閉鎖空間内にある材料の非接触測色法の提案

PROPOSAL OF NON-CONTACT COLORIMETRIC MEASUREMENT OF MATERIALS IN A CLOSED SPACE

磯見麻衣 ——— * 1 酒井英樹 ——— * 2
伊與田浩志 ——— * 3

Mai ISOMI ——— * 1 Hideki SAKAI ——— * 2
Hiroyuki IYOTA ——— * 3

キーワード：
測色, 閉鎖空間, 照射・受光条件, デジタルカメラ

Keywords:
Colorimetry, Closed space, Incident / receiving geometries, Digital camera

It was shown that the color of materials in a closed space can be measured from the outside of space under diffuse illuminations by using a concave glass as a partition. The measurement accuracy is $\Delta E_{ab}^* = 0.9$ in average for 24 colors of the standard color chart, where ΔE_{ab}^* is the color difference in $L^*a^*b^*$ (D65/2-deg.) color space of JIS Z8781-4. It is lower than that of the conventional colorimetry without a glass partition, in which the measurement accuracy is $\Delta E_{ab}^* = 0.7$ in average; it is, however, high enough compared to that of visual colorimetry.

1. はじめに

本研究では, 外気から遮断された空間内にある材料を, その外側から非接触で測色する方法を提案する。これは, 温度・湿度が材料に与える影響¹⁾を調べる際に, 調湿・調湿された容器内に材料を置き, 透明ガラス窓を通して容器外から測色することや, 歴史的に価値のある文化財の外観検査やデジタルアーカイブ²⁾を, 外気に触れて劣化させないように, 保存容器から取り出さずに行うことを念頭においたものである。

ここで, 材料を測色するには, 光を照射し, その材料表面で反射された光を受光する必要がある。そして, その際の照射・受光条件は, Fig.1 に示す (a) 45 度入射/垂直受光 (又は, 垂直入射/45 度受光) と (b) 拡散入射/垂直受光 (又は, 垂直入射/拡散受光) とが日本産業規格 JIS Z 8722^{3,4)}で定められており, 状況に応じて, どちらかを選択して測色することが求められる。

閉ざされた空間内にある材料を測色するには, 透明ガラスを通して光を照射することになるが, 高光沢である透明ガラス表面では, 照射した光の一部が正反射される。しかし, この正反射光は, 材料の色とは無関係である。よって, 測色する際は, この正反射光を避

けて, 材料表面からの反射光だけを受光する必要があるが, 正反射光は入射角と反射角が等しい, という性質があるため, Fig.2 (a) に示すように, 45 度入射/垂直受光であれば, ガラス表面の正反射光が受光されることはない。対して, Fig.2 (b) に示す拡散入射/垂直受光では, 一部の正反射光が受光される。つまり, ガラス表面に照射光源が映り込み, 材料表面の反射光の測定を妨害してしまう。そこで, 閉鎖空間内の材料の測色を行うには, 45 度入射/垂直受光が適している⁵⁾。

Fig. 2 The incident / receiving geometries through glass plate

ところが, 45 度入射/垂直受光の条件では, 平らな材料であれば問題なく測色できるが, 凹凸のある材料の場合, 1 つの入射角 (45 度) からの照射では, 凹凸による陰影が発生しやすく, その場合, 正しく測色できない。そこで, 通常であれば, 拡散入射/垂直受光, つまり, あらゆる入射角・方位角から光を照射し, 陰影を発生させずに測色することが可能だが, 上述の通り, ガラスを隔てた測色では, それができない。

そこで, 本研究では, この問題の解決策として, 空間を隔てるガ

Fig. 1 The incident / receiving geometries defined by JIS Z 8722

¹⁾ 大阪市立大学大学院生活科学研究科 大学院生・修士 (学術)
(〒 558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

²⁾ 大阪市立大学大学院生活科学研究科 教授・博士 (理学)

³⁾ 大阪市立大学大学院工学研究科 教授・博士 (工学)

¹⁾ Graduate Student, Graduate School of Human Life Science, Osaka City Univ., M.A.

²⁾ Prof., Graduate School of Human Life Science, Osaka City Univ., Dr.Sci.

³⁾ Prof., Graduate School of Engineering, Osaka City Univ., Dr.Eng.

ラスを凹状にすることで、拡散入射光を垂直方向以外に正反射させ、ガラス表面への光源の映り込みを抑制する方法を提案する。以下、本手法の妥当性を、理論的に検討したのち、実際に、凹状ガラスで空間を閉鎖し、その中に置かれた凹凸のある材料を測色した結果を報告する。

2. 理論

実験に先立ち、Fig. 2(b) 拡散入射／垂直受光において、空間を隔てるガラスがどのような形状であれば、ガラス表面への光源の映り込みを抑制することができるかを、光線軌跡を可視化できる光学シミュレーションソフト OpticalRayTracer⁶⁾を用いて検討した。まず、測定試料を封入する容器として直径 100 mm、高さ 20 mm の円筒形シャーレを仮定し、その容器全体を照射するための積分球（内壁に無光沢の白色塗料が塗布された球体で内部に均一な拡散光を生成する光学部品）として、直径 300 mm の半球体を仮定した。また、受光方法については、容器の垂直上方となる積分球の天頂部分に直径 30 mm の観察口があり、さらにその上方 50 mm の位置に受光器（カメラ）がある、と仮定した。

以上の条件で、容器の蓋のガラス形状として、(a) 平面状、(b) 曲率半径 200 mm の凹状の場合について、仮想的に受光器の位置に点光源を置き、光線がガラス表面で正反射される様子を計算した。なお、曲率半径 200 mm は、凹状ガラスからの正反射光の焦点が受光器の位置付近となるように設定した。その結果、Fig. 3 に示す通り、(a) 平面状では一部の光線が積分球内壁に到達した。これは、受光器の位置から観察した場合、積分球内壁がガラス表面に映り込むことを意味する。一方、(b) 凹状では全ての光線が受光器の位置に戻った。しかし、実際には受光器からは光は出ないので、ガラスには映ることはない。よって、ガラスはあたかも存在していないかのごとく、容器内の試料からの反射光だけが受光器に届くことになる。

以上、光学シミュレーションにより、空間を隔てるガラスを、受光器を焦点とする曲率を持った凹状とすることで、ガラス表面への照射光源の映り込みが抑制できることを確認した。

Fig. 3 Specular-component ray trajectories of virtual point source at camera

3. 実験方法

3.1 装置

2 章の理論に基づいて設計した閉ざされた空間内にある試料を測色する装置（断面図）を Fig. 4 に示す。拡散光を生成する積分球として、直径 300 mm のアクリル樹脂製の球体の内壁を白色塗料で塗布したものを作製し、LED ランプで積分球中心照度が 2,000 lx になる

ように調光した。積分球の形状は半球であるが、その底面部分に反射鏡を設置することで、下半球面を鏡像とする積分球としている。そして、テープ状の高演色白色 LED ランプ（相関色温度 6,200 K、平均演色評価数 Ra=90）を底面周囲の内壁を一周するように配し、LED からの直接光が試料に照射されないように障壁を設置することで、均一な拡散光照明を実現した⁷⁾。次に、容器として、底面中央に、直径 91 mm、高さ 21 mm のソーダ石灰ガラス製シャーレを設置し、その中に色補正用の標準色票と測定試料を入れた。また、外気から遮断された空間を作るための蓋には、同じくソーダ石灰ガラス製の直径 106 mm、ガラス厚み 2 mm、曲率半径 200 mm の時計皿を用いた。さらに比較用に、ソーダ石灰ガラス製の直径 96 mm、ガラス厚み 2 mm の平面ガラスも蓋として用いた^{注1)}。そして、受光器には、一眼レフデジタルカメラ Nikon D5100（ズームレンズ AF-S NIKKOR 18-55mm F3.5-5.6 G II ED を焦点距離 55 mm に固定し使用）を用いて、積分球の天頂部の直径 30 mm の観察口の上方 50 mm に設置した。そして、撮影は、被写界深度⁷⁾が最大となるように絞り値をレンズ上限の F36.0 とし、適正露出となるシャッター速度 1/1.3 秒で RAW 撮影（4928×3264 画素）した後、画像サイズを半分に縮小し、非圧縮の TIFF 形式（2464×1632 画素）に変換した。変換後の撮影画像の 21.72 画素が、1.0 mm に相当する。

Fig. 4 Setup of hemi-spherical diffuse illumination

ここで、デジタルカメラは、測色器として市販されているものではない。しかし、均一な照明の下で撮影し、適切に色補正を行えば、高解像度の測色画像が色彩計と同程度の精度で得られることから、近年、色分布の測定（2次元測色）に広く使われている^{8,9)}。色補正の方法はいくつかあるが⁴⁾、本研究では、伊與田ら¹⁰⁾の画像処理方法として、シェーディング補正（明るさ補正）と RGB 色補正の 2 段階補正を採用した。

まず、シェーディング補正として、試料の代わりに、無光沢白色紙を撮影し、その撮影画像の RGB 値から、ガラスを透過することによる照明の不均一性（ガラスがある場合）や、色温度、レンズの周辺光量の減衰を原因とする明るさの不均一さを補正するための係数を画素ごとに算出する。そして、これ以降撮影した画像には、すべて補正係数を画素ごとに掛けることで、均一な明るさの照明光の下で撮影された画像となる補正を行う。（シェーディング補正の計算式は、文献 10 の 2.2.1 節を参照のこと。）

次に RGB 色補正として、試料を撮影する際は、Fig. 4 に示すように、試料横に標準色票（Image Science 社の色補正用色票 ColorGauge

Nano^{注2)}を置いて撮影し、シェーディング補正を行った後、画像内の標準色票24色が、色票の規格RGB値になるように画像全体を色補正する。(RGB色補正の計算式は、文献10の2.2.2節を参照のこと。)

このようにして得られる補正後の画像は、各画素のRGB値が測色値sRGBとなっており、各種表色系に変換可能であるが、本研究ではこれをJIS X9204¹¹⁾に基づいて色の三刺激値XYZに変換し、さらに、JIS Z8781-4¹²⁾の変換式を使って、 $L^*a^*b^*$ 値(D65光/2°視野)に変換した。色表示としてD65光と2°視野を採用した理由は、今回使用した色補正用色票が、その条件で規格化されているためである。また、 $L^*a^*b^*$ 表色系を採用した理由は、色差式が簡便であり、測色精度の議論がしやすいためである。これら色の表示方法は、本研究で提案する閉鎖空間内の非接触測色法の必須条件ではなく、必要に応じて自由に選択することができる。

3.2 測定条件・試料

本研究では次の3通りの条件で測色を行った。条件1は蓋のない開放条件、条件2は平面状ガラスで蓋をした従来の閉鎖条件(以下、平面ガラス閉鎖条件)、条件3は本研究で提案する凹状ガラスで蓋をした閉鎖条件(以下、凹状ガラス閉鎖条件)で、それぞれ測色精度を検証するために、色補正に用いた標準色票と同じ色票をもう1つ用意し、それを試料として測定した。Fig.5が実際に撮影した画像の例(条件1、色補正後)であり、試料として測定したFig.5右の色票24色それぞれについて、直径1.5mmの円内に含まれる1,009画素(白抜き箇所)の平均 $L^*a^*b^*$ 値を算出し、標準色票24色の基準値(standard, std)との色差 ΔE^*_{ab} を次式(1)で計算した。

$$\Delta E^*_{ab} = \{ (L^* - L^*_{std})^2 + (a^* - a^*_{std})^2 + (b^* - b^*_{std})^2 \}^{0.5} \quad (1)$$

また、測定事例として、凹凸のある白色壁紙(アサヒペン・塩化ビニル樹脂補修用カベ紙、品番HK-15)と同じく凹凸のある灰色塗膜(アサヒペン・黒色ストーン調塗料に、ニッペホームプロダクツ・ダークグレー合成樹脂塗料を重ね塗りしたもの)を3片ずつ用意し、測色を行った。そして、接触式色彩計コニカミノルタCM-2600d(拡散入射/垂直受光、D65光/2°視野、測定径8mm)で測色した値と比較した。

4. 結果及び考察

4.1 開放条件(条件1)

Table 1に蓋のない開放条件で、試料として測定した色票24色の

Fig. 5 Example of color-corrected image of condition 1 (no glass)

Table 1 Results of measurement accuracy of condition 1
(no glass)

ColorGauge 24 colors $L^*a^*b^*$ values					Results with no glass			Color diff.	
No.	color name	L^* std	a^* std	b^* std	L^* no	a^* no	b^* no	$\Delta E^*_{ab,no}$	
1	dark skin	38.0	11.8	13.7	38.0	12.3	13.3	0.7	
2	light skin	65.7	13.7	16.9	65.5	14.1	16.8	0.5	
3	blue sky	50.6	0.4	-21.6	50.5	0.5	-21.8	0.2	
4	foliage	43.0	-15.9	20.5	43.4	-16.1	21.5	1.1	
5	blue flower	55.7	12.8	-25.2	55.7	12.8	-25.0	0.1	
6	bluish green	71.0	-30.6	1.5	70.8	-30.3	1.4	0.5	
7	orange	61.1	28.1	56.1	61.0	29.2	55.5	1.3	
8	purplish blue	41.1	17.4	-41.9	41.1	17.6	-42.3	0.4	
9	moderate red	51.3	42.1	14.9	51.0	42.3	15.0	0.3	
10	purple	31.1	24.4	-22.1	31.0	24.5	-22.7	0.6	
11	yellow green	71.9	-28.1	57.0	72.6	-27.6	58.0	1.3	
12	orange yellow	71.0	12.6	64.9	71.1	12.2	65.8	1.0	
13	blue	30.4	26.4	-49.7	29.7	26.7	-50.4	1.0	
14	green	55.0	-40.1	32.3	55.1	-40.6	32.7	0.6	
15	red	41.3	49.3	24.7	40.7	48.9	25.3	1.0	
16	yellow	80.7	-3.7	77.6	80.3	-3.8	77.2	0.5	
17	magenta	51.1	48.2	-15.3	51.1	47.4	-15.8	0.9	
18	cyan	51.2	-19.7	-23.4	51.6	-19.7	-23.1	0.5	
19	white(N9.5)	95.8	-0.2	0.5	95.1	-0.1	0.5	0.7	
20	N8.2	82.8	0.0	0.0	82.9	0.0	0.3	0.3	
21	N6.8	69.2	0.0	0.0	69.0	-0.2	0.0	0.3	
22	N5.5	55.9	0.0	0.0	55.8	-0.1	0.4	0.5	
23	N3.1	31.5	0.0	0.0	31.1	0.1	-0.3	0.4	
24	black(N2.1)	21.7	0.0	0.0	20.9	0.0	0.0	0.8	
								Max.	1.3
								Min.	0.1
								Ave.	0.7

測色値 L^*_{no} , a^*_{no} , b^*_{no} と、標準色票の基準値との色差 $\Delta E^*_{ab, no}$ を示す。色差の最大はNo.7 橙 (orange)とNo.11 黄緑 (yellow green)の1.3で、他の色はほぼ1.0以下に収まっており、24色の平均色差は0.7であった。このように基準値からの色差は非常に小さく、本実験の色補正が正しく行われていることが確認できた。

4.2 平面ガラス閉鎖条件(条件2)

次に、Table 2に平面ガラスで蓋をした閉鎖条件での色票24色の測色値 L^*_{fl} , a^*_{fl} , b^*_{fl} と、標準色票の基準値との色差 $\Delta E^*_{ab, fl}$ を示す。Fig.3(a)の光学シミュレーション結果の通り、この条件では、ガラス面で正反射された積分球内壁からの照射光が、試料面からの反射光に混入する。基準値との色差は24色の平均では2.8であるが、No.3 空色 (blue sky)とNo.4 葉色 (foliage)では色差が10を超えており、正しく色補正されていない。よって、拡散入射による平面ガラスを通しての材料の高精度の測色は困難であることがわかる。

4.3 凹状ガラス閉鎖条件(条件3)

次に、Table 3に本研究で提案する凹状ガラスで蓋をした閉鎖条件での色票24色の測色値 L^*_{wa} , a^*_{wa} , b^*_{wa} と、標準色票の基準値との色差 $\Delta E^*_{ab, wa}$ を示す。No.14 緑 (green)が2.3, No.24 黒 (black)が2.2となり、色差2を超えたが、他の色はほぼ1.0程度に収まっており、24色の平均色差は0.9であった。このように、開放条件(条件1)と比べると、色差が大きくなるものの、色差2程度の精度は期待できることが確認できた。よって、本測色法を、従来困難であった閉ざされた空間内の材料を、その外側から測色する方法として提案する。

Table 2 Results of measurement accuracy of condition 2
(flat glass)

ColorGauge 24 colors $L^*a^*b^*$ values					Results with flat glass			Color diff.
No.	color name	L^* std	a^* std	b^* std	L^* fl	a^* fl	b^* fl	$\Delta E^*_{ab, fl}$
1	dark skin	38.0	11.8	13.7	36.7	10.7	14.3	1.8
2	light skin	65.7	13.7	16.9	65.0	16.1	16.6	2.5
3	blue sky	50.6	0.4	-21.6	40.3	-0.7	-27.7	12.0
4	foliage	43.0	-15.9	20.5	29.3	-18.7	28.3	16.0
5	blue flower	55.7	12.8	-25.2	52.9	12.7	-25.8	2.8
6	bluish green	71.0	-30.6	1.5	70.3	-29.5	1.0	1.4
7	orange	61.1	28.1	56.1	60.9	28.4	55.8	0.5
8	purplish blue	41.1	17.4	-41.9	40.8	16.4	-42.0	1.1
9	moderate red	51.3	42.1	14.9	51.0	42.2	15.7	0.9
10	purple	31.1	24.4	-22.1	30.8	22.9	-21.0	1.8
11	yellow green	71.9	-28.1	57.0	72.6	-27.5	57.8	1.2
12	orange yellow	71.0	12.6	64.9	71.4	9.1	65.5	3.6
13	blue	30.4	26.4	-49.7	33.4	23.1	-45.8	5.9
14	green	55.0	-40.1	32.3	54.6	-36.4	29.5	4.7
15	red	41.3	49.3	24.7	40.6	48.1	24.2	1.5
16	yellow	80.7	-3.7	77.6	80.0	-3.9	76.7	1.1
17	magenta	51.1	48.2	-15.3	50.9	47.1	-14.9	1.2
18	cyan	51.2	-19.7	-23.4	50.5	-18.2	-24.4	1.9
19	white(N9.5)	95.8	-0.2	0.5	95.1	-0.1	0.6	0.7
20	N8.2	82.8	0.0	0.0	82.6	0.1	0.0	0.1
21	N6.8	69.2	0.0	0.0	68.4	-0.1	-0.1	0.8
22	N5.5	55.9	0.0	0.0	55.5	0.1	-0.2	0.5
23	N3.1	31.5	0.0	0.0	30.2	1.1	-1.1	2.0
24	black(N2.1)	21.7	0.0	0.0	21.4	0.9	-0.9	1.3
Max.							16.0	
Min.							0.1	
Ave.							2.8	

Table 3 Results of measurement accuracy of condition 3
(concave watch glass)

ColorGauge 24 colors $L^*a^*b^*$ values					Results with watch glass			Color diff.
No.	color name	L^* std	a^* std	b^* std	L^* wa	a^* wa	b^* wa	$\Delta E^*_{ab, wa}$
1	dark skin	38.0	11.8	13.7	37.6	12.0	13.1	0.7
2	light skin	65.7	13.7	16.9	65.4	14.2	16.7	0.6
3	blue sky	50.6	0.4	-21.6	50.4	0.3	-21.5	0.3
4	foliage	43.0	-15.9	20.5	43.2	-16.3	21.2	0.9
5	blue flower	55.7	12.8	-25.2	55.4	13.1	-25.3	0.4
6	bluish green	71.0	-30.6	1.5	70.7	-30.3	1.2	0.5
7	orange	61.1	28.1	56.1	60.7	29.6	55.5	1.6
8	purplish blue	41.1	17.4	-41.9	40.6	17.6	-42.6	0.9
9	moderate red	51.3	42.1	14.9	50.9	42.7	14.9	0.7
10	purple	31.1	24.4	-22.1	31.0	24.0	-22.1	0.4
11	yellow green	71.9	-28.1	57.0	72.4	-27.5	57.9	1.2
12	orange yellow	71.0	12.6	64.9	71.1	12.3	65.5	0.7
13	blue	30.4	26.4	-49.7	29.0	26.2	-50.3	1.5
14	green	55.0	-40.1	32.3	54.0	-41.7	33.6	2.3
15	red	41.3	49.3	24.7	40.1	48.5	25.6	1.7
16	yellow	80.7	-3.7	77.6	80.2	-3.9	76.9	0.9
17	magenta	51.1	48.2	-15.3	50.8	47.3	-15.8	1.0
18	cyan	51.2	-19.7	-23.4	51.3	-19.8	-23.2	0.2
19	white(N9.5)	95.8	-0.2	0.5	95.2	-0.1	0.5	0.7
20	N8.2	82.8	0.0	0.0	82.7	0.1	-0.1	0.1
21	N6.8	69.2	0.0	0.0	68.9	-0.5	0.0	0.6
22	N5.5	55.9	0.0	0.0	55.8	-0.1	0.6	0.7
23	N3.1	31.5	0.0	0.0	30.6	-0.3	-0.1	0.9
24	black(N2.1)	21.7	0.0	0.0	19.5	-0.2	0.0	2.2
Max.								2.3
Min.								0.1
Ave.								0.9

なお、開放条件と比べて色差がわずかに大きくなった原因としては、Table 3 より、基準値との色差が大きい色票は、 L^* 値が 1 程度低く測定される傾向があることから、凹状ガラス（透過率 0.93、実測値）を透過することで照射光、反射光とも開放条件よりも目減りした影響や、相対的にノイズが増加したことなどが考えられる。よって、照射光の光量を増強する、凹状ガラスを薄くする、透過率の高い石英ガラス製にする、反射防止コーティングを施す、などすることで、測定精度が改善する可能性がある。

5. 測定事例

最後に、実際の材料を使った検証として、条件 1 の開放条件と条件 3 の凹状ガラス閉鎖条件とで、白色壁紙と灰色塗膜を測色し、市販の接触式色彩計で測色した結果と比較した。3.2 節の説明の通り、これらの材料表面には凹凸があり、45 度入射／垂直受光では、材料本来の色が測定できない試料である。

Fig. 6 に条件 3 で撮影した際の色補正後の画像例を示す。壁紙、塗膜とも 20 mm × 30 mm の大きさで、それぞれ 3 片用意し、壁紙と塗膜を 1 つずつセットで撮影した。次に、各試料を容器から取り出して、色彩計（コニカミノルタ CM-2600d）で測定径 8 mm の円状の領域（Fig. 6 の赤丸で印す中央部分）を測色した。そして、測色画像から同じ 8 mm の円状の領域に含まれる 23,769 画素の平均 $L^*a^*b^*$ 値を計算した結果と比較した。その結果を Table 4 に示す。

Fig. 6 Example of color-corrected image of condition 3
(concave watch glass)

Table 4 Comparison of measured results of condition 1 (no glass) and condition 3 (concave watch glass) with those of colorimeter

Condition Samples	Proposed method			Colorimeter			Color diff.	
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*	ΔE^*_{ab}	Ave.
Con1: No glass								
Wall paper 1	93.7	0.1	2.1	93.9	-0.5	3.7	1.8	
Wall paper 2	93.5	0.0	2.0	94.0	-0.5	3.6	1.8	1.7
Wall paper 3	93.3	0.0	2.2	93.8	-0.5	3.5	1.5	
Gray paint 1	45.7	-0.2	-2.4	47.8	-1.1	-4.0	2.7	
Gray paint 2	44.7	0.6	-4.0	46.2	-1.0	-4.0	2.3	2.5
Gray paint 3	45.4	0.1	-3.1	47.2	-1.0	-4.0	2.4	
Con3: Concave watch glass								
Wall paper 1	93.8	-0.1	2.1	93.9	-0.5	3.7	1.7	
Wall paper 2	93.6	0.0	2.0	94.0	-0.5	3.6	1.7	1.7
Wall paper 3	93.7	0.0	2.0	93.8	-0.5	3.5	1.7	
Gray paint 1	45.5	0.4	-2.8	47.8	-1.1	-4.0	3.0	
Gray paint 2	44.4	0.5	-3.8	46.2	-1.0	-4.0	2.4	2.7
Gray paint 3	45.1	0.5	-3.3	47.2	-1.0	-4.0	2.7	

Table 4 より、条件 1（開放条件）と色彩計との色差は、壁紙 3 片の平均で 1.7、塗膜 3 片の平均で 2.5 であった。条件 3（凹状ガラス閉鎖条件）と色彩計との色差は、壁紙 3 片の平均で 1.7、塗膜 3 片の平均で 2.7 であった。以上のことから、本研究で提案する測色法は、市販の色彩計とも良い一致を示した。

6. まとめ

本研究では、閉鎖空間内の材料をその外側から非接触で測色する方法を示した。空間を隔てるガラスを凹状にし、受光器をその凹状ガラス面の焦点に配置することで、拡散入射／垂直受光の条件での測色を可能とする。測色精度は、標準色票に含まれる 24 色に対して平均色差 0.9、最大色差 2.3 であった。これは、ガラスを隔てない通常の測色（平均色差 0.7、最大色差 1.3）には及ばないものの、視感測色^{13,14)}に比べると高精度での機器測色が可能である。

注

- 注1) 本実験で使用したガラス器具類は、化学実験用として一般に市販されている製品の中から、Fig. 3 の光学シミュレーションで仮定した寸法に近いものを選んだ。ただし、曲率半径は、時計皿本来の機能と関係がないこともあり、製品仕様書には記載されていなかった。よって、曲率半径を指定して入手することは難しく、異なる曲率半径の凹状ガラスを使用する場合は、その焦点位置に、受光器を設置する必要がある。
- 注2) 色補正用色票としては X-Rite 社の ColorChecker が広く使われているが、ColorGauge Nano は Image Science 社のブランドで販売されている ColorChecker の小型版（17.5 mm × 20.7 mm）である。なお、ColorGauge には無彩色 6 色が追加収録されているが、本研究では追加分は使用せず ColorChecker に相当する 24 色のみを利用した。

参考文献

- 川村政史、笠井芳夫：ソイルセメントコンクリート製造のための土の見掛けの表乾状態試験方法に関する実験研究、コンクリート工学論文集、第 7 巻、第 1 号、pp. 103-112, 1996. 1
- 鈴木卓治：「デジタルアーカイブ」とは何か、日本色彩学会誌、第 31 巻、第 4 号、pp. 280-285, 2007. 12
- 日本産業規格：JIS Z8722：2009 色の測定方法-反射及び透過物体色、2009. 3
- 酒井英樹：色を測る：色彩研究における科学的手法(10)食品の色を測る、日本色彩学会誌、第 39 巻、第 6 号、pp. 239-245, 2015. 11
- Nakamori, Y., Iyota, H., Sakai, H., Matsumoto, T., Nomura, S.: Color Monitoring Method under High Temperature during Oven Cooking, Proc. of AIC2015 (Midterm Meeting of the International Colour Association), pp. 856-860, 2015. 5
- OpticalRayTracer Ver.9.6, <https://arachnoid.com/OpticalRayTracer/> (Accessed 2020-10-28)
- Isomi, M., Sakai, H., Watanabe, T.: MEASUREMENT OF WET COLOR CHANGE OF BRICKS DURING DRYING, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.85, No.777, pp.1367-1373, 2020.11 (in Japanese)
磯見麻衣、酒井英樹、渡部嗣道：濡れレンガの乾燥過程における色調変化の測定、日本建築学会構造系論文集、第 85 巻、第 777 号、pp. 1367-1373, 2020. 11
- Orava, J., Jaaskelainen, T., Parkkinen, J.: Color errors of digital cameras, Color research and application, Vol.29, No.3, pp. 217-221, 2004. 6
- 浦野祐嗣、小峯秀雄、安原一哉、村上哲：デジタルカメラを用いた新しい色彩測定方法と建築材料用石材の色彩評価指標値の提案、土木学会論文集 C、第 62 巻、第 4 号、pp. 793-802, 2006. 12
- 伊與田浩志、酒井英樹、高砂裕行、島田秀弥：デジタルカメラを用いた食品の焼き色評価装置の開発、日本食品工学会誌、第 11 巻、第 4 号、pp. 203-213, 2010. 12
- 日本産業規格：JIS X9204：2004 高精細カラーディジタル標準画像（XYZ/SCID），2004. 12
- 日本産業規格：JIS Z8781-4：2013 測色－第 4 部：CIE1976 $L^*a^*b^*$ 色空間，2013. 12
- 日本色彩研究所編：色彩ワンポイント 2 色彩管理の基礎、日本規格協会、pp. 78-79, 1993
- 小松原仁：色を測る：色彩研究における科学的手法(5)視感測色の実際、日本色彩学会誌、第 39 巻、第 1 号、pp. 30-34, 2015. 1

[2021 年 2 月 2 日原稿受理 2021 年 4 月 5 日採用決定]