

令和元年6月3日現在

機関番号：12501

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2018

課題番号：17K19996

研究課題名（和文）単独型分光プロジェクタを用いたipRGCの視覚的機能の解明

研究課題名（英文）Elucidation of visual function of ipRGC using single-type multispectral projector

研究代表者

堀内 隆彦（Horiuchi, Takahiko）

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：30272181

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：単独型分光プロジェクタを用いることによって、内因性光感受性網膜神経節細胞（ipRGC）の視覚的機能の解明の問題に取り組んだ。実験の結果、これまで報告されているように、ipRGCの明るさ知覚への影響が確認されたが、影響の仕方には個人差があることが明らかとなった。また、色覚にも影響している結果が得られ、ipRGCが色覚経路にも寄与している可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、ipRGCが輝度経路および色覚経路に寄与していることを示すデータが得られたことにより、明所視において錐体応答によって色と明るさが決定するとされる現在の学説を覆す可能性がある。また、産業界においても、RGBの三刺激値で映像表現を行っている視覚メディアの分野において、より厳密な映像再現にはipRGCの吸収率を含めた表現が必要となることを意味しており、変革を及ぼす結果につながる。

研究成果の概要（英文）：Aiming at elucidation of the visual function of intrinsically photosensitive retinal ganglion cell (ipRGC), I have been tackling the problem using a single spectral projector. As experimental results, as reported so far, the influence on brightness perception of ipRGC was confirmed, but it became clear that there is individual difference in the way of influence. In addition, the results that also affect color vision were obtained, suggesting that ipRGC may also contribute to the color vision pathway.

研究分野：視覚情報工学

キーワード：視覚経路 色知覚 ipRGC 分光プロジェクタ

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在の学説では、我々の眼の網膜には錐体と杆体と呼ばれる二種類の視細胞を光受容体として有しており、色や明るさの知覚量を決定するとされている。しかしながら、2003年頃からメラノプシン物質を含む第三の光受容体(ipRGC)が発見され、概日リズムや瞳孔反射に影響することが明らかにされてきた。さらに近年、この ipRGC が外側膝状体から視覚野への視覚経路にも寄与しているという報告があり、研究者による追試が開始されている。ipRGC の知覚への寄与の検証には、視覚実験結果が重要な根拠となる。このとき、ipRGC の感度は他の光受容体の感度とオーバーラップしているため、LED 光源からなる多原色刺激を制御することによって、他の光受容体の刺激を等価に保ちながら、ipRGC の刺激のみを可変とする刺激提示法が用いられている。しかし、この方法は刺激の分光分布が LED 原色に制限されるため、厳密で複雑な実験刺激を生成することが困難であり、詳細な検証の障壁となっていた。

2. 研究の目的

本研究では、我々が映像再現のために構築してきた『画素単位で所望の分光分布を有する光を生成できるプロジェクタ』を視覚刺激の生成に利用することによって、時空間の双方においてこれまでの実験精度を桁違いに改善し、視覚機能の総理解とモデル化に挑戦する。

3. 研究の方法

本研究では、分光可変な光源生成装置を利用することによって、世界に先駆けて構築した単独型の分光プロジェクタを利用する。一般の商用プロジェクタは、測色的色再現に基づいて設計されており、錐体の三刺激値が等価となるようにプロジェクタの原色強度(RGB(+補色))を制御している。これに対して、構築した分光プロジェクタは、画素単位で所望の分光分布を制御して照射することが可能であり、分光の色再現を実現している。加えて、数百 fps の速度で高速に光源を切り替えることが可能である。この装置を用いることによって、当初の計画では、(1)明るさ知覚への影響の解析、(2)輝度経路への寄与の解析、(3)色覚経路への寄与の解析、(4)瞳孔反応経路への寄与の解析、(5)表面特性の知覚への影響の解析、(6)視覚機能の総理解とモデル化の6つの課題に取り組むことを計画していた。

4. 研究成果

(1) 実験刺激

実験刺激として、先行研究(引用文献①)の Brown et al.らの実験で使用された分光分布の近似刺激を作成した。Brown らは積分球を用いて、視野角 95 度相当の実験刺激で実験を行っていたために、10 度視野の等色関数で計算したと考えられるが、今回の実験刺激は 5.5 度相当のものを使用しているため、2 度視野の等色関数を使用して三刺激値を計算し、三刺激値が等価になるように調整した。基準刺激と三刺激値は等価なまま ipRGC の刺激量を約 11% 変化させた ipRGC 刺激と、基準刺激と分光形状は等価なままパワーのみを±約 20%、±約 40% 変調させた light flux 刺激を使用した。使用した ipRGC 刺激を図 1 に示す。

本報告書では、ipRGC の刺激量を増やした刺激を ipRGC(+)刺激、減らした刺激を ipRGC(-)刺激と表現する。実験刺激は、ipRGC 刺激と Light flux 刺激の組合せで合計 15 種類となる。xy 色度は(0.36, 0.28)であり、実験中、各刺激の色度が小数第 3 位を四捨五入した際に一致する精度で調整した。Brown らの実験では、ipRGC の刺激輝度は 356 cd/m²であったが、本実験のプロジェクタの制約により、後述する周辺視実験の輝度は 17 cd/m²であった。

(2) 実験環境

被験者と刺激までの距離は 30cm で、視野角 5.5 度相当である。被験者は、20 代の男女 5 名の色覚正常者である。ipRGC 刺激および light flux 刺激をそれぞれ観察し、恒常法で明るさ感を評価した。各刺激の比較回数は 10 回とした。Brown らは、右目のみで評価していたが、本実験では視野闘争を考慮し、両眼で実験を行った。また、刺激周辺との対比効果の影響が考えられたため、刺激の周辺を黒い紙で覆った。また、本実験では、ipRGC の密度が高い 10° の周辺視で観察を行った。

(3) 実験手順

実験手順も Brown らの方法に従った。はじめに、被験者に 5 分間順応刺激(ipRGC0%)に順応してもらう。順応刺激(ipRGC0%)を提示し、2 秒かけて最初の刺激を 3 秒間提示する。その後、2 秒かけて 2 番目の刺激に移行し、3 秒間提示する。2 番目の刺激提示後、2 秒かけて順応刺激(ipRGC0%)に移行する。各刺激を評価するタイミングは音によって被験者に知らさ

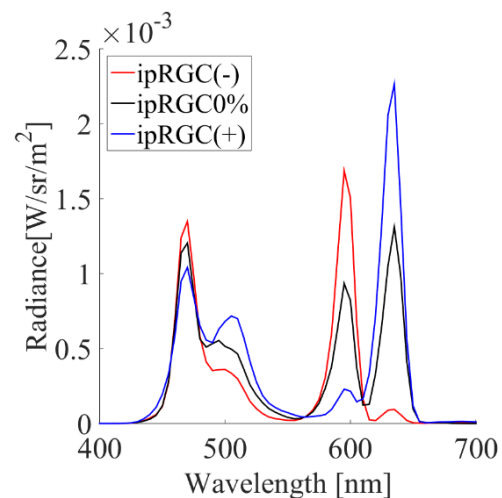


図 1 実験に使用した ipRGC 刺激

れる。刺激提示後、どちらが明るく感じられたか、どちらがより白く感じたか二者強制選択により口頭で回答した。被験者にはどの刺激対を比較しているかは伝えず、回答後も、回答した刺激が何であったかは伝えなかった。Brown らの実験と本実験の相違点を表 1 にまとめる。

表 1 Brown らの実験と本実験の相違点

	引用文献①	本実験
実験機器	積分球	分光プロジェクタ
視野角	95 度	5.5 度
色度	(0.351,0.311) 10 度視野の等色関数	(0.36,0.28) 2 度視野の等色関数
輝度	356 cd/m ²	20 cd/m ²
順応時間	5 分	5 分
テスト刺激の提示時間	1 秒	3 秒

(4) 実験結果

実験結果を図 2 および図 3 に示す。グラフの各点は 15 種類の刺激を示しており、各 ipRGC 刺激を横軸の Light flux 刺激と比較して、Light flux 刺激のほうが明るいと回答した割合、あるいは、白いと答えた割合を縦軸に示している。明るさや白さに ipRGC の影響がなければ、3 本のグラフは一致することとなる。実験結果を、ロジスティック関数 ($y = 1/(1 + \exp(-a(x-b)))$) でフィッティングして示している。図 2 に、例として 2 名の結果を示す。図 2 に示されるように、被験者ごとに異なる結果が得られた。被験者 1 は、Brown らの実験結果と同様に、ipRGC の刺激量が増加すると明るさが増すという結果が得られた。これに対して、被験者 2 は、各グラフが重複する結果になり、ipRGC が明るさ知覚に影響しない結果となった。この結果は、ipRGC の明るさへの寄与には、個人差があることを示唆している。

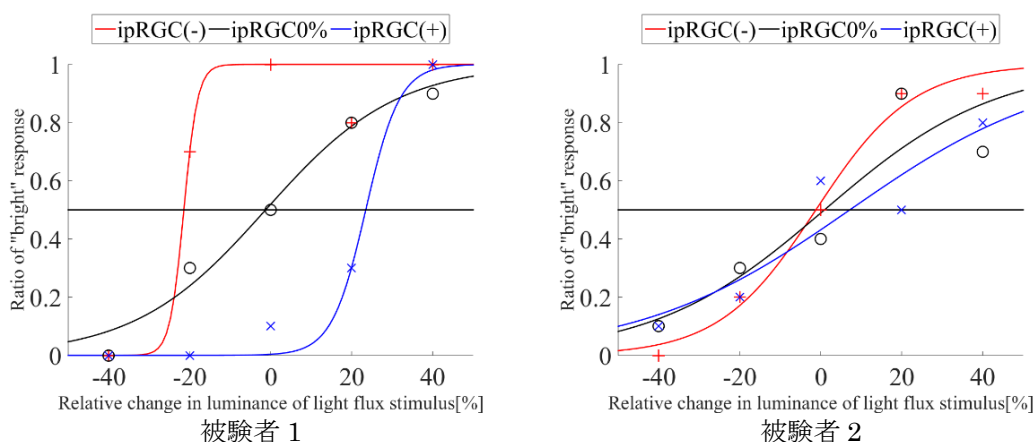


図 2 明るさ実験結果

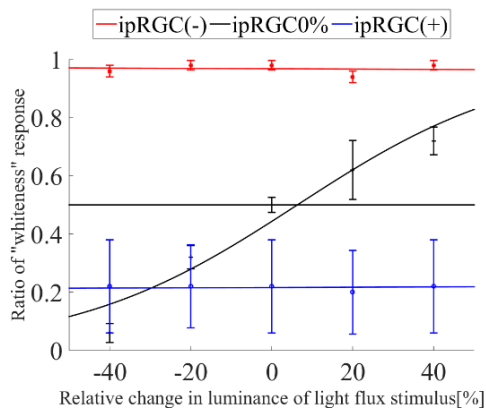


図 3 白さ実験結果

図3は、刺激から得られる白さの結果である。被験者5名の平均値を示しており、エラーバーは標準誤差を示している。図に示されるように、ipRGCの刺激量が増加すると、刺激の白さが増加する安定した結果が得られた。この結果は、ipRGCが色覚に影響する可能性を示唆している。

(5) ディスプレイデバイス上の再現における色覚への影響

本課題は、当初の研究計画にはなかったが、(3)で述べたように、ipRGCが明るさや色覚に影響を与える結果が得られたため、産業応用を見据えて、ディスプレイ上の再現色に対する影響を実験によって解析した。その結果、高輝度ディスプレイを用いたカラーマッチング実験により、ディスプレイの色覚にipRGCが影響し得る結果を得た。そこで、ipRGC吸収率を考慮したXYZ補正式を導出し、色差が改善されることを示した。

(6) まとめ

本課題研究では、分光プロジェクタを用いて、ipRGCの明るさ知覚への影響について、心理物理実験を通じて検証を行った。その結果、ipRGCの刺激量を増加させた場合、先行研究であるBrownらの結果を支持する被験者に加えて、先行研究とは異なる結果を示す被験者も確認された。このことは、ipRGCの感度に個人差がある可能性を示唆しており、今後注意深い解析が必要である。白さの評価では、ipRGCの刺激量が増加すると、白さも増加する結果が全被験者において安定して得られた。これにより、ipRGCが色覚に影響することが示唆された。加えて、ディスプレイ上の色再現においても、ipRGCが色覚に影響している結果が得られた。

今後、明るさ感だけではなく、輝度経路、色覚経路への寄与についても解析を注意深く進めていく必要がある。

<引用文献>

① T.M. Brown et al.: Melanopsin-Based Brightness Discrimination in Mice and Humans, *Current Biology*, 22, pp.1134- 1141 (2012).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

① K.Akiba, M.Tanaka and T.Horiuchi, Experimental consideration on the effect of ipRGC for color reproduction on display device, Proc. AIC2019 Midterm Meeting, 査読有, 2019, 印刷中.

② 秋葉航太, 田中緑, 堀内隆彦, ipRGCがディスプレイの色覚に与える影響, 日本色彩学会誌, 査読有, 43巻, 2019, 5-6.

③ 岡嶋克典, 堀内隆彦, 富永昌治, 質感の計測と制御, 日本画像学会誌, 査読有, 57巻, 2018, 217-213.

DoI: <https://doi.org/10.11370/isj.57.207>

④ Takahiko Horiuchi, Challenges in Shitsukan Imaging, Proc. 4th Asia Color Association Conference, 査読有, 2018, 30-32.

DoI: <https://doi.org/10.11370/isj.57.207>

⑤ Y.Tanaka, K.Hirai, M.Tanaka, T.Horiuchi and K.Okajima, Contribution of ipRGC to the Fluorescent Feeling, Proc. 13th AIC International Congress, 査読有, PS03-58, 2017, 1-4.

<https://aic-color.org/page-18077/>

⑥ 田中佑樹, 平井経太, 田中緑, 堀内隆彦, 岡嶋克典, 光感受性網膜神経節細胞の蛍光感知覚への影響, 日本色彩学会誌, 査読有, 41巻, 2017, 26-27.

DoI: https://doi.org/10.15048/jcsaj.41.3_26

[学会発表] (計5件)

① K.Akiba, M.Tanaka and T.Horiuchi, Experimental consideration on the effect of ipRGC for color reproduction on display device, AIC2019 Midterm Meeting, 2019.

② 秋葉航太, 田中緑, 堀内隆彦, ipRGCがディスプレイの色覚に与える影響, 第50回日本色彩学会全国大会, 2019.

③ Takahiko Horiuchi, Challenges in Shitsukan Imaging, 4th Asia Color Association Conference, 2018.

④ Y.Tanaka, K.Hirai, M.Tanaka, T.Horiuchi and K.Okajima, Contribution of ipRGC to the Fluorescent Feeling, 13th AIC International Congress, 2017.

⑤ 田中佑樹, 平井経太, 田中緑, 堀内隆彦, 岡嶋克典, 光感受性網膜神経節細胞の蛍光感知覚への影響, 第48回日本色彩学会全国大会, 2017.

[その他]

ホームページ等

<http://dippix.tp.chiba-u.jp/>

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：平井 経太

ローマ字氏名：(HIRAI, Keita)

所属研究機関名：千葉大学

部局名：大学院工学研究院

職名：准教授

研究者番号 (8桁)：30583405

(2)研究協力者

研究協力者氏名：岡嶋 克典

ローマ字氏名：(OKAJIMA, Katsunori)

研究協力者氏名：田中 緑

ローマ字氏名：(TANAKA, Midori)