

# 試作タキストスコープによる視力の時間的加重効果測定

丹羽 一司, 奥山 文雄, 所 敬

東京医科歯科大学医学部眼科学教室

## 要 約

20~30歳の正常者10名18眼を対象として、試作タキストスコープを用いて、視標の提示時間(1~1,000 msec)または背景輝度(0.1~200 cd/m<sup>2</sup>)を変化させ視力を測定した。視力値は提示時間とともに上昇し、背景輝度10 cd/m<sup>2</sup>以上では視力測定の臨界時間は500 msec代にあった。しかし、10 cd/m<sup>2</sup>未満の低輝度では臨界時間は延長した。瞳孔径を一定の3 mmにした場合も、こ

の傾向は保たれた。光覚と同じく視力も背景輝度と提示時間の積によっておおむね決定され、Bloch-Bunsen-Roscoeの法則を満足した。(日眼会誌 99:475-480, 1995)

キーワード: タキストスコープ, 視標提示時間, 臨界時間

## Measurement of Temporal Summation of Visual Acuity with the Use of a Trial Tachistoscope

Kazushi Niwa, Fumio Okuyama and Takashi Tokoro

Department of Ophthalmology, Tokyo Medical and Dental University School of Medicine

## Abstract

Visual acuity was measured in eighteen normal eyes of 10 subjects ranging from 20 to 30 years of age, using a modified tachistoscope. We changed the exposure time of the target (1~1,000 msec) or background luminance (0.1~200 cd/m<sup>2</sup>). The visual acuity rose with increasing exposure time. At background luminance over 10 cd/m<sup>2</sup>, the critical duration time was about 500 msec. However, at low luminance below 10 cd/m<sup>2</sup>, the critical duration was prolonged. This tendency was also seen when the

pupil diameter was fixed at 3 mm with an artificial pupil. Similar by luminance detection, visual acuity was also determined by the product of background luminance and exposure time. From these findings, we concluded that Bloch-Bunsen-Roscoe law was satisfied. (J Jpn Ophthalmol Soc 99:475-480, 1995)

Key words: Tachistoscope, Exposure duration time, Critical duration time

## I 緒 言

視力の定義は2点を識別する眼の能力とされ、通常の視力測定には高コントラストの視標を用い、判別までの時間を特に制限していない。しかし、例えば瞬時に出現する目標物を見分ける能力(瞬間中心視力)や周囲に対し暗い対象物を見分ける能力(対比視力)なども視機能として重要である。短時間提示による視力の測定は古くから行われており<sup>1)~3)</sup>、視力値は約500 msecまでは提示時間に依存し、この付近に視力測定における臨界時間があると考えられている。また、山出ら<sup>4)</sup>やBaronら<sup>5)</sup>は、視標輝度が時間的加重の臨界時間に及ぼす影響を検討

し、変化がなかったとした。しかし、彼らは背景輝度の影響を80 cd/m<sup>2</sup>以上の高輝度のみで比較しており、低輝度での臨界時間は検討されていない。そこで今回著者らは、背景輝度を0.1~200 cd/m<sup>2</sup>の範囲で変化させ、試作したtachistoscope(タキストスコープ, 瞬間露出器)を用いて視標提示時間1~1,000 msecでの健常眼の視力を測定した。各々の背景輝度での臨界時間を検討し興味ある結果が得られたので、ここに報告する。

## II 実験方法

対象は、軽度の屈折異常(等値球面屈折度-0.5 D以内)以外に特に眼疾患のない20~30歳の10名18眼であ

別刷請求先: 113 東京都文京区湯島1-5-45 東京医科歯科大学医学部眼科学教室 丹羽 一司  
(平成6年8月29日受付, 平成6年11月4日改訂受理)

Reprint requests: Kazushi Niwa, M.D. Department of Ophthalmology, Tokyo Medical and Dental University School of Medicine. 1-5-45 Yushima, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

(Received August 29, 1994 and accepted in revised form November 4, 1994)

る。タキストコープには、試作した三次元動体視力測定装置 DA-2 (図1) のメインメニューのうち瞬間提示測定を用いた。三次元動体視力測定装置の光学系を図2に示す。本機は Badal 系の内部視標を内蔵し、パーソナルコンピュータ (日本電気製 PC 9801 FA) でこの視標は制御される。固視目標はなく、約  $0.01 \text{ cd/m}^2$  の測定機内部に視標が提示される。一般に眼球運動は、予期できない刺激に対して 200 msec 程度の遅れ時間の後に応答を開始するが、今回の実験のように視標が提示される場所が予測できる場合には眼球運動の方が視標提示部位に先行している<sup>6)</sup>と考えられるため、今回は固視灯を用いなかった。視標には白色背景に黒ランドルト環を印字したものをを使用した。視力値は  $0.1 \sim 1.6$  までの範囲を  $0.1$  ごとに



図1 三次元動体視力測定装置。

設定できる。視標の背景輝度は  $0.1, 0.3, 1, 3, 10, 30, 100, 200 \text{ cd/m}^2$  の 8 段階に変えられる。測定は完全屈折矯正眼鏡装用下で自然瞳孔の単眼視状態で行った。ただし、被験者 SY と NA の右眼については網膜照度を一定とするため、 $0.4\%$  トロピカミド点眼で散瞳後に直径  $3 \text{ mm}$  の人工瞳孔を装用させた (この場合、網膜照度はそれぞれ  $0.71, 2.1, 7.1, 21, 71, 210, 710, 1,400 \text{ troland}$  に対応する)。室内照度は被験者の目の位置で約 30 ルックスとした。各試行ごとに少なくとも 1 分間は室内照度に順応させ、測定は迅速に行った。視標提示時間は  $1, 3, 10, 30, 100, 300, 1,000 \text{ msec}$  の 7 段階に設定され、それら設定時間に応じ測定装置本体のセラミック電子シャッター (シモン (株)) が開放し、視標が提示される。セラミック電子シャッターのオン-オフ時間は  $0.1 \text{ msec}$  以内である。各提示時間での視力は上下法に準じて求めた。視標の方向は左右二方向のみを用いるものとした。これはランドルト環の切れ目の方向が水平方向や斜めの方向よりも垂直方向の場合に最も視力が高くなり、切れ目の長さが同一でも方向により視力が異なる<sup>7)</sup>ためである。小さな視標から開始し、視標提示の後「右」、「左」、および「わからない」のうちのいずれかで答えるよう指示した。誤答もしくは「わからない」を選んだ時、順次設定視力値を下げてゆき正答できたら、同じ設定視力・提示時間においてランドルト環の方向を変えて 5 回以上測定し、正答率  $60\%$  未満ならさらに一段大きな視標で、正答率  $60\%$  以上なら一段小さな視標で測定し、正答率  $60\%$  以上となる最も小さな視標の視力値をもってその提示時間における視力値とした。また、視標提示時間

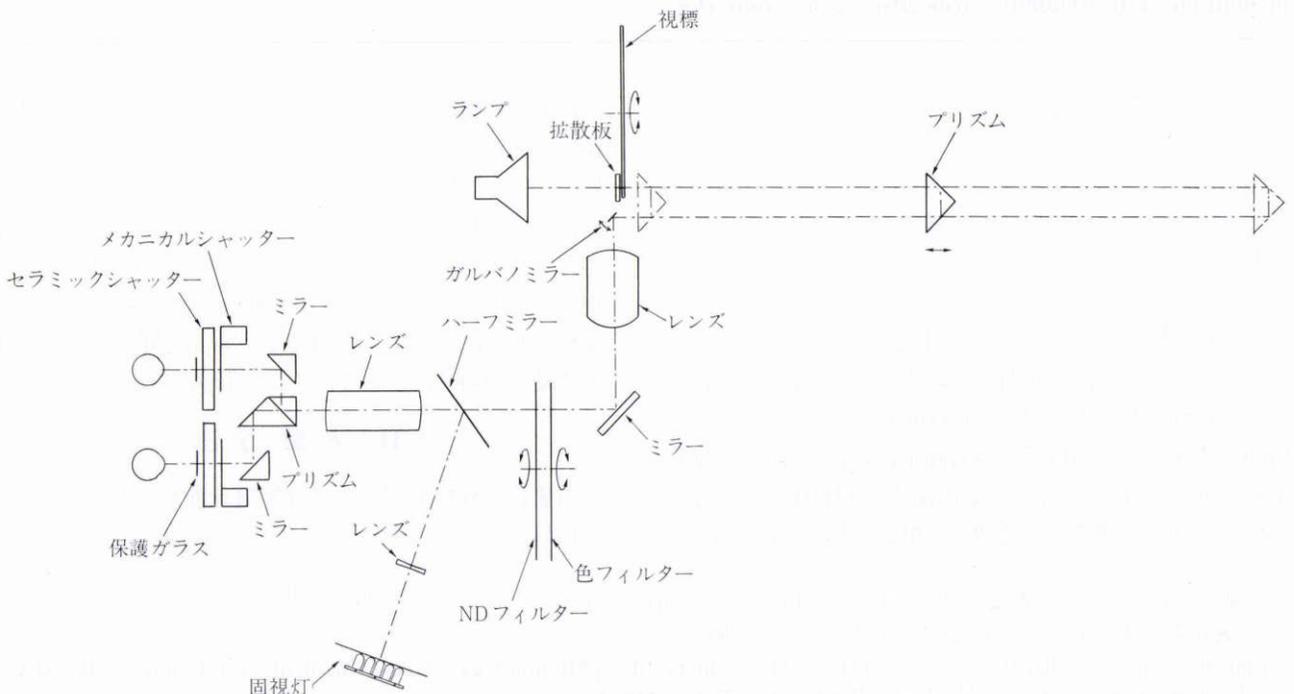


図2 三次元動体視力測定装置の光学系。

1,000 msec で得られた視力値に相当する視標を提示し、ランドルト環の切れ目の方向がわかった時点で応答スイッチを押し、正答時にはその視力値と反応時間を測定データとして保存した。さらに、提示時間を制限しないで視力値を測定した。1眼の測定で1時間以上要するため、被験者には途中で十分に休息をとってもらった。

### III 結 果

図3には横軸に提示時間(msec)の対数を取り、各背景輝度における視力値の幾何平均をプロットした。提示時間を制限しないで測定した視力は、いずれの背景輝度でも提示時間1,000 msecの場合と同じであった。各背景輝度ごとに、1~1,000 msecの範囲で横軸に提示時間(msec)の対数を取り、縦軸に対数をプロットし、最小二乗法により回帰直線を求め、この直線が時間を制限しな

い時の視力値に達した時の横軸の値をもって臨界時間とした(図4)。

表1には各背景輝度毎の回帰直線の勾配の平均、および臨界時間(msec)の幾何平均を示す。統計処理はstudent-t検定によった。例えば、200 cd/m<sup>2</sup>の場合の勾配と100 cd/m<sup>2</sup>における勾配といった具合に、隣合う背景輝度における勾配同士を各々検定した。200~3 cd/m<sup>2</sup>では背景輝度の低下とともに有意水準1%で直線の勾配は急峻化した。しかし、1 cd/m<sup>2</sup>と0.3 cd/m<sup>2</sup>では直線の勾配に有意差はなかった。0.1 cd/m<sup>2</sup>ではほとんどの被験者が300 msecでようやく0.1視標が判別できる程度で、プロット数の不足から回帰直線の算出が不可能であった。臨界時間については背景輝度200~10 cd/m<sup>2</sup>の範囲内では差はなかったが、10 cd/m<sup>2</sup>未満では背景輝度の低下とともに有意に延長していた。瞳孔径を一定にした2名2眼のうち、被験者NA(20歳、女性)について自然瞳孔下(30ルクス室内で瞳孔径5.5 mm、ただし、

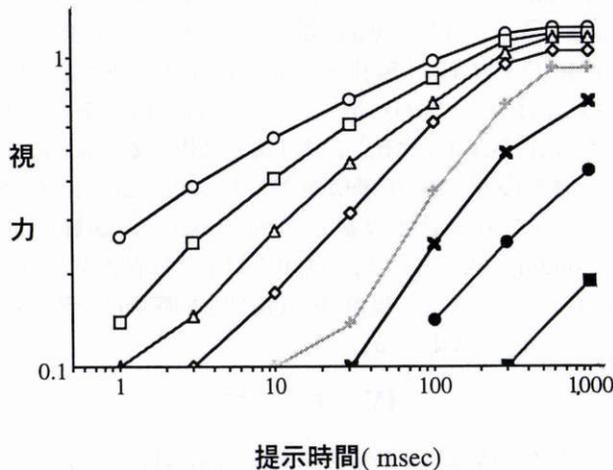


図3 各背景輝度における視標提示時間と視力の関係(全被験眼の平均)。  
背景輝度(cd/m<sup>2</sup>) 白丸:200 白四角:100 白三角:30 白菱形:10 薄網+印:3 罰印:1 黒丸:0.3 黒四角:0.1

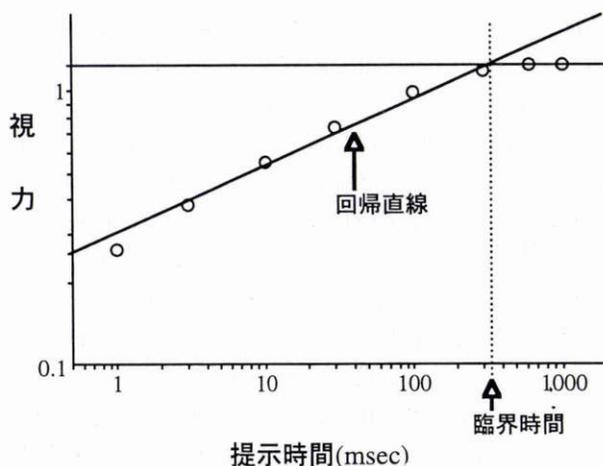


図4 視力の時間的加重効果の臨界時間。

表1 各背景輝度の回帰直線の勾配と臨界時間(全被験者の平均)

背景輝度 (cd/m <sup>2</sup> )	勾配	臨界時間 (log msec)	臨界時間 (msec)
200	0.23±0.041	2.708±0.056	510
100	0.31±0.050**	2.739±0.106	548
30	0.37±0.034**	2.740±0.056	550
10	0.43±0.066**	2.753±0.073	566
3	0.54±0.089**	2.838±0.025	689**
1	0.54±0.099	2.889±0.058	774*
0.3	0.48±0.013	2.958±0.052	973**
0.1	—	—	—

\*: p<0.05 \*\*: p<0.01

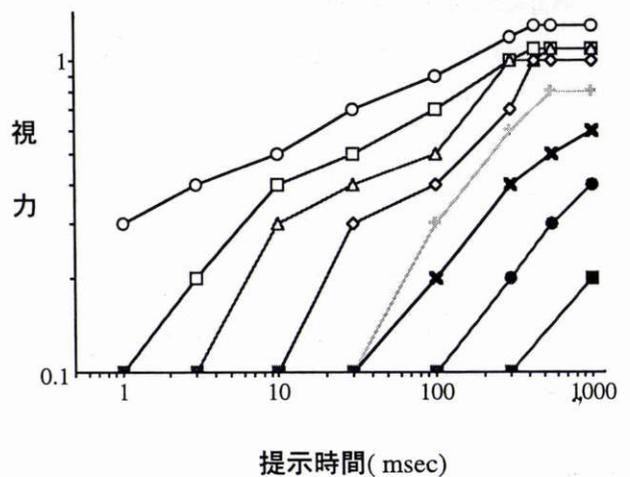


図5 各背景輝度における視標提示時間と視力の関係(被験者NA(20歳、女性)右眼)。  
背景輝度(cd/m<sup>2</sup>) 白丸:200 白四角:100 白三角:30.0 白菱形:10.0 薄網+印:3.0 罰印:1.0 黒丸:0.3 黒四角:0.1

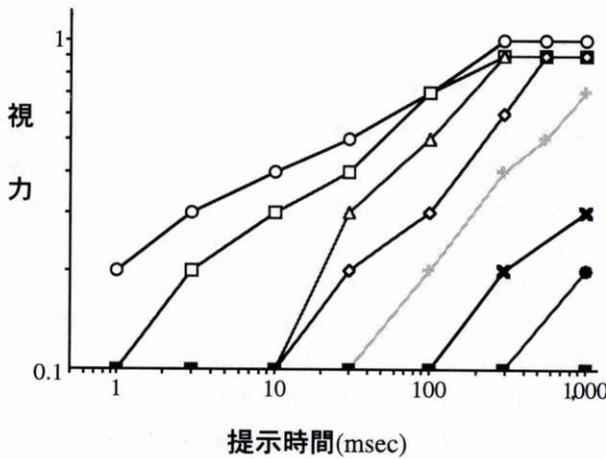


図6 瞳孔径を一定にした時の各網膜照度における視標提示時間と視力の関係 (被験者 N.A. (20歳, 女性) 右眼).  
網膜照度 (troland) 白丸:1,400 白四角:710 白三角:210 白菱形:71 薄網+印:21 罰印:7.1 黒丸:2.1 黒四角:0.71

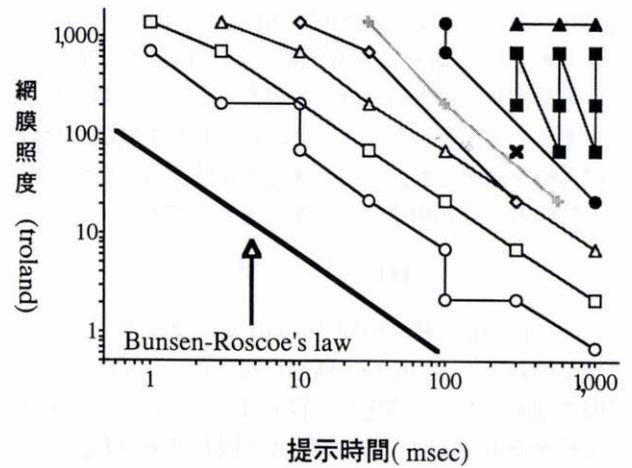


図7 各視力値を得るための視標提示時間と網膜照度の関係 (被験者 NA (20歳, 女性) 右眼).  
視力 白丸:0.1 白四角:0.2 白三角:0.3 白菱形:0.4 薄網+印:0.5 罰印:0.6 黒丸:0.7 黒四角:0.9 黒三角:1.0

表2 自然瞳孔における被験者 NA の各背景輝度の回帰直線の勾配と臨界時間

背景輝度 (cd/m <sup>2</sup> )	勾配	臨界時間 (msec)
200	0.23	562
100	0.34	479
30	0.39	575
10	0.50	617
3	0.61	646
1	0.57	774
0.3	0.48	956
0.1	0.60	790

表3 人工瞳孔における被験者 NA の各背景輝度の回帰直線の勾配と臨界時間

網膜照度 (troland)	勾配	臨界時間 (msec)
1,400	0.24	524
710	0.32	447
210	0.44	537
71	0.50	759
21	0.56	954
7.1	0.48	891
2.1	0.31	1,412
0.71	—	—

視力測定時の瞳孔径はモニターしていない) および人工瞳孔下の提示時間 (msec) と視力の関係をそれぞれ図5と図6に示す。また、被験者 NA の自然瞳孔下および人工瞳孔下における各背景輝度毎の回帰直線の勾配と臨界時間をそれぞれ表2と表3に示す。表3において0.71

troland 時の回帰直線はプロット数が1点のみであり、算出できなかった。図5, 6, 表2, 3から背景輝度10 cd/m<sup>2</sup>以上では人工瞳孔装用時と自然瞳孔状態で臨界時間に差はないことがわかる。しかし、3 cd/m<sup>2</sup>以下の低輝度では自然瞳孔下に比し、人工瞳孔装用下では回帰直線の勾配が緩慢で臨界時間が延長した。図7には同一視力を得るために必要な提示時間 (msec) と網膜照度 (troland) の関係を示す。視力0.7以下では両者間の勾配はおおむね-1で、視力が提示時間と網膜照度の積で規定されることがわかる。

#### IV 考 按

短時間刺激による最小視認閾値の測定は、古くから諸家により行われている<sup>1)~3)</sup>。条件により差はあるものの、視力は約500 msecまでは提示時間に依存し、この付近に視力測定における臨界時間があると考えられている。最近では黄野ら<sup>8)</sup>が単眼視・自然瞳孔下で60~1,000 msecの範囲内で視標(スクリーンに投影)の提示時間を変えて視力測定の臨界時間を求めており、平均620 msecであったと報告している。今回の実験でも背景輝度200~10 cd/m<sup>2</sup>の範囲内では臨界時間は500 msec代で、おおむね諸家の報告と一致している。

視力の時間的加重効果は眼球結像系によって規定されるのだろうか。それとも網膜以降の中樞側によって規定されるのだろうか。調節反応の潜時は平均360 msecとされ、調節の開始から終了にかかる時間は約640 msec程度であるとされる<sup>9)</sup>。また、瞳孔反応の潜時は200~500 msecで、縮瞳に要する時間は通常260~300 msecという<sup>10)11)</sup>。したがって、視覚刺激を受けてから調節反応が完成するには約1,000 msec、瞳孔反応の完成時間は460~800 msecである。視力の時間的加重の臨界時間は500 msec代であり、これは瞳孔反応の完成時間に一致し

ており、臨界時間への眼球結像系の関与は否定できない。しかし、Baronら<sup>5)</sup>は0.5%サイクロペントレート点眼と人工瞳孔を用いて調節や瞳孔径の影響を除去し、提示時間と視力の関係を調べたが、臨界時間は変わらないとしている。したがって、視力の時間的加重効果は網膜以降が主体となっているものと思われる。今回の実験でも、2眼について瞳孔径を一定にし、視力の時間的加重効果を測定したところ、10 cd/m<sup>2</sup>以上の背景輝度では自然瞳孔の時と臨界時間に差はなかった(図5, 6, 表2, 3)。しかし、3 cd/m<sup>2</sup>以下の低輝度では自然瞳孔下に比し、人工瞳孔装用下では回帰直線の勾配が緩慢で臨界時間が延長している。これは、主として提示時間300 msec以降の視力が人工瞳孔装用時の方が不良であるためである。今回、被験者の瞳孔径をモニターしなかったが、Campbellら<sup>12)</sup>によると、輝度が3 cd/m<sup>2</sup>以下では最高視力が得られる瞳孔径は4 mm以上であり、径3 mmの人工瞳孔装用下では網膜照度が低すぎたため、瞳孔反応が完成した後まで提示された時の視力値に差が生じたものと推定された。

輝度に対する生理的興奮の時間的加重効果(temporal summation)はよく知られているところである。すなわち、ある限界時間内においてはちょうど写真の絞りと露出の時間の補償関係のように輝度と時間の積が光覚を規定しており(Blochの法則)、光化学反応におけるBunsen-Roscoeの法則で説明されている。元来Bloch-Bunsen-Roscoeの法則は形態覚(resolution task)ではなく、光覚閾(detection task)についての法則であるが、形態の識別についても光覚の弁別と類似した時間的加重効果があるといわれている<sup>21)13)</sup>。Baronら<sup>5)</sup>によると、視力を時間-輝度図にプロットすると光覚閾についてのBloch-Bunsen-Roscoeの法則よりも勾配がやや緩慢である。今回の実験では、図7から視力0.7まではBloch-Bunsen-Roscoeの法則によく適合している(complete temporal summation)。しかし、視力0.9, 1.0になると同法則から逸脱しているかのような印象を受ける。高視力ではBarlowの実験<sup>14)15)</sup>におけるimcompleteないしnon-temporal summationの領域に相当すると評価すべきか、あるいはcomplete temporal summationであるにも関わらず、設定視力が0.1間隔となっているため、小数視力では同じ0.1の差でも高視力ほどランドルト環の切れ目の幅の差は小さくなってしまい、高視力になるとグラフ上変動が大きくなり、同法則から逸脱してしまったのかは不明である。

山出ら<sup>4)</sup>は視標の輝度を下げたり、グレアを負荷した場合でも短時間提示における視力を低下させるが、臨界時間は変わらないとした。ただし、彼らは背景輝度の変化による視力値の差異を85.75 cd/m<sup>2</sup>と686 cd/m<sup>2</sup>の高輝度で比較している。今回は、さらに背景輝度を低くし、10 cd/m<sup>2</sup>未満では臨界時間が延長する傾向がみられた。

輝度上昇とともに限界フリッカー値 critical flicker frequency (CFF)が増大<sup>16)</sup>する。光のちらつきを感じず連続光のように感じられるのは、一定の明るさに感じられるために必要な輝度と時間の間に時間的加重効果があり、時間的加重効果の成り立つ限界時間が輝度上昇とともに短縮されるためである。そして、ある限られた範囲内ではCFFは検査光輝度の対数に比例するという(Ferry-Porterの法則)。この限られた範囲とは、Hechtら<sup>16)</sup>の実験では100 troland近辺である。これは、例えば瞳孔径が3 mmの場合14 cd/m<sup>2</sup>に相当する。もし、光覚(detection task)についてこの法則が形態覚(resolution task)についても成立するならば、本実験で輝度を低くするとともに臨界時間が延長したことと一致する。また、今回の実験で10 cd/m<sup>2</sup>未満で視力の時間的加重効果の臨界時間が延長していることも矛盾がない。視力が良好であるにもかかわらずCFFが低下するような場合、例えば、visual display terminal (VDT) 作業に伴う視覚疲労などではCFFが低下するとされ<sup>17)</sup>、臨界時間の延長が予想されるが、今後、著者らは本装置をVDT作業者の視覚疲労度の判定などに利用していきたいと考えている。また、設定上難しいが、本装置で改造が望まれる点は臨界時間の存在する300~1,000 msecの範囲内で設定時間を2, 3設けること、小数視力ではなく、例えば国際標準化機構(ISO)の標準視標(DIS)「光学および光学器械-視力検査-標準視標とその表示」における視力値段階<sup>18)</sup>のような対数視力が等間隔になるように視力を設定する、などである。

本研究は、一部文部省科学研究費試験研究(B)課題番号04557075の補助により行われたことを付記し、ここに感謝する。

## 文 献

- 1) **Graham CH, Cook C**: Visual acuity as a function of intensity and exposure time. *Am J Psychol* 49: 654-661, 1937.
- 2) **Hart WM**: The temporal responsiveness of vision. In: Moses RA, et al (Eds): *Adler's Physiology of Eye. Clinical Application*, 8th Ed. CV Mosby, St Louis, 429-457, 1987.
- 3) **本田 博**: 瞬間中心視力. *日眼会誌* 59: 489-495, 1955.
- 4) **山出新一, 深見嘉一郎**: 短時間提示による視力測定. *眼紀* 31: 890-893, 1980.
- 5) **Baron WS, Westheimer G**: Visual acuity as a function of exposure duration. *J Opt Soc Am* 63: 212-219, 1973.
- 6) **Arnold DC, Tinker MA**: The fixational pause of the eyes. *J Exp Psychol* 25: 271-280, 1939.
- 7) **大山 正**: 空間知覚, 他(編): *視覚情報処理-生理学, 心理学, 生体工学-1*, 朝倉書店, 東京, 256-295, 1978.
- 8) **黄野桃世, 山出新一, 深見嘉一郎**: 眼疾患における視覚の時間加重効果(1)視力測定の視標提示時間につ

- いて. 日眼会誌 95: 184-189, 1991.
- 9) **Campbell FW, Westheimer G**: Dynamics of accommodation response of the human eye. *J Physiol* 151: 285-295, 1960.
  - 10) **Lowestein O, Kawabata H, Lowenfeld IE**: The pupil as an indicator of retinal activity. *Am J Ophthalmol* 57: 569-596, 1964.
  - 11) **Lowestein O, Lowenfeld IE**: Electronic pupillography. *Arch Ophthalmol* 59: 352-363, 1958.
  - 12) **Campbell FW, Gregory AH**: Effect of size of pupil on visual acuity. *Nature* 187: 1121-1123, 1960.
  - 13) **Kahneman D**: Temporal summation in an acuity task at different energy levels—A study of the determinations of summation. *Vision Res* 4: 557-566, 1964.
  - 14) **Barlow HB**: Temporal and spatial summation in human vision at different background intensities. *J Physiol* 141: 337-350, 1958.
  - 15) **池田光男**: 視覚の心理物理学. 森北出版, 東京, 1-248, 1975.
  - 16) **Hecht S, Verrijp CD**: Intermittent stimulation by light. III. The relation between intensity and critical fusion frequency for different retinal locations. *J Gen Physiol* 17: 251-265, 1933.
  - 17) **Basehera P, Grandjean E**: Effects of repetitive tasks with different degree of difficulty on critical fusion (CCF) and subjective state. *Ergonomics* 22: 377-385, 1979.
  - 18) **大頭 仁**: 眼科用光学機器の国際標準化(第2回). 視覚の科学 13(2): 57-60, 1992.
-