

## 二十世紀における視覚研究の足跡と展望：色覚研究の展開

内川 恵 二

東京工業大学大学院 理工学研究科 像情報工学研究施設

〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259

### 1. はじめに

二十世紀という 100 年間に視覚研究がどのように発展していったかという足跡を簡潔にまとめるのは極めて困難である。視覚研究の中のどの分野をとっても、この二十世紀の間に研究が爆発的に発展したからである。特に、色覚研究は他の分野に比べれると開始が早く、それだけ研究の蓄積も多い。そのため、本稿では色覚研究の足跡をきちんとまとめることをせず、色覚研究の一側面について述べるに留まってしまったことをお詫びしたい。

色覚研究は視覚研究の中でも先んじて発達したため、それだけ独自の路線を歩んできた。しかし、その発展の仕方は他の分野の原型になっている点も多い。本稿では色覚研究に限って解説をするが、内容は色覚以外の研究にも共通点があると考えられる。

### 2. 色覚研究の歴史

まず、色覚研究の歴史をざっと眺めてみる<sup>1-3)</sup>。表 1 に示すように、Newton と Gethe がそれぞれ物理的側面と心理的側面から色覚研

究の端緒を付けたのが 18 世紀である。3 色説の Young-Helmholtz が 19 世紀の終りに登場する。3 色説は 20 世紀の終りの L, M, S 錐体遺伝子の発見でようやく片が付いたことを考えると、一つの説が提案されてから確立するまでやはり 100 年ぐらいはかかるものである。

反対色説の Hering は 20 世紀の初めに登場するが、反対色メカニズムについてはまだ研究途上の部分も多く、解決しているとは言えない。一方、色の見えの研究も Munsell や Katz などの研究が 19 世紀後半から起こり、その後 20 世紀と引き続いている。

20 世紀になると色覚研究の方法が多様化してきた。主なものでも心理物理学では Stiles の 2 色閾値法や Wright の色弁別、生理学では富田の微小電極法による単一細胞記録がある。その結果、3 錐体の発見などの画期的な研究が起り、色覚研究は一挙に花開いた。

20 世紀の最後となる現在の色覚研究はと考えると、まだ 19 世紀の終わりからの一連の色覚研究の中に位置しているようである。ある分野の研究が 100 年間も継続しているのは、単に研究の進み方が遅いのではなく、色覚研究がそれだけ難しく、奥深い学問だからであろう。これは他の全ての視覚研究の分野にも当てはまる。

### 3. 色覚研究のかたち

色覚研究がこれまでにたどってきた形態を振り返ってみよう (図 1)。色覚研究は初め

表 1 色覚研究の歴史

Newton (1642-1727)	18 世紀	光線に色はない
Gethe (1749-1832)	18 世紀	色彩論
Young (1773-1829)	19 世紀	3 色説
Helmholtz (1821-1894)	19 世紀	3 色説
Hering (1834-1918)	20 世紀	反対色説
Munsell (1858-1918)	20 世紀	色の見えの表色系
Katz (1884-1953)	20 世紀	色の見え方
Stiles (1901-1985)	20 世紀	2 色閾値法
富田 (1908-1991)	20 世紀	3 錐体の発見
Wright (1906-1997)	20 世紀	CIE 表色系, 色弁別

は物理学、心理学、あるいは解剖学の分野でそれぞれほぼ独立に行われ、まとまった色覚研究としては分化していなかった。その中でまず、心理物理学 (Psychophysics) がかたちとなって現れてきた。様々な色覚特性が調べられ、そのメカニズムも様々に議論されるようになった。

次に、1950年代から生理学 (Physiology) での微小電極法による単一細胞応答の記録が色覚研究でも急激に盛んとなり、それまで心理物理学によって推測されてきた色覚メカニズムが次々に実証されるようになった。3錐体の発見や反対色応答を持つ細胞の発見が相次ぎ、色覚研究が一気に活気づいた。

しかし、ここで研究者はある問題に突き当たった。それはいわゆるマイクロとマクロの問題である。心理物理学により提唱された色覚のマクロの機能を生理学によって明らかにされた単一細胞のマイクロな応答にそのまま結び付けられるかどうかという問題である。単純に結びつけて、色覚メカニズムは解明されたとするのはあまりにも短絡的すぎるだろう。では、マイクロ応答からマクロ機能に至るための色覚構造は何か、またそれはどのような方法で調べることができるのかといった問題が真剣に議論された。

このような状況下で登場してきたのが計算論的視覚 (Computational Vision) である。これ

は、マイクロ構造を数多く組み合わせてマクロ機能を生み出す計算機シミュレーションから、マイクロ対マクロ問題を解決していく研究分野である。実験事実を仮定で結びつける理論的な研究でもあり、現在では、“Vision Research”のセクションの一つにもなっている。計算論的視覚は心理物理学と生理学とともに、図1に示すように色覚研究の3本柱の1本を担うものである。

最近、fMRIなどの脳イメージングの研究が急激に盛んになってきた。実証的な方法によるマイクロ対マクロ問題の解決策を与える研究分野として大いに期待されている。脳の活動が多くの部位で同時にしかも詳細に測定されればされるほど、この種の研究への期待は高まってくる。さらに技術改良が進めば脳の微細な構造がわかってくるだろう。現在、視覚のほとんどの研究者が関心を持っている。

色覚研究のかたちとして、心理物理学、生理学、計算論、および脳イメージング研究の関係について筆者の考えを述べたが、これは色覚研究だけではなく、視覚研究のすべてに当てはまると考えられる。視覚研究が学際研究の最たるものといわれる所以である。

#### 4. これまでの色覚研究

これまでに行われてきた色覚研究は、

- (1) 色覚メカニズム

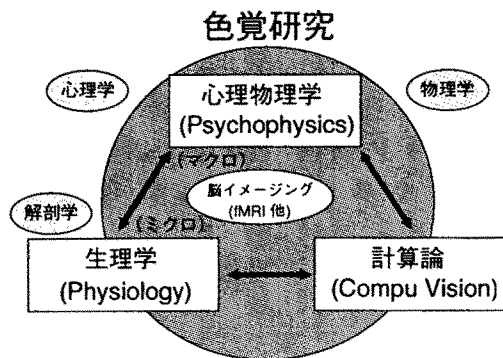


図1 色覚研究のかたち。現在は心理物理学、生理学、計算論が3本柱であり、脳イメージング研究が4本目の柱になりつつある。

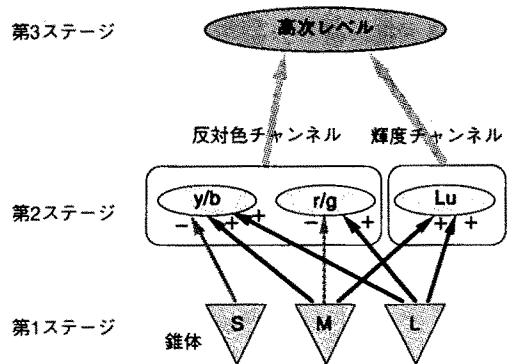


図2 色覚メカニズムの各ステージ。それぞれのステージで研究が進められている。

## (2) 色の見え (カラーアピアランス)

### (3) 表色系の確立

という三つの研究分野に大別できる。(1) 色覚メカニズムの研究では、錐体から上位レベルに至る信号伝達・変換過程と各レベルの時空間特性を調べてきた。一方、(2) 色の見え (カラーアピアランス) の研究では、さまざまな観察条件、刺激条件で色の見えのデータを取ることを行ってきた。ここでは必ずしも色覚メカニズムによる説明を目的とせず、特性を記述することを目的としたことが特徴であった。また、(3) 表色系の確立では、実用上の必要から様々な色空間の構築を行ってきた。

## 5. 色覚メカニズム

### 5.1 色信号の伝達・変換過程

この分野の研究では、図2に示すような色覚メカニズムにおいて、各ステージ間で信号がどのように伝達・変換されていくかが研究課題となり、具体的には様々なモデルが提唱されている。まず、第1ステージの錐体レベルでは、L、M、S錐体の分光感度の確立が長い間の目標であった。最近ではSmith-Pokornyの錐体分光感度(図3)が広く使われるようになった<sup>1)</sup>。錐体分光感度には、その他いくつかのバリエーションが提案されている。

第1ステージから第2ステージの変換過程、つまり錐体から反対色レベルへの信号変換法の研究では、1955年にJamesonとHurvichがキャンセルション法を用いて、歴史的な

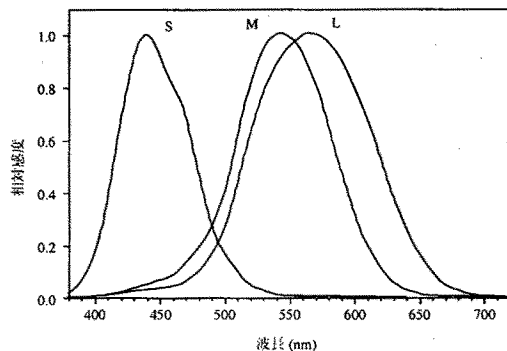


図3 Smith-PokornyのL、M、S錐体分光感度関数。

クロマティックバレンス関数(反対色チャンネルの分光感度)(図4)を測定し、研究の先駆けとなった。この関数の形は生理学的にも確認されるものとなった。

その後、1970年から80年代にかけて、L、M、S錐体からy/b、r/g反対色レスポンスとLu輝度レスポンスの結合の正負や重み係数を求める研究が盛んに行われた。ここでは、この重み係数をもったモデルで検出閾値、色弁別閾値、輝度、明るさ、色相、彩度、色順応などの色覚現象を説明することが目的である。

Boyntonの1979年の反対色モデルでは

$$y/b = S - (L+M)$$

$$r/g = L - 2M \text{ あるいは } L - 2M + 0.05S$$

$$Lu = L + M$$

となっている。結局、どのモデルもある程度は色覚現象を説明できるが、決して万能ではなく、それぞれのモデルが説明できる現象は限られていた。その後、モデルの精緻化がしばらく続いたが、基本的な変換方式の考え方は現在でも変わっていない。

### 5.2 各ステージの時空間特性

錐体レベルでは、L、M、S錐体の時間応答特性や網膜上の分布などが研究されてきた。特に錐体モザイクと呼ばれる網膜上の各錐体

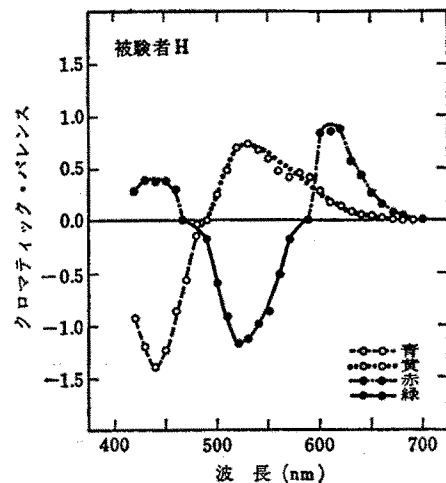


図4 Jameson-Hurvichが測定したクロマティックバレンス関数。

の分布形態については数の比をはじめ、まだ明らかになっていない点が多い。最近、極めて研究が盛んな分野でもある。また、色・輝度チャンネルの時空間特性についても不明な点が多い。この各ステージでの時間や空間特性の解明はこれからの研究課題である。

## 6. 色の見え

色の見え（カラーアピランス）と呼ばれている分野での研究は刺激の呈示条件（輝度レベル、刺激サイズ、網膜上の位置、呈示持続時間）や観察条件（空間対比、時間対比、色順応）の変化に伴う色の見えの変化特性について調べてきた。色覚のメカニズムの研究は長い間、「検出閾、弁別閾」という色の見えとは直接結びつかない色覚特性を基本にして進められてきた。一方、色の見えの研究は最終的な「見え」を扱うところに特徴を出し、色覚メカニズムを解明するというよりも、表色系の確立のためにデータを提供するなど、色の応用面での価値を強調してきた。

図5に「色の見え」の研究例を示す。1956年のMacAdamの色順応による色の見えの変化

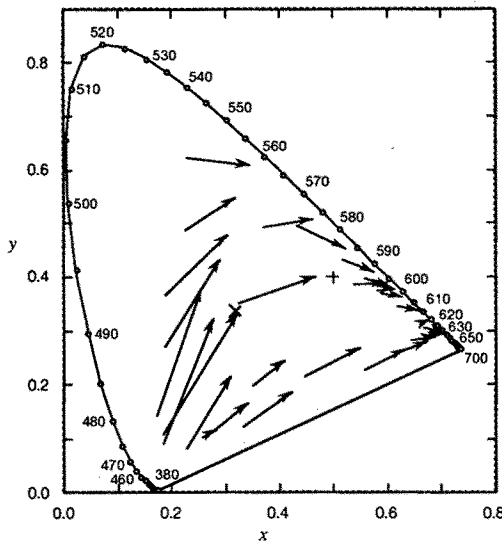


図5 MacAdamが求めた色順応の測定結果。被験者が(X)光源から(+)光源へと色順応が変化したときの対応色が矢印の尾と頭で示されている。

の測定結果である。被験者が(X)光源から(+)光源へと色順応が変化したときに、同じに見える色(対応色)が矢印の尾と頭で示されている。色順応するとこれだけ色の見えの変化が大きいということを定量的に示したもので、表色系に色順応の補正を加えるための基礎データを与えている。

## 7. 表色系の確立

表色系の研究には、CIE1931XYZ表色系から始まって、様々な表色系の提案がある。大きく分けると、等色に基づく表色系(CIE1931XYZ, LUV, LABなど)、色の見えに基づく表色系(修正Munsell, NCS, OSAなど)、色の見えのモデル(CIECAM97sなど)になる。これらの表色系の色覚研究に果たした役割は極めて大きい。もし、CIE1931XYZ表色系がなかったならば、色覚研究はほとんど進まなかったであろう。

## 8. 色覚研究のこれから

### 8.1 光から表面へ

色覚研究のこれからの流れを考えてみると、まず大きな流れに「光の知覚」から「表面の知覚」がある(図6)。過去には装置上の制限が強く、刺激は光学系を用いて作られることがほとんどであった。そのため被験者には「マックスウェル視光学系」により光刺激が与えられ、等色、閾値、弁別などの色覚特性が測定されてきた。光刺激の見えは開口色(光源色)モードになるので、当然、開口色モードで出せる色に研究が限られ、茶や黒などの研究が始るのは遅くなった。等色実

### ●光から表面へ

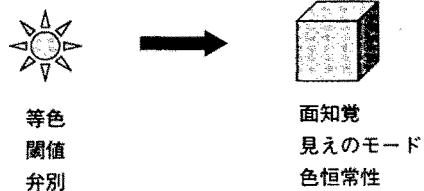


図6 色覚研究のこれから：光から表面へ。

験、閾値や弁別特性など、錐体レベルの特性が反映する研究に制限されていた。

1980年代に入り、パソコンが急激に発達し、個人で安く使える万能刺激呈示装置として研究者の中に急速に浸透していった。また、カラー CRT を使えば、これまでは不可能とあきらめていた2次元の色パターン刺激を簡単に作ることができ、研究が単なる光刺激を使ったものから面刺激を使う研究へと大きく移行していった。そもそも視覚系は光を見ているわけではなく、物を見ているわけで、装置上の制限が外されれば光から表面へと研究がシフトしていくのは当然の成り行きであろう。色恒常性、色の見えのモードなどの面知覚実験が最近非常に盛んなのは一つにはこのためである。

### 8.2 単純刺激から複雑刺激へ（実験室刺激から日常風景刺激へ）

色覚研究のこれからのもう一つの流れは単純刺激（実験室刺激）から複雑刺激（日常風景刺激）への移行であろう（図7）。これはまた、均一刺激から分布刺激への移行ともいえる。実験室では刺激をできるだけ単純化し、被験者の応答に与える刺激要因をできるだけ少なくして実験を行うのが、実験の正攻法とされてきた。しかし、単純な刺激から得られる結果をいくら寄せ集めても日常的な刺激に対する応答を予測できないことが再認識され、実験室でも積極的に複雑な刺激を使う研究者が現れてきた。もちろんこの裏にはカ

#### ●単純刺激から複雑刺激へ

（実験室刺激から  
日常風景刺激へ）



均一刺激



分布刺激



図7 色覚研究のこれから：単純刺激から複雑刺激へ。

ラー CRT の普及がある。

視覚系がそもそも日常的な複雑刺激を見るようにできているとすると、複雑刺激が与えられたときに正常な動作をするように作られているはずである。単純刺激では視覚系の動作点がとんでもないところに跳んでしまっているかもしれない。こう考えると、複雑刺激を使うことが重要であることがわかる。

### 8.3 反対色レベル以降の色覚処理過程

反対色レベルまでは現在、心理物理学、生理学的にみて、ある程度解明されていると言っても良いだろう。しかし、それ以降の高次色覚処理過程については残念ながらほとんどわかっていない。3色型色覚と反対色色覚に続くのは何型なのであるか。現在の色覚研究はまだこの疑問に答えられない。一つの可能性としてはカテゴリー色知覚がある<sup>1)</sup>。カテゴリー色名応答、色の記憶、認識などの心理物理学実験や、V4やIT野などからの生理学応答、さらに計算論からのモデルの構築といったように、心理物理、生理、計算論の分野が協力して研究は進められている。心理物理、生理、計算論の協力という点で、視覚研究の中での一つのモデルケースになればよいと考えている。

### 8.4 脳イメージングへの期待

fMRIで代表される脳イメージングは心理物理学で明らかになった色覚機能に対応する脳の部位の同定に極めて有効な方法である（図8）。被験者が実験を行いながら脳のどの部位が活動するかを知ることは、これまで生理学でも不可能であっただけに、やはり画期的なことであろう。もちろん、活動した脳の部位がすべて、その研究がねらっている視覚過程に関係しているかどうかの問題は残るが、今後の色覚研究のブレイクスルーとして大いに期待できる。

### 8.5 色応答と他の視覚機能との関係

視覚系の色応答を利用して、他の視覚機能を調べることもよく行われている。たとえば、等輝度刺激を用いることで、Magno系

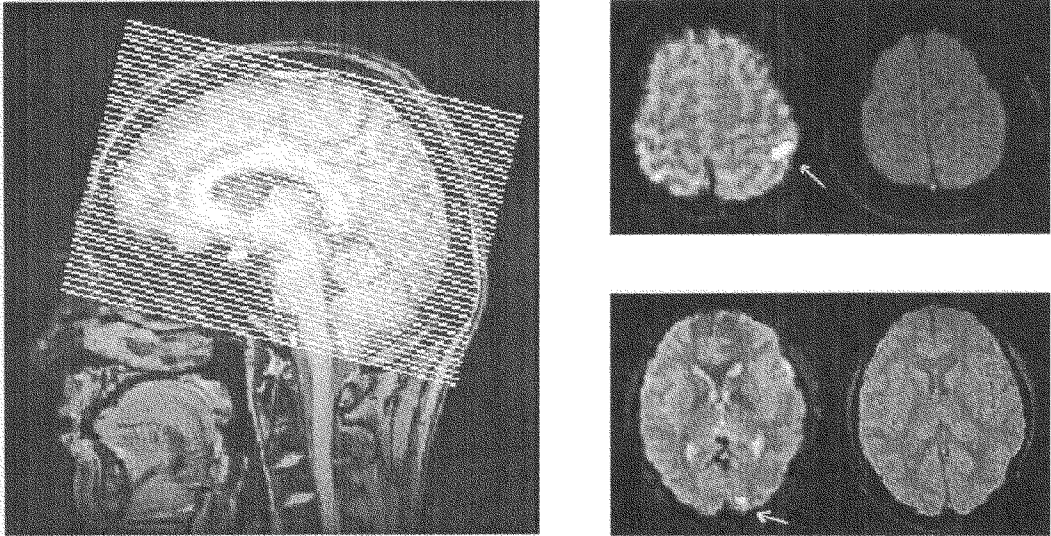


図8 色覚研究のこれから：脳イメージングへの期待。

(色選択性がない)と Parvo 系(色選択性がある)を分離して、各経路での特性を調べる実験などである。今後もこのような研究は盛んに行われるであろう。また、色覚応答と他のディメンジョン(運動、奥行きなど)との関係も今後ますます興味ある話題となろう。

## 9. おわりに

21世紀へ向かっての色覚研究の展開として、

- (1) 高次色覚経路の徹底解明
- (2) 実物の色の見え

の2分野の研究が予測できる。(1)は心理物理学、生理学、計算論および脳イメージングの各分野での研究協力があってはじめて成し遂げられるものである。現在様々な研究機関や研究プログラムで研究協力体制が進められている。今後に大いに期待できる研究である。

(2)はカラーの情報機器が市場に多く出回り、色合わせ問題の解決といった実用面からの要求が非常に強い分野である。現在、カ

ラーマネージメントシステムの構築には多くの投資が行われている。今後、違いなく発展する分野である。しかし、色は条件によって見えが簡単に変わるものであり、色の見えを日常的な条件で捕らえるのは至難のわざであることをこの分野の研究者はまず念頭に置かなければならない。周囲に安易な期待を抱かせることは絶対に慎んでほしい。かならずそのしっぺ返しが来て色覚研究全体にとって極めて大きなマイナスになってしまうからである。研究を進めるにはやはり基礎的なところから固めて行くという地道な努力が必要であること、さらにこの分野では全く新しいアイデアを生むことが強く要求されている。

## 文 献

- 1) 内川恵二：色覚のメカニズム。朝倉書店、1998。
- 2) 大山 正：色彩心理学入門(中公新書)。中央公論社、1994。
- 3) 金子隆芳：色彩の心理学(岩波新書)。岩波書店、1990。