原著論文

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 —

石川 成美 三善ふみ子 石橋 寛二

Colorimetric Study of Color Reproduction in Porcelain-Fused-to-Metal Restoration

— The Application of Kubelka-Munk Theory in Porcelain Mixtures —

Shigemi Ishikawa, Fumiko Miyoshi and Kanji Ishibashi

Abstract : To get a more natural and harmonious color of porcelain-fused-to-metal restorations, an objective and precise systematic method from shade selection to color evaluation is needed. Thus, the absorption and scattering coefficients were determined to develop a CCM system for porcelain-fused-to-metal restorations.

The Kubelka-Munk Theory was applied on the dental porcelain, opaque, dentin, and enamel. From these data, we predicted the color of the porcelain mixtures from the both coefficients.

From the results of comparing the spectral curves and analyzing the color differences between measured values and predicted values of porcelain mixtures, the following was analysed ;

1. In opaque, spectral curves of the predicted and measured values were exactly alike and the mean dE between two values was 0.39.

2. In dentin, the spectral curved of the predicted and measured values were exactly alike, and the mean dE was 1.13. The measured values indicated a slight increase in the level of chroma and lightness.

3. In enamel, the spectral curves were exactly alike and the mean dE was 1.16. The measured values indicated a slight decrease in the level of lightness. Therefore, it was possible to predict the color of opaque, dentin and enamel porcelain mixtures, by applying the Kubelka-Munk Theory.

Key words : color prediction, porcelain-fused-to-metal restoration, Kubelka-Munk theory, scattering coefficient, absorption coefficient

I. 緒 言

歯科領域において審美性に対する意識の向上が目ざましいが、陶材焼付鑄造冠においても患者と術者の共通の理解に立ったより適正な色調の再現が望まれる。そのためには色調の選択から評価までの過程を客観的で精度の優れたシステムとする必要がある。

著者らは陶材焼付鑄造冠の色調再現に対しコンピューターカラーマッチング (CCM) の応用を試みるべく、歯科用陶材の色特性として吸収係数および散乱係数について分析してきた¹⁾。CCM は色物体の吸収係数および散乱係数を定量化して混色結果の色調を予測する Kubelka-Munk の混色理論²⁾が基本となっている³⁾。これまで歯科用陶材に関する多くの色彩学的研究がなされているが、陶材焼付鑄造冠を対象とした焼付用陶材について混色理論の応用を試みた報告はない。陶材焼付鑄造冠の色調再現に関する CCM を確立するためには、歯科用陶材において Kubelka-Munk の混色理論²⁾が成立するかどうかを分析することが重要である。そこで、臨床で用いられている歯科用陶材 (オパーク陶材、デンティン陶材、エナメル陶材) に関して、それぞれに固有の吸収係数、散乱係数を使用して混色試料の色調予測を試みた。

II. 実験方法

1. オパーク陶材

1) 陶材試料の作製

(1) 単色オパーク試料

試料として焼付用陶材 (松風社製ヴィンテージ®) を用い、オパーク陶材シェイド A 1~D 4 を金型を用いて直径 10 mm の陶材焼付用合金 (I 社製 KIK-WING®) の金属板上に築盛、焼成した。なお、陶材の厚径はいずれのシェイドにおいても金属色が完全に遮断される厚径

として、焼成後において 0.25 mm になるように築盛した⁴⁾。オパーク陶材試料は A 1~D 4 までの各シェイドにつき 5 個ずつ作製した。

(2) 混色オパーク試料

オパーク陶材の 50% の 2 種混合, 33.3% の 3 種混合, 25% の 4 種混合の処方無作為に設定し、陶材パウダーを計量、混合し単色試料と同様の方法¹⁾で築盛、焼成した。

2) 試料の測色方法

測色装置は高速分光光度計 CMS-35FS (村上色彩技術研究所) を使用した¹⁾。単色試料および混色試料ともに、焼成後の陶材表面を分光測色し、分光反射率 R (Saunderson の補正⁵⁾を行う) を算出した。測色は 20 nm 間隔で 400~700 nm の 16 ポイントにおいて行い¹⁾、単色試料については試料 5 個の平均値を測定値とし、混色試料の色予測における基礎データとした。

3) 混色試料の予測値の算出方法

オパーク混色試料の予測値の算出には Duncan の公式の変法⁶⁾を用いた。A 1~D 4 までの単色試料の分光反射率から、以下の演算式にて各波長における K/S (K : 吸収係数, S : 散乱係数) を算出し、混色試料に使用したシェイドの K/S に混和率を乗じた値の合計が混色試料の K/S_{mix} となり、さらに K/S_{mix} から反射率 R_{mix} を算出する。

$$K/S = (1-R)^2 / 2 \times R$$

$$R = 1 + (K/S) - \{(K/S)^2 + 2 \times (K/S)\}^{1/2}$$

測色オパーク試料の反射率の算出方法の 1 例を表 1 に示す。なお、反射率はすべて Saunderson の補正を施した反射率を使用した。

2. デンティン陶材, エナメル陶材

1) 陶材試料の作製および測色方法

オパーク陶材同様にデンティン陶材の 50% の 2 種混合, 33.3% の 3 種混合, 25% の 4 種混合の処方無作為に設定し、陶材パウダーを計量、混合し、すでに報告した単色試料の作製方法と同様の方法¹⁾で築盛、焼成、研磨および厚径の測定を行った。なお、エナメル陶材についてはシェイド数が少ないこと、デンティン陶材に比較して色調への関与程度が小さいことから 50% 混合についてのみ行った。測色方法については、すでに報告したデンティン単色陶材試料の測色方法¹⁾と同様に、黒色板および白色板を背景に分光測色し、混色試料の分光反射率を算出した。

表 1 オパーク陶材混色色調の予測値の算出方法

Example Ingredient : A 2 50% + A 4 50%
A 2 : $R' \rightarrow R \rightarrow K/S_{A2}$
A 4 : $R' \rightarrow R \rightarrow K/S_{A4}$
$R' \rightarrow R$: Saunderson's correction
$K/S = (1-R)^2 / 2 \times R$
Mixture
$(K/S)_{mix} = (K/S)_{A2} \times 0.5 + (K/S)_{A4} \times 0.5$
↓
$(K/S)_{mix} \rightarrow R_{mix} \rightarrow R'_{mix}$
$R_{mix} = 1 + (K/S)_{mix} - \{(K/S)_{mix}^2 + 2 \times (K/S)_{mix}\}^{1/2}$

表 2 デンティンおよびエナメル陶材における
混色色調の予測値の算出方法

Example Ingredience : A 2 50% + A 4 50%

Thickness : 300 μ m

A 2 : $K_{A2} = K/1 \mu\text{m} \times 330$, $S_{A2} = S/1 \mu\text{m} \times 330$

A 4 : $K_{A4} = K/1 \mu\text{m} \times 330$, $S_{A4} = S/1 \mu\text{m} \times 330$

↓

$K_{mix} = K_{A2} \times 0.5 + K_{A4} \times 0.5$

$S_{mix} = S_{A2} \times 0.5 + S_{A4} \times 0.5$

$R_{mix} = 1 + (K/S) - [(K/S)^2 + 2 \times (K/S)]^{1/2}$

↓

$R_{mix} \rightarrow R'_{mix}$

図 1 オペーク陶材 2 色混合における予測値および実測値の分光カーブの比較

2) 混色試料の予測値の算出方法

デンティンおよびエナメル混色試料の予測値の算出には Duncan の公式⁹⁾を用いた。すなわちデンティン混色試料の作製に使用したデンティン陶材それぞれの $1 \mu\text{m}$ 単位の吸収係数、散乱係数¹⁾ に厚径および混和率を乗じた値の総和が混色試料の吸収係数および散乱係数となる。予測値算出の 1 例を表 2 に示す。

3. 実測値と予測値の色比較

オペーク陶材、デンティン陶材およびエナメル陶材における混色試料の予測値と実測値の分光反射率をもとに分光カーブの比較を行い、三刺激値 X, Y, Z から予測値に対する実測値の色差を求め、偏色内容について分析した。なお色彩学的分析は CIELAB 表色系および CMC 色差式⁷⁾を用いた。

図 2 オペーク陶材 3 色混合における予測値および実測値の分光カーブの比較

図 3 オペーク陶材 4 色混合における予測値および実測値の分光カーブの比較

III. 結 果

1. オペーク陶材の混色色調予測結果

オペーク陶材 2, 3, 4 種混色試料における色調予測結果例を図 1~3 および表 3 に示す。いずれの波長においても実測値の反射率は予測値よりも小さな値を示したが、分光カーブは相似形できわめて近似していた。ま

表 3 オパーク、デンティン、エナメル陶材の混色色調に関する
予測値に対する実測値の色差

	Total	2-mixture	3-mixture	4-mixture
Opaque n=12	0.39±0.03	0.23	0.50	0.41
Dentin n=63	1.13±0.05	1.17	0.97	1.23
Enamel n=10	1.16±0.04	—	—	—

dE : CMC(Mean±S.E.)

図 4 デンティン陶材 2 色混合における予測値および
実測値の分光カーブの比較

図 5 デンティン陶材 3 色混合における予測値および
実測値の分光カーブの比較

た試料全体の色差の平均値は 0.39 ± 0.03 (mean±S.E.) と非常に小さく、色差の内容に関しても一定の傾向は認められなかった。また、2, 3, 4 種混色試料における色差間に統計学的有意差は認められなかった。

2. デンティン陶材の混色色調予測結果

デンティン陶材における予測結果例を図 4～6 および表 3 に示す。オパーク陶材同様に実測値の反射率は予測値よりも小さな値を示したが、分光カーブは相似形で近似していた。全試料の色差の平均は 1.13 ± 0.05 (mean±S.E.) であり、オパーク陶材に比較して若干大きな値を示したが、人の半透明体の色彩判別閾²⁾よりも小さかった。色差の内容を分析すると、予測値に対し実測値では b^* が高い値を示すために彩度が増加し、また明度においてはわずかに増加傾向が認められた。また 2, 3, 4 種混色試料における色差間に統計学的有意差は認められなかった。

3. エナメル陶材の混色色調予測結果

エナメル陶材における予測結果例を図 7 および表 3 に示す。エナメル陶材に関しては 2 種混色についてのみ実験を行ったが、オパーク陶材およびデンティン陶材同様に、予測値に対する実測値の色差は小さく、平均色差は 1.17 であった。また色差の内容は明度においてやや減少傾向が認められた。

IV. 考 察

1. 本研究の臨床的意義

陶材焼付鑄造冠の適正な色調再現を目的とし、色調選択から色調評価までの過程に対しコンピューターカラーマッチング (CCM) を応用したシステムを確立するため、著者らは色彩学的検討を試みている¹⁾。CCM は調色に使用される材料の色特性を定量化し、これにより混色結果を予測する技術が基本となっており、Kubelka-Munk の混色理論が利用されている³⁾。ここで著者らが

図 6 デンティン陶材 4 色混合における予測値および実測値の分光カーブの比較

図 7 エナメル陶材 2 色混合における予測値および実測値の分光カーブの比較

対象としている物体の色特性とは陶材の分光反射率，すなわち吸収係数および散乱係数を意味する．CCM を確立するためには歯科用陶材の吸収係数および散乱係数を正確に定量化でき，両係数を用いて混色理論が成立しなければならない．デンティン陶材およびエナメル陶材の吸収係数，散乱係数に関してはすでに報告¹⁾したが，本論文においてはその両係数を用いた混色色調の色予測が可能であるかどうか，すなわち CCM の基本となる混色理論の成立を検討している．またオペークに関しては単色の分光反射率から混色試料の分光反射率の予測を試みた．

現在，色を扱う多くの分野において Kubelka-Munk の混色理論が応用されているが⁹⁻¹¹⁾，歯科領域における報告¹²⁻¹⁴⁾は少なく，焼付用陶材を使用して混色理論の応用を試みた報告はない．臨床で使用する歯科用陶材は染料や顔料，塗料などとは異なった性質を有しており，さらにその使用方法や応用する環境には特有の条件が存在する．第 1 に，歯冠色は個人，歯種，年齢などその他様々な条件によって異なるものの，歯冠色の色彩範囲は色相環のある限られた部分に局限している．第 2 に色調を作り出す方法は，素材に色剤を添加してさまざまな色を作り出すのではなく，陶材自体に色調が存在し層構造で色調を作り出す．第 3 に陶材焼付鑄造冠においては確保される陶材厚径が非常に小さく，オペークでは 0.25 mm 程度，デンティンにおいては多くても 1.0 mm 程度の厚径が対象となっている．第 4 に陶材の技工操作にお

いては高温の焼成サイクルが加わり，表面性状の影響など多くの複雑な条件が関与している．このような条件下で CCM を応用するには，臨床条件に適応した条件設定で Kubelka-Munk の混色理論が適用できることを確認することが重要である．そこで本実験においては臨床で使用されている歯科用陶材を用い，陶材厚径を 100～700 μm という狭い範囲に設定し，臨床に即した条件下での混色理論の応用を検討した．

2. 陶材の混色色調の予測方法について

陶材の混色色調を予測するには，混色に用いた単色陶材の吸収係数と散乱係数から混色後の両係数を算出しなければならない．しかし，色材の光学的特性により予測方法に対する配慮が必要である．デンティン陶材およびエナメル陶材に関しては，すでに報告した方法¹⁾で吸収係数と散乱係数を単独に算出することができ，Duncan の式⁶⁾により混色に用いた陶材の 1 μm 単位当たりの両係数に，厚径および混和率を乗じた値を合計したものが混色試料の吸収係数および散乱係数となる．混色試料の両係数が求めれば分光反射率を算出することができ，すなわち色を予測することが可能となる．

一方，オペーク陶材に関しては，デンティン陶材やエナメル陶材とは異なった条件が存在する．オペーク陶材の厚径に関しては临床上陶材層をできるだけ小さくすることが望ましく，いずれのシェイドにおいても金属色を完全に遮断できる最小の厚径は焼成後の厚径が約 0.25

mm であり⁴⁾、デンティン陶材やエナメル陶材のように吸収係数、散乱係数を個別に求める二定数法は適用しにくい。よって金属に一定の厚径 (0.25 mm) のオペーク陶材を焼成した状態での反射率より、K/S を求める一定数法が適していると考えた。すなわちオペーク陶材の混色色調の予測方法に関しては、単色試料の K/S から Duncan の式の変法⁹⁾により、混色試料の K/Smix を算出し、さらに分光反射率に変換して色調を予測する方法を採用した。

3. 実測値と予測値の一致度について

予測値に対する実測値の色調はオペーク陶材、デンティン陶材、エナメル陶材いずれにおいても非常に小さな色差を示した。実測値と予測値間にわずかな差が生じる原因としては、通常の単色陶材の焼成過程においてもみられる術式における誤差と^{15,16)}、陶材を混合するという新たに加わる操作に起因した誤差が考えられる。通法の焼成過程においては焼成時の減圧度¹⁵⁾やコンデンスの方法¹⁶⁾の違いにより焼成後の色調が異なるとされているが、本実験においては一定の減圧度および同一のコンデンス方法を用いて同一術者が実験を行っているため、それらの影響は考えにくい。

一方、数種の陶材混合時の誤差に関しては、2, 3, 4 種混合において色差の大きさに有意な差が認められなかったことから、陶材の混合条件に違いはないものと推察される。よって予測値と実測値間の色差は、通法の焼成操作に付随する誤差であると考えられる。とりわけオペーク陶材の色差が小さかったのは、オペーク陶材がほぼ不透明体に近い性質を呈していること、陶材の築成、焼成が行いやすく気泡が混入しにくいこと、さらに一定数法を用いているために、測色段階での誤差がデンティン陶材やエナメル陶材に比較して小さいことなどによるものと考えられる。一方、デンティン陶材およびエナメル陶材においては半透明の性質を呈し、陶材の築成時、焼成時、研磨時の誤差や、吸収係数および散乱係数の算出時の測色過程での誤差が加わり、オペーク陶材に比較して大きな色差を示したものと推察される。

しかしデンティン陶材、エナメル陶材においても平均色差は約 1.0 であり、半透明体の色彩判別関に関するこれまでの報告^{8,17-19)}からも、実測値と予測値は高い精度での一致が認められたと考えられる。

V. 結 論

歯科用陶材に関して Kubelka-Munk の混色理論の応用を試みたところ、以下の結論を得た。

1. オペーク陶材における 2, 3, 4 種の混色試料の予測値と実測値においては、分光カーブは近似し、平均色差 0.39 の一致が認められた。
2. デンティン陶材における 2, 3, 4 種の混色試料の予測値と実測値においては、分光カーブは近似し、彩度および明度がわずかに増加するものの平均色差が 1.13 の一致が認められた。
3. エナメル陶材における 2 種の混色試料の予測値と実測値においては、わずかな明度の低下が認められるものの平均色差 1.16 の一致が認められた。

以上のようにオペーク陶材、デンティン陶材、エナメル陶材に関して Kubelka-Munk の混色理論に基づく混色試料の色調予測が可能であることが明らかとなり、陶材焼付鑄造冠の色調再現における CCM を確立する上で重要な色彩学的基本要件が満たされた。

なお、本論文の要旨は 3rd Meeting International College Prosthodontists (July 9-12, 1989, in TORONTO) および第 82 回日本補綴歯科学会 (1989, 10, 23, 24 於 横浜) において発表した。

色彩学的分析に際しご専門の立場からご指導いただきました村田色彩エンジニアリングの村田幸男氏、村上色彩技術研究所の松本和二氏に感謝の意を表します。

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) Kubelka, P. and Munk, F.: Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche, Z tech Phys, 12 : 593~601, 1931.
- 3) 村田幸男: コンピューターカラーマッチングについて, 染料と薬品, 30 : 2~21, 1985.
- 4) 潤田和好, 大友孝恒, 山本 秀ほか: 陶材焼付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層金属色遮断効果, 補綴誌, 32 : 534~545, 1988.
- 5) Saunderson, J.L.: Calculation of the color of pigmented plastics, J Opt Soc Am, 32 : 727~736, 1942.
- 6) Duncan, D.R.: The color of pigment mixtures, Proc Phys Soc, 52 : 390~401, 1940.

- 7) McDonald, J. and Dyner, J.S. : Colourists 100, 128, 1984.
- 8) 根本ふみ子, 石川成美, 古川良俊ほか : 色彩判別能力に関する検討, 岩医大歯誌, 12 : 224~225, 1987.
- 9) Billmeyer, F.W.Jr. and Abrams, R.L. : Predicting reflectance and color of paint films by Kubelka-Munk analysis. I Turbidmedium theory, J Paint Technol, 45 : 23~30, 1973.
- 10) Billmeyer, F.W.Jr. and Abrams, R.L. : Predicting reflectance and color of paint films by Kubelka-Munk analysis. II Performance tests, J Paint Technol, 45 : 31~38, 1973.
- 11) Billmeyer, F.W.Jr. and Phillips, D.G. : Predicting reflectance and color of paint films by Kubelka-Munk analysis. III Effect of concentration errors on color for mixtures of one chromatic pigment with white, J Paint Technol, 46 : 36~39, 1974.
- 12) William, M.J., 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.
- 13) William, M.J., 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.
- 14) Miyagawa, Y. and Powers, J.M. : Prediction of color of an esthetic restorative materials, J Dent Res, 62 : 581~584, 1983.
- 15) 吉田 皓 : 陶材の色に関する測色的研究, 補綴誌, 16 : 245~267, 1972.
- 16) 劉 嘉東 : 歯科用陶材の粒子の移動が色調に及ぼす影響, 九州歯会誌, 41 : 1157~1170, 1987.
- 17) 指宿真澄, 加藤愛子, 浅岡一馬ほか : 歯科医師および歯科技工士の視感比色能について, 補綴誌, 22 : 135~139, 1978.
- 18) 川瀬誓子 : 視感比色による陶材色の識別—光源および背景による影響—, 補綴誌, 28 : 608~621, 1984.
- 19) 鬼島成和, 塩冶 孜, 片山伊九右衛門ほか : 歯科医師の色彩感覚能力について—歯冠色範囲の色票による二点識別能力について—, 日歯保誌, 29 : 69~80, 1986.