

## CCM によるセラミッククラウン切縁部の色調構築

坂下 勝啓

岩手医科大学歯学部歯科補綴学第二講座

(指導：石橋 寛二 教授)

(受付：1999年10月15日)

(受理：1999年10月26日)

**Abstract** : In order to establish the progressive Computer Color Matching (CCM) system for various restorations, a more precise method for incisal tooth color needs to be developed. The purpose of this study is the assessment of a newly developed CCM system for incisal tooth color. To reproduce the wide range of incisal tooth colors with numerous properties of translucency and chromaticity, six kinds of ceramics (two non-colored ceramics and four colored ceramics) were used, and colorimetric theories were applied to predict the incisal tooth color and free standing condition. The optimum scattering coefficients and absorbing coefficients for this CCM system were determined, and the precision of color reproducibility for the five kinds of ceramic targets and shade guides was analyzed. The color difference  $dE$  between the CCM sample and the target was under 3.5 for ceramic targets, and was under 3.0 for shade guides. Therefore, it can be said that the newly developed CCM system is an excellent color reproduction system for incisal tooth color, and has a high precision of color reproducibility.

**Key words** : computer, color, ceramic

### 緒 言

近年、審美性に対する要求が高まり、自然な色調を回復できるセラミッククラウンが広く応用されている。セラミッククラウンの色調を構築する際には、通常シェードガイドを用いた視感比色法による色合わせが行われている。しかし、視感比色法による色合わせは、術者の主観によるところが大きいため誤差を生じやすく、しかも術者と製作者の間で色調を正確に伝達することが困難である。これを改善するため、Computer Color Matching (以下 CCM) システムによる客観的な色調構築法が開発<sup>1-7)</sup>され

た。CCM システムは、色彩学的理論に基づいた精度の高い色合わせ法であり、目標とする歯を分光光度計により測色し、コンピュータで解析することによって、目標色を構築するのに必要なセラミックの種類と配合比率を算出するものである。

著者らの教室では CCM システムをメタルセラミッククラウンおよびラミネートベニアクラウンに適用するための研究を重ね、臨床応用を可能とした。しかし、その後臨床成績を追跡した結果、メタルセラミッククラウンに関しては、3種類のエナメル陶材(透明成分、白色隠蔽成分、褐色着色成分)を用いるこれまでのシ

---

Color reproduction for incisal of ceramic crown using CCM system

Katsuyoshi SAKASHITA

Department of Fixed Prosthodontics, School of Dentistry, Iwate Medical University

Director : Prof. Kanji Ishibashi

(1-3-27, Chuo-dori, Morioka, Iwate 020-8505 Japan)

岩手県盛岡市中央通1丁目3-27 (〒020-8505)

*Dent. J. Iwate Med. Univ.* 24 : 183-193, 1999

ステムでは、歯冠切縁部の色調を再現しにくいことが明らかになった<sup>8)</sup>。特に、隠蔽性が高く着色性の強い場合や、透明性が高く青成分または赤成分の着色がある場合は、CCM 処方への解が得られなかったり、予測と実際の色差が大きいなど、歯冠切縁部の色調構築精度をさらに向上させる必要が認められた。

さらに IPS-Empress を用いたオールセラミッククラウンについても、E. Ganz によって開発された CIBA-Q 法を応用した CCM システムを開発し、その色調構築精度を基礎的ならびに臨床的に検討<sup>9-11)</sup>してきた。しかし、メタルセラミッククラウンの場合と同様に、幅広い透明性<sup>12)</sup>と色調が要求される歯冠切縁部についてはさらに色調構築精度を向上させることが重要な課題である。

そこで、エナメル単体の歯冠切縁部を対象として、セラミック背面に空気の層が存在する状態 (Free standing) における広い歯冠切縁部に対応可能な色調構築法を確立するため、セラミックの透明性を考慮した CCM システムの検討を行った。

## 材料および方法

### 1. 実験材料

CCM による色調構築を行うための目標色のセラミックサンプル (以下、目標色セラミック) および配合成分として用いるセラミックサンプル (以下、基準色セラミック) の作製に、市販のセラミック粉末 (Super Porcelain AAA, Noritake 社) の 6 種類のシェードを使用した。シェードは、無彩色で透明性を有する T0、白色で隠蔽性を有する Creamy White (以下 CW)、黄色の Incisal Aureola (以下 IA)、褐色の Sun Bright (以下 SB)、赤色の Pink (以下 PI) および青色の Tblue (以下 TB) である。目標色セラミックとしては、さらにシェードガイド (VITAPAN 3 D MASTER, VITA 社) の 5 段階明度グループ中央の 1M-2、2M-2、3M-2、4M-2 および 5M-2 を用いた。

### 2. 試験片の作製

基準色セラミックは 6 種類のシェードをそれぞれ単色で作製し、目標色セラミックは、T0 90% に対して他の 5 種類をそれぞれ 10% 混合した透明性ならびに色度の異なる 5 種類を作製した。

測色に用いる基準色および目標色セラミックの試験片は、それぞれの粉体をシリコンモールド内で円板状に成型し、ポーセレンファーンネ (Programat P95, Ivoclar 社) を用いてメーカー指定の条件で焼成して作製した。試験片の直径は 10mm とし、厚さが 2.0mm となるように高速研磨機 (ドクターラップ, マルトー社) を用いて試験片両面を耐水ペーパー 1500 番まで研磨した。

半透明体においては、厚さにより散乱係数および吸収係数が異なるため、処方計算に用いる色材の適正な散乱係数および吸収係数は厚さを考慮したものを採用する必要がある。CW においては 2.0mm での白背景および黒背景での分光反射率が近接しており、絶対法による正確な散乱係数と吸収係数の算出には不適當である可能性があるため、分光反射率の近接が生じないような厚さ 1.0mm の試験片も作製した。また、IA においては、分光反射率から散乱係数および吸収係数を算出する際に、Kubelka-Munk の理論<sup>13,14)</sup>が適用できる厚さを見出す必要があるため、厚さ 2.5mm、3.0mm、3.5mm の試験片も作製した。

### 3. 測色方法

セラミック試験片の測色は、非接触型分光光度計 (マルチスペクトルカメラシステム MSC-120, オリンパス社) を用いて行った。光源には 100W のハロゲンタングステンランプを使用し、照明および受光の幾何学的条件としては、試料の法線に対し 45° の角度をなす 2 方向からの照明、0° で受光する条件 a (45-0) を採用した。各試験片について波長 400nm から 700nm まで 20nm 間隔の 16 波長について分光反射率を測定した。なお、6 種類の基準色セラミックについては白背景および黒背景の 2 条件で、目標

色セラミックについては、白背景、黒背景およびFree standingの3条件で測色した。ただし、目標色として用いたシェードガイドは切縁部分1.0×4.0mmの範囲を目標色とした。

分光反射率は、分光光度計の測定値にSaundersonの補正<sup>15)</sup>を行ったものを用いた。

#### 4. CCM計算プログラム

目標色セラミックの色調および半透明性を実現するための基準色セラミックの配合比率(CCM処方)は、両者の測色データを用いて以下の手順1)~4)で算出した。なお、本プログラムでは、セラミックの半透明性を表わすパラメータとして光の隠蔽性(Hiding power, 以下HP)を用いた。HPの計算は、白背景および黒背景で測定した分光反射率から導かれる散乱係数と等色関数の積を、波長λが400nmから700nmまで20nmごとの16波長について合計した値として求めた<sup>16,17,18)</sup>(式1)。

$$HP = \sum_{400}^{700} S(\lambda) \cdot y(\lambda) \quad (1)$$

S: 散乱係数, y: 等色関数

また、セラミックの色調を表わすパラメータとしては、散乱係数と吸収係数の比、CIE等色関数、標準光の分光分布および分光反射率から導かれる色濃度刺激値(QX, QY, QZ)を用いた。ただし、混合物の散乱係数と吸収係数の比 $(S/K)_m$ は、Duncan<sup>19)</sup>の式(式2)より求めた。 $(S/K)_m = \{S_1 \cdot P_1 + S_2 \cdot P_2 + \dots + S_n (1 - \sum P_i)\}$

$$/ \{K_1 \cdot P_1 + K_2 \cdot P_2 + \dots + K_n (1 - \sum P_i)\} \quad (2)$$

S: 散乱係数, K: 吸収係数, P: 配合比率  
n: 成分数  $i = 1, 2, \dots, n$

色濃度刺激値は、式3を使って計算した<sup>11,16)</sup>。

$$\begin{aligned} QX &= \sum (K/S)(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot x(\lambda) \\ QY &= \sum (K/S)(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot y(\lambda) \\ QZ &= \sum (K/S)(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot z(\lambda) \\ (K/S)(\lambda) &= \{1 - R(\lambda)\}^2 / 2R(\lambda) \quad (3) \end{aligned}$$

$x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$ : CIE等色関数

$S(\lambda)$ : 標準光の分光分布

$R(\lambda)$ : 分光反射率

#### 1) 基準色セラミックのHPの調整

基準色セラミックを配合したとき、配合物の半透明性が目標色セラミックの半透明性と一致するように、まず基準色セラミックそれぞれに、透明性のT0または白色隠蔽性のCWを加えて目標色セラミックとHPが一致する2成分系のセラミック(配合用セラミック)を処方した。つまり、6種類の基準色セラミックのうち、有彩色セラミック4種類についてはそれぞれのHPと目標色セラミックのHPとの比較を行い、有彩色セラミックのHPが目標色セラミックのHPより大きい場合には、透明性のT0を加え、その逆の場合には白色隠蔽性のCWを加えて有彩色の配合セラミックを処方した。なお、処方は両成分を混色したときのHPは加成性が成り立つものとして、比例計算によって求めた。無彩色の基準色セラミックについては、T0とCWの2成分で同様に目標色のHPと一致する処方を計算した。以上により、5種類の配合用セラミック(無彩色成分, 黄色成分, 褐色成分, 赤色成分および青色成分)の処方を決定した。

#### 2) 配合色セラミックの色濃度刺激値の調整

目標色セラミックとHPを一致させた5種類の配合用セラミックから3種類を使用する10通りの組み合わせについて、目標色セラミックと色濃度刺激値が一致する処方( $C_i, C_j, C_k$ )を計算によって求めた。すなわち、10通りの配合用セラミックの組み合わせのうち、任意の組み合わせ( $i, j, k$ )の各配合用セラミックの色濃度刺激値( $QX_i, QY_i, QZ_i, QX_j, QY_j, QZ_j$ ), および( $QX_k, QY_k, QZ_k$ )と目標色セラミックの色濃度刺激値( $QXT, QYT, QZT$ )を用いてCIBA-Q法の3元連立方程式(式4)により処方( $C_i, C_j, C_k$ )を算出した。

$$\begin{aligned} QXT &= QX_i \cdot C_i + QX_j \cdot C_j + QX_k \cdot C_k \\ QYT &= QY_i \cdot C_i + QY_j \cdot C_j + QY_k \cdot C_k \\ QZT &= QZ_i \cdot C_i + QZ_j \cdot C_j + QZ_k \cdot C_k \quad (4) \end{aligned}$$

なお、実際に配合用セラミック3種類の混合によって、目標色セラミックの色調が実現でき

るのであれば、この連立方程式は  $C_i > 0$ ,  $C_j > 0$ ,  $C_k > 0$  なる一意的な実数解が存在するが、配合用セラミックと目標色セラミックの色空間が乖離している場合には、正の実数解が存在しなくなる。

このため、本研究では、得られた解のうち収束性がよく、正の値をとる解のみを処方とした。本報ではこの処方を第1次 CCM 処方と呼ぶことにする。

3) Free standing で測色した目標色との色差の予測

上記の1)と2)で算出した第1次 CCM 処方は、白背景および黒背景で測色された光学特性に基づいて導かれた理論に従ったものである。より臨床的な色調は Free standing における色調である。そこで、第1次 CCM 処方で作製したセラミックサンプル(第1次 CCM セラミック)が Free Standing では目標色とどの程度の色差を生じるかを、理論的に予測した。すなわち、第1次 CCM 処方に基づいて、まず各基準色セラミックの散乱係数と吸収係数に配合比率を乗じたものを全成分について合計し、第1次 CCM セラミックの散乱係数と吸収係数をそれぞれ算出した。次に、この散乱係数と吸収係数を用いて Free standing での反射率を予測する Saunderson が提出した式を一部改変した式5を使って、反射率予測値 R を計算した。

$$R = \{1 - k_{22}(a-b) \cdot \text{ctgh } bSX\} / (a - k_{22} + b \cdot \text{ctgh } bSX) \quad (5)$$

ここで、Sは散乱係数、Kは吸収係数、Xはセラミックサンプルの厚さ、 $k_{22}$ はセラミックサンプル背面で内部に拡散反射する内面反射率であり、 $a = (S+K)/S$ ,  $b = (a-1)^{1/2}$ である。なお、 $k_{22}$ は直接計測することが困難であるために、予備実験により反射率既知の複数のセラミックサンプルを使って、適合性のよい値(0.58)を算出して用いた。

この R から得られる光学特性と Free standing で実測した目標色セラミックの光学特性から、色差を算出し、これを第1次 CCM

処方の予測色差とした。

4) CCM 処方の決定

第1次 CCM 処方のうち、予測色差が最も小さいものを CCM 処方とした。

5) 色調構築精度の評価

CCM 処方で作製したセラミックサンプル(CCM セラミック)と目標色セラミックの測色データを用いて、CIELAB 表色系の  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$  および CMC (2:1) 色差式<sup>9,16)</sup>による色差 dE で色調構築精度を評価した。

## 結 果

6種類の基準色セラミック(厚さ2.0mm)の分光反射率から算出した、それぞれの散乱係数(S)および吸収係数(K)を Fig. 1 および Fig. 2 に示す。散乱係数は、測定した波長範囲にわたっていずれもほぼ一定であるが、値は白色隠蔽性をもつ CW が約2.0と大きく、他は0.1~0.5の小さい値を示した。吸収係数は CW, SB, IA が低波長で大きな値をとり、高波長になるにつれ小さい値となった。PI は波長400~520nm で0.25と比較的高い値をとり、さらに高波長では急激に低下した。T0, TB は全範囲で0.05以下の小さな値を示した。

基準色セラミックの散乱係数および吸収係数を用いて計算した CCM 処方と CCM 処方で作製したセラミックサンプルの色調構築精度を Table 1 および Table 2 に示す。CCM 処方は、いずれも目標色セラミックの処方とは完全に一致しなかった。しかし、2 (T0/IA) を除く4種の目標色セラミックに対しては、T0の処方が80.9~93.5と目標色のT0処方に近い値であった。特に、赤成分を含む1 (T0/PI) に対しては、PIの処方値がやや大きかったものの、T0とPIの和が99.2であり、目標色の処方に近似していた。色調構築精度においても dE が2.2と色差が最も小さかった。また、青成分を含む5 (T0/TB) に対しては、TBの処方値がやや小さかったものの、T0とTBの和が99.7と目標色の処方に近似しており、色調構築精度においても dE が2.8と色差が小さかった。

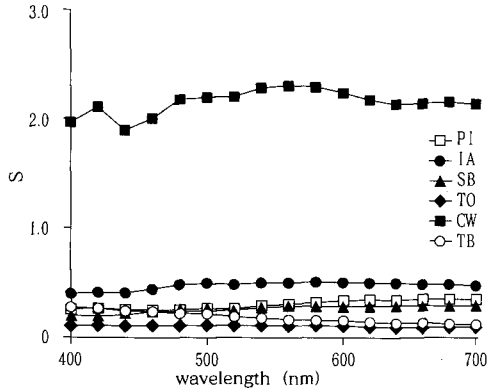


Fig. 1. Scattering coefficients of standard color ceramic (2.0mm thickness)

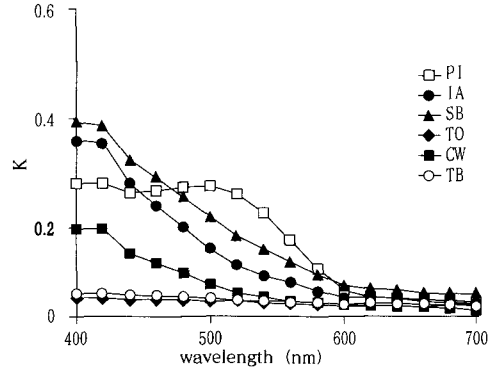


Fig. 2. Absorption coefficients of standard color ceramic (2.0mm thickness)

Table 1. CCM prescription using standard color ceramic having 2.0mm thickness

目標色	PI	IA	SB	TO	CW	TB	予測色差
1 (TO/PI)	16.0	0.5		83.2	0.3		1.3
2 (TO/IA)		22.1		40.3	2.0	35.6	1.0
3 (TO/SB)		6.5	12.3	80.9	0.3		0.9
4 (TO/CW)		3.1		93.5	1.9	1.5	4.2
5 (TO/TB)	0.2			93.3	0.1	6.4	3.8

Table 2. Precision of color reproduction using standard color ceramic having 2.0mm thickness

目標色	dL*	da*	db*	dC*	dE*
1 (TO/PI)	-2.5	1.1	1.2	1.6	2.2
2 (TO/IA)	-2.0	2.1	3.9	4.0	4.9
3 (TO/SB)	-1.4	-0.1	4.1	4.1	4.8
4 (TO/CW)	-8.1	3.7	6.9	6.9	10.7
5 (TO/TB)	-2.7	0.9	1.4	1.0	2.8
Mean					5.1

黄色成分を含む2 (T0/IA) に対する CCM 処方では、目標色の処方と最もかけはなれた処方であり、T0 が40.3と低く、IA が22.1と大きかった。さらに多量のTBとわずかなCWが CCM 処方に含まれた。この処方の予測色差は比較的小さかったが、色調構築精度としては、dE が4.9と色差が大きかった。色差の内容を見ると db\* の値が大きく、TB (青色成分) よりも IA (黄色成分) が強く現れた。褐色成分を含む3 (T0/SB) に対しては、CCM 処方のSBは12.3と目標色の処方に近かったが、T0の処方が80.9と目標色よりも10近く低い値であり、その分黄色成分IAが処方された。予測色差は0.9

と最も低い値であったが実際の色差dEは4.8とかなり高かった。白色成分を含む4 (T0/CW) は、これとは逆に、T0の CCM 処方は目標色に近かったが、CWが1.9と極端に低く、代わってIAおよびTBが処方された。また、予測色差も4.2と高く、実際の色差dEも10.7とかなり高かった。

目標色セラミックに対する CCM セラミックの色調は、いずれの目標色においても b\* 値が大きく、L\* 値が小さい傾向を示した。つまり、目標色よりも白色隠蔽成分を少なく見積る結果となった。また、目標色の処方と比べてIAの処方量が多いものが色差dEを比較的大きくし

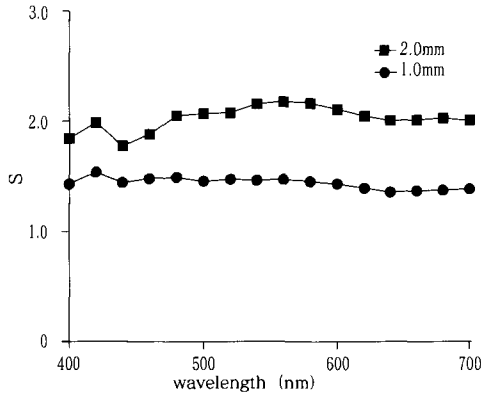


Fig. 3. Scattering coefficients of CW for various thicknesses

(4.8~4.9), CW の処方量が少ないものが色差 dE を最も大きくする結果となった。

CCM 処方において隠蔽力を実際よりも大きく見積る結果となった CW について試験片の厚さを1.0mmに変えたときの光学特性を測定した。また、着色力が予測結果よりも大きく現れた IA については試験片の厚さを2.5mm, 3.0mm, 3.5mmに変えたときの光学特性を測定した。そして、CW および IA の厚さの異なる光学特性をもとに同様な CCM 計算を行い、色調構築精度を分析した。

CW の厚さを変えた場合の散乱係数および吸収係数を Fig.3および Fig. 4 に示す。散乱係数は厚さ2.0mmに比べ、1.0mmでは、各波長とも0.5程度小さな値を示した。また、吸収係数は2.0mmに比べ1.0mmでは低波長(400~600nm)では小さな値を示すが、高波長ではほぼ同程度であった。

IA の厚さを変えた場合の散乱係数および吸収係数を Fig. 5 および Fig. 6 に示す。散乱係数は厚さが増すにつれ大きくなる傾向にあり、3.5mmの場合、特に大きな値を示した。吸収係数は厚さが増すにつれて増大するが、2.5mmと3.0mmでは変化がわずかであり、3.5mmでは、低波長側で特に大きな値を示した。

CW および IA の厚さを変えた場合の光学特性を用いて算出した CCM 処方と色調構築結果を Table 3~6 に示す。まず CW の厚さ1.0mm,

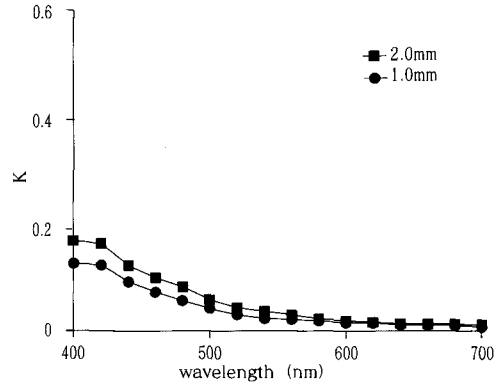


Fig. 4. Absorption coefficients of CW for various thicknesses

IA は2.5mm, それ以外のものは2.0mmの光学特性を用いて計算した場合 (Table 3), T0 の処方はすべての目標色に対して, 79.2~95.2となり, 目標色とかけはなれた処方は算出されなかった。5種類の目標色セラミックのうち, 1 (T0/PI), 5 (T0/TB) の CCM 処方はすべての基準色セラミックを厚さ2.0mmとした場合 (Table 1) と大きな変化はなく, 色差 dE はそれぞれ2.6および3.0と若干増加したものの, 値としては小さなものであった。2 (T0/PI) の処方は T0 が84, IA が13.7となり, IA および TB の処方量が Table 1 に比べて著しく減少し, 目標色の処方に近づいた。色差 dE も3.2と小さくなった。しかし, 3 (T0/SB) の処方は, Table 1 の処方に比べて, SB が5.6と目標色の処方よりも小さな値となり, IA が14.1と大きくなった。また, 色差 dE は5.5と Table 2 の結果よりも大きな値となった。Table 1 の処方で最も大きな色差を示した 4 (T0/CW) に対して, 目標色には含まれない IA, TB の処方量が増加したものの, CW が6.3と目標色中の処方に近づき, 色差 dE は2.3と Table 2 の結果と比べて著しく改善された。

次に, 基準色セラミックの厚さを CW1.0mm, IA3.0mmとし, それ以外のものは厚さ2.0mmとした場合 (Table 5), 3 (T0/SB) 以外は IA の厚さ2.5mmの場合と CCM 処方, 色差ともに比較的近い値であり, いずれも色差3.5以内であっ

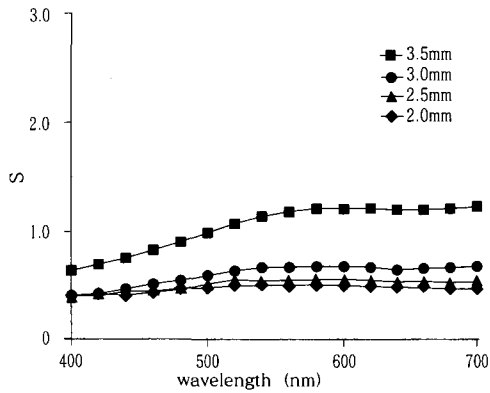


Fig. 5. Scattering coefficients of IA for various thicknesses

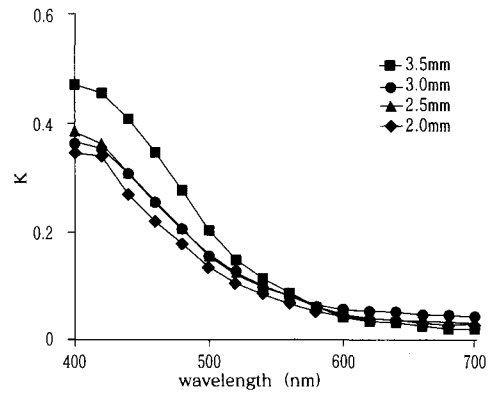


Fig. 6. Absorption coefficients of IA for various thicknesses

Table 3. CCM prescription using standard color ceramic having 2.5mm thickness of IA

目標色	PI	IA	SB	TO	CW	TB	予測色差
1 (TO/PI)	15.2		0.9	83.6	0.3		1.1
2 (TO/IA)		13.7		84.0	0.3	2.0	1.9
3 (TO/SB)		14.1	5.6	79.2		1.1	0.5
4 (TO/CW)		4.4		85.3	6.3	4.0	3.2
5 (TO/TB)	0.2			95.2	0.1	4.5	3.7

Table 4. Precision of color reproduction using standard color ceramic having thickness 2.5mm of IA

目標色	dL*	da*	db*	dC*	dE*
1 (TO/PI)	-2.8	0.8	1.8	1.9	2.6
2 (TO/IA)	-0.4	0.1	2.6	2.6	3.2
3 (TO/SB)	1.7	-0.1	4.8	4.8	5.5
4 (TO/CW)	-3.8	0.1	1.4	1.2	2.3
5 (TO/TB)	-4.2	1.4	0.7	0.8	3.0
Mean					3.3

Table 5. CCM prescription using standard color ceramic having 3.0mm thickness of IA

目標色	PI	IA	SB	TO	CW	TB	予測色差
1 (TO/PI)	14.5		0.9	84.3	0.3		1.5
2 (TO/IA)		15.1		82.3	0.4	2.2	1.6
3 (TO/SB)		11.0	8.2	80.7	0.1		0.5
4 (TO/CW)		2.2		87.5	8.2	2.1	3.0
5 (TO/TB)	0.2			94.5	0.1	5.2	3.7

Table 6. Precision of color reproduction by standard color ceramic having thickness 3.0mm of IA

目標色	dL*	da*	db*	dC*	dE*
1 (TO/PI)	0.6	1.4	1.7	2.2	2.4
2 (TO/IA)	3.9	0.1	2.6	2.6	3.5
3 (TO/SB)	3.2	-0.1	2.8	2.7	3.4
4 (TO/CW)	-2.8	-0.1	0.5	0.6	1.1
5 (TO/TB)	1.4	-0.1	2.4	-0.9	3.3
Mean					2.7

Table 7. CCM prescription of color reproduction for shade guides

目標色	PI	IA	SB	TO	CW	TB	予測色差
1M-2	5.3	23.0		68.7	0.2	2.8	0.8
2M-2	15.8	27.8		46.7	1.4	8.3	1.4
3M-2	16.6	30.2		46.2	1.3	5.7	1.1
4M-2	10.8		20.4	57.1	1.4	10.3	2.4
5M-2	5.8		24.5	66.5	0.5	2.7	3.1

Table 8. Precision of color reproduction for shade guides

目標色	dL*	da*	db*	dC*	dE
1M-2	-0.2	0.8	-0.5	-0.5	1.2
2M-2	3.9	0.8	-0.9	-0.8	2.1
3M-2	4.8	0.9	-1.3	-1.1	2.6
4M-2	2.8	1.0	1.1	1.5	3.0
5M-2	4.4	-0.1	-0.9	-0.9	2.1
Mean					2.2

た。これに対して、3 (T0/SB) はIAの処方量が減少し、その分SBの処方量が増大した結果、目標色の処方により近くなった。そして色差dEが3.4と著しく色調構築精度が改善された。なお、IAの厚さを3.5mmに設定した場合においては、CCM処方計算で解が得られなかった。

シェードガイドを目標色とした場合のCCM処方と色調構築精度をTable 7, 8に示す。すべての目標色に対してCCMセラミックの色差dEは3.0以下であり平均は2.2であった。色差の内容(dL\*, da\*, db\*, dC\*)においても著しい偏りがなく、いずれも小さな値であった。

## 考 察

### 1. 半透明性の調整

本研究において、処方計算の前段階でCCMに使用するセラミックの半透明性(隠蔽性)の指標となるHPを目標色と合わせる方法を採用した。その結果、CCM処方の計算段階でHPがほとんど変化することなく、目標色とほぼ同一のHPを維持したままCCM処方を算出することができ、さらに広い切縁色に対応させるために、赤成分、黄色成分、褐色成分および青成分の有彩色成分4種類を用いて色度の調整を行ったところ、広い範囲の色度半透明性を構築する

ことが可能であった。したがって本研究の手法は、半透明性と色度の両者を的確にコントロールするCCM色調構築法として、メタルセラミッククラウンおよびオールセラミッククラウンにおける切縁部の色調構築に寄与するものとする。

### 2. Free standing での色調予測

歯冠切縁部はオパークなどの裏打ちがなく、厚さも薄いため、サンプルと空気との界面で散乱が生じる<sup>13,16)</sup>。散乱係数と吸収係数を用いてFree standingでの色調を予測する際には、この散乱を考慮しなければならないが、散乱係数と吸収係数を求めるために用いるKubelka-Munkの理論は、理想的なBoundary conditionにおいて成立するものである<sup>16,20)</sup>。これは、着色物体が均一であり、無限大の厚さで屈折率が等しい物質と接している状態である。そこで、サンプル背面が空気に接しているFree standingでは、境界面における光の散乱を考慮した補正が必要である。この方法としてはSaundersonの補正が用いられる<sup>15)</sup>。この補正法においては、補正係数 $k_{22}$ の値がきわめて重要である。

今回適正な $k_{22}$ の値を求めるために、基準色セラミックの背面に暗箱を置き背面からの光の進入がない状態を設定して測色し、Free



standingにおける色調を予測する予備実験を行った。 $k_{22}$ の値を0.02ずつ変化させながら、散乱係数と吸収係数を用いて予測されるFree standingでの色調と、実際に測色によって得られた実測値とを比較しながら、最も精度良く色調を予測することが可能な $k_{22}$ の値を決定した。その結果0.58が最適値であった。口腔内の状態は背面からの光の進入はごくわずかと考えられ、予備実験で設定した光学条件は口腔内と近似したものであり、臨床に適したFree standingでの色調予測を可能とするものであると判断した。

### 3. 適正な散乱係数と吸収係数の決定

半透明体においては、厚さによって散乱係数および吸収係数が異なるため、CCM処方計算に用いる色材の適正な散乱係数と吸収係数は厚さを考慮に入れたものを採用する必要があることが明らかとなっている<sup>21)</sup>。その方法としては、散乱係数と吸収係数を算出する際にサンプル表面での光の散乱状態を規定するSaundersonの補正係数 $k_{11}$ 、 $k_{21}$ <sup>15)</sup>の調整を行い最適値を見出す必要がある。しかし、Saundersonの補正係数 $k_{11}$ 、 $k_{21}$ を調整することは散乱係数と吸収係数を同時に変化させ、一方だけを調整することは不可能である。高い透明性および着色性のある色材の場合は、白背景の反射率が黒背景の反射率よりも低くならない十分な厚さを持つサンプルを用いて散乱係数と吸収係数を求めることが推奨されている<sup>16)</sup>。すなわち、良好な色調構築精度を得るためには、どの程度の厚さのサンプルで得られる散乱係数および吸収係数が色調予測に適正なものであるかを分析することが重要である。

本実験では、平均的な歯冠切縁部の厚みが約2.0mmであることから、基準色セラミックの厚さを2.0mmと設定した。しかし、厚さ2.0mmの基準色セラミックから得られた散乱係数と吸収係数を用いたCCMによる色調構築精度を分析した結果、CCMセラミックに現れた色調発現の程度は $b^*$ 値が大きく、 $L^*$ 値が小さいものであった。そこで $b^*$ 値に關与するIAおよび $L^*$ 値に

關与するCWの基礎データを再検討した。

黄色成分であるIAは、他の有彩色に比較して着色力が強く、混色する際に少しの配合でも黄色成分が強く現れ、色差を大きなものにしてしまう。分光反射率を測定し、吸収係数および散乱係数の算出を行う際、測定された分光反射率をKubelka-Munkの理論が適用できるようSaundersonの補正を行ったが、この補正だけでは、良好な結果が得られなかった。半透明体では、厚さの異なるサンプルで測定した反射率により計算された散乱係数および吸収係数は異なった値となる。的確な散乱係数および吸収係数を算出するためには、十分な厚さを持たせ、Kubelka-Munkの理論が適用できる理想状態に近づける必要がある。

そこで、本実験においては、基準色セラミックの厚さを2.5、3.0、3.5mmと増加させて検討した結果、3.0mmにおける散乱係数と吸収係数を用いた場合に最も良好な色調構築精度が得られることが明らかとなった。IA以外の有彩色成分も着色力を有しているが、処方に使用される配合比率はIAに比較して著しく少なく、着色力も小さいことから、IAのみを調整することにより色調構築精度が向上したものと考える。一方、白色隠蔽成分であるCWの場合は、目標色セラミックと同一の厚さ2.0mmの基準色セラミックでは白背景および黒背景での分光反射率が低波長域において近接しており、絶対法による正確な散乱係数と吸収係数の算出には不適当な厚さであったものとする。低波長域における反射率の近接が生じないような厚さとして1.0mmにおける散乱係数と吸収係数を用いた結果、 $L^*$ 値の低下を抑え、良好な色調構築精度が得られた。

したがって、有彩色黄色成分のIAは3.0mm、無彩色白色隠蔽成分のCWは1.0mm、他の4種類の成分は2.0mmの基準色セラミックを用いて求めた散乱係数および吸収係数がCCMの基礎データとして適切であると判断した。

### 4. CCMによる色調構築精度

色差の許容範囲に関しては多くの報告がある

が、口腔内における許容範囲として、O'Brien<sup>22)</sup>やJohnston<sup>23)</sup>らは3.7~3.8であると報告している。本実験において黄色成分のIA、褐色成分のSB、赤成分のPI、青成分のTBを用いて作製した透明性および色度の異なる5種類のセラミックの色調を目標色とした場合、いずれにおいてもCCMによる色調構築精度は色差が3.5以下であり、臨床的に良好な色調構築精度である。

また、シェードガイドの色調を目標色とした場合の色調構築精度はすべての目標色において色差が3.0以下であり、色差の内容に一定の傾向は認められなかった。従来用いられているシェードガイドであるLuminn Vacuum (VITA社製)やChromascop (Ivoclar社製)の持つ色空間は明度および彩度が低く、天然歯の持つ色空間を網羅していない<sup>24,25)</sup>。一方、本実験に用いたVITAPAN 3D MASTER (VITA社製)は天然歯に近似した色空間を有している<sup>25)</sup>。VITAPAN 3D MASTERの明度グループ5段階から選択した5種類の目標色いずれにおいても色差3.0以下の色調構築結果が得られたことにより、今回検討したCCMシステムは天然歯の切縁色の色調構築を可能とするものと考えられる。

## 結 論

CCMによる歯冠切縁部の色調構築システムの検討を行い、その色調構築精度を分析した結果、以下の結論を得た。

1. 基準色セラミックの厚さを調整することにより、CCMに適した散乱係数および吸収係数を決定することができた。
2. 透明性および色度の異なる5種類のセラミックの色調を目標色とした場合の色調構築精度は、色差3.5以下であった。
3. シェードガイドVITAPAN 3D MASTERの切縁色を目標色とした場合の色調構築精度は、色差3.0以下であった。

## 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石橋寛二教授に深甚なる謝意を表します。また、本研究において種々ご教示頂きました岩手医科大学歯学部歯科理工学講座荒木吉馬教授に深謝いたします。さらに、懇切なるご指導を頂きました永井成美講師ならびに照井崇之博士に心よりお礼申し上げます。最後に、本研究を進めるにあたり、ご協力頂きました村田色彩エンジニアリング・村田幸男氏、ならびに歯科補綴学第二講座の方々に厚くお礼申し上げます。

## 文 献

- 1) Ishikawa-Nagai, S., Sato, R., Furukawa, K., and Ishibashi, K.: Using a computer color-matching system in color reproduction of porcelain restorations. Part 1: Application of CCM to the opaque layer. *Int. J. Prosthodont* 5 : 495-502, 1992.
- 2) Ishikawa-Nagai, S., Sawafuji, F., Tsutittoi, H., Sato, R., and Ishibashi, K.: Using a computer color-matching system in color reproduction of porcelain restorations. Part 2: Color reproduction of stratiform layered porcelain samples. *Int. J. Prosthodont* 6 : 522-527, 1993.
- 3) 永井成美, 沢藤太, 白石明, 佐藤理一郎, 土樋博志, 武部純, 橋尚文, 里館たまき, 石橋寛二, 池野広和, 三善匠, 村田幸男: 陶材焼付鑄造冠のCCMシステムに関する臨床的検討 第2報 シェードガイドを目標色とした陶材焼付鑄造冠における色調構築, 日補綴歯会誌 37 : 1238-1245, 1993.
- 4) Ishikawa-Nagai, S., Sato, R., Sawafuji, F., Shiraishi, A., and Ishibashi, K.: Clinical application of the computer color matching (CCM) system on metal ceramic restorations. *Dentistry in Japan* 31 : 51-53, 1994.
- 5) Ishikawa-Nagai, S., Sato, R., Shiraishi, A., and Ishibashi, K.: Using a computer color-matching (CCM) system in color reproduction of porcelain restorations. Part 3: A newly developed spectrophotometer designed for clinical application. *Int. J. Prosthodont* 7 : 50-55, 1994.
- 6) 辰巳浩輝, 永井成美, 多田建造, 沢藤太, 角江信彦, 伊藤邦彦, 石橋寛二, 村田幸男: CCMによるポーセレンラミネートベニアクラウンの色調構築 第1報 マスキングポーセレンの着色成分にオペークを用いた場合の色調構築精度, 日補綴歯会

- 誌 40 : 464-469, 1996.
- 7) 多田建造, 永井成美, 辰巳浩輝, 沢藤太, 遠藤忠治, 石橋寛二, 村田幸男: CCMによるポーセレンラミネートベニアクラウンの色調構築 第2報 マスキングポーセレンの着色成分にデンティンを用いた場合の色調構築精度, 日補綴歯会誌 40 : 878-883, 1996.
  - 8) 石橋寛二: フィールドテストによる陶材の色調構築システムの臨床評価, 平成10年度科学研究費補助金(基盤B)研究成果報告書, 3-5, 1999.
  - 9) 照井崇之: CCMによるオールセラミッククラウンの色調構築 -CIBA-Q法による検討-, 日補綴歯会誌 42 : 985-995, 1998.
  - 10) 石橋寛二, 永井成美, 照井崇之: 歯冠色の構築からみたオールセラミッククラウンの特徴, 日補綴歯会誌 43 : 203-208, 1999.
  - 11) Ganz, E.: Das Ciba-Q-rezepturverfahren. *Sonderdruck aus der Textil-Rundschau* 20, 9 : 255-261, 1965.
  - 12) Brodbelt, R., H., O'Brien, W., J., Fan, P., L., Frazer-Dib, J.G., and Yu, R.: Translucency of human dental enamel. *J. Dent. Res.* 60 : 1749-53, 1981.
  - 13) Kubelka, P., Munk, F.: Ein beitrage zur optik der farbanstriche. *Z. tech. Phys.* 12 : 593-601, 1931.
  - 14) Kubelka, P.: New contributions to the optics of intensely light-scattering materials. Part 1. *J. Opt. Soc. Am.* 32:727-736, 1948.
  - 15) Saunderson, J., L.: Calculation of the color of pigmented plastics. *J. Opt. Soc. Am.* 32 : 727-736, 1942.
  - 16) 村田幸男: 色彩技術ハンドブック, 総合技術センター, 東京, 1990.
  - 17) 里館たまき, 永井成美, 沢藤太, 遠藤忠治, 辰巳浩輝, 多田建造, 石橋寛二. マスキングポーセレンに関する色彩学的検討-Hiding powerを指標とした不透明性の評価-, 日補綴歯会誌 40 : 459-463, 1996.
  - 18) Alderson, J., V., Atherton, E., Derbyshire, A., N., : Modern physical techniques in color formulation. *J. Soc. Dyers Colourists* 77 : 657-669, 1961.
  - 19) Duncan, D., R.: The color of pigment mixtures. *Proc. Phys. Soc.* 52 : 390-401, 1940.
  - 20) Judo, D., B., Wyszecski, G.: Color in Business, Science and Industry. John Wiley & Sons, Inc, New York, 313-329, 1975.
  - 21) 沢藤太: 合着用カラーレンジメントの混色々調予測に関する研究, 日補綴歯会誌 41 : 958-964, 1997.
  - 22) O'Brien, W., J., Groh, C., L., Boenke, K., M. : A new, small-color-difference equation for dental shades. *J. Dent. Res.* 69 : 1762-1764, 1990.
  - 23) Johnston, W., M., Kao, E., C.: Assessment of appearance match by visual observation and clinical colorimetry. *J. Dent. Res.* 68 : 819-822, 1989.
  - 24) Hosokawa, M., Terui, T., Ishikawa-Nagai, S., Shioyama, T., Ishibashi, K.: Required color properties to dental ceramics for reproducing natural tooth color. *Int. Fed. Esthet. Dent.* 2 : 104, 1997.
  - 25) 佐藤敬, 坂下勝啓, 照井崇之, 永井成美, 石橋寛二: シェードガイドの色彩学的評価, 歯科審美 12 (1) : 93-96, 1999.