

## 最優秀賞（高等学校 共同研究の部）

### 残像の色の変化と錐体細胞の暗順応曲線

福島県立安積高等学校生物部視細胞班



#### I 研究動機

太陽や蛍光灯などの強い光を見た後に目をつむると、時間が経っていくうちに残像の色が変化する。その原因を解明したいと思い、研究を始めた。

#### II 光の残像について

残像の色の変化が、人によらず一定であることを調べる。

##### (1) 実験手順

- ① 光源に白の発光ダイオードを用い、100ルクスの光を30秒間見続ける。
- ② 目をつむり、残像の様子を被験者に言ってもらい記録する。この実験を被験者14名で行った。

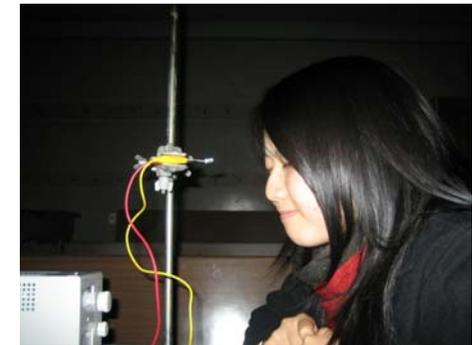
##### (2) 結果

下記のデータが得られた。この実験では、各自の認識に頼っておりばらつきが見られたが、青→緑→赤→黒の順に変化した被験者が多く、残像の色の変化において、一定の法則があるように思われた。

##### (3) 考察

光を感じる視細胞には、色彩を識別する錐体細胞と明暗を識別するかん体細胞がある。ヒトの錐体細胞には、赤・緑・青の波長を受容する3種類があり、これらの細胞にはそれぞれ異なるオプシンという視物質がある。この視物質が光によって壊れると視細胞が興奮し視神経に伝達され、脳が光を認識する。またこの視物質は時間とともに再合成される。以上のことを考慮し、私たちは次のように仮定した。

- ① 視物質は再合成により回復するも、視細胞内の何らかの影響で再度分解が起こる。
- ② 視物質の種類により回復速度が異なるため、残像に色の変化が生じた。この回復の早い順から、青→緑→赤となる。



sample1	緑	→	黒								
sample2	白	→	緑	→	青緑	→	緑	→	赤	→	黒
sample3	白	→	緑	→	赤	→	黒				
sample4	白	→	黄緑	→	緑	→	黒				
sample5	黄緑	→	黄緑	→	深青	→	赤紫	→	黒		
sample6	黄緑	→	水色	→	緑	→	赤紫	→	黒		
sample7	青	→	緑	→	水色	→	エメラルド	→	青		
		→	赤紫	→	赤	→	黒				
sample8	緑	→	青	→	緑	→	褐色	→	黒		
sample9	青	→	緑	→	赤	→	紫	→	黒		
sample10	緑	→	青	→	緑	→	赤	→	黒		
sample11	青	→	水色	→	エメラルド	→	黄緑	→	オレンジ		
		→	赤	→	紅	→	黒				
sample12	水色	→	緑	→	紫	→	黒				
sample13	水色	→	緑	→	紫	→	青	→	黒		
sample14	緑	→	白	→	緑	→	黄	→	深青	→	黒

### III 錐体細胞の回復と色の関係について

錐体細胞の視物質の回復速度を調べるために視細胞に関する資料を調べたところ、光の暗順応曲線というものがあり、これが活用できるのではないかと考えた。

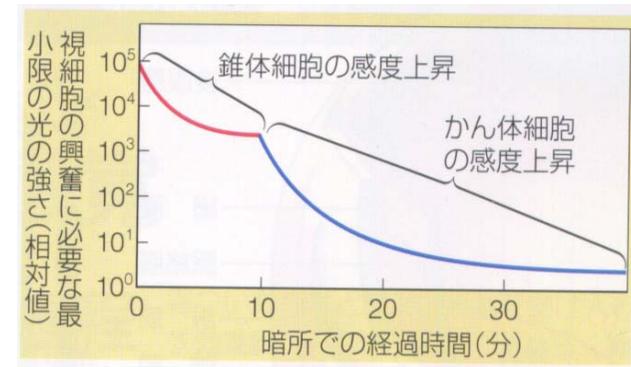
暗順応とは、明るい場所から暗い場所に入った際に、時間とともに目が暗闇に慣れてくるという現象である。これは、視物質の合成が進み、感度が上昇するために起こる。先に錐体細胞の視物質が回復し、10分ほどでかん体細胞が回復するため、暗順応曲線は二段階で下降するという特徴がある。このグラフを赤緑青それぞれの錐体細胞に対して作ることができれば、錐体細胞の種類による回復速度の違いを明らかにすることができるのではないかと考えた。(下図参照)

#### (1) 実験を始めるに当たって

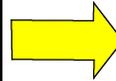
暗順応曲線を作成するために、光の強さ(照度)を調節できる装置が必要であったが、その装置は大掛かりなもので、とても入手できるものではなかった。そこで、自作することにした。電球、発光ダイオードなどを電源装置につなぎ、照度と電圧の検量線作成を試みた。しかし、どうしても正確に出力を調整することはできなかった。そこで、照度が距離の二乗に反比例するという性質を利用できないか検討することにした。

#### (2) 実験準備

まず、暗順応曲線が距離の二乗に反比例するという性質を利用して、作成できるか確かめる必要があった。そのため、十分な距離が取れ、かつ暗い環境でなければならない。そこで、実験は日が落ちた体育館で行うことにした。



夜の体育館でも外の街灯や月の光が入ってくるため、窓の暗幕を閉め、暗幕がない小さな窓は段ボールで塞ぐなどして外の光を可能な限り遮断した。  
また、体育館内にある電光板なども暗幕で覆い、光が漏れないようにした。



光源は電圧の調節可能な電源に発光ダイオードをつないで用いた。このとき発光ダイオードは距離 1 cm で、用いた照度計の最小値である 0.01 ルクスとなるようにした。また錐体細胞は網膜の中心部である黄斑に集中していることから光が黄斑に当たるように被験者の視線の高さに合わせた。



### (3) 実験手順

全ての色成分を含んだ、一定の光を一定時間見ること、開始段階の条件をそろえることにした。光源を見る前の明るい光としてパソコンの白の画面をプロジェクターに出力し、目をつむってその光を目に当てた。



①被験者はキャスター付きいすに座り、プロジェクターの光を目をつむったまま3分間見る。このとき、特定の残像を残さないように眼球を上下左右に動かした。

②プロジェクターを見るのをやめ、目をつむったままで一定時間いる。

③目を開けて真正面の光源を見る。いすを押ししてもらい、見えたら止める。

④光源からの距離を測定し記録する。

⑤①から④の作業を②の目を閉じた時間を変えて繰り返す。

⑥記録した数値を照度( $10^6$ ルクス) =  $1 \div \text{距離}^2$  (m)に代入し照度を求める。

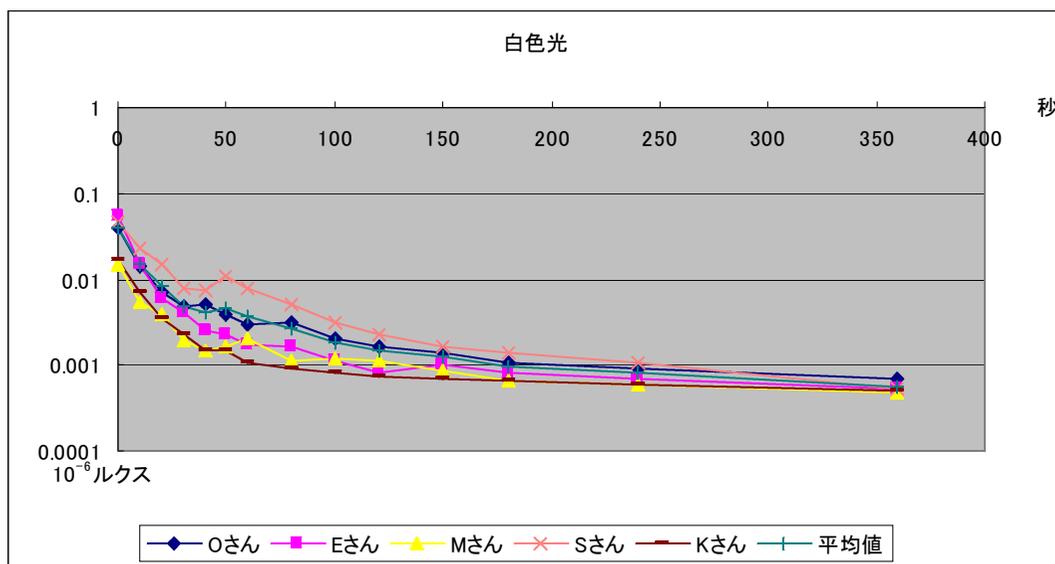
#### (4) 実験結果

白色光で行った結果である。

	白色光					
目を閉じた時間	Kさん	Mさん	Oさん	Sさん	Eさん	平均値
0	0.017132	0.014872	0.03984	0.045657	0.054083	0.034317
10	0.006876	0.005297	0.014274	0.023596	0.015355	0.01308
20	0.003424	0.003872	0.007097	0.015279	0.006075	0.00715
30	0.002244	0.001915	0.004945	0.008044	0.004088	0.004247
40	0.001487	0.00145	0.00498	0.007535	0.00249	0.003589
50	0.001471	0.00163	0.003815	0.010672	0.002219	0.003961
60	0.001067	0.002044	0.002989	0.008029	0.00172	0.00317
80	0.000902	0.001137	0.003149	0.004994	0.001667	0.00237
100	0.00081	0.00117	0.002077	0.003107	0.001141	0.001661
120	0.000748	0.001105	0.001684	0.002329	0.0008	0.001333
150	0.000684	0.000843	0.001419	0.001667	0.001007	0.001124
180	0.000661	0.000674	0.001071	0.001382	0.000817	0.000921
240	0.000589	0.000603	0.000902	0.001064	0.000679	0.000767
360	0.000486	0.000474	0.000693	0.000534	0.000543	0.000548



これをグラフにすると以下のようになった。



このグラフから、およそ5分程度で $10^{-2}$ の照度まで暗順応することがわかる。これは資料などに載っている錐体細胞が $10^{-1} \sim 10^{-2}$ まで暗順応するというデータと一致した。この結果から、この手法で暗順応曲線が得られることがわかったので、赤・緑・青の3色についての暗順応曲線を作ることにした。

#### IV 単色光における暗順応曲線の作成

##### (1) 実験準備

##### ①波長の分離

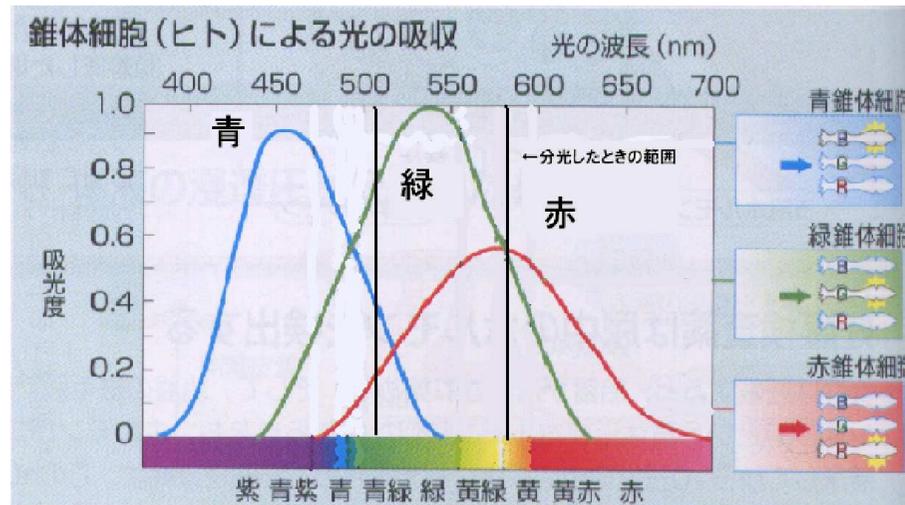
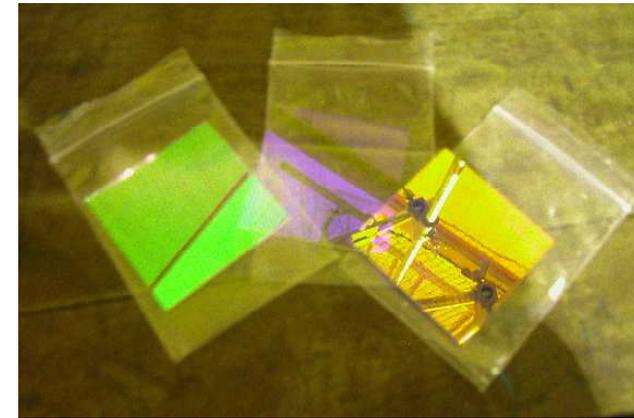
まず、赤・緑・青それぞれの波長の光を作ること着手した。パソコンから赤・緑・青各成分の出力を調節して、プロジェクターで投影してみたが、3色ある液晶を光が通過するプロジェクターでは、完全な波長の分離はできなかった。

次に各色の発光ダイオードを用いることを考えたが、分光器で見てみたところ様々な波長が混ざっていた。また、各色のセロファンをかぶせてみたが、それでも波長の分離はできなかった。

プリズムを用いての分光も試みたが、分光した光の幅が狭く、特定域だけを取り出すことができなかった。

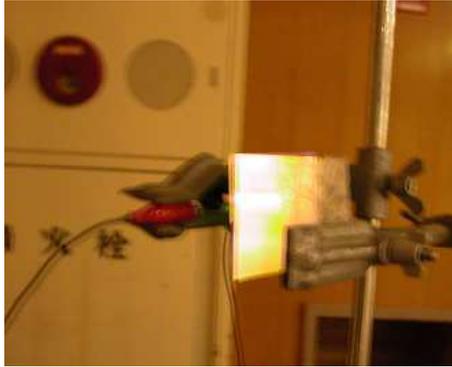
そこで、分光について調べたところ特定の波長を取り出せる光学フィルターの存在を知った。

用いた光学フィルターはイエロー、マゼンタ、シアンの3種類で、次頁のグラフ(縦軸：透過率、横軸：波長)のように光を通す。このフィルターを赤はイエローとマゼンタ、緑はイエローとシアン、青はマゼンタとシアンの2種類重ねて用いることで、赤・緑・青の波長だけにした。ただし、各色の錐体細胞の吸収する波長は次のグラフのようになっており、必ずしも分光した波長と錐体細胞が一致しているわけではないが、およそ合っているためそのまま実験を行った。

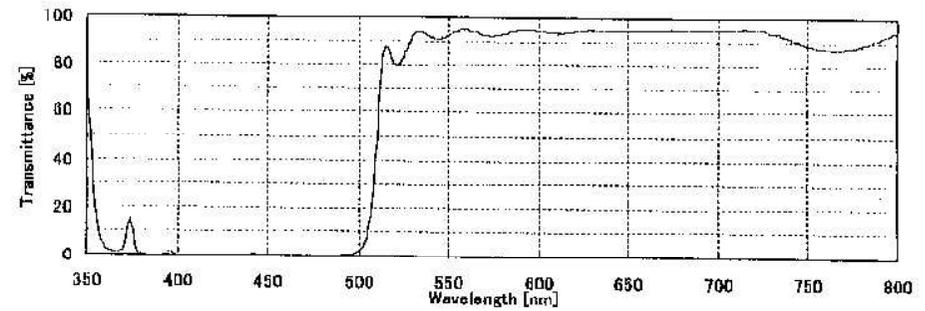


## (2) 実験手順

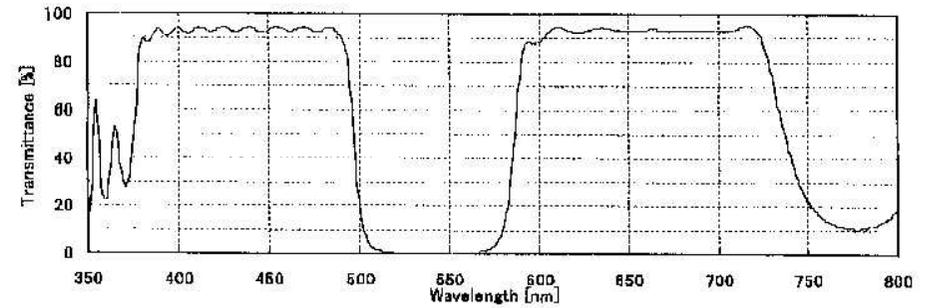
実験手順は、白色光での実験と同様に行った。光源に各色の発光ダイオードを用い、光源の前に光学フィルターを置いて分光したことだけ異なる。



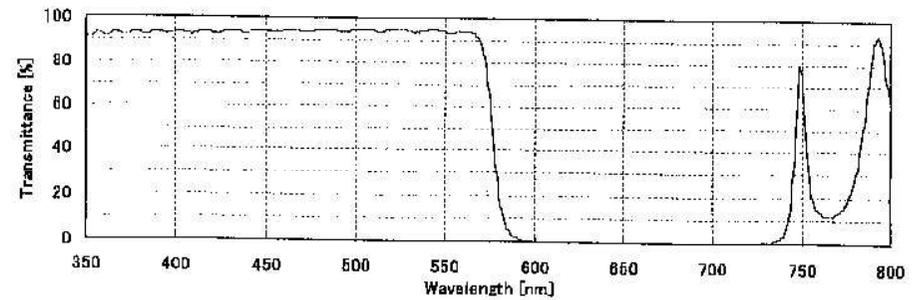
© Dichroic Filter (Yellow) -0°



© Dichroic Filter (Magenta) -0°



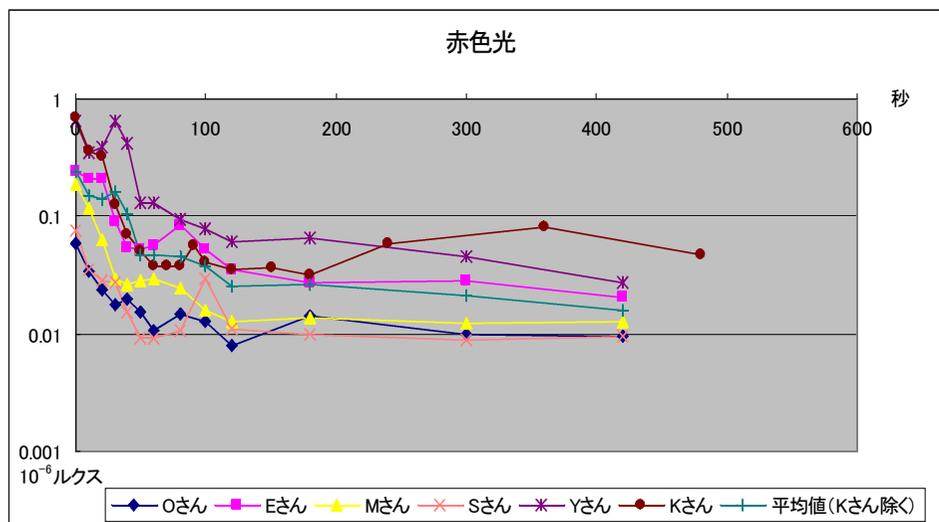
© Dichroic Filter (Cyan) -0°



(3) 結果

① 赤色光

一人目で実験を行った際に、時間が経ってからの伸びがなかったため二人目以降は実験の回数と時間を減らした。

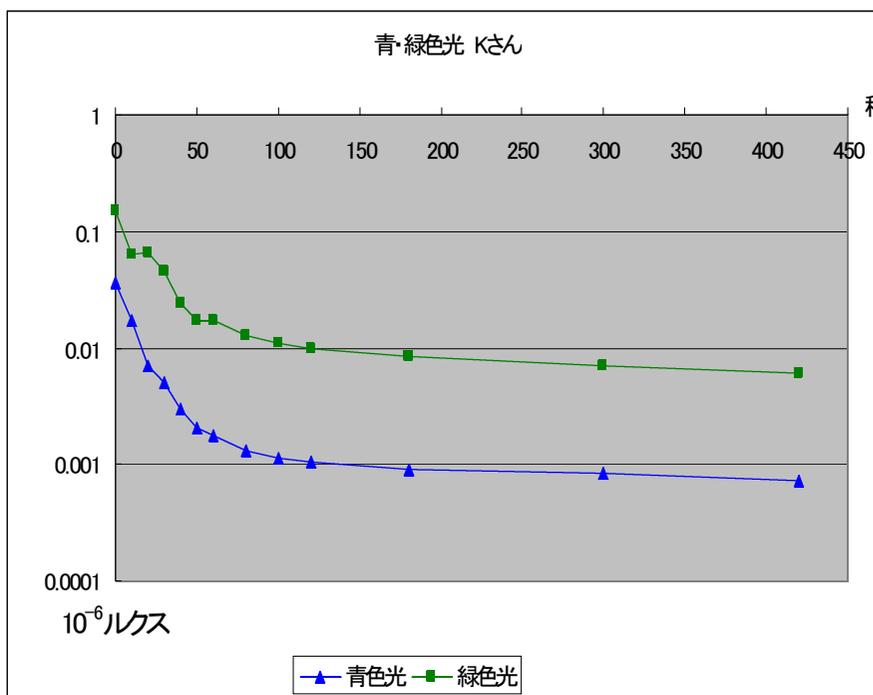


赤色光								
目を閉じた時間	Kさん	目を閉じた時間	Oさん	Eさん	Mさん	Sさん	Yさん	平均値
0	0.683013	0	0.058627	0.237954	0.19069	0.076734	0.64	0.240801
10	0.367309	10	0.033791	0.212364	0.115693	0.035466	0.350128	0.149488
20	0.326531	20	0.023238	0.208503	0.062189	0.028534	0.385788	0.14165
30	0.123983	30	0.017873	0.091273	0.029221	0.027594	0.64	0.161192
40	0.071492	40	0.020063	0.054846	0.026699	0.015432	0.410914	0.105591
50	0.051653	50	0.015393	0.053091	0.028534	0.009175	0.132231	0.047685
60	0.038296	60	0.010434	0.057233	0.029221	0.009246	0.130329	0.047292
70	0.037413	80	0.014728	0.089531	0.024414	0.010434	0.09352	0.045325
80	0.037558	100	0.012826	0.053336	0.015822	0.029121	0.078025	0.037826
90	0.057233	120	0.008073	0.034807	0.012826	0.011034	0.06188	0.025724
100	0.040322	180	0.014005	0.02723	0.013647	0.009707	0.06541	0.026
120	0.035466	300	0.009842	0.02863	0.012156	0.008866	0.045657	0.02103
150	0.03642	420	0.009593	0.020408	0.012596	0.009537	0.02723	0.015873
180	0.031661							
240	0.059488							
360	0.082574							
480	0.047673							

②青色光・緑色光

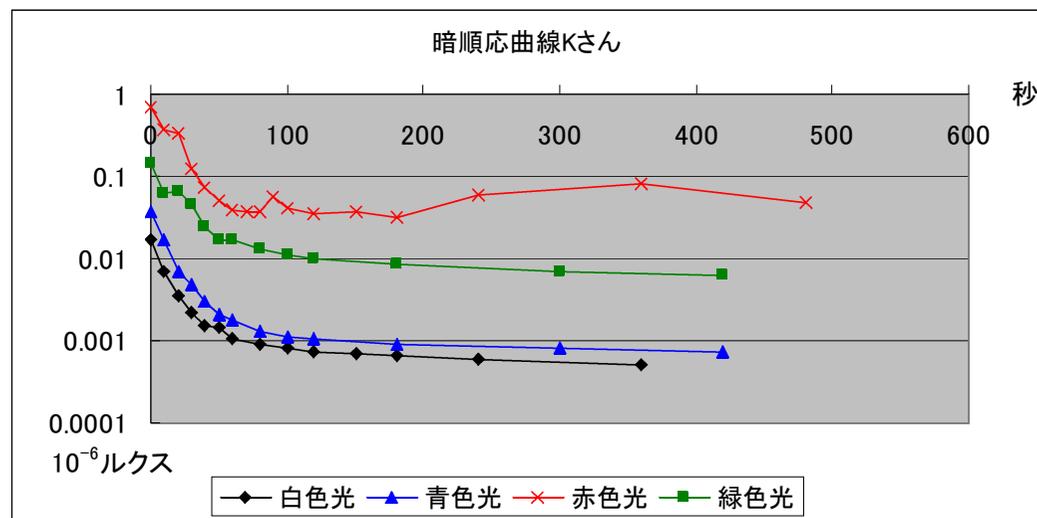
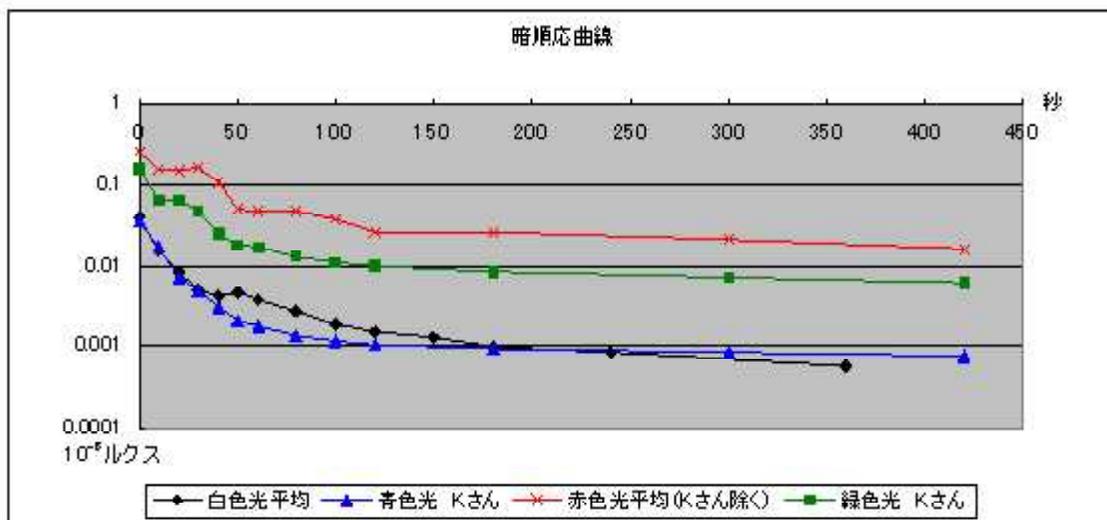
夜の実験で合宿時などにしか実験できなかったことと、実験に多くの時間と人手が必要だったため、「青」と「緑」の色は一人だけ実験を行った。

青色光		緑色光	
目を閉じた時間	Kさん	目を閉じた時間	Kさん
0	0.036281179	0	0.147928994
10	0.016866251	10	0.0625
20	0.007061648	20	0.06574622
30	0.004924592	30	0.045269353
40	0.003018959	40	0.024037017
50	0.002038227	50	0.017313019
60	0.001736111	60	0.016866251
80	0.001322314	80	0.012767723
100	0.001118556	100	0.011080332
120	0.001037234	120	0.01
180	0.000891067	180	0.008494553
300	0.000825737	300	0.007061648
420	0.000734425	420	0.00615148



### ③ グラフのまとめ

グラフ上の「赤」と「白」は被験者の平均値で、それ以外は K さんの結果である。グラフ下は、K さんだけの結果をまとめたものである。



## V 研究のまとめ

1 上図のグラフを見てみると、一人だけの実験結果ではあるが、「青」の錐体細胞が一番早く回復していることがわかる。その次に「緑」の錐体細胞が回復し、そして最後に「赤」の錐体細胞が回復している。また、グラフの下降についても、「赤」より「緑」、「緑」よりも「青」の方が下降している。このことから、錐体細胞は、青→緑→赤の順に回復し、またその順に認識しやすいのではないかと考えられる。この原因については、この結果からだけではわからないが、

- ① この順に錐体細胞の数が多い
- ② この順に視物質の回復速度が速い
- ③ この順に視物質が分解する光の閾値が低い

等を考えている。この点を考察するために、さらなる実験を行っていきたい。

2 視物質回復時にも視細胞の興奮が起こるといふ仮説を立てたが、本当にそのようなことが起こりうるのか、この点についても十分に検討が必要である。また、実験の試行回数を増やし、再現性も高めていきたい。

3 白色光のデータをさらに精査する必要がある。同じ0.01ルクスの光源を用いながら、単色光より回復が早いということは、各色の錐体細胞の閾値を考えると辻褄が合わない。色成分の相互作用や照度計の設計なども検討してみる必要がある。

4 青と緑の錐体細胞の回復が早いという実験データは、もしかしたら避難経路の案内板等に白や緑が多用されていることと関係があるのかもしれない。今後は、そのようなことも研究テーマにしていきたい。

5 この研究結果の活用方法として自動車のライトを青白くして歩行者の反射ステッカーや自転車の反射板などを青と緑の光を主に反射させるようにすることで、夜間に自動車の運転手が歩行者や自転車をより遠い位置で見つけることができ、事故防止につながられる。

以上、大きな課題は残るものの、錐体細胞の回復と色の間、関連を示すことができたと考える。今後は、さらに多くの文献を探し、研究を積み重ね、真実を突き止めていきたい。

### 謝辞

研究を行うにあたり、株式会社倉元製作所様より光学フィルターをいただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

〔参考文献〕

- ・フォトサイエンス生物図録 鈴木孝仁監修数研出版 2006
- ・ダイナミックワイド図説生物—総合版— 東京書籍

共同研究者		
鈴木 真嘉	角田 大朗	太田 聡美
松井 詩歩	嶋 恵理子	
[指導顧問]	遠藤 直哉	