

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	2色覚者のカテゴリカル色知覚と色名応答に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	西田浩聡
Author(English)	Hirotoishi Nishita
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9546号, 授与年月日:2014年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:内川 恵二,金子 寛彦,小林 隆夫,羽鳥 好律,山口 雅浩,吉澤 達也
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9546号, Conferred date:2014/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

東京工業大学大学院総合理工学研究科

博士論文

2色覚者のカテゴリカル色知覚と 色名応答に関する研究

指導教官 内川恵二 教授
平成 25 年 12 月

提出者

専攻 大学院総合理工学研究科
物理情報システム専攻
学籍番号 09D33062
氏名 西田浩聡
E-mail nishita@u.ip.titech.ac.jp

目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 視覚系における色情報処理	1
1.3 2色覚者の分類と特徴	2
1.4 2色覚者の色名応答における手掛かりの過去研究	4
1.5 本研究の目的	7
1.6 本論文の構成	7
第2章 2色覚者の3色覚の色名応答の手掛かり	9
2.1 はじめに	9
2.2 実験 1.1 : 色票条件	9
2.2.1 目的	9
2.2.2 方法	10
2.2.3 結果	13
2.3 実験 1.2 : モニター条件	24
2.3.1 目的	24
2.3.2 方法	24
2.3.3 結果	26
2.4 実験 1.3 : 小視野条件	33
2.4.1 目的	33
2.4.2 方法	33
2.4.3 結果	34
2.5 実験 1.4 : 短時間呈示条件	41
2.5.1 目的	41
2.5.2 方法	41
2.5.3 結果	42
2.6 実験 1.5 : 等輝度条件	50
2.6.1 目的	50

2.6.2	方法	51
2.6.3	結果	51
2.7	考察	56
2.8	まとめ	60
第3章	2色覚者の色記憶カテゴリー	61
3.1	はじめに	61
3.2	実験 2.1 : カスケード選択法による色記憶再生実験.....	61
3.2.1	方法	61
3.2.2	結果	65
3.2.3	考察	90
3.3	実験 2.2 : マッチングによる色記憶の再生実験.....	91
3.3.1	実験方法	91
3.3.2	結果	94
3.3.3	考察	100
3.4	まとめ	101
第4章	近赤外線分光法による色名応答時の皮質活動測定	102
4.1	はじめに	102
4.2	実験 3 : 近赤外線分光法 (NIRS) による色名応答時の皮質活動測定 102	
4.2.1	方法	103
4.2.2	結果	107
4.2.3	考察	113
4.3	まとめ	115
第5章	2色覚者の3色覚的色名応答メカニズム	116
5.1	はじめに	116
5.2	2色覚者の輝度手掛かりによる色名応答	118
5.3	錐体応答による2色覚者のカテゴリーチャンネルの分析	120
5.4	2色覚者の色名応答メカニズム	121
第6章	総合考察	123
6.1	2色覚者の3色覚的色名応答に必要な手掛かり	123
6.2	色記憶	123

6.3 色名応答時の皮質活動	124
6.4 2色覚者の色覚メカニズム	124
第7章 結論	126
謝辞	127
参考文献	128
研究業績	132

第 1 章

序論

1.1 はじめに

我々をとりまく生活環境の中には、無数の色が存在している。我々は 100 万色以上以上の色を弁別できると言われている。つまり、私たちの住む世界は、さらに多くの色から成り立っているとも考えられる。しかし、色名を 100 以上も知っている人は滅多にいない。それは、私たちが弁別できる色のすべてに色の名前を付けたりはせずに、ある範囲の色を 1 つのカテゴリにまとめているからである。たとえば、濃い緑、薄い緑、明るい緑など、違う色と弁別できるこれらの色に対して、まとめて「緑」というカテゴリを用いている。日常生活において、ものの特徴を捉える時に赤い服、茶色の鞆のように色名カテゴリを用いている。このように人間は色をいくつかのカテゴリに分類して知覚している [1][2]。視覚系における色の役割として、物体の弁別(検出)、物体形状の抽出、物体認識などがある [3]。これらの役割の中で色による弁別や検出について調べた心理物理実験に関してはこれまで様々な報告がなされており、弁別や検出を担う色覚メカニズムの特性が明らかになってきた。その一方で、カテゴリカル色知覚に関しては未解明な部分が多く、どのように色名応答を行なっているかについてはあまりわかっていない。また、色名応答では錐体を欠損し、赤緑方向を弁別できない 2 色覚者も 3 色覚者と類似した色名応答を行うことができる。2 色覚者の色覚メカニズムについては 3 色覚者と比べ、研究が少なく、明らかになっていない点が多い。そこで本研究では、この 2 色覚者の色名応答メカニズムに焦点を当てる。

1.2 視覚系における色情報処理

過去の研究により明らかになっている色情報処理の流れは以下の通りである。色情報処理はまず網膜上で波長に対する感度の異なる L 錐体、M 錐体、S 錐体の 3 種類の

錐体による光の吸収とその電気信号への変換によりはじまる。そして次の段階は ganglion cell で異なる錐体の入力線形統合される。例えば red-ON, green-OFF opponent cell は L 錐体の興奮性入力を中心に、M 錐体の抑制性入力を中心に持つ。blue-ON, yellow-OFF opponent cell では、同一の広がりを持つ S 錐体の興奮性入力と L 錐体と M 錐体の和の抑制性入力から構成される [4]。これらにより cone-opponent な 3 種類の信号に変換される [5][6]。さらに、cone-opponent チャネルよりも高次のマルチプルチャネルが存在することが多くの心理物理学的研究により示唆されている [7][8]。さらに高次の色覚メカニズムにおいてカテゴリカル色知覚に対応した生理的メカニズムが存在すると考えられている。心理物理学的にも生理学的にも、cone-opponent レベルまでの色覚処理に関してはかなりの理解が進んでいる。しかし、マルチプルチャネル以降の色情報処理については未解明の部分が多くある。V1 や V2 にある色選択性細胞のチューニング色方向は LGN にあるニューロン [6] のように cardinal 軸方向に集まらず、様々な方向に広く分布することが報告されている [9][10]。V1 や V2 のニューロンの色選択性は様々な色相範囲を符号化するため、マルチプルチャネルの特性と一致する。しかし、V1 や V2 のニューロンと心理物理学的な実験結果から報告されるマルチプルチャネルには異なる色度特性もみられる。過去の心理物理学的研究においては、色弁別を担うマルチプルチャネルの色相選択バンド幅が 60° であることが示唆されている [11][12]。一方、生理学的研究においては、V1 や V2 にある多くのニューロンが 60° よりも狭い色相選択性を持つことが示されている [9][10]。このように心理物理学的研究と生理学的研究において不一致な点があり、マルチプルチャネル以降の色情報処理については未解明な部分が多くある。

1.3 2 色覚者の分類と特徴

色覚正常者である 3 色覚者は 3 種類の錐体の応答を基に上記のような色情報処理を行っており、分光感度、色弁別や等色などの基本的な特性から、色の見え方、カラーネーミングや色の記憶などの認識レベルの特性に至るまで様々な面から調べられていて、錐体からそれに続く色覚メカニズムが明らかにされてきている [13]。一方、錐体の何種類かを欠損した色覚異常者については、等色や色弁別、分光感度などの基本的な特性はよく調べられている [13][14]。しかし、色の見え方やカラーネーミング、皮質活動などの特性を実験的に調べた研究は 3 色覚者に比べると少なく、色覚異常者が

日常の環境において色をどのように見て、認識しているかについてはまだ明らかになっていない点が多い。色覚異常者の多くは1種類の錐体を欠損している2色覚者がほとんどで、日本人男性の約5%存在している。

1種類の錐体を欠損した先天的色覚異常者は1型2色覚者(L錐体欠損)、2型2色覚者(M錐体欠損)、3型2色覚者(S錐体欠損)に分類され、それぞれ、M錐体とS錐体、L錐体とS錐体、L錐体とM錐体の2種類の錐体から2次元の色空間を形成し、それに基づいて色を知覚している。そのため2色覚者の色弁別能は3次元の色空間を持つ3色覚者に比べると劣り、弁別できない色が存在することになる。

1, 2型2色覚者は、それぞれM錐体とS錐体、あるいはL錐体とS錐体しか持っていないため、cone-opponentチャネルのうち赤緑(L-M)チャネルが無く、輝度(MあるいはL)チャネルと黄青(M-SあるいはL-S)チャネルで色を見ている、つまり、明るさと黄青の色みは知覚できるが、赤緑の色みは知覚できないと考えられている。2色覚者に弁別できない色をx-y色度図に示すと、図1.1のように混同色線と呼ばれる直線を引くことができ、2色覚者はこの直線上の色を弁別できない[13][15-17].

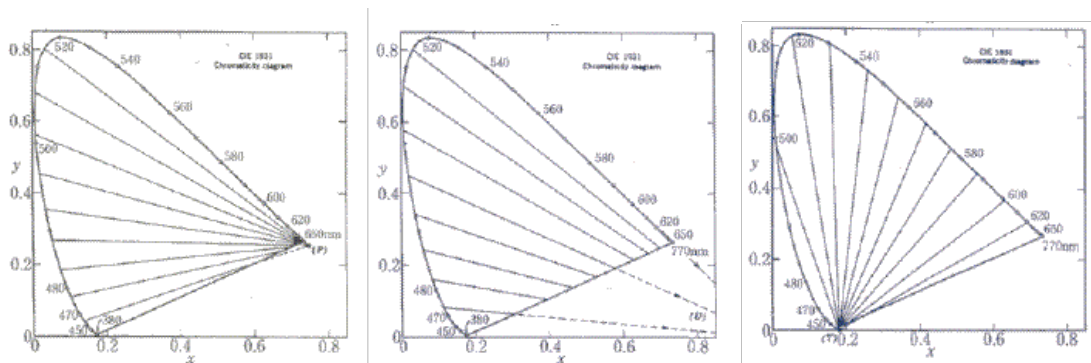


図 1.1 2色覚者の混同色線 (左:1型2色覚, 中:2型2色覚, 右:3型2色覚)

ところが、日常生活では、1, 2型2色覚者も3色覚者と同様に赤や緑の色名を使うことが知られ、実験的にも赤、緑の色名を使い分けていることが報告されている[18][19]. Montag and Boynton[20]は2色覚者の用いる色名について詳しく調べるために、OSA色票を刺激として用い、自由な色名によるカテゴリカルカラーネーミング実験を行った。その結果を図1.2に示す。図は横軸をj軸、縦軸をg軸とした平面に、各色名応答の中心座標をプロットしたものである。上図は1型2色覚者、下図は2型

2色覚者の結果を示し，シンボルの違いは被験者の違いを示す．2色覚者も3色覚者と同様に，11基本色名（red, green, blue, yellow, brown, orange, purple, pink, white, black, gray）を使用し，さらに基本色名の方がそれ以外の色名を使用した場合よりも一致度が高く，応答時間が短かった．さらに，基本色名で呼ばれた色票の重心（セントロイド）は3次元色空間全体に広がって分布することを明らかにした．この結果から2色覚者は日常的な視覚環境では3色覚者とほとんど同様に色名を用い，カテゴリカル色知覚を行っていることがわかった．

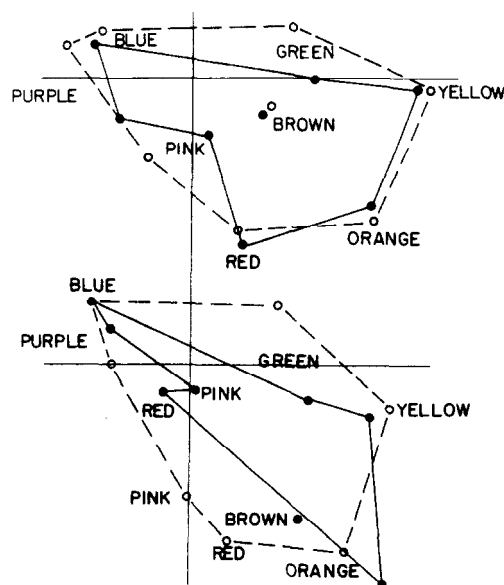


図 1.2 Montag and Boynton 1987 [20]の結果 色名応答のセントロイド，上図は1型2色覚者の結果，下図は2型2色覚者の結果を示す．シンボルの違いは被験者の違いを示す．

1.4 2色覚者の色名応答における手がかりの過去研究

2色覚者が2錐体のみから形成される輝度チャンネルと1種類の色チャンネルのみで色を見ているのであれば，輝度チャンネルと2種類の色チャンネルで色を見ている3色覚者と同様に知覚することはできず，色名も3色覚者と同様にはならないはずである．2色覚者の用いる色名が3色覚者のものと類似しているということは，2色覚者がこれらのチャンネル応答以外の何らかの手がかりを用いて，色名を答えていると考えられる．このような手がかりとして，これまでに，桿体の寄与[20-22]，残存錐体の影響[23][24]，非線形擬似的赤緑反対色チャンネルの存在[25]などが提案されてきた．

桿体の寄与については，Montag and Boynton[20]が桿体を明順応により飽和させる

ことで桿体の影響を排除した条件でカテゴリカルカラーネーミングを行った。その結果を図 1.3 に示す。図の見方は図 1.2 と同様である。2 色覚者は明順応後のカテゴリカルカラーネーミングにおいて、基本色名で呼ばれた色票のセントロイドが黄青方向の線上に潰れる傾向を示した。この結果から 2 色覚者は明順応により赤緑方向の区別ができなくなることを示し、2 色覚者は桿体の寄与により 3 色覚的なカラーネーミングを行っていることを示唆した。しかし、後日、Montag[23]はこの実験では桿体ではなく、残存錐体が寄与したことを示し桿体の寄与を訂正している。しかし、薄明視環境下では 2 色覚者 3 色覚者共に色の見えには桿体が寄与していることが報告されている[22]。そのため、桿体の色の見えへの寄与を否定することはできない。

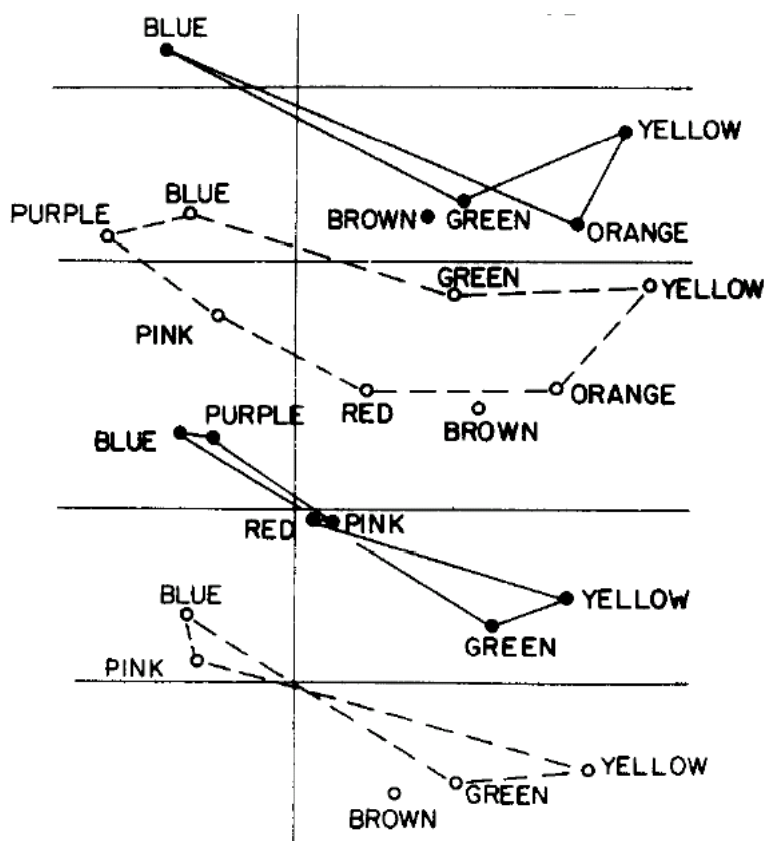


図 1.3 Montag and Boynton 1987 [20]の結果 色名応答のセントロイド，上図は 1 型 2 色覚者 2 名の結果，下図は 2 型 2 色覚者 2 名の結果を示す。シンボルの違いは被験者の違いを示す。

残存錐体の影響については、Nagy ら[24]が桿体を飽和させたカラーネーミング実験で桿体の影響を排除しても、刺激のサイズが大きいと 2 色覚者は 3 色覚者のカラーネ

ーミングを行うことを示し、桿体の寄与を否定した。さらに、小視野では3色覚者のカラーネーミングが出来なくなることを示し、周辺視野に存在する残存錐体の影響を示唆した。その他の研究でも、1, 2型2色覚者の多くは刺激サイズが大きいと（およそ8°以上）、ある程度赤緑方向を弁別できることが報告されている[17-19, 24]。Montag[23]は小視野、短時間、高明順応の刺激呈示条件下でカテゴリカルカラーネーミング実験を行った。その結果を図1.4に示す。グラフの横軸は刺激呈示条件を示し、縦軸は各セントロイド間の距離を示し、シンボルの違いは被験者の違いを示す。2色覚者は小視野、また短時間呈示により3色覚的カラーネーミングができなくなることを示し、存錐体がカラーネーミングに寄与するには長時間、大視野の足し合わせが必要なことを示した。

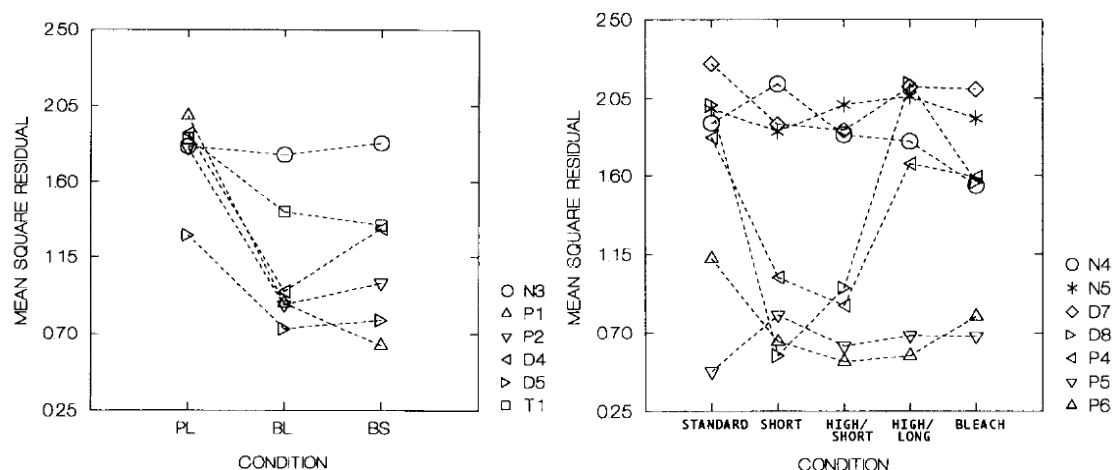


図1.4 Montag 1994 [23]の結果 色名応答の各色セントロイド間の距離の平均 横軸は刺激呈示条件（PL:長時間呈示大視野条件 BL:短時間呈示大視野条件 BS:短時間呈示小視野条件 STANDARD:中明順応長時間呈示条件 SHORT:中明順応短時間呈示条件 HIGH/SHORT: 高明順応短時間呈示条件 HIGH/LONG: 高明順応長時間呈示条件 BLEACH:桿体飽和条件）、シンボルの違いは被験者の違いを示す（N:3色覚者 D:2型2色覚者 P:1型2色覚者 T:3型2色覚者）。

また、Wachtlerら[25]は遺伝子検査により1種類の錐体が完全に欠損している2色覚者にカラーネーミング実験を行った。その結果、完全欠損の2色覚者でも赤と緑の色名を使用することを示した。さらにカラーネーミングの結果に420nm~450nmの波長に対し、青だけでなく赤の応答があることや、長波長で赤と黄の応答が混合することから、L錐体またはM錐体から非線形変換により擬似的な赤緑チャンネルを作る

モデルを提案した。これらのように 2 色覚者が 3 色覚的カラーネーミングを行うための手がかりとしていくつかの手掛かりが挙げられている。

1.5 本研究の目的

前述したように、2 色覚者が 3 色覚的カラーネーミングを行うための手がかりとしていくつかの可能性が挙げられている。しかし、多くの研究において 2 色覚者の結果は個人差が大きいいため、被験者ごとに異なる手がかりを使っている可能性があり、どの手がかりを実際に使っているか、あるいはこれ以外の手がかりを使っているかについてはまだ十分に調べられていない。たとえば、明所視、小刺激、短時間呈示のような桿体や残存錐体の影響を排除した刺激呈示条件では、2 色覚者のカラーネーミングはかなり劣化し、3 色覚者のカラーネーミングとは異なる。それでも赤緑の応答を行う 2 色覚者もいることから、2 色覚者は桿体や残存錐体以外の手がかりを用いている可能性もある。また、2 色覚者は欠損した錐体の位置に欠損していない錐体が置き換わるので、刺激条件によっては錐体検出感度が 3 色覚者よりも良くなるという報告もあることから [26]、3 色覚者が使うことができない手がかりを使っている可能性もある。あるいは、2 色覚者は輝度チャンネルと 1 種類の色チャンネルで色を 2 次元的に知覚していたとしても、表面の明るさ（明度）と色み（色度）を組み合わせると、3 色覚者の色名に対応させているという可能性もある。そこで本研究ではこれまでに挙げられている手がかりを含め、2 色覚者がどのような手がかりを使い 3 色覚的カテゴリカルカラーネーミングを行うか、またこれらの手がかりを色情報処理のどの段階で使われるのかを明らかにすることを目的とする。

2 種類の錐体を持つ 2 色覚者の 3 色覚的カテゴリカルカラーネーミングを行うメカニズムを調べることはこれまで明らかになっていない部分の多い、3 種類の錐体を持つ 3 色覚者のカテゴリカル色知覚について調べることにもつながると考えられる。

1.6 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第 1 章では、研究の背景と目的を述べた。

第 2 章では、刺激呈示条件を制限したカラーネーミング実験を行い、過去に挙げられた手がかりを含め、2 色覚者はどのような手がかりを使って 3 色覚的カラーネーミ

ングを行うかについて調べた実験について述べる。2色覚者は日常環境と同様に色票を自由に観察できる条件では各色名応答カテゴリーが分かれ、3色覚的カラーネーミングを行ったが、CRTモニターに刺激を呈示したり、小視野や短時間呈示にすることで赤緑方向の色名の区別が劣化した。さらに刺激を等輝度呈示することで完全に色名を混同することが示された。これらの結果から、2色覚者は色票の輝度（明度）を重要な手がかりとし、3色覚的カテゴリカルカラーネーミングを行うことを示唆する。

第3章では、カテゴリーチャンネルを反映していると考えられる色記憶について調べた実験について述べる。2色覚者はカラーネーミングによる色名カテゴリーと色記憶の広がりが異なっていた。また、色の記憶のマッチング結果は明度方向、記憶における色のシフトは黄青方向では3色覚者と同程度だが、赤緑方向では2色覚者の方が大きかった。これらの結果から、2色覚者は黄青方向、明度方向では3色覚者と同様なカテゴリーチャンネルを持つが、赤緑方向では異なるカテゴリーチャンネルを持つことを示唆する。

第4章では、カラーネーミング時の皮質活動を計測した実験について述べる。色覚異常者は第1章と同様にモニターに刺激を呈示すると3色覚者よりも赤緑方向の区別が劣化し、小視野、短時間呈示にすることでさらに赤緑方向の区別が劣化した。しかし、皮質活動では色覚異常者と3色覚者間に違いは計測されなかった。よって本章では計測できなかった解像度や部位に皮質活動の違いがあると考えられる。そこで色覚異常者と3色覚者は色覚メカニズムにおいて高次レベルに関係する皮質活動の違いがあることを示唆する。

第5章では、第2～4章までの実験結果から、2色覚者が3色覚者的カラーネーミングを行うメカニズムについてまとめる。

第6章では、本研究から得られた結果を総合的に考察する。

第7章では、本研究から得られた主な成果をまとめる。

第 2 章

2 色覚者の 3 色覚的色応答の手掛かり

2.1 はじめに

第 1 章で述べたように，2 色覚者は何らかの手掛かりを使って，3 色覚的カラーネーミングを行なっていると考えられる．手掛かりとして，第 1 章で挙げたようにいくつかの可能性はあるが，2 色覚者が実際にどの手掛かりを用いているか，あるいはこれら以外にも手掛かりがあるかについてはまだ十分に調べられていない．そこで，本章では刺激呈示条件を制限したカラーネーミング実験を行うことで過去の研究で挙げられた桿体や残存錐体の影響を調べ，また表面の明るさの違いの影響を調べる．刺激呈示条件として実際の色票を日常の環境と同じように被験者が自由に観察できる色票条件（実験 1.1）をコントロール条件とした．テスト条件としては，CRT モニター上に色票刺激をシミュレートし，それを標準視野サイズと時間制限なしで観察するが，被験者が色票を自由に観察できないモニター条件（実験 1.2），桿体と残存錐体の影響を除去するために中心小窩のみに刺激を呈示する小視野条件（実験 1.3）および短時間呈示条件（実験 1.4），さらに明るさの手がかりを除去するために等輝度条件（実験 1.5）を設定した．

2.2 実験 1.1：色票条件

2.2.1 目的

実験 1.1 では，コントロール条件として，OSA 色票を実験刺激として用い，日常環境と同じように被験者が自由に色票を観察できる条件でカラーネーミング実験を行い，過去の研究で報告されたように 3 色覚者と類似したカラーネーミングを行うかを調べることを目的とする．

2.2.2 方法

[装置]

実験は図 2.1 のように暗幕で覆われた暗室ブース内(奥行き 140cm, 幅 91cm, 高さ 180cm)で行われた. 照明は暗室ブース内上部から液晶プロジェクター (EPSON マルチメディア・プロジェクター ELP-7250) で作り出された. 照明光の色度は D65 (色度は $x=0.313, y=0.329$) 白色光で, テスト色票面での照度は $500lx$ である. 照明光は色票及びその周囲 (横 52cm×縦 40cm) を照らした.

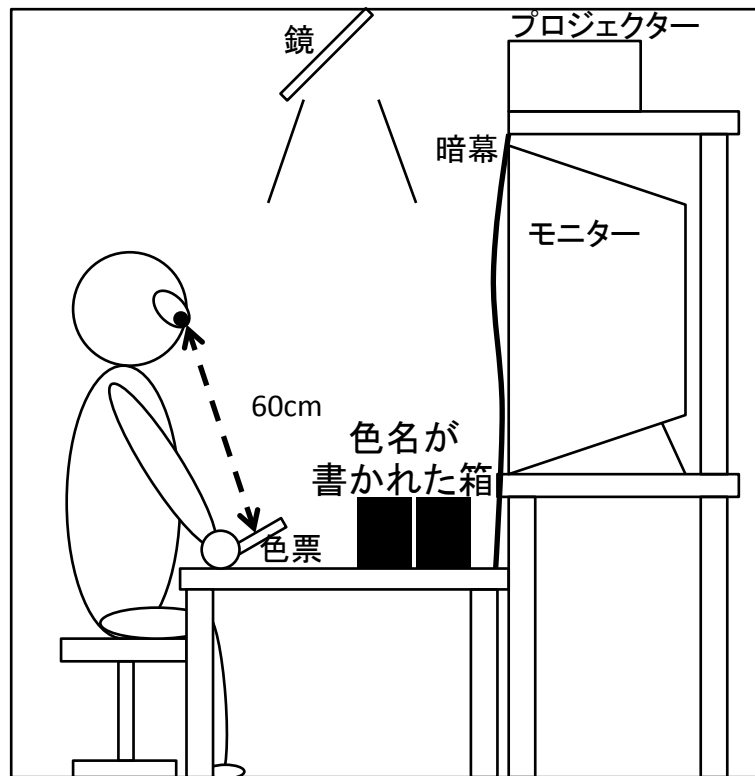


図 2.1 実験 1.1 での実験装置の概要

[刺激]

実験刺激には OSA 色標本[13]から全 424 枚の色票を使用した. 図 2.2 (a) に OSA 色空間の模式図を, 図 2.2 (b) に各明度面における色票を示す. OSA 色空間では L 軸が明度方向, j 軸が黄青方向, g 軸が赤緑方向に対応している. OSA 色空間の特徴は, L 軸方向を $\sqrt{2}$ 乗した OSA 色空間内のユークリッド距離が色差に対応し, 均等色空間になっていることである. したがって, OSA 色空間内で刺激の色を定義することによ

り，見えの色差を基準として利用することができる．

テスト色票は中央に直径 **2.5cm** の円形の穴の空いた正方形 (**6cm×6cm**) の灰色 Judd 修正色度 ($x'=0.340, y'=0.377$) の紙で覆われ，被験者はこの穴を通して色票を観察する (図 2.3)．テスト色票が置かれた机上面にはこれと同じ灰色の紙が貼られている．テスト色票の輝度範囲は **3.28～78.6cd/m²** だった．

[手続き]

被験者は実験ブース内に入り，まず 3 分間，照明光下で明順応する．その後，テスト色票が実験者によって 1 枚ずつ机上に置かれ，被験者はそのテスト色票を手を持って自由に観察する．視距離は約 **60cm** であるが自由に動かすことができる．机上には **11 基本色名** (赤，緑，青，黄，茶，オレンジ，紫，ピンク，白，黒，灰) がそれぞれ書かれた **11 個の小箱** が置かれ，被験者はテスト色票をその中の一つの箱に入れることでカテゴリカルカラーネーミングを行う．観察時間には制限はない．ほとんどの被験者は **5 秒以内** に応答した．**OSA 色票 424 枚** の試行を **1 セッション** とし，被験者 1 名で **2 セッション** を行った．

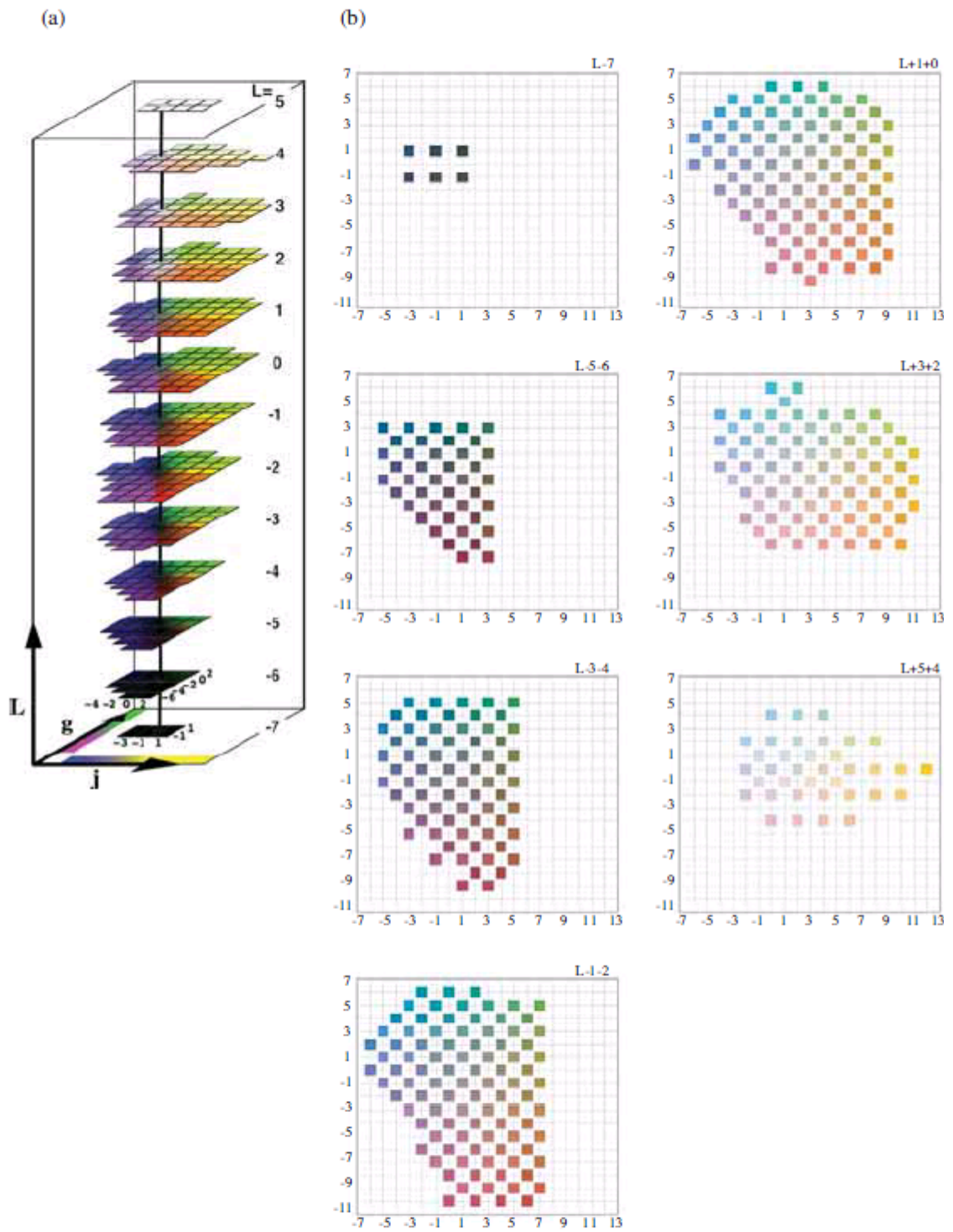


図 2.2 (a) OSA 色空間の模式図 (b) OSA 色空間の各明度における色票

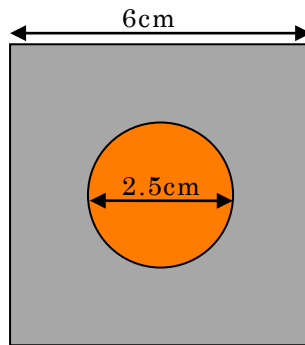


図 2.3 刺激の概要

[被験者]

被験者は3色覚者2名（HN0, HM0），1型2色覚者3名（KS1, AY1, YY1），2型2色覚者2名（HH2, TN2）である。被験者は全員男性で，視力または矯正視力正常である。3色覚者は石原式色覚検査票で色覚正常を確認した。2色覚者は石原式色覚検査票，アノマロスコープ，遺伝子検査によりその型を判別した。各被験者名のついている最後の数字0, 1, 2は被験者の色覚の方を表しており，0が3色覚者，1が1型2色覚者，2が2型2色覚者を示す。

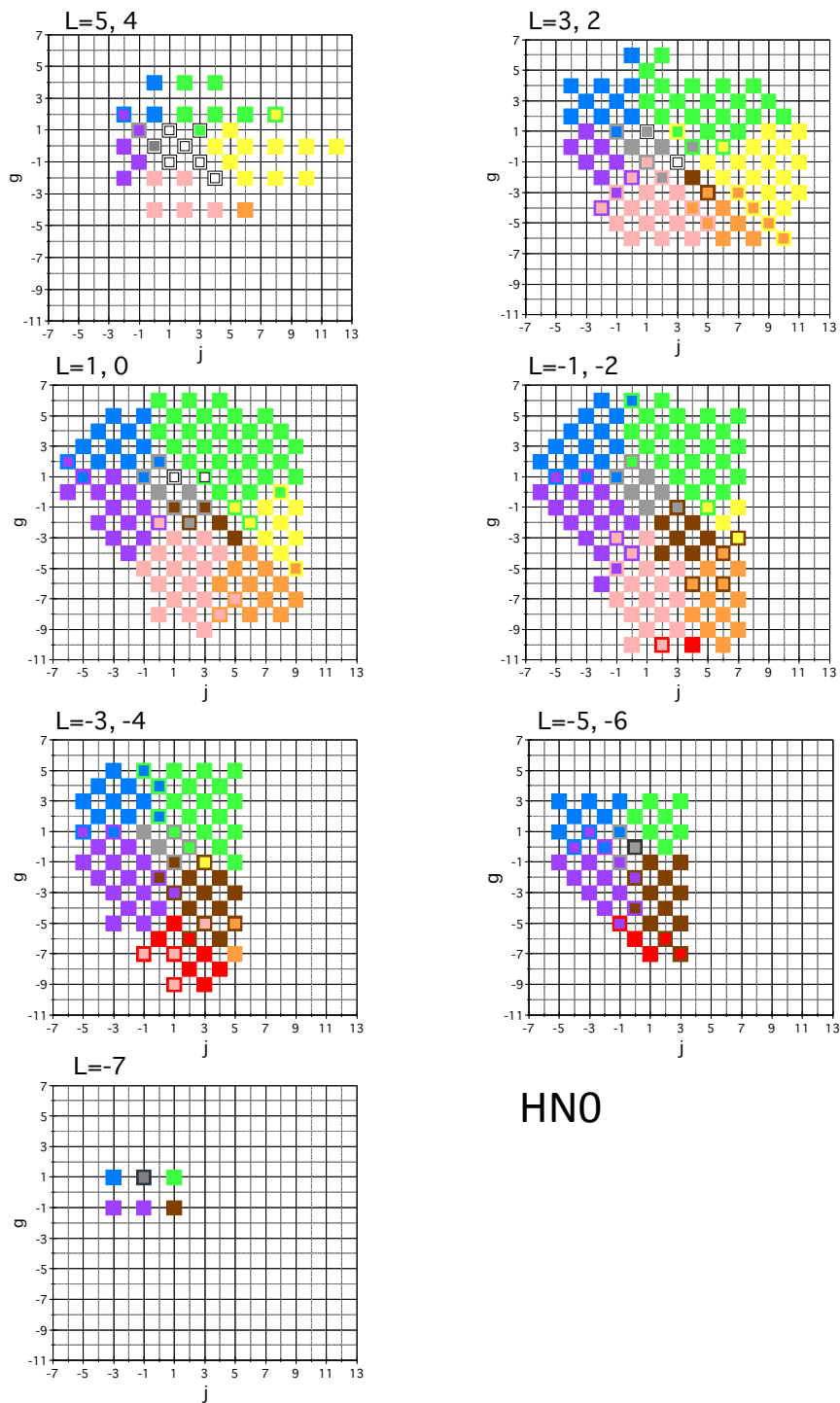
2.2.3 結果

実験結果をOSA色空間上で図2.4～2.10に示す。(j, g)の奇数番号組上の点がL値が奇数，偶数番号組上の点がL値が偶数の色票に対応している。シンボルの色が応答色名を表し，各点の外側の大シンボルが1回目，内側の小シンボルが2回目の応答結果を示し，両者は重ねて示されている。

まず，3色覚者の色名応答は過去の研究[13]とよく一致し，色名毎のカテゴリーがまとまった領域を形成している。また，2名の被験者間でも類似した結果を示した。

次に1型2色覚者KS1は黒の色名が使われず，色名の配置は3色覚者と多少異なっているが，2色覚者でも各色名カテゴリーは固まって現れた。g軸に沿った赤緑方向の色票に対しても，緑，灰，ピンク，赤のように色名で区別している。1型2色覚者AY1は3色覚者や1型2色覚者KS1と異なり，各色名カテゴリーがg軸に沿って広がり，j軸方向のみ区別している傾向だった。1型2色覚者YY1は黒の色名が使われず，g軸に沿った赤緑方向の色票に対し，ピンクと灰色，緑と赤のように区別して

いる傾向はあるが、3色覚者や1型2色覚者 KS1 と比べ、色名カテゴリーが混ざる結果だった。2型2色覚者 HH2 は3色覚者とは異なるが、g 軸に沿った色票に対して、緑、灰、ピンク、赤のように色名で区別している。2型2色覚者 TN2 は黒の色名が使われなかったが、各色名カテゴリーがまとまった領域を形成し、3色覚者と類似した傾向だった。



HNO

図 2.4 3色覚者 HN0 のカラーネーミング結果

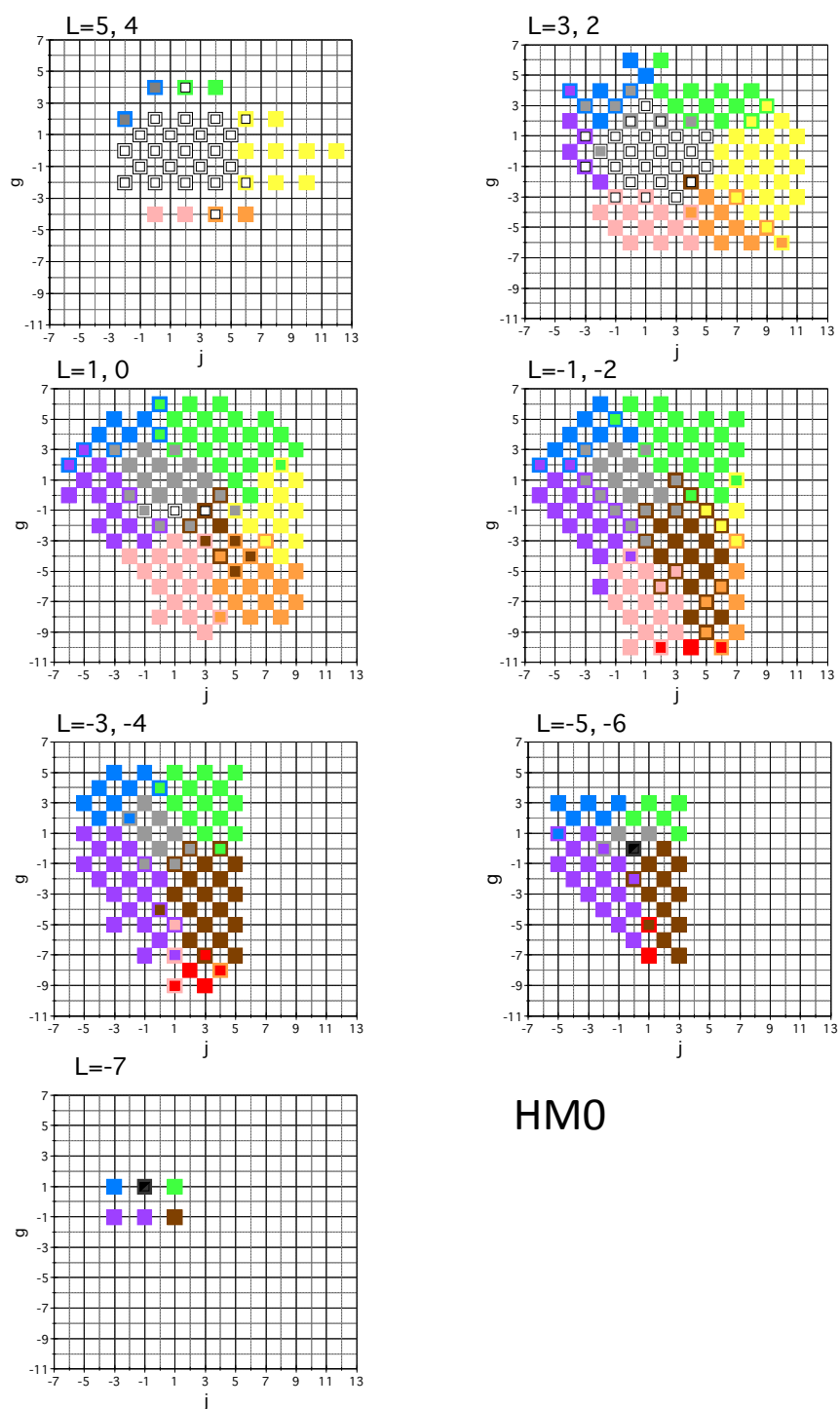


図 2.5 3色覚者 HM0 のカラーネーミング結果

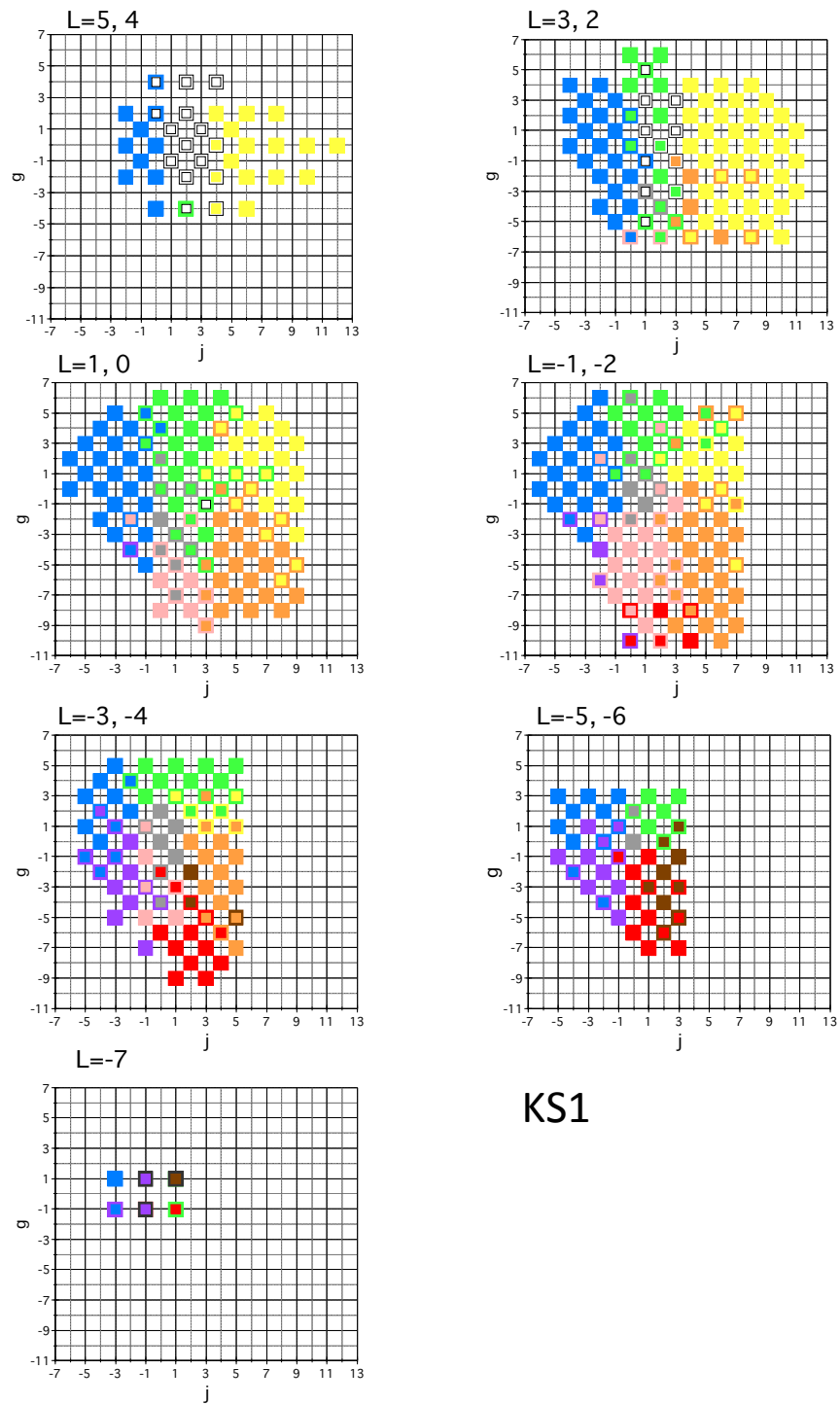


図 2.6 1 型 2 色覚者 KS1 のカラーネーミング結果

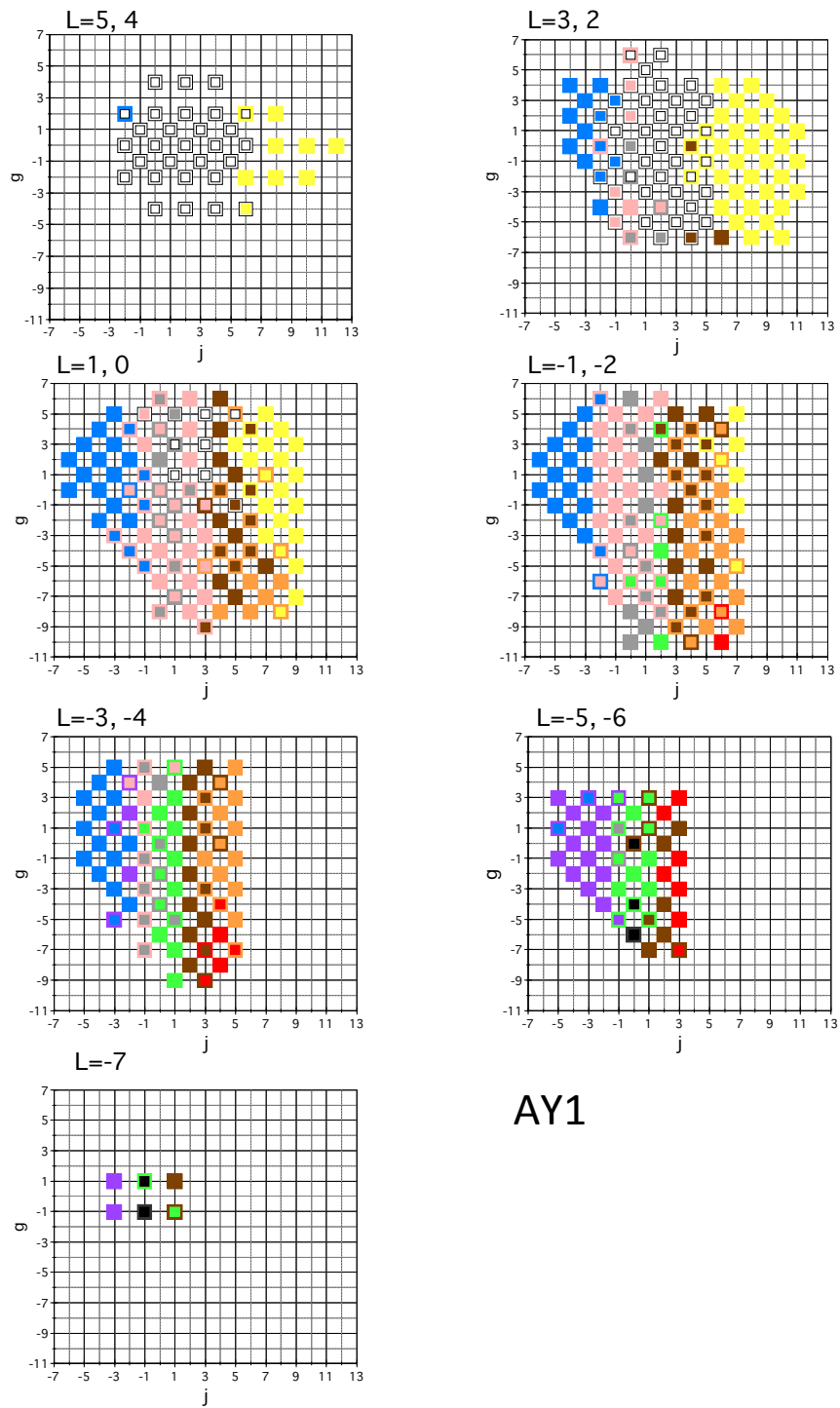


図 2.7 1 型 2 色覚者 AY1 のカラーネーミング結果

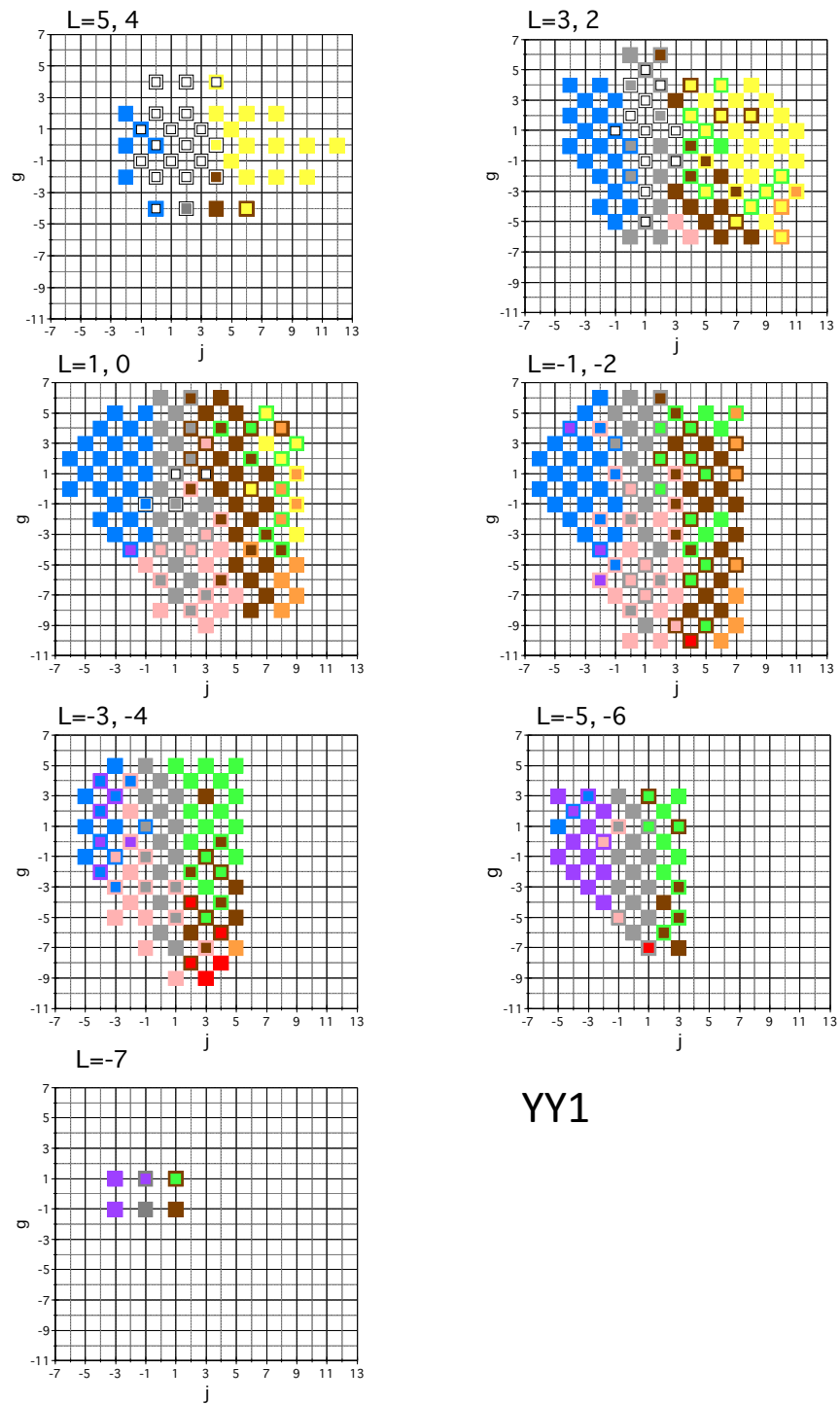


図 2.8 1 型 2 色覚者 YY1 のカラーネーミング結果

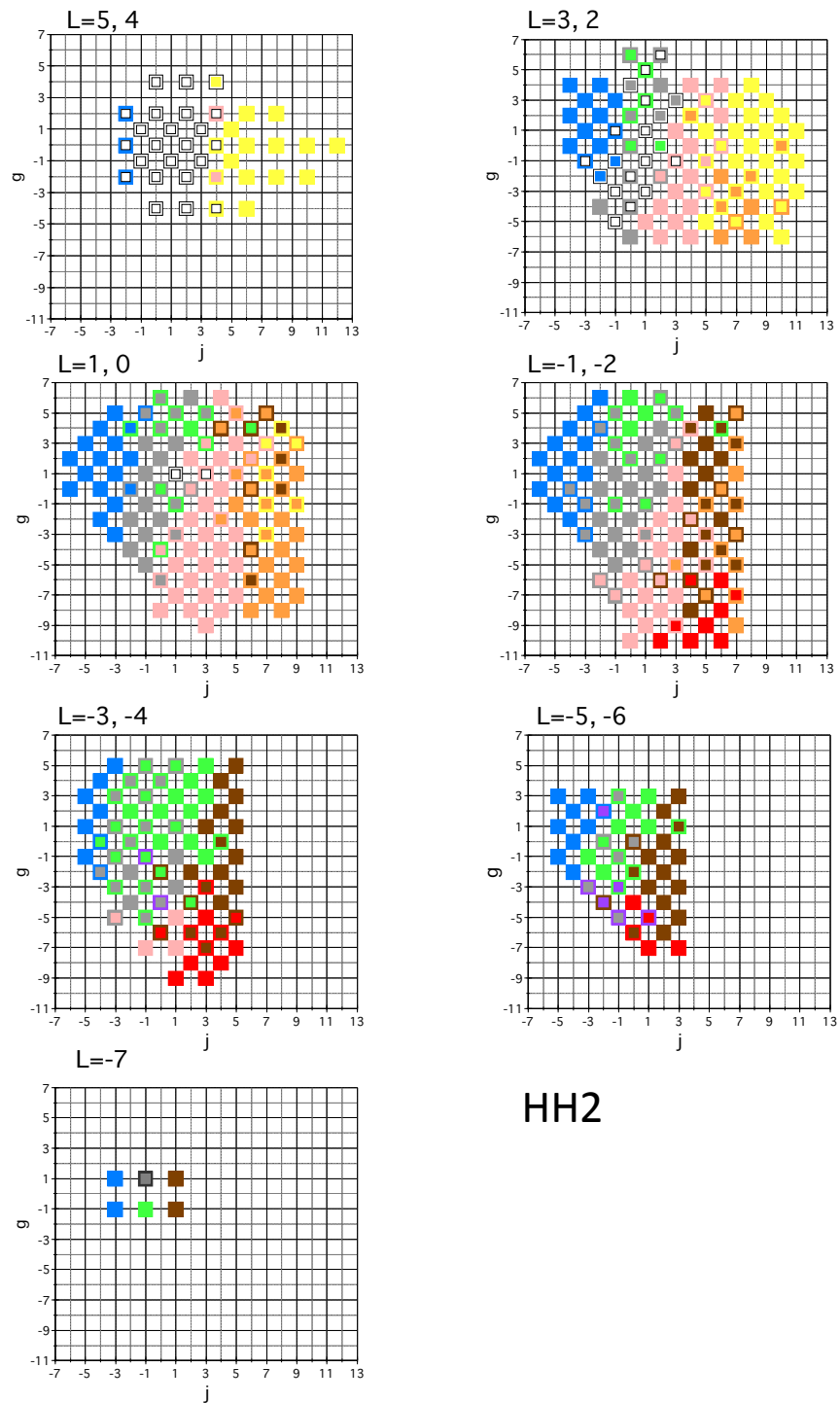


図 2.9 2 型 2 色覚者 HH2 のカラーネーミング結果

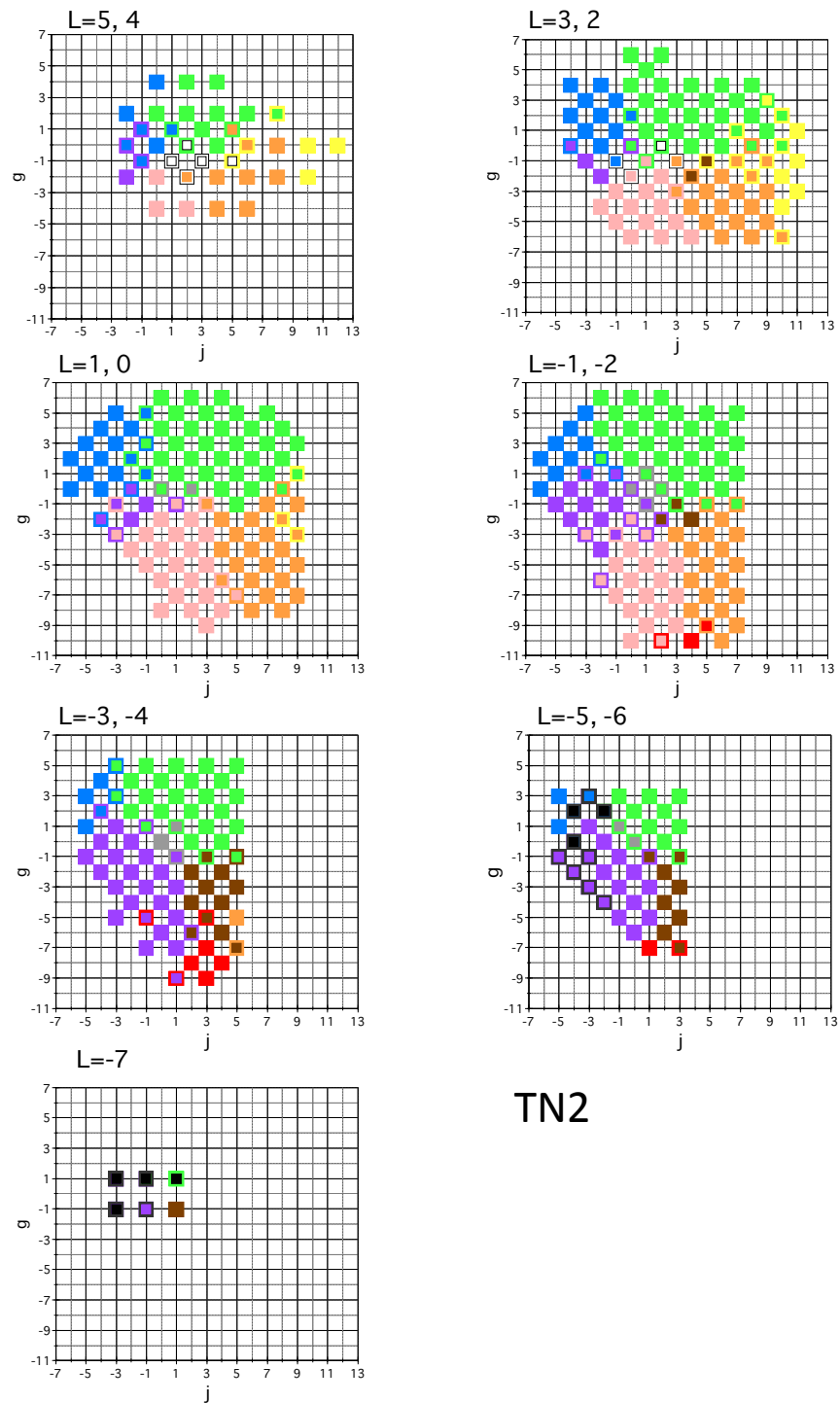


図 2.10 2型2色覚者 TN2 のカラーネーミング結果

次に色名応答がどのように j - g 平面, j - L 平面上に分布しているかを見るため, 色名
 応答結果のセントロイド (重心) を被験者ごとに図 2.11, 2.12 に示す. セントロイド
 とは, ある色名を与えた色票の L , j , g 値をその色名の応答回数の重みを付けて平
 均した値である. 各シンボルの色が色名を表し, 円の直径が応答回数を示す. KS1,
 YY1, TN2 では黒の色名が使われなかった.

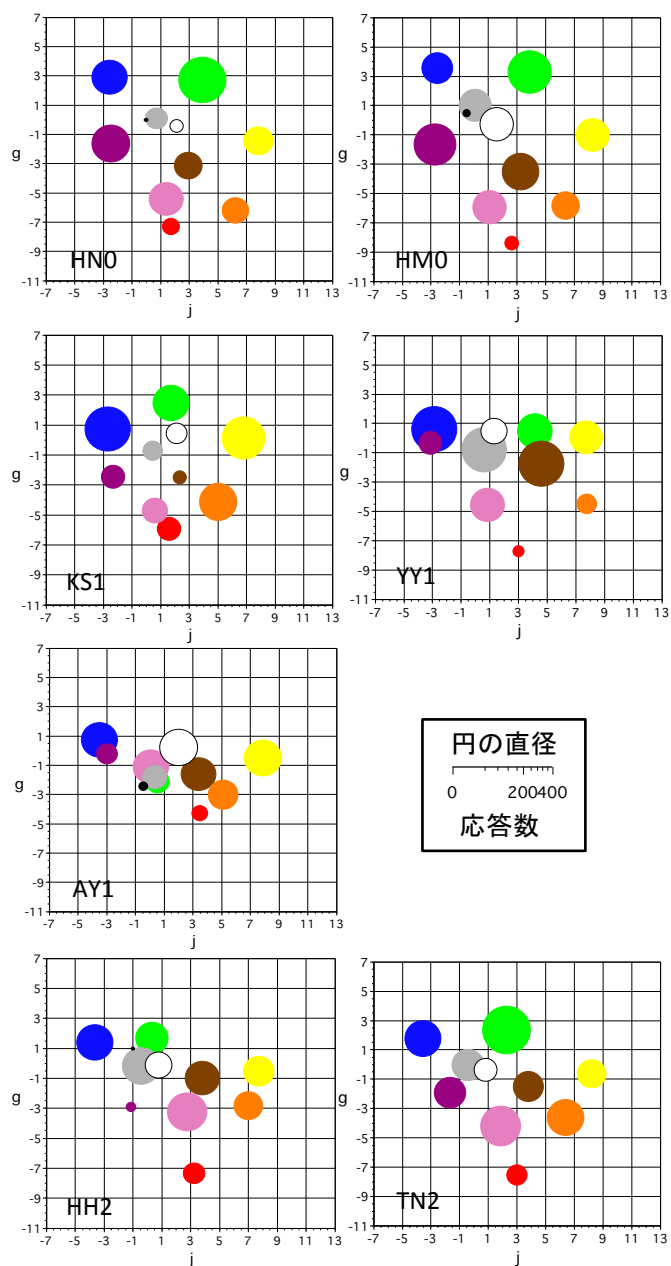


図 2.11 色票条件での全被験者の色名応答のセントロイドの (j, g) 面上の分布. 各
 シンボルの色が色名を表し, 円の直径が応答回数を示す.

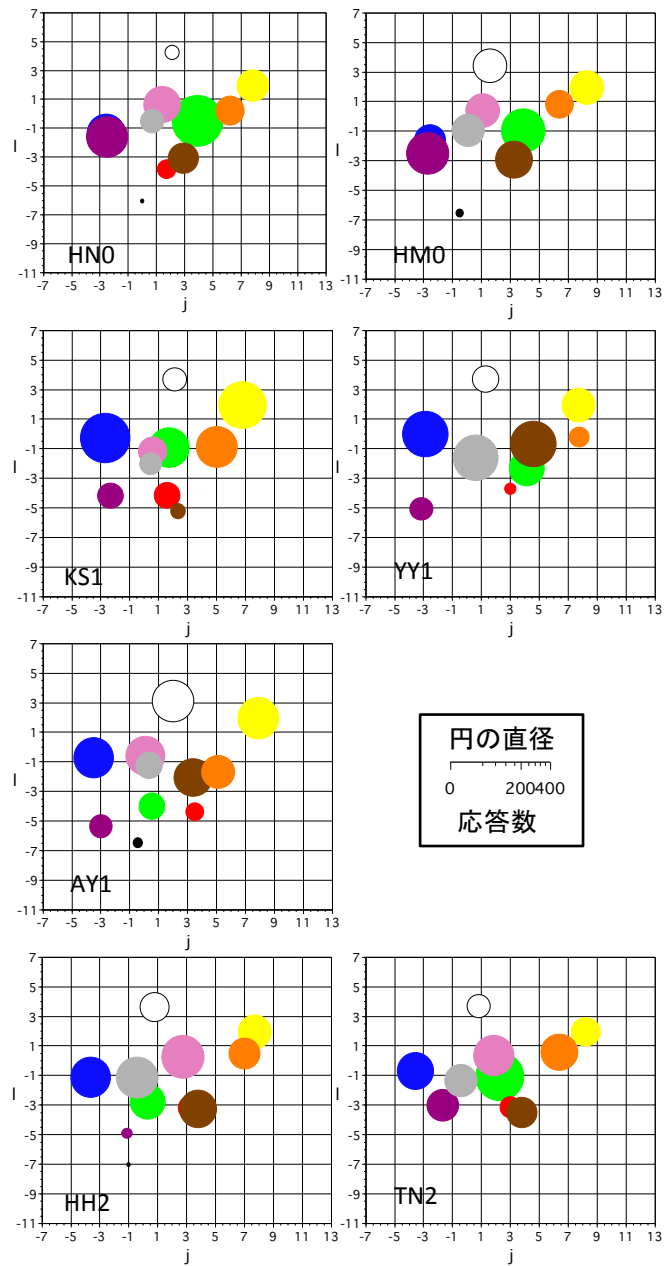


図 2.12 色票条件での全被験者の色名応答のセントロイドの (j, L) 面上の分布. 各シンボルの色が色名を表し, 円の直径が応答回数を示す.

図 2.11 より, 3 色覚者 HN0 と HM0 の各色のセントロイドの分布は外側へ広がり, その配置は両被験者間でよく一致している. 図 2.12 でも同様な傾向を示した. これらのことから 3 色覚者は両被験者間で類似したカラーネーミングを行ったことがわかる.

一方, 図 2.11 の (j, g) 平面においては 2 色覚者 KS1, YY1, HH2, TN2 では各色のセントロイドの広がり は 3 色覚者よりも狭くなっているが, その配置は 3 色覚者

と類似している。1型2色覚者AY1のセントロイドの分布は他の2色覚者とは異なり、黄と青を結ぶ線上に集まるような傾向を示した。これは、AY1は赤緑方向の色名をg軸方向の色み、つまり3色覚者にとっての赤みと緑みといった色みを使わないで用いていることを示す。図2.12の(j,L)平面においては2色覚者の各色のセントロイドの分布は外側へ広がっているが、1型2色覚者KS1, AY1, YY1では3色覚者と比較し、ピンク、オレンジ、紫のL値が低く、緑、茶のL値は3名の被験者で異なっている。2型2色覚者HH2, TN2ではピンク、オレンジ、茶の分布は3色覚者と類似しているが、緑と紫の分布は異なり、かつ2名の被験者で異なっている。

次に、被験者や刺激呈示条件による色名分布の違いを定量的に示すために、次式に示す類似性指標SIを用いた。この指標は参照者あるいは参照条件の色名分布に対して、他の被験者あるいは他の条件での色名分布がどの程度オーバーラップしているかを示す指標である。

$$SI_a = N_{aRX} / (N_{aR} + N_{aX} - N_{aRX})$$

ここで、

SI_a : ある色名 a に対する類似性指標 (similarity index)

N_{aR} : 参照者 (あるいは条件) R において色名 a で呼ばれた色票の合計枚数。カラーネーミングを複数回行った場合はその回数の重みを付けて枚数を計算する。

N_{aX} : 比較被験者 (あるいは比較条件) X において色名 a で呼ばれた色票の合計枚数。

N_{aRX} : 参照者 (あるいは条件) R と比較被験者 (あるいは比較条件) X の両者において色名 a で呼ばれた色票の合計枚数。カラーネーミングを複数回行った場合は上と同様に、その回数の重みを付けて枚数を計算する。

ここで、SIはSI_aの全ての色名に対する平均値とする。

実験1.1では、被験者間の比較を行うために、参照者Rとして3色覚者HN0を用いた。図2.13にSIを被験者別に示す。

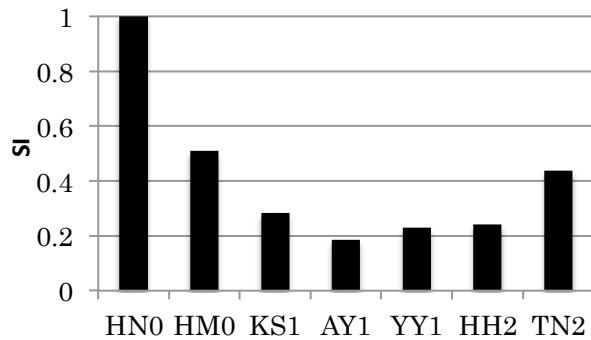


図 2.13 実験 1.1 (色票条件) での各被験者の類似性指標 SI. 被験者 HN0 を参照者
にしている

HN0 は参照者であるので $SI=1$ であるが、もう一人の 3 色覚者の HM0 は $SI=0.51$ となり、同じ 3 色覚者でも個人差あり、色名分布のオーバーラップは 50%程であることが分かる。

一方、2 色覚者では KS1 が $SI=0.28$, AY1 が $SI=0.19$, YY1 が $SI=0.23$, HH2 が $SI=0.24$ であり、3 色覚者と比較して SI は約半分の値になっている。ただし、TN2 は $SI=0.44$ であり、3 色覚者 HM0 よりも小さい値であるが他の 2 色覚者よりも大きな値となっている。

2.3 実験 1.2 : モニター条件

2.3.1 目的

実験 1.2 では OSA 色票を CRT モニター上にシミュレートし、それを標準視野サイズと時間制限無しで観察し、カラーネーミング実験を行う。被験者の頭部を固定するため、色票条件と比べ、被験者が色票を自由に観察できない。これがカラーネーミングにどのような影響を与えるかを調べることを目的とする。

2.2.2 方法

[装置と刺激]

実験は実験 1.1 と同じ暗室ブース内に CRT モニター (SONY GDM-F400) を設置して、モニター上で刺激呈示を行った (図 2.14)。被験者の頭部は顎台により固定し、視距離は 86cm、テスト刺激の形状と大きさは実験 1 と等しく円形視角 2.4° である。

テスト刺激は実験 1.1 と同じ D65 照明光下の OSA 色票をシミュレートしたものであるが、モニターでは呈示可能な輝度に上限があるため、刺激の中の最大輝度値が実験 1 の 0.73 倍となるように全テスト刺激の輝度を減少させた。テスト刺激の色度は実験 1 の刺激と L, M, S 錐体色度が等しくなるように決めた。L, M, S 錐体の分光感度は Stockman ら [27] のものを用いた。周辺光は実験 1.1 と同じ色度の灰色 ($x'=0.340$, $y'=0.377$) であり、輝度は 20.5cd/m^2 とした。大きさは視角横 22° \times 縦 17° である。

CRT モニターの R, G, B 蛍光体の分光測光には分光放射輝度計 PR-650 (Photo Research 社) を用い、輝度値の校正には輝度計 BM-8 (トプコン社) を用いた。

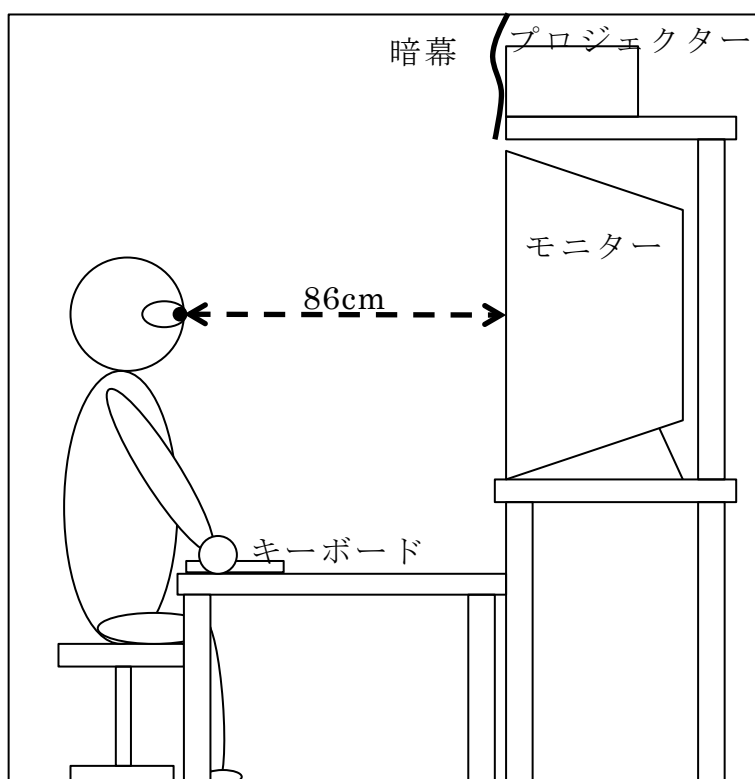


図 2.14 実験 1.2~1.5 での実験装置の概要

[手続き]

被験者はまず、モニター上に呈示される周辺光に 3 分間明順応する。その後、モニター上にランダムな順序で呈示されるテスト刺激を観察し、その色名を 11 基本色名から選択し、キーボード応答によりカテゴリカルカラーネーミングを行う。色名を選択するとテスト刺激の呈示が終了し、被験者がキーボードを押すことで次のテスト刺激が呈示される。全テスト刺激 424 色の試行を 1 セッションとし、各被験者は計 2 セ

セッションを行った。

[被験者]

被験者は3色覚者2名 (HN0, YO0), 1型2色覚者2名 (KS1, AY1), 2型2色覚者1名 (HH2) である。YO0以外の被験者は実験 1.1 と重複している。

2.3.3 結果

実験結果を OSA 色空間上で図 2.15~2.19 に示す。図の見方は実験 1.1 と同じである。

3色覚者 HN0 と YO0 では、HN0 で黒の色名が使われなかったが、色名毎のカテゴリーは固まった領域を形成し、互いによく一致している。HN0 では色票条件ともよく一致している。

一方1型2色覚者 KS1 では色名毎のカテゴリーはある程度固まっているが、色票条件と比較し、オレンジが g 軸にそって広がる傾向だった。2型2色覚者 HH2 では紫の色名が使われず、色票条件と比較し、緑の応答が少なくなり、低い明度では茶色が広く広がった。1型2色覚者 AY1 では色票条件と比較し、類似した傾向を示し、各色名領域が g 軸にそって広がった。

次に色名応答がどのように j-g 平面, j-L 平面上に分布しているかを見るため、色名応答結果のセントロイド (重心) を被験者ごとに図 2.20, 2.21 に示す。被験者 HN0 では黒, HH2 では紫の色名が使われなかった。

3色覚者 HN0 と YO0 では、j-g 平面, j-L 平面で HN0 について黒の色名が使われず、赤の色名が少なかったことを除いて各色のセントロイドの配置が互いによく一致し、さらに、HN0 では色票条件の結果ともよく一致している。赤と黒については、OSA 色票でも代表的な色を示す色票がないなど、赤と黒の色票数が少ないことは指摘されているが[13]、本実験においては色票をモニターに呈示したことによって色の見えが多少変化し、赤と黒の色名に対応する刺激のわずかな変化が、もとより刺激数が少ないことによって結果に影響してしまったのではないかと考えられる。

2色覚者は j-g 平面では、1型2色覚者 KS1 は、色票条件と比較すると、赤緑方向のセントロイドの広がりがかかなり狭くなっている。AY1 では色票条件と同様にセントロイドの分布は黄青方向の線上に集まった。HH2 でも j-g 平面では、セントロイドは黄青方向からやや傾いた線上に集まった。j-L 平面ではすべての被験者で色票条件

と類似した分布だった。また、2色覚者間では茶、緑、紫の配置が大きく異なった。

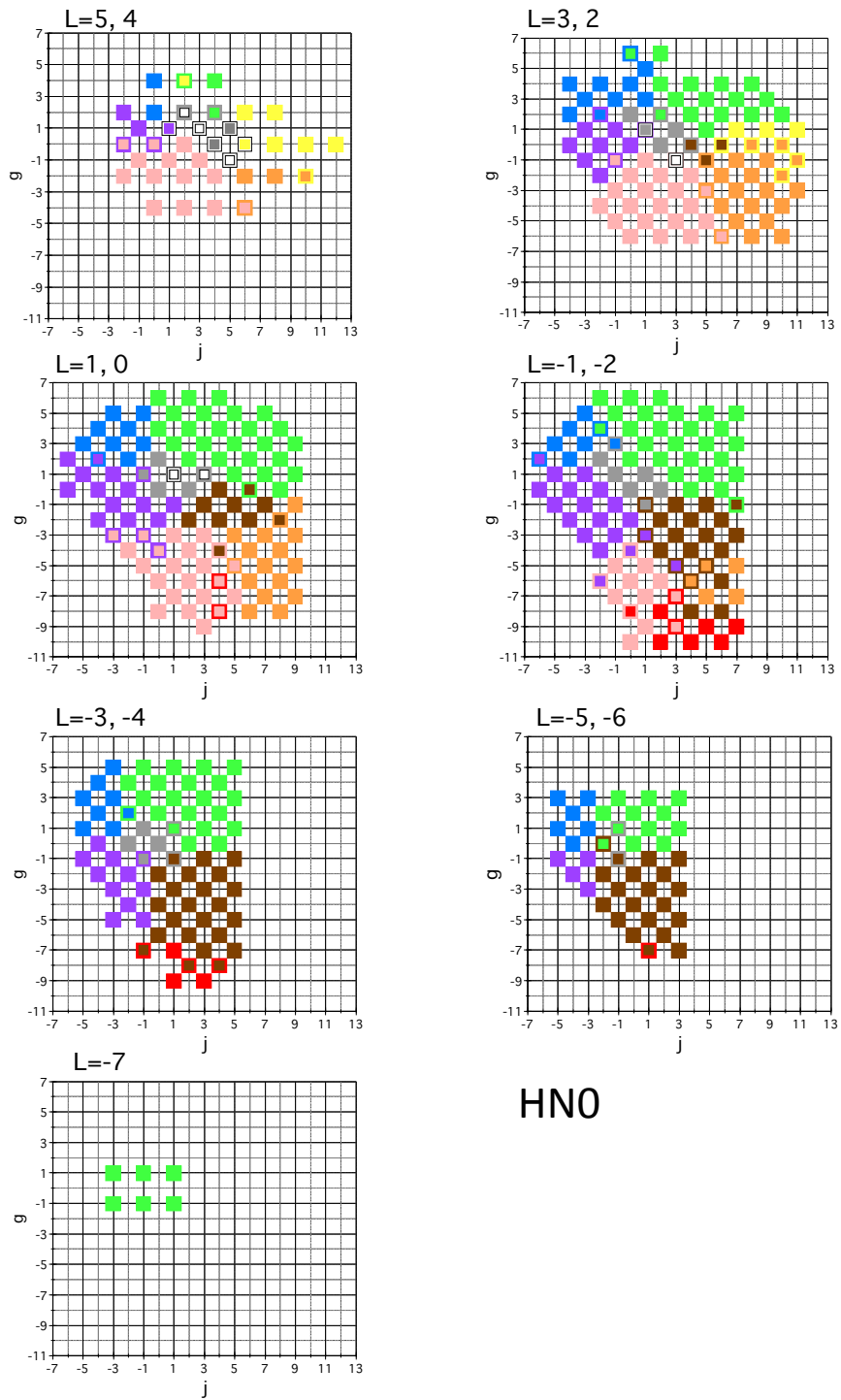


図 2.15 3色覚者 HN0 のカラーネーミング結果

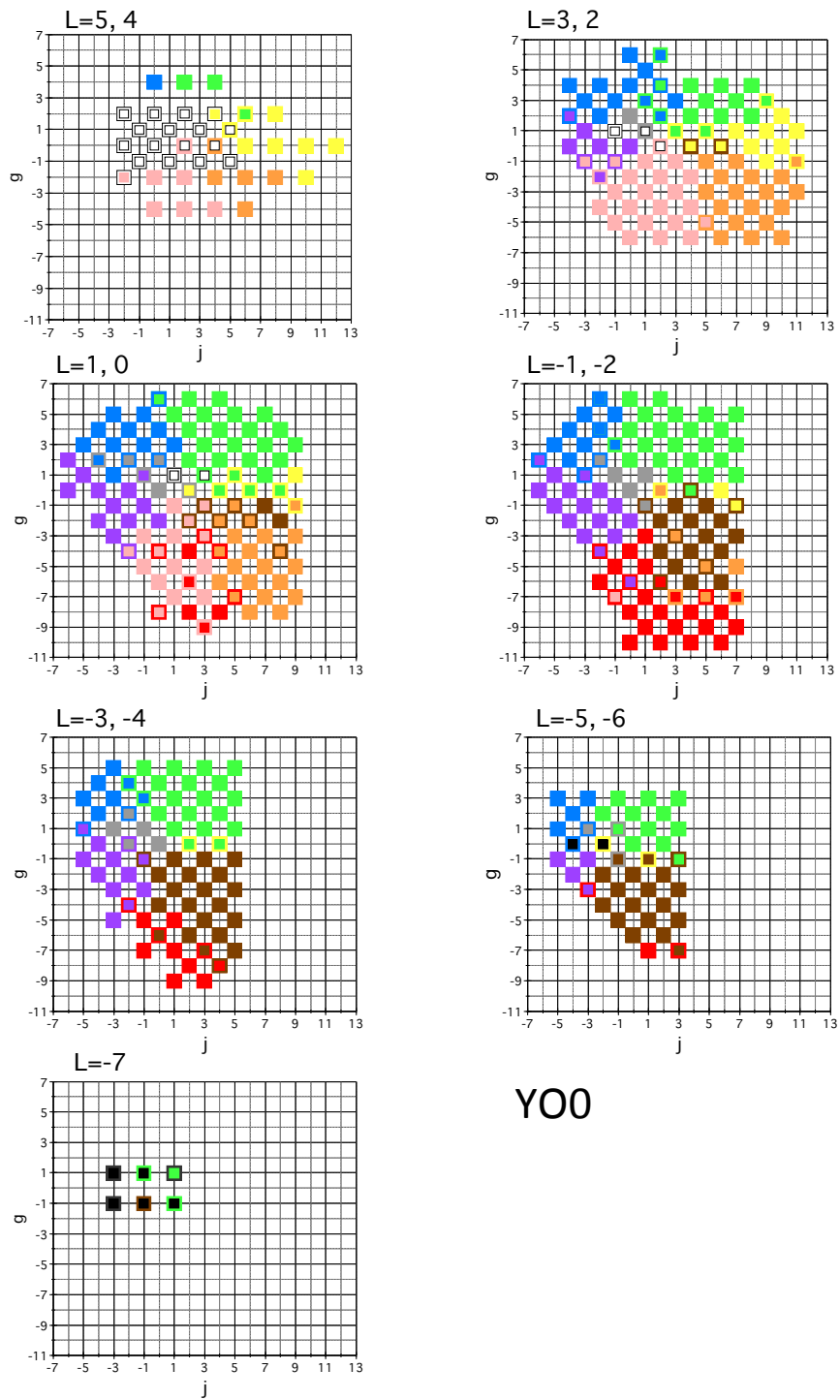


図 2.16 3色覚者 YO0 のカラーネーミング結果

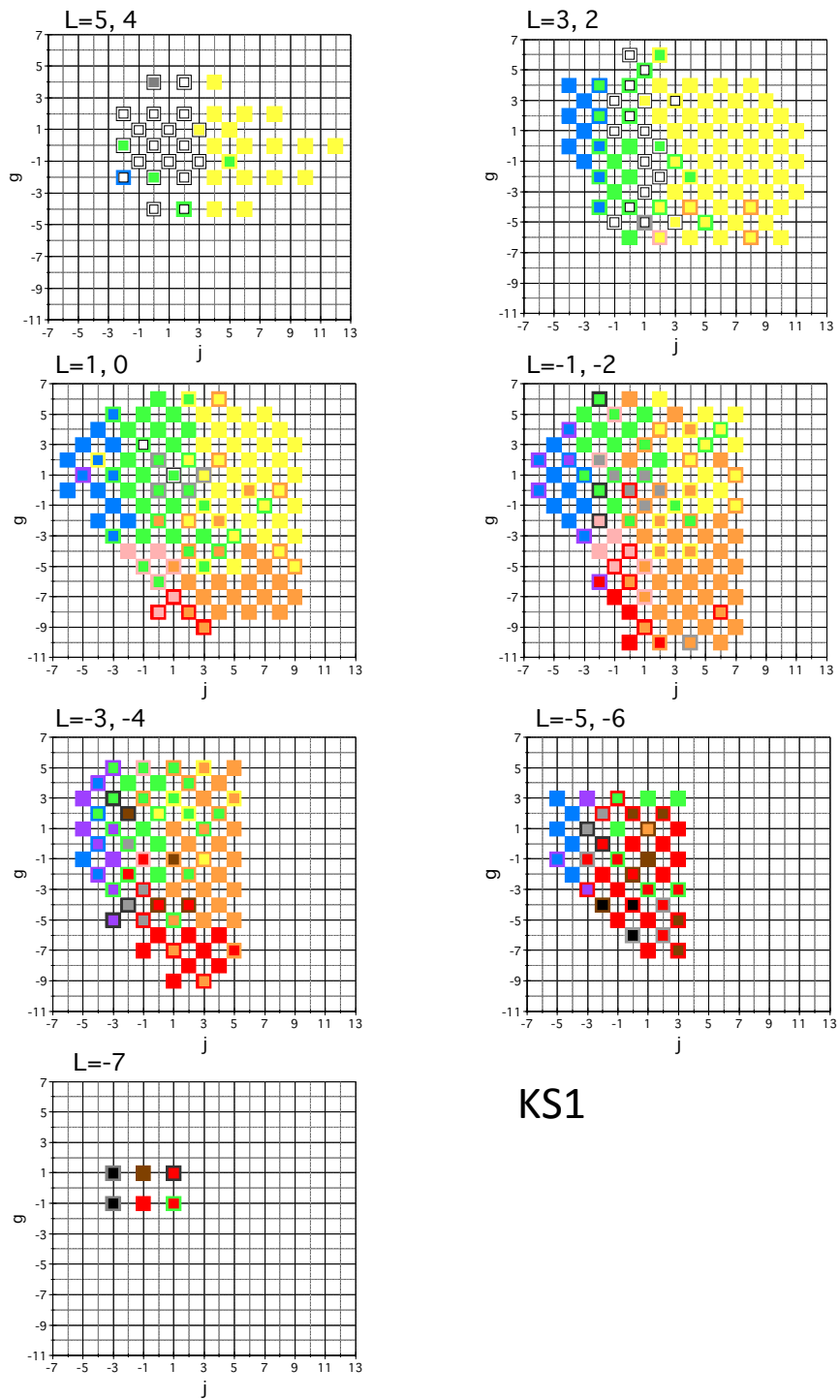


図 2.17 1 型 2 色覚者 KS1 のカラーネーミング結果

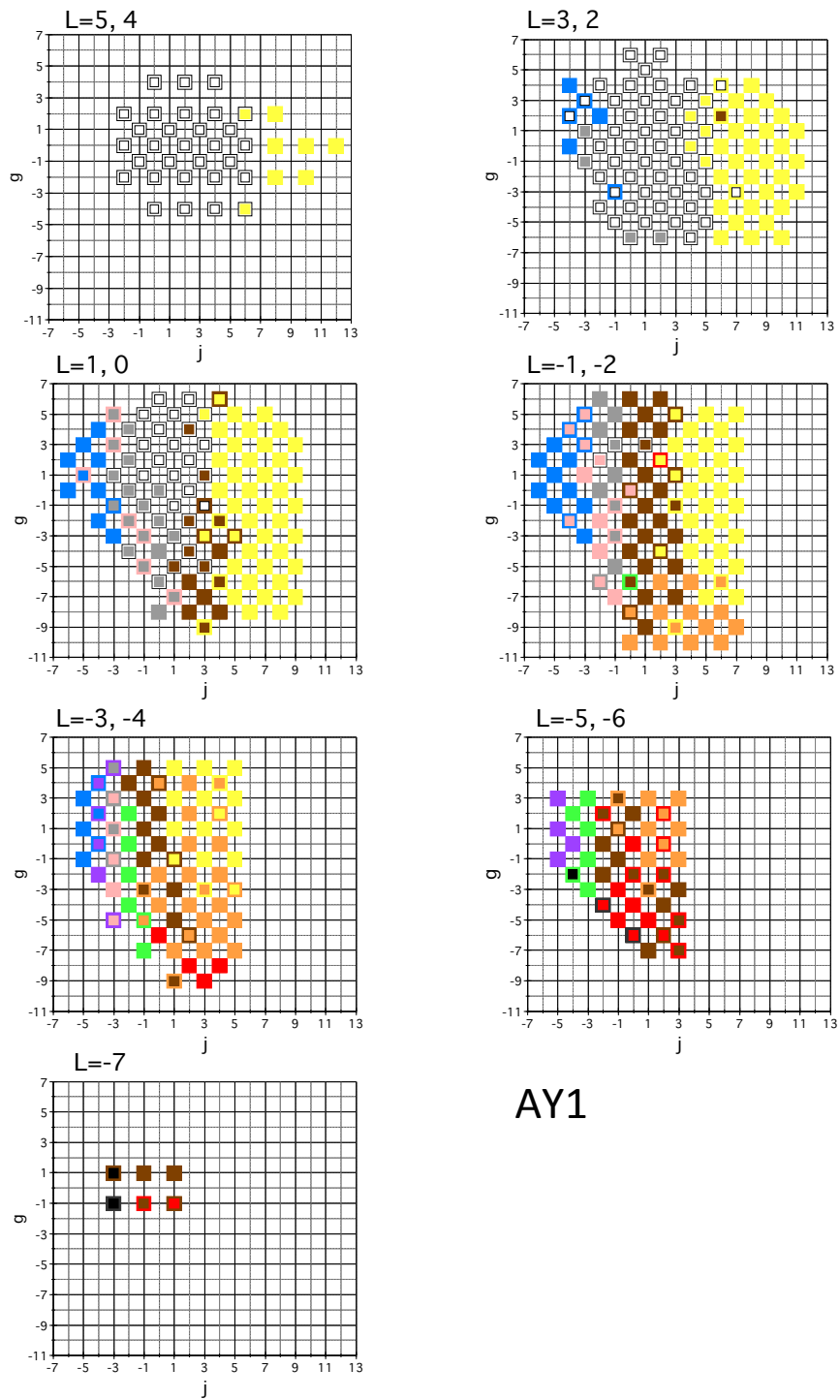


図 2.18 1型2色覚者 AY1 のカラーネーミング結果

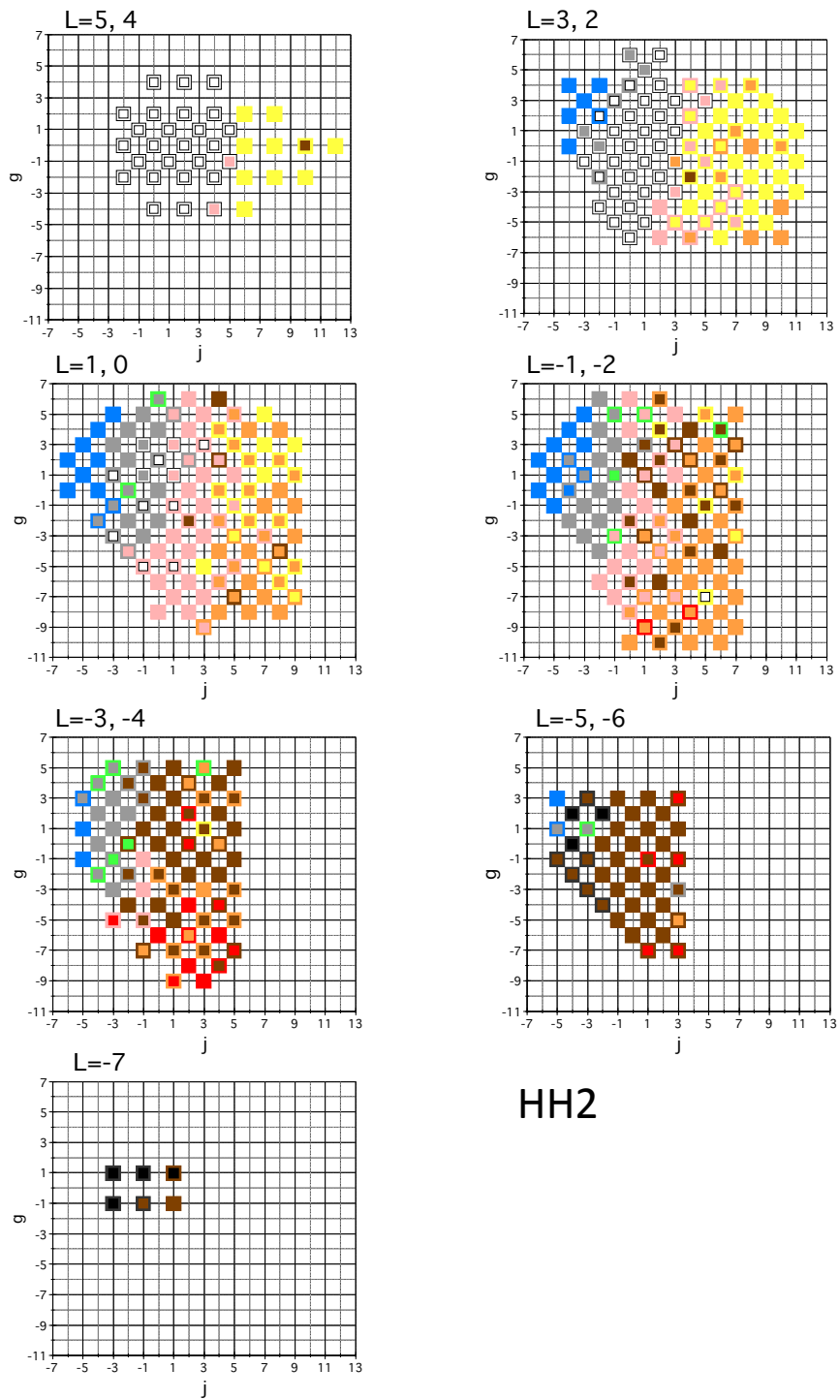


図 2.19 1型2色覚者 HH2 のカラーネーミング結果

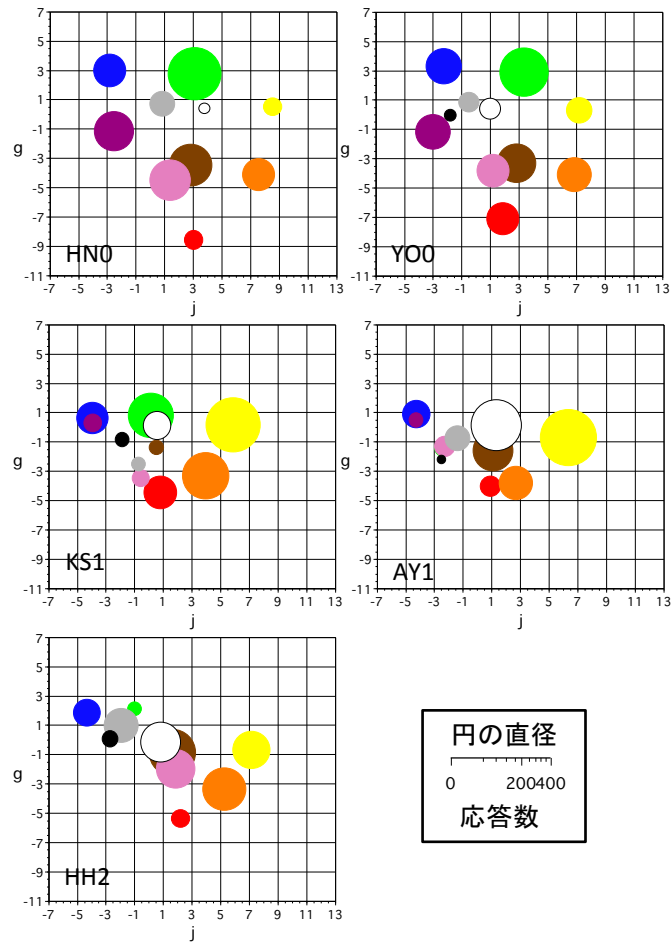


図 2.20 モニター条件での全被験者の色名応答のセントロイドの (j, g) 面上の分布.

各シンボルの色が色名を表し、円の直径が応答回数を示す.

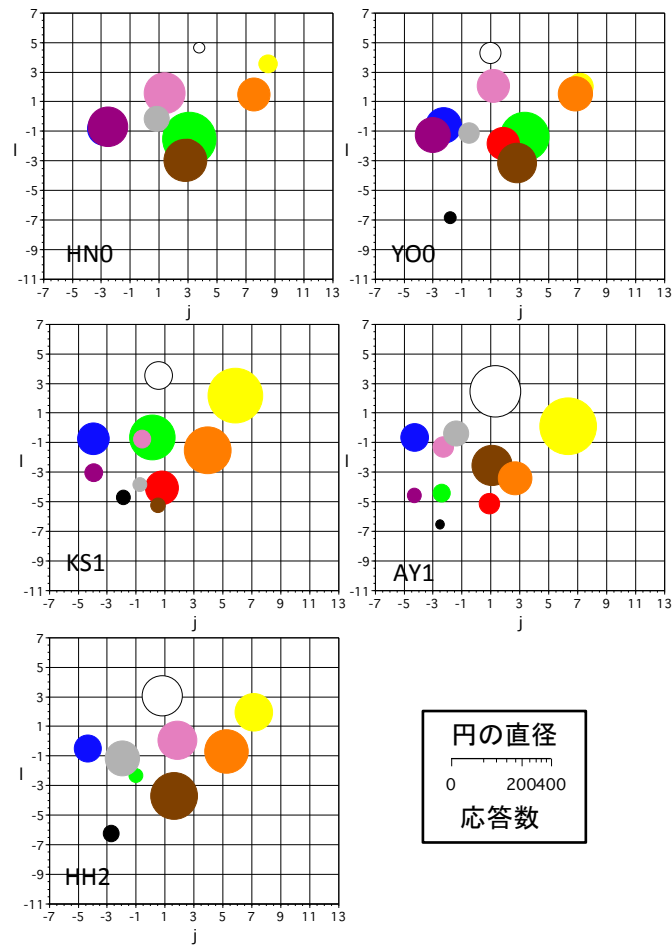


図 2.21 モニター条件での全被験者の色名応答のセントロイドの (j, L) 面上の分布。
各シンボルの色が色名を表し，円の直径が応答回数を示す。

2.4 実験 1.3：小視野条件

2.4.1 目的

実験 1.3 では 2 色覚者の 3 色覚的カラーネーミングに使われる手がかりとして，過去にあげられた桿体と残存の影響を調べることを目的とする。桿体は中心窩の周辺に分布し，残存錐体は周辺視に存在するため，刺激サイズを小さくすることでこれらの手がかりを除去し，カラーネーミング実験を行った。

2.4.2 方法

[刺激と手続き]

実験装置は実験 1.2 と同じ装置を使用した。実験刺激は刺激の大きさを円形視角 30' とした。手続きは実験 1.2 と同様である。

[被験者]

被験者は実験 1.2 と同じ 3 色覚者 2 名 (HN0, YO0), 1 型 2 色覚者 2 名 (KS1, AY1), 2 型 2 色覚者 1 名 (HH2) である。

2.4.3 結果

実験結果を OSA 色空間上で図 2.22~2.26 に示す。図の見方は実験 1.2 と同じである。

3 色覚者 HN0 と YO0 はモニター条件とほぼ一致する結果だった。1 型 2 色覚者 KS1 ではオレンジの領域がさらに広がり、低明度では赤の領域が広がった。1 型 2 色覚者 AY1 ではモニター条件とほぼ変わらない結果だった。2 型 2 色覚者 HH2 ではモニター条件と比較し、色名を更に混同する傾向だった。

次に色名応答がどのように j-g 平面, j-L 平面上に分布しているかを見るため、色名応答結果のセントロイドを被験者ごとに図 2.27, 2.28 に示す。

j-g 平面, j-L 平面上で 3 色覚者 HN0 と YO0 はモニター条件とほぼ一致していた。また 3 名の 2 色覚者でも, j-g 平面ではセントロイド分布の広がりがさらに狭くなっているものの、モニター条件とはほとんど違いがないことがわかる。j-L 平面上でも全ての被験者においてモニター条件と大きな違いはなかった。

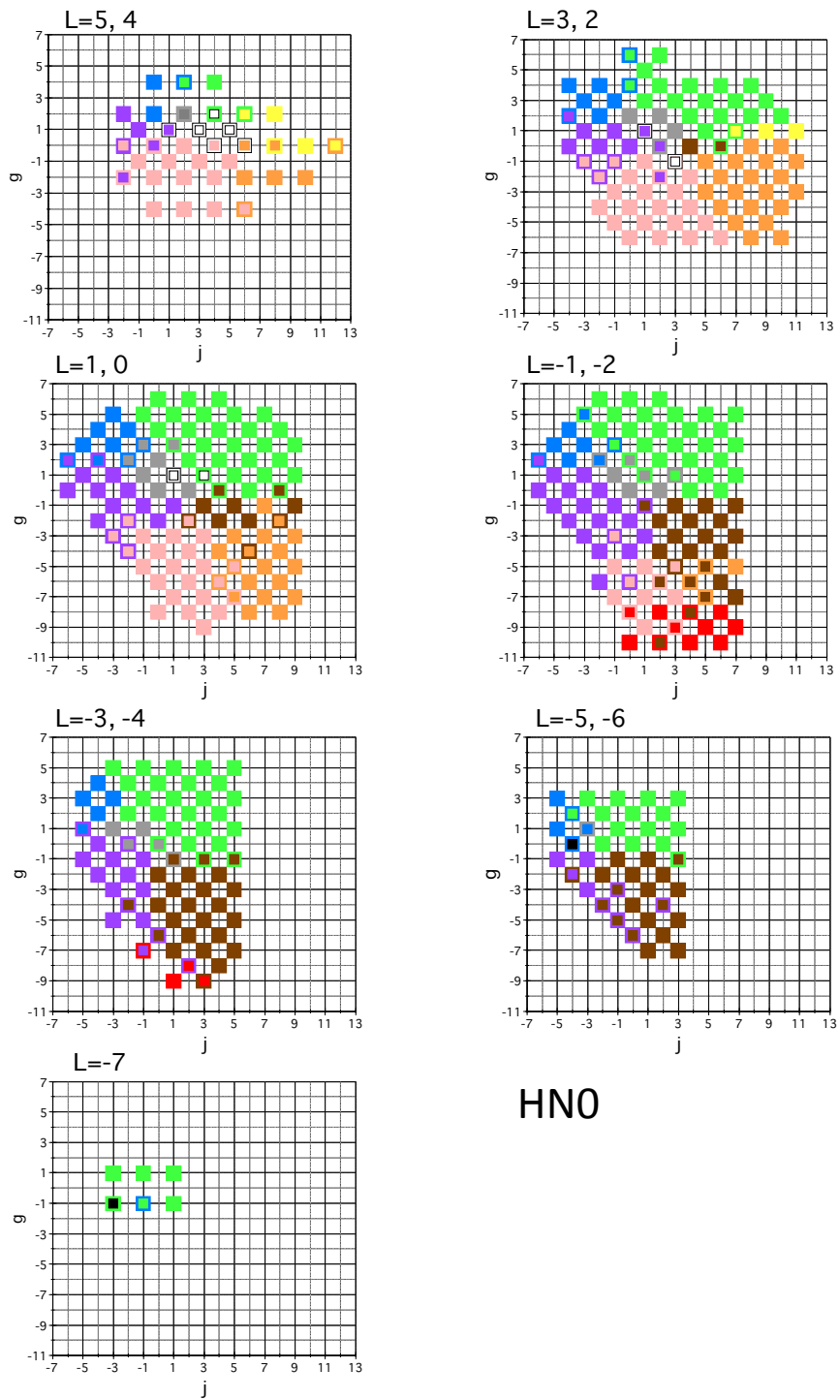


図 2.22 3色覚者 HN0 のカラーネーミング結果

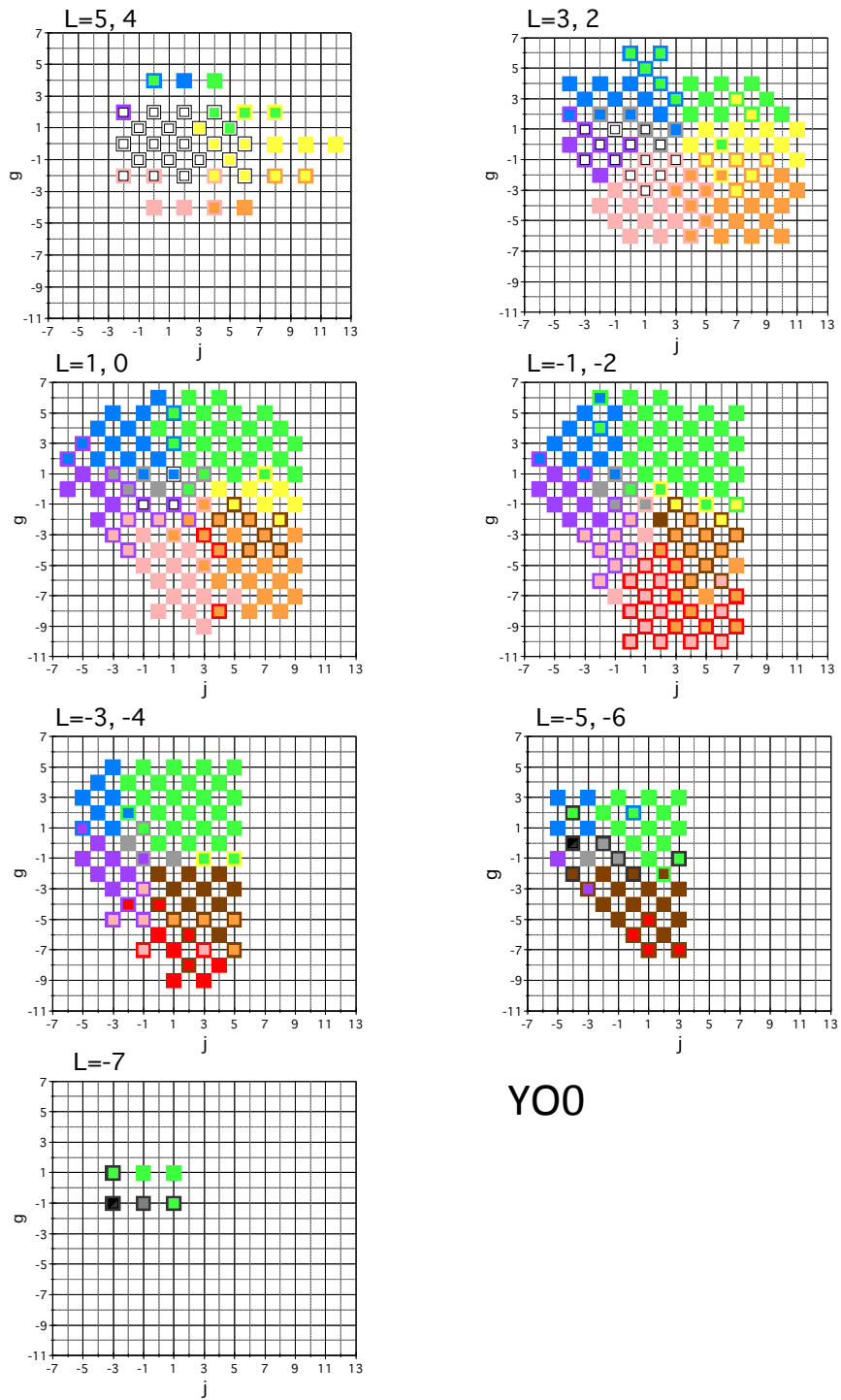


図 2.23 3色覚者 YO0 のカラーネーミング結果

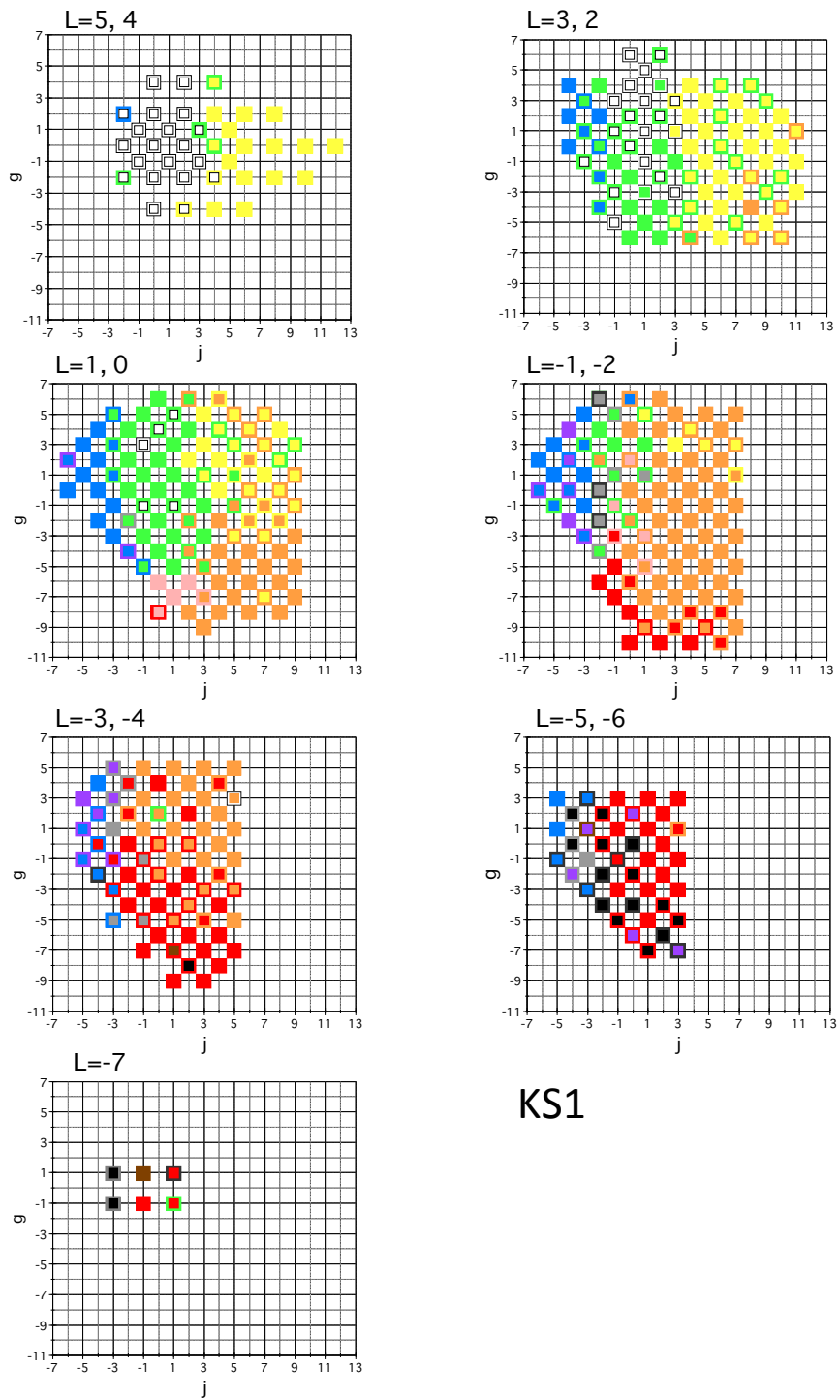


図 2.24 1 型 2 色覚者 KS1 のカラーネーミング結果

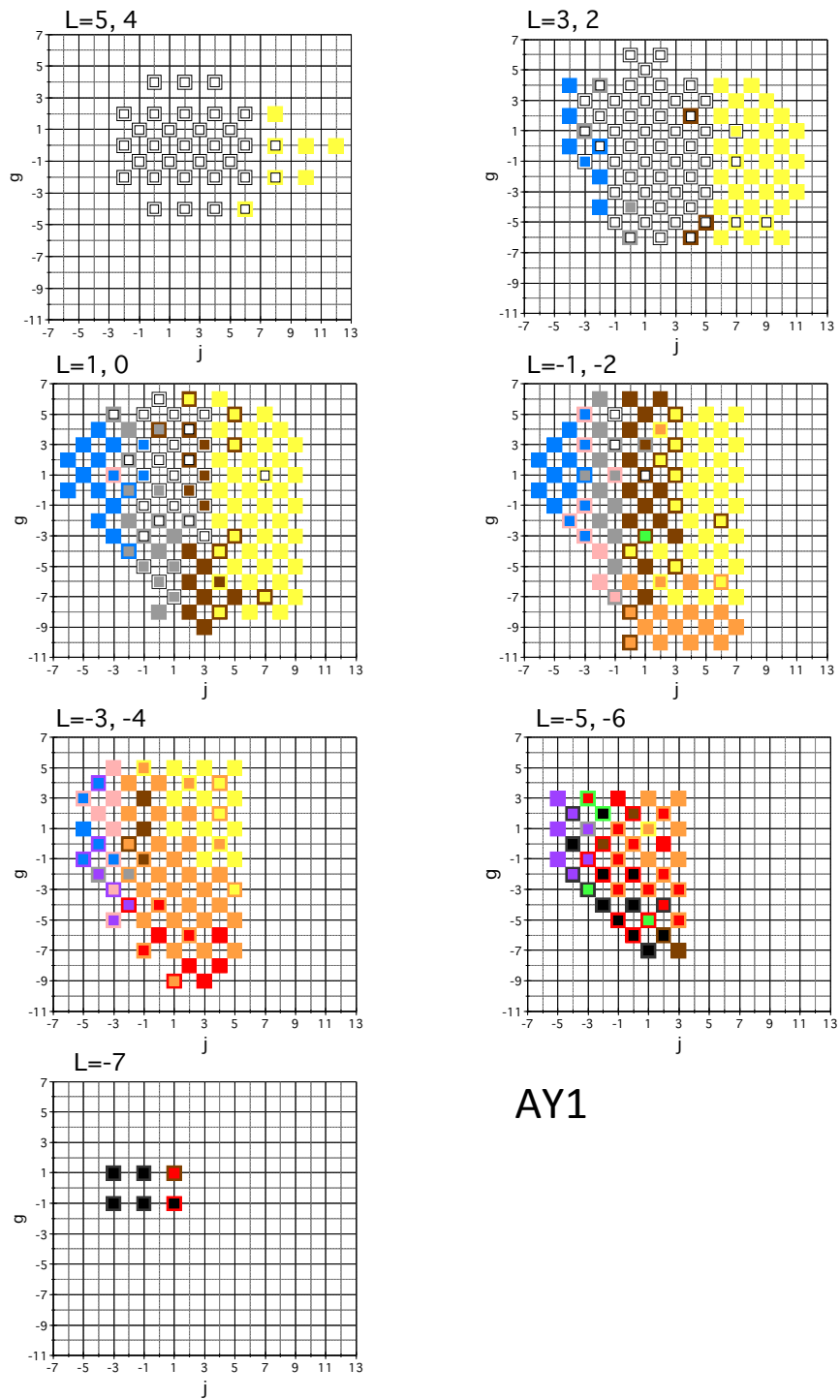


図 2.25 1 型 2 色覚者 AY1 のカラーネーミング結果

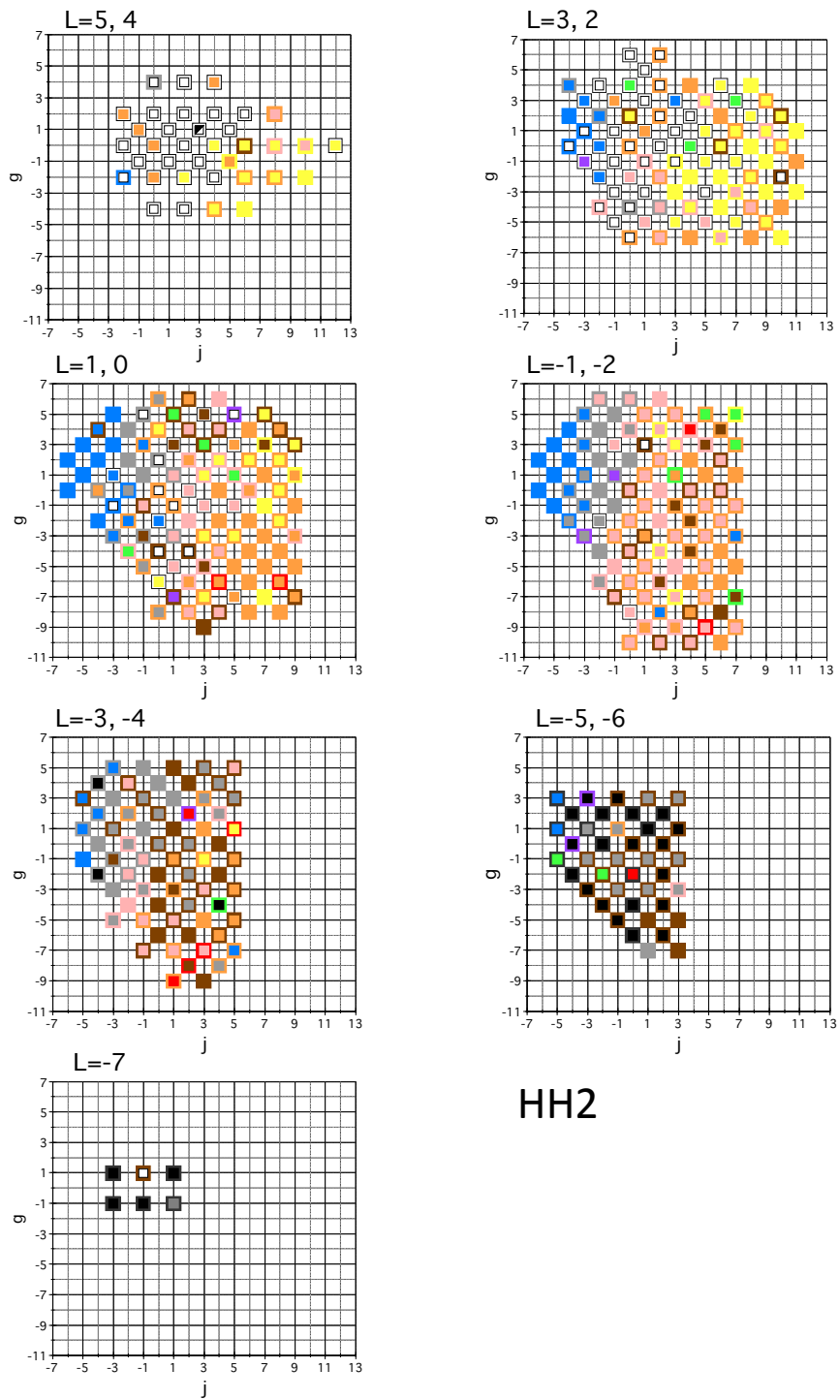


図 2.26 2 型 2 色覚者 HH2 のカラーネーミング結果

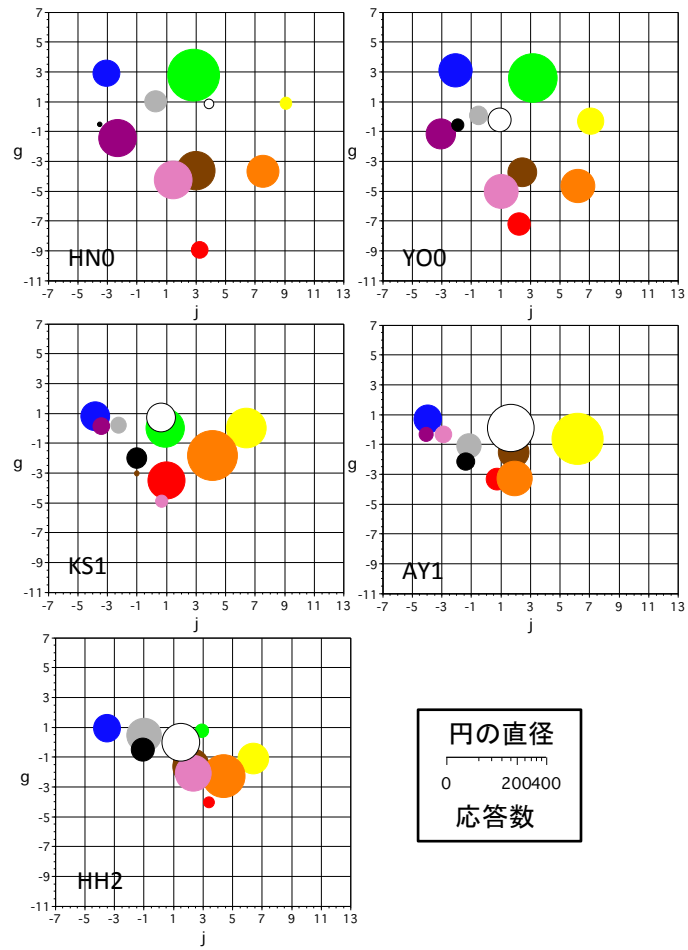


図 2.27 小視野条件での全被験者の色名応答のセントロイドの (j, g) 面上の分布.
各シンボルの色が色名を表し, 円の直径が応答回数を示す.

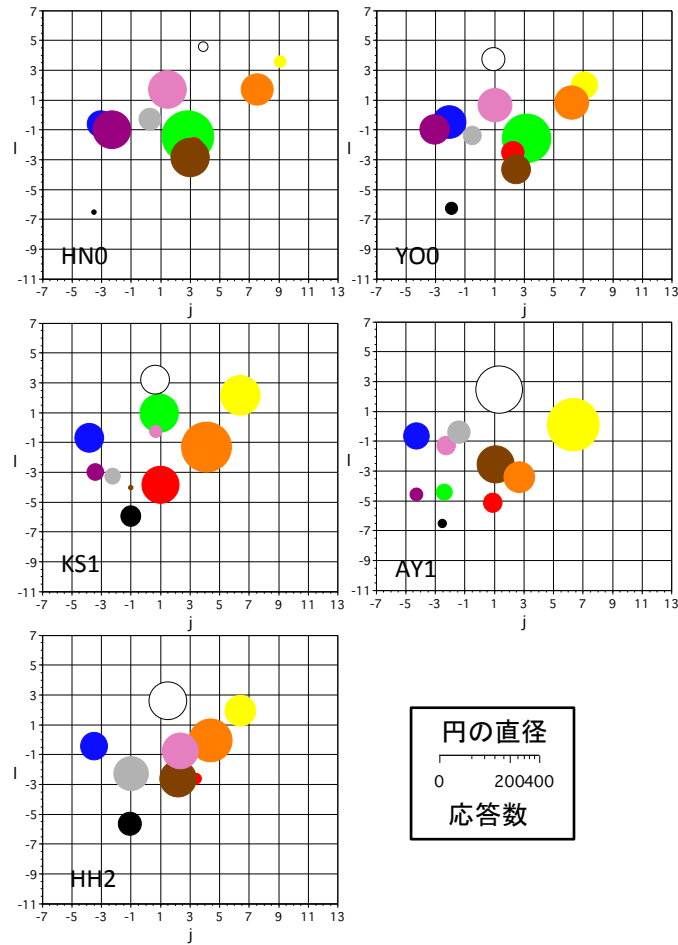


図 2.28 小視野条件での全被験者の色名応答のセントロイドの (j, L) 面上の分布。
各シンボルの色が色名を表し、円の直径が応答回数を示す。

2.5 実験 1.4 : 短時間呈示条件

2.5.1 目的

実験 1.4 では実験 1.3 と同様に 2 色覚者の 3 色覚的カラーネーミングに用いられる手がかりとして、過去にあげられた桿体と残存の影響を調べることを目的とする。桿体は時間解像度が低く、残存錐体は情報の統合に長時間必要なため、刺激呈示時間を短くすることでこれらの手がかりを除去し、カラーネーミング実験を行った。

2.5.2 方法

[刺激と手続き]

実験装置は実験 1.2, 1.3 と同じ装置を使用した。実験刺激は刺激の呈示時間を 50ms とした。手続きは実験 1.2, 1.3 と同様である。

[被験者]

被験者は実験 1.2, 1.3 と同じ 3 色覚者 2 名 (HN0, YO0), 1 型 2 色覚者 2 名 (KS1, AY1), 2 型 2 色覚者 1 名 (HH2) である。

2.5.3 結果

実験結果を OSA 色空間上で図 2.29~2.33 に示す。図の見方は実験 1.2, 1.3 と同じである。

3 色覚者 HN0 と YO0 はモニター条件, 小視野条件とほぼ一致する結果だった。1 型 2 色覚者 KS1, 2 型 2 色覚者 HH2 ではモニター条件とほぼ変わらない結果だった。2 型 2 色覚者 HH2 は緑の色名を使わなかった。1 型 2 色覚者 AY1 ではモニター条件, 小視野条件とほぼ変わらない結果だった。

次に色名応答がどのように j-g 平面, j-L 平面上に分布しているかを見るため, 色名応答結果のセントロイドを被験者ごとに図 2.34, 2.35 に示す。j-g 平面上ではモニター条件を比較すると, 被験者 HH2 の緑の応答が無くなったこと以外は全ての被験者で大きな差は無かった。また, 小視野条件の結果ともよく一致している。j-L 平面上でもモニター条件と大きな違いはなく, 小視野条件とも良く一致している。

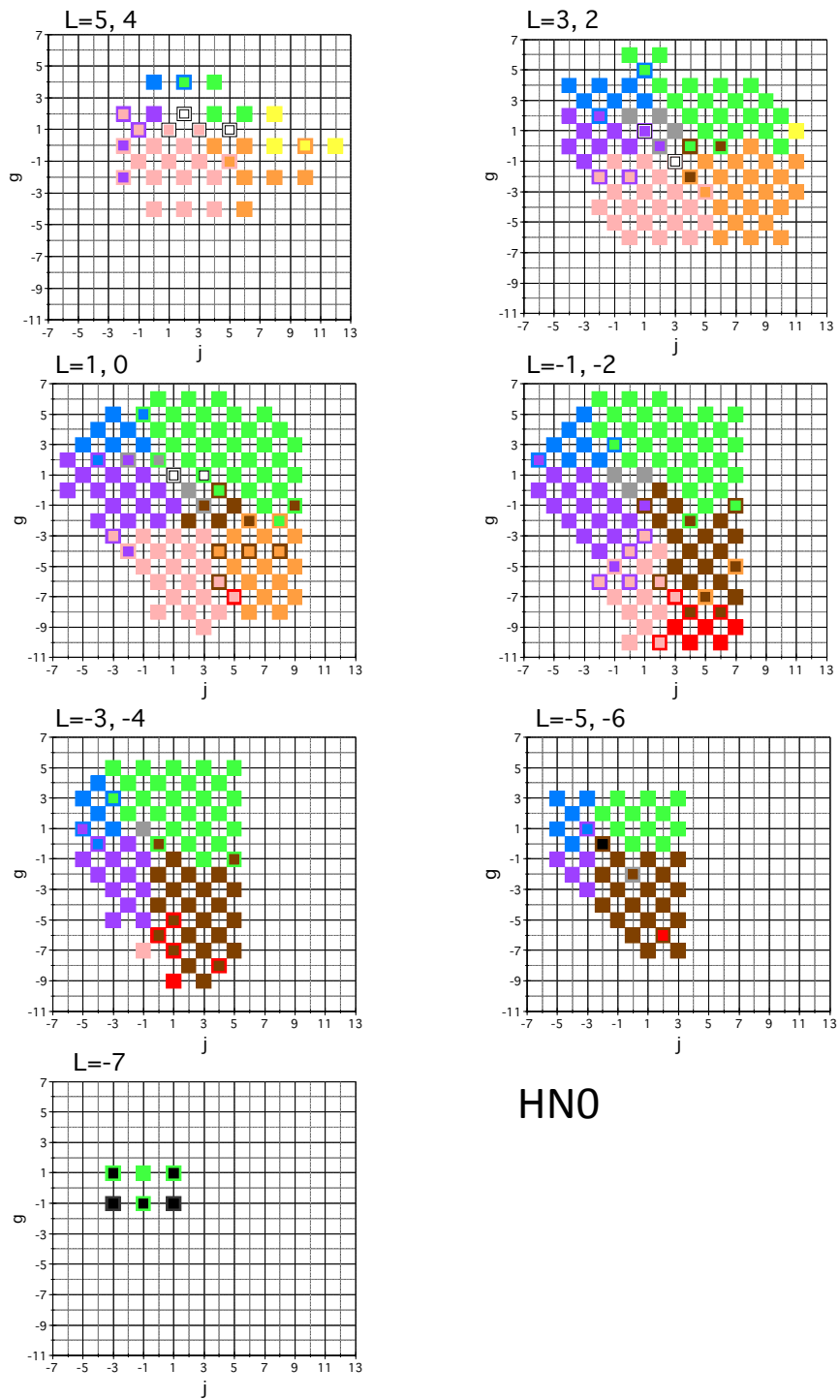


図 2.29 3色覚者 HN0 のカラーネーミング結果

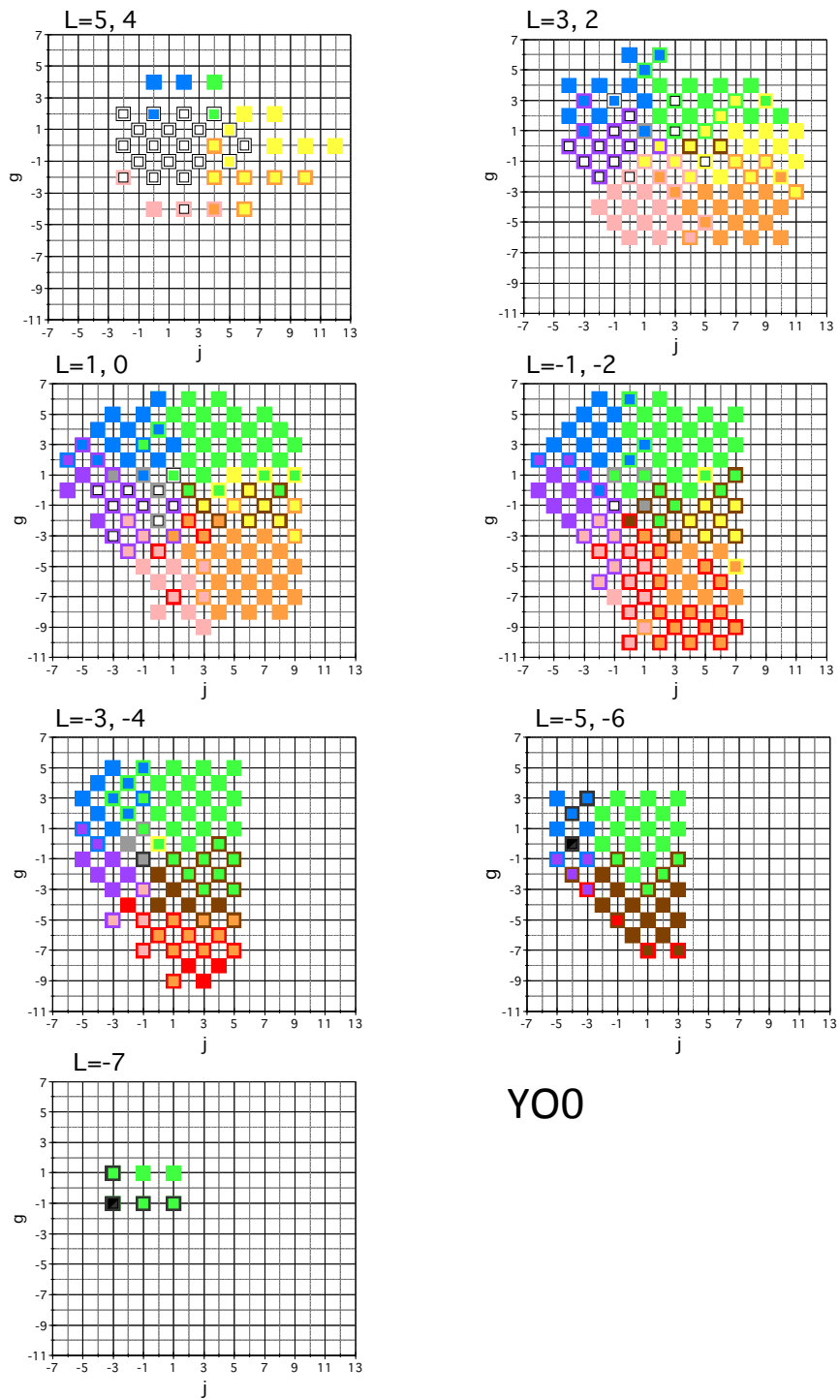


図 2.30 3色覚者 YO0 のカラーネーミング結果

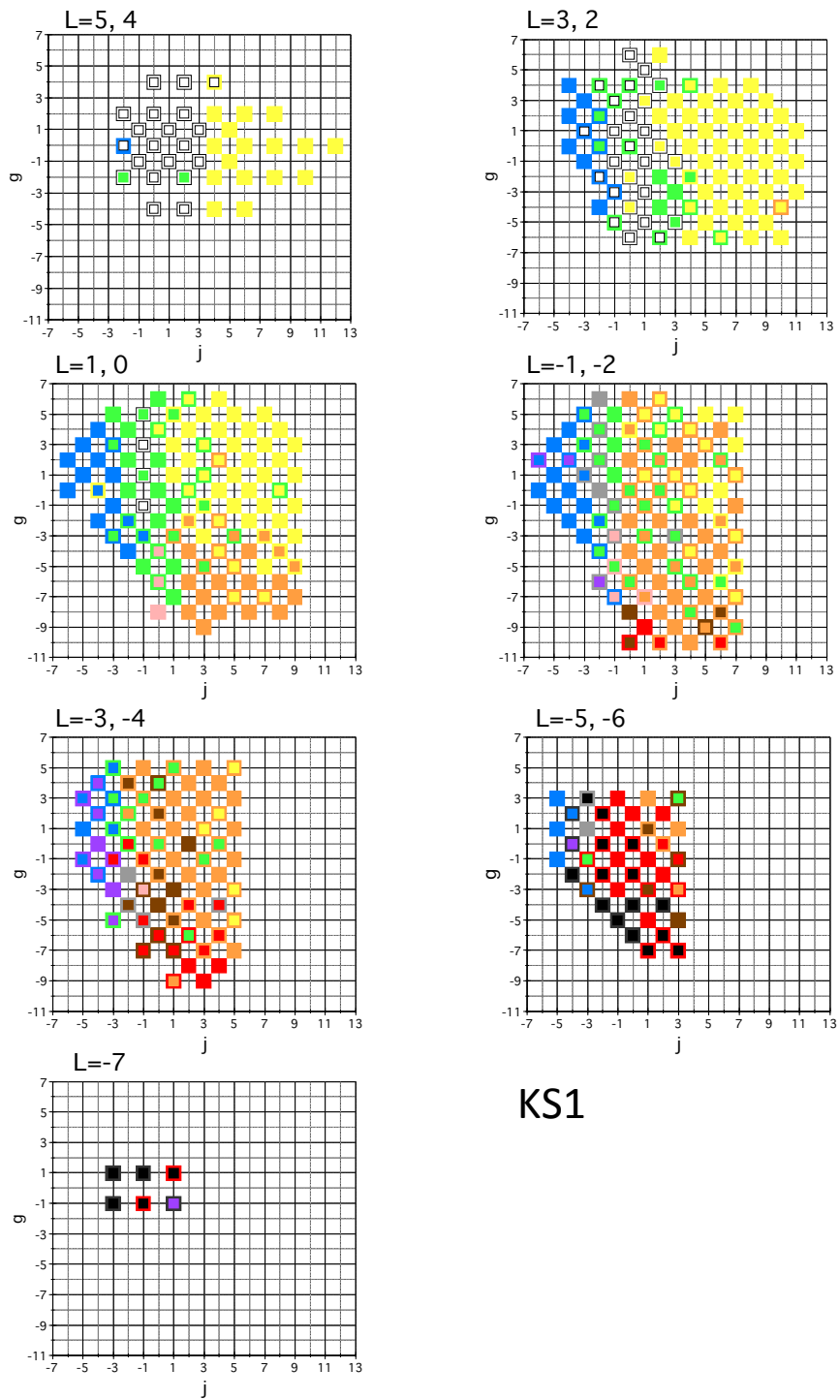


図 2.31 1 型 2 色覚者 KS1 のカラーネーミング結果

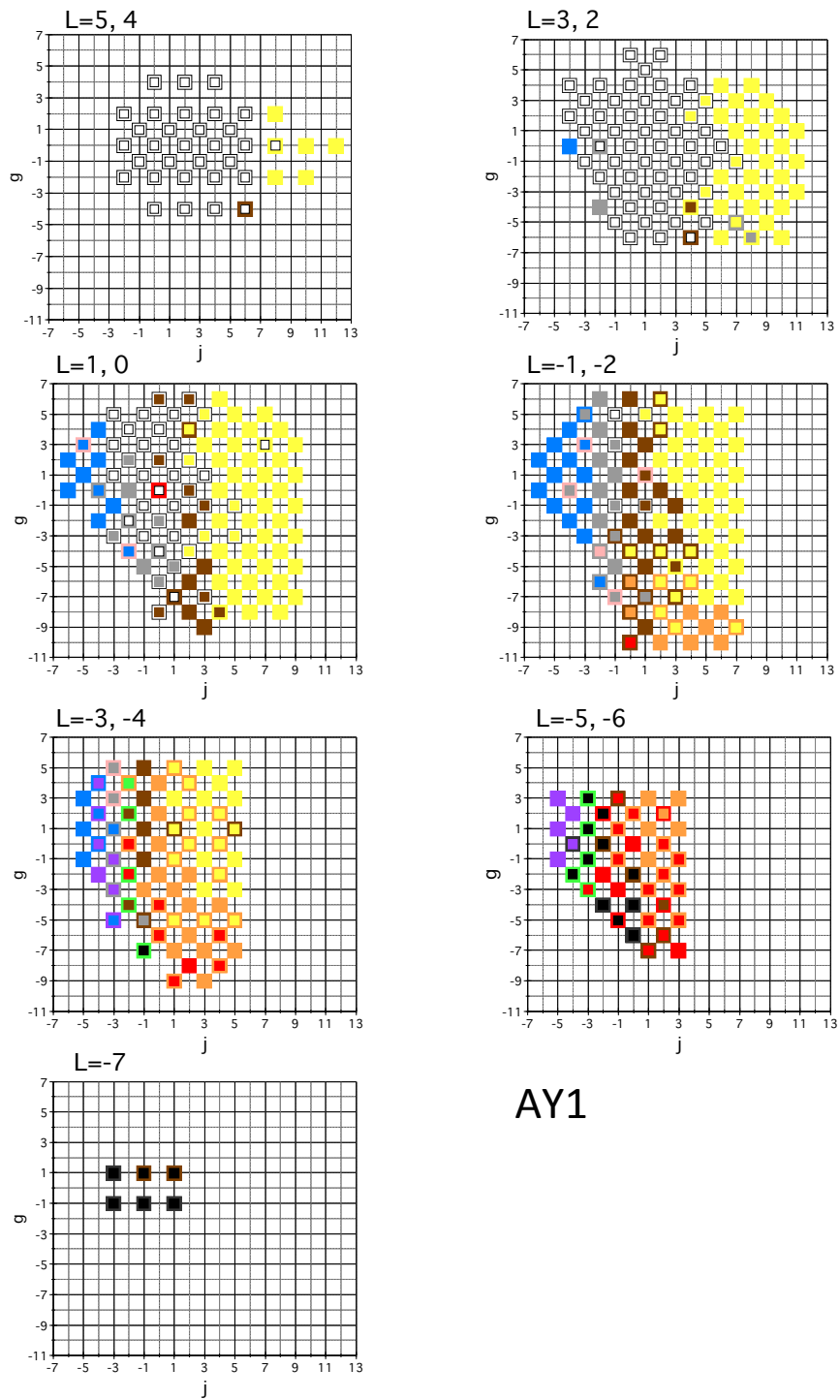


図 2.32 1型2色覚者 AY1 のカラーネーミング結果

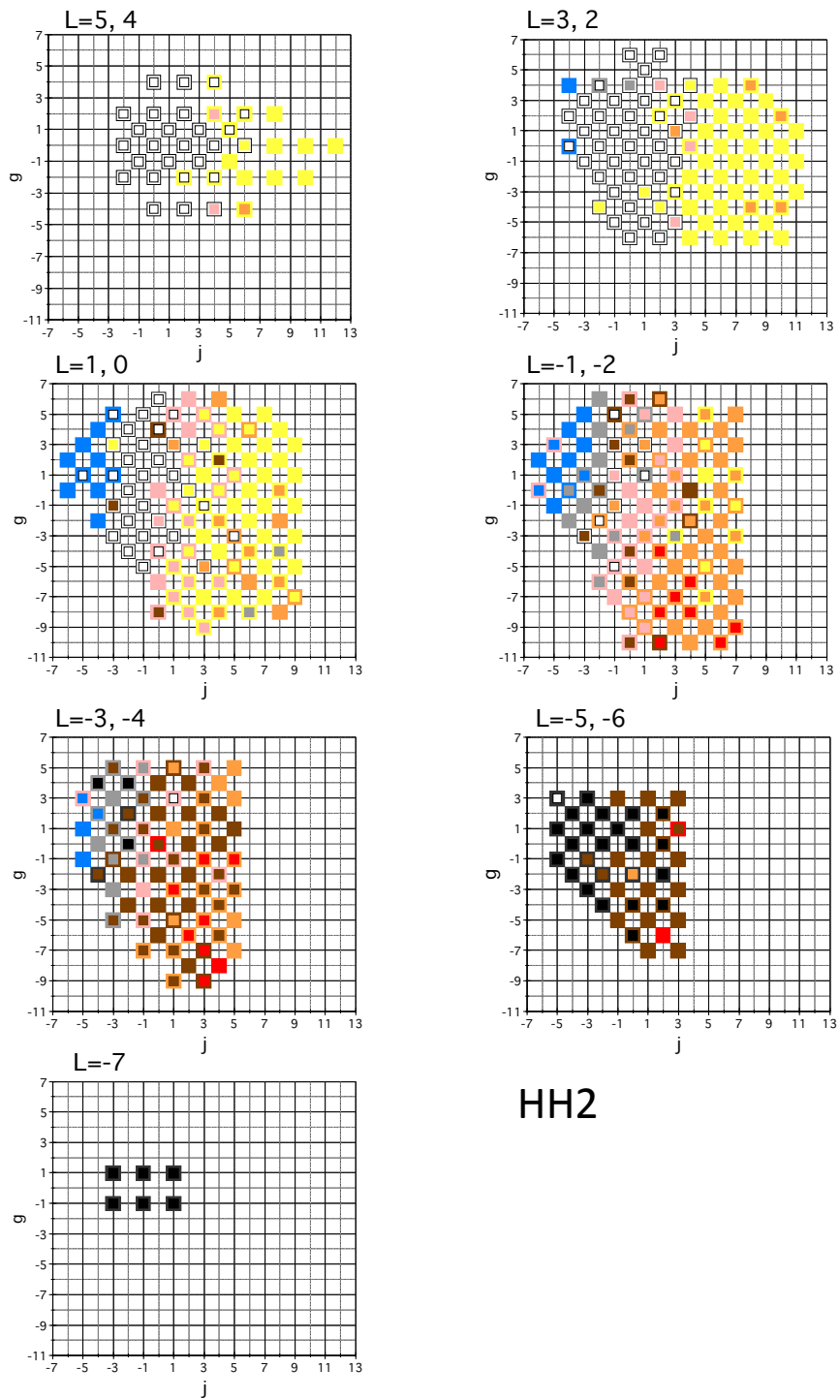


図 2.33 1型2色覚者 HH2 のカラーネーミング結果

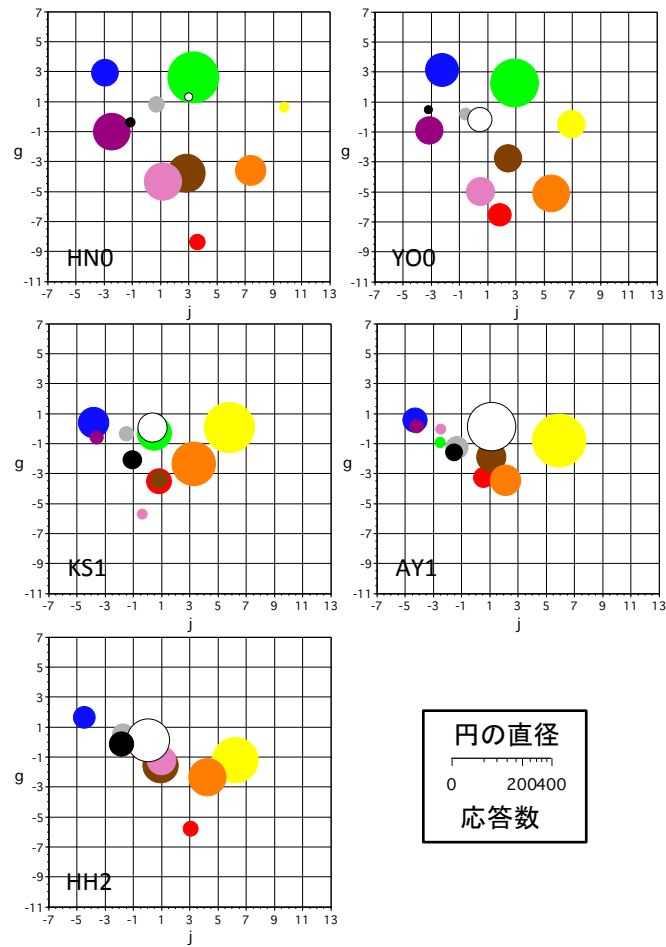


図 2.34 短時間呈示条件での全被験者の色名応答のセントロイドの (j, g) 面上の分布. 各シンボルの色が色名を表し, 円の直径が応答回数を示す.

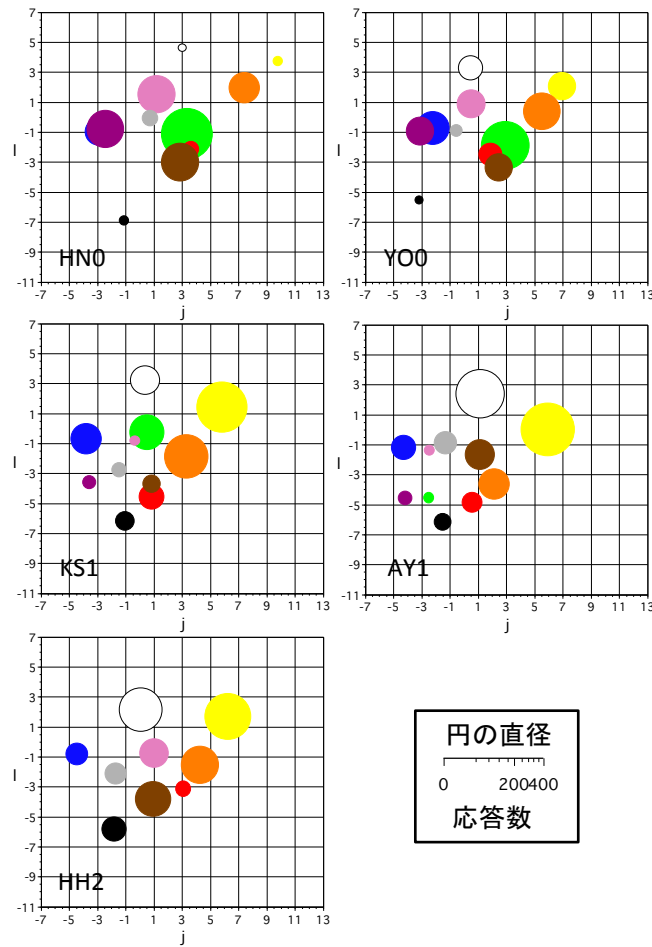


図 2.35 短時間呈示条件での全被験者の色名応答のセントロイドの (j, L) 面上の分布. 各シンボルの色が色名を表し, 円の直径が応答回数を示す.

次に図 2.36 に実験 1.2 (モニター条件), 実験 1.3 (小視野条件), 1.4 (短時間呈示条件) と実験 1.1 (色票条件) 間での類似性指標 SI を被験者別に示す. ここでは, 色票条件を参照条件としている. この結果を見ると, 3色覚者 HNO では, モニター条件, 小刺激条件, 短時間呈示条件共に色票条件と比較して約 0.4 の類似性を示した. 一方 2色覚者ではモニター条件では類似性指標が約 0.2~0.3 であり, 2色覚者の方がモニター条件での色名分布がより大きく異なっていることがわかる. また, 小刺激条件, 短時間呈示条件では類似性指標が約 0.2 であり, 2色覚者の方が小視野条件と短時間呈示条件での色名分布がより大きく異なっていることがわかる. この特性はモニター条件とほぼ等しい.

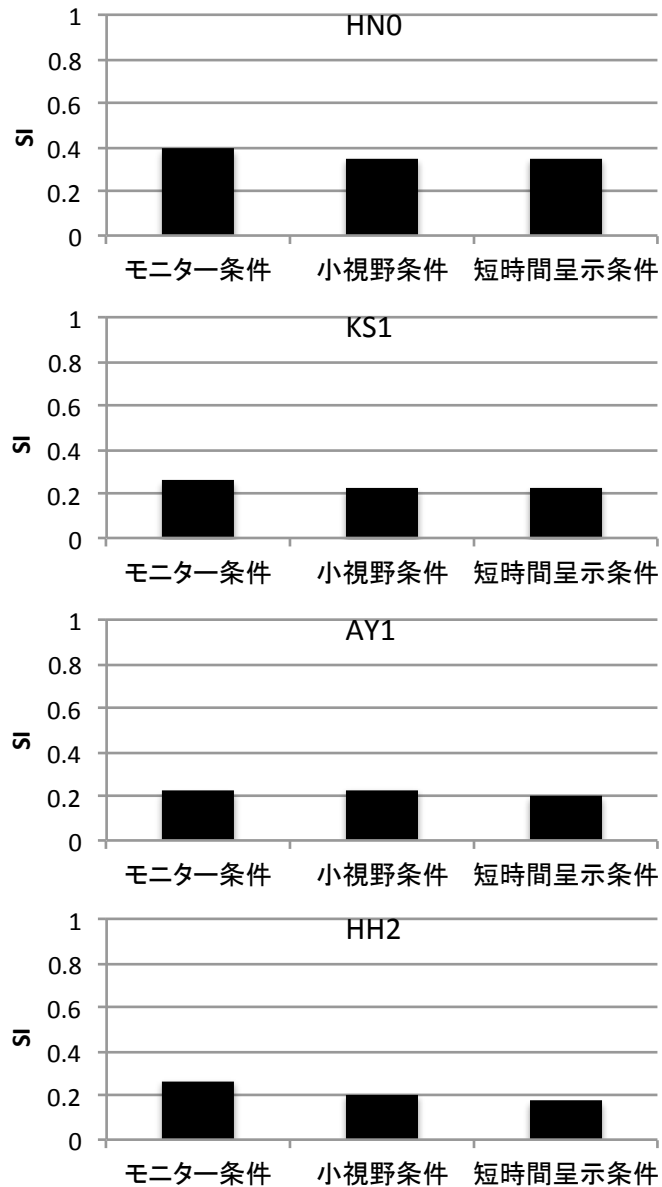


図 2.36 各条件間での類似性指標 SI の比較

2.6 実験 1.5 : 等輝度条件

2.6.1 目的

実験 1.5 では 2 色覚者は輝度チャンネルと 1 種類の色チャンネルで色を 2 次元的に知覚しているも、表面の明るさ（明度）と色み（色度）を組み合わせ、3 色覚者の色名に対応させている可能性があることから、明るさの手がかりの影響を調べることを目的とする。明るさの手がかりを除去するため、表面の輝度を一定にした、等輝度刺激を用いてカラーネーミング実験を行った。

2.6.2 方法

[刺激と手続き]

2色覚者の分光感度は3色覚者のものとは異なるため、等輝度刺激を作成するためには被験者毎に輝度合わせをしなければならない。本実験では、準備実験で被験者毎に交照法により刺激の輝度合わせを行い、等輝度刺激を作成した。実験に用いたテスト刺激の色度はjudd修正 $x'y'$ 色度図上で0.025ステップの等間隔で選んだ。参照刺激は白色 ($x'=0.340$, $y'=0.377$)、輝度を10, 25, 40 cd/m^2 の3レベルとした。全テスト刺激数はそれぞれの輝度レベルで138個 (10 cd/m^2)、113個 (25 cd/m^2)、84個 (40 cd/m^2) となり、合計335個である。

2色覚者の分光感度は3色覚者のものとは異なるため、等輝度刺激を作成するためには被験者毎に輝度合わせをしなければならない。ここでは、準備実験で2色覚者と3色覚者全ての被験者が交照法により、参照刺激にテスト刺激の輝度合わせを行い、等輝度刺激を作成した。

交照法で用いた刺激視野は視角 2.4° 、周辺光はモニター条件と同じ灰色刺激 (色度 $x'=0.340$, $y'=0.377$, 輝度 20.5cd/m^2) でとした。テスト刺激として、モニターに呈示できる色域の外周からそれぞれの輝度レベルに合わせて22点 (10 cd/m^2)、23点 (25 cd/m^2)、22点 (40 cd/m^2) を選んだ。交照法の刺激時間周波数は15Hzとした。輝度合わせは調整法により行われ、繰り返し試行回数は2回とした。次に、これらの選択された点で挟むその他の外周の刺激の輝度を $X'Y'Z'$ 空間内の距離により線形で重み付けをして計算により求める。最後に、色域内側の点の刺激については、この点を挟む左右外周の2点、あるいは上下外周の2点から、それぞれ、距離の線形重み付けをして輝度を計算し、最終的には両者の平均値を刺激の輝度とした。

本実験では、被験者は各輝度レベルの刺激に対してカテゴリカルカラーネーミングを行った。実験の装置と手続きは実験1.2と同様である。

[被験者]

被験者は実験1.2, 1.3, 1.4と同じ3色覚者2名 (HN0, YO0)、1型2色覚者2名 (KS1, AY1)、2型2色覚者1名 (HH2) である。

2.6.3 結果

図 2.37~2.39 に輝度レベル 10 cd/m^2 , 25 cd/m^2 , 40 cd/m^2 のカテゴリカルカラーネーミングの応答結果を x' , y' 平面上で示す. 大きいシンボルが 1 回目, 小さいシンボルが 2 回目の応答結果である.

3 色覚者 HN0 と YO0 は全ての輝度レベルで互いに良く一致した色名を使用し, カラーカテゴリー領域の境界も明瞭に現れている. 一方 2 色覚者では低輝度レベル 10 cd/m^2 (図 2.37) では, 3 色覚者が緑, 茶, 赤と区別している刺激領域に対して KS1 は一貫した色名を用いることができず, 緑, 茶, オレンジ, 赤を混同して用いている. AY1 はほとんど黄を用いている. HH2 は茶と赤を混同して用いている. ただし, 3 色覚者が青と紫と応答した刺激領域に対しては, KS1 と AY1 は紫や青, HH2 は青や灰で, その他の刺激領域とは異なった色名を用いて安定した応答をしている.

次に, 中輝度レベル 25 cd/m^2 (図 2.38) では, 3 色覚者が緑, 黄, オレンジ, ピンクと応答した刺激領域に対して KS1 は黄, 緑, オレンジを混同して用いている. AY1 はほとんど黄や茶を用いている. HH2 はオレンジとピンクを用いている. ここでも図 2.34 と同様に, 3 色覚者が青と応答した刺激領域に対してはどの 2 色覚者も青で安定して応答している.

最後に, 高輝度レベル 40 cd/m^2 (図 2.39) では 3 色覚者が緑, 黄, オレンジと応答した刺激領域をどの 2 色覚者もほとんど黄と白で応答している.

以上示したように, どの輝度レベルでも刺激を等輝度にしてしまうと, 2 色覚者は 3 色覚者にとって緑から黄, オレンジ, 茶, ピンク, 赤といった赤緑方向に色みに変化する刺激領域では色名を安定して用いることができなかつた. しかし, 3 色覚者が黄, 白, 青と応答した刺激領域に対しては異なった色名を用いて応答した.

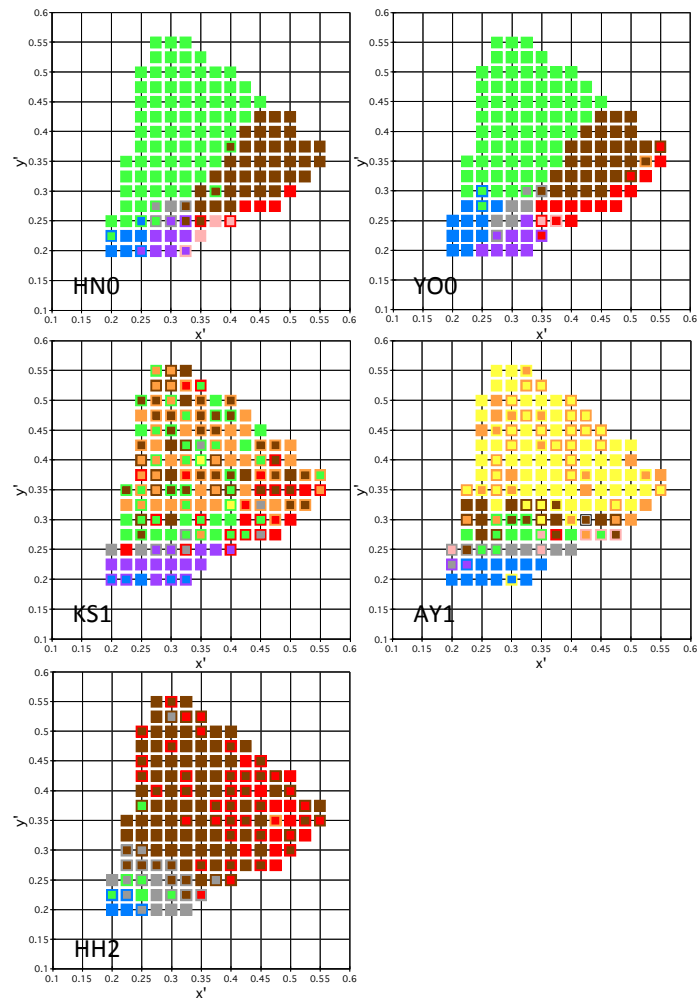


図 2.37 等輝度条件での全被験者の各刺激に対する色名応答結果。輝度レベル：10 cd/m^2 。各シンボルの色が色名を表す。外側の大シンボルが1回目，内側の小シンボルが2回目の応答結果を示す。

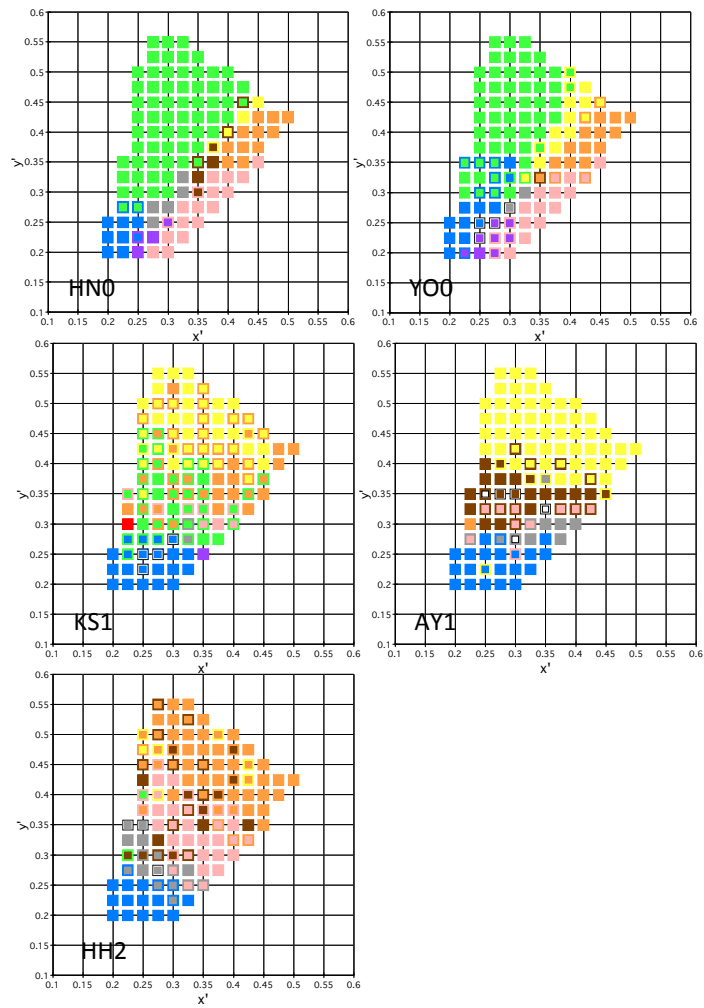


図 2.38 等輝度条件での全被験者の各刺激に対する色名応答結果。輝度レベル：25 cd/m²。各シンボルの色が色名を表す。外側の大シンボルが 1 回目、内側の小シンボルが 2 回目の応答結果を示す。

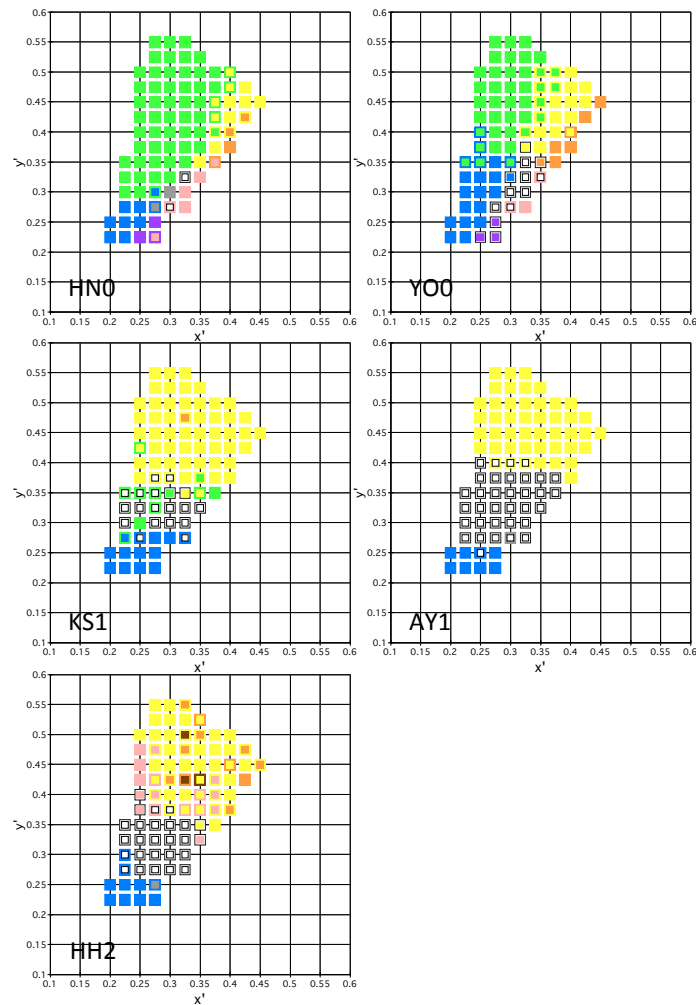


図 2.39 等輝度条件での全被験者の各刺激に対する色名応答結果。輝度レベル：40 cd/m^2 。各シンボルの色が色名を表す。外側の大シンボルが1回目、内側の小シンボルが2回目の応答結果を示す。

図 2.40 に、3色覚者 HN0 を参照者にした場合の各被験者の類似性指標 SI を示す。3色覚者の YO0 は $\text{SI}=0.49$ となり、3色覚者間の色名分布のオーバーラップは約 50% であることが分かる。2色覚者では KS1 が $\text{SI}=0.17$, AY1 が $\text{SI}=0.07$, HH2 が $\text{SI}=0.15$ であり、3色覚者とは色名分布が大きく異なっていることが分かる。

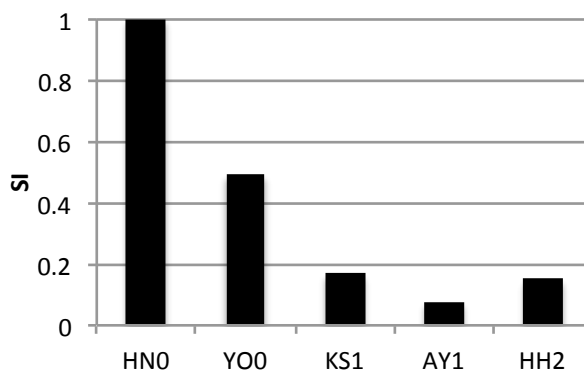


図 2.40 実験 1.5（等輝度条件）での各被験者の類似性指標 SI. 3色覚者 HN0 を参照者に行している

2.7 考察

本章では 1 型，2 型 2 色覚者が弁別できないはずである赤と緑がなぜ色名には現れるのか，2 色覚者が 3 色覚者と同様なカテゴリカルカラーネーミングを可能にする視覚的手掛かりを明らかにすることを目的とした．これまでの過去研究では手がかりとして、桿体の寄与，残存錐体の影響，非線形擬似的赤緑反対色チャンネルの存在などが提案されてきた．そこで本研究ではまず，これらの可能性のある手がかりが実際に役立つものであるかどうかを調べるために様々な刺激呈示の条件を用いて 11 基本色名によるカテゴリカルカラーネーミング実験を行った．

実験の結果から色票条件ではほとんどの 2 色覚者の色名応答は 3 色覚者のものとよく一致していた．しかし，1 名の 2 色覚者は赤緑方向の色名を区別して用いることができず，3 色覚者とは異なった結果を示した．また，モニター条件では，2 色覚者の赤緑方向の色名の区別が悪くなったため，セントロイドの分離が悪くなり，3 色覚者とは明確な違いがあった．これらの結果はカラーネーミングを行う際に用いる 2 色覚者の視覚手掛かりはモニター条件でかなり失われるものであることを示している．

次に小視野条件，短時間条件ではモニター条件に比べ，色名の区別はやや劣化するが，大きな違いはないという結果が得られた．もし，3 色覚者のカラーネーミングを行う際に用いる視覚的手掛かりが桿体や残存錐体の寄与であるならば，モニター条件では色名の混同は起こらず，小視野条件や，短時間呈示条件で混同が起こるはずである．したがって，過去の研究であげられた桿体や残存錐体の寄与は手掛かりとしての

可能性は低いといえる。

また、等輝度条件では、刺激を各被験者で等輝度にして提示すると、2色覚者は赤緑方向の色名を全く区別できなくなる結果だった。L, M 錐体応答の非線形変換により擬似的な赤緑チャンネルが形成され、それが手掛かりになっているのであれば、等輝度条件でも赤緑方向の区別が出来るはずである。したがって過去の研究であげられた記事的な赤緑チャンネルが手掛かりとなっている可能性も低いといえる。

以上の結果から、2色覚者が3色覚者のカラーネーミングを行う際に用いる視覚的手掛かりはモニター条件でかなり失われ、小視野条件、短時間呈示条件ではさらに失われ、等輝度条件では全く用いることができなくなる特性を持っていることが分かった。

しかし、2色覚者は等輝度条件では、赤緑方向では色名の区別ができなくなる一方で、黄青方向の色名の区別は劣化することがなかった。これらの結果から2色覚者は赤緑方向の色名を用いる際には刺激の輝度（明度）を手掛かりとして使い、黄青方向の色名方向ではこの手掛かりは用いない、つまり赤緑方向は輝度チャンネル応答に基づき色名応答をし、黄青方向は黄青チャンネルの応答に基づき色名応答をしているという仮説が導出される。

そこで、2色覚者の色名応答を詳細に調べるため、錐体応答空間に書く刺激に対する色名応答を表した。色票条件の結果について、図 2.40 に3色覚者 HN0、図 2.41 に1型2色覚者 KS1、図 2.42 に1型2色覚者 AY1 の色名応答結果を (M, S) 錐体応答面上に示す。1型2色覚者は L 錐体を欠損しているため、横軸と縦軸にはそれぞれ M 錐体応答と S 錐体応答（対数）を取った。

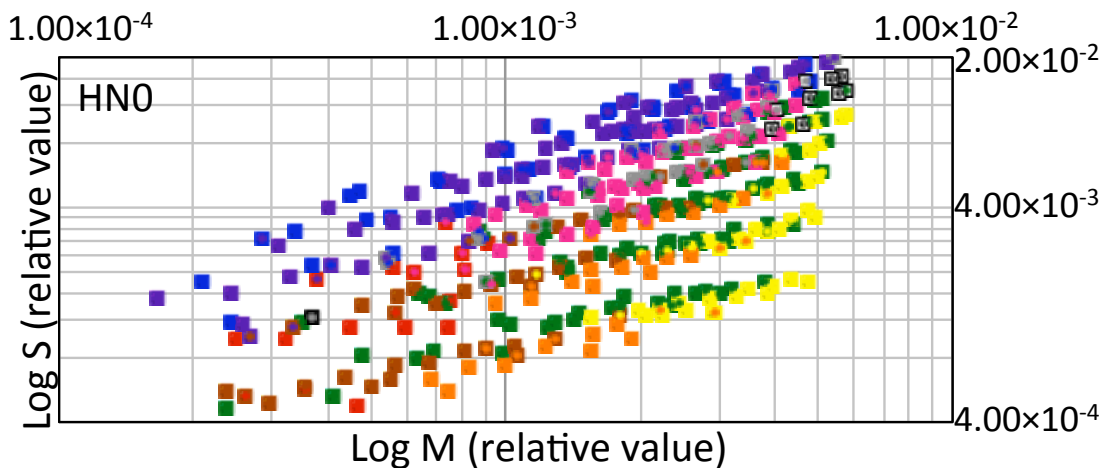


図 2.41 色票条件での 3 色覚者 HN0 の色名応答結果の (M, S) 錐体面上の分布

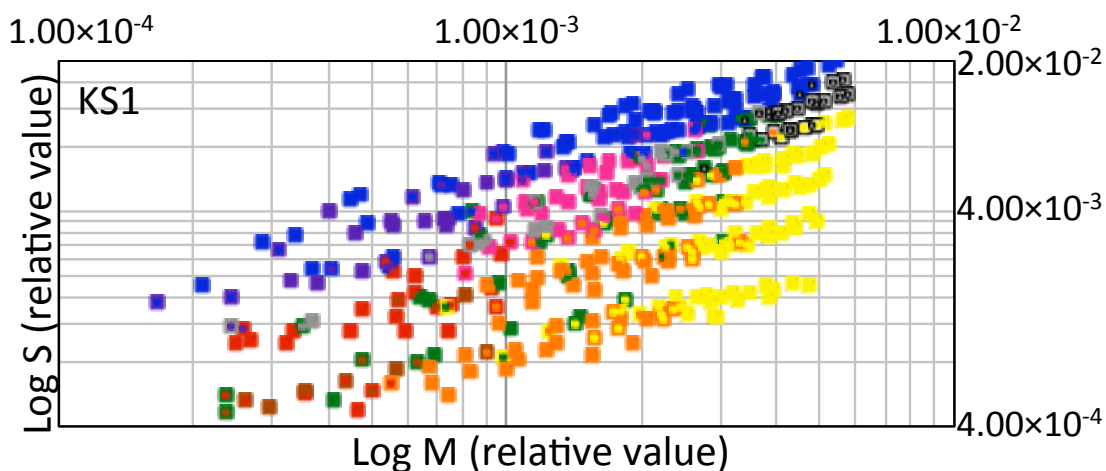


図 2.42 色票条件での 1 型 2 色覚者 KS1 の色名応答結果の (M, S) 錐体面上の分布

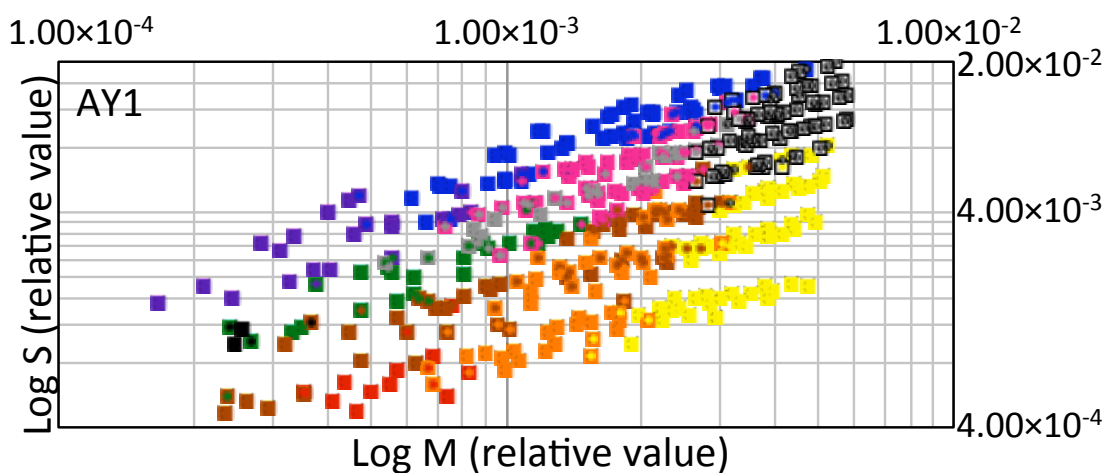


図 2.43 色票条件での 1 型 2 色覚者 AY1 の色名応答結果の (M, S) 錐体面上の分布

これらの図からわかることは、まず 3 人の被験者に共通している特徴として、グラフの右上に白、そこから左下に向かい灰が分布し、グラフのほぼ中央に右上から左下へ直線上に無彩色領域が存在していることである。そしてこの無彩色領域を上下にはさみ、上側に青と紫、下側に黄とオレンジが分布し、無彩色領域と重なるようにピンクが分布している。

次に、3 色覚者と 2 色覚者で異なっている点は、3 色覚者では青と紫は重なって分布し、黄とオレンジも重なって分布しているが、2 色覚者では青と紫も黄とオレンジもほぼ重ならず、M 値（輝度値）が大きい方に青、黄が分布し、小さい方に紫、オレ

ンジが分布しているという点である。これは3色覚者ではL値の違いで青と紫、あるいは黄とオレンジを区別することができ、輝度値を用いる必要がないが、2色覚者ではL値が存在しないため、M値（輝度値）の違いにより区別しなければならないことを示している。

緑の分布に関しては3色覚者と2色覚者間で異なり、さらに2色覚者間でも大きく異なっている。3色覚者では緑は黄とオレンジに重なるように分布しているが、1型2色覚者KS1では無彩色領域の白と灰の間の高輝度領域に分布し、1型2色覚者AY1では無彩色領域の低輝度領域に分布している。これらから、KS1は無彩色で高輝度の刺激を緑の色名をつけ、AY1は無彩色で低輝度の刺激を緑の色名をつけていて、2色覚者両者ともに緑の色名応答を輝度の違いを用い行なっていることがわかる。

また、ピンクについては、3色覚者ではL値の違いを用いて灰とピンクを区別しているが、2色覚者では黄青方向のわずかな彩度と輝度値を用いてピンクの色名応答をしていると考えられる。

以上示したように、2色覚者は輝度チャンネル応答に基づき赤緑方向の色名応答を行なっているとする仮説が支持されることがわかる。2色覚者は輝度の違いを用いることにより、黄青応答のみでも色票条件のように3色覚者と類似したセントロイドの分布を形成する事ができる。

モニター条件で2色覚者の色名の区別が劣化したのは、色票条件のように色票を手にとって傾け、照明のあたり具合から輝度変化を見るような手段が取れず、色票表面の明度を正確に判断することができなくなったためであると考えられる。つまり、明度が高い表面は明度が低い表面に比べ、照明が当たっている部分と影の部分では反射光の輝度差が大きいため、この僅かな輝度変化を捉えることで表面の明度をより正確に判断することができたということである。また、小視野条件や短時間呈示条件で2色覚者の色名の区別がさらに悪くなったのは、2色覚者は刺激の輝度（明度）を判断するためには十分な刺激表面の面積と観察時間が必要であるがそれが十分に与えられなかったためであると考えられる。黄青方向の色名応答は小視野や短時間呈示でも変わらなかったことから赤緑方向の色名判断とは異なるメカニズムにより行なっていることが分かる。刺激表面の明度は2色覚者にとって、色名応答の重要な視覚的手がかりであるといえる。

2.8 まとめ

本章では2色覚者が3色覚者のカラーネーミングを行う際に用いる視覚的手掛かりを明らかにするために、5種類の刺激呈示条件を設定し、カテゴリカルカラーネーミング実験を行った。その結果、2色覚者は実際の色票を観察すると3色覚者と類似したカテゴリカルカラーネーミングを行うが、刺激をモニター上に呈示することで赤緑方向の区別が大きく劣化し、小視野や短時間呈示にするとさらに劣化する。さらに刺激を等輝度で呈示することで赤緑方向の色名を完全に混同してしまうことがわかった。また、錐体空間内での色名応答結果を分析することで、2色覚者は色票条件では刺激の輝度の違いにより色名を使い分けることが可能であることが分かった。これらの結果から2色覚者は色票の輝度（明度）を重要な手がかりとし、3色覚的カテゴリカルカラーネーミングを行なっていることが示唆された。

第 3 章

2 色覚者の色記憶カテゴリー

3.1 はじめに

第 1 章では 2 色覚者が 3 色覚者のカテゴリーカルカラーネーミングを行うために輝度が重要な手がかりとなっていることが示された。しかし、2 色覚者がカテゴリーカルカラーネーミングを行うどの段階で輝度情報を使用しているのかは明らかになっていない。輝度情報を使用する段階として 2 つの仮説が考えられる。

仮説 1. 2 色覚者は輝度情報を使用し、3 色覚者と類似したカテゴリーチャンネルを持ち、カラーネーミングを行う際にはそのカテゴリーと対応する色名応答を行なう。

仮説 2. 2 色覚者は 3 色覚者とは異なるカテゴリーチャンネルを持ち、表面輝度の違いを使用し、カテゴリーチャンネルをさらに分類し、3 色覚者と類似した色名応答に当てはめている。

本章では 2 色覚者は上記のどちらの段階で輝度情報を使用しているかを調べる。

過去の研究で[27], 3 色覚者はカテゴリーカル色知覚を行うメカニズムを持ち、色記憶はカテゴリーチャンネルを反映していることを示唆している。このことから 2 色覚者の色記憶を調べることで 2 色覚者の持つカテゴリーチャンネルが 3 色覚者と類似しているかどうか明らかにできると考えられる。そこで本章では 2 色覚者の色記憶カテゴリーを調べることでどの段階で輝度情報を使用しているかを明らかにする。

3.2 実験 2.1: カスケード選択法による色記憶の再生実験

3.2.1 方法

実験装置は実験 1.1 の色票条件と同じものを用いる。被験者は実験 1.1 と同じ 3 色覚者 2 名 (HN0, HM0), 1 型 2 色覚者 3 名 (KS1, AY1, YY1), 2 型 2 色覚者 2 名

(HH2, TN2) である。実験刺激として、424 枚の OSA 色票を用いる。実験刺激はテスト色票として 424 枚の OSA 色票全体よりほぼ均等に選んだ色票 20 枚を用いた。選択される色票は 424 枚の OSA 色票を用いる。テスト色票、選択される色票は図 3.1~3.3 に L の値ごとに示す。×がテスト色票，ドットが選択される色票を示す。

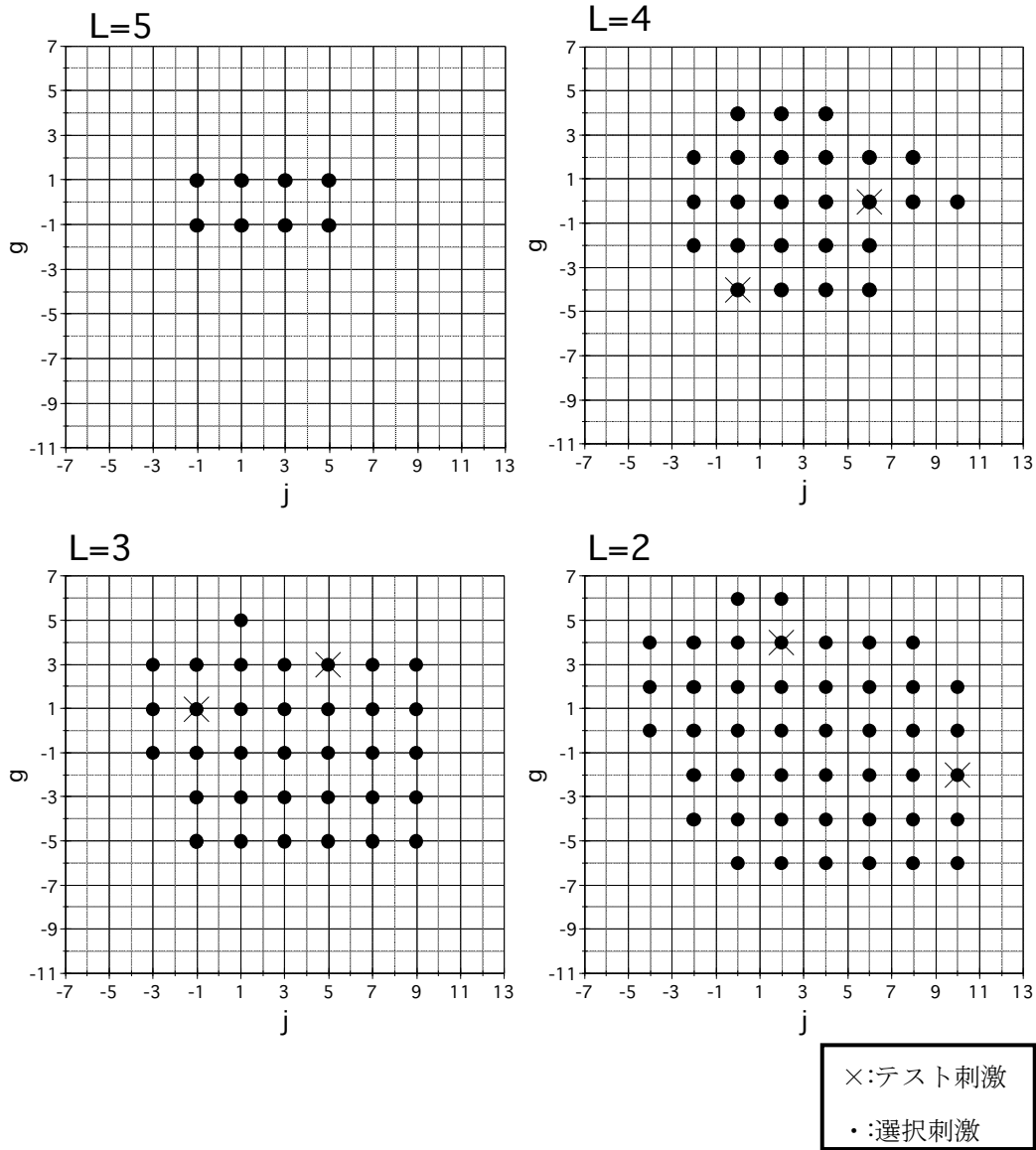
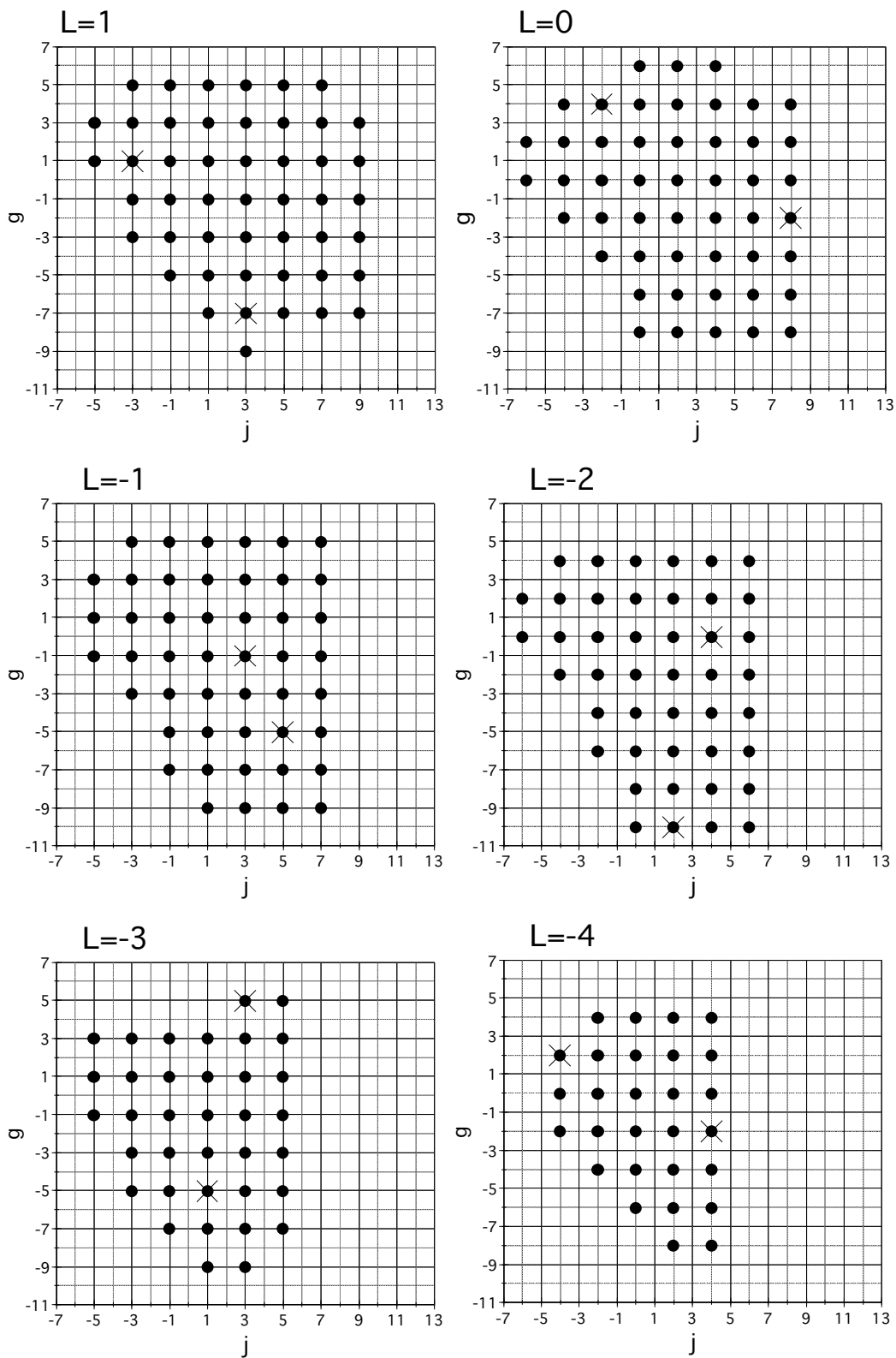


図 3.1 実験 2.1 で用いた刺激



×: テスト刺激
 ・: 選択刺激

図 3.1 実験 2.1 で用いた刺激

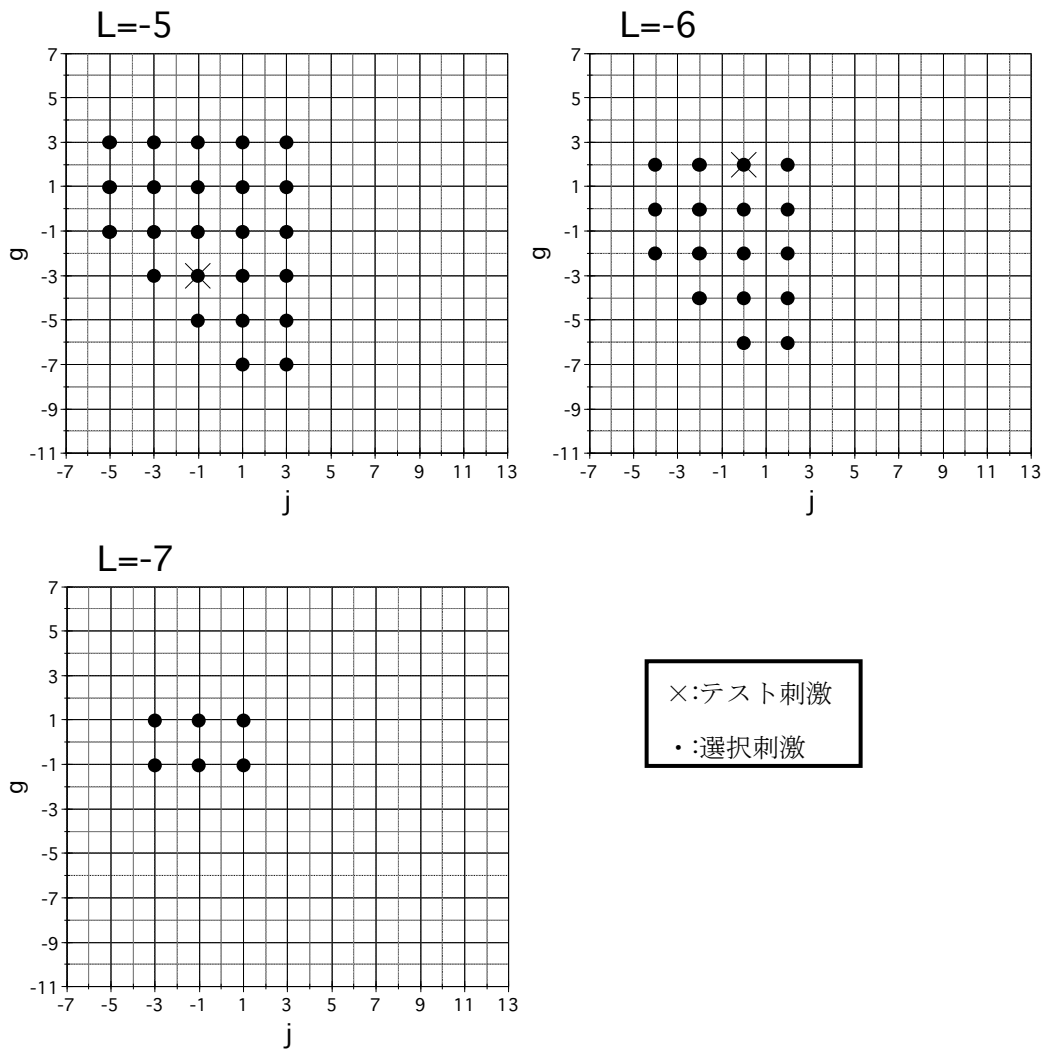


図 3.3 実験 2.1 で用いた刺激

[手続き]

被験者はまず 3 分間照明に順応し、続いて 5 秒間 1 枚のテスト色票を記憶する。次に 30 秒間眼を閉じて待機する。テスト色票の呈示されている間とその前後 10 秒間の合計 25 秒間に、被験者はある 3 桁の整数から 3 ずつ減算していくという計算課題を同時に行う。これは言葉によって色票の色を記憶することを妨害するためである。その後記憶した色票をカスケード選択法によって 424 枚の OSA 色票全体から選び出す。以上を 20 枚の色票に対し行う。

カスケード選択法とは色票を段階的に絞り込んで最終的に 1 枚の色票を選び出す手法である。概要を図 3.4 に示す。

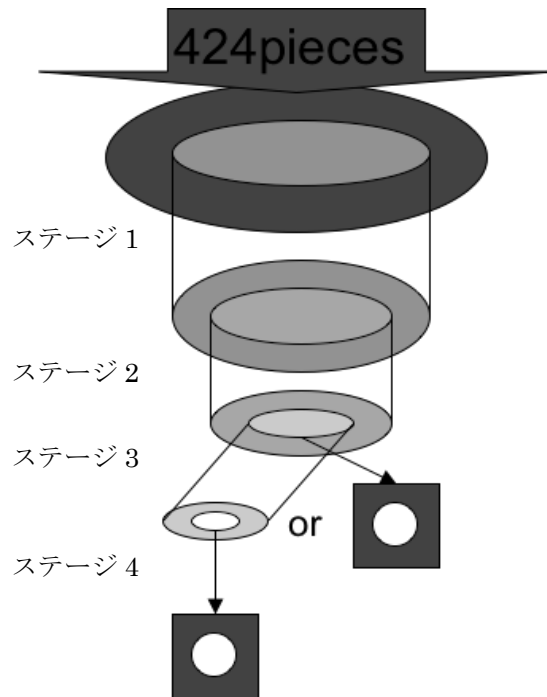


図 3.4 カスケード法の概要

ステージ 1 : 色票全体から明らかに違う色票を除く。

ステージ 2 : 残された色票の中からおそらく違う色票を除く。

ステージ 3 : 残された色票の中からテスト色と思う色を残し、他を除く。どれがテスト色か確信を持ってない場合は複数枚を残す。

ステージ 4 : 一番もっともらしい色票を 1 枚強制的に選び出す。

段階的に色票を選択することで、各ステージで選ばれた色票の色空間内の分布を調べることが出来るため、色の記憶特性が調べることが出来る。

3.2.2 結果

被験者 7 名それぞれの記憶実験の結果のうち、3 色覚者の傾向、2 色覚者の傾向がわかりやすい 3 種類(test95,263,280)をのテスト色票の結果を OSA 色空間上にプロットしたものを図 3.5~3.25 に示す。グラフは、輝度方向 $L=-7, L=-6, -5, L=-4, -3, L=-2, -1, L=0, 1, L=2, 3, L=4, 5$ の 7 つのグラフから成り、それぞれ横軸は j 方向、縦軸は g 方向を表す。●のシンボルはそれぞれのステージで残した色票を示し、小さいものから順にステージ 1, 2, 3, 4 で残した色票を示す。×のシンボルは記憶したテス

ト色票を示す. また色付きの口のシンボルは実験 1.1 の結果を示す.

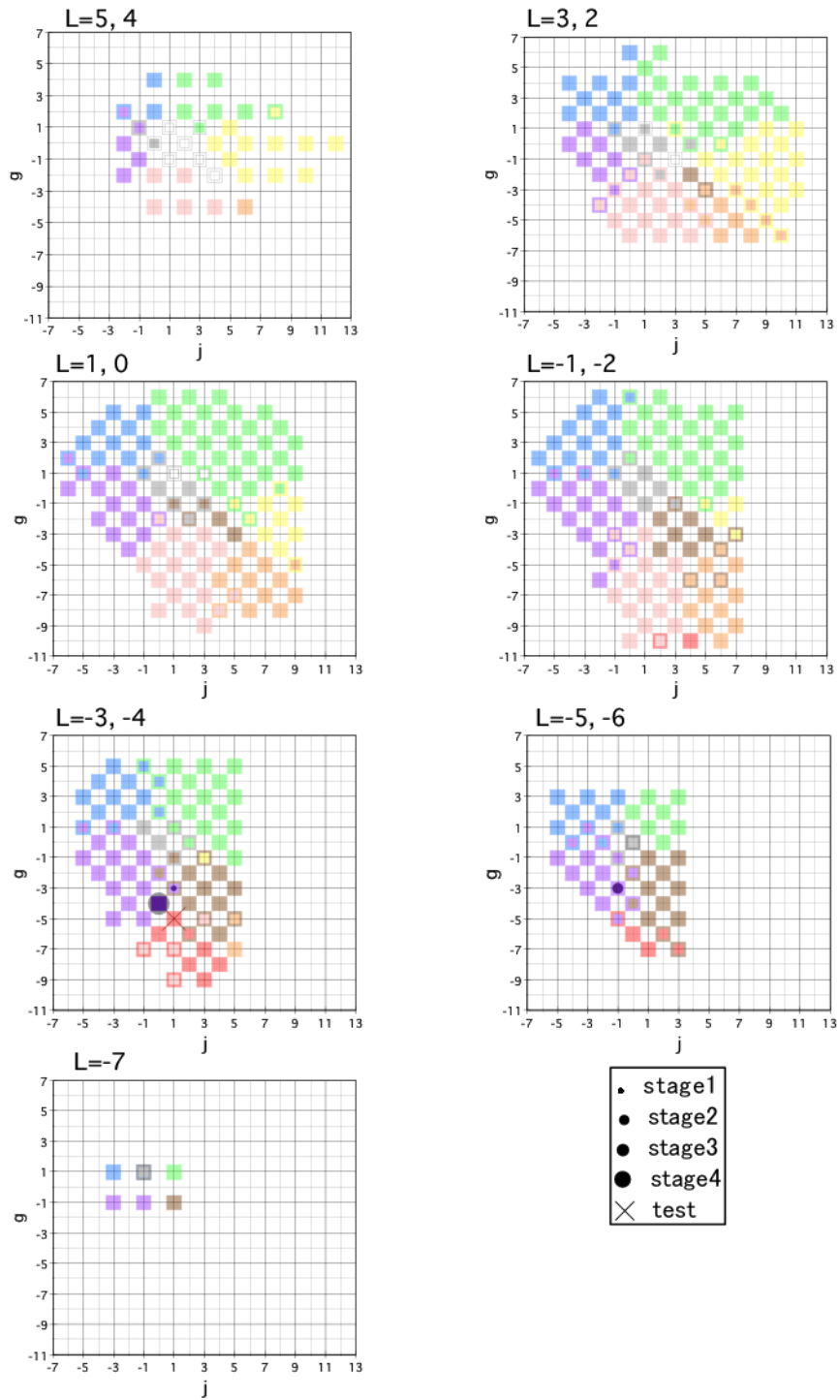


図 3.5 HN0 記憶実験の結果(test95)

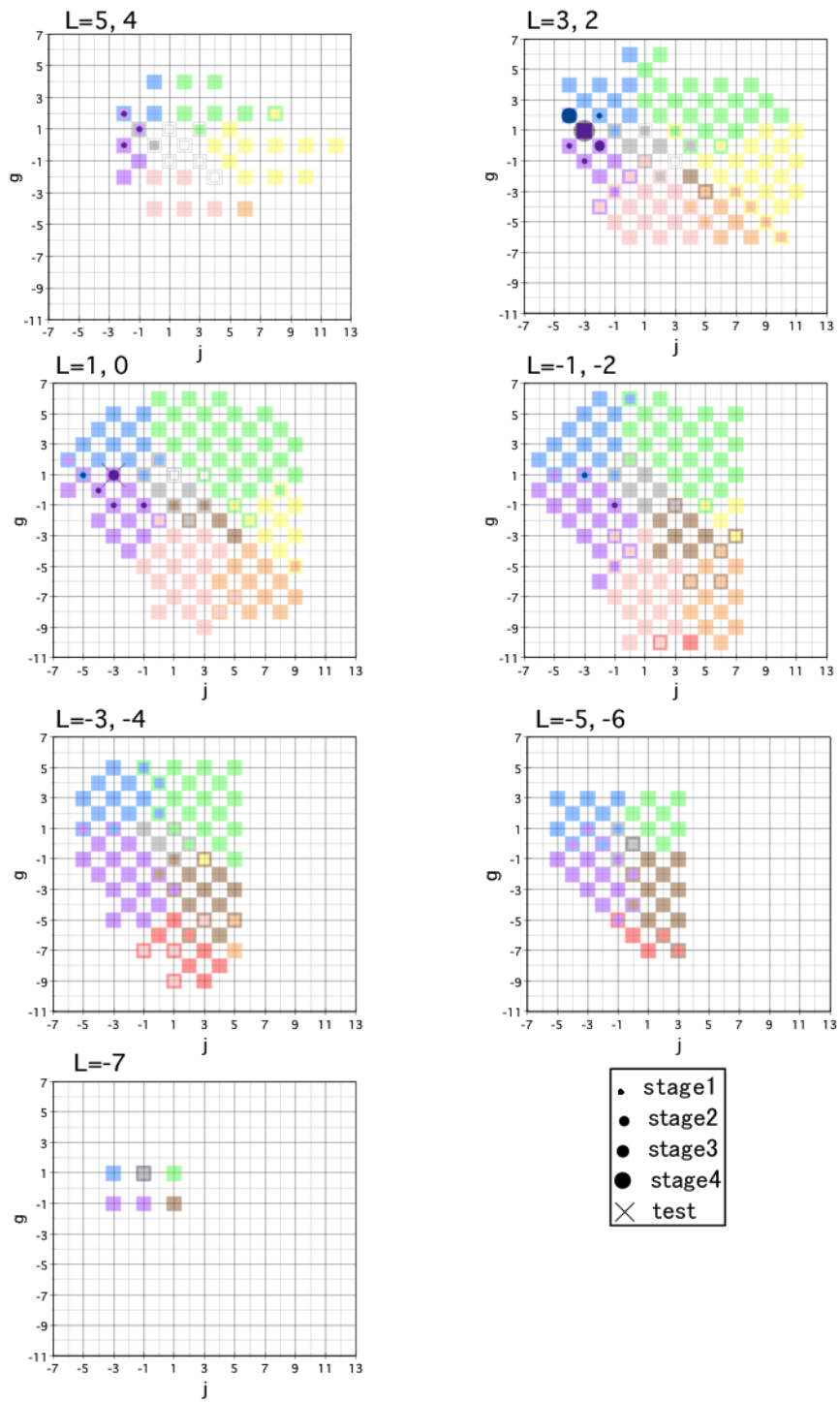


図 3.6 HN0 記憶実験の結果(test263)

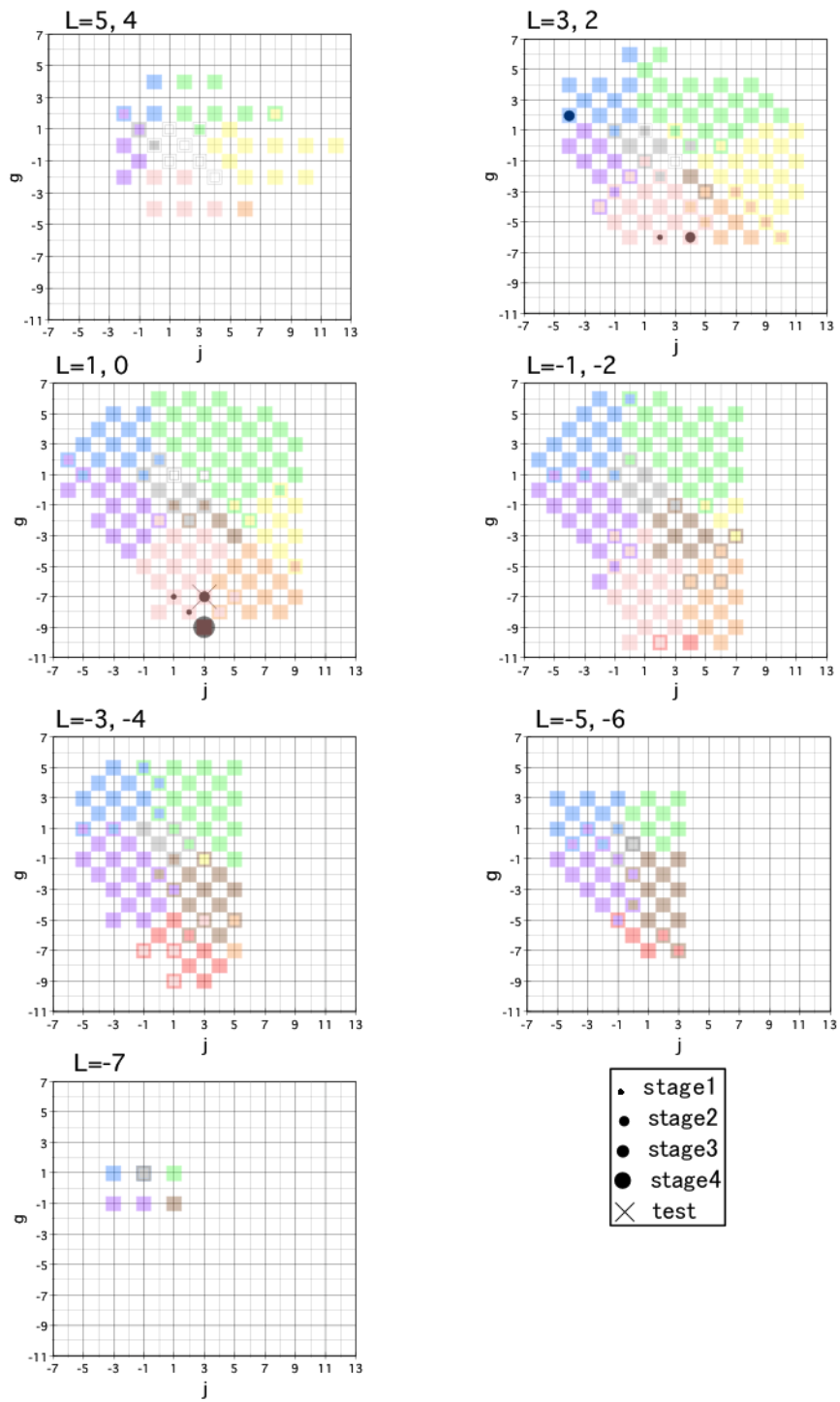


図 3.7 HN0 記憶実験の結果(test280)

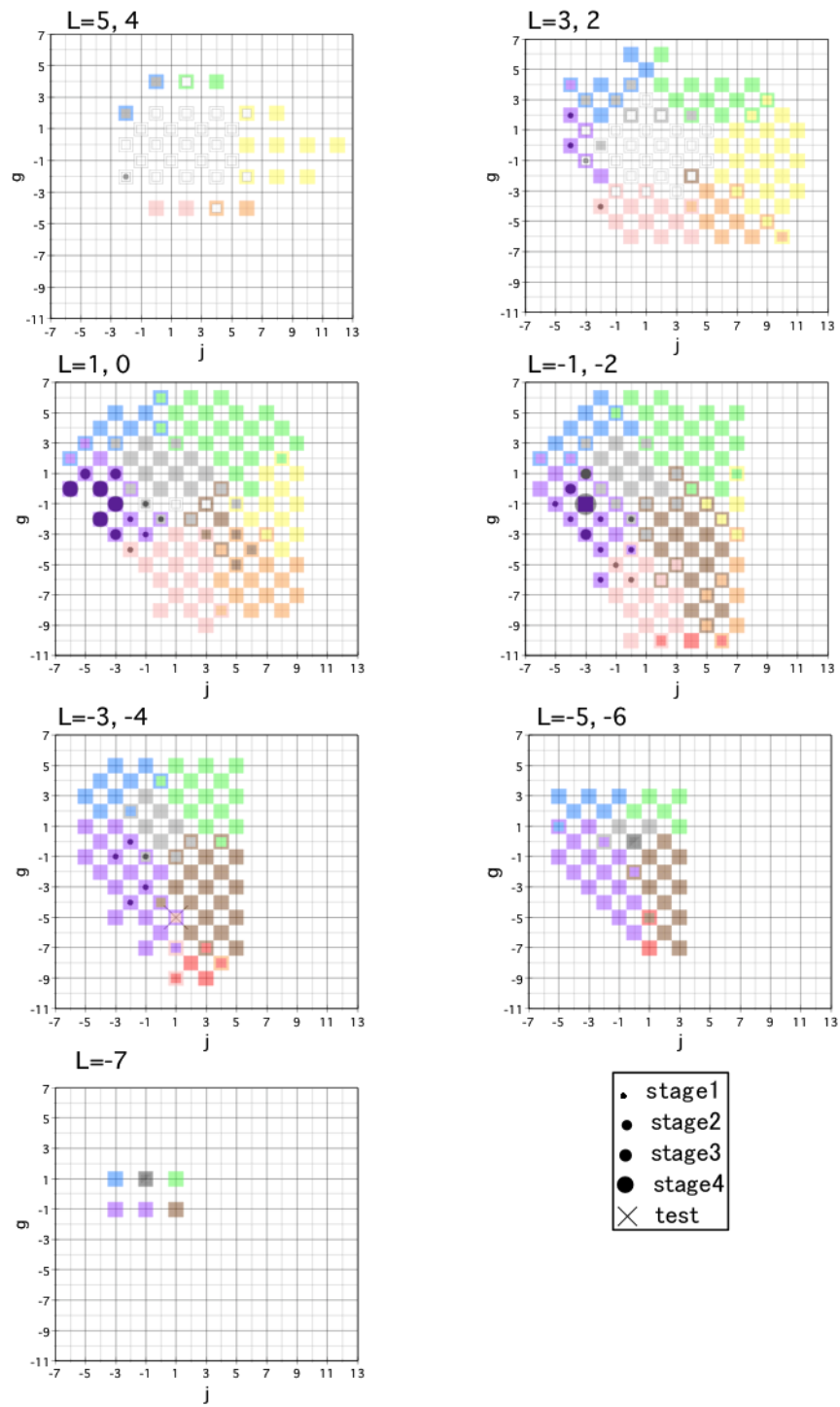


図 3.8 HM0 記憶実験の結果(test95)

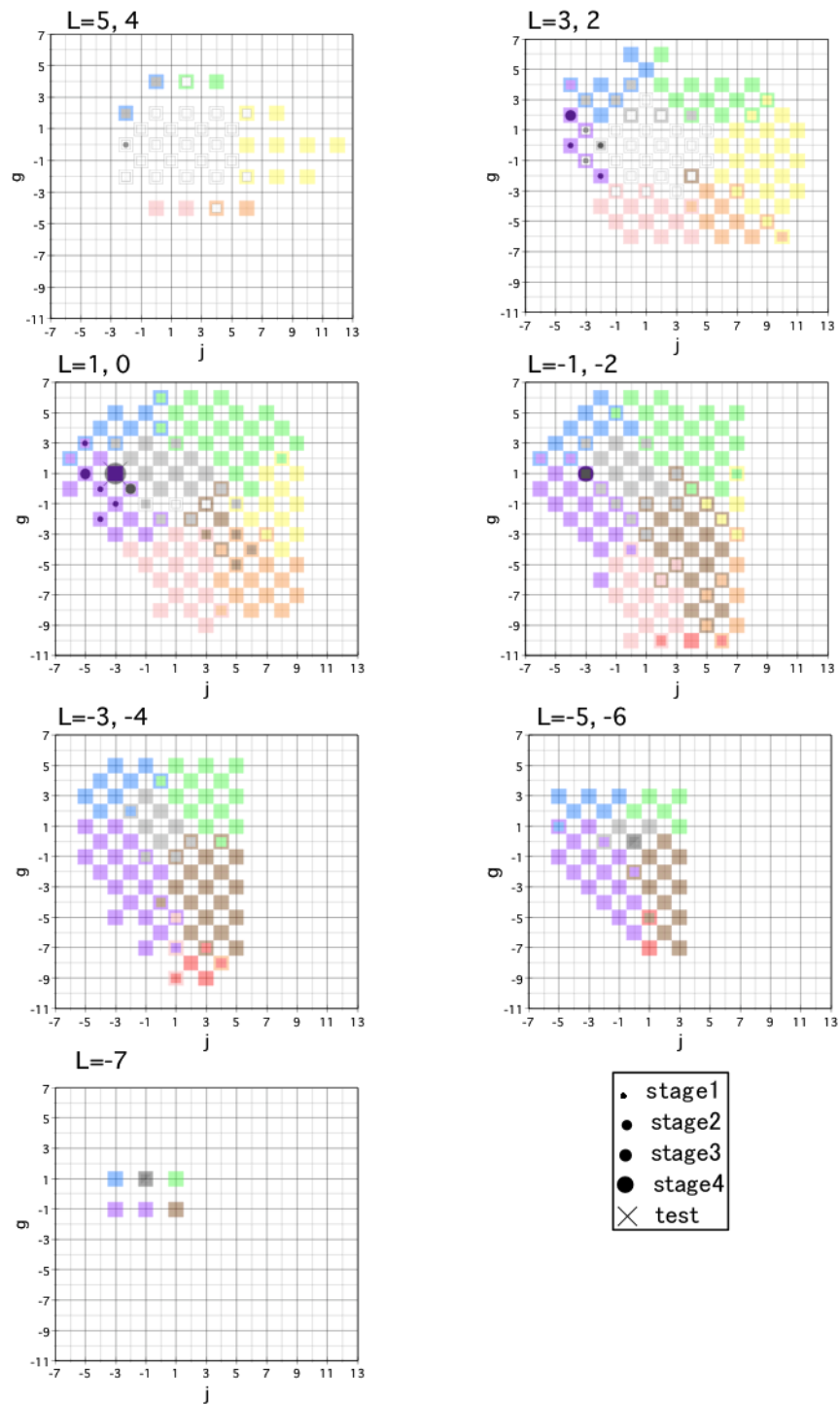


図 3.9 HM0 記憶実験の結果(test263)

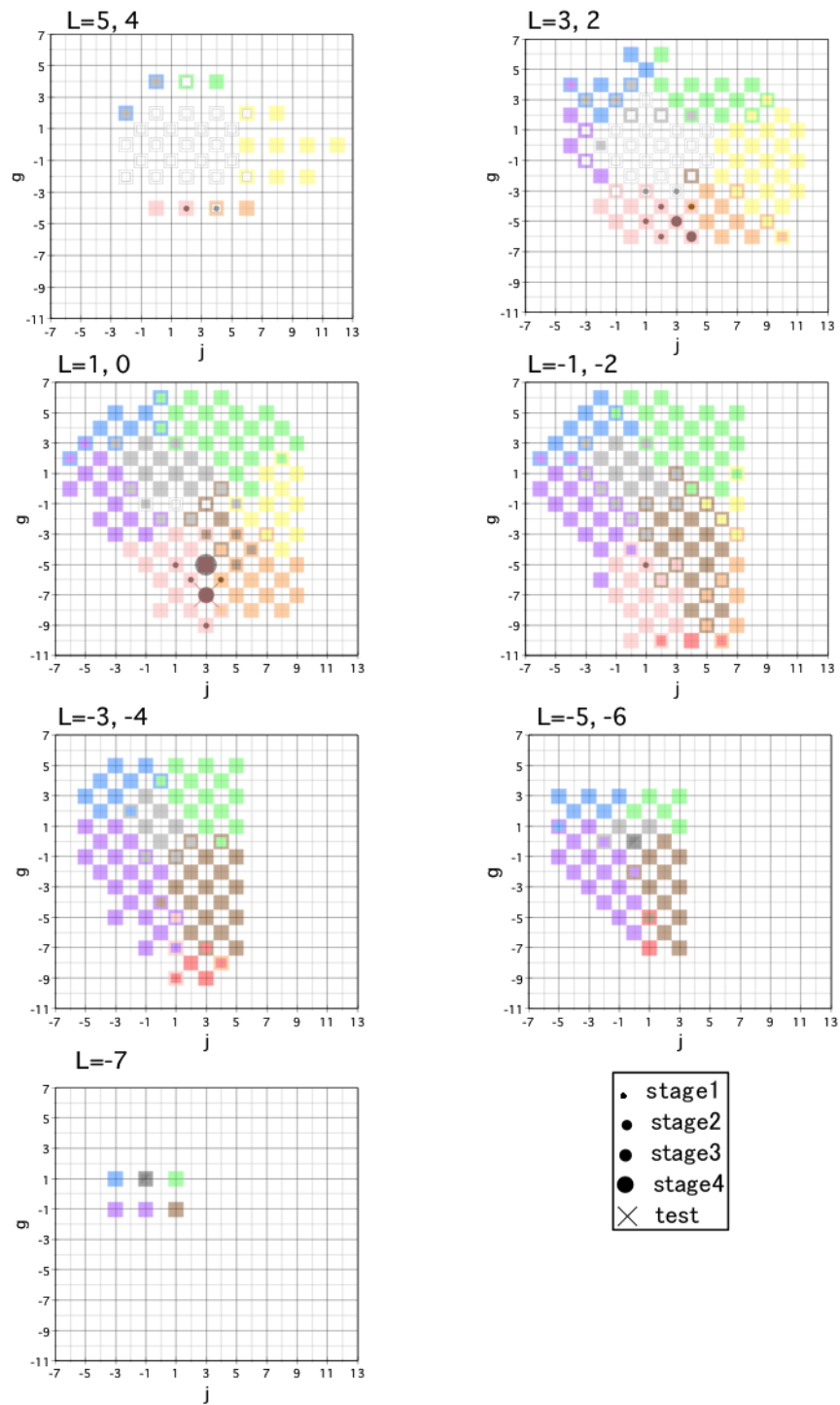


図 3.10 HM0 記憶実験の結果(test280)

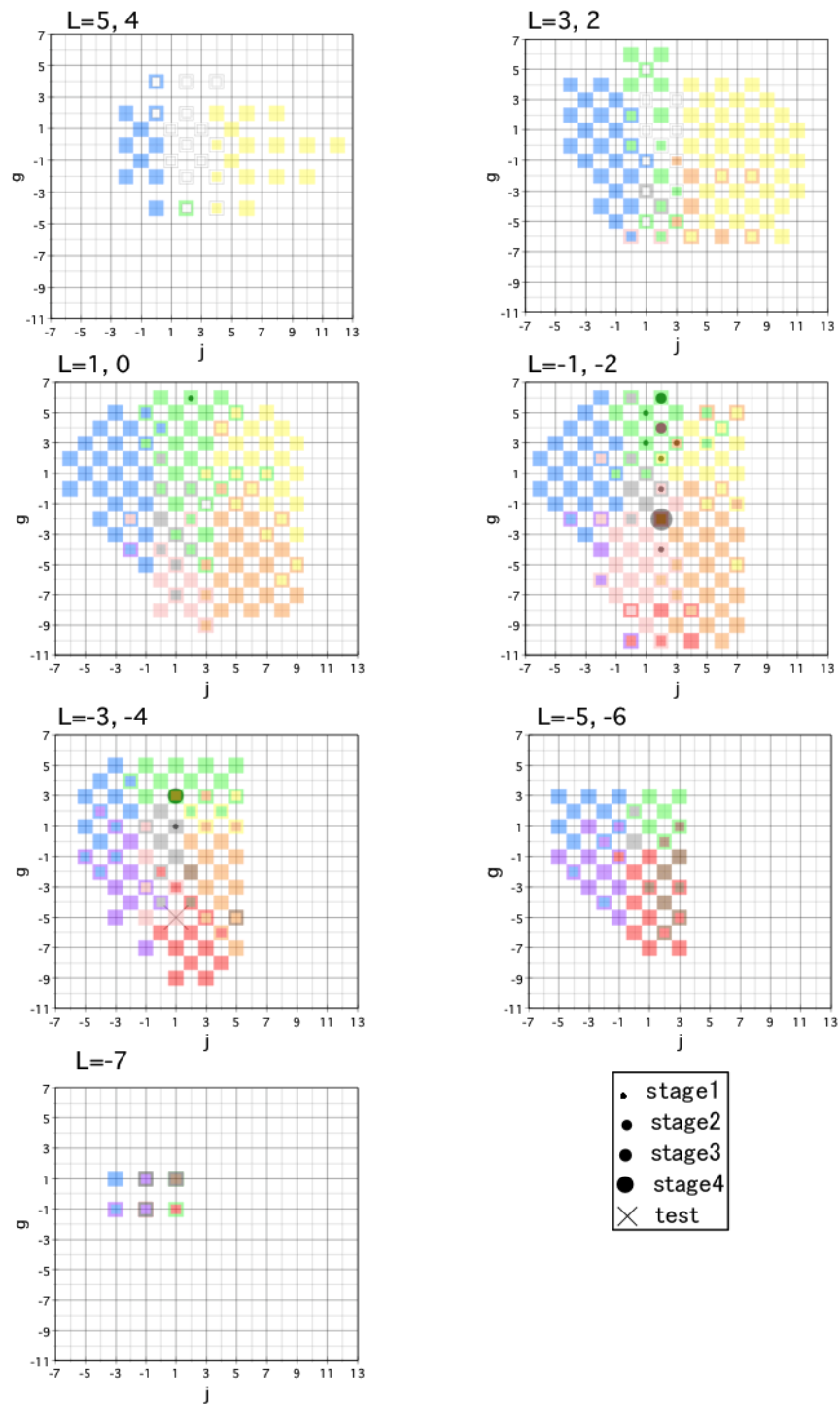


図 3.11 KS1 記憶実験の結果(test95)

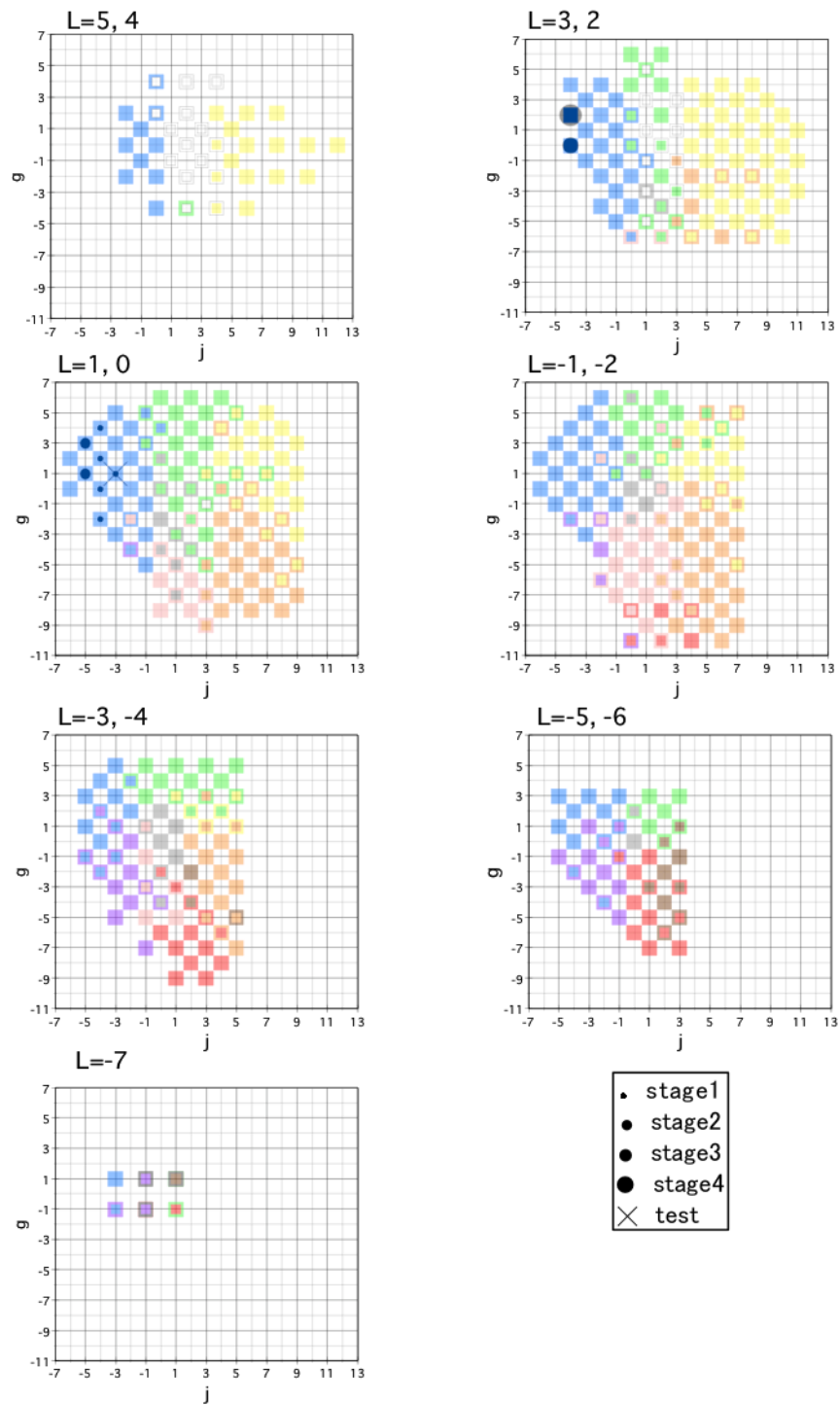


図 3.12 KS1 記憶実験の結果(test263)

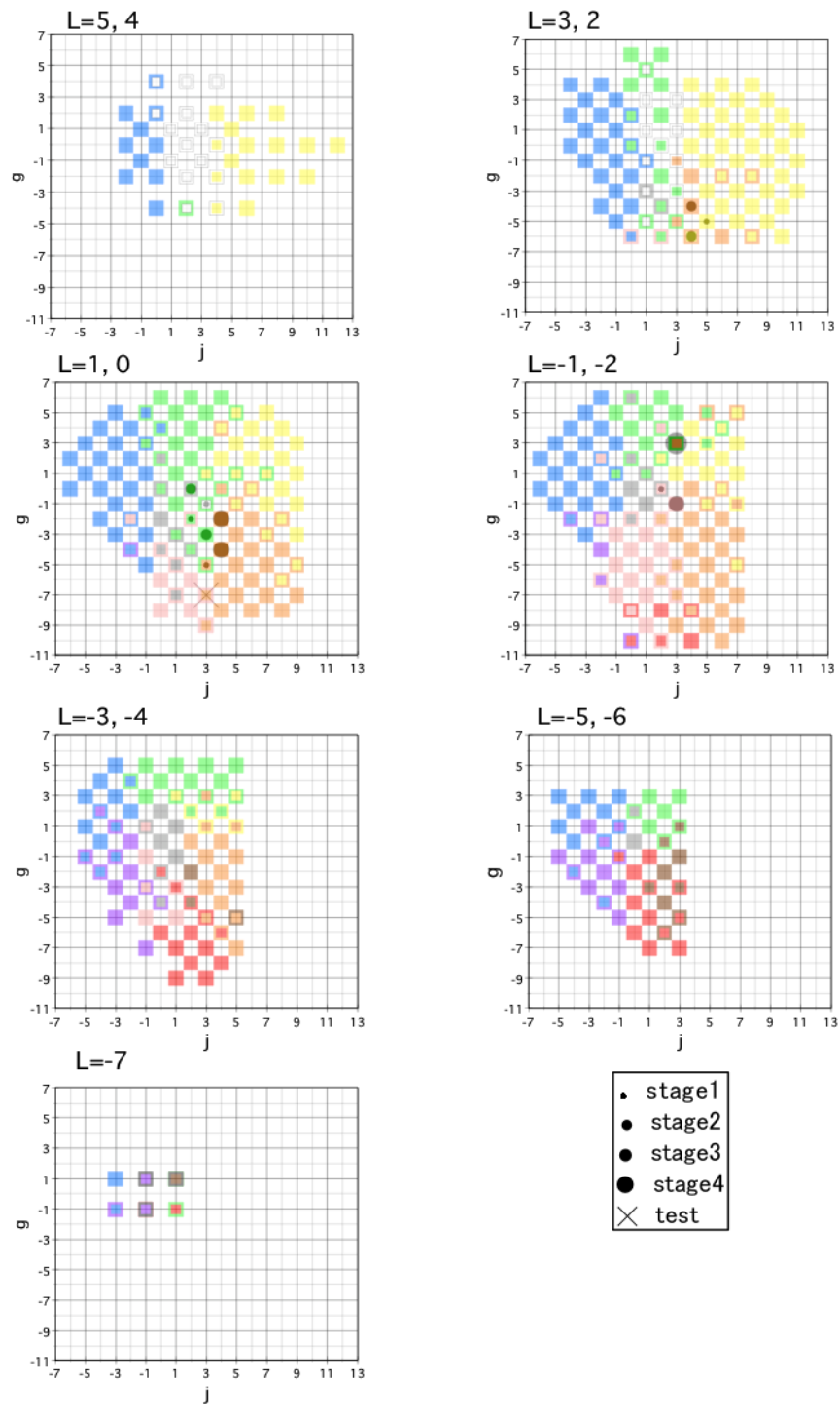


図 3.13 KS1 記憶実験の結果(test280)

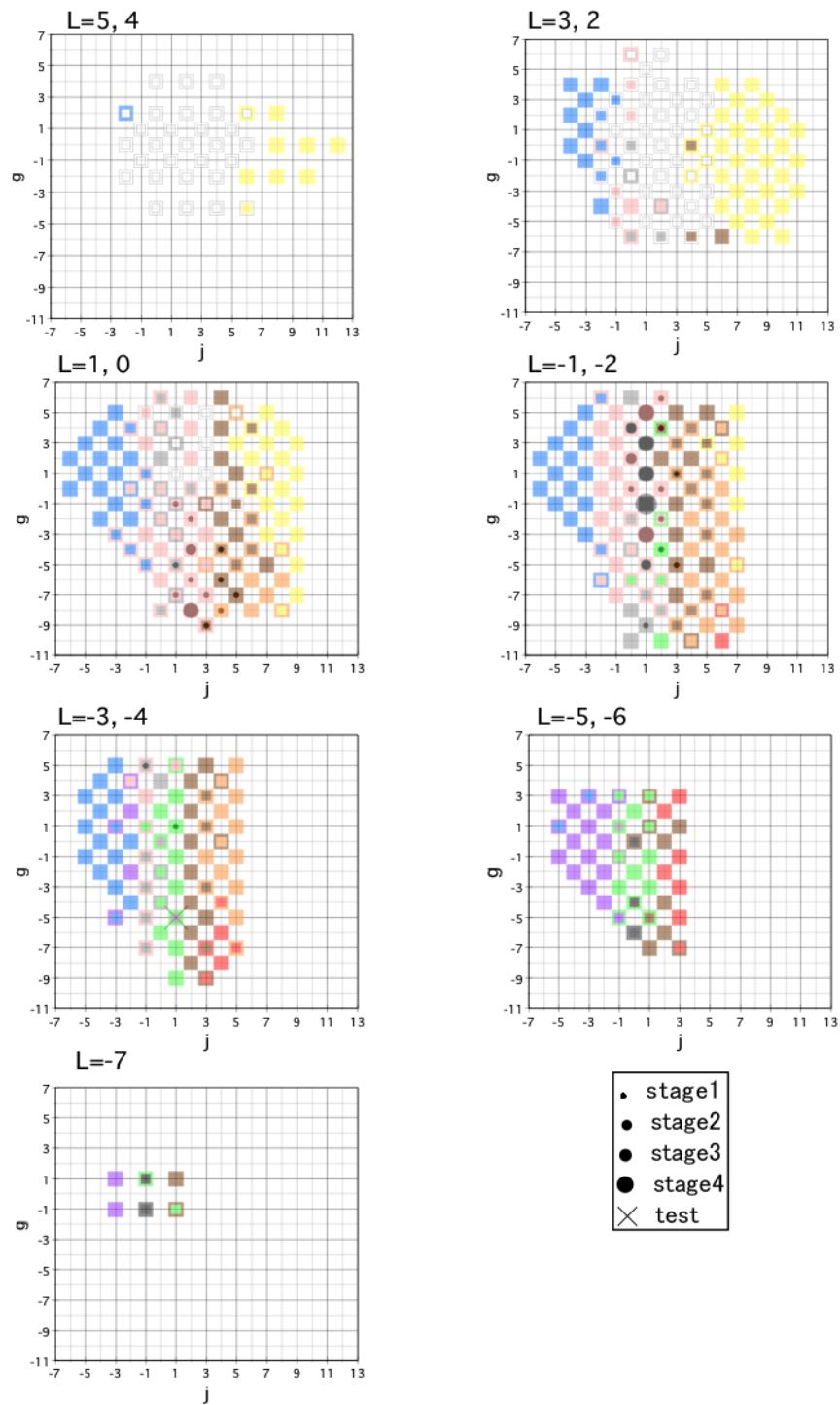


図 3.14 AY1 記憶実験の結果(test95)

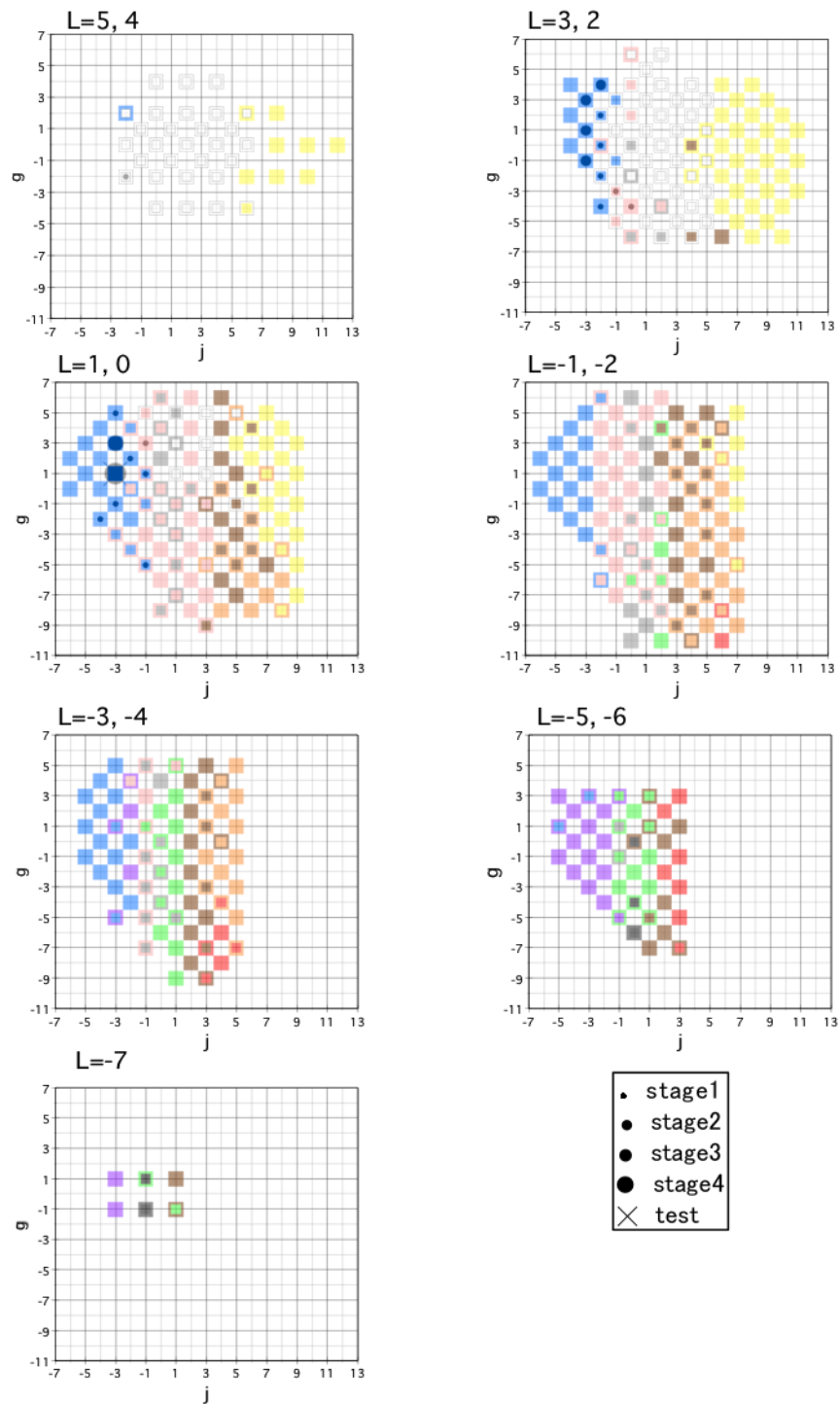


図 3.15 AY1 記憶実験の結果(test263)

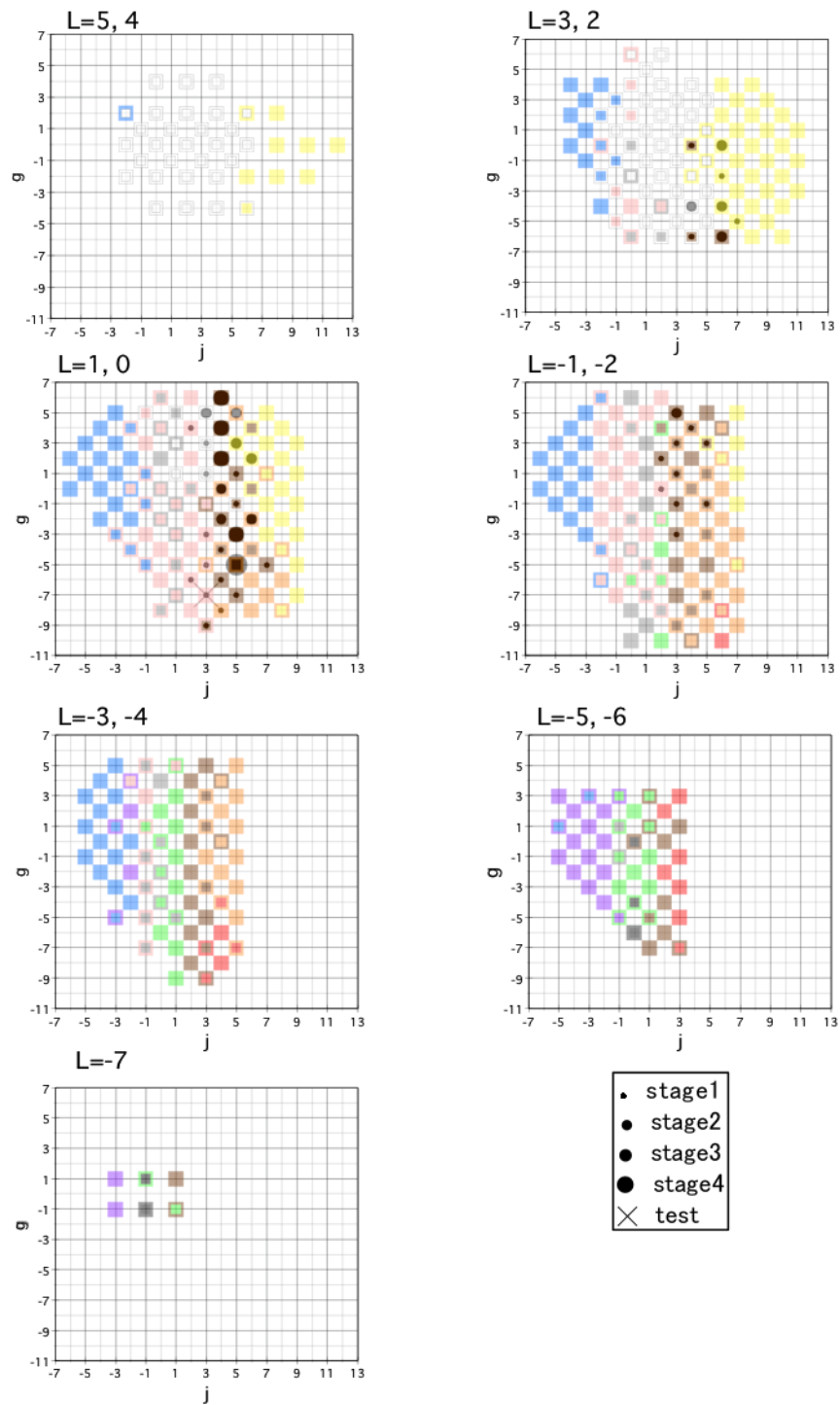


図 3.16 AY1 記憶実験の結果(test280)

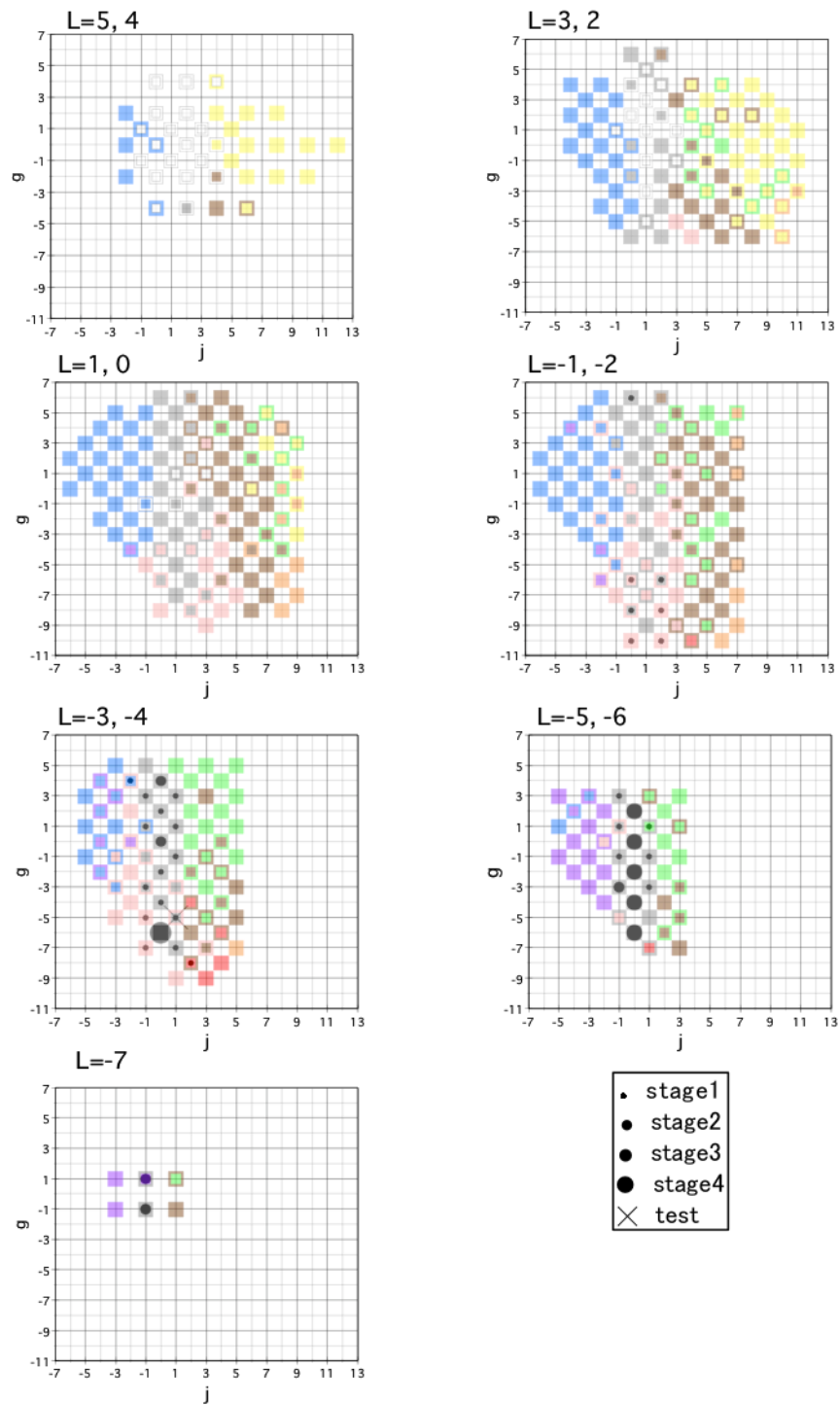


図 3.17 YY1 記憶実験の結果(test95)

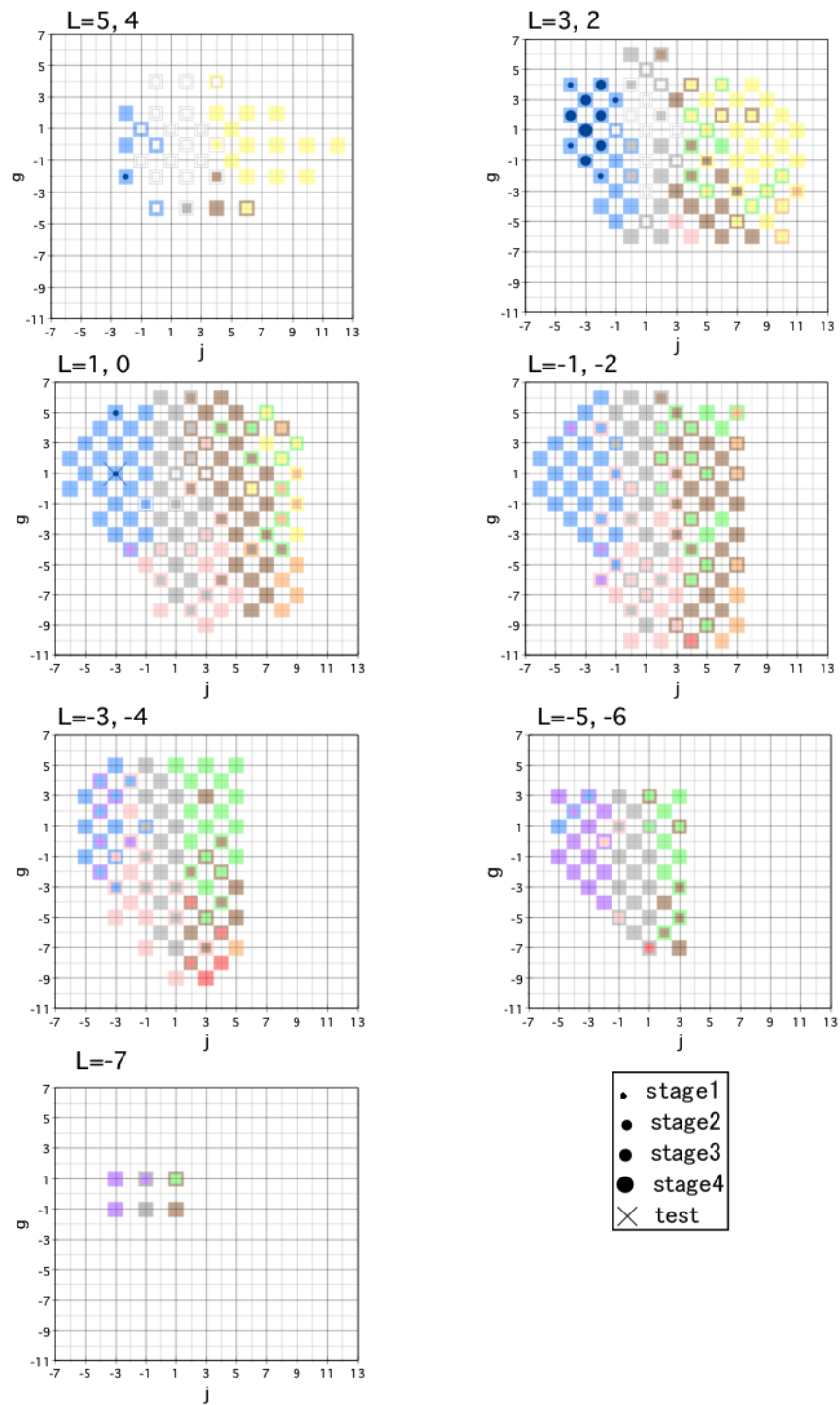


図 3.18 YY1 記憶実験の結果(test263)

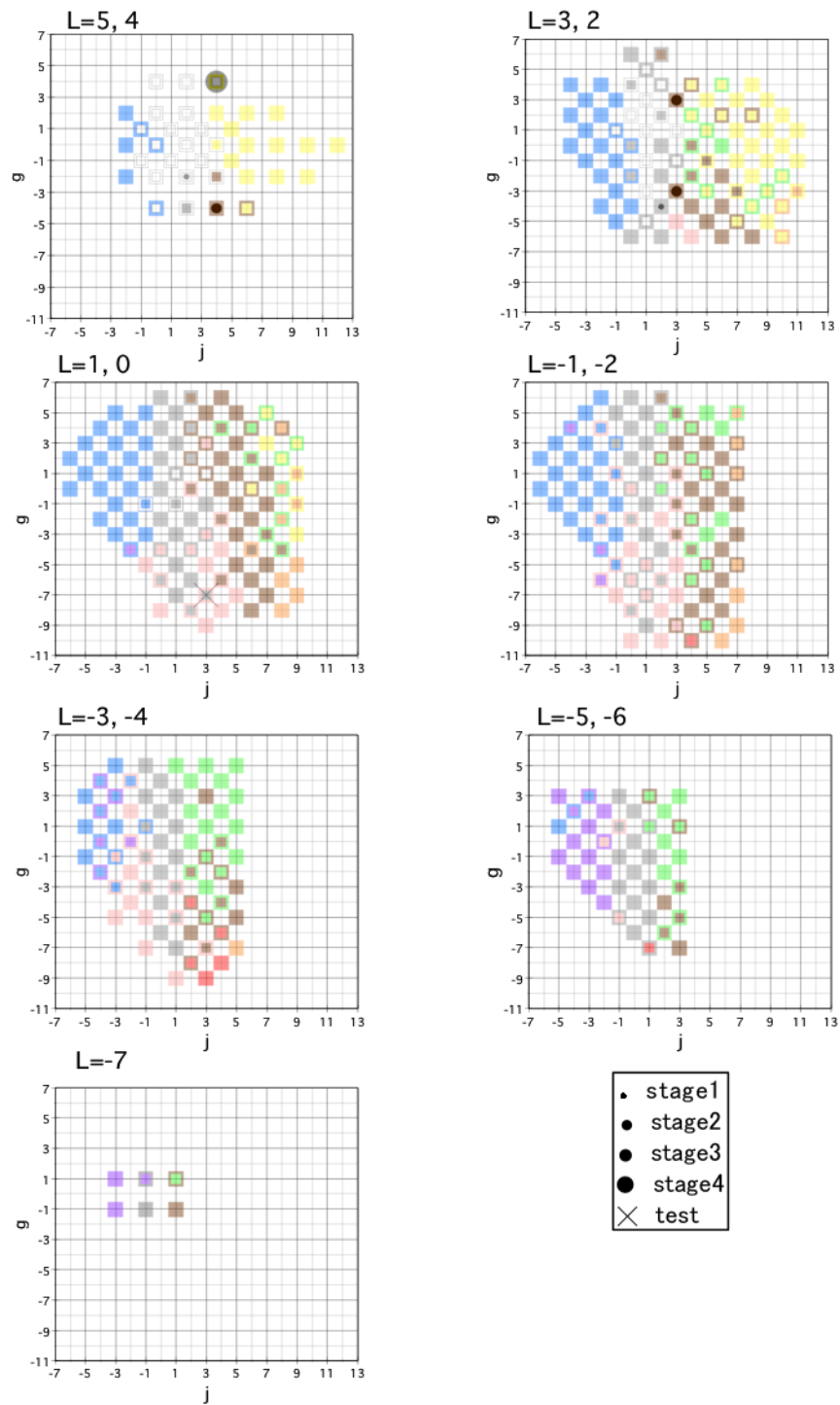


図 3.19 YY1 記憶実験の結果(test280)

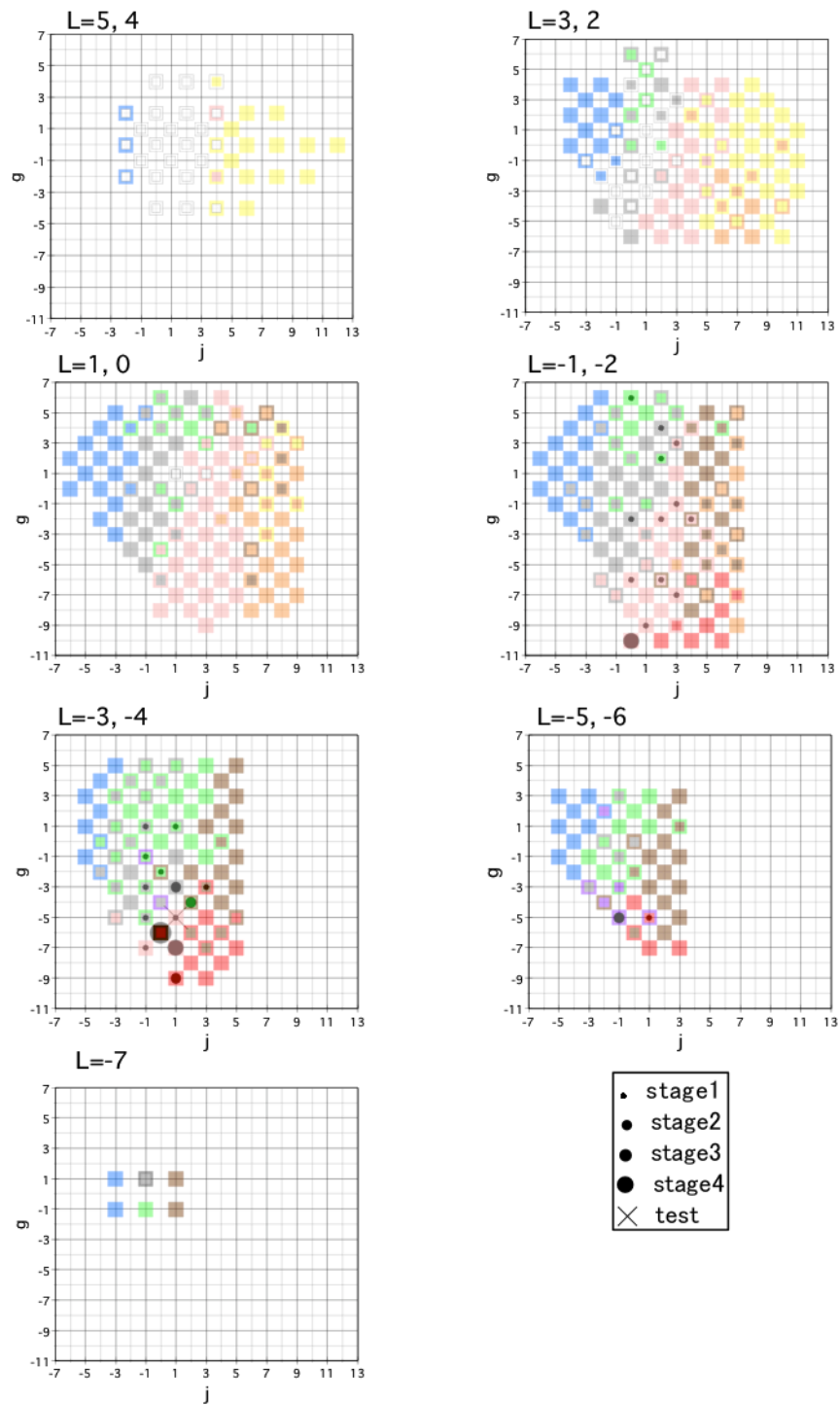


図 3.20 HH2 記憶実験の結果(test95)

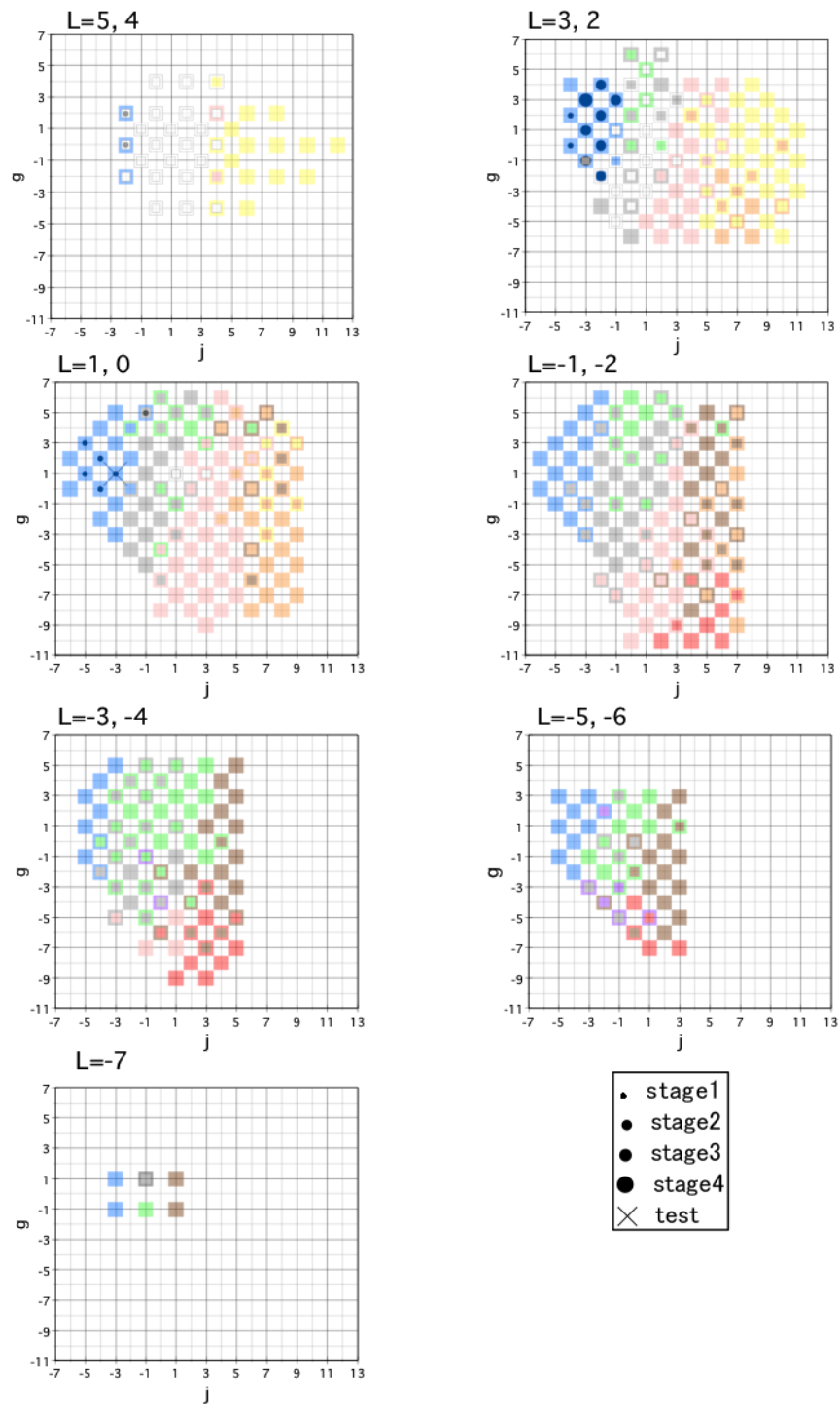


図 3.21 HH2 記憶実験の結果(test263)

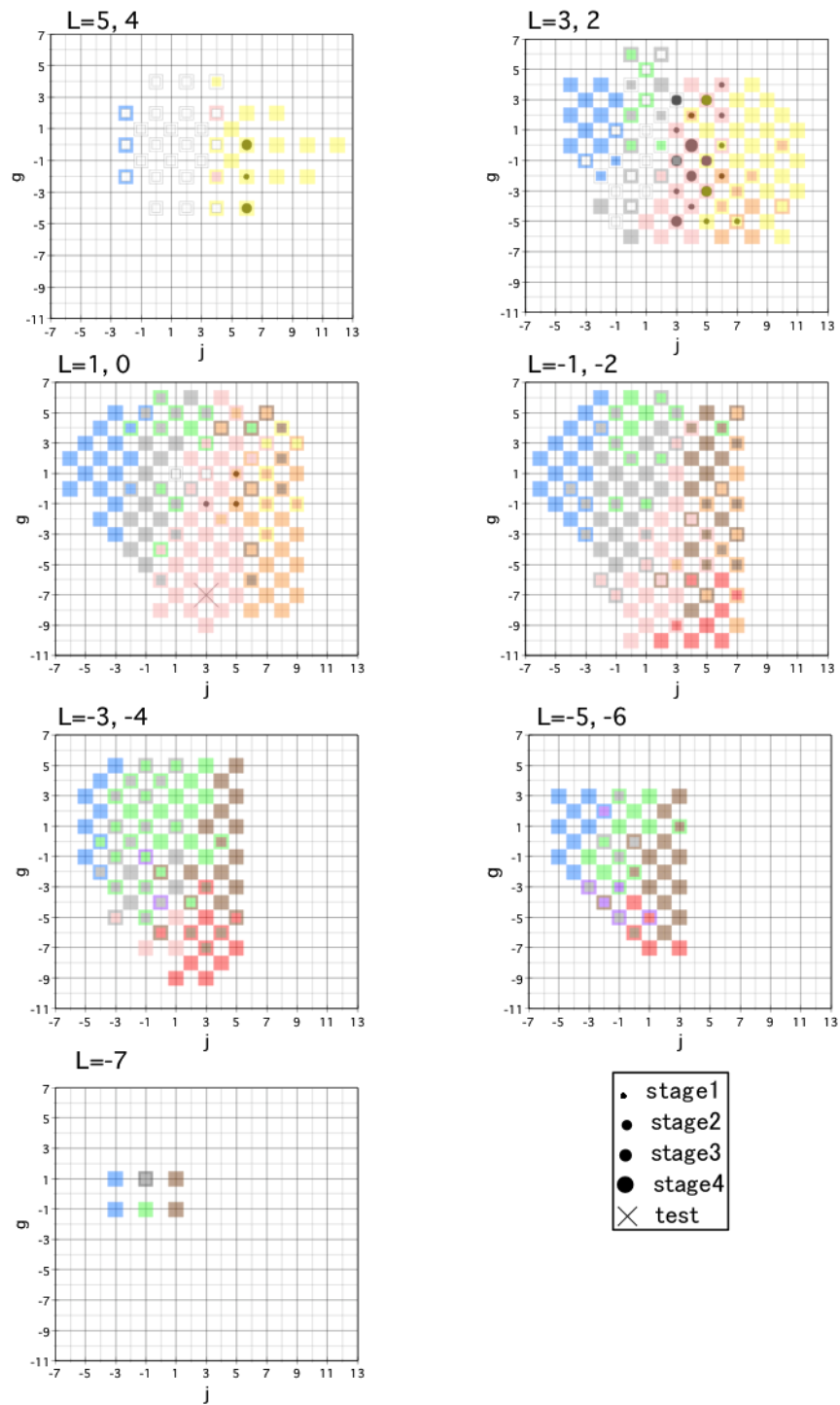


図 3.22 HH2 記憶実験の結果(test280)

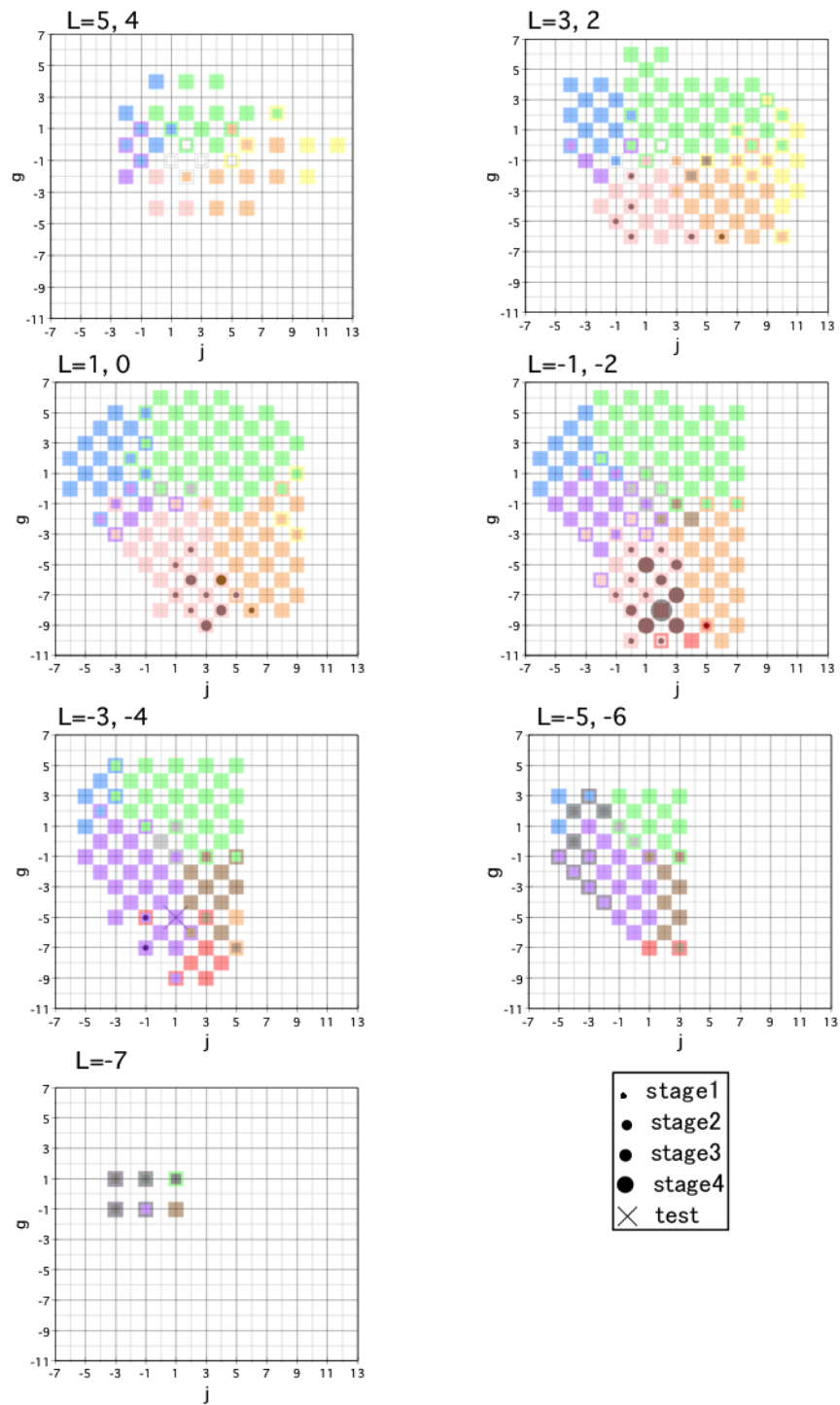


図 3.23 TN2 記憶実験の結果(test95)

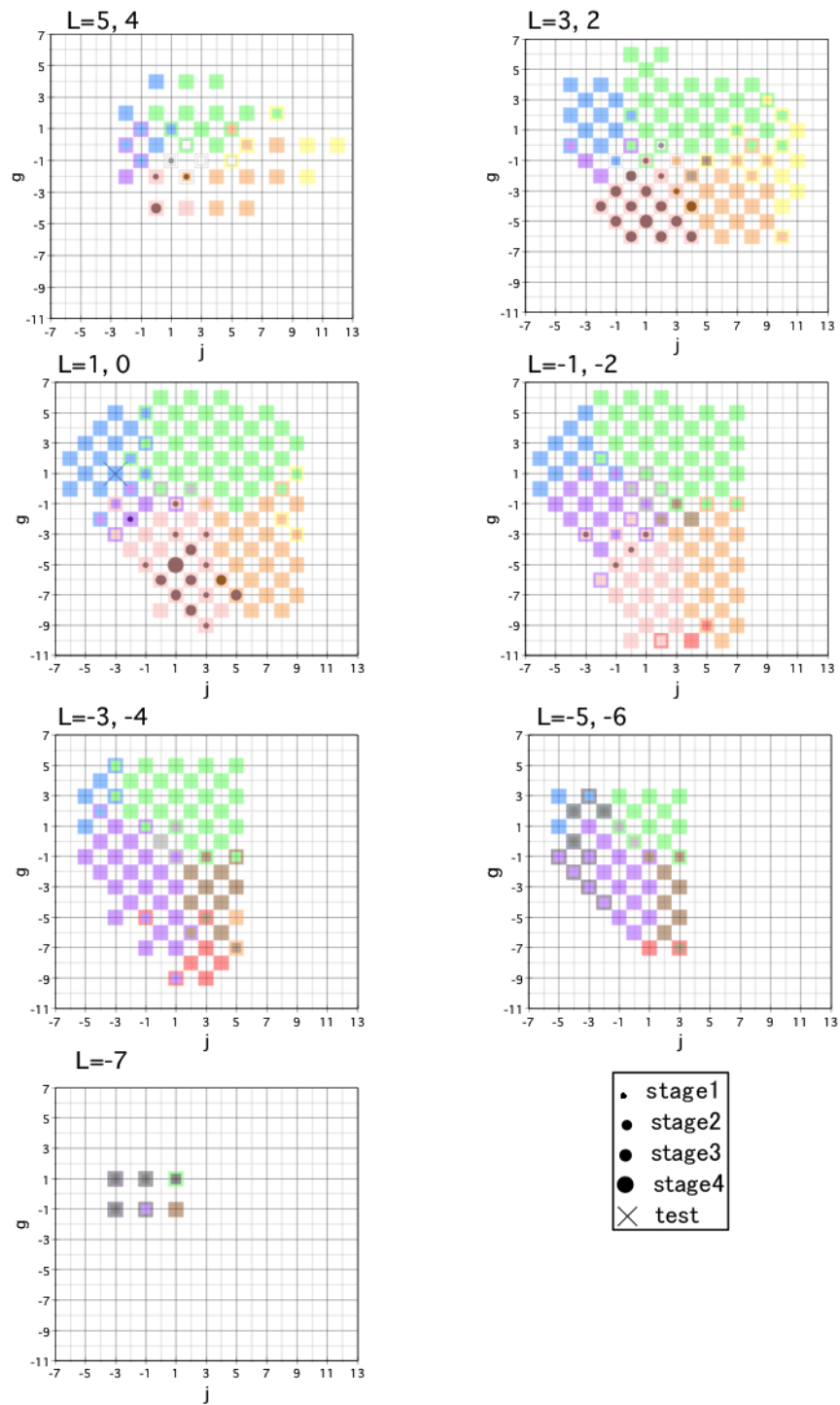


図 3.24 TN2 記憶実験の結果(test263)

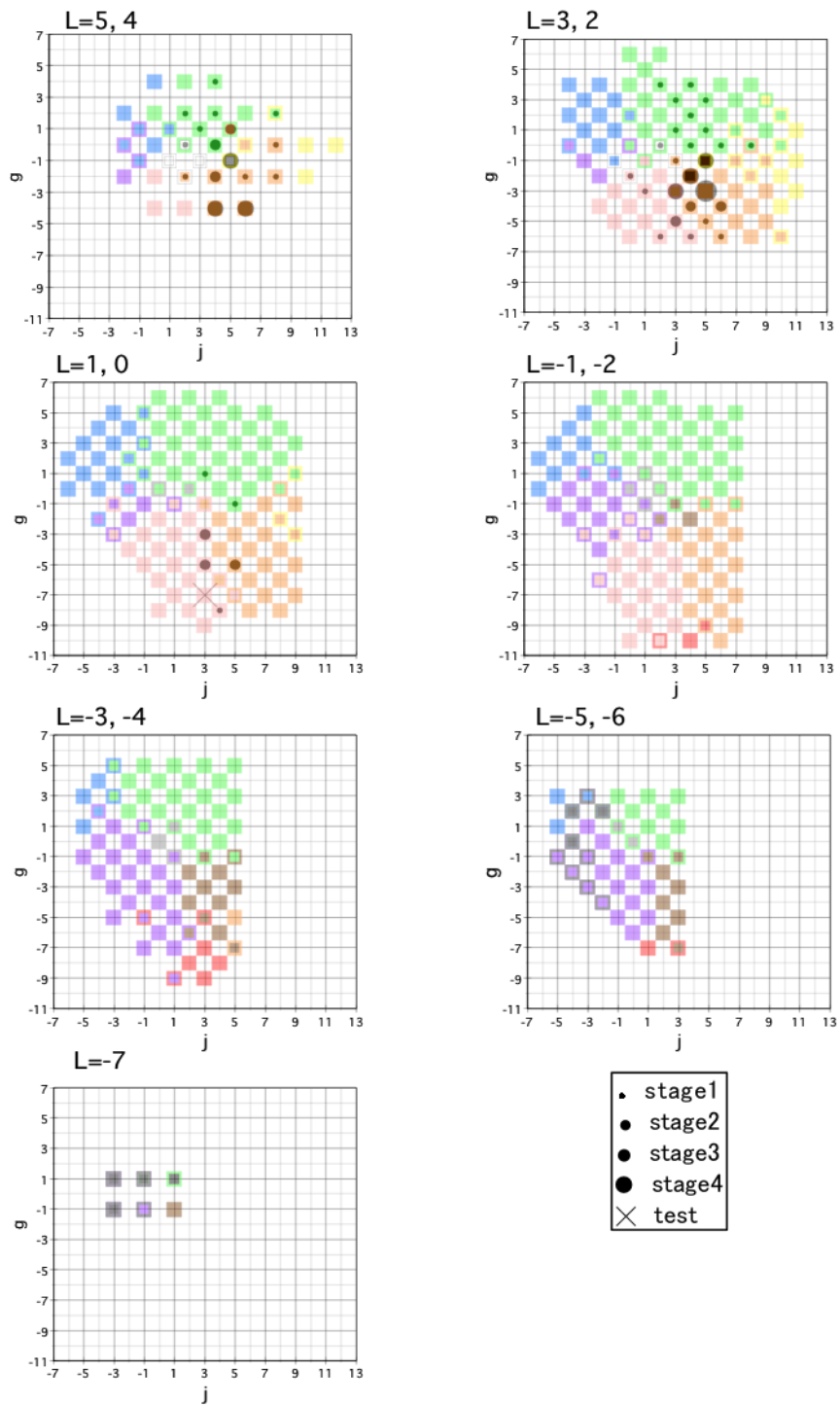


図 3.25 TN2 記憶実験の結果(test280)

実験 1.1 の色のカテゴリーと比較すると 3 色覚者の結果は両名ともステージ 1 から 1 つのカテゴリーに収まることも多く、またステージ 1 では複数の色のカテゴリーに分布している場合でも、ステージが進むにつれ 1 つのカテゴリーに収まる傾向が見られた。以上より 3 色覚者の色の記憶は見えと同じカテゴリーカル的であることが確認された。

2 色覚者の結果では記憶した色票が test263 のように青や黄色などの g の値が変化してもカテゴリーが変化しない色票についてはステージ 1 から 1 つのカテゴリーに収まるが多かった。しかし記憶した色票が test95 や 280 のように赤や緑などの g の値が変化するとカテゴリーが変化する色票ではステージ 1 で複数の色のカテゴリーに分布する場合が多く、またこの場合は 3 色覚者とは異なりステージが進んでも 1 つのカテゴリーに収まる傾向は見られなかった。

これらの結果を 3 色覚者と 2 色覚者とで比較するために記憶した色票とステージ 4 で最終的に選んだ色票が同じカテゴリーである割合の被験者毎の結果を図 3.26、色覚の型で平均した結果を図 3.27 に示す。

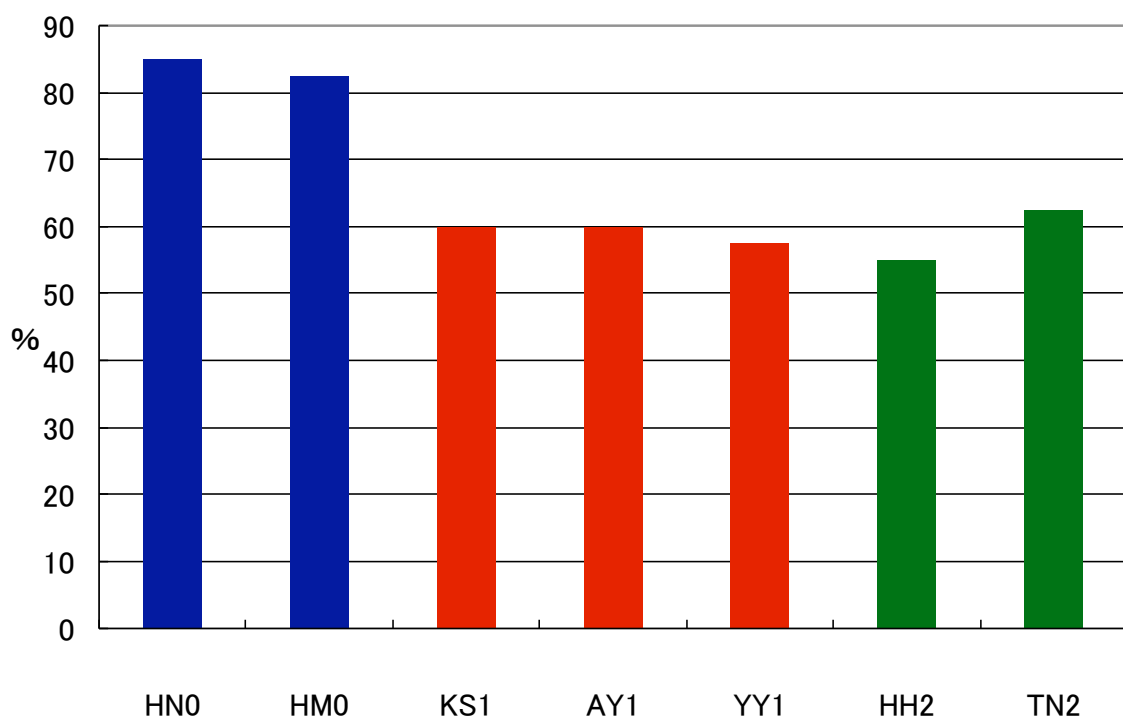


図 3.26 被験者毎の記憶した色票とステージ 4 で選んだ色票が同じカテゴリーである割合

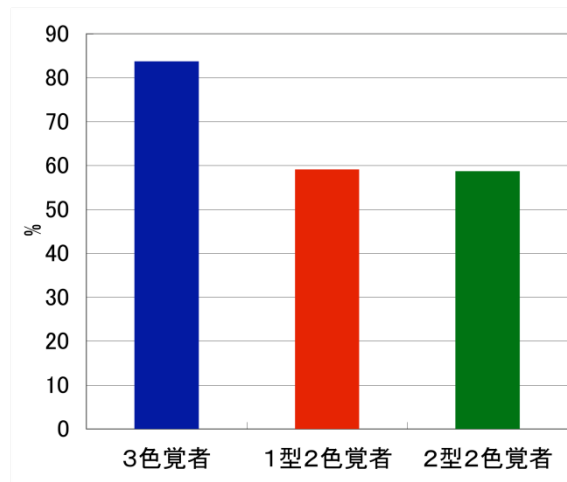


図 3.27 色覚の型毎の記憶した色票とステージ 4 で選んだ色票が同じカテゴリーである割合

3色覚者は80%以上と高い確率でステージ4では記憶した色票と同じカテゴリーの色票を選んでいるが、2色覚者では60%程度と低い確率になっている。これは3色覚者では最終的に選んだ色票はテスト色票と同じカテゴリーであるが、2色覚者ではその割合が低いことを示す。つまり3色覚者では色票の色記憶では記憶した色票の色名応答カテゴリーを超えて他の色名応答カテゴリーとして記憶することはほぼないが、2色覚者は異なる色名応答カテゴリーとして記憶することが多いということである。この結果から3色覚者は色名応答カテゴリーと記憶の色カテゴリーが一致するが、2色覚者では一致しないことが示される。

次に、テスト色票の色により、記憶色が見えとは異なるカテゴリーとなる割合が異なるかを調べるため、ステージ1からテスト色票と同じ色名応答カテゴリーの色票を選ぶことが多かった青と黄のテスト色票とその他のテスト色票を分けて、各ステージで選択され、次のステージで除かれた色票の中にテスト色票と同じ色名応答カテゴリーであるものが存在する割合を示す。テスト色票が青と黄であるものについては図 3.28 にそれ以外の色であるものは図 3.29 に示す。

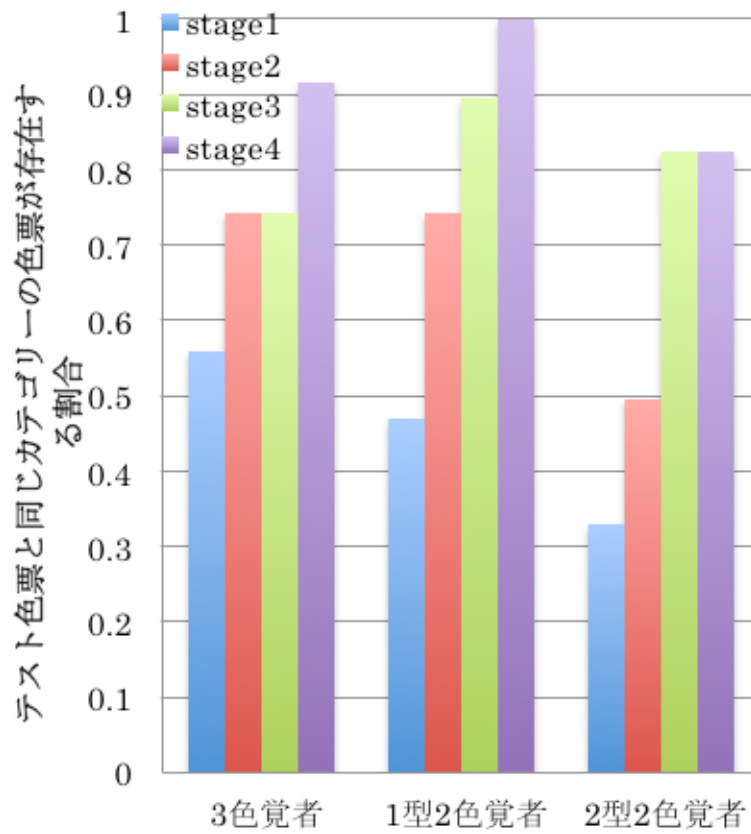


図 3.28 青と黄のテスト色票について，各ステージで選択され次のステージで除かれた色票がテスト色票と同じ色名応答カテゴリーであるものが存在する割合

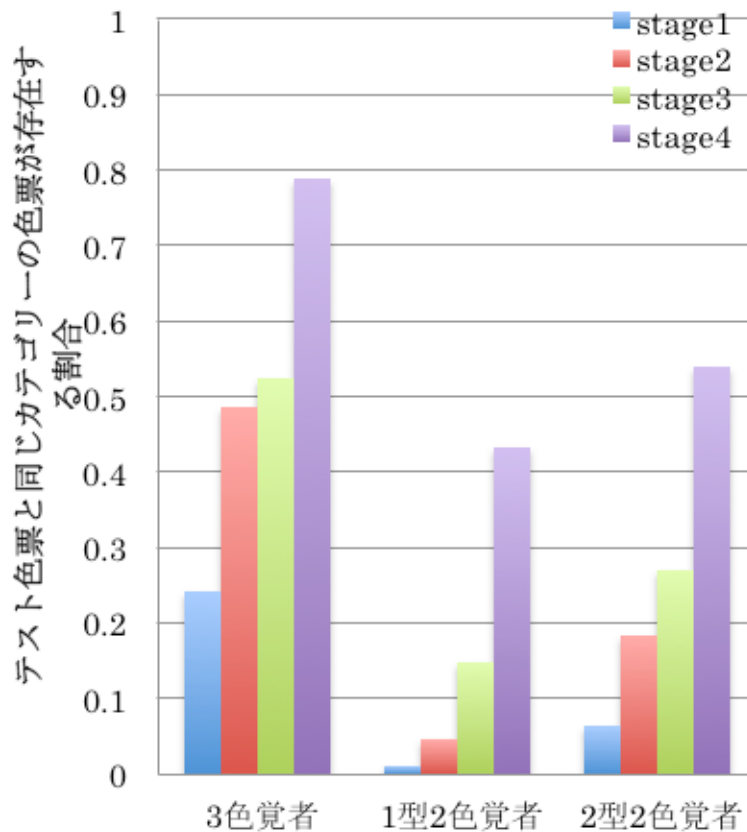


図 3.29 青と黄以外のテスト色票について、各ステージで選択され次のステージで除かれた色票がテスト色票と同じ色名応答カテゴリーであるものが存在する割合

青と黄のテスト色票については2色覚者も3色覚者もステージが進むに連れ、テスト色票と同じカテゴリーの色票を選ぶことが多くなっている。さらに2色覚者も3色覚者もその割合に大きな違いはない。

一方で青と黄以外の色票については2色覚者も3色覚者もステージが進むに連れ、テスト色票と同じ色票を選ぶことが多くなっているが、3色覚者に比べ2色覚者の割合は全体的に低い割合であった。

これらの結果から2色覚者は青と黄の色を記憶する時は3色覚者と同じように見えのカテゴリーと同じカテゴリーとして記憶しているが、それ以外の色では3色覚者とは異なり、見えとは異なるカテゴリーとして記憶をしていることが示される。

3.2.3 考察

2色覚者と3色覚者は類似したカラーネーミングを行うが、色の記憶では異なる傾

向を示した。さらに2色覚者は青や黄の刺激は3色覚者とほぼ同様に記憶していたが、それ以外の色では色の記憶では色名応答カテゴリーを超えることが3色覚者よりも多かった。これらの結果から2色覚者は2錐体により弁別できる黄青方向の色については3色覚者と同様に区別し、記憶しているが、2錐体では弁別できない赤緑方向の色についてはカラーネーミングでは3色覚者と同様に区別できるが、記憶では混同していることが示された。よって2色覚者は黄青方向は錐体応答に基づき区別をするが、赤緑方向は記憶では曖昧になってしまう手掛かりを用い区別していると考えられる。よって第2章で示された3色覚的カラーネーミングに重要な手掛かりである輝度情報は記憶では曖昧になってしまうと考えられる。

また、「はじめに」であげた仮説1のように2色覚者も3色覚者と類似したカテゴリーチャンネルを持っているならば、記憶においても3色覚者と同様に色名応答カテゴリーを超えて記憶することはない。よって2色覚者は3色覚者とは異なるカテゴリーチャンネルを持ち、表面輝度の違いを使用し、カテゴリーチャンネルをさらに分類し、3色覚者と類似した色名応答に当てはめているという仮説2を支持する。

実験3.1ではテスト色票、試行回数が少ないため、次の実験3.2ではより多くのテスト刺激を用い、より詳細に色の記憶を調べる。

3.3 実験2.2：マッチングによる色記憶の再生実験

3.3.1 実験方法

実験装置は実験1.2～1.5と同じものを用い、CRTモニター上で刺激呈示を行った。被験者の頭部は顎台により固定し、視距離は86cm、テスト刺激の形状と大きさは実験1と等しく円形視角 2.4° である。テスト刺激は実験1.2と同じD65照明光下のOSA色票をシミュレートしたものである。また、OSA色票はL, j, gすべての値が偶数、または奇数の色票により構成されているが、被験者が選ぶ事ができる刺激を増やすため、隣接する色票の平均 x' , y' の値を用いることで色票間の刺激を補完した。これにより、被験者が選択することが出来る刺激数は1406種類とした。また、記憶するテスト刺激としてOSA色空間全体からほぼ均等に100種類を用いた。実験に使用した刺激を図3.30に示す。●が被験者が選択できる刺激し輝度を示し、×がテスト刺激色度を示す。

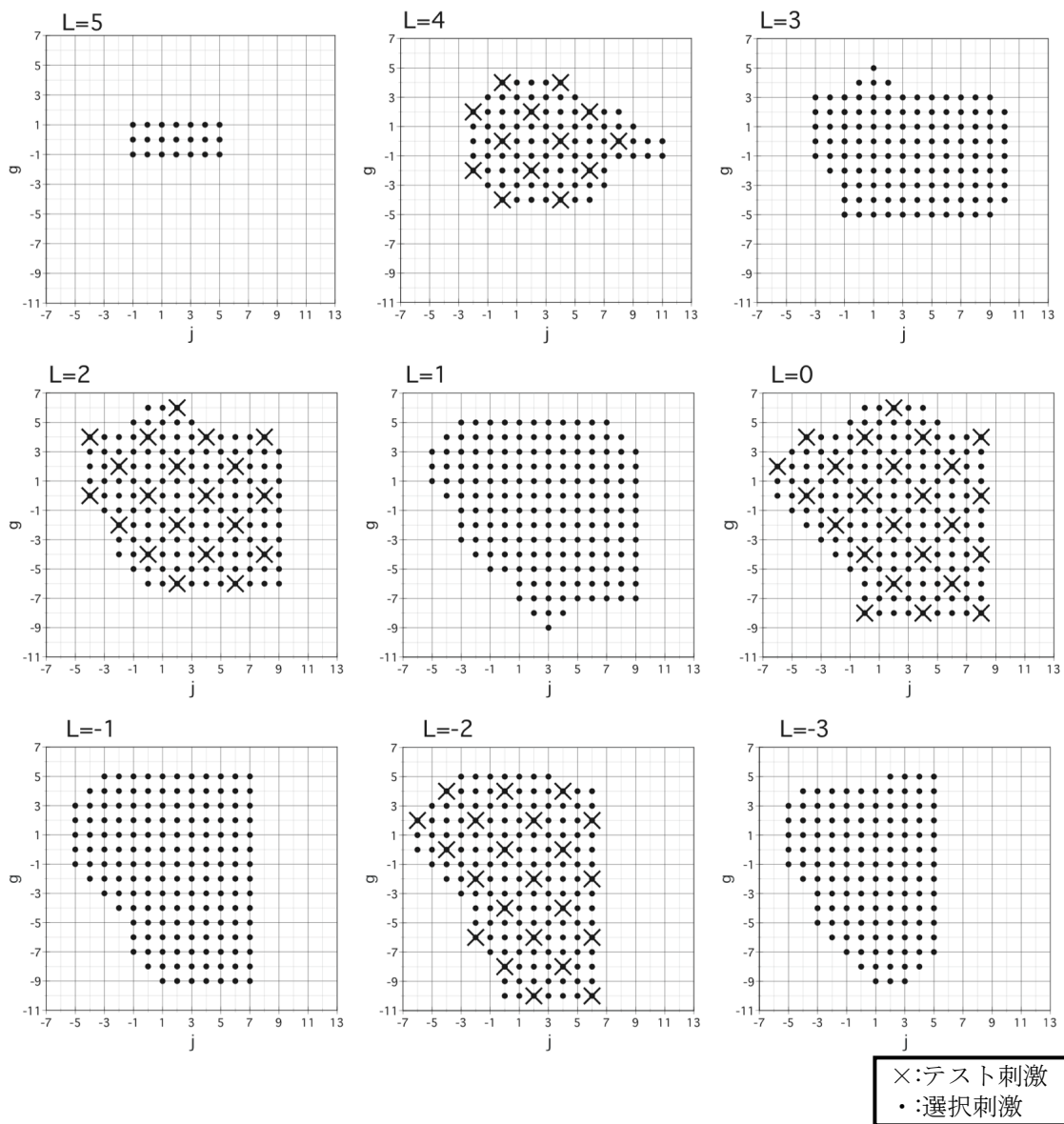


図 3.30 実験 2.2 で用いた刺激

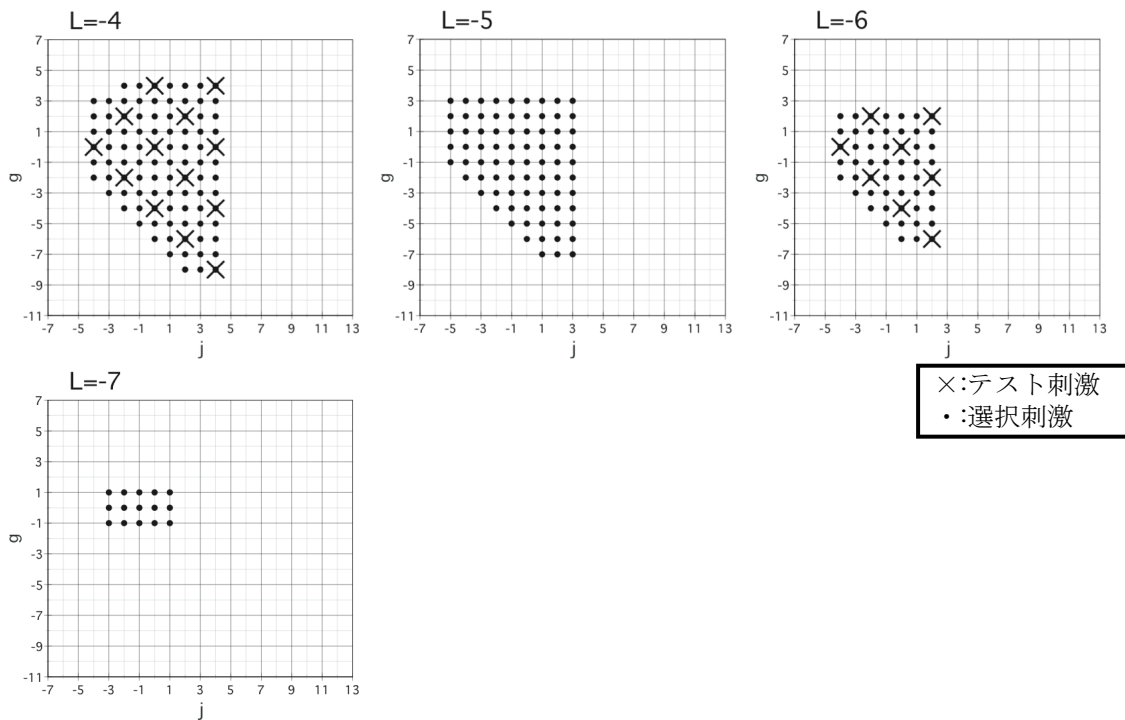


図 3.30 実験 2.2 で用いた刺激

周辺光は実験 1.2 と同じ色度の灰色 ($x'=0.340, y'=0.377$) であり，輝度は 20.5cd/m^2 とした．大きさは視角横 22° × 縦 17° である．

被験者は 3 色覚者 3 名 (HN0, YO0, YK0)，1 型 2 色覚者 2 名 (KS1, AY1)，2 型 2 色覚者 1 名 (HH2) である．YO0 以外の被験者は実験 2.1 と重複している．

[実験手続き]

被験者はまず 3 分間照明に順応し，続いて呈示される 3 桁の整数から 3 ずつ減算するタスクを色刺激が呈示される間とその前後の 10 秒間行う．数字が呈示された 10 秒後，5 秒間呈示される色刺激の色を記憶する．その後 30 秒間眼待機する．その後， $(L, j, g)=(0.0.0)$ の刺激が呈示されるので記憶したテスト色票の色にマッチングする．マッチングパラメーターは 2 色覚者にも変化分かるように明度 L が 1 ずつ増加か減少， j が 1 ずつ増加か減少， j と g が共に 1 ずつ増加か減少， j と g の一方が 1 増加もう一方が 1 減少である．マッチングが終了すると次の刺激が呈示される．以上を 100 枚のテスト刺激に対し行う．以上を 1 セットとし，5 セット行う．実験手続きを図 3.31 に示す．

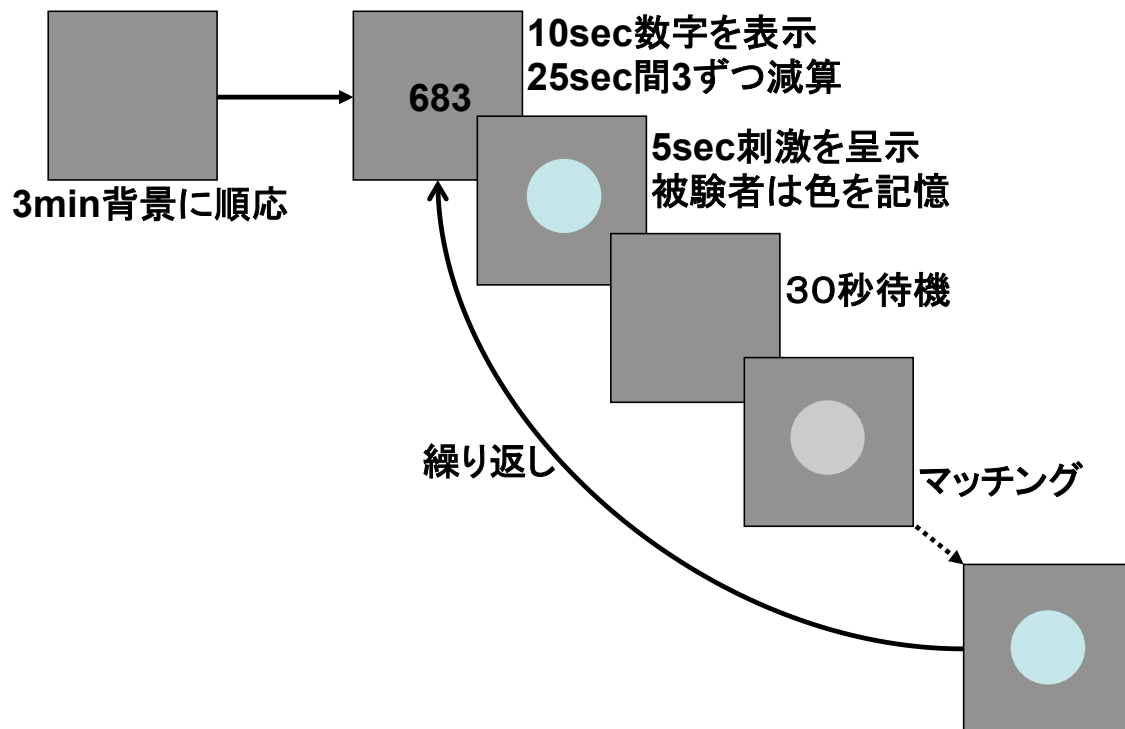


図 3.31 実験手続き

3.3.2 結果

マッチング結果の例として3色覚者 HN0 と1型1色覚者 KS1 の結果の一部を図 3.32, 3.33 に示す. 結果は L, j, g を軸とする3次元空間にプロットした. ×はテスト刺激の色度を示し, ●はマッチング結果の色度を示す. 色の違いはテスト刺激の違いを示す.

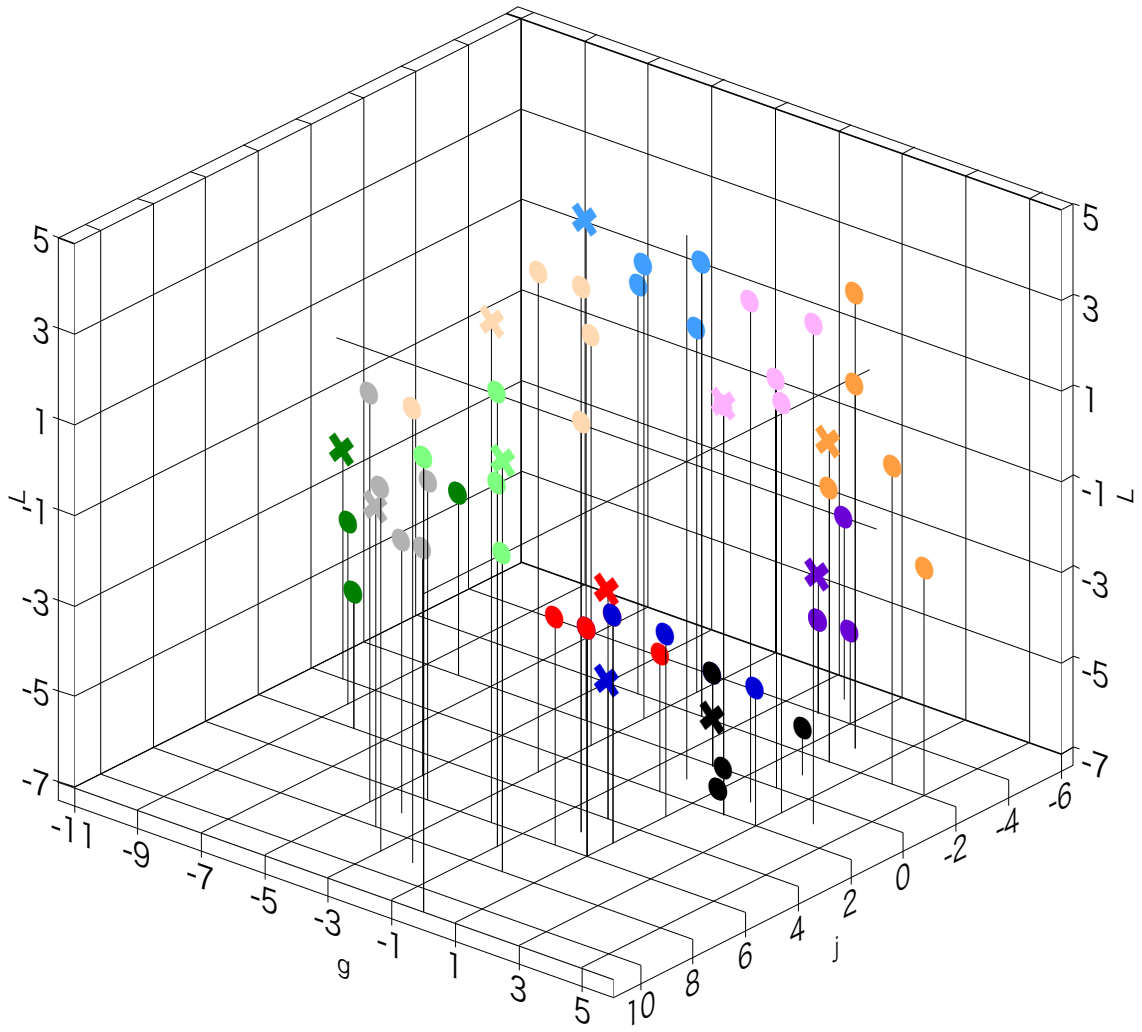


図 3.32 3色覚者 HN0 のマッチング結果

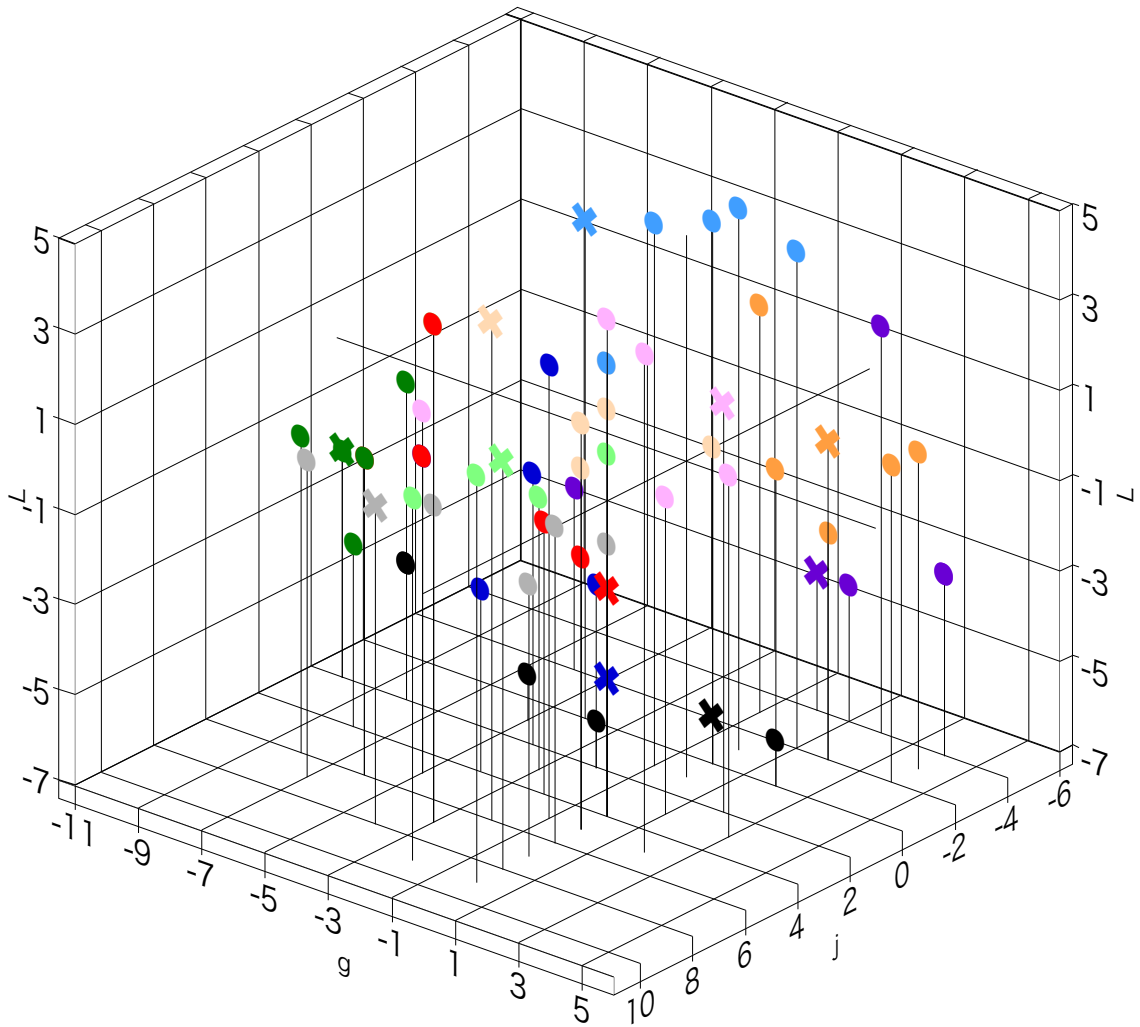


図 3.33 1 型 2 色覚者 KS1 のマッチング結果

3 色覚者 HN0 ではテスト刺激に対してマッチング点が比較的知覚に集まっている。一方で 1 型 2 色覚者では 3 色覚者と比べ、マッチング点が大きく移動している。

各被験者のテスト刺激からマッチング点の距離を図 3.34 に示す。棒グラフの色の違いは被験者の違いを示し、青は 3 色覚者、赤、ピンクは 1 型 2 色覚者、緑は 2 型 2 色覚者の結果を示す。グラフは左から全体（3 次元）、L 値、j 値、g 値の移動距離を示す。

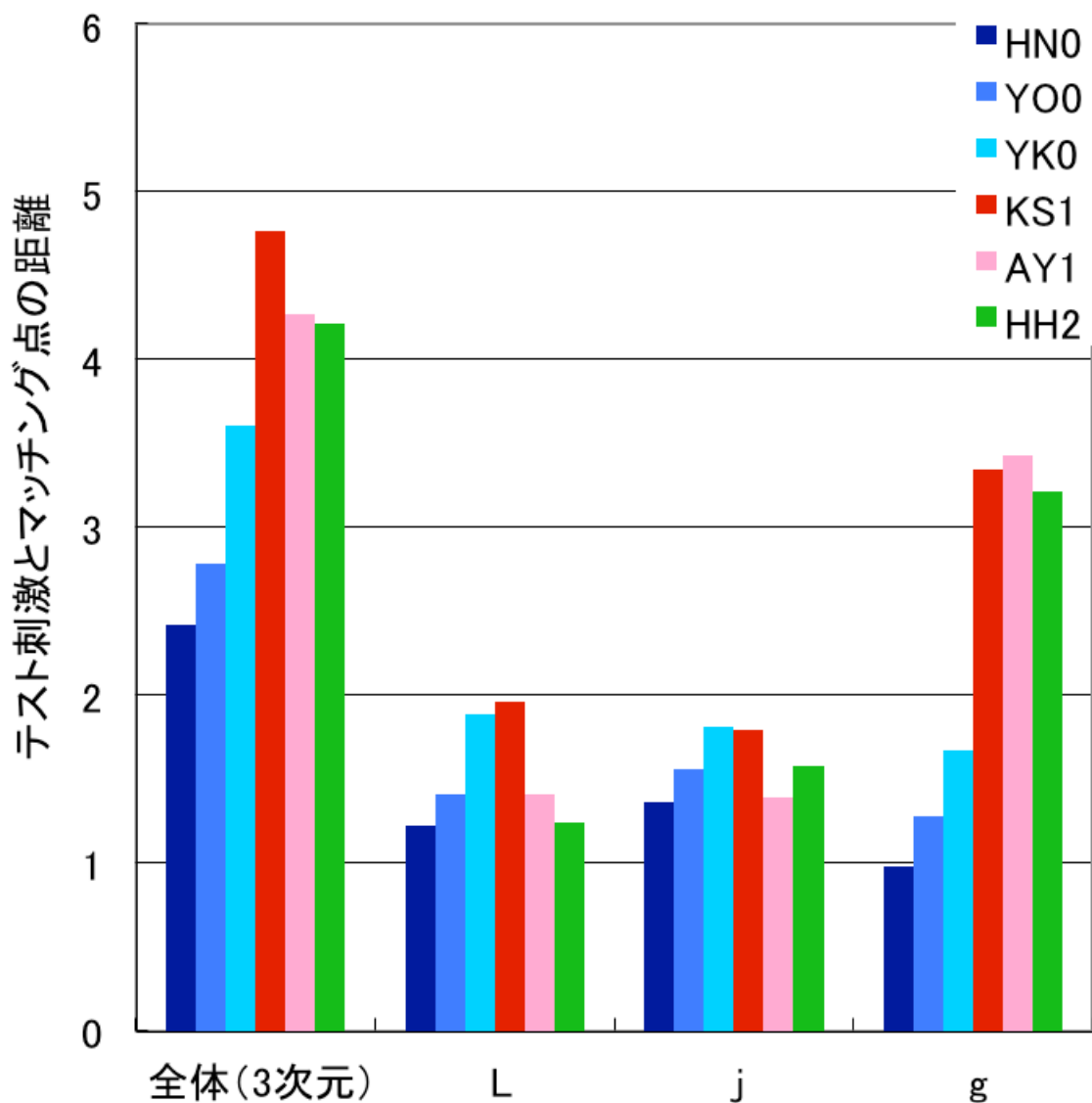


図 3.34 テスト刺激とマッチング点の距離

L 値, j 値ではテスト刺激とマッチング点の距離に違いはないが, g 値では 2 色覚者が 3 色覚者よりも大きい距離となった. これは明度 (L 値) と青黄方向 (j 値) は 3 色覚者と同様な正確さテスト刺激色を記憶しているが, 赤緑方向 (g 値) は 3 色覚者よりも記憶の中で大きくシフトしていることを示す.

次に 2 色覚者と 3 色覚者で違い大きかった g 値について, シフトの傾向をより詳細に調べるため, g 値大きさを分けてテスト刺激とマッチング点の g 値の距離を図 3.35 に示す. グラフは g 値の範囲により分け, 左から $-10 \leq g < -4$, $-4 \leq g < 2$, $2 \leq g < 6$ の距離を示す.

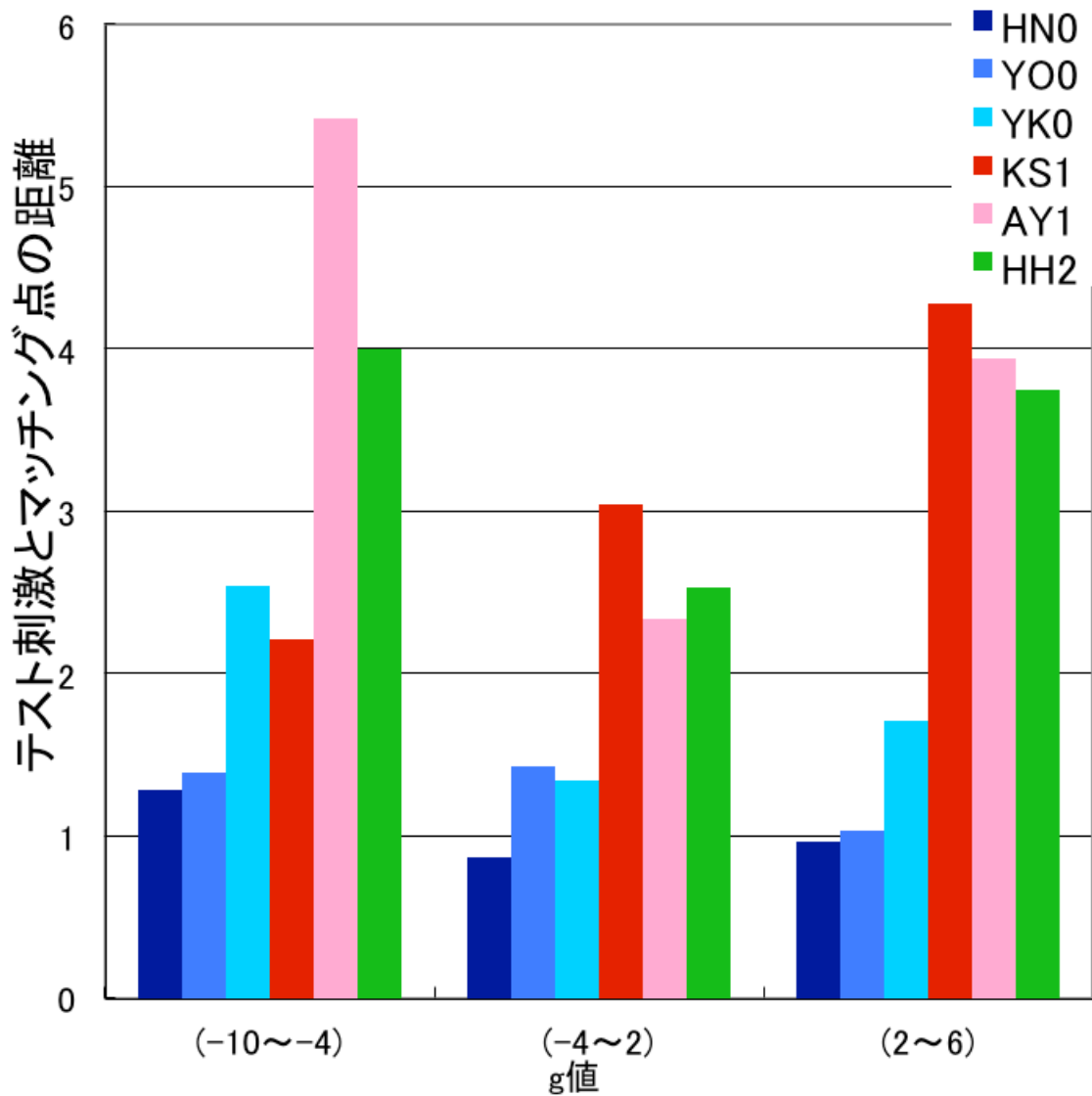


図 3.35 テスト刺激とマッチング点の g 値の距離

3色覚者は3名とも g 値の違いによるテスト刺激とマッチング点の距離に大きな違いはなかった。一方2色覚者では g 値により傾向に違いはあるがテスト刺激とマッチング点の距離に違いが現れた。1型2色覚者 KS1 では g 値の値が大きいほど距離が大きくなり、1型2色覚者 AY1 と2型2色覚者 HH2 では g 値が中間程度の時に距離が小さくなり、g 値が小さい時と大きい時に距離が大きくなった。この結果は3色覚者では色記憶のシフトが、g 値によらないが、2色覚者は色記憶のシフトが g 値により異なり、1型2色覚者 KS1 では g 値が小さい値に集まるようにシフトし、1型2色覚者 AY1 と2型2色覚者 HH2 では g 値が中間程度の値に集まるようにシフトすることを示す。

次にカラーネーミングによる色名応答カテゴリーと記憶の色カテゴリーを比較するため、マッチング結果を k-means 法によるクラスタ解析を行った。k-means 法は各点にランダムにクラスタを割り当て、クラスタの重心を計算し、その重心を基に各点を一番近い重心のクラスタに変更する。これをクラスタの変更がなくなるまで繰り返す。これにより実験結果を最適にクラスタ分類することが出来る。クラスタの数はカラーネーミングの色名と同じ数としクラスタ分類を行った。この結果をカラーネーミングによる色名応答カテゴリーと比較するため、各クラスタのセントロイドを求め、カラーネーミングのセントロイドに重ねて図 3.36 に示す。色付きの丸は実験 1.2 のモニター条件のセントロイドを示し、半透明の黒丸は記憶のクラスタ分類結果のセントロイドを示す。左図は 3 色覚者 HN0、右図は 1 型 2 色覚者 KS1 のものを示す。

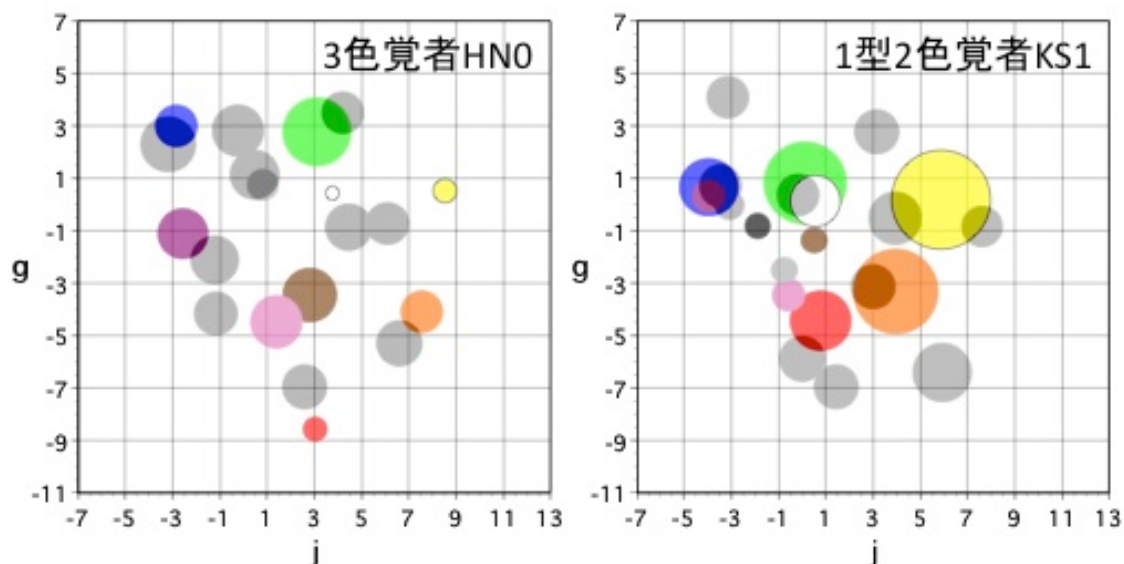


図 3.36 記憶のクラスタのセントロイドとカラーネーミングのセントロイド

3 色覚者 HN0 記憶のセントロイドとカラーネーミングのセントロイドの対応がつかないところもあるが、比較的類似した傾向を示している。1 型 2 色覚者 KS1 では対応がつかないものが多く、3 色覚者よりも記憶のセントロイドとカラーネーミングのセントロイドが異なっている事がわかる。

記憶のセントロイドとカラーネーミングのセントロイドの配置の類似度合いを調べるため、記憶とカラーネーミングのセントロイドの距離が最小となる組み合わせを求め、その時のセントロイド間の距離の平均を図 3.27 に示す。セントロイド間の距離は

L, j, g を軸とする 3 次元空間で求めた.

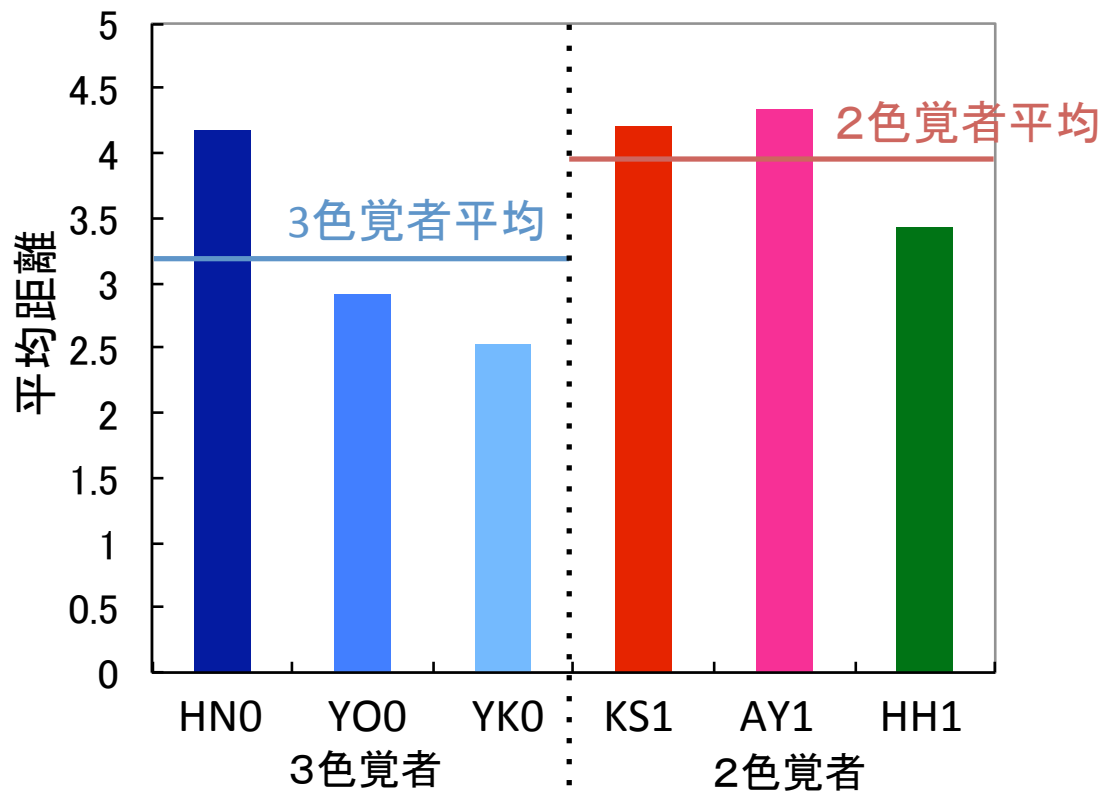


図 3.37 記憶とカラーネーミングのセントロイド間の距離

3 色覚者では HN0 が大きい値となっているが、カラーネーミング結果で黒の応答がなかったため、記憶のクラスター数も 10 としてクラスターを求めたため大きな値となったと考えられる。他の 2 人に関してはセントロイド間の距離は小さい値となっている。3 色覚者と 2 色覚者を比較すると 2 色覚者のほうが大きな値だった。T 検定を行った結果も HN0 を除くと有意差があるが ($p < 0.05$), HN0 を含めると有意差は無かった ($p = 0.15$)。

3.3.3 考察

マッチングにより色記憶のカテゴリーを調べたところ 2 色覚者は 3 色覚者よりも記憶のカテゴリーとカラーネーミングのカテゴリーが異なっていた。また、色の記憶では 2 色覚者も黄青方向のシフトは 3 色覚者とほぼ変わらなかったが、赤緑方向のシフトは 3 色覚者よりも大きかった。更に 2 色覚者ごとにより集まる点は異なるが、2 色覚者の記憶では赤緑方向がある一点に集まっていた。

これらの結果は青黄方向に関しては3色覚者と同様にカラーネーミングのカテゴリーを超えて色を記憶することはないが、赤緑方向に関しては3色覚者と異なりカラーネーミングのカテゴリーを超えて記憶をしていることを示す。更に赤緑方向に関し、1点に集る傾向を示すことから記憶のカテゴリーでは赤緑方向を同じカテゴリーとしていることが示唆される。

3.4 まとめ

本章では色の記憶を調べ、記憶のカテゴリーとカラーネーミングのカテゴリーを比較した。その結果、2色覚者は青黄方向に関しては3色覚者と同様に記憶し、カラーネーミングのカテゴリーと類似しているが、赤緑方向に関しては3色覚者と異なり、カラーネーミングのカテゴリーと異なり、少ないカテゴリーであることが示唆された。2色覚者は赤緑方向を輝度の違いにより区別するが、色の記憶では輝度情報を保持することはできず、色名応答カテゴリーとは異なる2色覚者が持つカテゴリーチャンネルが表れたと考えられる。

これらの結果は2色覚者は「はじめに」であげた仮説2の2色覚者は3色覚者とは異なるカテゴリーチャンネルを持ち、表面輝度の違いを使用し、カテゴリーチャンネルをさらに分類し、3色覚者と類似した色名応答に当てはめている。という仮説を支持する。

第 4 章

近赤外線分光法による色名応答時の皮質活動測定

4.1 はじめに

これまで 2 色覚者の 3 色覚者のカラーネーミングを行うメカニズムについて、心理物理実験により解明を試みてきた。本章では第 3 章の「はじめに」であげた 2 つの仮説を検証するために皮質活動を計測した。色名応答における輝度情報の寄与が、2 色覚者と 3 色覚者で異なっているのは、視覚野内であるのか、それとも高次皮質からの影響であるのかについて、もし、一つ目の可能性が正しいならば、2 色覚者と 3 色覚者で色カテゴリー形成以前に異なるメカニズムがあるため、サル電気生理研究において IT 野に色選択性のニューロンの存在が示されている [28] ことから IT 野以前の皮質活動が異なると考えられる。もし、二つ目の可能性が正しいならば、2 色覚者と 3 色覚者で色カテゴリー形成以前のメカニズムは同様であるため、IT 野以前の皮質活動に差異はないと考えられる。カラーネーミングを行う際に皮質活動を計測することでカラーネーミングに関わる部位が明らかになり、どのような処理が行われているかが明らかになると考えられる。よって 2 色覚者と 3 色覚者のカラーネーミング時の皮質活動を比較することでメカニズムの違いを明らかにすることが出来ると考えられる。皮質活動を行うためには酸素が必要となる。よって皮質活動を行う部位に酸素を運ぶため、その部位の血流量が増加する。本研究では血流量の変化を調べることで皮質活動を調べる。そして血流量の変化を測定するために近赤外線分光法 (NIRS) を用いる。

4.2 実験 3：近赤外線分光法 (NIRS) による色名応答時の皮

質活動測定

4.2.1 方法

[装置と刺激]

脳活動の測定には近赤外線分光法 (NIRS) を用いた。近年 NIRS が脳機能イメージングの簡便な方法として発達し、広く使われている。NIRS は、相対的なヘモグロビン濃度を計測することができる [29, 30]。局所脳血流量は神経活動中に必要とされる酸素とともに増加する。その結果、脳のある部分が活性化すると酸化ヘモグロビン (oxy-Hb) が増加し、脱酸化ヘモグロビン (deoxy-Hb) が減少する。したがって oxy-Hb と deoxy-Hb の濃度を計測することで皮質活動を調べることができる。

NIRS を使用した皮質活動の計測は、fMRI や PET などの他の脳イメージング装置と比べ多くの利点がある。第一に NIRS では oxy-Hb と deoxy-Hb 濃度の変化を同時に計測できる。そのため NIRS で計測される total-Hb, oxy-Hb は主として脳の毛細血管床の増加を示し、deoxy-Hb 低下は脳血流量増加に伴う脳血流速の増加を示しているため、血流量変化の要因を分類することができる。第二に NIRS の装置は小さく、比較的非侵襲の計測ができる。これにより、体の動きを伴うタスク時や、子供や病人のような他の脳イメージング装置が使用できない被験者の皮質活動も計測できる。これらの利点から近年多様な研究で NIRS が使用されている。

一方で、計測範囲が皮質表面に限定され、時空間分解能は他の脳機能画像解析方法に比べて低い。これらの点から NIRS は皮質表面の概略的活動の時空間変化、及び、全体的な時空間変化を簡便に計測できるため、認知・知覚機序の解明を対象とした広範囲の心理物理学実験を同時に行いながら皮質活動を計測する多様な研究に用いられている [31-33]。

第 1 章で 2 色覚者が 3 色覚者のカラーネーミングを行うためには自由に色票を観察できることが重要であることが示唆されているため、本実験でも被験者が皮質活動測定中にある程度自由にカラーネーミングを行うことが出来るように非侵略の計測が必要である。そこで 2 色覚者のカテゴリカル色知覚の皮質部位を調べるために NIRS を用いることにした。

実験環境はこれまでの実験と類似した暗室で行われ、CRT モニター (Dell P1230) 上に、すべての視覚刺激が呈示された。被験者は頭部を顎台に固定され、視距離 86cm で視覚刺激を観察した。課題遂行中の皮質活動は NIRS (ETG-4000, 日立メディコ)

を用いて計測した。本装置は 635nm と 830nm の異なる 2 種類の近赤外線光を使用しており，oxy-Hb， deoxy-Hb， 総ヘモグロビン（total-Hb）それぞれの脳内濃度の相対的变化を同時に計測できるが，本研究では皮質活動を最もよく反映していると報告されている [34, 35] oxy-Hb の変化量のみを解析に用いた。なお，oxy-Hb の変化量は時間分解能 10Hz で計測を行った。

脳血流の計測位置は図 4.1 に示す 24 箇所であり，左右半球それぞれに 3×3 に配置された 5 つの送信用プローブと 4 つの受信用プローブにより決められる。このとき送信用プローブと受信用プローブの距離は 3cm である。プローブの最下段は国際 10-20 法の T3 と Oz， T4 を結ぶ直線上に配置した。

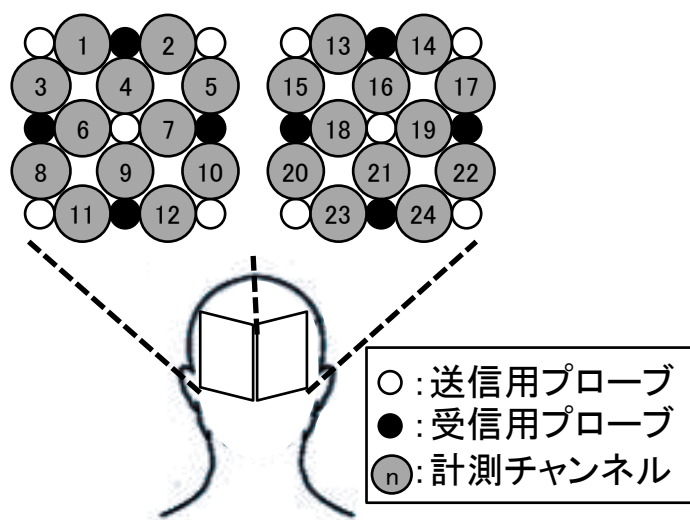


図 4.1 NIRS の装着位置

実験刺激には実験 1.2 と同じ OSA 色標本 [13] から全 424 枚の色票を D65 標準白色光源下でシミュレートした色刺激（輝度は 1.6~57cd/m²）を使用し，各色刺激は CRT モニター（Dell 社製，P1230）上に呈示された。背景刺激は Judd 修正色度（x'， y'）=（0.340， 0.377），輝度 20.5cd/m² とし，モニター全面に呈示された。

[手続き]

実験条件は以下の 4 条件である。

1. 色名黙読条件：コントロール条件として色刺激ではなく，黒の文字から成る 11 個の基本色名単語（赤，緑，青，黄，茶，オレンジ，紫，ピンク，白，黒，灰）

をランダムに呈示する。被験者は基本色名に対応したキーボードによりその色名を応答し、その時の皮質活動を調べた。この条件では、色名を回答するという行動における視覚野の活動のみを計測し、2～4の条件における色名応答における色覚のみに起因する皮質活動を抽出するためのコントロール条件であり、視覚皮質活動より、高次の領野からの影響を観測するために行った。

2. 色票分類条件：色刺激を呈示し、被験者はその色名を1と同様に応答する。1の色名黙読条件と比較し、色刺激を観察した時としない時の皮質活動の違いを調べる。実験刺激は実験 1.2 のモニター条件と同じ色刺激サイズを 2.4° とし、被験者は色名応答するまで色刺激を観察した。本条件では色票を観察し、カラーネーミングを行っている時の皮質活動を調べた。
3. 小視野条件：周辺視野に主に存在する桿体の寄与や残存錐体の影響を除去した場合、2色覚者はカテゴリカルカラーネーミングが困難になることが報告されており[20-24]、本条件でも輝度の空間的情報を減少させるために、中心小窩のみに色刺激を呈示した。色刺激サイズは $30'$ であり、色票分類条件と同様に被験者は色応答するまで色刺激を観察した。
4. 短時間呈示条件：色刺激呈示時間を 50ms とし、他の条件は色票分類条件と同様とした。実験 1.4 の短時間呈示条件と同じ条件とした。残存錐体の時間応答は相対的に遅いことが報告されており[21]、本条件では輝度の時間的情報を減少させることによる、カラーネーミングが困難な条件におけるカラーネーミング時の皮質活動を調べた。

被験者は背景（色度 $(x', y') = (0.340, 0.377)$ 、輝度 20.50cd/m^2 ）に3分間順応した後、呈示される色刺激の色（色名黙読条件では呈示される色名の単語）を11基本色名から選択し、11基本色名と対応付けられたキーボードの1～9, +, -で応答する。被験者は実験前に色名とキーボードの対応を覚え、実験中は呈示刺激のみを観察した。短時間呈示条件以外は応答後色刺激が消え、背景のみが呈示された後、次の色刺激が呈示される。被験者は40秒間タスクを続けた後、20秒間休憩をはさみ、同様にタスクと休憩を繰り返す。これを10回繰り返す。この間 NIRS により oxy-Hb と deoxy-Hb, total (oxy-deoxy) Hb の変化を計測し続けた。休憩の間、モニターには背景のみが呈示された。この間 NIRS により oxy-Hb と deoxy-Hb, total (oxy-deoxy) Hb の変化を計測し続けた。これを1ブロックとし、1セッションに全4条件を1ブ

ロックずつ行った。各条件 424 色×2 セット、または 3 セット終了するまで実験を行った。1 ブロックを時間で制限して終了するため、条件ごとにすべての刺激セットを終えるまでにかかるブロック数が異なるが、全ての条件が終了するまで他条件が先に終わっても各セッションに必ず全 4 条件を行った。各セッションで実験を行う条件の順番はカウンターバランスを取った。すべてのセットを終えるまで、各色刺激呈示条件を 2 セット行った被験者は 4 か 5 セッション、3 セット行った被験者は 6 か 7 セッション実験を行った。各セッションは別日、または十分な休憩を取った後に行った。セット数やセッション数が、被験者により異なるのは、各被験者からできる限り多くのデータをとるために調整したためである。

[被験者]

色覚正常者 14 名、2 型 3 色覚者 3 名、1 型 2 色覚者 1 名、2 型 2 色覚者 6 名。色覚異常者はアノマロスコープ検査、石原式色覚異常検査表、100hue テストの結果によって判定された。被験者は実験内容、結果の取り扱いについて事前に説明を受け、同意のもとに本実験に取り組んだ。以降、色覚正常者を 3 色覚者と表記し、また、1 型 2 色覚者、2 型 2 色覚者、2 型 3 色覚者をまとめて述べる場合、色覚異常者と表記する。

[データ処理]

NIRS により得られた計測値はチャンネルごとに以下の手続きで処理した。まず、体動などに起因する短時間の急激な値の上下を除去するため、原データに対し、0.1Hz のローパスフィルタリングを行った。次に、計測値の長期的な上昇、下降トレンドを除去するため、休憩毎の刺激呈示前の 10 秒間と刺激呈示後の 10 秒間の計測値に一次関数を当てはめ、これをベースラインとしてタスク、休憩間のデータの基線補正を行った。

NIRS の原データは相対値なので、直接被験者間やチャンネル間、条件間の比較はできない。そこで、effect size[36-38]を計算することでデータを正規化した。effect size (d)は以下の式 (1) で計算された。

$$d = (m1 - m2) / s \quad (1)$$

ここで、 $m1$ は補正後のデータ、 $m2$ と s はそれぞれはじめに刺激が呈示される 10 秒間の平均と標準偏差を示す。以降の解析ではこの effect size の値を使用する。

図 4.2 に oxy-Hb の effect size の時間変化の例として、3 色覚者 SK0 のチャンネル

20 における oxy-Hb の effect size の時間変化の結果を示す。色票分類条件、短時間呈示条件ではタスク開始直後 oxy-Hb の effect size が増加し、タスク開始後 5 秒あたりから増加量が小さくなった。小視野条件では oxy-Hb の effect size の増加が小さく、色名黙読条件では oxy-Hb の増加はほぼなかった。oxy-Hb の effect size の増加傾向は被験者毎に異なりタスク中増加し続ける被験者もいた。そこでタスクに対する oxy-Hb の effect size が最も安定すると考えられるタスク開始後 10 秒から 30 秒までの 20 秒間の oxy-Hb の effect size の 0.1 秒あたりの平均値をタスク時の oxy-Hb の effect size とする。休憩時の oxy-Hb の effect size はタスク直前の 20 秒間の oxy-Hb の effect size の 0.1 秒あたりの平均値とする。

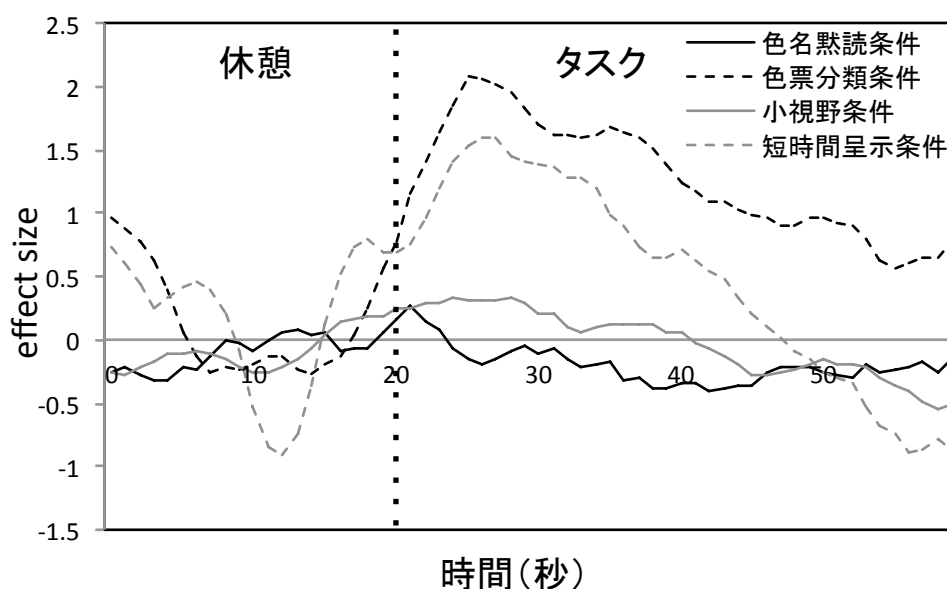


図 4.2 3 色覚者 SK0 のチャンネル 20 における oxy-Hb の effect size の時間変化
破線 (20 秒) で、視覚刺激が提示された。

4.2.2 結果

[カラーネーミング結果]

各条件でのカラーネーミング結果は実験 1.2~1.4 と類似した結果だった。3 色覚者はすべての条件で色名ごとにまとまったカテゴリー領域を形成した。一方、色覚異常者は個人差が大きく、全条件で 2 色覚的特徴を示した被験者と、色票分類条件では 3 色覚的特徴を示すが、呈示条件の制限により 2 色覚的特徴を示した被験者、全条件でほぼ赤緑方向を区別し、3 色覚的特徴を示した被験者がいた。

第1章と同様に色名応答の一致度, jg 平面において黄青の色名応答の中心を結ぶ直線とその他の色名応答の中心間の平均距離を計算した. 色名応答の一致度を図 4.3 に, 黄青の色名応答の中心を結ぶ直線とその他の色名応答の中心間の平均距離を図 4.4 に示す.

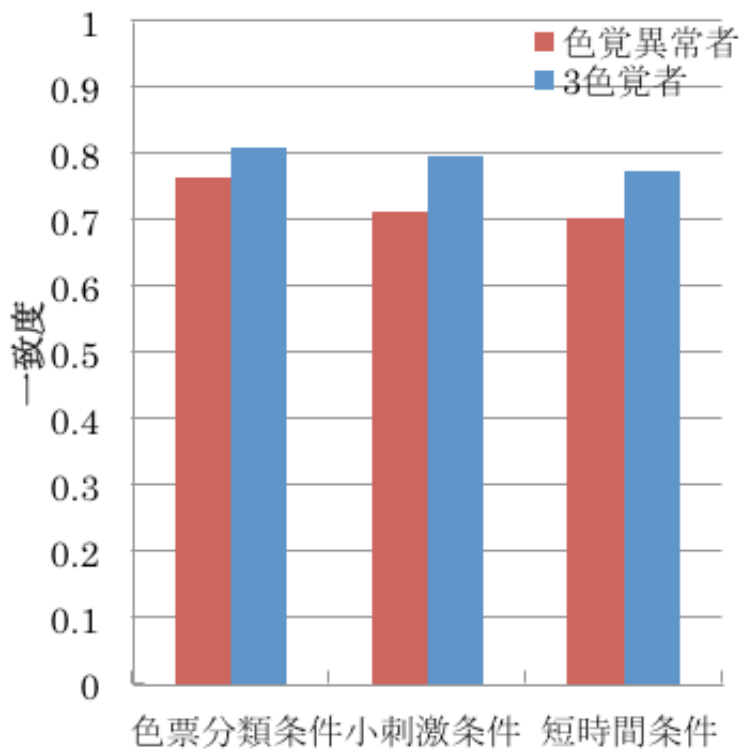


図 4.3 色名応答の一致度

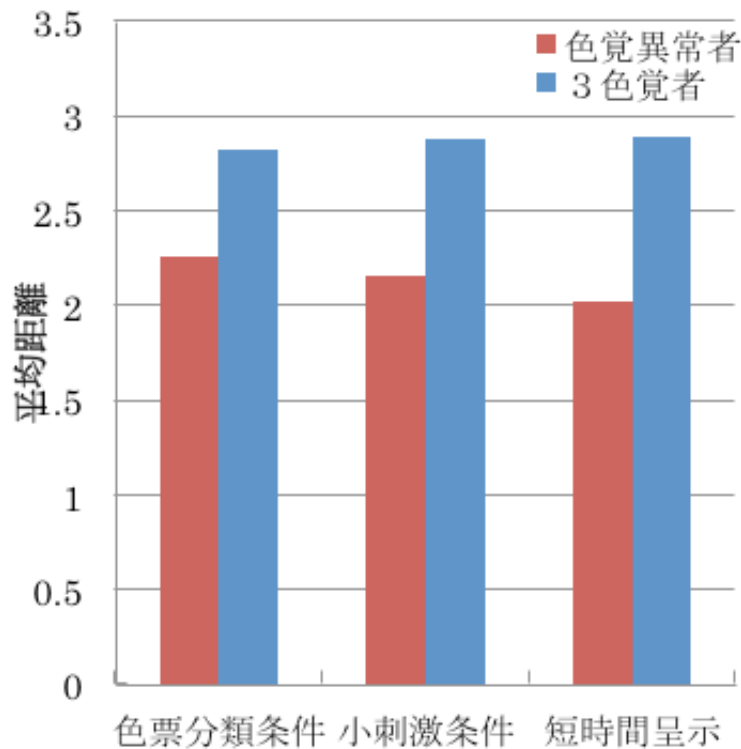


図 4.4 黄青の色名応答の中心を結ぶ直線とその他の色名応答の中心間の平均距離

色名応答の一致度について 2×3 (色覚異常者, 3色覚者 \times 実験条件) 分散分析を行った。その結果, 色覚 ($p < 0.05$), 実験条件 ($p < 0.01$) 共に主効果があった。下位検定の結果, 色覚異常者において色票分類条件が小刺激条件, 短時間呈示条件より有意に大きかった ($p < 0.05$)。

また, 黄青の色名応答の中心を結ぶ直線とその他の色名応答の中心間の平均距離についても 2×3 (色覚異常者, 3色覚者 \times 実験条件) 分散分析を行った。その結果, 色覚 ($p < 0.01$), 実験条件 ($p < 0.05$) 共に主効果があり交互作用もあった ($p < 0.01$)。下位検定の結果, 各実験条件において3色覚者のほうが色覚異常者よりも有意に大きかった ($p < 0.01$)。また, 3色覚者では実験条件間に有意差はなかったが, 色覚異常者では色票分類条件が他の条件よりも有意に大きく, 小刺激条件が短時間条件よりも有意に大きかった ($p < 0.05$)。

これらの結果は, 3色覚者はすべての条件で同様にカテゴリカルカラーネーミングを行ったが, 色覚異常者は色票分類条件において3色覚者よりも色名カテゴリーが崩れ, さらに小刺激, 短時間条件になると更に色名カテゴリーが崩れたことを示す。これらの結果は2章の結果と一致する。

[NIRS データ]

各実験条件の3色覚者の effect size の変化を図 4.5 と図 4.6 に、色覚異常者の effect size の変化を図 4.7 と図 4.8 に示す。白丸で示したチャンネルは休憩時に対し、タスク時に effect size が有意に増加したチャンネル，灰色丸で示したチャンネルは休憩時とタスク時に effect size の違いがなかったチャンネルを示す。

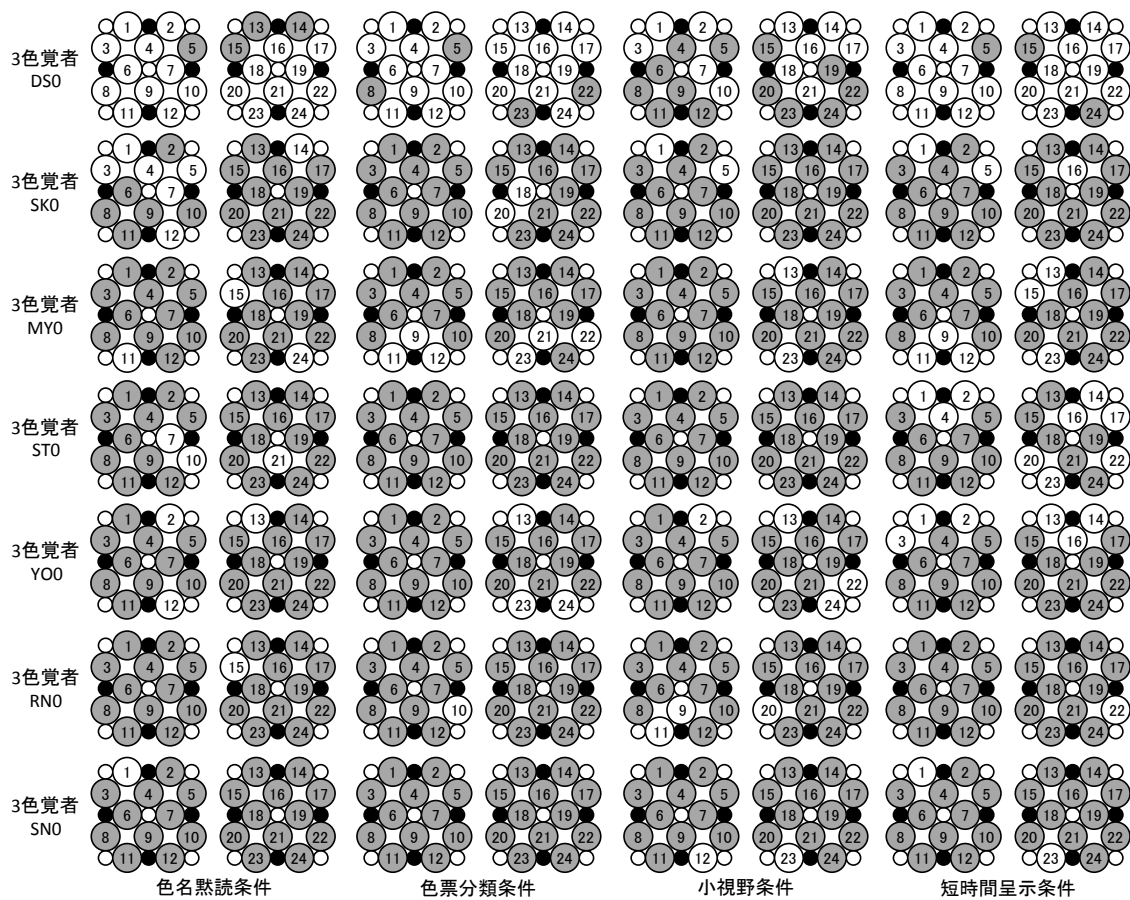


図 4.5 3色覚者の各実験条件における effect size の変化

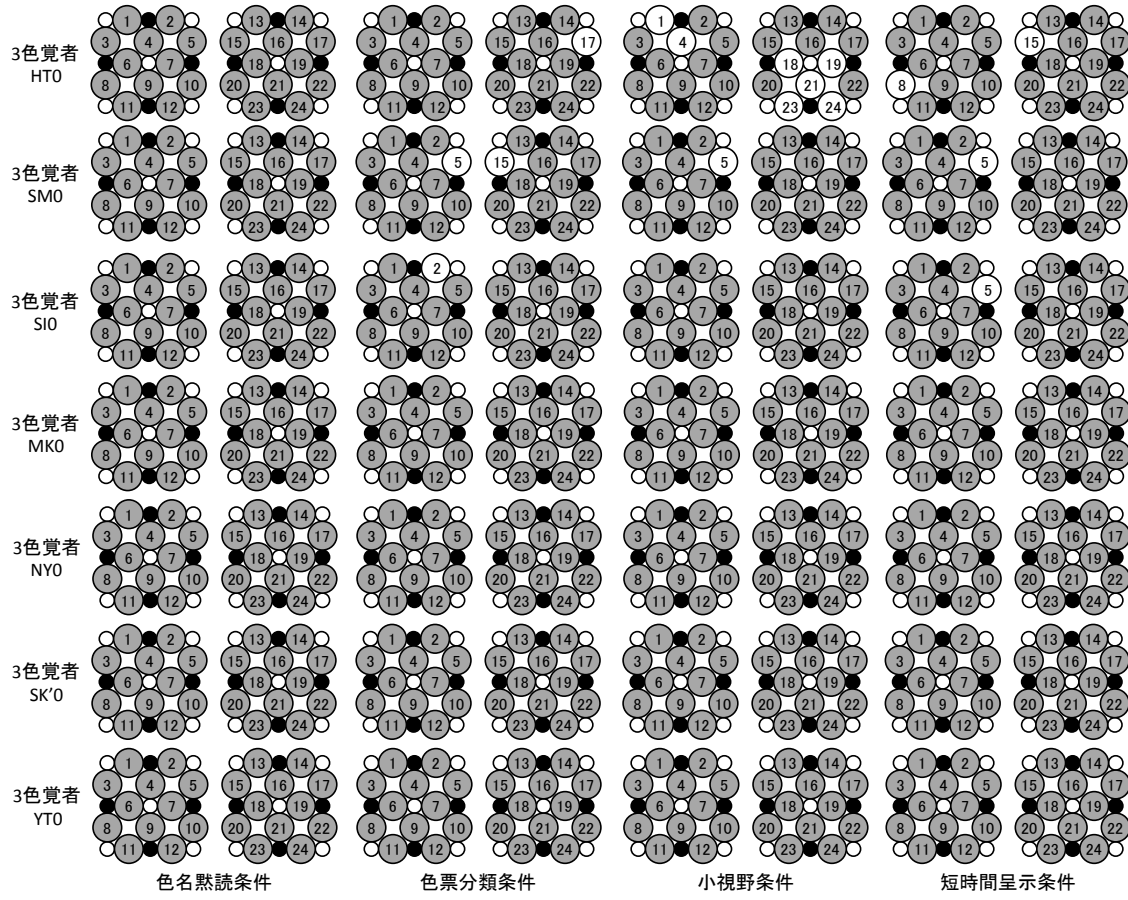


図 4.6 3色覚者の各実験条件における effect size の変化

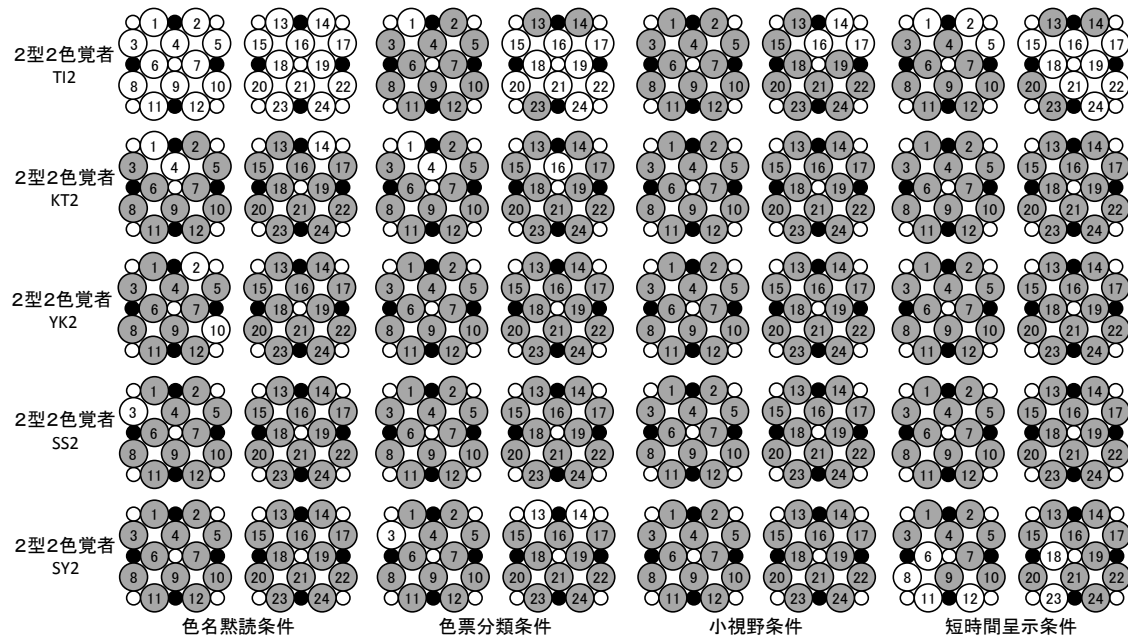


図 4.7 色覚異常者の各実験条件における effect size の変化

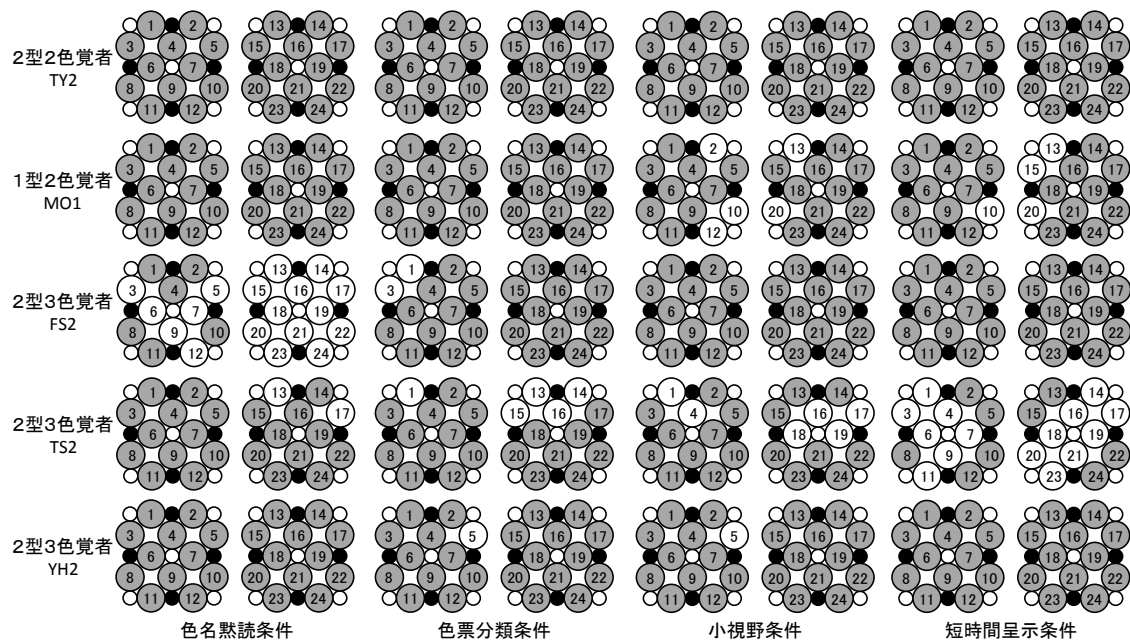


図 4.8 色覚異常者の各実験条件における effect size の変化

3色覚者について、色名黙読条件では DS0 や SK0 のように多くのチャンネルで effect size が増加した被験者もいたが、HT0 や SM0, SI0, MK0, NY0, SK'0, YT0 のように多くの3色覚者ですべてのチャンネルで effect size の有意な変化がなかった。また、3色覚者に共通したチャンネルの effect size の増加も現れず、最も effect size が増加した被験者が多かったチャンネルについても14人中3人のみで、3色覚者に共通した effect size の変化の傾向は現れなかった。他条件でも同様な結果で、最も effect size が増加した被験者が多かったチャンネルについても色票分類条件は14人中2人、小刺激条件は3人、短時間条件は5人で、共通の変化傾向は特になかった。

色覚異常者についても、色名黙読条件では2型2色覚者 TI2 や2型3色覚者 FS2 のように多くのチャンネルで effect size が増加した被験者もいたが、2型2色覚者 SY2, TY2 や1型2色覚者 MO1, 2型3色覚者 TS2, YH2 のように多くの色覚異常者ですべてのチャンネルで effect size の有意な変化がなかった。また、色覚異常者に共通したチャンネルの effect size の増加も現れず、最も effect size が増加した被験者が多かったチャンネルについても10人中3人のみで、色覚異常者に共通した effect size の変化の傾向は現れなかった。他条件でも同様な結果で、最も effect size が増加した被験者が多かったチャンネルについても色票分類条件は10人中4人、小刺激条件は2人、短時間条件は3人で、共通の変化傾向は特になかった。

各実験条件，チャンネルにおける加算平均したeffect sizeの値に対して，くり返しのある3元配置分散分析（3色覚者，色覚異常者×実験条件×チャンネル）を行った．その結果，主効果，交互作用共になかった．また，左右半球の優位性を調べるため，くり返しのある3元配置分散分析（3色覚者，色覚異常者×実験条件×左右半球）を行った結果，主効果，交互作用共になかった．さらに後頭葉（チャンネル5，10，15，20），側頭葉（チャンネル6，8，19，22）においてくり返しのある2元配置分散分析（3色覚者，色覚異常者×実験条件）を行った結果，主効果，交互作用共になかった．

これらの結果は本研究で計測した皮質部位におけるカラーネーミング時の皮質活動は今回行った解析においては刺激条件間，色覚異常者と3色覚者間において有意な差がなかったことを示す．

4.2.3 考察

本実験でも実験1.2のモニター条件と同様に色票分類条件において3色覚者と色覚異常者間でカラーネーミングの結果に違いが生じた．また，小視野や短時間呈示条件で色覚異常者の色名の区別が更に悪くなったのは，色覚異常者は刺激の輝度（表面の明度）を正しく判断するためには刺激の面積と観察時間が必要なため，これらが十分に与えられなかったためであると考えられる．すべての条件において，色覚異常者もj軸方向は区別することができていたことから，黄青方向は3色覚者と同様に区別することができ，赤緑方向の色名判断は条件間で異なる結果だったことから赤緑方向の色名判断は異なったメカニズムで行なっていると考えられる．刺激表面の明度は色覚異常者にとっては色名応答の重要な視覚の手がかりであると考えられる．

心理物理学実験の結果は，第2章の結果と一致しており，色覚異常者は3色覚者と異なり，輝度情報を用い，青黄方向を区別するメカニズムにより3色覚者的カラーネーミングを行っていることが示唆された．

皮質活動計測結果では，カラーネーミングにおいて刺激条件の違いや色覚異常者と3色覚者の間に皮質活動の系統的な違いが得られなかった．また，色名黙読条件と色票分類条件における皮質活動に有意な差が見られなかったことから，NIRSを用いた本研究では高次皮質から色名応答のメカニズムへの影響はほとんどないと考えられる．

NIRSを用いた本研究で計測した色覚異常者と3色覚者間の皮質活動の結果について、電気生理学的知見、脳機能画像解析的知見との対応関係で検討する。

1. 色覚異常者と3色覚者間で皮質活動に大きな局在した違いがない。例えば、特定の視覚前野内の局所的な活動分布には両者で差があったとしても、それらの活動を統合した結果として測定される皮質活動はhemodynamicの特性による制約を受けるため、結果として両者の皮質活動には差がなかった。サルの電気生理研究においてIT野に色選択性のあるニューロンがあることが示されている[28]が、本研究ではNIRSにより皮質活動を計測したため、各チャンネルの解像度はプローブ間の距離3cmである。よって単一ニューロンに違いがあったとしてもNIRSではその違いを計測することは出来なかったと考えられる。

2. 本研究では計測していない部位において色覚異常者と3色覚者に違いがある。本実験では3色覚者において色票分類条件、色名黙読条件共に皮質活動の有意な差はなかったが、PETを使用した過去の研究[39]では無彩色を観察した時よりも有彩色を観察した時の方が、右舌状回がより活性化した。過去の研究で得られた右舌状回の活性化は本実験で使用したNIRSでは測定できない深度であると考えられる。本研究で計測した部位よりも深い深度に違いがあるかもしれない。

さらに、色名カテゴリーの効果がストループ効果を使用した研究において、文字の色と意味が異なるときに一致した時よりも前頭で事象関連電位が大きく負の値をとった[40]。このことから色名カテゴリーの効果が前頭で何らかの影響を受けている可能性があり、本研究では計測することができなかった部位において3色覚者と色覚異常者に違いがあるかもしれない。

また、カテゴリカル色知覚について、左右視野に色のついた四角とその周りに色のついた枠を呈示し、四角と枠が同じ色であることを応答する時の皮質活動を調べた研究では、右視野に同じ色名カテゴリーの四角と枠を呈示した時に、前頭部から中心部にかけて強い反応を示した[41]。これは四角と枠の色は異なるが、同じ色名カテゴリーであるため、言語カテゴリーは同じだが色は異なるという矛盾が生じたために起きたことを示し、カテゴリカル色知覚は言語の影響を受けることを示している。この結果から本研究では計測していない言語の影響を反映する部位に色覚異常者と3色覚者に違いがあるかもしれない。ただし、その影響は色名応答というタスクに対してであり、その際の視覚皮質の活動に言語野からの影響が直接あることを裏付けているわけでは

なく、本研究結果とは矛盾してない。

以上のことから色覚異常者と3色覚者のカラーネーミング時における皮質活動の違いは本研究で測定した部位よりも高次処理を反映する部位にあると考えられる。2色覚者が輝度情報を用いて3色覚者と同じ色カテゴリーを形成し、そのカテゴリーに対応した色名応答をしているならば、本研究で計測できる部位に関して違いが現れるはずである。本研究では両者に違いが現れなかったことから、より高次処理に違いがあると考えられ、2色覚者は色情報と輝度情報から3色覚者より少ない色カテゴリーを形成し、このカテゴリーを輝度の違いにより更に分割し、3色覚者と同様なカラーネーミングを行なっていることを示唆する。

4.3 まとめ

本章では色覚異常者と3色覚者のカラーネーミング時の皮質活動を計測し、比較をすることで、その違いからカラーネーミングを行うメカニズムの違いを調べた。その結果、カラーネーミング結果では色覚異常者は第2章と同様に刺激をモニターに呈示すると3色覚者よりも赤緑方向の区別が劣化し、小視野や短時間呈示にするとさらに劣化した。しかし、本実験においては皮質活動では有意な違いは計測されなかった。これは皮質活動の違いが本実験では計測できなかった部位や、NIRSでは計測できない解像度で違いがあると考えられる。よって、高次レベルに関連した部位に色覚異常者と3色覚者色名応答時の皮質活動の違いがあると考えられる。

第 5 章

2 色覚者の 3 色覚的色名応答メカニズム

5.1 はじめに

まず，3 色覚者の色名応答メカニズムについてその流れを図 5.1 に示す．網膜上で波長に対する感度の異なる 3 種類の錐体により目に入った光が吸収され電気信号に変換される．そして，ganglion cell で異なる錐体の入力線形統合される．これらにより黄青，赤緑，輝度の 3 種類の反対色チャンネルが形成される．さらに高次レベルではマルチプルチャンネルが存在することが多くの心理物理学的研究により示唆されている[7][8]．さらに高次の色覚メカニズムにおいてカテゴリカル色知覚に対応した生理的メカニズムが存在すると考えられている．3 色覚者はこれらのカテゴリチャンネルに色名を対応させ色名応答を行なっていると考えられる．

一方で，1 種類の錐体を欠損する 2 色覚者はどのようなカテゴリチャンネルを持ち，どのように色名応答を行なっているのかを本章では考える．

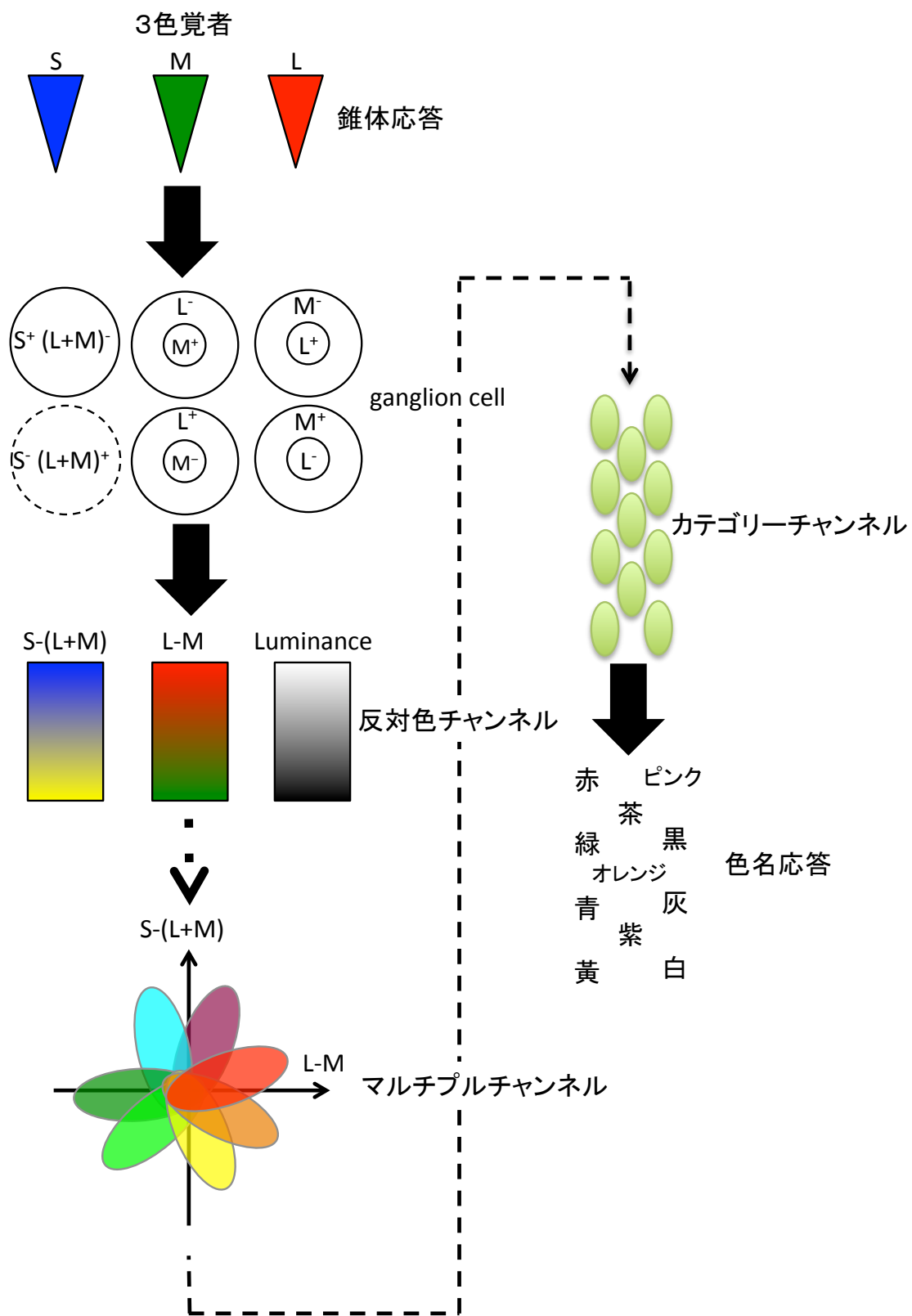


図 5.1 3色覚者の色名応答メカニズム

5.2 2色覚者の輝度手掛かりによる色名応答

第1章で2色覚者は輝度手掛かりにより3色覚的カラーネーミングを行うことが示された。そこで輝度手掛かりを色覚メカニズムにおいてどの段階で使用されているかを考える。輝度情報を使用する段階として2つの可能性が考えられる。これらの可能性を仮説1, 2として図5.2に示す。

仮説1. 2色覚者は輝度情報を使用し, 3色覚者と類似したカテゴリーチャンネルを形成し, カラーネーミングを行う際にはそのカテゴリーチャンネルと対応する色名応答を行なう。

仮説2. 2色覚者は3色覚者とは異なるカテゴリーチャンネルを持ち, 表面輝度の違いを使用し, カテゴリーチャンネルをさらに分類し, 3色覚者と類似した色名応答に当てはめている。

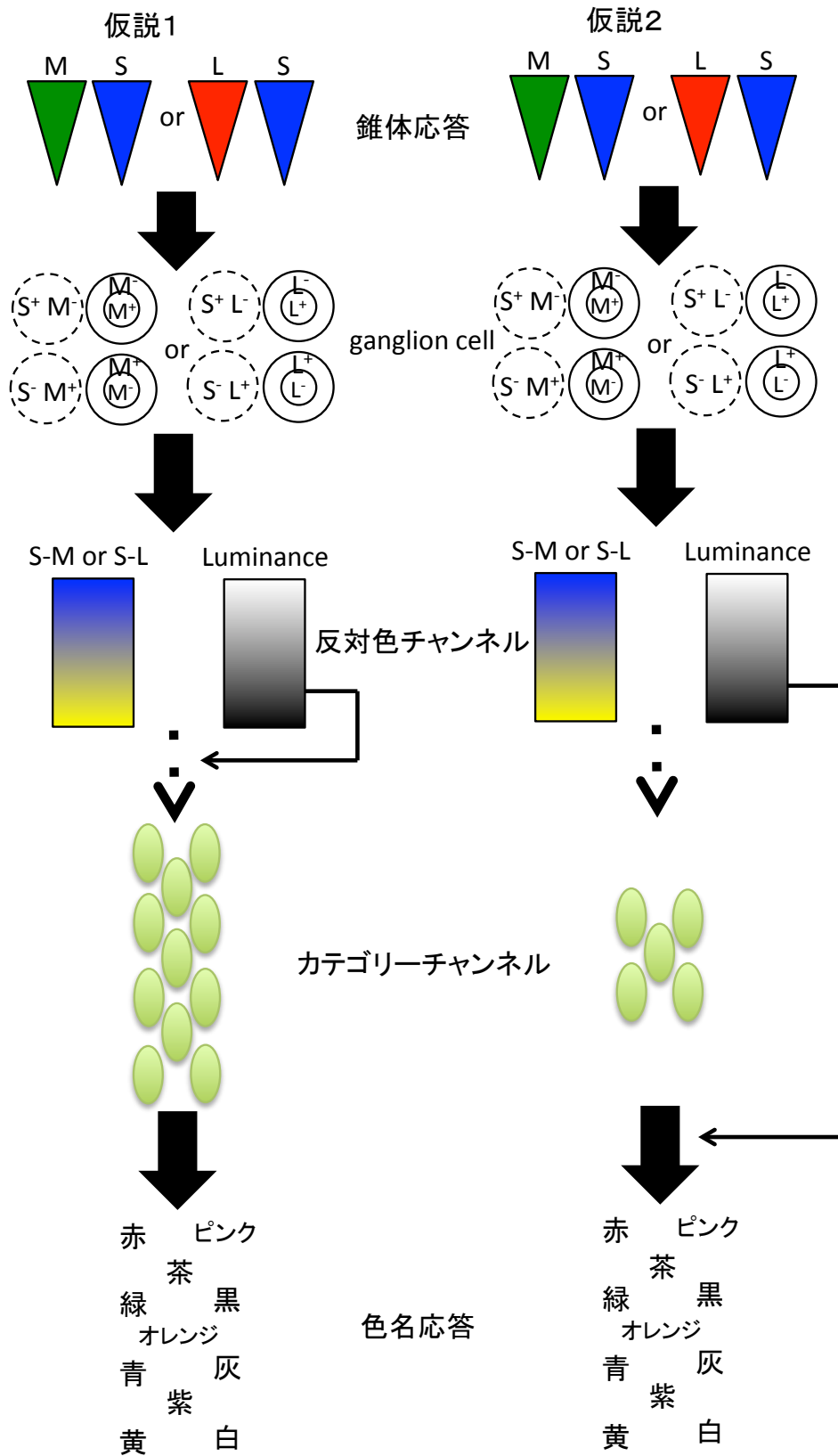


図 5.2 2色覚者が輝度を使用する段階

第3章から2色覚者は赤緑方向を混同して記憶し、少ないカテゴリーチャンネルを持つことが示唆された。これは仮説2を支持する結果である。また、第4章から色覚異常者と3色覚者では高次色覚メカニズムに違いがあることが示唆された。カテゴリーチャンネルは色覚メカニズムにおいて高次レベルに位置していることから、2色覚者は3色覚者と異なるカテゴリーチャンネルを持つと考えられる。よってこの結果も仮説2を支持する結果である。これらのことから2色覚者は3色覚者とは異なるカテゴリーチャンネルを持ち、表面輝度の違いを使用し、カテゴリーチャンネルをさらに分類し、3色覚者と類似した色名応答に当てはめているということが示唆される。

5.3 錐体応答による2色覚者のカテゴリーチャンネルの分析

2色覚者は3色覚者よりも少ないカテゴリーチャンネルを持つことが示唆されたが、この少ないカテゴリーチャンネルはどのようなものかをより詳細に調べるため、第2章の色票条件のKS1の色名応答結果の(M, S)錐体応答面上の分布(図2.42)を詳細に見てみる。色名毎のまとまりを黒い線で分類した図を図5.3に示す。

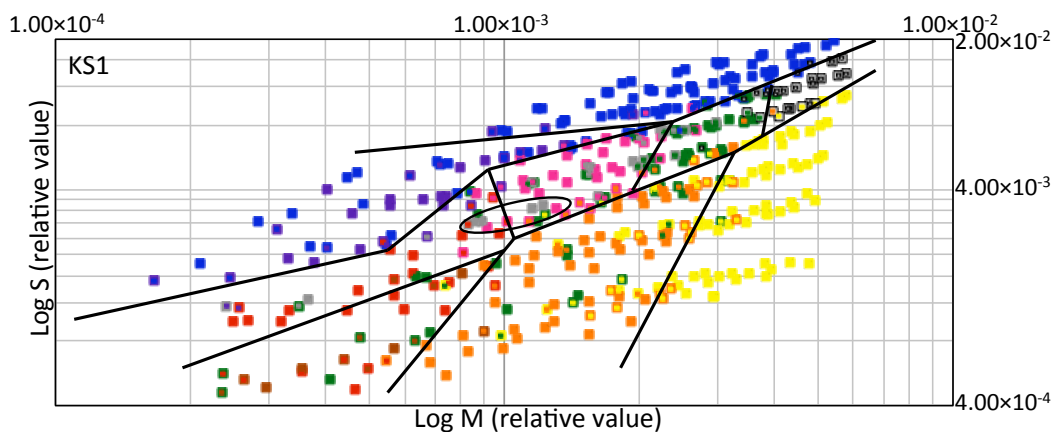


図 5.3 実験 1.1 の 1 型 2 色覚者 KS1 の色名応答結果の (M, S) 錐体面上の分布

色名のまとまりを分類すると左上から右下方方向の黄青方向を、左上から順に青、紫の色名、白、緑、ピンク、灰、赤の色名、黄、オレンジ、茶の色名に分かれている。青、紫の色名を M 錐体応答の大きいものから青、紫と区別し、白、緑、ピンク、灰、赤の色名を M 錐体応答の大きいものから白、緑、ピンク、灰、赤に区別し、黄、オレン

ジ，茶を M 錐体応答の大きいものから黄，オレンジ，茶のように区別している．2 色覚者は M 錐体応答から輝度チャンネルを形成する．このことから 2 色覚者は黄青チャンネルにより青，紫を含むカテゴリー C1 と白，緑，ピンク，灰，赤，黒を含むカテゴリー C2 と黄，オレンジ，茶を含むカテゴリー C3 の 3 つのカテゴリーチャンネルを形成し，そのカテゴリーを輝度の違いにより更に分類し，3 色覚者と同じ色名応答に当てはめていることが示唆される．

5.4 2 色覚者の色覚応答メカニズム

本研究の実験結果から 2 色覚者は 2 錐体の応答から黄青チャンネル，輝度チャンネルを形成し，これらのチャンネルから 3 色覚者と異なる赤緑方向を同じカテゴリーとするカテゴリーチャンネルを形成する．そして刺激を観察するときに表面輝度の違いを利用し，これらのカテゴリーチャンネルを分け，3 色覚者と類似した色名応答に当てはめていると考えられる．これらの流れを図 5.4 に示す．

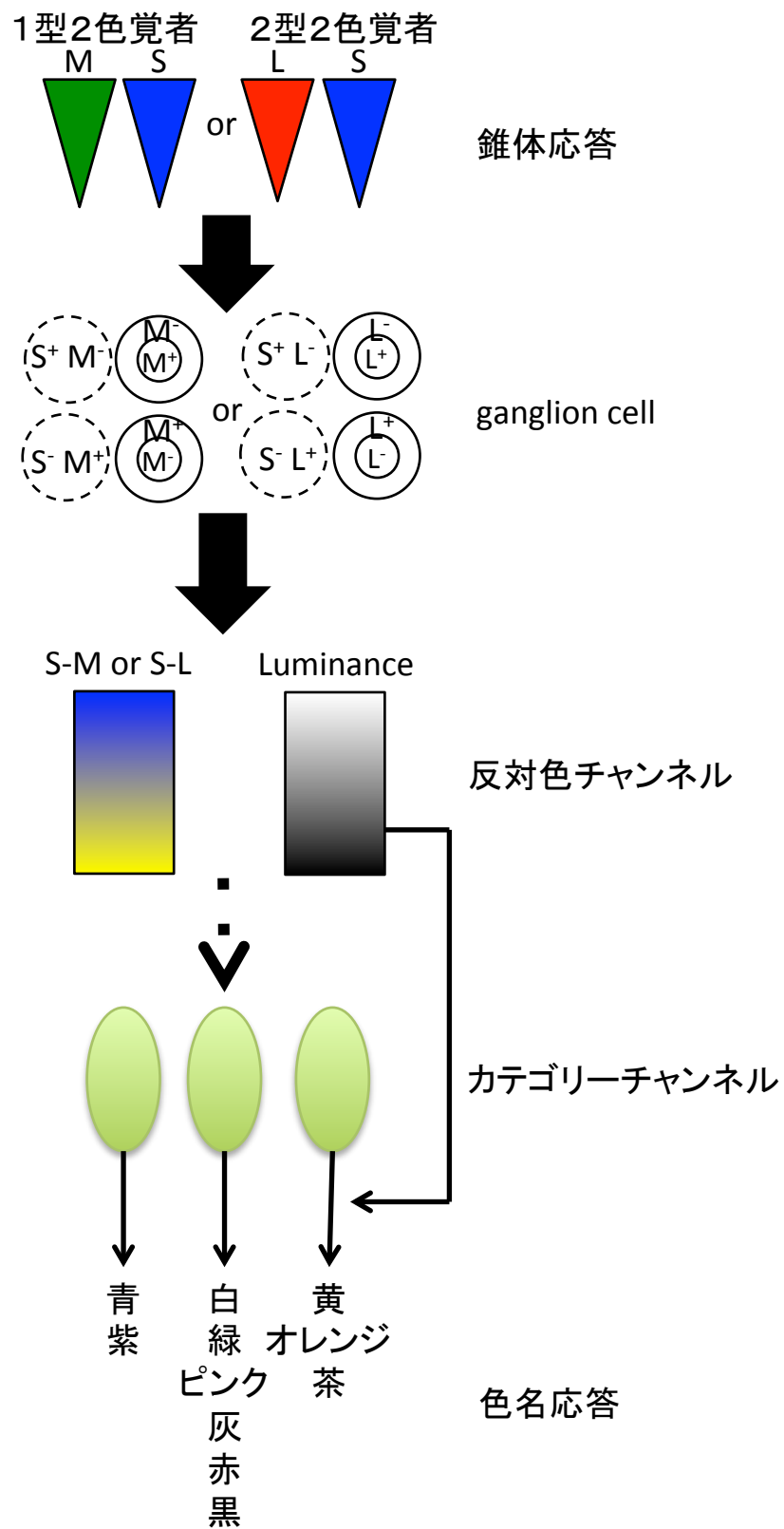


図 5.4 本研究から考えられる 2 色覚者の色覚応答メカニズム

第 6 章

総合考察

6.1 2色覚者の3色覚的色名応答に必要な手掛かり

第2章の結果から2色覚者が3色覚的色名応答を行うためには輝度が重要な手掛かりであることが分かった。この輝度情報について、実際の色票とモニターに呈示した刺激の違いと考えられる色票を傾ける際に変化する刺激毎の輝度の変化の違いを手掛かりとしているのかを詳細に調べるため、色票の傾きの変化に伴う色票の輝度変化をシミュレートした実験を行う必要がある。

また、他にも手掛かりとして、多くの情報があると考えられる。近年報告されている短波長域に感度を持つメラノプシン[42-44]が2色覚者において補助的に寄与している可能性もあり、今後検討が必要である。また、色収差や奥行き情報など他の手掛かりについても解明する必要がある。さらに、日常生活では刺激周辺にも様々な手がかりとなる情報があると考えられるため、様々な背景を用い実験を行うなどより日常生活に近い環境で実験を行い、他の手掛かりを解明していく必要がある。2色覚者の輝度情報の違いによる色名の分類について、どの程度の輝度の違いがあれば分類することができるのかなどより詳細に調べることや2色覚者の色名分類に役立つ手掛かりを探し出すことは、2色覚者にも見やすいカラーユニバーサルデザインにもつながるはずである。

6.2 色記憶

第3章の結果から2色覚者は記憶においては赤緑方向を混同し、3色覚者より少ないカテゴリーであることが分かった。しかし、本実験 2.2 では3色覚者の結果において色の記憶がカテゴリーカルである傾向が過去の研究[27]と比べ、弱い傾向だった。これは過去の研究では本実験 2.2 と比較し、被験者数、試行回数が共に多かったためであると考えられる。そのため、2色覚者についてもより多くの被験者、試行回数で実験を行い、より詳細な結果を集める必要がある。2色覚者の記憶の色カテゴリーをよ

り詳細に調べることで色名応答のカテゴリーとの比較から、2色覚者の色名応答形成メカニズムがより詳細にわかってくるかもしれない。

また、色の記憶からカテゴリーチャンネルを解明するためには色記憶がカテゴリーチャンネルを反映していることを解明しなければならない。色記憶がカテゴリーチャンネルを反映していることが解明されれば色記憶を調べることで直接カテゴリーチャンネルを調べることができ、色覚メカニズムの解明にあたり、色記憶が重要な役割になると考えられる。

6.3 色名応答時の皮質活動

第4章の結果から色覚異常者と3色覚者の色名応答時の皮質活動の違いは高次メカニズムに関連した部位にあることが示唆された。しかし本実験ではこの違いを計測することはできなかった。よって色覚異常者と3色覚者間に本当に高次メカニズムに関連した皮質活動において違いがあるのかを調べるため、前頭や頭頂の皮質活動の計測を行ったり、fMRIなどより解像度の高い画像を計測できる装置を使用し、皮質活動の計測を行う必要がある。さらに、色覚異常者と3色覚者の皮質活動の違いを計測し、違いが現れた部位がどのような情報を処理する部位かがわかれば色覚異常者と3色覚者で色名応答の際に用いる手掛かりがより明らかになると考えられる。また、EEGを使用し、時間解像度の高い脳波図を計測することで、時間的な違いから2色覚者の色名応答メカニズムのどの段階で手掛かりが使用されるかをより明らかにすることが出来るかもしれない。

6.4 2色覚者の色覚メカニズム

本研究では2色覚者の色名応答メカニズムについて3色覚者よりも少ないカテゴリーチャンネルを持つことが示唆された。しかし、反対色チャンネルからカテゴリーチャンネルをどのように形成しているのかは明らかになっていない。3色覚者と同様に2色覚者もマルチプルチャンネルを持っているのか、またはそのようなメカニズムは持たず、反対色チャンネルの2チャンネルからカテゴリーチャンネルを形成しているのか。今後これらのことを調べ、2色覚者の色覚メカニズム全体を明らかにしていく必要がある。2種類の錐体により形成される2色覚者の色覚メカニズムを明らかにすることで、3種類の錐体をもつ3色覚者の色覚メカニズムについても明らかにできる

かもしれない。

第 7 章

結論

本研究から得られた成果を以下に述べる。

1. 2色覚者は実際の色票を観察すると3色覚者と類似したカテゴリカルカラーネーミングを行うが、刺激をモニターに呈示すると赤緑方向の区別が大きく劣化し、小視野や短時間呈示にするとさらに劣化する。さらに刺激を等輝度で呈示することで赤緑方向の色名を完全に混同してしまう。一方で黄青方向はどの呈示条件でも区別することが出来る。
2. 色の記憶では2色覚者は黄青方向は3色覚者と同様に記憶するが、赤緑方向は混同して記憶する。
3. 色覚異常者はモニターに呈示すると赤緑方向の区別が3色覚者より劣化するが、NIRSにより後頭から側頭の皮質活動を測定し、3色覚者と比較すると違いを計測することはできなかった。
4. 2色覚者は2錐体により形成される黄青チャンネル、輝度チャンネルによりカテゴリチャンネルを形成し、表面輝度（明度）の違いを用いることにより赤緑方向のカテゴリチャンネルを分類し、3色覚と同様な色名に当てはめ3色覚的カラーネーミングを行うことが示唆された。

謝辞

大学院生活を送るにあたり，多大なご指導を頂いた内川恵二教授に心より感謝いたします。本研究の進め方や研究室での生活態度だけでなく，人としてのあり方など多くのことを学ぶ事ができました。また，研究の面白さを知ることができたのは内川教授のご指導のお陰です。学部から博士までの7年間，欠けた部分の多い私のせいで多大なご迷惑をかけてしまいましたが，最後まで根気強くご指導いただき本当にありがとうございました。

ゼミや研究報告会において私の研究に関する多くのご助言を頂いた金子寛彦准教授に深く感謝いたします。

博士論文の審査をして頂き，有益なご助言を頂いた小林隆夫教授，羽鳥好律教授，山口雅浩教授，金沢工業大学の吉澤達也教授に感謝いたします。吉澤教授には研究を進める上で必要である皮質活動についての知識や投稿論文についてもご教授頂き，さらに金沢での実験をするための生活の際にも住居などお世話をして頂きました。

皮質活動の計測について実験環境を整えて頂き，さらに皮質活動についての基礎知識や解析方法など一から教えて頂き，皮質活動の知識のない私のくだらない質問にも丁寧にも私にも理解できるよう答えて頂いた金沢大学の小島治幸教授に深く感謝しております。

些細な質問や発表の練習などいつも親身になって対応していただいた福田一帆助教に深く感謝いたします。

お忙しい中，被験者として協力していただいた多くの方々に感謝いたします。時には無理なスケジュールで被験者をお願いしてしまいましたが，引き受けていただいたおかげで私の研究を進めることができました。

研究に関することだけではなく学生生活においても多くの面でお世話になりました内川研究室，金子研究室，金沢工業大学の吉澤研究室，金沢大学の小島研究室の皆様感謝いたします。皆様の御蔭で充実した学生生活を送ることができました。

本研究の一部は学術研究助成基金助成金，挑戦的萌芽研究 23650112 の助成を受けて行われました。

参考文献

- [1] Boynton, R. M. and Olson, C. X.: "Locating basic colors in the OSA space", *Color Research and Application*, **12** pp 94-105, 1987.
- [2] Uchikawa, K. and Boynton, R. M.: "Categorical color perception of Japanese observers: comparison with that of Americans", *Vision Research*, **27**, pp 1825-1833, 1987.
- [3] Mollon, J. D.: " "Tho' she kneel'd in that place where they grew..." The uses and origins of primate colour vision", *Journal of Experimental Biology*, **146**, pp 21-38, 1989.
- [4] Dacey DM: "Circuitry for color coding in the primate retina." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **93**, pp 582-588, 1996.
- [5] Krauskopf, J., Williams, D. R. and Heeley, D. M.: "Cardinal directions of color space", *Vision Research*, **22**, pp 1123-1131, 1982.
- [6] Derrington, A. M., Krauskopf, J. and Lennie, P.: "Chromatic mechanisms in lateral geniculate nucleus of macaque", *The Journal of Physiology*, **357**, pp 241-265, 1984.
- [7] Gegenfurtner, K. R., and Kiper, D.C.: "Contrast detection in luminance and chromatic noise", *Journal of the Optical Society of America, A*, **9**, pp 1880-1888, 1992.
- [8] Webster, M. A. and Mollon, J. D.: "Changes colour appearance following post-receptoral adaptation", *Nature*, **349**, pp 235-238, 1991.
- [9] Lennie, P., Krauskopf, J. and Scalar, G.: "Chromatic mechanisms in striate cortex of macaque", *Journal of Neuroscience*, **10**, pp 649-669, 1990.
- [10] Kiper, D. C., Fenstemaker, S. B. and Gegenfurtner, K. R.,: "Chromatic properties of neurons in macaque area V2", *Visual Neuroscience*, **14**, pp 1061-1072, 1997.
- [11] Hansen, T. and Gegenfurtner, K. R.: "Higher level chromatic mechanisms for

- image segmentation”, *Journal of Vision*, **6**, pp 239-259, 2006.
- [12] D’Zmura, M. and Knoblauch, K.: “Spectral bandwidth for the detection of color”, *Vision Research*, **38**, pp 3117-3128, 1998.
- [13] 内川恵二：色覚のメカニズム-色を見る仕組み-, 朝倉書店, 1998.
- [14] Boynton, R. M.: *Human Color Vision*. Holt, Rinehart and Winston, New York, 1979.
- [15] 池田光男、”色彩工学の基礎”、朝倉書店, 1980.
- [16] 深見嘉一郎, “色覚異常-色盲に対する誤解をなくすために- 改訂第2版”, 金原出版株式会社, 1988.
- [17] Judd D. B.: Standard response functions for protanopic and deuteranopic vision, *Journal of the Optical Society of America*, **35**, 199-221, 1945.
- [18] Boynton, R. M. and Scheibner, H.: On the perception of red by “red-blind” observers. *Acta Chromatica*, **1**, pp 205-220, 1967.
- [19] Jameson, D. and Hurvich, L. M.: Dichromatic color language: “reds” and “greens” don’t look alike but their colors do. *Sensory Processes*, **2**, pp 146-155, 1978.
- [20] Montag, E. D. and Boynton, R. M.: Rod influence in dichromatic surface color perception. *Vision Research*, **27**, 2153-2162, 1987.
- [21] S. K. Shevell, Y. Sun, M. Neitz; Protanomaly without darkened red is deuteranopia with rods, *Vision Research*, **48**, 2599-2603, 2008.
- [22] J. Pokorny, M. Lutze, D. Cao, A. J. Zele; The color of night: Surface color categorization by color defective observers under dim illuminations, *Visual Neuroscience*, **25**, 475-480, 2008.
- [23] E. D. Montag; Surface color naming in dichromats. *Vision Research*, **34**, 2137-2151, 1994.
- [24] A. L. Nagy, R. M. Boynton ; Large-field color naming of dichromats with rods bleached, *Journal of the Optical Society of America*, **69**, 1259-1265, 1979.
- [25] T. Wachtler, U. Dohrmann, R. Hertel; Modeling color percepts of dichromats. *Vision Research*, **44**, 2843-2855, 2004.
- [26] Sharpe L. T., de Luca E., Hansen T., Jägle H., Gegenfurtner K. R.: Advantages and disadvantages of human dichromacy. *Journal of Vision*, **6**, 213-223, 2006.
- [27] 杉山徹, “色の記憶を用いた色覚中枢メカニズムの解明”, 東京工業大学修士論文,

1994.

- [28] K. Koida, H. Komatsu.: Effects of task demands on the responses of color-selective neurons in the inferior temporal cortex. *Nature Neuroscience*, **10**: 108-116
- [29] Villringer A., & Chance, B.: Non-invasive optical spectroscopy and imaging of human brain function. *Trends in Neuroscience*, **20**, 435-442, 1997
- [30] Strangman, G., Boas, D. A., & Sutton, J. P.: Non-invasive neuroimaging using near-infrared light, *Biological Psychiatry*, **52**, 679-693, 2002
- [31] M. Peña, A. Maki, D. Kovacic, G et al.,: Sounds and silence: An optical topography study of language recognition at birth, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **100**, 11702-11705, 2003.
- [32] G. Maehara, S. Taya, H. Kojima.: Changes in hemoglobin concentration in the lateral occipital regions during shape recognition, *Journal of Biomedical Optics*, **12**, 1083-3668, 2007.
- [33] M.J. Herrmann, A-C. Ehlis, et al.,: Near-infrared optical topography to assess activation of the parietal cortex during a visuo-spatial task, *Neuropsychologia*, **43**, 1713-1720, 2005.
- [34] Yoko Hoshi, Norio Kobayashi, and Mamoru Tamura: Interpretation of near-infrared spectroscopy signals: a study with a newly developed perfused rat brain model, *J Appl Physiol*, **90**: 1657-1662, 2001
- [35] Gary Strangman, Joseph P. Culver, John H. Thompson, and David A. Boas: A Quantitative Comparison of Simultaneous BOLD fMRI and NIRS Recordings during Functional Brain Activation, *Neuroimage* **17**: 719-731, 2002
- [36] Matsuda, G., & Hiraki, K.: Sustained decrease in oxygenated hemoglobin during video games in the dorsal prefrontal cortex: A NIRS study of children. *NeuroImage*, **29**: 706-711, 2006.
- [37] Otsuka, Y., Nakato, E., Kanazawa, S., Yamaguchi, M. K., Watanabe, S., & Kakigi, R: Neural activation to upright and inverted faces in infants measured by near infrared spectroscopy. *NeuroImage*, **34**: 399-406, 2007.

- [38] Schroeter, M. L., Zysset, S., Kruggel, F., & von Cramon D. V: Age dependency of the hemodynamic response as measured by functional near-infrared spectroscopy. *NeuroImage*, 19: 555-564, 2003.
- [39] Linda L. Chao and Alex Martin.: Cortical Regions Associated with Perceiving, Naming, and Knowing about Colors. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11:1, 25-35, 1999.
- [40] A. J. Holmes, D. A. Pizzagalli: Response conflict and frontocingulate dysfunction in unmedicated participants with major depression. *Neuropsychologia*, **46**, 2904-2913, 2008.
- [41] Q. Liu, H. Li, J.L. Campos, C. Teeter, W. Tao, Q. Zhang, H. J. Sun : Language suppression effects on the categorical perception of colour as evidenced through ERPs. *Biological Psychology*, **85**, 45-52, 2010.
- [42] D.M. Dacey, H.W. Liao, B.B. Peterson, F.R. Robinson, V.C. Smith, J. Pokorny, K.W. Yau, P.D. Gamlin: Melanopsin-expressing ganglion cells in primate retina signal colour and irradiance and project to the LGN. *Nature*, 433, 749–754, 2005.
- [43] P.D. Gamlin, D.H. McDougal, J. Pokorny, V.C. Smith, K.W. Yau, D.M. Dacey: Human and macaque pupil responses driven by melanopsin-containing retinal ganglion cells. *Vision Research*, 47, 7, 946-954, 2007.
- [44] S. Tsujimura, K. Ukai, D. Ohama, A. Nuruki, K. Yunokuchi : Contribution of human melanopsin retinal ganglion cells to steady-state pupil responses. *Proceedings of the Royal Society B Biological Science*, 277, 2485–2492, 2010.

研究業績

● 論文

- 西田浩聡, 福田一帆, 内川恵二: 2色覚者のカテゴリカルカラーネーミングに及ぼす視覚の手がかり, 視覚と科学, 2013
- 西田浩聡, 内川恵二, 福田一帆, 小島治幸, 吉澤達也: 色覚異常者と3色覚者間でのカテゴリカル色応答時の皮質活動の比較, 視覚と科学, (査読中)

● 国際会議

- Hirotoishi Nishita and Keiji Uchikawa, "Characteristics of Color Categories of Dichromats." Asia-Pacific Conference on Vision(APCV2010), 22.04, Taipei(Taiwan), July 23 - 26, 2010 (ポスター発表、査読あり)
- K. Uchikawa, H. Nishita, "Categorical color mechanisms of dichromats revealed by color naming and color memory." 20th Symposium of the International Colour Vision Society(ICVS2009), Abstract Booklet 93, Braga(Portugal), July 24 - 28, 2009 (口頭発表、査読あり)
- Hirotoishi Nishita and Keiji Uchikawa, "Trichromat-like colour-naming categories are not observed in colour memory of dichromats." Asia-Pacific Conference on Vision(APCV2008), Abstract 45, Brisbane(Australia), July 18 - 21, 2008 (ポスター発表、査読あり)

● 国内学会

- 西田浩聡, 内川恵二 「刺激呈示条件の制限に伴う2色覚者の色カテゴリー分類の明度への依存傾向の増大」, 日本視覚学会 2012年夏季大会, VISION, 24(3), 山形大学(山形), 7月, 2012年
- 西田浩聡, 福田一帆, 内川恵二, 吉澤達也, 小島治幸 「2色覚者と3色覚者のカラーネーミング時の脳活動」, ヒューマンインフォメーション研究会, 映像情報メディア学会技術報告, 35(51), 沖縄産業支援センター305中会議室(沖縄), 12月, 2011年

- 西田浩聡, 内川恵二 「2色覚者の色の記憶メカニズム特性」, 日本視覚学会 2009年夏季大会, VISION, 21(3), 京都工芸繊維大学(京都), 7月, 2009年
- 西田浩聡, 内川恵二 「色の記憶による2色覚者の色カテゴリーの解明」, 第42回知覚コロキウム, 22-2, 休暇村志賀島(福岡), 3月, 2009年
- 西田浩聡, 内川恵二 「色の記憶による2色覚者の色カテゴリー分類」, 日本視覚学会 2009年冬季大会, VISION, 21(1), 工学院大学(東京), 1月, 2009年
- 西田浩聡, 「2色覚者のカテゴリカルカラーネーミングと色の記憶特性の比較」, 第10回日本感性工学会, 21E-08, 大妻女子大学(東京), 9月, 2008年
- 西田浩聡, 内川恵二 「2色覚者の色の記憶特性とカテゴリカルカラーネーミングの比較」, 映像情報メディア学会ヒューマンインフォメーション研究会, 映像情報メディア学会技術報告, 32(15), 東京工業大学(東京), 3月, 2008年