原 著 論 文

陶材焼付鑄造冠の CCM システムに関する臨床的検討

第 1 報 歯冠色の部位差に対応した色調構築

永井 成美 土樋 博志 石田 聡 佐藤理一郎
白石 明 沢藤 太 武部 純 橘 尚文
里館たまき 石橋 寛二 池野 広和* 三善 匠*
村田 幸男**

Clinical Application of the Computer Color Matching (CCM) System on Metal Ceramic Restorations

Part. 1 Color Reproducibility of CCM-Samples

Shigemi Ishikawa-Nagai, Hiroshi Tsuchitoui, Satoshi Ishida, Riichiro Sato,
Akira Shiraishi, Futoshi Sawafuji, Jun Takebe, Naofumi Tachibana,
Tamaki Satodate, Kanji Ishibashi, Hirokazu Ikeno*, Takumi Miyoshi* and Yukio Murata**

Abstract : Studies related to the Computer Color Matching (CCM) system were carried out from a clinical standpoint. The concept involved making a 3-layered porcelain sample by the CCM program and comparing its color to that of an objective porcelain sample which resembled the structure of the upper anterior tooth.

Points A and B dealt with measurements of the reflection rate of the enamel layer and the enamel + dentin stratified layer, respectively. Point C consisted of the enamel + dentin + opaque stratified layer, and points D and E consisted of the dentin + opaque layer.

Trial porcelain samples were baked according to these standards, and their color was analyzed and compared to the objective samples.

The results showed that the color of the CCM porcelain samples was almost identical to that of the target samples, and the color difference dE was within the range of 1.0~3.0 (CMC), indicating a high level of color reproducibility.

Key words : color, CCM, metal ceramic restorations

岩手医科大学歯学部歯科補綴学第二講座（主任：石橋寛二教授）

*岩手歯科技工専門学校

**村田色彩エンジニアリング

Department of Fixed Prosthodontics, School of Dentistry, Iwate Medical University (Chief : Prof. Kanji Ishibashi)

*Iwate School of Dental Technology

**Murata Color Engineering

平成 5 月 6 日 10 日 受付

I. 結 言

歯科審美に対する社会的関心が高まっている近年、適正な歯冠色の構築はきわめて重要な課題である。しかしながら、補綴臨床における従来の色調構築法には多くの曖昧さや限界があるにもかかわらず、その精度を向上させる方法はいまだ開発されていない。

著者らは、Computer Color Matching (以下 CCM と略す) を応用した陶材による色調構築システムについて基礎的検討を重ね¹⁻³⁾、単色のポーセレンサンプルを用いた層構造試料において良好な色調構築結果を得ている⁴⁾。また本システムの臨床応用に際し、半透明体である歯の微小面積を精度良く測色するために、非接触型微小面積測色用分光光度計を開発した^{5,6)}。

今回は、CCM システムの臨床応用の第一段階として、上顎中切歯を想定したポーセレンサンプルを目標色として、開発した CCM システムにより部位による色調差に対応した色調構築を試み、良好な結果を得たので報告する。

II. 実験方法

1. 目標色サンプル (以下ターゲット・サンプルと略す) の作製

メタルフレームとなる平板を陶材焼付用合金オーロラ (松風社製) を用いて作製した。メタルフレームの形態は、平均的な上顎中切歯の唇側面観を想定して長径 10 mm、幅径 6 mm とし、金属厚径は約 0.5 mm とした。このメタルフレーム上に焼付用陶材 (松風社製 UNIBOND-VINTAGE) を通法に従って築盛、

焼成し、ターゲット・サンプルを 2 個作製した。なお、オペーク、デンティン、エナメルの種類はそれぞれ無作為に選択し、未知の色調を有するターゲット・サンプルとした。

2. ターゲット・サンプルの測色

サンプルの測色には、著者らが開発した非接触型微小面積測色用分光光度計 CAS-ID 1^{5,6)} を用いた (図 1)。本装置は光源に 100 W のハロゲンランプを使用し、45° 照明、0° 受光で、測色面積は 1×2 mm である。また、コンピュータ制御による駆動装置を備え、指定した範囲を走査測色する機構を有している。サンプルホルダーにターゲット・サンプルを固定し、切縁から歯頸部にかけて A, B, C, D, E の 5 部位を走査測色した (図 2)。

ポジション A: 切縁 1 mm の範囲で、舌側に白および黒パテをおいて測色した。

ポジション B: 切縁から 2~3 mm の範囲で、フリースタANDINGで測色した。

ポジション C, D, E: 歯冠中央部から歯頸部にかけての範囲で、C は切縁側 1/3, D は中央, E は歯頸側 1/3 とし、フリースタANDINGで測色した。なお、C, D, E については 1×2 mm の範囲を 2 か所測色し、その平均値を測色値とした。ターゲット・サンプルの測色により得られた 5 部位における 6 つの分光反射率を CCM 計算の目標色とした。

3. CCM 処方の算出

図 3 に CCM によるポーセレンサンプル (以下 CCM サンプルと略す) の構造を示す。A, B, C, D, E の 5 つの測色ポイントが色合せのポイントである。A 点はエナメルのみ、B 点はエナメルとデンティン、C 点はエナメル、デンティン、およびオペーク、D 点および E 点はデンティンとオペークで構成され

図 1 非接触型微小面積測色用分光光度計 CAS-ID 1 による測色風景

図 3 CCM サンプルの断面図

図 4 CCM のフローチャート

る。図 4 に CCM 計算のフローチャートを示し、処方
 はエナメル→デンティン→オベークの順に決定され
 る。なお、各色合せポイントにおけるデンティン、エ
 ナメルの陶材厚径は唇側削除量に対応して自由に設定
 することができる。本実験では唇側削除量として A 点
 では 2.0 mm、B 点では 2.2 mm、C 点では 1.5
 mm、D 点では 1.0 mm、E 点では 0.9 mm とし、金
 属 0.3 mm、オベーク 0.3 mm のスペースを差し引い
 た厚径をデンティンとエナメルの厚径として CCM 処
 方計算を行った。なお、B 点ではエナメルとデンティ
 ンを 1:1 の比率で、C 点では 2:8 の比率に設定し
 た。

最初に、エナメルの処方として切縁部 A 点と等しい
 半透明性が得られるエナメル成分 2 種類の組合せとそ
 の混合比率を算出する。2 種類のエナメル成分は、固
 定成分である STL（オパールポーセレンスーパー
 ートランスルーセント）と、TL（オパールポーセレン
 ートランスルーセント）、57, 58, 59, 60 の中からの
 1 種類である。

次に、B 点の測定値に基づいて A 1～D 4 までの 16
 種類のデンティンの中から 1 種類が選択される。その
 際、すでに決定しているエナメルとデンティン陶材と
 の組合せのなかで、B 点の測定値との色差が最小とな
 る組合せのデンティン陶材が選択される。

オベーク処方の算出過程は、大きく 2 つのステップ
 に分かれる。最初のステップはオベーク層の反射率
 Rg の予測である。これは Kubelka-Munk の公式^{7,8)}
 に基づいて、エナメル層やデンティン層の散乱係数と

吸収係数から下地となるオベーク層の反射率を算出す
 る過程である。C 点におけるオベーク層の反射率 Rg
 -C の場合、C 点の測色で得られた反射率から C 点に
 おけるエナメル・デンティン層の部分差し引いた反
 射率として算出される。D、E 点においても同様に
 Rg-D、および Rg-E が算出される。

次のステップは 8 種類（White, A2, B1, B4,
 C4, Pink, Yellow, Brown）のオベーク陶材から
 4 種類を選択する 70 通りの組合せについて、Allen
 の式⁹⁾により色合せの混合比率を算出する過程であ
 る。Allen の方法は概略処方の計算段階（ラフ・マッ
 チ）と精密処方の計算段階（クロス・マッチ）によ
 り構成されており、C、D、E の各ポイント毎にオ
 ベーク処方が決定される³⁾。なお、C、D、E につ
 いてはメタメリズムを検討するために D 光源、A 光
 源、F 光源での色合せ計算結果を分析し、メタメリ
 ズムの最も小さい処方を選択した。

4. CCM サンプルの作製方法

メタルフレームの大きさおよび形態はターゲット・
 サンプルと同様に上顎中切歯を想定した形態とした。

オベーク陶材は、C、D、E の各測色ポイント毎
 に、それぞれの処方に基づき境界部が移行的になるよ
 うにかつ 0.3 mm の厚さに築盛、焼成した。デンティ
 ン陶材は通法に従い築盛・焼成し、各部の厚みが指
 定された値となるように調整した。エナメル陶材も、
 同様の方法で築盛・焼成し、最後にグレージングを行
 って CCM サンプルを完成した。なおオベーク陶材は専

図 7 ターゲット・サンプル 1 と CCM サンプルの歯冠中央部における分光反射率曲線

図 8 ターゲット・サンプル 2 と CCM サンプルの歯冠中央部における分光反射率曲線

表 1 ターゲット・サンプル 1 と CCM サンプルの色調比較結果

	ターゲット 1			CCM			dE	
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	CIELAB	CMC
切縁	64.42	3.42	15.74	66.06	3.76	15.73	1.6	1.4
中央	68.77	5.08	18.64	70.12	5.21	19.13	1.4	1.1
歯頸部	67.94	6.86	21.75	70.18	6.40	20.65	2.5	1.9

表 2 ターゲット・サンプル 2 と CCM サンプルの色調比較結果

	ターゲット 1			CCM			dE	
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	CIELAB	CMC
切縁	65.59	1.58	11.07	68.27	1.94	13.37	3.5	2.8
中央	71.19	3.63	15.90	72.08	3.15	15.86	1.0	0.9
歯頸部	71.06	5.36	17.37	72.63	4.24	16.03	2.3	1.8

用液 (Paint-on) を、デンティンおよびエナメル陶材は蒸留水を用いて超音波によりコンデンスし、十分な予備乾燥後、メーカー指示に従い焼成した。

5. 色調構築精度の評価

ターゲット・サンプルと CCM サンプルとを視感評価および測色評価した。測色評価においては、サンプルの切縁部、中央部、歯頸部の 3 カ所についてそれぞれ約 4×3 mm の範囲を分光測色し、分光反射率曲線と CIELAB 表色系の L^* 、 a^* 、 b^* および CMC 色差について分析した。

III. 結 果

1. 視感評価

ターゲット・サンプルと CCM サンプルを肉眼で比較した結果、その色調は一致していた (図 5, 6)。

2. 測色評価

図 7, 8 および表 1, 2 に 2 種類のターゲット・サンプルに対する CCM による色調構築結果を示す。両者の分光反射率曲線は 400~700 nm の波長の全域にわたって近似していた。また色差は 2 例ともいずれの部位においても、CMC 色差式で 1~3 の範囲にあり、色差の内容に一定の傾向は認められなかった。

IV. 考 察

口腔領域の審美性を左右する因子として、前歯部の色調はきわめて重要な意味を持っている。歯科審美に対する要求が高まっている近年では、より自然感のある歯列に調和した前歯部の色調構築が重要視される。しかし、従来の歯冠色の構築法は客観性に欠け、多くの問題点が残されている。第一に視感比色法による色調選択では個人の色彩感覚や周囲の条件に左右され、同一歯に対して何種類ものシェイドガイドが選択されることはめずらしくない¹⁰⁾。また、市販のシェイドガイドの色調は 16 種類と限られており、天然歯の色調を決定するには限界がある。色調の伝達においては“A2 よりやや黄色く”とか“B3 で切縁の透明感を強く”などと、きわめて曖昧な色調の伝達方法がとられているのが現状であろう。技工操作においては統一的な操作ではなく、術者の経験的な判断に委ねられている面が大きいと考える。さらに、色調の評価においても客観的な判断基準はなく、光源による色調のみえ方の違い、すなわちメタメリズムに関する対策はほとんどなされていない。より適正な色調を再現するために多方面からの研究がなされてはいるものの¹¹⁻¹⁵⁾、従来法の欠点や限界を解決できる方法は確立されていない。しかし一方では、電子技術の発達により歯科領域においてもコンピュータを応用した種々の検査、診断機器、そして修復物の製作技術が開発され¹⁶⁾、臨床に應用されており、歯冠色の再現においても客観的な色調構築法が切望される。そこで、著者らは、これまで人間が目と手で行ってきた色合せ操作を分光光度計とコンピュータによって数値的に定量化して処理する客観的な色合せ方法である、Computer Color Matching (CCM) を應用した陶材による色調構築法に関して基礎的研究を重ねてきた。CCM は工業界ではすでに 20 年以上前から導入され、広く應用されているが、歯科領域においては対象が半透明体できわめて小さい歯であること、口腔内という特殊な環境下にあることに起因した客観的な歯冠色の測色やコンピュータによる歯冠色の解析のむずかしさが CCM の臨床導入を困難にしてきた。しかし、著者らは陶材の光学的性質を詳細に分析することにより、目標となる歯冠色に対し、オペークの単層、そしてオペーク、デンティン、エナメル層構造での良好な色合せを可能とし^{3,4)}、さらに CCM の臨床應用にむけて非接触型微小面積測

色用分光光度計を開発し^{5,6)}、その精度および臨床での測色方法についても検討してきた。

CCM の臨床應用に際しては、天然歯の色調の特徴である部位による色調差に対応した色合せが要求される。歯冠色は同一歯でも、切縁部、中央部、歯頸部の部位ごとに色調が異なるということが報告されている¹⁷⁻²⁰⁾。これは象牙質層とエナメル質層の色調と厚みが部位によって異なるためと考えられており、すなわち天然歯の色調を構築するには、天然歯の層構造を模倣した色合せを行う必要がある。本実験では未知の色調を有するターゲット・サンプルに対し、オペーク陶材、デンティン陶材、エナメル陶材を用いて天然歯を模倣した層構造により、部位による色調差に対応した色合せを試み、良好な結果を得た。これは CCM の臨床應用に向けての大きな可能性を提示する重要な意義を有する。

CCM を應用した陶材による色調構築において重要なことは、陶材の構成成分とその厚径であり、また陶材焼付鑄造冠の色調は、その構造からオペークを使用しない部分と、オペークを使用する部分とにわけて考える必要がある。オペークを使用しない部分は切縁部であり、半透明性の正確な構築が要求される。本システムでは切縁の半透明性を決めるために、金属とオペークの裏打ちの存在しない切縁部 1 mm の範囲を対象として、白バック、黒バックの測色値から切縁部の半透明性を求め、その半透明性を STL と TL, 57, 58, 59, 60 のいずれかとの 2 種類の混合によって構築する方法を用いた。すなわち STL を透明成分と考え、57, 58, 59, 60 を着色成分として、その混合によって切縁の半透明性を構築することになる。しかし、ターゲット・サンプル 2 と CCM サンプルの切縁部の色調を分析すると、中央部に比較してやや色調構築性の精度が低い結果となっており、透明成分 (STL) と着色成分 (TL, 57, 58, 59, 60) の 2 種の組合せでは半透明性を十分には構築できない可能性が推察される。今後の対応策としては、透明成分、着色成分に加えて陰弊成分の使用が必要であると考えている。

一方、デンティンに関してはエナメルとの組合せで実際に 2 層構造となる部分はきわめて狭い範囲で、すなわち B 点の色調は C 点のオペークの影響を多分に受ける結果となる。C 点でのオペークの色調に対し CCM 計算を行う現システムにおいては、デンティンの混合ではなく、16 種類のデンティンからの 1 種類

の選択という方法で十分に対応できるものと考え。

また、陶材焼付鑄造冠の色調の重要な決定要素であるオペークの色調に対しては、Allen の方法を用いて処方計算を行っている。オペークの処方計算過程は、エナメルとデンティン層を差し引いた下地として必要なオペーク層の色調予測過程と CCM 計算過程からなる。オペークの処方算出方法についてはすでに報告しており^{3,4)}、オペークの種類は 8 種類で対応している。オペークにはより広範囲な色調を構築できる成分構成が要求されるが、これまでの実験でも^{3,4)}十分な構築精度が得られており、現システムの構成成分の妥当性が示されている。一方、ターゲット・サンプル 1 および 2 とも、歯冠中央部に比較して歯頸部においてやや大きな色差値を示す傾向が認められた。その原因としては歯頸部での陶材厚径の少なさが大きく影響すると思われるが、CMC 色差は 2.0 以下であり、視感的に十分な色調構築精度であると判断した。しかしながら、歯冠色には辺縁歯肉や歯冠内部の歯髄の色調が大きく関与することからも、今後口腔内を対象とした CCM においては、新たなオペーク成分の追加に対する検討も必要と考えられる。

本システムでは従来の方法とは異なり、陶材厚径の設定が必要である。すなわち、唇面の削除によって得られたスペースに金属、オペーク、デンティン、エナメル成分がそれぞれ決められた厚径で構築されることが要求される。本実験ではポーセレン試料を対象としているが、厚径の設定については平均的な陶材焼付鑄造冠の断面より割り出した。オペークについては金属色遮断に必要な厚径が焼成時に約 0.3 mm あれば十分との報告^{21,22)}から、0.3 mm に規定した。本システムでは C, D, E の 3 部位においてそれぞれ処方異なるため、境界部分は色調が移行的になるように仕上げている。また、エナメルとデンティンに関しては、正確に厚径を設定するためにデンティンとエナメルを別個に焼成して、陶材厚径を調整した。なお、本実験ではあくまでポーセレン試料としての段階であり、唇面の特徴的なディテイルは付与せずに陶材を築盛している。ディテイルの付与がどの程度 CCM 処方による色調構築性に影響を与えるかは今後の検討課題とした。

今回、歯冠の部位による色調差に対応した CCM システムによる色調構築で、歯冠の切縁部、中央部、歯頸部のいずれの部位においても CMC 色差式で色差 dE が 3 以下の精度が得られた。肉眼での色の識別能

力に関しては NBS 単位が知られているが、歯冠色は半透明体であり表面色の識別とは異なる。歯冠色やポーセレンを対象とした研究^{17,21,23,24)}においては、CIELAB 色差 dE が 2~4 を識別色差として扱っている。本実験のターゲット・サンプルと CCM サンプルの CMC 色差 dE は 1~3 であり、口腔内という環境を考え合えると、十分に許容でき得る構築精度と考える。なお、CMC とは英国の SDC (Color Measurement Committee) の略称であり、多くの色合せ結果の判定実験を基に、CIELAB 色差をより視感に対応するように改良されたものであり、CCM の評価に広く応用されている色差式である²⁵⁾。著者らは本 CCM システムの色合せ結果の評価にはより視感に対応した基準が望ましいとの見地から、この CMC 色差式を応用している。

V. 結 論

部位による色調差を有するターゲット・サンプルに対し、エナメル、デンティン、オペークの三層構造での CCM による色調構築を試みた結果、以下の結論を得た。

1. ターゲット・サンプルと CCM サンプルを視感比較したところ、両者の色調は一致していた。
2. ターゲット・サンプルと CCM サンプルを分光測色によって比較したところ、歯冠の切縁部、中央部、歯頸部のいずれにおいても色差 dE (CMC) が 1~3 の範囲にあった。

以上により、陶材焼付鑄造冠の色調構築における本システムの実用の可能性が示された。

文 献

- 1) 石川成美, 佐藤理一郎, 古川良俊ほか: 歯科用陶材に関する色彩学的検討—散乱係数, 吸収係数の特性について—, 補綴誌, 34: 585~592, 1990.
- 2) 石川成美, 三善ふみ子, 石橋寛二: 陶材焼付鑄造冠の色調再現に関する新しい試み—Kubelka-Munk の混色理論の応用について—, 補綴誌, 34: 593~598, 1990.
- 3) Ishikawa-Nagai, S., Sato, R., Ishibashi, K. et al: Using a computer color matching system in color reproduction of porcelain restorations Part 1: Application of CCM to the opaque layer, Int J Prosthodontics, 5: 495~502, 1992.
- 4) Ishikawa-Nagai, S., Sato, R., Ishibashi, K. et al: Using

- a computer color matching system in color reproduction of porcelain restorations Part 2: Color reproduction of stratiform layered porcelain samples, *Int J Prosthodontics*, Vol 6, 1993. 印刷中.
- 5) 石橋寛二, 石川成美, 白石 明: 非接触型微小面積測色用分光光度計の開発, 補綴誌, 37: 619~626, 1993.
- 6) Ishikawa-Nagai, S., Shiraishi, A., Ishibashi, K. et al: Using a computer color matching system in color reproduction of porcelain restorations Part 3: A newly developed spectrophotometer designed for clinical application, *Int J Prosthodontics*, Vol 6, 1993. 印刷中.
- 7) Kubelka, P. and Munk, F.: Ein Beitrag zur Optik der Fabansstriche, *Z tech Phys*, 12: 593~601, 1931.
- 8) Kubelka, P.: New contributions to the optics of intensely light-scattering materials Part 1., *J Opt Soc Am*, 38: 448~457, 1948.
- 9) Allen, E.: Basic equations used in computer color matching, 2. Tristimulus match, two-constant theory, *J Opt Soc Am*, 64: 991~993, 1974.
- 10) 中里登紀子, 石川成美, 三善ふみ子ほか: 陶材焼付鑄造冠の色調選択に関する色彩学的検討, 岩医大歯誌, 15: 1~8, 1990.
- 11) Culpepper, W.D.: A comparative study of shade-matching procedures, *J Prosthet Dent*, 24: 116~173, 1970.
- 12) Sorensen, J.A. and Torres, T.J.: Improved color matching of metal ceramic restorations Part 1: A systematic method for shade determination, *J Prosthet Dent*, 58: 133~139, 1987.
- 13) Sorensen, J.A. and Torres, T.J.: Improved color matching of metal ceramic restorations Part 2: Procedure for visual communication, *J Prosthet Dent*, 58: 669~677, 1987.
- 14) Johnston, W.M., O'Brien, W.J. and Tien T.Y.: The determination of optical absorption and scattering in translucent porcelain, *Color Res Appl*, 11: 125~130, 1986.
- 15) Johnston, W.M., O'Brien, W.J. and Tien T.Y.: Concentration additivity of Kubelka-Munk optical coefficients of porcelain mixtures, *Color Res Appl*, 11: 131~137, 1986.
- 16) Preston, J.D.: *Computers in Clinical Dentistry*, 100~104, Quintessence, Chicago, 1993.
- 17) 中川善晴: 歯冠色分析に関する研究, 補綴誌, 19: 109~130, 1975.
- 18) 加藤愛子: 歯冠色の構成に関する色彩学的研究, 補綴誌, 20: 570~584, 1976.
- 19) 一和多寿樹: 歯に関する色彩学的研究一分光放射測定法による検討一, 補綴誌, 30: 652~664, 1986.
- 20) 山崎信夫: 上顎前歯の色彩学的研究, 日歯保誌, 29: 81~94, 1986.
- 21) 寺田善博: 陶材焼付鑄造冠の色調に関する基礎的研究一下地金属の違いによるオペーク陶材の色調について一, 補綴誌, 29: 1270~1283, 1985.
- 22) 潤田和好, 大友孝恒, 山本 秀ほか: 陶材やきつけ鑄造冠のオペーク陶材に関する測色学的研究 第 1 報 黄色系オペーク陶材による裏装金属色遮断効果, 補綴誌, 32: 534~545, 1988.
- 23) 太田忠興: 各種の照明光源下における歯冠色の見えに関する研究, 口病誌, 50: 450~465, 1983.
- 24) 川瀬誓子: 視感比色による陶材色の識別一光源および背景による影響一, 補綴誌, 28: 608~621, 1984.
- 25) 村田幸男: 色彩技術ハンドブック, 189~206, 総合技術センター, 東京, 1990.

図 2 CCM による測色部位

図 5 ターゲット・サンプル 1 と CCM サンプル

図 6 ターゲット・サンプル 2 と CCM サンプル