

周辺視に於ける明るさ受容機構の 精神物理学的研究Ⅱ

—— Bloch, Broca-Sulzer, Stevens, Troxler の諸法則と
Time-Dependent な明るさ幂関数の一般モデル——

芋 阪 直 行

A Psychophysical Analysis of Brightness Transduction Processes in Peripheral Vision II

—— Bloch's, Broca-Sulzer's, Stevens', and Troxler's law and a
Model on Time-Dependent Brightness Power Function——

Naoyuki OSAKA

1. 周辺視光覚閾を規定する時間・空間的相補性原理

白色光を用いた場合、視野のある部位に呈示されたフラッシュ光の光覚閾値は呈示された視野の位置効果や眼の順応効果といった、いわば視覚系に固有な特性に規定されるほか、フラッシュ光の物理的条件からも影響を受けることは既述(本稿Ⅰ)の如くである。この物理的条件は大きく分けて空間的要因と時間的要因に分類できよう。つまり、光覚閾の規定要因には spatial-dependent な側面と time-dependent な側面があるといえる。所謂、定数測定法的 old psychophysics の実験の流れは主として光覚閾値を規定する要因としての空間積分効果 (spatial summation) や時間積分効果 (temporal summation) の成立する諸条件を探索する方向で展開されてきたといえる (Bauman & van den Brink, 1952)。これらの実験データの集積の中から引き出された経験的「法則」として、閾値を規定する空間積分効果の生じる条件としては次のような関係が報告されている。

$$\phi A = \text{const.} \quad \text{—— Ricco's law}$$

$$\phi \sqrt{A} = \text{const.} \quad \text{—— Piper's law}$$

$$\phi A^n = \text{const.} \quad \text{—— Piéron's law}$$

本研究の一部は昭和53年度文部省科学研究費 奨励研究A (課題番号 371038) によった。

ここで ϕ 及び A は各々フラッシュ輝度と面積を示す。暗順応下でのデータでは Ricco's law は微小な A を用いた時に広義の中心視条件で成立し, Piper's law は周辺視条件で A の大きさが視角 1° 以上の場合に成立するといわれる。 ϕ と A の関係が完全に相補的な型 (即ち, 空間積分効果が完全保存されている) で表現されているのは Ricco's law のみで, Piper's law では周辺視では相補性がやや弱くなり部分的空間積分作用が働くことを示している。周辺視条件では A が 1° から 10° 位まで大きくなるとその積分作用はますます弱くなり, ついには, 閾値の規定条件は ϕ のみとなる状態 (critical area) に移行するといわれる (Diamond, 1962)。このような視野による空間積分効果の働き方を評価するには Piéron's law による方が発展性がある。即ち, $n=1$ 及び $n=1/2$ の場合を各々特に, Ricco's law 及び Piper's law と考えればよいからである。結局, 累指数を一般的に n と置き換えた Piéron's law が本質的には Ricco's law と Piper's law を含んでいるといえる。Piéron's law が視野による空間積分効果の相異を一般累指数 n の中に吸収させてしまう型で前 2 者の法則をより一般型に拡張したことを利用すれば, n の大きさによってさらに種々の周辺視野での空間積分効果の程度を整合的に評価することができよう。

さて, このような一般的評価指数が時間領域に於ても見い出されるであろうか。次に, 閾値を規定する時間積分効果を吟味すると, その条件としては次のものが報告されている。

$$\phi T = \text{const.} \quad \text{--- Bloch's law}$$

ここで, T はフラッシュ呈示時間を示す。この法則は, 感光物質の光化学反応の法則である Bunsen-Roscoe の法則から導かれたものである。空間積分効果でそうであったように, 時間積分効果でも中心視と周辺視では差が認められるであろうか。時間領域の場合は, $n=1$ の場合 (Bloch's law) のみが報告されており, しかも Bloch's law が成立するのは, ほぼ $T \leq 100 \text{ ms}$ に限られている (Bloch's law が成立する最大時間を critical duration という)。また, 周辺視, 中心視で critical duration に余り差が認められなかったというデータ (Blondel & Rey, 1911; Bouman, 1969; Karn, 1936; Long, 1951) や差が認められたというデータ (Baumgardt, 1948; Rochi, 1971; Ronchi & Nováková, 1971; Sperling & Jolliffe, 1965) が報告されており未だ検討の余地が残されているといえよう。しかし, 周辺視では, 刺激の面積が大きくなると critical duration が短くなること (Graham & Margaria, 1935) にも示唆されるように, 空間的要因が強い相互作用をもつことが分る。このように, 光感閾を規定する要因としては空間積分効果が大きな視野差をもつことが知られている割合には, 時間積分効果の検討は未だ少なくまた方法論的にも問題が残されているといえるだろう。

2. 閾値に「明るさ」はあるか？

—— 閾—閾上値の問題 ——

前節では空間・時間的相補性原理が「閾値」を如何に規定するかをみてきたが、ここで「閾値」と「閾上値」の問題を再びとり上げてみたい。何故ならば、「閾値」—「閾上値」問題は歴史的にも方法論的にもかなり異った土壤から発生しているにもかかわらず、概念的にはかなり混同した型で理解されてきたからである。

閾値に「明るさ」はない——というのが所謂 old-psychophysics の考え方である。この考え方によれば、brightness at suprathreshold とか brightness at threshold という記述は厳密な文脈ではいずれも誤っていると考えられる。前者はいわば tautology である。刺激が supra-threshold だからこそ刺激を見れば brightness 感覚が生じるのであり、その逆も真である。また、後者には伝統的思考法からみて「木に竹をつぐ」という類の語義矛盾が内在している。定義によって「閾値」には「明るさ」はないからである。しかしながら、brightness at threshold という概念は二律背反的概念ではあるが、日常経験的、或いは直観的にはむしろなんとなく納得できる——のどにひっかからない——表現である。ここにも混同の原因の一つがあると思われる。繰り返しになるが、明るさ (brightness) 或いはみかけの明るさ (perceived brightness, apparent brightness) というコトバの定義は通常、「閾上値」刺激の誘発する主観的感覚にのみ妥当するとされており、「閾値」刺激は明るさ感覚とは無関係な存在であるといえる。操作主義的観点からは閾値とは、例えば恒常法的手続きによって得られた統計的確率概念であり、「何か見えた」という確率密度の記述にすぎず、「ピカッと光が光った(閾上値)」といった、「直接的」経験とは乖離したものである。さて、古典的 psychophysics の実験の伝統はその多くが基本的には光覚「閾値」の規定条件を探索する形で展開されてきた閾値 psychophysics であって、実は、「明るさ」の psychophysics ではなかったのである。「明るさ」の psychophysics、即ち、閾上値刺激を用いて、マッチング実験や ME 尺度構成法等が発展するのは歴史的にはかなり新しいものである。「閾値」psychophysics と「明るさ」の psychophysics は一見、一卵性双生児に似ているようにみえながら、実は方法論的にも概念的にも「閾値」と「明るさ」については曖昧な点が多い。この点は、「明るさ」の psychophysics に於て、一般幂関数式の中での所謂 threshold correction (ϕt 項の概念的処理) が Fechner 流の pure threshold と如何に対応するのかという問題として残されており(宇阪, 1979a)、この定数項の処理と解釈に関しては所謂 new psychophysicist も苦慮した形跡もうかがえて興味深い(Baird & Noma, 1978; Marks & Stevens, 1968; Stevens, 1960)。

さて、「明るさ」の psychophysics を検討している筆者の立場からこの問題の一つの解決策

を示すと、それは「閾値に「明るさ」はあり、それは「明るさゼロ」の明るさである」と考えることである。これは、理論的には一種の null-hypothesis であって、この仮説を種々の側面から実験的に検討してゆく足がかりとなる点でのみ意味をもつ。従って、前節で述べた「閾値」を規定する相補性法則は全て、ここでは「明るさゼロ」の「明るさ」を生ぜしめる諸条件の表現として考える。この仮説を用いれば、「閾値」psychophysics を支配した諸法則は、一応全て、「閾上値—明るさ」の psychophysics の領域でもそのまま平行移動した形で使用できることになる。例えば、Bloch's law の右辺の constant 項が constant brightness 項となる。但し、これはあくまでも null-hypothesis であるから、閾値レベルで成立した法則が閾上値では成立しない、或いは閾値で周辺視で成立した関係が閾上値では成立しないが中心視では成立したということも十分あり得ることである。本稿では、閾値レベルの法則として知られてきた Bloch's law を閾上値でも成立すると仮定して、この法則を閾上値での他の time-dependent な明るさを規定する諸法則との連関に於て検討したい。また、周辺視と中心視に於ける明るさ受容機構を時間領域に於て整合的に評価する点からも Piéron が提示したような関数型を time-dependent な明るさ関数の一般モデルとしてさぐってみたい。

3. 閾上値に於ける Bloch, Broca-Sulzer, Stevens, 及び Troxler の諸法則と Time-Dependent な明るさ冪関数の一般モデル

Fig. 1 A, B に示されるのは、明るさ（対数）が閾上値フラッシュの呈示時間（対数）にどのように依存するかを種々の可能な関数型（視野による違いも含む）を想定して描いた模型図である。Fig. 1A（上）では、呈示時間を変えた場合、明るさが3種の輝度レベル（ $L_1 \sim L_3$ ）でどのように変化するかを明るさの冪関数の型で示している。左右2つずつのグラフは各々、呈示時間の増加に伴って明るさが増加（減少）するが、輝度レベルによって変化の仕方が異なるケースを、上と下のグラフは同様のケースで輝度レベルによって変化しないケースを、中央のグラフは呈示時間の効果を全く受けない（明るさは輝度によりのみ規定される）ケースを示している。さらに、Fig. 1A（下）には Fig. 1A（上）に対応した Equal brightness contour を、3つの異なる等明るさレベルで示している。次に、Fig. 1B（上）は Fig. 1A に対応した冪指数が示してある。ここでは指数は $L_{1 \sim 3}$ 及び $\psi_{1 \sim 3}$ で相互に平行移動関係にあるものだけが呈示時間と独立になっている点が注目すべき点であり、その他（左右）のグラフでは冪指数自身も呈示時間の影響を受けて変化していることが示されている。最後に、Fig. 1B（下）は、従来のデータから予測されるモデルが示されている。つまり、short flashes ($T \geq 10^3$ ms) では Bloch's law が、medium flashes ($10^3 \leq T \leq 10^4$ ms) では狭義の Stevens law が、long flashes ($10^5 \leq T$) では Troxler's law が働くものとして Fig. 1A~B のグラフのうち、中央とその左右のグラフが可能な組み合わせの中から選択されている。これらのグラフは一応フラッシュの長さとの明るさの関

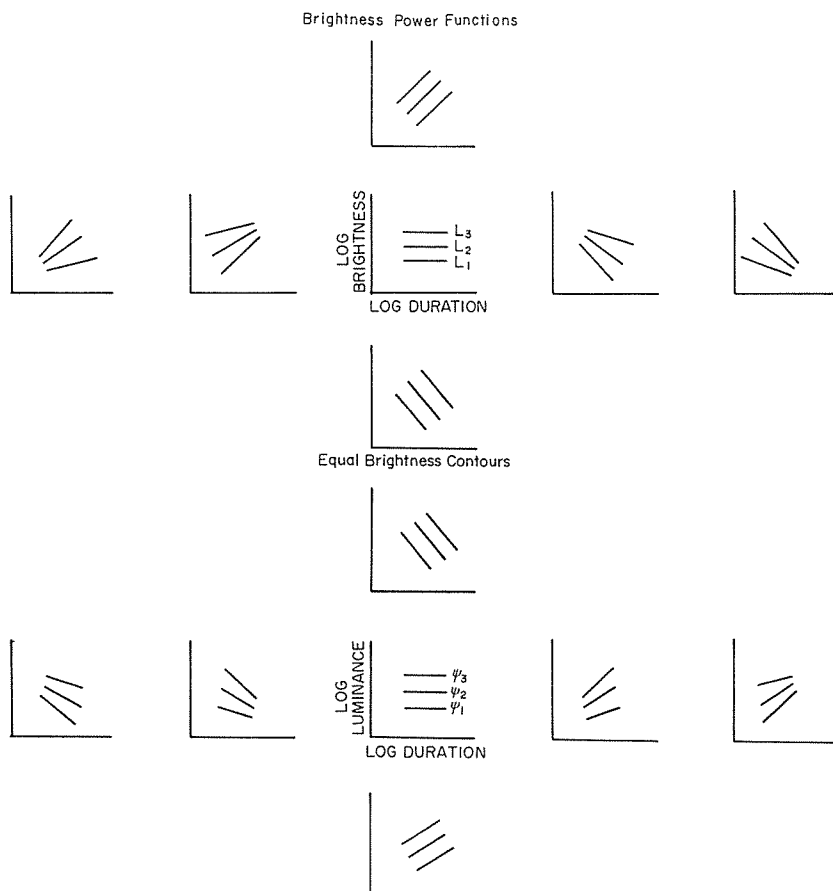


Fig. 1A. Upper panel: Brightness power functions for three different suprathreshold luminance levels. Log brightness as a function of log flash duration for possible brightness functions. Lower panel: Corresponding equal brightness contours for three different criterion brightness. Panel shows log luminance as a function of log duration.

係が Equal brightness contour や冪指数との関連で論じることができるということを示すにすぎない。次に、呈示時間に伴う明るさの変化をやや詳細に図示したのが Fig. 2 であり、これに対応した Equal brightness contour を示したのが Fig. 3 である。まず、Fig. 2 についてみると、Bloch region では明るさは呈示時間の増加に伴って増大するが、約 100 ms の所で critical duration に達し、それ以降は明るさは duration の影響を受けず、輝度の効果のみを受ける(この安定した領域での明るさ関数は Stevens が cubic root law と名づけた冪関数型をもつので Stevens' law の成立範囲と考えてみた)、そして、さらに時間が延長されてゆくと、こんどは次第に明るさは Troxler 効果によって減少してゆく(Broca-Sulzer 効果については後述)。

ここでは、Stevens' law は retinal transduction を反映する Bloch's law と post retinal adaptation を反映する Troxler's law の支配する時間領域の相互に拮抗する時点領域に働いてい

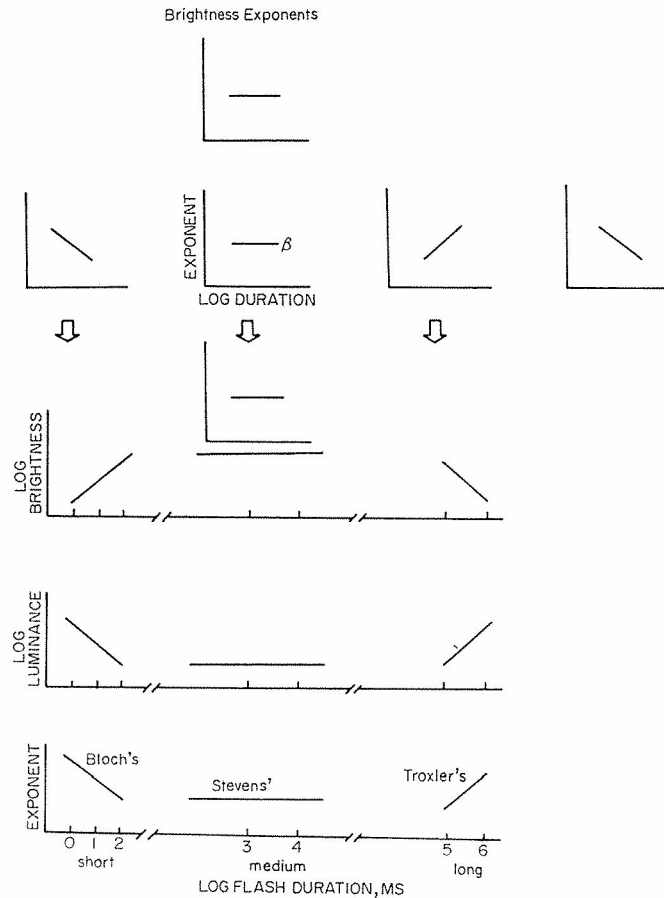


Fig. 1B. Upper panel: Brightness exponent as a function of log duration. Lower panel: A model describing the relationships among brightness function, equal brightness contour, and exponent as a function of log flash duration.

るように描いてある。つまり、明るさ感覚は本質的に time-dependent なものであるが、網膜レベルと中枢レベルの time-dependent な明るさ規定因がちょうど相殺された時点で Stevens の安定帯がみかけ上、存在するようにみえることを示している。そして、その境界点に非線型な一過性の明るさの overshoot 効果 (Broca-Sulzer 効果) や undershoot 効果 (Troxler fading 効果) が生じると考えている (Fig. 3 参照)。また、Fig. 2 の Bloch と Troxler region では 4 つの equal luminance contour が相互に平行移動の関係になっていないこと (即ち、Fig. 1A, B の分類では冪指数が呈示時間により変化すること) にも注意が必要であろう。

さて、Fig. 1~3 で出てきた閾上値に於ける諸法則について簡単に言及すると次の如くである。

Bloch's law——閾値レベルで確認された $\phi T = \text{const.}$ という関係を、閾上値レベルで $\phi T = \text{const. brightness}$ と置き換えたもの。

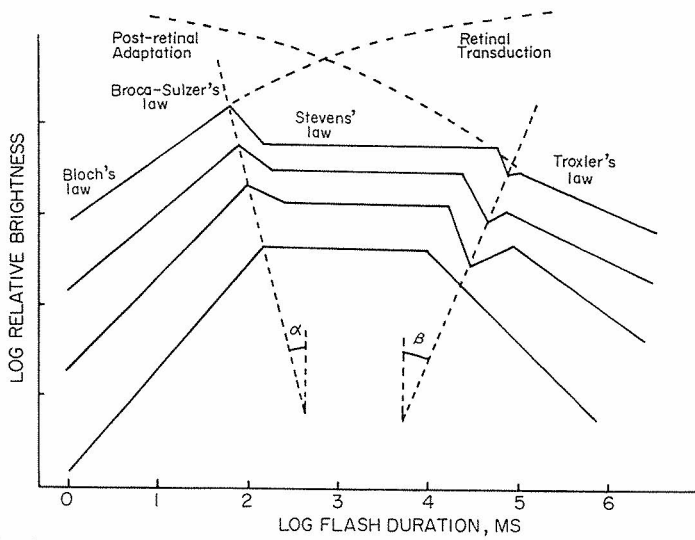


Fig. 2. Brightness/duration relations: Interrelations among Bloch's, Stevens', Troxler's, and Broca-Sulzer's law.

Broca-Sulzer's law——閾上値レベルでの critical duration の前後に生じる明るさの一過性の enhancement 効果を示す。

Stevens' law——所謂 Stevens の power law で、本来この法則は、明るさの変化の仕方を累指数により記述する法則であるから呈示時間もその関数パラメタに入っており、数秒の呈示時間帯のみに成立する法則ではないが、ここでは狭義に呈示時間と独立な cubic root function の一つとして採用した。

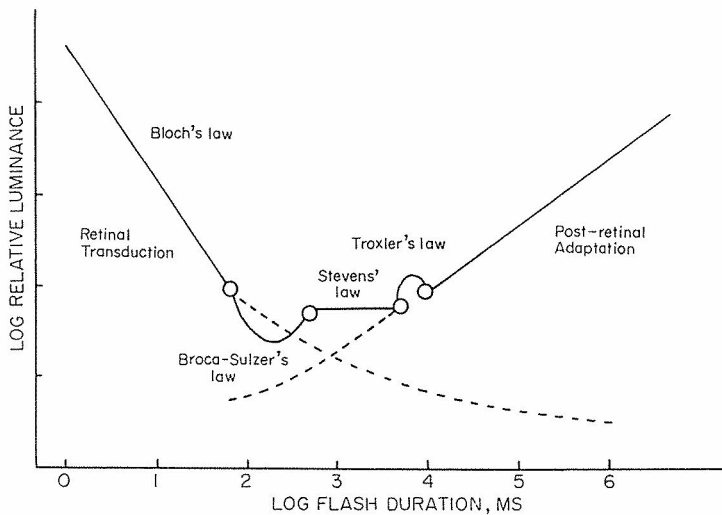


Fig. 3. Equal brightness contours: Interrelations among Bloch's, Stevens', Troxler's, and Broca-Sulzer's law.

Troxler's law——呈示時間が長くなると、明るさが徐々に fluctuate しながら減少してゆく現象で、輝度が小さい場合は一時的に消滅してしまうケースもある (Clarke, 1957; 1960, 1961; Clarke & Belcher, 1962)。 (Fig. 2 や 3 では log-log plot によっているので Troxler's law はかなり長い時間にわたる明るさの減衰過程であることに注意)。

Fig. 4 は critical duration (T_c) と関連した一過性の明るさの overshoot (Broca-Sulzer 効果) と undershoot (Troxler 効果) を詳細に示している。Broca-Sulzer's law については、刺激輝度が上昇する程 enhancement が大きくなり、また T_c も短かくなることが確認されている (Stevens & Hall, 1966)。Fig. 4 で Bloch region と Stevens region とでの明るさの冪指数の大きさは F と S の長さで比例し、そして両者の関係は角度 θ によって決まる (Anglin & Mansfield, 1968)。即ち、Fig. 4 から、

$$\tan \alpha = BC/BD = (F-S)/BD$$

ここで、

$$BD = AE = (F-S)/\tan \alpha$$

故に、

$$\tan \theta = AE/ED = (F-S)/(S \cdot \tan \alpha)$$

従って、

$$F/S = 1 + \tan \alpha \cdot \tan \theta$$

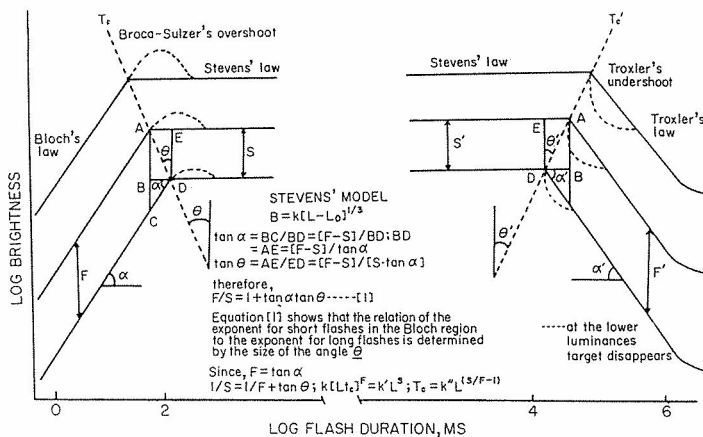


Fig. 4. Theoretical relationship between the exponent governing the brightness of short flashes and the exponent for long steady-state flashes. In these log-log plots the distances F and S are proportional to the respective exponents. As the angle θ increases, the vertical distance F increases according to EQ. 1 (Adapted from Anglin & Mansfield, 1968).

この関係は Bloch region と Stevens region での明るさの冪指数の相互関係が角度 θ によって決まることを示している。

また、 F と S の大きさを各々の冪の絶対値と考えると、

$$F = \tan \alpha$$

となり、これを用いて

$$1/S = 1/F + \tan \theta$$

を得る。これは Stevens (1966, p. 98) の見出しした関係式である。この関係式は角度 θ が大きくなるほど (90° に近づく程) F は大きくなることを示しているといえる。さらに、Bloch region での明るさと Stevens region での明るさを同じ輝度エネルギーの水準でマッチング (或いは ME 評価) できるとすると、

$$a(\phi T_c)^F = b\phi^S$$

と書ける、従って

$$T_c = c\phi^{(S/F-1)}$$

を得る。

この式は T_c も $(S/F-1)$ の冪をもつ輝度の冪関数で記述できることを示している (但し、この場合は enhancement 等の現象は除外して考えている)。このことは、Troxler's undershoot の場合にも当て嵌まる。但し、この undershoot に関しては本稿ではモデルからの予測に止まっており、実際に Broca-Sulzer's law のように明確に出現するかどうかは現在の所データの的には不明である (overshoot に比較してやや長い時間帯を持つと推定され、測定にも困難が伴うと思われる)。また、Fig. 4 では分かり易くするために F の長さは T_c 以下であればどこでも同じようにしてあるが (冪指数が呈示時間と独立であると仮定している。Fig 1 参照)、実際には F の長さは呈示時間によって、また視野によって異ってくる (本稿 I の Fig. 1, 3 及び 4 参照)。この様相は Fig. 2 に示すとおりである。従って、 T_c の冪表現での F は T_c の近傍での F で近似することとなり、 T_c より短い側へ移動した呈示時間では F の大きさ、即ち、Bolch region での冪指数の値自身は一般に大きくなってゆく傾向を示すことになる。実験データとしては、Bloch region では呈示時間が短くなる程、特に中心視での冪指数が増大することが分っている (Osaka, 1977; 1978)。また、Stevens region での明るさはそのほとんどが輝度の cubic root に近い関数型で記述できることが多い点から (Osaka, 1979b) S の大きさはほぼ invariant であると考えてよいだろう (この場合にも一般に周辺になる程冪は微増する傾向がある (荳阪, 1979a))。

いずれにしても、ここで重要な事は、 F の値が呈示時間に依存はするものの、基本的には T_c に近い F と S の値、及び θ が推定できれば T_c (overshoot 及び undershoot の T_c) が如何なる幂関数に従うかが推定できることであろう。

さて、もとの戻ると、このモデルは基本的には retinal transduction 過程と postretinal adaptation 過程の2つの過程の相互拮抗作用のダイナミックスが種々の法則が支配する領域を生じさせていることを示している点にその特徴があるといえる。まず、Bloch's law は Bunsen-Roscoe の法則から導かれているようにほぼ Photo-chemical な過程を含む、retinal transduction 過程であると言えるだろう。幂指数の側から評価するならば receptor レベルではその反応が photo-chemical なものに近づく程指数はリニア (1.0) に近づくことが種々の動物に於て確認されている (Mansfield, 1974, 1976)。そして、receptor レベルから神経節細胞レベルに近づくに従って retinal transduction 過程の幂指数は輝度の square root から cubic root function に近づいてゆくことが知られている (Mansfield, 1974)。一方、Troxler region での post-retinal adaptation 過程はかなり時定数の大きな現象で、post-retinal なレベルで少なくとも外側膝

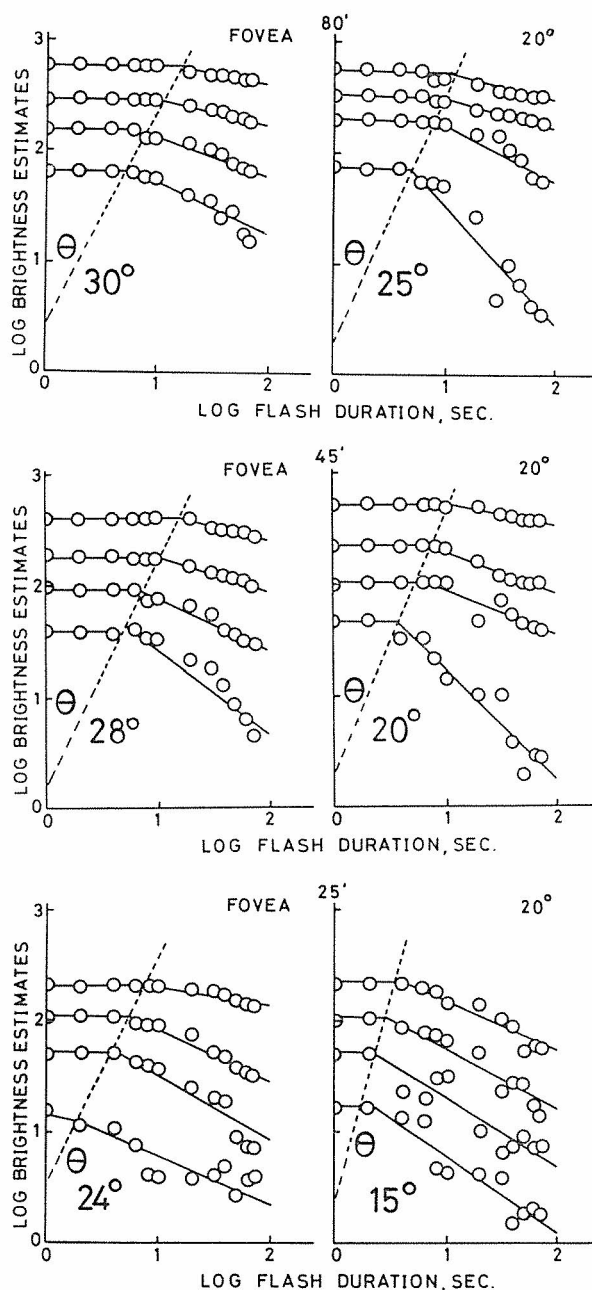


Fig. 5. Brightness as a function of flash duration (log-log plot) in the Troxler region. Parameter is criterion luminance target size, and retinal locus.

状態から中枢までの間の段階で徐々に進行する現象と推定される (Clarke & Belcher, 1962)。Troxler 現象のメカニズムは不明の点が多いが、ただ、この現象が post-retinal な段階での順応に基づいていることだけは確実なようである (Craik, 1940; Pitt, 1939)。

4. 周辺視、閾上値に於ける Troxler 効果と Time-Dependent な明るさの冪指数のデータ

明るさと呈示時間の関係は Bloch, Broca-Sulzer, Stevens の region では種々のデータがそれらの閾上値での成立を確認していることから問題は少ないと思われるので、問題は Troxler 効果に絞られてくると思われる。

第3節のモデルで示した Troxler's law と undershoot 現象を検討するために、既述のデータ (本稿 I, Fig. 6 の一部) をモデルに沿った形でプロットしたのが Fig. 5 である (log-log plot とした)。まず、 θ の値をみると $25'$ から $80'$ までのいずれの面積条件でも、 20° 周辺視が中心視より小さいことが分る。従って、 T_c は周辺視で面積が小さくなる程やや小さくなっていることが分る。また、これは周辺視では低輝度刺激の明るさの減衰が T_c 以上で著しいこと、即ち、冪指数の増加が急激であることを示唆している。これらは、Troxler's law が生じているが、た

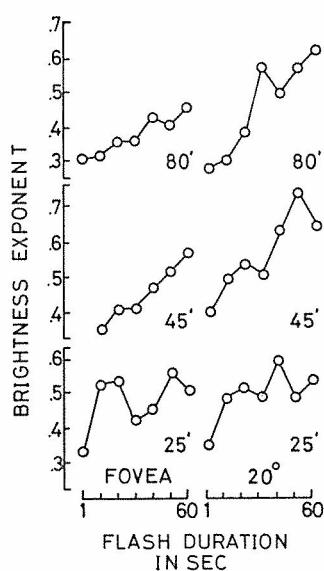


Fig. 6.

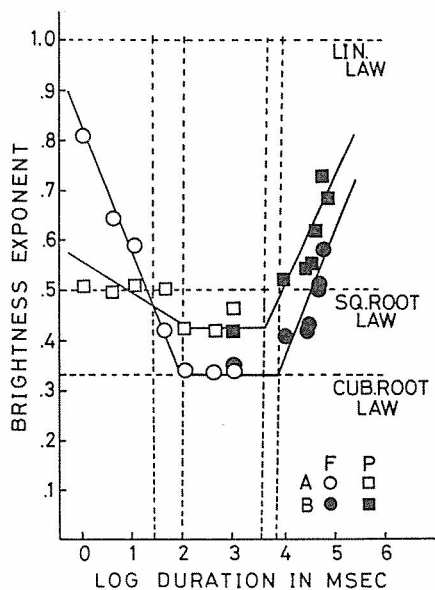


Fig. 7.

Fig. 6. Brightness exponent as a function of flash duration (linear scale) in the Troxler region. Parameter is retinal locus and target size.

Fig. 7. Brightness exponent as a function of log flash duration in the periphery and in the fovea. It describes how brightness exponent changes as a function of log duration in the Bloch-, Broca-Sulzer-, Stevens-, and Troxler-region.

だ予測された undershoot のみが特に明確には表われていない点が異なるといえよう。

Fig. 6 には、それに対応する冪指数の変化を示す。呈示時間が長くなれば (adaptation が長くなると) 指数がいずれの条件でも著しく増加してゆく様相が分る。Fig. 7 には呈示時間の変化に伴う冪指数の変動の様相を示す (これは本稿 I の Fig. 8 を各法則の支配領域を参考にして直線近似でより整理して示した図である)。周辺視では明るさの冪指数は左方にアシンメトリックな浅い U-shape function を形成し, 中心視では両側で指数が 1.0 に急激に漸近する深い U-shape function を成すことが分る。周辺視に於てアシンメトリックな形状になるのは, Bloch region でも短い呈示時間になると低輝度の刺激が rod intrusion 効果によって sensitivity が上昇し, 明るくみえるために明るさがせいぜい輝度の square root function までには落ちないことによると推測される。この間の関係は Fig. 8 に模型的に示す。

Time-Dependent な明るさの冪関数モデルをさらに定量的に記述するには, 諸法則との関連

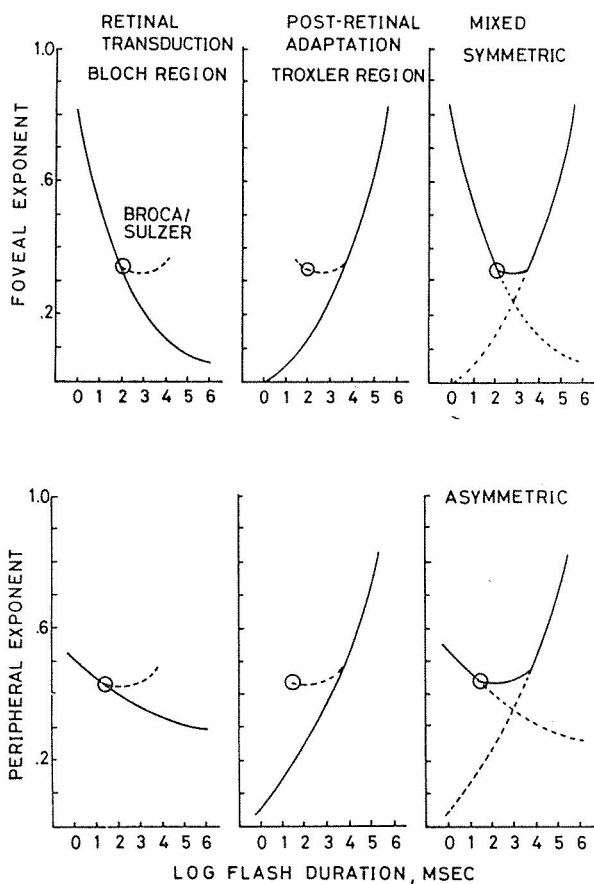


Fig. 8. Foveal and peripheral brightness exponent as a function of log flash duration.

の実験的検討, 特に Troxler's law との関連をデータの面からさらに詳細に検討する必要があると思われる。

References

- Anglin, J. M., & Mansfield, R. J. W. 1968. On the brightness of short and long flashes. *Perception & Psychophysics*, **4**, 161-162.
- Baird, J. C., & Noma, E. 1978. *Fundamentals of scaling and psychophysics*. New York: Wiley.
- Baumgardt, E. 1949. Les theories photochimiques et quantiques de la vision et l'inhibition nerveuse en vision lumineuse. *Revue d'Optique*, **28**, 661.
- Blondel, A., & Rey, J. 1911. Sur la perception des lumières brèves à la limite de leur portée. *Journal de Physics*, **1**, 530-550.
- Bouman, M. A. 1969. My image of the retina. *Quarterly Review of Biophysics*, **2**, 25-64.
- Bouman, M. A., & van den Brink, G. 1952. On the integrate capacity in time and space of the human peripheral retina. *Journal of the Optical Society of America*, **42**, 617-620.
- Clarke, F. J. J. 1957. Rapid light adaptation on localized areas of the extra-foveal retina. *Optica Acta*, **4**, 69-73.
- Clarke, F. J. J. 1960. A study of Troxler's effect. *Optica Acta*, **7**, 219-236.
- Clarke, F. J. J. 1961. Visual recovery following local adaptation of the peripheral retina. *Optica Acta*, **8**, 121-135.
- Clarke, F. J. J., & Belcher, S. J. 1962. On the localization of Troxler's effect in the visual pathway. *Vision Research*, **2**, 53-68.
- Craik, K. J. W. 1940. The effect of adaptation on subjective brightness. *Proceedings of the Royal Society (London)*, **B. 128**, 232-247.
- Diamond, A. L. 1962. Brightness of a field as a function of its area. *Journal of the Optical Society of America*, **52**, 700-706.
- Graham, C. H., & Margaria, R. 1935. Area and the intensity-time in the peripheral retina. *American Journal of Physiology*, **113**, 299-305.
- Karn, H. W. 1936. Area and the intensity-time relation in the fovea. *Journal of General Psychology*, **14**, 360-369.
- Long, G. E. 1951. The effect of duration of onset and cessation of light flash on the intensity-time relation in the peripheral retina. *Journal of the Optical Society of America*, **41**, 743-747.
- Mansfield, R. J. W. 1974. Measurement, invariance, and psychophysics. In H. R. Moskowitz, B. Scharf, & J. C. Stevens (Eds.) *Sensation and measurement: Papers in honor of S. S. Stevens*. 111-126, Reidel, Dordrecht: Netherlands.
- Mansfield, R. J. W. 1976. Visual adaptation: Retinal transduction, brightness and sensitivity. *Vision Research*, **16**, 679-690.
- Marks, L. E., & Stevens, J. C. 1968. The form of the psychophysical function near threshold. *Perception & Psychophysics*, **4**, 315-318.
- Osaka, N. 1977. Perceived brightness as a function flash duration in the peripheral visual field. *Perception & Psychophysics*, **22**, 63-69.
- Osaka, N. 1978a. Brightness exponent for the periphery in the Bloch region. *Journal of the Optical Society*

- of America*, **68**, 140-142.
- 学阪直行 1978b. 周辺視に於ける明るさ受容機構の精神物理学的研究 I —呈示時間の効果—, 追手門学院大学文学部紀要, **12**, 29-45.
- 学阪直行 1979a. 周辺視における明るさの冪関数と Equal Brightness Contour —暗・明順応下での比較—, 心理学研究, **50**, 1-8.
- Osaka, N. 1979b. Brightness exponent as a function of retinal eccentricity in the peripheral visual field: Effects of dark- and light-adaptation. *Perception & Psychophysics*, In press.
- Pitt, F. H. G. 1939. The effect of adaptation and contrast on apparent brightness. *Proceedings of the Physical Society (London)*, **51**, 817-830.
- Ronchi, L. 1971. Absolute threshold before and after correction of oblique-ray astigmatism. *Journal of the Optical Society of America*, **61**, 1705-1709.
- Ronchi, L., & Nováková, O. 1971. Luminance-time relation at various eccentricities: Individual differences. *Journal of the Optical Society of America*, **61**, 115-118.
- Sperling, H. G., & Jolliffe, C. L. 1965. Intensity-time relationship at threshold for spectral stimuli in human vision. *Journal of the Optical Society of America*, **55**, 191-199.
- Stevens, J. C., & Hall, J. W. 1966. Brightness and loudness as functions of stimulus duration. *Perception & Psychophysics*, **1**, 319-327.
- Stevens, S. S. 1960. The psychophysics of sensory function. *American Scientist*, **48**, 226-253.
- Stevens, S. S. 1966. Duration, luminance, and the brightness exponent. *Perception & Psychophysics*, **1**, 96-100.