

照明の明るさ感と瞳孔の開度

川 上 元 郎* 荒 井 俊 男** 清 田 芳 信***

Relationship between Subjective Brightness and the Size of Aperture of the Pupil.

Genro KAWAKAMI, Toshio ARAI, Yoshinobu SEIDA

Subjective brightness of scene illuminated by the three-band-type fluorescent lamp is higher than the one illuminated by regular white fluorescent lamp. The former fluorescent lamp is with spectral distribution which includes three peaks at 450, 540 and 610 nm respectively. The brightness increases about 40 %. Consequently the equivalent illuminance ratio is about 1.4.

The front part of our eyeball is the iris, which automatically controls the amount of light which enter the eye. For example, the pupil expands under low levels of light. If the level by the three-band-type fluorescent lamp is higher than the one by the white fluorescent lamp under the equal illuminance, the pupil will close, and its diameter will decrease.

For confirming this phenomena, variation of aperture of the pupil was measured by using photographs of the pupil taken by infrared film. The variation was between 4.5 and 5.9 mm, and actually the diameter of the pupil always decreased under the three-band-type fluorescent lamp. Although the variation includes a personal error, the equivalent illuminance ratio is about 1.4 under 1000 lx. The lower the illuminance, the less the ratio, and it will be near 1.

This evaluation is characterized by its objectivity of measuring the diameter of pupil, comparing with usual psychological evaluation which answers the degree of brightness.

1. ま え が き

蛍光ランプは、熱陰極を有する低圧水銀放電灯で発生する 253.7 nm 強い線スペクトルのエネルギーを蛍光膜で受けて、ここで可視光に変換して光源として利用するランプである¹⁾。

蛍光ランプに使用される蛍光体はりん酸カルシウムなどの酸素酸系で、アンチモン増感で青、マンガンで赤に光るので、適当に混合して昼光色や白色を発色させる。

ところが数年以前からパルック、メロウルック、

ルピカエースと言う商品名で従来と違った蛍光体混合のランプが出回り始めた。技術用語では「3波長域発光形蛍光ランプ（以下3波長形蛍光ランプと略称する）」と言う。

これは青、緑、赤の狭帯域発光を持つ希土類蛍光体を組合わせて白色光を発光するランプで²⁾、450, 540, 610 nm 付近に強い発光のピークを持つ分光分布になる。そのためか、「白色蛍光ランプによる照明の約 0.7 倍の照度で、等しい心理的明るさ感が得られる」という³⁾。言い換えれば同照度で点灯しても3波長形は一般に使用されている白色蛍光ランプに比して 1.4 倍明るく手元を照らすことが出来ると華やかに宣伝された。

この点に着目して「等しい照度点灯で4割増の明るさが得られるのならば省エネルギーの立場か

* 電子工学科教授

** 大学院画像工学専攻2年次生

*** 株式会社 東芝

昭和 61 年 9 月 12 日受理

ら興味のあることである」と、当照明工学研究室においても関心を持ち、作業能率⁴⁾や視力⁵⁾の向上が期待できるかについて調査研究を続けて来た。本報はその調査研究の一環として調査した瞳孔の開度に関する調査結果で、その一部は外部において既に報告されている⁶⁾。

瞳孔は周知のとおり、辺りが明るくなると閉じ、暗くなると開く。その点、3波長形蛍光ランプによって増した明るさ感に対応して瞳孔の開度が減るとすれば、その明るさ感の増加は心理的だけではなく、生理的にも影響している事の検証が出来ると考え、この調査をすることにした。

2. 明るさ感

昭和 58, 59 年度の2か年間にわたり持たれた照明学会の「明るさ感覚研究調査委員会」においては、明るさの定量的取扱いについて次のように述べている⁷⁾。

『“明るさ”は、それを感じる人の状態に支配される心理量であるが、物理的な光（放射）の量の大小と密接に関連することもまた確かである。このような観点から、明るさに関連する測光量（光束、照度、輝度など）が物理的に定義されている。

しかし視環境の中での物体の見掛けの“明るさ”の大小の何れもが測光量で表わし得るとは限らない。色が異なる面について、また演色性の異なる光源下の部屋について、その明るさの感じ、即ち“明るさ感”が等しいとは限らない事が問題にされるようになった』。

なお“明るさ感”という言葉について次のように言及している⁸⁾。

『ここで“明るさ感”という語が用いられたのには2つの観点がある。その一つである測光量「全光束」については既に“明るさ”という表現を用いているので、それと区別するために“感”を付けたものである。もう一つはランプによって照明した雰囲気全体の明るさという、もう一段総合的な概念を“明るさ感”で表わそうとしたものである』。

本報で取扱うのは後者の“明るさ感”である。

3. 瞳孔の開度

瞳孔は眼球の虹彩の真ん中にある小さな穴で、光線が眼球にはいる入口である。

この虹彩は外界の明るさによって開口の大きさがおおよそ直径 3～8 mm の範囲で自動的に変わる絞りである。瞳孔の直径 d mm と輝度 L cd/m² との関係はクロフォード (Crawford, 1936) によって次のような実験式が示されている¹⁰⁾。

$$d = 5 - 3 \tanh(0.4 \log L) \quad (1)$$

4. 実験

4.1 実験器具の配置

図1のように暗室内に被験者の位置と実験器具とを配置した。

4.2 実験の諸条件

a) 被験者

年齢 22 才の本学の男子学生2名で、観測中は頭を顔面固定台に当て、眼球位置が動かないようにした。瞳孔からスクリーン面までの距離は約 70 cm にした。

b) スクリーン

瞳孔の開閉を促す外界の明るさを作るのに、約 160×160 cm の映写用白幕（ウチダ）を用いた。

c) 蛍光ランプ点灯台

60×90 cm の鉄アングルの枠を立て、それに 20 w 用蛍光灯器具を横4列に取り付け、スクリーンに向けて設置した。

その設置位置や点灯本数を加減して、スクリー

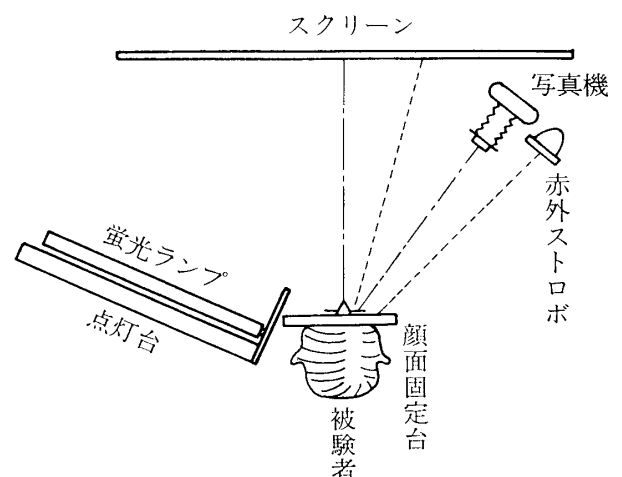


図1 実験器具の配置

ン鉛直面照度を 350, 500, 750, 1000 lx の 4 段階に調光した．使用した蛍光ランプの仕様を表 1 に示す．

表 1 使用した蛍光ランプ

蛍光ランプの種類	メーカー	品名 消費電力	記号	相対色温度 公称値 (K)
白色	ナショナル	ハイライト S 20 W 18 W 型	FL 20 SS W	4200
3 波長域 発光形	東芝	メロウルク W 20 W 18 W 型	FL 20 SS EX	5000

観測開始前に蛍光ランプは 15 分くらい予備点灯した．

d) 観測用撮影装置

当初はビデオカメラ (SONY CCD-G5) を使用しようとしたが、被験者の瞳孔の位置からビデオカメラのレンズまでの距離が数 cm しか取れない．そのため照明光を遮ってしまうので使用を断念した．

写真機 (PENTAX LX/ME Super) にベローズ (PENTAX オートベローズ M) を付け、レンズは (PENTAX SMC 135 mm) を使用すれば照明に支障を与えない距離 (約 70 cm) から撮影が出来た．

一般用フィルムでは虹彩の映像を明瞭に撮影できなかったもので、フィルター (ケンコー R1, JIS: SR-60), 赤外フィルム (サクラ赤外 750) を使用して目的を達し得た．スクリーンの明るさに順応した虹彩の撮影は赤外ストロボ (ミノルタ エ

レクトロ・フラッシュ 2 + 学研赤色セロファン) を用いた．

眼球光軸に対し約 30 度方向から撮った．そのほうが明瞭に写り込むことが分った．なお瞳孔の直径の測定のために虹彩の横にメジャーを当て、同時に写し込んで読取りの目安とした．

撮影されたオリジナル・データとして映像の例を写真 1 に示す．

4.3 測定値

瞳孔の測定結果を表 2 に示す．

表 2 測定値 (mm)

被 験 者		MSW		MHI	
照度 (lx)	log	W	EX	W	EX
350	2.54	5.9	5.8	5.6	5.4
500	2.69	5.7	5.5	5.3	5.1
750	2.87	5.4	5.2	5.0	4.9
1000	3.00	5.1	4.7	4.8	4.5

㊤ 蛍光ランプの種類=W:白色, EX:3波長形.

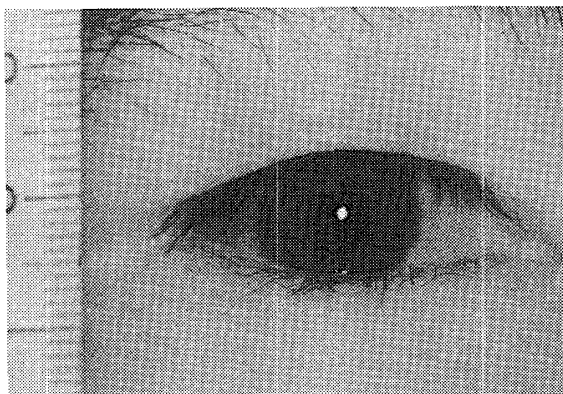
測定は 3 日間に分け、被験者 MSW は延べ 29 回、MHI は 17 回繰返しデータを求めたが、繰返し間に有意差が認められなかったのでプールし、それらの平均値を測定値とした．

5. 考 察

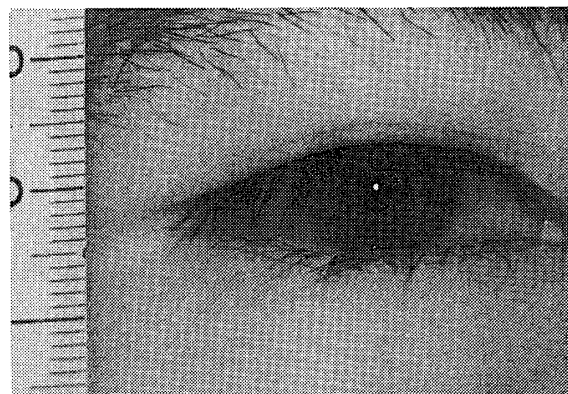
5.1 ランプ間の有意差検定

三元配置による分散分析を行なったところ表 3 のようになった．

この分析は表 2 中の測定値を 10 倍して 50 を



白色 : 350 lx



白色 : 1000 lx

写真 1 瞳孔の映像の例

表 3 分散分析表

要 因	ss	ϕ	ms	F_{obs}	$F_{0.05}$	$F_{0.01}$
D: 照 度	177.69	3	59.23	257.5**	9.28	29.5
S: 被験者	45.56	1	45.56	198.1**	10.1	34.1
T: ランプ	18.06	1	18.06	78.5**	10.1	34.1
交互作用						
D \times S	1.19	3	0.40	1.74	9.28	29.5
D \times T	2.69	3	0.90	3.91	9.28	29.5
S \times T	0.06	1	0.06	0.26	10.1	34.1
E: 誤差	0.69	3	0.23			

引いた値をマトリックスとして計算した。

分析表の F_{obs} を見ると、各要因共に**印が付された。即ち「危険率 0.01 で有意差あり」と算出された。言い換えれば、照度間にも、被験者間にも瞳孔の開度に差があることを物語っていると同時に「ランプ間にも明らかに違いがある」ことを示している。

それも、1000 lx のデータの一部に異常値が認められるけれども、一般には何れの照度の場合でも、何れの被験者の場合でも、白色蛍光ランプに比し、3波長型蛍光ランプのほうが瞳孔の開度を小さくする。この結果から「後者のランプで照明された外界を、一般に明るく感じているからであろう」と推論できる。

5.2 外界の明るさと瞳孔の開度との関係

『網膜の視細胞に当たる光が、強過ぎる場合に

は、虹彩の筋に神経刺激が伝えられ、自動的に虹彩が閉じるようになっている¹¹⁾』ぐらいしか一般に述べてなく、詳細の仕組みや働きについてはかなりの専門医学書に寄らねばなるまい。

しかし又『瞳孔の開度は光量のみでなく、感情、両眼幅湊、交感神経刺激、副交感神経刺激などで大きさを變えることが知られている¹²⁾』という解説もある。本報で言及する瞳孔の開度は、この精神状態による要因も含まれていると考えられる。即ち3波長型蛍光ランプの光の心への働き掛けが見掛け上明るく感じさせるのではなかろうか。

瞳孔の開度を左右する「明るさ」として、本報では「照度」を対象とした。外界の照度と瞳孔の開度との関係について既成書^{13,14)}に示された例を図2の(a)に示す。この図中で黒く菱形に塗りつぶした部分が本報の研究で調査した関係曲線群である。等しい照度でありながら、既成書の結果に比し瞳孔の開度がかなり大きい。この原因は個人差なのか、或は観測条件の違いなのか、不詳である。

外界の輝度と瞳孔の開度との関係については前項にクロフォードの式を示したが、他にも既成書の例があるので、併せて図2の(b)に示す。

そこで本研究でも、各照度下の映写用白幕の輝度を色彩輝度計(トプコン BM-5)で測定した。その結果を表4に示す。

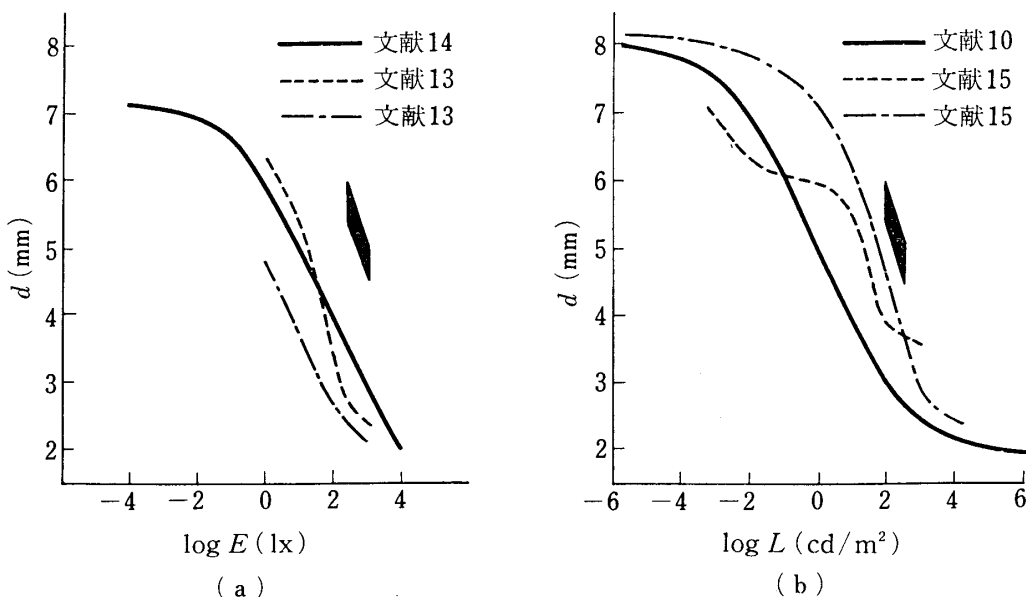


図 2 外界の明るさと瞳孔の開度

表 4 輝 度 値

照 度(lx)	ランプ	350	500	750	1000
輝度(cd/m ²)	-W	99.1	146.9	207.0	292.0
	-EX	99.5	147.4	209.1	292.0

この図中の黒い菱形も関係曲線群である。このほうが前図に比し既成書の結果に近い。

興味のある事は関係曲線群の傾斜が両者共に夫々既成書の結果に極めて等しい事である。即ち明るさ変動に対する瞳孔の開度の変動傾向は全く等しかったと言える。

5.3 等明るさ感照度比

表 2 の測定値を基に照度の対数に対する瞳孔の開度の回帰直線を求めると下記のようなになる。

$$\text{MSW-W: } dw = 10.31 - 1.73 \log E_w \quad (2)$$

$$\text{-EX: } dx = 11.64 - 2.29 \log E_x \quad (3)$$

$$\text{MHI-W: } dw = 9.98 - 1.73 \log E_w \quad (4)$$

$$\text{-EX: } dx = 10.08 - 1.84 \log E_x \quad (5)$$

等しい明るさ感の場合は瞳孔の開度が等しいものと仮定して、 $dw = dx$ と扱うと、式(2)及び(3)から、

$$10.31 - 1.73 \log E_w = 11.64 - 2.29 \log E_x$$

$$= 10.31 - 2.29 \log E_w + 0.56 \log E_w$$

$$\log(E_w/E_x) = (-1.33 + 0.56 \log E_w) / 2.29$$

$$\therefore E_w/E_x = 10^{((0.56 \log E_w - 1.33) / 2.29)}$$

同様にして式(4)及び(5)からも E_w/E_x を求め、それらの結果を表 5 に示す。

表 5 等明るさ感照度比: E_w/E_x 値

白色蛍光ランプの照度 (lx): E_w	350	500	750	1000
E_w/E_x -MSW	1.10	1.20	1.33	1.42
-MHI	1.25	1.28	1.31	1.33

6. 結 論

以上の結果、等しい明るさ感に対して瞳孔の開度が 1 対 1 の対応をするものならば、

1) この実験によっても、三波長型蛍光ランプによる照明は白色による照明に比して外界を明るく感じていることを検証し得た。

2) 等明るさ感照度比の値については、諸報告

の発表値と同様に 1.4 に近い結果が得られた。

3) しかし、その照度比には個人差が認められた。

4) また、外界が明るいほど照度比が大きくなる傾向があった。

7. あとがき

本研究で取り上げた等明るさ感照度比を求めるのに、既発表の研究では、明るさを知覚したら、その程度を「言葉」で表現したものが大部分である。これは主観的であるからバラツキを免れない。

その点、本研究のように瞳孔の開度によれば、生理的挙動であるから客観的な「寸法」で測定ができる。この特徴的手段は筆者らの一人、荒井の着想による。また本研究の一部はもう一人の筆者、清田の昭和 60 年度卒業論文である。

終りに被験者になって貰った本学の学生諸君、撮影に関して便宜を計って戴いた写真工学科画像解析研究室の方々、実験企画、データ整理のご指導を戴いた財団法人日本色彩研究所の小松原 仁氏に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) 大山松次郎: 照明講義案 2 版 5 刷 (昭 59: オーム社) 39
- 2) 日本色彩学会編: 新編色彩科学ハンドブック 5 刷 (昭 60: 東大出版会) 13
- 3) 延々幸夫ほか: 照学誌 **63-5** (昭 54) 260-271
- 4) 川上元郎, 荒井俊男: 明るさ感と作業 (昭 59) 夏期生理光学研究会
- 5) 川上元郎, 荒井俊男: 照学誌 査読審査中
- 6) 川上元郎, 荒井俊男: 明るさ感と瞳孔径との関係 (昭 61) 夏期生理光学研究会
- 7) 照明学会委員会報告: 等明るさ感照度比の定量化の試み (昭 51) 4
- 8) 同上 p. 7
- 9) 成定康平: 照学誌 **67-7** (昭 58) 297-299
- 10) 池田光男: 視覚の心理物理学 (昭 57: 森北出版) 2
- 11) C. G. ミューラーほか: 光と視覚の話 (昭 43: タイム・ライフ・インターナショナル) 128
- 12) 応用物理学会光学懇話会編: 生理光学 (昭 50) 朝倉書店) 40
- 13) 久保田広: 光学 (昭 50)
- 14) 山田幸五郎: 光学の知識 (昭 41: 東京電機大学出版局) 185
- 15) 筒井俊正編: 応用光学概論 (昭 32: 金原出版) 238