HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	心的視覚イメージに関わる脳活動についての生理心理学的研究
Author(s)	山崎, 圭子
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(教育学)
Dissertation Number	乙第6901号
Issue Date	2013-12-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.r6901
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/54645
Type	doctoral thesis
File Information	Keiko_Yamazaki.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学大学院教育学研究科

博士学位論文

心的視覚イメージに関わる脳活動についての生理心理学的研究

山崎　圭子

第 I 部　序　論 7
第 1 章 心的イメージとは 8
1.1 心的イメージ現象とその定義 8
1.2 心的イメージの性質 9
1.3 心的イメージの認知心理学的位置づけ 12
第 2 章 心的イメージのモデル 14
2.1 心的イメージの 3 つのモデル 14
2.2 Kosslyn の計算論的モデル 15
2.2.1 モデルを構成するサブシステム 16
2.2.2 イメージの機能 18
第 3 章 心的イメージの諸機能に関する先行研究 21
3.1 文字イメージ課題 21
3.2 文字イメージ課題中の脳活動 23
3.3 文字イメージ課題中に想定される処理 25
第 4 章 心的イメージと事象関連脳電位 27
4.1 事象関連脳電位 27
4.2 事象関連脳電位を用いた心的イメージ研究 27
4.2.1 イメージ課題中の ERP 27
4.2.2 文字イメージ課題中の ERP 31
4.3 本研究で注目する ERP 効果 35
4.3.1 初期成分 35
4.3.2 SPCN 36
第 5 章 本研究の目的 38
5.1 目的 38

5.2 実験的検討の構成 39
第 II 部　　実験的検討 41
第 6 章 心的イメージの生成・走査の処理過程（実験１，２）..... 42
6.1 実験１　イメージの複雑さによる初期成分への影響 42
6.1.1 目的 42
6.1.2 方法 43
6.1.2.1 参加者 43
6.1.2.2 刺激 44
6.1.2.3 手続き 45
6.1.2.4 記録と分析 46
6.1.3 結果 46
6.1.3.1 行動指標 46
6.1.3.2 ERP 49
6.1.4 考察 63
6.1.4.1 行動指標および後期成分から考えられる処理過程 63
6.1.4.2 複雑さ，およびプローブ位置による初期成分の変動 65
6.2 実験２　文字イメージ課題のプローブ位置による初期成分への影響 69
6.2.1 目的 69
6.2.2 方法 70
6.2.2.1 参加者 70
6.2.2.2 刺激 70
6.2.2.3 手続き 71

6.2.2.4 記録と分析 71
6.2.3 結果 72
6.2.3.1 行動指標 72
6.2.3.2 ERP 73
6.2.4 考察 82
6.2.4.1 行動指標から考えられる処理過程 82
6.2.4.2 生成初期に想定される処理過程 83
6.2.4.3 プローブ位置による初期成分の変動 85
6.3 まとめと今後の課題 88
第 7 章 心的イメージ走査の処理過程（実験 3） 90
7.1 目的 90
7.2 方法 91
7.2.1 参加者 91
7.2.2 刺激 91
7.2.3 手続き 91
7.2.4 記録と分析 92
7.3 結果 93
7.3.1 行動指標 93
7.3.2 ERP 93
7.4 考察 99
7.4.1 行動指標から考えられる走査の処理過程 99
7.4.2 走査を反映する初期成分の変動 99

第 8 章 心的イメージの生成・維持の処理過程（実験 4）..... 102
8.1 目的..... 102
8.2 方法..... 103
8.2.1 参加者..... 103
8.2.2 刺激..... 103
8.2.3 手続き..... 103
8.2.3.1 VSTM 条件..... 103
8.2.3.2 IMG 条件..... 103
8.2.4 記録と分析..... 104
8.3 結果..... 106
8.3.1 行動指標..... 106
8.3.2 ERP..... 107
8.3.2.1 初期成分..... 107
8.3.2.2 主成分分析..... 112
8.3.2.3 SPCN..... 122
8.4 考察..... 126
8.4.1 行動指標から考えられる維持の処理過程..... 126
8.4.2 生成による初期成分の変動..... 127
8.4.3 イメージと視覚的短期記憶に共通の保持機構..... 129
第 III 部 総合考察..... 131
第 9 章 実験的検討の結果..... 132
9.1 実験的検討のまとめ..... 132

9.2 イメージ機能による ERP 変動 133
9.3 文字イメージ課題中の脳活動 137
第 10 章 心的イメージの脳内メカニズム 141
10.1 心的イメージモデルとの対応づけ 141
10.2 本研究の意義と位置づけ 143
第 11 章 人間の認知における心的イメージの位置づけ 145
11.1 視覚認知との関わり 145
11.2 視覚的注意との関わり 146
11.3 視覚的短期記憶との関わり 146
11.4 心的イメージの性質と役割 148
第 12 章 今後の展望 150
第 13 章 要約および結論 152
引用文献 156
付録 A (実験 1 のデータ表) 162
付録 B (実験 2 のデータ表) 169
付録 C (実験 3 のデータ表) 175
付録 D (実験 4 のデータ表) 176

第I部　序　論

第1章　心的イメージとは

1.1 心的イメージ現象とその定義

「イメージ」という言葉は日常生活でよく用いられる．例えば人に言われたことが理解しきれないとき，「うまくイメージできない」といった表現を用いることがあるし，他人に対する印象を「イメージ」と表現することもある．本研究ではこうした日常生活で使われる「イメージ」の根底にあると考えられる，人間の基礎的な機能としての「心的イメージ (Mental imagery)」について検討する．例えば，新しい洋服を買うときには，現在家のタンスにある手持ちの服を頭の中に思い浮かべ，それに合う色や形のものかどうかを判断する．あるいは，知らない店について他人に道順を説明するとき，「大通りを北に向かって進み，スーパーマーケットの次の角を右に曲がってすぐにある茶色いビルの向かい」などと伝える．このとき，話し手の側も聞き手の側も頭の中に実際に道を進んでいるかのように映像を再現するであろう．本研究では，このように，記憶をもとにして再現される，類知覚的体験としての心的イメージについて扱う．

心的イメージには知覚や運動に対応したモダリティがある．例えば，前述のように，道順を他人に伝えるような場合には視覚イメージが用いられる．何度も聞いた歌は心の中で再生することが可能であり，これは聴覚イメージと考えられる．運動をするときには事前に身体感覚や筋肉の動かし方をシミュレーションすることがあるが，そのようなイメージは運動イメージと呼ばれる．このような知覚・運動イメージの中でもとりわけ使用頻度が高いものとして，視覚モダリティにおけるイメージがある．これは，我々の知覚の中で視覚が最もよく使われることと対応しているかもしれない．本研究ではこの視覚モダリティにおけるイメージを扱う．

心的イメージは，一般的には，実際の刺激入力の無い状態での類知覚的体験として定義される（Kosslyn, Thompson, & Ganis, 2006；リチャードソン, 1973）．しかし，この定義は幅広い事象を含み，残像などの知覚や，記憶との区別が明確でないという問題がある．聴覚イメージの定義に関しては，菱谷（2001)が「短期記憶痕跡あるいは長期記憶の情報に基づいて，聴覚体験時の符号化フォーマットを保存するように心的に再現，（再)構成，創造された類知覚的体験」としている．この定義は聴覚ということばを視覚に置き換えれば，視覚イメージの定義として用いることができる（菱谷, 2001）．この定義は，各モダリティのイメージに特徴的な機能や性質については言及していない．しかし，知覚および記憶との区分が明確であるという点から，本研究ではこの定義を採用して議論を進める．

1.2 心的イメージの性質

心的イメージは，主観的には類知覚的な体験として感じられる．しかし，それが本質的に知覚と同様の性質を持つのかについては，心理学前史から現代に至るまで，多くの議論が行われてきた（Denis, 1989；北村, 1982）．特に，1970年代には，認知心理学的な観点から，イメージの性質と機能について追求しようという流れが生まれた．この流れはイメージ論争と呼ばれ，その後のイメージ研究に大きな影響を及ぼした（Bartolomeo, 2008; Kosslyn, 1994; Mellet, Petit, Mazoyer, Denis, & Tzourio, 1998; Pylyshyn, 2003; Tye, 2003）.

イメージ論争の論点は，イメージという体験の根底にある，表象の性質についてである．イメージで用いられる表象が，言語そのものではないが言語に類似的な性質をもち，統語論的に処理されるという立場を命題派と呼ぶ．この考え方によれば，イメージは主観的には知覚に類似しているが，その基盤にある表象や処理過程などは，言語や推論といった他の認知過程となんら違いはないということになる．つまり，命題派の主張は，イメージ現

象そのものは否定しないが，それを実現している内的な表象は「思考の言語」とよばれるような命題的な形式をとっているはずだという主張である．

これに対して，内的な表象として命題的なものがあることを否定はしないが，イメージに関しては知覚的・絵画的な別の表象が用いられているという考えがイメージ派の主張である．その根拠として，行動指標を用いた多くの実験的検討が行われた．代表的なものとして，Shepard & Metzler (1971)によって発見された心的回転があげられる．参加者に，異なる傾きを持った二つの図形の異同判断を行わせた場合，図形間の傾きの差が大きいほど判断に要する時間が長くなる．つまり，実際に目の前にある図形を回転させて異同判断を行う場合と同様に，心の中にある図形を回転させていると考えられるというのがイメージ派の解釈である．しかし，Anderson (1978)は，図形の辺の長さや傾きを命題の形で計算したとしても，このような結果が説明可能であることを示した．一方，Kosslyn (1973)は，心の中に思い浮かべた絵のある部分から別の部分へと注意を向けるときに，距離に比例して反応時間が変化することを発見した．例えば，船の舳先から帆に注意を向ける場合，舳先と船尾の間よりも反応時間は短縮する．この結果は心の中にある表象に，空間的な距離が存在していると解釈できる．しかし，この解釈に対しても，命題派は，空間的距離ではなく注意を向ける物体間にある属性の数が影響していると反論した．この反論については距離と属性の両方を操作することで，距離が反応時間の規定因であることが再び示されている (Kosslyn, Ball, & Reiser, 1978)．しかし，命題による記述のリストに物体間の距離についての数値があるとすれば，この結果も命題表象によって説明できてしまうため，決定的な証拠にはならなかった (Kosslyn & Pomerantz, 1977).

以上のように，イメージ派が行った実験は，イメージ課題の遂行成績が，知覚の場合と比較して同様の反応パターンを持つことを示した．しかし，イメージと知覚の類似性を示したそれらの研究は，命題派の主張を退けるには至らなかった．Anderson (1978)は，一つ

の実験的事実を説明するためにはある種類の表象とプロセスが必要であり，同じ結果を説明するために他の種類の表象を用いたとしても，プロセスを変更することで対応可能であると指摘した．つまり，表象それ自体を抽出できない以上，一つの現象を説明するときに，どのような表象を用いて説明することも可能であるということである．したがって，行動指標のみを用いた実験によっては，表象の性質についての議論は決着することがない．

そこで，近年用いられるようになったのが，生理指標，特に脳機能の計測を用いた研究である．脳の機能として，イメージ中に知覚時と同様の活動が観察されれば，命題ではなく知覚表象が用いられていることが証明できると考えられる．結果として，心的視覚イメージ中には，閉眼状態であっても視覚野の活動が観察されることが，複数の研究から明らかになった（Chen et al., 1998; Ganis, Thompson, & Kosslyn, 2004; Kosslyn et al., 1993; Kosslyn et al., 1999; Kosslyn, Thompson, & Kim, 1996; Kosslyn & Thompson, 2003; Kosslyn, Thompson, & Alpert, 1997; Roland & Gulyás, 1994; Thompson, Kosslyn, Sukel, & Alpert, 2001）．さらに，その中のいくつかにおいては，一次視覚野の活動が認められた(Chen et al., 1998; Kosslyn et al., 1999; Kosslyn et al., 1996; Kosslyn & Thompson, 2003; Thompson et al., 2001）．一次視覚野は，知覚時に入力された視覚情報が網膜局在的に表現されることで知られる部位である．つまり，人間の網膜に入力された視覚情報が，外界に対応して地図のように神経細胞の活動を決定する．したがって，イメージ中の一次視覚野の活動は，知覚的表象を用いていることの証拠となると考えられた．

これらの認知神経科学的知見に対して，Pylyshyn (2003)は，視覚イメージが視覚野を活動させるという事実は，イメージの複雑な処理過程を解明するための重要な発見であるということは認めつつも，これまでの行動指標を用いたイメージ研究の結果を説明しきれないと指摘した．たとえば，大きな物体をイメージしてその中の一部に注目するとき（象の鼻など)と，小さな物体の一部（アリの触角など)に注目するときを比較すると，大きなものを

イメージしたときの方が反応時間は短縮する（Kosslyn, 1975）．一方で，最近の脳画像研究によると，実際に見たものの大きさに対するのと同様に，大きなイメージを生成したときは一次視覚野の前方が活動し，小さなイメージの時には後方が活動する（Kosslyn et al., 1993）．このような脳画像研究による知見は，なぜ大きなイメージから特徴を抽出するときの方が反応時間が短縮するのか，については説明しない．イメージが脳の「どこ」で行われているのか，というよりも，「どのように」行われているのかについて明らかにすることが必要である（Pylyshyn, 2003）．すなわち，行動指標によって得られる結果を実現する処理過程について説明することが必要ということである．特に，イメージの知覚的性質を担うと考えられる視覚野が，課題に関連した処理過程のどの段階で関与するのか，また，複数の段階において関与する可能性はあるのかという問題が，イメージの性質を解明するために重要と考えられる．

1.3 心的イメージの認知心理学的位置づけ

心的イメージが「どのように」生起するのかについて考える上では，イメージそのものだけでなく，関連する領域についても考慮する必要がある．心的イメージは，記憶や知覚，注意など，複数の認知機能と関わりを持つ複雑な現象と考えられる．

中でも，心的イメージとの関わりが最も強い機能として，記憶があげられる．特に，直前に見た視覚表象を一定期間維持する機能である，視覚的短期記憶との区分は明確でない．そのため，最近では，視覚的短期記憶や視覚的ワーキングメモリと，心的イメージとの異同について，複数の立場からの検討が行われている（Borst, Ganis, Thompson, & Kosslyn, 2012; Borst, Niven, & Logie, 2012; Ganis, Thompson, & Kosslyn, 2009; Logie & Van Der Meulen, 2009）．しかし，心的イメージに特異的な点として，直前の知覚表象を維持するだけでなく，何らかの合図を元に表象を再構築するという機能がある．例えば，我々は「ス

ヌーピーの耳の形はどんな形か」といったような質問に対して，直前にスヌーピーを見ていなくとも，記憶をもとに頭の中に映像を思い浮かべることが可能である．更に，「空を飛ぶ，翼がついた犬」といったように，見たことがないものであっても，鳥の羽と犬の記憶を元に想像することが可能である．つまり，短期記憶との類似性の点からだけでなく，表象を形成するための情報を長期記憶に依拠している点でも記憶分野との関わりは深い．

また，再構築された表象としてのイメージに関しては，知覚との関連性が強い．イメージ表象が，主観的に感じられる通りに，知覚的な性質を持つか否かについて，これまでに多くの議論が行われてきた（Kosslyn, 1994; Pylyshyn, 2003）．その延長として，最近では神経生理学の立場から，心的イメージ過程には知覚システムが重要な役割を果たすという知見が多く提出されている（Cattaneo, Bona, & Silvanto, 2012; Ganis et al., 2004; Kosslyn et al., 1999; Roland & Gulyás, 1994）．したがって，知覚の分野での蓄積した心理生理学的・解剖学的知見は，心的イメージ表象の性質について考える上で重要なてがかりである．一方で，知覚研究の立場からも，心的イメージについての知見は情報源となり得る．例えば，物体を知覚する際には，単なる感覚とは異なり，記憶情報に基づいてその物体が何であるか，見たことがあるかなどの判断が行われると考えられる．心的イメージは，記憶情報を知覚的な表象として再構築する過程であると捉えることができるため，知覚的な記憶表象の利用によって行われる知覚，再認のメカニズムの一部を明らかにできる可能性がある．

心的イメージは，これらの複数の認知機能と関わりを持つ複雑な現象であり，それを考慮した認知心理学的モデルを採用することで，本研究における考察を有効に進めることができると考えられる．次章では，心的イメージの認知心理学的モデルについて述べる．

第2章　心的イメージのモデル

2.1 心的イメージの 3 つのモデル

現在のところ，提案されている心的イメージのモデルは3つある．一つは視知覚とイメージ現象を包括的に説明しようとするKosslyn (1994; 2006)の計算論的モデルである．このモデルはイメージ派の流れを汲むもので，depictive theory，あるいはquasi-pictorial theoryと呼ばれる（Kosslyn 2006）．脳科学による最近の知見を前提として，コンピュータによるシミュレーションが行われるまでに精緻化されており，最も広く知られている．本研究においても，このモデルをベースに実証的研究を行うため，次節でより詳しく述べる．

もう一つは命題派の中心的存在であるPylyshyn（2002)が主張するモデルであり，Propositional theory，またはDescriptive theoryと呼ばれる．このモデルは，イメージ表象が命題的な性質を持つことを前提として，イメージ論争におけるイメージ派の見解や実験結果の解釈などを否定することに重点をおいており，それ自体でイメージ現象を説明するという段階には至っていない．

最後に，まだ一般的ではないが最近提案されるようになってきたモデルとして，Perceptual activity theoryがある（Thomas, 1999）．このモデルはロボット工学の視点から考案されたモデルであり，前述の二つとは根本的に考え方を異にする．最も大きな違いは，知覚・イメージの両方に関して，内的な表象自体を仮定しないことである．このモデルによれば，環境を探索し明らかにする能動的な視覚活動の予期的スキーマが視覚過程であり，そのスキーマが外的刺激に対してではなく生起する場合に心的イメージが経験されるという．このような視点から心的イメージを考える立場は非常に興味深いものではあるが，現

時点では具体的な理論として確立しているとは言い難い．最近，このようなタイプの理論をより具体的にしようという試みもなされているが，いずれは表象を仮定しなければ成り立たないだろうという批判もある（Kosslyn et al., 2006).

これらの諸理論を踏まえた上で，本研究では，最も詳細な実験的検討が行われているKosslynのモデルをベースとして実験的検討およびその解釈を行っていくこととする．

2.2 Kosslynの計算論的モデル

Kosslyn (1994; 2006)が提案した計算論的モデルは，イメージ論争の結論として提出されたものである．したがって，基本的にはイメージ論争におけるイメージ派の論理を踏襲し，知覚との類似性を強調している点が特徴的である．さらに，単に知覚と類似しているということだけでなく，まずは視知覚を説明するための基本的なモデルを構築した上で，それが最終的には心的視覚イメージをも説明するように構成されている．したがって，視知覚に関する生理学的知見，脳の各部位がどのように連絡しているかという解剖学的知見，脳画像法によって得られた認知活動の局在などを基礎として，低次から高次までの視覚認知機能の説明がなされている．

このモデルのもう一つの特徴的な点として，計算論的な立場から作られたモデルであるということがあげられる．イメージの機能を実現するサブシステムは，脳の各部位に対応づけられ，シミュレーションと実際の脳機能計測によってその妥当性がある程度確かめられている（Kosslyn et al., 2006）．心的イメージ活動を実現するために必要と考えられる機能は「生成（Generation)」，「内査（Inspection)」，「維持（Maintenance)」，「変換(Transformation)」の４つに分類されている．生成は，長期記憶に蓄えられた情報を読み出して再構成する機能である．内査は，生成されたイメージ表象の部分や特徴を検出したり，

空間関係を符号化する．維持は，一度生成したイメージ表象を保持する．変換は，一度生成した表象を回転させたり，一部を変形させる．現実にイメージ課題を行うときの心的活動は，これらの機能を実現するサブシステムの組み合わせによって説明される．

2.2.1 モデルを構成するサブシステム

このモデルはいくつものサブシステムから構成され，そのサブシステムがさらに細分化されることで様々な視覚認知・イメージ現象の説明を可能にしている．本研究では「プロトタイプ」と呼ばれる段階のモデルを用いて，イメージが「どのように」実現されているかについての検討を行う．Figure 2-1にこのプロトタイプモデルを示す．

このモデルの中で最も重要な役割を果たすのが「視覚バッファ（Visual Buffer)」と呼ばれるサブシステムである．このサブシステムは，後頭葉の網膜局在的に構成された視覚野に位置づけられる．視覚認知の際には網膜から入力された情報を，また，イメージ中には記憶から引き出した情報を描写するために用いられる．この「視覚バッファ」内には，ある一定の領域を優先的に処理するため，「注意の窓（Attention Window)」が設定されている．これは，一般的に例えられる，注意のスポットライトのはたらきと同様のものである．

この「注意の窓」をシフトするのが，「注意シフト（Attention Shifting)」である．対応する脳領域としては，前頭眼野（8野)，後部頭頂葉（とりわけ7a野)，視床枕，上丘などが想定されており，新しい位置や対象へ注意の焦点を転換する処理を行う．また，注意の転換に伴う眼球や頭，身体の動きのシフトに関わる．

「視覚バッファ」，つまり網膜局在的な視覚野からは，空間および物体を処理する視覚野への神経連絡があることが知られている．空間特性を処理する背側の処理経路は「空間特性処理（Spatial-Properties-Processing)」，物体特性を処理する腹側の処理経路は「対象

特性処理（Object-Properties-Processing)」と名付けられている．視覚入力を受ける場合，「視覚バッファ」の情報がこの二つの経路に渡され，それぞれに処理が進められる．最終的には，各経路の情報は統合され，「連合記憶（Associative Memories)」に蓄積される．一方で，記憶情報を必要とするような視覚認知の場合には，「連合記憶」から引き出した情報が「情報短絡」 を経由して「対象特性処理」に入力され，網膜側からの入力情報とのマッチングが行われる．イメージ中には，同様の情報がこの経路を経由して「視覚バッファ」へと入力される．

「連合記憶」では，これらの経路からの出力を対象・場面構造の命題的記述として蓄える．一般的な短期記憶と長期記憶はどちらもこのサブシステムに含まれ，前頭前野背外側部やウェルニッケ野，角回，側頭葉前部など，古典的な連合野を含む多くの領域が対応する．

背外側前頭前野に位置する「情報短絡（Information Shunting)」は，「連合記憶」に蓄えられている物体の情報や特徴，位置などの記憶情報をもとに，注意をどこの位置に向けるべきかという情報を「注意シフト」に送る．また，物体認知の際のトップダウン処理において，「連合記憶」に蓄えられている情報を「対象特性処理」に出力する．「対象特性処理」はこの情報をもとに，実際の入力とのマッチングを行う．

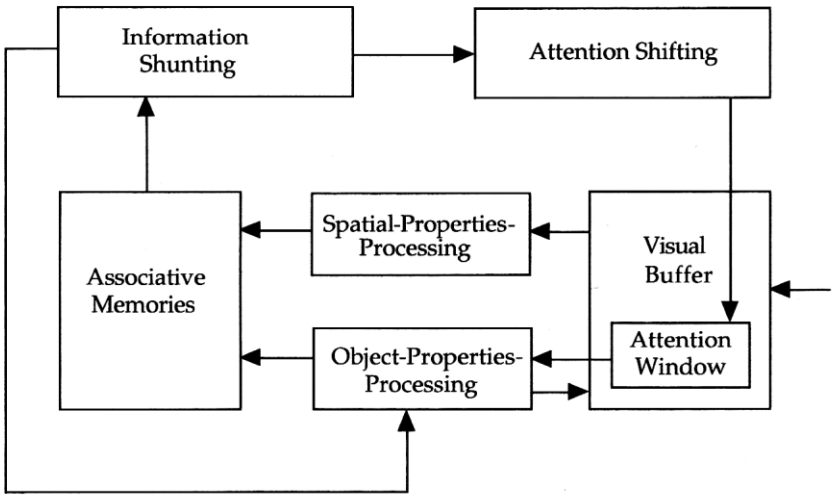


Figure 2-1 Computational model of the mental imagery (Kosslyn, 2006).

2.2.2 イメージの機能

イメージ活動を実現する機能は「生成」，「内査」，「維持」，「変換」の４つに分類される．この分類は，イメージを模したコンピュータシミュレーションを構築する過程で同定され (Kosslyn 1980, 1994)，その後，イメージが障害された脳損傷例 (Farah, 1984) や神経画像研究 (Kosslyn, 1994など)によって裏付けられたものである．

「生成」は，長期記憶に蓄えられた情報を読み出して再構成する機能である．この機能は，課題遂行に必要とされる表象がどのような種類であるかによって，異なったはたらきをする．例えば，自転車のサドルの形状について質問された場合，自転車の全体像の中から，サドルのみに注意を向け，その形について可能な限り詳細な表象を形成する必要がある．モデルによる説明では，このような物体イメージを生成する際には，「連合記憶」に蓄えられた命題的な記憶情報の中から必要なものを「情報短絡」が読み出し，特徴的な部分の位置情報を「注意シフト」に送る．それによって，「注意の窓」が「視覚バッファ」内の適切な位置に配置される．同時に，「対象特性処理」に物体の索引情報が伝えられ，そこに蓄えられた形や色についての情報が「視覚バッファ」に描写される．自転車のように，複数の部分によって構成される物体の場合には，この手続きを何度も繰り返すことで知覚的表象の全体が形成される．一方で，道順について言語的に説明されるような場合，特徴的な建物や道筋の空間的位置関係について，大まかな表象のみを形成すればよく，建物の具体的な形状や道の曲がり具合などの詳細な情報は必要としない．このような空間イメージのみが必要とされる場合には，「連合記憶」から「情報短絡」が引き出した物体の位置情報に基づき，「空間特性処理」内において，空間的表象が形成される．

「内査」は，生成されたイメージ表象の部分や特徴を検出したり，空間関係を符号化することで，イメージを解釈する機能である．例えば，猫の耳がどんな形かを問われたとき，猫の頭全体をイメージし，その中で耳の形について精査するような場合にはたらく．このような物体イメージの場合，モデル上では，「視覚バッファ」に形成された表象の部分や特徴を，「注意の窓」をシフトさせることで検索する．また，空間イメージに関しては，「空間特性処理」において，知覚の時に行われているのと同様に空間関係が符号化される．例えば，言語情報によって地図を思い浮かべ，A地点からB地点までの道筋について考える場合，最初に思い浮かべた道筋とは異なる経路を地図の中で見いだすことができる．つまり，実際に地図を見ているときと同様に，空間イメージを新たに解釈し直すことが可能である．このような「内査」の機能は，課題遂行時には「生成」と対になってはたらくことが多く，両者をはっきりと区別することは難しい．

「維持」機能は，一度生成したイメージ表象を保持する機能である．視知覚においては，眼球運動に伴って新たに入力される情報を処理するため，一度視覚野に描写された表象が保持される時間はごくわずかである．それと同様に，生成されたイメージ表象も，視覚野内で長期間維持されることはできない．したがって，モデル上では，維持機能は「視覚バッファ」において表象を再活性化し続けることと定義される．

イメージの「変換」は，一度生成した表象を回転させたり，一部を変形させる機能のことである．この機能は「対象特性処理」が「視覚バッファ」内の表象を調整することで実行される．「変換」機能は，イメージそれ自体と言うよりも，イメージを操作する上で必要となる機能である．本研究では，イメージそれ自体の基礎的な機能について扱うため，変換については扱わなかった．

以上のように，イメージを実現する諸機能は，脳部位に関連づけられた各サブシステムをどのように働かせるかについても，具体的に想定されている．しかし，各機能と脳領域との対応が完全に実証されているわけではない．Kosslyn (2004)では，課題を工夫することで，生成と内査に関わる脳領域を特定しようとした．生成課題では，サークル内に視覚呈示された数字とイメージした文字を合成した形の特徴について判断を求めた．内査課題では，イメージした文字について，サークル内での位置関係についての判断を求めた．回帰分析によって，複数の異なる脳部位の活動が各課題の行動成績を予測することが示された．また，生成と内査に共通して賦活する部位として，前頭葉と視床が報告された．しかし，Kosslyn (2004)では両課題でイメージ生成が行われていたため，生成と内査を完全に分離できていたとは言い難い．

各機能と脳領域の対応だけでなく，これらの機能がどのようなタイミングで実行されるのかについても，実証的な証拠は乏しい．機能間での実行タイミングの違い，および各機能の課題開始後の実行潜時を検証することは，「どのように」イメージ課題が実行されるのかについて明らかにすることにつながる．また，モデル上では，生成・内査・維持の各機能が，視覚に関連する脳領域に相当するサブシステムを駆動するとされているが，全ての機能が視覚野の活動を変動させるのかについても実証はされていない．視覚野の活動は視覚モダリティにおけるイメージの知覚的性質との関連が深く，どの機能が視覚野の活動をいつ変動させるのかについての検討を行うことが必要とされる．したがって，Kosslynの理論の妥当性を確認するためには，各機能を分離できる課題と指標を採用する必要がある．

第3章　心的イメージの諸機能に関する先行研究

3.1 文字イメージ課題

文字イメージ課題は，複数の先行研究で採用され，その処理過程が最も明らかになっている課題の一つである．この課題はPodgorny & Shepard (1978)によって最初に開発された．参加者は，格子状の枠内にアルファベットの大文字をイメージし，枠内のマス目の1つ，あるいは3つにつけられたドットが，イメージした文字と重なるかどうかを判断した．Podgorny & Shepard は，大文字をイメージした時と，枠内に大文字が表示されている知覚時とを比較し，文字を構成するマスの数が多い場合には反応時間が延長するというパターンが類似していたことから，イメージと知覚との同型性を主張した．また，文字上にプローブがある場合は，文字を構成する線分の交点において，反応時間が短縮したことから，線分単位で表象が形成されていることを示唆した．

Kosslyn (1988)は，この課題を改変して，線分 (セグメント)単位の生成が，系列的か並列的なのかについて検討した．2カ所のXマークプローブが遠く離れたセグメントにある場合には，近い場合よりも反応時間が延長したことから，セグメントごとに系列的に文字イメージが生成されることが明らかになった．また，文字の複雑さ，つまりセグメントの数が反応時間を延長させることが再び示された．大文字がすでに表示されている知覚条件では，その効果は見られなかった．また，生成完了の報告後に呈示したプローブ刺激に対しては，複雑さの効果は減少した．したがって，複雑さの効果は，主に生成過程によるものであることが明らかとなった．また，実験2では，文字イメージ条件のほかに，意図的にイ

メージした文字上を走査させるスキャン条件と，眼球運動を禁じて走査を抑制した固視条件を比較した．2つのプローブが離れたセグメント上にある場合には，近接したセグメントにある場合よりも，全条件で反応時間が延長した．しかし，プローブが近接したセグメント上にある場合に，それぞれのセグメントにあるプローブ間の距離が近い場合と遠い場合を比較すると，スキャン条件でのみ，距離の効果が観察された．プローブ間の距離とは，各セグメント内に位置するプローブの間に，いくつマス目があるかということである．これらの結果から，セグメント間の距離の効果は，主に生成過程によるものであり，セグメント内での距離の効果は走査によるものであると解釈された．さらに，実験3では，無意味図形のセグメントを記憶する順序を操作することによって，記憶した順に系列的に生成が行われることが示された．

これらの結果から，文字イメージ課題における複雑さによる反応時間の変動は，イメージ全体の生成過程を反映することが示された．また，プローブ位置による反応時間の変動は，セグメント単位の生成過程，および走査過程を反映するといえる．このような，複雑さとプローブ位置による反応時間の変動は，参加者がイメージを用いて課題を行っていたことの証拠として用いることができる．

さらに，文字の複雑さとプローブ位置による操作が，異なるプロセスを駆動させているという証拠がある．Emmorey (1996)は，ASL (American Sign Language)を用いる手話話者では，複雑さによる反応時間の延長は見られないが，プローブ位置の効果は非話者と同等に見られることを報告した．ASLは視覚を用いた言語形式であるため，日常的にそれを用いる手話話者は，視覚的な形態の想起に優れていると考えられる．したがって，複雑さの効果は長期記憶内での形態の活性化を反映し，プローブ位置の効果はセグメントを視覚化して系列的に構成する過程を反映すると解釈された．この解釈を支持する証拠として，高齢者は若年者よりも複雑さによる反応時間の延長が観察されたが，プローブ位置の効果

には大きな違いが見られず，複雑さとプローブ位置の効果に乖離が見られたという報告がある（Dror & Kosslyn, 1994b）．加齢による機能の低下が，あるプロセスに限局的に起こるとすれば，複雑さとプローブ位置の効果は，異なるプロセスを反映するものといえるだろう．

3.2 文字イメージ課題中の脳活動

文字イメージ課題は，参加者がイメージを用いて課題を行っていることを保証することから，イメージ中の脳活動について検討する際にも用いられてきた．この課題を用いて検討されたイメージ中の脳活動については，視覚野の活動に関するものと，左右半球間の機能分化に関するものがある．

視覚野の活動に関するものとして，Kosslyn (1993)は文字イメージ課題中の脳活動をPET (Positron emission tomography)を用いて測定した．実験1において，イメージ群では，4 x 5のマス目とその下に小文字が同時呈示され，プローブの消失に対してボタン押しを行うベースラインを引き算することで，イメージ中の脳活動を算出した．一方，知覚群では，マス目上にあらかじめ大文字が描かれており，イメージ条件と同様のベースラインを引き算した．刺激は参加者が反応を完了するまで呈示した．結果として，楔部や17野を含む多くの領野で，知覚群よりもイメージ群で活動が増強することが示されたが，予測に反して記憶に関連する領野は活動しなかった．実験2では，小文字を200 ms呈示した後，マス目の呈示時間を300 msに短縮して呈示し，同様の分析を行った．このような状況では，イメージ条件で，17野に加えて左右の側頭回，左下部側頭回，19野といった，視覚的記憶に関わる領野も活動することが示された．刺激呈示時間の短縮によって，呈示されているマス目をてがかりにすることが不可能になったため，記憶を頼りに課題を遂行したと考えられる．したがって，彼らは，実験1では空間的注意をベースにしたイメージ，実験2では視覚的記

憶をベースにしたイメージが用いられたと解釈した．Kosslyn (1997)では，同様にPETを用いて，イメージ中と高次知覚課題中の脳活動を比較した．イメージ課題はKosslyn（1993）の実験2と同様であり，高次知覚課題では，日常的な事物の絵を見なれない角度で呈示した際の，単語との正誤判断を行わせた．高次知覚課題は再認課題であるが，視覚的記憶を想起する必要がある．結果として，イメージと知覚で活動部位の大きな重複が見られたことから，高次の視覚認知とイメージでの処理の共有が示された．文字イメージ課題を行う際に，記憶を元にした描画的（depictive)イメージが生成された証拠といえる．

イメージの左右半球間の差については，Kosslyn (1995)が，同様の文字イメージ課題を用いて検討した．視空間的処理については，2種類の空間関係処理の存在が提案されている(Kosslyn, 1987)．Categorical空間関係は左，上，右といったような，部位間の相対的な位置関係を表す空間処理であり，左半球処理が想定される．一方，Coordinate空間関係は，運動をガイドするような，正確な距離としての空間処理であり，右半球処理が想定される．イメージを生成する際に用いる空間関係によって，実際に左右差が観察されるかどうか，左右視野への瞬間呈示法を用いて検討した．実験1では，マトリックス上に言語による指示で図形をイメージし，学習した．したがって，「一番上の行に左端から右端までの線分，その右端に下に向かって2マス分の線分」などといった，Categorical空間関係を用いて図形の学習が行われた．テスト刺激では，4つの鉤括弧（bracket)に囲まれた正方形のスペース内の一カ所に×印を呈示し，イメージした文字と重なるかどうかについて判断した．実験2では，学習時にも鉤括弧で指定したスペースにセグメントを継時的に視覚呈示し，それをつなぎ合わせることで文字を学習した．マス目が呈示されていないため，Coordinate空間関係を用いて学習が行われた．テスト刺激は実験1と同じであった．結果として，実験1では右視野にテスト刺激を呈示した場合に，実験2では左視野に呈示した場合に誤答率が低下した．したがって，Categorical空間関係処理が左半球優位，Coordinate空間関係が右半球

優位で処理されていることが示された．しかし，その後の実験3から7までの検討によって，Coordinate空間関係による右半球優位は繰り返し観察されたものの，Categorical空間関係による左半球優位は有意差に届かず，観察されにくいことも示された．また，Kosslyn (2005)では，実験1，2と同様の課題中の脳活動を，PETを用いて測定したが，空間関係による半球の左右差は，視覚野ではなく前頭・頭頂においてわずかに観察された．したがって，テスト刺激がマス目であるか，空白のスペースであるかということによる空間関係処理の影響は，後頭部位の左右半球差としては観察されないと考えられる．

3.3 文字イメージ課題中に想定される処理

これらの知見から，文字イメージ課題が描写的な表象を用いて行う課題であることは明らかである．イメージの区分としては，Farah (1988)が，空間イメージと視覚イメージの区分を提案している．空間イメージは背側の視覚経路を用いて行われるイメージであり，視覚イメージは腹側の視覚経路を用いたイメージである．この区分は，先に述べた，Kosslyn (1993)の空間的注意ベース，物体ベースという区分とほぼ一致する．本研究では，Kosslynの定義に従い，それぞれ空間イメージ，物体イメージと呼ぶことにする．文字イメージ課題がどちらのイメージを用いて行われているかについて，明示的に示されてはいないが，Podgorny & Shepard (1978)，およびKosslyn (1988)では，セグメントごとの生成が示されている．これは，物体として表象することを意味することから，単に空間的なイメージのみによって課題が行われていたわけではないことを示す．しかし，Kosslyn (1993)においては，刺激の呈示方法によって，記憶関連領野が働くかどうかが決まることが示されている．したがって，この課題自体は，空間的注意をベースとしたイメージと，物体をベースとしたイメージの両方を用いていると考えられる．ただし，後のKosslyn (2003)では，一次視覚野の活動が観察された研究と，されない研究をメタ分析した結果，空間イメージのみでは

一次視覚野の活動が観察されないことが示されている．一次視覚野の活動は，視角1°以内の詳細な判断を必要とされる，物体イメージでのみ観察される．従って，理論上は，文字イメージ課題は物体イメージと考えることができる．ただし，同様に理論上では，物体イメージを生成する際には必ず空間イメージも必要とされるため，空間イメージを用いていないということではない．心的視覚イメージという語は，広義には視覚モダリティにおける心的イメージを指す．また，狭義には，色や詳細な形などの視覚的特性を持つイメージという意味を持つ．本研究では，そのどちらの意味においても，文字イメージ課題で用いられるイメージを心的視覚イメージとして扱う．

さらに，文字イメージ課題中に想定される処理については，以下のことが言える．第一に，テスト刺激を短時間で呈示した場合には，記憶をベースとした描画的イメージが生成される．また，その際の生成はセグメントごとに系列的に行われる．第二に，生成する文字，または図形の複雑さによる行動指標への効果は，生成過程を反映する．中でも，記憶内での表象の活性化を示す可能性が高い．また，プローブの位置の効果は部分を配置するという生成機能の一部，あるいは走査距離を反映する．第三に，位置関係の学習において用いられる空間関係によって，左右差が観察される可能性があるが，視覚野に影響する可能性は低い．特に，「視覚バッファ」に相当するような初期視覚野の活動を惹起する要因としては，視角1°程度の高解像度の細部の判断が含まれること，空間的でないイメージであること，手法の感度などの要因が大きく影響し，空間関係の種類については決定的な要因とはならない（Kosslyn & Thompson, 2003）.

以上のことから，イメージ生成，内査，維持の各機能について検討する上で，文字イメージ課題を用いることが適切と考える．生成については，複雑さの効果，および生成中のプローブ位置の効果をてがかりにすることができる．また，走査は内査機能の一部であるため，内査に関しては，プローブ位置の効果をてがかりにすることが可能である．各機能

が，時間的に近接して働く際の脳活動については，時間分解能の高い指標を用いて検討することが望ましい．

第4章　心的イメージと事象関連脳電位

4.1 事象関連脳電位

事象関連脳電位（ERP; Event-related brain potential)は，光・音などの刺激や，運動などの事象に対応して生じる脳の電気活動である．ERPは，なんらかの事象を基準として，脳波（Electroencephalogram)を加算平均処理することによって得られる．最大の長所として，高い時間分解能を持ち，ミリ秒単位で時系列的に脳活動を分析できることがあげられる．また，これまでに蓄積された知見が多く，時間帯・頭皮上分布などをてがかりに，どのような心的過程がはたらいているかについて分析することが可能である．

ERPは通常，いくつかの波から構成される波形として記録される．波形の振幅や潜時，頭皮上分布が条件に伴ってどのように変動するかを分析することで，事象に関連して生起した心理過程について推測する．波形は，複数の成分が時間的・空間的に重畳したものとして考えられる．成分は，操作的には潜時，頭皮上分布，実験操作への応答性から定義される（入戸野, 2005）．本研究では，これまでに同定が進んでいる，いくつかの成分に着目することで，イメージ課題中の心理過程について検討を行う．

4.2 事象関連脳電位を用いた心的イメージ研究

4.2.1 イメージ課題中のERP

ERPを用いた心的イメージに関わる研究は，大まかにいくつかのタイプに分類できる．図形の形状などのイメージ生成課題を用いた研究（Farah, Peronnet, Gonon, & Giard,

1988; Page, Duhamel, & Crognale, 2011; Qiu, Li, Liu, & Zhang, 2007; Yamamoto & Mukai, 1998)，具象語と抽象語のような言語に関わる研究（Farah & Weisberg, 1989; Huang, Lee, & Federmeier, 2010; Koenig, Kochi, & Lehmann, 1998; Shimoyama, Nakajima, Ito, & Shibata, 1997; West & Holcomb, 2000)，心的回転関連の研究（Heil, 2002; Muthukumaraswamy, Johnson, & Hamm, 2003; A. A. Wijers, Otten, Feenstra, Mulder, & Mulder, 1989)，視覚的ワーキングメモリとして位置づけられた研究（Griffin & Nobre, 2003)である. このうち, 心的回転は, 直接に知覚した刺激に対する判断であるため, 他のイメージ課題とは質が異なるという指摘がある（Kosslyn et al., 2006)．また，前述のイメージの4つの機能の内の一つである「変換」機能，あるいは運動関連処理を用いるとされる（Heil, 2002).

言語に関わる研究については，ただ単に単語に対する判断を行わせるものと（Huang et al., 2010; Koenig et al., 1998; Shimoyama et al., 1997)，単語を呈示してイメージ生成を教示するものが存在する．言語呈示によるイメージ生成の代表的な研究として，Farah et al. (1989)では，イメージ開始からのERPを測定し，イメージ生成そのものに伴う脳活動を測定した．その結果として，具象物をイメージした際には，イメージしていない場合よりも，250 ms以降に惹起し，800 ms付近で最大振幅に達する緩徐な陽性電位が増強することが報告された．さらに，この陽性電位は後頭部優勢の分布であったことから，視覚関連の活動であることが示唆された．一方，West & Holcomb (2000)では，文章の最後に呈示した単語について，イメージ課題，意味判断課題，および表記上の判断課題を設定し，単語が具象語であるか抽象語かに基づいてERPを比較した．イメージ課題と意味判断課題では，単語の意味処理を反映するN400が，具象語で抽象語よりも増強した．また，意味課題よりイメージ課題で，前頭で優勢な陰性成分であるN700が観察され，具象語で抽象語よりも振幅が増強することが示された．この活動は課題や出現潜時帯の違いから，視覚活動よりも高次

の処理過程を反映すると解釈された．彼らは，このN700がKosslyn (1994)のモデルでのInformation Lookup Subsystem (Kosslyn (2006)以降では「情報短絡」)に相当するような，イメージした物体の特定の特徴にアクセスする活動の反映であると主張した．

これらの研究は，250 ms以降に視覚関連の活動が，それに引き続いて，イメージした表象の部分を見つけ出す活動がERPに反映されることを示している．しかし，どちらも単語によって様々な物体をイメージするという課題であるため， ERPの基準となる事象としては，個人ごと，試行ごとにばらつきがあった可能性がある．特に，Farah et al. (1989)では行動反応を求めていないことから，参加者が本当にイメージをしていたのか，また，イメージ内容とERP反応との対応づけなどは行われていない．

単語のイメージよりも個人や試行間でのばらつきが少ないのは，事前に学習した図形などの一定の対象をイメージする課題である．そのような課題は，イメージ開始からのERPを直接測定するものと，イメージ中に呈示するプローブへの反応を測定するものに分けられる．前者として，Yamamoto & Mukai (1998)はアルファベットの大文字を呈示し，対応する小文字が上向きの棒線を持つか (b, d)，下向きの棒線を持つか (p, q)について判断させ，同じ刺激を受動的に観察している際のERPと比較した．結果として，イメージ課題の潜時約220 ms付近で，左半球の前頭，中心，頭頂部位で優勢な陰性電位が観察された．彼らは，この電位をイメージ生成に関わる空間ワーキングメモリの反映と捉え，イメージに関わる視覚処理はERP上で観察されなかったと報告した．しかし，受動的コントロール課題では，参加者の内的状態を推測することが難しく，視覚関連のERP反応が検出できなかった可能性がある．

Qiu et al. (2007)は，実験前に学習した中国語の疑似単語を呈示した後，200-300 ms後のテスト刺激で書き順についての判断をさせた．テスト刺激と同時に疑似単語を呈示する場

合を知覚条件とし，呈示しない場合をイメージ条件とした．結果として，イメージ条件のERPは，潜時約240 ms付近で知覚条件よりも陰性にシフトした．この陰性のシフトは頭皮上の右前頭部位に優勢であり，右海馬傍回が発生源と推定されたことから，空間的記憶に関わると解釈された．Yamamoto & Mukai (1998)において観察された陰性電位とは，潜時帯，前頭部位に優勢の頭皮上分布を持つ，などの点で類似しているが，半球差に関しては一貫しなかった．この違いの理由として，必要とされる空間関係の処理が異なっていた可能性が考えられる．複数の部分から構成される文字の書き順判断の場合には，Coordinate空間処理が用いられ，文字の棒線の向きに関する判断では，Categorical空間処理が用いられたと考えると，頭皮上での左右差が説明できるかもしれない．これらの研究から，イメージ表象に関わる空間処理が，220-240 ms付近の陰性電位に反映される可能性が示唆される．さらに，Qiu et al. (2007)では，潜時約520 msにおいても，イメージ課題で知覚課題よりも大きな陰性電位が観察されており，右の後頭側頭接合部 (BA 18)が発生源と推定された．この電位については，イメージの形成そのものというよりも，書き順の判断に関わる視覚的処理と解釈された．

イメージ生成に関連した視覚野の活動に注目したものとして，最近のPage et al. (2011)では，ビープ音によって色と輝度の視覚刺激をイメージした際と，実際の色と輝度刺激を呈示した際の誘発電位を比較した．イメージ時には，知覚時よりも28 ms短い潜時で，知覚時の誘発電位にきわめて類似した波形が得られると報告された．イメージによる視覚野の活動について，より直接的に知覚との類似性を示した研究と言える．しかし，この研究においては，イメージの視覚的性質を証明するという目的にとどまっており，どのようなプロセスを経て実現するかというメカニズムまでは明らかにされていない．

イメージ開始時点からERPを測定する研究が少ないことの理由として，心的イメージの開始時点が特定しにくいことがあげられる．心的イメージは主観的な体験であるため，知

覚的な刺激への反応や運動反応と異なり，ERPの測定基準となる事象を外的に判断することが難しい．そのため，Farah (1988)はイメージ中の外的刺激に対する反応を分析することで，間接的に脳活動を計測するという手法を用いた．文字のイメージを画面上に投影している際に，同じ文字が出た場合と，異なる文字が出た場合を比較し，後部優勢のN1 (潜時173 ms)に振幅の差が生じることを示した．N1は，視覚刺激によって誘発される電位の一つであり, 視覚情報処理過程を反映することが知られている (Johannes, Münte, Heinze, & Mangun, 1995; A. Wijers, Lange, Mulder, & Mulder, 1997)．このことにより，神経画像法が主流でない時代において，イメージ中の視覚野の活動が示されたが，心的イメージそれ自体がどのようなプロセスを経て実現されるのかについては依然として明らかにはなっていない．

4.2.2 文字イメージ課題中のERP

Yamazaki & Katayama (2013)では，文字イメージ課題中のERP変動について，最初の検討を行った．文字イメージ課題は，1秒以内の短い潜時での反応が可能であり，反応時間のばらつきも少ないことから，ERP実験に適した課題と言える．しかし，この課題を用いたERP研究はこれまでに行われておらず，イメージに関連した反応が得られるか，得られるとすればどのような潜時帯か，などについての予測が難しい．そこで，我々はP3成分を基準として, 文字イメージ課題中のERP変動について, 探索的な検討を行った．P3潜時は，モダリティや反応選択過程の難易度に関わらず，呈示された刺激がターゲットであるか否かを評価・判断するまでの時間によって変動する (McCarthy & Donchin, 1981)．したがって，P3についてはイメージ課題における判断でも出現することが予測できる．イメージ開始刺激呈示時点から，刺激評価を反映するP3潜時までの区間において，イメージに関連した変数によってERPが変動するならば，イメージ生成の効果と考えることができる．

我々が用いた刺激および課題について，Figure 4-1に示す．実験では，プローブ刺激として5×5のマス目と，その一つに×印がついたものを用いた．また， Cue刺激として，アルファベットの小文字 (c, g, h, i, l, s, t, u)を用いた．Cue刺激はプローブ刺激の下線より3 cm下に同時呈示した. 参加者の課題は, Cue刺激によって指示されたアルファベットの大文字を，プローブ刺激上のマス目にイメージし，プローブ刺激の×印がイメージした大文字と重なる場合にのみ，できるだけ早く正確にボタンを押すことであった．プローブ刺激上にイメージした大文字と×印が重なる試行をTarget (25%)，重ならない試行をStandard (75%)とした．また，Target試行のうち，×印が描き順の始めに近いものをEarly試行，描き終わりに近いものをLate試行とした．各試行は全てランダム順に，SOA 2000 msで300 ms間呈示した．

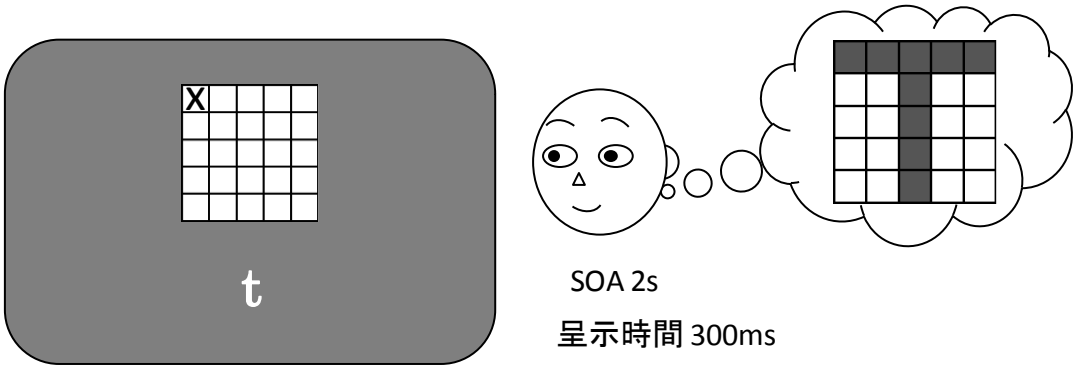


Figure 4-1 Experimental procedure for Yamazaki & Katayama (2013).

実験の結果，P3については，Target試行において，Standard試行よりも大きな振幅が観察された．また，P3潜時については，Late試行でEarly試行よりも延長するという，反応時間と同様のパターンを示した．したがって，イメージ課題においても，P3潜時が課題遂行中の刺激評価時間を反映することが確認された．続いて，刺激呈示以降，P3潜時以前の潜時帯について，後部電極に注目して分析を行った．両後側頭部電極の総加算平均波形をFigure 4-2に示す．振幅を分析したところ，N1 (135-185 ms)で最初のプローブ位置効果が観察された．プローブ位置の効果は，文字イメージの生成・走査に関わった効果と考えら

れる．さらに，Late試行からEarly試行の振幅を引き算し，プローブ位置効果の分布について分析を行った．頭皮上分布については，Figure 4-3に示す．結果として，プローブ位置効果は左後側頭部位で優勢であり，N1振幅の優勢部位と重なった．N1振幅は視覚情報処理に関わることが示されており（Johannes et al., 1995; A. Wijers et al., 1997），プローブ位置の効果が，N1そのものと類似した発生源を持つとすれば，視覚処理に関わる活動を反映していると考えられる．したがって，本実験で観察されたN1潜時帯でのプローブ位置の効果は，視覚野でのイメージによる脳活動の違いを反映した．これらのことから，文字イメージ課題中のERPを検討することにより，イメージ過程に関わる視覚処理を検出できる可能性が示唆された．しかし，本実験には，プローブ位置が物理的に統制されていないという問題がある．初期成分は，外因性の刺激の配置によって振幅が変動する（Johannes et al., 1995; A. Wijers et al., 1997）．本実験でのプローブ位置による物理的な差はわずかなものではあるが，その物理的な位置によって変動した可能性は排除できない．

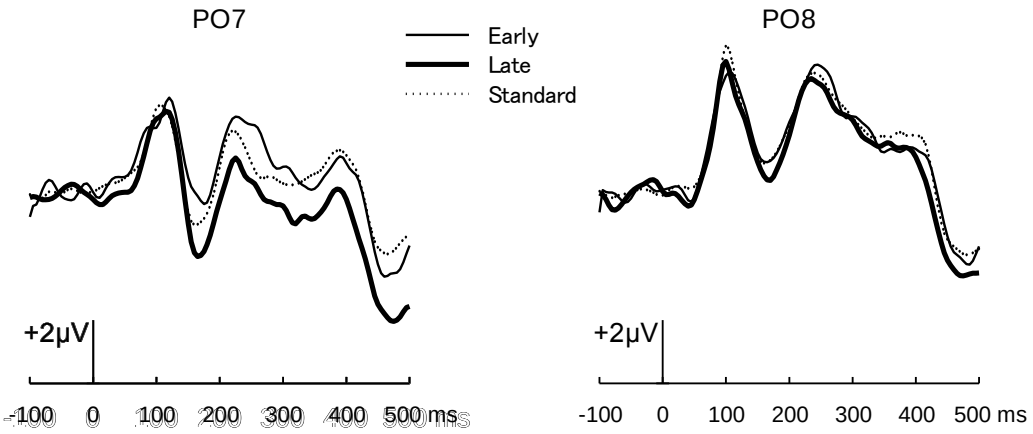


Figure 4-2 Grand averaged waveforms at the PO7 and PO8 (Yamazaki & Katayama, 2013).

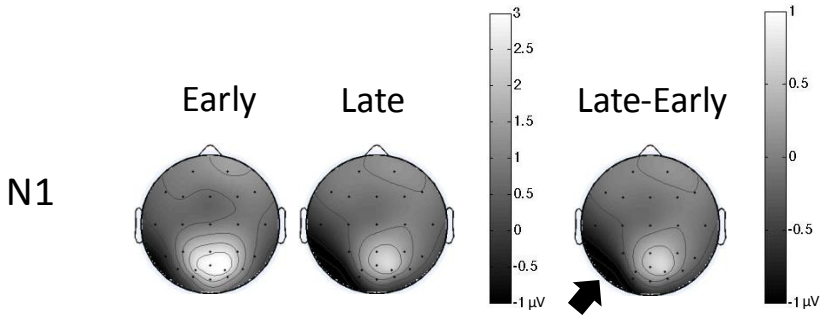


Figure 4-3 Topographic map of the N1 mean amplitude,

and the probe effect (Yamazaki & Katayama, 2013).

4.3 本研究で注目するERP効果

4.3.1 初期成分

視覚刺激が呈示された場合，通常は，一連の陽性と陰性の電位からなるERP波形が出現する. 典型的には, 刺激呈示後に最初の陽性電位として, P1 (頂点潜時90-140 ms)が出現し, N1 (160-190 ms)，P2 (200-250 ms)，N2 (260-300 ms)と続く.

これらの電位のうち，P1やN1は視覚刺激の物理特性によって振幅や潜時が変動し，刺激の対側後部に優勢な分布を持つことから，視覚情報処理に関わると考えられている (Johannes et al., 1995; A. Wijers et al., 1997)．したがって，外因性電位と呼ばれることもあるが，認知的処理によっても変動することが確かめられている．例えば，空間的注意が向けられている位置に呈示された刺激に対しては，振幅が増強する（Mangun & Hillyard, 1995)．また，P1は，言語処理などの高次な処理によっても振幅が変動する（Skrandies, 1998).

P2も感覚誘発性反応であるが，認知処理によっても影響を受けることが示されている．特に，視覚探索課題中には，視覚特徴分析によって変動する（Luck & Hillyard, 1994)ことから，高次の視覚情報処理を反映する．また，記憶や閾下プライミングの研究において，刺激の反復呈示によって増強するという報告もある（Curran & Dien, 2003; Misra & Holcomb, 2003)．Dunn (1998)は単語の記憶課題において，単語の符号化時のP2振幅が，成績の良かった参加者では後頭部位，悪かった参加者では前頭部位で優勢になることを示した．これらのことから，視覚的な入力と，内的な表象や記憶における，予期や言語的文

脈との比較照合に関わる処理過程を反映しているという指摘がある（Evans & Federmeier, 2007).

N2 は，頭皮上分布の違いによって，どのような処理過程を反映しているかの解釈が異なる．頭皮上前部のN2は刺激の新奇性に，後部のN2はターゲットであるかどうかに感度がある（Folstein & Van Petten, 2008）．特に，後部のN2は，ターゲット検出課題中の，視覚に特異的な情報処理に関連する自発的注意の程度を反映するという主張がある（Suwazono, Machado, & Knight, 2000).

現在のところ，聴覚刺激によるイメージ開始は，実際に刺激を知覚したときのERPと類似した波形を惹起することが示されているが（Page et al., 2011），心的イメージの開始に伴って，視覚的なイメージ開始合図に対する初期成分が変動するかどうかについては明らかでない．Kosslynの計算論モデルでは，イメージ生成時に空間的注意が重要な役割をもつことが想定されていることや（Kosslyn, 1994; Kosslyn et al., 2006），心的イメージ課題中には空間的注意に関わる部位が活動するという証拠から（Kosslyn et al., 1993），空間的注意と同様にP1あるいはN1の振幅を変動させる可能性が期待できる．また，前述したように，心的イメージと記憶との関連の深さを考えると，P2成分にも，イメージ処理が反映されると予測できる．これらの初期成分が，イメージに関わる実験操作によって変動するならば，イメージの各機能がどの潜時帯で遂行されているかを検討することが可能である．

4.3.2 SPCN

SPCN (Sustained Posterior ContraLateral Negativity)は，視覚的短期記憶を維持している間に観察される，緩徐な陰性電位である．典型的には，片側視野に呈示された視覚刺激を一定期間保持するパラダイムにおいて，保持している視野と対側の後部電極において

観察される（Dalvit & Eimer, 2011; Eimer & Kiss, 2010; Luria, Sessa, Gotler, Jolicoeur, & Dell'Acqua, 2010; McCollough, Machizawa, & Vogel, 2007; Vogel & Machizawa, 2004）．また，保持する刺激が持つ属性の数には関わらず，オブジェクトの数によって振幅を変動させる（Vogel & Machizawa, 2004）．さらに，視覚的短期記憶容量の限界付近で振幅が天井効果を示すことや，個人の短期記憶容量と振幅の相関が観察されることから，視覚的な保持容量を反映すると考えられている（McCollough, Machizawa, & Vogel, 2007）．

前述したように，心的イメージと視覚的短期記憶に関しては，現在のところ明確な区分はない．しかし，SPCNの振る舞いを調べることで，イメージ表象を維持している際に，視覚的短期記憶と同様の機構が働くのかについて検討することができる．

第5章　本研究の目的

5.1 目的

心的視覚イメージは，「短期記憶痕跡あるいは長期記憶の情報に基づいて，視覚体験時の符号化フォーマットを保存するように心的に再現，(再)構成, 創造された類知覚的体験」(菱谷, 2001)として定義できる．行動指標・生理指標を用いた先行研究から，その体験の根底となる表象は，本質的に知覚と同様の性質を持つと考えられる．特に，近年では，脳画像研究によってイメージ中のモダリティ特異的な領野の活動が示されてきている．また，それらの知見の集約として，知覚システムをベースとした計算論的モデルが構築され，イメージを実現する脳内過程について，信頼性のある仮説が提出されている．

しかし，心的イメージのメカニズムを解明するためには，イメージ課題の行動遂行が，どのような認知処理を経た結果であるのかについて，検討する必要がある．また，その検討の過程において，イメージの知覚的性質の基盤となるであろう視覚野の活動が，どのようなタイミングで生起するかという点が，重要な問題となる．イメージ過程における視覚処理の惹起タイミングについての情報は，イメージが持つと考えられる知覚的性質が，課題遂行において，いつどのような役割を果たすかを解明するためのてがかりとして用いることができる．また，その視覚関連の脳活動が，記憶や視覚的注意などの，心的イメージに関連する諸機能とどのように関係づけられるかという点も考慮せねばならない．

本研究の目的は，視覚イメージの処理過程において，生成，内査，維持の機能のいずれに視覚処理が関与するのか，また，それが課題遂行のどの段階で惹起し，どのように課題遂行に関わるのかを明らかにすることである．そのため，課題処理中の脳活動を，時系列的に分析することが可能な指標であるERPを用いて検討を行う．最終的には，神経生理学的知見，および計算論的モデルを合わせ，他の認知機能との関連から，「どのように」心的イメージが実現されるかについて考察していく．

本研究では，行動遂行パターンがある程度一貫して得られる課題として，文字イメージ課題を採用した．この課題では，イメージする文字が複雑な場合には単純な場合よりも，また，プローブ位置が書き順の最初にある場合には最後にあるよりも，反応時間が短縮することが確かめられている．先行研究からは，文字の複雑さによる効果は長期記憶内での文字表象の活性化を，プローブの位置の効果は部分単位での文字の構成化，あるいはイメージ上の位置の走査を意味していると考えられている．ただし，いずれも行動指標によって得られた結果であり，神経画像法によって得られる脳活動との関連性や，ERP波形への影響については示されていない．文字の複雑さやプローブ位置などの変数が，後頭部位優勢の初期成分を変動させた場合，刺激の視覚的処理が影響を受けたことになる．すなわち，イメージによる視覚野の活動が惹起したと考えることができる．

5.2 実験的検討の構成

本研究の実験的検討では，イメージの生成，走査，維持の機能を枠組みとして，ERPがどのように変動するかを観察していく．Figure 5-1に，各実験と機能との関連性を示した．実験１および２では，生成と走査について検討した．また，実験３では，走査によるERP変動に焦点を当てた．最後に，実験４では，生成および維持の過程についての実験的検討を行った．

より具体的には， Yamazaki & Katayama (2013)によって，イメージ開始後すぐに視覚的活動が開始され，それがERPの初期成分に反映される可能性が示唆されていることから，実験1では，イメージ開始合図，およびプローブ位置による初期成分への影響が，単に物理的条件によるものではないことを確認した．実験２では，ERPに反映されるプローブ位置による効果が意味する過程について詳しく検討した．実験３では，ERP上でのプローブ位置の効果が，走査と関連する可能性について仮説検証した．実験４では，「生成」から「維

持」するまでの時系列的処理について検討した．また，イメージに特有の活動を特定するため，周辺領域である視覚的短期記憶との比較を行った．

		Generation	Inspection	Maintenance
Chapter 6	Exp. 1	○	○	-
	Exp. 2	○	○	-
Chapter 7	Exp. 3	-	○	-
Chapter 8	Exp. 4	○	-	○

Figure 5-1 The functions of imagery and experiments in the study.

第II部　実験的検討

第6章　心的イメージの生成・走査の処理過程（実験１，２）

6.1　実験１　イメージの複雑さによる初期成分への影響[1]

6.1.1　目的

第5章で述べたように，Yamazaki & Katayama (2013)は，心的イメージ課題において，視知覚的な表象が初期視覚関連の活動としてERPに反映される可能性を示唆した．しかし，我々の実験では，イメージ開始刺激，およびプローブ位置について，物理的な刺激統制が行われていなかったため，プローブの物理的位置の違いによって初期成分に条件差が見られた可能性がある．そこで，本実験ではプローブ刺激の物理的な位置を統制して，初期成分の変動が，イメージそのものによる効果であるかどうかを検証することを目的とした．そのため，覚える図形を左右対称の4種類の無意味図形とし，記憶順序についても，左右どちらから覚えるかをカウンターバランスした．したがって，ある同じプローブ位置について，Earlyである場合とLateである場合とを設定した．

さらに，初期成分の変動がイメージに関連して観察された場合に，どのような側面を反映するかについて，詳しく検討する必要がある．我々の実験では，文字の複雑さごとの分析を行っていないが，文字イメージ課題を用いた先行研究では，プローブ位置だけでなく，文字の複雑さによっても反応時間が延長することが報告されている（Dror & Kosslyn, 1994a; Emmorey, Kosslyn, & Bellugi, 1993; Kosslyn et al., 1988; Podgorny & Shepard, 1978）．文字の複雑さは生成プロセスにおける視覚的長期記憶の賦活と関連すると考えられている（Dror & Kosslyn, 1994b; Emmorey et al., 1993）．一方，プローブ位置は，セグメントを視覚化して統合していく過程（Dror & Kosslyn, 1994b; Emmorey et al., 1993），あるいはセグメント内での走査過程（Kosslyn, 1988)と考えられている．複雑さを要因に加え，

[1] Yamazaki, K., & Katayama, J. (2008, 4/12-15). *Early visual component of ERP reflects the sequential process of mental imagery generation.* Paper presented at the The 15th Annual Meeting of the Cognitive Neuroscience Society, San Francisco, CA, USA.

プローブ位置による初期成分への影響と対比することによって，それぞれと関連する過程が，ERPにどのように反映されるのかについて検討を行った．

さらに，プローブ刺激を統制して行った最初の16名について，図形の記憶順序が同じであったことを考慮し，記憶順序のみを変更してさらに16名の参加者について記録を行った．最初のグループでは単純な図形を最初に記憶しており，残りのグループでは複雑な図形を最初に記憶するという違いから，それぞれのグループを個別に検討した．このことにより，初期の視覚関連の活動と記憶との関係について考察する．

まとめると，本実験の目的は，物理刺激を統制した上でも，イメージによる初期成分の変動が観察されるかどうかを明らかにすることであった．さらに，プローブ位置と複雑さが，初期成分の変動にどのように反映されるか，また，その際に記憶順序が関わってくるのかについて検討することであった．

6.1.2　方法

6.1.2.1　参加者

視力もしくは矯正視力が正常な右利きの成人32名（男性16名，女性16名，20-33歳，平均年齢24.3歳)が実験に参加した．参加者は，実験前に本実験に関する説明を受け，同意した上で実験に参加した．参加者のうち，16名（男性8名，女性8名，20-33歳，平均年齢23.9歳)をSC群，残りの16名（男性8名，女性8名，21-31歳，平均年齢24.6歳)をCS群とし，刺激の学習順序を操作した．

6.1.2.2 刺激

学習刺激

AからDまでのアルファベットに対応させて無意味図形を記憶するため，図形を構成する線分が1本ずつ矢印として描かれた5×5のマス目を，線分の数だけ用意した．マス目全体の大きさは，4.5 cm×4.5 cm (視角4.39°×4.39°)であった．矢印を組み合わせた結果，できあがる図形をFigure 6-1に示す．半数の参加者では，Aと Bを単純な図形 (Simple 条件)，C, とDを複雑な図形 (Complex 条件)として順に学習し，これをSC 群とした．一方，残り半数はA, Bを複雑な図形，C, Dを単純な図形としてアルファベット順に学習したことから，CS 群とした．

イメージ刺激

学習刺激と同様の5×5のマス目上で，中央にAからDのいずれかのアルファベット，中央以外のどれか一つのマスにプローブとなる×印が描かれたものを使用した．AからDに対応した図形をイメージした時に，プローブが図形と重なるものをONとし， 重ならないものをOFFとした．それぞれの中で，×印が書き順の最初にあるものをEarly試行，最後にあるものをLate試行とした．ON，OFF試行およびEarly，Late試行は全て同数であった．

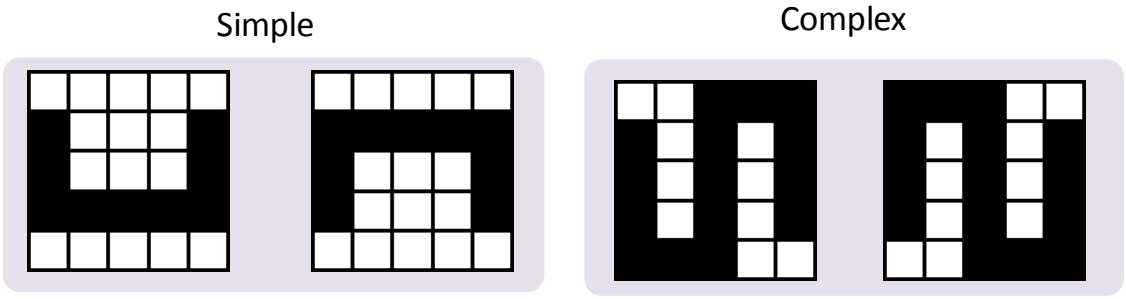


Figure 6-1 Simple and Complex stimuli.

6.1.2.3 手続き

全ての参加者が学習フェイズで無意味図形を学習した後，イメージ試行を行った．学習フェイズでの手続きを， Figure 6-2に示す．学習フェイズでは，ボタンを押すごとに，画面中央に順に呈示されるマス目上に描かれた矢印を組み合わせることで，アルファベットと対応する図形を記憶した．矢印の向きによって示される描き順は，AB, CDのうちそれぞれひとつを左から，もうひとつを右から順に呈示した．描き順は参加者ごとにランダマイズし，完全に記憶するまで行った．

イメージ試行では，イメージ刺激をSOA 1000ms，呈示時間500 msで，観察距離60 cmのディスプレイ上に呈示した．参加者は，呈示されたイメージ刺激の中央のアルファベットに対応した図形をマス目内にイメージした．同時に呈示されたプローブの×印と重なるかどうかを，できるだけ早く正確に左右のボタン押しをすることで判断した．72試行を1ブロックとして18ブロック行った．刺激はランダム順に呈示し，反応手は参加者ごとにランダマイズした．

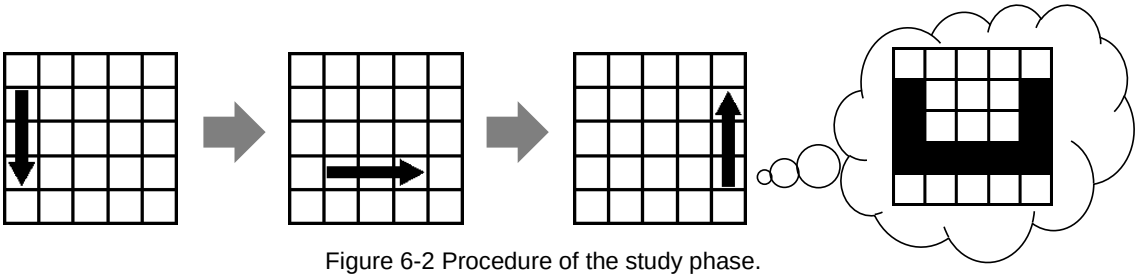
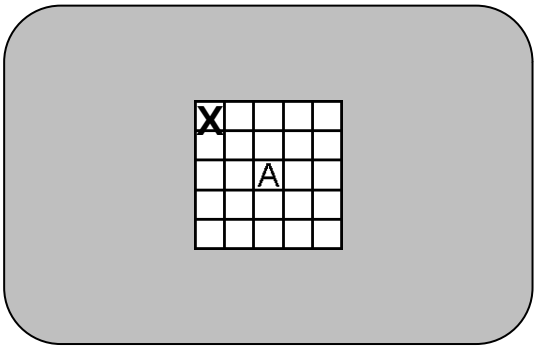


Figure 6-2 Procedure of the study phase.



SOA 1000ms, Duration 500 ms

Figure 6-3 Procedure of the test phase.

6.1.2.4　記録と分析

行動遂行について，反応時間と正答率を記録した．反応時間はイメージ刺激の呈示開始から反応までの時間を測定した．

脳波記録は，銀-塩化銀電極を装着した電極キャップを用いて，頭皮上25部位（Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, T3, C3, Cz, C4, T4, T5, P3, Pz, P4, T6, PO7, PO3, POz, PO4, PO8, O1, Oz, O2)から鼻尖を基準として導出した．接触抵抗は5kΩ未満とした．サンプリング周波数200 HzでAD変換をし，オフラインで0.05-30 Hzのバンドパスフィルタをかけた．誤答試行，およびEEGまたはEOG（Electrooculogram)が100μVを超えた試行は分析から除外した．ERPは刺激呈示前100 msをベースラインとして400 ms間を加算して，初期成分の分析を行った．その後，刺激呈示前200 msをベースラインとして1000 ms間を加算し，後期成分についても評価した．分析は分散分析（analysis of varianvce: ANOVA)を用いて行い，Greenhouse-Geisser法で自由度を補正した．単純効果の検定にはプールしない水準別誤差項を用いた．多重比較はBonferroni法を用いた．

6.1.3　結果[2]

6.1.3.1　行動指標

反応時間と正答率については，群ごとに，反応種（ON, OFF)×複雑さ（Complex, Simple)×プローブ位置（Early, Late)の3要因分散分析を行った．

平均反応時間については，Figure 6-4に示す．SC群では，反応種と複雑さの交互作用（F (1,15) = 19.26, p < .01)，および複雑さとプローブ位置の交互作用（F (1,15) = 10.23, p < .01)が有意であった．反応種ごとの複雑さの効果は，ON (F(1,15) = 32.29, p < .01)，OFF

[2]行動および ERP 指標のデータ表は付録 A を参照

($F(1,15) = 71.77$, $p < .01$)の両反応種で有意であった．Complex試行ではSimple試行よりも反応時間が延長し，その効果はOFF試行でON試行よりも大きかった（プローブ位置を平均した値について, ON試行ではSimple: 679 ms, Complex: 744 ms, OFF試行ではSimple: 735 ms，Complex: 861 ms). また, プローブ位置ごとの複雑さの効果は, Early ($F(1,15) = 68.59$, $p < .01$)，Late ($F(1,15) = 55.06$, $p < .01$)の両試行で有意であった．ComplexでSimpleよりも反応時間が延長し，その効果はLateでEarly試行よりも大きかった（反応種を平均した値について, Early試行ではSimple: 701 ms, Complex: 779 ms, Late試行ではSimple: 713 ms, Complex: 826 ms)．また，複雑さごとのプローブ位置の効果は，Simple ($F(1,15) = 7.51$, $p < .05$)，Complex ($F(1,15) = 18.11$, $p < .01$)の両試行で有意であった．したがって，LateでEarly試行よりも反応時間が延長し, その効果はComplex試行でSimple試行よりも大きかった.

CS群では，反応種と複雑さ（$F(1,15) = 41.20$, $p < .05$)，複雑さとプローブ位置（$F(1,15) = 34.15$, $p < .05$)，およびプローブ位置と反応種の交互作用（$F(1,15) = 4.93$, $p < .05$)が有意であった．反応種ごとの複雑さの効果はOFF試行でのみ優位であり（$F(1,15) = 58.05$, $p < .01$)，ComplexでSimpleよりも反応時間が延長した（プローブ位置を平均した値について, ON試行ではSimple: 784 ms, Complex: 797 ms, OFF試行ではSimple: 834 ms，Complex: 922 ms)．また，プローブ位置ごとの複雑さの効果については，Early ($F(1,15) = 4.72$, $p < .05$)，Late ($F(1,15) = 57.03$, $p < .01$)の両試行で有意であった．したがって，ComplexでSimpleよりも反応時間が延長し，その効果はLateでEarly試行よりも大きかった（反応種を平均した値について，Early試行ではSimple: 809 ms，Complex: 831 ms，Late試行ではSimple: 809 ms，Complex: 888 ms)．同様に，複雑さごとのプローブ位置の効果は，Complex試行でのみ有意であった（$F(1,15) = 45.53$, $p < .01$)．したがって，Complex試行において，Late試行でEarly試行よりも反応時間が延長した．また，反応種ごとのプローブ

位置効果は，ON試行でのみ有意であった（$F(1,15) = 23.03$, $p < .01$）．したがって，ON試行でのみ，Late でEarlyよりも反応時間が延長した（複雑さを平均した値について，ON試行ではEarly: 769 ms，Late: 813 ms，OFF試行ではEarly: 872 ms，　Late: 884 ms）.

両群に観察された効果として，イメージする図形が複雑な場合には，単純な場合よりも反応時間が延長したが，その効果はON試行よりもOFF試行で大きかった．また，複雑な図形の場合に単純な図形をイメージした場合よりも反応時間が延長し，その効果はEarly試行よりLate試行で大きかった．Late試行でEarly試行よりも反応時間が延長するという効果は，複雑な図形をイメージしたときに，より大きかった．CS群でのみ観察された効果として，ON試行にのみLateでEarly試行よりも反応時間が延長する効果が認められた.

正答率に関しても，同様の分析を行った．平均正答率をFigure 6-5に示す．SC群では，反応種と複雑さの交互作用が有意であった（$F(1,15) = 7.51$, $p < .05$）．CS群においても，反応種と複雑さ（$F(1,15) = 6.22$, $p < .05$），および複雑さとプローブ位置の交互作用（$F(1,15) = 8.83$, $p < .05$)が有意であったが，いずれも正答率は8割以上であり，speed-accuracy trade offは観察されなかった.

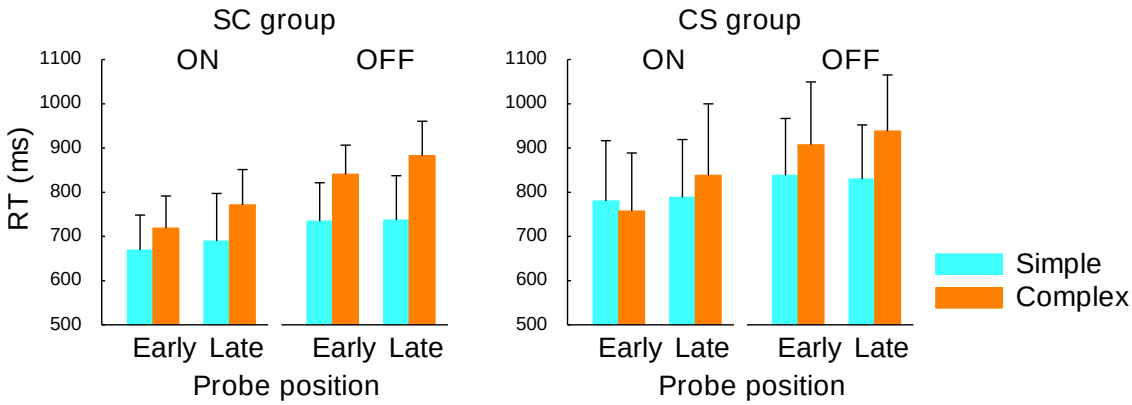


Figure 6-4 Mean reaction time for SC and CS groups.

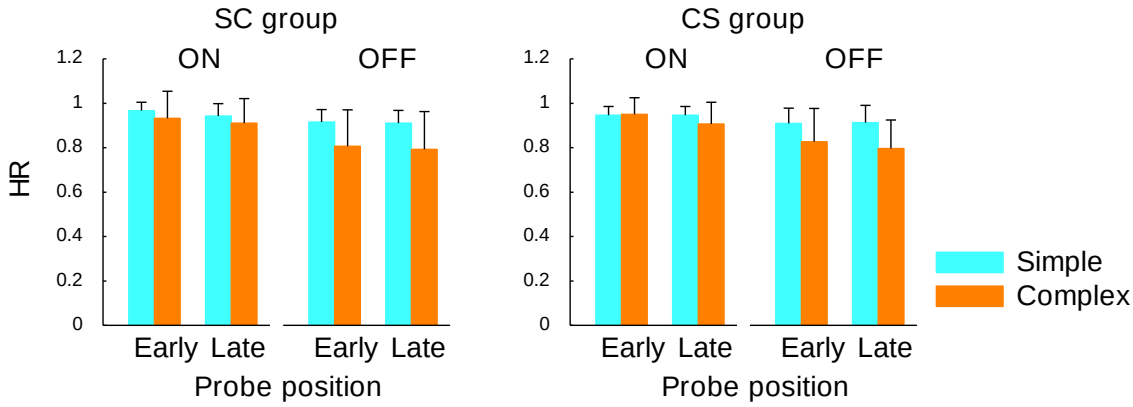


Figure 6-5 Mean hit rate for SC and CS groups.

6.1.3.2 ERP

初期成分

初期成分については，物理的刺激を統一したON試行についてのみ分析を行った．Figure 6-6にSC群の，Figure 6-7にCS群の総加算平均波形を示す．SC群，CS群ともに，頭皮上の後部両側に優勢な大きな陽性成分としてP1 (潜時約100 ms)が観察され，それに続いて，N1 (165 ms)，P2 (225 ms)，N2 (325 ms)が後部優勢に観察された．総加算平均波形から，P1 (90-110 ms)，N1 (150-180 ms)，P2 (210-240 ms)，N2 (310-340 ms)の平均振幅を算出した．

各成分の優勢部位が，後頭部両側に観察されたため，後部電極（PO3/4, PO7/8, O1/2)のデータを用いて分析を行った．SC群の平均振幅をFigure 6-8に，CS群の平均振幅をFigure 6-9に示す．成分ごとに，複雑さ（Simple, Complex)×プローブ位置（Early, Late)×半球(Left, Right)×電極（PO3/4, PO7/8, O1/2)の4要因分散分析を行った.

SC群のP1振幅について，半球×電極の交互作用が有意であったが（F (2,30) = 7.28 p < .01)，複雑さおよびプローブ位置に関する効果は観察されなかった．N1振幅についても，電極の主効果のみが有意であった（F(2,30) = 5.61, p < .05)．P2振幅については，電極の主効果（F(2,30) = 4.64, p < .05)，半球×電極（F(2,30) = 3.83, p < .05)，および複雑さ×半球の交互作用（F(2,30) = 7.76, p < .05)が有意であった．半球ごとの複雑さの効果は，右半球のみで，Complex試行でSimple試行よりも振幅が増強していた（F(1,15) = 5.32, p < .05)．したがって，P2振幅において，複雑さの効果が右半球で観察された．N2については電極の主効果のみが有意であった（F(2,30) = 5.64, p < .05).

CS群では，P1振幅について電極の主効果（F (2,30) = 5.59, p < .01)，複雑さ×電極（F (2,30) = 3.75, p < .05)，プローブ位置×半球×電極の交互作用（F(2,30) = 3.68, p < .05)が有意であった．電極ごとの分析では，PO3/4においてのみ，Simple試行でComplex試行よりも振幅が増強していた（F(1,15) = 5.11, p < .05)．また，電極ごとにプローブ位置×半球の2要因分散分析を行ったところ, PO7/8において, 半球の主効果のみが有意であった（F(1,15) = 5.21, p < .05)．N1については，有意な効果は観察されなかった．P2については，半球×電極の交互作用が有意であったが（F(2,30) = 4.49, p < .05)，複雑さおよびプローブ位置に関しての効果は観察されなかった．N2振幅に関しては，電極の主効果（F (2,30) = 6.79, p < .01)，および複雑さ×プローブ位置×半球の交互作用が有意であった（F (1,15) = 9.88, p < .01)．複雑さごとにプローブ位置×半球の2要因分散分析を行ったところ，Simple試行の場合にのみ交互作用が有意であった（F(1,15) = 14.64, p < .01)．さらに，半球ごとのプロー

ブ位置効果について，左半球で有意傾向であった（$F(1,15) = 3.38$, $p = .086$）．したがって，左半球で，Early試行でLateよりも振幅が増強する傾向にあったことが示された．また，プローブ位置ごとに複雑さ×半球の2要因分散分析を行ったところ，Early試行でのみ，複雑さ×半球の交互作用が有意であった（$F(1,15) = 8.06$, $p < .05$）．複雑さの効果は左半球でのみ，有意であった（$F(1,15) = 7.09$, $p < .05$）．したがって，Early試行でのみ，左半球において，Simple試行でComplex試行よりも振幅が増強していた．

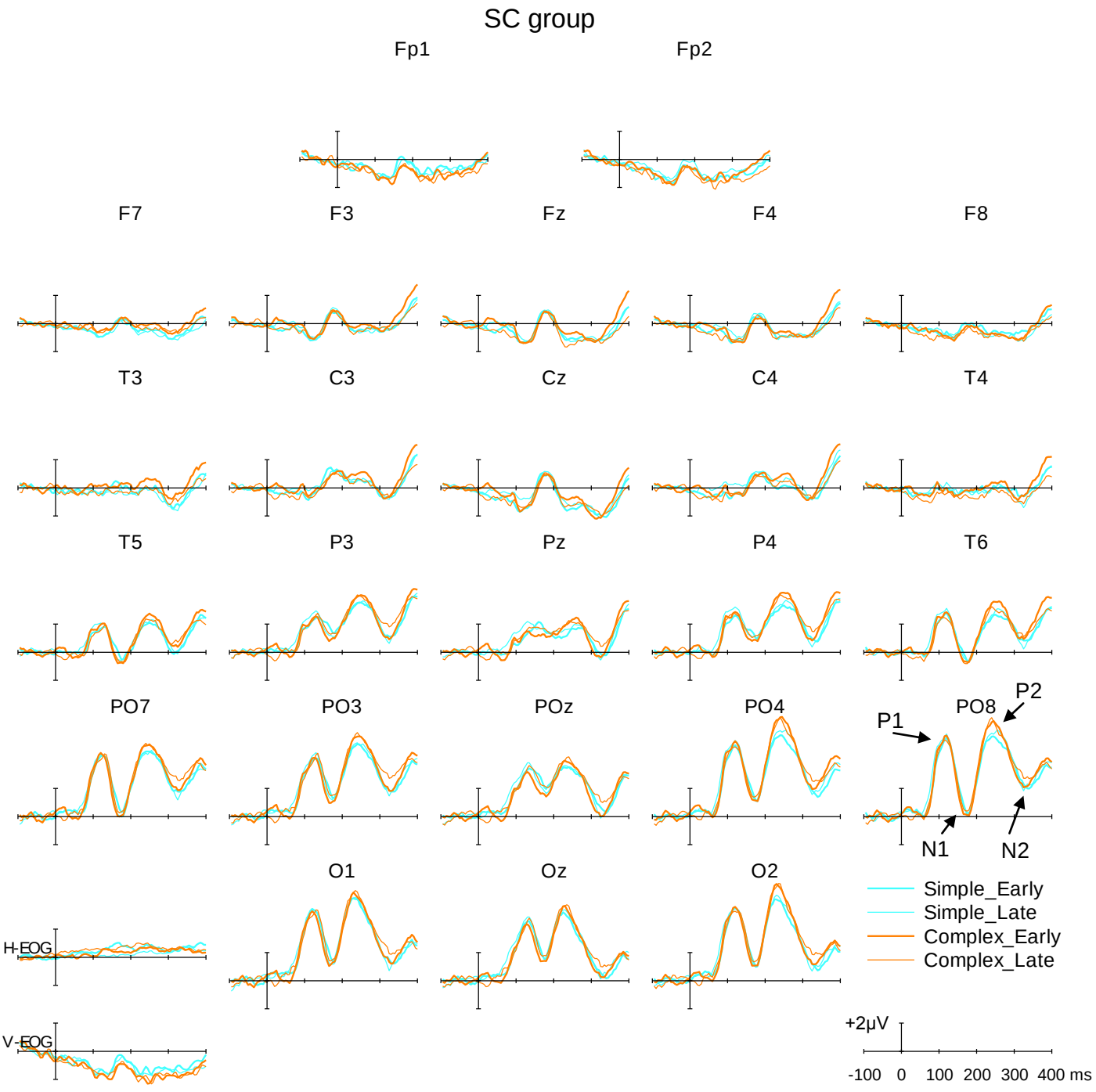


Figure 6-6 Grand average waveforms for SC group.

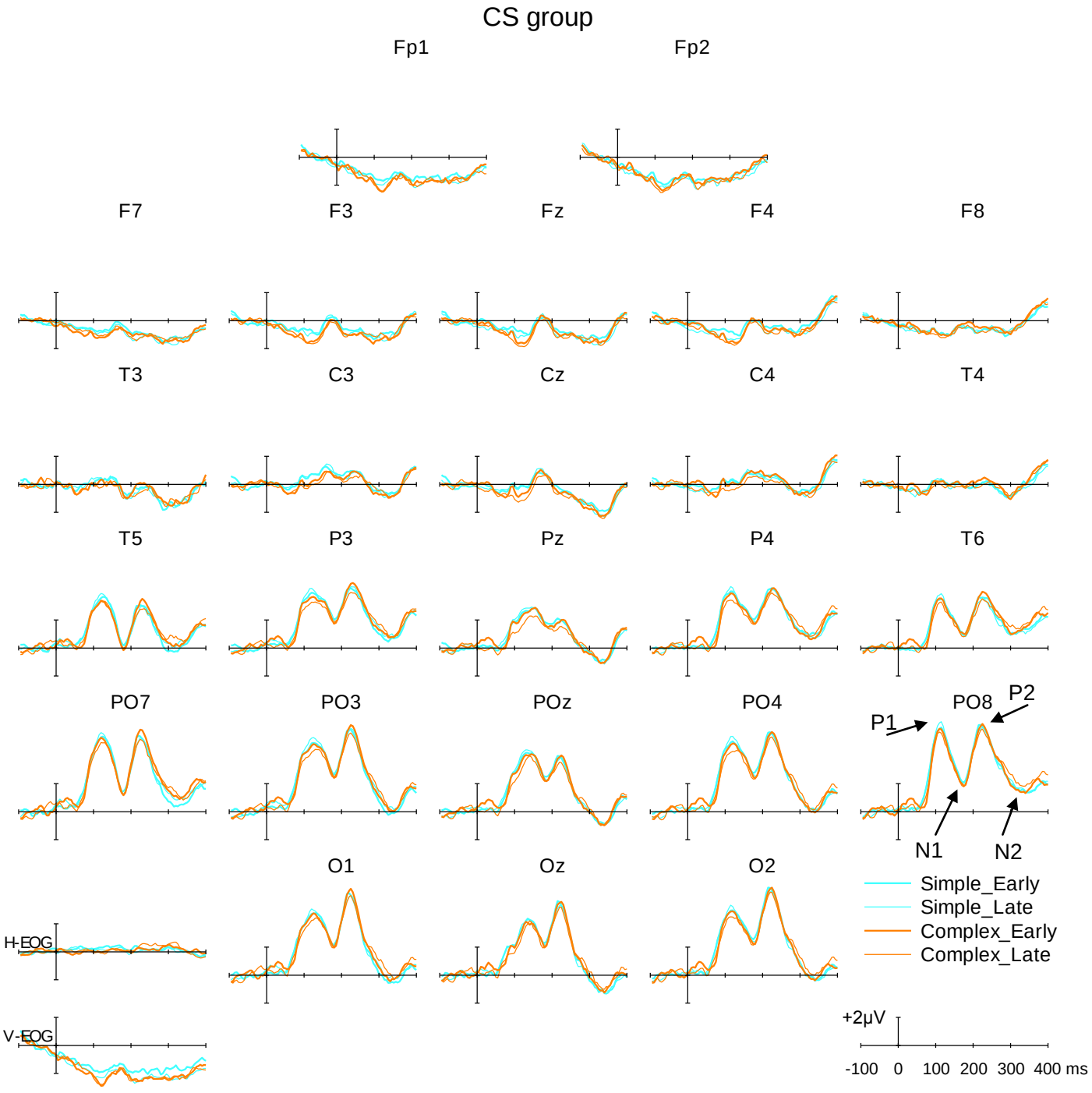


Figure 6-7 Grand average waveforms for CS group.

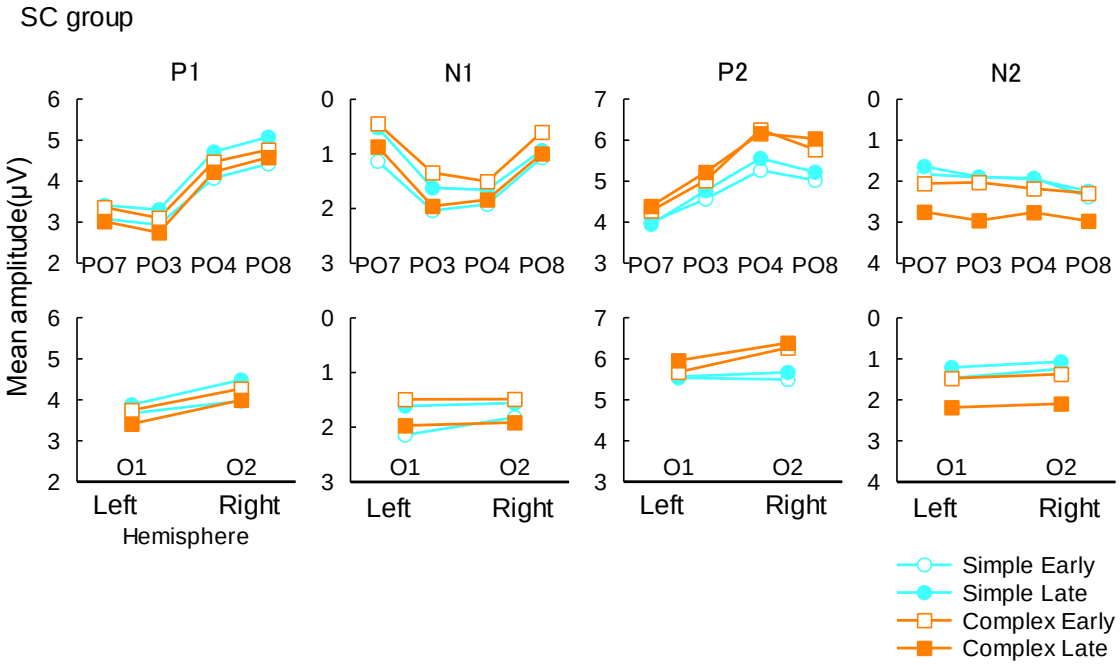


Figure 6-8 Mean amplitudes of P1, N1, P2 and N2 for SC group.

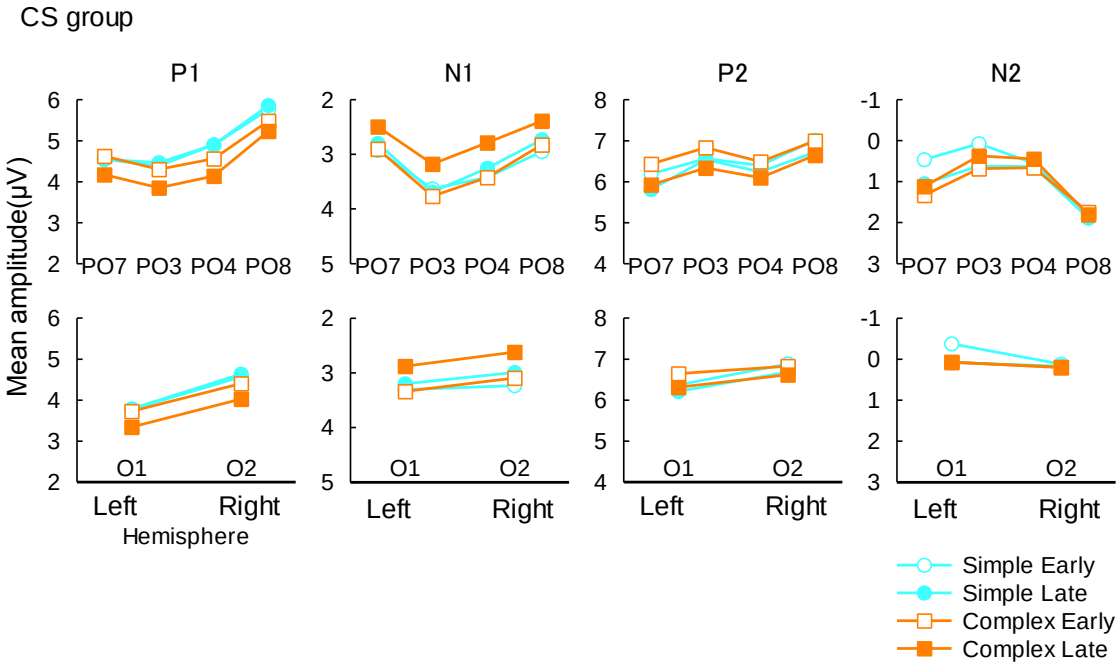


Figure 6-9 Mean amplitudes of P1, N1, P2 and N2 for CS group.

初期成分における効果の頭皮上分布

続いて，観察された試行条件の効果の分布について検討を行った．複雑さ，あるいはプローブ位置の効果があった成分について，それらの効果自体の頭皮上分布を調べた．複雑さの効果として，Complex試行の振幅からSimple試行の振幅を引いた差分を算出した．また，プローブ位置の効果として，Late試行での振幅からEarly試行の振幅を引いた差分を算出し，効果が最大になる電極部位について検討した．

SC群のP2振幅の分布をFigure 6-10左に，Complex試行からSimple試行の振幅を引いた値の分布をFigure 6-10右に示す．頭皮上後部において，Complex試行でSimple試行よりも増強した．後部について，プローブ位置×半球（Left/Right)×電極（PO7/8, PO3/4, O1/O2, T5/6, T3/4)の3要因分散分析を行ったところ，電極の主効果のみが有意であった（$F(4,60) = 5.47$, $p < .01$）．多重比較の結果，電極間での有意な差は検出されなかったが，振幅値はPO3/4，PO7/8，O1/2，T5/6，T3/4の順に大きかった．引き算をしないP2振幅では，右半球で複雑さの効果が大きかったが，複雑さ効果の分布においては同様の効果は検出されなかった．

CS群のP1に関しては，複雑さの効果とプローブの効果の分布について，それぞれに分析を行った．Figure 6-11に頭皮上分布を示す．複雑さの効果について，SimpleでComplexよりも大きな振幅値は，前頭・中心部位の正中線上から後頭部位にかけて観察された．この分布は，P1振幅が最大値をとった後頭頂部位よりも前部であった．そこで，プローブ位置×Line（前頭，中心，頭頂，後頭頂，後頭)×電極（F3/C3/P3/PO3/O1，Fz/Cz/Pz/POz/Oz, F4/C4/P4/PO4/O2)の3要因分散分析を行ったところ，Line×電極の交互作用が有意であった（$F(8,120) = 4.30$, $p < .01$）．電極ごとにLineの1要因分散分析を行ったが，有意な効果は検出されなかった. Lineごとの電極の効果は, 中心部で有意であった（$F(2,30) = 6.00$, $p < .01$).

多重比較の結果，C4でC3，Czよりも複雑さの効果が大きかった（$p < .05$）．引き算をしないP1振幅については， PO7/8で最大値を示したことと比較して，明らかに分布が異なった．

プローブ位置の効果に関しても，前頭から頭頂にかけての広範な部位で，EarlyでLateよりも陽性に振れていた．複雑さ×Line×電極の3要因分散分析を行ったが，有意な効果は観察されなかった．

CS群のN2潜時帯について，複雑さとプローブ位置の効果について同様の分析を行った．Figure 6-12にそれぞれの効果の分布を示す．引き算をしないN2の頭皮上分布は，左右後頭頂で陽性となっていた．これは，N2の直前に惹起したP2の影響により，見かけ上後部両側で陽性の電位があらわれたものである．複雑さの効果について，Complex 試行でSimple試行よりも陽性となっている部位は，後部に優勢であったため，プローブ位置×半球（Left, Right)×電極（PO7/8, PO3/4, O1/O2, T5/6, T3/4)の3要因分散分析を行った．3要因の交互作用が有意であったため（$F(4,60) = 3.85$, $p < .05$），プローブ位置ごとに半球×電極の2要因分散分析を行ったところ, Earlyでのみ交互作用が有意であった（$F(4,60) = 3.27$, $p < .05$). さらに，電極ごとの半球の効果は，O1/2 ($F(1,15) = 4.59$, $p < .05$)，PO7/8 ($F(1,15) = 8.16$, $p < .05$)，PO3/4 ($F(1,15) = 8.22$, $p < .05$)の各電極部位において，左半球で右半球よりも大きかった．N2潜時帯での複雑さの効果として，Early試行では，左の後頭頂部位において，Complex試行でSimple試行よりも陽性となることが示された．

N2潜時帯でのプローブ位置の効果についても同様の分析を行った．後部に注目して，プローブ位置×半球（Left/Right)×電極（PO7/8, PO3/4, O1/O2, T5/6, T3/4)の3要因の分散分析を行ったところ，交互作用が有意であった（$F(4,60) = 3.85$, $p < .05$）．複雑さごとに，半球×電極の2要因分散分析を行った結果，Simple試行では半球の主効果（$F(1,15) = 7.81$, $p < .05$)，Complex試行では交互作用が有意であった（$F(4,60) = 3.97$, $p < .05$）．この交互作

用について，電極ごとの半球の効果は有意でなかった．したがって，Simple試行では，Ealy試行でLate試行よりも振幅が増強する効果が左半球で観察された．Complex試行では，左右半球によって分布が異なった．

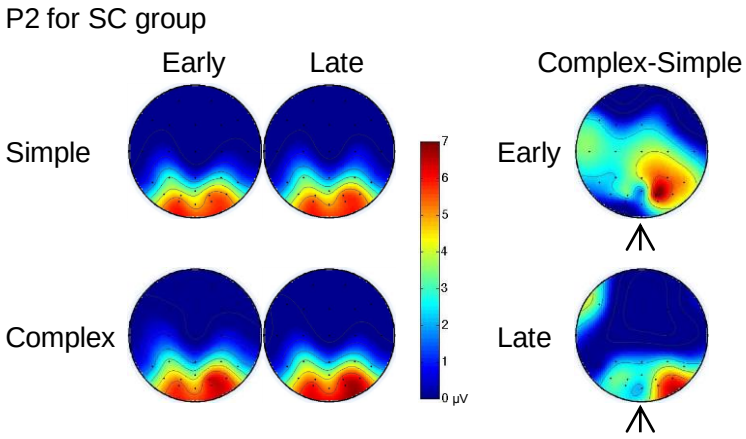


Figure 6-10 Topography of P2 amplitude and complexity effect for SC group.

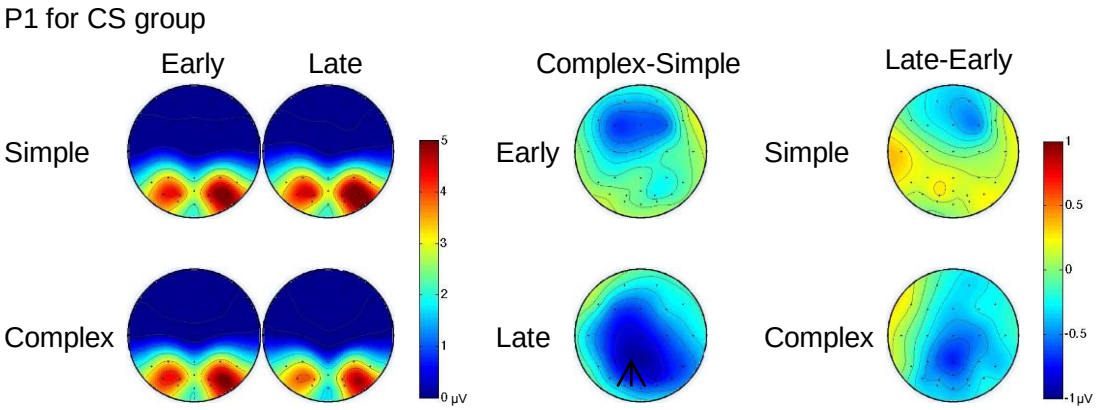


Figure 6-11 Topography of P2 amplitude, complexity effect, and probe effect for CS group.

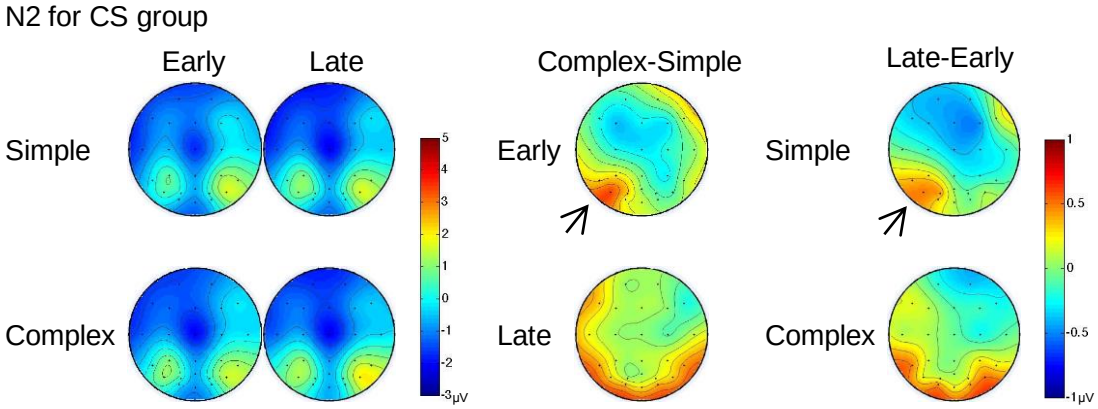


Figure 6-12 Topography of N2 amplitude, complexity effect, and probe effect for CS group.

後期成分

初期成分において観察された群間での違いがどのような意味を持つのかについて検討するため，初期成分に続いて起こる反応についても評価した．刺激呈示前200 ms間をベースラインとして，刺激呈示後1000msまでの波形について分析を行った．Figure 6-13にSC群，Figure 6-14にCS群の総加算平均波形を示す．波形から，約440 ms以降で条件間の分岐が見られた．明瞭なP300は観察されなかったが，440 ms以降で大きな条件差が観察された．したがって，電極Fz，Cz，Pzにおける440 msから990 msまでの平均電位を算出して，比較を行った．各群の平均電位をFigure 6-15に示した．群と反応種（ON/OFF)ごとに，複雑さ（Complex/Simple)×プローブ位置（Early/Late)×電極（Cz/Pz/Oz)の3要因分散分析を行った．

SC群では，ON試行でプローブ位置の主効果（$F(2,30) = 9.26$, $p < .01$），および複雑さとプローブ位置の交互作用が有意であった（$F(1,15) = 11.34$, $p < .05$）．プローブ位置の効果について，Complex試行でのみ，Early試行でLate試行より陽性に振れていることが示された（$F(1,15) = 16.53$, $p < .01$）．また，プローブ位置がLateの場合にのみ，Simple試行でComplex試行よりも陽性であった（$F(1,15) = 4.92$, $p < .05$）．つまり，複雑な図形をイメージし，かつプローブ位置が描き順の最後にあった場合には，他の条件よりも振幅が減衰していた．

SC群のOFF試行では，複雑さの主効果（$F(1,15) = 17.73$, $p < .05$），および複雑さと電極の交互作用が有意であった（$F(2,30) = 11.77$, $p < .05$）．電極ごとの複雑さの効果は，Fz($F(1,15) = 10.75$, $p < .01$)，Cz ($F(1,15) = 16.23$, $p < .01$)，Pz ($F(1,15) = 20.81$, $p < .01$))の全電極で有意であった．さらに，複雑さの効果を電極間で比較するため，Complex試行とSimple試行の差分について電極の1要因分散分析を行ったが，有意な効果は検出されなかっ

た．つまり，プローブ位置に関わらず，複雑な図形をイメージした場合には，単純な図形の場合よりも振幅が減衰した．

CS群では， ON試行で，複雑さの主効果（$F(1,15) = 9.38, p < .05$），プローブ位置の主効果（$F(1,15) = 9.09, p < .05$），および複雑さとプローブ位置の交互作用，プローブ位置と電極の交互作用が観察された．プローブ位置の効果として，Complex試行でのみ，Early試行でLate試行より陽性に振れていた（$F(1,15) = 16.80, p < .01$）．また，プローブ位置がLateの場合にのみ，Simple試行でComplex試行よりも陽性であることが示された（$F(1,15) = 16.83, p < .01$）．また，電極ごとのプローブ位置の効果は，Fz($F(1,15) = 6.36, p < .05$），Cz（$F(1,15) = 9.36, p < .01$），Pz（$F(1,15) = 9.06, p < .01$））の全電極で観察された．プローブ位置の効果を電極間で比較するため，Early試行とLate試行の差分について電極の1要因分散分析を行ったが，有意な効果は検出されなかった．つまり，SC群と同様に，複雑な図形をイメージし，かつプローブ位置が描き順の最後にあった場合には，他の条件よりも振幅が減衰していた．ただし，SC群とは異なり，プローブ位置の効果が電極によって異なるという結果が得られた．

CS群のOFF試行では，複雑さの主効果（$F(1,15) = 30.15, p < .05$），および複雑さと電極（$F(2,30) = 21.56, p < .05$），プローブ位置と電極の交互作用（$F(2,30) = 9.84, p < .05$）が観察された．電極ごとの複雑さの効果は，Fz($F(1,15) = 19.02, p < .01$），Cz（$F(1,15) = 24.63, p < .01$），Pz（$F(1,15) = 45.12, p < .01$））の全電極で観察された．複雑さの効果を電極間で比較するため，Complex試行とSimple試行の差分について電極の1要因分散分析を行った結果，主効果が有意であった（$F(2,30) = 21.56, p < .01$）．下位検定の結果，Fzよりも，CzおよびPzで複雑さの効果が大きかった（$p < .05$）．また，電極ごとにプローブ位置の1要因分散分析を行ったが，有意な効果は観察されなかった．SC群とは異なり，複雑さだけでなくプローブ位置の効果が電極間で異なるという結果が得られた．

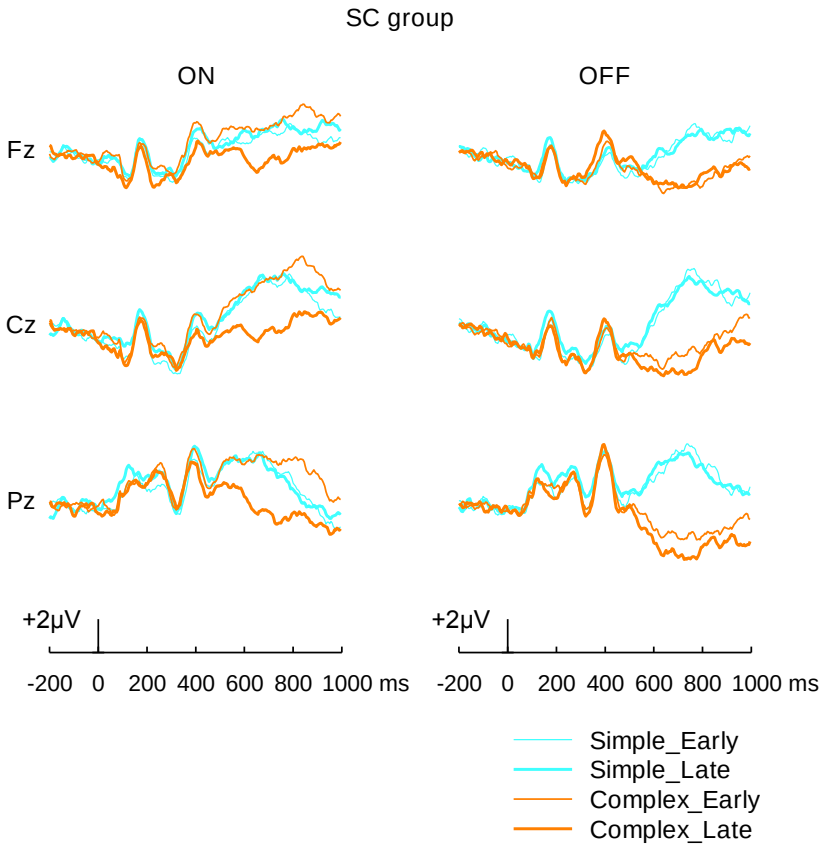


Figure 6-13 Grand average waveform from -200 to 1000 ms for SC group.

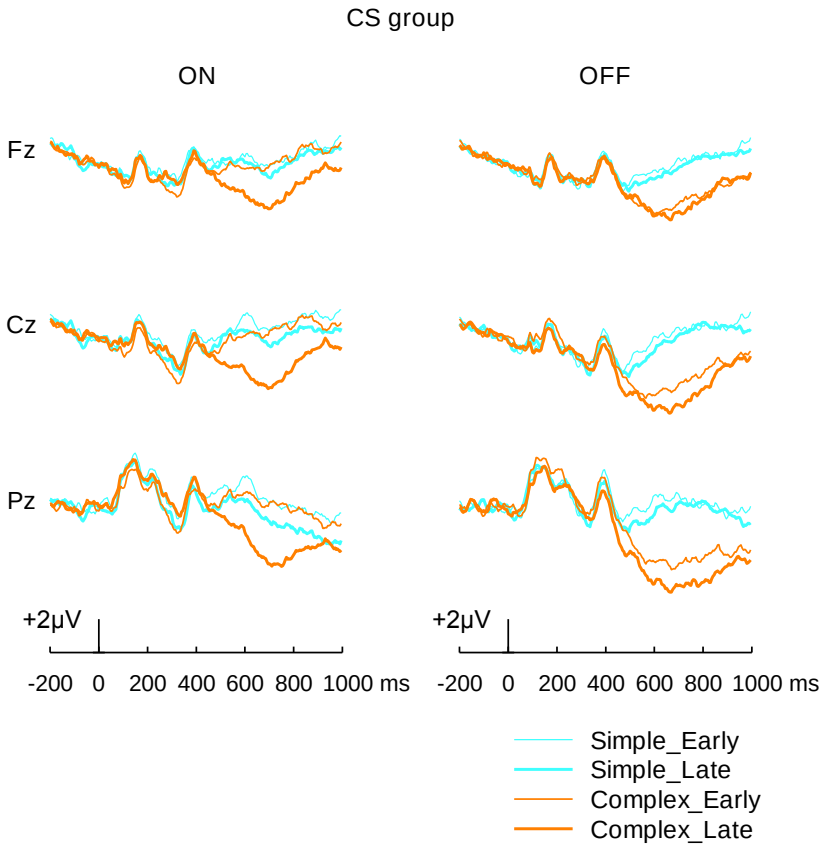


Figure 6-14 Grand average waveform from -200 to 1000 ms for CS group.

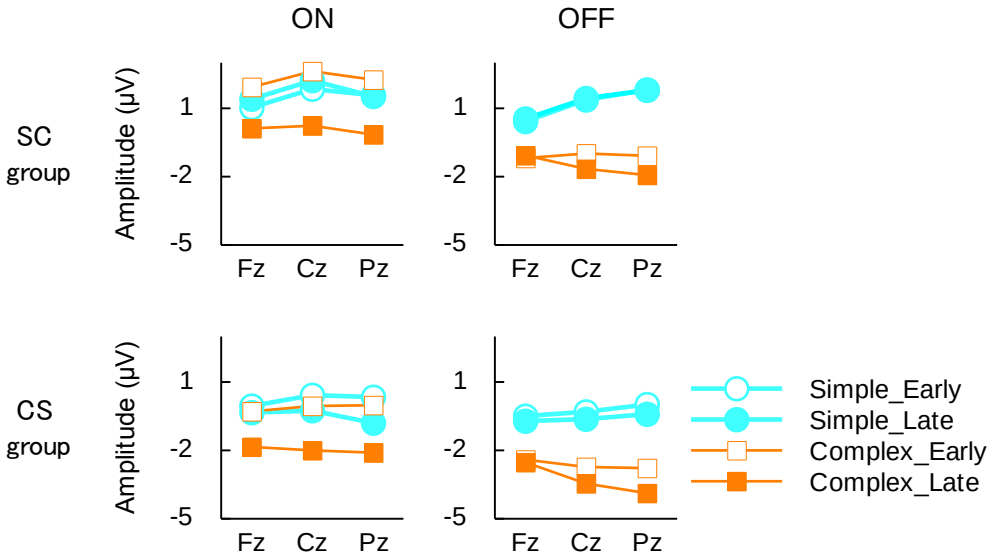


Figure 6-15 Mean amplitudes in the late latency range (440-900 ms).

6.1.4　考察

6.1.4.1　行動指標および後期成分から考えられる処理過程

反応時間に関しては，両群ともにLate試行でEarly試行よりも反応時間が延長するという効果が，Complex試行でSimple試行よりも大きかった．Early試行では，プローブ位置は，事前に学習した描き順の最初のセグメントにあり，Late試行では最後のセグメントにある．また，EarlyとLateのプローブ間にあるセグメントの数は，複雑な図形の方が単純な図形よりも多い．したがって，参加者が事前に学習した書き順通りに，継時的にイメージを生成・走査していたことが示された．この結果は，Kosslyn (1988)とも一致する．

さらに，両群ともに，複雑な図形の場合には単純な図形をイメージした場合よりも反応時間が延長し，その効果はLate試行で大きかった．複雑さは視覚化したセグメントの数を意味することから，Late試行ではEarly試行よりも多くのセグメントが視覚化されたと考えられる．つまり，参加者の方略として，プローブの位置を検出した時点で，たとえ最後の

セグメントまで視覚化していなくとも，反応に関わる処理が行われた．この解釈は，ON試行よりOFF試行において，イメージする図形が複雑な場合には，単純な場合よりも反応時間が延長するという結果からも支持される．OFF試行では，プローブが図形外のマス目にあるため，図形を構成するセグメントの最後までイメージ生成を行った上で反応を決める必要がある．そのため，プローブがあるセグメントを生成した時点で反応が可能なON試行よりも，複雑さの効果が大きかったと解釈できる．

さらに，後期成分の変動から，各群のON試行とOFF試行における処理過程の違いについて考察する．Yamazaki & Katayama (2013)と異なり，本実験では明瞭なP3頂点は観察されなかったが，潜時約440 msから900 msにかけて，大きな陽性成分が観察された．両群ともに，この陽性成分の振幅における条件差は正中線上の中心・頭頂部で大きく， ONとOFFの間で異なるパターンであった．この条件差が，P3によるものと考え，反応時間との対応から考察を進める．

ON試行では，SC群，CS群でともに，プローブ位置と複雑さの効果が交互作用的にP3振幅を変動させた．すなわち，複雑な図形をイメージし，かつプローブ位置が描き順の最後にあった場合には，他の条件よりも振幅が減衰していた．また，OFF試行では， 両群ともに，プローブ位置に関わりなく，Simple試行でComplexよりも振幅が増強した．このようなパターンの違いは，反応時間によって観察された難易度の違いと対応した．

しかし，一方で，プローブ位置の効果に関しては，反応時間では観察されなかった，群間での違いが観察された．SC群で観察されたプローブ位置の効果は，ON試行でのみ，複雑さとの交互作用として観察された. 一方, CS群では, プローブ位置と電極の交互作用がON, OFFの両試行で観察された．電極間の比較での有意差は検出されなかったが，このプローブ位置の効果はPz，Cz，Fzの順に大きく，他の分布を持つ電位の重畳というよりも，P3の

効果である可能性が高い．つまり，CS群でのみ，複雑さとON・OFF試行に関わらない，プローブ位置による難易度の違いが観察された．Figure 6-15の振幅パターンを群間で比較すると，CS群のSimple試行で，プローブ位置の効果が比較的大きくなっていることがこの効果の原因となっていると考えられる．Simple試行ではセグメント数が2本であるにも関わらず，CS群では，プローブ位置による難易度の差があったということになる．CS群では，Complex試行の図形を先に学習していたため， Simple試行の図形を想起することが相対的に難しくなった可能性がある．ただし，全体的な振幅値のパターンはSC群と共通しており，図形の複雑さによる難易度の差を超えない範囲での小さな効果といえる．さらに，CS群では，ONのEarly試行ではSimpleよりもComplex試行で反応時間が短縮していた．有意な差ではないが，このことも，想起に関する難易度の違いを反映する現象と考えられる．これらのことから，図形の記憶順は，想起の難易度を変動させていたと解釈される．

6.1.4.2 複雑さ，およびプローブ位置による初期成分の変動

ERPの初期成分について，両群で共通しているのは，複雑さによる効果が観察されたことである．本実験の第一の目的は，物理的刺激を統制した上で，Yamazaki & Katayama (2013)で観察されたような，イメージ課題中の初期成分の変動が起こるのかについて確認することであった．両群でのパターンは異なるが，物理的な刺激に関しては一貫して統一されていることから，イメージ開始合図の直後から初期成分の変動，すなわち視覚関連処理が開始されることが示された．

この初期成分の変動が，どのような過程を反映するかについて，両群の違いから考察する．SC群では，P1，N1振幅には実験操作による変動は観察されなかったが，P2でイメージの複雑さによる振幅の変動が観察された．P2振幅がComplex試行でSimple試行よりも増強するという複雑さの効果は，右半球後頭部で観察された．また，Complex試行とSimple

試行の差分，つまり複雑さの効果についても，P2振幅との大きな分布の違いは観察されなかった．P2に続くN2成分には，試行条件による振幅差は検出されなかった．

P2は視覚的な入力と，内的な表象や記憶における予期や言語的文脈との比較照合に関わる処理過程を反映していると考えられている（Evans & Federmeier, 2007）．また，Dunn (1998)は，単語の記憶課題において，単語の符号化時のP2振幅が，成績の良かった参加者では後頭部位，悪かった参加者では前頭部位で優勢になることを示した．彼らはこの結果について，前頭部P2は視覚刺激の符号化，後部P2は長期記憶内での単語の想起を反映すると考察している．また，本実験でP2振幅を変動させた図形の複雑さは，生成プロセスにおける長期記憶の賦活と関連づけられる（Dror & Kosslyn, 1994b; Emmorey et al., 1993）．これらのことから，SC群については，P2潜時帯で，呈示されたアルファベットに対応した図形の，長期記憶内での視覚的活性化が起こっていたと考えられる．

一方で，CS群では，P1で複雑さ，およびプローブ位置の効果が観察された．複雑さについては，電極PO3/4において，Simple試行でComplex試行よりも振幅が増強していた．この効果は，前頭から頭頂にかけての広範な部位に分布し，Simple試行でComplex試行よりも陽性に振れていることが示された．つまり，SC群のP2複雑さ効果と対比して，CS群でのP1潜時帯での複雑さ効果は100 ms以上早く，Simple試行でComplex試行よりも増強するという逆の極性の効果としてあらわれた．さらに，複雑さ効果の頭皮上分布も大きく異なった．これらのことから，P1での複雑さ効果はSC群のP2での効果とは異なる処理を反映した可能性が高い．

本実験では，両群の記憶順序の違いにより，長期記憶内での図形の活性化タイミングが異なったと考えられる．記憶順序に関しては，先に覚えたものの方が，後で覚えたものよりも短時間で想起できる（Sternberg, 1966）．本実験の場合では，C,Dの図形よりもA,Bの

方が想起しやすいということになる．また，本実験での反応時間，および後期成分の分析からは，複雑な図形で単純な図形よりも難易度が高いことが示された．このことを踏まえると，SC群では単純な図形をA，B，複雑な図形をC,Dとして順に記憶しているため，記憶順序と複雑さによる効果が相乗的にはたらき，Complex試行でSimple試行よりも全体としてイメージ生成時間が延長した．一方で，CS群に関しては，複雑な図形をA, B，単純な図形をC, Dとして記憶した．記憶順序ではA,Bの方がC,Dよりも，複雑さによる効果ではC,Dの方がA,Bよりも容易であったため，記憶順序による効果と複雑さによる効果が相殺した．P1の複雑さ効果は，このような，記憶順序と複雑さが混在して難易度が変化した記憶想起過程を反映するかもしれない．頭頂から前頭にかけての分布は，この効果が視覚処理ではなく，より一般的な記憶検索に関わるものであることを示唆する．これらのことから，長期記憶からの想起のしやすさによって，イメージ生成過程がERPの初期成分に反映される潜時帯は変動する可能性がある．

CS群では, P2に続くN2振幅にも試行条件による違いが観察された. N2振幅については, Simple試行において，Early試行でLate試行よりも増強するというプローブ位置の効果が, 後頭頂の左半球で大きかった．Complex試行でSimple試行よりも増強するという複雑さの効果は，Early試行で後頭頂の左半球優位に観察された．プローブ位置の効果についても, 後頭頂部位においてLate試行でEarly試行よりも増強する効果が, Simple試行で左半球優位に，Complex試行では左右の電極で異なって観察された．これらの効果の頭皮上分布は, N2振幅それ自体の分布と類似していた．後部のN2は，ターゲット検出課題中の，視覚に特異的な情報処理に関連する，自発的注意の程度を反映するという主張がある（Suwazono et al., 2000）．複雑さの効果はEarly試行で，プローブ位置の効果はSimple試行で，ともに後頭部位で大きかった．つまり，難易度の違いがN2振幅に影響した可能性があることを考えると，ON，OFF判断に関わる視覚的注意のはたらきを反映している可能性がある．

CS群では，SC群と異なり，刺激処理の初期段階からプローブ位置に影響を受けていたといえる．特に，複雑さの効果が観察された，つまり記憶想起の段階と考えられるP1潜時帯で，すでにプローブ位置の効果が観察されていた．長期記憶内での図形の活性化と同時に，プローブ位置の処理も進行していたと考えられる．一方で，SC群では，刺激評価に関わるP3潜時帯で，初めてプローブ位置の効果が出現した．したがって，図形の想起段階が終了した後，プローブ位置に対する判断を行っていたと考えられる．このような，群間でのプローブ位置効果の出現タイミングの違いは，セグメントを統合していく過程と走査過程の違いによるものかもしれない．ERP上でのプローブ位置の効果について，想起の難易度を一定にした上で確認する必要がある．

6.2 実験２　文字イメージ課題のプローブ位置による初期成分への影響[3]

6.2.1 目的

実験１では，心的イメージ課題中のERP初期成分の変動が，物理的な刺激位置の違いによるものではなく，イメージ対象の複雑さとプローブ位置によるものであることを示した．イメージする図形の複雑さが反映される潜時帯は，記憶順序に伴う想起のしやすさによって変動した．プローブ位置による効果に関しても，記憶順序の違いによってERP上に反映される潜時帯が変動した．実験１では，イメージ開始合図とプローブが同時に呈示されていたため，プローブ位置の効果に図形の想起難易度の違いが影響したと考えられる．一方，Yamazaki & Katayama (2013)では，プローブ位置による初期成分の変動が観察されている．しかし，生成と走査が同時に進行し，プローブ検出時点で生成を中止していたとすれば，プローブ位置による初期成分の変動は，記憶から想起したセグメントの数を反映し，プローブそのものに対する処理を反映したものではないかもしれない．そこで，プローブ位置そのものによって，ERPが変動するかどうかについて検討することを目的として本実験を行った．

本実験では，記憶順序による想起の難易度の影響が比較的小さいと思われる，文字刺激を用いた．また，プローブ刺激の処理に同期して起こる脳活動を検討するため，イメージ開始合図後100 msでプローブ刺激を呈示し，プローブをトリガーとしてERPを測定した．

実験１の結果から，ON試行とOFF試行では，処理過程が異なることが示唆された．ON試行では，生成・走査がプローブのあるセグメントに到達した時点で反応処理を行った．一方で，OFF試行では，生成・走査が完了した後，プローブの検出が行われたと考えられる．そうだとすれば，OFF試行中のERP上にプローブ位置の効果が観察された場合，生成・

[3] Yamazaki, K., Katayama, J. , & Murohashi, H. (2011). An ERP study of visual processing during image generation and inspection. *Journal of Mental Imagery*, 35(1&2), 109-122

走査が完了したタイミングを知ることができる．さらに，本実験では，イメージ開始刺激をプローブに先立って呈示したため，プローブ呈示時点ではある程度生成が進んでいることが予測できる．Farah (1988)では，イメージした文字を画面上に投影している際に，同じ文字が出た場合には，異なる文字の場合よりも後部優勢のN1 (潜時173 ms)が増強した．したがって，生成が進んでいるセグメントに関しては，イメージした大文字とプローブが重なるON試行では，OFF試行と異なった効果が初期成分にあらわれる可能性がある．これらの理由から，最初の分析では，OFF試行でプローブ効果が現れるタイミング，および，ON試行とOFF試行での波形の違いに注目した．その後，イメージ表象に対しての走査を反映すると考えられる，ON試行でのプローブ効果について，詳しく分析を行うこととした．

6.2.2 方法

6.2.2.1 参加者

視力もしくは矯正視力が正常な右利きの成人12名（男性6名，女性6名，21-26歳，平均年齢22.3歳)が実験に参加した．参加者は，実験前に本実験に関する説明を受け，同意した上で実験に参加した．

6.2.2.2 刺激

Cue刺激は5×5のマス目の中央にアルファベットの小文字があるもの，プローブ刺激は同様のマス目の一つに×印がついたものを使用した．Cue刺激の全体の大きさは6 cm ×6 cmであり，マス目の大きさは1.2cmであった．Cue刺激は大文字をイメージしたときに単純な形のもの (t, l)，複雑なもの (g, s)，その中間の複雑さの2文字 (c, u)を用いた．複雑さの効果についての検討では，単純な形と複雑な形の刺激のみを用いた．中間の複雑さの2文字については，刺激の種類を多くすることで，参加者が文字とプローブの配置による反応を完全に記憶することを防ぐ目的で設定した．文字刺激の特性上，プローブの位置に関して，Early

試行とLate試行，ON試行とOFF試行で完全に同一に設定することは不可能だったが，ON刺激とOFF刺激のプローブ位置はEarly試行，Late試行のいずれにおいても1マス以内の距離であった．

6.2.2.3　手続き

プローブ位置に関連するERPを明確にするため，Cue刺激を100ms間呈示後，プローブ刺激を500 ms間呈示した．参加者は，小文字に対応した大文字をマス目の中にイメージし，プローブ刺激の×印がイメージした大文字と重なるかどうかについて，できるだけ早く正確に選択反応を行った．プローブ刺激の呈示後，1500 msで次の試行が開始した．プローブがイメージした大文字と重なる場合（ON），重ならない場合（OFF），さらにその中で×印の位置がアルファベットの描き順の最初にある場合（Early），最後にある場合（Late)は等確率であった．48試行を1ブロックとし，15ブロック行った．刺激の呈示順は全てランダムであり，条件及び反応手は参加者ごとにランダマイズした．

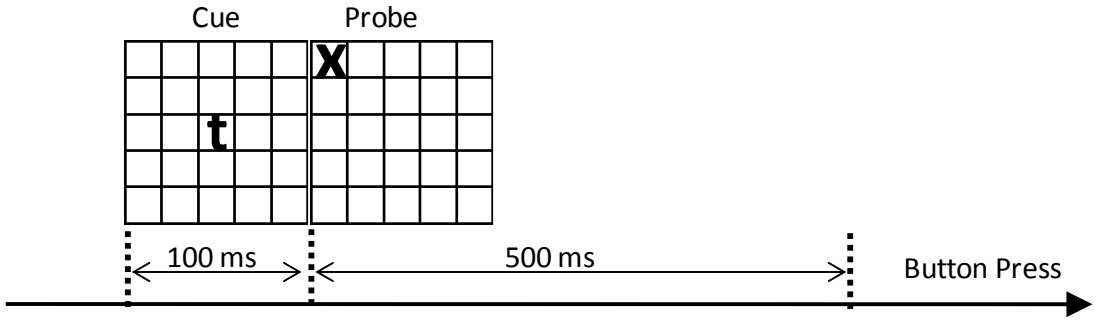


Figure 6-16　Experimental procedure for Exp. 2.

6.2.2.4　記録と分析

行動遂行について，反応時間と正答率を記録した．反応時間はイメージ刺激の呈示開始から反応までの時間を測定し, 各参加者の中央値を平均したものを用いた. 脳波およびEOGの記録は実験 1 と同様の手続きで行ったが，頭皮上の左右差について考慮するため，脳波については両耳朶の平均電位を基準として導出した．ERPはプローブ刺激呈示前200 msを

ベースラインとして500 ms間を加算して，初期成分の分析を行った．分析については，実験 1 と同様に行った．

6.2.3 結果[4]

6.2.3.1 行動指標

Figure 6-17に，平均反応時間を示す．反応時間について，反応種（ON/OFF)×複雑さ(Simple/Complex)×プローブ位置（Early/Late)のANOVAを行ったところ，3要因の交互作用が有意であった（$F(1, 11) = 7.07, p < .05$).

反応種ごとに，複雑さとプローブ位置の2要因分散分析を行ったところ，ON試行では交互作用が有意であった（$F(1, 11) = 5.72, p < .05$). プローブ位置の効果は，Simple（$F(1, 11) = 14.99, p < .01$)，Complex（$F(1, 11) = 39.36, p < .01$)の両試行で有意であった．したがって，ON試行では，Early試行よりもLate試行で反応時間が延長し，その効果の程度はComplex試行でSimple試行よりも大きかった．また，複雑さの効果は，Early，Lateの両試行で，有意でなかった．一方，OFF試行では，プローブ位置の主効果のみが有意であり（$F(1, 11) = 15.99, p < .05$)，Earlyよりも Lateで反応時間が延長したことが示された．

さらに，反応種の効果を確かめるため，複雑さごとに反応種×プローブ位置の2要因分散分析を行った．Simple試行では反応種（$F(1, 11) = 24.07, p < .01$)，およびプローブ位置（$F(1, 11) = 24.39, p < .01$)の主効果が観察された．Complex試行では交互作用が有意であったため（$F(1, 11) = 21.39, p < .01$)，プローブ位置ごとに反応種の1要因分散分析を行った．結果として，Late試行では反応種の効果は検出されず，Early試行においてのみ，OFF試行でON試行よりも反応時間が延長したことが示された（$F(1, 11) = 15.16, p < .01$). 単純な文字

[4]行動および ERP 指標のデータ表は付録 B を参照

をイメージした場合には， OFF試行でON試行よりも，また，Late試行でEarly試行よりも反応時間が延長した．また，複雑な文字の場合には，ON・OFF試行間での反応時間の違いはEarly試行で大きかった．

正答率に有意な差はなく，speed-accuracy trade offは観察されなかった．

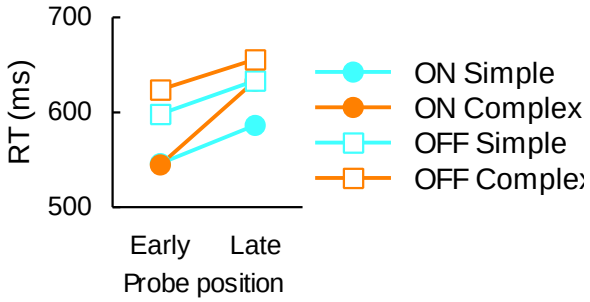


Figure 6-17　Mean response time.

6.2.3.2　ERP

初期成分

Figure 6-18，Figure 6-19に後部の総加算平均波形を示す．各電極で，後頭部位優勢の明瞭な電位が観察された. 総加算平均波形から， P1 (潜時約90 ms), N1 (165 ms), P2 (215 ms), N2 (265 ms)の各成分について分析を行った. 各成分の振幅として, それぞれP1 (80-100 ms), N1 (150-180 ms)，P2 (200-230 ms)，N2 (250-280 ms) の平均振幅を算出した．ON試行での各成分の振幅の平均値をFigure 6-20，OFF試行についてはFigure 6-21に示す．各成分の振幅について，反応種（ON，OFF)×複雑さ（Simple，Complex）× プローブ位置（Early, Late)×半球（Left, Right)×電極（PO7/8, PO3/4, O1/2)の5要因分散分析を行った．有意な統計値のまとめをTable 6-1に示す．プローブ位置の効果は反応の種類によって異なることが予測されるため，反応による違いに注目して分析を進めた．その後，プローブ位置がイメージ処理により関連すると考えられるON試行について，より詳しく分析を行った．

P1振幅については，複雑さと反応種の交互作用が有意であった．複雑さの効果は，ON試行で有意傾向であったが（$F(1, 11) = 4.67$, $p = .055$），OFF試行については有意な効果は検出されなかった．Complex試行での振幅がSimple試行よりも増強するという複雑さの効果が，ON試行でOFF試行よりも大きかったことが示された．

N1振幅については，電極の主効果，反応種の主効果，電極×複雑さ，および半球×複雑さの交互作用が有意であった．電極の主効果について，多重比較を行ったところ，全ての電極間での差が有意であった（$p < .05$）．反応種の主効果については，OFF試行でON試行よりも振幅が増強していた．また，電極ごとの複雑さの効果は，電極PO3/4でのみ有意であった（$F(1, 11) = 8.13$, $p < .05$）．半球ごとの複雑さの効果については，左半球でのみ有意であった（$F(1, 11) = 4.90$, $p < .05$）．したがって，N1振幅に関しては，Simple試行でComplex試行よりも増強するという複雑さの効果が，電極PO3/4で最大となる分布を持ち，右半球よりも左半球で大きかった．

P2振幅に関しては，反応種×半球×複雑さ×プローブ位置の交互作用が有意であった．反応種ごとに，半球×複雑さ×プローブ位置の3要因分散分析を行ったところ，ON試行では半球（$F(1, 11) = 7.13$, $p < .05$），複雑さの主効果（$F(1, 11) = 6.20$, $p < .05$），および3要因の交互作用が観察された（$F(1, 11) = 32.32$, $p < .05$）．半球ごとに複雑さ×プローブ位置の2要因分散分析を行ったところ，左半球では複雑さの主効果のみが有意であった（$F(1, 11) = 5.04$, $p < .05$）．一方，右半球では複雑さの主効果（$F(1, 11) = 5.49$, $p < .05$），および交互作用（$F(1, 11) = 6.42$, $p < .05$)が有意であった．さらに，右半球については，Late試行でのみ複雑さの効果が観察された（$F(1, 11) = 27.22$, $p < .01$）．したがって，ON試行では，Complex試行でSimple試行よりもP2振幅が増強した．その効果は両半球で観察されたが，右半球で，Late試行の場合にEarly試行よりも効果が大きかった．OFF試行についても同様に，半球×複雑さ×プローブ位置の3要因分散分析を行ったところ，半球（$F(1, 11) = 10.74$, $p < .01$），

およびプローブの主効果（$F(1, 11) = 10.74$, $p < .01$)のみが観察され，複雑さの効果は検出されなかった．OFF試行では，左半球よりも右半球で，また，Early試行でLate試行よりも振幅が増強していた．

N2振幅については，反応種×半球×複雑さ×プローブ位置の交互作用が有意であったため，電極について平均したデータを用いて，反応種ごとに半球×複雑さ×プローブ位置の3要因分散分析を行った．ON試行では，複雑さ（$F(1, 11) = 24.37$, $p < .01$)，およびプローブ位置（$F(1, 11) = 15.39$, $p < .01$)の主効果のみが有意であった．したがって，Simple試行でComplex試行よりも，また，Late試行でEarly試行よりも振幅が増強した．OFF試行では，半球（$F(1, 11) = 7.02$, $p < .05$)，複雑さ（$F(1, 11) = 9.66$, $p < .05$)，プローブ位置（$F(1, 11) = 40.42$, $p < .01$)の主効果，および3要因の交互作用が有意であった（$F(1, 11) = 18.73$, $p < .01$)．そこで，半球ごとに複雑さ×プローブ位置の2要因分散分析を行ったところ，両半球で複雑さ(左：$F(1, 11) = 10.18$, $p < .01$，右：$F(1, 11) = 36.63$, $p < .01$)，およびプローブ位置（左：$F(1, 11) = 7.46$, $p < .05$，右：$F(1, 11) = 39.36$, $p < .01$)の主効果が有意であった．

OFF試行でのプローブ位置効果は，P2潜時帯で観察された．したがって，本実験においては，文字イメージの生成・走査は，遅くともP2潜時帯で完了していた．また，ON試行とOFF試行の振幅差は，P1およびN1潜時帯で観察された．したがって，ディスプレイに投影された文字イメージとプローブが重なっている場合とそうでない場合で，初期成分の振幅が異なることが示されたが，この潜時帯では，プローブの位置がEarlyであるかLateであるかの違いは反映されなかった．

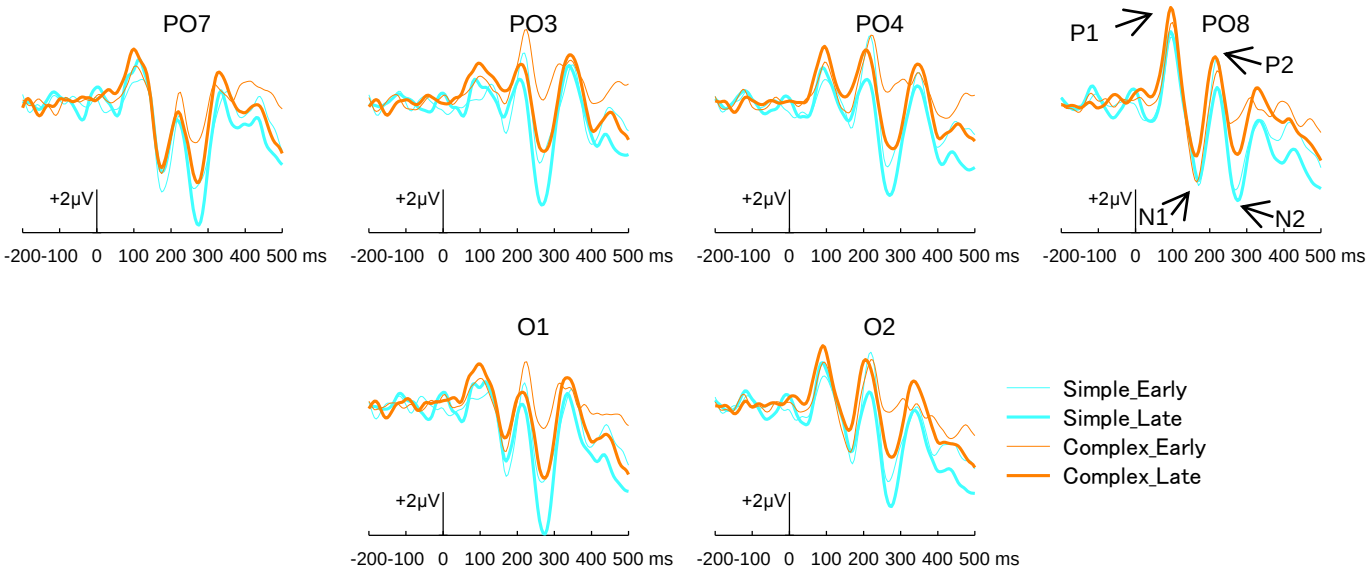


Figure 6-18 Average waveform for ON trials.

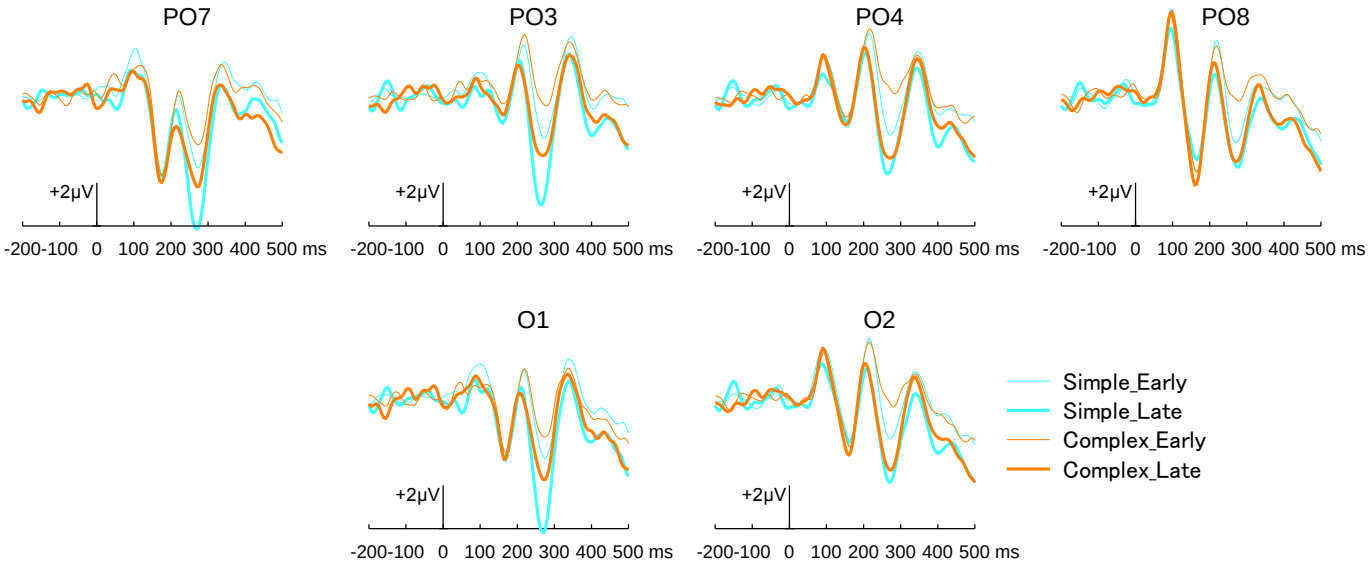


Figure 6-19 Averaged waveform for OFF trials.

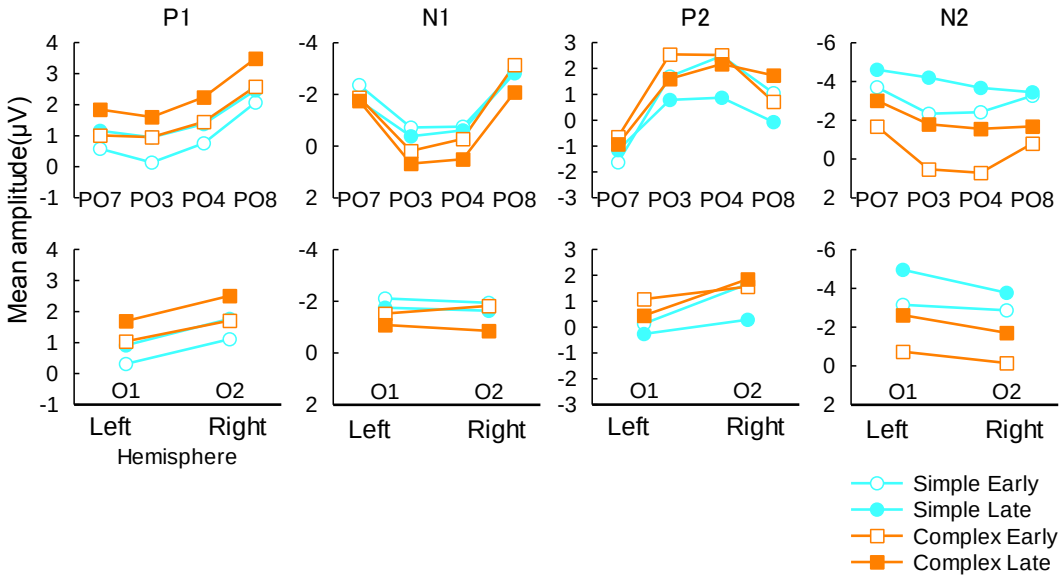


Figure 6-20 Amplitude of VEP for ON trials.

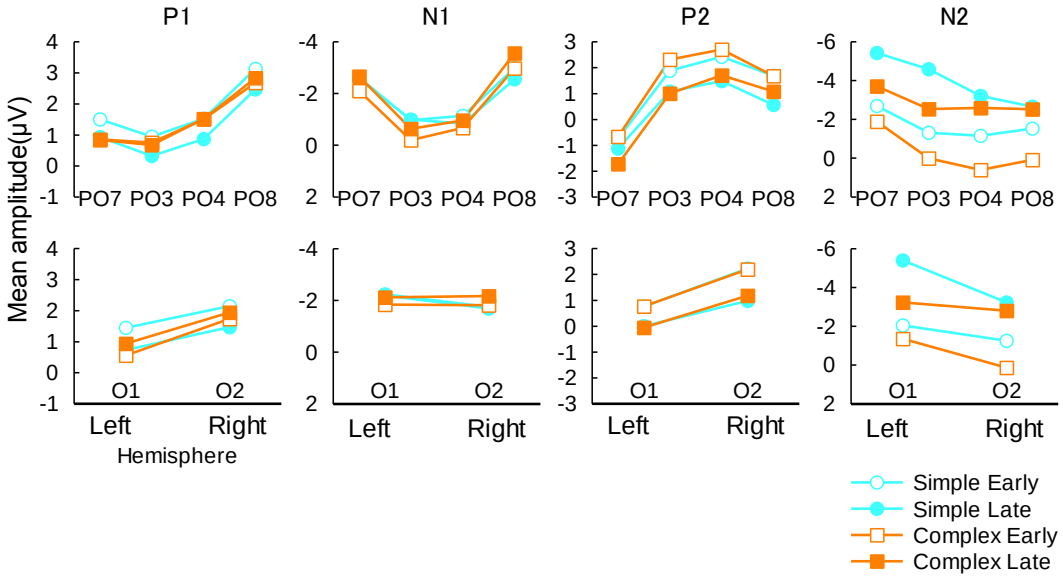


Figure 6-21 Amplitude of VEP for OFF trials.

Table 6-1 Significant effects for the P1, N1, P2 and N2 amplitudes.

	P1	N1	P2	N2
Response	–	6.82	–	–
Electrode	5.87	18.78	9.56	–
Hemisphere	7.87	–	9.00	–
Complexity	–	–	–	23.01
Probe	–	–	8.79	50.78
Interaction	R x C (7.99)	E x C (7.76)	R x H (6.54)	R x H (11.98)
	E x H (11.73)	H x C (5.21)	E x H (12.48)	R x C (5.85)
			E x P (8.93)	E x C (7.88)
			R x E x P (4.95)	E x P (6.15)
			H x C x P (16.28)	R x E x H (6.28)
			R x H x C x P (8.48)	H x C x P (12.05)
			E x H x C x P (7.64)	R x H x C x P(15.94)

プローブ位置による効果の分布

各成分の振幅の分析から，プローブ位置の効果はP1およびN1の潜時帯では観察されず，P2潜時帯以降で初めて観察された．プローブ位置を処理する過程について，さらに考察を進めるため，ON試行でのプローブ位置効果の分布について分析を行った．OFF試行では，生成・走査完了後，イメージした文字とは異なる位置にあるプローブ検出処理を行っていると考えられるため，分析から除外した．ON試行でのプローブ位置の効果として，Late試行からEarly試行での振幅を減じた値を算出した．

Figure 6-22にP2振幅の頭皮上分布，およびP2潜時帯でのプローブ位置効果の分布を示す．プローブ位置効果は，後頭部左右で，EarlyでLate試行よりも陽性の効果として観察された．また，その効果はSimple試行では右半球よりに，Complex試行では左半球よりに中心を持っていた．そこで，電極（PO3/4, PO7/8, O1/2, T5/6)×半球（Left, Right)×複雑さ（Simple, Complex)の3要因分散分析を行った．Figure 6-23に，各電極におけるプローブ位置効果を示す. 結果として, 電極の主効果（$F(3, 33) = 7.39$, $p < .01$), 半球×複雑さ（$F(1, 11) = 25.55$, $p < .01$)，電極×半球×複雑さの交互作用（$F(3, 33) = 4.97$, $p < .05$)が観察された．電極ご

とに，半球×複雑さの2要因分散分析を行ったところ，PO3/4 ($F(1, 11) = 34.63$, $p < .01$), PO7/8 ($F(1, 11) = 24.91$, $p < .01$), O1/2 ($F(1, 11) = 16.61$, $p < .01$), T5/6 ($F(1, 11) = 12.21$, $p < .01$)の全ての電極で交互作用が有意であった. それぞれの電極についての半球の効果は, Simple試行では, PO3/4 ($F(1, 11) = 17.13$, $p < .01$), PO7/8 ($F(1, 11) = 13.07$, $p < .01$), O1/2 ($F(1, 11) = 5.91$, $p < .05$)で有意であった. 一方Complex試行では, PO3/4 ($F(1, 11) = 13.14$, $p < .01$), PO7/8 ($F(1, 11) = 9.59$, $p < .05$), O1/2 ($F(1, 11) = 9.50$, $p < .05$), T5/6 ($F(1, 11) = 7.36$, $p < .05$)の全てについて，有意であった．つまり，プローブ位置効果は，Simple試行では右半球優位に，Complex試行では左半球優位に，後頭部を中心として分布していることが示された.

N2潜時帯でのプローブ位置効果についても，同様の分析を行った．Figure 6-24にN2振幅の頭皮上分布，およびN2潜時帯でのプローブ位置効果の分布を示す．EarlyでLate試行よりも陽性の効果が，後頭頂部位に優勢に観察された．したがって，電極（PO3/4, PO7/8, O1/2, T5/6)×半球（Left, Right)×複雑さ（Simple, Complex)の3要因分散分析を行ったが，電極の主効果のみが有意であった（$F(3, 33) = 7.79$, $p < .01$)．多重比較を行ったところ，電極間で有意な効果は観察されなかった（$p > .05$)が，効果の大きさはPO3/4で最も大きかった.

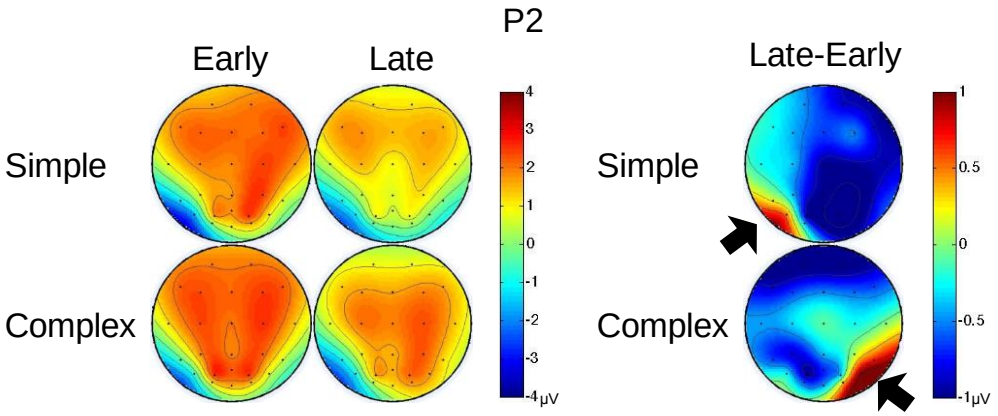


Figure 6-22 Topography of P2 amplitude and imagery effect for ON and OFF tirals.

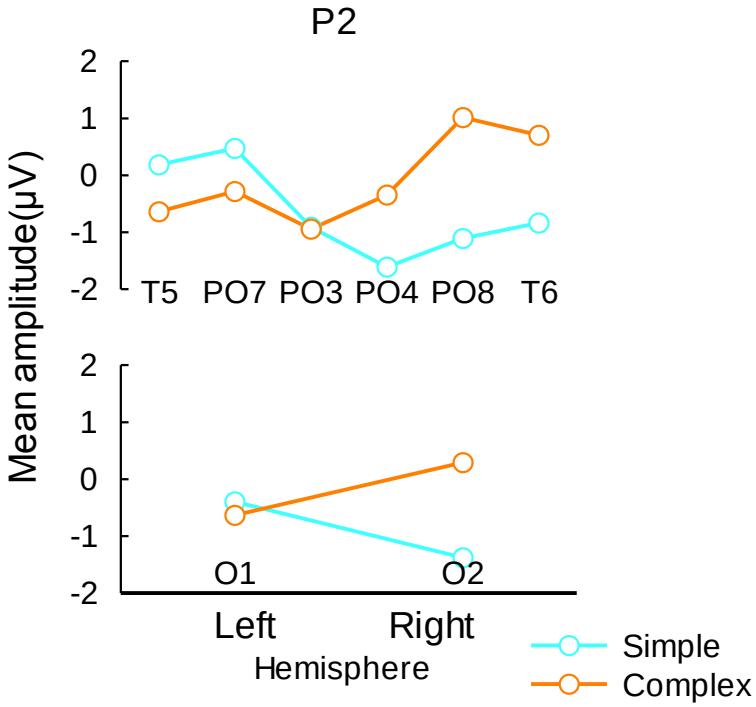


Figure 6-23 Probe effect in the P2 latency range at the posterior electrodes.

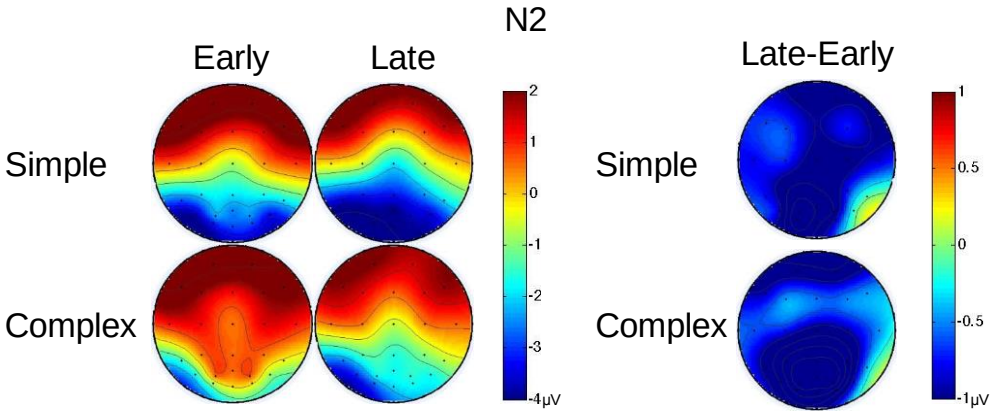


Figure 6-24 Topography of N2 amplitude and complexity effect for ON and OFF tirals.

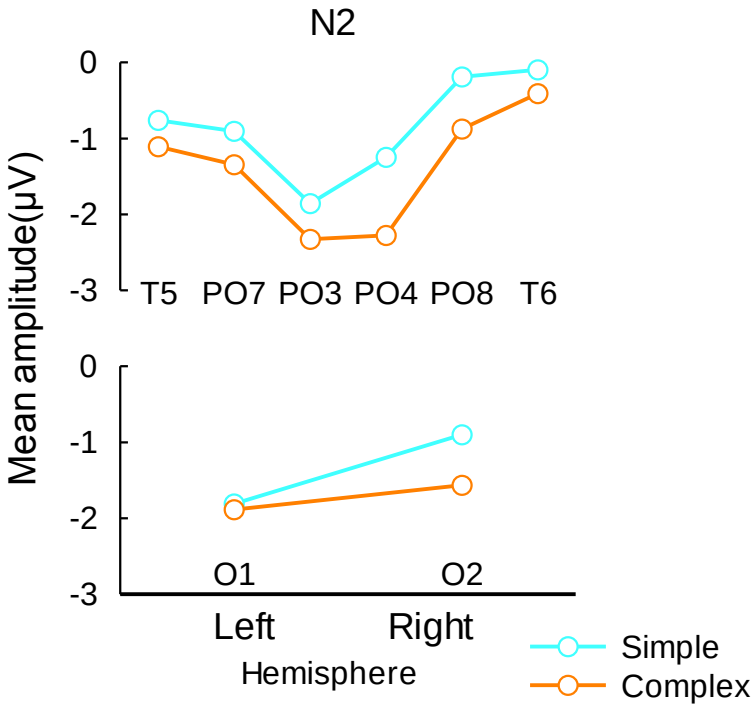


Figure 6-25 Probe effect in the N2 latency range at the posterior electrodes.

6.2.4 考察

6.2.4.1 行動指標から考えられる処理過程

反応時間については，ON試行とOFF試行で異なったパターンが観察された．ON試行ではEarly試行よりもLate試行で反応時間が延長し，その効果の程度はComplex試行でSimple試行よりも大きかった．つまり，プローブが描きはじめのセグメントにある場合には，描き終わりのセグメントにある場合よりも反応時間が短縮し，その効果は複雑な文字をイメージした場合のほうが，単純な文字の場合よりも大きかった．このことから，本研究の実験１と同様に，参加者が一定の描き順で文字イメージを生成していたことが確認された．しかし，実験１とは異なり，OFF試行での複雑さの効果は観察されなかった．本実験では，イメージ開始刺激を呈示した後，100 ms後にプローブ刺激を呈示した．そのため，同時呈示した場合とは異なり，プローブ呈示時点で，長期記憶内での活性化がすでに開始していた．したがって，OFF試行での複雑さの効果が表れなかったと考えられる．ただし，プローブ刺激呈示時に，生成が完了していたと考えることは難しい．同種の課題において，イメージ完了報告後にプローブ刺激を呈示した場合には，プローブ位置は反応時間に影響しない (Kosslyn et al., 1988). 本実験では, 単純な文字をイメージした場合であっても，Late試行でEarly試行よりも反応時間が延長した．したがって，生成過程の少なくとも一部は，プローブ刺激呈示後にも行われていたと考えられる．

実験１では，反応時間における複雑さの効果がOFF試行でON試行よりも大きかったことから，ON試行ではプローブ位置に到達した時点で，また，OFF試行では生成が全て完了した後に，反応処理が行われたと結論した．本実験では，複雑さに関して同様の結果は観察されなかったが，ON・OFF試行による反応時間の違いについて分析したところ，Complex試行では，Early試行でのみON・OFF試行の違いが観察され，Late試行では違いが検出されなかった．つまり，最後まで生成を行うべきLate試行ではON試行とOFF試行との違いが見られなかったのに対して，生成途中でも反応に移行できるEarly試行では，OFF試行より

もON試行で素早く反応が行われた．したがって，Complex試行に関しては，ON試行で生成途中での反応が行われたと考えられる．一方で，Simple試行に関しては，ON試行でOFF試行よりも反応時間が短縮したが，その程度はプローブ位置に関わらなかった．本実験では文字を刺激として用いたため，Simple試行でのセグメント数が2つしかなく，ON試行とOFF試行の間でのプローブ位置の効果の違いが観察されにくかった可能性がある．別の可能性として，プローブ刺激に先だって呈示されたイメージ開始刺激により，すでに生成が完了していた可能性が考えられるが，そうだとすると，ON試行とOFF試行での反応時間の違いを説明することが難しい．これらのことから，イメージ開始刺激の先行呈示によって，プローブ呈示時には生成処理が開始されていたが，ON試行ではプローブ刺激を検出した時点での反応が行われ，OFF試行では最後まで生成を完了させていたという解釈の上，ERPの検討を行っていく．

6.2.4.2 生成初期に想定される処理過程

P1振幅については，Complex試行でSimple試行よりも増強する効果が，ON試行でOFF試行よりも大きかった．本実験では，イメージ開始合図が先行して呈示されたため，トリガーであるプローブ刺激が呈示された時点では，生成がすでに開始していた．したがって，ON試行で観察された複雑さ効果の増強は，活性化した視覚表象に，プローブ刺激が重なって呈示されたことによるものと考えられる．Farah (1988)では，文字イメージを維持している画面上の位置に，同じ文字を瞬間呈示した場合には，異なる文字を呈示した場合よりも，潜時約160 msに頂点を持つN1の振幅が増強した．本実験ではプローブとして，文字刺激ではなく単なる×印を用いているため，より早い潜時帯で反応があらわれた可能性がある．また， N1振幅については，OFF試行でON試行よりも振幅が大きかった．両後側頭を中心に分布し，電極PO7/8で最大値をとった．しかし，Simple試行でComplex試行よりも増強

するという複雑さの効果は，PO3/4で最大となる分布を示した．N1振幅の変動はP1で観察された効果と同様に，イメージ表象との重なりによる視覚的反応であると考えられる．しかし，N1振幅と複雑さ効果が最大になる部位が異なっているため，N1そのものというよりも，P1から引き続く効果が重畳したものである可能性が高い．

P1およびN1潜時帯では，複雑さによる効果が大きかった．この効果は，プローブ刺激に先立って呈示されたイメージ開始合図による，生成関連の活動と考えられる．P1，N1の両潜時帯は，イメージ開始合図の呈示を起点とすると，180-280 msの区間に当たる．実験１において，本実験と同様の記憶順序で学習を行ったSC群では，潜時210-240 msのP2成分に頭皮上後部で複雑さの効果があった．このことを考慮すると，この潜時帯では記憶表象の活性化が行われていたと解釈できる．頭皮上後部における複雑さの効果が，ONとOFF試行で異なっていたことは，活性化された視覚的な記憶表象とプローブ位置との重なりによる反応と考えられる．

ON・OFF試行での違いが観察されたにも関わらず，プローブ位置の効果が観察されなかったことは興味深い結果といえる．ON試行とOFF試行の違いは，プローブがイメージした大文字に重なるかどうかである．ON・OFFの違いは区別するが，描き順を意味するプローブのEarly・Lateを区別しないような表象が形成されていた可能性がある．そのような表象は，Kosslyn (2006)において仮定された対象地図（object map)と一致する．彼の理論によれば，対象地図は，「空間特性処理」，つまり，空間特性を処理する背側の処理経路によって作成される表象であり，対象のおおまかな位置関係を同定する．複雑な部分を持つイメージを生成する場合には，この対象地図に基づいて注意の窓をシフトさせ，各部分を配置・構成していくと考えられている（Kosslyn, 2006）．本実験は，複数の部分を持つ文字をイメージする課題を用いたため，最初に対象地図が作成され，その後，各セグメントの配置が行われたと想定できる．それは，P1およびN1でON・OFF試行の弁別がされていたにも関

わらず，直接反応処理に移行するのではなく，その後のP2潜時帯において，プローブの効果が観察されたことからも推察される．

6.2.4.3 プローブ位置による初期成分の変動

プローブ位置に関連した変動は，P2潜時帯において，初めて観察された．P2振幅については，ON試行とOFF試行で，複雑さとプローブ位置の影響が異なった．ON試行では，Complex試行でSimple試行よりも，両半球でP2振幅が増強した．また，右半球では，Late試行の場合にEarly試行よりも大きな複雑さの効果が観察された．OFF試行では，複雑さに関わらず，Early試行でLate試行よりも振幅が増強していた．OFF試行でプローブ位置の効果があったことから，少なくともこの潜時帯で生成・走査が完了していた．また，ON試行のみにおいて，複雑さとの交互作用が観察されたことから，イメージした大文字の描き順に関連した処理が行われたことが示唆された．すなわち，生成時の視覚的構成化，あるいは走査のどちらかを想定できる．

ON試行について, この効果の分布を検討した結果, Simple試行では左後側頭部, Complex試行では右後側頭部に中心を持つことが示された．P2潜時帯でのプローブ位置効果はLate試行からEarly試行の波形を引き算している．したがって，Early試行でLate試行よりも陽性となる部位が，Simple試行では右の，Complex試行では左の後側頭部位に優勢であったことになる．本実験では，文字刺激を用いたため，プローブの物理的位置に関しては統制が難しかったため，この左右差は，プローブの物理的位置に起因するかもしれない．SimpleとComplex試行のプローブの位置について，Figure 6-26に示す．Simple試行について，Early試行でのプローブ位置は，左側に多い．一方で，Late試行については，中心からやや右よりに配置されていた．また，Complex試行については，Early試行のプローブ位置は右側に位置しており，Late試行では中心から左側に位置していた．この物理的な位置の違い

が，対側後頭部位でのP2振幅の増強をもたらしたとするならば，P2潜時帯でのプローブ位置効果の分布と対応する．したがって，イメージ処理とは関わりなく，プローブの物理的な位置に対する視覚処理の影響が観察されたという可能性が考えられる．

しかし，単純な物理的属性のみによる変動とは考えられない要因がいくつか存在する．一つ目は，単なる物理属性のみを反映する潜時帯としては遅すぎるということである．P2は感覚誘発性反応であるが，認知処理によっても大きく影響を受ける（Curran & Dien, 2003; Dunn et al., 1998; Evans & Federmeier, 2007; Luck & Hillyard, 1994; Misra & Holcomb, 2003）．P1およびN1にはプローブ位置による効果がみられず，この潜時帯においてのみ観察されたということは，物理的位置には関連しているが，認知的な処理を介した上での影響として考えることが妥当である．すなわち，イメージ生成時の視覚的構成化や，走査を行った結果であるという可能性が指摘できる．二つ目の要因としては，OFF試行との違いが挙げられる．OFF試行では，物理的な差を最小化するため，ON試行でのプローブ位置からできるだけ近い場所にプローブ位置を設定した．したがって，物理的な違いとしては，1-2マス以内の差に限定されている．しかし，OFF試行とON試行では，異なったパターンとしてP2振幅が観察された．単純な物理的位置の違いであれば，このような違いが観察されるとは考えにくい．

これらのことから，プローブ位置そのものが，ERPの初期成分を変動させることが明らかになった．しかし，その変動がどのような処理過程を反映するかについては，本実験から結論することは難しい．これまでの行動指標による先行研究からは，プローブ位置は，セグメントを視覚化して統合していく過程（Dror & Kosslyn, 1994b; Emmorey et al., 1993），あるいはセグメント内での走査過程（Kosslyn, 1988）と考えられている．ON試行において，複雑さの効果の大きさがプローブ位置間で異なっていたことからは，このどちらであったとしても，解釈が可能である．

文字上での走査を反映したとするならば，EarlyとLateの位置の違いは，単純な文字よりも複雑な文字の方が大きいため，走査に関しても複雑さの効果が交互作用として観察されたと解釈できる．また，生成時の部分の構成化を反映したとするならば，生成時の視覚的構成化と走査を同時に行っており，プローブ検出時点で視覚的構成化が終了したと解釈できる．ただし，生成時の部分の構成化は，セグメントを配置していく過程であるため，セグメントの数には関連するが，プローブの位置自体には関わりないとも考えられる．いずれにせよ，本実験の結果のみからは，P2プローブ位置効果が生成と走査のどちらに関わるかについて断言することができないため，実験３において，この可能性を検討する．

N2振幅については，ON試行ではSimple試行でComplex試行よりも，また，Late試行でEarly試行よりも振幅が増強した．OFF試行では同様の効果が，左右半球間で異なってあらわれた．生成が完了した後の，イメージした文字には重ならないマス目にあるプローブを探索していたと考えられる．ON試行のN2潜時帯のプローブ効果の分布に関しては，LateでEarlyよりも陰性となる効果が，後頭頂部位中心に観察されたが，複雑さとプローブ位置の効果は観察されなかった．この潜時帯では，イメージした文字上での走査過程が終了し，ターゲット処理へと移行していたと考えられる．

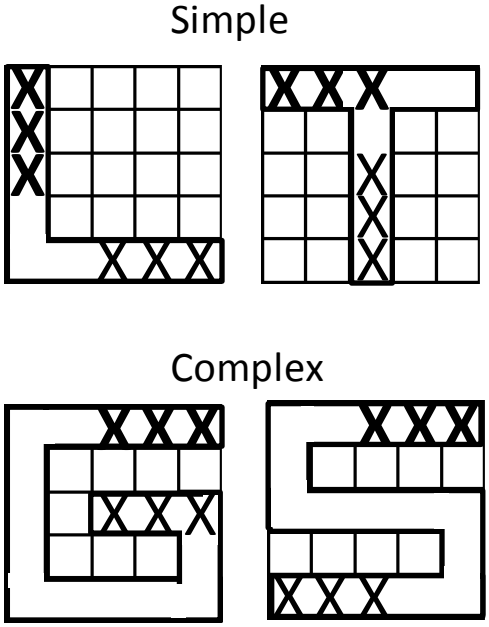


Figure 6-26 Probe position for ON trials.

The thick X marks indicate Early probe, and thin X marks indicate Late probe, respectively.

6.3 まとめと今後の課題

実験１では，イメージ開始合図に対する初期成分の振幅が，物理的な刺激によるものではなく，イメージに関わるパラメータによって変動することが確かめられた．複雑さ効果については，想起難易度によってタイミングが異なるものの，一貫して初期成分に反映されることが示された．しかし，プローブ位置によるERP効果については，両群で振る舞いが異なった．SC群ではプローブ効果が観察されたのが後期成分であり，視覚処理との関連は示されなかった．CS群では初期成分でプローブ効果が観察されたが，その分布は中心から後頭にかけての広範囲であった．

実験２では，記憶想起に関する難易度が比較的一定である文字刺激を使用し，プローブ位置が初期成分に影響するかについての検討を行った．P1およびN1の振幅には文字の複雑さが反映された．このことから，プローブ刺激の100 ms前に呈示されたイメージ開始刺激

による視覚的記憶の活性化が，この潜時帯で行われたことが示唆された．また，この潜時帯では，ON試行とOFF試行で異なった振幅が観察されたにも関わらず，プローブ位置による影響は見られなかった．すなわち，イメージ生成の初期において，視覚化すべき文字に重なるプローブがONかOFFかは区別するが，プローブの詳細な位置については区別しない状態の表象がつくられていた可能性を示す．そのような表象については，Kosslyn（2006）においても，対象マップ（object map)として言及されている．対象マップは，複数の部分によって構成される物体のイメージを生成する際に，部分を配置するガイドの役割を果たすための，骨格イメージとして定義される．この対象マップが実験１の複雑さの効果であったとすると，SC群では記憶順序に従って，単純な図形の対象マップが複雑な図形よりも先につくられていた．単純な図形では，プローブの位置による効果はわずかである．そのため，初期成分に反映されるような潜時帯では，プローブの効果は観察されなかった．一方，CS群では，複雑な図形の対象マップが単純な図形よりも先につくられ，それに続く視覚的構成化，あるいは走査が行われた．したがって，複雑さとプローブ位置の効果が交互作用として観察されたと考えることができる．

実験２において，プローブの位置は，P2およびN2振幅を変動させた．特に，ON試行でのP2潜時帯における効果の分布は，プローブの位置に関連した認知処理が行われていた可能性を示唆する．この変動は，生成の一部である視覚的構成化，あるいは走査に関するものと考えられるが，本実験の結果からはどちらの処理を反映するか決定することはできない．実験３ではより明示的に走査過程を分離し，プローブ位置の効果についてさらに検討を行う．

第7章　心的イメージ走査の処理過程（実験３）[5]

7.1 目的

実験２の結果から，文字イメージ課題において観察される初期成分の変動に関して，プローブ位置の効果が，生成の一部である視覚的構成化と走査のどちらかを反映する可能性が示された．実験２のように，イメージ開始合図とプローブ刺激の呈示が近接している場合，生成と走査が同時に進行すると考えられる．そのため，プローブ位置の効果が，どちらに関わるものであるかを決定づけることが難しかった．そこで，本実験では，生成と走査を可能な限り分離し，走査に関わるプローブ位置の効果について検討することを目的とした．

そのための方法として，実験２の基本的なパラダイムにいくつかの変更点を加えた．一つ目として，プローブ位置に焦点を当てるため，文字の複雑さごとの分析は行わず，プローブ位置に基づいてERPを分析した．また，生成が関わる場合と，走査のみの場合とを比較するため，刺激の呈示時間を操作した．Short-ISI条件では，イメージ開始Cueの呈示後200 msでプローブ刺激を呈示した. 実験2では, Cueとプローブの呈示間隔が100 msであり，Cueによる誘発反応が重畳していた．本実験では，その影響を最小化しつつ，生成に連続した時間帯を計測するため，呈示時間をさらに100 ms延長した．この条件では，生成と走査過程が重なり合って生起している場合の，プローブ刺激に対するERPについて検討した．また，Long-ISI条件では，イメージ開始Cueからプローブ刺激の呈示までを1600 msとし，生成が完了するのに十分と思われる時間間隔を設定した．このことにより，生成完了後の走査のみについて，検討が可能となった．

---

[5] Yamazaki, K., & Katayama, J. (2006, October). *The relationship between generation and inspection of mental imagery: An ERP study.* Poster session presented at the annual meeting of the Society for Psychological Research, Vancouver, Canada.

プローブ位置による初期成分の変動が，走査によるものであれば，Short-ISI条件とLong-ISI条件の両方でプローブ位置の効果が観察されると予測できる．また，生成中の視覚的構成化に関わるものであれば，Short-ISI条件でのみ，プローブ位置の効果が観察されると考えられる．

7.2 方法

7.2.1 参加者

視力もしくは矯正視力が正常な右利きの成人11名（男性5名，女性6名，21-26歳，平均年齢22.3歳)が実験に参加した．参加者は，実験前に本実験に関する説明を受け，同意した上で実験に参加した．

7.2.2 刺激

刺激は実験２と同一であった．

7.2.3 手続き

基本的な手続きは実験２と同様であったが，Short-ISI条件とLong-ISI条件を分けて実験を行った．Figure 7-1に実験手続きを示す．Short-ISI条件では，Cueが100 ms間呈示された後，さらに100 ms後にプローブを呈示した．したがって，生成が継続していると思われる状態でプローブ刺激が呈示された．一方，Long-ISI条件では，Cueが100 ms間呈示された後，1500 msでプローブを呈示した．実験１，および２の反応時間から，イメージの生成は1500 ms以内には完了すると考えられるため, Long-ISI条件でのプローブに対する処理過程は走査のみと仮定できる．

48試行を1ブロックとして，各条件9ブロックずつ行った．刺激はランダム順に呈示し，条件，反応手については参加者ごとにランダマイズした．

7.2.4 記録と分析

行動遂行について，反応時間と正答率を記録した．反応時間はプローブ刺激の呈示開始から反応までの時間を測定した．本実験では，個人差が大きく観察されたため，各参加者の中央値を用いて分析を行った．

脳波およびEOGの記録は，以下の部分を除いて，実験２と同様の手続きで行った．本実験ではプローブ刺激が反映する処理について検討するため，生成・走査を行う場合と，走査のみを行っている場合を比較する．したがって，プローブ刺激をトリガーとして加算平均を行った．刺激呈示前200 msをベースラインとして1200 ms間を加算して，初期成分の分析を行った．

行動・脳波データは反復測定分散分析（analysis of varianvce: ANOVA)を用いて検討し，下位検定はBonferroni法を用いた．

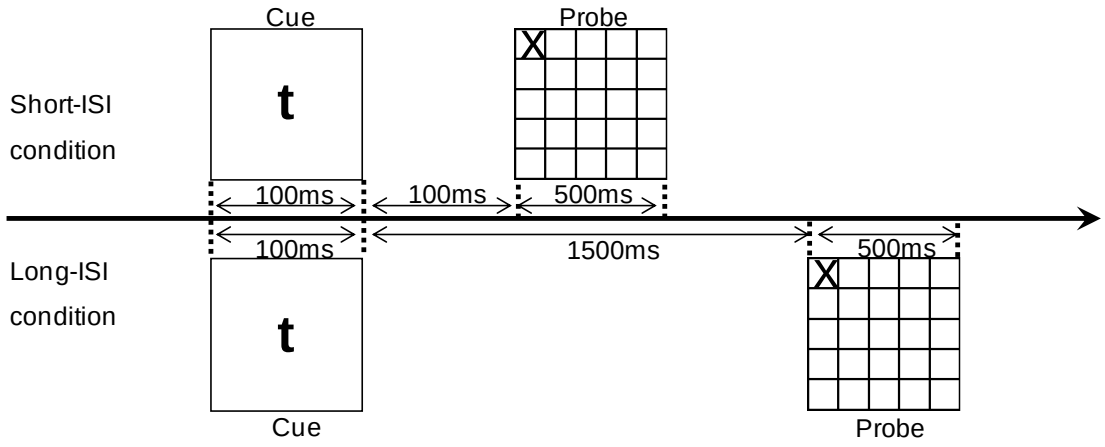


Figure 7-1 Procedure for Short-ISI and Long-ISI condition.

7.3 結果[6]

7.3.1 行動指標

Figure 7-2に平均反応時間と正答率を示す．反応時間について，反応種（ON/OFF)×刺激間間隔（Short-ISI/Long-ISI)×プローブ位置（Early/Late)の3要因分散分析を行ったところ，3要因の交互作用が有意であった（$F(1,10) = 5.61$, $p < .05$）．条件ごとに，反応種×プローブ位置の2要因分散分析を行ったところ，Short-ISI条件では交互作用が有意であった（$F(1,10) = 10.33$, $p < .01$）．さらに，プローブ位置の効果として，ON試行でのみ，Earlyよりも Late試行で反応時間が延長したことが示された（$F(1,10) = 17.31$, $p < .01$）．Long-ISI条件では，反応の主効果のみが有意であった（$F(1,10) = 81.98$, $p < .01$）．したがって，プローブによる反応時間の延長は，Short-ISI条件のON試行でのみ起こっていたことが示された．正答率について有意な効果はなく，speed-accuracy trade offは観察されなかった．

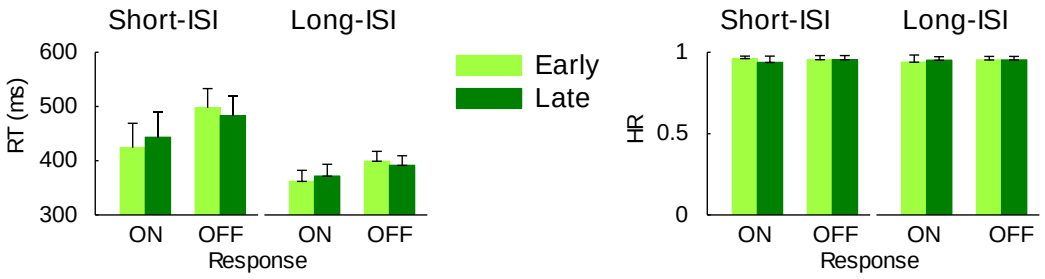


Figure 7-2 RT and Hit rate.

7.3.2 ERP

Figure 7-3，Figure 7-4に，後部電極における条件ごとの総加算平均波形を示す．条件間での波形の違いが大きく，初期成分の振幅を単純比較することが難しかったため，プローブ位置，および反応種による波形の分岐を分析することとした．両条件について，プローブ位置の効果が最も早い潜時帯で観察された，電極PO7について分析を行った．5ポイント

[6]行動および ERP 指標のデータ表は付録 C を参照

ごとに，反応種（ON/OFF)×プローブ位置（Early/Late)の2要因分散分析を行い，4区間以上連続で5%水準での有意な効果が見られた区間についてFigure 7-5に示す．下部のグレーのラインが反応種の主効果，黒のラインがプローブの主効果を表す．Short-ISI条件では，最初のプローブの効果は180 msから有意となり，その後，380 ms 以降および530 ms以降で反応種の効果が有意となった．さらに，630 ms以降でプローブ位置の効果が再び観察された．Long-ISI条件では，プローブ位置の効果は155 ms以降で初めて有意となり，その後，355 ms以降で反応種の効果が観察された．430 ms以降からは，再びプローブ位置の効果が有意となり，分析区間の最後までその差は継続した．

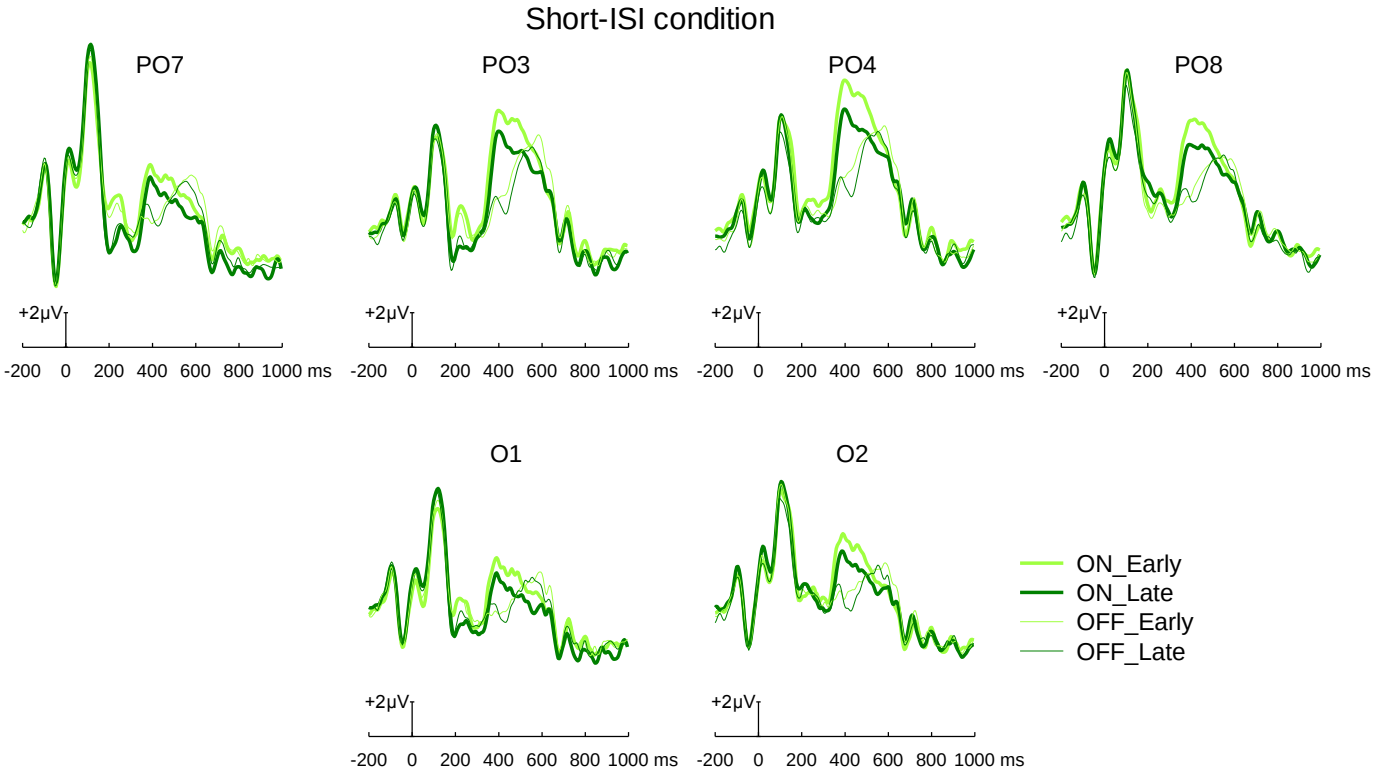


Figure 7-3 Grand average waveform for Short-ISI condition.

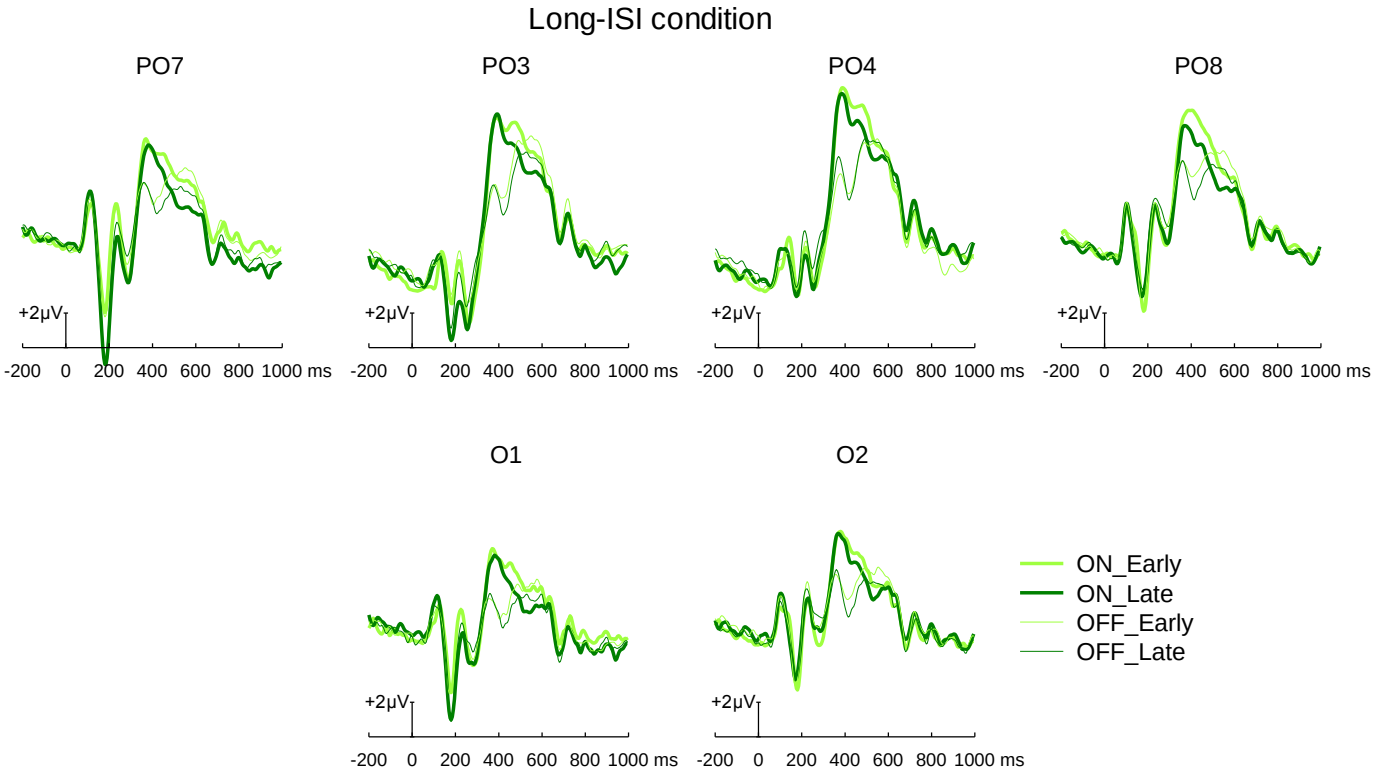


Figure 7-4 Grand average waveform for Long-ISI condition.

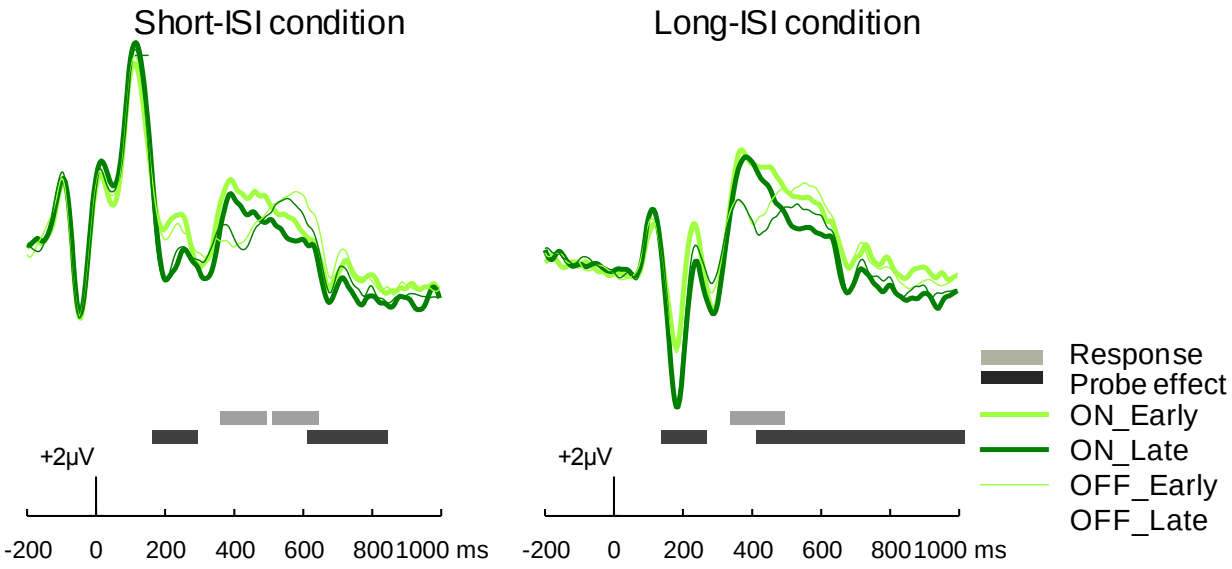


Figure 7-5 Divergence between waveforms at PO7.

The gray line under the waveforms indicates significant main effect of response (ON/OFF), and the black line indicates main effect of probe (Early/Late).

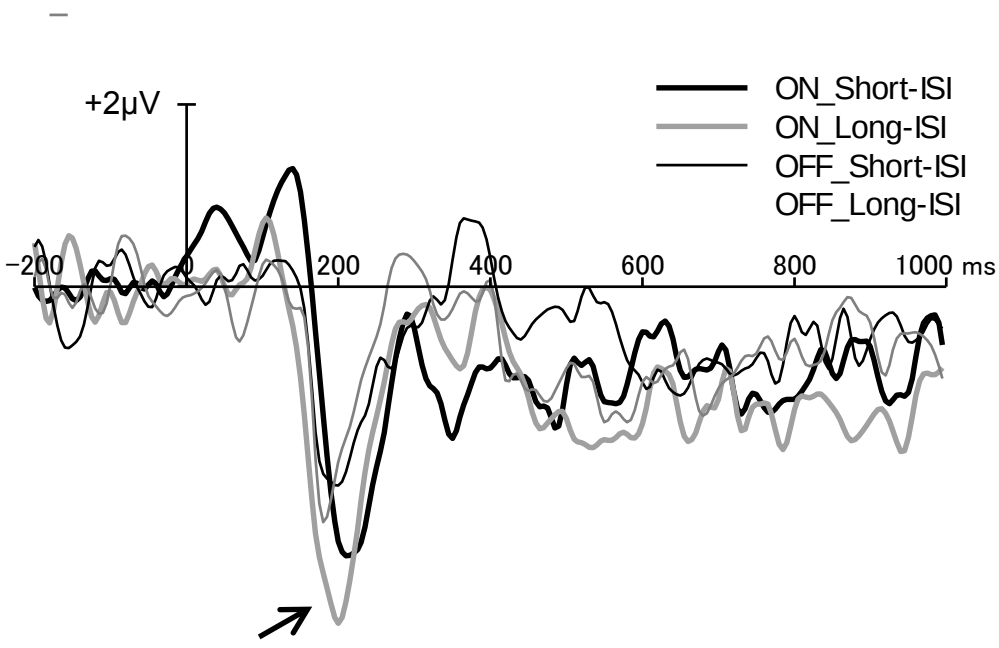


Figure 7-6 Difference wave between Late and Early trials at PO7.

波形の分岐の分析により，両条件で，プローブ位置の効果が反応による違いに先立って出現したことが示された．また，プローブ位置効果の後，反応による違いがあらわれ，その後，再びプローブ位置効果が観察されるというパターンについても同一であった．さらに，Long-ISI条件では，Short-ISI条件よりも25 ms早くプローブ位置の効果が出現した．しかし，条件ごとに分けて分析を行ったため，有意な効果であるかどうかについて確認する必要がある．

Short-ISI条件とLong-ISI条件でのプローブ位置効果について直接比較するため，Late試行からEarly試行の値を減じた波形を算出した．PO7における波形をFigure 7-6に示す．プローブ位置の効果は，両条件の潜時約200 ms付近において最大値を示した．この電位について，155-280 msの区間の頂点振幅および頂点潜時を算出して分析を行った．Figure 7-7に頂点振幅を示す．頂点振幅について，刺激間間隔（Short-ISI, Long-ISI)×反応種（ON, OFF)×電極（PO7, PO8)の3要因分散分析を行った結果，反応種（$F(1, 10)=11.94, p < .01$)，および電極の主効果（$F(1, 10)=20.46, p < .01$)が有意であった．したがって，ON試行ではOFF試行よりもプローブ位置の効果が増強したことが示された．プローブ位置効果は左後頭頂部位で優勢であった．Figure 7-8にこの潜時帯でのプローブ位置効果の分布を示す．プローブ位置の効果は，条件および反応種による分布の変動を受けず，一貫して左後頭頂部位で優勢であった．したがって，頂点潜時についての分析は電極PO7における値を用いて行った．Figure 7-9に頂点潜時を示す．条件×反応種の2要因分散分析を行ったところ，交互作用が有意であった（$F(1, 10)=8.59, p < .05$)．反応種の効果は，Short-ISI条件でのみ有意であった（$F(1, 10)=5.11, p < .05$)．したがって，プローブ位置効果が最大となる時点は，Short-ISI条件ではON試行でOFF試行よりも遅延したが，Long-ISI条件では反応種による違いが観察されなかった．

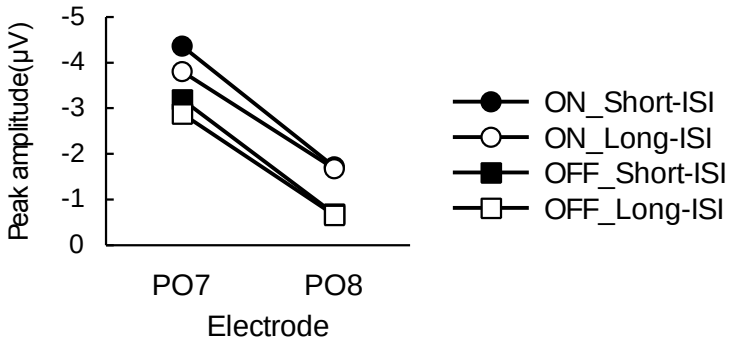


Figure 7-7 Peak amplitude of probe effect on the difference waveform.

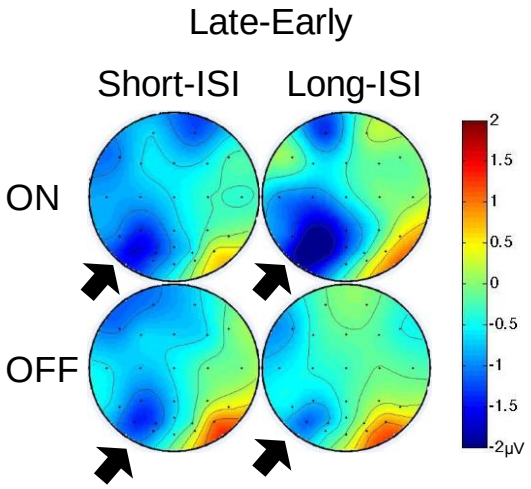


Figure 7-8 Topography of peak amplitude of probe effect from 155 to 280 ms.

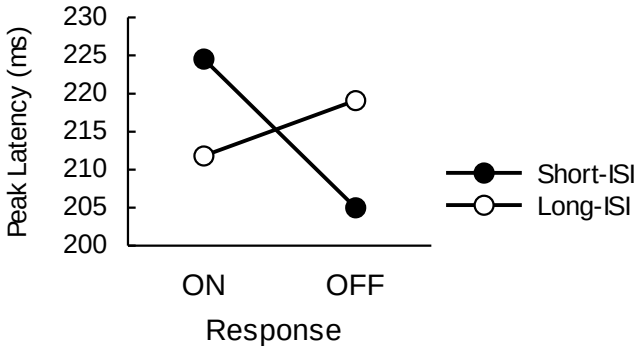


Figure 7-9 Peak latency of probe effect on the difference waveform.

7.4 考察

7.4.1 行動指標から考えられる走査の処理過程

行動指標の結果から，プローブによる反応時間の延長は，Short-ISI条件のON試行でのみ起こっていた．つまり，Late試行でEarly試行よりも反応時間が延長する効果は，生成と走査を同時に行っている時のほうが，走査のみを行っているときよりも大きかった．このことは，Kosslyn(1988)の結果と一致する．Kosslynらは，イメージの生成を行う場合には，プローブ位置によって反応時間が異なるが，走査のみを行う場合，反応時間にはほとんど影響しないことを報告した．したがって，本実験では，Short-ISI条件では生成に関わる処理が継続しており，Long-ISI条件では走査のみが行われていたと考えられる．この結果は，走査機能を分離するという本実験での操作が成功したことを意味する．

7.4.2 走査を反映する初期成分の変動

ERPに関するプローブ位置の効果は，生成と走査の両条件において観察された．仮説に従って，プローブ刺激の位置によるERP上での効果は，走査過程を反映することが示された．プローブ位置の効果があらわれるタイミングについては，Short-ISI条件では，180 ms から有意となり，その後，380 ms 以降で反応種の効果が有意となった．Long-ISI条件では，プローブ位置の効果は155 ms以降で有意となり，その後，355 ms以降で反応種の効果が観察された．つまり，Long-ISI条件において，Short-ISI条件よりもプローブ位置，反応種について，短い潜時で効果が観察された．本実験では，どちらの条件においても，同じプローブ刺激に対する反応を分析しているが，Short-ISI条件では直前にイメージ開始cueが呈示されているため，刺激の分析，および生成処理によって，プローブ刺激に対する反応が遅延したと考えられる．つまり，Short-ISI条件では，プローブ位置の呈示時点では生成は開始しているが継続中であり，走査過程はそれに引き続いて開始された．Short-ISI条件よりも，Long-ISI条件のほうが全体的な反応時間も短縮する傾向にあり，行動指標とも一貫した結果といえる．

プローブ位置の効果は，潜時約200 ms付近で最大となった．この効果の潜時帯は，実験２において，P2 (200-230 ms)以降の潜時帯でプローブの効果が観察されたこととも一致する．実験２では，ON試行ではP2潜時帯で複雑さとプローブ位置が関連して振幅を変動させたが，OFF試行では複雑さの効果は関連しなかった．つまりイメージした文字上の走査を反映したと考えられる．本実験では，複雑さの効果は分析していないが，プローブ位置の効果の大きさは，条件に関わらずON試行でOFF試行よりも大きかった．Short-ISI条件ではプローブ呈示の200 ms前に，Long-ISI条件では1600 ms前にイメージ生成が開始しているため，視覚的に活性化された文字表象上を走査する場合には，文字以外のマス目上を検索する場合よりも，プローブ効果が増大したと考えられる．

他の可能性として，ON試行とOFF試行でのプローブ位置の物理的な違いが反映された可能性が考えられる．プローブの位置は条件間では同一であるが，ON・OFF試行間では，視角1°以内であるとはいえ，わずかに異なっている．しかし，分布について，ON・OFF試行間での違いは見受けられず，一貫して左後頭頂部位に優勢であった．また，潜時については条件間で異なったパターンを示したことから，単純な物理的刺激の差異による変動の可能性は除外できる．潜時については，Short-ISI条件でのみ，ON試行でOFF試行よりも延長した．Short-ISI条件では，イメージ開始からプローブの呈示までの時間がLong-ISI条件よりも短い．したがって，生成に関わる処理がこの潜時の延長の原因と考えられる．Long-ISI条件では生成が完了していたため，文字の内部と外部でプローブの位置を走査する過程に違いが観察されなかった．

実験２，および本実験の実験状況では，プローブ位置の効果が，プローブ呈示から200 ms付近で観察された．この効果は走査過程を反映すると考えられる．これらの実験では，生成および走査を行う条件と，走査のみの条件を比較したため，生成そのものによる効果については検討を行っていない．また，Long-ISI条件では，生成の後，維持が関わっている

可能性がある．そこで，実験４では，生成による直接的なERPへの影響と，維持過程について検討を行う．

第8章　心的イメージの生成・維持の処理過程（実験４）[7]

8.1 目的

実験２および３では，刺激の呈示間隔を操作することでプローブ刺激に対する反応の分析を行い，イメージ活動が初期成分に与える影響について検討を行った．結果として，ERPの初期成分におけるプローブ位置の効果が，走査過程を反映することが示された．本実験では，生成過程において，文字の複雑さが単独で初期成分に与える影響を検討することを第一の目的とする．

第二の目的として，維持過程に伴う脳活動について検討する．近年，視覚情報の維持過程として，視覚的短期記憶が特有のERP電位であるSPCN（Sustained Posterior ContraLateral Negativity)を惹起することが報告されている．SPCNに関するこれまでの先行研究では，直前に見た視覚情報を片側視野に保持している際に，対側の後頭部位で陰性電位が観察されることが示されている（Dalvit & Eimer, 2011; Eimer & Kiss, 2010; Luria et al., 2010; McCollough et al., 2007; Vogel & Machizawa, 2004）．本研究では，このSPCNが，自ら生成したイメージの維持によっても惹起するかどうかについて，検討を行う．もし，心的イメージによってもSPCNが惹起するならば，イメージ表象が視覚的短期記憶と共通の保持機構を使用していることが示されるだろう．また，SPCNは，短期記憶における保持容量を反映するという性質を持つ（McCollough et al., 2007; Vogel & Machizawa, 2004）．したがって，イメージ表象の内容が，維持時にどのように構成されているのかについての示唆を得ることができる．

---

[7] 山崎圭子. (2011). 視覚イメージの生成過程に関する新たな視点―心的イメージ生成に関わる脳活動の時系列的検討―. *イメージ心理学研究, 8*(1), 11-14.

8.2 方法

8.2.1 参加者

視力もしくは矯正視力が正常な右利きの成人12名（男女各6名，19-31歳，平均年齢23.0歳)が実験に参加した．参加者は，実験前に本実験に関する説明を受け，同意した上で実験に参加した.

8.2.2 刺激

視覚的短期記憶（VSTM)条件では，Cue刺激として5×5のマス目にアルファベットの大文字が描かれたもの，イメージ（IMG)条件では同様のマス目の中央にアルファベットの小文字が記入されたものを用いた．マス目の大きさは，3 cm × 3 cm (視角2.86° ×2.86°)であった．凝視点からの距離は中心から左右に1.9 cm (視角2.81°)であった．図形の複雑さによって半数をSimple (L, T)，残りをComplex (G, S)とした。プローブ刺激は同様のマス目の中央以外のいずれか1つのマスにプローブである×印がついたものであった.

8.2.3 手続き

実験は, VSTM (視覚的短期記憶)条件と, IMG (イメージ)条件に分けて行った. Figure 8-1に各条件の手続きを示す.

8.2.3.1 VSTM条件

刺激は観察距離約60 cmのディスプレイ上に呈示した．凝視点の後，左右いずれかの矢印が画面中央に500 ms間呈示された．続いて，500-700 ms 後に左右各視野に1000 ms間，Cue刺激が呈示された. 参加者は矢印によって指示された側の大文字の形状を視覚的に保持し，1500 msのブランクの後に呈示されるプローブ刺激の×印が保持している大文字の形状と重なるかどうかについて，できるだけ早く正確に左右のボタン押しを行った.

8.2.3.2 IMG条件

Cue刺激が異なる以外はVSTM条件と同様の手続きで行った．参加者はCue刺激中央の小文字をてがかりとして，対応する大文字のイメージを生成・保持し，VSTM条件と同様の課題を行った．

各条件につき68試行を1ブロックとし9ブロック行った．条件の順序および刺激の呈示順は全てランダム，反応手は参加者ごとにランダマイズした．

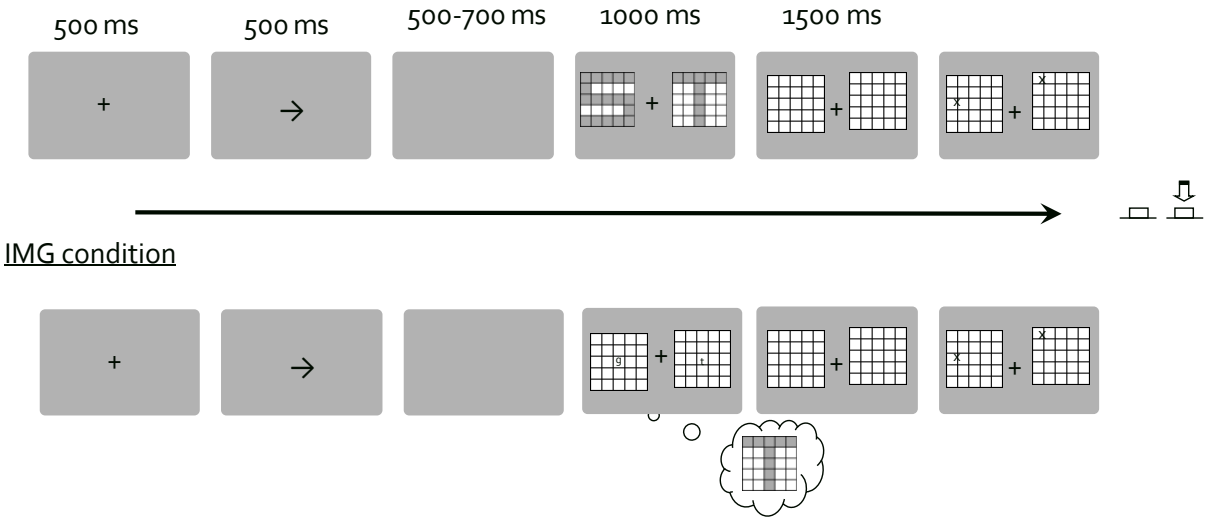


Figure 8-1 Procedure for VSTM and IMG condition.

8.2.4　記録と分析

行動遂行について，反応時間と正答率を記録した．反応時間はプローブ刺激の呈示開始から反応までの時間を測定した．

脳波は頭皮上25部位から両耳朶の平均値を基準として，0.016-60 Hzのバンドパスフィルタをかけ，サンプリング周波数250 Hzで記録した．垂直眼球運動は左眼上下から，水平眼球運動は左右眼角から双極導出した．その後，オフラインで30 Hzのローパスフィルタをかけ，誤答試行，およびEEGまたはEOG (Electrooculogram)が100μVを超えた試行は分析から除外した. 初期成分を評価するため, Cue刺激呈示前100msをベースラインとして1100ms

区間を加算平均した．加算平均波形に関しては，主成分分析（Principle component analysis; PCA)を用いて頭皮上分布および成分の同定を行った．主成分分析に関しては，SPSS12.0.1Jを用いて分析を行った．

主成分分析は，多変量データ行列を線形的に分解する分析手法であり，ERPを解析する手法として用いることができる（Handy, 2004; 入戸野, 2005)．実験で得られたデータから，関連する変数を最もよく説明する新しい軸を線形結合によって算出する．これを第一因子として，新しい軸と元の軸との相関を因子負荷量（Factor loading)，新しい軸上での個々のERP波形の位置を因子得点（Factor score)とよぶ．最初の因子の抽出に続いて，新しい軸に直交する軸を求め，次の因子とする．ERPにおける空間主成分分析は，各電極を変数として，各被験者，条件，各時点で記録されたデータを分析する．したがって，空間主成分(Spatial factor; SF)は，まとまって変動する頭皮上分布パターンを意味する．また，時間主成分分析は，記録された各時点を変数として，記録されたデータがまとまって変動する時点を抽出する．したがって，時間主成分（Temporal factor; TF)は，ERP波形に含まれる個々の成分を意味する．本実験では，Spencer et al.（2001)の手法に基づき，空間主成分分析を行った後，その因子得点に対して時間主成分分析を行った．空間主成分分析は，電極（25)を変数とし，28800本の波形（12被験者×2条件×2刺激の複雑さ×2視野×300データポイント)に対して，分散共分散行列を用いて行った．説明率が95%を超えるよう，8因子を抽出し，Kaiser法による修正を伴うバリマックス回転を行った．その後，空間主成分分析から得られた因子得点を用いて，時間主成分分析を行った．分析は，データポイント（300)を変数として，768（12被験者×2条件×2刺激の複雑さ×2視野×8空間因子)本の波形に対して行った．分散共分散行列を用いて，説明率が90%を超えるよう，22因子を抽出し，Kaiser法による修正を伴うバリマックス回転を行った．得られた因子得点については，空間因子ごとに条件×刺激×視野の3要因分散分析を用いて条件間の比較を行った．

SPCNの分析については，cue刺激の呈示前200 msをベースラインとして，2500 ms間を加算平均したデータを用いて行った．行動指標，および初期成分の分析とは異なり，分析区間が長かったため，区間内での瞬きが多かった1名を除外した後，記憶保持視野と同側か対側によって左右の電極のデータを平均した．

8.3 結果[8]

8.3.1 行動指標

Figure 8-2に各条件の平均反応時間を示す．反応時間について，条件（VSTM/IMG)×反応種（ON/OFF)×文字の複雑さ（Simple/Complex)×視野（Left/Right)の4要因分散分析を行った結果，反応種（$F(1,11) = 56.65, p < .01$），複雑さ（$F(1,11) = 20.89, p < .05$），注意視野（$F(1,11) = 8.10, p < .05$)の主効果がそれぞれ有意であった．交互作用は観察されなかった．つまり，ONよりもOFFで，SimpleよりもComplexで，左視野よりも右視野に呈示したときに反応時間が延長した．

正答率についてFigure 8-3に示す．反応時間と同様の分析を行ったところ，条件×複雑さ×注意視野の交互作用のみが有意であった（$F(1,11) = 8.92, p < .05$）．視野ごとに，条件×複雑さの2要因分散分析を行ったところ，右視野でのみ交互作用が有意であった（$F(1,11) = 9.46, p < .05$）．さらに，条件ごとでの複雑さの効果は，VSTM条件でのみ，ComplexでSimpleよりも正答率が低下していた（$F(1,11) = 5.97, p < .05$）．全体としては9割前後の正答率であり，speed-accuracy trade offは観察されなかった．

[8]行動および ERP 指標のデータ表は付録 D を参照

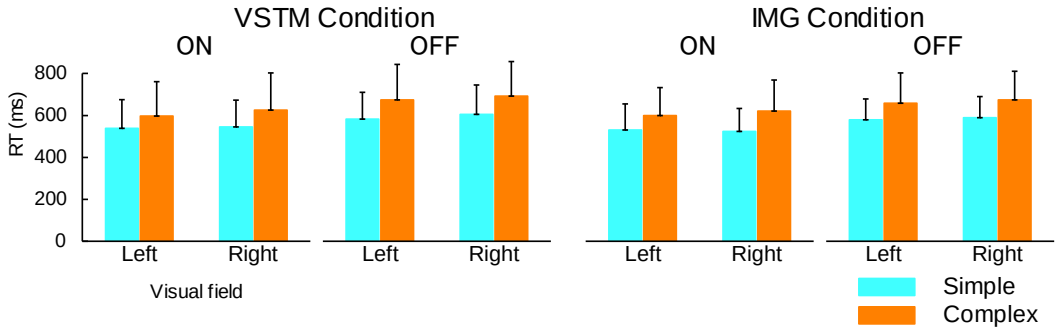


Figure 8-2 mean RT.

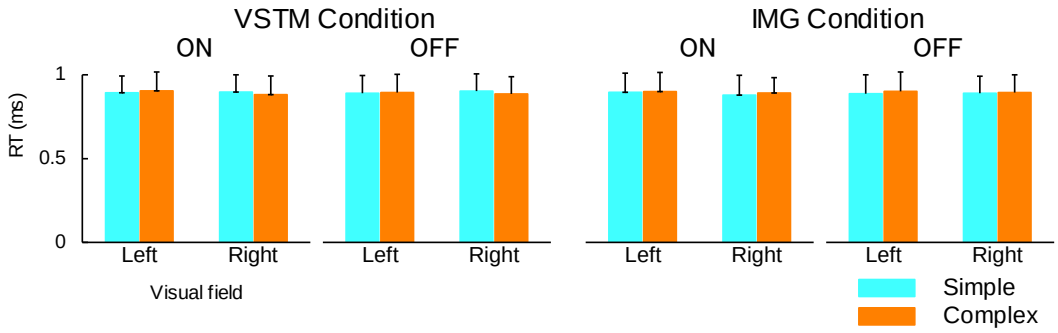


Figure 8-3 mean Hit rate.

8.3.2 ERP

8.3.2.1 初期成分

Figure 8-4にVSTM条件，Figure 8-5にIMG条件の，全電極部位での総加算平均波形を示す．IMG条件では，潜時約170 msで後部に優勢の陽性成分が観察された．VSTM条件では，同じ潜時帯での陽性成分が中心から前頭にかけて増強していた．後頭頂部位に注目すると，特にIMG条件で，170 msより早い潜時帯で，明瞭な初期成分が観察された．Figure 8-6およびFigure 8-7に，各条件についての，刺激呈示後500 msまでの電極PO7およびPO8における波形を示す．どちらの条件においても，刺激呈示後約50 msで陽性の成分が出現した．典型的に観察されるP1成分は，潜時約90-140 ms付近に頂点潜時を持つことから，P1より

も早い潜時帯で観察される電位であるC1の可能性がある．C1は，刺激呈示後約50 msで開始し，100 ms以内の潜時帯に頂点を持つ電位であり，一次視覚野が発生源と考えられている（Clark, Fan & Hillyard 1995）．典型的には，上視野の刺激により陰性の，下視野への刺激により陽性の極性となることから，P1やN1と区別される（Rauss, Schwartz, & Pourtois, 2011）．C1は従来，注意などのトップダウンの制御を受けないと報告されてきたが(Hillyard & Anllo-Vento, 1998; Hillyard, Vogel, Luck, & Anllo-Vento, 1998)，近年では，それを覆す証拠も提出されている（Pourtois, Rauss, Vuilleumier, & Schwartz, 2008; Rauss et al., 2011; Rossi & Pourtois, 2012）．本実験では，上下視野での刺激を行っていないため，加算平均波形のみによってC1を同定することが難しい．そのため，観察された陽性電位をP48と呼ぶことにする．また，P48に続いて潜時約90 ms付近で観察された陰性成分をN90とする．P48，N90は注意視野によって，後部両側の電極における振幅の変動が観察された．また，約170 msに頂点を持つ大きな陽性の成分についても，刺激の複雑さや左右視野による変動が観察された．この成分をP170とする．これらの初期成分は，複雑な頭皮上分布を持ち，最大値をとる部位を判断することが難しく，電極部位によっては頂点が明瞭でない．これは，ERPを構成する複数の波が複雑に重なり合った結果と考えられる．したがって，初期成分については，空間・時間主成分分析を用いて，P48，N90，P170に相当すると思われる成分を抽出し，条件間での差異について分析を行った．

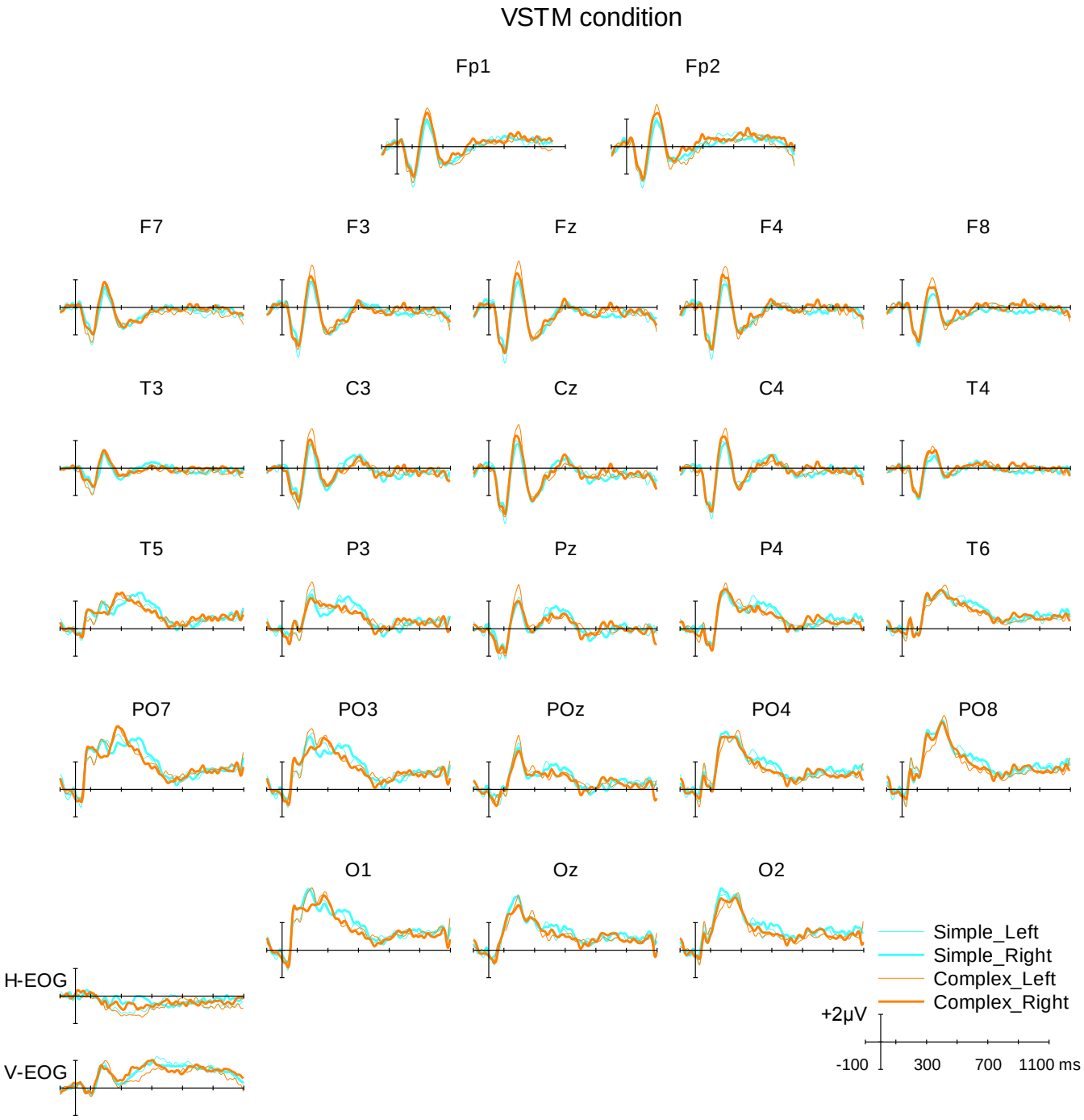


Figure 8-4 Grand average waveform for VSTM condition.

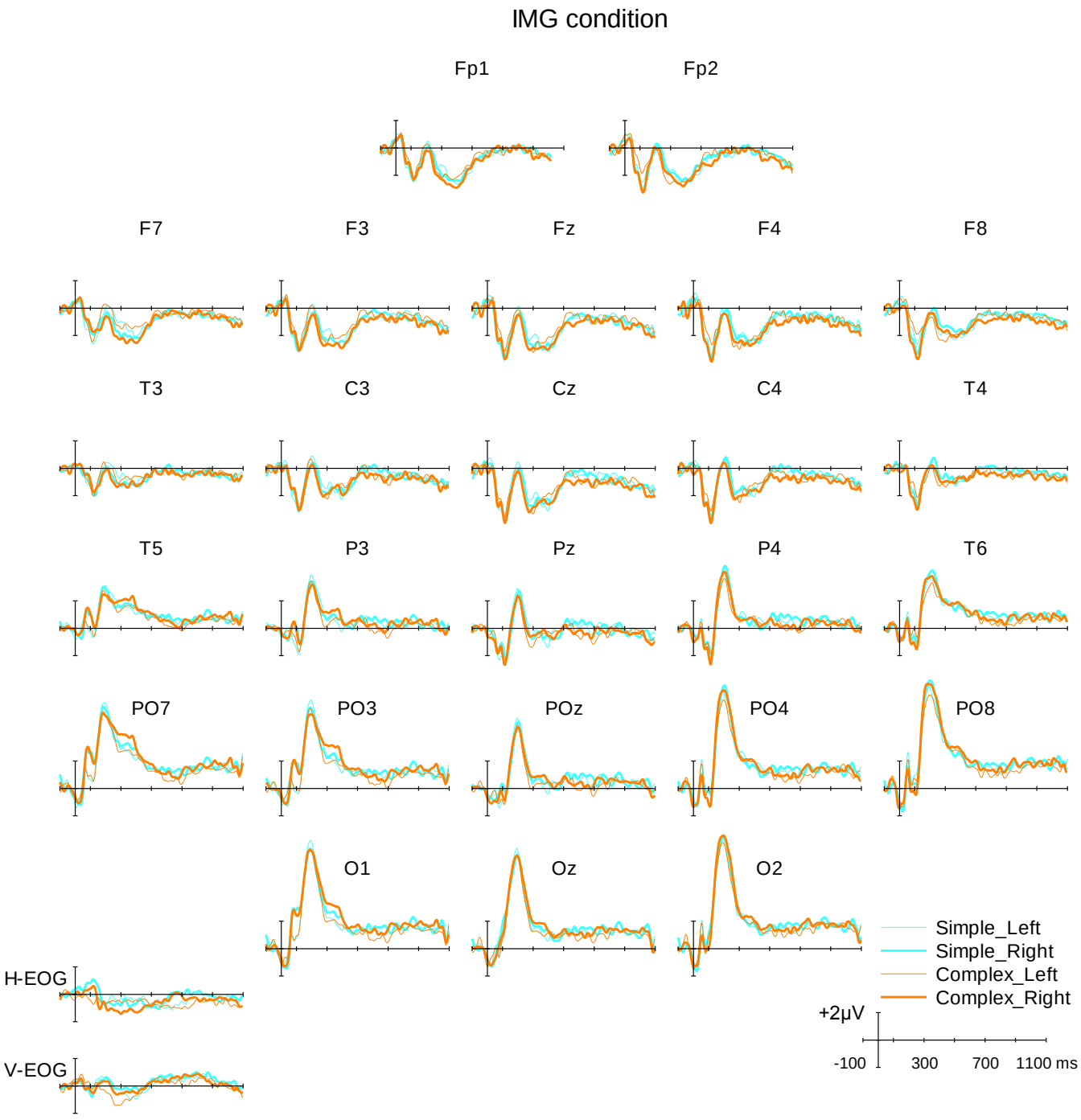


Figure 8-5 Grand average waveform for IMG condition.

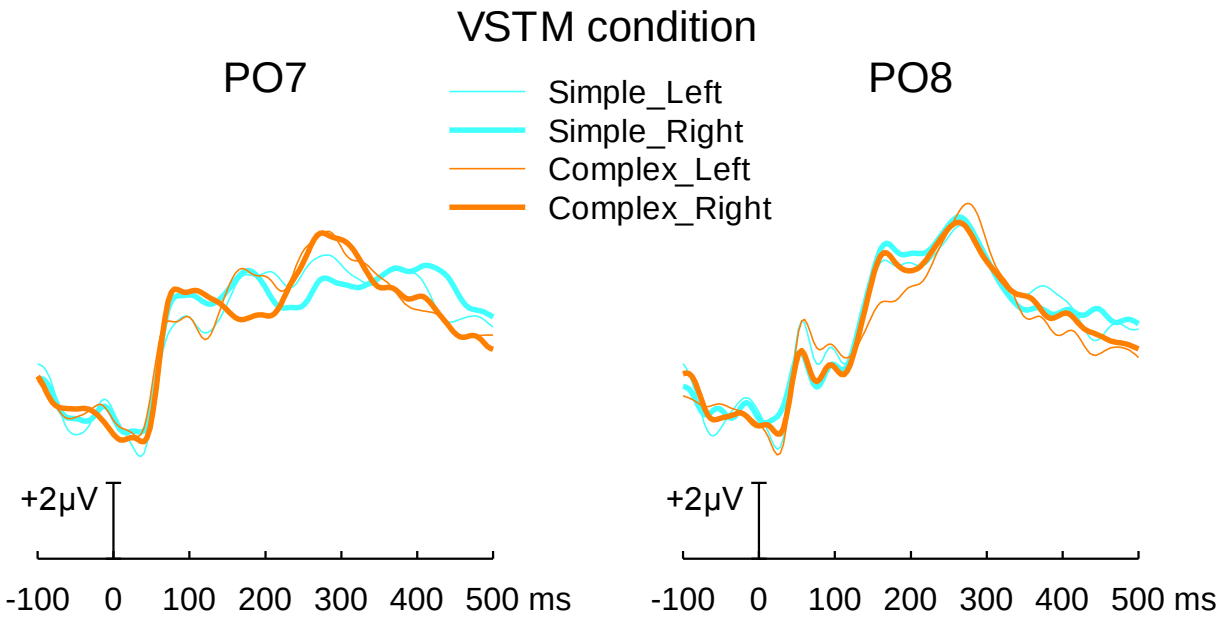


Figure 8-6 Grand average waveform for VSTM condition from -100 to 500 ms.

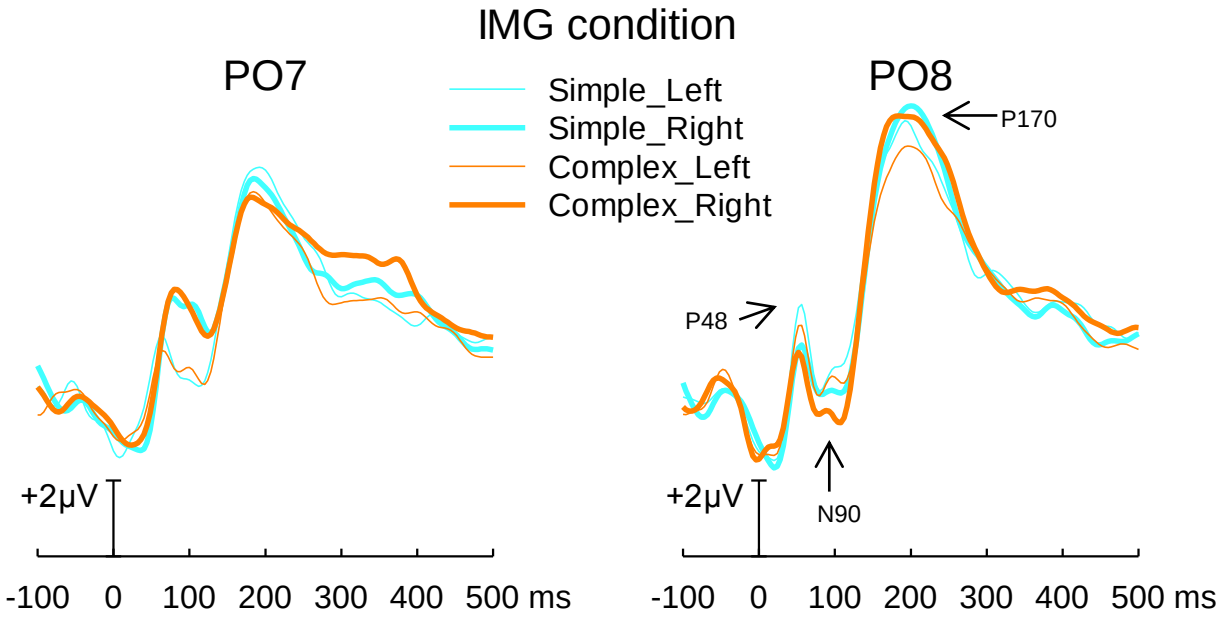


Figure 8-7 Grand average waveform for IMG condition from -100 to 500 ms.

8.3.2.2 主成分分析

Figure 8-8に空間主成分分析によって得られた8空間因子の因子負荷量を示す．SF1は中心・前頭の広範な分布を示した．SF2は，右後頭頂から後頭のPO8を中心とした分布，SF3は左後頭頂部位のPO7が中心となる分布を示した．本研究の実験１および２で観察された複雑さの効果は，この左右後頭頂の分布パターンと一致する．SF4では頭頂部位，SF5では右側頭部位，SF6では左側頭部位が中心部位であった．また，SF7では前頭前部が中心であることから，眼球運動の影響と考えられる．SF8については後頭の正中線近くに分布した．Figure 8-9にVSTM条件，Figure 8-10にIMG条件についての，空間主成分分析の因子得点を波形として示す．総加算平均波形で観察されたP48，N90，およびP170が最も明瞭に観察されたのは右後頭頂の分布パターンを持つSF2であった．また，左後頭頂を中心とするSF3では，視察でははっきりしなかったP48が大きく観察された．特に，イメージ条件ではN90の頂点が明瞭であり，注意視野による変動が見られた．P170については頂点が不明瞭であり，複数の波が重畳していると考えられるが，複雑さ，左右視野による振幅差が観察された．加算平均波形の視察により観察された初期成分が明瞭であり，これまでの実験１，および２においても中心的に効果が観察された部位であることから，以降の分析はSF2およびSF3を中心に行った．

加えて，VSTM条件では，SF1で潜時約200 ms付近で大きな陽性波が観察された．視察により観察されたP170と分布は異なるが，VSTM条件では右後頭頂のSF2でIMG条件よりもP170成分が小さかったことと対比すると，同じ成分が前頭部有意に出現している可能性がある．そのため，P170に相当すると思われる時間成分については，SF1についても分析を行った．IMG条件のSF6については左右の視野による振幅差が観察されたが，分布が左側頭であること，また，表象として保持した内容に関わらない，視野による効果のみであったことから，分析では取り上げなかった．

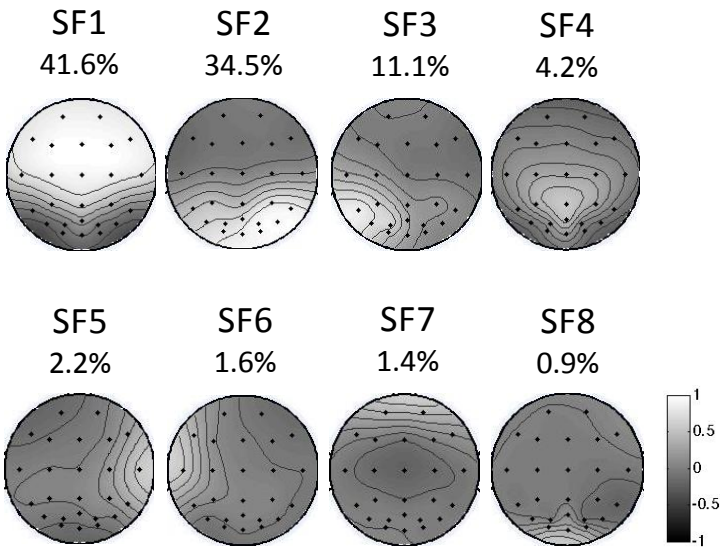


Figure 8-8 Factor loadings of the eight spatial factors.

The percentage of variance accounted for by each factor after rotation is indicated.

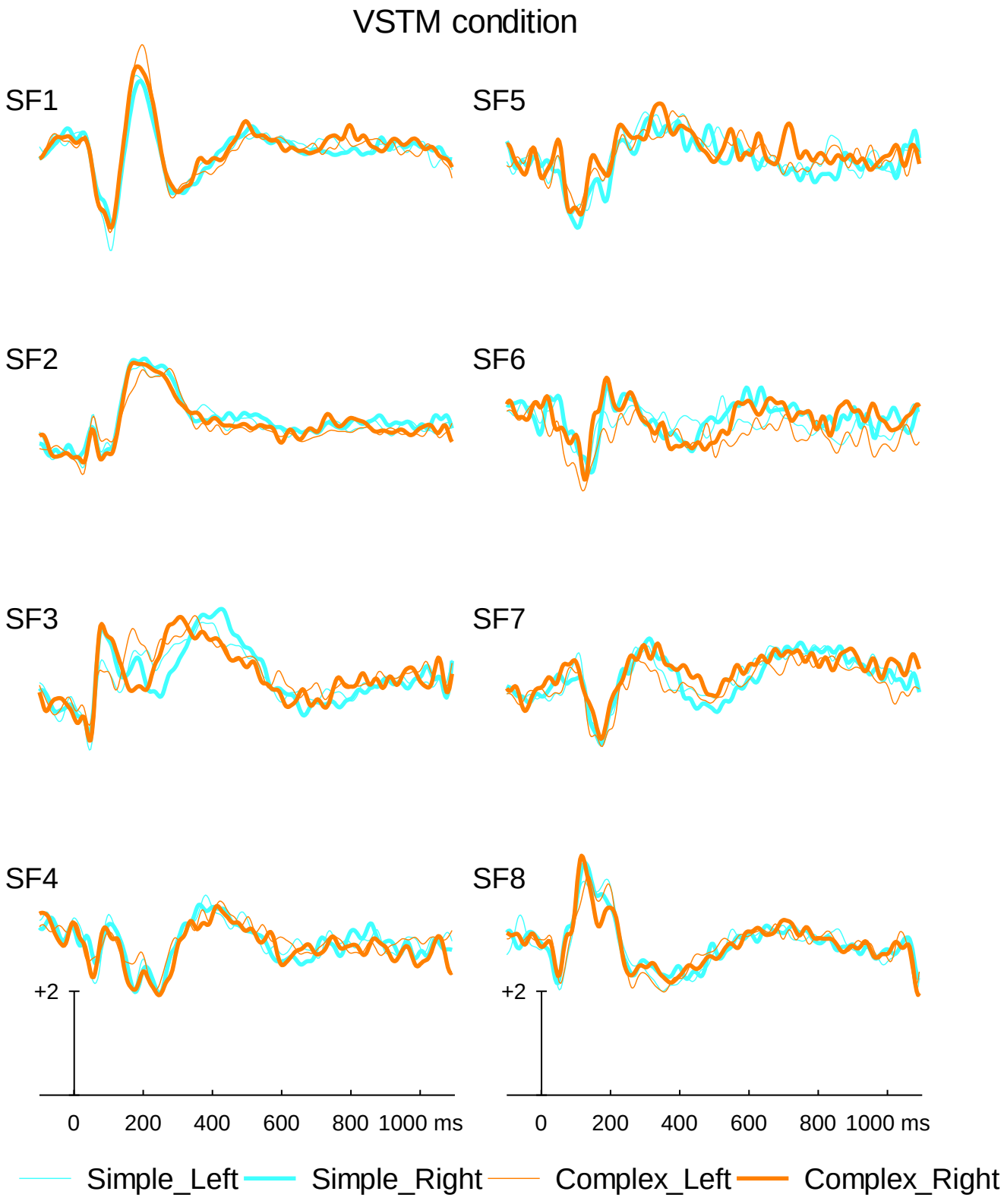


Figure 8-9 Spatial factor scores for VSTM condition.

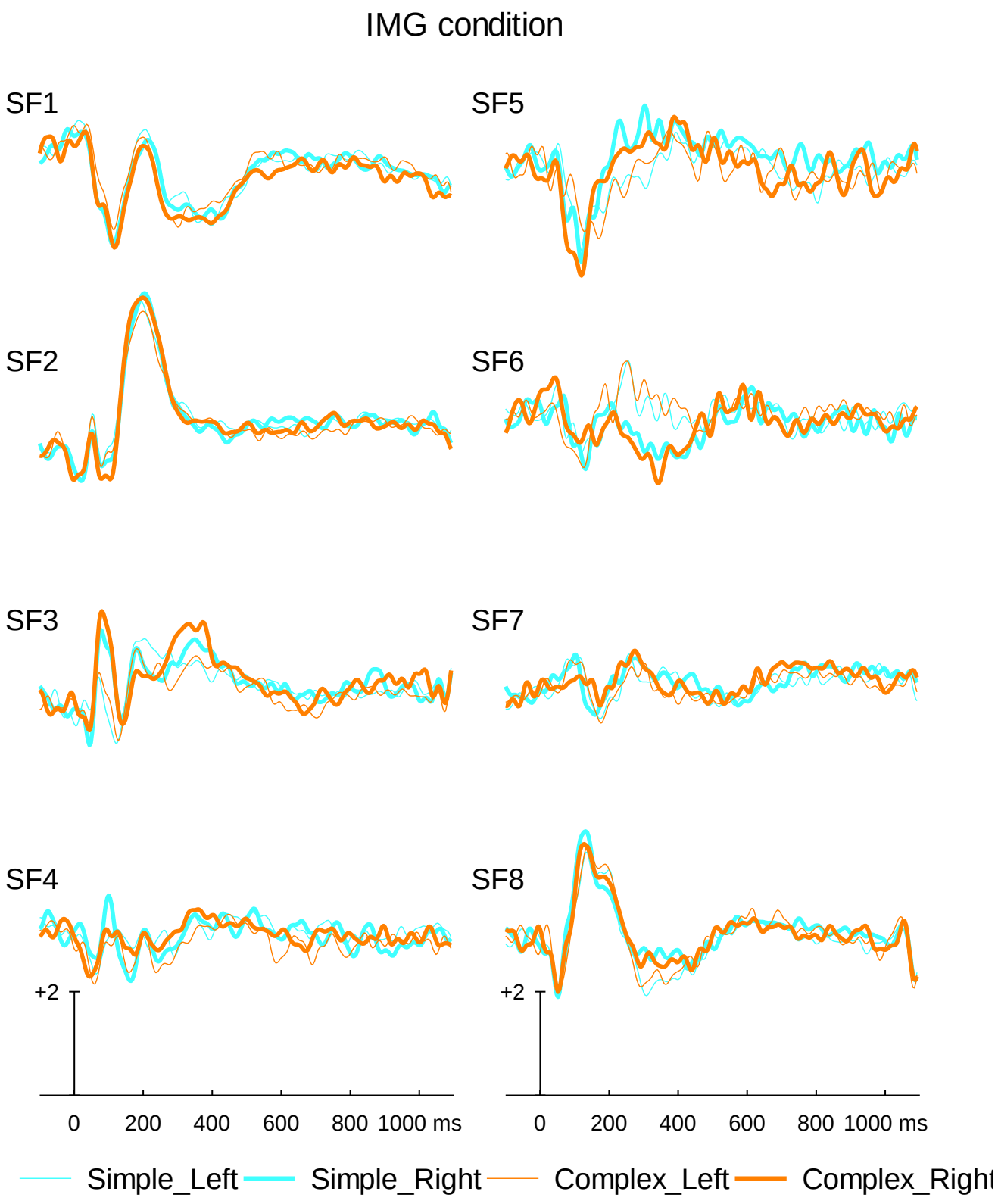


Figure 8-10 Spatial factor scores for IMG condition.

時間主成分分析によって抽出された22因子について，因子負荷量を波形としてFigure 8-11に示す．P48成分に相当すると思われる成分は，潜時48 msに頂点を持つTF15であると考えられる．SF2およびSF3におけるTF15の因子得点をFigure 8-12に示す．条件×刺激×視野の3要因分散分析を行ったところ，SF2では有意な効果は観察されなかったが，視野の主効果が有意傾向であり，左視野の場合に右視野よりも陽性方向に増強する傾向を示した（$F(1,11) = 4.15$, $p = .066$). SF3では, 3要因の交互作用が有意であった（$F(1,11) = 8.81$, $p < .05$). 条件ごとに刺激×視野の2要因分散分析を行ったところ，VSTM条件では有意な効果は検出されなかったが, IMG条件では交互作用が有意であった（$F(1,11) = 7.24$, $p < .05$). さらに，視野ごとの複雑さの効果について，有意な効果は検出されなかった．したがって，TF15はイメージ条件でのみ，左後頭頂部位において，複雑さと視野によって変動することが示された．

N90に対応する成分として，潜時約90 msのTF8が最も可能性が高い．SF2およびSF3におけるTF8の因子得点をFigure 8-13に示す．条件×刺激×視野の3要因分散分析を行ったところ，SF2では有意な効果は観察されなかった．SF3では，視野の主効果（$F(1,11) = 13.20$, $p < .01$），および刺激の複雑さ×条件の交互作用（$F(1,11) = 8.39$, $p < .05$)が有意であった．条件ごとの複雑さの効果については，両条件で有意でなかった．イメージ条件の場合には，ComplexでSimpleよりも陽性となり，VSTM条件では逆のパターンであった．したがって，TF8について，左後頭頂において，右視野の場合に振幅が陽性方向に増強し，条件によって複雑さによる効果のパターンが異なることが示された．

P170と最も一致する潜時帯の成分は，潜時184msで最大値をとるTF2であった．TF2については，SF2，SF3およびSF1における因子得点をFigure 8-14に示す．条件×刺激×視野の3要因分散分析を行ったところ，SF2では条件の主効果のみが有意であった（$F(1,11) = 56.17$, $p < .01$）．また，SF3では複雑さの主効果（$F(1,11) = 7.42$, $p < .05$），視野の主効果（F

(1,11) = 8.22, p <.01)，および複雑さ×視野の交互作用（F(1,11) = 5.38, p <.05)が有意であった. 複雑さの効果は, 右視野でのみ有意であった（F(1,11) = 12.51, p <.01). したがって, TF12は，右後頭頂ではIMG条件でVSTM条件よりも陽性を示した．また，左後頭頂では，条件に関わらず，右視野の場合にはComplex試行で陰性方向に振幅が増強したが，左視野ではそのような効果は観察されなかった.

SF1についても同様の分析を行ったところ，条件の主効果のみが有意であった（F (1,11) = 56.17, p <.01). したがって, TF2に関して, 前頭・中心部位においては, VSTM条件でIMG条件よりも陽性方向に振幅が増強していた.

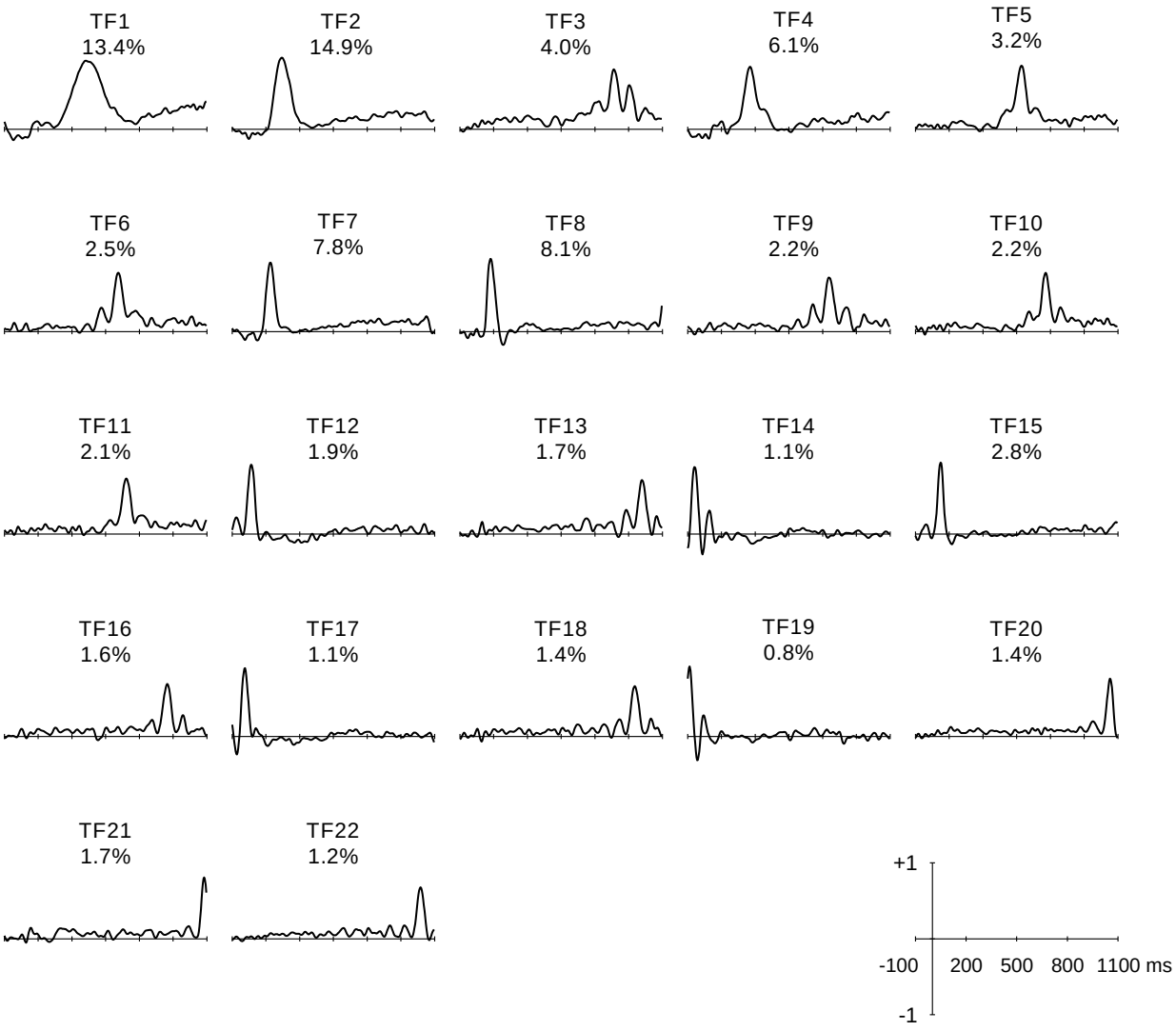


Figure 8-11 Factor loadings of the 22 temporal factors.

The percentage of variance accounted for by each factor after rotation is indicated.

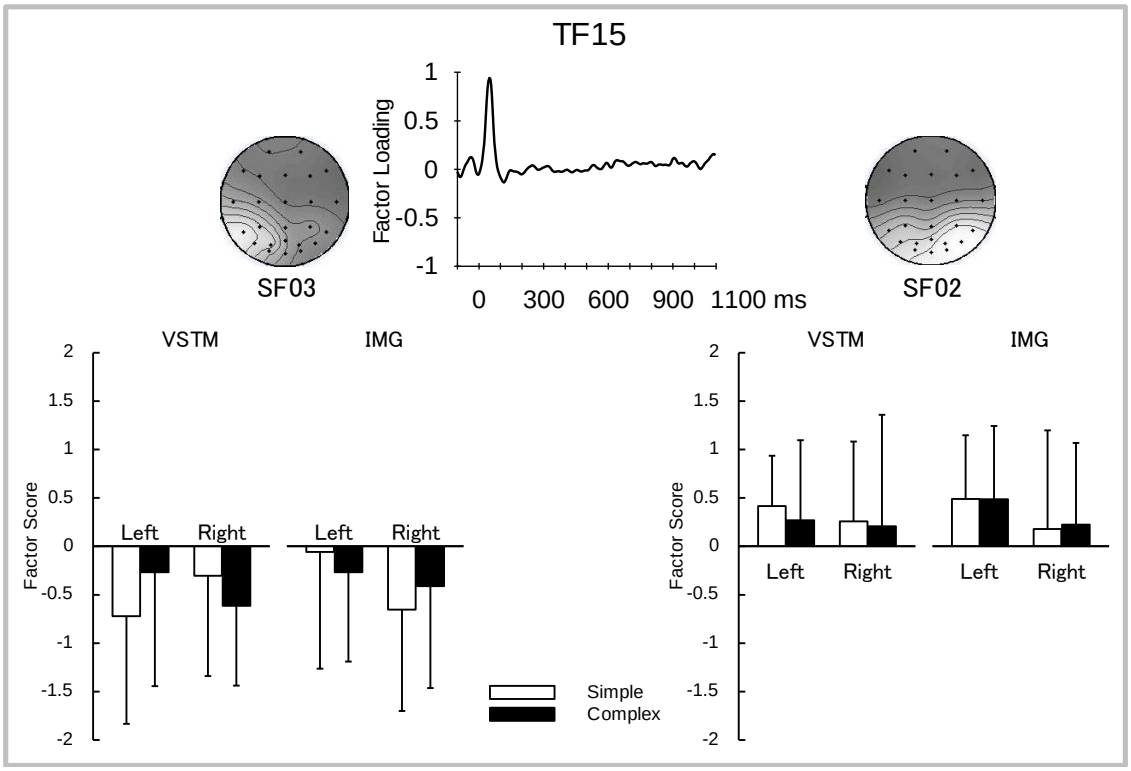


Figure 8-12 Scores for the temporal factors.

Displayed are the scores for the TF15 applied to the spatial factors SF2 and SF3.

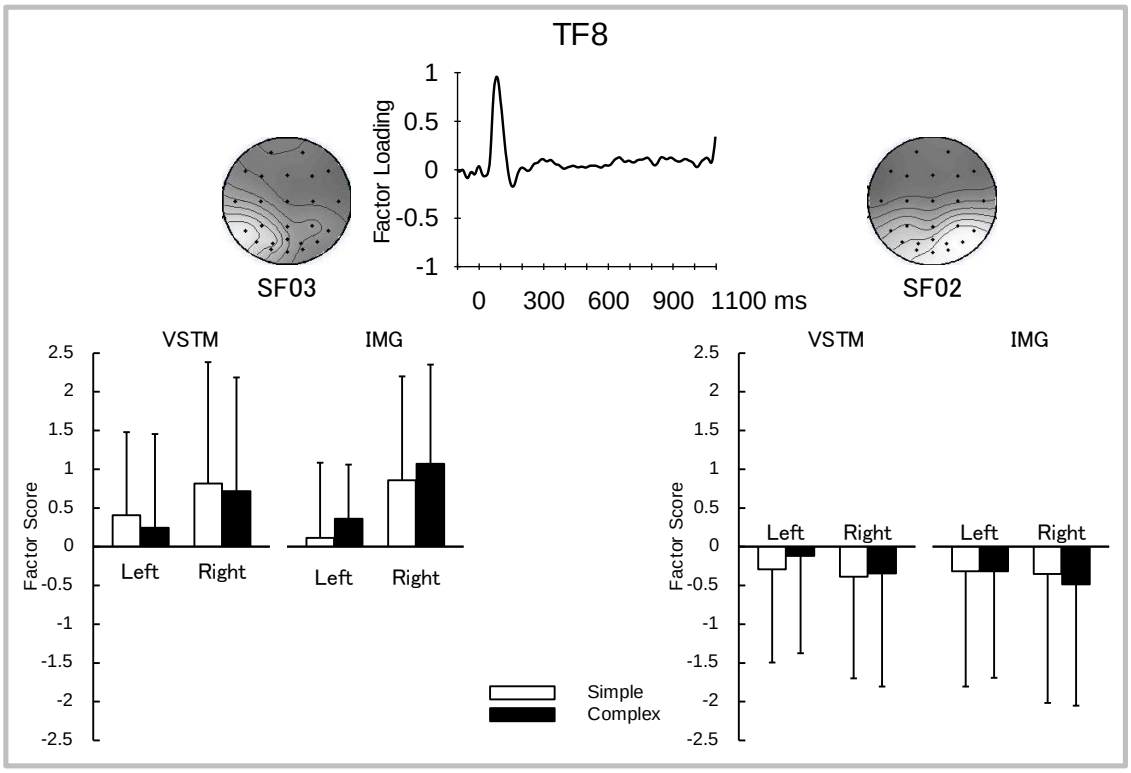


Figure 8-13 Scores for the temporal factors.

Displayed are the scores for the TF8 applied to the spatial factors SF2 and SF3.

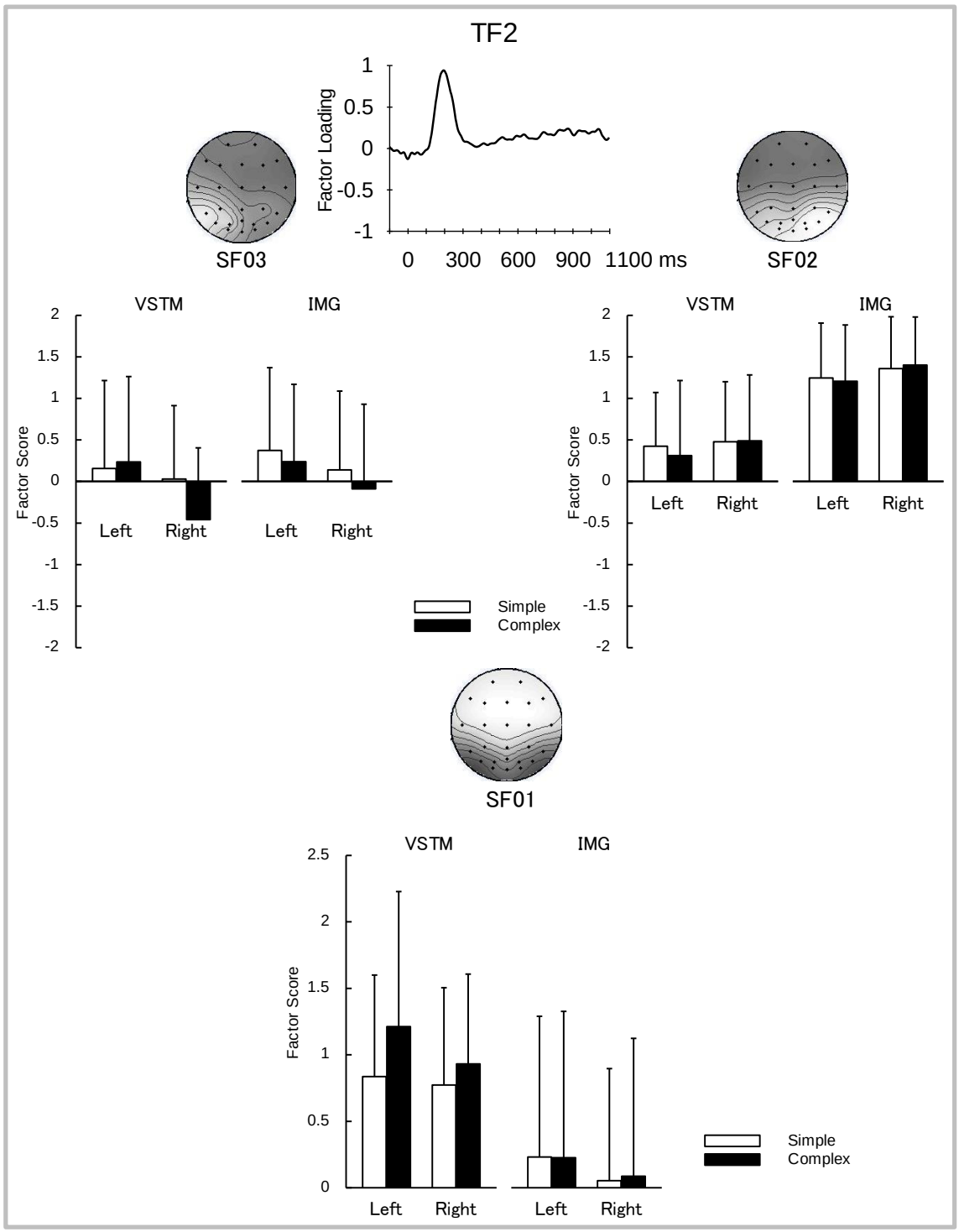


Figure 8-14 Scores for the temporal factors.

Displayed are the scores for the TF2 applied to the spatial factors SF2, SF3, and SF1.

8.3.2.3 SPCN

SPCNは，表象を保持している視野と対側の後頭・後頭頂部位で陰性になる電位である．Figure 8-15に，電極PO3/4，PO7/8，O1/2のそれぞれについて，表象の保持視野と同側・対側ごとの総加算平均波形を示す．同側よりも対側で陰性になる傾向が観察されたが，電極間に大きな違いは見受けられなかった．そこで，これらの後頭・後頭頂の電極を平均した値を用いて分析を行った. Figure 8-16に, 後頭の電極を平均した総加算平均波形を示す. 対側と同側の振幅差が出現する時間帯を検討するため，100 msごとの平均電位を算出し，それぞれの時間帯について，条件×複雑さ×側性の3要因分散分析を行った．統計値のまとめをTable 8-1に示す.

100-200 ms区間において，条件の主効果，および条件と側性，複雑さと側性の交互作用が有意であった．Figure 8-17左に，100-200 msの平均振幅を示す．側性ごとの条件の効果は，対側（$F(1,10) = 18.39$, $p < .05$），同側（$F(1,10) = 10.10$, $p < .05$)のどちらにおいても，有意であった．したがって，条件による振幅の差は同側よりも対側で大きかった．また，側性ごとの複雑さの効果として，対側では有意傾向が認められたが（$F(1,10) = 4.04$, $p = .072$)，同側では有意な効果は検出されなかった．複雑さの効果については，対側でわずかに大きい傾向にあった．前項で記述した，この潜時帯での初期成分の変動を反映したと考えられる.

側性の主効果は500ms 以降で出現し，1300 ms区間まで継続した．対側で同側よりも陰性となる効果であることから, この陰性電位をSPCNと同定した. SPCN出現直後の500-600 ms区間では, 複雑さの主効果が有意であった. Figure 8-17に, この区間の平均振幅を示す. 条件に関わらず，Complex試行では，Simple試行よりも陰性に振れていた.

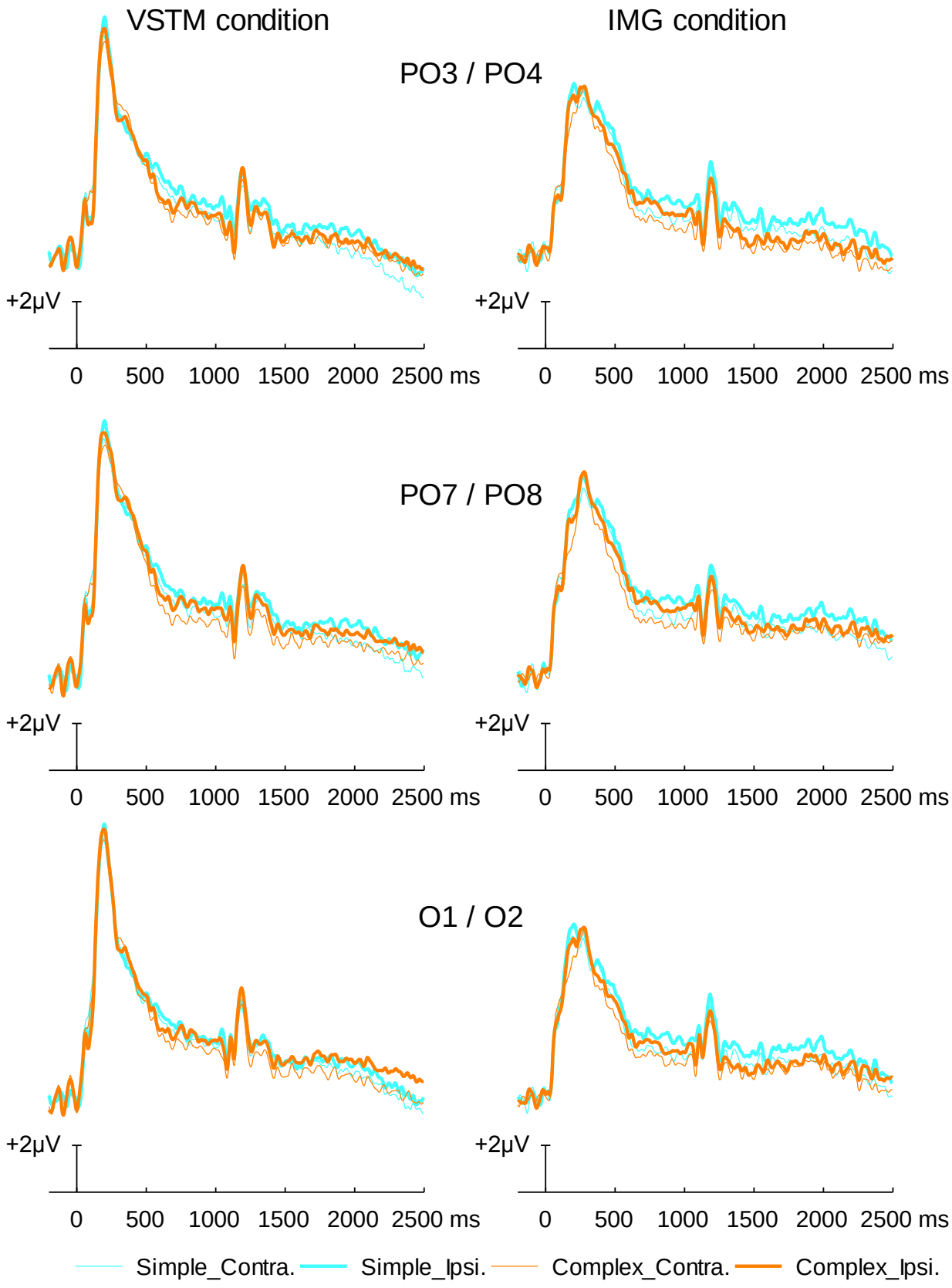


Figure 8-15 Grand average waveforms at the posterior electrodes.

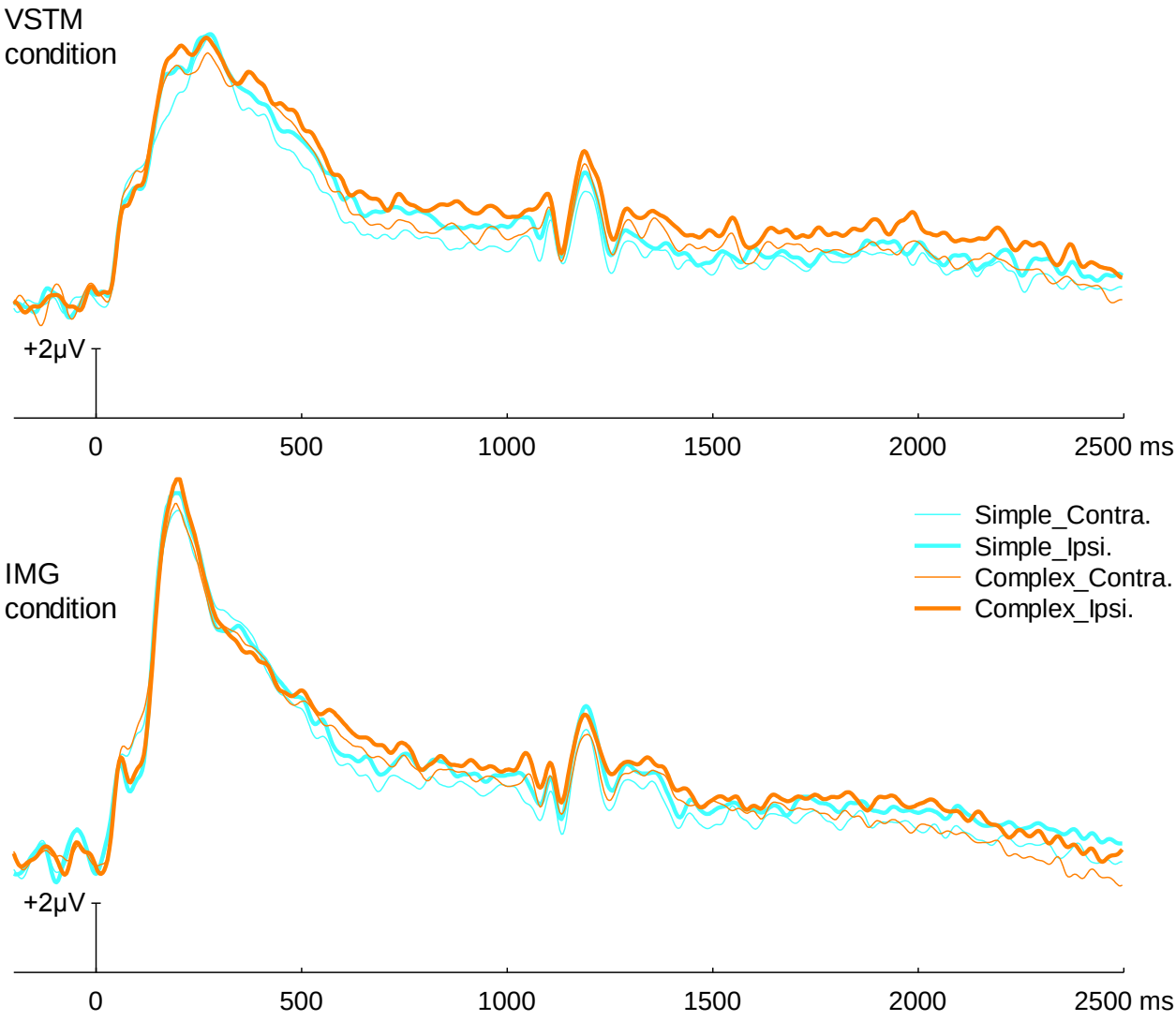


Figure 8-16 Grand average waveform for contralateral and ipsilateral elctrodes to the visual field for maintaining visual representation.

Table 8-1 SPCN time-course analysis

Time (ms)	Condition	Complexity	Laterality	Interaction
0–100 (ms)	–	–	–	
–200	14.08	–	–	Cond x L(5.65), Com x L (6.92)
–300	–	–	–	
–400	–	–	–	
–500	–	–	–	
–600	–	7.19	5.18	
–700	–	–	7.22	
–800	–	–	8.07	
–900	–	–	7.04	
–1000	–	–	7.87	
–1100	–	–	8.57	
–1200	–	–	6.00	
–1300	–	–	8.19	
–1400	–	–	–	
–1500	–	–	–	
–1600	–	–	–	
–1700	–	–	–	
–1800	–	–	5.99	
–1900	–	–	7.63	
–2000	–	–	11.56	
–2100	–	–	9.38	
–2200	–	–	9.00	
–2300	–	–	11.99	
–2400	–	–	12.44	
–2500	–	–	8.64	

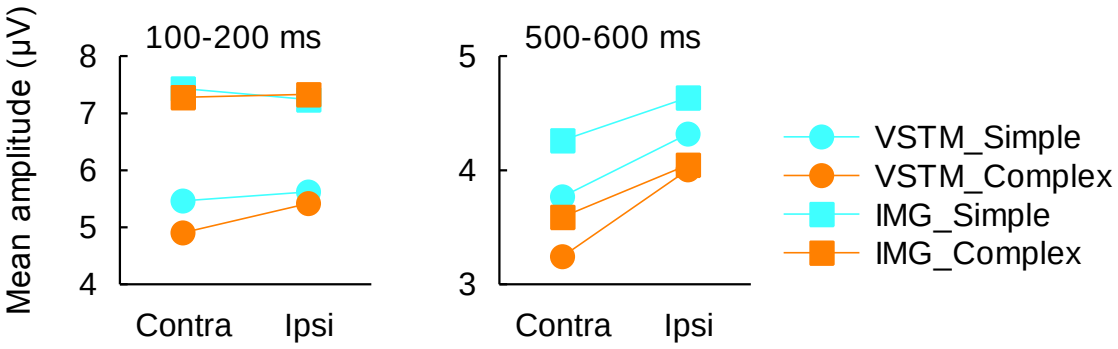


Figure 8-17 Mean amplitudes from 100 to 200 ms, and 500 to 600 ms time window.

8.4 考察

8.4.1 行動指標から考えられる維持の処理過程

行動指標の結果から，SimpleよりもComplexで反応時間が延長することが示された．この結果は，Kosslyn (1988)の結果と一致する．彼らの実験 1 では，対応する大文字をイメージするための小文字を呈示した500 ms後にプローブ刺激を呈示した場合には，複雑さ，プローブ位置の双方によって反応時間が延長した．また，参加者が，イメージ生成完了した合図として，ボタン押しを行った500 ms後にプローブを呈示した場合には，プローブ位置の効果は観察されず，複雑さの効果は大幅に減少した．この結果は，複雑さが主に生成過程に関わるものとして解釈された．本実験においても，プローブがイメージ開始合図から2500 ms後に呈示されたにも関わらず，複雑さの効果が観察された．プローブが描き終わりにある場合には，複雑な文字は単純な文字よりも走査するべき距離が長い．実験 2 においては，初期成分のP2についての分析結果から，複雑さが走査過程にも影響する可能性が示されていることから，本実験で観察された複雑さの効果が，走査を反映する可能性がある．しかし，実験 3 の結果からは，走査過程におけるプローブ位置は，ERP上での違いとして観察されるが，反応時間には影響しないことも示されている．したがって，もう一つの可

能性として，維持期間が長いことによる再構成化が考えられる．実験３と比較すると，本実験では，維持する時間が2500 msと非常に長い．Kosslyn (1994; 2006)は，知覚とイメージの双方で，維持期間には視覚表象が薄れていくため，Visual Buffer上で何度も描き直される可能性を指摘している．それは，ディスプレイに例えるならば，リフレッシュと呼ばれるような仕組みと説明され，知覚し続ける場合にも起こると想定される．その仮説に従えば，長い維持期間の最後の反応時に，両条件において「リフレッシュ」が起こっていた可能性がある．そうだとすると，OFF試行でON試行よりも反応時間が延長したことについても，説明が可能である．実験１，３で示されたように，イメージの構成化中に呈示されたプローブ刺激に対しては，ON試行ではプローブを検出した時点で反応が可能なのに対して，OFF試行では最後まで構成化を続ける必要があるため，OFF試行では反応までにより多くの時間を必要とする．

本実験においては，条件間での反応時間の差は示されなかった．一方，正答率については，右視野で課題を行った場合にのみ，VSTM条件でIMG条件よりも，複雑さによる正答率の低下が観察された．このことについては，ERPの結果とも併せて考察を行う．反応時間についての結果も考慮し，全体的な難易度に関しては，VSTM条件とIMG条件の間に差はなかったものとして分析を進めた．

8.4.2 生成による初期成分の変動

これまでの実験で観察された初期成分よりも早い潜時帯で，イメージと視野による効果が観察された．主成分分析の結果から，最も初期の振幅差が観察されたP48を構成する成分として，TF15が同定された．この成分については，左後頭頂部位に分布するSF3で，視野によって複雑さの影響が異なった．TF15は48 msに頂点を持ち，左右の後頭頂部位で極性が反転するという特徴が観察されたことから，一次視覚野に発生源を持つC1と推定される．

視覚的イメージによる一次視覚野の活動については，神経画像法によって報告されている (Chen et al., 1998; Kosslyn et al., 1999; Kosslyn et al., 1996; Kosslyn & Thompson, 2003; Thompson et al., 2001).

N90の潜時帯では，TF8が抽出された．TF8についても，左右の頭頂部位での極性の反転が見られた．TF15とは対照的に左後頭頂部位で陽性，右後頭頂部位で陰性を示した．潜時から，C1に続くC2とも考えられるが，本実験では両視野に刺激を呈示していたことから，TF8は左視野，TF15は右視野に対する反応が遅れて出現した可能性がある．C1は視野と対側の後頭頂部位で増強するため, 左後頭頂のSF3では右視野で左視野よりも陽性方向に振幅が増強していたことは，この可能性を支持する．TF8に関しては，条件間での複雑さ効果のパターンが異なることが示された.

C1はこれまで，トップダウンの影響を受けないと考えられてきたが，近年では，注意や情動によって変動するという証拠が提出されている (Pourtois et al., 2008; Rauss et al., 2011; Zhu & Luo, 2012)．本実験では，ERP測定のために限られた表象を繰り返しイメージしていたため，初期視覚の段階でイメージによる効果があらわれたかもしれない．視覚イメージ開始合図によってC1が変動するとすれば，視覚イメージにおける一次視覚野の役割は決定的なものということができる．しかし，C1は上下や左右の視野刺激による反転を同定の基準とすることが一般的である．本実験では左右の両視野に刺激を呈示していることから，C1と同定する決定的な根拠に欠ける．また，主成分分析の危険性として，時間的・空間的ジッターによる分散の誤推定も指摘されている．これらのことから，本実験でのC1の変動は慎重に再試する必要があると考える.

P170の潜時帯では，TF2が抽出された．TF2については，右後頭頂部位を中心とするSF2で，IMG条件でVSTM条件よりも陽性となることが示された．Dunn (1998)は，単語の符号

化時のP2について，高記憶保持者では頭皮上後部で増強し，低記憶保持者では前部で増強することを報告している．後頭のP2が記憶想起に関連するとすれば，後頭頂部位でのTF2がIMG条件で増強したことを説明できる．本実験では，前頭・中心部位のSF1では，VSTM条件でIMG条件よりも陽性方向に増強していた．Dunn (1998)で観察された，前頭・中心部位でのP2は，課題遂行の方略によって分布を変えたと解釈できるかもしれない．また，左後頭頂部位のTF3では，Complex試行で陰性方向の増強が観察された．本研究での実験２では，イメージ開始から265 ms後のN1に左半球頭頂部位優位の複雑さの効果が観察された．N1そのものはプローブ刺激に対する反応であるが，イメージ開始時のP2が重畳して，Complex試行の場合にSimple試行よりも陽性となったと解釈するならば，本実験の結果と一致する．一方，本研究の実験１では，SC群におけるP2での複雑さ効果が観察されたが，その効果は右半球に優勢であった．イメージする内容が文字であるか無意味図形であるかということが，左右半球差としてあらわれる可能性がある．

8.4.3 イメージと視覚的短期記憶に共通の保持機構

SPCNは600 msから1300 ms，および1800 msから2500 msの間の区間で観察されたが，IMG，VSTMの両条件間での違いは，刺激呈示後，100 msから200 msの間で観察された．この潜時帯については初期成分として詳しく分析を行った．対側と同側で平均した波形においても，条件間の違いがあったことから，心的イメージに固有の視覚処理が行われていたと考えられる．

SPCNが開始した500-600 msでは，側性の効果だけでなく複雑さの効果が観察された．SPCNは，視覚的短期記憶の保持容量を反映する（McCollough et al., 2007; Vogel & Machizawa, 2004）．したがって，この潜時帯においては，文字を構成するセグメントが，統合されきっていなかったと考えられる．統合されているとすれば，保持されている物体

数は1つとなるため，保持容量は同じになると考えられる．しかし，その効果には，条件による違いは観察されなかった．すなわち，視覚的短期記憶に関しても，心的イメージに関しても，統合されていない状態での表象の保持が行われていたと考えられる．イメージ表象については，構成される部分ごとに系列的に生成し，統合するとされており，刺激呈示直後には，統合が完了していなかった可能性がある．条件に関する交互作用がなかったことから，VSTM条件に関しても，同様の過程が想定される．視覚的短期記憶とイメージの違いは，最初の入力の処理に起因するということになる．Ishai & Sagi (1997)では，イメージによる知覚への影響について，長期記憶に由来するイメージであるか，短期記憶由来であるかが大きな要因となることが示されている．視覚的短期記憶と心的イメージの違いについては，さらなる検討が必要とされる．

第III部 総合考察

第9章　実験的検討の結果

9.1 実験的検討のまとめ

本研究の目的は，視覚イメージの知覚的性質を担うと考えられる視覚処理が，どの段階で惹起し，どのように課題遂行に関わるのかを明らかにすることである．そのために，イメージの知覚的性質の基盤となるであろう，視覚野の活動の生起タイミングに重点をおいて実験を行った．

実験１では，Yamazaki & Katayama (2013)で示された初期成分の変動が，刺激の物理的特性によるものではなく，イメージに関連した変数によるものであることを確認した．具体的には，記憶からの想起難易度，および対象の複雑さによって，イメージに関わる視覚処理の開始タイミングが変動した．また，プローブ位置のERP上の効果に関しても，単純に位置の違いによるものでないことが示された．

実験２では，プローブ位置による初期成分の変動について検討を行った．プローブの位置に関しては，P2およびN2振幅に反映された．特に，P2では，プローブの位置と対応した効果の分布が観察され，イメージした文字とプローブの位置関係によって初期成分が変動することが示された．また，イメージ開始刺激後，100 ms後に呈示されたプローブ刺激に対し，P1およびN1成分では，複雑さの効果だけでなく，ON試行とOFF試行で異なった反応が示された．この反応は，プローブの位置がEarlyであるかLateであるかには関連しなかったことから，描き順には関連しない対象マップの存在が示された．

実験３では，ERP上でのプローブ位置効果が生成と走査のどちらによるものかを検討した．反応時間から，Short-ISI条件では，生成と走査が同時に行われ，Long-ISI条件では走査のみが行われていたことが確認された．両条件でプローブ位置による初期成分の変動が観察されたことから，ERP上でのプローブ位置効果が走査機能を反映することが示された．

実験４では，生成から維持に至る処理について，視覚的短期記憶との比較による検討を行った．イメージを生成後，維持した場合には，一次視覚野の活動と考えられる成分が複雑さによって変動した．この効果は視覚的短期記憶を維持した場合には観察されず，イメージ生成に固有の活動と考えられる．また，視覚的短期記憶の維持を反映するSPCNは，イメージ表象の維持時にも同様に惹起し，条件間での違いは観察されなかった．このことから，視覚的短期記憶とイメージでの保持機構の共有が示唆された．SPCNにおける複雑さの影響に関しても，両条件において違いが見られなかったことから，視覚的短期記憶と心的イメージで，統合過程も共有する可能性が示された．

いずれの実験においても，イメージする文字の複雑さ，およびプローブ位置によって後頭部位に優勢な初期成分の変動が見られた．イメージを実現する生成過程と走査過程，および維持機能は，それぞれに異なった影響をERPに及ぼすと考えられる．次節では，それぞれの機能がどのようにERPに反映されるかという視点から，実験的検討についてまとめる．

9.2 イメージ機能によるERP変動

本研究では，Kosslyn (1996)のモデルに従い，心的イメージ現象を，生成・走査・維持の3つの機能的枠組みで捉えてきた．行動指標による知見からは，文字の複雑さは生成過程における視覚的記憶の活性化に関わると考えられた．また，プローブの位置は，生成過程での視覚的構成化，あるいは走査過程に関わる可能性があった．また，視覚的短期記憶との比較により，維持過程について検討を行った．文字イメージ課題における，これらの実験操作が，どのようにERPを変動させたかについてまとめる．

イメージする内容の複雑さによる初期成分への影響については，実験１，２，４で扱った．複雑さが初期成分に影響するタイミングは，実験間で異なった．実験１では，単純な図形を最初に記憶したSC群ではP2で，複雑な図形を最初に記憶したCS群ではP1で複雑さの効果が観察された．実験２では，プローブ位置の呈示に同期して測定したERPについて，P1およびN1で複雑さの効果が観察された．P1では，Complex試行での振幅がSimple試行よりも増強するという複雑さの効果が，ON試行でOFF試行よりも大きかった．また，N1では，Simple試行でComplex試行よりも増強するという複雑さの効果が，右半球よりも左半球で大きかった．実験４では，イメージ条件でのみ，一次視覚野の活動を意味すると考えられる，P48およびN90に複雑さの効果が観察された．実験間での違いから，ERP上での複雑さの効果があらわれるタイミングと振る舞いは，課題によって変動することが示された．特に，実験１での記憶順序による群間差から，想起難易度が効果のタイミングに影響していることがわかる．また，実験２で，初期の複雑さ効果が，プローブ位置のEarly・Lateに関わりなく出現したことから，Kosslyn (2006)において述べられているような，対象マップ，つまり，イメージすべき部分を個別に配置する以前の，骨格イメージの存在が初期成分に反映されていたと考えられる．以上のことから，ERPが反映する複雑さの効果は，これまでの行動指標による結果と一致して，視覚的記憶の活性化を反映すると考えられる．

しかし，ERP上での複雑さの影響として，視覚的記憶の活性化以外によるものと考えられる効果も観察された．実験１のCS群におけるP1は，頭皮上中央部に優勢部位を持っており，視覚的というよりも，一般的な記憶の検索に関わっていた可能性がある．また，実験２では，P2以降でも，複雑さによる変動が観察されたが，プローブ位置との交互作用による効果であることから，複雑さそのものというよりも，プローブ間のセグメント数に影響されるような過程を反映すると考えられる．

プローブ位置の効果については，実験１から３で扱った．実験１では，CS群ではP1およびN2でプローブ位置による変動，SC群では後期成分での変動が観察された．これは，記憶順序および複雑さによって，視覚的記憶の活性化のタイミングがずれたことによる違いであると考えられる．また，無意味図形を用いていることから，他の実験よりも想起に時間がかかり，走査過程の開始が遅れた可能性もある．実際，初期成分に引き続いて現れる後期成分の分析では，両群でプローブ位置の効果が後頭において観察された．Late試行でEarly試行よりも陰性にシフトするという傾向も同様であった. 実験２では, P2で最も早く，プローブ位置による効果が観察された．この効果は，プローブの物理的位置と対応する頭皮上分布を持っていたことから，空間的注意と類似しているとされるイメージ機能，すなわち，走査を反映する可能性が考えられた．この可能性は，実験３によって検証され，ERP上でのプローブ位置の効果が，走査を反映することが示された．実験３において，生成過程の影響が最も少なかったと考えられるLong-ISI条件で，プローブ位置が書き順の最初の線分にあるEarly試行よりも，最後の線分にあるLate試行で陰性成分が増強していた．Late試行で陰性にシフトする傾向は，Yamazaki & Katayama (2013)，および実験１，２でも同様であった．

維持に関しては，実験４において検討を行った．視覚的短期記憶の保持容量を反映するSPCNは，イメージの維持中にも同様に観察された．直前の知覚入力である短期記憶か，記憶からの想起であるイメージであるかに関わらず, SPCNに表象の維持が反映されることが示された．

最後に，観察された効果の左右半球差について考察する．複雑さ効果については，実験１のCS群で，Early試行でのN2に左後頭頂部位優位の効果が観察された．一方，SC群のP2では，右半球で効果が大きく観察されたが，有意な差とはならなかった．実験２では，N1振幅の分析の結果，Simple試行でComplex試行よりも増強するという複雑さの効果が，左

半球で右半球よりも大きかった．P2については，複雑さというよりも，プローブ位置間でのセグメントの数に影響されたと考えられるが，複雑さの効果は右半球で，Late試行の場合にEarly試行よりも効果が大きかった．実験４では，P48およびN90で，ともに，左後側頭に分布するSF3において複雑さの効果が観察された．その後のP170では，右後頭頂部位で，VSTM条件との違いのみが観察された．

概括すると，左半球で複雑さ効果が大きかったのは，実験１のCS群におけるN2，実験２のN1と実験４のN48, P90であった．実験２での効果は，ON・OFF試行は区別するが，プローブのEarly・Lateを区別しない対象マップの生成と考えられる．また，実験４の効果についても，48 msおよび90 msという早い潜時帯での効果であることを考えると，同様に対象マップの反映と想定できる．したがって，対象マップの生成が，左半球優位の分布を持つと仮定される．そうだとすれば，実験１のCS群での効果は，やはり対象マップを生成するタイミングの違いによるものだと考えることができる．

一方で，右半球で複雑さ効果が大きかったのは，実験２のP2，および実験４のP170であった．実験２でのP2の複雑さ効果は，対象マップ生成後の処理，すなわち，視覚的構成化として考えることができるかもしれない．実験３からは，プローブ位置効果が走査過程を反映することが示されているが，実験２では視覚的構成化が同時に進行していたと考えられる．また，実験４ではVSTM条件との違いが右後頭頂・側頭部位で観察されているため，イメージに特有の視覚的構成化が反映されたという考えは妥当と考えられる．

大まかな空間位置を決定する対象マップの生成が左半球優位に，詳細な位置に部分を配置する視覚的構成化が右半球優位に行われるという推測は，空間関係に関する左右差とも関係する．前述したように，Categorical空間関係は左，上，右といったような，部位間の相対的な位置関係を表す空間処理であり，左半球処理が想定される．一方，Coordinate空

間関係は，運動をガイドするような，絶対的な距離としての空間処理であり，右半球処理が想定されている（Kosslyn, 1987）.

9.3 文字イメージ課題中の脳活動

本研究では，視覚刺激によって開始される，イメージの生成から維持までの視覚関連の脳活動を，ERPによって検討した．心的イメージ研究の先行研究としては，PETやfMRIなどの神経画像法を用いたものが主流である．それらの研究では，イメージ中の視覚野の活動が，繰り返し示されている（Chen et al., 1998; Ganis et al., 2004; Kosslyn et al., 1993; Kosslyn et al., 1999; Kosslyn et al., 1996; Kosslyn & Thompson, 2003; Kosslyn et al., 1997; Roland & Gulyás, 1994; Thompson et al., 2001）.

Kosslyn et al. (1993)では，本研究と同様の課題中の脳活動を，PETを用いて測定している．彼らの実験１では，イメージ条件において，本研究での実験的検討と同様に，プローブとなる×印のついたマス目を呈示し，イメージした文字と重なるかどうかについて判断する課題を用いた．知覚条件では，マス目の中にイメージすべき大文字が，あらかじめ呈示されていた．結果として，イメージ条件では知覚条件よりも17野の活動が大きいことが示された．本研究の実験４でも，C1と一致する成分として，N48，およびP90にイメージの複雑さ効果が観察された．C1は一次視覚野に発生源を持ち，注意や情動刺激によって変動する（Pourtois et al., 2008; Rauss et al., 2011; Rossi & Pourtois, 2012）．しかし，本研究では，イメージ条件でVSTM条件よりも振幅が大きいという結果は観察されなかった．Kosslynらによって検出された，そのような効果は，より遅い潜時帯の高次視覚野からのフィードバックによるものかもしれない.

また，Kosslynらの実験２では，プローブの呈示時間を短縮して，記憶に関わる活動が見られるかについて検討した．知覚条件では，マス目内に呈示する大文字を知覚しにくいように劣化させ，トップダウン処理の影響も検討した．ベースラインとして，イメージ条件と同一の刺激に対して，イメージをせずに反応のみを行う条件を設定した．イメージ条件ではベースラインと比較して，17野と18野での活動が大きいことが示された．また，視覚的記憶に関わる領域として，左右の側頭回，左下部側頭回，および19野の活動が報告された．加えて，知覚条件と比較した際に，注意の解放を担うと考えられる，上部頭頂部位が活動することが示された．これらの活動は，記憶から部分情報を引き出し，それを再構築する過程で注意を移動させ，最終的には網膜局在的な視覚野に表象を形成するのだと解釈された．Kosslynらの実験1では，参加者が反応を行うまで，全ての刺激を呈示し続けた．一方，実験２では，イメージ開始合図が200 ms，プローブが300 ms間の呈示であった．実験２でのみ，記憶関連領域の活動が検出されたことは，この呈示時間の違いによるものだと考えられる．本研究では，全ての実験において，イメージ開始合図およびプローブが参加者の反応前に消失しているため，Kosslynらの実験２と同様に，記憶に基づいたイメージが生成された．特に，複雑さによる初期成分への影響は，Kosslynの実験２で観察された，記憶に関わる部位の活動と考えられる．

次に，ERPを用いた心的イメージに関する先行研究との関連性について考察する．いずれも，課題や測定方法が異なるため，直接の比較は難しいが，本研究との共通点と相違点について検討する．

Farah et al. (1988)では，文字のイメージを画面上に投影している際に，同じ文字が出た場合には, 異なる文字が出た場合と比較して, 初期成分のN1振幅が増強することを示した．このことは，イメージ中の視覚野の活動を示すものと考えられ，視覚野上でのイメージ表象と知覚表象の重なりによってN1の増強が起こると解釈された．しかし，文字の一致によ

る影響であることから，視覚表象そのものの重なりではなく，文字の同一性に対する反応や，空間的注意による反応であるという可能性が残されていた．本研究では，実験３において，イメージ開始中・後のプローブ刺激に対する誘発電位を測定しており，実験状況として類似していると考えられる．実験３のLong-ISI条件では，プローブ位置の効果が155 ms以降で有意となっているが，この潜時帯はN1に相当する．プローブ位置はイメージ表象上での書き順位置に対応しているが，文字そのものではない．したがって，Farahらが観察したものと同じ効果と考えると，文字の同一性に対する反応という可能性は除外できる．さらに，Farahらは，維持されている視覚表象と空間的注意の関係について言及しており，両者の区別が実際上，困難であると述べている．本研究で観察されたプローブ位置による効果は，走査機能を反映した．Kosslyn (1994, p. 144)によれば，走査を含む内査機能は，「「視覚バッファ」に形成された表象の部分や特徴を，「注意の窓」をシフトさせることで検索する」とされている．本研究で述べてきた走査機能は，空間的注意に相当するかもしれない．

Farah et al. (1989)では，イメージ開始からのERPを測定し，イメージなし条件と比較して，600 ms以降の緩徐な陽性電位を報告した．本実験では，イメージなし条件を設定していないため，直接の比較はできない．しかし，実験４におけるイメージ維持中には，維持視野の同側と比較して対側で陰性にシフトすることが示された．Farahらによる結果は，言語によって具象物をイメージするという課題に付随するものかもしれず，今後の検討が必要である．

最近のPage et al. (2011)の実験では，ビープ音によって単純な視覚刺激をイメージした際に，実際の刺激を呈示したときの誘発電位と類似した波形が得られるという報告をしている．本研究ではイメージ開始の合図が聴覚ではなく，視覚刺激に対するものという違いがある．また，イメージ材料が，色やチェッカーボードであるか，文字や図形であるかと

いう点も異なっている．しかし，イメージ開始に対する初期成分の変動に違いが観察されるという意味では，共通している．Pageらの研究は，本研究で観察された初期成分の変動が，イメージに特有のものであるということを，間接的に支持するといえる．

第10章　心的イメージの脳内メカニズム

10.1 心的イメージモデルとの対応づけ

序論でも述べたように，Kosslyn (1994; 2006)のモデルはいくつものサブシステムから構成され，そのサブシステムがさらに細分化されることで様々な視覚認知・イメージ現象の説明を可能にしている．このモデルと，実験的検討の結果との関連について考察を進める．

まず，本研究で観察された，複雑さによる初期成分の変動は，視覚的記憶の活性化に関わるものと考えられる．本研究の実験２から，視覚的記憶の活性化によって，イメージ生成の最初の段階で対象マップが生成されることが示された．対象マップは，「空間特性処理」を活性化することで作成される．「空間特性処理」は背側の処理経路であり，空間特性を保持する．一方，「対象特性処理」は腹側の処理経路であり，イメージする際には，物体特性を保持する．このサブシステムは，対象マップの生成後，イメージを構成する部分が視覚的に配置する機能と関連する．本研究の一連の実験において，この視覚的構成化を反映すると考えられるERP変動は，実験４で観察された．実験４では，P170振幅が，右後頭頂・側頭ではIMG条件でVSTM条件で大きく，前頭中心部では，VSTM条件でIMG条件よりも大きく観察された．この違いから，視覚的構成化を行う際に，実際の刺激が入力されていないIMG条件では，後頭頂・側頭の視覚的記憶に関連する領野を活動させる必要があったと考えられる．

「空間特性処理」，および「対象特性処理」のサブシステムは，「視覚バッファ」と名付けられた，網膜局在的な視覚野に情報を出力することで，イメージ表象が構成する．本研究で，最も顕著に観察された「視覚バッファ」の働きは，実験４におけるN48およびP90の変動である．一次視覚野の活動は，対象への詳細な判断が求められる場合に観察されると考えられてきた (Kosslyn, 2003)．しかし，本研究での結果は，対象マップの作成時にも，一次視覚野が活動する可能性を示した．

走査に関しては， ERP位置効果として反映されることが，実験３により示された．走査を含む内査は，「視覚バッファ」に形成された表象の部分や特徴を，「注意の窓」をシフトさせることで検索する．本研究で観察された，走査によるERP効果は，視覚情報に対する空間的注意によって，「注意の窓」による調節が起こった結果として解釈できる．また，プローブそれ自体は，実際に入力される視覚情報であるため，課題遂行のためには，生成したイメージ表象との位置関係について判断せねばならない．したがって，課題遂行には「空間特性処理」もまた，関係すると考えられる．

維持に関しては，実験４によって，SPCNに反映されることが示された．SPCNは，表象の保持視野と対側後頭部位での活動ということから，一定の網膜局在性が存在する．モデルの中で，このような特性を持つのは「視覚バッファ」である．先に述べたように，実験４でのN48，およびP90の振幅変動が，「視覚バッファ」の活動を示すとすれば，維持の際に観察される「視覚バッファ」の活動は，高次視覚野からの再入力を意味すると考えられる．SPCNの発生源については，現在のところ，明らかになっていないが，「視覚バッファ」の機能を反映すると考えるならば，初期成分の変動との関連性を検討する必要がある．

Kosslynのモデルは，解剖学的特性や，神経画像，行動指標を基盤として構築されているため，各サブシステムと，そこに割り当てられた機能やシステム間のつながりについては，十分な証拠を持つ．しかし，イメージに関わる機能を説明しようとする際に，どのサブシステムが，どの順番で活動するのかについての実証的証拠は示されてこなかった．本研究ではこの点を補完し，イメージの生成・走査・維持に関連して，サブシステム間がどのような時間的関係で働くのかを示した．

10.2 本研究の意義と位置づけ

本研究の実験的検討の意義は，心的イメージのメカニズムについて，脳の「どこが」関与するかだけでなく，「どのように」イメージ体験を実現するかについて明らかにした点にある．そのことにより，現在最も主流であるKosslynのイメージ理論に実証的証拠を提供した．また，神経画像法によって示されてきた，イメージ中の視覚野の活動が，複数の機能による脳活動の混合であることを示唆した．

近年の神経画像法を用いた研究では，イメージ中の視覚野の活動，中でも一次視覚野の関与の有無が主な関心事であった．つまり，イメージが「どこ」で実現されるのか，という視点を追求することで，イメージと知覚の類同性を示そうとしてきた．しかし，Pylyshyn (2002)が述べたように，どこが活動するか，という問題は必ずしも，どのように活動するかを明らかにはしない．本研究では，イメージの知覚的性質を担うと考えられる，視覚に関連した処理がどの時点で生起するかに焦点を当てた．イメージの生成を行う場合には，最初に，視覚的記憶が活性化される．この段階では，全体としての枠組みを示すような，対象マップと呼ばれる表象が作成される．それに続いて，イメージを構成する各部分の配置が行われる．ここまでの過程が，生成機能と区分できる．視覚的構成化は，空間的注意と類似した性質を持つ走査と時間的に並列して行われる．また，維持する場合には，視覚的短期記憶と共有されるような，網膜局在的な視覚情報として保持される．これらの，生成，走査，維持の一連の機能は，視覚野の活動が複数段階に分けて生起することにより遂行される．このことは，視覚野に表象を描画するといったような，単一の過程によりイメージ体験が実現されているわけではないことを示す．つまり，視覚野の活動の意味づけは，それぞれの過程によって異なっており，視覚的長期記憶の活性化，さらに記憶から表象を再構築する過程，生成した表象を走査する過程，生成した表象を維持する過程のそれぞれにおいて，関連した視覚的な活動が生起しているということである．さらに，それらの活動

は，いつでも同じように生起するわけではなく，記憶からの想起難易度や，課題に必要とされる条件に対応して変動する．これまでに観察された神経画像法による視覚野の活動は，これらの活動が混合したものであり，分離して検討することで，イメージの基盤となる脳活動についての新たな知見が得られた．

第11章　人間の認知における心的イメージの位置づけ

11.1 視覚認知との関わり

本研究では，イメージによる視覚関連の活動が，視覚認知と同等の早い潜時帯で起こりうることを示した．これまでの，神経画像法を用いた先行研究では，視覚野の活動がどのような時間帯で起こるのかについては触れられてこなかった．ERPによる先行研究では，Page et al. (2011)において，初期成分の変動が示されているが，その影響がイメージに関わるどのような処理を反映するかについては述べられていない．それ以前の研究では，イメージ生成は，後期成分によって反映されることが示されているのみであった (Farah & Weisberg, 1989)．しかし，本研究では，実験１から４までの全てで，イメージ開始刺激に対する初期成分において，イメージによる影響が観察された．

本研究で枠組みとして採用したKosslyn (1994; 2006)のモデルでは，視覚認知にイメージが及ぼす影響について言及している．視覚イメージは，視覚認知のシステムの一部であり，表象の知覚的性質を共有する．また，それだけではなく，物体を認知する際には重要な役割を果たす．何らかの物体を認知するには，それを構成する部分を認識し，その部分同士の位置関係を分析し，それが記憶にあるものと一致するかどうかという照合を行うことが必要とされる．例えば，文字に関して，我々は初めて見た誰かの手書きの文字を，見慣れたアルファベットとして認識可能である．ゆがんでいたり，癖があったりして，自分が知っているアルファベットの「H」と完全に同一でなくとも，縦棒と横棒の数，それぞれの長さ，位置関係をもとにして，正しく同定ができる．つまり，入力された情報と，記憶情報の中から引き出してきた情報の比較照合によって，視覚認知が可能になる．Kosslynによれば，この照合の過程において，記憶から引き出して来た表象がイメージである．視覚認知と同等の潜時帯で，イメージに関連する視覚野の活動が観察されたことは，この主張を支持する．

11.2 視覚的注意との関わり

本研究では，心的イメージと視覚的注意，なかでも空間的注意との関わりについても示唆が得られた． Kosslynの理論的前提としては（第2章のFigure 2-1を参照），本研究で用いた課題における内査に関して，「空間特性処理」と 「注意シフト」，「注意の窓」が主に関わる．「空間特性処理」は，「視覚バッファ」上に知覚情報として入力されたプローブの位置を符号化し，その情報をいくつかのサブシステムを介して，「注意シフト」に送る．「注意シフト」は，その情報に基づいて，「視覚バッファ」上の「注意の窓」を移動させ，再構成された，あるいはされつつある表象を検索する．つまり，理論上では，走査を含む内査は，空間的注意に関わるサブシステムによって実行される．本研究においても，実験３では，Short-ISIとLong-ISIの両条件で，プローブ位置の効果が観察された．その効果は，イメージ生成後に呈示されたプローブ位置がLateである場合には，EarlyよりもN1成分が増強した．この傾向は，複雑さによる交互作用がありながらも，実験１および２でも観察された．また，実験２では，プローブの位置と対応した，ERP効果の頭皮上分布が観察された．これらのプローブ位置の効果は，空間的注意が対側後頭部位の電位を変動させるという知見と非常に良く一致する（例として，Mangun & Hillyard, 1995）．走査を含む内査の機能は，理論上，またERP上の効果としても，空間的注意による視覚情報の増幅と対応づけられる．

11.3 視覚的短期記憶との関わり

心的視覚イメージと視覚的ワーキングメモリの関係については，両モデルの構造が非常に類似していることから，同じ機構を利用しているのかどうかについて議論されてきた（Borst, Ganis et al., 2012; Borst, Niven et al., 2012; Ganis et al., 2009; Logie & Van Der

Meulen, 2009)．実験的な検討はまだそれほど多いとはいえないが，視覚的妨害課題などを用いて，その類似性と相違が検討されはじめている（Borst, Ganis et al., 2012; Borst, Niven et al., 2012)．そのような検討の一つとして，本研究の実験 4 は，心的視覚イメージと視覚的短期記憶について，統合および維持に関する機構が共有されることを示した．しかし, 機構が共有されることが, 機能的に同一であることを示すとは限らない. Ishai & Sagi (1997)は，長期記憶から生成したイメージと，視覚的短期記憶に由来するイメージでは，知覚への干渉効果が異なることを示している．この機能的な違いが，本研究で観察された視覚的短期記憶とイメージ課題での違い，すなわち，P48およびN90振幅に観察された，複雑さ効果のパターンの違いによるものか否かについては，今後の検討が必要である．

短期記憶に関しては，近年，特徴の結びつけ（binding)について注目が集まっている．特徴の結び付けは，本来，視覚認知メカニズムの解明にとっても重要な問題である．特に，対象が運動したり，遮蔽などによって失われたとしても，安定した物体の認識が保たれることについては，視覚的短期記憶による保持の役割が想定される．Treisman (1988)によって提案された特徴統合理論によると，知覚時の特徴の結びつけは，選択的注意によって一度に一物体ずつ継時的に行われると考えられる．そうだとすると，一度に複数の物体を認識しているという我々の主観は，視覚的短期記憶に保持された表象によるものと考えられる（齋木, 2009)．しかし，視覚的短期記憶での結びつけに関する研究は，直前に呈示された視覚刺激を保持する課題を用いている（Luria & Vogel, 2011; Shen, Yu, Xu, & Gao, 2012). そのため，直前に呈示された視覚刺激に対する結びつけの影響を受ける可能性がある．本研究によって，心的イメージと視覚的短期記憶がこの保持機構を共有していることが示されたことから，直前の視覚刺激による影響が無い状態での結びつけ問題についても検討することが可能となった．

11.4 心的イメージの性質と役割

心的視覚イメージに関する本研究の検討から，生成過程と視覚認知，走査過程と視空間的注意，維持過程と視覚的短期記憶との関わりが示された．本節では，これらの関わりから導かれる，心的イメージの性質と役割について考察を加える．

本研究の実験的検討の結果は，神経画像法で示されてきたイメージ中の視覚野の活動について，新たな解釈の余地があることを示す．これまでの研究においては，イメージ中の視覚野の活動が，どのタイミングで起こっているのかは明確ではなかった．命題派の主張による，付帯現象としての視覚野の活動が，論理的にはあり得たわけである．しかし，本研究の結果からは，イメージ課題に関する判断よりも先に，視覚野が活動することが示された．これは，イメージ中の視覚野の活動が，イメージ課題を遂行する際に必要不可欠なものであることを強く支持する．視覚野の活動が付帯現象であるならば，視覚認知と同等の潜時帯で生起する必要がないばかりでなく，課題遂行を遅延させる要因となりかねないからである．さらに，イメージの生成，走査，維持の全ての機能に視覚野の活動が関与することは，イメージが知覚的な性質を持つ表象であるばかりでなく，記憶や空間的注意など，知覚表象に対する場合と共通の機能が必要とされることを示す．したがって，心的視覚イメージは，確かに知覚的であると明らかにすることができた．

最後に，これらの発見から考えられる，イメージの役割について述べる．心的イメージは，主観的な現象であり，他の多くの認知機能と比較して，その役割があいまいであった．例えば，注意は多くの情報の中から重要なものを優先的に処理するという役割が，言語であれば，他者とのコミュニケーションや効率的な表象の処理といったような役割が想定される．その中で，心的イメージが持つ積極的な役割は，これから起こりうる事物に対する，具象性を持った予測機能であると推定できる．心的イメージの知覚的な性質は，視覚認知

が行われる時間帯にすでに生起する．また，生成された表象について，知覚と同様の注意機能が発揮され，維持時には知覚した記憶と同様の保持がなされる．つまり，実際の知覚情報が入力された場合と，ほぼ同等の処理が可能である．このことが意味するのは，心的イメージが実際に起こりうる事物の模倣であり，シミュレーションであるということである．

第12章　今後の展望

本研究は，心的イメージに関わる脳内の処理過程を，時系列的に分析した最初の研究である．したがって，実験的検討で観察された，初期成分の変動についての解釈は，探索的にならざるを得なかった．そのため，イメージ研究で伝統的に行われてきた他の課題や，状況に対して，本研究によって得られた知見が一般化できるかどうかを検討する必要がある．今後は，本研究の結果を基礎に，イメージの種類や状況に応じて，本研究で観察されたような，視覚関連の初期成分の変動が見られるのかについて基礎的証拠を積み重ねる必要がある．生成に関しては，対象マップの生成と部分の視覚的構成化による視覚野の活動が，これまで一次視覚野の活動を必要としないとされてきたタイプのイメージでも観察されるかを検討する必要がある．特に，空間イメージに関して，理論上では，対象マップのみの生成によって課題が行われるとされていることから，空間イメージと物体イメージの比較を行うことにより検討が可能と考えられる．走査に関しては，空間的注意との対応づけについて述べた．しかし，知覚とイメージは，処理機構を共有しているが，完全に一致するわけではない．走査と空間的注意がどの程度同じものだと言えるのかについては検討の余地がある．また，維持に関しては，本研究で観察された視覚的短期記憶のメカニズムとの違いと共通性が，どのように機能的な違いを生み出すのかについて明らかにする必要がある．最後に，本研究では扱わなかった変換機能について，発展的に研究を行う必要がある．変換機能は，心的回転などの動的なイメージとの関係が指摘されている（Kosslyn, 1994）．人間の認知機能におけるイメージの役割を予測機能とするならば，動的なイメージは，最も日常生活で必要とされるタイプのイメージである．したがって，動的イメージの研究は，イメージそのものの本質を追求するてがかりとなる可能性がある．

また，それらの基礎研究を通じて，臨床を含めた他分野への応用も考えていかねばならない．例えば，近年話題になっているヒューマン・マシン・インターフェイスの分野など

では，イメージに関わる脳活動が即時に検出できるようになれば，大きな貢献ができるだろう．また，発達臨床分野においては，自閉症児が持つイメージに関する報告もある．コントロール群よりも優れたイメージ能力を持つ, あるいは, イメージ能力が劣る（Gaffrey et al., 2007; Kana, Keller, Cherkassky, Minshew, & Just, 2006)という両方向の結果が出ており，現在のところ，どちらが正しいのかは明らかでない．しかし，自閉症児が健常児とは異なった特殊なタイプのイメージを持っているとすれば，本研究で発見されたような，ERP，あるいはVEPの効果を用いることによって，自閉症のメカニズムにも迫ることができる可能性がある．

第13章　要約および結論

心的イメージは，「他者に道順を伝える」といったようなコミュニケーション場面や，メンタルトレーニングに代表されるような学習場面など，日常生活場面において重要な役割をもつ．心的イメージの脳内メカニズムの解明は，日常生活における心的イメージの機能や活用を考える上で，基礎的な情報を提供できるという点に意義がある．視覚モダリティにおける心的イメージは，「短期記憶痕跡あるいは長期記憶の情報に基づいて，視覚体験時の符号化フォーマットを保存するように心的に再現，（再）構成，創造された類知覚的体験」として定義される．行動指標・生理指標を用いた先行研究から，心的イメージ表象は，本質的に知覚と類似した性質を持つと考えられる．特に，近年では，脳画像研究によって，イメージ中のモダリティ特異的な領野の活動が示されてきている．また，それらの知見の集約として，知覚システムをベースとした計算論的モデルが構築され，イメージを実現する脳部位について，信頼性のある仮説が提出されている．

しかし，心的イメージのメカニズムを解明するためには，脳の「どこ」がはたらくかだけでなく，「どのように」はたらくかを明らかにすることが必要である．すなわち，イメージ課題の行動遂行が，どのような認知処理を経た結果であるのかについて検討する必要がある．また，その検討の過程において，イメージの知覚的性質の基盤となるであろう，視覚野の活動が，どのようなタイミングで生起するかという点が，重要な問題となる．イメージ過程における視覚処理の惹起タイミングについての情報は，イメージが持つと考えられる知覚的性質が，課題遂行において果たす役割を解明するための手がかりとして用いることができる．本研究の目的は，視覚イメージの知覚的性質を担うと考えられる視覚処理が，どの段階で惹起し，どのように課題遂行に関わるのかを明らかにすることである．そのため，計算論的モデル，およびシミュレーションによって示された，イメージ活動の3つの機能に着目して検討を行った．「生成」は，長期記憶に蓄えられた情報を読み出して

再構成する機能である．「内査」は，生成されたイメージ表象の部分や特徴を検出したり，空間関係を符号化することで，イメージを解釈する機能である．この機能には，生成したイメージ表象上の一部分を検索する「走査」過程が含まれる．「維持」機能は，一度生成したイメージ表象を保持する機能である．これらの機能は時間的に近接して働くことが想定されるため，高い時間分解能を持ち，課題処理中の脳活動を時系列的に分析することが可能な指標である事象関連脳電位（Event-related-brain potential; ERP）を用いて検討を行った．課題としては，複数の先行研究により，その処理過程が最も明らかになっている文字イメージ課題を採用した．文字イメージ課題は，アルファベットの小文字を手がかりとして，格子状の枠内に大文字のイメージを投影し，枠内のマス目の1つにつけられた×印が，イメージした文字と重なるかどうかを判断するものである．生成する文字，または図形イメージが単純である場合には，複雑な場合よりも反応時間が短縮する．行動指標における，この複雑さ効果は，「生成」機能の一部である，視覚的記憶の活性化を示す可能性が高い．また，プローブの位置が描き順の最初にある場合には，最後にある場合よりも反応時間が短縮する．このプローブ位置効果は，部分を配置するという「生成」機能の一部，あるいは「内査」における走査距離を反映するとされる．Yamazaki & Katayama (2008) では，文字イメージ課題中の脳活動をERPを用いて測定し，後頭部位を優勢とする初期成分の振幅が，プローブ位置の違いによって変動することを示した．この変動は，イメージの生成あるいは走査が，刺激によって惹起した視覚処理に影響した結果と考えられるため，視覚イメージによる視覚野の活動を反映する可能性が高い．しかし，我々の実験では，刺激を厳密に統制しておらず，単に物理的な刺激の違いによってこの効果が観察された可能性も否定できない．

実験１では，イメージに関連する初期成分の変動が，刺激の物理的特性によるものかを検討した．結果として，初期成分の変動は，イメージそのものによる変動であることを確認

した．また，記憶からの想起難易度によって，初期成分に反映される視覚処理のタイミングが変動することを示した．しかし，このタイミング変動のため，プローブ位置によるERP効果については明らかにならなかった．

実験２では，プローブ位置による初期成分の変動について検討を行った．プローブの位置に関しては，ERPのP2，およびN2振幅に反映された．したがって，プローブ位置がERPの初期成分に影響することが示された．また，P2以前のP1およびN1振幅では，プローブがイメージした文字と重なる場合とそうでない場合で，異なった反応が示された．プローブが描き順の中で占める位置については効果がなかったことから，描き順には関わりのない，骨格イメージと呼ばれる表象が存在することが実証された．

実験３では，プローブ位置が，部分を配置するという「生成」機能の一部，あるいは「内査」における走査距離のどちらを反映するかを明らかにすることを目的とした．イメージ開始刺激とプローブ刺激の呈示間隔を操作し，生成と走査を行うShort-ISI条件と，生成した後，走査のみを行うLong-ISI条件を設定した．プローブ刺激の呈示によって惹起したERPにおいて，プローブ位置による初期成分の変動が両条件で観察された．したがって，ERP上でのプローブ位置効果は，両条件において共通して駆動したと考えられる，走査を反映することが示された．

実験４では，視覚的短期記憶との比較を行うことにより，生成から維持に至るまでの処理について検討した．視覚的短期記憶条件では，イメージ開始合図である小文字の代わりにマス目内に大文字を呈示し，視覚的に保持した．イメージ条件では，小文字と対応する大文字をイメージし，同様に保持した．イメージ条件では，イメージ開始に伴って一次視覚野の処理を反映するC1が複雑さによって変動したが，そのような効果は視覚的短期記憶条件では観察されなかった．イメージ生成に固有の活動と解釈できる．また，より遅い潜時

帯の成分であるSPCNは，両条件で惹起し，条件差は観察されなかった．SPCNは，視覚的に保持する物体数を反映するため，視覚的短期記憶と心的イメージにおける保持過程の共有が示された．

実験１および実験２では，「生成」および「走査」について，実験３では「走査」，実験４では「生成」から「維持」について検討した．いずれの実験においても，イメージする文字の複雑さ，およびプローブ位置によって，後頭部位に優勢な初期成分の変動が見られた．したがって，「生成」，「走査」，「維持」のそれぞれが，イメージの知覚的性質を担うと考えられる視覚野の活動を必要とすることが示された．先行研究において観察された，神経画像法による視覚野の活動は，これらの活動の混合であることが示唆される．また，心的イメージを実現するプロセスについて，以下のような時系列的処理が想定できる．イメージの生成を行う場合には，まず視覚的長期記憶が活性化され，全体の骨格イメージが形成される．次の段階として，全体を構成する部分を配置し，再構築される．走査は生成に引き続いて，時間的に並列して行われ，必要な情報を検出した時点で生成も終了する．また，維持する場合には，視覚的短期記憶と同様に，網膜局在的な視覚情報として保持される．本研究は，文字イメージ課題中の脳内メカニズムについて，従来の計算論的モデルに，実証的かつ時系列的な情報を付加した．また，日常生活における心的イメージの活用を考える場合には，「生成」，「内査」，「維持」のそれぞれと関連づけて検討する必要があり，その個別の検討にERPが利用できる可能性をも示した．

引用文献

Anderson, J. R. (1978). Arguments concerning representations for mental imagery. *Psychological Review*.

Bartolomeo, P. (2008). The neural correlates of visual mental imagery: an ongoing debate. *Cortex; a journal devoted to the study of the nervous system and behavior, 44*, 107-108.

Borst, G., Ganis, G., Thompson, W. L., & Kosslyn, S. M. (2012). Representations in mental imagery and working memory: evidence from different types of visual masks. *Memory & Cognition, 40*, 204-217.

Borst, G., Niven, E., & Logie, R. H. (2012). Visual mental image generation does not overlap with visual short-term memory: a dual-task interference study. *Memory & Cognition, 40*, 360-372.

Cattaneo, Z., Bona, S., & Silvanto, J. (2012). Cross-adaptation combined with TMS reveals a functional overlap between vision and imagery in the early visual cortex. *NeuroImage, 59*, 3015-3020.

Chen, W., Kato, T., Zhu, X.-H., Ogawa, S., Tank, D. W., & Ugurbil, K. (1998). Human primary visual cortex and lateral geniculate nucleus activation during visual imagery. *Neuroreport, 9*, 3669-3674.

Curran, T., & Dien, J. (2003). Differentiating amodal familiarity from modality-specific memory processes: An ERP study. *Psychophysiology, 40*, 979-988.

Dalvit, S., & Eimer, M. (2011). Mechanisms of percept-percept and image-percept integration in vision: behavioral and electrophysiological evidence. *Journal of Experimental psychology. Human Perception and Performance, 37*, 1-11.

Denis, M. (1989). *イメージの心理学―心像論のすべて [単行本]* (大久保 政憲, 兵藤 宗吉, 寺内 礼, 富田 正二 & 三上 典生, Trans.): 勁草書房.

Dror, I., & Kosslyn, S. (1994). Mental imagery and aging. *Psychology and aging*. *9(1)*, 90-102.

Dunn, B. R., Dunn, D. a., Languis, M., & Andrews, D. (1998). The relation of ERP components to complex memory processing. *Brain and cognition, 36*, 355-376.

Eimer, M., & Kiss, M. (2010). An electrophysiological measure of access to representations in visual working memory. *Psychophysiology, 47*, 197-200.

Emmorey, K., Kosslyn, S., & Bellugi, U. (1993). Visual imagery and visual-spatial language: Enhanced imagery abilities in deaf and hearing ASL signers. *Cognition, 46*, 139-181.

Emmorey, K., & Kosslyn, S. M. (1996). Enhanced image generation abilities in deaf signers: a right hemisphere effect. *Brain and Cognition, 32*, 28-44.

Evans, K. M., & Federmeier, K. D. (2007). The memory that's right and the memory that's left: event-related potentials reveal hemispheric asymmetries in the encoding and retention of verbal information. *Neuropsychologia, 45*, 1777-1790.

Farah, & Weisberg, L. (1989). Brain activity underlying mental imagery: Event-related potentials during mental image generation. *Journal of Cognitive Neuroscience, 1*, 302-316.

Farah, M. J., Peronnet, F., Gonon, M. A., & Giard, M. H. (1988). Electrophysiological Evidence for a Shared Representational Medium for Visual Images and Visual Percepts. *Journal of Experimental Psychology:General, 117*, 248-257.

Folstein, J. R., & Van Petten, C. (2008). Influence of cognitive control and mismatch on the N2 component of the ERP: a review. *Psychophysiology, 45*, 152-170.

Gaffrey, M. S., Kleinhans, N. M., Haist, F., Akshoomoff, N., Campbell, A., Courchesne, E. et al. (2007). Atypical [corrected] participation of visual cortex during word processing in autism: an fMRI study of semantic decision. *Neuropsychologia, 45*, 1672-1684.

Ganis, G., Thompson, W. L., & Kosslyn, S. M. (2004). Brain areas underlying visual mental imagery and visual perception: an fMRI study. *Brain research. Cognitive Brain Research, 20*, 226-241.

Ganis, G., Thompson, W. L., & Kosslyn, S. M. (2009). Visual mental imagery: More than "seeing with the mind's eye". In J. R. Brockmole (Ed.), *The visual world in memory* (pp. 215-249): Psychology Press.

Griffin, I. C., & Nobre, A. C. (2003). Orienting attention to locations in internal representations. *Journal of Cognitive Neuroscience, 15*, 1176-1194.

Handy, T. C. (Ed.). (2004). *Event-related potentials: A methods handbook* (1 edition ed.). London: A Bradford Book.

Heil, M. (2002). The functional significance of ERP effects during mental rotation. *Psychophysiology, 39*, 535-545.

Hillyard, S. A., & Anllo-Vento, L. (1998). Event-related brain potentials in the study of visual selective attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 95*, 781-787.

Hillyard, S. A., Vogel, E. K., Luck, S. J., & Anllo-Vento, L. (1998). Sensory gain control (amplification) as a mechanism of selective attention. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London - Series B: Biological Sciences, 353*, 1257-1270.

菱谷 晋介. (Ed.). (2001). *イメージの世界*: ナカニシヤ出版.

Huang, H.-W., Lee, C.-L., & Federmeier, K. D. (2010). Imagine that! ERPs provide evidence for distinct hemispheric contributions to the processing of concrete and abstract concepts. *NeuroImage, 49*, 1116-1123.

Ishai, a., & Sagi, D. (1997). Visual imagery: effects of short- and long-term memory. *Journal of Cognitive Neuroscience, 9*, 734-742.

Johannes, S., Münte, T. F., Heinze, H. J., & Mangun, G. R. (1995). Luminance and spatial attention effects on early visual processing. *Cognitive Brain Research, 2*, 189-205.

Kana, R. K., Keller, T. a., Cherkassky, V. L., Minshew, N. J., & Just, M. A. (2006). Sentence comprehension in autism: thinking in pictures with decreased functional connectivity. *Brain : a journal of neurology, 129*, 2484-2493.

北村 晴郎. (1982). *心像表象の心理*: 誠信書房.

Koenig, T., Kochi, K., & Lehmann, D. (1998). Event-related electric microstates of the brain differ between words with visual and abstract meaning. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 106*, 535-546.

Kosslyn, S. M. (1973). Scanning visual images: Some structural implications. *Attention, Perception, & Psychophysics, 14*.

Kosslyn, S. M. (1975). Information representation in visual images. *Cognitive Psychology, 7*, 341-370.

Kosslyn, S. M. (1987). Seeing and imagining in the cerebral hemispheres: a computational approach. *Psychological Review*, 148-175.

Kosslyn, S. M. (1988). Aspects of a cognitive neuroscience of mental imagery. *Science, 240*, 1621-1626.

Kosslyn, S. M. (1994). *Image and brain : the resolution of the imagery debate*. Cambridge, Mass.: MIT Press.

Kosslyn, S. M., Alpert, N. M., Thompson, W. L., Maljkovic, V., Weise, S. B., Chabris, C. F. et al. (1993). Visual Mental-Imagery Activates Topographically Organized Visual-Cortex - Pet Investigations. *Journal of Cognitive Neuroscience, 5*, 263-287.

Kosslyn, S. M., Ball, T. M., & Reiser, B. J. (1978). Visual images preserve metric spatial information: evidence from studies of image scanning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 4*, 47-60.

Kosslyn, S. M., Cave, C. B., Provost, D. A., & Jr Von Gierke, S. N. (1988). Sequential processes in image generation. *Cognitive Psychology, 20*, 319-343.

Kosslyn, S. M., Maljkovic, V., Hamilton, S. E., Horwitz, G., & Thompson, W. L. (1995). Two types of image generation: Evidence for left and right hemisphere processes. *Neuropsychologia, 33*, 1485-1510.

Kosslyn, S. M., Pascual-Leone, A., Felician O S., C., Keenan, J. P., Thompson, W. L., Ganis, G. et al. (1999). The Role of Area 17 in Visual Imagery: Convergent Evidence from PET and rTMS. *Science, 284*, 167-170.

Kosslyn, S. M., & Pomerantz, J. R. J. (1977). Imagery, propositions, and the form of internal representations. *Cognitive Psychology, 9*, 52-76.

Kosslyn, S. M., Thompson, W., & Kim, I. (1996). Individual differences in cerebral blood flow in area 17 predict the time to evaluate visualized letters. *Journal of Cognitive Neuroscience, 8:1,* 78-82.

Kosslyn, S. M., & Thompson, W. L. (2003). When is early visual cortex activated during visual mental imagery? *Psychological Bulletin, 129*, 723-746.

Kosslyn, S. M., Thompson, W. L., & Alpert, N. M. (1997). Neural Systems Shared by Visual Imagery and Visual Perception: A Positron Emission Tomography Study. *NeuroImage, 6*, 320-334.

Kosslyn, S. M., Thompson, W. L., & Ganis, G. (2006). *The case for mental imagery*. New York: Oxford University Press.

Kosslyn, S. M., Thompson, W. L., Shephard, J. M., Ganis, G., Bell, D., Danovitch, J. et al. (2004). Brain rCBF and performance in visual imagery tasks: Common and distinct processes. *European Journal of Cognitive Psychology, 16*, 696-716.

Kosslyn, S. M., Thompson, W. L., Sukel, K. E., & Alpert, N. M. (2005). Two types of image generation: evidence from PET. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience, 5*, 41-53.

Logie, R. H., & Van Der Meulen, M. (2009). Fragmenting and integrating visuo-spatial working memory. In J. R. Brockmole (Ed.), *The visual world in memory* (pp. 1-32): Psychology Press.

Luck, S. J., & Hillyard, S. A. (1994). Electrophysiological correlates of feature analysis during visual search. *Psychophysiology, 31*, 291-308.

Luria, R., Sessa, P., Gotler, A., Jolicoeur, P., & Dell'Acqua, R. (2010). Visual short-term memory capacity for simple and complex objects. *Journal of Cognitive Neuroscience, 22*, 496-512.

Luria, R., & Vogel, E. K. (2011). Shape and color conjunction stimuli are represented as bound objects in visual working memory. *Neuropsychologia, 49*, 1632-1639.

Mangun, G. R., & Hillyard, S. A. (1995). Mechanisms and models of selective attention. In M. D. Rugg & M. G. H. Coles (Eds.), *Electrophysiology of mind: Event-related brain potentials and cognition.* (pp. xii 220). New York, NY, US: Oxford University Press.

McCarthy, G., & Donchin, E. (1981). A metric for thought: A comparison of P300 latency and reaction time. *Science, 211*, 77-80.

McCollough, A. W., Machizawa, M. G., & Vogel, E. K. (2007). Electrophysiological measures of maintaining representations in visual working memory. *Cortex; a journal devoted to the study of the nervous system and behavior, 43*, 77-94.

Mellet, E., Petit, L., Mazoyer, B., Denis, M., & Tzourio, N. (1998). Reopening the mental imagery debate: lessons from functional anatomy. *NeuroImage, 8*, 129-139.

Misra, M., & Holcomb, P. J. (2003). Event-related potential indices of masked repetition priming. *Psychophysiology, 40*, 115-130.

Muthukumaraswamy, S. D., Johnson, B. W., & Hamm, J. P. (2003). A high density ERP comparison of mental rotation and mental size transformation. *Brain and Cognition, 52*, 271-280.

入戸野 宏. (2005). 心理学のための事象関連電位ガイドブック. 190.

Page, J. W., Duhamel, P., & Crognale, M. A. (2011). ERP evidence of visualization at early stages of visual processing. *Brain and Cognition, 75*, 141-146.

Podgorny, P., & Shepard, R. N. (1978). Functional representations common to visual perception and imagination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 4*, 21-35.

Pourtois, G., Rauss, K. S., Vuilleumier, P., & Schwartz, S. (2008). Effects of perceptual learning on primary visual cortex activity in humans. *Vision Research, 48*, 55-62.

Pylyshyn, Z. W. (2002). Mental imagery: in search of a theory. *The Behavioral and Brain Sciences, 25*, 157-182; discussion 182-237.

Pylyshyn, Z. W. (2003). Seeing and visualizing : it's not what you think. xviii, 563 p.

Qiu, J., Li, H., Liu, Q., & Zhang, Q. (2007). Brain mechanisms underlying visual perception and visual mental imagery of Chinese pseudo-characters: an event-related potential study. *Brain Research, 1184*, 202-209.

Rauss, K., Schwartz, S., & Pourtois, G. (2011). Top-down effects on early visual processing in humans: a predictive coding framework. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 35*, 1237-1253.

リチャードソン, A. (1973). *心像* (鬼沢 貞. 滝浦 静雄, Trans.). 東京: 紀伊國屋書店.

Roland, P. E., & Gulyás, B. (1994). Visual-Imagery and Visual Representation. *Trends in Neurosciences, 17*, 281-287.

Rossi, V., & Pourtois, G. (2012). State-dependent attention modulation of human primary visual cortex: a high density ERP study. *NeuroImage, 60*, 2365-2378.

齋木 潤. (2009). 視覚性短期記憶における結び付け問題. *日本神経回路学会誌, 16*, 12-21.

Shen, M., Yu, W., Xu, X., & Gao, Z. (2012). Building Blocks of Visual Working Memory : Objects or Boolean Maps ? , 743-753.

Shepard, R., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *171*, 701-703.

Shimoyama, I., Nakajima, Y., Ito, T., & Shibata, T. (1997). Visual evoked potentials relating to imagery: words for concrete objects versus absolute concepts. *Brain topography, 9*, 271-274.

Skrandies, W. (1998). Evoked potential correlates of semantic meaning--A brain mapping study. *Brain research. Cognitive Brain Research, 6*, 173-183.

Spencer, K. M., Dien, J., & Donchin, E. (2001). Spatiotemporal analysis of the late ERP responses to deviant stimuli. *Psychophysiology, 38*, 343-358.

Sternberg, S. (1966). High-speed scanning in human memory. *Science, 153*, 652-654.

Suwazono, S., Machado, L., & Knight, R. T. (2000). Predictive value of novel stimuli modifies visual event-related potentials and behavior. *Clinical Neurophysiology, 111*, 29-39.

Thomas, N. J. T. (1999). Are Theories of Imagery Theories of Imagination? An Active Perception Approach to Conscious Mental Content. *Cognitive Science, 23*, 207-245.

Thompson, W. L., Kosslyn, S. M., Sukel, K. E., & Alpert, N. M. (2001). Mental imagery of high- and low-resolution gratings activates area 17. *NeuroImage, 14*, 454-464.

Treisman, A. (1988). Features and objects: the fourteenth Bartlett Memorial Lecture. *Quarterly Journal of Experimental Psychology (2006), 40A*, 201-236.

Tye, M. (2003). Review-The Imagery Debate. *7*.

Vogel, E. K., & Machizawa, M. G. (2004). Neural activity predicts individual differences in visual working memory capacity. *Nature, 428*, 748-751.

West, W. C., & Holcomb, P. J. (2000). Imaginal, Semantic, and Surface-Level Processing of Concrete and Abstract Words : An Electrophysiological Investigation. *Journal of Cognitive Neuroscience, 12*, 1024-1037.

Wijers, A., Lange, J., Mulder, G., & Mulder, L. (1997). An ERP study of visual spatial attention and letter target detection for isoluminant and nonisoluminant stimuli. *Psychophysiology, 34*, 553-565.

Wijers, A. A., Otten, L. J., Feenstra, S., Mulder, G., & Mulder, L. J. M. (1989). Brain Potentials During Selective Attention, Memory Search, and Mental Rotation. *Psychophysiology, 26*, 452-467.

Yamamoto, S., & Mukai, H. (1998). Event-related potentials during mental imagery. *NeuroReport, 9*, 3359-3362.

Yamazaki, K., & Katayama, J. (2013). Spatial property of visual mental imagery representation: Evidence from ERP P3. *Biomedical Soft Computing and Human Sciences, 18*(2), 19-24.

Zhu, X.-R., & Luo, Y.-J. (2012). Fearful faces evoke a larger C1 than happy faces in executive attention task: An event-related potential study. *Neuroscience Letters, 526*, 118-121.

付録A　(実験 1 のデータ表)

Table A1

Mean reaction time (ms) and hit rate for SC group (SDs in parentheses).

	Complexity	Simple				Complex			
	Probe position	Early		Late		Early		Late	
RT	ON trial	668.67	(73.02)	689.43	(79.92)	718.42	(79.40)	771.28	(108.13)
	OFF trial	734.30	(65.81)	737.12	(78.21)	840.57	(87.09)	882.19	(100.45)
Hit rate	ON trial	0.97	(0.04)	0.94	(0.06)	0.93	(0.12)	0.91	(0.11)
	OFF trial	0.92	(0.06)	0.91	(0.06)	0.81	(0.16)	0.79	(0.17)

Table A2

Mean reaction time (ms) and hit rate for CS group (SDs in parentheses).

	Complexity	Simple				Complex			
	Probe position	Early		Late		Early		Late	
RT	ON trial	780.25	(136.78)	788.57	(131.02)	757.19	(131.42)	837.69	(161.77)
	OFF trial	837.85	(128.60)	829.82	(122.59)	906.75	(142.52)	938.18	(126.74)
Hit rate	ON trial	0.95	(0.04)	0.95	(0.04)	0.95	(0.07)	0.91	(0.10)
	OFF trial	0.91	(0.07)	0.91	(0.08)	0.83	(0.15)	0.80	(0.13)

Table A3

Mean amplitude(μV) of early components for SC group at the posterior electrodes (SDs in parentheses).

			PO7	PO3	PO4	PO8	O1	O2
P1	Simple	Early	3.08 (2.94)	2.94 (3.51)	4.07 (4.49)	4.42 (3.68)	3.67 (3.88)	3.97 (3.52)
		Late	3.41 (2.97)	3.30 (3.36)	4.72 (4.65)	5.07 (3.48)	3.88 (4.24)	4.48 (3.73)
	Complex	Early	3.36 (3.63)	3.10 (4.23)	4.47 (5.29)	4.77 (4.28)	3.74 (4.59)	4.27 (4.29)
		Late	3.02 (4.11)	2.75 (4.64)	4.22 (5.38)	4.58 (4.61)	3.41 (4.91)	3.99 (4.32)
N1	Simple	Early	1.14 (5.63)	2.03 (5.48)	1.92 (5.14)	1.07 (5.53)	2.14 (5.60)	1.82 (5.18)
		Late	0.52 (5.76)	1.62 (5.22)	1.66 (4.98)	0.94 (5.58)	1.61 (5.45)	1.56 (5.13)
	Complex	Early	0.45 (6.25)	1.34 (6.05)	1.50 (5.41)	0.60 (6.03)	1.49 (5.92)	1.49 (5.65)
		Late	0.87 (6.13)	1.95 (5.91)	1.84 (5.91)	0.99 (6.48)	1.97 (5.96)	1.91 (6.05)
P2	Simple	Early	4.00 (6.59)	4.56 (7.34)	5.26 (6.35)	5.02 (5.93)	5.53 (6.82)	5.50 (6.21)
		Late	3.95 (6.26)	4.77 (6.85)	5.56 (6.63)	5.22 (6.20)	5.56 (6.57)	5.67 (6.29)
	Complex	Early	4.27 (7.12)	5.01 (8.05)	6.26 (6.88)	5.77 (6.59)	5.68 (7.33)	6.27 (6.86)
		Late	4.39 (7.67)	5.22 (8.39)	6.16 (7.75)	6.04 (7.32)	5.96 (7.82)	6.38 (7.56)
N2	Simple	Early	1.83 (4.87)	1.90 (4.93)	1.93 (6.25)	2.38 (6.54)	1.47 (5.17)	1.24 (5.92)
		Late	1.63 (5.20)	1.89 (4.99)	1.94 (6.50)	2.24 (6.88)	1.21 (5.39)	1.07 (6.20)
	Complex	Early	2.05 (5.69)	2.03 (5.74)	2.18 (6.70)	2.29 (7.08)	1.47 (5.97)	1.37 (6.53)
		Late	2.75 (6.16)	2.96 (6.19)	2.76 (7.13)	2.97 (7.51)	2.18 (6.28)	2.09 (7.00)

Table A4

Mean amplitude(μV) of early components for CS group at the posterior electrodes (SDs in parentheses).

			PO7	PO3	PO4	PO8	O1	O2
P1	Simple	Early	4.54 (2.56)	4.39 (2.53)	4.90 (3.89)	5.76 (3.66)	3.78 (3.11)	4.57 (3.80)
		Late	4.55 (3.03)	4.47 (3.09)	4.90 (3.65)	5.86 (3.73)	3.79 (3.44)	4.63 (4.00)
	Complex	Early	4.62 (2.33)	4.30 (2.32)	4.56 (3.20)	5.48 (3.22)	3.73 (2.83)	4.40 (3.46)
		Late	4.17 (3.05)	3.85 (3.25)	4.14 (3.94)	5.23 (3.92)	3.34 (3.68)	4.03 (4.30)
N1	Simple	Early	2.93 (5.26)	3.63 (4.62)	3.42 (3.76)	2.95 (4.13)	3.30 (5.17)	3.23 (4.42)
		Late	2.80 (5.02)	3.69 (4.38)	3.25 (3.55)	2.73 (3.70)	3.20 (4.80)	2.99 (4.14)
	Complex	Early	2.90 (4.93)	3.77 (4.33)	3.42 (3.41)	2.82 (3.79)	3.34 (4.61)	3.09 (4.03)
		Late	2.49 (5.05)	3.18 (4.53)	2.79 (3.66)	2.39 (4.10)	2.87 (4.82)	2.62 (4.35)
P2	Simple	Early	6.19 (4.08)	6.56 (4.10)	6.40 (4.41)	7.01 (4.96)	6.37 (4.35)	6.88 (4.70)
		Late	5.81 (3.84)	6.54 (4.27)	6.24 (4.39)	6.72 (4.36)	6.21 (3.97)	6.68 (4.40)
	Complex	Early	6.43 (4.31)	6.83 (4.78)	6.49 (4.78)	7.00 (5.01)	6.64 (4.39)	6.83 (4.89)
		Late	5.92 (4.32)	6.34 (4.49)	6.10 (4.40)	6.65 (4.74)	6.32 (4.60)	6.62 (4.81)
N2	Simple	Early	0.46 (3.83)	0.08 (4.03)	0.55 (4.25)	1.77 (4.22)	-0.38 (3.87)	0.12 (3.99)
		Late	1.05 (3.79)	0.62 (4.23)	0.63 (4.37)	1.89 (4.11)	0.08 (3.75)	0.17 (3.86)
	Complex	Early	1.33 (3.56)	0.68 (4.20)	0.66 (4.17)	1.74 (4.03)	0.07 (3.74)	0.20 (3.88)
		Late	1.12 (4.28)	0.37 (4.60)	0.45 (4.46)	1.80 (4.21)	0.07 (4.45)	0.19 (4.32)

Table A5

Probe and complexity effect (μV) on P2 latency for the SC group (SDs in parentheses).

		Frontal			Central			Parietal			Pariet-Occipital			Occipital		
		F3	Fz	F4	C3	Cz	C4	P3	Pz	P4	PO3	POz	PO4	O1	Oz	O2
Late-Early	Simple	-0.01	0.09	0.17	0.18	0.43	0.48	0.15	0.41	0.23	0.20	0.13	0.29	0.03	0.23	0.17
		(1.44)	(1.86)	(1.76)	(1.34)	(2.03)	(1.90)	(1.80)	(1.94)	(1.51)	(1.94)	(1.77)	(1.60)	(2.11)	(2.08)	(1.56)
	Complex	-0.31	-0.69	-0.31	-0.39	-0.33	-0.34	0.06	0.11	-0.14	0.20	0.27	-0.10	0.28	0.23	0.12
		(1.54)	(1.40)	(1.46)	(1.69)	(2.18)	(1.74)	(1.71)	(2.03)	(1.85)	(1.68)	(1.90)	(2.05)	(1.76)	(2.08)	(1.91)
Complex-Simple	Early	0.18	0.28	0.16	0.41	0.53	0.52	0.35	0.60	0.77	0.45	0.25	0.99	0.14	0.26	0.77
		(1.35)	(1.63)	(1.71)	(1.47)	(1.43)	(1.38)	(1.63)	(1.67)	(1.45)	(1.76)	(1.51)	(1.60)	(1.75)	(1.41)	(1.56)
	Late	-0.12	-0.51	-0.31	-0.17	-0.23	-0.31	0.26	0.30	0.40	0.45	0.38	0.60	0.40	0.31	0.72
		(1.44)	(1.73)	(1.58)	(1.67)	(2.27)	(1.68)	(2.07)	(2.15)	(1.80)	(2.31)	(2.02)	(1.84)	(2.07)	(1.90)	(1.88)

		Posterior_Left					Posterior_Right				
		T3	T5	PO7	PO3	O1	T4	T6	PO8	PO4	O2
Late-Early	Simple	-0.10	0.19	-0.05	0.20	0.03	-0.13	0.04	0.20	0.29	0.17
		(1.04)	(1.27)	(1.79)	(1.94)	(2.11)	(0.97)	(0.98)	(1.41)	(1.60)	(1.56)
	Complex	-0.51	-0.10	0.12	0.20	0.28	-0.48	-0.26	0.26	-0.10	0.12
		(1.54)	(1.67)	(1.63)	(1.68)	(1.76)	(1.36)	(1.69)	(1.67)	(2.05)	(1.91)
Complex-Simple	Early	0.49	0.31	0.27	0.45	0.14	0.23	0.71	0.75	0.99	0.77
		(1.39)	(1.43)	(1.71)	(1.76)	(1.75)	(1.23)	(1.63)	(1.80)	(1.60)	(1.56)
	Late	0.09	0.03	0.44	0.45	0.40	-0.13	0.41	0.82	0.60	0.72
		(1.46)	(1.68)	(2.10)	(2.31)	(2.07)	(1.10)	(1.30)	(1.77)	(1.84)	(1.88)

Table A6

Probe and complexity effect (μV) on P1 latency for the CS group (SDs in parentheses).

		Frontal			Central			Parietal			Pariet-Occipital			Occipital		
		F3	Fz	F4	C3	Cz	C4	P3	Pz	P4	PO3	POz	PO4	O1	Oz	O2
Late-Early	Simple	-0.38	-0.51	-0.59	-0.12	-0.27	-0.18	0.03	0.00	-0.04	0.08	0.02	0.00	0.02	0.01	0.06
		(1.06)	(1.15)	(1.16)	(1.24)	(1.36)	(1.12)	(1.64)	(1.59)	(1.57)	(1.92)	(1.79)	(1.84)	(1.85)	(1.74)	(1.87)
	Complex	-0.18	-0.47	-0.34	-0.32	-0.63	-0.56	-0.44	-0.74	-0.44	-0.45	-0.55	-0.43	-0.39	-0.44	-0.38
		(0.93)	(1.17)	(1.11)	(1.19)	(1.37)	(1.32)	(1.66)	(1.55)	(1.44)	(1.81)	(1.78)	(1.58)	(1.60)	(1.48)	(1.40)
Complex-Simple	Early	-0.64	-0.57	-0.49	-0.47	-0.40	-0.15	-0.22	-0.13	-0.29	-0.09	-0.18	-0.34	-0.05	-0.09	-0.17
		(0.87)	(1.03)	(1.15)	(0.79)	(1.03)	(0.91)	(1.30)	(1.20)	(1.18)	(1.35)	(1.38)	(1.37)	(1.37)	(1.26)	(1.36)
	Late	-0.44	-0.53	-0.23	-0.67	-0.76	-0.53	-0.69	-0.87	-0.69	-0.62	-0.75	-0.76	-0.45	-0.54	-0.61
		(0.97)	(1.11)	(0.97)	(1.15)	(1.24)	(1.20)	(1.51)	(1.48)	(1.33)	(1.58)	(1.49)	(1.38)	(1.14)	(1.17)	(1.14)

Table A7

Probe and complexity effect (μV) on N2 latency for the CS group (SDs in parentheses).

		Frontal			Central			Parietal			Pariet-Occipital			Occipital		
		F3	Fz	F4	C3	Cz	C4	P3	Pz	P4	PO3	POz	PO4	O1	Oz	O2
Late-Early	Simple	-0.27	-0.32	-0.31	-0.11	-0.26	-0.18	0.42	0.05	-0.04	0.55	0.21	0.08	0.46	0.24	0.05
		(1.48)	(1.47)	(1.64)	(1.35)	(1.51)	(1.25)	(1.41)	(1.63)	(1.24)	(1.41)	(1.47)	(1.32)	(1.15)	(1.10)	(1.29)
	Complex	-0.21	-0.51	-0.48	-0.35	-0.56	-0.67	-0.29	-0.49	-0.22	-0.31	-0.36	-0.21	0.01	-0.18	-0.01
		(1.51)	(1.55)	(1.40)	(1.79)	(1.70)	(1.61)	(2.10)	(1.98)	(2.10)	(2.38)	(2.13)	(2.22)	(2.11)	(2.09)	(2.05)
Complex-Simple	Early	-0.19	-0.02	-0.09	0.03	-0.07	0.03	0.54	0.25	-0.06	0.61	0.23	0.11	0.45	0.37	0.08
		(1.11)	(1.25)	(1.62)	(0.92)	(1.40)	(1.23)	(0.85)	(1.14)	(1.08)	(1.14)	(1.11)	(1.13)	(1.04)	(1.09)	(1.19)
	Late	-0.13	-0.22	-0.26	-0.20	-0.37	-0.45	-0.18	-0.28	-0.24	-0.25	-0.33	-0.18	0.00	-0.06	0.02
		(1.10)	(1.00)	(1.03)	(1.29)	(1.40)	(1.00)	(2.18)	(1.75)	(1.80)	(2.34)	(2.03)	(2.03)	(2.39)	(2.10)	(2.13)

		Posterior_Left					Posterior_Right				
		T3	T5	PO7	PO3	O1	T4	T6	PO8	PO4	O2
Late-Early	Simple	-0.01	0.45	0.59	0.55	0.46	-0.06	-0.06	0.12	0.08	0.05
		(1.09)	(0.96)	(1.02)	(1.41)	(1.15)	(1.06)	(1.12)	(1.48)	(1.32)	(1.29)
	Complex	-0.17	0.13	-0.21	-0.31	0.01	-0.48	-0.23	0.06	-0.21	-0.01
		(1.47)	(1.79)	(2.26)	(2.38)	(2.11)	(1.64)	(1.90)	(2.12)	(2.22)	(2.05)
Complex-Simple	Early	0.24	0.52	0.87	0.61	0.45	0.26	0.19	-0.03	0.11	0.08
		(0.88)	(0.73)	(0.93)	(1.14)	(1.04)	(1.05)	(1.21)	(1.32)	(1.13)	(1.19)
	Late	0.08	0.20	0.07	-0.25	0.00	-0.15	0.01	-0.09	-0.18	0.02
		(1.20)	(1.87)	(2.24)	(2.34)	(2.39)	(1.09)	(1.65)	(2.07)	(2.03)	(2.13)

Table A8

Mean amplitudes in the late latency range (440-900 ms) for the SC group at the Fz, Cz and Pz (SDs in parentheses).

	Electrode		Fz	Cz	Pz
ON	Simple	Early	1.03 (2.57)	1.85 (2.59)	1.57 (3.58)
		Late	1.40 (2.92)	2.21 (3.21)	1.52 (4.34)
	Complex	Early	1.92 (2.82)	2.62 (3.69)	2.25 (5.13)
		Late	0.11 (2.77)	0.23 (4.47)	-0.16 (5.75)
OFF	Simple	Early	0.43 (2.95)	1.37 (3.30)	1.80 (4.28)
		Late	0.54 (3.18)	1.44 (3.66)	1.79 (4.94)
	Complex	Early	-1.19 (3.14)	-0.98 (4.19)	-1.09 (6.35)
		Late	-1.07 (3.19)	-1.66 (4.56)	-1.93 (6.08)

Table B9

Mean amplitudes in the late latency range (440-900 ms) for the CS group at the Fz, Cz and Pz (SDs in parentheses).

	Electrode		Fz	Cz	Pz
ON	Simple	Early	-0.05 (2.52)	0.41 (2.89)	0.34 (3.85)
		Late	-0.35 (3.34)	-0.25 (3.85)	-0.81 (4.92)
	Complex	Early	-0.30 (2.81)	-0.06 (3.49)	-0.02 (3.96)
		Late	-1.85 (3.51)	-2.01 (3.83)	-2.10 (4.46)
OFF	Simple	Early	-0.49 (2.83)	-0.31 (3.32)	0.00 (4.54)
		Late	-0.72 (2.74)	-0.63 (3.06)	-0.41 (4.03)
	Complex	Early	-2.40 (3.82)	-2.74 (3.74)	-2.78 (4.14)
		Late	-2.52 (3.75)	-3.47 (4.42)	-3.89 (5.28)

付録B　(実験２のデータ表)

Table B1

Mean reaction time (ms) and hit rate for each trials (SDs in parentheses).

Response	ON				OFF			
Complexity	Simple		Complex		Simple		Complex	
Probe position	Early	Late	Early	Late	Early	Late	Early	Late
RT (ms)	546.13	586.42	544.67	633.21	598.17	633.42	623.79	655.79
	(56.98)	(50.44)	(59.21)	(83.28)	(62.89)	(39.95)	(89.41)	(82.31)
Hit rate	0.94	0.94	0.98	0.92	0.93	0.93	0.94	0.93
	(0.05)	(0.03)	(0.02)	(0.07)	(0.03)	(0.03)	(0.05)	(0.05)

Table B2

Mean amplitude (μV) of of P1, N1, P2, and N2 for the ON and OFF trial(SDs in parentheses).

				PO7	PO3	PO4	PO8	O1	O2
P1	ON	Simple	Early	0.58 (2.14)	0.14 (2.42)	0.76 (1.97)	2.07 (1.59)	0.31 (2.42)	1.11 (1.54)
			Late	1.16 (1.83)	0.95 (2.55)	1.38 (2.20)	2.46 (1.84)	0.91 (2.26)	1.77 (1.86)
		Complex	Early	1.01 (1.67)	0.95 (2.07)	1.45 (1.53)	2.59 (1.70)	1.04 (1.99)	1.71 (1.44)
			Late	1.85 (1.74)	1.61 (2.07)	2.24 (1.62)	3.49 (1.34)	1.69 (1.99)	2.51 (1.36)
	OFF	Simple	Early	1.51 (1.33)	0.95 (2.04)	1.53 (1.83)	3.13 (1.73)	1.45 (1.68)	4.57 (3.80)
			Late	0.93 (1.93)	0.33 (2.20)	0.87 (2.09)	2.47 (1.90)	0.74 (2.32)	4.63 (4.00)
		Complex	Early	0.86 (1.47)	0.76 (2.09)	1.51 (2.06)	2.68 (1.74)	0.56 (1.55)	4.40 (3.46)
			Late	0.84 (1.16)	0.68 (1.90)	1.52 (1.65)	2.84 (1.71)	0.94 (1.43)	4.03 (4.30)
N1	ON	Simple	Early	0.58 (2.14)	-0.72 (2.07)	-0.76 (2.29)	-2.89 (3.59)	-2.11 (2.43)	-1.94 (3.22)
			Late	-1.77 (2.08)	-0.39 (1.60)	-0.61 (1.77)	-2.82 (3.17)	-1.76 (2.07)	-1.64 (2.71)
		Complex	Early	-2.62 (2.70)	-0.97 (1.95)	-1.14 (2.13)	-2.98 (3.83)	-2.24 (2.59)	-1.75 (3.08)
			Late	-2.55 (2.64)	-1.00 (2.04)	-0.84 (2.40)	-2.55 (4.42)	-2.20 (3.29)	-1.69 (3.73)
	OFF	Simple	Early	-1.88 (2.96)	0.19 (2.04)	-0.29 (2.53)	-3.14 (4.02)	-1.53 (2.59)	3.23 (4.42)
			Late	-1.76 (2.22)	0.67 (2.11)	0.51 (2.33)	-2.09 (3.95)	-1.08 (2.73)	2.99 (4.14)
		Complex	Early	-2.11 (2.45)	-0.20 (2.44)	-0.67 (2.39)	-2.97 (3.98)	-1.84 (2.75)	3.09 (4.03)
			Late	-2.66 (2.07)	-0.64 (1.88)	-0.96 (1.65)	-3.56 (3.18)	-2.12 (2.06)	2.62 (4.35)
P2	ON	Simple	Early	-1.63 (3.60)	1.69 (3.27)	2.48 (3.19)	1.04 (3.37)	0.13 (3.18)	1.66 (3.04)
			Late	-1.15 (2.84)	0.78 (3.25)	0.87 (2.90)	-0.07 (2.81)	-0.26 (2.49)	0.28 (2.28)
		Complex	Early	-0.74 (2.79)	1.88 (3.11)	2.43 (2.87)	1.69 (3.18)	0.76 (2.76)	2.23 (2.74)
			Late	-1.12 (3.48)	1.08 (3.62)	1.49 (3.61)	0.56 (3.41)	0.01 (3.34)	0.98 (3.48)
	OFF	Simple	Early	-0.64 (3.30)	2.54 (3.65)	2.52 (3.10)	0.72 (2.67)	1.08 (3.26)	6.88 (4.70)
			Late	-0.92 (2.64)	1.60 (3.12)	2.17 (2.87)	1.73 (2.86)	0.45 (2.33)	6.68 (4.40)
		Complex	Early	-0.66 (3.54)	2.32 (4.07)	2.71 (3.87)	1.69 (3.42)	0.76 (3.73)	6.83 (4.89)
			Late	-1.72 (3.06)	1.01 (4.02)	1.71 (3.77)	1.08 (3.31)	-0.05 (3.25)	6.62 (4.81)
N2	ON	Simple	Early	-3.71 (2.52)	-2.35 (2.95)	-2.43 (3.03)	-3.26 (2.83)	-3.15 (2.26)	-2.87 (2.68)
			Late	-4.61 (2.74)	-4.20 (2.74)	-3.67 (2.97)	-3.45 (3.02)	-4.96 (2.40)	-3.77 (2.31)
		Complex	Early	-2.69 (1.95)	-1.31 (2.82)	-1.16 (3.12)	-1.53 (2.91)	-2.05 (1.80)	-1.26 (2.57)
			Late	-5.43 (2.88)	-4.58 (2.25)	-3.21 (2.71)	-2.65 (3.47)	-5.40 (2.77)	-3.23 (2.96)
	OFF	Simple	Early	-1.68 (2.09)	0.53 (2.82)	0.71 (3.00)	-0.81 (2.98)	-0.74 (1.91)	0.12 (3.99)
			Late	-3.03 (2.31)	-1.80 (2.71)	-1.57 (3.00)	-1.69 (2.64)	-2.62 (1.77)	0.17 (3.86)
		Complex	Early	-1.89 (2.62)	0.01 (3.56)	0.61 (3.51)	0.08 (3.73)	-1.36 (2.55)	0.20 (3.88)
			Late	-3.71 (2.66)	-2.54 (3.19)	-2.59 (3.38)	-2.52 (3.48)	-3.23 (2.38)	0.19 (4.32)

Table B3

Probe and complexity effects (μV) on the P1 latency (SDs in parentheses).

			Frontal			Central			Parietal			Pariet-Occipital			Occipital		
			F3	Fz	F4	C3	Cz	C4	P3	Pz	P4	PO3	POz	PO4	O1	Oz	O2
Late-Early	ON	Simple	0.20	0.45	0.70	0.38	0.58	0.22	0.65	0.83	0.35	0.81	0.75	0.62	0.60	0.62	0.66
			(1.12)	(1.26)	(1.54)	(1.41)	(1.60)	(1.53)	(1.54)	(1.58)	(1.57)	(1.60)	(1.52)	(1.53)	(1.65)	(1.48)	(1.56)
		Complex	0.00	0.09	0.12	0.36	0.63	0.36	0.51	0.88	0.80	0.65	0.74	0.79	0.65	0.66	0.80
			(1.68)	(1.85)	(1.54)	(1.59)	(1.93)	(1.54)	(1.49)	(1.64)	(1.42)	(1.77)	(1.84)	(1.74)	(1.73)	(1.79)	(1.60)
	OFF	Simple	0.99	1.05	0.80	0.55	0.72	0.46	-0.20	-0.31	-0.32	-0.62	-0.44	-0.65	-0.71	-0.68	-0.67
			(1.57)	(1.93)	(1.40)	(1.32)	(1.72)	(1.32)	(1.39)	(1.08)	(0.90)	(1.10)	(0.88)	(0.87)	(1.49)	(1.09)	(0.90)
		Complex	-0.49	-0.06	-0.11	-0.25	-0.22	0.03	-0.12	0.06	0.22	-0.08	0.11	0.00	0.38	0.33	0.21
			(1.11)	(1.27)	(1.16)	(1.14)	(1.02)	(0.99)	(1.30)	(1.49)	(1.27)	(1.78)	(1.72)	(1.75)	(1.50)	(1.39)	(1.14)
Complex-Simple	ON	Early	0.38	0.57	0.79	0.52	0.59	0.43	0.76	0.62	0.49	0.82	0.77	0.69	0.73	0.69	0.60
			(1.96)	(1.92)	(1.90)	(1.96)	(1.84)	(1.85)	(1.66)	(1.84)	(1.61)	(1.89)	(1.75)	(1.54)	(1.49)	(1.43)	(1.35)
		Late	0.18	0.21	0.20	0.50	0.64	0.57	0.63	0.68	0.94	0.66	0.77	0.86	0.78	0.72	0.74
			(1.42)	(1.20)	(0.99)	(1.45)	(1.59)	(1.39)	(1.28)	(1.62)	(1.53)	(1.31)	(1.39)	(1.50)	(1.11)	(0.93)	(1.22)
	OFF	Early	0.86	0.69	0.60	0.49	0.96	0.51	-0.04	0.12	-0.03	-0.20	-0.04	-0.01	-0.89	-0.43	-0.41
			(1.50)	(2.03)	(1.85)	(1.31)	(1.59)	(1.64)	(1.34)	(1.28)	(1.42)	(1.38)	(1.29)	(1.51)	(1.38)	(1.21)	(1.27)
		Late	-0.62	-0.41	-0.31	-0.30	0.01	0.08	0.04	0.50	0.51	0.35	0.51	0.65	0.20	0.58	0.47
			(1.82)	(2.04)	(1.60)	(1.67)	(2.00)	(1.83)	(0.95)	(1.15)	(1.15)	(0.96)	(0.90)	(0.66)	(1.09)	(0.61)	(0.78)

			Posterior_Left					Posterior_Right				
			T3	T5	PO7	PO3	O1	T4	T6	PO8	PO4	O2
Late-Early	ON	Simple	-0.31	0.17	0.58	0.81	0.60	-0.26	0.31	0.39	0.62	0.66
			(0.86)	(1.19)	(1.47)	(1.60)	(1.65)	(0.86)	(1.15)	(1.53)	(1.53)	(1.56)
		Complex	-0.10	0.41	0.83	0.65	0.65	0.05	0.55	0.90	0.79	0.80
			(1.01)	(1.30)	(1.85)	(1.77)	(1.73)	(1.20)	(0.98)	(1.40)	(1.74)	(1.60)
	OFF	Simple	0.44	-0.31	-0.58	-0.62	-0.71	0.28	-0.53	-0.66	-0.65	-0.67
			(1.10)	(1.50)	(1.84)	(1.10)	(1.49)	(0.78)	(0.78)	(1.07)	(0.87)	(0.90)
		Complex	-0.22	-0.03	-0.02	-0.08	0.38	0.15	0.09	0.15	0.00	0.21
			(1.08)	(1.58)	(1.54)	(1.78)	(1.50)	(0.69)	(0.83)	(1.25)	(1.75)	(1.14)
Complex-Simple	ON	Early	-0.11	0.31	0.43	0.82	0.73	0.18	0.62	0.52	0.69	0.60
			(1.38)	(1.31)	(1.64)	(1.89)	(1.49)	(1.27)	(1.32)	(1.65)	(1.54)	(1.35)
		Late	0.11	0.55	0.68	0.66	0.78	0.49	0.87	1.02	0.86	0.74
			(0.88)	(1.09)	(1.16)	(1.31)	(1.11)	(0.89)	(1.23)	(1.48)	(1.50)	(1.22)
	OFF	Early	0.19	-0.24	-0.65	-0.20	-0.89	0.01	-0.30	-0.45	-0.01	-0.41
			(1.34)	(1.49)	(1.60)	(1.38)	(1.38)	(1.36)	(1.26)	(1.76)	(1.51)	(1.27)
		Late	-0.47	0.05	-0.09	0.35	0.20	-0.13	0.33	0.36	0.65	0.47
			(1.61)	(1.26)	(1.88)	(0.96)	(1.09)	(1.38)	(1.23)	(1.16)	(0.66)	(0.78)

Table B4

Probe and complexity effects (μV) on the N1 latency (SDs in parentheses).

			Frontal			Central			Parietal			Pariet-Occipital			Occipital		
			F3	Fz	F4	C3	Cz	C4	P3	Pz	P4	PO3	POz	PO4	O1	Oz	O2
Late-Early	ON	Simple	0.00	-0.11	0.01	0.03	-0.04	-0.16	0.28	0.31	0.05	0.33	0.27	0.15	0.35	0.36	0.30
			(2.03)	(2.25)	(2.12)	(2.22)	(2.59)	(2.15)	(2.07)	(2.27)	(1.91)	(2.06)	(2.19)	(1.92)	(1.06)	(1.44)	(1.49)
		Complex	-0.27	-0.02	0.21	0.08	0.24	0.23	0.14	0.52	0.80	0.48	0.69	0.79	0.45	0.64	0.96
			(1.27)	(1.43)	(1.52)	(1.81)	(1.66)	(1.69)	(2.11)	(1.76)	(1.50)	(1.82)	(1.74)	(1.56)	(1.88)	(1.48)	(1.26)
	OFF	Simple	0.36	0.18	-0.07	0.01	0.18	0.27	-0.13	-0.08	0.23	-0.02	0.21	0.29	0.04	0.10	0.06
			(1.95)	(2.64)	(2.20)	(1.72)	(2.61)	(2.30)	(1.83)	(2.43)	(2.05)	(1.93)	(2.16)	(2.09)	(1.68)	(1.89)	(1.97)
		Complex	-0.51	-0.26	-0.42	-0.32	-0.37	-0.12	-0.21	-0.22	-0.12	-0.44	-0.30	-0.29	-0.28	-0.21	-0.36
			(1.88)	(2.32)	(2.43)	(1.56)	(2.55)	(2.28)	(1.50)	(2.10)	(1.55)	(1.73)	(1.80)	(1.67)	(1.30)	(1.38)	(1.30)
Complex-Simple	ON	Early	0.73	0.62	0.57	0.95	0.92	0.56	1.08	1.06	0.24	0.91	0.92	0.47	0.58	0.60	0.12
			(2.02)	(2.21)	(2.29)	(2.29)	(2.70)	(2.43)	(1.80)	(2.36)	(1.89)	(1.40)	(1.63)	(1.60)	(1.24)	(1.35)	(1.52)
		Late	0.47	0.70	0.77	1.00	1.20	0.96	0.94	1.27	0.98	1.06	1.35	1.12	0.67	0.89	0.78
			(1.61)	(1.70)	(1.35)	(1.40)	(1.78)	(1.63)	(1.22)	(1.36)	(1.44)	(1.49)	(1.43)	(1.51)	(1.34)	(1.13)	(1.25)
	OFF	Early	0.68	0.31	0.15	0.65	0.82	0.35	0.58	0.73	0.20	0.77	0.70	0.47	0.40	0.26	-0.07
			(1.67)	(2.04)	(1.74)	(2.01)	(2.36)	(2.47)	(2.09)	(2.38)	(2.20)	(2.10)	(2.29)	(2.20)	(1.87)	(1.90)	(1.94)
		Late	-0.19	-0.13	-0.20	0.32	0.28	-0.04	0.50	0.58	-0.15	0.36	0.20	-0.12	0.08	-0.05	-0.48
			(1.55)	(1.79)	(1.82)	(1.16)	(1.57)	(1.17)	(1.41)	(1.35)	(1.09)	(1.91)	(1.59)	(1.49)	(1.93)	(1.66)	(1.47)

			Posterior_Left					Posterior_Right				
			T3	T5	PO7	PO3	O1	T4	T6	PO8	PO4	O2
Late-Early	ON	Simple	-0.18	0.22	0.60	0.33	0.35	-0.35	0.04	0.07	0.15	0.30
			(1.41)	(0.83)	(0.91)	(2.06)	(1.06)	(1.20)	(1.14)	(1.53)	(1.92)	(1.49)
		Complex	-0.36	-0.22	0.12	0.48	0.45	0.28	0.60	1.05	0.79	0.96
			(1.11)	(2.00)	(2.31)	(1.82)	(1.88)	(1.04)	(1.26)	(1.19)	(1.56)	(1.26)
	OFF	Simple	-0.06	0.06	0.07	-0.02	0.04	0.34	-0.01	0.43	0.29	0.06
			(1.01)	(1.42)	(1.58)	(1.93)	(1.68)	(1.07)	(1.86)	(2.12)	(2.09)	(1.97)
		Complex	0.16	-0.23	-0.55	-0.44	-0.28	-0.26	-0.57	-0.58	-0.29	-0.36
			(1.23)	(1.27)	(1.15)	(1.73)	(1.30)	(0.80)	(1.08)	(1.43)	(1.67)	(1.30)
Complex-Simple	ON	Early	0.69	0.42	0.48	0.91	0.58	0.03	-0.08	-0.25	0.47	0.12
			(1.55)	(1.34)	(1.75)	(1.40)	(1.24)	(1.30)	(1.61)	(1.60)	(1.60)	(1.52)
		Late	0.51	-0.01	0.01	1.06	0.67	0.66	0.48	0.73	1.12	0.78
			(0.98)	(1.15)	(1.27)	(1.49)	(1.34)	(0.91)	(1.00)	(1.17)	(1.51)	(1.25)
	OFF	Early	-0.01	0.37	0.51	0.77	0.40	0.15	-0.20	0.01	0.47	-0.07
			(1.25)	(2.07)	(2.23)	(2.10)	(1.87)	(1.47)	(1.46)	(1.85)	(2.20)	(1.94)
		Late	0.21	0.07	-0.11	0.36	0.08	-0.45	-0.76	-1.01	-0.12	-0.48
			(1.19)	(1.41)	(1.84)	(1.91)	(1.93)	(0.55)	(0.79)	(1.55)	(1.49)	(1.47)

Table B5

Probe and complexity effects (μV) on the P2 latency (SDs in parentheses).

			Frontal			Central			Parietal			Pariet-Occipital			Occipital		
			F3	Fz	F4	C3	Cz	C4	P3	Pz	P4	PO3	POz	PO4	O1	Oz	O2
Late-Early	ON	Simple	-0.42	-0.65	-0.51	-0.38	-0.96	-0.93	-0.40	-1.05	-1.37	-0.91	-1.24	-1.61	-0.40	-1.01	-1.38
			(1.94)	(2.23)	(2.24)	(1.80)	(2.25)	(1.92)	(1.65)	(2.00)	(1.63)	(1.89)	(1.99)	(1.79)	(1.65)	(1.75)	(1.81)
		Complex	-0.64	-0.50	-0.56	-0.33	-0.09	-0.25	-0.84	-0.39	0.10	-0.95	-0.69	-0.35	-0.63	-0.45	0.29
			(2.42)	(2.38)	(1.99)	(2.42)	(2.67)	(2.35)	(2.24)	(2.57)	(2.02)	(2.22)	(2.44)	(2.34)	(1.83)	(1.82)	(1.74)
	OFF	Simple	1.05	1.31	0.88	0.59	0.93	0.73	-0.20	-0.14	-0.52	-0.80	-0.60	-0.94	-0.76	-0.99	-1.26
			(2.25)	(2.96)	(2.22)	(2.00)	(2.57)	(2.24)	(1.41)	(2.17)	(1.68)	(2.17)	(2.15)	(2.13)	(1.68)	(1.81)	(1.67)
		Complex	-0.93	-0.76	-0.77	-0.96	-0.74	-0.19	-1.02	-0.65	-0.55	-1.31	-1.09	-1.00	-0.82	-0.93	-1.01
			(2.36)	(2.55)	(2.08)	(2.38)	(2.58)	(1.58)	(2.28)	(2.33)	(1.48)	(2.23)	(2.11)	(1.77)	(1.63)	(1.38)	(1.02)
Complex-Simple	ON	Early	0.17	-0.01	0.35	0.46	0.14	0.14	0.94	0.18	-0.29	0.85	0.46	0.04	0.94	0.59	-0.10
			(2.40)	(2.88)	(2.65)	(2.27)	(2.81)	(2.73)	(1.62)	(2.26)	(1.77)	(1.93)	(2.11)	(2.07)	(1.64)	(1.76)	(1.90)
		Late	-0.05	0.13	0.30	0.51	1.01	0.83	0.50	0.84	1.17	0.82	1.01	1.30	0.71	1.15	1.56
			(1.59)	(1.71)	(1.43)	(1.44)	(1.88)	(1.45)	(1.16)	(1.64)	(1.20)	(1.29)	(1.54)	(1.27)	(1.09)	(0.98)	(0.98)
	OFF	Early	1.08	1.03	0.95	0.72	1.00	0.62	0.45	0.39	0.22	0.43	0.38	0.28	0.00	0.03	-0.03
			(1.73)	(2.35)	(1.82)	(1.82)	(2.29)	(1.99)	(1.76)	(1.87)	(1.75)	(1.69)	(1.93)	(2.11)	(1.62)	(1.61)	(1.66)
		Late	-0.90	-1.04	-0.70	-0.83	-0.67	-0.30	-0.37	-0.11	0.20	-0.07	-0.11	0.22	-0.06	0.09	0.21
			(2.27)	(2.43)	(1.69)	(2.58)	(2.59)	(1.78)	(2.56)	(2.94)	(2.50)	(2.86)	(2.76)	(2.83)	(2.20)	(2.26)	(2.33)

			Posterior_Left					Posterior_Right				
			T3	T5	PO7	PO3	O1	T4	T6	PO8	PO4	O2
Late-Early	ON	Simple	-0.24	0.19	0.47	-0.91	-0.40	-0.91	-0.84	-1.11	-1.61	-1.38
			(1.20)	(1.20)	(1.59)	(1.89)	(1.65)	(1.07)	(1.25)	(1.63)	(1.79)	(1.81)
		Complex	-0.45	-0.64	-0.28	-0.95	-0.63	-0.01	0.70	1.01	-0.35	0.29
			(1.60)	(1.33)	(1.56)	(2.22)	(1.83)	(1.28)	(1.19)	(1.54)	(2.34)	(1.74)
	OFF	Simple	0.29	-0.05	-0.38	-0.80	-0.76	0.71	-1.06	-1.13	-0.94	-1.26
			(1.08)	(0.97)	(1.31)	(2.17)	(1.68)	(0.97)	(1.84)	(1.71)	(2.13)	(1.67)
		Complex	-0.52	-0.68	-1.05	-1.31	-0.82	-0.06	-0.44	-0.60	-1.00	-1.01
			(1.51)	(1.82)	(1.60)	(2.23)	(1.63)	(0.80)	(1.00)	(1.06)	(1.77)	(1.02)
Complex-Simple	ON	Early	0.29	0.76	0.99	0.85	0.94	-0.40	-0.21	-0.33	0.04	-0.10
			(1.47)	(1.33)	(2.03)	(1.93)	(1.64)	(1.55)	(1.70)	(2.15)	(2.07)	(1.90)
		Late	0.09	-0.07	0.23	0.82	0.71	0.50	1.33	1.80	1.30	1.56
			(0.93)	(1.04)	(1.30)	(1.29)	(1.09)	(0.96)	(0.98)	(1.19)	(1.27)	(0.98)
	OFF	Early	0.48	0.26	0.07	0.43	0.00	0.25	-0.17	-0.01	0.28	-0.03
			(1.34)	(1.53)	(1.82)	(1.69)	(1.62)	(1.28)	(1.61)	(1.98)	(2.11)	(1.66)
		Late	-0.33	-0.36	-0.59	-0.07	-0.06	-0.51	0.44	0.52	0.22	0.21
			(1.99)	(1.79)	(2.18)	(2.86)	(2.20)	(1.03)	(1.68)	(2.02)	(2.83)	(2.33)

Table B6

Probe and complexity effects (μV) on the N2 latency (SDs in parentheses).

			Frontal			Central			Parietal			Pariet-Occipital			Occipital		
			F3	Fz	F4	C3	Cz	C4	P3	Pz	P4	PO3	POz	PO4	O1	Oz	O2
Late-Early	ON	Simple	-0.62	-0.96	-0.73	-0.68	-1.13	-1.09	-1.21	-1.29	-0.73	-1.86	-1.51	-1.25	-1.81	-1.38	-0.90
			(1.67)	(1.84)	(1.91)	(1.97)	(2.35)	(1.79)	(1.36)	(1.91)	(1.49)	(1.68)	(2.10)	(2.18)	(1.35)	(1.92)	(2.26)
		Complex	-0.45	-0.55	-0.50	-0.74	-1.13	-0.93	-1.80	-2.19	-1.56	-2.33	-2.31	-2.28	-1.89	-1.86	-1.56
			(2.06)	(2.04)	(1.77)	(2.36)	(2.27)	(2.16)	(2.24)	(2.55)	(1.97)	(2.14)	(2.36)	(2.18)	(1.80)	(1.73)	(1.76)
	OFF	Simple	0.78	0.71	0.63	-0.44	-0.21	0.01	-2.32	-1.95	-1.34	-3.27	-2.40	-2.06	-3.35	-2.74	-1.97
			(1.42)	(1.80)	(1.44)	(1.53)	(1.81)	(1.41)	(1.43)	(1.86)	(1.61)	(2.03)	(1.77)	(2.04)	(2.22)	(2.11)	(2.31)
		Complex	-0.45	-0.51	-0.68	-1.21	-1.16	-0.85	-1.91	-2.21	-2.32	-2.55	-2.73	-3.20	-1.87	-2.31	-2.93
			(2.73)	(3.04)	(2.51)	(3.06)	(3.19)	(2.45)	(2.71)	(2.97)	(1.95)	(2.39)	(2.40)	(2.09)	(2.15)	(1.94)	(1.56)
Complex-Simple	ON	Early	0.06	0.13	0.43	1.09	1.26	1.02	2.41	2.52	2.23	2.88	3.12	3.14	2.42	2.74	2.72
			(1.93)	(2.34)	(2.09)	(2.43)	(2.55)	(1.89)	(2.19)	(1.95)	(1.52)	(2.10)	(1.86)	(1.78)	(2.16)	(1.92)	(2.13)
		Late	0.23	0.54	0.65	1.03	1.26	1.17	1.82	1.63	1.40	2.40	2.31	2.11	2.34	2.25	2.06
			(1.72)	(1.95)	(1.64)	(2.06)	(2.26)	(1.81)	(1.83)	(2.15)	(1.61)	(2.02)	(2.13)	(1.95)	(2.36)	(2.03)	(1.64)
	OFF	Early	0.69	0.58	0.64	0.79	0.84	0.70	1.12	1.33	1.34	1.32	1.57	1.77	0.69	0.93	1.39
			(1.57)	(1.96)	(1.69)	(2.17)	(2.55)	(1.87)	(2.54)	(2.31)	(2.07)	(2.19)	(2.32)	(2.43)	(2.21)	(1.88)	(1.81)
		Late	-0.54	-0.64	-0.66	0.02	-0.12	-0.16	1.52	1.08	0.35	2.04	1.24	0.62	2.17	1.36	0.43
			(2.36)	(2.24)	(1.97)	(1.99)	(2.02)	(1.35)	(1.69)	(1.81)	(1.67)	(1.92)	(1.67)	(1.56)	(1.81)	(1.58)	(1.71)

			Posterior_Left					Posterior_Right				
			T3	T5	PO7	PO3	O1	T4	T6	PO8	PO4	O2
Late-Early	ON	Simple	-0.78	-0.76	-0.90	-1.86	-1.81	-0.86	-0.10	-0.19	-1.25	-0.90
			(0.86)	(0.68)	(1.14)	(1.68)	(1.35)	(1.22)	(1.35)	(1.93)	(2.18)	(2.26)
		Complex	-0.61	-1.11	-1.34	-2.33	-1.89	-0.48	-0.41	-0.87	-2.28	-1.56
			(1.40)	(1.82)	(2.20)	(2.14)	(1.80)	(0.81)	(1.32)	(1.38)	(2.18)	(1.76)
	OFF	Simple	-0.25	-1.53	-2.73	-3.27	-3.35	0.47	-1.21	-1.13	-2.06	-1.97
			(1.11)	(1.08)	(1.58)	(2.03)	(2.22)	(0.98)	(1.84)	(2.37)	(2.04)	(2.31)
		Complex	-0.55	-1.13	-1.82	-2.55	-1.87	-0.58	-1.74	-2.60	-3.20	-2.93
			(2.10)	(1.97)	(1.64)	(2.39)	(2.15)	(0.82)	(1.08)	(1.20)	(2.09)	(1.56)
Complex-Simple	ON	Early	0.47	1.35	2.02	2.88	2.42	0.22	1.52	2.45	3.14	2.72
			(1.65)	(2.04)	(2.49)	(2.10)	(2.16)	(1.32)	(1.72)	(2.22)	(1.78)	(2.13)
		Late	0.64	1.00	1.58	2.40	2.34	0.60	1.21	1.77	2.11	2.06
			(0.90)	(1.68)	(2.16)	(2.02)	(2.36)	(1.04)	(0.86)	(1.68)	(1.95)	(1.64)
	OFF	Early	0.44	0.88	0.81	1.32	0.69	0.49	0.74	1.61	1.77	1.39
			(1.54)	(2.42)	(2.21)	(2.19)	(2.21)	(1.15)	(1.51)	(2.08)	(2.43)	(1.81)
		Late	0.15	1.28	1.72	2.04	2.17	-0.56	0.20	0.13	0.62	0.43
			(1.56)	(1.46)	(1.91)	(1.92)	(1.81)	(0.77)	(1.38)	(1.81)	(1.56)	(1.71)

付録C　(実験３のデータ表)

Table C1

Mean response time (ms) and hit rate for each condition (SDs in parentheses).

Condition	Generation				Scanning			
Response	ON		OFF		ON		OFF	
Probe position	Early	Late	Early	Late	Early	Late	Early	Late
RT (ms)	423.86	443.32	497.68	482.68	415.91	419.64	476.18	482.82
	(45.40)	(46.81)	(35.75)	(36.15)	(40.14)	(43.98)	(36.40)	(35.75)
Hit rate	0.96	0.94	0.95	0.95	0.94	0.95	0.95	0.95
	(0.02)	(0.04)	(0.02)	(0.02)	(0.04)	(0.02)	(0.02)	(0.02)

付録D　(実験４のデータ表)

Table D1

Mean response time (ms) and hit rate for each condition (SDs in parentheses).

Condition	VSTM								IMG							
Response	ON				OFF				ON				OFF			
Complexity	Simple		Complex		Simple		Complex		Simple		Complex		Simple		Complex	
Hemifield	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right
RT (ms)	538.36	544.80	597.56	625.07	582.12	605.65	673.52	692.20	530.02	523.69	599.10	620.51	578.91	589.28	658.52	673.84
	(136.75)	(128.00)	(163.78)	(177.52)	(127.93)	(140.10)	(169.45)	(164.64)	(124.05)	(109.96)	(133.21)	(148.25)	(99.79)	(100.27)	(144.10)	(136.22)
Hit rate	0.89	0.90	0.90	0.88	0.89	0.90	0.90	0.89	0.90	0.88	0.90	0.89	0.89	0.89	0.90	0.89
	(0.10)	(0.10)	(0.11)	(0.11)	(0.11)	(0.10)	(0.11)	(0.10)	(0.11)	(0.12)	(0.11)	(0.09)	(0.11)	(0.10)	(0.12)	(0.11)

Tabele D2

Factor scores of TF15, TF8, TF2 asocciated with SF2 and SF3 (SDs in parentheses).

		VSTM				IMG			
		Simple		Complex		Simple		Complex	
		Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right
TF15	SF2	−0.42	−0.26	−0.27	−0.21	−0.49	−0.18	−0.49	−0.22
		(0.52)	(0.82)	(0.83)	(1.15)	(0.66)	(1.02)	(0.76)	(0.84)
	SF3	0.72	0.30	0.27	0.61	0.06	0.65	0.27	0.41
		(1.11)	(1.04)	(1.18)	(0.82)	(1.20)	(1.05)	(0.92)	(1.05)
TF8	SF2	0.29	0.39	0.12	0.35	0.31	0.35	0.32	0.49
		(1.20)	(1.31)	(1.26)	(1.46)	(1.49)	(1.66)	(1.38)	(1.57)
	SF3	−0.41	−0.82	−0.25	−0.72	−0.11	−0.86	−0.36	−1.07
		(1.07)	(1.57)	(1.21)	(1.47)	(0.97)	(1.34)	(0.70)	(1.28)
TF2	SF1	−0.84	−0.77	−1.21	−0.93	−0.23	−0.05	−0.23	−0.09
		(0.76)	(0.73)	(1.02)	(0.68)	(1.06)	(0.84)	(1.10)	(1.04)
	SF2	−0.43	−0.48	−0.31	−0.49	−1.25	−1.36	−1.21	−1.40
		(0.65)	(0.72)	(0.90)	(0.79)	(0.66)	(0.62)	(0.68)	(0.58)
	SF3	−0.16	−0.03	−0.24	0.46	−0.37	−0.14	−0.24	0.09
		(1.06)	(0.88)	(1.03)	(0.86)	(1.00)	(0.95)	(0.93)	(1.02)

Table D3

Mean amplitudes(μV) of each latency range for VSTM condition (SDs in parentheses).

Complexity	Complex		Simple	
Laterality	Contra.	Ipsi.	Contra.	Ipsi.
0–100 (ms)	1.67 (1.60)	1.74 (1.75)	1.73 (1.66)	1.66 (1.73)
200	4.91 (4.61)	5.42 (4.70)	5.46 (4.46)	5.62 (4.64)
300	6.94 (4.59)	7.36 (4.73)	6.80 (4.95)	7.42 (4.93)
400	6.16 (5.69)	6.54 (5.54)	6.58 (5.80)	6.75 (5.83)
500	4.74 (4.76)	5.27 (4.83)	5.54 (5.16)	5.83 (5.35)
600	3.24 (4.17)	4.00 (4.35)	3.77 (4.23)	4.32 (4.48)
700	2.12 (3.73)	2.89 (4.06)	2.48 (3.87)	3.22 (4.09)
800	2.09 (3.54)	2.92 (3.85)	2.33 (3.94)	3.02 (4.18)
900	1.86 (3.46)	2.52 (3.58)	2.21 (3.93)	2.92 (4.26)
1000	1.77 (3.43)	2.44 (3.51)	2.02 (3.96)	2.76 (4.04)
1100	1.79 (3.34)	2.46 (3.48)	2.15 (3.76)	2.78 (3.84)
1200	2.18 (4.44)	2.62 (4.14)	2.52 (4.32)	2.88 (4.24)
1300	1.71 (3.98)	2.20 (3.94)	2.22 (3.96)	2.73 (4.03)
1400	1.58 (3.96)	1.82 (3.78)	2.13 (4.04)	2.51 (3.76)
1500	1.05 (3.85)	1.34 (3.70)	1.48 (4.24)	1.97 (4.08)
1600	1.20 (3.56)	1.53 (3.45)	1.60 (4.00)	2.13 (3.70)
1700	1.37 (3.30)	1.68 (3.27)	1.70 (3.78)	2.13 (3.58)
1800	1.34 (3.35)	1.58 (3.21)	1.66 (3.72)	2.16 (3.63)
1900	1.55 (3.53)	1.80 (3.49)	1.69 (3.68)	2.32 (3.48)
2000	1.59 (3.36)	1.90 (3.43)	1.80 (3.77)	2.56 (3.63)
2100	1.39 (3.52)	1.69 (3.51)	1.53 (3.83)	2.18 (3.67)
2200	1.31 (3.47)	1.50 (3.39)	1.47 (4.05)	2.13 (3.84)
2300	1.07 (3.36)	1.56 (3.28)	1.32 (4.09)	2.03 (3.86)
2400	0.97 (3.33)	1.50 (3.37)	1.04 (4.17)	1.78 (3.95)
2500	0.82 (3.43)	1.25 (3.34)	0.73 (4.21)	1.44 (4.04)

Table D4

Mean amplitudes(μV) of each latency range for IMG condition (SDs in parentheses).

Complexity	Complex		Simple	
Laterality	Contra.	Ipsi.	Contra.	Ipsi.
0–100 (ms)	1.75 (1.51)	1.51 (1.75)	1.71 (1.94)	1.40 (2.15)
200	7.28 (3.55)	7.33 (3.41)	7.43 (3.95)	7.24 (3.64)
300	8.93 (3.06)	9.10 (2.96)	8.67 (3.70)	9.22 (3.51)
400	7.18 (3.49)	6.95 (3.25)	6.83 (4.04)	6.69 (3.90)
500	5.13 (3.28)	5.50 (3.22)	5.34 (3.76)	5.44 (3.56)
600	3.59 (2.77)	4.05 (3.02)	4.26 (3.21)	4.64 (3.14)
700	2.50 (2.54)	3.07 (2.72)	3.33 (3.13)	3.80 (3.00)
800	2.35 (2.43)	3.03 (2.56)	2.95 (3.11)	3.38 (3.08)
900	2.37 (2.33)	2.90 (2.40)	2.74 (2.91)	3.10 (2.94)
1000	2.15 (2.29)	2.60 (2.38)	2.59 (2.67)	3.01 (2.86)
1100	1.78 (2.20)	2.35 (2.42)	2.36 (2.55)	2.91 (2.64)
1200	2.22 (2.13)	2.82 (2.26)	2.55 (2.85)	3.07 (2.99)
1300	2.14 (2.25)	2.86 (2.39)	2.48 (2.74)	3.03 (2.89)
1400	2.07 (2.04)	2.52 (2.10)	2.58 (2.54)	2.83 (2.77)
1500	0.97 (2.35)	1.43 (2.48)	1.68 (2.95)	1.88 (3.06)
1600	1.12 (2.26)	1.54 (2.28)	1.63 (3.11)	1.85 (3.29)
1700	1.19 (2.11)	1.55 (2.08)	1.64 (3.00)	1.90 (3.21)
1800	1.29 (2.14)	1.88 (2.22)	1.60 (3.03)	2.01 (3.11)
1900	1.19 (2.16)	1.76 (2.24)	1.42 (2.94)	1.90 (2.99)
2000	1.20 (2.17)	1.67 (2.28)	1.23 (3.22)	1.90 (3.26)
2100	1.03 (2.44)	1.65 (2.56)	1.17 (3.30)	1.82 (3.42)
2200	0.87 (2.68)	1.48 (2.68)	0.91 (3.51)	1.47 (3.38)
2300	0.79 (2.64)	1.39 (2.55)	0.50 (3.54)	1.08 (3.33)
2400	0.64 (2.78)	1.29 (2.80)	0.27 (3.73)	0.90 (3.65)
2500	0.36 (2.81)	1.09 (2.68)	0.02 (4.02)	0.60 (3.78)

Table D5

Mean amplitudes(μV)　from100 to 200, and from 500 to 600 (SDs in parentheses).

			Contralateral	Ipsilateral
100–200 ms	VSTM	Simple	5.46 (4.46)	5.61 (4.64)
		Complex	4.90 (4.60)	5.41 (4.70)
	IMG	Simple	7.43 (3.95)	7.24 (3.64)
		Complex	7.28 (3.54)	7.32 (3.40)
500–600 ms	VSTM	Simple	3.76 (4.22)	4.31 (4.48)
		Complex	3.24 (4.16)	4.00 (4.34)
	IMG	Simple	4.26 (3.20)	4.63 (3.14)
		Complex	3.58 (2.77)	4.04 (3.01)