

# 周辺網膜における 2 パルス光の時間的足し合わせ特性

## Temporal Summation Properties of Double Pulse Lights in Peripheral Retina

学生会員 増田 修<sup>†</sup>, 正会員 内川 恵二<sup>†</sup>

Osamu Masuda<sup>†</sup> and Keiji Uchikawa<sup>†</sup>

**Abstract** We investigated temporal summation properties in the peripheral retina using luminance and chromatic double pulse lights. The sizes of the stimuli were 1° at the fovea and 10° at 30° temporal visual field, being scaled according to the cortical magnification factor. Consistent acceleration of the characteristic peaks and troughs of the summation properties with retinal eccentricity suggested that a double-duty mechanism might be preserved in the periphery, whereas a marked elevation of the thresholds and the summation indexes in the peripheral chromatic channel suggested a significant change of the chromatic mechanism in the periphery.

キーワード：周辺視、時間的足し合わせ、2刺激法

### 1. まえがき

従来から周辺視での色覚は中心窓から周辺にいくにつれ劣化するといわれてきた<sup>1)2)</sup>。しかし一方、そのような色覚の劣化は、周辺部位の偏心度の増加に合わせて刺激サイズを増大することにより補償できるともいわれている<sup>3)4)</sup>。

色覚チャネルの時間特性については、中心視では時間的コントラスト感度関数が低域通過型および輝度応答よりも融合周波数が小さいことなどがわかっている<sup>5)6)</sup>。Noorlander ら<sup>7)</sup>は、周辺視野で刺激サイズを拡大して周辺視における色覚の時空間コントラスト感度を調べたが、時間条件に関しては、1 Hz のフリッカ条件と定常条件しか用いていない。これまでの研究では、周辺視での色覚チャネルの時間特性については充分に調べられていないといえる。

視覚の時間特性を調べる方法として、様々な時間周波数の正弦波刺激光が良く用いられている<sup>5)6)</sup>。しかし、周辺視野においては Troxler 効果があり、視覚系は長時間呈示の刺激光に順応してしまうので、正弦波刺激光はあまり適当ではない。そこで本研究では、時間的 2 刺激法<sup>8)9)</sup>を採用し、短時間呈示の 2 パルス光を刺激光として用いることにした。中心窓および耳側視野 30° の周辺視野で、輝度および色度に関して変調された 2 パルス光の時間的足し合わせ特性を調べた。刺激サイズは皮質倍率<sup>12)</sup>に基づいてスケーリングした。

† 東京工業大学 大学院 総合理工学研究科

(〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259 G2-1, TEL 045-924-5453)

† Department of Information Processing, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology (G2-1, 4259 Nagatsuda-cho, Midori-ku, Yokohama 226-8502)

### 2. 方 法

#### 2.1 装置と刺激

図 1 に装置の概略図を示す。被験者は半球ドーム（内半径 40cm、内面は中性灰色）の中央に開けられた円形開口を通して右片眼で開口後部の CRT 上に呈示される刺激光を観察する。CRT(Nanao FlexScanT766) 全面に一様に刺激が呈示されるため被験者には開口の位置に刺激があるよう見える。被験者の上下左右にはそれぞれ 1 本ずつ D65 近似蛍光灯が配置され、全視野をほぼ一様に照明している。ドーム内面の輝度および色度は約 100 cd/m<sup>2</sup>, x=0.318, y=0.339 となった。

白色の周辺刺激の中に輝度 50 cd/m<sup>2</sup> の黄 (x=0.419, y=0.505) の直径視角 1° (中心視条件) または 10° (周辺視条件) の刺激光が定常呈示される。被験者は中心視条件における

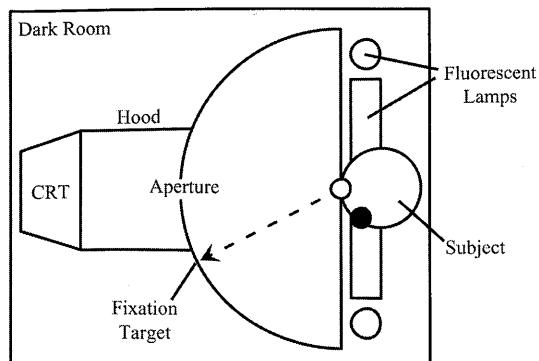


図 1 装置の概略図  
Schematic diagram of the apparatus.

いては刺激光を中心窓で見る。周辺視条件においては、鼻側視野 30° にある黒い固視点を見て刺激光は周辺視で見る。

パルス刺激は、輝度条件では定常刺激からの色度一定の輝度増分 ( $\Delta I$ ) あるいは輝度減分 ( $\Delta D$ ) である。色度条件では、定常刺激からの輝度一定を保ったままの赤蛍光体方向 ( $\Delta R$ ) あるいは緑蛍光体方向 ( $\Delta G$ ) への色度変化である。輝度一定の設定には被験者毎に交照法に基づく輝度比を用いた。1 試行内にパルス刺激光が 2 個表示されるが、それぞれのパルス刺激光の強度は同一とした。ただし、 $\Delta I$  と  $\Delta D$  の強度および  $\Delta R$  と  $\Delta G$  の強度を合わせるには、予備実験でそれぞれの単発パルス刺激の検出閾値を測定し、その比を用いた。

1 個のパルス刺激の呈示時間は輝度条件では 10ms、色度条件では 20ms である。ただし、OM 以外の被験者の周辺視色度条件では 40ms とした。2 パルス刺激間の呈示開始時刻ずれ (SOA) には 10ms から 2000 ms の間の 13 種類を用いた。また、同一セッション中に単発パルスも含めて呈示して、その閾値を測定した。

CRT 蛍光体の立上り時間は 0.38ms(赤) および 0.25ms(緑) で、立下り時間は 1.24ms(赤) および 1.08ms(緑) であった。

## 2.2 手続き

被験者はまず 5 分間暗順応した後、3 分間刺激視野全体に明順応し、その後 2 セッションを続けて行った。被験者が試行開始ボタンを押すと、一定時間幅 (2500ms) 内のいずれかの時刻に 2 個のパルス刺激が 1 試行毎にランダムにある SOA で呈示される。その後、被験者はパルス刺激光を検出したかどうかを Yes-No で応答する。刺激の呈示強度は、階段法により制御した。この応答結果に Probit 法により知覚確率曲線をフィットし、応答率 50% に対応する刺激の値を閾値とした。

被験者は 3 名の男性 OM (33 歳), TN (23 歳), KK (22 歳) であり、いずれも色覚正常かつ視力正常ないし矯正視力正常である。

## 3. 結 果

図 2 に結果を示す。横軸は 2 パルス刺激間の SOA(ms), 縦軸は三人の被験者の平均足し合わせ係数<sup>8)</sup>  $S$  である。足し合わせ係数は  $S = -\log((\Delta_{\text{double},1}/\Delta_{\text{single},1} + \Delta_{\text{double},2}/\Delta_{\text{single},2})/2)$  と定義される。ここで、 $\Delta_{\text{double},1}$ ,  $\Delta_{\text{double},2}$  はそれぞれ 2 パルス刺激の 1 番目と 2 番目の閾値である。 $\Delta_{\text{single},1}$ ,  $\Delta_{\text{single},2}$  はそれぞれ 2 パルス刺激の 1 番目および 2 番目と同じ種類 ( $\Delta I$ ,  $\Delta D$ ,  $\Delta R$ ,  $\Delta G$ ) の単発パルス刺激の閾値である。■は中心視条件 (F), ◇は周辺視条件 (P) の結果を表す。誤差棒は標準誤差を表す。

図 2(a) は  $\Delta I + \Delta I$  の結果を表す。F と P 共に SOA=10ms では  $S \approx 0.3$  ではなく完全な足し合わせが成り立っている。SOA の増加とともに  $S$  は急激に減少して極小値を持つ。これは 2 パルスが相互に抑制し合っていることを意味する。この抑制性の谷の後、 $S$  は再び増加し、

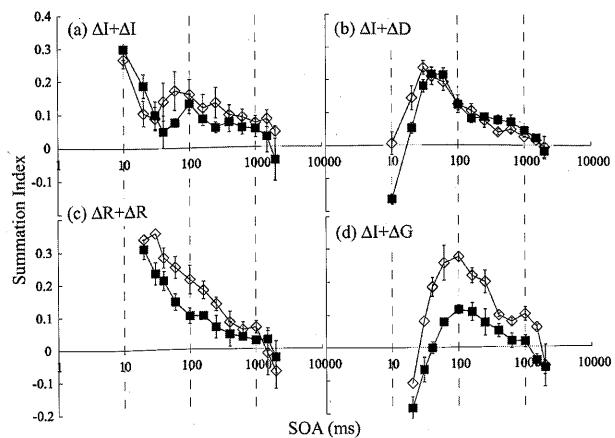


図 2 2 パルス光の時間的足し合わせ特性。■: 中心視条件, ◇: 周辺視条件。

Temporal summation properties of double pulses. ■: foveal condition, ◇: peripheral condition.

ピークを迎えた後、一定値に収束していく。SOA=2000ms で  $S$  の値が更に減少しているが、これは周辺全視野を一様にした場合にある時間条件でパルス光の検出感度が下がる現象<sup>13)</sup> の影響と考えられる。この影響は、他の図 2(b)～(c) の条件においても表われている。この結果から、 $\Delta I$  の刺激への輝度チャネルの応答は、まず興奮性の応答(第1相)が起きた後に抑制性の応答(第2相)が続き、さらにその後、弱い興奮性の応答(第3相)が起こる3相性を示すと推測される。

第2相の抑制性の谷に対応する SOA は、F では 40ms, P では 20～30ms(P) となり、P の方が早い。第3相の興奮性のピークに対応する SOA は F では 100ms, P では 60ms であり、これも P の方が早い。

図 2(b) は  $\Delta I + \Delta D$  の結果である。短い SOA においては  $S$  が小さく  $\Delta I$  と  $\Delta D$  の応答が相互に打ち消し合っていることがわかる。その後  $S$  は増大し、F では SOA=40～60ms, P では 30ms においてピークとなる。これは  $\Delta I$  からの第2相の抑制性応答と  $\Delta D$  からの第1相の興奮性応答が同符号の応答として足し合わされた結果と考えられる。このピーク点 SOA も、F よりも P の方がやや早く、しかも同じ偏心度での  $\Delta I + \Delta I$  での抑制性の谷の SOA と一致する。

図 2(c) は  $\Delta R + \Delta R$  の結果である。短い SOA においては  $S \approx 0.3$  で完全な足し合わせが成り立っているが、SOA と共に  $S$  は単調に減少していく。ただし、前述した理由から SOA=1500～2000ms の  $S$  は除く。この結果からは、色チャネルの応答は 1 相性であると推測される。ただし、 $S$  の値そのものは F よりも P の方が一貫して高い。

図 2(d) は  $\Delta R + \Delta G$  の結果である。 $S$  は SOA と共に増加し、ピークを持ってその後ゆるやかに減少する。 $\Delta G$  への色応答が単純に  $\Delta R$  に対する 1 相性応答の反転であるとすると、このようなピークを持った足し合わせは起こりえず、したがって 2 相性の応答を生じていると考える必要

がある。この山のピークに対応する SOA は、F では 100~160ms, P では 60~100ms となり、F よりも P の方が早い。これらの SOA は F と P 共に  $\Delta I + \Delta I$  の第3相とほぼ一致する。S の値は F よりも P の方が一貫して高い。

中心視での単発パルス閾値に対する周辺視での単発パルス閾値の比は、輝度では  $\Delta I$  と  $\Delta D$  を平均して 0.75(OM), 1.13(TN), 0.83(KK), 色度では  $\Delta R$  と  $\Delta G$  を平均して 3.12(OM), 3.12(TN), 2.53(KK) となった。輝度変化に対しては、中心視と周辺視で閾値がほぼ同じになったが、色度変化に対しては、周辺視の閾値の方が中心視よりも約3倍大きくなつた。

#### 4. 考 察

輝度チャネルの時間特性について、中心視と周辺視のいずれの場合でも  $\Delta I + \Delta I$  では3相性、 $\Delta I + \Delta D$  では2相性の足し合わせ特性が得られた。中心視の結果は Uchikawa & Yoshizawa の結果<sup>8)</sup>を支持している。周辺視では、対応する谷とピークが中心視の場合よりも早まり、応答全体が高速化していることが明らかとなつた。

周辺視における単発輝度パルスの検出閾値は、中心視の場合とほぼ同等であり、これは、皮質倍率に基づく刺激サイズのスケーリングが有効であったことを示す。

Tyler<sup>11)</sup>は、周辺視で皮質倍率に基づいた刺激サイズの正弦波輝度フリッカを用いて、時間的コントラスト感度関数(tCSF)を測定し、帯域通過型の特性を見出した。このtCSFのピーク感度は測定されたどの偏心度においてもほぼ一定であり、それに対応する時間周波数は周辺視では高周波側にシフトした。本研究もこの結果を支持している。

輝度においては有効であったサイズスケーリングは、色では無効であり、単発色度パルスの検出閾値は、周辺視では中心視よりも大きくなつた。刺激サイズをスケーリングし、さらにパルス幅を2倍にした場合でさえも閾値は大幅に増大した。

色チャネルのコントラスト感度関数は、中心視では低域通過型の特性が報告されてきた<sup>5)6)9)</sup>。本研究での  $\Delta R + \Delta R$  の結果からは、この特性が周辺視にもあることが確かめられた。しかし、 $\Delta R + \Delta G$  の結果は、 $\Delta R + \Delta R$  から得られた色チャネルの低域通過型特性からは説明できない。これと同様の結果は、Uchikawa & Yoshizawa<sup>8)</sup>およびEskewら<sup>10)</sup>が中心視で報告している。Uchikawa & Yoshizawaは特有のリバウンド応答を含むインパルス応答を用いて、 $\Delta R + \Delta G$  の結果を説明する二重職務型的色覚モデルを提案している。

各足し合わせ特性における特徴的なピークと谷の位置は、F と P でそれぞれ一貫した対応を示しており、この点からは、輝度チャネルと色チャネルに共通の下位メカニズムの潜時を早めることにより、二重職務仮説的色覚モデルが周辺にも拡張できる可能性を示唆する。その一方で、色チャネルにおける足し合わせ係数が、F よりも P の方が一貫

て高いということは、周辺では色チャネルの応答がより長く持続する、あるいは時間的変化がより緩慢になっているために、長い SOA を挟んでも応答波形間の類似性が高くなっている、という可能性が考えられる。

パルス光検出において、輝度では有効であったサイズスケーリングは色では無効であり、また、周辺視での色の時間的足し合わせは中心視よりも一貫して強い。これらは、周辺の色チャネルにおいては、空間的にも時間的にも輝度チャネルとは異なる特有のメカニズム変化が生じている可能性を示唆する。

#### [文 献]

- 1) Moreland J. D. and Cruz A., "Colour perception with the peripheral retina," *Opt. Acta*, 6, 117-151 (1959)
- 2) Boynton, R. M., Schafer W., Neun M. E., "Hue-wavelength relation measured by color-naming method for three retinal locations," *Science* 164 666-668 (1964)
- 3) van Esch, J.A., van Doorn, A. J., Koenderink J.J., "Spectral sensitivity and wavelength discrimination of the human peripheral visual field," *J. Opt. Soc. Am. A*, 1, 443-450 (1984)
- 4) Abramov, I., Gordon, J. and Chan, H., "Color appearance in the peripheral retina: effects of stimulus size," *J. Opt. Soc. Am. A*, 8, 404-414 (1991)
- 5) de Lange, H., "Research into the dynamic nature of the human fovea → cortex systems with intermittent modulated light. I. Attenuation characteristics with white and colored light," *J. Opt. Soc. Am.*, 48, 777-784 (1958)
- 6) Kelly, D. H., "Luminous and chromatic flickering patterns have opposite effects," *Science*, 188, 371-372 (1975)
- 7) Noorlander C., Koenderink J. J., Ouden R. J. and Edens, B.W., "Sensitivity to spatiotemporal color contrast in the peripheral visual field," *Vision Res.*, 23, 1-11 (1983)
- 8) Uchikawa, K. and Yoshizawa, T., "Temporal responses to chromatic and achromatic change inferred from temporal double-pulse integration," *J. Opt. Soc. Am. A*, 10, 1697-1705 (1993)
- 9) Burr, D. C. and Morrone, M. C., "Impulse-response functions for chromatic and achromatic stimuli," *J. Opt. Soc. Am. A*, 10, 1706-1713 (1993)
- 10) Eskew, R. T., Stromeyer, C. F. and Kronauer, R. E., "Temporal properties of the red-green chromatic mechanism," *Vision Res.*, 23, 3127-3137 (1994)
- 11) Tyler, C. W., "Analysis of visual modulation sensitivity. II. Peripheral retina and the role of photoreceptor dimensions," *J. Opt. Soc. Am. A*, 2, 393-398 (1985)
- 12) Rovamo, J. and Virsu, V., "An estimation and application of the human cortical magnification factor," *Exp. Brain Res.*, 37, 495-510 (1979)
- 13) 増田修, 内川恵二, "パルス刺激光の検出閾値に及ぼす中心固視と周辺視野の影響," *Vision*, 17, 159-167 (2005)



ますだ おさむ  
増田 修 1993年、新潟大学工学部情報工学科卒業。1995年、同大学院修士課程修了。1995年~2002年、大蔵省(財務省)印刷局勤務。2002年、東京工業大学大学院総合理工学研究科物理情報システム創造専攻博士課程に入學し、現在に至る。学生会員。



うちかわ けいじ  
内川 恵二 1980年、東京工業大学大学院総合理工学研究科修了。York University (Canada) Postdoctoral Fellow, 東京工業大学助手、助教授を経て、1994年より、東京工業大学教授。視覚情報処理、色覚認識、心理物理学を専門とする。工学博士、正会員。