

原 著

色と輝度のコントラスト検出感度に及ぼす視覚的注意の効果

内川 恵二, 沖山 夏子

東京工業大学大学院総合理工学研究科

Effects of Visual Attention on Chromatic and Luminance Contrast Detection Sensitivity

Keiji Uchikawa and Natsuko Okiyama

Tokyo Institute of Technology, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering

視覚的注意が視覚情報の高次レベル処理を促進したり抑制したりすることは、これまでの研究で示されている。しかし、視覚的注意が視覚系初期レベル処理を調整しているかどうかはまだ不明である。そこで、本研究は、視覚的注意が視覚系初期レベルにあるとされている色と輝度チャンネルに別々に影響を与えるかどうかを明らかにすることを目的とした。実験では、色と輝度応答のコントラスト検出感度を中心刺激と周辺刺激の二重課題を用いて測定し、色と輝度チャンネルのコントラスト感度が中心課題優先条件と周辺課題優先条件間で異なるかどうかをみた。その結果、視覚的注意によって中心刺激に対する色と輝度チャンネルのコントラスト感度が増大することは明らかとなつたが、両コントラスト感度は異なった優先条件間で同じように変化することがわかった。本研究では視覚的注意が色と輝度チャンネルに別々に影響を与えるかどうかを明らかにするに足る十分な結果は得られなかつたが、今後、視覚系の初期過程への注意の効果を調べるために、刺激呈示の時間条件を考慮する必要があることが示唆された。(視覚の科学 31: 114-119, 2010)

キーワード：視覚的注意、色と輝度応答、コントラスト感度、注意の2重課題

Previous studies have shown that visual attention either facilitates or inhibits the higher-level processes of visual information. However, it is not clear whether visual attention modulates the early level processes of the visual system. The present study aims at revealing whether visual attention independently affects luminance and chromatic channels, which are assumed to be in the early level of the visual system. In experiments, we measured the contrast detection sensitivities of chromatic and luminance responses to foveal stimulus and peripheral stimulus in the dual task paradigm, and observed whether the contrast sensitivity of the luminance and chromatic channels varied in a different manner between central priority and peripheral priority conditions. We found that visual attention increased contrast sensitivity in the chromatic and luminance channels, but in the same way between different priority conditions. Results were not sufficient to reveal whether visual attention independently affected the luminance and chromatic channels, but suggested that the temporal condition of stimulus presentation should be considered, to observe the effects of attention on the early level processes of the visual system.

(Jpn J Vis Sci 31: 114-119, 2010)

Key Words : Visual attention, Chromatic and luminance response, Contrast sensitivity, Dual task of attention

別刷請求先：226-8502 横浜市緑区長津田町 4259-G2-1 東京工業大学大学院総合理工学研究科 内川恵二
(2010年12月5日受理)

Reprint requests to: Keiji Uchikawa Dept of Information Processing, Tokyo Institute of Technology
G2-1, 4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 226-8502, Japan
(Received and accepted December 5, 2010)

1. まえがき

視覚的注意は視覚系に入力される膨大な情報を取捨選択することによって、物体の検出、認識といった視覚系の機能をコントロールし、様々な視環境下で我々が適切に行動する上で重要な役割を担っている。視覚的注意には、視野の部分的な領域に注意を向ける空間注意、物体に注意を向ける物体注意、色や形といった特徴に対して注意を向ける特徴注意がある。また、注意の移動にはトップダウン的に注意をコントロールする内発的(能動的)注意と視野内に刺激が呈示されるとそこに注意が引かれてしまうという外発的(受動的)注意がある¹⁾。

視覚的注意が認識や記憶といった視覚系の高次レベルの機能に影響を与えることはよく知られていたが、最近では視覚系の外側膝状体(LGN)やV1といった初期レベルまで影響を及ぼす可能性があることが、生理学あるいは心理物理学的研究によって示唆されている^{2,3)}。視覚的注意がコントラスト感度を増大させること⁴⁾、視覚の空間的解像度を増加させること⁵⁾、また、注意資源は輝度と色応答では独立であること⁶⁾、などが報告されている。

このように、もし視覚的注意が視覚系の初期レベルまで影響を及ぼすのであれば、トップダウン的な注意は視覚系の高次レベルから初期レベルに至るすべての過程をコントロールしていると考えられ、視覚系を解明するにはボトムアップ処理過程と同様にトップダウン的な処理過程も十分に考慮に入れなければならない。しかし、このようなトップダウン的な視覚系の特性についてはほとんどわかっていない。

本研究は、視覚的注意が色と輝度応答に異なった効果を及ぼしているかどうかを調べることにより、色と輝度応答がまだ並列にそれぞれのチャンネルで処理されている視覚系の初期レベルまで遡って影響しているか否かを明らかにすることを目的とする。実験では、色度変化ガボール刺激と輝度変化ガボール刺激を行い、それぞれの刺激に対する検出コントラスト感度関数を、刺激呈示位置に内発的注意を向けた場合と向けない場合で測定して、その差を求める。色度コントラスト感度関数の差と輝度コントラスト感度関数の差が異なれば、視覚的注意は色と輝度チャンネルに別々に働いていることが強く示唆される。

実験1では、視野中心に刺激を呈示する中心課題と視野周辺に刺激を呈示する周辺課題の二重課題を用

い、それぞれの課題に対する内発的注意の強さを変化させて、色度と輝度のコントラスト感度関数を測定する。実験2では、実験1の結果を補足するために周辺刺激のサイズを変えて同様の測定を行う。

2. 方 法

1) 刺 激

刺激はcathode ray tube(CRT)モニター(FlexScan, 1,280×1,024 pixels, 75Hz, EIZO社)上に呈示される。制御用コンピュータ(Power Mac G4, Apple社)のディスプレイ出力にBITS++(CRS社製)を取り付け、モニターのred(R), green(G), blue(B)色光の階調をそれぞれ14ビットとした。

実験に用いた刺激を図1に示す。観察は両眼視で行われ、視距離は57cmである。背景光は輝度30cd/m²の等エネルギー白色光、被験者が検出する刺激には中心刺激と周辺刺激があり、両刺激ともにガボールパターンにより作られている。中心刺激は固視点を挟んで左右どちらかに呈示され、周辺刺激は視野周辺8箇所のうちの1箇所に呈示される。刺激の呈示位置は正方形の黒枠で背景上に示されている。中心刺激の呈示枠は大きさ視角1deg、周辺刺激の呈示枠は3.9deg(実験1), 1deg(実験2)、呈示枠の中心の離心距離(固視点からの距離)はそれぞれ中心刺激では0.6deg、周辺刺激では10degである。視野中心には直径0.2degの固視点が示される。固視点と枠の輝度は15cd/m²である。

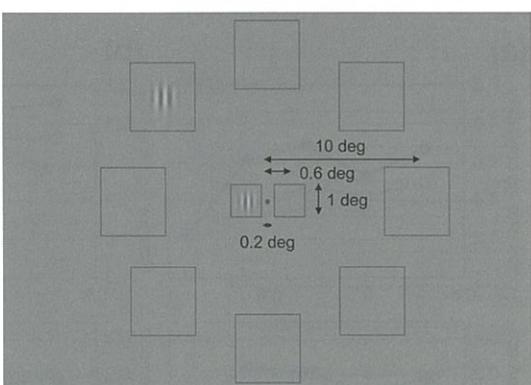


図1 実験に用いた刺激

背景光は等エネルギー白色光(輝度30cd/m²)。中央に固視点がある。視野周辺の8個の大黒枠は周辺刺激の呈示位置、中心の2個の小黒枠は中心刺激の呈示位置を示す。周辺刺激は皮質拡大率によって大きさが中心刺激の3.9倍に拡大されている。

ガボールパターンの空間周波数は中心刺激で0.5, 1, 2, 4, 8 cycles per degree (cpd) となっている。ただし、実験1では、周辺刺激は皮質拡大率⁷⁾によって中心刺激を3.94倍に拡大した刺激となる。この場合、周辺刺激の空間周波数は減少しているが、刺激内のサイクル数は等しくなっている。実験2では、周辺刺激は中心刺激と等しくしている。ガボールパターンのコントラスト変調は輝度方向, r-g 色方向, y-b 色方向に設定した。本研究ではBoyntonの反対色空間⁸⁾を用い、錐体応答L, M, Sに対して輝度応答(Lum)はL+M, 赤緑反対色応答(r-g)はL-2M, 黄青反対色応答(y-b)は(L+M)-Sで定義される。色方向変調刺激の等輝度点は、予備実験で最小運動知覚法によって被験者ごとに求めた。

2) 手続き

被験者は中心課題と周辺課題の二重課題を行う。各セッションでは、被験者はまず背景光に約3分間の明順応をし、その後、試行が開始される。1試行では、被験者が固視点を見て、手元のキーを押すと1s後に中心刺激と周辺刺激が同時に200 ms間呈示される。被験者は中心刺激が左右のどちらに検出できたかをTwo alternative forced choice法(2AFC)で応答する。これが中心課題である。また、周辺刺激が視野周辺8箇所のどこに検出できたかを8AFCで応答する。これが周辺課題である。被験者が応答すると試行が終了し、次の試行に移行する。刺激のコントラスト呈示は階段法によって変化し、刺激呈示がなされる。1試行中の全応答数は150~200回である。

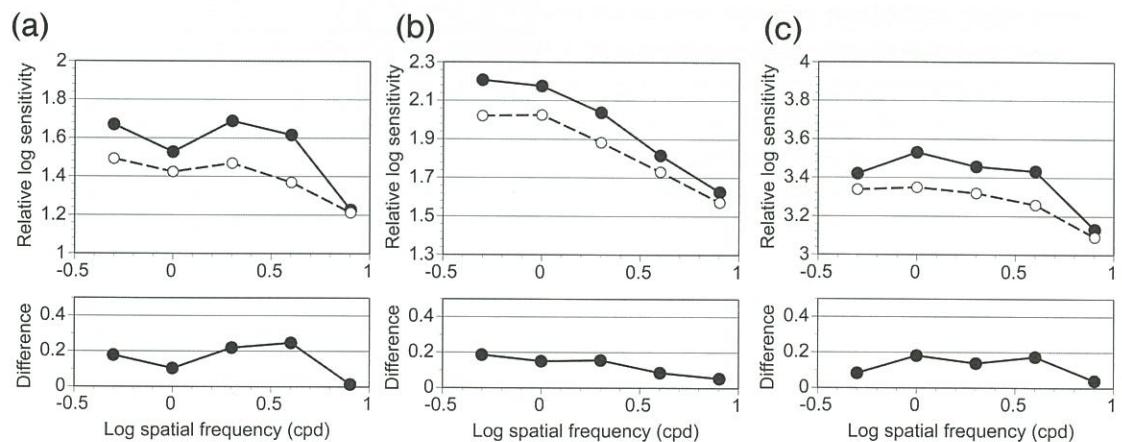


図2 中心刺激に対する被験者2名の平均コントラスト感度関数（実験1）
(a)：輝度方向, (b) : r-g 方向, (c) : y-b 方向, 上パネル：中心課題優先条件（実線）と周辺課題優先条件（破線）でのlogコントラスト感度関数, 下パネル：両条件のlogコントラスト感度関数の差

二重課題の遂行には中心課題優先と周辺課題優先の2条件がある。中心課題優先の条件では、中心刺激の検出が優先され、被験者は中心刺激に周辺刺激よりも強い注意を向けるように教示される。刺激呈示後、被験者は最初に中心刺激の応答をし、次に、周辺刺激の応答をする。周辺課題優先の条件では中心刺激と周辺刺激の扱いが逆転する。中心課題優先条件と周辺課題優先条件はそれぞれ別々のセッションで行われる。被験者は実験1では色覚正常者2名、実験2ではそのうちの1名である。

3. 結 果

1) 実験1

実験により得られた被験者の検出確率応答にロジスティック関数をフィッティングし、中心課題では75.00%，周辺課題では56.25%の検出確率を与えるコントラストを検出閾値とした。各条件で得られたコントラスト閾値の逆数をとり、コントラスト感度とした。閾値の統計的検定は永井らの方法⁹⁾を用いた。

図2に中心刺激に対する被験者2名の平均コントラスト感度関数を示す。図2(a), (b), (c)上パネルはそれぞれ輝度方向, r-g 色方向, y-b 色方向のlogコントラスト感度関数を中心課題優先条件は実線で、周辺課題優先条件は破線で示し、図2(a), (b), (c)下パネルは上図の2本のlogコントラスト感度値の差を示している。図2より、輝度方向と色方向にかかわらず、中心刺激に対するコントラスト感度は中心刺激に注意が向いている方が向いていないときよりも高いこ

とがわかる。有意差検定は被験者ごとに行い、注意の有無の効果は、輝度方向では被験者1は有意差あり（自由度1, $p<0.01$ ），被験者2は有意差なし（自由度1, $p=0.14$ ），r-g 色方向と y-b 色方向では両被験者ともに有意差あり（自由度1, $p<0.01$ ）であった。注意が向いている場合の感度増加と空間周波数との相互効果は、y-b 色方向の被験者2でのみ有意差があり（自由度1, $p<0.01$ ），他の条件では有意差はなかった（自由度1, $p>0.05$ ）が、図2より低空間周波数の方が注意による感度増大が大きい傾向がみられる。視覚的注意による感度差は輝度方向と色方向ともに約0.2 log以下であり、その大きさは輝度方向と色方向によって系統的な差がないことがわかる。

図3に周辺刺激に対する被験者2名の平均コントラスト感度の測定結果を示す。図中の各グラフのシンボルの違いは図2と同様であるが、図3では実線は周辺課題優先条件、破線は中心課題優先条件をあらわす。図3で明らかなように、輝度方向でも色方向でも周辺刺激に対するコントラスト感度は視覚的注意が向いているかどうかにかかわらずほとんど差がない結果になっている。注意の有無の効果の有意差検定結果は、輝度方向では被験者1（自由度1, $0.1>p=0.042>0.01$ ），被験者2（自由度1, $p>0.1$ ），r-g 方向では被験者1（自由度1, $p>0.1$ ），被験者2（自由度1, $0.1>p=0.018>0.01$ ），y-b 方向では被験者1（自由度1, $p>0.1$ ），被験者2（自由度1, $p>0.1$ ）となり、被験者1の輝度方向と被験者2のr-g 方向では差のある傾向がみられたが、両被験者のほとんどの条件で $p>0.1$ であり、有意差があるとはいえない。この結果

より、本実験条件では周辺刺激に対する視覚的注意は中心刺激に対する場合と異なり、感度を増大させる効果をもたなかつたことがわかる。

実験1では、周辺刺激に対して注意の効果があらわれなかった。この結果は過去の研究結果と一致していない^{2, 3)}。その一つの理由として、周辺刺激のサイズを皮質拡大率に合わせて拡大したために刺激の検出が容易となり、周辺刺激へ向けられる注意の強弱にかかわらず検出閾値には差が出なかつたことが考えられる。そこで、この可能性を確かめるために周辺刺激のサイズを拡大せず、中心刺激のサイズと等しい1degにして同様の測定を実験2で行った。

2) 実験2

図4に被験者2の周辺刺激に対するコントラスト感度関数を示す。各グラフのシンボルの違いは図3と同様である。ただし、刺激の空間周波数が0.5, 8 cpdの場合、r-g およびy-b 方向の色コントラスト閾値が装置の限界を超えてしまったために測定ができないかった。図4より、周辺刺激のサイズが1degになると、周辺刺激でも注意の有無により輝度と色の両方向のコントラスト感度の増減があることがわかる。注意の有無の効果は、輝度方向, r-g 方向, y-b 色方向のそれぞれ個別に検定した結果、どの方向でも有意差あり（自由度1, $p<0.01$ ）であった。この結果は過去の研究結果と一致する。注意が向いている場合の感度増加と空間周波数との相互効果には有意差はなかった（ $p>0.05$ ）。また、輝度方向と色方向のどちらとも視覚的注意による感度の増加にはほとんど差がないことも示された。中心刺激に対する結果は実験1とほ

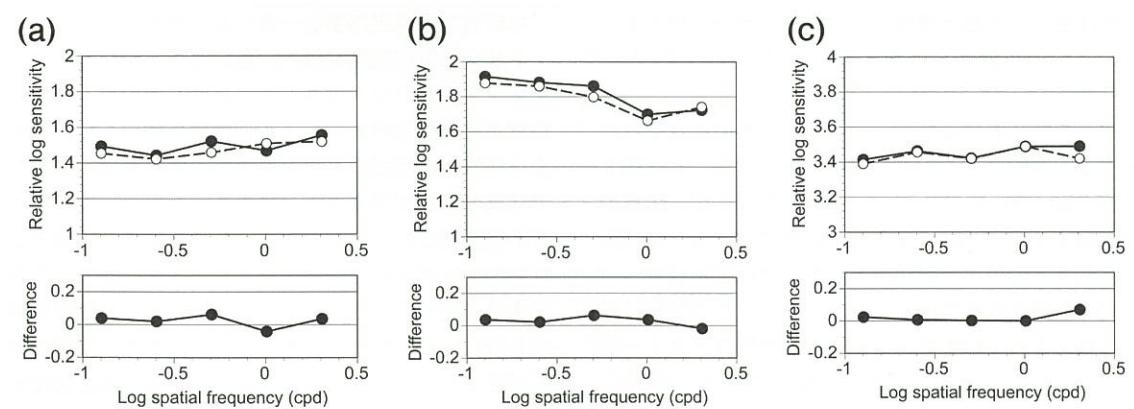


図3 周辺刺激に対する被験者2名の平均コントラスト感度関数（実験1）
(a)：輝度方向, (b) : r-g 方向, (c) : y-b 方向, 上パネル：周辺課題優先条件（実線）と中心課題優先条件（破線）でのlogコントラスト感度関数, 下パネル：両条件のlogコントラスト感度関数の差

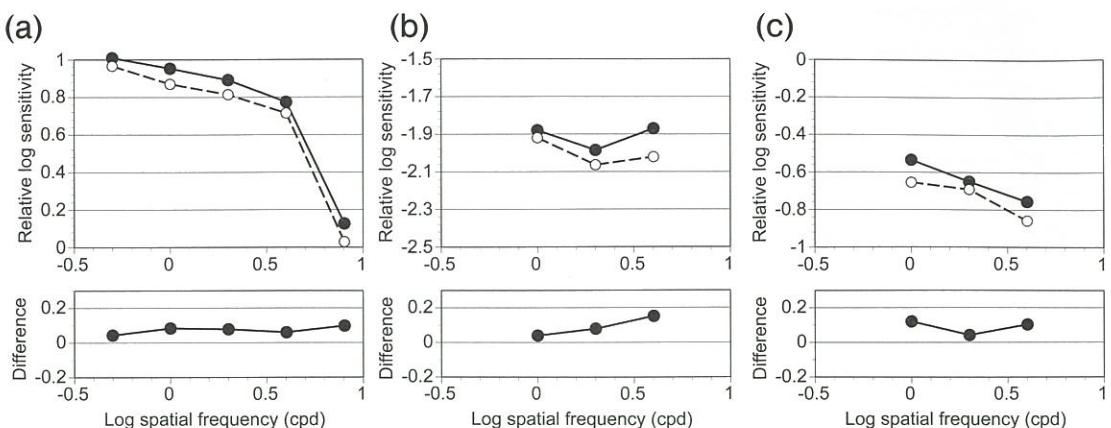


図4 周辺刺激に対する被験者2のコントラスト感度関数（実験2）
刺激サイズ：1 deg. (a)：輝度方向, (b)：r-g 方向, (c)：y-b 方向, 上パネル：周辺課題優先条件（実線）と中心課題優先条件（破線）でのlogコントラスト感度関数, 下パネル：両条件のlogコントラスト感度関数の差

ほぼ同様であった。

4. 考察

本研究は、視覚的注意が輝度チャンネルと色チャンネルに別々に働くかどうかを調べるために、輝度方向のコントラスト感度関数と r-g および y-b 色方向のコントラスト感度関数を注意の強弱の条件で測定した。注意が強く向けられた条件では、すべての方向でコントラスト感度の増大がみられたが、輝度方向と色方向での増大の差には違いがみられなかった。したがって、本実験結果では、視覚的注意が色と輝度チャンネルに別々に働くかどうかを明らかにすることはできず、仮に視覚的注意が色と輝度チャンネルに別々に働いたとしてもその効果が同程度であるか、あるいは視覚的注意は元来色と輝度チャンネルに別々に働くかないかの二つの可能性を区別することができないことに成了。

中心視野における輝度、r-g, y-b 応答のそれぞれに対する空間的コントラスト感度関数として、本実験では図2(a), (b), (c)に示した関数が得られた。注意の強弱にかかわらず、r-g と y-b 応答ではローパス型、輝度応答では用いた空間周波数帯ではほとんどローパス型の空間周波数特性が示されている。この結果は過去に報告されているコントラスト感度関数とよく一致している¹⁰⁾。したがって、本実験条件でも一般的なコントラスト感度関数が求められたといえよう。注意の強弱によって、より低空間周波数でコントラスト感度差が大きくあらわれる傾向にあることが示された

が、この傾向を確認するためには刺激の空間周波数の範囲を広げて更なる実験が必要である。

本実験では、中心刺激と周辺刺激を同時に 200 ms 間呈示した。もし、内発的注意が効果をもつまでに少なくとも数百 ms の時間がかかるとすると¹¹⁾、本実験の刺激呈示条件では注意が向けられた刺激の感度が増大し、注意が向けられなかった刺激の感度が減少する効果があらわれるまでに刺激の呈示が終了してしまう。そのために注意の効果が測定できなかったと考えられる。優先課題刺激の呈示をまず行い、次にある時間遅れ stimulus onset asynchrony (SOA) 後に非優先課題刺激の呈示をすることにより、優先課題刺激に十分強い注意がかかるような時間条件を設定することが必要であろう。

本研究では輝度応答を一定にして色チャンネルのコントラスト検出感度を調べ、色応答を一定にして輝度チャンネルのコントラスト検出感度を調べた。視覚的注意がそれぞれのチャンネルに独立に作用してその感度を増減し、増減のゲインが異なっていれば、本方法で注意の効果が求まることになる。しかし、コントラスト感度増減のゲインが両チャンネルで等しい場合は本方法では注意の効果が求まらないことになる。この場合は、視覚的注意の視覚系初期レベルへの効果を調べる新しい実験原理が必要であろう。また、視覚的注意が色と輝度チャンネルに別々に影響して感度変化をもたらすとしても、色応答と輝度応答が足し合わされて刺激検出をする際にこの視覚的注意の感度増減効果があらわれる。例えば、色応答と輝度応答がすでに

存在する場合に、視覚的注意は色応答により強い影響を及ぼすというような特性があるとすれば、それぞれの応答を一定にして刺激検出をする方法では、この視覚的注意の効果はつかまらないことになる。両応答とともに変化するような刺激を用いて実験することが必要であろう。

5. あとがき

視覚的注意は、人間が行動する上で必要な情報を的確にかつ素早く取り入れるために、視覚系の機能をその状況に最適化する重要な役割を担っている。視覚情報処理メカニズムを解明する上で、視覚的注意がどのような働きをしているかについての研究は最近、心理物理学と生理学、また脳イメージングの分野において活発になり、様々な重要な特性が明らかとなっている。そのなかで、視覚的注意が視覚系のどのレベルまで遡ってコントロールをしているかについての証拠はまだ少なく、その解明に至っていない。本研究は心理物理的手法で注意の及ぼすレベルを同定するために、色と輝度応答のコントラスト検出感度が注意のかかり方の強弱によって異なって増減するかどうかを調べたが、その疑問を明らかにするに十分な結果は得られなかつた。しかし、本研究からコントラスト検出感度は色と輝度応答において注意により増減するという特性は明らかとなった。今後は、更に注意の時間応答特性を考慮して、色と輝度応答による刺激検出の実験方法を改良することにより、新しい実験を行うことが課題として残された。

文 献

- 1) 塩入 諭: 8. 視覚的注意. 内川恵二, 塩入 諭編, 感覚・知覚の科学 視覚II, 183-224, 朝倉書店, 東京, 2007.
- 2) O'Connor DH, Fukui MM et al: Attention modulates responses in the human lateral geniculate nucleus. *Nat Neurosci* 5: 1203-1209, 2002.
- 3) Carrasco M: Chapter 3. Covert attention increases contrast sensitivity: Psychophysical, neurophysiological and neuroimaging studies. In: Martinez-Conde S, Macknik S, et al eds, *Progress in Brain Research*, Vol.154, 33-70, Elsevier, New York, 2006.
- 4) Carrasco M, Penpeci-Talgar C & Eckstein CM: Spatial covert attention increases contrast sensitivity across the CSF: Support for signal enhancement. *Vision Res* 40: 1203-1215, 2000.
- 5) Goto M, Toriu T & Tanahashi J: Effect of size of attended area on contrast sensitivity function. *Vision Res* 41: 1483-1487, 2001.
- 6) Morrone MC, Denti V & Spinelli D: Different attentional resources modulate the gain mechanisms for color and luminance contrast. *Vision Res* 44: 1389-1401, 2004.
- 7) Cowey A & Rolls ET: Human cortical magnification factor and its relation to visual acuity. *Exp Brain Res* 21: 447-454, 1974.
- 8) Boynton RM: Human Color Vision. Holt, Rinehart and Winston, New York, 1979.
- 9) 永井岳大, 星野崇宏, 内川恵二: 恒常法により推定された閾値間の統計的有意差検定法. *Vision* 18: 113-123, 2006.
- 10) Mullen KT: The contrast sensitivity of human colour vision to red-green and blue-yellow chromatic gratings. *J Physiol* 359: 381-400, 1985.
- 11) Posner MI: Orienting of attention. *Q J Exp Psychol*, 32: 3-25, 1980.