

# 光感受性網膜神経節細胞が関与する明るさ知覚の定式化

## Formulation of perceived brightness as a function of ipRGC

山川 昌彦 Masahiko Yamakawa 横浜国立大学大学院 Yokohama National University  
 岡嶋 克典 Katsunori Okajima 横浜国立大学大学院 Yokohama National University

**Keywords:** 明るさ知覚, 光感受性網膜神経節細胞

### 1. はじめに

光受容する視細胞において、錐体、桿体とは異なる内因性光感受性網膜神経節細胞(以下 ipRGC)が発見され、その機能は生体の概日リズム制御や瞳孔反射にあることが見いだされた<sup>1)2)</sup>。これらの経路は非視覚形成と呼ばれ、従来の輝度、色や運動知覚の視覚形成とは異なる投射経路である。一方で、ipRGC にて受容された光が視覚形成経路への投射や明るさ弁別がノックアウトマウス等による実験によって示され<sup>3)4)</sup>、明るさ知覚へ影響することが示唆されつつある。そこで本研究では、ヒトにおける ipRGC が関与する明るさ知覚機構の解明を目的として、明るさ知覚の定式化と錐体・桿体・ipRGC 寄与の機構を検討した。

実験は 6 色光源を用いて、silent substitution 法によって行なった。ipRGC への刺激を変数とし、錐体への光刺激が一定である錐体 silent、さらに錐体および桿体への光刺激強度が一定である錐体桿体 silent の光刺激を作製し、magnitude estimation 法を用いて明るさの数値化を行なった。その結果を基に ipRGC が関与する明るさ知覚の定式化を行なった。

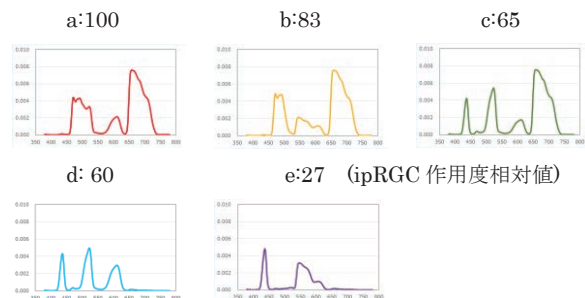
### 2. 実験方法

#### (1) 光刺激作製

実験は錐体 silent(実験 I)と錐体&桿体 silent(実験 II)を行なった。光源は RGB 分光分布の異なる 2 種類のプロジェクター(6 原色プロジェクター)を使用し、それぞれの出力をスクリーン上で合成し、視覚刺激とした。錐体 silent の場合は L・M・S-錐体および ipRGC の 4 種類の細胞への刺激を制御するため、6 色中少なくとも 4 色の混合が必要となる。同様に、錐体と桿体の両方を silent にするには、桿体を加えた 5 種類の細胞への刺激を制御するために 6 色中少なくとも 5 色の混合が必要となる。2 台のプロジェクターを駆動する PC のそれぞれの RGB 値を調整することにより、色度は白色( $x=0.328, y=0.367$ )とし、実験 I、実験

II それぞれ ipRGC 作用度の異なる 5 条件、2 条件の光刺激を作製した。また、各刺激において 20 ~ 110 cd/m<sup>2</sup> の間で輝度変化させた。図 1 にそれぞれの光刺激の分光分布および ipRGC 作用度(相対値)を示す。

#### 実験 I



#### 実験 II

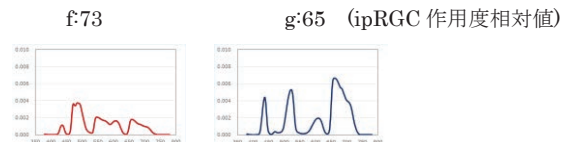


図 1 光刺激分光分布(横軸: 波長(nm)、縦軸: 強度)

#### (2) 明るさ知覚評価

明るさの評価は magnitude estimation 法で測定した。被験者は全員色覚正常で、ブルーライトカット機能の眼鏡を装着しない大学生および大学院生(実験 I : 7 名、実験 II : 9 名)とし、5 分間の暗所順応後、プロジェクター出力を投影したスクリーンからの反射光を、基準光、テスト光の順で各 5 秒、1 セット 2 回繰り返し提示した。ipRGC は中心視より周辺視で密度が大きいことから、刺激位置は網膜周辺とし、右眼片眼で刺激サイズ 5°、刺激位置中心鼻側 7°の刺激を観察した。測定は、暗所において、基準光の明るさを 100 とした時のテスト光の明るさを、1 刺激につき各 3 回、数値で回答させた。ipRGC の応答時定数を考慮し、刺激を提示直後の明るさではなく、刺激提示開始後 3~4 秒経過後の知覚の回答とした。

### 3. 結果

#### (1)実験Ⅰ～錐体 silent～

図2は光刺激の輝度を横軸に、縦軸に数値化した明るさを刺激毎にプロットした結果である。これらの結果をStevensのべき乗則に従うフィッティングを行なった。べき乗則は、明るさを  $Y$ 、輝度を  $I$  としたとき、 $Y = \alpha I^\beta$  で表すことができる。係数  $\alpha$ 、 $\beta$  について、i)  $\alpha = \text{Const.}$ ,  $\beta = \text{Variable}$ , ii)  $\alpha = \text{Variable}$ ,  $\beta = \text{Const.}$  の2条件において非線形最小二乗法にて計算したところ、i)条件の方が高相関であるが示された(図2)。

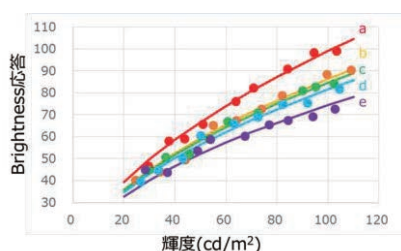


図2 明るさ知覚測定値(●)と実験式(一)

結果から算出した係数  $\beta$  と ipRGC 作用度の関係を図3に示す。回帰分析の結果、 $R^2=0.92$  であることから、ipRGC 作用度に対してべき数は線形の関係にあると言える。

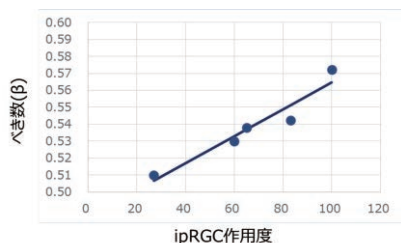


図3 ipRGC 作用度とべき数  $\beta$  との関係

#### (2)実験Ⅱ～錐体&桿体 silent～

実験Ⅰと同様に明るさの測定値、フィッティング結果を図4に、ipRGC 作用度とフィッティングべき数との関係を図5に示す。

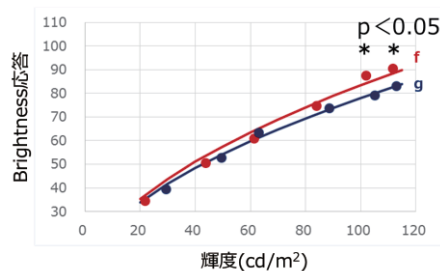


図4 明るさ知覚測定値(●)と実験式(一)

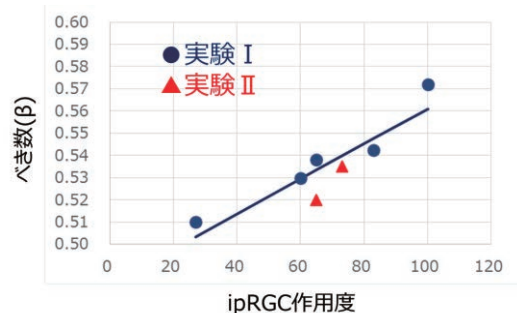


図5 ipRGC 作用度とべき数  $\beta$  との関係

実験ⅠとⅡの結果から、 $\beta = 7.91 \cdot 10^{-4} * (\text{ipRGC 作用度}) + 0.482$  ( $R^2=0.82$ ) となり、ipRGCの明るさ知覚への寄与を定量的に示した。

### 4. まとめ

色度と輝度値(錐体作用度)と桿体作用度が同じでipRGC作用度だけが異なる光刺激を生成し、ipRGC作用度を変化させるだけで明るさに差異が生じることを示し、ipRGCの明るさ知覚への寄与を明らかにした。さらに、Stevensのべき乗則のフィッティングから、べき数はipRGC作用度に対して線形関係があることが示された。

### 謝辞

鹿児島大学大学院工学研究科辻村先生にはipRGC action spectrumの提供を、また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専攻山口先生には6原色プロジェクターをご提供頂きました。ここに感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) S.Hatter et al.(2002) Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity. Science 295, 1065-1070
- 2) D.M.Berson et al.(2002) Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. Science 295, 1070-1073
- 3) T.M.Brown et al.(2010) Melanopsin contributions to irradiance coding in the thalamo-cortical visual system. PLoS Biology 8, e1000558
- 4) T.M.Brown et al.(2012) Melanopsin-based brightness discrimination in mice and humans. Current Biology 22, 1134-1141