

任意スペクトル分布光刺激装置 を用いた等色実験装置の開発

課題番号：12650043

平成12年度～平成13年度科学研究費補助金 基盤研究 (C) (2) 研究成果報告書

平成14年4月

研究代表者：中野靖久
(広島市立大学情報科学部助教授)

はしがき

研究組織

研究代表者： 中野 靖久 （広島市立大学情報科学部助教授）

交付決定額（配分額）

（金額単位：千円）

	直接経費	間接経費	合計
平成12年度	1,700	0	1,700
平成13年度	1,200	0	1,200
総計	2,900	0	2,900

研究発表

- (1) 学会誌等 （中野靖久他、デジタルマイクロミラーデバイスを用いた任意分光分布光呈示装置の開発とその等色の加法則検証への応用、光学、予定）
- (2) 口頭発表 （Y. Nakano et al., Polychrometer using digital micro-mirror device and its application to additivity test of color matching, The 25th session of the CIE (International Commission on Illumination), June 2003）

目次

第一章 序論	4
1.1 はじめに	4
1.2 等色の加法性	5
1.3 目的	8
第二章 実験方法	8
2.1 実験装置	8
2.2 実験原理	14
第三章 実験結果	16
3.1 装置のキャリブレーション	16
3.2 等色実験	25
第四章 考察	27
第五章 結論	28
謝辞	28
参考文献	28
付録	29

第一章 序論

1.1 はじめに

色を数値化して定量的に表示することを測色と呼ぶ。光に照らされた物体を眼で見る場合、その色を測定し数値化することにより定量的に表示することができる。しかし、眼で色を見る場合、個人により色の評価は異なってくる。そこで色を見る人間の目を標準化する必要がある、CIE (国際照明委員会) は 1931 年に CIE1931 測色標準観測者 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ を規定した。CIE1931 測色標準観測者は、イギリスの Wright および Guild らによる観測結果に基づいて導出された。色覚正常者の 17 名の被験者が視角 2° の視野で波長が 400nm から 700nm の単色光刺激に対して特別に選定された波長の赤、緑、青の原刺激を用いて加法混色で等色した等色実験によって得られた結果を数学的に変換して等色関数 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ とした。そして大きな視野用の標準観測者として、1964 年 CIE1964 測色補助標準観測者 $\bar{x}_{10}(\lambda)$ 、 $\bar{y}_{10}(\lambda)$ 、 $\bar{z}_{10}(\lambda)$ を規定した。CIE 測色補助標準観測者はイギリスの Stiles と Burch ならびにソ連の Speranskaya らによる観測結果に基づいて導出されたものである。総計 67 名の被験者が視角 10° の視野で波長 390nm から 830nm の単色光刺激に対して赤、緑、青の原刺激を用いて加法混色で等色した等色実験によって得られた結果を数学的に変換して等色関数 $\bar{x}_{10}(\lambda)$ 、 $\bar{y}_{10}(\lambda)$ 、 $\bar{z}_{10}(\lambda)$ とした。今日、測色において、等色関数は重要な位置にあり、なくてはならない存在になっている。

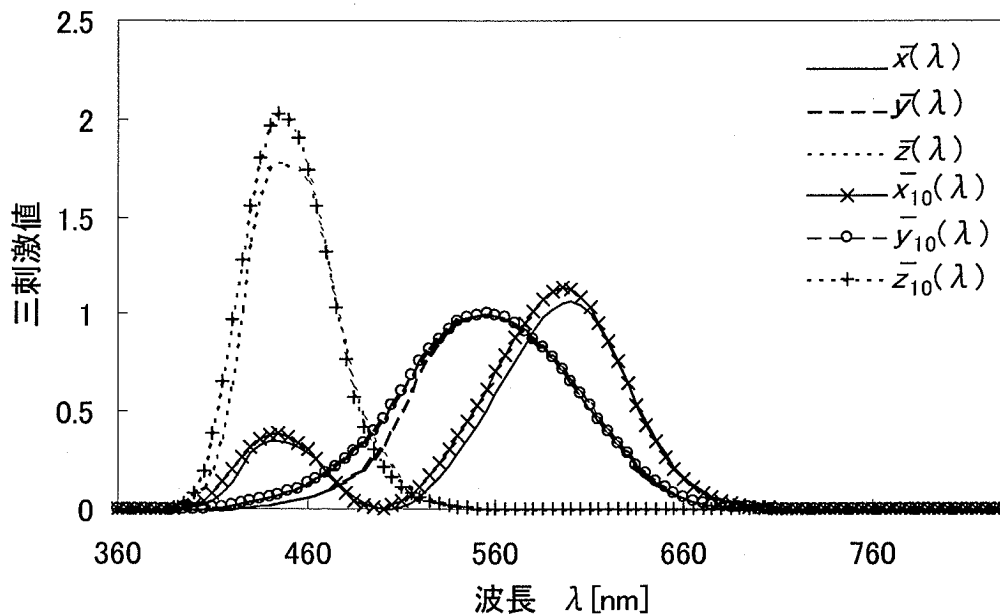


図1 等色関数

1.2 等色の加法性

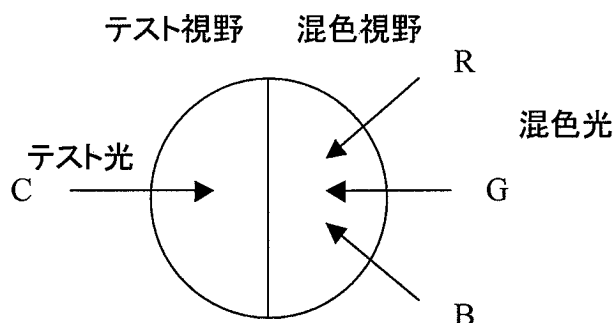


図2 2分視野

図2のような2分視野を用いて、一方の視野にテスト光Cを、他方の視野にR、G、Bの3色光を光学的に重ねる。テスト光Cにどのような色光を持ってきても、3色光R、G、B光を適当な強度に調整して混色すると、まったく等しい見えを作ることができる。このような操作を等色と呼び、色光を重ね合わせて混ぜることを加法混色と呼ぶ。ここで「まったく等しい見えを作る」という操作はR、G、B光の強度を調節すると左右の視野の明るさも色みもまったく等しくなるということである。このことを式で表すと、

$$C = R + G + B \quad (1)$$

となる。これを等色方程式と呼ぶ。このように物理的な分光組成の異なる二つの色光が等色することをメタメリックマッチングあるいは条件等色と呼ぶ。Grassmannは加法混色の現象をグラスマンの法則(Grassmann's law)としてまとめている。

- 1) 対称則(symmetry law) : $A=B$ ならば $B=A$
- 2) 比例則(proportionality law) : $A=B$ ならば $nA=nB$
- 3) 置換則(transitivity law) : $A=B, B=C$ ならば $A=C$
- 4) 加法則(additivity law) : $A=B, C=D$ ならば $A+C=B+D$

このように、どのような色でも式(1)のように3つの原色R、G、Bの加法混色によって等色することが可能であることが確立され、R、G、Bという尺度で色を表現できる。ここで有用になるのが、等色関数である。等色関数は、等エネルギースペクトルに対する原刺激R、G、Bの三刺激値 $\bar{r}(\lambda)$ 、 $\bar{g}(\lambda)$ 、 $\bar{b}(\lambda)$ であり、これさえあればいかなる色光の色もRGB表示が可能になる。等色関数は、可視領域の等エネルギー単色光 λ ($\lambda=380\sim 780\text{nm}$)に対して、原刺激R、G、Bを用いて等色実験をして、三刺激値 $\bar{r}(\lambda)$ 、 $\bar{g}(\lambda)$ 、 $\bar{b}(\lambda)$ を求める。これが等色関数である。このようにして求められた等色関数などが国際的に取り定めるものでなければ活用範囲はきわめて狭くなり、とても有用なものにはなりえない。そこで国際照明委員会CIEは1931年に等色関数について基準を作り、国際的に使用するよう勧告した。

それが CIE1931 測色標準観測者 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ である。現在等色関数は世界的に使用されている。等色関数は 1930 年代に実際に使用されるようになった。しかし、その時代に分光分布を正確に測定する事はできなかった。測定は、間接的な方法に頼らなければならなかった。

近年、矢口による等色実験により求められた等色関数において、異なった 2 種類の方法で求められた等色関数は、等色におけるグラスマンの法則が成立するならば、適当な線形変換により一致するはずであるが、測定された結果、青の等色関数が 2 種類の方法により、短波長域で異なるという結果が示されている⁷⁾。結果のグラフを図 3 に示す。これは、何らかの非線型性のために 2 種類の結果が異なると考えられる。この 2 種類の結果が異なった原因として、短波長域においてグラスマンの法則が成立していないからであると考えられ、成立しない要因の一つとして、網膜に存在する黄斑色素による吸収が考えられる。黄斑色素には個人差があり、図 4 に示される分光吸収特性を持っており、450~460nm 付近に吸収のピークが存在する。これらの吸収が、青錐体に対して、何らかの影響をあたえていると考えられる。

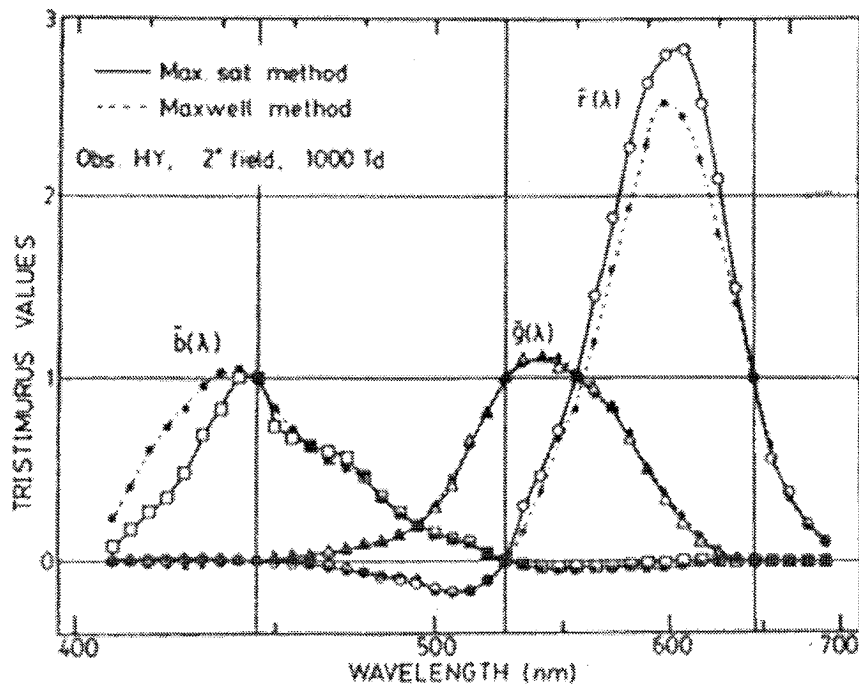


図 3 2 種類の実験方法による結果のグラフ

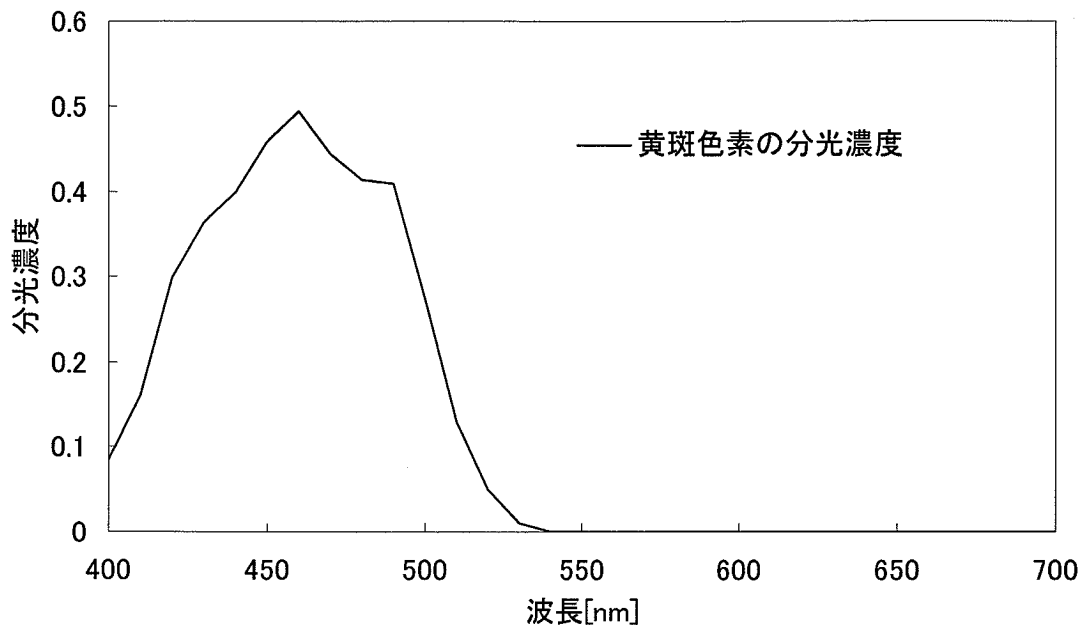


図4 黄斑色素の分光濃度グラフ

グラスマンの加法則についてはいくつかの検証がおこなわれている。Trezona はライト式の測色計を用いて等色実験を行い⁸⁾、その結果、色差の弁別域と比べて加法則からのずれはそれほど大きくなく実験誤差の範囲内であり、成立するという結論を得た。しかし、近年、グラスマンの加法則の検証実験を Thornton が行い⁹⁾、その結果を色度座標上に表示すると系統的な誤差が生じると報告している。このような状況からグラスマンの加法則についてのより精密な検証実験、等色関数の再検討が急がれている。しかし、現在用いられている等色実験の装置では、3つの原刺激光を混色するタイプのものがほとんどであり、グラスマンの加法則の詳しい検証実験を行うためには、3種類以上の色光を混色する必要があることから、新たな実験装置の開発が必要となる。

各波長のエネルギーを自由にコントロールし、任意の分光エネルギー分布をもった色光刺激を呈示する装置を作ることができれば、グラスマンの加法則検証をはじめとしてさまざまな視覚実験が可能となる。近年、デジタル・マイクロミラー・デバイス (DMDTM) という微小なミラーをアレイ状に並べた素子がテキサス・インスツルメンツ社により開発され、プロジェクターなどの画像表示装置に用いられている。光源から出た光をいったんスペクトルに分解し、波長ごとのエネルギーをこの素子を用いて調整し、再び複合光に合成することにより、任意スペクトル分布光刺激装置が可能となると考えられる。

1.3 目的

デジタル・マイクロミラー・デバイスを用いて可視範囲の単色光の強度を任意に操作することができる任意スペクトル分布光刺激装置を開発し、等色におけるグラスマンの加法則検証実験等に応用する。

第二章 実験方法

2.1 実験装置

等色実験を行うための装置として、DMD™ (Digital Micromirror Device Texas Instruments 社製) デバイスを用いた新しい等色実験の装置を提案する。開発した実験装置の概略図を図5に示す。

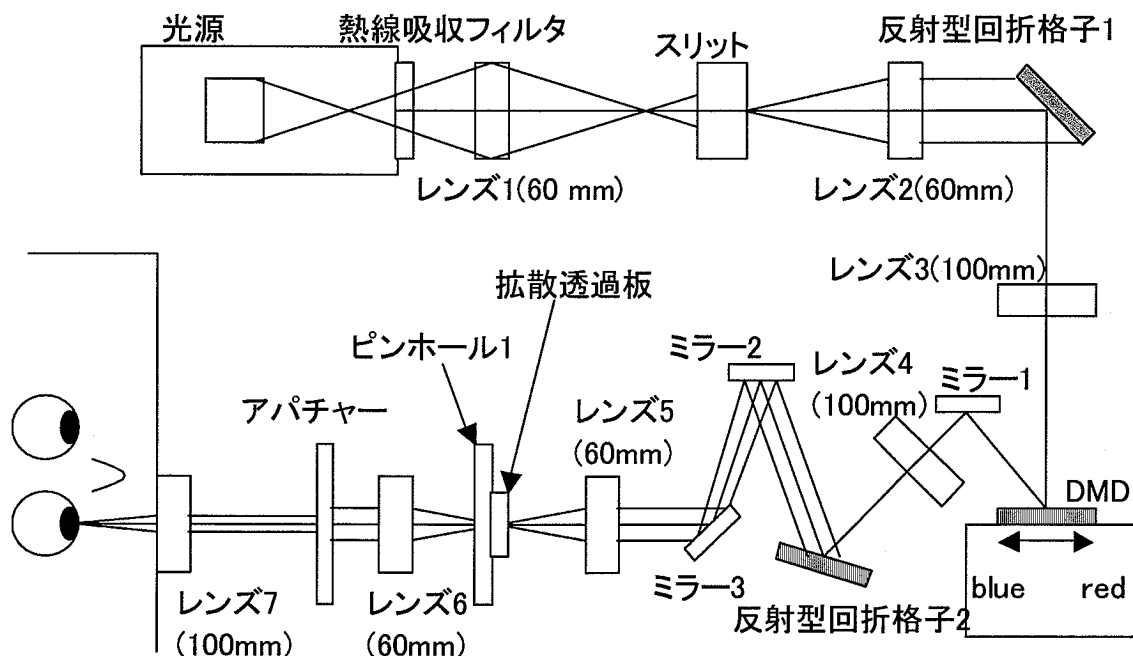


図5 実験装置の概略図 括弧内は焦点距離。

使用した製品の型番とメーカーを補足に示す

2.1.1 装置原理

これまで提案された等色実験の装置は、3種類の原刺激 R、G、B ですべての色を作り出すことができるという原理を元に作られたものであり、自由に必要な数の単色光を加法混色することはできない。そこで、DMD™デバイスを用いることで、自由に必要な数の単色光を加法混色することができるようにした。

2.1.1.1 DMD™

DMD™はテキサス・インスツルメンツが1987年に発明した2進法パルス幅変調技術を使うことで、正確に光量を制御する高速反射型デジタル式光スイッチで、半導体ベースのアレイである。このDMD™と画像処理、メモリー、光源および光学系を含めたシステムをDLP™システムとよび、デジタル映像投影装置として各メーカーから発売されている。DMD™は $16\mu\text{m}$ 四方のアルミニウムミラーが $1\mu\text{m}$ 間隔で 800×600 枚並んだもので、基盤となるメモリーセルの状態に応じて、2方向のうちいずれかの方向に光を反射することができる。光源からの光をミラーの傾きがON(+ 10°)の時はレンズの方向へ、OFF(- 10°)の時は光吸収体へ反射する。このミラーのON/OFFをPWM変調で制御することにより階調を作り出すことが可能である。図6にDMD™ミラーと、ミラーの傾きによる光の反射光についての図を示す。図7に2進法パルス幅変調の模式図を示す

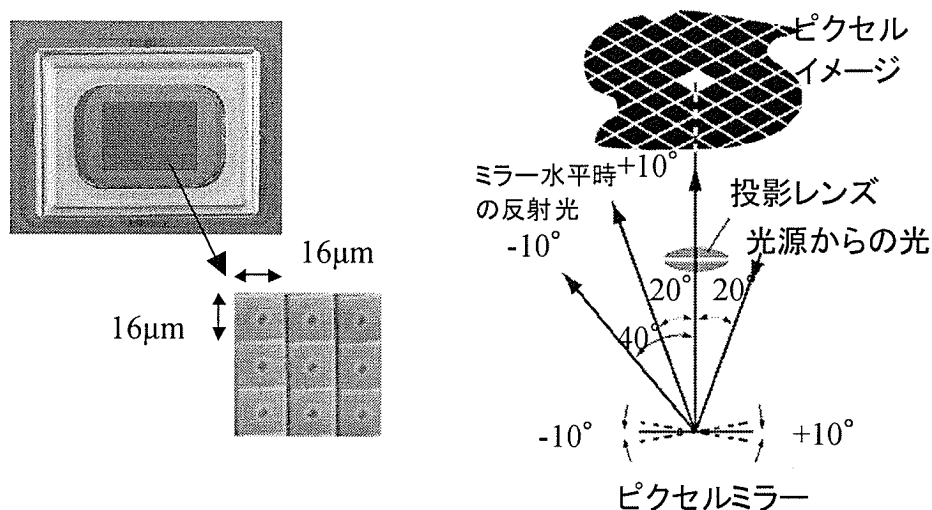


図6 DMD™ミラーと、ミラーの傾きによる反射方向¹⁰⁾

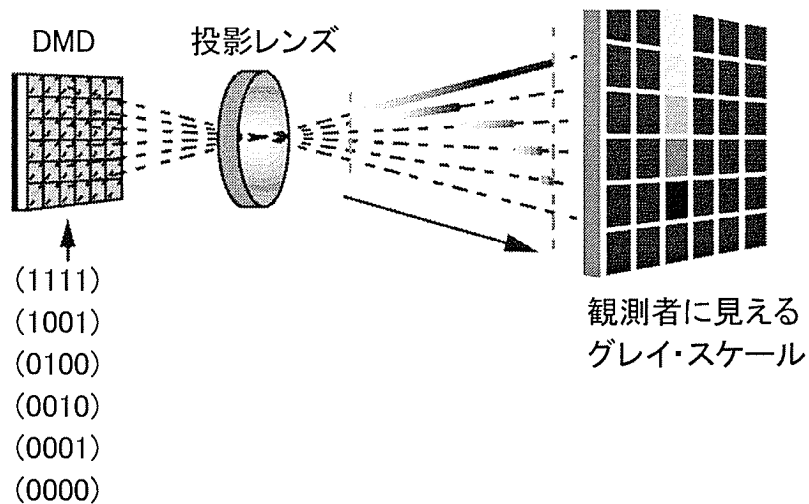


図7 DMDTM2進法パルス幅変調(4ビットの例)¹⁰⁾

2.1.2 装置概要

単色光を自由に操作するための原理は、図8のようにスリットを通過した白色光を、反射型回折格子を用いてスペクトルに分解し、焦点距離の位置においたレンズによりAの位置に波長ごとの光源像を結像する。Aを軸として左右対称となるようにレンズと反射型回折格子を設置することによって、再びスペクトルを合成することができる。そこで、Aの位置にDMDTMを設置することにより波長ごとの強度を調節する。

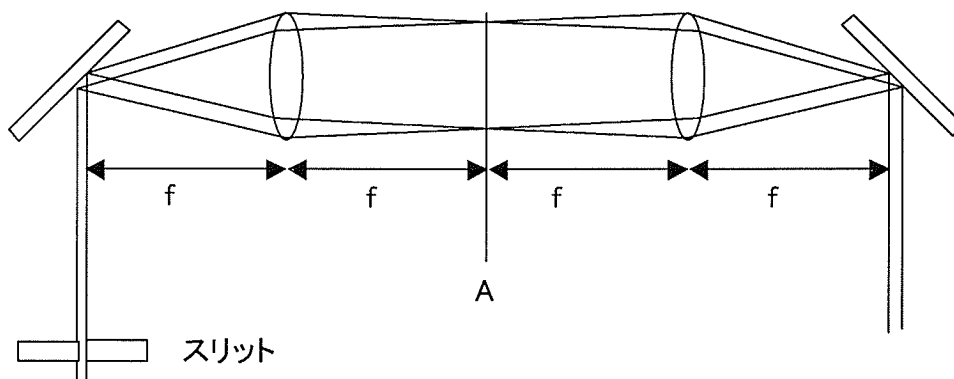


図8 装置原理の概略図

2.1.2.1 反射型回折格子

反射型回折格子は、平行白色光をスペクトルに分解する。格子定数によって、波長による回折角度が異なる。次の式により、格子定数、波長、入射角に応じた回折角度が求まる。

$$n\lambda = d(\sin\alpha \pm \sin\beta) \quad (2)$$

α は、反射型回折格子への入射角であり、 β は回折角である。 d は格子定数である。 λ は波長である。 n は回折次数であり、 $n=1$ を用いる。表1に格子定数と波長(400nmと700nm)による回折角を示す。入射角は 45° とした。

表1 格子定数と回折角

	格子定数 (溝の数/mm)				
	100	200	300	600	800
β_{400} [deg]	41.84	38.83	35.94	27.78	22.77
β_{700} [deg]	39.57	34.54	29.79	16.58	8.45
$\beta_{400} - \beta_{700}$ [deg]	2.26	4.28	6.148	11.20	14.31

2.1.2.2 レンズの焦点距離と反射型回折格子

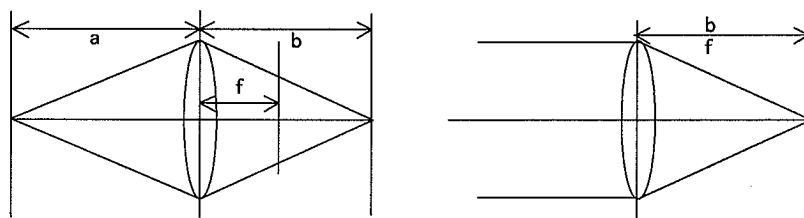


図9 レンズの焦点距離

レンズの焦点距離と像の位置は次の式で表される。

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (3)$$

平行光を作成する場合は、焦点距離と像の位置を同じにすればよい。ここで、反射型回折格子の格子定数と、レンズの焦点距離により A の位置にできる像の大きさが決定する。像の大きさは、次式で決定する。

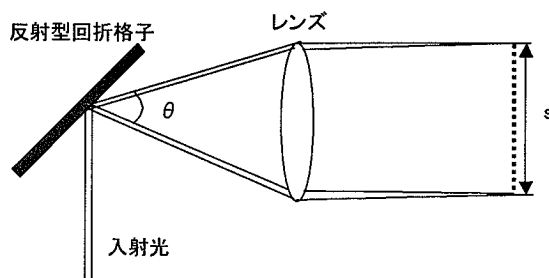


図10 反射型回折格子の格子定数とレンズの焦点距離による像の大きさ

$$s = 2f \tan \frac{\theta}{2} = f \theta \quad (4)$$

レンズに $f=80, 100, 125\text{mm}$ を用いた場合の像の大きさを表に示す。

表 2 格子定数と像の大きさ

格子定数(溝の数/mm)		100	200	300	600	800
焦点距離 f [mm]	$\theta = \beta_{400} - \beta_{700}$ [deg]	2.26	4.28	6.14	11.20	14.31
80		3.16	5.98	8.58	15.63	19.98
100	s [mm]	3.95	7.48	10.73	19.54	24.98
125		4.94	9.35	13.41	24.43	31.23

2.1.3 装置

装置はマックスウエル視光学系により実現した(図 5)。光源にはキセノンランプ(XL300 ソーラーシミュレータ、Perkin Elmer 社製)を使用した。光源に多く含まれる赤外光を減らすために熱線吸収ガラスを挿入した。レンズ 2(60mm)により白色平行光を作り出し、平行光を反射型回折格子に当て、スペクトルに分解し、レンズ 3(100mm)から焦点距離の位置に置かれた DMD™ 上にスリットの像を結像した。DMD™ は市販のプロジェクター(U3-880、PLUS 社製)を分解し DMD™ 上に直接スペクトルの像をあてることできるようにした。DMD™ のサイズ 13.5mm と、レンズを置く位置から回折格子の格子定数を 200 本/mm のものを使用し、レンズ 3 の焦点距離を 100mm とした。 $+10^\circ$ の時反射する方向にミラー 1 を置きレンズ 3 と同じ焦点距離を持ったレンズ 4 を置き、焦点距離の位置に反射型回折格子 2 を置きスペクトルを合成した。合成した光はレンズ 5 によりピンホール 1 の位置に焦点を結ぶ。ピンホール 1 の手前に置かれた透過拡散板はスペクトルの混色の一様性を高めるために挿入した。マックスウエル視光学系は、人工瞳や散瞳剤を用いないで、網膜上での照度が瞳孔径の変化をまったく受けないようにするための方法である。そこで、レンズ 6 により平行光にし、視野の大きさが 2 度になるようにアパチャーの大きさを決め、レンズ 7 から焦点距離の位置にアパチャーを置いた。被験者は、歯型台により、頭を固定し、焦点が瞳孔の位置にくるように調節をする。この装置で単色光を呈示するために DMD™ のミラーを調節する。パソコンモニタの設定において、画面の領域を 800×600 、色を True Color(24 ビット)に設定した(ここで、モニタの左から縦一列を 1 番と数えていく。右端は、800 番である)。モニタに矩形を表示することでスペクトルに分解された白色光のスペクトルの一部だけが反射され単色光を呈示することができる。強度を 765 階調で変化させるために以下の手順でモニタに表示する色を決めた。設定したい階調を 3 で割った時の余りが 0 である場合、そのときの商を R、G、B それぞれに与える。余りが 1 であった場合、そのときの商を G、B に与え、商に 1 を加えたものを R に与える。余りが 2 であった場合、そのときの商を B に与え、商に 1 を加えたものを R、G に与える。これにより、765 階調を作り出す。

2.1.4 装置のキャリブレーション

実際に組んだ装置のキャリブレーションを行う。以下にキャリブレーションの方法を示す。

2.1.4.1 波長とミラーの位置関係

波長とミラーの位置関係を分光放射輝度計（PR-650、Photoreserch 社製）により分光放射輝度分布を測定し決定する。測定は、拡散透過板の位置に標準拡散板を置き、パソコンモニタに矩形を表示する。表示する矩形は、中心の位置と幅と階調があたえられる。矩形の中心を左から順番に変化させ、呈示される単色光の分光放射輝度分布を測定する。測定された分光放射輝度分布をガウス関数で近似をおこない、そのときの中心波長を求める。図 11 にガウス関数の概形と式を示す。

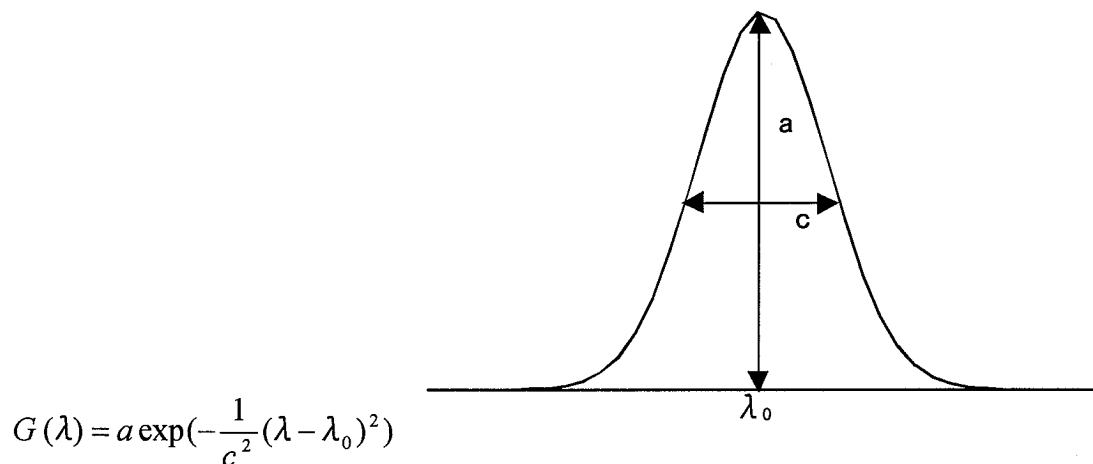


図 11 ガウス関数の概形とガウス関数

図 11 のガウス関数を用いて測定した分光感度に近似をする。近似はデータ解析ソフト（KaleidaGraph、HULINKS 社製）を用いて近似を行い、ガウス関数のパラメータ λ_0 を求め、それによりミラーと波長の位置関係を求める。

2.1.4.2 矩形の幅

矩形の幅を決定する。拡散透過板の位置に標準拡散板を置き、矩形の幅を変えて、呈示される単色光の色度座標を分光放射輝度計（PR - 650、Photoreserch 社製）で測定する。測定された色度座標と、呈示した単色光の中心波長の色度座標との距離が最も近くなる幅を決定する。

2.1.4.3 モニタに表示する階調と提示される色光の強度変化

モニタに表示する階調と提示される色光の強度変化の関係を求める。モニタに表示する階調を0から765まで順に変化させ、放射計(DR2000 EG&G社製)でセンサに流れる電流値を測定する。階調を0と設定した場合に、DMD™で反射される光がなくなるので、常に存在する背景光として、測定した電流値の最小値を引くことで取り除き、最大値が100%となるようにする。

2.1.4.4 最大網膜照度

マックスウェル視光学系では、光の強度の単位は輝度ではなく網膜照度を用いる。そこで、放射計(DR2000 EG&G社製)を用いて、焦点からの距離 d の位置における照度を測定する。網膜照度 B と照度 E には焦点からの距離を d として次式の関係が成り立つことを用いて、網膜照度を求める¹²⁾。

$$B [\text{Td}] = E [\text{Lux}] \times d^2 [\text{cm}] \times 100. \quad (5)$$

階調を最大値(=765)に設定し、距離を変えて最大網膜照度を測定する。測定された最大網膜照度に、測定されたミラーと階調の関係により、設定した階調による網膜照度を求めることが可能となる。

2.2 実験原理

短波長領域の色光 V を三原色 R, G, B で等色する場合におけるグラスマンの加法則についての検証を以下の2つの方法で行う。

2.2.1 マックスウェル法

まず R, G, B を網膜照度 r_r, g_r, b_r で混色して常に一定の色光 C を作る。次に短波長の色光 V を網膜照度 v_t で与えこれに R, G, B を混色してその網膜照度を調整し C に等色するときの R, G, B の網膜照度を r_t, g_t, b_t とする。この条件等色を式で表すと。

$$r_t R + g_t G + b_t B = r_r R + g_r G + b_r B + v_t V, \quad (6)$$

となる。 $v_t=0$ のときは便宜上

$$r_t R + g_t G + b_t B = r_r R + g_r G + b_r B, \quad (7)$$

と書け、グラスマンの加法則が成り立つ場合、これら二つの条件等色対を適当な割合で混色しても等色は崩れないので、

$$r_t R + g_t G + b_t B = (\rho_1 r_t + \rho_2 r_r) R + (\rho_1 g_t + \rho_2 g_r) G + (\rho_1 b_t + \rho_2 b_r) B + \rho_1 v_t V, \quad (8)$$

ただし、

$$\rho_1 + \rho_2 = 1 \quad (9)$$

が成り立つ。式(9)を用いて式(8)を整理すると、

$$V = \frac{r_r - r_t}{v_t} R + \frac{g_r - g_t}{v_t} G + \frac{b_r - b_t}{v_t} B \quad (10)$$

となり、 $r_r - r_t$ 、 $g_r - g_t$ 、 $b_r - b_t$ はそれぞれ v_t に比例する。この関係が成り立つかどうかで加法則を検証する。

2.2.2 最大彩度法

V をある網膜照度 v_t で与え、これに G を混色した色光と、B と R を混色した色光が等色するように R、G、B の網膜照度調整する。このときの R、G、B の網膜照度を r_t 、 g_t 、 b_t とすると、この条件等色は

$$v_t V + g_t G = r_t R + b_t B, \quad (11)$$

と表され、これを整理すると、

$$V = \frac{r_t}{v_t} R - \frac{g_t}{v_t} G + \frac{b_t}{v_t} B \quad (10)$$

となり、 r_t 、 $-g_t$ 、 b_t はそれぞれ v_t に比例する。この関係が成り立つかどうかで比例則を検証する

2.2.3 実験条件

R、G、B、V には 622nm、539nm、454nm、420nm の単色光を使用した。B は、黄斑色素の吸収が最も多い波長を選び、V は B よりも黄斑色素の吸収が少ない波長を選択した。実験者が v_t の網膜照度を 9 段階に変化させたときに、それぞれの実験方法で 2 つの色光が条件等色となるように r_t 、 g_t 、 b_t の値を被験者が調整する。

マックスウェル法における一定の参照光 C の網膜照度は R 143Td、G 172Td、B 299Td とした。また、V の網膜照度はどちらの方法でも 0、3.8、7.2、10.8、14.5、17.8、20.9、24.7、29.4Td の 9 段階を設定した。

被験者は YN 1 名である。

2.2.4 実験手順

被験者は、暗室に入り、歯型台で頭を固定し、瞳孔の位置に光源像がくるように調節ねじを、上下、左右、前後に動かす。実験を開始するとき、被験者が F8 キーを押す。被験者は、2 つの色光が条件等色するように、R、G、B の網膜照度を調節する。網膜照度の調整は被験者がキーボードでおこなう。キーボードの Insert キーと Delete キーで R の網膜照度、Home キーと End キーで G の網膜照度、PageUp キーと PageDown キーで B の網膜照度を変える。2 つの色光の切り替えは ScrollLock キーでおこなう。条件等色が完了したら F1 キーを押して 1 回の等色実験が終了となる。等色実験は v_t の網膜照度を 9 段階に変えて、2 つの色光が条件等色になるようにそれぞれの点で 9 回、全部で 81 回の等色実験をおこなった。9 種類の条件はランダムな順番で提示される。

第三章 実験結果

3.1 装置のキャリブレーション

3.1.1 波長とミラーの位置関係

DMDTMのミラーと波長の関係について測定した。ミラーの650番、630番、610番、590番、570番、550番、530番、510番、490番、470番、450番、430番、410番、390番、370番、350番、330番、310番、290番、270番、250番、230番、210番、190番、170番を中心、矩形の幅を30ピクセルとして、呈示される色光を分光放射輝度計(PR-650 Photoreserch社製)で分光放射輝度分布を測定した。測定した結果を図12示す。グラフのピークは左から650番で右端が170番である。次に、測定した分光放射輝度分布をガウス関数で近似し中心波長を求めた。410番をガウス関数で近似したときの結果を図13示す。このときの中心波長は539nmであった。それぞれのミラーと波長の間を関係を表3に示す。測定した分光放射輝度分布をガウス関数で近似した時のパラメータは、データ解析ソフト(KaleidaGraph、HULINKS社製)で行った。

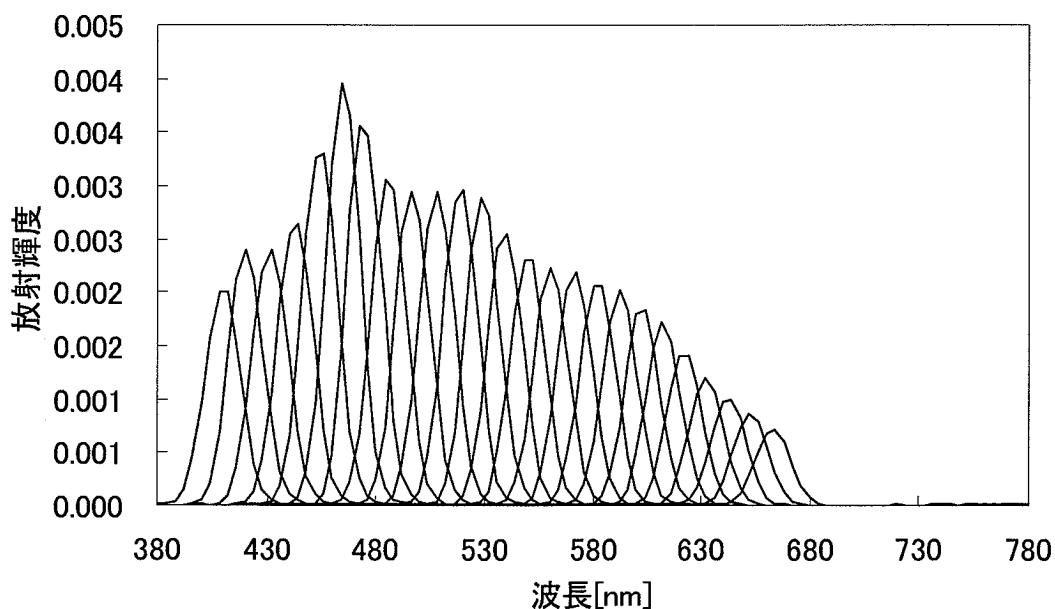


図12 分光放射輝度計で測定した分光放射輝度分布 それぞれの分光放射輝度は左からモニタの650番、左が170番である。

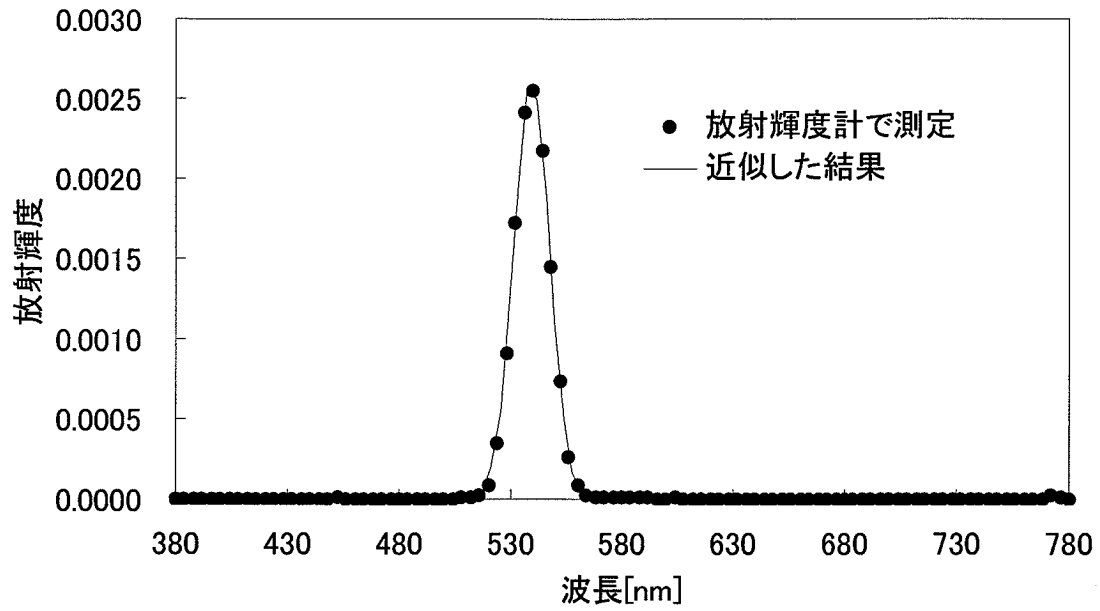


図 13 分光放射輝度計で測定した分光放射輝度分布をガウス関数で近似した結果。黒丸が放射輝度計で測定した分光放射輝度分布、実線がデータ解析ソフトを用いてガウス関数で近似した結果。

表 3 モニタの番号と波長の関係

モニタ[番]	波長[nm]
650	410
630	420
610	431
590	443
570	454
550	465
530	474
510	486
490	497
470	508
450	519
430	529
410	539
390	550
370	561
350	571
330	582
310	592
290	603
270	612
250	622
230	632
210	643
190	653
170	663

3.1.2 矩形の幅

等色実験で使用する波長について、モニタに表示する矩形の幅を決定するために、分光放射輝度計で矩形の幅を変えて呈示される単色光の色度座標を測定した。630番、570番、410番、250番を中心、幅は10、20、30、40、50、60ピクセルである。そのとき測定した分光放射輝度分布と、色度座標を図14～21に示す。実線は、色度座標におけるスペクトル軌跡である。黒丸は、中心波長における色度座標である。×印は、分光放射輝度計で測定した結果である。それぞれの測定結果と中心波長における色度座標との距離を表4～7に示す。その結果、630番の場合、最も近い幅は60ピクセルであるが、分光分布の中心波長が長波長側にずれているので、50ピクセルとした。570番は30ピクセル。410番は30ピクセル。250番は30ピクセルであった。

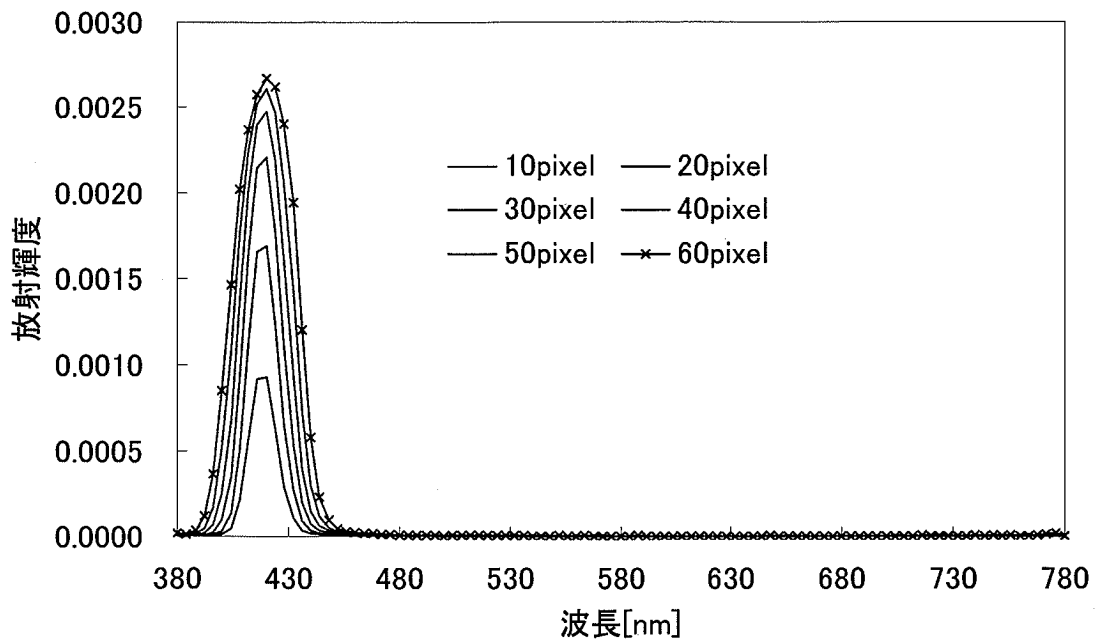


図 14 モニタの 630 番を中心として矩形の幅を変えたときの分光放射輝度分布

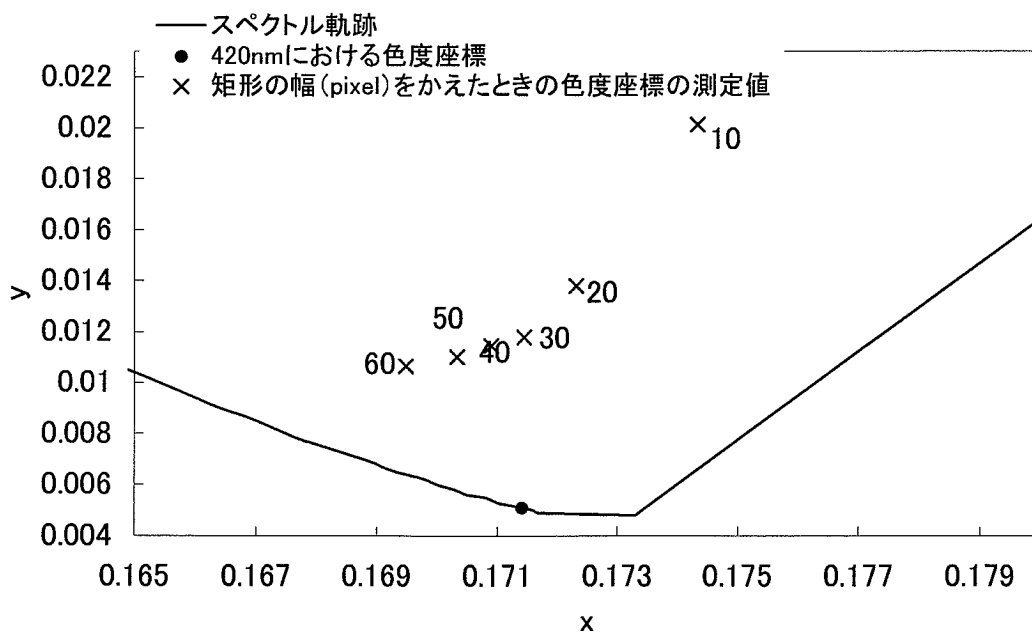


図 15 モニタの 630 番を中心として矩形の幅を変えたときの色度座標の変化 実線は xy 色度座標上のスペクトル軌跡、黒丸は 420nm における色度座標、×印は分光放射輝度計で測定した結果。

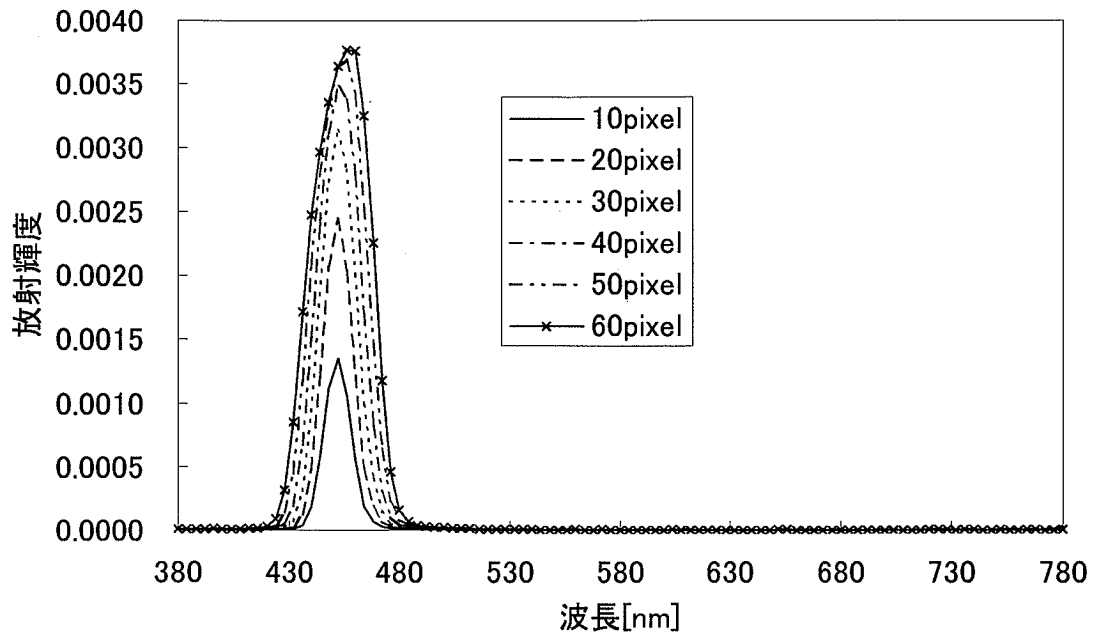


図 16 モニタの 570 番を中心として矩形の幅を変えたときの分光放射輝度分布

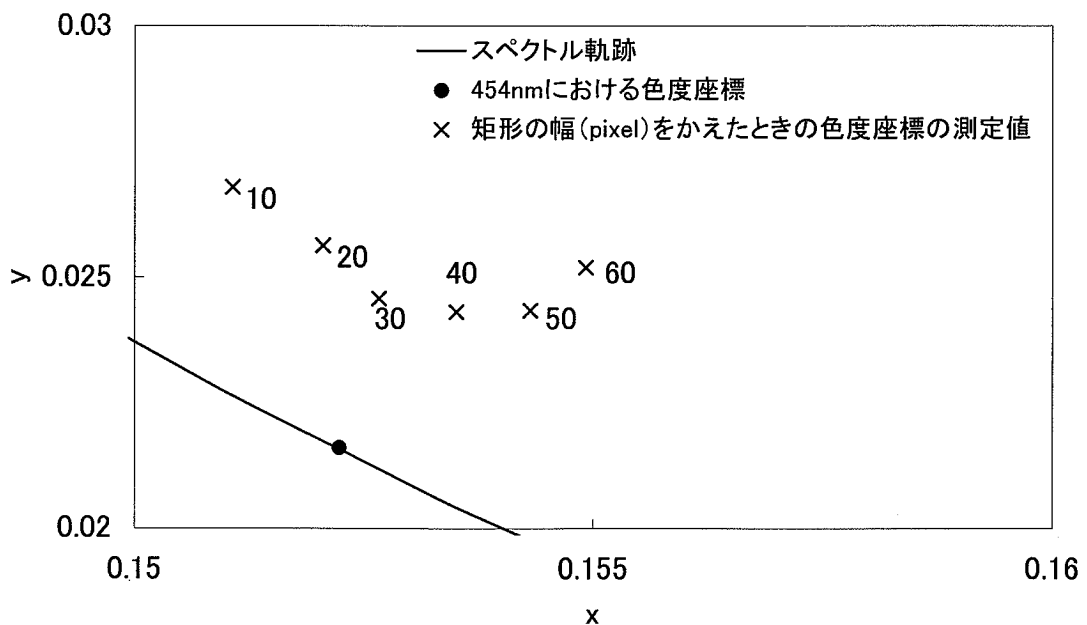


図 17 モニタの 570 番を中心として矩形の幅を変えたときの色度座標の変化 実線は xy 色度座標上のスペクトル軌跡、黒丸は 454nm における色度座標、×印は分光放射輝度計で測定した結果。

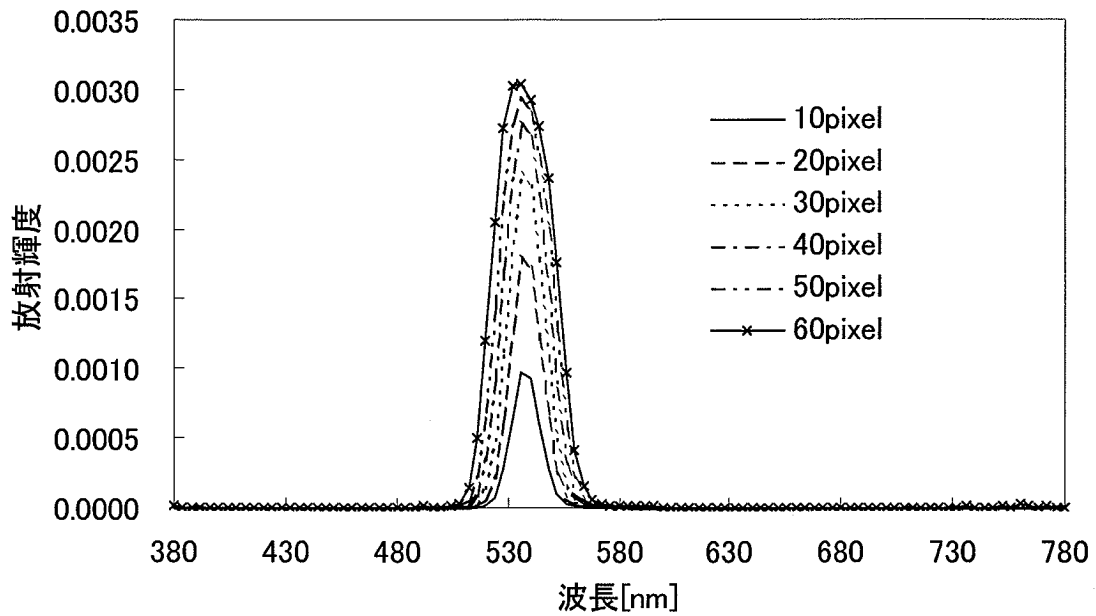


図 18 モニタの 410 番を中心として矩形の幅を変えたときの分光放射輝度分布

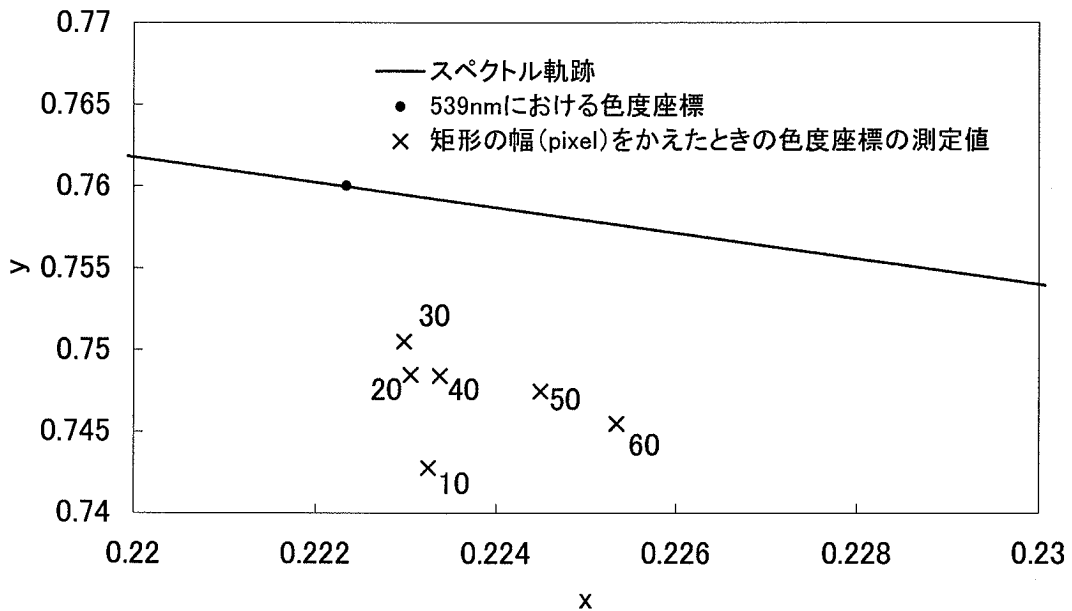


図 19 モニタの 410 番を中心として矩形の幅を変えたときの色度座標の変化 実線は xy 色度座標上のスペクトル軌跡、黒丸は 539nm における色度座標、×印は分光放射輝度計で測定した結果。

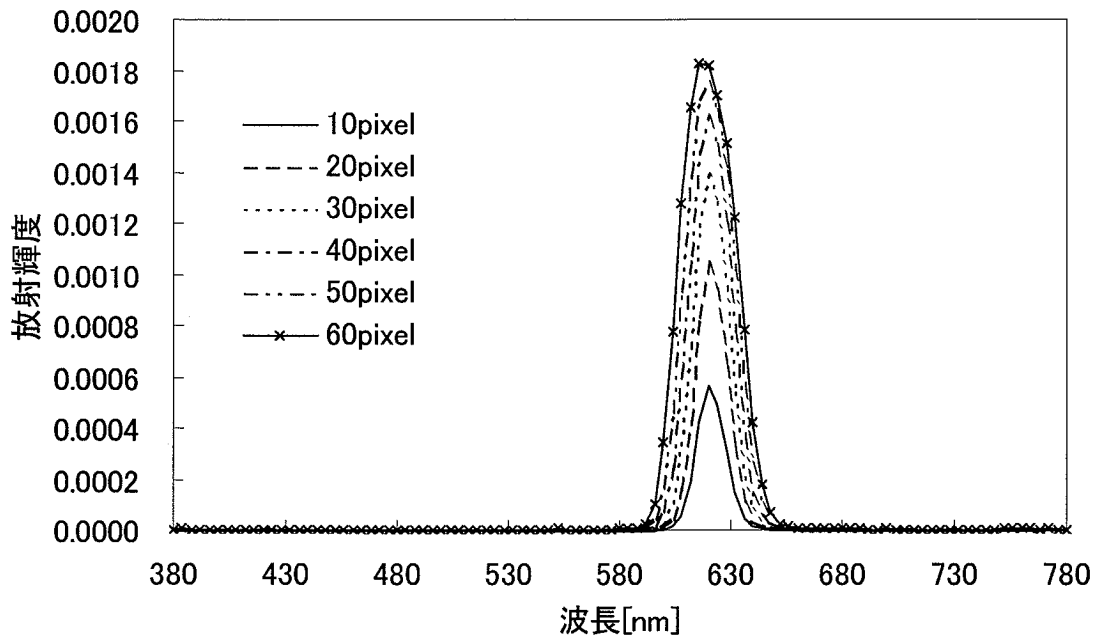


図 20 モニタの 250 番を中心として矩形の幅を変えたときの分光放射輝度分布

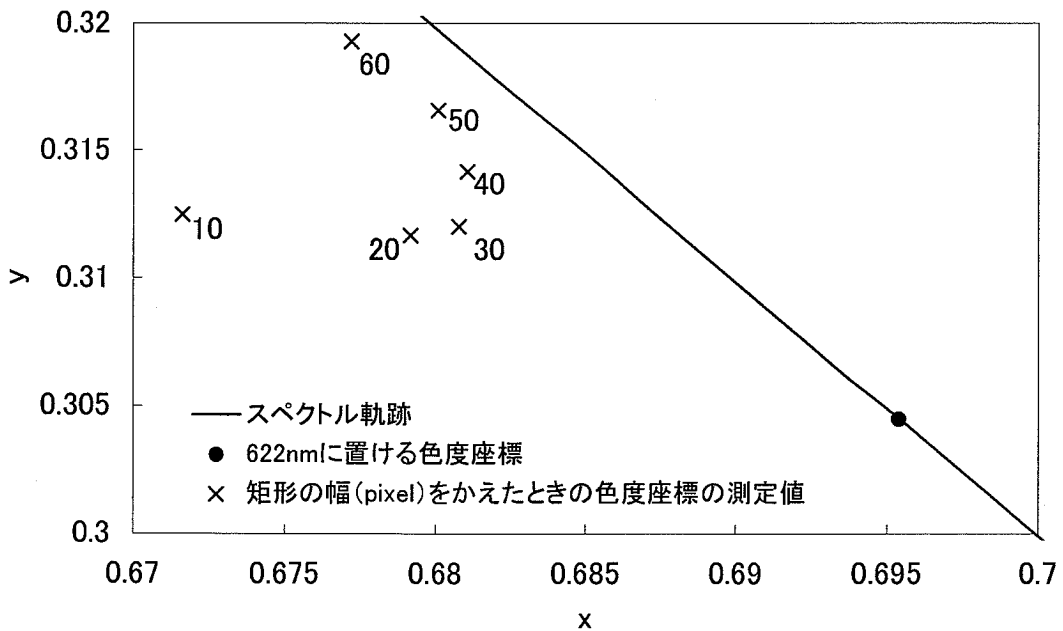


図 21 モニタの 250 番を中心として矩形の幅を変えたときの色度座標の変化 実線は xy 色度座標上のスペクトル軌跡、黒丸は 622nm における色度座標、×印は分光放射輝度計で測定した結果。

表4 モニタを630番を中心として矩形の幅を変えて測定した色度座標と中心波長における色度座標との距離

幅[pixel]	x	y	色度座標との距離
10	0.1743	0.0201	0.0153
20	0.1723	0.0138	0.0088
30	0.1714	0.0118	0.0067
40	0.1709	0.0114	0.0064
50	0.1703	0.0110	0.0060
60	0.1695	0.0106	0.0059

表5 モニタを570番を中心として矩形の幅を変えて測定した色度座標と中心波長における色度座標との距離

幅[pixel]	x	y	色度座標との距離
10	0.1549	0.0252	0.004491
20	0.1543	0.0243	0.003433
30	0.1535	0.0243	0.002988
40	0.1527	0.0246	0.002993
50	0.1520	0.0256	0.004027
60	0.1511	0.0268	0.005314

表6 モニタを410番を中心として矩形の幅を変えて測定した色度座標と中心波長における色度座標との距離

幅[pixel]	x	y	色度座標との距離
10	0.2233	0.7428	0.0173
20	0.2231	0.7484	0.0116
30	0.2230	0.7505	0.0096
40	0.2234	0.7484	0.0117
50	0.2245	0.7475	0.0127
60	0.2253	0.7454	0.0149

表7 モニタを250番を中心として矩形の幅を変えて測定した色度座標と中心波長における色度座標との距離

幅[pixel]	x	y	色度座標との距離
10	0.6716	0.3125	0.02508
20	0.6792	0.3117	0.01774
30	0.6808	0.3120	0.01644
40	0.6811	0.3142	0.01729
50	0.6801	0.3166	0.01951
60	0.6772	0.3193	0.02346

3.1.3 モニタに表示する階調と提示される色光の強度変化

次に、モニタのRGBの階調を変えて提示される光の強度変化について測定を行った。2.1.3の手順でRGBを0から765まで1段階ずつ変化させ提示される色光を放射計（DR2000EG & G社製）でセンサに流れる電流値[A]を測定した。測定した結果を図22に示す。測定した結果は、最大値を100%としている。

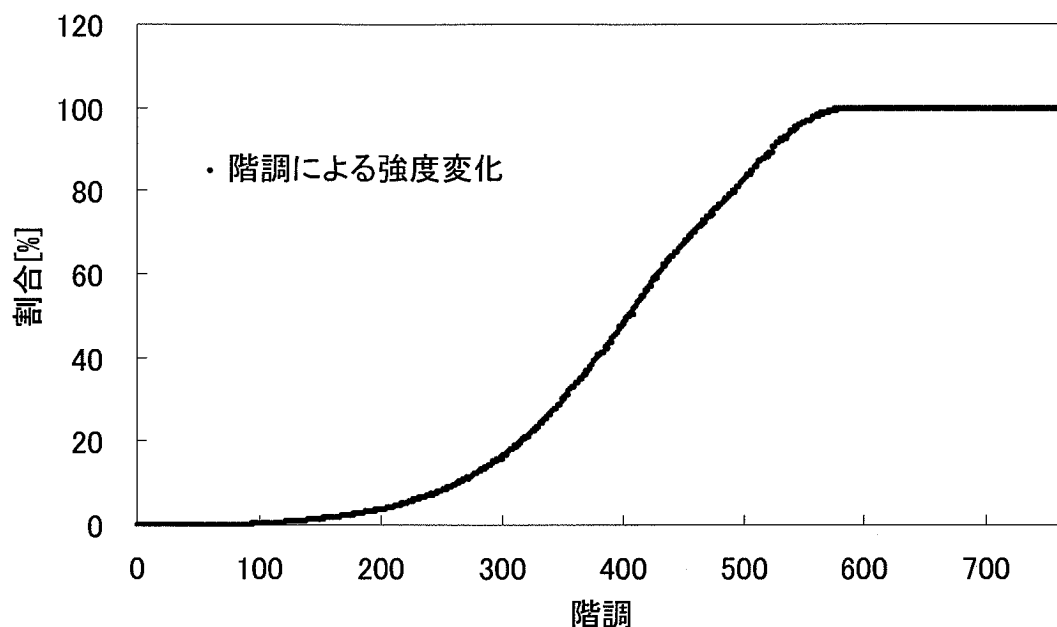


図 22 階調による色光の強度変化

3.1.4 最大網膜照度

使用する単色光の最大網膜照度を測定した。その結果の表を表8に示す。

表 8 それぞれの波長における最大網膜照度

波長[nm]	最大網膜照度[Td]
420	29.41
454	622.18
539	11368.45
622	3663.56

3.2 等色実験

キャリブレーションを完了した装置を用いて、等色実験を行った。

3.2.1 マックスウェル法による等色の加法則の検討

横軸に ν_t 、縦軸に $r_r - r_t$ 、 $g_r - g_t$ 、 $b_r - b_t$ を取り、実験結果をプロットしたグラフを図 23 に示す。シンボルの意味は図中に示したとおりである。縦棒は 95%信頼区間を表し、原点を通る直線は最小 2 乗法によりフィットした直線である。この図から、 $r_r - r_t$ 、 $g_r - g_t$ 、 $b_r - b_t$ は ν_t に比例しており、この場合加法則は成立しているといつてよいと思われる。

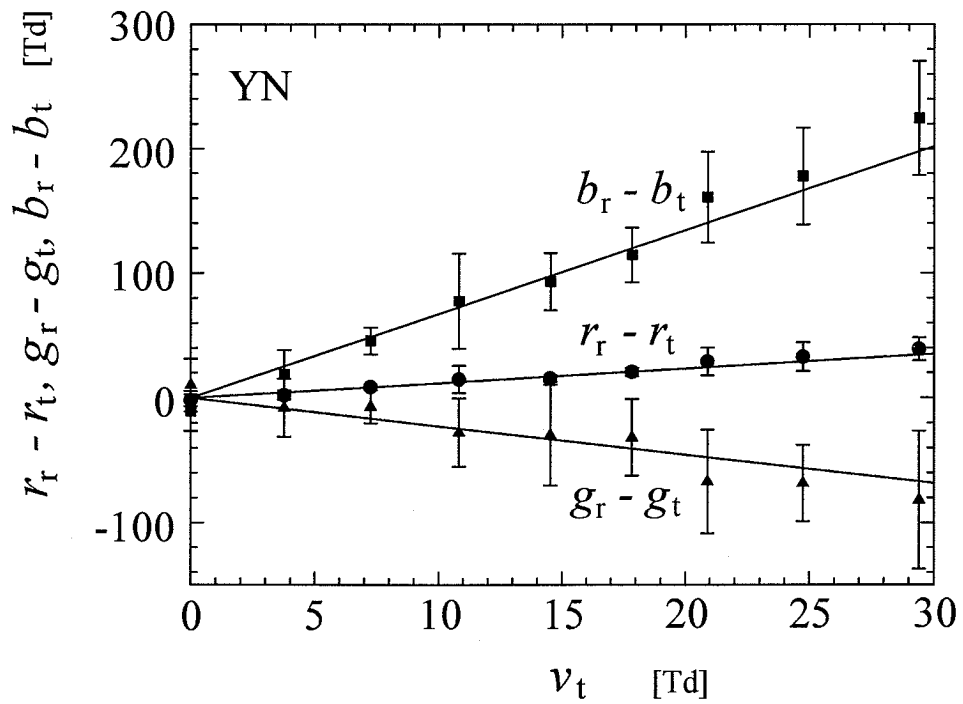


図 23 マックスウェル法による等色の加法性実験結果

3.2.2 最大彩度法による等色の比例則の検討

横軸に v_t 、縦軸に r_t 、 $-g_t$ 、 b_t を取り、実験結果をプロットしたグラフを図 24 に示す。シンボルの意味は図中に示したとおりである。縦棒は 95% 信頼区間を表し、原点を通る直線は最小 2 乗法によりフィットした直線である。この場合は、マックスウェル法と異なり、G と B に対して直線に乗らない場合があることが示された。したがって、最大彩度法を用いた場合、比例則は成立しないと考えられる。

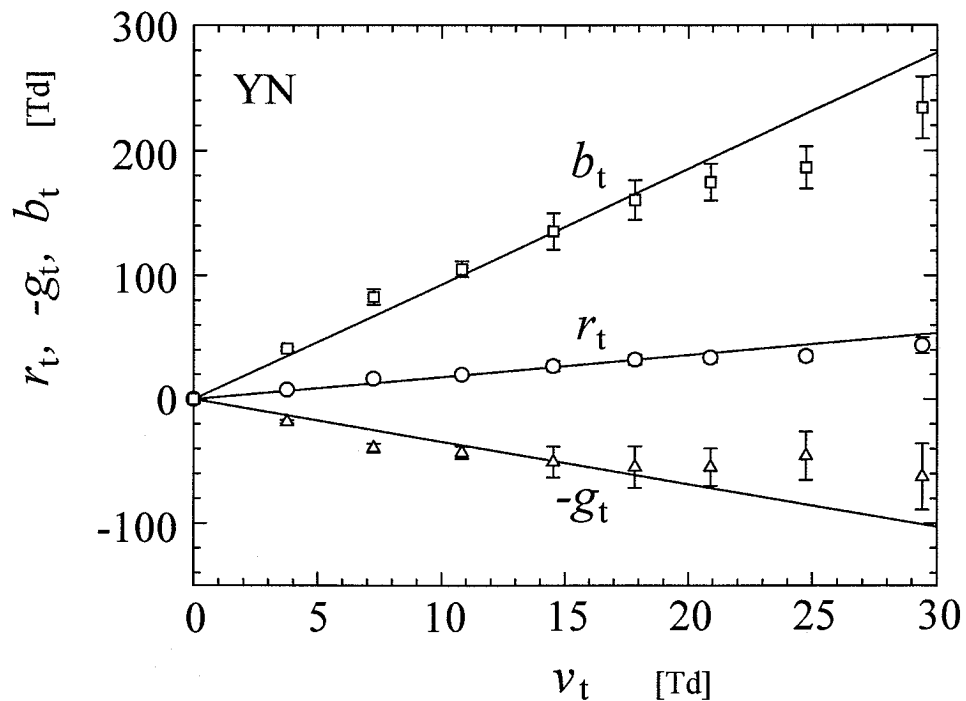


図 24 最大彩度法による等色の加法性実験結果

第四章 考察

Bの網膜照度に関してマックスウェル法と最大彩度法の結果を比較した図を図25に示す。マックスウェル法と最大彩度法による等色関数を比較した図3と比べると、図3では420nm付近でマックスウェル法の値が最大彩度法の値より大きくなっているのに対して、図25では最大彩度法の値がマックスウェル法の値より大きくなっている。しかし、図3の実験では1000Tdという非常に明るい条件で行っている。マックスウェル法は加法則が成り立つとすると v_t の増加に対して $b_r - b_t$ は線形に増加すると予測されるが、最大彩度法では比例則が成り立たず、図25からは v_t の増加に対して b_t の増加は飽和する傾向にあり、図25でもより高い網膜照度の領域ではマックスウェル法の値がより大きくなる可能性がある。マックスウェル法は常に一定の参照色刺激と等色するのにに対して、最大彩度法では色度は一定であるが v_t が増加するにしたがって等色時の色の網膜照度は増加する。こうしたことから、最大彩度法における加法則不成立の原因としては、黄斑色素の濃度の網膜照度依存性、順応による等色時の錐体活動の割合の変化などが考えられる。

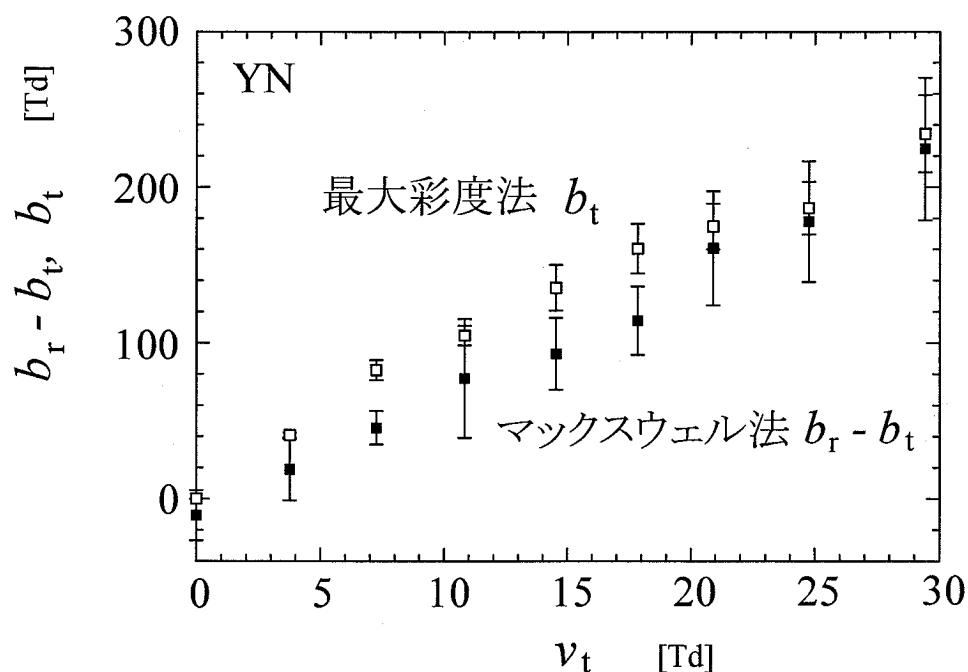


図25 マックスウェル法と最大彩度法の結果の比較

第五章 結論

DMDTMを用いて可視範囲の単色光の強度を任意に操作することにより、任意のスペクトル分布を持った色刺激を呈示できる実験装置を開発することができた。開発した装置を用いて、短波長域におけるグラスマンの法則の検証実験を行った結果、マックスウェル法ではほぼ加法則が成り立つが、最大彩度法では比例則が成り立たないという結果が得られた。

本装置では、1つの視野で2つの色光を時間的に切り替えて等色実験を行っているが、もう1光路任意スペクトル分布光を作る光路を追加し、図2のような2分視野で実験できることが望ましい。また、グラスマンの加法則検証もまだ予備実験の段階であるので、より包括的な実験が必要である。これらは今後の課題である。

謝辞

本報告をまとめるにあたり、報告者の所属する研究室のスタッフ一同（矢野卓雄教授、末原憲一郎助手、香田次郎助手）ならびに修士2年森木宏明君らの多大なご協力に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本色彩学会 (1998) 新編色彩科学ハンドブック第2版 東京大学出版会
- 2) 大田 登 (1993) 色彩工学 東京電機大学出版局
- 3) 照明学会 (1990) 光の計測マニュアル 日本理工出版会
- 4) 内川恵二 (1998) 色覚のメカニズム 朝倉書店
- 5) 池田光男 (1980) 色彩工学の基礎 朝倉書店
- 6) 池田光男 (1975) 視覚の心理物理学 森北出版
- 7) 矢口博久 “等色実験に基づく色覚モデルの検証” 第4回色彩工学コンファレンス論文集 pp87-94 (1987)
- 8) Trezona, P. W. “Additivity of Color Equations” Proc. Phys. Soc. (London) B66, 548 (1953)
- 9) Thornton, W. A. “Toward a more accurate and extensible colorimetry Part1 Introduction. The visual colorimeter-spectroradiometer. Experimental results.” Col Res Appl 17:79-122 (1992)
- 10) Larry J. Hornbeck “Digital Light ProcessingTM for High-Brightness, High-Resolution Applications” Electronic Imaging, EI '97 Projection Displays III Co-Sponsored by IS&T and SPIE An Invited Paper 10-12 February 1997 San Jose, California USA
- 11) Thornton, W. A. “Spectral Sensitivities of the Normal Human Visual System, Color-Matching Functions and Their Principles, and How and Why the Two Sets Should Coincide” Col Res Appl 24:139-156 (1999)
- 12) 山田欣次 広島市立大学情報科学部情報機械システム工学科卒業論文 “明るさ/輝度比測定のための任意色刺激呈示装置の開発” (1998)

付録

実験機器リスト

表9 使用機器リスト

品名	メーカー	形式
コンピュータ	株式会社ミウラ	MPC-P1000
ビデオボード	Matrox	G200 MMS/QUADP/DV
光源		
キセノンランプ	Pneum	XL300
プレート	駿河精機	A65-1
ラボジャッキ	駿河精機	B-35
熱線吸収ガラス	エドモントサイエンティフィックジャパン	BJ43893
可変式スリット	エドモントサイエンティフィックジャパン	BJ40488
ねじ山変換アダプター	エドモントサイエンティフィックジャパン	BEJ0021
DLP プロジェクター	PLUS	U3-880
高さ調整プラットホーム	駿河精機	A61-50
ラボジャッキ	駿河精機	B-35
回折格子		020-050-250
フィルターホルダー	エドモントサイエンティフィックジャパン	BJ54996N
回転ステージ	エドモントサイエンティフィックジャパン	BJ55029N
ベースプレート	駿河精機	A21-4
拡散透過板	エドモントサイエンティフィックジャパン	BJ53871
ピンホール	駿河精機	F70