

解 説

シリーズ「色知覚の理論」

## 2. 混色と3色性

京 都 大 学      江 島   義 道

### 1 はじめに

われわれは、みかんの鮮やかなオレンジ色をテレビのCRT上に見ることができるが、実際のみかんで反射される長波長領域の広い帯域スペクトラムの光は、CRTからは出されていない。CRT上のみかんの分光分布と実際のみかんの分光分布は、図1に示すように、著しく異なる。しかし、われわれは、このような光を同じ色と見る。なぜか。シリーズ第2回目では、その理由を錐体の特性から考える。

### 2 混色と3色性

CRTのオレンジ色の部分を拡大して見ると、これは赤と緑の小光点(画素)の集まりで、どこにもオレンジ色の発光体は存在しない。肉眼で赤と緑の区別がつかないのは小光点が眼の解像力よりも小さいからである。赤色光と緑色光が

同時に網膜のほぼ同じ場所に到達すると、われわれはそこにオレンジ色の感覚を得る。これは混色という視覚系の性質によるものである。

ヒト視覚系のもつこのような混色の性質を組織的に研究したのはニュートンが最初であるが、その後、YoungをはじめとしてHelmholtz, Maxwell, König, Hechtらが詳細な検討を加え、三色説として理論的に体系化した。その理論の内容は次のように示されている。

(1) 視覚系の受容機構には分光感度特性の異なる3種の感覚器が存在する。

(2) 光が眼にはいると3種の感覚器はそれぞれ次のような反応をする。

$$G_1 = k_1 \int E(\lambda) g_1(\lambda) d\lambda$$

$$G_2 = k_2 \int E(\lambda) g_2(\lambda) d\lambda$$

$$G_3 = k_3 \int E(\lambda) g_3(\lambda) d\lambda$$

ここで、 $k_1, k_2, k_3$  は定数である。また、 $E(\lambda)$  は光の分光エネルギー、 $g_1(\lambda), g_2(\lambda), g_3(\lambda)$  はそれぞれの感覚器の分光感度である。(3) 色の感覚は3種の感覚器のレスポンス  $G_1, G_2, G_3$  の相対的な値の関数である。

今日、あらゆる家庭に普及しているカラーテレビの色再現は、この理論に示されている3色性を利用している。CRTの場合は、赤、緑、青の蛍光体を使い、これらを励起・発光させ、混合することによって、種々の色感覚を与える光をつくっている。液晶ディスプレイの場合は、光源に3種の分光フィルターリングを施したものを混合することによって色を表現している。

今回のテーマは、先に述べた混色の性質の1

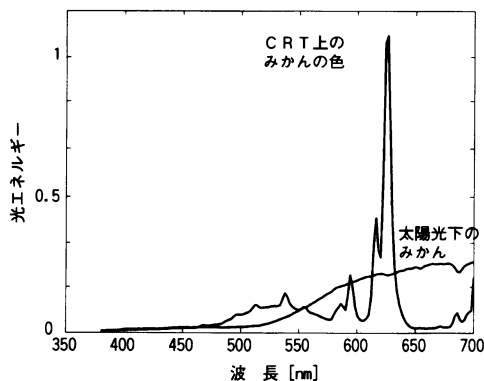


図1 みかんに発せられる分光波長分布  
太陽光の下にあるみかんに発せられる反射光の分光分布とCRT上のみかんに発せられる光の分光分布。分光分布特性は異なるが、色の見えは同じである。

つである3色性を、錐体のもたらす情報の性質から説明しようとするものである。したがって、上述の三色説理論を良く理解されている読者にとっては、今回のテーマは、「釈迦に説法」となるかもしれない。

### 3 錐体情報と色の弁別

#### 3. 1 桿体・錐体の分光感度特性と単一変数原理

可視光という言葉があるように、生体の視覚系はある限られた波長領域の光だけを感じ取る。視覚系の波長分光感度を決める主な因子は、光を吸収してこれを電気信号に変換し、次段階へ信号を伝達する視細胞の変換効率である。

視細胞では、まず、光刺激によって視物質の化学変化が引き起こされる。すなわち、最初の視覚信号は、視細胞内での化学変化の有無として形成される。視細胞内の電位が変化すると、視細胞から次段の細胞への伝達物質の放出量に変化がもたらされる。このようにして、視覚情報は、視細胞からの伝達物質の放出量として表現され、1次元性をもつことになる。すなわち、波長とエネルギーの2変数の情報をもつ光情報は、受容細胞(錐体または桿体)で、1変数の情報に圧縮(縮退)されることになる。視細胞のもつこのような性質は「単一変数原理」と言われ、視覚系の基本的な性質である。言い換えると、「どのような光であろうと、視覚刺激に対する視細胞の反応は20, 30, 100などの1次元の量として表出される」のである。

視細胞には、ヒトの場合は、暗いところで主に働く桿体と、明るいところで主に働く3種の錐体(L, M, S錐体)がある。これらは、表1と図2に示すように、それぞれが異なる分光感度特性をもつ。最初の視覚情報は、これらの感度特性に依存して、強度情報として表現されることになる。

#### 3. 2 錐体のもたらす情報と色弁別

##### 1) 単一錐体による色弁別

1種の錐体だけを持つ人(一色型)にとって、波長の異なる2種の光はどのような情報をもたらすか。一色型の人には異なる2種の光を弁別で

表1 錐体と桿体の波長感度特性と錐体感度比  
錐体感度はSmith and Pokorneyが提案したもの、桿体感度は、1951年CIEによる。

波長 [nm]	L錐体	M錐体	S錐体	桿体	L/M
400	1.69E-03	1.11E-03	1.39E-03	9.29E-03	1.53E+00
410	4.39E-03	3.01E-03	3.69E-03	3.48E-02	1.46E+00
420	1.01E-02	7.42E-03	8.54E-03	9.66E-02	1.36E+00
430	1.49E-02	1.24E-02	1.18E-02	2.00E-01	1.19E+00
440	1.92E-02	1.87E-02	1.29E-02	3.28E-01	1.02E+00
450	2.19E-02	2.49E-02	1.18E-02	4.55E-01	8.77E-01
460	2.63E-02	3.37E-02	1.03E-02	5.67E-01	7.78E-01
470	3.99E-02	5.11E-02	8.92E-03	6.76E-01	7.82E-01
480	6.49E-02	7.41E-02	6.06E-03	7.93E-01	8.76E-01
490	1.03E-01	1.05E-01	3.58E-03	9.04E-01	9.85E-01
500	1.67E-01	1.55E-01	2.12E-03	9.82E-01	1.08E+00
510	2.70E-01	2.33E-01	1.24E-03	9.97E-01	1.15E+00
520	3.93E-01	3.17E-01	6.13E-04	9.35E-01	1.24E+00
530	4.93E-01	3.69E-01	3.31E-04	8.11E-01	1.33E+00
540	5.63E-01	3.91E-01	1.61E-04	6.50E-01	1.44E+00
550	6.08E-01	3.87E-01	7.03E-05	4.81E-01	1.57E+00
560	6.33E-01	3.62E-01	3.24E-05	3.29E-01	1.75E+00
570	6.36E-01	3.16E-01	1.82E-05	2.08E-01	2.01E+00
580	6.15E-01	2.55E-01	1.45E-05	1.21E-01	2.41E+00
590	5.70E-01	1.87E-01	9.89E-06	6.55E-02	3.04E+00
600	5.06E-01	1.25E-01	7.25E-06	3.32E-02	4.06E+00
610	4.27E-01	7.58E-02	3.44E-06	1.59E-02	5.63E+00
620	3.38E-01	4.32E-02	2.05E-06	7.37E-03	7.82E+00
630	2.42E-01	2.29E-02	7.83E-07	3.34E-03	1.06E+01
640	1.63E-01	1.16E-02	4.10E-07	1.50E-03	1.41E+01
650	1.01E-01	5.66E-03	1.94E-07	6.77E-04	1.79E+01
660	5.82E-02	2.80E-03	9.54E-08	3.13E-04	2.08E+01
670	3.07E-02	1.32E-03	4.49E-08	1.48E-04	2.33E+01
680	1.63E-02	6.56E-04	2.24E-08	7.15E-05	2.49E+01
690	7.90E-03	3.09E-04	1.05E-08	3.53E-05	2.56E+01
700	3.95E-03	1.52E-04	5.19E-09	1.78E-05	2.59E+01

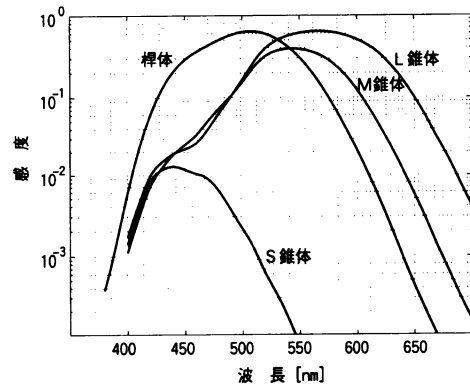


図2 錐体と桿体との波長感度特性

きるだろうか。この問題を理論的に考えてみよう。

具体的に説明するためにL錐体を例とし、2種の光を赤(ここでは620nmとする)と緑(ここでは500nmとする)とする。L錐体では、表1と図2に示されているように、赤と緑では感度が異なる。これらの感度を基に、光強度(エネルギー)とL錐体の反応(信号)の関係を描くと図3のようになる。

さて、読者は、「錐体の反応の大きさ」から眼

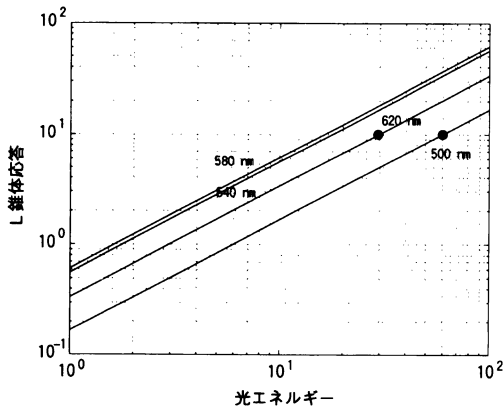


図3 光強度とL錐体の反応の関係

錐体反応は感度と光強度の積に比例すると仮定し、表1の分光感度の相対値を利用して、光の強度とL錐体反応の関係を求めた。図の直線は、上から、580、540、620、500nmの各波長に対応する。●印は、L錐体が反応10に対応する620nmと500nmの光強度を示している。

に与えられた光が赤か緑かを判別できるだろうか。錐体信号から、眼に照射された光が何かを脳の立場に立って推測していただきたい。

このような問題をいくつかの前提条件を設定しながら考えてみよう。

[問題1] 眼に赤か緑のいずれかの光が与えられるとする。L錐体が大きさ10の反応を示したとき、眼にはどちらの光が与えられたと考えられるか。

図3から明らかのように、これに対する答えは「エネルギー強度30の赤」か「エネルギー強度60の緑」かのいずれとなる(以後、赤(30)、緑(60)などと記述する)。

[問題2] 眼に赤か緑のいずれかの光が与えられるとする。2種の光が与えられ、これらに対して、L錐体が10と5の反応を示した。2つの光は同じ色か。または異なる色か。異なるとすれば10の反応はどちらの色か。5の反応はどちらの色か。

これに対する答えは

10の反応に対しては、赤(30)か緑(60)のいずれか、

5の反応に対しては、赤(15)か緑(30)のいずれか、

したがって、2種の光は(赤(30)、赤(15))、

(赤(30)、緑(30))、(緑(60)、緑(30))、(緑(60)、赤(15))の4組のうちのいずれかになる。脳は極めて曖昧な答えしか出せない。

問題1と問題2では、前提条件が与えられていたので曖昧ながらも答えを出すことができたが、我々が日常直面している環境は、このような前提条件のない環境である。

眼に照射される前提条件を少し緩和し、「赤か緑か」から「400nmから700nmの単波長光の中のいずれか」に変えて、改めてこの問題を考えてみよう。

[問題3] 眼に単波長の光が与えられたとする。L錐体が10の反応を示した。眼にはどのような波長の光が与えられたと考えられるか。

前提条件が緩和されると、この問題に対する解は不定解となる。すなわち、赤、緑、青、黄、紫、オレンジなど、あらゆる単波長光の可能性があり、確定的な答えを出すことができなくなる。

結論として、「単一錐体では色を弁別できない」となる。

## 2) 2種の錐体による色弁別

次に二色型(ここでは、L錐体とM錐体とする)の人の場合はどうなるだろうか。まず、2種の光を「赤か緑」として、問題3と類似の問題を考えてみよう。

[問題4] 眼に単波長の光が与えられとする。L錐体が24、M錐体が10の反応を示した。眼にはどのような波長の光が与えられたと考えられるか。

表1を利用することによって、正しい単一解を導くことができる。答えは黄色光(580nm)である。問題1～3にみられるように、単一錐体だけの情報では確定的な答えを出すことができないが、2種の錐体情報が使えらる、単一の答えを出すことができる。錐体情報が1つ増えることによって、色弁別能力が向上するのである。

しかし、いつでも単一の解が出せるわけではない。錐体の反応比(L反応:M反応)の値によっては、単一の解ではなく、2つの解を示す場合

がある。図4には、錐体感度の比を波長の関数として示しているが、縦軸と横軸は必ずしも1価関数(縦軸と横軸が1対1の対応を示す関数)ではない。縦軸の1つの値に対して2つの波長が対応する場合がある。波長が400nm~550nmの範囲がこの場合で、この場合は、1つの錐体の反応比の値に対して2種の光の可能性を示すことになる。

利用できる情報が1錐体から2錐体になることによって、色弁別能力(錐体反応信号から、元の光を推定する能力)は増加する。しかし、矢張り曖昧さは残る。

つぎに、前提条件をすべて取り払ってみよう。

[問題5] 眼に光が与えられ、L錐体が24, M錐体が10の反応を示した。眼にはどのような光が与えられたと考えられるか。

単波長光という制約条件が取り払われたこの問題には、単一の解は存在しない。すなわち、与えられた光の候補には、無数の可能性がある。これらの可能な解をCIExy色度座標上にプロットすると図5左上図の580nmの点を通る実線になる。この直線上の点に対応するすべての光に対して、L錐体とM錐体の反応比が2.4となる。図には、L錐体とM錐体の反応比が2.4 以外の場合も描いている。同じように、同一直線上の任意の2点に対応する視覚刺激に対して、L錐体とM錐体のもたらす情報がまったく同じになるので、これらを相互に弁別することはできない。このような直線群は、2色型(L, M)の人が色混同を示す直線群に対応するものである。

結論として、「利用できる情報が1錐体から2錐体に増えることによって、光の色弁別能力は増加するが、2錐体情報だけでは弁別できない一連の光が存在する」となる。

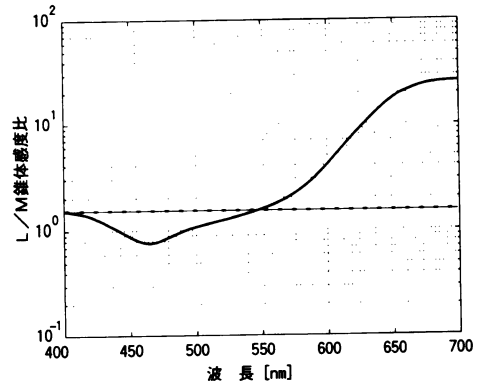


図4 L錐体とM錐体の反応比と波長の関係  
400nm~540nmは2価関数で、540nm以上は1価関数である。1価関数では、1つのL/M錐体反応比の値に対して1つの波長値が対応するが、2価関数では、1つのL/M錐体反応比の値に対して2つの波長値が対応する。

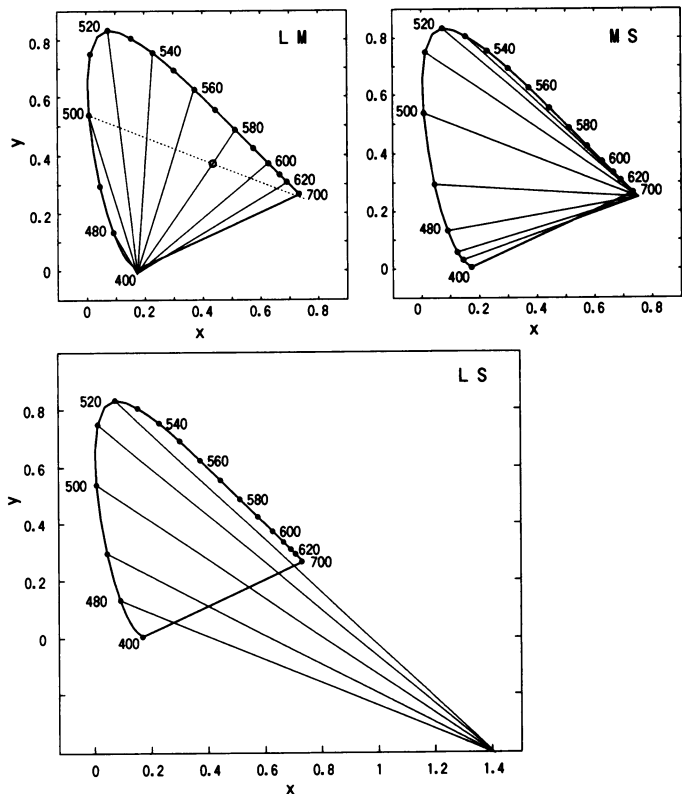


図5 2錐体の反応比が一定になる条件。  
左上図：(L, M)型, 右上図：(M, S)型, 下図 (L, S)型。  
直線上の点では、2錐体の反応比が一定になる。したがって、2錐体型の人では直線上の任意の2点を識別することはできない。しかし、3錐体(L, M, S)型の人ではこれらを識別できる。例えば、 $L/M=2.4$ には、左上図の580nmを通る直線が対応する。このような直線は、混同色中心座標値と表1の錐体感度から求めることができる。ここでは、Smith and Pokorney が使用した混同色中心座標値、(LM ;  $x=0.1748, y=0$ , MS; $x=0.7465, y=0.2535$ , LS; $x=1.4000, y=-0.4000$ )を使用している。  
○印は、錐体反応が $L=24, M=10, S=0.137$ を示す色光である。

### 3) 3種の錐体による色弁別

次に三色型のヒトの場合についてはどのようなようになるだろうか。同様の問題を考えてみよう。

[問題6] 眼に光が与えられ、L錐体が24、M錐体が10、S錐体が0.137の反応を示した。眼にはどのような光が与えられたと考えられるか。

図5左上図の580nmを通る直線上の2点間では、L錐体とM錐体情報は同じであるが、S錐体情報は異なる。したがって、S錐体情報が与えられると、直線上の一点が特定できることになる。

問題6の答えは、白丸印の点に対応する光である。これは、図5の左上図の580nmを通る直線(L/M比が2.4となる直線)と、右上図の500nmを通る直線(M/S比が73.1となる直線)の交点として求められたものである。このようにして、一般的に、L、M、S錐体の情報が与えられるとこれに対応する色度上の点を求めることができる。

結論は、「色度座標上の任意の2点の光は3錐体情報により識別できる」となる。

利用できる情報が2錐体から3錐体になることによって色弁別能力が増加することは事実である。しかし、色弁別能力の増加はあくまで相対的である。分光分布の異なる任意の2種の光をすべて3錐体情報によって弁別することはできない。このことを、さらに、説明しよう。

まず、提示される光刺激についてつぎの制約条件を設けた問題を考えてみよう。

制約条件：眼に与えられる光は、青(460nm)、緑(500nm)、赤(640nm)、黄(580nm)の4種の合成光からなるとする。

[問題7] 眼に光が与えられ、L錐体が10、M錐体が9.3、S錐体が0.5の反応を示したとき、眼にはどのような光が与えられたか。ただし、光は、制約条件に示されたように、4種の合成光からなるとする。

この問題は、中学生高学年の数学の問題である。

表1を利用すれば、それぞれの単位エネルギー

光に対する、L錐体、M錐体、S錐体の反応の大きさは次のようになる。

青(460nm)の光は、

$$(L, M, S) = (0.0263, 0.0337, 0.0103)$$

緑(500nm)の光は、

$$(L, M, S) = (0.167, 0.155, 0.00212)$$

赤(620nm)の光は、

$$(L, M, S) = (0.338, 0.0432, 0.000002)$$

黄(580nm)の光は、

$$(L, M, S) = (0.615, 0.0255, 0.00001)$$

したがって、青、緑、赤、黄の光のエネルギーをそれぞれ、 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 、 $k$ とすれば、4種の合成光は、それぞれつぎのような錐体反応をもたらす。

$$L = 0.0263x + 0.167y + 0.338z + 0.615k$$

$$M = 0.0337x + 0.155y + 0.0432z + 0.0255k$$

$$S = 0.01032x + 0.00212y + 0.000002z + 0.00001k$$

問題7では、このような錐体反応が、 $L=10$ 、 $M=9.3$ 、 $S=0.5$ となるような、 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 、 $k$ を探すが求められている。

未知数の数4が方程式の数3より多いので、この解は不定解となり、無数に存在することになる。念のためにそれらの例を示すと、

$$(x, y, z, k) = (38.0, 51.4, 1.24, 0.0),$$

$$(38.0, 51.4, 1.03, 0.1),$$

$$(37.9, 51.6, 0.226, 0.5)$$

などである。これらの光は、いずれも錐体反応が、(10, 9.3, 0.5)となる光である。脳は、これらの違いを推定することはできない。すなわち、三色型の人はいずれの光を弁別することはできないことになる。

これらの違いを推定するためには、理論的には4種の錐体が必要になる。4種の錐体を仮定して(ここでは、桿体を第4のR錐体と仮定して)、さらに、次の問題を考えてみよう。

[問題8] 眼に光が与えられ、L錐体が13、M錐体が4、S錐体が0.14、R錐体が27の反応を示した。眼にはどのような光が与えられたと考えられるか。ただし、光は、制約条件に示されているように4種の合成光からなるとする。

4種の合成光の成分強度をもとめるための方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned} L; 13 &= 0.0263x + 0.167y + 0.338z + 0.615k \\ M; 4 &= 0.0337x + 0.155y + 0.0432z + 0.0255k \\ S; 0.14 &= 0.01032x + 0.00212y + 0.000002z \\ &\quad + 0.00001k \\ R; 27 &= 0.567x + 0.982y + 0.00737z + 0.121k \end{aligned}$$

この場合は、未知数の数4が方程式の数4と同じなので、次のような単一の解を求めることができる。

$$(x, y, z, k) = (9.37, 20.47, 4.25, 12.84)$$

しかし、注意しておかなければならないのは、この解は「眼に与えられる光が、青(460nm)、緑(500nm)、赤(640nm)、黄(580nm)の4種の合成光からなる」という制約条件のときの解である」ことである。

我々が日常直面している視環境は、このような制約条件がない場合である。したがって、ヒトは、例え4種の錐体を保有していたとしても、錐体情報から光の波長分光特性を特定することはできない。もし、眼に照射される光の分光波長特性を高い精度で推定することが求められるならば、3種以上の多数の錐体を必要とすることになる。

読者はすでにお気づきのことと思うが、以上の考察から、次のような一般的法則が導ける。

N種の錐体を保有する生体にとっては、

- (1) 任意の色はN種の光でつくることができる。
- (2) N種の錐体情報から、N+1種以上の成分光で合成される光の分光分布を推定することはできない。

N=3の場合が三色型で、錐体情報から3種の成分光の分光分布(それぞれの光強度)を推定できるが、成分光が4種以上の場合は特定できない。N=2の場合は二色型で、錐体情報から3種以上の成分光の分光分布を推定することはできない。

## 4 むすび

ここまでの論述で、「CRT上のオレンジが、実際のみかんのオレンジと分光分布が異なるにも関わらず同じ色に見える」理由をお解りいただけたと思う。分光分布が異なっている、錐体情報が同じであれば同じ色に見えるのである。すなわち、図1に示した2種の分光分布の光に対するL, M, S錐体の応答が同じになるので、同じ色に見えるのである。CRT上のオレンジと実際のみかんのオレンジとを弁別するためには、4種以上の錐体を必要とする。

また、三色説の理論の意味するところもご理解いただけたと思う。人の知覚は、対象を適当なサイズの種類(カテゴリ)に分類するために構成されているもので、決して、物理的な特性を無際限に忠実に理解するためにつくられているものではない。ヒトの場合は、カテゴリ化の元となる尺度として、L, M, S錐体の3次元情報が用いられている。我々の色知覚が3次元を越えて大きくなれば、かえって情報負荷が大きくなり、フットワークの悪いシステムになるかもしれない。知覚は行動のための情報処理過程であり、行動に対応した適正な情報規模が望ましいのである。

## 参考文献

- Smith V.C. and Pokorney J., Spectral Sensitivity of colorblind observers and the cone pigments. Vision Research 12, 2059-2071(1972)
- Smith V. C. and Pokorney J., Spectral Sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm. Vision Research 15, 161- 171(1975)

本稿の1は2000年12月号に掲載してあります。