

平成 18 年 3 月修了  
博士(工学)学位論文

(和文題目)

単眼及び両眼での時間的足し合わせから予測される  
空間周波数チャンネルの時間応答に関する研究

(英文題目)

Temporal Response of Spatial Frequency-tuned Channels Inferred from  
Temporal Summation in Monocular and Binocular Stimulation

平成 17 年 12 月 16 日

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻 (基盤工学コース)

学籍番号 1076032

平山 正治

Hirayama Masaharu



## 要 旨

# 単眼および両眼での時間的足し合わせから 予測される空間周波数チャンネルの 時間応答に関する研究

平山 正治

本論文では、視覚系の時空間周波数特性を明らかにし、そのメカニズムをモデル化することを目的とした。ある帯域幅をもって異なる空間周波数に同調した空間周波数チャンネルが視覚系に複数存在し、それぞれが異なる時間特性をもつと予想し、視覚応答の時間特性から空間周波数チャンネルの分離を検討した。

実験では、さまざまな空間周波数をもつ輝度あるいは等輝度色グレーティングを時間的ニ刺激光法を用いて呈示し、そのコントラスト検出閾値を測定した。時間的ニ刺激光法によって得られたコントラスト検出閾値と刺激の呈示時間間隔から、短時間呈示された刺激光に対するインパルス応答関数 ( Impulse Response Function ) を導出することが可能である。インパルス応答関数は、視覚系全体の時間特性を反映する関数であるので、刺激の空間周波数に同調した空間周波数チャンネルの時間特性を反映していると考えられる。

本論文の前半では、単眼呈示条件における輝度あるいは等輝度色刺激に対するコントラスト検出閾値を測定し、インパルス応答関数を導出した。得られたインパルス応答関数の時間特性は、刺激光の空間周波数に依存して変化し、その時間特性変化は、ある特定の空間的足し合わせ範囲をもつ受容野が空間フィルタとして働き、空間周波数チャンネルを構成すると考えた「受容野モデル」によって定性的に説明が可能であることを示した。受容野の空間的足し合わせ範囲が空間周波数チャンネルを構成するのであれば、今回我々が実験を行なった空間周波数 ( 0.4 ~ 4.9 cpd ) の範囲に、輝度情報伝達経路には少なくとも 2 つの空間周波

数チャンネルが存在することを示し、それはおよそ 2 cpd 付近で切り替わることを示した。

等輝度色刺激を用いた実験の結果も同様に、刺激光の空間周波数に依存してインパルス応答関数の時間特性が変化した。等輝度色刺激に対するインパルス応答関数の時間特性変化も、我々が提案した受容野モデルによって定性的に説明が可能であり、色情報伝達経路においても 2 つの空間周波数チャンネルが存在することを示し、色相によらずおよそ 4 cpd 付近で切り替わることを示した。

本論文の後半では、時間的二刺激光法を応用し、左右眼の同一視野に刺激を呈示し、その検出閾値を測定しすることで、網膜以降の処理段階でも、時間的足し合わせが生じる可能性を検証した。実験は、さまざまな空間周波数をもつ輝度あるいは等輝度色刺激を用い、ある呈示時間間隔において左右眼の同一視野にそれぞれ 1 刺激ずつ呈示し、そのコントラスト検出閾値を測定した。

輝度刺激を用いた実験の結果、2 cpd 付近と 4 cpd 付近の空間周波数領域でのみ、両眼間に時間的足し合わせが存在することを示した。両眼間の時間的足し合わせが空間周波数依存性を示したことから、輝度情報伝達経路に両眼性の空間周波数チャンネルが存在する可能性がある。等輝度色刺激（赤）を用いた実験の結果は、輝度刺激の場合と異なり、両眼間の時間的足し合わせは存在しなかった。これらの結果から、両眼間の時間的足し合わせは輝度情報伝達経路のみに存在し、輝度情報伝達経路には両眼性の空間周波数チャンネルが存在する可能性があることを示した。

本論文では、視覚情報処理系の初期の段階で分離して処理される「輝度情報伝達経路」と「色情報伝達経路」に対して、単眼および両眼それぞれの条件で、時間的二刺激光法を用いて統一的な実験を行ない、視覚系の時空間周波数特性について検討した。

キーワード 時間的二刺激光法，時間的足し合わせ，インパルス応答関数，空間周波数チャンネル

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>研究背景と目的</b>	<b>1</b>
1.1	研究背景 . . . . .	1
1.2	目的 . . . . .	2
1.3	視覚系の刺激検出メカニズム . . . . .	3
1.4	刺激の時空間周波数が刺激検出に与える影響 . . . . .	5
1.5	神経生理学の知見 . . . . .	6
<b>第 2 章</b>	<b>実験手法と装置</b>	<b>9</b>
2.1	実験手法 . . . . .	9
2.1.1	順応効果を用いた実験手法 . . . . .	9
2.1.2	マスク刺激を用いた実験手法 . . . . .	11
2.1.3	時間的二刺激光法 . . . . .	11
2.2	実験刺激と装置 . . . . .	13
2.2.1	刺激 . . . . .	13
2.2.2	実験装置 . . . . .	14
2.2.3	測光 . . . . .	15
2.2.4	被験者 . . . . .	16
2.3	実験手順 . . . . .	16
2.4	インパルス応答関数の導出方法 . . . . .	18
2.4.1	Burr and Morrone のモデル . . . . .	18
2.4.2	確率的足し合わせを含む閾検出モデル . . . . .	19
2.4.3	実験データのモデルへのフィッティング . . . . .	20
<b>第 3 章</b>	<b>単眼呈示条件でのコントラスト 検出閾値</b>	<b>22</b>

## 目次

3.1	単眼刺激呈示条件での輝度刺激に対する結果	22
3.1.1	被験者 MH の実験結果	22
3.1.2	被験者 YF の実験結果	26
3.1.3	被験者 TT の実験結果	30
3.1.4	被験者 RK の実験結果	34
3.1.5	被験者 TS の実験結果	38
3.2	等輝度色刺激に対する結果	41
3.2.1	被験者 MH の実験結果	41
<b>第 4 章</b>	<b>単眼呈示条件に対する考察</b>	<b>44</b>
4.1	単眼呈示条件でのインパルス応答関数の時間特性	44
4.1.1	輝度インパルス応答関数	44
4.1.2	等輝度色インパルス応答関数	46
4.2	受容野モデル	47
4.3	輝度インパルス応答関数と受容野モデル	50
4.4	等輝度色インパルス応答関数と受容野モデル	51
<b>第 5 章</b>	<b>両眼呈示条件での時間的足し合わせ</b>	<b>53</b>
5.1	実験目的	53
5.2	実験	54
5.2.1	実験手法	54
5.2.2	実験装置と刺激	54
5.2.3	実験手順	56
5.2.4	被験者	57
5.3	輝度刺激に対する結果	57
5.3.1	被験者 MH の実験結果	57
5.3.2	被験者 YF の結果	61

## 目次

5.3.3	被検者 YK の結果 . . . . .	63
5.4	等輝度色刺激 ( 赤 ) に対する結果 . . . . .	66
5.4.1	被検者 MH の実験結果 . . . . .	66
5.4.2	被検者 YK の実験結果 . . . . .	68
5.4.3	被検者 TH の結果 . . . . .	70
5.5	両眼間の時間的足し合わせ . . . . .	72
<b>第 6 章</b>	<b>単眼及び両眼での視覚情報処理モデル</b>	<b>75</b>
6.1	両眼立体視における対応問題 . . . . .	75
6.2	両眼立体視における両眼網膜像差 . . . . .	76
6.3	両眼間の時間的足し合わせと両眼立体視 . . . . .	77
<b>第 7 章</b>	<b>まとめ</b>	<b>82</b>
	謝辞	83
	参考文献	84





# 第 1 章

## 研究背景と目的

本章では、本研究の背景と、研究目的について述べ、時間的二刺激光法の実験原理と、インパルス応答関数が視覚系全体の時間特性を反映する関数であることを説明する。

### 1.1 研究背景

情報技術の発達に伴って、多種多様な情報機器が普及し利用されている。ノート型のコンピュータや携帯電話のような従来からある機器だけでなく、自動車や家電製品にも情報技術が積極的に採用されている。一方で、機械と人間との間のインタフェース部分については十分に改良されているとはいえない。たとえば、キーボードの配列や携帯電話のキー配列は、古くから使用されているものとの互換性を重視しているため、改善が十分に進んでいない。また、情報標示機器に関しても、CRT ディスプレイや液晶ディスプレイ (LCD)、プラズマディスプレイ (PDP) などが盛んに開発されているが、表示させるアイコンのサイズや配置、デスクトップ画面の配色などはこれまで利用されていたインタフェースが継続して利用されていることが多い。

情報機器が高機能化するにつれて操作が複雑になることは、利用者側に高い情報リテラシーを要求する。携帯電話や情報機器の機能を組み込んだ家電製品などは従来の利用者層と異なり、成人前の児童や生徒あるいは高齢者も利用する機会が増えることが予想され、情報機器の操作に不馴れな利用者に対しても使いやすいインタフェースの開発が必要とされており、人間の特性に合わせたインタフェースの開発が望まれている。

人間が外界から獲得する情報のおよそ 80% が視覚情報であるといわれており、情報機器

## 1.2 目的

の出力もそのほとんどが CRT ディスプレイや LCD に代表される表示装置に出力されることから，本研究では，人間の視覚情報処理に着目した．GUI やディスプレイを人間の視覚特性を考慮して改善することは，生産性を高めると同時に，ヒューマンエラーを防止する点からも重要である．また，視覚情報処理メカニズムを考慮した映像圧縮アルゴリズムの開発や高品質テレビの画質評価などにも応用が期待できる．

視覚情報処理の特長の 1 つとして，時空間特性がある．これは，視覚系が追従できるような時間周波数や判別可能なグレーティングの空間周波数に対する視覚特性のことで，時間的あるいは空間的な足し合わせやフリッカー光のちらつきによって測定されているが，順応効果による影響が避けられないとの指摘もあり，視覚系の時空間周波数特性は未だ不明な点が多い．そこで，本研究では，フリッカーを用いない時間的二刺激光法を用いて視覚系の時空間周波数特性を検討した．時間的二刺激光法は，パルス刺激を短時間に呈示するため，順応効果が生じない利点を持つ．さらに，時間的二刺激光法を用いて測定された検出閾値から，視覚系全体の時間特性を反映するインパルス応答関数を導出することが可能である．

視覚系の時空間周波数特性を明らかにすることは，一般的な自然画像に対する視覚特性だけでなく，グラフィカルユーザインタフェース (GUI) に代表される人工的な画像に対する人間の視覚応答を予測することが可能となり，人間がストレスなく操作可能なインタフェースの開発や画像提示手法への応用が期待される．

## 1.2 目的

本研究では，人間の視覚系における時空間周波数特性を明らかにし，その特性を統一的に扱うことができるモデルを構築することを目的とした．視覚系の時空間周波数特性とそのメカニズムを解明するために，実験では時間的二刺激光法を用いてさまざまな空間周波数をもつグレーティング刺激に対する検出閾値を測定した．時間的二刺激光法によって得られた検出閾値から，視覚系全体の時間特性を反映するインパルス応答関数 (Impulse Response Function) を導出することが可能であり，求められたインパルス応答関数は，空間周波数

### 1.3 視覚系の刺激検出メカニズム

チャンネルの時間特性を反映することが期待された．その時間特性を比較することで，視覚系に複数存在する空間周波数チャンネルの分離が可能であるか検討した．

さらに，時間的二刺激光法を応用し左右眼の同一視野に刺激をそれぞれ 1 回呈示し，その検出閾値を測定することで，網膜以降の処理過程でも時間的足し合わせが存在するかを検討した．両眼視での実験は，通常の視環境における視覚特性を理解するために重要であり．両眼間で時間的な干渉が存在するのであれば，両眼立体視における対応問題を解く手がかりになることが期待される．

次節ではまず，視覚系における閾値決定メカニズムについて説明し，視覚系の生理学的メカニズムについて説明する．さらに，眼球光学系を通して入射した光刺激が網膜上の視細胞で電気パルスに変換され，視神経を伝わり大脳一次視覚野に伝達される過程で，どのような信号処理がなされているかを説明する．

### 1.3 視覚系の刺激検出メカニズム

心理物理実験における刺激の閾値検出メカニズムは，図 1.1 に示されるような線形フィルタ，ノイズ，閾値検出器を備えた線形モデルを仮定する．図 1.1 において，入力信号  $I(t)$  は， $N$  段の空間周波数フィルタに並列に入力される．それぞれのフィルタからの出力  $RN(t)$  にノイズ源からのノイズが可算された後，少なくとも 1 つ以上の瞬間において閾値レベルを越えた場合に閾値検出器 ( Threshold Device ) で検出される．実験から得られたフリッカー感度や検出閾と呈示時間の関数のような異なる時間特性の相互関係が，このような線形フィルタモデルによって説明可能 [1][2] であることから支持されている．

### 1.3 視覚系の刺激検出メカニズム

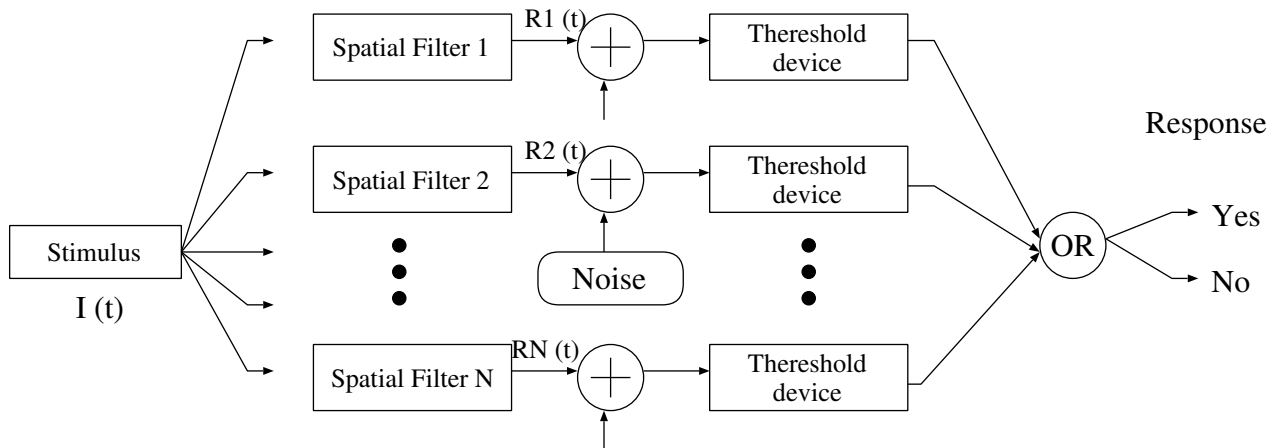


図 1.1 線形フィルタモデルの模式図

視覚系の空間周波数フィルタを  $N$  段のローパスフィルタと考えると，インパルス応答  $H(t)$  は式 1.1 で示される．

$$H(t) = \frac{1}{(n-1)} \left( \frac{A}{\tau} \right)^{n-1} \exp \left\{ - \left( \frac{t}{T} \right) \right\} \quad (1.1)$$

$A$  は比例定数， $\tau$  は時定数であり，モデルの第一段階での出力  $R_n(t)$  は， $I(t)$  と  $H(t)$  の畳み込み積分となり，式 1.2 で与えられる．

$$R(t) = \int_0^t I(t')H(t-t')dt' \quad (1.2)$$

モデルの第二段階では， $R(t)$  に生体ノイズが加算される．生体ノイズは確率的な性質をもつので，閾値検出器への入力とその出力の関係は確率的加重から，式 1.3 によって，コントラスト検出閾 (Detection Threshold) をが計算される． $\beta$  はノイズ特性によって決定される定数である．

$$DT = \frac{1}{\left[ \int_0^t |R(t')|^\beta dt' \right]^{\frac{1}{\beta}}} \quad (1.3)$$

系全体の感度  $S$  は，式 1.3 の逆数で与えられる．

視覚系の閾値決定メカニズムは Wilson [3] によって次のようなモデルが提案されている．視覚応答  $R(t)$  を，ある時間  $t_i$  における応答  $R(t_i)$  の連続したものとみなし，時刻  $t_i$  で  $R(t_i)$  が閾値を越える確率を  $P(t_i)$  とする．どの時刻  $t_i$  でも  $R(t_i)$  が閾値を越えれば応答

#### 1.4 刺激の時空間周波数が刺激検出に与える影響

$R(t)$  が検出されるとすると,  $R(t)$  の検出確率  $P(t)$  は  $P_i$  を用いて式 1.4 で与えられる.

$$P(t) = 1 - (1 - r)\Pi_i(1 - P_i) \quad (1.4)$$

式 1.4 において,  $r$  はチャンスレベルであり,  $P_i$  は式 1.5 で与えられる知覚確率である.

$$P_i = 1 - (1 - r) \exp \left\{ -|R(t_i)|^\beta \right\} \quad (1.5)$$

式 1.5 を式 1.4 に代入し, 式 1.6 が連続関数として与えられる.

$$P = 1 - (1 - r) \exp \left\{ -\int_0^T |R(t)|^\beta dt \right\} \quad (1.6)$$

$T$  は  $R(T) = 0$  となる時間を示し, 検出確率  $P$  は, 刺激光の強度  $I(t)$  の単調増加関数となる. これは, 刺激光の強度に比例して検出確率が 1 に近づくことを意味している.

#### 1.4 刺激の時空間周波数が刺激検出に与える影響

人間の生活する環境は時間的あるいは空間的に常に変化しているので, 視覚系にはそれらの変化に対応するためのメカニズムが存在すると考えられる. 入力される視覚刺激が時間的あるいは空間的な変化を伴う場合, 視覚系の応答はどのように変化するだろうか. 視覚系の時空間特性を明らかにするために, 過去にフリッカーを用いた時間周波数特性やグレーティングを用いた空間周波数特性が研究されてきた.

高頻度でちらつきを繰り返すフリッカーを用いた実験では, 視覚系が追従できる(ちらつきを認識できる)時間周波数に対するコントラスト検出閾値が測定され, その逆数が時間的コントラスト感度関数(temporal contrast sensitivity function)として求められた. 時間的 CSF は, 網膜照度が 77 td 以上の明るい環境では 20 Hz 付近に感度のピークがあるバンドパス(帯域通過)型を示し, 網膜照度が減少するにつれて感度のピークが低周波数側にシフトし, 網膜照度が 0.06 td にまで減少すると感度のピークが消失し, ローパス型を示す報告 [4] がある.

視覚系の空間特性を測定する実験は, グレーティングパターンのコントラスト検出閾値を測定し, コントラスト感度関数が求められた. 輝度グレーティングの空間的 CSF は, 刺

## 1.5 神経生理学の知見

激光が 525 nm の単色光で網膜照度が 900 td と高い条件では，空間周波数が 5 cycle per degree の付近に感度のピークを持ち，バンドパス型を示した [5]．時間的 CSF と同様に，刺激の網膜照度が減少するにつれ，ピークが低周波数側にシフトし，0.09 td 以下の条件では感度のピークが消失し，ローパス型となる．

一方で，赤緑と黄青の格子縞を用いた色度変化実験では，刺激の網膜照度によらずローパス型となった [6]．これは，色相によって空間周波数特性に差はなく，r-g と y-b の二つの色チャンネルの空間特性に差はないことを示している．

ただし，視覚系の時間特性や空間特性は刺激のサイズや空間周波数によって異なることも示されており [21]，コントラスト感度関数は時間周波数と空間周波数の 2 変数として扱う必要がある．

## 1.5 神経生理学の知見

視覚系の時空間特性は，眼球光学系や網膜上の視細胞や視細胞で発生した電気信号を伝達する視神経の特性が反映していると考えられ，神経生理の研究結果との比較がなされている．

網膜には，3 種類の錐体と 1 種類の桿体が存在し，光刺激は視細胞によって電気刺激に変換され，視神経を通り大脳視覚領へと伝達される．眼球外に出た視神経は，視交叉で交差ししており，左右両眼ともに網膜右側が右外側膝状体へ，網膜左側が左外側膝状体へと投射される．外側膝状体は 6 層からなり、第 1 層と第 2 層は大きな細胞体のニューロンで構成され、大細胞層 ( Magno-Cellular layer )，第 3 層から第 6 層は，小さな細胞体のニューロンで構成され，小細胞層 ( Parvo-cellular Layer ) と呼ばれる．網膜上で広範囲に樹状突起を広げるパラソル神経節細胞が大細胞層に経路 ( Magno-Cellular Pathway ) を形成し，この神経節細胞は広範囲からの信号を寄せ集めるため，空間解像度が低く，時間解像度が高い．一方，小細胞層に経路を形成しているミジェット神経節細胞は，信号寄せ集めの範囲が狭いため空間解像度が高く，時間解像度が低い特性を示す．さらに，ミジェット神経節細胞は波長選択

## 1.5 神経生理学の知見

性的色対立型の応答を示すため，色覚情報を伝達する．

図 1.2 に示すように，大細胞層のニューロンは大脳一次視覚野の  $IV_{c\alpha}$  層に投射し，運動視や空間視に必要な情報を伝達する．小細胞層のニューロンは  $IV_{c\beta}$  層に投射し，形態視や色覚情報を伝達する．情報の質によって大脳へ至る経路が異なっていることは，視覚情報が一次視覚野（V1）で処理されるよりも前の段階からすでに情報処理が始まっていることを意味している．

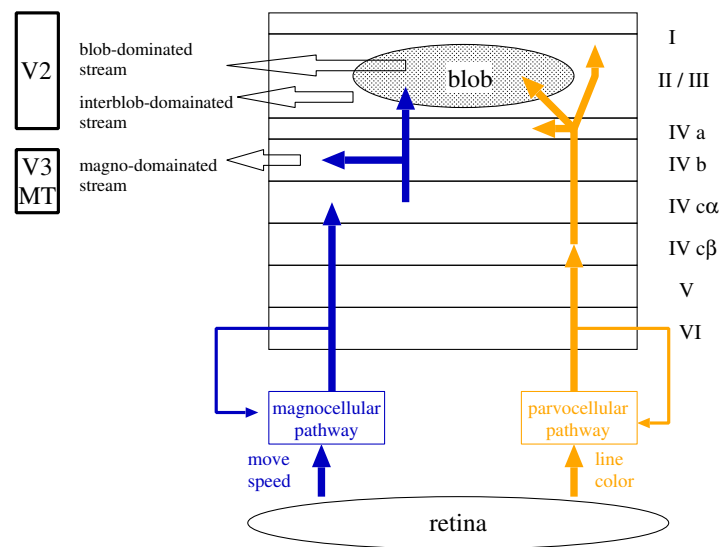


図 1.2 網膜から一次視覚野への入力

さらに，視覚系には図 1.3 に示されるような複数のサブシステムとして時空間周波数チャンネルの存在がある．低時間周波数領域では多数の空間周波数チャンネルが存在し，高時間周波数領域では空間周波数チャンネルの数は少ない．これは，時間解像度と空間解像度間にトレードオフの関係があることを意味しており，神経生理学の所見との対応が考えられる [7]．一方で，時間周波数チャンネル，あるいは空間周波数チャンネルがいくつ存在するかという問題に対して，明確な答えは示されておらず，時間周波数チャンネルよりも空間周波数チャンネルの方が数が多いのではないかとわれている．

## 1.5 神経生理学の知見

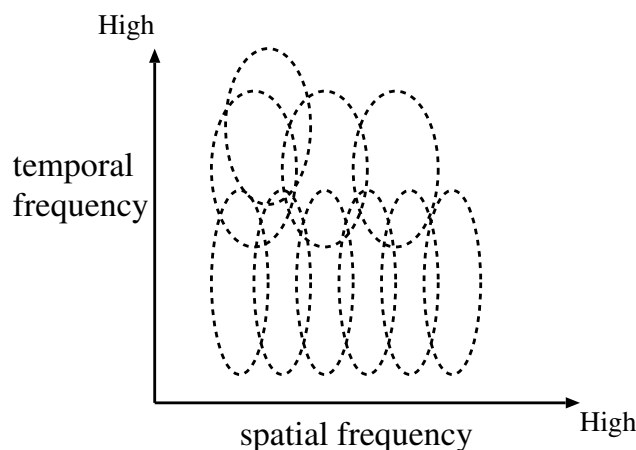


図 1.3 時空間周波数チャンネルの模式図

順応刺激を利用した実験 [8] では，3 cpd より低周波数の順応に対しては 3 cpd にピークをもつ閾値上昇が得られた．刺激サイズを変えた実験 [9] は，1.19 cpd の順応刺激を用いた結果，1 cpd 付近に閾値上昇のピークを得たことから，閾値上昇した周波数付近に感度のピークをもつ空間周波数チャンネルが存在すると考えられる．

一方で，複数存在する空間周波数チャンネルには，相互作用があることが指摘されている [9]．順応によってある周波数チャンネルの感度が低下すると，そのチャンネルの抑制を受けている隣接するチャンネルによる検出感度の上昇が起こることで説明され，順応を用いた実験での問題点とされている．本研究では，マスク法や順応法で問題となる他チャンネルへの相互作用を避けるため，短時間の刺激呈示を行なう時間的二刺激法を用いることで，この問題を回避できると考えた．グレーティング刺激の空間周波数に感度をもつ空間周波数チャンネルの応答によって閾値が決定されると予測し，実験ではさまざまな空間周波数をもつ刺激に対する検出閾値を測定した．



## 第 2 章

# 実験手法と装置

本章では，実験で使用した刺激，装置と実験手法について述べる．さらに，実験で得られたコントラスト検出閾値からインパルス応答関数を導出する手法について説明する．

### 2.1 実験手法

本節ではまず，従来から用いられてきた順応実験手法とマスク実験手法について説明し，その手法の問題点を述べる．さらに，本研究で用いた時間的二刺激光法の原理と利点について解説する．

#### 2.1.1 順応効果を用いた実験手法

順応実験は，あるメカニズムが一定の刺激に対して長時間反応し続けた結果，感度が低下することを利用した実験手法である．一定の周波数の正弦波グレーティング刺激を順応刺激として提示し，その後コントラスト感度を測定するとき，周波数特性が単一のメカニズムで決定されるのであれば，順応による感度低下はすべての周波数で同様に生じると予想される（図 2.1 ( a )）．一方，狭帯域に感度をもつメカニズムが順応刺激を検出しているのであれば，順応効果による感度の低下はそのメカニズムの空間周波数特性を反映した結果となると予測される（図 2.1 ( b )）．

## 2.1 実験手法

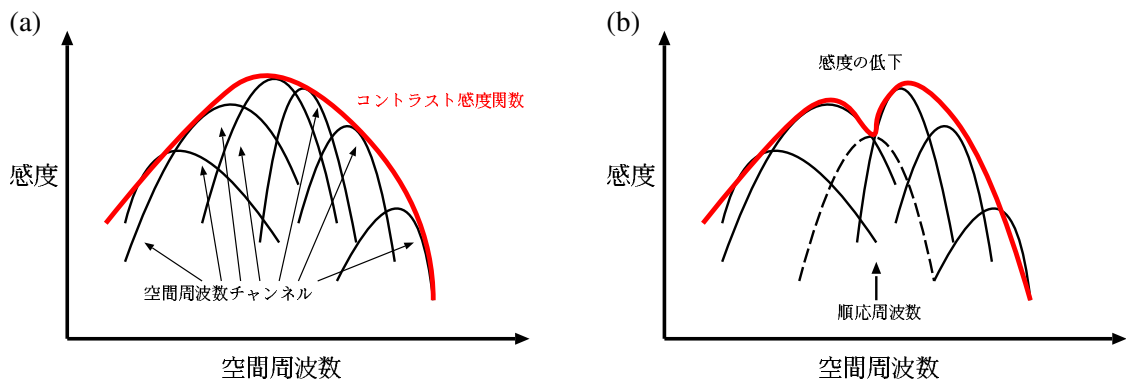


図 2.1 (a) コントラスト感度関数は、複数の空間周波数チャンネルの感度の包絡線として得られる。

(b) 1 つの空間周波数チャンネルの感度のみが低下した場合、コントラスト感度の低下はそのチャンネルの特性を反映する。

順応前と順応後のコントラスト感度を比較した実験では、順応刺激の空間周波数を中心として感度が低下し、順応周波数から離れた周波数では感度低下が生じないという報告 [8] があり、これは、順応刺激の周波数とは異なるメカニズム（空間周波数チャンネル）で刺激が検出されていることを示している。

順応法を用いた実験で得られた周波数特性には、それぞれのチャンネルが独立に働くという仮定がなされているという問題点が指摘されている。各空間周波数チャンネル間には、相互作用があることもわかっており、順応効果が隣接するチャンネルに影響を与えることから、順応効果によって、ある周波数チャンネルの感度が低下すると、そのチャンネルの抑制を受けている隣接するチャンネルの検出感度の上昇することが報告 [9] されている。

また、順応効果をテスト刺激の閾値で表現した場合には、チャンネルの感度そのものを測定していることにはならないことにも注意する必要がある。

## 2.1 実験手法

### 2.1.2 マスク刺激を用いた実験手法

マスク実験は、テスト刺激にある周波数の刺激を重ねて呈示することで、その感度低下の度合いを測定する実験である。同じ周波数の刺激のみを呈示した場合には、マスクのコントラストが高くなるにつれて、テスト刺激の検出閾値が高く（感度が低く）なる。テスト刺激を検出するメカニズムが感度をもたない周波数のマスク刺激は、テストの検出閾値には影響せず、感度が高い周波数では閾値の上昇をもたらす。よって、複数のマスク刺激を用いてマスクと閾値の相対的な関係を調べることで、テスト刺激を検出しているチャンネルの周波数特性を得ることができる。

マスク法を用いた実験での問題点は、順応法と同様に、テスト刺激が単一のメカニズムで検出されているかどうかである。マスク法での実験では、一般的に確率的足し合わせで閾値が決まるという仮定においてチャンネルの空間周波数を推定するが、チャンネル間の相互作用の問題は残る。さらに、テストの検出にかかわらないチャンネルへもマスク効果が働いている可能性が指摘されている [10]。他のチャンネルから影響を受けるのであれば、推定される帯域幅は実際より広くなると考えられる。

### 2.1.3 時間的二刺激光法

本研究で用いた時間的二刺激光法は、色覚メカニズムの興奮抑制の結合を研究するための手法として確立 [11][12][17] され、2 つのパルス刺激を短時間呈示し、その呈示時間間隔を変数として閾値を求める実験手法である。この実験手法によって、刺激呈示間隔の増加とともに閾値が単調に増加するのではなく、時間間隔が 60 ms 付近で 2 つのパルス刺激を呈示したときに、検出閾値が高くなる抑制効果が生じることが示された。

図 2.2 に時間的二刺激光法の原理を示す。時間的二刺激光法では、刺激呈示間隔が変数として扱われ、それは SOA ( Stimulus Onset Asynchrony ) あるいは ISI ( Inter Stimulus Interval ) で与えられる。

二刺激光の呈示間隔  $t$  とその時の知覚確率を  $W(t)$  とすると、二刺激光の呈示間隔が十分

## 2.1 実験手法

に大きく、それぞれ別の刺激と考えると良い場合を  $W(\infty)$  とすると、

$$q(t) = \frac{W(t) - W(\infty)}{W(t) + W(\infty)}$$

となる  $q(t)$  が定義でき、これは、二刺激光の時間的な相互作用を示す。二刺激光が同時 ( $t = 0$ ) に呈示された時、 $q(t) = 1$  となり、これは完全時間的足し合わせを示す。逆に、二刺激光がまったく干渉しない程十分に大きい  $t = \infty$  時間間隔の時、 $q(t) = 0$  となり、時間的足し合わせは生じず、二刺激光に相互作用はないことを意味する。

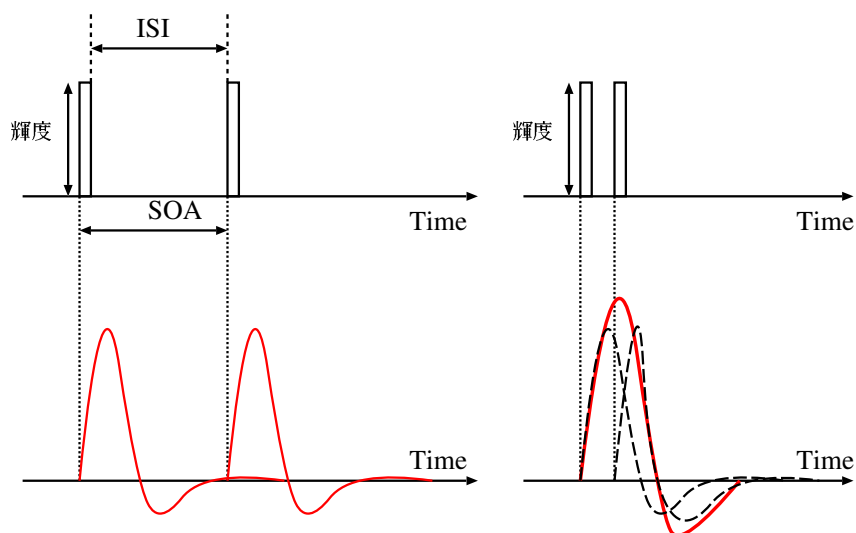


図 2.2 刺激呈示間隔 (SOA あるいは ISI) が十分長い場合 (左図)、二刺激光による応答は時間的干渉はない。刺激呈示間隔が比較的短い場合 (右図)、二刺激による応答が時間的に干渉し、応答は大きくなる。

時間的二刺激光法で用いるテスト刺激は短時間呈示であるため順応が生じず、順応法やマスク法で問題となった他チャンネルへの順応効果は、無視できるほどに小さいと考えられる。さらに、時間的二刺激光法を用いて得られた検出閾値から、視覚系全体の時間特性を示すインパルス応答関数を導出することが可能であり、視覚系の空間特性と時間特性の相互作用を測定する実験手法として用いられている。

本研究では、この時間的二刺激光法を用いてさまざまな空間周波数を持つ輝度刺激あるいは等輝度色刺激に対するコントラスト検出閾値を測定した。時間的二刺激光法では、マスク

## 2.2 実験刺激と装置

法や順応法で挙げられたような他チャンネルへの順応効果の影響を避けることができ、得られたコントラスト検出閾値から視覚系全体の時間特性を示す関数であるインパルス応答関数を導出することができる。導出されたインパルス応答関数は、刺激の空間周波数に同調した空間周波数チャンネルの時間特性を反映することが期待され、その時間特性を比較することで、空間周波数チャンネルの分離可能性を検討した。

さらに、時間的二刺激法を両眼に適用することで、網膜以降の処理段階でも時間的足し合わせが生じるかを検討した。両眼間で時間的相互作用が存在するならば、両眼性の空間周波数チャンネルが存在する可能性がある。

また、視覚情報処理系は初期の段階で輝度と色情報を分離して伝達することが知られていることから、実験で用いた刺激は、輝度刺激と等輝度色刺激の2種類を使用した。それぞれについて、単眼呈示実験と両眼呈示実験を行なうことで、単眼および両眼での時空間周波数特性を検討した。

## 2.2 実験刺激と装置

本節では、単眼刺激呈示条件で用いた実験刺激と装置について説明する。両眼刺激呈示条件で用いた実験刺激と装置については、第5章に記述する。

### 2.2.1 刺激

単眼刺激呈示実験で用いられたテスト刺激には、空間周波数をもつグレーティングにガウス関数の包絡線をかけたものが採用された。グレーティングにガウス関数の包絡線をかけたのは、エッジ(輪郭)による検出を避けるためである。刺激サイズは、ガウス関数のSD直径( $\pm SD$ )は視角 $2^\circ$ である。

実験において、刺激の呈示時間(duration)および呈示時間間隔(ISI)はすべてCRTディスプレイのフレーム数で定義された。CRTディスプレイの周波数は150 Hzに設定したので、1フレームは6.7 msとなる。刺激呈示時間は1フレーム(=6.7 ms)とした。

## 2.2 実験刺激と装置

ISI は 6.7 から 180 ms の範囲で 14 種類を採用した。

刺激の空間周波数は 0.43 から 4.90 cycle / degree の範囲で 14 種類を採用した。0.43 cycle / degree の条件は、ガウス関数自身の主空間周波数であり、刺激に縞は存在しない。実験で呈示される二刺激光は、ともに同じ空間周波数をもっており、実験の 1 セッション中は変化しない。

### 2.2.2 実験装置

テスト刺激はコンピュータに接続されたビデオカード（VSG2/4; Cambridge Research Systems）によって生成され、CRT ディスプレイ（BARCO CCID-121）上に呈示された。実験は暗室内に設置された実験ブース内で行なわれ、被験者はあご台と額当てで頭部を固定し、133.9 cm の視距離で CRT ディスプレイを観察した。実験ブースは 180 cm × 270 cm × 90 cm（高さ × 長辺 × 短辺）のサイズで、市販のアングル材と黒色ボード板、暗幕を用いて作製された。図 2.3 に示すように、実験ブース内には、CRT ディスプレイとあご台、椅子、被験者の応答を測定するためのボタンスイッチのみが設置され、実験中はディスプレイを除いて暗黒であった。

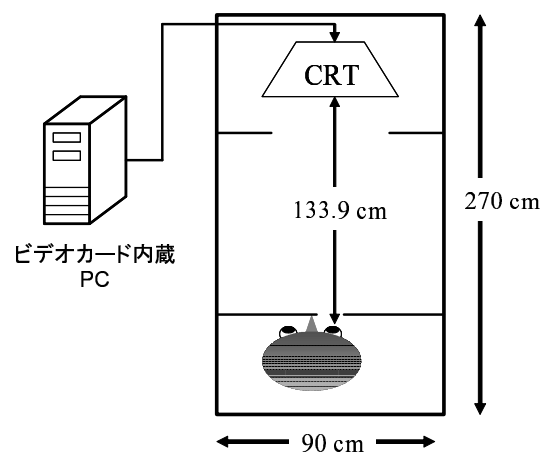


図 2.3 暗室内に実験ブースを作製し、実験を行なった。ブース内にはディスプレイ以外に発光するものは存在しない。

## 2.2 実験刺激と装置

単眼刺激呈示実験では，片眼のみを使用し，実験に使用しない眼は眼帯（eye patch）で覆われた．また，実験装置に光学機器は使用していない．

連続して呈示される二刺激光は CRT ディスプレイの 4 分割されたうちのいずれか 1 ヶ所にランダムに呈示される．被験者のタスクは，刺激が CRT ディスプレイ上のどこに呈示されたかを応答することである．被験者は，対応するボタンスイッチ（図 2.4）を押すことで，刺激がどこに呈示されたかを応答した．このとき「どこに呈示されたかわからない」という応答は認められない 4 Alternative Forced-Choice 法を用いて被験者の応答を測定した．

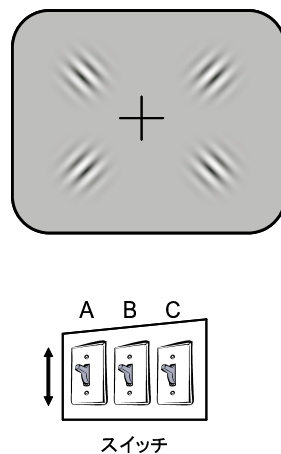


図 2.4 被験者は刺激が呈示された場所に対応するボタンを押すことで，刺激がどこに呈示されたかを応答した．B のボタンは，実験の強制終了ボタンである．

### 2.2.3 測光

実験装置である CRT ディスプレイと実験刺激は，実験開始前に測光（Calibration）を行なった．CRT ディスプレイの輝度は，画面の 9 カ所で測光し，平均値を採用した．相対輝度は Optical（Cambridge Research Systems）で測光し，絶対輝度は LS-100 および CT-1000（ともに Minolta 製）を用いて測光した．刺激の色度点は，CS-100（Minolta 製）を用いて測光した．

CRT ディスプレイや PC は，電源投入直後は色ムラを起こしやすく，PC やそれに内蔵されたビデオカードは電圧が安定せずに動作が不安定となることがある．そのため，実験

## 2.3 実験手順

装置に電源を投入して 30 分間は，warm up のための時間とし，CRT ディスプレイにはランダムドットノイズを表示していた．また，電源電圧の安定を保つために，実験に使用した PC には UPS（APC 社製）を取り付けていた．

### 2.2.4 被験者

単眼刺激条件での輝度刺激呈示実験に参加した被験者は，筆者を含む男子大学生 5 名（MH，YF，TT，RK，TS）である．そのうち，3 名（MH，YF，TS）は，等輝度色刺激呈示実験にも参加した．すべての被験者は，視力正常あるいは矯正済（視力 0.8 以上）で，事前に石原表及びパネル D-15 テストによって色覚正常であると判定された．

等輝度色呈示実験では，被験者ごとに色交換フリッカーを用いて 3 色蛍光管（RGB）相互の感度比を測定し，各蛍光管輝度を被験者毎に調整した．これにより，被験者ごとに背景白色の見えが若干異なる可能性はあるが，等輝度状態については十分な精度を確保している．筆者を除く被験者は，実験の目的についてなにも知らされていなかった．

## 2.3 実験手順

本節では，実験手順について説明する．実験セッションの流れを図 2.5 に示す．

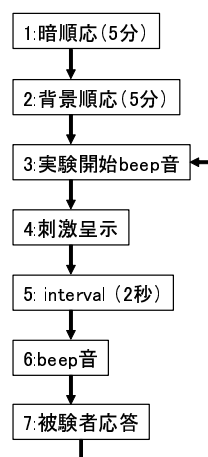


図 2.5 実験セッションの手続き．すべての ISI 条件でコントラスト検出閾値が決定するまで 3 から 7 が繰り返される．



## 2.3 実験手順

ある空間周波数をもつ刺激に対し，4 セッションの実験を行なった．セッション中，刺激の空間周波数は一定で変化せず，さまざまな ISI 条件で刺激が呈示され，そのコントラスト検出閾値を測定した．実験セッションは暗順応から実験終了まですべてコンピュータで制御され，自動化されている．図 2.6 に CRT ディスプレイに呈示される刺激の時間的变化を示す．

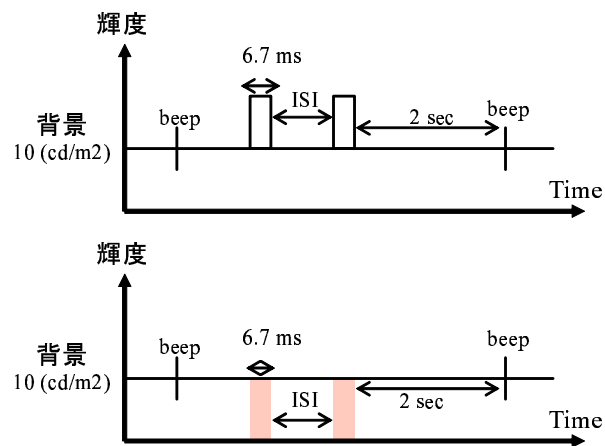


図 2.6 CRT ディスプレイに呈示される刺激の時間的变化．上図は，輝度刺激呈示条件で，下図は等輝度色刺激呈示条件を示す．

テスト刺激は，CRT ディスプレイ上の 4 分割（右上 - 右下 - 左上 - 左下）された領域のうち 1 カ所に連続的に呈示される．被験者は CRT ディスプレイのどの場所にテスト刺激が呈示されたかをボタンスイッチを押すことで応答する．その時，被験者の応答は「わからない」という応答は許されない，4 Alternative Forced-Choice で測定された．

呈示されるテスト刺激の輝度（色）コントラストは，階段法（Two-down One-up）により変化させた．輝度コントラストあるいは色コントラスト刺激は，first flash と second flash は，常に同じコントラストである．刺激のコントラストは  $0.005 \log cd/m^2$  step で変化し，最初の 2 つの reversal（上昇系列と下降系列の変曲点）までは，3 から 6 までの reversal の 5 倍量（ $0.025 \log cd/m^2$ ）で変化した．コントラスト検出閾値は，3 から 6 までの reversal における刺激コントラストの幾何平均値で決定された．実験によって得られた閾値データの例を図 2.7 に示す．

## 2.4 インパルス応答関数の導出方法

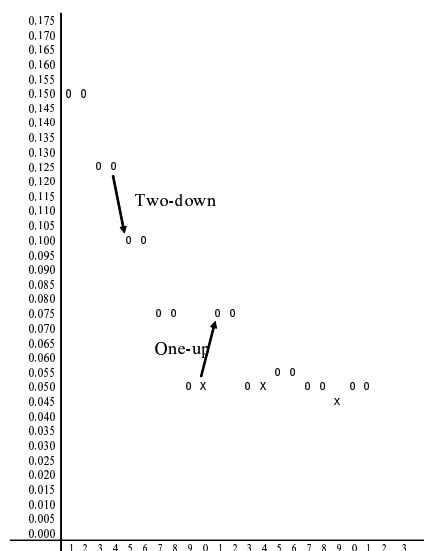


図 2.7 実験によって得られた検出閾値データの例．ある ISI において，被験者の応答が 2 回続けて正解すれば，次にその ISI で刺激が呈示されるとき，刺激のコントラストは 1 段階減少する．被験者の応答が間違いであれば，次にその ISI で刺激が呈示されるとき，刺激のコントラストは 1 段階増加する．

1 つの空間周波数について 4 セッションの実験を行ない，その 4 セッションの幾何平均値をその空間周波数におけるコントラスト検出閾値として採用した．明らかにエラーと見なされるような実験データが含まれていた場合には，そのセッションの閾値データすべてを無効とし，後日改めて追加実験を行なった．

## 2.4 インパルス応答関数の導出方法

本節では，実験で得られたコントラスト検出閾値からインパルス応答関数を導出する過程について説明する．

### 2.4.1 Burr and Morrone のモデル

インパルス応答関数を導出するモデルは多数提案されている [14] [15] が，他のモデルよりもパラメータが少なく，最小位相フィルタの仮定が必要ないという理由 [16] から，本研究では Burr and Morrone [17] の式 2.1 を採用した．式 2.1 は時間とともに強度の減少を伴い

## 2.4 インパルス応答関数の導出方法

振動し、0へ近づく減衰関数である。式 2.1 において、 $H(t)$  は次のような関数として与えられる。また、 $a_0, a_1, a_2, a_3$  はそれぞれ、関数全体のゲイン、振動の基本周波数、周波数変調、指数関数的な減衰を制御するパラメータである。

$$IRF(t) = a_0 H(t) t \sin \left\{ 2\pi [a_1 t(t+1)]^{-a_2} \right\} \exp(-a_3 t) \quad (2.1)$$

$$H(t) = 0, t < 0;$$

$$H(t) = 1, t \geq 0.$$

### 2.4.2 確率的足し合わせを含む閾検出モデル

求められたインパルス応答関数からコントラスト検出閾値を予測するために、式 2.2 [1] を用いた。

$$p = 1 - (1 - r) \exp \left[ - \left\{ \int_0^T |R(t, \tau)|^\beta dt \right\} \right] \quad (2.2)$$

ただし、検出確率  $p$  を式 2.2 より求めるに当たって、応答量  $R(t, \tau)$  を式 2.3 のように定めた。

$$R(t, \tau) = k \{ IRF(t) + IRF(t, \tau) \} \quad (2.3)$$

式 2.2 において、 $r$  は偶然確率であり、本研究では 4AFC を採用したので、 $r = 1/4$  である。心理測定関数の傾きを決定する  $\beta$  の値は 2 パルス感度から推定された 4.0 を仮定 [18] した。これは、刺激呈示時間によって変化しないという定常性の仮定がなされて決定された値である。また、刺激強度を階段法 (Two-down One-up) で変化させたので、閾値において検出確率  $p$  は  $0.707 (\sqrt{2}/2)$  となる。

式 2.3 の  $k$  は、刺激強度である。式 2.3 は、 $ISI = \tau$  の時間間隔をとまって呈示された二刺激光による視覚系全体の応答  $R(t)$  が、ある時間  $t$  に呈示された刺激光によって生成されたインパルス応答  $IRF(t)$  と、 $\tau$  後に呈示された刺激光によって生成されたインパルス応答  $IRF(t + \tau)$  を線形加算したものとなることを示している。

## 2.4 インパルス応答関数の導出方法

### 2.4.3 実験データのモデルへのフィッティング

実験から得られたコントラスト検出閾値と、あるパラメータセット  $a_0, a_1, a_2, a_3$  を仮定したときに式 2.1 から得られたインパルス応答関数を式 2.2 に代入することによって得られたコントラスト検出閾値  $k(\text{cd}/\text{m}^2)/10(\text{cd}/\text{m}^2)$  の差が最小となるような  $a_0, a_1, a_2, a_3$  の値を最小二乗法によって決定し、それをその空間周波数条件での  $IRF(t)$  とした。図 2.8 は、実験から得られたコントラスト検出閾値、図 2.9 は、前述の手法によって得られた  $IRF(t)$  を示す。さらに、図 2.8 には、図 2.9 に示された  $IRF(t)$  から式 2.3 を用いて予測されたコントラスト検出閾値も同時に掲載した。

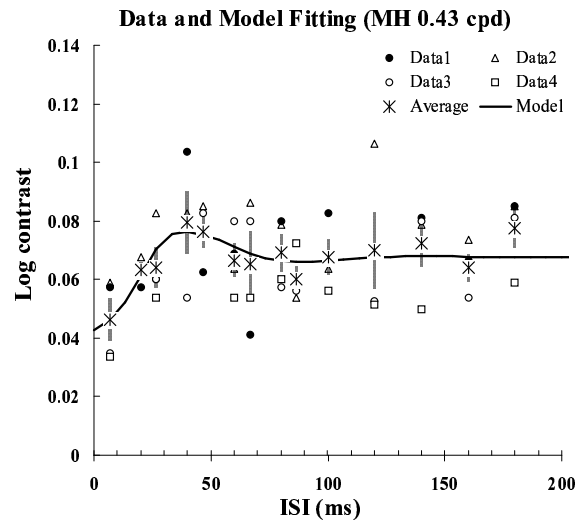


図 2.8 実験から求められたコントラスト検出閾値。各シンボルは実験セッションを示し、実線はモデルから計算されたコントラスト検出閾値を示す。縦軸は対数輝度コントラスト、横軸は刺激呈示間隔 (ISI) を示す。シンボルから伸びる縦線は、標準誤差を示す。

## 2.4 インパルス応答関数の導出方法

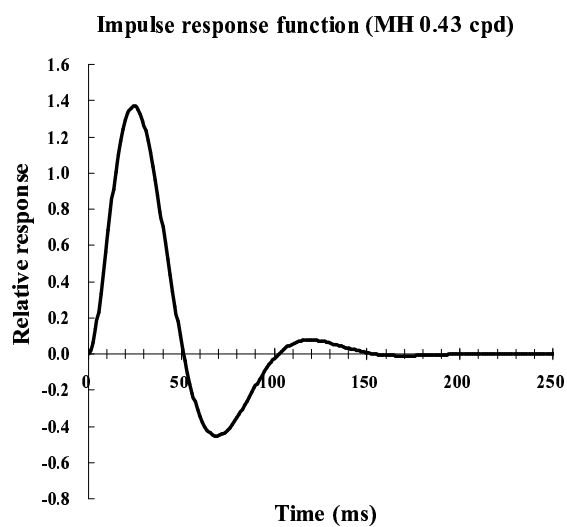


図 2.9 実験データとの差が最小となるような  $a_0, a_1, a_2, a_3$  の値を式 2.1 に代入して得られたインパルス応答関数．縦軸は強度，横軸は時間 (ms) を示す．

## 第 3 章

# 単眼呈示条件でのコントラスト 検出 閾値

本章では，単眼呈示条件において，さまざまな空間周波数を持つ輝度あるいは等輝度色グレーティング刺激に対するコントラスト検出閾値を測定した結果を記載する．同時に，導出されたインパルス応答関数についても記載する．

### 3.1 単眼刺激呈示条件での輝度刺激に対する結果

本節では，時間的二刺激光法を用いた単眼刺激呈示条件での輝度刺激に対する対数輝度コントラスト検出閾値と，それから計算されたインパルス応答関数を示す．各図の左側には，11 種類の空間周波数をもつ輝度グレーティング刺激に対する対数輝度コントラスト検出閾値を ISI の関数としてプロットしたもの示す．図中の各シンボルは実験セッションを示し，誤差線は標準誤差 (SEM) である．各図の右側には，実験データから第 2 章で示した手順によって計算されたインパルス応答関数を示した．

#### 3.1.1 被験者 MH の実験結果

被験者 MH の実験結果を示す．

### 3.1 単眼刺激呈示条件での輝度刺激に対する結果

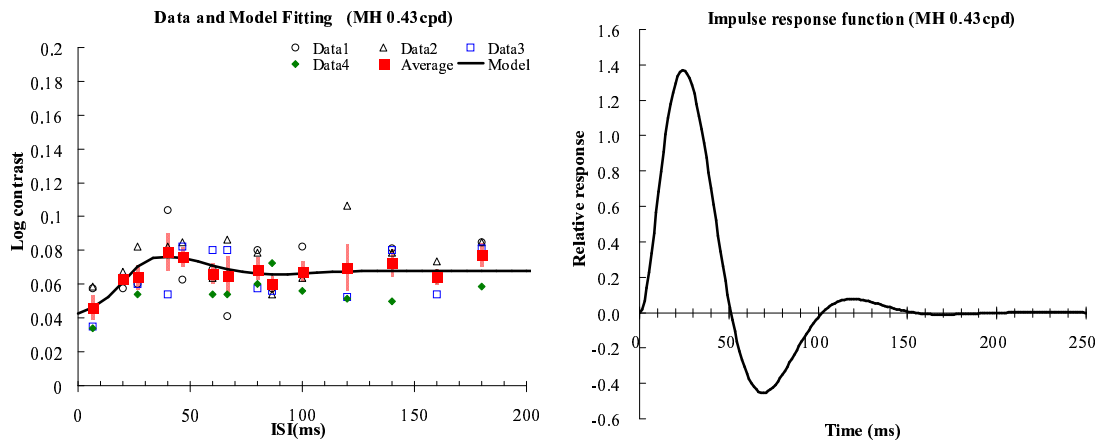


図 3.1 被験者 MH 0.43 cpd の実験結果 .

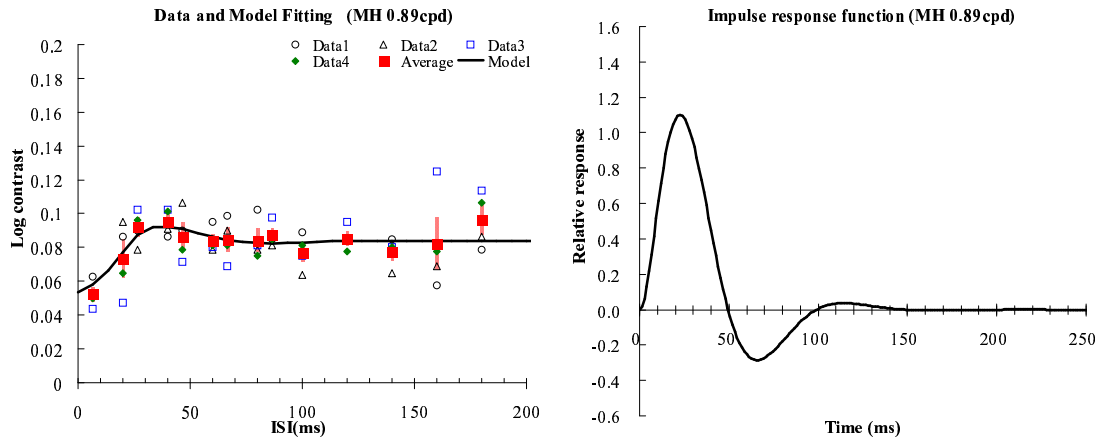


図 3.2 被験者 MH 0.89 cpd の実験結果 .

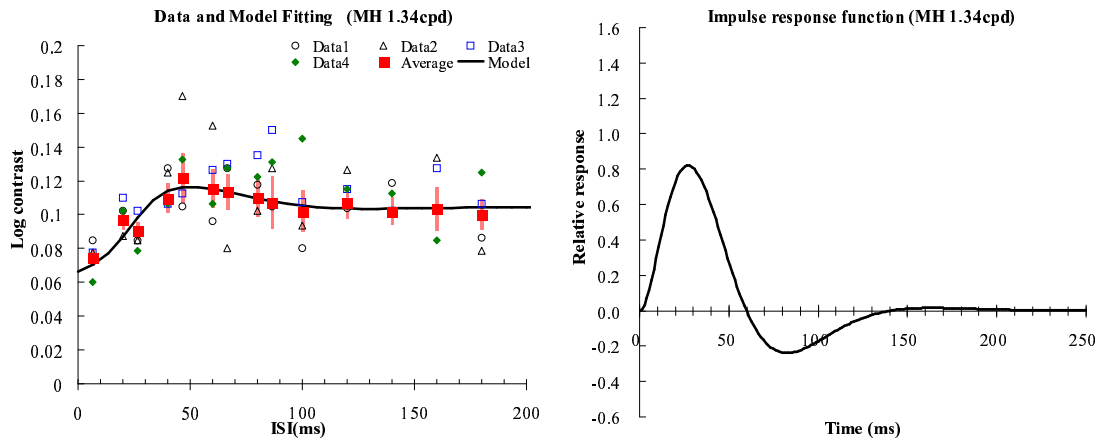


図 3.3 被験者 MH 1.34 cpd の実験結果 .

### 3.1 単眼刺激呈示条件での輝度刺激に対する結果

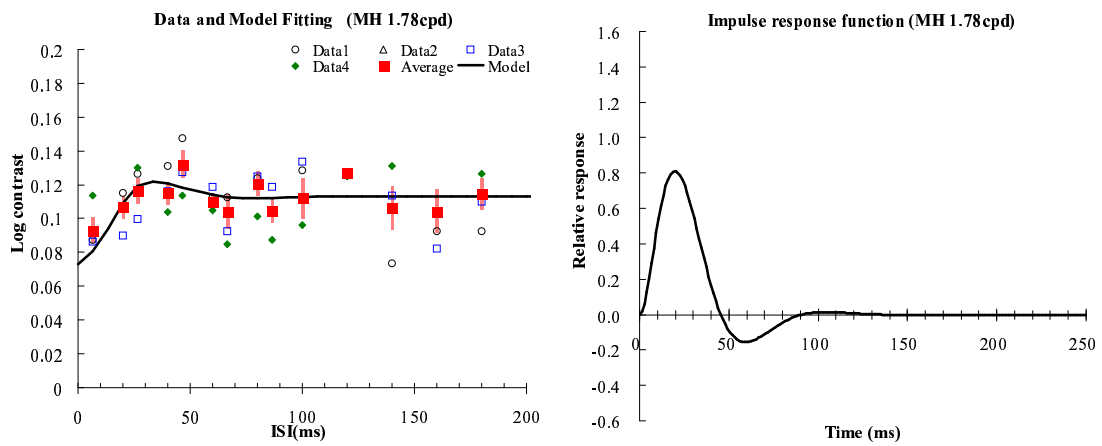


図 3.4 被験者 MH 1.78 cpd の実験結果 .

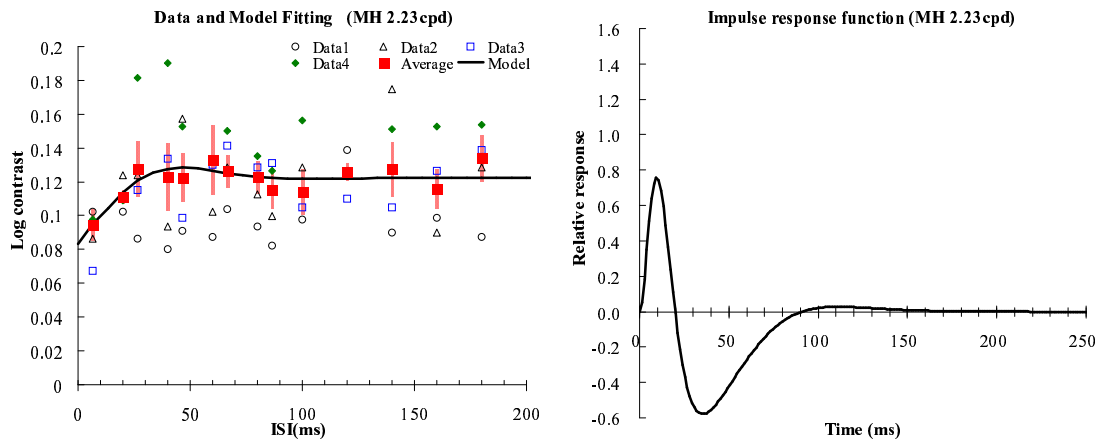


図 3.5 被験者 MH 2.23 cpd の実験結果 .

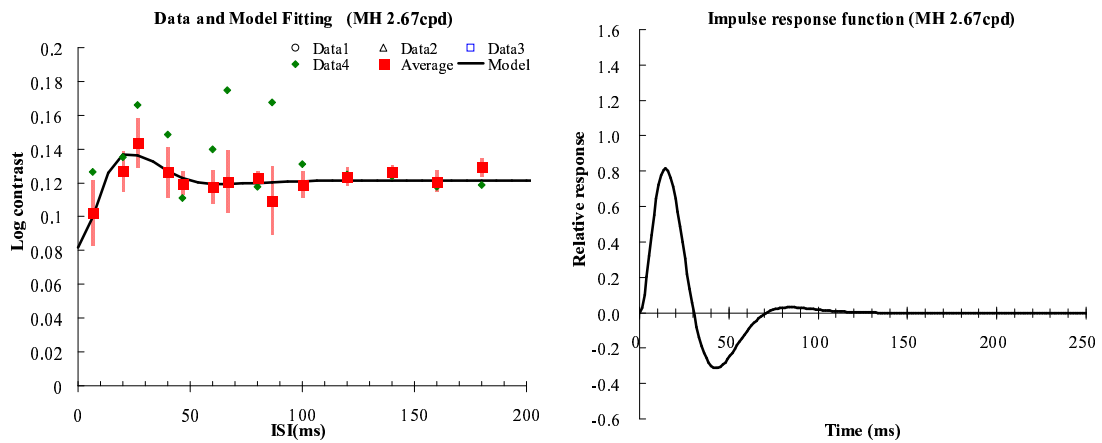


図 3.6 被験者 MH 2.67 cpd の実験結果 .



### 3.1 単眼刺激呈示条件での輝度刺激に対する結果

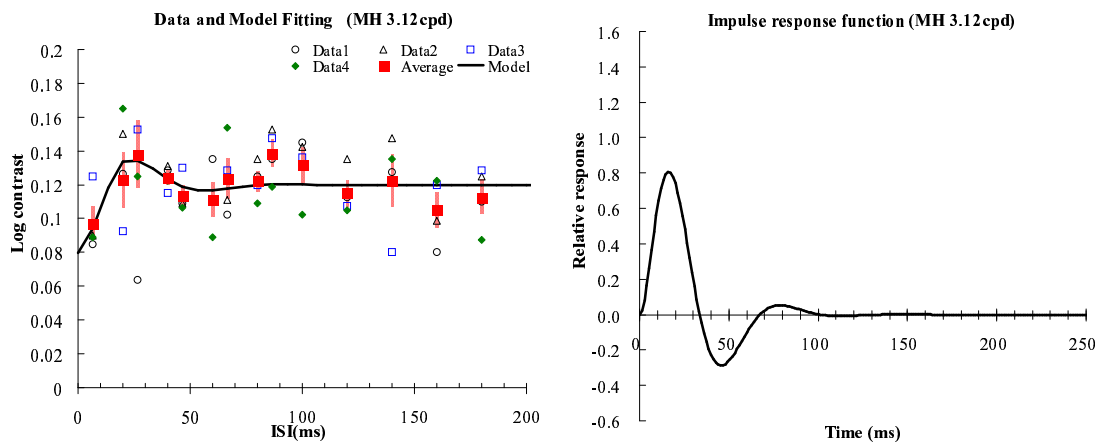


図 3.7 被験者 MH 3.12 cpd の実験結果 .

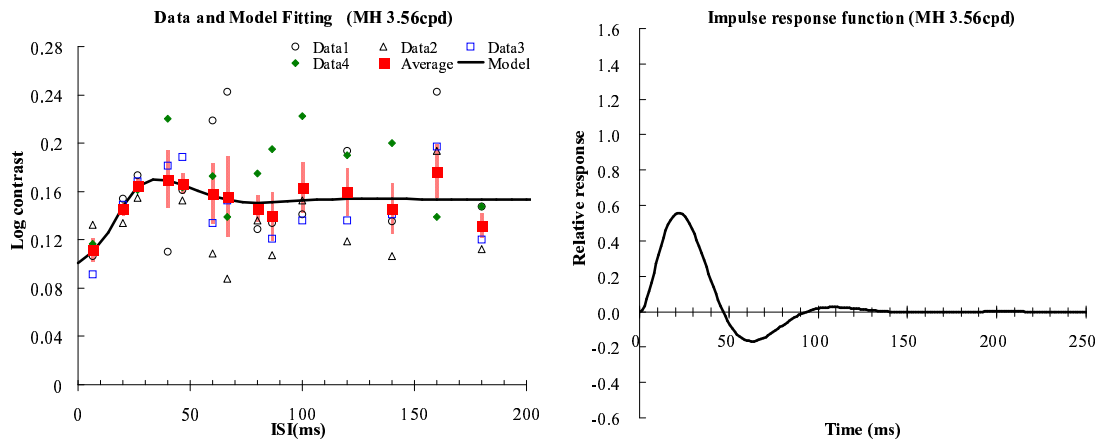


図 3.8 被験者 MH 3.56 cpd の実験結果 .

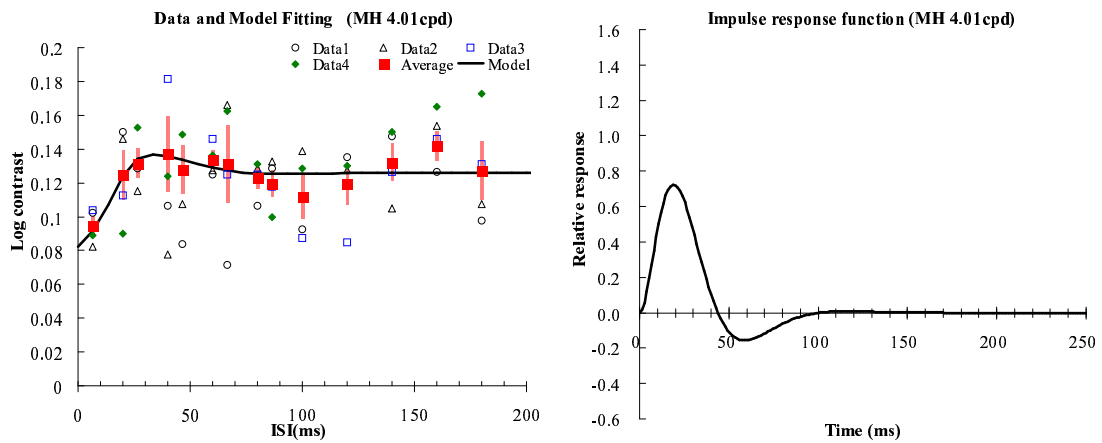


図 3.9 被験者 MH 4.01 cpd の実験結果 .

### 3.1 単眼刺激呈示条件での輝度刺激に対する結果

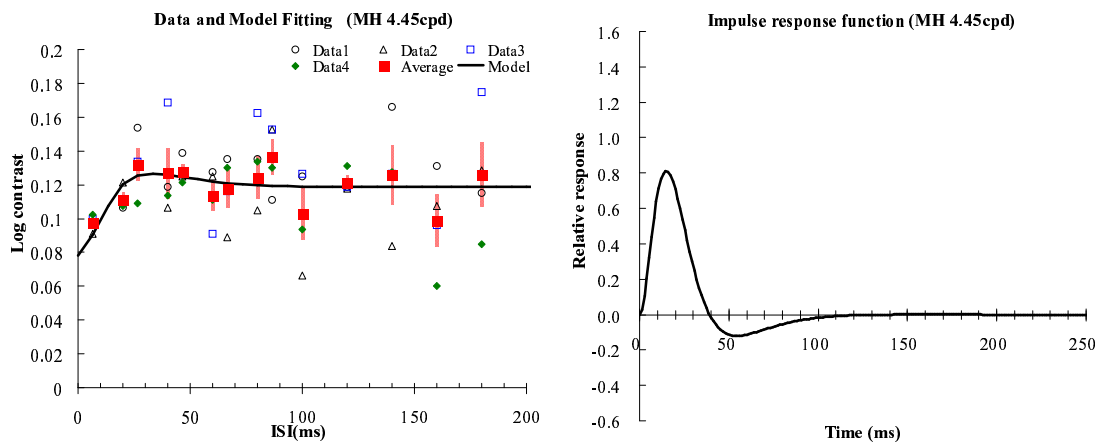


図 3.10 被験者 MH 4.45 cpd の実験結果 .

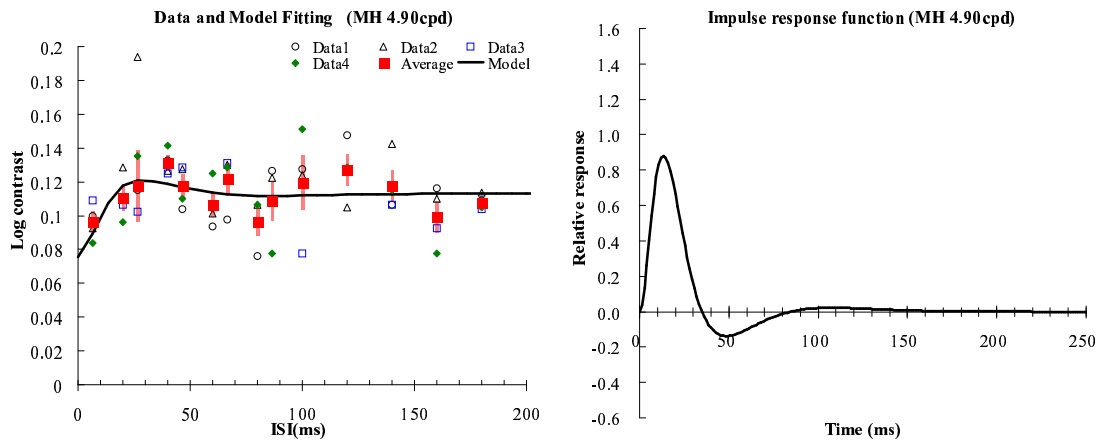


図 3.11 被験者 MH 4.90 cpd の実験結果 .

#### 3.1.2 被験者 YF の実験結果

被験者 YF の実験結果を示す .

### 3.1 単眼刺激呈示条件での輝度刺激に対する結果

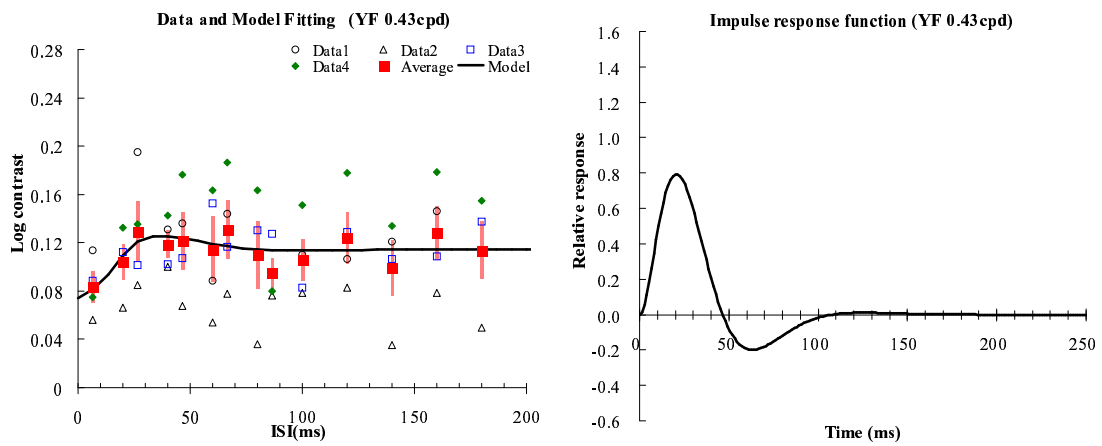


図 3.12 被験者 YF 0.43 cpd の実験結果 .

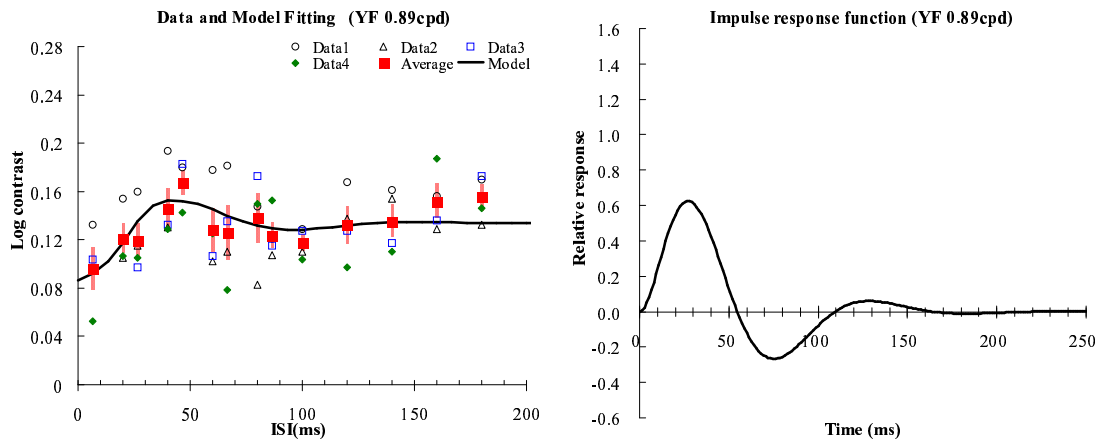


図 3.13 被験者 YF 0.89 cpd の実験結果 .

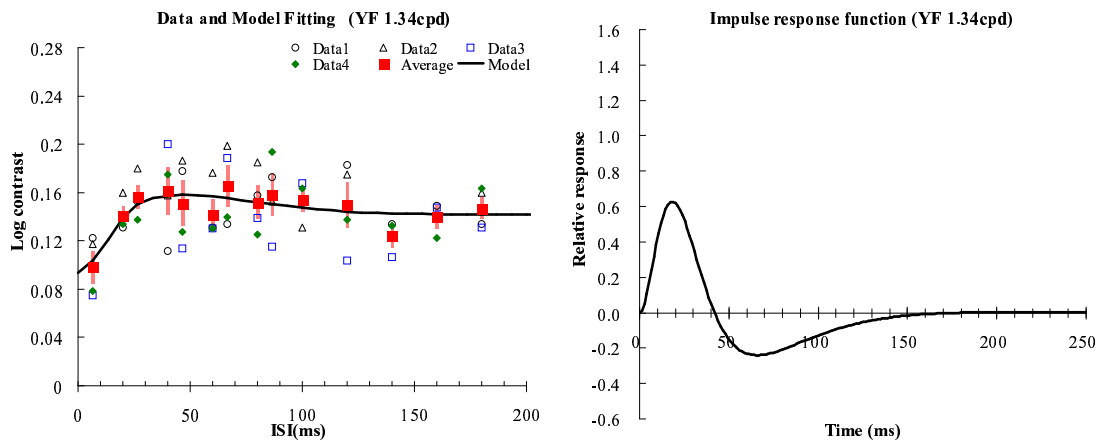


図 3.14 被験者 YF 1.34 cpd の実験結果 .

### 3.1 単眼刺激呈示条件での輝度刺激に対する結果

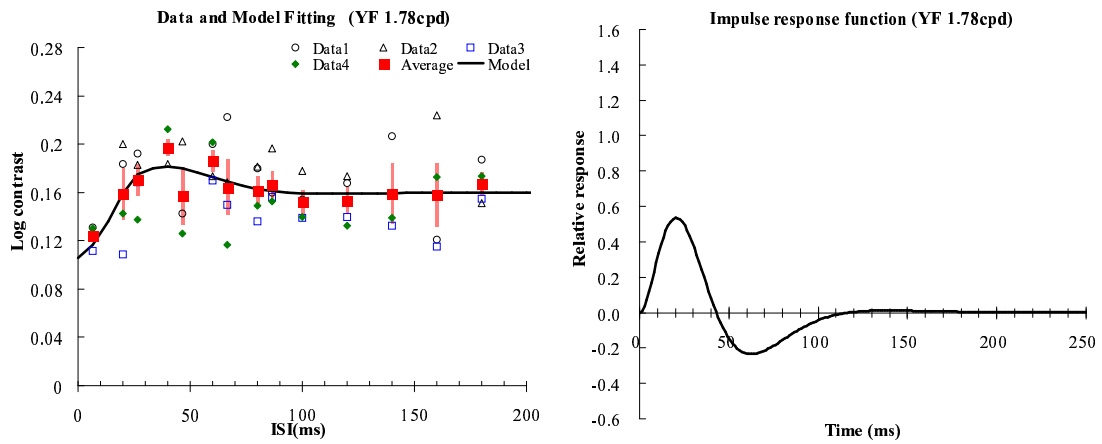


図 3.15 被験者 YF 1.78 cpd の実験結果 .

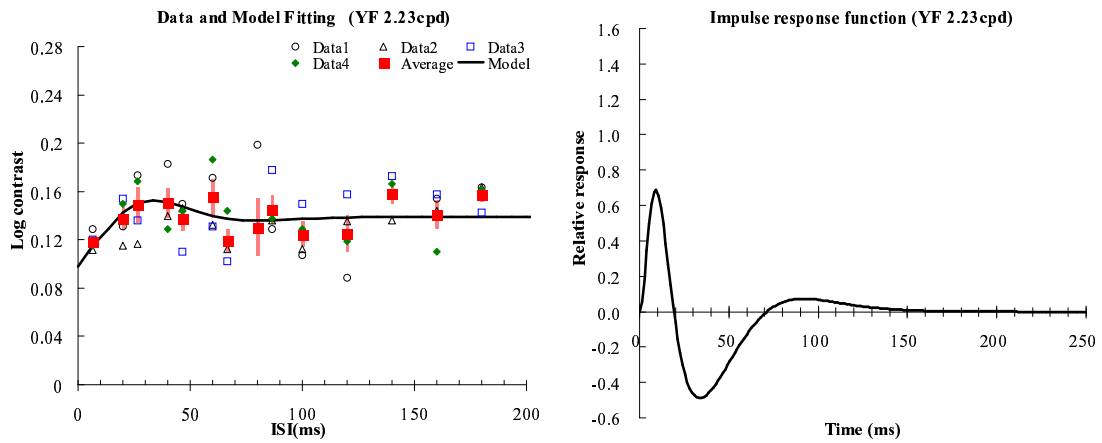


図 3.16 被験者 YF 2.23 cpd の実験結果 .

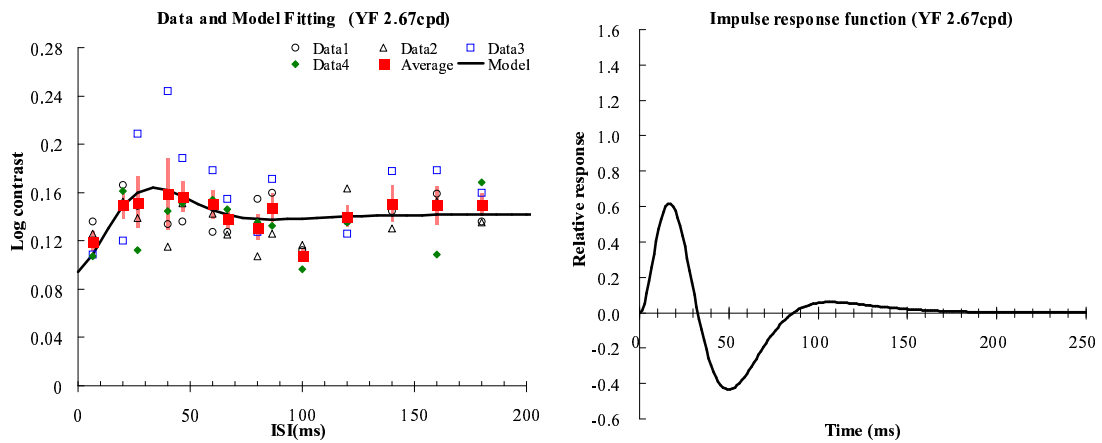


図 3.17 被験者 YF 2.67 cpd の実験結果 .

### 3.1 単眼刺激呈示条件での輝度刺激に対する結果

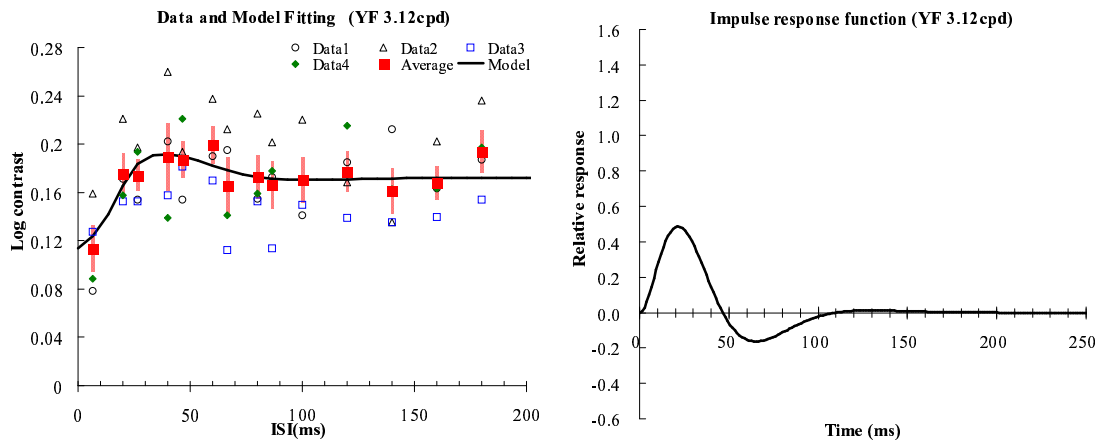


図 3.18 被験者 YF 3.12 cpd の実験結果 .

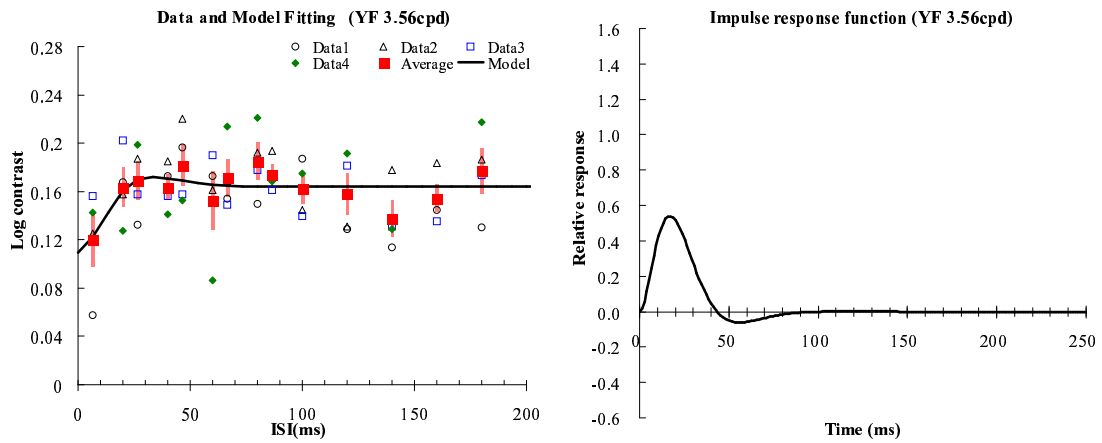


図 3.19 被験者 YF 3.56 cpd の実験結果 .

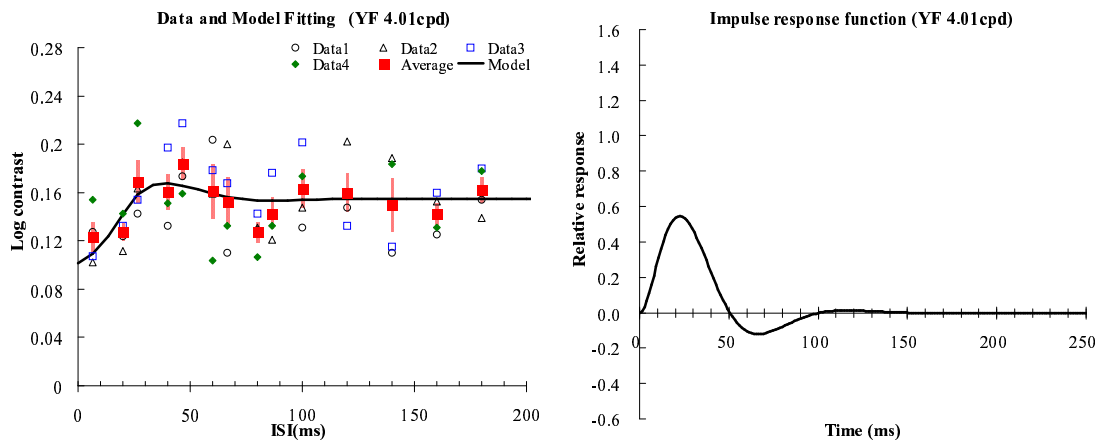


図 3.20 被験者 YF 4.01 cpd の実験結果 .

### 3.1 単眼刺激呈示条件での輝度刺激に対する結果

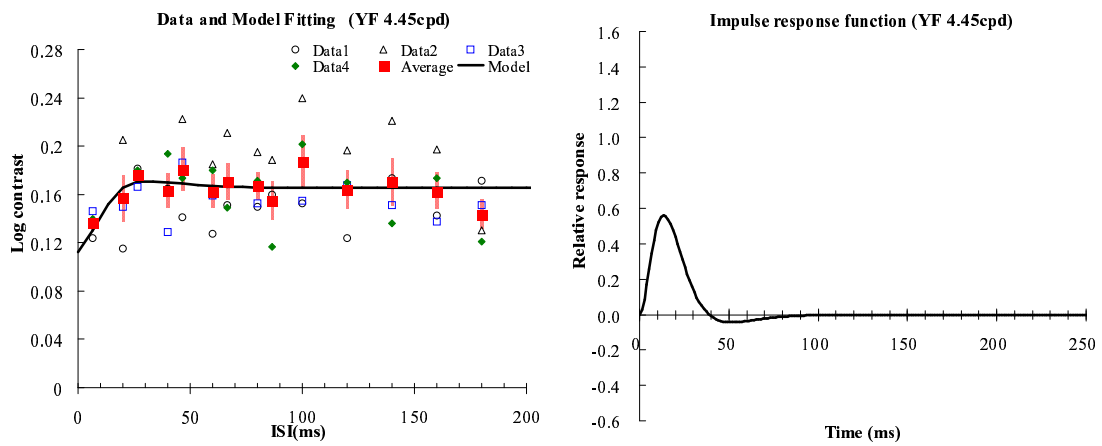


図 3.21 被験者 YF 4.45 cpd の実験結果 .

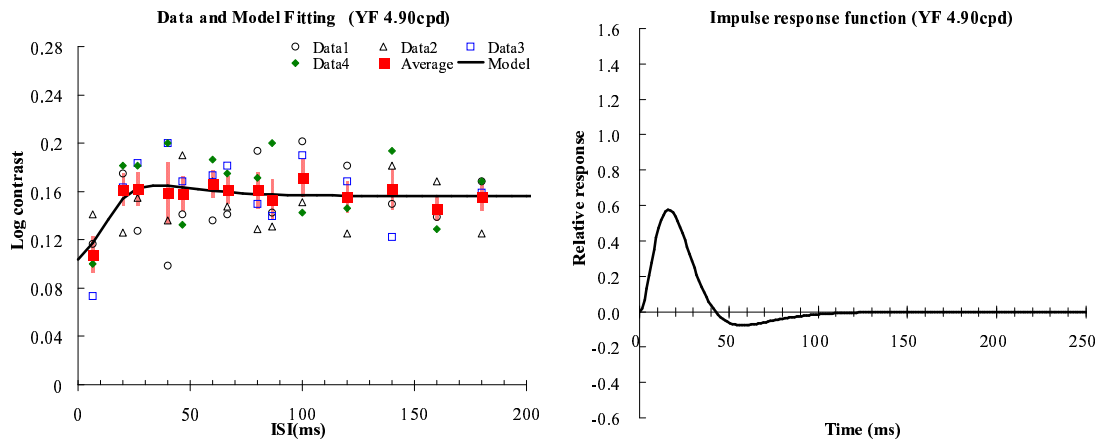


図 3.22 被験者 YF 4.90 cpd の実験結果 .

#### 3.1.3 被験者 TT の実験結果

被験者 TT の実験結果を示す .

### 3.1 単眼刺激呈示条件での輝度刺激に対する結果

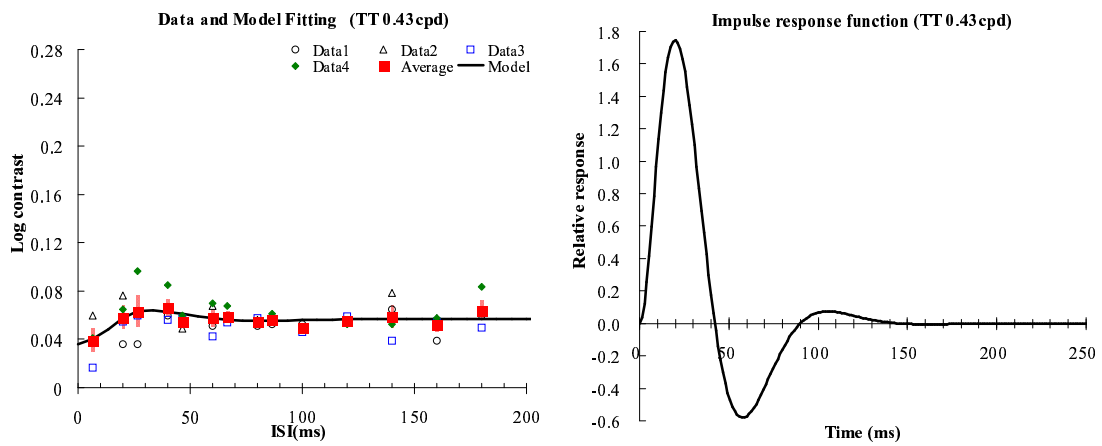


図 3.23 被験者 TT 0.43 cpd の実験結果 .

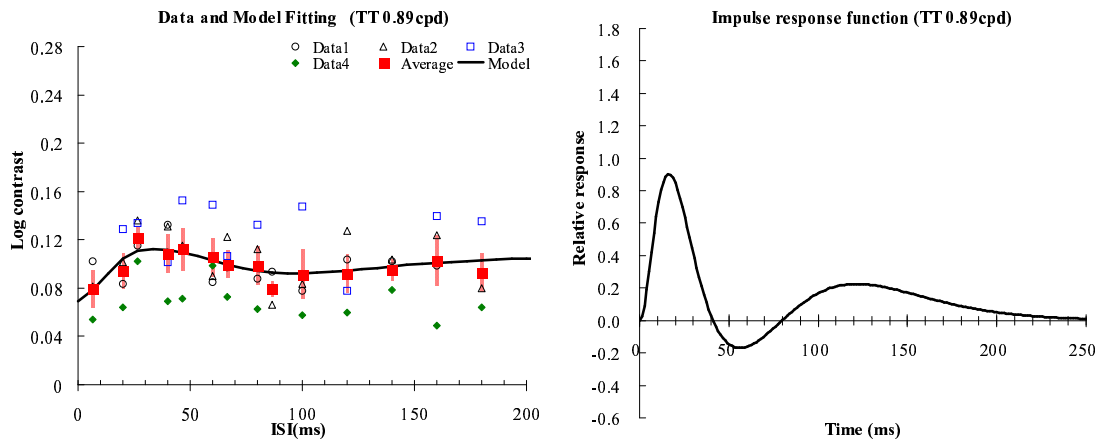


図 3.24 被験者 TT 0.89 cpd の実験結果 .

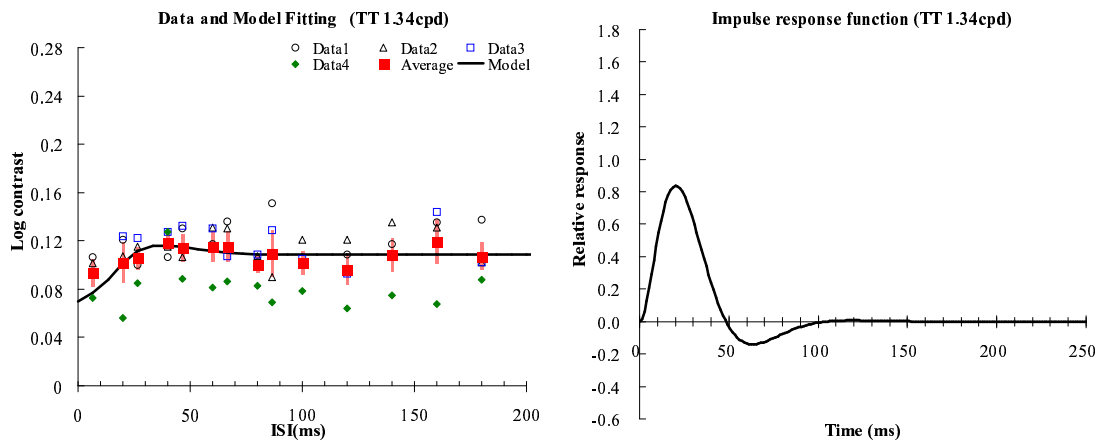


図 3.25 被験者 TT 1.34 cpd の実験結果 .

### 3.1 単眼刺激呈示条件での輝度刺激に対する結果

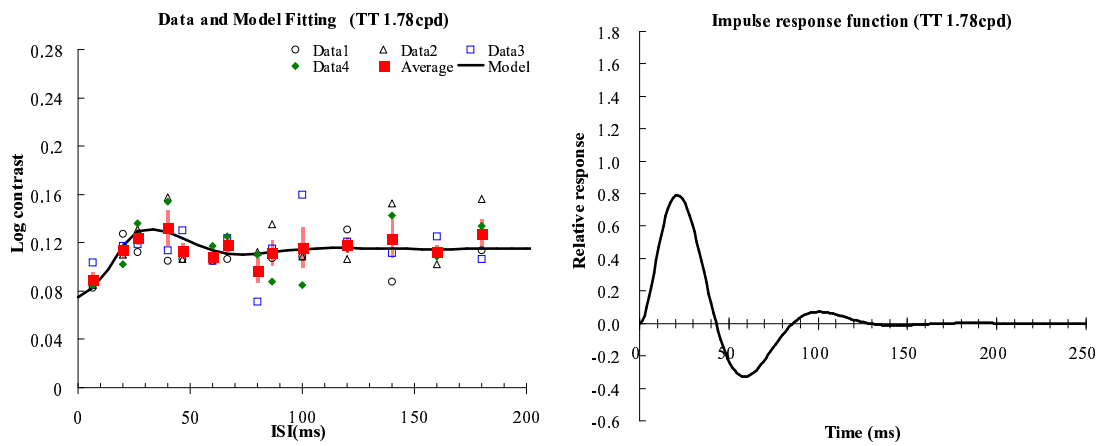


図 3.26 被験者 TT 1.78 cpd の実験結果 .

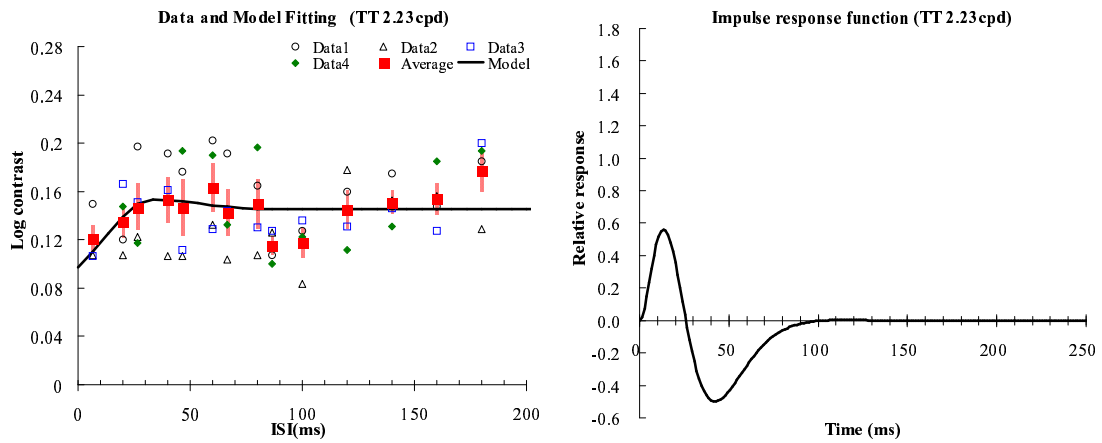


図 3.27 被験者 TT 2.23 cpd の実験結果 .

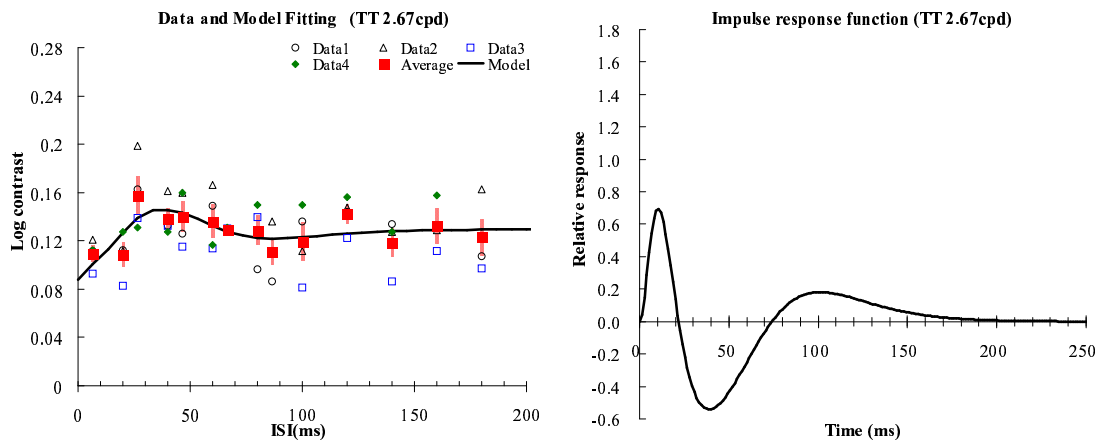


図 3.28 被験者 TT 2.67 cpd の実験結果 .



### 3.1 単眼刺激呈示条件での輝度刺激に対する結果

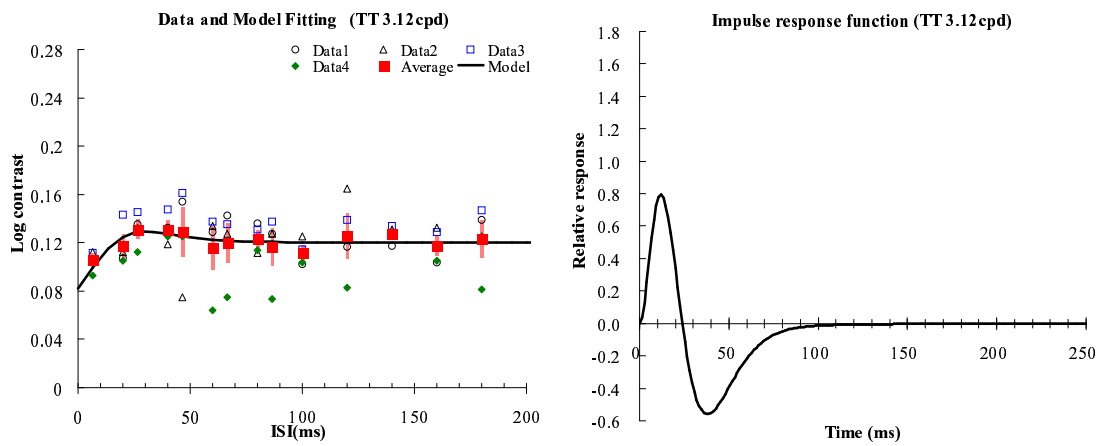


図 3.29 被験者 TT 3.12 cpd の実験結果 .

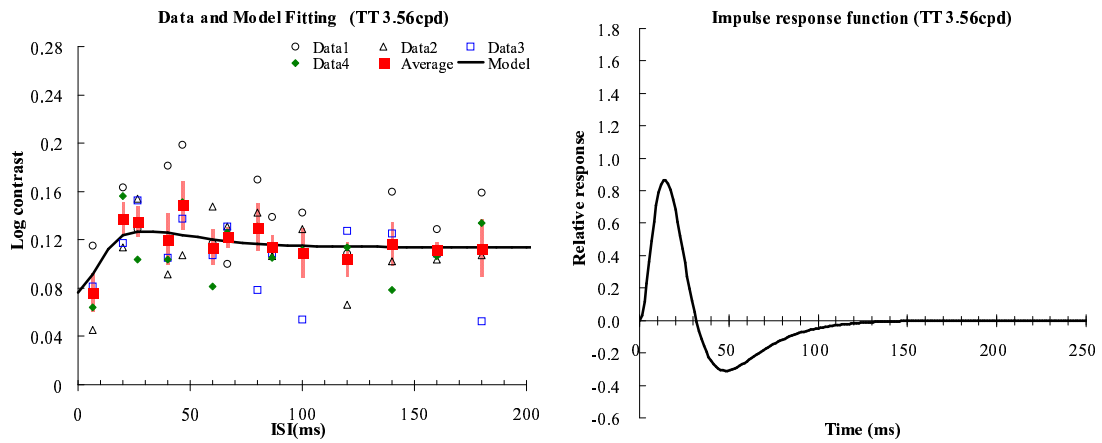


図 3.30 被験者 TT 3.56 cpd の実験結果 .

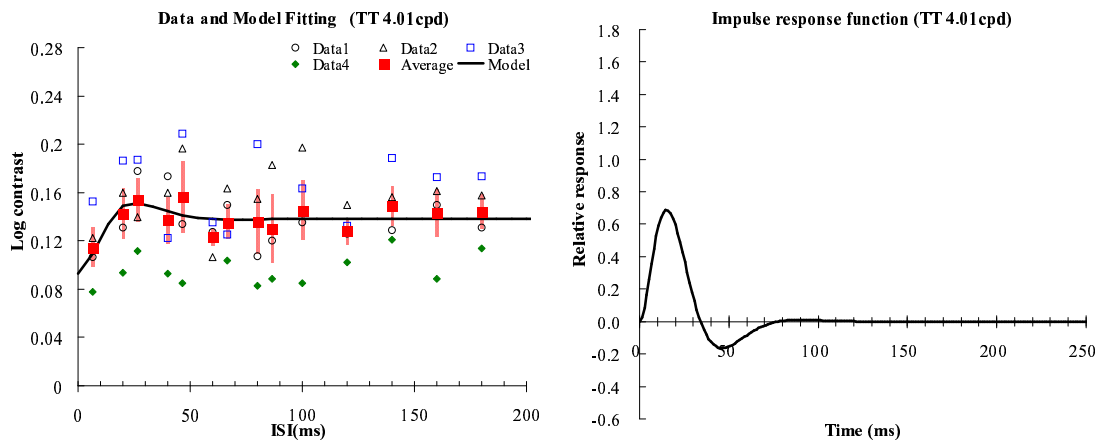


図 3.31 被験者 TT 4.01 cpd の実験結果 .

### 3.1 単眼刺激呈示条件での輝度刺激に対する結果

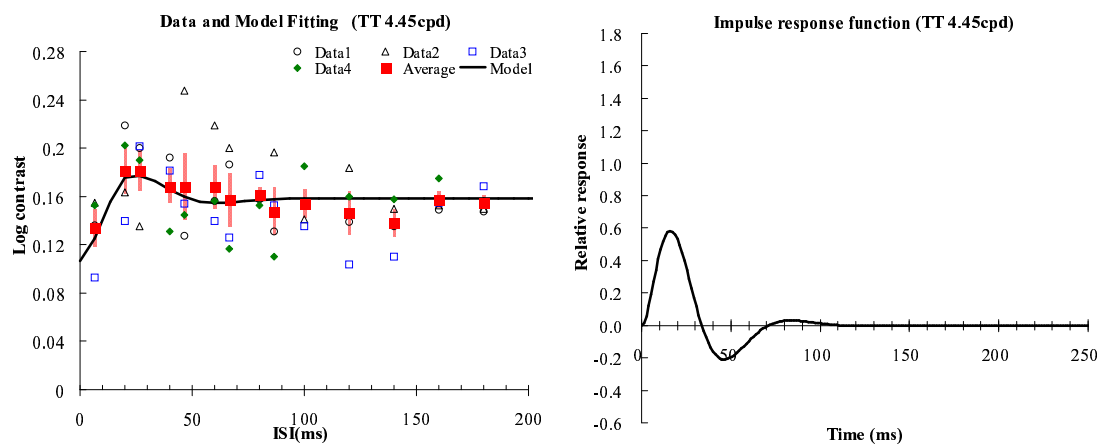


図 3.32 被験者 TT 4.45 cpd の実験結果 .

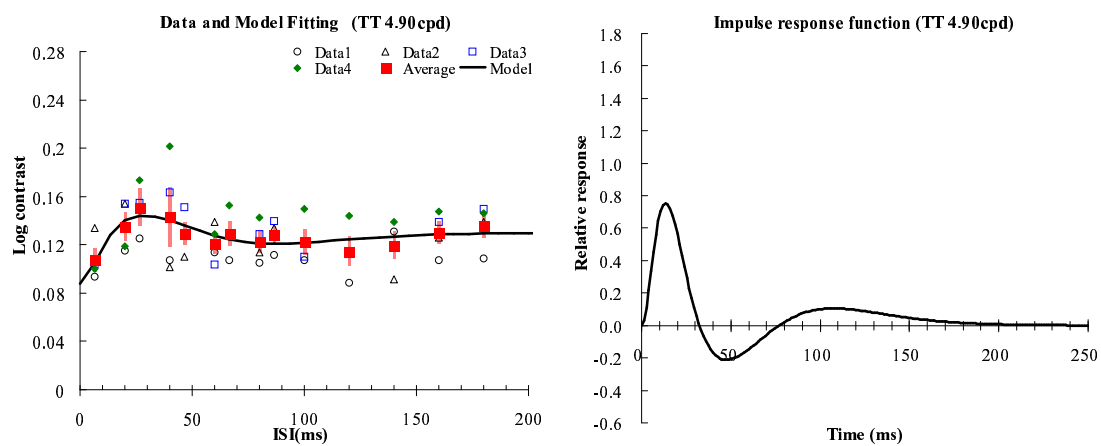


図 3.33 被験者 TT 4.90 cpd の実験結果 .

#### 3.1.4 被験者 RK の実験結果

被験者 RK の実験結果を示す .

### 3.1 単眼刺激呈示条件での輝度刺激に対する結果

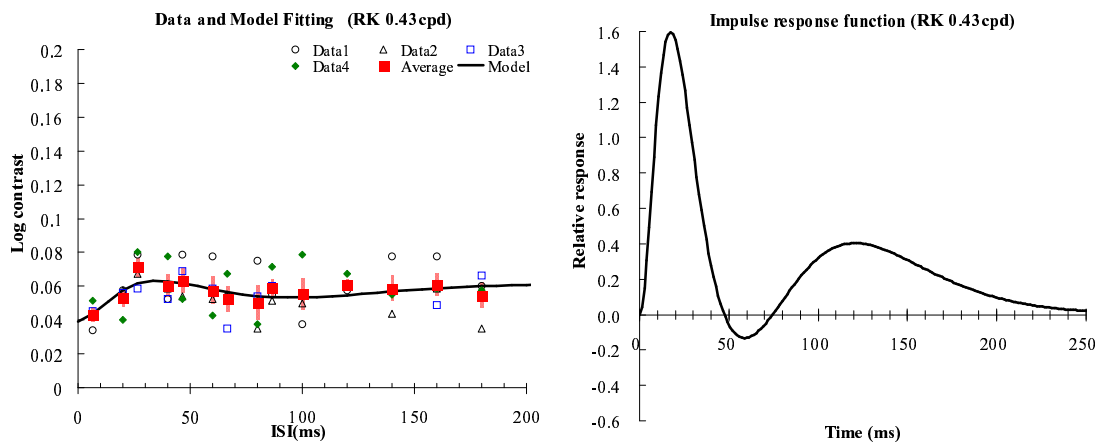


図 3.34 被験者 RK 0.43 cpd の実験結果 .

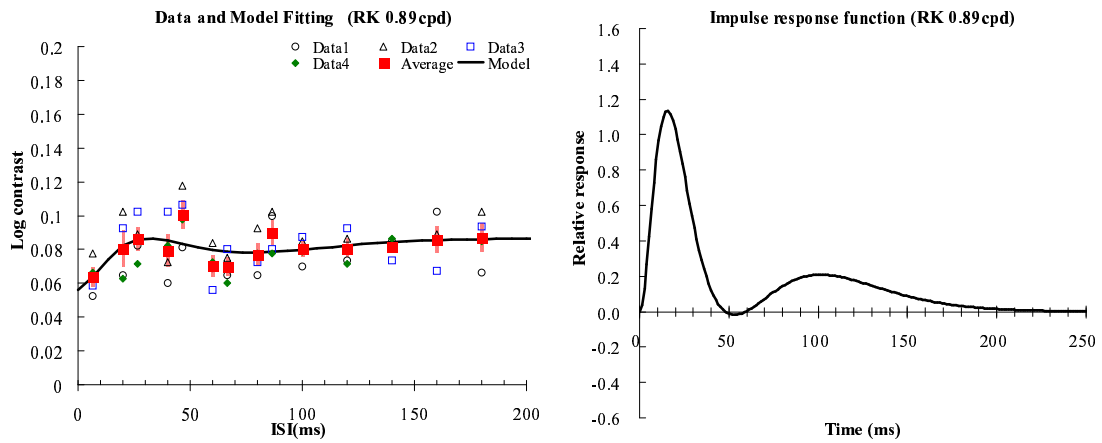


図 3.35 被験者 RK 0.89 cpd の実験結果 .

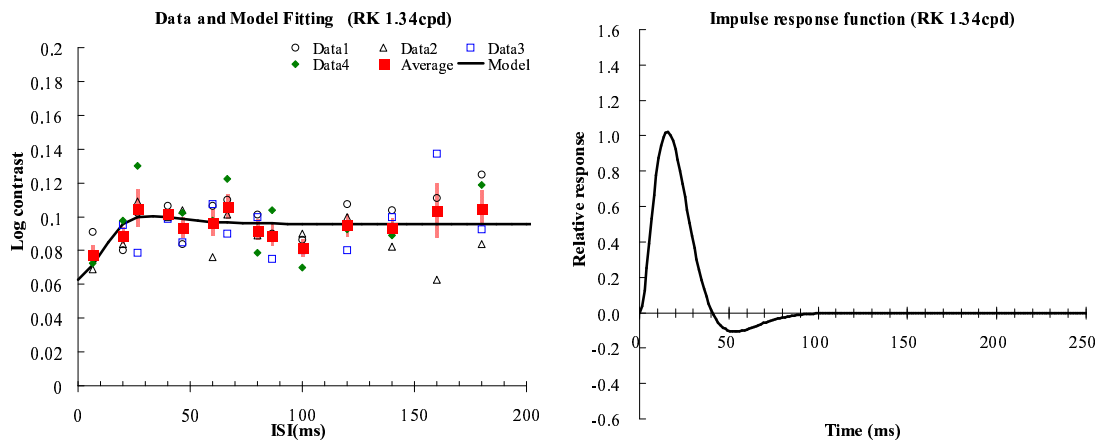


図 3.36 被験者 RK 1.34 cpd の実験結果 .

### 3.1 単眼刺激呈示条件での輝度刺激に対する結果

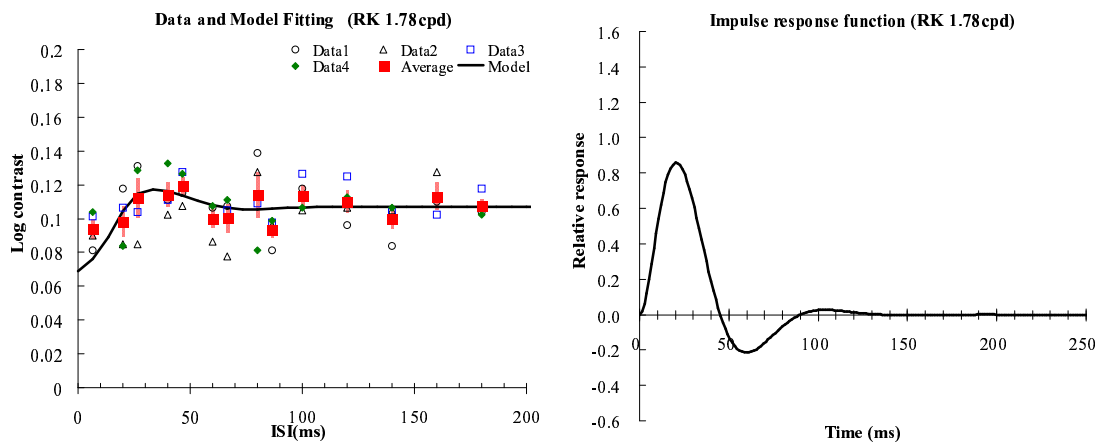


図 3.37 被験者 RK 1.78 cpd の実験結果 .

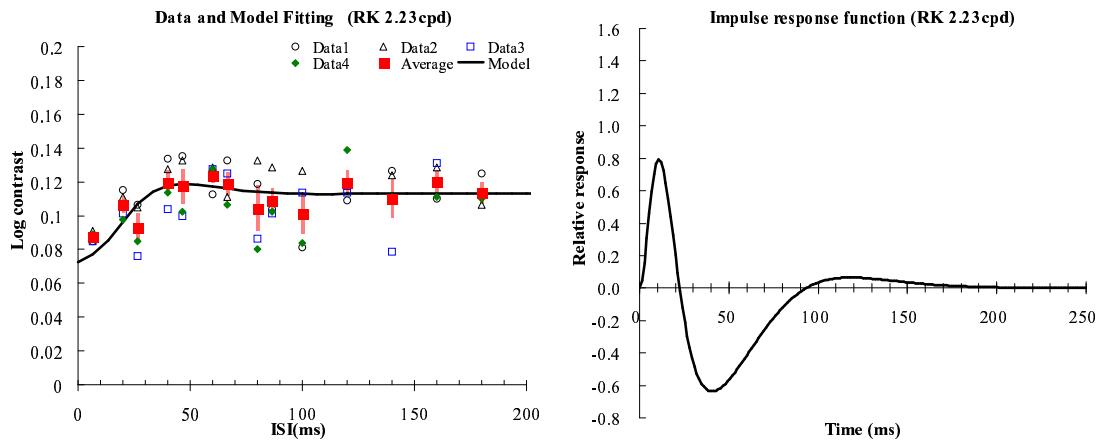


図 3.38 被験者 RK 2.23 cpd の実験結果 .

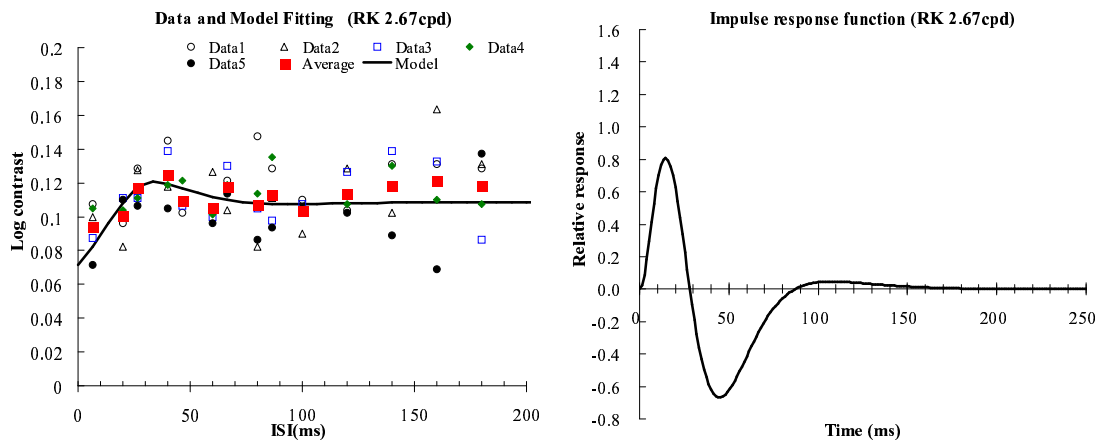


図 3.39 被験者 RK 2.67 cpd の実験結果 .

### 3.1 単眼刺激呈示条件での輝度刺激に対する結果

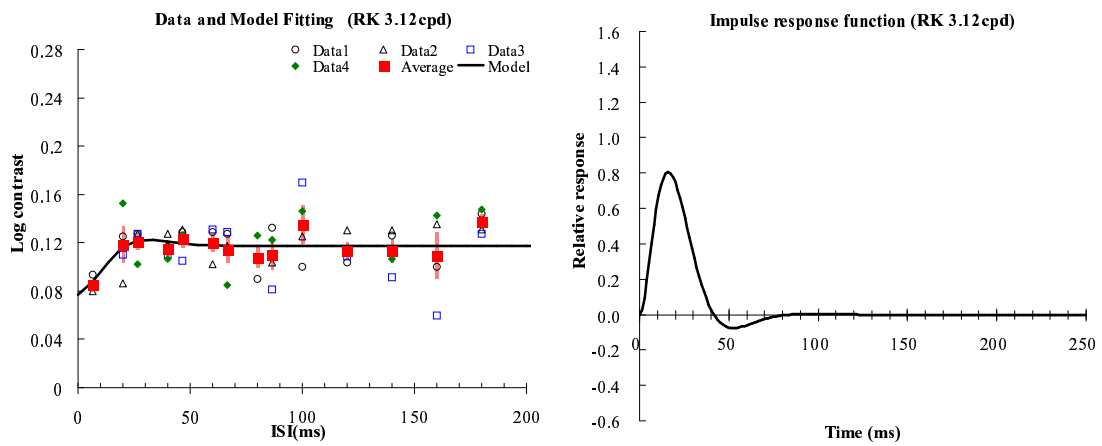


図 3.40 被験者 RK 3.12 cpd の実験結果 .

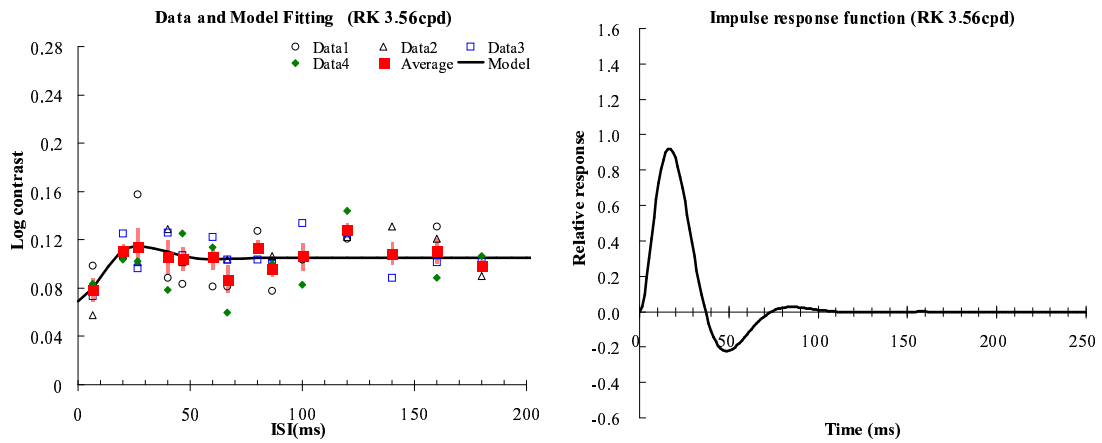


図 3.41 被験者 RK 3.56 cpd の実験結果 .

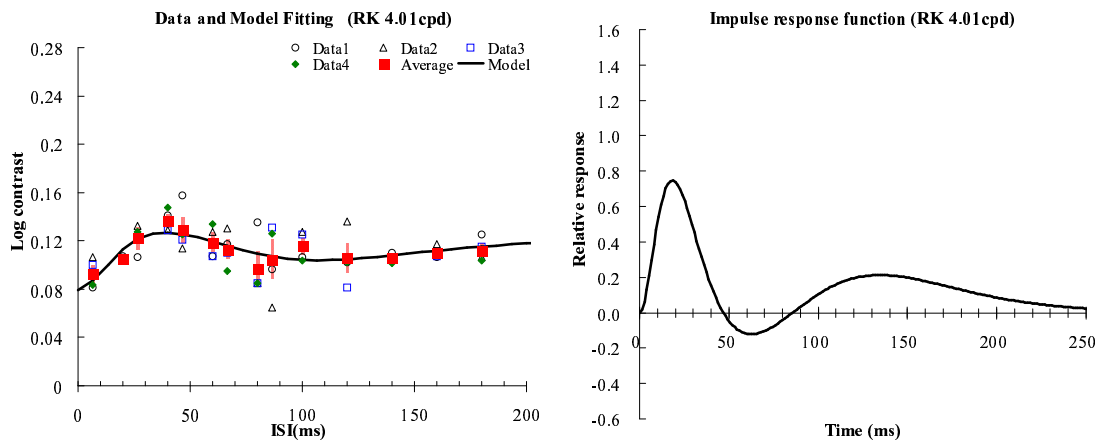


図 3.42 被験者 RK 4.01 cpd の実験結果 .

### 3.1 単眼刺激呈示条件での輝度刺激に対する結果

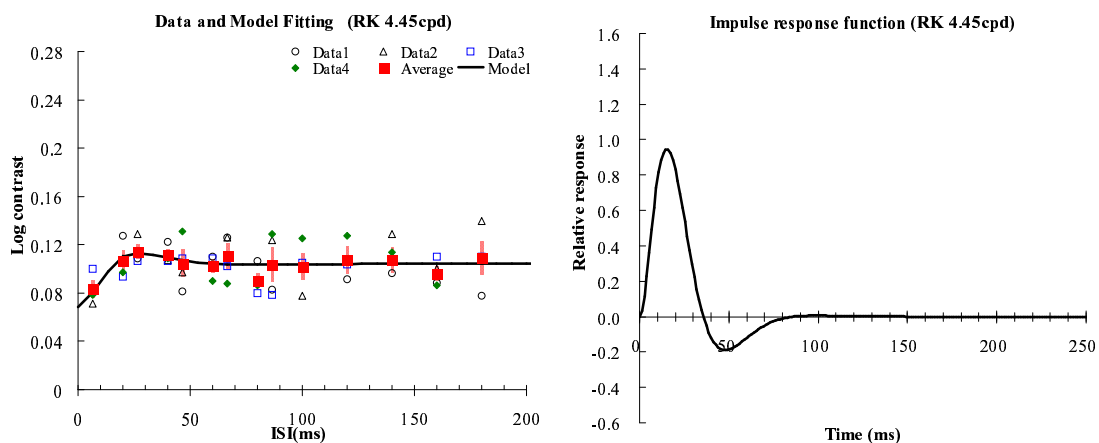


図 3.43 被験者 RK 4.45 cpd の実験結果 .

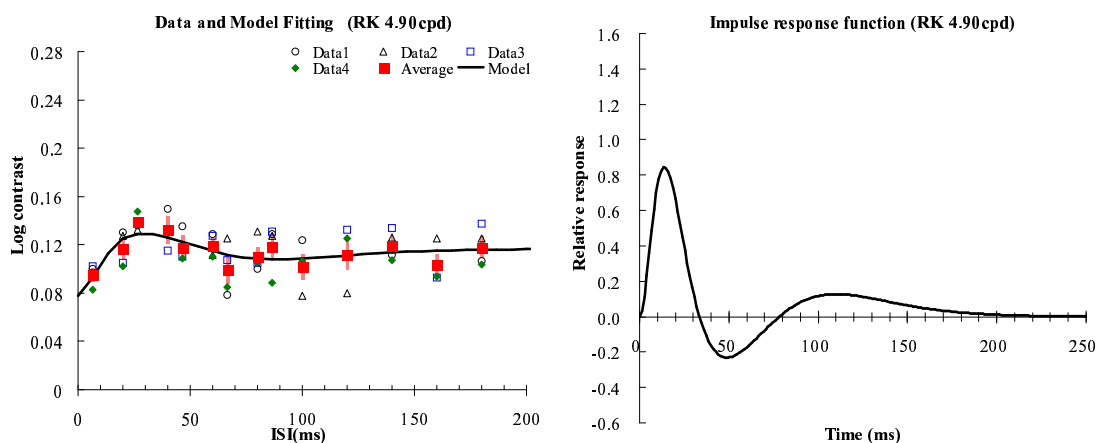


図 3.44 被験者 RK 4.90 cpd の実験結果 .

#### 3.1.5 被験者 TS の実験結果

被験者 TS の実験結果を示す . 被験者 TS の場合のみ , 実験に用いた空間周波数は 7 種類である .

### 3.1 単眼刺激呈示条件での輝度刺激に対する結果

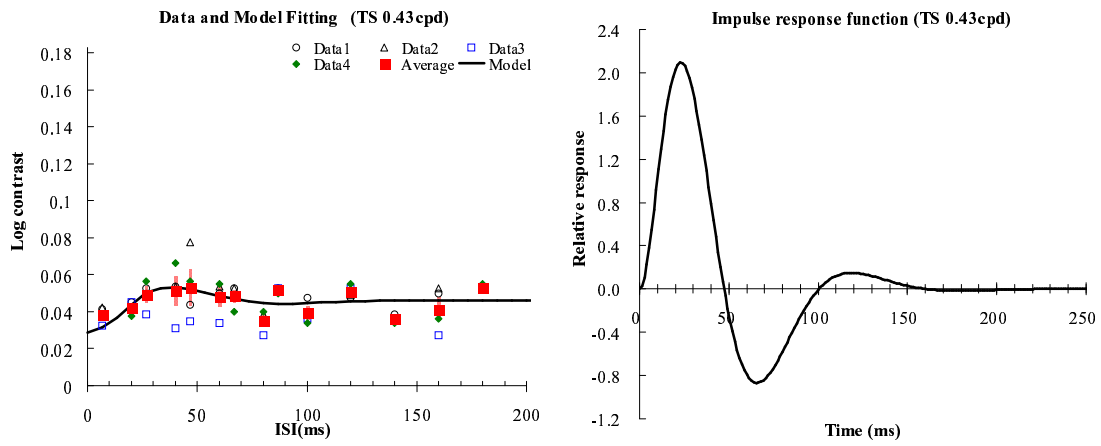


図 3.45 被験者 TS 0.43 cpd の実験結果 .

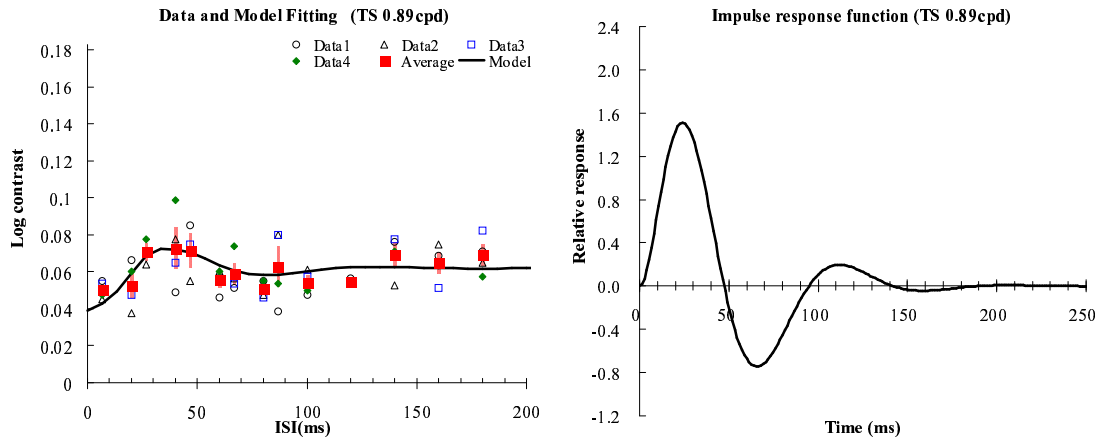


図 3.46 被験者 TS 0.89 cpd の実験結果 .

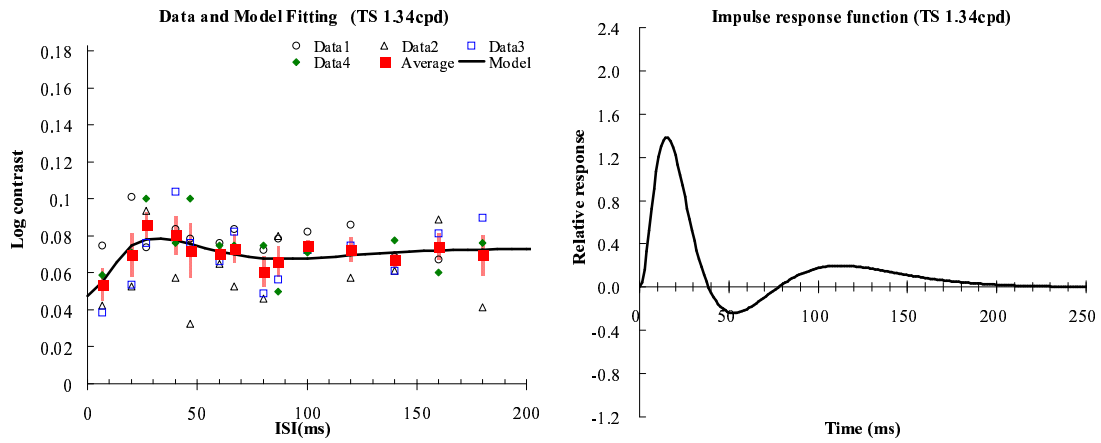


図 3.47 被験者 TS 1.34 cpd の実験結果 .

### 3.1 単眼刺激呈示条件での輝度刺激に対する結果

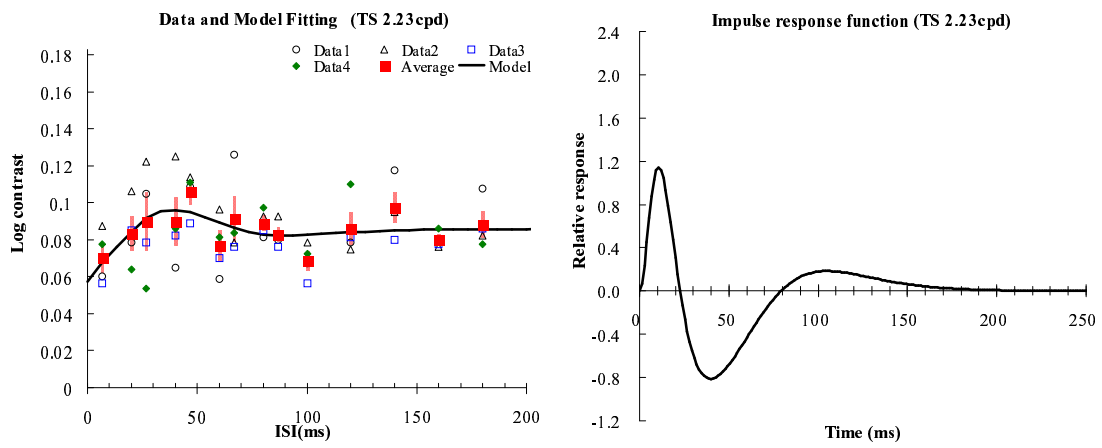


図 3.48 被験者 TS 2.23 cpd の実験結果 .

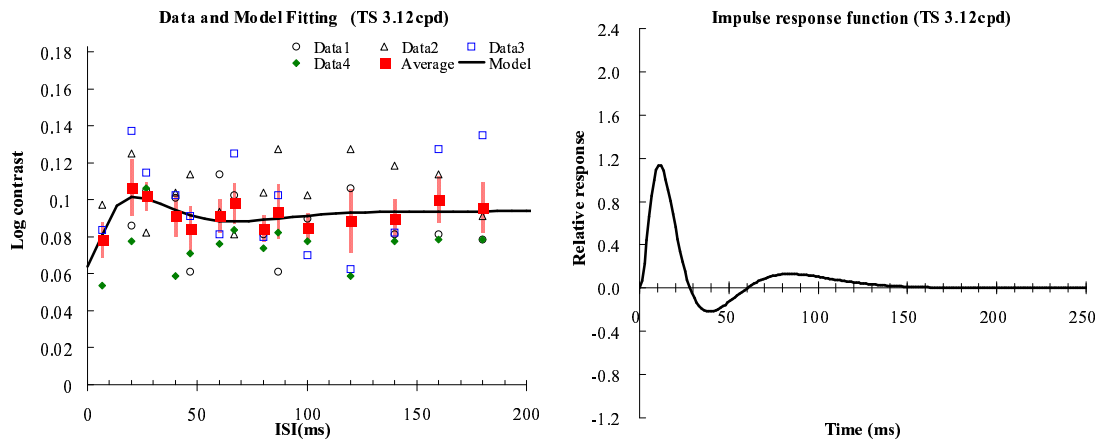


図 3.49 被験者 TS 3.12 cpd の実験結果 .

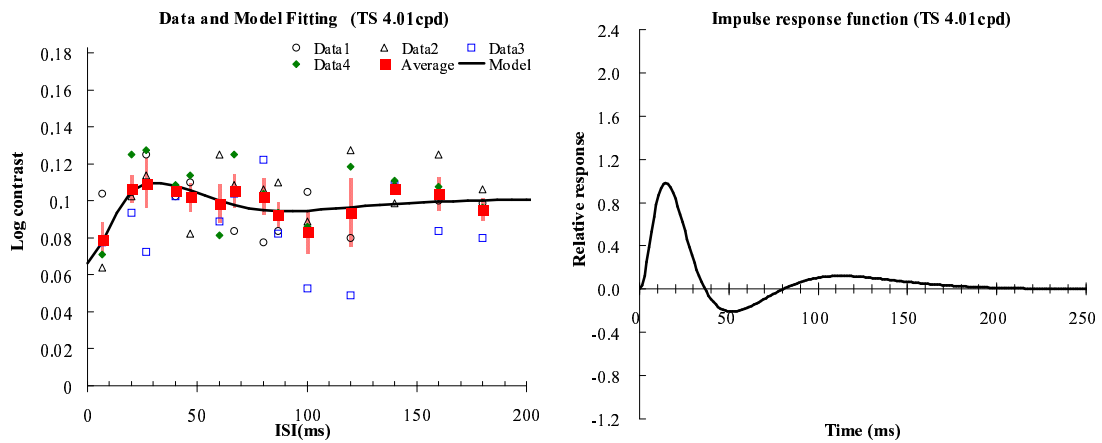


図 3.50 被験者 TS 4.01 cpd の実験結果 .



### 3.2 等輝度色刺激に対する結果

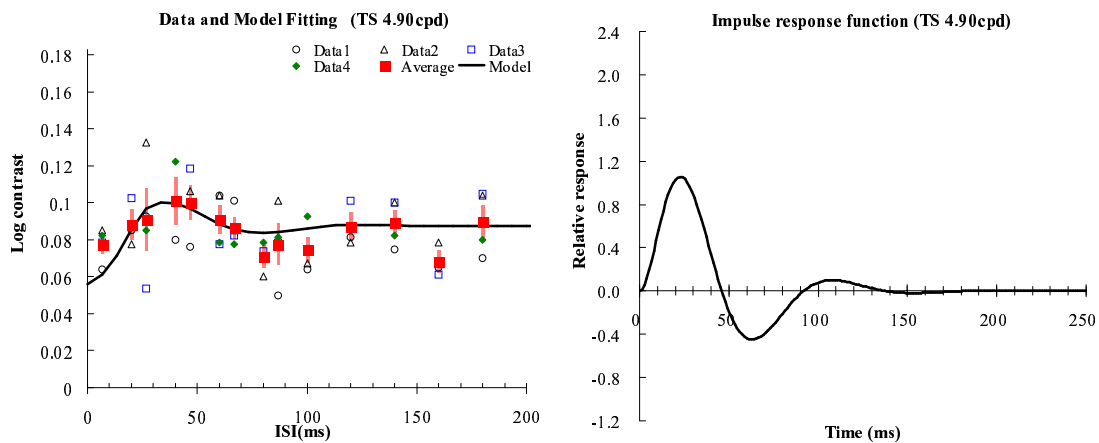


図 3.51 被験者 TS 4.90 cpd の実験結果 .

## 3.2 等輝度色刺激に対する結果

本節では、時間的二刺激光法を用いた単眼刺激呈示条件での等輝度色コントラスト検出閾値と、そこから計算されたインパルス応答関数を示す。0.43 ~ 4.90 cpd の範囲で選択された 6 種類の空間周波数をもつ等輝度グレーティング刺激に対するコントラスト検出閾値データを各図の左側に、実験データから第 2 章で述べた手順によって計算されたインパルス応答関数を各図の右側に示した。

### 3.2.1 被験者 MH の実験結果

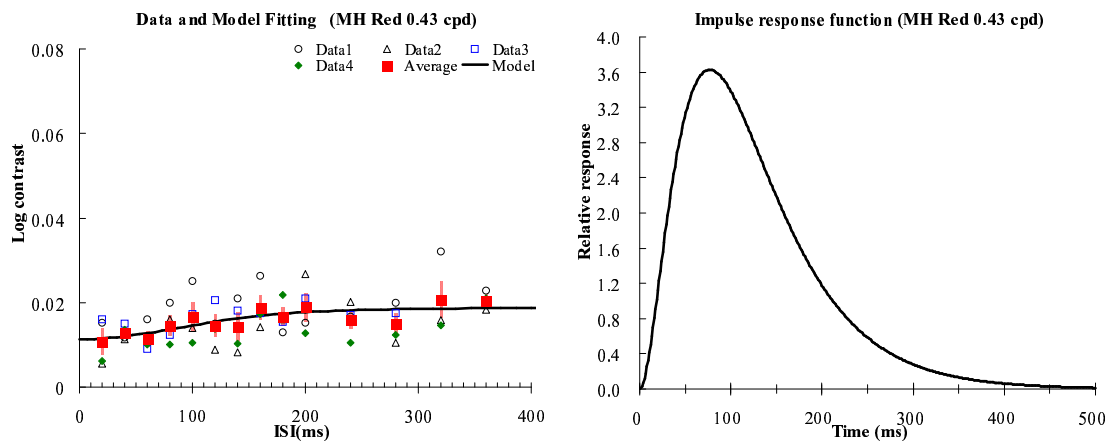


図 3.52 等輝度色刺激 ( 赤 ) 0.43 cpd に対する被験者 MH の結果 .

### 3.2 等輝度色刺激に対する結果

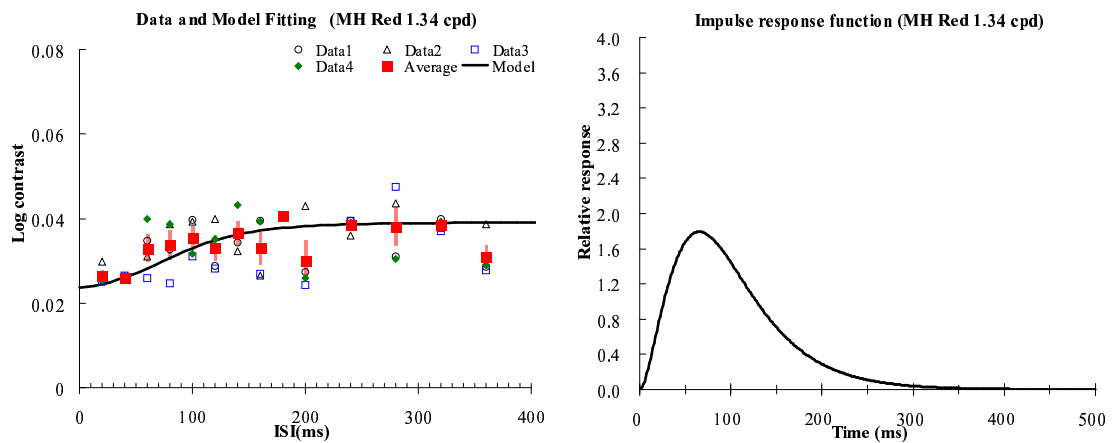


図 3.53 等輝度色刺激 ( 赤 ) 1.34 cpd に対する被験者 MH の結果 .

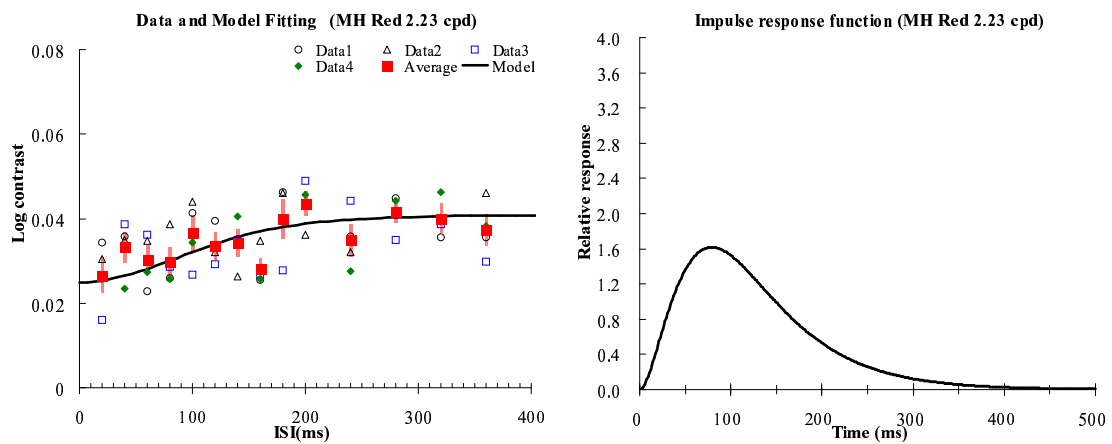


図 3.54 等輝度色刺激 ( 赤 ) 2.23 cpd に対する被験者 MH の結果 .

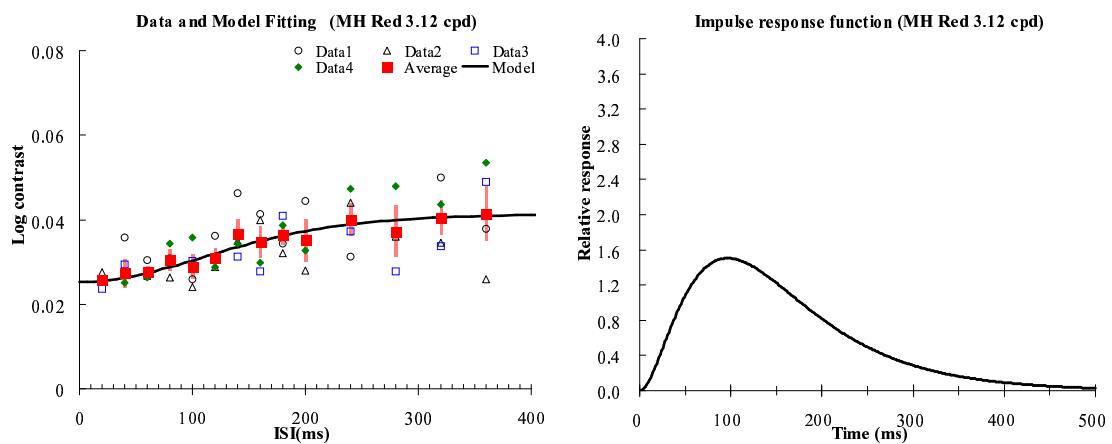


図 3.55 等輝度色刺激 ( 赤 ) 3.12 cpd に対する被験者 MH の結果 .

### 3.2 等輝度色刺激に対する結果

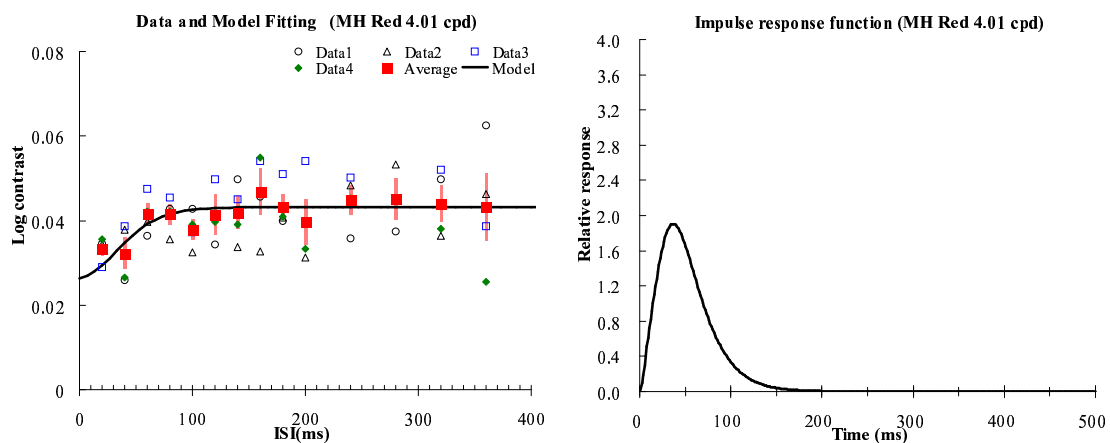


図 3.56 等輝度色刺激 ( 赤 ) 4.01 cpd に対する被験者 MH の結果 .

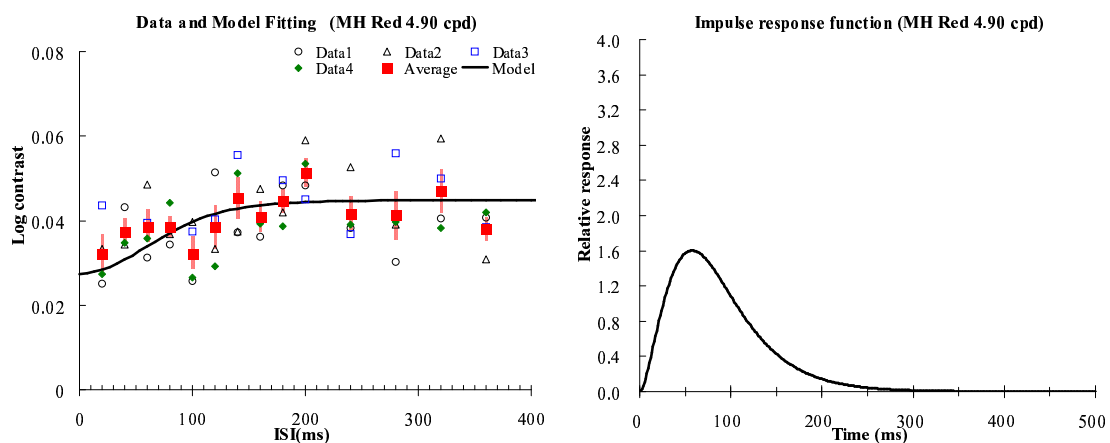


図 3.57 等輝度色刺激 ( 赤 ) 4.90 cpd に対する被験者 MH の結果 .

## 第 4 章

# 単眼呈示条件に対する考察

本章では，インパルス応答関数の時間特性変化から，視覚系の空間周波数チャンネルが受容野構造に起因する可能性について検討し，新たに受容野モデルとして提案した．

### 4.1 単眼呈示条件でのインパルス応答関数の時間特性

第 3 章では，時間的二刺激光法によって得られた検出閾値と，その呈示時間間隔 (ISI) の関係から導出されたインパルス応答関数を示した．インパルス応答関数は，視覚系全体の時間特性を反映する関数であるため，刺激のもつ空間周波数に応じて検出に關与する空間周波数チャンネルの時間特性を反映していると考えられる．本章では，実験結果から計算されたインパルス応答関数の時間特性について考察を行なう．

#### 4.1.1 輝度インパルス応答関数

実験では，ISI が比較的短い (30 ms 以下) 条件で二刺激光の時間的足し合わせによってコントラスト検出閾値が低下した．ISI の増加とともに，コントラスト検出閾値は上昇し，50 ms 付近で最大となる．これは，最初に呈示された刺激光による応答の抑制信号が時間遅れを伴って足し合わされるためである．ISI が十分に大きくなると，二刺激光の応答は時間的に干渉せず，互いに独立の刺激光とみなされるため，時間的な足し合わせ効果は生じず，コントラスト検出閾値は確率的足し合わせを含んだ一定の値に収束する結果を示した．この傾向は，二刺激光を用いた過去の報告 [13] と一致している．

インパルス応答関数は視覚系全体の時間特性を反映する関数であるため，刺激検出に關与

#### 4.1 単眼呈示条件でのインパルス応答関数の時間特性

した空間周波数チャンネルの時間特性を反映していると考えられる．そこで本研究では，インパルス応答関数の時間特性として，インパルス応答関数の強度が 0 となる時間（0 交差時間）に着目した．輝度インパルス応答関数は，興奮相と時間遅れを伴う抑制相から構成される 2 相性を示したことから，本研究では，インパルス応答関数の強度が 0（ $IRF(t) = 0$ ）となる時間を 0 交差時間とし，インパルス応答関数の時間特性を示す指標として採用した．

図 4.1 は，5 名の被験者の輝度インパルス応答関数の 0 交差時間を破線で示し，その平均を実線で示している．縦軸には時間（ms），横軸は刺激光の空間周波数である．5 種類のシンボルは各被験者を示している．

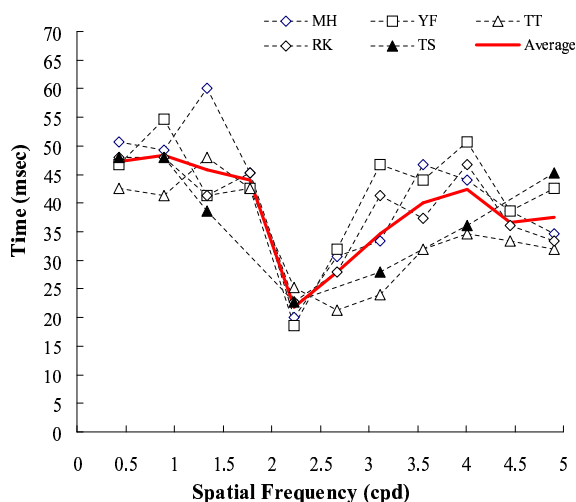


図 4.1 輝度インパルス応答関数の 0 交差時間．縦軸は時間（ms），横軸は刺激光の空間周波数（cpd）を示す．被験者毎に異なるシンボルでプロットした．

図 4.1 の特長を以下にまとめる．

- 低空間周波数の刺激光（0.43 ~ 1.78 cpd）に対する輝度インパルス応答関数の 0 交差時間は，5 名の被験者間で大きな差はなく，全被験者の平均はおよそ 47 ms であり，時間的に遅い応答を示した．
- 5 名の被験者に共通して，2 cpd 周辺で輝度インパルス応答関数の 0 交差時間は最も早くなる傾向を示した．

#### 4.1 単眼呈示条件でのインパルス応答関数の時間特性

- 刺激光の空間周波数が 3 cpd 以上の条件では，輝度インパルス応答関数の 0 交差時間は増加した．
- 刺激光の空間周波数が 4 cpd 以上の条件では，輝度インパルス応答関数の 0 交差時間は緩やかに減少する傾向を示した．

図 4.1 に示されるように，刺激光の空間周波数に応じて，輝度インパルス応答関数の 0 交差時間は変化したことから，視覚応答の時間特性は，低空間周波数側では時間的に遅く，2 ~ 3 cpd 周辺で最も早く，高空間周波数側ではやや遅くなる傾向を示した．このような輝度インパルス応答関数の時間特性の変化は，刺激光の空間周波数に最も高い感度をもつ空間周波数チャンネルの時間特性を反映している可能性が考えられる．本実験から得られた輝度インパルス応答関数の時間変化と刺激光の空間周波数の関係から，空間周波数チャンネルメカニズムが受容野構造から決定されるのではないかと考え，第 4.2 節では，受容野構造に着目した処理モデルを提案した．

##### 4.1.2 等輝度色インパルス応答関数

等輝度色刺激を用いた実験の結果は，輝度刺激を用いた場合と同様に，ISI が比較的短い（100 ms 以下）条件では，二刺激光の時間的足し合わせによってコントラスト検出閾値が低下した．ISI が増加するに従って，コントラスト検出閾値は上昇し，150 ms 付近で最大となり，その後一定の値に収束する．輝度刺激を用いた実験の結果とは異なり，ピークとなる時間が遅いことは，色情報伝達経路が輝度情報伝達経路に比べて時間的に遅いことを示している．また，コントラスト検出閾値がピークの後，減少せずに一定の値に収束することは，等輝度色刺激光に対するインパルス応答関数が，抑制相をもたない単相性であることを示している．

輝度インパルス応答関数の場合と同様に，色インパルス応答関数の時間特性変化についても，空間周波数チャンネルの時間特性を反映していると考えられ，色情報伝達経路に存在する空間周波数チャンネルが，色選択性を示す受容野構造に起因する可能性について第 4.4 節

## 4.2 受容野モデル

で検討した。

## 4.2 受容野モデル

本節では，インパルス応答関数の時間特性変化をもたらすメカニズムとして，受容野モデルを提案した。

視覚系には，細胞が応答する視覚領域があり，それを受容野と呼ぶ．図 4.2 に示される受容野は，興奮性の受容野が抑制性の受容野で取り囲まれた オン中心 - オフ周辺 ( ON-center / OFF-surround ) 型受容野で，順応レベルが高い条件では，周辺の抑制性の結合をもつことにより空間的な分解能を高める構造をとる．逆に，順応レベルが低い条件では，興奮性の結合を空間的に足し合わせる構造に変化し，弱い刺激光でも検出可能となる．

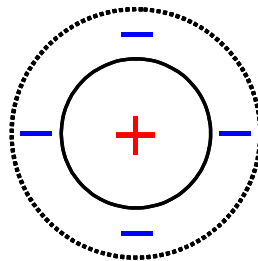


図 4.2 興奮性の受容野が抑制性の受容野を取り囲むオン中心 - オフ周辺型受容野の構造

本研究では，視覚系に複数存在する空間周波数チャンネルが，受容野の空間的なサイズによって決定すると仮定し，視覚刺激の空間周波数に適したサイズをもつ受容野が閾値決定に関与していると考えた受容野モデルを提案した。

このモデルにおいて，ある特定の空間的サイズを持つオン中心 - オフ周辺型受容野に，空間周波数をもつグレーティング刺激光が与えられた場合を考えると，刺激光の空間周波数と受容野の空間的サイズが同調した場合は図 4.3 に示される状態となる．このとき，受容野の中心部分に ON 刺激，受容野周辺部分に OFF 刺激が与えられることから，中心部分からの興奮信号は強く，周辺からの抑制信号は弱くなる．その結果，インパルス応答関数の興奮相の強度（振幅）は大きな値を示し，抑制相の強度は小さくなると考えられ，インパルス応

## 4.2 受容野モデル

答関数の興奮相と抑制相の強度比率は小さくなる。

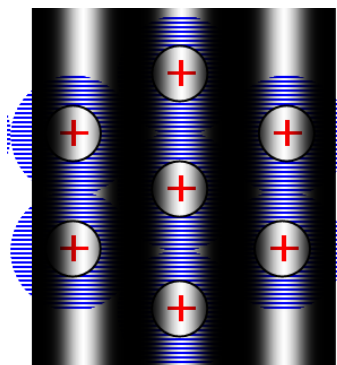


図 4.3 刺激光の空間周波数と受容野の空間的サイズが同調した状態。

刺激の空間周波数が増加すると，図 4.4 に示されるように，受容野中心部分に OFF 刺激，受容野周辺に ON 刺激が与えられるようになる。このとき，中心からの興奮信号は減少し，周辺からの抑制信号は増加することになるので，インパルス応答関数の興奮相の強度は小さくなり，抑制相の強度は大きくなる。その結果，インパルス応答関数の興奮相と抑制相の強度比率は増加し，大きな値を示す。また，受容野中心からの興奮信号と周辺からの抑制信号の時間的足し合わせ範囲は，受容野サイズから一定の値であると考えると，抑制相の強度が増加することによって，インパルス応答関数の 0 交差時間は前方にスライドすることになる。その結果，見かけ上の時間特性 (0 交差時間) は早くなると予想される。

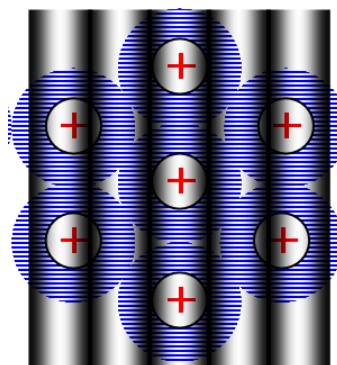


図 4.4 図 4.3 の状態から，刺激の空間周波数が増加した状態。

図 4.4 の状態から，さらに刺激の空間周波数が増加した場合を図 4.5 に示す。刺激光の空



## 4.2 受容野モデル

間周波数がさらに増加すると，受容野中心部分に OFF 刺激，周辺部分に OFF 刺激がさらに与えられ，中心からの興奮信号はさらに弱く，周辺からの抑制信号は強くなる．その結果，インパルス応答関数の興奮相と抑制相の強度比率は，大きな値を示すことになる．また，受容野中心からの興奮信号と周辺からの抑制信号の時間的足し合わせ範囲は，受容野サイズから一定の値であると考えれば，インパルス応答関数の見かけ上の時間特性（0 交差時間）は最も早くなると予想される．

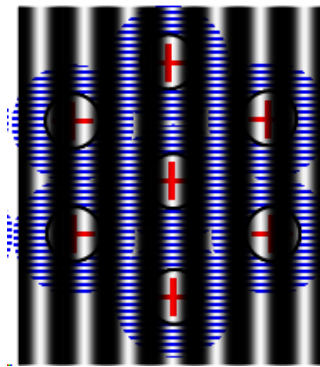


図 4.5 図 4.4 の状態から，刺激の空間周波数が増加した状態．

ここで，空間的足し合わせ範囲の狭い小さなサイズの受容野が存在すると仮定する．図 4.5 の状態と同じ空間周波数の刺激光が与えられたとき，空間的足し合わせ範囲の狭い受容野であれば，受容野中心に ON 刺激，受容野周辺に OFF 刺激が与えられる（図 4.4 の状態をとる）ため，興奮信号が強く，抑制信号が弱くなる．足し合わせ範囲の大きな受容野と比較して，興奮信号の強度が大きければ，刺激光の検出に有利となり，閾値決定に關与する受容野サイズが切り替わることが予測される．このとき，インパルス応答関数の興奮相と抑制相の強度比率は図 4.4 と比較すると小さくなり，インパルス応答関数の時間特性も遅くなると予想される．

刺激光の空間周波数に適した空間的なサイズをもつ受容野によって検出されると考えた受容野モデルでは，受容野の空間的な足し合わせ範囲が空間フィルターとして働くことで，空間周波数チャンネルを構成していると考えられ，複数の空間フィルターからの出力のうち，信号強度の最も大きなものが検出器で検出される（図 1.1）．視覚系にさまざまな足し合わ

### 4.3 輝度インパルス応答関数と受容野モデル

せ範囲をもつ受容野が複数存在することで、異なる空間周波数に感度のピークをもつ空間周波数チャンネルが存在することを意味する。

### 4.3 輝度インパルス応答関数と受容野モデル

インパルス応答関数の興奮相と抑制相の強度比率が減少する点で、受容野サイズが切り替わることを意味する。受容野モデルを検証するために、実験により得られたインパルス応答関数の興奮相と抑制相の強度比率を比較したものを図 4.6 に示した。

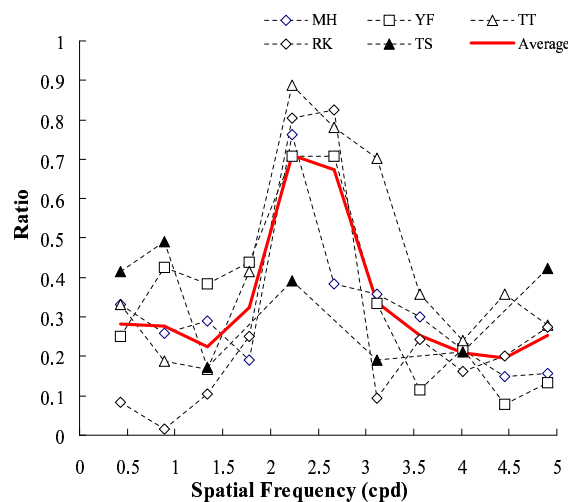


図 4.6 輝度インパルス応答関数の興奮相と抑制相の強度比率。縦軸は強度比率，横軸は刺激光の空間周波数を示す。実線は被験者 5 名の平均値を示す。

被験者 5 名の結果には多少の差は見られるが、平均として輝度インパルス応答関数の興奮相と抑制相の強度比率はおよそ 2 cpd 付近で最も高い値を示し、それ以降で減少する結果を示した。さらにこの結果は、図 4.1 に示されるインパルス応答関数の時間特性変化と一致していることから、受容野モデルは、実験の結果を定性的に説明できることを示した。

受容野モデルから、インパルス応答関数の時間特性が増加に転じ、また興奮相と抑制相の強度比率が減少に転じる点で閾値決定に関与する受容野の空間的サイズが切り替わると考えられ、受容野の空間的サイズが空間周波数チャンネルを構成するのであれば、今回我々が得

#### 4.4 等輝度色インパルス応答関数と受容野モデル

た結果から，およそ 2 cpd で空間周波数チャンネルが切り替わり，輝度情報伝達経路には少なくとも 2 つの空間周波数チャンネルが存在することを示した．

#### 4.4 等輝度色インパルス応答関数と受容野モデル

色選択性を示す受容野は，輝度の場合と異なり周辺抑制を持たないことから，受容野モデルでは，単純に受容野の空間的足し合わせ範囲のみで空間周波数チャンネルの切り替わりを予測できる．周辺抑制を持たないため，輝度の場合とは異なり，インパルス応答関数の強度が最大となる時間（ピーク時間）をインパルス応答関数の時間特性として採用し，比較した．

図 4.7 は，等輝度色インパルス応答関数の興奮相がピークとなる時間を示している．色相によらず，4 cpd 周辺でインパルス応答関数のピークとなる時間が減少していることから，この空間周波数領域で閾値決定に關与する受容野の空間的サイズが小さくなり，空間的足し合わせ範囲が狭くなることでインパルス応答関数の時間的に早くなったことが考えられる．

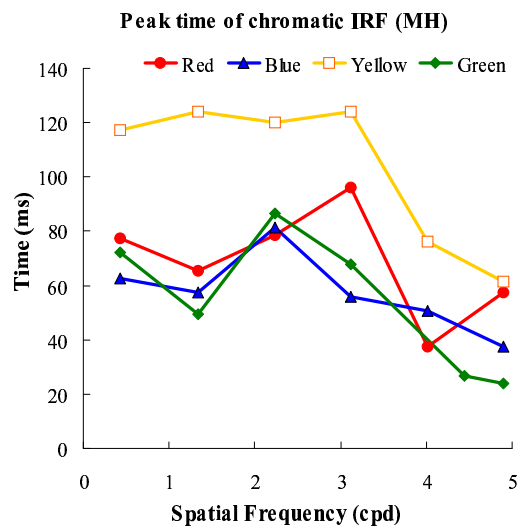


図 4.7 等輝度色インパルス応答関数の興奮相がピークとなる時間．

受容野の空間的サイズが空間周波数チャンネルを構成していると考えた受容野モデルでは，今回我々が得た結果は，色情報伝達経路では，およそ 4 cpd で空間周波数チャンネルが切り替わり，色情報伝達経路では 2 つの空間周波数チャンネルが存在することを示した．こ

#### 4.4 等輝度色インパルス応答関数と受容野モデル

のことから，色情報伝達経路にも異なる空間周波数に感度のピークをもつ空間周波数チャンネルが存在することを示した．

## 第 5 章

# 両眼呈示条件での時間的足し合わせ

時間的二刺激光法を用いて両眼にそれぞれ 1 刺激ずつ呈示することで、両眼間の時間的足し合わせと刺激の空間周波数の影響を検討した。本節では、実験目的と手法、実験装置について説明し、その結果を示す。

### 5.1 実験目的

第 3 章と第 4 章では、単眼のみに二刺激光を呈示し、その検出閾値からインパルス応答関数を計算した。本章では、二刺激光法を応用し、左右眼の同一視野に刺激光をそれぞれ 1 回呈示し、その検出閾値を測定することで、両眼間の時間的な足し合わせが網膜以降の処理段階でも生じるかどうかを検討した。

通常、我々は視対象を観察するとき、左右の眼を利用している。両眼で得られた視覚情報は、網膜から大脳一次視覚野 (V1) に至る経路では左右視野ごとに分離されており、左視野の視覚情報は右 LGN へ、右視野の視覚情報は左 LGN へと伝達される。この分離は LGN 以降でも保たれており、同側の V1 へと投射されている [19]。このことは、左視野にある視対象は網膜右側に結像し右 LGN を経て右半球の大脳一次視覚野へ伝達され処理され、逆に、右視野にある視対象は網膜左側に結像し左 LGN を経て左半球の大脳一次視覚野へ伝達され処理されることを意味している。このとき、網膜上で同一視野に対応する点は LGN や V1 において比較的近い場所で処理され、また、左右視野の境界に対応する部分からは両半球に対してオーバーラップした投射がある [20] ことから、本研究では、両眼からの視覚信号に対して時間的な足し合わせが生じるのではないかと予測した。両眼の同じ視野で相互干渉

## 5.2 実験

が存在するのであれば，両眼視野を統合する過程での対応点問題を解決するメカニズムが明らかになる可能性があり，検証のための実験を行なった．

## 5.2 実験

### 5.2.1 実験手法

実験手法は，第 2 章と同様に，時間的二刺激光法を用いて実験を行なった．ただし，両眼間の時間的足し合わせを測定するために，連続的に 2 回続けて呈示される刺激光を，右視野あるいは左視野のどちらか一方に，左右眼それぞれ 1 刺激ずつ ISI をおいて連続的に呈示し，そのコントラスト検出閾値を測定した．単眼刺激呈示条件の場合と同様に，両眼間に時間的な足し合わせが存在するのであれば，二刺激光の呈示時間間隔が比較的短い条件ではコントラスト検出閾値が減少することが予想される．反対に，両眼間に時間的な足し合わせが存在しないのであれば，二刺激光のコントラスト検出閾値は呈示時間間隔によらず一定の値となることが予測される．

### 5.2.2 実験装置と刺激

実験刺激はコンピュータに接続された VSG 2/4 によって生成され，CRT ディスプレイ (SONY G-500) に呈示された．図 5.1 に示されるように，CRT ディスプレイのスクリーンは，左右眼に刺激を呈示するために水平方向に 2 分割され，被験者は 4 枚のミラーを通してスクリーンを観察するので，結果として，被験者は長方形の表示領域を知覚することになる．実験中，CRT ディスプレイのスクリーンを除いて暗黒であり，被験者の頭部はあご台と額当てによって固定され，スクリーンまでの光学距離は 65.5 cm であった．

## 5.2 実験

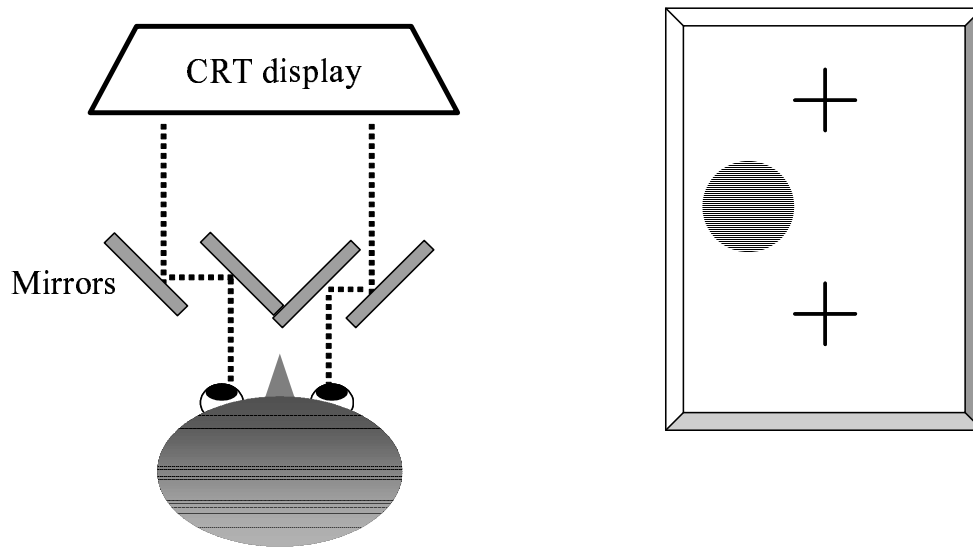


図 5.1 左図に示されるように，被験者は 4 枚のミラーを通して CRT ディスプレイを観察する．右図：被験者は右図に示されるような融合面を知覚する．

本実験では，輝度コントラスト刺激実験と，L 錐体混同色線上で背景白色から赤方向に彩度が変化する等輝度色コントラスト刺激実験の 2 種類が行なわれ，さまざまな空間周波数をもつグレーティングにガウス関数の包絡線をかけたものを刺激光として採用した．刺激光呈示時の眼球運動による網膜像の乱れを軽減するために，刺激光のグレーティングは水平方向に設定し，刺激サイズはガウス関数の SD 直径が視角  $2^\circ$  である．刺激の空間周波数は， $0.43 \sim 4.71$  cpd の範囲から選択された． $0.43$  cpd は，ガウス関数自身の主空間周波数であるため，刺激光は格子縞をもたない刺激光である．

実験中，CRT スクリーンには常に背景白色 ( $10\text{cd}/\text{m}^2$ ) が呈示 (視野サイズ：縦  $13^\circ$ ，横  $9^\circ$ ) されており，両眼視野の中心垂直方向の上下に融合線が 2 箇所呈示されていた．

輝度コントラスト実験で用いられた刺激光の空間周波数は 15 種類 ( $0.43, 0.74, 1.24, 1.49, 1.74, 1.98, 2.23, 2.48, 2.73, 3.23, 3.72, 3.97, 4.22, 4.47, 4.71$  cpd)，等輝度色コントラスト実験では 10 種類 ( $0.43, 0.74, 1.24, 1.74, 2.23, 2.73, 3.23, 3.72, 4.22, 4.71$  cpd) の中から選択され，実験セッション中は変化せず，左右眼に連続して呈示される刺激光の空間周波数は，常に同じである．

## 5.2 実験

CRT ディスプレイの垂直同期周波数は 100 Hz に設定され、実験中の時間制御はすべて CRT ディスプレイのフレーム数で定義 (1 frame = 10 ms) し、刺激呈示時間はすべての実験条件で 10 ms とした。刺激呈示間隔 (ISI) は、輝度コントラスト実験では 10 ~ 180 ms の範囲で 14 種類の中から、等輝度色刺激実験では 10 ~ 260 ms の範囲で 14 種類の中から選択された。ISI は、トライアル毎に擬似ランダムに選ばれ、被験者の疲労の影響が各 ISI 条件に対して極力均等に現れるようにした。

### 5.2.3 実験手順

実験は、5 分間の暗順応と 5 分間の背景順応の後、刺激呈示が開始された。CRT スクリーン上の刺激光は、図 5.2 に示されるような時間変化で右視野あるいは左視野のどちらか一方に ISI をおいて左右眼にそれぞれ 1 回ずつ呈示され、被験者は、刺激光が左右視野のどちらに呈示されたかをボタンスイッチによって応答 (強制二者択一) した。刺激光の第 1 呈示が右眼に呈示されるか左眼に呈示されるか、あるいは、連続した 2 つの刺激が右視野に呈示されるか左視野に呈示されるかはランダムで決定した。

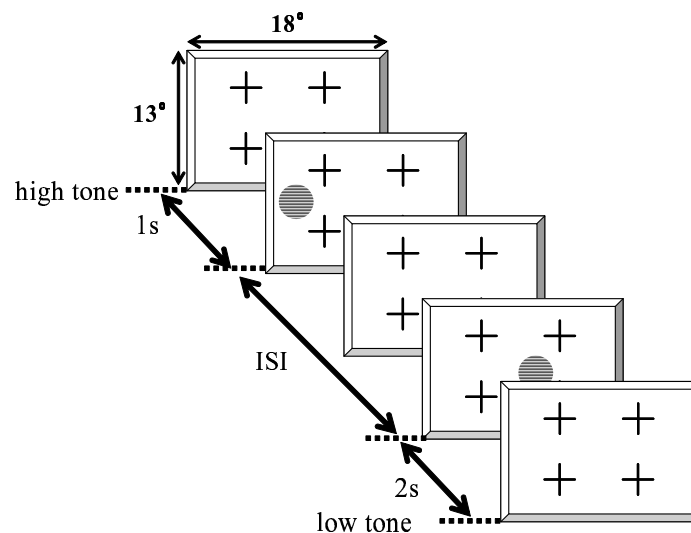


図 5.2 両眼呈示条件の時間変化



### 5.3 輝度刺激に対する結果

刺激光の輝度コントラスト，または彩度は階段法 ( Two-down One-up ) で変化させており，実験の 1 セッションは，14 種類の ISI すべてで第 6 番目の変曲点が得られるまで繰り返された ( 図 2.3 ) . 得られた変曲点の第 3 番目から第 6 番目の幾何平均値を閾値として採用し，4 セッションの結果の幾何平均値をその空間周波数条件かつ ISI 条件でのコントラスト検出閾値として採用した．被験者の疲労を避けるため，実験セッションは最低 30 分の間隔をおいて行なわれた．

#### 5.2.4 被験者

実験に参加した被験者は，21 ~ 26 歳の男性 4 名 ( MH , YF , YK , TH ) で，全員視力正常あるいは矯正済 ( 視力 0.8 以上 ) である．輝度コントラスト実験には，上記の被験者のうち 3 名 ( MH , YF , TH ) が参加し，等輝度色刺激実験には，上記の被験者のうち 3 名 ( MH , YK , TH ) が参加した．すべての被験者は，事前に石原表およびパネル D-15 テストを行ない，色覚正常であると判定されている．

### 5.3 輝度刺激に対する結果

本節では，両眼呈示条件での輝度刺激に対する対数輝度コントラスト検出閾値を ISI の関数として示す．図中の各シンボルは実験セッションを示し，誤差線は標準誤差 ( SEM ) である．

#### 5.3.1 被検者 MH の実験結果

被験者 MH の実験結果を示す．

### 5.3 輝度刺激に対する結果

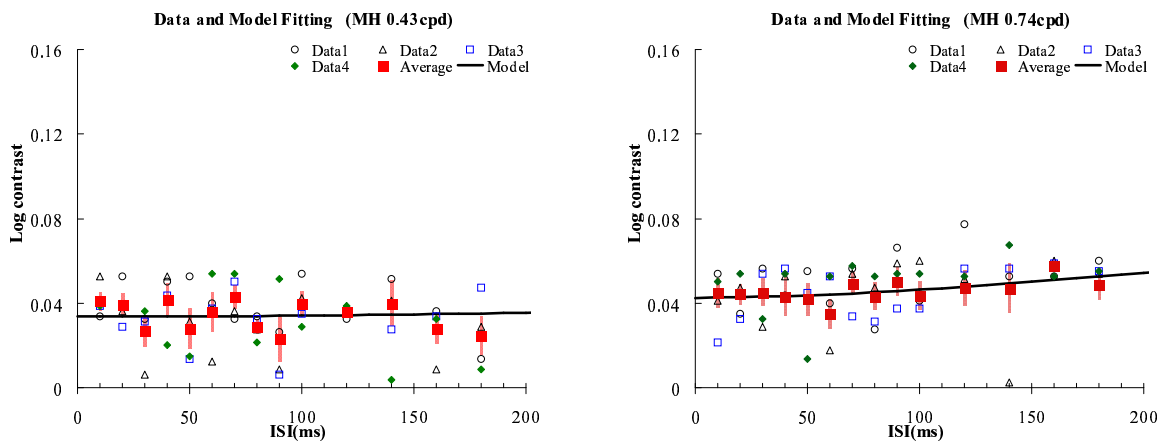


図 5.3 MH 0.43, 0.74 cpd の輝度コントラスト検出閾値

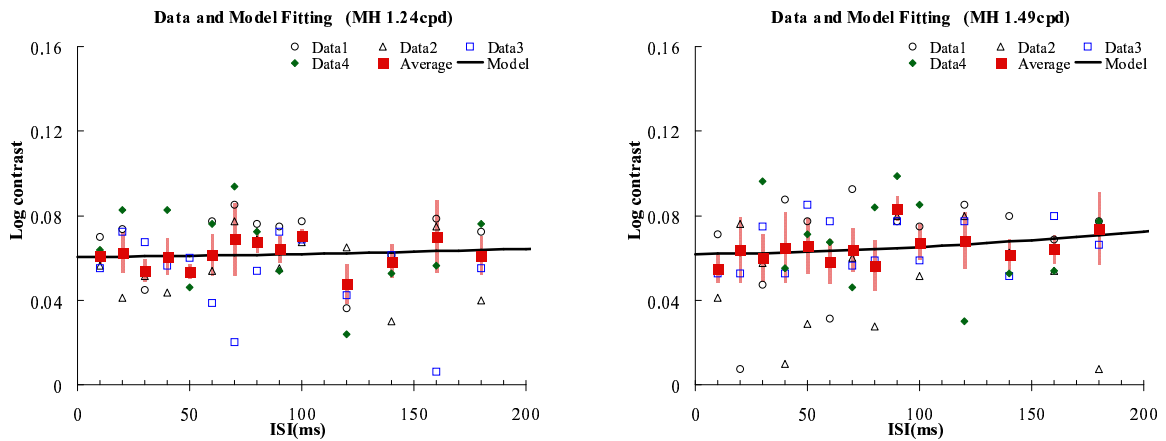


図 5.4 MH 1.24, 1.49 cpd の輝度コントラスト検出閾値

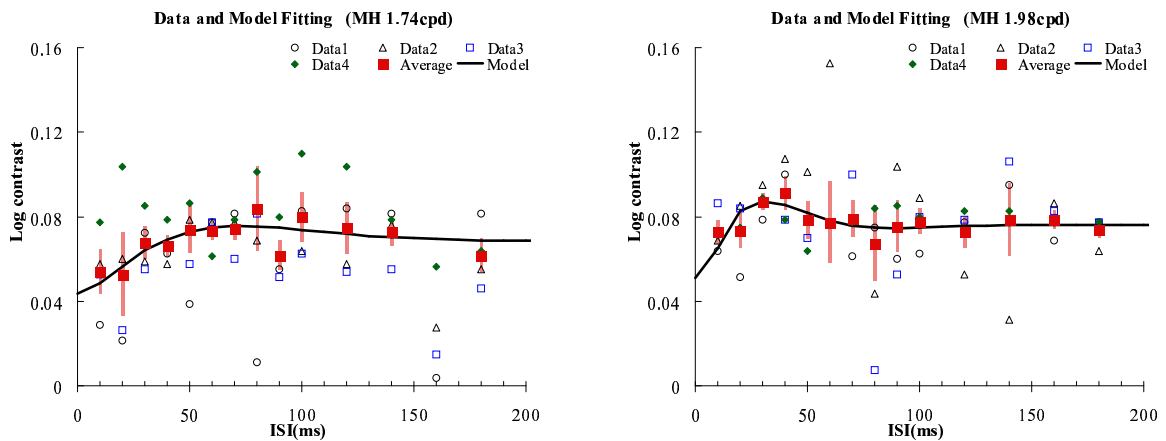


図 5.5 MH 1.74, 1.98 cpd の輝度コントラスト検出閾値

### 5.3 輝度刺激に対する結果

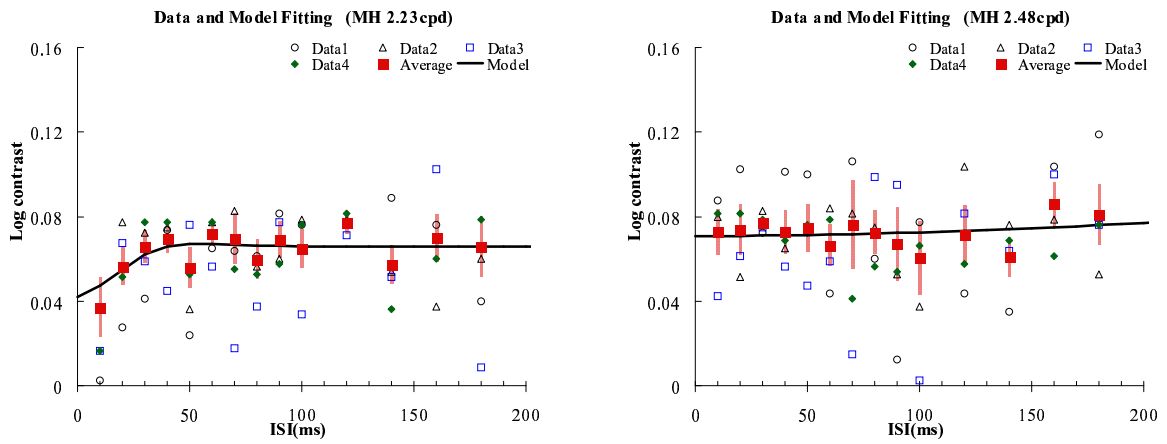


図 5.6 MH 2.23, 2.48 cpd の輝度コントラスト検出閾値

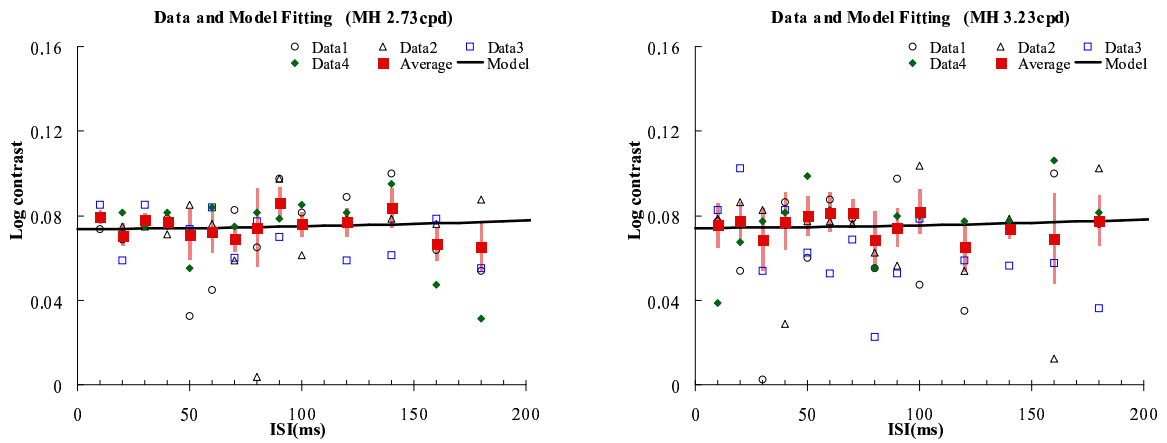


図 5.7 MH 2.73, 3.23 cpd の輝度コントラスト検出閾値

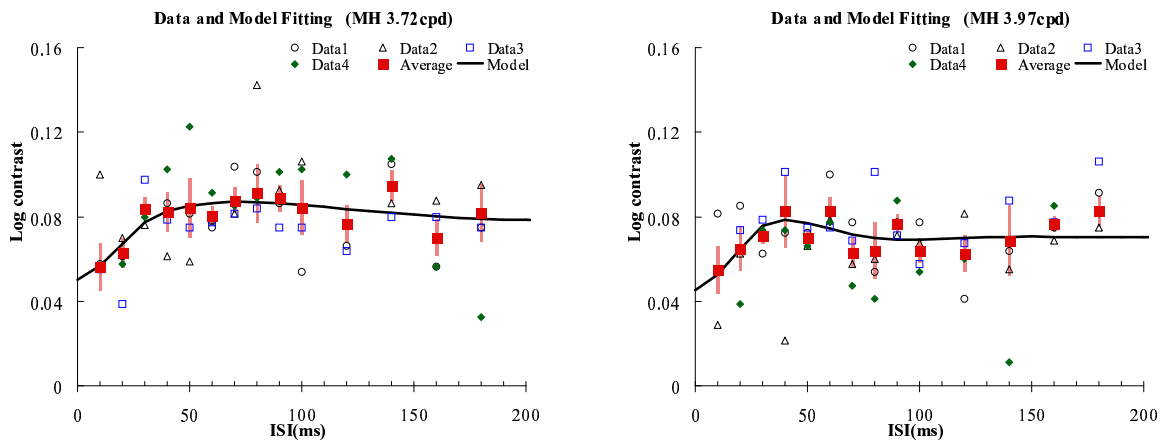


図 5.8 MH 3.72, 3.97 cpd の輝度コントラスト検出閾値

### 5.3 輝度刺激に対する結果

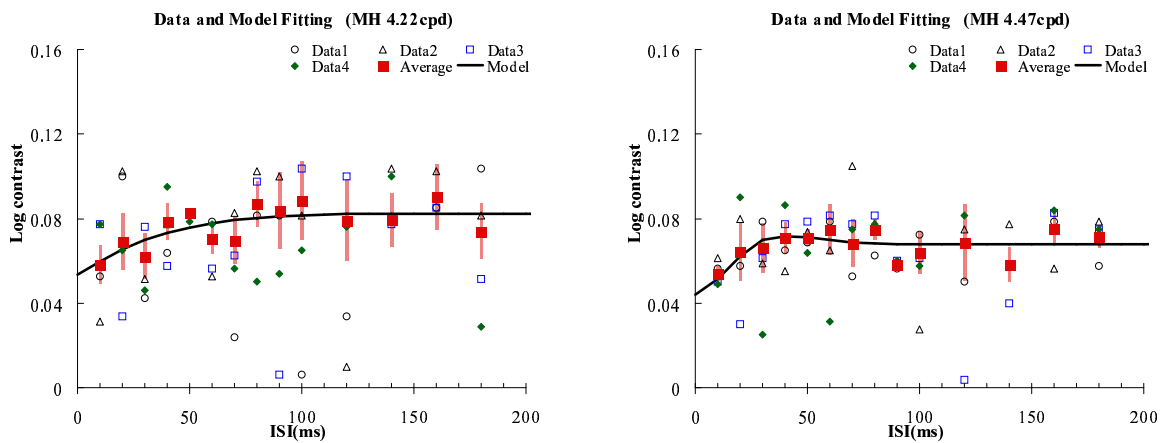


図 5.9 MH 4.22, 4.47 cpd の輝度コントラスト検出閾値

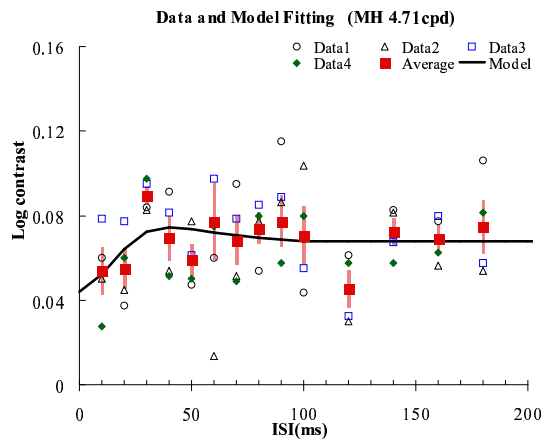


図 5.10 被験者 MH 4.71 cpd の輝度コントラスト検出閾値

実験の結果，刺激光の空間周波数が 0.43 ~ 1.49 cpd , 2.48 ~ 3.23 cpd の条件では，ISI によらずコントラスト検出閾値はほぼ一定の値を示し，これらの空間周波数をもつ輝度刺激光に対しては，両眼間で時間的な足し合わせが存在しない結果が得られた．しかしながら，刺激光の空間周波数が 1.74 ~ 2.23 cpd , 3.72 ~ 4.71 cpd の条件では，ISI が比較的短い条件でコントラスト検出閾値が減少し，両眼間に時間的な足し合わせが存在する結果となった．

### 5.3 輝度刺激に対する結果

#### 5.3.2 被検者 YF の結果

被験者 YF の実験結果を示す．被験者 YF は他の被験者と異なり，実験に用いた刺激光の空間周波数は，0.43，0.74，1.24，1.74，2.23，2.73，3.23，3.72，4.22，4.71 cpd の 10 種類である．

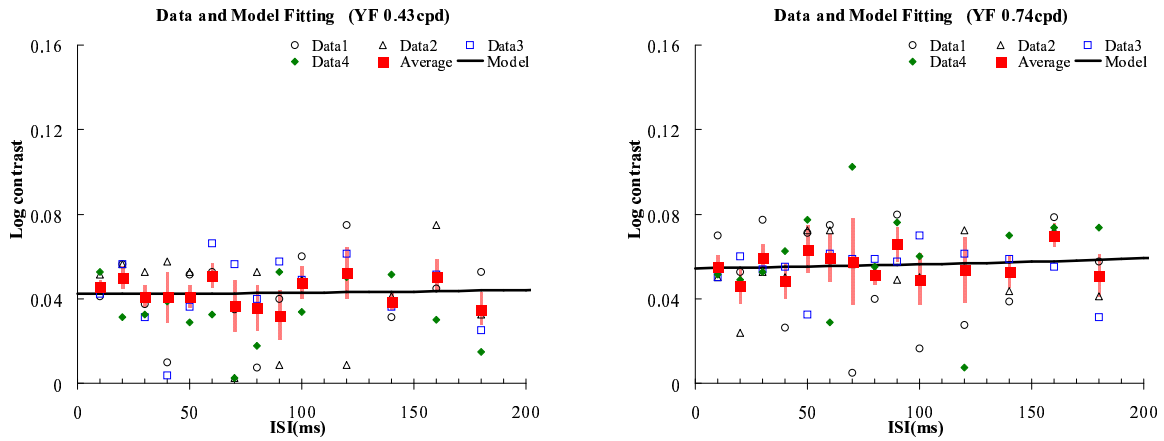


図 5.11 被験者 YF 0.43，0.74 cpd の輝度コントラスト検出閾値

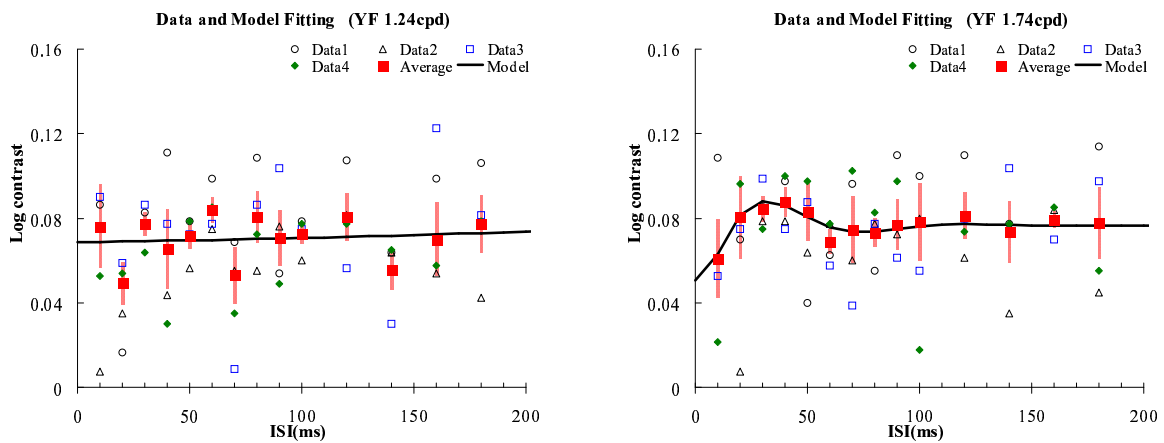


図 5.12 被験者 YF 1.24，1.74 cpd の輝度コントラスト検出閾値

### 5.3 輝度刺激に対する結果

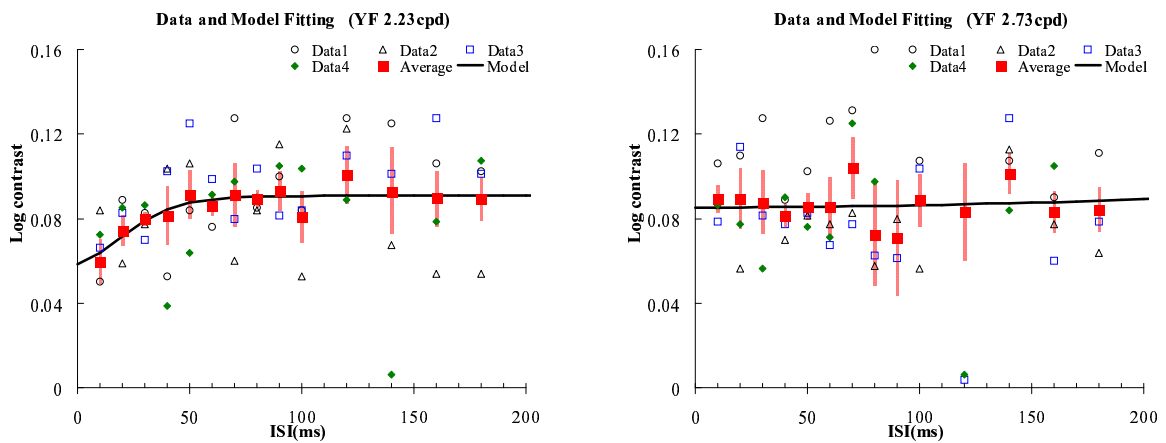


図 5.13 被験者 YF 2.23 , 2.73 cpd の輝度コントラスト検出閾値

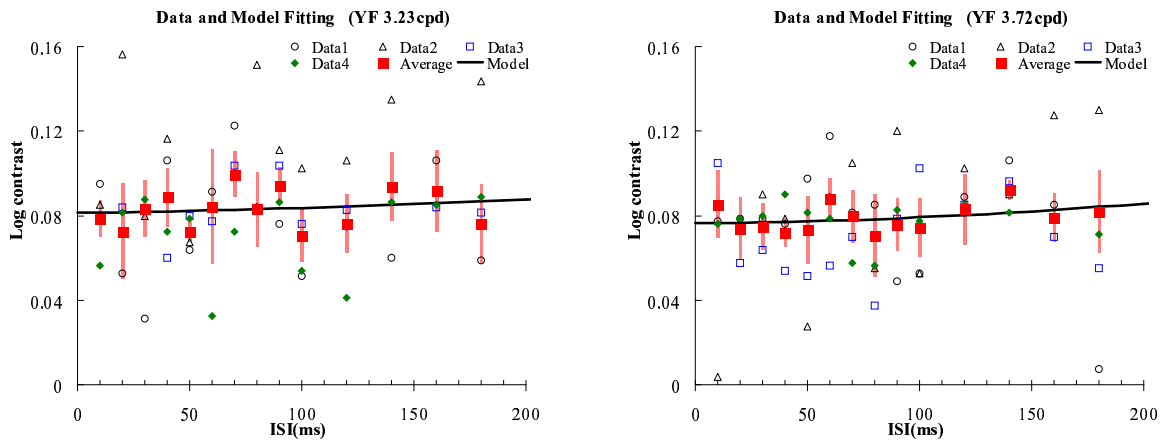


図 5.14 被験者 YF 3.23 , 3.72 cpd の輝度コントラスト検出閾値

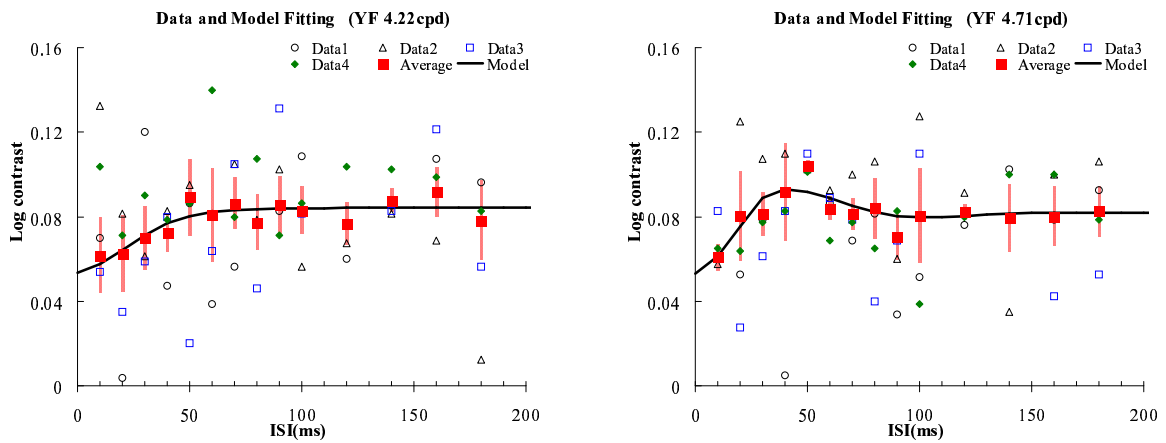


図 5.15 被験者 4.22 , YF 4.71 cpd の輝度コントラスト検出閾値

### 5.3 輝度刺激に対する結果

実験の結果，刺激光の空間周波数が 0.43 ~ 1.24 cpd , 2.73 ~ 3.72 cpd の条件では，ISI によらずコントラスト検出閾値はほぼ一定の値を示し，これらの空間周波数をもつ輝度刺激光に対しては，両眼間で時間的な足し合わせが存在しない結果が得られた．しかしながら，刺激光の空間周波数が 1.74 , 2.23 cpd , 4.22 , 4.71 cpd の条件では，ISI が比較的短い条件でコントラスト検出閾値が減少し，両眼間に時間的な足し合わせが存在する結果となった．

#### 5.3.3 被検者 YK の結果

被験者 YK の実験結果を示す．

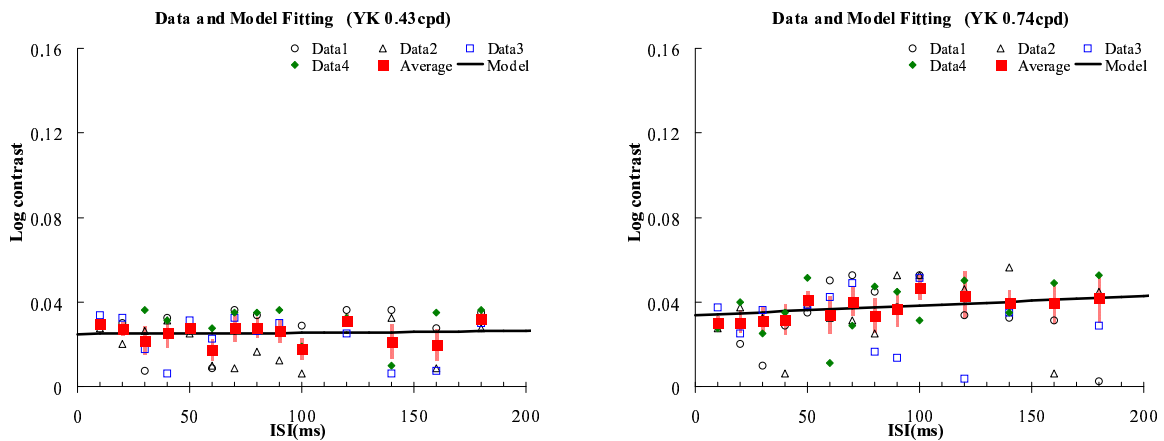


図 5.16 被験者 YK 0.43 , 0.74 cpd の輝度コントラスト検出閾値

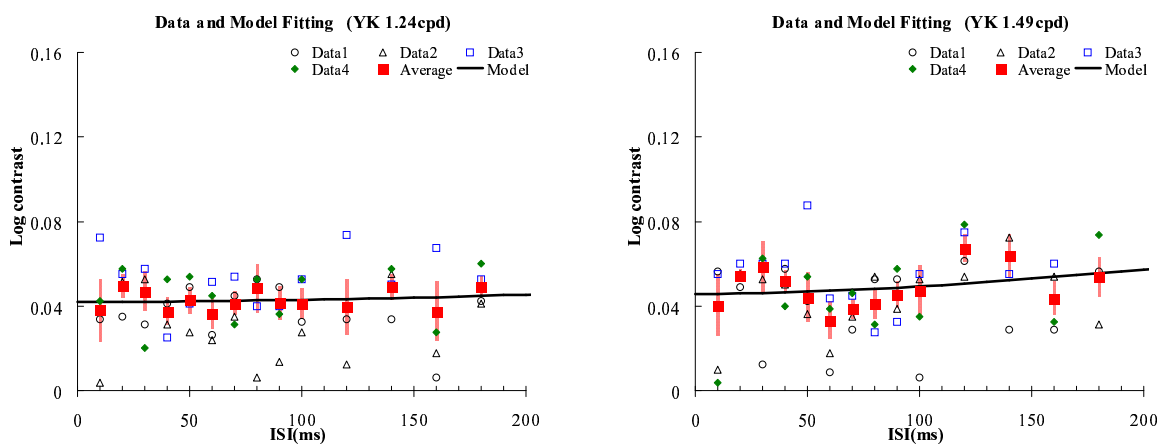


図 5.17 被験者 YK 1.24 , 1.49 cpd の輝度コントラスト検出閾値

### 5.3 輝度刺激に対する結果

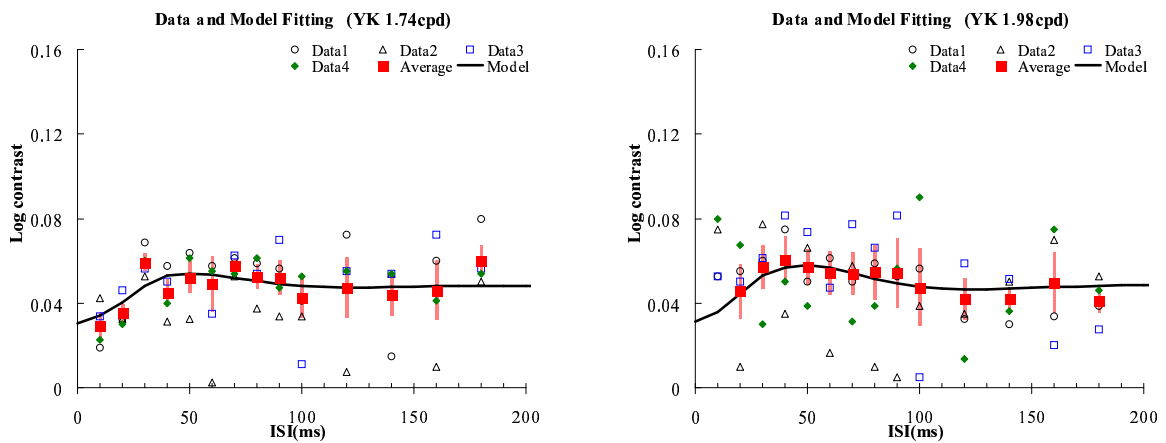


図 5.18 被験者 YK 1.74 , 1.98 cpd の輝度コントラスト検出閾値

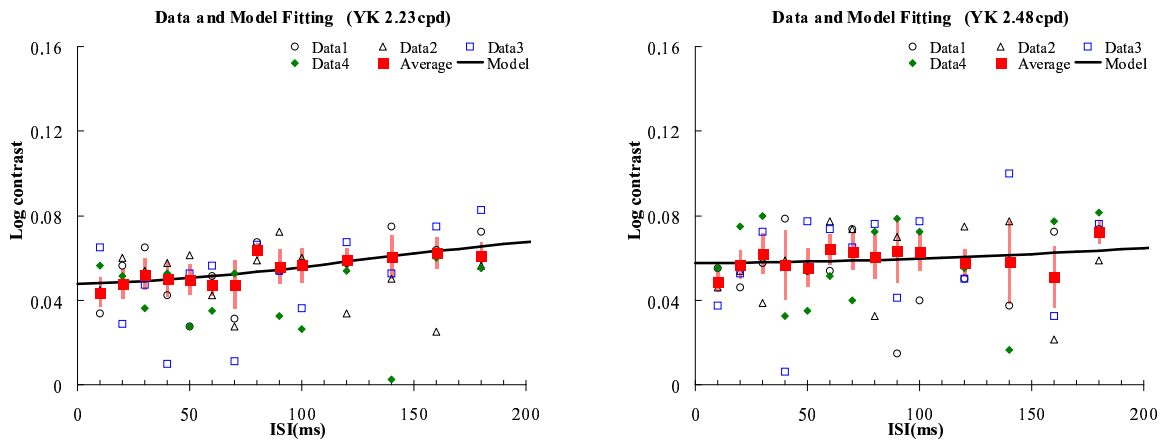


図 5.19 被験者 YK 2.23 , 2.48 cpd の輝度コントラスト検出閾値

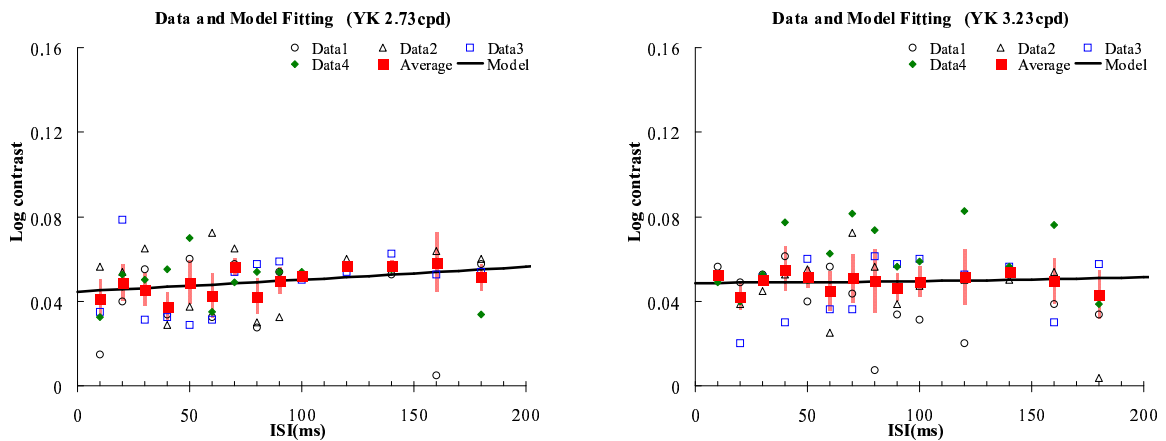


図 5.20 被験者 YK 2.73 , 3.23 cpd の輝度コントラスト検出閾値



### 5.3 輝度刺激に対する結果

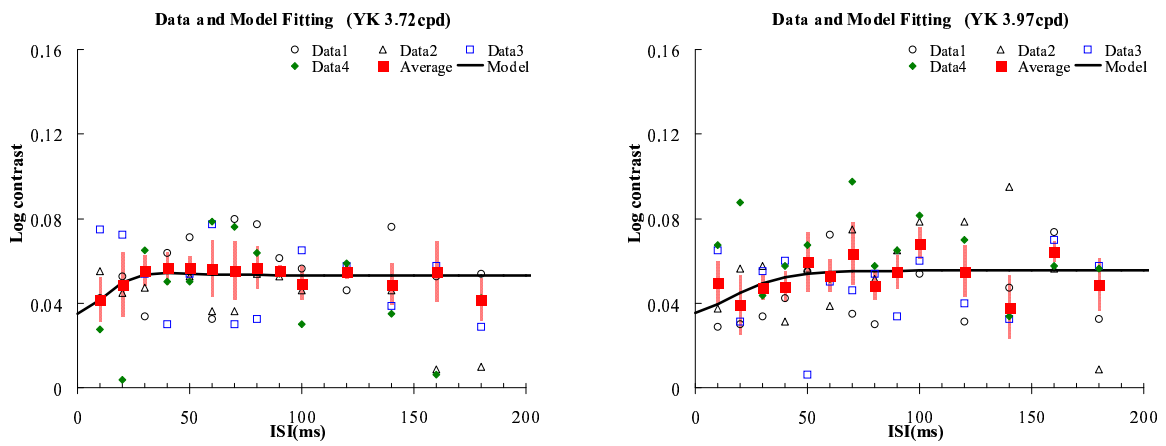


図 5.21 被験者 YK 3.72 , 3.97 cpd の輝度コントラスト検出閾値

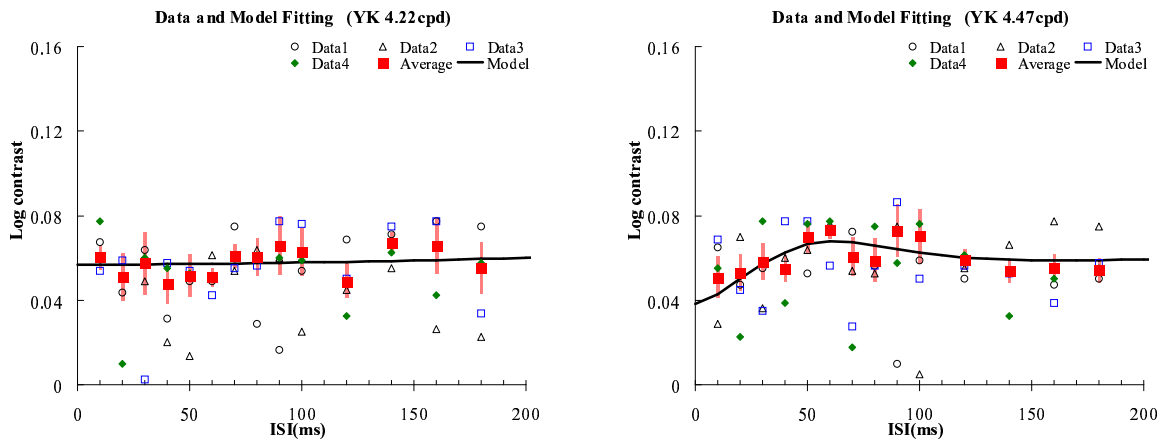


図 5.22 被験者 YK 4.22 , 4.47 cpd の輝度コントラスト検出閾値

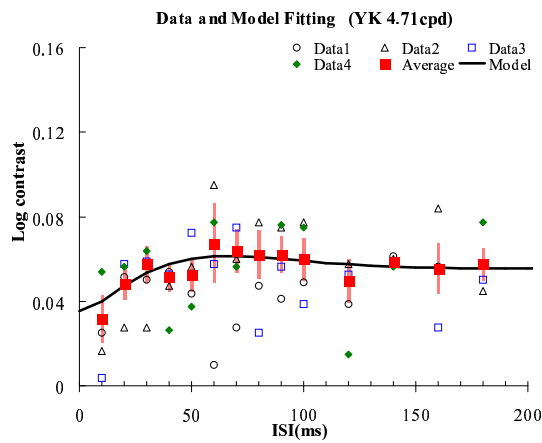


図 5.23 被験者 YK 4.71 cpd の輝度コントラスト検出閾値

## 5.4 等輝度色刺激 ( 赤 ) に対する結果

実験の結果，刺激光の空間周波数が 0.43 ~ 1.49 cpd , 2.23 ~ 3.23 , 4.22 cpd の条件では，ISI によらずコントラスト検出閾値はほぼ一定の値を示し，これらの空間周波数をもつ輝度刺激光に対しては，両眼間で時間的な足し合わせが存在しない結果が得られた．しかしながら，刺激光の空間周波数が 1.74 , 1.98 , 3.72 , 3.97 , 4.47 , 4.71 cpd の条件では，ISI が比較的短い条件でコントラスト検出閾値が減少し，両眼間に時間的な足し合わせが存在する結果となった．

## 5.4 等輝度色刺激 ( 赤 ) に対する結果

本節では，両眼呈示条件での等輝度色刺激 ( 赤 ) に対する対数 L 錐体刺激量コントラスト検出閾値を ISI の関数として示す．図中の各シンボルは実験セッションを示し，誤差線は標準誤差 ( SEM ) である．

### 5.4.1 被検者 MH の実験結果

被験者 MH の実験結果を示す．

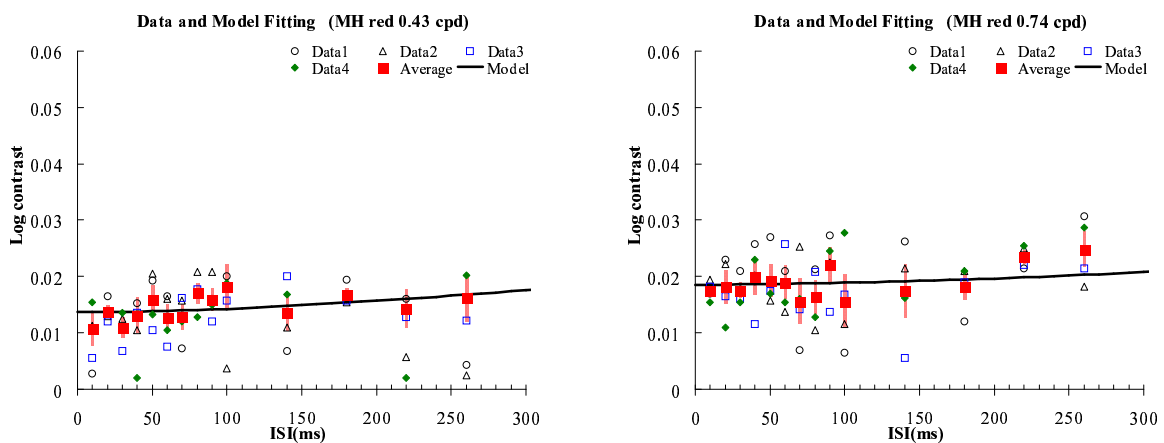


図 5.24 被験者 MH 0.43 , 0.74 cpd の等輝度色コントラスト検出閾値

## 5.4 等輝度色刺激 ( 赤 ) に対する結果

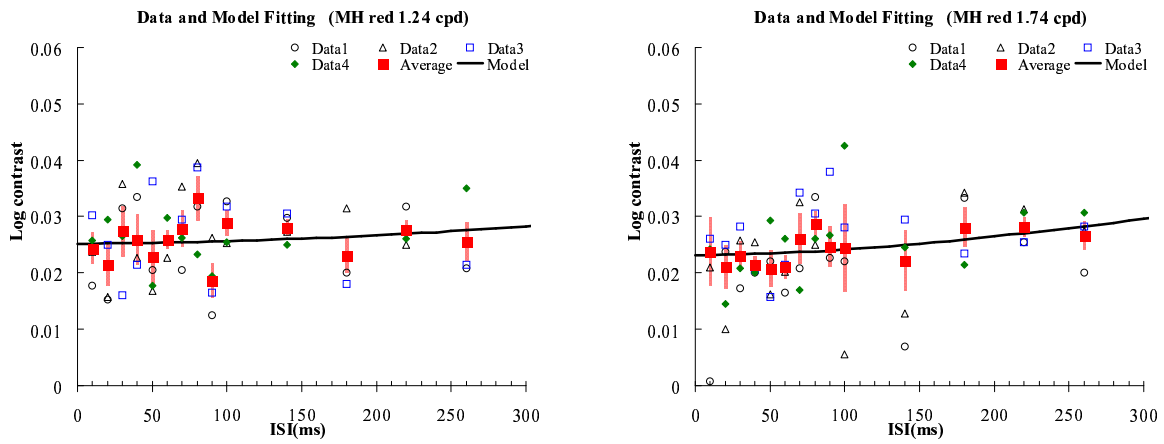


図 5.25 被験者 MH 1.24 , 1.74 cpd の等輝度色コントラスト検出閾値

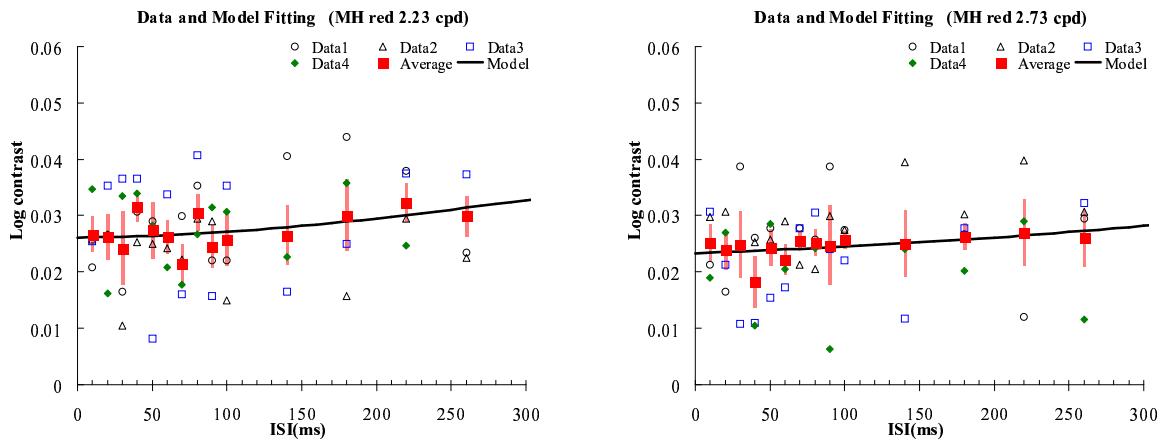


図 5.26 被験者 MH 2.23 , 2.73 cpd の等輝度色コントラスト検出閾値

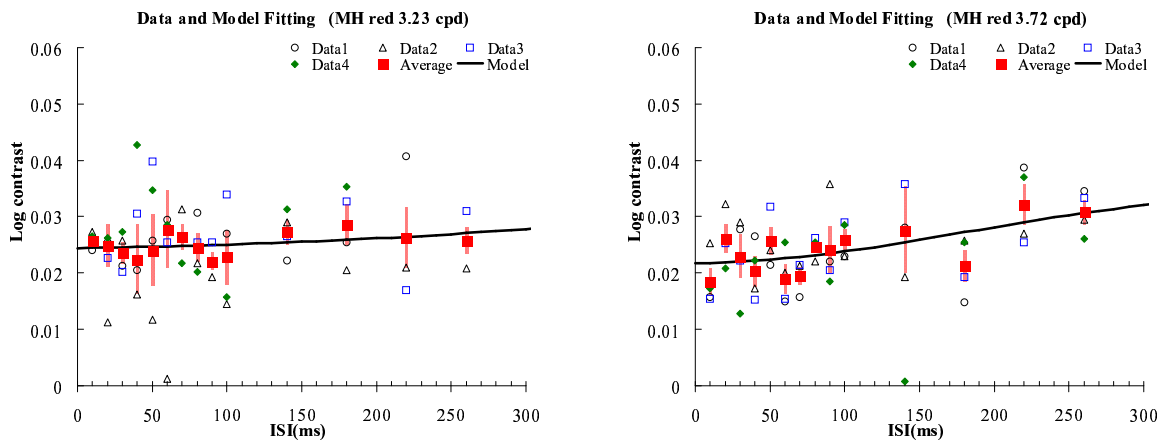


図 5.27 被験者 MH 3.23 , 3.72 cpd の等輝度色コントラスト検出閾値

## 5.4 等輝度色刺激 ( 赤 ) に対する結果

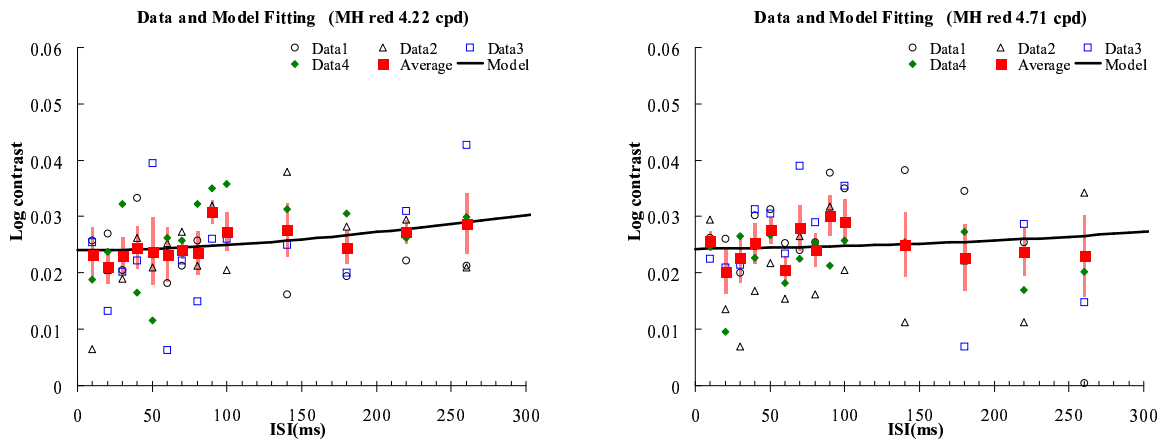


図 5.28 被験者 MH 4.22 , 4.71 cpd の等輝度色コントラスト検出閾値

被験者 MH の等輝度色刺激を用いた実験の結果は、すべての空間周波数条件で、ISI によらずコントラスト検出閾値はほぼ一定の値を示した。これは、単眼刺激呈示条件の結果と異なり、両眼間に時間的な足し合わせは存在しないことを示した。

### 5.4.2 被検者 YK の実験結果

被験者 YF の実験結果を示す。

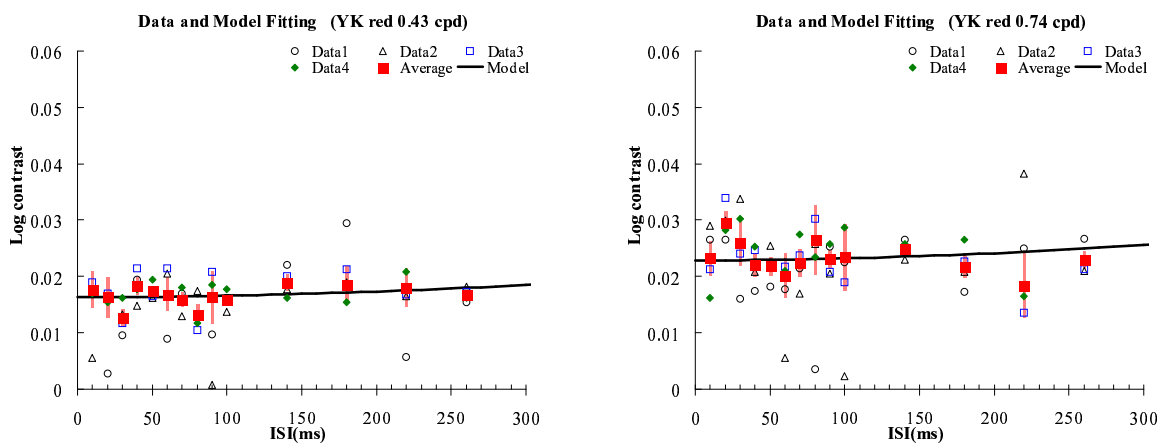


図 5.29 被験者 YK 0.43 , 0.74 cpd の等輝度色コントラスト検出閾値

## 5.4 等輝度色刺激 (赤) に対する結果

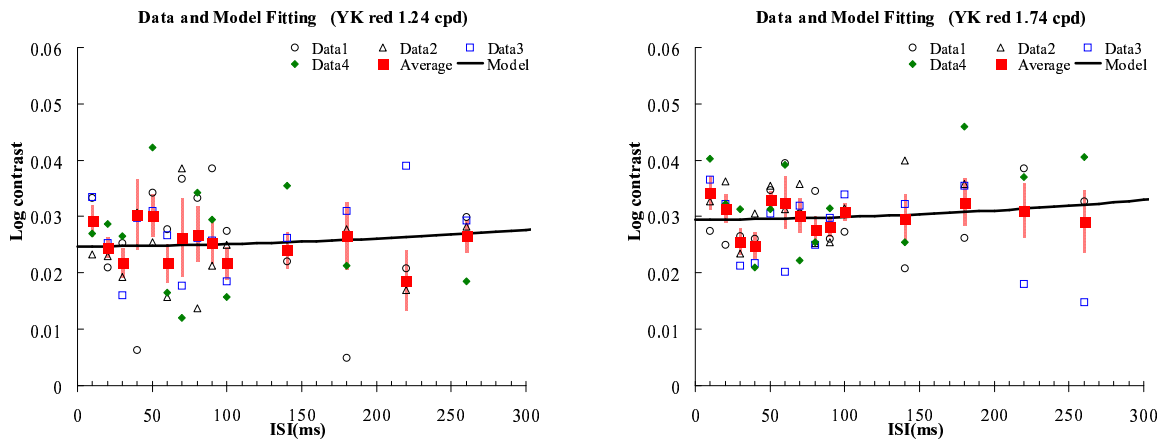


図 5.30 被験者 YK 1.24 , 1.74 cpd の等輝度色コントラスト検出閾値

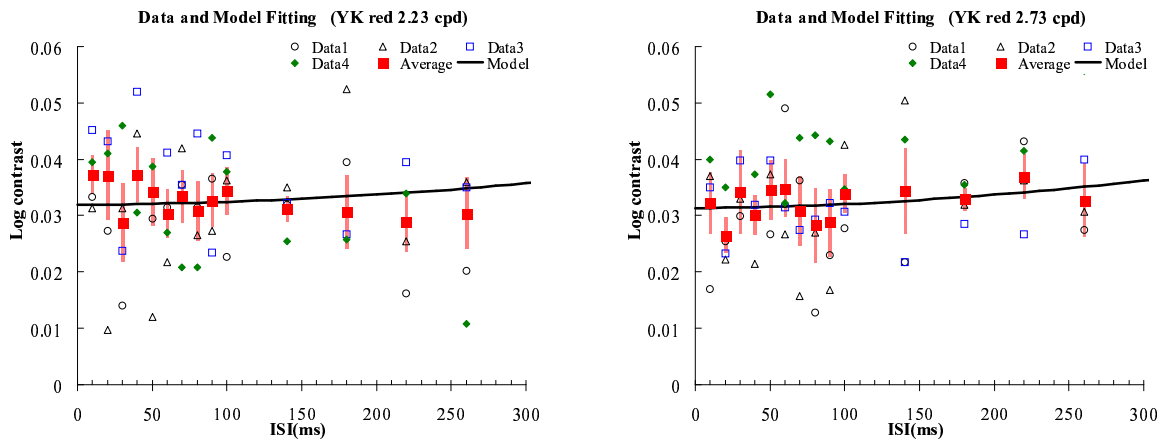


図 5.31 被験者 YK 2.23 , 2.73 cpd の等輝度色コントラスト検出閾値

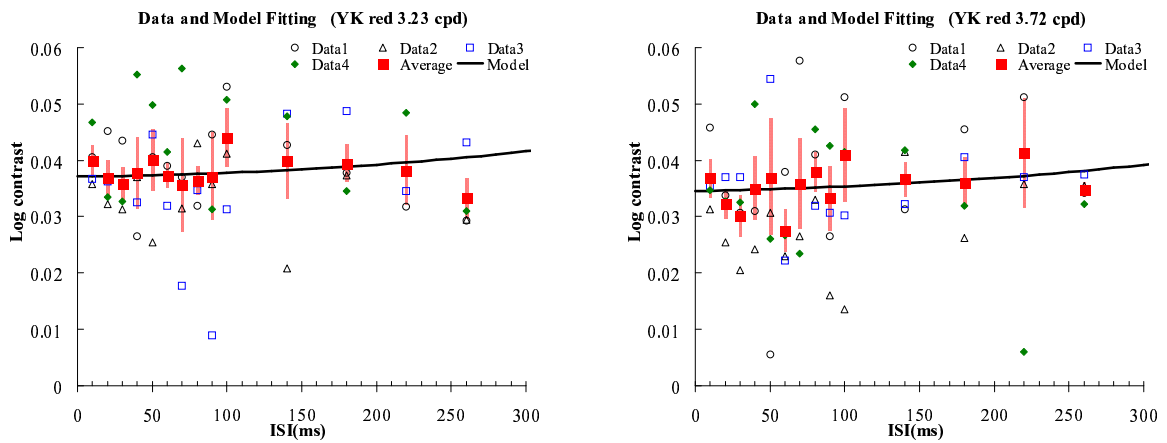


図 5.32 被験者 YK 3.23 , 3.72 cpd の等輝度色コントラスト検出閾値

## 5.4 等輝度色刺激 ( 赤 ) に対する結果

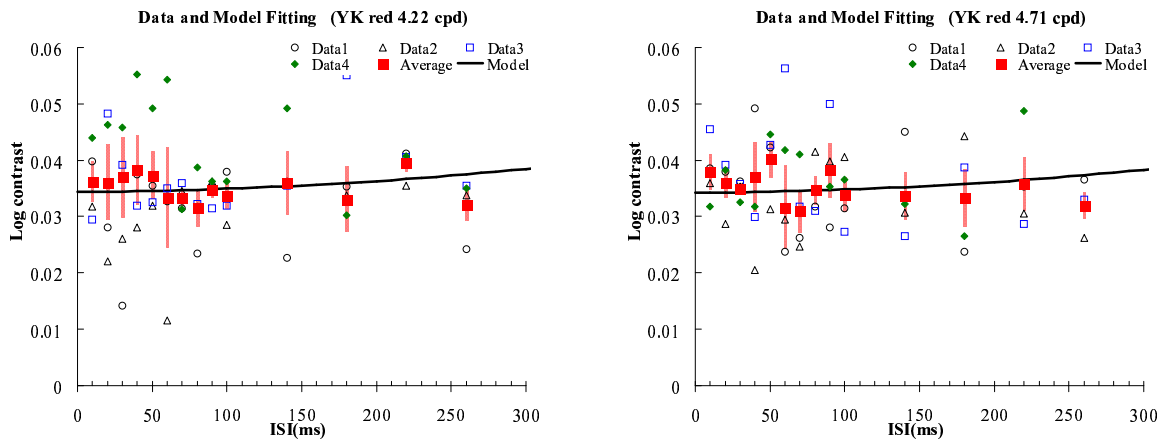


図 5.33 被験者 YK 4.22 , 4.71 cpd の等輝度色コントラスト検出閾値

被験者 YK の等輝度色刺激を用いた実験の結果は、すべての空間周波数条件で、ISI によらずコントラスト検出閾値はほぼ一定の値を示した。これは、単眼刺激呈示条件の結果と異なり、両眼間に時間的な足し合わせは存在しないことを示した。

### 5.4.3 被験者 TH の結果

被験者 TH の実験結果を示す。

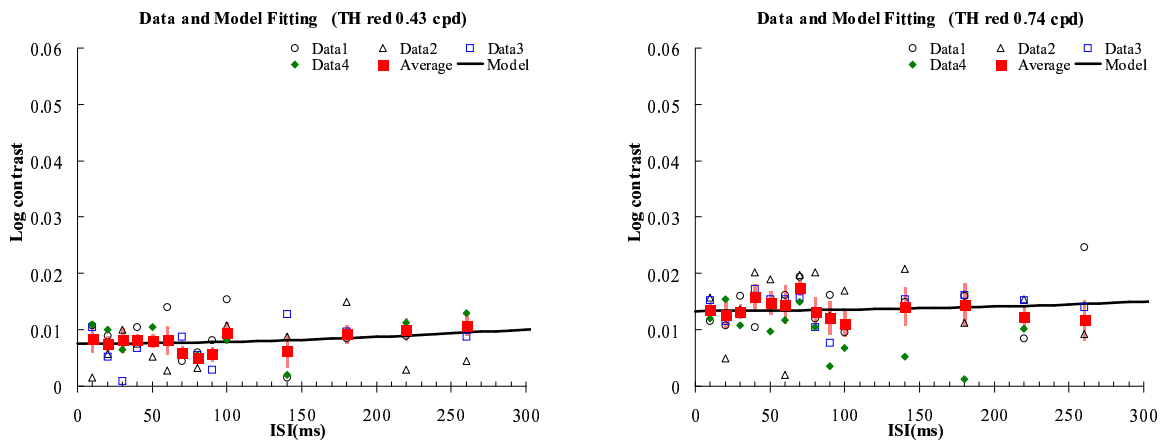


図 5.34 被験者 TH 0.43 , 0.74 cpd の等輝度色コントラスト検出閾値

## 5.4 等輝度色刺激 ( 赤 ) に対する結果

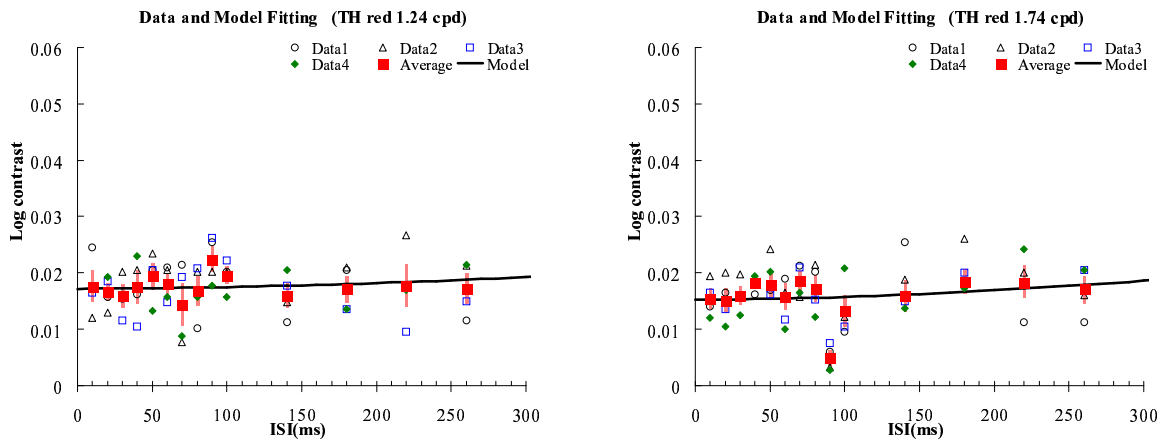


図 5.35 被験者 TH 1.24 , 1.74 cpd の等輝度色コントラスト検出閾値

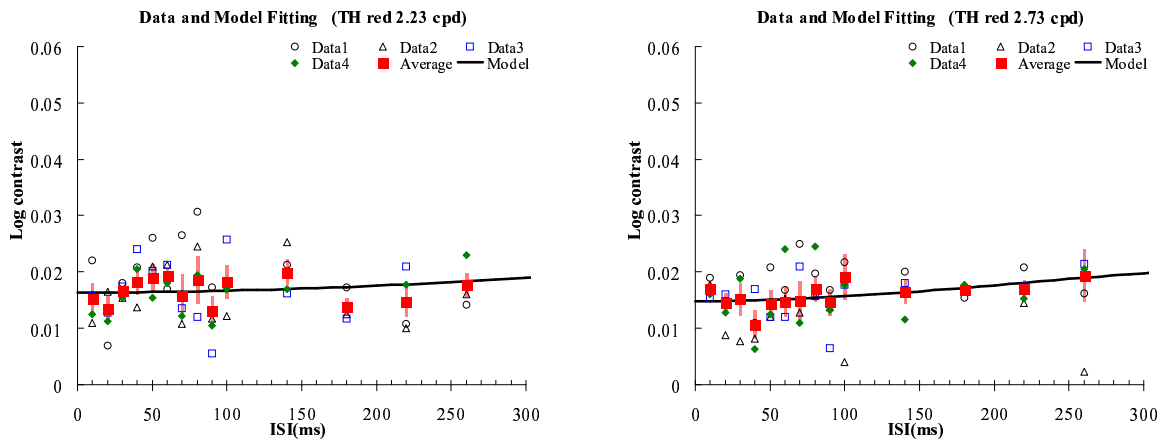


図 5.36 被験者 TH 2.23 , 2.73 cpd の等輝度色コントラスト検出閾値

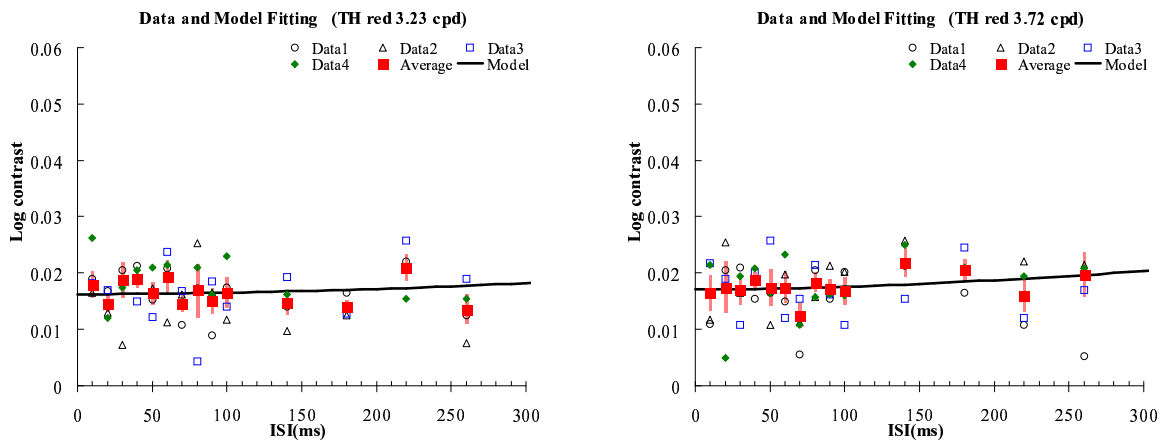


図 5.37 被験者 TH 3.23 , 3.72 cpd の等輝度色コントラスト検出閾値

## 5.5 両眼間の時間的足し合わせ

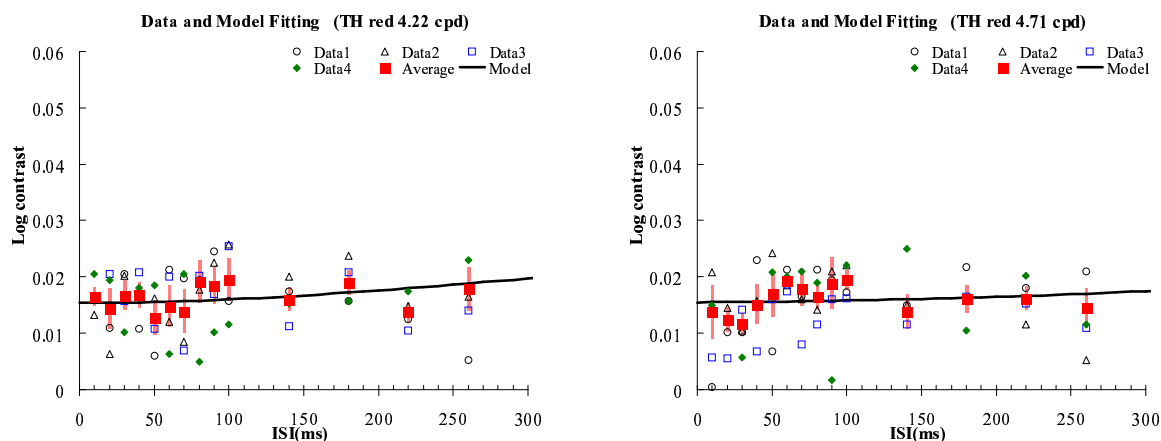


図 5.38 4.22, 被験者 TH 4.71 cpd の等輝度色コントラスト検出閾値

被験者 TH の等輝度色刺激を用いた実験の結果は、すべての空間周波数条件で、ISI によらずコントラスト検出閾値はほぼ一定の値を示した。被験者 TH は、輝度刺激条件の実験は行っていないものの、他の被験者 2 名 (MH, YK) と同様に両眼間に時間的な足し合わせは存在しないことを示した。

## 5.5 両眼間の時間的足し合わせ

本節では、前節で示された両眼呈示条件の結果から、両眼間での時間的足し合わせについて考察する。

左右眼にそれぞれ呈示された二刺激光に時間的な足し合わせが存在することを確認するために、表 5.1 を示す。ある空間周波数条件における幾何平均コントラスト検出閾値が最大となる ISI のデータ点すべてと ISI が 10 ms のときのデータ点全てとを、分散が等しくないと仮定した 2 標本として t 検定を行ない、統計的有意差 (有意水準 5%) を求めた。表 5.1 中の は、両側検定において統計的有意差が存在することを示しており、ある被験者のその空間周波数刺激において、足し合わせか抑制かによらず、両眼間刺激に相互作用があることをいみしている。 は片側検定のみ有意差が存在する場合であり、このときは ISI が 10ms の解きに足し合わせによる閾値減少、閾値が最大となる ISI の時は相互作用無しで確率的足し合わせのみ、あるいは抑制性の相互作用で閾値が高くなる、という仮定のもとで統



## 5.5 両眼間の時間的足し合わせ

計的有意差が存在している。は、データ点がばらついているために、あるいは閾値の変動幅が小さいために統計的有意差は存在しないけれども、閾値が連続的に変化しておりインパルス応答関数を妥当に計算できる場合である。×は統計的有意差が存在しなかった条件を示している。また、等輝度色(赤)変化刺激を用いた実験での は、片側検定において統計的な有意差は存在するけれども、妥当なインパルス応答関数が得られなかった場合である。

(cpd)	0.43	0.74	1.24	1.49	1.74	1.98	2.23	2.48	2.73	3.23	3.72	3.97	4.22	4.47	4.71
<b>Luminous flashes</b>															
MH	×	×	×					×	×	×					
YK	×	×	×	×					×	×			×		
YF	×	×	×	-		-		-	×	×	×	-			-
<b>Chromatic (red) flashes</b>															
MH	×		×	-	×	-	×	-	×	×		-		-	×
YK	×	×	×	-	×	-	×	-	×	×	×	-	×	-	×
YF	×		×	-	×	-	×	-	×	×	×	-	×	-	×

表 5.1 輝度コントラスト刺激に対する両眼呈示条件での閾値変化の統計的有意差を示す。は両側検定で有意差が存在、は片側検定で有意差が存在、は有意差はないがインパルス応答関数を妥当に計算可能であった条件、×は統計的有意差が存在しなかった条件、は片側検定で統計的有意差は存在するが妥当なインパルス応答関数が計算できなかった条件を示す。

統計的有意差の強度および被験者間の空間周波数のばらつきはあるものの、輝度刺激を用いた実験の結果、刺激の空間周波数が 1.49~2.48 cpd の範囲と、3.72~4.71 cpd の範囲において、統計的に優位な閾値変動が得られた。これらの空間周波数条件では、ISI の増加に伴ってコントラスト検出閾値が一定の傾向をもって変化し、これは、時間的二刺激光法を用いた単眼での結果 [11][12][13][17][16] と一致した傾向であり、これらの空間周波数をもつ輝度刺激に対して両眼間で時間的な足し合わせが存在することを示した。

一方、等輝度色刺激に対する実験では、妥当なインパルス応答関数を導出することはできなかった。等輝度色刺激呈示実験の統計的有意差は、ISI が 10ms の閾値あるいは閾値が最

## 5.5 両眼間の時間的足し合わせ

大となる ISI におけるデータ点のばらつきが極端に小さい場合に生じたアーティファクトである可能性が大きいと考えられる．今回用いた色相が赤の条件では，色チャンネルに両眼間の時間的足し合わせが存在しないことを示した．

## 第 6 章

# 単眼及び両眼での視覚情報処理モデル

第 5 章で示されたように，両眼間の時間的足し合わせは輝度刺激光の場合のみ存在し，そしてそれは，刺激光の空間周波数に依存することが明らかとなった．本章では，視覚系の空間周波数フィルタ両眼視差を用いた両眼立体視における対応問題を解く手がかりとして用いられている可能性について考察した．本章では，本論文を総括した単眼および両眼でのモデルを構築した．

### 6.1 両眼立体視における対応問題

空間間隔の印象（奥行き印象）を伴うすべての視覚経験のことを奥行き視（visual depth perception）とよび，奥行き量，順序，奥行き感などの違いは，視覚系が利用できる情報の種類と特性によって産み出される．これらの情報は，一般に奥行き手がかり（cues to depth）と呼ばれる．

立体視（stereopsis）は奥行き視の下位概念で，両眼網膜像差（binocular retinal disparity）に基づく両眼立体視（binocular stereopsis）と単眼運動視差（monocular motion parallax）に基づく単眼立体視（monocular stereopsis）とに分けられる．本章では，両眼網膜像差による両眼立体視と，空間周波数チャンネルとの関連について説明する．

## 6.2 両眼立体視における両眼網膜像差

両眼網膜像差による両眼立体視の研究は、近年では、コンピュータによって作製されたランダムドットステレオグラムを用いて両眼立体視の研究が行なわれている [22]。ランダムドットステレオグラムには輪郭は存在しないが、両眼融合後に一定の輪郭をもつ奥行き面が生じ、色や形といった手がかり (cue) の要素を含まない純粋な両眼網膜像差手がかりの効果を示したものと見える。

両眼立体視は、左右眼の網膜像の位置差に基づいて形成されるため、左右眼の網膜像の対応する位置を決定するメカニズムが必要である。しかしながら、左右眼に呈示されるランダムドットステレオグラムには、立体視をすることで知覚される図形の情報存在せず、これは、両眼立体視が左右眼の網膜像差のみで知覚されることを意味している。左右眼の網膜像から、なんらかの特長を抽出して両眼網膜像を比較し、対応点を検出する処理は、一般に「対応問題」と呼ばれ過去にいくつかのモデルが提案 [25] [26] されているが、視覚系のモデルとしてどのモデルが適当であるかは結論が出ていない。

一方で、両眼網膜像差を利用した両眼立体視においても、空間周波数チャンネルの存在が示されている。ランダムドットステレオグラムを用いたマスク法での実験 [23] では、異なる周波数に感度をもつ空間周波数チャンネルが存在することを示す結果を得ているが、バンド幅やピーク周波数については、実験により異なり正確なチャンネル特性は十分に明らかにはなっていない。

しかしながら、両眼立体視でのコントラスト感度のピークと網膜像差の大きさに相関がある [24] ことから、両眼立体視には複数の空間周波数チャンネルが寄与しており、小さな網膜像差は高空間周波数に感度をもつチャンネルからの信号を受け、大きな網膜像差は低空間周波数に感度をもつチャンネルからの信号を受けることが考えられ、両眼網膜像差による両眼立体視に空間周波数チャンネルが関与していることを示している。

第 5 章では、両眼間の時間的足し合わせは輝度チャンネルのみに存在し、また、それはある特定の空間周波数領域にのみ存在することを示した。異なる空間周波数に感度をもつ空間

### 6.3 両眼間の時間的足し合わせと両眼立体視

周波数チャンネルが両眼間に存在することは、両眼立体視における対応問題を解く手がかりとなる可能性がある。

ランダムドットステレオグラムの両眼画像を考えると、左右眼に呈示されたそれぞれの画像から対応点を特定することは非常に困難である。これを解決する手法として、粗い処理を行ってから細かい処理を行なうという coarse to fine の処理が考えられる。これは、低空間周波数のみを取り出す処理を行ない、大まかな網膜像差が決定できた後に、高空間周波数に感度をもつメカニズムがその近傍の網膜像差についてのみ注目することで、より効率的に対応点の検出が可能となる処理メカニズムである。

本研究の第 5 章で示したように、輝度刺激に対する実験では 2 cpd と 4cpd の空間周波数領域で両眼間の時間的足し合わせが得られたことから、これらの空間周波数チャンネルが両眼立体視における対応問題を解く手がかりとして寄与している可能性がある。すべての空間周波数領域ではなく、ある特定の空間周波数領域( 2 cpd と 4 cpd 付近 )でのみ両眼からの視覚応答に時間的な干渉が存在することは、対応点検出処理において処理メカニズムの単純化とコストの上から妥当だと考えられる。

また、両眼対応問題を解くメカニズムに両眼性の空間周波数チャンネルが寄与していることは、単眼網膜像処理を必要としないわけではない。単眼網膜像の特徴点抽出などの処理を経た後に続く処理と考えることもできる。

### 6.3 両眼間の時間的足し合わせと両眼立体視

第 5 章で示したように、両眼間の時間的足し合わせは輝度刺激光でのみ存在し、等輝度色刺激( 赤 )を用いた場合は、どの空間周波数であっても存在しない結果となった。この結果は、初期視覚の 2 つの経路( Magno 経路と Parvo 経路 )のうち、色選択性を示す Parvo 経路には両眼間に時間的な干渉が存在しない可能性がある。これらの経路は、第 1 章で述べたように、互いに異なる時間特性を持つことが知られている。そこで、両眼間で時間的足し合わせが得られた空間周波数条件において、第 3 章で説明した手法を用いてインパルス応答

### 6.3 両眼間の時間的足し合わせと両眼立体視

関数を導出し，図 6.1～図 6.3 に示す．

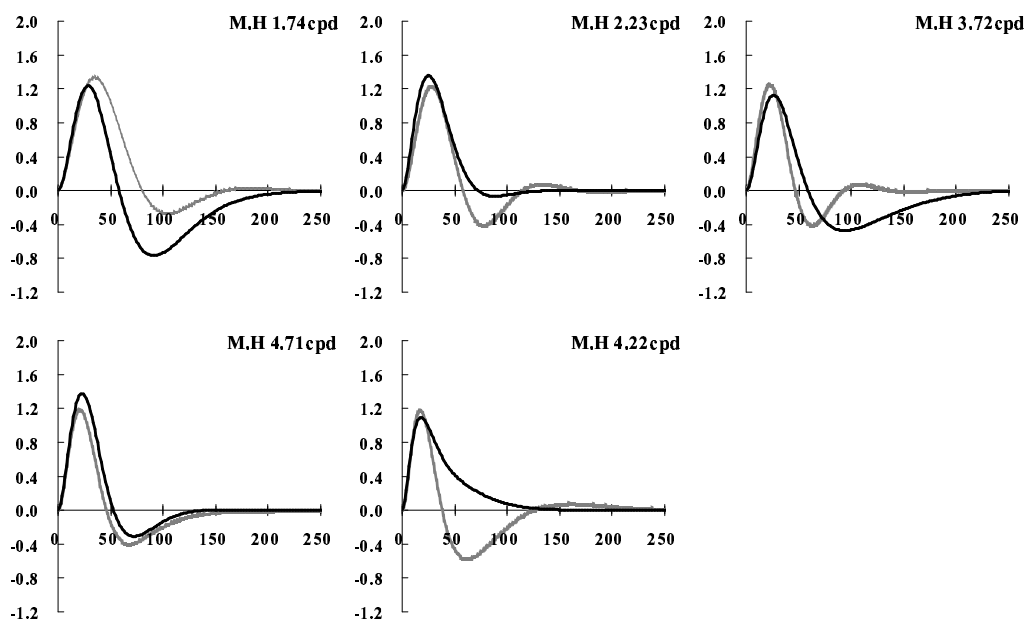


図 6.1 被験者 MH の両眼提示条件でのインパルス応答関数．時間的足し合わせが得られた空間周波数条件のみインパルス応答関数を導出した．実線が両眼提示条件で求められたインパルス応答関数を示し，破線は，同じ実験装置を用いて単眼提示条件で求められたインパルス応答関数を示す．

### 6.3 両眼間の時間的足し合わせと両眼立体視

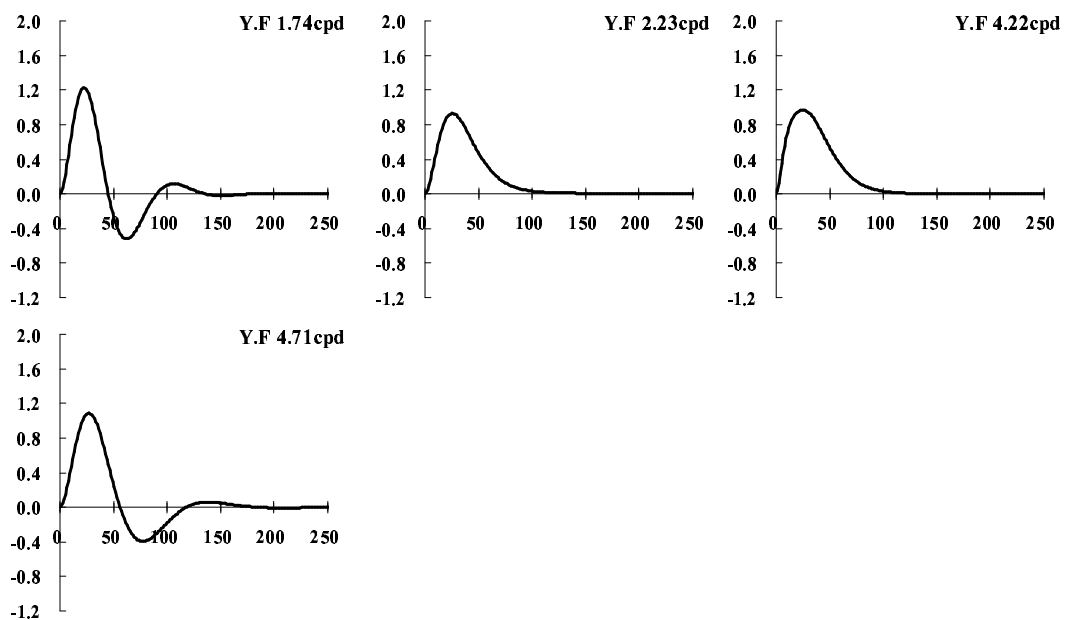


図 6.2 被験者 YF の両眼呈示条件でのインパルス応答関数．時間的足し合わせが得られた空間周波数条件のみインパルス応答関数を導出した．

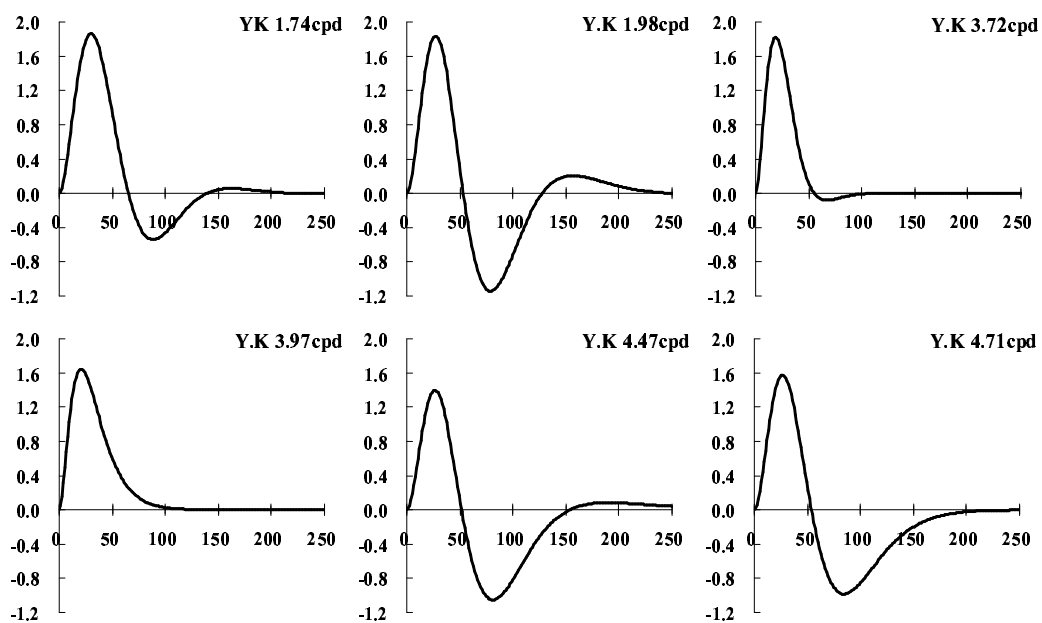


図 6.3 被験者 YF の両眼呈示条件でのインパルス応答関数．時間的足し合わせが得られた空間周波数条件のみインパルス応答関数を導出した．

### 6.3 両眼間の時間的足し合わせと両眼立体視

図 6.1 に示されるように，被験者 MH の場合，2.23 と 4.22 cpd の条件でその波形が大きく異なることが明らかとなった．他の空間周波数条件（1.74，3.72，4.71 cpd）では単眼呈示と両眼呈示でほとんど変化はないが，2.23 および 4.22 cpd の空間周波数に対する両眼呈示条件でのインパルス応答関数は抑制相をもたず，興奮相のみから構成される単相性を示した．同様に，図 6.2 に示される被験者 YK の場合，3.72 および 3.97 cpd の空間周波数に対する両眼呈示条件でのインパルス応答関数は抑制相をもたない単相性の波形を示した．両眼間の時間的な足し合わせは，輝度刺激光の空間周波数に依存して生じていることから，そこから計算されたインパルス応答関数は両眼性の空間周波数チャンネルの時間応答特性を反映していると考えられる．両眼性のインパルス応答関数に抑制相をもたない単相性を示すものが得られたことから，両眼間で時間的な相互作用をもつ空間周波数チャンネルには，抑制信号を伝達するものと伝達しないチャンネルが存在する可能性がある．ただし，同じ空間周波数をもつ刺激光に対するインパルス応答関数であっても，被験者によってその特性が異なる場合がある．被験者間の相異が，空間周波数チャンネルのバンド幅やピーク空間周波数の違いによる個人差で説明可能かどうか，今後明らかにする必要がある．

一方，等輝度色刺激（赤）を用いた実験の結果，両眼間の時間的足し合わせが存在しなかったことから，第 3 章で述べた手順でインパルス応答関数は導出することができない．これは，2 つの刺激光に対する視覚応答に時間的な相互作用が存在しなければインパルス応答関数を導出できないという時間的二刺激光法の実験原理によるものである．同様の理由から，輝度刺激を用いた実験であっても，両眼間の時間的足し合わせが得られたなかった条件ではインパルス応答関数は導出することができなかった．

本研究の結果から，両眼網膜像差による両眼立体視で，両眼性の空間周波数チャンネルが対応問題を解く手がかりとして用いられている可能性がある．今回テストした範囲の空間周波数条件では，2 cpd と 4 cpd 付近で両眼間で時間的足し合わせが存在しており，それ以外の空間周波数では両眼間の時間的な相互作用は存在しなかったことから，空間周波数チャンネルが空間フィルタの役目を果たし，輝度変化の左右網膜像の差位を空間フィルタの出力の差で取りだしているとするモデル [27] を支持する．



### 6.3 両眼間の時間的足し合わせと両眼立体視

また，時間的足し合わせが得られた空間周波数条件で，インパルス応答関数を導出した結果，単眼呈示条件とは異なり抑制相を持たない単相性を示す空間周波数条件が存在した．さらに，両眼呈示条件で等輝度色刺激を用いた場合，どの空間周波数条件でも時間的足し合わせは得られなかった．これらの特長の違いは，視覚系に存在する 2 つの経路（Magno 経路と Parvo 経路）の違いを反映している可能性がある．等輝度色刺激を用いた実験では，両眼間の時間的足し合わせが存在しなかったことから，色選択性を示す Parvo 経路には両眼性の空間周波数チャンネルは存在しない可能性が考えられる．しかしながら，輝度チャンネルにおいて，低空間周波数に感度をもつ Magno 経路から構成される空間周波数チャンネルと，高空間周波数に感度をもつ Parvo 経路から構成される空間周波数チャンネルの特性をそれぞれ反映しているとも考えられ，今回得られた結果が Magno / Parvo の経路特性を反映しているのか，あるいは輝度 / 色チャンネルの特性を反映しているのかについては，今後さらに検討していく必要がある．

# 第7章

## まとめ

本研究では、時間的二刺激光法を用いて単眼刺激呈示条件および両眼刺激呈示条件での時間的足し合わせから視覚系の輝度・色メカニズムにおける空間周波数チャンネルの時間特性について統合的に実験を行なった。

時間的二刺激光法を用いて、さまざまな空間周波数をもつ刺激に対するコントラスト検出閾値を測定し、得られたコントラスト検出閾値と刺激呈示間隔から、視覚系全体の時間特性を示すインパルス応答関数を導出し、その時間特性変化から空間周波数チャンネルの分離を検討した。

単眼輝度刺激呈示条件で得られたインパルス応答関数の時間特性は、およそ 2 cpd で最も早くなることを示した。単眼等輝度色刺激呈示条件で得られたインパルス応答関数の時間特性は、刺激光の色相によらず、およそ 4 cpd で時間的に早くなる傾向を示した。

本研究では、視覚系の空間周波数チャンネルが、ある特定の空間的足し合わせ範囲をもつ受容野のサイズによって構成されていると考えた「受容野モデル」を提案し、検証した。その結果、インパルス応答関数の時間特性変化は、受容野モデルによって定性的に説明可能であることを示し、輝度情報伝達経路には 2 cpd 付近で、色情報伝達経路には 4 cpd 付近で空間周波数チャンネルの切り替わりが存在することを示した。

さらに、時間的二刺激光法を応用した両眼刺激呈示実験では、輝度情報伝達経路でのみ、2 cpd と 4 cpd で両眼間の時間的足し合わせが存在することを示し、等輝度色刺激を用いた実験では、両眼間で時間的足し合わせは存在しなかった。本実験の結果、両眼性の空間周波数チャンネルは輝度情報伝達経路にのみ存在することを示した。

# 謝辞

本研究を行なうにあたり，指導教員である篠森敬三教授には 7 年もの長期に渡り，多大な助力と助言を頂きました．私が篠森研究室に配属されてからこれまでの先生のご指導に対して，ここに深く感謝の意を示します．篠森敬三教授の下で，研究活動に関する指導はもちろん，大学院生としての精神面での指導も受けることができたことを幸せに思います．私が体調不良になった際にはご迷惑をおかけしたこともあり，大変申し訳なく思っております．妙な縁で地域コンソーシアムのプロジェクトでお世話になることもあるかもしれません．社会人としてさらに成長した姿をお見せできるよう努力していきたいと思っております．

高知工科大学情報システム工学科の教員の皆様にも深く感謝致します．学部の頃より副査を快諾して頂きました岡田守教授と福本昌弘助教授には，研究に関する有益な助言を数多く頂き，深く感謝致します．また，本論文の副査を快諾して頂き，また，研究に関する様々なアドバイスを頂いた西谷隆夫教授，菊池豊助教授にも深く感謝致します．

研究活動のみならず，充実した学生生活を過ごす上で多くの助言を頂きました高知工科大学情報システム工学科の妻鳥貴彦講師に感謝致します．

本研究を行なうにあたり，実験に参加して頂いた被験者の方々に感謝致します．特に，研究の当初から実験に参加して頂いた深田良尚君には，深く感謝致します．体調を気遣いながら長期に渡る実験に参加して頂き，本当にありがとうございました．共に篠森研究室の一期生として，研究室生活を送ることができたことに感謝致します．これまでの篠森研究室に所属したメンバーにも感謝致します．

高知工科大学情報システム工学科を支えておられる情報システム工学科秘書室の村上加織さん，坂本さん，松谷さんに感謝致します．特に，村上加織さんには，開学以来 9 年間，研究活動以外でも大変お世話になりました．本当にありがとうございました．

最後に，9 年間の学生生活を支援して頂き，学費と生活費の援助をしてくれた両親と精神的に支えてくれた兄姉，そしてわが家の愛犬に深く感謝いたします．

## 参考文献

- [1] Andrew B. Watson “*Probabillity summation over time,*” *Vision Research* **19**, 515 - 522, 1979.
- [2] Georgeson M.A. “*Temporal properties of spatial contrast vision,*” *Vision Research* **27**, 765 - 780, 1987.
- [3] Hugh R. Wilson David K. McFarlane and Gregory C. Phillips “*Spatial frequency tuning of orientation selective units estimated by oblique masking,*” *Vision Research* **24**, 873 - 882, 1983.
- [4] Kelly D. H. “*Visual responses to time-depedent stimuli.I. Amplitude sensitivity measurements,*” *J. Opt. Soc. Am.* **51**, 422 - 429, 1961.
- [5] van Ness, F. L. and Bouman, M. A. “*Spatial modulation transfer in the human eye,*” *J. Opt. Soc. Am.* **57**, 401 - 406, 1967.
- [6] K. T. Mullen “*The contrast sensitivity of human colour vision to red-green and blue-yellow chromatic gratings,*” *Journal of Physiology*, **359**, 381 - 409, 1985.
- [7] G. T. Plant “*Tempral properties of normal and abnormal spatial vision,*” In *Vision and Vision Dysfunctions* **4**, Limits of Vision, Regan (ed.), 43 - 63, 1991.
- [8] C. Blackmore and F. W. Campbell “*On the existence of neurons in the human visual system selectively sensitive to the orientation and size of retinal images,*” *Journal of Physiology* **203**, 237 - 260, 1969.
- [9] K. K. De Valoia “*Spatial frequency adaptation can enhance contrast sensitivity,*” *Vision Research* **17**, 1057 - 1065, 1977.
- [10] C. F. Stromeyer III and B.Julesz “*Spatial-frequency masking in vision: critical bands and spread of masking,*” *Journal of the Optical Society of America* **62**, 1221 - 1232, 1972.

## 参考文献

- [11] M. Ikeda “*Temporal summation of positive and negative flashes in the visual system,*” J. Opt. Soc. Am. **55**, 1527 - 1534, 1965.
- [12] R. W. Bowen “*Two pulses seen as three flashes: A superposition analysis,*” Vision Research **29**, 409 - 417, 1989.
- [13] K. Uchikawa and T. Yoshizawa “*Temporal responses to chromatic and achromatic change inferred from temporal double-pulse integration,*” J. Opt. Soc. Am. A **10**, 1697 - 1705, 1993.
- [14] Watson A. B. “*Derivation of the impulse response: comments on the method of Roufs and Blommaert,*” Vision Res., **22** 1335 - 1337, 1982.
- [15] Swanson W. H., Ueno, T. Smith, V. C. Pokorny J. “*Temporal modulation sensitivity and pulse-detection thresholds for chromatic and luminance perturbations,*” J. Opt. Soc. Am. A **4**, 1992 - 2005, 1987.
- [16] Keizo Shinomori and J. S. Werner “*Senescence of the temporal impulse response to a luminous pulse,*” Vision Res., **43** 617 - 627, 2003
- [17] D. C. Burr and M. C. Morrone “*Impulse-response functions for chromatic and achromatic stimuli,*” J. Opt. Soc. Am. A **10**, 1706 - 1713, 1993.
- [18] Ohtani Y. and Ejima Y “*Relation between flicker and two-pulse sensitivities for sinusoidal gratings*” Vision Res., **28**, 145 - 156, 1988.
- [19] Hubel, D.H. and Wiesel, T.H. “*Functional architecture of macaque monkey visual cortex,*” Proc. Roy. Soc. Lond. **198B**, 1 - 59, 1977.
- [20] Y. Fukada, H.Sawai, M. Watanabe and K. Morigiwa “*Nasotemporal overlap of crossed and uncrossed retinal ganglion cell projections in the Japanese monkey (macaca fuscata),*” Journal of Neuroscience, **9**, 2353 - 2373, 1989.
- [21] D. H. Kelly “*Adaptation effects on spatio-temporal sine-wave thresholds,*” Vision Research, **12**, 89 - 101, 1971.
- [22] B.Julesz “*Binocular depth perception of computer generated patterns,*” Bell System

## 参考文献

- Technical Journal, **39**, 1125 - 1162, 1960.
- [23] R. Shumer and L. Ganz “*Independent stereoscopic channels for different extents of spatial pooling,*” Vision Research, **19**, 1303 - 1314, 1979.
- [24] H. S. Smalman and D. I. A. MacLeod “*Size- disparity correlation in stereopsis at contrast threshold,*” Journal of the Optics Society of America, **A11**, 2169 - 2183, 1994.
- [25] D. Marr and M. Pettet “*A computational theory of human stereo vision,*” Proceedings of the Royal Society, London, **B241**, 42 - 46, 1982.
- [26] S. B. Pollard, J. E. W. Mayhew and J. P. Frisby “*A stereo correspondence algorithm using a disparity gradient limit,*” Perception, **14**, 449 - 470, 1985.
- [27] I. Ohzawa, G. G. De Angelis and R. D. Freeman “*Stereoscopic depth discrimination in the visual cortex: neural network finding binocular correspondence,*” Biological Cybernetics, **31**, 209 - 217, 1990.