

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	階層的色覚メカニズムを考慮した色空間の構築に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	鯉田孝和
Author(English)	
出典(和文)	学位:不明, 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第4451号, 授与年月日:2000年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:., Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第4451号, Conferred date:2000/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

階層的色覚メカニズムを考慮した 色空間の構築に関する研究

平成 12 年 (2000 年) 1 月

指導教官： 内川 恵二 教授

提出者： 東京工業大学大学院 総合理工学研究科
物理情報工学専攻
鯉田 孝和
97D24029

目次

第 1 章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 脳の機能の両側面．～色覚との対応づけ～	5
1.3 色知覚の階層性と生理学的構造の対応．～ 3 段階の色情報処理～	7
1.4 色を表現する色空間	11
1.5 本研究の目的	15
1.6 本論文の構成	16
第 2 章 実験条件の設定	17
2.1 D 65 光源による照明	17
2.2 表面色刺激	17
2.3 表面色モードと明るさ効率の比較実験	17
2.3.1 表面色モードと開口色モード	17
2.3.2 方法	18
2.3.3 結果	20
2.3.4 考察	23
第 3 章 カテゴリカル色知覚	25
3.1 カテゴリカル色知覚とは	25
3.2 カテゴリカル色知覚に関する過去の研究	25
3.3 新しい実験手法によるカテゴリカル色知覚の検証	25
3.4 分類実験	26
3.4.1 目的	26
3.4.2 方法	26
3.4.3 結果と考察	29
3.5 単一語彙カラーネーミング実験	47
3.5.1 目的	47
3.5.2 方法	47
3.5.3 結果	48
3.5.4 考察	55
3.6 まとめ	58

第 4 章 色差の評価限界	60
4.1 色差評価の問題点	60
4.2 主観評価による限界設定実験	61
4.2.1 目的	61
4.2.2 方法	61
4.2.3 結果	66
4.2.4 考察	69
第 5 章 色差の評価基準の変化	71
5.1 色差の記述を困難にする原因	71
5.2 中間色設定実験 1 : 色平面内の 2 次元操作による色設定条件	72
5.2.1 装置と刺激	72
5.2.2 被験者	72
5.2.3 手続き	72
5.2.4 結果・考察	73
5.3 中間色設定実験 2 : 参照刺激間を結ぶ直線上での色設定条件	77
5.3.1 装置と刺激	77
5.3.2 被験者	77
5.3.3 手続き	77
5.3.4 結果	79
5.3.5 考察	88
5.4 コントロール実験 (空間距離の中間座標設定)	90
第 6 章 総合的考察	91
6.1 導入する新しい概念	91
(1) 新たな軸 (4 つめの次元) の導入 : 色差評価軸	91
(2) 色空間内部に切れ目を作る (白・黄領域)	93
6.2 新しい色空間の提案	93
6.3 今後の課題	93
第 7 章 結論	95
謝辞	96
参考文献	97
研究業績	100
付録	102

第1章 序論

1.1 はじめに

色は複雑

クレヨンを使って樹木の絵を簡単に描いてみる。葉の色は緑なので緑のクレヨンを使う。木の幹は茶色なので茶色で塗る。このようにして描かれた絵は本来の樹木とはかなり雰囲気の異なるものとなる。それに関わらず、色を選んで塗るという絵の描き方に我々は普遍性を感じるのではないだろうか。また、この絵を見た多くの人は「樹木である」と認識できるのではないだろうか(図1.1)。色を塗るという至って単純な行為にも、人間特有の色情報処理メカニズムの結果が反映されているのである。例えば、コンピュータを用いて、自然画像を変化させ数種のクレヨンで色を塗ったようにすることを試みると、それに必要な画像処理は非常に複雑なものになってしまう。



図 1.1 樹木の絵を描いてみる。

色は物理的な特性か？

そもそも色とは何であろうか。我々は物体の特徴を表すのに色をよく用いる。例えば「青いユニフォーム」であるとか「透明感のあるブルーのパソコン」と表現している。つまり、我々は色が物体の表面特性であると考えている。実際、色を物体表面の属性として取り扱ってもほとんど問題は起こらない。このことが拍車を掛け、色が物体の物理的な属性であることに全く疑いを感じていない。

ところが、色は物体と関係なく光で定義できる。色を含むすべての見えは、物体から反射した光あるいは光源の光が我々の眼に飛び込んだ結果である。ならば、色は光の波長特性で記述できるのではないか。たしかに光のスペクトルを見ると、紫・青・緑・黄・赤というように色が変化している。波長に色が付いていると考えるのも無理はない。色とは光の波長なのだろうか。しかしながら、これは過ちである。ここで3つの狭帯域スペクトル光を考える。それぞれ530nm, 570nm, 640nmに強度のピークを持つ波長幅の狭い光である。これら3つの光が眼に入射すると、緑、黄、赤という色に見える。この段階では色=波長でもよいように思える。ところが、この緑の光と赤の光を適当な強度で加えあわせると、黄の光と区別がつかない色を作り出すことができるのである。光の波長が色を記述するのであれば、これは非常におかしな現象である。光の波長が増減するにしたがって生じる色の変化を、波長を変えることなく生み出せるのである。また、光のスペクトルをよく観察すると、その中に白やピンクといった色が存在しないことにも気づく。これもまた、波長が必ずしも色を記述することにならない例である。これらの例で示されているように、確かに単純に光の波長と色を結びつけることはできない。しかし、眼に入射するの光が色を生むことに疑う余地はないのだから、色は光で表せないとおかしい。

色とは物理と人間との相互作用で生まれる心理物理現象

ここまで「断片なく光の足しあわせ」「色」という言葉を使っていたことに問題がある。そこで物理的な足しあわせについて考える。波の足しあわせならば、波長成分ごとに分離分析することができる。しかし、色はそのように分離できない。異なる波長特性の光から同じ色が観測されるのだから、色から波長への逆変換、波長成分への分離ができないと言える。つまり、光を足しあわせるという物理現象と、色が見えるという現象は、異なる次元で考えなければならないのである。

色とは、混ぜ合わせに特別な特徴がある物理現象と考えればよいのだろうか。色光の混ぜあわせの特性をうまく利用した表示技術にテレビがある。テレビで見る映像はとてモリアルで、色に関して言えばほとんどの物体の見えを再現しているように思われる。ここで、テレビに近づき輝面をよく見ると、赤緑青(RGB)の3つの光だけで構成されていることがわかる。つまり、3つの光をコントロールすることで、色は表現できることになる。この事実は光の三原色というよく知られた概念である。色とは、3つの基底を持った光で定義される特別な物理現象なのだろうか。

色とは純粋な物理現象ではなく、「どのように見えるか」という観察者の応答である。三原色だけを用いて確かにほとんど色の見えを再現できてしまうにも関わらず、3つの色に心理的な独立性、基底性が感じられないということがある。RGBの3色に、黄や白という色の成分が含まれているのだろうか。また逆に、白色のなかに赤や緑といったすべての色が含まれているのだろうか。そのようには感じられない。結局、色というのは光の物理組成だけでは議論できない。しかしあくまでも色は、光という物理現象の入力があって初めて生じる。双方をまとめると、色とは視覚大脳系が光の情報をどのように見るか、解釈するかという視覚特性の一つであるということになる。「色」という現象は、外界の光と人間の視覚大脳系との相互作用で形成される「見え」を表す心理物理現象なのである。

色の見えについて研究する手法

このような「色」について研究するということは、我々が持つ色覚情報処理系について調べることに他ならない。では、人間の色覚情報処理系を研究対象とした場合、どのようにアプローチしていけばよいのだろうか。構造を直接調べるには人間の眼、網膜、そこからつながる神経系、そして大脳皮質の生理学的性質を調べていくことになる。しかしながら、この方法には二つの大きな問題点が存在している。第一には生きている人間に対してそのような解剖学的な実験を試みるのは倫理的にも道徳的にもおおよそ不可能であるということ、そして第二に、いくら神経細胞の反応を調べたとしてもそれが「色を知覚する」という現象とは直接結びつけることはできないということである。第一の問題点については解決できるかもしれない。近年の計測技術の進歩により、大脳の神経レベルでの活動が、非侵襲的（生体を傷つけることなく外部から計測をすることが可能になってきている。fMRI、PETなどといった手法がそれである。しかしながら、非侵襲的計測で神経組織の特性が理解できたとしても、第二の問題点で示されたように、色の知覚とは結びついていないのである。

そこで、色の知覚を調べるための心理物理実験という手法がある。物理的に制御された視覚刺激を観測者に呈示し、それを評価することで実験を行うものである。色を見るというメカニズムを一つのシステムとして捉え、入力に対する出力を取るといった方法である。この方法を用いれば先に示した倫理的な問題点に触れることはなく、かつ色の知覚そのものを調べることができる。

最初のクレヨンの例から、色知覚における多くの具体的な疑問点を挙げる。そもそも2色のクレヨンだけで樹木の全ての色を再現できるようなものではないだろう。そのことを知った上で、同様の色の塗り方をする人もいる。これは一体どうしたことか！「どうして、このような色で塗ったのですか」と尋ねると私の友人は次のように答えた。

「クレヨンの色数が足りないから、適当に近い色で塗ったのだ」

この答えから、大きく分けて三つの疑問が浮かび上がる。第一に、色数が足りないのならば、一体どのくらいの色数があれば十分なのか。100色か？100万色だろうか？第二に、限られた中から選んだ色で塗ったのであれば、どのような妥協点で色が選ばれたのか。そもそも、妥協点を導くためには、色に遠い・近

いの概念が必要になってしまうが、はたして距離を定める概念は存在するのだろうか、それは量的に比較できるものなのだろうか？第三に、適当に近い色があればいいが、無いかもしれない。適当に近い色を選び出すのに必要な色の最小数はいくつなのか。クレヨンの色数は何色有ればおおよそ満足なのか。その数に意味はあるのか。その色は何か。

本研究は心理物理実験で、色について挙げられた疑問点を解明すべく研究を行うものである。

1.2 脳の機能の両側面 . ~ 色覚との対応づけ ~

脳にとって知覚の最終的な役割とは 外界からの情報のカテゴリー分けである 網膜に届く光の情報を解析(アナライズ)することで カテゴリー分けのための情報を得る これが脳に与えられた最も基本的な課題であると言える .

我々は何のために外界から情報を知覚するのだろうか .おそらくそれは 我々がこの世界に生きるうえで必要な情報を得るためであろう .では 必要な情報とはどのようなものだろうか .それは対象とする物体の基本的で不変な特性ではないだろうか .逆に言えば ,一日を通じて刻一刻と変化してしまう情報は重要ではないということである .

色覚にとって重要な物体の不変な特徴とは 物体表面の分光反射特性であって 眼に入る光の分光組成ではないと考えられる .例えば 木々の中から熟した果物を見つけだすために必要な情報とは 物体表面の分光反射特性である この分光反射特性をもとに ,それが木の葉なのか果物なのかを分離することができる .分離すること ,すなわちカテゴリー分けすることが脳の目的なのである .もし単純に光の分光組成をもとに果物を見つけようとすると ,夕日に照らされた木々はすべて果物の特徴をもつことになってしまい ,分離が非常に困難になる .

同じ対象を見ている状況であっても 照明光の変化や対象の揺れ動きや見る角度のちがいなどによって 網膜を照らす光のパターンは刻一刻と変化する .網膜の受容器の生理学的な組成が 環境からの普遍的な特性を抽出するとは考えにくい .網膜は測光器やテレビカメラのようにシンプルではあるが膨大な情報を脳に送っているにすぎない .少なくとも第一次視覚野の入り口まではこの膨大な情報が一対一で届いていると考えて良いだろう .この膨大な情報を解析(アナライズ)するのが脳に科せられた最初の重要な処理である .しかし 解析した結果自体には見る対象のカテゴリー分けという動きは無い .

脳は 膨大な情報を解析して得られた結果を統合して 唯一の判断を下さなければならない .しかしどのように統合してカテゴリー分けした判断を下しているのかについては 現在よくわかっていない というのも 生理学的 心理学的研究が多くの成果を得てきたものは脳の解析機能(アナライザー)についてのものだからである .研究の次のステップであるカテゴリーライザーの解明については 色覚はとても良い題材であると考えられる .

では 色知覚の各現象をアナライザー・カテゴリーライザーという脳機能の両側面にあてはめてみよう .アナライザーの特徴とは ,”相対的な知覚 ” ,”比較すること ” ,”定量的 ” ,”細かく分析すること ” であると考えられる .これを色覚に当てはめるならば 色弁別 量的な色差評価 明るさ・彩度などが挙げられるだろう .これに対してカテゴリーライザーの特徴とは ,”絶対的な知覚 ” ,”何なのか認識 ” ,”定性的 ” ,”判断 ” であると考えられる .これに対応する色知覚は ユニーク色・白色 カテゴリカル色知覚・色名などが挙げ

られる(図1.2.1)。

アナライザー・カテゴライザーという両側面は、脳機能の低次・高次の働きとも対応づけられる。階層的な色覚メカニズムを通じた包括的な研究は、色覚に限定した話のみならず脳機能の解明への糸口として重大な関心を持って取り組むべきである。

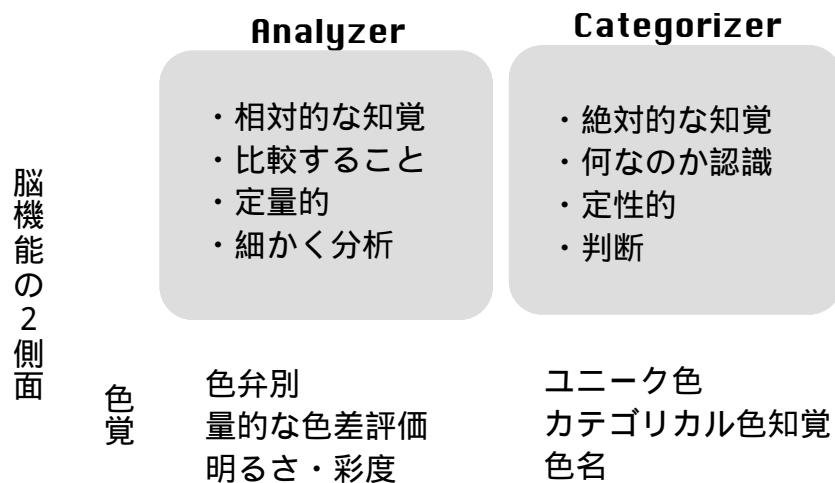


図 1.2.1 脳機能の両側面

1.3 色知覚の階層性と生理学的構造の対応 . ~ 3段階の色情報処理 ~

これまでの研究から色知覚現象の生理学的構造との対応付けが行われている .それらは心理物理実験 電気生理 臨床など広範囲に渡ったものである .ここで これらの色知覚メカニズムを錐体出力・大脳低次・大脳高次の3段階に分けて捉えることにする(図1.3.1) これらの関係を次に順を追って述べる .

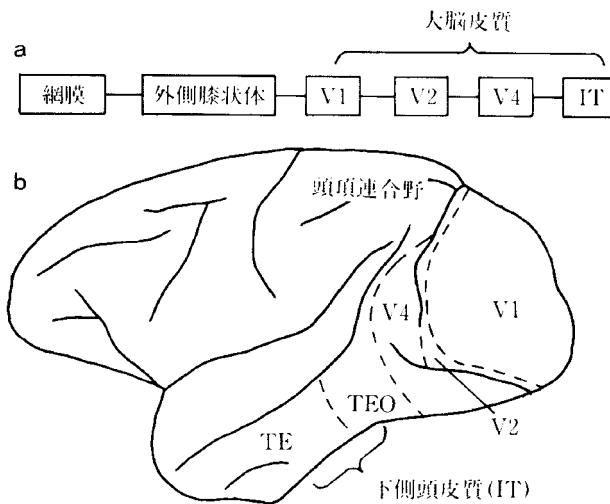
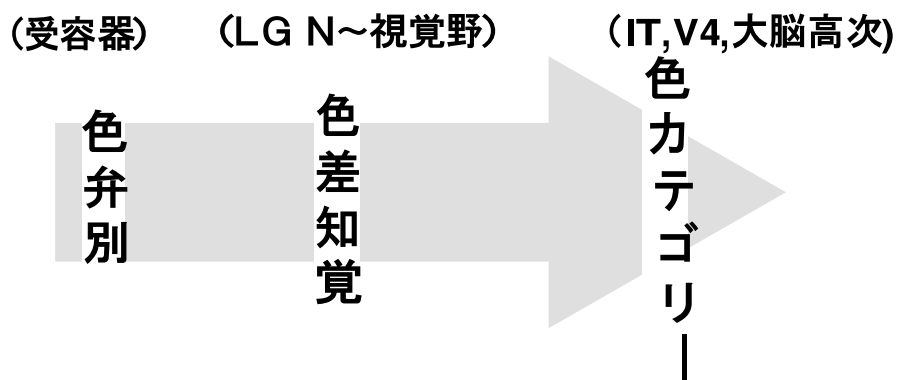


図 1.3.1 階層的な色覚メカニズムとマカクザルの視覚情報の流れ (小松 1995 より引用)

網膜（3つの錐体）

眼に入射した光は、まず網膜の受容器に吸収され、神経応答に変換される。網膜には3種類の錐体があり、これらの3つの情報を基点に色知覚が生み出される。3錐体の分光感度を図1.3.2に示す。

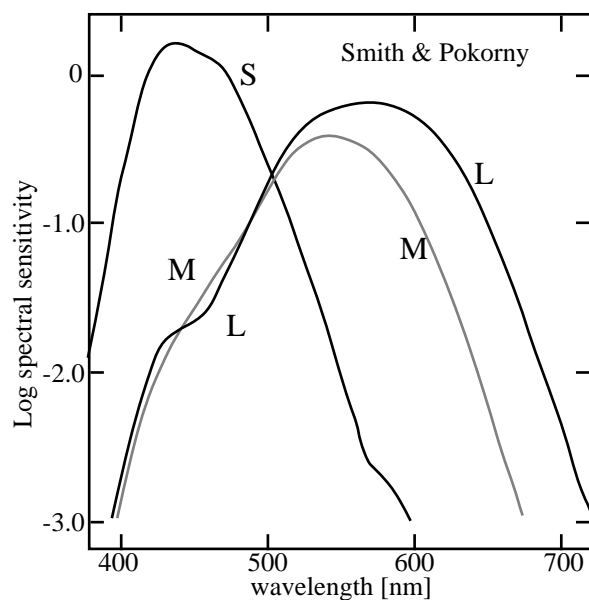


図1.3.2 3つの錐体の分光感度。これらは3つの錐体のうち一つを失った色覚異常の観測者が示す混同色線の結果から得られている。ここで示してあるものはSmith & Pokornyが報告したデータをもとに、等色関数としてVosによるJudd修正をしている（色彩工学の基礎より引用）。

網膜 ~ L G N (反対色チャンネル)

現在もっとも妥当だとされている色覚メカニズムの第一段階を図1.3.3に示す .それは ,一つの輝度チャンネルと二つの反対色チャンネルを持つものである .輝度応答とは交照法により求められた比視感度関数により定義される .これはL錐体出力とM錐体出力の和によって得られていると考えられている .二つの色チャンネルはその色からR/GチャンネルとY/Bチャンネルと呼ばれている .R/GチャンネルはL錐体出力とM錐体出力の差 ,Y/BチャンネルはL ,M錐体出力の和からS錐体出力を引いたものと考えられている .具体的な計算式はモデルによって異なっているが ,いずれの場合でも各錐体出力の和と差を取っていることに代わりはない .反対色型の細胞応答はサルの外側膝状体から記録されている .その結果parvo細胞の神経応答が錐体出力の線形変換であることが確かめられている (Derringtonら ,1984) .しかし ,集団では色応答が2つのチャンネルにわかれるものの ,各細胞の応答にはかなりのばらつきがある .これは外側膝状体での反対色チャンネルが ,色知覚とは単純に結びついていない可能性を示唆している (De Valoisら , 1997) .

この階層での色覚メカニズムで色弁別を説明できるという報告がある (Boyntonら ,1980;1983; Nagyら ,1987; Crookら ,1987) .このことは ,色弁別は錐体出力のもつ精度の限界まで利用して行われていることを示している .

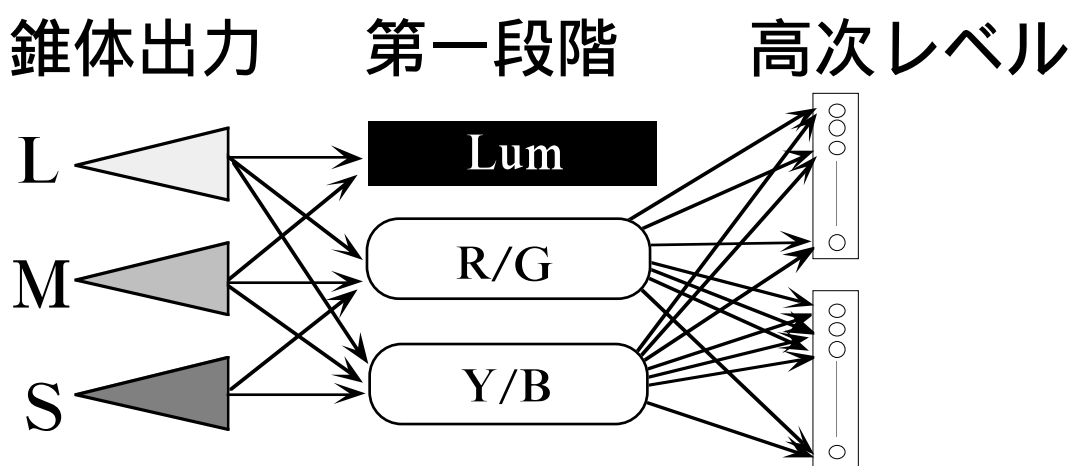


図 1.3.3 錐体出力から反対色チャンネルへの変換を示す一般的な色覚モデル .

大脳皮質（低次）

V1の非方位選択性細胞は錐体出力の線形変換である(Lennieら,1990)最近の研究によるとユニーク色とのずれはV1の各チャンネルの時間的ダイナミクスによって起きている可能性が示唆されている(Cottarisら,1998)。

次に述べるV4・下側頭皮質が色認知と密接に絡んでいることを考慮すると,色差評価といった量的な色の判断は大脳皮質の低次の階層で得られていると考えられる。錐体応答から色相判断までを3段階のモデルで説明しようというモデル(De Valoisら,1993)からもこの階層での色知覚を考えている。

大脳皮質（高次）

脳機能のカテゴリライザーとしての役割は,大脳の高次の働きであることは間違いない。その働きが大脳皮質のどこで行われているのかについて,サルの下側頭皮質で色カテゴリー応答(Komatsuら,1992),サルのV4で色カテゴリー応答(Yoshiokaら,1996)などがある。興味深い報告として,色を順番に並べることはできるが,色のカテゴリライズができないという臨床報告(久米川ら,1998)やサルのV4損傷実験の結果(Walshら,1992)がある。そこでは,大脳の下側頭皮質の損傷と密接な関係が示唆されている。また,大脳性色盲をサルのV4損傷実験で作らだした(heywoodら,1992;1995; Coweyら,1995)という報告からも,この階層でのカテゴリカル色知覚との対応付けを示唆している。

1.4 色を表現する色空間

目的や特徴ごとに色空間は多種類存在する . そのうち目的が大きく異なる4種類の色空間を取り上げ以下に紹介する .

1 : 条件等色を表す XYZ 色空間

三原色の存在 , すなわち全ての色が三つの情報で構成されうるという事実は , 色光に関する三次元空間をもって色を記述できることを示唆している . 全ての光は単色光の組み合わせから構成されるのであるから , 光の波長に対して重みづけの異なる三つの評価関数を上手く選び出し , その評価関数で計算される三つの数値を色の評価値とすれば任意の色を表現するのに適当であろうと言える . これを受けてCIE(国際照明委員会)は1931年に等色関数を設定し , この関数から計算される三刺激値 X, Y, Z をもって , 色を表現する表色系とすることを勧告した(池田, 1980; Wyszecki & Stiles, 1982) . XYZ表色系では三刺激値で構成されるベクトルが色を表記することとなる . そのベクトルの大きさ(スカラー量)が色光の強さを表し , 強さ以外の色属性はベクトルの向きで表現されることになる . そこで次式で三刺激値の絶対量を X, Y, Z の和で正規化し色属性を表現することとした . ここで求められた x, y は色度座標と呼ばれ , この色度座標と輝度 Y を用いて全ての色光は数値で評価できるようになった(図1.4.1) . ただしここで注意をするべき点がある . CIEによって勧告されたこれらの数値は , あくまでも色を表現するために使用上便宜を図るために決まってきたことであり , 数値自身に特別な意味はない . これらの関数の分光曲線や色度図のスペクトル軌跡を視覚のメカニズムと直接結びつけることは誤りである .

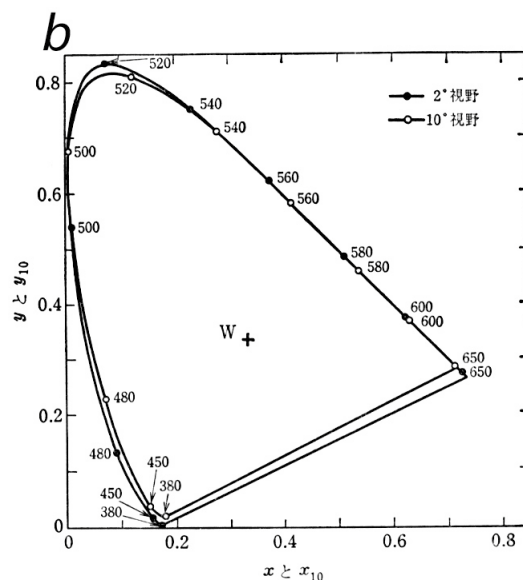


図 1.4.1 xy 色度図

2 : 色弁別均等性をねらった CIELUV

色弁別域をxy色度図上にプロットした際、その不均一性が明らかとなった。このことを受けて、色弁別の楕円が色度図上でどここの位置でも等しくなるように色度図を変換させるべきだ と考えられる。もしこれが完成し、色の見え方が均等になっていれば均等色度図 uniform chromaticity scale diagram ができるはずである。均等色度図において必要となるのは色差である。まずxy色度図を射影変換することで作られる新しい平面で、均等色度図を作り出そうという試みがなされた。このような射影変換で正しく均等に色差を表現することはできないことは知られている。しかし、実用面から簡単な操作で変換が行えることを考慮して大まかな近似として射影変換を用いいることが提案された。その変換パラメータについて、多くの実験・提案・改良の末CIEは1960年にMacAdamのものを採用した。また1976年にそれを修正しu'v'色度図を採用することとなった(図1.4.2)。

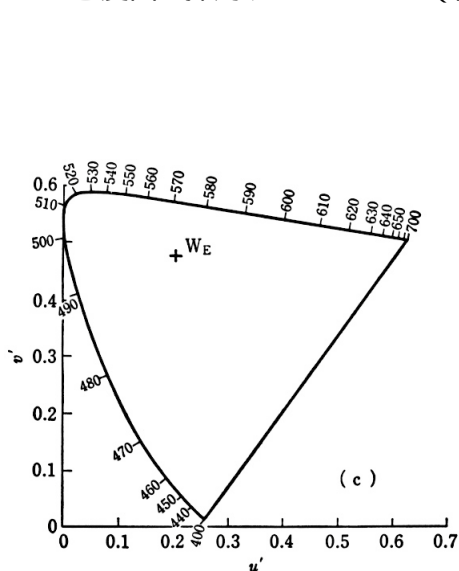


図 1.4.2 u'v' 色度図

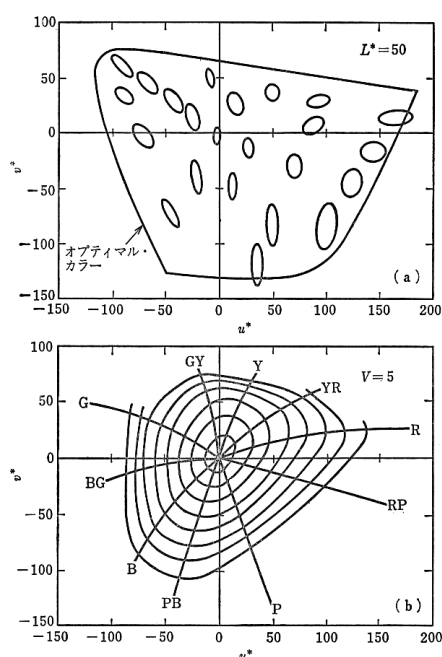


図 1.4.3 CIELUV

均等色度図は等輝度の刺激の色差を均等にするために作られたが、輝度軸を含め均等であるような空間があればより実用性が増すことになる。そこでCIEは1976年に物体色(反射・透過)に対して、同時に二つの均等色空間を勧告した。ここでは特にCIELUVを説明する(図1.4.3)。この均等色空間がどのくらい均等なものであるかを示す目安としてMacAdamの弁別楕円をプロットしたものを示す。均等であれば楕円は全て等しい大きさとなって分布すると考えられる。また、均一性を調べる手段としてマンセル表色系もよく用いられる。マンセル表色系は色弁別よりは大きな尺度で色の差を評価したものである。もし空間が均等であれば等クロマ線は同心円状になり、等色相の線は白色を中心に放射状の直線軌跡を描くはずである。これらの図からわかるとおりCIELUV空間はどちらの評価基準を持っても完全とは言いがたい。

3 : 空間等方性をもつ OSA 色空間

心理物理実験に即したデータを基に、色を並べていくことで色空間を表したものにOSA色空間がある。適切な条件で色票を観測した際にその色サンプル同士が互いに等距離に離れている。その差の基準として色弁別が選ばれており、OSA色空間上での1単位は色弁別の20倍に相当する。一つの明度の中での色はユニーク色の4色を軸として選ばれており、色票は格子点上に並んでいる。ただし、-7から+5までの13段階ある明度軸の奇数の明度を持つ面には奇数の格子点上だけに、そして偶数の明度を持つ面には偶数の格子点上だけに色票が置かれる(図1.4.4)。これは、一つの明度面内で隣り合う色票は4枚あり、その距離はOSAユニット2である。そして明度方向の段階はOSAユニット離れているので、明度の異なる面での色票との関係は、OSAユニット2で均等に離れた4組があることになる。つまり、一つの色票にとって近傍に来る色票は合計12枚あり、その全てに対してOSAユニット2離れているということになる。

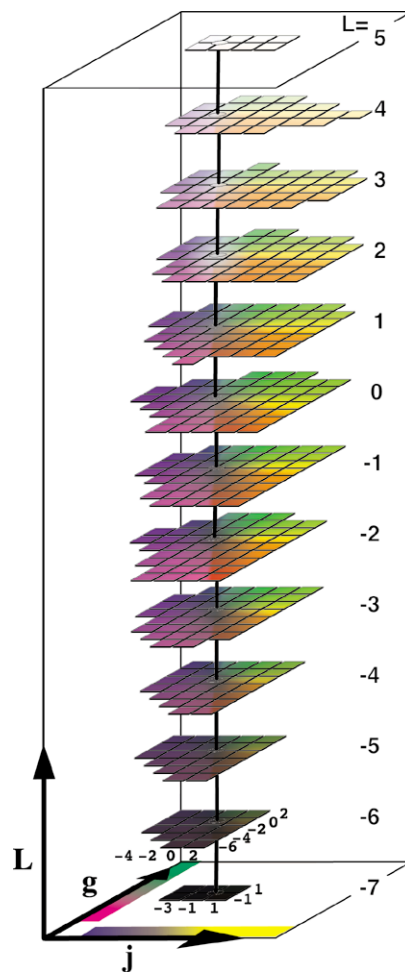


図 1.4.4 OSA 色空間の概略図

4：色のカテゴリー性を取り入れたマンセル色空間・NCS 色空間

歴史的にはXYZ表色系より古く、マンセル表色系がある。これは色の感覚を三つの尺度「色相 hue・クロマ chroma・明度 value」に分け、空間的に色を配置するものである。まず、色相については赤R・黄Y・緑G・青B・紫Pを五つの基本色相として、色相の輪を丁度五等分するように配置する。この5色相というコンセプトに色のカテゴリー性が含まれていると言える。次にこれら五つの色相の間に中間の色を配置する。そしてこれらの隣り合った色を10等分する。その結果得られる合計100の単位がマンセル表色系での色相である。これらの等分については、もちろん心理物理実験によって決定されたものである。クロマは無彩色からどれだけ離れているか、という感覚を表したものであり、彩度 saturation と良く似ている。無彩色を彩度0とし、その上限は色相や明度によって変化する(図1.4.5)。今日一般的にマンセル表色系として指すものは修正マンセル表色系と呼ばれるものであり、これはJISで現在採用されている。

スウェーデンで開発された表色系にNCSがある。これはHeringの反対色理論に基づいたもので、色の白み・黒み・黄色み・赤み・青み・緑みをもってその合計が100となるように比率評価することで色を表すものである。NCSはあくまでも色知覚の評価で行われるものであり、色票や三刺激値で記述されるものではない(Hardら1981)。その大きさは観測条件によって心理物理的に正しく補正されるものである。図に示すNCS表色系を示す色票は、あくまでもNCSの概念の理解を助けるために作られたものである。ので、まちがえてはならない。この表色系を用いての一つの問題点として茶色の存在がある。茶色の知覚を6つの色属性で簡単に記述することは難しいとされている。

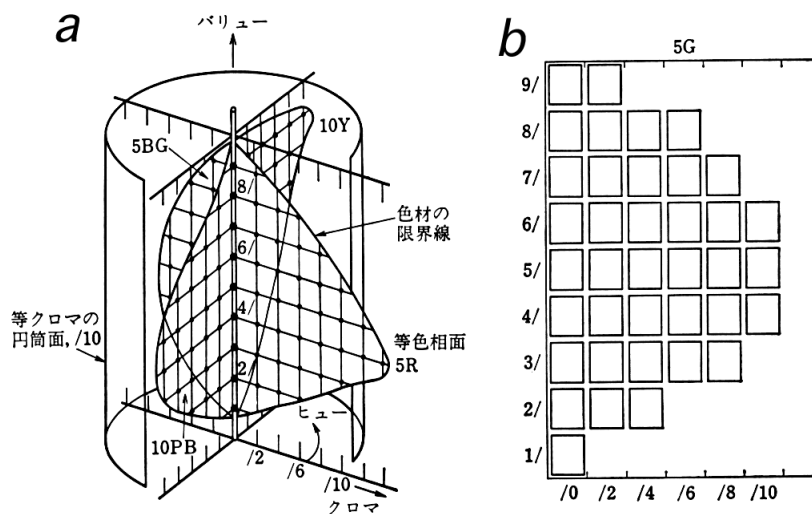


図 1.4.5 a, マンセル色立体 . b, Hue=5G のマンセル色票の配列

1.5 本研究の目的

1.4で示したように、目的に応じて異なる色空間が提唱されている。なぜ決定打となる包括的な唯一の色空間は存在しないのだろうか。目的に応じて異なる定義を行うことに問題があるのだろうか。既存の考えでは色の見えを完全に表現する色空間は構築できない可能性がある。

そこで新しい方法論として、色知覚メカニズムの階層性に着目した。目的に応じて色空間が異なるというのは対象とする色知覚現象が異なることを指している。異なる色知覚現象を階層的に捉えることができることについて1.3で述べた。そこで本研究では色知覚現象の各階層に相当する実験を行い、それぞれの関係性を確かめる。その上で色知覚現象を統合する新しい色空間を構築する事を最終目標とする。具体例では、色弁別程度の小色差を色差均等に拡大できないか、色差が極端に大きい場合の色差評価の困難さを記述できないか、カテゴリカル色知覚を考慮できないか、といった事が挙げられる。

このような色空間の構築は、脳機能の両側面の橋渡しを行う試みであり、脳機能の解明における先進的な研究であるといえる。

1.6 本論文の構成

本研究は階層的色覚メカニズムを考慮した色空間の構築を目的とする。そのため、色覚の各階層に対応する色知覚現象をとらえる実験を行う。図1.6.1に本論文の構成を示す。第2章は対象とする色を表面色に限定することについて述べる。第3章は最も高次のカテゴリカル色知覚について述べる。第4章は色差の評価限界とカテゴリカル色知覚の関係について述べる。第5章は色差評価の線形性と評価基準の変化について述べる。最後に第6章で包括的な表現を行う色空間の構築を行う。

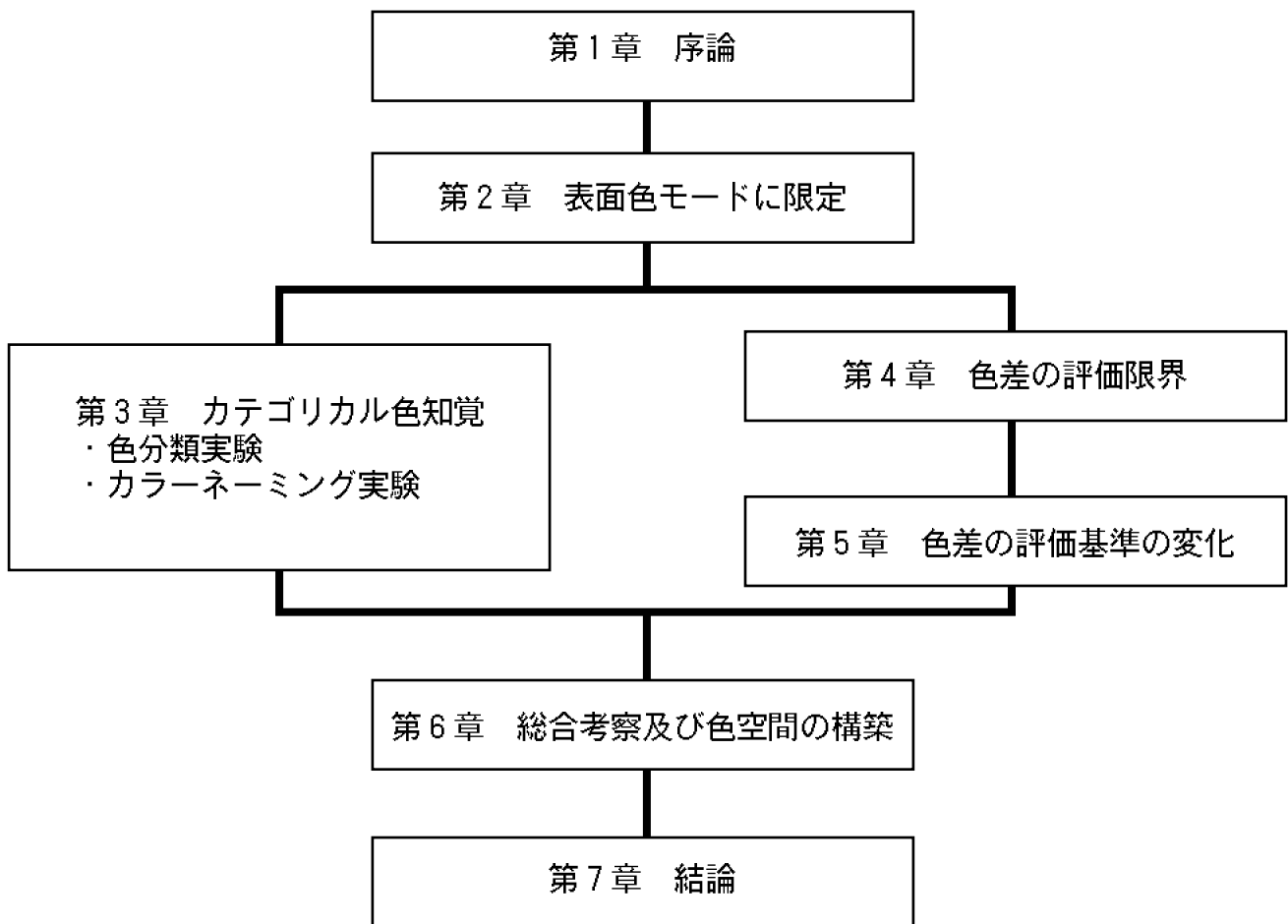


図 1.6.1 本論文の構成

第2章 実験条件の設定

2.1 D 65 光源による照明

我々が生活する世界は 刻一刻と照明光の色 強度が変化する。しかし 本研究では一般的な観測条件であるD65白色光源下のみを対象とする。他の照明色度に対する特性を必要とするならば 錐体加重を変化させる単純な色順応を考えるだけでよいと思われる。錐体加重モデルはVos Kries型感度調整メカニズムと呼ばれており 錐体加重を変化させることで色見えを説明・予測できることがKurikiら(1996; 1998)によって示されている。

2.2 表面色刺激

色を見るというのは単純化された色光だけで議論することはできない。例えば茶色や黒の見えが光源にはない(内川ら,1993;1994;Shinodaら,1993;内川,1994)といった例に挙げられるように表面色のみで得られる色知覚がある。そこで本研究では表面色のみを対象として取り扱うことにする。

表面色のモードを決定する条件の報告(鯉田ら,1996;山内ら,1998;1999)によると、色の明度知覚が重要な役割を果たしていることが示唆されている。これについて実験を行い確かめたので以下に報告する。

2.3 表面色モードと明るさ効率の比較実験

2.3.1 表面色モードと開口色モード

色見えには主に2つの全く異なる見えのモードがある(Boynton,1979)。1つは表面色(物体色)モード、もう1つは開口色(光源色)モードである。表面色モードとは色が物体の表面に付いているような見え方であり、開口色モードとは対象自体が発光しているような見え方である。われわれが日常見ている色はほとんどが表面色モードの見えであるが、測色学のデータは開口色モードから得られている(Wyszecki, 1982)。眼に入る光の物理組成が等しくても、見えのモードによって知覚される色は全く異なってしまうことが知られている(内川ら,1993;1994;Shinodaら,1993;内川,1994)したがって、呈示条件によって色見えのモードがどのように変化するかを調べることは、色知覚のメカニズムを探る上だけでなく、CRTと印刷物とのカラーマッチングといった測色学的な応用面でも非常に重要であるといえる。

見えのモードは、実際にその刺激が発光体か反射表面かで決まるものではなく、テスト刺激と周辺刺激の呈示の仕方によって変化させることができる(内川,1994)。テスト刺激は、周辺刺激を十分明るくすると表面色モード、十分暗くすると開口色モードとなる。過去の研究ではこのような方法で、2つの見えのモードを作りだし、色見えの違いを測定している(Uchikawaら, 1984; 岡嶋ら, 1988)。しかしながら、どの程度の強さの周辺刺激を与えれば開口色モードから表面色モードへ移行するのか、あるいはテスト刺激の色度とモード変化とはどのような関係にあるのかといった色見えのモード変化に関しては正

確にはわかっていない。

本章における実験では、色の見えのモード変化をテスト刺激の色度を変数として調べ、さらに、テスト刺激の明るさとモード変化の関係を明らかにすることを目的とした。実験1では色光の見えのモードの評価を行う。見えのモードは中心の刺激と周辺の刺激との輝度条件で表面色モードと開口色モード間を移動する。本実験では中心刺激として輝度一定の色光を用い、白色の周辺刺激の輝度を段階的にとることで、色光の見えのモードの変化を実現する。実験2では、色光見えのモード評価変化と比較するために輝度一定の色光の色度の違いによる明るさ変化を測定する。

2.3.2 方法

装置

中心に呈示するテスト刺激は、単色光や470 nmと630 nmの光を混色して得た赤紫線上の色光を含め、実在色全領域をカバーするために光学系を用いて作る。光学系はキセノンランプを光源とした3光路から構成され、光路1と3では干渉フィルターにより任意の単色光をつくり、光路2では白色光を作る。図2.3.1に示すようにこれらの色光は完全白色板上で加法混色され、被験者はその反射光を手前に置かれた白色のアーチャーを通じて見る。このアーチャーは直径5mmの円形で、このサイズが刺激サイズとなる。アーチャーの被験者側の面はプロジェクターで照明され、周辺刺激となる。アーチャーまでの視距離は30cm、刺激サイズは視角直径1度である。アーチャーの手前にはシャッターが取り付けられていて、刺激呈示時以外には中心刺激が見えないようになっている。被験者は歯形台で頭の位置を固定され、眼前5cmにおかれた直径3cmの円形アーチャーから右眼で刺激を見る。周辺刺激のサイズは、このアーチャーで決定され、視角直径30度である。

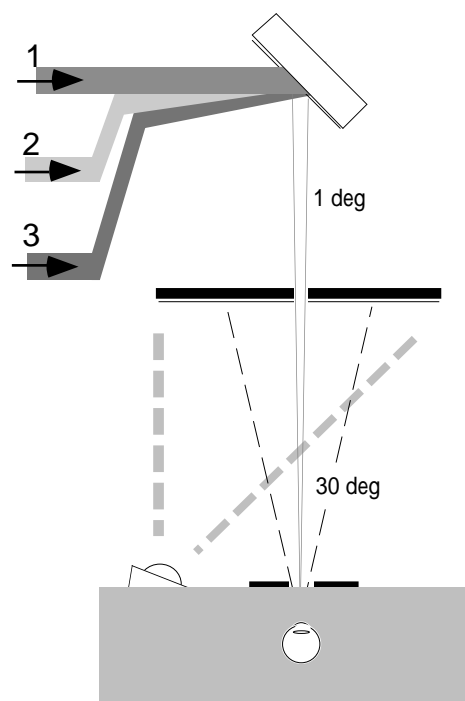


図 2.3.1 装置の光路図

刺激

実験1では、中心に呈示するテスト刺激の輝度は10 cd/m²一定である。テスト刺激の色度はxy色度図上で、白色(x=0.33,y=0.33)を中心として、おおよそユニーク色とその間の8方向の放射線状(主波長:420, 490, 510, 540, 570, 600, -495, -540 nm, -は補色主波長を示す)に広がり、各方向でそれぞれ5段階の輝度純度(0.0, 0.45, 0.63, 0.78, 0.89, 1.0)計41点とった(図2.3.2)。周辺刺激は白色(x=0.31, y=0.37)で輝度は0, 5, 10, 15, 30 cd/m²の5段階を設定した。実験2では、テスト刺激の色度は実験1と同じ41点を用いる。周辺刺激は10 cd/m²のみを用いる。

手続き

被験者は試行を始める前に周辺刺激に対して5分間明順応する。実験1ではその周辺刺激で、テスト刺激が3秒間呈示される。被験者はテスト刺激を見た後にその見えのモードを次のようにして評価する。完全な開口色モードならば5、完全な表面色モードならば1として、その間を3段階に分け、合計5段階のマグニチュード評価を行う。テスト刺激は被験者が応答するまで何度も見ることができる。これが1試行である。次の試行のテスト刺激は41個の刺激中からランダムに1つ選ばれる。以上41回の試行を5つの周辺条件に対して行う。同じ条件での評価を2回繰り返す。

実験2では、中心のテスト刺激に対して周辺刺激を参照刺激として、明るさマッチングを行う。ここでは明るさマッチングの方法として上下法を用いた。1試行では1テスト刺激の明るさマッチングを行う。高輝度を出発点とするテスト刺激系列と、低輝度を出発点とするテスト刺激系列の2つの系列を用意し、それぞれの系列の呈示はランダムとする。被験者はテスト刺激が3秒間呈示された後、周辺刺激に対してテスト刺激が明るい暗いかを強制選択する。テスト刺激は再度見ることできる。1つの系列内で、被験者の応答が逆転してその応答が2回続くと次の呈示刺激の輝度値の変化方向を反転させる。6回応答反転するとその系列は終了する。6回の反転点のうち、後半の4点をとり、4点の対数輝度値の平均を結果として得る。1試行では系列が2本あるので結果は2点求まる。同じ条件での明るさマッチングを2回繰り返す、計4点の測定結果を得る。

被験者

色覚正常の男性2名, KK, MS を被験者として用いた。両名共に心理物理実験の経験者である。

2.3.3 結果

実験1

図2.3.2 2.3.3にそれぞれ被験者 KK, MS の見えのモード評価結果を示す 図中,モード評価値はテスト刺激の(x,y)色度点上へプロットされ シンボルの大きさをモード評価値の大きさを表している 結果は周辺刺激の輝度値ごとに別々のパネルに示す 周辺刺激 0 cd/m²の結果はすべてのテスト刺激が完全な開口色であったため,同じ大きさのシンボルで表されている.

図2.3.2 2.3.3により 周辺刺激の輝度が増加すると中央のテスト刺激の見えのモードは開口色モードから表面色モードに変化することがわかる また 周辺刺激の輝度が同じであってもテスト刺激は色度によってモード評価値が異なっている これはテスト刺激はすべて等輝度であったことから 見えのモード変化には色度特性があることを示している 色度特性は (1) 輝度純度が高いほど開口色モードになりやすい (2) 赤から青の色方向のテスト刺激に対して開口色モードになる傾向が強い (3) 黄方向では純度が高くなっても開口色モードにはなりにくいとまとめられる ただし青方向のテスト刺激の応答については, KKのモード評価値がMSと比べかなり小さい値となっているように 被験者間で個人差が存在している.

実験2

図2.3.4 2.3.5に明るさマッチングの結果を被験者別に示す ここではマッチングしたテスト刺激の輝度値(L)に対する周辺白色参照光の輝度(B)の比の対数,いわゆるB/L比の対数をとっている これは等明るさになるためのテスト刺激光の効率を表している また 見方を変えると等輝度色光の明るさ評価値とも考えられる(岡嶋,1988) 図中では,シンボルのサイズがlog(B/L)の大きさを示している.

図から明らかなように,テスト刺激の明るさには色度特性が存在し (1)輝度純度が高いほど明るさ効率が良い (2)その変化は色相によって異なり 赤から青では明るさ効率が良い (3)黄方向ではあまり明るさ効率が良くないことがわかる.ただし,青方向のテスト刺激の明るさ効率はKKがMSに比べかなり低いというように 被験者間で異なっている.

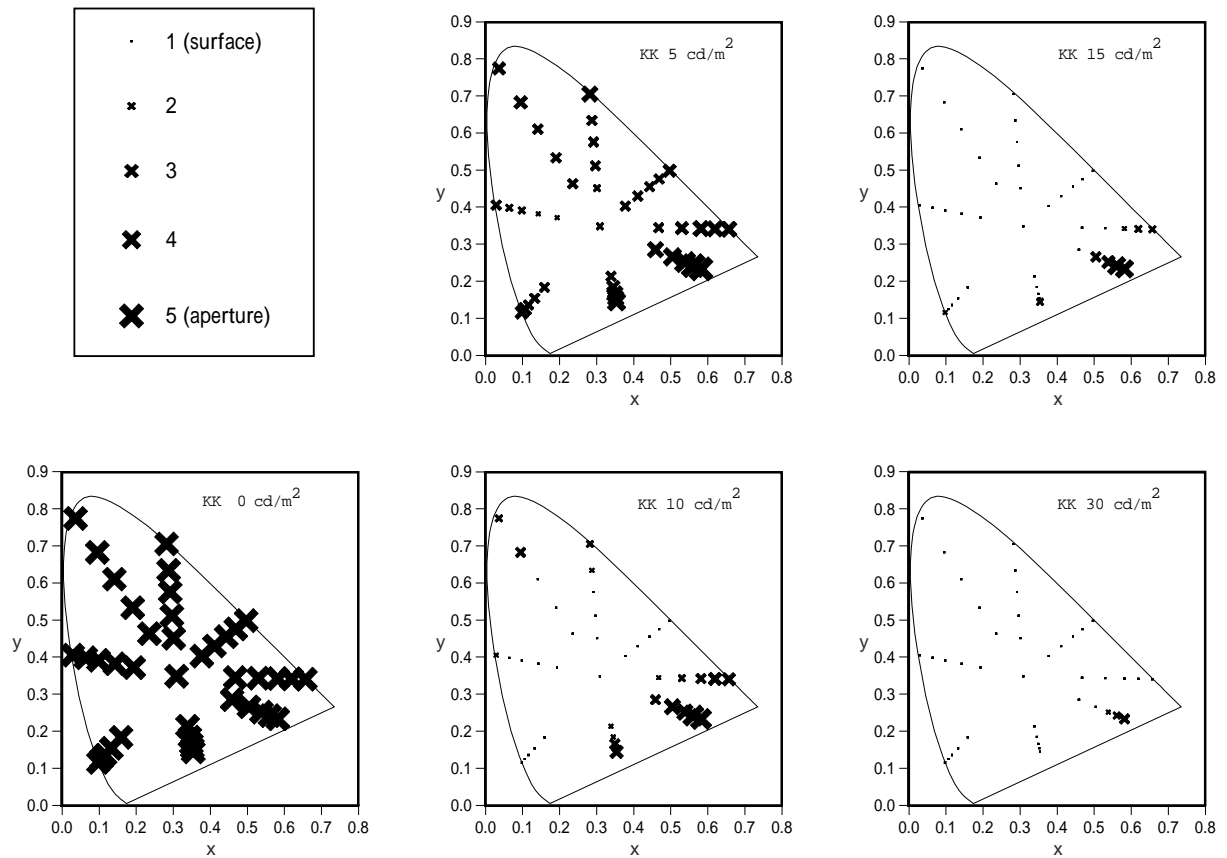


図2.3.2 被験者KKのモードの評価 .それぞれのグラフは周辺照明の輝度に対応する . 結果をCIE1931xy色度図に表示する . シンボルの大きさが開口色モードの評価値に相当する .

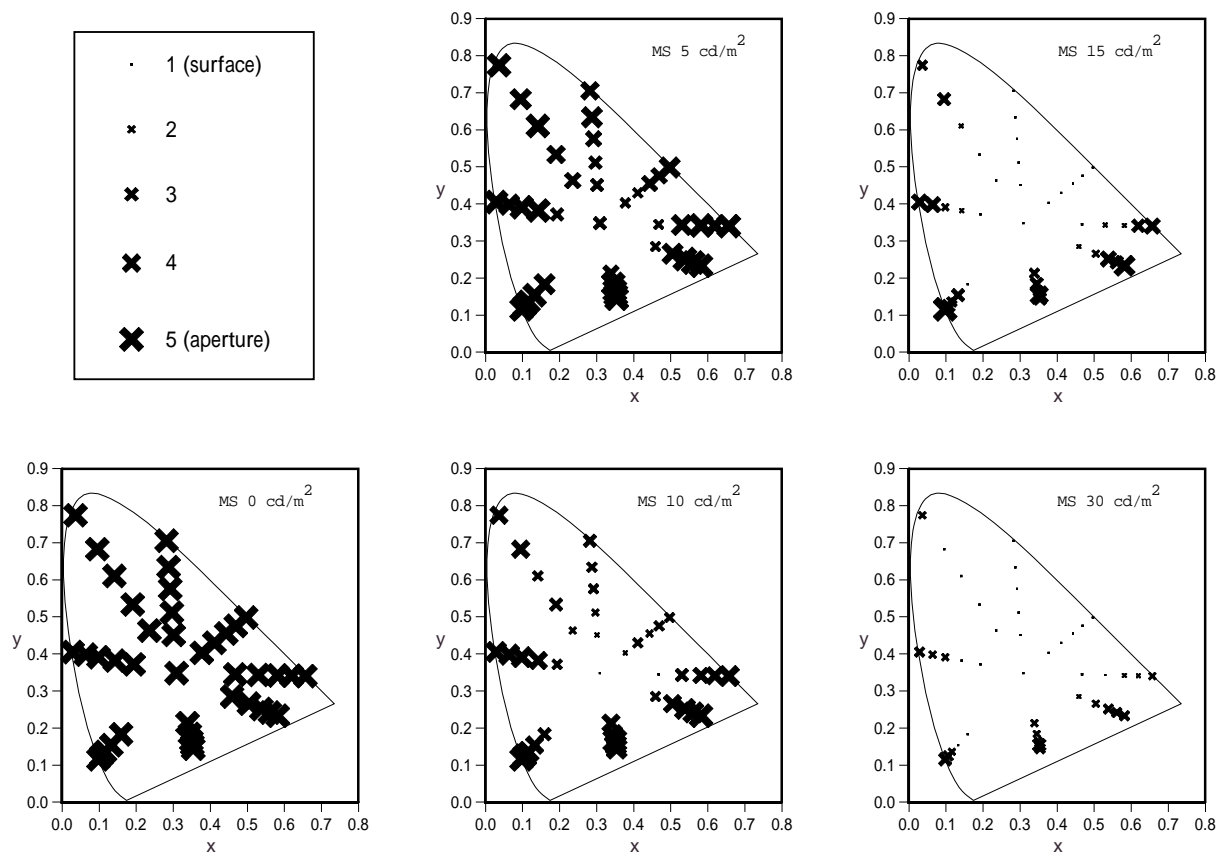


図 2.3.3 被験者MSのモードの評価 . 図 2.2 と同様

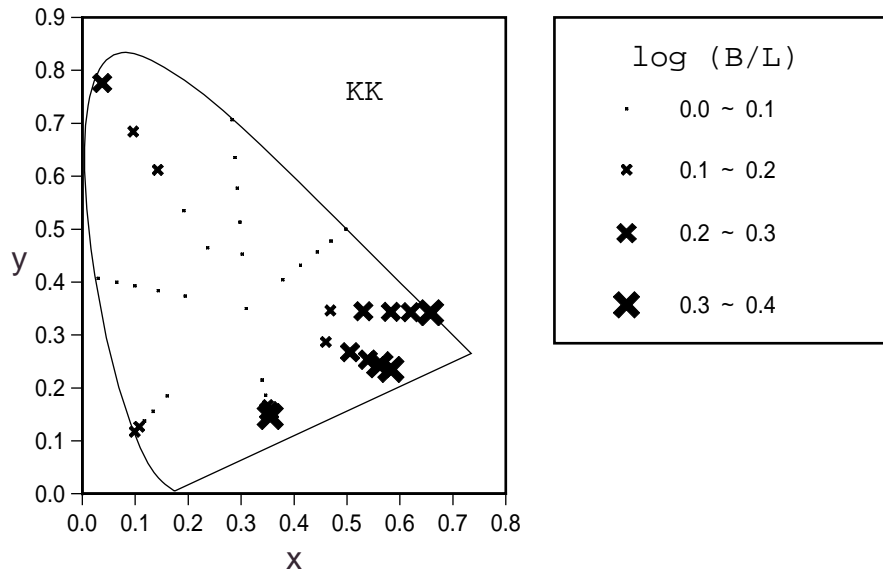


図 2.3.4 被験者 K K の明るさ効率 (B/L) . シンボルのサイズが $\log(B/L)$ の大きさを示している .

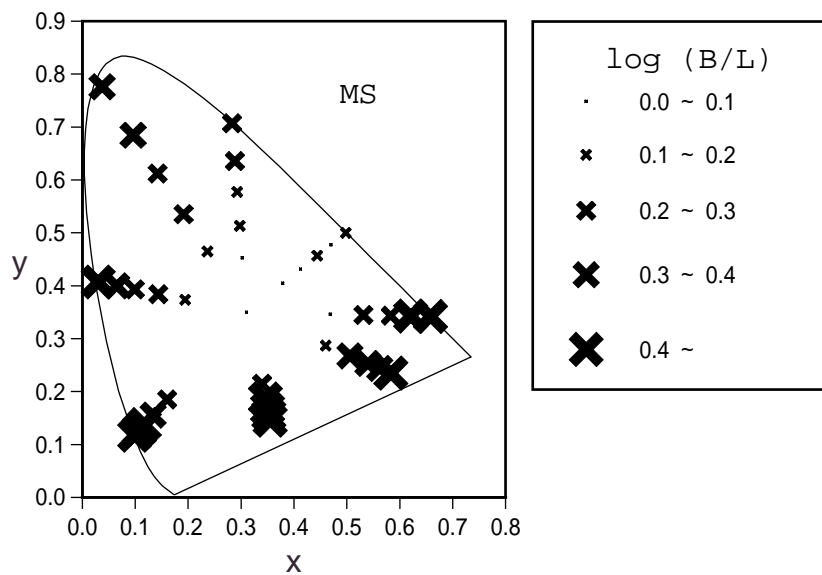


図 2.3.5 被験者 M S の明るさ効率 (B/L) . 図 2.4 と同様

2.3.4 考察

2つの実験の結果から、色光のモード変化と明るさ変化の色度特性が極めて良く一致していることがわかる。図2.3.2 2.3.3の 10cd/m²の結果と図2.3.4 2.3.5をそれぞれ比較すると明らかなように、テスト刺激の色相および輝度純度変化に対する特性と青方向の被験者間の個人差がそれぞれ2つの実験で非常によく一致している。図2.3.6 2.3.7にテスト刺激の輝度純度変化に対するモード変化とlog(B/L)値を示す。縦軸の対応は一致するように適当に選んだ。この図からも、色光のモード変化と明るさ変化の一致が明らかである。

2つの実験の結果に共通して、青方向のテスト刺激に対する被験者間の個人差がある。これを説明するものとして、網膜中心窩付近に分布する黄斑色素濃度の個人差が考えられる。黄斑色素の分光吸収率は、400-450 nm 付近で高く、また、刺激の輝度は測光値から与えているため、青領域の刺激の明るさは被験者によって大きく異なる可能性がある (Smithら, 1975)。もし各被験者ごとに輝度を等しくするならば、黄斑色素の影響をキャンセルすることができ、青方向の個人差は減少すると考えられる。

刺激の輝度は、標準比視感度 $V(\lambda)$ によって決定されている。しかしこれは、明るさそのものを評価しているわけではない。色光の明るさは見えを直接マッチングすることで測定できる (内川ら, 1984)。今回の実験では刺激を直接見て、刺激の面が輝いているか、あるいは物体表面に見えるかといった判断をしている。したがって、モードの評価は面を見る明るさメカニズムの寄与で決定されるのではないだろうか。見えのモードの決定が周辺刺激と中心刺激の輝度ではなく面の明るさで行われているとすれば、モード変化と明るさ変化の色度特性の一致は当然であろう。本実験は見えのモードが明るさメカニズムで決定されることを強く示唆するものであるといえよう。

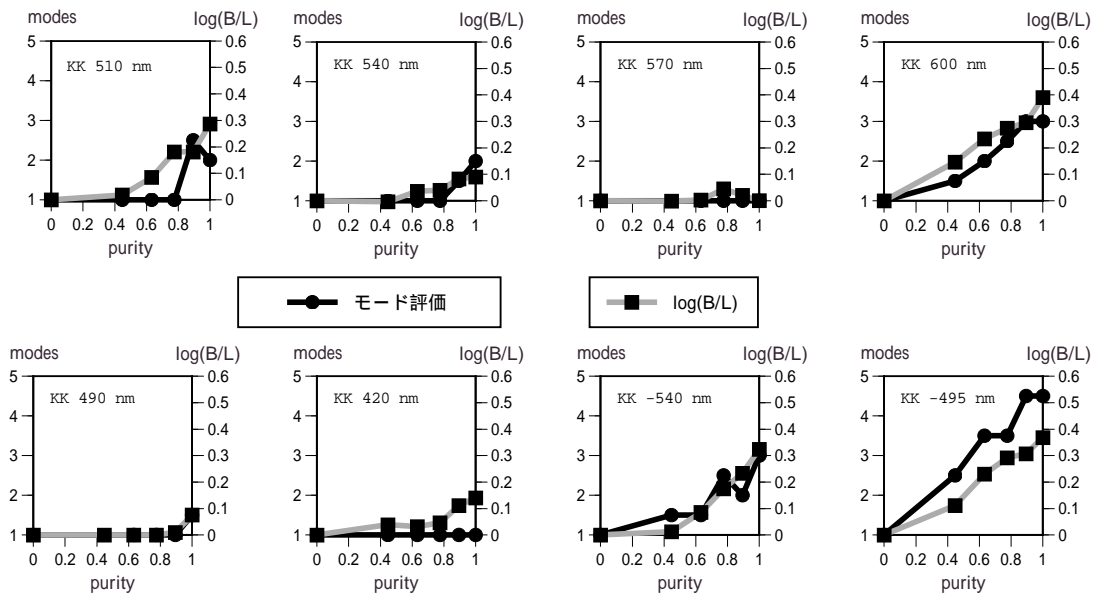


図 2.3.6 被験者 K K のテスト刺激の輝度純度変化に対するモード変化 と log(B/L) 値
 . 縦軸の対応は一致するように適当に選んだ

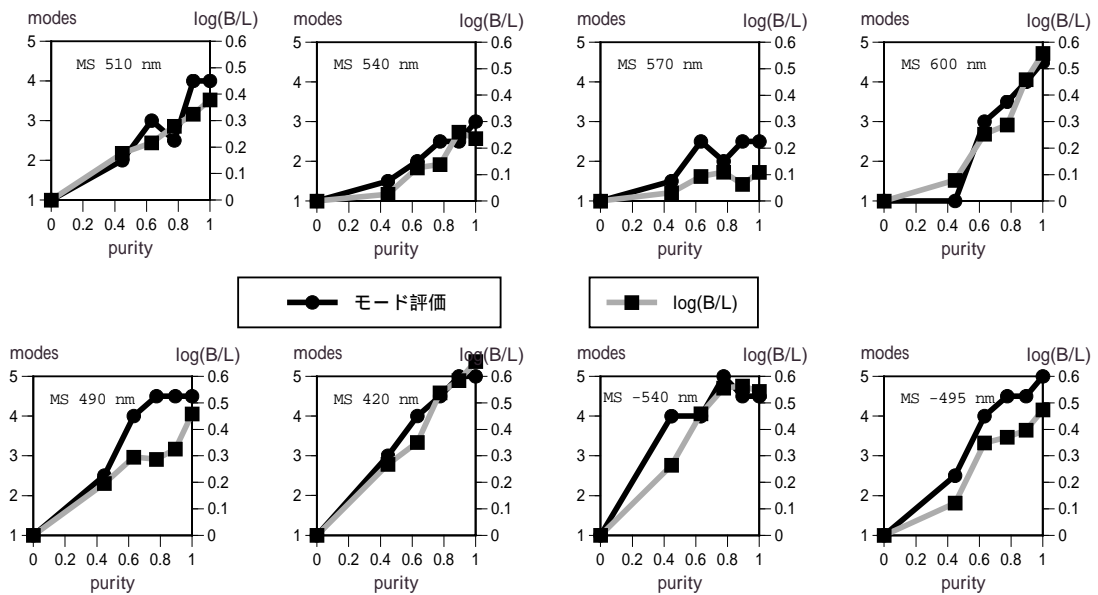


図 2.3.7 被験者 M S のテスト刺激の輝度純度変化に対するモード変化 と log(B/L) 値
 . 縦軸の対応は一致するように適当に選んだ

第3章 カテゴリカル色知覚

3.1 カテゴリカル色知覚とは

無数に存在する色をいくつかの色カテゴリーとしてまとめ捉える知覚は、カテゴリカル色知覚と呼ばれている。カテゴリカル色知覚の研究において最も重要なものに基本色名の存在がある。Berlin and Kay (1969)は世界中の98種の言語について調べた結果、発達した言語には11個の基本色名があることを見いだした。その11色名とは red, green, yellow, blue, brown, orange, purple, pink, white, black, gray である。Boynton and Olson(1987,1990)とUchikawa and Boynton(1987)は、OSA色票を刺激とした単一色名によるカラーネーミングを行い、11個の基本色名は誰がいつどこで使っても安定して用いられる色名であることを示した。これらの研究から、基本色名の起用には言語や文化を越えた共通性が存在し、色知覚において普遍的な特徴を示していると考えられている。

3.2 カテゴリカル色知覚に関する過去の研究

カテゴリカル色知覚に関する研究の多くは、カラーネーミング実験によるものであった。しかし、手法として言語を用いる以上、語彙の影響を避けることができない。応答に言葉を用いることがカテゴリカル色知覚の研究にとって限界を与えているとも考えられる。Berlin and Kay(1969)は、言語の発達度合いによって基本色名の数は変化することと、11個に満たない言語の色名の発生順番には一定の規則があることを示している。これらの事実は、カテゴリカル色知覚が必ずしも11個の基本色名とはならないことを示唆している。

また逆に、色覚メカニズムとしての色カテゴリーはもっと細かく分化しうるのに、現在の言語の発達程度がまだ足りないだけかもしれない。その可能性をBoynton and Olson(1987)は A missing basic color という表現で指摘している。また、内川(1988)は日本人のカラーネーミングには、基本11色以外にmizu, hadaの2色が基本色名としての特徴を満たしていることを示している。

3.3 新しい実験手法によるカテゴリカル色知覚の検証

カテゴリカル色知覚に対応したメカニズムが本当に存在しているのかどうかについて、まだ明確な証拠はない。カテゴリカル色知覚として考えられている現象は、言語による色のカテゴリー化プロセスにすぎないのかもしれない。色覚メカニズム自体にはカテゴリカルな特性は無く、単に言葉として表現・伝達するために色がカテゴリカルに処理されるだけなのかもしれない。この疑問に答えるためには、言語を用いずにカテゴリカル色知覚を調べることも必要である。

3.4 分類実験

3.4.1 目的

似た色を集めて色を分類するという課題で、カテゴリカル色知覚を調べることができる。その際、分類すべき数だけを指定して色全体を分類してもらえば、色カテゴリーの数についても調べることができると考えられる。分類の数が色覚メカニズムにフィットするときは、色分類の傾向は人によらず一致するだろうし、フィットしなければ数をそろえるための無理な分類が行われるのだから人による差がでるだろう。また、そもそも色覚メカニズムにカテゴリー性がほとんど無いなら、色の分類には各被験者ごとの共通性もなく、そもそも分類も困難なものになるであろう。

本研究の目的は、色全体を分類するという手法で言語を用いることなくカテゴリカル色知覚について調べることである。色空間内にまとめられやすい領域は存在するのか、あるならばどのような分布を持つのか、そしてそれは分類の数に応じてどう変化するのか、共通の分類パターンが得られる特別な分類数は存在するのか、これらの問題について考察する。

3.4.2 方法

装置と刺激

被験者ブースは暗幕で仕切られ、外部から光が入らないようにした。図3.4.1に示す様に、ブースの中に机が置かれる。室内はD65蛍光灯4本により照明されており、机上の中心部が照度700 luxになるよう調節した。机上の色票に蛍光灯が正反射するのを抑えるために、蛍光灯にルーバーを模擬した紙を取りつけた。机の大きさは90cm四方で、被験者が実験を行うのに十分な広さが用意される。机表面は、マンセル明度N5、OSA明度L=-2に相当する灰色で塗装した。被験者は机の前に用意された椅子に座り、実験を行う。

分類刺激として用いる色票は合計430枚で、OSA色票(424枚)とJISマンセル色票(6枚)である。OSA均等色空間はL(明度)軸、j(黄~青)軸、g(緑~赤)軸をもち、各色票を(L,j,g)座標で表現する(図1.4.4参照)。OSA色票に不足している色を追加するために、N1(L,j,g=-8,0,0相当の黒)、N1.5(-7,0,0相当の黒)、5.0R3/10(-6,2,-8相当の赤)、5.0R4/14(-4,2,-10相当の赤)、5.0R5/12(-2,3,-10相当の赤)、5.0R6/12(0,2,-10相当の赤)のJISマンセル色票を用いた。色票のサイズは5cm四方で、机の上に全て積まれてある。

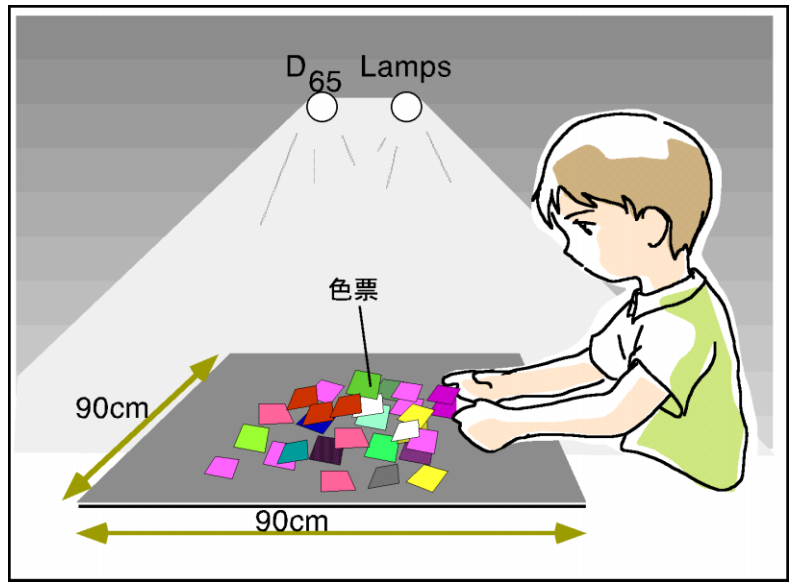


図 3.4.1 実験ブースの概略図

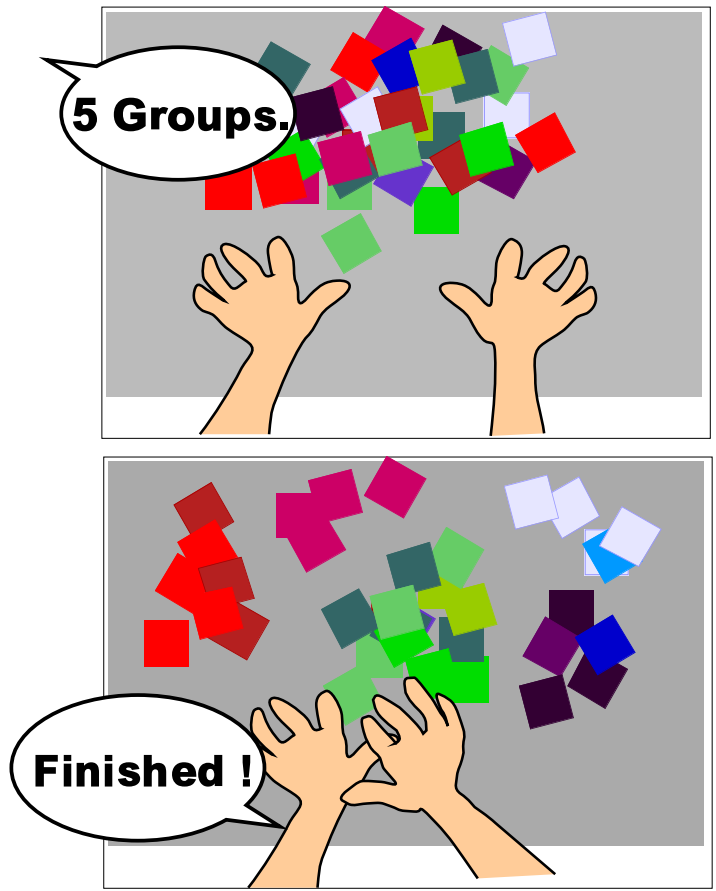


図 3.4.2 実験の様子

手続き

被験者ブース内で3分以上の順応を経てから実験を開始する。机の上には全ての色票がバラバラに積み、被験者は色票を自由に見ることができる。実験開始時に次のインストラクションが被験者に与えられる(図3.4.2)。「色の近いもの同士をあつめて、色票全体を n 個に分類して下さい。その際分類の各グループの色票の枚数は問いません。ここで n 個として与えられるのは2~14である。上限の数は14であるが、上限の設定理由は被験者拘束時間を2日に抑えることと、1グループの色票数が少なくなりすぎないことである。同一明度面にあるOSA色票は50枚以下であるため、仮に一つの明度面を15以上に分類すると、1グループ平均3.3枚以下になってしまう。また、内川(1988)は、日本人のカラーネーミング実験から、基本11色にmizu, hadaを加えた合計13色が基本色名の特徴を満たしていると述べている。これらをふまえ、分類数14が適当な上限であるとした。

分類数 n の順番はランダムとした。繰り返し試行は行わない。実験に要する時間の制限はなく、被験者が満足した時点で終了とした。分類の結果を記録し、色票をシャッフルした後に次の実験に移る。

被験者

被験者は合計5名(TS, NI, YT, HY, MN)で、22-24歳の全員色覚正常の男性である。全員とも心理物理実験の経験はなく、実験の目的、内容を知らされていない。色彩に関する特別な教育も受けていない。

3.4.3 結果と考察

実験結果の一例

実験結果の例として被験者NIの2分類の結果を示す(図3.4.3). OSA空間の3次元(L, j, g)表示でプロットする. 図より, 色票がg値の正負(手前側と奥側)で2つのグループに分類されたことがわかる. 結果の全データは付録参考.

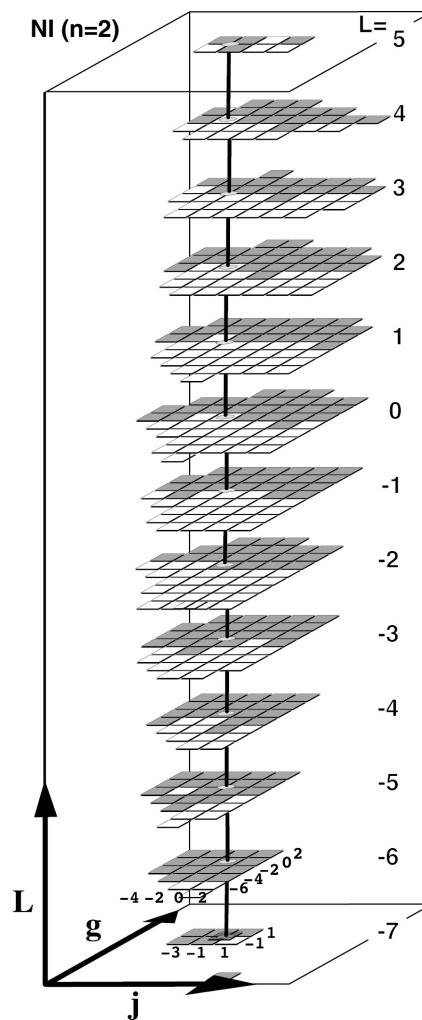


図 3.4.3 実験結果の例. 分類数 2, 被験者 NI の結果を OSA の 3 次元空間で表記する. 分類された 2 つのグループを塗り分けて表現する.

分類境界の点数付け方法

分類の結果を被験者間で比較平均する。しかし、異なる条件で分類されたグループが同一のカテゴリを表しているとは限らないので、各色票ごとにデータを比較することはできない。そこで、隣接する色票との関係を見る。隣接しあう色票がそれぞれ同じグループに分類されたかどうかを評価し、同じグループであった場合は0点、異なるグループであった場合は1点として、隣接しあう色票間の中間点の座標に点数をおく。この点数を通じて条件間での比較、平均を取ることができる。この場合、色空間内で点数が高い領域は、色分類の境界を示していることになる。

jk平面の色分類の傾向

最も特徴的な傾向が見られたjk平面での結果を示す。OSA色空間内では1つの色票に対して12の等色差の隣接色票が存在する(MacAdam, 1974; Nickerson, 1981)。図3.4.4に示すように、そのすべての組み合わせはj,g値が異なっている。Lだけが異なり、j,g値が同じである隣接色票は定義されていない。よって、色票間の点数をjk平面に投影し、重なる点を平均すればjk平面での傾向を見ることができる。

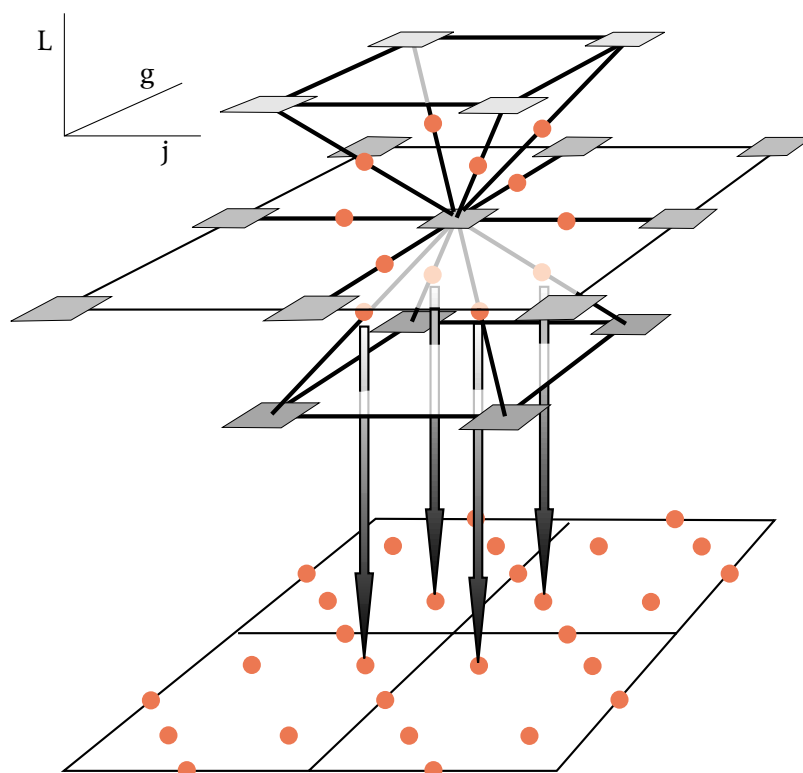


図 3.4.4 OSA 色票の 12 近傍とその中間点，および中間点の jg 投影面での座標．図上部の立体的に配置した正方形が各色票の存在する座標である．丸点は各色票間の中間点の座標であり，この点に分類の点数を与える．これらの点を jg 面に投影すると図の下部のような分布になる．4 本の矢印は投影の例である．

その結果を分類数ごとに分け、表示したのが図3.4.5である。ここでは色空間をLが0以上と0未満の2つに分けてそれぞれをjg平面に投影した。投影した結果得られる点数は、もちろんデータ点上にだけしか存在しない。そこで、各データ点から面全体での傾向を見るために補間表示を行う。各データ点から平面を最小領域に切り分け、各領域ごとに線形面で補間する。得られた点数に応じて、領域を網点の濃度で表示する。特定の境界領域を境に色分類が被験者間で一致して行われていれば、分類の境界線がくつきりと浮かび上がると考えられる。

結果の図3.4.5を見ると、全体を通じて分類の境界線がくつきりと浮かび上がっている。これは被験者間で色分類の傾向が一致していることを示している。また分類の境界線は無秩序に現れているのではなく、分類の数に従って段階を追って増えていくことがわかる。次に、この段階を大きく4つに分けて傾向を見る。

第1段階(2分割): $n=2,3$ で顕著にみられる。明度Lの高低両方で $g=0$ の軸に沿った横方向の境界線で分割されている。

第2段階(4分割): $n=4-6$ でみられる。第1段階での横方向の境界線に加えて、 $j, g=0,0$ の無彩色点から上方向と右下に伸びる境界線がある。これは、第1段階で分割された領域が部分分割されたことを示している。 $n=5$ で境界線がぼやけているが、 $n=6$ で再び境界線がはっきり現れている。

第3段階(新たに1つの部分分割, 1つの領域の発生): $n=7-9$ でみられる。第2段階での分割領域がさらに部分分割されている。高明度側で無彩色点から左下方向に伸びる境界線($n=8$ 以上)、低明度側で無彩色点から下方向に伸びる境界線($n=7$ 以上)が出現する。この2つの境界線は、同種の境界面から得られたものであり、明度に応じてjg面での位置が変化しているものである。これについては後述する。同時に($n=8$ 以上)、低明度側で $j, g=-3, -3$ 近辺の領域をとり囲むような境界線が現れている。

第4段階(新たな2つの部分分割, 1つの領域の発生): $n=11$ 以上の低明度側で、第3段階で現れた囲まれ領域の下側の低g値方向に境界線が現れる。 $n=12$ の高明度側で $g=0$ 軸上のj値が高い領域を挟みこむ境界線が現れる。 $n=13$ の低明度側で無彩色点から右上に伸びる境界線が現れる。

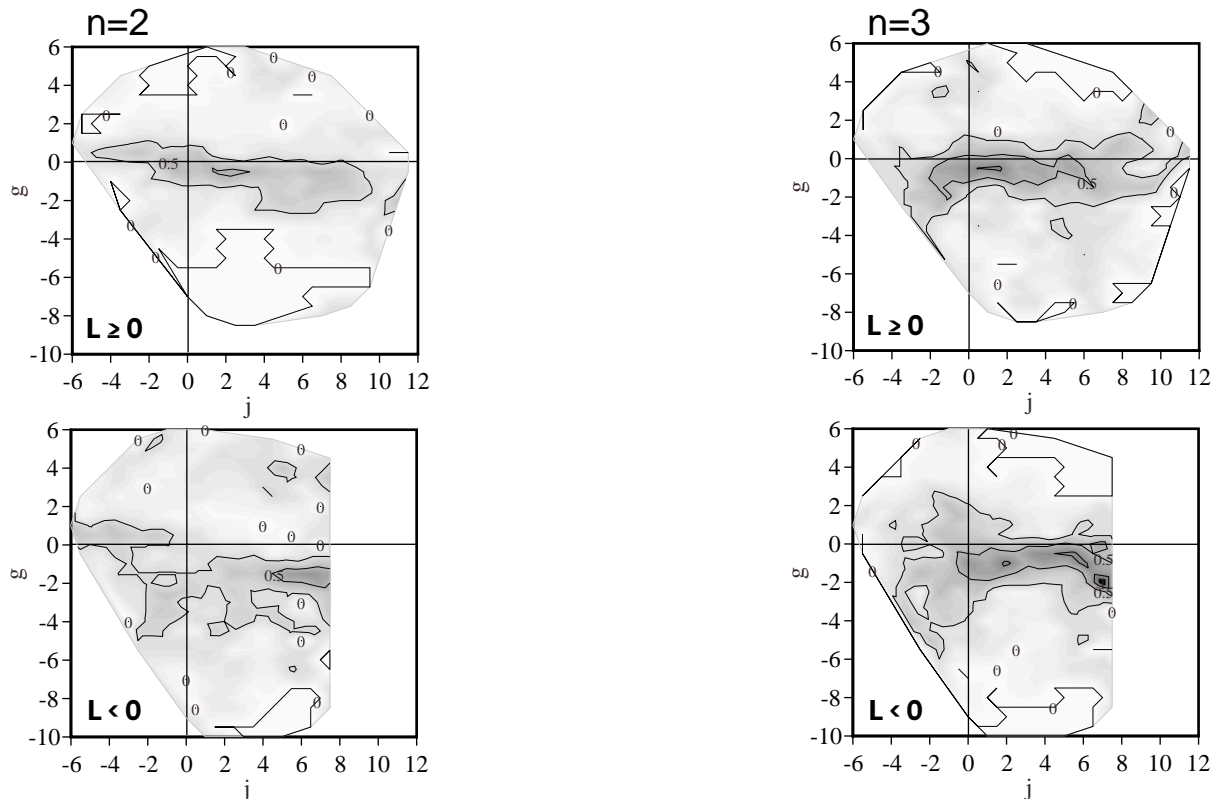
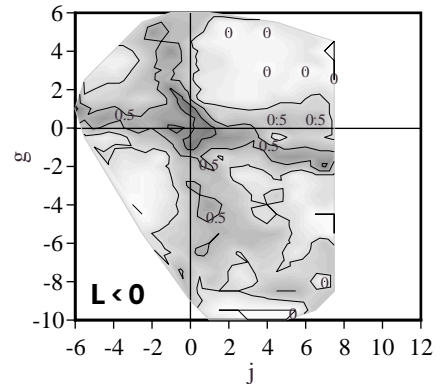
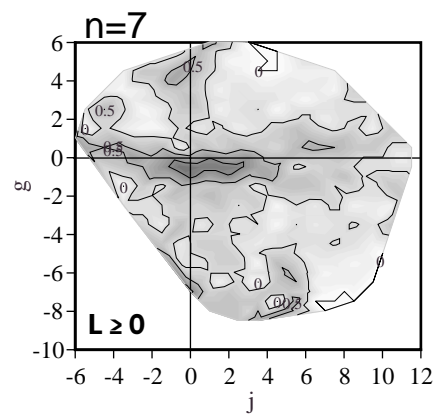
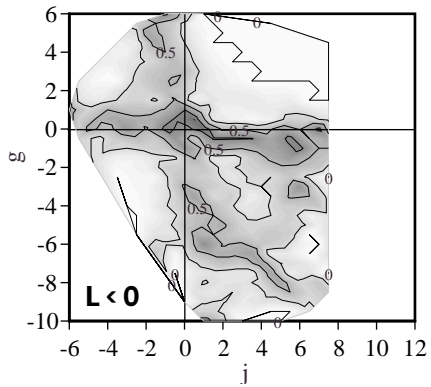
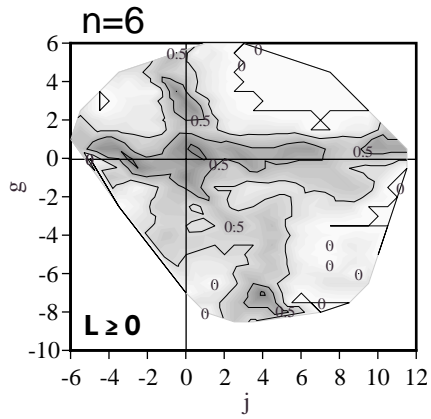
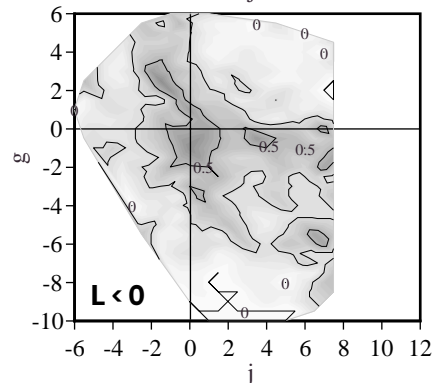
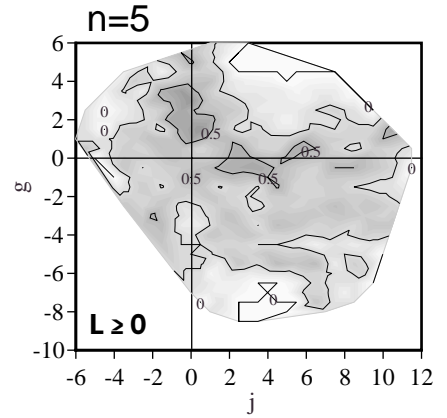
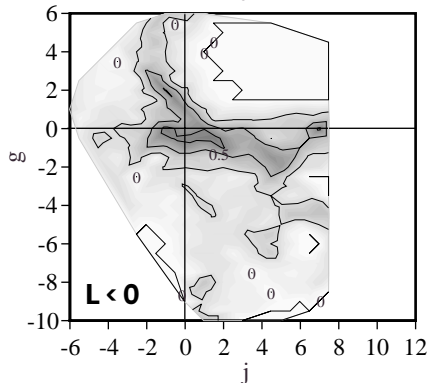
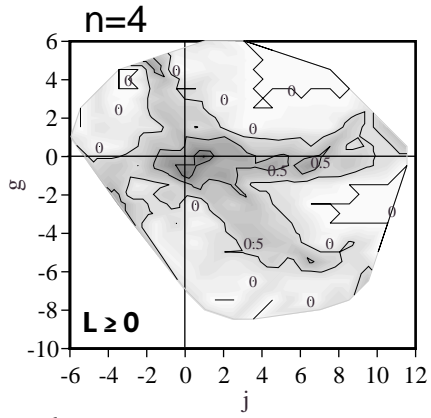
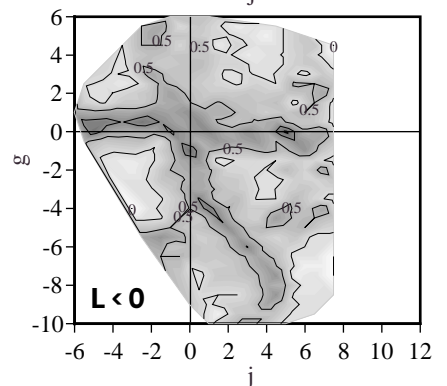
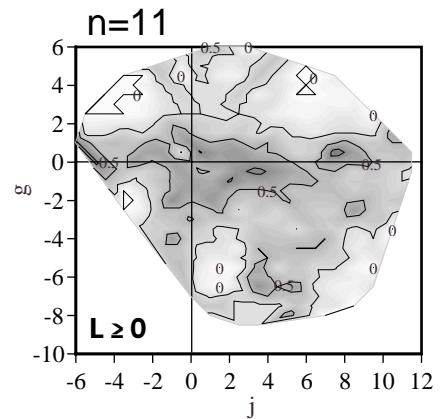
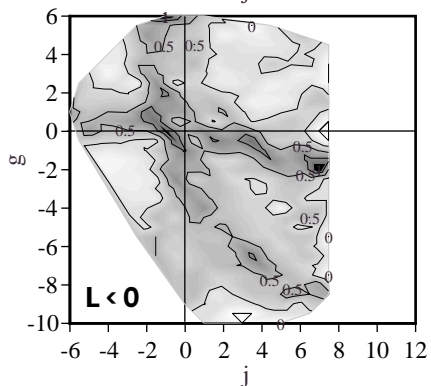
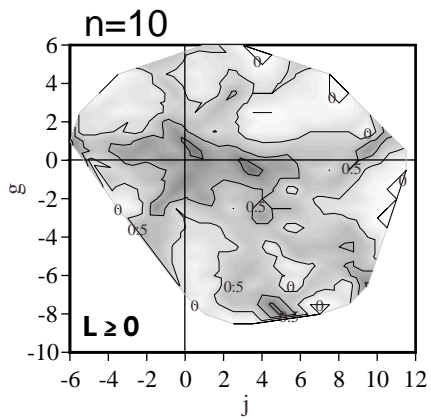
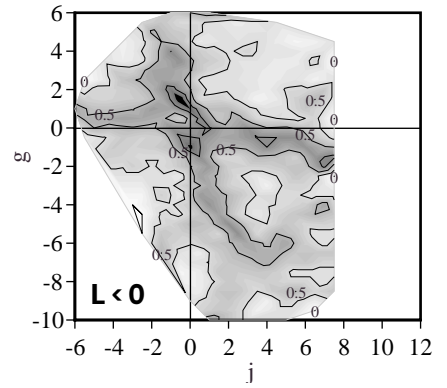
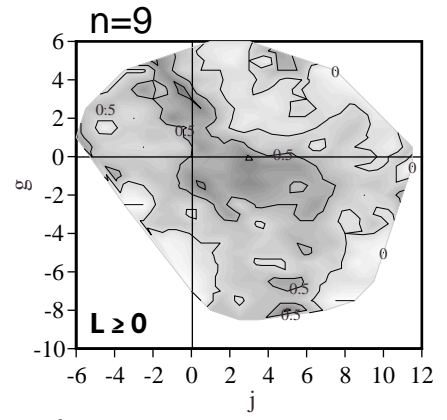
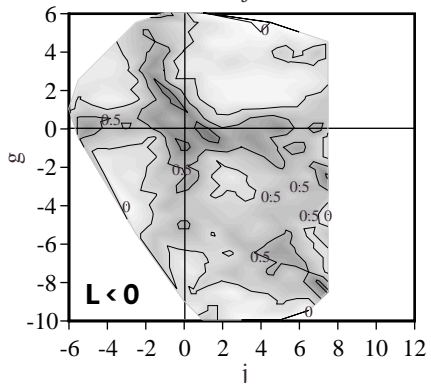
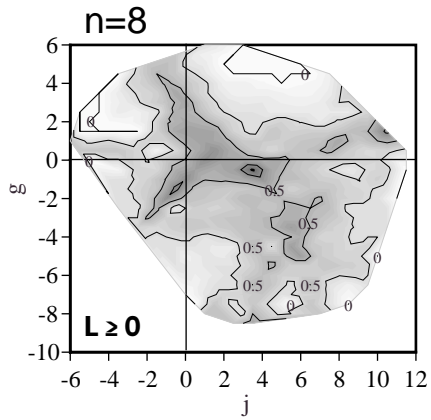


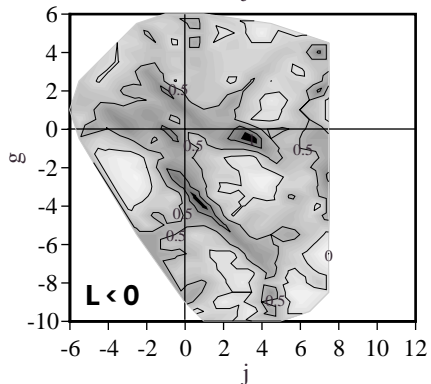
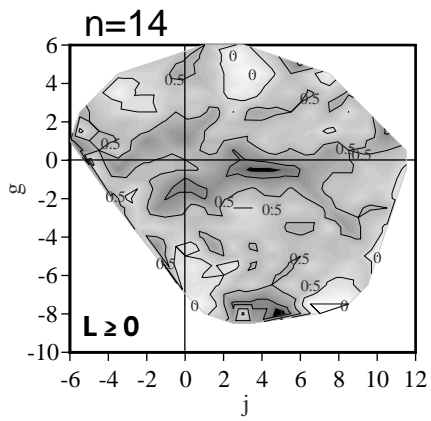
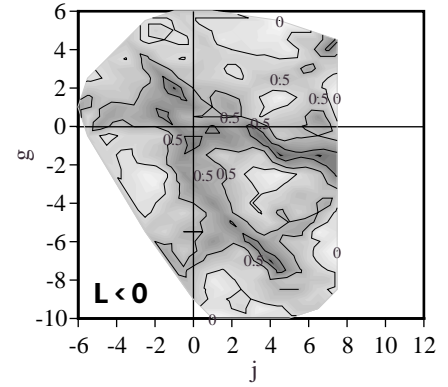
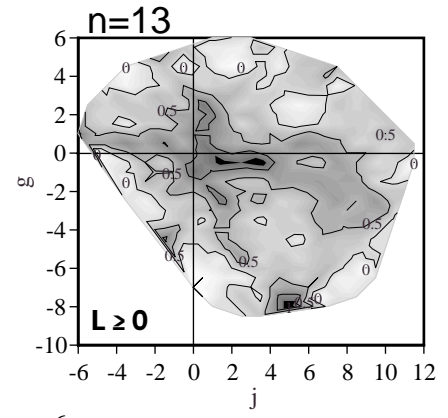
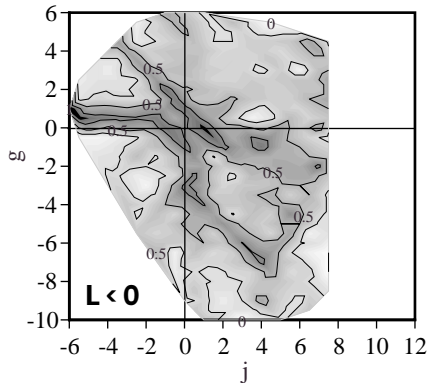
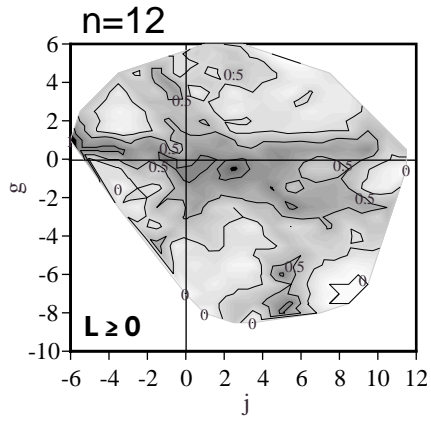
図3.4.5 jg平面へ投影した色分類の結果．分類の数(n)ごとに表示する．色空間をLが0以上，0未満で2つに分けてjg平面に投影し，被験者間で平均した結果を示す．データ点が存在する領域を補間して網点の濃度で分類境界の点数を表示する．等高線は，分類境界の点数が0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0となる線上で引いてある．外周部の白い領域は，データ点が存在しない領域である．



☒ 3.4.5 (continued)



☒ 3.4.5 (continued)



☒ 3.4.5 (continued)

明度方向の色分類の傾向

jpg平面に投影した図からは、明度に応じた色分類の傾向を見ることができない。明度方向での傾向について示すために次の手続きをおこなう。

jpg平面での特徴として、色分類の境界線の多くは原点(無彩色点)から放射状に伸びているということがあった(図3.4.5)。これは等色相線と似た特性であると考えられる。そこで、各データ点を極座標表示に変換する。ここで方位角をHue angleと呼ぶことにする。Hue angleごとに色分類された領域は、原点からの放射方向にデータを投影することでより明確に傾向を見ることができる。その投影図をHue angle-L面グラフとして示すことで、明度L方向の傾向について確認できると考えられる。

ただし、Hue angle-L面の投影について、3つの注意点がある。第1に、原点近傍のデータは色相による傾向を示すのに不適當であると考えられる。そのため、各明度面での原点近傍のデータ点(半径2以下)は投影していない。第2に、Hue angle-L面への投影は、明度に応じた傾向を見るのが目的である。そのため、同じ明度面内での隣接色票間のデータ点は省略した。ここでは表示しないが、すべてのデータ点を投影した図は乱雑さが高かった。これは結果の説明には適さないと判断した。第3に、Hue angleによってデータ点の個数に差が大きい。6度刻みでデータ点をひとまとめにした。jpg平面での第2象限(Hue angle 90~180度)と第3象限(Hue angle 180~270度)のデータ点は相対的に少ない。データ点の個数は、第1象限から順番に509, 338, 353, 858個である。すべてのデータ点をそのまま投影すると、データ点の密度に差が生じる。また、投影することによるデータ点の集積度を上げるためにも、ある程度のHue angleごとにデータをひとまとめにするべきであると判断した。第2象限では、一つの明度内でのデータ点の個数が最も多いところでも28個である。データを集積する意味から、一つの象限を15分割する角度(=6度)とした。

色分類の数全体を通じての傾向として、図3.6のjpg平面への投影と比較すると境界線ははつきりと浮かび上がっていない(図3.4.6)。比較的傾向が見られる境界線の多くは垂直方向に並んでいる。垂直方向の境界線が多いというのは、色分類が主にHue angleによって行われていたことを示している。つまり、明度による色空間の一致した分割は、相対的に少ないといえる。

次に、分類数の順を追って傾向を見る。n=6までの、分類数が少ない条件では明度による分割に共通性はみられない。分類数n=6までというのは先に述べた第2段階に相当する。第3段階と考えられるn=7では、Hue angle 90から180の範囲(jpg面での第2象限)でL=-2を境界とした明度方向の分割が見られる。ほぼ水平の境界線を描いているので、jpg投影面では確認できなかったものである。n=8-11では、Hue angle 270, L=-6を頂点としたV字型の境界線を描いている。この傾向は図4のjpg投影面で示されたものと一致する。第4段階としてn=10で、Hue angle 0から90の範囲(jpg面での第1象限)でL=-1近傍を境とした明度方向の分割が見られる。ほぼ水平の境界線を描いているので、jpg投影面では確認できなかった。

ものである。さらにこの象限は、高明度側でHue angle 60を境に分割され、低明度側では幅広く一つに分類がなされている。

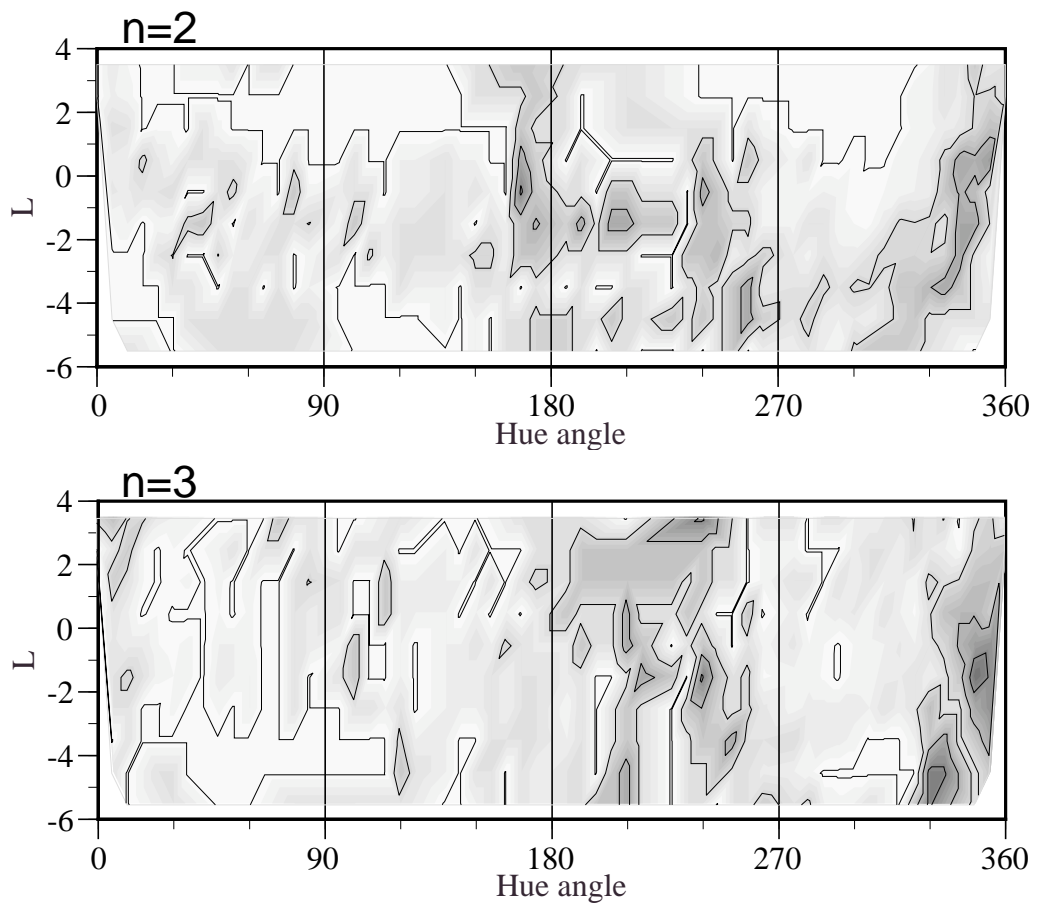


図 3.4.6 Hue angle-L 面へ投影した色分類の結果。分類の数 (n) ごとに、被験者間で平均した結果を示す。データ点が存在する領域を補間して網点の濃度で分類境界の点数を表示する。Hue angle は、j 軸正方向を 0 度として反時計回りに正の回転角として計算した値である。白色点近傍のデータ点と、等明度内での比較で得られたデータ点は除外してある。Hue angle のデータ座標は 6 度ごとにひとまとめにして計算されてある。

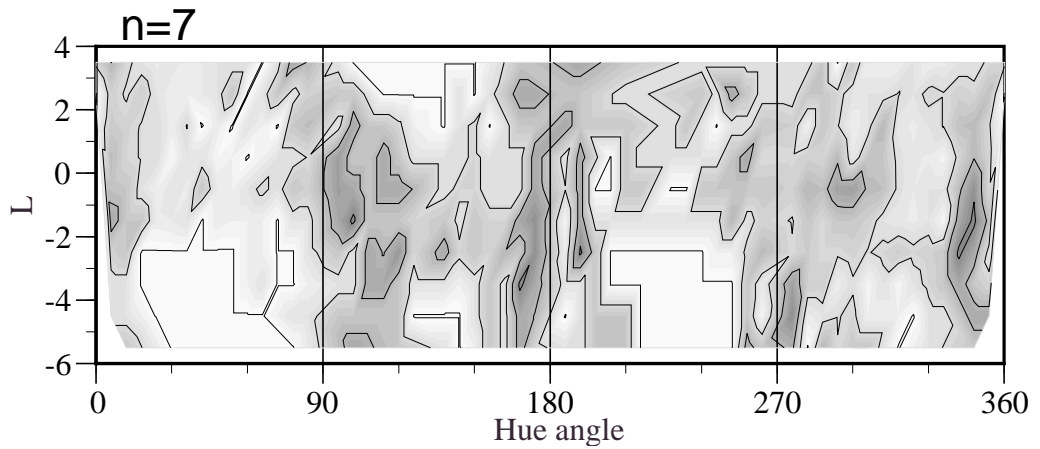
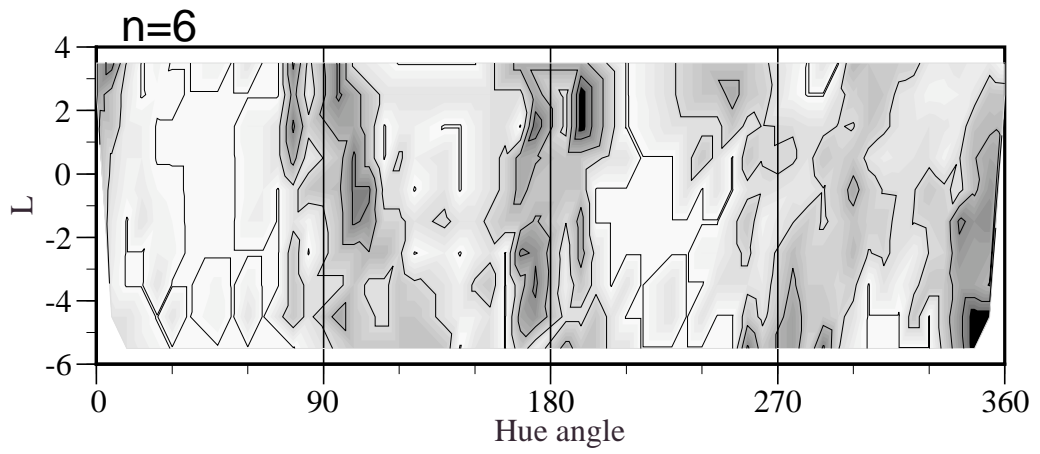
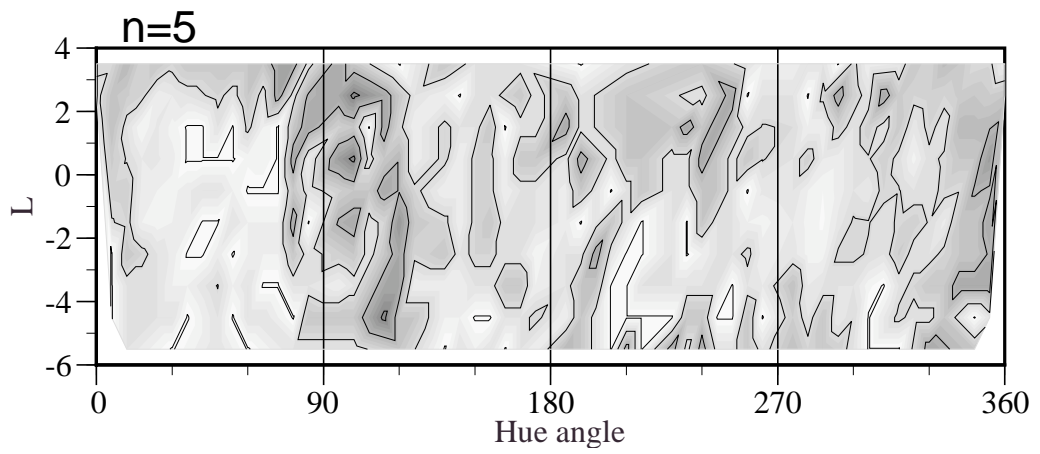
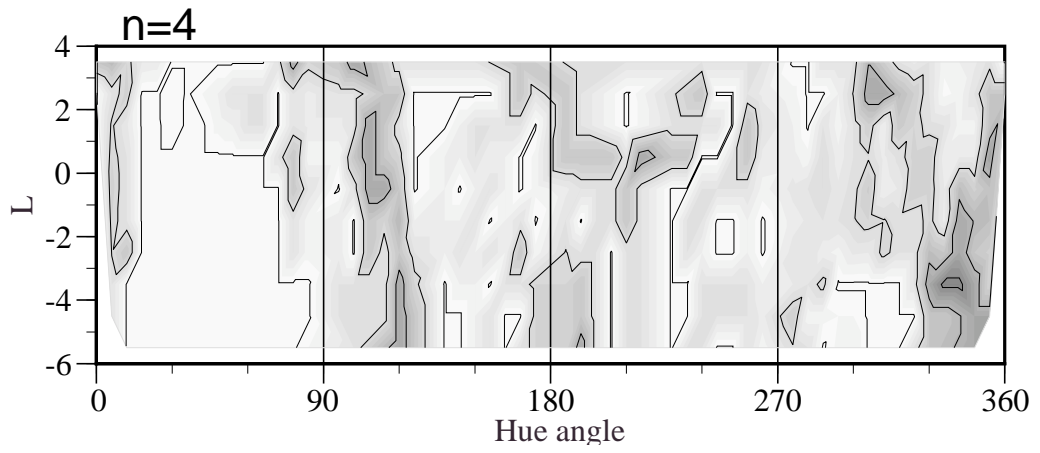


图 3.4.6 (continued)

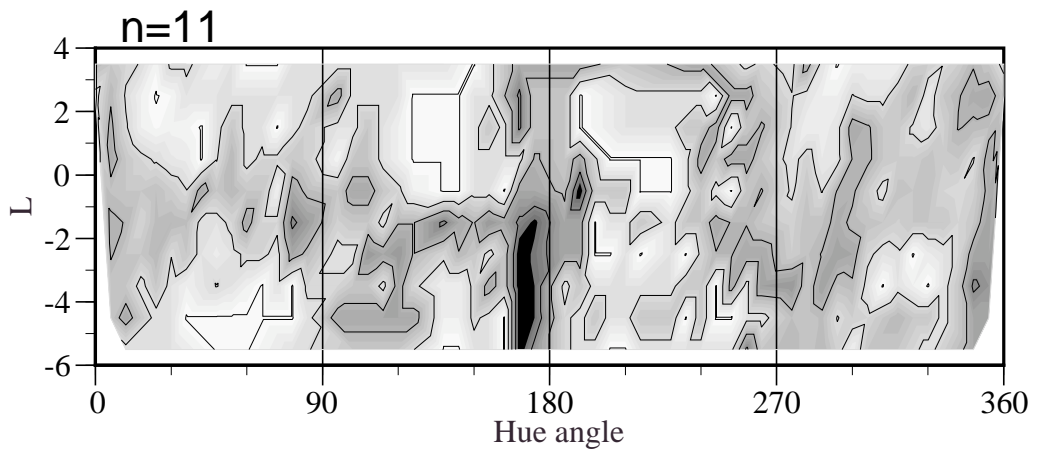
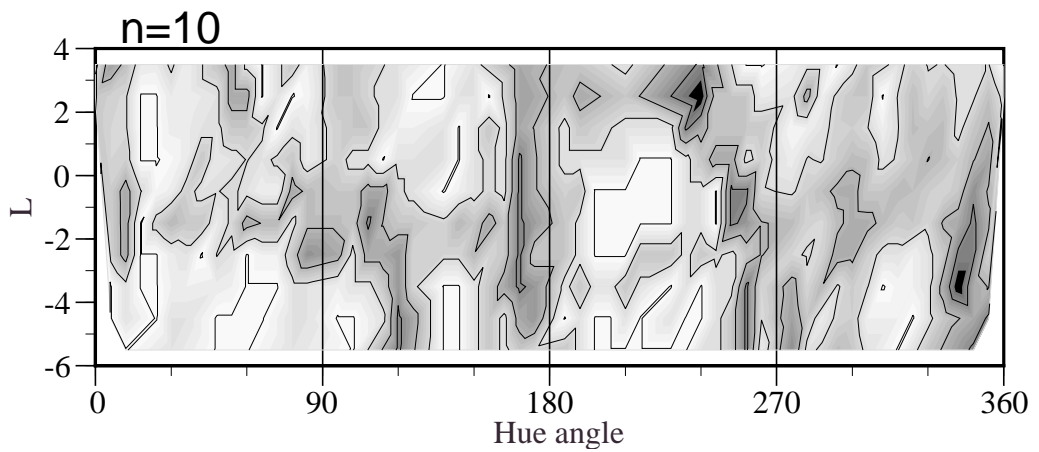
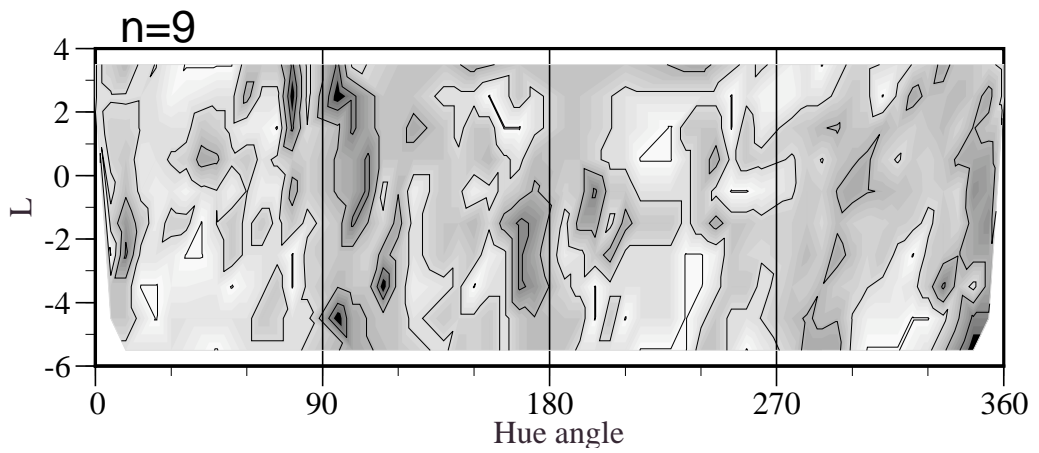
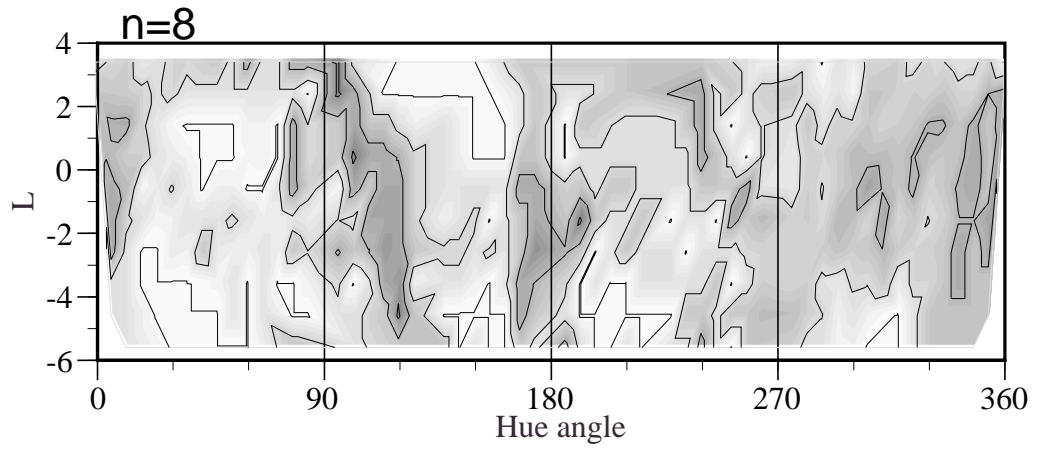
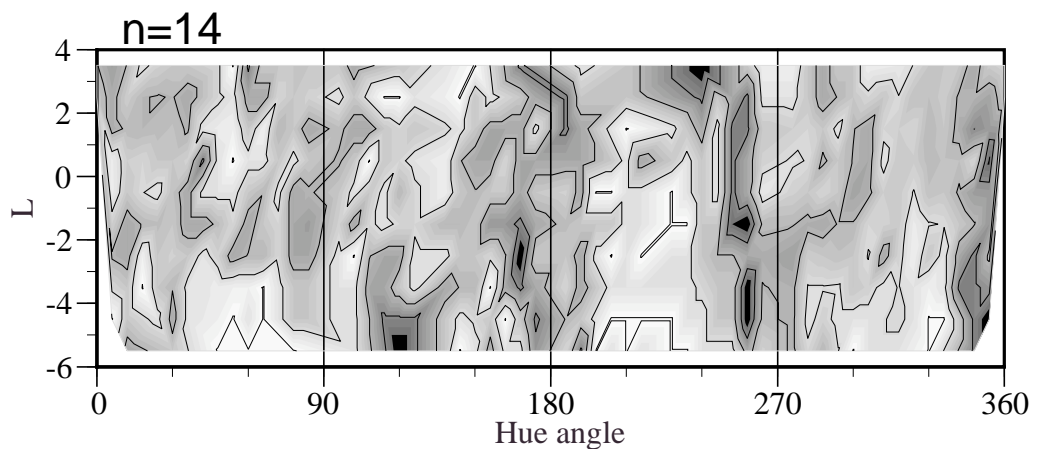
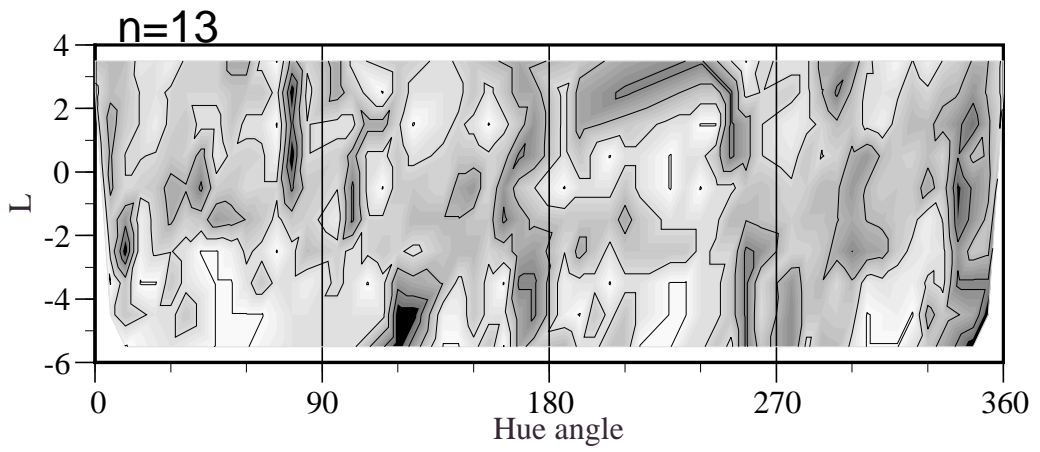
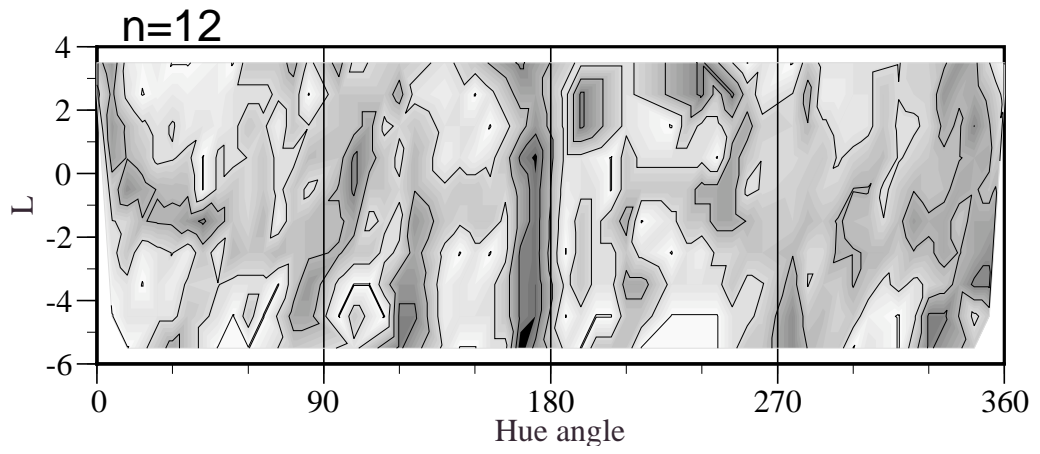


图 3.4.6 (continued)



無彩色の分類

無彩色の分類が得られているかどうかについては、図3.4.5、3.4.6で用いた手法では示すことができない。jg平面内で無彩色の色票は1枚であることと ρ_{sa} の近傍色票としてj,g値が同じでLだけが異なるものは定義されていないことが原因である。各被験者の分類傾向で無彩色のもの次の通りである。

TS;すべての分類数で無彩色の分類なし。

NI;5分類のみ白,9分類以降で灰色の領域を分類する。

YT;8分類以降で白,13分類以降で灰色を分類する。

HY;6分類のみ白,11分類のみ灰色を分類する。

MN;3分類以降すべて無彩色の分類を行う。ただし明度方向の分離はされていない。

以上の結果から、無彩色は分類の第4段階で登場するのではないかと考えられる。無彩色を明度で分類する傾向に一致はみられなかった。

分類数と一致度

jg平面での傾向として、色分類の境界線が $n=5$ でぼやけた後に $n=6$ で再びくっきりと現れることがあった(図3.4.5)。このように、分類の一致度に変化が起きる特定の分類数があるようである。また、イントロで述べた共通の分類パターンが得られやすい特別な分類数は存在するのかという疑問を確かめるために、分類の一致度について考察する。

全色票間の隣接するペアの数は2058ある。そのうち各被験者の色分類の結果から境界の数が何個あるのかを数えたのが図3.4.7の折れ線グラフである。ダイヤ()でしめす点が全被験者の平均である。分類の数が増えるに従って、境界の数が増えている。次に、5人の被験者で一致した境界の数を数える。3人の一致、4人の一致、全員の一致とわけて表示したのが図6の棒グラフである。こちらも分類の数に従って増加している。また、分類の数が増えるにつれて棒グラフの高さがトータルの境界数(折れ線)に近づいている。近づいているからといって、分類数に従って被験者間の一致度は高まっているのだと考えるのは正しくない。それは分類する色票の枚数が限られているからである。例えば仮に全体を430グループに分類せよとすると、色覚メカニズムとは関係なく全被験者の応答は完全に一致してしまう。つまり、限られたデータ点では分類数が増えていくと必然的に被験者間の分類境界の一致度は増加するのである。分類境界の一致度を測るための指標を与える必要がある。

色分類の境界が被験者ごとに完全にバラバラだった場合を仮定する。すると、各被験者の分類境界の数(図3.4.7の)から計算することで境界線が一致する期待値を求めることができる。各点での分類境界の存在確率は、 $\frac{\text{トータルの境界数}}{2058}$ で与えられる。これを各被験者ごとに求め、分類境界が少なくとも3人以上一致する期待値を計算する。この期待値と実験結果の3人以上一致した分類境界の

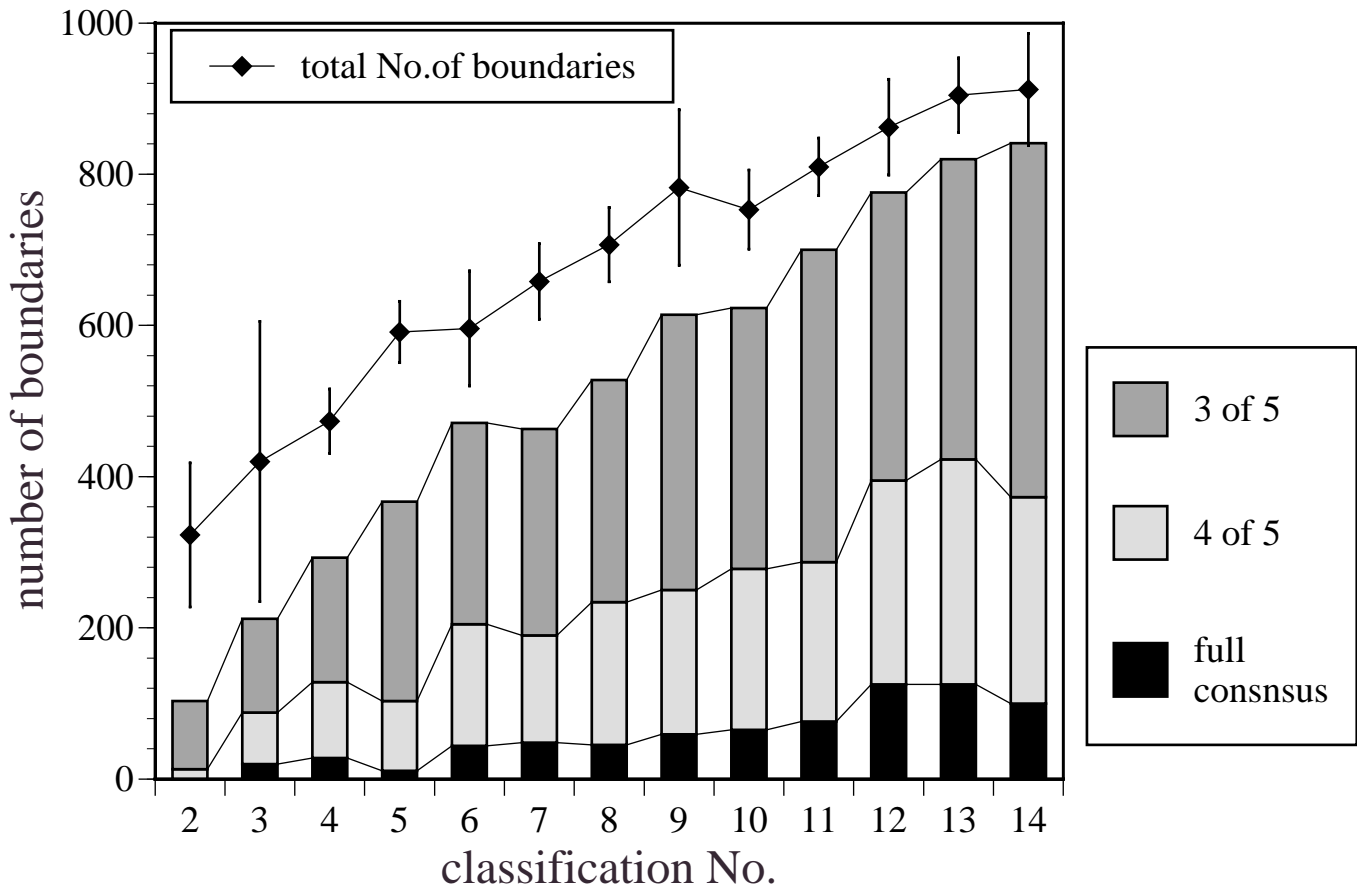


図3.4.7 分類境界の数 . 全色票間の各被験者の分類境界の数をダイヤ()で示す . 誤差棒は5人の被験者の標準偏差を表す . 被験者間の一致度に応じて一致した分類境界の数をバーで示す .

数との比をとることで、分類境界の一致指数とする。ただし、実際には分類境界が空間内に完全にバラバラに配置されることはあり得ないので、実際の期待値とは異なる可能性はある。

分類境界の一致指数を分類数ごとに示したのが図3.4.8である。すべての値が1以上であり、完全にバラバラに分類されたときの期待値より一致度が高い。灰色の曲線は、単調減少の指数関数によるフィッティングカーブである。このカーブとの比較から、一致度は分類数3,4,6,10で高く、2,5,9,11で低いといえる。この傾向は図3.4.5、3.4.6での、境界線がくっきりと浮かび上がっているかどうかと一致している。

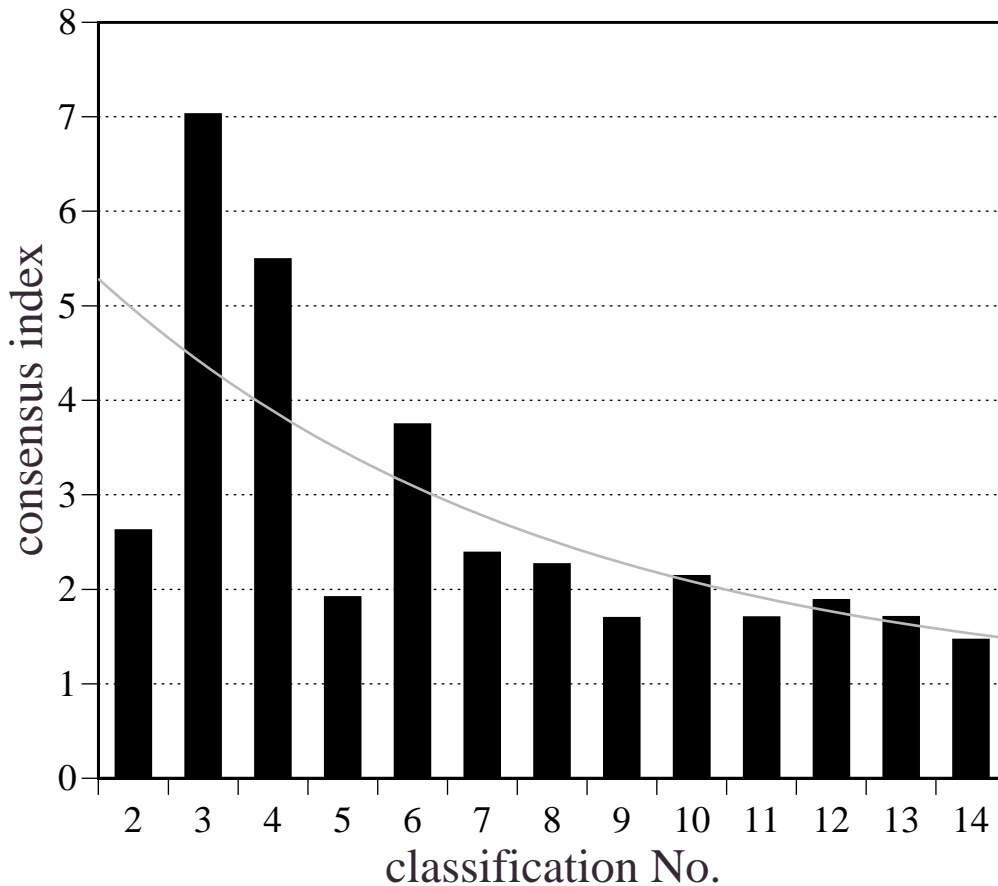


図3.4.8 分類境界の一致指数。色分類の境界が完全にバラバラだった場合に一致する期待値に比べて、実際の一致が何倍になっているのかを指標として示す。曲線は指数関数によるフィッティング。

言語の進化による基本色名の発生順との比較

Berlin and Kay(1969)は、基本色名の数が11個に満たない言語についても調べ、言語の進化による色名の発生順には一定の法則があることを示した。言語の進化による典型的な発生順は、白・黒 < 赤 < 緑・黄色 < 青 < 茶 < ピンク・紫・オレンジ・グレーであるとしている。ただし、ここでの色名は便宜上名付けられてものであり、色の見えを想像するには適切でない。発生したカテゴリーの色度分布に注目するべきである。この法則は、本研究の色分類の数に応じた分類傾向とどのような関係があるのだろうか。

基本色名の分布との関係を同じOSA色空間で比較する。Berlin and Kayの実験は、マンセル色票群から彩度の高い外殻部を選び出して行われている。本実験と比較するためには、マンセル色空間での基本色名の分布をOSA色空間に変換するとよい。具体的には、標準観測光下でのマンセル色票の色度点(Wyszecki & Stiles, 1982)をOSA色空間のLjg座標に変換する(MacAdam, 1974)。Berlin and Kayはまた、基本色名の進化をステージでわけている。ステージIIは明暗による分化、ステージIIではこれに色を表す赤が現れる。基本色名による色度方向の分割はステージIII以降でみられるので、ここではステージIIIa(赤・緑)、IIIb(赤・黄)、ステージIV(赤・緑・黄)、ステージV(+青)、ステージVI(+茶色)、ステージVII(基本11色)の6段階を図3.4.9に示す。また、図3.4.5のjg投影図と対応するように明度L=0で2つに分離し表示する。

基本色名の分布を、ステージを追って比較する。基本色名のステージIIIaは、 $g=0$ の横一線を境界とした色空間の分割であり、色分類実験の第1段階と同じ傾向である。ステージIIIbの白丸に相当する分割は色分類実験では得られていないが、 $g=0$ の線を境界とすることで一致していると考えられる。ステージIVとVIは、原点から右下方向の境界線と上方向の境界線による色空間の分割を示している。これは色分類実験の第2段階と一致する。ステージVIでは、低明度側にだけ発生する領域分割がある。低明度側にだけ発生する領域は、色分類実験の第3段階で得られている。しかし、jg色度図上での領域は一致していない。最終段階とされているステージVIIでは色空間は基本11色名に分割される。これは色分類実験の第4段階と類似している。

基本色名による色空間の分割は11個までであった。しかし分類実験は11個以上に色空間が部分分割されていくことを示している。これらの細かい領域に対応する基本色名は現在の言語の進化ではまだ到達できていない可能性がある。

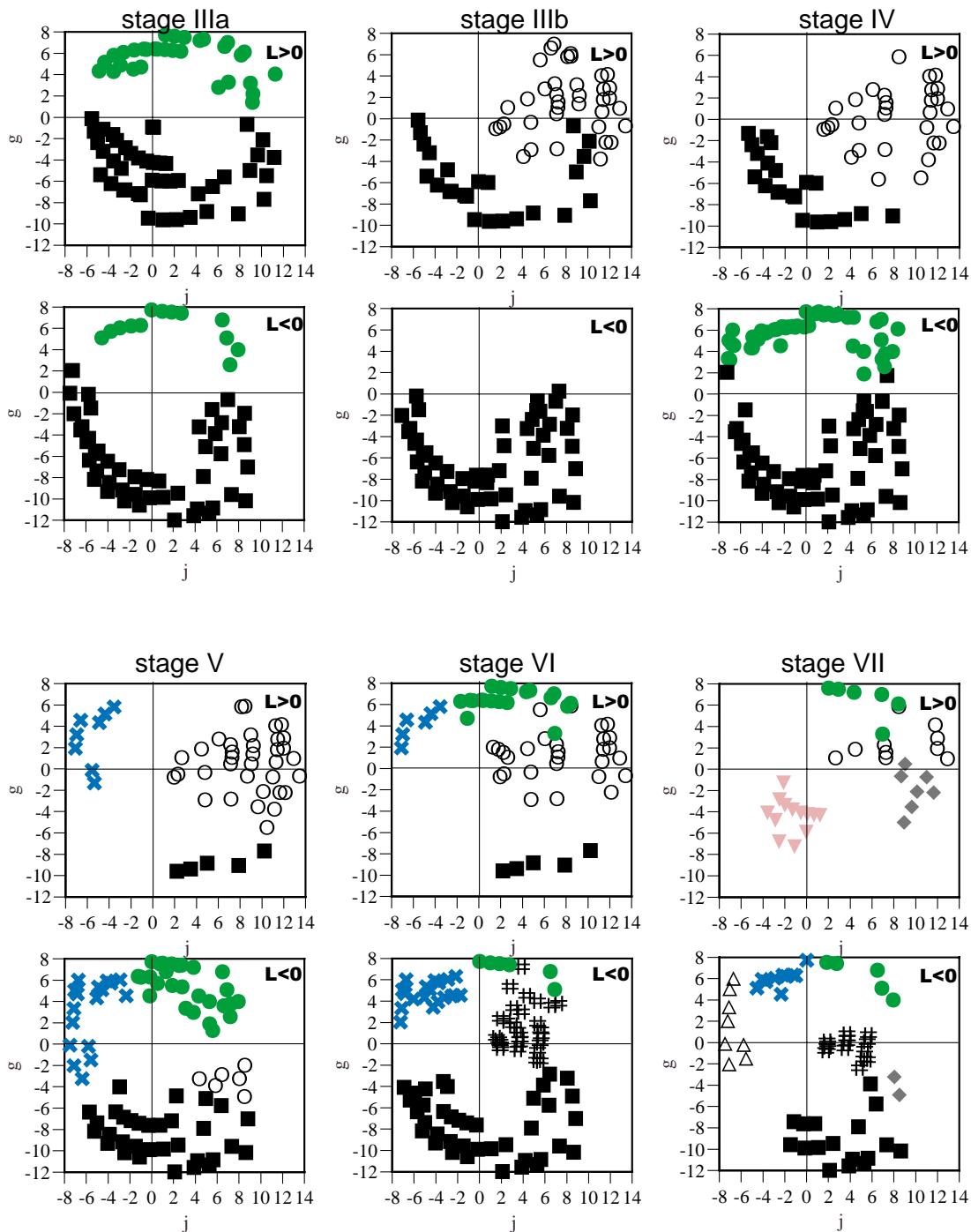


図3.4.9 Berlin and Kayによる、基本色名が11以下の言語での基本色の発生順。マンセル色票の色度点から OSAj-g 座標に変換しプロットする。図3.4.5との対応をとるために明度 $L=0$ で2つに分けて表示する。言語の進化による色名の発生のステージは7段階あるとされており、そのなかで色度による分化が起きるステージIII以降の6つのステージについて示す。煩雑さを避けるため白、黒は表示しない。各シンボルの色名は以下の通りである。○；正方形が赤，●；丸が緑，○；白丸が黄，×；ばつ印が青，#；井戸型が茶，▽；逆三角形がピンク，△；上三角形が紫，◇；菱形がオレンジ。

その他の段階的な色カテゴリー性を支持する研究

就学前の子どもが成長に従って獲得する色名の順番が ,red, green, Black, white, orange, yellow, blue, pink, brown, purpleであるとの報告がある(Johnson, 1977) この順番は ,言語の発達による色名の獲得順と ,色分類課題での分類数の増加にしたがって現れる色カテゴリーと無関係でない (Bornstein, 1985) .

ヒト以外で色カテゴリー性を支持する研究がある .Komatsu(1992)は ,マカクザルの下側頭皮質から単一細胞記録を行い ,色カテゴリー領域と類似した色度分布で神経応答を示す細胞を発見した . Matsuzawa(1985)はチンパンジーがヒトと共通の色カテゴリー知覚を行っている可能性を示唆した .チンパンジーに特定の色票の色名を学習させ ,その後色全体をどのように呼び分けるかをテストした .その結果はヒトのカラーネーミングによる呼び分けと きわめて類似していた .カテゴリーカル色知覚はヒト特有の現象だけでなく ,サルを含めた霊長類の共通の色知覚である .

これらをふまえると ,カテゴリーカル色知覚のメカニズムとしての存在はもはや疑う余地はないと言える .

3.5 単一語彙カラーネーミング実験

3.5.1 目的

色分類実験から4段階構造をもつカテゴリカル色知覚を導き出した。しかしこれらの段階にはどのような意味があるのだろうか。第1,第2段階は色覚メカニズムの初期段階の特性を反映した色カテゴリー分割であると考えられる。そして第3,第4段階と、細かく分割されていくことはどのようなメカニズムを反映しているのだろうか。分類実験の結果は、言語の進化による色名の発生順や成長に従った色名語彙の獲得順と類似していた。よって言語によるカテゴリー分割との比較も必要である。Berlin & Kay (1968)によると、日本語は十分に発達した言語であり、11の基本色名を持つ。この事実は、Uchikawaら(1987)の心理物理実験によっても確かめられている。色名で分類する数はいくつであろうか。分類実験で得られたどのステージに相当するのだろうか。本節では分類実験と同一の観測者による単一語彙カラーネーミング実験を行う。

3.5.2 方法

装置と刺激

分類実験で行われたものと同様である。

手続き

実験ブース内の照明に5分以上順応した後、実験が開始される。実験開始とともに、ランダムな順に束ねられた色票50枚が被験者に手渡される。被験者は色票を手を持ち自由に見ることが出来る。この観察条件は、色分類実験での観測条件と一致している。被験者は、色票を一枚ずつ順に見て、口頭で任意の色名を答える。ただし、色名として使用できる言葉は単一語彙に限られ、「赤っぽい緑」、「薄い青」、「青緑」といった応答はできない。

練習セッションとして、適当に選んだ50枚の色票を用いてカラーネーミングを行う。その後、本実験として全ての色票を用いてカラーネーミングを行う。繰り返し試行は2回である。

被験者

先行して行われた色分類実験と同一の、TS(24),NI(23),YT(24),HY(24),MN(23)の男性5名である。色覚正常。実験の目的は知らされていない。本実験を行った時期は、色分類実験を行った後1年が経過している。

3.5.3 結果

全被験者を通じて用いられた色名は、合計45個であった。表3.5.1は、各被験者が応答時に用いた色名の起用回数を示したものである。ただし、各被験者の2回の繰り返し試行で、一貫した色名応答を示した色票だけを対象とするため、表中の色名は合計33個となっている。残りの12個の色名は、一度も一貫した起用が行われなかったものである。

全被験者の各色票に対するカラーネーミングの結果を図3.5.1に示す。2回の繰り返しで応答が一致しなかった色票は示さない（noneと表記）。5人の平均応答を次のようにして求めた。5人の被験者の2回応答で、各色票ごとに合計10回の応答が得られている。10回の応答中5回（50%）以上同一の色名で呼ばれた場合、その色名が平均の色名応答であるとする。

図3.5.2に平均の色名応答を示す。図3.5.2から、被験者を通じて色票が安定した色名で応答されていることがわかる。平均応答として得られた色名のほとんどは、表3.5.1の上位13個であり、この13色名だけで全色票の実に87%が埋め尽くされている。

表 3.5.1 使用された色名一覧

No.	Name	TS	NI	YT	HY	MN
1	赤	2	3	4	5	12
2	青	12	11	11	23	22
3	黄	15	7	9	7	10
4	緑	116	105	30	93	106
5	オレンジ	22	4	12	39	
6	ピンク	45	23	30	29	
7	紫	49	45	38	69	63
8	茶	40	36	20	27	50
9	白	5	3			
10	灰	14	13	5	16	3
11	黒	3	2	3	2	2
12	みずいろ	26	24	45	10	2
13	はだいろ	12	19	30	12	37
14	しゅいろ	2	1	5		4
15	クリーム		4	8	3	
16	こん	2	5	1		
17	だいだい		8			17
18	もも		4			15
19	おうどいろ			2	15	
20	ふじいろ		11			
21	からし		7			
22	アイボリー		4			
23	くさいろ			44		
24	グレー			4		
25	れんが			1		
26	あずき			2		
27	ピリジアン			1		
28	エメラルド				10	
29	くんじょう				2	
30	ワインいろ				1	
31	つちきいろ				1	
32	ねずみいろ					6
33	たまごいろ					2

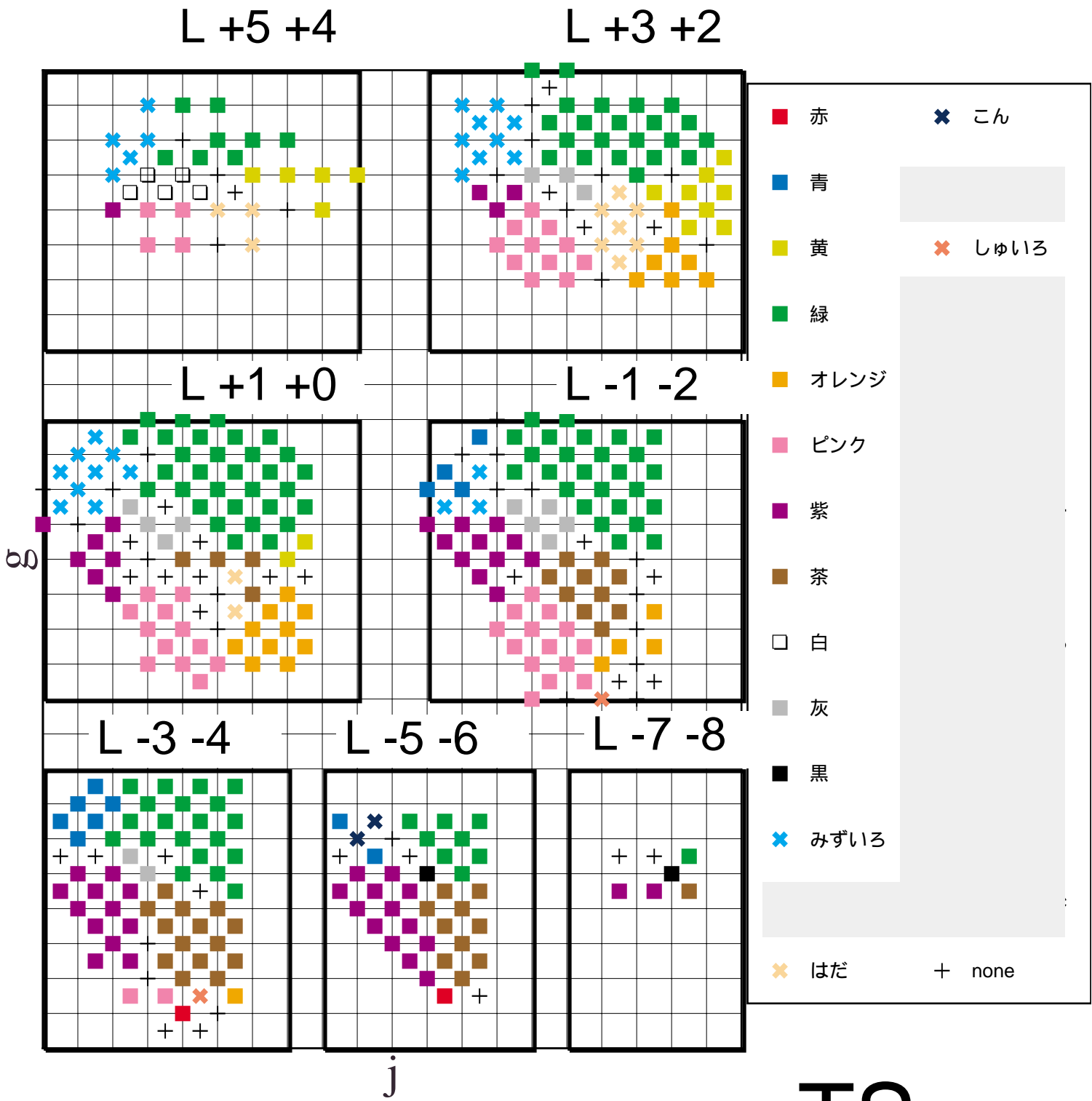
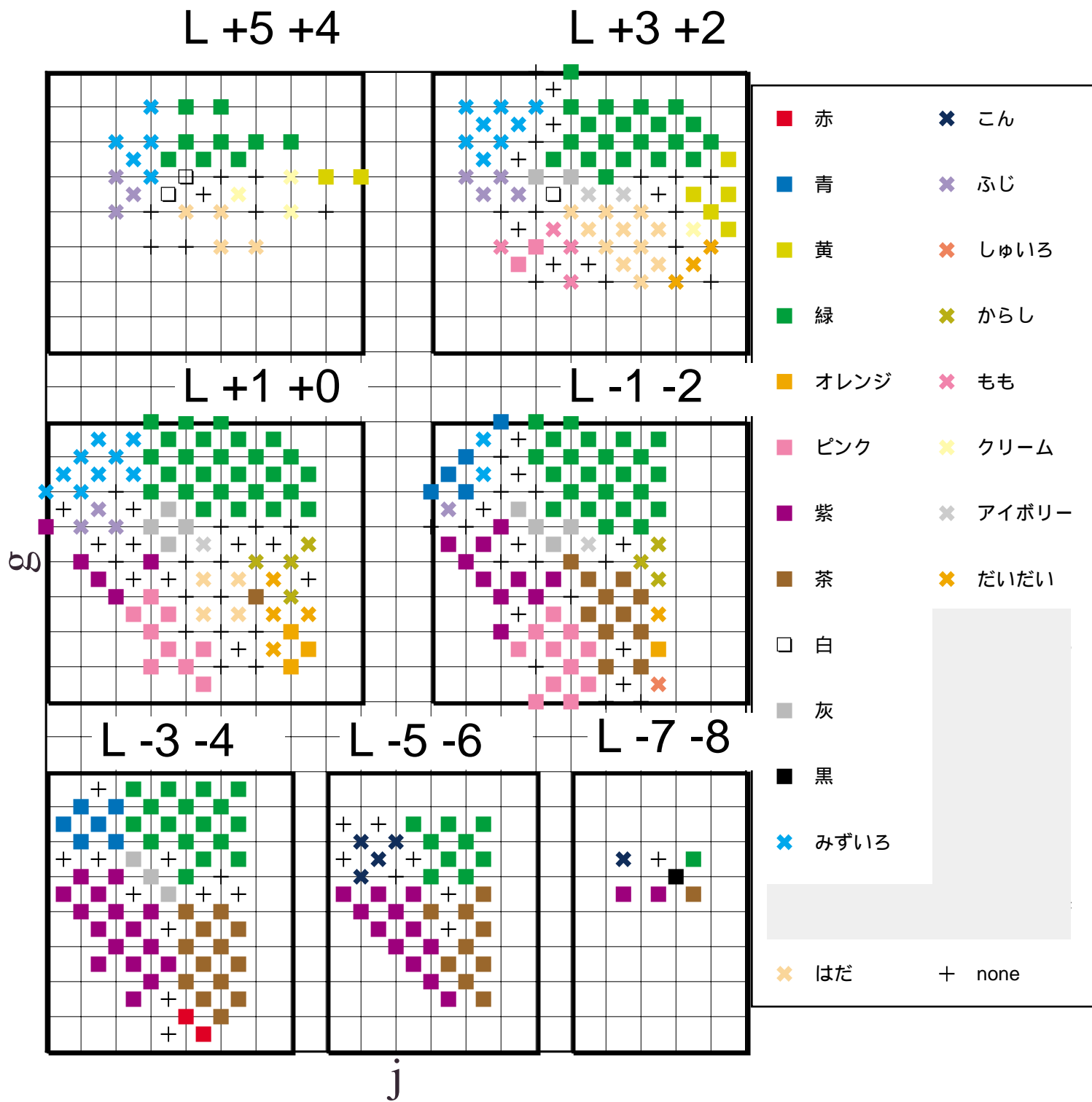
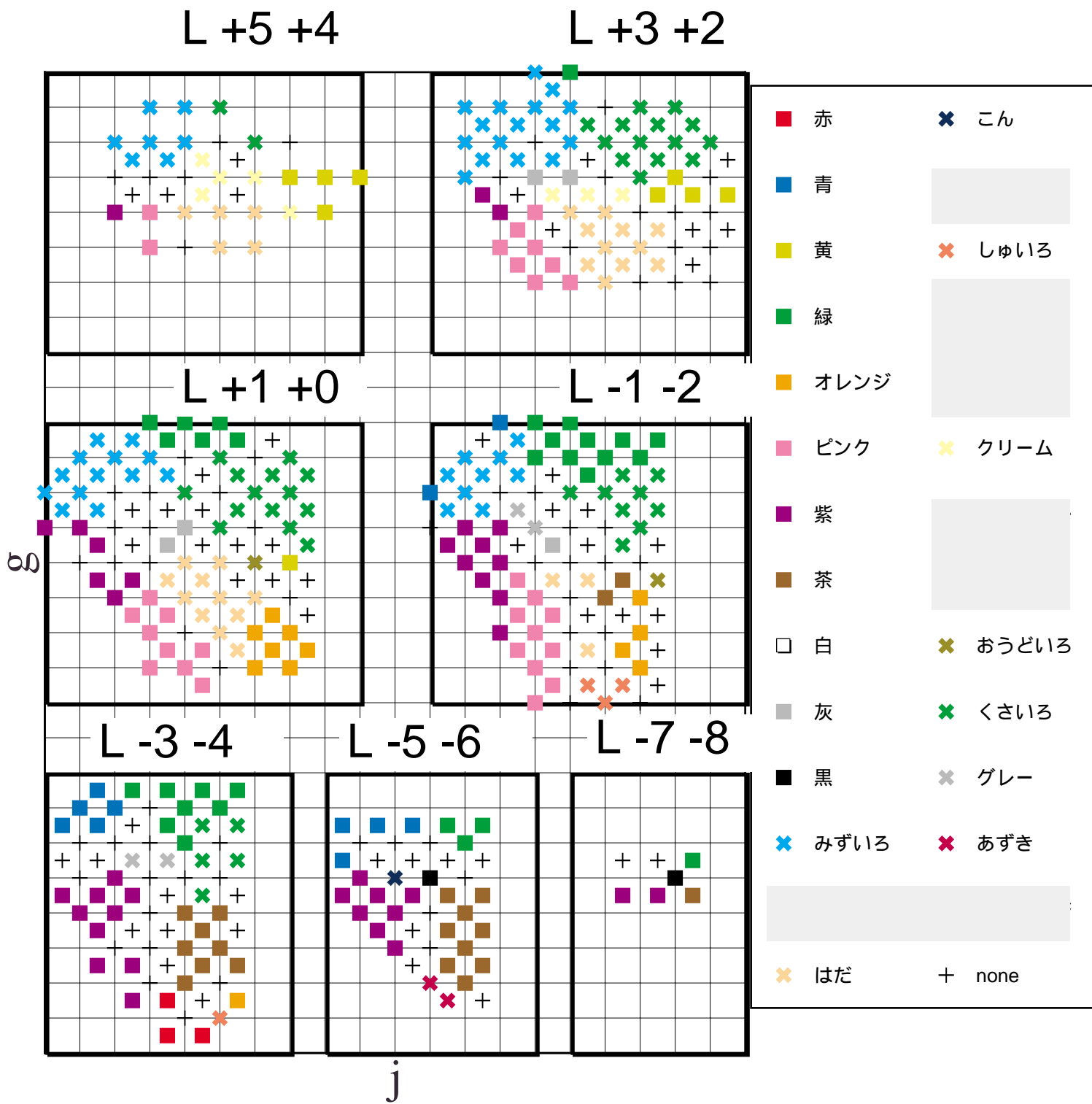


図3.5.1 各被験者の単一語彙カテゴリカルカラーネーミングの結果。OSA色票の配置の特徴として、 L が奇数の面には j, g が奇数の格子点上に、 L が偶数の面には j, g が偶数の格子点上に色票が配置するように設計されている。この特徴から、 $L=+1, 0$ などの隣接する2つの明度面の結果を一つの面上に表示することができる。図中の7つのグラフは、それぞれ2つの明度面の結果を併せて表示している。



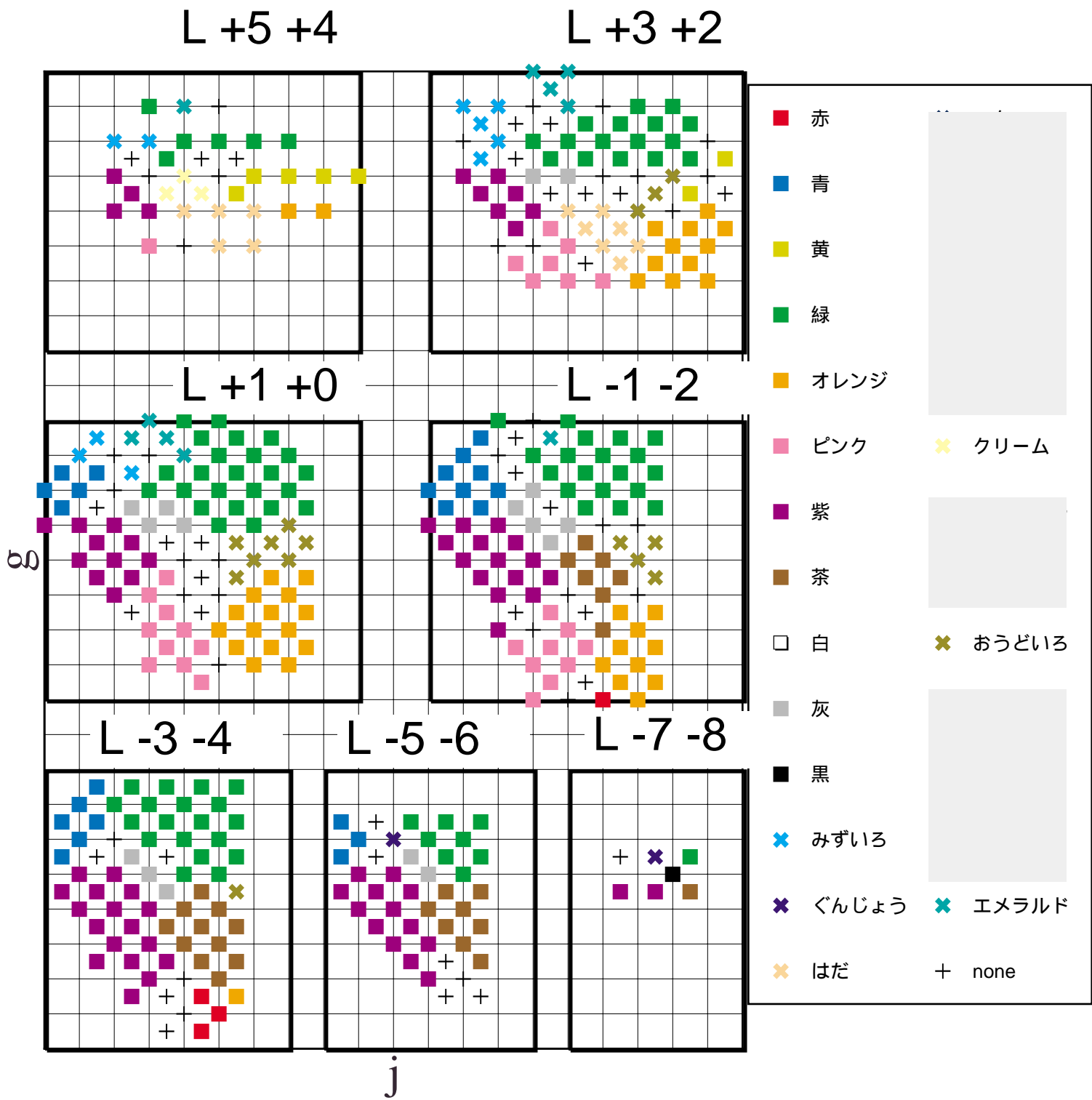
NI

図 3.5.1 (continued)



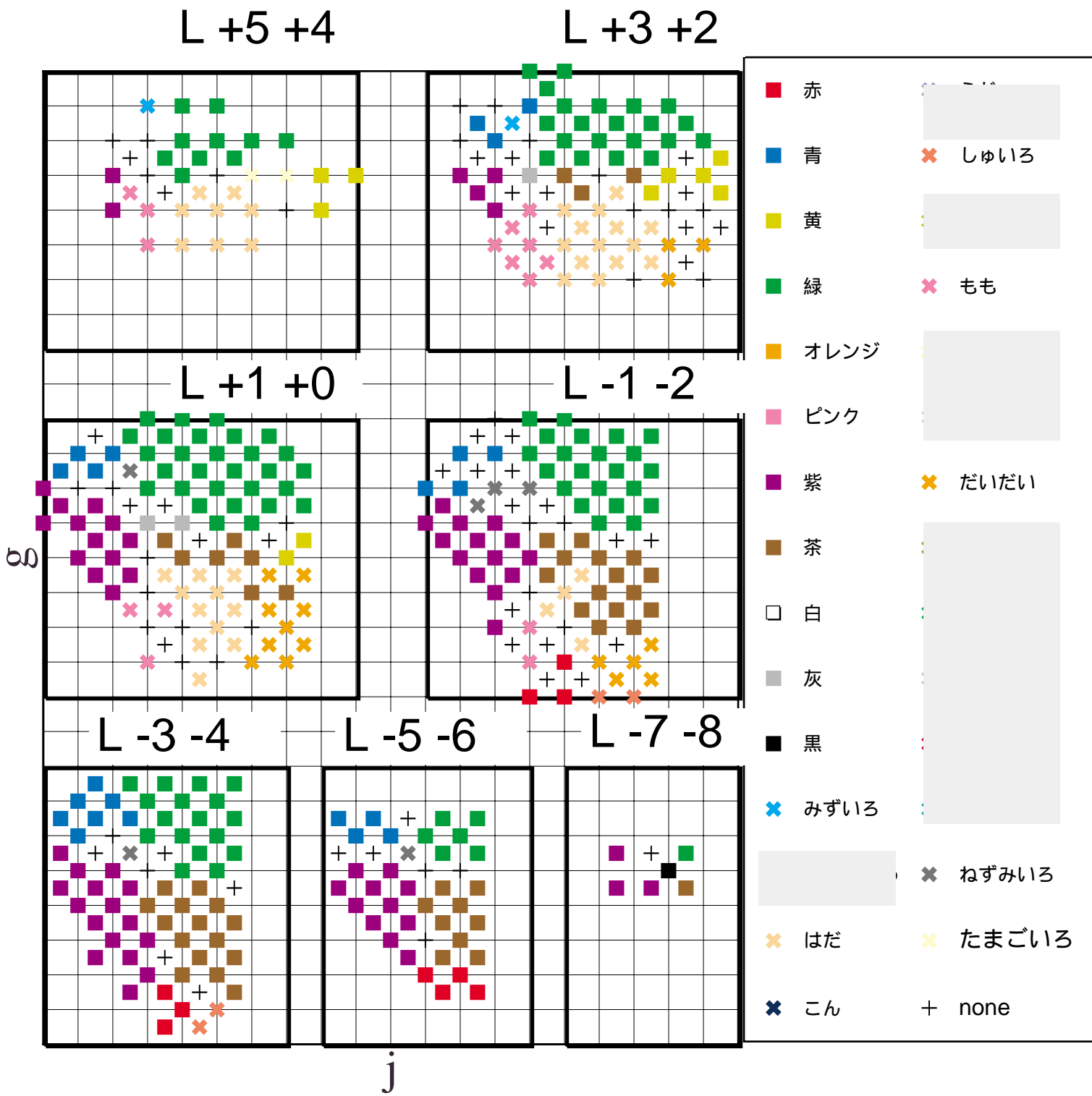
YT

図 3.5.1 (continued)



HY

図 3.5.1 (continued)



MN

図 3.5.1 (continued)

All Subjects 50% consensus

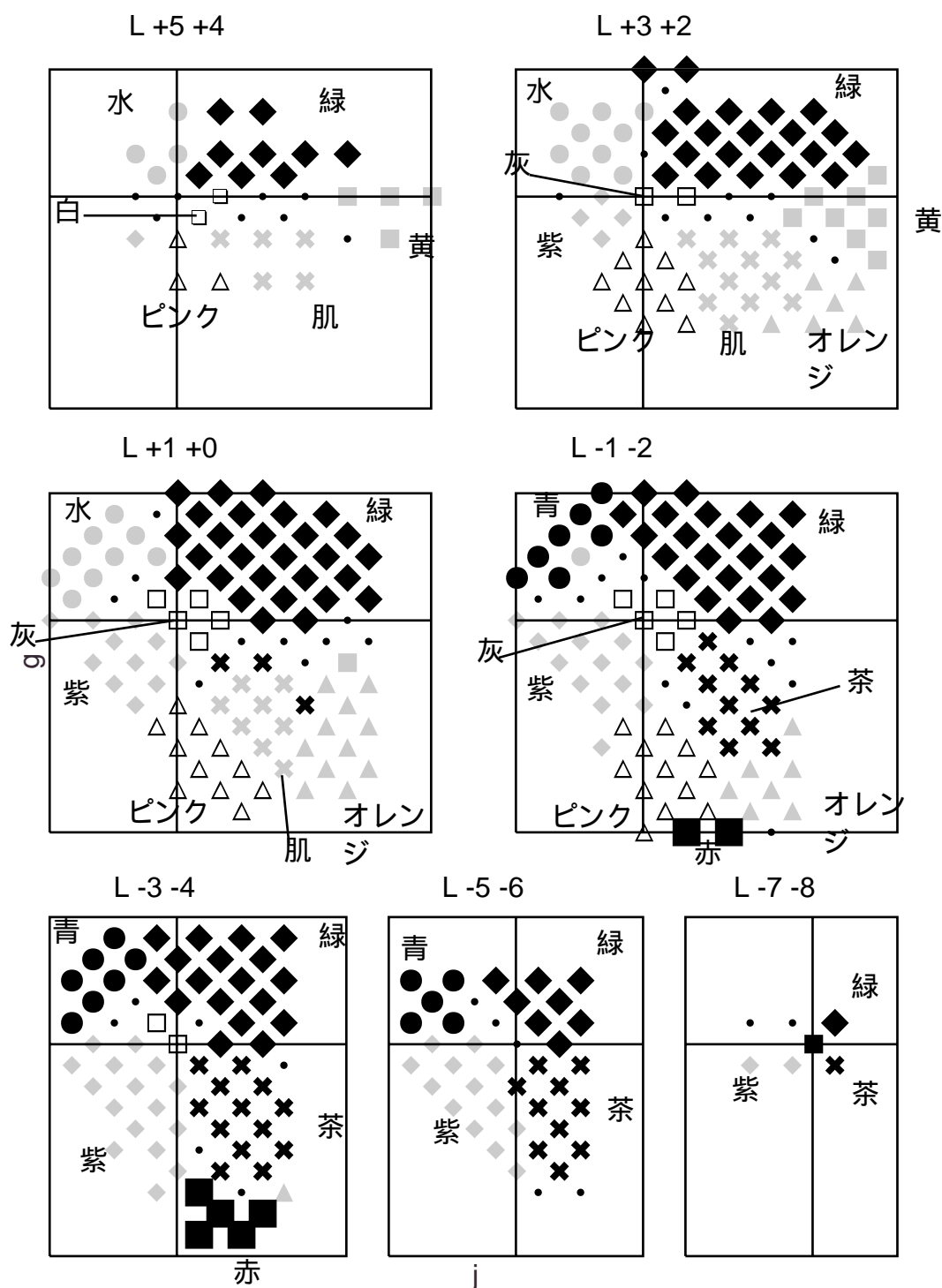


図3.5.2 単一語彙カテゴリカルカラーネーミングの結果の平均 .OSA色票の配置の特徴として，Lが奇数の面にはj,gが奇数の格子点上に，Lが偶数の面にはj,gが偶数の格子点上に色票が配置するように設計されている．この特徴から，L=+1,0などの隣接する2つの明度面の結果を一つの面上に表示することができる．図中の7つのグラフは，それぞれ2つの明度面の結果を併せて表示している．

3.5.4 考察

色分類実験との比較

色分類実験との比較のためには、図3.4.5のように境界線で示す方が好ましい。カラーネーミングによって分けられた各領域の境界線を示す(図3.5.3)。ここでは図3.4.5で示した表現手法と同様の処理を行った。比較のために、分類数11-14の色分類実験で得られた境界の平均を併記する(図3.5.4)。

2つの実験結果が示す境界線は一致している。これは驚くべきことではない。なぜなら、色分類実験での被験者の判断基準として、色名が影響を与えていたことが十分考えられるからである。確かに分類数が多い条件($n=11-14$)は、色名によって色分類を行っていた可能性が高い。少なくともこの一致から、色名による分類は、色分類課題の第4ステージに相当すると言える。

また、被験者固有のカテゴリカルカラーネーミング領域が存在している(図3.5.1と表3.5.1)。大きな領域をしめる例を示すと、NIの「ふじ」、YTの「くさいる」、HYの「おうどいる」が挙げられる。色名の個人差をつきつめると、どのようにしてカテゴリカル色知覚に個人差が生じたのだろうかという疑問になる。この説明として2つの説が考えられる。一つは、各被験者はそもそも異なる色カテゴリーを持っているという説である。もう一つは、色カテゴリーの境界は全ての人に共通に存在するが、多数存在する境界にはそれぞれ強度順位があり、その強度順位に個人差があるという説である。色分類実験から、被験者は色を階層的に部分分割できることがわかった。これを説明するメカニズムとして、色空間内部には強度順位の異なる色カテゴリー境界が多数存在し、その強度順位に従って階層的な色分類が行えるのだと考えるのが適当であろう。このメカニズムで色カテゴリーが決まっていると仮定すると、カテゴリカル色知覚の個人差は、後者の説である可能性が高いと考えられる。

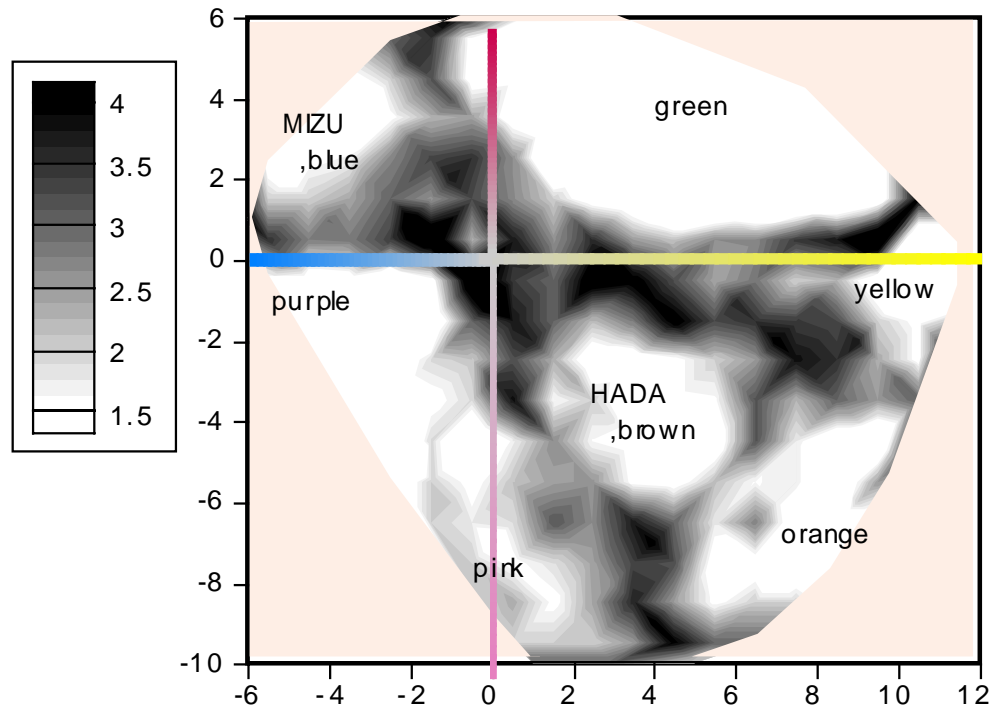


図3.5.3 単一語彙カテゴリカルカラーネーミングによって分けられた色空間 .jg 平面へ投影したものである . データ点が存在する領域を補間して網点の濃度で分類境界の点数を表示する .

Ave 11 ~ 14

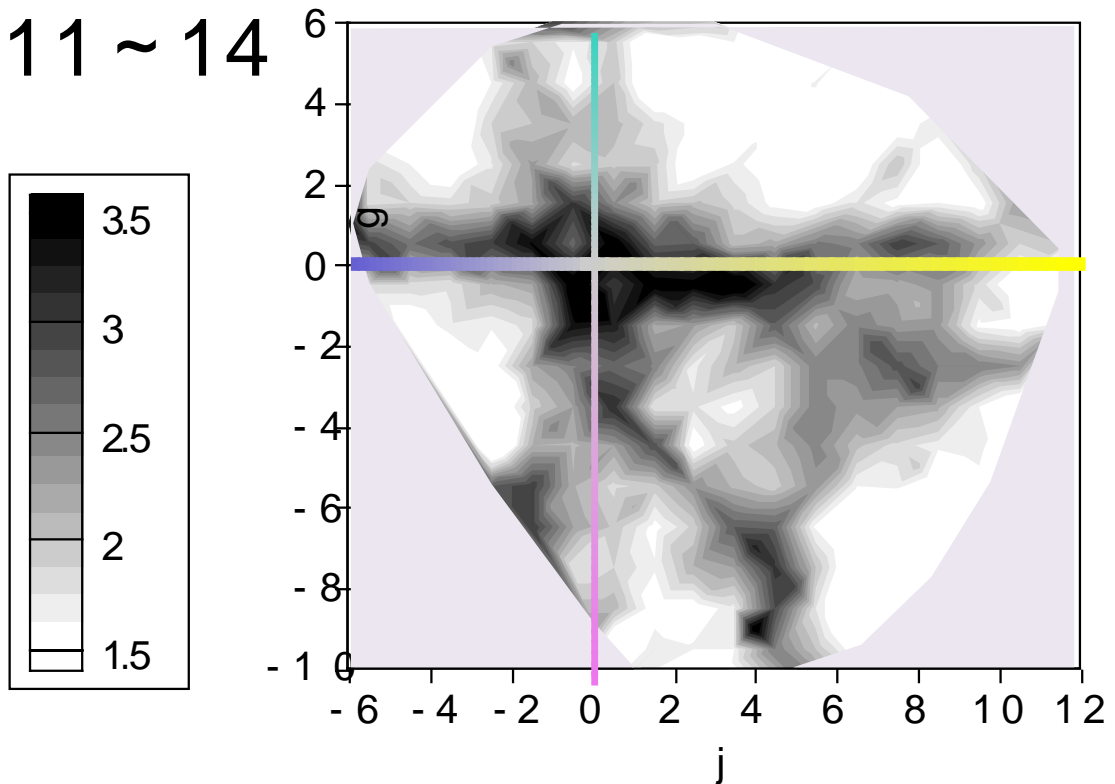


図3.5.4 色分類実験から得られた分類境界 .jg 平面へ投影したものである . ここでは分類数n=11-14の平均を示す . データ点が存在する領域を補間して網点の濃度で分類境界の点数を表示する .

基本11色名との比較

Berlinら(1969)は 発達した言語には共通した11個の基本色名(赤・青・黄・緑・紫・オレンジ・ピンク・茶・白・黒・灰)が存在することを見いだした. 今回の実験結果では 基本11色に加えて 肌色 水色という2つのカテゴリーの存在が明らかになった. 肌色は 茶色とj-g色平面での分布が似ており 明度が高い領域に分布している. 水色も青と同様な関係にあるように見える. 肌色・水色の2色は日本語特有のカテゴリー領域なのであろうか. 少なくとも肌色領域に関しては普遍性を示すデータがある. Boyntonら(1987)が英語を母国語とした被験者集団から導き出した基本11色名の領域を図3.5.5に示す. A Missing Basic Colorという領域を彼らは指摘しており, 図3.5.5のj=+6, g=-3を中心とした明度の高い領域がそれである. この領域は 本実験で得られた肌色領域と一致している. また 水色領域の分割は色分類実験では第3段階で行われている. 基本11色名の分類段階と比較しても後発の分化ではない. またこれらの追加の2色について 本実験結果はUchikawaら(1987)の同様の実験による結果と一致している.

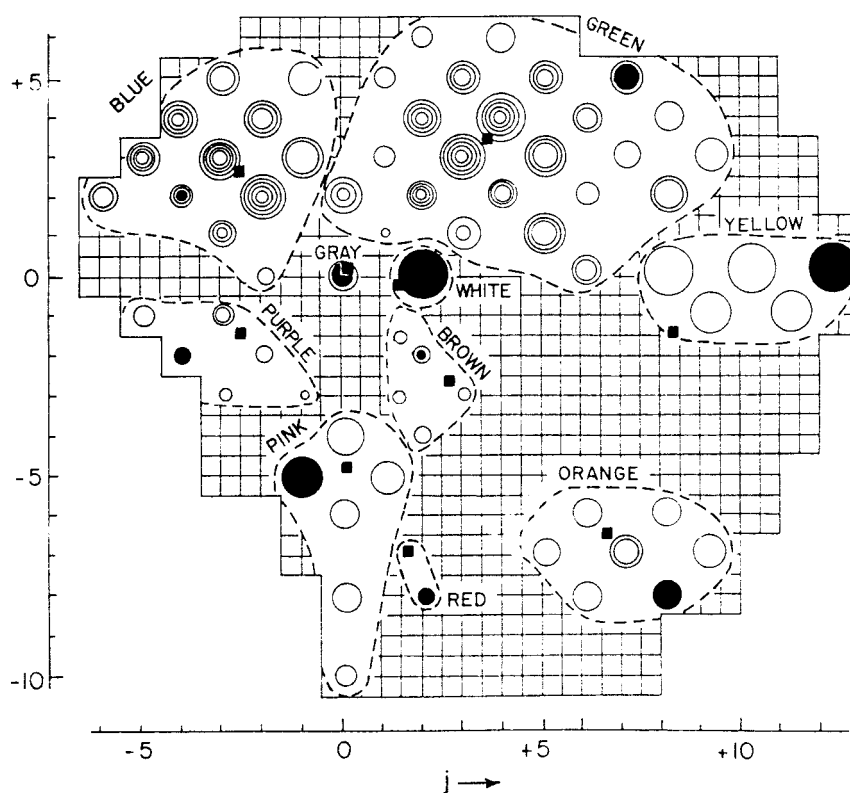


図 3.5.5 Boyntonら(1987)による基本11色名の領域分布. 明度はシンボルの大きさと表現している.

3.6 まとめ

(i) 色分類は、共通の傾向を持って行われる。

ケースバイケースで分割が行われるのではなく、共通の傾向を持っていることが示された。つまり、色空間内にはひとまとめにされやすい色の領域、分割されやすい境界領域が存在するといえる。錐体出力から色空間を考えた場合は色空間は連続的な一様なものでしかない。したがって、色分類の領域は色覚の高次段階で生まれる特性であるといえる。

(ii) 段階的なカテゴリカル色知覚メカニズムに従って、色空間は順に部分分割される。

jg投影面、HueAngle-L投影面、無彩色の3側面からの結果をまとめると表3.6.1のようになる。表3.6.1では各カテゴリーに色名実験の結果を参考に名前をつけて示した。分類数の増加に応じて色空間を細かく分割するプロセスには2つの方法が考えられる。一つの領域を部分分割することで分類数を増やす方法と、二つの領域の間に新たに分類領域を割り込ませて増やす方法である。前者は段階的な分類メカニズムの可能性を示唆し、後者は分類数条件が不安定な分類から安定な分類になったことを示唆すると考えられる。

段階的な分類ということとは、異なる色を一つまとめにするという色知覚のカテゴリカル性に強弱があることを意味している。色分類課題による色カテゴリーの強弱は、言語の進化に応じて発生する基本色の順とも一致していた。このことから、カテゴリカル色知覚はメカニズムとして段階性を持っているといえる。

色分類の数に応じて安定・不安定があることは、分類境界の一致指数で確かめられた。不安定な分類数として2, 5, 9, 11があげられる。この分類数を越えると一致指数は増加し、色カテゴリーの次の段階へと変化するのではないかと考えられる。

(iii) 色名だけを判断基準に色分類は行なわれてはいない。

分類数が増えると、基本11色によるカラーネーミングの結果と類似するようになる。この条件では色分類課題は単に色名を判断基準に行われたのではないか、という意見を否定できない。しかし、表3.6.1からわかるように、基本11色名で分離している色が $n=14$ の条件でも完全に分離していないのに対して、基本11色名では分離していない色が分割されている。それらは、jg面第2象限(青領域)での明度による分割と、jg面第1象限(緑領域)での明度による分割、色相による分割である。前者は単一語彙カラーネーミング実験で得られた水色カテゴリーに相当する。しかし、後者に相当するカラーネーミングの結果は得られていない。カテゴリカル色知覚は言語化によるフィルターで生まれた特性ではなく、色覚メカニズムとして明らかに存在すると結論できる。

表3.6.1 段階的な色分類のまとめ .分類数が増えるに従って色空間がどう分割しているかを示す .

	Stage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Hue angle											Achromatic				
								orange							
								brown							
	270							pink							
								purple							
	180				ao			dark-blue							
							mizu								
90											blue-green				
											dark-green				
											light-green				
0												yellow			

第4章 色差の評価限界

4.1 色差評価の問題点

色差評価の数値化を困難にしている現象として、色弁別閾程度の色度差を積み重ねていくと、知覚される色差とずれが生じるといったことが知られている。色差を均等に記述しようと試みた均等色空間は数多く提唱されているが、上に挙げたような理由で統一的に表現することは難しく、条件に応じて使い分けるといった方法がとられている。また、より大きな色差を与えようとする、そもそもの色差の数値評価が困難になる傾向がある。このような色差評価基準の変化や、評価が困難になる理由は十分解明されていない。

4.2 主観評価による限界設定実験

4.2.1 目的

本研究は、色の差を広げることで、色差評価・判断にどのような変化が示されるのかを調べるものである。二つの色の差がかなり大きい場合、色の差はすでに数値的(量的)な知覚ではなく、質的な差に知覚されるようになることがある(図4.2.1)。本研究では特に、この点に着目して実験を行う。また本実験は、色覚メカニズムの初期段階を基準にして色差知覚の高次段階の特性を調べることに相当する。

4.2.2 方法

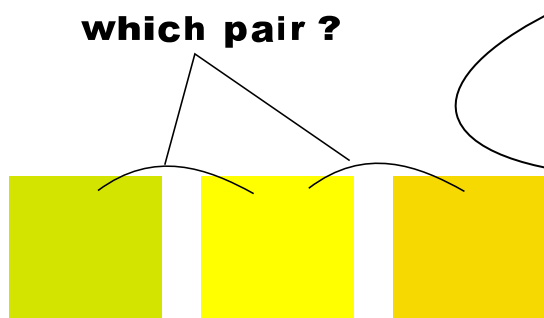
原理

色差の評価・判断が変化することを積極的に取り出すために、特定の色の組み合わせに対する色差知覚の評価基準が小色差の場合の評価基準と同じかどうかを判断させる実験を行った。トレーニングセッションとして、OSA空間での最近接の色刺激組の色差評価を行うことで色差評価基準を覚え、その後刺激組の差を変化させ評価基準がトレーニングの刺激組の場合と同じかどうかを応答する。OSA空間は隣接するすべて格子点間での等色差が保証されている(MacAdam, 1974)。そのため、均等な差を積み重ねること、すなわちOSA空間での距離を離していくことで判断基準の変化がどのように生じるのかを測定できると考える。

Question,

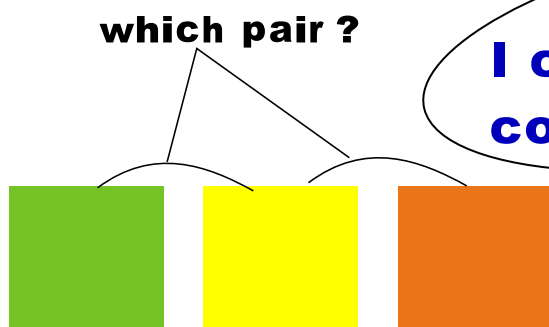
Can you see which pair has smaller perceptual color-difference?

[within small difference]



Yes, I can compare these color-differences.

[over large difference]



I cannot evaluate the color difference...

Is there any change in Color-Difference perception!?

図4.2.1 参照の色差が極端に離れると色差評価が困難になる例 .どちらの色差が大きいか判断できるだろうか？色差が小さい場合と大きい場合 .

装置と刺激

被験者ブースは暗室になっており、外部から光が入らないようになっている。室内はD65蛍光灯2本により照明されており、卓上の中心部が照度200 luxになるように蛍光灯の位置が調節されている。机表面はOSA明度 $L=-2$ に相当する灰色で塗装されており、その上にCRTモニターが置いてある(図4.2.2)。被験者からCRTの視距離は50cmで、刺激サイズは視角6度。図4.2.3に示すように、一辺5cmの正方形のOSA色票が横に3枚並んで置かれた状況をシミュレートした刺激呈示を行う。刺激の間隔は0.5cmである。両端の2つが参照刺激で、中心が被験者がトレーニングセッション時に色を調整する刺激である。

参照刺激として用いる色度を図4.2.4に示す。これらは $L=-2$ と $L=+2$ の明度面の中から選び出している。ここで $L=-2$ の無彩色点は 16cd/m^2 で、 $L=+2$ の無彩色点は 30cd/m^2 である。等OSA明度面は色度によって反射強度が異なるため無彩色での輝度のみを示すことで刺激強度の表記とする。色票は二枚の組み合わせとして呈示されるため、色票組での総当たりを組み合わせとして用いた。色票組として定めたのは、各明度面内での軸方向とg軸方向の各列、それと2つの斜め方向である。

実験は次に示す二つのセッションに分かれており、順に行われる。(1)まず初めにトレーニングセッションを行う。ここで2つの刺激組として呈示される色票は、OSA単位で2unitつまり最近接の色票組だけに限る。ここで最近接の組だけを刺激として用いるのは、小さな色の差での色差評価を記憶させ、次のセッションでの判断基準として用いるためである。被験者は二つの色票の中間に相当する色をCRT上に作り出す。この色調整を通じて最小単位での色差評価を記憶する。(2)次に、色票組内での総当たりの色票組に対して、トレーニングセッションで記憶した色差の評価と同じ判断基準で色の調整が可能かどうかを被験者に尋ねる。すなわち(1)で記憶した小色差の量的な評価が、色の質的な差へと変化していないかについて着目してもらい、その変化を(yes/no)で尋ね、これを結果とする。

被験者

被験者はTS(23)、KK(24)の二名で、色覚正常の男性である。

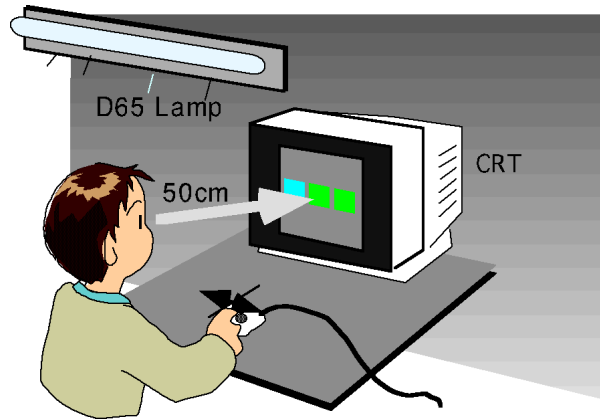


図 4.2.2 装置の概略図

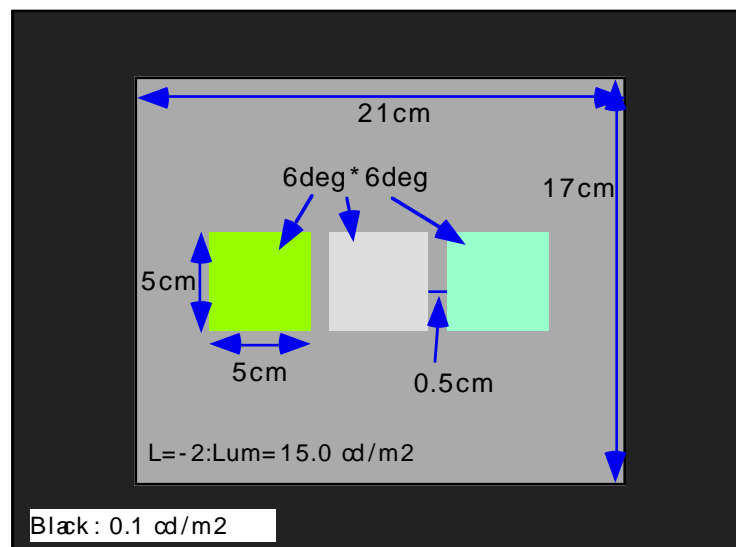
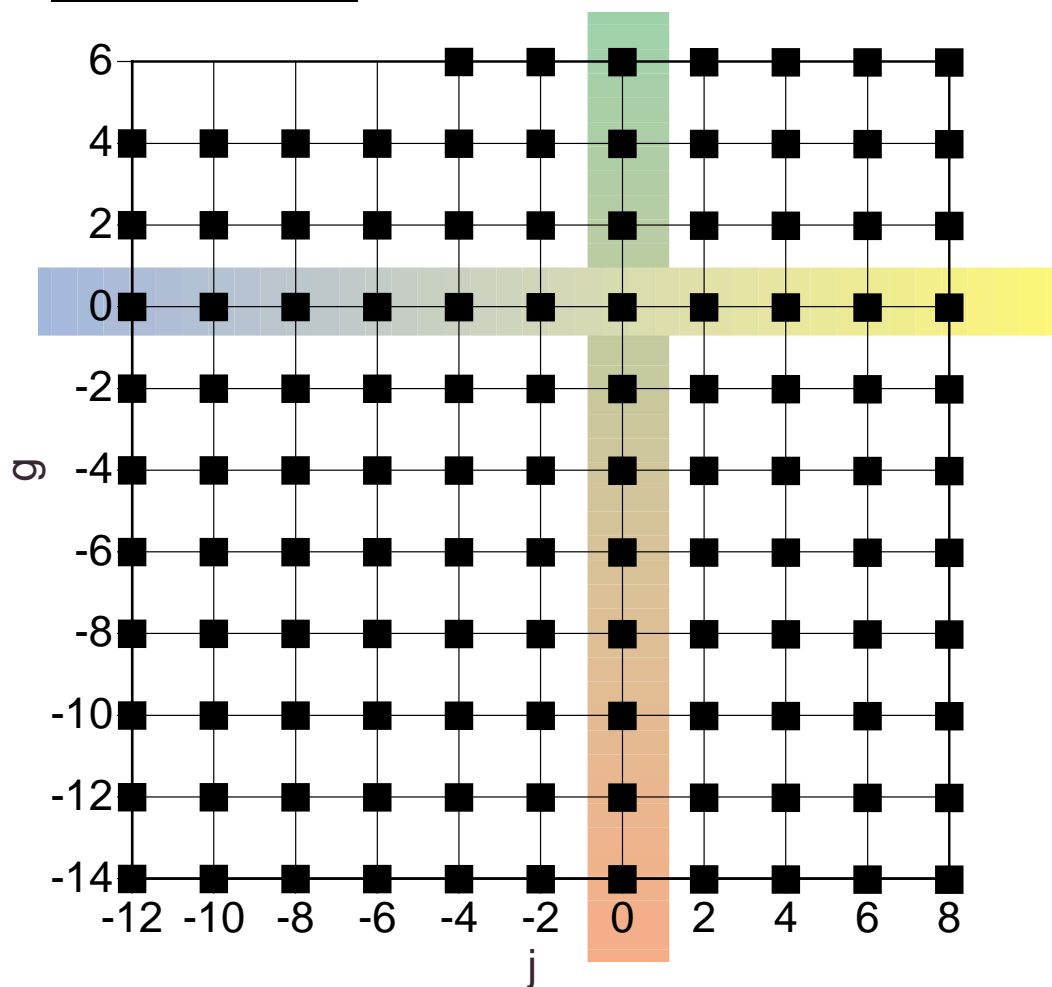


図 4.2.3 刺激の見え

Stimuli $L=+2$

OSA



xy

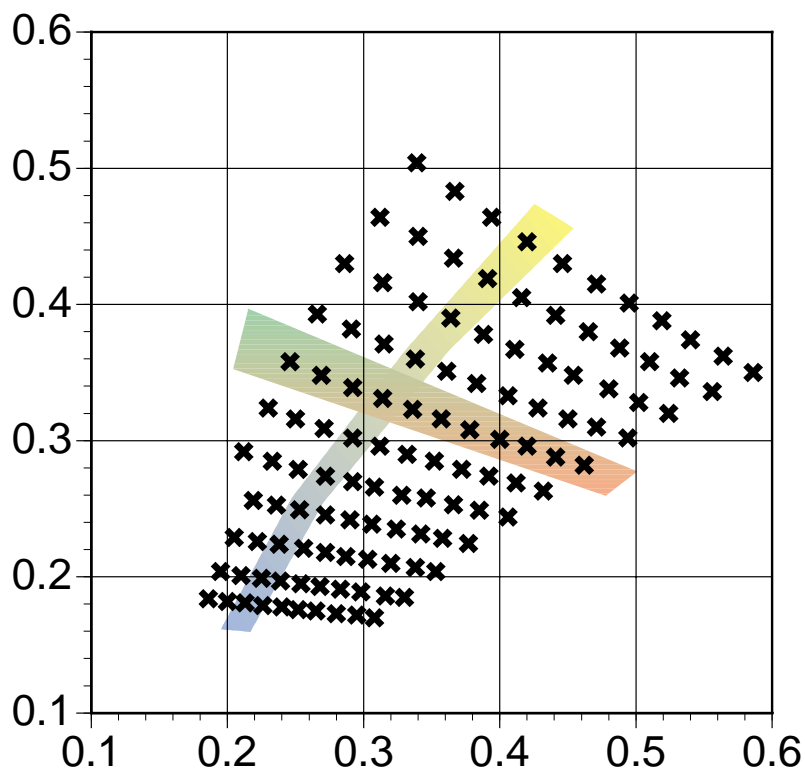
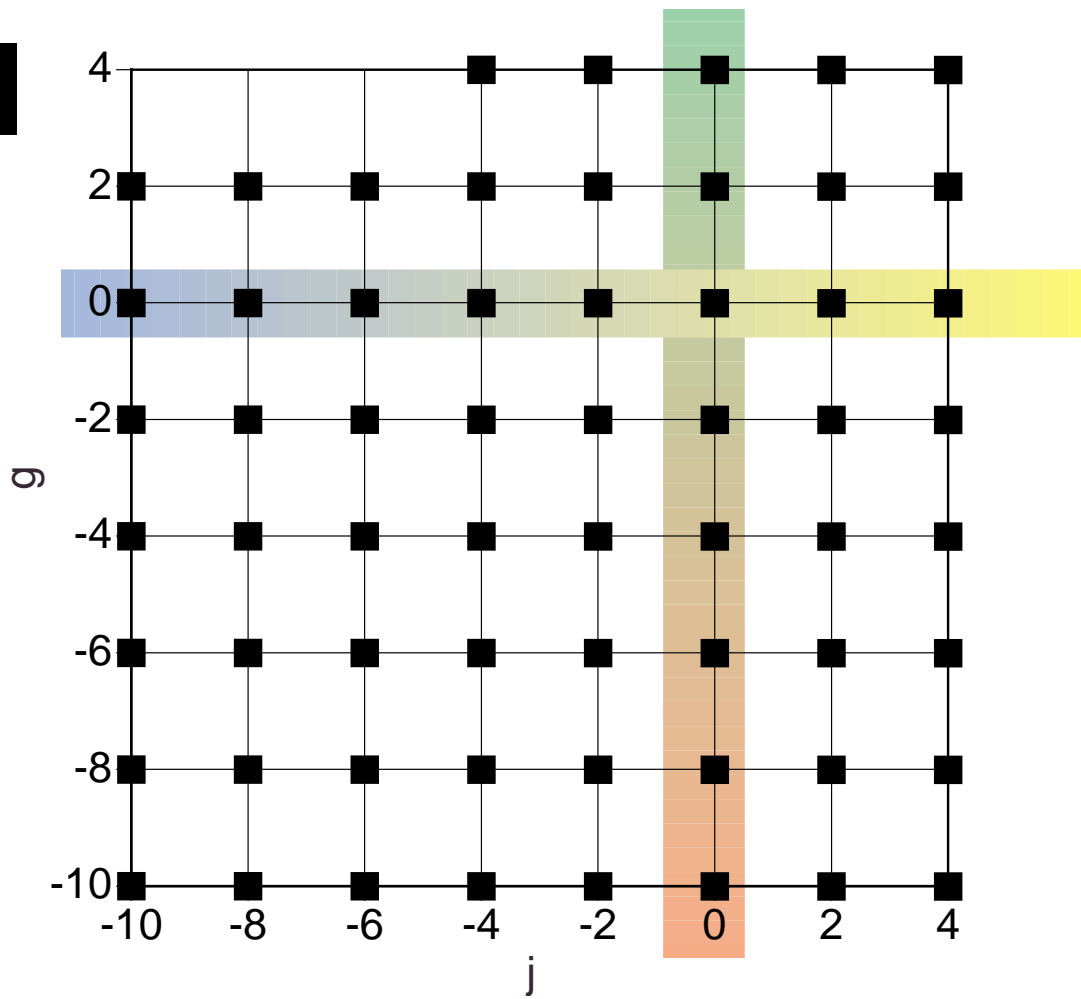


図 4.2.4 参照刺激の色度点 .

$L=-2$

OSA



xy

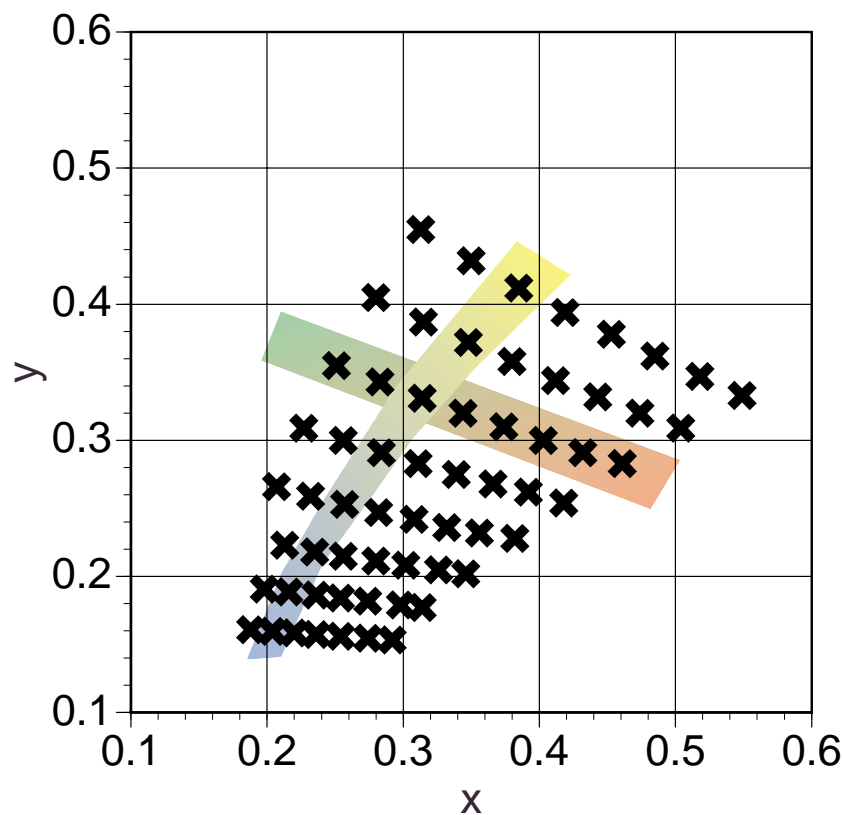


图 4.2.4 (continued)

4.2.3 結果

色の調整結果

本実験の目的は色差評価の判断基準の変化を求めることであるため、色の調整結果については省略する。ただし、行われた調整は2つのセクションを通じて安定しており、調整タスクに関して問題はないと考えられる。

判断基準の変化が起こる色度差について

図4.2.5に結果の例を示す。OSAユニットで一定以上離れたときに色差評価の判断基準の変化が起きていることが示されている。これを色差の評価限界と呼ぶことにする。注目すべき点として色差の評価限界が一部に集まっている傾向がある。図4.2.5では $g=+2, -6$ に集中していることがわかる。

もし、色差の評価限界がOSAユニットで一定値離れた色で起きるのならば、このような限界の集中はみられないはずである。つまり、集中が見られた領域に色空間内での特異点として性質があると考えられる。そこで色差の評価限界をすべての刺激系列に対して求めて、色平面上にプロットしたものが図4.2.6である。明らかに色差の評価限界が特定領域に集中している。その特定領域とは、1) g 軸方向系列での $j=0$ の線上、2) 軸方向系列での白色点近傍と白色点から右下(第4象限)方向と左下方(第3象限)に伸びる曲線領域である。また、それぞれの系列で色差の評価限界が交差しているということがある。例えば図4.2.6では g 値が増える方向と減る方向での色差の評価限界が重なり合っていることである。

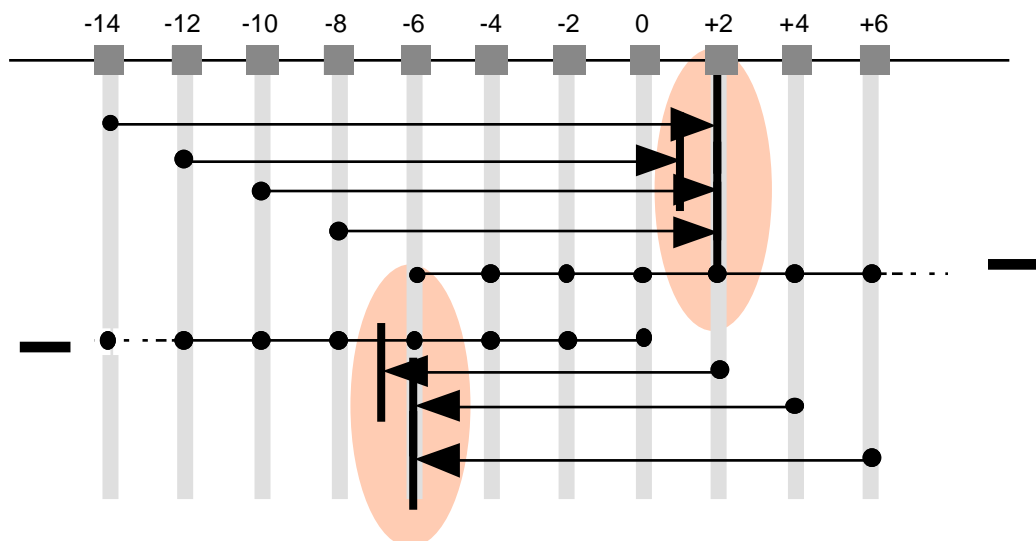


図 4.2.5 結果の一例 . g 軸に平行な刺激系列 ($j=+8$) に対する色差の評価限界の求め方

RESULTS $L=+2$

Distributions of the limits of color-difference estimation are drawn with short li

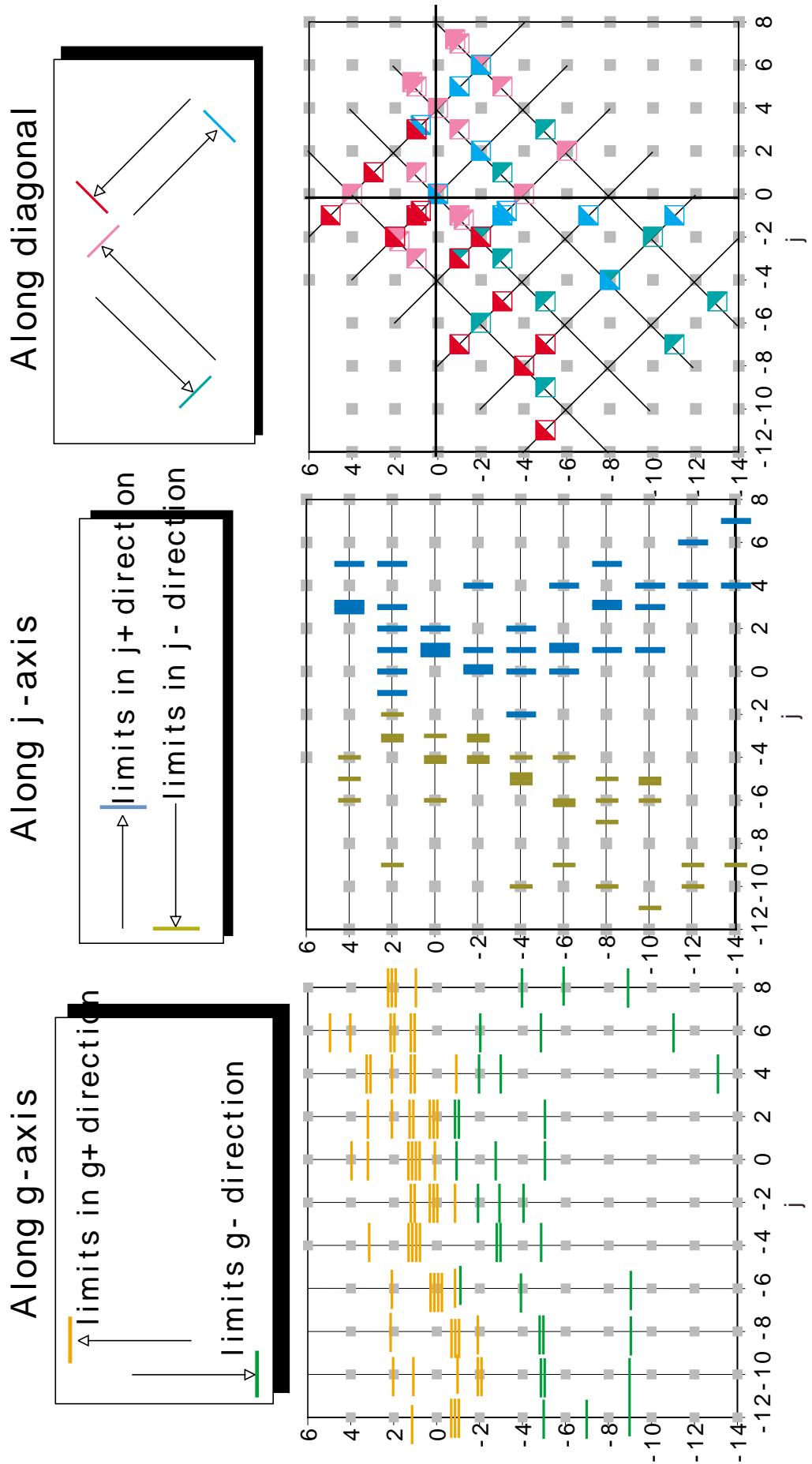
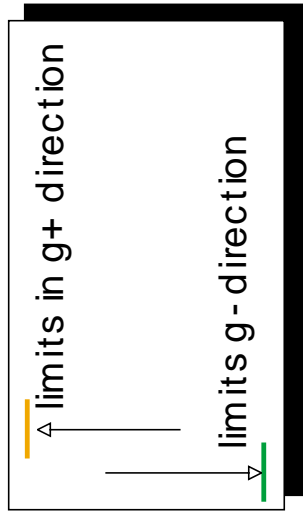


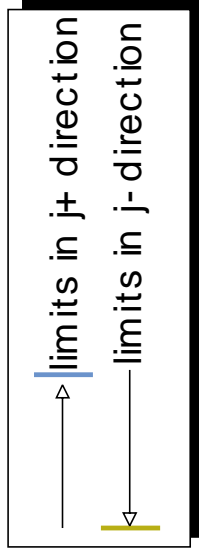
図4.2.6 色差の評価限界の色空間内の分布．各明度ごとに，縦系列，横系列，斜め系列にわけて表示する．

$L = -2$

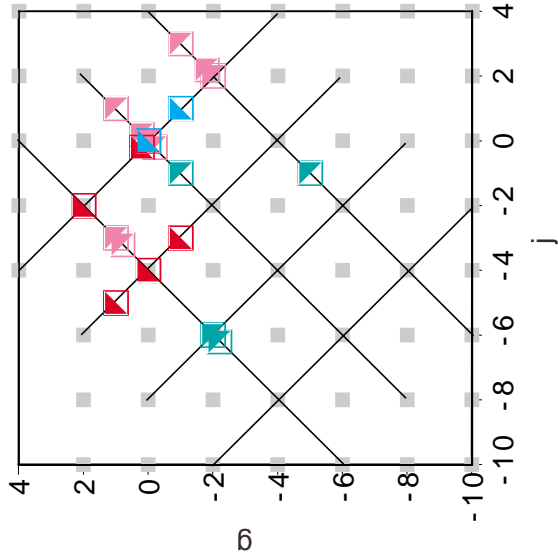
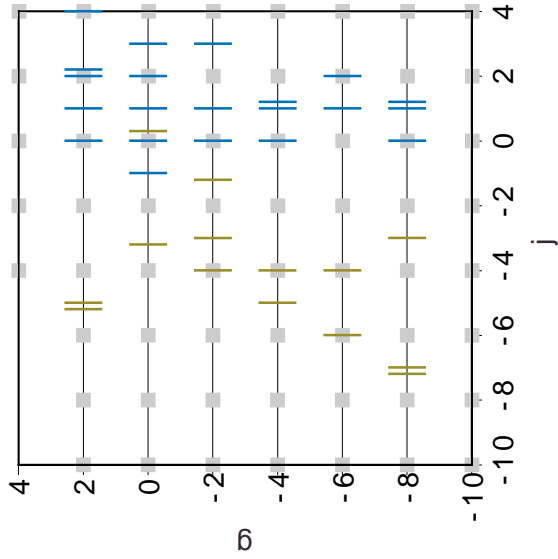
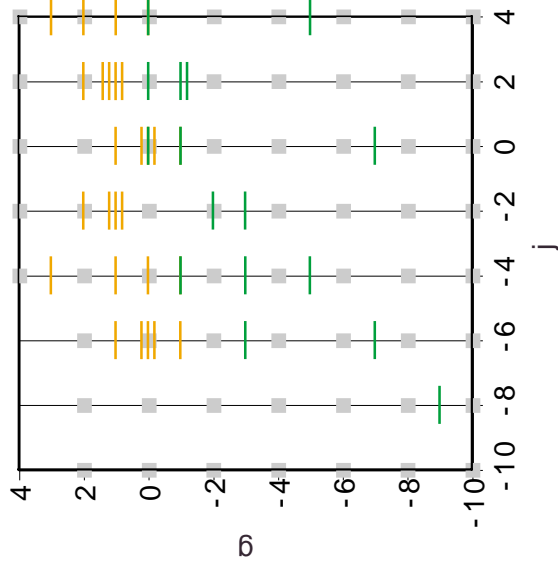
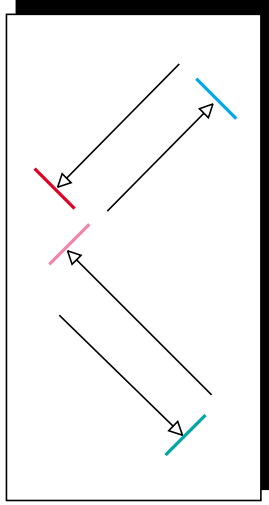
Along g-axis



Along j-axis



Along diagonal



4.2.4 考察

色差評価の限界が局所的に集まっているという結果から次のようなことが示唆される。色差評価ができるかどうかは、対象となる色の組が色空間の中である特定の境界領域をはさむかどうかによって決まっているのであり、OSA色空間での距離によって決まっているのではない。

色差の判断基準の限界とは何であろうか。小さな色差を評価する場合は、色差の量的な知覚があるため色差を数値評価したり中間に相当する色の調整をすることは容易である。しかし、刺激の色票組が限界線をまたぐ条件の場合、色差の量的な知覚は失われ色の質的な差の知覚が主となるため、色差の数値評価は困難となり中間色に相当する色の調整ができなくなってしまうのではないだろうか。刺激の色差が大きくなって行くに従い、以上のようなメカニズムに沿って色の調整の可能・不可を判断しているのではないかと考えられる。

このような色の質的な感覚を捉えるものとして、色のカテゴリー性が考えられる。そこで色の分類実験から得た結果(分類数11-14)を今回の実験結果に重ねて比較する(図4.2.7)。今回の実験結果から得られた色差の判断基準の限界線の分布の特性に、ここであてはめた色の分類実験の特性が良く一致することがわかる。このことは、色差判断基準の変化は、その二つの色刺激がカテゴリー境界をまたぐかどうかによって決まるのではないかと示唆するものである。

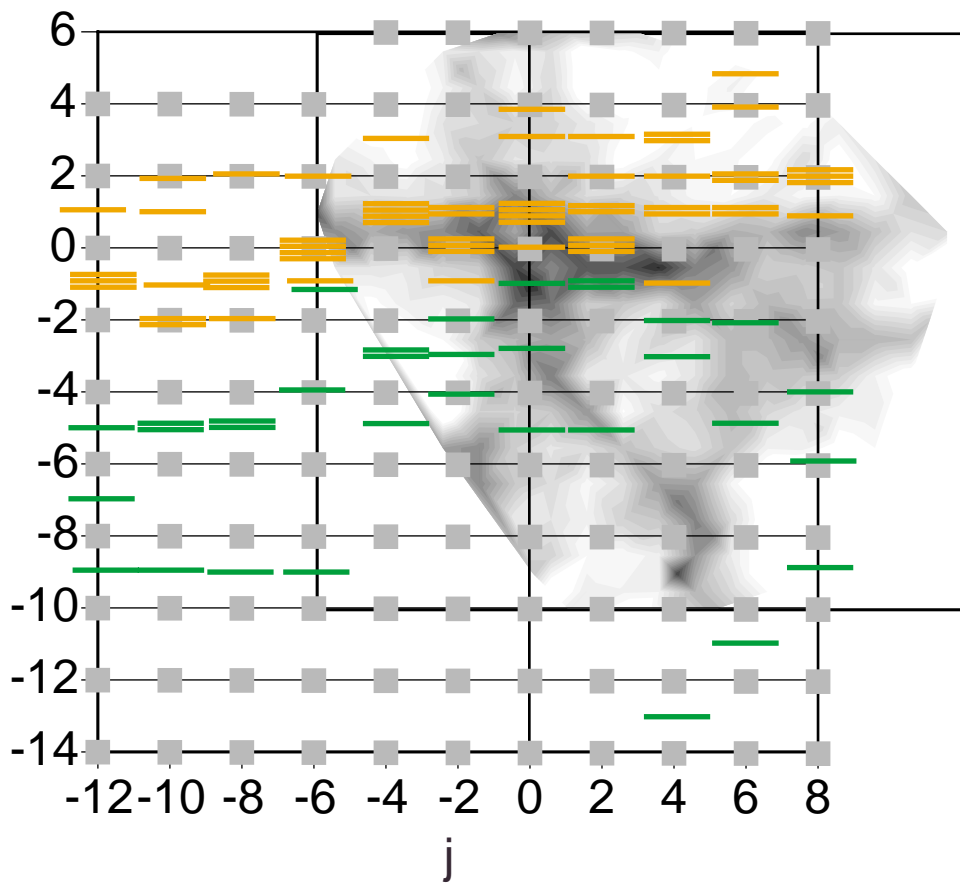
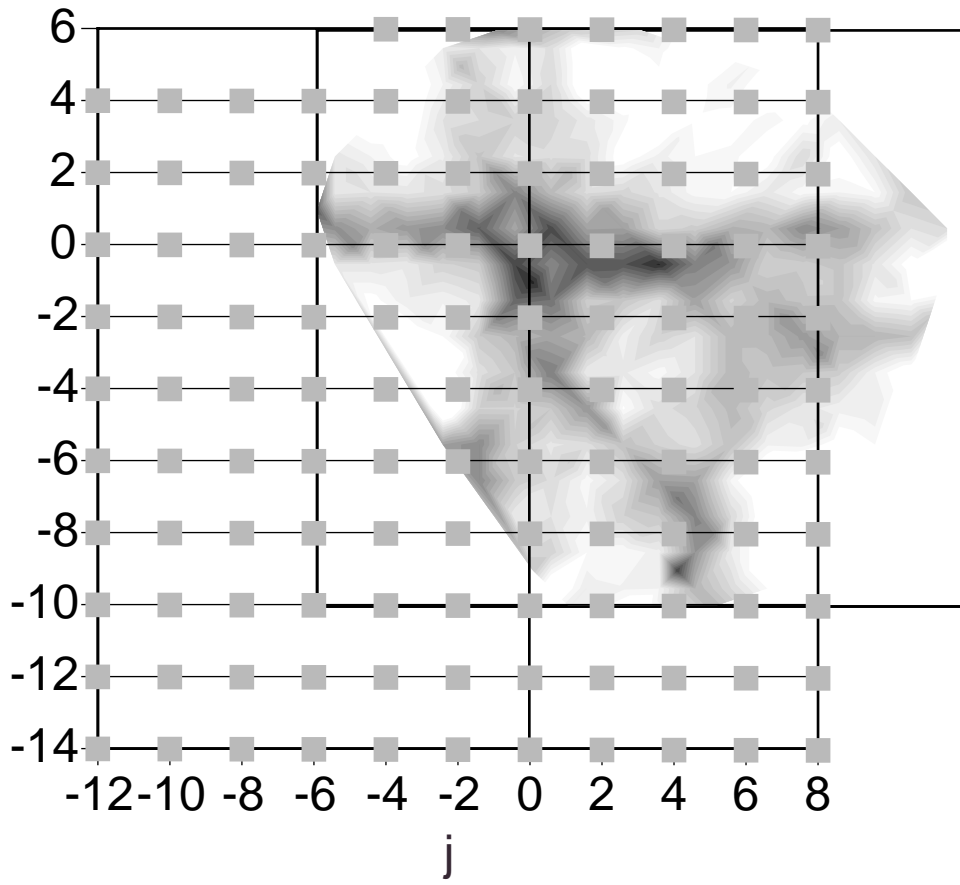


図 4.2.7 色差の評価限界と分類実験で得られた境界の比較

第5章 色差の評価基準の変化

5.1 色差の記述を困難にする原因

色弁別程度で均等である色差を同じだけ積み重ねたとしても、その色度によって感じられる色差に差が生じる場合がある。そこで、色差の数量化する試みとして、中間色の設定実験を行う。

現在、決定的な均等色差空間は構築されていない。その原因の一つに色差評価に対して色空間の線形性が維持されていないことが考えられる。例えば、2色刺激の色度差が小さい場合と大きい場合で色差評価の判断基準が変化したならば、色空間の一樣な表現は難しいだろうと考えられる。そもそも、黄色と薄い黄緑といった小さな色差の評価と、赤と緑といった極端に大きな色差を評価する場合とでは、色差知覚そのものに違いが生じていると考えられる。参照刺激の色差を大きくすると第4章で求めたように、色差の評価限界が現れる。しかし、この限界は主観評価によって求められたものであるので、実際に中間色の設定実験で調整点にどのような特徴が現れるのかに付いて調べていない。

そこで、異なる2つの参照色を呈示し、それらの中間点に相当する色を作り出す実験を考える（Fuchida, 1985）。呈示する色刺激の色度差に応じて、色差評価がどのように変化するのだろうか、色差評価の変化を捉えられるだろうか、色差評価の判断基準に変化が生じるならば、その変化は何によって決定されているのかを考察する。

5.2 中間色設定実験 1 : 色平面内の 2 次元操作による色設定条件

5.2.1 装置と刺激

暗幕で仕切られた実験ブース内に、D65蛍光灯2本による照明がある。視距離60cmのCRTモニタ上に一辺視角5.4°の正方形刺激が横に3つ、間隔0.8°をあけて呈示される。背景刺激として、OSA色票明度 $L=-2$ の灰色($j,g)=(0,0)$ を模擬した輝度 20.10cd/m^2 、 $(x,y)=(.3139, .3309)$ の灰色で、サイズは横 35° 縦 25° である。3つ並んだ刺激の両端の2つが参照刺激である。中心に呈示されるのが被験者の調整用の刺激である。装置、刺激の見えについては第4章のものと同様である。

中間色の設定を色平面内から選び出す条件として二つの系列をピックアップした。参照刺激として呈示する色度点はOSA色票の明度 $L=0$ 、 $j=+2$ の色度点から7点(刺激系列1)、 $j=0$ の色度点から7点(刺激系列2)選んだ。それぞれの色度点を図5.2.1に示す。輝度は、無彩色点で 30cd/m^2 である。

5.2.2 被験者

色覚正常、眼鏡による視力補正の2名、いずれとも心理物理実験の経験を有する。

5.2.3 手続き

各刺激系列の参照刺激から異なる2つの色をランダムに抽出し、同時に呈示する。被験者は、調整用刺激の色を、2つの参照刺激間の最も近い中間点へと調整する。参照刺激の組み合わせは21組ある。参照刺激の左右の呈示位置を入れ替えた条件でも呈示するため、合計42組で1セットになる。これを4回繰り返すことで、1つの組に8点のデータが得られる。

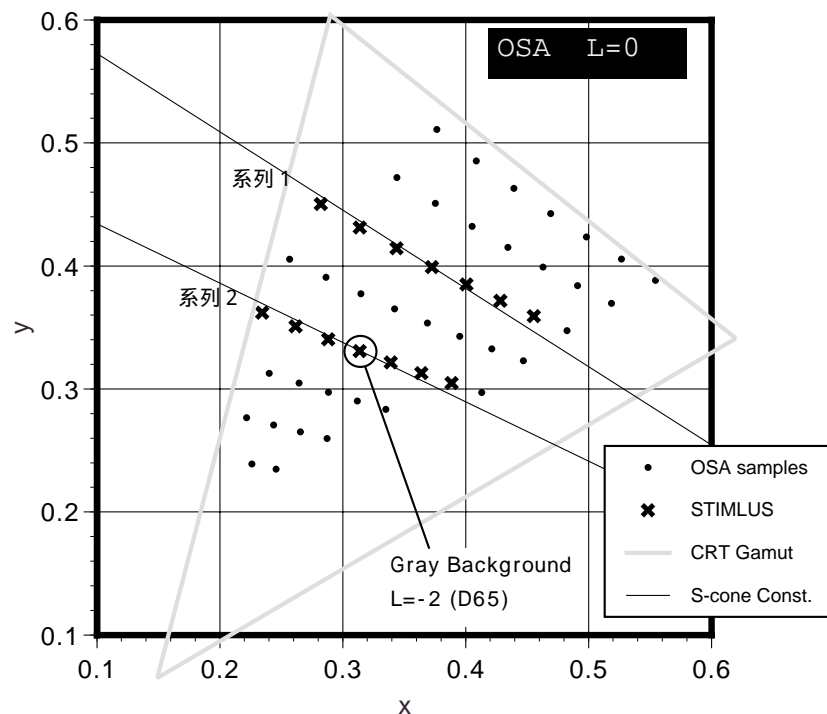


図 5.2.1 条件 1 の参照刺激の色度点

5.2.4 結果・考察

図5.2.2に刺激系列1の結果を示す。参照刺激として与えた色のペアが1,2 stepsの場合には、データ点のばらつきが相対的に小さい。両被験者を通じたばらつきの傾向として、白色点とを結んだ線上に大きな広がりがあることが解る。この傾向は、参照刺激の色度差が大きくなり、中間点のばらつきが相対的に大きくなった結果に対しても言える。白色点から放射状に伸びた線にばらつくという結果は、等色相線にそってばらついているとも考えられる。つまり、色の中間点の判断基準の一つとして、色相が採用されていると考えられる。参照刺激の色度差が大きくなると、ばらつきが大きくなるだけでなく、データ点の平均値の被験者間の差異が大きくなっている。具体的には、KKは彩度が高い方へデータ点が移動しているのに対して、SHは参照刺激を結んだ線上にばらついている。これは、KKは参照刺激の中間点として等彩度を求める傾向があるのに対して、SHは測色的に線形に近い判断基準を持っていると考えられる。ただし、KKについてもばらつきが大きいことから、判断基準の曖昧さ、可変性を含んでいるとも言える。

図5.2.3に刺激系列2の結果を示す。刺激系列1の結果から、色の中間点の決定に色相が重要な役割を果たしていると考えられた。刺激系列2の刺激点は、白色点を通る直線状に並んでいるため、色相以外の判断基準について調べることができるだろう。1~3stepsのペアまでの、参照刺激のペアの色度差が小さい範囲では、参照刺激の並ぶ線に対して垂直な方向へのずれはほとんどない。参照刺激がほぼ等色相であることから、色相が判断基準として強く関与しているのならば、参照刺激の並ぶ線上に収まると考えられるだろう。よってこの結果は、判断基準として色相が重要であることを強める結果である。では、参照刺激の並ぶ線方向でのずれはどうであろうか。参照刺激の色度差が小さい範囲では、色味の評価つまり彩度の評価を調べたことに他ならない。

参照刺激の色度差が大きくなると、すなわち、4steps以上離れたペアに対して、データ点のばらつきが大きくなる。ここで4steps以上離れたペアに共通する点がある。それは、参照刺激がかならず白色点を挟んだペアであることである。つまり、次の仮説が考えられる。白色点を挟んだ色のペアに対しては、判断基準は曖昧になるだろう。そこで、参照刺激として3steps離れたペアのうち、白色点を挟んだペアに対する結果をみると、果たしてばらつきが大きい。しかしながら、次のような考えもある。白色点を挟んだペアは色相が全く異なっている。判断基準として色相が重要であるならば、白色点を挟んだペアに対してばらつきが大きくなるのは当然であろう。

色差評価には、色弁別閾上程度の微小色差、色の差分を評価する中色差、カテゴリー的に色を区別するカテゴリーカル色差、の各段階があると考えられる。小程度の色差評価には評価の限界色度差があり、その限界は、色カテゴリーの境界によって決まっている可能性が示唆されている(第4章より)。呈示する色差を広げていくと色差評価の限界に近づき、小色差評価とカテゴリーカルな色差評価の2つの判断基準が入り交じることが考えられる。白色点を挟むことによるばらつきの増大は、色カテゴリーの境界を

越えることで色差評価が困難になったことを示す結果であると考えられる。この仮説の問題点として、判断基準が困難になったと考えられる参照刺激が4steps以上離れた色のペアに対しても、確かにばらつきは大きい。色が中間点を調整できているということがある。調整ができた理由として、消極的な色調整が考えられる。消極的というのは、目的の色に向かって積極的に色を調整しているのではないということから名付けた。しかしながら、この考えは被験者の内観報告によるものであり、より客観的な実験結果として示していかなければならない。

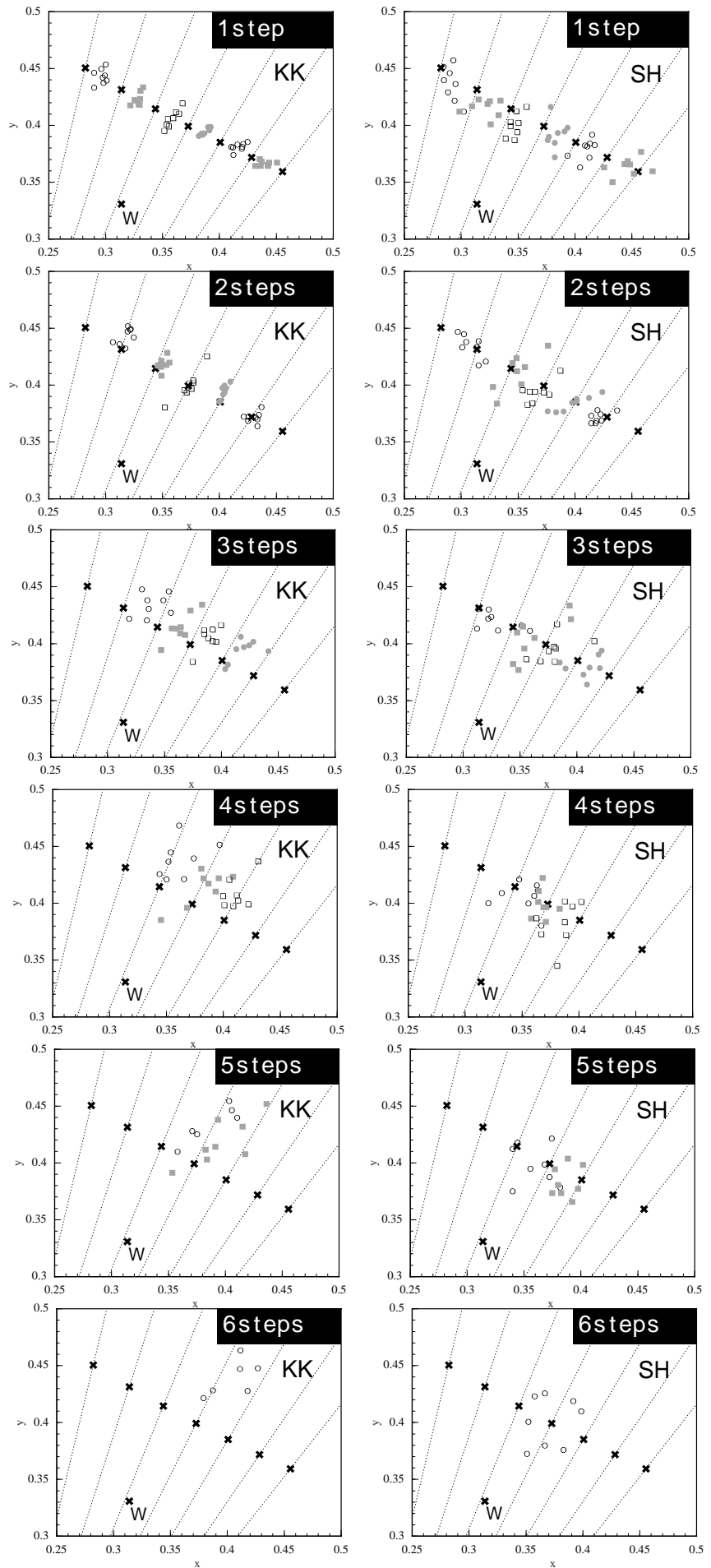


図 5.2.2 刺激系列 1 の実験結果

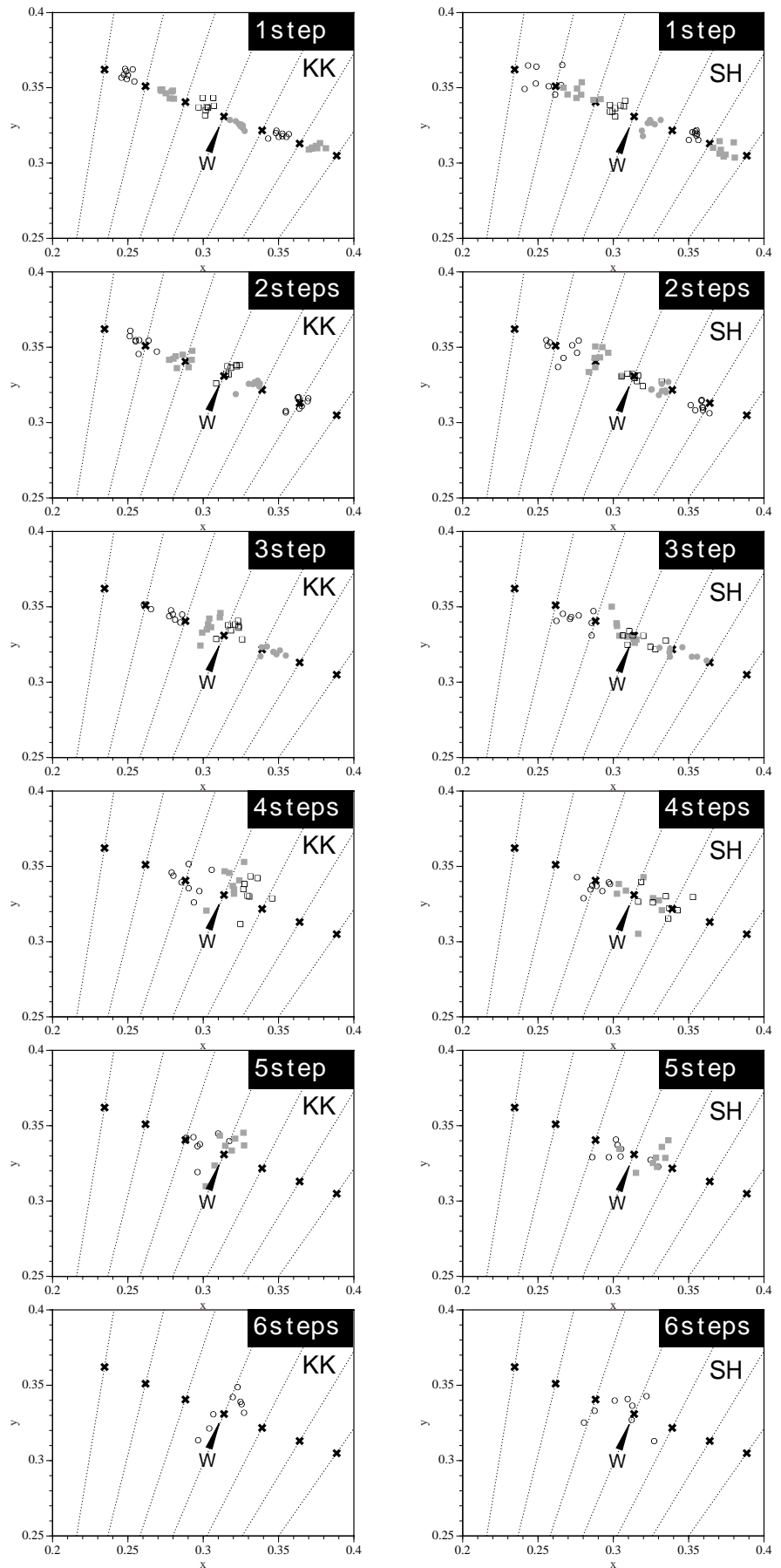


図 5.2.3 刺激系列 2 の実験結果

5.3 中間色設定実験 2 : 参照刺激間を結ぶ直線上での色設定条件

5.3.1 装置と刺激

装置及び刺激の見えは実験1と同様である。

色の調整を1次元に限定する場合を考える。なぜ限定したのかというと、次の3つの理由がある。第一に、調整を1次元直線に限定することによって、色空間の線形・非線形性を調査できると考えられる。第二に、調整点ばらつきをSDで数値化するのが容易である。条件1での考察で調整点のばらつきに注目すべき点があった。より客観的にばらつきを調査するためには一次元上のSDによる数値化が有効であろう。第三に、被験者の労力軽減がある。平面から選ぶ場合と比べてかなり楽である。よって多くの色度条件に対して実験を拡大することができる。

参照刺激の色度点として選んだの図5.3.1の8系列である。その内訳は軸に平行な3系列、g軸に平行な2系列、白色点を通る斜めの2系列、無彩色の明度方向の変化を示す系列である。

5.3.2 被験者

色覚正常、心理物理の経験を有する3名。そのうち2名が眼鏡による視力補正をしている。

5.3.3 手続き

条件1と以下の点を除いて同様。刺激系列のすべての組み合わせで中間色の設定を行うのではなく、各系列の両端の刺激点に対する組み合わせのみを行う。実験1で行った総当たりの場合よりも、組み合わせの数は少ない。

すべての系列を同時に混ぜだめて行う。どの系列が選ばれるかはランダム順である。各系列の中からランダムに参照刺激が選ばれる。同じ条件で5回の繰り返し試行を行う。参照刺激の呈示位置が左右で入れ替わる条件をふくめて、計10点のデータが得られる。実験は、一人の被験者につき4日間を要した。

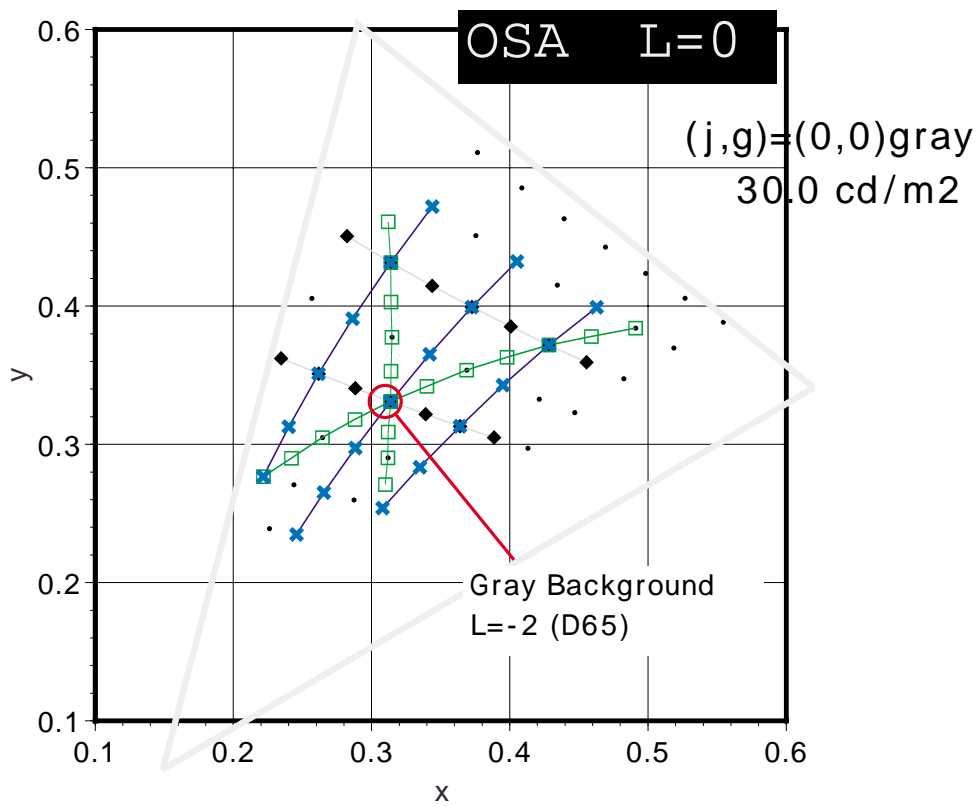
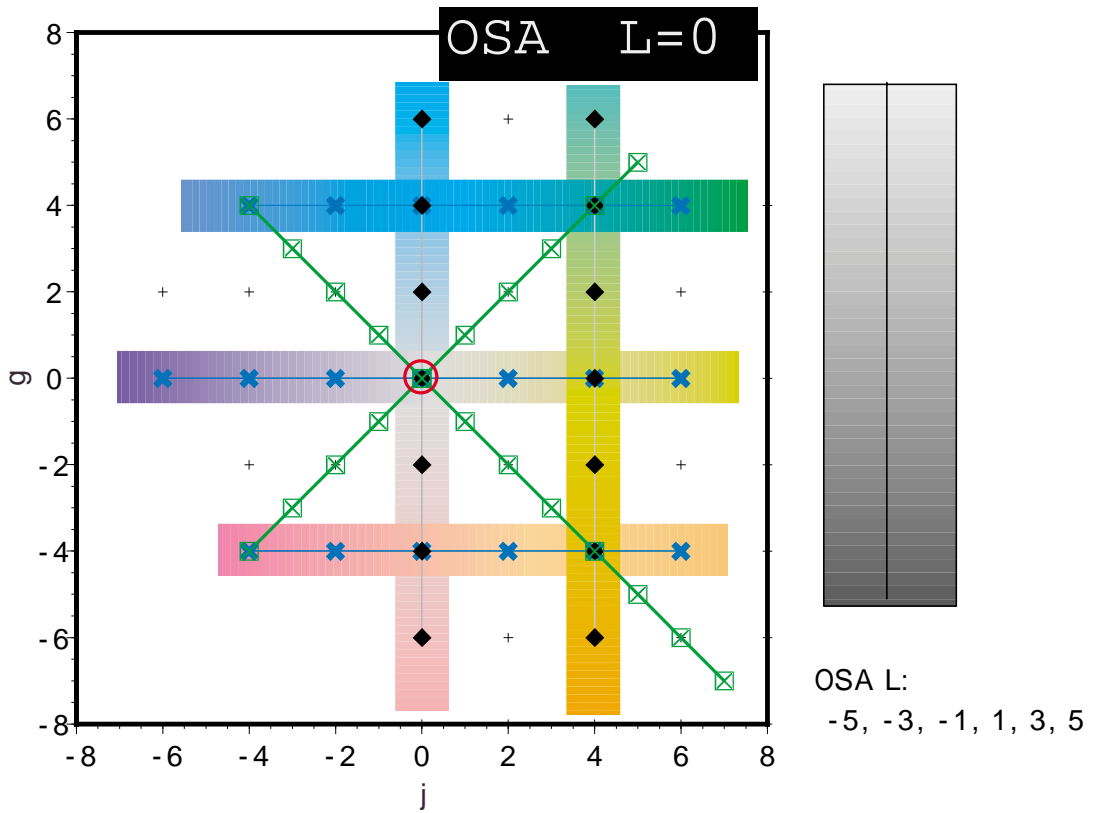
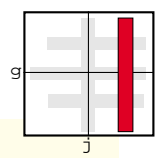


図 5.3.1 参照刺激と 8 つの系列

5.3.4 結果

OSA色空間に対して色差評価が線形・非線形であるかどうかを見るために、OSA空間内で中間点との比較を行う8つの系列ごとに分けて、3人の被験者の結果を図5.3.2に示す。まず $j = +4$ (オレンジ～黄色～緑)の系列と $j = 0$ (ピンク～灰色～水色)の系列について $g = 0$ の領域を変曲点としたS字型のカーブを描いている。少なくともこの変曲点(黄色)に中間色の設定基準が依存していることが示唆される。次に $g = +4$ (青～緑)の系列について、OSA色空間に対して色差が大きくなると中間点が青側にずれる傾向を示している。変曲点がないことから参照色差に対して色差知覚のバランスがずれることだけが起きたと考えられる。次に $g = 0$ (青～灰色～黄色)の系列について $j = 0$ の領域を変曲点としたS字型のカーブを描いていることが見られる。少なくともこの変曲点(白色)に中間色の設定基準が依存していることが示唆される。次に $g = -4$ (ピンク～オレンジ)の系列について、OSA色空間に対して色差が大きくなると中間点にずれが生じているが、ほぼOSA空間に対して線形であると言える。最後に無彩色点を通る斜めの系列2つについて述べる。それぞれ無彩色点領域を変曲点としたS字型のカーブを描いていることが見られる。少なくともこの変曲点(白色)に中間色の設定基準が依存していることが示唆される。また、無彩色の明るさ方向に対しては、OSA空間に対して線形性が示された。

図5.3.2 中間色の設定色度とSD。横軸が刺激の組み合わせの違いで、両端が色差小、中央が色差最大である。シンボル及び色の違いが被験者の違いを示す。10回の繰り返し設定の全データを平均値を結んだ線とともにプロットしてある。OSAユニットに線形な中間点設定が行われていた場合の直線を重ねてある。中央部の色づけられた領域は第4章で得られた色差の評価限界を超えた色差条件である。下のグラフは横軸が同一で縦に調整のSDをプロットしたものである。



Results; $j=+4$ line

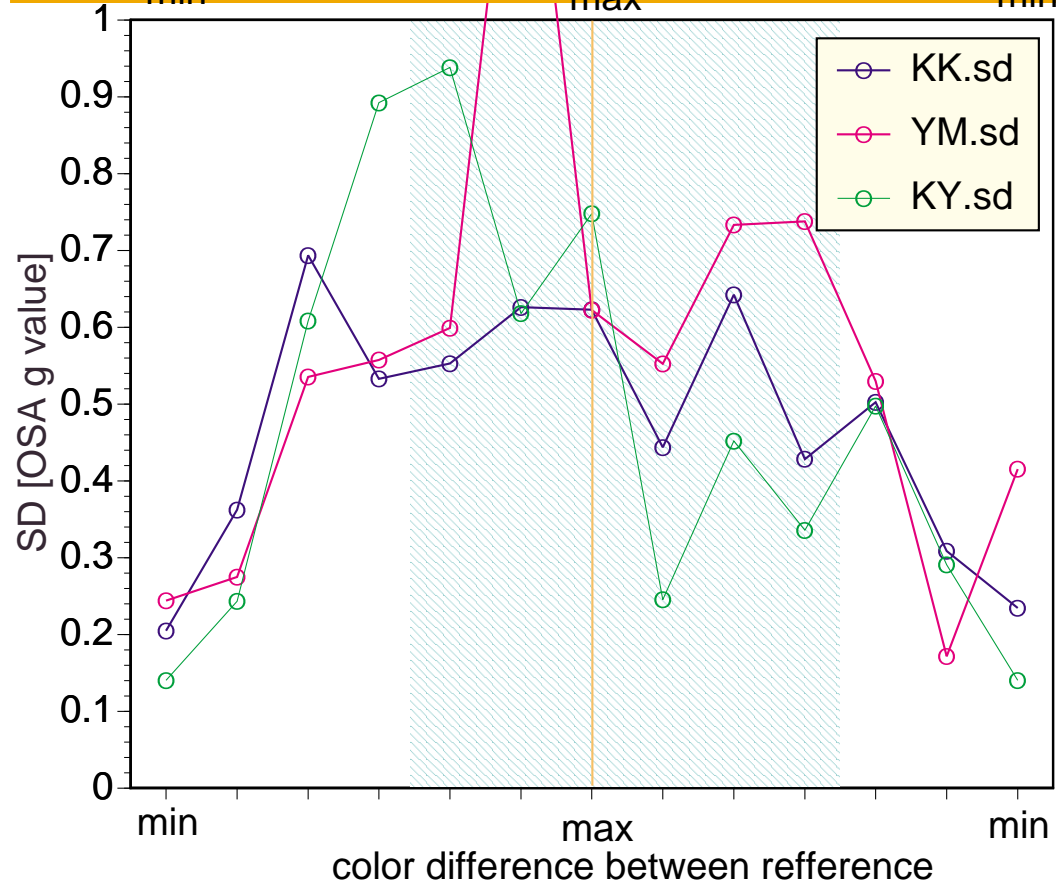
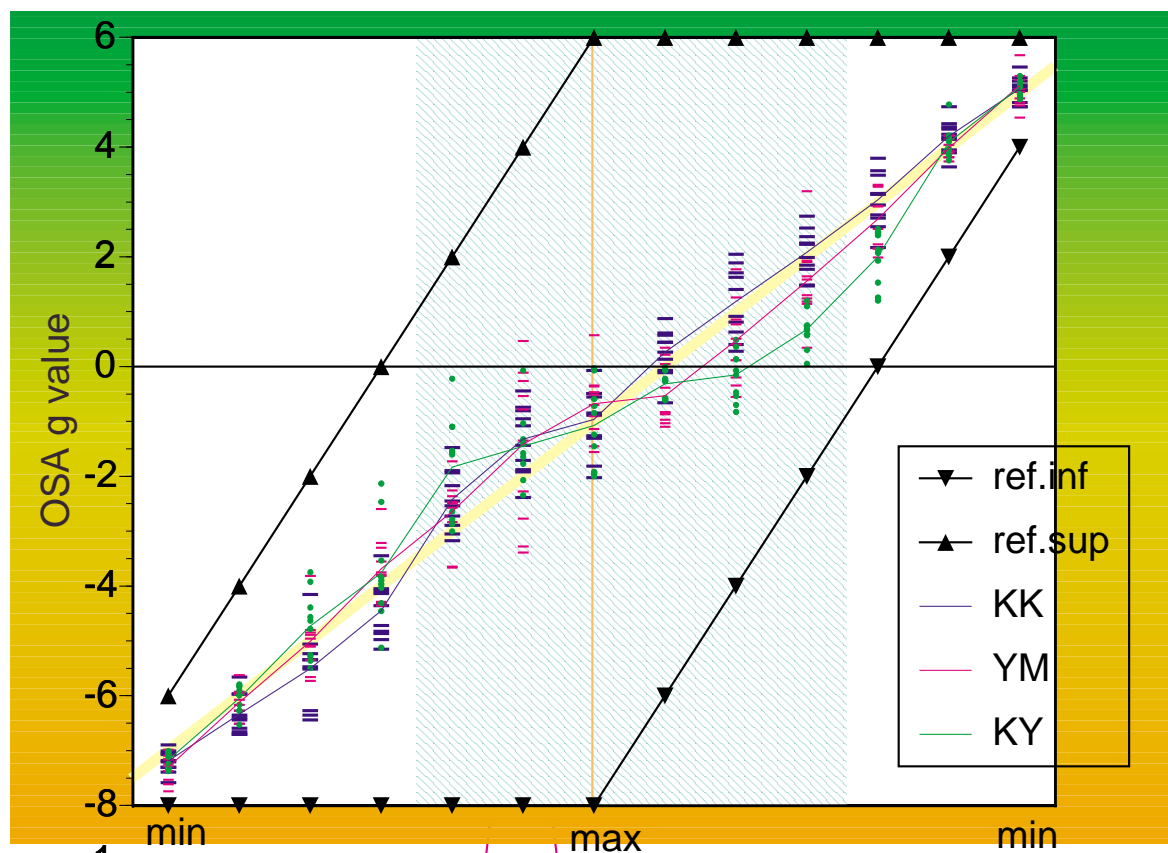
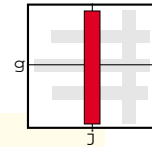


Figure 5.3.2 (continued)



Results; j=0 line

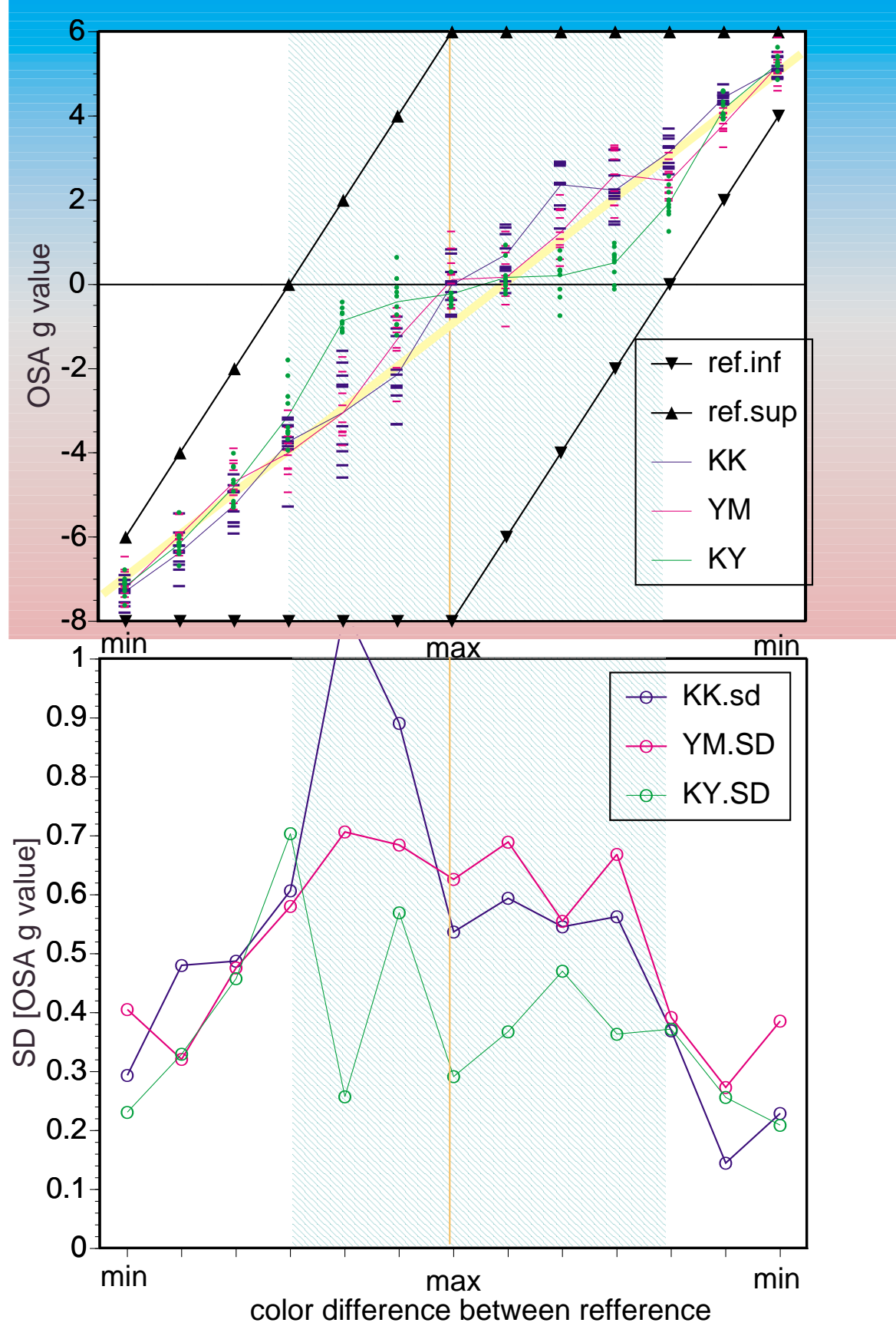
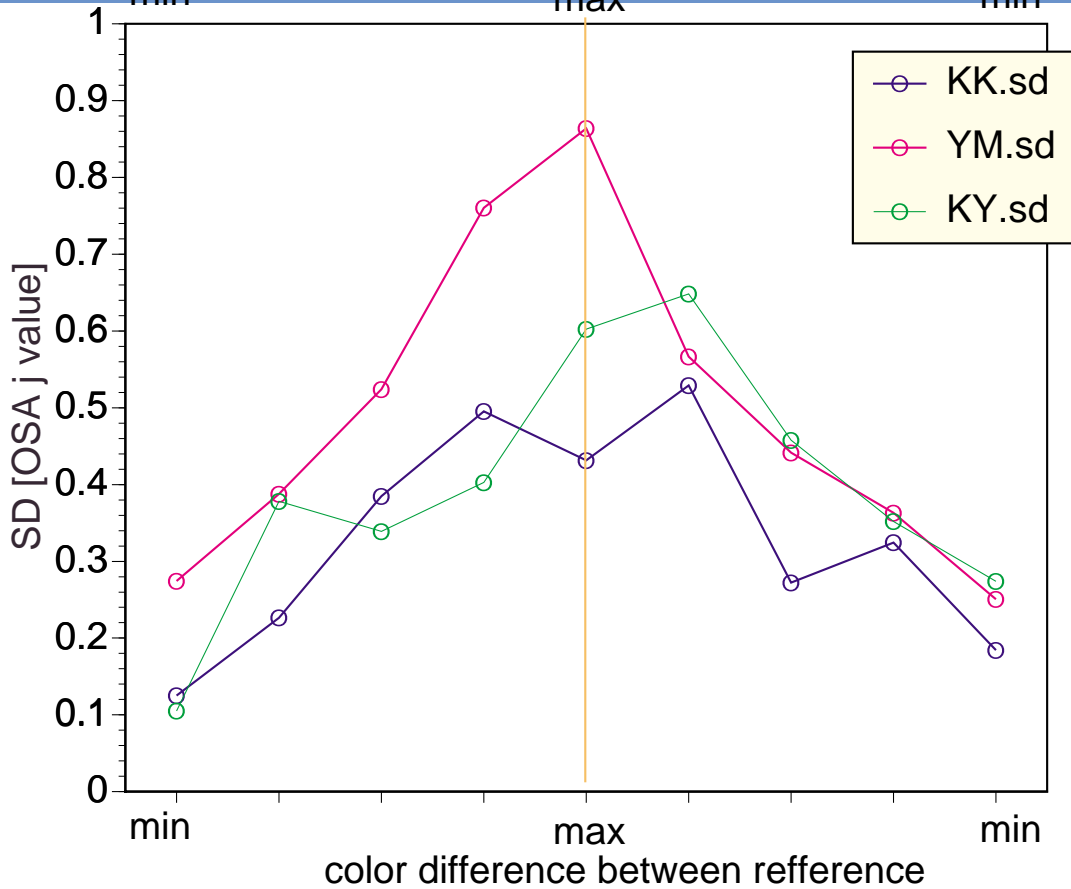
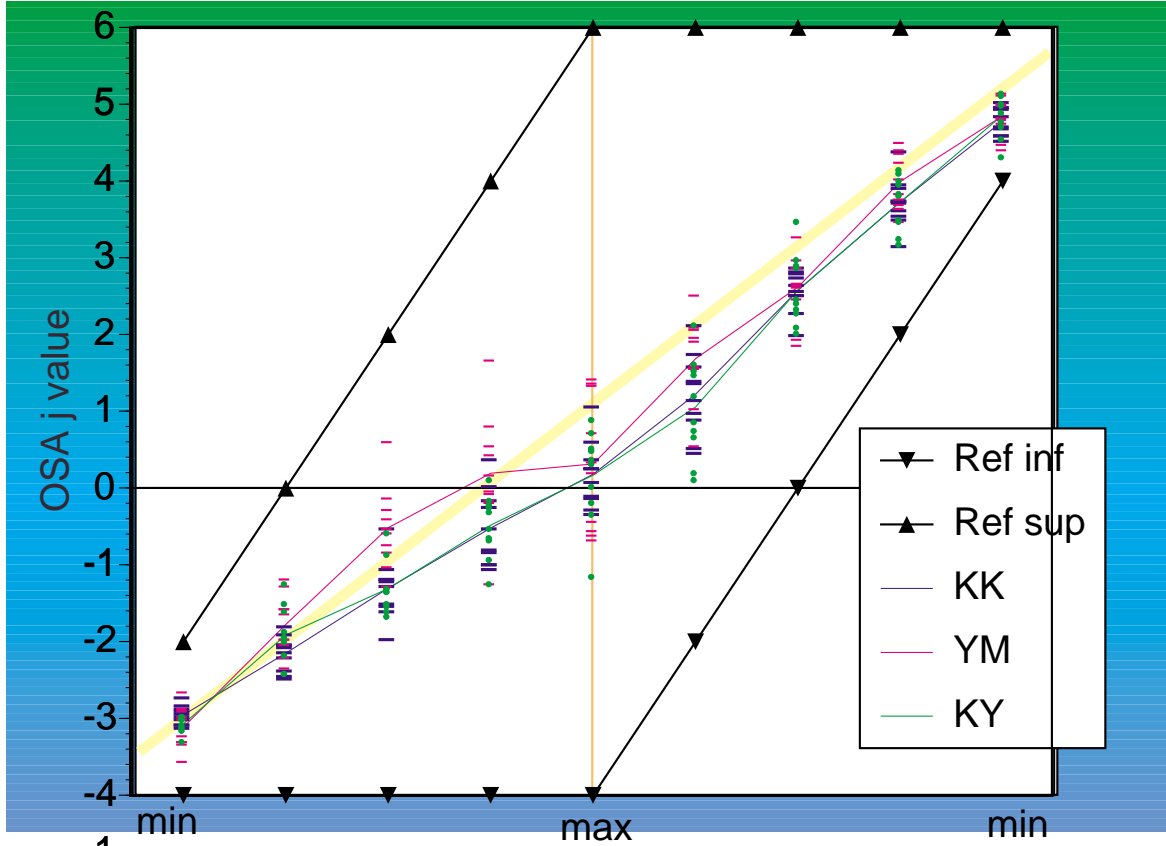
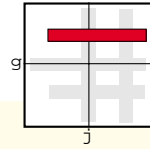
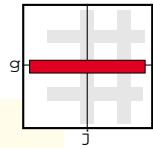


Figure 5.3.2 (continued)

Results; g=+4 line



☒ 5.3.2 (continued)



Results; g=0 line

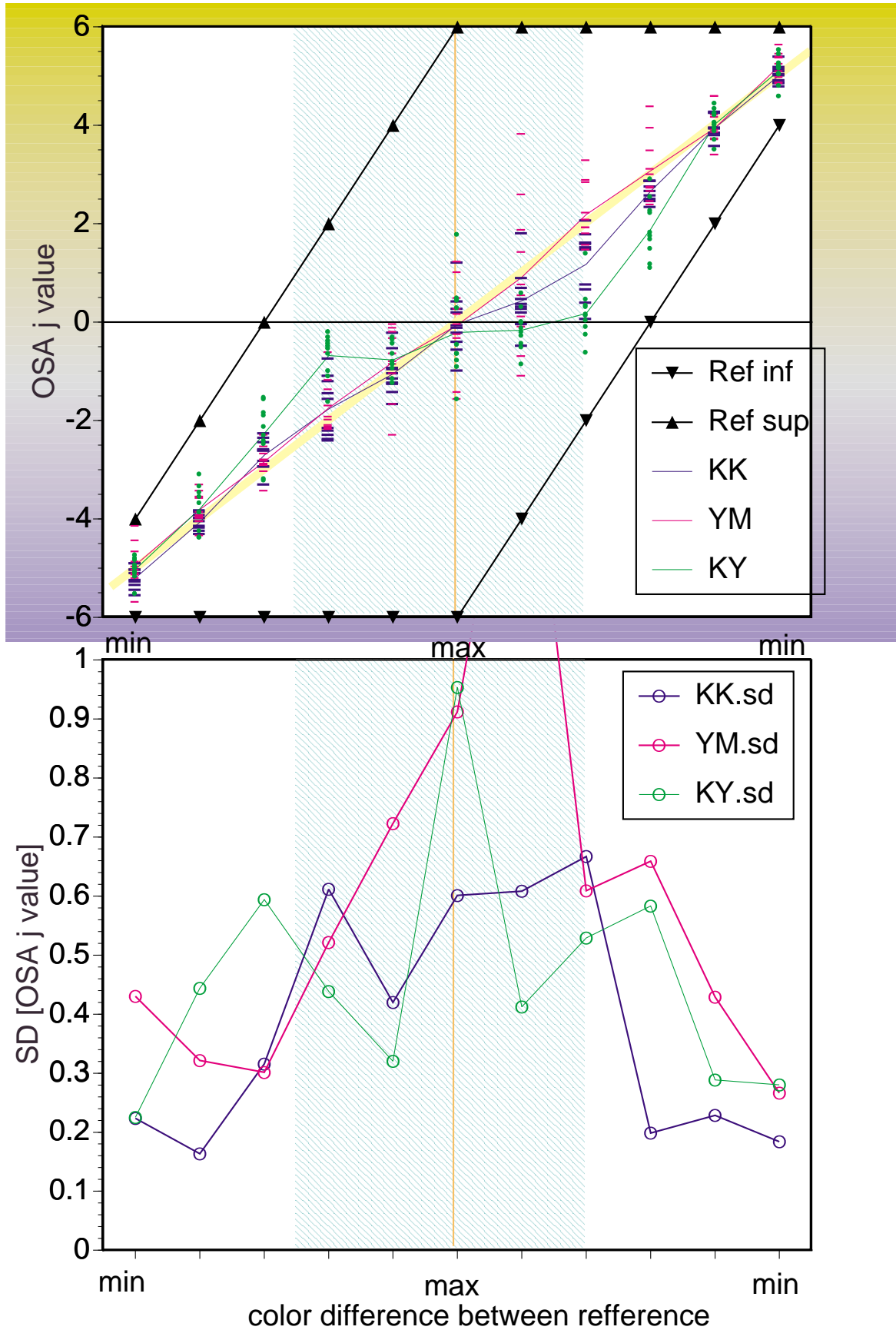
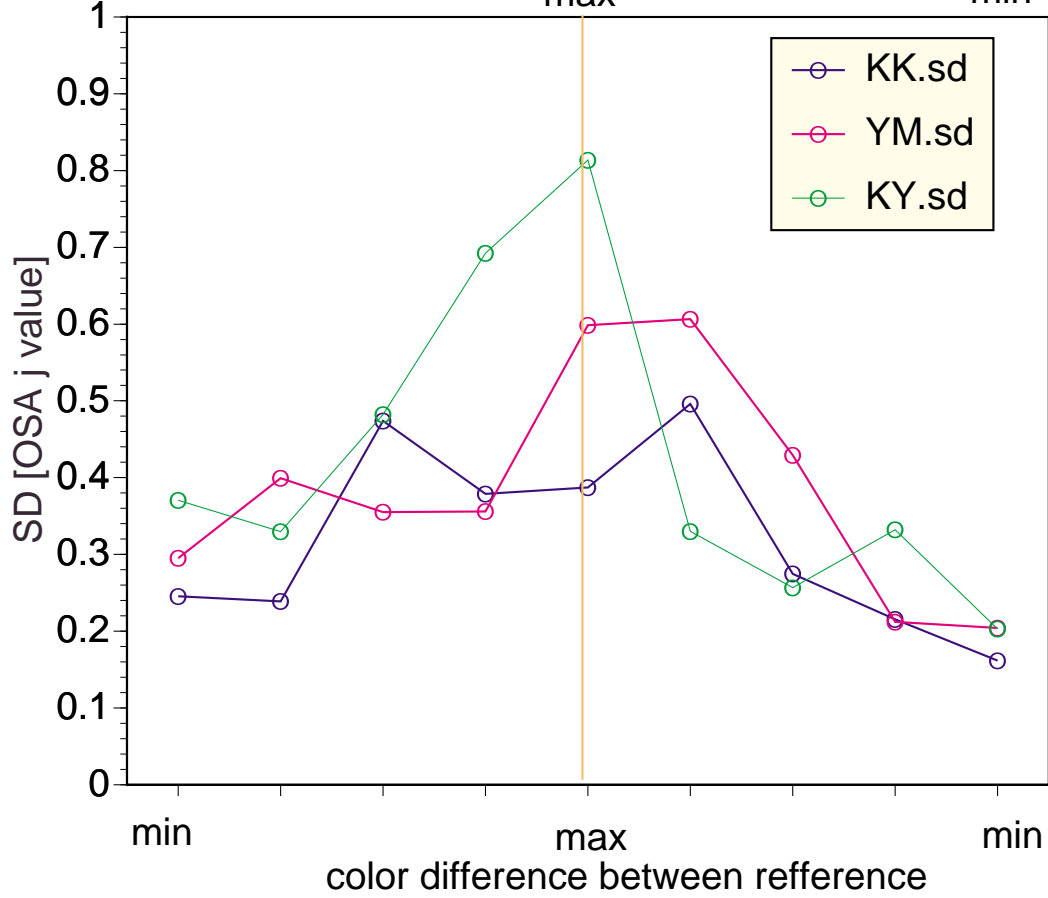
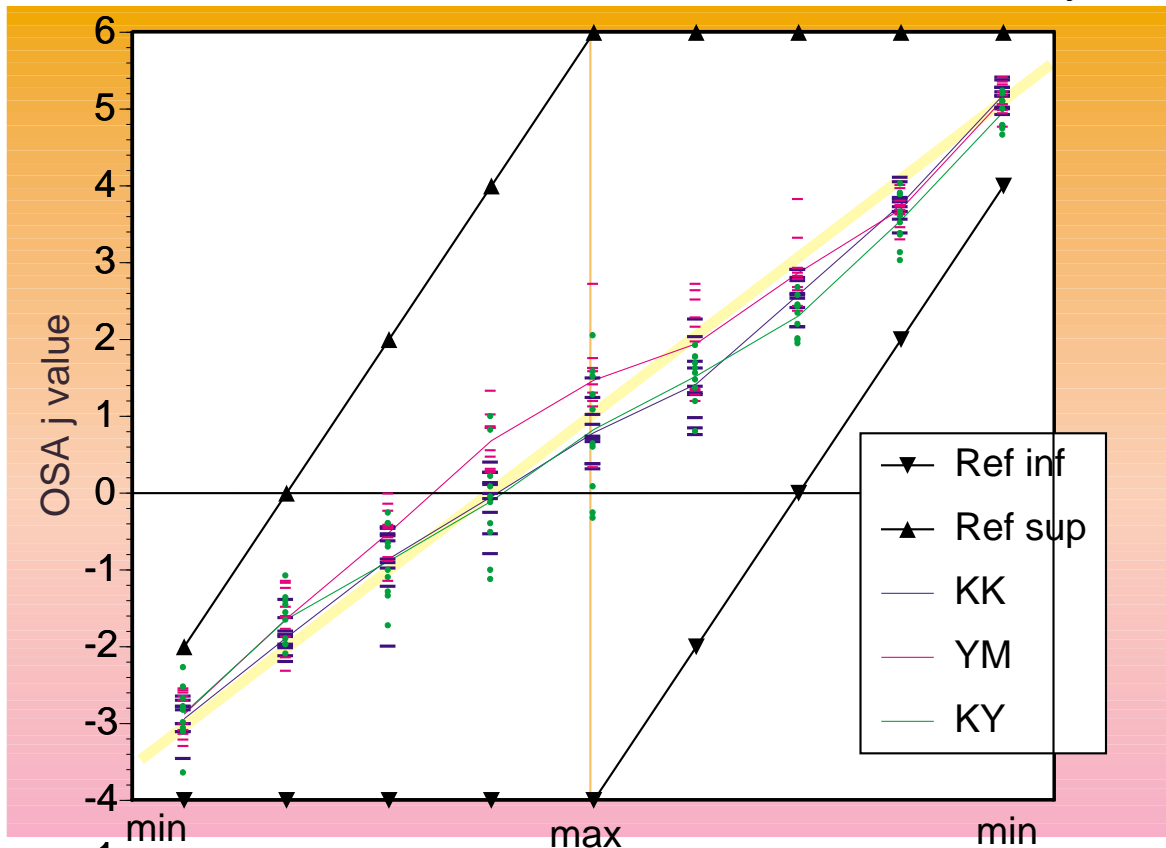
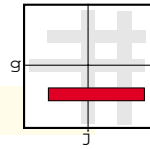
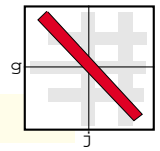


Figure 5.3.2 (continued)

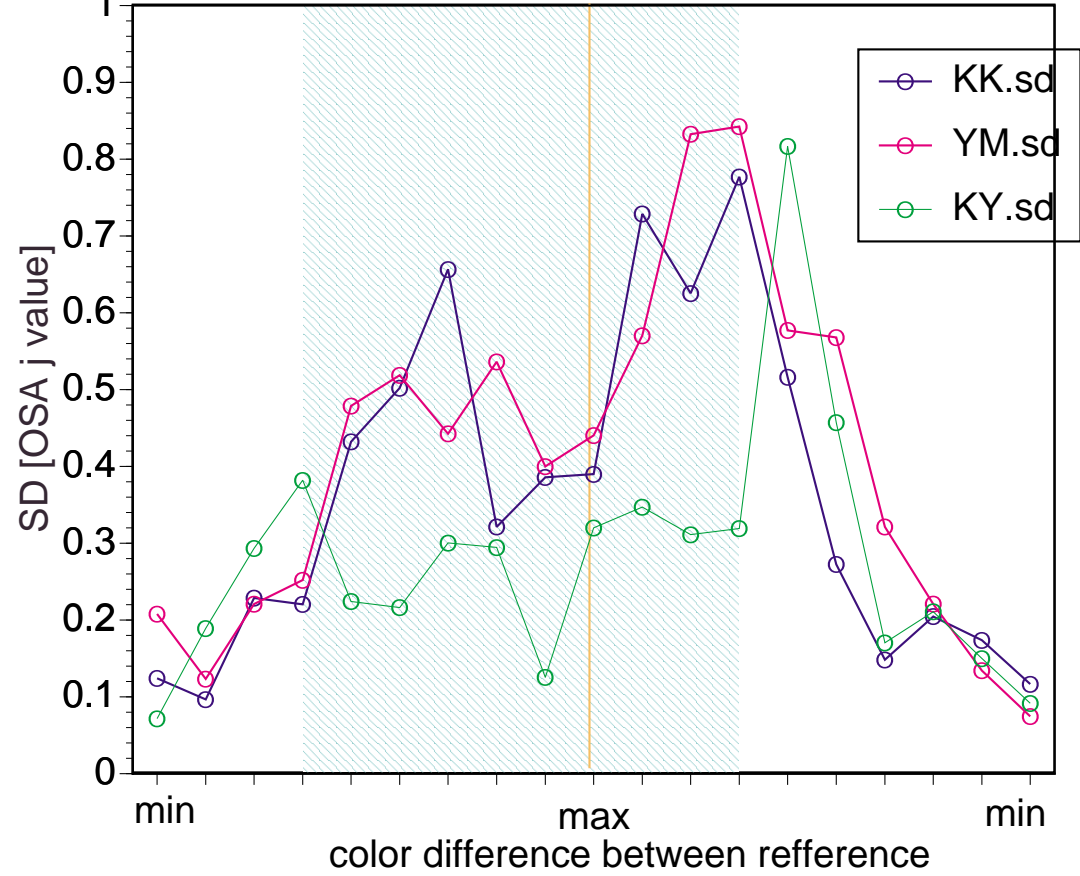
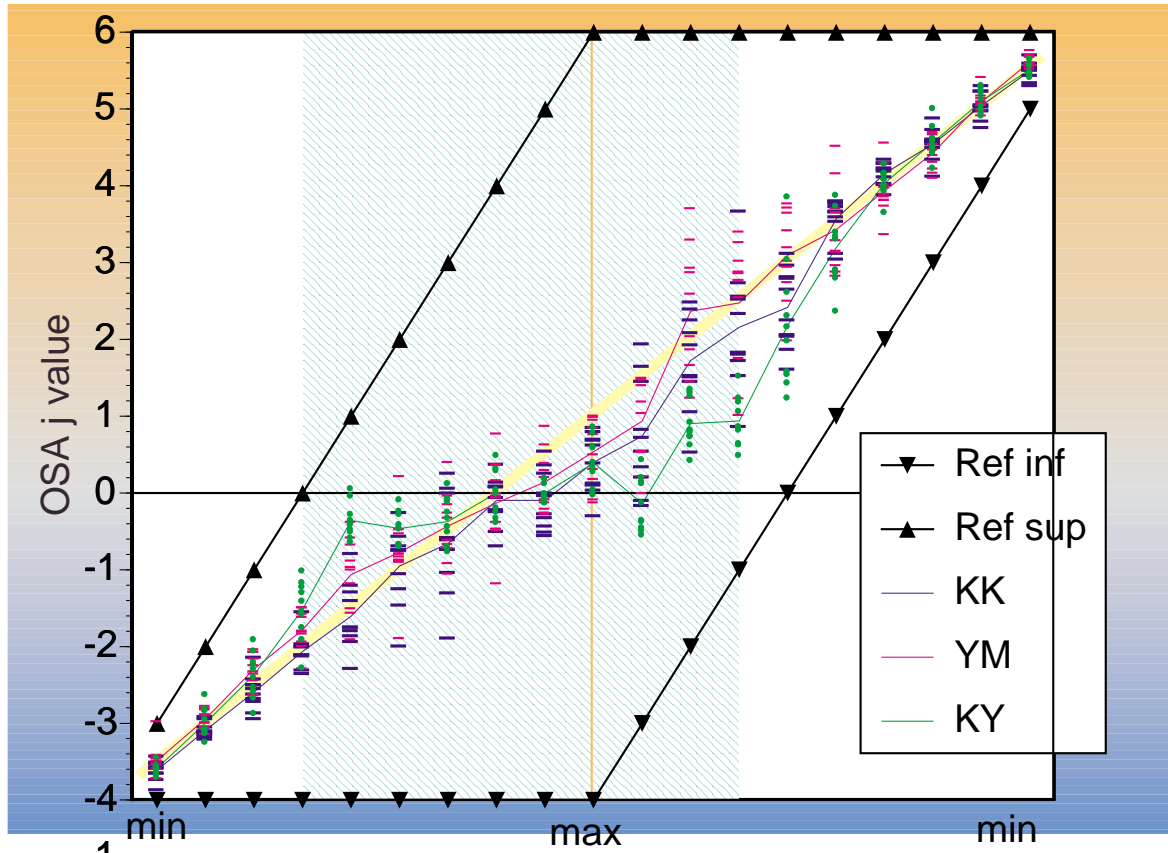
Results; g=-4 line



☒ 5.3.2 (continued)

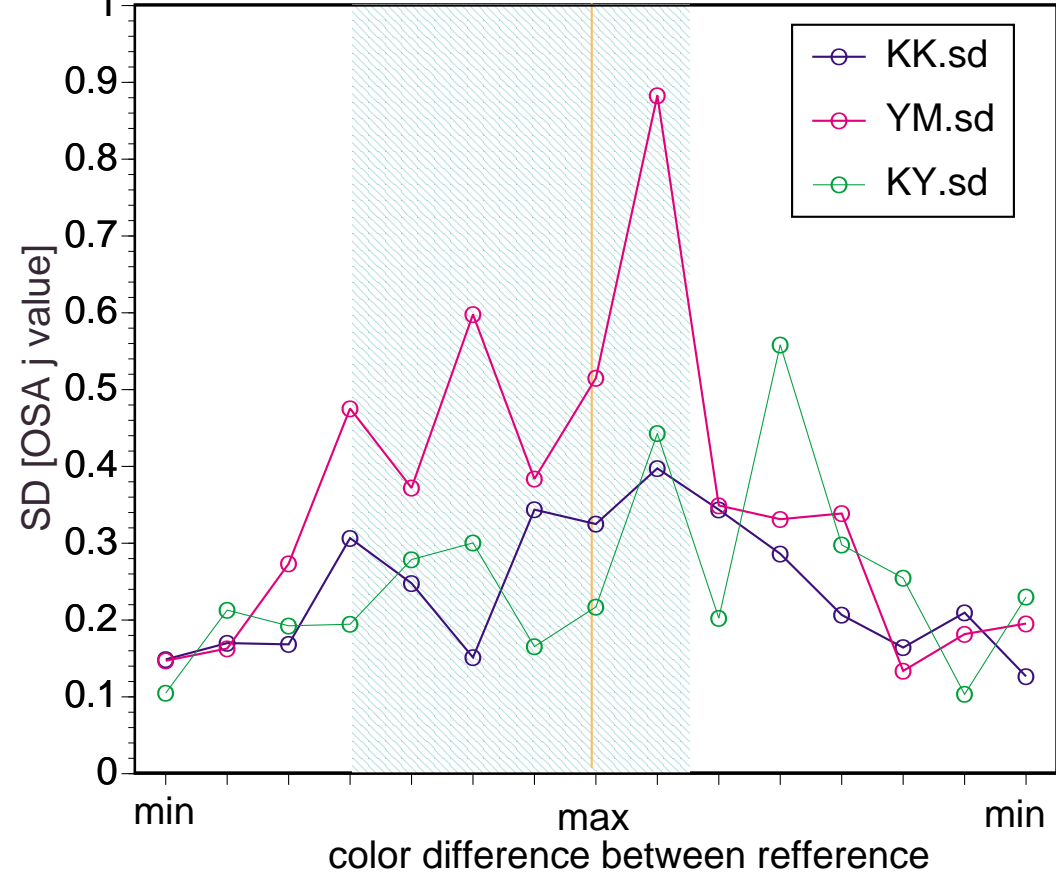
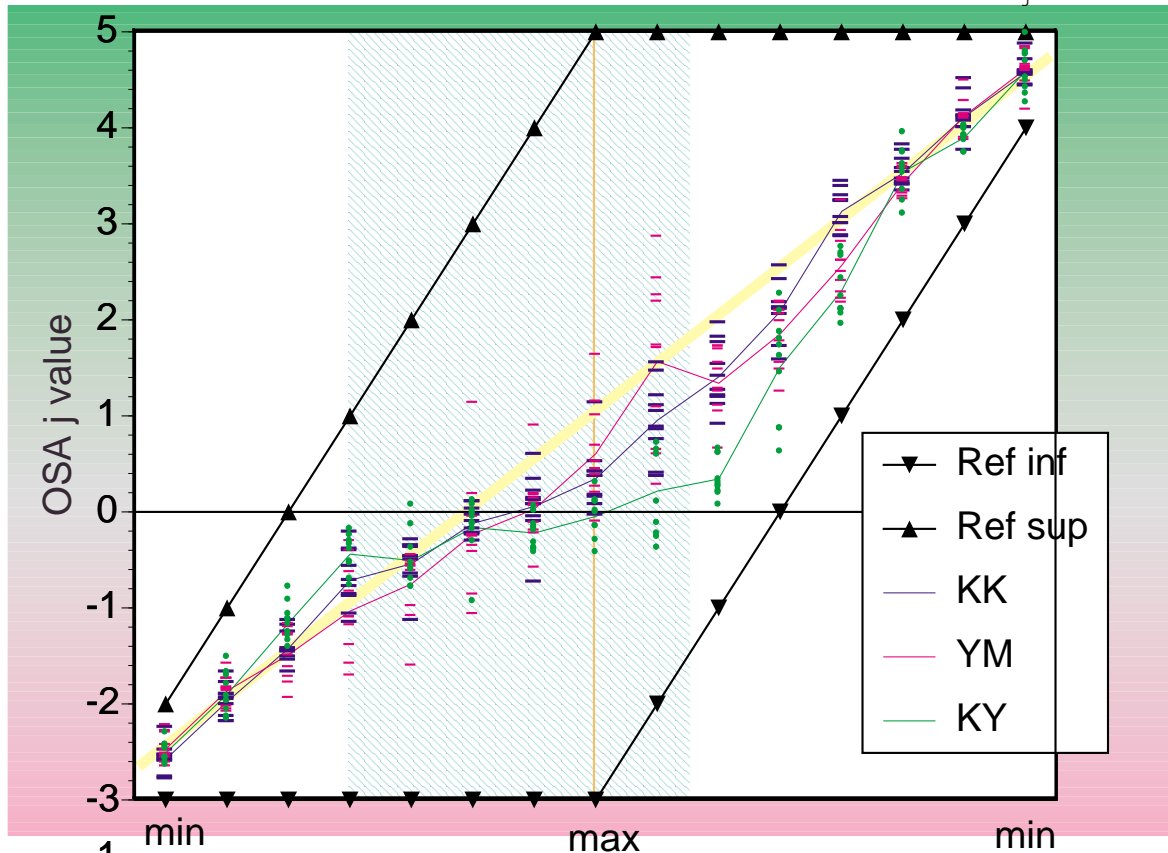
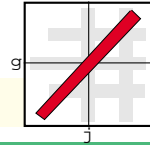


Results; Back-slash



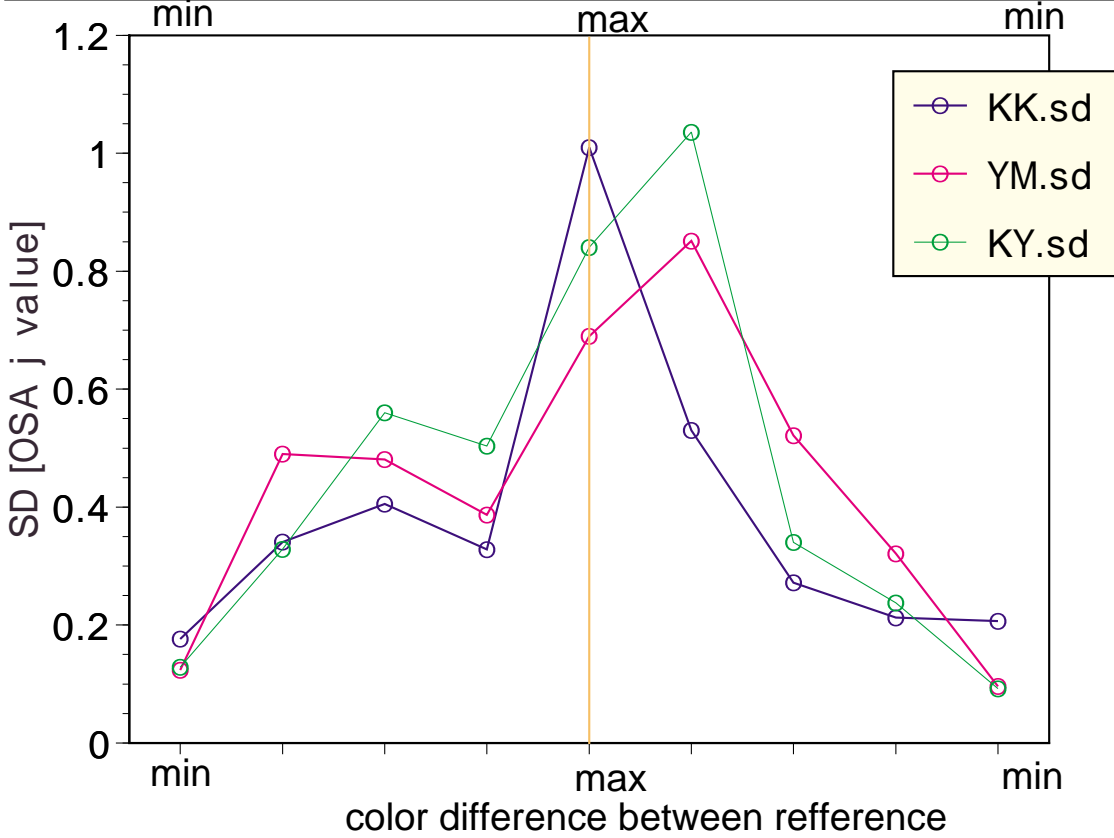
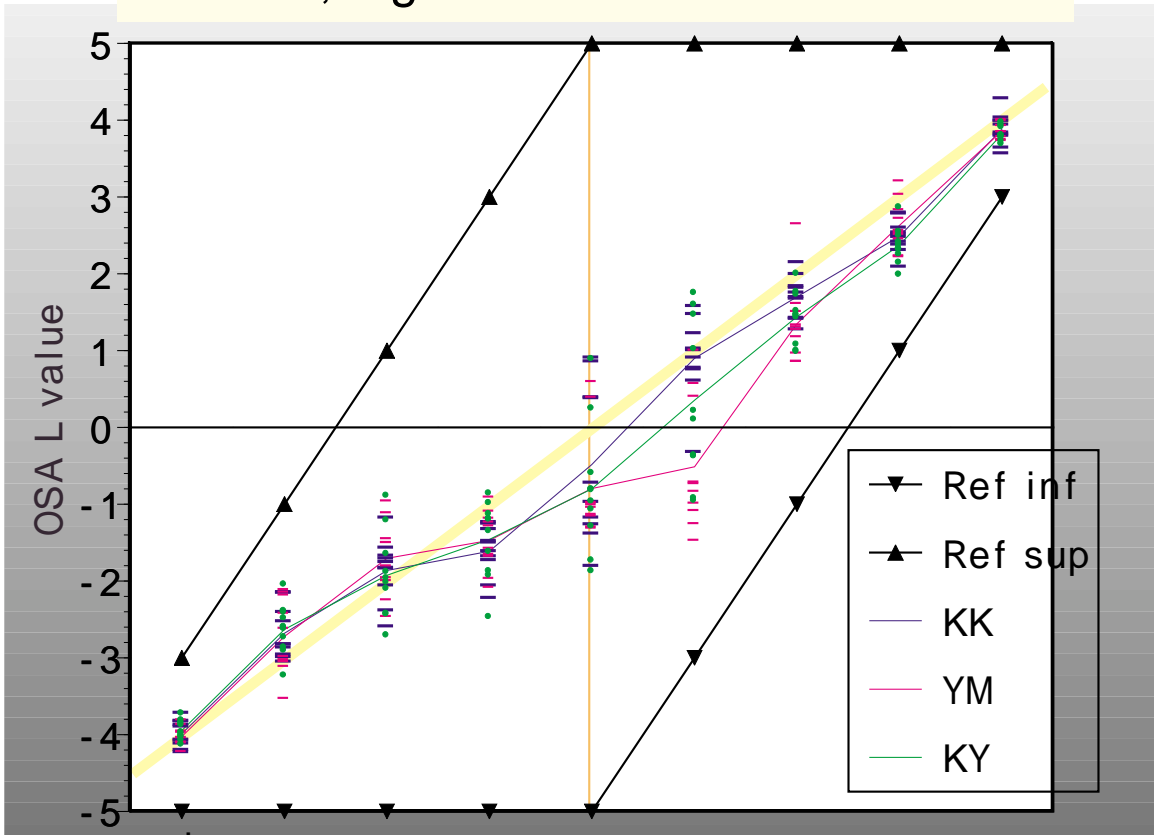
☒ 5.3.2 (continued)

Results; slash/ line



☒ 5.3.2 (continued)

Results; Lightness line



☒ 5.3.2 (continued)

5.3.5 考察

SDに対する単調増加の仮説 .

調整点のばらつきをみてみると 参照距離が離れるとばらつきが大きくなっているように見える .そこで次の仮説を立てた .中間色設定のばらつき (SD)に着目する .ここでは色に限定した話でなく心理物理現象一般に拡大して考える .図5.3.3に示すように参照刺激の間の距離が二倍になると設定のばらつき (SD)も二倍になると考えられる .これは調整のばらつき (SD)が 参照間の距離の評価の精度の閾値であると仮定した場合のWeber則に相当する .この仮定が成り立つ範囲内では 参照刺激間の距離を横軸に設定のばらつき (SD)を縦軸に取ること直線状の増加が得られると考えられる(図5.3.4)この仮説について後述のコントロール実験を行い 成り立つ現象が存在することを示した .

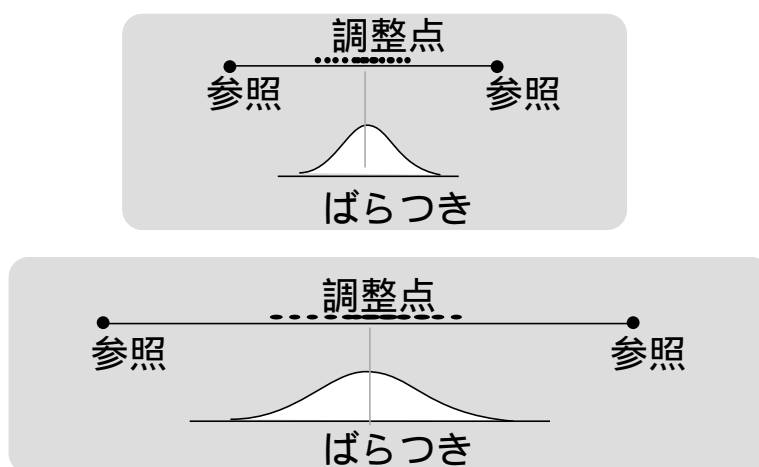


図 5.3.3 SDに対する単調増加の仮説 .参照刺激の距離が倍になると ,中間点の調整のばらつき (SD)も倍になると考えられる

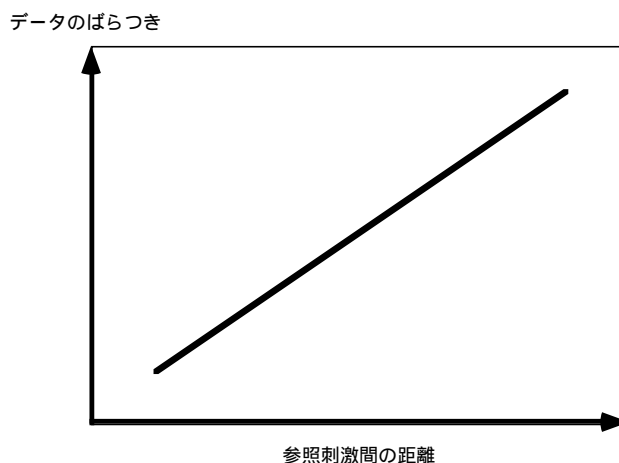


図 5.3.4 参照刺激の距離に対するデータのばらつき (SD)の予想 .仮説が成り立っていれば ,直線状になると考えられる .

この仮説を検証するために、中間色の設定のばらつき (SD) を参照刺激間の色差に対してプロットしたのが図5.3.2の下図である。このグラフでは両端が参照色差小、中央で参照色差最大となるので、仮説が成り立てば、中央の参照色差最大の点で左右対称の直線状の山型を描くことになる。

結果を見ると(図5.3.2)、仮説にしたがう系列3つ ($g = +4$ (青~緑) $g = -4$ (ピンク~オレンジ) 無彩色の明度方向変化系列) と、従わなわずにSDが頭打ちし、台形型やカルデラ型を描く系列 ($j = +4$ (オレンジ~黄色~緑) $j = 0$ (ピンク~灰色~水色) $g = 0$ (青~灰色~黄色) 無彩色点を通る斜めの系列2つ) に分かれることがわかった。

ここで第4章で得られた色差の評価限界をあてはめてみる。色差の評価は特定の色領域を超えることで判断基準が変化することをしめしたものである。図5.3.2の中央部の色づけられた領域が色差の評価限界を超えた色差条件である。中間色の設定と比較してみる。評価限界を超えない色差が小さい領域をみるとS字型を描く刺激系列であっても安定した応答が得られていることがわかる。実験データのばらつき (SD) と比較してみると、台形・カルデラ型の頭打ち領域と一致している。

結果をOSA色平面上にまとめると、白~黄の領域が特殊だという可能性が示された(図5.3.5) この領域は第4章で得られた色差の評価限界を与えるカテゴリー境界と一致する。このような境界を超えた色差判断は困難であるために、調整点に特異性がみられたのだと考えられる。

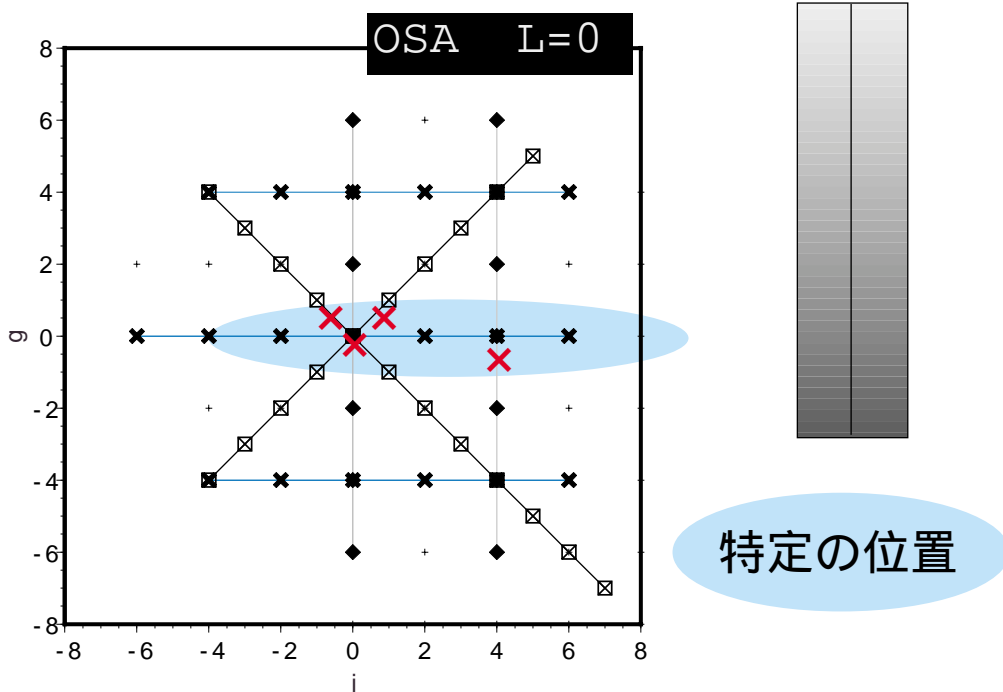


図 5.3.5 特殊な傾向を示す色度領域についてのまとめ

5.4 コントロール実験（空間距離の中間座標設定）

調整点のばらつき(SD)が参照距離に対して線形に増加するという仮説を確かめるために、空間距離の中間座標設定実験を行う。本実験と同様の装置を用いて、CRTモニタ上に高さ3cm、幅1mmのバーを2本呈示する。その2本間の距離をパラメータとし、距離は5cmから30cmまでの9段階ある。被験者はマウスで自由に動かすことのできる3本目の画面に呈示されたバーを、2本の参照バーの中間座標に調整する。被験者KKとYMが10回の繰り返し試行を行った結果のSDが図5.4.1である。参照距離に対してSDが線形に増加していることが示されており、空間距離の知覚において、仮説が確かめられた。

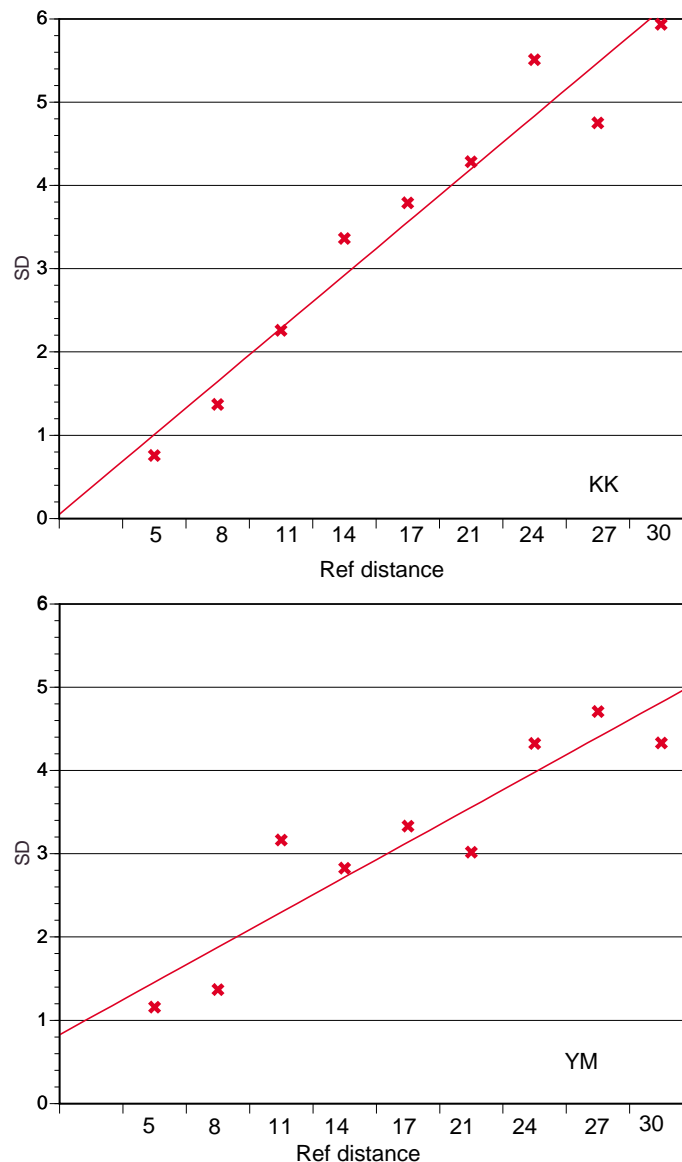


図 5.4.1 参照距離に対する中間座標の調整のSD。

第6章 総合的考察

6.1 導入する新しい概念

これまでの実験の結果から総合的に考察して、色空間内には不連続な境界領域が存在することが明らかである。包括的な色空間の表現には、色空間の連続性と不連続性を両立させる必要がある。次に挙げる2つの新しい概念を色空間に導入する。

(1) 新たな軸(4つめの次元)の導入：色差評価軸

第5章の中間色設定のデータを見る。ここでは、色差が一定の判断基準で評価できる範囲内に限る(図5.3.2の色づけられていない領域)。すると、中間色の設定に非線形性が得られたのは、 $j = +4$ 系列上の緑領域、 $g = +4$ 系列上の全領域(青～緑)、 $g = 0$ 系列上の黄色領域、斜め系列の緑領域であった。まとめると、これらの領域はすべて緑領域近傍(OSA第一象限)のみで起きている。

このような非線形性を記述するため新たな軸を導入する。これを色差評価軸と呼ぶ。ここで特に $g = +4$ 軸系列(青～緑)に着目する。この系列の範囲内では、色差の評価限界が現れない。色差が大きくなるに連れて中間色の設定が青方向にずれる傾向がある。最大の色差条件(図5.3.2の中央部)で、中間色の設定が青方向にOSA1ユニットずれている。これを表現する方法として、色差評価軸方向に図6.1.1に示す曲率を持ったカーブを考える。この新しい空間の中で直線距離が色差に相当する。すると与えられた参照色差が大きくなると中間色が青方向にずれることを記述できる。また、OSA2ユニット程度ではほとんど非線形性が現れないことも説明できる。

また、色差評価軸で色差の評価限界を記述することができる。第5章の実験からは $g = +4$ 軸上で判断基準の変化は取り出せなかった。ただし、色差の評価限界は $g = +4$ 軸上にも存在していることが第4章で示されている。これを記述する方法がある。与えられた色刺激の差を色差評価軸方向で数値化し、その量が一定値に達すると色差の評価限界になると定義する。

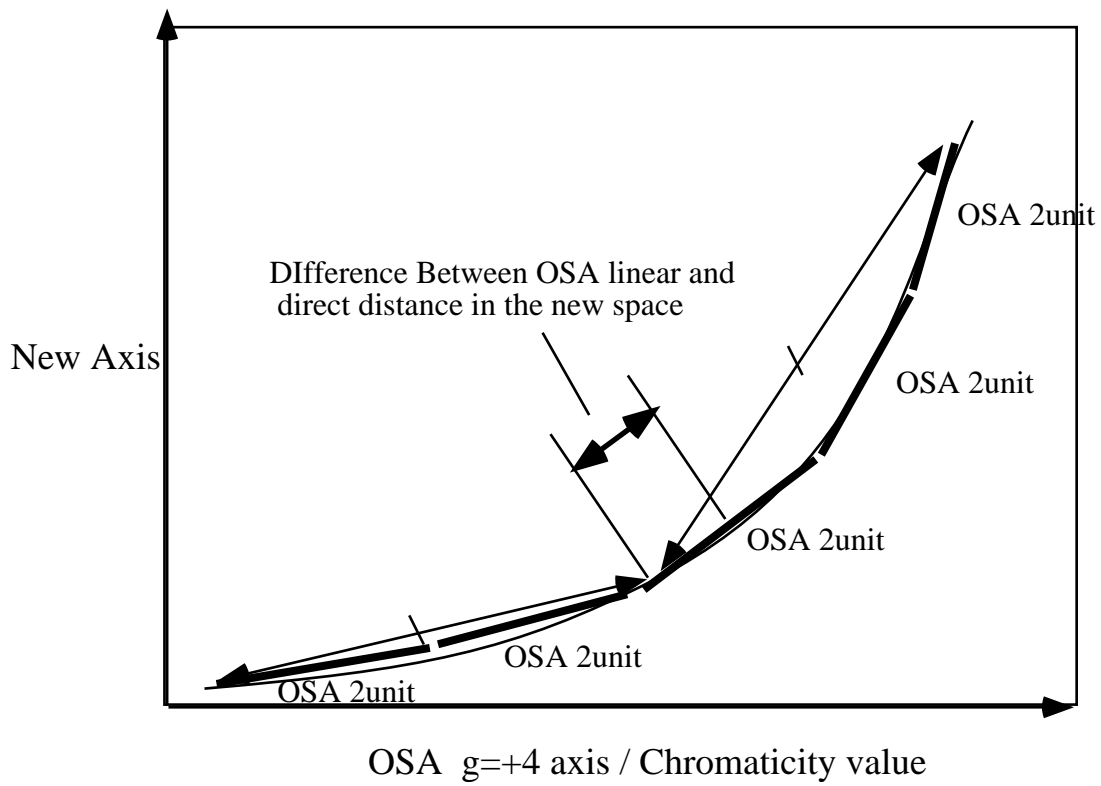


図6.1.1 新しい軸の導入と各色度点に与えられた曲率 .色差評価は二点間の直線距離であたえられる .

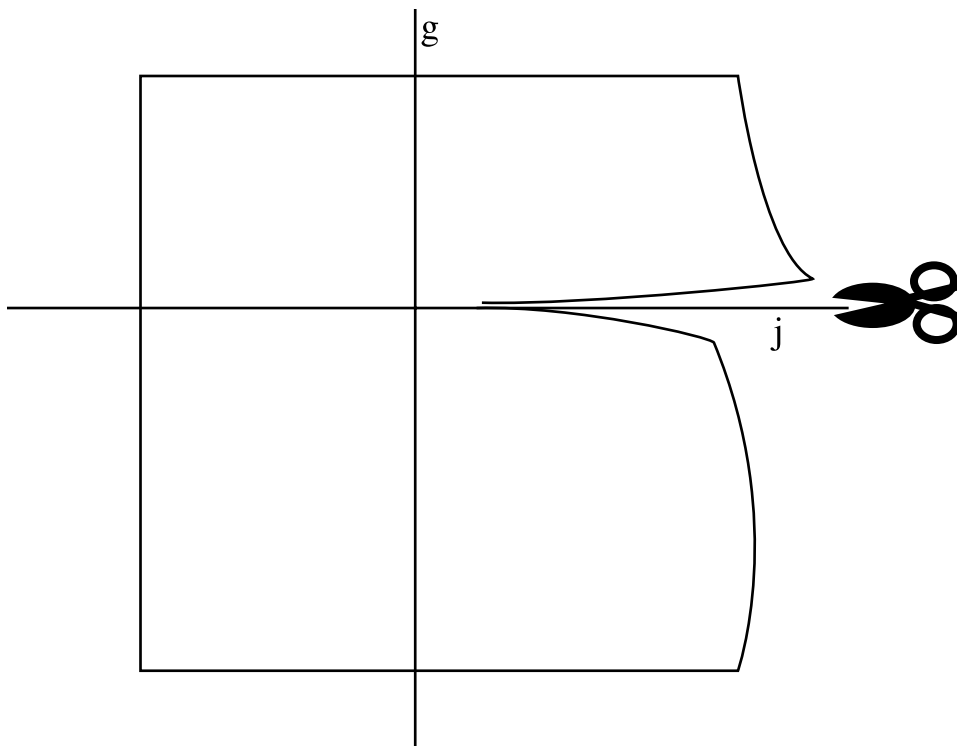


図 6.1.2 色空間に切れ目を入れる

(2) 色空間内部に切れ目を作る(白・黄領域)

第3章から、色カテゴリーの境界(第一段階)が白・黄を結ぶ線上にあることが示された。この境界領域がカテゴリカル色知覚にとって最も分断されやすい境界であることを示している。第4章から、色差は白・黄領域をまたぐと評価限界を超えてしまうことを示した。色差の大小に関わらず、この特別領域を超えるか否かで評価限界に達することからも特殊性が示されている。第5章から、色差の評価基準の変化が白・黄領域をまたぐ領域のみで検出された。これらの色覚メカニズムの各階層を通じて特殊性が示されている。

そこで、白・黄面に色空間の切れ目を入れる(図6.1.2)。切れ目によって図6.1.1の曲線に不連続な点を作り出すことができる。不連続な点で色差評価軸上の値が大きく変化していれば、色差の評価限界が切れ目の領域に集中することを表現できる。また、色差評価軸上の値で2段階の色カテゴリー境界を切り出すことができる。切り離し領域を境に、色差評価軸の値を正負反転させるのであれば、第1段階の境界は色差評価軸の値がゼロの領域である。第2段階の境界は正負両方に与えられる一定値で境界領域となる。ただし、色差の評価限界を与える差分と、色差評価の非線形性が同じ軸上で定量化できるのかどうかは、また新たに確かめなければならない。

6.2 新しい色空間の提案

この曲線を色空間全体に与える。曲率が強い領域は色平面のなかで緑領域であり、他の曲率も第5章の実験データから得たものである。また、面の傾きの絶対値は色差の評価限界を記述するように選ぶ。切れ目が存在し、この領域を境に色差評価軸の値が正負が変わる。色差評価軸の絶対値は、段階的に発生する色カテゴリー境界に相当するように定める。これをKoida空間と名付ける(図6.2.1)。

ただし、明度方向についての統合は難しいと考えられる。これについて、Stalmeierら(1988; 1991)は、明度と色の両方に差がある刺激を呈示し、インストラクションによって明度方向の色差評価への寄与が変化することを示している。また、その報告の中で、色差評価には一つの判断基準を保つのが困難であること、色カテゴリーの影響があることを述べており、これは本研究のデータを支持する。

6.3 今後の課題

カテゴリカル色知覚は段階を持っている事が第3章で示されているが、現在のKoida空間では第1・第2段階のカテゴリー分離しか記述することができない。段階的に色カテゴリー分割が行われることを説明できていない。今後より複雑な概念を導入しなければならないかもしれない。

本研究で色差の評価を定量的に測定したのは、色空間内のごく一部にすぎない。包括的な空間を全体的に記述するためには、より細かい測定が必要とされる。

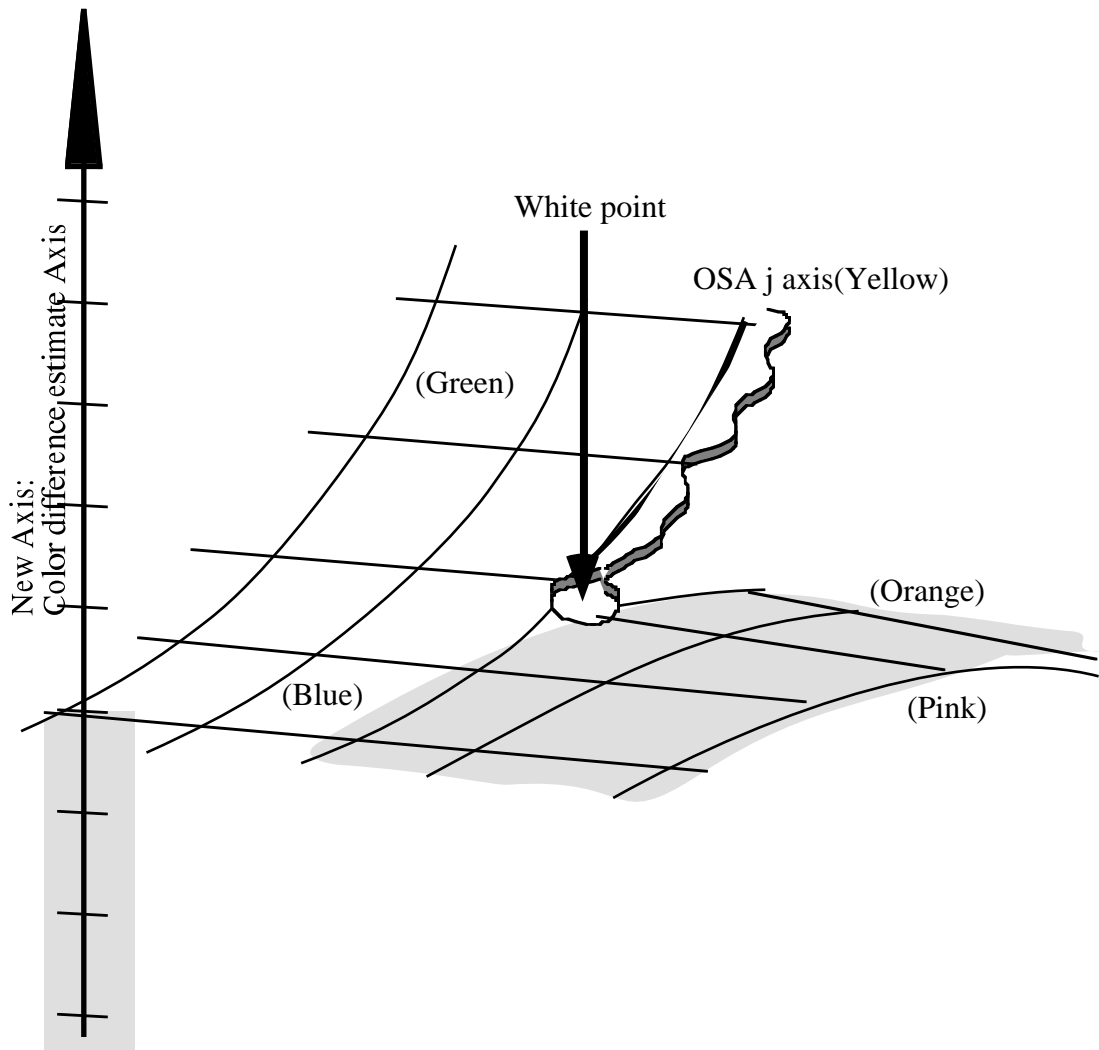


図 6.2.1 新概念を色空間全体に拡大した概略図 (Koida 空間)

第7章 結論

本研究から得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 新しく考案した実験手法である色分類課題を通じて、人によらず安定して色空間が段階的に部分分割されることが示された。少なくとも4段階以上のステージに分かれた段階的なカテゴリカル色知覚メカニズムが存在することを示唆した。
- 2) 色差の量的な評価限界が存在することを指摘した。その限界は色差によって決定されるのではなく、色空間内の特定の領域に存在していることを示した。OSA色平面上での特定領域とはg軸方向系列での $j=0$ の線上、j軸方向系列での白色点近傍と白色点から右下(第4象限)方向と左下方向(第3象限)に伸びる曲線領域であった。また、この領域が色カテゴリーの境界領域と同じ色度特性であることを示した。階層的な色覚メカニズムにおいて互いに違う段階であると考えられるカテゴリカル色知覚と色差評価であるが、影響を及ぼしている可能性を示唆した。
- 3) 色差の評価基準が、参照となる色差に対して変化することを、中間色の設定実験を通じて客観的に示した。参照となる色差に対して設定のばらつき(SD)が線形に増加するという仮説をうち立て、これが成立する範囲と成立しない範囲で評価基準の変化を抽出することができた。評価基準の変化が起きる色差条件は、結論2)で示す色差の量的な評価限界と一致していた。
- 4) 階層的な色覚メカニズムを考慮し、それぞれを記述できる色空間の提言を行った。これをKoida空間と名付ける。その特徴として色空間に新たな次元を加えること、白～黄色領域での空間の断裂を定義したことがある。Koida空間によって色のカテゴリー性、色差の評価限界、色差評価の非線形性をそれぞれ記述することができる。

謝辞

本論文を終えるにあたり、学部4年から大学院博士課程までの6年間の長きに渡って温かき指導をしてくださった内川恵二教授に心から感謝いたします。私の破天荒な言動をしっかりと受け止めてくださったことを忘れることはできません。研究に関することのみならず、人間としての成長を促してくださいました。ありがとうございました。

本論文をまとめるにあたって、長橋 宏教授、長尾智晴助教授、山口雅浩助教授、そして金子寛彦助教授には貴重なご意見をいただきました。感謝いたします。

本研究で行った実験の被験者として参加してくださった方々に感謝いたします。内川研究室のメンバーから、佐藤雅之さん、杉山俊美さん、平嶋須磨子さん、水科晴樹さん、横井健司さん、三谷ゆりさん、James M. Bebkoさん、川上さん、伊東さん、そして、斎藤武くん、石田伯仁くん、高田康宏くん、八木弘幸くん、永野将隆くんには、研究室外からの被験者として参加していただきました。どうもありがとうございました。

研究のことに限らず、ディスカッションの相手をしてくださったたり、叱咤激励をいただいたり、内川研究室のメンバーには多大な援助をいただきました。御礼申し上げます。

本研究は、日本学術振興会特別研究員制度、科学研究費補助金の援助を受けて行われました。

引用文献

- Berlin B, Kay P: Basic Color Terms, Their Universality and Evolution, University of California Press, Berkeley (1969).
- Bornstein MH: On the development of color naming in young children: data and theory., *Brain Lang* 1985 Sep;26 (1):72-93
- Boynton RM, Kaiser PK: Human Color Vision 2nd Ed, Optical Society of America, Washington DC (1996)
- Boynton RM, Kambe N: Chromatic difference steps of moderate size measured along theoretically critical axes, *Vision Res* 1980 Spring;5(1):13-23
- Boynton RM, Nagy AL, Olson CX: A flawed Equations for predicting chromatic differences, *Vision Res* 1983 Summer;8(2):69-74
- Boynton RM, Olson CX: Locating basic colors in the OSA space, *Color Res. Appl.*, 12, 94-105 (1987).
- Boynton RM, Olson CX: Salience of chromatic basic color terms confirmed by three measures, *Vision Res.*, 30, 1311-1317 (1990)
- Cottaris NP, De Valois RL: Temporal dynamics of chromatic tuning in macaque primary visual cortex, *Nature* 1998 Oct 29;395(6705):896-900
- Crook JM, Lee BB, Tigwell DA, Valberg A: Thresholds to chromatic spots of cells in the macaque geniculate nucleus as compared to detection sensitivity in man, *J Physiol (Lond)* 1987 Nov;392:193-211
- Cowey A, Heywood CA: There's more to colour than meets the eye., *Behav Brain Res* 1995 Nov;71(1-2):89-100
- De Valois RL, De Valois KK: A multi-stage color model, *Vision Res* 1993 May;33(8):1053-65
- De Valois RL, De Valois KK, Switkes E, Mahon L: Hue scaling of isoluminant and cone-specific lights, *Vision Res* 1997 Apr;37(7):885-97
- Derrington AM, Krauskopf J, Lennie P: Chromatic mechanisms in lateral geniculate nucleus of macaque., *J Physiol (Lond)* 1984 Dec;357:241-65
- Fuchida T, Cowan WB, Wyszecki G: Matching Large Color Differences with Achromatic and Chromatic Surrounds, *Col res and Appl*, 10, 2, Summer,92-97(1985)
- Hard, Sivak: NCS-Natural Color Systems: A Swedish standard for color notation, *Col Res App*,6,123-138(1981)
- Hardin CL, Maffi L: Color categories in thought and language, Cambridge University Press, Cambridge (1997)
- Heywood CA, Gadotti A, Cowey A: Cortical area V4 and its role in the perception of color, *Neurosci* 1992 Oct;12 (10):4056-65
- Heywood CA, Gaffan D, Cowey A: Cerebral achromatopsia in monkeys, *Eur J Neurosci* 1995 May 1;7(5):1064-73
- 池田光男:色彩工学の基礎 朝倉書店 (1980)
- Johnson EG: The Development of Color Knowledge in Preschool Children, *Child Development* (1977),48,308-311
- 久米川浩一 北原健二 中泊聡 堀越陽子:色相分類障害 視覚の科学,18, 4 (1998):106-111
- Kuriki I, Uchikawa K: Limitations of surface-color and apparante-color matching, *J Opt Soc Am(A)*,13, 1622-

1636(1996)

Kuriki I, Uchikawa K: Adaptive shift of visual sensitivity balance under ambient illuminant change, J Opt Soc Am (A), 15, 2263-2274(1998)

鯉田孝和,内川恵二:色光の見えのモードと明るさの色度特性比較, VISION, 8, 143-148(1996)

Komatsu H, Ideura Y, Kaji S, Yamane S: Color selectivity of neurons in the inferior temporal cortex of the awake macaque monkey, J Neurosci 1992 Feb;12(2):408-24

小松英彦:色彩知覚のニューロン機構, 神経研究の進歩, 39, 4, 551-560(1995)

Lennie P, Krauskopf J, Sclar G: Chromatic mechanisms in striate cortex of macaque, Neurosci 1990 Feb;10(2): 649-69

Matsuzawa T: Colour naming and classification in a chimpanzee(Pan troglodytes), J Human Evol, 14, 283-291 (1985)

MacAdam DL: Uniform Color Scales, J. Opt. Soc. Am. 64, 1691-1702 (1974)

Nagy AL, Eskew RT Jr, Boynton RM: Analysis of color-matching ellipses in a cone-excitation space, J Opt Soc Am [A] 1987 Apr;4(4):756-68

Nickerson D: OSA Uniform Color Scale samples: A unique set, Color Res. Appl., 6, 7-33 (1981)

岡嶋克典・阿山みよし・内川恵二・池田光男: "光源色モードと表面色モードにおける明るさ効率の比較", 光学, 17 (1988) p582-592

Shinoda H, Uchikawa K and Ikeda M: Categorized color space on CRT in the aperture and surface color mode, Col Res and Appl,18,5,326-333(1993)

Smith VC, Pokorny J: Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm, Vision Res, 15,161-171(1975)

Stalmeier PFM, Weert CMM: Large Color Differences Measured by Spontaneous Gestalt Formation, Col res and Appl, 13,4, August,209-218(1988)

Stalmeier PFM, Weert CMM: Large Color Differences and selective attention, J Opt Soc Am(A), 8, 1, January,237-247(1991)

Uchikawa K, Boynton RM: Categorical color perception of Japanese observers: Comparison with that of Americans, Vision Res., 27, 1825-1833 (1987)

Uchikawa H, Uchikawa K, Boynton RM: "Influence of achromatic surrounds on categorical perception of surface colors." Vision Res. 29 p881-890 (1984)

内川恵二:開口色と表面色モードの色の見えの特長, VISION,6,61-67(1994)

内川恵二:色覚のメカニズム-色を見る仕組み- 朝倉書店 (1998)

内川恵二:表面色のカテゴリカル知覚, 光学, 17,661-669 (1988)

内川恵二,内川弘美, Kaiser PK: "色光の '明るさ-輝度差' の色度の違いによる変化", 照明学会誌 68 p259-264 (1984)

内川恵二,栗木一郎,篠田博之:開口色と表面色モードにおける色空間のカテゴリカル色名領域, 照明学会誌, 77 6, 346-354(1993)

内川恵二,栗木一郎,篠田博之:カテゴリ比率評価法による開口色と表面色モードの見える表現, 照明学会誌, 78 2, 83-93(1994)

- Walsh V, Butler SR, Carden D, Kulikowski JJ: The effects of V4 lesions on the visual abilities of macaques: shape discrimination, Behav Brain Res 1992 Sep 28;50(1-2):115-26
- Wyszecki G, Stiles WS: Color Science, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York (1982)
- 山内泰樹,内川恵二 栗木一郎:表面色モード知覚のための限界輝度条件 映像情報メディア学会誌, 52, 227-234(1998)
- 山内泰樹,内川恵二:輝度勾配刺激に対する表面色モード知覚の限界輝度条件 ,VISION, 11, 1-11(1999)
- Yoshioka T, Dow BM, Vautin RG: Neuronal mechanisms of color categorization in areas V1, V2 and V4 of macaque monkey visual cortex, Behav Brain Res 1996 Apr;76(1-2):51-70
- Zeki, S: A Vision of the Brain, Blackwell scientific publications, Oxford (1993)

研究業績

学会誌等への発表（研究論文 3 件）

1. 鯉田孝和,内川恵二,色光の見えのモードと明るさとの色度特性比較 . VISION, 8(3), 143-148, 1996
2. 鯉田孝和,内川恵二,色空間の分類数に応じて現れる階層的なカテゴリカル色知覚,照明学会誌(投稿中)
3. 鯉田孝和,内川恵二,中間色設定のばらつきから示される色差評価の変化, VISION ,(準備中)

学会誌等への発表（講演要旨 3 件）

1. 鯉田孝和,内川恵二,栗木一郎,色調整のばらつきから見る色差評価の変化 . VISION, 11(2), 89-92, 1999
2. 鯉田孝和,栗木一郎,内川恵二,被験者ごとの色分類領域とカテゴリカルカラーネーミングによる分割領域の比較 . VISION, 10(3), 133-136, 1998
3. 鯉田孝和,栗木一郎,内川恵二,色差評価の限界色度差の測定 . VISION, 9(4), 241-244, 1997

国際会議（ 4 件）

1. K. Koida, K. Uchikawa, EFFECTS OF LIMITS OF COLOR-DIFFERENCE JUDGEMENT ON COLOR ADJUSTMENTS. IOVS, 40(4), s748, 1999. (ARVO Annual Meeting, 1999, May, 9-12-14, Fort Lauderdale, Florida)
2. K. Koida, K. Uchikawa, COMPARISON OF BOUNDARIES FOR CATEGORICAL COLOR REGIONS AND PERCEPTUAL COLOR DIFFERENCE LIMITS. IOVS, 39(4), s157, 1998. (ARVO Annual Meeting, 1998, May, 10-15, Fort Lauderdale, Florida)
3. Kouwa Koida, Ichiro Kuriki and Keiji Uchikawa, Comparison of color-difference limits with categorical color regions. OSA ANNUAL MEETING, WFF27, 1997 (OSA ANNUAL MEETING, Long Beach, California, 1997. 10. 12-14,15,16,17)
4. Kouwa Koida, Ichiro Kuriki and Keiji Uchikawa, MEASUREMENT OF COLOR-DIFFERENCE JUDGEMENT-BOUNDARIES IN A COLOR SPACE. AIC Color 97 Kyoto, H-P13-06,1997 (The 8th Congress of the International Colour Association, Kyoto, 1997. 5. 25-30)

国内学会,研究会（ 17 件）

1. 鯉田孝和,内川恵二,色カテゴリーによる色差の評価基準の変化. 第60回応用物理学会学術講演会講演予稿集, No.0, 69, 1999 (第60回応用物理学会学術講演会, 1999年9月1,2-4日,甲南大学)
2. 鯉田孝和,内川恵二,色空間の階層的な分割. 映像情報メディア学会99(映像情報メディア学会, 1999年8月24日,工学院大学)
3. 鯉田孝和,内川恵二,色差の評価基準の変化とカテゴリカル色知覚. VISION, 11(3), 138, 1999. (日本視覚学会1999年夏期研究会, 1999年7月26,27,28日,河口湖畔サニーデビレッジ)
4. 鯉田孝和,伊東由紀,栗木一郎,内川恵二,表面色モードの輝度限界とオプティマルカラーの類似. 第46回応用物理学関係連合講演会予稿集, No.3, 1088, 1999. (第46回応用物理学関係連合講演会, 1999年3月28,29-31日,東京理科大)

5. 鯉田孝和, 内川恵二, 色調整のばらつきから見る色差評価の変化. VISION, 11(1), 47, 1999. (日本視覚学会 1999 年冬季大会, 1999 年 1 月 25-27 日, 工学院大学)
6. 鯉田孝和, 内川恵二, 栗木一郎, 比較刺激の色差に応じた色差知覚の変化, カラーフォーラム Japan 198 論文集 (カラーフォーラム Japan 198, 1998 年 11 月 11 日, 工学院大学)
7. 鯉田孝和, 内川恵二, 栗木一郎, 色差評価に対する色空間の非線形性. 光学連合シンポジウム岡山 '98 講演予稿集, 267 (光学連合シンポジウム岡山 '98, 1998 年 9 月 18, 19 日, 岡山大学)
8. 鯉田孝和, 伊東由紀, 栗木一郎, 内川恵二, 色空間全域のカテゴリカル領域分割. 第 45 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 73(第 45 回応用物理学関係連合講演会, 1998 年 3 月 28,29-31 日, 東京工科大学)
9. 鯉田孝和, 内川恵二, 被験者ごとの色分類領域とカテゴリカルカラーネーミングによる分割領域の比較 (日本視覚学会 1998 年冬季大会, 1998 年 1 月 22 日, 工学院大学)
10. 鯉田孝和, 内川恵二, 栗木一郎, 色空間のカテゴリカル分割と小色差評価の限界. 視覚科学フォーラム第一回研究会「人の視覚と神経生理学」, 31 (視覚科学フォーラム第一回研究会「人の視覚と神経生理学」, 1997 年 8 月 22,23,24, 岡崎国立共同研究機構 岡崎カンファランスセンター)
11. 鯉田孝和, 栗木一郎, 内川恵二, 刺激の色度差による色差判断基準の変化. VISION, 9(3), 197, 1997. (日本視覚学会 1997 年夏期研究会, 1997 年 7 月 28,29,30 日, 河口湖畔サニーデビレッジ)
12. 鯉田孝和, 栗木一郎, 内川恵二, 色差評価の限界色度差の測定. VISION, 9(1), 40, 1997. (日本視覚学会 1997 年冬期研究会, 1997 年 1 月 13,14,15 日, 工学院大学)
13. 鯉田孝和, 栗木一郎, 内川恵二, 色の見えのカテゴリ空間への分類. 光学連合シンポジウム福岡 '96 講演予稿集, 267 (光学連合シンポジウム福岡 '96, 1996 年 9 月 6, 7 日, 九州大学箱崎地区)
14. 鯉田孝和, 内川恵二, カテゴリ空間の段階的な形成. VISION, 8(3), 182, 1996. (日本視覚学会 1996 年夏期研究会, 1996 年 7 月 28,29,30 日, 河口湖畔サニーデビレッジ)
15. 鯉田孝和, 内川恵二, 色度による表面色と開口色のモード変化. カラーフォーラム JAPAN195 論文集, 151, (カラーフォーラム JAPAN195, 1995 年 10 月 25, 26 日, 工学院大学)
16. 鯉田孝和, 内川恵二, 光源色・表面色のモード変化の色度特性. 光学連合シンポジウム東京 '95 講演予稿集, 269 (光学連合シンポジウム東京 '95, 1995 年 9 月 20-22 日, 日本女子大学)
17. 鯉田孝和, 内川恵二, 光源色と表面色のモード変化の色度特性. VISION, 7(3), 122, (日本視覚学会 1995 年夏期研究会, 1995 年 7 月 31, 8 月 1,2 日, レオニオン (財) 石川県青年会館)

付録：分類実験の各被験者の全分類数の分類境界．

(1) jg 平面での切り出し

TS A.1-4

NI A.5-8

YT A.9-12

HY A.13-16

MN A.17-20

(2) j L 平面での切り出し

TS A.21-24

NI A.25-28

YT A.29-32

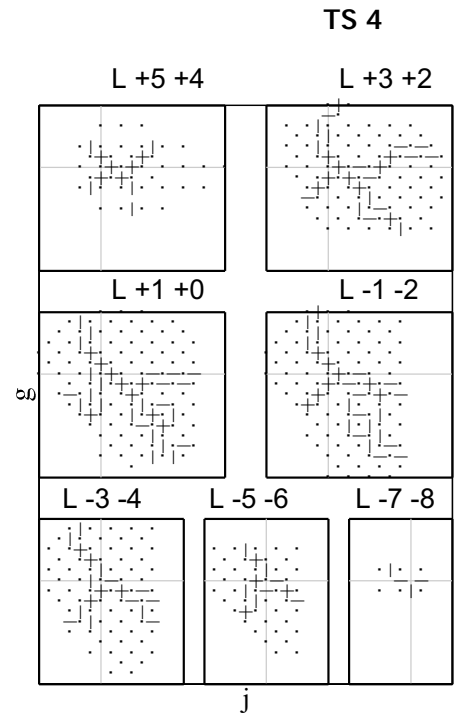
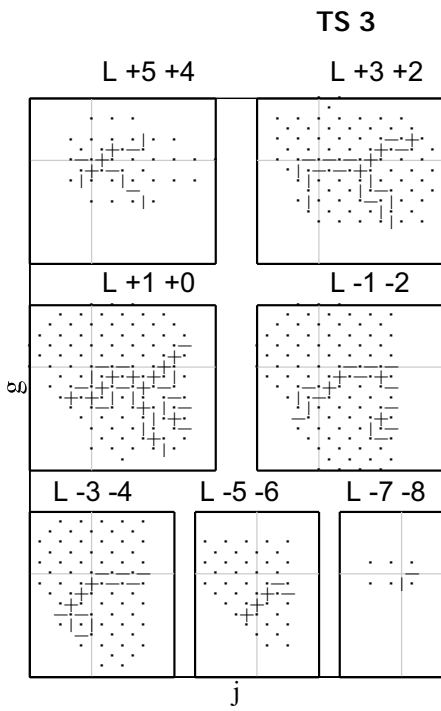
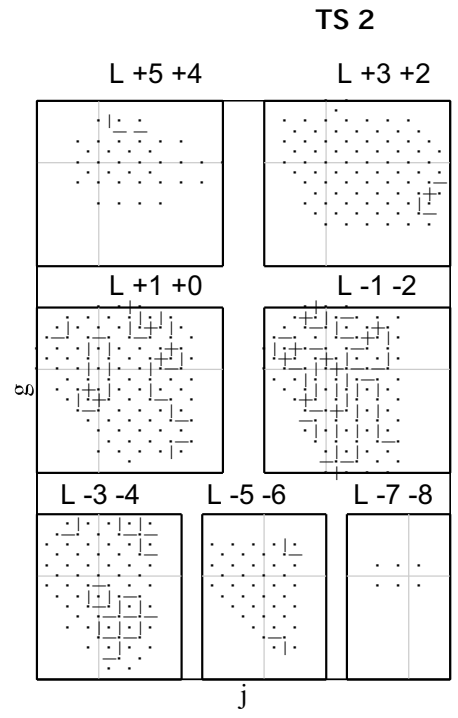
HY A.33-36

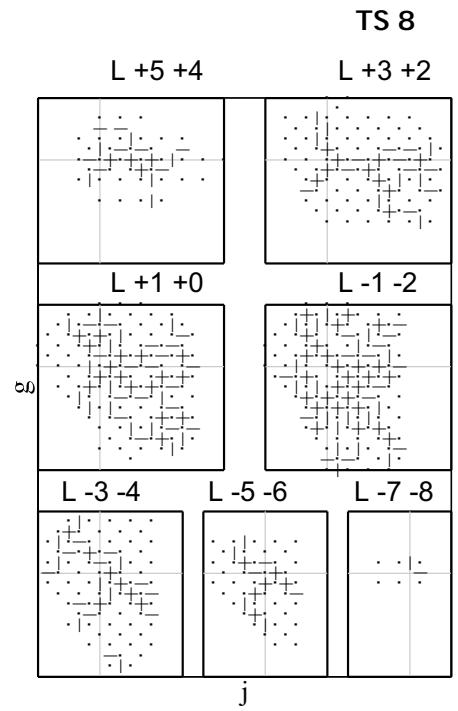
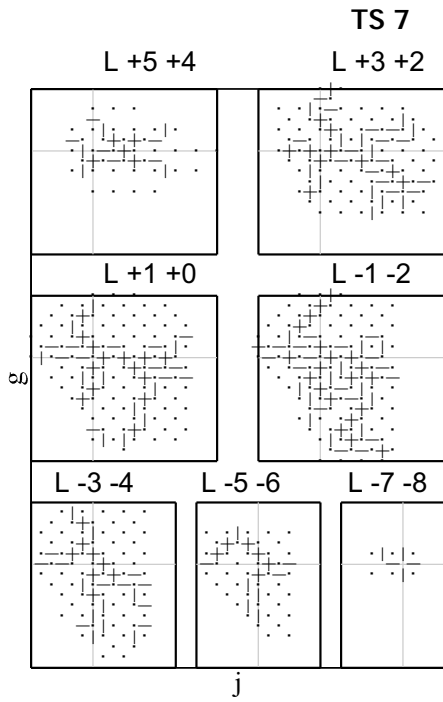
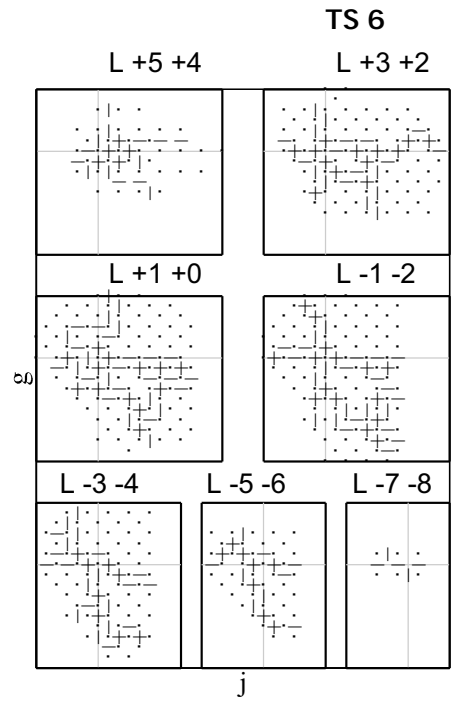
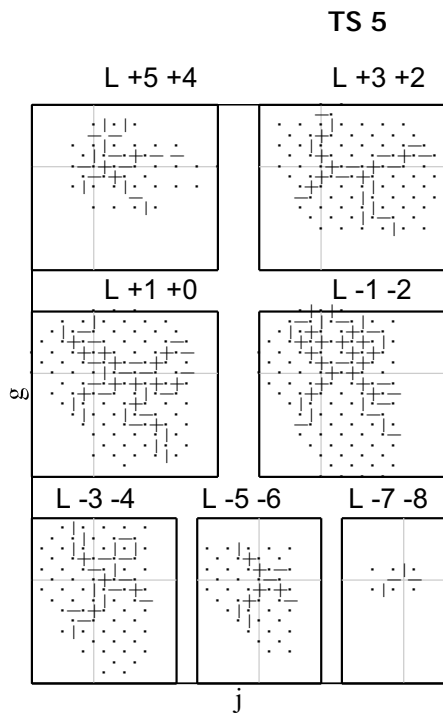
MN A.37-40

OSA 色票は，それぞれ 1 2 個の均等に離れた色票と隣り合っている．

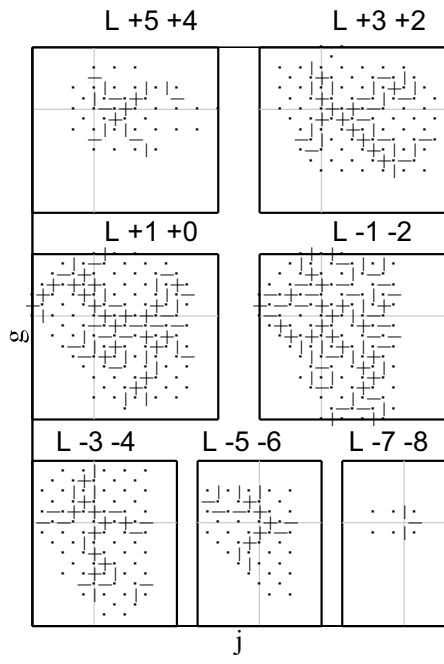
(1) jg 平面上で隣接する 4 色票との分類境界をバーで示す．

(2) 明度が異なって隣接する 8 色票との関連をバーで示す．

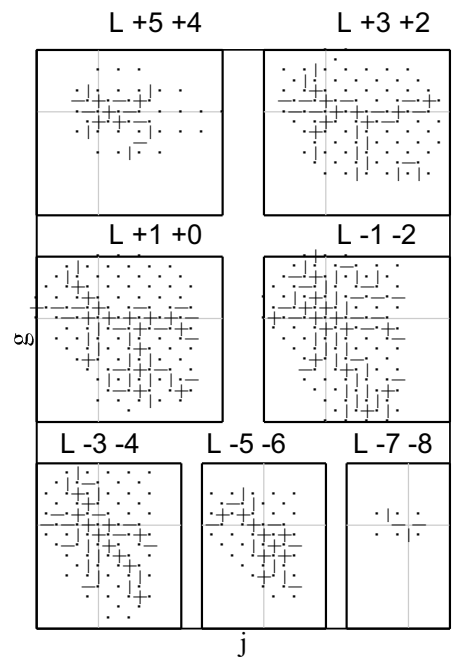




TS 9

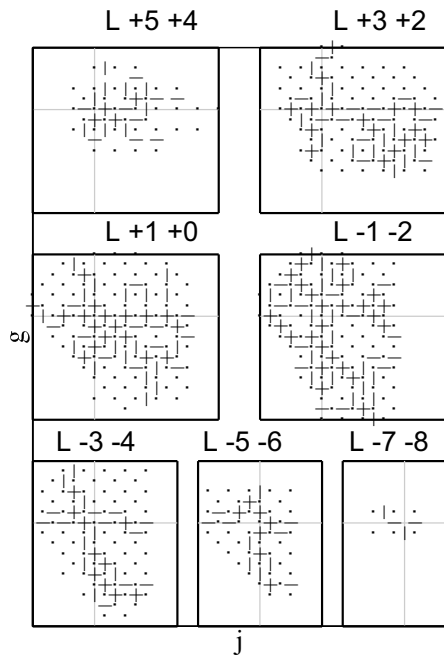


TS 10

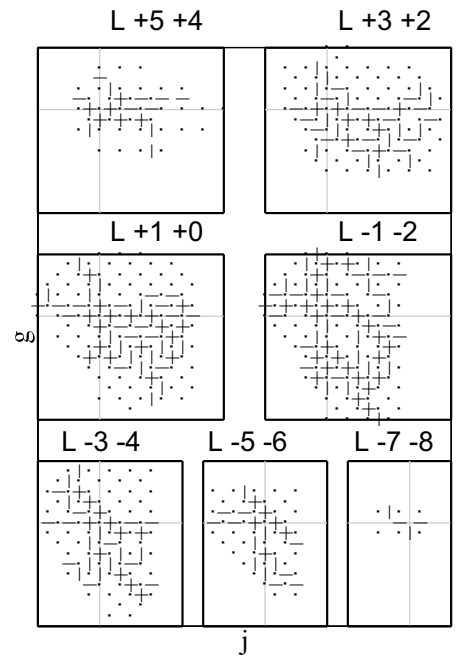


TS 14

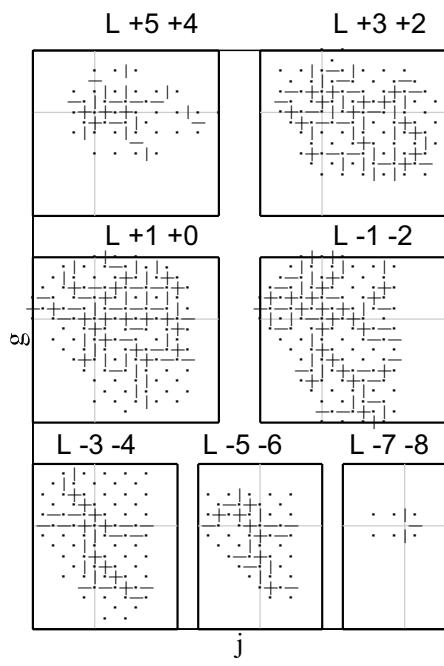
TS 11



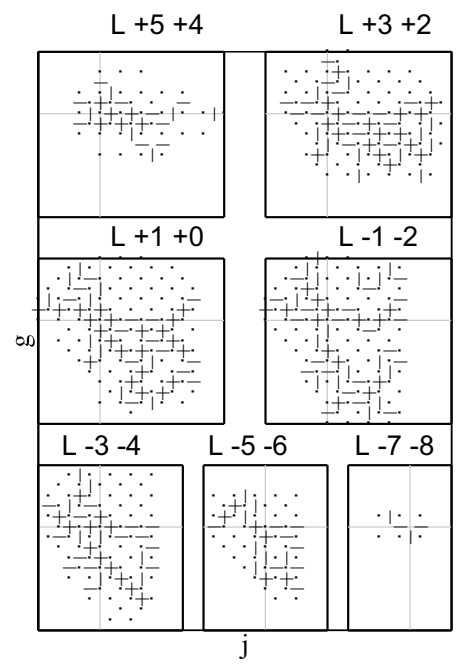
TS 12

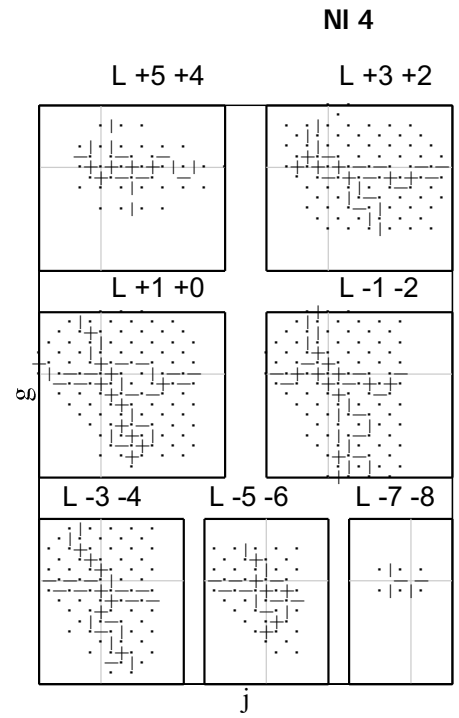
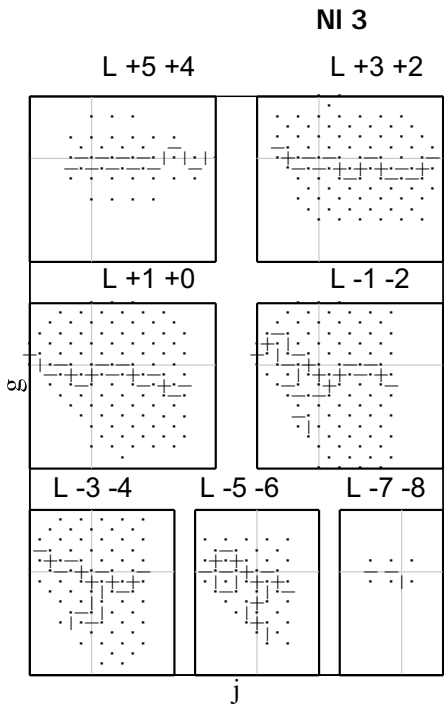
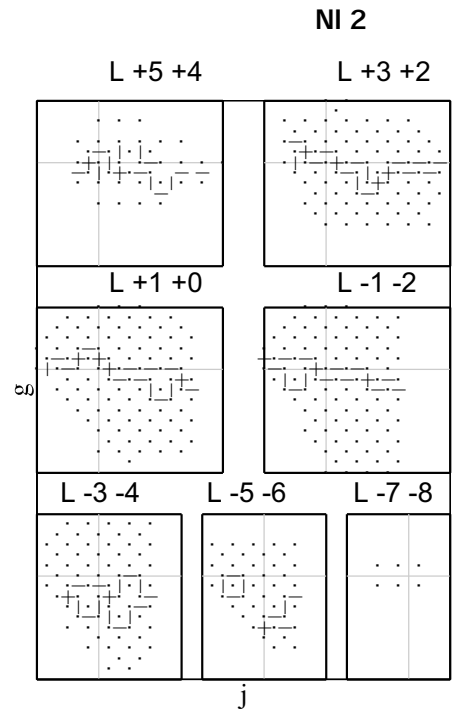


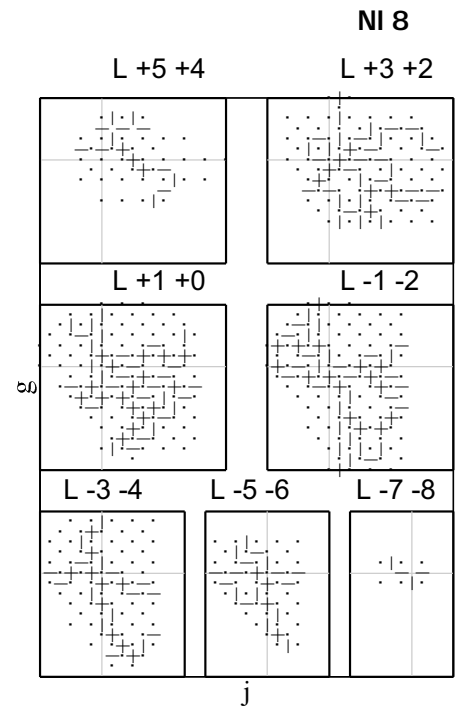
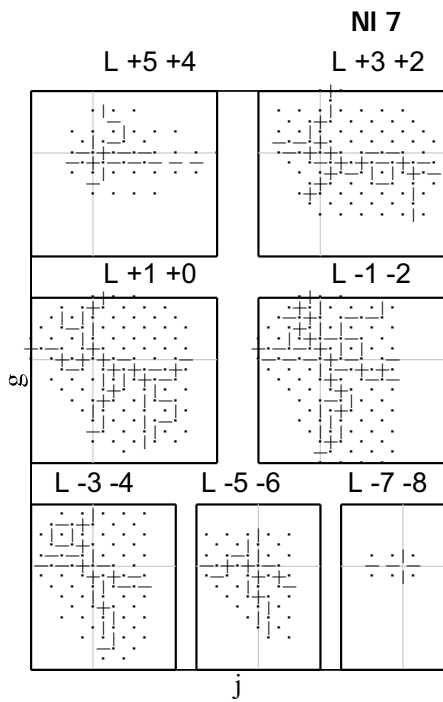
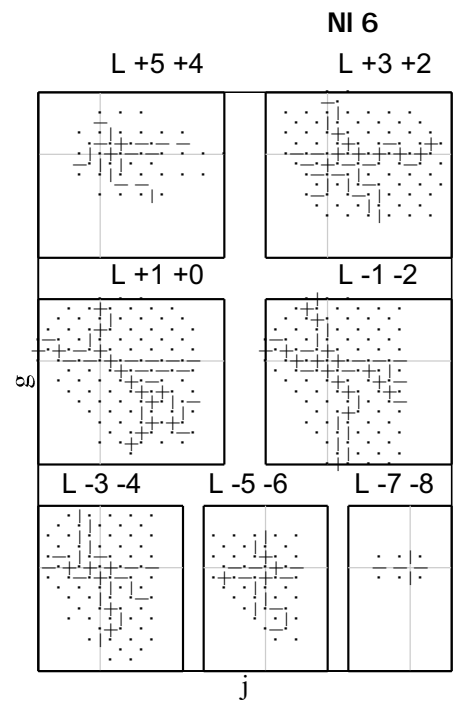
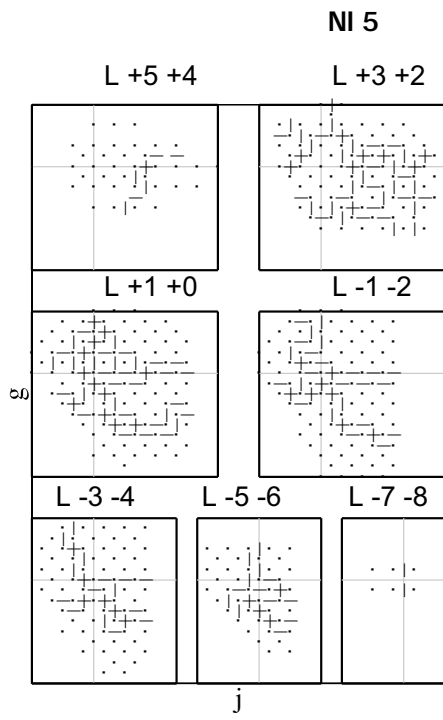
TS 13



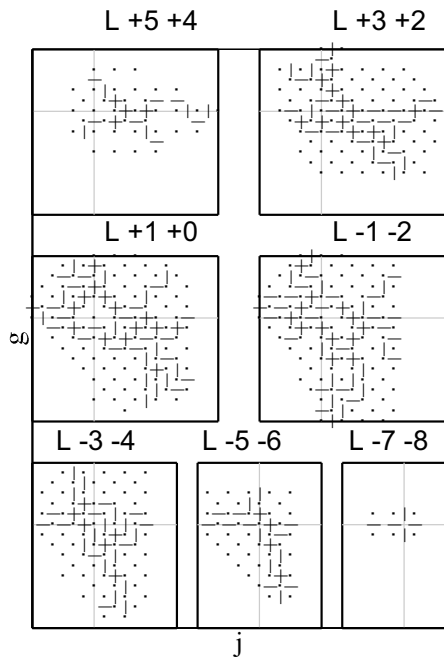
TS 14



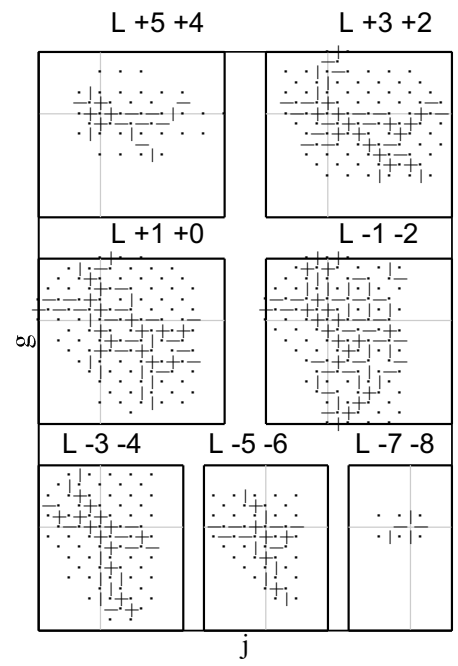




NI 9

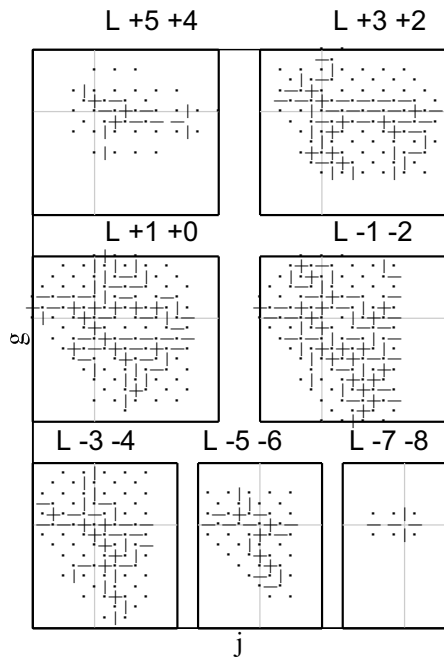


NI 10

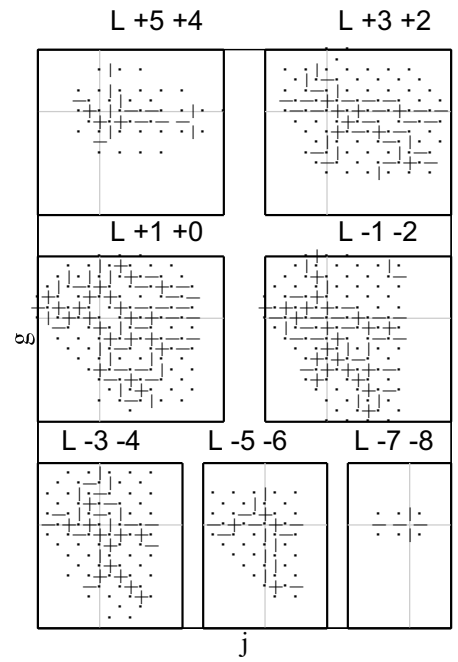


NI 14

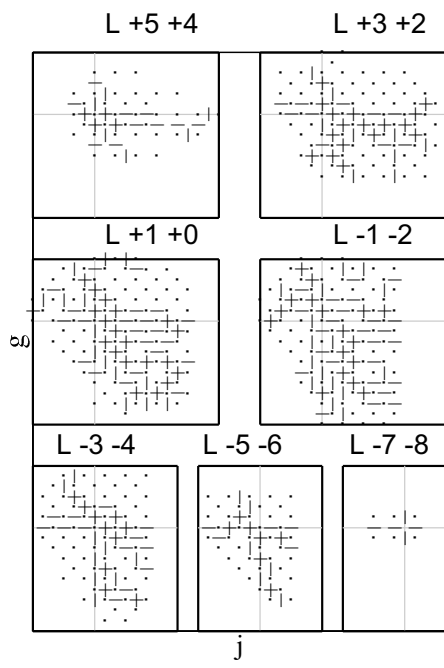
NI 11



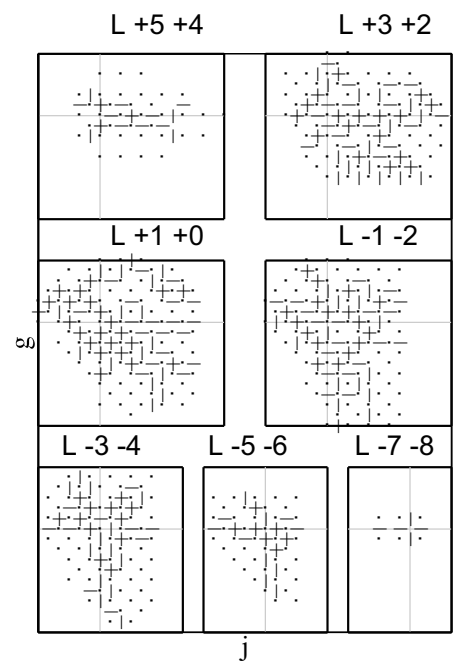
NI 12

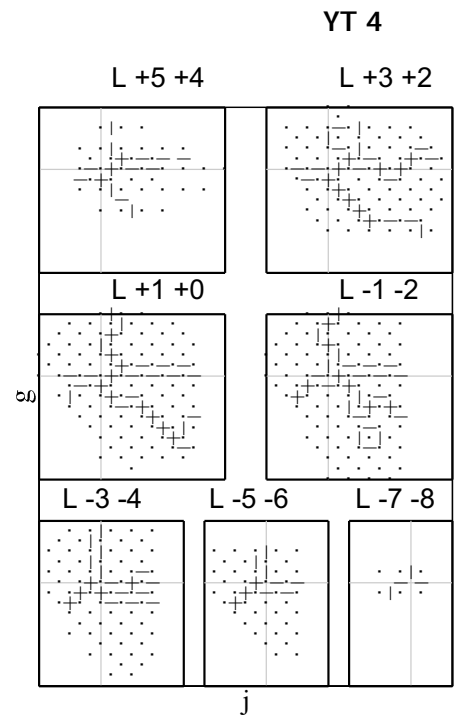
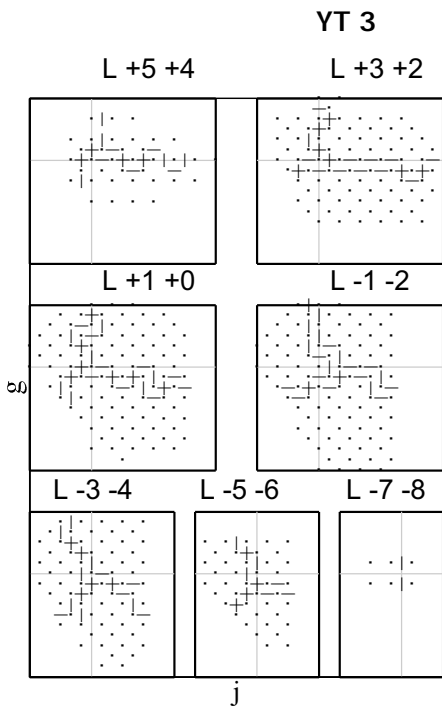
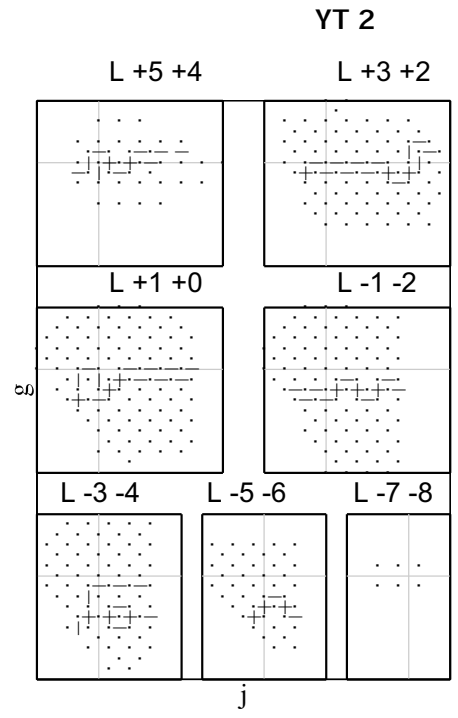


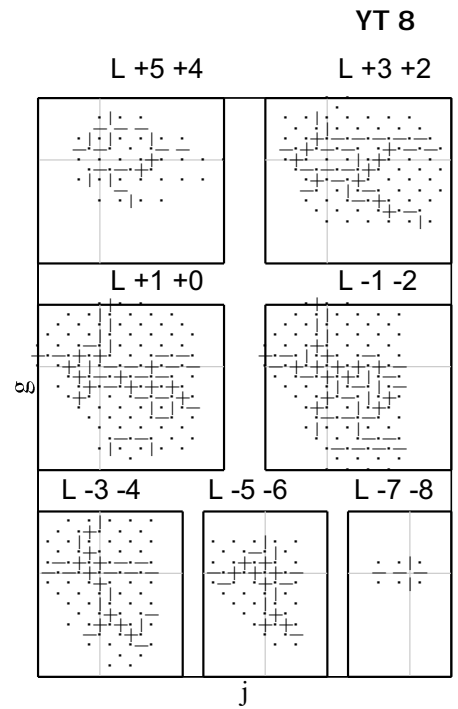
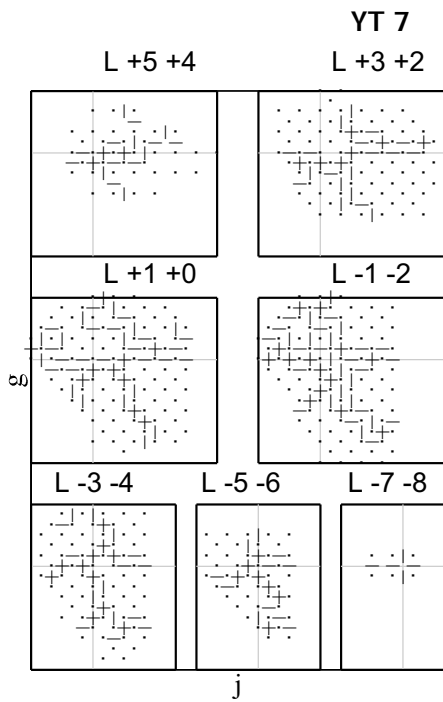
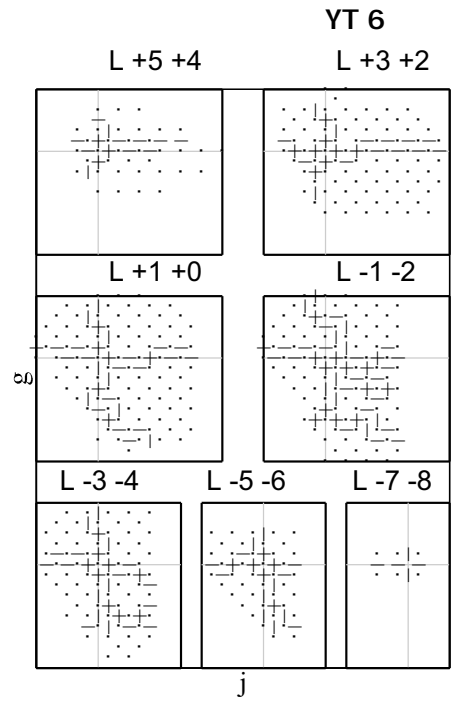
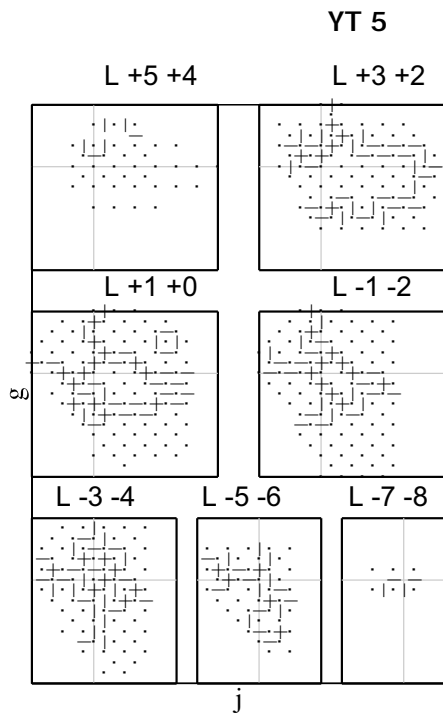
NI 13



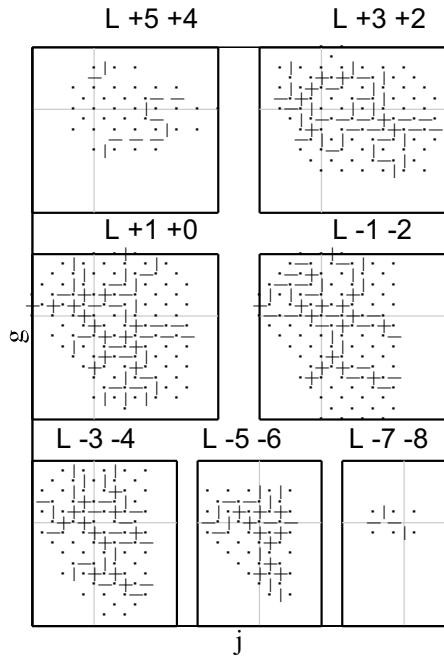
NI 14



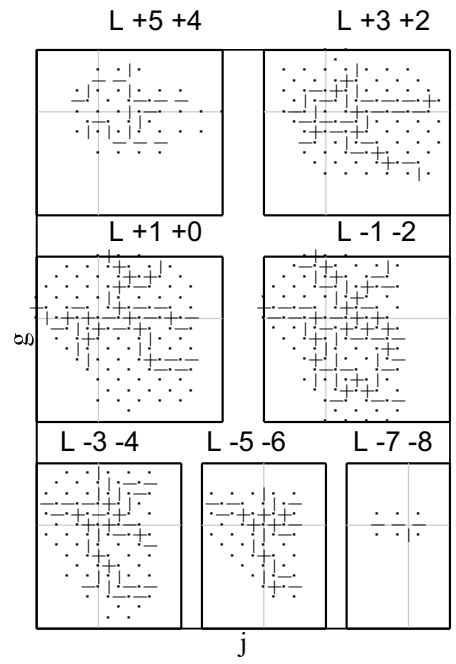




YT 9

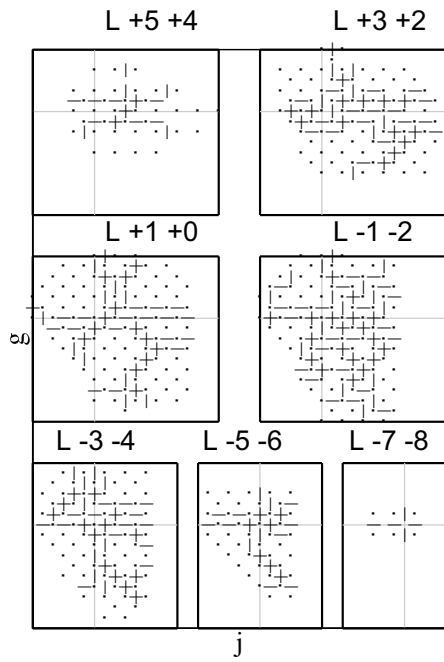


YT 10

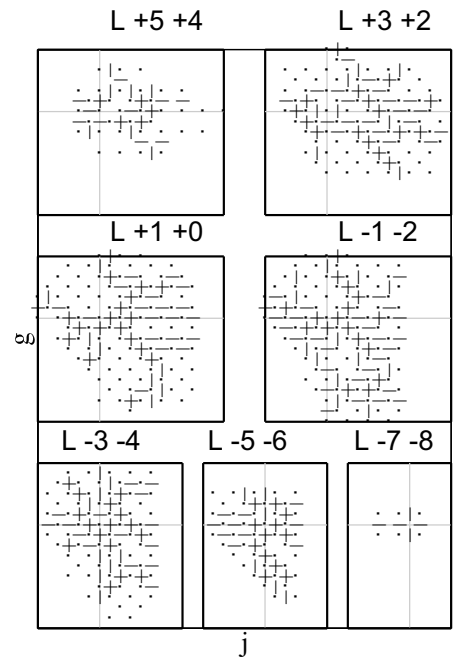


YT 14

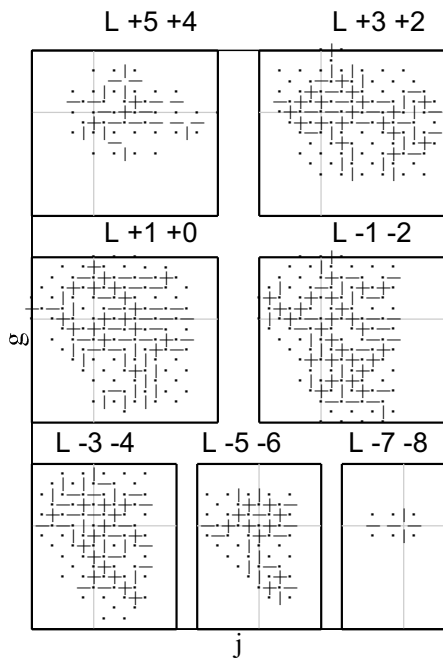
YT 11



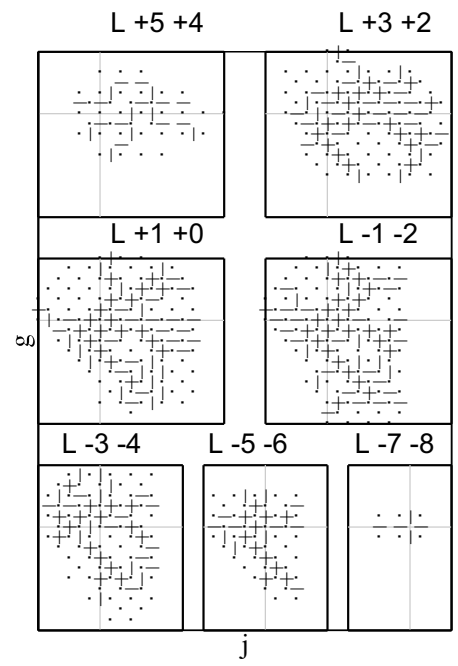
YT 12

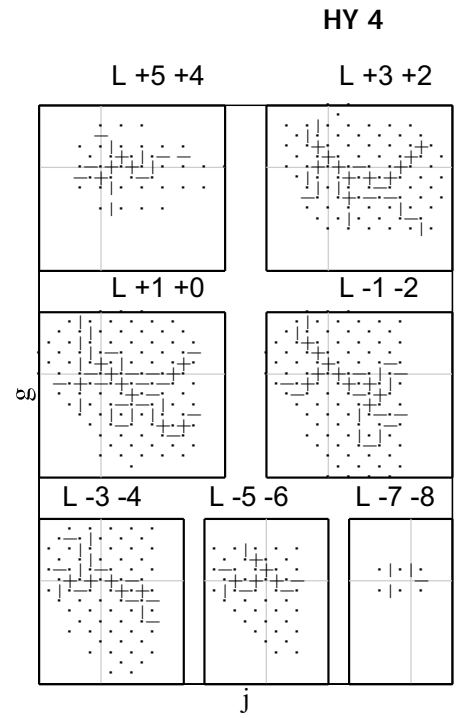
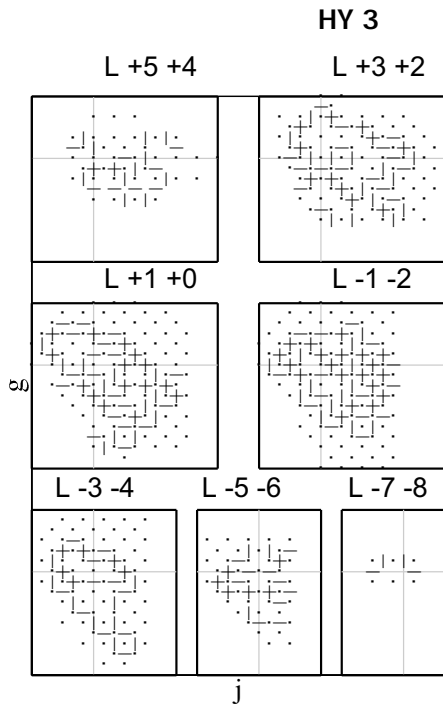
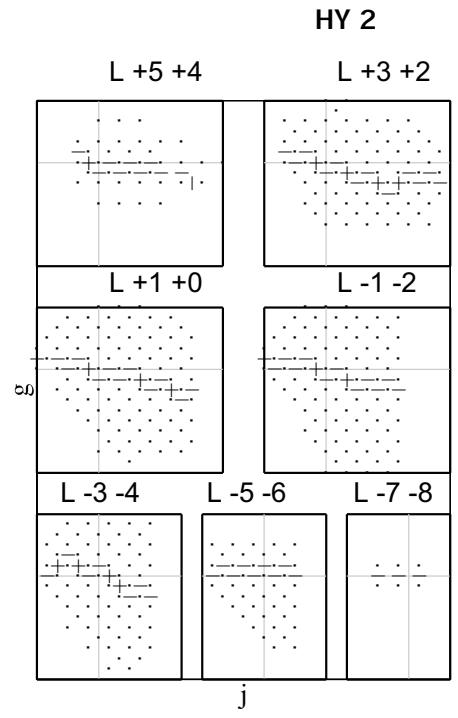


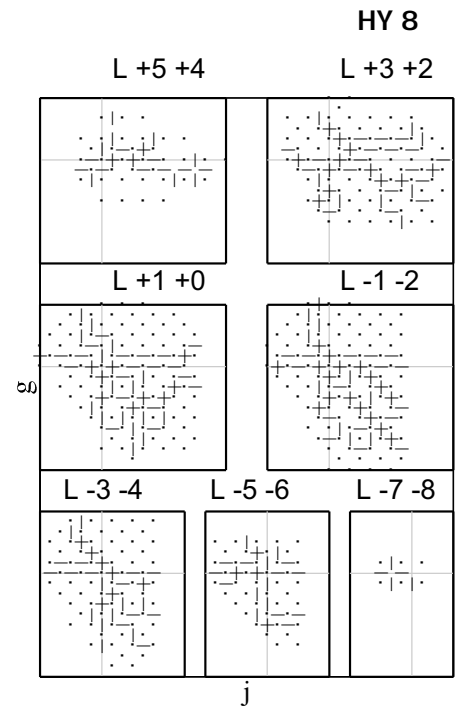
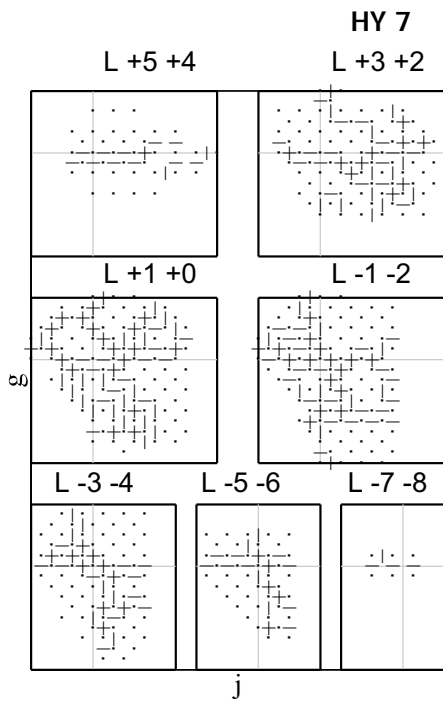
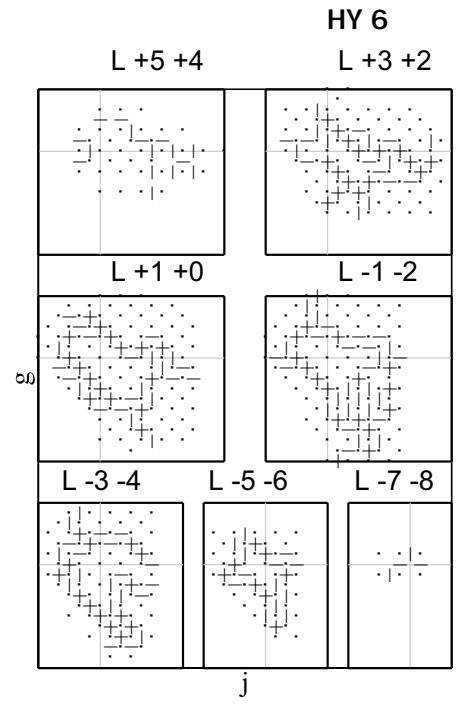
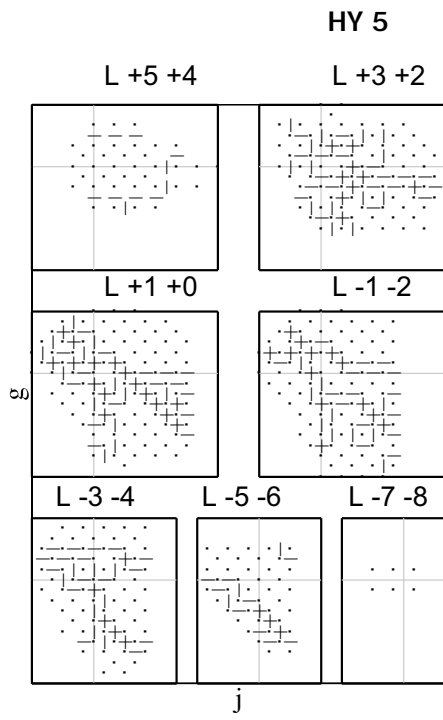
YT 13



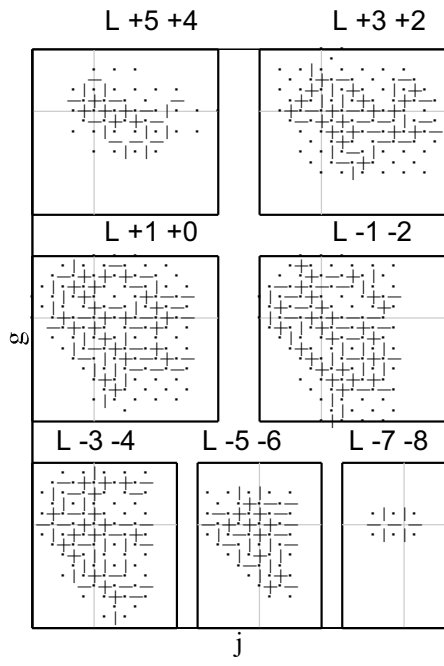
YT 14



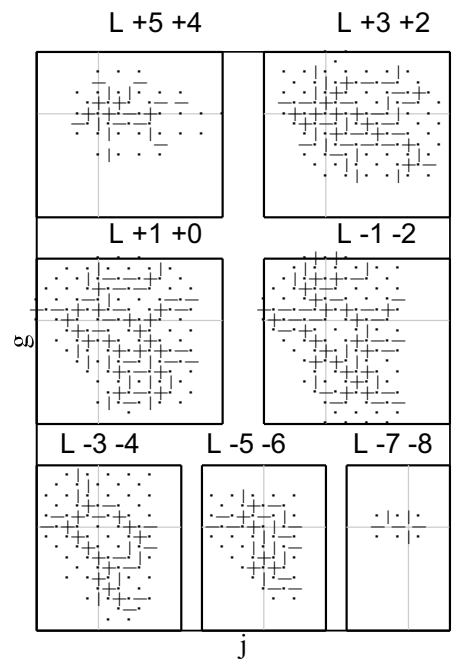




HY 9

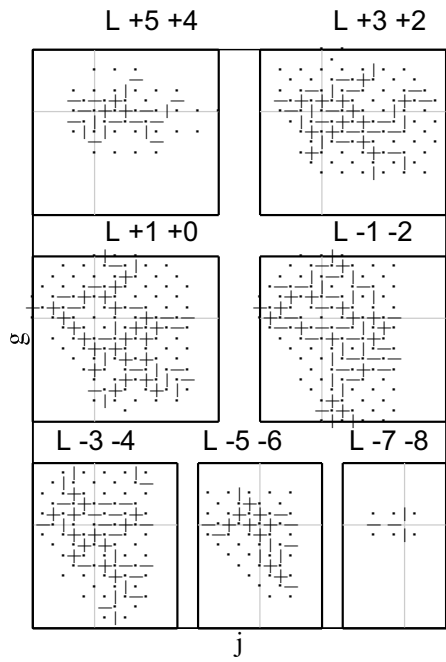


HY 10

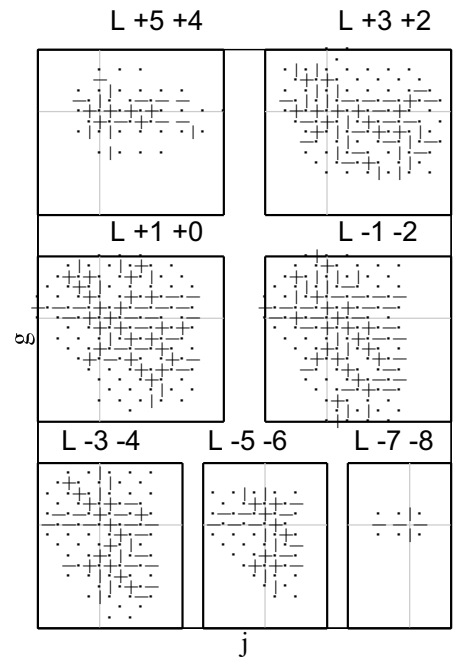


HY 14

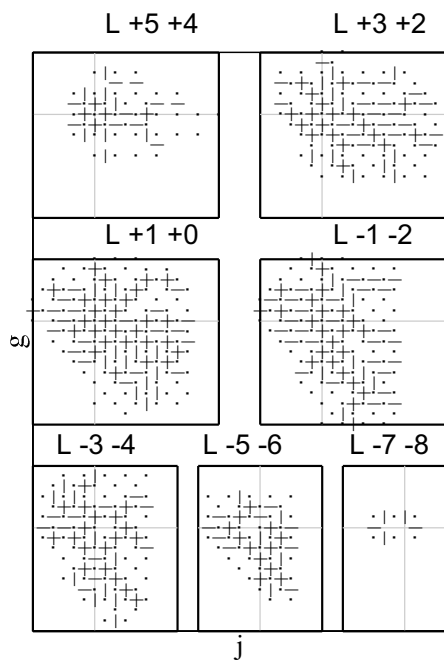
HY 11



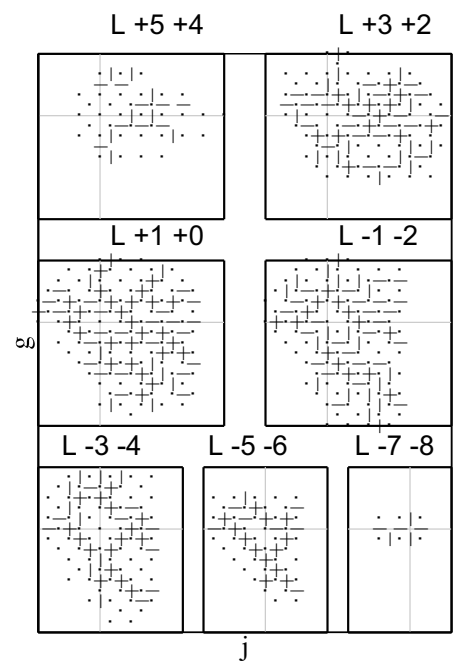
HY 12



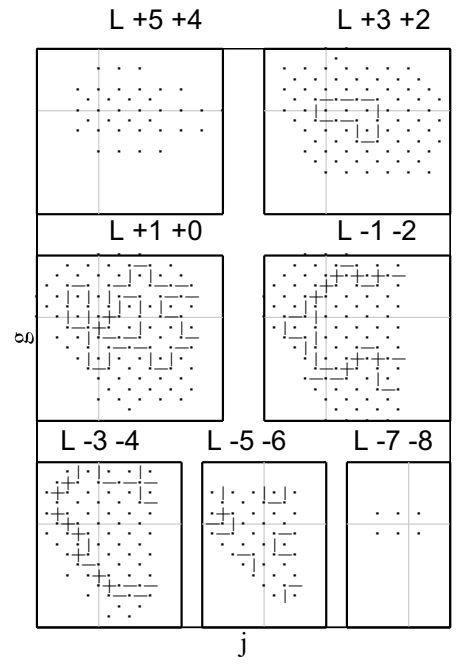
HY 13



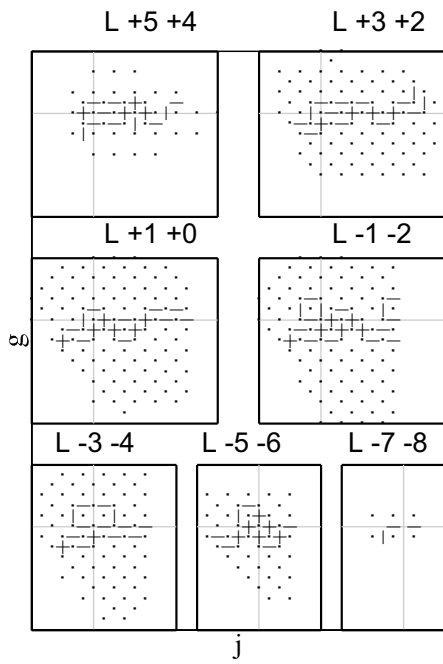
HY 14



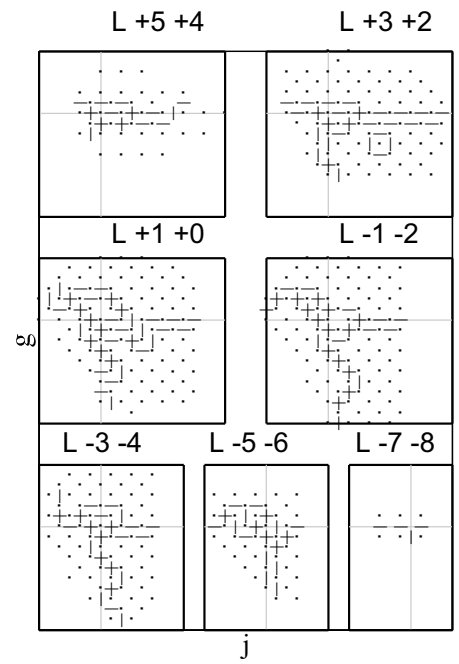
MN 2

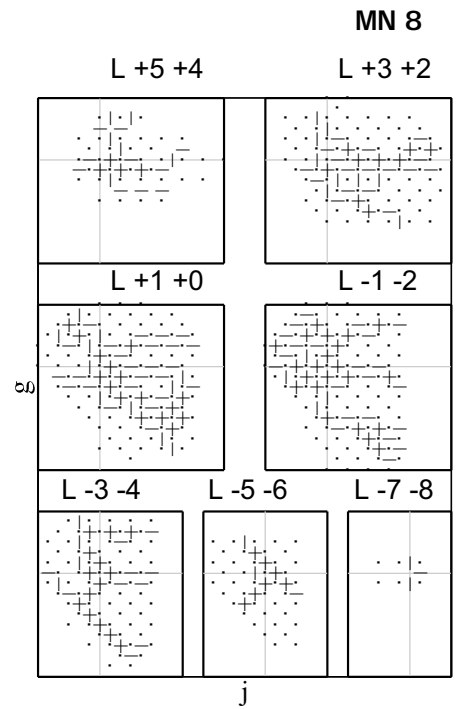
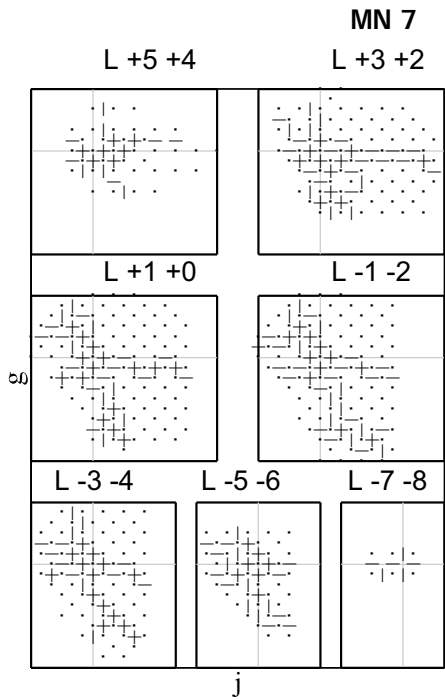
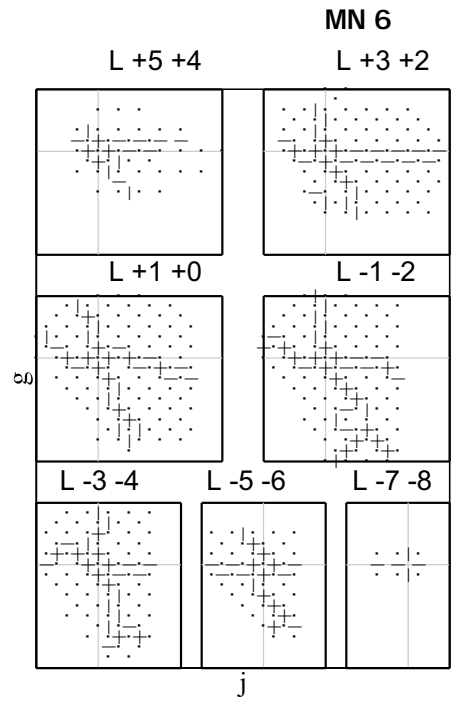
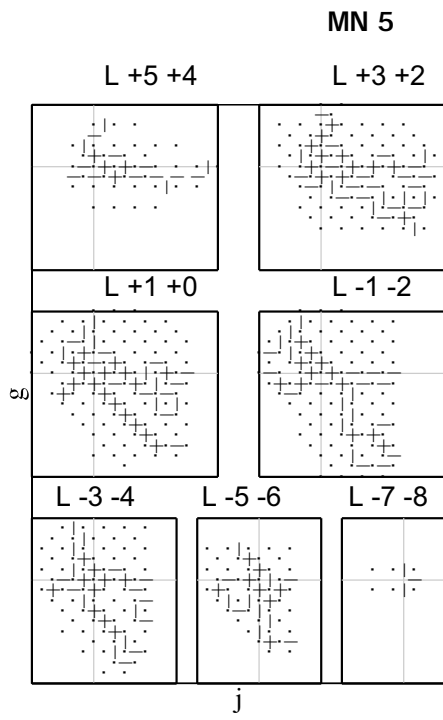


MN 3

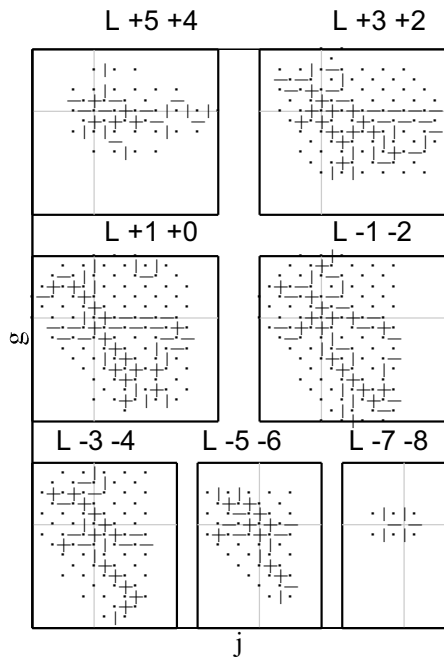


MN 4

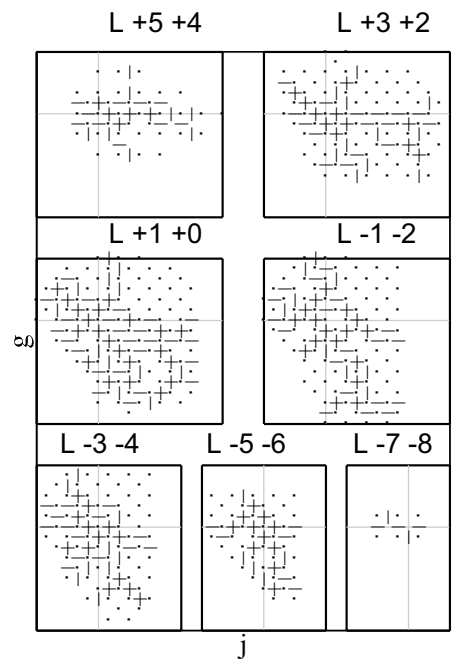




MN 9

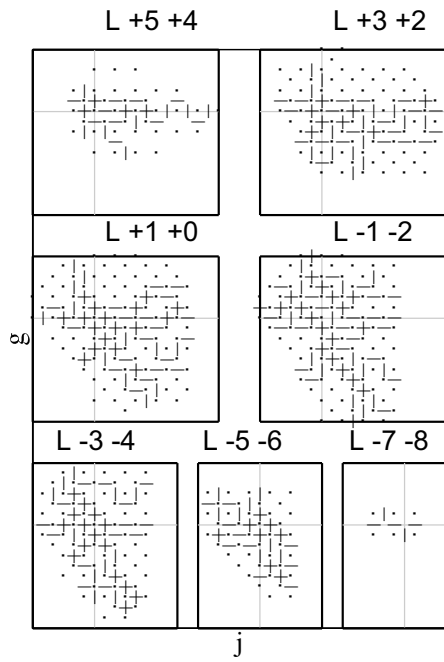


MN 10

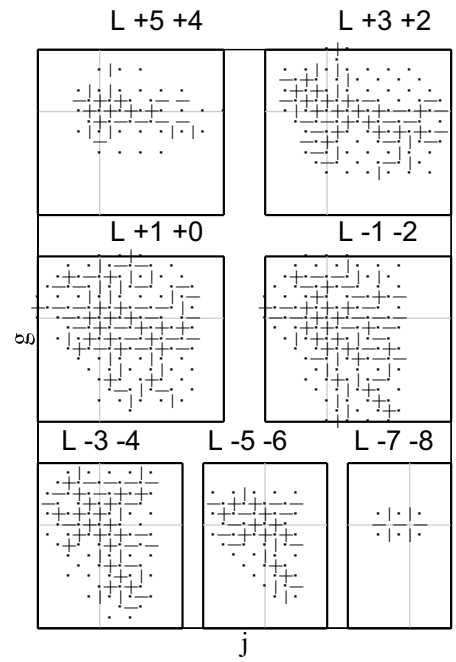


MN 14

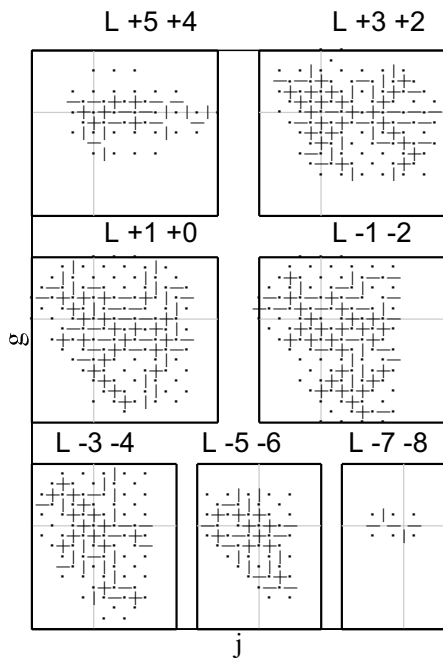
MN 11



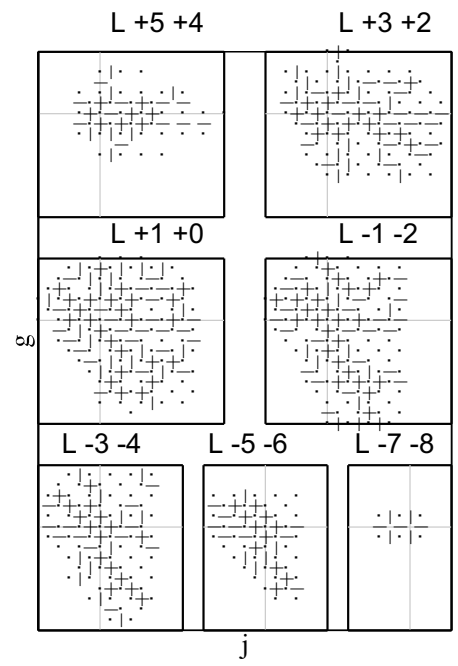
MN 12



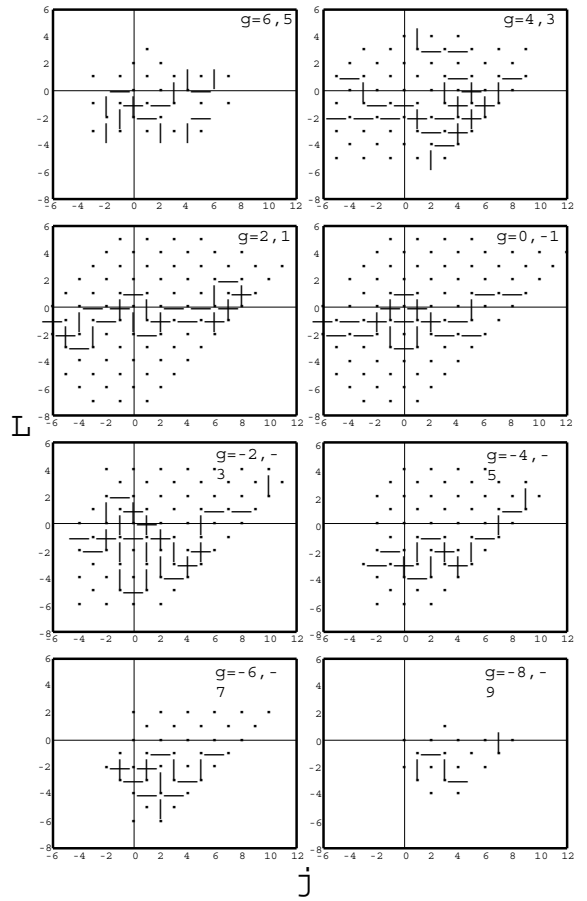
MN 13



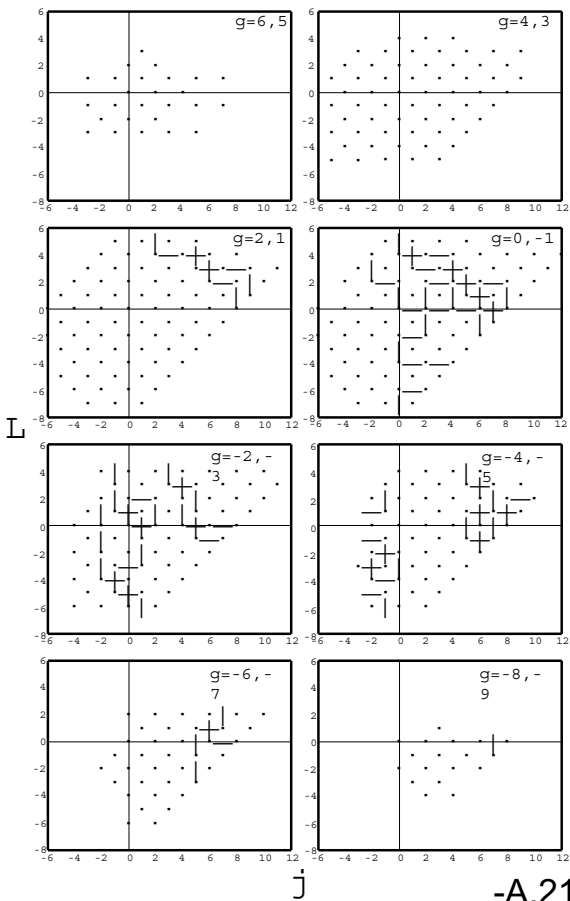
MN 14



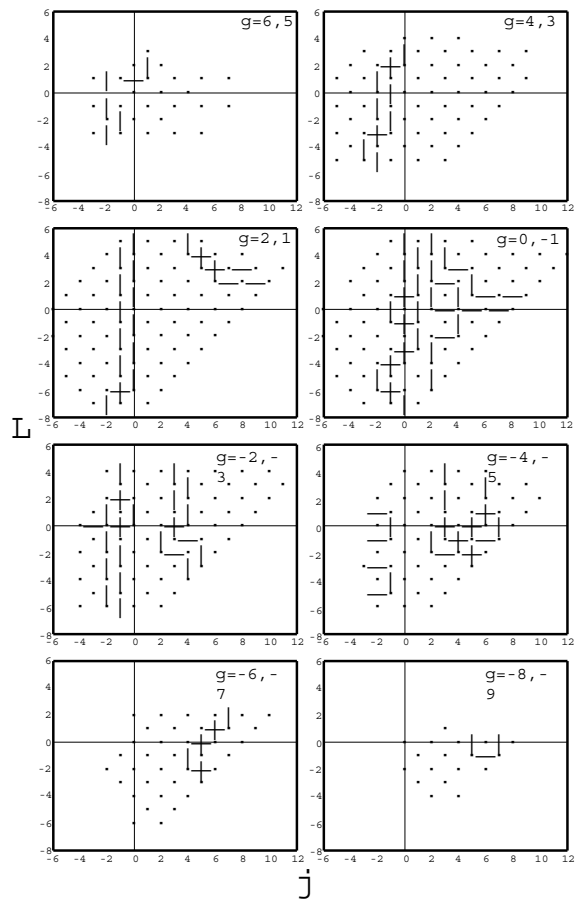
TS 2



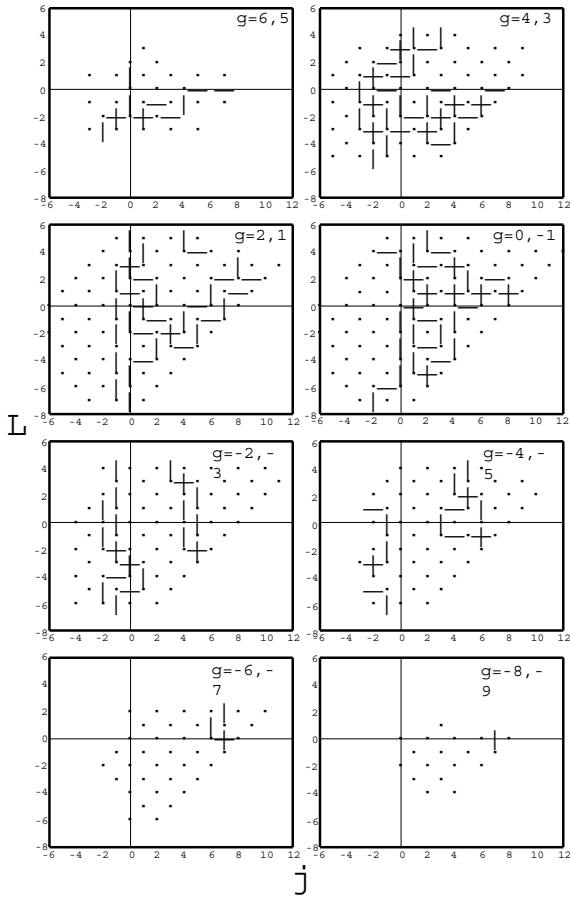
TS 3



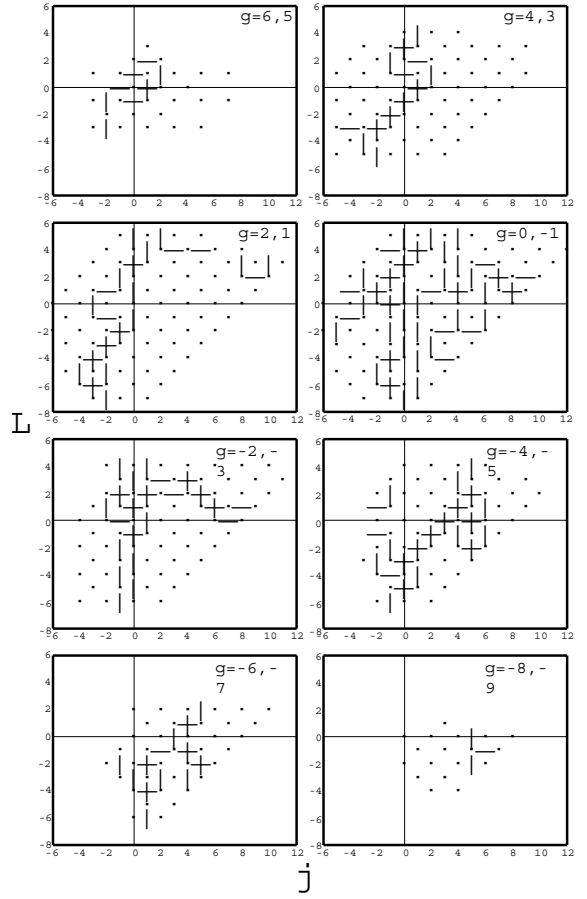
TS 4



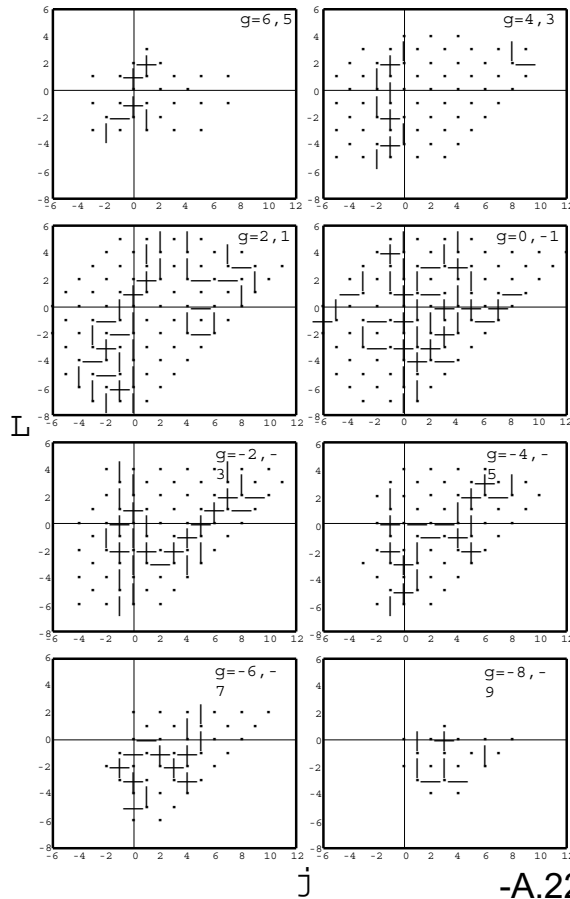
TS 5



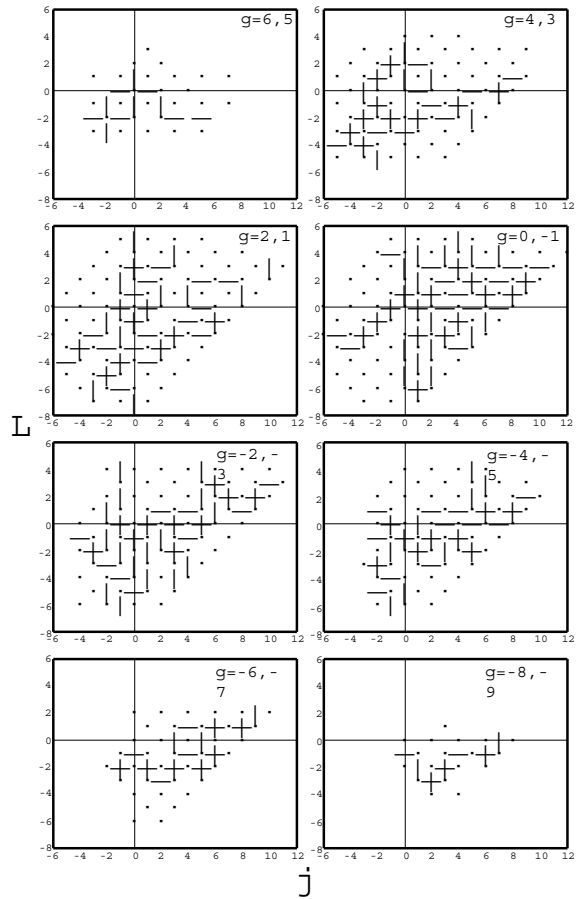
TS 6



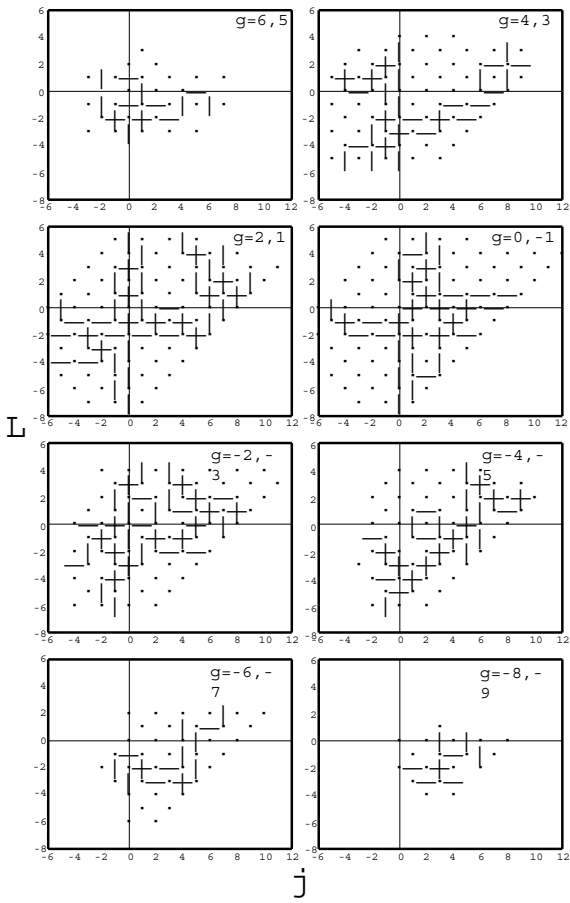
TS 7



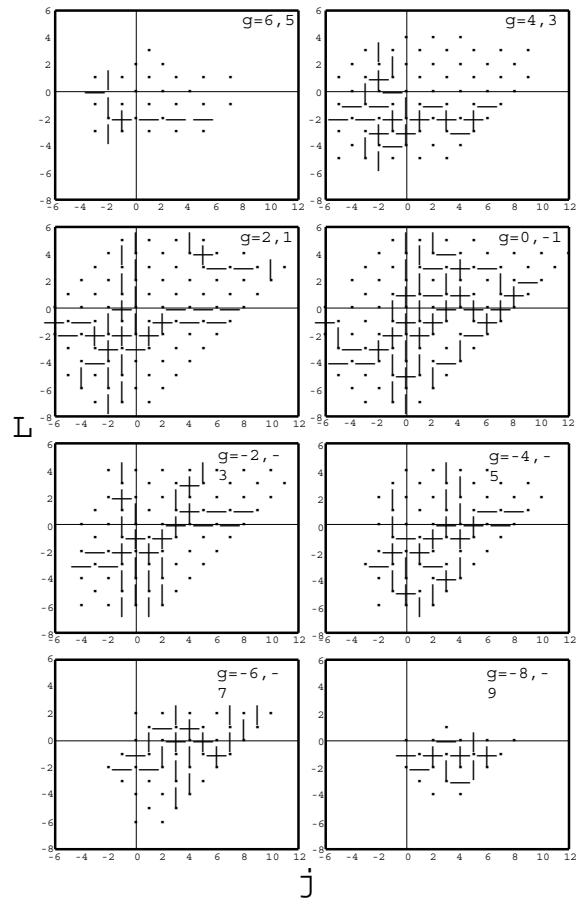
TS 8



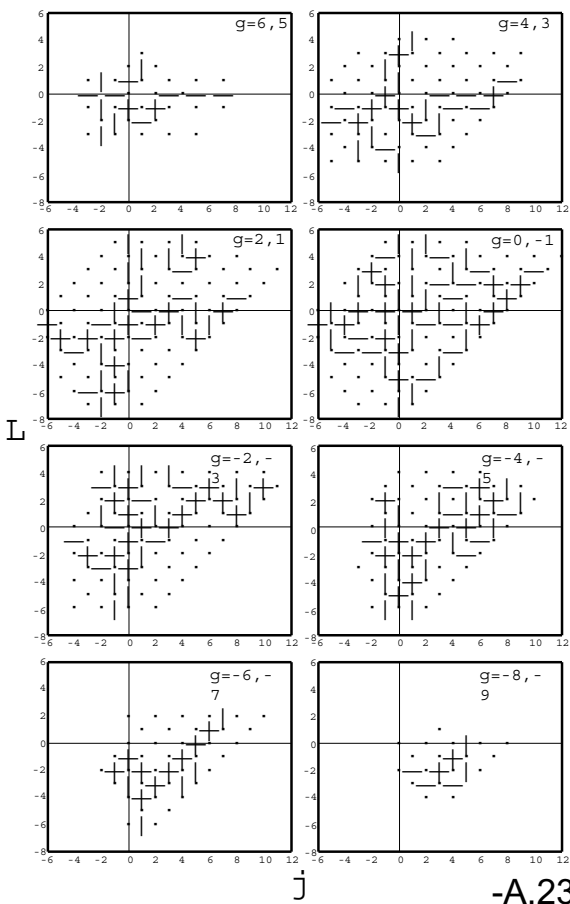
TS 9



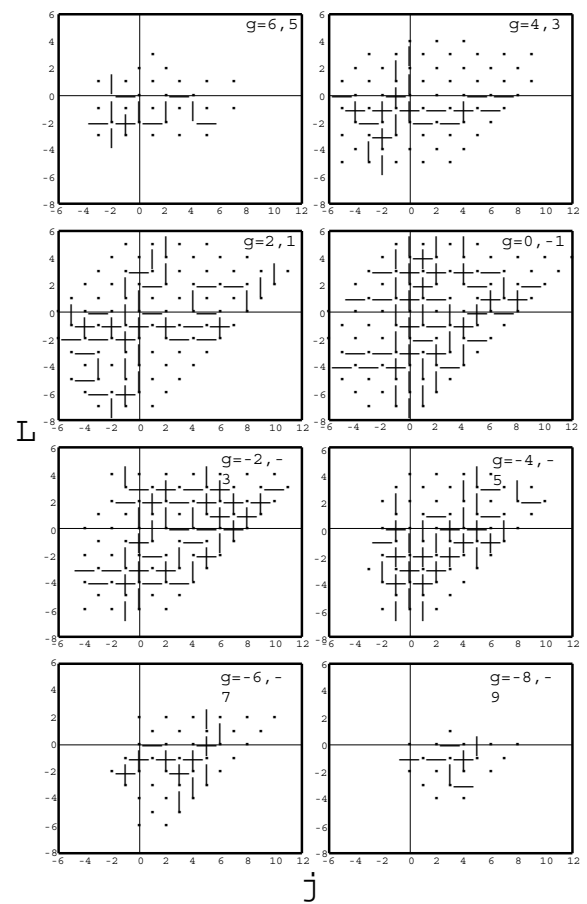
TS 10



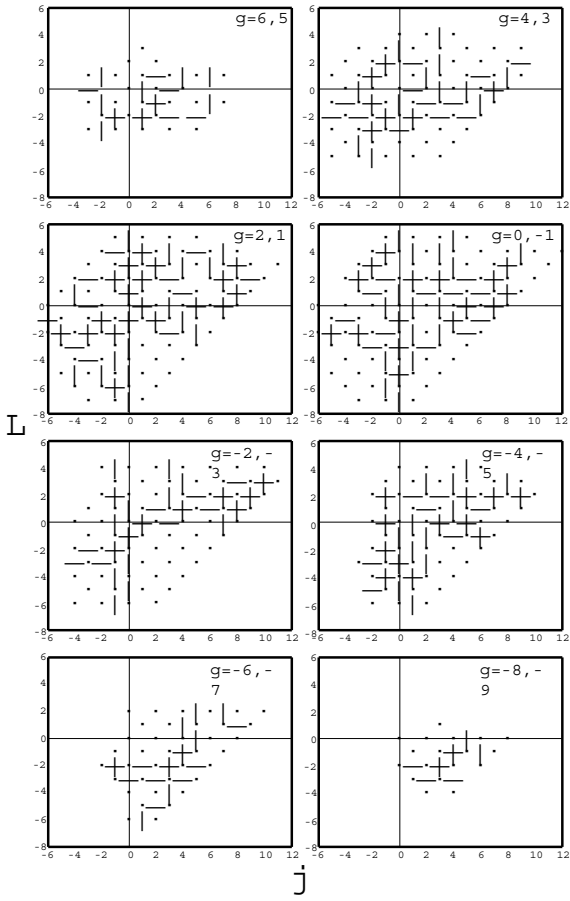
TS 11



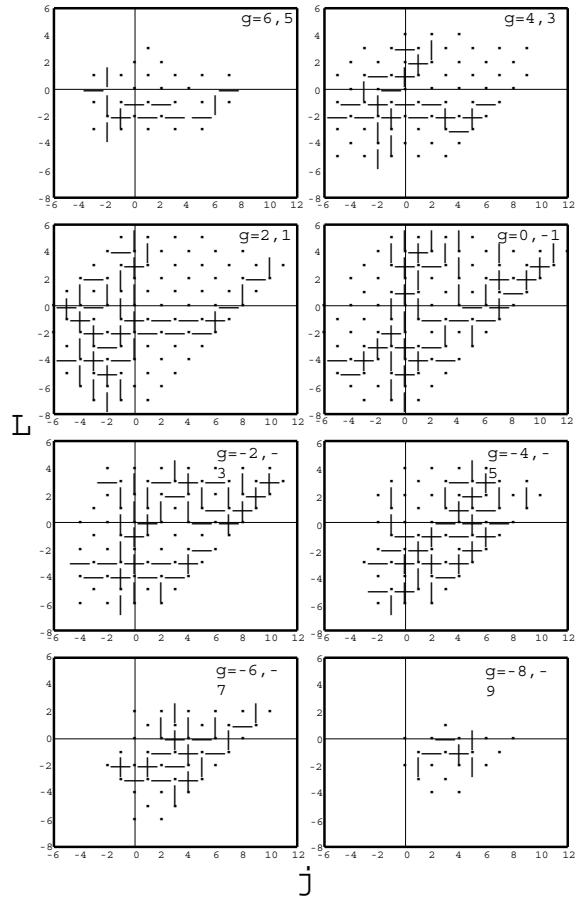
TS 12



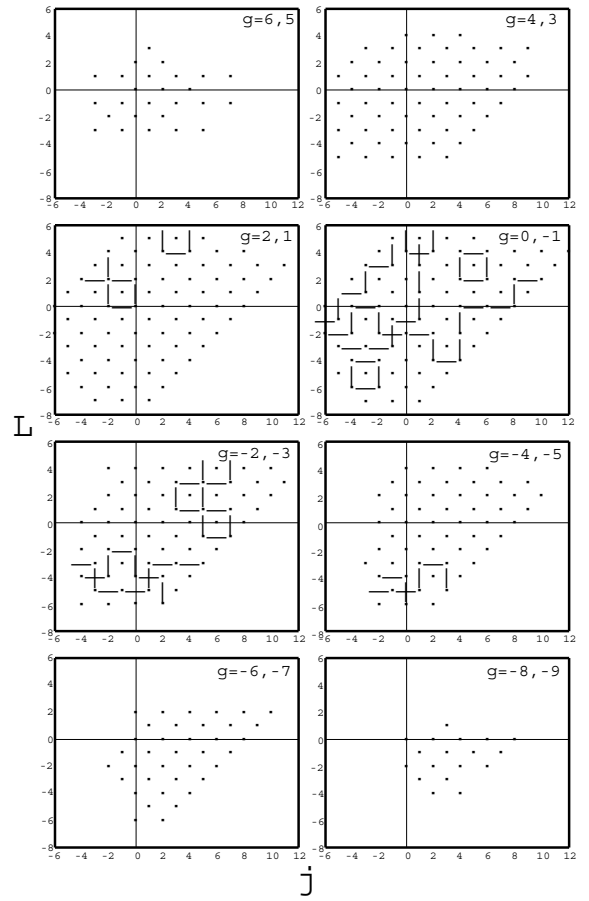
TS 13



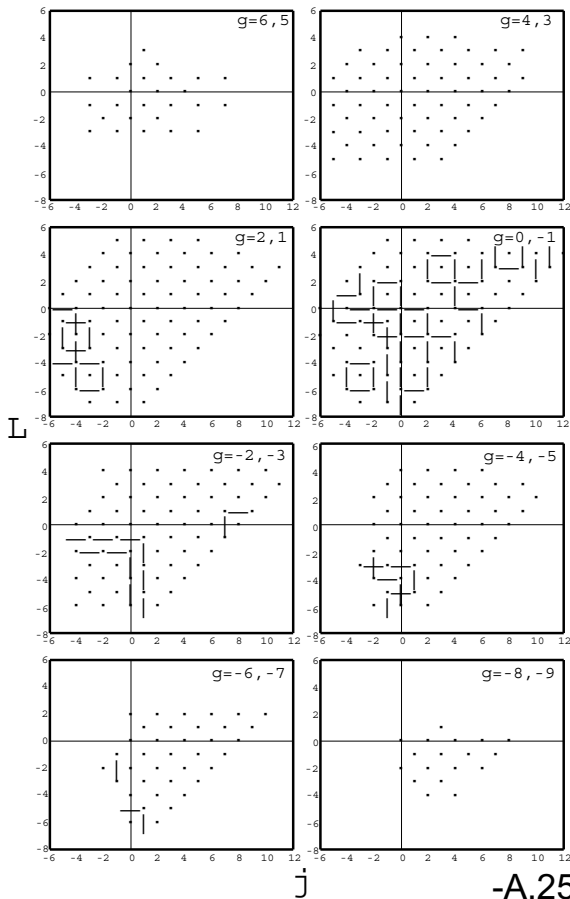
TS 14



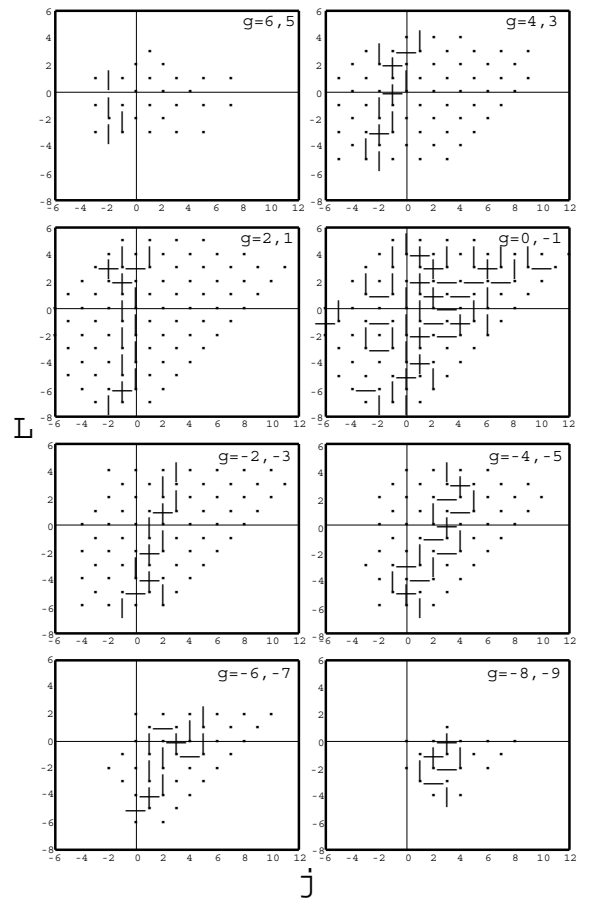
NI 2



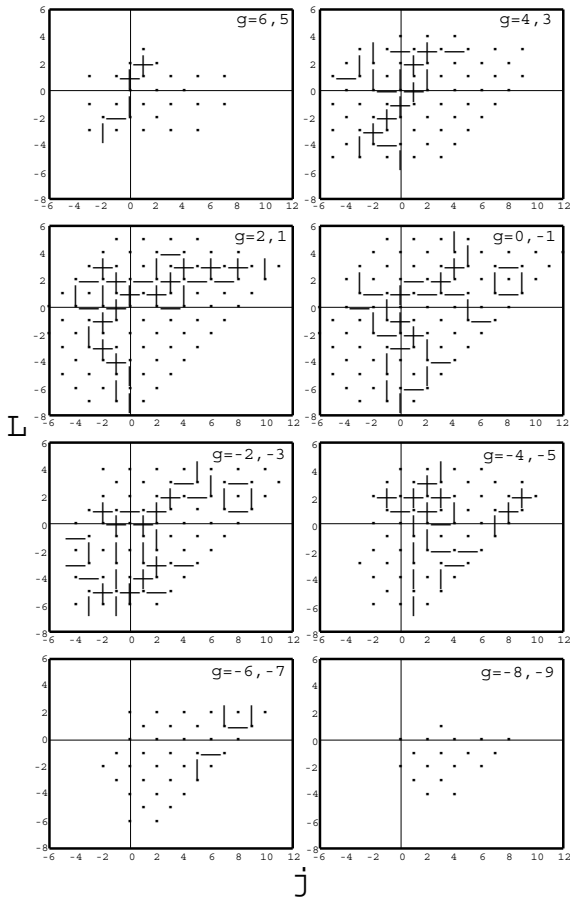
NI 3



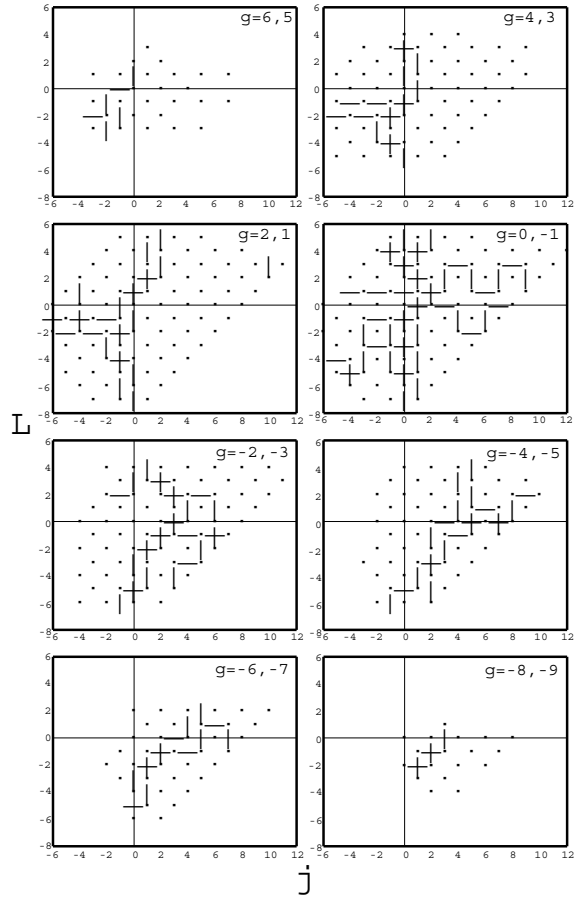
NI 4



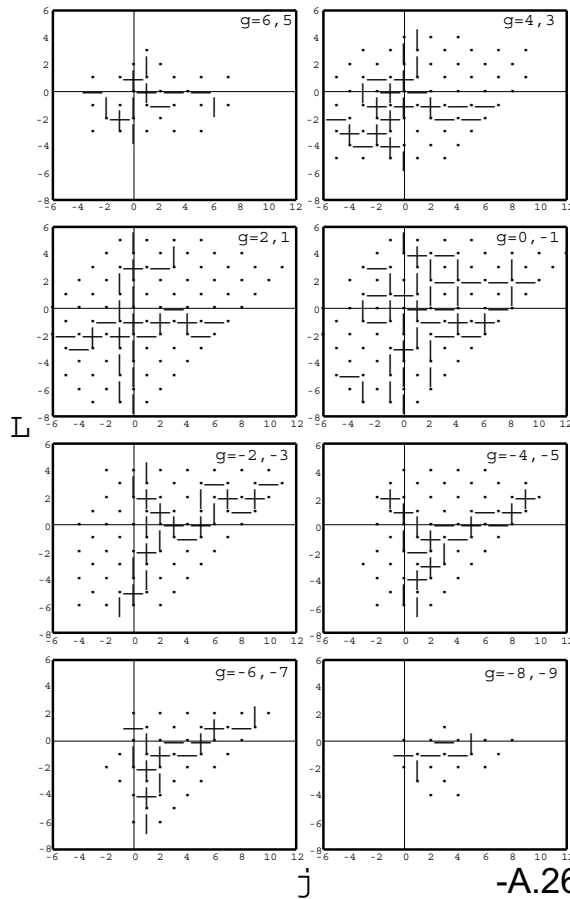
NI 5



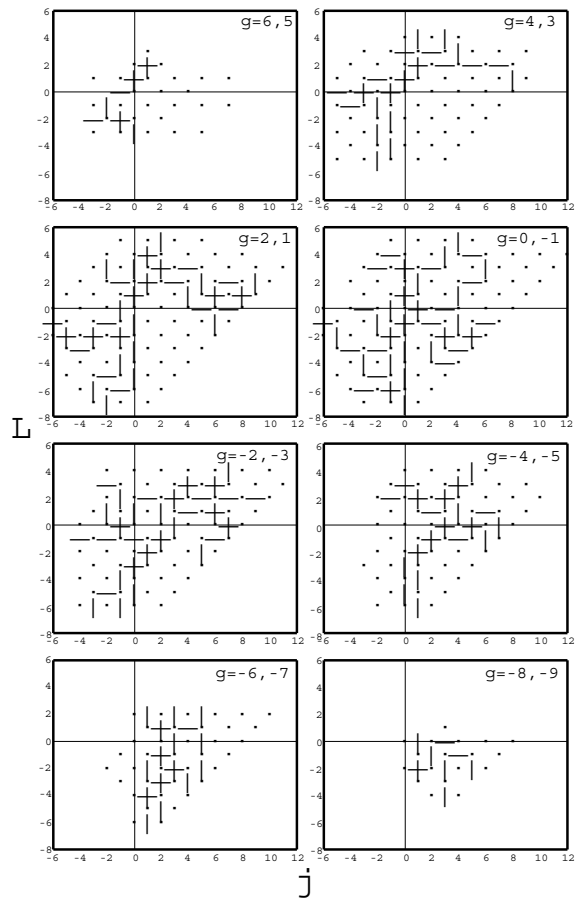
NI 6



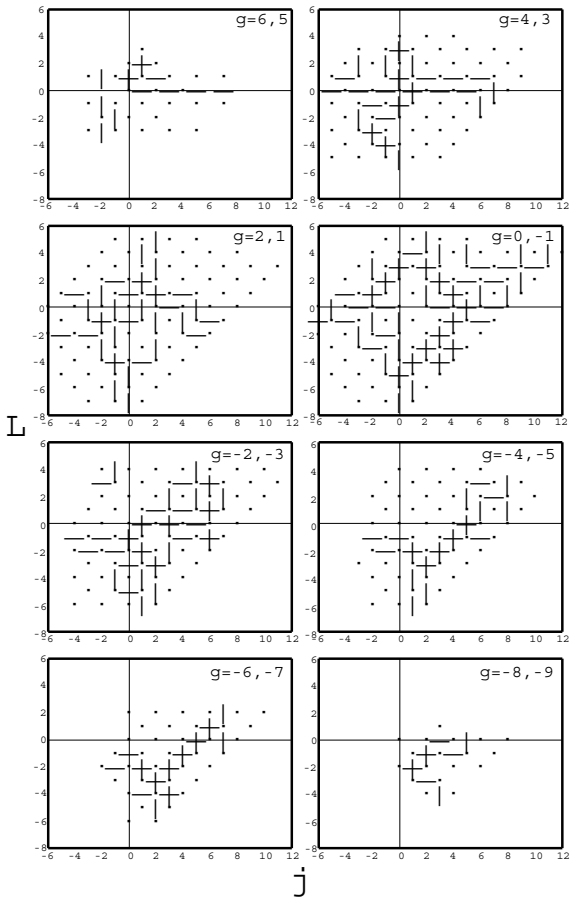
NI 7



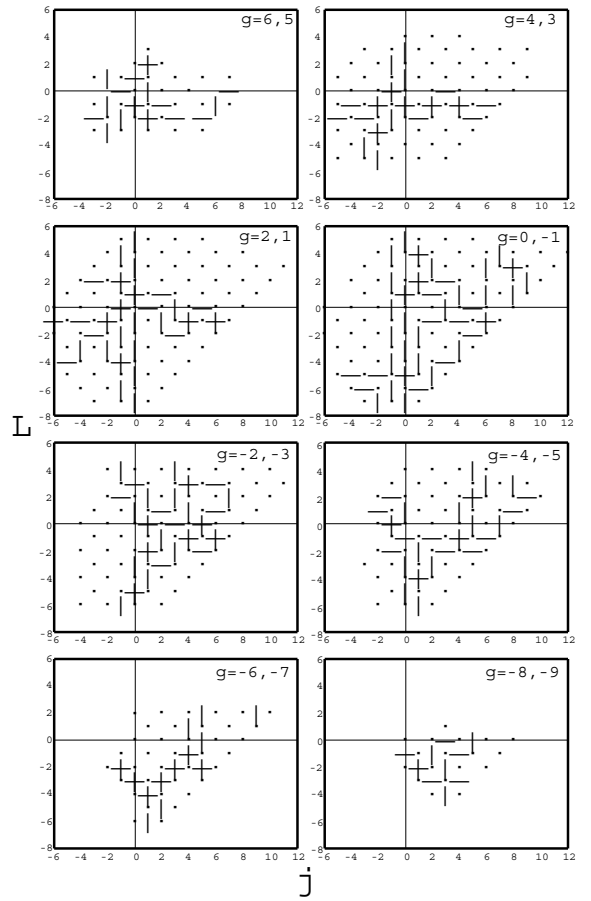
NI 8



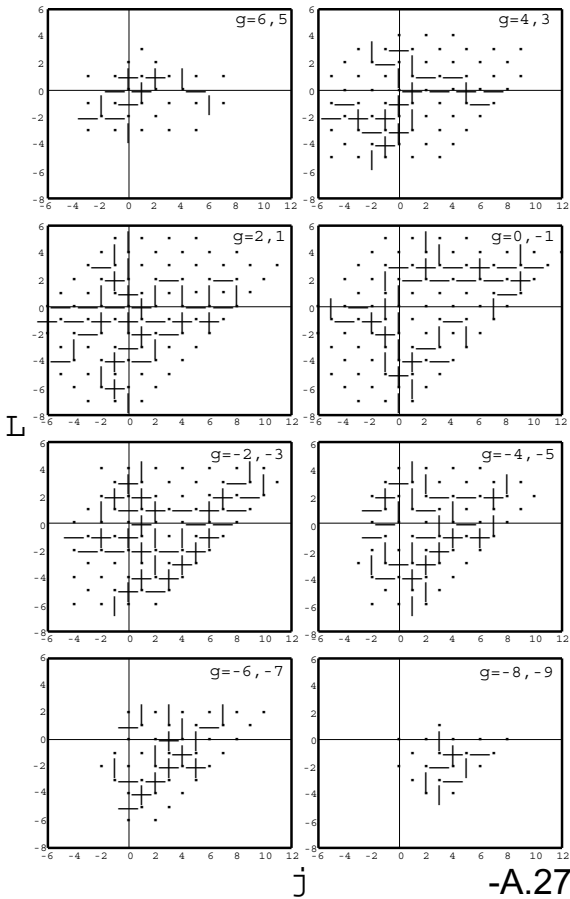
NI 9



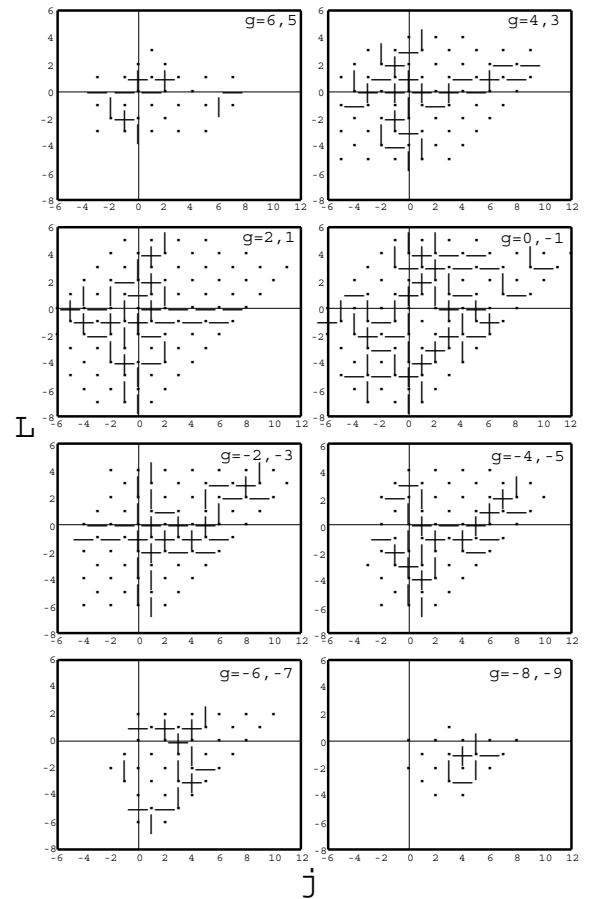
NI 10



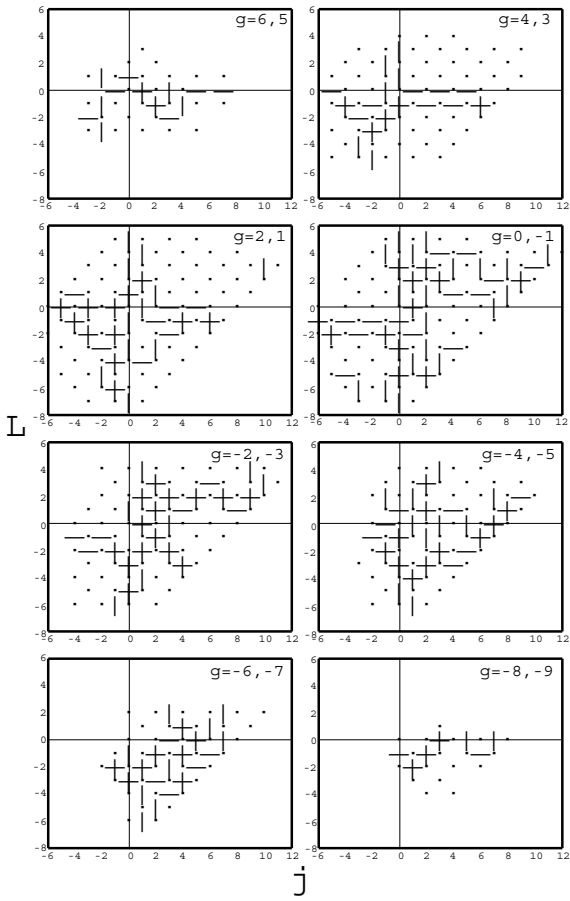
NI 11



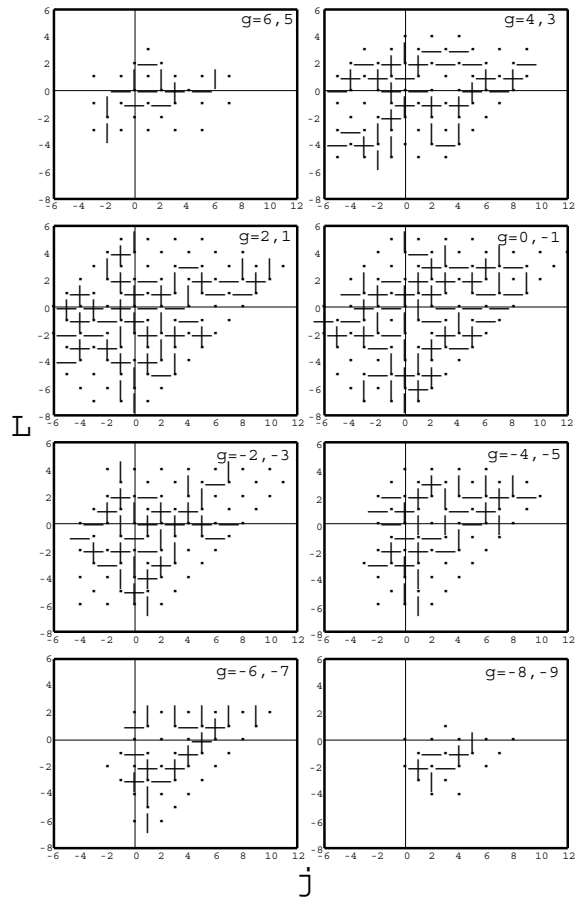
NI 12



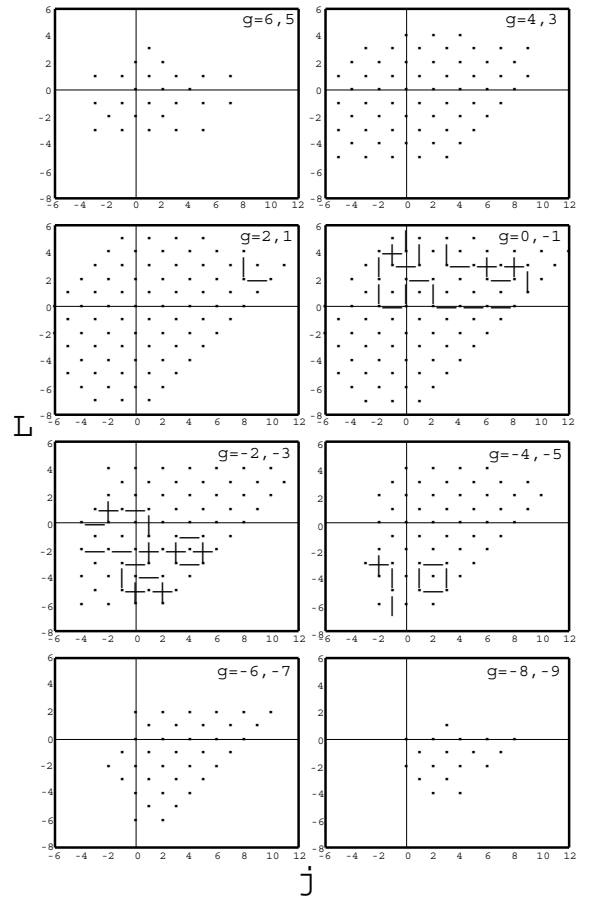
NI 13



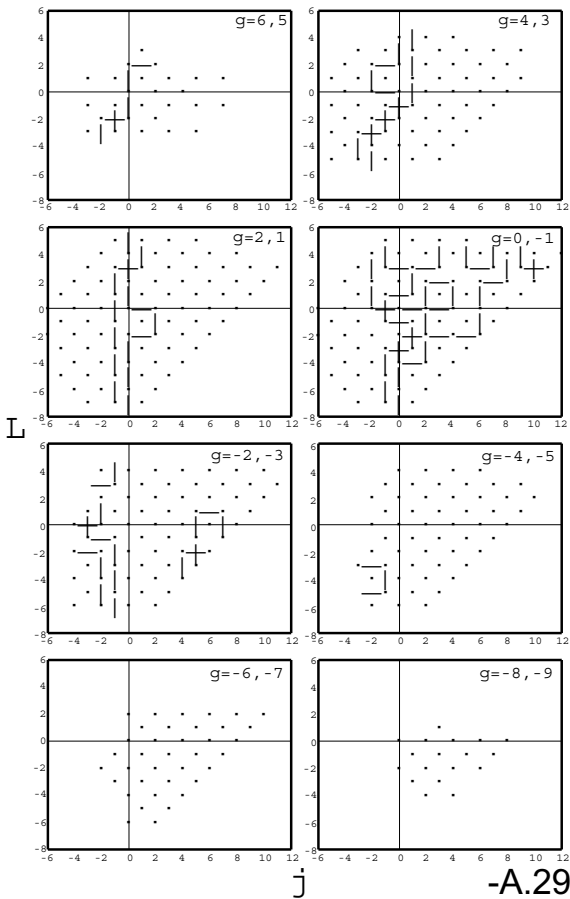
NI 14



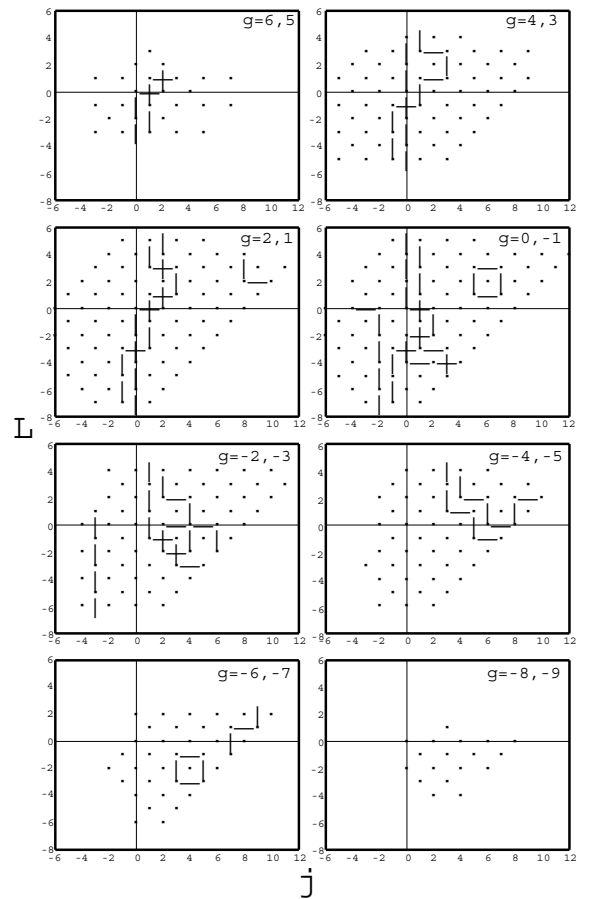
YT 2



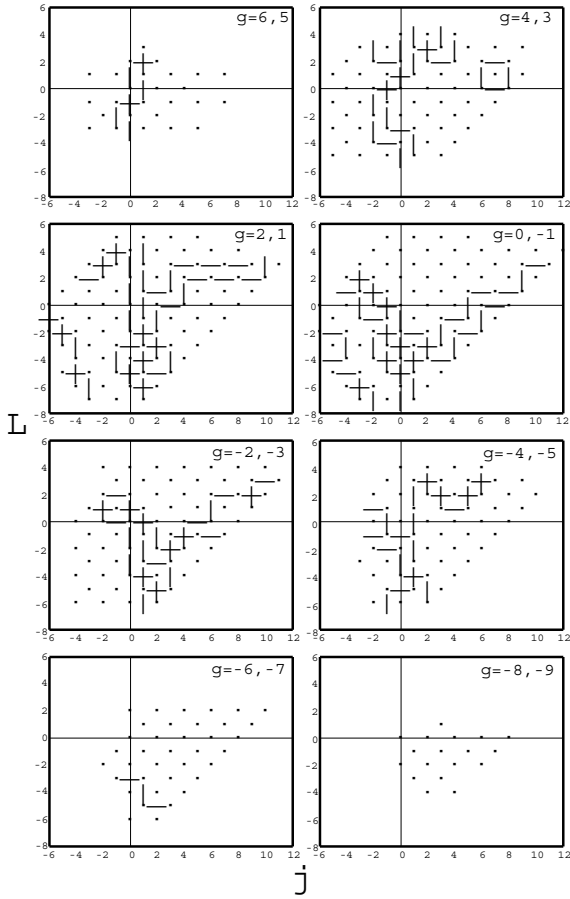
YT 3



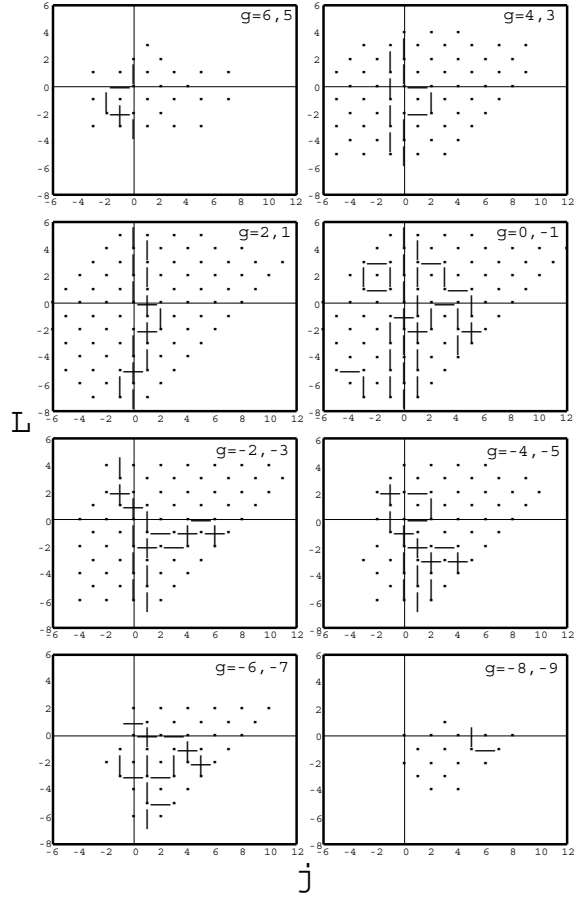
YT 4



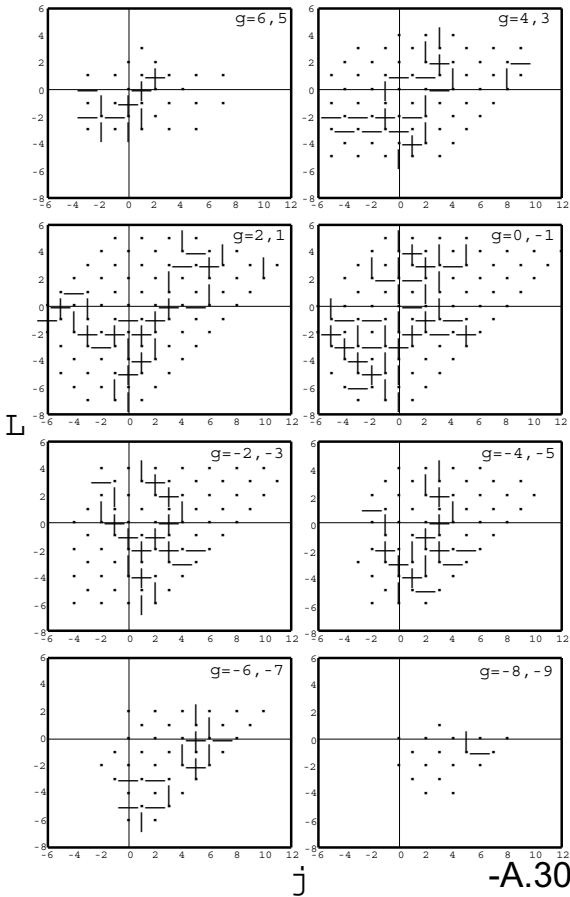
YT 5



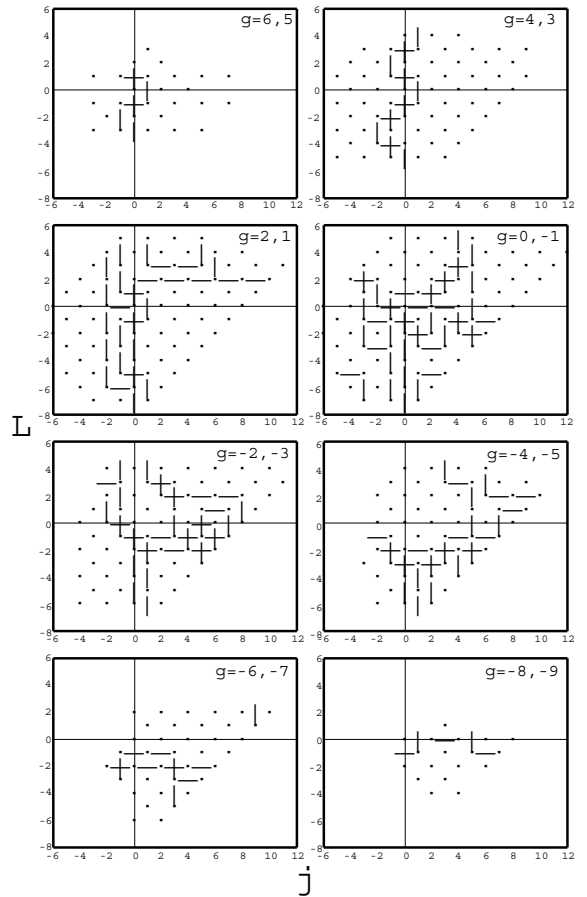
YT 6



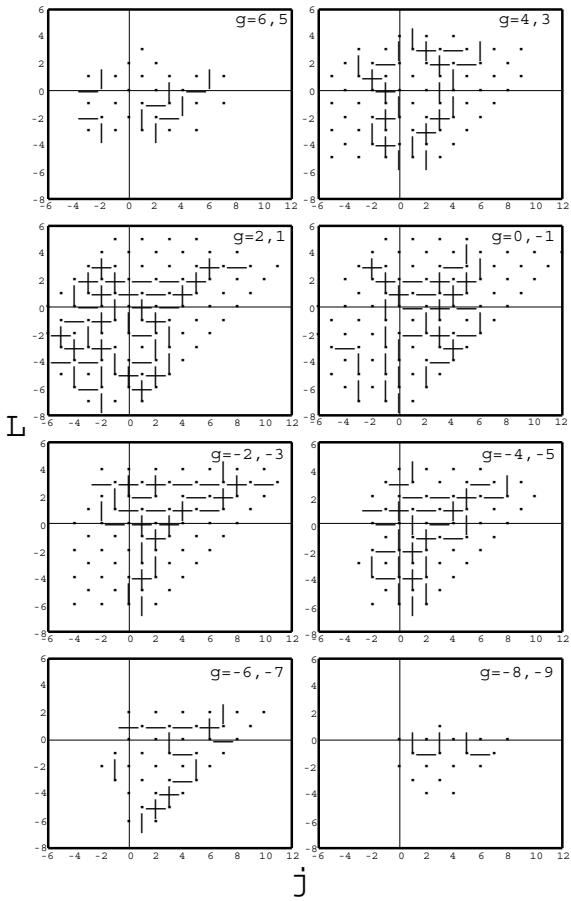
YT 7



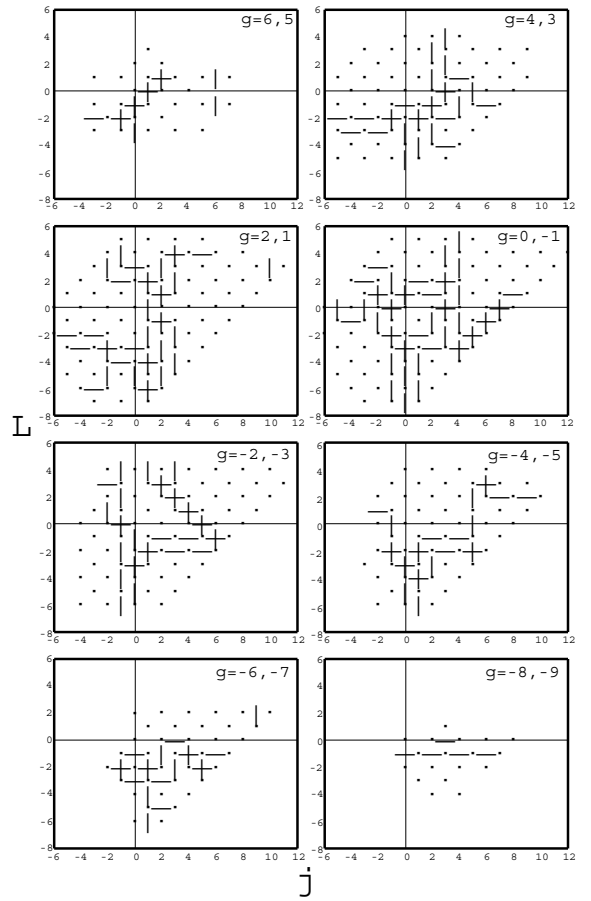
YT 8



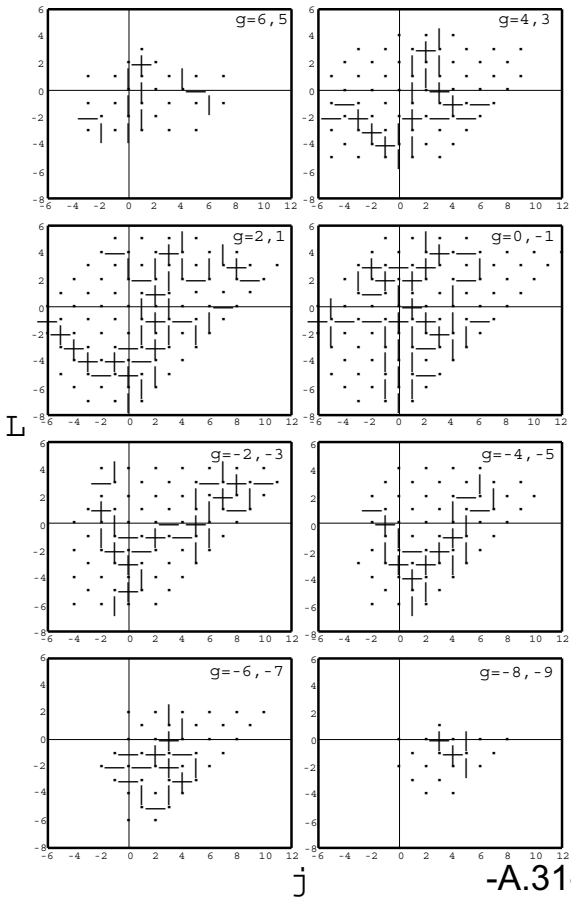
YT 9



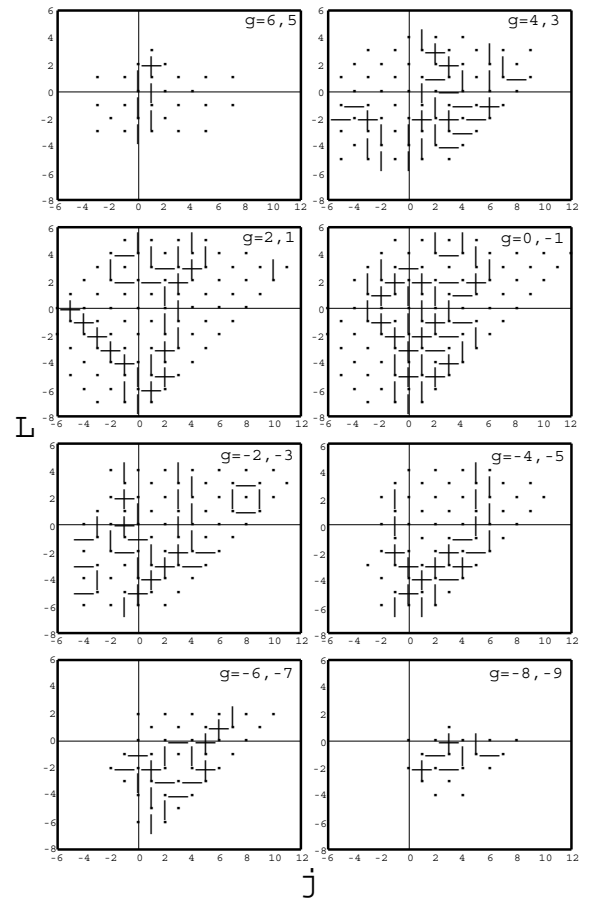
YT 10



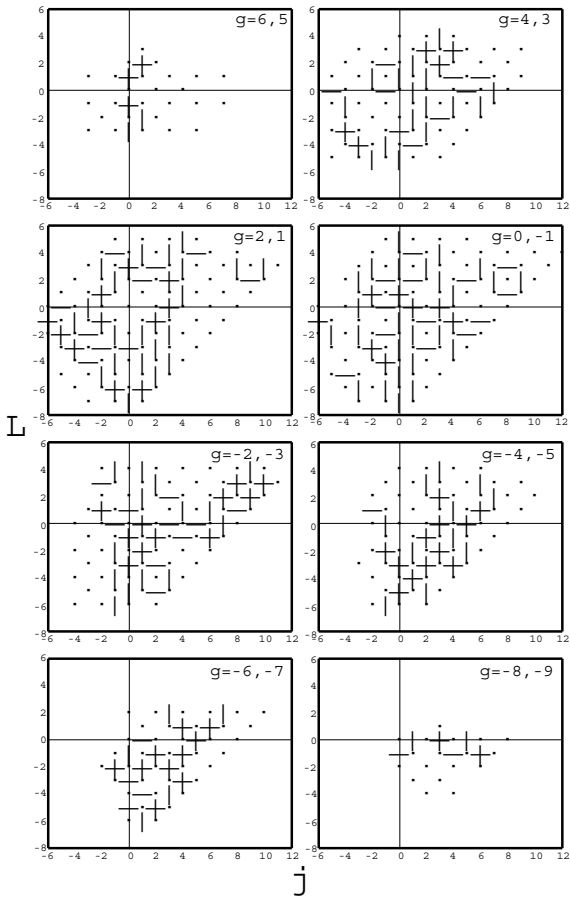
YT 11



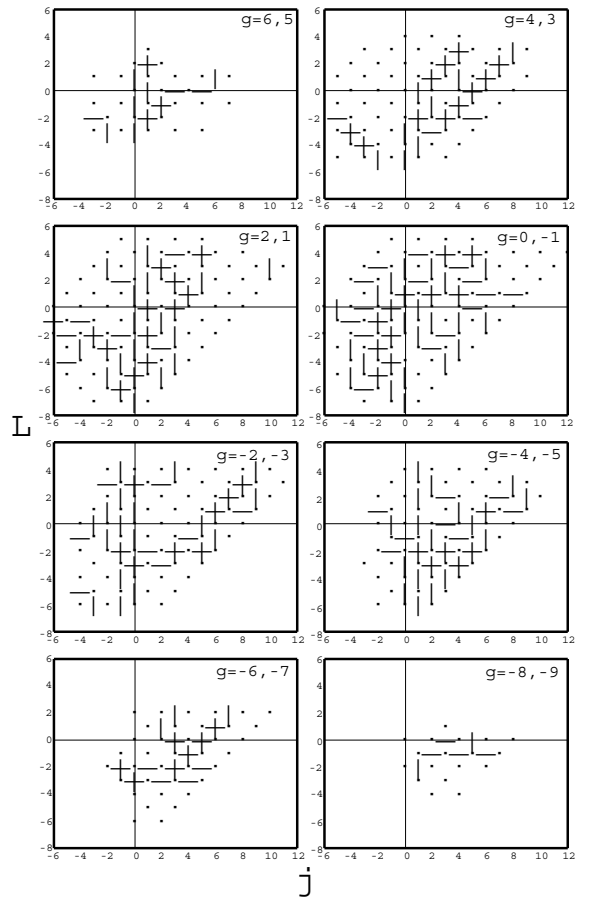
YT 12



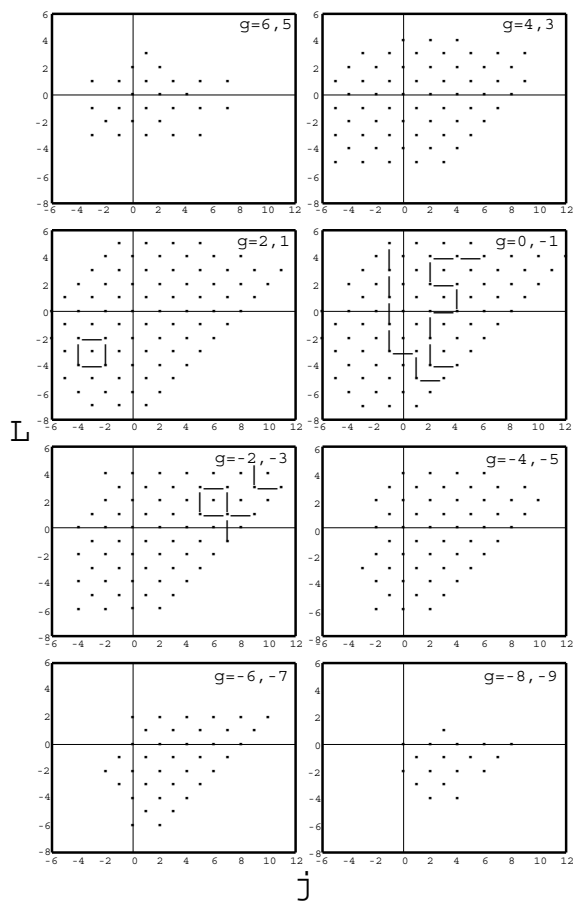
YT 13



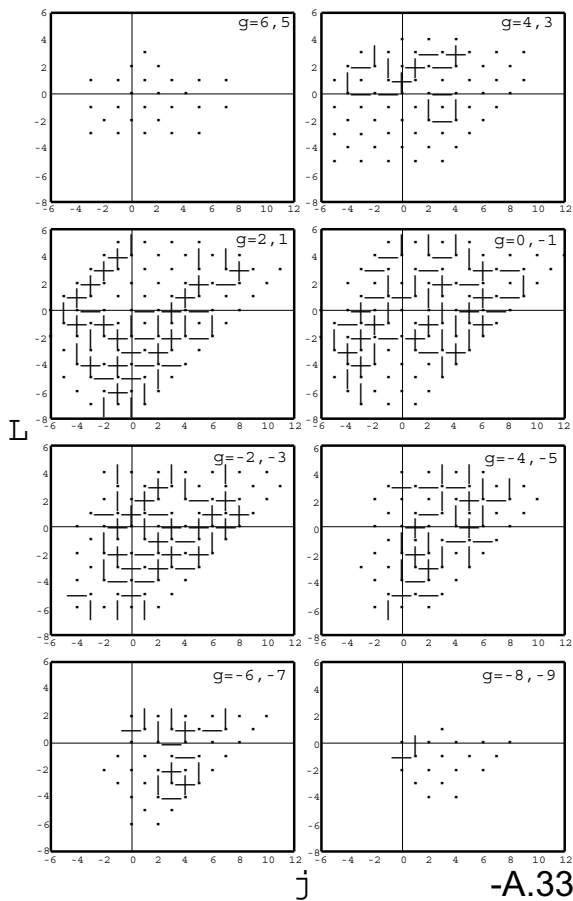
YT 14



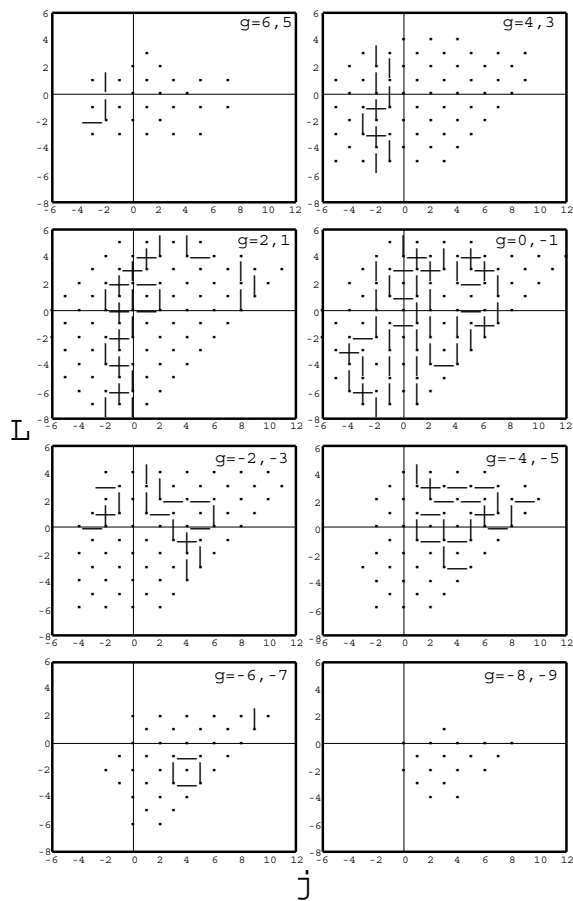
HY 2



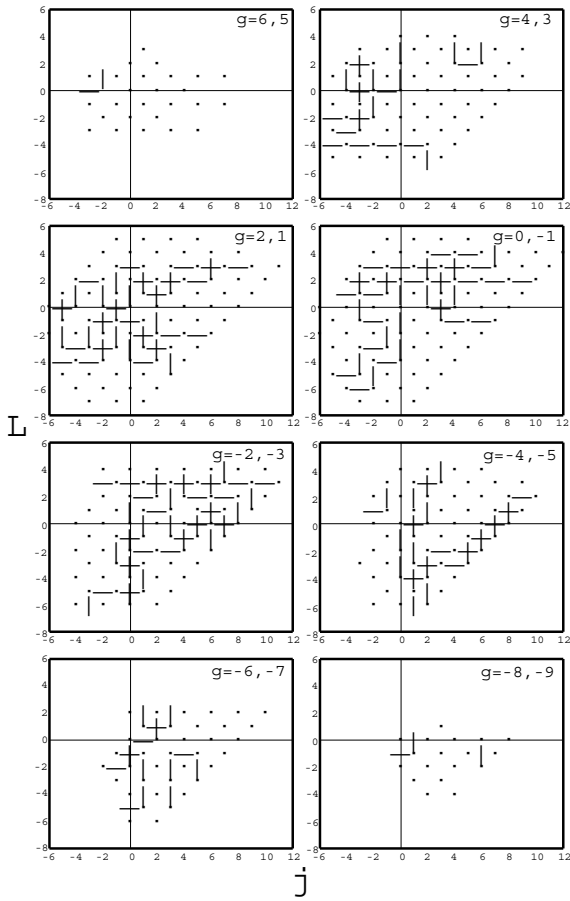
HY 3



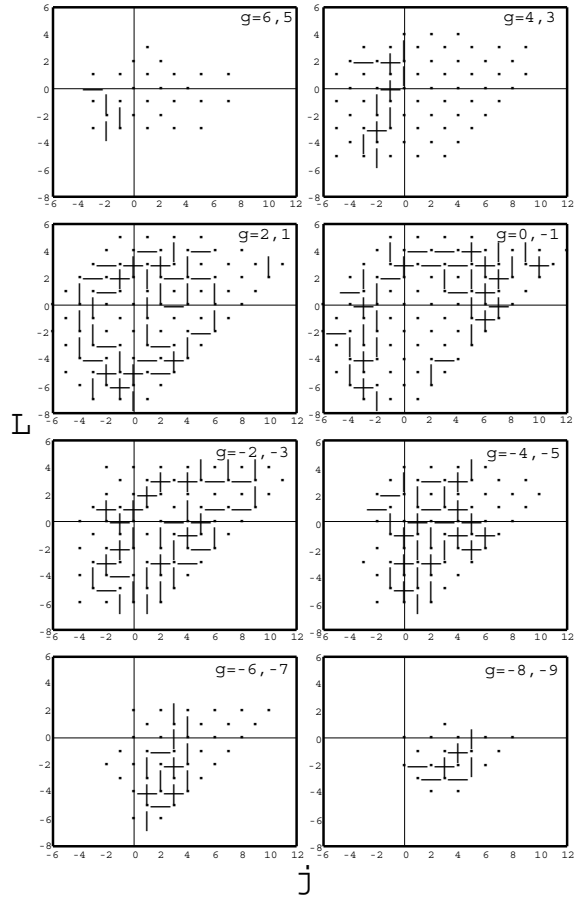
HY 4



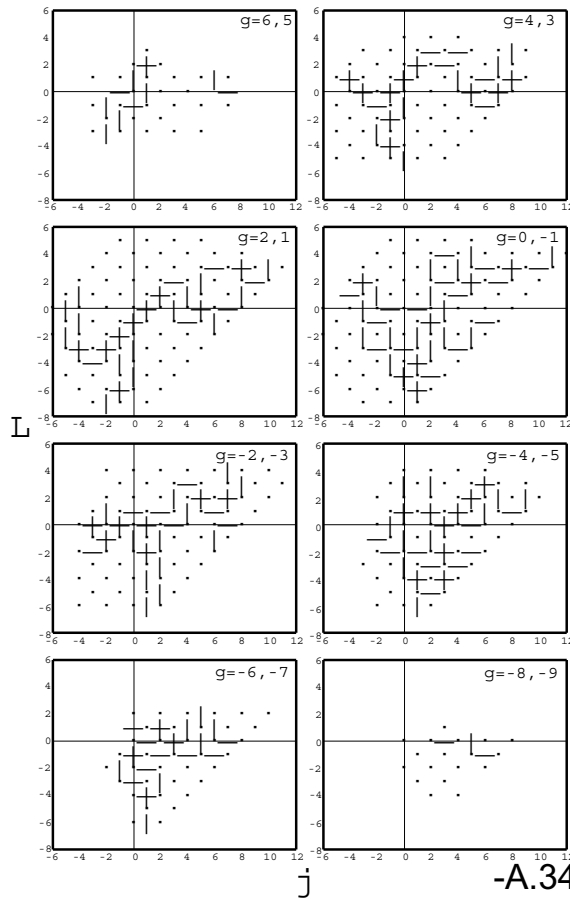
HY 5



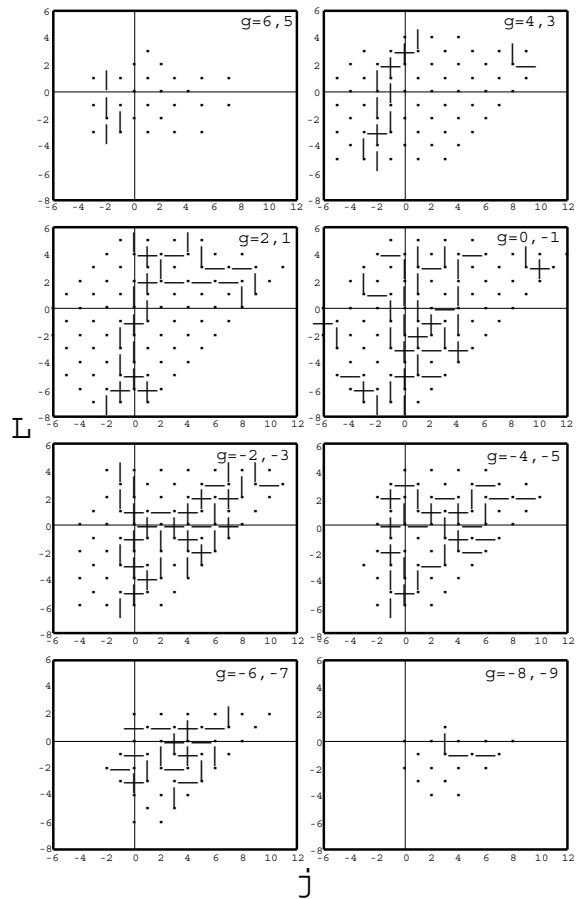
HY 6



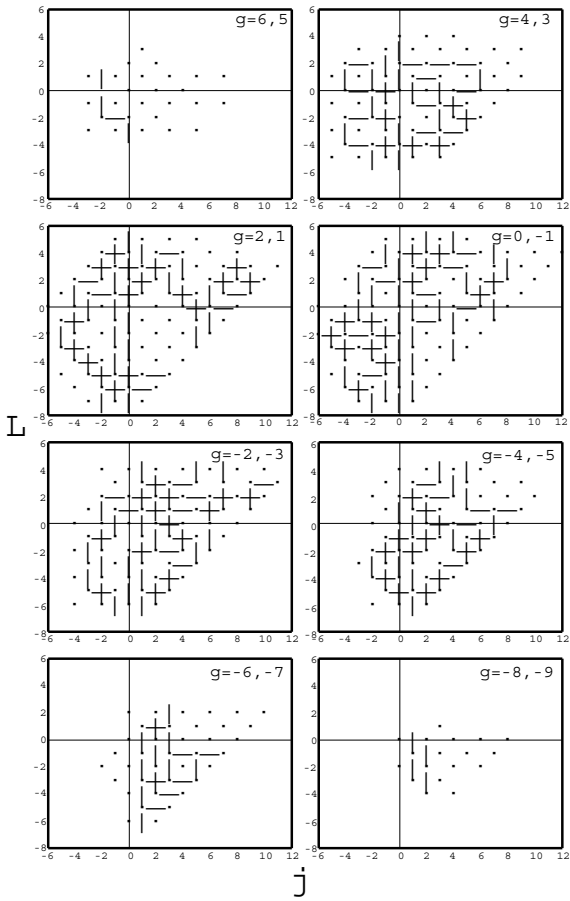
HY 7



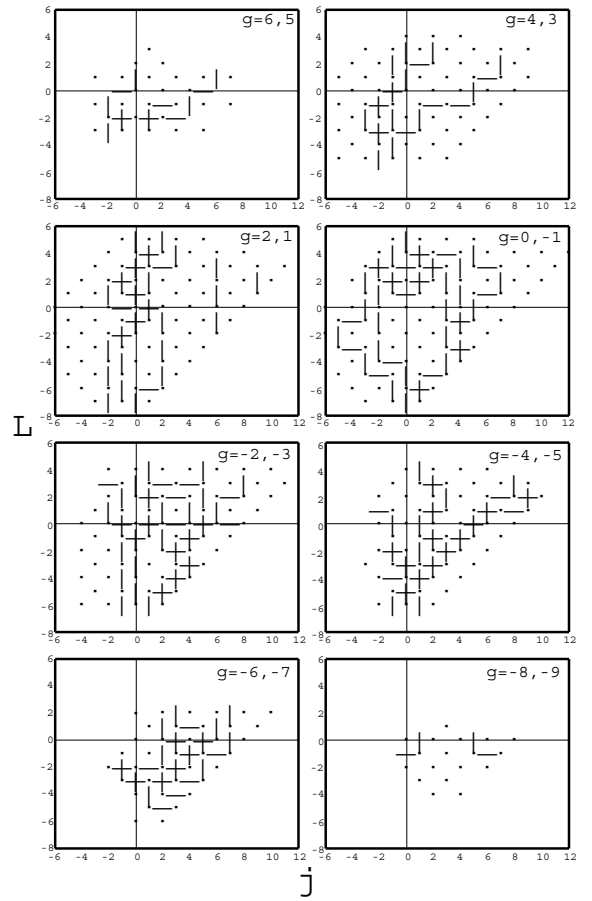
HY 8



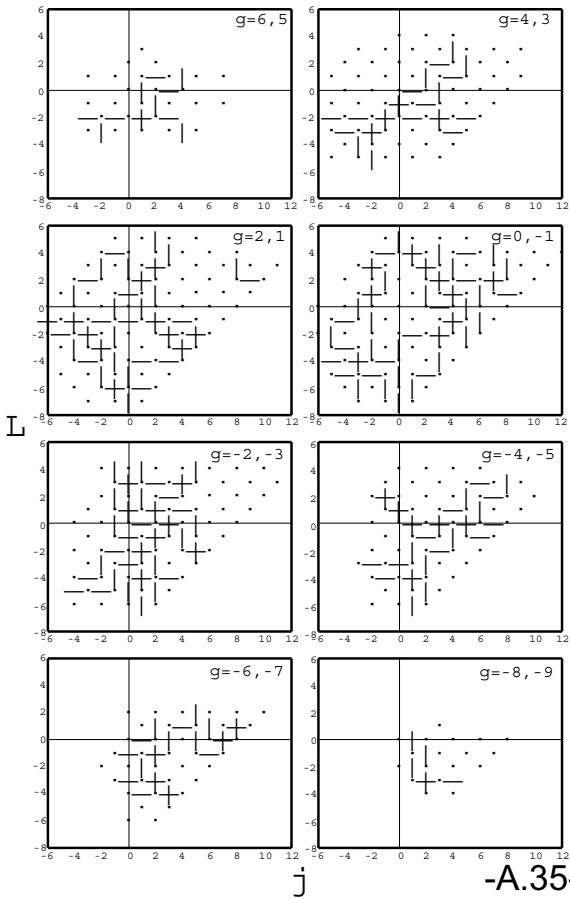
HY 9



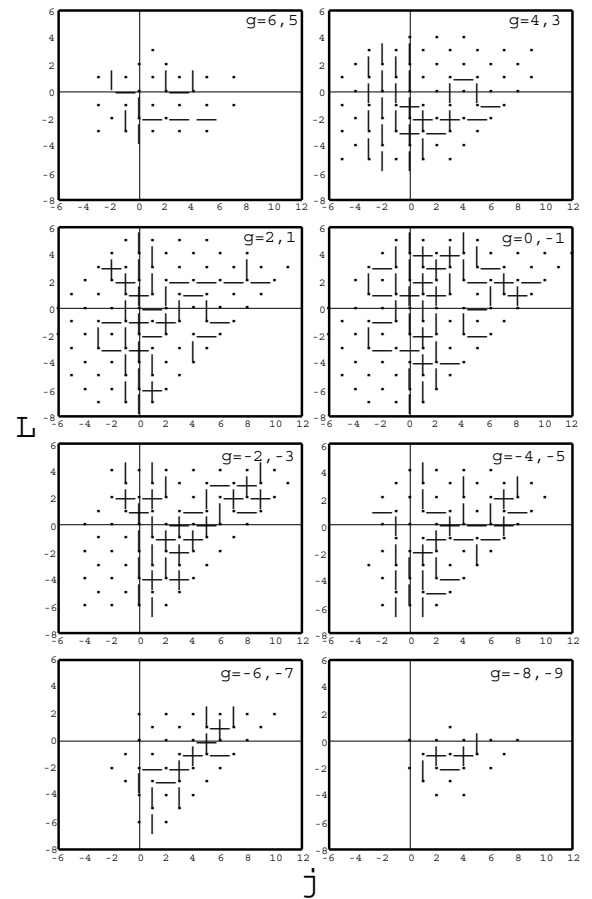
HY 10



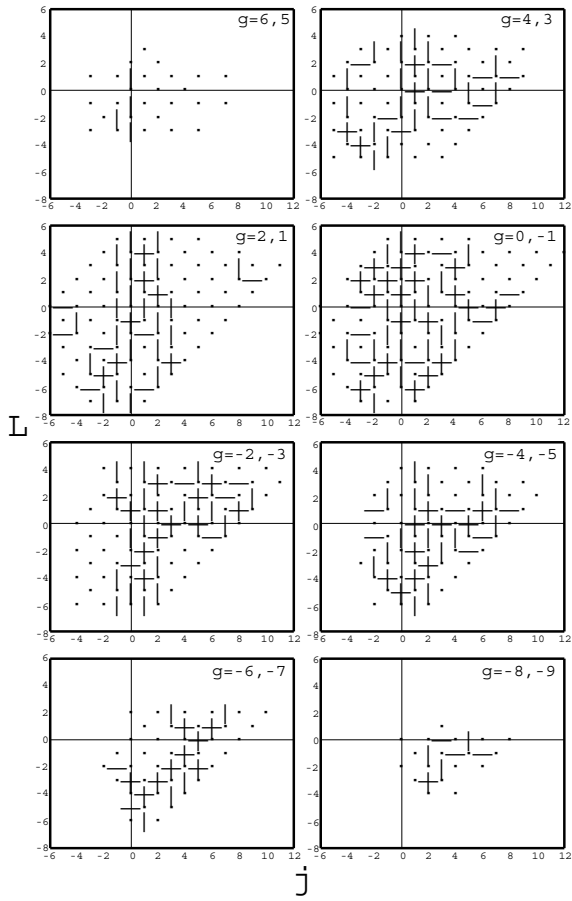
HY 11



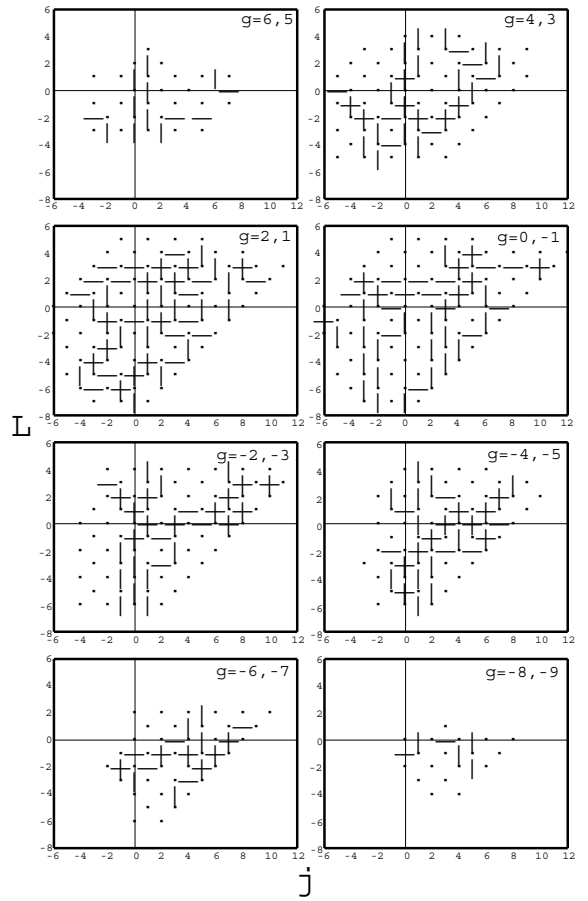
HY 12



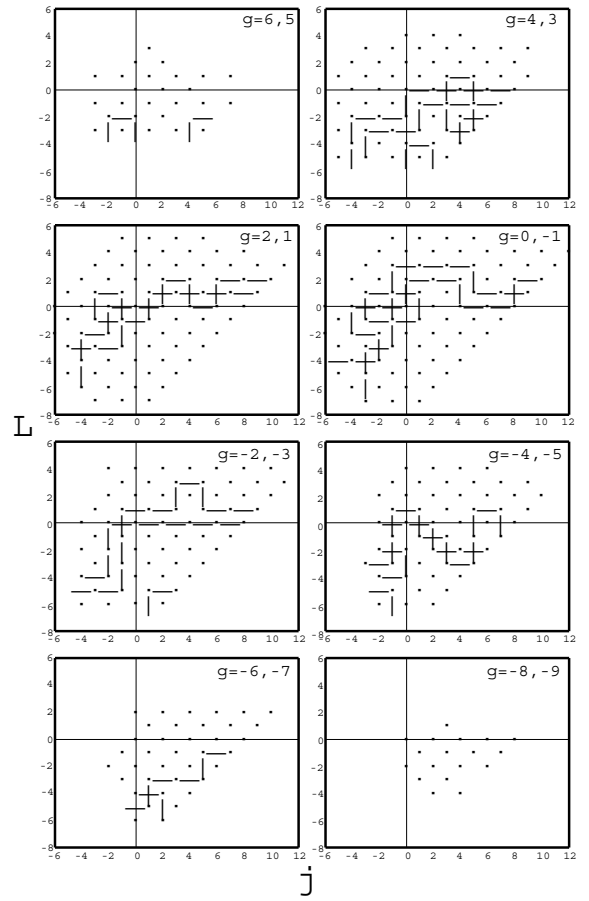
HY 13



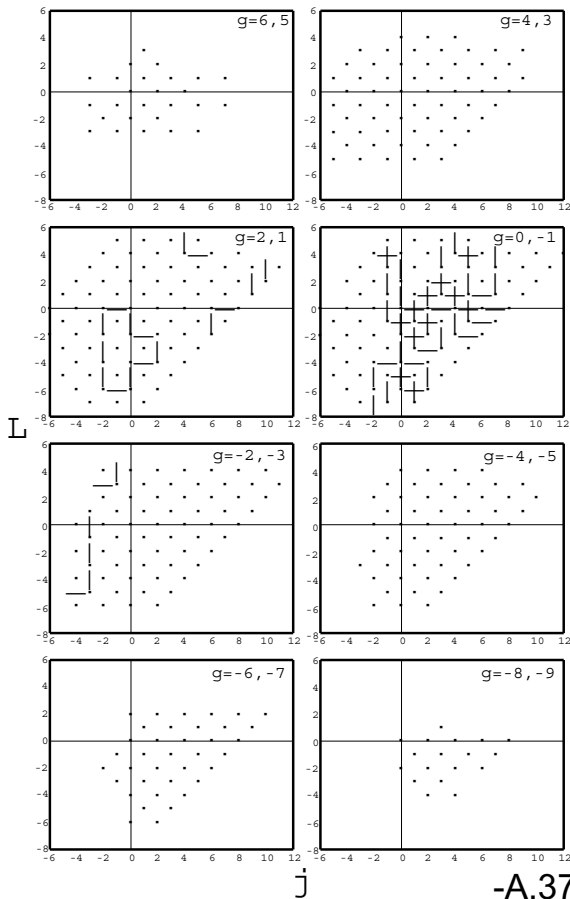
HY 14



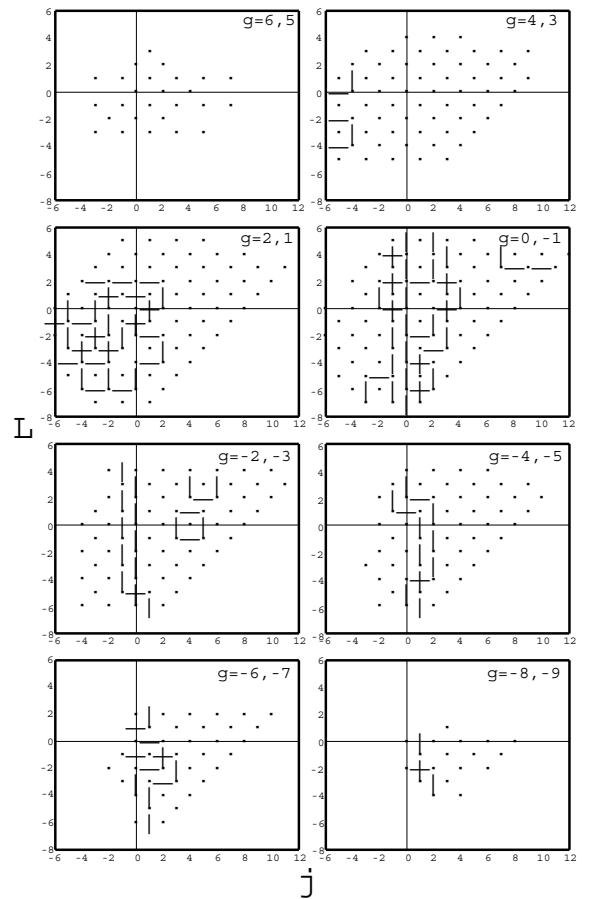
MN 2



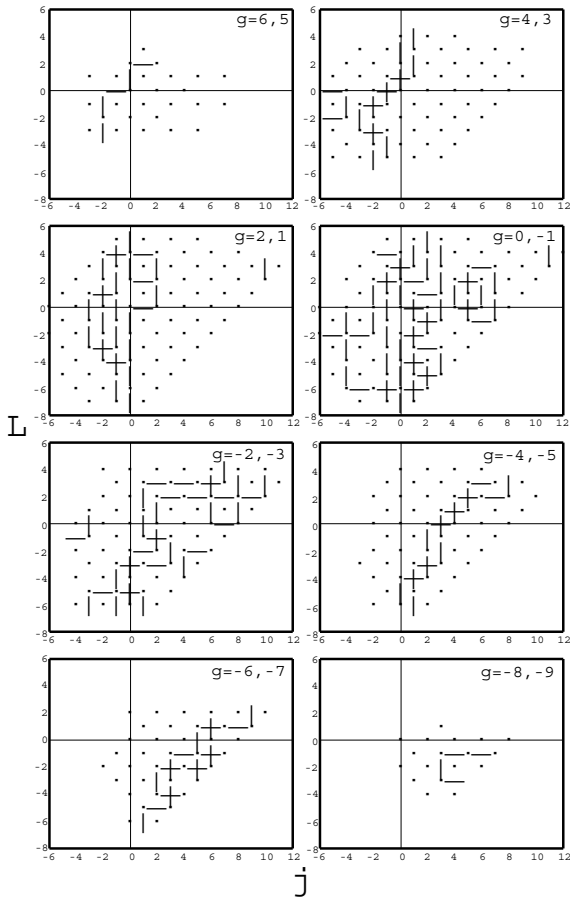
MN 3



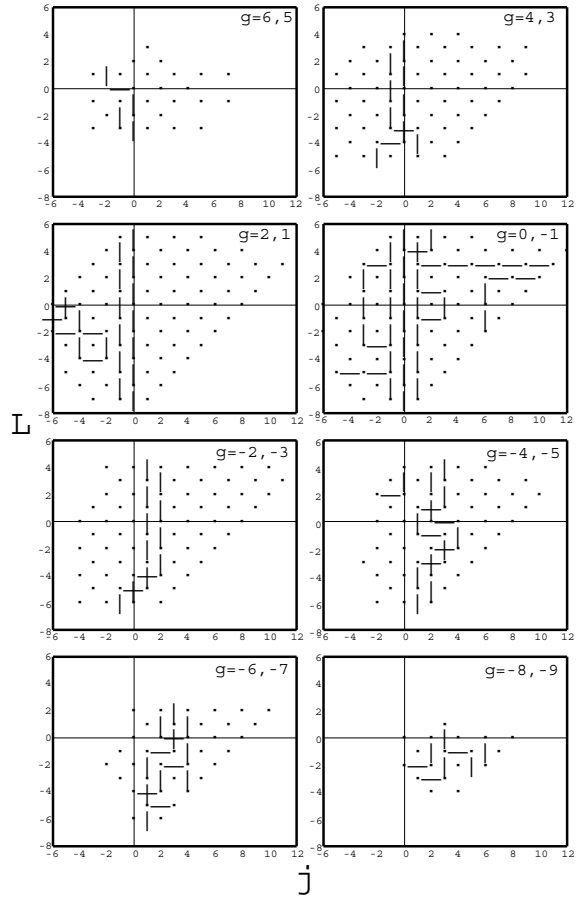
MN 4



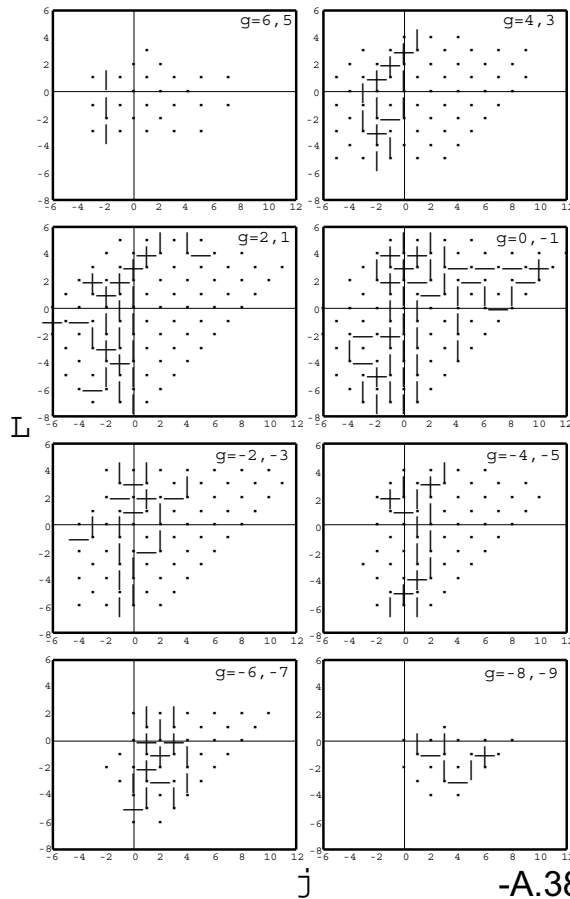
MN 5



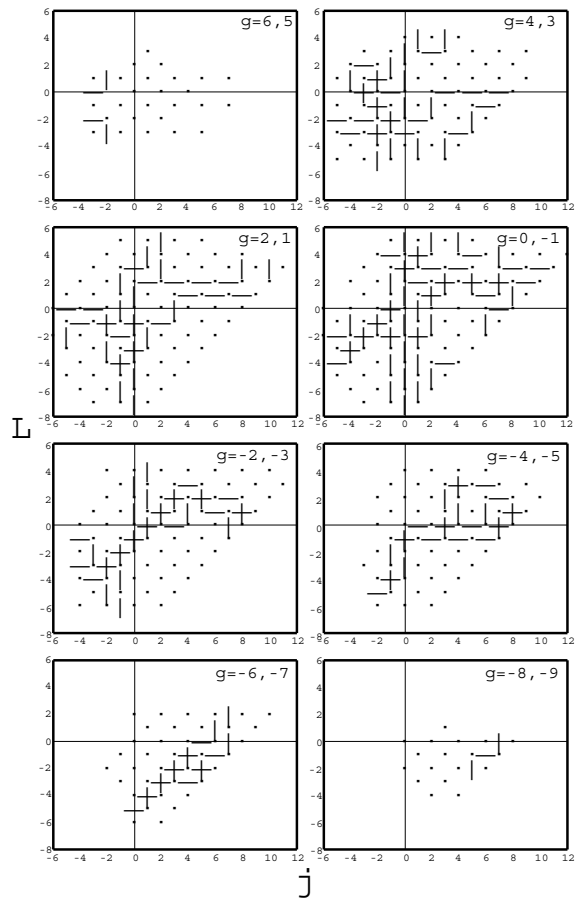
MN 6



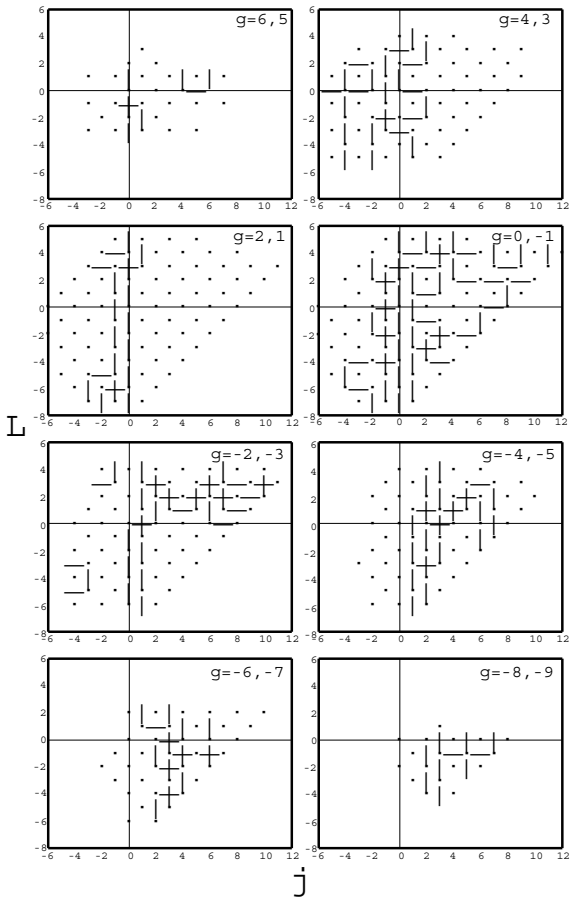
MN 7



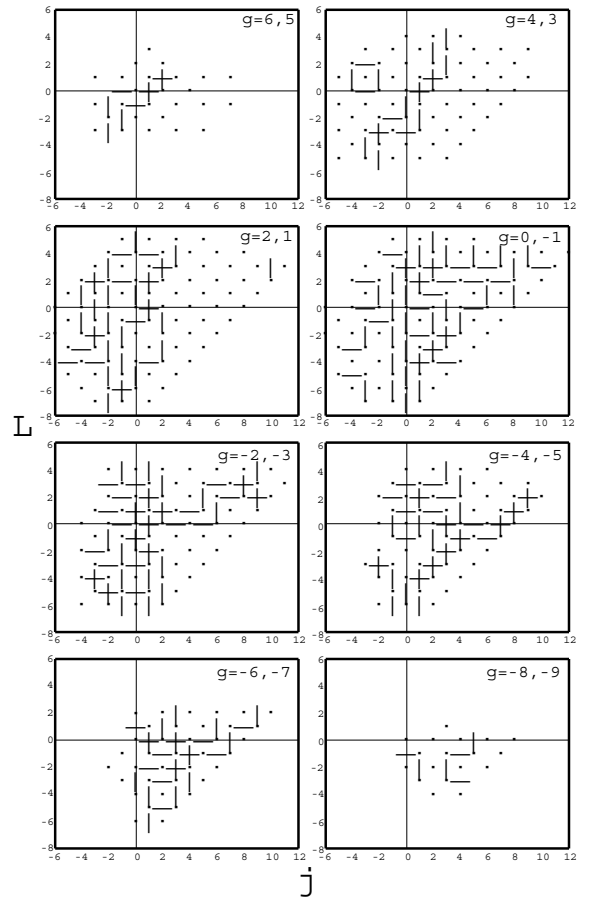
MN 8



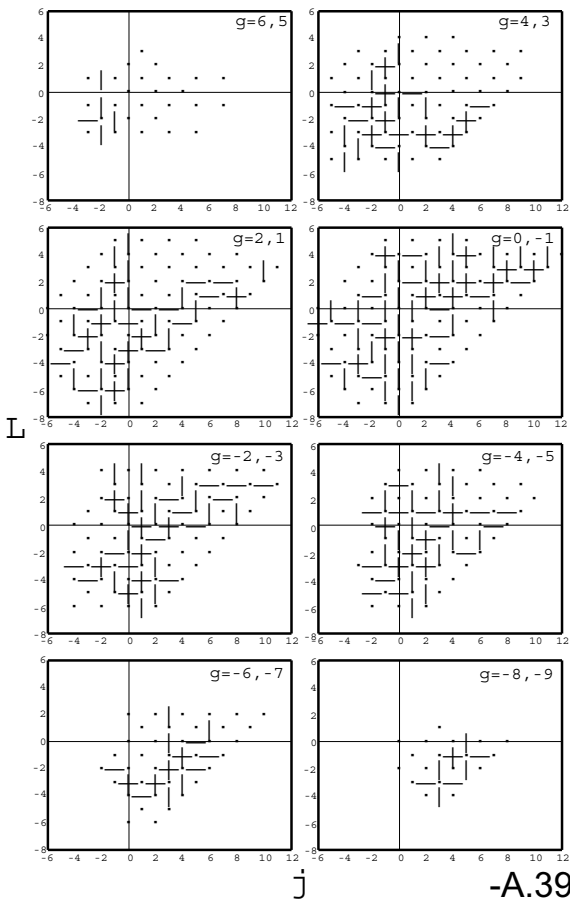
MN 9



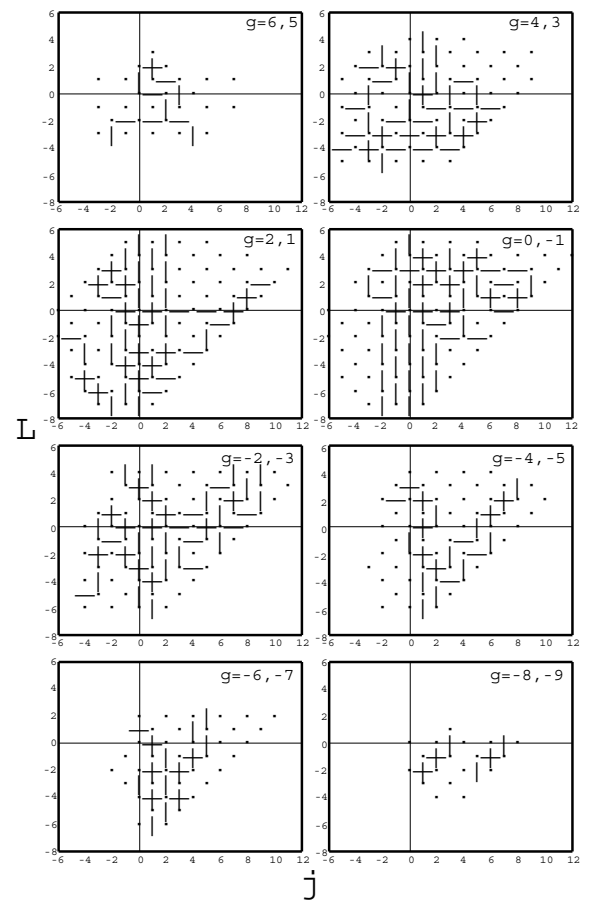
MN 10



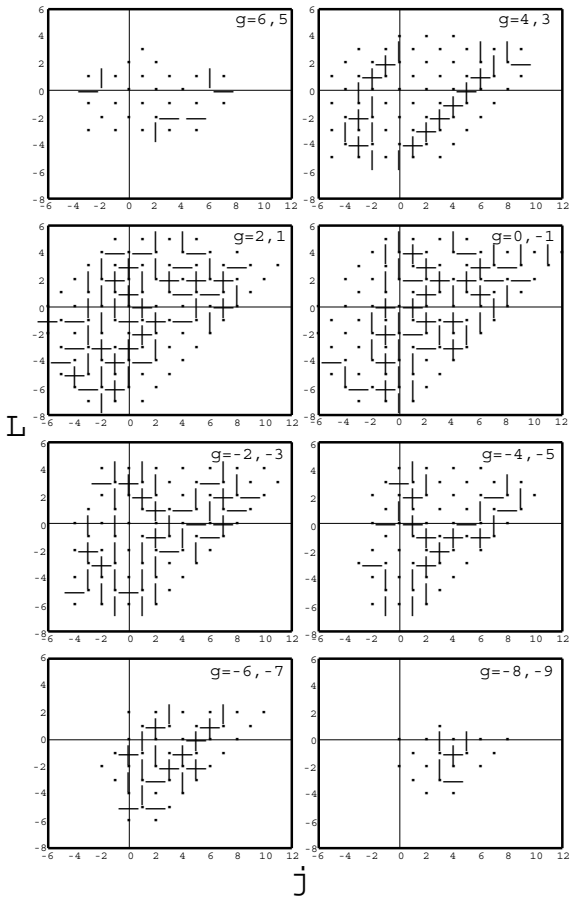
MN 11



MN 12



MN 13



MN 14

