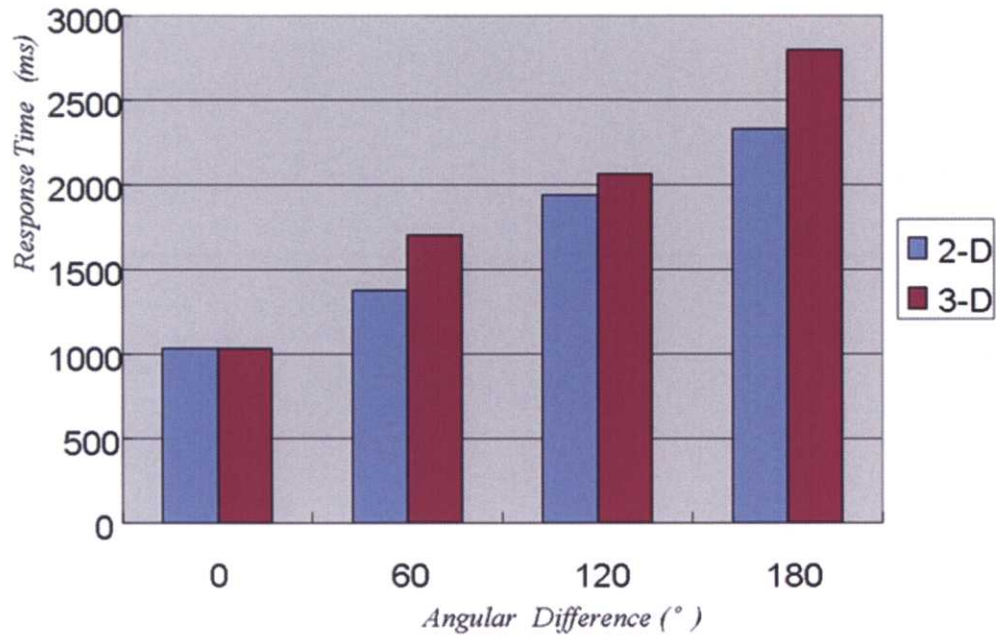


図 16 反応時間計測結果

5.1.2.2. fMRI 実験結果

5.1.2.2.1. 比較解析

3D-2D のみ右 SPL(BA 7)の活動に有意差が見られた (図 17、表 13 参照)。一方で、2D-3D では、活動に有意差を見出すことができなかった。

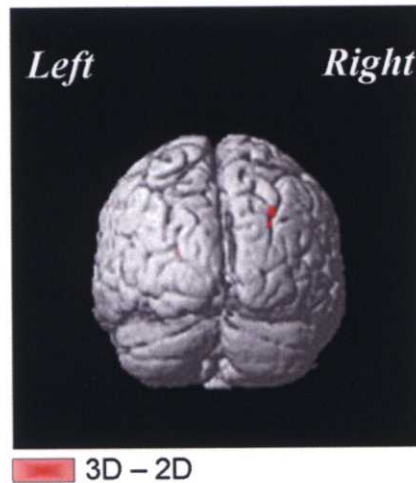


図 17 3次元的な回転と2次元的な回転の比較で優位差が見られた活動部位

表 13 3次元的な回転と2次元的な回転の比較で優位差が見られた活動部位

	x	y	Z	t-value
3D - 2D				
右上頭頂小葉(SPL) (BA 7)	30	-72	38	4.50
2D - 3D				
.

5.1.2.2.2. 分離解析

2次元的な回転と3次元的な回転のどちらのメンタルローテーションにおいても、優位差のある活動は、右半球に多かった（図 18、表 14 参照）。さらに、両タスクともに、両側の頭頂後頭領域を含む IPS(Intraparietal Sulcus)後部を中心とした領域(BA7、BA19)で活動に有意差が見られる。

3次元的な回転に特徴的な有意差のある活動は右 PM(BA 6)に幅広くみられる。一方、2次元的な回転に特徴的な有意差のある活動は右 SPL(BA 7)に幅広く見られる。

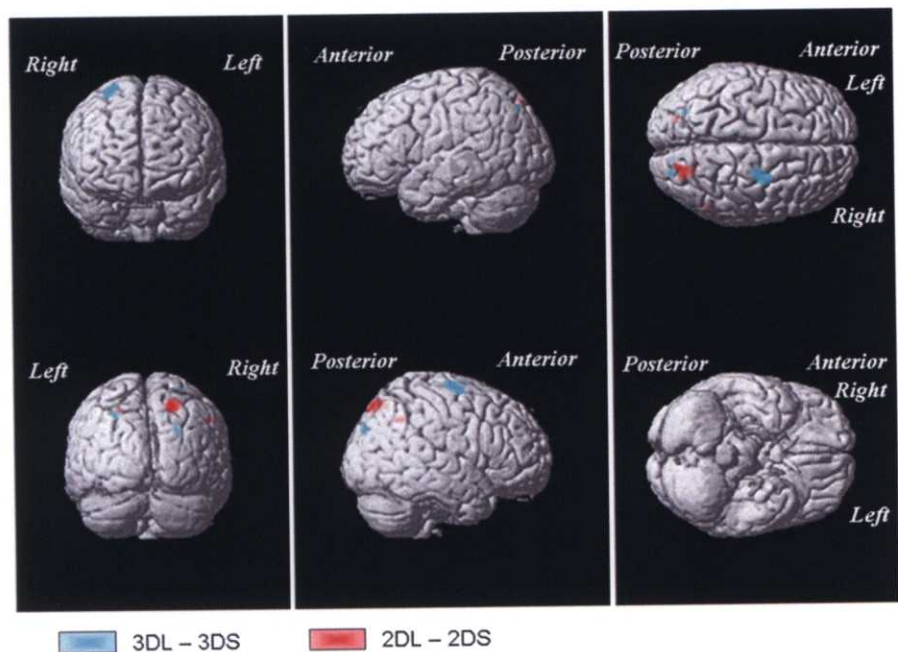


図 18 3次元的な回転(3DL-3DS)と2次元的な回転(2DL-2DS)で優位差が見られた活動
部位

表 14 3次元的な回転(3DL-3DS)と2次元的な回転(2DL-2DS)で優位差が見られた活動
部位

	X	y	Z	t-value
3DL・3DS (LIGHT BLUE)				
左上頭頂小葉 (SPL) (BA7)	-28	-74	44	6.25
右中心前回 (PM) (BA 6)	28	-12	70	5.72
右楔部 (BA 19)	24	-86	32	4.64
2DL・2DS (RED)				
右上頭頂小葉(SPL) (BA 7)	24	-80	52	8.32
右上頭頂小葉(SPL) (BA 7)	10	-60	48	5.18
右下頭頂小葉(IPL) (BA40)	56	-54	40	5.05
左上頭頂小葉(SPL) (BA 7)	-22	-82	48	4.72

5.1.3. 考察

分離解析の結果、3次元的な回転、2次元的な回転ともに IPS 後部近傍領域に有意差のある活動が見られた。この結果は、3次元物体のメンタルローテーションでは、頭頂連合野に活動が見られるという知見[22][27][28][30][38]に合致するものである。

ここで、2次元的な回転では右半球の IPS 近傍で有意差のある活動が幅広い領域で見られた。文字のメンタルローテーションの場合、右半球の IPS に活動が見られる[29][39]。さらには、visual strategy が右半球の脳損傷と関係があるという知見もある。2次元的な回転では、外部モデルをイメージ上で変形し、見えない部分を想起する必要がないため、認知過程において外界に対して働きかける処理の負荷が3次元的な回転と比較すると小さいと考えられる。こうしたことから、2次元的な回転では、被験者の採用している戦略が visual strategy に近いと考えられる。

2次元的な回転における頭頂葉の有意差のある活動(BA 7, 40)は、サル LIP(Lateral Part of Intraparietal Area)野および CIP(Caudal Part of Intraparietal Area)野に対応する場所に位置すると考えられる。こうした後部頭頂葉の領域は、PET により visually guided reaching の際のキャリブレーションに重要な役割を果たしていることが示されている[46]。また、これらの領域は、サルで他者の動作を見たときに賦活される F5 野(ミラーニューロン)[47]やヒトが他者の行動を予測する際に賦活される腹側 PM[67]に対して投射がある[68][69]。さらに、CIP 野においては傾きの検出を行うことも知られている[70][71]。こういったことから、2次元的な回転においては、IPS 近傍の有意差のある活動は心的シミュレーションに起因する空間処理に関連する活動であると考えられる。

一方で、3次元的な回転と相関のある頭頂葉の活動は、頭頂後頭領域にみられる。運動の選択やリハーサルを行う際に活動する背側 PM に至る経路上に、この活動が見られた領域に対応する PTO(Parieto-occipital Area)がある[69]。PTO ではこうした運動の選択やリハーサルの元となる空間情報を処理していると考えられる。さらに、比較解析の結果、右 SPL における有意差のある活動が3次元的な回転から2次元的な活動の差分をとったときのみ見られた。この結果は、メンタルローテーションのパフォーマンスに右 SPL の活動が関係するとした先行研究の結果[27]と一致するものであり、3次元的な回転の方が難しいとする被験者内観と一致するものであった。ただし、この結果は分離解析において、2

次元的な回転の方がより幅広い頭頂連合野の領域で有意差のある活動が見られたという結果と相反するものである。すなわち、3次元的な回転において有意差がみられた右 SPL の活動がメンタルローテーションによるものではない可能性もあるため、3次元的な回転と2次元的な回転における頭頂連合野の活動については活動時間情報などの解析により詳細な検討が必要である。

トップダウン的な処理をきっかけに賦活される運動系の領野の活動について以下で述べる。従来研究では visual strategy を被験者が選択した場合には、運動系の領野は賦活せず、motor strategy を被験者が選択した場合には、運動系の領野が賦活すること[24]が知られている。本研究の3次元的な回転においては、右背側 PM(BA 6)の活動に有意差がみられた(分離解析)。しかしながら、比較解析の結果では、どちらの条件においても運動系の領野の活動に有意差を見出すことができなかった。そこで、有意差のある PM の活動に関してより詳細に解析を行った。詳細な解析としては、3DL-3DS、2DL-2DS、3DL-2DL、3DS-2DS の4つに関して有意差のある PM の活動を調べた(図 19 参照)。結果として、3DL-3DS では活動に有意差がある大きな領域がみられ(voxel 数= 127、t-value = 5.72)、2DL-2DS(voxel 数= 1、t-value = 4.09)と 3DL-3DS(voxel 数= 4、t-value = 4.58)では小さな領域がみられた。また、3DS-2DS では有意差が見られなかった。本実験の4条件(3DL、3DS、2DL、2DS)は視覚刺激に関する3次元イメージの生成が必要となり、唯一3DLのみイメージ上で3次元物体を変形させ、見えない部分を想起するという、3次元的な大きな回転が要求される。こうしたことからこれらの4条件はイメージ上で外界情報に対する働きかけを行うという、3次元情報に基づく操作が多かれ少なかれ必要と考えられ、それによって PM の活動が程度は別として見られたと考えられる。さらに、3次元的な回転と PM の活動には、より相関があると考えられ、3次元的な回転では、2次元的な回転のように視覚的な処理だけでなく、よりトップダウン的にマルチモーダルな処理を行っていると考えられる。

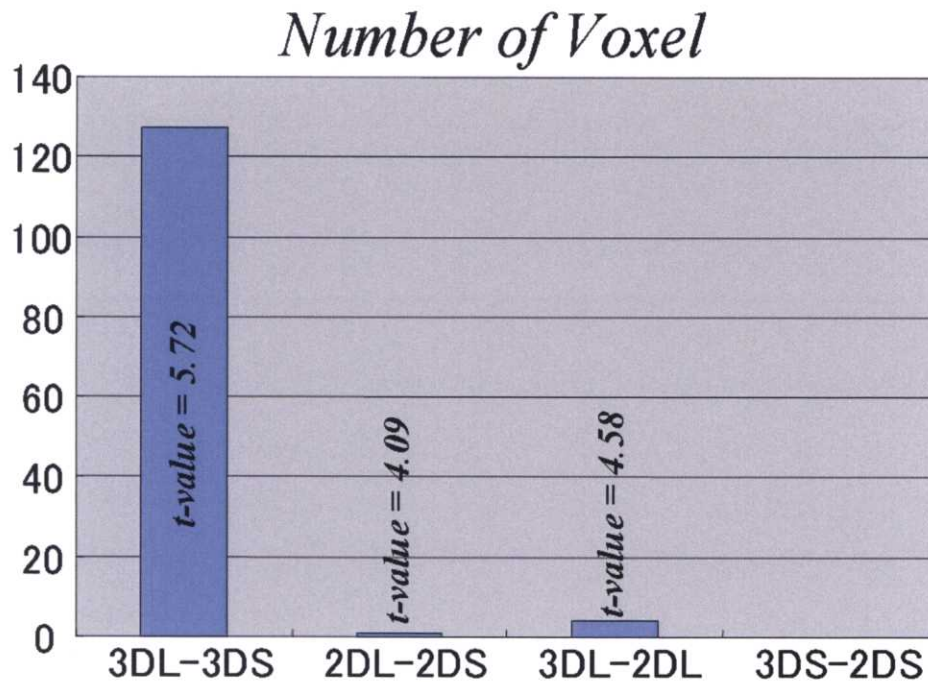


図 19 PM の活動の比較

手のメンタルローテーションに関する従来研究[7][26][52]では motor strategy の際に左半球優位の活動が見られる。さらにツールや3次元物体のメンタルローテーションでは、右半球優位[23]、あるいは、両側同等[24][65][92]の活動が見られる。こうしたことから PM の活動半球については一致した見解が見られない。一方で、PM の活動に関しては、提示された物体を、力をこめて握るタスクである Power-grip タスクと物体のバランスを保ち正確性を重視して握るタスクである Precision-grip タスクの際のヒト脳活動を fMRI にて計測した研究[72]がある。この研究の結果、Power-grip タスクでは左の PM の活動が見られ、Precision-grip タスクの場合には、右の PM の活動が見られる。さらに、PET の研究[73]により、意味のない一連の動作を覚える際には右の PM の活動が見られることが知られている。今回のメンタルローテーションは、身体の一部のメンタルローテーションや、3次元物体のメンタルローテーションにおいて提示図形を手で回転するイメージを事前に植えた場合と異なり、運動系を利用して回転させることに対する慣れが少ないと考えられる。こうしたことから、右 PM において活動に有意差が見られたことは、被験者が無意識下で正確性を重視してメンタルローテーションを行ったことに起因するのではな

いかと考えられる。

さらに、右 PM において有意差がみられた活動は背側に位置する。これは、motor strategy の際に PM の活動が見られる場合には背側に位置していたとする結果に一致する [7][26]。また、背側の PM は条件に応じて運動を選択するタスクにおいて活動が見られる箇所である [74][75]。さらには、運動のリハーサルにおいても活動が見られることが知られている [100]。被験者の内観によると、今回のメンタルローテーションはターゲットにあわせて心的にシミュレーションを行う際に試行錯誤的に行ったとのことであった。こうしたことから、本実験の 3 次元的な回転の際に、活動が見られた背側の PM は、PTO にて処理される空間情報を利用しつつ、見えない部分を想像しながら変形を伴うメンタルローテーションを行ったために、正確性を重視して、かつ、試行錯誤的に行ったことを示唆している。

一方で、メンタルローテーションにおいて起こりうる前頭性の活動としてサッケードによる前頭眼野 (FEF: Frontal Eye Field) の活動がある。FEF の活動は上前頭溝と中心前溝の交差点を中心として、背側と腹側に分かれることが知られている [76]。腹側の FEF の活動は、特に return を伴わない周辺点へのサッケードのみに特有である。さらに、return を伴うサッケードのときには背側が活動する。一方で、今回の実験では、FEF 近傍で有意差が見られた活動は、3 次元的な回転での右 PM の活動のみである。しかし、今回のタスクでは、刺激画像の提示位置を変更していないため、被験者は提示画像を見た後に中心に戻り、もう片方を見てまた中心に戻るといった return があるサッケード、あるいは、片側の提示画像に着目して、比較のためにもう一方の提示画像を見るという return があるサッケードのいずれかを行っていると考えられる。ここで、前者であれば、本研究の活動部位は右半球のみとなる一方で、[76] は両側に活動が見られるためまったく重ならない。さらには、今回のタスクにおいては、提示頻度が高い基準図形の提示位置は同確率で入れ替えている。そうしたこともあり、被験者の内観として右側あるいは左側のいずれかを基準にしたということはなかった。この被験者の内観から考えると、これらの領野の活動がサッケード依存であれば、両側に活動が見られることが妥当であるが、本研究の活動部位は右半球のみとなるため、後者でもない。そうした観点から本実験結果が示した PM の活動はメンタルローテーションによるもので、サッケード依存のものではないと考えられる。

5.1.4. 結論

我々は、2種類(3次元的な回転、2次元的な回転)の3次元物体のメンタルローテーションを同一セッション内で遂行する際の、被験者の脳活動を fMRI により計測した。この二種類は被験者がメンタルローテーションを行う際に、外部モデルを立体的に構築し、見えない部分を想像する必要がある場合(3次元的な回転)とそうでない場合(2次元的な回転)である。3次元的な回転では、右 PM の活動との間に相関が見られた。また、2次元的な回転は右 SPL の活動との間により相関が見られた。こうしたことから、提示刺激の3次元的な属性が運動系の領野の賦活に関連し、トップダウン的な処理の選択に関係があることが示唆された。一方で、3次元的な回転においても SPL の活動が重要である事が示唆されたが、2次元的な回転と比較すると回転角度との間の相関がそれほど見られなかったため、メンタルローテーションに関連する活動なのか否かの判断が難しい。こうしたことから、これらの活動の時間情報を収集することでの詳細な検討が重要となる。

5.2. MEG による実験

前節で述べたように、2次元的な回転と比較して、3次元的な回転と SPL の活動との間には、それほど相関が見られなかった。しかしながら、3次元的な回転と2次元的な回転を比較すると、3次元的な回転の方が右 SPL の活動が大きいことが示された。3次元的な回転における SPL の活動の意味合いを検討するために、全頭型 SQUID システムにより上記と同様のタスク遂行時の脳内活動を計測し、頭頂連合野を中心とした領域の活動の時間情報に関して他のタスクと同様の時間帯に活動が見られるかどうかという観点からの検討を行った。

5.2.1. 実験方法

5.2.1.1. 被験者

本実験においては、23～31歳の正常な視力を持つ8名(女性2名、男性6名)が参加した。全ての被験者は Edinburgh テスト[66]により右利きであることを確認した。なお、被験者に対しては実験前に実験内容・目的などの説明を行い、同意を得た。

5.2.1.2. 視覚刺激

本実験の提示画像は基本画像と回転画像の2つを組み合わせることで生成した。基本画像としては、3種類の3次元物体とした。これに対して2次元的な回転(回転によって見える部分が変わらないもの)と3次元的な回転(回転によって見える部分が変わるもの)を行い、回転画像を生成した(図20参照)。回転角度は6種類の角度(0° 、 60° 、 120° 、 180° 、 240° 、 300°)である。これらの画像はランダムな順序で左視野に提示した。この中で回転画像については基本画像と鏡像のもの、および、同一のものを提示した。なお、鏡像のもの表示確率は同一のもの1/4である。

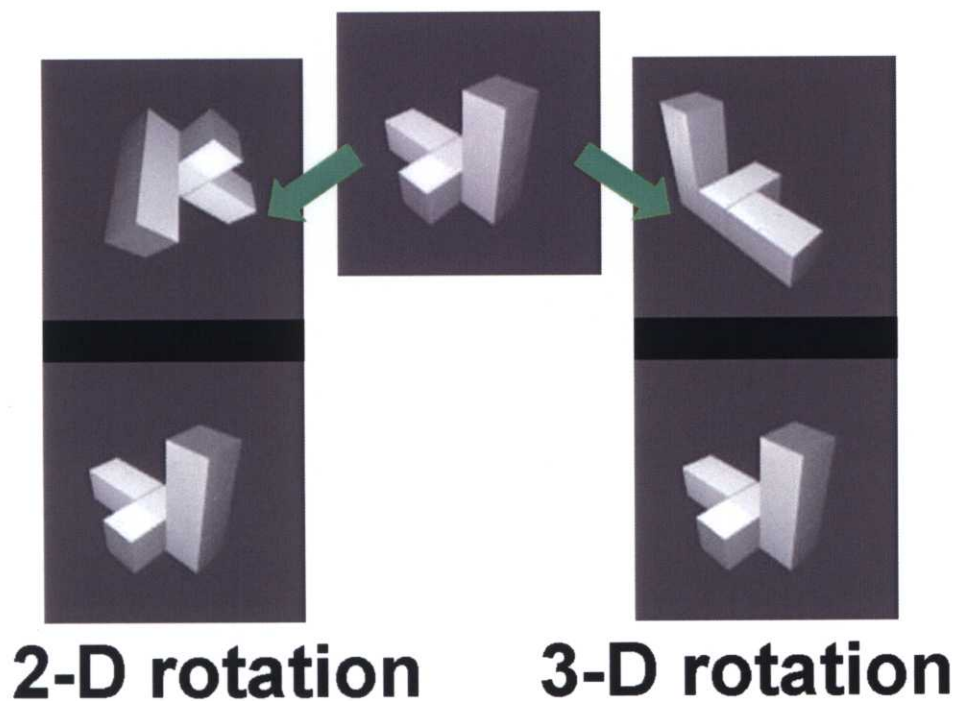


図 20 提示画像生成方法

5.2.1.3. MEG 計測実験

被験者には、実験中スクリーンの真ん中の十字の固視点を注視することと、瞬き・体動(ボタン押しを含む)を行わないことを要求した。さらに、被験者には判断完了時に判断結果(同一の組か鏡像の組か)を頭に念じるのみとするように指示した。なお、これらの被験者は事

前にボタン押しによる実験を行い、そのパフォーマンスについてはメンタルローテーション的な特徴(回転角度に応じて RT が増す)を持つと確認済みである(図 21 参照)。刺激提示から次の刺激提示までの間隔は、被験者が刺激提示タイミングを予期できることを避けるために、1.3~2.9 s の間でランダムな値を取るようにした。この刺激間隔は反応時間計測実験結果から設定した。実験後、全ての被験者は、実験において頭の中で判断結果を思い浮かべる際に図形を心的に回転させたと報告した。

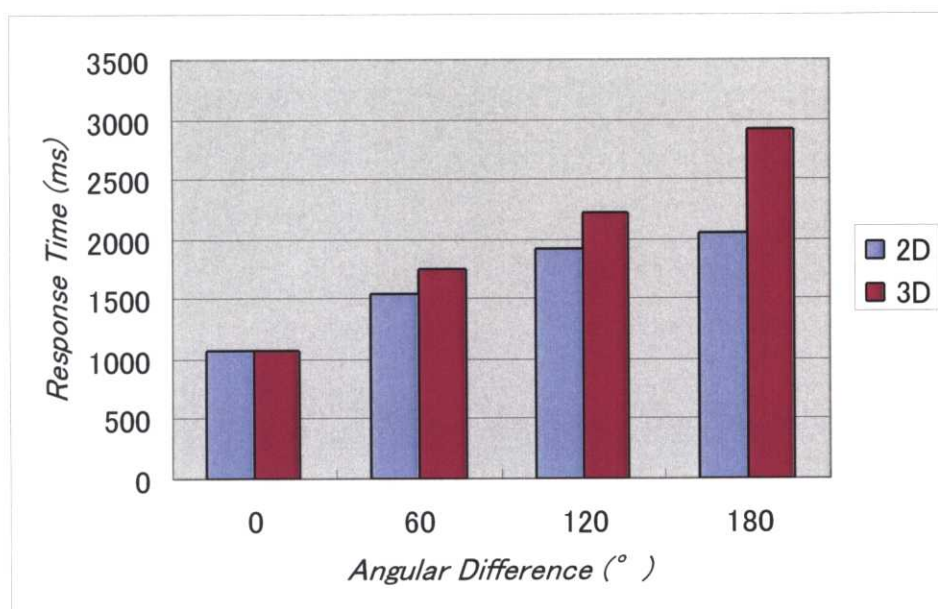


図 21 3次元物体のメンタルローテーションタスクを遂行する際に要した時間

実験においては、磁気遮蔽室に設置された306チャンネルの全頭型 SQUID システム (フィンランド Neuromag 社製) を利用した。提示刺激は磁気遮蔽室の外に設置した液晶プロジェクタから磁気遮蔽室内のスクリーンに投影した。なお、提示刺激である3次元物体の組のパターンは PC によって生成した。MEG は1.6 ms 毎に12 bit 値にデジタル化した上で、刺激提示前200ms から1200ms 間計測した。

5.2.1.4. MEG データ解析方法

本実験においては、2次元的な回転に対する反応(180°)、3次元的な回転に対する反応(180°)についてそれぞれ加算処理を行った。加算処理においては、アーチファク

トの混入していない64試行以上の加算平均を取った。その後、0.5Hz、40Hzのバンドパスフィルタをかけ、脳磁界の零点を刺激に対する背景脳磁界と考えられる-200ms~0ms(時刻の基点は全て刺激提示時)とした。図22に2次元的な回転に対して計測された波形を示す。

本タスクのような実験デザインにより脳活動の詳細化を実施した、非侵襲計測手法を活用した研究は我々のもの以外に見当たらない。そのため、信号源を推定するには解析者の恣意性に左右されないことが望ましい。そこで、解析においては脳を近似球として扱ったMinimum Norm推定[63]を用いた。Minimum Norm推定ではダイポール推定のように初期値を設定することが必要でないため、個々の解析者のノウハウによることなく適切な解を導き出すことができる。本解析では、SN比がよいと考えられる、100ms以降のERFに関して1.6ms間隔で解析を行った。

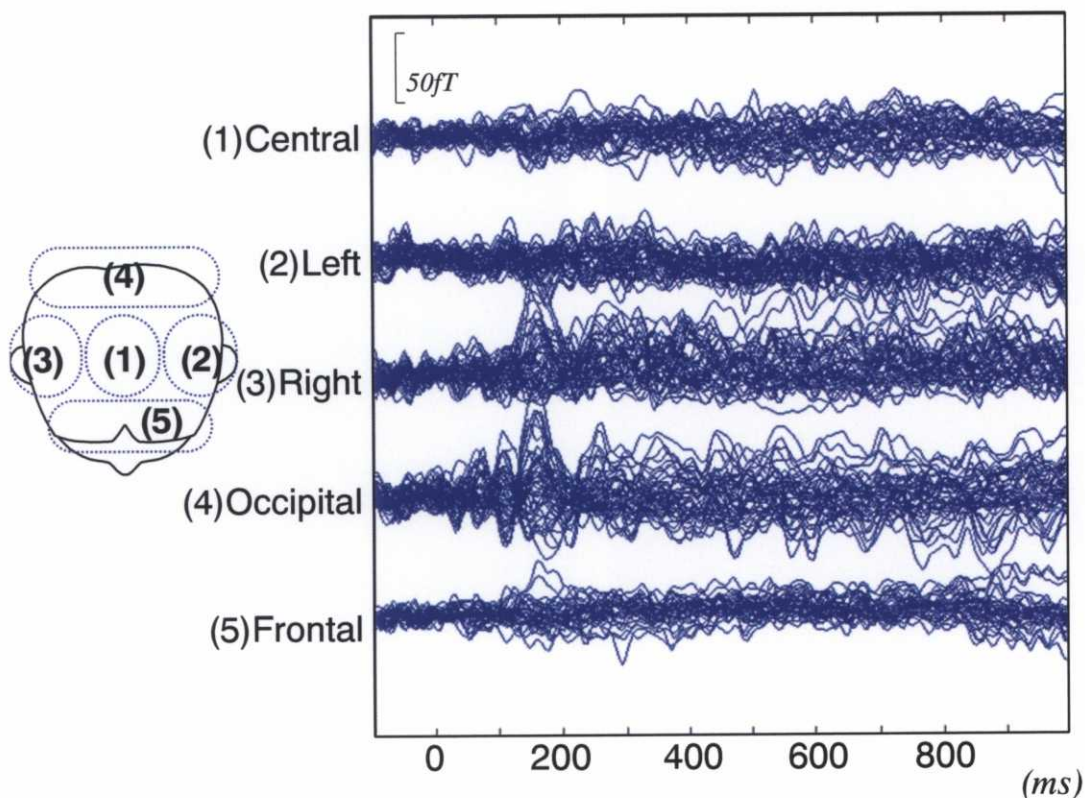


図 22 2次元的な回転に対する波形

続いて、得られた解析結果に対してROI(Region of Interests)を設定した。ROIの設定

場所は後頭葉領域と fMRI で活動の意味合いが十分に分からなかった頭頂葉領域であり、事前を取得した MRI 画像から算出したものである。なお、頭頂葉領域の ROI は以下の条件を満たす。

- ・ 大脳半球の内側面および後頭頭頂溝に接する
- ・ 頭頂間溝に中心が位置する
- ・ 半径 2 cm の球

一方で後頭葉領域の ROI は以下の条件を満たす。

- ・ 大脳半球の内側面と底面に接する
- ・ 球の接面が後頭極に接する
- ・ 半径 2.5 cm の球

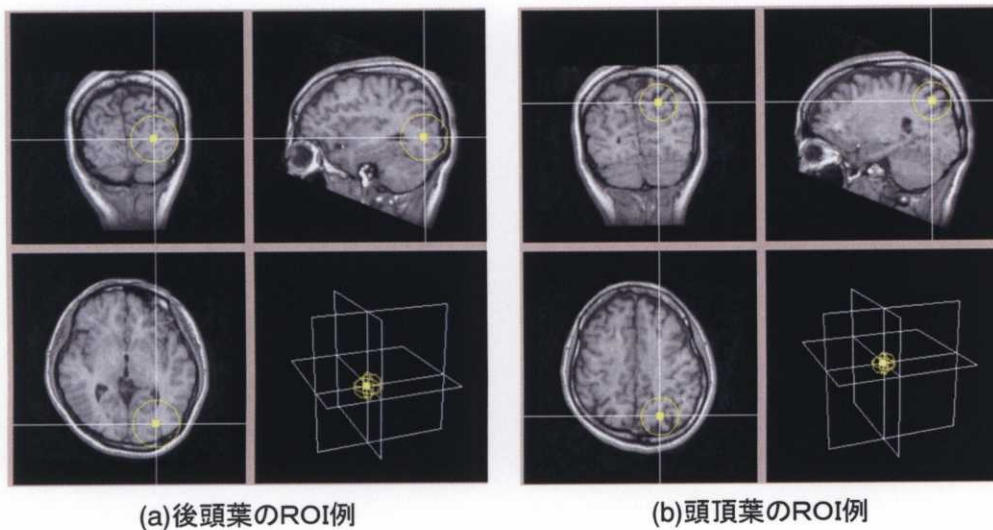


図 23 ROI 設定例

5.2.2. 結果

MEG での計測前に実施した反応時間計測実験結果 (図 21 参照) に示す通り、2次元、および、3次元の回転共に、角度差が増加するにつれ RT は長くなっている。二つの条件

に分けて、得られた RT と角度差に関して回帰分析を行った結果(2次元的な回転: $F(1, 30) = 12.505$, $R = 0.542$; 3次元的な回転: $F(1, 30) = 18.220$, $R = 0.615$)、RT と角度差の間に相関があることが示された。なお、平均エラー率は2次元の回転で1.8%、3次元の回転で6.9%である。

表 15 後頭葉 ROI の比較(R: 右半球の活動が大きい, L: 左半球の活動が大きい, N: 両半球とも活動がない)

被験者		A	B	C	D	E	F	G	H
タスク	時間(ms)								
2次元的な回転	100-200	R	L	R	R	R	R	N	R
	200-300	R	R	R	R	L	R	R	R
3次元的な回転	100-200	R	L	R	R	R	R	R	L
	200-300	R	L	N	R	L	L	R	L

Minimum Norm 推定の結果に関して、後頭葉の ROI の 100~200ms、200~300ms の活動量に関して平均値を取り、左右半球で比較を行った(表 15 参照)。右半球の活動量が大きい時が左半球の活動量が大きくなるよりも早い(100~200ms が”R”、かつ、200~300ms が”L”というパターン)、あるいは、左半球の活動量が大きくなる時がない(いずれの時間帯においても”L”となるケースがなく、いずれか一つ以上の時間帯で”R”となるパターン)という、視覚刺激の提示視野と対側の右半球がドミナントであるケースが2次元的な回転では8人中7人で、3次元的な回転では8人中6で見られた。また、手のメンタルローテーション、文字のメンタルローテーションと同様に100~200ms の活動のみに限っても、視覚刺激の提示視野と対側の右半球の活動がドミナントとなったケースは8人中6人ずつであった。

さらに左右頭頂葉に ROI を設定し、100ms 単位で活動量の平均値を計算した結果を図 24 に示す。こうして得られた結果に対して2次元の回転、3次元の回転の活動量の平均値に関して paired t 検定を行った。その結果右半球の ROI の 400~500ms の間

の活動量のみ有意差があった ($p < 0.05$)。

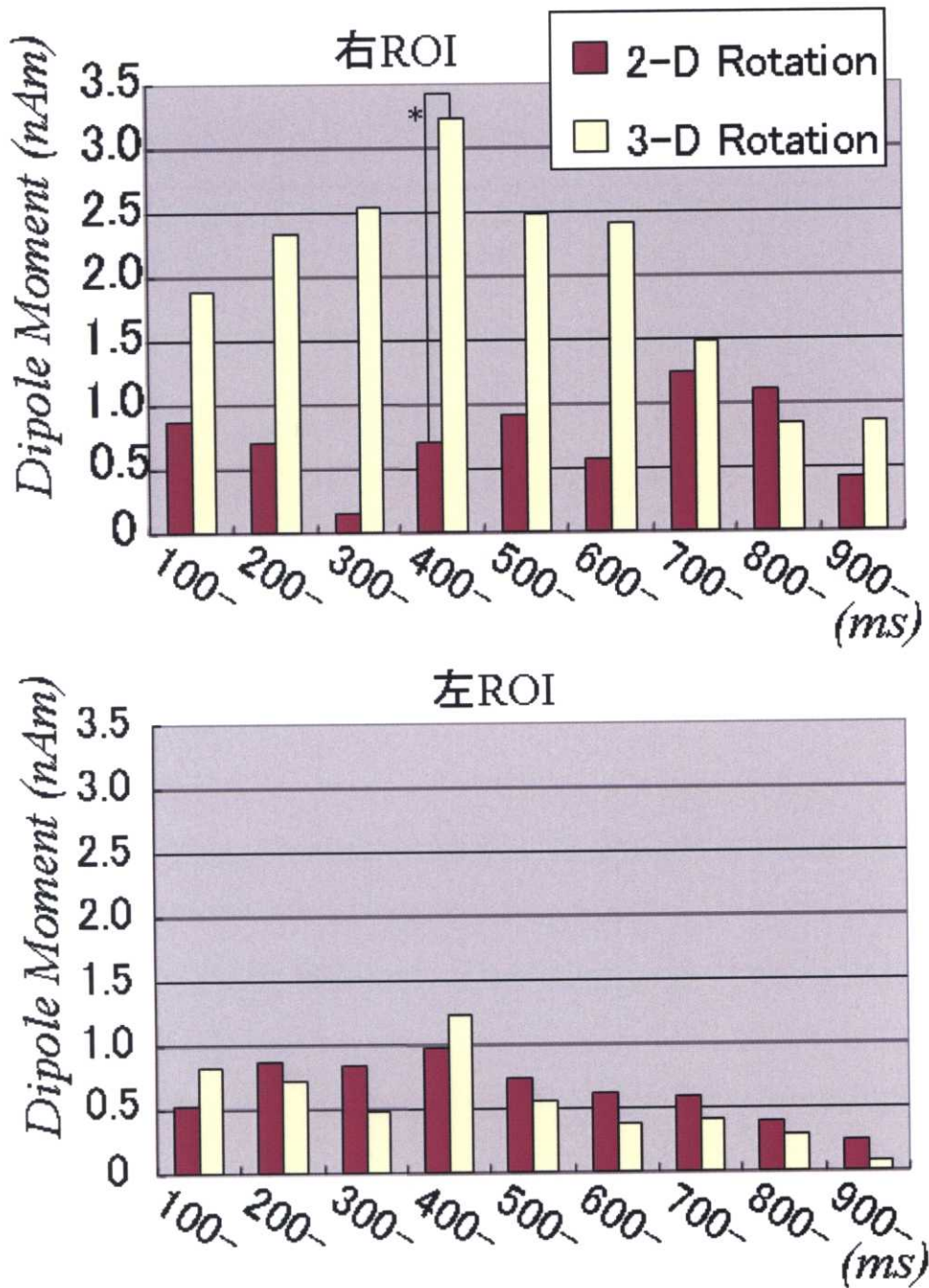


図 24 頭頂連合野 ROI の活動の比較

5.2.3. 考察

100～300msにおいて刺激提示視野と対側の右後頭葉優位の活動が見られたもの

は16ケース中13ケースであり、100～200msにおいて刺激提示視野と対側の右後頭葉優位の活動が見られたものは16ケース中12ケースである。これらからは、視覚処理に関する右半球ドミナントの結果が得られたと考えられる。この結果は従来計測結果と同様に、視覚刺激に対する活動と考えられ、対側優位性を示すものである。

さらに、3次元的な回転と2次元的な回転を比較した結果、右頭頂連合野の活動量は400～500msの間で有意差が見られ、3次元的な回転の方が、2次元的な回転と比較して、活動量が多い。この時間帯の頭頂連合野の活動は3、4章に述べたメンタルローテーションの実験結果と一致するものである。そのため、3次元的な回転によって活動が見られた頭頂連合野はメンタルローテーションに関係がある活動の可能性が高い。そのため、この実験結果は、fMRIの結果を補足するものであり、3次元的な回転においてもメンタルローテーションによる頭頂連合野の活動があることを示唆するデータであると考えられる。

6. 結論

本研究では、工学的に応用可能な知見が十分でないために、工学的な応用が進んでいないヒトのトップダウン的な脳内処理機構の解明を狙いとした。ヒト認知過程のトップダウン的な処理には、認知した情報に基づいて、無意識下で複数のモダリティの機能を活用しているものがある。本研究では、認知過程の中でもトップダウン的な処理を行っていると考えられ、今まで研究がよく行われてきたメンタルローテーションを対象として、上記に述べた処理機構の解明を狙いとした。

その中で、(1)メンタルローテーションタスクにおける脳内の時系列的な活動を調べること、(2)メンタルローテーションにおいて被験者が採る戦略の決定というトップダウン的な処理がメンタルローテーションのこういった側面に影響を受けるのかということ調べることを狙いとして研究を進めた。

(1)の目的を達成するために、身体の一部を視覚刺激として利用するメンタルローテーションと身体以外のイメージを視覚刺激として利用するメンタルローテーション遂行時の脳内の時系列的な活動を調べるために MEG により実験を行った。

(2)の目的を達成するために、3次元物体のメンタルローテーション遂行時に戦略の決定に寄与する要因を明確にすることを狙いとして fMRI および MEG を用いて実験を行った。

本論文ではこれらの研究成果を第3章から第5章までに分けて述べた。

第3章では、PET での先行研究で脳内活動の空間的情報が得られている、手を提示刺激として用いたメンタルローテーションタスクに関する脳内の時系列的な活動を、時間分解能に優れた MEG により調べた。本実験においては、視野と対側の VC(100~200ms)と IPL の早い成分の活動(200~300ms)が見られた。その後、左 PM と IPL の遅い成分の活動が見られた。この結果から視野と対側の VC、IPL にて身体図式の認識をした後で左 PM、IPL で心的シミュレーションを行っているという処理の流れが示唆された。

第4章では、第3章で得られた結果がメンタルローテーションに共通的なものかどうかを検討した。手のメンタルローテーションと同様に内的にモデルを持っている提示刺激の内、身体以外の刺激であるアルファベットを使ったメンタルローテーションタスク遂行時

の脳内の時系列的な活動を MEG により評価した。結果として、右 VC の活動(100~200ms)が見られた後に、文字の音韻的な処理に関係する左 STR(約 300ms)の活動が見られた。その後 PM、IPL、SPR の活動が続く。これらの PM、IPL、SPR の活動は心的シミュレーションに関与していると考えられる。但し、PM に関しては、両条件で活動が見られた被験者数が同程度だったことから他の二つの領域と比較して、心的シミュレーションの難易度と活動量の相関がそれほど高くない可能性がある。第 3 章および第 4 章に述べた 2 つの実験の結果から、外部刺激が何かという仮説を立てた後で心的シミュレーションを行うという処理の流れが、メンタルローテーションに共通である事が示唆された。

続いて第 5 章にて、運動系の活動と関係のある提示画像の因子を調べるために実験デザインを詳細化して脳内活動を調べた。2 種類(3 次元的な回転、2 次元的な回転)の 3 次元物体のメンタルローテーションを遂行する際の、被験者の脳活動を fMRI/MEG により計測した。3 次元的な回転は被験者がタスク中に視覚刺激の見えない部分を想起する必要があるものであり、2 次元的な回転はそうでないものである。結果として、3 次元的な回転のみが右 PM の活動と相関があるという結果を得た。こうした結果から、視覚刺激の 3 次元的な要素がトップダウン的な心的シミュレーション処理の遂行に関与していることが示唆された。

本研究に示すようなトップダウン的な処理の流れの解明が進めば、柔軟性に富んだコンピュータ処理機構の実現につながると考えられる。例えば、コンピュータが環境に遍在するユビキタスシステムにおいて生活者に対してサービスを提供する場合[77][78][79][80]には、様々な状況下でユーザとシステムとのインタラクションが行われる。本研究で対象とした処理機構は、上記ユビキタスシステムでの新しいインタラクションの提供、例えば、使いやすさという観点だけでない、ヒト認知過程のトップダウン的な処理の存在を仮定しての利用者に合わせた様々な評価尺度を持つデザインインターフェースの実現や、様々なモダリティの情報に基づく内的なシミュレーションによる利用者の心理状態の推定に基づくサービスなどにつながる可能性が高い。さらに、このような環境は今後さまざまな情報システムにおいて起こりうると考えられるため、こうした知見を蓄積し工学的に応用が行われることが期待される。

謝辞

本研究を進めるに際しては、多くの方々に大変お世話になりました。ここに謝辞を述べさせていただきます、私の感謝の意を表したいと思います。

本研究を進める上で、終始、懇切丁寧なご指導をいただきました東京大学大学院工学系研究科兼東京大学大学院医学系研究科 上野照剛教授に心から感謝申し上げます。

本論文をまとめるにあたり、様々なご助言を賜りました東京大学大学院工学系研究科原島博教授、廣瀬啓吉教授、合原一幸教授、相澤清晴教授、廣瀬明助教授に厚く御礼申し上げます。

東京大学 吉澤修治名誉教授には、本研究をまとめる上で、懇切なるご指導をいただきました。深く感謝申し上げます。

首都大学東京 菊池吉晃教授には、本研究にて行った実験の計測手法に関しご指導をいただき、また研究結果についての考察についてご指導をいただきました。心より感謝申し上げます。

64チャンネル全頭型 SQUID システムによる脳磁気計測実験において、測定手法および解析手法に関しご助言いただきました産業総合技術研究所 斉藤綾子氏、小早川達氏、遠藤博史氏、IBM 杉原亮氏に心より感謝申し上げます。

306チャンネル全頭型 SQUID システムによる脳磁気計測実験において、測定手法および解析方法に関しご助言いただきました東京大学 前野崇博士、東京大学大学院医学系研究科博士課程 Klevest Gjini 氏、東京大学大学院工学系研究科修士課程 多加谷真生氏に感謝申し上げます。

fMRI 計測実験における測定手法および解析方法にてご助言いただきました首都大学東京 妹尾淳史講師、則内まどか氏に深く感謝申し上げます。

(株)日立製作所システム開発研究所において本研究の推進にご指導いただきました多くの方々に感謝申し上げます。特に、元主管研究員 河野克己博士(現、同社 情報通信グループ)には、本研究の推進にご賛同いただき、東京大学大学院医学系研究科 客員研究員として研究を推進することへのご配慮をいただき、こうした研究を企業研究として、いかに展開するかということについてご指導いただきました。また、同所 主管研究員 船

橋誠壽博士、佐々木敏郎氏、小泉稔氏、鮫嶋茂稔氏、加藤博光氏には、本研究に関し、高所よりご指導いただきました。感謝の意にたえません。

その他、被験者となってくださった方など本研究の進行を支えてくださった皆様に感謝します。

最後に、日ごろから精神的に支えてくれ、励ましとよき環境づくりをしてくれた妻弥生に感謝いたします。

研究業績

A. 論文誌論文

- (1) H. Kawamichi, H. Endo, Y. Kikuchi, T. Takeda, S. Yoshizawa, Temporal structure of implicit motor imagery in visual hand-shape discrimination as revealed by MEG. *Neuroreport*, 9(6): 1127-32, 1998 Apr 20.
- (2) H. Kawamichi, Y. Kikuchi, S. Ueno, S. Yoshizawa, Spatiotemporal brain activity in mental rotation. *Neurology and Clinical Neurophysiology*, 66, 1-7, 2004.
- (3) H. Kawamichi, Y. Kikuchi, S. Ueno, Magnetoencephalographic measurement during two types of mental rotations of three-dimensional objects. *IEEE Transactions on Magnetics*, 41(10), 4200-4202, 2005.

B. 国際講演

- (1) H. Kawamichi, Y. Kikuchi, S. Ueno, S. Yoshizawa, Spatio-temporal brain activity in mental rotation. *Proceedings of the 14th International Conference on Biomagnetism (BIOMAG 2004)*, 431-432, 2004.
- (2) H. Kawamichi, Y. Kikuchi, S. Ueno, Magnetoencephalographic measurement during two types of mental rotations of three-dimensional objects. Digests of the IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG 2005), 618, 2005.
- (3) H. Kawamichi, S. Sameshima, K. Kawano, Y. Adachi, Transmission Performance Testing for Cooperating Processes of an Autonomous Decentralized Manufacturing System. *Proceedings of IEEE Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2001)*, 1-7, 2001.
- (4) H. Kawamichi, S. Sameshima, K. Kawano, S. Ookubo, A notification-suppression method using cooperative software agents. *Proceedings of SICE Annual Conference (SICE 2003)*, 319 -323, 2003.
- (5) H. Kawamichi, S. Sameshima, H. Kato, K. Kawano, A service selection method

based on context types for a ubiquitous service system in a public space. *Proceedings of Service Oriented Computing Workshop (SAINT 2004)*, 319-325, 2004.

- (6) H. Kawamichi, T. Sekiguchi, S. Sameshima, H. Morikawa, K. Takashio, H. Tokuda, Opportunities and issues relating to middleware technologies for context-aware services (2). *Proceedings of SICE Annual Conference (SICE 2004)*, 2704-2708, 2004.
- (7) R. Sugihara, Y. Kikuchi, H. Kawamichi, T. Kobayakawa, H. Endo, S. Yoshizawa, Neuromagnetic fields during motor imagery, in T. Yoshimoto et al. (Ed.): *Recent Advances in Biomagnetism (Proceedings of BIOMAG98)*, 474-477, 1999
- (8) S. Sameshima, H. Kawamichi, H. Kato, T. Sekiguchi, H. Morikawa, K. Takashio, H. Tokuda, Opportunities and issues relating to middleware technologies for context-aware services. *Proceedings of IEEE conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2004)*, 5667-5672, 2004.

C. 国内講演

- (1) 川道 拓東, 遠藤 博史, 菊池 吉晃, 武田 常広, 吉澤 修治, メンタルイマジエリーにともなう脳磁気計測. 第11回生体・生理工学シンポジウム論文集, 425-428, 1996.
- (2) 川道 拓東, 遠藤 博史, 菊池 吉晃, 武田 常広, 吉澤 修治, 左右手判別タスクにおける脳磁界計測. 日本ME学会専門別研究会: 生体情報の可視化技術研究会, 4: 32-36, 1996.
- (3) 菊池 吉晃, 川道 拓東, 吉澤 修治, 手の左右判別に伴う脳内活動, 電気学会計測研究会 IM-00-60, 2000.
- (4) 川道 拓東, 遠藤 博史, 菊池 吉晃, 武田 常広, 吉澤 修治, 文字のメンタルローテーション課題遂行時の脳磁界. 第12回生体・生理工学シンポジウム論文集, 257-260, 1997.
- (5) 川道 拓東, 山口 佳子, 菊池 吉晃, 遠藤 博史, 吉澤 修治, メンタルローテー

シヨンの情報処理モデル-脳磁データからの推定-. 電子情報通信学会技術研究報告
MBE97-135, 65-72, 1998.

- (6) 菊池 吉晃, 川道 拓東, 吉澤 修治, 文字の心的回転の脳内過程. 電気学会計測研究会 *IM-00-61*, 2000.
- (7) 川道 拓東, 菊池 吉晃, 上野 照剛, 吉澤 修治, 文字のメンタルローテーションタスクに伴う頭頂葉の活動. 第19回日本生体磁気学会, 94-95, 2004.
- (8) 杉原 亮, 遠藤 博史, 川道 拓東, 菊池 吉晃, 武田 常広, 吉澤 修治, 運動の想起における脳磁界. 第12回日本生体磁気学会, 10(1), 178-179, 1997.
- (9) 杉原 亮, 遠藤 博史, 川道 拓東, 菊池 吉晃, 武田 常広, 吉澤 修治, 脳磁気計測による運動の想起と実行の比較. 日本神経回路学会第8回全国大会, 85-86, 1997
- (10) 岡崎 由希子, 小早川 達, 川道 拓東, 杉原 亮, 菊池 吉晃, 吉澤修治, Octave illusion における脳磁界. 第13回日本生体磁気学会, 11(1) : 222-223, 1998.
- (11) 川道 拓東, 鮫嶋 茂稔, 河野 克己, 中野 利彦, 大久保 訓, “広域サービスシステム基盤 eCommArt におけるサービス管理方式の開発”, 情報処理学会第63回全国大会 3-569~570, 2001
- (12) 川道 拓東, 鮫嶋 茂稔, 河野 克己, 大久保 訓, 大森 勝美, 多端末を有するシステムにおける高効率情報集配信方法. 第15回自律分散システム・シンポジウム, 81-86, 2003.

参考文献

- [1] R. N. Shepard, J. Metzler, Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, (171): 701-703, 1971.
- [2] R. N. Shepard, L. A. Cooper, Mental images and their transformations. *Cambridge, MA/London, England: MIT Press*, 1982.
- [3] L. A. Cooper, R. N. Shepard, Chronometric studies of the rotation of mental images. *In W. G. Chase (Ed.), Visual information processing. New York: Academic Press*, 1973
- [4] L. A. Cooper, R. N. Shepard, Mental transformations in the identification of left and right hands. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 104: 48-56, 1975.
- [5] L. M. Parsons, Imagined spatial transformations of one's hands and feet. *Cognitive Psychology*, 19(2): 178-241, 1987 Apr.
- [6] L. M. Parsons, Temporal and kinematic properties of motor behavior reflected in mentally simulated action. *Journal of Experimental Psychology*, 20(4): 709-730, 1994.
- [7] H. Kawamichi, H. Endo, Y. Kikuchi, T. Takeda, and S. Yoshizawa, Temporal structure of implicit motor imagery in visual hand-shape discrimination as revealed by MEG. *Neuroreport*, 9(6): 1127-32, 1998 Apr 20.
- [8] 川道 拓東, 脳磁計測による心的回転の研究. 東京大学工学部機械情報工学科卒業論文, 1996.
- [9] 川道 拓東, 遠藤 博史, 菊池 吉晃, 武田 常広, 吉澤 修治, メンタルイマジエリーにともなう脳磁気計測. 第11回生体・生理工学シンポジウム論文集, 425-428, 1996.
- [10] 川道 拓東, 遠藤 博史, 菊池 吉晃, 武田 常広, 吉澤 修治, 左右手判別タスクにおける脳磁界計測. 日本ME学会専門別研究会: 生体情報の可視化技術研究会, 4: 32-36, 1996.

- [11] 菊池 吉晃, 川道 拓東, 吉澤 修治, 手の左右判別に伴う脳内活動, *電気学会計測研究会 IM-00-60*, 2000.
- [12] H. Kawamichi, Y. Kikuchi, S. Ueno, S. Yoshizawa, Spatiotemporal brain activity in mental rotation. *Neurology and Clinical Neurophysiology*, 66: 1-7, 2004.
- [13] 川道 拓東, 脳磁気計測によるメンタルローテーションの情報処理モデルの研究. 東京大学大学院工学系研究科機械情報工学専攻修士論文, 1998.
- [14] 川道 拓東, 遠藤 博史, 菊池 吉晃, 武田 常広, 吉澤 修治, 文字のメンタルローテーション課題遂行時の脳磁界. 第12回生体・生理工学シンポジウム論文集, 257-260, 1997.
- [15] 川道 拓東, 山口 佳子, 菊池 吉晃, 遠藤 博史, 吉澤 修治, メンタルローテーションの情報処理モデル-脳磁データからの推定-. *電子情報通信学会技術研究報告 MBE97-135*, 65-72, 1998.
- [16] 菊池 吉晃, 川道 拓東, 吉澤 修治, 文字の心的回転の脳内過程. *電気学会計測研究会 IM-00-61*, 2000.
- [17] 川道 拓東, 菊池 吉晃, 上野 照剛, 吉澤 修治, 文字のメンタルローテーションタスクに伴う頭頂葉の活動. 第19回日本生体磁気学会, 94-95, 2004.
- [18] H. Kawamichi, Y. Kikuchi, S. Ueno, S. Yoshizawa, Spatio-temporal brain activity in mental rotation. *Proceedings of the 14th International Conference on Biomagnetism (BIOMAG 2004)*, 431-432, 2004.
- [19] H. Kawamichi, Y. Kikuchi, S. Ueno, Magnetoencephalographic measurement during two types of mental rotations of three-dimensional objects. *Digests of the IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG 2005)*, 618, 2005.
- [20] H. Kawamichi, Y. Kikuchi, S. Ueno, Magnetoencephalographic measurement during two types of mental rotations of three-dimensional objects. *IEEE Transactions on Magnetism*, 41(10), 4200-4202, 2005.
- [21] H. Kawamichi, Y. Kikuchi, M. Noriuchi, A. Senoo, S. Ueno, A specific right dorsal premotor activity for three-dimensional mental rotation. *Neuroreport*, Submitted.
- [22] M. S. Cohen, S. M. Kosslyn, H. C. Breiter, G. J. DiGirolamo, W. L. Thompson, A. K.

- Anderson, S. Y. Bookheimer, B. R. Rosen, J. W. Belliveau, Changes in cortical activity during mental rotation a mapping study using functional MRI. *Brain*, 119, 89-100, 1996.
- [23] G. A. Tagaris, S. Kim, J. P. Strupp, P. Andersen, K. Ugurbil, A. P. Georgopoulos, Mental rotation studied by functional magnetic resonance imaging at hi field (4 tesla): performance and cortical activation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9, 419-432, 1997.
- [24] S. M. Kosslyn, W. L. Thompson, M. Wraga, N. M. Alpert, Imagining rotation by endogenous versus exogenous forces: distinct neural mechanisms. *Neuroreport*, 12(11), 2519-25, 2001.
- [25] M. Wraga, W. L. Thompson, N. M. Alpert, S. M. Kosslyn, S. M. Implicit transfer of motor strategies in mental rotation. *Brain and Cognition*, 52(2), 135-43, 2003.
- [26] L. M. Parsons, P. T. Fox, J. H. Downs, T. Glass, T. B. Hirsch, C. C. Martin, P. A. Jerabek, J. L. Lancaster, Use of implicit motor imagery for visual shape discrimination as revealed by PET. *Nature*, 375, 54-58, 1995.
- [27] G. A. Tagaris, S. Kim, J. P. Strupp, P. Andersen, K. Ugurbil, A. P. Georgopoulos, Quantitative relations between parietal activation and performance in mental rotation. *Neuroreport*, 7, 773-776, 1996.
- [28] W. Richter, K. Ugurbil, A. Georgopoulos, S. Kim, Time-resolved fMRI of mental rotation. *Neuroreport*, 8, 3697-3702, 1997.
- [29] I. M. Harris, G. F. Egan, C. Sonkkila, H. J. Tochon-Danguy, G. Paxinos, J. D. Watson, Selective right parietal lobe activation during mental rotation: a parametric PET study. *Brain*, 123 (Pt 1), 65-73, 2000.
- [30] I. Gauthier, W. G. Hayward, M. J. Tarr, A. W. Anderson, P. Skudlarski, J. C. Gore, BOLD activity during mental rotation and viewpoint-dependent object recognition. *Neuron*, 34(1), 161-71, 2002.
- [31] K. Podzbenko, G. F. Egan, J. D. Watson, Widespread dorsal stream activation during a parametric mental rotation task, revealed with functional magnetic

- resonance imaging. *NeuroImage*, 15(3), 547-58, 2002.
- [32] F. Grynzpan, D. B. Gesselowitz, Model studies of the magnetocardiogram. *Biophysical Journal*, 13, 911-925, 1973.
- [33] M. Mishkin, L. G. Ungerleider, K. A. Macko, Object vision and spatial vision: two cortical pathways. *Trends in Neurosciences*, 5, 414-417, 1983.
- [34] J. V. Haxby, C. L. Grady, B. Horwitz, L. G. Ungerleider, M. Mishkin, R. E. Carson, P. Herscovitch, M. B. Schapiro, S. I. Rapoport, Dissociation of object and spatial visual processing pathways in human extrastriate cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 88, 1621-1625, 1991.
- [35] D. R. Patzwahl, J. M. Zanker, E. O. Altenmuller, Cortical potentials reflecting motion processing in humans. *Visual Neuroscience*, 11, 1135-1147, 1994.
- [36] S. E. PETersen, M. Corbetta, F. M. Miezin, G. L. Shulman, PET studies of parietal involvement in spatial attention: Comparison of different task types. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 48, 319-338, 1994.
- [37] V. W. Ng, E. T. Bullmore, G. I. de Zubicaray, A. Cooper, J. Sucklin, S. C. Williams, Identification rate-limiting nodes in large-scale cortical networks for visuospatial processing: an illustration using fMRI. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13 (4), 537-45, 2001.
- [38] K. Jordan, H. J. Heinze, K. Lutz, M. Kanowski, L. Jancke, Cortical activations during the mental rotation of different visual objects. *NeuroImage*, 13(1), 143-52, 2001.
- [39] I. M. Harris, C. Miniussi, Parietal lobe contribution to mental rotation demonstrated with rTMS. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13(4), 315-23, 2003.
- [40] S. Bestmann, K. V. Thilo, D. Sauner, H. R. Siebner, J. C. Rothwell, Parietal magnetic stimulation delays visuomotor mental rotation at increased processing demands. *NeuroImage*, 17(3), 1512-20, 2002.
- [41] F. Peronnet, M. J. Farah, Mental rotation: An event-related potential study with a

- validated mental rotation task. *Brain and Cognition*, 9, 279-288, 1989.
- [42] G. Ganis, J. P. Keenan, S. M. Kosslyn, A. Pascual-Leone, Transcranial magnetic stimulation of primary motor cortex affects mental rotation. *Cerebral Cortex*, 10(2), 175-80, 2000.
- [43] H. Sakata, Y. Takaoka, A. Kawarasaki, H. Shibutani, Somatosensory properties of neurons in the superior parietal cortex (area 5) of the rhesus monkey. *Brain Research*, 64, 85-102, 1973.
- [44] V. B. Mountcastle, J. C. Lynch, A. Geurgopoulos, H. Sakata, C. Acuna, Posterior parietal association cortex of the monkey: command functions for operations within extrapersonal space. *Journal of Neurophysiology*, 38, 871-908, 1975.
- [45] R. A. Andersen, In: *M.S. Gazzanig(Eds.), The Cognitive Neurosciences, London: MIT Press*, 519-532. 1995.
- [46] C. M. Clower, J. M. Hoffman, J. R. Votaw, T. L. Faber, R. P. Woods, G. E. Alexander, Role of posterior parietal cortex in the recalibration of visually guided reaching. *Nature*, 383, 618-621, 1996.
- [47] G. Rizzolatti, L. Fadiga, V. Gallese, L. Fogassi, Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Cognitive Brain Research*, 3, 131-141, 1996.
- [48] M. Taira, S. Mine, A. P. Georgopoulos, A. Murata, H. Sakata, Parietal cortex neurons of the monkey related to the visual guidance of hand movement. *Experimental Brain Research*, 83, 29-36, 1990.
- [49] P. R. Roelfsema, A. K. Engel, P. Konig, W. Singer, Visuomotor integration is associated with zero time-lag synchronization among cortical areas. *Nature*, 385, 157-161, 1997.
- [50] B. Tomasino, R. I. Rumiati, Effects of strategies on mental rotation and hemispheric lateralization: Neuropsychological evidence. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(5), 878-888, 2004.
- [51] K. Sekiyama, Kinesthetic aspects of mental representations in the identification of left and right hands. *Perception Psychophysiology*, 32(2), 89-95, 1982 Aug.

- [52] E. Bonda, M. Petrides, S. Frey, A. Evans, Neural correlates of mental transformations of the body-in-space. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 92(24), 11180–11184, 1995 November 21.
- [53] Y. Kikuchi, H. Endo, S. Yohizawa, M. Kita, C. Nishimura, M. Tanaka, T. Kumagai, T. Takeda, Human cortico-hippocampal activity related to auditory discrimination revealed by neuromagnetic field. *Neuroreport*, 8(7), 1657-61, 1997 May 6.
- [54] M. Jeannerod, J. Decety, F. Michel, Impairment of grasping movements following a bilateral posterior parietal lesion. *Neuropsychologia*, 32(4), 369-80, 1994 Apr.
- [55] M. A. Goodale, J. P. Meenan, H. H. Bulthoff, D. A. Nicolle, K. J. Murphy, C. I. Racicot, Separate neural pathways for the visual analysis of object shape in perception and prehension. *Current Biology*, 4(7), 604-10, 1994 Jul 1.
- [56] G. Goldenberg. In: T. E. Feinberg, M. J. Farah eds. *Behavioural Neurology and Neuropsychology*, New York: McGraw-Hill, ch. 22, 289–296, 1997.
- [57] M. Roth, J. Decety, M. Raybaudi, R. Massarelli, C. Delon-Martin, C. Segebarth, S. Morand, A. Gemignani, M. Decorps, M. Jeannerod, Possible involvement of primary motor cortex in mentally simulated movement: a functional magnetic resonance imaging study. *Neuroreport*, 7(7), 1280-4, 1996 May 17.
- [58] J. Decety, D. Perani, M. Jeannerod, V. Bettinardi, B. Tadary, R. Woods, J. C. Mazziotta, F. Fazio, Mapping motor representations with positron emission tomography. *Nature*, 371(6498), 600-2, 1994 Oct 13.
- [59] K. M. Stephan, G. R. Fink, R. E. Passingham, D. Silbersweig, A. O. Ceballos-Baumann, C. D. Frith, R. S. Frackowiak, Functional anatomy of the mental representation of upper extremity movements in healthy subjects. *Journal of Neurophysiology*, 73(1), 373-86, 1995 Jan.
- [60] M. Leonardo, J. Fieldman, N. Sadato, G. Campbell, V. Ibañez, L. Cohen, M. P. Deiber, P. Jezzard, T. Pons, R. Turner, D. Le Bihan, M. Hallett, A functional magnetic resonance imaging study of cortical regions associated with motor task execution and motor ideation in humans, *Human Brain Mapping*, 3(2), 83-92,

1995.

- [61] C. A. Porro, M. P. Francescato, V. Cettolo, M. E. Diamond, P. Baraldi, C. Zuiani, M. Bazzocchi, P. E. di Prampero, Primary motor and sensory cortex activation during motor performance and motor imagery: a functional magnetic resonance imaging study. *Journal of Neuroscience*, 16(23), 7688-98, 1996 Dec 1.
- [62] A. P. Georgopoulos, M. D. Crutcher, A. B. Schwartz, Cognitive spatial-motor processes: Motor cortical prediction of movement direction during an instructed delay period. *Experimental Brain Research*, 75(1), 183-94, 1989.
- [63] K. Matsuura, U. Okabe, Selective Minimum-norm solution of the biomagnetic inverse problem. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 42, 608-615, 1995.
- [64] B. Alivisatos, M. Petrides, Functional activation of the human brain during mental rotation. *Neuropsychologia*, 24(1), 111-118, 1997.
- [65] G. Vingerhoets, F. P. de Lange, P. Vandemaele, K. Deblaere, E. Achten, Motor imagery in mental rotation: an fMRI study. *NeuroImage*, 17(3), 1623-1633, 2002.
- [66] R. C. Oldfield, The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh Inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97-113, 1971.
- [67] N. Ramnani, C. Miall, A system in the human brain for predicting the actions of others. *Nature Neuroscience*, 7(1), 85-90, 2004.
- [68] R. C. Miall, Connecting mirror neurons and forward models. *Neuroreport*, 14(17), 2135-2137, 2003.
- [69] H. Nakamura, T. Kuroda, M. Wakita, M. Kusunoki, A. Kato, A. Mikami, H. Sakata, K. Itoh, From three-dimensional space vision to prehensile hand movements: The lateral intraparietal area links the area V3A and the anterior intraparietal area in Macaques. *Journal of Neuroscience*, 21(20), 8174-8187, 2001.
- [70] K. Tsutsui, H. Sakata, T. Naganuma, M. Taira, Neural correlates for perception of 3D surface orientation from texture gradient. *Science*, 298, 409-412, 2002.
- [71] E. Shikata, F. Hamzei, V. Glauche, R. Knab, C. Dettmers, C. Weiller, C. Buchel,

- Surface orientation discrimination activates caudal and anterior intraparietal sulcus in humans: an event-related fMRI study. *Journal of Neurophysiology*, 85(3), 1309-1314, 2001.
- [72] H. H. Ehrsson, A. Fagergren, T. Jonsson, G. Wetling, R. S. Johansson, H. Forssberg, Cortical activity in precision- versus power-grip tasks: an fMRI study. *Journal of Neurophysiology*, 83(1), 528-536, 2000.
- [73] J. Decety, J. Grezes, N. Costes, D. Perani, M. Jeannerod, E. Procyk, F. Grassi, F. Fazio, Brain activity during observation of actions influence of action context and subject's strategy. *Brain*, 120, 1763-1777, 1997.
- [74] S. T. Grafton, A. H. Fagg, M. A. Arbib, Dorsal premotor cortex and conditional movement selection: a PET functional mapping study. *Journal of Neurophysiology*, 79, 1092-1097, 1998.
- [75] K. Kurata, T. Tsuji, S. Naraki, M. Seino, Y. Abe, Activation of the dorsal premotor cortex and pre-supplementary motor area of humans during an auditory conditional motor task. *Journal of Neurophysiology*, 84, 1667-1672, 2000.
- [76] M. Kato, S. Miyauchi, Human precentral cortical activation patterns during saccade tasks: an fMRI comparison with activation during intentional eye blink tasks. *NeuroImage*, 19, 1260-1272, 2003.
- [77] H. Kawamichi, S. Sameshima, K. Kawano, S. Ookubo, A notification-suppression method using cooperative software agents. *Proceedings of SICE Annual Conference (SICE 2003)*, 319 -323, 2003.
- [78] H. Kawamichi, S. Sameshima, H. Kato, K. Kawano, A service selection method based on context types for a ubiquitous service system in a public space. *Proceedings of Service Oriented Computing Workshop (SAINT 2004)*, 319-325, 2004.
- [79] H. Kawamichi, T. Sekiguchi, S. Sameshima, H. Morikawa, K. Takashio, H. Tokuda, Opportunities and issues relating to middleware technologies for context-aware services (2). *Proceedings of SICE Annual Conference (SICE 2004)*, 2704-2708,

- 2004.
- [80] S. Sameshima, H. Kawamichi, H. Kato, T. Sekiguchi, H. Morikawa, K. Takashio, H. Tokuda, Opportunities and issues relating to middleware technologies for context-aware services. *Proceedings of IEEE conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2004)*, 5667-5672, 2004.
- [81] S. D. Muthukumaraswamy, B. W. Johnson, J. P. Hamm, A high density ERP comparison of mental rotation and mental size transformation. *Brain and Cognition*, 52(2), 271-280, 2003.
- [82] R. B. Silberstein, F. Danieli, P. L. Nunez, Fronto-parietal evoked potential synchronization is increased during mental rotation. *Neuroreport*, 14(1), 67-71, 2003 Jan 20.
- [83] J. Vanrie, E. Beatse, J. Wageman, S. Sunaert, P. Van Hecke, Mental rotation versus invariant features in object perception from different viewpoints: an fMRI study. *Neuropsychologia*, 40(7), 917-30, 2002.
- [84] Z. C. Thayer, B. W. Johnson, M. C. Corballis, J. P. Hamm, Perceptual and motor mechanisms for mental rotation of human hands. *Neuroreport*, 12(16), 3433-3437, 2001 Nov 16.
- [85] A. Yoshino, M. Inoue, A. Suzuki, A topographic electrophysiologic study of mental rotation. *Brain Research Cognitive Brain Research*, 9(2), 121-124, 2000 Mar.
- [86] S. Iwaki, S. Ueno, T. Imada, M. Tonoike, Dynamic cortical activation in mental image processing revealed by biomagnetic measurement. *Neuroreport*, 10(8), 1793-1797, 1999 Jun 3.
- [87] W. Richter, R. Somorjai, R. Summers, M. Jarmasz, R. S. Menon, J. S. Gati, A. P. Georgopoulos, C. Tegeler, K. Ugurbil, S. G. Kim, Motor area activity during mental rotation studied by time-resolved single-trial fMRI. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(2), 310-20, 2000.
- [88] S. Johnston, E. C. Leek, C. Atherton, N. Thacker, A. Jackson, Functional contribution of medial premotor cortex to visuo-spatial transformation in humans.

- Neuroscience Letters*, 355, 209-212, 2004.
- [89] C. Windischberger, C. Lamm, H. Bauer, E. Moser, Human motor cortex activity during mental rotation. *NeuroImage*, 20, 225-232, 2003.
- [90] B. Tomasino, A. Toraldo, R. I. Rumiati, Dissociation between the mental rotation of visual images and motor images in unilateral brain-damaged patients. *Brain and Cognition*, 51(3), 368-371, 2003 Apr.
- [91] B. Tomasino, L. Vorano, M. Skrap, G. Gigli, R. I. Rumiati, Effects of strategies on mental rotation performed by unilateral brain damaged patients. *Cortex*, 40, 197-199, 2004.
- [92] K. Jordan, T. Wustenberg, H. J. Heinze, M. Peters, L. Jancke, Women and men exhibit different cortical activation patterns during mental rotation tasks. *Neuropsychologia*, 40(13), 2397-2408, 2002.
- [93] B. W. Johnson, K. J. McKenzie, J. P. Hamm, Cerebral asymmetry for mental rotation: effects of response hand, handedness and gender. *Neuroreport*, 13(15), 1929-32, 2002 Oct 28.
- [94] T. Makany, K. Kazmer, J. Kallai, Interference between verbal concept formation and spatial mental rotation in female subjects. *Perceptual and Motor Skills*, 95, 227-232, 2002.
- [95] R. Vandenberghe, C. Price, R. Wise, O. Josephs, R. S. J. Frackowiak, Functional anatomy of a common semantic system for words and pictures. *Nature*, 383, 254-256, 1996.
- [96] A. N. Herber, M. A. Mintun, R. D. Nebes, J. T. Becker, Regional cerebral blood flow during word and nonword reading. *Human Brain Mapping*, 5, 84-92, 1997.
- [97] S. E. Petersen, P. T. Fox, M. I. Posner, M. Mintun, M. E. Raichle, Positron emission tomographic studies of the cortical anatomy of single-word processing. *Nature*, 331, 585-589, 1988.
- [98] C. Lamm, C. Windischberger, U. Leodolter, E. Moser, H. Bauer, Evidence for premotor cortex activity during dynamic visuospatial imagery from single-trial

functional magnetic resonance imaging and event-related slow cortical potentials. *NeuroImage*, 14, 268-283, 2001.

[99] G. A. Tagaris, W. Richter, S. G. Kim, G. Pellizzer, P. Andersen, K. Ugurbil, A. P. Georgopoulos, Functional magnetic resonance imaging of mental rotation and memory scanning: a multidimensional scaling analysis of brain activation patterns. *Brain Research Reviews*, 26, 106-112, 1998.

[100] P. Cisek, J. F. Kalaska, Neural correlates of mental rehearsal in dorsal premotor cortex. *Nature*, 431 (701), 993-996, 2004.