

JIER-099

不均一な照明環境下での視認性に関する
研究調査委員会

報告書

平成20年3月

社団法人 照明学会

目 次

章・節		頁
1	委員会の目的と活動経緯	1
1.1	はじめに	1
1.2	委員会の目的	1
1.3	委員会の構成	1
1.4	委員会活動	1
2	関連する既往研究	4
2.1	自動車照明機器の順応輝度研究事例について	4
2.2	夜間の交通視環境と瞳孔反応に関する研究	6
2.3	道路照明の視認性に関する研究	9
2.4	精神的作業負荷の瞳孔径変化に与える影響について	11
2.5	不均一環境下における輝度差弁別閾	13
2.6	自己存在空間と観察空間での空間の明るさ判断の比較	14
2.7	カメラを利用した輝度分布測定	16
2.8	火災環境下での視認性と避難者行動との関係	17
2.9	自動車運転場面における視覚的注意特性	19
2.10	視野全域における高輝度面による順応輝度増加量の加法性の検討	21
3	視覚系の順応および順応輝度とは？	23
3.1	暗順応と明順応	23
3.2	暗順応曲線	23
3.3	順応輝度	24
4	不均一な照明環境下での視認閾値	29
4.1	空間的な不均一が視認性に及ぼす影響の評価方法（順応輝度の推定方法）	29
4.2	時間的な不均一が視認性に及ぼす影響（順応過渡過程における視認能力）	31
4.3	周期的視野輝度変動時の輝度差閾値	36
5	不均一な照明環境の評価	40
5.1	コントラスト・プロファイル法を用いた不均一照明環境の評価	40
5.2	FEU（フー）による評価	43
5.3	空間周波数分布の影響	46
6	照明環境の不均一性の活用事例	49
6.1	トンネル入口部における照明設計	49
6.2	順応を考慮した非常用照明	51
7	まとめ	54

1 委員会の目的と活動経緯

1.1 はじめに

人間が日々多くの時間を過ごしている日中や室内照明環境は、大まかには均一ではあるが、実際には空間的に不均一な照明環境である。また道路や交差点など交通視環境は時間的にも不均一な視環境である。

しかしながら、従来までの視覚研究においては、均一に照明された視環境下における視認性に関する研究が主流を占めていた。照明の不均一性を定量的に扱う方向性が定まっていなかったからと考えられる。均一な照明環境下でのさまざまな視覚特性に関する研究所見が蓄積されてきた現在、次の段階として、不均一な照明環境下での視覚特性を明らかにしていくことが重要な研究課題である。

そこで当該調査研究委員会では、空間的および時間的に不均一な照明環境下における視認性に注目し、平成17年度より3カ年、研究調査を実施した。

1.2 委員会の目的

当該委員会は下記3項を目的とした。

- ① 空間的・時間的に、どのような不均一照明環境での視覚特性の解明が、照明学会に関連する産業界から要望されているかについて調査と整理
- ② 関連する既往研究の調査と整理
- ③ 空間的・時間的に不均一な照明環境下における順応輝度および視認性をどのように定義し、さらにはそれらの測定方法に関する考察と検討

上記の研究調査により、下記の分野においてヒューマンセンタードな照明方式確立への方向性が示されることとなり、社会に貢献できる。

- 交通照明：安全走行を支援する道路照明および車載前方照明，歩行者支援用街路照明
- 建築照明：災害時における避難誘導照明及び表示，快適または適正空間照明

1.3 委員会の構成

委員会の構成を本章末の表1に示す。交通関係，建築の研究者を主体に18名が参画し，活動を実施した。

1.4 委員会活動

委員会では外部からの講師の招請，各委員の研究事例紹介，話題提供を実施すると共に，それらを基に，当該分野の研究の現状，応用分野での問題点，今後の研究課題の討議と整理，を実施してきた。

委員会は17回開催した。活動内容を以下に記す。

- 第1回委員会 (H17.6.10) 照明学会第1会議室
委員会起案書の説明並びに名簿確認と自己紹介
トンネルの入口照明；松下電工（株）坂本氏（招待講演）
協議事項；①委員会の進め方について，②年間活動計画について
- 第2回委員会 (H17.8.5) 照明学会第1会議室
道路トンネル照明における眼の順応の定量化；（社）日本電球工業会 武内氏（招待講演）
自動車照明機器の順応輝度研究事例について；小島委員
交差点周辺の交通視環境における瞳孔反応について；小林幹事
協議事項；当該委員会の研究ニーズ・課題，順応の定義に関するディスカッション
- 第3回委員会 (H17.10.31) 照明学会第1会議室
道路照明の視認性に関する研究；江湖委員，中村委員
古典的暗順応曲線について；阿山委員長
協議事項；視覚認知・順応メカニズムに関するフリーディスカッション

- 第4回委員会 (H17.12.22) 照明学会第1会議室
照明デザインにおける均一, 不均一; 面出委員
明所視, 暗所視, 白明視を調べるための実験について; 篠田委員
協議事項; 活動中間レビューの確認とダイナミックレンジに関する議論
- 第5回委員会 (H18.3.14) 照明学会第1会議室
瞳孔径変化測定による心理的負荷推定の可能性について; 森田委員
協議事項; 共同実験の実施について
- 第6回委員会 (H18.4.18) 照明学会第1会議室
不均一環境下における輝度差弁別域 EOG (動視標) 法による; 上條委員
自己存在空間と観察空間における明るさ判断の比較; 宇都宮大学 江田氏・阿山委員長
協議事項; ①眼のダイナミックレンジ検証方法について, ②今後の活動計画について
- 第7回委員会 (H18.6.6) 照明学会第1会議室
FEU について; 篠田委員
協議事項; 研究助成応募について (三井住友海上福祉財団; 交通安全等関係)
- 第8回委員会 (H18.9.6) (独) 交通安全環境研究所 (三鷹) 会議室
順応条件が急変した時の視覚特性; (独) 交通安全環境研究所 塚田氏 (招待講演)
トンネル照明における視認性の検討; 伊東委員
交通安全環境研究所研究・実験施設の見学
- 第9回委員会 (H18.11.13) 照明学会第1会議室
カメラを利用した輝度計測; 藤波委員
協議事項; 不均一関連文献の調査分担について
- 第10回委員会 (H19.1.29) 照明学会第1会議室
眼のダイナミックレンジ計測方法の検討; 小林幹事
協議事項; 次年度活動計画案について
- 第11回委員会 (H19.3.11) 照明学会第1会議室
照明による住宅階段踏み面の視認性とグレア知覚の加齢評価; セントラルメロ (株) 明道氏 (招待講演)
ミシガン大学における人間工学に基づいた自動車灯体研究の紹介; スタンレー電気 木村氏
- 第12回委員会 (H19.5.21) 照明学会第1会議室
光環境の明るさ感における空間周波数分布の影響; 岡嶋委員
JOSA 文献「Effects of Adaptation」の紹介; 1963, Stevens J C, et. al. ; 舟川委員
- 第13回委員会 (H19.7.20) 照明学会第1会議室
火災環境下での視認性と避難者行動との関係; 秋月委員
自動車運転場面における視覚的注意特性—変化の見落とし現象を指標として; 中京大 宮崎氏・和気委員
- 第14回委員会 (H19.9.5) 情報オアシス神田 淡路町スペース
順応過渡過程における眼の感度-実効輝度を用いた視認能力の動的評価法; 井上委員
トンネル進入時における順応特性; 宇都宮大 大島氏, 山田氏・阿山委員長
- 第15回委員会 (H19.10.17) 関西大学住宅照明実験施設
視野全域での高輝度面による順応輝度増加量の加法性の検討; 奈良女子大 池上氏・井上委員
関西大学住宅照明実験施設見学
- 第16回委員会 (H19.12.17) 松下電工 (株) 汐留ビル会議室
歩行者の視認に与える光幕の影響—街路照明のグレアとエネルギー損失の関係; 江湖委員
- H20.3.31 関西大学先端科学技術推進機構, 学術フロンティア・センター
委員会報告書の査読と今後の校正スケジュール
公開研究会の件 (開催日・講演者・予算・会場)

表1 不均一な照明環境下での視認性に関する研究調査委員会の構成（五十音順）

役職	氏名	勤務先名	勤務先所属
委員長	阿山 みよし	宇都宮大学	大学院工学研究科 情報制御システム科学専攻
幹事	小林 正自	(株) 小糸製作所	研究所
委員	秋月 有紀	富山大学	人間発達科学部 人間環境システム学科
委員	伊東 勇人	松下電工 (株)	照明事業本部 中央エンジニアリング総合部
委員	井上 容子	奈良女子大学	生活環境学部 住環境学科
委員	岩田 三千子	摂南大学	工学部 建築学科
委員	岡嶋 克典	横浜国立大学	大学院 環境情報研究院
委員	上條 正義	信州大学	大学院 総合工学系研究科
委員	江湖 俊介	岩崎電気 (株)	研究開発本部 技術研究所
委員	小嶋 伸一	スタンレー電気 (株)	筑波研究所 研究開発センター
委員	篠田 博之	立命館大学	情報理工学部 知能情報学科
委員	中村 芳樹	東京工業大学	大学院 総合理工学研究科 人間環境システム専攻
委員	原 直也	関西大学	環境都市工学部 建築学科 建築環境工学第2研究室
委員	藤波 研次	小糸工業 (株)	開発本部 研究開発部
委員	舟川 政美	日産自動車(株)	日産先進技術開発センター 総合研究所
委員	面出 薫	(株) LPA	代表 LPA (ライティング プランナーズ アソシエーツ)
委員	森田 和元	(独) 交通安全環境研究所	自動車安全研究領域
委員	和氣 典二	中京大学	心理学部 心理学科
Obs.	池上 陽子	奈良女子大学	大学院 人間文化研究科 社会生活環境学専攻
Obs.	岩井 彌	松下電工 (株)	照明事業本部 中央照明エンジニアリング総合部
Obs.	江田 哲也	宇都宮大学	大学院工学研究科 情報制御システム科学専攻
Obs.	大島 淳宏	宇都宮大学	工学部 情報工学科
Obs.	木村 能子	スタンレー電気 (株)	筑波研究所 研究開発センター
Obs.	坂本 正悦	松下電工 (株)	照明事業本部 中央照明エンジニアリング総合部
Obs.	武内 徹二	(社) 日本電球工業会	
Obs.	塚田 由紀	(独) 交通安全環境研究所	交通システム研究領域
Obs.	宮崎 由樹	中京大学	心理学部 心理学科
Obs.	明道 成	セントラルメルコ (株)	
Obs.	山田 慎哉	宇都宮大学	工学部 情報工学科

(文責 ; 幹事 小林正自)

2 関連する既往研究

2.1 自動車照明機器の順応輝度研究事例について

本項では、自動車用照明機器照明環境における順応輝度について、ミシガン大学交通研究所 (the University of Michigan Transportation Research Institute) が行った研究事例を紹介する。尚、単位系は SI 単位でないので文末の換算式で換算願いたい。

2.1.1 自動車照明機器の順応輝度の推測 (グレアが無い場合) ¹⁾

本研究は、米国連邦道路交通安全局 (National Highway Traffic Safety Administration [米国運輸省]) の委託研究であり、当局が自動車用前照灯の法規改定作業を行った際に、視認性を裏付ける基礎データ取得のために行われた。

(1) コントラスト感度の測定

自動車用照明機器照明環境における順応輝度を推定する前に、基礎となるコントラスト感度の測定を実験室で行った。実験のセッティングを図 2.1.1 に示す。実験方法は、順応輝度調整用光源によって均一に照射された順応輝度調整用スクリーンの輝度に順応させた状態で、視対象である光源の輝度を ND フィルタによって変化させ、視対象が“見えた”あるいは“見えない”を被験者に申告させた。尚、実験は順応輝度：5 水準 (0.005~2 ft-L) および視対象の輝度：12 水準 (0.84~220.37 ft-L) で実施された。各順応状態で“見えた”の申告率 50%の時の視対象輝度を統計的に求め、視認可能輝度の閾値とした。得られた順応輝度と視認可能輝度の関係を図 2.1.2 示す。

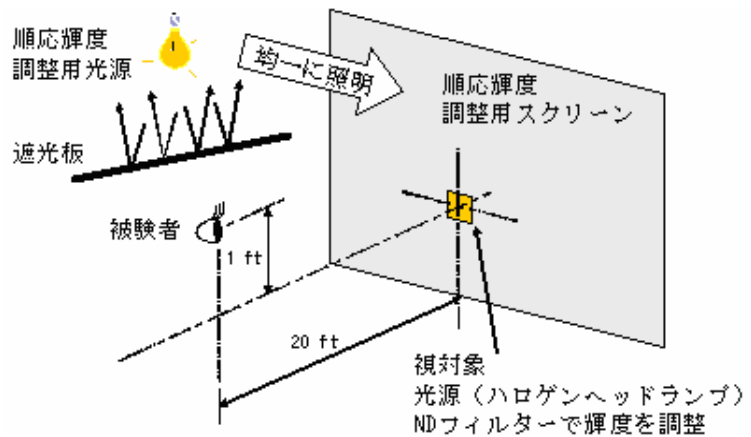


図 2.1.1 実験のセッティング

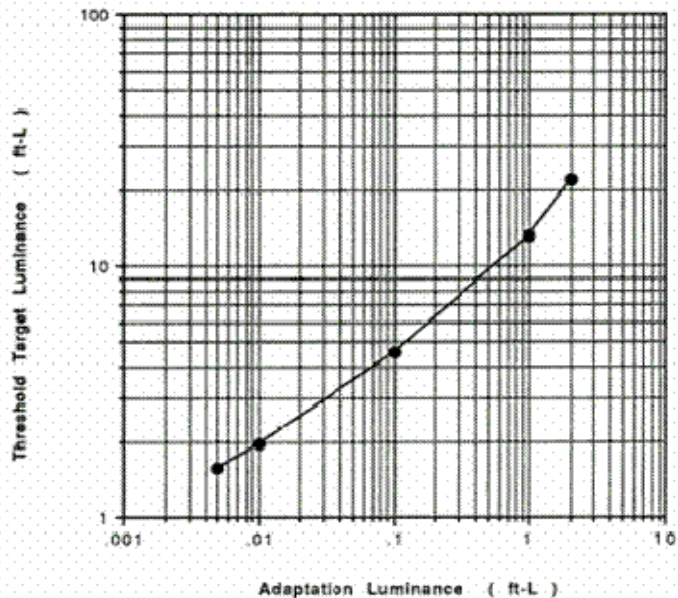


図 2.2.2 順応輝度と視認可能輝度の関係

(2) 自動車用照明機器照明環境における順応輝度の推定

実験室の順応輝度調整用光源の代わりに実際の自動車用照明機器 (前照灯) を使用した屋外実験を行った。実験方法は、前照灯によって照射された路面の輝度に順応させた状態で、20 フィート前方に設置した視対象である光源の輝度を ND フィルタによって変化させ、視対象が“見えた”あるいは“見えない”を被験者に申告させた。尚、実験は順応輝度：5 水準 (照明なし、すれ違いビーム、走行ビーム、すれ違いビーム [高照度帯を遮光]、街路灯 [高圧ナトリウム灯]) および視対象の輝度：12 水準 (0.84~220.37 ft-L) で実施された。実験室での実験同様、各順応状態で“見えた”の申告率 50%の時の視対象輝度を統計的に求め、視認可能輝度の閾値とした。得られた視認可能輝度閾値を実験室の実験で得られた順応輝度と視認可能輝度の関係 (図 2.1.2) から、等価順応輝度を求め自動車用照明機器照明環境における順応輝度の推定を行った。結果を表 2.1.1 に示す。

表 2.1.1 自動車用照明機器照明環境における順応輝度（グレアが無い場合）

照明条件	順応輝度
なし	0.005 ft-L (0.02 cd/m ²)
すれ違いビーム	0.3 ft-L (1 cd/m ²)
走行ビーム	1.7 ft-L (5.8 cd/m ²)
すれ違いビーム（高照度帯遮光）	0.2 ft-L (0.69 cd/m ²)
街路灯（高圧ナトリウム灯）	1.5~2.0 ft-L (5.14~6.85 cd/m ²)

2.1.2 自動車照明機器の順応輝度の推測（グレアがある場合）²⁾

実際の交通環境下においては対向車の前照灯からのグレアを考慮する必要がある。そこで本研究はグレアがある場合の順応輝度の推定を行った。

(1) 暗順応時間の測定

前述の研究ですれ違いビーム照明下の順応輝度は先の実験で 0.3 ft-L と分かっており、またその順応レベルでの視認可能輝度閾値は図 2.1.2 より 3 ft-L であった。この結果を利用し グレア暴露における順応レベルからすれ違いビームにおける順応レベルになるまでの暗順応時間（視力回復時間）の測定を行った。尚、順応レベル：4 水準（5~30 ft-L）で行われた。本実験で得られた視力回復時間を図 2.1.3 に示す。例えば、初期順応輝度 5 ft-L からすれ違いビーム照明下の順応レベルになるまでの時間は約 4 秒弱であった。

(2) 対向車の前照灯からのグレア照射における順応輝度の推定

すれ違いビームを点灯した車両に被験者が乗車し、グレアとして 150 フィート前方に設置した対向車の前照灯を点灯させ十分に順応させた。その後、対向車の前照灯を消灯し、20 フィート前方に設置した視対象（3 ft-L）が“見えた”と申告するまでの時間を測定した。尚、グレアは 2 水準（すれ違いビーム、走行ビーム）で行われた。各グレア暴露からの視力回復時間の平均を表 2.1.2 に示す。得られた視力回復時間を実験室の実験で得られた視力回復時間の関係（図 2.1.3）から、グレアがある場合の等価順応輝度を求め自動車用照明機器照明環境における順応輝度の推定を行った。結果を表 2.1.3 に示す。

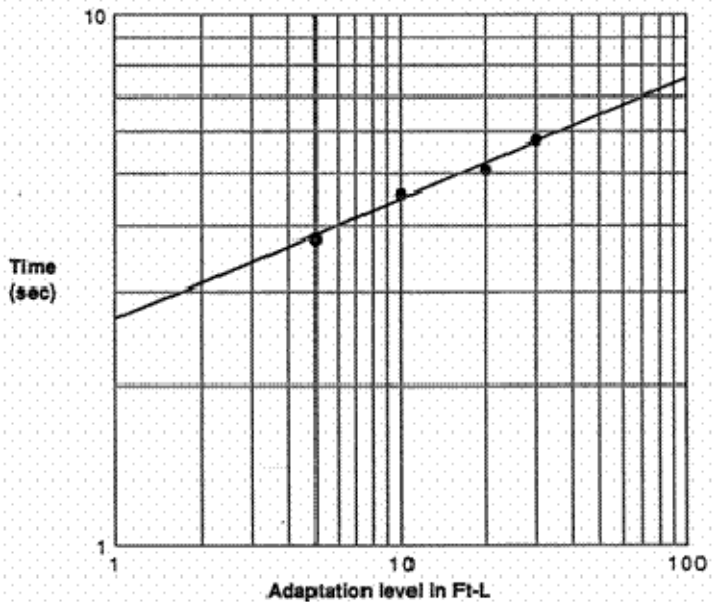


図 2.1.3 高い順応レベルからすれ違いビーム照明下の視力回復時間の関係

表 2.1.2 各グレア暴露からの視力回復時間

グレアの種類	視力回復時間（平均）
すれ違いビーム	3.63 秒
走行ビーム	5.14 秒

表 2.1.3 自動車用照明機器照明環境における順応輝度（グレアがある場合）

照明環境	グレアの種類	順応輝度
すれ違いビーム	すれ違いビーム	5 ft-L (17.1 cd/m ²)
	走行ビーム	20 ft-L (68.5 cd/m ²)

2.1.3 まとめ

紹介した2つの研究事例（自動車用照明機器照明環境における順応輝度）のまとめを図2.1.4に示す。
換算式；1 (ft-L) = 10.764/n (cd/m²), 1 (ft) = 0.3048 (m)

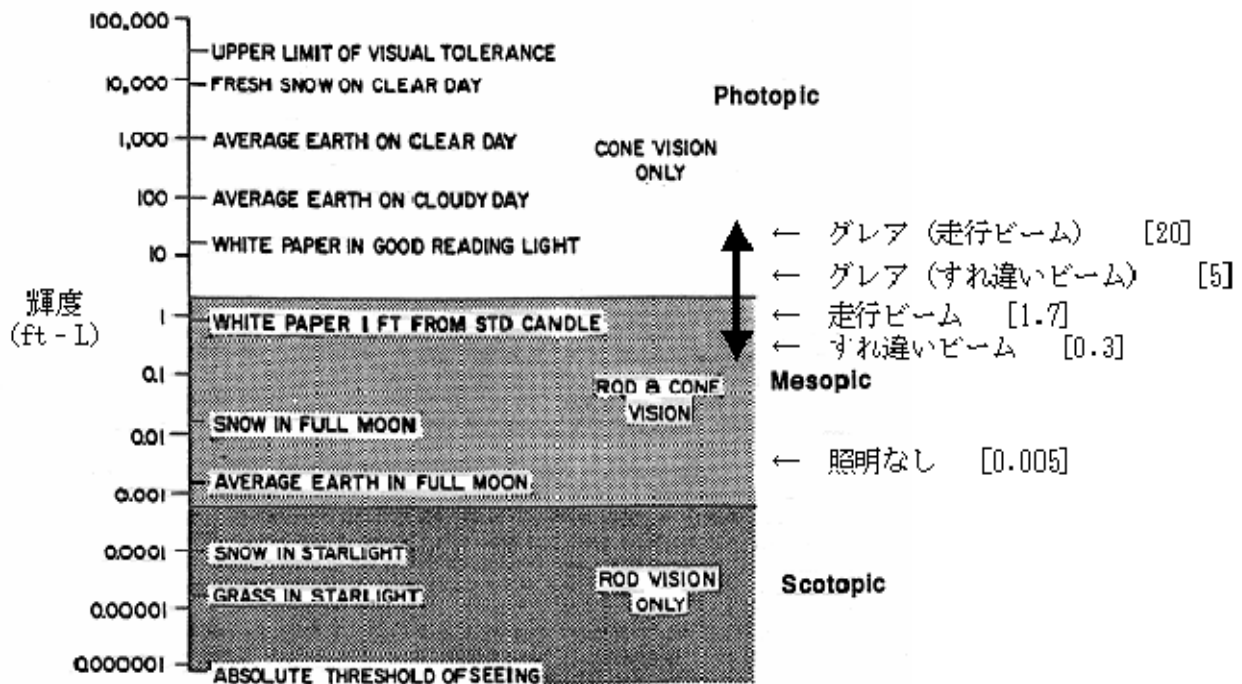


図 2.1.4 自動車用照明機器照明環境における順応輝度

(文責；スタンレー電気 (株) 筑波研究所 小嶋伸一)

参考文献

- 1) Paul L. Olson, et.al.; Development of a headlight system performance evaluation tool, UMTRI technical report, UMTRI-90-41, 1990
- 2) Paul L. Olson, Toshiaki Aoki; The measurement of dark adaptation level in the presence of glare, UMTRI technical report, UMTRI-89-34, 1989

2.2 夜間の交通視環境と瞳孔反応に関する研究¹⁾

2.2.1 はじめに

一般に夜間の交通事故多発地点には道路照明が存在する。そして、その道路照明の存在箇所近傍においては視環境が変化する。この視環境変化の詳細、その移動空間内でのドライバ視覚反応の特徴が把握できれば、夜間交差点及びその近傍における歩行者事故要因の抽出の一助となる可能性がある。

そこで実道路と交差点実験施設における視環境調査実験を実施することにした。

2.2.2 実験1 実道路における視環境調査実験

(1) 調査内容と手法

調査対象は静岡市内の歩行者事故多発地点とし、交通視環境上の問題点があるか否か検討することとした。

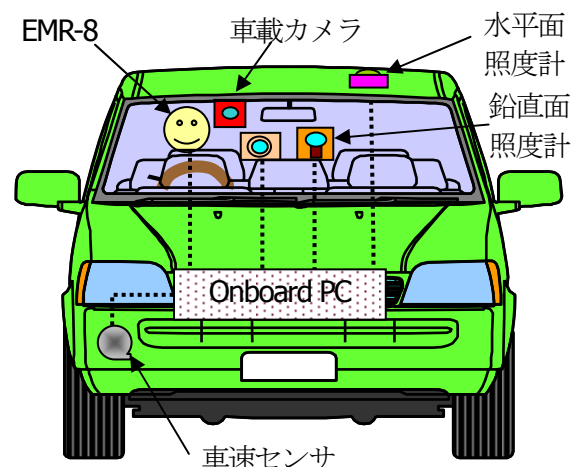


図 2.2.1 車載視環境計測システム

交通視環境については路面輝度，水平面照度，角膜照度を実車走行計測する。更にその視環境下での視覚反応として瞳孔反応を計測することとした。瞳孔は環境の明るさに対応して縮動する。そこで瞳孔反応を調査すれば，瞳孔反応の観点から交通視環境の問題点を抽出できる可能性がある。

計測に使用した車載システムを図 2.2.1 に示す。

- ・ 照度計；IM-5 (0.01~19.99 lx)
- ・ 輝度計；BM-8 (0.01~19.99 cd/m²，視野角 2°)，15m 前方に照準。車両前方約 10m~30m の範囲が計測対象範囲となる。
- ・ Eye Mark Recorder；EMR-8 (分解能 0.02mm)
- ・ 計測サイクル；30Hz

(2) 調査結果；調査地域 (横内単路部)

調査対象道路の代表地点における夜間の視環境と，調査対象地域の交通視環境(水平面照度，角膜照度，路面輝度)並びに瞳孔径測定結果を図 2.2.2 に示す。

この道路の前半区間は道路照明以外に店舗照明が存在し，水平面・角膜照度も高く明るい区間となっているが，後半は店舗照明もなくなり，暗い区間となっている。前半の明るい区間で視認できていた歩道に存在していた歩行者も後半区間では視認できなくなる可能性が高いと思われる。

瞳孔径は，このような交通視環境の明るさ変化が存在しているにもかかわらず，ほぼ一定となっており，瞳孔の光量調整機能が見られない。なお，270m 近辺で路面輝度が増加しているが，この原因は先行車のテールライトの影響である。

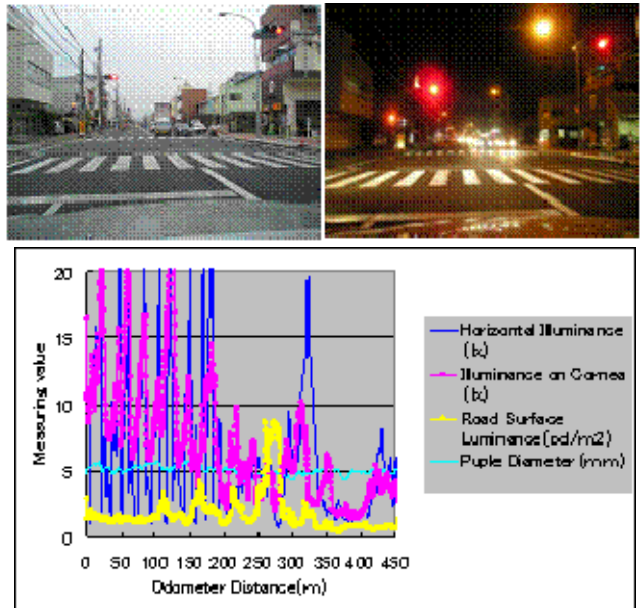


図 2.2.2 交通視環境と瞳孔反応測定結果

2.2.3 実験 2；交差点実験施設

前項の調査は実路で対向車のグレアおよび店舗照明など外乱ノイズが存在する環境下であった。そこで上記のような外乱ノイズが少ない交差点照明下における瞳孔反応を計測することとした。

(1) 実験方法

実験は，国土技術政策総合研究所内・ITS 研究センター交差点事故防止支援実証実験設備で実施した。夜間時における照明状況を図 2.2.3 に示す。この設備は，図 2.2.4 に示すように，片側 2 車線 (車線幅員：3.25m) の道路が交差する実大サイズの交差点である。

道路照明装置は設置基準配置による 4 基と，交差点コーナ部に付加配置した 4 基の計 8 基を配置している。なお，実験車と計測装置は前項に記した車載計測システムを使用した。



図 2.2.3 夜間照明状況

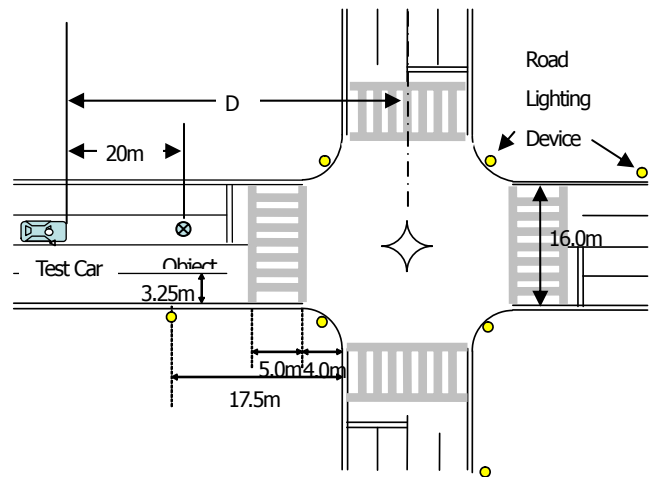


図 2.2.4 実験配置

(2) 実験内容と被験者

視環境計測と瞳孔計測は定点計測と実車走行計測を実施した。

① 定点計測；視環境計測と瞳孔計測は、実験車を図 2.2.4 内に示す $D=-100, -50, -30, -15, 0, 15, 30, 50\text{m}$ に静止させて、定点計測（計測時間は 1 分間）する。なお、計測位置は交差点中心からの距離であり、の負は交差点の手前、正は後方（通過後）である。

② 実車走行計測；上記の定点計測区間を実走し、区間内を連続計測する。

なお、瞳孔計測は被験者 3 名（視力 1.0 以上、内 2 名視力矯正）にて実施した。瞳孔計測時における注視位置は、定点計測では 20m 前方の視標（灰バック）を 1 分間注視するよう指示した。また、走行実験では注視位置の指示は行わなかった。

(3) 定点計測結果

定置観測における被験者 3 名の瞳孔径と路面輝度との関係を図 2.2.5 に示す。縦軸は瞳孔径（mm）及び路面輝度（ cd/m^2 ），横軸は計測位置（m）である。

被験者間で瞳孔径のバラツキは存在するが、路面輝度の増加に伴い、瞳孔径が縮小していく傾向が伺える。

(4) 実車走行計測結果

実車走行は、約 $60\text{km}/\text{hr}$ にて走行し、交差点中央を含む 150m 区間（計測時間に換算して約 9 秒）にしてについて路面輝度と被験者 3 名の瞳孔径を計測した。

被験者 3 名の計測結果はほぼ同じであった。

ここでは結果の 1 例として、定置計測にて路面輝度に最も瞳孔が反応していた学生 A の結果を図 2.2.6 に示す。結果より、走行時には瞳孔径は視環境の変化に追従できていないことが分かった。

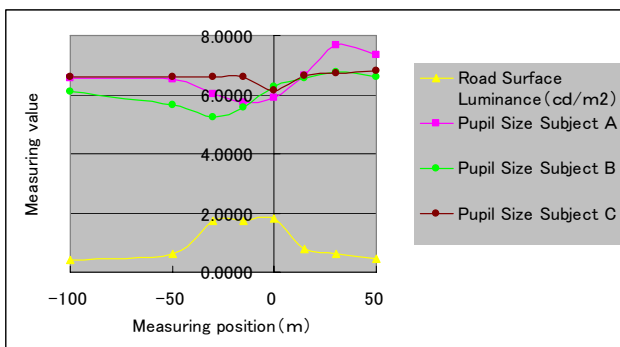


図 2.2.5 定置計測結果

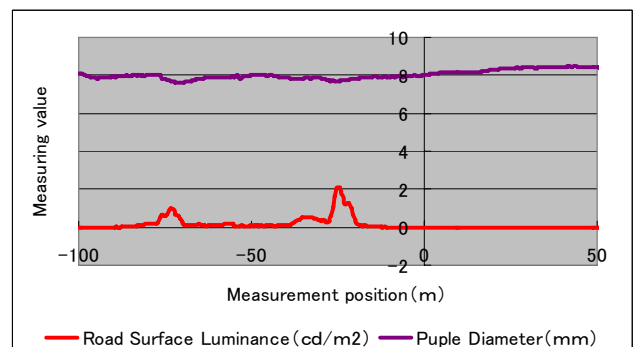


図 2.2.6 走行計測結果（被験者 A）

2.2.4 まとめ

(1) 実道路における交通視環境と瞳孔反応の調査結果

夜間歩行者事故多発地点である横内単路部は、調査地域内で視環境が 2 段階に変化していた。しかし、ドライバ瞳孔径に変化は見られず、歩行者の視認性が急変する可能性があることが分かった。

(2) 交差点実験施設における瞳孔反応の調査結果

対向車のグレアや店舗照明などの外乱ノイズの少ない、交差点実験施設において瞳孔反応調査を実施した。その結果、① 定点計測では瞳孔径は視環境の明るさに対応して変化するが、視環境の変化レベルほどには瞳孔径は変化しない、② 走行時には瞳孔径は視環境の変化に追従していない、ことが分かった。

（文責；(株) 小糸製作所 研究所 小林正自）

参考文献

- 1) 小林正自, 上條正義; 夜間の交通視環境と瞳孔反応に関する研究, 自動車技術会全国大会予稿集, 20075978

2.3 道路照明の視認性に関する研究

道路照明は、安全・円滑な自動車走行の支援として夜間時の視環境を確保するためにあり、特に路面上の障害物の視認が重要な要件である。この基準として道路照明設置基準¹⁾では、路面輝度や均斉度の値を定めている。近年、路上障害物の視認性を評価する方法として、可視度（ビジビリティレベル）が注目されており、実用化に向けての研究が盛んに行われている²⁾。ここでは、その可視度の計算方法と共に、可視度の計算に必要な背景輝度の考え方に関する検討を紹介する。

2.3.1 可視度の考え方

可視度は、路面に存在する障害物の視認性を予測評価するもので、一般に100m先に存在する反射率20%、大きさ20cm×20cmの障害物を運転者が視認できるか否かで評価する。

可視度は式(1)で求め、1.0以上であれば障害物が75(%)の確率で視認できると評価される。

$$VL = |L_b - L_o| / \Delta L_{min} \dots \dots (1)$$

VL：可視度

L_b ：背景輝度 (cd/m²)

L_o ：障害物の輝度

ΔL_{min} ：輝度差弁別閾 (cd/m²)

背景輝度は、一般に図2.3.1のように障害物の背景となるある範囲(例えば円の範囲)の平均輝度や、障害物の後方7mの部分輝度が用いられる。

輝度差弁別閾は、障害物が視認できる背景との最小輝度差 ($L_b - L_o$) である。輝度差弁別閾の求め方には、様々な研究が行われている。例えば、照明学会が提案する図2の輝度差弁別閾カーブ²⁾を用いて、中心窩順応輝度による値(ΔL_{min1})と背景輝度及び等価光幕輝度による値(ΔL_{min2})を合計したもので算出する。

しかし、可視度の算出における背景輝度の考え方には大きな問題点がある。道路照明器具の配置が連続的ではない場合や交差点など

では背景輝度が不均一となり、計算、実測ともに背景輝度を定量化することが難しい。

2.3.2 背景輝度の定量化

背景輝度の定量化については、中村³⁾が複雑な輝度分布においても背景輝度や輝度対比を特定できるNフィルタを使ったコントラストプロファイル法(以降Nフィルタとする)を提案し、主に屋内環境の輝度分布を評価した研究を数多く報告している。ここでは、Nフィルタを利用して、道路照明での背景輝度の定量化に関する検討を紹介する。

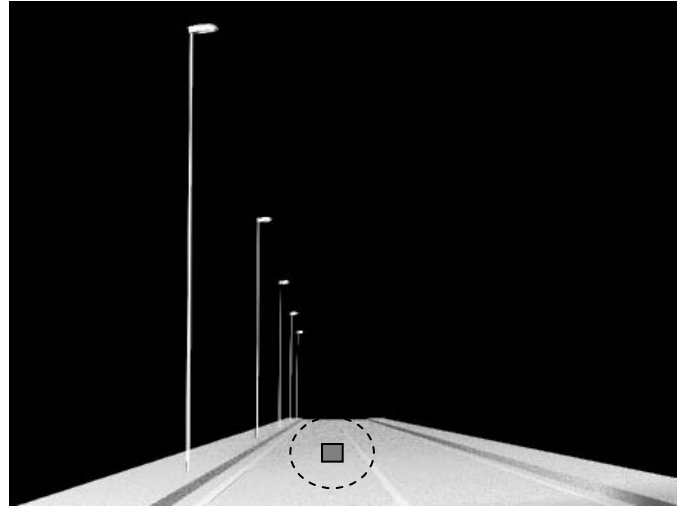


図 2.3.1 障害物と背景

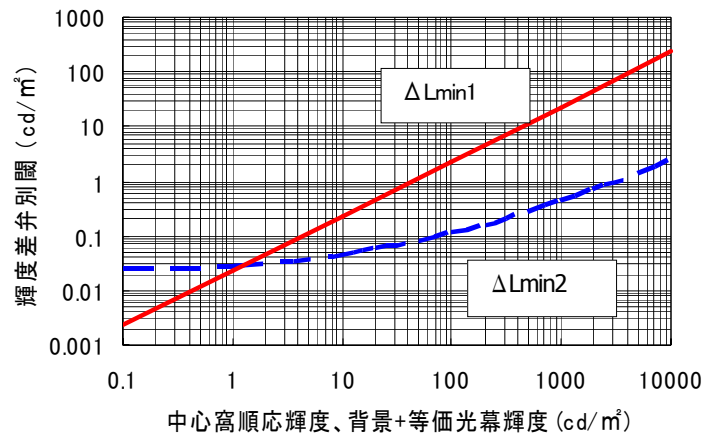


図 2.3.2 輝度差弁別閾カーブ

表 2.3.1 検討条件

	トンネル照明	交差点照明
測定場所	つくば実大トンネル	自社の交差点実験施設
輝度分布	比較的均一な背景	複雑な背景
設計輝度	1.0(cd/m ²)	1.0(cd/m ²)
視標	20×20(cm)の障害物	横断歩行者
輝度対比データ	n=28 ①輝度計による実測値 (上下左右の4点法) ②写真測光法 +N フィルタ	n=73 ①輝度計による実測値 (上下左右の4点法) ②写真測光法 +N フィルタ
印象評価	被験者 10 名	被験者 19 名

背景輝度が比較的均一といえるトンネル内と、背景輝度が複雑である交差点において、表 2.3.1 に示す条件で視標に対する輝度対比が計測された。この時の背景輝度は、視標の上下左右の 4 点を実測（4 点法）により求める方法と、画像から N フィルタにより算出する方法で求められた。次に、輝度対比データと表 2.3.2 の評価カテゴリを用いて実施された視標の見え方評価結果との関係を示す。

表 2.3.2 評価カテゴリ

5	非常に良く見える
4	良く見える
3	まあまあ見える
2	かろうじて見える
1	見えない

(1) 輝度分布が均一な場合

輝度計による輝度対比の実測値と N フィルタによる輝度対比の比較を示した図 3 より、輝度分布が均一な場合においては、両者とも概ね同じ結果が得られることがわかる。輝度計による輝度対比の実測値と印象評価の関係（図 4）と、N フィルタによる輝度対比と印象評価の関係（図 5）より、両者とも輝度対比と印象評価の相関が概ね良好であると思われる。

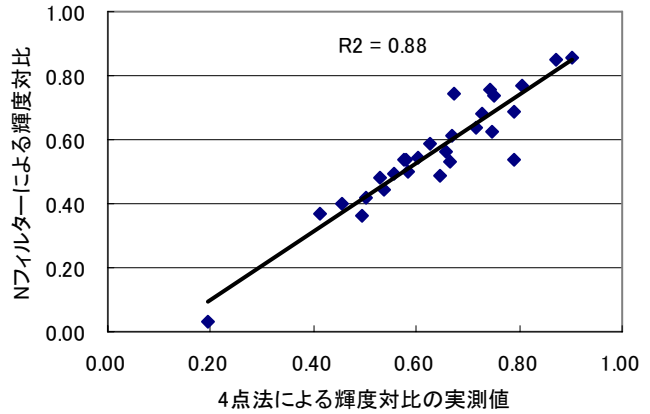


図 2.3.3 輝度対比の比較

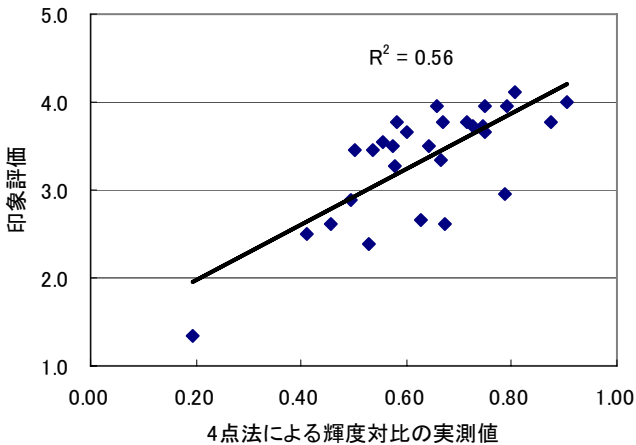


図 2.3.4 輝度対比の実測と印象評価

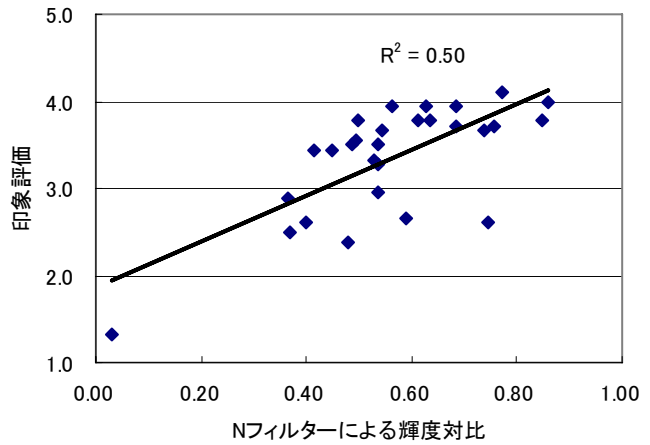


図 2.3.5 N フィルタの輝度対比と印象評価

(2) 輝度分布が複雑な場合

輝度計による輝度対比の実測値と N フィルタによる輝度対比は、図 2.3.6 より、輝度分布が複雑な交差点照明においては大きな相違があることがわかる。視標の輝度は両者とも同値なので、背景輝度の値の差が要因であると言える。輝度計による輝度対比の実測値あるいは N フィルタによる輝度対比と印象評価との関係は、図 2.3.7、図 2.3.8 より、4 点法による輝度対比は相関が低く、N フィルタによる輝度対比は印象評価との相関が良好であることが分かる。

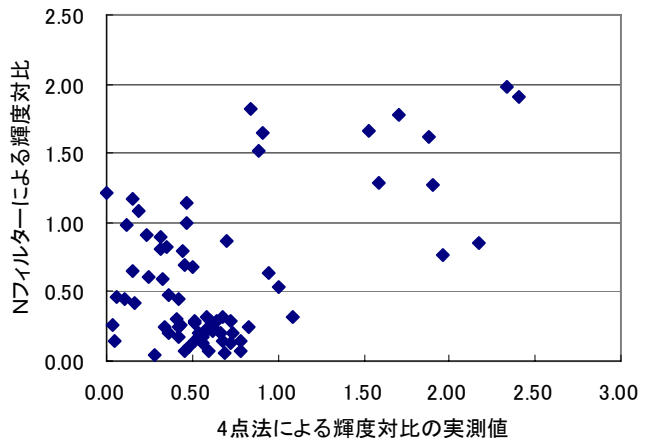


図 2.3.6 輝度対比の比較

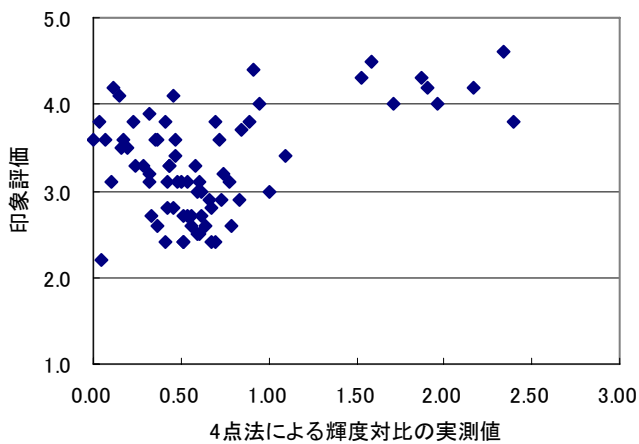


図 2.3.7 輝度対比の実測と印象評価

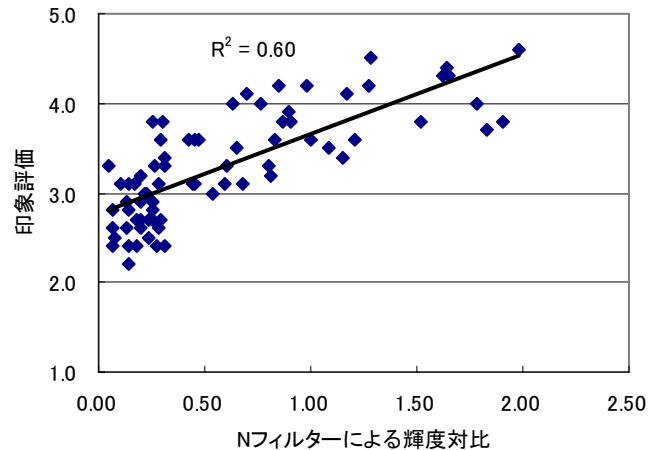


図 2.3.8 N フィルタの輝度対比と印象評価

以上より、N フィルタを利用することによって、輝度分布が均一な場合だけでなく、複雑な場合においても、輝度対比を定量化できることが確認された。これにより、可視度の問題点であった背景輝度の定量化が可能となり、道路照明の視認性の評価方法に大きく寄与できると思われる。

(文責；岩崎電気 (株) 技術研究所 江湖俊介)

参考文献

- 1) 道路照明施設設置基準・同解説, (社) 日本道路協会, 2007
- 2) 道路照明のビジビリティレベルに関する調査研究委員会報告書, (社) 照明学会, 2002
- 3) 中村芳樹：光環境における輝度の対比の定量的検討法, 照明学会誌, PP.522-528, 2000
- 4) Y.NAKAMURA : Method to Obtain Luminance Contrast between a Visual Target and the Non-uniform Background, Luxpacifica2005(2005)

2.4 精神的作業負荷の瞳孔径変化に与える影響について

(1) 調査目的

瞳孔径は外光の影響によって変化するだけでなく、自律神経系の影響を受けて⁽¹⁾、興味、不安、思考などの精神作業によって変化することが知られている^(2~5)。このことを利用すれば、ドライバの情報処理時の精神的作業負荷のレベルを瞳孔径の測定により推定できる可能性がある。従って、室内でのドライビングシミュレータ (DS) を用いた模擬走行において、15名 (平均年齢 32.3 歳, SD5.4 歳) の被験者を用いて評価実験を行い、精神的作業負荷課題として、暗算課題、3文字単語を逆さ読みに再生させる課題、4文字単語を逆さ読みに再生させる課題の3種類を与えてそのときの瞳孔径変化を調べた⁽⁶⁾。

(2) 実験概要

DS の走行道路は高速道路を模擬しており、100m 前方に先行車両を 100km/h で走行させ、被験者 (ドライバ) には車間距離を保ちつつ追従するように指示をした。

被験者に対して以下の3種類の精神的作業負荷を与えた。

- ① 0～9までの1桁の数字をパソコンから音声により伝え、被験者にその数字から3を引いた値を回答させる (暗算課題)
- ② 3文字の単語をパソコンから伝え、被験者にその単語を逆さに回答させる (3文字課題)
例「ごりら」に対して「らりご」
- ③ 4文字の単語をパソコンから伝え、被験者にその単語を逆さに回答させる (4文字課題)
例「ねくたい」に対して「いたくね」

暗算課題については、著者らがこれまでに実施してきた各種の評価実験で使用してきた副次的課題である。単語を逆さに回答させる課題については、言語処理に関する負荷を調べるために採用したものである。

(3) 実験結果

3文字課題の場合の例を図 2.4.1 (被験者 G) に示す。図中の縦線は、課題の呈示終了時点 (図中左側部分) と、回答終了後のキュー信号入力時点 (図中右側部分) を示す。ただし、この回答終了後のキュー信号 (図中右側部分) は、手動によるボタン押下により入力しているため厳密な回答終了時とは異なり、参考としての値である。図 2.4.1 をみると、課題呈示時から瞳孔径は拡大し、回答終了後に徐々に縮小していることがわかる。

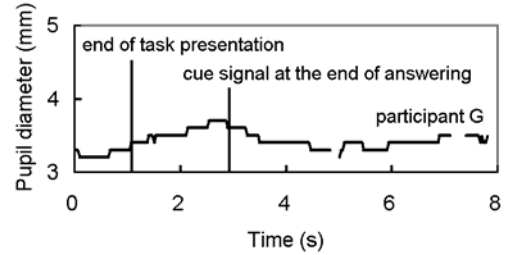


図 2.4.1 瞳孔径変化の一例
(3文字課題)

つぎに、各時刻の瞳孔径に関して、各被験者ごとに各実験条件における平均を求める。そのデータに関して、課題呈示開始時刻における瞳孔径の平均を用いて各時刻の瞳孔径を除して正規化する。この正規化した瞳孔径について、15名の被験者の結果例を図 2.4.2 の細線で示す (3文字課題の場合)。また、その 15名の正規化瞳孔径の平均を太線で図中に示す。図中の縦線は、その太線で示される瞳孔径について、課題呈示終了時点の平均 (図中左側部分) と、回答終了後のキュー信号押下時点の平均 (図中右側部分) を示す。図 2.4.2 の太線にみられるように、瞳孔径の変化状況が明確に認められ、最大で約 10%瞳孔径が拡大した。

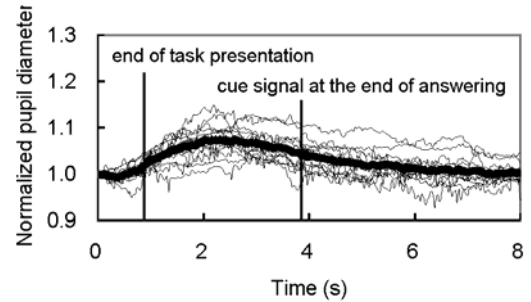


図 2.4.2 正規化瞳孔径の平均化処理結果
(3文字課題)

(4) 考察

実際に屋外を運転する場合には、外光の条件が一定ではないため、瞳孔径はそれに応じて変化することが予想される。そこで、夜間時に対向車とすれ違う場合の運転者の瞳孔径の変化について測定した例を示す。

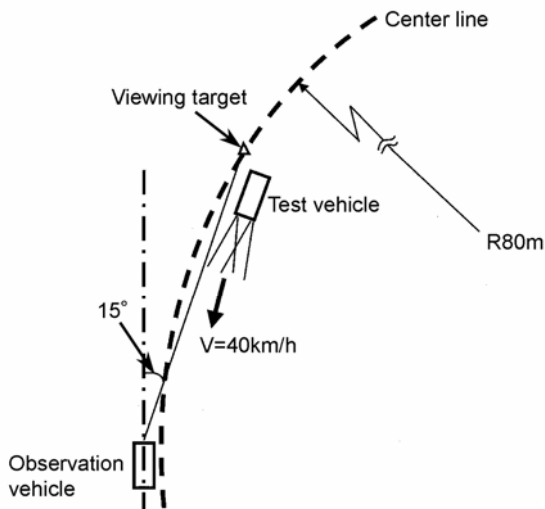


図 2.4.3 実験条件レイアウト

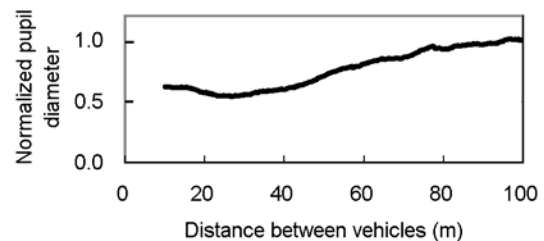


図 2.4.4 すれ違いビーム点灯車両が
接近する場合の正規化瞳孔径の変化

図 2.4.3 に示すように半径 80m のカーブを対向車 (放電灯タイプのすれ違いビームを点灯) とすれ違う場面を想定した⁽⁷⁾。テストコース上で被験者の乗車した車両は停車しており、対向車が 40km/h の速度で接近した。車間距離 100m (カーブにそって測定) のときの運転者 (被験者) の瞳孔径を基にして、接近するさいの時々刻々の瞳孔径をその値で除して正規化した。被験者は 6 名 (平均年齢 27.7 歳, SD4.9 歳) であり、各被験者の正規化瞳孔径の 6 名による平均を求めた (図 2.4.4)。ここで、図中の横軸に関しては、右側から左に向かい時間が経過していることとなる。この図から、正規化した瞳孔径の平均については、対向車の前

照灯の影響により 0.54 程度まで縮小 (46%の低下) することがわかった。

(5) まとめ

精神的作業負荷によって瞳孔径は変化するものの、その変化量は約7~10%であり、外光の影響はそれ以上に大きい。従って、環境の明るさを一定に保つことが可能な室内実験では瞳孔径変化の測定によって精神的作業負荷を推定できる可能性があると考えられる。

(文責 ; (独) 交通安全環境研究所 自動車安全研究領域 森田和元)

参考文献

- 1) 大野新治 ; 瞳孔と加齢, 眼科, 41, pp.31-39, 1999
- 2) 松永勝也 ; 瞳孔運動の心理学, 149p, ナカニシヤ出版, 1990
- 3) Timo Partala, Veikko Surakka ; Pupil size variation as an indication of affective processing, International Journal of Human-Computer Studies, 59, pp.185-198, 2003
- 4) Von Peter Rößger, Mattbias Rötting, Pieter Unema: Experimentelle Untersuchung zum Einfluß von Leuchtdichteveränderungen und mentaler Beanspruchung auf den Pupillendurchmesser, Z Arbetiwiss, Vol.47, No.3, pp.141-147, 1993
- 5) 高橋功次, 中山実, 清水康敬 : 計算課題が瞳孔面積と視標追従時の視点移動に及ぼす影響, 電子情報通信学会論文誌, D- I, Vol.J84-D- I, No.11, pp.1573-1576, 2001
- 6) 森田和元, 小幡和紀, 関根道昭, 岡田竹雄, 益子仁一 : 瞳孔径変化測定による心理的負荷推定の可能性, 自動車技術会学術講演会概要集 No.11-05, pp.5-10, 2005
- 7) 岡田竹雄, 森田和元, 益子仁一, 関根道昭 : カーブ走行時における A F S のグレアに関する評価実験, 自動車技術会学術講演会前刷集 No.69-03, pp.5-8, 2003

2.5 不均一環境下における輝度差弁別閾¹⁾

(1) はじめに

輝度対比弁別閾 (以下, Cth) の測定は, 多くの研究が行われてきたがそのほとんどが, 均一背景輝度によるものであり, この Cth を用いて実環境の視認性が評価されている。しかし, 実環境では均一な背景輝度は皆無であり, 様々な分布を持っている。本研究では, 不均一な背景輝度における Cth を求め, 実照明環境の視認性を評価できる手法の開発を目的としている。本稿では, 我々が提案した Cth を簡易に測定できる動視標法[1]を用いて図 2.5.1 に示す背景における Cth を測定した。その結果, 背景に対する視標の提示位置により, Cth が異なることが明らかになった。

(2) 実験概要

背景と視標は, LabVIEW で作成し, CRT ディスプレイ (Procalix:TOTOKU)上に表示した。視標サイズは 10[min]の正方形とした。背景は, 自動車の前照灯を想定したグラデーション状とした (図 2.5.1)。背景上部の最も暗い位置で 0.05[cd/m²], 下部で最も明るい部分で 1.5[cd/m²]とした。被験者は十分背景面に順応した状況にて実験を行った。視標提示位置は図 2.5.1 に示す位置に提示した。背景輝度については, deg-1 から deg2 の位置では 0.05[cd/m²], deg3 は 0.38[cd/m²], deg4 については 0.69[cd/m²]とした。視標を水平方向に往復運動させると同時に, 視標の輝度を背景輝度に徐々に近づくように提示した。被験者には視標を目で追従させ, その際の眼球運動を, 眼球運動の測定手法である EOG (Electro-oculography) 法で測定し, 視標を見失った点から弁別閾を測定した (動視標法)。ディスプレイと被験者との距離は 1mとした。被験者は大学生男女 5 名で, 各条件 3 回ずつ測定を行い, それらの結果を平均して Cth を算出した。

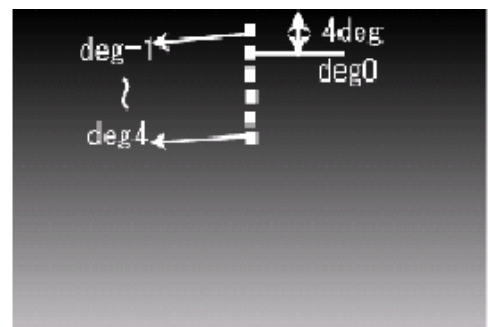


図 2.5.1 自動車の前照灯を想定した背景面

(3) 実験結果および考察

実験結果を図 2.5.2 に示す。

視標提示位置 deg-1 から deg2 についてはいずれの位置も、背景輝度が $0.05[\text{cd}/\text{m}^2]$ で背景面の中では暗部であるが、背景面下側の明部に近い位置ほど Cth は高くなっていき、見にくくなる傾向があった。これは背景面の下側の背景輝度が高い部分が、グレア光源となり、視標の知覚を妨げたためだと考えられる。また、背景輝度が $0.38[\text{cd}/\text{m}^2]$ の deg3, $0.69[\text{cd}/\text{m}^2]$ の deg4 の視標提示位置については、背景輝度が高いために Cth は低く、暗部に比べて見やすいことが明らかになった。これらの結果より、人間の視覚特性を反映させたより視認性の高い照明の実現には、均一な背景輝度での Cth では不十分であり、実際の背景輝度での Cth による評価が必要であることが確認された。

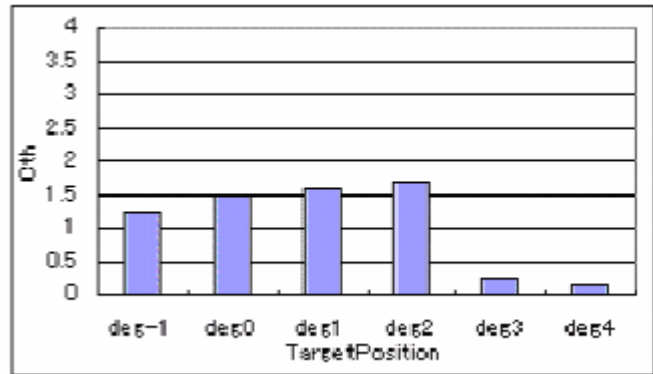


図 2.5.2 視標提示位置ごとの Cth

(文責；信州大学大学院 総合工学系 上條正義)

参考文献

- 1) 北澤達磨, 上條正義, 佐渡山亜兵, 小林正自 ; 動視標法による輝度分布背景における輝度対比弁別閾の測定, 第 38 回照明学会全国大会講演論文集, 2005

2.6 自己存在空間と観察空間での空間の明るさ判断の比較

2.6.1 はじめに

我々はある空間がどの程度の明るさかという判断を常にしており、明るさは空間照明設計の重要な要因である。従来までも空間の明るさに関する研究は多く実施されているが、小型な模型装置を用いて観察しながら行うことが多い。しかし、窓を通して観察するような空間（観察空間と呼ぶ）の明るさ判断が、自分が存在する空間（自己存在空間と呼ぶ）の明るさ判断と同様に判断されるのだろうか。そこで、自己存在空間と観察空間の明るさを各々測定し、比較検討した。また、空間内壁面の明度が空間の明るさ判断に影響を与えることは既存研究^{1), 2)}により報告されている。そこで、内壁面の明度の影響も検討した。

2.6.2 実験

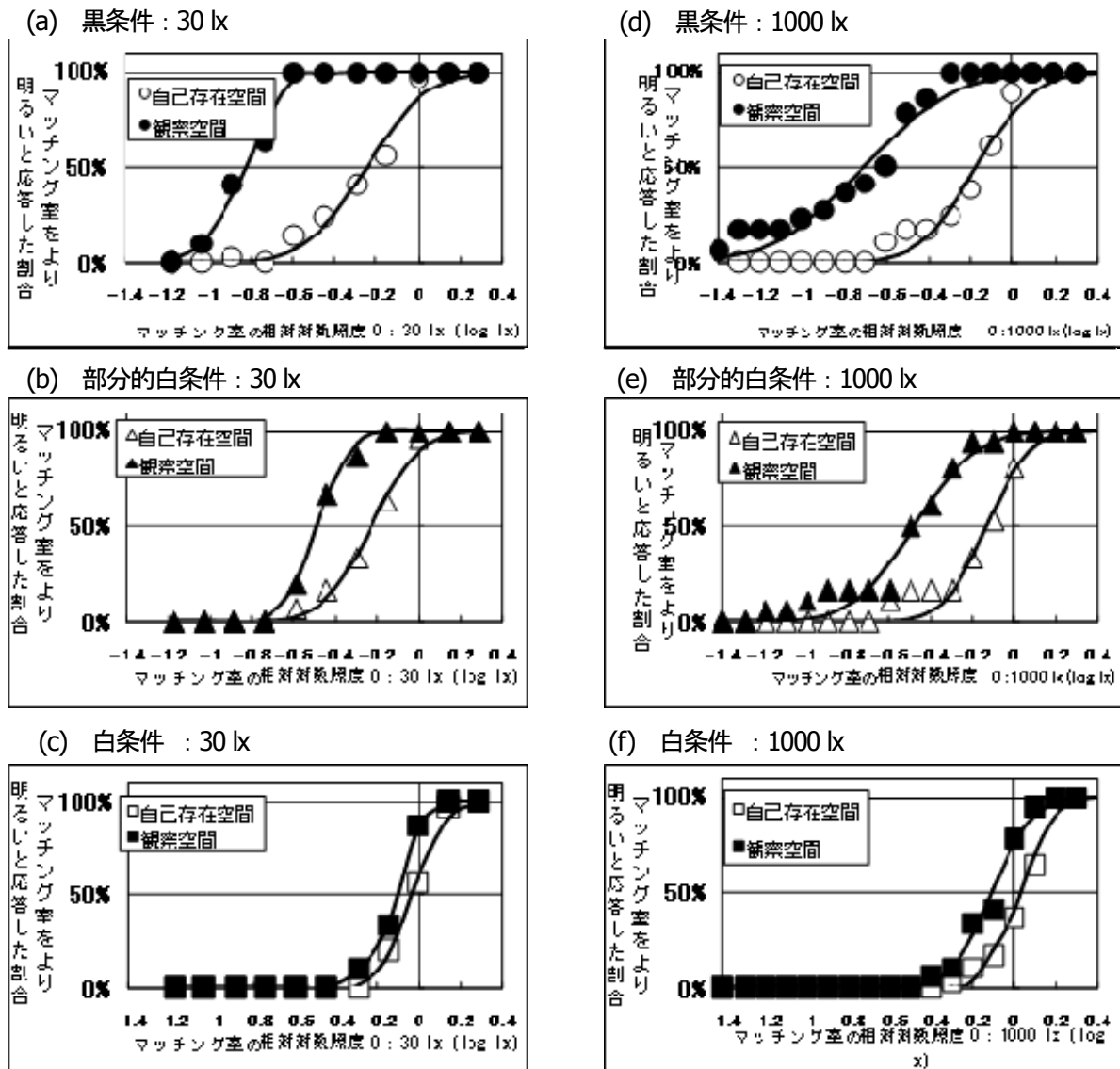
空間の明るさ判断のためのテスト空間としてテスト室 A・B（各々 210cm の立方体）を作成し、テスト空間の明るさの測度として、テスト室 A・B とは別の参照空間（マッチング室と呼ぶ）を作成し、その明るさを用いた。被験者がテスト室 A に入り、テスト室 A の明るさを判断する自己存在空間条件と、ほぼ暗黒にしたテスト室 A から小窓を通してテスト室 B を観察し、テスト室 B の明るさを判断する観察空間条件の 2 条件で実験を行った。マッチング室はテスト室 A の別の小窓からのみ観察できる。実験方法は、マッチング室の照度を変化させ、恒常法を用いてテスト室（A 又は B）と等しい明るさとなるマッチング室の照度を決定した。その時、テスト室 A・B の照度は床面で 30 lx 及 1000 lx に設定した。加えて、テスト室 A 及びテスト室 B の内装は、空間内壁面の明度の影響を検討するため、3 つの視環境条件になるようにした。内壁面の明度が非常に低い (N2.0 相当) 条件、その条件に A4 版の N9.5 の紙 1 枚を置いた条件、内壁面の明度が非常に高い (N9.0 相当) 条件の 3 種である。これ以降各々を黒条件、部分的白条件、白条件と呼ぶ。

床面照度 30 lx での実験では 5 人、床面照度 1000 lx での実験では 6 人の被験者で実験を行い、1 条件に対して 6 セッションずつ行った。

2.6.3 結果

横軸の各点において、全被験者の全応答における「マッチング室がより明るい」応答の割合をプロットしたのが図 2.6 である。各プロット点において、白抜きで示された点は自己存在空間条件での結果であり、黒で示された点

は観察空間条件での結果である。図 2.6 の設定照度が 30 lx において、部分的白条件から白条件となるに依り、自己存在空間と観察空間の差が減少していく。図 2.6 の設定照度が 1000 lx においても、図 2.6 と同様に自己存在空間と観察空間で違いが見られたのは、黒条件であった。そして、部分的白条件でその差は減少するが、白条件では床面照度 30 lx の条件に比べて差の縮まりは顕著ではなかった。このように、図 2.6 の設定照度が 30 lx 及び 1000 lx において、内壁面の明度の影響を大きく受けるのは観察空間であること、また内壁面による影響は照度に関わらず同様の傾向を示すことが明らかとなった。



2.6.4 まとめ

本研究では、ある照明された空間において、被験者がそこに存在する場合の明るさ判断と被験者が外部から小窓を通してその空間を観察する場合の明るさ判断を、3 種の内装条件において比較検討した。その結果、自己存在空間及び観察空間各々において、内装の明度は空間の明るさ判断に影響し、高明度では設定照度よりも明るく、低明度では暗く判断されることが示唆された。また内壁面が低明度でも A4 サイズ 1 枚の白色表面があると空間の明るさ評価が上がり、設定照度により近い値となった。

自己存在空間と観察空間の比較においては、内壁面が高明度の場合は空間の明るさ評価がそれほど変化しないが、内壁面が低明度になると観察空間条件でより暗いと評価していることが示唆された。

照明設計における応用としては、例えばコリドールにおける小ウィンドウディスプレイの照明や内装に適用できる。その内壁面を比較的高明度に設定しないと予想以上に暗い空間に知覚されてしまう可能性があるため注意が必要

要である。逆に暗く感じさせたい場合は内装を低明度にするのは効果があることになる。

図 2.6 テスト室を床面照度 30 lx (a),(b),(c)及び 1000 lx (d),(e),(f)に設定した時の各視環境条件別の明るさ判断

(文責；宇都宮大学大学院工学研究科 江田哲也)

参考文献

- 1) 池田,金子；照明認識視空間への初期視覚情報の影響 —明度と彩度の場合—, 照学誌, 第 80 卷, 第 5 号, 1996
- 2) Y. Mizokami, M. Ikeda and H. Shinoda ; Lightness change as perceived in relation to the size of recognized visual space of illumination, Opt. Rev., 5-5, pp.315~319,1998

2.7 カメラを利用した輝度分布測定¹⁾

輝度測定は一般に輝度計を使用するが、輝度分布の測定を行う場合、複数箇所の輝度を何度も測定しなければならず、時々刻々と輝度分布が変化する対象を測定することは非常に困難である。これに対し、カメラを利用した輝度測定では、広い視野の測定が可能であり動的な対象の輝度分布を簡単に測定することができる。本節では、カメラを用いた輝度分布測定、測定にあたっての留意点等について紹介する。

(1) カメラを用いた輝度分布測定の特長

表2.7.1に輝度計とカメラを用いた輝度測定の比較を示す。カメラを用いて輝度分布測定を行う最大の特長は、広い視野の輝度分布を測定できることや、擬似カラー表示など輝度を数値ではなく視覚的に捉えることが可能なことである。また、輝度計は1〜数秒間の平均値を出力するため移動体や移動しながらの測定は困難であるが、カメラによる測定では映像を元にして測定を行えるため、極端に速い対象でなければ移動体の測定も可能となる。

しかし、測定精度（測定確度）は輝度計が±数%程度であるのに対し、カメラによる測定では数十画素程度の平均値で±10%程度となる。また、ダイナミックレンジも、輝度計が約140dBであるのに対し、カメラは60〜100dB程度である。さらに、カメラは対象が低輝度の場合、ノイズの影響を無視できなくなるため、低輝度測定には限界がある。

表2.7.1 輝度計とカメラを利用した輝度測定の比較

項目	輝度計	イメージセンサ
測定視野	1度, 0.2度など	30度など広範囲 (レンズにより選択可能)
測定精度	±数%	±10%
ダイナミックレンジ	約140dB	60~100dB
移動体の測定や移動しながらの測定	できない	録画した動画を処理できるので可能

(2) カメラを利用した輝度測定の留意点

- 1] 視感度補正；カメラで使用している撮像素子は、人間の目と異なる分光感度特性を有する。また、レンズも分光透過率特性を持つため、そのまま撮影しても輝度測定はできない。そのため、「レンズ」+「イメージセンサ」+「視感度補正フィルタ」＝「人間の目」となるように、出力が人間の目の感度特性と一致させる補正フィルタが必要となる。
- 2] 光源のフリッカ；直流点灯の照明光や、カメラの露光時間に対して周波数が十分早い高周波点灯の蛍光ランプ等ではフリッカの問題は生じない。しかし、電源の商用周波数で点灯するHIDランプや蛍光ランプでは、露光時間によって蓄積する光量が異なるため注意が必要となる。一般に発光周波数の整数倍で露光すれば、どんなタイミングで露光を開始しても露光量が一定となるため、測定値は変動しない。

3] 周辺減光；カメラを利用した輝度測定では，中心部に比べ周辺部が暗くなる。そのため，仮に均一な発光面を測定しても，周辺の輝度値が低く算出されてしまう。正しく測定を行うためには，画面中の画素の位置に応じた出力レベルの補正が必要となる。

(3) まとめ

カメラを利用した輝度測定を行うことで，輝度計では困難だった輝度分布を簡単に測定できる。また，動画表示などにより従来とは違った視点で視環境を評価することが可能となる。今後は測定対象や目的に合わせて輝度計とカメラを利用した輝度測定を使い分け，視環境を総合的に評価していくことが重要であると考えられる。

(文責；小糸工業 (株) 研究開発部 藤波研次)

1) 小平恭宏；イメージセンサを用いた輝度分布測定，照明学会誌，第91巻，第4号，pp.228-231，2007年

2.8 火災環境下での視認性と避難者行動との関係¹⁾²⁾

2.8.1 はじめに

火災時の避難経路は停電や煙の伝搬により視認性が大きく低下し，それに伴い避難者の歩行速度に影響する。非常灯の非常点灯時は直下床面照度 $1[\text{lx}]$ 以上確保することが定められているが，これは歩行空間の床面照度と歩行速度に関する既往研究³⁾に基づいている。しかし一方，被験者の属性（年齢）が変われば同じ照明下であっても歩行速度が変わる知見もある⁴⁾。視認性は照明や視対象の状態及び人間の視認能力によって決定されるため，避難経路の歩行速度を予測するためにはこれらを網羅する必要がある。そこで本節では実大歩行空間を用いて，火災煙を含む様々な光環境下で視認能力の異なる被験者の歩行速度を測定し，歩行空間の視認性に応じた歩行速度の予測式を構築した。

2.8.2 実験概要

実験空間は高さ $1.77 \times$ 幅 $1.77[\text{m}]$ の大きさで，内装反射率 0.427 の順応室（長さ $5.58[\text{m}]$ ）・歩行空間（ $18.48[\text{m}]$ ）・評価室（ $3.72[\text{m}]$ ）の3室からなる。順応室と歩行空間の照明は各々調光でき，歩行空間の室中央（歩行位置）の照度分布はほぼ一様である。歩行空間に $3[\text{m}]$ 間隔で設置された赤外線センサで通過時間を自動計測する。また床面とほぼ同等の反射率の大小立方体（一辺 $5[\text{cm}]$ と $10[\text{cm}]$ ）を歩行空間 $1.5[\text{m}]$ 間隔に設置し，視認性の手がかりとする。視認能力を実験変数とするため，年齢の異なる高齢者 30 名（平均 70.2 ± 3.3 才）と若齢者 30 名（平均 24.9 ± 5.1 才）の被験者で実験を行う。歩行空間の床面照度 E_t は $0.03 \sim 100[\text{lx}]$ に設定する。被験者の順応状態は，歩行空間の床面照度に完全に順応した定常状態（順応室床面照度 $E_a = E_t$ ）と，順応過渡過程の非定常状態（順応室との照度変化率 $E_a/E_t = 1 \sim 10000$ ）を設定する。順応室での順応時間はいずれも 2.5 分間とし，非定常状態は歩行空間の視認性が悪い $0.03 \sim 1[\text{lx}]$ について行う。更に歩行空間内に煙発生装置を設置し（煙濃度平均 $0.68[1/\text{m}]$ ）定常順応状態と同じ照明条件下で実験を行った。

2.8.3 歩行空間での視認能力

歩行時照明環境下での視認能力は，内装反射率 0.93 の均一視野輝度空間で 1.5m 視距離用のランドルト環視力表（輝度対比 $C0.94$ 背景反射率 0.70 ）を用いて正答率 0.8 となる視力を採用した。実験で求められた二つの年齢層の背景輝度 L と視力 VA の関係式を式 2.8.1 に示す。式の係数 α は各年齢層によって異なる。

$$VA = \alpha \times (\log_{10} L + 1.85) \quad \text{但し } \alpha_{\text{aged}} = 0.17, \alpha_{\text{young}} = 0.34 \quad \text{式 2.8.1}$$

2.8.4 定常順応状態での歩行速度の予測

定常順応時は歩行空間の移動距離に対応した歩行速度の変動が見られないので，移動距離毎の結果を平均して年齢層毎に取り扱う。図 2.8.1 に床面照度と歩行速度の関係を，図 2.8.2 に視力と歩行速度の関係を示す。なお歩行空間床面と視力表の反射率がそれぞれ異なるので，歩行空間の反射率と照度から輝度を換算し同一輝度値での視力 VA （但し輝度対比 $C=0.94$ ）と歩行速度を対応させた。図 2.8.1 で見られた年齢層による違

いが図 2.8.2 では見られなくなり、歩行速度と視力には年齢層に関わらず共通した関係が成立する。定常順応状態での歩行速度 v_o [m/s] と視力 VA の関係は式 2.8.2 (相関係数 $R^2=0.91$) で表すことができる。

$$v_o = 1.53 \times VA^{0.12} \quad (VA < 0.3), \quad v_o = 1.32 \quad (VA \geq 0.3) \quad \text{式 2.8.2}$$

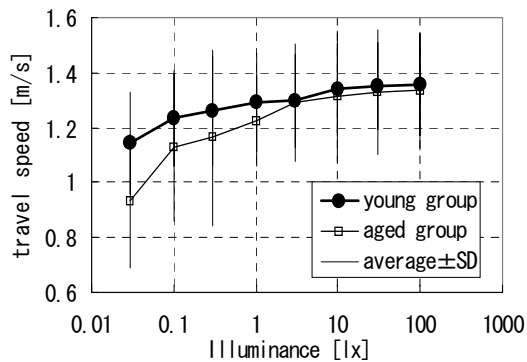


図 2.8.1 床面照度と歩行速度

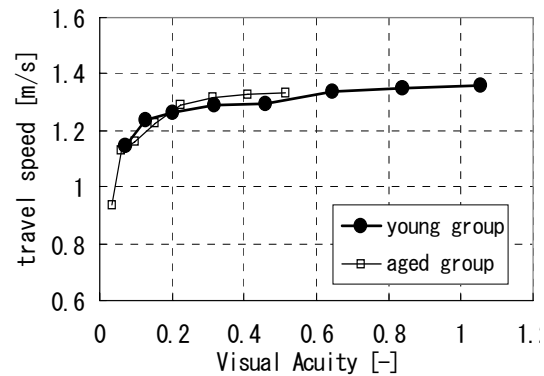


図 2.8.2 視力表面照度と視力

2.8.5 非定常順応状態での歩行速度の予測

順応過渡過程の影響が最も抽出しやすい歩行空間入室直後(1~3[m]の区画)での、歩行空間の床面照度 E_t [lx]・順応室照度 E_a との照度変化率 ($RE_a = E_a/E_t$)、および定常順応状態の歩行速度 v_o [m/s]に対する非定常順応状態の歩行速度 v_i [m/s]の比率 (順応速度比 $Rv_a = v_i/v_o$) の結果 (高齢者) を図 2.8.3 に示す。定常順応状態では順応速度比が 1 になることに対し、非定常順応状態の順応速度比は、歩行空間の照度が低く順応室との照度変化率が大きいほど低下する傾向が見られる。歩行空間床面照度下での視力 VA (但し輝度対比 $C=0.94$)、照度変化率および順応速度比の相互関係を図 2.8.4 に示す (両年齢層の結果を含む)。 $RE_a = 10$ では順応速度比が 1 になると考えられ、また $RE_a = 100$ 及び 1000 の時には図中の回帰式で表される。最終的に非定常順応状態の歩行速度 v_i は式 2.8.3 で表され、この時 v_o は前出式 2.8.2 を用いる。

$$Rv_a = 1.12^{(\log_{10} RE_a - 1)} \times VA^{0.08(\log_{10} RE_a - 1)} \quad (RE_a > 10 \text{ and } VA < 0.3), \quad Rv_a = 1 \quad (RE_a \leq 10 \text{ or } VA \geq 0.3) \quad \text{式 2.8.3}$$

$\therefore Rv_a = v_i/v_o, RE_a = E_a/E_t$

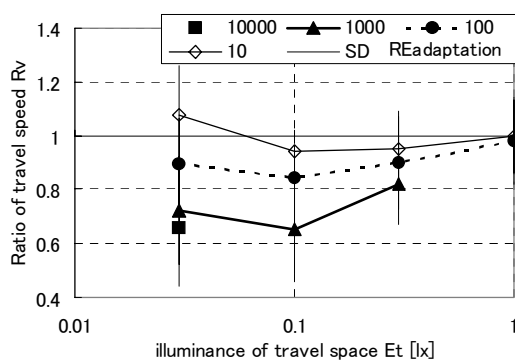


図 2.8.3 順応環境と歩行速度の関係 (高齢者)

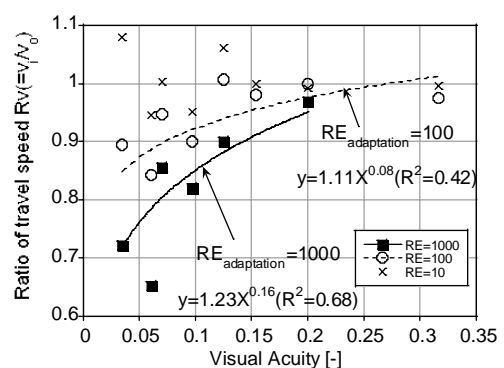


図 2.8.4 非定常順応時の視力と歩行速度の関係

2.8.6 煙環境下での歩行速度の予測

空間内に煙が有る場合の方が、煙がない場合に比べて歩行速度が低下する (図 2.8.5)。同一照度条件 (定常順応状態) での煙がない場合の歩行速度 v_o [m/s]に対する煙が有る場合の歩行速度 v_s [m/s]の比率 (煙速度比 $Rv_s = v_s/v_o$) を縦軸に取り、歩行空間の視力 VA (但し輝度対比 $C=0.94$) との関係を示したものが図 2.8.6 である。煙速度比と視力には年齢に関わらず共通した関係式 2.8.4 が成立する。但しこの式は煙濃度が 0.68 [1/m]の時の結果であり、今後は煙濃度の変数を式に組み込む必要がある。

$$Rv_s = 0.97 \times VA^{0.12} \quad \therefore Rv_s = V_s / V_o \quad \text{式 2.8.4}$$

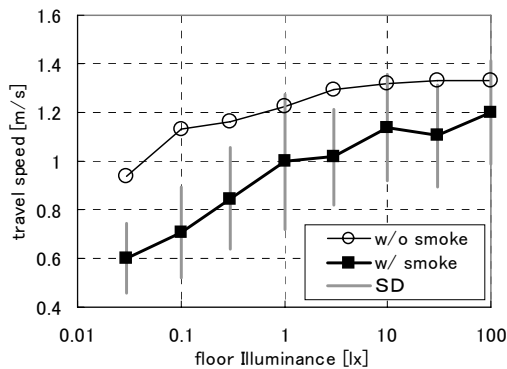


図 2.8.5 煙中の床面照度と歩行速度の関係（高齢者）

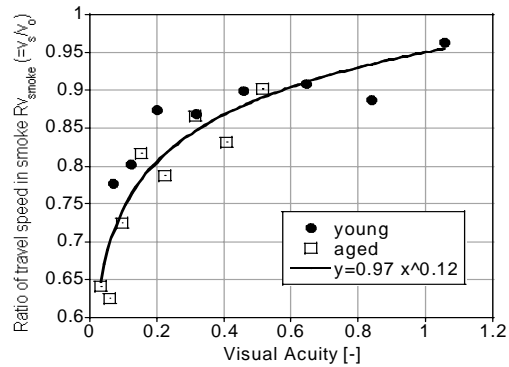


図 2.8.6 煙中の視力と歩行速度の関係

（文責；富山大学 人間発達科学部 秋月有紀）

参考文献

- 1) 秋月有紀, 山尾耕平, 田中哮義; 災害時避難経路の視認性と避難歩行速度に関する実験的研究その1 様々な光環境下での歩行速度の予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp.279-280, 2007
- 2) Yuki Akizuki, Takeyoshi Tanaka and Kohei Yamao ; Experimental Study for Walking speed in Escape route considering Luminous Condition, Smoke Density and Evacuee' Visual Acuity, Proceedings of the 7th Asia-Oceania Symposium on Fire Science & Technology.
- 3) R.C. Simmons ; Illuminance, diversity and disability glare in emergency lighting , Lighting Research and Technology, Vol.7, No.2, pp.121-132, 1975
- 4) Wolfgang Jaschinski ; Conditions of emergency lighting, Ergonomics, Vol.25, pp.363-372, 1982

2.9 自動車運転場面における視覚的注意特性¹⁾

2.9.1 背景・目的

本研究は、多様化・複雑化を増す交通問題の中で、ますます重要性を増す自動車事故問題に関し、心理学研究でいう人間の視覚的注意及び視覚的短期記憶特性の観点からスポットライトを当てたものである。

近年、知覚・認知研究領域で多岐に渡る研究報告がなされている、変化の見落とし(Change blindness; 以下、CB)現象を指標として自動車運転場面における視覚的注意特性を検討した。以下では、自動車事故と視覚的注意の相関及び、CB現象を概説する。

- 1) 自動車事故と視覚的注意：自動車事故要因として、最も高い割合を占めるのが前方不注意である。この中には、脇見運転と漫然運転が含まれる。脇見運転は本来向けるべき対象から注意がそれる注意の転導である。漫然運転は心理的・生理的要因による覚醒レベルの低下であり、いわゆる不注意である。即ち、脇見運転は意図的にないしは非意図的に注意を外す行動に対して、漫然運転は注意力の低下である。

上述のように、自動車事故と人間の視覚的注意特性は非常に相関が高いものであり、自動車事故の大半は視覚的注意の制約性、不完全性に起因すると考えられる。

- 2) 変化の見落とし現象：明らかに検出可能であると思われる物理的変化が提示されても検出できなかったり、検出が大幅に遅れることがある。この現象はCB現象と呼ばれ、人間の知覚、認知特性を反映する現象として、数多くの研究がこれまで行われてきた^{2), 3)}。CB現象は、注視対象範囲外で生じると考えられ、比較的最近に注意が向けられた対象或いは情景のみしか情報処理が行なわれていないことを示唆する。即ち、人間の視覚的注意特性が如何に制約的であるかを予測させる。

本研究では、自動車運転と視覚的注意の関係を調査するために、①交通場面において如何なる対象に注意が向き易い(検出が早く)のか、②反対に如何なる対象に注意が及びにくい(検出が遅い)のか、③どのような条件下で注意機能が低下するのか、④運転熟練度は注意の向け方にどう作用するのか、等に対して変化の見落とし現象に着目して検討した。

2.9.2 方法

- ① 被験者：被験者は全 30 名(男性 10 名, 女性 20 名)であり, 平均年齢は 21.4 歳であった。その内, 運転免許取得者は 26 名, 非取得者は 4 名であった。運転免許取得者の内, 運転歴が 1 年以上かつ週 3 回以上の頻度で運転している被験者を熟練者群(18 名), それ以外及び非取得者を非熟練者群(12 名)として区別した。また, 全被験者は視力 1.0 以上で色覚正常であった。
- ② 刺激：本研究の刺激には 20 種の交通運転場面を想定した自然画像を使用した。このうち昼の画像を 15 種, 夜の画像を 5 種使用した。この 20 種の写真刺激の 1 種につき, 変化パターンを 4 種設定した。変化パターン 4 種のうち自動車運転との関連性が高い対象を 2 種, 関連性が比較的に低い対象を 2 種設定した。
- ③ 呈示条件：被験者前方スクリーンに図 2.9.1 のフリッカーパラダイム{原画像(500ms)→ブランク画面(500ms)→変化画像(500ms)を繰り返し提示}にて呈示する。なお変化画像は原画像の一対象物のみ変更させるようにしている。映像サイズは 12.9° × 17.9° とした。なお, 刺激は全てランダム提示とした。
- ④ 課題：変化画像の中から変化箇所をできるだけ素早くかつ正確に検出させるように指示し, 検出後にはマウスを押圧させ, 変化内容を口頭で報告するよう求めた。なお, 制限時間は 3 分とした。
- ⑤ 計測内容：呈示後からマウス押圧までに要する時間を反応時間として計測した。

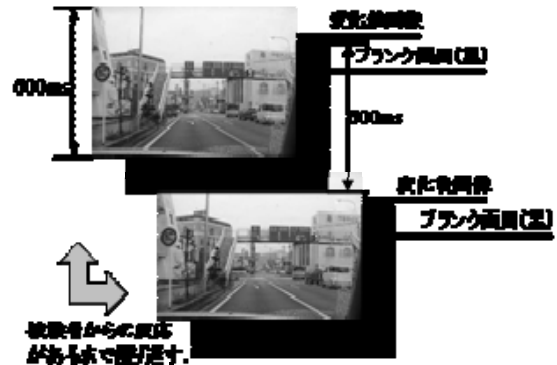


図 2.9.1 実験概要

2.9.3 結果

- ① 時間帯の影響：昼の刺激より, 夜の刺激の方が平均反応時間は長かった。
- ② 自動車運転との関連性：交通の文脈と関連性が高い対象ほど, 関連性が低い対象に比べて平均反応時間は遅かった。また, 自動車運転との関連性が高い対象の中でも, 信号や車のテールランプ, ウィンカーといった交通関連発光体の方がセンターライン, 標識等の非発光交通関連標示部材より反応時間が速かった。
- ③ 運転熟練度：熟練者群は非熟練者群より反応時間が速かった。

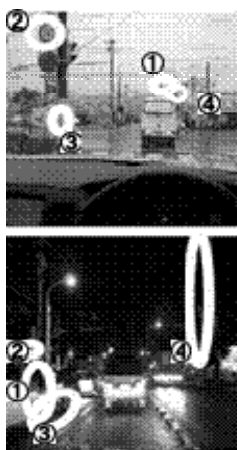


図 2.9.2 条件 (上: 昼, 下: 夜)ごとの反応時間の例 (* $p < .05$, ** $p < .01$)

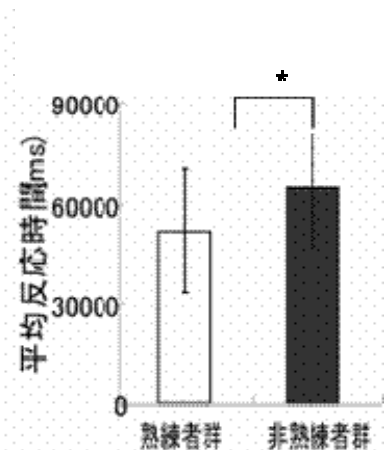
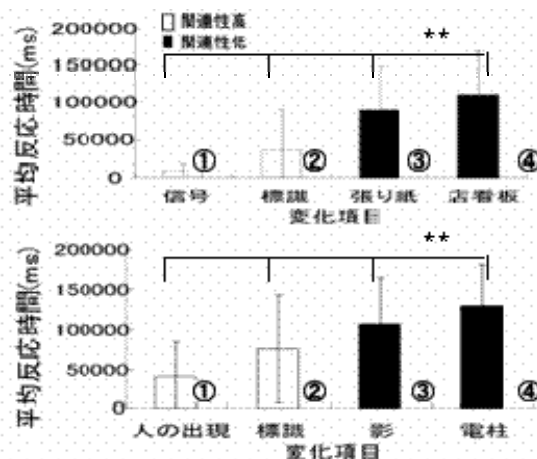


図 2.9.3 熟練度による反応時間の差 (* $p < .05$, ** $p < .01$)

2.9.4 まとめ

- ① 交通場面の文脈の関連性が変化検出に影響を及ぼす。
- ② 交通関連発光体は非発光交通関連標示部材に比べて注意が向き易い。
- ③ 時間帯(画面上輝度・コントラスト)によって注意機能が低下する。
- ④ 運転熟練度によって探索方略が異なるかもしくは注意の範囲が異なる。

上記が本研究のまとめである。また、この研究に参加した被験者の内観調査結果からは、「変化箇所付近を見ていたが全く気付かなかった。」という意見が多く聞かれた。自動車事故の当事者も「見ていたが、気付かなかった。」と証言することが多い。森を見て木を見ず、人間の視覚情報処理が如何に不完全なものであるか、自動車運転時は十分に認識しておく必要がある。

2.9.5 今後の課題

本研究では各条件で反応時間に差は認められるものの、平均反応時間は最も速い場合でも 10 秒以上は要している。これは、ダイナミックな自動車運転場面を想定すると、十分な速さではないと考えられる。今後更に交通視覚情報の有効性と実験・呈示条件に関する検討を進める必要がある。

(文責；中京大学 心理学部 和氣典二，宮崎由樹)

参考文献

- 1) 宮崎由樹，小林正自，和氣洋美，和氣典二，自動車運転場面における視覚的注意特性—変化の見落とし現象を指標として—，2007 年照明学会全国大会予稿集
- 2) O'Regan, J.K., Rensink, R.A., & Clark, J.J., (1999). Change blindness as a result of 'mudsplashes'. *Nature*, 398, 34
- 3) Rensink, R.A., O'Regan, J.K., & Clark, J.J., (1997). To see or not to see : The need for attention to perceive changes in scenes. *Psychological Science*, 8, 368-373.

2.10 視野全域における高輝度面による順応輝度増加量の加法性の検討¹⁾

順応輝度は、明るさ、グレア、見易さなどを評価する上での重要事項である。複雑な輝度分布視野での順応輝度は、視野内の各部位からの眼球内散乱光の中心窩への重畳光の影響による順応輝度増加量の和と考えられる。この加法性の成立は、順応輝度算定法の構築において重要である。

2.10.1 実験方法

実験は高輝度面を有する視野における輝度差弁別閾値の測定である。表 2.10.1 は実験条件を示し、図 2.10.1 は被験者から見た高輝度面呈示位置(等距離射影図)である。被験者は青年 10 名であり、被験は両眼視で行う。被験者は高輝度面を有する 25 又は 27 種類の不均一輝度視野において、視野中心に呈示された視標が視認閾となるように、視標面輝度を調節する。なお、高輝度面非呈示時の輝度差弁別閾値曲線も同時に求めている。

表 2.10.1 不均一輝度視野の条件

視標	形状	円形
	直径 α (')	8.0, 16
視距離		2300
接近距離	大きさ	直径 10°
	輝度 (cd/m ²)	2.0, 3.5, 6.0, 10
輝度閾値	離角	10~90° の間 6 段階
	方位角	60° 単位で変化
	輝度 (cd/m ²)	8500

※ 離角・・・中心からの隔たり角

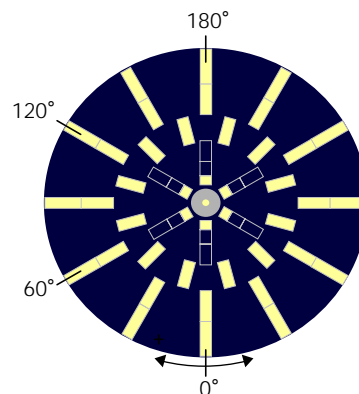


図 2.10.1 高輝度面呈示位置 (等距離射影図)

2.10.2 検討方法

近接背景輝度と輝度差弁別閾値 ΔL_{th} 、順応輝度増加量 ΔL_a との関係を表(1)を用いて回帰する。順応輝度増加量は背景輝度によらず一意的に定まるものである(§4.1 参照)。

$$\Delta L_{th} = a \cdot (\log(L_b + \Delta L_a))^2 + b \cdot \log(L_b + \Delta L_a) + c \quad \text{式(1)}$$

L_b : 近接背景輝度, a, b, c : 高輝度面無し ($\Delta L_a=0$) の結果より求めた係数

まず、式(1)より各高輝度面による ΔL_a を被験者毎に求める(回帰 1)。次に、 ΔL_a の加法性を仮定し、その制約の下で各高輝度面による ΔL_a を求める(回帰 2)。この両者による予測 ΔL_{th} のばらつき、及び予測精度を検討し、回帰 2 の妥当性を示すことで加法性を検証する。

尚、高輝度面の有無による予測 ΔL_{th} に有意差 5% (t 検定) がない高輝度面呈示条件は、検討には用いていない。

2.10.3 結果

表 2.10.2 に、式(2)を用いて求めた ΔL_{th} のばらつき σ を被験者毎に示す。

$$\log \bar{\sigma} = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \sigma(i, j) / (m \cdot l) \quad \text{式(2)}$$

$$\sigma(i, j) = \sqrt{\sum_{k=1}^n (\log \Delta L_{th}(i, j, k) - \overline{\log \Delta L_{th}(i, j)})^2 / n}$$

$\overline{\log \Delta L_{th}(i, j)}$: 高輝度面毎、近接背景輝度 L_b 毎の $\log \Delta L_{th}$ の平均値, l : 高輝度面条件数 ($l=25$ or 27), m : 近接背景輝度 L_b の条件数 ($m=4$), n : 試行回数 ($n=5$)

表 2.10.2 の RSE, RSE1, RSE2 は、実測値、回帰 1、回帰 2、それぞれのばらつき σ で、どの被験者においても三者に大きな違いは見られない。

表 2.10.2 輝度差弁別閾値のばらつき σ (円形視標: 8')

	被験者				
	K.T.	S.T.	Y.N.	Y.N.	H.H.
RSE	1.30	1.23	1.26	1.26	1.31
RSE1	1.32	1.26	1.38	1.29	1.37
RSE2	1.34	1.26	1.35	1.29	1.36
	被験者				
	H.K.	Y.K.	Y.S.	N.N.	S.Y.
RSE	1.39	1.21	1.39	1.45	1.61
RSE1	1.42	1.24	1.44	1.48	1.70
RSE2	1.43	1.25	1.46	1.49	1.71

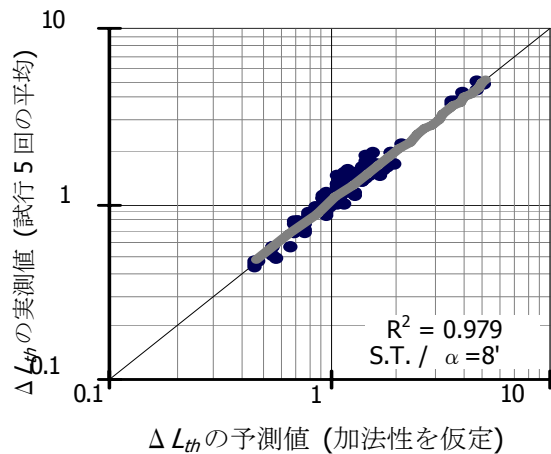


図 2.10.2 加法性の成立を仮定した場合の輝度差弁別閾値の予測精度

図 2.10.2 に加法性を仮定した場合(回帰 2)の輝度差弁別閾値の予測値と実験値との相関を示す。両者の相関は高く、表 2 に示すように両者のばらつきにも差がみられないことから、加法性が成立すると考えて良い。他の被験者についても相関係数 $r = 0.879 \sim 0.987$ で加法性の成立を確認している。

(文責 ; 奈良女子大学 池上陽子, 井上容子, 関西大学 原直也)

参考文献

1) 池上陽子, 原直也, 井上容子; 視野全域での高輝度面による順応輝度増加量の加法性の検討, 日本建築学会環境系論文集, 第 626 号, 2008. 04.

3 視覚系の順応および順応輝度とは？

3.1 暗順応と明順応

人間の視覚系は、星明かり (10^3 ルクス) から真夏の太陽の下 (10^4 ルクス) まで 10^7 の範囲、絶対閾値から限界までだとさらに広い照度範囲の光環境において機能できる。しかし常時そのような広いダイナミックレンジを維持しているわけではない。脊椎動物視覚系の最末端にある光受容細胞は、順応刺激強度に合わせて、もっと狭い実質的なダイナミックレンジを移動させていることがわかっている¹⁾。人間の視覚系にも同様なメカニズムがあり、以下に述べる日常生活での経験の基盤となっていると考えられている。たとえば明るい屋外から薄暗い室内に移動したとき、最初は何も見えないが、しばらくして眼が慣れてくると周りの様子がわかるようになり、20~30分もすると何の不便もなく歩き回れるようになる。このような、光環境に合わせて視覚系の応答範囲を移動できる機能を順応という。明るいところから暗いところへの変化のときを暗順応といい、逆に暗いところから明るいところへの変化を明順応という。前者は20~30分かかるが、後者は暗と明の環境の差に依存するが、数十秒といわれている。

3.2 暗順応曲線

おそらくは野戦での戦略上の必要があったためであろうが、20世紀前半には人間の視覚系の応答限界を測定する研究が多数報告された。Hechtら²⁾の研究もその一つで、暗順応曲線の古典的研究として引用されることが多いので、やや詳細に紹介する。

この研究の第1番目の実験では、中心視で刺激サイズを変化させた。前順応光は白色300mL (mLはミリランバート、1mLは 3.183cd/m^2)、明順応時間は2分間である。順応光のサイズは不明だが、数センチ以上の白濁ガラス (opal plate) から4センチの位置に目を置いたと記載されている。テスト刺激のサイズは直径視角 2° 、 3° 、 5° 、 10° 、 20° で、各々で30分間閾値を測定した。被験者は自分でシャッターを2、3度開けて、テスト視野が“the test-field just become visible”になるように、光学ウェッジを調整する。光学ウェッジはラックアンドピニオン方式で動かすことができ、被験者がここだと調整した位置が記録される。最初の数分の3~4回の測定は“measurements are made as rapidly as possible”で、その後は2~5分毎に測定を行った。

結果を図3.1に示す。 2° 視野ではあまりはっきりしないが、 3° ~ 20° になるにつれて、Kohlruschの屈曲点が明確になり、錐体-桿体移行が顕著に現れており、閾値も低下している。

中心視、 10° 視野で、C.H.が3時間測定したが20分以降はほとんど変化がなかった。また中心視 20° 円形刺激と直径 20° 幅 1° のリング状刺激の暗順応曲線をS.H.の右眼で比較している。これは 20° 刺激の時の見えが、うっすらと周辺部にリング状にみえてくることから比較実験を行った。結果は、 20° 円形刺激では錐体-桿体移行が現れたこと以外は、定性的および定量的にも一致した。

2番目の実験では、テスト刺激の位置を変化させた。中心窩から 0° 、 2.5° 、 5° 、 10° 、 15° の偏位で、直径 2° の刺激を用いて暗順応曲線を測定した。結果は 0° では、錐体-桿体移行がなく、中心からの偏位が大きくなるにつれて錐体-桿体移行が顕著に現れている。

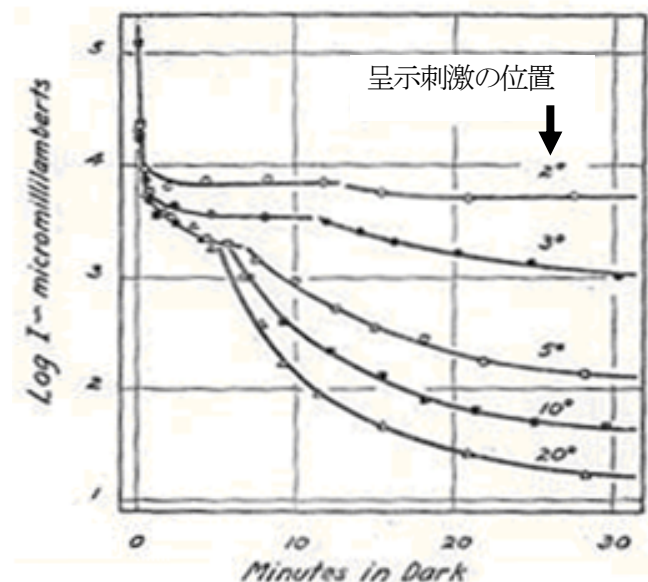


図3.1 網膜部位による暗順応曲線の変化
「Hechtら²⁾より改変」

これらから、暗順応曲線は二つの部分、初期の短時間で一定となりその感度上昇がそれほど大きくない部分と、後半の5～10分以降に現れるゆっくりとした大きな感度上昇部分から成る。これらは前者が錐体、後者が桿体の特性であると考えられる。

Hecht らはこれ以降も暗順応曲線に関する研究を続けた。1937年の研究³⁾では、263td から 400,000td まで5段階の明順応光において暗順応曲線を測定した。明順応光は白色光でその視野は直径30°である。テスト光は、直径5°で、480nm 以下のみ透過するフィルター (Corning No.511) による violet light と 690nm 以上のみ透過するフィルター (Wratten No.88) による red light で、網膜上で30° 鼻側に0.2秒提示された。

前者は桿体の感度が錐体のそれより高い色で、後者はその逆である。従って、明順応光のレベルが同じでも、異なる暗順応曲線が得られると予想された。violet light による結果を図3.2に示す。263td では桿体の順応特性だけが現れているが、明順応光の網膜照度が上がるに連れて、初めは錐体で、次に桿体の順応特性が現れるのが良く分かる (Kohlrausch の屈曲点)。図3.3に示す red light による結果では、3,800td から 400,000td までの4段階の明順応光で実験したが、測定時間のほとんどにおいて錐体の順応しか現れなかった。

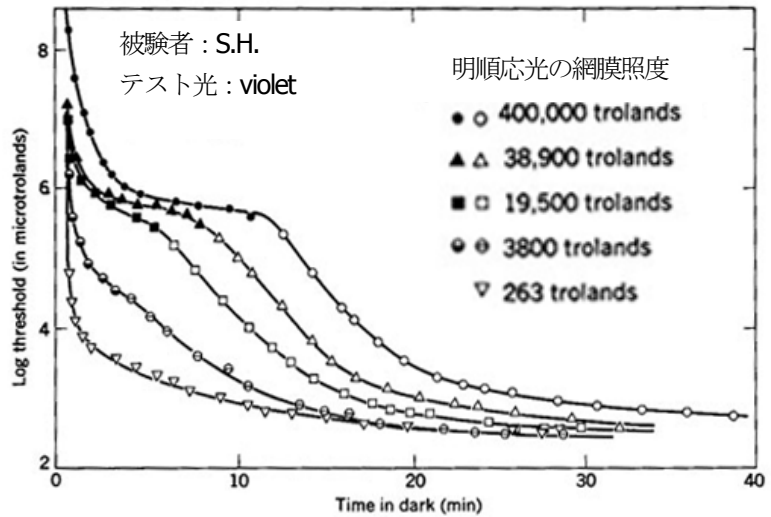


図 3.2 明順応光の網膜照度による暗順応曲線の変化
テスト光 : violet light の場合。Color Science⁴⁾より改変

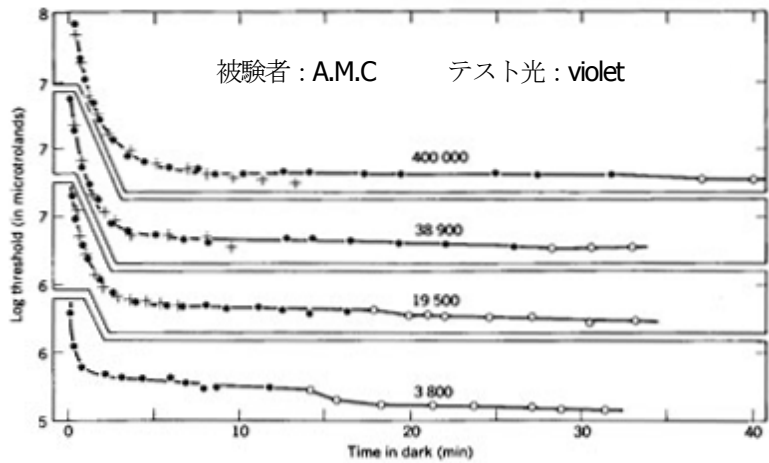


図 3.3 明順応光の網膜照度による暗順応曲線の変化
テスト光 : red light の場合。Color Science⁴⁾より改変

3.3 順応輝度

3.2 で紹介した実験では、ほぼ一様な広い視野の明順応光を与えているので、視覚系は明順応光の輝度レベルに順応していると考えられる。しかし日常生活では、そのような一様な視野を見ることはほとんどなく、日中太陽光の下の環境も含めて、頭上にメインの照明光があり、様々な反射率の壁や物体や道路や建物に囲まれていることが多い。つまり不均一な照明環境で不均一な輝度分布の世界を見ている。そのような状況で順応輝度を定義するのは難しいが、応用的には重要な指標であり、それを規定することができれば有用である。

ここでは、照明に関する様々な分野の研究者に対して、順応とは何か、そして不均一な照明環境における順応輝度をどう捉えているか、さらに各々の専門分野で何が問題となっているのか、について質問形式の調査を行った。具体的には、各委員に以下の2つの設問を出した。各々の設問に対する各委員の回答を記載する。

■ 設問 1. 「視覚系の順応」・「順応輝度」をどのように定義しているか？

自分の考え、自分の研究や業務に深く関係する分野もしくは研究論文での考えを記載して下さい。異なる視点から複数でも OK。

● 阿山委員長の回答

- 「視覚系の順応」とは、与えられた順応光により視覚系の光に対する検出感度が変化すること。その特性の定量的測定としては、閾値測定による暗順応曲線が典型的である。
- 「順応輝度」とは、古典的および方法論的には、暗順応曲線測定時、最初に被験者に提示する刺激光の輝度を指す。個人的には、視覚系は、その時被験者が存在する環境の平均的な明るさに順応するのではないかと考えている。その場合の順応輝度をどのように定義したら良いのか、模索中である。

● 井上委員の回答

- 「視覚系の順応」：これまでに、自発的にこの表現を用いたことは無い。
- 「順応輝度」：視野の（時間的、空間的）輝度分布によってきまる特定の能力、たとえば輝度差弁別閾値、が等しくなる視野を同じ数値（順応輝度）で表す。例としては、不均一輝度分布視野 A での輝度差弁別閾が $0.1\text{cd}/\text{m}^2$ で有る場合、輝度差弁別閾値 $0.1\text{cd}/\text{m}^2$ となる均一視野 B の輝度を A の順応輝度とする。この場合、取り上げる能力や感覚によって、順応輝度が等しい視野グループが変わる可能性大。

● 岡嶋委員の回答

- （視覚系の）順応の定義；限られたダイナミックレンジを使って（幅広く重要な）情報を外界から最大限取り入れるための制御機能のこと。生理学的な疲労によって生じる、継続的な刺激に対する感度低下を示す場合もある。
- 「順応輝度」の定義；時空間的に不均一な輝度環境下における順応状態と等価な順応状態を与える一様パターン輝度

● 篠田委員の回答

- 主に新測光システムへの実用化にむけて。
 - 1] 薄明視環境における、錐体と桿体の寄与の割合として
 - 2] 物体色の明るさ（知覚明度）を決定する際の尺度、知覚照明強度として

● 秋月委員の回答

観察している視対象の背景輝度に順応していると考え、その視対象に対する視認性評価に影響を及ぼす「視対象背景輝度」「視対象輝度と視対象背景輝度の対比」「視対象寸法」の三要素（建築環境工学では明視三要素と呼称）と人間の視感度（私は視力を取り扱いました）の相互関係について、これまで検討してきた。

明視三要素の考え方については、以前大阪大学にて教鞭をとっていた伊藤克三先生を始めとする研究グループ（関西大学野口太郎先生、大手前大学大野治代先生、大阪工業大学佐藤隆二先生、奈良女子大学井上容子先生、関西大学原直也先生、広島国際大学奥田紫乃先生など）の流れに準じたものである。

視野内の輝度分布が異なる場合の、視認性評価（文書の読み易さ）への影響については 1999 年度照明学会全国大会にて実験結果を報告し¹⁾、文書全域をカバーする照射範囲 44 度以上において（それ以下の照射範囲では検討していません）下記の結論を得ている。

- ① 周辺輝度 $400[\text{cd}/\text{m}^2]$ で文書輝度 $800[\text{cd}/\text{m}^2]$ （輝度比 0.5）の条件では半数の人が均一視野の読み易さより悪くなる。文書輝度が $260[\text{cd}/\text{m}^2]$ と低くなると、読み易さに対する輝度比の影響は小さくなる。
- ② 読み易さに対する①の結果に対する個人差（年齢・視力）の影響は小さい。
- ③ 文書の明るさ感は、年齢による違いが認められる（視力の影響はない）。若齢者は不均一ほど「明るく」感じ、高齢者は「暗く」感じる傾向が見られる。

- 1) 1999 年度照明学会全国大会「文書の読み易さと作業面の明るさ感に関する研究（その 4）視野内の輝度分布の影響」秋月有紀、井上容子（奈良女子大学）、岩井彌、阪口敏彦（松下電工）

● 小嶋委員の回答

ミシガン大学交通研究所では、視対象が視認弁別できた時の眼の状態を順応としている。初めにある順応状態（輝度）と視対象が視認弁別できた時の視対象輝度との関係を明らかにしておき、次に視対象が視認弁別できた時の視対象輝度を測定することによって、眼の順応輝度を推定する手法が用いられている。視認性

やグレアを議論する際には順応輝度がいくつなのか明確なことが大切になるが、ラボ実験においては順応輝度を $1\text{cd}/\text{m}^2$ 、フィールド実験においては、実際のランプを使用（順応輝度は明確ではない）して、評価していることが多い。

● 小林委員の回答

➤ 視覚系の順応；考えたことはないが、所定の視環境 A から視環境 B に移行する際において、視環境 B で最良の視機能を発揮するために必要な眼の感度調整メカニズムのように捉えたい。視覚系の順応は下記の 2 分類で定義すべきでは？

- 1] 順応状態が安定（定常）→順応
- 2] 順応状態が遷移→過渡的順応

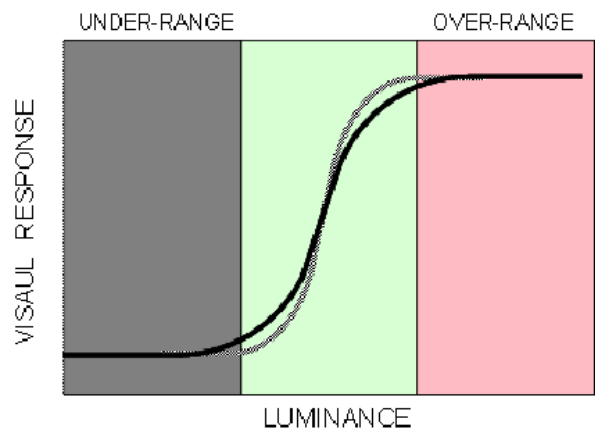
➤ 順応輝度；眼が順応した後、その視環境（不均一）下で得られる輝度差弁別閾と等価な均一視環境下の背景輝度

● 舟川委員の回答

順応輝度によって、視覚系の輝度コントラスト応答のダイナミックレンジ DR, アンダーレンジ UR とオーバーレンジ OR が決まる。例えば、0.05 のコントラストが弁別できるか否かを基準に UR, DR, OR を定義できるだろう。

疑問点

- ① 順応輝度と DR の輝度スケール上での位置関係
- ② UR, DR, OR に対する順応輝度の変化や加齢の影響
- ③ 低空間周波数・低時間周波数の世界の話？ 周波数領域よりパワーの話？
- ④ 網膜レベル（局所的?）と皮質レベルがある？



● 藤波委員の回答

道路照明では、多くの場合、便宜的に「背景輝度」＝「路面輝度」としてしまうようである。そこで、「視覚系の順応」、「順応輝度」を以下のように取り扱っているかと思う。

- 「視覚系の順応」：路面の輝度レベルに対して網膜の感度が安定した状態
- 「順応輝度」：路面の輝度

■ 設問 2. 当該委員会で議論すべきまたは議論してほしい問題点・研究課題

● 阿山委員の回答

「視覚系の順応」および「順応輝度」の定義の整理。不均一な視環境において視覚系は何に順応していると考えるのが妥当なのか、つまりは順応輝度とは何か、どう測定したら妥当なのか、について議論してほしい。

● 井上委員の回答

- ① 順応に関する既往研究の共通点と見解が異なる点の抽出。
→まずは委員相互のこれまでの研究成果の共通点、相違点
- ② 不均一視野における順応輝度の取り扱い
- ③ 実際に起こり得る不均一であることの影響の程度の把握
→均一、定常として扱えない範囲

● 岡嶋委員の回答

- ① 「均一・不均一の定義」：環境（輝度）vs. 網膜（網膜照度）
- ② 「ローカル vs. グローバル」：どこまでの領域を平均化している（できる）のか？
- ③ 「順応」によって、いったい何がどう変わっているのか？（時間特性も含む）
- ④ 日常生活における「順応」が問題となる状況の抽出と分析（検討）

● 篠田委員の回答

「順応」の多様な定義、「順応」の多様なアプリケーションを調べ、整理して欲しい

● 秋月委員の回答

不均一な照明環境（現実空間）の視認性評価において、シチュエーションの違いがどう影響するか興味があります。（災害時といった非常事態と、日常生活のような安定した精神状態では、等しい視認性評価が得られる物理条件が異なるのでしょうか？）

● 舟川委員の回答

概念、規格、標準、の整理整頓

● 小嶋委員の回答

ミシガン大学の手法を参考に各種実験を行っている、ミシガン大学の順応輝度と視認弁別輝度を明らかにしたラボ実験は均一照明下で行われており、フィールド実験では実環境に近い不均一照明下で行っている。

本委員会では議論してほしい事（上記実験も踏まえ）

- ① 均一照明下での実験結果と不均一照明下での実験結果をリンクさせて良いか？
- ② 不均一照明下での順応輝度の測定の考え方、及び測定手法の確立
- ③ 実験はハロゲンヘッドランプで行われているが、同輝度、異なる色温度照明下（HID、LED）でも応用できるのか？
- ④ 順応輝度と色順応の関係（パラメータは輝度のみで良いのか？）
- ⑤ トンネル内や住宅環境にも適用できる？
- ⑥ 上記を委員各位と議論できることを希望する。

➤ 上記研究ニーズ・背景などの補足説明

- ◇ 運転中の環境は不均一な照明下であり、その環境における視認性向上を追求している。
- ◇ 真っ暗な郊外やグレアが多い市街地、雨天等、様々な環境における順応輝度の考え方が問題。
- ◇ そのような環境下での評価手法の確立が重要と考えている。
- ◇ 実環境の例；下の写真。他にも、道路照明、コンビニ室内照明の漏光、信号灯（赤、アンバー）等、順応に影響を及ぼしそうな因子が考えられる。



● 小林幹事の回答

➤ 順応輝度の定義、計測方法

- ◇ 夜間走行時の種々の走行環境下における順応輝度を把握したい。瞳孔径計測で代用できないか？
- ◇ 暗順応曲線；暗順応曲線は蒲山曲線、Hechtの曲線が有名であるが、他には？
 - 蒲山氏、Hecht氏の測定方法は同じか？ 結果は同じか？ 高齢者の暗順応曲線？

▶ 順応の変化メカニズムとダイナミックレンジ

- ◇ 眼のダイナミックレンジを調べていけば、順応変化時の条件が分るのではないか？
 - ▶ 各種環境輝度下におけるダイナミックレンジが知りたい。BCD や輝度差弁別閾データなどを活用して出せないか？
 - ▶ その視環境下におけるダイナミックレンジ外の視対象を視認すべき状況が発生した時、或いはグレアがその視環境に現われたときに順応の変化が生じる？
- ◇ 不均一視環境下における輝度差弁別閾は注視点位置を変更すると値が変化するものと考えられる（周辺明るさの影響）。従って輝度差弁別閾により順応輝度を規定することは不均一環境下では無理があるのでは？
- ◇ 対向車とのすれ違い、ハイビームからすれ違いビームへの切り替え時の順応回復曲線がほしい。
 - ▶ 1975年頃のミシガン大ヘッドライトシミュレーションにおいては **Adaptation** (グレア増加中), **Readaptation** (対向車前方でグレアが減少中), **Recovery** (対向車すれ違い後；対向車不在) の3タイプですれ違い時の順応過渡現象を記述。同ソフトで **Recovery** の式を定義していたが出展が不明。
- ◇ 瞳孔が変化した後には網膜感度の調整が行われる？
 - ▶ 順応メカニズムに基づいた視認性・快適性評価手法の研究が必要と考える。

● 藤波委員の回答

不均一な照度分布の環境下で、どこを対象物に対して、どこを背景として取り扱うことが適切なのかを議論できればと思う。さらに、VL の計測方法を明確にできると良いかと考えている。

● その他；委員会での発言（意見表明者不明）

- ▶ 色順応の計測方法？ 色覚閾で計測？
- ▶ 順応状態が明るさ感に与える影響？
- ▶ 視覚以外の順応の定義も調査し、視覚系の順応の定義を明確にすべきでは？

(文責；宇都宮大学大学院工学研究科 阿山みよし)

参考文献

- 1) K.I.Naka, W.A.H.Rushton, "S-potential and dark adaptation in fish", J.Physiol. Vol.194, pp.259-269, 1968
- 2) S.Hecht, C.Haig, G.Wald, "The dark adaptation of retinal fields of different size and location", J. Gen. Physiol., Vol.19, pp.321-337, 1935
- 3) S.Hecht, C.Haig, A.M.Chase, "The influence of light adaptation on subsequent dark adaptation of the eye", J. Gen. Physiol., Vol.20, pp.831-850, 1937
- 4) G.Wyszecki and W.S.Stiles, Color Science : Concepts and methods, quantitative data and formulae, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., pp.519-520, 1982

4. 不均一な照明環境下での視認閾値

日常体験する視野は、輝度が空間的にも時間的にも一様ではない不均一な輝度視野である。そのため、不均一輝度視野における視認能力の解明は、視認問題を検討する上に必須のものである。

空間的不均一とは、視野の輝度が一様ではなく分布があることである。時間的不均一とは視野輝度やその分布様相が時間とともに変化することである。空間に供給されている光が定常であっても、作業者の移動等によって、時間的変動は生じる。従って、作業者にとっての照明環境は、空間的不均一と時間的不均一の影響が混在しているが、ここでは、空間的不均一 (§ 4.1) と時間的不均一 (§ 4.2, § 4.3) に分けて、それぞれの視認性への影響についての研究を紹介する。

4.1 空間的な不均一が視認性に及ぼす影響の評価方法 (順応輝度の推定方法)

任意の輝度分布を持つ視環境での視認能力の評価は、均一輝度視野における眼の感度を基準として、不均一輝度視野を眼の感度に関して等価な均一輝度視野に置換することで対応できる。ここでは、目の感度として輝度差弁別閾値に着目し、不均一輝度視野における順応輝度を求めた結果を紹介する¹⁾。この順応輝度と輝度分布との間の法則性を見出し、任意の輝度分布を持つ視野による順応輝度の予測を可能にしておけば定常順応時のもとより、順応過渡過程における視認能力の評価が可能となる。

4.1.1 実験方法

用いた視野装置を図4.1.1に示す。視野中心に直径50cmの提示板を有する視距離56.5cmの半球状視野装置である。半球面内装は白色つや消し仕上げである。不均一輝度視野提示部全面を半球内装と同質にすれば均一輝度視野となる。不均一輝度視野提示部に乳白色スリガラス面を取り付けることで、背部の光源ボックスからの照明によりガラス部分が高輝度面となる。

実験に用いた不均一輝度視野は、図4.1.2に示す一辺300'の正方形高輝度面を有する視野である。高輝度面中心と視標提示位置中心との距離は250'、高輝度面輝度 L_G と背景輝度 L_b との差 ΔL_G は、1200 cd/m²~12000 cd/m²の範囲で6段階に設定している。使用ランプは蛍光灯 (FLR20SW) である。被験者は灯箱板に取り付けられた光源を調光し、提示視標が視認閾となるように視野輝度を調節する。用いた視標は輝度対比0.030~0.92、辺長8.2'の正方形視標である。被験者は表4.1.1に示すQ~Rの男子大学生3名である。

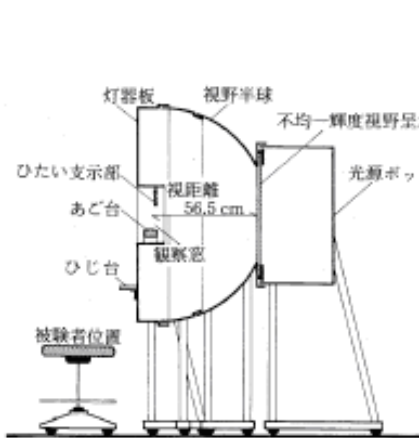


図 4.1.1 実験装置 (視野装置)

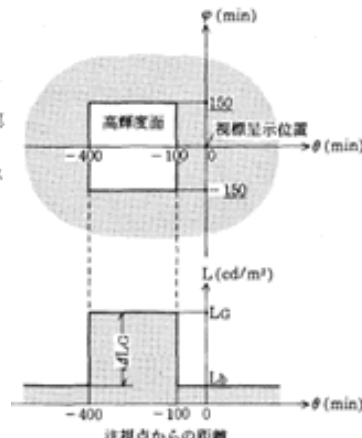


図 4.1.2 設定視野

表 4.1.1 被験者

被験者	視力		年齢	性別	備考
	右	左			
G	1.5	1.5	27	女子	
H	1.5	1.5	25	男子	
I	1.0	1.0	23	男子	矯正
J	1.0	1.0	21	男子	矯正
K	1.5	1.5	25	男子	
L	1.2	1.2	23	男子	矯正
M	1.2	1.2	22	男子	
N	1.5	1.5	23	男子	
O	1.5	1.5	23	男子	
P	0.8	0.8	23	男子	
Q	1.0	1.0	23	男子	右眼矯正
R	1.0	1.0	23	男子	
S	1.5	1.5	21	男子	

4.1.2 結果

図4.1.3に、均一視野輝度における輝度差弁別閾値と高輝度面が存在する不均一輝度視野における輝度差弁別閾値の測定結果を示す。図中の○印のプロットは均一輝度視野における測定結果である。破線で示したその回帰曲線は同被験者の十分に大きな視標による輝度差弁別閾値曲線を正方形視標の実効率に相当する量だけ縦軸正方向に平行移動したものである。

高輝度面による眼球内散乱光量が視標面上の各注視点で一定であるとみなせば、視標と背景との輝度差 ΔL は高輝度面の有無に関係なく一定である。したがって、図4.1.3は形・大きさともに一定の視標による測定結果であるため、同図中で ΔL の等しい視野での眼の感度、すなわち順応輝度は等しい。なお、 ΔL_G は高輝度面輝度 L_G と背景輝度 L_b との差である。

図中に示すように、 ΔL に対応する順応輝度は、それに対応する均一背景の輝度である。このとき不均一輝度視野の順応輝度を背景輝度 L_b から L へ増加させているのは高輝度面の存在である。図中の $\Delta L_G=2000 \text{ cd/m}^2$ 、 7000 cd/m^2 の各場合の回帰曲線は、各高輝度面が順応輝度 L に及ぼす影響は背景輝度 L_b には無関係にそれぞれ一定であるとして、式4.1を満たすように引いたものであるが実験結果とよく一致している。他の条件、他の被験者についても同様である。

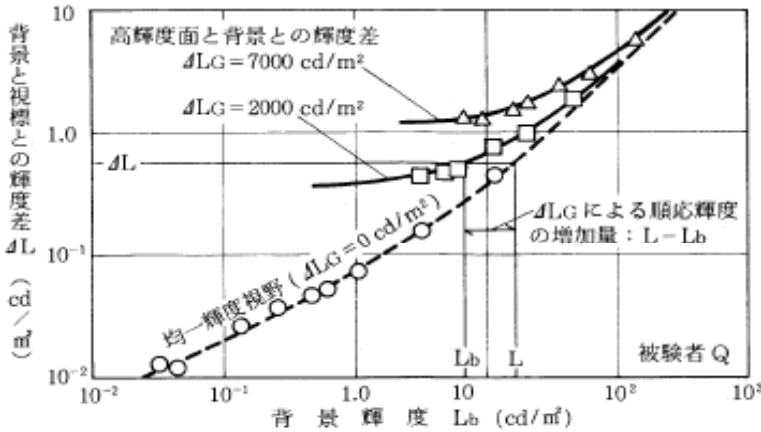


図 4.1.3 不均一輝度視野における輝度差弁別閾値

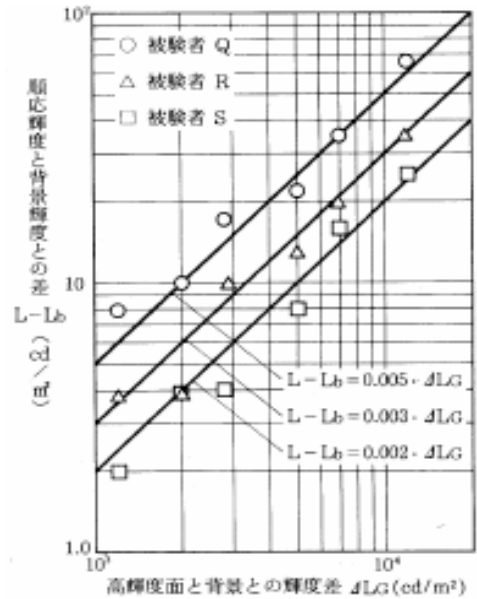


図 4.1.4 高輝度面による順応輝度の上昇

$$L - L_b = \text{constant} \quad \text{if} \quad \Delta L_G = L_G - L_b = \text{constant} \quad \dots \quad (4.1)$$

図 4.1.4 は、 ΔL_G に対して唯一定まる ($L - L_b$, ΔL_G) の関係を被験者毎に両対数軸上に示したものである。被験者毎に傾き 45 度で挿入した回帰直線はいずれの被験者の結果も非常に良く説明している。

$$\log(L - L_b) = \log(\Delta L_G) + C \quad (C = \text{constant}) \quad \dots \quad (4.2)$$

$$\therefore L - L_b = a \cdot \Delta L_G \quad L = L_b + a \cdot \Delta L_G \quad (a = \text{constant}) \quad \dots \quad (4.3)$$

ここで、 a は被験者毎に、高輝度面の位置と大きさ毎に定まる定数である。

図 4.1.4 に示すように、3 名の被験者 a 値は 0.002~0.005 である。これより、視野が不均一である事による、特にグレア源による順応輝度の変化（言い換えれば、図 4.1.3 に示す輝度差弁別閾値の上昇）は視認問題を扱う上で、看過できない重要問題であることが確認できる。

4.1.3 考察

視認能力が中心窩への刺激量のみで定まっているものであれば、実効輝度^{1), 2)}が等しい条件下では目の感度は常に等しくなり、順応輝度はその時の実効輝度を求めることで得られる。実効輝度とは視対象および背景からの眼球内散乱光の注視点における相互重畳を考慮した中心窩への実刺激である。図 4.1.4 の回帰直線は、あらかじめ求めておいた各被験者の眼球内散乱特性（実効輝度関数）から、図 4.1.2 の高輝度面単位輝度あたりの中心窩への散乱量（実効輝度＝光幕輝度）を求め、それに基に決定したものである¹⁾。従って、 a 値は、 ΔL_G が 1.0 cd/m^2 あたりの注視点での実効輝度であり、高輝度面上の各点からの中心窩への散乱光量を積算した値である。

これまでの研究において、背景の大きさの問題も含め、不均一輝度視野を眼の感度に関して等価な均一輝度視野に置き換えるという手法を用いながらも視認能力を統一的に扱い得るに至らない最大の原因は、不能グレアにおいて眼球内の散乱光を扱いながらも、注視点そのものによる中心窩への刺激量も、中心から周囲への散乱によって、注視点そのものの輝度とは異なっていることを見逃している点にあると考える。実効輝度を導入することで、視対象を含む任意の輝度分布を持つ視野に対する順応輝度の予測が可能であり、今日まで重要な課題として残されている不均一視野輝度に対する順応輝度の問題の解明が可能である。尚、実効輝度の加法性成立は検証済みである (§ 2.11 参照)³⁾⁴⁾。方位性については、実用上は無視して差し支えない

場合が多いと考えられるが³⁾、方位性の取り扱い方法については検討中である。

(文責；井上容子 奈良女子大学 生活環境学部)

4.2 時間的な不均一が視認性に及ぼす影響（順応過渡過程における視認能力）

視環境を実態に即して動的に評価するためには、作業者の視線の動きなどによって生じる目の順応の時間的変化に対応した視認能力の時間特性を明らかにしておくことが求められる。ここでは、視認能力評価の基本である均一輝度視野における眼の感度の時間特性について示す。単純な明暗両順応過程における目の感度の時間経過のみならず、順応過渡状態において視野輝度が変化する場合の目の感度の時間経過についても検討している¹⁾⁵⁾。

4.2.1 実験概要

実験視野装置は、図 4.2.1 に示す内装白色拡散仕上げの視半径 110 cm の半球状均一輝度視野装置である。灯器板には蛍光ランプ FLR20SW 36 灯とハロゲン電球 JL100/100VWF24 灯が放射状に均等に配置されている。呈示輝度の変化は調光レバーの操作、あるいは電源スイッチの切り替えにより、瞬時に行うことができる。

視標は、写真焼き付けにより作成した 1 辺 5 cm (視距離 110 cm で視角 160') の正対比 (白地に黒) の正方形視標である。この視標による測定結果は、最小対比閾値および最小輝度差弁別閾値と見なすことができる。視標の輝度対比は 10 種類であり、0.015~0.90 の範囲である。

被験者は、観察窓に設けられたあご台に頭を固定し、視線を水平に保ち、与えられた視野条件下で視野中央に呈示された視標が視認できるまでの時間を測定する。1 条件 3~5 回実施しており、結果は平均値を用いて示す。被験者は表 4.1.1 (§ 4.1.1) に示す G~J の青年男女 4 名であり、予め、各被験者の定常順応時の最小対比閾値曲線および最小輝度差弁別閾値曲線を求めている。

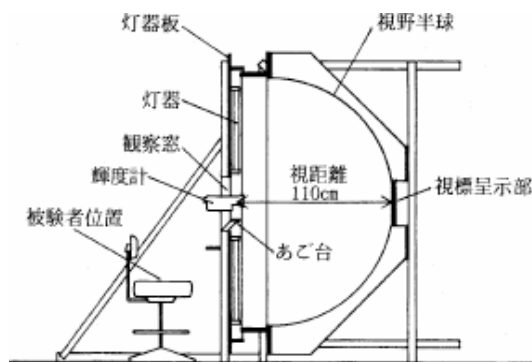


図 4.2.1 実験装置 (視野装置)

4.2.2 暗順応過程における視認閾値の時間変化

(1) 定常順応状態からの暗順応過程

被験者の目を視野輝度 L_1 に順応させた後、視野輝度を L_2 ($L_2 < L_1$) に変化させ、変化後視野中央に呈示されている視標を被験者が視認するまでの時間を測定した。設定視野輝度は表 4.2.1 に示す 24 組である。

a) 対比感度の回復過程

図 4.2.2 に対比閾値の時間変化を被験者 G の場合を例に示す。図中の各点は、各視標の輝度対比と視野輝度変化後にその視標が視認された時間を示している。

図 4.2.2(a) は前順応輝度 L_1 毎に結果を示したものである。回帰曲線は L_2 に十分順応したときに得られる対比閾値 (定常順応時の対比閾値) に漸近すべきものであるとして推定している。全て同一形状の曲線であり、 L_1 による差異は曲線の横軸 (時間軸) 方向の移動としてみられ、移動量は L_1 間の比に比例している。この移動量は何れの L_2 についても等しいという結果が得られている。図中の回帰曲線はこれらのことを満たすように描いたものである。

図 4.2.2(b) は変化後の視野輝度 L_2 毎に結果を示したものである。回帰曲線は、図 4.2.2(a) の場合と同様に引いたものであり、全て同じ形状である。回帰曲線の横軸方向の移動量は L_2 間の比に比例し、しかもその移動量は図 4.2.2(a) に示した L_1 間の比による移動量と等しいという結果が得られた。したがって、図 4.2.2(b)

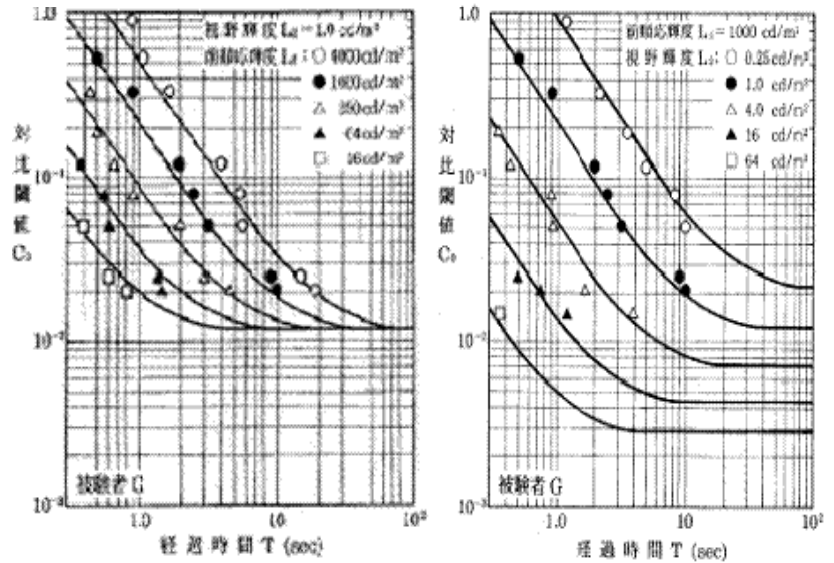
表 4.2.1 設定条件

—定常順応状態からの暗順応の場合—

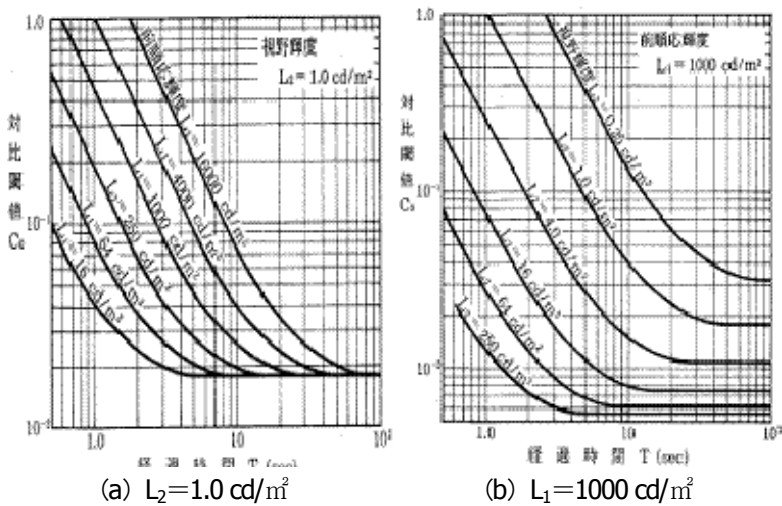
前順応輝度 L_1 (cd/m ²)	変化後の視野輝度 L_2 (cd/m ²)									
	0.25	1.0	3.0	4.0	12	16	48	64	190	250
4.0	○									
16	○	○								
64	○	○		○						
250	○	○		○		○				
1000	○	○		○		○		○		
4000		○		○		○		○		○
12000			○		○		○		○	

中の曲線をそれぞれ縦軸方向に移動させて漸近線を重ねれば、横軸方向の間隔は等間隔となり、その間隔は図4.2.2(a)と等しい。他の3名の被験者についても同様である。ただし、個人差があり、曲線の形状や間隔は被験者によって異なる。

図4.2.3に4名の被験者による暗順応過渡過程における対比閾値の時間経過の平均値を示す。図4.2.3(a)は $L_2 = 1.0 \text{ cd/m}^2$ の場合、図4.2.3(b)は $L_1 = 1000 \text{ cd/m}^2$ の場合である。各被験者の回復曲線の形状、 (L_1, L_2) の差異による曲線の時間軸(横軸)方向の移動量、および L_2 に完全に順応するのに要する時間の3者を各々別個に平均することで求めている。視野輝度 L_2 に十分順応している場合の対比閾値 C_0 ⁸⁾⁹⁾は表4.2.1に示す13名の平均対比閾値曲線(式4.4)から求めた値を用いている。



(a) 前順応輝度 L_1 毎の結果 (b) 変化後の視野輝度 L_2 毎の結果
図4.2.2 対比閾値の時間経過(暗順応, 被験者G)



(a) $L_2 = 1.0 \text{ cd/m}^2$ (b) $L_1 = 1000 \text{ cd/m}^2$
図4.2.3 暗順応過渡過程における対比閾値の時間経過(4名の平均値)

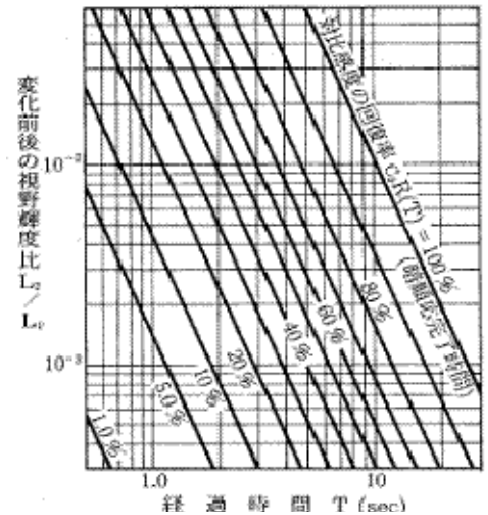


図4.2.4 暗順応過渡過程における対比閾値の回復率(4名の平均値)

図4.2.4は、図4.2.3を基に、対比感度の回復率をパラメータとして、変化前後の視野輝度比 L_2/L_1 と経過時間 T との関係を示したものである。変化前後の視野輝度比 L_2/L_1 と経過時間 T の間には両対数軸上で直線関係があり、暗順応の完了、あるいは、所定の回復率に達する時間は、視野輝度 L_1, L_2 の値には関係なく、両者の比 L_2/L_1 で一意的に決まる。ここで、回復率 $R(T)$ は式4.5のように定義する。

$$\log C_0 = \log L_2 - 0.769\sqrt{4.47 - \log L_2} + 3.96 \quad (2.0 \times 10^{-4} \leq L_2 \leq 3.0 \times 10^2 \text{ cd/m}^2) \quad \dots \dots \dots (4.4)$$

$$R(T) = \frac{1/C_0(T)}{1/C_0} \times 100 = \frac{C_0}{C_0(T)} \times 100 = 1.1 / \{1 + 10^{(-0.7 \log \frac{T^{2.44} \cdot L_2}{L_1} - 0.67)}\} \times 100 \quad (\%) \quad \dots \dots (4.5)$$

C_0 : 視野輝度 L_2 に定常順応時の対比閾値, $C_0(T)$: L_2 に変化して T 秒後の対比閾値

b) 輝度差弁別閾値の回復過程

図4.2.5(a)は、被験者 G について前順応輝 L_1 毎に得られた結果を視野輝度変化後の経過時間 T と、輝度差弁別閾値 ΔL との関係で示したものである。 T 秒後の輝度差弁別閾値 ΔL は、その時点での対比閾値 $C_0(T)$ に

視野輝度 L_2 を乗じることで求められるため、図中の各曲線は、図4.2.2の各 L_2 に対する対比閾値曲線を縦軸方向に L_2 だけ平行移動させたものとなっている。

$$\Delta L_0(T) = C_0(T) \times L_2 \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

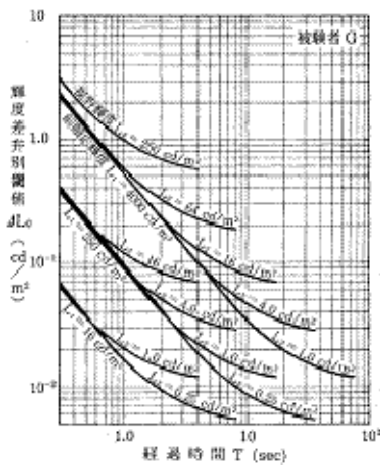
$$\log \Delta L_0(T) = \log C_0(T) + \log L_2 \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

回復曲線の直線部分はほぼ重なり合い、1本の直線とみなすことができる。図4.2.5 (b) は被験者Iによる結果である。輝度差弁別閾値 ΔL の時間経過を示す回復曲線の傾き、および L_1 間の比に比例したT軸方向への移動量には個人差がみられるが、直線部分は重なり合って1本の直線と見なし得ることは、被験者 G の場合と同様であり、定性的には等しい結果 が得られている。他の2名についても同様である。

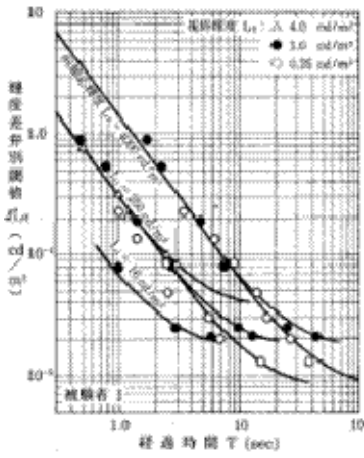
従って、本実験条件内では経過時間Tと輝度差弁別閾値 $\Delta L(T)$ との関係は、両対数軸上で直線と見なして差し支えないものである。これを前順応輝度 L_1 に対する暗順応直線と称する。 L_1 による差異は暗順応直線の時間軸 (T軸) 方向の移動としてのみ現れ、その移動量は L_1 間の比に比例して定まることは、前項の対比感度の回復曲線の性状より明らかなどころである。

視野輝度変化直後は、輝度差弁別閾値は L_1 が同じであれば L_2 の如何に依らず同一の暗順応直線をたどって回復していくが、変化後の視野輝度 L_2 への順応が進むと、回復過程はこの暗順応直線からそれて、 L_2 に十分順応しているときに得られる輝度差弁別閾値 ΔL に漸近 するかたちで回復していくという過程を辿ると考えられる。

図4.2.6は、4名の被験者による各種の前順応輝度 L_1 に対する平均暗順応直線 (式4.8) であり、図4.2.3～図4.2.4より求めたものである。



(a) 被験者 G



(b) 被験者 I

図 4.2.5 輝度差弁別閾値の時間経過 (暗順応)

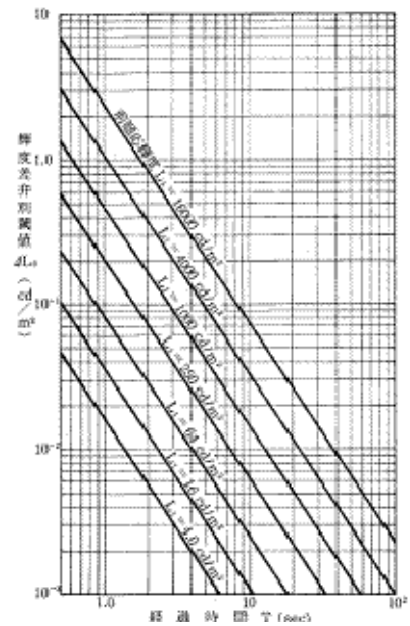


図 4.2.6 前順応輝度 L_1 に対する暗順応直線 (4名の平均値)

$$\Delta L_0 = 7.13 \cdot L_1^{0.604} / T^{1.52} \times 10^{-3} \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

尚、式4.9に示すように、輝度差弁別能力 $1/\Delta L(T)$ 、対比感度 $1/C_0(T)$ の回復率は同じ値であり、図4.2.6は両者に共通する図である。

$$\frac{1/\Delta L_0(T)}{1/\Delta L_0} \times 100 = \frac{\Delta L_0}{\Delta L_0(T)} \times 100 = \frac{C_0 \cdot L_2}{C_0(T) \cdot L_2} \times 100 = \frac{C_0}{C_0(T)} \times 100 = R(T) \quad (\%) \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

(2) 暗順応過渡状態からの暗順応過程

作業者の視線の動きの実態を考えると、視野輝度に順応しきらないうちに、更に視野輝度が変化すること

が十分予測される。視認に関する明順応は短時間で完了する (§ 4.2.3)。したがって、明順応過渡過程において視野輝度が変化する場合は、明順応が完了したものとして変化後の視野への順応を考えれば、視認能力に関しては安全側であり、かつ、時間的誤差も無視しうる程度のものである。そのため、暗順応過渡状態からの暗順応過程についてのみ、検討を行っている。

a) 実験条件

被験者を視野輝度 L_1 に十分順応させた後、視野輝度を L_2 ($<L_1$) に切り換え、 L_1 から L_2 への暗順応過程のある時点 (L_2 への視野輝度変化 T 秒後)において、更に視野輝度をその時点での順応輝度 T_L より低い L_3 に変化させる。その後、視野中央に呈示された視標を被験者が視認するまでの時間を測定することで、 T_L から L_3 への暗順応過程を求めた。ここで、 T_L とは、 T 秒後の順応状態を、これと等しい輝度差弁別能力を持つ定常順応時の順応輝度で示したものである。設定条件、(L_1 , L_2 , L_3) および L_2 の呈示時間 T は表4.2.2に示す5条件であり、被験者はIとJの2名である。

表 4.2.2 設定条件

—暗順応過渡状態からの暗順応の場合—			
前順応輝度 L_1 (cd/m ²)	視野輝度 L_2 (cd/m ²)	L_2 の呈示時間 (sec)	視野輝度 L_3 (cd/m ²)
4000	4.0	3	0.5
4000	0.064	3	
4000	4.0	3	0.064
4000	4.0	6	
250	1.0	3	

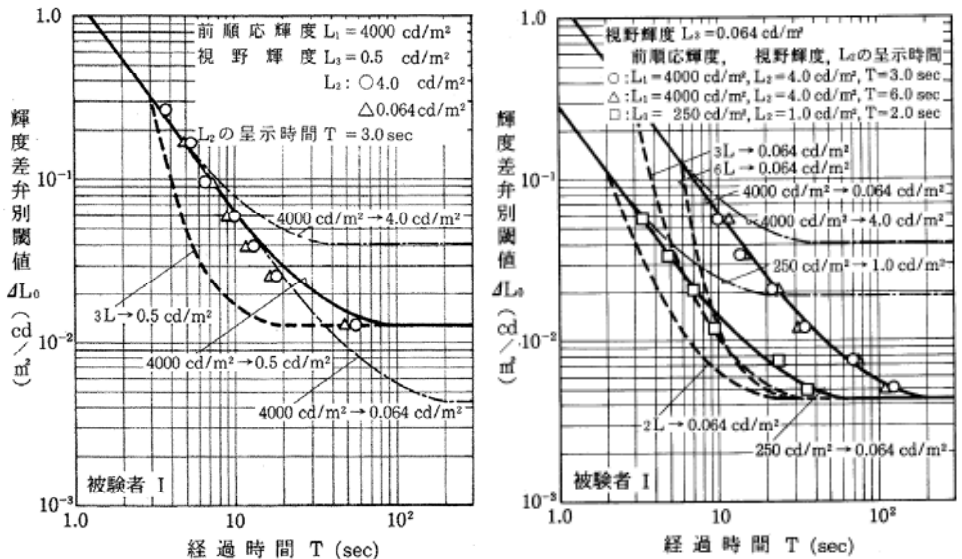
b) 輝度差弁別能力の回復過程

図4.2.7に、被験者Iの場合を例に結果を示す。図中の各点が実測時間であり、各視標が視認できた時間(経過時間 T)を示している。縦軸の輝度差弁別閾値 ΔL_0 は次式よりもとめている。

$$\Delta L_0(T) = C \times L_3 \quad \dots\dots\dots(4.10) \quad \text{ここで、} C : T \text{秒で視認できた視標の輝度対比}$$

図中の各曲線は、被験者Iの定常順応からの暗順応過程に関する結果から求めたものである。実線は前順応輝度 L_1 から L_3 への暗順応過程、鎖線は L_1 から L_2 への暗順応過程、破線は T_L に定常順応している場合の T_L から L_3 暗順応過程である。

図4.2.7(a)は、視野輝度 $L_3=0.5\text{cd/m}^2$ への暗順応過程を、 L_2 が L_3 より明るい場合 ($L_2>L_3$)と暗い場合 ($L_2<L_3$)とに関して検討を行なったものである。いずれの場合も、図中に実線で示した前順応輝度 L_1 に対する輝度差弁別閾値の回復曲線をたどって L_3 へ順応していくという経過をとり、視野輝度を L_3 へ切り換える時点での順応輝度 T_L に定常に順応している場合の回復過程(T_L に対する輝度差弁別閾値の回復曲線=図中破線)を辿るものではない。



(a) L_2 の検討 ($L_3=0.5\text{cd/m}^2$) (b) L_1 と T の検討 ($L_3=0.064\text{cd/m}^2$)

図 4.2.7 暗順応過渡状態からの暗順応

図4.2.7(b)は、視野輝度 $L_3=0.064\text{cd/m}^2$ への暗順応過程を、 L_2 が L_3 より明るい場合 ($L_2>L_3$)について、(L_1 , T)を変化させて検討したものである。これらの場合においても、破線で示した順応輝度 T_L に対する回復過程を辿るのではなく、実線で示した L_1 から L_3 に対する暗順応直線で定まる経過を辿って L_3 へ順応している。

C) 考察

視野輝度 L_1 に順応した状態から視野輝度 L_2 への暗順応過程において、視野輝度はその時点での眼の順応輝度 T_L より低い視野輝度 L_3 に変化した場合は、 L_2 や T に依らず、 L_3 への暗順応過程は L_1 から L_3 への暗順応過程を辿る。従って、順応の時間変化を考慮した明視環境計画には、図4.2.4 (+図4.2.6)と定常順応時の輝度差弁別閾値曲線(または対比閾値曲線 式4.4)があれば対応できる。

暗順応に要する時間や各時点での輝度差弁別閾値は、視野輝度を(切り替え時点での順応輝度以下に)段階的に切り変えた場合も、一気に L_3 に切り換えた場合も等しい。輝度差弁別閾値が等しいならば、視野輝度が明るい程、同一輝度対比の視対象の背景との輝度差は大きくなるため、高い見易さが得られる。従って、視野輝度を段階的に切り換えれば、高い見易さを保ちながら暗順応させることができる。このことを応用した非常用照明の点灯方式を§5.3において紹介している。

4.2.3 明順応課程における視認閾値の時間変化

(1) 実験条件

明順応過程における眼の感度を、視野輝度 L_1 への定常順応状態から視野輝度が $L_2(>L_1)$ に変化した場合について、暗順応の場合と同様の方法により測定した。視野輝度は表4.2.3に示す13組の(L_1, L_2)である。

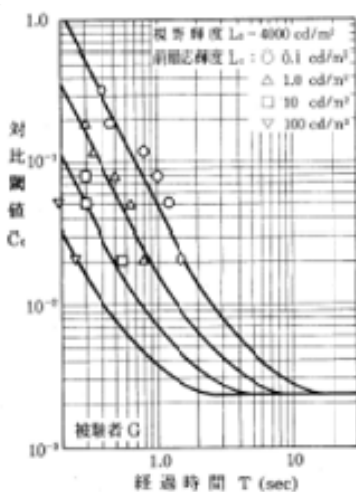
(2) 対比感度の回復過程

図4.2.8に被験者Gの場合を例に結果を示す。図4.2.8(a)は L_1 の影響、図4.2.8(b)は L_2 の影響を示したものであり、暗順応の場合の図4.2.2に対応する。図中の回復曲線は、全て同一形状の曲線とし、順応完了時間が暗順応の場合と同様に变化前後の視野輝度比 L_2/L_1 によって定まるように引いたものであり、実験結果とよく一致している。他の3名の被験者についても定性的には同様の結果が得られているが、回復曲線の傾き、および間隔には個人差がみられる。

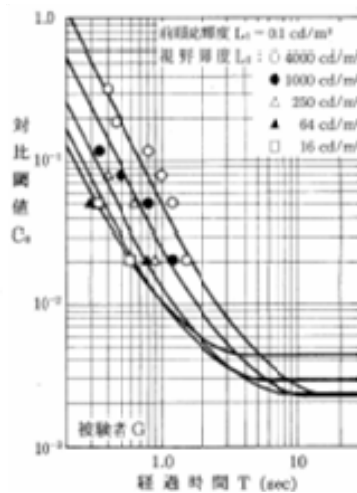
表 4.2.3 設定条件

—明順応過渡過程の場合—

前順応輝度 L_1 (cd/m ²)	変化後の視野輝度 L_2 (cd/m ²)				
	16	64	250	1000	4000
0.1	○	○	○	○	○
1.0		○	○	○	○
10			○	○	○
100					○



(a) L_1 の影響



(b) L_2 の影響

図 4.2.8 対比閾値の時間経過 (明順応, 被験者 G)

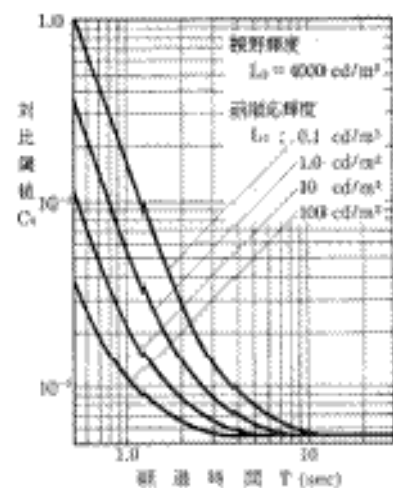


図 4.2.9 明順応過渡過程における対比閾値の時間経過(4名の平均値)

図4.2.9は4名の被験者による明順応過渡過程における対比閾値の時間経過の平均値であり、暗順応過渡過程の場合の図4.2.3に対応する。

図4.2.10は回復率 $R(T)$ をパラメータとして、変化前後の視野輝度比 L_2/L_1 と経過時間 T との関係(式4.11)を示したものであり、暗順応の場合の図4.2.4に対応する。

$$R(T) = 1.04 / \{1 + 10^{(0.445 \log \frac{L_2}{T^{5.5} \cdot L_1} - 0.643)}\} \times 100 \quad (\%) \quad \cdots(4.11)$$

(3) 考察

眼の感度が低下していくのが明順応であるため、視野輝度の変化直後には呈示輝度に定常順応している場合の対比閾値以下のものが視認され、時間の経過とともに感度が低下し、やがては対比閾値以上のもののみが視認されるということになる。しかしながら、本実験条件では、視野輝度の急激な上昇による眼へのストレス、例えば、まぶしさ等の影響が大きく、感度の点からいけば感度過剰による一時的な視認不能が生じたと考えられる。上記結果は、これらの要因による視認能力の一時的低下からの回復過程を捉えたものとする。

回復過程は、全て同一の曲線で近似され、順応完了時間は変化前後の視野輝度比 L_2/L_1 で定まるとは、明暗両順応過程に共通している。両者間の顕著な相違点は、①明順応では暗順応に比べ回復が非常に速く曲線の勾配が急であること、②視野輝度比 L_1/L_2 の違いが及ぼす視認能力回復への影響が暗順応の場合に比し小であることである。

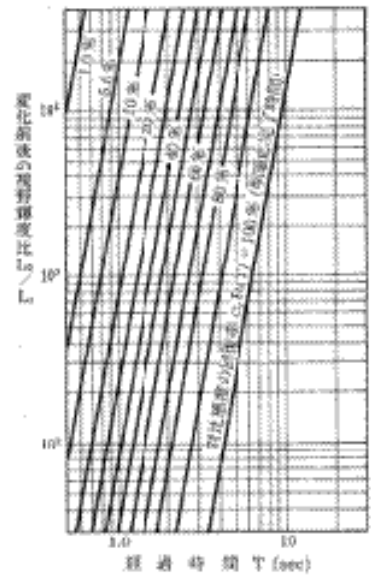


図 4.2.10 明順応過渡過程における対比閾値の回復率 (4名の平均値)

(文責；井上容子 奈良女子大学 生活環境学部)

4.3 周期的視野輝度変動時の輝度差閾値

視野輝度変動に関わる研究としては、フリッカの知覚に関する研究や、単一の視野輝度変動における輝度変化の知覚¹¹⁾や輝度差の過渡過程⁷⁾に関する研究などがある。ここでは周期的な輝度変動下において順応輝度に対応する輝度差閾値を示す。視野輝度が変動しない定常時には、順応輝度は視野内の輝度の空間的な分布と対応づけられる¹²⁾。視野全体の輝度が変動する状態では、人の順応輝度が変動すると考えられる。順応輝度は視野輝度の変動履歴に左右され、その特定には視野輝度変動に対する人の視覚特性の把握が必要となる。ここでは規則的かつ周期的な変動の代表例として矩形波状に視野輝度が変動する状態において、被験者に背景と視対象との輝度差閾値を調整させた結果を基に、視野輝度変動が輝度差閾値に及ぼす影響を概括する。

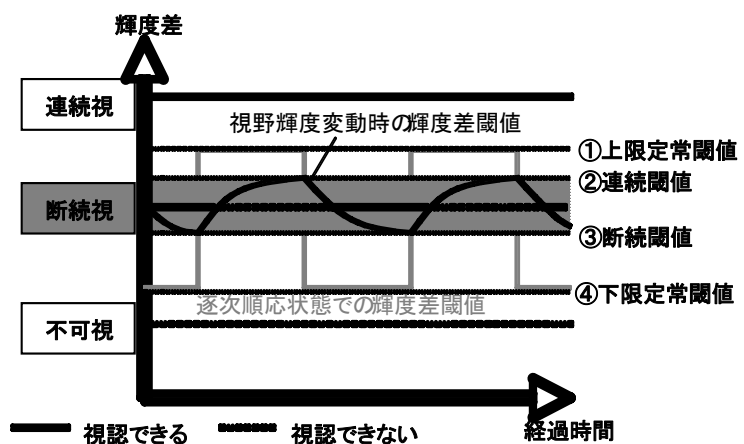


図 4.3.1 視野輝度の矩形波状変動時の輝度差閾値の模式図

図 4.3.1 に視野全体の輝度が矩形波状に変動する状態において推測される輝度差閾値の変動過程の模式図を示す。順応が輝度変動に完全に追従するならば輝度差閾値としては図中破線のように①上限定常と④下限定常閾値とが交互に現れるが、順応には時間を要することや明順応と暗順応でのその時間の差から実際には実線のごとく推移すると考えられる。

視対象と背景との輝度差が輝度差閾値の変動範囲の上端 (②) より大きい場合は視対象は連続して視認できる (連続視)、下端 (③) より小さい場合は常に視認できない (不可視)、それら上下端の間にある場合は視認できる状態とできない状態が交互に出現する (断続視) 見え方になる。

図 4.3.2 に示す視野装置において、変動する視野全体の輝度に対して視対象と背景との輝度差を独立して調整可能とするため視対象を光像（投影画像）として呈示し、上述の見え方の境界となる輝度差（②上限定常閾値、③下限定常閾値）に視対象の輝度を調整させ、それらの間を輝度差閾値の変動範囲として特定した実験の詳細は13,14,15。観察距離 0.8m で一辺の視角が 16, 64, 256（分）の 3 種となる正方形視対象を設定した。

周期 1, 4, 10 [s], 振幅係数 1.1, 1.3, 1.5, 平均輝度 10, 100, 1000 [cd/m²] の各 3 段階の変動特性値の組み合わせで規定される 27 パターンの視野輝度変動を設定した。視野輝度は平均輝度に振幅係数 (k) とその逆数 (1/k) をそれぞれ乗じた輝度で変動する。図 4.3.3 に視野輝度変動の実測値の一部を示す。

ここでは被験者 2 人の内 K.S から得られた輝度差閾値の対数平均値で結果を示す。

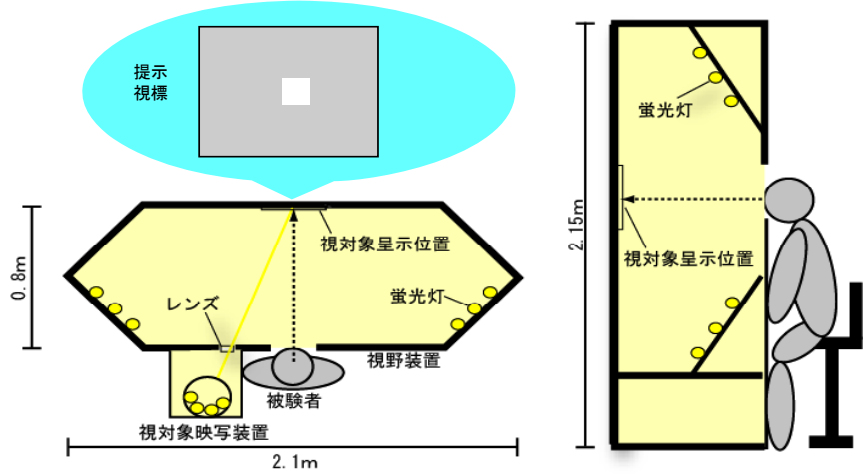


図 4.3.2 視野輝度変動と視対象の呈示装置

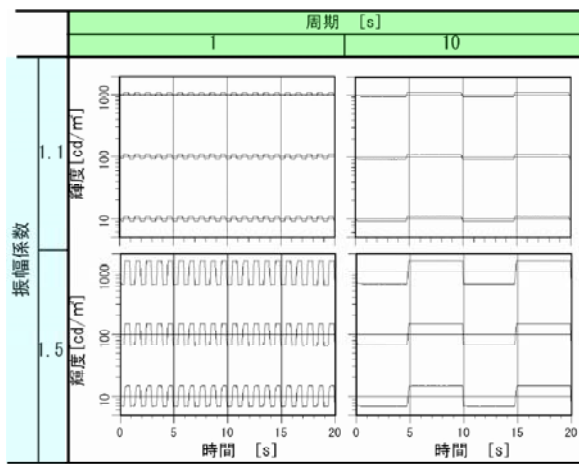


図 4.3.3 視野輝度の矩形波状変動過程

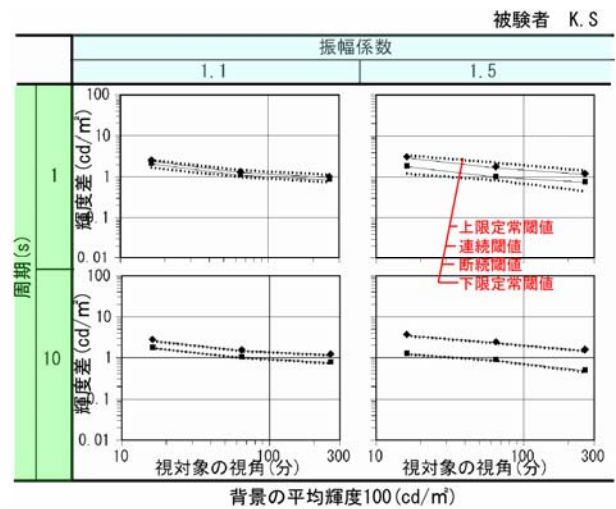


図 4.3.4 視対象の視角と輝度差閾値との関係

図 4.3.4 は、背景の平均輝度 100 (cd/m²) において、周期 1.0, 10(s) と振幅係数 1.1, 1.5 との組み合わせ条件での、視対象の視角と輝度差閾値との関係を示す。連続閾値、断続閾値を実線で示し、視野輝度変動の上限・下限定常閾値を破線で示す。視対象の視角が大きいくほど輝度差閾値は小さい。

図 4.3.5 は、視対象の視角 256（分）において、振幅係数 1.1, 1.5 と背景の平均輝度 10, 1000 (cd/m²) の組み合わせ条件での、周期と輝度差閾値との関係を示す。連続閾値、断続閾値を実線で示し、視野輝度変動の上限・下限定常閾値（周期に関わらず同一値）を破線で示す。全ての条件において視野輝度変動に伴う輝度差閾値は上下限の定常閾値の範囲内で変動する。周期が小さい 1 (s) では、輝

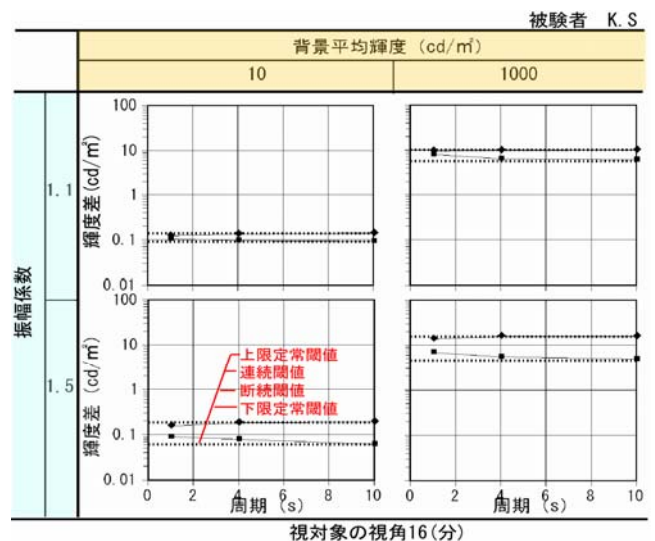


図 4.3.5 周期と輝度差閾値との関係

度差閾値の変動幅は、上下限の定常閾値の幅に対して明らかに小さく、その範囲は上限定常閾側に偏っている。変動幅の縮小は上下限の定常閾値と差があり定常閾値に到達する前に次の視野輝度に変化するためと考えられ、その偏りは明暗順応に要する時間の差異が原因と考えられる。周期が大きいほど輝度差閾値の変動幅は上下限の定常閾値の幅に近くなり、周期が十分に大きい条件では次の視野輝度変化の前に定常閾値に達すると考えられる。視野輝度変動時の輝度差閾値は上下限定常閾値の範囲内で周期が大きいほど振幅係数が大きいほど変動幅が広くなり、背景輝度が高いほど高い輝度差閾値で変動する。視野輝度変動時の輝度差閾値の変動範囲は、平均輝度に最も大きく影響を受け変動範囲のレベルが大きく異なる、次いで振幅係数、そして周期の順に差異が大きい。

図 4.3.6 に定常時の背景輝度と輝度差閾値との関係を示す輝度差弁別閾値曲線 (図 b) を用いて、視野輝度変動時の連続閾値、断続閾値と同じ輝度差閾値を与える定常時の均一輝度視野の背景輝度として、それぞれに対応した順応輝度を同定する方法を破線で示す。図 a) に見られる視角による輝度差閾値の差異は、同定した順応輝度では見られなくなる。視対象の輝度では視対象の大きさが順応輝度には大きく影響を及ぼさないためと考えられる。

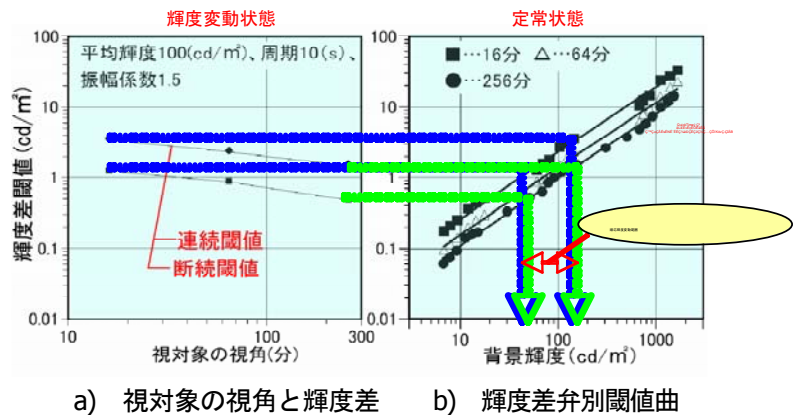


図 4.3.6 順応輝度の同定方法

図 4.3.7 に、図 4.3.4 に示した条件について視対象の視角と順応輝度との関係を示す。視対象の視角に関わらず順応輝度がほぼ一定になる。

図 4.3.8 に図 4.3.5 に示した振幅係数及び平均輝度の組合せ条件について、周期と輝度差閾値との関係、及び、それらの変動幅に対応した順応輝度の変動幅 (それぞれ△, ▽) との関係を示す破線で示す。視野輝度変動時の順応輝度は、平均輝度を跨いで変動し、周期が大きいほど振幅係数が大きいほど変動幅が広がる。周期、振幅と順応輝度との関係には、それらと輝度差閾値との関係と同様の結果が得られている。すなわち、視野輝度変動に伴う順応輝度は定常時の順応輝度の範囲内で変動し、その変動範囲は、明暗順応に要する時間の際によって、周期が小さい場合は高い側の定常時順応輝度に偏るが、周期が大きい場合は定常順応時の順応輝度の幅と一致する。順応輝度変動幅は周期が大きいほど振幅係数が大きいほどが広く、背景輝度が高いほど高い順応輝度となる。

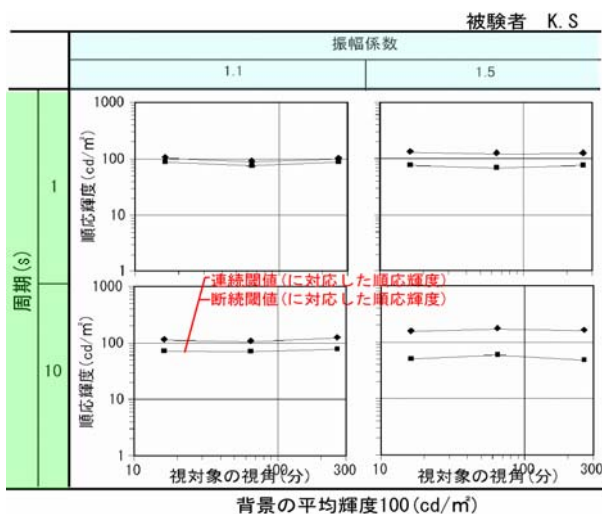


図 4.3.7 視対象の視角と順応輝度との関係

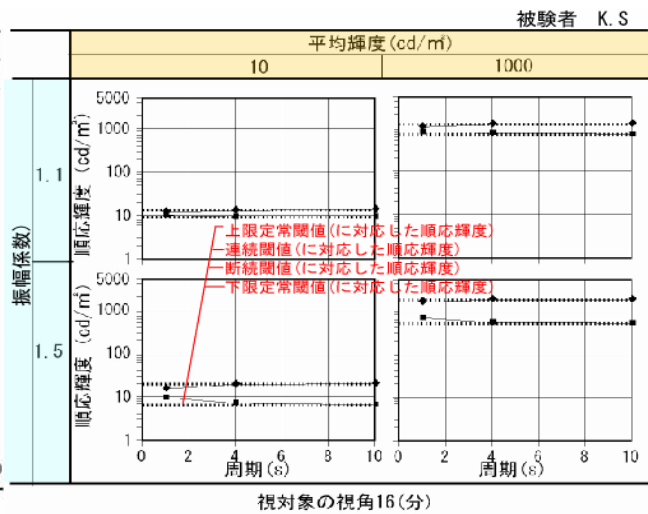


図 4.3.8 周期と順応輝度との関係

(文責；関西大学 環境都市工学部 原直也)

参考文献

- 1) 井上容子：視環境の動的評価法，大阪大学学位論文 5 章，7-8 章，10 章，1985.3
- 2) 伊藤克三，野口太郎，井上容子：実効輝度による視認問題の統一的解明，照明学会誌，第 72 巻第 6 号，pp.34-41，1988.06
- 3) 井上容子，野口太郎，伊藤克三：高輝度面の実効輝度への影響 実効輝度関数 $F(\theta)$ の定量方法に関する検討(その 1)，日本建築学会計画系論文集，第 473 号，pp.1-6，1995.07
- 4) 池上陽子，原直也，井上容子：視野全域での高輝度面による順応輝度増加量の加法性の検討 実効輝度関数 $F(\theta)$ の定量方法に関する検討(その 2)，日本建築学会計画系論文集，第 473 号，pp.1-6，2008.04
- 5) 井上容子，伊藤克三：順応過渡過程における目の感度：実効輝度を用いた視認能力の動的評価法(その 1)，日本建築学会計画系論文集，第 486 号，pp.11-16，1995.02
- 6) 井上容子，伊藤克三：順応過渡時の視認能力と実効率の関係：実効輝度を用いた視認能力の動的評価法(その 2)，日本建築学会計画系論文集，第 474 号，pp.1-6，1995.08
- 7) 井上容子，伊藤克三：均一輝度視野における視認能力の動的評価図：実効輝度を用いた視認能力の動的評価法(その 3)，日本建築学会計画系論文集，第 501 号，pp.17-21，1997.11
- 8) 井上容子，伊藤克三：定常順応時の視認域値に関する研究，日本建築学会近畿支部研究報告集，pp.209-212，1989
- 9) 井上容子：輝度差弁別閾値の標準化，20 歳代前半の場合，日本建築学会近畿支部研究報告集，pp.121-124，2001
- 10) 井上容子他 2 名：ランドルト環視標の実効率に関して，日本建築学会近畿支部研究報告集，pp.9-12，2000
- 11) T.SHIKAKURA, H.MORIKAWA and Y.NAKAMURA : Perception of Lighting Fluctuation in Office Lighting Environment, Journal of Light&Visual Environment, 27-2, pp.75-82 (2003)
- 12) 木村，原，野口：実在空間における順応輝度の特定方法に関する研究，照明学会全国大会講演論文集，pp.236-237 (2002)
- 13) 田中，原，野口：視野内輝度の経時変動状態に於ける順応に関する研究，照明学会全国大会講演論文集，pp.232-233 (2002)
- 14) 大垣，田中，原，野口：視野輝度変動下における視作業性に関する研究その 2 一輝度変動時の読みやすさの予測法の枠組みについて-，日本建築学会近畿支部研究報告集，43，pp.45-48 (2003)
- 15) 大垣，田中，原，野口：視野輝度変動時の読みやすさの予測法の枠組みについて，照明学会全国大会講演論文集，p.177 (2003)

5 不均一な照明環境の評価

5.1 コントラスト・プロファイル法を用いた不均一照明環境の評価

5.1.1 はじめに

自宅に居るとき、十分に明るい昼間に室内で読書をしていても、窓からの光だけでは暗く感じることもある。このようなとき、室内の電灯をつけることになるが、実際にはあまり明るくならず、文字も読みやすくない。ところが、その同じ電灯を夜につけると、室内は十分明るくなり、文字もとても読みやすくなる。同じ照明器具を点灯すれば、その照明器具から与えられる光の量は同じだから、このような事実は、夜部屋を十分に明るくし、物を見やすくすることができた量の光が、昼間にはほとんど効果を上げないということを示している。

このような光の量が同じでも人の感覚量が異なるという現象は、順応という言葉を用いて説明されることが多い。私たちの感覚器官には、外からの刺激に応じて感受性を変化させ、変化だけを検出できるようにするという特性があって、この感受性が変化する過程、あるいは変化した状態を順応と呼ぶ。昼間の部屋と夕刻の部屋では、われわれの目が順応している状態が異なるため、同じ量の光を一方は暗く、一方は明るく感じると説明されることになる。

5.1.2 順応と対比

しかしながら、このような状況を別の言葉を使って表現することもできる。ここで具体的な例として、机の上においた白い花瓶を見るという状況を設定してみよう。

われわれが机の上においた白い花瓶に目を向けているとき、われわれの目には、その花瓶だけではなくその背後にあるものも同時に見える。背後に見えるものは、机、部屋の壁、家具といったものであり、場合によれば窓や床なども見えることもあるだろう。ここで、この花瓶だけにスポットライトを使って照明を当ててみる。このとき花瓶の輝度は、ライトの出力と花瓶の色によって決まる、ある値になる。夜、外からの光がほとんど入らないようなとき、花瓶の輝度はほぼこのスポットライトからの光だけで決まるが、その背後にある机や壁や家具には光がほとんど当たらないため、その輝度はとても低くなっている。このとき花瓶は明るく輝いて見える。

ここで花瓶を、視対象と考え、机や壁や家具をその背景と考えると、この状況を「視対象と背景との間には正の強い輝度の対比がある」と表現することができる。

次に昼間、大量の光が室内に流入してくる時を考える。このとき、花瓶にはスポットライトの光と、日の光が与えられているため、その輝度は夜の場合よりもかなり高くなる。一方、その背後にある机や壁などにも大量の光が当たるため、これらも高い輝度になる。このとき花瓶は、その輝度が夕刻よりもかなり高くなっているにもかかわらず、あまり明るく感じない。そしてこの状況は、視対象と背景との間の輝度の対比が小さい、場合によっては負の輝度の対比がある。このように表現できる。

ここで背景を私たちの視野全体、すなわち目に見えるすべての範囲にまで広げて考えれば、視対象と背景の対比を考えることと、目の順応状態を考えることが、実は同じ状況を表現していることが分かる。このように対比を用いてこのような状況をとらえることは、順応を用いて表現することに比べて大きなメリットがある。それは対比を用いた場合、その状況を数量的に表現できるということである。

5.1.3 明るさの同時対比

一方、対比というと明るさの同時対比という現象がよく知られている。これは同じ明度をもつ灰色の色票が、その色票の周辺にある色によって影響を受け、周辺が黒で囲まれたときには明るく、周辺が白で囲まれたときには暗く知覚されるという現象で、図 5.1.1 のように、白と黒という二つの異なった背景の中央に置かれたグレーの同じ反射率をもつ色票が、異なった明るさに見える。

ここで、中央のグレーの色票を視対象、その周囲の色票を背景と考えると、視対象と背景との間に輝度の対比があることにより、視対象の明るさが異なって見えると表現できる。そうすると、前節で

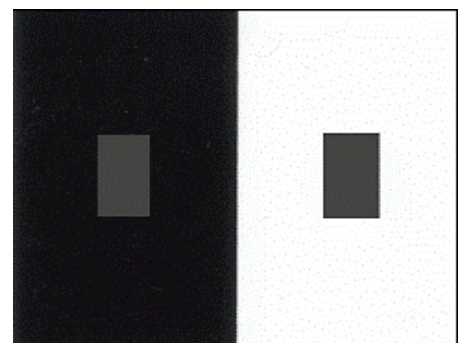


図 5.1.1 明るさの同時対

順応を対比で説明しようとした方法と同じ方法で、明るさの同時対比が生じる状況を表現できることになる。

ただ背景の大きさは異なる。明るさの同時対比の場合、目の前に色票を配置しているのだから、その背景は視野全体に比べるととても小さい。そうすると問題は、大きさの異なる背景をどのように表現すればよいかということになる。そしてまた、少し注意深く考えてみると分かるように、視対象の大きさもまた、現実の光環境では簡単に定義することができないという問題もある。

5.1.4 コントラスト・プロファイル法を用いた対比の表現

ある視対象と背景との輝度の対比は、次のような輝度比を用いて表されることがしばしばある。

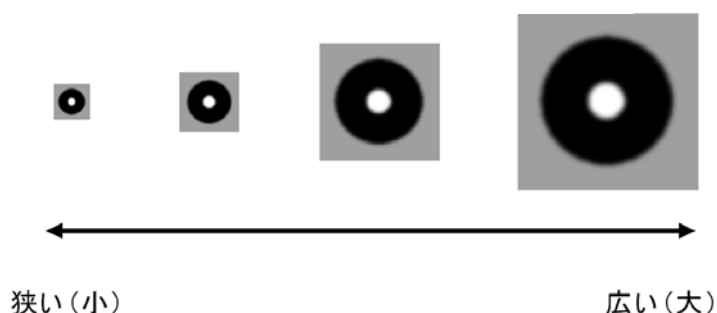
$$\text{輝度比} = (\text{視対象輝度}) / (\text{背景輝度})$$

輝度の対比をこのような輝度比で表すには、まず視対象輝度と背景輝度を決めなければならない。それでは、たとえば図 5.1.2 のような輝度画像があったとき、どのようにして視対象輝度と背景輝度を決めればよいのか。それに答える一つの方法がコントラスト・プロファイル法と呼ばれる対比(コントラスト)の表現方法である¹⁾。



図 5.1.2 実際の輝度画像

コントラストを考える範囲を変化



対象輝度を白の部分、周辺輝度を黒の部分として、コントラストを考える。

図 5.1.3 コントラスト・プロファイル法の考え方

コントラスト・プロファイル法では、視対象と背景のコントラストが一つに定まるとは考えない。そうではなく、視対象と背景とのコントラストは、どのような広さ(空間的な大きさ)のコントラストを考えるかを決めて初めて量として表現できると考える。具体的にいえば、図 5.1.3 に示すように、ある点とその周辺とのコントラストには、その点を中心とした針の先端ほどの小さな領域とその背景領域とのコントラストもあるし、その点を中心とした親指くらいの領域とその背景領域とのコントラストや、その点を中心とした大きな風船くらいの領域とその背景とのコントラストもあると考える。そうするとコントラストは、コントラストを考える空間的な大きさの関数として表現されることになり、大きさ毎にコントラストが求められることになる。

このようにしてコントラストを表すと、視野全体のコントラストを考えなければならないような場合、すなわち順応を近似するような場合には、空間的に大きいコントラストについても算出する必要があるが、明るさの同時対比のように狭い範囲のコントラストしか考えないでよい場合、空間的に大きいコントラストはほぼ0、輝度比でいえば1と考えてよいということになる。

この方法をさらに展開すると、さまざまな空間的な大きさを持つコントラストが、われわれの「明るさ知覚」に及ぼす効果をあらかじめ求めておけば、算出したコントラストの値から視対象の明るさ知覚を予測できると考えることができることになる。このようにして予測された明るさの知覚が次項に述べる「明るさ尺度値」である。明るさ尺度値の計算には、まず大きさ毎のコントラストの強さを計算して、その値に、大きさ毎に与えられた「コントラストが明るさ知覚に及ぼす影響を表す係数」を掛け、その結果をすべて足し合わせ、さらに輝度の絶対値の効果も加味して、明るさ知覚が予測される。

5.1.5 輝度画像と明るさ画像

ここで、視環境が1画素0.1度の大きさを持つ視野角60度の輝度画像として表現されており、この輝度

画像の一つの画素に対応する小さな領域に、自分の視線を向けた状況を考える。このときの目の順応状態は、その画素の部分とその背景との対比の状態で表現されることになるが、順応状態を正確に表現しようとするとき、背景を 180 度まで考える必要があるため、60 度の画角に対応した輝度画像では、順応状態をかなりあらく近似しているということになる。

ここで仮に、順応状態が 60 度の画角で近似できるとして、その画素の部分を見て感じる明るさ（明るさ知覚）は、その順応状態を加味した上で、言い換えればさまざまな空間的な大きさをもつ対比を加味した上で、その画素の輝度の値から求められることになる。このような考え方を採用すると、輝度画像が与えられれば各画素の明るさ知覚を予測できることになり、この予測された明るさ知覚を「明るさ尺度値（NB）」と呼び、各画素がこの明るさ尺度値を持つ画像を明るさ画像という。明るさ尺度値は、普段使われている明るさを表す形容詞と図 5.1.4 のような関係を持っている。

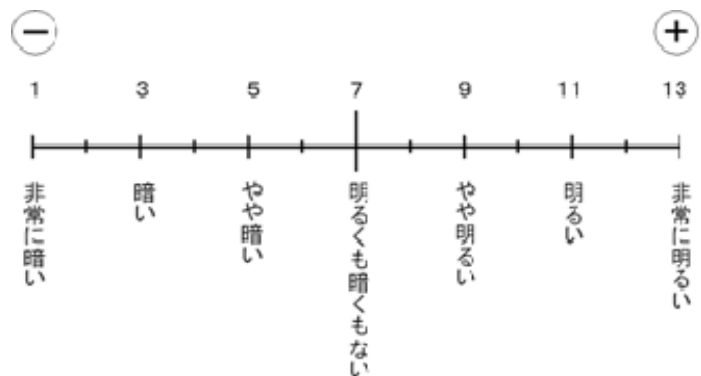
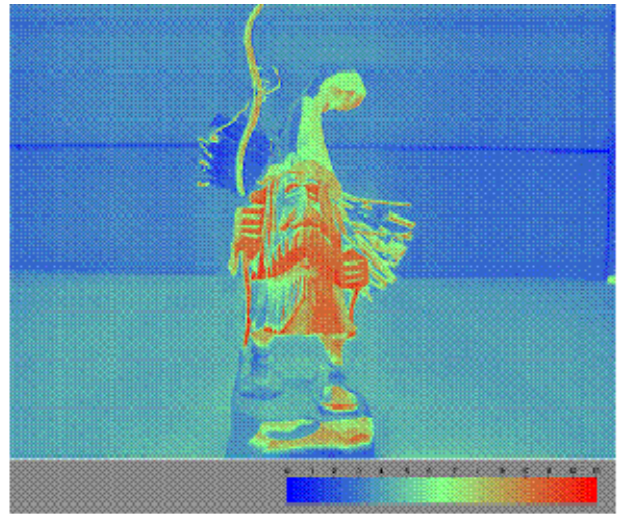


図 5.1.4 明るさ尺度値と明るさの形容詞の関係

実際の輝度画像から明るさ画像への変換には、ウェーブレット変換という変換方法が用いられる⁴⁾。ウェーブレット変換は、コントラスト・プロファイル法における対比を、近似的なものではあるが高速に算出できる変換方法である。またこの演算では、輝度画像の端部の対比を算出するとき、不足した画像を鏡像で補う。輝度画像の端部の明るさ尺度値は、そのような考え方で近似されたものであるということを理解しておく必要がある。



(a) 輝度画像例



(b) 明るさ画像例

図 5.1.5 輝度画像とそれより変換された明るさ画像の例

(文責；東京工業大学大学院 総合理工学研究科 中村芳樹)

参考文献

- 1) 中村芳樹：光環境における輝度の対比の定量的検討法；照明学会誌, Vol.84, No.8A, 522-528, 2000
- 2) 中村芳樹, 江川光徳：均一背景をもつ視対象の明るさ知覚 —輝度の対比を考慮した明るさ知覚に関する研究(その1)—;照明学会誌, Vol.88, No.2, 77-84, 2004
- 3) 中村芳樹, 江川光徳：コントラスト・プロファイルを用いた明るさ知覚の予測 —輝度の対比を考慮した明るさ知覚に関する研究(その2)—;照明学会誌, Vol.89, No.5, 230-235, 2005
- 4) 中村芳樹：ウェーブレットを用いた輝度画像と明るさ画像の双方向変換—輝度の対比を考慮した明るさ知覚に関する研究(その3)—;照明学会誌, Vo.90, No.2 pp.97-101, 2006

5.2 Feu (フー) による評価

5.2.1 色モード境界輝度

色モード (色の見えのモード) とは、現象学的な、純粋に見え方による色の分類である³⁾。物体表面のように光を反射していると知覚する場合を「物体色モード」、自ら発光していると知覚する場合を「光源色モード」と呼ぶ。これらの見え方は、人間の視覚系の判断であって、必ずしも物理的な状況と一致しない。例えば物理的に発光している CRT ディスプレイも周囲が十分明るければ物体色に見え、反射物体でもその部分だけスポット照明を施せば光源色に見える (典型例は建築物のライトアップや舞台照明)。

測定方法は単純で、図 5.2.1 のように、明るさを評価したい場所に灰色の色票を設置し、部屋の照明とは独立の光源でスポット照明 (図では床のプロジェクタ) を当て、その強度を上げてゆく。スポット照明の強度が弱ければ色票は物体色のままで、灰色から明るい灰色、さらに白色へと、単に高明度の色票に置き換わるように見える。さらに強度を上げるともはや反射表面ではなく自発光しているように見える光源色モードへと切り替る。観察者は、物体色に見える上限の照明光強度に設定するのである。この物体色モード上限輝度は「色モード境界輝度」と呼ばれ、空間の明るさによって上下する。



図 5.2.1 色モード境界輝度測定の様子

物理的に 1.0 (あるいは 100%) を越える反射率をもつ物体表面は存在しない。視覚系も何らかの方法で色票面に当たる光の強さと、表面の反射率を推定し、その知覚反射率が 1.0 以下であれば物体色モードと判定しているはずである。つまり物体色モード上限輝度は、反射率 1.0 を持つ表面と視覚系が判断したときの輝度であり、その値は、表面に当たる光の知覚量そのものである (知覚反射率=1.0 なので、知覚的には「反射光=入射光」が成立)。これが、色モード境界輝度をその場所の明るさ感として考える根拠である。

(1) 色モード境界輝度と ME 法による明るさ感

部屋の明るさ感評価に多用されるマグニチュード推定法 (ME 法) と色モード境界輝度による明るさ感評価との対応を調べた⁴⁾。被験者は併置された 2 つの模型空間 (参照室とテスト室) を観察し、参照室の明るさを基準にして、テスト室の相対的な明るさを答える (ME 法)。色モード境界輝度測定では、LED を用いて図 5.2.1 のスポット照明装置のミニチュア版を作製し、模型の中央に置いて物体色モード上限輝度に設定した。テスト室の内装を 5 種類、両室の床面照度を 75, 150, 300lx として様々な組み合わせで実験を行った。

ME 法によって得られた参照室に対するテスト室の明るさ感の比と、参照室に対するテスト室の色モード境界輝度の比は、次式で表され。明るさ感は色モード境界輝度の約 1/2 乗に比例するということが分かった。

$$\text{明るさ感} \propto \text{色モード境界輝度}^{1/2}$$

(2) 明るさ感に与える照度と内装の影響

6 畳のリビングルームを、壁や物体の明度制限をしない通常的环境 N と最高明度をマンセルバリュー 5 以下に制限した環境 L において色モード境界輝度を測定した (図 5.2.2 参照)⁵⁾。例えば環境 L では壁を 5Y9/1 から N2 へ、カーテン、雑誌、観葉植物の幹、造花をそれぞれバリュー 5 以下に替えた。それ以外は環境 N と同一である。部屋中央のテーブル Tb 上の水平面照度を 3~300lx に設定し、9 名の被験者に色モード境界輝度を設定させた。

図5に示すように、同じ環境であれば色モード境界輝度は照度に比例する。しかし環境Lの境界輝度は環境Nの約1/2となり、水平面照度が等しくても、内装により明るさ感が変わることが示された。

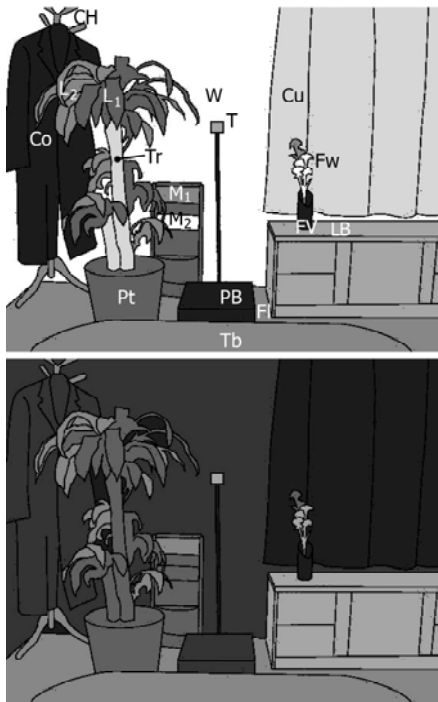


図5.2.2 色モード境界輝度測定環境
通常環境N(上)、低明度内装環境L(下)

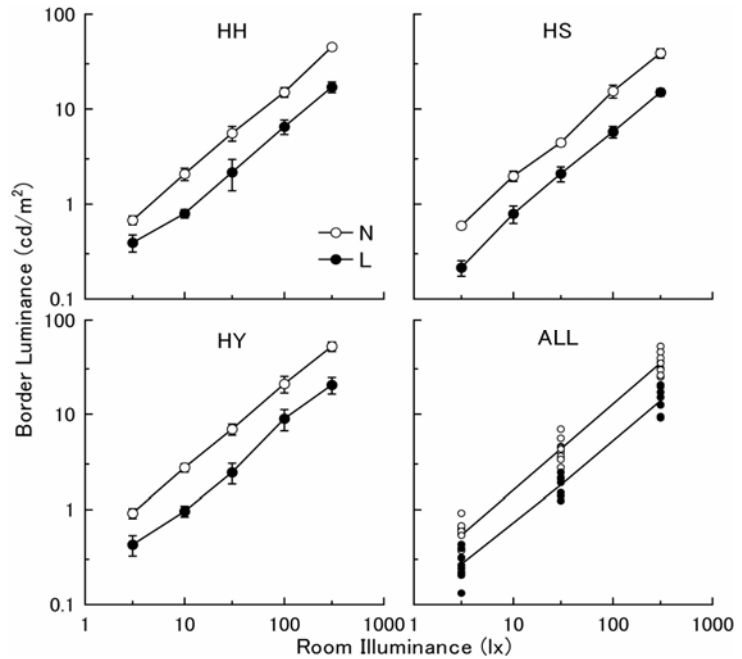


図5.2.3 測定結果

○環境N、●環境L、右上、左上、左下はそれぞれ被験者HS、HH、HYの15回の平均値。右下は他6名を加えた9名の被験者の設定値と平均値。

5.2.2 Feuの開発

以上述べてきたように、色モード境界輝度を用いることで、空間の明るさ感を定量的に評価することが可能になる。そこで、色モード境界輝度を空間の輝度分布から予測できる式を求め、さらに、実際の照明設計に使いやすいように、住宅の居間空間としてちょうど良いと感じる空間の明るさ感の平均が値10となる下記式に示す空間の明るさ感指標「Feu」の算出式を求めた。

$$Feu = a \cdot \left(\sqrt[N]{\prod_{\theta=vs}^{\vee e} \prod_{\phi=hs}^{\text{he}} L(\theta, \phi)} \right)^b$$

ここで、 $L(\theta, \phi)$ は観察位置からの角度(θ, ϕ)の位置における輝度分を示しており、 a, b, vs, ve, hs, he は空間の観察条件に応じて決まる定数である。一連の実験により、これら各定数は、 $a=1.5, b=0.7, vs=50, ve=35, hs=-50, he=50$ であることが導き出された。

図5.2.4は、8畳サイズの居間空間において、3灯の照明器具を配置し、各照明器具を調光させることにより設定された計12条件の照明条件に対して求められた色モード境界輝度⁶⁾と、輝度分布から上記式に基づき求められたFeu値との関係を示している。

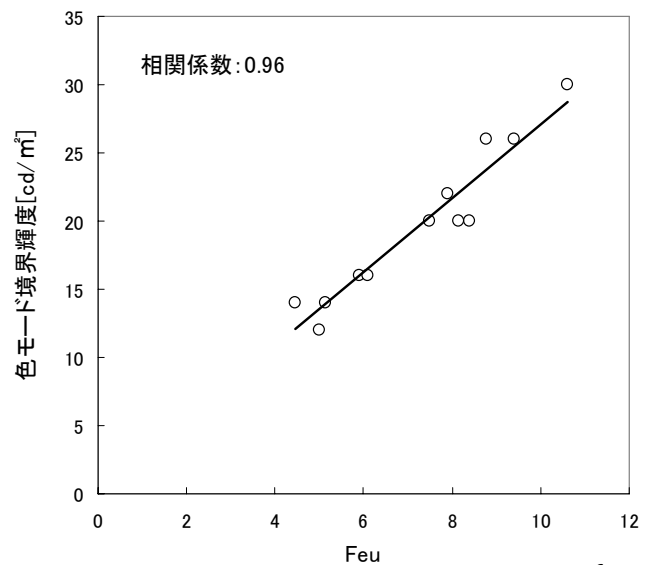


図5.2.4 Feu値と色モード境界輝度との関係⁶⁾

なお、Feu(フィー)は、フランス語で火や炎の意味であり、現在のところ、松下電工(株)独自の指標として、SmartArchi、HomeArchiシリーズなどの空間を意識した商品を用いた光環境の計画・評価に活用されている⁷⁾。

同社は、上記式に基づき、現実空間であれば CCD カメラからの画像を、設計段階であれば輝度分布を正確に表現するリアル CG のデータを用いて **Feu** を算出し、様々な光環境の明るさ感評価を行っている。

5.2.3 Feu による光環境計画・評価の実例

これまで、明るさ感が十分にあるにもかかわらず、照度値が低いという理由で受け入れられなかった提案が多くある。しかし **Feu** 値を提示することで、そのような計画案を安心して推奨することが可能になった。例えば廊下の照明 (図 5.2.5) だが、天井間接照明 (右) はダウンライト (左) に比べて床面平均照度は低いにもかかわらず、高い **Feu** 値が得られ、結果として省エネルギーの照明空間となることが分かる。これまでは、明るくても照度が低く、右の案は採用されなかったのである。

図 5.2.6 は内装の異なるエレベータホールに同じ照明器具を施したときの比較であるが、右の空間の方が **Feu** 値が高く、内装の違いが明るさ感に与える効果を適正に評価していることが分かる。

Feu はこれまで未解決であった課題解決の糸口をもたらず。例えば「タスク&アンビエント照明」と「昼光利用の調光システム」、どちらも省エネで視作業に十分な光量を提供するが、暗くて陰気な雰囲気になるという問題点を指摘される。前者では、アンビエント照明に壁面の間接照明やきらめき感を与えるスパークル照明を施し、物理的な光量を増やさずに明るさ感を向上させればよい。とくにこれらの照明は総光束がまだ低い LED 照明には格好の活用例となる。実際に大阪府の環境省委託事業でも実証済みである (8)。後者の昼光利用では照度が一定になるように室内人工照明の出力調整を行っているが、**Feu** と照度の両方を用いて制御すべきであろう。



(a) ダウンライト 193lx, Feu8.6, 16.5W/m² (b) 天井間接照明 140lx, Feu12.5, 13.6W/m²

図 5.2.5 異なる照明方法の比較



(a) Feu15.8 (b) Feu19.9

図 5.2.6 内装の影響 (EV ホール)

5.2.4 Feu の今後とこれからの光環境計画・評価

窓から見える戸外と室内を同一空間のように感じさせる室内照明調光 (連続感照明)^{9, 10)}、逆に物理的に一つである大空間を照明によって分断し複数空間のように感じさせる方法、さらに、壁に設置された人工障子窓の明るさと色を調節してあたかも本物の戸外が壁の向こうにあるかのように見せる CWL (コミュニケーションウィンドウライティング)^{11, 12)}などを、これまでに提案してきた。いずれもが、照度ではなく明るさ感による調光制御を必要とする。逆に言えば、明るさ感を物理的な光量と区別したからこそ、これらの発想が生まれたと言える。

明るさ感指標 **Feu** の登場で新しい光環境の提案・評価が可能になった。しかし **Feu** は発展途上であり万能ではない。ここに紹介しないが、様々な改良が加えられるべく研究が進行中である。かつて JIS 照度基準が独り歩きし、本来意図しない範囲にまで拡大活用され、光環境に対する柔軟な発想を閉め出してしまったように、**Feu** が同じ轍を踏まないためには、**Feu** の開発意図や適用範囲を正しく理解して用いることが肝要である。

ここに紹介した「明るさ感」は一例であり、光を扱う尺度が他にあってもよい。要するに光を複数の尺度で扱えば、それだけ新しい光環境の創造が可能になるということである。さらに照明ハードとソフトが発展するには新しい尺度の創造が必須であり、ときに、新たな技術は既存の尺度では正しく評価できないことがある。新たな光の付加価値を見いだすとともに、それに見合った尺度を確立することが重要と考える。

(文責 ; 松下電工 (株) 照明事業本部 岩井彌, 立命館大学情報理工学部 篠田博之)

参考文献

- 1) 木村・加藤・関口；「住居における室内の光環境に関するアンケート調査—居住者と設計者の意識比較—」，第 29 回 照明学会東京支部大会，2003
- 2) JIS 照度基準；JIS Z9110，1979
- 3) 篠田・藤枝；「色彩工学入門」，第 2 章，森北出版，2007
- 4) 山口・篠田；「色モード境界輝度による空間の明るさ感評価」，照明学会誌，vol.91，No.5，pp.266-271，2007
- 5) 山口・篠田・池田；「照明認識視空間の明るさサイズの測定による実環境における空間の明るさ感の評価」，照明学会誌，vo.86，No.11，pp.830-836，2002
- 6) 井口・岩井・藤野・山口・篠田，「色モード境界輝度による空間の明るさ感評価の応用事例:住宅居室における間接照明を主体とした一室複数灯配置の明るさ感評価」，照学全大，p. 161，2005
- 7) 岩井；「快適な照明空間創りのための新しい照明設計の考え方-空間の明るさ感指標「Feu」に基づく照明設計」，住宅電気利用技術懇話会誌，No.25，pp.25-33，2007
- 8) 大阪府環境情報センター；「地球温暖化対策技術開発事業-白色 LED を使用した省エネ型照明機器に関する技術開発-成果報告書」，平成 16 年度環境省委託事業，2005
- 9) 村中・篠田・池田；「居住空間における連続間照明の自動化」，照明学会第 34 回全国大会，講演論文集，p.211，2001
- 10) 井上・山口・篠田・池田；「室内から屋外への連続感を与える照度の許容範囲」，日本色彩学会第 35 回全国大会，日本色彩学会誌，Vol.28 Supplement，pp.126-127，2004
- 11) 井上・山口・篠田・池田；「コミュニケーション・ウィンドウ・ライティング(CWL)による外界情報伝達」，照明学会第 36 回全国大会，講演論文集 p.170，2003
- 12) 井上・西川・山口・篠田・池田；「コミュニケーション・ウィンドウ・ライティング (CWL) における室内印象評価」，照明学会第 37 回全国大会，講演論文集 p.196，2004

5.3 空間周波数分布の影響

我々を取り巻く光環境は，一般に不均一である。我々はそのような不均一かつ動的な光環境において，空間の明るさ感を瞬時に判定する能力を有している。空間の明るさ感は照度や平均輝度だけでなく，照明の方法や照らされている部屋の状況等によっても大きく異なるが，「不均一さ」の定量化が困難なこともあり，外界からの複雑な光情報をどのように処理して明るさ感を決定しているのかは未だ明らかとはされていない。明るさ感は，照度や平均輝度だけでは決定されず，空間周波数分布にも影響されることが示唆される。明るさ感の決定メカニズムを解明し，その結果を応用することは，間接照明空間やライトアップ，そして道路等などの不均一光環境の照明設計・評価への応用が期待できるなど，有効性が高い。

本稿では，映像から空間の明るさ感を自動的に評価するシステムの開発を目指し，実際の空間をカメラで撮影し，光環境の輝度分布を空間周波数分布の観点から解析¹⁾し，人間による評価実験を行うことで，人間が感じる画像や空間の明るさ感がどのような情報で決定されているのかを明らかにするとともに，その定式化した試みについて紹介する。

デジタルカメラ(Sony Cyber-shot DSC-P9)で室内を撮影した 7 枚の画像(#001~#007)から，実験に適していると思われる領域を切り抜き，512×512 画素の 8bit グレースケール画像(参照画像)を作成した。さらに，7 枚の画像のパワースペクトルを平均した画像(#008)を作成し，それら 8 種類の画像に対して空間周波数情報を操作し，コントラストを変化させた刺激画像(9 種類：コントラストゲイン 0.1 倍~0.9 倍まで 0.1 倍ステップ)，ならびに高空間周波数をカットした刺激画像(13 種類：カットオフ空間周波数(ガウス窓が半値となる周波数) 1~13 c/deg まで 1 c/deg ステップ)を作成した。こうして用意された画像を 21 インチ CRT ディスプレイ(Sony GSM-F520)にオリジナル画像を参照刺激とし，処理した画像をテスト刺激として並べて被験者に提示した。視距離は 50cm，刺激画像の大きさは，それぞれ 15cm x 15cm (16.7°x 16.7°)とした。被験者は，参照画像の輝度を変化させることで，2 枚の並べられた画像の明るさ感が等しいと感じるように

調節した。このときの操作量を分析することで刺激画像の明るさ感が参照画像と比較してどの程度変化していたかを測定し、空間周波数情報の操作が明るさ感に与える影響を明らかにする。もし空間周波数情報の操作により明るさ感に違いが生じる場合は、並べられた画像の明るさ感は違って見えるはずである。実験は暗室内で行なった。マッチングの際の参照画像の輝度変化は、画像に撮影された空間の照度が下がった場合と等価な変化が起こるように処理した。

今回、画像処理による明るさ感の減少率を定量化するために、明るさ感マッチングした際のマッチング画像の平均輝度（等価平均輝度）が処理前画像（元画像）の平均輝度に対してどれだけ変化したかの割合（＝（処理前画像の平均輝度－マッチング画像の平均輝度）／処理前画像の平均輝度×100[%]）によって計量化した。これは、明るさ感の非線形性やスケール等を無視しているため、実際の知覚的な明るさ感覚の変化に直接対応するものではないが、今回は便宜的にこれを「明るさ感の減少率」と定義して以下に議論を進める。

この際、例えば減少率 40%の結果が減少率 20%の結果に対して明るさ感そのものの減少率が2倍あるということを保証しないことに留意する必要があるが、大小関係については比較が可能であり、また上記定義を用いることで等価平均輝度（明るさ感が等しくなる処理前画像の平均輝度）を求めることも可能である。

2人の被験者（Sub.MW:26歳、Sub.SF:22歳、ともに色覚・視覚機能正常）の結果はほぼ同一だったため、平均値を棒グラフで示し、それに全体の標準偏差棒を加えたのが図 5.3-1 である。横軸はコントラストゲイン減少率、縦軸に明るさ感の減少率の結果をプロットしたグラフである。図 5.3.1 のグラフから、平均輝度を一定にしているにもかかわらず、コントラストを低下させると明るさ感が顕著に減少することが分かる。全体のコントラストを 0.9 倍に減少させると 16.5%の明るさ感の減少が生じ、コントラストを 0.1 倍にするとおよそ 73%の明るさ感の減少が生じる。

図 5.3.1 の結果は8種類の画像(#001～#008)の平均値であるが、画像によって減少率に大小の違いが見られた。

これは、元画像のパワースペクトル分布が画像によって異なるためであると考えられる。図 5.3.1 の実線は、パワースペクトル平均画像#008 の結果を示す。精度の高い明るさ感評価システムの実現には、画像によるパワースペクトル分布の違いを考慮する必要があると考えられるが、図 5.3.1 の平均画像の結果は、平均的なテンプレートでも実用的な明るさ感評価システムを構築できる可能性を示唆している。

図 5.3.2 は、3人の被験者（Sub.SF:22歳、Sub.SK:23歳、Sub.YY:22歳、ともに色覚・視覚機能正常）ごとにローパスフィルタリングを行った場合の明るさ感の変化をプロットしたグラフで、曲線は対数近似した結果である。塗り潰した丸シンボル(●)は、3人の結果の平均値を示している。横軸はカットオフ周波数（これより高い周波数成分はすべてカット）、縦軸は図 5.3.1 と同様の程度の明るさ感変化である。この結果を見ると、ローパスフィルタリングを行なった場合も、カットオフ周波数を低くするほど、すなわち高い空間周波数成分をより多く取り除くほど、平均輝度一定であっても明るさ感が減少することを示している。平均値で見ると、明るさ感の変化は 9c/deg～13c/deg までがほぼ 10%の減少で、そこからカットオフ周波数が低くなるにつれて、1c/deg まで最大 22%まで減少している。コントラストを減少させた場合（最大 73%減少）に比べると、明るさ感の減少率は相対的に小さく、カットオフ周波数 1c/deg 以下の周波数成分が、明るさ感に大きく寄与していることを示している²⁾。

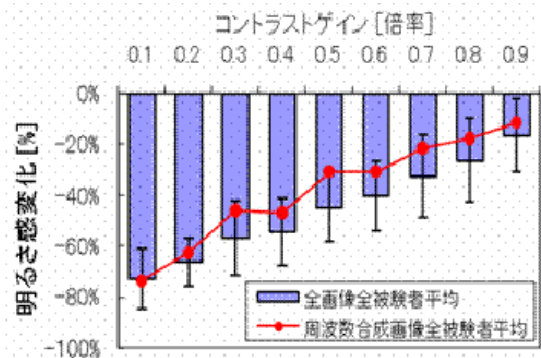


図 5.3.1 コントラストゲインに対する明るさ感の変化

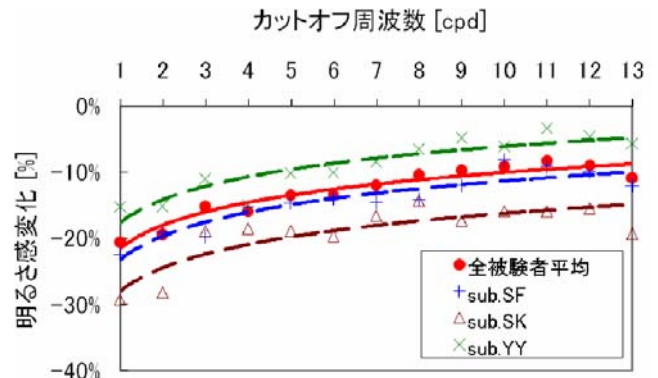


図 5.3.2 ローパスフィルタリングのカットオフ周波数に対する明るさ感の変化

シーンのコントラスト情報ならびに空間周波数分布が、明るさ感に寄与していることが実験的に示された。すなわち、平均輝度一定の条件下において、画像全体のコントラストを減少させると明るさ感が大幅に減少し、その減少率はコントラストゲインに対して線形的に変化する。また画像に対してローパスフィルタリングを施した場合にも、明るさ感は減少した。以上の結果は、不均一な画像情報から空間周波数情報を抽出・解析することで明るさ感を定量的に推定できる可能性を示すとともに、視覚系の空間周波数チャンネルが明るさ感に寄与している可能性を示唆している。

(文責；横浜国立大学大学院 環境情報研究院 岡嶋克典)

参考文献

- 1) Image spectral amplitude distributions, J. Opt. Soc. Am. A, Vol.23, No.8, pp.1823-1926, 2006
- 2) The lowest spatial frequency channel determines brightness perception: Vision Res., Vol.47, No.10, pp.1282-1291, 2007

6 照明環境の不均一性の活用事例

6.1 トンネル入口部における照明設計

昼間、トンネルに接近する運転者が比較的明るい視環境からトンネル内部の路上障害物や先行車を視認できるように、トンネル坑口から一定区間のトンネル内には、図 6.1.1 に示す入口照明が設置されている。道路照明施設設置基準¹⁾ などにおいて、表 6.1.1、図 6.1.2 に示すように、設計速度や野外輝度などに応じて入口照明の所要路面輝度が規定されている。境界部、移行部における所要路面輝度の推移は、トンネルに接近する運転者の視野内の輝度分布の変化による順応レベルの推移に応じて設定されたものである。



図 6.1.1 トンネル照明の一例

表 6.1.1 入口照明の路面輝度と区間長さ
(野外輝度 3,300cd/m² の場合)

設計速度 (km/h)	路面輝度 (cd/m ²)			長さ (m)			
	L ₁	L ₂	L ₃	ℓ ₁	ℓ ₂	ℓ ₃	ℓ ₄
100	95	47	9.0	55	150	135	340
80	83	46	4.5	40	100	150	290
70	70	40	3.2	30	80	140	250
60	58	35	2.3	25	65	130	220
50	41	26	1.9	20	50	105	175
40	29	20	1.5	15	30	85	130

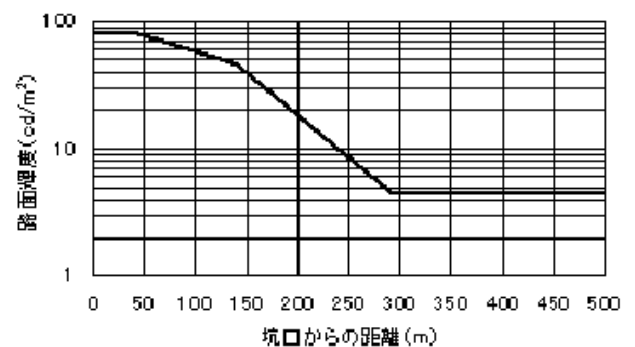


図 6.1.2 入口照明曲線

(設計速度 80km/h, 野外輝度 3,300cd/m²)

L₁ は境界部輝度, L₂ は移行部終点, L₃ は緩和部終点 (基本照明) の路面輝度, ℓ₁ は境界部, ℓ₂ は移行部, ℓ₃ は緩和部, ℓ₄ は入口部照明の長さ

前述の境界部および移行部の所要路面輝度は、昭和 40 年代に成定ら²⁾ によるトンネルに接近する運転者の視野内の輝度分布の変化を模擬できるシミュレータを用いた研究に基づいており、実験結果から図 6.1.3 に示す結果が得られている。当時、運転者がトンネル坑口に近づくことによって生じる順応レベルの推移は、周囲に比べて比較的輝度の低いトンネル坑口内を運転者が注視し、中心窩順応輝度が低下することによるものと考えられていたため、図 6.1.3 はトンネル内部を注視した時間に対する所要路面輝度が示されている。

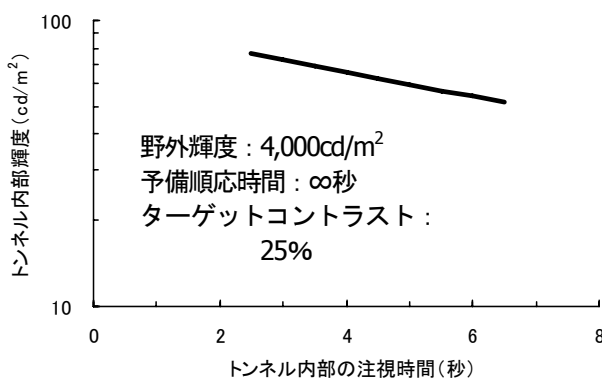
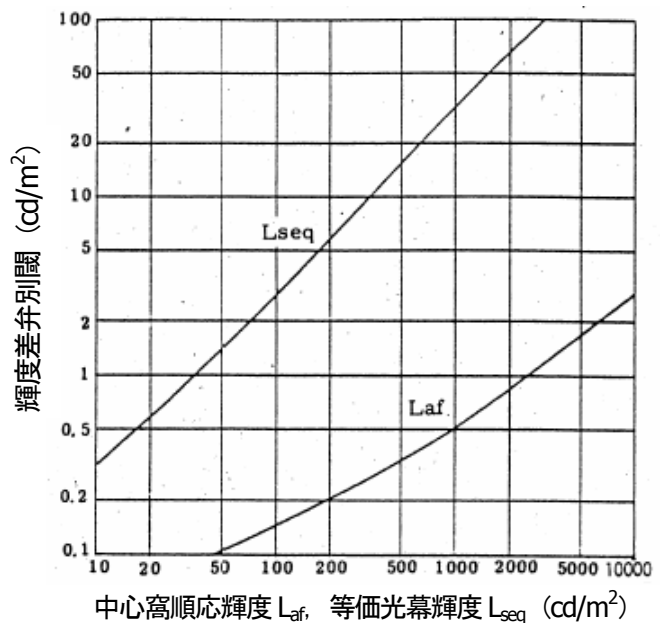


図 6.1.3 トンネル注視時間による所要路面



視標の視角寸法 10 分、視標提示時間 0.125 秒

図 6.1.4 中心窩順応輝度 L_{af} または等価光幕輝度 L_{seq} による輝度差弁別閾⁴⁾

その後、順応に関する Narisada ら³⁾の研究によつて、図 6.1.4⁴⁾ に示す中心窩順応輝度と等価光幕輝度のそれぞれによる輝度差弁別閾が求められた。一方、Schreuder⁵⁾によつて、図 6.1.5 に示す、均一な輝度分布を有する視環境の輝度 L_1 (等価均一輝度と定義されている) において、視標を視認できる背景輝度 L_2 が求められた。成定らは、図 6.1.4 と図 6.1.5 の結果を用いて中心窩順応輝度と等価光幕輝度による輝度差弁別閾と等しくなる (Schreuder 実験の) 等価均一輝度 L_1 との関係を求めた。その結果を図 6.1.6 に示す。図 6.1.6

から、等価光幕輝度が比較的高くなると、中心窩順応輝度による等価均一輝度への影響は小さくなり、入口照明に接近中の運転者の順応レベルは等価光幕輝度が支配的であることが示された。なお、前述の成定らのシミュレータを用いた研究において、当時は、運転者の順応レベルは中心窩順応輝度に基づくものと考えられていたが、その実験方法からトンネル接近中の運転者の等価光幕輝度の推移も模擬されており、図 6.1.3 の所要路面輝度は等価光幕輝度に基づく順応レベルに応じた結果であると考えられる

また、CIE においても 2004 年の道路トンネル照明のガイド⁶⁾ の改定時に入口照明の境界部輝度を求める方法として、式 (1) に示す等価光幕輝度に基づいた知覚輝度対比法が推奨されている。

知覚輝度対比法による境界部輝度の計算式：

$$L_{th} = L_m / \{1 / C_m (\rho / \pi / q_c - 1)\} \quad (1)$$

ここで

L_{th} : 境界部の輝度

$$L_m = (\tau_{ws} \cdot L_{atm} + L_{ws} + L_{seq}) / (\tau_{ws} \cdot \tau_{atm})$$

τ_{ws} : フロントガラスの透過率

τ_{atm} : 大気の透過率

L_{ws} : フロントガラスによる光幕輝度

L_{atm} : 大気による光幕輝度,

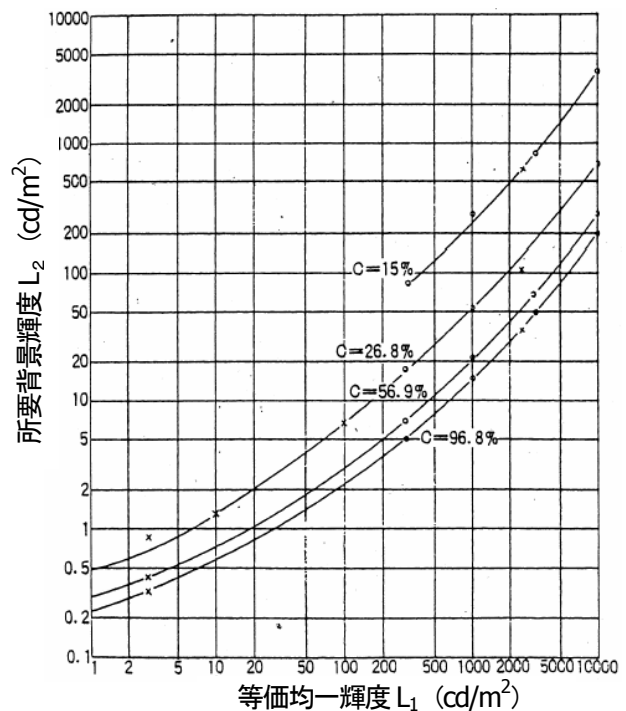
q_c : コントラスト係数

C_m : 必要最小限度の知覚輝度対比

ρ : 対象物の反射率

<参考文献>

- 1) 日本道路協会；道路照明施設設置基準・同解説，pp.75～87，2007
- 2) 成定康平，吉川孝次郎；トンネル入口照明，National Technical Report, Vol.11, No.5 pp.342～358，1965
- 3) Narisada, K. Yoshimura, K.; Adaptation luminance of driver's eyes at Entrance of Tunnel, Transactions of the 3rd International Symposium of Road Lighting Effectiveness, Karlsruhe, pp.56～73，1977
- 4) CIE Pub. No.61 Tunnel entrance lighting，1984
- 5) D. A. Schreuder；Physiological aspects of the lighting of tunnel entrance, Philips technical rev., Vol.27, 1966
- 6) CIE Pub. No.88 2nd edition Guide for the lighting of road tunnels and underpasses，1984



視標の視角寸法 7 分、視標提示時間 0.1 秒

図 6.1.5 等価均一輝度 L_1 と所要背景輝度 L_2 の関係⁵⁾

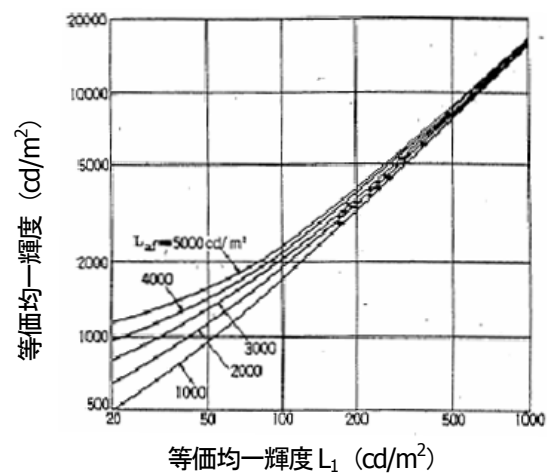


図 6.1.6 等価光幕輝度と等価均一輝度の関係

(文責；松下電工 (株) 伊東勇人)

6.2 順応を考慮した非常用照明

6.2.1 はじめに

非常用照明は停電時に速やかに点灯し、所定の照度を確保することを旨として設置されている。しかし、この場合に生じる常用照明からの急激な視野輝度の低下と、それに伴う順応過渡時の視認性低下に対する配慮が希薄である。このため、見えの低下から迅速な避難が妨げられ、不安感が増大し、パニック等の二次災害を引き起こす恐れがある。この問題は順応時間の増加や視力低下など、視機能が低下している高齢者にとっては特に深刻である。

この事態を解消するために、順応特性 (R(T)特性 § 3.3.2 参照) を考慮した点灯方式を提案し、提案方式では視対象が全く見えなくなることがなく、従来方式に比べて視力の回復時間が著しく短縮され、高視力を必要とする場合や低視力者 (高齢者) に特に効果的であることを視認実験に基づいて検証しているため、その内容を紹介する。

6.2.2 順応を考慮した点灯方式

停電時の課題は、非常灯点灯によって避難に必要な視認能力を如何に迅速に確保するかである。視認すべき視対象が一時的に全く見えないという状況を回避するには、式6.2.1に示すように、視対象と背景との実効輝度差 ΔL_e を常に避難する人の輝度差弁別閾値 $\Delta L_0(T)$ 以上に保つことが必要である。実効輝度差とは大きさの要素を加味 (輝度に変換) した上での輝度差のことであり、実効率 $k(\alpha)$ は実効輝度差を求めるための係数 (実効率⁴⁾) であり、視対象の輝度対比には関係なく大きさ α によって決まる。

視野輝度変化T秒後の最小輝度差弁別閾値 $\Delta L_0(T)$ の必要条件：

$$\Delta L_0(T) < \Delta L_e = |L_b - L_t| \times k(\alpha) = C \times L_b \times k(\alpha) \quad \dots\dots\dots (6.2.1)$$

L_b : 背景輝度 L_t : 視対象輝度 $k(\alpha)$: 大きさ α の視対象の実効率

C : 視対象と背景の輝度対比 ($C = |L_b - L_t| / L_b$)

背景輝度に応じて障害物と背景の輝度差が決まるため、必要条件を満たすには非常灯の出力の時間特性が鍵となる。式6.2.2は順応過渡過程における輝度差弁別閾値の時間特性 $1/R(T)$ である。

$$\text{順応過渡過程における輝度差弁別閾値の時間特性} : \frac{1}{(R(T)/100)} = \frac{\Delta L_0(T)}{\Delta L_0} \quad \dots\dots\dots (6.2.2)$$

ΔL_0 : 変化後の背景輝度 L_b に定常順応時の最小輝度差弁別閾値

大きさ α の視対象を視認するための必要背景輝度 $L_b(T)$ は、式6.2.1式6.2.2より式6.2.3のように表される。式6.2.5は切れ目幅 α のランドルト環の実効率である。

$$\text{視野輝度変化T秒後の必要輝度} : L_b(T) > \frac{1}{(R(T)/100)} \times \frac{\Delta L_0}{C \times k(\alpha)} \quad \dots\dots\dots (6.2.3)$$

ここで、

$$\log \Delta L_0 = 0.81 \times \log L_b \times \log(2.0 - 0.25 \log L_b) - 4.22 \times \log(5.0 - \log L_b) + 1.21 \quad \dots\dots\dots (6.2.4)$$

$(1.0 \times 10^5 \leq \Delta L_0 \leq 1.0 \times 10^2 \text{ cd/m}^2)$

$$k(\alpha) = -0.319(\log \alpha)^2 + 1.67 \log \alpha - 2.03 \quad (0.4 \leq \alpha \leq 80 \text{ min}) \quad \dots\dots\dots (6.2.5)$$

$$R(T) = 1.1 / \{1 + 10^{-0.7 \log(T^{2.44} \cdot L_2 / L_1) - 0.67}\} \quad (0.3 \leq T \leq 60 \text{ sec}) \quad \dots\dots\dots (6.2.6)$$

式6.2.2中の $\Delta L_0 / (C \times k(\alpha))$ は観察者と視対象によって決まる経過時間には依存しない値である。従って、非常灯の出力を時間特性 $1/R(T)$ に比例させて徐々に低下させることで、避難する人の輝度差弁別閾値以上の輝度差が確保される。この方式に依れば非常灯に切り替わった直後の極端な見えの低下が緩和されると共に、避難に必要となる視力に回復する時間の短縮が図られると考えられる。

図6.2.1に、 $1/R(T)$ の時間特性に基づいて視野輝度を 0.1 cd/m^2 に漸減させた場合の時間変化

($L_b(T) = 0.1/(R(T)/100)$)を■(黒四角)で示す。太線は、 $1/R(T)$ の時間特性に近似させた点灯方式(順応配慮型点灯方式)であり、 1.0 cd/m^2 で点灯させ、 0.1 cd/m^2 まで徐々に照度を低下させたものである。細線は点灯直後から設定目標を維持する従来型の非常灯の時間特性である。

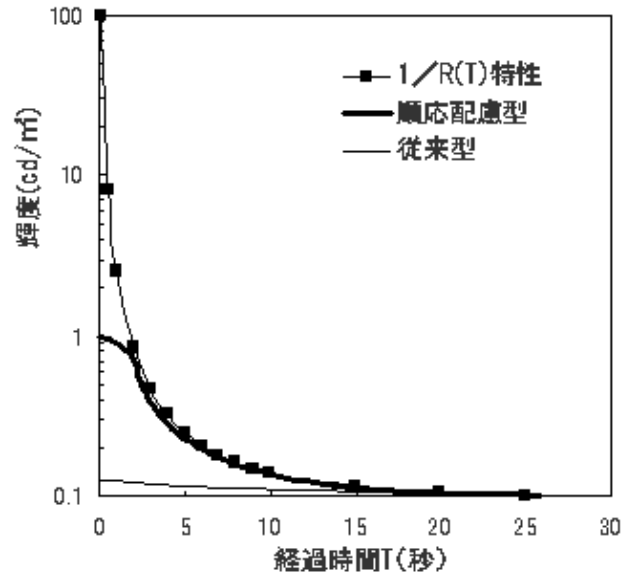


図6.2.1 $1/R(T)$ の時間特性と順応配慮型点灯方式
 $L_1=100\text{cd/m}^2$, $L_2=0.1\text{cd/m}^2$

6.2.3 点灯方式の有効性の検証

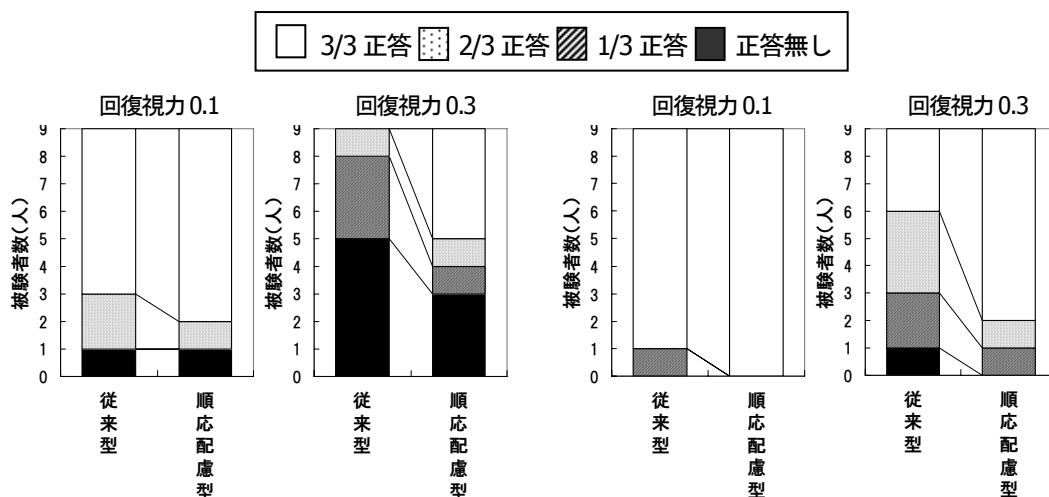
(1) 実験方法

検証にあたっては、照度 500lx で照明された反射率 60% の壁面(≒ 100cd/m^2)に眼が十分順応している時に停電し、反射率 30% の床面(1.0lx で 0.1cd/m^2)の情報を探しながら避難するという、一般的なオフィスでの停電時を想定した条件設定を行った。

被験者を視野輝度 $L_1=100\text{cd/m}^2$ に十分順応させた後、視野輝度を変化させ、輝度対比 0.8 のランドルト環の切れ目方向を被験者が正しく識別するまでの時間を測定した。識別時間は 30 秒までとした。視野輝度の時間変化は図6.2.1に示す順応配慮型と従来型である。被験者は $20\sim 40$ 代 9 名(若齢者、平均年齢 34 才、平均両眼視力 1.5)と $70\sim 80$ 代 9 名(高齢者、平均年齢 74 才、平均両眼視力 0.9)である。実験は両眼視で行い、測定回数は各被験者各条件 3 回である。

(2) 正答率の増加

図6.2.2に、従来型と順応配慮型それぞれの場合の、 30 秒以内でのランドルト環の切れ目方向判別の正答率を示す。順応を配慮することで、年齢層やランドルト環寸法(視力)に関わらず正答率が上がっている。切れ目寸法 3.3 分(視力 0.3)の場合の正答率の増加が著しい。特に高齢被験者で著しく、従来型では過半数の 5 名が全く正答できず、 3 回正答した者はいなかったが、順応配慮型では、正答なしは 3 名に減少し、 3 回正答が 3 名出現している。



(a) 高齢者の場合

(b) 若齢者の場合

図6.2.2 順応配慮型点灯方式による正答率の増加

(3)視力回復時間の短縮

図 6.2.3 に、視力 0.1、および視力 0.3 に回復するまでの時間（＝ランドルト環の切れ目方向を正しく識別するのに要する時間）を示す。横軸は各被験者の十分に明るい場所での両眼視力である。被験者の視力と回復時間の相関が明瞭である。

高齢者の方が、また低視力者ほど回復時間が長い。年齢層に関わらず順応配慮型にすることで時間が短縮されている。視力 0.1 という比較的短時間で回復する視力であっても、順応配慮型にすることで、一層時間が短くなり、特に高齢者での時間短縮が著しい。また、視力 0.1 よりも 0.3 の場合の方が時間短縮幅が大きく、順応を考慮した方式は、高い明視性を確保しようとする場合に一層効果的であるといえる。

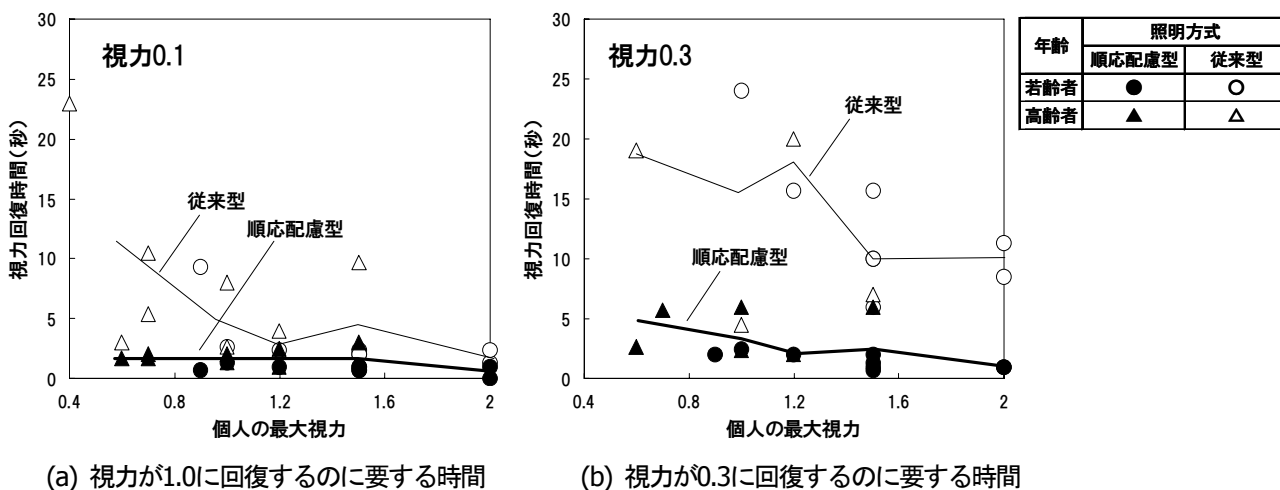


図6.2.3 順応配慮型点灯方式による視力回復時間の短縮
(個人の視力および年齢との関係、両眼視の場合)

6.2.4 まとめ

視認性の低下や、これに伴う二次災害誘発を回避するために、順応に配慮した点灯方式を考案した。

目の順応に伴う輝度差弁別閾値の時間的変化の特性 R(T)を、非常用照明の点灯特性に応用したものである。これによって、停電時に非常点灯に切り替わることなどにより急激に視野輝度が低下した直後の、極端な視認性低下が回避できることを実証した。避難に必要となる視力が回復する時間が大幅に短縮され、低視力者や高齢者、あるいは高い明視性を得ようとする場合に特に効果的であった。

また、時間的特性としてだけでなく、明るい所から暗い方向に避難する場合の通路の輝度分布計画に R(T)特性を適用することで、通路を通過する避難者に常に一定水準以上の視認性を保証することが可能となるため、空間の輝度分布計画への適用も推奨される。

(文責；奈良女子大学 生活環境学部 井上容子, 松下電工 (株) 照明事業本部 岩井彌)

参考文献

- 1) Youko Inoue, Wataru Iwai, Tadahisa Jin : EMERGENCY LIGHTING WITH CONSIDERING ADAPTATION OF EYES, Lighting system based on the time characteristic of luminance difference threshold in the transition process of dark adaptation, 26th CIE Session Proceedings, 2007
- 2) 井上容子, 岩井彌 : 人の目の順応に配慮した非常用照明, 暗順応過渡過程における輝度差弁別閾値の時間特性に基づいた点灯方式, 照学誌, pp. 203-208, 2006

7 まとめ

本報告書は、第1章では委員会活動を紹介し、第2章では委員会で話題提供して頂いた各委員などの研究紹介や関連する既往研究紹介、第3章では視覚系の順応についての古典的研究の説明と委員会活動の初期に行った順応に対する視点や委員会への希望調査が抄録されている。さらに第4章では、不均一な照明環境における視認性研究の概説、第5章では、比較的最近提案された不均一な照明環境の評価法の紹介、そして第6章では公共空間全体や非常灯、トンネル照明といった実際場面での不均一照明の活用事例を紹介している。

同一対象物の知覚的な明るさが、それに隣接する表面や視環境の状況により変化する事は良く知られている。この問題の中心は、①不均一な背景の中での対象物の見え方を定量的に測定できるのか？ ②ある視環境における視覚系の順応状態はどのように同定できるのか？の2点に集約される。

既に19世紀後半には定量的な実験がなされている¹⁾。

20世紀後半からの電気生理学の発展により網膜の錐体・桿体の背景光による応答変化や光による褪色と視物質の再生特性が明らかにされた。さらに、水平細胞、神経節細胞、そして最近では双極細胞やアマクリン細胞の応答特性に関する知見が蓄積されている。そのような中で、順応の基盤メカニズムとしては、視細胞の感度変化に注目が集まっていたようであるが²⁾、現在では神経系の感度変化も関与していると考えられている。

20世紀の心理物理学研究では、暗順応および明順応に関する膨大な研究が報告されているが、順応光は一様な円形視野が多い。高い網膜照度まで測定したいので、マックスウェル視光学系を用いていた。その結果視野サイズはせいぜい30°程度までである。そのような単純な順応光を用いた実験結果が、実際の視作業環境や映像鑑賞環境での順応特性に適用できるのか、また、ある視環境にいる被験者の順応状態の適切な測度は何か、視覚心理物理学、環境計画学、自動車用灯火製造、トンネルや屋外照明設備、に携わる人々に共通する疑問であった。この委員会では、古典から最新研究まで多角的にアプローチしたつもりだったが、いまだ答えは見つかっていない。しかしながら過去・現在の多岐に渡る関連研究を一つの報告書としてまとめたことで、少なくともその疑問への現時点での有用な資料になったと考えている。

100年課題ともいえる不均一な照明環境下での視認性研究は、刺激的かつ挑戦的である。委員を初めとする関係各位の研究のさらなる発展を期待する。3年間にわたり委員会活動にご協力戴いた委員各位に深く感謝するとともに、各位の所属機関のご理解・ご支援に深甚なる謝意を表するものである。

(委員長；宇都宮大学大学院工学研究科 阿山みよし)

参考文献

- 1) D.Jameson, L.M.Hurvich, "Theory of brightness and color contrast in human vision", *Vision Res.*, Vol.4, pp.135-154, 1964
- 2) W.A.H.Rushton, "Light and dark adaptation", *Investigative Ophthal. Visual Sci.*, Vol.11, pp.503-517, 1972