

Kubelka-Munk の 2 常数理論による光重合型コンポジットレジンの光学的性質に関する研究

平 雅之, 若狭 邦男, 山木 昌雄

Studies on the Optical Properties of Visible-light-cured Composite Resins by Kubelka-Munk's 2 Constant Theory

Masayuki Taira, Kunio Wakasa and Masao Yamaki

(平成 6 年 3 月 30 日 受付)

緒 言

光重合型コンポジットレジンとは良好な色調並びに操作の簡便さ等の理由から、歯冠修復用材料として広く用いられている。しかしながら、内部に光が透過しにくく重合深度が浅い欠点を有している¹⁾。材質的改善を計るためには、コンポジットレジン内部の光の透過性に関する研究²⁾を行うことが必要と考えられる。

コンポジットレジンとは半透明性物質であり、色調(光の反射)は厚さや背景色の影響を大きく受ける。コンポジットレジン内部には、光を著しく散乱させる無機フィラーが多く存在し入射光は多重散乱や屈折等の対象となるため、光の反射率や透過率を単純な一次回帰式で表現することは不可能である^{2,3)}。Kubelka と Munk は、強度に光を散乱する物質に対する光の反射率と透過率を、波長に依存した 2 常数(吸収係数と散乱係数)の逆双曲線関数として表現している⁴⁾。この理論は後述のように 2, 3 の制約が存在するものの、コンポジットレジン^{2,3,5,6)}や焼付陶材⁷⁻¹⁰⁾の色調(光の反射率)を評価するのに極めて有効なことが報告されている。しかしながら、Kubelka-Munk の理論を用いてコンポジットレジン光透過性に検討を加えた研究は極めて少ないのが現状である⁵⁾。

そこで、本研究では 1 種類の市販光重合型コンポジットレジン未重合ペーストと重合硬化体について、紫外可視分光光度計と積分球を用いて拡散反射率

の測定を行い Kubelka-Munk の理論から 2 常数(吸収係数と散乱係数)を求め、光学的性質に比較検討を加えた。また、重合硬化体について、拡散反射率の測定から推定された理論光透過率と実測された光透過率を比較し、Kubelka-Munk の理論の妥当性に検討を加えた。さらに、試料厚さが未重合ペーストと重合硬化体の理論光透過率に及ぼす影響に検討を加えた。

材料ならびに方法

1. 材 料

本実験には、市販光重合型コンポジットレジン P50 (ユニバーサルシェード No. 9350 ロット番号=1EJ2, 3M 社, U.S.A.) を用いた。P50 の光重合には、市販光照射器 (Quicklite Model VL-1, モリタ社, 京都) を用いた。未重合ペースト試料 (1 mm 厚) は、分割可能で試料室内径が約 5×30×1 mm の石英セル (AB20-G-1.0, 日本分光社, 東京) に填入した。重合硬化体試料 (1 mm 厚) は、未重合ペーストをテフロン金型 (10×10×1 mm) に填入後、両面をスライドガラスで圧接し、両面より 40 秒間ずつ光照射することによって作製した。

2. 方 法

積分球 (TIS-417, 日本分光社, 東京) (図 1) を装着した紫外可視分光光度計 (UV-Vis) (UVIDEC-610B, 日本分光社, 東京) を用いて P50 の未重合ペーストと重合硬化体の拡散反射率並びに P50 重合硬化体の光透過率を測定した。積分球内部では、試料から 180° の角度で反射された(拡散)光はすべて内壁 (BaSO₄) に全反射され光検知セルに集光され

広島大学歯学部歯科理工学講座 (主任: 山木昌雄教授)

本研究の一部は文部省科学研究費補助金 (奨励研究 (A) 平成 4 年度 No. 04857237) による。

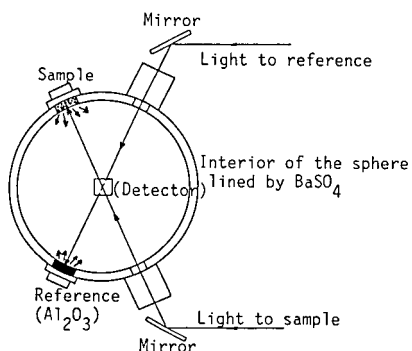


図1 積分球の模式図。

た。UV-Vis の実験条件は以下の通りであった：Band width = 2 nm; Wavelength = 350-700 nm; Wavelength scale = 20 nm/cm; Scan speed = 100 nm/min。拡散反射率の測定では、両試料（1 mm 厚）の背面に $\phi 27 \times 6$ mm の白色（拡散）板（アルミナ製，日本分光社，東京）と $17 \times 17 \times 3$ mm の黒色板（長野県産黒耀石，ニチカ社，京都）を交互に接触させ，もう一枚の白色板を対照側に置いて試料の拡散反射率を測定した（図1）。光透過率の測定では，試料側と対照側に白色板を置き，石英板（ $12 \times 45 \times 1$ mm）に仮着した試料ともう一枚の石英板を積分球の光入射部に置いて試料の光透過率を測定した。

以下に Kubelka-Munk の 2 常数理論の概要と当理論の応用方法を示す^{2,3,11)}。

図2に Kubelka-Munk の理論の基礎を図示した。ここで三つの仮定が成り立つとする。すなわち，試料内部の光束はすべて拡散光（diffuse）であり，散乱因子（フィラー等）は均質かつアトラングラムに媒質中に存在し，試料表面に平行に進む光束は無視できるとする。すると，試料の中を進む光束のすべては試料の中を底面に向かう拡散光束と試料の中を表面へ向かう拡散光束である。試料面に平行で試料の厚さ X に比べればごく薄い厚さ dx の層素子を，底面向きの光束 i と表面向きの光束 j が通過し， K および S を試料を構成

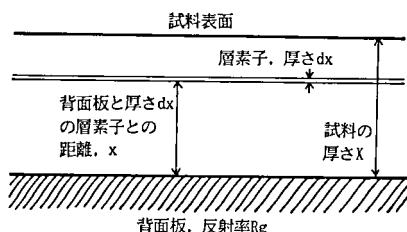


図2 光を散乱する層による反射および透過についての Kubelka-Munk 理論の基礎。

する物質の吸収係数並びに散乱係数とすると，

底面向きの光束の総変化 di は

$$di = -(S+K)idx + Sjdx \dots\dots\dots (1)$$

表面向きの光束の総変化 dj は

$$dj = -(S+K)jdx + Sidx \dots\dots\dots (2)$$

で表される。式(1)と(2)の微分方程式を解くと，試料の反射率 $R (=j_x/i_{x=0})$ は：

$$R = \{ (Rg - Rinf) / Rinf - Rinf (Rg - 1 / Rinf) \cdot e^{SX(1/Rinf - Rinf)} \} / \{ Rg - Rinf - (Rinf - 1 / Rinf) e^{SX(1/Rinf - Rinf)} \} \dots\dots\dots (3)$$

となる。

ここで， X ： 試料厚さ(mm)

Rg ： 試料の背面の反射率

$Rinf$ ： これ以上厚さを増しても反射率に変化が現れないくらいの厚さ ($Xinf$) を持つ試料の反射率 (固有反射率)

実験的に試料の K と S を求めるためには，反射率が既知の2つの背面板（白色板と黒色板）の上に薄い試料を載せ，試料の拡散反射率を測定し，(3)式に代入することが広く行われている^{2,3)}。

以下に， K と S を算出するための Kubelka-Munk の公式を示す¹¹⁾。

まず，試料の反射率の粗データ (R) を試料の光沢の有る無しによって校正する (R')³⁾。

光沢有り試料の場合：

$$R' = R / (0.4R + 0.576)$$

光沢無し試料の場合：

$$R' = (R - 0.04) / (0.4R + 0.56)$$

ここで，白色板の反射率を Rw ，黒色板の反射率を Rb ，白色板を背面にした試料の反射率を Rsw ，黒色板を背面にした試料の反射率を Rsb ，校正後の白色板を背面にした試料の反射率を $R'sw$ ，校正後の黒色板を背面にした試料の反射率を $R'sb$ とすると，

$$a = (S+K) / S = 1/2 (R'swRwRb - R'swRwR'sb + Rb - R'sb - RwR'sbRb - Rb + R'swR'sbRb + R'sw) / (RbR'sw - RbR'sb) \dots\dots\dots (4)$$

$$b = (a^2 - 1)^{1/2} \dots\dots\dots (5)$$

ただし， a と b は K と S を算出するための光学常数

$$S = \text{arctgh} \{ (aRw + aR'sw - R'swRw - 1) / (bRw - bR'sw) \} / bX \dots\dots\dots (6)$$

$$K = S(a-1) \dots\dots\dots (7)$$

ただし， X は試料厚さ (mm)

となる。

K と S がわかると，任意の厚さ X に対して反射率 $R(X)$ と透過率 $T(X)$ が以下の式で与えられる。

$$R(X) = \frac{|1 - R'g(a - b \cdot ctgh(bSX))|}{|a + b \cdot ctgh(bSX) - R'g|} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、R'g は校正後の背面板の反射率

$$T(X) = b / |a \cdot \sinh(bSX) + b \cdot \cosh(bSX)| \dots\dots (9)$$

さらに、数学的に Rinf は a-b によって与えられ、式(6)で R'sw=0.999 Rinf とした時の X の値は試料が背面板の影響を受けなくなる臨界の試料厚さ Xinf とみなされている^{2,10)}。K と S 並びに Rinf との間には以下の関係が成り立つ。

$$K/S = (1 - Rinf)^2 / 2Rinf \dots\dots\dots (10)$$

本研究では、P50 未重合ペースト並びに重合硬化体について、拡散反射率並びに光透過率を測定し、以上の理論的背景並びに公式を用いて光学的性质に比較検討を加えた。

結 果

図3に、背面に白色板と黒色板を置いた場合の P50 未重合ペースト (1 mm) の拡散反射率の測定結果を示した。図4には、背面に白色板と黒色板を置いた場合の P50 重合硬化体 (1 mm) の拡散反射率の測定結果を示した。白色板を背面とした試料の拡散反射率の値は常に黒色板を背面とした試料の拡散反射率の値を上回っていた。光の反射は、高波長域程大きく低波長域 (特に 450 nm 以下) 程小さくなる傾向が認められた。重合硬化体試料の拡散反射率は未重合ペーストのそれをかなり上回る特長も見られた。

表1に、P50 未重合ペーストの波長350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700 nm における拡散反射率の値と、これらを光沢無し試料として校正した反射率の値を用いて計算した2つの光学常数 a と b 並びに吸収係

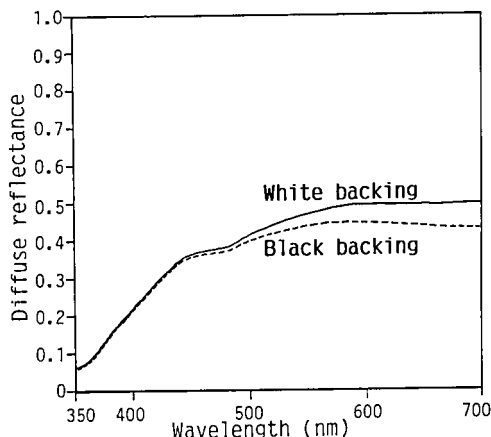


図3 背面に白色板 (White backing) と黒色板 (Black backing) を接触させた場合の P50未重合ペースト (1 mm 厚) の拡散反射率の測定結果。

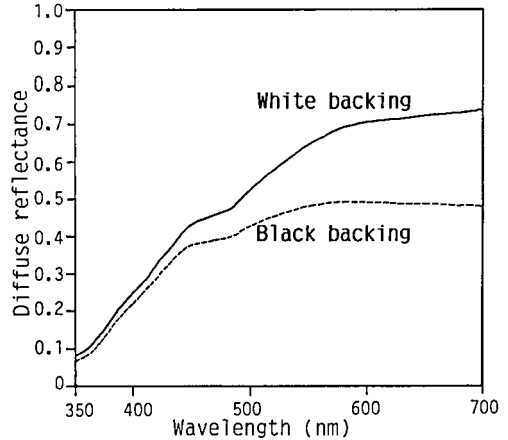


図4 背面に白色板 (White backing) と黒色板 (Black backing) を接触させた場合の P50重合硬化体 (1 mm 厚) の拡散反射率の測定結果。

表1 P50未重合ペースト (1 mm) の拡散反射率の測定結果と光学常数 a と b 並びに吸収係数 K と散乱係数 S の計算結果

波長 (nm)	Rw	Rb	Rsw	Rsb
350	1.000	0.050	0.055	0.055
400	1.000	0.049	0.212	0.209
450	1.000	0.047	0.356	0.352
500	1.000	0.046	0.413	0.396
550	1.000	0.043	0.468	0.437
600	1.000	0.041	0.490	0.423
650	1.000	0.041	0.490	0.434
700	1.000	0.041	0.493	4.429

波長 (nm)	a	b	K (mm ⁻¹)	S (mm ⁻¹)
350	19.42	19.39	4.11	0.22
400	2.03	1.77	1.63	1.59
450	1.34	0.90	1.05	3.06
500	1.25	0.75	0.67	2.72
550	1.18	0.63	0.50	2.75
600	1.18	0.63	0.39	2.13
650	1.18	0.62	0.41	2.33
700	1.18	0.62	0.39	2.21

注：Rw = 白色板の反射率, Rb = 黒色板の反射率
 Rsw = 白色板を背景とした試料の反射率
 Rsb = 黒色板を背景とした試料の反射率

数 K と散乱係数 S の値を示した。表2には、P50 重合硬化体の波長350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700 nm における拡散反射率の値と、これらを光沢有り試料として校正した反射率の値を用いて計算した2つの

表2 P50重合硬化体 (1 mm) の拡散反射率の測定結果と光学常数 a と b 並びに吸収係数 K と散乱係数 S の計算結果

波長 (nm)	Rw	Rb	Rsw	Rsb
350	1.000	0.050	0.079	0.069
400	1.000	0.049	0.244	0.223
450	1.000	0.047	0.434	0.382
500	1.000	0.046	0.528	0.438
550	1.000	0.043	0.654	0.483
600	1.000	0.041	0.742	0.492
650	1.000	0.041	0.722	0.486
700	1.000	0.041	0.735	0.480

波長 (nm)	a	b	K (mm ⁻¹)	S (mm ⁻¹)
350	4.39	4.28	1.67	0.49
400	1.63	1.29	0.92	1.45
450	1.19	0.65	0.44	2.27
500	1.12	0.50	0.28	2.39
550	1.07	0.37	0.15	2.30
600	1.04	0.30	0.09	2.11
650	1.05	0.32	0.10	2.10
700	1.05	0.31	0.09	2.01

注：Rw = 白色板の反射率, Rb = 黒色板の反射率
 Rsw = 白色板を背景とした試料の反射率
 Rsb = 黒色板を背景とした試料の反射率

光学常数 a と b 並びに吸収係数 K と散乱係数 S の値を示した。吸収係数 K の値は、全波長域において未重合ペーストが重合硬化体を 2 倍程度上回っていた。また、両試料の吸収係数 K は、高波長域で小さく低波長域 (特に 450 nm 以下) で大きくなる特長が見られた。散乱係数 S の値は、全波長域において未重合ペーストと重合硬化体で同等であった。両試料の散乱係数 S は、高波長域 (600-700 nm) で 2 mm⁻¹ 程度であり、中波長域 (450-600 nm) で 2 から 3 mm⁻¹ と若干大きくなり、そして短波長域 (450 nm 以下) で 2 mm⁻¹ 以下と小さくなる傾向が認められた。

表3に、P50 未重合ペーストと重合硬化体の固有反射率 Rinf と固有反射率を生じる最小の試料厚さ Xinf の計算結果を示した。Rinf と Xinf の値は共に、重合硬化体の方が未重合ペーストを上回っていた。両試料の Rinf と Xinf は、低波長域で小さく高波長域で大きいことが判明した。

図5に、P50 重合硬化体 (1 mm) の (拡散反射率の測定から得られた吸収係数 K と散乱係数 S を用いて推定した) 理論光透過率と実測された光透過率を示した。理論光透過率は、450 nm 以下の低波長域を除き

表3 (a) P50未重合ペーストと(b) P50重合硬化体の固有反射率 Rinf と固有反射率を生じる最小の試料厚さ Xinf (理論値)

(a) P50未重合ペースト		
波長 (nm)	Rinf	Xinf (mm)
350	0.026	0 (0.0002)
400	0.263	0.025
450	0.447	0.074
500	0.502	0.127
550	0.552	0.181
600	0.552	0.232
650	0.558	0.224
700	0.555	0.232

(b) P50重合硬化体		
波長 (nm)	Rinf	Xinf (mm)
350	0.115	0.006
400	0.341	0.063
450	0.543	0.206
500	0.617	0.336
550	0.697	0.627
600	0.746	1.003
650	0.732	0.902
700	0.736	0.976

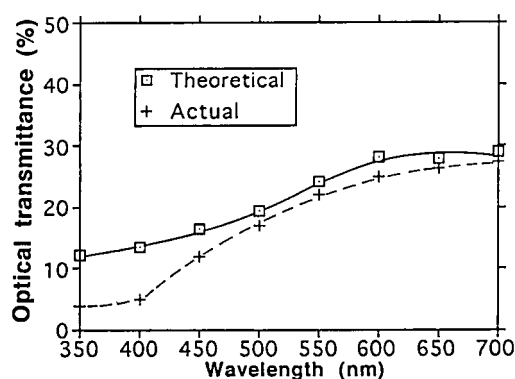


図5 P50重合硬化体 (1 mm 厚) の理論光透過率 (Theoretical) と実測光透過率 (Actual)。

広い可視光領域 (450-700 nm) で実測光透過率とかなり類似していた。表4には、厚さを増加させた場合 (X=1, 2, 3, 4, 5 mm) の P50 未重合ペーストと重合硬化体の理論光透過率を示した。理論光透過率は、重合硬化体の方が未重合ペーストをかなり上回ることが明らかとなった。両試料の理論光透過率は、高波長域ほど大きく低波長域ほど小さくなる特長も見られ

表4 (a) P50未重合ペーストと(b) P50重合硬化体の理論光透過率(%)

(a) P50未重合ペースト					
波長 (nm)	試料厚さ (mm)				
	1	2	3	4	5
350	1.32	0.02	0	0	0
400	5.65	0.34	0.02	0	0
450	5.17	0.33	0.02	0	0
500	9.86	1.29	0.17	0.02	0
550	12.36	2.16	0.38	0.07	0.01
600	18.44	4.69	1.21	0.31	0.08
650	16.59	3.86	0.91	0.22	0.05
700	17.85	4.43	1.12	0.28	0.07

(b) P50重合硬化体					
波長 (nm)	試料厚さ (mm)				
	1	2	3	4	5
350	12.07	1.48	0.18	0.02	0
400	13.63	2.09	0.32	0.05	0.01
450	16.36	3.68	0.84	0.19	0.04
500	19.35	5.66	1.70	0.51	0.16
550	24.13	9.56	4.04	1.72	0.74
600	28.20	13.28	6.86	3.63	1.94
650	27.78	12.74	6.36	3.25	1.67
700	29.08	13.77	7.14	3.79	2.03

た。

考 察

コンポジットレジンのような粉体(フィラー)充填物では、多重散乱が光の性質を決定している¹²⁾。現在、粉体充填層の反射率及び透過率を求める研究は主として不連続層別法と微分層別法に大別されている¹²⁾。Kubelka-Munkの理論はそのうち後者に属している。その特長は、2常数(吸収係数と散乱係数)の意味がやや不明確で現象論的性格が強いものの、得られた式は一般的に実験結果の解析に適した簡単な形を取る長所を有している¹²⁾。Kubelka-Munkの理論を用いれば、コンポジットレジン^{2,3,5,6)}や焼付陶材⁷⁻⁹⁾の色調に及ぼす背景色や試料厚さの影響を明解に説明することができる。この理論はまた、コンポジットレジンの光透過性を評価するのに有効と考えられるが、この種の研究⁵⁾はこれまであまりなされてこなかった。本研究では、コンポジットレジンの光学的性質が未重合段階と重合段階でかなり異なり、光透過性に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。また、コンポジットレジンの光学的性質は入射光の波長によって著

しく異なることも明らかとなった。以下では、コンポジットレジン P50 の光学的性質に検討を加える目的で、個々の実験結果並びに解析結果に解説を試みてみる。

P50 未重合ペーストは光沢が無いために光を反射しにくく、一方 P50 重合硬化体は光沢を有するため光を反射しやすかった。両者は明らかに異なる表面反射の性質を有するため、反射率の粗データの校正には2つの異なる校正式を用いた。これらは、フレネル表面反射や表面散乱光等を考慮したものである³⁾。

本研究では、白色板を背景とする試料の拡散反射率と黒色板を背景とする試料の拡散反射率に差があるほど試料に光透過性があることが確認された。ところで、反射率(R)は試料の色調を決定する。UV-Visによって得られた反射率のデータは、CIE-L*a*b*等の色度座標¹³⁻¹⁶⁾等に換算可能である^{2,3)}。表3に示した Rinf はコンポジットレジン P50 の固有の色調を示す値である。各波長において、試料が Xinf 以下の厚さの場合、試料の光の反射は背景物体の光の反射に影響される。しかしながら、試料が Xinf 以上の厚さを有する場合、試料は固有反射率(Rinf)を示す。P50 硬化体の Rinf は、低波長域(青色)で小さく、中波長域(黄色)と高波長域(赤色)で大きい。光の反射による色調は黄色と赤色を混色した象牙色を呈することになる。

次に、拡散反射率から得られた吸収係数Kと散乱係数S(表1と2)の意味について検討を加えてみる。コンポジットレジン P50 未重合ペーストは2官能性モノマーの Bis-GMA と TEGDMA よりなるモノマー成分とハイブリット型純シリカ(SiO₂)粉とマイクロフィルド型結晶性ジルコニア(ZrO₂)粉の混合物よりなるフィラー成分によって構成されている。P50 は重合に伴い全波長領域において吸収係数Kの値が半減した。これは、モノマー成分の屈折率が重合によって上昇しフィラー成分の屈折率と近似し、その結果 P50 の吸収係数Kを減少させたためと思われる。両試料とも低波長域(400 nm 以下)で吸収係数Kの値が大きかった。これはフィラー中の重金属元素(Zr)の低波長光吸収作用に起因すると考えられる。一方、散乱係数Sはフィラーの粒径や分布によって決定されると考えられる。重合前後で散乱係数Sの値が変化しなかったのは、重合前後でフィラーに変化が生じなかったためと考えられる。なお、両試料とも散乱係数Sの値は中波長域(450-500 nm)で若干大きくなった。これはこの波長が丁度ジルコニアフィラーの粒径の2倍程度に相当し Rayleigh 散乱¹²⁾を生じたためと考えられる。光の波長がこの領域以下になると、

逆に光の散乱は起きにくくなる¹²⁾のも興味ある現象である。

図5に示したように、波長450 nm以上ではP50重合硬化体の理論光透過率は実測光透過率に極めて近似していた。前者は後者を若干上回っていたが、これはKubelka-Munkの理論の前提ではないとされた試料表面に平行な方向への光の損失が実際には生じたためと考えられる。波長450 nm以下ではP50重合硬化体の実測光透過率は理論光透過率をかなり下回っていた。これは、ジルコニアフィラーとシリカフィラー間で光の乱反射等が生じたためと考えられる。なお、コンポジットレジン中の光重合に必要な光の波長は光重合開始剤カンファーキノンの有効励起波長である470 nm前後である¹⁾。この波長域の光の透過性がコンポジットレジンの重合深度を決定している¹⁷⁻²²⁾。この波長域の光の透過性はKubelka-Munkの理論による推定が可能と考えられる。

表4に示したP50未重合ペーストと重合硬化体の理論光透過率のうち450 nm以上の波長を有する値は、厚さを1 mm以上に増加させても実測値と近似すると考えられる。また、表4はコンポジットレジンP50が重合するに伴い光透過性を増加させることを示唆している。この理由は前述の様に重合によってレジン成分の屈折率が変化し吸収係数を減少させたためと考えられる。高波長域の光に比べて低波長域の光の透過率が小さいのは、主としてフィラー起因の散乱現象と重金属元素(Zr)による光吸収作用によるものと思われる。経験的に、(40秒間の光照射で)光照射器を用いてコンポジットレジンに光重合させるためには、UV-Visの光透過率は未重合ペーストで約0.1%程度必要である。470 nm波長光がP50未重合ペーストで透過率約0.1%を示すのは、(450 nmと500 nmのデータで推定すると)約3.5 mmである。この値はP50の重合深度と一致するものである。

以上のように、Kubelka-Munkの理論は光重合型コンポジットレジンの光学的性質や光重合挙動を評価するのに極めて有用なことが明らかとなった。今後、Kubelka-Munkの理論を用いて試作光重合型コンポジットレジンの光学的性質について各種の検討を行う予定である。

結 論

光重合型コンポジットレジンP50の未重合ペーストと重合硬化体について、紫外可視分光光度計と積分球を用いて拡散反射率の測定を行い、Kubelka-Munkの2常数(吸収係数と散乱係数)理論から光学的性質に比較検討を加えた。得られた知見は以下の通りで

あった。

(1) 吸収係数の値は、未重合ペーストが重合硬化体を2倍程度上回った。散乱係数の値は、両試料で同程度であった。

(2) 重合硬化体の(拡散反射率の測定から推定された)理論光透過率は実測された光透過率と近似していた。

(3) P50は光重合に伴い光透過性が良好になることが示唆された。

参 考 文 献

- 1) Ruyter, I. E. and Oysaed, H.: Conversion in different depths of ultraviolet and visible light activated composite materials. *Acta. Odontol. Scand.* **40**, 179-192, 1982.
- 2) Miyagawa, Y., Powers, J.M. and O'brian, W.J.: Optical properties of direct restorative materials. *J. Dent. Res.* **60**, 890-894, 1981.
- 3) Cook, W. D. and Mcaree, D. C.: Optical properties of esthetic restorative materials and natural dentition. *J. Biomed. Mater. Res.* **19**, 469-488, 1985.
- 4) Kubelka, P.: New contributions to the optics of intensely light-scattering materials. Part I. *J. Opt. Soc. Amer.* **38**, 448-457, 1948.
- 5) Yeh, C.L., Powers J.M. and Miyagawa, Y.: Color of selected shades of composites by reflection spectrophotometry. *J. Dent. Res.* **61**, 1176-1179, 1982.
- 6) Miyagawa, Y. and Powers, J.M.: Prediction of color of an esthetic restorative material. *J. Dent. Res.* **62**, 581-584, 1983.
- 7) 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, 吸収係数の特性について—。補綴誌 **34**, 585-591, 1990.
- 8) 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—。補綴誌 **34**, 592-598, 1990.
- 9) 平安山英守: 陶材におけるKUBELKA-MUNK方程式による歯冠色の再現。日歯保誌 **36**, 1350-1367, 1993.
- 10) Wozniak, W. T., Siew, E. D., McGill, S. L., Sabri, Z. and Moser, J. B.: Color mixing in dental porcelain. *Dent. Mater.* **9**, 229-233, 1993.
- 11) 山内二郎, 尾本義一: 色彩科学ハンドブック。4版, 南江堂, 東京, 473-521, 1966.
- 12) 久保輝一郎, 水渡英二, 中川有三, 早川崇八郎: 粉体 理論と応用。2版, 丸善, 247-264, 1974.
- 13) 山崎信夫: 上顎前歯の色彩学的研究。日歯保誌 **29**, 81-94, 1986.

- 14) 石橋隆弘：歯の分光放射輝度率による色彩学的研究—上顎前歯部について—。補綴誌 33, 771-785, 1989.
- 15) 占部秀徳, 田中康晴, 松前 泉, 佐藤淳子, 佐藤尚毅, 新谷英章：各種修復材料の審美性に関する研究—シェードガイドと修復用コンポジットレジンとの比較—。日歯保誌 36, 341-346, 1993.
- 16) 齊藤 淳：無髄歯変色の機序とその漂白に関する基礎的研究。日歯保誌 36, 1783-1793, 1993.
- 17) 藤田 光, 並木勇次, 西山典宏, 勝木紘一, 堀江港三：光重合型コンポジットレジンに関する研究 その1 成分の屈折率と硬化深さとの関係。歯材器誌 4, 608-613, 1985.
- 18) 平林 茂：可視光線重合型コンポジットレジンの光透過性と重合性に及ぼすモノマー組成とフィラーの影響。歯材器誌 6, 481-495, 1987.
- 19) McCabe, J. F. and Carrick, T. E.: Output from visible-light-activation units and depth of cure of light-activated composites. *J. Dent. Res.* 68, 1534-1539, 1989.
- 20) 小松光一, 根本君也, 堀江港三：光重合型コンポジットレジンの光透過性に関する研究 その1：光透過率の経時的变化の測定。歯材器誌 9, 102-111, 1990.
- 21) Hirabayashi, S. and Hirasawa, T.: Improvements to light transmittance in light-cured composite resins by the utilisation of low refractive index dimethacrylate. *Dent. Mater. J.* 9, 203-214, 1990.
- 22) Kawaguchi, M., Fukushima, T. and Miyazaki, K.: The relationship between cure depth and transmission of visible-light-activated resin composites. *J. Dent. Res.* 73, 516-521, 1994.