

論文

輝度差と波長差が共存するときの両眼融合限界

中嶋芳雄*・池田光男*

Binocular Fusion Limit caused
by the Luminance and Wavelength Difference

Yoshio Nakashima・Mitsuo Ikeda

Tokyo Institute of Technology Graduate School

Abstract

When two monochromatic lights enter the right and left eyes, respectively, they do not fuse as one uniform and steady field if there exist a large difference in the luminance L as well as the wavelength λ . The binocular fusion limit ΔL and $\Delta\lambda$ beyond which no color fusion is assured was determined at eleven different wavelengths and at the retinal illuminance 60 td that were provided to the right eye.

The visual field of 10° arc was employed. The ΔL - $\Delta\lambda$ curve showed generally a closed curve in a manner that ΔL decreased gradually as $\Delta\lambda$ increased to indicate ΔL and $\Delta\lambda$ are not completely independent with each other in determining the binocular fusion limit.

左右それぞれの眼に異なる刺激を呈示した場合、その刺激の差を大きくすると非融合の状態が生じる。たとえば、右眼に波長 λ と輝度 L 、左眼に波長 $\lambda + \Delta\lambda$ と輝度 $L + \Delta L$ なる色光を与えた場合を考えると、 $\Delta\lambda$ および ΔL をある値以上にすると左右の刺激光は1つの安定した視野として知覚されなくなるということである。このことを Fig. 1 で説明する。横軸は波長差 $\Delta\lambda$ 、縦軸は明るさの差 ΔL をとっている。したがって原点 O は右眼に与えた刺激の位置を示し、これに対して左眼の刺激がたとえば E 点で表わされることにする。左右の刺激の差は $\Delta\lambda$ と ΔL によって表わされるが、この図を用いるならそれは ΔS すなわち $\overrightarrow{OE}$ で置き換えられよう。 ΔS が小さければ、視野は融合して見えるが、それがある値以上になれば非融合となる訳であり、このときの ΔS あるいは $\Delta\lambda$ と ΔL の組み合わせが融合限界と呼ばれるものになる。この融合限界 ΔS を原点 O の回りの全ての方向について求むれば、ある1つの λ と L の組み合わせに対する融合限界を表す閉曲線が求まるはずである。この形がどのようなものであるかを知ることが、両眼視のメカニズムを解明する上で非常に有効であると思われる。

融合限界の閉曲線の中で、特に横軸上の点すなわち $\Delta L = 0$ の時の融合限界 A および B 点を求める研究は既

にいくつか報告されている (Johannsen¹⁾; Pickford²⁾; 佐川と池田³⁾; Ikeda and Sagawa⁴⁾; 中嶋と池田⁵⁾; Ikeda and Nakashima⁶⁾)。このうち特に池田らのものは融合限界 $\Delta\lambda$ を各波長に対して詳しく求めたものであり、 1° 視野、10 td (池田と佐川³⁾)、 10° 視野、60 td (池田と中嶋⁵⁾) の2条件についていわゆる $\Delta\lambda$ - λ 関数を決定している。閉曲線の他の点についての研究では縦軸上の点すなわち $\Delta\lambda = 0$ の C および D 点に関する定性的な検討 (Levelt⁷⁾) があるのみで、 ΔL の値を決定するに至ってはいない。したがって A および B はもとより、 C および D 点を決定すること、さらにはより一般的な $\Delta\lambda$ と ΔL を共にある値としたときの両眼融合限界を決定することが望まれている。もしそれが実行されれば、そのデータは両眼融合限界への明るさと色との相互関係を明らかにし、両眼視メカニズムを究明するための基礎的データとなるはずである。本研究はそのような観点から $\Delta\lambda$ と ΔL を共に変えて融合限界を求め、Fig. 1 で示した閉曲線を決定しようとするものである。

装置

装置の原理図を Fig. 2 に示す。マックスウェル視の左右対称な2光路より構成されており、それぞれの光路は左右の眼に導かれている。Sは2kWのキセノンラン

* 東京工業大学総合理工学研究科

プ、W は光学くさび、M はモノクロメータ、A は視野を定めるアパチャー、M.L. はマックスウェルレンズである。左眼用のマックスウェルレンズ、アパチャーおよびミラーは互に固定されており、全体が左右上下方向に微動できる。これによって左右の瞳孔と、左右の光路とを一致させることが可能である。被験者の頭は歯型によって固定され、その位置は3方向に微動可能である。SH はソレノイド・シャッタであり、これは刺激呈示持続時間の制御に用いられる。

被験者が観測する視野を Fig.3 に示す。(a) は予備実験の明るさマッチング用のものであり、左側の半円は左眼のみが観測するもの、右側の半円は右眼のみが観測するものである。周囲の円環と中央の垂直の線は融合用のものであり、両眼共に観測するようになっている。(b) は両眼融合限界の測定に使用するものであり、中央の円がテスト視野である。その大きさは 10° である。外側の円環は融合用の枠であり、外径約 13° 、幅 $30'$ となっている。左右の刺激視野の形状は全く等しく、被験者が片眼を閉じるなどしなければ、左右いずれの眼に刺激が呈示されているかの判定は不可能である。被験者に固視は要求せず、したがって彼は視野の中を自由に観測してよい。

実験手順

本実験では Fig.1 の両眼融合限界 ΔS を種々の方向に対して求めたいのであるが、このとき $\Delta\lambda$ および ΔL を同時に変えて ΔS を変化させることは実験者への負担が大きいため、 $\Delta\lambda$ をある値に固定し ΔL のみを変化させて融合限界を求める手法をとった。ここで ΔL を設定するためには、各刺激光の明るさが、あらかじめ分っていないなければならない。そのために明るさマッチングの予備実験を行なった。すなわち Fig.3(a) に示した視野を用いて直接比較法で各波長の刺激光を 60 td の白色参照光の明るさにマッチした。60 td を選んだのは、それが青領域で得られた最高の明るさであったからである。明るさマッチングの予備実験は左右の眼についてそれぞれ行なった。以上のデータによって Fig.1 の縦軸の値が全ての波長に対して決定されたことになる。

両眼融合限界の実験では右眼の波長および明るさはそれぞれ λ_R , L_R に固定する。次に ΔL を変えて融合限界を求めるには恒常法を用いる。すなわちある $\Delta\lambda$ をもった左眼の波長 λ_L が選定されると、その λ_L について $0.2 \log$ unit 間隔でとった 10 数個の ΔL を設定し、それぞれについて融合、非融合の観測を行なう。 ΔL は正負の値を取り得ることはもちろんである。右眼の刺激波長 λ_R としては 440 nm から 640 nm まで 20 nm 毎に選んだ 11 種類の波長を準備する。その明るさ L_R は白色光 60 td に等しい明るさに相当するものにする。左眼に与える $\Delta\lambda$ の値は Fig.1 の A および B 点の内側で選ぶが、その間隔は 10 nm とする。

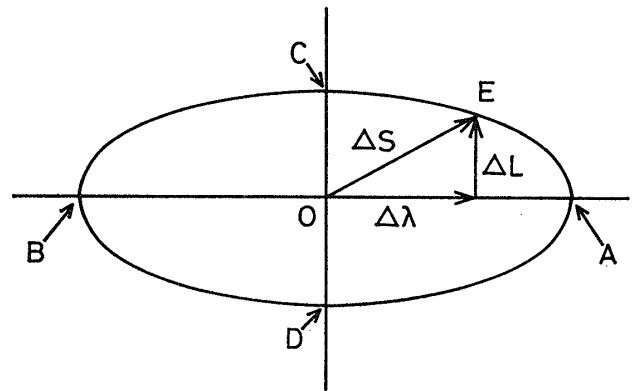


Fig.1 両眼融合限界 ΔS の模式図

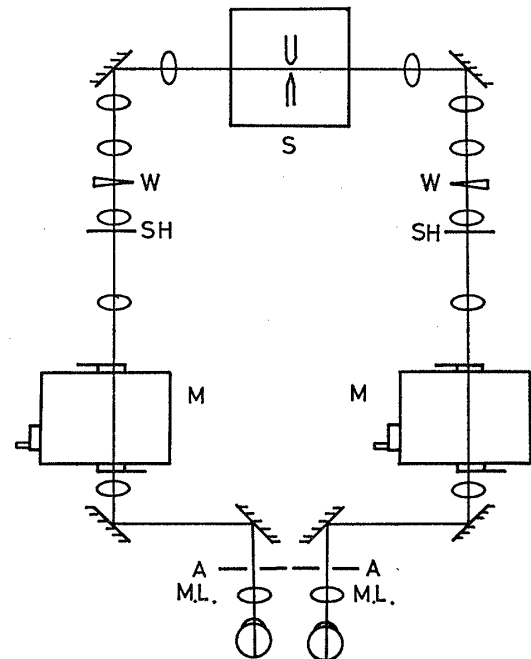
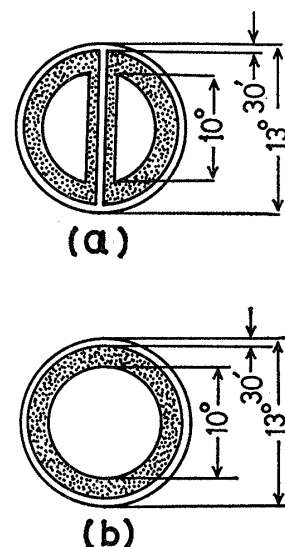
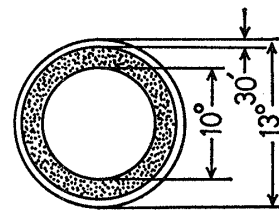


Fig.2 装置図



(a)



(b)

Fig.3 (a) 明るさマッチング用視野
(b) 両眼融合限界測定用視野

左右の刺激の組み合わせが定まると両刺激を同時に15秒間呈示し、その後直ちに被験者はその視野が融合であったか非融合であったかの判定をする。この判定を各 ΔL に対して繰り返し行なえば1つの λ_R について ΔL -非融合確率曲線が得られる。非融合確率 p が 0.5 に対応する ΔL が融合限界ということになる。

1つの λ_R と λ_L の組み合わせについて10数個の ΔL の実験を5回繰り返しこれを1セッションとする。次に λ_L を他の波長に変えて以上述べたことと全く同様の手順を繰り返して他のセッションが得られる。このようにしてある λ_R に対して全ての λ_L を網羅するまで実験を行ない、これを1ユニットとする。したがって1ユニットは約6~10個のセッションより構成されることになる。 λ_R を他の値に変えて、同様な実験を繰り返す。これを11個の λ_R 全てに対して行ない実験の1ブロックとする。ブロックを4回繰り返して全実験を終了する。

Fig. 1 のAおよびB点は上記の実験手法では求めることができない。したがって λ_L を与える $\Delta\lambda$ を 10 nm 間隔で採り、この $\Delta\lambda$ に対して恒常法を使用した。 $\Delta\lambda$ - p 曲線から融合限界の $\Delta\lambda$ が求まる。 $\Delta\lambda$ の値はAおよびB点を十分カバーするものでなければならない。 $\Delta\lambda$ も正負の値をとり得る。実験セッションの構成は上述の ΔL を $\Delta\lambda$ に読み替えると全て同じとなる。但し上述にあった $\Delta\lambda$ はここでは存在しないので、実験のユニットは消滅する。

実験に先立ち被験者は約10分間の暗順応を行なう。1回の刺激呈示と次の呈示までには約1分間の間隔がある。1セッションに要する時間は約60~90分であった。セッション間に被験者は約30分間の休憩をもった。

被験者は YN1 人である。

結果および考察

非融合確率曲線の例を Fig. 4 に示す。これは λ_R が 520 nm の場合で、上方8個の曲線は ΔL - p 曲線である。 λ_L として 490 nm から 560 nm まで 10 nm 間隔でとっているため8個となる。最下段のものが $\Delta\lambda$ - p 曲線である。 ΔL - p 曲線における横軸は本当は $\log L_L - \log L_R = \Delta(\log L)$ であるが、便宜上 ΔL で示した。図の各データ点は20回の判定より得た非融合確率 p である。 ΔL - p 曲線での実線はプロビット分析によるものであり、 p が 0.5 近辺のデータを重視して全体を正規確率で表わしたものである。最下段の $\Delta\lambda$ - p 曲線についてはこの分析を省略した。

Fig. 4 の ΔL - p 曲線の特性を指摘しておく。まず $\Delta L = 0$ では一例を除いて λ_R と λ_L がどのような組み合わせでも非融合確率 p は零となっている。すなわち常に視野は融合する。しかし ΔL が増大していくとその正負にかかわらず p の値は次第に増加し、やがて1.0となり、融合が全く成立しないことを示している。次に $\Delta\lambda$ が増大するにつれて左右の非融合確率曲線の間隔が狭くなる

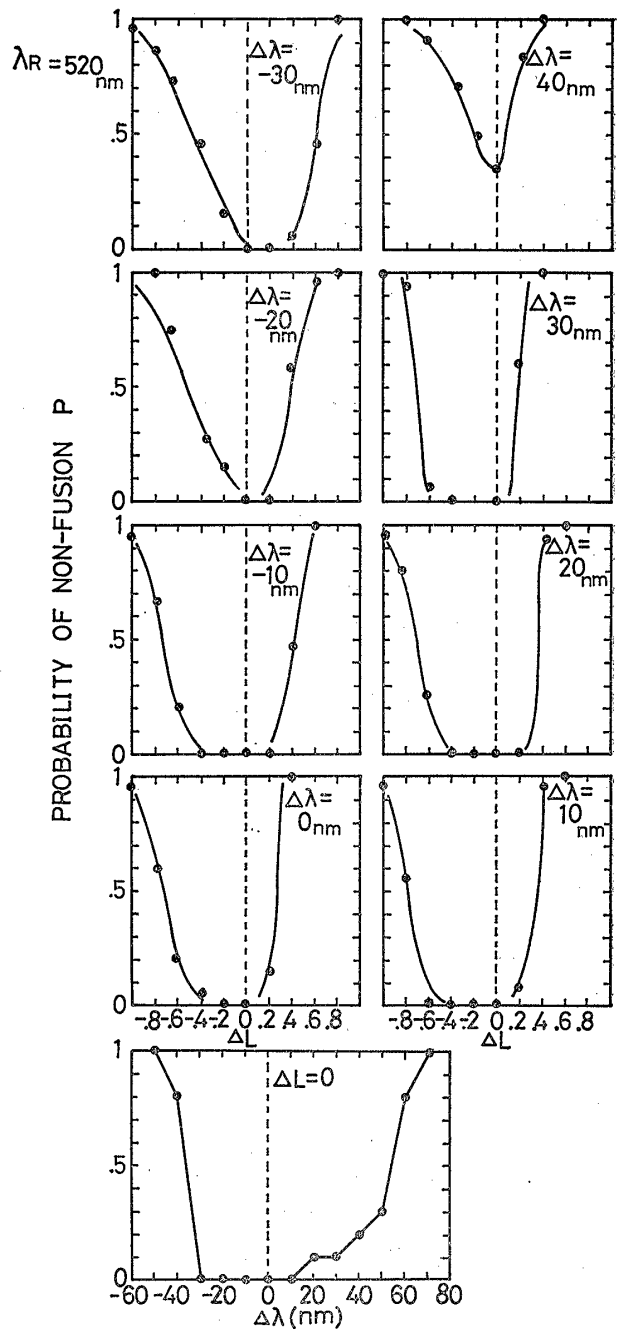


Fig. 4 非融合確率曲線
($\lambda_R = 520$ nm)

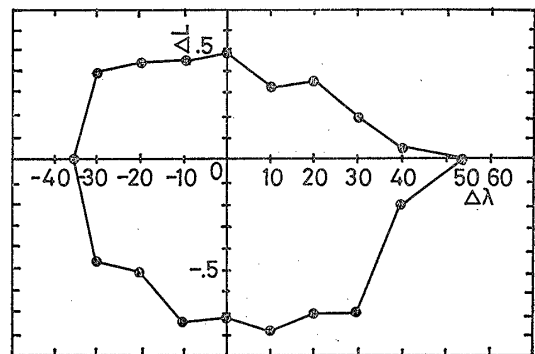
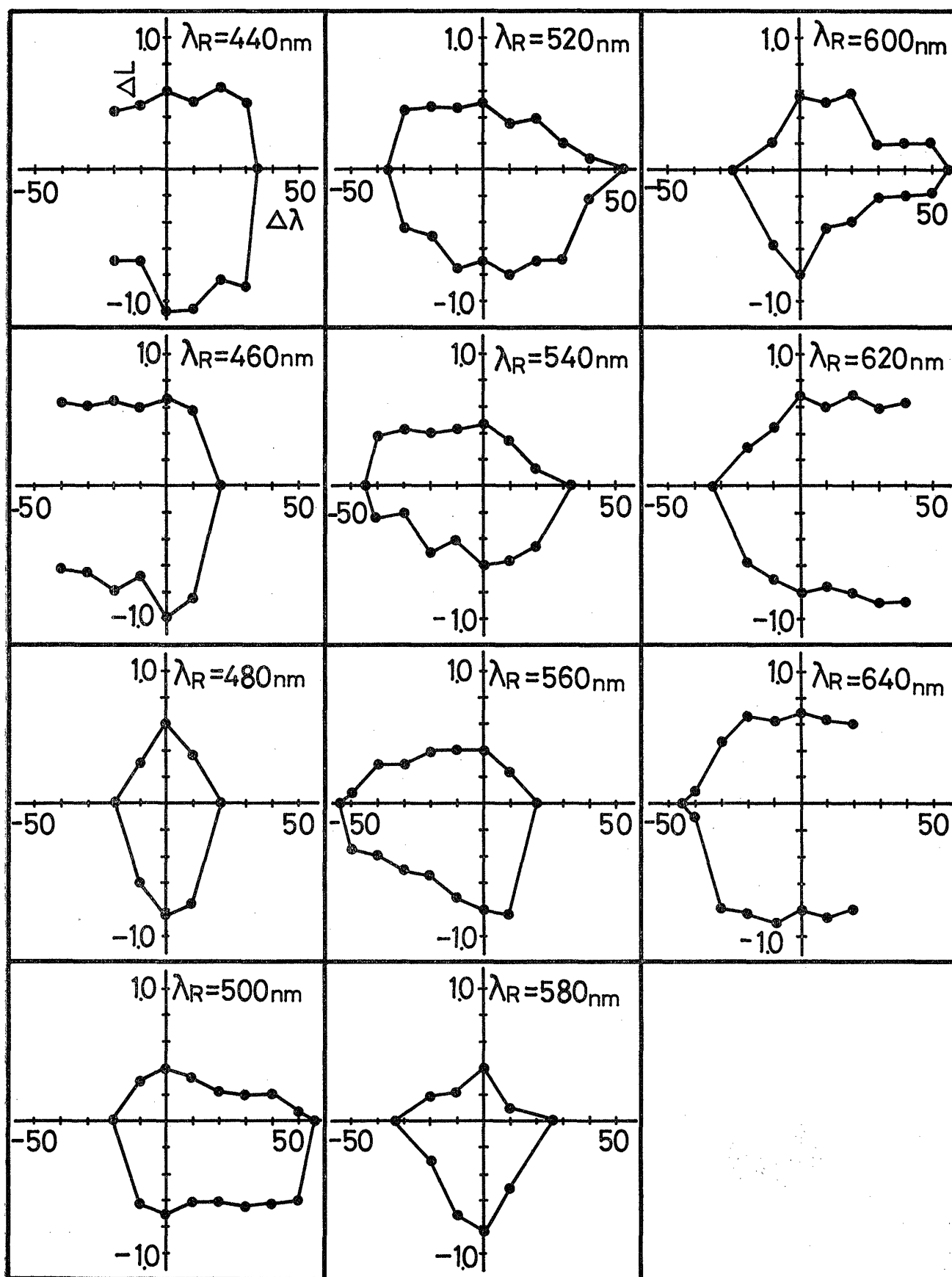


Fig. 5 $\lambda_R = 520$ nm における $\Delta S-S$ 関数

Fig.6 種々の λ_R に対する ΔS - $\Delta \lambda$ 関数

傾向も見られる。その極端なものが $\lambda_L=560\text{ nm}$ の場合で、 $4L=0$ でも p は既に 0.35 となっている。これは Fig. 1 の A 点に近い条件に相当するので当然のことと思われる。もう 1 つの特性としては融合領域が $4L$ の負の所と正の所とで差のあることである。すなわち前者の方が広くなる傾向が見られる。

Fig. 4 の非融合確率曲線から $p=0.5$ に対応する融合限界 $4L$ および融合限界 4λ を決定し、Fig. 1 と同様の図を求めたのが Fig. 5 である。横軸に 4λ 、縦軸に $4L$ をとっている。便宜上これを $4S-S$ 関数と呼ぶことにする。

本実験で採用した 11 通りの λ_R 全てに対して Fig. 4 の $4L-p$ 曲線と Fig. 5 の $4S-S$ 関数を求めることができるが、そのうちの $4S-S$ 関数を示したのが Fig. 6 である。このうち横軸上の点すなわち Fig. 1 の A および B 点に対応する値は本実験ではとくに測定せず、既に報告した結果⁵⁾⁶⁾をそのまま採用した。 $4S-S$ 関数の形状は λ_R が短波長と長波長領域の場合を除けば Fig. 5 と同様に 1 つの閉曲線を示している。そして 4λ が増加するにしたがって融合限界 $4L$ が減少し最後に横軸と交わる。これは融合限界に対して波長差 4λ と明るさの差 $4L$ との間に何らかの加算作用があることを示している。 4λ と $4L$ とが両眼融合限界に対して全く独立に作用し 4λ と $4L$ のうち大きい方が非融合を決定するならば $4S-S$ 関数は Fig. 1 でいえば $\overline{AB}$ と $\overline{CD}$ に等しい長さの線分を辺とする長方形に近い形状となるはずである。そのようなはっきりした形状は閉曲線を示す $4S-S$ 関数を見る限りでは見当らない。すなわち 4λ と $4L$ とは何らかの相互作用があると見るのが妥当であろう。

λ_R が短波長の場合 (440, 460 nm) と長波長の場合 (620, 640 nm) では $4S-S$ 関数の片方が開いたままとまっている。すなわち融合限界の 4λ が求まらないのである。ここでは λ_L と λ_R の波長差の増加に関係なく $4L$ はほぼ一定の値をとっている。これは両眼融合限界が波長差に関係なく $4L$ のみによって決定されていることを示している。

Fig. 6 の $4S-S$ 関数のうち $\lambda_R=580\text{ nm}$ のものはその閉曲線の面積つまり融合領域が小さいことが分かる。これは 580 nm 近辺は両眼融合限界に対しては感度が高いと解釈することができる。また $4S-S$ 関数の全体にわたって $4L$ の正領域と負領域の値を比べてみると負のものの方が正のものより 0.2 程度大きいことが分かる。そこで波長が同じで明るさだけに差がある刺激に対する両眼融合限界すなわち Fig. 1 の C および D 点を Fig. 6 より取り出してその波長依存性を調べてみる。これが Fig. 7 である。曲線は $4L$ 正領域および $4L$ 負領域共に中波長でミニマムとなっている。これは短波長(青)および長波長領域(赤)の色光に比べて、中波長領域(緑, 黄)のものは明るさの差 $4L$ が小さい場合でも非融合が起こり得ることを示している。また $4L$ の正領域のものが全波

長にわたって小さい値をとっていることも注目される。

この原因について考察すると先ず左右の眼の非対称性が考えられる。 $4L$ の正の場合は左眼刺激より右眼刺激が暗いのに對して、負の場合はその逆で右眼刺激の方が明るくなっている。もし左右の眼の特性に非対称性がある、右眼の方が暗く刺激されると大きい $4L$ の量を与えるということなら、この $4L$ の正負の大きさの差が生じることが予測される。このような明るさに対する非対称性の検討を行ない得るデータを本実験は提供しないので断定的な事は言えないが、先の報告⁵⁾⁶⁾で 4λ を測定した場合について左右の視覚特性を検討したところでは左右眼の非対称性はほとんど見られなかった。したがって Fig. 7 の正負の非対称性の原因を左右眼の特性の非対称性に求める事は妥当でないように思われる。他に考えられる原因は明るさレベルによって両眼融合限界が異なっていることである。すなわち L が大きくなるほど明るさの融合限界 $4L$ が減少すると考えれば Fig. 7 は説明できる。ただしこのことの正否に関してはなお今後の検討が必要である。

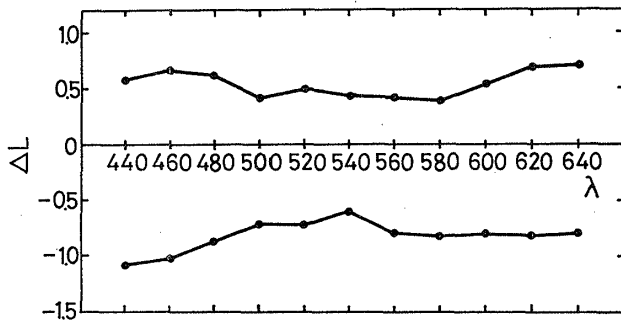
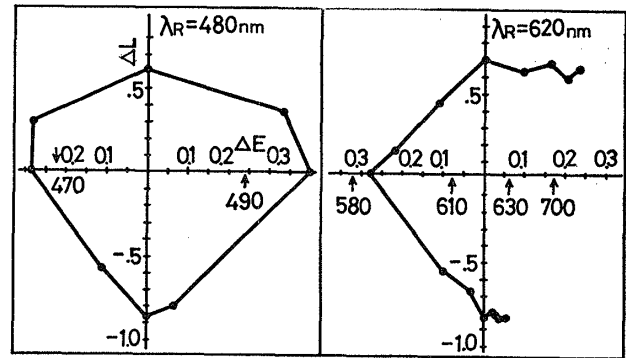
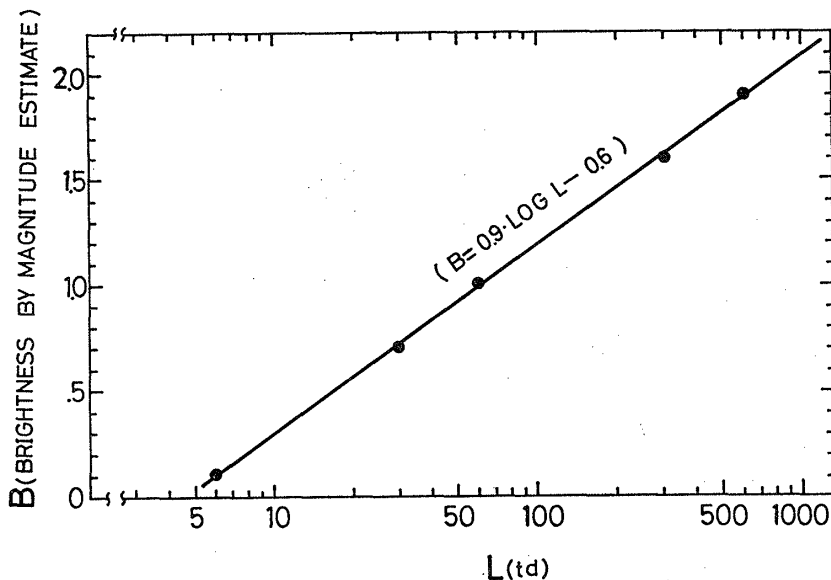
さて Fig. 6 の横軸は波長差をとっている。しかし融合限界は色差で検討した方が実験結果をよりよく説明し得ることが分っている (中嶋, 池田; Ikeda and Nakashima⁶⁾)。そこで今回の結果にも色差を導入して検討してみる。色差計算は CIE 1976 $L^*u^*v^*$ 均等色空間を用いて行なうが、明度 L^* が直接に得られない。そこで L^* を本実験で用いた光源色について求めなければならない。光源色の輝度を L_* に変換する式は Hunt (1977)⁶⁾ が提案しているが未だ正式化されたものではない。本実験ではそれを実際に実験で得ることにする。

まず二分視野の右半分に 60 td, 550 nm の参照光を呈示し、左半分に 550 nm のテスト光を与え、その網膜照度を 6, 30, 60, 300, 600 td にとり、それぞれ 5 回呈示する。被験者は参照光の明るさを 1 とした時のテスト光の明るさをマグニチュード・エスティメイトする。その結果を Fig. 8 に示す。横軸に照度を対数でとり、縦軸に各照度に対する明るさの評価点の平均値をとっている。なお被験者は本実験の場合と同じく YN を使用した。データ点は直線で近似でき次式を得る。

$$B=0.9 \log L-0.6$$

但し B は心理的な明るさであり、 L は網膜照度(td)である。これで CIE の色差式の L^* に相当する値が得られるので Fig. 6 の全ての点を、横軸に色差 $4E$ をとって表現し直すことができる。

結果の 2 例を Fig. 9 に示す。横軸の $4E$ の単位は CIE 1976 $L^*u^*v^*$ 色差式における 13 L^* を便宜上 1 としてプロットしたものである。各波長が横軸上で占める位置を矢印で示した。Fig. 6 に比べて顕著に変ったと見えるものは $\lambda_R=620\text{ nm}$ の場合の λ_L が長波長側の領域の形

Fig. 7 ΔL - λ 関数Fig. 9 ΔL - ΔE 関数Fig. 8 マグニチュード・エスティメイトにより求めた B - L 関数

状である。すなわち、 $4S$ - S 曲線が右方に開きかつ平行になっていたものが、特に $4L$ が負の領域でその平行の部分ほとんどなくなり縮小して 1 点に集ってしまったことである。長波長の赤領域では色に変化の生じない事を考えれば当然の結果である。しかし $4L$ が正の領域ではこの縮小が生じず、かえって Fig. 6 のものより広がってしまっている。これは物体色に対して求められた CIE 色差式の L^* に本実験で得た Fig. 8 の B を代入し、光源色に対してもこの色差式が成立するものと仮定した事に因るのである。実際に $\lambda_R=620\text{ nm}$ で $4L=0.7$ に相当する λ_L を観察した限りでは Fig. 9 で示唆されるような大きな色差は感じられない。したがって光源色のための色差式がもし得られていたとし、それを活用できたとするならこの部分も $4L$ が負の場合と同様にかなり縮小されてプロットされる可能性がある。このことは $\lambda_R=480\text{ nm}$ にも適用される事であり、 $4L$ が正の領域の $4E$ が零でない 2 点も実際以上に大きな $4E$ が与えられていると考えられる。今後の検討が必要である。

本研究は文部省科学研究費補助金 No. 046063 によ

て行われた。本論文を作成する上で有益な御意見を頂いた当研究室の近江政雄氏に深く感謝致します。

参考文献

- (1) D. E. Johannsen : J. Gen. Psychol. 4(1930)282
- (2) R. W. Pickford : Nature 159(1947)268
- (3) 佐川, 池田 : 光学 3 (1978)103
- (4) M. Ikeda and K. Sagawa : J. Opt. Soc. Am. 69 (1979)316
- (5) 中嶋, 池田 : 光学 9 (1980)12
- (6) M. Ikeda and Y. Nakashima : Vision Res. 20 (1980)693
- (7) W. J. M. Levelt : Institute for perception, RVO-TNO, Soesterberg, The Netherlands
- (8) R. W. G. Hunt : Color research and application 2(1977)55

(受付 昭和55年 8 月25日)