

## 論文

 $u'v'$ 色度図全域における色光の色相および飽和度Hue and Saturation of Colored Lights in the Whole Area of the  $u'v'$  Chromaticity Diagram

阿山みよし      Miyoshi Ayama      Utsunomiya University  
池田 光男      Mitsuo Ikeda      Kyoto University

## Abstract

Hue and saturation of 195 colored lights equally sampled from the whole area of the CIE 1976 ( $u'$ ,  $v'$ )-chromaticity diagram were measured using color naming method for four color normal observers. The contours of the constant saturation curves extend along the direction connecting the white and the shortwavelength edge of the spectral locus for all the observers. Individual differences of unique blue and yellow loci were smaller than those of unique red and green loci. Nonuniformity of the  $u'v'$  chromaticity diagram, individual differences of unique hue loci, relation to physiological findings, an estimation of the wavelength discrimination curve, and the comparison with Kelly's color designations were discussed.

## 要 旨

CIE 1976 ( $u'$ ,  $v'$ ) 色度図全域にほぼ均等に分布する195個のテスト光に対して、4名の色覚正常の被験者において、カラーネーミング法を用いて色相と飽和度を測定した。色度図上の等飽和度曲線の形状は被験者により異なったが、共通して白とスペクトル軌跡の短波長端を結ぶ方向に張り出す特徴を示した。等色相線については、ユニーク黄・青軌跡がユニーク赤・緑軌跡よりも個人差が小さい特性が目立った。 $u'v'$ 色度図の不均等性、ユニーク色軌跡の個人差、生理学的研究知見との関係、波長弁別曲線の推定、及びKellyの色領域との比較等について検討した。

## 1. はじめに

ある測色的特性を持つ色刺激が実際にどのような色の見え方をするのか。これは色彩関連分野の研究者や技術開発者が常に考える問題である。光源、発光素子、CRTディスプレイ、色フィルター、各種のコーティング等を開発する際に設計段階で計算するのは一般的にはXYZ表色系の値であり、その測色値から製品の色の見えを予測したいからである。このような実際的な要望は以前からあり、色の見えが測色値によって完全に決定されるのであればその対応関係はすでに確立されていたであろう。しかしながら多くの心理物理学研究により、色の見えは色度が一定でも、視野サイズ<sup>1)</sup>、呈示持続時間<sup>2)~4)</sup>、呈示網膜位置<sup>5)6)</sup>、明るさレベル<sup>3)7)8)</sup>、色順応<sup>9)</sup>、また「光源色」「表面色」に代表される見えのモード<sup>10)</sup>など種々の要因により変化することが明らかにされている。すなわち測色値と色の見えは1対1に対応するものではないことが、数多くの綿密な実験結果に基づいて示されているのである。ある測定条件下で色度座標と色の見えの詳細な対応づけをしても、測定条件を1つでも変えた場合には色の見えは変化してしまう。これではそのような対応づけを行ってもあまり意味がない。色度図上の領域とその色の見え方に関する研究が殆ど行われなかったのはこのようなことに起因するのかもしれない。しかし初めに述べたように色彩工学の広い分野において、色度座標と色の見え方の対応図は参考値としてでも望まれているのが現状である。

色度図上の領域とその色の見えの対応に関する研究は少数ではあるが報告されている。Kelly<sup>11)</sup>による研究は広く引用されており、我が国ではJISZ8110「光源色の色名」の参考図「系統色名の一般的な色度区分」の基になっている。しかし彼の研究はその直前に完成した表面色の色体系であるマンセル表色系とCIE1931 ( $x, y$ ) 色度図 (以後 $xy$ 色度図と呼ぶ) との対応表<sup>12)</sup>に基づいている。色度図上におけるマンセル表色系の等色相線とその滑らかな延長線により色領域の境界線を引き、それらが色光にも適用できるとしたものである。2名の被験者により色度図全域で実験的に検証したとあるが、用いられた刺激の視野サイズ、輝度、色度等の実験条件が明記されていない。

色度図全域にわたる色光の色の見えに関係する比較的新しいデータとしては、Ayamaら<sup>13)</sup>による色度図上のユニーク色および均衡色軌跡を3段階の網膜照度において測定した結果がある。またユニーク色軌跡

についてはBurnsら<sup>14)</sup>及びIkeda and Uehira<sup>15)</sup>の研究もある。しかしこれらの研究では色相に関するデータだけを示しており、飽和度も含めた色の見えを表現している実験的結果ではない。また高瀬ら<sup>6)</sup>は中心窩と周辺網膜において色度図全域における色の見えを測定したが、1名の被験者の結果でありそれを一般的なデータとして採用するのは難しい。最近の報告では内川ら<sup>16)17)</sup>による開口色と表面色モードにおけるカテゴリカル色名領域の測定がある。しかしCRTや色票を用いているために限定された色度範囲での領域分割である。すなわち、色度図全域における色光の色の見えを、複数の被験者に対して系統的な心理物理学実験により測定した研究結果は報告されていない。

そこで本研究では、1つの測定条件下ではあるが、精度の高い心理物理学実験に基づいて色度座標と色の見えの対応図を作成することを目的に、色度図全域に分布する195個の色光について、4名の被験者に対して、カラーネーミング法を用いてそれらの色光の色の見えを測定した。

## 2. 実験

### 2.1. カラーネーミング

本研究ではBoyntonら<sup>5)8)</sup>により考案されたカラーネーミング法をやや修正した手法により色の見えを測定した。測定方法の説明の前に本手法での色相評価の基となっている反対色について簡単に説明しておく。我々の色覚において、赤、黄、緑、青の4色は各々それ以上分解できない純粋な色感覚を生起させる色であり、ユニーク色と呼ばれている。これ以外の色、例えば橙色は赤みと黄みがあると言えるし、また青緑は青みと緑みが感じられる色と表現できる。すなわちすべての色は、単一のユニーク色として、または複数のユニーク色が共存する色として表現することができる。このようにユニーク色を用いて色相を表現しようとする時、どんな色に対しても「赤みと緑みがある」または「黄みと青みがある」という表現は出てこない。4つのユニーク色の内、「赤と緑」および「黄と青」は一つの色刺激に共存することのない色であることが知られている。色覚理論では、これらは各々何らかの拮抗過程を経て知覚される色の対であると考えられており、反対色と呼ばれている。それらの拮抗過程を赤-緑および黄-青反対色過程という。

本研究で用いたカラーネーミング法の第1段階は、図1の左に示すように色刺激における有彩色成分と無

彩色成分の比を主観評価する。各々の成分比を全体を10として配分するよう指示するが、用いる単位は任意である。無彩色成分が10の場合はここで終わりである。有彩色成分がある場合には第2段階に進み、図1の右に示すようにその色相を評価する。すなわち4つのユニーク色から2つまでを用い、知覚されるそれらの含有比を有彩色成分全体を10として主観評価する。ここでも配分比の単位は任意である。比率の大きい方を第1ユニーク色、小さい方を第2ユニーク色と呼ぶことにする。全体のカラーネーミング応答としては、例えば「無彩色3, 有彩色7, 赤3.5, 黄6.5」となる。この場合第1ユニーク色は黄で第2ユニーク色は赤である。この方法により色刺激の飽和度および色相を定量的に表すことができる。本研究のカラーネーミング法とほぼ同様の評価法を用いてスペクトル光の色の見えを測定した研究が報告されている<sup>10)</sup>。

## 2.2. 刺激

刺激は中心窩に呈示された。前述したように色の見えは明るさにより変化するので、テスト光の明るさをそろえた条件において測定するのが望ましい。そこで刺激視野としては直径2°の円形2分視野を用い、左半分を色光が呈示されるテスト視野、右半分を一定の明るさに設定する為の白色参照視野とした。白色参照光の色度座標( $x, y$ )は(0.34, 0.38)、網膜照度は120td(赤紫線に最も近い18点は60td)で、刺激視野の周囲は暗黒であった。テスト光としてはCIE1976( $u', v'$ )色度図(以後本研究では $u'v'$ 色度図と呼ぶ)上でほぼ均等に分布する色度座標を有する195個の色光を採用した。そのうち単色光は26個であった。テスト光の $u'v'$ 色度座標値を表1の各枠の第1及び第2列に、その $u'v'$ 色度図上の位置を図2に示す。

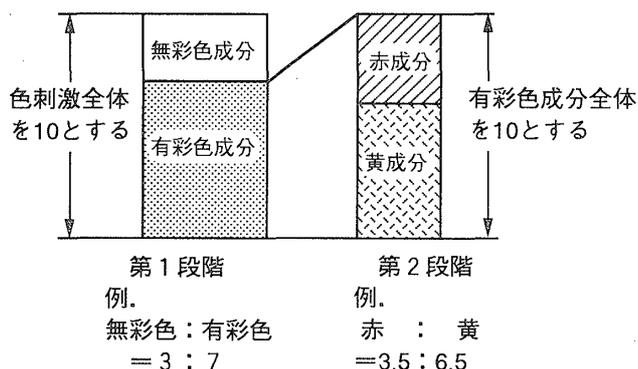


図1 カラーネーミング法の原理

## 2.3. 装置

実験装置としては500Wキセノンランプを光源とする3光路マックスウェル視光学系を用いた。装置の概略を図3に示す。3光路のうち1光路は白色参照光用で、あとの2光路はテスト光用である。この2光路には各々モノクロメータ(図3のMM1とMM2)と光学濃度ウエッジ(W1とW2)があり、それぞれの光路における単色光( $\lambda_s$ と $\lambda_t$ とする)の波長と強度を自由に調節できた。テスト色光はこの2光路の光を重ねた光路で作られ、 $\lambda_s$ と $\lambda_t$ の波長および混色比を変えることにより、任意の色度座標の色光を実現することができた。単色光をテスト色光とする場合はどちらか一方の光路のみを用いた。 $\lambda_s$ と $\lambda_t$ を重ねた後の光路にも光学濃度ウエッジ(W3)があり、これを用いて $\lambda_s$ と $\lambda_t$ の混色比をほぼ一定に保ちつつ、すなわち色度座標一定の状態では、テスト色光全体の強度を調節できた。このような装置により、任意の色度座標の色光を作りそれを一定輝度の白色光と等しい明るさに設定することが可能となった。

## 2.4. 実験手順

各セッションの初めに被験者は約10分間暗順応した。その後被験者は装置の最前面に取り付けられた歯型を噛んで頭部を固定し実験を行った。まず実験者が、テスト色光が目的の色度座標となるよう $\lambda_s$ と $\lambda_t$ の波長及びW1とW2を所定の値に設定した。次に被験者がW3を調整して、テスト視野の明るさを参照視野の明る

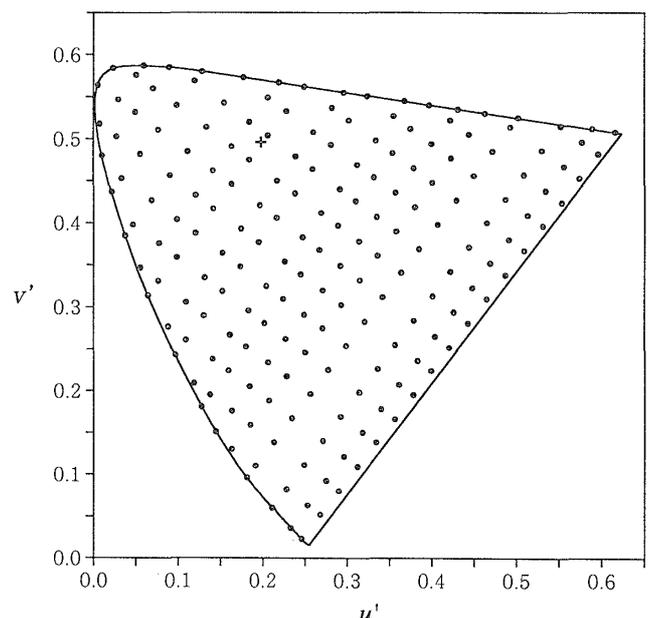


図2 テスト色光の $u'v'$ 色度図上の色度座標。+は参照白色光の色度座標

表1 テスト色光の $u'$  $v'$ 色度座標と4名の被験者の平均値に基づくカラーネーミング応答。\*は単色光, #はスペクトル軌跡に近い色度座標のテスト光を示す

$u'$	$v'$	color naming									
0.25	0.02	7.4R0.3B9.7*	0.51	0.46	7.4R9.0Y1.0	0.13	0.18	6.9G0.3B9.7*	0.06	0.31	6.4G2.1B7.9*
0.27	0.05	6.6R3.2B6.8	0.53	0.49	7.8R8.3Y1.7	0.14	0.19	6.7G0.4B9.6	0.08	0.33	6.0G2.6B7.4
0.29	0.08	6.5R5.0B5.0	0.55	0.51	8.2R7.2Y2.8#	0.16	0.22	5.9R0.1B9.9	0.10	0.36	5.3G3.1B6.9
0.31	0.11	6.9R6.1B3.9	0.18	0.10	7.4G0.5B9.5*	0.18	0.25	5.4R1.7B8.3	0.12	0.39	4.6G2.8B7.2
0.33	0.14	7.3R6.7B3.3	0.19	0.11	6.9R0.5B9.5	0.20	0.28	5.1R3.6B6.4	0.14	0.42	3.5G3.0B7.0
0.36	0.17	7.6R6.9B3.1	0.21	0.14	6.3R2.8B7.2	0.22	0.31	4.7R4.9B5.1	0.16	0.45	2.8G4.1B5.9
0.38	0.20	7.7R7.2B2.8	0.23	0.17	5.6R4.3B5.7	0.25	0.34	4.5R5.4B4.6	0.18	0.47	1.9G9.0B1.0
0.40	0.22	7.8R7.7B2.3	0.26	0.20	5.5R5.3B4.7	0.27	0.37	4.7R6.6B3.4	0.21	0.50	3.3G2.1Y7.9
0.42	0.25	8.0R8.1B1.9	0.28	0.22	5.6R5.9B4.1	0.29	0.40	4.6R7.7B2.3	0.23	0.53	5.9G0.5Y9.5
0.44	0.28	8.2R8.2B1.8	0.30	0.25	5.8R6.3B3.7	0.31	0.43	5.2R9.3B0.7	0.25	0.56	7.3G0.2Y9.8#
0.47	0.31	8.3R8.3B1.7	0.32	0.28	6.1R6.9B3.1	0.33	0.45	5.5R7.7Y2.3	0.05	0.35	6.3G3.2B6.8#
0.49	0.34	8.2R8.4B1.6	0.34	0.31	6.1R7.4B2.6	0.35	0.48	6.2R5.5Y4.5	0.08	0.38	5.6G3.6B6.4
0.51	0.37	7.6R8.6B1.4	0.36	0.34	6.3R8.0B2.0	0.38	0.51	7.0R5.1Y4.9	0.10	0.40	5.2G3.9B6.1
0.53	0.40	8.4R8.9B1.1	0.38	0.37	6.3R8.5B1.5	0.40	0.54	7.5R4.4Y5.6*	0.12	0.43	4.4G5.5B4.5
0.55	0.42	8.6R9.3B0.7	0.41	0.40	6.2R9.7B0.3	0.12	0.21	6.9G0.6B9.4#	0.14	0.46	3.9G7.6B2.4
0.57	0.45	8.7R9.9B0.1	0.43	0.43	6.6R8.9Y1.1	0.14	0.24	6.1G0.5B9.5	0.16	0.49	3.4G8.6Y1.4
0.60	0.48	8.7R9.7Y0.3	0.45	0.46	7.1R8.1Y1.9	0.16	0.27	5.3R0.8B9.2	0.18	0.52	4.3G5.0Y5.0
0.62	0.51	9.0R9.6Y0.4*	0.47	0.49	7.2R7.4Y2.6	0.18	0.30	4.8R2.4B7.6	0.21	0.55	6.0G2.5Y7.5
0.23	0.04	7.4G0.1B9.9*	0.49	0.51	7.6R6.5Y3.5	0.20	0.32	4.5R3.6B6.4	0.22	0.57	6.9G2.0Y8.0*
0.25	0.06	6.2R2.5B7.5	0.50	0.52	8.0R6.4Y3.6*	0.23	0.35	4.3R4.4B5.6	0.04	0.38	6.4G5.3B4.7*
0.28	0.09	5.9R4.3B5.7	0.16	0.13	7.3G0.4B9.6#	0.25	0.38	4.2R6.0B4.0	0.05	0.40	6.2G5.5B4.5
0.30	0.12	6.2R5.6B4.4	0.19	0.16	6.5R1.2B8.8	0.27	0.41	4.2R7.2B2.8	0.07	0.43	5.8G6.7B3.3
0.32	0.15	6.7R6.5B3.5	0.21	0.19	5.7R3.1B6.9	0.29	0.44	4.8R9.4Y0.6	0.09	0.46	5.2G8.0B2.0
0.34	0.18	7.0R7.1B2.9	0.23	0.22	5.4R4.4B5.6	0.31	0.47	5.4R6.3Y3.7	0.11	0.49	4.9G9.6B0.4
0.36	0.21	7.2R7.0B3.0	0.25	0.25	5.2R5.1B4.9	0.33	0.50	6.3R4.3Y5.7	0.13	0.51	5.2G7.4Y2.6
0.38	0.24	7.1R7.7B2.3	0.27	0.28	5.3R5.8B4.2	0.35	0.53	7.1R4.3Y5.7	0.15	0.54	5.9G6.4Y3.6
0.40	0.27	7.3R7.9B2.1	0.29	0.30	5.5R6.6B3.4	0.37	0.55	7.6R3.5Y6.5*	0.18	0.57	6.6G4.7Y5.3*
0.43	0.29	7.5R8.2B1.8	0.31	0.33	5.4R7.3B2.7	0.10	0.24	6.8G0.9B9.1*	0.02	0.44	6.4G7.7B2.3*
0.45	0.32	7.3R8.3B1.7	0.34	0.36	5.6R7.9B2.1	0.11	0.26	6.4G1.0B9.0	0.03	0.45	6.1G8.6B1.4
0.47	0.35	7.6R8.3B1.7	0.36	0.39	6.0R9.0B1.0	0.13	0.29	5.5G0.8B9.2	0.05	0.48	6.0G9.5Y0.5
0.49	0.38	7.6R8.9B1.1	0.38	0.42	6.0R8.7Y1.3	0.15	0.32	4.5B10	0.08	0.51	5.8G8.8Y1.2
0.51	0.41	7.7R9.4B0.6	0.40	0.45	6.4R7.3Y2.7	0.17	0.35	4.0R1.7B8.3	0.10	0.54	6.2G7.3Y2.7
0.53	0.44	7.9R9.9B0.1	0.42	0.48	6.9R6.6Y3.4	0.19	0.38	3.7R3.1B6.9	0.12	0.57	6.7G7.0Y3.0
0.56	0.47	8.1R9.6Y0.4	0.44	0.50	7.2R6.2Y3.8	0.22	0.41	3.0R4.9B5.1	0.13	0.58	6.6G6.4Y3.6*
0.58	0.50	8.4R9.0Y1.0	0.46	0.53	7.8R5.6Y4.4*	0.24	0.44	3.0R6.8B3.2	0.01	0.48	6.4G9.7B0.3*
0.59	0.51	8.5R8.2Y1.8*	0.14	0.15	7.1G0.2B9.8*	0.26	0.46	3.9R8.1Y1.9	0.03	0.50	6.6G8.6Y1.4
0.21	0.06	7.3G0.4B9.6*	0.16	0.18	6.6R0.1B9.9	0.28	0.49	5.3R4.7Y5.3	0.05	0.53	6.7G8.1Y1.9
0.23	0.08	6.4R1.9B8.1	0.18	0.20	5.7R1.5B8.5	0.30	0.52	6.6R2.8Y7.2	0.07	0.56	6.7G7.3Y2.7
0.25	0.11	6.0R4.0B6.0	0.21	0.23	5.3R3.2B6.8	0.32	0.55	7.6R2.3Y7.7#	0.09	0.58	6.8G6.9Y3.1*
0.27	0.14	6.0R5.2B4.8	0.23	0.26	5.2R4.4B5.6	0.09	0.28	6.7G1.4B8.6#	0.01	0.52	6.6G8.8Y1.2#
0.29	0.17	6.2R5.9B4.1	0.25	0.29	5.0R5.6B4.4	0.11	0.31	5.9G1.5B7.5	0.03	0.55	6.8G7.9Y2.1
0.31	0.20	6.4R6.4B3.6	0.27	0.32	5.0R6.3B3.7	0.13	0.34	4.9G1.5B8.5	0.05	0.58	6.7G7.3Y2.7
0.34	0.23	6.5R6.7B3.3	0.29	0.35	5.0R6.7B3.3	0.15	0.36	4.0G0.6B9.4	0.06	0.59	6.9G7.1Y2.9*
0.36	0.25	6.6R7.3B2.7	0.31	0.38	5.1R7.6B2.4	0.17	0.39	2.9R1.0B9.0	0.01	0.56	7.0G8.1Y1.9*
0.38	0.28	6.8R7.3B2.7	0.34	0.41	5.6R9.5B0.5	0.20	0.42	1.7R3.2B6.8	0.02	0.58	7.0G7.6Y2.4*
0.40	0.31	6.9R7.9B2.1	0.36	0.44	5.6R8.0Y2.0	0.22	0.45	2.0R6.2B3.8			
0.42	0.34	6.8R8.4B1.6	0.38	0.47	6.1R6.3Y3.7	0.24	0.48	3.3R5.8Y4.2			
0.44	0.37	6.9R8.7B1.3	0.40	0.49	6.8R5.8Y4.2	0.26	0.51	5.5R3.6Y6.4			
0.47	0.40	7.1R9.5B0.5	0.42	0.52	7.4R5.5Y4.5	0.28	0.54	6.8R1.4Y8.6			
0.49	0.43	7.3R9.8Y0.2	0.43	0.54	7.6R5.0Y5.0*	0.30	0.56	7.5R1.0Y9.0*			

さにマッチングする操作を1回行った。実験者によるW1とW2の微調整後、被験者は同様の明るさマッチングを4回行い、実験者はその平均値にW3を設定した。このようにして120tdの白色参照光と等しい明るさに設定されたテスト色光に対して、被験者は2.1で述べたカラーネーミングを1回行った。この間刺激視野は連続的に呈示されていた。全ての被験者において、4回の明るさマッチングは約1分で終了し、その直後にカラーネーミングを行った。

1つのテスト色光の測定が終了すると被験者は視野から目を離して2~3分暗順応した。1セッションで約20個の異なるテスト色光について測定し、実験全体では各テスト色光について3回ずつの測定となるようにした。1セッションで行うテスト色光の選択や呈示の順番はランダムであった。

## 2.5. 被験者

被験者は色覚正常の男性、KO, LS, TT, MTの4名で、全員が心理物理学実験の十分な経験を有する。KOとTTは20代前半、LSは30代前半、MTは40代後半で、LS以外は日本人である。LSは米国籍の白人で、指示および応答はすべて英語で行った。

## 2.6. 較正

3つの光学濃度ウエッジW1~W3の回転角度-光学濃度、 $\lambda_s$ と $\lambda_l$ の分光放射照度、白色参照光の網膜照度と色度座標はEG&G社製のmodel550 Spectroradio/photometer systemを用いて測定した。この測光器はTHE EPPLEY LAB社のEPT・1223の標準光源Aでその分光感度特性を較正したものである。モノクロメータはその理論的半

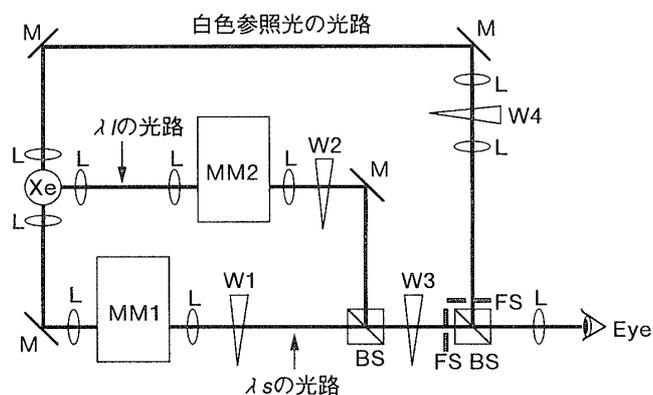


図3 実験装置図。BS:ビームスプリッター, FS:視野絞り, L:レンズ, M:ミラー, MM1・MM2:モノクロメータ, W1~W4:光学濃度ウエッジ, Xe:キセノン光源

値幅を3nmに設定し、その波長は水銀ランプの546.1nmと435.8nmの輝線により較正した。

白色光の網膜照度は以下の方法で測定した。被験者の眼に入射する光束が測光器の受光面をカバーする大きさに広がった位置での照度を $Klx$ とし、マックスウェリアン・レンズの焦点面から受光面までの距離を $Dm$ とした時に網膜照度 $eTd$ は次式で与えられる<sup>19)</sup>。

$$e = 10^6 \cdot K \cdot D^2 \quad (1)$$

そこで $K$ と $D$ を測定し $e$ を得た。

テスト光の $u'v'$ 色度座標値は $\lambda_s$ と $\lambda_l$ のエネルギー比から計算したものである。そのため $\lambda_s$ と $\lambda_l$ 用の光路の相対分光エネルギー分布(便宜的に両光路とも550nmを基準とした)及び白色参照光の網膜照度は、実験を行う日は最低1回測定した。実験期間全体を通して約80回の測定において、 $\lambda_s$ と $\lambda_l$ 用の光路の550nmの放射照度比の標準偏差は1.3%、白色参照光の網膜照度の標準偏差は6.3%であった。毎回その日の測光値と各被験者の明るさマッチングにおけるW1, W2, W3の設定値を用いて色度座標を計算した。応答3回の平均 $u'v'$ 色度座標値と設定値(図2および表1参照)との差は被験者TTの1点における $\Delta u' = 0.01$ ,  $\Delta v' = 0.02$ が最大で、他は全て0.01以下であった。W1, W2, W3の回転角・光学濃度の較正は、採用した $\lambda_s$ と $\lambda_l$ すべてについて、実験期間の初期と後期に行った。その変動の最大値は光学濃度で0.03であった。

## 3. 結果

各テスト色光について3回の応答の平均値を以てその点の値とした。1回の応答に「赤2, 緑8」というような反対色を組み合わせた色相応答はなかった。しかし3回の応答の内、第2ユニーク色に反対色が現れることはあった。その時はBoyntonら<sup>5)B)</sup>により提唱された方法で処理した。彼らの方法は反対色理論に基づいたものである。例えば「赤9, 黄1」, 「赤9, 青1」, 「赤8.5, 黄1.5」となったとする。つまり第2ユニーク色に「黄」と「青」が出現した場合「黄と青」は反対色なので一つの色刺激に共存することはない。そこで黄の評価値の合計(1+1.5)から青の評価値の合計1を差し引いて黄の評価値合計を1.5(=2.5-1)とし、それを3で割った値0.5を黄色の評価値とする。全体を10として比率を評価しているので10-0.5=9.5が赤の評価値となる。第1ユニーク色が黄または青で、3回の応答のうち第2ユニーク色として赤と緑の両方が応答された場合も同様に処理した。

4名の被験者のカラーネーミングの結果から色度図上に等飽和度曲線と等色相線を描くことにする。滑らかな曲線を描くために、ローデータにおける微小な局所変動やばらつきを移動平均法による平滑処理（測定点の重みを1/2、隣り合う4点を各1/8とする。隣り合う点が3点の時は測定点をはさむ2点を用い、重みを各1/4とする）により除去した。4名の被験者について等飽和度曲線とユニーク色および均衡色（例えば赤と黄のちょうど中間の色相）軌跡を描いたのが図4(a)~(d)である。

等飽和度曲線は有彩色成分が等しい点を結ぶことにより描いた。被験者間で曲線の形状が異なるが、1) 参照白色光の近傍で小さい値となり、スペクトル軌跡および赤紫線に近づくにつれて有彩色成分の評価値が

増加していること、2) 曲線群全体として $v'$ 軸に沿った方向すなわち白から青の方向に張り出していること、の2点が共通した特性である。色度図全域における色光の飽和度を測定した研究はUchikawaら<sup>20)</sup>により報告されているが、彼らの研究の2名の被験者の結果にも同様の特性が見られている。

ユニーク色軌跡は、色相応答が単一ユニーク色になる点または第2ユニーク色が反対色へ変化する点を結ぶことにより得た。均衡色については、2つのユニーク色応答の比が等しい点または第1と第2ユニーク色が逆転する点を結んで得た。これらは一つの点ではなくある範囲に広がることがあったが、その場合にはその範囲のほぼ中央の点を結んだ。いずれの被験者のいずれの色相においても飛び地が生じることはなく、連

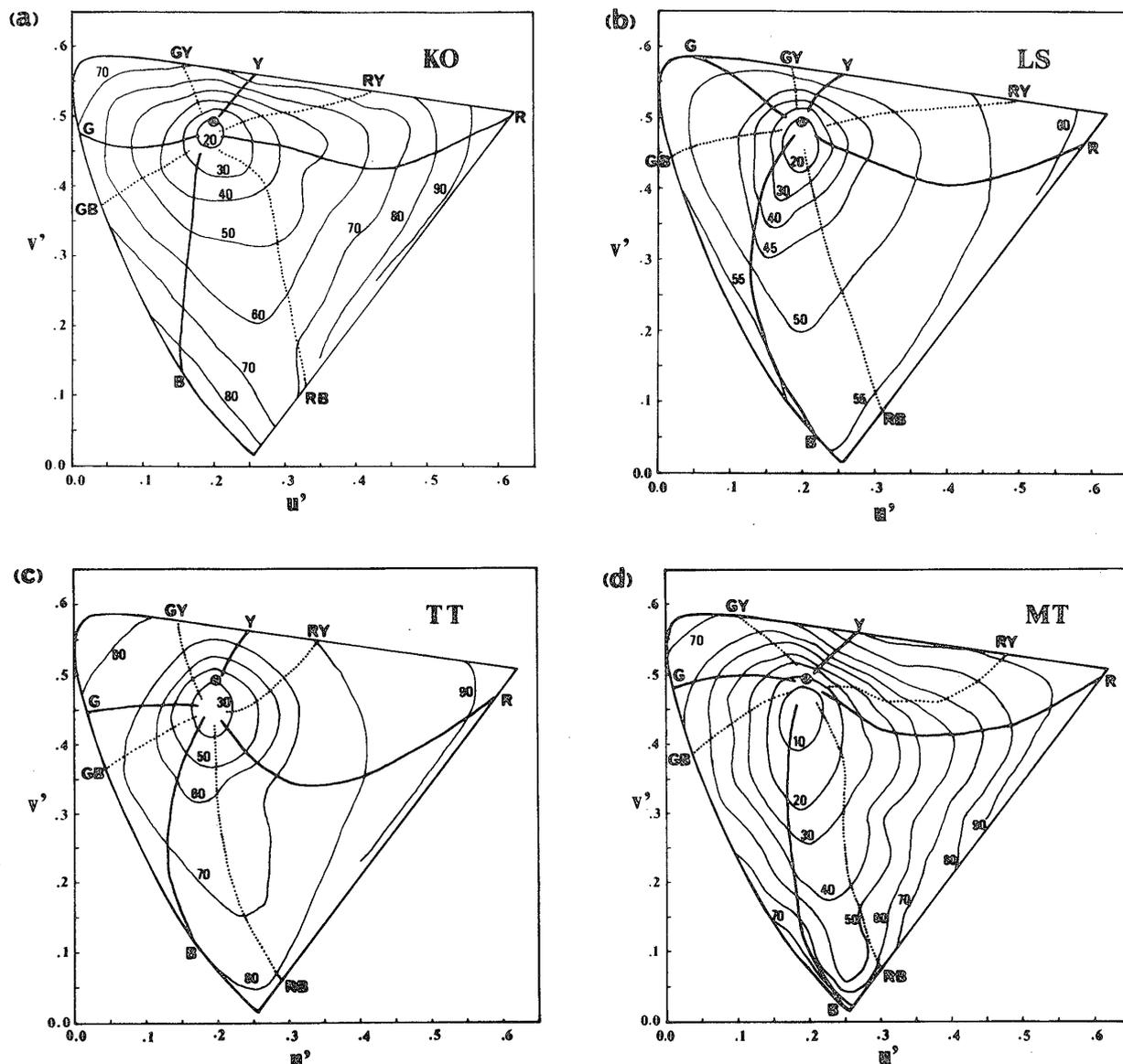


図4 各被験者における等飽和度曲線とユニーク色及び均衡色軌跡。(a), (b), (c), (d)は各々被験者KO, LS, TT, MTの結果。図中の数値は有彩色成分の%を示す。R, Y, G, Bは各々ユニーク赤, 黄, 緑, 青を示し, RY, GY, GB, RBは各々赤と黄, 黄と緑, 緑と青, 青と赤の均衡色を表す。⊙は参照白色光の色度点

続した滑らかな線を無理なく描くことができた。

表1の各枠の第3列に各点における4名の被験者の平滑化されたカラーネーミング応答の平均値を示す。これを基に $u'v'$ 色度図及び $xy$ 色度図に等飽和度曲線と等色相線を描いたのが各々図5(a)(b)である。

## 4. 考察

### 4.1. $u'v'$ 色度図の不均等性

完全な知覚的均等色度図とは、等飽和度曲線群が白色点を中心とした同心円群となり、等色相線が放射状に広がる直線群となる図である。図4及び5の結果は均等色度図として提唱されている $u'v'$ 色度図の知覚的均等性が低いことを示している。特に $v'$ 軸に沿った方向で等飽和度曲線の張り出しが顕著であることは、知覚的に均等な飽和度変化に比べて $u'v'$ 色度図が $v'$ 軸に沿って過度に拡大されていることを示唆している。

### 4.2. 色の見えの個人差

#### 4.2.1. ユニーク色軌跡

前述したように $u'v'$ 色度図は色知覚に関する不均等性を有するが、ここでは均等色度図とみなすことにして等色相線、特にユニーク色軌跡に注目してその被験者内及び被験者間の特性について考察してみる。

ユニーク色に近い色では3回の応答中第2ユニーク色に反対色が出現することがあった。これは第1ユニーク色判断のゆらぎを表しており、このような応答が得られる点の均等色度図上での分布範囲はその第1ユニ

ーク色の決定精度を反映していると考えられる。つまり色相の変化方向に沿って狭い範囲でのみこのような応答が出現するのであればそのユニーク色判断は容易で精度良くユニーク色点が決まり、逆に広い範囲からこのような応答が得られるのであれば、そのユニーク色判断は難しくユニーク色点を精度良く決定できないということである。そこで、図6に第2ユニーク色に反対色が出現したテスト色光の位置をプロットしてみた。最も点が少ないのは第1ユニーク色が黄で第2ユニーク色に赤又は緑が出たもの(大きい◇)で、被験者LSの2点のみである。他の被験者についてはマークがないことから、3回の応答とも、図4に示されるユニーク黄軌跡をはさんで「黄X, 赤Y」から「黄X, 緑Y」に変わったことがわかる。すなわち各被験者内においてユニーク黄軌跡は精度良く決定されたことを示している。次に第1ユニーク色が青の点(大きい□)であるが、これは被験者K0以外の被験者について各々いくつかの点が現れている。しかしどの被験者においても、各々のユニーク青軌跡に沿ってこのような点が分布しており色相の変化方向に対してはその分布範囲は小さい。すなわちユニーク青軌跡も比較的精度良く決定されたことを示している。第1ユニーク色が緑又は赤の点(各々大きい△と○)は各々のユニーク色軌跡に沿ってだけでなく色相の変化方向に沿ってもある範囲に広がっており、第1ユニーク色が黄または青の点に比べて広範囲に分布している。特にユニーク赤は飽和度70%以下の領域で拡がりが大きく精度良

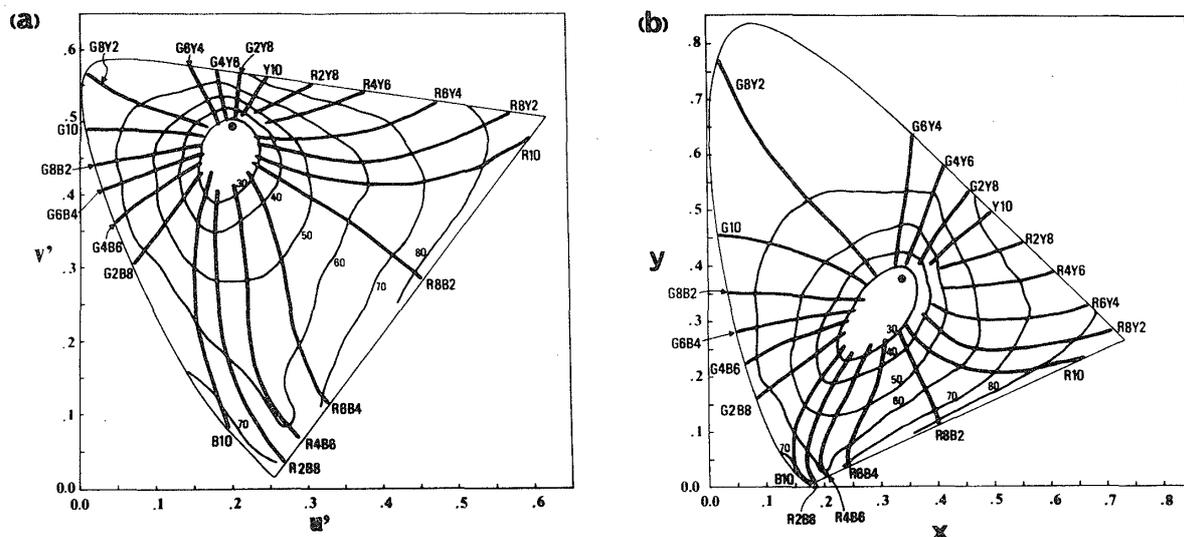


図5 4名の被験者の平均値に基づく色度図上の等飽和度曲線と等色相線。(a)は $u'v'$ 色度図、(b)は $xy$ 色度図にプロットした図。太い実線は等色相線で、色相記号はR, Y, G, Bが各々赤, 黄, 緑, 青を, 数字は各々の成分比を表す。細い実線は等飽和度曲線で数値は有彩色成分の%を示す。●は参照白色光の色度点

く決定できなかったことを示している。図6の○は被験者間で第1と第2ユニーク色が異なった点であり、白色付近にのみ現れた。

ユニーク色および均衡色軌跡についての被験者間の相違を見るために、それらを一つの色度図上にプロットしたのが図7(a)(b)である。ユニーク色の中では黄と青における被験者間の相違が、赤と緑に比べて小さい。特にユニーク黄軌跡は良好に一致しており、また4名の被験者全ての結果がほぼ直線に近い。 $u'v'$ 色度図上で均等に分布する測定点を用いたので、第1ユニーク色として黄の応答が得られるテスト色光の数が相対的に少なく(4名の平均で10%)、狭い範囲に黄応答が

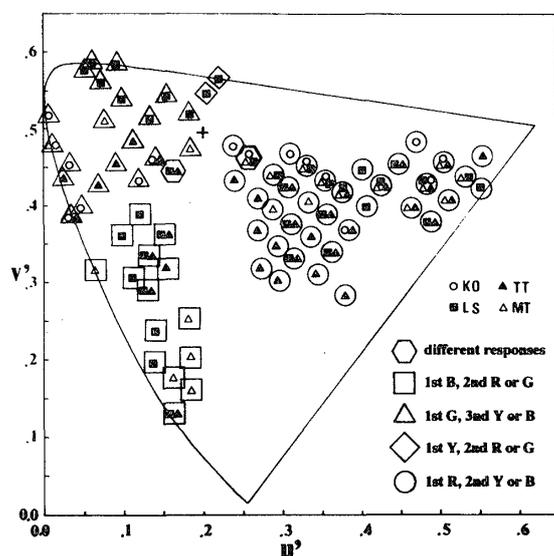


図6 3回の応答で反対色が出現したテスト色光。小シンボルは被験者の違いを、大シンボルは色相応答の違い(第1及び第2ユニーク色が何か)を表す。+は参照白色光の色度点

限局されてしまった可能性はある。しかし緑についても第1ユニーク色として緑応答が得られるテスト色光は少ない(平均で14%)が、ユニーク緑の個人差は大きい。曲線の形状については、ユニーク赤、青の軌跡は4名の被験者で位置は異なっても湾曲方向はそろっている。しかしユニーク緑軌跡においては、被験者LSとMTの結果は黄緑方向に凸になるように湾曲しているのに対して、被験者KOの結果では青緑方向に凸になるように湾曲している。

以上のようなユニーク色軌跡の個人差の特徴は全く異なる手法によるこれまでの研究結果においても見られている。すなわち、純度が異なる刺激間での色相マッチングによるAyama<sup>13)</sup>の結果にも、また輝度純度一定で変化する刺激を呈示し被験者の絶対判断によるIkeda and Uehira<sup>15)</sup>の結果においても図7と同様の傾向が示されている。色度図上のユニーク緑・赤軌跡の位置の個人差がユニーク黄・青のそれより大きいこと、およびユニーク緑の湾曲方向が人により異なることは、測定手法に依存しない色知覚の個人差の特性であることが示唆される。

#### 4.2.2. 黄斑色素濃度の影響

個人差の一因として被験者による黄斑色素濃度の違いが考えられるが、本研究では各被験者の黄斑色素濃度を測定しなかった。黄斑色素の吸収域は可視域では短波長端から530nm付近まででその吸収ピークは460nmである。本研究のテスト光は $\lambda_s$ と $\lambda_l$ の混色光なので、黄斑色素の影響を最も大きく受けるのは $\lambda_s$ に430~480nmを用いた領域で測定されたユニーク赤、

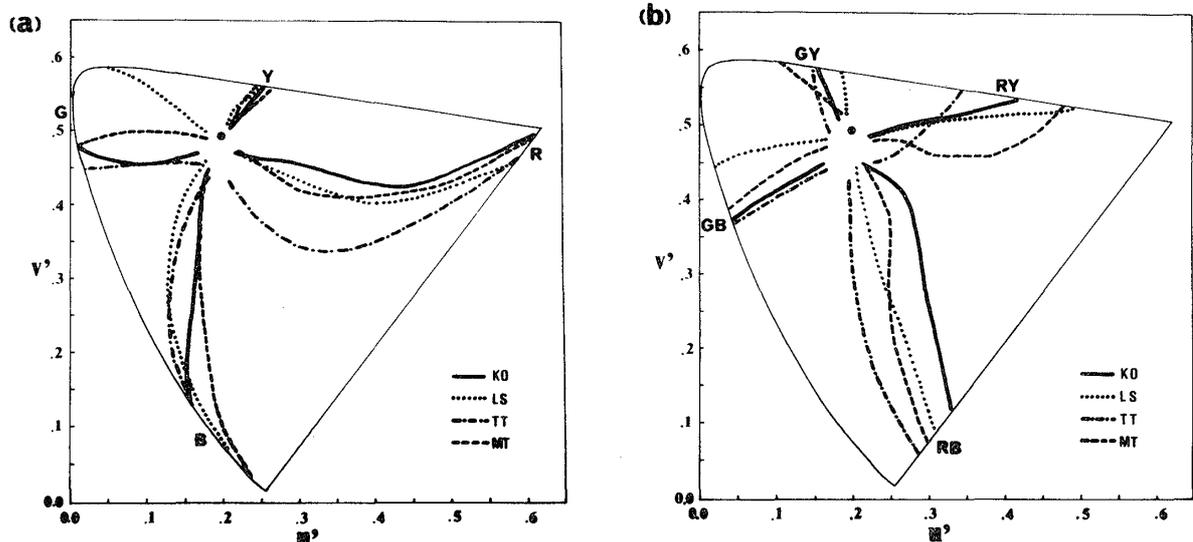


図7 等色相線の個人差。(a):ユニーク色軌跡,(b):均衡色軌跡の個人差。記号定義は図4と同じ

赤と青の均衡色, 及びユニーク青の等色相線である。そこで, これら 3 種の等色相線位置の相違から計算できる各被験者の $\lambda_s$ と $\lambda_l$ のエネルギー比の関係が, 黄斑色素濃度の個人差で説明しうるかについて以下の検討を行った。

ある $\lambda_s$ と $\lambda_l$ を結ぶ直線上で同じ色相応答となる点の, 被験者Aと被験者Bの色度座標値が各々 $(u'_A, v'_A)$ ,  $(u'_B, v'_B)$ であるとする。まずこれらを $xy$ 色度座標 $(x_A, y_A)$ ,  $(x_B, y_B)$ に変換する。この時 $\lambda_s$ と $\lambda_l$ のエネルギーが各々 $E_{s_i}$ と $E_{l_i}$  ( $i=A, B$ ) であるとする,

この混色を次式で表すことにする。

$$E_{s_i}(\lambda_s) + E_{l_i}(\lambda_l) \rightarrow (x_i, y_i) \quad i=A, B \quad (2)$$

ここで被験者Bの被験者Aに対する相対黄斑色素濃度を $\Delta D$ とし, これだけが原因で同じ色相評価となる色度点が $(x_A, y_A)$ から $(x_B, y_B)$ に移動したと仮定する。 $\lambda_s$ のみ黄斑色素吸収の影響を受けるので, 以下が成立する。

$$10^{\Delta D} \cdot E_{sA}(\lambda_s) + E_{lA}(\lambda_l) \rightarrow (x_B, y_B) \quad (3)$$

(2)(3)より

$$\frac{10^{\Delta D} \cdot E_{sA}}{E_{lA}} = \frac{E_{sB}}{E_{lB}} \quad (4)$$

また $\lambda_s$ と $\lambda_l$ の色度座標を各々 $(x_s, y_s)$ ,  $(x_l, y_l)$ とすると $xy$ 色度図の性質から,

$$\frac{E_{s_i}}{E_{l_i}} = \frac{(x_l - x_i) \cdot y_s \cdot y(\lambda_l)}{(x_i - x_s) \cdot y_l \cdot y(\lambda_s)} \quad i=A, B \quad (5)$$

(4)(5)より各 $\lambda_s$ における黄斑色素濃度差 $\Delta D$ が求められる。

ユニーク赤, 赤と青の均衡色, ユニーク青において被験者K〇が $\lambda_s$ が少ない位置にあり最も黄斑色素濃度が低いと考えられる。そこで, 3種の等色相線の結果から被験者K〇を基準にした他の被験者の相対黄斑色素濃度を上記の手法により導出し $\lambda_s$ に対してプロットしたのが図8(a)~(c)である。図中の黒丸は, Boneら<sup>21)</sup>の研究における高濃度被験者と低濃度被験者群の差(被験者TTの(a)及び中濃度被験者と低濃度被験者の差(被験者LSとMTの(b)と(c))である。もし, 等色相線の個人差が黄斑色素濃度差のみによるのであれば430~480nmの範囲では色相に関わらず黒丸のようにほぼ一定値となるはずであるが, 3名の被験者とも波長により, また色相により $\Delta D$ は変化している。特にMTやLSのユニーク青では負の値となり,  $\lambda_s$ の $\lambda_l$ に対する相対的光量が色相によりK〇より多くなり少なくなったりすることを意味している。これらの結果は, 図7に示された色度図上の等色相線位置の個人差が黄斑色素濃度差だけでは説明できないことを示唆している。ただし, 被験者TTに関しては, 3種の色相の結果がほぼ一致し, 全ての波長で正であり, さらに変動幅も他の2名に比べて小さいので, 被験者K〇との黄斑色素濃度差が等色相線位置シフトの主要因の一つである可能性は否定できない。

#### 4.2.3. 生理学的研究との比較

図6と7に示されるようにユニーク黄と青はユニーク赤と緑に比べて被験者内および被験者間のばらつき

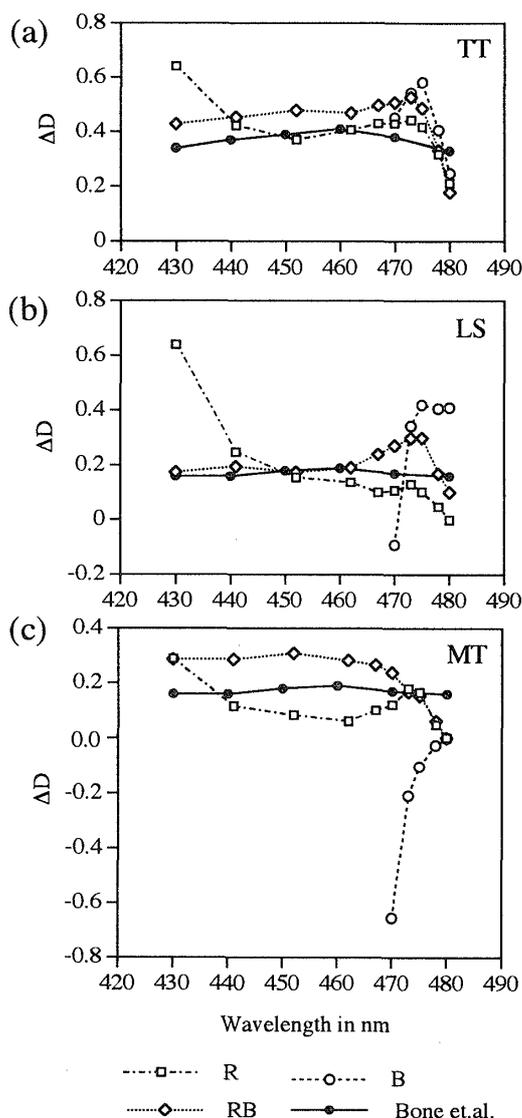


図8 等色相線の相違からの推定による相対黄斑色素濃度(被験者K〇に対する値)。(a), (b), (c)は各々被験者TT, LS, MTの結果を示す。□, ○, ◇は各々ユニーク赤, 赤と青の均衡色, ユニーク青の色相線からの推定値。●はBoneらの研究<sup>21)</sup>における高濃度と低濃度被験者群の差(a)及び中濃度と低濃度被験者群の差(b)と(c)。

が小さい。前者は赤-緑反対色過程の、後者は黄-青反対色過程の平衡点なので、図6と7は2つの反対色過

程の非対称性を示していることになる。

赤・緑反対色過程の出力が錐体分光感度の線形和であれば、その平衡点であるユニーク黄およびユニーク青は $xy$ 及び $u'v'$ 色度図上で直線の軌跡となる<sup>13-15)22)</sup>。色度図上の等色相線に関する研究は本研究の結果も含めていずれも、ユニーク黄軌跡の直線性を示しているが、ユニーク青については曲線となりS錐体の非線形的関与を示唆している<sup>13-15)</sup>。色相打ち消し法により測定された赤・緑反対色関数が、S錐体が関与しない中・長波長領域でL錐体とM錐体出力の線形和で近似できることは<sup>23-25)</sup>、色度図上のユニーク黄軌跡の直線性と等価である。さて、スペクトルにおけるユニーク黄波長はL・M錐体出力線形和の重み係数決定に重要な一点である<sup>1)</sup>。Cicerone<sup>26)</sup>の研究によればユニーク黄波長は中心窩におけるL錐体とM錐体の数の比と極めて良い相関があるという。赤-緑反対色過程を表すL・M錐体出力の重み係数がL・M錐体数の比により決定されているならば、錐体数比は1.6~2.0に局限している<sup>26)</sup>ので赤-緑反対色過程の個人差の範囲も限定されることになる。本研究で示されたユニーク黄軌跡の直線性と顕著に小さい個人差は、赤-緑反対色過程(S錐体が関与する領域を除く)の線形性およびL・M錐体数比による重み係数のモデルに矛盾しない知見といえよう。

一方、黄-青反対色過程の平衡点是非線形的性質があり、赤-緑反対色過程と同様の錐体出力線形和では表せないことは以前から指摘されている<sup>24)25)27)28)</sup>。しかし、黄-青反対色過程の種々の特性を包括的に説明でき、かつ生理学的知見とも合致するような非線形モ

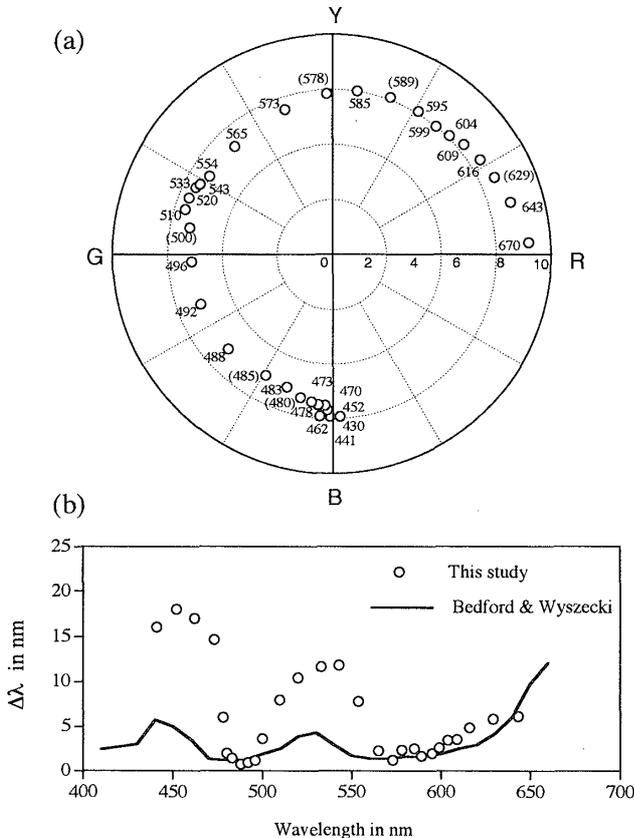


図9 (a): スペクトル光及びスペクトルに近いテスト光におけるカラーネーミング応答の極座標表示(色相を角度, 飽和度を半径方向にプロット)。図中の数値はテスト光の波長, 又は最も近い単色光の波長。但し467nmと475nmに近いテスト光は他の点と重なるので省略した。(b): ○は(a)からの推定による波長弁別能で, 実線はBedfordら<sup>30)</sup>の測定結果

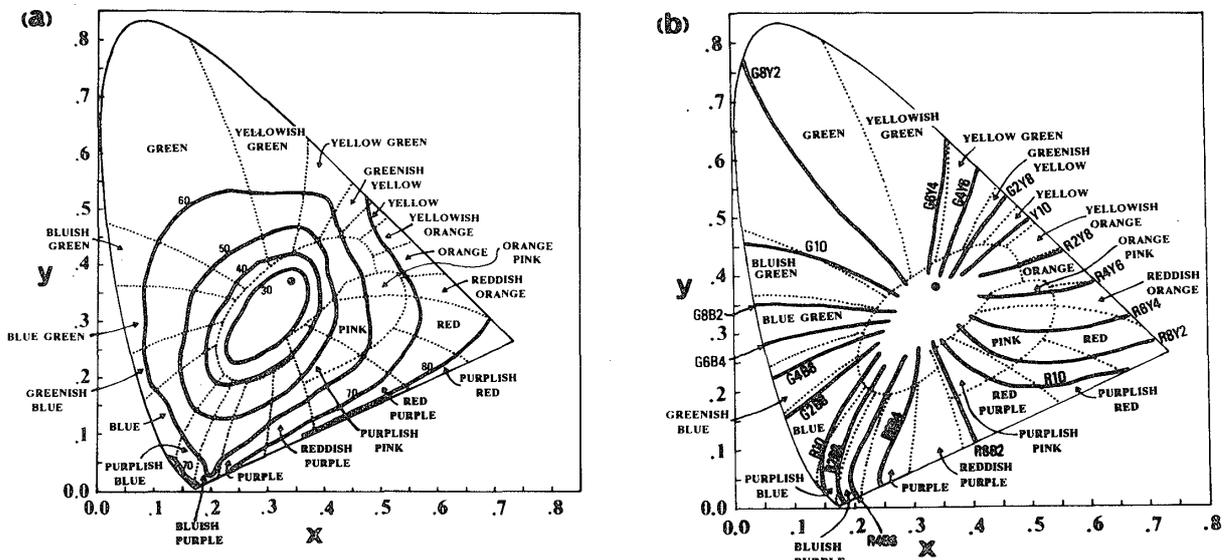


図10 図5の結果とKellyの色領域<sup>11)</sup>との比較。(a)は等飽和度曲線と, (b)は等色相線と比較した図

デルは確立されていない。

反対色的分光感度特性を示す細胞は、霊長類では網膜神経節細胞ベルから報告されている。しかしながら、赤-緑反対色型細胞の応答が興奮から抑制に移行する中性点波長は、575nm付近に多いが全体としては420~650nmの広範囲に分布し、一方黄-青反対色過程の中性点は490~500nmに集中しているという<sup>29)</sup>。もし、神経節細胞レベルの反対色型細胞が、色知覚を決定している赤-緑及び黄-青反対色過程であるならば、それら反対色型細胞の応答の中性点波長は、赤-緑反対色型細胞であればユニーク黄または青に、黄-青反対色型細胞であればユニーク赤または緑の波長に対応すると考えられる。赤-緑反対色型細胞の中性点波長が広範囲に分布し、黄-青反対色型細胞の中性点が特定波長領域に集中しているという前述の生理学的知見は、ユニーク黄の個人内・個人間のばらつきが小さく、ユニーク緑のそれが大きいという心理物理学研究の結果と単純には合致しない。

#### 4.3. 波長弁別曲線

本研究の測定点には26個の単色光と8個のスペクトル軌跡にきわめて近い色度点が含まれており、それらのカラーネーミング応答からスペクトル光における波長弁別曲線を予測することができる。そのために、表1における上記測定点の応答を図9(a)に示すように横軸に赤-緑、縦軸に黄-青の反対色をとり、色相が角度で飽和度が半径方向に表される極座標にプロットした。図9(a)において弁別閾は半径一定の小円で表されると仮定して得られた波長弁別能が図9(b)の白丸である。 $\Delta\lambda$ はスペクトルの両端および緑領域で大きく480nmと570nm近辺で最小となり、実線で示されたBedfordら<sup>30)</sup>の結果と定性的には類似した特性となっている。これは色相及び飽和度を合わせた色の見えが波長弁別能に深く関与していることを示している。さらに、波長弁別能 $\Delta\lambda$ の標準偏差も570nm近辺で最小値、530nm付近の緑領域で極大、スペクトル長波長端の赤領域で最大となる特性を示すことが報告されている<sup>31)32)</sup>。これらの結果は、ユニーク黄が他のユニーク色に比べて著しく高精度で決定され、ユニーク緑やユニーク赤の決定精度が低いという本研究の結果(図6)と一致している。

#### 4.4. Kellyの結果との比較

図5の結果をKellyの結果<sup>11)</sup>と比較するために図10

に各々等飽和度曲線(a)及び等色相線(b)とKellyの色名領域区分を重ねてプロットしてみた。まず彼の色名未定義領域は図5での有彩色成分が30%の範囲よりかなり広い。Reddish Purple, Purple, Bluish Purple領域と接する境界は有彩色成分40%の等飽和度曲線とほぼ重なるし、Yellow, Yellowish Orange, Orangeと接する境界は有彩色成分60%より外側にあった。この付近の色光はカラーネーミングが困難でもなく有彩色成分も60%以上なので色名を決定すべきである。内川ら<sup>16)</sup>も指摘しているように、Kellyの図における色名未定義領域は色知覚の観点からは広すぎるといえよう。また彼の図の各々の色領域は我々の等飽和度曲線のいくつかにまたがっている。カテゴリカルな色の領域区分という点では有用かもしれないが、もう少し細かい色の見えの違いを検討したい場合には領域が大きすぎる部位が多い。本研究では6段階の等飽和度曲線と20本の等色相線を示したので、同じカテゴリーに入るが飽和度は異なるといった色刺激の区別にも対応できる。

等色相線についてはユニーク黄とユニーク青の等色相線は彼の図のYellowとBlueの領域内にほぼおさまっている。しかしユニーク緑は高純度側でGreen領域からややはずれてBluish Green領域に入っている。ユニーク赤は彼らのRed領域から大きくはずれた位置にあり、Purplish PinkからReddish Purple領域を通り赤紫線の近傍で僅かにRed領域に入っている。

本研究では赤紫線に最も近いテスト光(430nmと670nmを結ぶ直線上の18個)の網膜照度として60tdを用いたが、それがユニーク赤軌跡のKellyのRed領域からのずれに影響したのだろうか。Ayamaら<sup>13)</sup>によれば、赤紫線上のユニーク赤は網膜照度の増大につれて補波長 $\lambda_c$ が短波長側に移動(すなわち色度図上ではスペクトル軌跡の長波長端よりシフト)している。そこで上記18個のテスト光の網膜照度が他のテスト光と同じ120tdであれば、ユニーク赤軌跡の赤紫線上の終点はもう少しスペクトル軌跡の長波長端に近くなり、図10の結果よりはRed領域に十分入った可能性はある。しかし色度図内部のユニーク赤軌跡はすべて120tdのテスト光での測定結果に基づくものであり、それが下方に湾曲してRed領域と大きくずれたことと上記テスト光の低網膜照度の関係は考えにくい。

ユニーク赤の大きなずれの一因として、この領域に

おけるカテゴリカルな色命名と本研究で用いた反対色に基づくカラーネーミングとの違いが考えられる。カテゴリカルな色命名では「ピンク」, 「紫」, 「橙」が用いられる。低飽和度の青みの赤および黄みの赤は「ピンク」に含まれるのであろう。第1著者のユニーク色決定実験被験者としての経験からの推測であるが、高飽和度の青みの赤は青みがほんの僅かでも「紫」と命名されるが、「橙」はかなり黄みが入った赤にしか用いられないのではないかと思われる。カテゴリカルな色命名における「紫」と「橙」はユニーク赤を中心として黄と青方向に対称的に位置するのではなく、「紫」の方がより純粋な赤に近い色を含む領域にあると考えられる。そう仮定するとカテゴリカルな色命名での「赤」はユニーク赤からやや黄みの赤にかけての高飽和度の色を指すことになる。ユニーク赤は飽和度に関わらず黄みも青みもない純粋な赤のことなので、色度図上のユニーク赤軌跡は、低飽和度から高飽和度に向かってカテゴリカル色の「ピンク」そして紫に近い「赤」領域を通すことになる。図8のユニーク赤軌跡とKellyの色領域との比較でもそのような傾向は見られる。しかし彼の赤領域は図7のR6Y4の等色相線も含んでおりやや黄色方向に寄りすぎているといえよう。またこの領域では本研究の等色相線とKellyの図における境界線の湾曲方向が逆である。色光を用いた等色相線に関するどの研究<sup>13-15)</sup>においてもユニーク赤軌跡は図7と同じ方向に湾曲した曲線となっており、黄方向に凸の曲線となる結果は一つも報告されていない。Kellyの図はマンセル表色系の等色相線を適用・拡張したものであるが、それをそのまま色光の等色相線とするのは問題があるのではないかと思われる。

最近「開口色」「表面色」モードと色の見えに関する問題が注目されている<sup>10)16)17)33)</sup>。色度と色の見えの対応図を確立するためには、刺激のサイズや輝度、呈示時間等について実用的な条件を選択し、見えのモードも考慮した実験条件下で、種々の手法による色の見えをさらに多くの被験者において測定することが必要である。

注1) 本研究は東京工科大学大学院総合理工学研究科にて行われたものである。

#### 謝辞

本研究において、長期間にわたり被験者として実験に協力しかつ貴重なコメントを下された岡嶋克典博士、

高瀬正典博士、田村徹博士、そしてLeo Stefurak博士に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 池田光男：色彩工学の基礎，朝倉書店（1980）173, 242.
- 2) 阿山みよし，池田光男，中枝武弘：呈示持続時間のBezold-Brücke現象への影響，日本色彩学会誌，4（1980）150-155.
- 3) S. M. Luria: Color-name as a function of stimulus-intensity and duration. *Am. J. Psychol.*, 80 (1967) 14-27.
- 4) T. H. Nilsson: Effects of pulse duration and pulse rate on hue of monochromatic stimuli. *Vision Res.*, 12 (1972) 1907-1921.
- 5) R. M. Boynton, W. Schafer, and M. E. Neun: Hue-wavelength relation measured by color-naming method for three retinal locations. *Science*, 146 (1964) 666-668.
- 6) 高瀬正典，阿山みよし，池田光男：周辺網膜における色度図全域にわたる色光の色の見えの変化：一人の被験者についての測定，光学，20（1991）420-429.
- 7) D. McL. Purdy: Spectral hue as a function of intensity. *Am. J. Psychol.*, 43 (1931) 541-559.
- 8) R. M. Boynton and J. Gordon: Bezold-Brücke hue shift measured by color-naming technique. *J. Opt. Soc. Am.*, 55 (1965) 78-86.
- 9) H. Sobagaki, T. Yamanaka, K. Takahama, and Y. Nayatani: Chromatic-adaptation study by subjective-estimation method. *J. Opt. Soc. Am.*, 64 (1974) 743-749.
- 10) 岡嶋克典，池田光男：表面色モードと光源色モードにおける対応色の関係，光学，20（1991）363-368.
- 11) K. L. Kelly: Color designations for lights. *J. Opt. Soc. Am.*, 33 (1943) 627-632.
- 12) S. M. Newhall, D. Nickerson, and D. B.

- Judd: Final report of the O. S. A. subcommittee on the spacing of the Munsell colors. *J. Opt. Soc. Am.*, 33 (1943) 385-418.
- 13) M. Ayama, T. Nakatsue, and P. K. Kaiser: Constant hue loci of unique and binary balanced hues at 10, 100, and 1000 Td. *J. Opt. Soc. Am. A*, 4 (1987) 1136-1144.
- 14) S. A. Burns, A. E. Elsner, J. Pokorny, and V. C. Smith: The Abney effect: chromaticity coordinates of unique and other constant hues. *Vision Res.*, 24 (1984) 479-489.
- 15) M. Ikeda and I. Uehira: Unique hue loci and implications. *Color Res. Appl.*, 14 (1989) 318-324.
- 16) 内川恵二, 栗木一郎, 篠田博之: 開口色と表面色モードにおける色空間のカテゴリカル色名領域, *照明学会誌*, 77 (1993) 346-354.
- 17) 内川恵二, 栗木一郎, 篠田博之: カテゴリー比率評価法による開口色と表面色モードの色の見えの表現, *照明学会誌*, 78 (1994) 83-93.
- 18) J. Gordon and I. Abramov: Scaling procedures for specifying color appearance. *Color Res. Appl.*, 13 (1988) 146-152.
- 19) 池田光男: マクスウエル視のときの網膜照度の計算と測定, *VISION*, 1 (1989) 58-61.
- 20) K. Uchikawa, H. Uchikawa, and P. K. Kaiser: Luminance and saturation of equally bright colors. *Color Res. Appl.*, 9 (1984) 5-14.
- 21) R. A. Bone and J. M. B. Sparrock: Comparison of macular pigment densities in human eyes. *Vision Res.*, 11 (1971) 1057-1064.
- 22) M. Ayama and M. Ikeda: Dependence of the chromatic valence function on chromatic standards. *Vision Res.*, 29 (1989) 1233-1244.
- 23) D. Jameson and L. M. Hurvich: Some quantitative aspects of an opponent-colors theory. I. Chromatic responses and spectral saturation. *J. Opt. Soc. Am.* 45 (1955) 546-552.
- 24) J. S. Werner and B. R. Wooten: Opponent chromatic mechanisms: relation to photopigments and hue naming. *J. Opt. Soc. Am.* 69 (1979) 422-434.
- 25) 阿山みよし, 池田光男: 傍中心窩における反対色レスポンス関数の測定, *日本色彩学会誌*, 5 (1981) 50-62.
- 26) C. M. Cicerone: Color appearance and the cone mosaic in trichromacy and dichromacy. *Color Vision Deficiencies*, ed. Y. Ohta, Kugler & Ghedini, Amsterdam (1990) 1-12.
- 27) M. Ayama and M. Ikeda: Additivity of yellow chromatic valence. *Vision Res.*, 26 (1986) 763-769.
- 28) Y. Ejima and S. Takahashi: Interaction between short-and longer-wavelength cones in hue cancellation codes: Nonlinearities of hue cancellation as a function of stimulus intensity. *Vision Res.*, 25 (1985) 1911-1922
- 29) E. Zrenner: A new concept for the contribution of retinal colour-opponent ganglion cells to hue discrimination and colour constancy: The zero signal detector. *Central and Peripheral Mechanisms of Colour Vision*, ed. D. Ottoson and S. Zeki, The Macmillan Press, London (1985) 165-181.
- 30) R. E. Bedford and G. Wyszecki: Wavelength discrimination for point sources. *J. Opt. Soc. Am.*, 48 (1958) 129-135.
- 31) M. H. Siegel and F. L. Dimmick: Discrimination of color II. Sensitivity as a function of spectral wavelength, 510 to 630 nm. *J. Opt. Soc. Am.*, 52 (1962) 1071-74.
- 32) M. H. Siegel: Discrimination of color IV. Sensitivity as a function of spectral wavelength, 410 through 500 nm.

J. Opt. Soc. Am., 54 (1964) 821-823.

- 33) 鈴木恒男：カラーアビランスとカラーマネージメント，色の見えのモードを中心として，VISION, 6 (1994) 25-32.

(受付：1993年11月1日)

#### 著者紹介



あやま  
阿山みよし

昭和29年4月10日

東京工業大学大学院総合理工学研究科物理情報工学専攻博士後期課程，昭和58年，宇都宮大学工学部情報工学科

日本色彩学会，日本視覚学会，日

本光学会，米国光学会，照明学会

工学博士



いけだみつお  
池田光男

昭和8年2月12日

大阪大学工学部，昭和30年，米国ロチェスター大学大学院博士課程，昭和37年，京都大学工学部建築学教室

日本色彩学会，応用物理学会，照

明学会，日本照明委員会，米国光学会

Ph. D.