

順応条件が急変する時の視覚の空間特性

交通システム部 塚田 由紀 豊福 芳典 青木 義郎

1. はじめに

明るい戸外からトンネルや映画館などの暗い所へ入っていくと、真っ暗でしばらくは何も見えない。同様の現象で、太陽直下を飛行している航空機が突然雲中に入るとき、操縦士が視界を失う場合がある。このとき、計器類を誤認し事故につながったと考えられるケースが過去に報告されている¹⁾。視環境(順応条件)の急激な変化による一時的な視覚機能の低下は、事故の原因となる可能性もあるため、その対応策を検討する必要がある。

我々の視覚系には順応という機能が備わっており、瞳孔の大きさや網膜から大脳中枢に至る視覚系そのものの感度を変化させて、視環境(順応条件)の変化に対応している。視環境の明るさは、真夏の太陽の下から星空の下まで、照度によると $10^5\text{lx} \sim 10^{-3}\text{lx}$ まで 10^8 ほどのレンジで変化しているため、順応の機能なくして対象物を知覚することはできない。しかし、トンネルや映画館に入った時のように環境の明るさが急変したときには、順応が追いつかず視覚機能が一時的に大幅に低下する現象がみられる。しばらくすると周りの視環境(順応条件)に順応し、ほとんどの視覚機能は回復する。

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、暗順応曲線として知られている^{2,3)}。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^{4,5)}。物体の形状認識に関係するコントラスト感度関数も、明所視と暗所視ではその形状が異なり、明るいところではより細かいものを見る機能が高いことが報告されている。

しかし、順応条件が急変する時の視覚機能の経時的な変化については、刺激光に対する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、順応条件の急変時における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、視覚系の空間特性としてコントラスト感度を取り上げ、順応条件が急変する時のコントラスト感度関数を経時的に測定した。その結果から、順応条件急変時には視界がどのような空間特性をもっているのかについて考察する。

2. 実験

2.1. 実験装置

実験装置の概略を図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

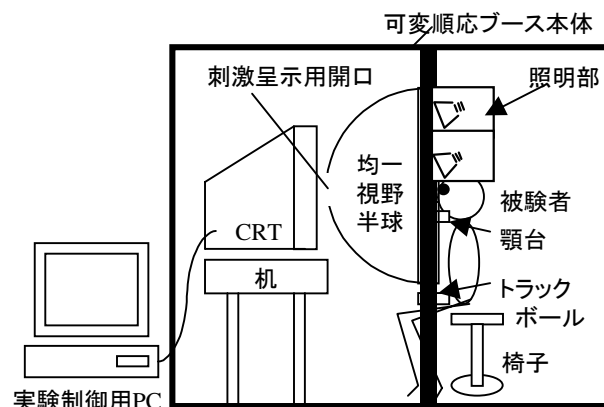


図1 実験装置概略図

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、順応条件を急変させる。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モニタ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）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 (Macintosh G4) で作成し、均一視野半球の背面に設置された CRT (SONY GDM) 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

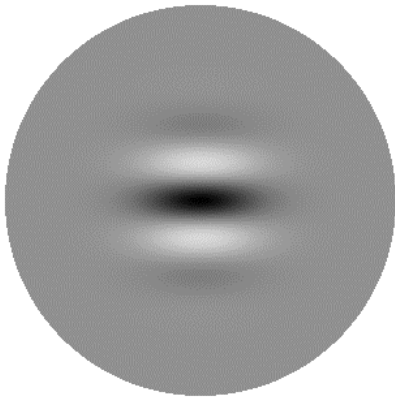


図2 刺激

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 D₆₅（標準照明光）相当の白色で、輝度は 30cd/m² とした。被験者はトラックボールを操作し、Gabor パッチの縞模様がやっと認識できるコントラストに調節した。ここでの判断基準は、Gabor パッチの明暗の縞が分離できること、とした。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った。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り、次の刺激が呈示され上記の測定が繰り返された。

実験条件は、0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 15 cycle per degree (cpd)、暗順応開始後の測定時間は 0, 0.5, 1, 2, 3, 5, 8, 10, 12, 15, 20min とした。刺激の平均輝度はどの実験条件においても 30cd/m² で一定に設定した。1 つの条件につき測定を 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 D₆₅ 白色、30cd/m² 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。

1 つの測定にかかる時間は平均すると 4 秒程度であった。

2.3. コントラスト感度

視覚の空間処理特性を表現するために、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。

$$\text{Contrast} = (L_{\max} - L_{\min}) / (L_{\max} + L_{\min})$$

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

コントラスト感度 = 1 / コントラスト閾値
となる。

3. 結果

実験結果を図 3 ~ 5 に示す。図 3 は、明所視、順応条件急変直後、順応条件急変後 20 分の 3 つの条件におけるコントラスト感度関数を示したものである。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、× が明所視、○ が順応条件急変直後、△ は 20 分間暗

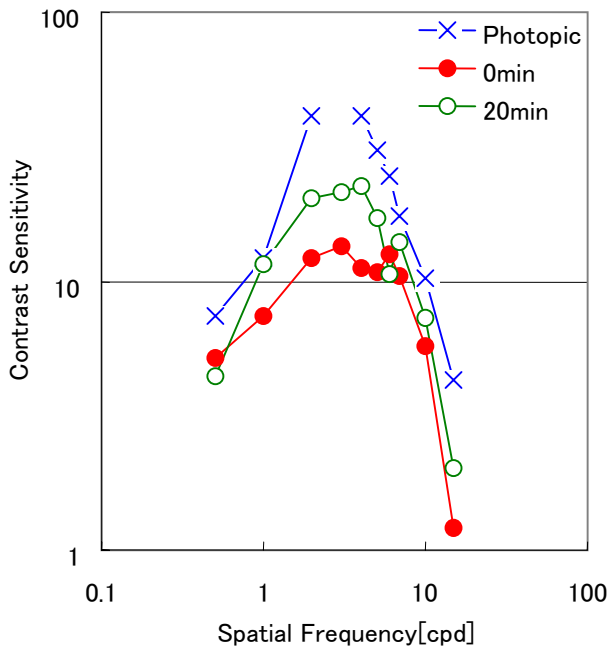


図3 コントラスト感度関数

順応した後の条件を示している。ただし、明所視条件の結果で、空間周波数 2~4cpd 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、順応条件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 2~5cpd では、感度が 0.5log 以上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関数は、順応条件急変直後に比べると感度が高くなっており、特に 2~5cpd におけるコントラスト感度の回復が大きいことが分かった。

図4には、順応条件急変直後から1分、5分、10分、20分のコントラスト感度関数を表している。軸

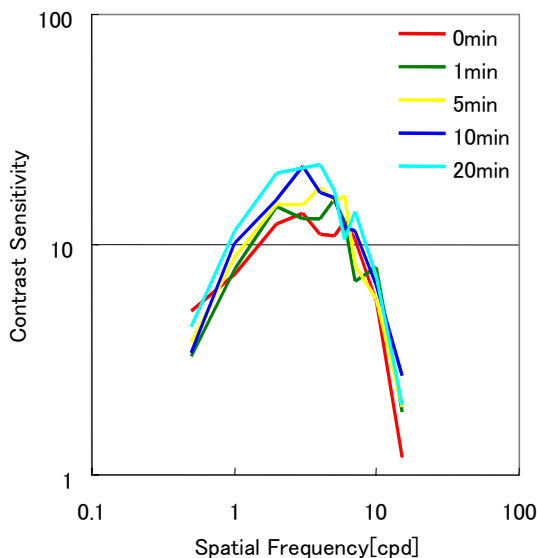


図4 コントラスト感度関数の暗順応時間推移

は図3と同様で、シンボルの違いは順応開始後から測定開始までの時間の違いを表している。図5は、順応開始からのコントラスト感度関数の変化を示したものである。横軸は順応開始時間を0としたときの、測定開始時間を表し、シンボルの違いは空間周波数の違いを示している。図4、図5から、10cpd以上の高空間周波数領域では、順応条件の急変後にコントラスト感度が低下するものの、1分程度で回復し、ほぼ暗順応状態と同様になることが分かる。0.5cpdの低空間周波数では、順応条件が急変した後で最も感度が低下しているが、それでも1分程度するとほぼ暗順応状態と同様になっている。一方、2~7cpdでは、順応条件急変後の感度の低下率も高く、感度の回復過程は低、高空間周波数領域に比べてゆるやかである傾向がみられた。

4. 考察

昼光下の明るさから突然暗黒へと順応条件が急変するとき、コントラスト感度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 2~5cpd での感度低下が最も大きく、0.5log 以上も低下した。この空間周波数領域は、視覚系が感度を持つ比較的高空間周波数の領域でもあり、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、順応条件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、

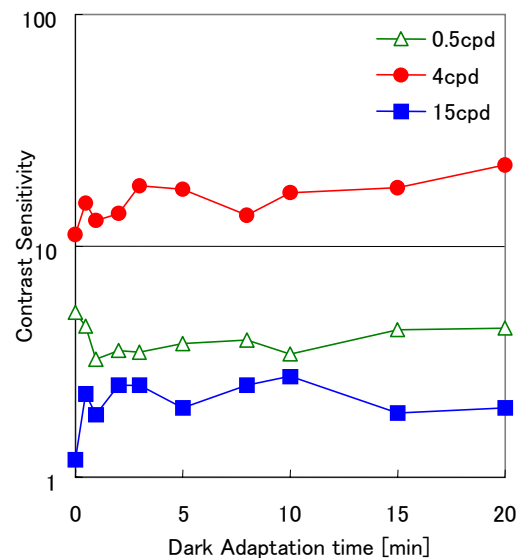


図5 暗順応時間に対するコントラスト感度

大まかな形状認識を確保していることが推測される。

また、暗順応開始後20分経ってもコントラスト感度は完全には回復しないことも示された。順応時間が増すごとにコントラスト感度が上昇していることは、順応によって小さな輝度差を検出する能力が徐々に高くなっていることを示しているが、同時に暗い環境下における視認性を高めるように視覚系の全ての機能がシフトしているため、完全に回復(明順応条件と同様のコントラスト感度関数を有する)することはないとはいえる。このことは、暗い環境の中から突然明るい画面を短時間観察する場合にも、視覚機能の低下が起こることを表している。この実験に用いた刺激はすべて平均輝度を30cd/m²と明るい条件に設定しており、運行中の航空機の順応条件が変わっても計器類の明るさは変化しない状況を再現していたからである。つまり、コクピット内から暗い前方を注視していたパイロットが突然明るい計器類を見るような場合にも、視認性が低下するといえる。

順応条件が急変した直後のコントラスト感度関数は全体に低いものの、その回復過程には空間周波数によって差があることが示された(図5)。特に、低空間周波数のコントラスト感度は順応条件急変後の順応過程において低下し、形状認識に重要な空間周波数領域(2~5cpd)ではコントラスト感度の上昇に時間がかかっていることは特徴的である。これは、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複数の検出経路があるとする仮定⁶⁻⁷⁾を支持する結果と考えられる。しかし、その回復過程の違いが物体認識にどのように影響を与えるかは今後の検討課題である。

5. まとめ

順応条件が急変する時の視覚の空間特性として、コントラスト感度が急激に低下することが分かった。特に空間周波数が2~5cpdでの感度低下が最も大きく、順応条件が急変すると輪郭抽出の機能が低下し、精細な形状認識が困難になること示された。しかし、低空間周波数領域の感度低下は相対的に小さく、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。

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