

Title	輝度の加法性について 色彩スケール論 3
Sub Title	On the additivity law of luminance : treatises on color scales 3
Author	印東, 太郎(Indo, Taro)
Publisher	三田哲學會
Publication year	1960
Jtitle	哲學 No.38 (1960. 11) ,p.281- 306
JaLC DOI	
Abstract	As one of the treatises in a continued series making inquiries into psychological problems involved in photometry and colorimetry, the present article provided a detailed account of all the postulates inherent in the present definition of the psychophysical concept: light. In regard to the C.I.E. luminosity curve, discussions were made about individual differences in its source data, the psychophysical procedures employed, restrictions in the observational conditions and so on, but special emphasis is laid on the role played by Abney's law, i.e., the additivity of luminance. Hence, results of the recent experiments made by MacAdam, Sperling, Fedorov etc., which concern directly or indirectly with the additivity assumption, were reviewed with the conclusions as follows. If Abney's law holds at all, it does only under luminance matches by the flicker method. Direct comparison methods do not consistently support the precise additivity of luminance. The additivity principle, however, underlies all the present systems of photometry and colorimetry. Nevertheless, the flicker method could not reasonably be accepted as the sole basis for photometric measurements to the exclusion of direct observations. Though useful, the flicker photometry is a secondary procedure in the sense that it is less closely related to ordinary conditions of observing colors. Photometry and colorimetry have served more than thirty years for practical purposes with no serious trouble, which would indicate that the deviations from additivity be of the magnitude that can be tolerated in ordinary situations where colors are under direct observation but no direct comparison is involved. Hence, textbooks are warranted in taking the additivity principle for granted. From the viewpoint of psychophysics, however, it might be of importance to make clear the abney's law has been established accurately only by the flicker method. It was argued that luminance is ultimately based on the determination of the equality in brightness and remains to be the lower metric of brightness even when it is defined with internal consistency. Higher metric should answer the question by how many times one brightness differs from another.
Notes	横山松三郎先生古稀記念論文集
Genre	Journal Article
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN00150430-00000038-0288

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

輝度の加法性について

〔色彩スケール論 3〕

印 東 太 郎

一、緒 言

測光学 (photometry)、測色学 (colorimetry) はいずれも物理学の一部門と見なされるものであるが^{3,7}、そこには同時に多くの心理学的な問題も含まれているので、機会ある毎に、それら心理学的問題を一つ／＼とり上げて論ずることを試みて来た^{4,5}。そこで、精神物理学 (psychophysics) に、終始、深い関心をよせて来られた横山教授の古稀記念論文集というこの機会には、特に精神物理学に興味が深いと思われる一つの問題に焦点を合わせ、少しく立入つて論じて見たいと思う。

測光、測色のシステムは、近代技術の関係方面にとつては、一つの規格として通用するもので (JIS Z-8701, Z-8721, Z-9110)、他人目には完備された物理的計測として見え^{1,2,8}、そこに心理学的問題の含まれている事実は見過され易いであろう。照度といえ、光電照度計のスケールの上に直読できるルクスを単位とする数値という具合であるが、実は光や色という概念も、ルクス^{12,13,14}という単位も、本来、心理物理学の性格をもっている。O. S. A. (Optical Society of America) 測色委員会の公式見解によれば^{12,13,14}、たとえば光 (light) は「視感覚 (visual sensations) を通し認知され

る放射エネルギーの一特性”と定義され、^{5,13} 一つの psychophysical concept と呼ばれている。O.S.A. の *psychophysics* とは “物理的的刺激と心理的反応との関係に関する知識”であるから、Fechner 以来の伝統的な精神物理学とは同じ意図を表すものであるが、O.S.A. の意味での *Psychophysics* を、以下、特に心理物理学と呼ぶことにすると、光の計測は、放射エネルギーの測定には違いないが、単なる物理量としての測定ではなく、むしろ、それが標準状態の下で標準観測者に明るさという心理的経験をひきおこす力が計測の対象となつているところから、これを心理物理学的測定と呼び、この操作によつて定義される光を心理物理学的概念と呼んでいるのである。英国の *Physical Society* の公表した色彩の術語に関する報告では、³² 心理物理的概念という言葉は用いていないが、光に関する定義には内容的に相違はない。

光はこのように定義された概念であるから、単位時間当りの光の量、光束 (luminous flux) F は、波長 λ を $m\mu$ で表して

$$F = K \int_{380}^{760} P_{\lambda} V_{\lambda} d\lambda \quad (1)$$

で与えられることは、国際的に現在採用されている規格で、 P_{λ} は単位波長当りの分光放射束 (radiant flux) でワット W を単位として測定され、ルーメン lm を単位として F を表すには、^(註1) 常数 $K = 680 lm/w$ とおけばよい。一方、 V_{λ} は標準比視感度 (standard luminosity) で、特定の波長 λ の放射束が目にも明るさの感覚をひきおこす相対的能力を表すものとして、後に述べる操作によつて定義されている数値であるから、波長 λ の純物理量としての放射束が P_{λ} ワット存在すれば、これを明るさをひきおこす力として評価したものが $K P_{\lambda} V_{\lambda}$ となり、幾つかの λ の混在しているのが普通で

あるから、可視光線の範囲にわたつて積分しているのである。この定義から、光の心理物理学的性格は明らかである。 P_v はエネルギーであるから光電管、熱電堆などによつて測定されるが、これを、物理量の心理的効果を表す係数 V_v によつて、いわば変調しておかなければ光にはならない。光電照度計などはそのスケールが F を示すよう調整されているのであるが、この純物理的と見える照度 ($I_x \parallel \text{lm/m}^2$) の計測操作にも、その calibration の中に V_v という心理物理学的係数が織込まれていることに注意しなければならない。

以上、光について述べたのであるが、色の輝度 (luminance) lm/cm^2 についても同様で、たとえば、XYZ表色系における刺激値 Y は、色光にせよ、物体色にせよ、(1)式そのもの乃至それに比例する量として計算される。事実、測光学、測色学の全体系の基礎に(1)式があるので、従つて、(1)式に含まれる心理学的問題の考察は、これをゆるがせにする訳にはゆかない。もつとも、測光、測色を一つの技術としてのみ見るとすれば、それは過去卅余年にわたつて大過なくその任務を果して来たものであるから、今更、その基礎的な問題を論じるのもおかしい話であろう。問題があるとするれば、それは実務における何らかの破綻から生じたものでなければならぬし、それは論じて片づく問題でもないであろう。しかし、これは「哲学」の紙上であるから、心理的事象をも併せ考えざるを得ない測光、測色学の論理体系上の基礎としての(1)式について、まず、その心理物理学の問題点を指摘して見たいと思うのである。

二、問題の所在

心理物理学的概念としての光、輝度に含まれている問題点は、(1)式から明らかなように、これを二つに大別して考へることが出来る。すなわち、第一は比視感度 V_v の妥当性に関する問題、第二は各波長における光束の積分によつて

全体としての光束を定義する操作に関する問題であろう。

比視感度 V_l を波長 λ の函数として描いた曲線は、以前は visibility curve と呼ばれたが^{22,28} O. S. A. では、現在、比視感度曲線 (luminosity curve) と¹³いうことになっている。C. I. E. (Commission Internationale de l'Eclairage) により、1924 に採用され、1933 の International Committee on Weights and Measures で公認された現行の比視感度曲線は、その観察条件としては、a 視野中央における、b 視角 2° 程度の、c 明所視 (photopic vision)、明るさの matching の方法としては等明度法かフリッカー法のいずれかによつて行われた実験データのみを勘考して定義されている^{13,14,18,19}。したがつて、厳密に言えば、(1)式による光束の定義はこの条件の下においてのみ意味をもつことになつてしまい、問題といえども一つの問題であろう。実験としては、勿論、観察条件をせまく指定すればそれだけ consistent なデータを得ることが出来るが、それは同時にその結果の妥当範囲をせまくすることに他ならない。標準比視感度曲線にしても、個人差その他の面において、データの consistency を余り捐うことなしに、より条件をゆるめることが出来るか否か、問題になるであろう。c の条件についていえば、順応明度面の輝度を 1 fcd 以下に下げてゆくと Purkinje shift によつて V_l の値は本質的に変化するので^{27,39,40}、これは論外とし、a の条件もこれを崩せば、網膜の構造から、結果は多義的となるのは明らかであるから、結局、残る問題は視角 2° という制限になる。ドイツは 1937 に視角を 5° 以下におさえ純円錐体視の条件において標準比視感度曲線を定義しようという提案を行つたが、それに対する米国の回答は次のようなものであつた。すなわち、その下で光という概念の用いられる一般の条件を考えると、現行の V_l の数値が批判されるとすれば、視角 2° の制約が大きに過ぎるためではなく、逆に小さきに過ぎることではなればならないというのである。¹⁸ Maxwell's spot の介入により明るさの matching の困難になるのを承知で視角を

10°にとる試みが、最近、注目されはじめているのも同じ思想にもとづくものであろう。^(註2, 28, 36, 37) いずれにせよ、観察の条件としては、データの consistency と、結果の妥当範囲とのバランスシートの上でそれを適当に定めるといふ、いわば、便宜的な決定だけが問題で、心理物理学の見地から特に論じる必要はないように思われる。

一方、 V_λ の妥当性に関するもう一つの問題として、その測定方法があげられる。比視感度 V_λ の数値を求めるには次のような操作を必要とする。特定の基礎刺激 (basic stimulus)、たとえば標準白色、を一定の輝度に固定し、各波長 λ の刺激をこれと比較し同じ明るさに見えるそのエネルギーとしての放射束 P_λ を決定すれば、

$$V_\lambda \propto \frac{1}{P_\lambda} \quad (2)$$

とすればよく、通常、 $1/P_\lambda$ の最大になる $\lambda = 555 m\mu$ において $V_{555} = 1$ と定義するのである。ところで、明るさを match をせよというこの心理物理学実験において問題となるのは、その matching の方法ないし規準であろう。色をその三属性において一致させ、全く区別の出来ない状態を作る完全等色ではなく、明るさのみを一致させる heterochromatic な部分等色を行うのであるから、何を以て二色の明るさが一致したと見なすか、その規準は必ずしも明確ではないのである。二色の間に明るさに関する部分等色を定義する方法として、原理的には、次の四つの規準が考えられる。¹⁸⁾

すなわち、a 観察者が直接に二色を比較しながら両者の明るさの一致したという印象を得る点を求める等明度法

(method of equality of brightness) b 二色を時間的に交替させてフリッカーをおこし、一方の放射束の強さを変化させ、フリッカーの印象の消滅ないし最小になったところを以て明るさの一致と定義するフリッカー法 (flicker method) c 二色光の下でそれ／＼視力 (visual acuity) を測り、照度を変化して視力の等しくなった時に両色光は同じ明るさをもつと見なす方法、d 二色についてそれ／＼臨界融合頻度 c.f.f. を測定し、それが等しい場合、二色の明るさは等しいと定義する方法、とである。この四方法の中、a を除けば、いずれも間接的な手段で明るさの brightness を定義しており、それというのも、色度 (chromaticity) の異なる二色において明るさだけを抽象してその一致を直接的に指摘するのが、比較的、困難であるからに他ならない。もしそれが簡単であれば、a の等明度法以外は全く考慮する余地はなかつたはずである。ところで、現行の標準比視感度曲線は、前述のように、a、b 二方法によって定義されているのであるから、ここにその妥当性に関する一つの問題がある。両者が全く同等の結果を与えるものならよいが、そうでないと、たとえばフリッカー法によつて測定された V_2 にもとづく光の定義は、常に flicker photometry によつて評価するという条件付でしか成立しない。

緒言に述べた心理物理学的概念としての光を与えるため、エネルギーとしての放射束 P_2 を「変調」する係数 V_2 を決定するには、操作的定義からいつて、等明度法が最も直截にその目的に適っているにもかゝらず、フリッカー法の援助を仰がなければならなかつたのは、測定結果の consistency において後者が前者を凌駕するという理由によるものである。ここに consistency とはデータの安定性と、もう一つ、加法性の成立という二つの面をもつが、後者は後に詳述するので、ここでは安定性についてのみ述べる。同一個人が同一測定を反復した場合における個人内変動と、同じ測定を何人かの被験者が行つた場合の個人差、すなわち、個人間変動の二つの変動の小さい時に、デ

タは安定しているというべきであろうが、たとえば Coblenz & Emerson¹¹ (1917) の 110 名におよぶ被験者の、タングステン球による光を基礎刺激とし、等明度法によつて行われた測定の結果は、これを標準比視感度の基礎とするには不安定に過ぎるといわれている。これは基礎刺激と比較刺激の色度における相違が大きく、明るさのみの matching の困難に過ぎるためとされ、そこでしばしば用いられるのは、small step いわゆる cascade による等明度法である。この場合は、基礎刺激を一つに固定せず、 λ_1 に λ_2 の明るさを match させたら、次に λ_2 に λ_3 の明るさをさせるといふふうに、標準刺激をスペクトラムの上でずらせてゆくので、その方法によると、色度の差を極小にして明るさの比較が出来るので、データは安定してくるといわれる。^{13, 18} 一般にはスペクトラムの全可視部を同一輝度にして matching を行うのは困難なので、波長によつて輝度レベルをずらせ、換算しながら (2) 式により V_λ を求めるので、たとえば、C. I. E. 標準曲線の基礎に採用されている Gibson & Tyndall (1923) の実験では網膜照度 7~43 troland の範囲で¹⁸ 変化されている。このように、等明度法は論理的には最適であろうが、実施上、上述の困難を伴い、また、これを固定基礎刺激との比較と、cascade による step by step の比較とにわけた場合、同じ被験者においても比視感度の数値は全く異なるものになることが考えられるという意見もある。²⁹ P. 301

一方、目をフリッカー法に転じると、夙に 1912 Ives²⁴ によつてこの方法による結果が、cascade 等明度法によるそれと一致すると認められて以来、¹³ P. 249 一般に、比較的信用を博して来たように思われる。たとえば、ドイツは 1937 に、さきに述べた視角に関する提案と共に、標準比視感度曲線はフリッカー法によつてのみ定義されるべきであるという提唱を行つた。¹⁸ この方法の原理は、二色間におけるフリッカーの生起には色度の相違が寄与しない時でも、輝度の差は寄与しているという仮説で、したがつて、色度の相違が存在しているにもかゝらずフリッカーの消滅ないし最小

になるエネルギー強度関係が存在すれば、そこにおいて両者の明るさは一致しているはずということであろう。しかし、上述のドイツ提唱に対する米国の回答において指摘されているように、フリッカー法はあくまで二次的なもの (secondary procedure) で、この方法が等明度法と異なる結果を与えるとすれば、等明度法にかえてこれを標準比視感度曲線決定の基礎にする訳にはゆかない。^{18 P27} もし ^{35 P253} Hicker photometry をその基礎とするなら、光の概念の、そしてまた測光体系の目標の慎重な再検討を要するであろう。等明度法が明るさの一致したという観察者の印象、より正確に言えば、明るさの相違が存在しているとは認められなくなつたという余り輪郭の明快でない点をおさえようとしているのに反し、フリッカー法の方は、ともかく、フリッカーの消失ないし最小になるという比較的是つきりした点を扱うところから、物理学関係の方にはより客観的で、より頼りになるように見えるかもしれないが、普通の意味における明るさの matching がこの操作によつて可能であるというのはあくまでも仮説であり、さもないければ、この方法によつて明るさの一致を操作的に定義し、そのかわり、その内容が直接的に知覚されるそれとは異つてくるかもしれないことを覚悟してかゝらなければならない。フリッカー法は、それが等明度法と本質的に同じ結果を、しかも、等明度法よりもより安定した形で与えてこそ、これを援用する意味が生きて来るが、それ以外の場合には、測定の中にある論理的困難を含むものというべきであろう。

以上、比視感度 V_v の妥当性をめぐり、その観察条件および測定法の二面から考察を行つて来た。しかし、光の概念に含まれる心理物理学の問題点としては、本節の冒頭に指摘したように、もう一つ、(1)式の示すような積分操作を用いることの可否があり、これは同時に、三頁にふれたように、加法性の成立という意味でのデータの consistency の問題に連り、等明度法、フリッカー法を別箇の観点から比較することにもなるので、次にこの問題をとり上げなければ

ばならない。

波長 $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ を含む複合刺激の輝度は、これら成分 λ_i の輝度の和になるという加法性の原理は、一般に、Abney's law^{8, 35}として知られている。これは、普通、複合刺激について述べられているようであるが、成分として同一波長の場合を考えれば、同じ波長をもつ二つの単波長光を合成して得られる単波長光の輝度はそれらの単波長光の輝度の和に一致するという¹⁹ことも出来るであろう。二つの成分の場合についても、この加法性が、一旦、厳密に成立することになれば、同一原理は多数個の成分の場合にもやはり成立する訳で、(1)式の積分操作はこの基礎の上に立つており、また成分として、単波長のかわりに、表色系における基本刺激 (reference stimuli) のように、それ自身複合刺激を考えてもやはり加法性の成立することになり、加色混合に関する Grassmann の法則の中の輝度加法性につらなつて来るのである。

このように、輝度の加法性はその上に測光学、測色学の全体系を支える基本原理ということが出来る。測光についていえば、比視感度 V_λ であればその数値が一部疑わしい場合には、^(註3)その値だけ修正すればそれで済むのであるが、加法性の原理がもし崩れるとなると、それは部分的修正によつて解決される問題ではない。一方、測色学からいっても、XYZ表色系のYは、周知のように、(1)式そのものによつて計算されるよう定義されており、しかも、C.I.E. 1931測色標準観測者の分布係数 (distribution coefficients) の決定自身、加法性の原理を利用しながら混色実験の数値を変換して求められたものであるから、^{8, 35}単にYの数値のみならず、X、Zの定義にもこの原理は関連をもっているといわなければならないであろう。

ところが、Abneyによつて 1913 定式化されたこの法則は、その後の実験的研究によつて完全には支持されてい

ない。それが必ずしも事実に一致しないことは以前から知られてはいたが、しかし、その不一致は最近まで、許容されて来たか、とり上げられないで来た (have been tolerated or evaded) ので、昨今の測色学の危機 (crisis) の根源にはこの法則に対する疑義がある、¹⁹ ¹⁹⁸⁰ という意見も現れて来た。事実、過去四〇年の間に相当程度の (rather size-able) 不一致が見出されて来ているのである。²⁸ ²⁸ しかし、この原理を前提とせずに測光、測色の体系を組織することは、事実上、不可能と思われ、一方、この基礎の上に立つ測光、測色の技術が、既に指摘したように、過去卅余年にわたつて大過なくその任務を果して来たことも、また、事実である。したがつて、たとえ厳密には成立しないものであつても、実用上はこの法則を認容しても余り支障を来たさななものかもしれないし、事実と「担当程度の」不一致があるにしても、比視感度 V や分布係数 x 、 y 、 z などが、本来、相当大的個人差を平均化して定義されている事実を考えると、その不一致をとり立て、論じることが、実際問題としては、余り意味をもたないかもしれない。心理物理学としては、しかし、代表的な心理物理学的概念である光について、このような加法性が認められるか否かということ、極めて興味深い問題で、古来、感覚が可測であるか否かという議論と加法性の問題とは密接に結びついて来たのであるから、実用上の意味を離れてこの問題を検討することは「哲学」の論文としてはふさわしいように思われる。加法性を離れても感覚の可測性に対する合理的根拠 (rationale) を考えることは出来る。^{6, 33} ³³ しかし、加法性が成立すれば、論理構造の極めて明快単純になることは明らかなのである。また、一つの心理的事象において加法性の認められるか否かという問題は、それ自身としても興味のあることで、光においてさえそれが成立しないとなると、聴覚を除き、他の領域において加法性の成立を求めることは、多分、望みうすいものと考えなければならぬであろう。

このような見地から、以下、輝度の加法性の問題について、少しく詳細に検討を加えて見たいと思うのである。

三、加法性に関する実験

輝度の加法性が測光、測色学の全体系の基礎に当ることはさきに述べたが、入門書はともかく、この体系の比較的高度の解説書と認められる単行本においても^{9, 14, 30}この原理は極めてあつざりと認容されており、それだけを読む者の目には、それは一つの公理として映じるであろう。少くとも、この原理に相反する結果を述べた実験報告の存在する事実は、これをうかゞい知ることは出来ないであろう。このような実験の review を 1955 に彼自身発表している Judd の書物においても (1951, 1952)²⁶、加法性に関する疑義はさしはさまれてなく、²⁶「われ／＼の目がこの単純な加法性を成立させるよう作用するという事実は驚くべきことで (a marvel)」、これに比肩するような法則は他の感覚器官には見出されないのである。²⁶ ^{P52}「という具合である。実際、この原理があつてこそ、表色系は現存の linear-trichromatic³⁷ として体系化されるのであるから、Graham の行っているように「表色系の解説はこの伝統的な原理の上に立つて述べるが、この原理をめぐつて、近い将来、表色系のシステムに相当の変革のおこり得る可能性を読者に警告しておく」態度をとるか¹⁹ ^{P181} O.S.A. の最近の方針のように、次のような要領で、輝度とは別に明るさ (brightness) ないし白さ (lightness) を定義しておく他ないであろう。すなわち、O.S.A. では (1) 式の光束によつて定義される輝度については加法性を認めるかわり、光の場合には「観察者がそれによつて輝度の相違を認知するところの感覚の属性」としての明るさ、物体色の場合には「それによつて黒から白にいたる系列が識別される対象知覚の属性^{14, 27}」としての白さを考えているのであるが、この明るさ、白さと輝度あるいは反射率との対応関係は明確でなく、僅かに「可視強度の大部分の範囲を通して明るさは輝度と correlated significantly¹⁴ ^{P105}」という程度であるから、これでは未だ問題の解決

にはなっていない。

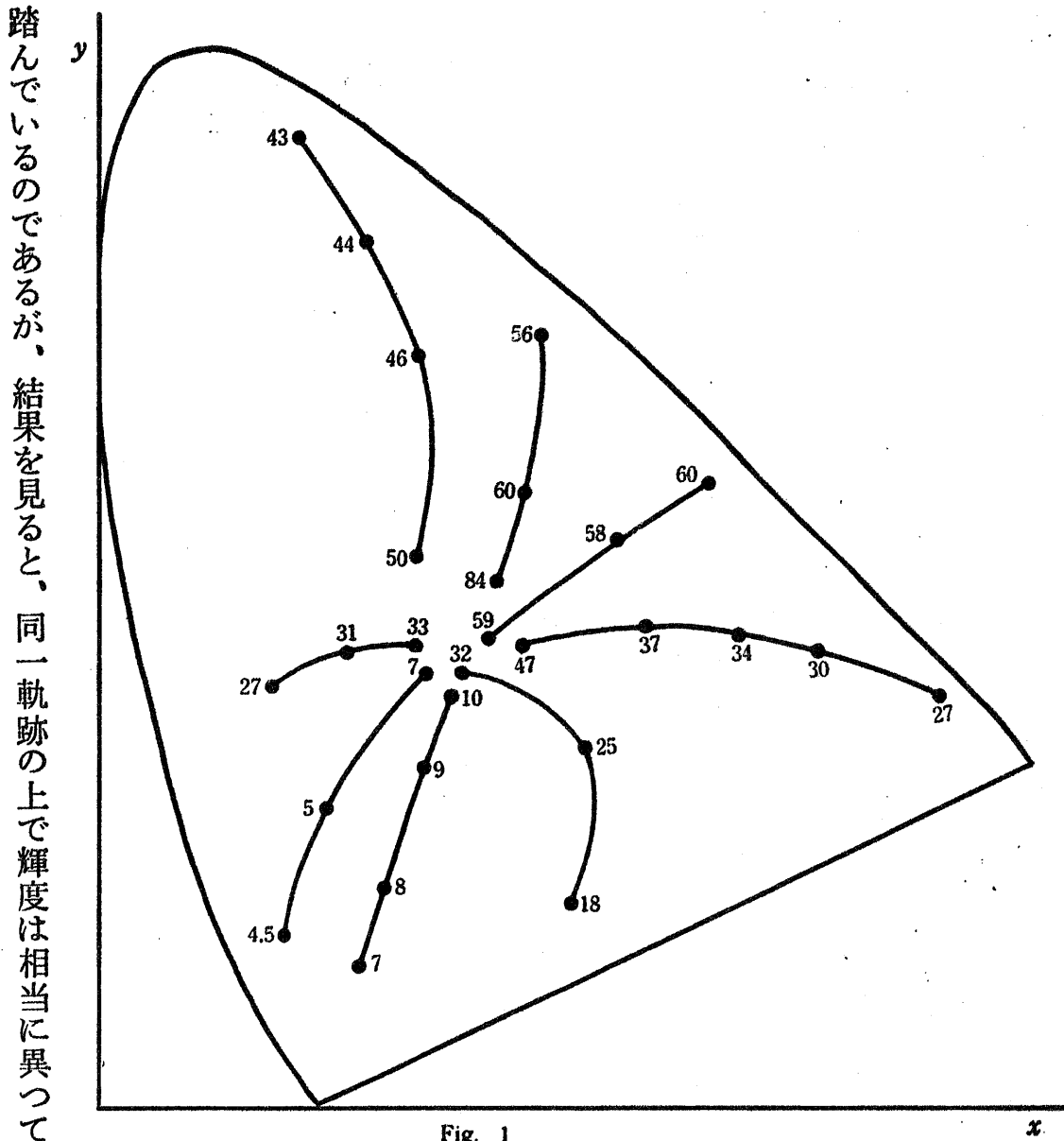


Fig. 1

踏んでいるのであるが、結果を見ると、同一軌跡の上で輝度は相当に異っているのである。彼自身が観察者で暗い周

そこで、輝度の加法性に関連して行われた実験的研究の結果に目を転ずることにする。勿論、実験的検討はいろいろな方向から加えられているが、まず、比較的巨視的な見地から行われた実験から出発し、徐々に、加法性そのものを微細に追求した実験に移つてゆくことにしよう。色度図の上で、色調は一定におさえ飽和度のみを変化させた場合の軌跡を実験的に追求している間に、Mac Adam は次のような事実を、その副産物として、見出した。色度図上であるから、色調と同時に明るさ match させるという実験手続きを

囲の中に 10° の視角をもつ場合のデータの一部分を、一例として、Fig. 1に引用した。曲線が同じ色調に見える色度の軌跡、そこに印された数字は同じ明るさに見えているはずの刺激の輝度 ($Y-L$) である。異なる色調の間では明るさは match されていないので、異った軌跡上の輝度の値を比較することは意味をもたないが、もし、輝度が知覚上の明るさを表すものとすれば、同一軌跡上の数値は一定の値になつていなければならない。MacAdamはこの数値の不ぞろいが、輝度測定の誤差、あるいは、標準比視感度曲線が観察者に適合していないというような事情のみから説明され難いことを述べ、加法性の基礎の上に計算される輝度は明るさを表さず、したがつて、明るさについて加法性は成立しないことを認めている。そして輝度は、マンセル記号で表して RY, Y, GY の附近を除き、飽和度の高い方が小さい数値を示し、換言すれば、飽和度の高い方が明るく見えるのである。この傾向は以前から気づかれており、一般に、初心者には明るさと飽和度とを区別し難いためと解されているが、Fig. 1を見ると、ヴェテラン MacAdam にしてなお且つ然り、であるから、観察の誤りと強弁するより、現行の輝度の数値では、飽和度によつてその表す明るさが異なることを事実として認めた方がよいであろう。なお、この実験では飽和度のみが少し異なる二色の間で色調と明るさの matching が行われているのであるから、cascade の等明度法というべきで、特に観察が困難であつたとは思われない。

一方、Chapanis & Halsey¹⁵ は4名の観察者について、フィルターを用い、色度図の全面をカバーする342個の点においてすべての明るさを一つに match させてからその視感透過率 (luminous transmittance) Y を測定したところ、色度図の位置によつてその値は大きく変化し、色度図を適当な領域に区別し領域毎に平均値をとると $Y=488 \times 10^{-6}$ から 159×10^{-6} にわたつており、しかも、Fig. 1と同じく、マンセル記号 GY, Y, O の附近を除けば、中央の

白色部から飽和の高い領域にかけてYの数値は減少し、全くMacAdamと同じ傾向を示している。また、Table 1のように、Yの数値の殆ど同一の6個と、この実験結果から同じ明るさに見えらると思われるYの値をもつ6個とを11名の naive な人々に見せたところ、問題なく、前者6個は明るさにおいてまち／＼に見えるのに反し、後者は全体として均等な明るさに知覚されたと報告している。

Table 1

$$Y = \text{数値} \times 10^{-6}$$

色 調	R	Y R	Y	G Y	G
Y の 値 が 均 等	305	283	303	303	312
明 る さ が 均 等	225	416	451	420	282

これら実験は、計算上輝度の等しい色も、色度によつてその明るさの異なる事実を示しているが、Harringtonによれば、輝度の等しい白色光も、色温度によつてその明るさは変り、5380~6260°Kの範囲では、100°Kの増加に対する明るさの利得は、等明度法では、1%、フリッカー法では0.17%になつてゐる。こうなると、少しく不思議なのはマンセル表色系の場合で、これは色調H、彩度Cのいかんを問はず、視感反射率Yの等しい色票はすべて同一明度Vに定義され、同一行にはつてあるのである。^{5, 31} 上述の調子でゆけば、詳細に検討するとこれらの間に白さの系統的な偏倚が見出されるかもしれない。ともかく(1)式を通して計算される輝度なりYなりの数値が観察の直接的所与を一義的に規定し得ないとなると、Juddの言葉を借りれば、これは not be tolerable であるから、^{28, 30, 31} O.S.A.は輝度と明るさ、白さを、概念上、区別するようになり、C.I.E.は光東の定義の冒頭から「視感覚の測度 (measure) を与え」という句を削除し、それを単に、便宜上ならびに実用上の目的から、理想化された平均的眼の反応を表すと約束した²⁸ものと解することを検討していると伝えられる。これでは、光、色という概念の心理物理学性格はいさゝかうすれ

て来たといわなければならないであろう。

上述の結果は、しかし、必ずしも加法性のみの責任ではない。そこには前節に指摘した(1)式に含まれる問題点が多かれ、少かれすべて関与しているであろう。そこで、次に、より直接的に加法性の問題を扱った実験をとり上げることにする。Sperling³⁵は6名の被験名を用い、周囲暗黒の視角2°の視野において、比視感度 V_λ と $R(650m\mu)$ $G(520m\mu)$ $B(460m\mu)$ 三基本刺激の等エネルギー混色函数(color mixture functions)とを測定した。こゝに混色函数とは分布係数 $r_{(\lambda)}$ 、 $-g_{(\lambda)}$ 、 $-b_{(\lambda)}$ にそれぞれ明度係数(luminosity coefficients)を乗じた値に比例する意味をもつので、以下、 $r_{(\lambda)}$ 、 $g_{(\lambda)}$ 、 $b_{(\lambda)}$ で表すことにする。 V_λ は $G(520m\mu)$ 500 trolands を基礎刺激として等明度法、フリッカー法により測定され、分析はすべてこの二種類の V_λ について別々に行われている。測定の反復はそれぞれ一人4回づゝであった。混色函数の方はまず、 V_λ に従い等しい明るさに見える放射束 P_λ に対する色方程式

$$P_\lambda = P_\lambda(\lambda)R + P_B(\lambda)G + P_G(\lambda)B$$

が実験から定まれば

$$r(\lambda) = V_R \frac{P_R(\lambda)}{P_\lambda} \quad g(\lambda) = V_G \frac{P_G(\lambda)}{P_\lambda} \quad b(\lambda) = V_B \frac{P_B(\lambda)}{P_\lambda}$$

によつて計算され、これも二種類の V_λ についてそれぞれ求められている。測定の反復はそれぞれ一人6回であつた。もし加法性が成立するとすれば、それ自身独立に測定された V_λ と、等色実験結果から上述のように導出した混色函数の和とが一致するはずで Fig. 2 に $r(\lambda) + g(\lambda) + b(\lambda)$ を曲線、 V_λ を○印で示した。明らかにフリッカー法の方が一致がよく、 V_λ の個人差もフリッカー法の方が小さいのであるが、この比較的小さい個人差から見ても、まず、図に見られ

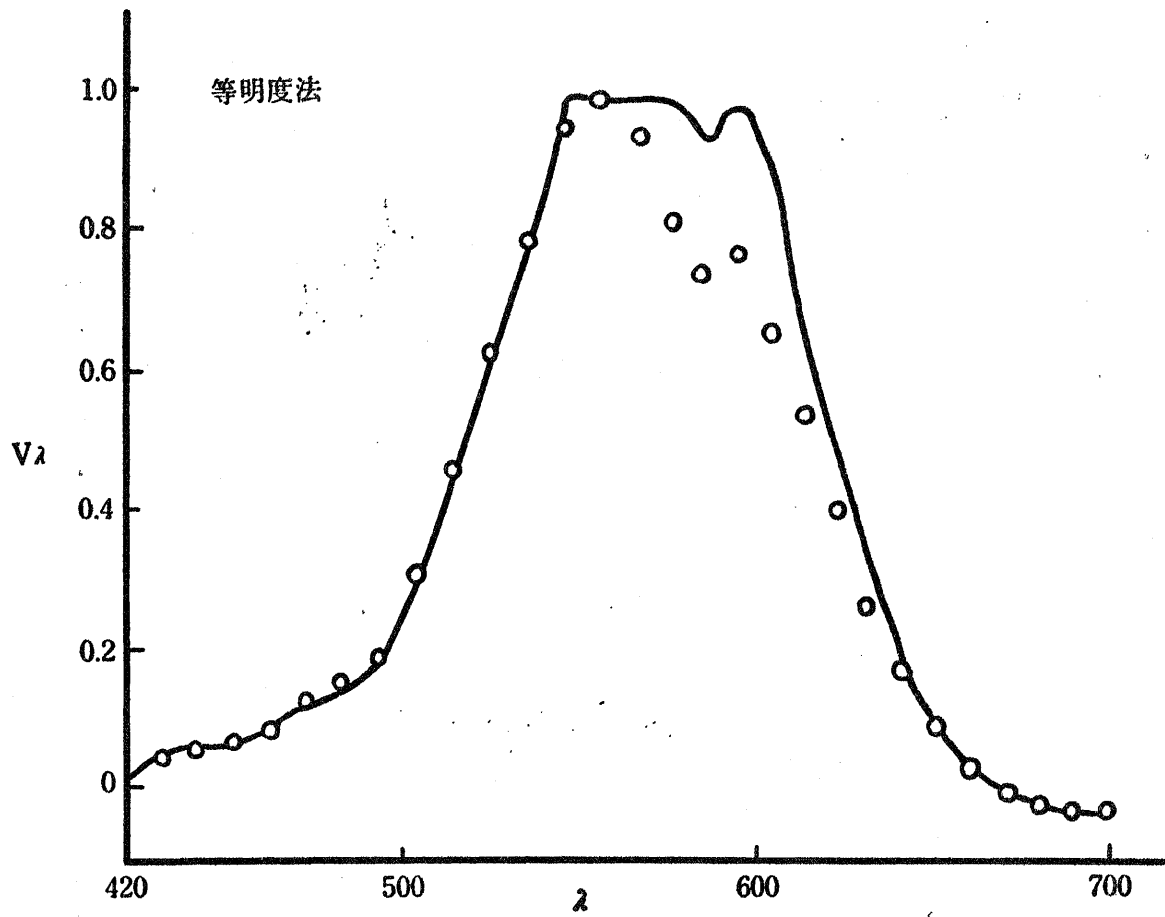
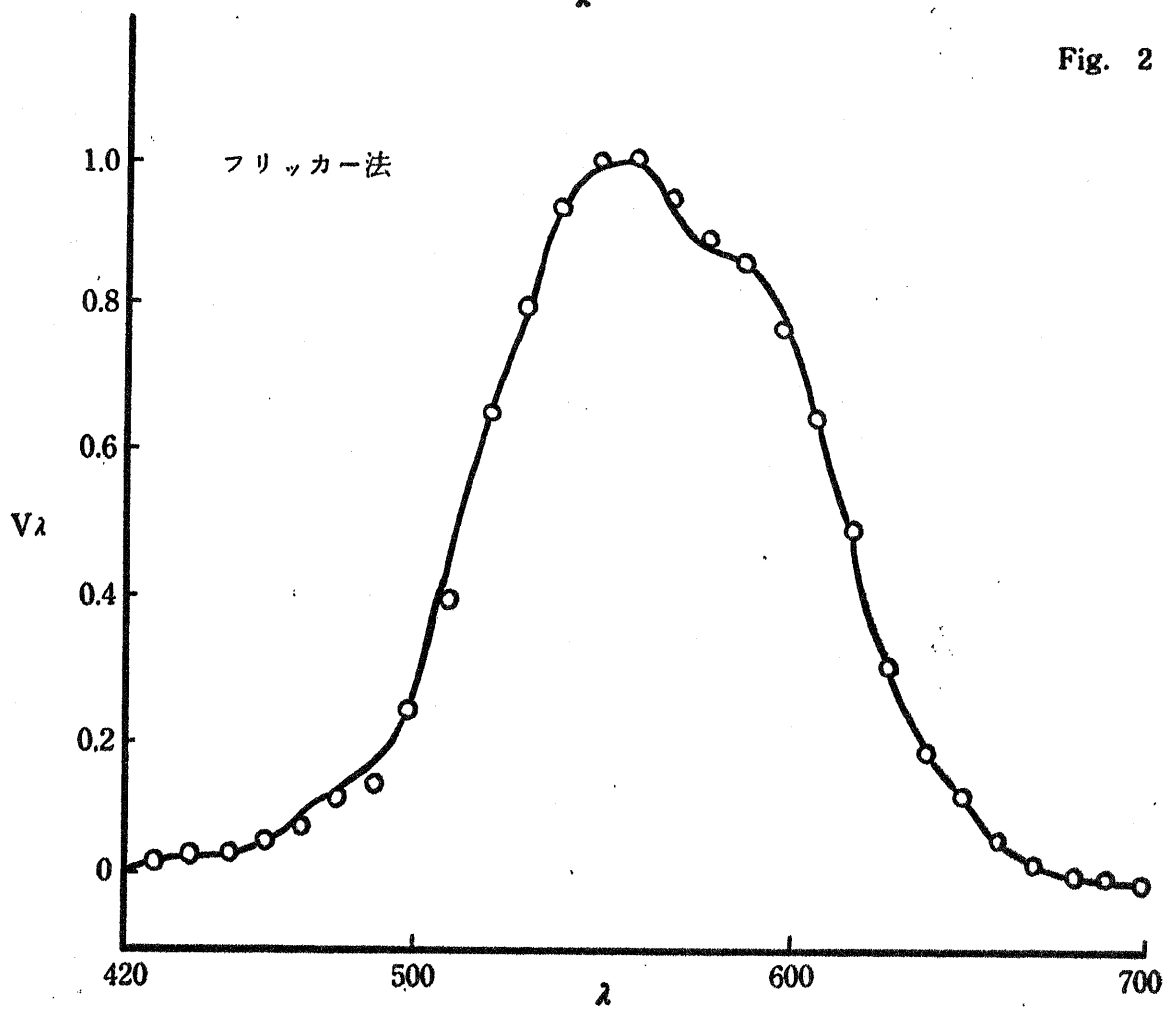


Fig. 2



る僅かの不一致は意味をもたない。この実験においては、加法性を検討するその被験者について、同一条件の下で、測定された V_2 が用いられているのであるから、Fig. 2 の等明度法における○印と曲線とのギャップは、加法性の欠如以外にその理由を考えることは出来ないであろう。すなわち、フリーカー法によつて輝度を定義する限りその加法性は成立するが、等明度法によつて定義したのでは、それは完全には成立しないのである。もつとも、この場合、等明度法は cascade でないことに注意しなければならない。Sperling の指摘しているように、飽和度の相違、同時対比など明るさに影響を及す多くの要因によつて contaminate され易い条件だからである。

この heterochromatic な比較の困難を避けるため、完全等色を行いながら加法性を検討したのは Fedorov である¹⁶。彼は二人の観察者それぞれについてその個人の V_2 を cascade の等明度法で求めておき、三属性において完全に一致する二色の色方程式

$$F_A = a_1\lambda_1 + a_2\lambda_2 \quad F_B = a_3\lambda_3 + a_4\lambda_4$$

を実験によつて求め、 a の値が与えられたなら、これと V_2 とを用いて計算すると、加法性の成立する場合、等式

$$(a_1V_1 + a_2V_2) = (a_3V_3 + a_4V_4)$$

が成立しなければならないという論法で、長波長の部分では $\pm 1\%$ の範囲で両辺は一致するが、490 mμ 以下になると $5 \sim 12\%$ の order で加法性の崩れてくることを報告している。一般に青を余計に含む複合刺激において上述の数值は大きくなり、これらの事実は視野の輝度が $1 \sim 2 \text{ mL}$ の時にも、 $15 \sim 20 \text{ mL}$ の時にも認められている。

一方、Stiles も³⁶同一被験者群について、視角 10° の視野で、まず、R、G、Bに対する分布函数を測定しておき、次に、これら三基本刺激を特定の白色光に完全等色させ、その結果を、上述の分布函数と白色光の分光エネルギー分

布から測色計算によつて求められた三刺激値との一致を調べている。すると、分布函数などにおける個人差を考慮すれば、三刺激値 R 、 G については上述の一致は認められ、 B に関してのみ統計的には有意な不一致 (Fedorov と同一傾向) が見出されたのであるが、彼の意見によれば、表色系を a linear system として扱うのをおびやかす程のものではない。

混色の結果を直接に観察比較し乍ら加法性を検討し、しかも、複合刺激とそれ々の成分刺激の明るさを同一レベルにおさえておこうという試みが、次の二人によつて行われている。色を F で表し、 F_1 と F_3 、 F_2 と F_3 の明るさが match され、更に $(a_1F_1 + a_2F_2)$ と F_3 の明るさが match されたとしたら、加法性が成つていれば、 $a_1 + a_2 = 1$ でなければならないが Yurov はこの見地から、自分自身の実験も含め、計10個の実験結果を整理した。⁴² この方法であると F_1 、 F_2 の混色も明るさは同じにとられているから、比視感度が輝度の函数になる薄暮視 (mesopic) 以下の場合にも通用する。彼の到達した結論によれば、加法性は否定され、特定の波長に対する眼の感度は、同時に眼に作用する他の波長から独立な常数としてこれを表すことはできない。一方、Weaver⁴⁰ は同一の方法を用い、 $0.01ft-L$ 、 $0.001ft-L$ と低輝度レベルにおける自身の実験から、加法性の成立を認めているが、彼の得た $(a_1 + a_2)$ の値は、全体の平均としては、 0.969 であるから、Yurov であれば、多分、別の結論を下したであろう。一般に、加法性を認めるか否かに、多分に研究者の latitude によつて思うように思われる。

筆者が直接に目を通すことのできた加法性に関連する実験は上記の通りであるが、Ives 自身の実験結果の一部は、1932 の Houston²² の書物に引用されており、同書には彼自身の行つた実験データも収録されているが、卅数年以前には加法性を支持するものと解されたこれらの結果も、今日の目で見ると、逆に、僅かではあるが加法性から偏倚の

生じ得ることの証拠を示しているように思われる。また、データはかゝげられていないが、Bouma⁹は自分自身の実験結果として、桿体では加法性は厳密に成立したが、純円錐視では少しく加法性の崩れてくることがあり得ると述べているのが目につく。

以上のような実験結果から、次のようにいうことが出来るであろう。フリッカー法によつて測定した比視感度を用いて定義した輝度について、フリッカー法によつて検討を行う限り、その加法性はこれを厳密に認めることが出来る。しかし、等明度法による結果を基礎に定義された輝度の加法性を等明度法によつて検証すると、それは必ずしも成立しない場合があり得る。この場合でも、しかし、視比感度の測定と加法性の検証とが同一被験者について、同一観測条件の下で行われるならば、加法性からの偏倚は余り大きなものではないであろう。しかし、最初に述べた二つの実験、MacAdam や Chapanis & Halsey の観察では、多数の観察者に対し、一つに定義された比視感度曲線が用いられ、また、後者においては観察条件も比視感度測定の時よりもずっと制約の少い形をとっており、この場合には、計算上の輝度と知覚上の明るさとの間には、色度その他にしたがい、相当に大きく系統的なずれが認められる。このずれは、比視感度における個人差、観察条件の相違の比視感度への影響にもよるであろうが、Abney's law の完全には成立しないという事情にもよるであろう。ともかく、この場合のずれは、Fig. 1 から明らかなように、無視出来る程のものではなく、しかも、このような条件、すなわち、輝度の計算は個人差を平均化した標準比視感度によつて行われ、明るさの観察は制約の少い自然条件というのが実際には一般の形なのである。従つて、一般には、輝度を表す数値は、特に明確に対比その他の影響が存在するとは思われない時にも、人間が知覚する明るさを一義的に規定するとはいえないのであろう。上述の O.S.A. の最近の方針のように、輝度と明るさとはこれを区別しておかな

ければならない。

四、結 語

同じ刺激でも、対比のほか周囲の影響によつて、異つた明るさ、白さに見える事實は以前からよく知られていたが、特にそのような要因の認められない場合でも、色度その他その刺激の内容によつて、輝度の表す明るさが変化してしまうことは、比較的、注意されないで来たように思われる。それには次の二つの理由が考えられるであろう。

第一に、弁別閾を測定するための観察という場合ならばともかく、一般には、人間の観察には弁別閾を大巾に上廻る寛容度がある。計算上輝度の等しい刺激の間に明るさの不均質が存在し、現実にはそれが知覚されていても、この寛容度の範囲内にある限り、特にそれを指摘し、問題にすることはあまりないように思われる。特に明るさの比較が問題になつていない時には、少しぐらい明るさが異つて見えていても、余り気にならないという観察上の弾力性が存在するのであらう。したがつて、(1)式の形で光束を規定し、その基礎の上に輝度や照度を定義し、これらを人間の感覚に対応するものと考えても、特別の場合を除き、上述の弾力性に救われて、特に支障がおこらなかつたように思われる。

また、測光、測色の目的を、光なり色なりの形で顕現している対象の物理的状态の specification と見るならば、一定の物理的状态は、それを一定の方式で測定した場合、常に一定の計測値が得られるという再現性および計測方式の論理構造の整合性とが第一の問題で、それさえ充足されてしまえば、その計測値と感覚との系統的な対応の問題など二の次となるであらう。品質管理でいえば、一旦、ある色が定り、一定の方式にしたがい、それを表す三刺激値の

数値が決定されれば、後は日々の製品がその状態にあるか否かを同一方式の計測で管理するのであるから、感覚との結びつきはその色とその計測値との特殊的対応に止まり、その方式の下におこり得る可能なるすべての数値とそれが表す色との一般的対応関係は問題ではない。計測方式の整合性とは、たとえば、製品の分光組成が異つていても、三刺激値が同じであればそれによいという論理的保証に相当するが、品質管理であれば、分光組成の大巾に変化するケースは余り考える必要もないであろうから、いわば局所的な整合性でことは足りるであろう。この程度の整合性を一方にもち、一方にある程度感覚との対応を保証すると認められるような標準方式が、一旦、確立されてしまえば、余程の支障でも見出されない限り、その標準方式に手をつける必要はないのである。

測光、測色学の現体系の全般的整合性の基礎がその線型性、すなわち、加法性の承認にあることは既に述べた。C.I.E. の 1931 の標準観察者の決定に関係した人々は加法性を疑う余地のない事実と見なし、その不成立から生じるであろう結果について考えなかつたという批判に対し、当事者の一人として Guild は次のように答えている。^{32 Page}すなわち、その数値が単なる numerical labels 以上の意味をもつような測定方式を定義するためには加法性を postulate せざるを得なかつたので、それが事実と信じたからではなく、他にしようがなかつたからなのである。そして、上述のように、観察上の弾力性とその使用情況の二つの理由から、測光、測色の技術としては、加法性を前提としたシステムの中で、大過なくその任務を果して来たものである。前節の冒頭に指摘したように、多くの書物が、加法性をそれが厳密に成立するかのように扱っているのも、その限りにおいては正しいと思われる。しかし、伝統的な意味における精神物理学の問題として加法性をとり上げるとすれば、上述のような消極的承認を事実の積極的確認と誤認してはならないであろう。このような観点から、前節において諸家の実験結果を通覧したのであるが、刺激効果をフリッカ

一法によつて測定する限り、エネルギーが光として心理学的現象をひきおこすに當つて、それが加法的に作用する事実は、積極的な意味においても、これを事実として確認してもよいように思われる。そうなれば、視覚の生理学的メカニズムの解明に當つて、この事実は一つの大きな布石として役立つであろう。聴覚において、その心理物理学的考察が聴覚の生理学的問題と直結しているのに反し、測光、測色における心理物理学的分析は、比較的、生理学的考察とは独立に行われて来た。しかし、それら心理物理学的分析は、一方において、XYZ表色系のように論理的整合性と技術上の便宜性から構成された抽象的体系を生むと共に、他方において、それを枠組として生理学的模型を構成する基礎データを提供してくれるはずなのである。

なお、本稿の副題である色彩スケールという観点から見ると、現在の輝度、照度の定義は、言葉の強い意味においては、心理物理学的スケールではない。Yurov の表現を借りれば lower metrics of the light sensation であつても、⁴² higher metrics ではない。第二節に述べた内容から明らかのように、その数値の等しい刺激は同じ明るさに見えるべきであつても、その数値が二倍になつたからといつて、明るさもまた二倍になるというような意味はその中に全く含まれていない。すなわち、たとえば輝度は明るさの比例尺度でも間隔尺度でもないのである。この点を特に指摘している書物は少いが、たとえば英国側の見解を代表すると思われる Hurray 編のものでは、比視感度において $V_{555} = 2V_{510}$ になつてゐるからといつて、 $\lambda = 555$ と $\lambda = 510$ の二つの刺激の放射束の等しい場合、前者が後者より明るく見えることは明らかであつても、二倍の明るさに見える意味にはならないと明記している。^{30 P112} それだからこそ、それ自身すでに心理物理学的概念である視感反射率を更に変換して、白さに対する higher metrics としてのスケール、Munsell value scale が定義されているのである。音の強さの場合、それ自身心理物理学的概念ではあるが低次

の測度に過ぎないデシベルの他に、感覚尺度としての sone スケールの構成されているように、輝度についても、明るさに対する高次のスケールが必要とされる。Hanes によつて Brill という奇妙な名をもつスケールが提唱されているが、^{20, 21} その本格的検討は今後の問題であらう。

以上、輝度の加法性を中心に、(1)式による光の定義に含まれる心理学的問題を考察して来た。加法性という場合、今まではそれを専ら輝度に関する問題、XYZ 表色系でいえば、専ら Y に関する問題としてとり扱つて来たが、加法性の問題は同じく X、Z の定義の中にも含まれており、たとえば Stiles が表色系を linear-trichromatic と呼ぶ場合、彼の検討の対象としては三刺激値のすべてが考慮されているように見える。^{36, 37} したがつて、分光組成の如何を問はず、計算上、三刺激値の等しい刺激は完全等色するはずであるという条件等色 (metamerism) の現象は、⁴¹ 従来余り支障を来さなかつたという消極的承認の他に、その積極的検証を必要とする訳で、Y について MacAdam や Chapanis & Halsey の行つたような実験が X や Z についても詳細に行われなければならないであらう。

註1 K の数値は Planck の黒体放射の式に含まれる二つの常数 C_1 、 C_2 の数値によつて異なる。

註2 逆に視角を 2° 以下にした実験もまた行われている。¹⁰

註3 現行の C.I.E 標準比視感度曲線については、短波長の部分におけるその数値にしばらく疑念がもたれている。^{10, 40}

- 1 東 亮 応 用 色 彩 学 工業物理学講座 12巻 日 刊 工 業 新 聞 1958
- 2 東 亮 照 明 お よ び 色 彩 計 量 管 理 技 術 双 書 3 コ ロ ナ 社 1959
- 3 日 置 隆 一 測 色 学 応 用 物 理 学 会 編 応 用 光 学 下 巻 94—184 金 原 出 版 1954
- 4 印 東 太 郎 色 彩 ス ケ ー ル 論 (1) DL を 基 に し た U. C. S. 構 成 に 含 ま れ る 心 理 学 的 問 題 心 評 1959, 3, 145—161
- 5 印 東 太 郎 色 彩 ス ケ ー ル 論 (2) マ ソ ン セ ル 表 色 系 に 含 ま れ る 心 理 学 的 問 題 横 山 松 三 郎 先 生 古 稀 記 念 心 理 学 論 文 集 23—36 1960
- 6 印 東 太 郎 測 定 の 基 礎 現 代 教 育 心 理 学 大 系 9 測 定 ・ 評 価 (理 論 篇) 72—100 中 山 書 店 1958
- 7 久 保 田 広 応 用 光 学 岩 波 全 書 245 岩 波 書 店 1959
- 8 照 明 学 会 編 照 明 の デ ー タ ブ ー ク (改 訂 増 補) オ ー ヌ 社 1958
- 9 Bouma, P.J. *Physical aspects of colour: An introduction to the scientific study of colour stimuli and colour sensations.* N.V. Philips Gloeilampenfabrieken. 1947
- 10 Bedford, R.E., & Wyszecki, G.W. Luminosity functions for various field sizes and levels of retinal illuminance. *J. opt. Soc. Amer.*, 1958, 48, 406-411.
- 11 Coblentz, W.W., & Emerson, W.B. Relative sensibility of the average eye to light of different colors and some practical applications to radiation problems. *U.S. Bureau of Standards Bulletin*, 1917, 14, 167-236.*
- 12 Committee on Colorimetry. Concept of color. *J. opt. Soc. Amer.*, 1943, 33, 544-554.
- 13 Committee on Colorimetry. The psychophysics of color. *J. opt. Soc. Amer.*, 1944, 34 245-266.
- 14 Committee on Colorimetry: Optical Society of America. *The science of color.* Thomas Y. Crowell. 1953.
- 15 Chapanis, A. & Halsey, R.M. Luminance of equally bright colors. *J. opt. Soc. Amer.*, 1955, 45 1-6.
- 16 Fedorov, N.T. The additivity of spectral heterochromatic luminances in connexion with the revision of Standard spectral mixture curves. In *Ref.* 29, 307-316.

- 17 Gibson, K. S., & Tyndall, E.P.T. Visibility of radiant energy. *U.S. Bureau of Standards, Scientific Paper No. 475*, 1923, 19, 131-191.*
- 18 Gibson, K.S. Spectral luminosity factors. *J. opt. Soc. Amer.*, 1940, **30**, 51-61.
- 19 Graham, C.H. Color theory. Koch, S. (Ed.) *Psychology: A study of a science. Study I. Conceptual and systematic. Vol. I. Sensory, perceptual, and physiological formulations*. McGraw-Hill, 1959, 145-287.
- 20 Hanes, R.M. A scale of subjective brightness. *J. exp. Psychol.*, 1949, **39**, 438-452.
- 21 Hanes, R.M. The construction of brightness scale from fraction-date: a validation. *J. exp. Psychol.*, 1949, **39**, 719-728.
- 22 Houstown, R.A. *Vision and colour vision*. Longmans, Green and Co., 1932.
- 23 Harrington, R.E. Effect of color temperature on apparent brightness. *J. opt. Soc. Amer.*, 1954, **44**, 113-119.
- 24 Ives, H.E. Studies in the photometry of lights of different colors. *Phil. Mag.*, 1912, **24**, 149-188, 352-370, 744-751, 845-853, 853-863.*
- 25 Jones, A.L. The historical background and evolution of the colorimetry report. *J. opt. Soc. Amer.*, 1934, **33**, 534-543.
- 26 Judd, D.B. *Colors in business, science, and industry*. John Wiley, 1952.
- 27 Judd, D.B. Basic correlatess of the visual stimulus. Stevens, S.S (Ed.) *Handbook of experimental Psychology*. John Wiley, 1951, 811-867.
- 28 Judd, D.B. Radical changes in photometry and colorimetry foreshadowed by C.I.E. actions in Zürich. *J. opt. Soc. Amer.*, 1955, **45**, 897-898.
- 29 MacAdam, D.L. Loci of constant hue and brightness determined with various surrounding colors. *J. opt. Soc. Amer.*, 1950, **40**, 589-595.
- 30 Murray, H.D. (Ed.) *Colour in theory and practice*. Chapman & Hall: London, 1952.
- 31 Newhall, S.M., Nickerson, D. & Judd, D.B. Final report of the O.S.A. Subcommittee on the spacing of the Munsell colors. *J. opt. Soc. Amer.*, 1943, **33**, 385-418.
- 32 National Physical Laboratory. *Visual problems of colour. A symposium held at the National Physical Laboratory on*

- 23rd, 24th, 25th September, 1957, Vol. 1, Vol. 2, Her Majesty's Stationery Office, 1958.
- 33 Reese, T.W. The application of the theory of physical measurement to the measurement of psychological examples. *Psychol. Monogr.*, 1943, 55 No. 3.
- 34 Stevens, S.S. A scale for the measurement of a psychological magnitude: loudness. *Psychol. Rev.*, 1936, 43, 405-116.
- 35 Sperling, H.G. An experimental investigation of the relationship between colour mixture and luminous efficiency. In *Ref.* 29, 251-277.
- 36 Stiles, W.S. The average colour-matching functions for a large matching field. In *Ref.* 29, 211-247.
- 37 Stiles, W.S. The trichromatic scheme. *Mechanisms of colour discrimination: Proceedings of an international symposium on the fundamental mechanisms of the chromatic discrimination in animal and man held in Paris at the Collège de France, 25-29 July, 1958*, Pergamon Press, 1960, 187-198.
- 38 Troland, L.T. *The principles of psychophysiology. II. sensation*. D. Van Nostrand. 1930.
- 39 Weaver, K.S. The visibility of radiation at low intensity. *J. opt. Soc. Amer.*, 1937, 27, 36-41.
- 40 Weaver, K.S. A provisional standard observer for low level photometry. *J. opt. Soc. Amer.*, 1949, 39, 278-291.
- 41 Wyszecki, G. Evaluation of metameric colours. *J. opt. Soc. Amer.*, 1958, 48, 451-454.
- 42 Yurov, S.G. The question of the metrics of brightness. In *Ref.* 29, 197-208.

* 印は直接に目を通す機会を得なかつたもの