



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	初期の空間的注意選択における知覚的体制化の役割
Author(s)	竹谷, 隆司
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(教育学)
Dissertation Number	甲第12285号
Issue Date	2016-03-24
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k12285
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/62208
Type	doctoral thesis
File Information	Ryuji_Takeya.pdf



北海道大学大学院 教育学院

博士学位論文

初期の空間的注意選択における知覚的体制化の役割

竹谷隆司

はじめに

脳が一度に処理できる情報量には限りがあり、選択的注意の機能は適応的行動にとって重要である。物体ベースの注意 (object-based attention) の理論では、注意選択は「物体」を単位として生じる。これまで、様々な視覚刺激が注意の単位となることが実験的研究から示されてきた。ただし、視覚処理には局所的な特徴を符号化する低次な視覚野からそれらを統合するより高次な視覚野—性質の異なる網膜同位性を持つ 30 以上の視覚野—が関わっている。そのため注意選択の対象となる視覚物体の表象は単一ではなく、視覚刺激や関わる視覚領域によって異なるはずである。しかし、物体ベースの注意の神経基盤と物体の性質の関係についての生理学知見は少ない。

本研究の目的は、中間段階の視覚処理における「物体」を構成する刺激要因を整理し、それらが物体ベースの注意に果たす役割を明らかにすることである。第 1 部では、物体ベースの注意に関して、特に、注意選択の一連の過程を反映する事象関連電位 (event-related potential, ERP) を用いた研究を中心にまとめ、注意の単位となる視覚表象と対応する ERP 成分を示すモデルを生成した。第 2 部は、物体の性質をより詳細に明らかにすることを目的とした実験から構成される。視覚処理においては、階層的な体制化処理のそれぞれが異なる性質の物体表象を形成すると考えられている。そこで、もっとも基本的な体制化手がかりであると考えられる均一な連結性 (uniformed connectedness) と図地手がかり (figure-ground cue) が物体ベースの注意に果たす役割を、ERP を用いて検討した。結果として、連結性は特別な群化要因ではなく、むしろ他の群化要因と同様に物体ベースの注意選択を促進することが示された。一方で、手前の物体が周囲の物体や背景を遮蔽する図地手がかりは、物体ベースの注意選択が生じる処理段階を早めることが示唆された。第 3 部ではこれらの実験結果に基づき、第 1 部で生成した、注意が選択する視覚表象に関する ERP モデルを更新した。

目次

はじめに	2
第 1 部 文献的研究	6
1 章 物体ベースの注意 (object-based attention)	6
1.1 視覚的注意における物体	6
代表的な実験パラダイムと知見	6
バイアス化競合モデルにおける位置づけ	8
1.2 「物体」とは	9
「物体」の性質に関する議論	9
体制化と物体選択段階	11
2 章 物体ベースの注意の生理学的基盤	11
2.1 脳機能画像法による検討	11
2.2 事象関連電位による検討	12
事象関連電位	12
初期の空間的注意選択	13
持続的な物体提示下の物体ベースの注意	15
物体出現時の物体ベースの注意	16
注意の単位となる視覚表象	20
結論	22
第 2 部 実験的研究	24
1 章 実験研究 1 初期の空間的注意選択における連結性の役割 ¹	26
1.1. 序論	26
1.2 方法	30
実験参加者	30
刺激	30
手続き	31

記録・分析	31
1.3 結果	32
行動反応.....	32
ERP	33
1.4 考察	35
物体ベースの注意における群化要因の種類と関係性.....	36
ERP 注意拡散効果の機能的意義.....	37
1.5 結論	39
2 章 実験研究 2 初期の空間的注意選択における図地手がかりの役割 ²	40
2.1 序論	40
2.2 実験 1	43
2.2.1 方法	44
2.2.2 結果	46
行動反応.....	46
ERP	47
2.2.3 考察	50
2.3 実験 2	51
2.3.1 方法	52
2.3.2 結果と考察	52
2.4 考察	56
2.5 結論	58
第 3 部 総合考察	59
1 章 ERP の初期注意選択と空間マップの性質	59
1.1 実験的研究で得られた知見のまとめ	59
1.2 初期の注意選択の媒体となる空間マップに関する ERP モデル.....	60
P1 に反映される図領域の空間マップ	60
N1 に反映される独立な物体空間マップ	62

2 章 物体ベースの注意における知覚的体制化の役割	64
3 章 結論	66
引用文献	68

第1部 文献的研究

1章 物体ベースの注意 (object-based attention)

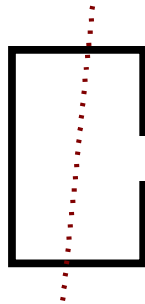
1.1 視覚的注意における物体

私たちは日常的に様々な物体を認識、記憶、あるいは操作する。こうした行動は、ばらばらな要素をまとまりのある表象に変換する知覚的体制化と、特定の情報の処理を促進あるいは抑制する選択的注意に支えられている。これらは異なる機能として研究の対象となることが多い。これに対し、注意選択の最も基本的な単位が体制化の産物「物体」であるという物体ベースの注意の考えが1980年代に提唱され、現在まで実験的証拠が蓄積されている。

代表的な実験パラダイムと知見

視覚的注意の研究領域では、注意を向けた空間位置における情報処理を促進もしくは抑制する機能である空間的注意の研究が数多くなされてきた。これに対して物体ベースの注意ははじめ、空間的注意とは異なる注意選択機能として捉えられていた。物体ベースの注意の先駆的研究である Duncan (1984) は、長方形と線分を重ねあわせた刺激を一瞬だけ提示し、参加者に2つの特徴に関する反応を課した (図 1.1.1 a)。その特徴とは、長方形の形と切れ込みの位置、線分の傾き方位と破線の種類の計4つであった。結果として、同じ物体の2つの特徴を答える場合 (同物体条件)、2つの物体について1つずつ答える場合 (異物体条件) よりも正確だった。この結果は物体が重ね合わされていたことから空間的注意では説明できず、物体を単位とした注意により1つの物体の複数の特徴の処理が促進されたためと解釈された (Duncan, 1984; Valdes-Sosa, Cobo, & Pinilla, 1998)。こうした、課題に関連しなくても物体構造が存在することによって生じる行動成績の変化は、物体ベースの注意効果と呼ばれる。しかし、Duncan (1984) が用いた2つの物体は異なる奥行にあるようにも知覚されるため、

a)



b)

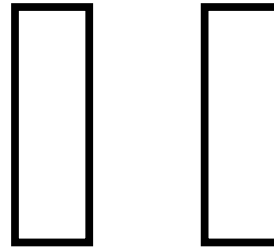


図 1.1.1 代表的な実験パラダイムで用いられた刺激。a) Duncan (1984) で用いられた刺激例（論文中の図をもとに作成）。b) Egly et al. (1994) で用いられた刺激例（論文中の図をもとに作成）。

特定の奥行きへの注意と物体への注意は区別することができない (Lavie & Driver, 1996; Vecera & Farah, 1994)。

実際には、物体は空間の一部を占めるために、空間と物体の選択は無関係とはいえないだろう。このような観点から、空間手がかり法を用いた物体ベースの注意研究は、物体が占める空間領域がどのように選択されるかを検討してきた。Egry, Driver, & Rafal (1994) は平行に配置された 2 つの長方形上に提示される標的刺激の検出課題を用いた (図 1.1.1 b)。4 箇所ある長方形の端のうち 1 箇所に先行手がかりが提示され、続いて標的刺激が提示された。標的刺激は 75 % の確率で先行手がかりと同じ位置に提示され (有効条件)、残りの 25 % のうち半分は先行手がかりが提示された長方形の反対側の位置に (無効・同物体条件)、もう半分は別の長方形の隣り合う位置に提示された (無効・異物体条件)。重要な結果は、反応時間が有効条件で無効条件よりも短縮したのに加えて (典型的な空間的注意の効果)、無効条件では同物体条件で異物体条件よりも短縮したことである。両物体条件における先行手がかりと標的刺激の間の距離は等しかったため、この結果は空間的注意のみでは説明できず、手がかりが提示された物体全体に注意が不随意的に向けられたために生じたと考えられた。このような解釈は、

標的とフランカー刺激の間に特徴類似性や連結性がある場合にフランカー効果が増大する結果にも適用可能である (Baylis & Driver, 1992; Kramer & Jacobson, 1991; Richard, Lee, & Vecera, 2008)。

以上のような、物体が占める空間に配分される注意のあり方は、物体ベースの空間的注意 (object-based spatial attention) と呼ばれており、物体領域全体への自動的な注意拡散 (attention-spreading) により生じると考えられている (Richard et al., 2008)。

バイアス化競合モデルにおける位置づけ

物体ベースの注意の理論を含めた視覚的注意の神経生理学的モデルとしてバイアス化競合モデル (biased competition model, Desimone & Duncan, 1995) が挙げられる。このモデルの特色は、視覚皮質の受容野構造による視覚物体間の競合を仮定することである。視覚皮質の神経細胞は、特定の刺激位置への選好性により空間位置を符号化している。受容野は視覚処理の水準が高くなるにしたがって拡大し、高次皮質では左右視野をまたがるほどの大きさとなる。バイアス化競合モデルによると、大きな受容野内に複数の物体が入る状況においては、いずれの物体が優先的に処理されるかについて複数の視覚処理段階で競合が生じる。例えば赤色の物体に対して大きく反応する神経細胞の受容野内に赤と緑の物体が提示されたとき、発火頻度は赤色の物体のみを提示したときよりも小さくなる。これは2つの物体間でいずれが符号化されるかを巡る競合が生じるためと解釈される (Desimone, 1998)。

このような競合状態は注意によって解消される。上記の例において赤い物体に注意が向けられた場合、発火頻度は赤い物体が単体で提示された場合と同様に大きくなる。一方で緑の物体に注意が向けられた場合、発火頻度は小さくなる (Desimone, 1998)。これは一方の物体に注意を向けることで、その物体のみが提示された場合に類似した神経活動が見られることを意味し、注意による競合の解決の神経生理学的証拠とされた。このような競合の解決には、特定の空間

位置や特徴などをもつ物体を重みづけるよう働く 2 種類のバイアスが関与する。一つは、ボトムアップバイアスと呼ばれ、顕著性が高い物体の処理が重み付けられる。もう一方はトップダウンバイアスと呼ばれ、課題遂行のために選択すべき特徴を持った物体が重みづけられる。これら双方の作用が加算され、もっとも活性化が高い物体が符号化される。

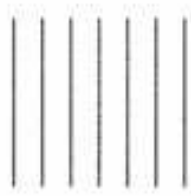
バイアス化競合モデルは物体間の競合を仮定するため、視覚情報のまとまりの程度によって競合のありかたは変化する。すなわち、受容野内に複数の物体がある場合は競合が生じるのに対し、それらがまとまって 1 つの物体となる場合は競合する相手がいないため、競合がなくなる。そのため物体の一部に注意を向けている場合でも、空間的注意によるバイアスは生じにくく、結果として物体内の多くの空間領域が活性化する (Vecera, 2000)。このようにバイアス化競合モデルにおいては、物体ベースの注意の知見は物体を単位とした競合を示す証拠として説明される。

1.2 「物体」とは

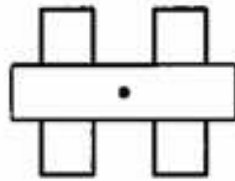
「物体」の性質に関する議論

物体ベースの注意の研究領域においては、「物体」となる要因を明らかにするために多様な刺激が用いられてきた (図 1.1.2)。具体的には、線分 (Abrahami, 1999)、および補完によって知覚される長方形 (Moore, et al., 1998) で物体ベースの注意効果が生じる。また類似した要素群 (Baylis & Driver, 1992; Egly et al., 1994)、面として知覚されるランダムドット群 (Valdes-Sosa, Cobo, & Pinilla, 1998)、半透明な家・顔画像 (O' Craven, Downing, & Kanwisher, 1999) などでも物体ベースの注意効果が得られている。

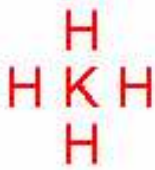
これらの知見が蓄積されるにつれ、「物体」とはばらばらな視覚要素をまとめた 1 つの表象に変換する機能である知覚的群化 (perceptual grouping) の産物であるという考えが提唱された (Baylis & Driver, 1998; Scholl, 2001)。図 1.1.2 に示した物体は異なる特徴を持っているが、いずれもまとまって知覚される。こ



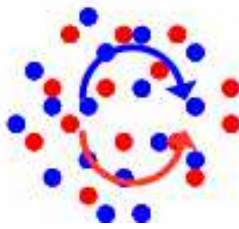
Abrahami (1999)



Moore et al. (1998)



Driver & Baylis (1992)



Valdes-Sosa et al. (1998)



O'craven et al. (1999)

図 1.1.2 物体ベースの注意研究で用いられた「物体」の例。長方形だけでなく、線 (Abrahami, 1999 より引用), 錯視的補完により知覚される物体 (Moore et al. 1998 より引用), 色が類似した文字列 (Baylis & Driver, 1992 をもとに作成), 回転するドット (Valdes-Sosa et al., 1998 をもとに作成), 家や顔の画像など (O'craven et al., 1999 より引用), 様々な刺激で物体ベースの注意効果が示されている。

の考えは、必ずしも長方形などだけではなく、色や形が類似した文字群などでも物体ベースの注意効果が観察されることなど (Baylis & Driver, 1994), 物体ベースの注意の知見を包括的に説明した。

このように群化と物体ベースの注意が密接に関係することから、物体ベースの注意効果が知覚的群化を調べる手がかりになりうるという考えも提案されている。知覚的群化は、古典的には主観的体験を指標として調べられてきたのに対し、物体ベースの注意は刺激構造がまとまりを形成することによる課題への影響を定量化できる (Driver & Baylis, 1998; Palmer, 2003; Scholl, 2001)。

体制化と物体選択段階

群化と物体ベースの注意の関係が示される一方で、物体ベースの注意効果が物体がマスク刺激などにより主観的には見えない場合においても観察されることも示されている (Chou & Yeh, 2012; Norman, Heywood, & Kentridge, 2013)。この知見は、群化によって生じるまとまりの主観的な体験を伴う刺激が必ずしも物体ではないことを示す。すなわち、物体ベースの注意は意識に上る以前の、中間段階の視覚表象を単位とした注意選択であると考えられる。

そこで問題となるのは、物体がどのように表象されるかは視覚刺激の性質や関わる視覚領野によって異なることである。生理学的指標を用いた研究は、刺激の持つ物理的特性と主観的体験のパターンである群化要因 (Grouping factor) の種類により、体制化処理に関わる脳領域あるいは処理段階が異なることを示している (Han, Jiang, Mao, Humphreys, & Gu, 2005; Han, Song, Ding, Yund, & Woods, 2001)。したがって、物体の種類によって行動レベルの物体選択を支える神経基盤が異なることが示唆される。注意選択は複雑な視覚情報処理の様々な段階で生じ、行動指標はその最終出力であるため (Luck & Hillyard, 1999)、行動指標における物体ベースの注意効果は、それを支える神経基盤の違いを反映しない。そこで次章では、行動レベルの物体選択を支える物体ベースの注意の神経基盤についての生理学的知見を、特に一連の注意選択段階を可視化する事象関連電位の研究を中心に概観する。

2 章 物体ベースの注意の生理学的基盤

2.1 脳機能画像法による検討

機能的脳磁気共鳴画像法 (functional magnetic resonance imaging, fMRI) を用いた物体ベースの注意の先駆的研究として O' Craven, Downing, & Kanwisher (1999) が挙げられる。参加者は重ね合わされた半透明の家と顔の画像のうち一方に注意を向けるよう教示され、同一の刺激に対する注意の効果が調べられた。

結果として、顔に注意を向けると紡錘顔領域が、家に注意を向けると海馬傍皮質がより大きく賦活したことから、特定のカテゴリーを表象する高次の視覚皮質が物体ベースの注意に関わることが示された。異なる方向に回転する2つのランダムドット群のうち一方に注意を向ける場合では、注意を向けたランダムドットの運動方向の変化により、V1をはじめとした初期視覚皮質からMT野まで、広い領域で増大した活動が見られた (Ciaramitaro, Mitchell, Stoner, Reynolds, Boynton, 2011)。このことは、非常に低次の視覚皮質が物体ベースの注意に関わること、また顔画像とランダムドットといった物体の性質により、関わる皮質領域が異なることを示す。

物体ベースの空間的注意の知見として Müller & Kleinschmidt (2003) は Egly et al. (1994) の行った実験パラダイムを脳機能画像法に応用し、物体ベースの空間的注意に関わる脳領域を探索した。2つの長方形が持続的に提示され、参加者はそのうち一方の端に注意を向け検出課題を行った。プローブ刺激は注意位置、注意した物体の非注意位置、注意していない物体のいずれかに提示された。結果として注意を向けた物体の非注意位置にプローブが出現したとき、異なる物体上に刺激が出現したときよりも V2, V3, および V4 といった比較的低次の皮質の活動が増強した。このことは物体ベースの空間選択にも低次の皮質領域に関わることを示す。

2.2 事象関連電位による検討

事象関連電位

ERP は特定の感覚、運動、あるいは認知的な事象に同期した脳活動の生理指標である。ERP は頭皮上で記録された脳波 (electroencephalogram, EEG) を加算平均し、事象に同期していない脳活動の影響を小さくすることで得られる。ERP の特徴は、脳の電気活動を時間遅れなしで可視化し、特定の事象に対する情報処理過程をミリ秒単位で検討することができることである。これまでに、特定の極性、潜時、頭皮上分布を持つ ERP 成分がどのような脳機能を反映するか

についての知見が蓄積されてきている。視覚的注意についても主に後頭葉で優勢な複数の成分が同定されており、その信号源なども明らかにされている。そのため注意の一連の過程を明らかにするための有効な指標であるといえる。

ERP を用いた物体ベースの注意の知見は、空間的注意の ERP の知見と相互に関連している。そこで、まず初期の空間的注意選択に関する基本的な知見を、次にそれらに関連した物体ベースの注意の知見を概観する。

初期の空間的注意選択

空間的注意が初期の視覚誘発成分の振幅を調整することは、多くの研究によって示されている（レビューとして、Hillyard, Vogel, & Luck, 1999）。代表的なパラダイムは、参加者が注意を向けるべき位置を試行ごとに手がかりによって示される空間手がかりパラダイムと、持続的に特定の位置に注意を向け続ける持続焦点的注意パラダイムである。注意による効果は、同一の刺激に対する ERP を、刺激が提示される位置に注意を向けていたかどうかで比較することで得られる。典型的な空間的注意効果を図 1.2.1 に示した。いずれのパラダイムにおいても、注意を向けた位置に刺激が現れた場合、刺激提示後 90-150 ms を頂点潜時とする後方部電極で優勢の陽性成分である P1、および同じく後方部優勢の 150-200 ms 付近を頂点とする陰性成分 N1 の振幅が増大することが繰り返し示されている（Hillyard et al., 1999）。これらは空間的注意が初期の視覚処理を調整する証拠として解釈された。P1 と N1 成分の神経信号源はいずれも感覚・知覚処理に関わる視覚野であり、特に P1 は比較的初期の視覚皮質領域である V3 と V4 に推定されており、主にフィードフォワードの視覚処理を反映するためである（Di russo, Martinez, & Hillyard, 2003; Lamme & Roelfsema, 2000）。P1 と N1 の振幅は注意により潜時や頭皮上分布をほとんど変えずに増加することから、注意のゲイン制御機構の証拠であると考えられている（for a review, Hillyard et al., 1999）。

実際の視覚空間においては、視覚情報は複数存在し、そのいずれかを選択す

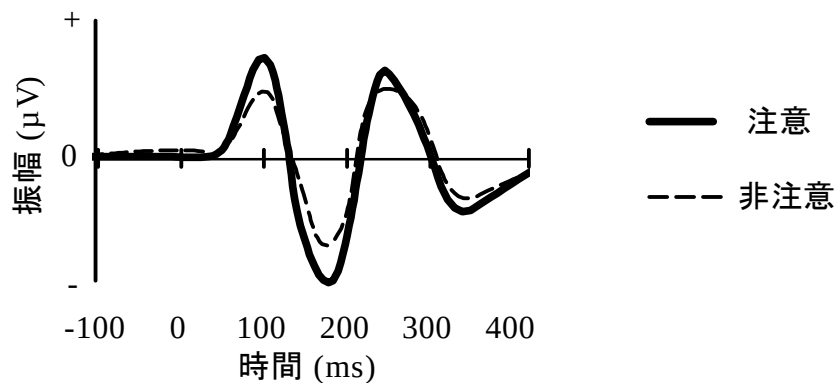


図 1. 2. 1 典型的な ERP の空間的注意効果。参加者は視野のいずれかの位置に注意を向ける。刺激が提示された位置に注意を向けていた場合（注意条件），向けていなかった場合（非注意条件）に比べ，刺激提示後 100 ms 前後に現れる陽性電位（P1）および 200 ms 前後の陰性電位（N1）の振幅が後頭側頭部を中心に増大する。

る必要に迫られる。そこで，刺激を左右に一つずつ提示し，いずれか一方に注意を向ける場合が調べられた。このパラダイムでは，注意効果は注意を向けた位置の対側半球の ERP から，同側半球の ERP を引き算することで得られる。このような状況では，主に P1 の注意効果のみが報告されている (Woldorff, Liotti, Seabolt, Busse, Lancaster, & Fox, 2002; Heinze et al., 1994; Heinze, Luck, Mangun, & Hillyard, 1990)。このような結果から，P1 が注意視野のゲイン制御，N1 が刺激の弁別や定位を反映すると考えられた (Heinze & Luck, 2002; Heinze, Luck, Mungan, & Hillyard, 1990)。P1 と N1 の機能乖離については，他にも，P1 が非注意位置の処理の抑制，N1 が注意位置の処理の促進を反映するとする説などが提唱されている (レビューとして Luck & Kappenman, 2011)。

多くの ERP の空間的注意の研究では，注意が二次元の空間マップの一部に向けられることを暗に仮定していた。これに対し Kasai, Morotomi, Katayama, & Kumada (2003) は両眼視差法を用いることで三次元空間における空間選択過程を検討した。刺激は手前あるいは奥の 4 箇所 (手前か奥，右か左) に提示され，

参加者はいずれかの位置に注意を向けた。結果として、P1 の二次元の空間的注意効果 (80-100 ms) は、注意した奥行とは無関係に、手前に現れた刺激でのみ得られ、奥に知覚される刺激では生じなかった。一方、N1 の後期潜時 (160-190 ms) においては、刺激の奥行位置とは無関係に、注意する 3D 位置に現れた刺激に対してもっとも振幅が増加した。これらの結果は、P1 は図 (Figure) として知覚される空間領域における二次元の空間選択を反映し、一方で N1 は三次元空間の選択を反映すると考えられた。このように、各 ERP 成分は性質の異なる空間表象を媒体とした注意選択を反映することが示されている。

持続的な物体提示下の物体ベースの注意

物体ベースの注意の ERP 研究の先駆けは、異なる方向に回転するランダムドットを重ね合わせた刺激を用いた Valdes-sosa, Cobo, & Pinilla (1998) である。参加者は 2 つの平面として知覚されるランダムドットのうち一方に注意を向け、運動方向の変化を検出する課題を行った。結果として、注意を向けた面の運動方向の変化により、注意を向けていない面の場合よりも、P1 および N1 の振幅が増大した。さらに、外発的手がかりにより注意を向けた場合は、より早い C1 (75-110 ms) の振幅が増大した (Khoe, Mitchell, Reymonds, & Hillyard, 2005)。これらの結果は、空間的注意によらない物体ベースの注意が初期の視覚処理を調整する証拠として注目された。ただし、このような刺激は奥行方向に異なる平面にあると知覚されうるため、空間的注意が関与していないとはいえない。

物体ベースの空間的注意の研究としては、He, Fan, Zhou, & Chen (2004) が Egly et al. (1994) の用いた実験状況において、標的刺激の出現に対する ERP を記録・分析した。刺激は一瞬間提示され、参加者はその後に物体上に提示される標的刺激を検出する課題を行った。結果として、手がかりが示された位置の標的刺激に対して P1 振幅が増大する典型的な空間的注意効果が示された。重要なことに、先行手がかりと異なる位置かつ同じ物体に標的刺激が現れた条件において、先行手がかりと異なる物体に標的刺激が現れた条件よりも N1 振幅 (140-200

ms) が増大した。物体に基づく N1 空間選択効果は長方形の一部に持続的に注意を向け続ける状況においても観察され、その信号源は空間的注意効果と同様の外側後頭複合体 (lateral occipital complex, LOC) に推定された (Martinez, Ramanathan, Foxe, Javitt, & Hillyard, 2007 ; Martinez, Teder-Salejearve, Vazquez, Molholm, Foxe, Javitt, Di Russo, Worden, & Hillyard, 2006)。これらの N1 の効果は、空間的注意による活性化と同じ脳部位に推定されたことから、物体ベースの注意と空間的注意が同じ神経メカニズムを共有する証拠として、あるいは空間的注意が物体領域の全体に拡散する証拠として解釈された (Martinez, et al., 2006; Martinez et al., 2007b)。

N1 の物体ベースの効果は異なる実験パラダイムでも示されている (Martinez, Teder-Salejarui, & Hillyard, 2007)。参加者は持続的に提示された長方形もしくは分割された長方形の一部に持続的に注意を向け標的刺激を検出する焦点的注意課題を行った (図 1.2.2)。プローブ刺激は刺激構造の 4 隅のいずれかに提示された。注意位置のプローブへの ERP は、非注意位置のプローブよりも P1 及び N1 振幅が増強するという典型的な空間的注意効果が認められた。重要なことに、非注意位置のプローブに対する N1 振幅は単一物体条件で分割物体条件よりも増大し、またその信号源は空間的注意効果と同様の LOC に推定された。同様の結果は錯視的輪郭を用いた場合でも得られ、N1 は物理的な輪郭で定義される低次の視覚表象ではなく、知覚処理が進んだ中間段階の物体表象の選択を反映することが示唆された。このように、N1 振幅が物体ベースの空間選択を反映することが繰り返し示されているが、必ずしも行動指標の物体ベースの注意効果と対応するわけではない (Martinez et al., 2007)。そのため N1 は行動レベルよりも初期の処理段階における物体の空間的選択を反映すると考えられる。

物体出現時の物体ベースの注意

持続的に物体が提示される状況では、物体出現時の一過性の体制化処理は終了し、何らかの皮質活性化により物体の表象が維持されると考えられる。その

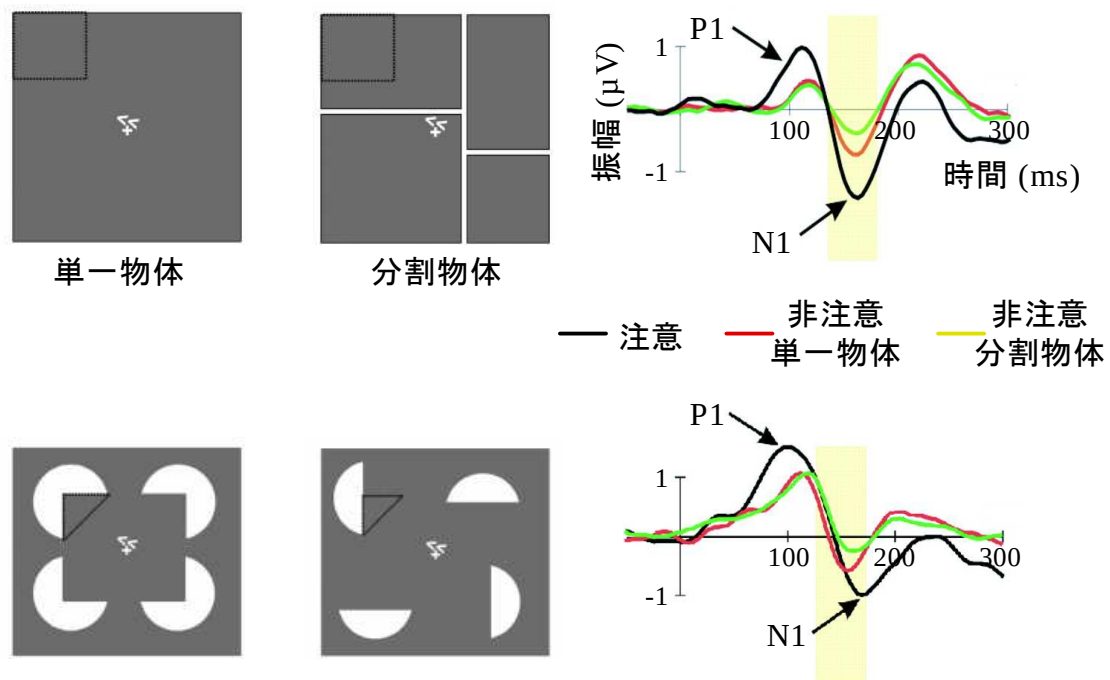


図 1.2.2 Martinez et al. (2007a) が用いた刺激と ERP の結果（一部日本語に修正し引用）。実験 1（上段）では正方形あるいは分割された正方形が持続的に提示され，刺激の四隅のうち一か所にプローブ刺激が短時間，ランダム順に現れた。参加者は点線で示された位置に持続的に注意を向けた。注意を向けた位置のプローブ刺激に対して，P1 および N1 振幅が増大した。重要なことに，非注意位置に提示されたプローブに対する ERP では，単一物体条件で分割物体条件より N1 振幅が大きかった。これは単一物体条件では注意が物体全体に拡散したためであると解釈された。実験 2（下段）では補完図形を用い，実験 1 と類似した効果が認められた。このことから，N1 は低次の物理的な輪郭ではなく，知覚的な視覚表象の選択を反映することが示された。

ような状況でのプローブ刺激に対する ERP は，物体表象の維持や表象が再活性化の際の脳活動を主に反映する。これに対し，視野の一部に注意を向けた状況で物体自体を提示するパラダイムは，刺激に対する一過性の知覚処理が空間的注意に与える影響を検討することができる (Kasai, 2010; Kasai, Moriya, & Hirano, 2011; Kasai & Takeya, 2012; 竹谷・河西, 2011, 図 1.2.3)。参加者は左右い

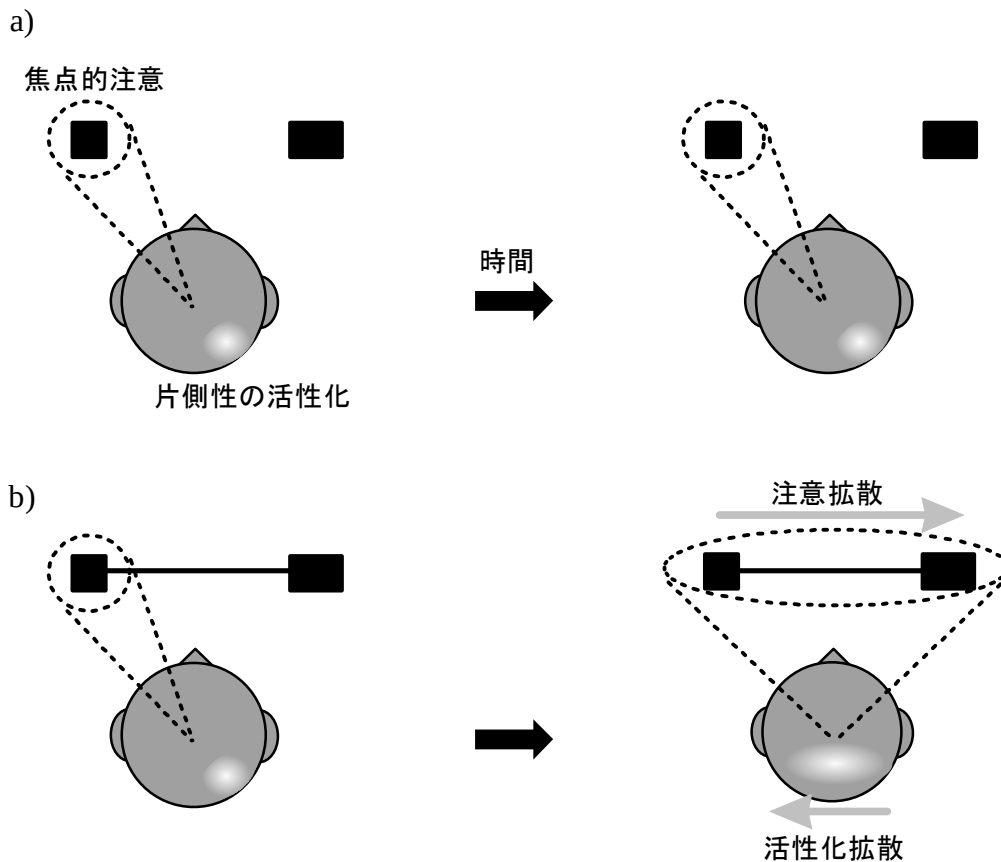


図 1.2.3 刺激出現時の空間的注意効果进行分析することで得られる物体ベースの注意拡散。a) 左右のいずれかの視野に焦点的注意を向けているとき，その対側半球で初期の視覚誘発 ERP の振幅が増大する（ERP 空間的注意効果）。またその効果は複数の ERP 成分で見られる。b) しかし，連結性などにより注意が物体全体に拡散すると，皮質上でも活性化の拡散が生じ，片側性の活性化効果は減衰する。このように群化要因を操作した刺激条件間の注意効果を比較することで，注意が拡散するタイミングを捉えることができる。

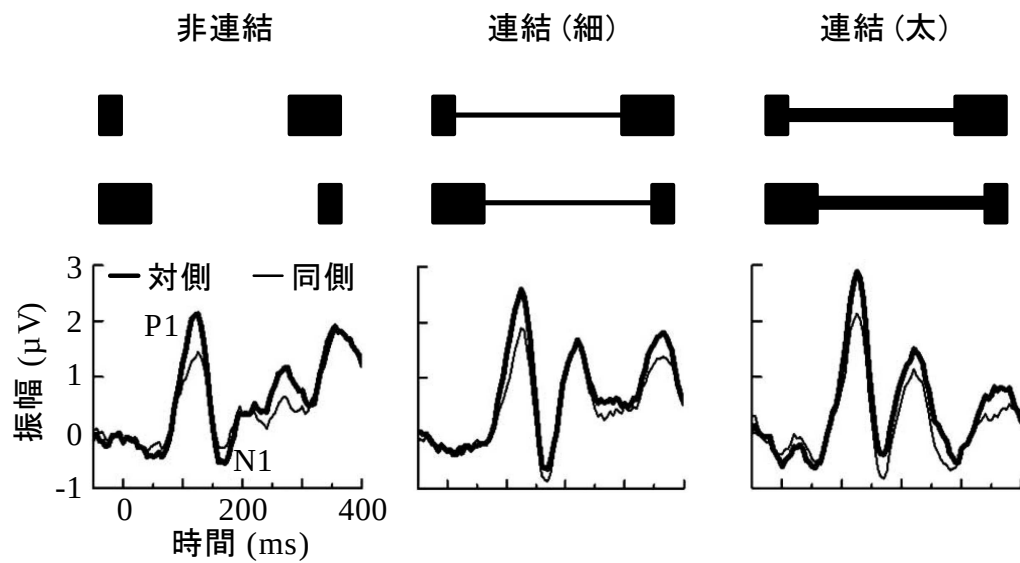
いずれかの視野に持続的に注意を向け，特定の特徴を持つ刺激が現れたらボタン押しする課題を行う。刺激は両側に同時に提示され，刺激間の群化要因が操作される。刺激条件間において，ERP 注意効果（注意対側 ERP から同側 ERP を引き算した差電位）が比較される。この際，注意効果の違いを分析対象とすることで，連結線の有無といった物理量の影響を最小限にすることができる。連結線

の太さを操作した実験においては、連結性による群化の程度に応じて徐々に N1 注意効果が減衰した (Kasai 2010, 図 1.2.4)。同様の N1 注意拡散効果は色類似性および遮蔽された連結線の場合でも観察された (Kasai, 2010; Kasai, et al., 2011; Kasai & Takeya, 2012; 竹谷・河西, 2011)。これらのことから、出現した物体上への注意の拡散が N1 潜時に生じること、またそれが知覚的群化の程度を反映することが示された。ただし、N1 の注意拡散効果は必ずしも行動指標の物体ベースの注意効果を伴わないため (Kasai et al., 2011), 行動レベルの物体選択にはさらに他の要因が関わることを示唆されている。

このような物体出現時の空間的注意効果を指標とする場合、物体上の注意配分については検討することができないが、刺激に対する一過性の群化処理が空間的注意に及ぼす影響を可視化することができる。興味深いことに、持続的に物体が提示されるパラダイムと同様に N1 の物体ベースの注意効果が得られている。このことは、物体出現時の体制化処理に伴う注意の拡散と、物体表象の維持あるいは再活性化が同じ神経基盤によることを示唆する。いずれにせよ、実験パラダイムや群化手がかりの種類によらず同じ処理段階 (N1) において物体空間の選択が生じることが繰り返し示されていることから、物体の空間選択は共通した神経基盤により生じることが示唆されている。

ただし、N1 で選択が生じない「物体」もある。Kasai, Takeya, & Tanaka (2015) は N1 に反映される物体空間の性質を調べるために、左右に四角形の線画を提示し、それらの間の連結性を操作した。視覚物体は通常、その形態の特徴である境界特徴 (boundary feature) と色やテクスチャなどの面の特徴 (surface feature) が独立に処理されると仮定される (Cavanagh, Arguin, & Treisman, 1990)。線で描かれた物体は形の特徴を持つが、物体が占める空間領域が非常に狭いために面の情報は最小限であることが想定された。これにより、N1 の物体ベースの注意効果がいずれの情報の活性化に関わるかを調べた。結果として、それまでの研究で頑健に示されてきた N1 注意拡散効果が見られなかった。このことから、N1 は物体の形ではなく物体内の面特徴の活性化を反映することが示唆された。

a)



b)

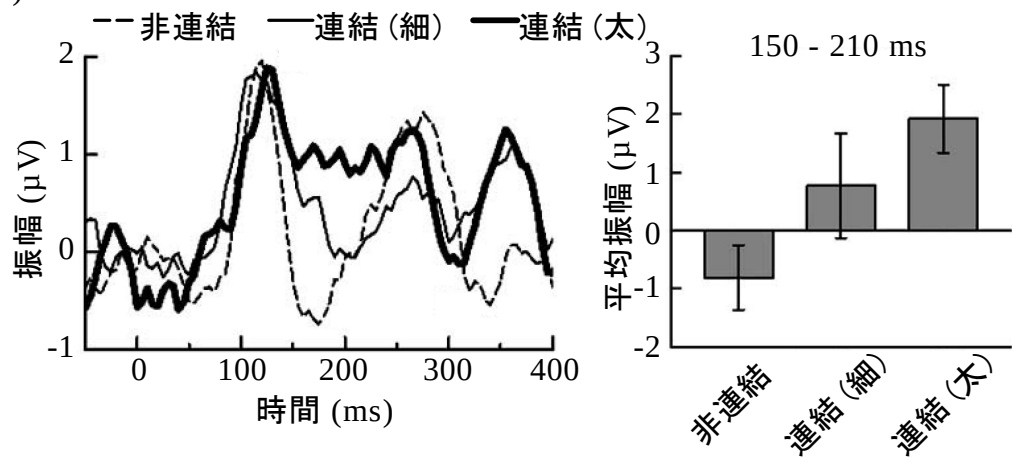


図 1.2.4 a) Kasai (2010) が実験 1 で用いた刺激と ERP (一部日本語に修正し引用)。注意側対側で振幅が増大する空間的注意効果が P1 において認められるが, N1 では刺激条件間で異なる。b) 注意効果の引き算 ERP (注意側対側—同側)。N1 潜時の ERP 注意効果は, 連結性による群化の程度に従って減衰した。

注意の単位となる視覚表象

以上の ERP の知見より, 注意の単位として様々な空間マップが刺激提示後 200 ms 以内の早い視覚処理段階で形成されることが示された。注意の単位は, 二次元の空間マップと物体空間マップに大別される (図 1.2.5)。二次元空間マップは網膜同位的な二次元空間の表象であり, 注意により一部の空間位置が活性化する。これは典型的な空間的注意の効果に反映される。一方で物体空間マップでは, 物体内の空間は統合され競合が生じないため, 物体の一部に注意を向けた場合であっても, 物体の空間領域全体が自動的に活性化する。これは物体ベースの空間的注意効果に反映される。

注意の単位となる空間マップと対応する ERP 成分をまとめたモデルが図 1.2.6 である。視覚情報は図地分離手がかりに基づき図領域と背景領域のいずれかに割り当てられるが, P1 はそのうち図領域の二次元平面 (Kasai et al., 2003) 及びランダムドット (Valdes-sosa et al., 1998) を単位とした注意選択を反映する。これらのことから, P1 は手前の面の二次元空間領域の表象に関わることが示唆される。P1 でランダムドットの選択が生じるのは, 重ね合わされたドット群のう

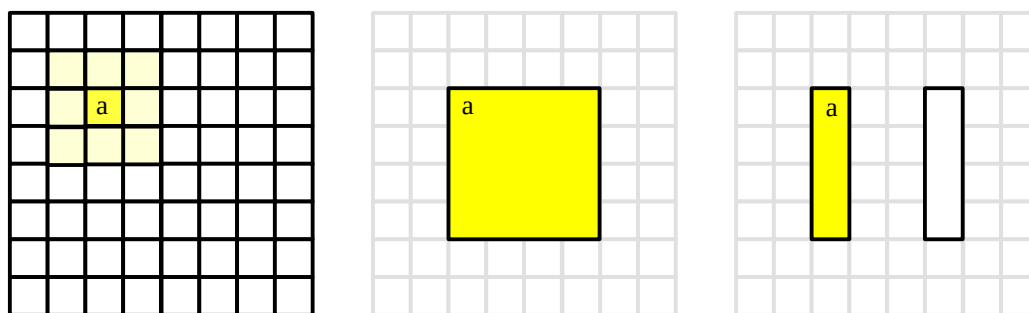


図 1.2.5 注意の単位となる空間表象。注意を向けた位置は a で示されている。左図は二次元の空間マップを示しており, 注意は空間位置に向けられる。そのため注意を向けた位置とその周囲が活性化する。中央と右の図は物体空間マップであり, それぞれの黒い実線は物体の空間位置を示している。物体の一部に向けた注意は物体全体の空間を活性化させる。

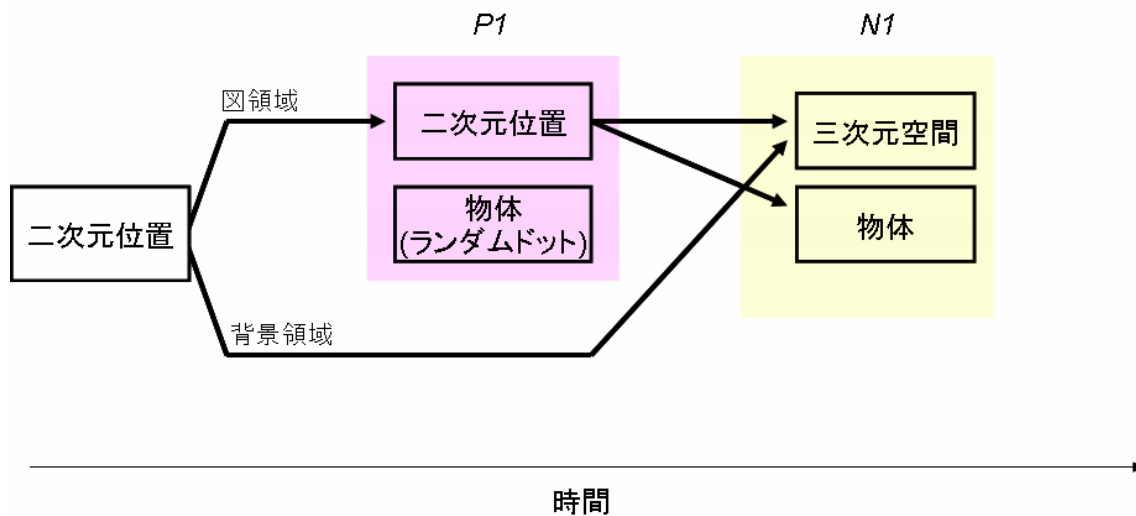


図 1.2.6 初期空間的注意における注意の単位を示すモデル。視覚刺激はまず図と地に分離され、そのうち P1 は図領域の二次元空間およびランダムドット群を単位とする注意選択を反映する。一方で N1 は図領域と背景領域が統合された三次元空間、および物体空間マップにおける選択を反映する。

ち一方に注意を向けることで、注意を向けたドット群がより手前に知覚されることを促進するためかもしれない。続く N1 潜時では、P1 潜時で見られた手前面への選択性が消失し、三次元空間が注意単位となる (Kasai et al., 2003)。また、物体ベースの空間的注意効果が繰り返し確認されている。すなわち三次元空間と物体という、より高次の視覚表象が選択の単位となる。

結論

物体ベースの注意に関わる皮質領域や処理段階は、物体を形成する群化要因などの刺激手がかりにより異なることが示唆される。そこで第 1 部では、先行研究の知見をまとめ、注意の単位となる視覚表象についてのモデルを生成した。それにより、刺激提示から 200 ms 以内の非常に短い時間に、性質の異なる複数の空間マップが形成されることがわかった (図 1.2.6)。N1 の物体ベースの注意効果は繰り返し示されていること (表 1.2.1)、およびその信号源は物体認知などに

関わる LOC に同定されている。このことから、N1 が物体空間選択の神経基盤であると考えられている。しかしランダムドットを用いた場合には P1 から生じるため、物体の性質と ERP 成分に関する知見は一貫しているとはいえない。

表 1.1 ERP の物体ベースの注意効果と物体の種類

		P1	N1
持続 提示	運動ランダムドット	Valdes-sosa et al. (1998)	Khoe et al. (2005) Valdes-sosa et al. (1998)
	長方形	–	He et al. (2004) Martinez et al. (2006) Martines et al. (2007a; 2007b)
	感性的補完図形		Martinez et al. (2007a; 2007b)
出現	幾何学図形	連結性	– Kasai (2010)
		色類似性	– Kasai et al. (2011)
		形類似性	–
	非感性的補完図形	連結性	– Kasai & Takeya (2012)
	線画図形	連結性	–

第2部 実験的研究

第1部では、空間的注意選択において注意の単位となる空間マップと対応するERP成分を示すモデルを生成した。ランダムドットの選択はP1やC1などの早いERP成分に、幾何学図形の空間選択は共通してN1成分に生じることが示された。この潜時の違いは、物体によって関わる視覚処理段階あるいは脳領域が異なるという知見と一致する。ただし、刺激間のどのような違いにより物体ベースの注意選択のタイミングが異なったのかは不明である。

物体の性質と物体選択の基盤を考えるうえで重要なのが、視覚処理における階層的な体制化処理である。空間や物体は瞬時に知覚されるように感じられるが、実際にはエッジの検出、次に面の傾き、影、曲率などの見えている面の記述、そして遮蔽された部分も含めた三次元空間の形成という、階層的な知覚体制化処理が想定される (Marr, 1982)。すなわち視覚表象は情報の入力から認知に至るまでの間に変換され、視覚皮質の異なる領域で表象される。視覚処理の特に初期に焦点を当てた計算論モデルでさえ、二次元のエッジマップ、領域マップ、図領域マップ、群化した領域という細分化された階層的な空間表象を想定している (Palmer & Rock, 1994)。それぞれの段階での知覚処理は、特定の群化要因や図地手がかりに基づいて生じると考えられている。

そこで第2部では、「物体」の形成に関わる体制化手がかりを細分化し、それが物体ベースの注意に果たす役割をERPの空間的注意効果を指標として検討した。一般的に体制化は、空間領域間の奥行き関係を決定する図地分離と、視覚要素をまとめあげ1つの群あるいは物体に変換する群化の2つに大別される。実験研究1では群化に着目し、物体ベースの空間的注意拡散における連結性の役割を検討した。連結性はこれまで、他の群化要因よりも早い処理水準で体制化に関わる最も基本的な群化要因であると考えられてきた。そこで実験研究1では、連結性と特徴類似性を直交操作した4つの刺激条件におけるERPの空間的注意効果を比較することで、類似性による注意拡散の潜時や効果の大きさが

連結性によって異なるかどうかを検討した。実験研究 1 ではこれまで連結性や色類似性、形類似性などの個別の群化要因による注意拡散効果を同定してきた実験パラダイムを用いた。

実験研究 2 では、物体選択における図地分離の役割に焦点を当てた。物体として知覚される条件のひとつは、背景から分離され図の領域として処理されることである。図地分離に感度のある視覚神経細胞は、V1 や V2 などの初期皮質から物体カテゴリー特異的な反応を示す下側頭葉などの後期皮質まであり (Baylis & Driver, 2001; De Yoe & Van Essen, 1988; Lamme, 1995; Qiu & von der Heydt, 2005), 物体の処理における重要性が示唆される。さらに図地分離は特定の領域とその周囲の領域の相対的な奥行き関係を記述する機能であり、群化よりも早く生じると考えられている (Palmer & Rock, 1994)。しかしながらこれまでの物体ベースの注意研究では、この図地分離の役割は系統的に調べられていなかった。本研究はこれまで用いられてきた刺激が図地分離において曖昧性があることに着目した。例えば長方形型の図形は二次元ディスプレイ上では穴のようにも知覚されうる。そこで実験研究 2 の実験 1 では、遮蔽手がかりを用いて物体がより明瞭に手前にあるように知覚される条件での注意拡散効果を分析し、奥行知覚の明瞭さが物体選択に与える影響について検討した。実験研究 2 では物体のどの空間位置にも同様に注意が拡散するのかどうかを明らかにすることを副次的な目的とした。そのため物体を持続的に提示し、その一部にプローブ刺激を提示する実験パラダイムを採用した。実験 2 では、実験 1 とほぼ同様の実験手続きにおいて、周囲よりも奥に知覚される物体の空間選択を検討した。実験 1 の刺激配列はこれまでの研究と異なる点を含んでおり、このことが実験結果の原因となった可能性を検討するとともに、奥行知覚と物体選択の関係性を確認することを目的とした。

1 章 実験研究 1 初期の空間的注意選択における連結性の役割¹

1.1. 序論

視覚系の重要な役割の一つは、無数の断片的な要素を体制化することである。知覚的体制化と刺激構造の関係について、古典的なゲシュタルト心理学は主に主観的報告に基づいて検討した (Weltheimer, 1923)。これに対し現代の認知心理学は体制化の客観的指標を発展させてきた (Driver & Baylis, 1998; Palmer, 2003; Scholl, 2001)。例えば、弁別課題の行動遂行成績は、標的と標的を囲む刺激の間に特徴類似性や連結性のような群化要因があるとき悪くなる (Baylis & Driver, 1992; Kramer & Jacobson, 1991; Richard, et al., 2008)。また、長方形のようなまとまりを持った物体の一部に、標的の出現位置を高確率に予告する手がかりが出現するとき、手がかりが異なる物体上に出現するときより行動成績は向上する (Egley, et al., 1994)。このような課題に関連しない物体構造による行動遂行への影響は、一般に物体ベースの注意の効果と呼ばれ、知覚的群化の程度の客観的指標になりえると考えられている (Driver & Baylis, 1998; Palmer, 2003; Scholl, 2001)。

物体ベースの注意の研究における主要な問題の一つは、注意選択における「物体」とは何かということである (Scholl, 2001)。一般に、長方形や連結した視覚要素など、均一もしくは滑らかに変化する特徴 (輝度, 色, 運動, 及びテクスチャなど) により連結された領域, すなわち均一な連結性 (Uniform connectedness, Palmer & Rock, 1994) をもつ刺激は「物体」として曖昧性がない。したがって多くの研究が連結性により物体性を操作し、物体ベースの注意効果を観察してきた (e.g., Egley et al., 1994; Richard et al., 2008)。しかし一方で、空間的に離れた複

¹ 実験研究 1 は発表されている論文を加筆修正したものである。

竹谷・河西 (2014). 物体ベースの初期注意選択における連結性の役割. *心理学研究*, **85**, 276-283.

数の視覚要素間に色や運動方向などの特徴類似性がある場合、つまり類似性により群化された要素群でも同様の物体ベースの注意効果が得られることが示されている (Baylis & Driver, 1992; Duncan & Humphreys, 1989; Humphreys, 1999)。このことから、均一な連結性を持つ単一物体と、離れた要素からなる知覚的群は、いずれも注意選択において「物体」であると言える。

しかしながら均一な連結性と特徴類似性では、知覚的体制化が生じる処理水準が異なることが主張されている。Palmer & Rock (1994) は、初期の視覚処理過程においてまず均一な連結性で定義される空間領域が形成され、より後期の処理過程においてその空間領域が特徴類似性や近接性などによって群化されると仮定した。したがって均一な連結性は最も基本的で特殊な群化要因として位置づけられている。計算論的な観点から導かれたこの仮説は、物体ベースの注意に関する研究により支持されている。Watson & Kramer (1999) は2つの平行なレンチ型の刺激を提示し、レンチの端のいずれかの箇所提示される標的刺激の数を答える課題を行った。レンチが均一な連結性を持つ条件では、2つの標的が同一物体内に提示されたときの反応時間が、異なる物体に提示されたときより短縮した (物体ベースの注意効果)。しかしこの効果は、レンチ上に輝度特徴の不連続がある条件では消失した。このことから、注意が選択しうるのは均一な連結性に定義される比較的低次の表象であると解釈された。だがこの解釈は、先述した離れた要素間の特徴類似性による物体ベースの注意効果の知見や (Baylis & Driver, 1992; Duncan & Humphreys, 1989; Humphreys, 1999)、連結性と閉合の群化要因による独立加算的な物体ベースの注意効果の増大を示唆する知見と矛盾する (Marino & Scholl, 2005)。したがって、均一な連結性が注意選択において特別な役割を果たすのかどうかはまだ明らかではない。

行動指標が複数の処理段階で起こる注意選択過程の最終出力であるのに対し、脳活動を高い時間解像度で測定するERPは、初期から後期までの一連の注意選択過程を反映する (Luck & Hillyard, 1999)。ERPを用いることで、意図的に物体あるいは知覚的群の一部に向けられた注意がその全体に拡散する様相を、視覚

皮質における活性化の拡散として可視化することができる (Kasai & Kondo, 2007)。具体的には、刺激が視野の両側に同時に高速で提示され、参加者は視線を中心の固視点に向けたまま左右いずれかの視野に注意を向け続けるよう教示される。このような操作によって、注意を向けた視野の対側半球の後頭側頭部で同側半球よりも ERP 振幅が増強する空間的注意効果が観察される (Heinze, et al., 1990; Heinze, et al., 1994; Woldorff, et al., 2002)。重要な点は N1 潜時 (刺激提示後 150-210 ms) の注意効果が、刺激がより群化すると仮定される刺激条件で減少することである (Kasai, 2010; Kasai et al., 2011; Kasai & Takeya, 2012)。空間的注意は視覚誘発成分である P1 と N1 の振幅を潜時や頭皮上分布をほとんど変えずに調節するため、P1 と N1 注意効果は感覚情報のゲイン制御メカニズムを反映すると考えられている (e.g., Hillyard, Vogel, & Luck, 1998)。したがって、知覚的群化に関わる N1 注意効果の減衰は、物体ベースの注意と空間的注意が少なくとも一部の神経メカニズムを共有することを示す。

上記の手法を用いた一連の ERP 研究には、注意選択における均一な連結性と特徴類似性に関する知見が含まれている。均一な連結性と色類似性による注意拡散はいずれも N1 潜時に同定された (Kasai, 2010; Kasai et al., 2011)。一方、形類似性による注意拡散はそれよりも遅い N2 潜時 (210-260 ms) に同定された (Kasai et al., 2011)。連結性がより早い水準の体制化処理に関わるならば、連結性による注意拡散は他の群化要因による注意拡散よりも早く生じると考えられる。そのため、均一な連結性は色類似性よりも基本的だとは言えないが、形類似性よりは基本的であることが示唆される。類似性による注意拡散効果の違いは、色や輝度などの表面特徴 (Surface feature) が、表面特徴の不連続によって定義される境界特徴 (Boundary feature) よりも早く分析されるという考え (Cavanagh et al., 1990) に一致している。しかしながら、以上の ERP 研究では、強力な群化要因である対称性 (Saiki, 2000) により群化の天井効果が生じる可能性があるとし、常に左右に異なる大きさの視覚要素を提示した。そのため、形類似条件においても形は同じではなく、形類似性が小さいために注意拡散の潜時が遅れた

可能性を排除できない。加えて、N2 潜時の注意効果には陽性電位と陰性電位が重畳している可能性があり (Kasai et al., 2011; Kasai & Takeya, 2012), この潜時帯の注意効果の機能的意義はまだ分かっていない。加えて、連結性と類似性による体制化処理に階層性があるならば (Palmer & Rock, 1994), 連結性の有無によって類似性による物体ベースの注意効果は異なると考えられるが、これまで検討されていない。以上より、物体ベースの注意選択において、均一な連結性が表面特徴の類似性と同等であることが示唆される一方で、境界特徴の類似性よりも基本的であるとはいえない。

本実験の目的は、初期の空間的注意選択過程における、均一な連結性と境界特徴の類似性の役割とそれらの関係性を検討することである。方法として一連の ERP 研究と類似の持続焦点的注意パラダイムを用い (Kasai 2010; Kasai & Kondo, 2007; Kasai et al., 2011; Kasai & Takeya, 2012), 均一な連結性と境界特徴の類似性を直交させて操作した (図 2.1.1)。境界特徴の類似性の効果は、左右の刺

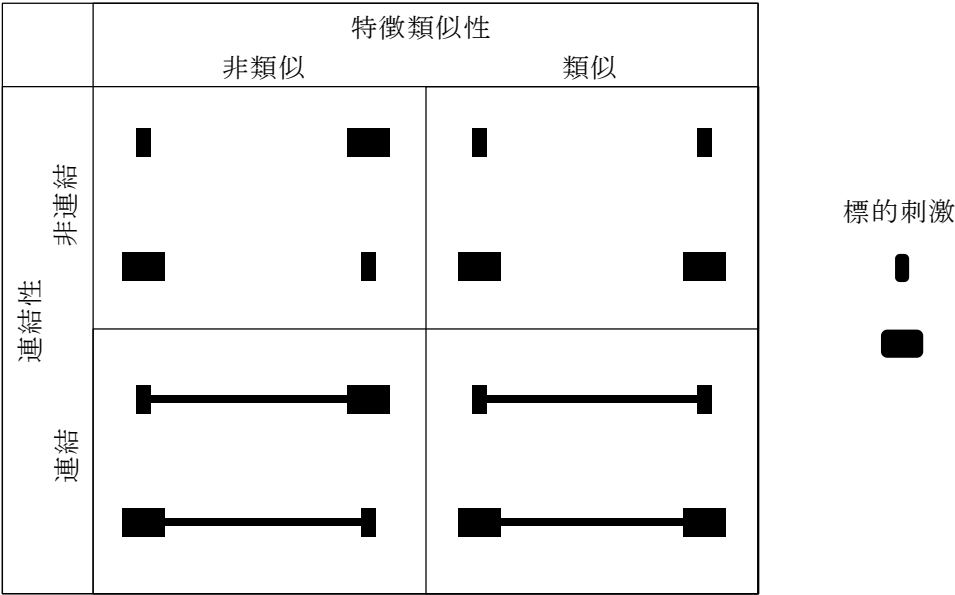


図 2.1.1 実験 1 で用いられた刺激。全ての両側標準刺激のパターンを示した。参加者は標的刺激が注意した視野に現れたらボタン押しするよう求められた。

激の横幅がまったく同じ場合と異なる場合の比較により検討した。横幅の変化により形と大きさが変わるが、これらはいずれも境界特徴である (Cavanagh et al., 1990)。課題は、左右いずれかの視野に注意を向け続け、高確率で提示される標準刺激 (長方形) の中から低確率で出現する標的 (角の丸い長方形) を検出することであった。本実験の標的は先行研究 (正方形, Kasai 2010; Kasai et al., 2011; Kasai & Takeya, 2012) とは異なるが、横幅の変化との交絡を避けるために用いられた。もしも均一な連結性が注意選択においてより初期の処理単位を形成するならば、均一な連結性による注意拡散効果は特徴類似性によるそれよりも早く生じるはずである。また、連結性が階層的に上位の注意の単位を形成するならば、特徴類似性による注意拡散効果は連結条件には減衰あるいは消失するはずである。

1.2 方法

実験参加者

18 歳から 27 歳 (平均 21.9 歳) の 16 名の大学生あるいは大学院生 (女性 8 名) が実験に参加した。全ての参加者の視力または矯正視力は正常であった。1 名は瞬目が多かったため分析から除外した。実験は北海道大学大学院教育学院倫理委員会の承認を得て行った。全ての参加者は実験の目的、方法および実験の安全性についての説明を受け、書面により参加に同意した。

刺激

全ての刺激は PsyScope ボタンボックスを付属した PsyScope (Cohen, MacWhinney, Flatt, & Provost, 1993) による制御のもと、CRT ディスプレイ上に提示した。背景は灰色であり、刺激はすべて黒色だった。凝視点 (視角度 $1.08^\circ \times 1.08^\circ$) が画面中央に常に提示された。その上側 (1.80°) の両側 4.17° (刺激中心まで) に、標準刺激として高さ 0.98° 、幅 0.49° または 1.47° の長方形を提示した。刺激の高さをすべての条件で同一にしたのは、CRT モニタ上に描出される際の

刺激の出現時間を揃えるためであった。標的刺激では長方形の角が半径 0.16° の正円弧であった。刺激条件として左右の四角形の連結性と横幅の類似性を直交させて操作した (Figure 2.1.1)。連結性に関しては両側刺激を結ぶ連結線がない場合 (非連結) とある場合 (連結), 横幅の類似性に関しては左右の四角形の幅が異なる場合 (非類似) と同じ場合 (非類似) があった。これらを組み合わせた 4 つの刺激条件として, 非連結・非類似条件, 非連結・類似条件, 連結・非類似条件, 及び連結・類似条件があった。連結線の太さは 0.25° であり, 観察距離は 70 cm だった。

手続き

すべての刺激を, 持続時間 100 ms, 刺激間間隔 350-600 ms (6 段階, 矩形) で, ランダム順に提示した。刺激提示確率は標準刺激が 75 %, 標的刺激が 25 % だった。標的刺激の半分は左視野に, もう半分は右視野に提示した。刺激条件は等確率で提示された。

参加者は電気シールド室の椅子に座り, ブロック中は左右いずれかの視野に注意し, 注意側の標的に利き手でできるだけ早く正確にボタン押しをするよう教示された。課題遂行中は凝視点から視線を動かさないよう指示した。1 ブロックは 100 回の刺激提示からなり, 左視野注意ブロックと右視野注意ブロックを 12 回から 16 回ずつ, 交互に行った。各ブロックの最初に, 次のブロックで注意する方向が画面上に示された。参加者の求めに応じてブロック間に短い休憩をとった。最初の 1 回から 2 回の練習ブロックで, 参加者が凝視点に視線を向けたまま課題が遂行できることを確認した。左右いずれの注意条件から開始するかは参加者間でカウンターバランスした。

記録・分析

行動遂行は注意視野への標的提示後 200-1000 ms の反応を Hit, それ以外をフォールスアラーム (FA) とし, Hit の反応時間 (RT) を測定した。

脳波は電極帽の 25 箇所銀—塩化銀電極 (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, 国際 10-20 法

に従う) から鼻尖を基準として導出した。瞬きなどの眼球運動を、両眼目尻の水平眼電図 (HEOG) と左眼窩上下垂直眼電図 (VEOG) により記録・モニタした。電極と頭皮の間の電気抵抗値は $10\ \Omega$ 以下を保った。バンドパスフィルタは 0.1-30 Hz, サンプルング周波数は 200 Hz であった。

左注意と右注意ブロックそれぞれにおいて、電極及び刺激条件毎に刺激提示前 200 ms から刺激提示後 800 ms までの 1000 ms を加算平均した。刺激提示前 200 ms 間の平均電位をベースラインとして補正した。 $\pm 75\ \mu\text{V}$ の基準で自動アーチファクトリジェクションを行った。運動や意思決定の影響の少ない標準刺激に対する ERP を分析対象とし、反応を含む試行及び反応の次の試行を分析から除外した。

本実験と類似した実験手法を用いたこれまでの研究において、注意視野 (左注意, 右注意) による ERP 注意拡散効果の系統的な違いは観察されていないため (Kasai, 2010; Kasai et al., 2011; Kasai & Takeya, 2012), 行動及び ERP データを注意視野を平均化して注意側対側と同側に分けた。

1.3 結果

行動反応

平均 RT, Hit 率及び FA 率を表 2.2.1 に示す。それぞれの指標について、連結性 × 類似性の繰り返しのある 2 要因分散分析を行ったところ、いずれの行動反応においても統計的に有意な効果は認められなかった。

表 2.2.1. 行動データのまとめ

		連結・類似		連結・非類似		非連結・類似		非連結・非類似	
		<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>
反応時間 (ms)		449	9	452	9	445	10	448	11
ヒット率 (%)		78.4	3.3	77.8	3.7	80.1	3.3	80.0	3.1
FA 率 (%)	標準刺激	0.8	0.2	1.1	0.2	1.2	0.3	1.5	0.4
	非注意標的刺激	0.3	0.1	0.7	0.3	1.9	0.9	1.3	0.4

ERP

ERP の注意効果は、後頭側頭部 (PO7・PO8) で最も明瞭に、注意視野の対側半球と同側半球における ERP 振幅差として、P1 (85-125 ms) 及び N1 (125-185ms) の潜時帯において観察された (図 2.1.2a)。この注意による側性化効果の刺激条件間の違いを明らかにするために、対側の ERP から同側の ERP を引いた差波形を図 2.1.2 b に示す。

明瞭な注意効果が見られた後頭側頭部の P1 及び N1 潜時帯の平均電位を算出し、それぞれの電位について連結性 (非連結, 連結), 類似性 (非類似, 類似), 及び側性化 (注意側対側電極, 同側電極) の 3 要因の繰り返しのある分散分析を行った。統計的に有意あるいは有意傾向が得られた全ての ERP の検定結果について、効果量として偏イータ 2 乗 (η^2) を算出した。表 2.1.2 は各潜時帯における分散分析の結果である。

P1 潜時帯の平均電位において、対側で同側よりも陽性電位が増加したことが、側性化の有意な主効果で明らかにされた [$F(1,14) = 44.27, p < 0.0001, \eta^2 = 0.76$]。さらに、P1 潜時帯の平均電位には類似性と側性化の有意な交互作用があった [$F(1,14) = 5.73, p < 0.05, \eta^2 = 0.29$]。各類似性条件における側性化の下位検定を行ったところ、類似条件と非類似条件いずれにおいても有意な側性化の主効果があり、対側で同側よりも陽性であることが示された [$F(1,14) = 47.98, p < 0.00001, \eta^2 = 0.77$; $F(1,14) = 36.84, p < 0.0001, \eta^2 = 0.72$]。刺激間の側性化効果量をより直接的に比較するために、対側から同側を引いた差電位について連結性と類似性の 2 要因の繰り返しのある分散分析を行ったところ、類似条件の注意効果が非類似条件の注意効果よりも有意に陽性であった [$F(1,14) = 5.69, p < 0.05, \eta^2 = 0.29$]。

N1 潜時帯の平均電位においては、連結性と側性化の交互作用が有意だった [$F(1,14) = 19.37, p < 0.001, \eta^2 = 0.58$]。各連結性条件における側性化の下位検定において、連結条件では対側で同側よりも陽性であったが [$F(1,14) = 14.38, p < 0.01, \eta^2 = 0.51$]、一方で非連結条件では側性化の効果は認められなかった

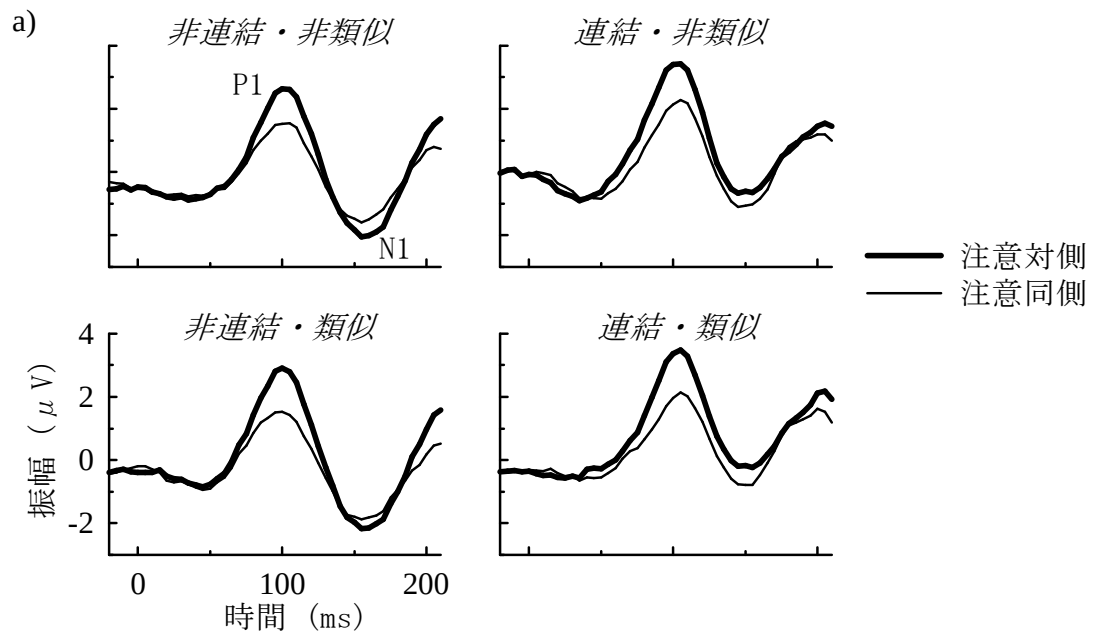
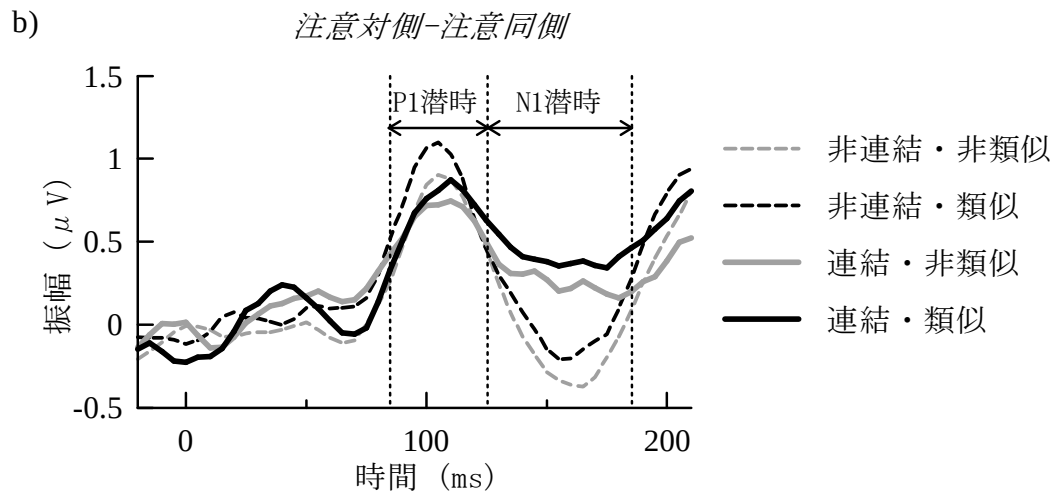
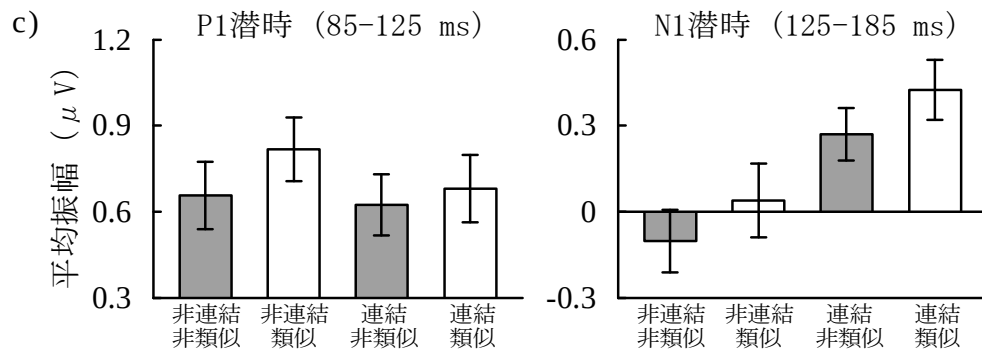


図 2.1.2 a) 後頭側頭部電極 (P07, P08) における総加算平均 ERP。非連結非類似, 非連結類似, 連結非類似, 及び連結類似, の 4 条件の ERP を算出した。注意視野に対する対側及び同側の ERP を重ね書きした。b) 注意効果の差波形 (注意対側 ERP から同側 ERP を引き算)。c) 注意効果の平均電位。エラーバーは標準誤差を示す。

[$F(1,14) = 0.08, p = 0.78$]。引き算 ERP に対する検定の結果, 注意効果は連結条件で非連結条件よりも有意に陽性であった [$F(1,14) = 19.29, p < 0.001, \eta^2 = 0.58$]。さらにこの潜時帯には類似性と側性化の交互作用も認められた [$F(1,14) = 5.12, p < 0.05, \eta^2 = 0.27$]。下位検定においては, 類似条件における側性化効果はわずかに有意ではなく [$F(1,14) = 4.37, p = .055, \eta^2 = 0.24$], 非類似条件ではこの効果は認められなかった [$F(1,14) = 0.94, p = 0.35$]。しかしながら対側から同側を引いた差電位においては, 注意効果は類似条件で非類似条件よりも陽性であった [$F(1,14) = 5.14, p < 0.05, \eta^2 = 0.27$]。

いずれの潜時帯においても, 連結性 $\times$ 類似性 $\times$ 側性化の交互作用は認められなかった ($ps. > 0.52$)。

1.4 考察

本実験は, ERP の空間的注意効果 (注意側同側に対する対側の振幅増加) を指標として, 初期の空間的注意選択における均一な連結性と境界特徴の類似性の役割を検討した。仮説として, 均一な連結性がより初期の注意選択単位を形成するなら, 境界特徴の類似性による ERP 注意拡散効果 (注意効果の減衰) が均一な連結性による効果よりも遅く生じるか, または連結性によって調整されると考えた。結果において, P1 潜時帯 (85-125ms) の空間的注意効果は参加者が課題関連視野に注意を向けていたことを示した。しかしこの効果は類似条件で非類似条件より増加し, 続く N1 潜時帯 (125-185 ms) では連結性と類似性による注意拡散効果が互いに独立に観察された。したがって仮説は支持されず, む

表 2.2.2. ERP の統計結果のまとめ

	P1		N1	
	85–125 ms		125–185 ms	
	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
連結性	5.8	.030*	17.3	.001**
類似性	0.01	.934	0.3	.625
側性化	44.3	.00001**	2.8	.115
連結性 × 類似性	2.4	.141	0.1	.766
連結性 × 側性化	1.9	.193	19.4	.001**
類似性 × 側性化	5.7	.031*	5.1	.040*
連結性 × 類似性 × 側性化	0.4	.522	0.01	.989

分散分析の結果：連結性（分離，連結），類似性（非類似，類似），注意視野に対する側性化（同側，対側）。* = $p < .05$, ** = $p < .01$

しろ境界特徴の類似性が連結性と同様の時間に、もしくはそれより早く課題非関連位置への注意の誘導を生じさせることが示された。

物体ベースの注意における群化要因の種類と関係性

本実験で観察された連結性による N1 注意拡散効果は、Kasai (2010) の実験 1 と実験 2、さらに画面中央に遮蔽物体がある状況 (Kasai & Takeya, 2012) と同様であり、連結性による N1 注意拡散効果が頑健であることを示す。さらに本実験は N1 の潜時帯に境界特徴の類似性による注意拡散効果を同定した。これまでに色（表面特徴）の類似性による注意拡散効果も N1 に同定されていることから (Kasai et al., 2011)、均一な連結性による注意拡散と離れた要素間の類似性による注意拡散が、共通の神経メカニズムに基づくことが示唆される。この知見は、Palmer & Rock (1994) の仮説を直接的に否定するものではないが、少なくとも初期の注意選択における単位の形成において連結性は特別な群化要因ではないことを示す。

ただし本実験は、境界特徴類似性によるより初期の注意効果の調整も同定した。P1 注意効果の増大は課題関連視野への注意の焦点化を示すため (Heinze et al., 1994), 類似条件における P1 注意効果の増大は、より群化された刺激において注意が焦点化されていたことを示唆する。これは想定した群化の効果 (注意拡散) と逆である。このような結果が得られた原因として、本実験における類似性の操作が刺激の対称性に関わることが挙げられる。対称性はヒトの顔の魅力評価等に関わる生物学的に重要な刺激属性であるとともに、非常に頑健に検出されうる特殊な刺激構造である (e.g., Treder, 2011)。近年では、対称性の変化による視覚皮質の活動が刺激入力後 120 ms から生じることが示されている (Kecskés-Kovács, Sulykos, & Czigler, 2013)。このような対称性に対する特殊な知覚処理が早い注意選択過程に何らかの作用を及ぼしたのかもしれない。このような解釈には更なる検討が必要であるが、本結果は N1 より早い P1 潜時帯における空間的注意効果に刺激構造が影響し得ることを示す。

本実験の結果において異なる群化要因による注意拡散効果が独立・加算的であったことは、行動指標を用いた物体ベースの注意研究における主張 (Marino & Scholl, 2005) と神経生理学的研究の知見 (Wannig et al., 2011) と一致する。このような注意選択における群化要因の加算性には、生態学的な妥当性があると考えられる。群化要因を持つ要素群は、実際に単一の物体であることが多いため、群化は物体認知に貢献する (Palmer, 2003)。このとき、異なる群化要因による注意拡散が互いに独立であることは、個々の群化要因が他の群化要因に干渉されずに適応性を発揮できることを意味する。本実験は、刺激構造の一部に注意を向けている際に生じる自動的かつ初期段階の注意選択においてもこの適応的な群化作用が生じることを初めて示した。

ERP 注意拡散効果の機能的意義

これまでの ERP 研究は、両側刺激提示時の N1 注意効果が、行動指標における物体ベースの注意効果と類似して、知覚的群化の客観的指標となることを示唆してきた。つまり、N1 注意効果は刺激間の連結性が強まるにつれ減衰し

(Kasai, 2010), 色類似性 (Kasai et al., 2011) や非感性的補完 (Kasai & Takeya, 2012) によっても減衰する。したがって N1 注意効果は、群化要因の種類によらず知覚的群化量を反映すると考えられる。本実験は、境界特徴の類似性による注意拡散も同様に N1 注意効果に反映されることを示し、この考えを更に補強した。

ただし、この境界特徴の類似性による注意拡散効果は、これまでの研究で観察された形類似性による N2 潜時帯で見られた注意拡散効果 (Kasai et al., 2011) よりも早かった。このことは、異なる群化要因に共通の注意選択メカニズムの駆動が、知覚的群化がある程度強い場合に限られることを示すかもしれない。序論で述べたように、本実験は先行研究に比べて両側刺激間の類似性が高くなるよう操作した。したがって、知覚的群化が強まるにつれて、注意拡散が起こる時間帯がより早くなる可能性が考えられる。しかしながら、先行研究において連結性による群化の程度は潜時の違いではなく N1 潜時帯における注意効果量 (振幅) の違いに反映されたので (Kasai, 2010), この可能性に関しては更なる検討が必要である。

また本実験では、Kasai (2010) で見られたような行動指標における物体ベースの注意効果 (連結条件における RT の遅延と Hit 率の低下) が観察されなかった。このことは、ERP が反映する初期の選択過程が行動に現れるかどうか、課題によって異なることを示す。その課題要因の 1 つとして、標的の処理水準が考えられる。Kasai (2010) は長方形 (標準刺激) の中から正方形 (標的刺激) の検出を要求したが、本実験の場合は角の丸みという、比較的低次かつ局所的な特徴で標的が定義できた。そのため本実験ではより早く標的が検出され、N1 の注意拡散効果が行動レベルに現れなかったと考えられる。実際に、本実験における反応時間は Kasai (2010) より早かった (本研究, 440-450 ms; Kasai, 2010, 520-570 ms)。また 2 つ目の要因として、群化を定義する特徴と標的を定義する特徴の一致性が考えられる。Lamy & Tsal (2000) の行動実験では、物体ベースの注意効果が、課題が物体を定義する特徴に関連するときのみ生じることが示

されている。Kasai (2010) では、標的と群化要因がそれぞれ刺激の幅と横方向の連結性で操作されており、両者には関連性があったため行動指標における物体ベースの注意効果が生じたかもしれない。以上から、初期の空間的選択段階においては自動的に物体候補が形成され、その後さらに課題に基づく物体候補の選択が生じることが示唆される。

1.5 結論

本実験は、行動指標には必ずしも現れない物体ベースの自動的な注意拡散過程を、初期の知覚処理段階における空間的注意選択過程を反映する ERP を用いて検討した。得られた ERP の結果から、連結性による注意拡散効果は境界特徴の類似性よりも早いとはいえず、また境界特徴類似性による注意拡散は連結性により変わらなかった。これらのことから初期の空間的選択過程において連結性は特に基本的な群化要因とは言えず、複数の群化要因は互いに独立・加算的に注意を誘導することが示唆された。

2 章 実験研究 2 初期の空間的注意選択における図地手がかりの役割²

2.1 序論

網膜に映る像は二次元かつ断片的であるが、私たちは日常的に三次元空間で物体とふれあっている。このことを可能にしている機能の一つが、物体ベースの注意とよばれる物体を単位とした注意選択である。物体ベースの注意は、一般的には二次元ディスプレイ上の単純な幾何学図形を用いて調べられてきた。例えば、参加者が一つの長方形あるいは群化した線分に注意を配分する場合、2つの長方形に配分する場合よりも行動成績が向上する (e.g., Duncan, 1984; Marino & Scholl, 2005)。さらに、参加者が長方形の一部に注意を向けたとき、その長方形の他の部分に現れた刺激の検出が促進される (Egley, Driver, & Rafal, 1994)。このような物体ベースの注意効果は、注意が物体あるいは群に属する空間あるいは特徴に自動的に拡散するために生じると考えられる (Richard, et al., 2008; Zhao, Kong, & Wang, 2013; Wegener, Galashan, Aurich, & Kreiter, 2014)。一方で、長方形型の領域が両眼視差を持ち周囲よりも奥に知覚される、つまり穴のように知覚されるとき、物体ベースの効果は観察されなかった (Albrecht, List, & Robertson, 2008)。このことは、注意によって選択される「物体」とは3次元空間における奥行のある構造であり、二次元の形態ではないことを示唆する。

選択的注意には複数の処理段階が関わるため (e.g., Luck & Hillyard, 1999)、物体ベースの注意に関わる処理段階あるいはタイミングは物体選択のメカニズムを明らかにするために重要である。これまでの事象関連電位を用いた研究はこ

² 実験研究 2 は発表されている論文を日本語に修正し、加筆修正を加えたものである。

Takeya & Kasai (2015). Object-based spatial attention when objects have sufficient depth cues. *Journal of Vision*, **15**, 1-10.

の観点における知見を提供してきた。回転するランダムドットから成る二つの重なり合う面 (Surface) を用いたとき、注意を向けた面の運動方向の変化に対する P1 (90-120 ms) と N1 (160-240 ms) 成分の振幅は、注意を向けていない面の場合よりも大きかった(Valdes-Sosa, et al., 1998)。さらに、面に不随意的に注意を向ける場合は、より早い成分 (C1, 75-110 ms) も調整された (Khoe, et al., 2005)。これらは空間的注意から分離された物体ベースの注意が、ごく早い視覚処理を調整しうることを示す。一方、幾何学図形と空間的注意課題 (特定の視野位置に注意を向ける) を用いた ERP 研究は、持続的に提示された物体上にプローブが現れる場合でも、物体それ自体が出現する場合でも、N1 成分の振幅が調整されることを繰り返し示してきた (He, et al., 2004; Martinez, et al., 2007a; Martinez, et al., 2007b; Martinez et al., 2006; Kasai, 2010; Kasai, et al., 2011; Kasai & Takeya, 2012; 本研究の実験研究 1)。この物体ベースの N1 注意効果の信号源は外側後頭皮質 (lateral occipital cortex, LOC) に推定されており、この部位は物体あるいは図 (Figure) の知覚に貢献すると考えられている (Flevaris, Martinez, & Hillyard, 2013; Martinez, et al., 2006; Martinez, et al., 2007a; Martinez, et al., 2007b)。ただし、物体の空間的な選択の場合には、なぜ N1 より早い処理段階が関わらないのかは明らかにされていない。

これまでの ERP を用いた研究は、P1 及び N1 の空間的注意効果が感覚入力 of デイン制御を反映することを示してきたが (e.g., Hillyard, Vogel, & Luck, 1998), これらの成分の機能的な違いも説明されている (レビューとして, Luck & Kappenman, 2011)。しかしながら、これらの機能的な違いに対し、断片的な二次元の視覚イメージから三次元物体が構築される過程がどのように関わるかは注目されてこなかった。先に述べた二つの重なりあう面を用いた実験は、一般的に空間的注意によらない物体への注意を検討するのに用いられるが、これらは奥行方向に分割された二つの面としても知覚されうる。一方で、これまでの物体ベースの空間的注意の研究では一般的には単純な長方形か、主観的輪郭の知覚を伴うカニツツァ図形が用いられてきた。このような刺激は研究者により「物

体」として定義されたが、必ずしも物体が図として処理されるのに十分な奥行手がかりを持っているとはいえない。具体的には、図 2.2.1 で示すように、2 次

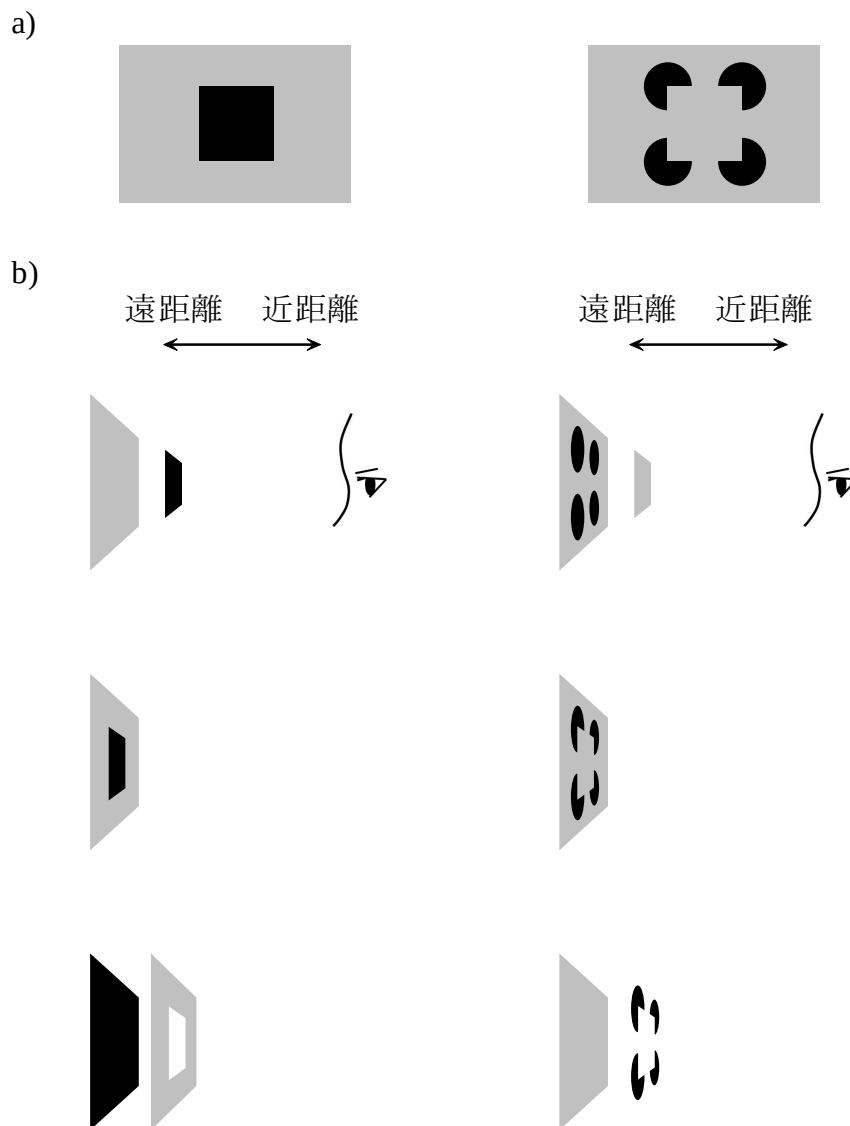


図 2.2.1 a) 奥行順序の曖昧性がある二次元の視覚刺激の例。b) 三次元解釈の候補。a の刺激は多くの場合、図と背景として知覚されるが（上段）、中央の領域は背景と同じ奥行面（中段）あるいは周囲よりも奥にあるようにも知覚されうる（下段）。

元ディスプレイ上の長方形は閉合や大きさ手がかりに従って物体となりうるが、一方で2次元の模様あるいは穴としても解釈されうる。またカニツツア図形は補完された図形ではなくパックマン型の図形としても解釈されうる。神経生理学的なモデルにおいても、図地解釈が曖昧な刺激に対しては初期の視覚皮質が複数の図地パターン候補を同時に表象し、そのうち1つのみが知覚されることが仮定されている (for a review, Long & Toppino, 2004)。そのため、先行研究では奥行知覚が明瞭でない刺激を用いたために初期の皮質領域に表象すべき図地パターンをめぐる競合が生じ、結果として早い物体ベースの注意効果が見られなかったのかもしれない。ただし、ランダムドットと幾何学図形では、誘発反応の信号源 (Di Russo et al., 2013) および群化要因の1つである共通運命 (common fate) の違いがあったため、原因を特定することは難しい。

本研究の目的は、図地分離の曖昧性により物体ベースの空間的注意選択が生じる処理段階が異なるかどうかを検討する事であった。そこで、本研究は二次元ディスプレイ上においても相対奥行が明瞭に知覚されるように、長方形とパックマン型図形を組み合わせた刺激を用いた。実験1の物体は周囲よりも手前に知覚され (図 2.2.2)、実験2の物体は周囲よりも奥に知覚された。課題として一般的な持続空間的注意パラダイムを用いた。物体が持続的に提示される状況において、参加者は視野の左あるいは右側に持続的に注意を向け、低頻度で注意位置に現れる標的プローブ刺激を検出した。物体ベースの注意拡散効果は、空間的注意効果 (注意を向けた位置に提示されたプローブ刺激に対する ERP 振幅が非注意視野に現れたプローブへの ERP 振幅よりも増大する) が連結条件で分離条件よりも減衰する効果として示される。

2.2 実験 1

実験1では、物体が先行研究よりも曖昧性なく図として知覚される状況における ERP の注意拡散効果を検討した。もしも空間的物体選択が三次元解釈の明瞭さと無関係に生じるならば、これまでと同様に N1 において注意拡散効果が観

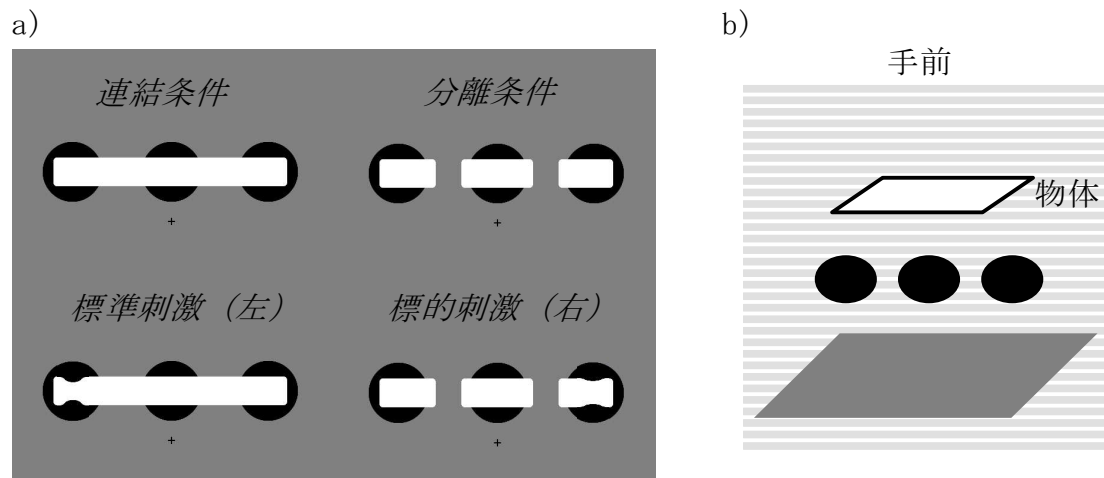


図 2.2.2 実験研究 2 の実験 1 で用いられた刺激。a) 白い長方形とパックマン型刺激は背景刺激として持続的に提示された。プローブ（長方形の凹み）は左、右、あるいは中央に、短時間かつ繰り返しランダム順に提示された。下段に各プローブ刺激の例を示した。b) 白い長方形は灰色の背景、その手前の黒い丸のさらに手前に知覚される。

察されるはずである。一方で三次元解釈の明瞭さが物体ベースの注意選択の生じる処理段階を調整するならば、これまでよりも早い P1 や C1 潜時に注意拡散効果が示されるはずである。また本実験は、注意が物体に属する空間領域全体に同様に拡散するかどうかを調べるために、中央の非注意位置にもプローブ刺激を提示し、それに対する ERP 振幅への連結性の効果も検討した。しかし中央プローブ刺激に対する ERP 振幅には連結性の効果はなかった。これは中心視野の刺激に対して ERP の空間的注意が生じないためと考えられる (Handy & Khoe, 2005)。そのため、中央に提示されたプローブ刺激のデータについては報告しない。

2.2.1 方法

実験参加者

19 歳から 24 歳の 12 名の成人 (女性 6 名) が実験に参加した。全ての参加者の

視力あるいは矯正視力は正常であった。実験は北海道大学大学院教育学院倫理委員会の承認を得て行った。全ての参加者は実験の目的、方法および実験の安全性についての説明を受け、書面により参加に同意した。

刺激

全ての刺激は E-Prime version 1.0 (Psychology Software Tools) の制御のもと、CRT ディスプレイ上に提示した。観察距離は 70 センチだった。凝視点 (視角度 $0.4^{\circ} \times 0.4^{\circ}$) が画面中央に常に提示された。その上側に 1.3° の間隔を空けて、連結条件においては角の丸い長方形 ($9.4^{\circ} \times 1.1^{\circ}$) が、分離条件においては 1.0° の間隔によって 3 つに分割された長方形が提示された。長方形は白色で、水平に並んだ 3 つの正円 ($2.4^{\circ} \times 2.4^{\circ}$, 間隔 1.6°) を遮蔽していた。実験後に、これらの刺激の奥行関係について質問したところ、全員が白い長方形が最も手前に見えたと答え、それ以外を報告したものはいなかった。プローブ刺激は、長方形の一部が幅 0.9° で凹むように見える刺激であり、標準プローブは高さ 0.2° 、標的プローブは高さ 0.1° だった。プローブは視野の左、右 (固視点との間隔 3.2°)、あるいは中央に、長方形の上下に同時に提示された。

手続き

長方形と遮蔽された正円はブロック中に持続的に提示され、プローブ刺激は 1 ブロックにつき 40 回、短時間 (150 ms) で刺激間間隔 400-600 ms (5 段階、矩形) で提示された。標準プローブは高頻度で (左 : 33%, 右 : 33%, 中央 : 17%), 標的プローブは低頻度で左か右視野に提示された (各 8%)。各被験者は電気防音室の椅子に座り、ブロック中は左あるいは右に注意を向け、右手親指で注意位置の標的に対して可能な限り速く正確にボタン押しするよう教示された。注意する視野位置はブロックの始めに矢印で示された。注意方向は左右で交互に、また連結性の順序操作は 2 ブロックごとに、ABBA 系列で行われた。各被験者は 96 ブロックを行い、注意視野と連結性の順序は被験者間でカウンターバランスした。

記録・分析

行動遂行は注意視野への標的提示後 300-1200 ms の反応を Hit, それ以外を FA とし, Hit の反応時間 (RT) を測定した。

脳波は電極帽の 25 箇所(銀-塩化銀電極 (Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, T3, C3, Cz, C4, T4, T5, P3, Pz, P4, T6, O1, Oz, O2, PO7, PO3, POz, PO4, および PO8, 国際 10-20 法に従う) から鼻尖を基準として導出した。瞬きなどの眼球運動を, 両眼目尻の水平眼電図 (HEOG) と左眼窩垂直眼電図 (VEOG) により記録・モニタした。電極と頭皮の間の電気抵抗値は 10 k Ω 以下を保った。バンドパスフィルタは 0.1 - 30 Hz, サンプル周波数は 500 Hz であった。

標準プローブに対する ERP は, 刺激位置, 刺激位置への注意, および連結性ごとに刺激提示前 200 ms から刺激提示後 800 ms までの 1000 ms を加算平均した。刺激提示前 200 ms 間の平均電位をベースラインとして補正した。 $\pm 75 \mu V$ の基準で自動アーチファクトリジェクションを行った。反応を含む試行及び反応の次の試行を分析から除外した。

2.2.2 結果

行動反応

表 2.2.1 に行動データを示す。Hit と RT については刺激視野×連結性の繰り返しのある 2 要因分散分析を行った。

表 2.2.1. 実験 1 の行動データのまとめ

	連結		分離	
	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>
反応時間 (ms)	500	15	499	14
ヒット率 (%)	78.8	3.0	80.9	2.8
FA 率 (%)				
注意標準刺激 (両端)	6.1	1.3	5.7	1.3
非注標準刺激 (両端)	0.7	0.2	0.5	0.2
非注意標準刺激 (両端)	0.4	0.2	0.6	0.2
中央標準刺激	0.8	0.3	0.3	0.1

FA については注意視野の標準刺激, 非注意視野の標準刺激, 非注意視野の標準刺激でそれぞれ分析した。Hit 率は分離条件で連結条件よりも高かったことが, 連結性の有意な主効果で示された [$F(1,11) = 4.9, p < 0.05$]。RT と FA においては, 連結性を含めた効果は有意ではなかった (RT: $p > 0.57$, FA 率: $p > 0.17$)。

ERP

標準刺激に対する総加算平均 ERP において, 注意刺激に対して非注意刺激よりも ERP 振幅が増大する空間的注意の効果が, 後頭側頭部を優勢に P1 (100-140 ms) および N1 (150-220 ms) 潜時において観察された (図 2.2.3)。これまでのプローブ法を用いた物体ベースの注意研究 (Martinez et al., 2006; Martinez et al., 2007a; Martinez et al., 2007b) と同様に, 各半球の後方電極 (O1/O2, PO3/PO4, PO7/PO8, P3/P4, T5/T6) をクラスターとして平均し定量化した。P1 および N1 の平均電位について, 刺激視野, 刺激位置への注意, 連結性, および半球の 4 要因の繰り返しのある分散分析を行った。統計的に有意な全ての ERP の検定結果について, 効果量として偏イータ 2 乗 (η^2) を算出した。表 2.2.2 に各潜時帯における ERP の結果を示した。

一般的な片側性プローブの効果として, 刺激対側半球の P1 (100-140 ms) の振幅が増大したことが, 刺激位置と半球の交互作用で示された [$F(1,11) = 11.1, p = 0.01, \eta^2 = 0.50$]。さらに, 注意により振幅が増大していたことが, 刺激への注意の主効果により示された [$F(1,11) = 9.1, p = 0.01, \eta^2 = 0.45$]。

重要なことに, P1 注意効果は連結性により異なっていたことが (図 2.2.4), 刺激への注意, 連結性, および半球の交互作用より示された [$F(1,11) = 4.9, p = 0.05, \eta^2 = 0.31$]。分析を単純化するために, 注意条件から非注意条件を引いた引き算 ERP (注意効果) を計算し分析したところ, 連結性と半球の交互作用が有意だった [$F(1,11) = 4.9, p = 0.05, \eta^2 = 0.31$]。下位検定においては, 両半球で分離条件の注意効果が連結条件の注意効果よりも大きかった [左半球, $F(1,11) = 8.0, p = 0.02, \eta^2 = 0.42$; 右半球, $F(1,11) = 6.3, p = 0.03, \eta^2 = 0.36$]。二重引き算 (分離条件の注意効果 ERP から連結条件の注意効果 ERP を引き算) の分析を行ったところ,

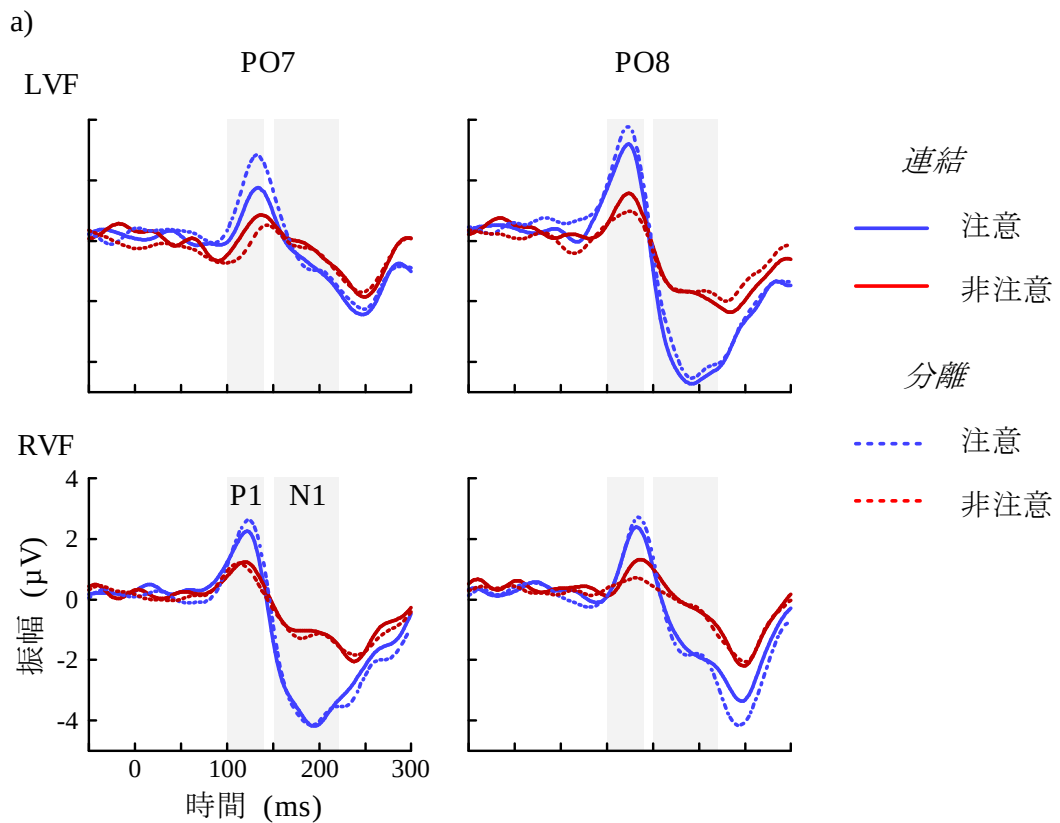
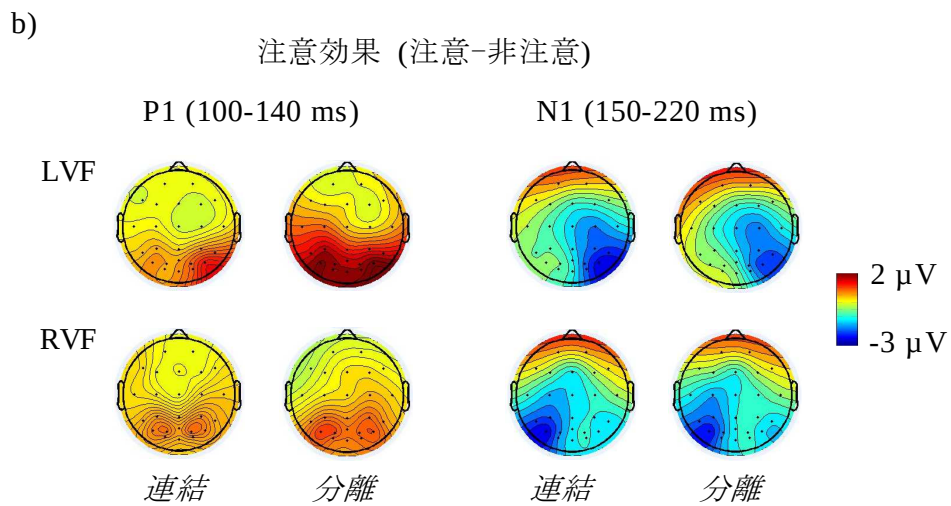


図 2.2.3. a) 左および右視野の標準刺激に対する後頭側頭葉 (P07, P08) における総加算平均 ERP。b) 各条件における注意効果の頭皮上分布。注意条件の ERP から非注意条件の ERP を引き算して算出した。P1 及び N1 注意効果が明瞭に観察されるが、P1 効果は連結条件において減衰した。

連結性による注意効果の減衰は左半球で右半球よりも大きかった [$F(1,11) = 4.9$, $p = 0.05$, $\eta^2 = 0.31$].

N1 潜時においても注意プローブに対し非注意プローブより振幅が増大したことが刺激への注意の有意な主効果により示されたが [$F(1,11) = 15.3$, $p = 0.002$, $\eta^2 = 0.58$], 注意と連結性の交互作用を含めた有意な効果はなかった ($ps > 0.12$).

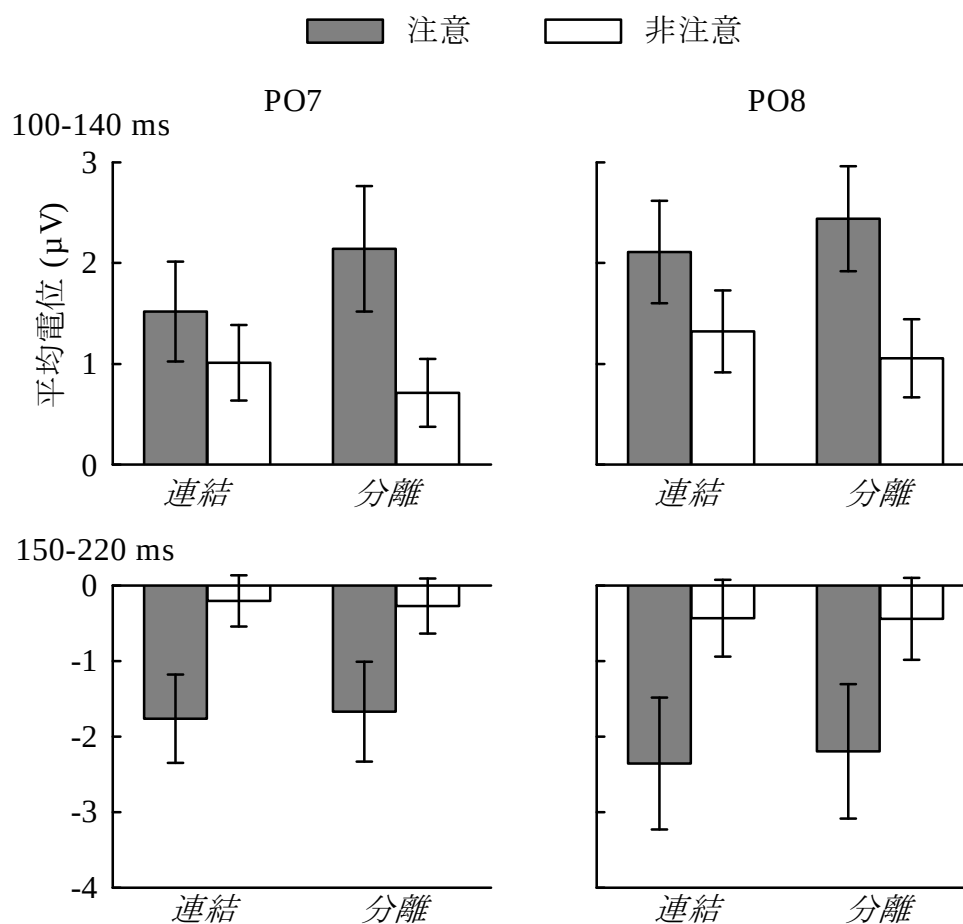


図 2.2.4. 後頭側頭電極における標準刺激に対する ERP 反応の平均電位。物体ベースの注意効果と無関係だった刺激視野は平均化した。エラーバーは標準誤差を示す。

表 2.2.2. 実験1のクラスター化したERPの統計結果のまとめ

	P1 (100–140 ms)		N1 (150–220 ms)	
	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
注意	9.1	0.01	15.3	0.002
連結性	1.4	–	0.3	–
半球 *	11.1	0.01	26.4	0.003
注意 × 連結性	7.5	0.02	2.9	–
注意 × 半球*	0.3	–	55.8	0.00001
連結性 × 半球	7.8	0.01	0.2	–
注意 × 連結性 × 半球	4.9	0.05	0	–

全ての有意な *p* 値が得られた統計結果を示した。*は刺激視野との交互作用を示す。

2.2.3 考察

本実験は、明瞭に手前に知覚される物体を用いた場合の物体ベースの空間的注意拡散効果を検討した。結果として P1 と N1 における典型的な空間的注意効果が観察されたが、先行研究で頑健に見られた物体ベースの N1 効果 (He, et al., 2004; Kasai, 2010; Kasai et al., 2011; Kasai & Takeya, 2012; Martinez et al., 2007a; Martinez et al., 2007b; Martinez et al., 2006; Takeya & Kasai, 2014) は見られなかった。代わりに、P1 において連結性による空間的注意効果の減衰が認められた。この結果は、先行研究が示してきたよりも早い視覚処理段階に物体ベースの空間的注意拡散が生じ得ることを示唆する。

また、本実験では物体ベースの注意効果として連結物体での行動成績の低下が観察された。これは注意の拡散により課題関連位置への注意の焦点化が阻害されたためと考えられる (Richard et al., 2008)。しかし、このような行動指標における効果は、本実験と類似した実験パラダイム (物体の持続的提示, 持続空間

的注意課題、およびプローブ刺激) を用い、N1 の物体ベースの注意効果を観察した先行研究では認められなかった (Martinez et al., 2007a)。したがって、早い処理段階における物体ベースの空間的注意選択は行動レベルの物体選択により強く影響することが示唆される。

本実験の結果は、物体あるいは図を定義する奥行手がかりが、物体の空間選択が生じる処理段階を決定する重要な要因であることを示唆する初めての知見である。しかし、本実験で用いた刺激配列が特殊だったために偶発的にこの結果が得られた可能性もある。例えば、本実験で用いた長方形は角が丸く、上視野に提示されたが、これまでの物体ベースの空間的注意を調べた ERP 研究ではこのような刺激は用いられていない。そのため本実験の結果を解釈するためにはさらに実験を行う必要がある。

2.3 実験 2

実験 1 では、これまで示されてきたよりも早い処理段階で物体に基づく空間選択が生じることが示された。しかし、用いた刺激配列の特殊性により偶発的にこの結果が得られたのか、物体の奥行が比較的明瞭だったためかは明らかではない。そこで実験 1 の結果の原因を明らかにするために実験 2 を行った。実験 2 の手続きは実験 1 とほぼ同様だったが、長方形が周囲よりも奥に知覚されるようパックマン型の刺激を修正した (図 2.2.5a)。刺激は 2 箇所分割されていたが、連結条件では補完された長方形が知覚されることを意図した (図 2.2.5b)。先行研究より、N1 注意拡散効果は感性的補完図形と同様に、一部が遮蔽された非感性的補完図形でも示されているため (e.g., Albrecht, et al, 2008; Kasai & Takeya, 2012; Moore, Yantis, & Vaughan, 1998), 本実験でも同様の効果が得られることが予測される。しかしこれらの先行研究では、物体は一部が遮蔽されているものの周囲の空間領域よりも手前に知覚されており、図としての活性化 (figural enhancement) があつたと考えられる。しかし、穴の向こうにあるように知覚される空間領域にもこのような活性化が生じるかどうかは明らかではない。

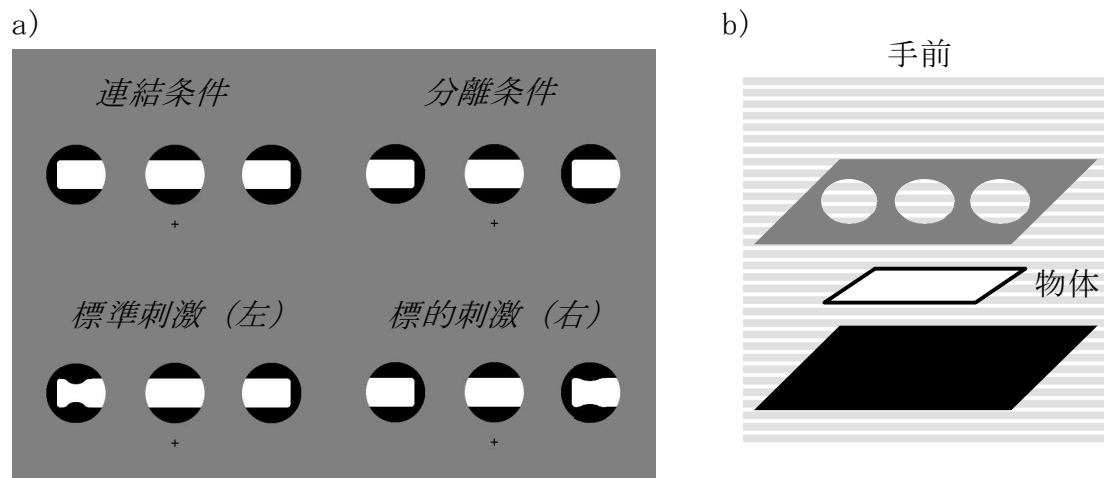


図 2.2.5. 実験 2 で用いられた刺激。a) 標準および標的プローブ刺激は実験 2 と同じだった。b) 白い長方形は灰色の領域よりも奥に知覚される。

仮説として、実験 1 の結果が刺激配列などの副次的影響ならば、実験 2 でも実験 1 と同様の結果のパターンが得られるはずである。一方で、物体が曖昧性なく手前に知覚されたことが原因ならば、物体が周囲よりも奥に知覚される実験 2 では P1 の注意拡散効果は得られないはずである。

2.3.1 方法

方法は以下の例外を除き実験 2 と同様であった。21 歳から 26 歳の 12 人 (女性 5 名) が実験に参加した。実験 1 と同様に本学教育学院の倫理審査委員会の承認および参加者の同意を得て実験を行った。白い長方形の輪郭の一部は黒い円の輪郭にちょうど重なっており、周囲の灰色の領域よりも奥に知覚された (図 2.2.5)。分離条件の刺激は、連結条件における左右の正円刺激を入れ替えて作成した。実験後に刺激の奥行関係について質問したところ、全員が灰色の領域よりも奥に白い長方形が見えた と答えた。

2.3.2 結果と考察

表 2.2.3 に行動データを示した。連結性を含めた有意な効果は得られなかった

表 2.2.3. 行動データのまとめ

	連結		分離	
	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>
反応時間 (ms)	612	20	611	24
ヒット率 (%)	77.9	2.9	75	3.2
FA 率 (%)				
注意標準刺激 (両端)	3.3	0.9	2.9	1
非注意標準刺激 (両端)	0.8	0.2	0.8	0.3
非注意標的刺激 (両端)	1.1	0.3	0.9	0.3
中央標準刺激	0.7	0.2	0.8	0.3

(Hit 率, $ps > 0.09$; RT, $ps > 0.13$; FA 率, $ps > 0.08$)。

ERP の注意効果は後頭側頭部で最も優勢であった (図 2.2.6, 2.2.7)。クラスター化した ERP においては, 片側性の標準刺激により刺激対側半球の P1 振幅が増大したことが, 刺激視野と半球の有意な交互作用により示された [$F(1,11) = 6.7$, $p = 0.03$, $\eta^2 = 0.38$]。また P1 振幅は刺激が注意位置に現れた場合に非注意位置の場合より陽性であったことが, 刺激への注意の有意な主効果により示された [$F(1,11) = 85.1$, $p = 0.000002$, $\eta^2 = 0.89$]。N1 でも同様に注意による振幅の増大が認められた [$F(1,11) = 9.7$, $p = 0.01$, $\eta^2 = 0.47$]。しかし, P1 と N1 の両潜時において, 注意と連結性の交互作用を含めた有意な効果は認められなかった ($ps > .14$, 表 2.2.4)。

実験 2 では実験 1 と異なり, 行動成績における物体ベースの効果, および ERP の物体ベースの注意効果は得られなかった。この結果は, 注意が周囲よりも手前の「図」の領域を拡散するという考えを支持する。さらにこの結果は実験 1 で見られた P1 の注意拡散効果が刺激配置のためではなかったことを示す。したがって, 物体が曖昧性なく周囲よりも手前に知覚される場合は, 物体の空間選択がより早い処理段階で生じるという考えが支持された。

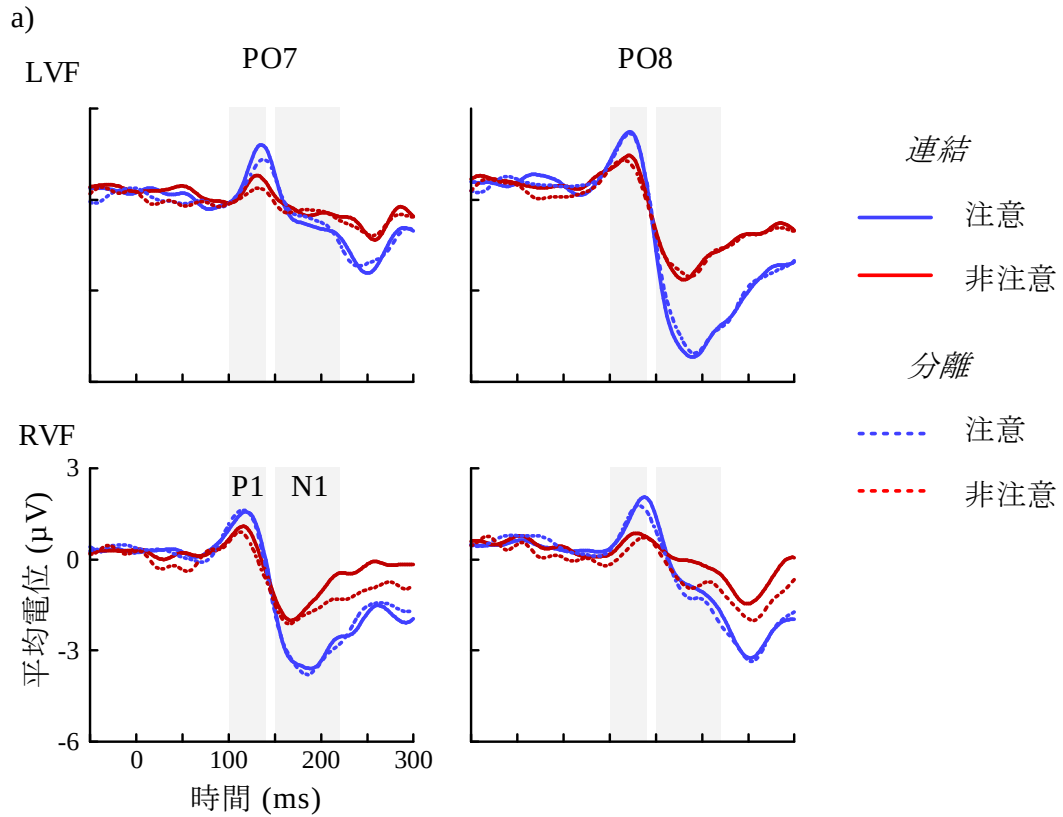
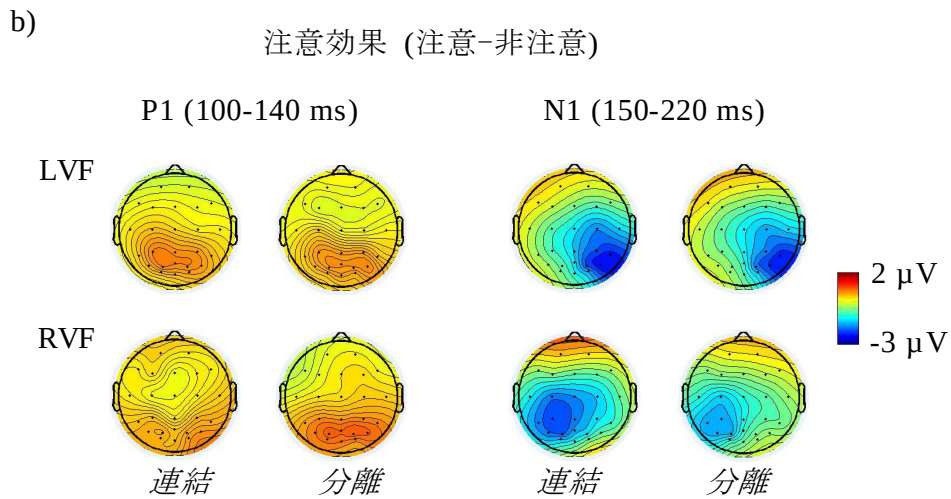


図 2.2.6. a) 左および右視野の標準刺激に対する後頭側頭葉 (P07, P08) における総加算平均 ERP。b) 各条件における注意効果の頭皮上分布。注意条件の ERP から非注意条件の ERP を引き算して算出した。P1 及び N1 注意効果が明瞭に観察されるが、連結性の効果はなかった。

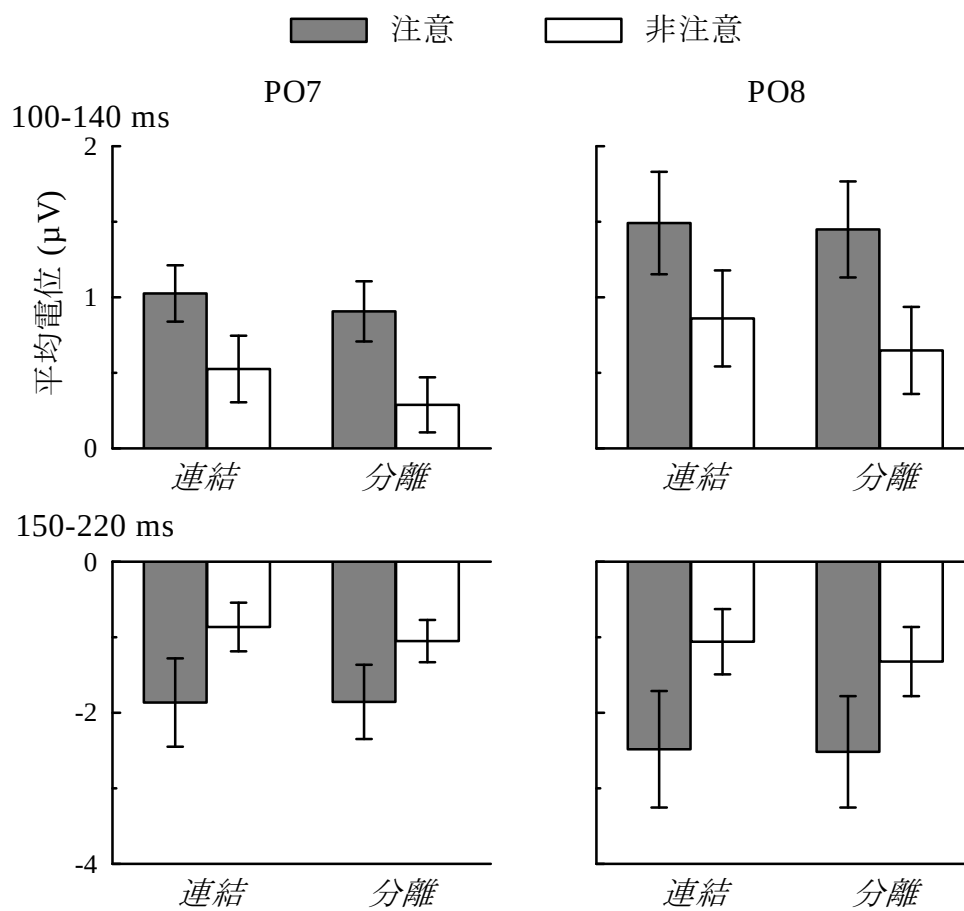


図 2. 2. 7 後頭側頭電極における標準刺激に対する ERP 反応の平均電位。エラーバーは標準誤差を示す

表 2.2.4. クラスター化した ERP の統計結果のまとめ

	P1 (100–140 ms)		N1 (150–220 ms)	
	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
注意	85.0	0.000002	9.7	0.01
連結性	3.3	–	1.0	–
半球 *	6.7	0.03	16.0	0.002
注意 × 連結性	0.4	–	2.5	–
注意 × 半球*	0.0	–	24.6	0.0004
連結性 × 半球	0.4	–	0.2	–
注意 × 連結性 × 半球	0.02	–	0.02	–

全ての有意な *p* 値が得られた統計結果を示した。*は刺激視野との交互作用を示す。

2.4 考察

本研究の目的は、初期の物体ベースの空間的注意選択における図地手がかりの役割を検討することであった。結果として、実験 1 ではこれまでよりも早い P1 注意効果と行動指標の物体ベースの注意効果が観察された。一方で実験 2 では、ERP、行動指標ともに物体ベースの注意効果は得られなかった。P1 注意効果は、多くの研究では二次元ディスプレイ上の視覚刺激に対するゲイン制御メカニズムとして解釈されてきたが (Hillyard et al., 1998)、三次元空間における奥

行きの情報も関与する。両眼視差の三次元ディスプレイを用いて二次元の空間的注意効果（左視野注意と右視野注意条件の ERP を比較）を検討した研究において（Kasai et al., 2003）, 典型的な二次元の P1 空間的注意効果は周囲よりも手前の刺激でのみ見られた。このような刺激状況においては、手前の刺激と周囲の領域の境界は、手前にある物体の輪郭として知覚される。そのためこの結果は、P1 注意効果が図として知覚される領域における空間的注意選択を反映することを示唆する。本研究の実験 1 における物体ベースの注意効果はこの考えを支持するだろう。このような早い物体の選択は、V1 あるいは V2 などの初期の視覚皮質における物体輪郭への選択的な活動に支えられていると思われる（De Yoe & Van Essen, 1988; Lamme, 1995; Qiu & von der Heydt, 2005）。

予測しなかった結果として、実験 1 で得られた P1 の物体ベースの注意効果は左半球でより大きかった。この結果は物体ベースの空間的注意の制御が左半球優勢であることと関連しているだろう（Shomstein & Behrmann, 2006; Wilson, Woldorff, & Mangun, 2005）。しかし、無視できない不一致もまた存在する。神経心理学研究においては、左半球に損傷のある患者群において物体ベースの注意の障害があり、右半球の損傷患者は健常者と同様であることが示されている（Egly et al., 1994）。しかし、経頭蓋磁気刺激では結果を再現しなかったという報告もある（Du, Chen, & Zhou, 2012）。さらに、これまでの物体ベースの N1 効果においても半球差は報告されていない（He et al., 2004; Martinez, Ramanathan, et al., 2007; Martinez, Teder-Salejarui, et al., 2007）。このように、物体ベースの空間的注意における各半球の機能的役割の違いを明らかにするためにはさらなる研究が必要である。

十分な奥行き手がかりを持つ物体を用いた本実験では、物体ベースの N1 注意拡散効果が観察されなかった。物体ベースの N1 注意効果は繰り返し観察されており、その信号源は LOC に同定されている（Martinez, Ramanathan, et al., 2007; Martinez, Teder-Salejarui, et al., 2007）。一般的には物体認知に関わるとされている N1 振幅の調整とその信号源である LOC は（for a review, Grill-Spector, Kourtzi, &

Kanwisher, 2001), 錯視的図形の知覚にも関係することが示されている (Murray et al., 2002; Murray, Foxe, Javitt, & Foxe, 2004)。このことから, N1 は三次元解釈において曖昧性のある物体の選択に特異的に関わることを示唆される。すなわち P1 と N1 はそれぞれ, 図地の曖昧性が低い物体と高い物体に関わるかもしれない。そのためランダムドットを用いた実験において P1 と N1 の両潜時で物体ベースの注意効果が出現するのは (Valdes-Sosa et al., 1998), ランダムドットへの誘発反応は物体の空間選択の場合とは異なる脳部位の活動を反映するためと考えられる (Di Russo et al, 2013)。ただし, 実験 1 で N1 注意拡散効果が得られなかった理由として, 物体ベースの P1 注意効果が刺激提示後 200 前後まで延長し, N1 の効果を相殺した可能性は排除できない。

2.5 結論

本実験は物体ベースの空間的注意選択における図地手がかりの役割を検討した。結果として, これまでの研究よりも十分な奥行手がかりを持った物体に基づく空間選択には P1 注意効果が関わることを示された。このことは, より早い皮質処理が物体の空間選択に関わるかどうかには奥行順序の明確さが重要な要因であることを示唆する。

第3部 総合考察

1章 ERPの初期注意選択と空間マップの性質

1.1 実験的研究で得られた知見のまとめ

本研究の目的は、中間段階の視覚表象の形成に関わる体制化手がかりを整理し、それらが物体ベースの注意選択に果たす役割を明らかにすることであった。第2部は2つの実験研究から構成された。実験研究1では特に基本的な体制化処理に関わると考えられてきた連結性が初期の空間選択に果たす役割を検討した。連結性と境界特徴の類似性は直交操作され、それぞれによるERPの注意拡散効果が調べられた。結果として、類似性による注意拡散効果は連結性と同じN1潜時に生じた。よって連結性は少なくとも注意の単位の形成においては特別とはいえないことが示された。さらに、特徴類似性による注意拡散効果は連結性の有無とは無関係に生じた。N1における注意拡散効果は、色類似群や非感性的補完物体での拡散と類似している (Kasai et al., 2011; Kasai & Takeya, 2012; 竹谷・河西, 2011)。独立な注意拡散効果という結果は、群化要因が加算的に物体ベースの注意効果を増強するという考えや (Marino & Scholl, 2005), V1神経細胞における注意拡散効果が群化要因により独立であるという知見 (Wanning et al., 2011) と一致する。これらはあらかじめ物体が提示される際の知見であるのに対し、本研究は出現した物体に対する注意拡散も同様であることを示した。

実験研究2では物体ベースの注意における図地手がかりの役割を検討した。図地分離は群化よりも早く生じると仮定されていること (Palmer & Rock, 1994), および図地分離に感度のあるニューロンが視覚皮質に広く分布していることから (Baylis & Driver, 2001), 物体処理における重要性が示唆される。しかしこれまでの物体ベースの注意研究では、図地手がかりの役割は系統的に調べられていなかった。そこで実験1では、これまでよりも明瞭に周囲よりも手前に知覚される物体が空間的注意選択に及ぼす影響を検討した。結果として、これまで

よりも早い P1 で物体ベースの注意拡散効果が認められたことから、十分な図地手がかりは物体の選択が生じる処理段階を早めることが示唆された。さらに、図地に曖昧性のあった刺激を用いた場合 (Martinez et al., 2007a) には認められなかった行動指標の物体ベースの注意効果が認められた。このことから、早い注意拡散は行動レベルの物体選択により強く影響することが示唆された。さらに物体が明瞭に手前に知覚されることが重要なのかどうかを確かめるために実験 2 を行った。実験 2 の手続きは実験 1 とほぼ同様であったが、遮蔽手がかりにより物体が周囲よりも奥に知覚された。結果として、実験 2 では P1 と N1 の両潜時で物体ベースの効果が認められなかった。この結果は、物体が明瞭に手前の領域として知覚されることが重要であるという考えを支持するとともに、周囲よりも奥に知覚される物体の選択には初期の空間選択過程は関わらないことを示した。

1.2 初期の注意選択の媒体となる空間マップに関する ERP モデル

第 1 部で示した注意の単位となる視覚表象と対応する ERP 成分を示すモデル (図 1.2.6) を、実験的研究から得られた知見により更新した (図 3.1.1)。横軸は時間を、図中の長方形は注意の単位となる空間マップの性質を示した。

P1 に反映される図領域の空間マップ

P1 が図領域の二次元空間選択を反映することは先行研究より示されていた (Kasai et al., 2003)。しかし物体選択については、ランダムドットを用いた場合のみでみられ (Valdes-Sosa et al., 1998)、長方形などの幾何学図形を用いた場合では報告されていなかった。これに対し本研究の実験研究 2 は、明瞭に手前に知覚される物体では P1 の物体ベースの注意拡散効果が生じることを示した。

この知見により、図地手がかりに基づき少なくとも 4 種類の空間マップが形成されることが明らかになった。まず、曖昧性なく図として解釈される空間領域として処理された領域では、2 次元の空間マップと物体空間マップが注意選択

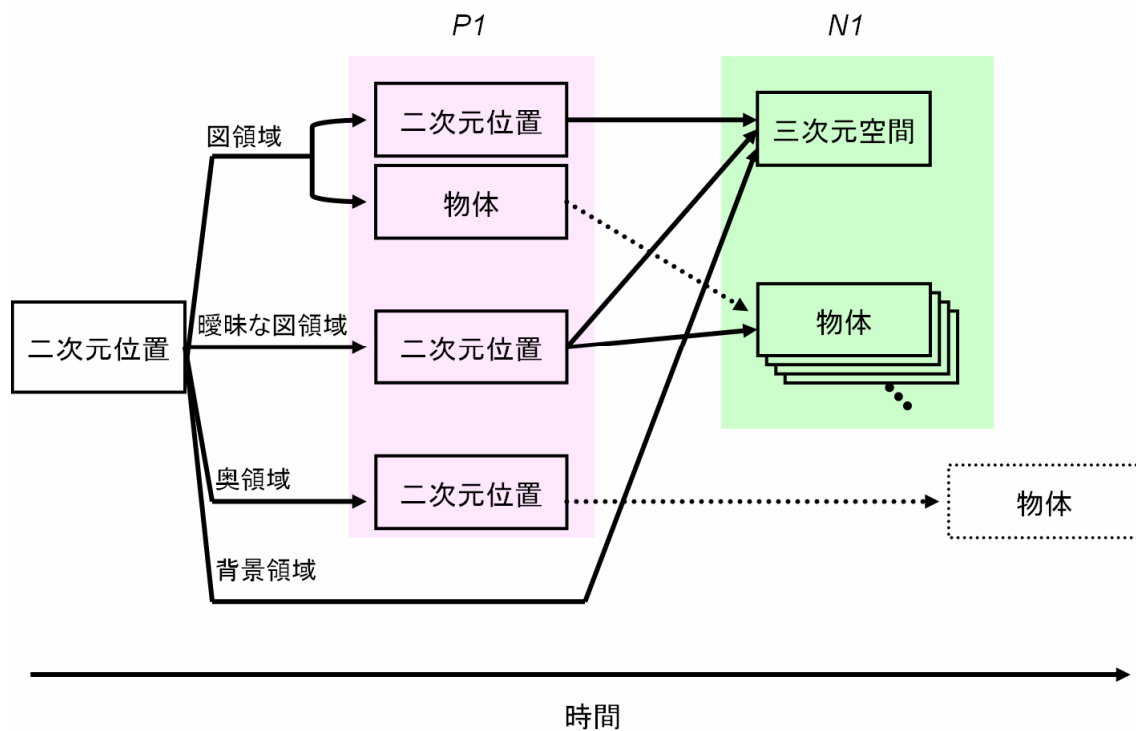


図 3.1.1 初期空間的注意における注意の単位と対応する ERP 成分を示すモデル。図 1.2.6 のモデルを実験研究の知見に基づき修正した。空間領域は図地分離手がかりに基づき図領域，曖昧な図領域，奥物体，背景領域のいずれかに割り当てられる。P1 は明瞭な図領域の空間マップと物体空間マップにおける注意選択を反映する。N1 は三次元空間と物体の選択を反映することが知られていたが，物体空間マップが群化要因によって独立に存在することが新たに示された。

の単位となる (Kasai et al., 2003, 本研究の実験研究 2)。また，P1 空間的注意効果は図地手がかりがさほど明瞭でなくても頑健に示されることから，奥行きが明瞭でない図領域の二次元の空間マップも P1 に生じる。ただし，曖昧性のある物体の場合では物体ベースの空間的注意選択は報告されていない。次に周囲よりも奥にある物体は，二次元の空間的注意効果は示されたものの，物体ベースの注意効果は得られなかった (本研究の実験研究 2・実験 2)。そのため奥にある空間領域 (ただし背景ではない) の選択は P1 に生じるが，物体空間の選択は初

期の処理段階では生じない。最後に背景領域はこれまで P1 空間的注意効果が得られないことがわかっている (Kasai et al., 2003)。これらの知見より、P1 は主に図領域の空間・物体の注意選択を反映することが示唆される。

本研究は知覚される奥行きのもあい性により物体ベースの効果が表れる ERP 成分が異なることを示した。このことは、知覚処理機能の個人差が注意選択過程の違いをも生じさせうることを示唆する。P1 成分の注意効果は明確に図として知覚される領域における空間選択を反映する。そのため、豊富な図地手がかりを持つランドマークなどを用いて初期の空間的注意を検討する場合、図地分離機能に問題がある場合には P1 注意効果が減衰すると考えられる。そのため、例えば参加者群によって初期の空間選択過程が異なるかどうかを検討するような場合には、注意だけでなく体制化機能の群間差が結果に影響しうることに留意する必要があるだろう。

興味深いことに、fMRI を用いた研究からは図地がもあいな物体の空間選択においても V3 や V4 などの P1 の信号源と考えられている皮質領域が関わることを示されている (Müller & Kleinschmidt, 2003)。この知見は、プローブや物体提示後の数秒後には、もあい性によらず初期の視覚処理段階が関わることを示唆する。類似した知見は、V1 における注意拡散効果が刺激提示後 250 ms という、比較的遅い時間から開始することと一致する (Wannig, et al., 2011)。V1 の活動は視覚的意識の必要条件であると考えられることから (Crick & Koch, 1990)、この高次皮質からのフィードバック活動が物体知覚あるいは群化の意識体験の基盤かもしれない。本研究は刺激提示後 200 ms 程度の初期の注意選択に焦点を当てており、より後期の物体選択の理解のためには異なる指標あるいは実験パラダイムを用いた検討が望まれる。

N1 に反映される独立な物体空間マップ

N1 潜時ではこれまで三次元空間を媒体とした空間選択が示されており (Kasai et al, 2003)、より初期 (P1) の段階では分離されていた図と地の二次元空

間マップが統合されている。またこれまでの物体ベースの注意研究により、曖昧性のある図領域の物体を単位とした選択も N1 に生じることが示されている。これらの知見は、N1 では比較的高次な空間表象を単位とした選択が生じること示す。これに対し本研究の実験研究 2 は周囲よりも奥に知覚される物体空間マップにおける選択は N1 に生じないことを明らかにした。したがって、N1 においても図領域が選択的に表象されることが示唆される。この考えは N1 が図領域の活性化 (Figural enhancement) に関わるという知見 (Kasai et al., 2015) と一致する。

さらに本研究は、N1 の物体空間マップが群化要因ごとに独立しているという新たな性質を明らかにした。これまで行動指標において群化要因による加算的な物体ベースの注意効果が得られることは主張されてきており (Marino & Scholl, 2005), また V1 における物体ベースの注意拡散効果が群化要因により独立であることは示されていた (Wanning et al., 2011)。本研究は、これまで ERP を用いた研究により繰り返し示されてきた N1 物体ベースの注意効果にも同様の性質があることを示した。この知見は、群化要因による並列的な空間統合作用を示唆する。物体ベースの空間的注意は、注意を向けた位置を受容野とする神経細胞の活性化が、何らかの信号伝達により物体内のほかの位置を受容野とする神経細胞の活性化を促進することで生じる。これは、より大きな受容野を持つ高次皮質からのフィードバック信号か、同じ水準における興奮性信号の水平伝達のいずれかによってなされと考えられる。群化要因の独立な作用は、このような空間統合が群化要因ごとに干渉しあわず並列的に作用することを示唆する。ただし、実験研究 1 では刺激出現時の注意拡散を検討しており、また図地分離には比較的曖昧さがあった。物体を持続的に提示する場合や図地分離が明瞭な場合を検討することで、初期の物体空間選択における群化要因の役割を包括的に明らかにできるだろう。さらに、これまでの研究で、より遅い N2 潜時に注意拡散が生じ得ることが報告されており (Kasai et al., 2011), その理由の 1 つとして群化が弱かったことが考えられる。すなわち群化の程度により注意拡

散の潜時が異なる可能性は完全には否定できず、更なる検討が必要である。

2 章 物体ベースの注意における知覚的体制化の役割

1 章では、初期の注意選択の単位となる視覚表象に関する ERP モデルを作成した。このモデルを、行動指標を含めた一連の物体選択過程における群化と図地分離の役割という観点から整理した仮説を図 3.2.1 に示した。図の横軸は情報処理段階を表している。図の縦軸は特定の範囲の注意拡散の量を表し、特定の空間領域内での競合 (Desimone & Duncan, 1995) の減少に対応する。

群化と図地分離はいずれも行動指標に反映される物体選択を調整するが、その背景にある初期の空間選択への作用が異なると考えられる。この仮説において群化は、その程度に従ってある情報処理段階における空間統合を促進する。群化の程度と空間統合の強さの関係については繰り返し示されており、連結線の太さ (Kasai, 2010)、色類似性と形類似性、連結性と境界特徴の類似性の組み合わせ (竹谷・河西, 2011, 実験研究 1) などがある。後者は独立な注意拡散を同定しており、空間統合の程度は複数の群化要因による効果の単純な足し算であると考えられる。

一方で図地分離は、「物体」が形成される処理段階を早める作用があると考えられる。これまで N1 の物体ベースの注意効果は繰り返し示されていたが、必ずしも行動レベルにおける物体ベースの注意効果は示されなかった (Martinez et al., 2007a)。本研究の実験研究 2 は類似した実験パラダイムにおいて、より明瞭に図として知覚される物体の場合にはより早い処理段階 (P1) の物体ベースの注意効果および行動レベルの物体ベースの注意効果を示した。より早い処理段階で注意拡散が生じる場合、注意拡散によって調整された信号はより多くの視覚皮質領域に入力されることで行動レベルにおける物体選択が生じやすくなると考えられる。

群化と図地分離が、空間統合の強さと空間統合が生じる処理段階の調整という異なる役割を有するという考えは、階層的な知覚的体制化処理の仮説に一致

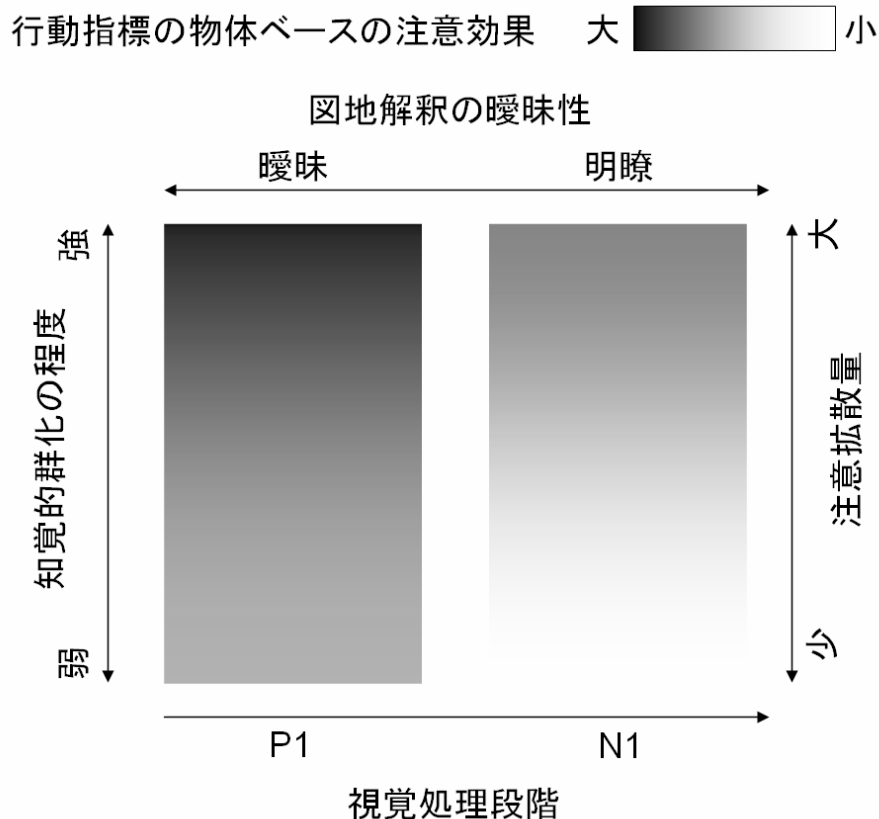


図 3.2.1 物体ベースの注意における体制化手がかりの役割についての仮説。
横軸は視覚処理段階を、縦軸は空間領域の統合の程度を示す。図地分離と知覚的群化は異なる方法で行動レベルの物体選択を調整する。知覚的群化は、ある視覚処理段階における空間統合の程度を調整する。一方で図地分離は、どの処理段階で空間統合が生じるかを調整する。

する。群化が生じるためには、その部品となる視覚要素が図として知覚される必要がある (Palmer & Rock, 1994)。図地が明瞭な場合には視覚要素はすぐに群化する一方で、図地手がかりが豊富でない場合には図地分離処理に多くの時間がかかるため、群化がより後期の段階で生じると考えられる。

今後の課題の一つは、物体ベースの注意と図地分離の関係についてより詳細に検討することである。図地分離の役割はこれまであまり着目されてこなかった。事実、行動指標を用いた物体ベースの注意研究の多くは図地分離に曖昧性

がある刺激を用いていた (Abrahami, 1999; Egly et al., 1994; Moore, 1998; Watson & Kramer, 1999)。図地手がかりを系統的に操作したうえで ERP 空間的注意効果と行動指標を計測してこの仮説を検証する必要があるだろう。さらに実験研究 2 で用いた刺激は 2 次元ディスプレイ上に提示されていたため、両眼視差手がかりによって物体と背景が同じ奥行面にあるように知覚されうる。遮蔽手がかりなどの単眼奥行手がかりは初期の選択過程を調整するとはいえ (Parks & Corballis, 2006)、私たちが日常的にふれあっているような豊富な奥行き情報を持つ物体の選択過程を明らかにするには、奥行手がかりをさらに系統的に操作し検討することが不可欠である。

課題の 2 つ目は、注意による体制化の促進が物体ベースの注意に及ぼす影響を検討することである。本研究は注意選択への知覚的体制化の影響を検討したが、知覚的体制化は一方的に注意を制御するわけではなく、注意によって制御されうる。認知心理学においては、体制化は前注意的、すなわち空間的注意を向ける前から生じると考えられてきた (レビューとして, Treisman, 1985)。しかし、体制化処理が注意により制御されるとする証拠も蓄積されている。例えばカニツァの三角形に代表される錯視輪郭図形に対する体制化処理は、LOC を起源とした N1 振幅に反映されるが (Mullay et al., 2002)、その振幅は空間的注意や数計算による認知的負荷により増減する (竹谷・奥村・河西, 2014; Wu, Zhou, Qian, Gan, & Zhang, 2015)。群化と注意が双方向に作用しあうことは、物体ベースの注意が体制化処理を促すことを示唆する。しかし、物体ベースの注意研究においては、群化による注意焦点の変化と、注意による体制化の促進という循環的な作用を取り入れた注意誘導モデルが提案されているのみであり (Sun, Fisher, Wang, & Gomes, 2008)、さらなる検討が必要である。

3 章 結論

本研究は、注意の単位となる視覚表象の形成に関わる体制化処理を分類し、それらが物体ベースの注意選択に対してどのような役割を果たすのかを検討す

るために2つの実験研究を行った。実験研究1では最も基本的な処理単位の形成に関わると考えられてきた連結性の役割を検討した。結果として、特徴類似性による注意拡散効果は連結性と同じN1潜時に生じた。また特徴類似性による注意拡散効果は連結性の有無とは無関係であった。このことから仮説は支持されず、初期の空間選択においては個々の群化要因が独立に、同じ処理段階の空間統合の程度を線形に増加させることが示された。

実験研究2では群化よりも早い体制化処理とされてきた図地分離の役割を検討した。実験1では明瞭に周囲よりも手前に知覚される物体が空間的注意選択に果たす役割を検討した。結果としてより早い注意拡散効果が同定され、さらに類似した実験パラダイムでは得られなかった行動指標の物体ベースの注意効果が認められ、早い注意拡散は行動レベルの物体選択により強く影響することが示唆された。この実験1の結果が奥行知覚によるものなのか、あるいはこれまでのERP研究と異なる刺激配列を用いたためなのかを明らかにするために物体が遮蔽手がかりにより周囲の領域よりも奥に知覚される物体を用いて実験2を行った。結果としてP1およびN1の両潜時で物体ベースの効果は認められなかった。そのため実験1の知見が奥行知覚によるものであることが確認され、さらに周囲よりも奥に知覚される物体の選択には初期の空間選択過程は関わらないことが示唆された。

これらのERPの知見より、初期の視覚処理における物体ベースの注意選択において知覚的群化と図地分離が異なる役割を持つことが示唆される。知覚的群化の程度はある処理段階における空間統合の程度を調整し、統合の程度は行動レベルの物体選択に反映されるだろう。これに対して図地分離は、視覚処理のどの段階で「物体」が生じるかを調整すると考えられる。より初期の処理段階で注意拡散が生じることで、その影響がより多くの皮質に波及し、結果として行動レベルの物体選択により強く影響すると思われる。このように本研究はERPの初期空間的注意効果を指標とした実験により、知覚的体制化が性質の異なる注意の単位を形成する動的な過程を検討できることを示した。

引用文献

- Albrecht, A. R., List, A., & Robertson, L.C. (2008). Attentional selection and the representation of holes and objects. *Journal of Vision*, **8**, 1–10.
- Avrahami, J. (1999). Objects of attention, objects of perception. *Perception & Psychophysics*, **61**, 1604-1612.
- Baylis, G. C., & Driver, J. (1992). Visual parsing and response competition: the effect of grouping factors. *Perception & Psychophysics*, **51**, 145-162.
- Baylis, G. C., & Driver, J. (2001). Shape-coding in IT cells generalizes over contrast and mirror reversal, but not figure-ground reversal. *Nature neuroscience*, **4**, 937-942.
- Cavanagh, P., Arguin, M., & Treisman, A. (1990). Effects of surface medium on visual search for orientation and size features. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, **16**, 479–491.
- Chou, W. L., & Yeh, S. L. (2012). Object-based attention occurs regardless of object awareness. *Psychonomic bulletin & review*, **19**, 225-231.
- Ciaramitaro, V. M., Mitchell, J. F., Stoner, G. R., Reynolds, J. H., & Boynton, G. M. (2011). Object-based attention to one of two superimposed surfaces alters responses in human early visual cortex. *Journal of neurophysiology*, **105**, 1258-1265.
- Cohen, J., MacWhinney, B., Flatt, M., & Provost, J. (1993). PsyScope: an interactive graphic system for designing and controlling experiments in the psychology laboratory using Macintosh computers. *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*, **25**, 257–271.
- Crick, F., & Koch, C. (1990). Towards a neurobiological theory of consciousness. *Seminars in the Neurosciences*, **2**, 263-275
- De Yoe, E. A., & Van Essen, D. C. (1988). Concurrent processing streams in monkey visual cortex. *Trends in Neuroscience*, **11**, 219–226.
- Desimone, R. (1998). Visual attention mediated by biased competition in extrastriate

- visual cortex. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, **353**, 1245-1255.
- Di Russo, F., Martínez, A., & Hillyard, S. A. (2003). Source analysis of event-related cortical activity during visuo-spatial attention. *Cerebral cortex*, **13**, 486-499.
- Driver, J., & Baylis, G. C. (1998). Attention and visual object segmentation. In R. Parasuraman (Ed.), *The attentive brain*. Cambridge, MA: MIT Press, pp. 299-325.
- Du, X., Chen, L., & Zhou, K. (2012). The role of the left posterior parietal lobule in top-down modulation on space-based attention: A transcranial magnetic stimulation study. *Human Brain Mapping*, **33**, 2477–2486.
- Duncan, J. (1984). Selective attention and the organization of visual information. *Journal of Experimental Psychology: General*, **113**, 501–517.
- Egely, R., Driver, J., & Rafal, R. D. (1994). Shifting visual attention between object and locations: Evidence from normal and parietal lesion subjects. *Journal of Experimental Psychology: General*, **123**, 161–177.
- Flevaris, A. V., Martinez, A., & Hillyard, S. A. (2013). Neural substrates of perceptual integration during bistable object perception. *Journal of Vision*, **13**, 1–25.
- Grill-Spector, K., Kourtzi, Z., & Kanwisher, N. (2001). The lateral occipital complex and its role in object recognition. *Vision Research*, **41**, 1409–1422.
- Han, S., Jiang, Y., Mao, L., Humphreys, G. W., & Gu, H. (2005). Attentional modulation of perceptual grouping in human visual cortex: Functional MRI studies. *Human Brain Mapping*, **25**, 424-432.
- Han, S., Song, Y., Ding, Y., Yund, E. W., & Woods, D. L. (2001). Neural substrates for visual perceptual grouping in humans. *Psychophysiology*, **38**, 926-935.
- Handy, T. C., & Khoe, W. (2005). Attention and sensory gain control: a peripheral visual process? *Journal of Cognitive Neuroscience*, **17**, 1936–1949.
- He, X., Fan, S., Zhou, K., & Chen, L. (2004). Cue validity and object-based attention.

Journal of Cognitive Neuroscience, **16**, 1085–1097.

- Heinze, H. J., Luck, S. J., Mangun, G. R., & Hillyard, S. A. (1990). Visual event-related potentials index focused attention within bilateral stimulus arrays. I. Evidence for early selection. *Electrophysiological and Clinical Neurophysiology*, **75**, 511–527.
- Heinze, H. J., Mangun, G. R., Burchert, W., Hinrichs, H., Scholz, M., Münte, T. F., Gos, A., Scherg, M., Johannes, S., Hundeshagen, H., Gazzaniga, M. S., & Hillyard, S. A. (1994). Combined spatial and temporal imaging of brain activity during visual selective attention in humans. *Nature*, **372**, 543–546.
- Hillyard, S.A., Vogel, E.K., & Luck, S. (1998). Sensory gain control (amplification) as a mechanism of selective attention: electrophysiological and neuroimaging evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, **353**, 1257–1270.
- Kasai, T. (2010). Attention-spreading over hierarchical spatial representations for connected objects. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **22**, 12–22.
- Kasai, T., & Kondo, M. (2007). Electrophysiological correlates of attention-spreading in visual grouping. *NeuroReport*, **18**, 93–98.
- Kasai, T., Moriya, H., & Hirano, S. (2011). Are objects the same as groups? ERP correlates of spatial attentional guidance by irrelevant feature similarity. *Brain Research*, **1399**, 49–58.
- Kasai, T., Morotomi, T., Katayama, J., & Kumada, T. (2003). Attending to a location in three-dimensional space modulates early ERPs. *Cognitive Brain Research*, **17**, 273–285.
- Kasai, T., & Takeya, R. (2012). Time course of spatial and feature selective attention for partly-occluded objects. *Neuropsychologia*, **50**, 2281–2289.
- Kasai, T., Takeya, R., & Tanaka, S. (2015). Emergence of visual objects involves multiple stages of spatial selection. *Attention, Perception, & Psychophysics*, **77**, 441–449.

- Kecskés-Kovács, K., Sulykos, I., & Czigler, I. (2013). Visual mismatch negativity is sensitive to symmetry as a perceptual category. *European Journal of Neuroscience*, **37**, 662-667.
- Khoe, W., Mitchell, J. F., Reynolds, J. H., & Hillyard, S. A. (2005). Exogenous attentional selection of transparent superimposed surfaces modulates early event-related potentials. *Vision Research*, **45**, 3004 – 3014.
- Kramer, A. F., & Jacobson, A. (1991). Perceptual organization and focused attention: The role of objects and proximity in visual processing. *Perception & Psychophysics*, **50**, 267-284.
- Lamme, V. A. F. (1995). The neurophysiology of figure-ground segregation in primary visual cortex. *Journal of Neuroscience*, **15**, 1605–1615.
- Lamme, V. A., & Roelfsema, P. R. (2000). The distinct modes of vision offered by feedforward and recurrent processing. *Trends in neurosciences*, **23**, 571-579.
- Lavie, N., & Driver, J. (1996). On the spatial extent of attention in object-based visual selection. *Perception & Psychophysics*, **58**, 1238-1251.
- Long, G. M., & Toppino, T. C. (2004). Enduring interest in perceptual ambiguity: alternating views of reversible figures. *Psychological Bulletin*, **130**, 748.
- Luck, S. J., & Hillyard, S. A. (1999). The operation of selective attention at multiple stages of processing: Evidence from human and monkey electrophysiology. In M. S. Gazzanniga (Ed.), *The New Cognitive Neuroscience*. Cambridge: MIT Press. pp. 687–700.
- Luck, S. J., & Kappenman, E. S. (2012). ERP components and selective attention. *The Oxford handbook of event-related potential components*, 295-328.
- Marino, A.C., & Scholl, B.J. (2005). The role of closure in defining the “objects” of object-based attention. *Perception & Psychophysics*, **67**, 1140–1149.
- Marr, D. (1982). *Vision: A computational approach*. Freeman: San Francisco.
- Martinez, A., Ramanathan, D. S., Foxe, J. J., Javitt, D. C., & Hillyard, S. A. (2007). The

- role of spatial attention in the selection of real and illusory objects. *Journal of Neuroscience*, **27**, 7963–7973.
- Martinez, A., Teder-Salejari, W., & Hillyard, S. A. (2007). Spatial attention facilitates selection of illusory objects: Evidence from event-related brain potentials. *Brain Research*, **1139**, 143–152.
- Martinez, A., Teder-Salejari, W., Vazquez, M., Molholm, S., Foxe, J. J., Javitt, D. C., Di Russo, F., Worden, M. S., & Hillyard, S. A. (2006). Objects are highlighted by spatial attention. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **18**, 298–310.
- Moore, C. M., Yantis, S., & Vaughan, B. (1998). Object-based visual selection: evidence from perceptual completion. *Psychological Science*, **9**, 104–110.
- Murray, M. M., Foxe, D. M., Javitt, D. C., & Foxe, J. J. (2004). Setting boundaries: Brain dynamics of modal and amodal illusory shape completion in humans. *The Journal of Neuroscience*, **24**, 6898–6903.
- Murray, M. M., Wyllie, G. R., Higgins, B. A., Javitt, D. C., Schroeder, C. E., & Foxe, J. J. (2002). The spatiotemporal dynamics of illusory contour processing: Combined high-density electrical mapping, source analysis, and functional magnetic resonance imaging. *The Journal of Neuroscience*, **22**, 5055–5073.
- Müller, N. G., & Kleinschmidt, A. (2003). Dynamic interaction of object- and space-based attention in retinotopic visual areas. *The Journal of neuroscience*, **23**, 9812–9816.
- Norman, L. J., Heywood, C. A., & Kentridge, R. W. (2013). Object-based attention without awareness. *Psychological science*, **24**, 836–843.
- O'Craven, K. M., Downing, P. E., & Kanwisher, N. (1999). fMRI evidence for objects as the units of attentional selection. *Nature*, **401**, 584–587.
- Palmer, S. E., (2003). Perceptual organization and groupings. In: Kimuchi, R., Behrman, M., Olson, C. R., (Eds), *Perceptual organization in vision*. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates, pp. 3–43.

- Palmer, S., & Rock, I. (1994). Rethinking perceptual organization: The role of uniform connectedness. *Psychonomic Bulletin & Review*, **1**, 29-55.
- Parks, N. A., & Corballis, P. M. (2006). Attending to depth: electrophysiological evidence for a viewer-centered asymmetry. *Neuroreport*, **17**, 643-647.
- Qiu, F. T., & von der Heydt, R. (2005). Figure and ground in the visual cortex: V2 combines stereoscopic cues with gestalt rules. *Neuron*, **47**, 155–166.
- Richard, A. M., Lee, H., & Vecera, S. P. (2008). Attentional spreading in object-based attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **34**, 842–853.
- Saiki, J. (2000). Occlusion, symmetry, and object-based attention: comment on Behrmann, Zemel, and Mozer (1998). *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, **26**, 424–433.
- Scholl, B. J. (2001). Objects and attention: the state of the art. *Cognition*, **80**, 1–46.
- Shomstein, S., & Behrmann, M. (2006). Cortical systems mediating visual attention to both objects and spatial locations. *Proceedings of the National Academy of Sciences, U.S.A.*, **103**, 11387–11392.
- Sun, Y., Fisher, R., Wang, F., & Gomes, H. M. (2008). A computer vision model for visual-object-based attention and eye movements. *Computer Vision and Image Understanding*, **112**, 126-142.
- 竹谷隆司・奥村安寿子・河西哲子. (2014). 錯視的輪郭に特異的な視覚誘発反応は認知的負荷により減衰する. *生理心理学と精神生理学*, **32**, 11-17.
- 竹谷隆司, & 河西哲子. (2011). 物体ベースの注意選択における複数のゲシュタルト要因の効果: 事象関連電位を用いた検討. *信学技報*, **111**, 83-88.
- Treder, M. S. (2010). Behind the looking-glass: a review on human symmetry perception. *Symmetry*, **2**, 1510-1543.
- Treisman, A. (1985). Preattentive processing in vision. *Computer vision, graphics, and image processing*, **31**, 156-177.

- Valdes-Sosa, M., Bobes, M. A., Rodriguez, V., & Pinilla, T. (1998). Switching attention without shifting the spotlight object-based attentional modulation of brain potentials. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **10**, 137–151.
- Valdes-Sosa, M., Cobo, A., & Pinilla, T. (1998). Transparent motion and object-based attention. *Cognition*, **66**, B13-B23.
- Vecera, S. P. (2000). Toward a biased competition account of object-based segregation and attention. *Brain and Mind*, **1**, 353-384.
- Vecera, S. P., & Farah, M. J. (1994). Does visual attention select objects or locations?. *Journal of Experimental Psychology: General*, **123**, 146.
- Wannig, A., Stanisor, L., & Roelfsema, P. R. (2011). Automatic spread of attentional response modulation along Gestalt criteria in primary visual cortex. *Nature Neuroscience*, **14**, 1243-1244.
- Watson, S. E., & Kramer, A. F. (1999). Object-based visual selective attention and perceptual organization. *Perception & Psychophysics*, **61**, 31-49.
- Wegener, D., Galashan, F. O., Aurich, M. K., & Kreiter, A. K. (2014). Attentional spreading to task-irrelevant object features: experimental support and a 3-step model of attention for object-based selection and feature-based processing modulation. *Frontiers in human neuroscience*, **8**, 1-14.
- Wertheimer, M. (1923). Gestalt theory. In Ellis, W. D. (Ed.), *A source book of Gestalt psychology*. London: Routledge & KeganPaul, pp. 1-16. (Originally published in German)
- Wilson, K. D., Woldorff, M. G., & Mangun, G. R. (2005). Control networks and hemispheric asymmetries in parietal cortex during attentional orienting in different spatial reference frames. *NeuroImage*, **25**, 668–683.
- Woldorff, M. G., Liotti, M., Seabolt, M., Busse, L., Lancaster, J. L., & Fox, P. T. (2002). The temporal dynamics of the effects in occipital cortex of visual-spatial selective attention. *Cognitive Brain Research*, **15**, 1–15.

- Wu, X., Zhou, L., Qian, C., Gan, L., & Zhang, D. (2015). Attentional modulations of the early and later stages of the neural processing of visual completion. *Scientific reports*, 5.
- Zhao, J., Kong, F., & Wang, Y. (2013). Attentional spreading in object-based attention: The roles of target–object integration and target presentation time. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 75, 876-887.

謝辞

本論文をまとめるにあたり、ご指導ご鞭撻をいただいた河西哲子先生に心より感謝申し上げます。河西先生には、修士課程より6年間、研究の基本的な考え方から専門的な知識に関することまで、多くのことをご指導いただきました。

教育学院の特殊教育・臨床心理学グループの教授であられた室橋春光先生のご指導・助言は本研究をまとめるために不可欠でありました。感謝を申し上げます。また当時の研究グループの仲間には公私ともに支えていただきました。特に当時博士課程に在籍されていた奥村安寿子さん、山田優士君、現在修士課程在籍の宇野智己君、蒔苗詩歌さん、漆原彩花さんの存在は、研究を進めていく上で大きな励みとなりました。

学位論文審査において、貴重なご指導とご助言をいただいた文学部特任准教授河原純一郎先生、教育学院准教授関あゆみ先生、医学部教授田中真樹先生に心より感謝いたします。