

## 色情報は役に立つ

多くの人々にとって見えるということは日常的に当たり前のことです。しかし、もし見るができなかったら、どんなに不便かを想像することもそう難しいことではありません。目を閉じることによって、見えない世界を体験することもできる。正常な視覚を持つ多くの人々にとって、見ることなしに、対象物を知り、その位置関係、その動きなどを判断することは容易ではないでしょう。マガーク効果では、耳で聞いた音声と目で見た唇の動きが合わないとき、人は目で見た唇の動きから音声を判断します。この例でも分かるように、人の日常生活は視覚に大きく依存しています。

視覚の中で、色は役に立つ要素のひとつです。日常生活の中で魚の眼の色で鮮度を見分けたり、サンマの口先の色で油の乗りを見分けたり、野菜の葉先の変色で鮮度を見分けるときも、色情報は役立っています。絵画を楽しむときも色がなければその楽しみは半減します。また、地下鉄の路線図やデータシートを色分けすることで日常の判別を容易にしています。交通信号も色で指示を与えます。このようにヒトは色の情報を様々な場面で用いています。

色は視覚刺激のいろいろな特徴の中で、目立つ特徴です。Gegenfurtner と Rieger (Sensory and cognitive contributions of color to the recognition of natural scenes. *Current Biol.* 10, 805-808, 2000.) は、ヒトを被験者として遅延見本あわせ課題をテストすると、色のついた写真の識別と記憶は、モノクロ写真の識別や記憶よりも良い成績となると報告しています。色のついた写真の方が反応時間も短縮します。八木晃らの報告(ニホンザルの「色・形問題」I - 孤立項選択問題による検討 - *Ann. Animal Psychol.* 24, 87-96, 1974)によれば、ヒトと同じ色覚を持つニホンザルやアカゲザルの属するマカカ属のサルは形の識別課題よりも色の識別課題の方が成績を出します。一方、色が目立つことを利用して、捕食者から身を守る動物もいます。保護色の動物は、色や色のパターンを似せることで、わずかな明るさの違いが作り出す輪郭を見えにくくしています。このような条件では、捕食者にとって色の見えることが不利になっています。

## 色は脳で見える

光は波の性質を持ち、その周波数は連続的です。色はある周波数範囲の光の周波数を動物が見分けるときに脳が行う巧妙な処理のひとつです。虹色をはじめ7色に分けたニュートン(Newton I : *Optics* (Based on the 4th (1730) edition). Dover Pub. Inc. NY, 1952.) は「光線には色はない」という名言を残しました。これは、色は物理世界の存在するのではなく、波長の違いを脳が色として見る。言い換えは、「色を見るのは脳である。」という意味です。

一般にヒトは外の世界を自らの感覚器官を通して受容します。受容した結果をどのように知覚しているかは本人でなければ分かりません。しかし、視覚の中で視覚情報の空間的配置や位置の変化や形は外の世界に客観的に存在するので、自ら外の世界へ働きかけその結果をフィードバックすることによって、外の世界と矛盾しない知覚像を脳内につくることができます。一方、色の場合は外の世界にあるのは光の波長の相違でありその変化は連続的です。色は主観的なものであり、脳で見た色が正しいかどうか、見えている色が他人と同じように見えているかどうかを日常的に確かめるには「ことば」でフィードバックする以外にありません。それでも、光の波長と検出の閾値や、応答の特性との関係から色覚を客観的に調べることは可能です。

## 色情報の抽出過程

網膜には光を神経細胞が扱う電気信号に変換する視細胞があります。視細胞には形態の異なる、杆体(かんたい、高校の教科書では棒細胞)と錐体(すいたい、高校の教科書では円錐細胞)があります。杆体は光感受性は非常に高いが光に感受性を持つ物質(視物質)は一種類しかありません。一方、ヒトやアジア、アフリカに住むサルの網膜の錐体は普通3種類あって、短波長(青)視物質、中波長(緑)視物質、長波長(赤)視物質のうちいずれかを持っています。サルやヒトが色を見ることができるのはこの3種類の錐体の活動の違いによって光の波長を区別できるからです。網膜のレベルでは赤と緑の組み合わせから黄が検出され、大脳皮質でさらにいろいろな色味の抽出が行われます。

## 視物質遺伝子の話

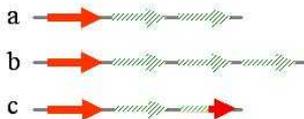
ヒトの目が色を検出できるのは、網膜の錐体が持つ視物質の働きによります。ヒト視物質遺伝子の解析によれば、L(赤)およびM(緑)視物質遺伝子は相同性が高く、364個のアミノ酸配列のうち15個のアミノ酸が違うだけです。L、M視物質遺伝子はともにX染色体上にL、Mの順にタンデムに並んで配列します(図1)。約6割のヒトがM視物質遺伝子を2個以上持つタンデムリピート構造を持ちますが、最初の2つのいずれかが転写されるので、正常色覚となります。L、またはM視物質遺伝子の欠損による色盲は、ヒト男性の約2%存在し

ますが、これはL、M視物質遺伝子のこのような構造に起因し、減数分裂時に不等交差が生じ視物質遺伝子の欠損が起こるためと考えられます。さらに、不等交差や遺伝子変換により、MとL視物質遺伝子のハイブリッドができ、その転移部位に視物質の吸収波長特性に作用する遺伝子部分が含まれると、色盲や色弱を引き起こします。一方、S(青)視物質遺伝子は7番目の常染色体にあり、その欠損はまれです。

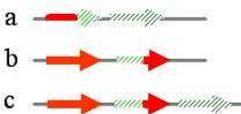
A. 正常色覚の場合のL、M視物質遺伝子の配列



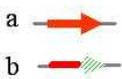
B. 色盲・色弱の原因とならないL、M視物質遺伝子の変異



C. 色弱の原因となるL、M視物質遺伝子の変異



D. 色盲の原因となるL、M視物質遺伝子の変異



注] はL、 はM、 はハイブリッド遺伝子

図1 ヒト、チンパンジー、サルのL、M視物質遺伝子の配列

A. 正常色覚。aはオス、bはメスの場合。B. 多コピーを持つが最初の2つが転写されるため正常色覚(ヒトでは66%、カニクイザルでは5%、チンパンジーでは6.9%)。C. aはハイブリッド遺伝子の吸収波長がMに近く実質的にはL欠損に相当する色弱、西アフリカから来たチンパンジーの「ラッキー」はこのタイプ。bとcはハイブリッド遺伝子の吸収波長がLに近い実質的にはM欠損に相当する色弱。D. aはMを欠損する色盲、bはLを欠損する色盲。インドネシアのパンガンダランで発見した色盲カニクイザルはこのタイプ。(後述)

色覚の進化

色覚の起源は無脊椎動物の時代にあり、彼らの色検出の仕組みは脊椎動物と高い共通性を持っています。行動レベルでも、照明光が変わっても安定した色感覚の得られる「色の恒常性」といった色覚の特性は、昆虫にも存在します。脊椎動物で見ると、最も進化した哺乳類は、その大部分が2種類の錐体視物質しか持たないいわゆる「赤緑色盲」です。ヒトや類人猿、オナガザル科のサル達は3種類の錐体視物質を用いて色を検出しますが、魚類、両生類、爬虫類、鳥類の大部分は4種類の錐体視物質を持っており、彼らの方がヒトやサルよりも豊かな色覚を持っている可能性があります。ヒトが現在もっている色覚は、ヒトの祖先が歩んだこうした歴史の産物であり、現生のヒトやサルの色覚のメカニズムの中にその歴史が埋め込まれています。

ヒトやオナガザル科のサル達も持っている3種類の錐体視物質の起源については、広鼻猿(新世界ザル)と狭鼻猿(旧世界ザル)が分岐したおよそ3000-4000万年前と見るのが一般的です(例えば、Surridge et al. Trends Ecol. Evol. 18, 198-205, 2003)。しかし、広鼻猿と狭鼻猿の共通の祖先で、より下等なサル類である原猿の中にも3種類の錐体視物質を持つ個体があり、3色型の起源はもっと古いとする主張もあります(Dominy and Lucas, Nature, 410, 353-366, 2001)。いずれにしても、哺乳類の祖先である原始哺乳類は爬虫類の全盛期に夜行性の生活をおくる中で哺乳類の祖先が保持していた4種類の錐体視物質遺伝子の2つを失いました。そのため殆どの哺乳類は2色性色覚となりましたが、その後ヒトの祖先は長波長側の視物質遺伝子が分離し、異なる吸収波長特性を持つ2種類の錐体視物質を持つことにより3色性となりました。ヒトでは、この長波長、中波長の視物質遺伝子がX染色体上にタンデムに配列し、両遺伝子の相同性が高いため、減数分裂時にしばしば遺伝子組換えが起こり、遺伝子の増加や欠損・ハイブリッドの遺伝子が生成します。ヒトではこのような組換えによる多くの多型が見られ、色盲・色弱の出現頻度も男性で5-8%を占めています。

## 中南米のサル(新世界ザル)とアジア・アフリカのサル(旧世界ザル)

現在、地球上には約 250 種の霊長類がいます。これら現生の霊長類は原猿亜目と真猿亜目に分けられます。原猿亜目のサルは霊長類の中では下等なサルの仲間です。真猿亜目はさらに広鼻下目と狭鼻下目に分けられます。広鼻下目はアメリカ大陸に住む霊長類であり、そのために新世界ザルとも呼ばれています。一方、狭鼻下目はさらにオナガザル上科とヒト上科に分けられます。ニホンザルもヒトこの仲間です。オナガザル上科のサルはアジア・アフリカに住んでいるので旧世界ザルとも呼ばれています。ヒト科に属するチンパンジー、ゴリラ、オランウータン、テナガザルなどの類人猿もアジア・アフリカに住んでいるし、人類もアフリカ起源なので、狭鼻下目の霊長類全体が旧世界の霊長類です。

## 中南米のサル(新世界ザル)

アジア・アフリカに住んでいる旧世界ザルの祖先は、類人猿の祖先として分かれ、やがて、ヒトへと進化しました。一方、約4000万年ほど前にアメリカ大陸に移動したサルは独自の進化を遂げました。この頃、すでにアメリカ大陸とアフリカは大西洋をはさんで分離しており、アメリカ大陸のサルの祖先がどのように大西洋を越えることができたかという謎は未だ解決していません。一説では、アフリカ大陸に大きな洪水が起こり、倒れて流された大木に乗ったサルがアメリカ大陸にたどり着いたと言われています。

このようにして、アメリカ大陸で独自の進化を遂げたサルは新世界ザルと呼ばれています。新世界ザルの仲間には、子ネコ程度の大きさしかないマーモセットやタマリンなどマーモセット科のサルと、小型から中型のオマキザル科のサルがいます。いずれも木の上での生活に適応していますが、マーモセット科のサルは足の親指にしか平爪がなく、すべての指に平爪を持つオマキザルや旧世界ザルとは少し違っていています。

## 新世界ザルの色覚

新世界ザルの色覚の研究では、これまでに 12 種類の新世界ザルで視物質遺伝子が調べられています。それらの中で、オマキザル科に属し夜行性のヨザルは 1 種類の錐体視物質しか持っていません。一方、やはり、オマキザル科に属するホエザルはヒトや旧世界ザルのように 3 種類の視物質を持っています。このヨザルとホエザルを除き、残りの新世界ザルは種としては複数の視物質を持ちながら、個体レベルではオスは全て 2 色型、メスは 2 色型または 3 色型の色覚を持っています。これは、X 染色体の上に 1 種類の視物質遺伝子しかなく、旧世界ザルのように、X 染色体の上に赤視物質遺伝子と緑視物質遺伝子が並んでいないことによります。そのため、X 染色体を 1 本しか持たないオスは、1 種類の視物質遺伝子しか持たず、短波長(青)の視物質遺伝子と合わせて 2 種類しか持たないことになります。一方、X 染色体を 2 本持つメスは、2 本の X 染色体上の視物質遺伝子が同じときは青と合わせて 2 色型に、2 本の X 染色体上の視物質遺伝子が違うときは青と合わせて 3 色型になります。このような色覚パターンがなぜ新世界ザルで長いあいだ保たれているかを解明するような確実なデータは現在のところ得られていません。

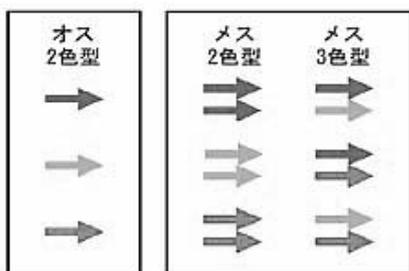


図2 大部分の新世界ザルの視物質遺伝子のパターン

これまでに、マーモセット科の、マーモセット(*Callitrichidae Callithrix*)、ピグミーマーモセット(*Callitrichidae Cebuella*)、ゲルディモンキー(*Callitrichidae Callimico*)、ライオンタマリン(*Callitrichidae Leontopithecus*)、タマリン(*Callitrichidae Saguinus*)とオマキザル科のリスザル(*Cebidae Saimiri*)、オマキザル(*Cebidae Cebus*)、ウーリーモンキー(*Cebidae Lagothrix*)、クモザル(*Cebidae Ateles*)、ティティ(*Cebidae Callicebus*)がこの図と同じような遺伝子型を持っていることが明らかになっています。(文献: Surridge, Osorio and Mundy, *Evolution and selection of trichromatic vision in primates. Trends in Ecology and Evolution*, 18, 198-205, 2003; Surridge and Mundy, *Trans-specific evolution of opsin alleles and the maintenance of trichromatic colour vision in Callitrichine primates.*, *Molecular Ecology*, 11, 2157-2169, 2002; Heesy; and Ross, *Evolution of*

### アジア・アフリカのサル(旧世界ザル)の色覚

旧世界ザルの中でマカカ属のサルがヒトと同じ色覚を持つことを示す行動実験は1930年代からすでに報告がありました。1960年代に入ると、いくつかの詳細な実験が行われました。De Valoisら(1974)は、カニクイザル3頭、ブタオザル4頭、ベニガオザル2頭で行動実験を行い、その色覚をヒトの色覚と比較しました。彼らを用いた第1のテストは、3種類の定常光とフリッカー光を同時に呈示し、フリッカー光を選ぶと報酬を与える課題です。この課題により、まず、各波長(色)毎のサルの分光感度を求め正常色覚者のヒト被験者と同じであることを確認しました。つぎに、4つのうち1つだけ異なった色の刺激を呈示し、この刺激を選択すると報酬を与える課題をテストしました。この課題では、サルが全ての色を白色光と区別することが確認できました。さらに、光の波長の識別できる閾値を求めたところ、各波長における識別できる波長差の最小値もヒトのデータとよく似ていました。彼らの一連の実験ではすべての検査個体がヒトと同じ3色型色覚を持つことが明らかになりました。

1960年代には網膜の神経節細胞の色応答を調べた研究もマカカ属の一種であるアカゲザルが3色型の色覚を持つことを示しました。その後、1970-90年代には網膜電図(ERG)を用いた研究、1980-90年代には網膜視細胞の分光分析を用いた研究、さらに、1990年後半以降は遺伝子レベルによる研究が行われ、これまでにオナガザル科の18種類(アカゲザル、カニクイザル、ブタオザル、ベニガオザル、タラボワン、パタスモンキー、グリベットモンキー、ダイアナモンキー、ブルーモンキー、モナモンキー、ショウハナジログエノン、クチヒゲゲエノン、アカオザル、ブラッザモンキー、アングラコロプス、アビシニアコロプス、シルバートン、ギニアヒト)、テナガザル、オランウータン、チンパンジー、ゴリラの色覚についてのデータが集まりました。オナガザル科のサルについては、現生の種のまだ約15%の検査が行われたに過ぎませんが、これまでに検査が行われた旧世界ザルと類人猿のすべての種が3種類の錐体視物質を持っており、その色覚は3色型でした。そのため、旧世界霊長類は、すべてヒトと同じような色覚を持つとする見方が一般的です

### ヒトの色盲と視物質遺伝子

すでに紹介したように、ヒトでは色盲・色弱の頻度は高いのですが、ヒト以外のアジア・アフリカの霊長類では、色盲、色弱が存在する証拠は1998年まで得られませんでした。De Valoisらは、旧世界ザルで色盲が見つければ、ヒトの色覚の進化の問題を解くカギが得られるであろうと述べた後、彼らが調べた15頭のマカカ属サルに色覚異常はなかったと書いています(De Valoisら、Vision Res. 14, 53-67, 1974)。最近ではJacobsらが類人猿を含む104頭の旧世界霊長類の網膜電図(ERG)を用いて調べ、色覚異常は見つからなかったと報告しています(Jacobs and Williams, Col. Res. Appl. 26, S123-S127, 2001)。

### 旧世界ザルで色盲を探す

我々は、1997年に生理学研究所、基礎生物学研究所、霊長類研究所の共同研究プロジェクトとして、色盲のサルを探す試みを開始しました。この時点では、オナガザル科のサルや類人猿に色盲、色弱の個体の報告はありませんでしたが、それまでの研究では調べた個体の総数が少なかったため、見つからないのはそのためとも考えられました。テストした個体数が少なかった理由の1つは、行動実験、分光分析、ERGを用いる方法では1頭調べるのに相当の期間と手間を要することによります。一方、1980年代後半からヒトを対象に研究の進んだ遺伝子レベルの研究は、血液サンプルを用いるため比較的短期間に多数のサンプルを調べられる利点があります。そこで我々は、まず遺伝子解析から始めることにしました。

プロジェクトの開始当初はヒトと同じ程度の出現頻度を予測していたため、霊長類研究所保有の約700頭のマカカ属サルから発見できるものと考えていました。しかし、霊長類研究所保有のサルから視物質の異常は見つからず、筑波霊長類センターをはじめとする日本国内の入手可能なマカカ属の血液サンプルの解析を進めました。しかし、日本国内でも見つからず、霊長類研究所の竹中修教授がタイおよびインドネシアで採取したマカカ属サルの血液サンプルの解析も行いました。

### カニクイザルの視物質遺伝子の解析

大西ら(文献1、文献3)は主に東南アジアおよび日本に生息する19種のマカカ属のサル合計2788頭(オス1092頭・メス1696)のゲノムDNAサンプルに関して遺伝子レベルの解析を行いました。まずサンプル数の一番多かったカニクイザルより、遺伝子をクローニングし、その構造をヒトと比較しました。その結果、カニクイザルのLおよびM遺伝子はヒトと同じく6つのエクソンで構成され、タンデムリピート構造を取ることが分かりまし

た。この結果は、マカカ属のサルでもヒトと同じく不等交差による視物質遺伝子の欠損や、不等交差や遺伝子変換によるハイブリッド遺伝子の出現する可能性を示しています。

この結果を受け、さらに遺伝子レベルの解析を行った結果、霊長類研究所の竹中、後藤がサンプルしたカニクイザル血液から、エクソン1から4までがL視物質遺伝子の配列を、エクソン5と6がM視物質遺伝子の配列を取るハイブリッド視物質(4L5M)を1つだけ持つカニクイザル・オスが3頭みつかりました。また、この4L5M視物質を培養細胞に発現させ、吸収極大波長を測定した結果、4L5M視物質はM視物質の吸収極大波長より長波長側に6nmシフトするものの、ほとんどM視物質と差がありませんでした。この結果から、これら3頭は短波長(S)視物質とほぼ中波長(M)に吸収極大を持つハイブリッド視物質による2色型であり、その遺伝子型はヒトで言うL視物質欠損型の第一色覚異常であることが分かりました。この遺伝子型の出現頻度は、我々が調べたオスのカニクイザルのサンプルで計算すると約0.4%でした。

上記の3頭は、すべてインドネシア、ジャワ島、パンガンダランのカニクイザルでした。パンガンダランには各群約30-40頭の8つの群が確認されています。そこで、この地区のカニクイザルで再度捕獲調査を実施しました。その結果、4L5Mを持つ個体がオス5頭、メス10頭みつかりました。これらのサルは3つの隣接する群に限局していました。オス・アダルトのカニクイザルは群を出て移動することが知られているので、4L5Mの遺伝子型は3つの群のいずれかから出て伝播した可能性が示唆されます。

ところで、色盲の遺伝子型は不等交差による遺伝子の欠損に起因します。不等交差により遺伝子欠損が起こるとき遺伝子の増加も起こります。そのため、ヒト男性では66%がM視物質遺伝子を多コピー持ちます。そこでカニクイザル・オスの130サンプルについて調べたところ、6サンプルがM視物質遺伝子を多コピー持っていました。これらはすべてタイ南部のヤラとソククラのサンプルであった。カニクイザルにおける多コピーの出現頻度(5%)はヒトと比較して低かった。

### ハイブリッド視物質遺伝子を持つ個体の色覚

分子遺伝学的手法により、ハイブリッド視物質遺伝子を持つと判定されたオスのカニクイザル(2色型)は、L視物質遺伝子を欠損しているため、網膜にもL錐体が存在せず、赤色に対する感度が正常個体(3色型)よりも低いことが予測されました。そこで、花澤ら(文献2)は網膜電図(ERG)によって網膜の赤と緑に対する相対感度を測定し、この点を検討しました。テスト光には、525nm(緑)および644nm(赤)の発光ダイオードを用い、30Hzの逆位相でフリッカー呈示しました。相対感度は、赤または緑の輝度を固定し他方の輝度を変化させる方法で、ERG応答の最も小さくなる輝度比から求めました。

3色型では、緑と赤の輝度比が1:1のときにERG応答が最小となり、L、M両方の錐体が平等に存在することが示されました。一方、ハイブリッド視物質遺伝子4L5Mのみを持つ2色型では赤に対する感度は緑の4分の1であった(図4)。X染色体の1つがL、M、もう1つが4L5Mの視物質遺伝子をもつヘテロ型のメスでは赤に対する感度は緑の2分の1でした。これらの結果は、4L5Mのみを持つオスは、その網膜にL錐体が存在せず、表現型においても2色型であり、2色性の色覚を持つ可能性が高いことを示しました。一方、ヘテロ型の網膜にはL錐体が存在するが、その数は3色型よりも少ないと推定されました。このように、遺伝子型と網膜の赤、緑に対する感度は良好な対応関係を示しました。

### 色盲ザルの行動学的判定

さらに、知覚レベルの解析により表現型を確認するため、三上らは2色型と3色型のサルで、石原式色覚テスト票を模して作成した図形の弁別テストを行いました。訓練用の図形として、背景は明るい緑、リングは暗い赤茶で描いた刺激(P100)を用意しました。この図形は色盲にも識別できる図形です。つぎに、ヒト第1色覚異常の混同色を用いて作成した刺激(E0)を用意しました。この図形は、背景は明るさ3段階の緑、リングは明るさ2段階の赤茶(肌色)で構成し、明るさの配置が手がかりとならないように各色をモザイク状に配置しました。これらの中間の条件としてP100とE0の条件を一定の比率で混合し、E50、E25、E12の刺激を用意しました。これらのテスト図形がヒトの第1色覚異常検出に有効であることを確認するための予備実験を行い、色盲・色弱の被験者でE12、E0条件でリングのパターンが見えないことを確認しました。

サルにはリングの描かれた図とリングの描かれていない図を同時に呈示し、リングの描かれた図を選択すると正解として報酬を与えました。まず、訓練図形(P100)、ついで基準図形(E50)を用い、1ブロック20試行、1日2ブロックの訓練を行い、正答率80%以上のブロックが5回連続したとき訓練を終了しました。テストセッションでは1ブロック中、E50を17回、E25を1回、E12を1回、E0を1回呈示しました。各個体22ブロック以上テストした結果、3色型は、E25、E12、E0ともに好成績であったが、2色型個体はE12、E0で成績が有意に低下しました。これら一連の結果は、ハイブリッドの視物質遺伝子1個を持つオスのカニクイザルが、ヒトの第1色覚異常と相同の視覚特性を持つことを示しました。

## ヒト以外の旧世界霊長類ではなぜ色盲・色弱が少ないか

その後、チンパンジーでも色弱個体を発見し行動などの詳細な解析を行いました(文献5)。一連の研究の結果、我々のサンプルで計算した色盲、色弱の出現頻度はカニクイザルで0.4%、チンパンジーで1.7%とヒトと比較して圧倒的に少ないことが分かりました。ヒト以外の旧世界霊長類で色盲、色弱が少ない理由のひとつとして考えられているのが、淘汰圧の問題です。色盲・色弱の個体は熟した赤い実や新芽を緑の葉の間で見つけるのが困難であり、自然の環境では不利であるという解釈です(Tan and Li, Nature 402, 36, 1999)。確かに、我々が行った検査でも、色盲ザルは彼らが生息しているパンガンダランにありサルの餌場となっているBuni (*Antidesma bunius*, Bignay)の木の实の識別ができませんでした(文献4)。ヒトで色盲、色弱の出現頻度が高い理由も、現代人は自然の中で木の实を素早く見つけることで生き延びる生活とは無縁であり、最早淘汰圧とはならないと説明されます。しかし、前述のように自然界には色以外にも様々な手がかりがあり、色盲、色弱でも日常生活には適応可能と見ることもできます。パンガンダランで我々が色盲と同定したサルの何頭かは高齢になるまで生き延びたサルであり、また、オスザルの1頭はその群れのアルファー・メール(ボスザル)であったことを考えると、色盲、色弱が淘汰圧になるとする見方は単純すぎるように思います。

我々の調査結果では、色覚には直接影響せず淘汰圧にはならないはずのM視物質遺伝子を多コピー持つ個体がカニクイザルでもチンパンジーでも圧倒的に少数でした。この事実も、カニクイザル、チンパンジーとヒトとの相違は、単純に淘汰圧では説明できないことを示しています。淘汰圧以外の要因として考えられるのは、カニクイザルやヒトへの進化の過程で少数の集団から急速に拡大した時期があり、その集団が持っていた遺伝子構成の特徴が引き継がれたとする「瓶首効果」説です。そのほか、サルや類人猿では、群れのサイズが小さく、移動範囲も狭いこと、さらには、イントロン部分の遺伝子構造の違いなどの要因の可能性も考慮する必要があります。

### < 関連発表 >

1. Onishi, A., Koike, S., Ida, M., Imai, H., Shichida, Y., Takenaka, O., Hanazawa, A., Komatsu, H., Mikami, A., Goto, S., Bambang, S., Kitahara, K., Yamamori, T. (1999) Finding of dichromatic macaque monkeys. *Nature* 402, 139-140.
2. Hanazawa, A., Mikami, A., Angelika, P. S., Takenaka, O., Goto, S., Onishi, A., Koike, S., Yamamori, T., Kato, K., Kondo, A., Suryobroto, B., Farajallah, A., (2001) Electroretinogram analysis of relative spectral sensitivity in genetically identified dichromatic macaques. *PNAS*, 98, 8124-8127.
3. Onishi, A., Koike, S., Ida-Hosonuma, M., Imai, H., Shichida, Y., Takenaka, O., Hanazawa, A., Komatsu, H., Mikami, A., Goto, S., Suryobroto, B., Farajallah, A., Varavudhi, P., Eakavhibata, C., Kitahara, K., Yamamori, T. (2002) Variations in long-wavelength-sensitive and middle-wavelength-sensitive opsin gene loci in crab-eating monkeys. *Vision Res.* 42, 281-292.
4. Saitou, A., Mikami, A., Hasegawa, T., Terao, K., Koike, S., Onishi, A., Takenaka, O., Teramoto, M. and Mori, Y. (2003) The behavioral evidence of the color vision deficiency in a protanomalia chimpanzee (*Pan troglodytes*). *Primates*, 44, 171-176.