

直接比較時における色光の明るさの変化

高瀬正典 岡嶋克典 内川恵二 池田光男



直接比較時における色光の明るさの変化

高瀬正典^{*,**}, 岡嶋克典^{**}, 内川恵二^{**}, 池田光男^{**}

* 防衛大学校応用物理学教室 〒239 横須賀市走水 1-10

** 東京工業大学大学院総合理工学研究科 〒227 横浜市緑区長津田町 4259

(1989年11月1日受理)

Change of Brightness of Colored Lights Measuring by the Direct Comparison Method

Masanori TAKASE^{*,**}, Katsunori OKAJIMA^{**}, Keiji UCHIKAWA^{**} and Mitsuo IKEDA^{**}

* Department of Applied Physics, National Defense Academy,
1-10, Hashirimizu, Yokosuka 239

** Department of Information Processing, Tokyo Institute of Technology Graduate School,
4259, Nagatsuda, Midori-ku, Yokohama 227

Brightness matching experiments were carried out to see whether brightness of a test colored-light, presented in a field placed adjacent to a reference field, is differently perceived from the case when no adjacent reference light was used. Three-channel Maxwellian-view optical system was used. The stimulus field was a 2° bipartite field. A white light of 120 Td was used as a reference (ref. 1). Five monochromatic lights of 470, 510, 580, 600 and 640 nm were presented as test colors. First, they were matched in brightness to the reference by the direct comparison method. Then, to estimate brightness of each stimulus, a successive comparison method was used in two conditions with another white reference (ref. 2). In the first condition, the pair of test and ref. 1 stimuli, matched in the direct comparison method, were alternated with ref. 2 in 0.33 Hz. In the second condition, only the test stimuli without the ref. 1 were alternated with ref. 2. It was obtained that brightnesses of a test color estimated in two successive comparison conditions were different, and this difference corresponds to that observed in brightness luminous efficiency functions obtained in the direct and successive comparison methods. The present results indicate that brightness of a monochromatic test light in a bipartite field is affected by the adjacent white reference light.

1. はじめに

色光の比視感度を測定する方法としては、直接比較法、交照法、逐次法、MDB法、絶対閾値法などがある。CIEの標準比視感度関数 $V(\lambda)$ はおもに交照法によって求められているが、直接比較法によって求められた比視感度 $V_0(\lambda)$ のほうが人間の明るさ知覚をよく反映していることが知られている^{1,2)}。直接比較法は参照光とテスト光を併置して、同時に呈示し、明るさマッチングを行う方法である。この方法を空間的な刺激配置の面からみると、参照光とテスト光を密接併置して比較するのが特徴と言える。

ところで、テスト刺激の明るさや見えは、単独呈示時に比べ、周辺に別の刺激があることによって影響されることが最近明らかになってきている³⁻⁶⁾。そうすると、直接比較法における併置比較の呈示条件では、単独呈示時に比べ、白色参照光とテスト色光の明るさの変化する可能性がある。一方、Ejimaら⁶⁾は、同時色対比効果による色誘導の強さが、テスト場と誘導場間の距離の減少に伴い急激に増すという結果を得ている。この結果から、色光の明るさについても同様に、周辺参照光との間の距離が減少すると参照光の影響は増加し、距離が離れるとその影響は減少して、単独に呈示した色光の明るさを示すようになるのではないかと推測することもでき

る。直接比較法は視覚の明るさ特性を調べる心理実験の基本的手法としてよく用いられることを考えると、併置した白色参照光とテスト色光の明るさが単独呈示時に比べ変化するののかという問題を明確にすることは、色光の明るさ実験において空間的に呈示条件の異なる結果を比較する場合や明るさ知覚メカニズムを考えるうえで重要なことであると考えられる。

本研究の目的は、同じ被験者および同じ刺激光を用いて、直接比較法によって測定した明るさの視感度を、白色参照光とテスト色光をそれぞれ単独に呈示して、継時比較して測定した視感度と比較し、その違いの原因を明確にすることである。ここで用いる継時比較法は、参照刺激とテスト刺激を間をあけることなく繰り返し交代して呈示するものであり、その結果は記憶の影響のほとんどないテスト刺激の明るさを示していると考えられる。

2. 実験方法

2.1 装置および刺激

実験には、500 W のキセノン光源と3光路マックスウェル視光学系を用いた。刺激は直径 2° の2分視野からなり、その右半分は参照視野、左半分はテスト視野である。参照視野には一つの光路からの 120 Td の白色光を連続に、または継時的に呈示できる。テスト視野には、一つのモノクロメータを含む光路で設定した単色光を単独に、またはその単色テスト光ともう一つの光路のモノクロメータからの0次回折光を継時的に呈示できる。背景光は用いていない。単色テスト光の波長として、ほぼユニーク色光に近い 470, 510, 580, 640 nm に加えて、黄と赤のほぼ平衡色光である 600 nm を選んだ。モノクロメータからの0次回折光は、明るさマッチングした状態での刺激の明るさを測定するための基準光として用いた。テスト視野の明るさの調整は中性濃度ウエッジを動かすことによって行った。白色参照光とモノクロメータ0次光の (x, y) 色度座標はそれぞれ (0.363, 0.401), (0.483, 0.453) であった。継時比較の場合のテスト刺激と参照刺激の呈示時間は各1.5秒で、切替はシャッターの閉開で行い、マッチングが完成するまで何度も繰り返し続けた。直接比較の呈示時間は、一般的に用いられている連続呈示とした。

2.2 刺激の呈示条件

刺激が単独に呈示されるか、側に別の刺激が併置されるかの呈示条件の違いによる明るさの変化を測定するために、Fig. 1 に示すような条件1 (condition 1) から条件5 (condition 5) の明るさマッチングを行う条件設

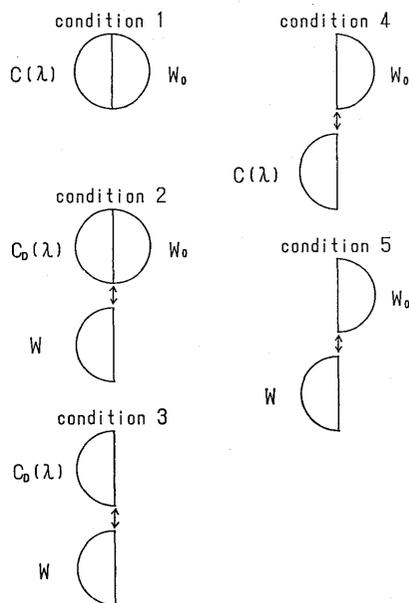


Fig. 1 Experimental conditions for presenting stimuli. Condition 1 and condition 4 are direct and successive comparisons of a test stimulus light $C(\lambda)$ and a white reference light W_0 (120 Td), respectively. Successive comparison method with another white reference W , is used for measuring brightness of the pair of $C_D(\lambda)$ and W_0 in condition 2, $C_D(\lambda)$ in condition 3 and W_0 in condition 5. $C_D(\lambda)$ represents a colored light $C(\lambda)$ matched in brightness with W_0 by direct comparison method.

定をした。条件1と条件4がそれぞれ直接比較と継時比較の視感度を測定するための呈示条件で、他の呈示条件は条件1と条件4でマッチングしたときの各刺激の明るさを基準光で測定するために行った。条件1と4では参照光の明るさにテスト色光の明るさを、および条件2、3および5では明るさマッチング後の各刺激の明るさに基準光の明るさをマッチングする調整法を用いた。Fig. 1 の刺激呈示条件の図における上下方向の矢印は、上と下の刺激が継時的に間を置かず繰り返し交代することを示す。参照刺激とテスト刺激を何回も継時的に繰り返し比較することで、記憶の効果が入らないマッチングを達成できる。

条件1は直接比較法による白色参照光 W_0 と単色テスト光 $C(\lambda)$ の明るさマッチングで連続呈示である。条件1以外は継時比較法による明るさマッチングで、5回以上の継時的な繰り返し比較の後マッチングを完成させるようにした。条件2は、条件1により W_0 にマッチングした色光 $C_D(\lambda)$ と W_0 の組をテスト刺激とし、そ

れに基準光 W を参照光として継時比較することによってマッチングさせる。この条件2の実験によって、条件1の直接比較による明るさマッチング完成時の明るさを、基準光の輝度に置き換えて知ることができる。条件3は、条件1でマッチングした色光 $C_b(\lambda)$ だけをテスト光として、それに基準光 W を継時比較してマッチングさせる。これで条件1の白色参照光を取り除いて単独に呈示した $C_b(\lambda)$ の明るさを知ることができる。条件4は、継時比較法による白色参照光 W_0 への単色テスト光 $C(\lambda)$ の明るさマッチングで、マッチングを完成した色光を $C_k(\lambda)$ とする。条件5は、条件1で用いた白色参照光 W_0 をテスト光として単独呈示したときの明るさを知るために、基準光 W を参照光として継時比較により明るさマッチングを行う。これは条件4での白色参照光 W_0 と同じ明るさなので、 $C_k(\lambda)$ の明るさは条件5の結果から求めることができる。このようにして、条件2, 3, 5の結果から、条件1, 4における刺激の全ての明るさを、基準光 W のエネルギー軸に対応させることによって比較することができる。

なお、条件2および3の測定ではテスト光と参照光が同じ位置に呈示されるので、刺激の切換え時に残像があった場合には、それが消えた後の明るさでマッチングするように被験者に指示し、順応の影響が入らないようにした。

2.3 手順

実験に先立ち、各被験者に継時比較する場合の注意事項を示した。(イ) 残像の影響を避けるため、呈示時間1.5秒のうち、最初のONのときの明るさでマッチングしないようにし、それ以後の明るさでマッチングする。(ロ) マッチングは継時の繰返し回数にして5回以後に完成する。(ハ) 条件2におけるテスト刺激である W_0 と $C_b(\lambda)$ の組の見方は、条件1でマッチングしたときと同じ見方をする。 W_0 だけまたは $C_b(\lambda)$ だけを見てマッチングしない。

実験は、各被験者について、次の手順で行った。

- (1) 暗順応, 10分以上
- (2) ある波長で、条件1, 2, 3について、この順序で明るさマッチングを各1回ずつ行う。
- (3) 同じ波長で、条件4について明るさマッチングを行う。
- (4) 波長をランダムな順序で替えて、(3), (2)の順序で明るさマッチングを行う。
- (5) 五つの単色光につき各2回ずつ測定するまで、(2)から(4)の手順を繰り返す。

(6) 条件5の明るさマッチングを2回繰り返す。

(7) 手順(1)から(6)までを1セッションとして、全部で5セッション繰り返す。

2.4 被験者

被験者は、色覚正常な男性 TM, HS, MT の3名である。TM と HS は 20 歳代で、MT は 40 歳代であり、3名とも心理物理実験の経験がある。ただし、TM と HS は実験の目的を知らされていないかった。

3. 結果と考察

条件1の直接比較と条件4の継時比較で得られた明るさ分光感度の結果を各被験者ごとに Fig. 2 に示す。横軸に波長を、縦軸に放射輝度の逆数の対数を取り、各波長につき10回の測定の平均値をプロットした。グラフの縦軸は正規化していない絶対量なので、相互に比較することができる。平均値周りのデータのばらつきを標準偏差のエラーバーで示した。

Fig. 2 より両比較法による結果の差は、被験者 HS で大きく、TM では長波長で大きく、そして MT では小さいことがわかる。3名とも、580 nm より長波長では直接比較で得られた感度は継時比較で得られた感度よりも高い。510 nm より短波長での両比較法で得られた感度の差は、長波長での差よりも小さいが、感度の増減についての傾向は、被験者ごとに異なっている。また、データのばらつきは長波長と短波長で大きい。このばらつきについては、中波長でのマッチングは容易であるが短波長および長波長でのマッチングは難しいという被験者の内観と一致する。この両比較法の結果に統計的に差があるかどうかを調べるために、各波長での平均値の差の検定 (t -検定) を行った。その結果、有意水準 0.05 で差があるといえないのは、被験者 TM の波長 510 nm と MT の 510 および 640 nm の場合だけであった。したがって、TM と MT の他の波長についておよび HS の全波長について、両比較法による視感度に有意水準 0.05 で差があるといえる。

このように、直接比較法と継時比較法による明るさマッチングの結果に差のあることが明らかになった。そこで何が変化したのかを見ることにする。上記の両比較法によって明るさマッチングした状態の知覚した明るさの相対比較を基準光 W によって行うための刺激呈示条件 2, 3 および 5 による実験結果を、各被験者について Fig. 3 に示す。これは、横軸に波長を取り、縦軸に各呈示条件でテスト刺激に継時的にマッチングさせた基準光 W の輝度の対数をとってプロットした図である。各ブ

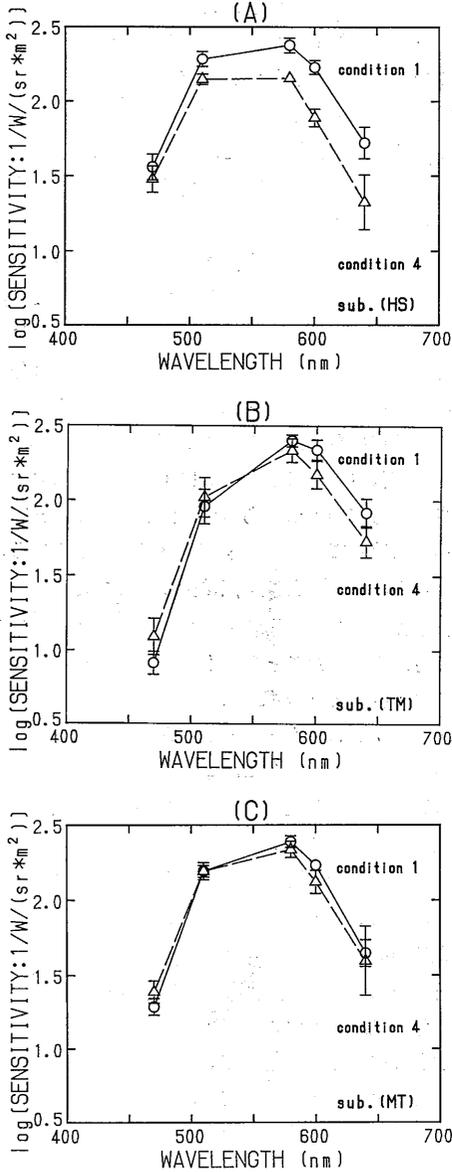


Fig. 2 Luminous efficiency functions for brightness by the direct and successive comparison method, shown by open circles connected by solid lines and triangles connected by broken lines respectively. (A), (B) and (C) are for subjects HS, TM and MT, respectively.

ロットは 10 回の測定の前平均値で、エラーバーは平均値周りのばらつきを表す標準偏差を示す。ただし、条件 5 の横軸は白色光 W_0 を示す。Fig. 3 の実線で結んだ白丸のシンボルは、条件 2 について、直接比較 (条件 1) でマッチング完成後の W_0 と $C_D(\lambda)$ の組をテスト刺激としたときの知覚した明るさを基準光 W によって求めた

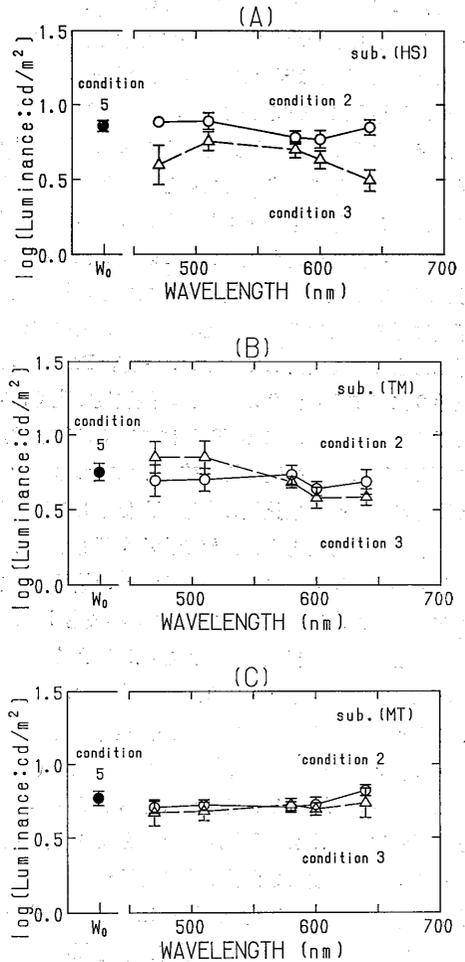


Fig. 3 Luminance of the W stimulus required to make brightness match to each stimulus in condition 2, 3 and 5 by successive comparison method. (A), (B) and (C) are the same in Fig. 2. Open circles connected by solid lines and triangles connected by broken lines denote condition 2 and condition 3, respectively. A closed circle denotes condition 5.

結果である。また、破線で結んだ三角のシンボルは、条件 3 について、直接比較でマッチングした色光 $C_D(\lambda)$ をテスト刺激としてその明るさを基準光 W によって求めた結果である。そして、黒丸のシンボルは、単独呈示の白色参照光 W_0 の明るさを基準光 W をスケールとして求めた結果である。

条件 2 の結果は、条件 5 の結果に比べ、波長によって TM と MT について平均値でわずかに低く、HS についてはわずかに上下しているといった差が認められるものの、条件 3 の結果ほど変化していない。したがって、

直接比較によりマッチングしたときの明るさは、波長によってわずかしかが変わらず、単独に呈示された白色参照光 W_0 の明るさとほぼ同じであるといえる。

次に、条件3についての結果は、MTを除いて波長依存性があり、その明るさは条件2の結果および条件5の結果とも差があることを示している。条件3の結果に対して条件2の結果が最も高くなったのはHSで、しかも長波長と短波長での差が大きい。このHSについての特徴は、Fig. 2の継時比較に対する直接比較の視感度の上昇傾向に対応している。しかし、470 nmでの値の大小関係はあまりよく対応していない。一方、TMについての条件3に対する条件2の結果は、長波長で高く、短波長で低くなっている。このTMについての特徴は、やはりFig. 2の両視感度の値の差に現れており、短波長で継時比較に比べ直接比較の視感度が低下していることと傾向が一致するとともに、値の大小関係もかなりよく一致している。MTについてのFig. 3の結果はわずかしかが差がないが、このMTについての特徴もFig. 2の結果に、短波長での傾向の不一致を除けばよく対応しており、両比較法における視感度の差は小さい。

このように、個人差は存在するが、条件2と条件3の結果(Fig. 3)の差は、条件1と条件4の結果(Fig. 2)の差に470 nm以外では定性的に対応している。すなわち、単独に呈示した $C_D(\lambda)$ の明るさよりも直接比較でマッチングした明るさが高いとき(Fig. 3では大半がそうである)は、直接比較で W_0 にマッチングさせて $C_D(\lambda)$ の状態とするのに単独呈示時よりも低い色光のエネルギーで十分であるので直接比較の視感度は上昇し、逆に明るさが低いときの(TMについての短波長)視感度は低くなるというデータが得られたと考えられる。どの被験者についても、短波長におけるこれらの差相互の対応がよくない。これらの定量的な分析は、今後の課題であろう。継時比較においてマッチングを完成させるまでの継時的な参照刺激とテスト刺激の交代の繰返しの回数はどの場合もほぼ10回以上あったので、以上の結果への記憶の影響は非常に小さいと言える。

最近、周辺光を置くことによって色の見えや明るさ効率が変化することがわかってきている³⁻⁵⁾。したがって今回の結果は、直接比較法における参照光である白色光がテスト光に対して周辺光の役割を果たし、単色光の明るさが変化したためと考えることができる。このことは、色光単独で呈示され参照光の影響を受けない継時比較の条件のほうが、その色光の知覚した明るさを測定するうえで、よりシンプルであることを示している。

内川ら⁷⁾は、同時(直接)比較と記憶に基づく継時比較から求めた明るさの視感度に差のあることを示した。この差は、今回われわれが求めたものと定性的に一致している。このことは、記憶に基づく継時比較による視感度の実験結果には、記憶だけでなく比較法の違いによる効果が含まれている可能性を示唆している。すなわち、単色テスト光の明るさを、呈示条件によって変化した状態で記憶したために今回と同様な結果が得られたと考えることもできる。一方、われわれの採用した参照刺激とテスト刺激が繰返し交代する継時比較においても、結果にまったく記憶の影響が入らないという保証はない。継時比較では、直接見ている刺激と記憶している刺激との比較を参照刺激とテスト刺激について継時的に繰返し交代させることで記憶による変化の無いマッチングを実現しているのであるが、たとえばこの比較を記憶レベルで行っていないと断言できないからである。しかしながら、その影響は今回は少ないと考えられる。

併置した参照光が周辺光の役割を果たしたために色光の明るさが変化したことが示されたことから、直接比較するテスト視野と参照視野の形状や配置だけでなく、Yaguchi⁸⁾がチェッカーボードパターンを用いた間隙による B/L の変化と同様に、2分視野の境界に間隙があるかないかで、また間隙がある場合その幅の大きさで色光の明るさは変化することが予想される。その結果得られる視感度は、刺激形状の条件によって変化する可能性がある。また、このYaguchiによる結果⁸⁾やEjimaらによる結果⁶⁾に加えて今回のわれわれの結果から推測すると、テスト光と参照光の間の距離を離していくと参照光の影響は小さくなり、単独に呈示した色光の明るさを示すようになることを示唆している。しかしながら、実験などによる確認は行っていない。したがって、呈示条件によって色光の明るさがどう変わるかを定量的に調べるのが、今後の課題であると思われる。

4. ま と め

直接比較時の色光の明るさが単独呈示時に比べて変化しているのではないかを調べるために、同じ被験者と同じ刺激を用いた直接比較と継時比較による明るさマッチングと、そのときの刺激の明るさを測定する実験を行った。その結果、直接比較によって得られた明るさの視感度と継時比較によって得られた明るさの視感度には有意な差が認められた。両比較法で得られた結果の差は、直接比較法で呈示される単色テスト光の明るさが白色参照光によって変化するために生じることがわかった。直

接比較法による色光の明るさ実験は、テスト波長によって異なる参照光の効果を考慮する必要があると結論できる。

文 献

- 1) M. Ikeda, H. Yaguchi and K. Sagawa: "Brightness luminous-efficiency functions for 2° and 10° fields," J. Opt. Soc. Am., **72** (1982) 1660-1665.
- 2) International Commission on Illumination: *Spectral Luminous Efficiency Functions Based upon Brightness Matching for Monochromatic Point Sources 2° and 10° fields*, Publication CIE No. 75 (Central Bureau of the CIE, Austria, 1988).
- 3) H. Uchikawa, K. Uchikawa and R. M. Boynton: "Influence of achromatic surrounds on categorical perception of surface colors," Vision Res., **29** (1989) 881-890.
- 4) 岡嶋克典, 阿山みよし, 内川恵二, 池田光男: "光源色モードと表面色モードにおける明るさ効率の比較", 光学, **17** (1988) 582-592.
- 5) 岡嶋克典, 池田光男: "白色光における輝面色モードと表面色モードの見えの定式化", 光学, **18** (1989) 558-564.
- 6) Y. Ejima and S. Takahashi: "Relationship between chromatic induction and spatial variables: an integrated explanation in terms of element-contribution function," J. Opt. Soc. Am., **73** (1983) 203-207.
- 7) 内川恵二, 池田光男: "色光の明るさの同時比較と継時比較", 照明学会誌, **68** (1984) 528-533.
- 8) H. Yaguchi: "Heterochromatic brightness matching with checkerboard patterns," J. Opt. Soc. Am. A, **4** (1987) 540-544.