

Mesopic Vision 下の基本的視機能に関する探索的検討ⁱ

—分解能と実際運動検出閾の測定—

高橋啓介・土田梨代ⁱⁱ

A Pilot Study of The Fundamental Visual Function under Mesopic Vision.

—Measure The Visual Accuracy and The Real Motion Detection Threshold.—

Keisuke Takahashi, Riyo Tsuchida

Abstract: The fundamental visual function under mesopic vision may be different to that under both of photopic and scotopic vision. Because both of cone and rod contribute to the visual function interactively, but they work incompletely under mesopic vision. In this pilot study, we attempted to examine the fundamental visual function under mesopic vision. In Experiment 1, we measured visual acuity under mesopic vision and evaluated the effect of adaptation to mesopic vision upon visual acuity. In Experiment 2, we measured velocity threshold under mesopic vision and evaluated the effect of adaptation to mesopic vision upon velocity threshold. Results were as follow: (1) Visual acuity was reduced by about 60% under mesopic vision in comparison with photopic vision. (2) Motion detection sensitivity was reduced by about 33% under mesopic vision in comparison with photopic vision. (3) Both of visual acuity and motion detection sensitivity were not affected by the adaptation level to the mesopic vision.

Keywords : mesopic vision、分解能、小数視力、実際運動検出、速度閾
mesopic vision, visual acuity, decimal visual acuity,
real motion detection, velocity threshold

1. 問題

mesopic vision は、錐体細胞の限界輝度である数 cd/m² と桿体細胞の飽和輝度である 0.001cd/m² との中間の輝度水準における視感度特性を指し、錐体細胞、桿体細胞のいずれもがその機能を十分に発揮しえない状態であると考えられている。photopic vision (錐体視) から scotopic vision (桿体視) に移行することによって、分光視感度が短波長側に偏移する現象は Prukinje shift と言い、photopic vision から scotopic vision への移行に伴って、長波長色より短波長色の方が明度が高くなる現象は Prukinje Phenomenon として広く知られている。mesopic vision における分光視感度は、輝度水準に応じて、錐体細胞と桿体細胞との寄与度が変化するために複雑に変化することが明らかにされている (Sagawa & Takeichi, 1987)。

当然のことながら、我々の視覚を支える2種類の視細胞の寄与度が変化する mesopic vision では、色覚ばかりではなく、分解能や動対象の検出といった、基本的視機能についても変化が生ずることが予測される。mesopic vision 下での錐体細胞、桿体細胞の寄与度は、刺激の色や作業によって異なり、また、両者の重みつき平均で予測できるものではないことが報告されている (佐川, 2000; 佐

ⁱ 本研究は平成 19 年度愛知淑徳大学研究助成による助成を受けた。

ⁱⁱ 愛知淑徳大学医療福祉学部医療貢献学科視覚科学専攻実習助手。

川,2003)。またたとえば、いわゆる黄昏時には、視対象の視認度が低下するという現象は、日常的に経験される場所である。しかしながら、mesopic vision 下におけるこうした基本的な視機能については、要因の組織的な制御を行った実験による詳細な検討はこれまで十分に試みられてきたわけではない。そこで本研究では、mesopic vision 下での分解能と実際運動の検出といった基本的視機能について、探索的な実験的測定を試みる。その際、mesopic vision 状態への順応度に伴ってそれらの基本的視機能がどのように変化するのかについても併せて検討する。

2. 実験1

1) 目的

mesopic vision 下での分解能を測定する。また、mesopic vision 状態への順応に伴って分解能がどのように変化するのかについても併せて検討する。

2) 方法

- (1) 被験者：3色覚者で視機能に問題が認められない大学生女子4名（平均年齢21.5歳）。
- (2) 視力表：対数視力検査装置（LVC-1：NEITZ）。
- (3) 検査眼条件：遠方視力（検査距離5m）を小数視力1.6に矯正した片眼（優位眼）に、可視スペクトル帯域全般にわたってほぼ均等に入射光量を 10^{-3} にカットする neutral density filter（ND filter: Fuji Film）を装着させた。
- (4) 順応条件：ND filter 装着直後から3分刻みで21分までの8条件を設定した
- (5) 手続き：一般的な視力検査の手続きに従って、検査距離5mで被験者の検査眼（優位眼）の裸眼視力を測定し、小数視力1.6になるよう矯正した。その後、矯正した検査眼にND filterゴーグルを装着させ、各順応条件下での視力測定を4回行った。非検査眼は遮蔽した。視力測定は全被験者でND filter 装着直後から順次、順応時間が長くなる順序で実施したが、各順応条件間には24時間以上の間隔を置いた。視力表の平均照度水準は633.0lxであり、被験者の位置から見た視力表の平均輝度は 272.3cd/m^2 であった。

3) 結果と考察

順応条件を潰したmesopic vision下での平均小数視力は0.66であり、photopic visionでの小数視力1.6に対してmesopic visionでは、約40%まで分解能が低下することが見出された。

Figure 1に、mesopic visionへの順応時間に伴う平均小数視力の変化を示した。図中、小数視力の誤差範囲を上下各 0.5sd として示した。Figure 1によると、ND filterを装着直後に小数視力は顕著に低下し、ND filter装着持続時間が長くなっても小数視力に顕著な変化は認められなかった。各順応条件における平均小数視力について、対応のある一元配置分散分析を行ったところ、順応条件間に有意差は認められなかった($F(7,120)=.818, n.s.$)。

Landolt環によって測定される分解能については、mesopic visionへの順応効果は見出されなかった。ただ本実験においては、輝度水準に関する条件分析を行っておらず、mesopic visionへの順応が分解能に影響を与えるか否かについては、輝度水準を組織的に操作して検討する必要があるだろう。

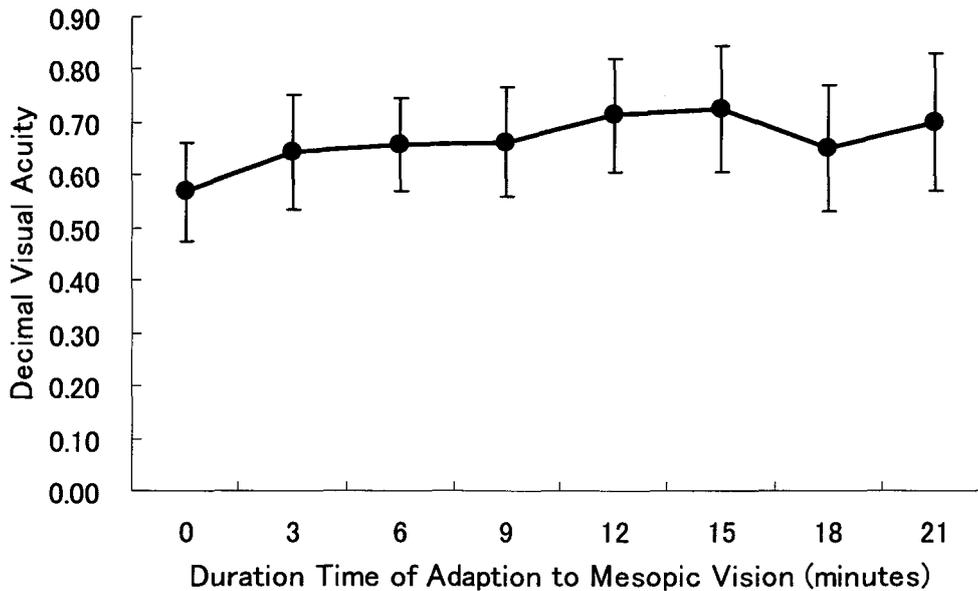


Figure 1 Mean decimal visual acuity as a function of duration Time of adaptation to mesopic vision.

3. 実験2

1) 目的

実験1ではmesopic visionにおける分解能を測定し、その特徴について検討した。分解能は、形態知覚の基礎であり、視覚の最も基本的な機能の1つである。その形態知覚と同様に、視覚の基本的機能として運動知覚がある。Nakayama(1985)が指摘するように、運動対象の検出は、系統発生的にも比較的初期に具わる機能であり、ヒトを含めた生物にとって適応的に重要である。またその入力、大細胞系から中枢の背側経路において処理され、MT野が原因中枢であり、腹側経路において処理されIT野を原因中枢とする形態知覚とは別個に検討される必要がある。そこで実験2では、mesopic vision下での実際運動の検出を、その速度閾を測定することで検討する。実験1と同様、mesopic visionへの順応状態が速度閾におよぼす効果についても併せて検討する。

2) 方法

- (1) 被験者：3色覚者で視機能に問題が認められない大学生女子4名（平均年齢21.5歳）。
- (2) 検査眼条件：遠方視力（検査距離5m）を小数視力1.6に矯正した片眼に、可視スペクトル帯域全般にわたってほぼ均等に入射光量を 10^3 にカットするneutral density filter（ND filter: Fuji Film）を装着させた。
- (3) 順応条件：ND filter装着直後から3分刻みで21分までの8条件を設定した
- (4) 運動刺激：FLASH MX2004(Macromedia)によって作成した。観察距離40cmで、コンピュータのモニター画面中央に凝視点を呈示し、凝視点の水平方向左側に視角 4.3° の地点に直径視角 1.4° の黒点を呈示した。この黒点を運動刺激とした。
運動刺激は、1判断試行において200ms呈示され、その間に、 $0.25'/s \sim 1.25'/s$ の範囲で $0.25'/s$ ステップ、5段階の速度で初期呈示位置から左方向に運動した。
- (5) 手続き：実験室は照度633lxの照度水準で、運動刺激呈示画面の平均輝度は 272.3 cd/m^2 であった。遠方視力を小数視力で1.6に矯正した検査眼（優位眼）にND filterゴーグルを装着させ、非検査眼は遮蔽した。上下法の手続きで速度閾を測定した。被験者には、モニター中央の凝視点を凝視させ、順次呈示される運動刺激が「運動している」「わからない」「静止している」の3件法で判断を行わせた。上昇系列-下

降系列-下降系列-上昇系列の4試行を1セットとし、各被験者につき4セットの測定を行った。順応条件はND filter装着直後から順次、順応時間が長くなる順序で実施したが、各順応条件間には24時間以上の間隔を置いた。

3) 結果と考察

Figure 2に、ND filter非装着時の平均速度閾、平均上昇別閾、平均下弁別閾および、各閾値のND filter装着持続時間に伴う変化を示した。図中、速度閾については上下に0.5sdの誤差範囲を併記した。ND filter非装着時の平均速度検出閾は0.234' /sであり、順応条件を潰したmesopic vision下での平均速度検出閾は0.839' /sであった。

Figure 2によると、ND filter非装着時に比べND filter装着時に著しく速度閾が上昇する傾向が見出された($F_{88,63}=50.406$, $p<.001$)。閾値の上昇は速度で約2.5倍であり、約33%の感度低下が生じていることになる。このことは、photopic visionに比べmesopic visionにおいて運動検出感度が著しく低下することを示している。

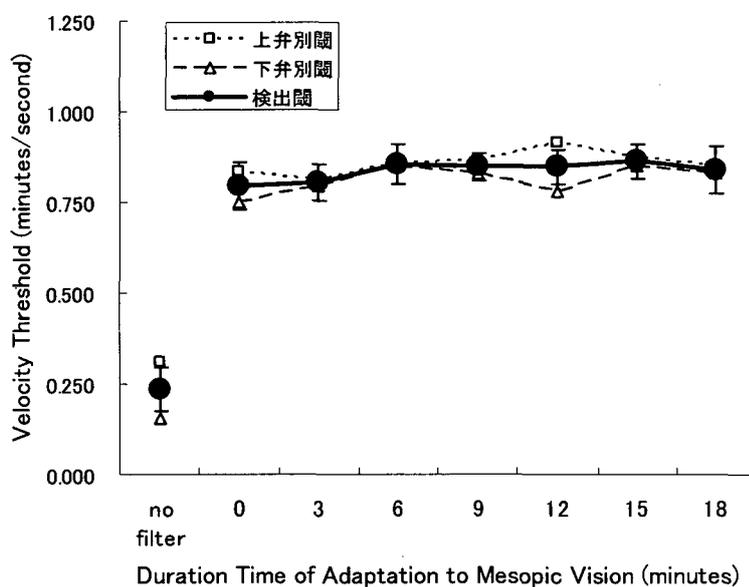


Figure 2 Mean velocity threshold as a function of duration time of adaptation to mesopic vision.

Figure 2からは速度閾におよぼすND filter装着持続時間の効果に顕著な傾向は認められない。そこで、各被験者のND filter非装着時の速度閾と各順応条件における速度閾との差を Δ 速度閾として算出し、それがND filter装着持続時間に伴ってどのように変化するかを検討した。

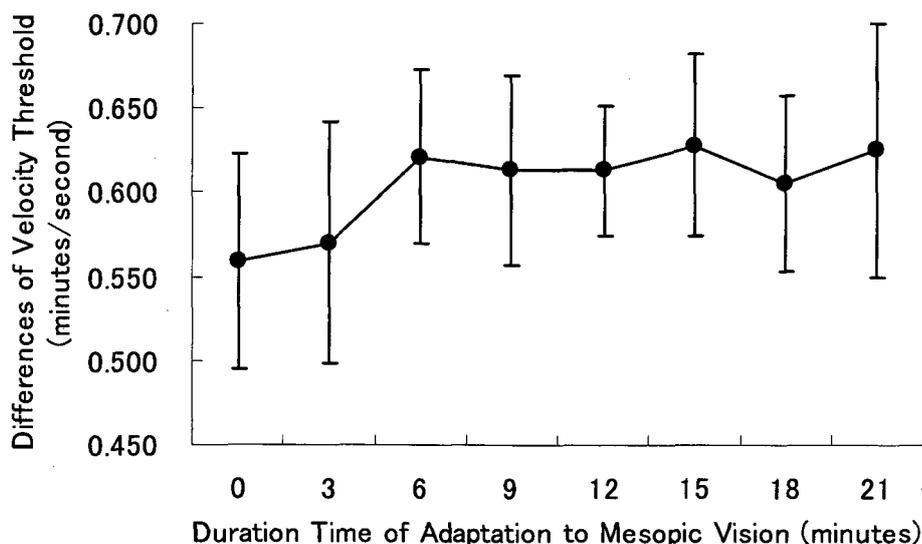


Figure 3 Mean differences of velocity threshold as a function of duration time of adaptation to mesopic vision.

Figure 3に Δ 速度閾のND filter装着持続時間に伴う変化を示した。図中、 Δ 速度閾の上下に0.5sdの誤差範囲を併記した。Figure 3によると、ND filter装着直後から6分後までに Δ 速度閾は緩やかに上昇し、その後安定する傾向が認められる。しかし、dataの分散が大きいためその傾向は明確ではない。各順応条件における平均 Δ 速度閾について一元配置分散分析を行ったところ、 Δ 速度閾には順応条件間に有意差は認められなかった($F(7,120)=.774$, n.s.)。運動検出感度についても、mesopic visionへの順応による変化は見出されなかったが、分解能と同様、輝度水準について組織的な操作による検討を行う必要がある。

4. 討論

mesopic vision下での分解能について検討した実験1では、photopic visionに較べてmesopic visionで約70%、分解能が低下することが見出された。輝度水準が最小分離閾、最小可読閾におよぼす効果については、いくつかの古典的研究がある。背景輝度が高い場合の最小可読閾について、Lythgoe(1932)は30"以下、Schober(1937)は24.5"、Shlaer, et al.(1942)は22"との所見をそれぞれ報告している。またShlaer(1937)は、網膜照度の上昇に伴い、視力はS字型を示して上昇し、低輝度水準では縞視力の方が、高輝度水準ではLandolt環の方が視力が高くなることを報告している。Figure 4にShlaer(1973)の報告にあるdata(copyright The Rockefeller University Press)を示す。

本実験では人工瞳孔を用いなかったため、各被験者の網膜照度を正確に把握することはできないが、通常の場合の瞳孔径の変化が2mm~6mmの範囲であること、本実験での輝度水準が0.2723cd/m²であったことを考慮すると、本実験状況下での各被験者の瞳孔径はほぼ6mmであったとみなすことは合理的であろう。この場合、本実験での輝度水準は網膜照度で7.695td程度ということになる。この網膜照度におけるLandolt環小数視力をShlaer(1937)のdataから求めると、およそ0.65程度ということになり、本実験で認められた視力の低下は、Shlaer(1937)の所見とよく合致している。

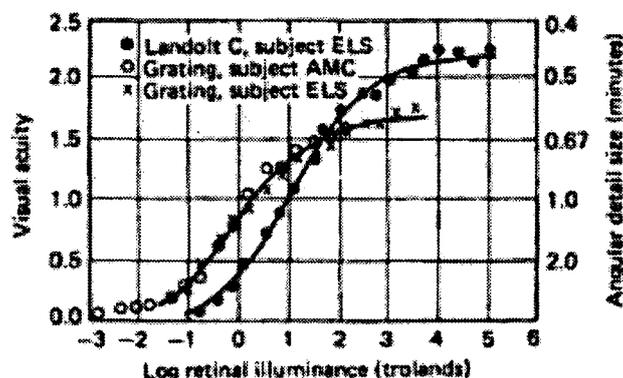


Figure 4 Visual acuity and retinal illuminance. (Reference from Shlaer(1937), copyright The Rockefeller University Press.)

次に、実験2では、mesopic vision下での運動検出感度を、速度閾を測定することで検討した。その結果、mesopic visionでは、photopic visionに較べて運動検出感度は65%程度の水準に低下するとの所見が得られた。速度閾におよぼす輝度水準の効果についても古典的で基本的な所見が得られており、最大感度は $1\sim 2'$ /sであり、刺激輝度の増加が閾値を下げるということが知られている(Graham & Hunter, 1931; Crook, 1937; Brown & Conklin, 1954; Brown, 1955; Leibowitz, 1955)。

Leibowitz(1955)は、様々な刺激呈示時間において、輝度水準に伴う速度閾の変化を測定している。本実験において運動刺激は2秒呈示され、輝度水準は 0.2723cd/m^2 (0.0855mL)であった。この条件でLeibowitz(1955)のdataを参照すると、速度閾は $0.8'$ /s $\sim 1.0'$ /sの間に相当し、本実験での測定結果もこれによく合致している。

本研究では、mesopic visionの輝度水準への順応の効果についても併せて検討したが、順応時間の増加に伴って分解能、運動検出感度が変化するという明らかな傾向は見出せなかった。速度閾では順応が進むと閾値が上昇する若干の傾向が認められたものの、統計的な確認は得られなかったし、閾値の上昇は順応による感度の上昇と拮抗する現象である。

視感度は暗順応によって上昇するにもかかわらず、順応の効果が分解能や運動検出感度に認められないのは重大な謎である。mesopic visionの輝度水準は錐体系の感度以上に輝度チャンネルの情報処理を著しく阻害するのかもしれない。桿体系は感度については高性能ではあるが、分解能、運動検出能では錐体系に較べて精度が劣ることが知られている。つまり、本研究で用いた輝度水準では、錐体系の寄与が極めて低い状態であったと推測できるのではないだろうか。この点を明らかにするためには、mesopic visionの範囲の輝度水準に限らず、暗順応過程における分解能や運動検出感度など、基本的な視機能の変化について組織的な検討を加える必要があるだろう。

順応の問題は今後の課題ではあるが、本研究の結果は、mesopic visionの輝度水準では基本的な視機能が著しく低下することを示しており、日常生活における輝度水準の確保の重要性を示唆している。特に、老視や白内障の症状のある場合には、こうした観点からの環境設定は極めて重要であり、考慮されるべきであろう。

5. References

- Brown, R. H. (1955) Velocity discrimination and the intensity time relation. *Journal of Optical Society of America*, 45, 189-192.
- Brown, R. H. & Conklin, J. E. (1954) The lower threshold of visible movement as a function of exposure time.

- American Journal of Psychology*, 67, 104-110.
- Crook, M. N. (1937) Visual discrimination of movement. *Journal of Psychology*, 3-4, 541-588.
- Graham, C. H. & Hunter, W. S. (1931) Thresholds of illumination for the visual discrimination of direction of movement and for the discrimination of discreteness. *Journal of General Psychology*, 5, 178-190.
- Leibowitz, H. W. (1955) The relation between the rate threshold for the perception of movement and luminance for various durations of exposure. *Journal of Experimental Psychology*, 49, 209-214.
- Lythgoe, R. J. (1932) The measurement of visual acuity. *Medical Research Council Special Report Series*, No.173 (Report of Committee upon the Physiology of Vision. No.X) London: His Majesty's Stationary Office.
- Nakayama, K. (1985) Biological image motion processing: A review. *Vision Research*, 25, 625-660.
- Sagawa, K. & Takeich, K. (1987) Mesopic spectral luminous efficiency function: Final experimental report. *Journal of Light and Visual Environment*, 11, 22-29.
- 佐川 賢 (2000) 「分光視感効率と測光システム」 日本視覚学会(編)『視覚情報処理ハンドブック』, 161-166. 朝倉書店
- 佐川 賢 (2003) 「薄明視」 日本色彩学会(編)『色彩用語事典』, 375. 東京大学出版会
- Schober, H. (1937) Neuere untersuchungen über Sehschärfe. Auflösungsvermögen der optischen Instrumente und besonders des menschlichen Auges. *Zeitschrift für Technische Physik*, 19, 343-344.
- Shlaer, S. (1937) The relation between visual acuity and illumination. *Journal of General Physiology*, 21, 165-188.
- Shlaer, S., Smith, E. L., & Chose, A. M. (1942) Visual acuity and illumination in different regions. *Journal of General Physiology*, 25, 553-569.