

CCM による歯冠色グラデーションの構築

鶴田 撰

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 : 2002年10月23日)

(受理 : 2002年11月15日)

Abstract : An objective methodology of color reproduction based on color science has been attempted for dental restoration. The purpose of this study was to evaluate the accuracy in reproducing a tooth color gradation in ceramic by means of a Computer Color Matching (CCM) system employing a prototype program and spectrophotometer measurements. The colors of 5 shade tabs of VITAPAN 3 D MASTER were measured for 4 regions of each tooth from the incisal to the gingival area. Ceramic prescriptions calculated by CCM program were used to fabricate tooth shaped ceramic specimens using IPS Empress 2. Formulated ceramic powders were applied to the color regions and blended at the interfaces for shade continuity. Color coordinates L^* , a^* and b^* of ceramic specimens and target shade tabs for each pair in 10 incremental areas (each 1 mm x 3 mm) indicated very similar values. Color difference (dE) were below 3.6 in all 10 incremental areas. It was concluded that the CCM methodology reproduced the target tooth color gradation at a clinically satisfactory level.

Key words : 色調構築, CCM, 歯冠色グラデーション

緒 言

クラウンの色調構築法として、測色値に基づいた客観的手法の確立が望まれている。これには天然歯の測色値を基に最適なシェードを選択する方法 (Computer Color Searching : CCS) と、目標色に対するセラミック処方算出する方法 (Computer Color Matching : CCM) がある。著者らの教室では後者の CCM に関して研究を行い、陶材焼付鑄造冠の色調構築への応用を可能とした¹⁻⁷⁾。

天然歯に類似した光の透過性をもつ色調再現が望まれているが、金属を使用しないオールセ

ラミッククラウンは天然歯の有する半透明性の表現が可能である。しかし、その半透明性ゆえに支台歯の色調の影響を受けるため、色調構築に際してはより複雑な条件が伴う。したがって、支台歯を含めて構成要素の色調を数値化して客観的に処理することができる CCM の有用性が一層高い。照井⁸⁾および坂下⁹⁾はオールセラミッククラウンを対象として CIBA-Q 法¹⁰⁾による CCM に関して基礎的研究を行い、単色のセラミックサンプルに対して良好な色調構築精度が得られることを報告した。しかし、CCM によるオールセラミッククラウンの色調構築法の臨床応用にあたっては目標色が天然歯となるた

Reproduction of Tooth Color Gradation using Computer Color Matching System

Osamu TSURUTA

Department of Fixed Prosthodontics, School of Dentistry, Iwate Medical University,
1-3-27 Chuo-dori, Morioka, Iwate 020-8505, Japan

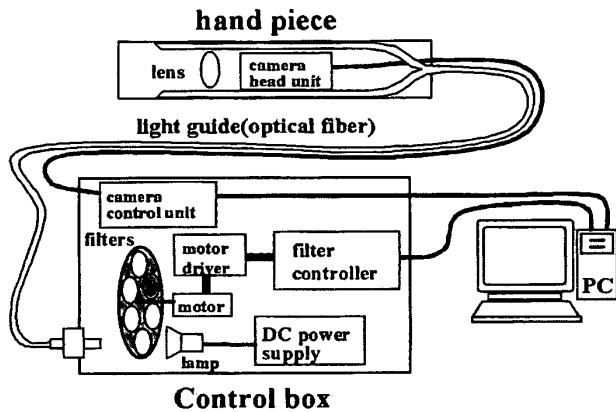


Fig. 1. Diagram of Multi-spectrophotometer MSC-2000

め、部位により色調が移行的に変化する、いわゆる歯冠色グラデーションを構築する必要がある。

そこで本研究ではシェードガイドを目標色とし、オールセラミックラウンの臨床術式ならびに技工操作に沿った色調構築システムを組み立て、歯頸部から切縁部にかけての歯冠色グラデーションの色調構築について検討した。

材料および方法

1. 測色装置

測色装置はオリンパス社製のマルチスペクトルカメラシステム MSC-2000を用いた (Fig. 1)。光源は100W のハロゲンランプで、照明光はフィルターを介して約25W となる。測色範囲は直径20mmで測色時間は8秒である。

測色方法に関しては大平の研究に準じ¹¹⁾、400 nm から700nm までの20nm 間隔の分光反射率および CIELAB 表色系の L^* 、 a^* および b^* を算出した。

2. 基礎データの作成

オールセラミッククラウン材料として IPS-Empress 2[®] (Ivoclar 社製、以下エンプレス2と略す) を用いた。6色の Incisal セラミック (IC: TN, E4, OD1, E5, TB, Pink), 6色の Dentin セラミック (LC: 010, 140, 310, 440, 540, pink) および3色の Dentin Ingot (In: 100, 200, 300) を用いた。

CCM に使用する基礎データは、IC および

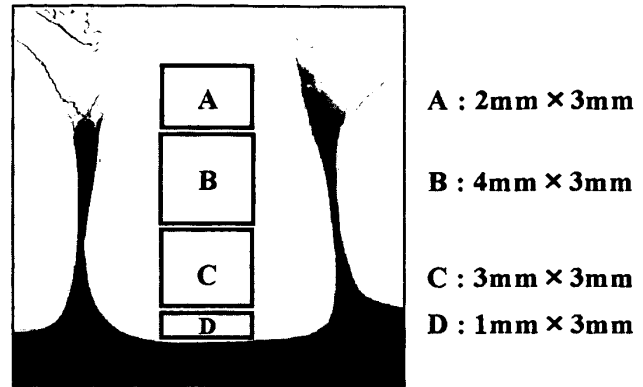


Fig. 2. Measuring positions on the target shade guide

LC では吸収係数 (K) と散乱係数 (S)¹²⁾ である。 K および S の算出には、基礎データ用セラミックサンプル (IC の初期厚さ: 2.0mm, LC の初期厚さ: 1.0mm) を White backing および Black backing で測色した分光反射率を用いて、Saunderson の補正式¹³⁾ および Kubelka-Munk の公式^{14,15)} によって算出した。単色のセラミックサンプルを目標色とし初期厚さの基礎データ用サンプルから算出された K および S による CCM 結果を基準として、基礎データサンプルの厚さを増減させながら、最も精度の良い結果が得られる K と S を決定した。IC に関しては、坂下⁹⁾の研究に用いた切縁色を想定した5色のセラミックサンプル (2.0mm) を目標色とし、LC に関しては、厚さ1.0mmの LC セラミックサンプル6色それぞれを Ingot200 に重ねたものを目標色とした。

また、In 3色に関しては厚さ5.0mmのサンプルをフリースタANDINGで測色し、 L^* 、 a^* および b^* 値を基礎データとした。

3. CCM セラミックラウンの製作

シェードガイドを目標色とし、オールセラミックラウンの臨床術式および技工操作に準じて CCM ステップを組み立てた。

1) 目標色の測色

目標色は VITAPAN 3 D MASTER[®] (VITA 社製) のシェード 1M-1, 2L-1.5, 3M-2, 4M-2, 5M-2 の5種類とした。口腔内を想定して暗箱内に顎歯模型 (D18D-EP.18) を

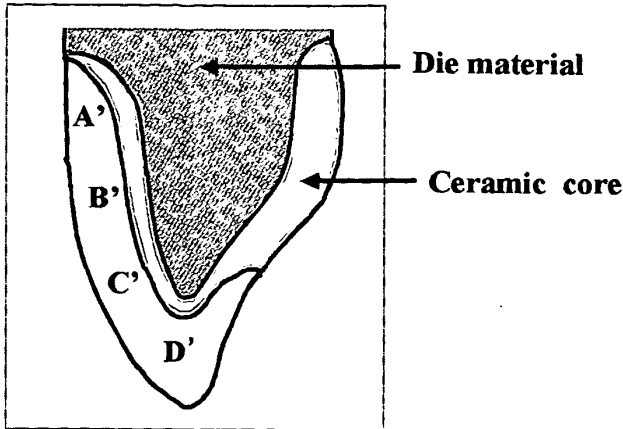
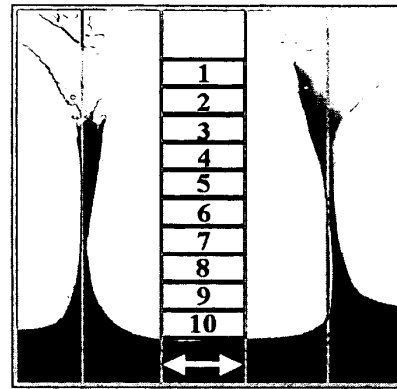


Fig. 3. Measuring positions on the ceramic core



center 1/3 (1-10: 1mm x 3mm)

Fig. 4. Incremental areas for evaluation of color gradation

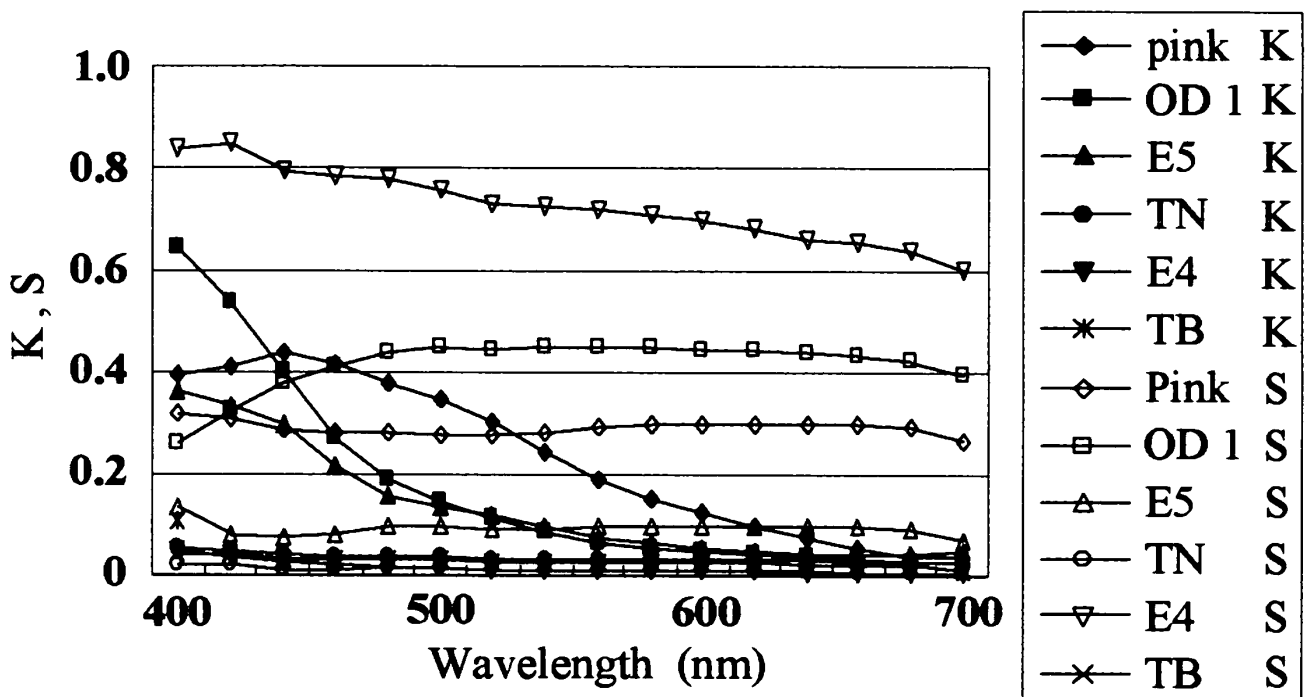


Fig. 5. Absorption and scattering coefficients of IC

固定し、上顎左側中切歯部にシェードタブを固定して測色を行った。測色部位は歯頸部 (A: 2 mm x 3 mm), 中央部 (B: 4 mm x 3 mm), 切縁側 (C: 3 mm x 3 mm), 切縁部 (D: 1 mm x 3 mm) の4部位とした (Fig. 2)。測色部位 A, B, C はフリースタANDINGで、測色部位 D はフリースタANDING, White backing および Black backing で測色した。

2) セラミックコアの製作および下地色の決定
顎歯模型の上顎左側中切歯に対して、マージン幅2.0mmのシャンファーを有するオールセラ

ミッククラウンの支台歯形成を施し、それを支台歯とした。シェードガイドの測色部位 B の色調と最小の色差を有する In を使用し、通法にしたがって厚さ1.0mmのセラミックコアを製作した。セラミックコア内面にダイマテリアル (ST 1) を満たし、セラミックコア中央部 (3 mm x 3 mm) を測色して、この分光反射率を下地色とした。

3) CCM 処方 の算出

測色部位 A, B, C についてはセラミックコア上に重ねる厚さ1.0mmの LC に対する処方を、

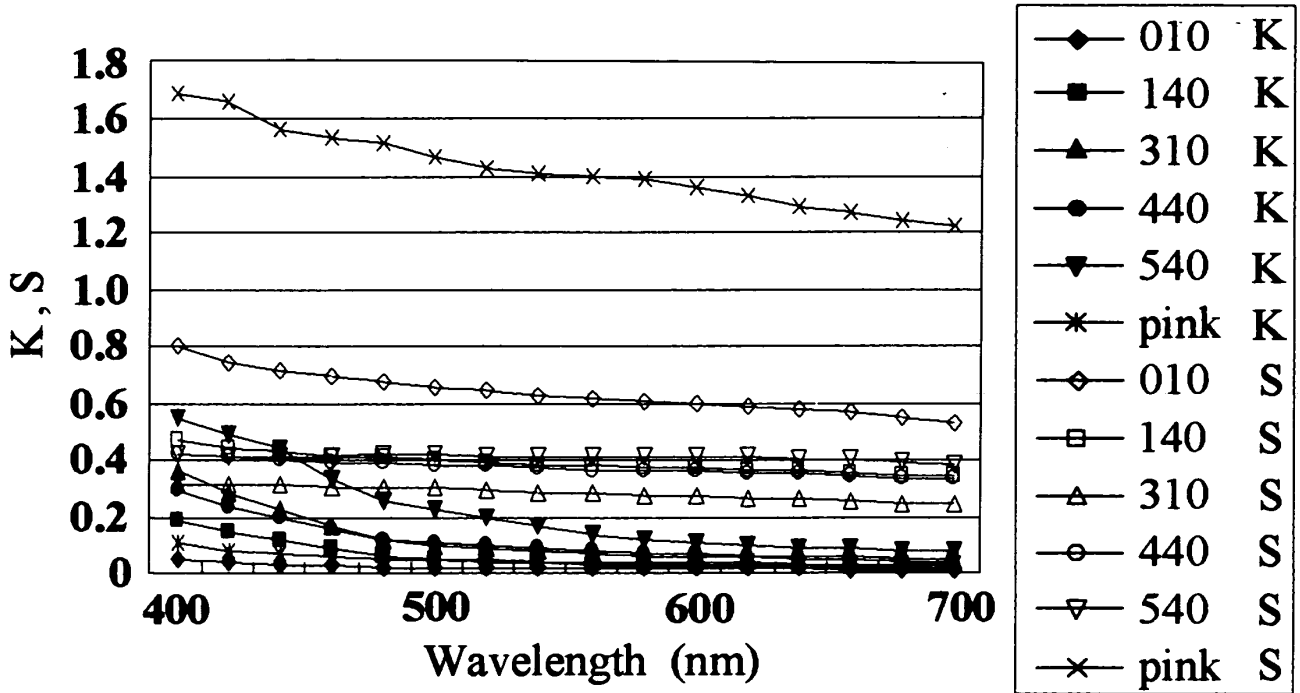


Fig. 6. Absorption and scattering coefficients of LC

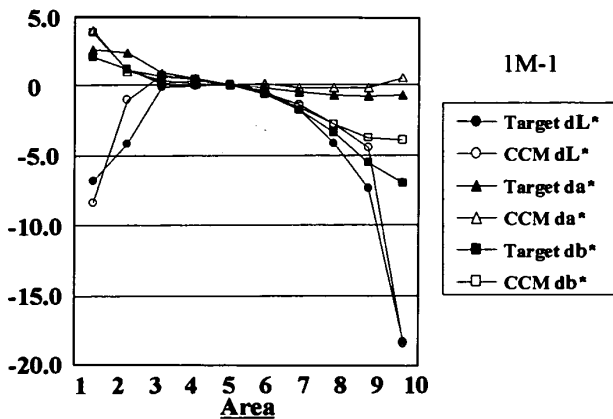


Fig. 7. Comparison of L^* , a^* and b^* for target shade guide and CCM specimen in 10 incremental areas for 1 M-1

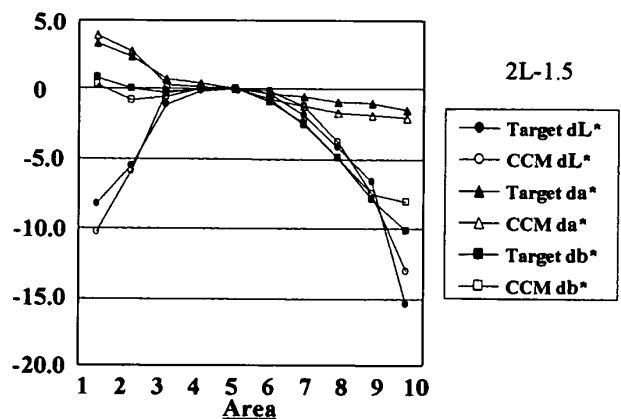


Fig. 8. Comparison of L^* , a^* and b^* for target shade guide and CCM specimen in 10 incremental areas for 2 L-1.5

測色部位 D については2.0mmの厚さの IC 単体に対する処方 を CIBA-Q 法により算出した。測色部位 A, B, C に対しては、基礎データとした LC 6 色から 4 色を選ぶ15通りの組み合わせに対して処方計算がなされ、その処方の中からすべての混合比が正の値で、かつ予測色差が最小の処方を選択した。測色部位 D に対しては、処方計算に先立ち有彩色 4 色が無彩色透明の TN (clear) および白色不透明の E 4 (white) の 2 色によって目標色と Hiding power が同等にな

るように調整した。さらに TN (clear) と E 4 (white) の混合によって無彩色成分の Hiding power を調整した。その後、Hiding power 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処方計算を行った。LC 同様に、すべての混合比が正の値で、かつ予測色差が最小の処方を選択した。

4) オールセラミッククラウンの製作

CCM 処方にしたがってセラミックパウダー

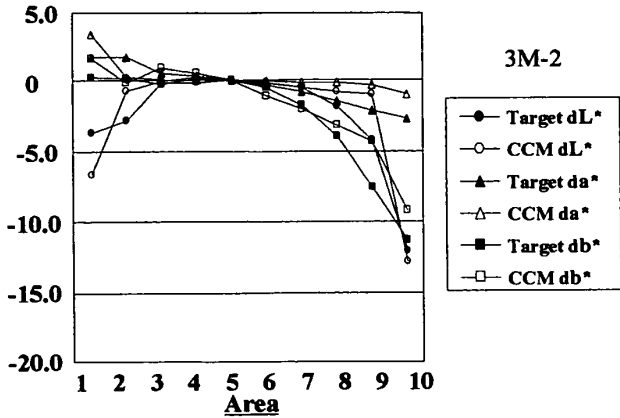


Fig. 9. Comparison of L*, a* and b* for target shade guide and CCM specimen in 10 incremental areas for 3 M-2

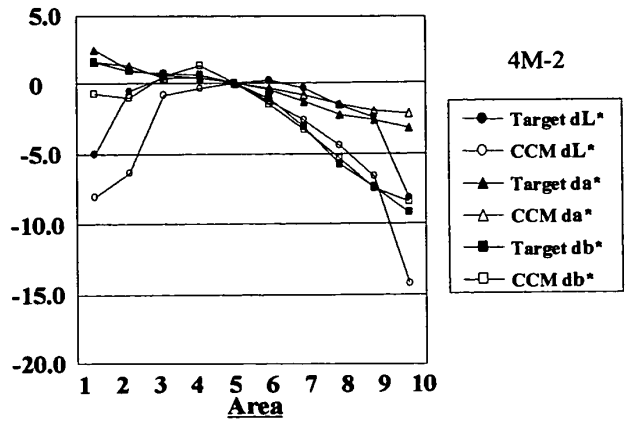


Fig.10. Comparison of L*, a* and b* for target shade guide and CCM specimen in 10 incremental areas for 4 M-2

を計量，混合し，セラミックコア上に測色部位 A', B', C' の順に LC セラミックを築盛し，厚さ1.0mmになるように調整した。A', B' および C' それぞれの境界面は移行的になるようにコンデンスし，部位 C' の先端には発育葉を付与した。部位 A', B' および C' の LC を焼成後，IC を部位 C' にオーバーラップさせるように部位 D' に築盛し，切縁部分で2.0mmの厚さになるように調整した (Fig. 3)。部位 D' の焼成後，各部位の厚さを最終調整し，形態修正を行った後，グレーディングを施して CCM によるオールセラミッククラウンの完成とした。

4. CCM による歯冠色グラデーション構築精度の分析

目標色シェードガイドおよび CCM によって製作されたオールセラミッククラウンそれぞれの歯頸部から切縁部までを連続的に10ヶ所測色し (Fig. 4)，CIELAB 表色系における L*, a* および b* を算出した。測色部位 5 の値を基準とし，切縁部方向に測色部位10までの歯冠色グラデーションおよび歯頸部方向に測色部位 1 までの歯冠色グラデーションを dL*, da* および db* によって分析した。また，10ヶ所の測色部位ごとに目標色シェードガイドと CCM クラウンの色差を算出し，色調構築精度を分析した。

結 果

1. CCM 用基礎データ

セラミックサンプルを目標色とした CCM において最も精度の良い結果が得られた K と S を IC および LC の基礎データとした (Fig. 5, 6)。IC の E 4 (white) と TB (blue) については2.0mmの，P (pink)，OD 1 (yellow) および TN (clear) については 1.0 mm の，E 5 (brown) では1.7mmの基礎データ用セラミックサンプルで得られた K および S を基礎データとした。また LC では，010, 140, 310, 440, 540, pink の 6 色とも，1.0mmの基礎データ用セラミックサンプルで得られた K および S を基礎データとした。

2. 歯冠色グラデーションの構築精度

目標色シェードガイド 1 M-1 の測色部位 5 を基準とした歯頸部方向ならびに切縁部方向への歯冠色グラデーションは，歯頸部にかけて a* および b* が増加し L* が低下，切縁部にかけては b* および L* が低下する傾向があり，CCM クラウンにより同等の歯冠色グラデーションが構築された (Fig. 7)。2 L-1.5 においては歯頸部にかけて a* が増加し L* が低下，切縁部方向に L*, a* および b* が低下する歯冠色グラデーションが (Fig. 8)，3 M-2 においては歯頸部にかけて L* が低下し，切縁部にかけて b* および L* が低下する歯冠色グラデーションが構築された (Fig. 9)。4 M-2 および 5 M-2 では歯頸部にかけて a* が増加し L* が低下，切縁部にかけては L*, a* および b* が低

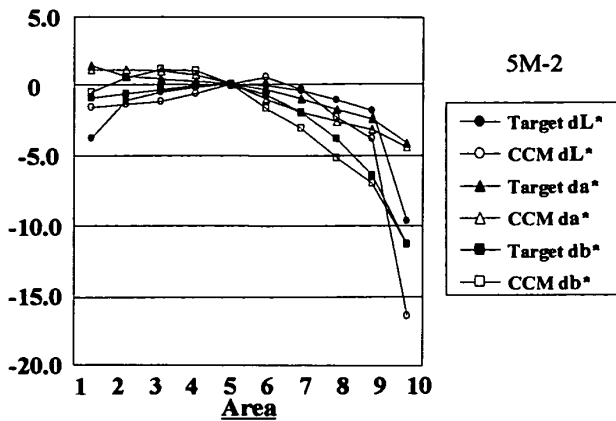


Fig.11. Comparison of L*, a* and b* for target shade guide and CCM specimen in 10 incremental areas for 5 M-2

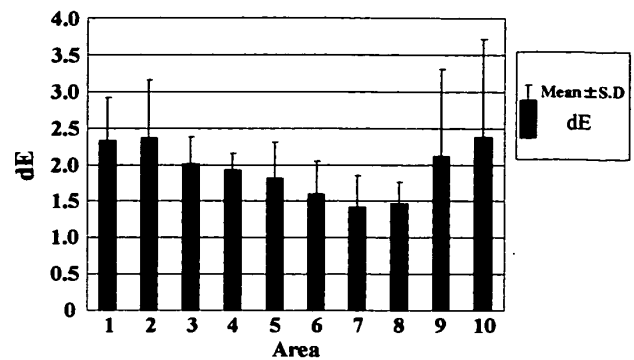


Fig.12. Mean values of color difference dE between values CCM ceramic crowns and target shade guides in 10 increment

下する歯冠色グラデーションが認められ、CCMクラウンに同様の歯冠色グラデーションが再現された (Fig. 10, 11)。

歯冠色グラデーションの構築精度を色差 dE で分析した結果、色差値は歯冠中央部よりも歯頸部および切縁部でやや大きい値を示したが、測色部位10ヶ所いづれにおいても色差 dE の平均は2.4以下であった (Fig. 12)。

考 察

1. 本研究の意義

色を数値化して色彩学的理論に基づいて色調を構築する手法である Computer Color Matching (CCM) を応用する場合、その目標は単一の色調である。当教室におけるオールセラミッククラウンの CCM に関する基礎的研究により、円盤状の単一色のサンプルを目標色とした CCM において色差2.0以下の良好な色調構築精度が得られた^{8,9)}。しかし、クラウンの色調構築に CCM を応用しようとする際には天然歯の有する歯冠色グラデーションが対象となる。また、CCM の臨床応用という観点からは臨床に適した測色装置と実際のオールセラミッククラウンの製作術式に沿った体系の CCM が必要である。したがって、本研究では、CCM の目標色をシェードガイドとし、臨床的操作性に優れた円周照射0度受光でセミコンタクトタイプの測色装置を用い、さらにオールセラミック

クラウン材料としてエンプレス2を使用し、実際の臨床および技工術式に沿った CCM システムを組み立て、歯冠色グラデーションの構築精度について検討した。

2. 実験方法の妥当性

臨床応用に適した測色装置の具備条件としては、小型で操作性が良いことがあげられる。本研究に用いた測色装置 MSC-2000は本体とハンドピースから構成されたヘッド分離型のマルチスペクトルカメラで、被測色体に対してセミコンタクトで測色する装置である。ハンドピースによる測色が可能であるためチェアサイドでの測色が容易で、被測色者の負担も少ない。したがって、当教室の CCM に関する基礎的研究^{8,9)}に使用した測色装置と比較し、本研究で使用した MSC-2000はより臨床応用に適した測色装置と言える。

IC および LC の吸収係数と散乱係数を算出するために Kubelka-Munk の公式^{14,15)}を使用するに当たり、測色された分光反射率に Saunderson の補正¹³⁾ (公式1) を施す必要がある。

$$R' = (1 - k_1) \cdot (1 - k_2) \cdot R / (1 - k_2 R) \dots \dots \text{公式1}$$

R' : 測色された分光反射率

R : Kubelka-Munk 理論に應用される分光反射率

k₁, k₂ : Saunderson の補正係数

k1の値はセラミック材料の屈折率に基づき、これまでの基礎的研究と同様に0.05を使用した。k2の真値については照明受光の幾何学的条件によっても異なると言われているが¹⁶⁾、未だに定義されていない。よって、本研究ではDuncanの報告¹⁷⁾にしたがってこれまでの研究^{8,9)}と同様に0.555とした。

また Kubelka-Munk 理論にはサンプルの厚さによって算出されるKおよびSが異なるという限界がある。本研究では2.0mmのIC、1.0mmのLCのセラミックサンプルを目標色としてCCMを実施した結果、ICのE4 (white)とTB (blue)については目標色セラミックサンプルと同じ厚さの2.0mmの基礎データ用セラミックサンプルから得られたKとSが最適値であった。一方、P (pink)、OD1 (yellow)およびTN (clear)については1.0mmの、E5 (brown)は1.7mmの基礎データ用セラミックサンプルによる係数が最適であった。すなわち、着色性が強く透明性の高いセラミックの場合、本来よりもKが大きく、Sが小さく計算されるという現象が生じ、CCMによるサンプルの色調が着色性の少ないものとなった。したがって、目標色よりも薄い基礎データ用セラミックサンプルを使用してKを小さく、Sを大きく設定することにより、着色成分の混合比率が増加し、CCMの精度を向上させることができたものと考えられる。

一方、LCにおいて010、140、310、440、540およびPinkのすべてのシェードで1.0mmの基礎データ用サンプルで作成したKおよびSが最良の結果を示したことは、LC6色の透明性ならびに着色性がほぼ同等であったためと推察される。

3. CCMの組み立て

CCMの各ステップは、エンプレス2によるオールセラミッククラウンの臨床術式ならびに技工操作に沿ったものである。目標色としたシェードガイドは天然歯の色調を最も適切に再現していると考えられるVITAPAN 3 D MASTER¹⁸⁾とし、明度レベル5段階それぞれ

から任意に選んだ5種類のシェードタブとした。目標色シェードガイドの測色部位の設定にはオールセラミッククラウンの構造を考慮し、セラミックコアに裏打ちされないシェードガイドの切縁部1.0mm、切縁部を除いて歯冠を3分割した3部位、合計4部位とした。エンプレス2の場合、セラミックコアの色調は目標色に近似していることが望ましい。Ingotの色調は加熱加圧成型後に変化するという報告¹⁹⁾に基づき、セラミックコアの製作に際してのIngot色の選択に当たっては、加熱加圧成型後のIngotの色調と目標色との色差を評価した。また臨床における下地色は、支台歯にセラミックコアが装着されたものであるから、本研究では支台歯としてダイマテリアルを使用し、両者の間にグリセリンを介在させることにより空気層を排除し、境界面での光の散乱を除外した。

当教室では、メタルセラミッククラウンに対してE. Allenの二定数法²⁰⁾を用いて、不透明体であるオペーク陶材のCCM処方計算を行った。しかしオールセラミッククラウンの場合、セラミックコア上に積層されるICおよびLCに対してCCM処方計算をしなければならない。照井⁸⁾、坂下⁹⁾の研究により半透明体のセラミックサンプルに対して良好なCCM結果が報告された。これらの方法は加法混色によってCCM処方を算出するCIBA-Q法¹⁹⁾を用いている。測色部位A、B、Cにおいては照井⁸⁾の処方計算方法を、また測色部位Dに関しては坂下⁹⁾の方法を採用した。

歯頸部から切縁部にかけての4ヶ所の測色部位に対応した4種類のCCMセラミック処方により歯冠色グラデーションを構築するにあたり、セラミックの築盛方法に一定の基準を設けた。本研究で設けた築盛方法にしたがってセラミックを画一的に築盛することにより、4つのCCM処方で歯頸部から切縁部にかけての歯冠色グラデーションの構築が可能かどうかを分析した。歯冠色グラデーションの分析部位は、CCM処方による色調が単独で構築される部位と、隣接する部位とコンデンスされて2つの

CCM 処方に基づいた色調が交じり合う部分が対象となる。歯頸部 A では、CCM 処方単独の色調が構築される歯頸部、および中央部 B の色調とコンデンスされる切縁側の 2 部位が分析対象となる。同様に切縁部 D では、CCM 処方単独の色調が構築される切縁部、および切縁側 C の色調とコンデンスされる歯頸側の 2 部位が分析対象となる。一方中央部 B と切縁側 C では、それぞれの部位の中央で CCM 処方に基づいて構築される色調と、隣接する処方とコンデンスされる色調が歯頸側寄りと切縁側寄りに 2 ケ所存在するため、部位 B と C では各々 3 ケ所が分析対象となる。したがって、合計 10 部位において歯冠色グラデーションを分析することとした。上記の築盛方法にしたがって CCM クラウンを製作する際の反復精度を確認するために、1 つの目標色について同一術者が製作した 3 つの CCM クラウンの色調を分析した結果、分析部位 10 ケ所の平均色差が 1.5 以下であった。したがって、本研究で設定した 4 種類の CCM 処方を使ったセラミックの築盛方法は、色彩学的に優れた反復精度を有するものと判断された。

4. 構築精度

5 種類の CCM クラウンいずれにおいても、歯冠中央部から切縁側へ、また歯冠中央部から歯頸側にかけてシェードガイドと同様の L^* 、 a^* および b^* 値の変化が認められたことから、歯冠色グラデーションが適正に構築されたと判断される。測色部位 10 ケ所におけるシェードガイドと CCM クラウンの色差の平均が歯冠中央部に比較して歯頸部である部位 1 と 2、および切縁部である 9 と 10 で高い値を示した。特に歯頸部における色差の主な成分は明度差 dL^* であった。歯頸側マージン部では、セラミックコアと LC とのバットジョイント付近で LC の厚さが急激に減少してしまう。このために L^* 値に差が生じたものと推察される。一方、切縁部では b^* において差が生じていた。これは、切縁部 D ではセラミックコアである下地色を含まずに IC に対する CCM 処方を算出しているのに対し、実際のクラウンでは測色部位 C に存

在するセラミックコアの色調が切縁部 D の色調にも影響を及ぼしているために、 b^* 値に差が生じたのではないかと推察される。しかしながら、10 ケ所いずれの部位においても色差の平均は 1.42~2.37 の範囲にあり、臨床的色差の許容値が 3.6 であることから評価して²⁰⁾、十分な色調構築精度が得られているものと判断された。

天然歯の歯冠色グラデーションはシェードガイドよりも複雑な場合がある。CCM の臨床応用を一層確実にするためには、最後のステップとして天然歯を目標色とした CCM 精度の検討が必要である。

結 論

シェードガイドを目標色として、オールセラミッククラウンを対象とした CCM によっては冠色グラデーションの色調構築を検討した結果、以下の結論を得た。

1. 目標色シェードガイドの 4 部位に対する CCM 処方によって、オールセラミッククラウンの歯冠中央部から切縁部および歯頸部にかけての 10 部位における歯冠グラデーションが構築された。
2. CCM によるオールセラミッククラウンの色調構築精度は歯冠のいずれの部位においても色差 2.4 以下であった。
3. 本研究によって作成された CCM システムは、歯冠色グラデーションを臨床的に十分な精度で構築できることが明らかとなった。

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。さらに、懇切なるご指導を頂きました永井成美博士ならびに照井崇之博士、坂下勝啓博士、大平千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、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., Tsutitoi, 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 シェイ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, 補綴誌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) 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, 補綴誌40 : 464-469, 1996.
- 6) 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, 補綴誌40 : 878-883, 1996.
- 7) 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.
- 8) 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-, 補綴誌, 42 : 985-992, 1998.
- 9) 坂下勝啓: CCM によるセラミッククラウン切縁部の色調構築, 岩医大歯誌, 24 : 183-193, 1999.
- 10) Ganz, E. : Das Ciba-Q-rezepturverfahren. *Sonderdruck aus der Textil-Rundschau*. 20 : 255-261, 1965.
- 11) 大平千之: 視感色濃度値を基準とした天然歯の色体系の作成, 補綴誌46 : 83-92, 2002.
- 12) 石川成美, 佐藤理一郎, 古川良俊, 石橋寛二: 歯科用陶材に関する色彩学的検討-散乱係数, 吸収係数について-, 補綴誌34 : 585-591, 1990
- 13) Saunderson, J.L. : Calculation of the color of pigmented plastics, *J Opt Soc Am*, 32 : 727-736, 1942.
- 14) Kubelka, P., Munk, F. : Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche. *Z. tech. Phys.* 12 : 593-601, 1931.
- 15) Kubelka, P. : New contributions to the optics of intensely light-scattering materials. Part 1. *J. Opt. Soc. Am.* 38 : 448-457, 1948.
- 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) Duncan, D., R. : The color of pigment mixtures. *Proc. Phys. Soc.* 52 : 390-401, 1940.
- 18) 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.
- 19) 角江信彦: IPS Empress®の光学特性に関する研究-加熱加圧成型による色調変化とその原因-, 補綴誌40 : 1183-1193, 1996.
- 20) Allen, E. : Basic equations used in computer color matching, 2. Tristimulus match, two-constant theory. *J. Opt. Soc. Am.* 64 : 991-993, 1974
- 21) Johnston, W., M., Kao, E., C. : Assessment of appearance match by visual observation and clinical colorimetry. *J. Dent. Res.* 68 : 819-822, 1989.