

平成 14 年度
修士学位論文

輝度インパルス応答変化による
視覚空間周波数チャンネルの分離

Visual Spatial-Frequency-Tuned Channels
Separated by a Shape of Luminous Impulse Response
Functions

1055111 平山 正治

指導教員 篠森 敬三

2003 年 2 月 23 日

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻
情報システム工学コース

要 旨

輝度インパルス応答変化による 視覚空間周波数チャンネルの分離

平山 正治

情報技術の発達によって機械の性能限界による制限は解決しているにも関わらず、マシンと人間とのインタフェース部分の改良は十分とは言えない。マシン性能が格段に向上した現在では、人に優しいマン・マシンインタフェースの開発が望まれている。そのようなインタフェースを開発するに当たり、人の情報処理機構を理解することが重要であり、人の特性に合わせたインタフェースの開発が必要である。

本研究では、人の情報処理機構の中でも視覚情報処理に着目した。視覚情報処理の備える特性の 1 つとして、時空間特性がある。この空間周波数特性は、視覚系に複数存在するとされる空間周波数チャンネルによって決定されるが、これまでの研究ではチャンネル数の特定には至っていない。

そこで本研究では、異なる空間周波数を持つ輝度グレーティングを使用して、インパルス応答関数 (IRFs) を測定することによって空間周波数チャンネルの分離を試みる。刺激の空間周波数により、検出に関わる空間周波数チャンネルが切り替わるため、IRFs に変化があらわれると考えたからである。

IRFs を求める方法としては、2 刺激光法を採用し、コントラスト閾値を測定する。2 刺激の刺激呈示間隔と、コントラスト閾値の変化から、IRFs を計算することが可能である。

IRFs は視覚系の時間特性を直接的に示す関数である。よって、IRFs の変化によって閾値検出に関わる空間周波数チャンネルを分離することが可能であると考えた。

刺激には空間的正弦波グレーティングにガウス関数の包絡線をかけたものを採用し、各

ISI (Inter Stimulus Interval) でのコントラスト検出閾値を求め、最小位相の仮定を必要としない Burr and Morrone のモデル式を用いて輝度インパルス応答を導出した。刺激の空間周波数は、0.43cpd (Gauss 関数自身の空間周波数) から 4.90 cpd までの範囲で 11 ヶ所を採用し、実験を行なった。得られた輝度インパルス応答関数は視覚系の時間特性を直接的に反映するため、本研究では輝度 IRFs の強度が 0 となる時間 (0 交差時間) を比較した。

4 人の被験者の実験から、輝度 IRFs の 0 交差時間は 2.23cpd 周辺でもっとも早くなる結果 (平均 26ms) を得た。加えて、低空間周波数領域では遅く (48ms)、高空間周波数領域ではやや早い (38ms) という結果を得た。

輝度 IRFs の 0 交差時間の変化を説明するために、本研究では Power Ratio Change Model (PRC モデル) と Receptive Field Model (受容野モデル) を検討した。

PRC モデルは、輝度 IRFs を構成する興奮信号と抑制信号との位相差がその空間的受容野構造からあらかじめ決定しているという仮定の下に、興奮相と抑制相の強度比率を比較したものである。位相差が一定であるので、時間遅れを伴う抑制相の強度が大きくなれば見かけ上、0 交差時間は早くなることが説明できる。一方、受容野モデルでは、閾値検出にかかわる空間周波数チャンネルが複数存在し、その中で、もっとも感度の高いものによって刺激の検出がなされると考える。この空間周波数チャンネルは、異なる受容野サイズを持っているため、刺激の空間周波数に応じて閾値を決定するチャンネルが切り替わる。そして、それぞれの空間周波数チャンネルがインパルス応答関数の時間特性を決定すると考える。

実験から求められた輝度 IRFs を解析した結果、2.23cpd 周辺では、輝度 IRF の抑制相の強度が高い値を示していた。興奮相の強度も同様に、2.23cpd 周辺で増加傾向を示した。さらに、微弱ではあるものの、4cpd 周辺でも同様の傾向がみられた。

輝度 IRF の時間特性を PRC モデルと受容野モデルに基づいて解析した結果、2cpd 周辺で受容野特性の切り替わりが存在していることが示された。これは、空間周波数チャンネルの切り替わり点が存在することを示しており、輝度 IRFs の変化から空間周波数チャンネルを分離することができたことになる。

キーワード 輝度インパルス応答関数, 空間周波数チャンネル

Abstract

Visual Spatial-Frequency-Tuned Channels Separated by a Shape of Luminous Impulse Response Functions

Masaharu Hirayama

It is important to investigate the mechanisms of human visual information processing, especially for development of better human-machine interface, because the recent development of technologies enable to spend much more resources for the interface itself. For that purpose, I studied the spatial property of human vision.

I tried to separate spatial channels in human vision by measuring luminous impulse response functions (IRFs) with gratings in different spatial frequencies. Because the IRFs directly indicate temporal property of visual system, I assumed that the shape of IRFs would be influenced by the spatial frequency of gratings. It is expected that human visual system has some spatial channels. Thus, IRFs are not necessarily the same in different spatial channels. These spatial channels determine the spatial property of human vision but the number of these channels are still under discussion.

To obtain the luminous IRFs in various spatial frequencies, I used the double-pulse method with sinusoidal gratings in a certain spatial frequency (I used 11 different frequencies in a range from 0.43 to 4.90cpd). The gratings were displayed successively in a certain inter stimulus interval (ISI) (a range from 6.7 to 180ms). Thresholds for detection were measured in different ISIs.

The stimuli were radial sinusoidal gratings with a certain spatial frequency (a range

from 0.43 to 4.90cpd). The stimulus was displayed successively at variable inter stimulus interval (a range from 6.7 to 180ms). I used Burr and Morrone's model equation without the assumption of minimum phase to predict the IRFs.

As the temporal property of the IRFs, I mainly compared the data in terms of 0 crossing time.

As the result from four observers, the zero crossing time of luminous IRFs tend to be fastest at around 2 cycle per degree (cpd) (the average in all observers was 28msec). In lower spatial frequencies, it became slower (the average was 48msec). In higher spatial frequencies, it also became slower but faster than the one in lowest frequencies (the average was 38ms). The ratio of the inhibitory phase amplitude to the excitatory phase amplitude and the amplitude of the excitatory phase were also higher at around 2cpd. In addition, although it was feeble, the same tendency was obtained around 4cpd.

In order to explain the change of the temporal property of the IRFs, we made two models. One was the power ratio change model, the other was the receptive-field model. In the power ratio change model (PRC model), it is assumed that the phase shift between positive phase and negative phase in the IRFs is constant because the horizontal distance in positive and negative area in a receptive field has been determined. In this model, the power ratio, which was defined as the ration of the inhibitory phase amplitude to the excitatory phase amplitude would influence to the temporal property of the IRFs. In the receptive-field model, there will be two or more spatial frequency channels which determine the detection thresholds. The thresholds at a certain spatial frequency will be determined by the amount of the output from one channel, which is the most sensitive at that frequency.

As the results of these analyses to the IRFs based on the PRC and RF models, we found that the turning point of the spatial-frequency-tuned channels is at around 2.23cpd. This suggests that spatial frequency channels can be separated by the difference

of luminous IRFs and the turning point of spatial frequency channels can exist on around 2cpd in human visual system.

key words Impulse response function, Spatial-frequency-tuned channel

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	背景	1
1.2	目的	2
1.3	視覚システムにおける閾値検出	2
1.4	刺激の時空間特性が与える影響	4
1.4.1	コントラスト感度関数と空間周波数チャンネル	7
第 2 章	実験手法	11
2.1	視覚心理物理の実験刺激について	11
2.2	時間的二刺激法	12
2.3	刺激	13
2.4	実験装置	14
2.5	実験前の測光	16
2.6	被験者について	17
2.7	実験手順	17
2.8	データ解析	20
2.8.1	Burr and Morrone のモデル式	20
2.8.2	確率的足し合わせを考慮した閾検出モデル	20
2.8.3	モデルとデータのフィッティング	21
第 3 章	結果	23
3.1	被験者 M.H. の実験結果	23
3.2	被験者 Y.F. の実験結果	29
3.3	被験者 T.T. の実験結果	35

3.4	被験者 T.S. の実験結果	41
3.5	従来研究との比較	45
3.6	コントラスト閾値データのばらつき	46
第 4 章	考察	47
4.1	輝度 IRFs とコントラスト感度関数	47
4.1.1	被験者 M.H. のコントラスト感度関数	47
4.1.2	被験者 Y.F. のコントラスト感度関数	51
4.1.3	被験者 T.T. のコントラスト感度関数	54
4.1.4	被験者 T.S. のコントラスト感度関数	57
4.2	過去の研究との比較	59
4.2.1	誤りであると考えられるコントラスト感度関数	60
4.3	輝度 IRFs の時間特性	61
4.4	Power Ratio Change Model (PRC Model)	64
4.5	Receptive-Field Model (受容野モデル)	66
4.6	考察まとめ	72
4.7	今後の課題	75
第 5 章	結論	77
	謝辞	79
	参考文献	81
付録 A	輝度 IRFs のパラメータとデータ値	83

目次

1.1	閾値検出器	3
1.2	一次視覚野	6
1.3	多重チャンネルモデル	7
1.4	コントラスト感度の測定	8
2.1	増分閾値の測定手法	11
2.2	二刺激法の刺激呈示と視覚系の応答	12
2.3	CRT ディスプレイに呈示される刺激と固視線	14
2.4	暗室 A356 内の様子	15
2.5	ボタンスイッチと刺激呈示位置	16
2.6	実験の流れ図	18
2.7	呈示される刺激の時間的变化	18
2.8	実験データサンプル	19
2.9	実験データとモデル fit	21
2.10	インパルス応答関数	22
3.1	M.H. 0.43cpd	24
3.2	M.H. 0.89cpd	24
3.3	M.H. 1.34cpd	25
3.4	M.H. 1.78cpd	25
3.5	M.H. 2.23cpd	26
3.6	M.H. 2.67cpd	26
3.7	M.H. 3.12cpd	27
3.8	M.H. 3.56cpd	27

3.9 M.H. 4.01cpd	28
3.10 M.H. 4.45cpd	28
3.11 M.H. 4.90cpd	29
3.12 Y.F. 0.43cpd	30
3.13 Y.F. 0.89cpd	30
3.14 Y.F. 1.34cpd	31
3.15 Y.F. 1.78cpd	31
3.16 Y.F. 2.23cpd	32
3.17 Y.F. 2.67cpd	32
3.18 Y.F. 3.12cpd	33
3.19 Y.F. 3.56cpd	33
3.20 Y.F. 4.01cpd	34
3.21 Y.F. 4.45cpd	34
3.22 Y.F. 4.90cpd	35
3.23 T.T. 0.43cpd	36
3.24 T.T. 0.89cpd	36
3.25 T.T. 1.34cpd	37
3.26 T.T. 1.78cpd	37
3.27 T.T. 2.23cpd	38
3.28 T.T. 2.67cpd	38
3.29 T.T. 3.12cpd	39
3.30 T.T. 3.56cpd	39
3.31 T.T. 4.01cpd	40
3.32 T.T. 4.45cpd	40
3.33 T.T. 4.90cpd	41
3.34 T.S. 0.43cpd	42

目次

3.35 T.S. 0.89cpd	42
3.36 T.S. 1.34cpd	43
3.37 T.S. 2.23cpd	43
3.38 T.S. 3.12cpd	44
3.39 T.S. 4.01cpd	44
3.40 T.S. 4.90cpd	45
4.1 被験者 M.H. の CSF (0.43 , 0.89cpd)	48
4.2 被験者 M.H. の CSF (1.34 , 1.78cpd)	48
4.3 被験者 M.H. の CSF (2.23 , 2.67cpd)	49
4.4 被験者 M.H. の CSF (3.12 , 3.56cpd)	49
4.5 被験者 M.H. の CSF (4.01 , 4.45cpd)	50
4.6 被験者 M.H. の CSF (4.90cpd)	50
4.7 被験者 Y.F. の CSF (0.43 , 0.89cpd)	51
4.8 被験者 Y.F. の CSF (1.34 , 1.78cpd)	51
4.9 被験者 Y.F. の CSF (2.23 , 2.67cpd)	52
4.10 被験者 Y.F. の CSF (3.12 , 3.56cpd)	52
4.11 被験者 Y.F. の CSF (4.01 , 4.45cpd)	53
4.12 被験者 Y.F. の CSF (4.90cpd)	53
4.13 被験者 T.T. の CSF (0.43 , 0.89cpd)	54
4.14 被験者 T.T. の CSF (1.34 , 1.78cpd)	54
4.15 被験者 T.T. の CSF (2.23 , 2.67cpd)	55
4.16 被験者 T.T. の CSF (3.12 , 3.56cpd)	55
4.17 被験者 T.T. の CSF (4.01 , 4.45cpd)	56
4.18 被験者 T.T. の CSF (4.90cpd)	56
4.19 被験者 T.S の CSF (0.43 , 0.89cpd)	57

4.20 被験者 T.S の CSF (1.34 , 2.23cpd)	57
4.21 被験者 T.S の CSF (3.12 , 4.01cpd)	58
4.22 被験者 T.S の CSF (4.90cpd)	58
4.23 正弦波グレーティングから得られた CSF	59
4.24 エラーと思われる輝度 IRF と CSF	61
4.25 IRF の時間特性の比較点	62
4.26 輝度 IRFs の 0 交差時間の比較	63
4.27 Power Ratio Change Model	64
4.28 IRFs の興奮相と抑制相の強度比率	65
4.29 Receptive-Field Model (受容野モデル)	67
4.30 被験者 M.H. の輝度 IRFs の興奮相の振幅	69
4.31 被験者 Y.F. の輝度 IRFs の興奮相の振幅	69
4.32 被験者 T.T. の輝度 IRFs の興奮相の振幅	70
4.33 被験者 T.S. の輝度 IRFs の興奮相の振幅	71
4.34 輝度 IRFs の 0 交差時間比較	73
4.35 輝度 IRFs の興奮相と抑制相の強度比率	74
4.36 IRFs の興奮相の強度変化	75

表目次

A.1	パラメータ (M.H.)	83
A.2	パラメータ (Y.F.)	84
A.3	パラメータ (T.T.)	85
A.4	パラメータ (T.S.)	86

第 1 章

はじめに

1.1 背景

情報技術の発達によって、機械の性能限界による制限は解決しているにも関わらず、マシンと人間とのインタフェース部分の改良は十分とは言えない。例えば、キーボードの配列や CRT ディスプレイの設計、携帯電話の操作キーなどは従来から使用されているインタフェースに慣れているという理由から、あまり改善が進んでいない。また、デスクトップ画面の配色や、信号の色、車のカラーリングなどに関しては、まだまだ見やすさや安全性よりも、デザイン性やコストが優先されている。マシン性能が格段に向上した現在では、人に優しいインタフェースの開発が望まれる。そのようなインタフェースを開発するにあたり、人の情報処理機構を理解することが重要であり、人の特性に合わせたインタフェースの開発が必要である。

人が外界から受ける情報のおよそ 80% が視覚情報と言われている。一方で、情報機器からの出力もほとんどがディスプレイに代表される表示装置に出力されていることから、本研究では、人の情報処理機構の中でも、視覚情報処理に着目する。

視覚情報章の備える特徴の 1 つとして、時空間特性が挙げられる。これは、視覚系が追従できる時間周波数や、判別可能なグレーティングの空間周波数の特性のことである。視覚系における時空間周波数特性を明らかにすることで、動画装置の圧縮処理や、HDTV(高品質テレビ) に代表されるような新しい製品に応用することが可能である。

人間の視覚特性の 1 つとして、時空間特性がある。それを調べることによって、視覚系が追従できる時間周波数や、判別可能なグレーティングの空間周波数を明らかにする。

それらの知見より，動画像の圧縮処理や HDTV に代表されるような新しい製品における応用が可能となるであろう．

1.2 目的

2 刺激の相互干渉による閾値変化から，インパルス応答関数 (Impulse Response Function) を導出する．IRFs は，視覚系の時間特性を直接的に表す関数である．閾値検出に関わる空間周波数チャンネルの時間特性が IRFs の時間特性に反映され，その変化によって複数の空間周波数チャンネルへ分離することができるのではないかと考えた．

次の節ではまず，視覚系における閾値決定メカニズムを説明する．さらにに，先行する研究から明らかにされた，視覚系の生理的なメカニズムについて説明する．眼球光学系を通過して入射してきた光刺激は，網膜上の視細胞で電気パルス信号に変換され，視神経を通過し，大脳視覚野に伝達される．この段階でどのような情報処理がなされているかを説明する．

1.3 視覚システムにおける閾値検出

心理物理研究における視覚系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，ノイズ源，閾値検出器を備えた線形モデルを仮定し，研究が行なわれてきた．このモデルでは，入力信号 $I(t)$ は N 段ある空間周波数フィルタに並列に入力され，それぞれのフィルタからの出力 $RN(t)$ にノイズが加算された後，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) TD で検出される．

1.3 視覚システムにおける閾値検出

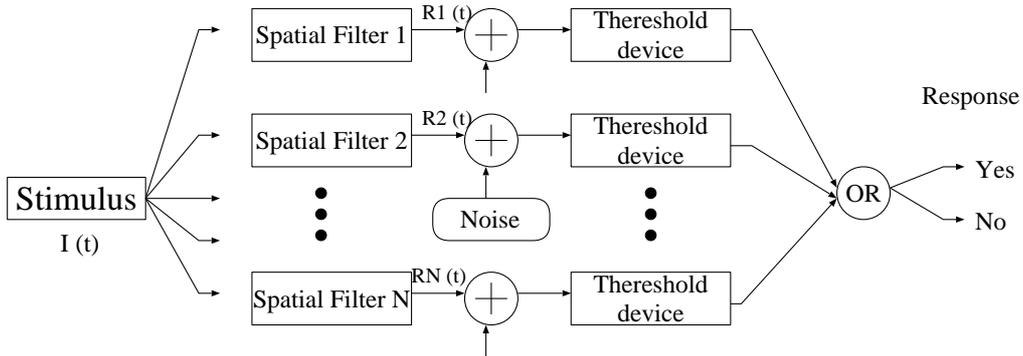


図 1.1 入力信号 $I(t)$ はいくつかある空間周波数フィルタを通過し，それぞれノイズが加算される．それぞれの応答は閾値検出器で検出される．

このような線形フィルタモデルは，実験から得られる 2 刺激感度，フリッカ感度などから，異なる時間特性間の相互関係が定量的に説明可能 [1] であることから広く支持されている．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． A は比例定数， τ は時定数である．

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

図 1.1 において，モデルの第一段階での出力 $R_n(t)$ は， $I(t)$ と $H(t)$ のたたみ込みとなり，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持つので，閾値検出器の入力と出力の関係は確率的加重効果から式 (1.3) により，コントラスト検出閾 (Detection Threshold) を予測することができる．

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

ここで， β はノイズ特性によって決定される定数である．

図 1.1 に示されたモデルでは，線形要素の信号にノイズ成分が加算される．このノイズは確率的な性質を持つため，閾値検出器 TD の入力から出力の間の過程は確率的過程として

扱うことが可能である．系全体の感度 S は，式 (1.4) で与えられ，これは，式 (1.3) の逆数となる．

$$S = \left[\int_0^T |R(t)|^\beta dt \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (1.4)$$

視覚系の閾値決定メカニズムは，Wilson[1] によって次のようなモデルが提唱されている．視覚系の応答 $R(t)$ を，ある時間 t_i に対する $R(t_i)$ のつながりとみなし， P_i をその時刻 t_i で $R(t_i)$ が閾値を越える確率とする．どの時刻 t_i でも $R(t_i)$ が閾値を越えれば応答 $R(t)$ 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 (1.5) で示される．

$$P(t) = 1 - (1 - r)\Pi_i(1 - P_i) \quad (1.5)$$

ただし， r はチャンスレベルによる確率である．確率 P_i は，式 (1.6) で示される知覚確率である．

$$P_i = 1 - (1 - r) \exp \{-|R(t_i)|^\beta\} \quad (1.6)$$

式 (1.6) を式 (1.5) に代入し，連続関数としてあらわすと式 (1.7) となる．

$$P = 1 - (1 - r) \exp \left\{ - \int_0^T |R(t)|^\beta dt \right\} \quad (1.7)$$

式 (1.7) において， T は $R(t) = 0$ となる時間で，検出確率 P は，刺激光の強度 $I(t)$ の単調増加関数となる．よって，刺激光の強度が強ければ強い程，検出確率は 1 に近付くことがわかる．

1.4 刺激の時空間特性が与える影響

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，視覚系の応答にどのような変化が生じるであろうか．ヒトの視覚系における時空間特性として，フリッカ刺激を用いた時間周波数特性と，空間的グレーティング刺激を用いた空間周波数特性が研究されている．

Kelly (1961) は，フリッカ刺激のちらつきに追従できる時間周波数を測定した．その結果，網膜照度が 77td 以上の明るい条件では 20Hz 付近にピークを持つバンドパス型で，網

1.4 刺激の時空間特性が与える影響

膜照度が低い条件では，ピークは低周波数側にシフトし，暗くなるにしたがってピークを持たないローパス型であることを示した．

空間周波数特性は，空間的なグレーティングパターンのコントラスト閾値によって測定されている (van Nes and Boumann, 1967)．輝度グレーティングのコントラスト閾値は，網膜照度が 90td 以上の明るい条件では 5cpd 付近にピークを持つバンドパス型で，網膜照度が低くなると，ピークは低周波数側にシフトし，さらに暗くなるとピークを持たないローパス型となる．

視覚系の時空間特性の変化は，受容野を構成する視細胞や，視細胞で発生した電気信号を伝達する神経系の特性によるものだと考えられる．網膜上の視細胞（桿体および 3 種類の錐体）で発生した信号は，視神経を通り眼球外へ伝達される．視神経は視交差を通過し，視索となり，その終端で外側膝状体 (LGN) と結合する．ヒトの外側膝状体は 6 層構造で，各層は左右どちらかの眼からの単眼入力を受け付ける．つまり，各網膜の右半分 (左視野) の情報は右 LGN へ，左半分 (右視野) の情報は左 LGN へと入力される．

LGN の第 1 層と第 2 層は大きな細胞体を持つニューロンで構成されており，大細胞層 (magnocellular layer) と呼ばれる．第 3 層から第 6 層までは，小さな細胞体を持つニューロンで構成され，小細胞層 (parvocellular layer) と呼ばれる．網膜で広範囲に樹状突起を広げているパラソル神経節細胞が大細胞層に経路 (magnocellular pathway) を形成し，樹状突起範囲の狭いミジェット神経節細胞が小細胞層に経路 (parvocellular pathway) を形成している．

大細胞層を形成するパラソル神経節細胞は，広い範囲からの信号を集めるため空間解像度が低く，時間解像度が高い特性を持ち，小細胞層を形成するミジェット神経節細胞は，空間的な信号の足し合わせ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持つ．さらに，ミジェット神経節細胞は，色対立型と呼ばれる反応を示すため，色覚情報を伝達している．

図 1.2 に示すように，大細胞層のニューロンは，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 .

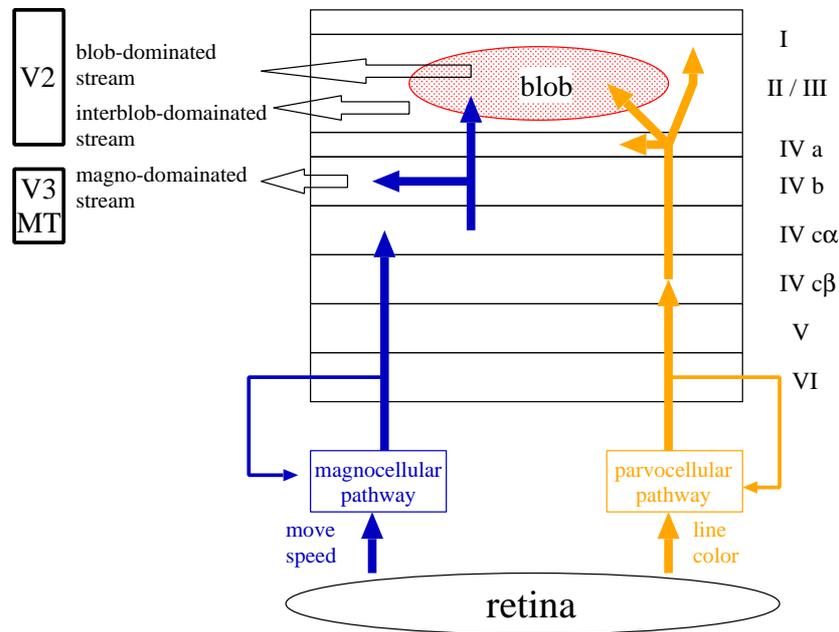


図 1.2 網膜から一次視覚野への入力 . 情報成分によって M 経路と P 経路に分離され , 一次視覚野へ入力される . 動きや早さに関する情報は M 経路を通り , V3 および MT (中側頭葉皮質) への出力となる . 形や色 , 形態視の経路は P 経路を通り , V2 へと出力される .

このことは , 視覚系へ入力された情報が , 色 , 形 , 動きなどが一次視覚野 (V1) で処理されるよりも前に , 網膜から大脳視覚野に至る時点で既に処理が行なわれていることを示している .

また , 視覚系の時空間周波数特性には , 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知られている . 図 1.3 に多重チャンネルモデルの概略図を示す . 時間的に低周波の領域では空間周波数方向に多数のチャンネルが存在し , 逆に , 高い時間周波数の領域では空間周波数チャンネルは少ない . これは , 時間解像度と空間解像度の間に , トレードオフの関係があることを示しているが , チャンネルがいくつ存在するかということには , 明確な答えは出ていない . 特に空間周波数チャンネルに関しては , テスト刺激や順応刺激の周波数に感度のピークを持つチャンネル特性が得られるために , 実験によってチャンネル数を決定す

1.4 刺激の時空間特性が与える影響

るのが難しい。

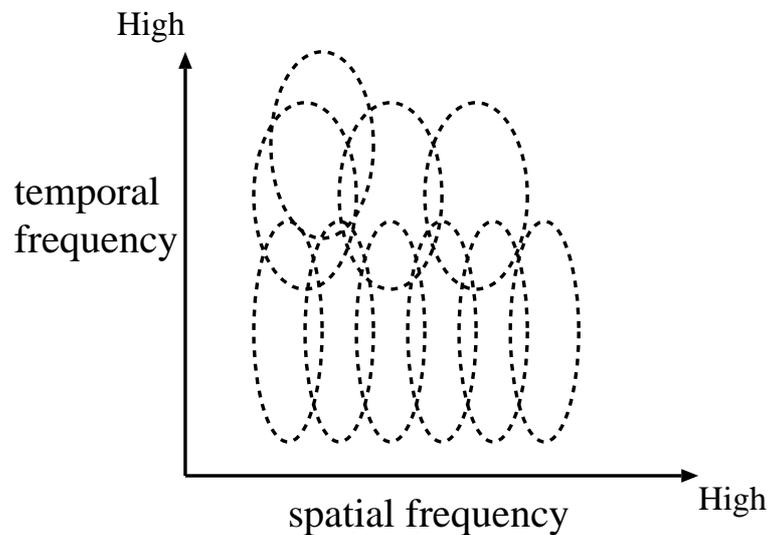


図 1.3 視覚系には複数の時空間周波数チャンネルが存在する。空間周波数チャンネルの数と比較して時間周波数チャンネルの数は少ないと言われるが、その数は明らかでない。

1.4.1 コントラスト感度関数と空間周波数チャンネル

視覚系の空間周波数特性を調べるために、正弦波を刺激としそのコントラスト閾値から求めたコントラスト感度関数 (Contrast Sensitivity Function) を用いた研究がある。コントラスト閾値を測定する際、図 1.4 に示されるコントラストが刺激として用いられ、被験者が知覚できる最小のコントラストをコントラスト閾値として求める。

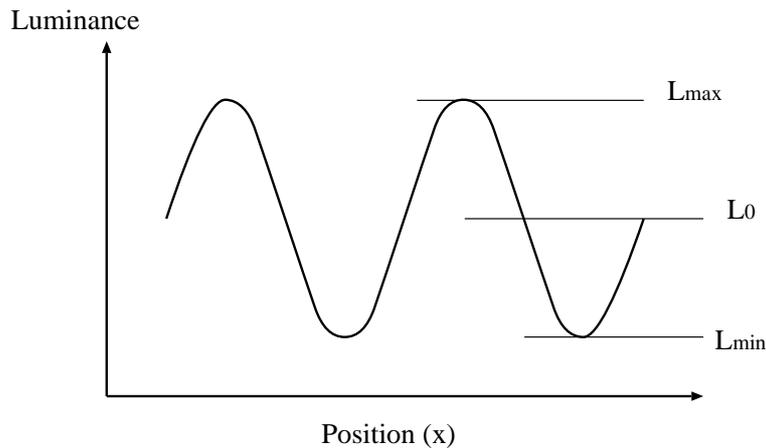


図 1.4 コントラスト感度を測定する際に使用する刺激．コントラスト感度は，コントラスト閾値の逆数として求めることができる．

$$\text{コントラスト} = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}}$$

明るい環境での CSF は，バンドパス型を示し，3～5cpd にピークを持つ．暗い環境でのコントラスト感度関数は，ローパス型に変化する．このような特性の変化は，明るい環境下では画像のエッジを強調する効果を，暗い環境下では，より広い範囲から信号を集め感度を向上させることを意味するものである．

順応効果を利用した Blakemore and Campbell (1969) によると，空間周波数チャンネルは 3cpd にピークをもつ閾値上昇を得ており，同様に De Valois (1977) は，1.19cpd の順応刺激に対し，1cpd 付近に閾値の上昇の最大を示す結果を得ている．

本研究では，視覚系に閾値検出に関わる空間周波数チャンネルが複数存在し，そのなかでもっとも感度の高いチャンネルによって刺激の検出がなされると考えた．空間周波数チャンネルは，ある特定の空間的な受容野サイズを持ち，刺激の空間周波数に応じて閾値決定チャンネルは切り替わる．そして，それぞれの空間周波数チャンネルのもつ時間特性がインパルス応答関数の時間特性を決定すると考えられる．

視覚系の時空間周波数特性を明らかにすることは，今後の表示装置開発に有益となるだけでなく，既存の表示手法を改良する指針となる．利用者に注意を促す表示法，警告表示，緊

1.4 刺激の時空間特性が与える影響

急を要する表示手法など，信号の重要度や危険度，緊急性に応じた表示手法を考える際に有益である．

第 2 章

実験手法

本章では、実験に使用した刺激、装置、被験者、手順について説明する。また、実験から得られた閾値データの解析手法と、IRFs の導出過程についても説明する。

2.1 視覚心理物理の実験刺激について

視覚実験を行なうにあたって、一番の課題が刺激呈示の手法である。刺激呈示が短時間である場合、瞬間的な刺激の明るさをマッチングすることは不可能であるため、図 2.1 に示すような増分閾法の手法が一般的に用いられ閾値が測定されている。この手法は、条件光の on-set から刺激光の on-set までの時間間隔 t を変数とする刺激の呈示手法である。

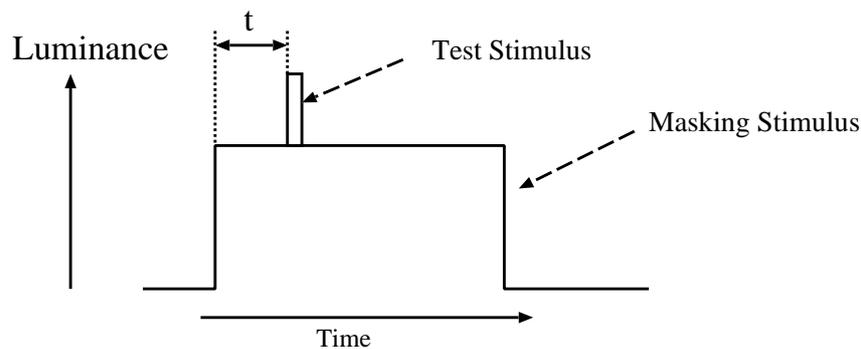


図 2.1 刺激光を条件光に重ねて与える。条件光はマスキング光、または順応光とも呼ばれる。

近年の視覚研究では、刺激呈示に CRT ディスプレイを用い、刺激の生成にコンピュータを使用することが多いため、刺激の呈示時間や呈示時間間隔を正確に制御することが可能となっている。しかしその一方で、CRT ディスプレイでは RGB 色空間しか扱えない、色収

差が存在する，画面描画がフリッカである点などの問題が存在するため，実験目的に合わせて調整あるいは制御する必要がある．

2.2 時間的二刺激法

本研究では，刺激呈示手法として時間的二刺激法を用いた．時間的二刺激法 (Temporal Double-pulse Method) とは，ある時間間隔において 2 つの刺激光を呈示する手法である．呈示間隔が短い場合，2 つの刺激は相互干渉を生じ閾値が下がり (感度が向上し)，呈示間隔が十分に長い場合，2 つの刺激の相互干渉はない．

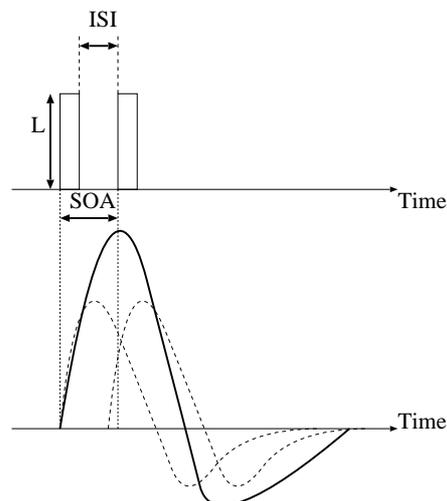


図 2.2 SOA (Stimulus Onset Asynchrony) は，first flash の立ち上がりから second flash の立ち上がりまでの時間間隔，ISI は，first flash の立ち下がりから second flash の立ち上がりまでの時間間隔である．ISI もしくは SOA が短ければ，それぞれの応答は足し合わされ，時間間隔が十分に大きければ相互干渉は起きない．

図 2.2 において，刺激の呈示間隔は SOA もしくは ISI (Inter Stimulus Interval) で与えられ，呈示間隔を変化させることで 2 つの刺激による足し合わせの影響を予測することが可能である．

2 刺激光の呈示間隔を t とおき，その時の知覚確率を $W(t)$ とする．2 刺激光の呈示間隔

2.3 刺激

が十分大きく，それぞれ別の刺激と考えてよい場合を $W(\infty)$ とすると，

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

となる $q(t)$ が定義できる．これは，2 刺激光の相互作用の度合を示す．2 つの刺激光が同時に ($t = 0$) 呈示された時 $q(t) = 1$ となり，完全時間的足し合わせとなる．逆に 2 つの刺激光がまったく干渉しない程十分に大きい ($t = \infty$) 時， $q(t) = 0$ となり，時間的足し合わせはない．この場合は 2 刺激による相互干渉はない．

Uchikawa and Yoshizawa [3] は二刺激光の手法を用い，さまざまな SOA を持つ 2 つの輝度刺激を用い，視覚系における時間的足し合わせ機能を測定した．その結果，SOA = 80ms 付近で閾値が上昇することを明らかにし，2 刺激の相互作用による刺激検出の抑制効果を示した．

2.3 刺激

本実験で用いられた刺激には，ある空間周波数 (0.43 ~ 4.90 cpd) を持つ輝度グレーティングに全周方向の ガウス関数の包絡線をかけたものを採用した．ガウス関数の包絡線をかけたのは，刺激の輝度エッジ (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 ($\pm SD$) = 2° である．刺激の色度点は，等エネルギー白色 $(x, y) = (0.33, 0.33)$ を採用し，背景から変化しない．刺激の中心から固視線 (fixation cross) の中心までの距離は， 2.28° である．

本実験における刺激の呈示時間 (duration) および呈示間隔 (ISI) は，すべて CRT ディスプレイのフレーム数で定義されている．実験に使用した CRT ディスプレイの周波数は 150 Hz と設定したので，1 frame = 6.7ms となる．刺激の呈示時間 (duration) は，first flash, second flash それぞれ 1frame = 6.7 ms を採用した．刺激呈示間隔である ISI には，6.7, 20.0, 26.6, 40.0, 46.7, 60.0, 66.7, 80.0, 86.7, 100.0, 120.1, 140.1, 160.1, 180.1 ms の 14 種類を採用した．

刺激の持つ空間周波数は，0.43, 0.89, 1.34, 1.78, 2.23, 2.67, 3.12, 3.56, 4.01,

4.45, 4.90cpd の 11 点を採用した。0.43cpd は、ガウス関数自身の空間周波数である。また、被験者 T.S. についてのみ 0.43, 0.89, 1.34, 2.23, 3.12, 4.01, 4.90cpd の 7 点で実験を行なった。

CRT ディスプレイの背景 (background) は、等エネルギー白色 $(x, y) = (0.33, 0.33)$ で、輝度は $10\text{cd}/\text{m}^2$ とした。CRT ディスプレイ上の刺激呈示を図 2.3 に示す。

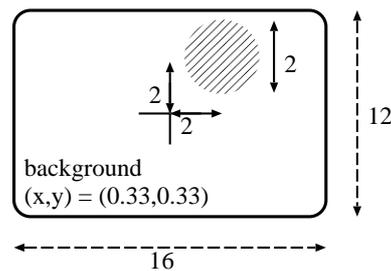


図 2.3 CRT ディスプレイに表示される刺激と固視線。実際の実験では、CRT ディスプレイには黒色ボードで覆いがかけられ、ディスプレイのフレーム部分が見えないようにしている。

実験中、CRT ディスプレイには固視線 (fixation cross) が常時呈示されており、被験者はこれを注視するように口頭で指示された。これは、被験者の眼球運動によって、輝度格子縞の波形形状が網膜上で大きく乱れることを避けるためである。しかし、眼球運動を完全に除去することはできないと考え、本実験では被験者の眼球運動の影響を極力少なくするために、刺激の格子縞が固視線の中心を向くように斜め 45° 傾けて呈示した。この傾きは、刺激が呈示された時の被験者の眼球運動の向きと一致しており、仮に眼球が (無意識に) 呈示された刺激の方向へ動いたとしても、網膜上の格子縞はあまり影響を受けないだろうと考えたからである。

2.4 実験装置

実験に使用した刺激は VSG2/3 (Cambridge Research Systems) によって生成され、BARCO モニター (CCID-121) に呈示された。

2.4 実験装置

実験は暗室内で行なわれた。暗室内に図 2.4 に示される実験ブースを設置し、実験を行なった。実験ブースは、高さ 180cm、横 270cm、奥行き 90cm のサイズで、市販のファンゲル材と厚さ 5 mm の黒色ボード板、暗幕カーテンを用いて作成された。この実験ブース内に、刺激呈示装置 (CRT ディスプレイ) と被験者、被験者の頭を固定するための顎台、被験者の応答を測るためのボタンスイッチを持ち込み、実験を行なった。なお、この実験ブースは、他の実験にも使用できるように光学系装置を組み込むことが可能なように設計されている。刺激生成のための VSG2/3 ボードを組み込んだ PC と実験者は実験ブース外に置かれている。実験ブースは 3 辺が黒色ボード板で固定され、残り 1 辺は暗幕カーテンで遮光されている。実験中は、暗室内外の照明を落とし、実験ブース内を完全に暗所とした。

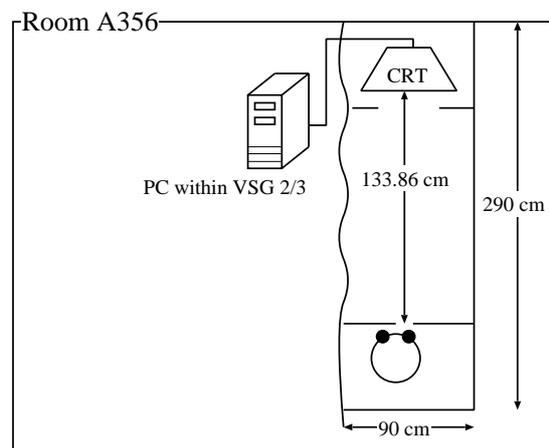


図 2.4 暗室 A356 の概略図。実験中は、部屋の照明は切られている。

被験者は、視距離 133.86 cm の位置から CRT ディスプレイを観察する。その際、被験者の眼球位置が変化しないように、頭を顎台に乗せ、被験者の頭を固定した。実験は片眼自然視 (natural viewing) で行ない、実験に使用しない方の目は eye patch で覆われた。また、本実験では光学系は一切使用していない。

被験者の応答の測定には、図 2.5 に示すボタンスイッチを用いた。CRT ディスプレイに呈示される刺激呈示位置と、ボタンスイッチには次のような対応関係がある。

- ディスプレイ左上 = A ボタンを奥に押す

- ディスプレイ右上 = C ボタンを奥に押す
- ディスプレイ左下 = A ボタンを手前に押す
- ディスプレイ右下 = C ボタンを手前に押す

被験者は対応するボタンを押すことで、CRT ディスプレイ上のどこに刺激が呈示されたかを応答する。

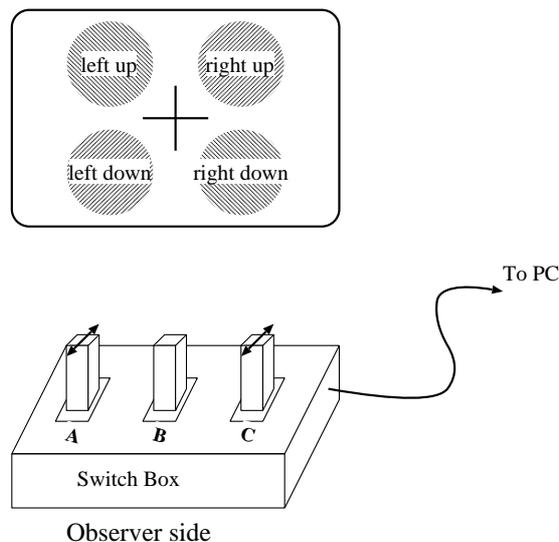


図 2.5 被験者の応答を測定するために用いたボタンスイッチ。実験には A と C のボタンのみを使用した。B のボタンは、実験を強制終了するために用いられるが、本実験で用いられることはなかった。

2.5 実験前の測光

実験を開始する前に、測光 (Calibration) を行なった。特に、刺激呈示装置である CRT ディスプレイは、正確に測光を行ない、調整した。CRT ディスプレイの輝度は画面の 9 ヶ所で測光した平均値を採用した。相対輝度は、Optical (Cambridge Research Systems) で測光し、絶対輝度は LS-100 (Minolta) および CT-1000 (Minolta) を用いて測光を行なった。刺激の色度点は、CS-1000 (Minolta) を使用して測光した。

また、CRT やコンピュータ、電子機器は、電源投入直後の色ムラ、動作不安定などを起

2.6 被験者について

こしやすい．そのため，実験前 30 分間は warm up のための時間とした．

2.6 被験者について

以下に挙げる 4 名を被験者として採用した．

- M.H. 23 years Male, 右目使用, 視力 1.5 (矯正)
- Y.F. 24 years, Male, 右目使用, 視力 1.2 (矯正)
- T.T. 21 years, Male, 右目使用, 視力 1.5 (裸眼)
- T.S. 22 years, Male, 左目使用, 視力 2.0 (裸眼)

被験者全員に対しては，あらかじめカラーテストを行ない，色覚正常であることが確かめられている．カラーテストには，以下の 2 つのテストを行なった．

- 石原式 Plate
- Panel D-15

また，被験者 M.H. 以外の被験者は，この実験に関してナイーブ (naive) であった．さらに，実験に当たって被験者毎の輝度感度測定を行なった．

2.7 実験手順

実験の流れを，図 2.6 に示す．

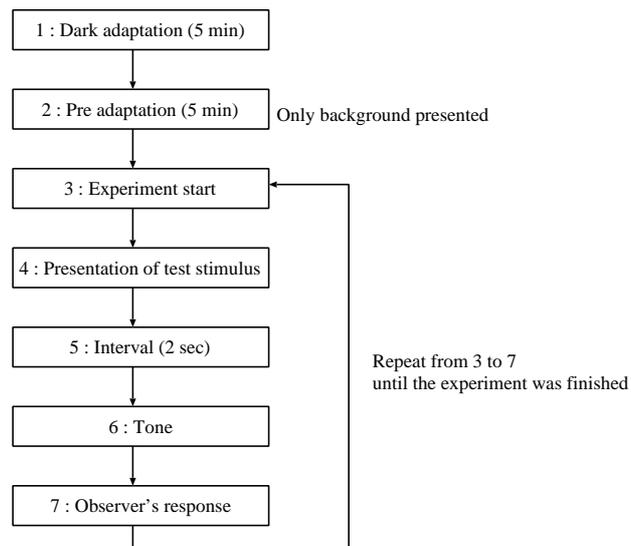


図 2.6 実験手順の流れ．閾値が決定するまで，3 から 7 の手順が繰り返される．

1 つの空間周波数に対し，同じ条件で 4 回実験を行なった．実験は，順応から実験終了までを通してすべて自動化されている．CRT ディスプレイに呈示される刺激の時間的变化を図 2.7 に示す．

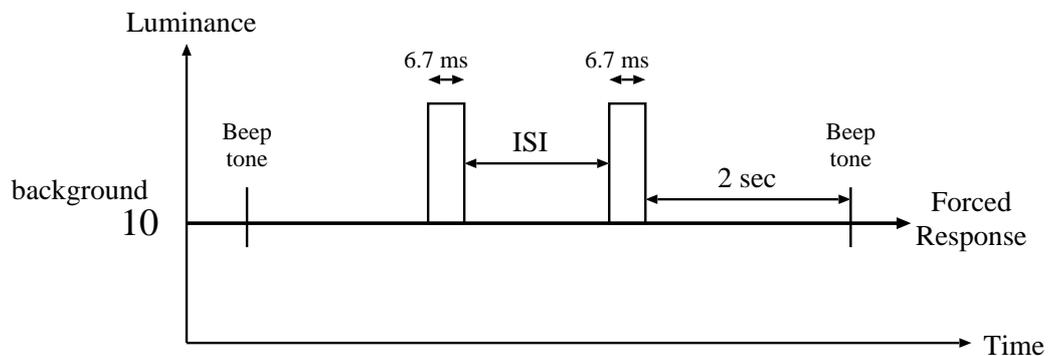


図 2.7 CRT ディスプレイに呈示される刺激の時間的变化．刺激が呈示される前後は，ブザーが鳴る．縦軸の輝度の単位は cd/m^2 である．

被験者の応答には，4AFC (4 Alternative Forced Choice) を採用した．刺激である 2 つの輝度 flash は，ランダムに選ばれた CRT ディスプレイの 4 ヶ所のうち 1 ヶ所に継時的に呈示される．被験者は CRT ディスプレイのどの場所に刺激が呈示されたかをボタン

2.7 実験手順

イッチを押すことで応答する。

呈示される刺激の輝度は、階段法 (Two-down One-up) によって変化させた。輝度の変化は、first flash と second flash は、常に同じである。輝度変化のレベルは、 $0.005 \text{ (log cd/m}^2\text{)}$ step で変化し、最初の 2 つの reversal (上昇系列と下降系列の変極点) までは、それ以降の 5 倍量 (0.025 log cd/m^2) 輝度レベルが変化する。検出閾値には、3 から 6 回目までの reversal (図 2.8 中の線で囲んだ部分) における刺激輝度の幾何平均値を採用した。実験により、得られた閾値データを図 2.8 に示す。

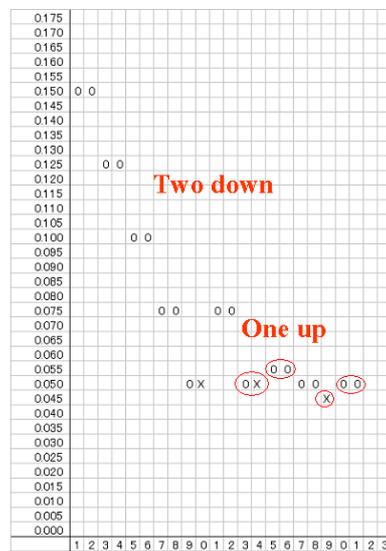


図 2.8 階段法によって求められた実験データのサンプル。ある ISI において、被験者の応答が 2 回続けて正しければ、次にその ISI の刺激が呈示される時、刺激の輝度レベルは 1 段階下げられる。被験者の応答が間違っていれば、次のその ISI の刺激が呈示される時、刺激の輝度レベルは 1 段階上げられる。

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閾値とした。実験データが明らかにエラーとみなされるような場合は、必要に応じて追加実験を行なった。

2.8 データ解析

以下に、実験から得られたコントラスト閾値データから輝度インパルス応答関数 (Impulse Response Functions) の導出過程について説明する。

2.8.1 Burr and Morrone のモデル式

本研究では、輝度 IRFs を導くため Burr and Morrone のモデル式 (2.1) を採用した。

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

式 (2.1) は、0 から開始され、時間と共に周波数の減少を伴い振動し、次第に 0 へと弱まる減衰関数としてモデル化される。さらに、 $H(t)$ は以下のような関数である。

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

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

a_0, a_1, a_2, a_3 はフリーパラメータである。

次に、閾値の予測は、Watson[1] がモデル化した式 (2.2) によって確率的な見えを含んだ関数として与えられる。

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

p は検出確率 (Proportion of Detection) であり、刺激光の強度 $I(t)$ の単調増加関数である。式 (2.2) において、 r は、閾値決定に 4AFC を採用していることから、 $r = 1/4$ となる。また、刺激の輝度レベルを階段法 (Two-down One-up) で変化させているので、 $p = \sqrt{2}/2$ が与えられる。

2.8.2 確率的足し合わせを考慮した閾検出モデル

式 (2.2) における $R(t)$ は次のように定義される。

$$R(t, \tau) = k((IRF(t) + IRF(t + \tau)))$$

2.8 データ解析

但し, k は刺激の強度である. ある $ISI = \tau$ の時間間隔において呈示された 2 刺激による視覚系全体の応答 $R(t)$ は, ある時間 t に呈示された刺激によって発生したインパルス応答 $IRF(t)$ と, τ 後に呈示された刺激によって発生したインパルス応答 $IRF(t + \tau)$ を加算したものである. 今回, 輝度 IRFs を求めるにあたり, 式 (2.2) において $\beta = 4.00$ を仮定した. これは, 2 パルス感度から推定された値である. このノイズパラメータは, 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 [5].

2.8.3 モデルとデータのフィッティング

実験データから得られた閾値の平均値 (図 2.9 の \times) と, ある係数セット a_0, a_1, a_2, a_3 を仮定した時に式 (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計算されたモデル閾値の差の 2 乗平均が最小になるような a_0, a_1, a_2, a_3 を Microsoft Excel97 を使用して求めた.

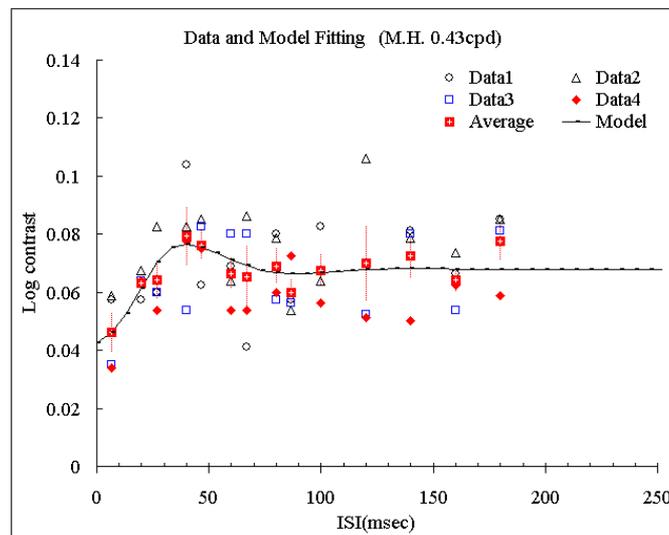


図 2.9 各シンボルが実験の各セッションで得られたデータ点を示す. 直線は, モデルから求められたフィッティング. 縦軸は log コントラスト, 横軸は ISI (ms) を示す.

この差を最小とする a_0, a_1, a_2, a_3 の値を用いて式 (2.1) より求めた関数 $I(t)$ を, その条件におけるインパルス応答関数と仮定した. 図 2.10 に図 2.9 のモデル fit から得られた

インパルス応答関数の例を示す。

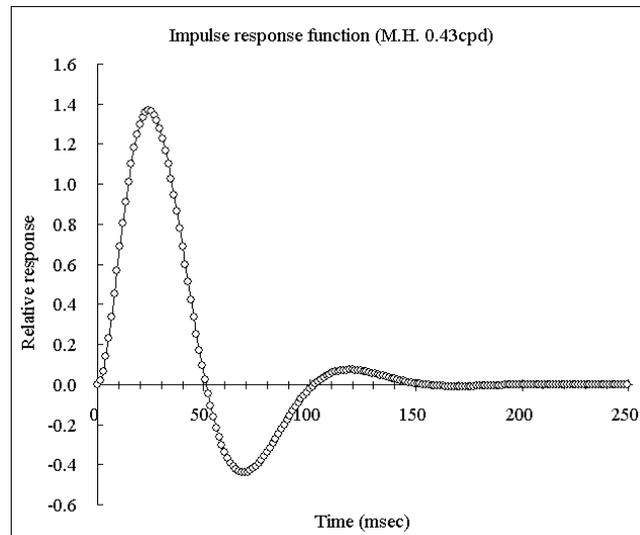


図 2.10 実験データとモデル値の最小 2 乗和を満たす a_0, a_1, a_2, a_3 を用いて仮定したインパルス応答関数 $I(t)$. 縦軸は強度, 横軸は時間 (ms) を示す .

第 3 章

結果

本章では,実験によるコントラスト検出閾値の測定結果と,そこから導出した輝度 IRFs を各被験者ごとに示す.また,導出された輝度 IRFs のフリーパラメータである a_0, a_1, a_2, a_3 の値は付録 A に示す.

3.1 被験者 M.H. の実験結果

被験者 M.H. の実験結果を以下に示す.実験によって求められたのは,ある空間周波数を持つ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であり,それは左図に 4 種類のシンボルで示される.シンボルの違いは,実験セッションの違いである.右図には,そこから求められたインパルス応答関数を示す.

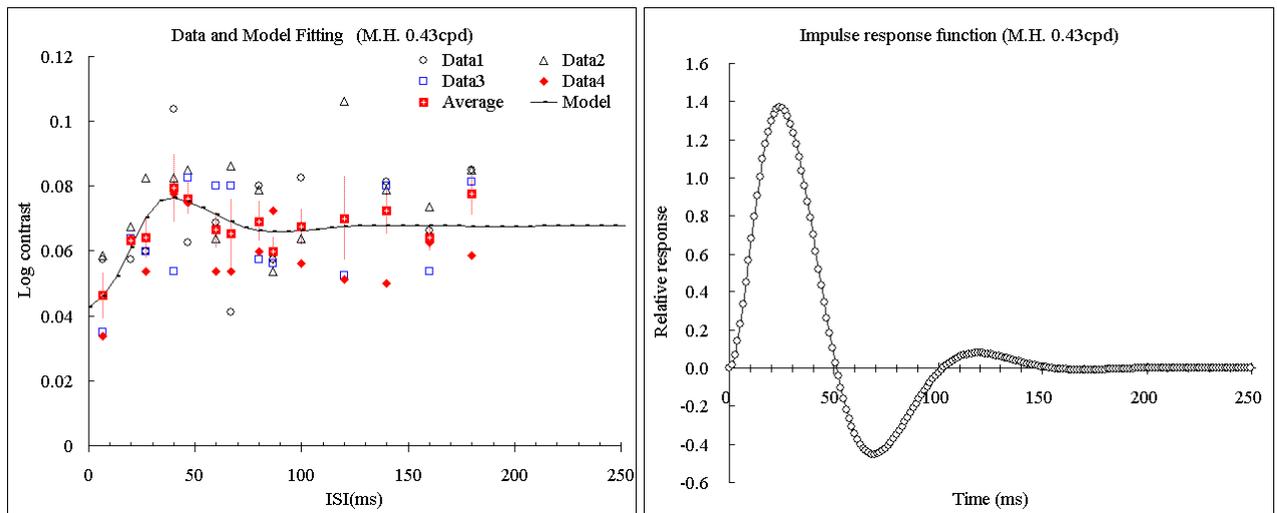


図 3.1 M.H. 0.43cpd の実験結果 . 左図に閾値データとモデルによるフィティング (直線) を示し, そこから求められた IRF を右図に示す .

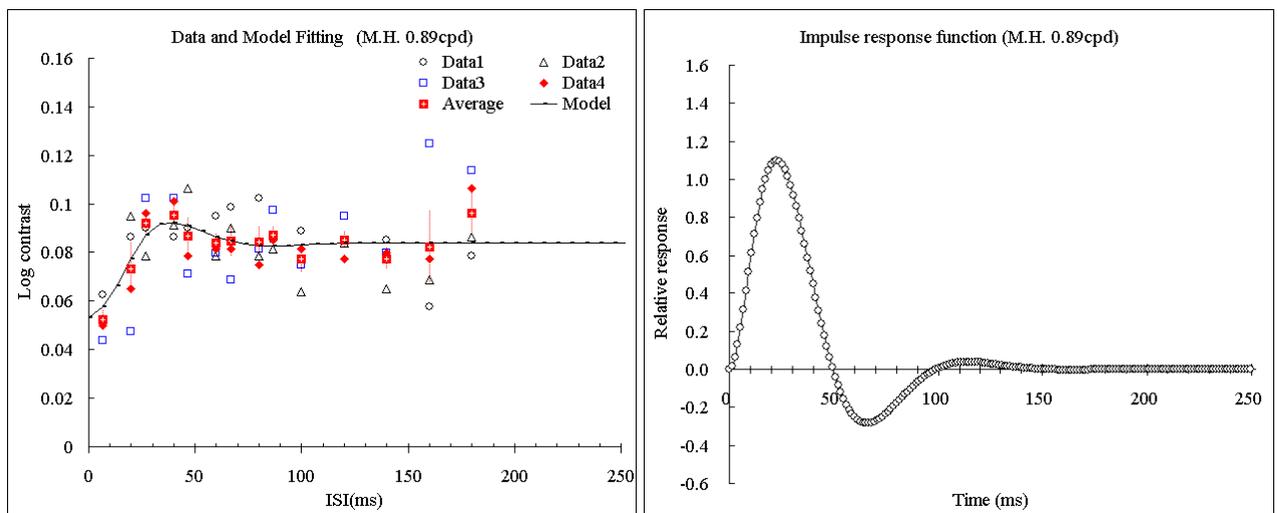


図 3.2 M.H. 0.89cpd の実験結果 . 左図に閾値データとモデルによるフィティング (直線) を示し, そこから求められた IRF を右図に示す .

3.1 被験者 M.H. の実験結果

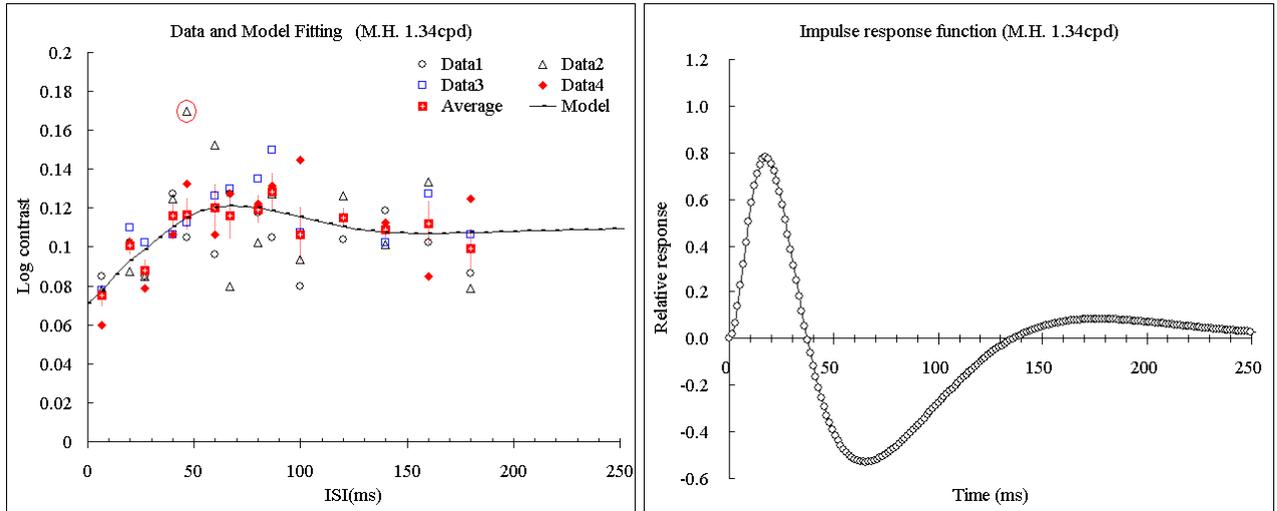


図 3.3 M.H. 1.34cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィッティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．左図中に線で囲まれたデータ点はエラーとみなし，平均値に加えていない．

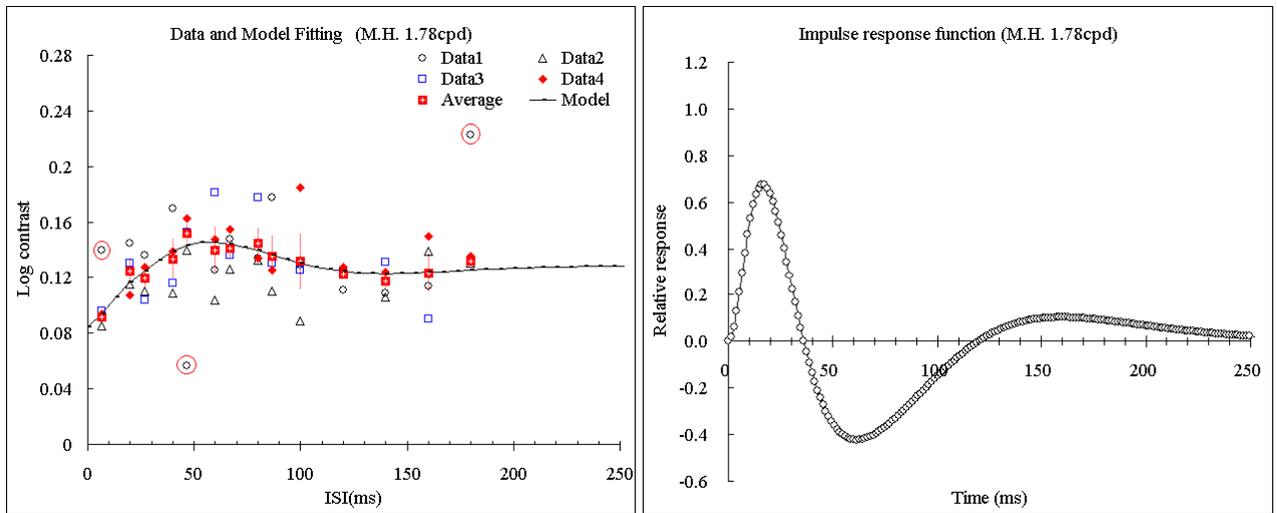


図 3.4 M.H. 1.78cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィッティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．左図中の線で囲まれたデータ点はエラーとみなし，平均値に加えていない．

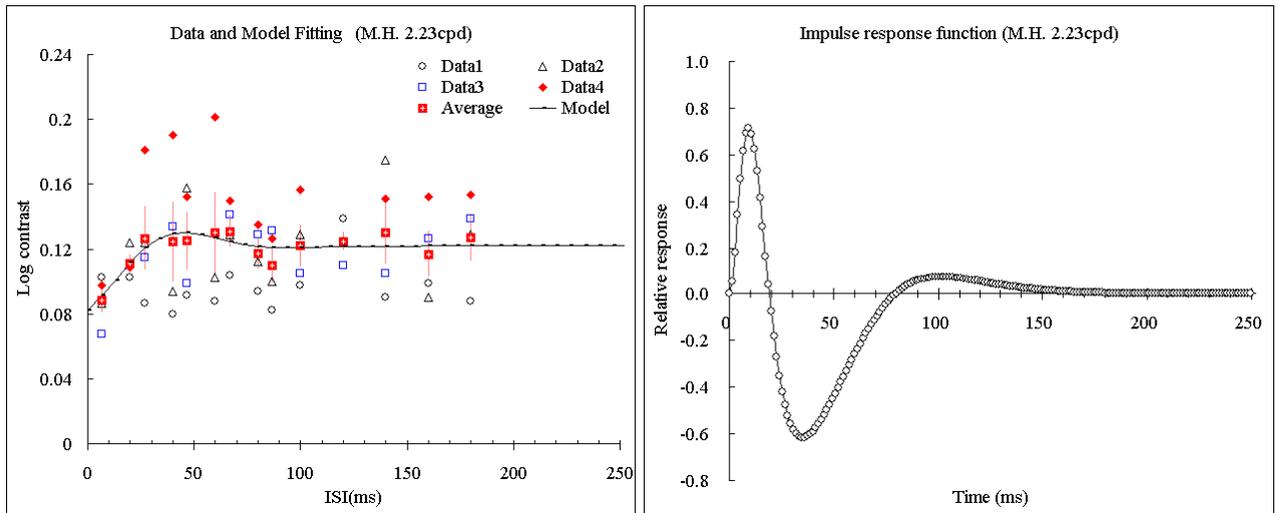


図 3.5 M.H. 2.23cpd の実験結果 . 左図に閾値データとモデルによるフィッティング (直線) を示し, そこから求められた IRF を右図に示す .

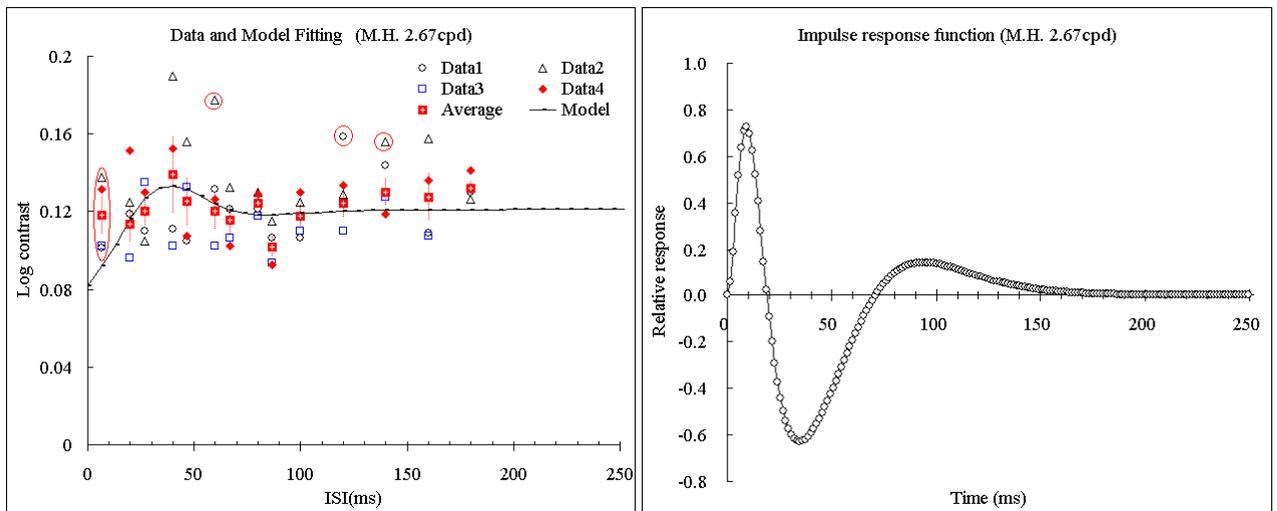


図 3.6 M.H. 2.67cpd の実験結果 . 左図に閾値データとモデルによるフィッティング (直線) を示し, そこから求められた IRF を右図に示す . 左図中の線で囲まれたデータ点はエラーとみなし, 平均値に加えていない .

3.1 被験者 M.H. の実験結果

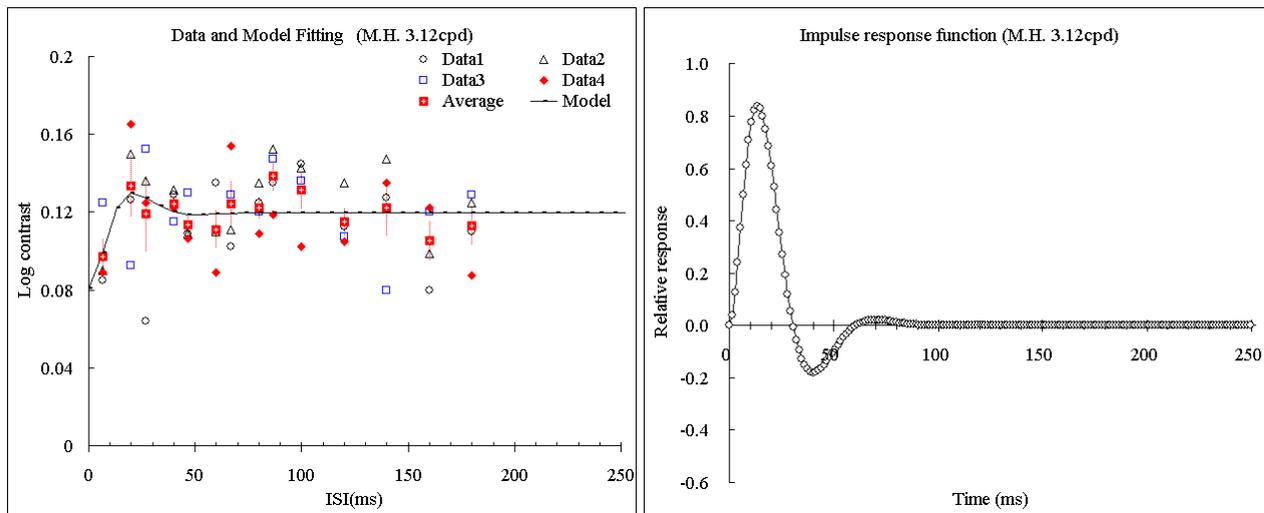


図 3.7 M.H. 3.12cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．

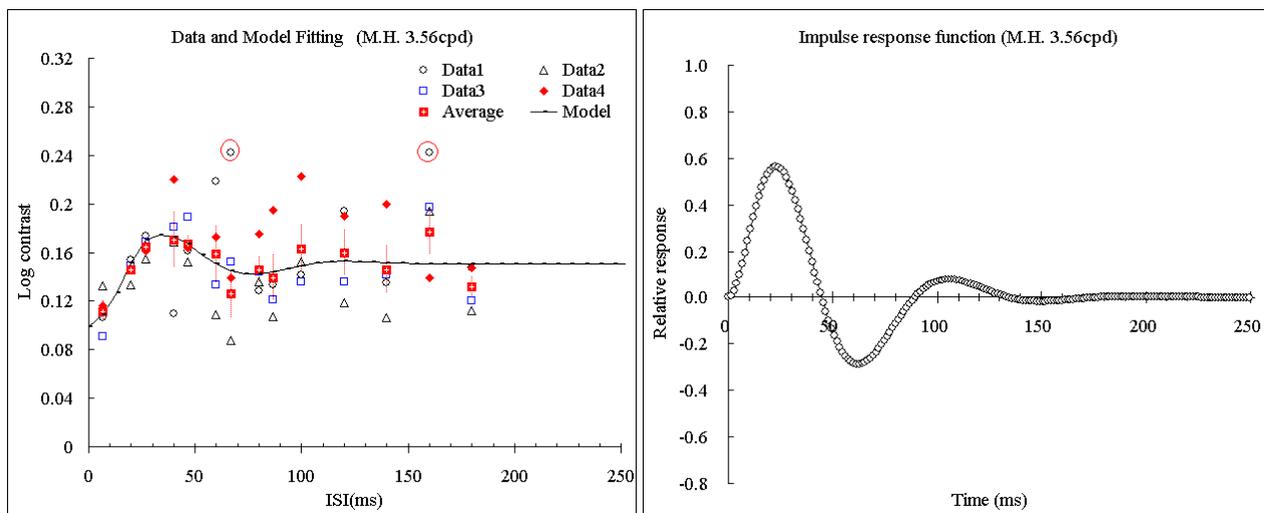


図 3.8 M.H. 3.56cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．左図中の線で囲まれた点は，エラーとみなし，平均値に加えていない．

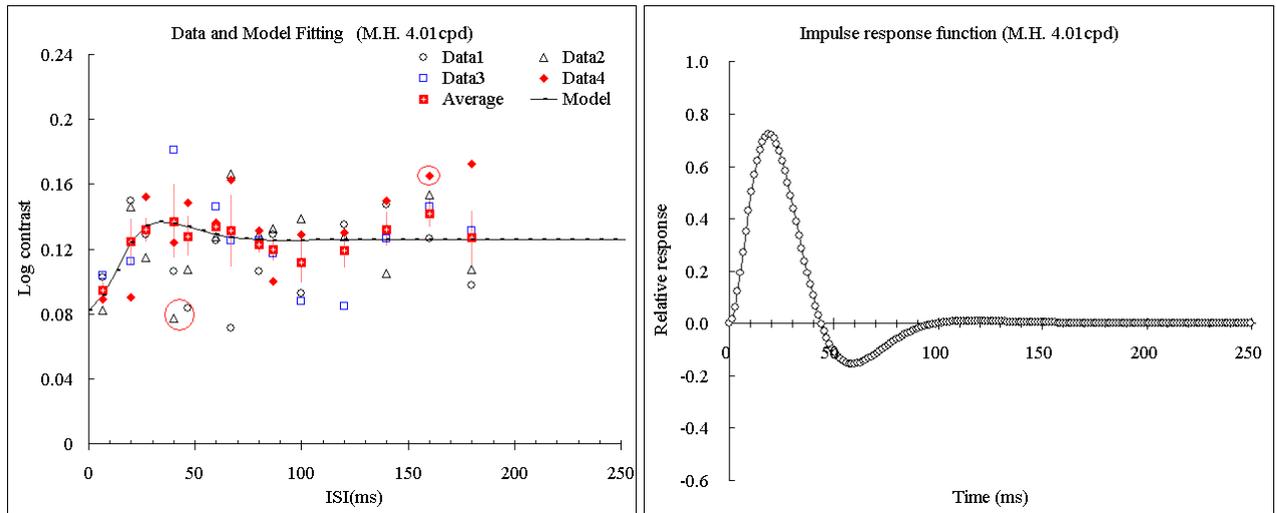


図 3.9 M.H. 4.01cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．左図中の線で囲まれたデータ点はエラーとみなし，平均値に加えていない．

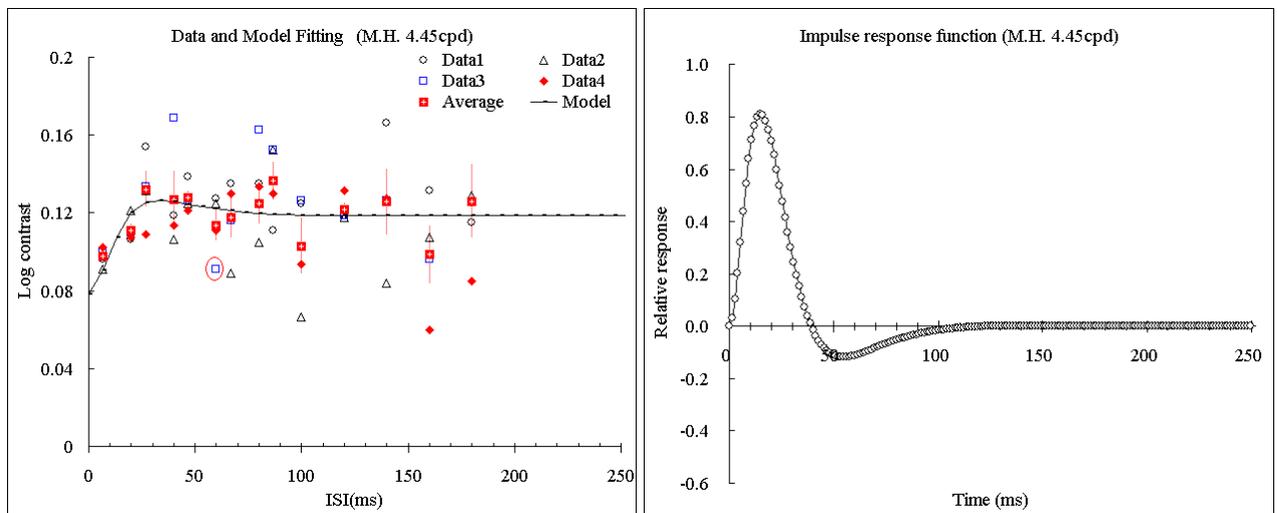


図 3.10 M.H. 4.45cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．左図中の線で囲まれたデータ点は，エラーとみなし，平均値に加えていない．

3.2 被験者 Y.F. の実験結果

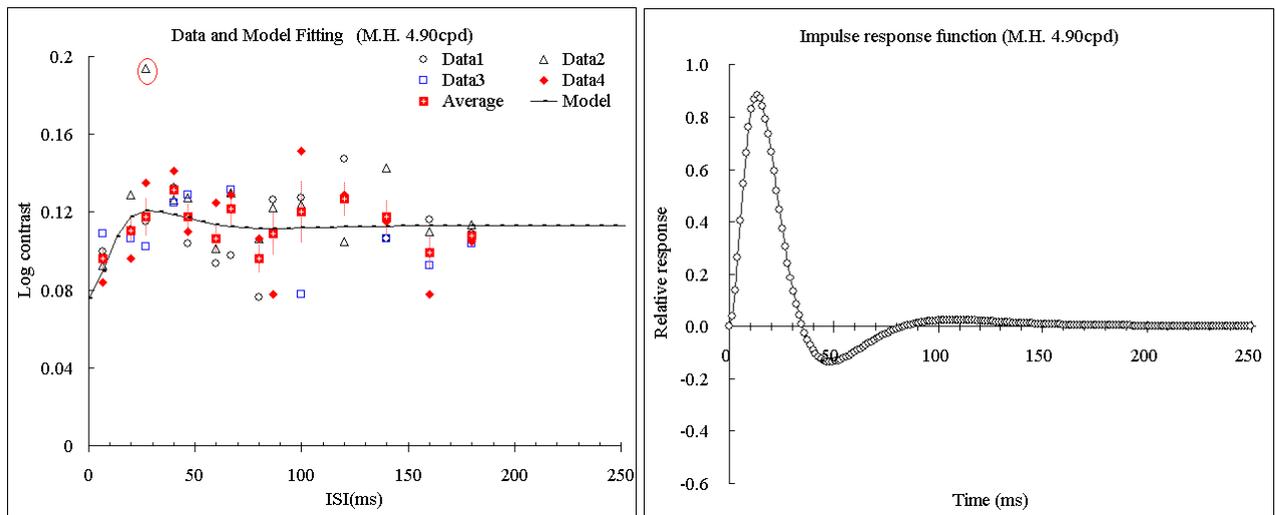


図 3.11 M.H. 4.90cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィッティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．左図中の線で囲まれたデータ点はエラーとみなし，平均値に加えていない．

3.2 被験者 Y.F. の実験結果

被験者 Y.F. の実験結果を以下に示す．実験によって求められたのは，ある空間周波数を持つ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であり，それは左図に 4 種類のシンボルで示される．シンボルの違いは，実験セッションの違いである．右図には，そこから求められたインパルス応答関数を示す．

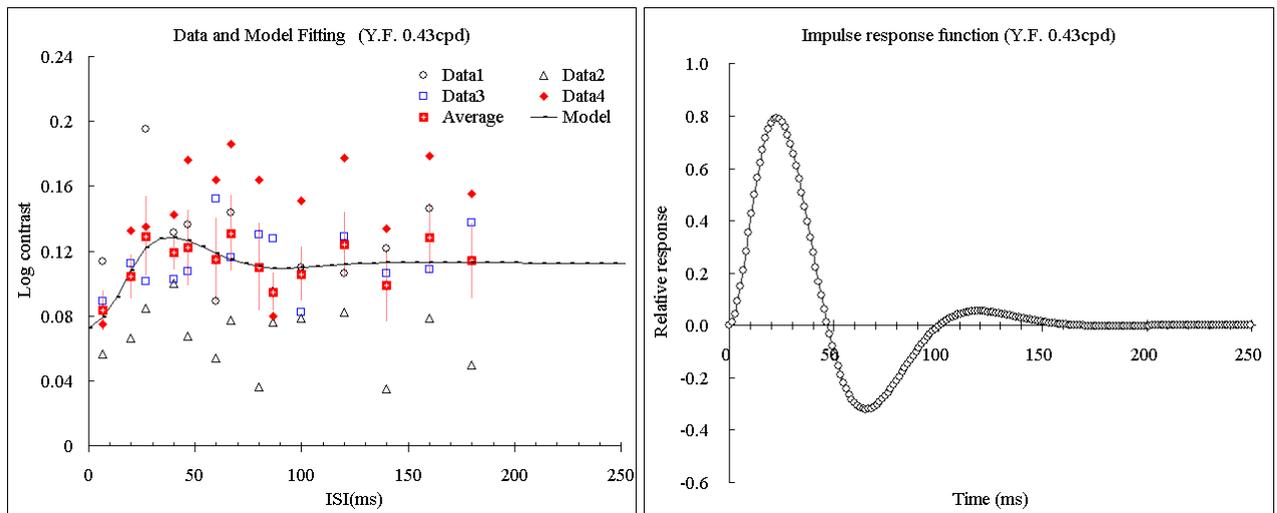


図 3.12 Y.F. 0.43cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．

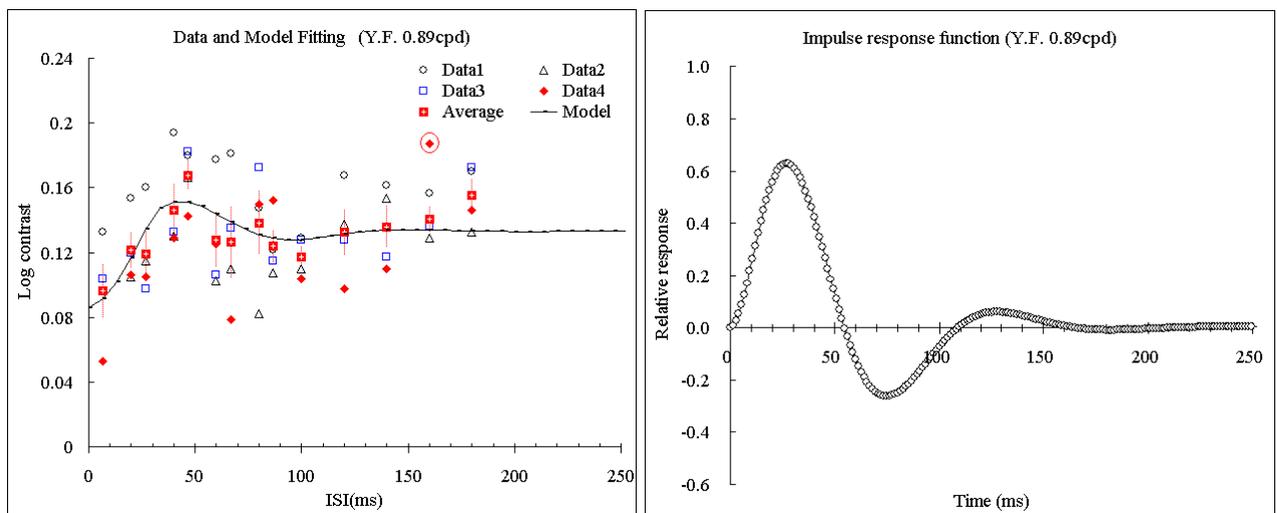


図 3.13 Y.F. 0.89cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．左図中の線で囲まれたデータ点はエラーとみなし，平均値に加えていない．

3.2 被験者 Y.F. の実験結果

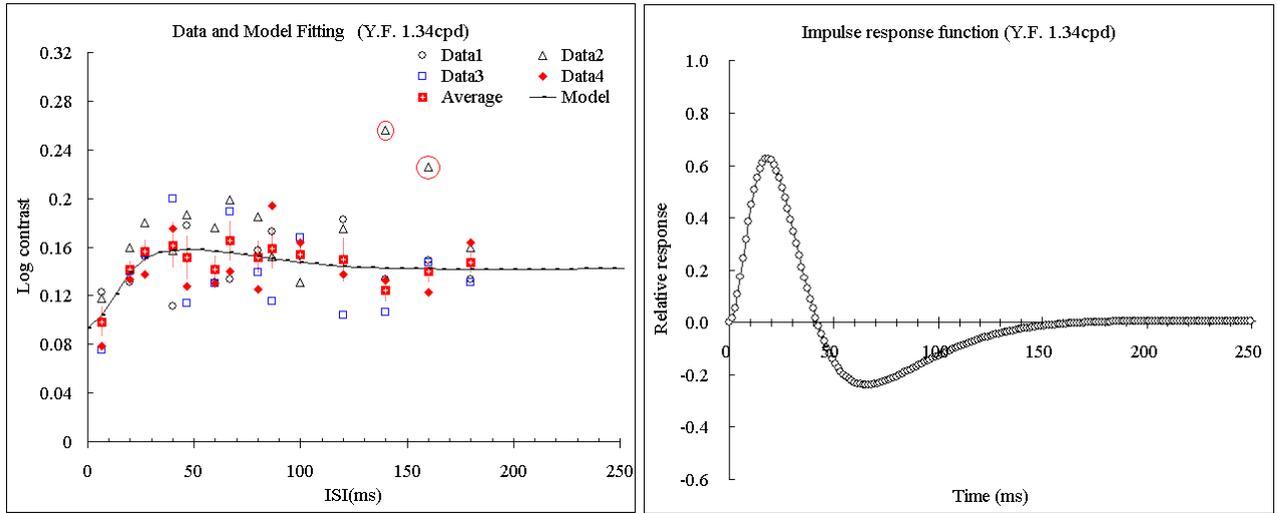


図 3.14 Y.F. 1.34cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．左図中の線で囲まれた点はエラーとみなし，平均値に加えていない．

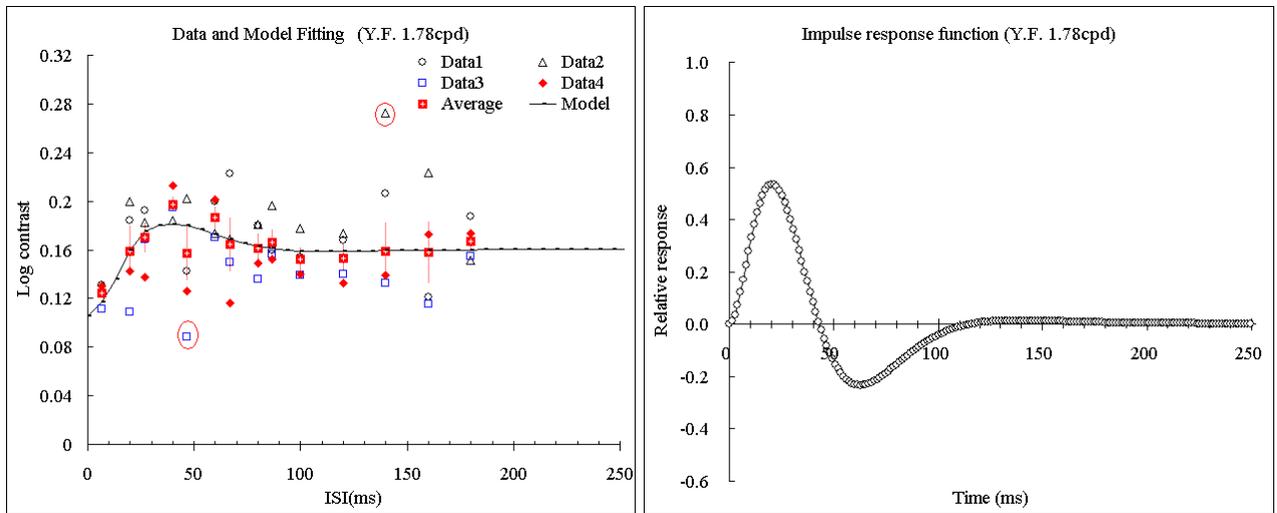


図 3.15 Y.F. 1.78cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．左図中の線で囲まれたデータ点はエラーとみなし，平均値に加えていない．

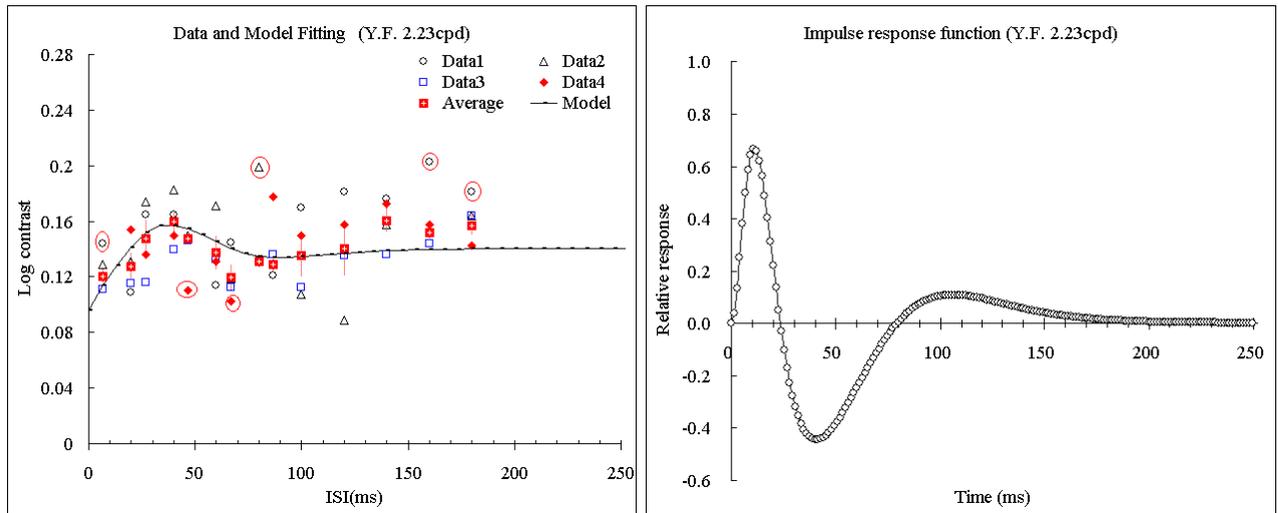


図 3.16 Y.F. 2.23cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィッティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．左図中の線で囲まれたデータ点はエラーとみなし，平均値に加えていない．

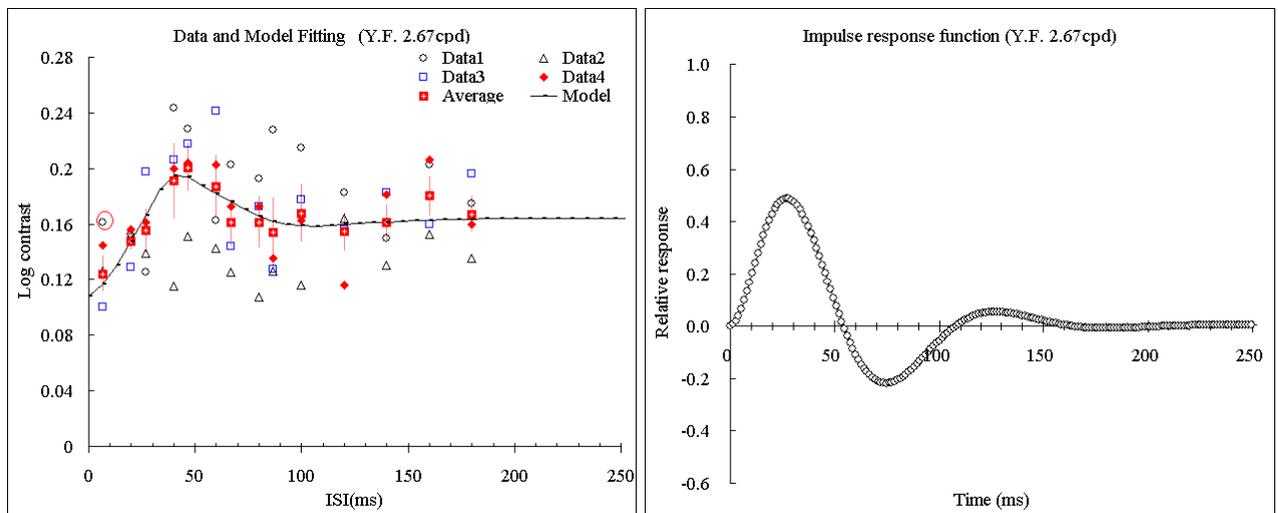


図 3.17 Y.F. 2.67cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィッティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．左図中の線で囲まれたデータ点はエラーとみなし，平均値に加えていない．

3.2 被験者 Y.F. の実験結果

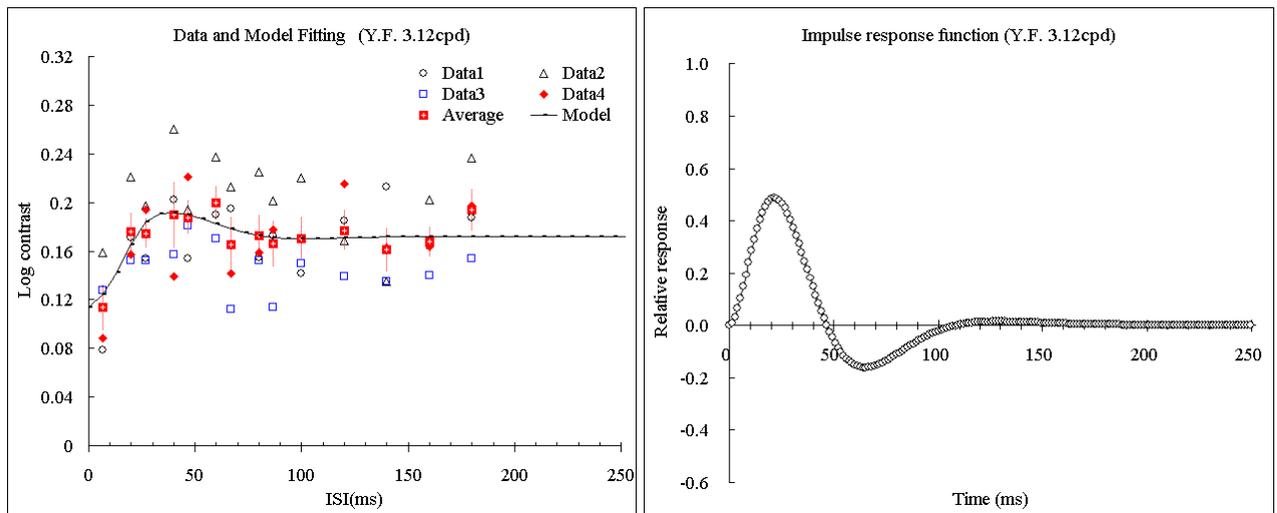


図 3.18 Y.F. 3.12cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．左図中の線で囲まれたデータ点はエラーとみなし，平均値に加えていない．

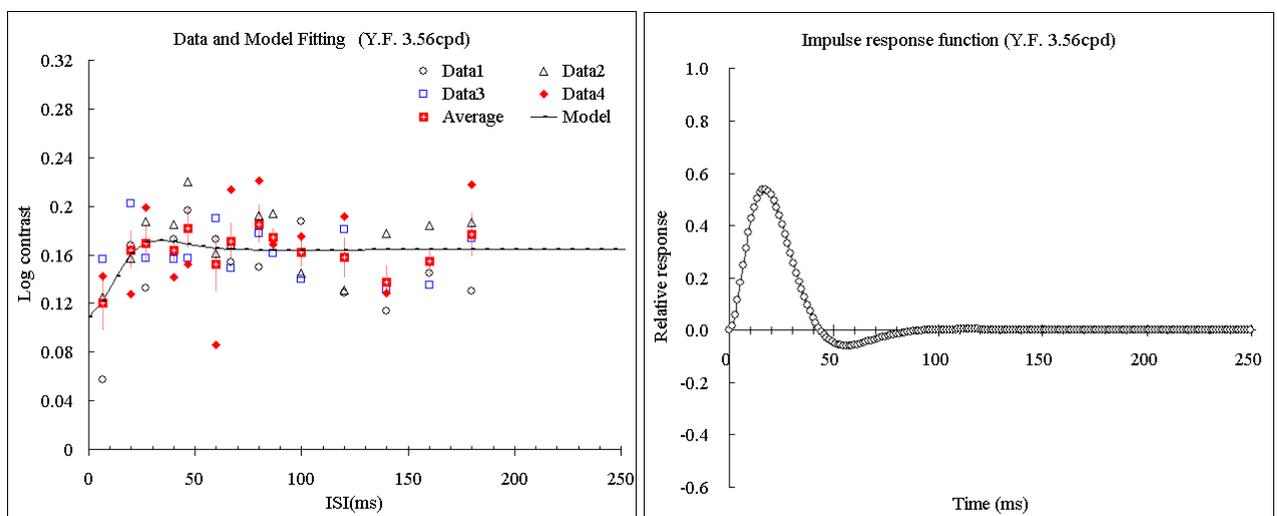


図 3.19 Y.F. 3.56cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．

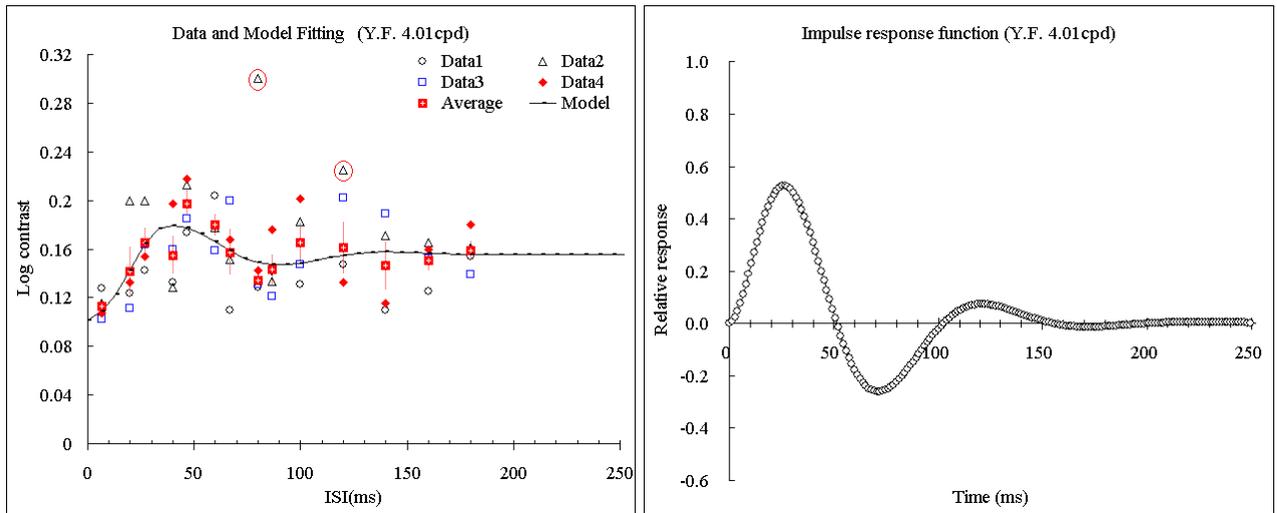


図 3.20 Y.F. 4.01cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィッティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．左図中の線で囲まれたデータ点はエラーとみなし，平均値に加えていない．

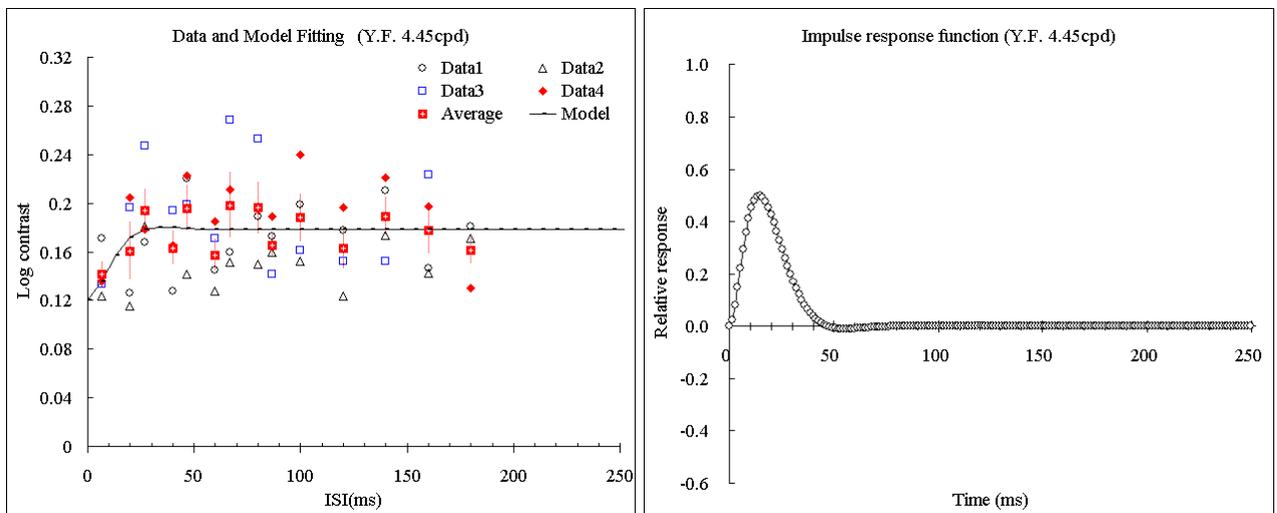


図 3.21 Y.F. 4.45cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィッティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．

3.3 被験者 T.T. の実験結果

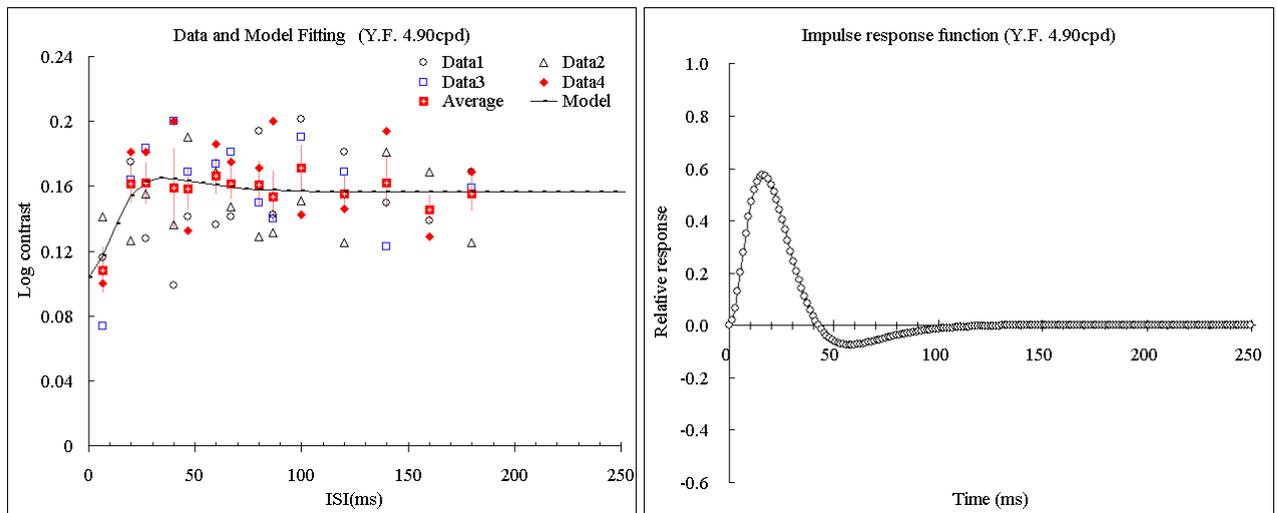


図 3.22 Y.F. 4.90cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィッティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．

3.3 被験者 T.T. の実験結果

被験者 T.T. の実験結果を以下に示す．実験によって求められたのは，ある空間周波数を持つ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であり，それは左図に 4 種類のシンボルで示される．シンボルの違いは，実験セッションの違いである．右図には，そこから求められたインパルス応答関数を示す．

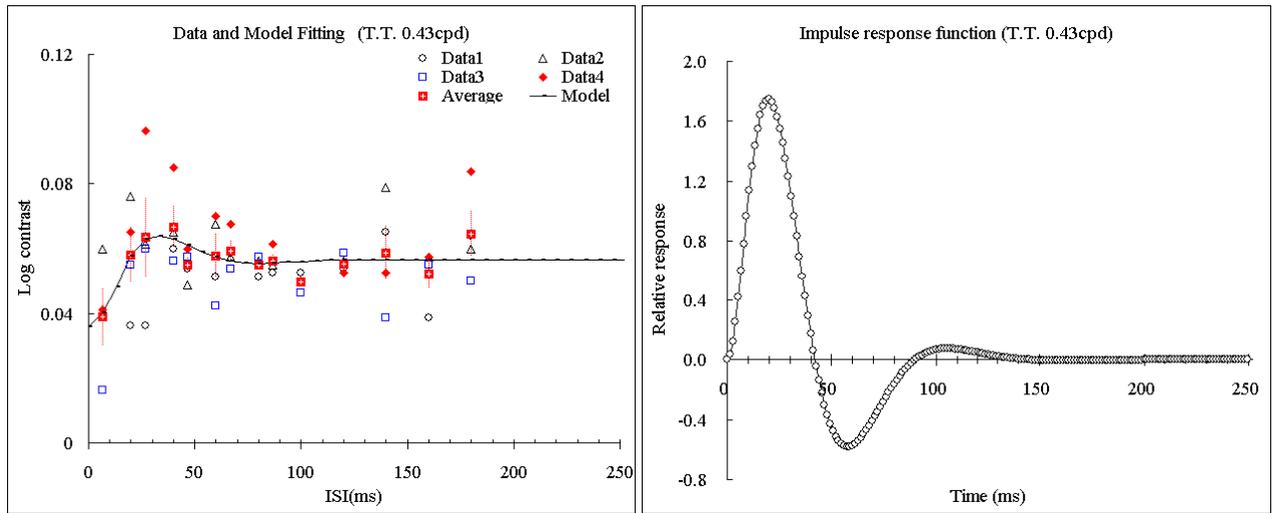


図 3.23 T.T. 0.43cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．

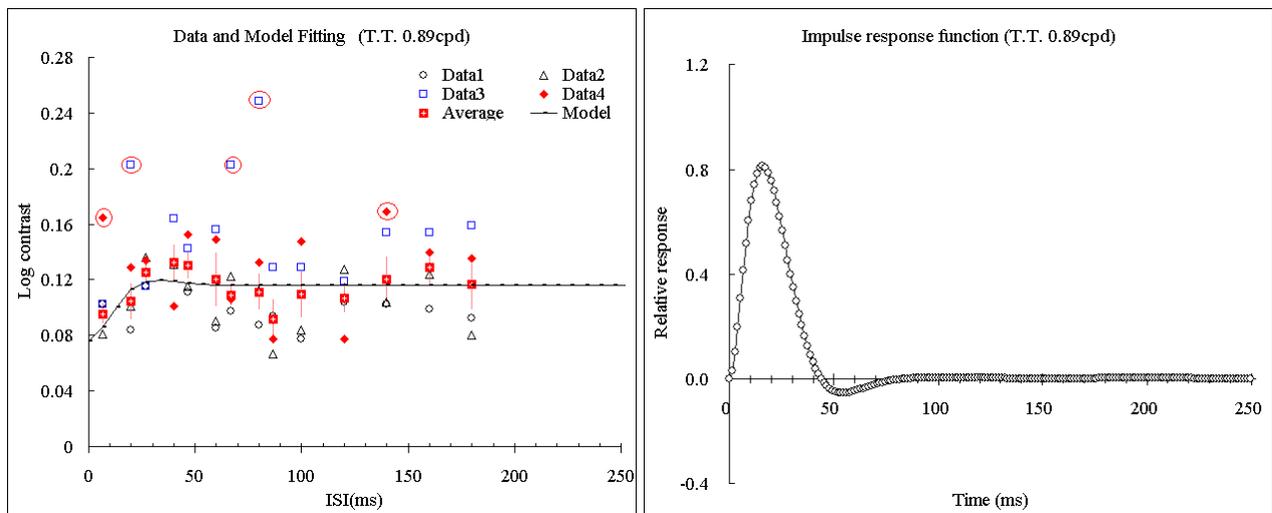


図 3.24 T.T. 0.89cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．左図中の線で囲まれたデータ点はエラーとみなし，平均値に加えていない．

3.3 被験者 T.T. の実験結果

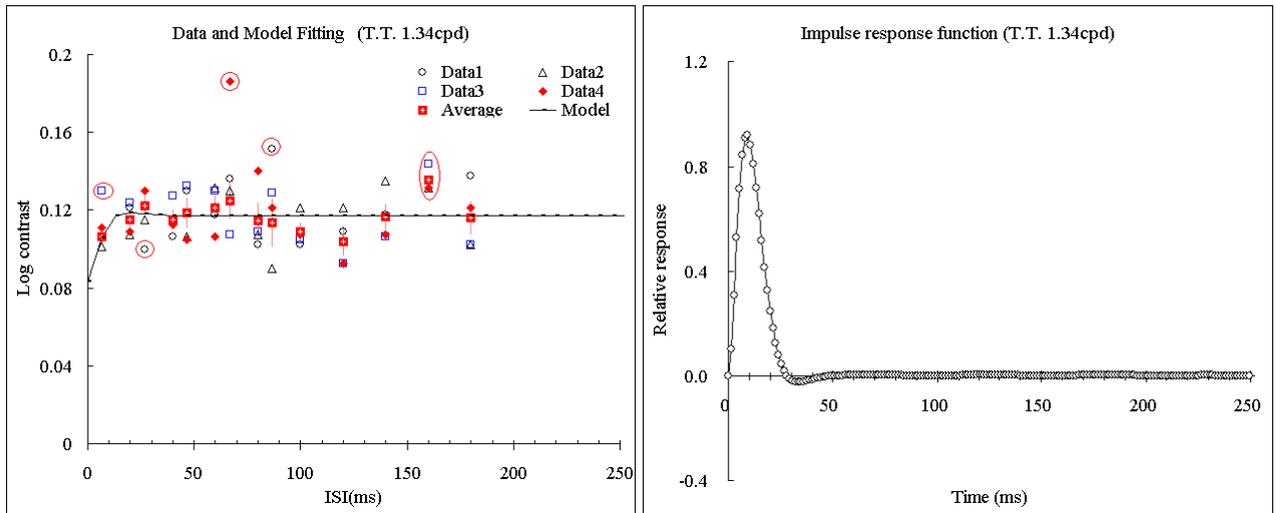


図 3.25 T.T. 1.34cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．左図中の線で囲まれたデータ点はエラーとみなし，平均値に加えていない．

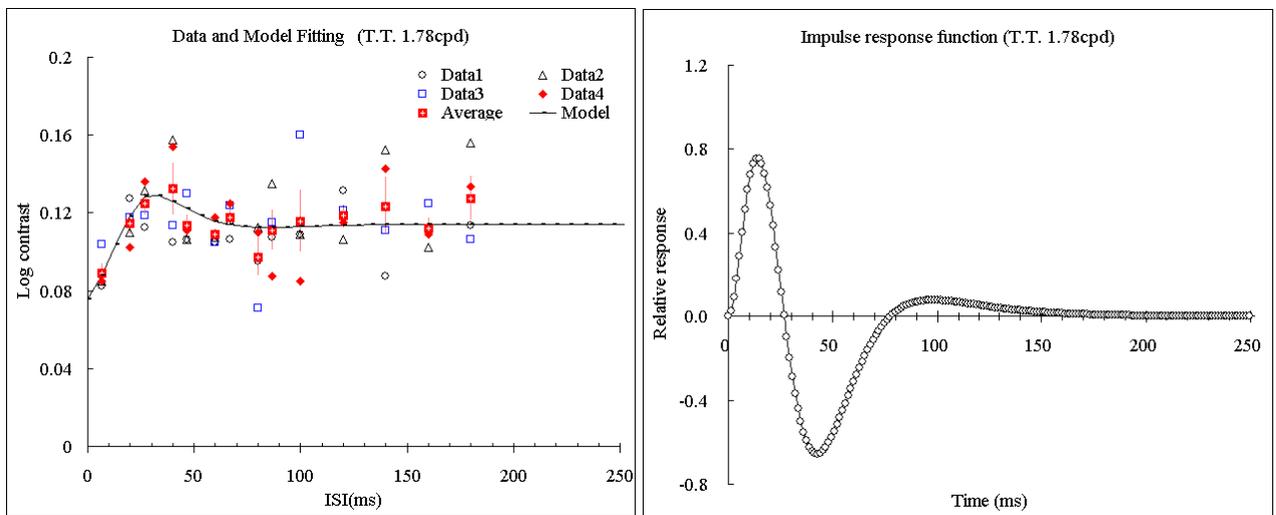


図 3.26 T.T. 1.78cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．

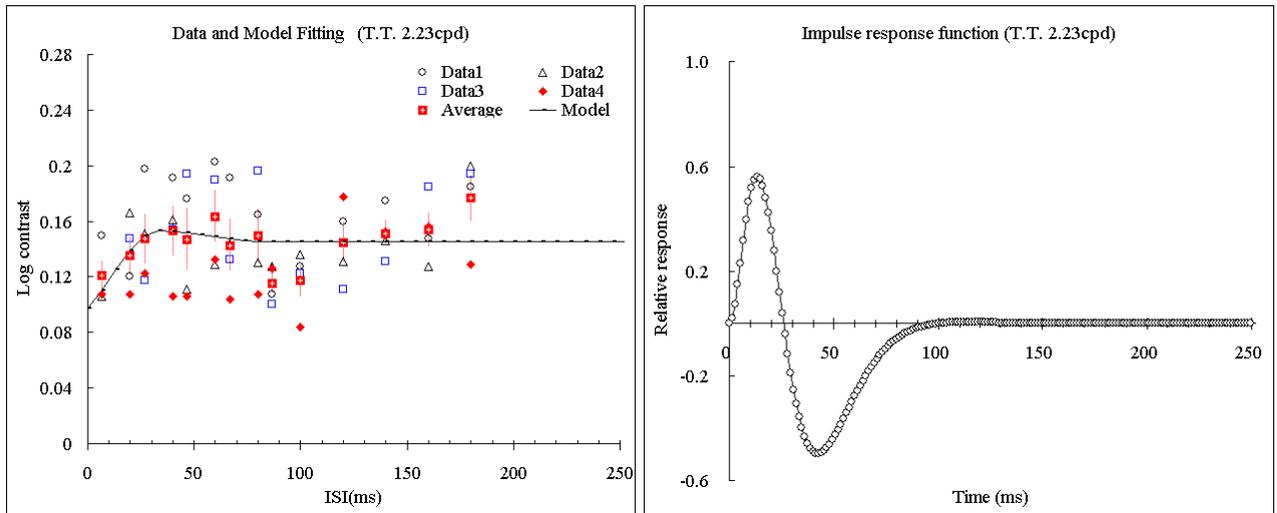


図 3.27 T.T. 2.23cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．

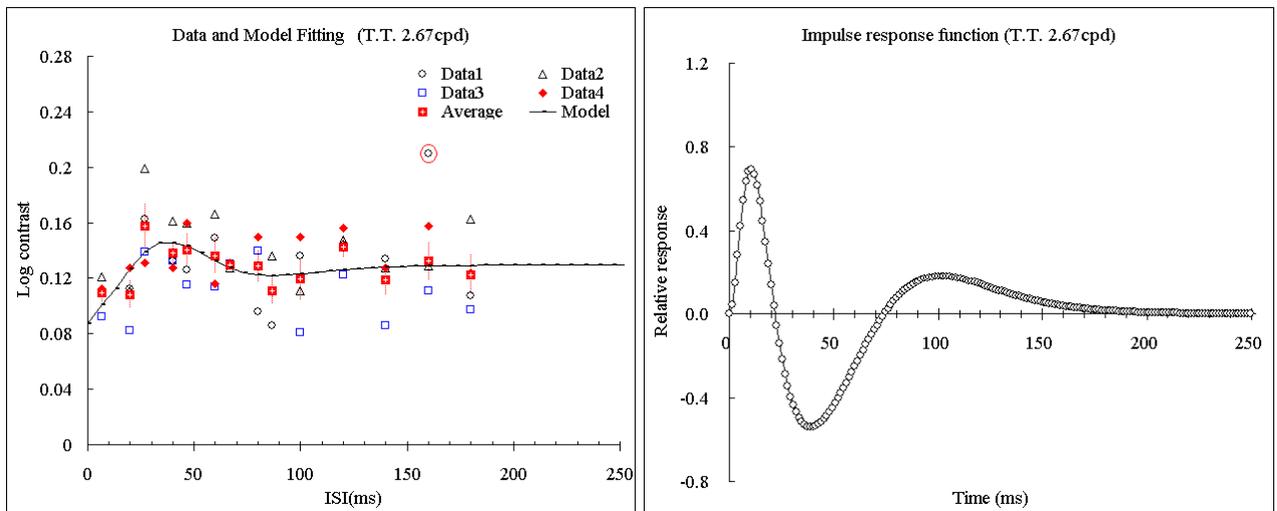


図 3.28 T.T. 2.67cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．左図中の線で囲まれたデータ点はエラーとみなし，平均値に加えていない．

3.3 被験者 T.T. の実験結果

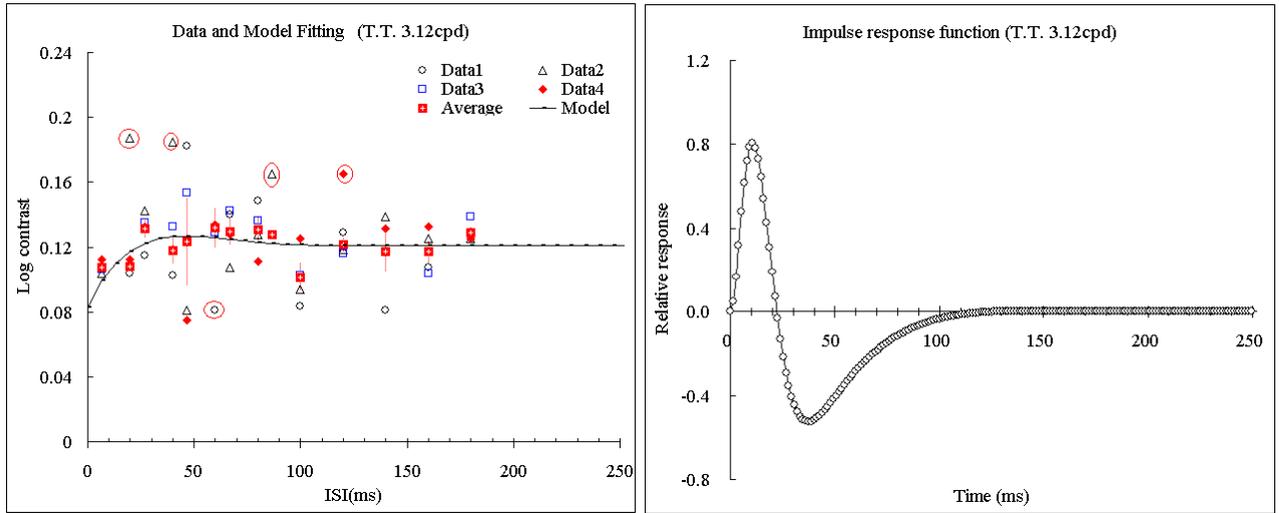


図 3.29 T.T. 3.12cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．左図中の線で囲まれたデータ点はエラーとみなし，平均値に加えていない．

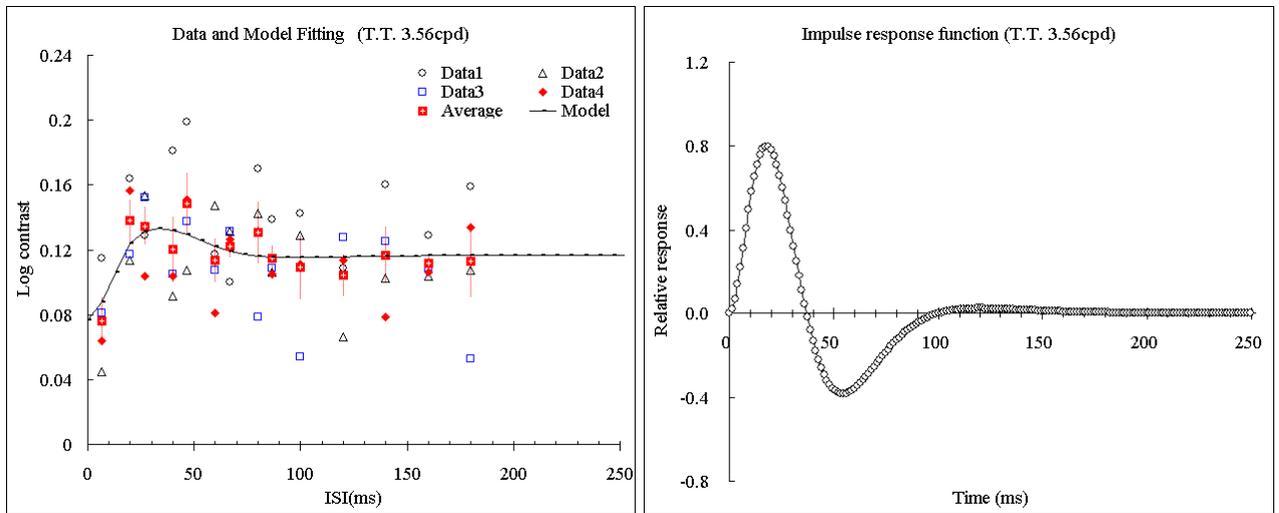


図 3.30 T.T. 3.56cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．

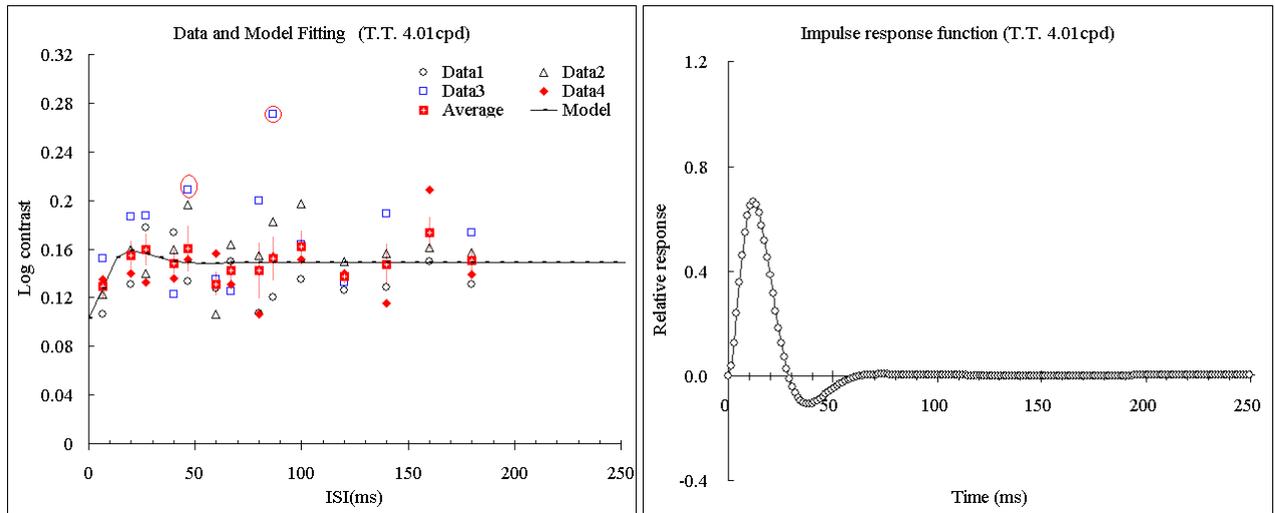


図 3.31 T.T. 4.01cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィッティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．左図中の線で囲まれたデータ点はエラーとみなし，平均値に加えていない．

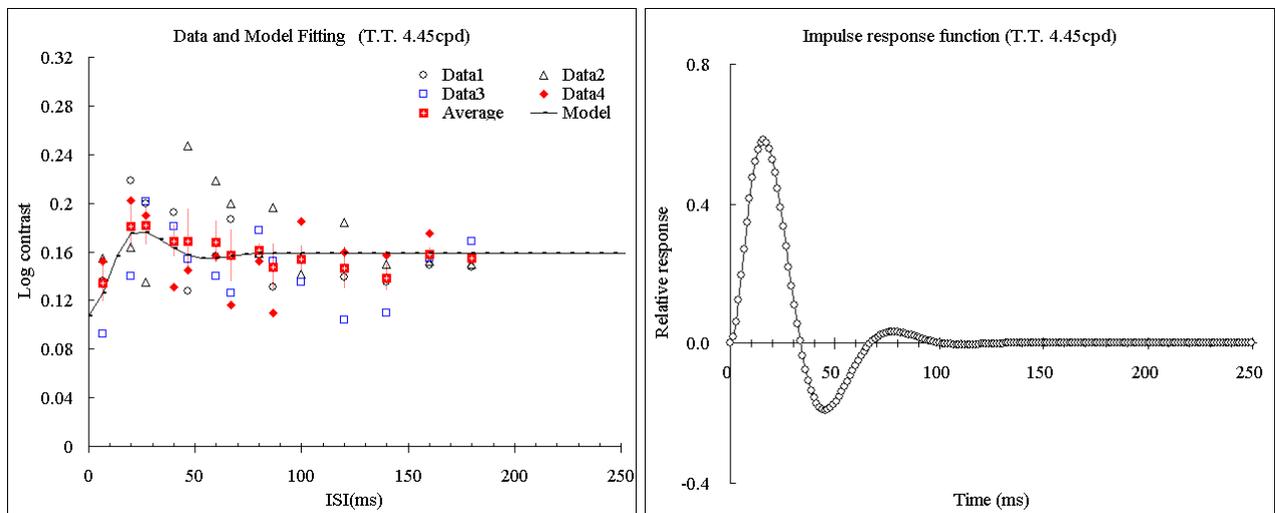


図 3.32 T.T. 4.45cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィッティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す

3.4 被験者 T.S の実験結果

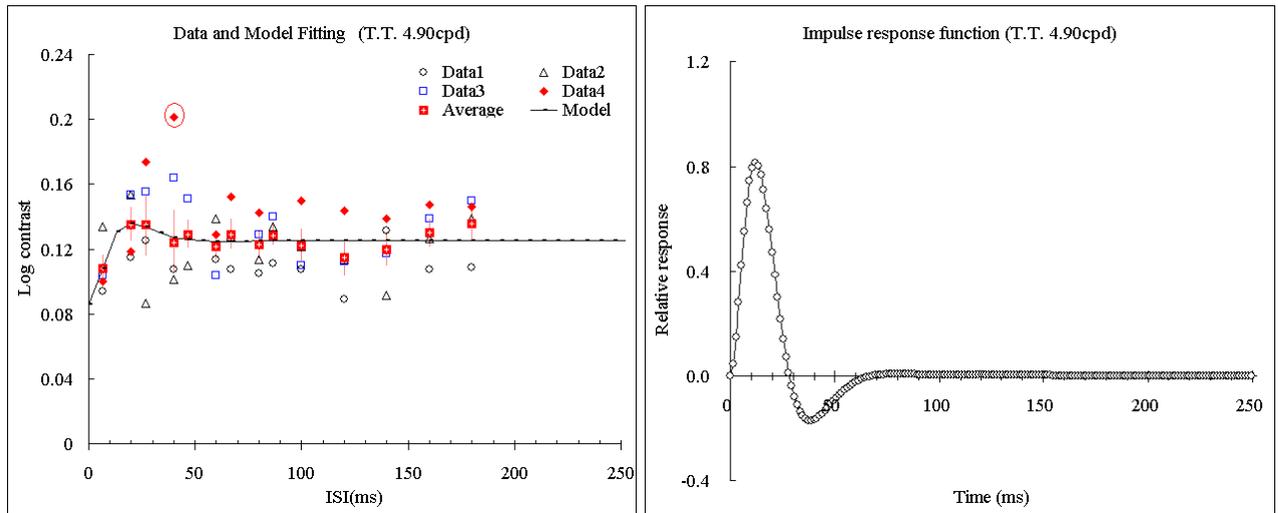


図 3.33 T.T. 4.90cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．左図中の線で囲まれたデータ点はエラーとみなし，平均値に加えていない．

3.4 被験者 T.S の実験結果

被験者 T.S. の実験結果を以下に示す．実験によって求められたのは，ある空間周波数を持つ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であり，それは左図に 4 種類のシンボルで示される．シンボルの違いは，実験セッションの違いである．右図には，そこから求められたインパルス応答関数を示す．

また，被験者 T.S. に限り，空間周波数は 0.43, 0.89, 1.34, 2.23, 3.12, 4.01, 4.90cpd の 7 点のみを使用した．

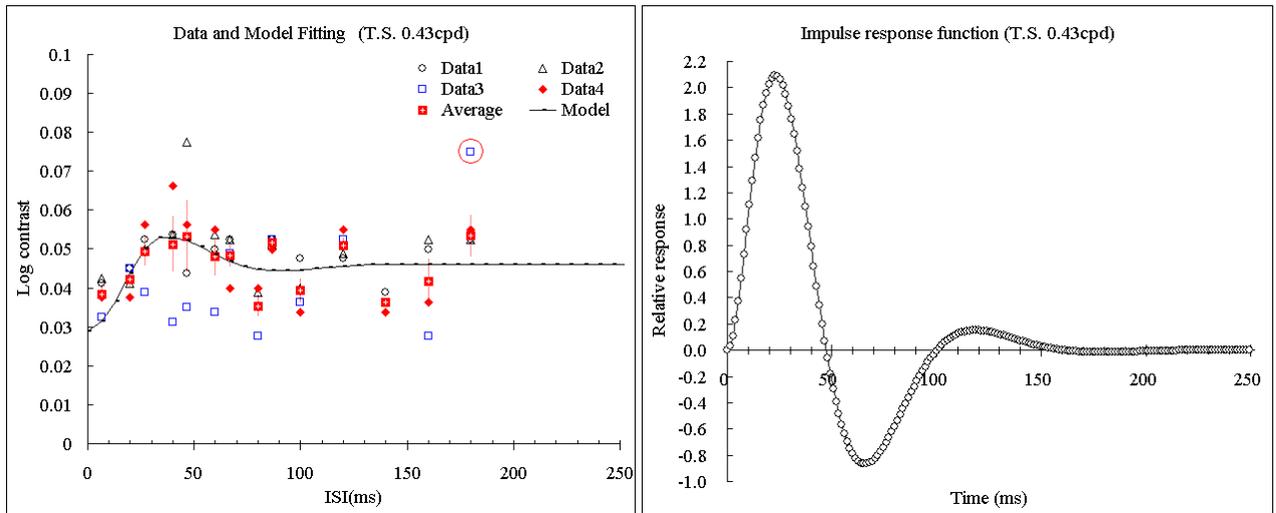


図 3.34 T.S. 0.43cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィッティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．左図中の線で囲まれたデータ点はエラーとみなし，平均値に加えていない．

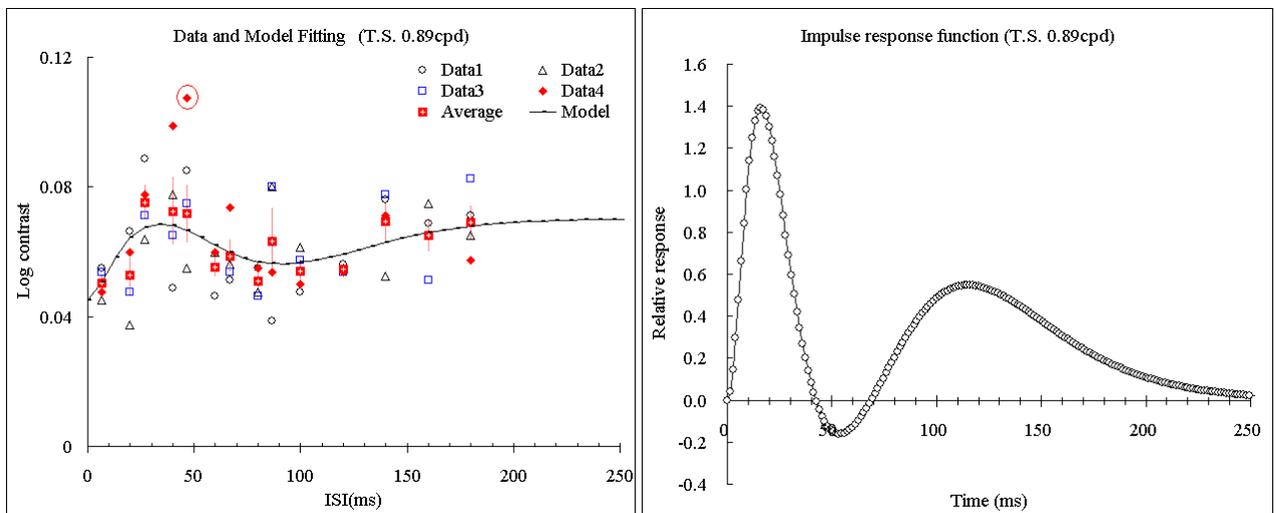


図 3.35 T.S. 0.89cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィッティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．左図中の線で囲まれたデータ点はエラーとみなし，平均値に加えていない．

3.4 被験者 T.S の実験結果

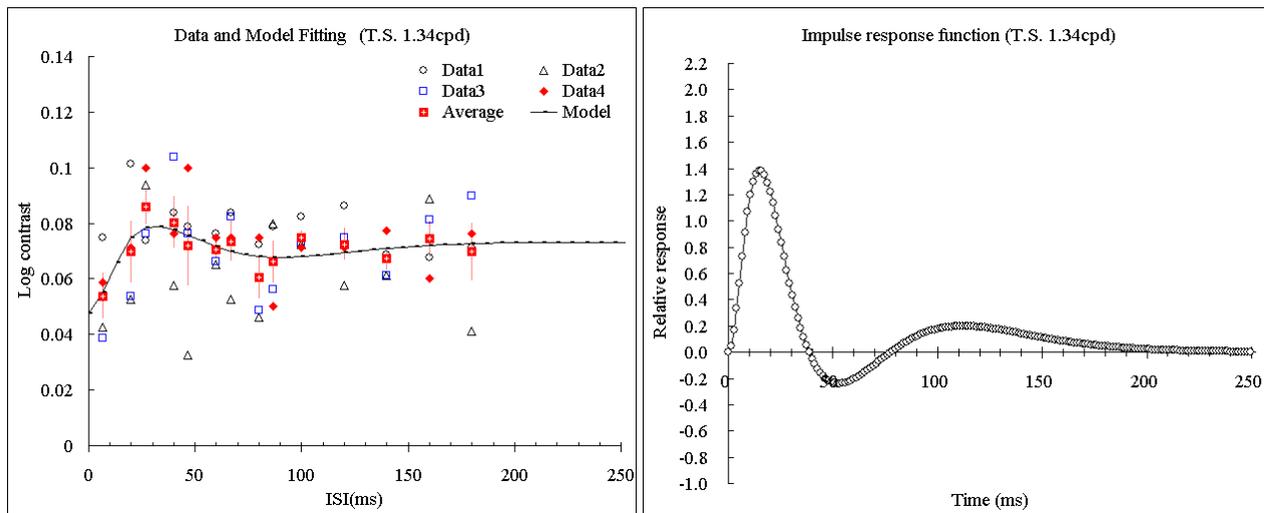


図 3.36 T.S. 1.34cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．

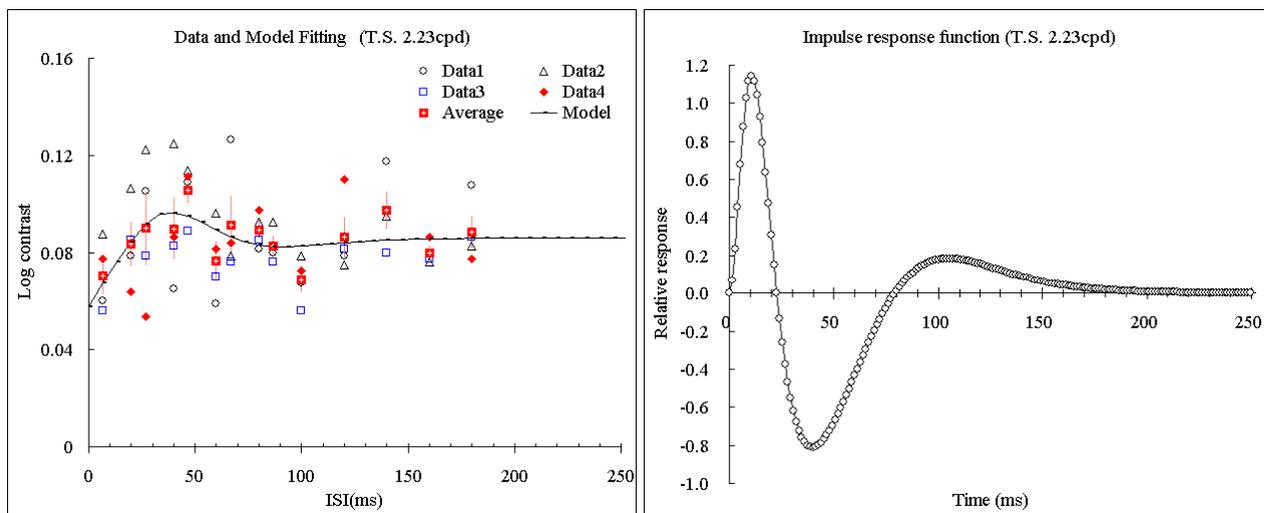


図 3.37 T.S. 2.23cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．

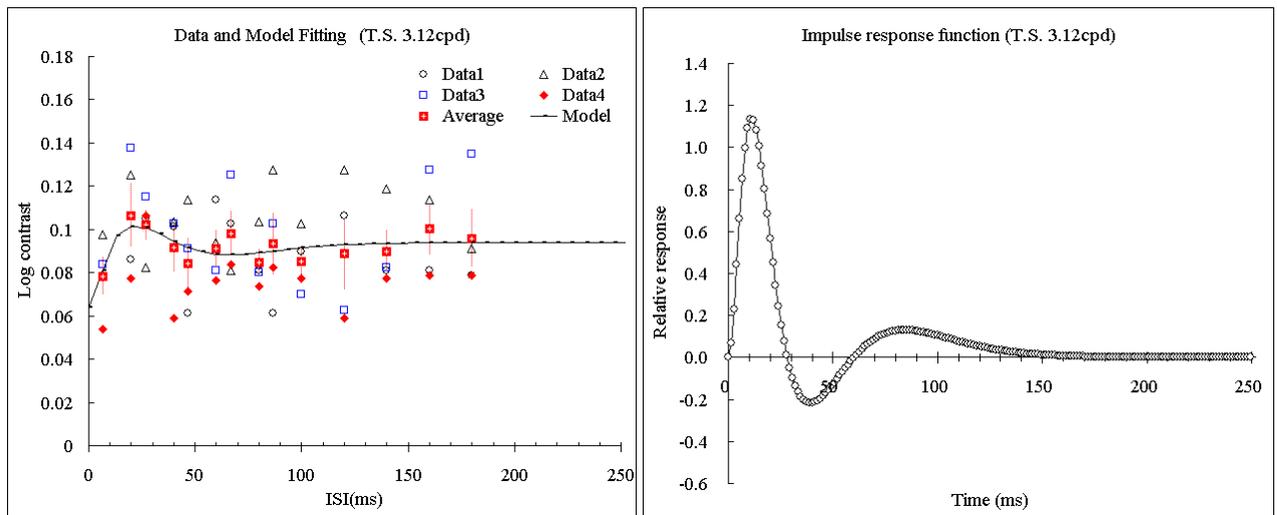


図 3.38 T.S. 3.12cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィッティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．

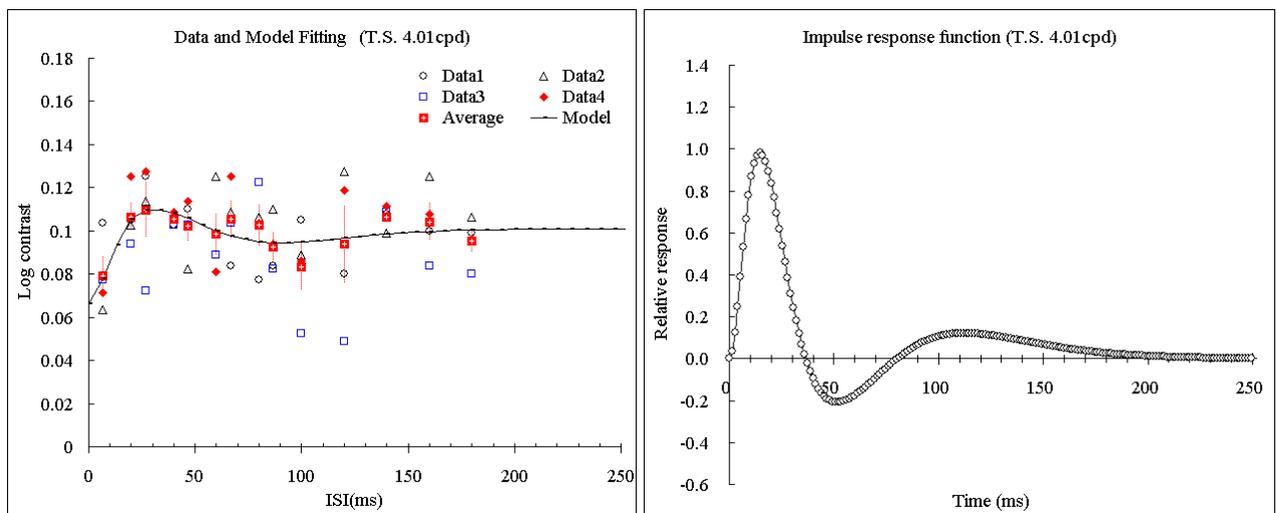


図 3.39 T.S. 4.01cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィッティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．

3.5 従来研究との比較

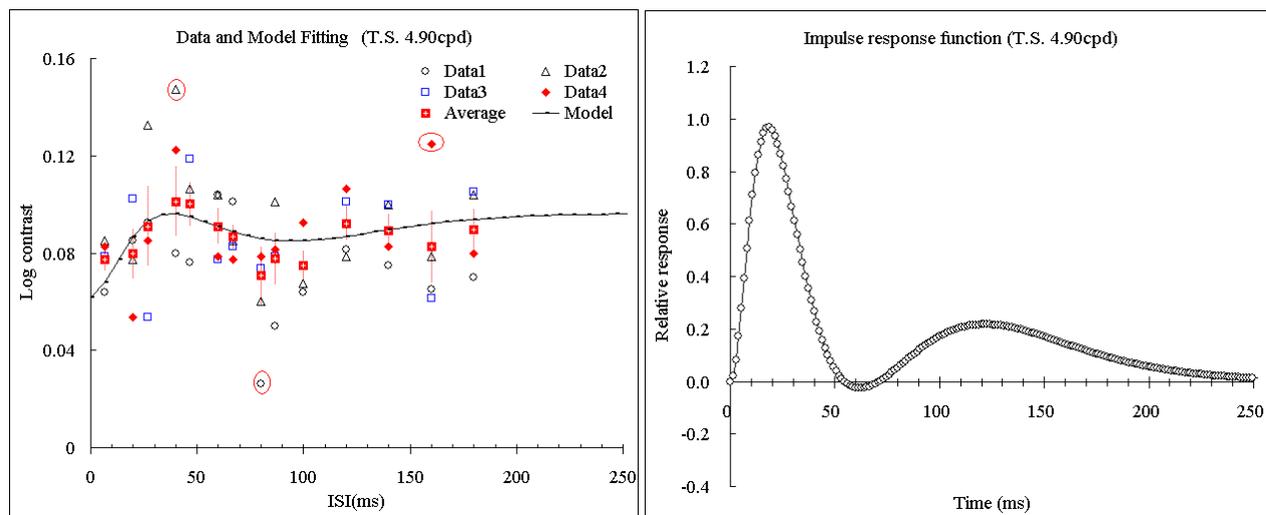


図 3.40 T.S. 4.90cpd の実験結果．左図に閾値データとモデルによるフィティング（直線）を示し，そこから求められた IRF を右図に示す．左図中の線で囲まれたデータ点はエラーとみなし，平均値に加えていない．

3.5 従来研究との比較

実験から得られたコントラスト閾値は，以下のような特徴が見られる．

- ISI が 50ms より短いところではコントラスト閾値は 2 刺激の相互干渉によって閾値の低下がみられるが，ISI が長くなるにつれてその干渉の程度はすぐに低くなり，閾値は上昇する．
- ISI が 50ms から 80ms ではコントラスト閾値は上昇している．この時間領域では，最初のパルス刺激によって発生した時間遅れをとまなう抑制信号と，2 番目のパルス刺激によって発生した興奮信号が干渉し，全体として興奮信号の強度が低下する．
- ISI が 130ms よりも長いところでは，コントラスト閾値はほぼ一定となり 2 刺激間の相互干渉はない．

以上の結果は，Uchikawa and Yoshizawa[3] の結果と一致している．

また、グレーティングを用いた CSF から予測されるインパルス応答関数では、低空間周波数（0.75cpd, 1.5cpd）で、SOA = 50ms で感度のピークを得ている [5]。これは、IRFs の抑制部分が存在することを示しており、本研究の実験結果と一致している。一方で、高空間周波数（3cpd, 6cpd）では CSF はピークを持たないという結果も示されているが、本研究から得られたデータの高空間周波数領域（4.45cpd, 4.90cpd）では IRFs の抑制部分が小さいながらも存在する結果が得られた。

3.6 コントラスト閾値データのばらつき

実験で得られたコントラスト閾値データには、セッション間でデータのばらつきが存在した。このばらつきは、閾値測定実験では避けられないものである。閾値は常に一定であることはなく、被験者の体調や、疲労、実験の日時、さらには被験者の性格によっても変化する。このばらつきを最小限に抑えるため、実験は 4 セッション行なわれ、解析にはその幾何平均値を利用したが、幾何平均値を計算する際に、明らかにエラーとみなせるデータ点は除外し、残り 3 セッションのデータを用いて幾何平均値を計算した。

第 4 章

考察

本章では，実験データから導出された輝度 IRFs の時間特性について考察する．Power Ratio Change Model と Receptive Field Model によって輝度 IRFs の時間特性変化が説明可能かどうかを検証する．

4.1 輝度 IRFs とコントラスト感度関数

輝度 IRFs は式 (2.1) に示されるように，時間変数 t の関数であるため，視覚系の時間特性を直接的に表す．視覚系の時間特性として従来はフリッカー感度を用いたコントラスト感度関数 (Contrast Sensitivity Functions) が知られている．そこで本研究では，2 刺激法から得られた輝度 IRFs から CSFs を求め，従来研究との比較を行なった．以下に，被験者ごとの輝度 IRFs から求めた CSFs を示す．

4.1.1 被験者 M.H. のコントラスト感度関数

グラフの縦軸はコントラスト感度の対数をとったもの，横軸は時間周波数の対数をとったものである．

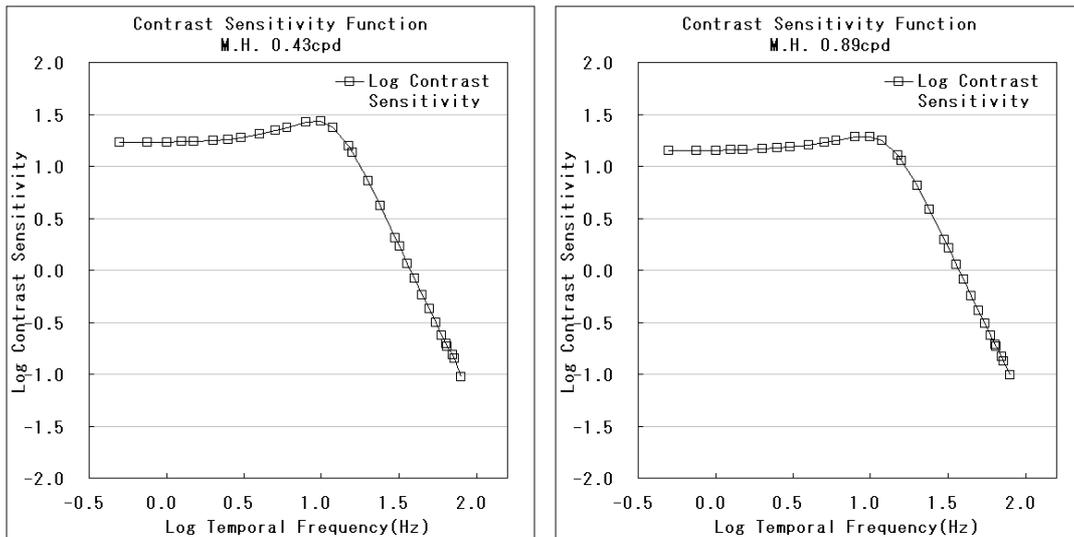


図 4.1 被験者 M.H. の輝度 IRFs から求めた CSF .(0.43 , 0.89cpd)

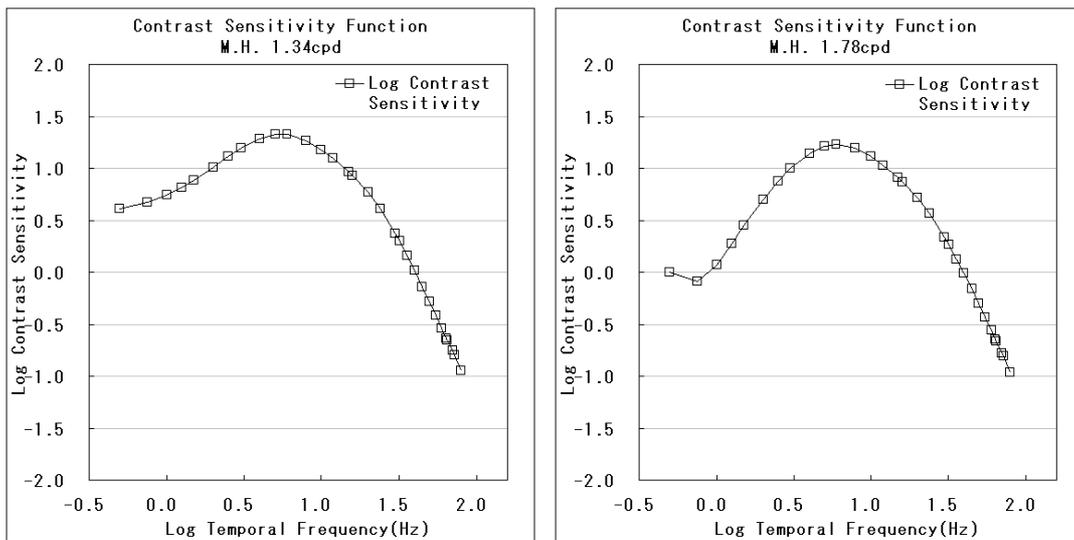


図 4.2 被験者 M.H. の輝度 IRFs から求めた CSF .(1.34 , 1.78cpd)

4.1 輝度 IRFs とコントラスト感度関数

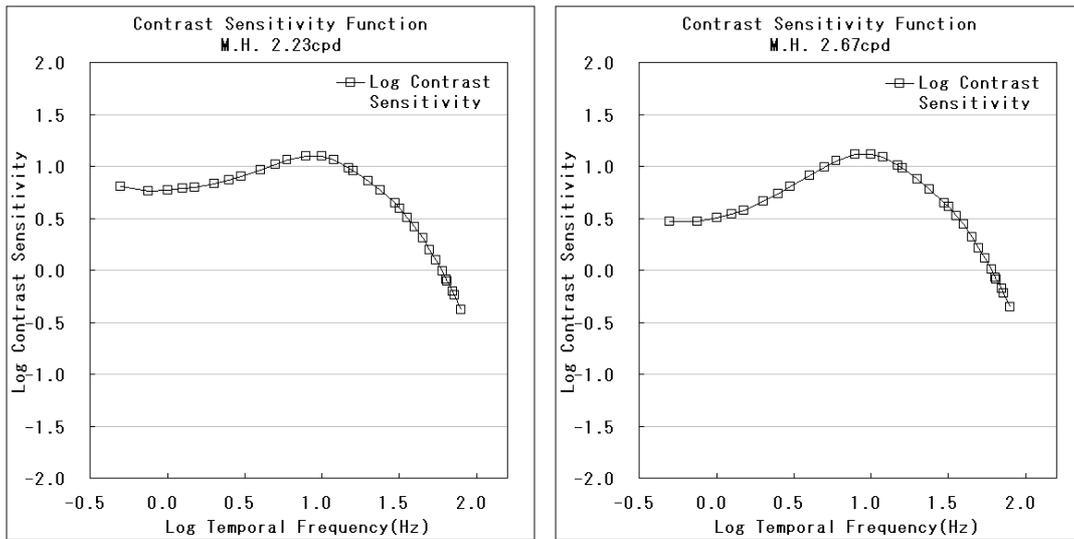


図 4.3 被験者 M.H. の輝度 IRFs から求めた CSF .(2.23 , 2.67cpd)

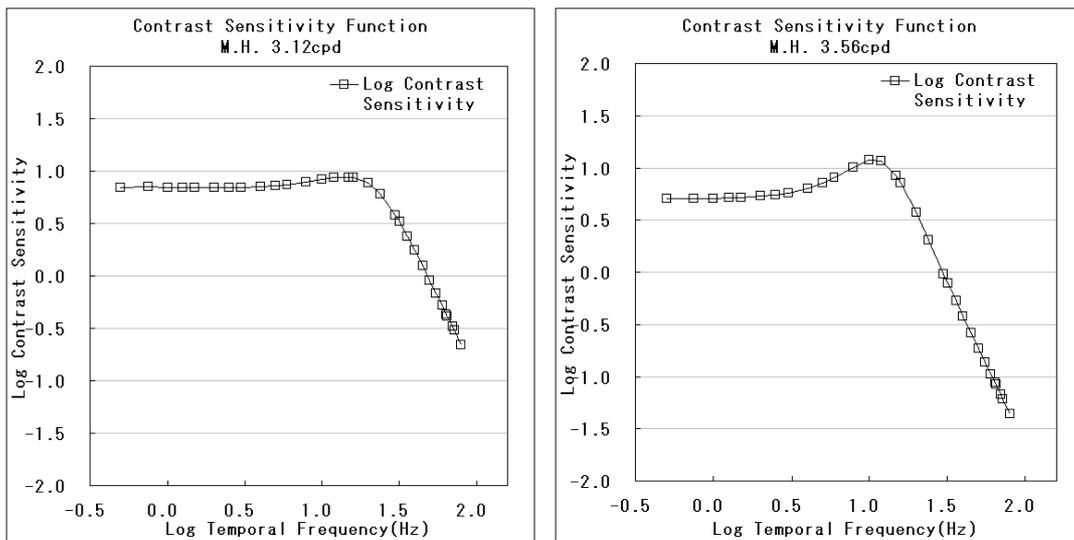


図 4.4 被験者 M.H. の輝度 IRFs から求めた CSF .(3.12 , 3.56cpd)

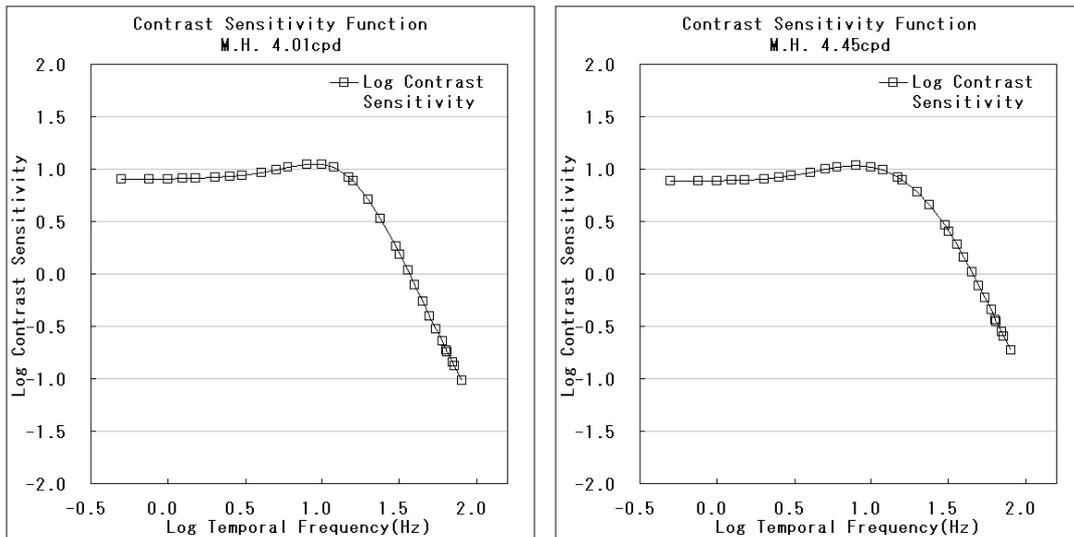


図 4.5 被験者 M.H. の輝度 IRFs から求めた CSF .(4.01 , 4.45cpd)

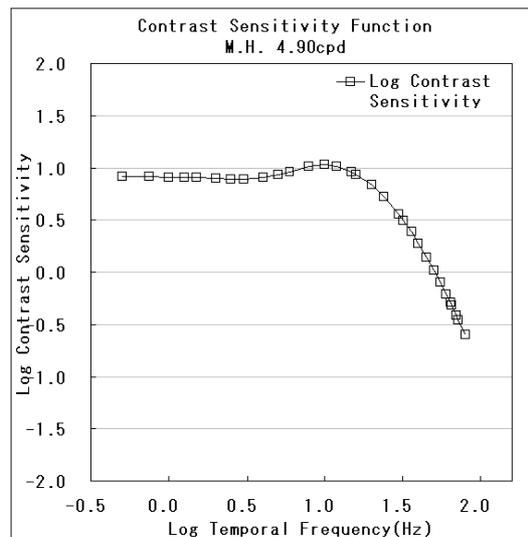


図 4.6 被験者 M.H. の輝度 IRFs から求めた CSF .(4.90cpd)

被験者 M.H. のコントラスト感度関数は、1.34、1.78、2.23、2.67、3.56cpd の空間周波数の時にバンドパス型を示し、それ以外では、ほとんどピークのないローパス型を示した。

一般に、コントラスト感度関数は、網膜照度が高くなる程、また、刺激の空間周波数が低くなる程バンドパス型を示す [6]。しかし、ここで得られた CSF は、低空間周波数 (0.43、

4.1 輝度 IRFs とコントラスト感度関数

0.89cpd) ではほとんどピークを持たないローパス型を示した。

4.1.2 被験者 Y.F. のコントラスト感度関数

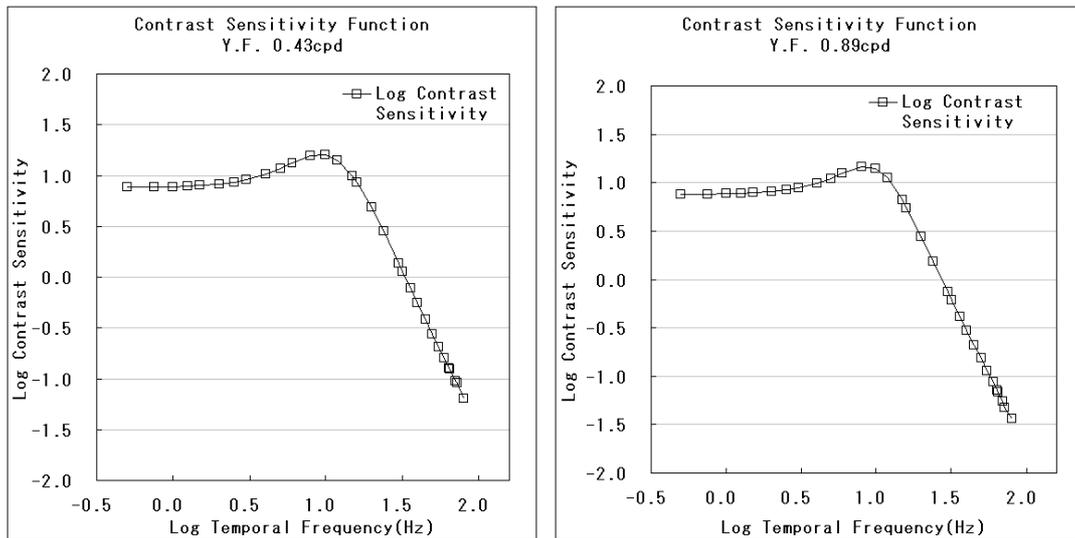


図 4.7 被験者 Y.F. の輝度 IRFs から求めた CSF .(0.43 , 0.89cpd)

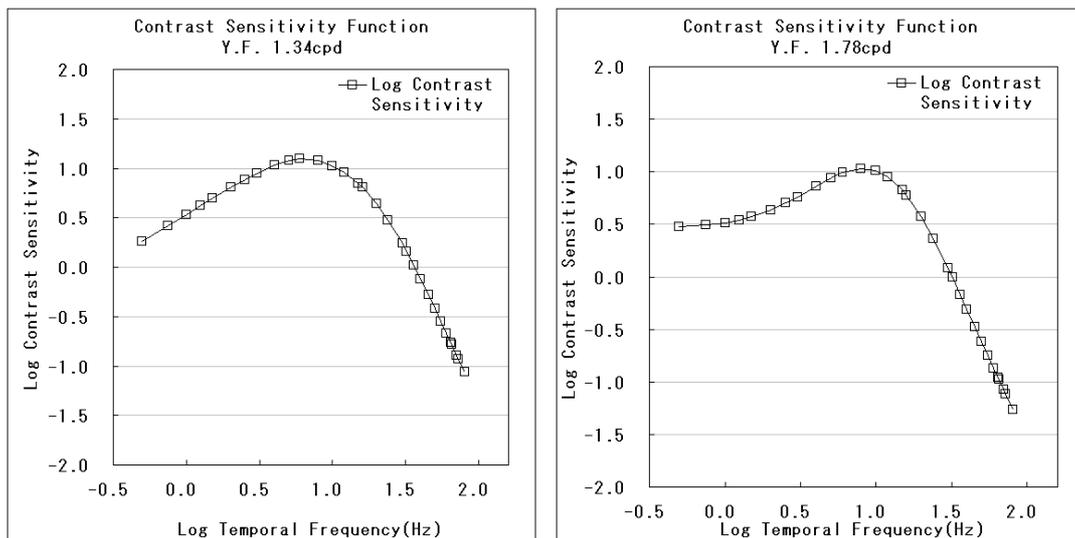


図 4.8 被験者 Y.F. の輝度 IRFs から求めた CSF .(1.34 , 1.78cpd)

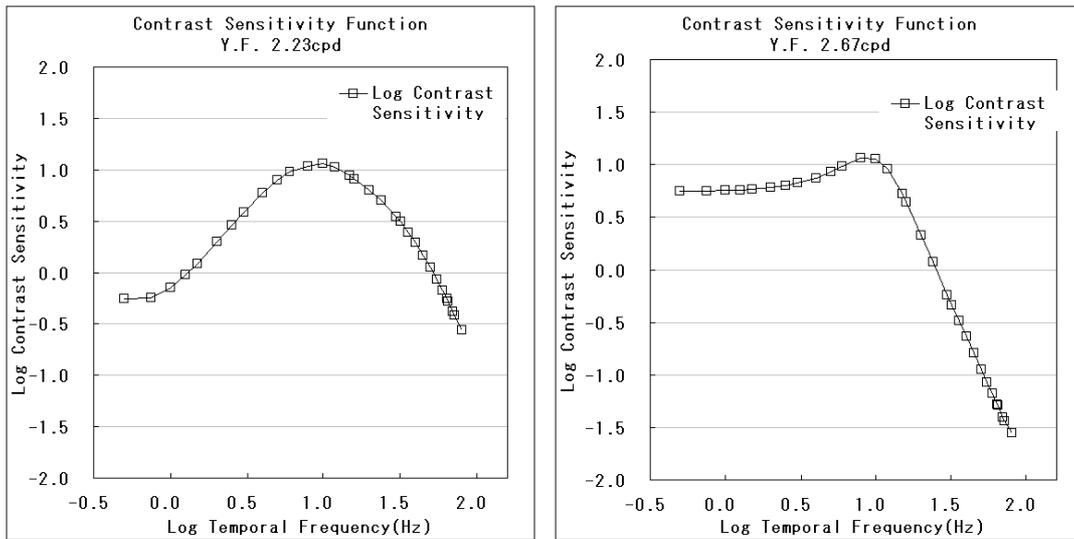


図 4.9 被験者 Y.F. の輝度 IRFs から求めた CSF .(2.23 , 2.67cpd)

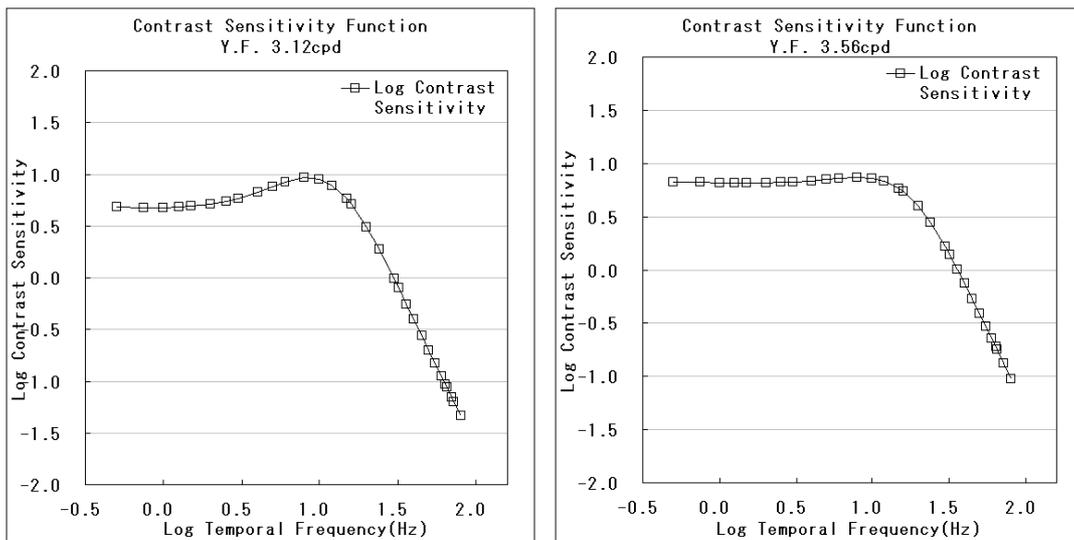


図 4.10 被験者 Y.F. の輝度 IRFs から求めた CSF .(3.12 , 3.56cpd)

4.1 輝度 IRFs とコントラスト感度関数

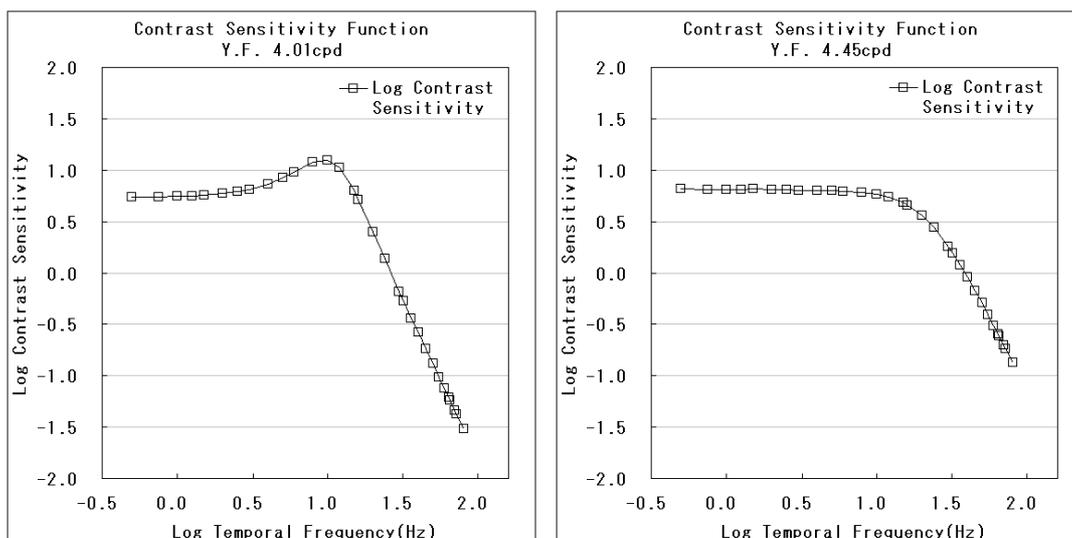


図 4.11 被験者 Y.F. の輝度 IRFs から求めた CSF .(4.01 , 4.45cpd)

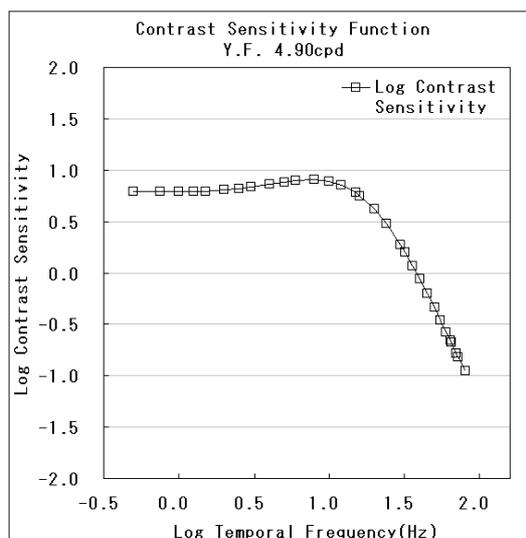


図 4.12 被験者 Y.F. の輝度 IRFs から求めた CSF .(4.90cpd)

被験者 Y.F. について、得られたコントラスト感度関数は、1.34、1.78、2.23、3.12cpd でバンドパス型を示した。0.43、0.89、2.67、3.12、4.01cpd は弱いピークがあるバンドパス型を示している。また、3.56、4.45、4.90cpd の高空間周波数刺激に対する CFS は、ローパス型を示した。これは、従来研究と一致する結果である。

4.1.3 被験者 T.T. のコントラスト感度関数

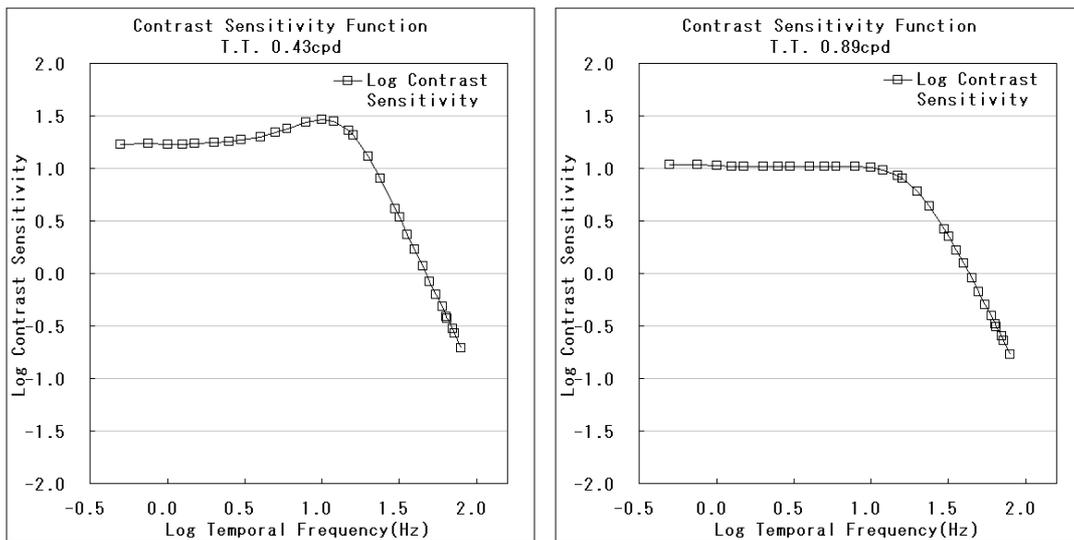


図 4.13 被験者 T.T. の輝度 IRFs から求めた CSF .(0.43 , 0.89cpd)

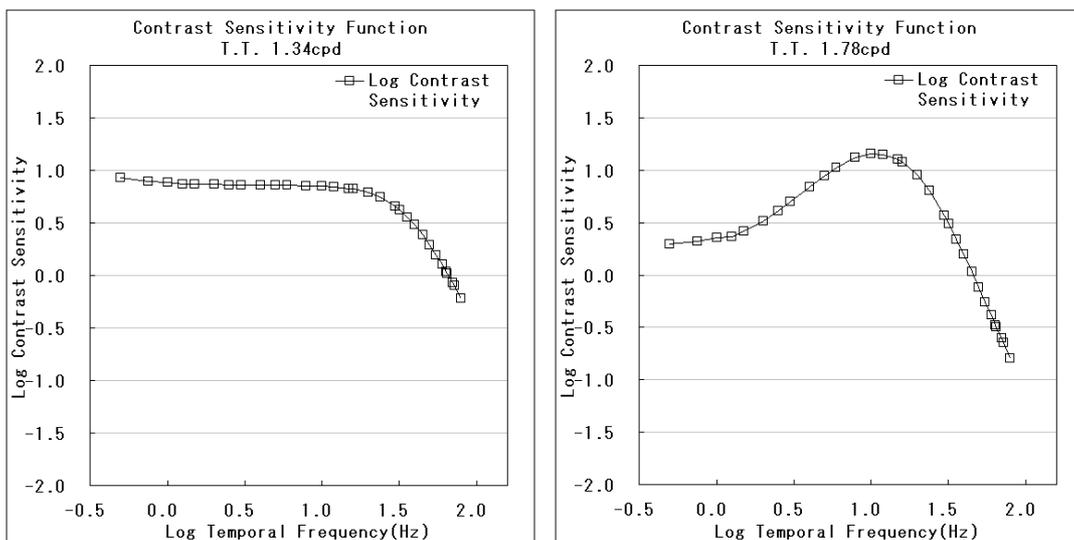


図 4.14 被験者 T.T. の輝度 IRFs から求めた CSF .(1.34 , 1.78cpd)

4.1 輝度 IRFs とコントラスト感度関数

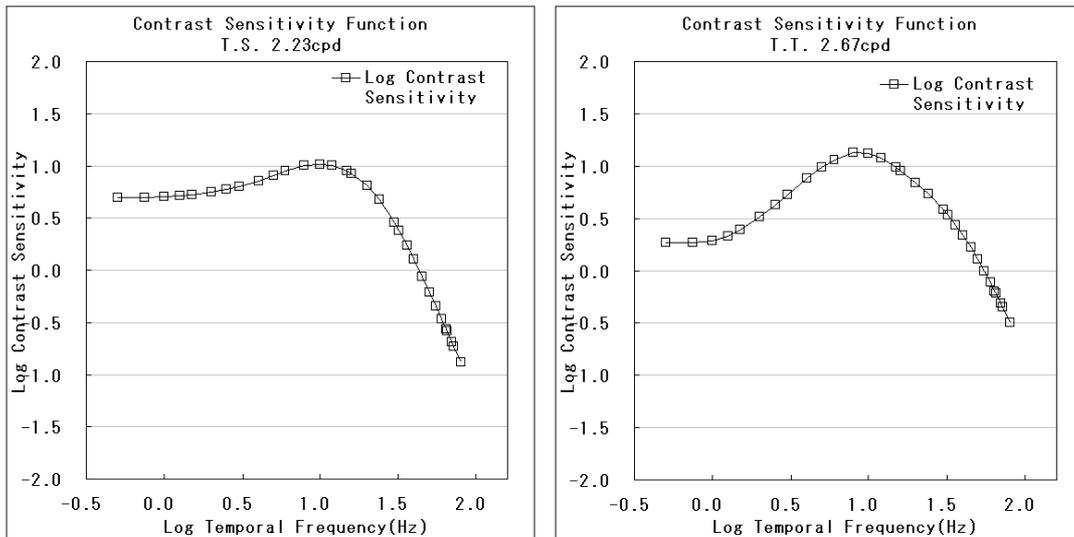


図 4.15 被験者 T.T. の輝度 IRFs から求めた CSF .(2.23 , 2.67cpd)

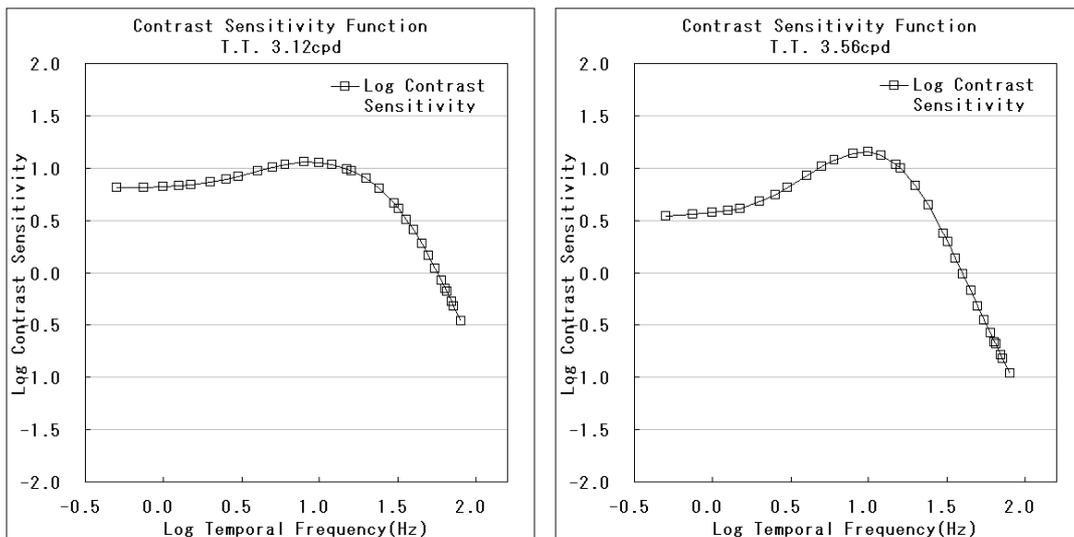


図 4.16 被験者 T.T. の輝度 IRFs から求めた CSF .(3.12 , 3.56cpd)

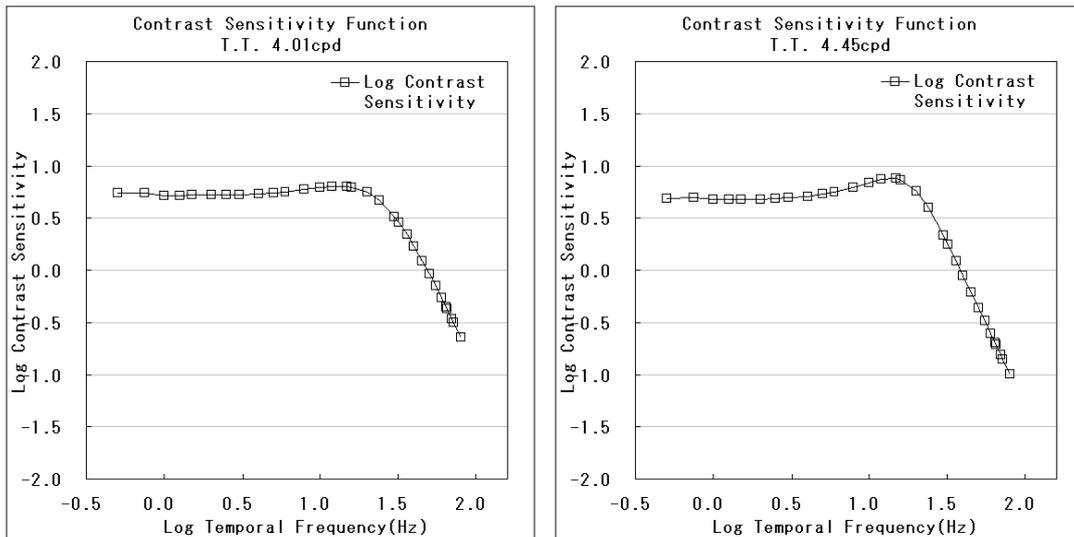


図 4.17 被験者 T.T. の輝度 IRFs から求めた CSF .(4.01 , 4.45cpd)

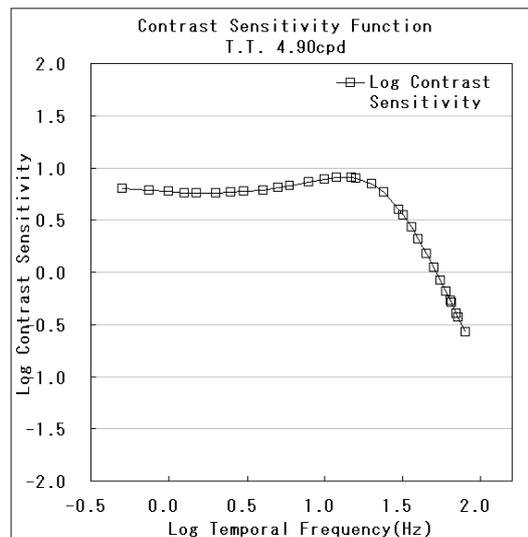


図 4.18 被験者 T.T. の輝度 IRFs から求めた CSF .(4.90cpd)

被験者 T.T. について，1.78 , 2.67 , 3.56cpd でバンドパス型を示した．その他の空間周波数の条件では，ピークを持たないローパス型を示していた．従来研究と比較すると，高空間周波数の刺激に対してローパス型を示す結果は一致したが，低空間周波数の刺激に対してバンドパス型を示す結果とは一致していない．

4.1 輝度 IRFs とコントラスト感度関数

4.1.4 被験者 T.S. のコントラスト感度関数

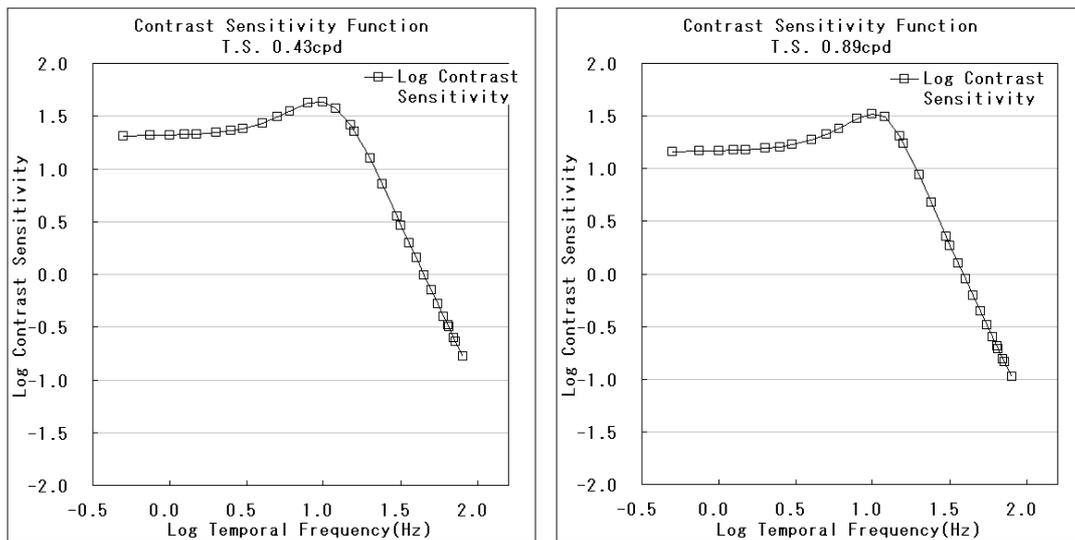


図 4.19 被験者 T.S の輝度 IRFs から求めた CSF .(0.43 , 0.89cpd)

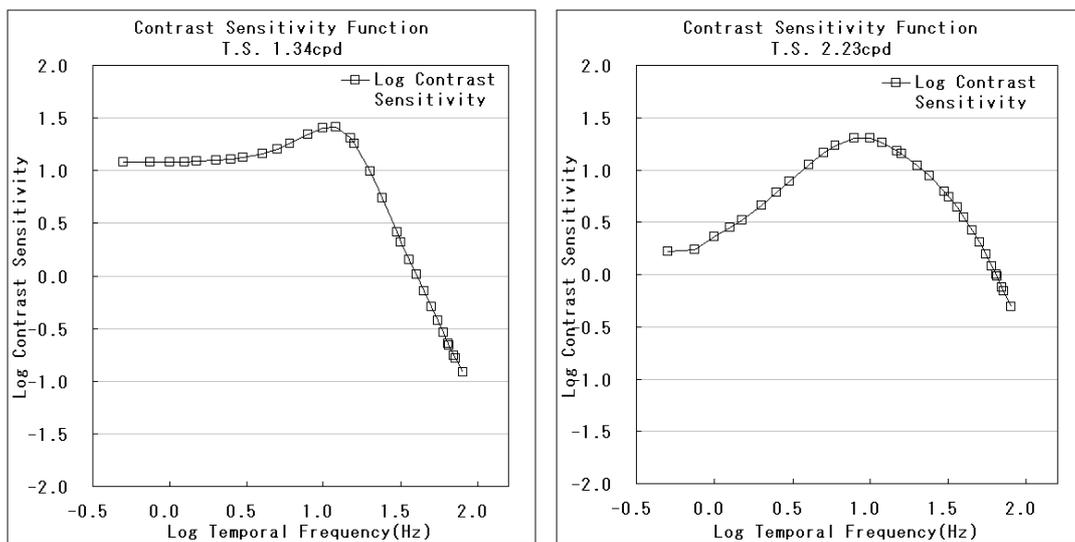


図 4.20 被験者 T.S の輝度 IRFs から求めた CSF .(1.34 , 2.23cpd)

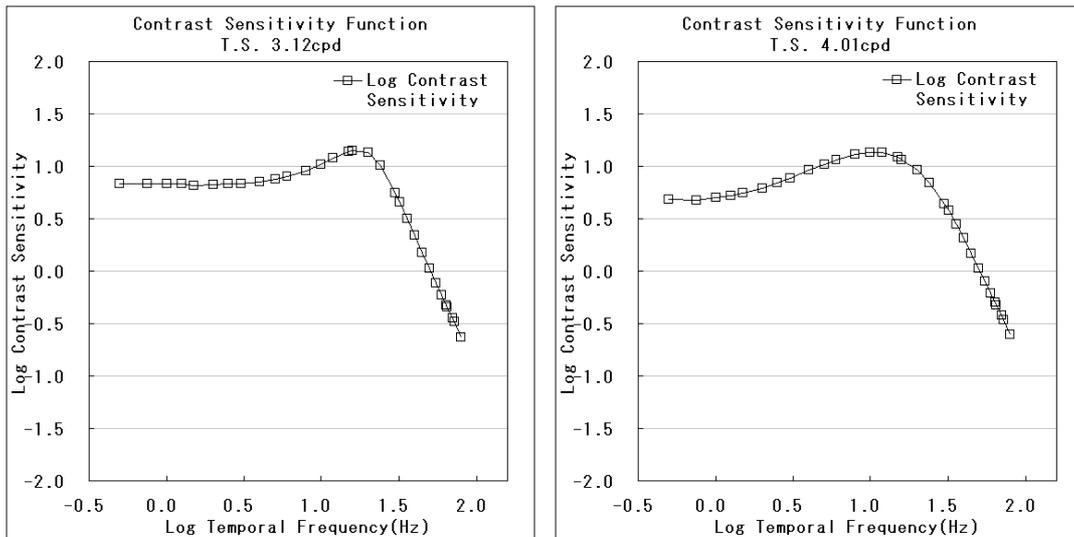


図 4.21 被験者 T.S の輝度 IRFs から求めた CSF .(3.12 , 4.01cpd)

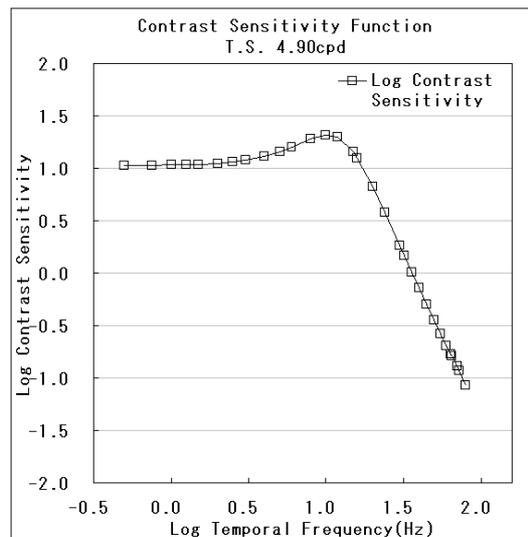


図 4.22 被験者 T.S の輝度 IRFs から求めた CSF .(4.90cpd)

被験者 T.S. について , CFS は 2.23 , 4.01cpd の条件でバンドパス型を示した . その他の空間周波数に対しては , 小さなピークがあるものの , ほぼローパス型を示す結果となった .

4.2 過去の研究との比較

4.2 過去の研究との比較

図 4.23 に大谷 [5] の研究から得られた CSF を示す .

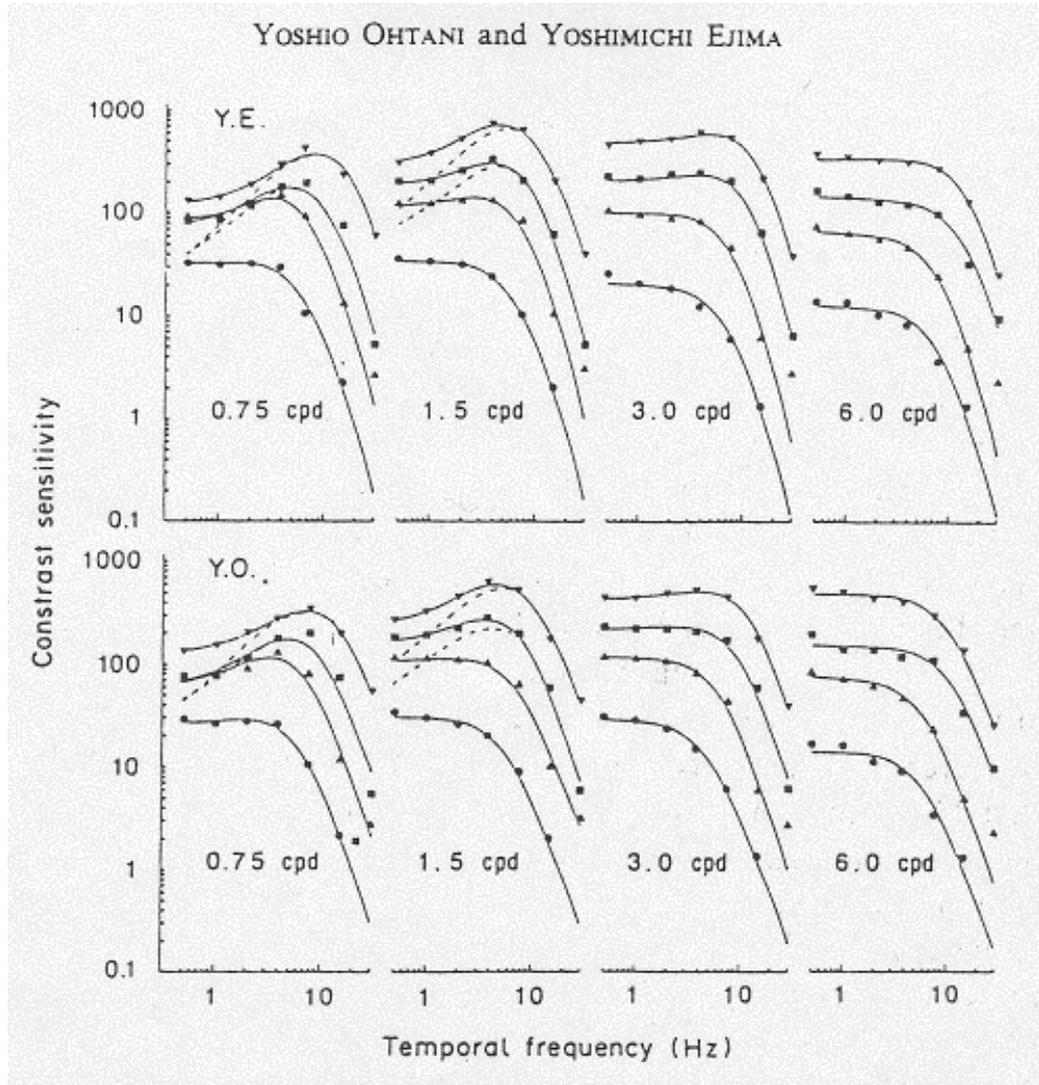


図 4.23 縦軸にコントラスト感度，横軸に時間周波数をとってプロットした．刺激の空間周波数は，左から 0.75, 1.5, 3.0, 6.0cpd である．グラフの上段が被験者 Y.E.，下段が被験者 Y.O. の結果である．．グラフのパラメータは網膜照度で，0.88()，8.8()，88()，1100()td である．

これは，正弦波グレーティングの時間関数を変数として測定された検出閾値から求めた CSF である [5]．本研究では，刺激の背景に $10\text{cd}/\text{m}^2$ を用いた．これを式 (4.1) を用いて

網膜照度に換算する．

$$\text{網膜照度 (td)} = \text{刺激の輝度 (cd/m}^2\text{)} \times \text{瞳孔面積 (mm}^2\text{)} \quad (4.1)$$

10cd/m² 時の瞳孔直径はおよそ 3mm となるので，本研究での網膜照度はおよそ，22.5td と換算される．

図 4.23 の 8.8td の結果，88td の結果と本研究から求められた CSF を比較する．図 4.23 中の 0.75cpd の場合，やや大きなピークを持つバンドパス型の CSF である．一方，本研究で 0.89cpd の結果から求められた CSF は，わずかにピークを持つ CSF で，網膜照度の差を考えると結果はほぼ一致すると考えられる．また，図 4.23 中の 6.0cpd の場合，ピークを持たないローパス型の CSF であるが，本研究で得られた CSF は被験者 T.S. 以外の被験者の結果とほぼ一致している．(被験者 T.S. の 4.90cpd の結果では，わずかではあるがピークがみられる)

しかしながら，中間の空間周波数では本研究と差異がみられる．図 4.23 の 1.5，3.0cpd の結果では，ほぼピークを持たないローパス型であるが，本研究で得られた CSF は 2 から 3cpd ではバンドパス型を示す結果が得られた．この差異の原因が，実験手法の違いによるものであるのか，または刺激の条件による違いであるのかは明らかではない．もし，実験手法による違いとするのであれば，2 刺激法による刺激呈示と，グレーティングによる刺激呈示の間に異なる検出のメカニズムが存在する可能性があり，今後検討する必要がある．

4.2.1 誤りであると考えられるコントラスト感度関数

輝度 IRFs から CSF を導出する際，図 4.24 に挙げるような例があったことを報告する．

4.3 輝度 IRFs の時間特性

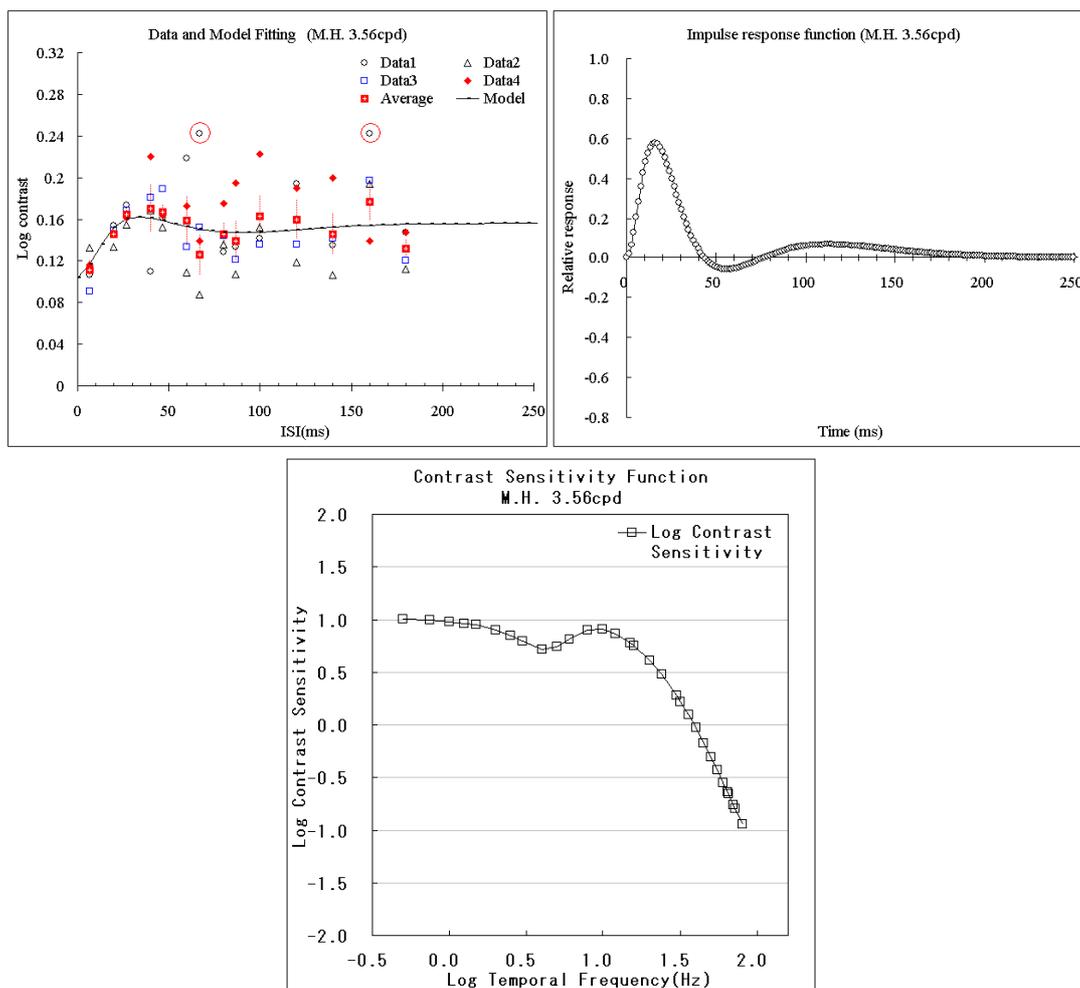


図 4.24 エラーと思われる輝度 IRF とそこから導出された CSF

これは、従来の研究からは得られていない形の CSF で、途中にくぼみがあるのが特徴である。このような CSF は過去に報告がないため、この場合は輝度 IRFs のパラメータに誤りがあると考えられる。本研究では、図 4.24 のような形の CSF が得られた場合はエラーとみなし、輝度 IRFs の導出から見直している。

4.3 輝度 IRFs の時間特性

輝度 IRFs は、式 (2.1) で示されるように、時間変数 t を含む関数である。網膜や視神経といった局所的ではなく、視覚系全体の時間特性を表す関数として扱う事ができる。

ヒトの視覚系内に特定の空間周波数にチューンした空間周波数チャンネルが複数存在するならば、その空間周波数チャンネルの時間特性が輝度 IRF の時間特性に反映されと考えられる。本研究では、空間周波数チャンネルが分離可能かどうかを検討するにあたって、輝度 IRFs の時間特性に着目した。輝度 IRFs の時間特性として、図 4.25 に示されるように、輝度 IRFs の強度が 0 となる時間（0 交差時間）を採用した。

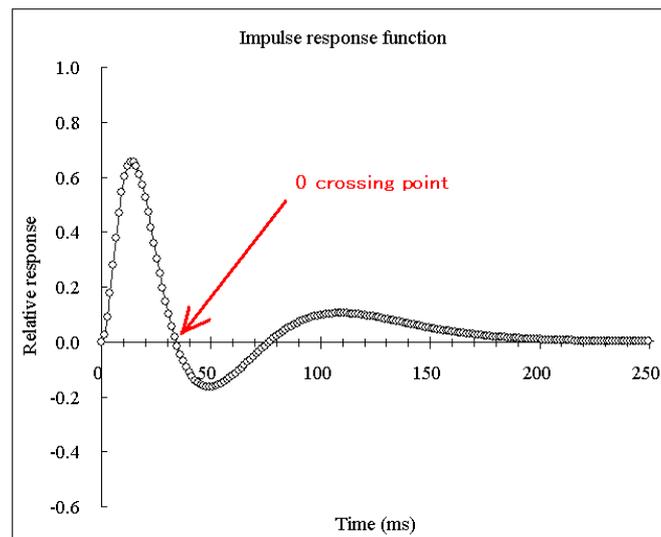


図 4.25 IRF の時間特性の比較点．IRF の強度が 0 となる時間（0 交差時間）について比較した．

図 4.26 に被験者 4 名から得られた輝度 IRFs の 0 交差時間を示す．グラフの縦軸は時間 (ms)，縦軸は刺激の空間周波数 (cpd) を示し，被験者ごとに異なるシンボルで表示した．

4.3 輝度 IRFs の時間特性

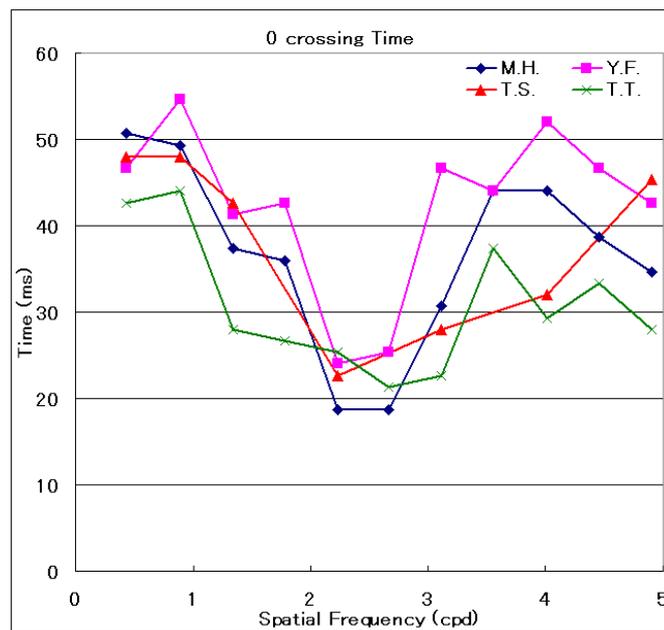


図 4.26 輝度 IRFs の 0 交差時間を被験者ごとに異なるシンボルでプロットした．縦軸に時間 (ms)，横軸に刺激の空間周波数 (cpd) をとった．

その特徴を以下にまとめる．

- 0.43, 0.89cpd の低空間周波数領域では輝度 IRFs の 0 交差時間に大きな違いはなく，全被験者平均しておよそ 48ms である．
- 輝度 IRFs の 0 交差時間は 1.34cpd から減少傾向を示し，どの被験者も刺激の空間周波数が 2 から 3cpd の時にもっとも短くなった．その時の 0 交差時間は，およそ 25.6ms 前後である．
- 3cpd 以降，0 交差時間は増加傾向を示した．被験者 M.H. と被験者 T.T. に関しては 3.56cpd で極大値をとり，被験者 M.H. は 44ms，被験者 T.T. は 37ms であった．被験者 Y.F. は 4.01cpd で極大値 52ms となった．また，被験者 T.S. に関しては，3cpd 以降単調増加の傾向を示した．
- 被験者 T.S. を除く 3 名の被験者については，4cpd 以降，0 交差時間は再び減少傾向を示したが，その傾きは緩やかなものであった．3 名の被験者のこの区間での平均は，

38.8ms となり，低空間周波数領域と比較すると早いものであった．

刺激の空間周波数変化が輝度 IRFs の 0 交差時間に影響を与え，その傾向は被験者 3 名についてはほぼ同じであった．1 人の被験者については，高空間周波数領域において他の被験者と差異がみられた．刺激の空間周波数が輝度 IRFs の時間特性に与える影響を説明するため，本研究では次に説明する Power Ratio Change Model と Receptive-Field Model の 2 つのモデルを検討した．

4.4 Power Ratio Change Model (PRC Model)

本研究で提案した Power Ratio Change Model (以下，PRC モデルと略す)とは，図 4.27 に示されるモデルで，IRF の興奮相と抑制相の時間的足し合わせ範囲に着目したモデルである．

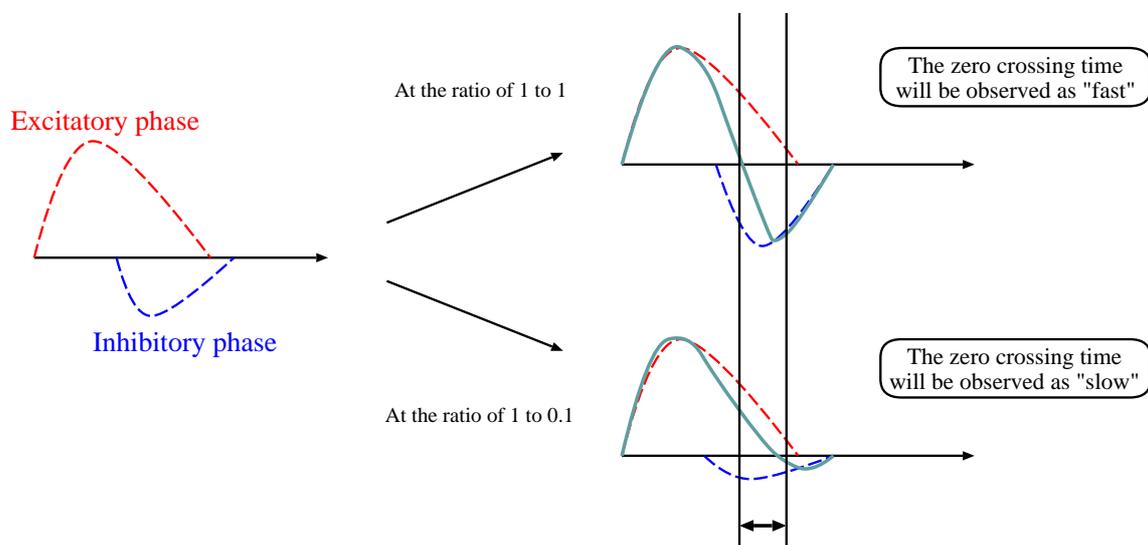


図 4.27 Power Ratio Change Model の概要．IRF の興奮相と抑制相の強度比率が大きい場合，0 交差時間は早くなる．逆に，IRF の興奮相と抑制相の強度比率が小さい場合，0 交差時間は遅くなる．受容野の時間的足し合わせ範囲は変化しない．

IRFs の時間的足し合わせ範囲は，受容野サイズによって既に決まっていると仮定すると，

4.4 Power Ratio Change Model (PRC Model)

興奮部分からの興奮信号と、抑制部分からの抑制信号が足し合わされる時間は一定であると考えられる。IRF の興奮信号強度と抑制信号強度の比率によって、0 交差時間が前後にスライドするというモデルである。図 4.27 上図に示されるように、受容野中心部分から生じる興奮信号（興奮相）と、受容野周辺から時間遅れを伴って足し合わされる抑制信号（抑制相）の強度割合が、1 : 1 に近い場合、IRF の 0 交差時間は早くなると考えられる。逆に、図 4.27 下図に示されるように、興奮相と抑制相の強度比が 1 : 0.1 程になる場合は、0 交差時間は長くなると考えられる。

このモデルを利用して、実験から得られた IRF の興奮相と抑制相の強度比率を検討したものが、図 4.28 である。

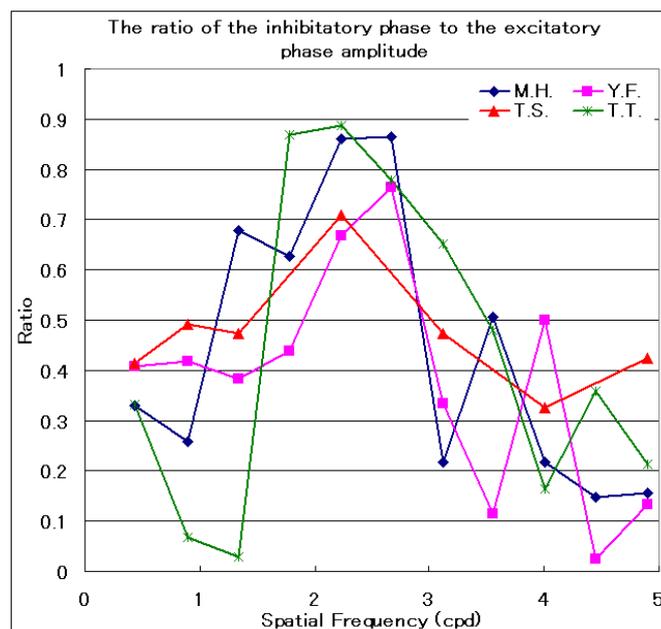


図 4.28 IRFs の興奮相と抑制相の強度比率．縦軸に $\frac{\text{抑制相の強度}}{\text{興奮相の強度}}$ ，横軸に空間周波数をとり、被験者ごとに異なるシンボルでプロットした。

図 4.28 から、4 人の被験者ごとに少し差はあるが、次のような特徴が得られた。

- 低空間周波数側 (0.43, 0.89, 1.34cpd) では、興奮相と抑制相の強度比率は 0.5 ほどである。

- 1.78, 2.23, 2.76cpd の空間周波数では, 興奮相と抑制相の強度比率は高くなる .
- 3.12 cpd 以上の空間周波数では, 興奮相と抑制相の強度比率は再び低くなる .

低空間周波数 (0.43, 0.89, 1.34cpd) の領域では, 興奮相と抑制相の割合が 0.5 を越えることはないが, 被験者 M.H. の 1.34cpd の結果はおよそ 0.75 と高い値となった .

中間の周波数 (1.78, 2.23, 2.76cpd) の領域では, 興奮相と抑制相の割合がこの領域で最も高くなる特徴は全被験者で一致している . さらに, 3.12cpd 以降の空間周波数では, 興奮相と抑制相の割合に減少傾向がみられた .

3.56cpd 以降, 刺激の空間周波数が増加するにつれて, 興奮相と抑制相の比率は再び増加する点が 1 点あるが, 2.23cpd 周辺の時のようには高い値は示していない .

低空間周波数領域 (0.43, 0.89, 1.34cpd) と, 1.78, 2.23, 2.78cpd の領域における興奮相と抑制相の比率の変化は, 被験者ごとに検定した結果, 統計的に有意な差であった (有意水準 5 %).

IRF の強度比率を比較した結果, 低空間周波数領域 (0.43, 0.89, 1.34cpd) と 2 から 4cpd までの領域, 高空間周波数領域 (4.45, 4.90cpd) の 3 つの領域に分割して捉えることができた .

この領域が, それぞれ別の空間周波数チャンネルの応答を反映していると考えられることもできるが, ここでさらに受容野モデルを導入し, 検討する .

4.5 Receptive-Field Model (受容野モデル)

Receptive-Field Model (以下, 受容野モデルと略す) とは, 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持つ受容野のサイズによって決定されると仮定したものである . 空間的な受容野サイズの切り替わりが, すなわち空間周波数チャンネルの切り替わりを意味している . 図 4.29 に受容野モデルの概略を示す .

4.5 Receptive-Field Model (受容野モデル)

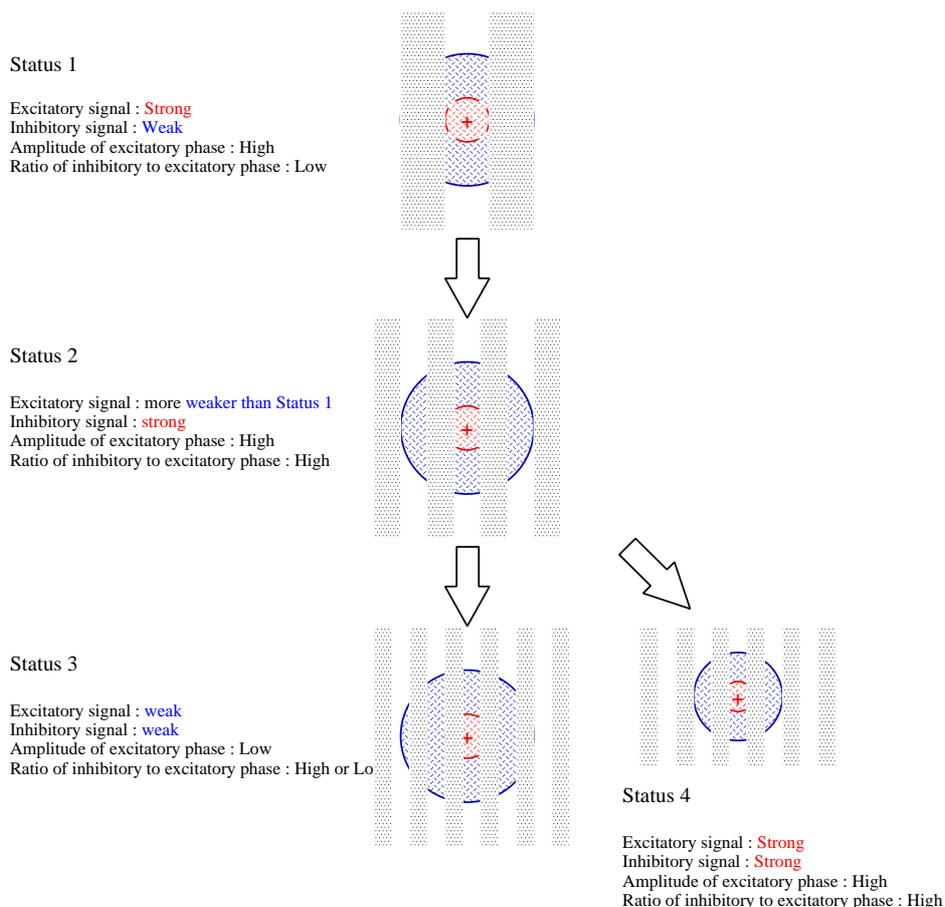


図 4.29 Receptive-Field Model (受容野モデルの概略．オンセンター/オフサラウンドの受容野は，ある特定の空間的足し合わせ範囲を持つ．)

図 4.29 に示すように，オンセンター/オフサラウンド受容野がある特定の空間的なサイズを持つとすると，刺激の空間周波数に伴う状態変移は，次のように考えられる．

1. 状態 1 において，受容野のセンター部分に光刺激，受容野の抑制部分にピッチ（影）となる場合，興奮信号は強く，抑制信号は弱くなることから，発生する輝度 IRFs の興奮相の振幅は大きく，抑制相の振幅は小さくなる．その結果，興奮相と抑制相の強度比率は小さくなる．
2. 状態 1 より高い空間周波数の刺激が与えられると状態 2 となる．受容野のセンター部分の直径よりも周期の短い周波数の刺激の場合，受容野のセンター部分にピッチも含ま

れるようになる。そのため興奮の信号は状態 1 に比べ小さくなり、周辺の抑制部分には光刺激が与えられるため、抑制の信号は強くなる。発生する輝度 IRFs の興奮相の振幅は状態 1 に比べると小さく、抑制相の振幅は大きくなる。その結果、興奮相と抑制相の強度比率は大きくなる。

3. 状態 2 よりさらに空間周波数の高い刺激が与えられたのが状態 3 である。受容野センター部分、周辺部分ともに状態 2 よりもさらにピッチが多く含まれているため、興奮信号、抑制信号どちらも弱い信号となる。発生する輝度 IRFs の興奮相、抑制相ともに振幅が小さくなる。この時の興奮相と抑制相の強度比率は、興奮相と抑制相の強度が同程度ならば高くなるが、一概に決めることはできない。
4. ここで、空間的に小さな足し合わせ範囲を備えた受容野を考えたものが、状態 4 である。受容野の空間的なサイズが小さくなることで、中心部分により多くの刺激が与えられ、状態 2 と同じ状態となる。状態 3 と比較して、興奮信号、抑制信号ともに強くなり、発生する輝度 IRFs の興奮相、抑制相ともに強度は大きくなる。その結果、興奮相と抑制相の強度比率は大きくなる。

刺激の空間周波数が高くなるに伴い、状態 1 から状態 2 へと移行する。状態 2 からさらに空間周波数が高くなると、状態 3 もしくは状態 4 へと移行するが、興奮信号が強く発生する状態 4 の方が、刺激の検出には有利に働くと考えられる。状態 2 と比較して状態 4 の方が優位 (dominant) であると考えられる。

受容野モデルから予測すると、輝度 IRFs の興奮相の振幅は、状態 1 から状態 2、状態 3 に移行するにつれて、減少し、状態 2 から状態 4 への移行する場合は、興奮相の振幅は増加すると予測される。

この仮説を検証するために、実験から得られた輝度 IRFs の興奮相の振幅を被験者ごとに比較したのが、図 4.30、図 4.31、図 4.32、図 4.33 である。

4.5 Receptive-Field Model (受容野モデル)

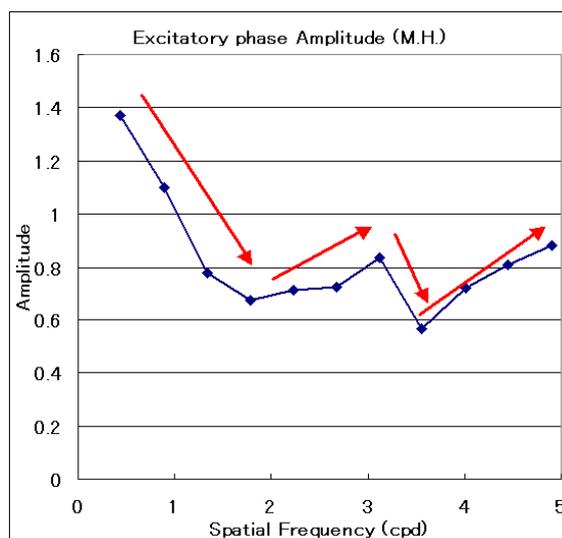


図 4.30 被験者 M.H. の実験から得られた輝度 IRFs の興奮相の振幅．縦軸に強度，横軸に刺激の空間周波数をとってプロットした．

被験者 M.H. について，輝度 IRFs の興奮相の振幅は，0.43cpd が最も大きく，1.78cpd までの区間で減少している．1.78cpd から 3.12cpd の区間で増加傾向がみられ，3.12cpd から 4.01cpd の間で減少する．4.01cpd 以降 4.90cpd まで再び増加傾向を示す．

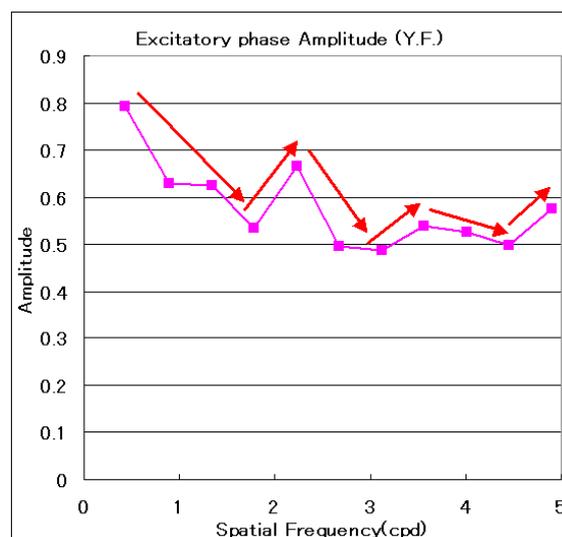


図 4.31 被験者 Y.F. の実験から得られた輝度 IRFs の興奮相の振幅．縦軸に強度，横軸に刺激の空間周波数をとってプロットした．

被験者 Y.F. について、輝度 IRFs の興奮相の振幅は 0.43cpd から 1.78cpd までの区間で緩やかに減少している。1.23cpd から 2.23cpd の区間で増加し、2.23cpd から 3.12cpd の区間で再び減少する。3.12cpd から 3.56cpd の区間では増加し、3.56cpd から 4.45cpd の区間は減少傾向を示した。4.45cpd から 4.90cpd の区間では増加している。

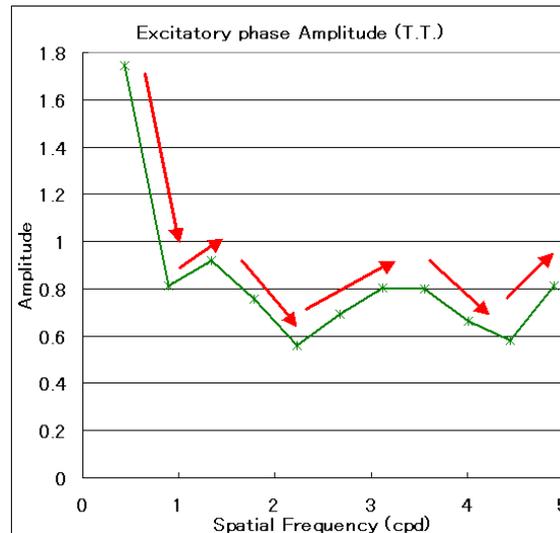


図 4.32 被験者 T.T. の実験から得られた輝度 IRFs の興奮相の振幅。縦軸に強度，横軸に刺激の空間周波数をとってプロットした。

被験者 T.T. について、輝度 IRFs の興奮相の振幅は 0.43cpd から 0.89cpd までの区間で急激に減少し、0.89cpd から 1.34cpd の区間でいったん増加する。1.34cpd から 2.23cpd の区間は減少傾向を示し、2.23cpd から 3.12cpd までの区間では再び増加傾向を示す。3.12cpd から 3.56cpd の区間では、興奮相の振幅はほとんど変化がなく、3.56cpd から 4.45cpd の区間で緩やかに減少する。4.45cpd から 4.90cpd の区間では再び増加傾向を示す。

4.5 Receptive-Field Model (受容野モデル)

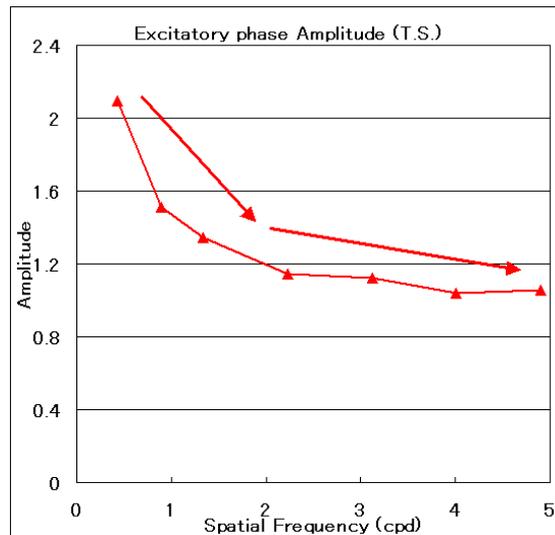


図 4.33 被験者 T.S. の実験から得られた輝度 IRFs の興奮相の振幅．縦軸に強度，横軸に刺激の空間周波数をとってプロットした．

被験者 T.S. について，輝度 IRFs の興奮相の振幅は，ほぼ単調減少を示す結果であった．この被験者の結果については次のような仮説が考えられる．

図 4.29 中の状態変移の際，受容野サイズの変更に伴い，空間的に小さなサイズの受容野から発生する興奮信号は，空間的足し合わせ範囲が狭くなると考えられる．空間的に大きなサイズの受容野では，刺激のピッチがオンセンター部分に入ってきている場合であっても，空間的足し合わせ範囲が広い．空間的足し合わせ範囲の異なる 2 種類の受容野の興奮信号の出力が同じレベルである，もしくは，足し合わせ範囲の狭い（受容野サイズの小さい）受容野からの出力が小さくなったのではないか．興奮信号の出力が同じレベルである場合，刺激のエッジ部分の強調あるいは空間解像度を向上させるために受容野サイズを持つものが積極的に検出に関わったのではないか．

受容野モデルの仮定から，興奮信号の強度が増加に転じた区間で空間周波数チャンネルが切り替わると考えられるので，各被験者の結果から，次のように考えられる．

- 被験者 M.H. について，1.78cpd から 3.12cpd の区間，4.01cpd から 4.90cpd の区間の 2 ヶ所で閾値検出に関わる空間周波数チャンネルの切り替わりが存在する．

- 被験者 Y.F. について，1.78cpd から 2.23cpd の区間，3.12cpd から 3.56cpd の区間，4.45cpd から 4.90cpd の 3 ヶ所で，閾値検出に関わる空間周波数チャンネルの切り替わりが存在する．
- 被験者 T.T. について，0.89cpd から 1.34cpd の区間，2.23cpd から 3.12cpd の区間，4.45cpd から 4.90cpd の 3 ヶ所で，閾値検出に関わる空間周波数チャンネルの切り替わりが存在する．
- 被験者 T.S. については，興奮相の強度は単調減少傾向を示しているため，減少の傾きが小さい区間で判断する．2.23cpd から 3.12cpd の区間，4.01cpd から 4.90cpd の区間の 2 ヶ所で，閾値検出に関わる空間周波数チャンネルの切り替わりが存在する．

4.6 考察まとめ

輝度 IRFs の時間特性

コントラスト検出閾値の測定から計算された輝度 IRFs は視覚系の時間特性を直接的に表すことから，導出した輝度 IRFs の 0 交差時間を時間特性として比較した．図 4.34 に，得られた輝度 IRFs の 0 交差時間を示す．異なる時間特性が得られた場所を図中に破線で囲んでいる．

1. 低空間周波数 (0.43, 0.89, 1.34cpd) 領域では，輝度 IRFs の 0 交差時間は遅く，平均するとおよそ 48ms であった．
2. 2 ~ 3cpd の空間周波数領域では，輝度 IRFs の 0 交差時間は全実験条件を通してもっとも早くおよそ 26ms であった．
3. 高空間周波数 (4.01, 4.45, 4.90cpd) 領域では，輝度 IRFs の 0 交差時間は遅くなり，およそ 39ms であった．

4.6 考察まとめ

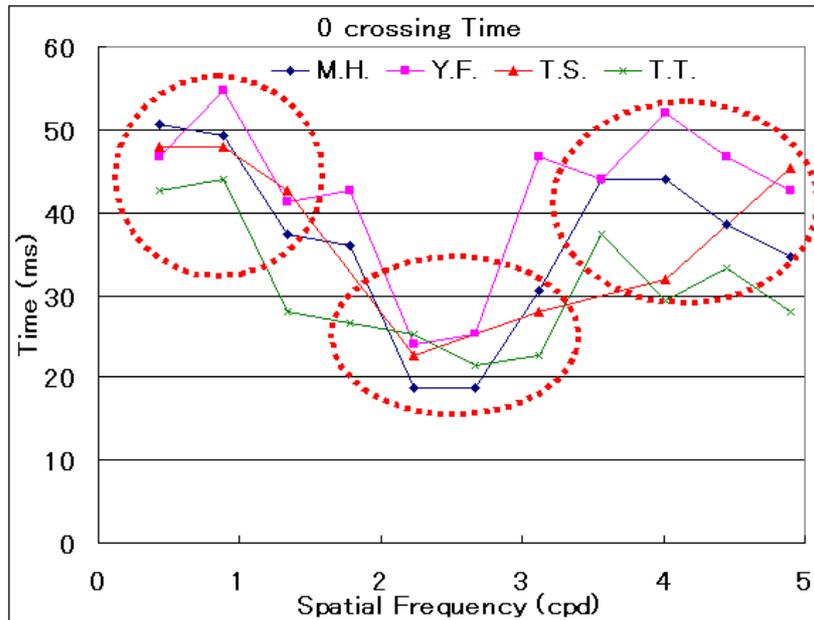


図 4.34 輝度 IRFs の 0 交差時間比較．異なる時間特性を示す部分を破線で囲んだ．

上記の結果から，輝度 IRFs の時間特性は刺激の空間周波数の影響を受けて変化することが明らかとなった．この輝度 IRFs の時間特性変化の理由を説明するため，本研究では PRC モデルと受容野モデルを検討した．

PRC モデル

PRC モデルを検討するため，輝度 IRFs の興奮相と抑制相の強度比率を比較し，図 4.6 に結果を示す．

1. 低空間周波数 (0.43, 0.89, 1.34cpd) 領域では，全被験者ともにやや低い値を示した．被験者 M.H. の 1.34cpd の値は 0.7 と比較的高い値を示している．
2. 2 から 3cpd の空間周波数領域では，全被験者で興奮相と抑制相の比率が高い値を示した．
3. 3.5 から 4.5cpd の間にも，わずかであるが，興奮相と抑制相の強度比率が高くなる傾向がみられた．

PRC モデルを検討した結果，輝度 IRFs の興奮相と抑制相の強度比率は，輝度 IRFs

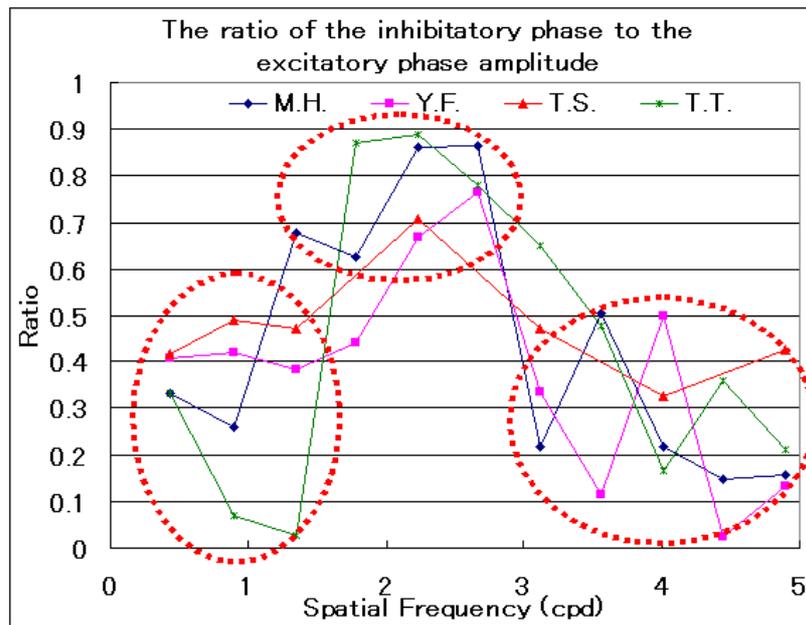


図 4.35 輝度 IRFs の興奮相と抑制相の強度比率を比較．異なる特性を示す部分を破線で囲った．

の時間特性変化と同じ空間周波数領域で分離できた．

受容野モデル

受容野モデルを検討するため，輝度 IRFs の興奮相の強度を比較し，図 4.36 に結果を示す．被験者 3 人について，輝度 IRFs の興奮相の強度が増加する空間周波数が存在することが明らかとなった．この空間周波数は，被験者間で水平方向（空間周波数軸方向）に多少スライドするが，およそ 2 cpd 付近であった．また，微弱ではあるが 4cpd 付近にも興奮相の増加する傾向がみられた．

被験者 T.S. については，IRFs の興奮相の強度は単調減少の傾向を示した．これは 2cpd 付近において，単調減少の傾きがほぼ水平を示していることから，受容野が切り替わる前後で，受容野の空間的なサイズ変化により興奮相の強度が増加しなかったことが考えられる．

4.7 今後の課題

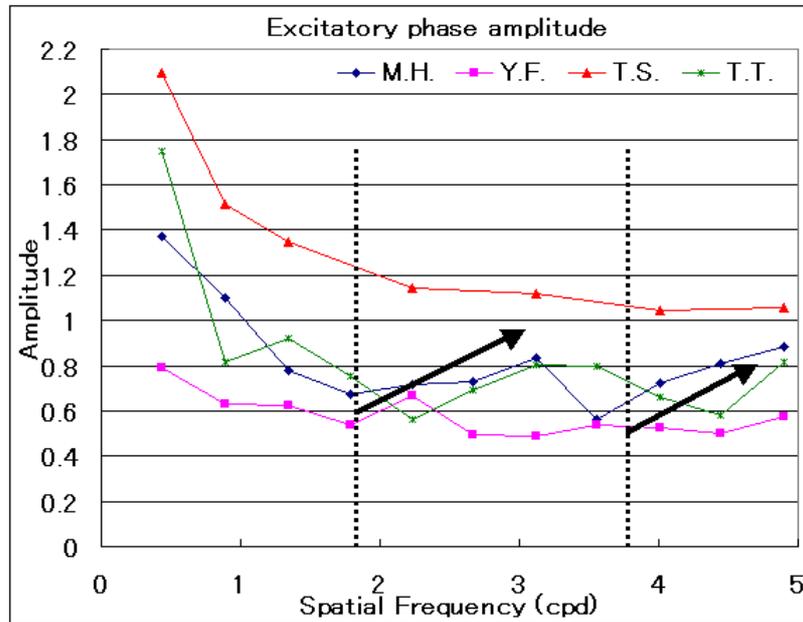


図 4.36 IRFs の興奮相の強度変化．増加傾向部分を矢印で示した．

輝度 IRFs の興奮相の増加も，輝度 IRFs の時間特性変化と同じ空間周波数領域で分離する事ができた．

これら 3 つの特徴が，同じ 2cpd 周辺の空間周波数領域で変化するという事は，この空間周波数領域で閾値検出に関わる空間周波数チャンネルが切り替わっている事を示唆している．

4.7 今後の課題

本研究の今後の検討課題として，次の点が挙げられる．

まず 1 つめに，コントラスト検出閾値データのばらつきを最小限に抑えることである．今回，同じ条件下での実験 4 回の幾何平均を求め，閾値としたが，各回で閾値が大きく異なる時もあった．閾値を出来るだけ正確に測定するためには，被験者の体調や性格など不確定な要素が大きいと考えられる．被験者の疲労を低減するため，実験を続けて行なわない，リラックスした状態で実験を行なうなどの細かな配慮が必要だと考える．さらに，同じ条件の

実験を続けて行なうのではなく、実験順をランダムに変化させることも有効と思われる。今後、閾値測定実験を行なう際にはできるだけ被験者の状態が一定になるよう注意しなければならない。

2 つめとして、被験者の眼球運動の影響である。眼球運動による網膜パターンの変化や、閾値上昇の可能性を否定できない。これを解決するには、固視線を工夫する必要があるのではないか。例えば、ディスプレイ中央にランダムに 1 文字を呈示し、それを黙読させる。または、中心に色の付いた円を呈示し、その色をランダムに変化させる。固視点上の指標がランダムに変化することで、被験者の注意が固視点に向かうのではないか。

一方で、視覚系には注意 (attention) の影響がある。注意対象物が視野に存在すると、視野が狭くなるのが判っているため、刺激呈示位置を中心から離れすぎないように注意する必要がある。

今後の研究課題としては、上記の点を考慮した上で、輝度 IRFs だけでなく、色に対する IRFs の測定を行なうことである。ヒトの視覚系には、3 つの錐体からの信号を輝度チャンネルと色チャンネルと分離して処理している。網膜から LGN へ至る経路の違いや、視覚系内での色情報処理の時間特性を明らかにできるのではないか。

色選択性を持つ Parvo cellular 経路の時間特性は遅いと言われていることから、色 IRFs の時間特性もまた遅くなると予測されるが、刺激の色 (赤, 緑, 青, 黄) によって変化するか、また、本研究で検討した受容野モデルが成立するかどうかとも検討したい。

第 5 章

結論

本研究では、2 刺激法を用いて空間周波数を持つ輝度刺激に対するコントラスト検出閾値を測定した。コントラスト検出閾値の変化から導出した輝度 IRFs は、視覚系の時間特性を反映することから、求められた輝度 IRFs の 0 交差時間を比較した。その結果、刺激の空間周波数が輝度 IRFs の時間特性に影響することが示された。これは、刺激検出に関わる空間周波数チャンネルの時間特性を示すものだと考えられる。

そこで、本研究で提案した PRC モデルと受容野モデルを検討した結果、2 cpd 周辺で空間周波数チャンネルの切り替わりを示す結果を得た。また、統計的に有意とは言えないが、4cpd 周辺でも輝度 IRFs の興奮相の強度が増加することから、この空間周波数でも空間周波数チャンネルが切り替わっている可能性がある。このことは、空間周波数がおおよそ 1.7cpd, 4.0cpd で切り替わり、少なくとも 3 つの空間周波数チャンネルが存在することを示唆している。

本研究では、輝度 IRFs の時間特性から、ヒトの視覚系に存在する空間周波数チャンネルを複数に分離でき、その時間、空間周波数特性を示すことができた。

謝辞

本研究を行なうにあたり，指導教員である篠森敬三助教授には多大な助力，助言を頂きました．深夜遅くまで指導して頂いた日や，学会前の発表準備などでも大変お世話になりました．ここに深く感謝するとともに，今後も御指導よろしくお願い致します．

篠森研究室のメンバー全員に感謝します．本研究の被験者として実験に参加して頂いた同研究室の深田良尚君，ありがとうございました．実験のやりすぎで体調を崩してしまいそうになったこと，申し訳なく思います．今後もお互いの被験者として協力し合いましょう．

同じく被験者として参加してくれた津野賢裕君，ご苦労さまでした．研究室配属になる以前から，被験者として協力してくれたことに感謝します．これから先数年間，同じ研究室のメンバーとして共に頑張りましょう．

また，修士論文を執筆するにあたって，高知工科大学情報システム工学科教員の方々には大変お世話になりました．副査を快く了解して頂いた岡田守教授，副査を快く了解して頂き，さらにアドバイスまでして頂いた福本昌弘助教授，いつもの確な助言をくださる妻鳥貴彦助手には特に感謝しております．

学科の教員が常に全力で学生の指導にあたれるように，学科を影で支えておられる情報システム工学科の秘書の村上加織さん，片山さおりさんに感謝致します．

最後に，大学院の進学を認め，学費の援助をしてくれた両親に感謝します．

参考文献

- [1] Andrew B. Watson *Probability summation over time* Vision Research, Vol.19 pp.515 - pp.522, 1979
- [2] David C. Burr and M. Concetta Morrone *Impulse-response functions for chromatic and achromatic stimuli* J. Opt. Soc. Am. A / Vol.10, No.8, pp.1706 - pp.1713. 1993
- [3] Keiji Uchikawa and Yoshizawa *Temporal responses to chromatic and achromatic change inferred from temporal double-pulse integration* J. Opt. Soc. Am. A / Vol.10, No.8, pp.1697 - pp.1696, 1993
- [4] Hugh R. Wilson, David K. McFarlane and Gregory C. Phillips *Spatial Frequency tuning of Orientation Selective Units estimated by oblique Masking* Vision Research Vol.24, No.9, pp.873 - 882, 1983
- [5] Yoshio Ohtani and Yoshimichi Ejima *Relation between Flicker and Two-pulse Sensitivities for sinusoidal Gratings* Vision Research Vol.28, No.1, pp.145 - pp.156, 1988
- [6] 内川 恵二色覚のメカニズム朝倉書店 1998

付録 A

輝度 IRFs のパラメータとデータ値

2 刺激法により求めたコントラスト閾値から Burr and Morrone のモデル式を用いて輝度 IRFs を計算した．ここでは，輝度 IRFs のフリーパラメータ a_0, a_1, a_2, a_3 と考察に使用したデータ値を表 A.1 (被験者 M.H.)，表 A.2 (被験者 Y.F.)，表 A.4 (被験者 T.S.)，表 A.3 (被験者 T.T.) に示す．

空間周波数 (cpd)	被験者 M.H.						
	a_0	a_1	a_2	a_3	興奮相の強度	0 交差時間 (ms)	強度比率
0.43	170.91	9.77	0	45.52	1.37	50.67	0.33
0.89	161.88	10.09	0	52.71	1.1	49.33	0.26
1.34	75.41	22.59	14.22	26.01	0.78	37.33	0.68
1.78	67.54	23.94	15.43	26.41	0.67	36	0.63
2.23	126.82	41.77	24.74	46.39	0.71	18.67	0.86
2.67	127.8	43.47	26.55	43.29	0.73	18.67	0.86
3.12	218.93	16.4	0	92.27	0.84	30.67	0.22
3.56	63.52	11.2	0	41.25	0.57	44	0.51
4.01	122.52	12.75	2.61	61.21	0.72	44	0.22
4.45	131.87	21.72	13.82	59.14	0.81	38.67	0.15
4.90	136.66	27.38	18.88	52.73	0.88	34.67	0.16

表 A.1 被験者 M.H. の輝度 IRFs を決定する 4 つのパラメータと，その興奮相の強度，0 交差時間，興奮相と抑制相の強度比率．

付録 A 輝度 IRFs のパラメータとデータ値

空間周波数 (cpd)	被験者 Y.F.						
	a_0	a_1	a_2	a_3	興奮相の強度	0 交差時間 (ms)	強度比率
0.43	93.64	11.37	1.42	43.47	0.79	46.67	0.41
0.89	64.7	9.16	0	37.79	0.63	54.67	0.42
1.34	68.62	19.32	11.76	36.63	0.63	41.33	0.38
1.78	63.29	14.05	4.5	43.01	0.53	42.67	0.44
2.23	101.07	36.23	22.89	39.7	0.67	24	0.67
2.67	63.96	34.67	22.54	28.37	0.5	25.33	0.76
3.12	62.32	12.19	2.81	47.08	0.49	46.67	0.33
3.56	123.15	13	2.81	78.07	0.54	44	0.11
4.01	51.9	9.74	0	36.23	0.53	52	0.5
4.45	204.12	11.51	1.46	112.15	0.5	46.67	0.02
4.90	101.36	17.48	9.5	64.66	0.58	42.67	0.13

表 A.2 被験者 Y.F. の輝度 IRFs を決定する 4 つのパラメータと、その興奮相の強度、0 交差時間、興奮相と抑制相の強度比率。

空間周波数 (cpd)	被験者 T.T.						
	a_0	a_1	a_2	a_3	興奮相の強度	0 交差時間 (ms)	強度比率
0.43	256.57	12.61	1.46	53.87	1.75	42.67	0.33
0.89	251.88	11.46	0.1	94.37	0.81	44	0.07
1.34	637.23	17.89	0	184.88	0.92	28	0.03
1.78	102.89	22.92	7.71	43.73	0.76	26.67	0.87
2.23	77.48	24.58	9.48	43.44	0.56	25.33	0.89
2.67	106.84	38.83	24.48	37.21	0.69	21.33	0.78
3.12	142.74	33.1	17.58	56.22	0.81	22.67	0.65
3.56	105.61	16.34	5.17	47.7	0.8	37.33	0.48
4.01	195.89	19.13	3.49	103.91	0.66	29.33	0.16
4.45	103.28	15.58	1.46	65.1	0.58	33.33	0.36
4.90	211.3	20.43	5.18	94.15	0.81	0.28	0.21

表 A.3 被験者 T.T. の輝度 IRFs を決定する 4 つのパラメータと，その興奮相の強度，0 交差時間，興奮相と抑制相の強度比率．

付録 A 輝度 IRFs のパラメータとデータ値

空間周波数 (cpd)	被験者 T.S.						
	a_0	a_1	a_2	a_3	興奮相の強度	0 交差時間 (ms)	強度比率
0.43	243.93	11.16	1.19	42.85	2.09	48	0.41
0.89	163.02	10.56	0	39.63	1.51	48	0.49
1.34	164.4	11.71	0	44.93	1.34	42.67	0.47
2.23	176.79	37.12	23.24	40.14	1.14	22.670	0.71
3.12	209	17.81	0	68.45	1.12	28	0.47
4.01	186.65	20.76	8.64	65.42	1.04	32	0.33
4.90	127.88	10.89	0	44.57	1.06	45.33	0.42

表 A.4 被験者 T.S. の輝度 IRFs を決定する 4 つのパラメータと，その興奮相の強度，0 交差時間，興奮相と抑制相の強度比率．