

# シリーズ特集

自然感を追究した審美補綴——セラモメタルクラウン  
における“光”と“形態”

## 第2回 光と視覚のメカニズムと 天然歯色調の把握法

セラモメタルクラウンが歯列や歯周組織と違和感なく調和することと、全く天然歯と同じ人工物を製作することは同じことを意味しているわけではありません。しかも、人工物としての構造や材質的な問題などから、それは、現状では不可能なことです。

したがって現実的には、ヒトの視覚のメカニズムを利用して、人工物を「自然なように見せる」ことで対応することとなります。色調という点では、そのために“光”をコントロールしなければならないことは、周知のことでしょう。一方、形態については、輪郭という点では天然歯の形態に可及的に近似させることが原則でしょうが、表面性状は光のコントロールにも密接な関係があり、これも残存天然歯が参考となります。

本シリーズ特集では、マイスターでドイツ在住の大島一成先生により、生体の視覚機構から説き起こしていただき、それに合致した技術論を展開していただきます。（編集部）

ドイツ・デュッセルドルフ市  
Dental Studio GmbH Rolf Herrmann  
大島一成 Kazunari OHATA

# 1

## はじめに

“色は光そのものである”とニュートンが唱えたように、われわれは物体から放出（反射）される光線のスペクトルによって物体の存在を認識し、色を感じる。歯に光が当たると光は屈折を繰り返し、そして通過してしまうものと、反射し返ってくるものがある（図1）。

前者によって主に透明感を感じ、後者によ

って色を感じることができる。さらに表面反射により表面性状が観察される（図1）。

天然歯と人工歯とのマテリアルの相違とそのメタメリズムは、現状では如何ともしがたいものであるから、セラモメタルクラウンに入射してくる光をコントロールしなければならないこととなる。そしてそのためには、セラモメタルクラウンの形態や表面性状を可及的に天然歯に近づけなければならない、と考える。また、ヒトの視覚メカニズムなどの色を認識する機構と、色が作り出されるメカニズムとを把握しておくことも必須と考えられる。

そこで本稿においては、まず、ヒトの視覚の基本的な機構と色を形成する機構との概要を説明した後、それらの要素を前提としたセラモメタルクラウンの色調の再現の方法について述べてみる。まず今回は、視覚と色の形成機構、さらにそれらがセラモメタルクラウンを製作するうえで、どのような形で参考となるか解説してみる。

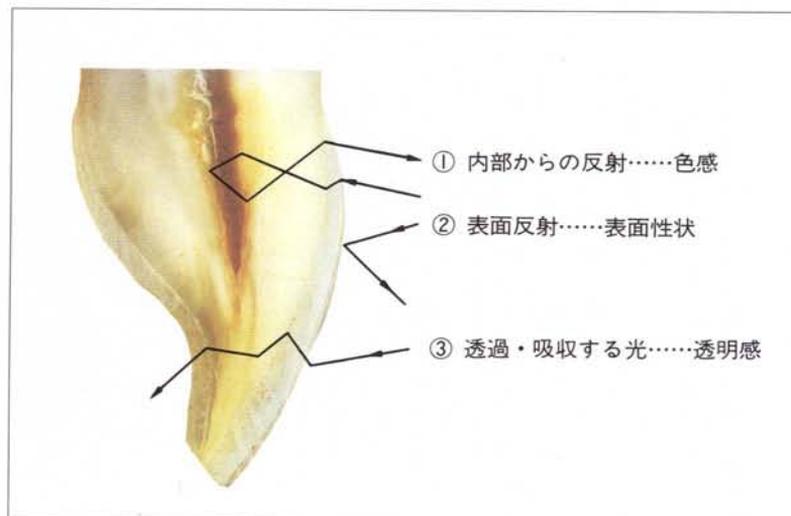


図1 歯に光線が当たった場合の光の“反射・吸収の三要素”（坂 清子：Q&A セラモメタルサイエンス、1989、より）

## 2

## ヒトの視覚メカニズムと理想的シェードテイキングとの関係

### 1) ヒトが視覚するメカニズム

光（可視光線）とは、物理学的には、およそ 400～700 nm の電磁波であり、波長の短いものから、青紫→青緑→緑→黄→赤オレンジ、へと移行する分光分布を示す(図 2)。光が物体に当たり、そして反射、吸収過程を経て、物体から反射してくる光が目の中の網膜に伝達される。

そして歯科においては、一般的には視感測色法による色の直接比較が行われるため、光電色彩計や分光測光器などを使用する物理測色法などに比べ、観察者の主観や視感覚に誤差を生じやすい(図 3)。

ヒトの眼の構造(図 4)はカメラのそれと類似しており(実際はカメラがヒトの眼を模倣している)、レンズを通過した光がフィルムに伝達されるのと同様、角膜や水晶体などを通った光が網膜に伝達され、網膜内の二種の視細胞“錐状体”と“桿状体”により色覚・光覚に分析され、視神経を介してフィルムに相当する脳の視中枢(視覚領)へ伝達されるわけである(図 5)。

### 2) ヒトの視覚メカニズムとシェードテイキングとの関係

錐状対は、主に“色覚”を司り、物の運動によく反応し、特に中心窩の中央部(図 4 ⑨)直径 2 mm の範囲には、この錐状体のみが約 4,000 個分布しており、2 度視野においては

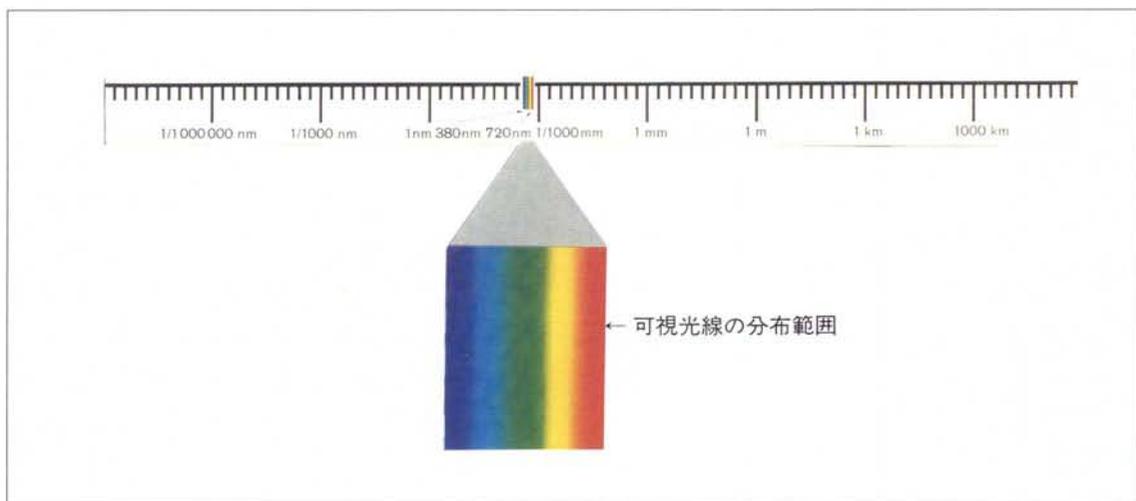


図 2 電磁波スペクトルと可視光線の分布範囲 (Harald kiippers : Farbe. 1987. より)

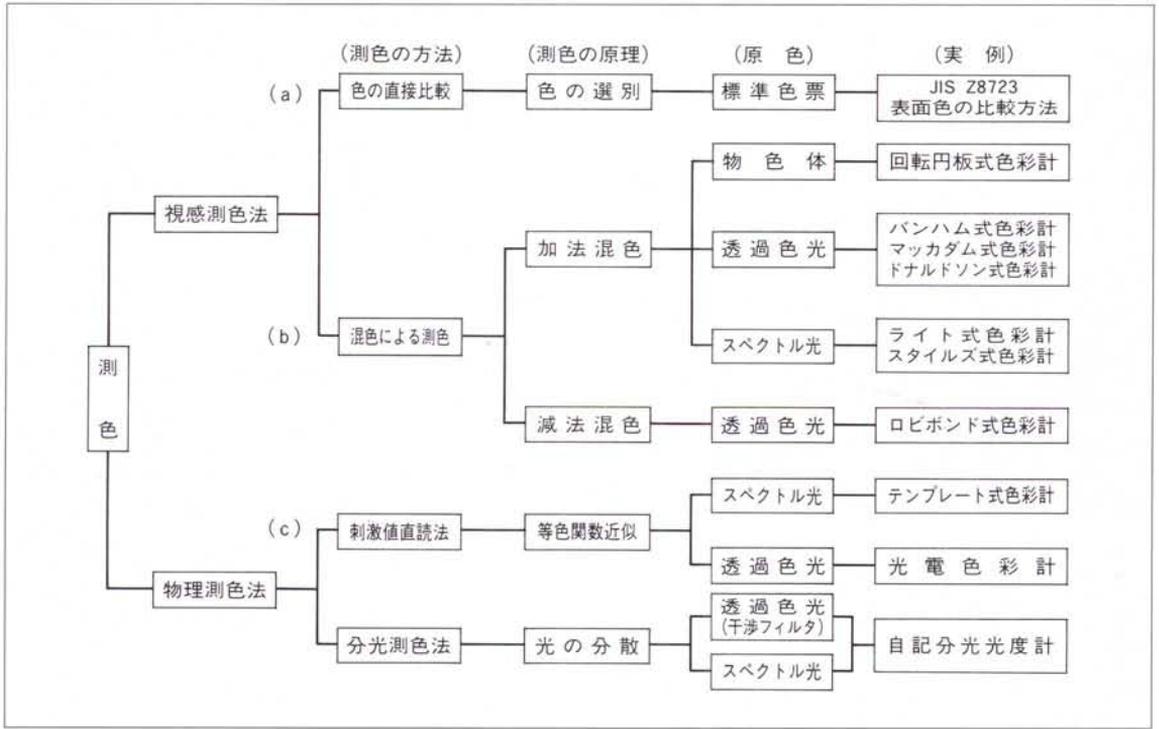


図3 測色法の分類 (川上元郎ほか編:色彩の事典,より)

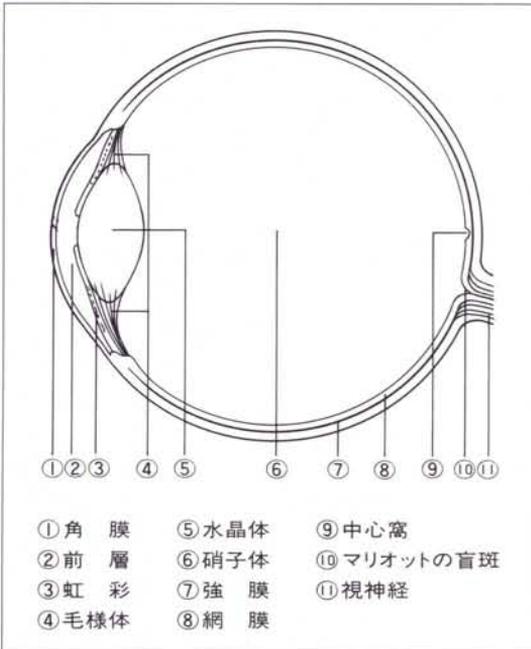


図4 右目の水平断面模式図 (坂 清子:Q&Aセラモメタルサイエンス,1989より)

30 cm をシェードテイキングの理想的距離とすると、約 1 cm<sup>2</sup>内で色覚を最も高めることが可能となり、シェードガイドを歯面下に平行に位置付けることによって、わりあい正確な測色ができる (図6)。

これに対して桿状体は“光覚”が発達しており、10度視野に最も多く分布することから (図7)、シェードガイドの測色距離では、5 cm<sup>2</sup>の範囲で、明暗 (明度) を最も理想的に観察できるはずである。

これらのことや、桿状体と錐状体の絶対数 (桿状体 1 億 3 千万個、錐状体 7 百万個) の差からしても、同一測色条件時の理想的測色範囲は、色覚より 5 倍も広い光覚に有利となる。これはすなわち、補綴物の明度が色調よりも優先されることにほかならない。

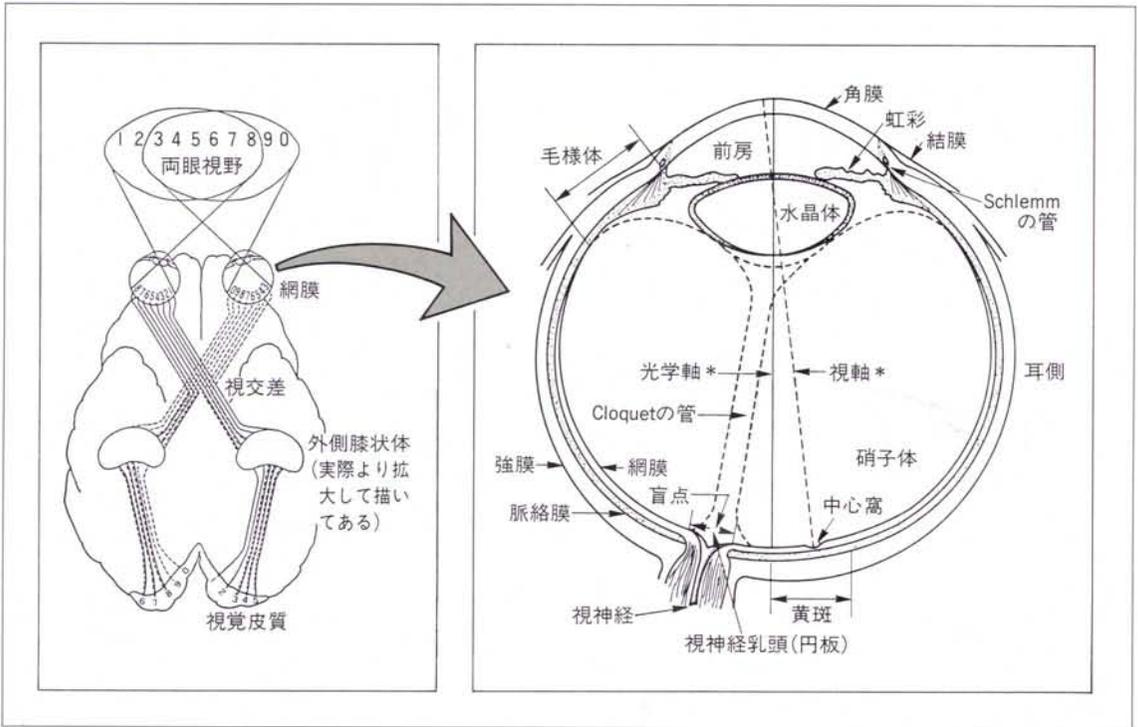


図5 視覚系の構造を示す模式図 (Lindsay and Norman, 1977, より)

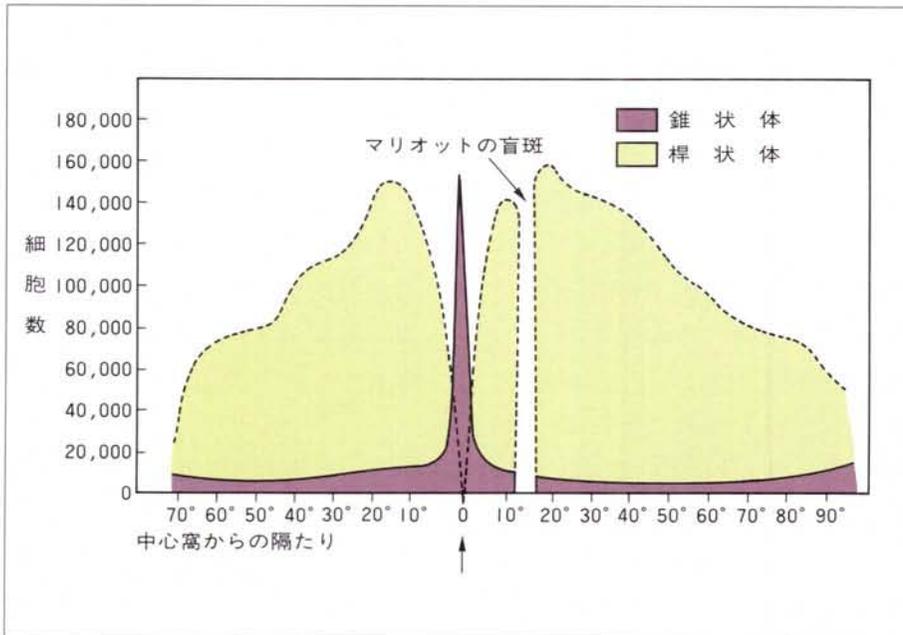


図6 中心窩を中心とした錐状体と桿状体の分布 (坂 清子: Q&A セラモメタルサイエンス, 1989, p.153, より)

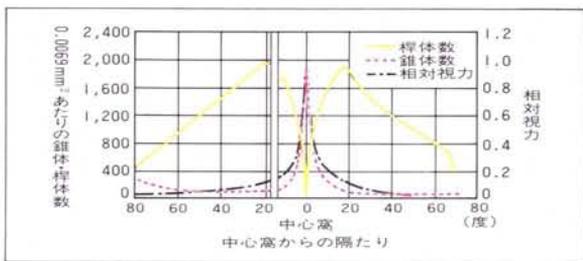
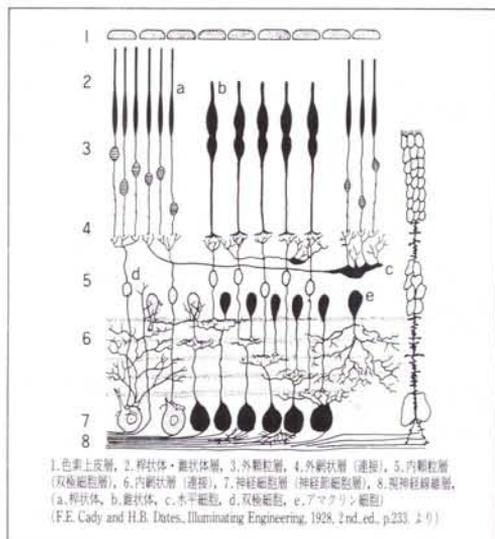
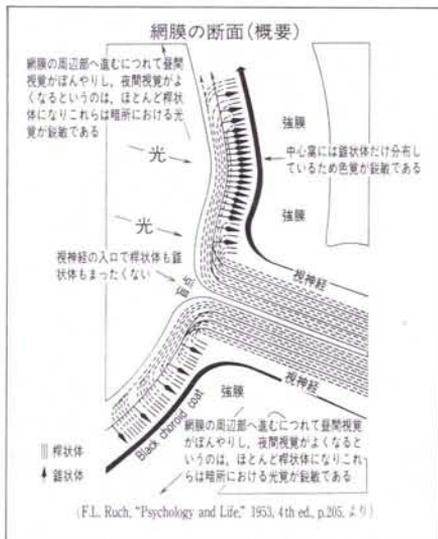


図7 人間の網膜の構造と桿状体、錐状体の数と相対視力との関係(川上元郎ほか編:色彩の事典,より)

さらに、光透過物質の色は、どんな光が透過または反射しても、不透明な物質の反射による色よりもずっと澄んで強くなることから、審美補綴におけるセラミック材を用いた補綴物の製作に関しては、特に明度、そして透明感を忠実に再現することが重要となる。

また、錐状体は明るい場所でよく働き(明順応)、その感度は桿状体に比べてずっと赤、橙の長波長の領域に寄っている(最大感度 554 nm)。これに対し、桿状体は弱い光に敏感に反応するため、暗いときにフル活動するようにできており(暗順応)、青、シアンなど短波長の領域に感度が増大する(最大感度 511

nm)(図8)。

このことから、シェードテイキング時に光源の明るさが十分でなければ、桿状体の有利な活動から、青やシアンなど短波長の色が強調されてしまうことになる(パーキンエ現象)。

### 3) 日照の違いによる民族間の色彩感の違い

一方で、民族による色彩感の相違も見逃すことができない。“人間は赤道に近づくにつれ、太陽光線の強さによって赤色視覚が高められる”ようである。そのためかどうか、ラ

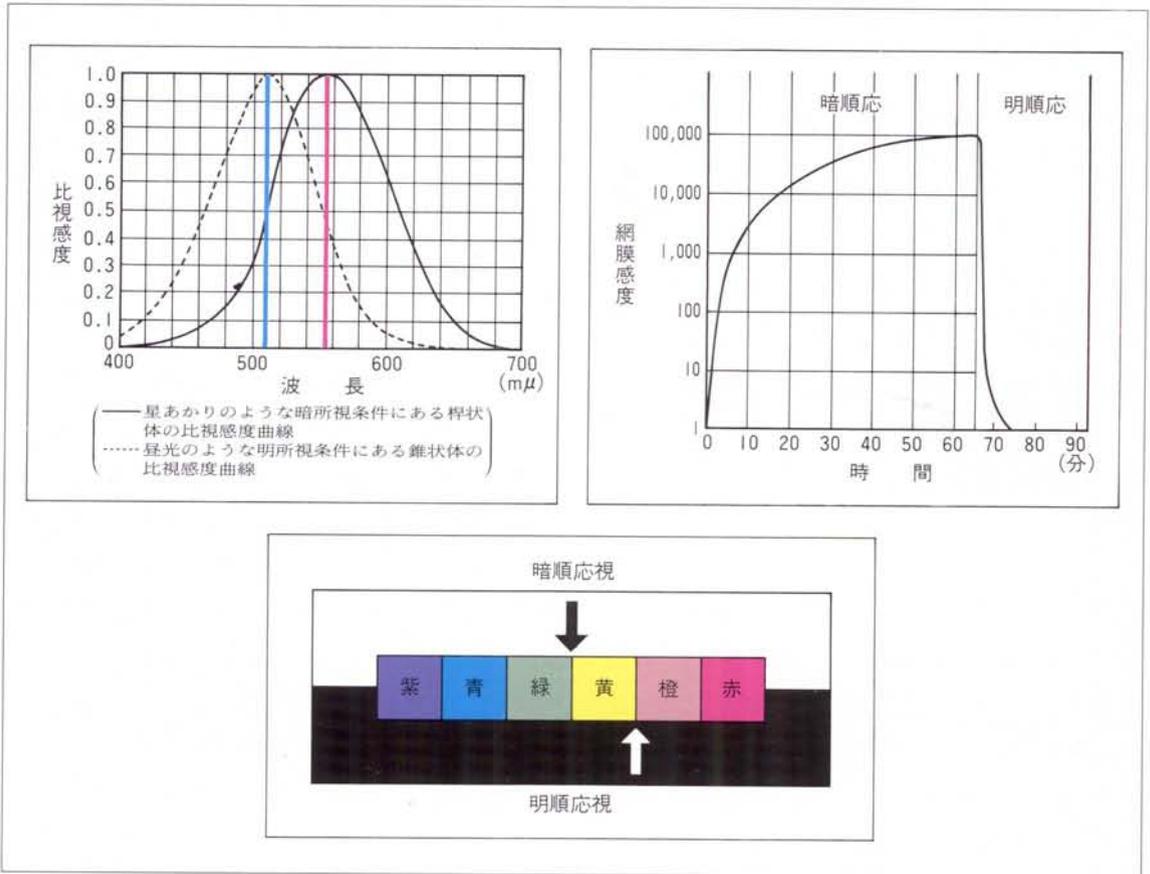


図8 桿状体と錐状体の比視感度曲線（野村順一：色彩効用論・ガイアの色、1988、p.66. より）

テン系民族は赤色など暖色系の色を好むとされている。これは風土的に強烈な“サンライト”光線が太陽順応させ、そこに住む人々の眼に変化を与えた（長波長光に対する眼の調節作用）。これにより、網膜の中心窩には強い色素形成が生じ、赤色視覚が発達していることから、赤色系がより鮮やかに見える。

これに対し北欧系民族は高緯度特有の“スカイライト”や“白夜”などの影響から、短波長の色——紫、青、緑などによく反応するので、緑色視細胞が発達し、青色系がより鮮やかに強調される。ただし紫外線の不足から、一般的に眼が弱くなることも事実である。

このように、日照率のよい地域と悪い地域とでは色感に大きな相違がみられ、異なった色嗜好をもち、ひいては色に対する先入観をもつことにつながる（パレット効果）。

筆者は長年北欧系民族の中で歯科技工士をしてきたが、彼らのいう“透明なブルーグレー”などというエナメル色の表現がずっと理解できないでいた。そのためかセラモメタルクラウンの色の修正などで、この壁によくぶち当たったことを覚えている。

最近、このような修正が少ないのは、自分自身の眼がこの環境に順応してきたためであろうか……。

# 3

## 光によりヒトが視覚を感じる化学的な機序

光が光受容器に働きかけると、錐状体や桿状体に含まれる視覚物質が光の刺激によって変化し、これら視細胞に受容器電位が生じる。この光化学反応による化学エネルギーによって網膜の神経要素が刺激され、視神経を通じて視覚中枢へ伝達される。

図9は、この光受容過程を示したものであるが、これら化学物質の変化は明順応と暗順応の関係に比例している。特に A. C. Clause の提唱する“ロドプシンの合成は、ビタミンAと網膜の代謝の有効性しだいである”という理論は、眼とビタミンA、それに生体の健康状態との間に決定的な関連性があることを裏付けている。

色感を司る錐状体には3種類のタイプがあり、それぞれがほとんど独立して色（光）の基本三原色（図10）の青紫、緑、赤オレンジの情報を受容する。具体的に例をあげると、

「3人の子供たちがおのおの同じ大きさのかごを持って山へきのこを取りに行ったとする。3人のテリトリーを大まかに決め、3個所できのこを採取することによって、きのこの量をテリトリー別に分析することができる。このテリトリー上の情報量の結果が三原色を判別する。

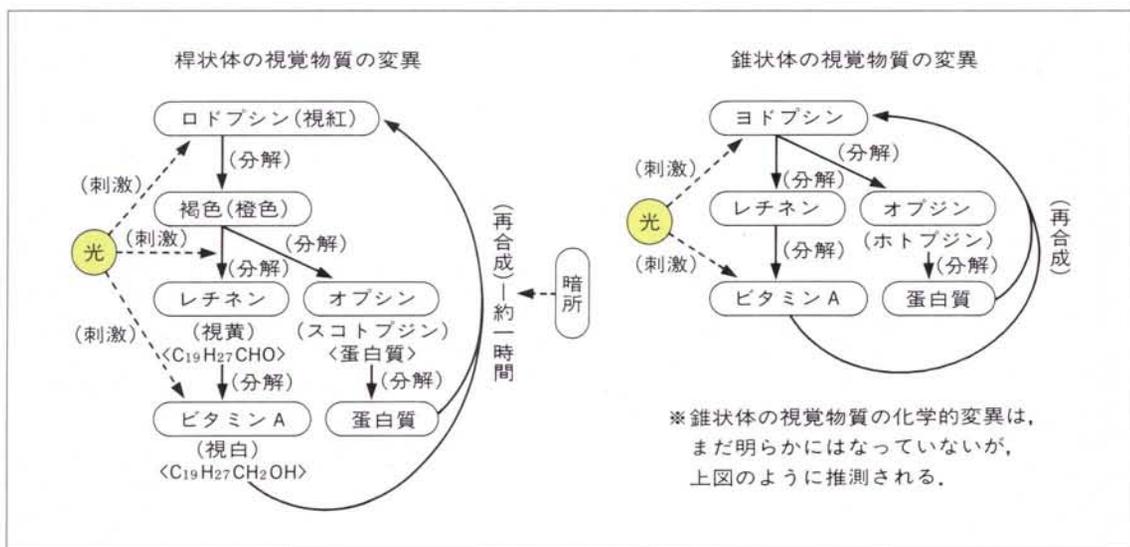


図9 桿状体の視覚物質の変異（野村順一：色彩効用論・ガイアの色、1988、改変引用）

さらに、3人の子供たちはテリトリー内できのこを採取するが、きのこは決まった場所のみには生えていない。どこか子供たちが重複して採取せざるをえない場所があるはずである。この重複する情報量が前述の基本三原色の重なりである」

このようにして、青緑、黄などの色調の情報の識別が可能になるのである(図11)。

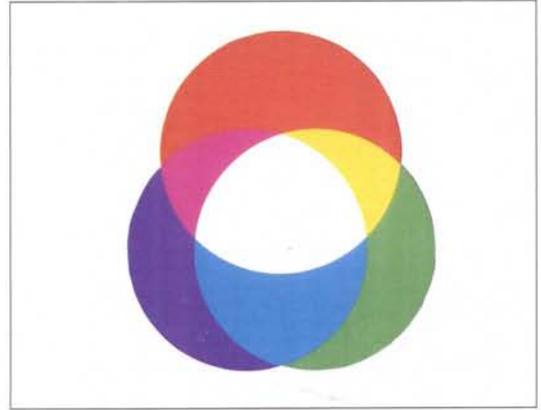


図10 光の基本三原色

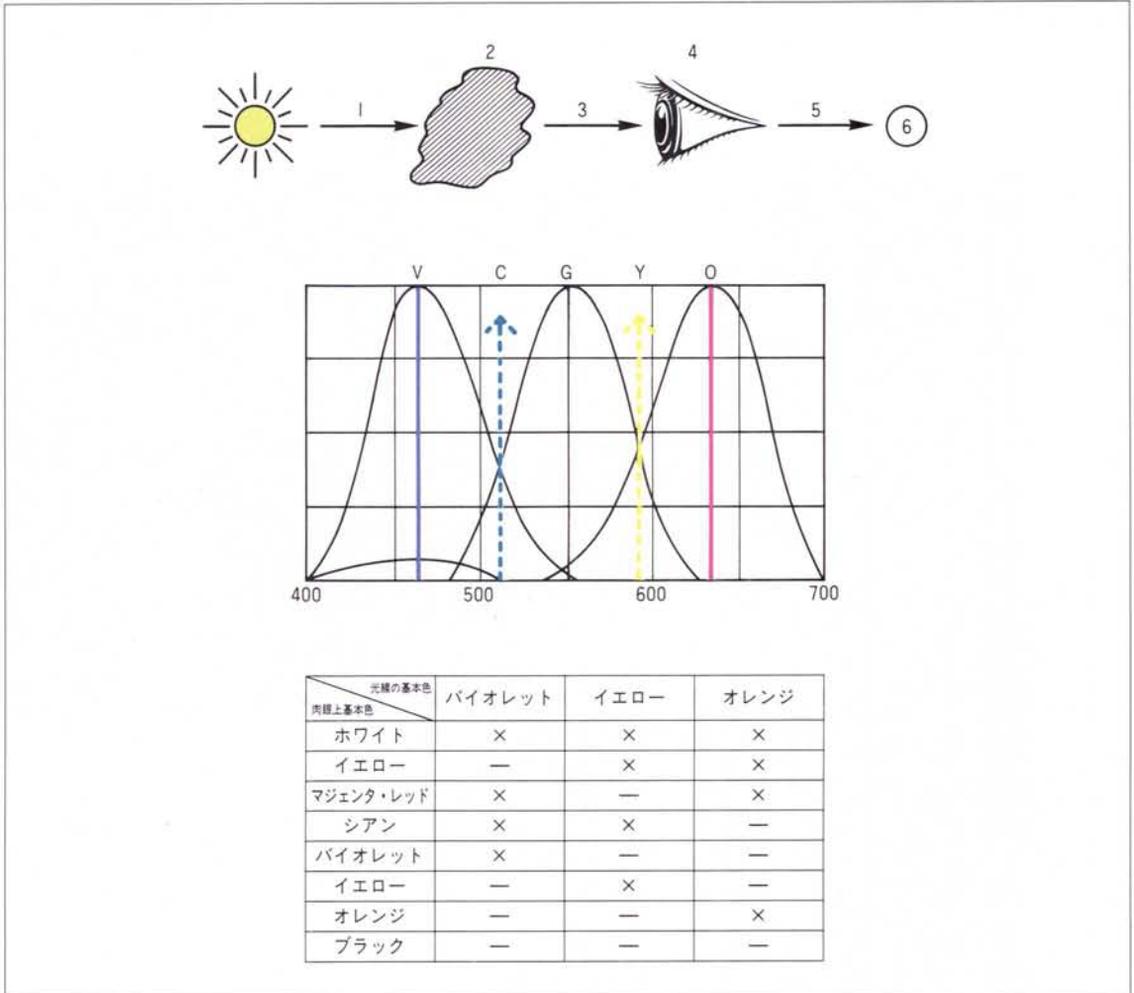


図11 錐状体の原色受容範囲 (Harald kiippers : Farbe, 1987. より)

# 4

## シェードテイキング に影響を及ぼす光源 についての基本

歯冠色調の測色の際には、光源の選択が適切に行われなければならないことは周知の事実であるが(図 12 A)、ここで、あらためてその原理について述べてみる。

図 12 B に示すように、光と物体とは同様の分光エネルギーをもっているから、同一光源下でも物体の分光エネルギーが変われば色が変わると同様に、物体は変化しなくとも光源が変わる物体の色が変化することが理解できる。

図 12 B に示す分光反射吸収率曲線からは、青紫の物体(図 12 B-a)が黄色の光源下(図

A. 分光比エネルギー分布

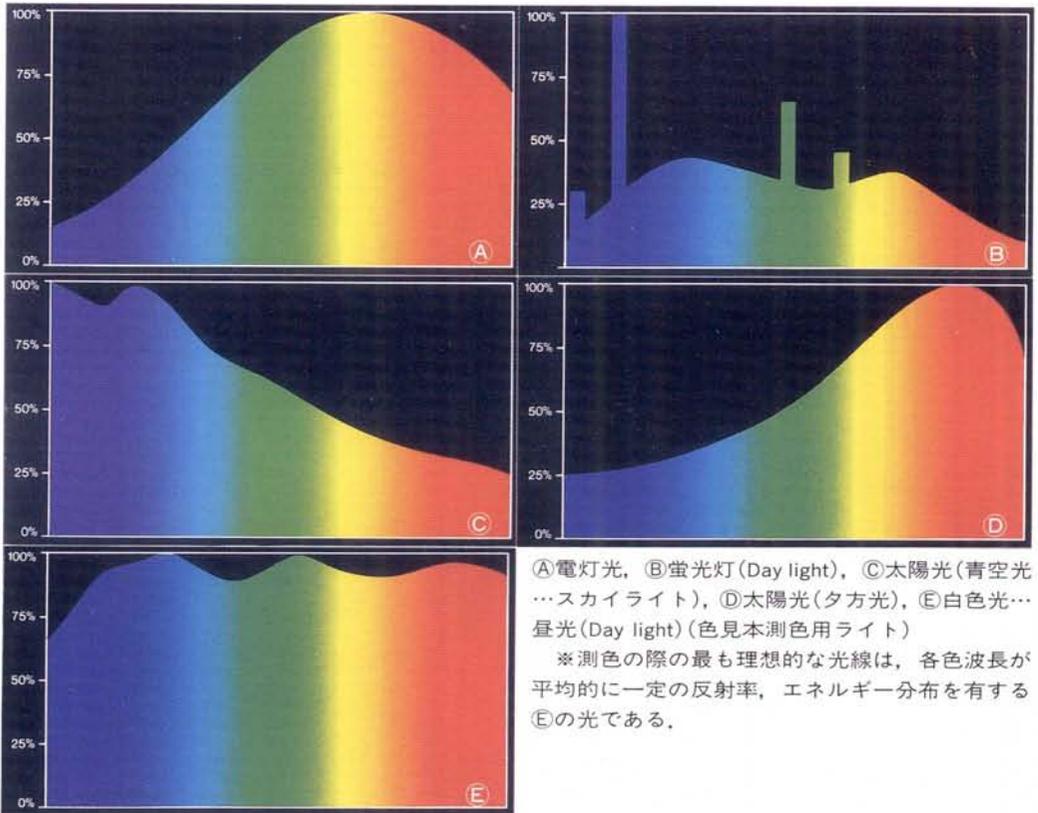


図 12 種々な光源の分光比エネルギー分布と、物体と光線の分光吸収・反射率曲線 (Harald Kiippers: Farbe, 1987. より)

12 B-b)に存在すると、青緑に変化することが理解できる(図 12 B-d)。これは、二種の分光反射率を有する物体が一体となって、互いに同等の分光構成(図 12 B-cの重複する領域)のみを反射し、さらには、短波長の成分(図 12 Bでは青紫)を吸収してしまう現象が起きることによる。

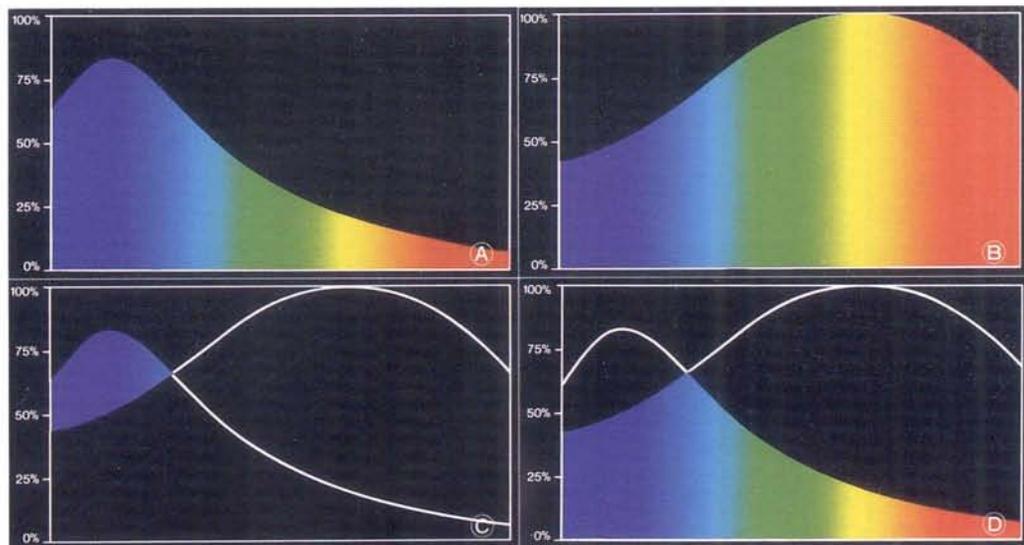
特に歯は半透明の物体であるため、その色調は異光源下で大きな違いを見せることを忘れてはならない(図 13)。このため、シェードテイキングの際の理想的な光源は太陽反射光(日中の北の窓から差し込んでくるインダイ

レクトな太陽光)とされているが、通年の日照率の差異や、作業時間と患者の訪問時間の都合の調整の難しさなどから、理想的な光源下で測色することが困難となることもしばしばである。

この場合は、人工照明下でシェードテイキングを行わなければならないが、これにより“光源を規格化できる”というメリットも出てくる。

ただしこの際は、すべての色スペクトルを分光反射可能な、ニュートラルな“白色光”を選択すべきである。

### B. 物体と光線の分光吸収・反射曲線



①青紫の物体、②色黄い光線、③物体と光の反射が重複しない部分、④物体と光の反射が重複しない部分(物体の色は、青緑に変化する)  
(色の存在しない部分…吸収/色の存在する部分…反射)

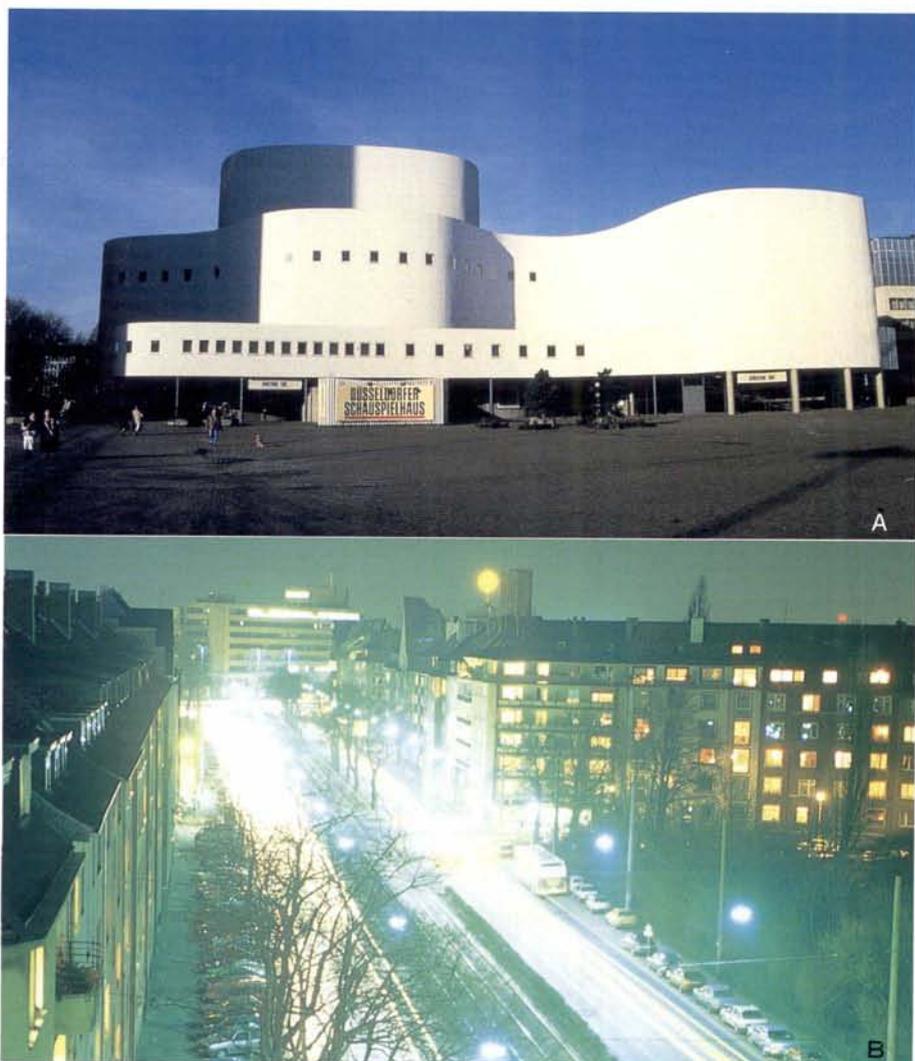


図 13 青空の太陽光 (A) と人工光 (B)。青空の太陽光によるダイレクトなスペクトルは図 12 A-c にあたり、理想的な測光状態とはいえないが、インダイレクトな太陽光は図 12 A-e に相当し、理想的な測光状態にある。特に人工光を用いる場合は、その選択に熟慮しなければならないが、一つには演色性の高い蛍光灯 (6,500°K, Daylight) を使用することもよい。しかしいずれにしても、“光を読む”知識が大切である

ドイツ工業界（特に印刷業）の光源規格では、色見本比較に用いられる白色光“ノーム” (DIN 6173) を中央ヨーロッパ平均太陽光と

定め、色温度 6,500°K の D (Daylight) 65 をニュートラルな白色光 (図 12 A-e) と規定している。

## 5

## 天然歯が“オパール効果”を有する

光と天然歯について述べるときに、忘れてはならない事項として、山本 眞氏が長年来提唱する“オパール効果”の有無がある（図14～16）。従来のエナメル質陶材のグレーで、ガラス様の質感を打ち破った画期的な「オパール陶材」の登場は、今や全世界で、オパールセンスなしでは陶材を語れない域にまで達している。

山本 眞氏の経験と要望によって開発された「オパール陶材」には、オパシファイヤー（超微粒子核）が添加されており、焼成されたオパール陶材を透過光で観察すると、やや

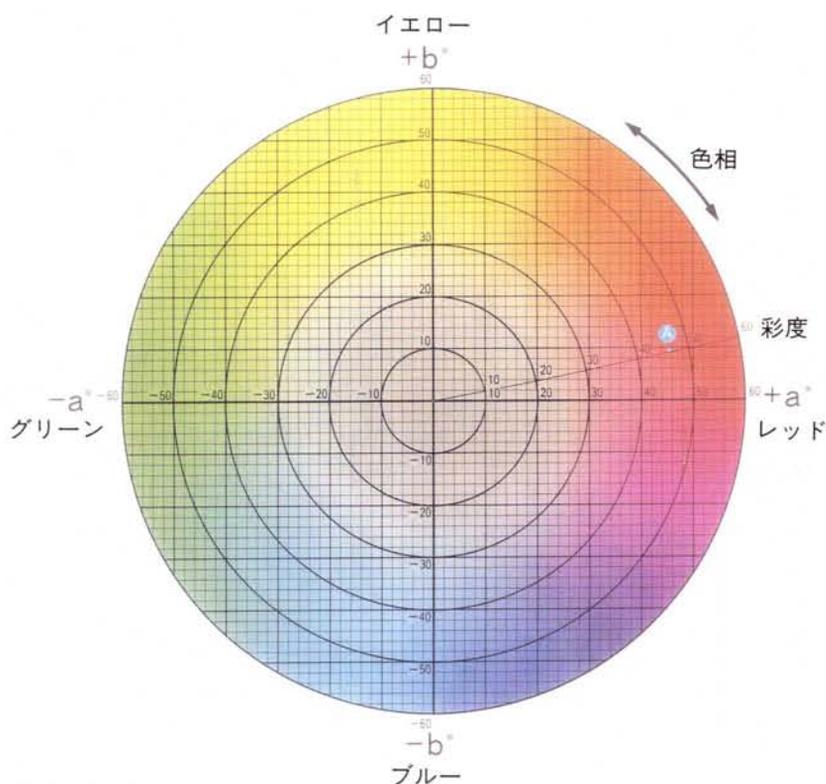


図14 マンセルの色標（色相と彩度）（Minolta, Exakte Farbkommunikation より）

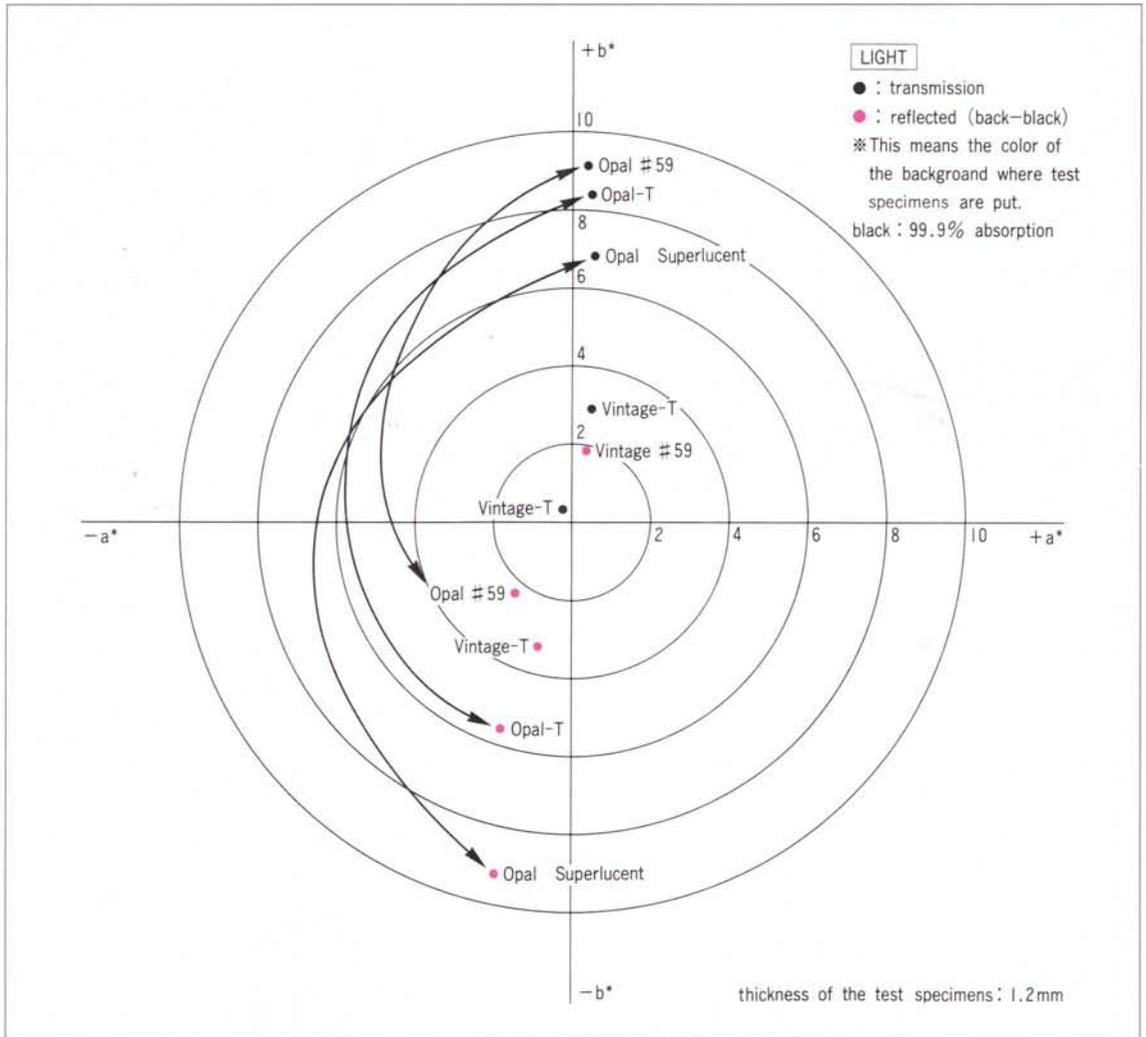


図15 オパール陶材の透過光および反射光下での変化。図14のマンセルの色標と比較参照すると、理想的なエナメルおよびトランスルーセント陶材のオパール効果が観察される

オレンジ色を帯びて見える (図17)。

これは、陶材マトリックス中の超微粒子が光の波長よりはるかに小さいため、もともと短波長 (青紫や青) の分光スペクトルを少なく有する透過光では、ポーセレン層内部で波長の短い (青紫や青い) 光のスペクトルが“散

乱”し、残りの波長の長い (赤やオレンジの) 光の成分のみが、反射してくるからである (図18)。

一方、反射光の下では、基本構成成分の波長の短い (青紫や青い) 光のスペクトルが十分に“散乱”している状態を観察することに

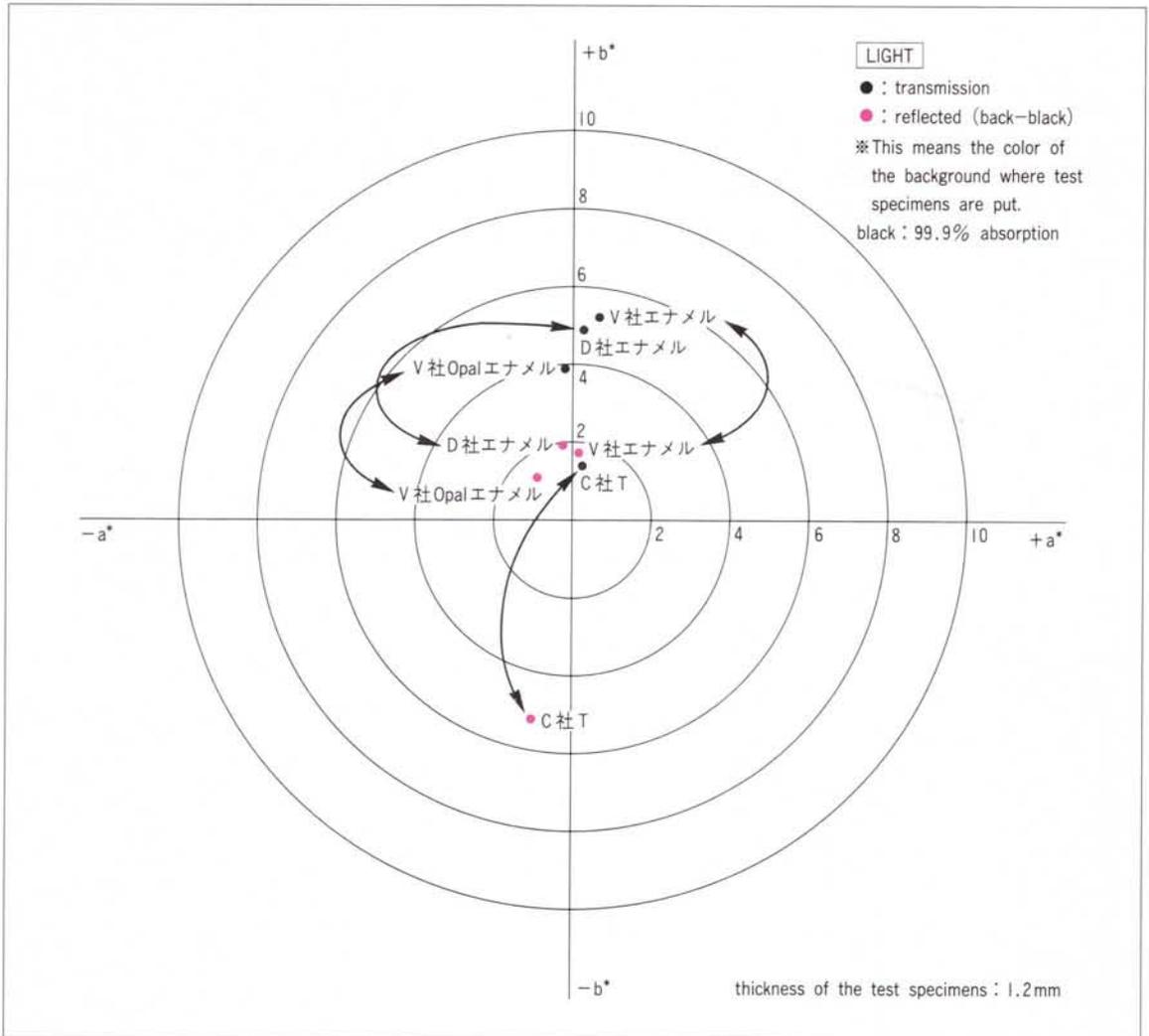


図 16 各社エナメル、トランスルーセント陶材の透過光および反射光下での変化。オパール効果がほとんど発揮されていないことがわかる

なるので、当然同じセラモメタルクラウンでも青っぽく見える (図 17 B)。

このように、天然歯が有するオパール効果を再現するためにはオパール陶材の使用は必然的といえるはずであり、陶材を築盛する際には天然歯様の層構成を模倣するのみで、か

なり完成度の高い補綴物を製作することが可能である。

なぜなら、光をコントロールするための作業として、術者は歯の形態、そして表面性状に重点を置けばよい、という最大の利点があるからである。



図 17 オパール陶材を使用したセラモメタルクラウン（フレームはガルバーノクラウン）を透過光（A）と反射光下（B）で観察した状態

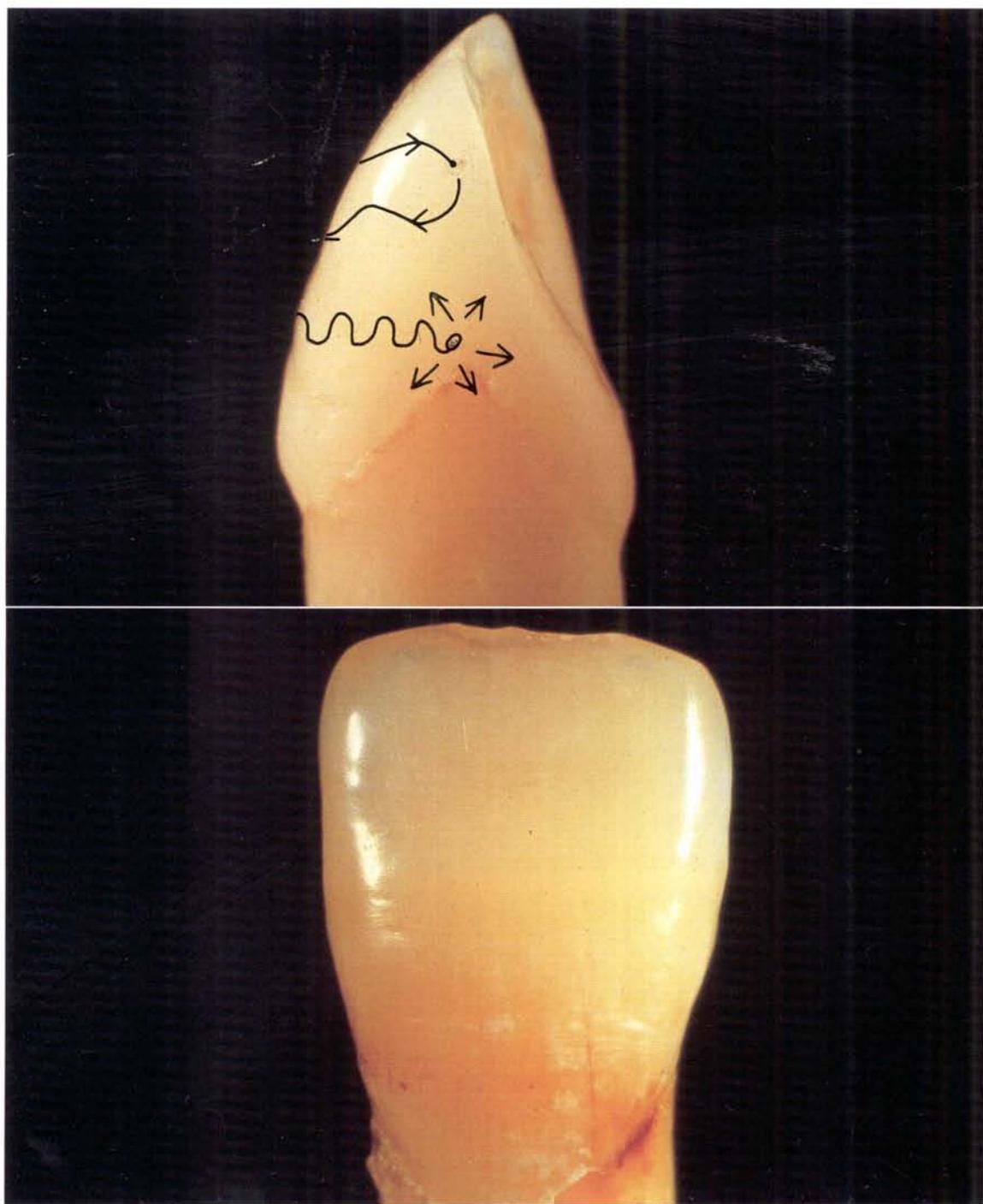


図 18 オパール効果の原理。長波長（赤やオレンジ）の分光スペクトルは、歯を透過、反射する性質を有するが、短波長（青紫や青）の光は“散乱”する。もともと短波長の分光スペクトルを少なくしか有しない透過光では、長波長の光のみが返ってくるため、このように暖かみのあるオレンジの光を発する

# 6

## 歯冠色調を特徴づける縁辺スペクトル

光と天然歯、そして審美補綴物を考察するうえで、“Kantenspektrum（縁辺スペクトル）”も重要である。

図19のように黒い背景中に白の細く平行なストライプを施し、焦距を0～30 cmの明視距離に置いて白のストライプを観察した場合、白のストライプの移行部がぼやけて見えることがすぐに判明する。この部分をやや近づけてよく見ると、白のストライプ上に青紫、緑、オレンジ、同様に白のストライプが接触する黒の背景上縁部に青・青紫、下縁部にオレンジ、黄の色相が現れる。これは、白

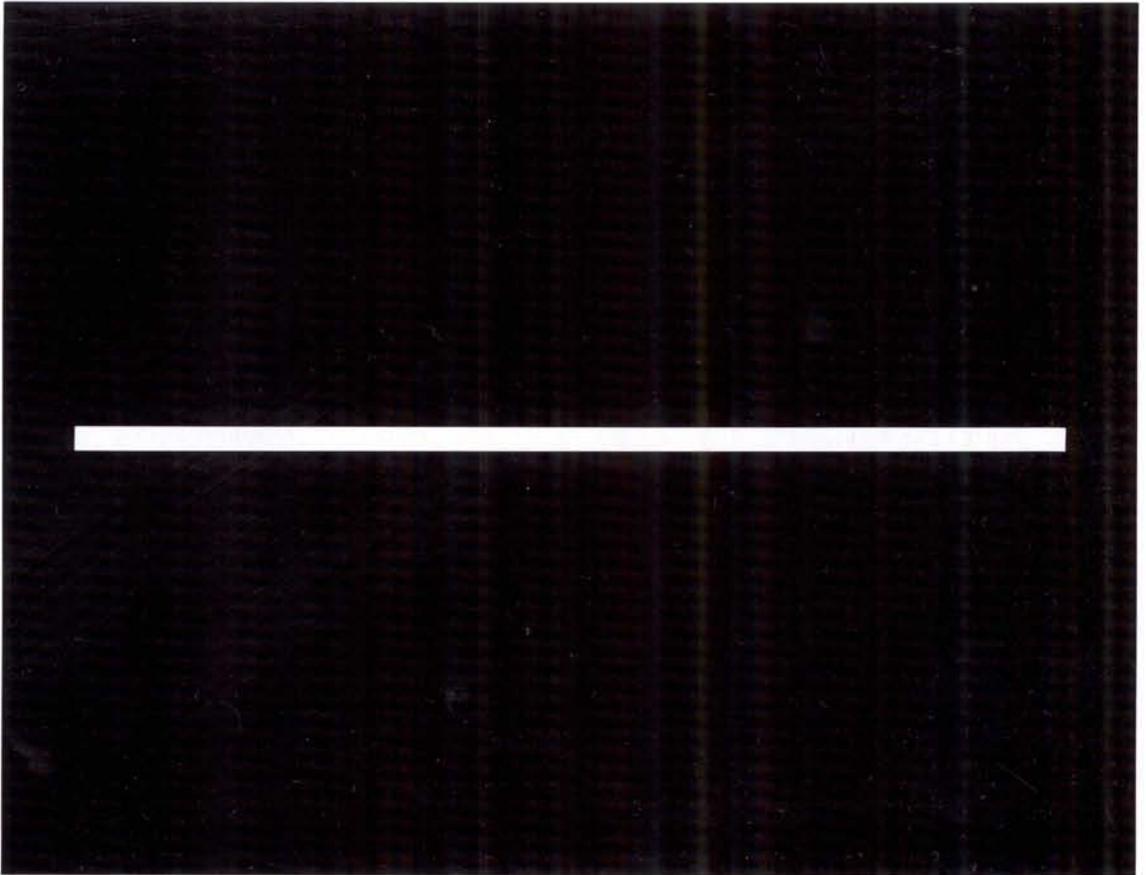


図19 縁辺スペクトル効果（Harald Kiippers：Das Grundgesetz der Farbenlehre, 1978, p.116～125. より）

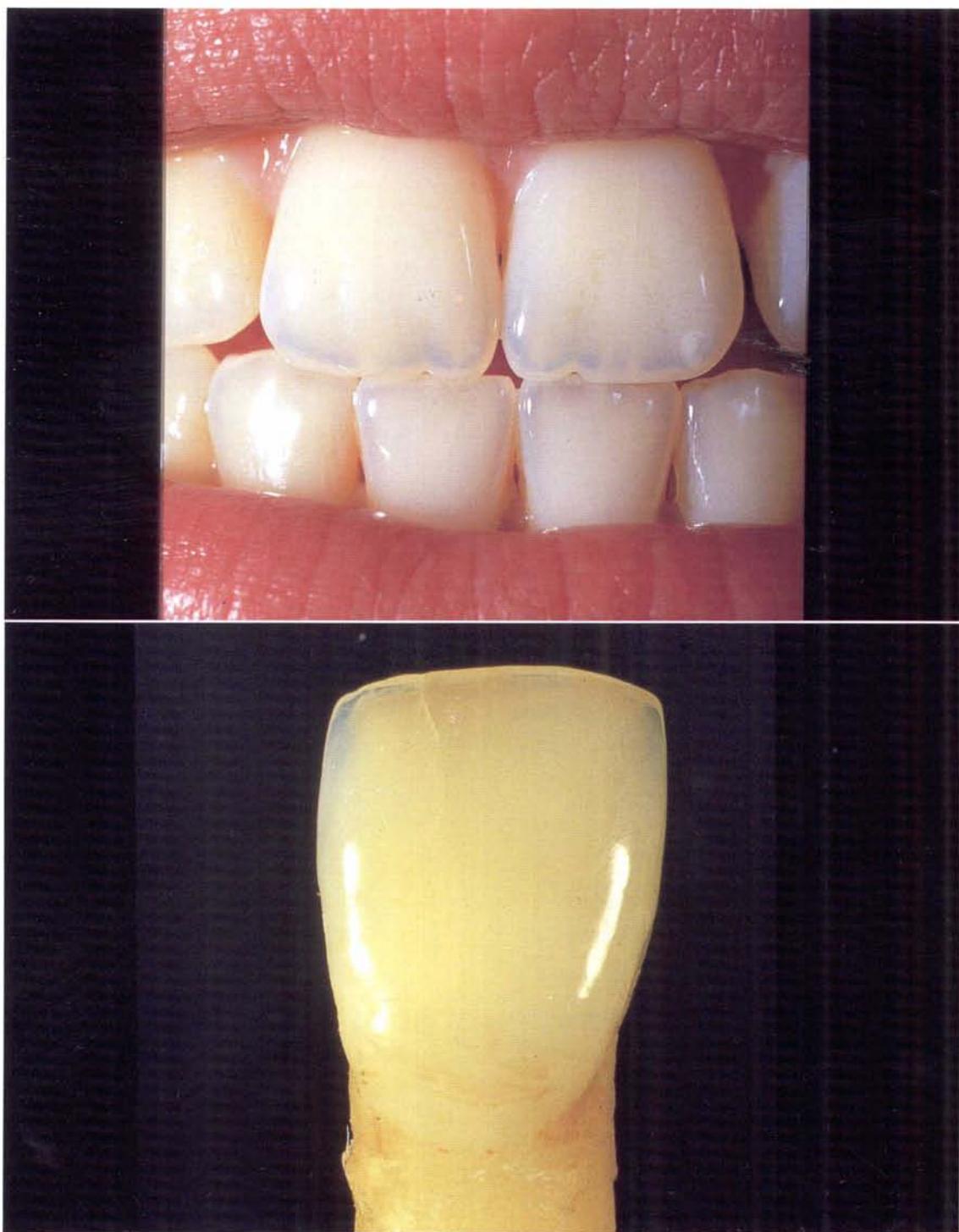


図 20 天然歯の切縁部、隣接部には、顕著な縁辺スペクトルが観察できる



図 21 切端部にクリーミーなアンバー色を用いて縁辺スペクトル効果を表現した症例

のストライプがプリズム作用を帯び、相対する背景下で光の屈折を伴った現象を引き起こしたためである。これを“縁辺スペクトル効果”を呼ぶ。

これは、すでに述べた三種類の錐状体の受光範囲が、白のストライプの視野範囲に対応不可能となり、黒色背景接触部分の両辺縁下に分断分布した結果である。この現象は、このストライプのケースのみでなく、すべてのシャープな辺縁移行部に観察される。

歯の切縁部を例にあげれば、この部分には、全反射によって生じる白っぽいストライプが存在する(図 20)。このホワイトィッシュなストライプを天然歯様に模倣し、再現することは、上述した縁辺スペクトル効果を同等に生

じさせることになり、補綴物の天然歯様のニュアンスを高めるうえで非常に重要である。

切縁部のほか、隣接部にも同様なストライプ、そして、歯冠中にも白色帯状構造などが現れる。これらは起源こそ違おうが、そこには縁辺スペクトルが生じていることを念頭に置いておくべきである。

しかし全反射による前歯部切縁部形成は、歯の植立状態、アンテリアガイダンスの付与、そして陶材と天然歯のメタリズムなどの要因から困難となる場合が生じることもある。このような場合、築盛法による再現を試みる必要がある。なぜなら、そこには縁辺スペクトル効果による色のプリズムが生じているからである(図 21)。

# 7

## 口腔内諸組織が歯冠色に色の対比効果を生む

本稿の最後として、“色の対比”について述べてみる。

色の対比とは、ある種の色が、他の色に影響され、単独で観察される場合と違って見える現象のことをいい、同時対比と継続対比に分けられる。

図 22 に示すとおり、同時対比は 2 色以上の色を同時に観察する場合の対比現象で、

- ① 色相對比は、異なる色相の物体を同時に見ると、その二つの色相が一層色味を増して見える現象をいい、最高色相對比は、色環上で相對する 2 色（補色關係にある 2 色）の場合に生じる
- ② 明度對比は、明度の異なる 2 色の場合、明るい色はより明るく、暗い色はさらに暗く見える効果である
- ③ 彩度對比は、彩度の異なる 2 色の對比で、彩度の高いほうはより彩かに、低いほうはさらにくすんで觀察されるというものである。

“継続対比”は、ある種の色を一定時間見た後で異なる色を観察する場合に、前に見た色が後に見る色に影響する現象をいう。青い物を 1 分間凝視した後で目を白紙に転じると同形の黄色の像が見える。つまり、補色關係にある色が見えてくるわけである。強烈な太陽光線下から暗いトンネル内に入ると、一時的に失明状態に陥いることをよく経験するが、これも継続対比の一例である。

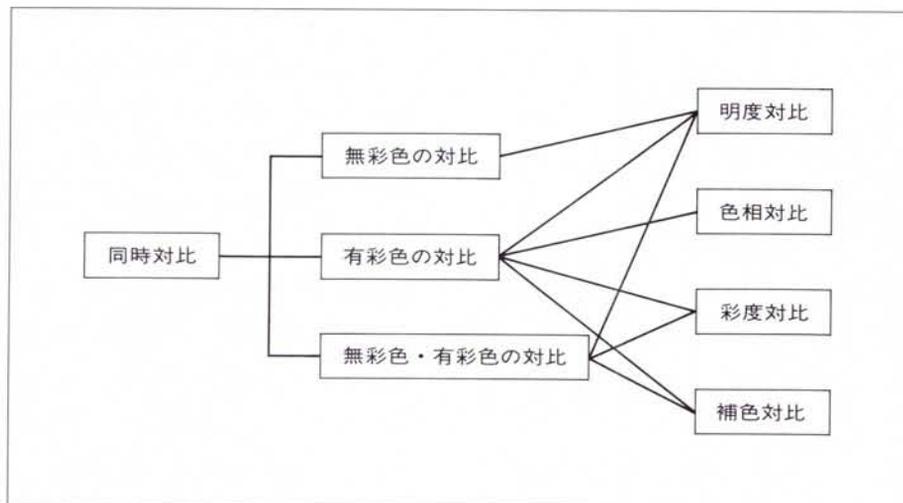


図 22 色の同時対比の分類（野村順一：色彩効用論，ガイアの色，1988，より）

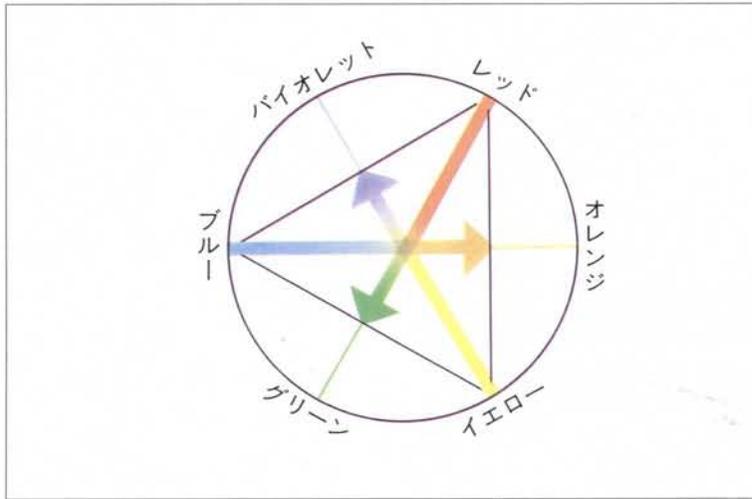


図 23 色標上の補色現象の動き (クレーの法則). 赤は緑, 紫は黄と補色関係にあるのがわかる (Paulik, J : Theorie der Faube, 1969, p. 25. より)

これらのことをふまえると, シェードテイキングの際に注意しなければならない点は, 事前に, 強烈に彩かな対象物や極端に明るい物を見ることは避けなければならないということである. 特に補色現象は, ある対象物の色を一定時間 (5 秒間以上) 凝視する場合, 色刺激が継続して脳に伝達され, 脳はその刺激を緩和する作用を起し, 対象物の色調をニュートラルな白に変えようとする. すなわち, 補色とは, 正しい色ではなく, 脳によって作り出される, 対象物とは色環上で相応する逆の分光スペクトルを有する色なのである (図 23).

シェードテイキング時, A 系統 (赤茶系) の色調が, 背景である歯肉 (赤紫系) の補色によって B 系統 (黄緑系) の色調に見えてしまうのも, この対比効果による.

元来, A 系統の色調が赤茶であることと, 彩度対比によって背景の赤紫の歯肉の色が, 赤茶色の歯の “赤” をくすんで観察させるこ

と, さらに, 光透過物質である歯の歯肉付近は, 歯肉の色調である赤紫のスペクトルを吸収・反射するため, 補綴物の歯頸部は, 赤味が圧倒的に不足することになること, を理解しておかなければならない.

そこで, 筆者はセラモメタルクラウンの歯頸部および歯冠部象牙質陶材に “Light Pink” のインテンシブポーセレンを少量混和することによって, この問題に対処している. また, セラモメタルクラウン装着時に, 隣在歯や歯肉などの光の障害のために明度が多少低くなる傾向にあるが, これも, 近年, 山本 眞氏によって開発された Value Plus 陶材によって解決された.

筆者は光の障害により生じたと思われる明度低下の問題を, デンチン陶材に 5% 程度 Value Plus 陶材を混和することによって対処しているが, これもシェードガイドが目安であるので, 明らかに明度の高い歯の混和率を正確に計測するためには, 多少の術者の経

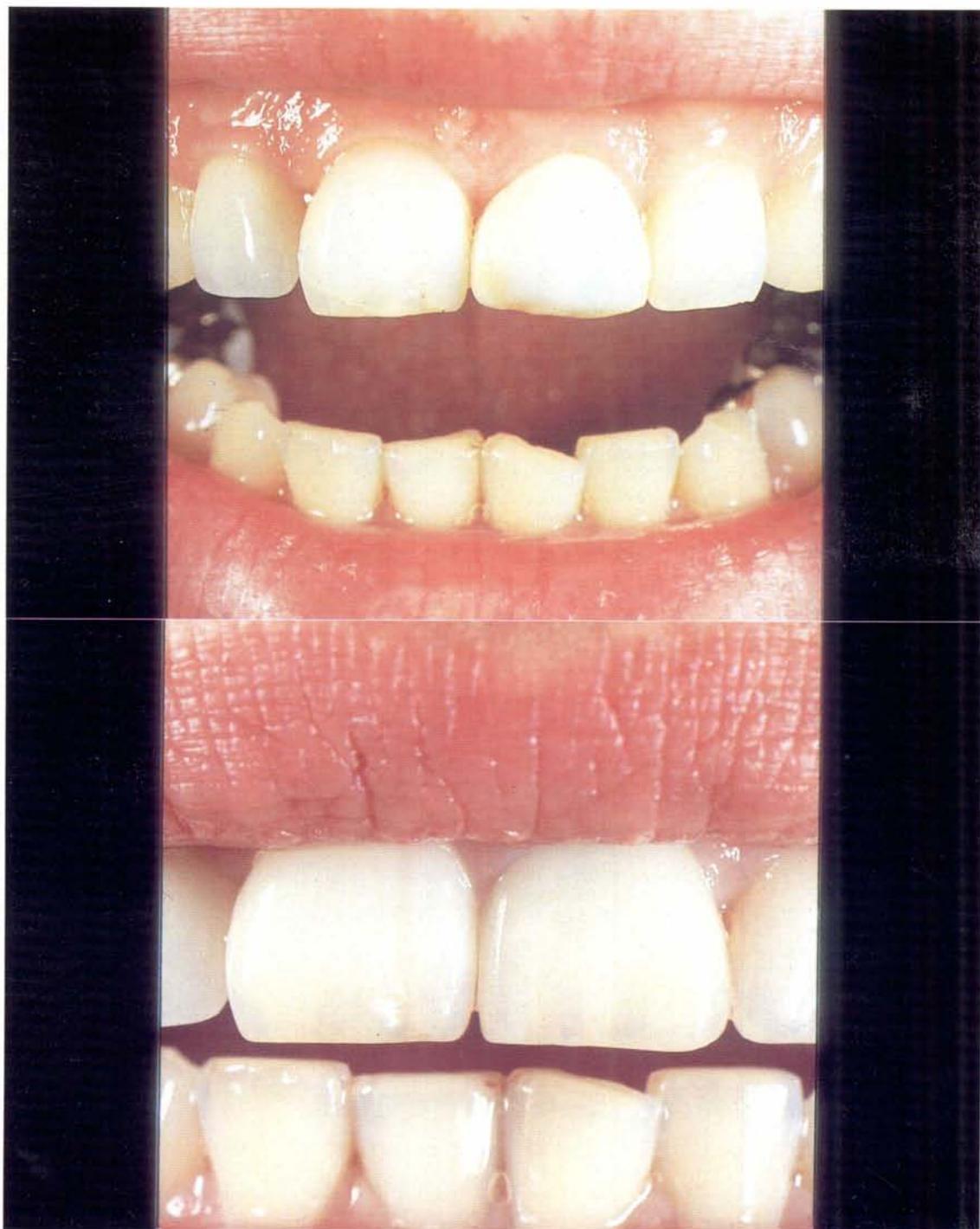


図 24 失敗例。基本色 A 0.75 と A 1 より明るい色調は、従来の陶材混和法（A 1 ボディにホワイトのインテンシブを混ぜて明度を高め、彩度の低下を適量のオレンジのインテンシブで補償する混和法）では明度が下がってしまう

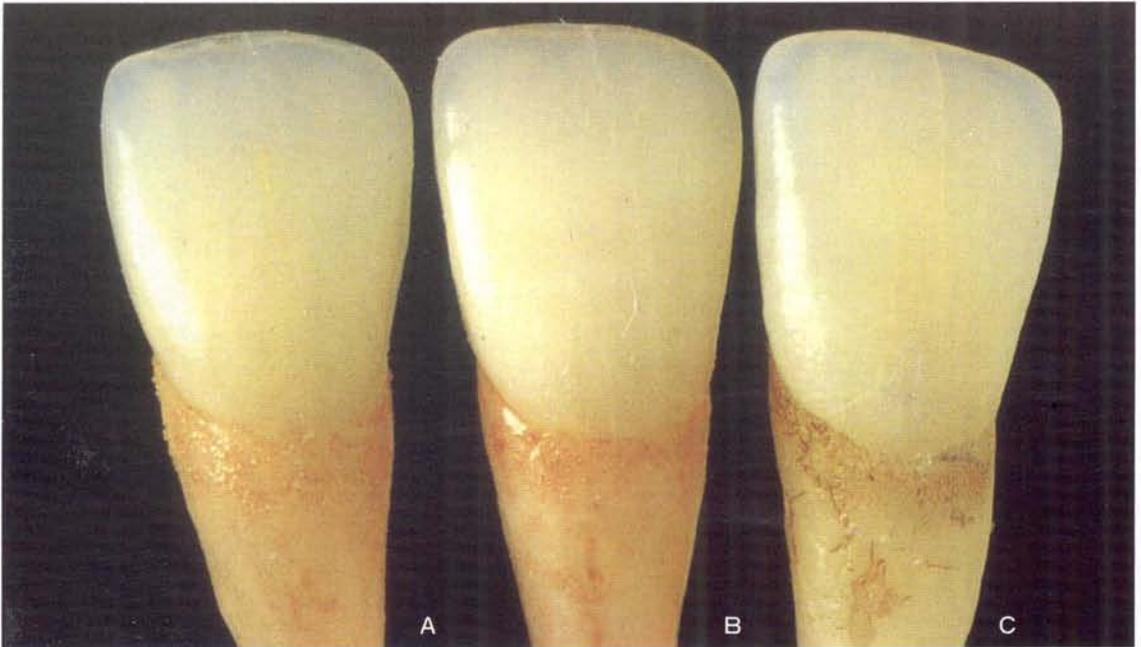


図 25 歯冠部の模倣天然歯 (A, B) と模倣の対象となった天然歯 (C)。B の明度がかなり上がっていることが観察される  
 A : A 1 ボディ単独, B : A 1 ボディ + A 1 Value Plus 20 %

験値が必要である。

図 24 の症例は、基本色 A 0.75 と A 1 よりも明るい色調であった。従来の陶材混合法では A 1 にホワイトのインテンシブを混ぜ明度を高め、彩度の低下を適量のオレンジのインテンシブによって補償することで、A 1 よりも明るい色調をコントロールしていたが、インテンシブ陶材の混和は陶材を不透明にするため、天然歯若年期のあの輝くような白い象牙質とはほど遠い質感を呈した。そこで、従来のオパーク陶材に VOP、象牙質陶材に VDL を適量混和することによって、ごく簡単に若年期象牙質の光の拡散による明るい象牙質の製作が可能となった (図 25)。

図 25 の 3 本の模倣天然歯と天然歯は基本色 A 1 で、特に明度の高いものであった。A

は従来の象牙質の A 1 Body 単独を使用、B は A 1 Body に 20 % Value Plus A 1 を混和 (エナメル陶材は 2 歯とも同様の Opal 58 と Opal Superlucent を使用) している。C は天然歯で、これの模倣を図った。

A のポーセレン歯は明らかに透明感が強すぎて、暗くなっているが、B はかなり天然歯に似た明度を有している。このように、Value Plus 陶材の使用によって、色調をほとんど変化させることなく、象牙質の明度を容易に上げることが可能となった。

今回は、これらの原理に基づくセラモメタルクラウンの色調表現の仕方について説明する。

(文献については最終回に一括掲載)