原 著

各種の照明光源下における歯冠色の見えに関する研究

太 田 忠 興

東京医科歯科大学歯学部第3 歯科補綴学教室（指導：林都志夫教授）

（1983年6月23日 受付）

Tooth Color Appearance under Various Types of Conventional Light Sources

Tadaoki Ohta

The Third Department of Prothodontics, Faculty of Dentistry, Tokyo Medical and Dental University

(Chief: Prof. Toshio Hayashi)

The differences of the color appearance (ΔE^*ab) of teeth under each of the five test light sources, three types of fluorescent lamps, a halogen-tungsten lamp built in a dental unit and CIE standard illuminant A as a incandescent lamp, were measured in comparison with their colors in the daylight (CIE standard illuminant D_{65}) by means of the spectrophotometer and computation. The spectral reflectance curves were obtained in 55 natural and 36 artificial teeth.

The following presents the outline of the results:

- (1) The value of ΔE^*ab ranges from 0.67 to 4.67, and it becomes larger when the light source is changed in the order of FL-EDL, FL-EX, FL-W, P3000 and illuminant A.
- (2) Some pairs of teeth with different spectral characters can be seen to have the same color under certain conditions of illumination.
- (3) Many pairs of teeth indicate the same color under the illuminant A, however one half of them do not have the same color under an illuminant of some other spectral composition. There are few pairs matching under the light of FL-EDL but most of them maintain the special condition of the same color appearance when the illuminant is changed.

I. 緒 言

補綴物に対し、機能的であると同時により審美的なものを求める気運が患者、術者を問わず強くなってきた。前歯部補綴にあっては人工歯選択の適否が大きな鍵であることは説明を要しない。そして、歯冠形態は人工歯の切縁部に年齢、性、咬合関係にふさわしい咬耗を与えることによって術者が容易に手を入れることができるが、色調については色合わせの段階で正しく行われなければ、後から手直しは効かない。

さて、歯の色の見え方が最も顕著に変化するの

は、歯の環境が変わるときである。日常で最も頻繁に起きる視環境の変化は、照明光の変化である。屋外から建物の中に入るときは、即時に太陽光照明から蛍光灯に変わる。一つの部屋から他の部屋に移るときは、蛍光灯照明から白熱灯照明に変わるかもしれない。これらの変化によって、当然同じ歯でも色の見えが異なってくることが考えられる。

測色学の教えるところでは、物体が固有の色を持っているのではなく、ただ光の波長に対して一定の反射率を持っているだけで、その場の照明光の性質によって様々な色に見えるとしており、そ

のような状況はわれわれもよく経験するところである。色について語るとき照明光は基本的には太陽光であり、臨床場においても歯の色を観察し、シェードマッチングを行うには、晴天の日中に北向きの窓のところで行うようにしてきた。しかし、天候、時間、治療室の構造上の制約から、必ずしも常にこの条件が揃うとは限らず、人工照明光源に頼らざるを得ないことも多い。

従来の歯の色に関する報告¹⁻¹²⁾は、色彩学の通法にのっとり、国際照明委員会が定めた標準の光C、すなわち平均的な昼光の下でみた場合の色に換算したものであり、人々の生活圏にある種々の照明下で歯冠色がどう変化するか具体的に、定量的に触れたものはない。シェードマッチングと歯科用照明に関する報告¹³⁻¹⁸⁾もあるが、定性的なものである。照明が変わると天然歯と人工歯の等色がくずれることがあることを指摘^{15,19)}しているものも、一般的な色彩学の立場からのものであり、天然歯と人工歯について実験的に明らかにしたものではない。

本実験では、種々の市販されている実用照明光源の下でみる歯冠色は、太陽光でみた色とどれほど違い、そのことが臨床とどうかかわってくるかを定量的に検討、考察した。また、天然歯と人工歯の歯冠色を評価するために、最も適した人工照明光源がどれであるかを検索した。ただし、昼光と色の異なる照明下での色の見えは生理的な順応や色彩恒常の現象が色刺激値の変化の上に合成されてくるものであり、それがどの程度であるかは、人の色覚機構にかかわるために複雑である。そこで、今回は問題を照明の分光組成の違いによる色彩効果に限ることとした。

II. 研究方法

1. 資 料

天然歯は、東京医科歯科大学歯学部付属病院、および東京都内の開業医診療所において収集した上下顎前歯部抜去歯牙55本である。男女、年齢18～65歳で歯冠色の測定に影響を与えそうな充填やカリエスがないものである。抜去歯から歯石、歯

垢、タバコのヤニ等の外来付着物を除去し、測定まで水中に保存し、抜去後1カ月以内に測定した。

人工歯は、床用人工歯の中で最も完成度が高く、種類も豊富なものの代表として、Trubyte Bioblend (Dentsaply 社製) シェードガイド1組36本である。

2. 測定器

日本色彩研究所が有する積分球つきカラーアナライザー(日立製307型)を使用し、照明受光条件は垂直照明・拡散受光(CIE O/D)である。測定バンドは3nmで、380nmから780nmの間を5nm毎に資料の分光比反射率を求めた。なお、歯冠の測定部位は、この測定器の最小測定可能面積である横4mm、縦6mmの範囲で、唇面中央部とした。

3. 測定値の処理

照明光源からの光束が歯冠に入射し、その反射光が歯冠を観察する人の眼に入り歯冠の色彩を知覚する。国際照明委員会(CIE: Commission Internationale de l'Eclairage)が、1931年および1964年に定めた色の表示法によると、照明光源の分光比エネルギー分布 $S(\lambda)$ 、それによって照明される物体、すなわち本実験では歯冠の分光比反射率 $\rho(\lambda)$ および観測者の色感度特性を代表する等色関数 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ を用いて、その物体の色を表示するための3刺激値 X 、 Y 、 Z の3つの数値を求める。すなわち、眼の入射光 $S(\lambda)\rho(\lambda)$ はそれぞれ $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ で重みづけられる3つに分解され、その積分値を観測者に対する物体色の色刺激とし、式で表すと次のようになる。

$$X = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \rho(\lambda) \bar{x}(\lambda) d(\lambda)$$

$$Y = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \rho(\lambda) \bar{y}(\lambda) d(\lambda)$$

$$Z = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \rho(\lambda) \bar{z}(\lambda) d(\lambda)$$

ここでの積分範囲は可視光線の波長範囲380nmより780nmであり、 K は基準化の係数で、

$$K = 100 / \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d(\lambda)$$

である。

このようにして得られる 3 刺激値 X , Y , Z は $\rho(\lambda)$ および $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ が一定であるが, $S(\lambda)$ が照明光源の種類により異なるために, 照明の種類によって異なる X , Y , Z が得られる。その値を元にしてデータの解析に必要な L^* , a^* , b^* 等の値を通法に従って換算した。

眼に入る物体からの拡散反射光が同一であっても, 色の見えの評価は人により異なる。そこで色の表示のためには, CIE が多くの正常観測者のスペクトル光に対する等色実験結果に基づいて, 2 種の標準観測者とその等色関数を定めている。それらは CIE 1931 標準観測者, および CIE 1964 補助標準観測者と呼ばれる。観測者は等色関数という分光特性で規定され, $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ の関数で示される。正確には等色関数は人間の網膜のスペクトル感度特性に対応するものではないが, 密接な関係を有する。 $\bar{x}(\lambda)$ は赤色部分の応答を, $\bar{y}(\lambda)$ は緑色部分の応答を, $\bar{z}(\lambda)$ は青色部分の応答を示すものと思われる。標準観測者と補助標準観測者は視野の大きさがそれぞれ 2 度視野, 10 度視野と視野の違いによる。観測者が 50cm の位置で直径 1.7cm の試料を観察し色を判定する場合が 2 度視野であり, 同じ距離で 8.8cm の試料を観察する場合が 10 度視野に対応する。

色の一致の判定精度は視野の大きさにより大きく影響される。Judd によると, 10 度視野に比べて 2 度視野の場合は判定精度が 3 倍くらい悪くなるという。しかし, 物体色を眺める場合, 視線は自動的に網膜の中心窩に物体色像を結ぶように動き, この部分はほとんど錐状体だけからなる。錐状体の密度は, 中心窩において最大であり, 中心窩から離れるほどその数は漸減する。一方杆状体は中心窩付近では少なく, それからはずれるとともに増加する。したがって, 2 度視野等色関数は色覚をつかさどる錐状体の特性をほぼ反映している。

歯という試料の大きさからいっても, 2 度視野の方が適していることはいうまでもなく, 本実験の等色関数は 2 度視野のものである。

4. 照明光源の種類

(1) 基準となる昼光は CIE が定めた標準光源 D_{65} とした。 D_{65} の分光比エネルギー分布の概略を図 1 に示す。

(2) 試験照明光源は市販されている実用照明光源の中から選ぶこととし, 白熱電球を代表するものとして CIE が定めた標準光源 A を, 一般によく普及している蛍光灯の中から白色蛍光灯 FL 40 S.W と三波長域型蛍光灯 FL 40 S.EX-50 を, またオフィスや家庭に普及しているとはいえないが, 店頭で市販している色評価用, 超高演色性蛍光灯 FL 20 S.EDL-50K を選んだ。それらの光源の分光比エネルギー分布を図 2 ~ 5 に示す。さらに, シェードマッチングに歯科医師が最も手軽に使いそうな照明として, デンタルユニットに付属している无影灯がある。そこで, 各メーカーの無

図 1 CIE 標準光源 D_{65} の分光エネルギー分布図。
ただし $Y=100$ に基準化してある

図 2 CIE 標準光源 A の分光エネルギー分布図。
ただし $Y=100$ に基準化してある

図3 白色蛍光灯 (FL 40 S. W) の分光エネルギー分布図。ただし Y=100 に基準化してある

図4 三波長域型蛍光灯 (FL 40 S. EX-50) の分光エネルギー分布図。ただし Y=100 に基準化してある

図5 超高演色性蛍光灯 (FL 20 S. EDL-50K) の分光エネルギー分布図。ただし Y=100 に基準化してある

図6 ハロゲンタングステン電球 (P 3000) の分光エネルギー分布図。ただし Y=100 に基準化してある

影灯に用いられているタングステンハロゲンランプの代表として P 3000 を加えた。分光比エネルギー分布を図 6 に示す。

Ⅲ. 結果および考察

1. 資料の分光比反射率

天然歯 55 本および人工歯 36 本の中から、各 12 本について分光比反射率曲線をそれぞれ図 7, 8 に示す。得られた分光比反射率の妥当性のチェックをするのが分光測定の常道となっている。そこで、測定値を標準の光 C の下での色に換算し、さらに同一資料に対して色の専門家が標準色標を用いて視感比色法による色を表示し、それらの値を比較検討した。本実験では日本色彩研究所職員が、このチェックを行った。

天然歯と人工歯の分光比反射率曲線を比較してみると、天然歯が上彎した極めてなだらかな単調なカーブをしているのに対し、人工歯は 420~550 nm あたりにかけて吸収帯があるために、470~480 nm 付近に極小点を持ち、420 nm と 550 nm あたりに極大点を持つ波のうねりのようなカーブが特徴となっている。

資料の標準の光 C の下での 3 刺激値、色度座標等の統計量を表 1, 2 に示す。また、修正マンセルの三属性による資料の個々の色を図 9~11 に示す。マンセル表色系に換算したのは、先に述べた視感比色法によるチェックのためである。これら

図7 天然歯の分光比反射率曲線の例

図8 人工歯の分光比反射率曲線の例

表1 天然歯の測定値

	平均値	分散	S D	最大値	最小値	範囲
X	34.16	27.72	5.26	48.58	26.11	22.47
Y	35.04	30.72	5.54	50.37	26.69	23.68
Z	30.86	38.16	6.18	50.40	21.88	28.52
x	0.3421	0.00007	0.0086	0.3603	0.3252	0.0351
y	0.3507	0.00005	0.0071	0.3670	0.3369	0.0301
L	65.55	18.22	4.27	76.30	58.68	17.62
a	-0.62	0.88	0.94	2.30	-2.19	4.49
b	13.28	8.18	2.86	20.04	8.24	11.80
H	3.96 Y	2.27	1.50	8.11 Y	0.92 Y	7.19
V	6.39	0.19	0.43	7.48	5.70	1.78
C	1.82	0.18	0.43	2.84	1.07	1.77

表2 人工歯の測定値

	平均値	分散	S D	最大値	最小値	範囲
X	37.76	31.13	5.58	45.91	24.24	21.67
Y	38.31	34.38	5.86	46.37	24.25	22.12
Z	32.18	42.97	6.56	42.50	17.38	25.12
x	0.3500	0.00016	0.0107	0.3695	0.3286	0.0409
y	0.3547	0.00007	0.0082	0.3682	0.3378	0.0304
L	67.62	21.40	4.63	73.79	56.34	17.45
a	0.72	1.53	1.24	3.92	-1.25	5.17
b	15.76	12.14	3.48	22.40	7.18	15.22
H	2.24 Y	1.51	1.23	5.27 Y	9.80 Y R	5.47
V	6.63	0.21	0.46	7.22	5.47	1.75
C	2.27	0.28	0.53	3.01	1.12	1.89

図9 天然歯および人工歯の測定値をマンセル
明度・彩度面に示す。○は天然歯を, ×は
人工歯を表す

図10 天然歯および人工歯の測定値をマンセル
色相・明度面に示す。○は天然歯を, ×は
人工歯を表す

図11 天然歯および人工歯の測定値をマンセル
色相・彩度面にプロットした。○は天然歯
を, ×は人工歯を表す

の値を丸井¹⁾, 加藤⁵⁾らの天然歯の色調を視感比色法で求めた報告と比較してみると大差なく, 分光比反射率の測定が成功したこと, ならびに資料の天然歯の色調が片寄らずに, 広い範囲からうまく抽出されたサンプルであることがわかる。

2. 照明光源を変えた時の歯冠色の変化

色の見えの評価は人により異なり, 二つのサンプルの色が等しいかどうかの判定もしばしば人により異なるという。このことは人間の網膜のスペクトル感度特性が人によって異なるということであり, CIE は1931年および1964年に, 多くの正常観測者のスペクトル光に対する等色実験に基づいて標準観測者の等色関数を定めている。そこで, 上述の式の $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ が既知である以上, 歯冠色を見る照明光源の $S(\lambda)$, およびその歯冠の $\rho(\lambda)$ さえわかれば, その光源でみる歯冠色を計算で求められることになる。このように色の表示が物理量である分光反射率と光源の分光分布の測定値のみから計算され, 実際にその設定条件において視感による測色をする必要がない。したがって, このような理論的な計算による色の表示は, 誰かがこのような色にみたということではなく, 色覚が標準モデルどおりである人がみれば, このような色に見えるはずだというものである。

本実験は昼光を基準光源として, 白熱電球, 白色蛍光灯, 三波長型蛍光灯, 色評価用超高演色性蛍光灯の下で同一の歯冠を標準観測者がみた場合に, 昼光の下でみる場合の色とどのように違った色となるかというものである。昼光は場所, 時刻, 天候状態等によって一定しているものではないので, 種々の昼光条件の平均を代表するものが必要である。1964年までは標準の光Cが主として用いられてきたが, C光の分光分布が現実の昼光と完全に一致しないことが問題となり, 実用上の諸要求から CIE ではイギリス, アメリカ, カナダの3国で昼光の分光分布に関して測定を行い, 新しく合成昼光の標準の光Dを規定した。この1964年に定めたD光3種, すなわち色温度 5500°K, 6500°K, 7500°K のうち, 色温度 6500°K の D₆₅

が近年最も重視されており、わが国の昼光のそれとほぼ近いといわれている。

われわれが日常用いる照明用光源は、もとはといえば太陽の代用として開発されてきたものであるが、太陽とは光色はかなり異なるものである。歴史的にみても、普及の程度からみてもその代表はタングステン電球であり、アルゴンと窒素の混合ガスを封入したものであれ、真空にしたものであれ、またフィラメントが単コイルであれ二重コイルであれいずれにしても、可視領域においては黒体放射とほぼ一致した分光比エネルギー分布を持ち、色温度約 2,300~3,500°K の範囲で作動する。そこで、タングステン電球の代表として、CIE は標準の光 A を採った。この A 光は色温度 2,856°K である。

一般に用いられている蛍光灯を光色によって分類すると多種にわたり、昼光色、天然昼光色、真天然昼光色、白色、天然白色、真天然白色、温白色、天然温白色等があるが、最も広く普及しているものは昼光色、白色、温白色蛍光灯である。これらのものは消費電力の割に明るさが得られる高効率を設計の重点としているために、演色性は劣っている。本実験においては普通形蛍光灯として白色 (FL-W) と、光の三原色に相当する波長帯により高い蛍光を発するもので、演色評価数と効率の面から最適化して得られた高演色ランプとして、各メーカーが近年最も力を入れて発売している三波長域型蛍光灯 (FL-EX) の 2 種を実用蛍光灯の代表とし、さらに効率が 10~30% 低いために普及の程度は低い、実用照明人工光源の中では最も演色性が良い超高演色性蛍光灯 (FL-EDL) を加えた。

二つ以上の比較したい色において、3 刺激値がそれぞれ等しい場合は、正常観察者について等色が成立するが、3 刺激値の間に差があるときに 3 刺激値空間内での距離が一定でも、その色の存在する領域によって同一の大きさの色差の知覚を与えない。そこで、表色系を他の表色系に変換して、その新しい表色系で 2 点間の距離が等しい場合に、どの色の領域でもほぼ一定の色差を知覚する

ようにしたものを均等色空間といい、その一つに CIE 1976 L*a*b* 色空間がある。3 刺激値 X, Y, Z から L*, a*, b* への変換方法の詳細については色彩学の成書にゆずるが、L* は明度を表し、a*, b* の両者で色相と彩度を合わせた色味を表す。均等色空間においては二つの色の差、つまり色差は 2 点間の距離で定義され、色差はつぎの式で表される。

$$\Delta E^*ab = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

照明を変えたときの歯冠色の色ずれを定量的に処理するために資料の測定値を X, Y, Z からさらに L*, a*, b* に変換した。

資料の天然歯および人工歯を昼光 (D₆₅) でみたときの色から、各試験照明でみたときに、どれほどの色ずれが起こるかについて上記色差式で検討し、その統計量を表 3 に示す。また、図が込み入り判別しにくくなるのを避けるために資料の中から天然歯 12 本、人工歯 9 本をとり出して具体的に a*, b* 平面に D₆₅ の下でみた色と、各種照明光でみた色をプロットしたものを図 12~16 に示す。図中の ● は天然歯、▲ は人工歯を基準照明 D₆₅ でみたときの色で、○△ はそれぞれ試験照明でみたときの色である。No. 1~12 までは天然歯、No. 13~21 までは人工歯の資料番号である。図は CIE

表 3 基準照明 (Ill. D₆₅) を各試験照明に変えたときに起こる色ずれ (ΔE^*ab)

天 然 歯	最大	最小	範囲	平均	S D
FL 20 S. EDL-50K	1.29	0.67	0.62	1.04	0.17
FL 40 S. EX-50	1.52	0.75	0.77	1.19	0.22
FL 40 S. W	2.64	1.40	1.24	1.98	0.34
ILL. A	4.67	2.54	2.13	3.86	0.57
P 3000	4.41	2.15	2.26	3.69	0.60

人 工 歯

FL 20 S. EDL-50K	1.25	0.78	0.47	1.01	0.14
FL 40 S. EX-50	1.59	0.83	0.76	1.23	0.25
FL 40 S. W	2.98	1.70	1.28	2.30	0.40
ILL. A	4.13	2.87	1.26	3.59	0.42
P 3000	4.02	2.79	1.23	3.49	0.41

図12 資料の中から選んだ12本の天然歯と9本の人工歯について照明を基準照明 (III. D₆₅) から試験照明 (FL 20 S. EDL-50K) に変えたときの色ずれを CIE 1976 (L^* , a^* , b^*) の $a^* \cdot b^*$ 面に示す

図14 資料の中から選んだ12本の天然歯と9本の人工歯について照明を基準照明 (III. D₆₅) から試験照明 (P 3000) に変えたときの色ずれを CIE 1976 (L^* , a^* , b^*) の $a^* \cdot b^*$ 面に示す

図13 資料の中から選んだ12本の天然歯と9本の人工歯について照明を基準照明 (III. D₆₅) から試験照明 (III. A) に変えたときの色ずれを CIE 1976 (L^* , a^* , b^*) の $a^* \cdot b^*$ 面に示す

図15 資料の中から選んだ12本の天然歯と9本の人工歯について照明を基準照明 (III. D₆₅) から試験照明 (FL 40 S. EX-50) に変えたときの色ずれを CIE 1976 (L^* , a^* , b^*) の $a^* \cdot b^*$ 面に示す

図16 資料の中から選んだ12本の天然歯と9本の人工歯について照明を基準照明(III. D_{65})から試験照明(FL 40 S. W)に変えたときの色ずれを CIE 1976 (L^* , a^* , b^*) の $a^* \cdot b^*$ 面に示す

1976(L^* , a^* , b^*)の均等色空間の a^* , b^* 平面であり、この平面上の2点は色相と彩度を合わせて表現する色味の違いを表しており、明るさについては読みとれない。 D_{65} からEDL型に変わった場合の色ずれ(図12)を L^* , a^* , b^* の別にみると、 $L^*_{D_{65}} - L^*_{EDL}$ で求められる ΔL^* が明るさの違いで、平均 -0.30 、 $a^*_{D_{65}} - a^*_{EDL}$ で求められる Δa^* の平均 -0.72 、 $b^*_{D_{65}} - b^*_{EDL}$ で求められる Δb^* の平均 -0.66 であった。同様に D_{65} からA光に変わった場合(図13)の平均値は、 ΔL^* は -0.90 、 Δa^* は -3.54 、 Δb^* は -0.52 、 D_{65} からP3000に変わった場合(図14)の平均値は、 ΔL^* は -0.78 、 Δa^* は -3.43 、 Δb^* は -0.53 、 D_{65} からEX型に変わった場合(図15)の平均値は ΔL^* は -0.34 、 Δa^* は $+0.42$ 、 Δb^* は -1.06 、 D_{65} からW型に変わった場合(図16)の平均値は、 ΔL^* は -0.73 、 Δa^* は $+0.16$ 、 Δb^* は -1.92 であった。これらの値を表4にまとめる。

資料の中から具体的に代表的な天然歯と人工歯を選んで図17に示す。基準照明 D_{65} からすべての

表4 昼光(D_{65})から各種の試験照明に変えた場合の色の変化(天然歯、人工歯の合計)

		$D_{65} - EDL$	$D_{65} - A$	$D_{65} - P3000$	$D_{65} - EX$	$D_{65} - W$
ΔL^*	平均	-0.30	-0.90	-0.78	-0.34	-0.73
	S D	0.09	0.27	0.31	0.09	0.26
Δa^*	平均	-0.72	-3.55	-3.43	0.42	0.16
	S D	0.13	0.54	0.55	0.26	0.50
Δb^*	平均	-0.66	-0.52	-0.53	-1.06	-1.92
	S D	0.13	0.55	0.51	0.18	0.31
ΔE^*_{ab}	平均	1.03	3.74	3.61	1.21	2.12
	S D	0.16	0.54	0.54	0.24	0.41

図17 資料の中から代表的天然歯と人工歯を選び照明光を基準の昼光(III. D_{65})からすべての試験照明に変えたときの色ずれを CIE 1976 (L^* , a^* , b^*) の $a^* \cdot b^*$ 面に示す

試験照明に変えた時の色を矢印で示し、その試験照明を記入してある。上の二つはEDLの照明で、基準照明からの色ずれが最大である天然歯と人工歯の例であり、下の二つは同様に色ずれが最小であった例である。矢印の長さが色ずれの大きさを表し、長いほど色ずれが大きい。矢印の方向は色相と彩度を合わせた色味を表している。照明

の種類によって色ずれの矢印の大きさや方向が特異的である。A 光と P 3000 はタングステン電球という点で同種であり、図 2 と 6 に示すように分光比 エネルギー 分布の形態も似ており、A は $2,856^{\circ}\text{K}$ 、P は $3,000^{\circ}\text{K}$ と色温度の違いによる影響だけのようであるところから、これらを分けて考える必要はなさそうである。これらの場合は矢印が一段と長く、大ざっぱにみると右横の方へ向かっているが、よくみると真横があったり、少し右上方へ向いているものがあったりしている。W 型の場合は大体上方を向いているが、真上、左上方、右上方と一定せず、しかも長さがかなり長い。しかし、EDL 型の場合は矢印の方向はほぼ右上方と一定しており、大きさに若干の差があるにすぎない。このことは EDL 型蛍光灯の下でみる色は、太陽日光の下でみる光から極めてわずかな色ずれを起こすにすぎず、その色味も一定であり、歯の種類を選ばないということになる。ここであげた試験照明 5 種の中で歯の色を、最も太陽光に近い色にみせることになる。

基準照明からそれらの試験照明に変わった場合に生じる色差 ΔE^*ab の値を表 5 に示す。表 3、5 からわかるように、EDL 型で D_{65} との色差が 1.29 と最大であった天然歯 No. 12 は A 光で 4.67、P 3000 でも 4.41 と最大値であり、EX 型では 1.49、W 型では 2.45 で共に最大ではないが、資料の最大値がそれぞれ 1.52、2.64 であるからその差は僅少で、ほとんど最大値に近いものである。また、最小値の方については天然歯 No. 1 は EX 型と A 光においてやはり最小であり、W 型と P

表 5 照明を D_{65} から各種の試験照明に変えた場合の色ずれ (ΔE^*ab)

試験照明	天 然 歯		人 工 歯	
	No. 12	No. 1	No. 20	No. 14
FL 20 S, EDL-50K	1.29	0.67	1.25	0.78
FL 40 S, EX-50	1.49	0.75	1.59	0.96
FL 40 S, W	2.45	1.52	2.75	1.70
ILL, A	4.67	2.54	4.13	2.87
P 3000	4.41	2.50	4.02	2.79

3000 についても最小値との差は大きくない。人工歯 No. 14 についても W 型、A 光、P 3000 がやはり最小であり、EX 型のみ最小ではないがわずかに 0.13 の差である。このようにみえてくると、照明の違いによる色ずれの大きさに差が出るのは当然としても、歯の違いによって天然歯も人工歯も照明を変えたときの色ずれは、ほぼ 2 倍弱の差のひらきがある。日光から照明を変えたときの色ずれが大きければ大きいほど、どのような人工照明でも大きくなり、逆にある人工照明で日光からの色ずれが小さいものは、他の人工照明でも小さい値を示すようである。これらの相関について、 D_{65} から EDL 型に変わったときの色差に対する、 D_{65} から EX 型、W 型、P 3000、A 光に変わったときの色差の相関散布図を図 18~21 に示し、回帰直線を求めた。また、 D_{65} から EDL 型に変わった場合だけでなく、他の照明に変わった場合の色差に対しても、すべての場合に生じる色差の相関係数を求め表 6 に示す。 D_{65} から照明を変えたときに起こる色差は、どのような照明に変えても、どれかの照明で大きいものは他の照明でも大きくなり、小さいものは小さいという直線相関の関係が一般に強いが、白色蛍光灯 W がからんでくると相関係数は A 光で 0.656、P 3000 で 0.673、EDL 型で

図 18 資料の中から抽出した 21 歯について日光から日光に最も近い EDL 型蛍光灯に照明を変えた色差と、日光から試験光 EX 型蛍光灯に変えた色差の相関散布図および回帰直線

図19 資料の中から抽出した21歯について昼光から昼光に最も近いEDL型蛍光灯に照明を変えた色差と、昼光から試験光W型蛍光灯に変えた色差の相関散布図および回帰直線

図21 資料の中から抽出した21歯について昼光から昼光に最も近いEDL型蛍光灯に照明を変えた色差と、昼光から試験光Aに変えた色差の相関散布図および回帰直線

図20 資料の中から抽出した21歯について昼光から昼光に最も近いEDL型蛍光灯に照明を変えた色差と、昼光から試験光P3000に変えた色差の相関散布図および回帰直線

0.745と低くなる。

3. 条件等色

とくにわかりやすい例として図12のEDLの場合と、図13のA光の場合を比較してみると、EDLに照明が変わっても21本の歯はD₆₅下の場合の色とほぼ等距離、等方向にしか変わらないために、お互いの色差にほとんど変化がないが、A光に照明が変わった場合には色ずれの方向、大きさが一定していないために、お互いの色差がD₆₅の時の

表6 基準照明(ILL. D₆₅)を各試験照明に変えたときに起こる色ずれ(J*E*ab)の相関係数

試 験 照 明	ILL. A	P 3000	EX	W
FL 20 S. EDL-50K	0.979	0.978	0.886	0.745
FL 40 S. W	0.656	0.673	0.860	
FL 40 S. EX-50	0.849	0.857		
P 3000	0.992			

ものとは変わってくる。図中に矢印で示した2組、すなわち12、17番と11、14番の組み合わせはそれらの現象が顕著な例である。この現象は別の言葉にすると、昼光やEDLの下では違った色にみえていた2本の歯が、白熱電球では等色することがあるということである。もちろん、逆に白熱電球の下ではほぼ等色していた2本の歯が、昼光やEDLの下では違った色にみえることがあるということにもなる。このようなある光源では等色するといっても、照明が変わると等色がくずれてしまうような等色は条件等色(metamerism)といい、D₆₅とA光の場合だけではなく、すべての照明の間で起こりうるものである。

色差の計算値と色差知覚に関して、色の専門家ではJ*E*ab=1.2はかなり大きく、ほとんどの人

が許容できないという。しかし、一般の人にとっては、その程度がちょうど色差が知覚できるかどうかの限界に対応すると考えてよい。 $\Delta E^*ab=2.5$ はたいていの人が色差の存在を認めることができるという。

そこで ΔE^*ab 2 以下の色差しかない 2 本の歯は等色しているとする。資料の 55 本の天然歯に対して、バイオブレンド人工歯 36 種を総あたりでその色差を求め、 D_{65} あるいは他の試験照明の少なくとも一つで等色する組を選び出したところ、24 本の天然歯に対して等色する人工歯があり、中には 1 本の天然歯に対し 5 本の人工歯がそれぞれ ΔE^*ab 2 以下となり、総数で 60 組の等色するサンプルが得られた。24 本の天然歯は資料の 43.6% にあたり、 ΔE^*ab 2 以下という比較的厳しい条件にもかかわらず約半数が等色しているということは、かなり高い確率のように思える。本実験では天然歯、人工歯共に歯種を分けずに総あたりで色差を計算したために、実験のサンプルとしては天然歯は中切歯であるにもかかわらず、人工歯は側切歯が等色している場合もある。しかし、文献によると歯種の違いによって色調は変わるものであるが、色の範囲は歯種の間でかなり広く重なるものであり、本実験のわずか 55 本の天然歯の中には入っていなかったが、当然サンプル以外の天然歯の中にはこの中切歯のような色調の側切歯が存在し

ていると考えるのは無理がないであろう。

昼光の下に天然歯と人工歯を 1 本ずつ組み合わせてみたときに生じている色差 $\Delta E^*ab(D_{65})$ が、人工照明の下ではどう変わるかを調べ、図 22～26、表 7 に示す。図の X 軸に $\Delta E^*ab(D_{65})$ をとり、Y 軸には変えた人工照明の下での色差をとっている。一般的には昼光下での色差が大きい組ほど、人工照明下での色差も大きいという相関関係は、表 7 の相関係数に示すように最も低い A 光の場合でも 0.797 であり、最も高い EDL 型の場合は 0.981 となる。しかし、相関散布図のばらつきから見当がつくように、 $\Delta E^*ab(D_{65})$ に対する ΔE^*ab

図23 天然歯と人工歯の対の昼光 (D_{65}) 下での色差に対する試験照明 EX 下での色差の相関散布図および回帰直線

図22 天然歯と人工歯の対の昼光下での色差に対する試験照明 EDL 下での色差の相関散布図および回帰直線

図24 天然歯と人工歯の対の昼光 (D_{65}) 下での色差に対する試験照明 W 下での色差の相関散布図および回帰直線

図25 天然歯と人工歯の対の昼光 (D₆₅) 下での色差に対する試験照明 P 3000 下での色差の相関散布図および回帰直線

図26 天然歯と人工歯の対の昼光 (D₆₅) 下での色差に対する試験照明 A 下での色差の相関散布図および回帰直線

(test) の値は増減をみせ、値の小さな順から EDL 型, EX 型, W 型, P 3000, A 光となる。A 光で最も大きく色差が変わる場合に、元の D₆₅ の色差の約 40% の値の増減を認める。

各種の照明光の下で ΔE*ab 2 以下の値となり、等色する天然歯と人工歯の組み合わせに対して、照明光が他に変った場合にその等色は維持されるかどうかを調べたところ、表 8 に示すような結果となった。

D₆₅ を基準照明とすると 31 組等色するものが得られた。これらは EDL 型, EX 型, W 型, A 光の

表 7 天然歯と人工歯の対の昼光 (D₆₅) 下での色差と各種試験照明下での色差との相関係数

D ₆₅ -A	D ₆₅ -P 3000	D ₆₅ -EDL	D ₆₅ -EX	D ₆₅ -W
0.797	0.814	0.981	0.944	0.863

すべての試験照明の下でも 25 組 81% も等色しており、EDL 型と A 光の下で等色するものが 3 組 10%、EDL 型, EX 型, W 型の下で等色するもの 2 組 6%、A 光のみで等色するもの 1 組 3% であった。昼光は歯冠色を厳しく評価し、等色であるとする組み合わせが少ないが、ここで等色したのは、多くの人工照明の下でも等色する。

試験照明の中で昼光と性質を最も異にする A 光の下で等色する 46 組のサンプルに対して、A 光と異なる照明光源の下でみても等色が維持されるかどうかをみる。昼光, EDL 型, EX 型, W 型のすべての照明の下でも等色であった組は 23 組と 50% あり、昼光と EDL 型の下でのみ等色し、他の EX 型, W 型の下では等色がくずれてしまったものが 3 組 7%、同様に EDL 型, W 型の下でのみ等色したもの 3 組, W 型でのみ等色したもの 3 組, 昼光のみ等色したもの 1 組であり、13 組 28% は A 光以外ではどの照明でも等色しなかった。表 8 にみられるように、EDL 型, EX 型, W 型をそれぞれ基準光源として等色する組数は 33, 33, 37 であり、それらを他のすべての試験照明の下でみたときに等色が保たれる割合は 76~68% と、EDL 型および EX 型はかなり高く、W 型もまずまずである。これら蛍光灯については一番成績の悪い W 型でも、A 光の場合のように基準光以外の照明で等色する照明がないといった極端な成績が全くないのは、一応の成果である。

また D₆₅ に対する各人工照明の等色の評価の一致度を統計的に検定した。すなわち、基準照明 D₆₅ の下で等色する組が試験照明の下でも等色している、あるいは逆に D₆₅ の下で等色しない組が試験照明の下でもやはり等色しない。これらの場合に D₆₅ と、その試験照明は等色評価が一致しているとする。また、D₆₅ の下で等色していた組が

表8 各種の基準照明下において等色する天然歯と人工歯の対が照明を変えた場合にも等色を保った例数

等色となる試験照明	基準照明と等色の例数				
	標準光源 D ₆₅	標準光源 A	E D L	E X	W
すべての試験照明	25(81%)	23(50%)	25(76%)	25(76%)	25(68%)
D ₆₅ , E D L, E X	—	0	—	—	2(5%)
D ₆₅ , E D L, W	—	0	—	2(6%)	—
E D L, E X, W	2(6%)	0	—	—	—
E D L, E X, A	0	—	—	—	4(11%)
D ₆₅ , E X, W	—	0	2(6%)	—	—
E D L, A	3(10%)	—	—	0	3(8%)
E D L, W	0	3(7%)	—	0	—
E X, W	0	0	1(3%)	—	—
W, A	0	—	3(9%)	2(6%)	—
D ₆₅ , E D L	—	3(7%)	—	0	0
D ₆₅ , A	—	—	2(6%)	2(6%)	0
A	1(3%)	—	0	2(6%)	3(8%)
D ₆₅	—	1(2%)	0	0	0
W	0	3(7%)	0	0	—
な し	0	13(28%)	0	0	0
合 計	31(100%)	46(100%)	33(100%)	33(100%)	37(100%)

試験照明の下で等色しなかったり、D₆₅の下で等色しない組が試験照明の下では等色する、これらの場合に等色の評価は一致しないとする。A光の下で J E 2 以下となる組み合わせをすべてとり出し、等色の一致を調べ、統計的検定をした結果は有意水準 5%においてD₆₅と EDL型、EX型、W型の蛍光灯は等色の評価が一致していたが、D₆₅とA光の間では一致しているとはいえない。したがって、表6のD₆₅で等色していた31組と、EDL型やEX型で等色していた33組のものは同一のものである可能性が高く、これらの蛍光灯は歯冠色を評価し、シェードマッチングを行うための昼光の代用になりうるといってもよい。

歯冠色をみるのに良い光源とは、明るく、しかも太陽光の下でみた色を忠実に再現することである。昼光と同じ忠実な色再現をする人工光源を選定しようとしても、人工光源は一般に太陽光とは異なった分光分布の特徴を有しているために、太陽昼光と一致するものはない。そこで心理的に太

陽光に近いと許容しうる分光分布のずれはどの程度であるか、またその分光分布のずれを、どのようにしてそこから生じる色ずれと心理的評価を対応させれば良いかなど問題は残る。一般に光源による歯冠色の演色の変化は、つぎの二つの要因による。①光源の分光分布が異なれば、それで照明される歯冠からの拡散反射光の分光分布が異なり、したがって3刺激値が変化する。②照明光による環境全体の色度変化に目が慣れて、目の感度が増加することによって演色の知覚が変化する。この色順応を数量的に取り扱うには困難が多い。さらには、これらの色刺激値変化と順応の両者は、どちらかといえば互いに打ち消し合う方向に働き、照明を変えても物体色の知覚はあまり変わらないようにしようとする色彩恒常(color constancy)の現象が成り立つ。このように、照明の変化による色知覚の問題は複雑であるが、歯科の臨床の立場で考えると、昼光下での歯冠色の見えと他の人工光源での見えが一致するかどうかが問

題になることは少ない。それよりも天然歯と人工歯が同時に口腔内に存在したときに、ある照明の下では等色しているが、照明が変わったときにその等色がくずれてしまう場合があり、問題が生じる。そこで色調のアンバランスを目立たせないようにするためには、等色がくずれた場合にもその色差が小さな値にとどまるような人工歯のシェードマッチングを行うには、どの照明を用いるべきであるかという問題を解決する方が有効である。

IV. 結 論

1. 蛍光灯の種類で超高演色性 EDL 型、三波長域 EX 型、白色 W 型の 3 種およびハロゲンタングステン電球 P 3000, CIE 標準光源 A の人工照明には太陽日光 (CIE 標準光源 D₆₅) と、歯冠色に関して演色性が一致するものはなく、上に述べた照明光源の順に、その照明光源でみた場合の歯冠色と、日光でみた場合の歯冠色との色差が大きくなる。その色差の最小値は EDL 型における天然歯が $J E^*ab$ 0.67 であり、最大値は A 光におけるやはり天然歯が $J E^*ab$ 4.67 であり、人工照明の種類によって、また、歯の種類によっても色ずれにかなり大きな差がある。

2. EDL 型蛍光灯が太陽日光に最も近い演色性を示すが、太陽日光との色差は一定にはならず、 $0.67 \leq J E^*ab \leq 1.29$ の範囲にあった。

3. EDL 型蛍光灯でみた場合に太陽光の下でみた場合と色ずれが大きくなればなるほど、その歯を他の照明光でみても太陽光との色ずれが大きくなるという一般的性質がある。しかし、両者の値は等しくなく、A 光のように EDL 型の 3 倍以上になる照明もある。

4. 2 本の歯を一つの照明下に並べてみた場合に、その色差は照明が変わってもその値が極端に変わることはなく、最大の場合でも日光下での色差の 40% の増減にとどまる。日光下での色差に近くみせる照明を順にあげると EDL 型、EX 型、W 型蛍光灯、P 3000, A 光の順になる。

5. 日光下、EDL 型および EX 型蛍光灯の下で等色している天然歯と、人工歯の組み合わせは

照明が変わっても 70% 以上の確率で等色を保っているが、他の W 型蛍光灯、白熱電球等の照明光の下で等色するように選んだ組み合わせは、照明が変わると等色がくずれる場合が多い。

6. 総合的に判断して、歯冠色を評価するためには日光の代わりとなる最もすぐれた人工照明は EDL 型蛍光灯であり、EX 型蛍光灯がそれに続く。W 型蛍光灯、A 光、P 3000 は用いない方がよいと思われる。

謝 辞

稿を終えるにあたり、終始ご懇篤なる指導と校閲を賜りました林都志夫教授に深甚なる謝意を表します。本研究の分光比反射率の計測にご協力戴きました(財)日本色彩研究所元香照夫氏、ならびに 3 刺激値の演算の労をとられた東京芝浦電気(株)総合研究所森礼於博士につつしんで感謝の意を表します。本研究の完成には畏友指宿真澄君の援助によるところがはなはだ多い。記して感謝の意を表する。

本論文の要旨の一部は、昭和 57 年 11 月、第 47 回口腔病学会総会、ならびに昭和 58 年 6 月、日本補綴歯科学会関東支部会学術例会において発表した。

文 献

- 1) 丸井昌夫：歯冠色に関する研究，第 2 報，歯冠色と皮膚色との関連性．口病誌 35：422-440, 1968.
- 2) 中川喜晴，他：陶材補綴におけるシェイドセレクション（色調選択）に関する研究，第 1 報，各種シェイドガイドの構成分析について．補綴誌 16：144-157, 1972.
- 3) 土屋 潔：前歯の色彩学的研究．歯科学報 73：87-119, 1973.
- 4) 中川喜晴：歯冠色分析に関する研究．補綴誌 19：109-130, 1975.
- 5) 加藤愛子：歯冠色の構成に関する色彩学的研究．補綴誌 20：570-580, 1976.
- 6) 指宿真澄，加藤愛子：上顎第 1 小臼歯の色彩学的研究．補綴誌 20：269-274, 1976.
- 7) 指宿真澄，加藤愛子，浅岡一馬，今井基泰：バイオブレンジシェードガイドの色調に関する研究．補綴誌 20：546-550, 1977.
- 8) 橋口緯徳，他：口腔内の色彩に関する研究，第 1 報，歯科用マイクロカラーメーターの考案と陶歯の色の測定．松本歯学 6：59-67, 1980.
- 9) 橋口緯徳，神津 英：口腔内の色彩に関する研

- 究, 第2報, 抜去歯牙の色彩. 松本歯学 6 : 68-73, 1980.
- 10) 橋口緯徳, 他 : 口腔内の色彩に関する研究, 第3報, 口腔内の測定値. 松本歯学 6 : 74-80, 1980.
 - 11) 橋口緯徳, 他 : 口腔内の色彩に関する研究, 第4報, 光の構成と陶歯の色. 松本歯学 7 : 77-86, 1981.
 - 12) 小塩博司, 他 : デンタルカラーアナライザーによる成人上顎6前歯の歯冠色分析. 岐歯学誌 9 : 248-255, 1981.
 - 13) Culpepper, W. D.: A comparative study of shade-matching procedures. J. Prosthet. Dent. 24: 166-173, 1970.
 - 14) Saleski, C. G.: Color, light, and shade matching. J. Prosthet. Dent. 27: 263-268, 1972.
 - 15) Sproull, R. C.: Color matching in Dentistry. Part III. Color control. J. Prosthet. Dent. 13: 146-154, 1974.
 - 16) Lemire, P. A. et al.: Color in Dentistry. St. Louis, 1975, Ney, 42-58.
 - 17) Preston, J. D.: Color and Esthetics, Yamada, H. N., Dental Porcelain: The State of the Art-1977. Los Angeles, 1977, Univ. of Southern California, 307-315.
 - 18) Preston, J. D. et al.: Color Science and Dental Art. St. Louis, 1980, Mosby, 56-62.
 - 19) Mclean, J. W.: The Science and Art of Dental Ceramics, Vol. I. The Nature of Dental Ceramics and their Clinical Use. Chicago, 1979, Quintessence, 24-30.