

# 順応光の明るさが急変した時の視覚特性

塚田 由紀\* 豊福 芳典\* 青木 義郎\*

## Visual Characteristics under Sudden Change of Adaptation Stimulus

by

Yuki Tsukada\* Yoshinori Toyofuku\* Yoshiro Aoki\*

### Abstract

When we move from daylight into a dark place, such as a tunnel or a movie theater, we can hardly see anything for a while, but our eyes soon adapt to the darkness and we can see things around us. Because this transient loss or deterioration of the visual function due to a sudden change in adaptation lightness may cause an accident, it is necessary to make an in-depth study of this phenomenon and to find a solution to it. To clarify the visual scene when the brightness of the adaptation light changes suddenly, we measured the contrast sensitivity functions, chromatic thresholds of white color and the effective visual field under that condition. In the results, we found the decrease of contrast sensitivity at high spatial frequency range, deterioration of the color sensation and shrinkage of the effective visual field. Our results show that the profile of an object looks blurry to the eye after the adaptation stimulus suddenly changes. Data from experiments conducted in this study will be used as basic data for determining the position, luminance and color of the types of instruments that can effectively support pilots or drivers in maintaining their visual functions when the brightness of the adaptation light changes suddenly.

## 1. はじめに

視覚系における順応の機能は、我々の生活に大きく貢献している。生活環境の明るさは、真夏の太陽の下から星空の下まで、照度によると  $10^5\text{lx}$  ~  $10^{-3}\text{lx}$  まで  $10^8$  ほどのレンジで変化している。このどの環境下においても物体を正しく認識することができるのは、瞳孔の調節に加え、網膜から大脳中枢に至る神経伝達系そのものの感度を变化させて、それぞれの環境の明るさに順応することができるからである。

しかし、明るい戸外から映画館などの暗い所へ突然入った時のように環境の明るさ（順応条件）が急変すると、順応が追いつかず視覚機能が一時的に大幅に低下する。しばらくすると周囲の明るさに順応し、ほとんどの視覚機能は回復する。同様の現象が、走行する自動車がトンネルに入るときや、太陽直下を飛行している航空機が突然雲中に入るときにも起こる。運転士や操縦士にとって、一時的であっても視覚情報が欠落することは、危険な状態を招くおそれがある。実際に、操縦士が視界を失ったために事故につながったと考えられるケースも過去に報告されており<sup>1)</sup>、対応策を検討することが重要である。

過去の研究では、明るい環境から暗い環境へ移行したときに知覚できる刺激光の閾値が経時的に測定され、この結果は暗順応曲線として知られている<sup>2,3)</sup>。最初の環境の明るさにも依存するが、およそ1~3分程度で閾値が急激に低下し、やがて徐々に低下していく。そして20~30分で閾値は最低となり、弱い光でも知覚できるようになる。また、明るい環境、暗い環境におけるそれぞれの視覚機能に関する研究は古くから多く行われている。

しかし、順応光の明るさが急変した時の視覚機能の経時的な変化については、光の検出閾値の測定にとどまっており、具体的な視界の変化の様子を推測することはできない。前述の航空機事故に対応できる具体的な策を検討するためには、様々な視覚機能の変化について明らかにしておく必要がある。

そこで本研究では、順応光の明るさが急変した時のコントラスト感度、色の識別閾、有効視野範

囲の3つの視覚特性を求め、順応していく視界の変化を把握することを目的とした。

## 2. コントラスト感度の測定

視覚の分解処理能力を調べるため、ある空間周波数の縞を検出することができるコントラストを調べ、コントラスト感度関数を求めた。

### 2.1 実験装置

実験装置の概略を図2-1に示す。暗幕で覆われたブース内に半径70cmの半球状のドームが固定されている。ドーム底面には観察用の開口があり被験者が中をのぞけるようになっている。ドーム内は艶消し白で塗られ、底面側からの照明（ネオアークビーム MR150/N, 4500K, 東芝ライテック、7個）により、昼光下と等しい50,000lxのほぼ均一な視野を被験者に呈示することができる。照明の前面にはエア駆動式のシャッターが取り付けられており、PC(Macintosh G4)の入力を受けて開閉し、順応光の明るさを急変させる。また、ドーム頂点にはシャッター付きの開口（直径10cm）があり、測定中のみ背面に置かれたCRT上の刺激が見えるようになっている。

刺激には正弦波をガウス関数で変調したガボール関数状の輝度分布をもつ刺激（Gaborパッチ、図2-2）を用いた。Gaborパッチのサイズは直径を視角5°とし、垂直方向に正弦波変調されている。無意識の眼球運動は水平方向が多いため、この動きに対する網膜像の変化が小さくなるように配慮した。この刺激をPCで作成し、均一視野半球の背面に設置されたCRT(SONY GDM)

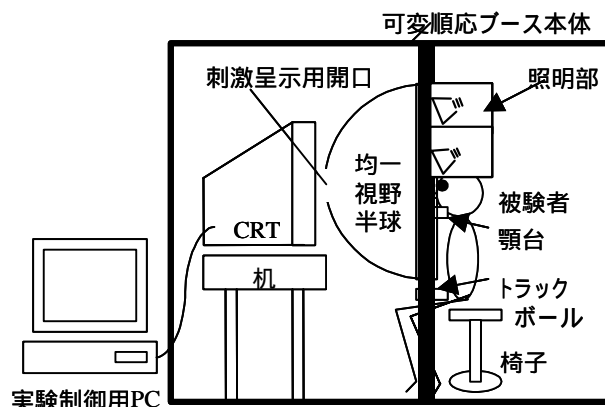


図2-1 実験装置概略図

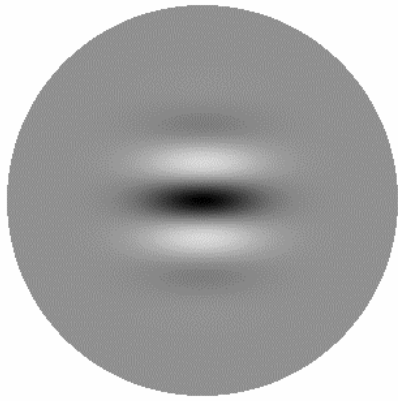


図2 - 2 刺激 (Gaborパッチ)

に呈示した。

被験者は顎台によって頭を固定され、手もとのトラックボールで刺激のコントラストを調節することができる。

## 2.2 実験手順

被験者は顎台に顎を固定してドームを覗き込み、50,000lxに照明された均一な視野に5分間順応した。順応後、照明前面のシャッターが閉じドーム内を暗黒に急変させ、同時にドーム頂点の刺激開口用シャッターが開き、CRTの画面が呈示される。CRTは始め均一な白色(CIE1931<sub>xy</sub>色度図、 $x=0.313$ 、 $y=0.329$ (標準照明光 D<sub>65</sub>))である。その後、被験者はトラックボールを動かすことによりGaborパッチのコントラストを変化させ、Gaborパッチの明暗の縞が分離して知覚できるように調節した。調節後、刺激開口のシャッターが閉じ、ドーム内は再び暗黒となる。予め設定された時間の経過後、PCから測定開始のピープ音が鳴り、次の刺激が呈示され上記の測定が繰り返された。

刺激の平均輝度(刺激の背景と同じ)は10cd/m<sup>2</sup>、30cd/m<sup>2</sup>の2条件とし、暗順応開始後0、0.5、1、2、3、5、8、10、12、15、20minにおいて、それぞれ空間周波数0.5、1、2、3、4、5、6、7、10、15 cycle per degree (cpd)のコントラスト感度を測定した。1セッションは、5分間の明順応後、上記のタイミングで測定を繰り返しながら約20分間暗順応が続いて終了する。1セッション内における刺激の平均輝度は一定であるが、各タイミング毎に呈示されるGaborパッチの空間周波数はラ

ンダムに変化した。各条件につき測定を5回繰り返し、その平均をコントラスト検出閾値とした。さらに、コントラスト検出閾値の逆数をコントラスト感度として結果を整理した。また、背景として使用したD<sub>65</sub>白色で各平均輝度のモニタに5分間順応し、同様の手順でコントラスト感度を測定し、これを明所視条件とした。

被験者が1回の調整にかかる時間は均4秒であった。

## 2.3. コントラスト感度

視覚の空間処理特性を表現するとき、コントラスト感度を用いることが多い。コントラスト感度とは、正弦波を刺激として、ある周波数の正弦波刺激の検出に必要なコントラストの閾値を測定し、その逆数をとったものである。視力が、細かい視覚刺激の解像限界のみを示すのに対し、コントラスト感度関数は広い周波数領域にわたる感度を示す。視覚系はフーリエ解析的な処理をしていると推測されるため、コントラスト感度関数は視覚系に入力される画像の処理能力を示す1つの目安と考えられている。

閾値を測定する際のコントラストとして正弦波の振幅の平均輝度に対する比率(マイケルソンコントラスト)が用いられる。ここでの振幅は輝度を示す。

$$\text{コントラスト} = (L_{\max} - L_{\min}) / (L_{\max} + L_{\min})$$

コントラスト閾値は、刺激の振幅を変化させることにより、被験者が知覚できる最小のコントラストとして求められる。コントラスト感度は閾値の逆数であるため

$$\text{コントラスト感度} = 1 / \text{コントラスト閾値}$$

となる。

## 2.4. 結果

実験結果を図2-3、4に示す。図2-3は、明所視、順応光の明るさ急変直後、急変後20分におけるコントラスト感度関数を示したものである。左のパネルは背景となる平均輝度が30cd/m<sup>2</sup>、右は10cd/m<sup>2</sup>である。横軸は空間周波数、縦軸はコントラスト感度の対数表示となっている。シンボルの違いは順応条件の違いで、 $\times$ は明所視、 $\square$ は順応光の明るさ急変直後、 $\circ$ は20

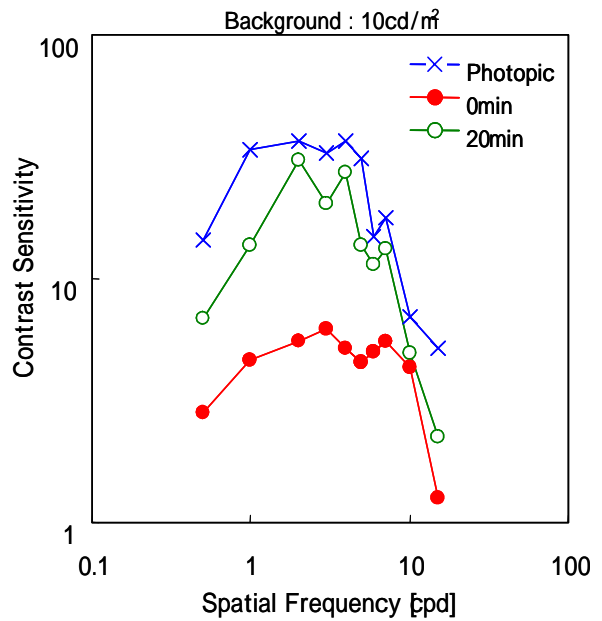
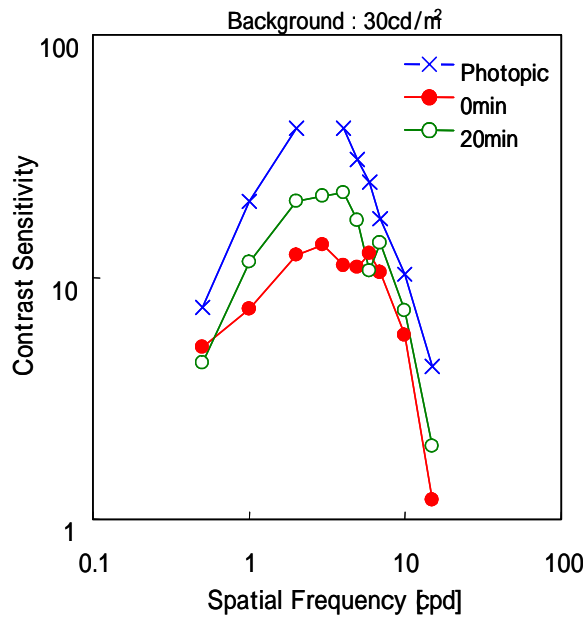


図2 - 3 実験結果

分の暗順応後の条件を示している。ただし、背景  $30\text{cd/m}^2$  の明所視条件の結果で、空間周波数  $2\sim 4\text{cpd}$  の条件は現在の実験装置の測定限界を超えており、正確に閾値測定ができなかった。このグラフより、順応光の明るさが急変するとコントラスト感度が急激に低下し、特に空間周波数が  $2\sim 5\text{cpd}$  では、背景輝度  $30\text{cd/m}^2$  で  $0.5\text{log}$  以上、背景輝度  $10\text{cd/m}^2$  で  $0.8\text{log}$  以上感度が低下することが分かった。20分の暗順応後のコントラスト感度は、順応光の明るさ急変直後より感度が回復して高くなるが、明所視条件下の感度までには回復

していない。また、刺激の背景輝度が低いとコントラスト感度がローパスフィルタ型となることが知られているが、ここでもその傾向がみられ、特に急変直後のコントラスト感度は、ローパスフィルタ型の特性が顕著に現れた。背景輝度が  $30\text{cd/m}^2$  から  $10\text{cd/m}^2$  へ  $0.48\text{log}$  低下すると、順応光の急変直後のコントラスト感度も  $0.20\sim 0.43\text{log}$  の感度低下がみられた。

図2 - 4は、順応開始からのコントラスト感度の変化を示したものである。横軸は(順応光の急変直後からの)暗順応経過時間を表し、シンボル

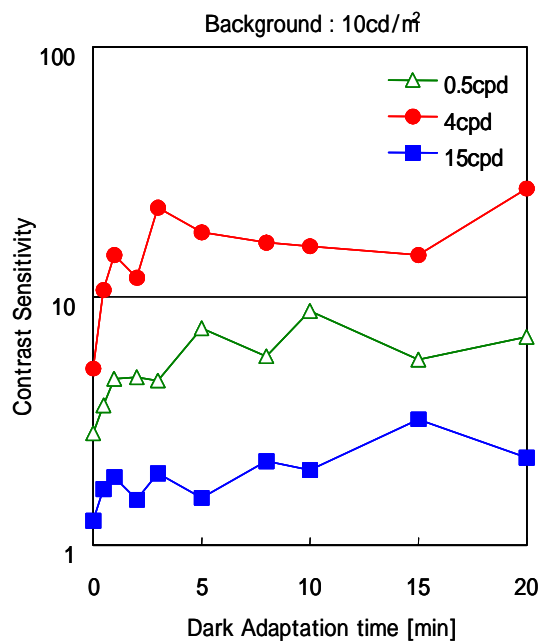
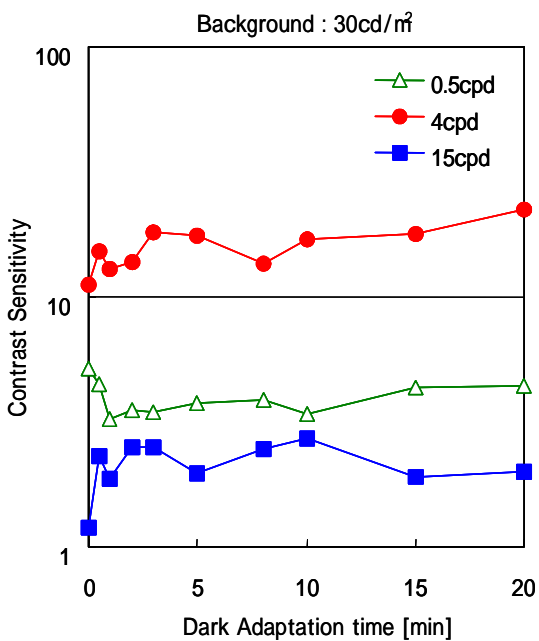


図2 - 4 順応時間に対するコントラスト感度

の違いは空間周波数の違いを示している。この図から、順応光の急変直後はコントラスト感が低下するが、1分程度間に急激な感度上昇がみられ、ほぼ暗順応状態と同様になることが分かる。背景輝度  $30\text{cd/m}^2$  の場合には、 $0.5\text{cpd}$  の低空間周波数では、順応光の明るさが急変した直後の感度低下が起きなかったが、1分程度するとほぼ暗順応状態の感度に達している。

## 2.5. 考察

昼光下の明るさから突然暗黒へと順応光の明るさが急変するとき、コントラスト感が急激に低下することが示された。特に明所視で最も感度が良いとされる空間周波数  $2\sim 5\text{cpd}$  での感度低下が大きく、背景輝度  $30\text{cd/m}^2$  では  $0.5\log$  以上、背景輝度が  $10\text{cd/m}^2$  では  $0.8\log$  以上も低下した。この空間周波数領域は、日常最も感度を高くして対象物の形状認識に対応していると考えられる領域である。よってこの結果は、順応光の明るさが急変すると輪郭抽出の機能が低下し、対象物の輪郭がぼやけ、形状認識が困難になることを示している。一方、低空間周波数領域の感度低下は比較的小さく押さえられているため、全体がぼやけた見え方となるが、大まかな形状認識を確保していることが推測される。このように、空間周波数領域ごとに感度の低下度合いが異なることは、コントラストを検出する視覚系の経路が空間周波数帯域毎に対応した複数の検出経路があるとする仮定<sup>4-7)</sup>を支持する結果と考えられる。視覚系は、順応光の明るさに応じて感度を検出経路毎に調節し、最低減必要な情報を獲得していることを示唆している。

刺激の背景輝度（平均輝度）の差によるコントラスト感度の低下にも違いがみられ、背景輝度が暗い場合の方がコントラスト感度の低下も大きいことが示された。これは、環境の明るさが明から暗へ急変した場合でも、視対象を明るくしておけば、よりはっきりと形状認識ができることを示している。しかし、20分の暗順応後のコントラスト感度は、背景輝度による差は小さく、むしろ背景輝度が低い方が若干ではあるが感度が高い傾向が示された。このことは、十分に暗順応した場合に明るい刺激を呈示しても形状認識に対す

る効果は大きくはなく、暗い刺激でも同様の認識ができることを示している。

## 3. 色の識別閾

順応光の明るさが急変したときの色の識別能力として、白色に対する識別能力を測定した。

### 3.1. 実験方法

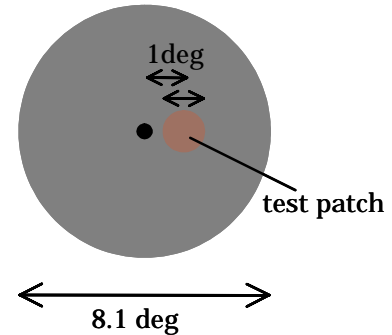


図3-1 実験刺激

実験装置は2.1で述べた装置を用いた。

図3-1に実験刺激を示す。中央に固視点が呈示され、そこから左右どちらかに $1^\circ$ 離れて直径 $1^\circ$ のテストパッチを呈示した。テストパッチは背景と色度が異なり、色度は試行毎に変化した。まず被験者は顎台に顎を固定してドームを覗き込み、 $50,000\text{lx}$ に照明された均一な視野に5分間順応する。順応後、ドーム内が暗黒に急変し、2秒間の暗順応に続きドーム頂点の開口から刺激が呈示される。刺激は始め背景の中央に固視点のみが呈示され、被験者は固視点を凝視するよう指示される。固視点のみが $200\text{msec}$ 呈示された後、固視点の左右どちらかにテスト刺激が $250\text{msec}$ 呈示される。続いて、固視点とテスト刺激が消え、背景のみの状態が $200\text{msec}$ 呈示され、その後刺激用シャッターが閉じて暗順応が再開する。被験者はテストパッチが固視点の左右どちらに呈示されたかをキーボードで応答する。この方法は2者択一強制選択法とよばれ、被験者は左右のどちらかを応答するだけで、その正誤から閾値を推定することができる。被験者の応答が間違えであれば、次の測定ではテスト刺激に呈示する色度差を上昇させ、被験者の応答が正解であれば減少させる。閾値付近では、正解と不正解が交

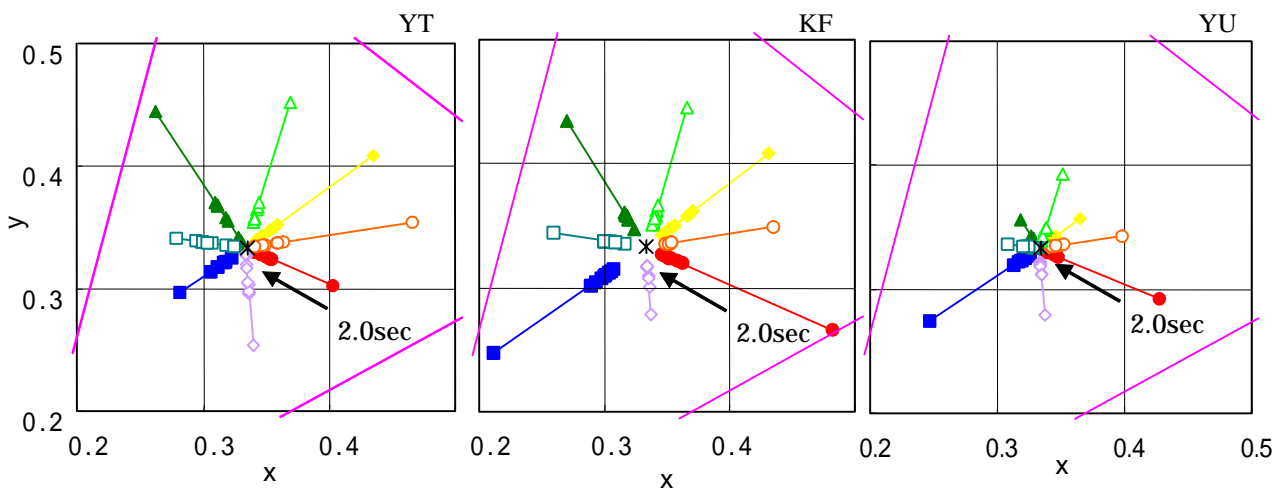


図3 - 2 順応条件が急変する時の色の識別閾

互になると考えられるため、応答が交互になるまで繰返し測定するものである。

本研究では、調整法で予備測定し、閾値の検討をつけ、繰返しが4回あったところで平均を計算しこれを閾値とした。よって、1つの色の識別閾を求めるために6～8回の試行を実行した。

### 3.2. 実験条件

背景の色度は等エネルギー白色(CIE1931<sub>xy</sub>色度図、 $x=0.333$ ,  $y=0.333$ )、輝度は $10\text{cd/m}^2$ で、テストパッチも共に常に等輝度とした。

識別閾の測定は、背景とした白色からユニーク赤(497nm)、ユニーク緑(500nm)、ユニーク青(472nm)、ユニーク黄(577)<sup>2)</sup>とその間の黄緑、青緑、紫、橙の8方向、これに白(輝度)を加えた9方向に対して行った。白については、試

行ごとにその輝度を変化させる輝度検出閾値を測定したことになる。

識別閾は暗順応開始後2 sec, 15 sec, 30 sec, 1 min, 1.5 min, 2 min, 3 min, 4min, 5 min, 10 minのタイミングで測定した。

被験者は、色覚正常な3名(21～30)で、YTは著者、他の2名は視覚実験の経験がまったく無い者であった。

### 3.3. 結果

図3 - 2は、順応光の明るさ急変後の白色(背景)との識別閾値をCIE1931<sub>xy</sub>色度図上に示したものである。パネルの違いは被験者の違いを表している。図中最も外側の点が順応光の明るさ急変2秒後の識別閾を示し、暗順応が進むにしたがって、図中中央の白色点(\*)に近づき、閾値が下がっていった。測定開始後15秒まで

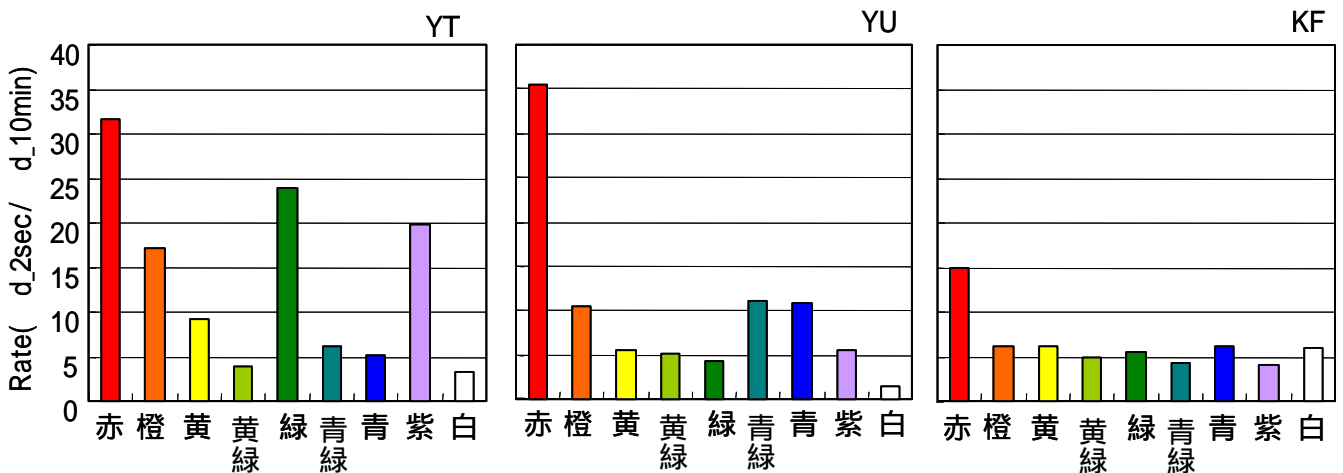


図3 - 3 順応条件急変後の閾値の比較



急激に閾値が減少していることが分かる。

順応光の明るさ急変後には、図3-2の一番外側の点を結ぶ領域内の色度をもつ色を白色背景の中に呈示しても識別できないことを示している。被験者 YT、KF においては CRT で再現できる色範囲の半分以上の色度点の色を、被験者 YU でも 3 分の 1 程度の色度点の色を背景白色と識別できていないことが分かった。

図3-3は、色方向における識別閾の違いを比較するため、順応光の明るさ急変2秒後に背景と識別できる色度差（識別閾）を10分間の暗順応後に測定した識別閾で割ったものである。色度差の計算は錐体応答色空間<sup>8)</sup>における色度点間の距離を用いて計算した。パネルの違いは被験者の違いである。どの被験者も暗順応時と比べると順応光の明るさ急変2秒後には赤方向への閾値の上昇が最も大きくなっている。次いでオレンジ方向も閾値の上昇が大きく、赤成分が多く含まれる色の識別閾値が増加する傾向がみられた。被験者 YT では緑方向へも大きな閾値の上昇がみられたが、他の KF, YU ではむしろ青方向への閾値の増加傾向が強かった。また、順応光の明るさ急変後に最も閾値の変化が小さかったものは3名の被験者とも白（輝度差）であった。

暗順応開始後の識別閾値の推移については、コントラスト感度の回復と同様の傾向がみられた。識別閾値は0.5秒後（暗順応開始後2.5秒）でほぼ飽和し、赤など閾値の上昇が大きかったものでも5分の暗順応で完全に暗順応後の識別能力に達した。

### 3.4. 考察

順応光の明るさ急変直後の測定を試みたが、CRT 上に再現できる最も彩度の高い色を呈示しても、背景と識別することはできなかった。2秒経ってからの測定でも、刺激の背景はほぼ黒く知覚され、ドーム内面と区別しにくかった。その中に色のついたテストパッチが浮かんで見える印象であった。ここでは、順応光の明るさ急変直後の測定が実施できなかった原因が、用いた実験装置の限界なのか、視覚系が全く処理を行わないようになってきているのか区別することができないため、順応光の明るさ急変直後の識別閾の推定を行っていない。

順応光の明るさ急変2秒後でも色覚の低下は著しく、CRT 上に再現できる色度範囲の半分程度しか白色と識別して色を知覚することができないことが分かった。自然界に存在する色は、ガラスフィルタも含め様々な波長で構成されているため、CRT の色再現領域を越えた彩度の高い色（色度図の外側の色）はそう多くはない。よって、昼光下（ほぼ白色）に順応した操縦席のパイロットが視界を誤認する確率は高いと考えられる。順応光の明るさ急変時にも識別できるよう、計器類、昼間障害標識等の色は、なるべく彩度の高い色を用いる必要があることが示された。

図3-3より、全ての被験者において赤方向への識別閾値が増加する傾向がみられた。被験者 YT, YU では暗順応時の値の30倍以上にもなっている。これは、順応光に4500Kの光を用いたことが影響している可能性も考えられる。順応していた環境が測定値上わずかに赤方向に

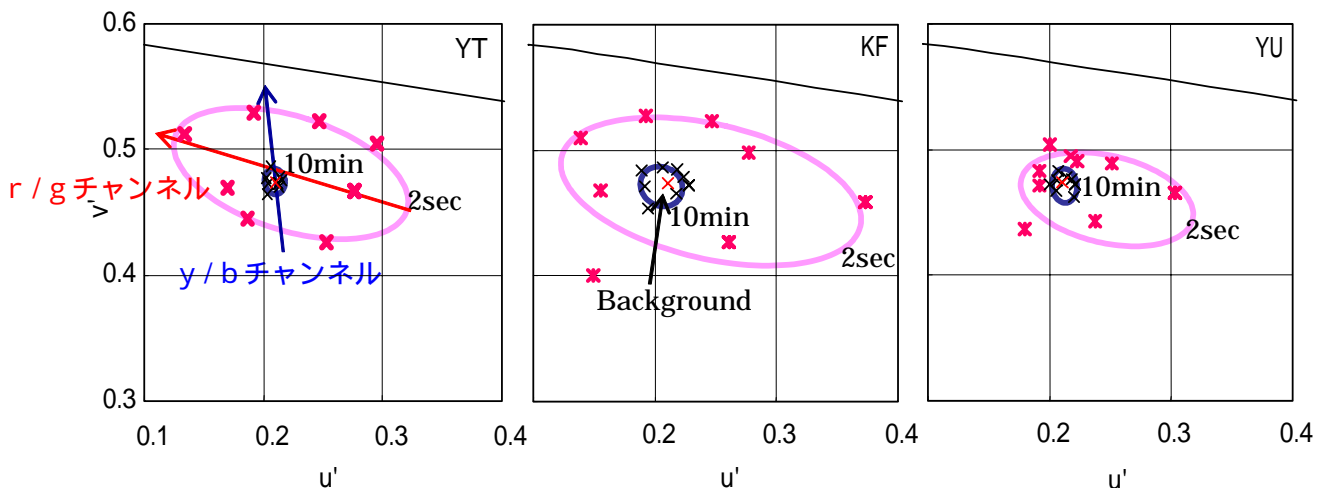


図3-4 順応条件急変時における色の識別閾値 ( $u'v'$ 色度図)

ずれた色光であったために、順応光の明るさ急変直後には赤方向への識別閾値が上昇したとも考えられる。しかし、被験者 YT は同時に緑方向への弁別閾値も大きく増加しており、視覚系の反対色過程である赤 / 緑処理過程への選択的な出力抑制効果があることも示唆された。

これらの影響をみるため、実験結果を色差に依存した色度図、 $u'v'$ 色度図<sup>9)</sup>に変換した(図3 - 4)。この色度図は均等色空間と呼ばれ、軸のスケールは我々の色差感覚に基づき、感覚量の色差がほぼ等間隔に並ぶようになっている。色の配置は  $xy$  色度図とほぼ等しく、右へ行くほど赤が強くなり、左は緑、上は黄で下が青方向となる。この図より、順応光の明るさ急変2秒後と10分間の暗順応後では、識別閾値の偏りが異なっていることが分かる。順応光の明るさ急変2秒後のデータを結ぶと、3名の被験者とも  $u'$ 軸方向の楕円となるのに対し、10分間の暗順応後にはその形状が  $v'$ 軸方向に伸びている。10分の暗順応後の結果は、MacAdam<sup>9) 10)</sup>らの結果とも類似している。一般に、色の視覚処理は赤から緑への変化に対して応答する経路( $r/g$ チャンネル)と黄から青への変化に対して応答する経路( $y/b$ チャンネル)とに分かれて処理しているといわれている。そこで、図3 - 4の被験者 YT の結果に、これら2つの経路の応答の軌跡を重ねて呈示した。これより、順応光の明るさ急変後の被験者 YT の結果の傾きは、 $r/g$ チャンネルの応答の方向に向かっていることが分かった。この傾向は他の2名の被験者についても同様である。つまり、順応光の明るさ急変後には  $r/g$ チャンネルの出力の低下度が  $y/b$ チャンネルに比べて大きく、2つのチャンネルの応答のバランスが崩れていることが示された。

また、色と輝度(白色の結果)では、圧倒的に輝度の識別閾の変化の方が小さかった。これは、順応光の明るさが急変するような緊急時において、色情報より輝度情報を優先させ、視認に有利なようにはたらこうとする視覚系の戦略とも考えられる。

#### 4 . 有効視野範囲の測定

人間の網膜は機能的にも解剖学的にも一様ではない。網膜の中心における分解能が最も高く、対象物をより鮮明に見ることができる。一方、網膜周辺では、弱い光に対する感度が高くなっている。しかし、視野のどの範囲までが有効であるか(有効視野範囲)は、網膜の生理的な機能に加え、作業の負荷にも依存しており、簡単に予測することはできない。そこで、運転席や操縦席における最適な情報の呈示位置を検討するため、この有効視野範囲を測定した。

##### 4 . 1 . 実験装置

実験装置は図2 - 1に示したものに改良を加え、均一視野半球の内面の任意の位置に赤色光点を呈示することができるよう、図4 - 1に示す有効視野範囲測定装置を均一視野半球内に設置した。中心から上下左右4方向にのびたLED取付腕上に直径5mmの赤色LEDが隙間なく設置されている。このLED取付腕は均一視野半球の中心軸上に設置される回転中心軸によって保持されている。回転中心軸は角度制御モーターと接続され、PCからの制御信号を受けて任意に回転させることができる。LEDは調光可能であり、点滅制御も基本的にPCを用いて行う。刺激となる赤色LED素子のピーク波長は630nmとした。

被験者の応答は、すべてPCに接続されたマウスで回収した。

##### 4 . 2 . 実験方法

刺激は、有効視野範囲測定装置によって呈示されるLED素子からの光である。

まず被験者は顎台にあごを固定してドームを覗き込み、50,000lxに照明された均一視野半球内に5分間順応した。このとき、被験者にはLED(非



図4 - 1 有効視野範囲測定装置 LED取付腕



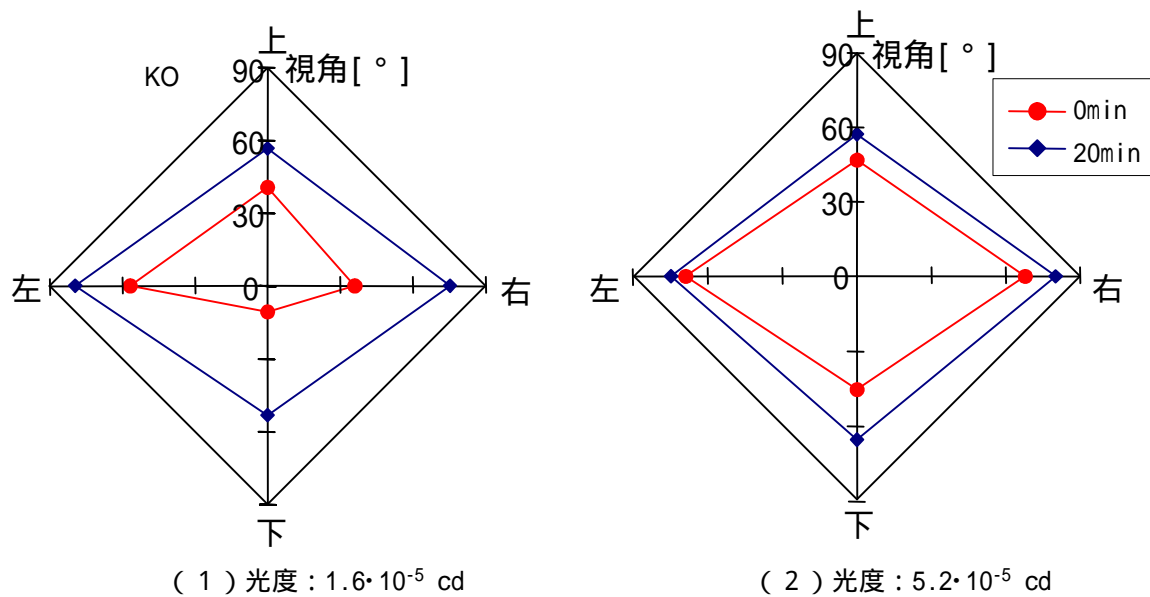


図4 - 2 順応条件が急変したときの有効視野範囲

点灯)等が見えているため、視野内は均一とはいえない。順応後、照明前面のシャッターが閉じドーム内を暗黒に急変させた。同時に上下左右4本のLED取付腕のうちの1本の腕の外側のLED素子から順に中心に向かって点灯消灯をくり返した。すなわち、1個の赤色刺激光が周辺部から中心に向かって移動するように見える。被験者は、ドーム中心に呈示された固視点を固視したまま、視野内にLED素子の点灯が確認できたら、マウスをクリックしてもらった。応答を受けるとLED素子は消灯し、再び暗順応が継続された。予め設定された時間の経過後、PCから測定開始のピープ音が鳴ってから1秒後に、再び上記の測定が繰り返された。この1秒は、被験者が固視点の注視をはじめめるために必要かつ十分な時間である。

1個のLEDの点灯時間は0.2secである。LEDの光度は $1.6 \times 10^{-5}$ cd、 $5.2 \times 10^{-5}$ cdの2種類とした。輝度計の測定視野がLED光点内におさまるようにして輝度を測定すると、これらの刺激はそれぞれ $3.0\text{cd}/\text{m}^2$ 、 $10\text{cd}/\text{m}^2$ であった。この刺激強度は暗順応中、中心窩で十分検出可能な明るさである。また、上下左右の測定方向の順番はランダムとし、被験者は試行ごとにどの方向のLED素子が点灯するか知らされていなかった。

被験者は、視力1.0以上の色覚正常な3名(女、28~31歳)であった。その内1名は著者、他の2

名は心理物理学実験未経験者で、実験目的等十分に説明してから実験を行った。

#### 4.3 結果

図4 - 2、3は心理物理学実験の経験のない被験者K0の実験結果である。他の2名も同様の傾向がみられたため、ここでは被験者K0の結果のみを示す。図4 - 2には、順応光の明るさが急変した時の有効視野範囲で、急変直後とその後20分経過した時の結果を併せて示してある。(1)は刺激光点の光度が $1.6 \times 10^{-5}$ cd、(2)は $5.2 \times 10^{-5}$ cdの時の結果である。図の縦軸、横軸は視野の上下左右を表し、軸の交点は中心 $0^\circ$ (固視点)に対応している。各シンボルは、が順応光の明るさ急変直後、が暗順応開始後20分の結果を示している。これより光度が $1.6 \times 10^{-5}$ cdの刺激に対する有効視野範囲は極端に減少していることが分かる。また、視野の減少の割合は各方向に対して一定ではなく、左右方向より上下方向の減少の方が著しい傾向がみられた。特に視野の下側での減少が激しかった。一方、 $5.2 \times 10^{-5}$ cdの刺激に対しては、順応光の明るさ急変時には上下方向の有効視野範囲の減少はみられるものの、左右方向にはほとんど減少がみられなかった。視野の下側での急激な減少も、光度が $1.6 \times 10^{-5}$ cdの結果に比べて大きくはなかった。これらの結果の傾

向は、ここで示した K0 以外の 2 名の被験者も同様であった。

図 4 - 3 は、被験者 K0 における順応光の明るさ急変後の有効視野範囲の時間的推移を表している。(1)、(2)の違いは図 4 - 2 と同様である。横軸は時間を表しており、順応光の明るさが急変したときを 0 としている。シンボルの違いは視野の方向の違いを表している。LED 素子の光度が  $1.6 \times 10^{-5} \text{cd}$  の場合には、左右方向へは順応光の明るさ急変後ほぼ 1 分で有効視野範囲は安定に達している。一方、急激な減少がみられた視野の下側の結果は、はじめ急激に回復していくが 3 分後には回復の速度が緩まり、徐々に有効視野範囲が広がっていく傾向がみられた。しかし、視野の上側での結果は、一定の割合で徐々に有効視野範囲が拡大していくようであった。

もともと視野の減少が少なかった LED 素子の光度が  $5.2 \times 10^{-5} \text{cd}$  の場合には、視野の左右方向に関して、順応光の明るさ急変直後から 1 分程度で回復し、この傾向は光度が  $1.6 \times 10^{-5} \text{cd}$  の結果と一致している。有効視野範囲の著しい減少が起きなければ、刺激光強度の違いによる回復過程の差はほとんどないことを示している。

#### 4.4 考察

順応光の明るさ急変直後の有効視野範囲の面積は、20 分の暗順応後に比べ、刺激光強度  $1.6 \times$

$10^{-5} \text{cd}$  のとき 28%、 $5.2 \times 10^{-5} \text{cd}$  では 66% まで減少した。他の 2 名の被験者も、それぞれの刺激光強度に対し、16、56%、63、69% に減少した。これより安全を考慮すると、対象の光度が  $1.6 \times 10^{-5} \text{cd}$  (ここでは、輝度  $3.0 \text{cd/m}^2$ ) の場合には、視野の中央で全視野の約 25% の領域を有効視野範囲とすることができる。また、対象物が  $5.2 \times 10^{-5} \text{cd}$  (ここでは、輝度  $10 \text{cd/m}^2$ ) であれば、全視野の約 65% の領域が順応光の明るさ急変時の有効視野範囲であることが分かった。

過去の心理物理学の実験結果では、上下方向と左右方向で光刺激の検出閾値が異なるデータが示されているが<sup>11)</sup>、本実験結果ほどの異なる傾向は見受けられない。生理学的な研究結果では、上下左右方向で網膜の構造が異なるというデータは見あたらない。しかし、視覚系全体で考えると、上下方向より左右方向の情報を優先的に処理する機能がある、ということは人間の眼の進化の過程からも推測できる。人間の生活環境は基本的に視野の左右(水平)方向へ広がっており、外敵から身を守るためにも水平方向へしか逃げることが出来ない。このため、左右方向の情報がより重要であったと考えられる。人間の眼の外観形状も上下に比べ左右方向へ大きく開き、眼球の動き方を見ても左右方向の情報をより取り込もうとする構造となっている。順応光の明るさが急変するとき上下方向より左右方向の情報を優先的に処理する機能が脳中枢に近い高次レベルに存在

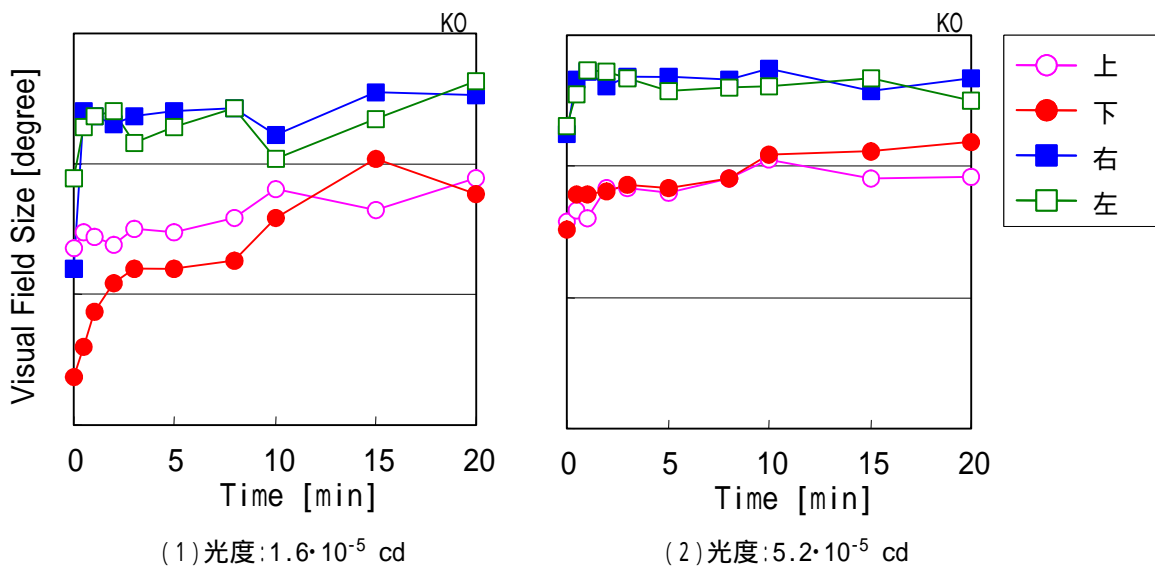


図 4 - 3 順応条件急変後の有効視野範囲の推移

することが予測できる結果といえる。

本実験における明順応時の有効視野範囲について、明順応は 50,000lx という極めて明るい照明下で行われたため、被験者は明るすぎて目を大きく見開くことはできなかった。被験者の報告により明順応時の視野を求めると、視野の下方方向と左右方向では、20 分の暗順応後の結果よりもわずかに外側まで見えていたが、上側では暗順応時よりもむしろ狭い範囲しか見えていなかった。視野の上側において、明順応時にまぶたで隠れていたために、網膜上の細胞が十分に明順応されないまま測定が行われたと考えられる。もし、明順応時にも目を大きく開けることができるなら、結果はまた異なったものとなるに違いない。ただ、このことから、視野の上側への情報呈示は、視環境が太陽直下ほどの明るい場合には適さないことが考察できる。

## 5. まとめ

本研究結果から順応光の明るさが急変すると、輪郭抽出や形状認識能力、色の識別能力が低下し、視野範囲も狭まること明らかとなった。これまでの順応に関する研究は、環境の明るさに応じて錐体から桿体へと担当する視細胞が変わることで説明されてきた。しかし、本研究の結果は、担当する視細胞の変化だけでは説明できない複雑な特性を示すことも明らかとなった。

順応光の明るさが急変した時には、高空間周波数帯域における感度低下、色の識別能力の低下、有効視野範囲の不均一な減少がおり、視野の下側の情報はなく、色の識別も困難で、輪郭抽出の機能が低下し、精細な形状認識が困難になるが、大まかな形状認識をする機能は確保されていることが推測された。このことは、外界から必要な情報だけを効率よく取り入れようとする視覚系の戦略とも考えられる。情報の優先度によって取舍選択を行うメカニズムについては、更に検討する必要がある。

## 参考文献

- 1) 視覚ガイダンスシステム, 運輸省航空局監修, 財団法人航空振興財団発行, 172-174, 1999
- 2) 池田光男: 視覚の心理物理学, 森北出版, 1975

- 3) K. Nordby, B. Stabell and U. Stabell: Dark-adaptation of the human rod system, *Vision Research*, **24**, 841-849, 1984
- 4) F. L. van Nes and M. A. Bouman: Spatial modulation transfer in human eye, *J. of the Optical Society of America*, **57**, 401-406, 1967
- 5) J. G. Robson and N. Graham: Probability summation and regional variation in contrast sensitivity across the visual field, *Vision Research*, **21**, 409-418, 1981
- 6) D. J. Swift and R.A. Smith: An action spectrum for spatial-frequency adaptation, *Vision Research*, **22**, 235-246, 1982
- 7) M. A. Georgeson and M. G. Harris: Spatial selectivity of contrast adaptation: models and data, *Vision Research*, **24**, 729-741, 1984
- 8) D. I. A. MacLeod and R. M. Boynton: A chromaticity diagram showing cone excitation by stimuli of equal luminance, *J. Opt. Socie. America*, **69**, 1183-1186, 1979
- 9) 池田光男: 色彩工学の基礎, 朝倉書店, 1993
- 10) D. L. MacAdam: Visual sensitivities to color differences in daylight, *J. of the Optical Society of America*, **32**, 247-274, 1967
- 11) W. S. Stiles and B. H. Crawford: The effect of glaring light source on extrafoveal vision, *Proc. Roy. Soc.*, **122B**, 255-280, 1937