

連載：色を測る — 色彩研究における科学的手法 —

(4) 測色機器を使いこなそう

(4) Using instruments for precise color evaluation

鳴瀬 一彦 Kazuhiko Naruse

コニカミノルタ株式会社

KONICA MINOLTA, INC.

はじめに

「色を測る」の連載のボタンを受けて、今回は明るさ、色を測定するための計測機器のお話をさせていただきます。その中で測定する際に気を付けていただきたい点を記載させていただきますので、読者の方々が計測機器をうまく使って、必要な色彩情報を正確に手に入れていただくことのお役に立てればと思います。

色に対する人間の感度

人間は目に入ってくる光によって、明るさおよび色の感覚を生じて明るさや色の違いを認識することができます。心理量である感覚を引き起こす刺激量を測定することで明るさや色の違いを物理量として捉えて、数値化しようという目的で測光機器、測色機器が作られています。

色に関して、人間には網膜に赤、緑および青の光に反応する3種類の錐状体の視神経があり、この錐状体によって発生する刺激量によって色を判別するようになっています。

図1は人間の目の感度を表すため、国際照明委員会が定めた等色関数 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ を示しています。この感度の中の $\bar{y}(\lambda)$ は明るさの感度を表す標準分光視感効率 $V(\lambda)$ と同じになるように定義されています。

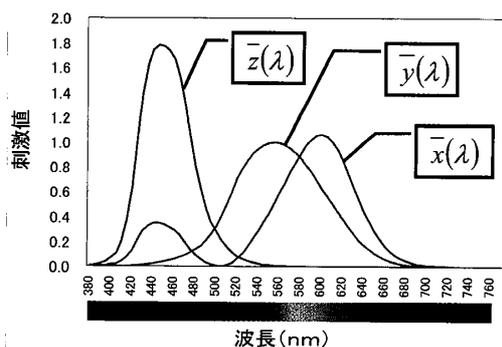


図1 人間の目に対応する分光感度(等色関数)

測色機器のセンサによる分類

色を計測する測色機器は、光を色として検出する受光器の方式によって以下の2つに分類されます。

1) 刺激値直読方式(光学フィルタ方式)

センサの前に複数枚のフィルタを配置して、人間の目の等色関数 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ に近似させた感度を持つ3つのセンサ出力から、人間の感じる刺激量である三刺激値 X 、 Y 、 Z を直接測る方式です。この方式は、構成が比較的簡単であり、一般的に小型化が可能で、低コストを実現することが可能となります。また、測定スピードが速いという特徴もあります。

しかしながら、フィルタの分光透過率を精度よくコントロールすることには限界があるため、等色関数からの誤差が生じてしまうことから、測定精度としては分光方式に比べると劣ることになります。

図2はセンサの分光応答度特性を示したものであり、図3、図4、図5は等色関数 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 用にそれぞれ使用される複数のフィルタの分光透過率を示したものです。

2) 分光方式

測色機器に入射する光を回折格子などの分光手段を用いて分光し、波長別にリニアセンサ上に集光させます。この出力から、測定する光の分光放射エネルギー分布を得た後に、等色関数を掛け合わせることで、三

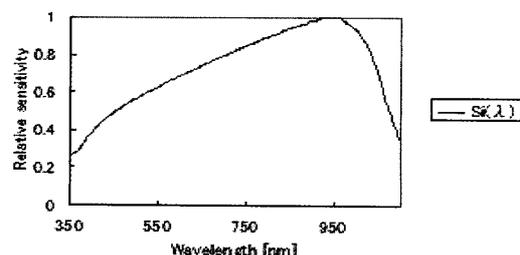
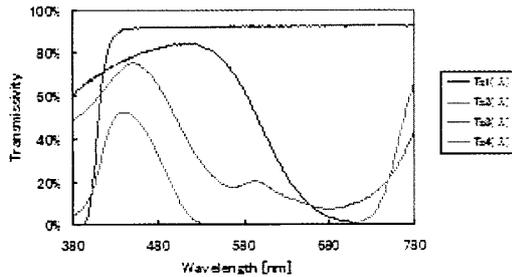
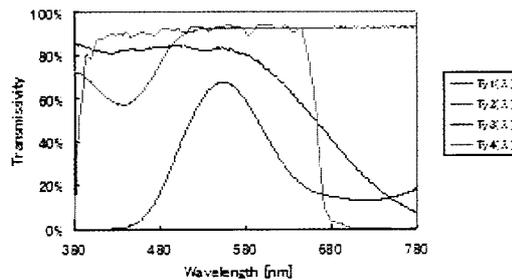
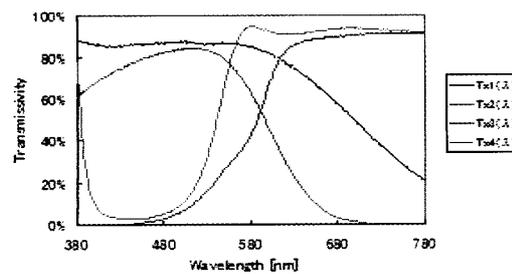


図2 シリコンフォトセンサの分光応答度特性

図3 $\bar{z}(\lambda)$ 用フィルタ分光透過率図4 $\bar{y}(\lambda)$ 用フィルタ分光透過率図5 $\bar{x}(\lambda)$ 用フィルタ分光透過率

刺激値 X , Y , Z を数値処理によって導き出します。測色機器の分光応答度を等色関数に一致させることが容易であり、高い測定精度を実現することが可能となります。反面光学系の構成が複雑となり、一般的に大型で高価格な測定機器となります。図6に分光型輝度計の光学系の一例を示します。

測色機器の測定対象による分類

測色機器は測定する対象物によって、光源色用測色機器と物体色用測色機器に分類することができます。

1) 光源色用測色機器

測定対象としては自らが発光する光源であり、自然昼光、白熱電球、蛍光灯、LED、有機EL、レーザーから、液晶ディスプレイ、有機ELディスプレイ、PDPディスプレイ等までが測定対象となります。

光源色用測色機器は国家標準機関の基準に準拠(トレーサビリティの確保)させるために、国家認定機関

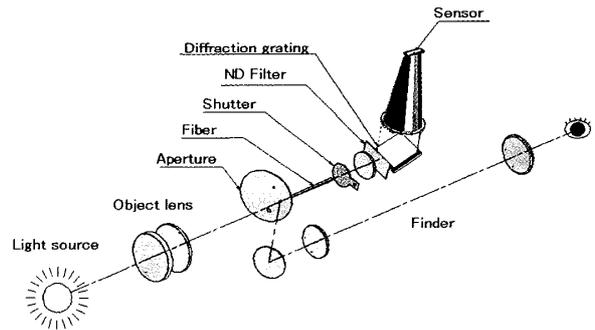


図6 分光型輝度計の光学系の構成の一例

が供給する光度及び分光分布基準値が値付けされた標準電球を用いて、1台ずつ測定値が基準値と一致するように校正されています。

また、分光方式のセンサを採用しています分光放射輝度計及び分光放射照度計においては、波長方向に対してもトレーサビリティを確保させるために、国際度量衡委員会で定義された輝線波長を有する光源を測定して、測定された輝線の波長と、輝線として値付けされている波長が一致するように校正がされています。

2) 物体色用測色機器

物体色用測色機器は、ある分光放射エネルギー分布をもった光で物体を照射したとき、その物体の分光反射特性に応じた反射光によって発生する色刺激量を測定することで、物体の色を数値化します。

光源色用測色機器と異なるのは、光源色は標準光源によって校正されますが、物体色は基準となる白色との対比として数値化されるということです。三刺激値 X , Y , Z の計算過程では、同一の照明、受光条件における仮想的な完全拡散面の反射光との比として定義される分光反射率 $R(\lambda)$ を含んでいます。

また、照明光の相対分光放射エネルギー分布にも影響されるため、同じ物体であっても、照明光が異なれば、違った色として認識されてしまいます。その意味で、測定に際しては、光源色用測色機器とは違った注意点が発生します。

以下、光源色用測色機器および物体色用測色機器で

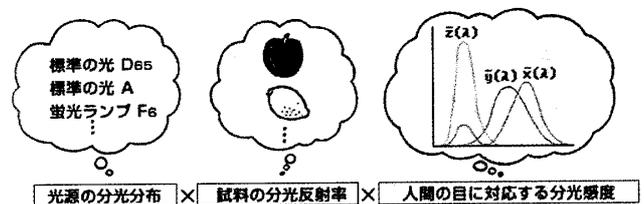


図7 物体の色の数値化

測定する場合の注意点を記載いたします。

光源色用測色機器の測定での注意すべき点

1) 光学フィルタ方式での等色関数からの感度ズレ

前述したように、刺激値直読方式の測色機器ではセンサ感度を等色関数に完全に合わせ込むことは難しいと言えます。これらの機器は、白熱電球と同じタイプの標準光源で校正を行いますので、測定対象となる光源の分光放射エネルギー分布が人間の知覚できる波長領域内でなだらかである場合には、問題ない精度レベルで測定ができます。しかし、3波長型蛍光灯や水銀灯、最近ではLED電球のような分光放射エネルギー分布の中に鋭いピーク波長を持つような光源では、センサ感度のズレによって、測定した値が大きな誤差(異色測光誤差)を持つことがあります。図8は、感度ズレにより発生する誤差について説明した図です。ここでは、等色関数の $\bar{y}(\lambda)$ (標準分光視感効率 $V(\lambda)$)を例にして、説明しています。

ここで発生する誤差は、測定される光源が同じ場合には、いつも同じ比率で発生することになりますので、一度分光放射輝度計等で光源の測定を行い、補正係数を事前に求めておき、次回からの測定値に補正係数を掛け合わせる事で、精度のよい測定値を算出することができます。今回は $\bar{y}(\lambda)$ で説明しましたが、同様に $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ でも同じように補正係数を求めておく事で、精度よく三刺激値を求めることができ、精度のよい色彩の測定が可能となります。

ここで注意しなければならないこととして、最近照明として使用されることが多くなってきていますLED照明では、照射する光の波長がLED素子の接合部(ジャンクション)温度によって変動することがあるという事です。LED素子を測定するたびに、ジャンクション温度が変化するような場合には、照射する光の波長

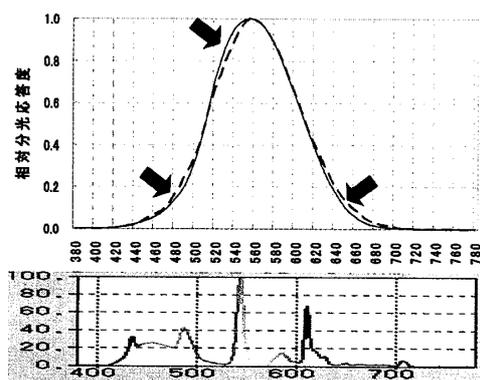


図8 分光視感効率 $V(\lambda)$ からの感度ズレ

が変化してしまいますので、前述した補正係数では完全に補正しきれない状況が起きることになります。このようなLED照明を精度よく測定するには、分光方式の光源色用測色機器を使用されることをお勧めします。

2) 斜め入射光特性からのズレ(照度計のみ)

次に説明します斜め入射特性は、照度を測定する場合に注意すべき特性です。照度とは、測定したい平面に照射される光の明るさを表す数値であり、定義としては、測定したい面の単位面積当たりに入射する光束となります。

あらゆる方向から同じ強さ(光束)の光が入射している場合、受光面となす角 θ から入射する光の照度と、垂直に入射する光の照度には、コサインの関係があります。これを斜め入射特性と言います。

受光面に対して角度 θ で入射した光は $\cos\theta$ の重みを持つことになります。これと同じ光学特性を照度計でも再現する必要があります。図10に示すような受光ブロックの構成となっています。ただ、斜め入射特性を完璧に $\cos\theta$ の重みと同じにすることは難しく、図11に示すような斜め入射特性誤差が発生してしまいます。

測定したい平面の明るさ(照度)または色彩照度を測定する場合には、受光センサが向いている 180° 方向から照射されるあらゆる光を測定する事になりますので、測定する光源からの光が壁や測定する人に反射して受光センサに入射しないように気を付けるとともに、壁

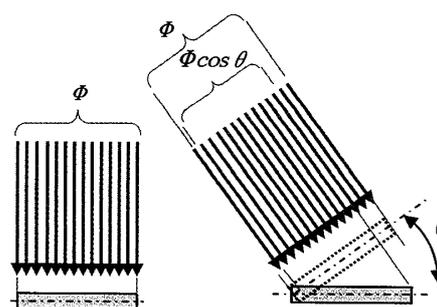


図9 斜め入射特性

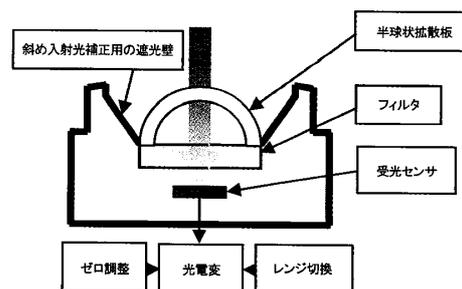


図10 受光ブロック

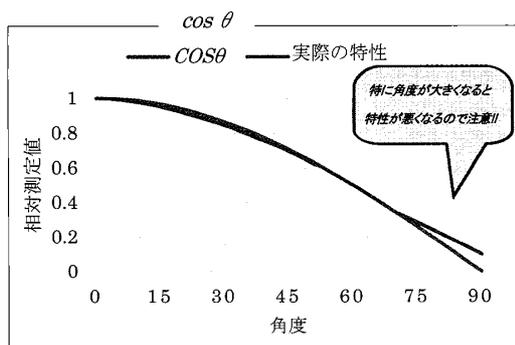


図11 斜め入射特性誤差

や測定者の服装は、できるだけ反射率の低いものを採用することが必要です。

3) 入射光に対する出力の直線性

刺激値直読型の測色機器の受光センサとしてはシリコンフォトセルが多く使用されており、このシリコンフォトセルの感度は、図2に示されているように、人間の知覚領域である380nm～780nm(可視波長領域)を十分にカバーできる波長範囲の300nm～1200nmに感度を有しております。また、明るさに対する感度に関しても5～6ディケード(5～6桁)あり、非常に使用し易いセンサであると言えます。しかしながら、測定しようとする明るさの範囲がこの感度範囲を超える場合があり、非常に明るい場合には入射する光束に対するセンサ出力が直線性を示さないことがあります。また、測定しようとする暗黒の明るさがセンサで忠実に測定できないような領域も存在します。図12は、この直線性誤差を示した図です。

基本的に計測機器のスペック表に記載されている明るさの範囲内で測定することが必要ですが、万一、仕様書に記載されている以上の高照度または高輝度の測定を行いたい場合には、分光透過率が可視波長領域でフラットなNDフィルタを受光部の前に配置することで、センサの直線性が成立する範囲で測定ことができ、計測機器の精度範囲内での測定が可能となります。

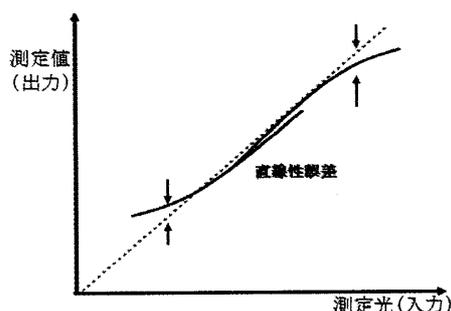


図12 測定光に対する測定値の直線性誤差

す。この場合、明るさに関する値は、測定した値をNDフィルタの透過比率で割算する必要があります。

3) 被測定光源の間欠発光依存

一般的に商用電源を用いた白熱電球や蛍光灯などの光源は、商用周波数またはその倍の周波数で明るさを変動しています。人間は、およそ100 Hz以上の周波数で変化する光源には目の感度が追従できないことから、均一な明るさとして感じるようになります。

また、液晶ディスプレイや有機ELディスプレイなどは、2次元の画像を順次表示するために、各ディスプレイにおいて適した周波数で、フレームの書換えを行っております。

このように光源色用測色機器として測定すべき対象は、ある周波数で間欠発光していることを理解した上で、測定しなければなりません。図13は間欠発光と測定積分時間の関係を説明した図です。

図13の上側の黒色矢印が示す測定積分時間で測定すると、測定をどのタイミングでスタートしても、必ず間欠発光の4周期分を平均測定することができます。下側の赤色矢印の測定積分時間で測定すると、測定のタイミングによって間欠発光の3回分を平均測定する場合と、4回分を平均測定する場合が発生するため、繰り返し精度が悪くなってしまいます。

光源色用測色機器では通常、測定積分時間を設定することができるようになっております。この測定積分時間を光源またはディスプレイの間欠発光の周期の整数倍に設定することで、間欠発光している光の強度変動を平均化して、繰り返し精度の高い測定が可能になります。

5) 回折格子を用いる分光方式での偏光の影響

分光方式の分光素子として、回折格子を使用している光源色測色機器では、分光性能が高く、ある程度コンパクトな構成にすることができる反面、回折格子が偏光依存特性を有しているために、測定した値にも偏

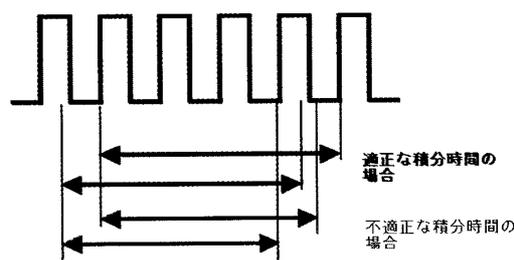


図13 間欠発光と測定積分時間との関係

光による影響が発生することがあります。分光方式の光源色用測色機器(分光輝度計)では、光路上に偏光解消部材を配置するなどして、偏光による影響を低減するように設計されていますが、完全に解消されるまでには至っていないのが現状です。液晶ディスプレイなどのように、偏光材料を使用されているディスプレイを測定する場合には、測色機器の偏光誤差特性に留意して測定する必要があります。

偏光誤差を補正する方法としては、液晶ディスプレイに分光輝度計を正対させて測定した後に、分光輝度計を光軸に対して 90° 回転させて再度同じ測定点を測定し、両方の測定値の平均値をその測定点の測定値として採用することで、偏光誤差を補正することが可能となります。

6) 経年変化

光源色用測色機器は、工場出荷時に標準電球および認証されている輝線波長を有する光源によって校正されていますが、実際の現場で使用されてゆく中で、ほこり・汚れの付着、温湿度等の変化による光学部材の影響、振動等による光学部材の微小なズレ等の発生により、指示値が工場出荷時の校正ポイントからずれてくる場合があります。精度よい測定を継続的に維持するには、定期的に年1回程度の測色機器の校正・点検を受けることが、推奨されています。

物体色用測色機器の測定で注意すべき点

1) 照明および受光の幾何学的条件

物体からの反射光には、反射面の法線に対して入射光と同じ角度で反射方向に反射する正反射光成分と、入射光が物体の内部で拡散して、あらゆる方向に反射される拡散反射光成分とが含まれています。図14は光沢度の高い白色塗装面での、反射光の配光特性の一例を示しております。このように、同じ試料を同じ角度で照明したとしても、観察する方向によって、異なった色として見えることとなります。

物体の反射率は、照明および受光の幾何学的条件によって異なるため、物体色用測色機器を使用する際には、どのような幾何学的条件で測定したらよいかを特定する必要があります。反射物体色測定の幾何学的条件とその表記方法はCIEおよびJISにより図15のように規定されています。

正反射光が含まれていない測定の方が、測定試料の色そのものを測定していることになり、目視に近い測

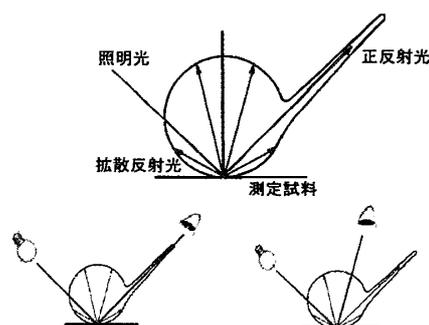


図14 反射光の成分と受光条件による影響

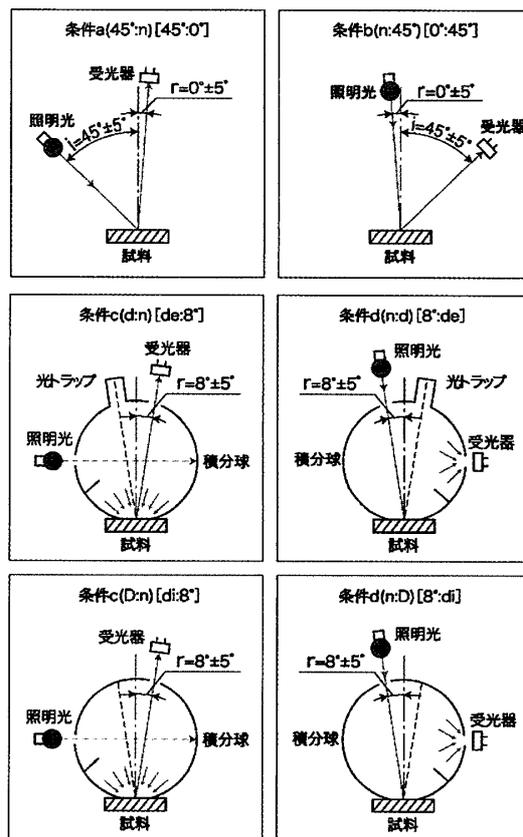


図15 照明および受光の幾何学的条件

定値が得られる一方で、試料の表面状態による影響を受けやすく、キズなどにより測定値が変動することがあります。

正反射光を含めた測定の方が、安定性の面で有利と言えますが、正反射光が含まれている分、照明光の影響を受けやすい測定となります。

その他に、観察する方向によって異なった色に見えるメタリック色などを測定するために、多方向から照明・観察するマルチアングルの幾何学的条件もあります。

測色の幾何学的条件については、業界によっては慣習で決まっていることがあります。例えば、繊維、プラスチック、ペイント等では $d:8^\circ$ が、印刷業界では

45°:0°がよく使われています。各業界で決められた規格に合わせた幾何学的条件が推奨されますが、測定される方の視感測定で得られた結果に対して、相関のある測定値が得られる幾何学的条件も、一つの選択肢と言えます。

2) 機器間誤差

物体色用測色機器を使って色管理を行い、特に色彩値にもとづいた色のコミュニケーションを行う場合には、測定した値の互換性が問題になります。注意すべき誤差要因として、同じ測定試料を同じ機種で測定したときに生じる個体差、すなわち機器間誤差があります。機器間誤差は基準の測定器からの差であり、BCRA タイル12色を測定したときの、色差(ΔE^*_{ab})の平均値で表されます。分光方式では一般的に機器間誤差は小さいですが、刺激値直読方式では等色関数からの感度ズレが機器間誤差に影響するため、機器間誤差(器差)が小さい機種を選択されることをお勧めします。

複数の刺激値直読方式の測色機器を使用する場合に、精度よく色管理を行うには、測定する試料に対して基準色板を作成し、複数の測色機器で基準色板を測定し、その基準色板の測定値を基準とした、各測定試料の色差を測定する事で、機器間誤差を軽減した色判定を行うことが可能となります。

ΔE^*_{ab} は、1976年国際照明委員会で規定された均等知覚色空間 $L^*a^*b^*$ 表色系での色差を表しています。

3) 測定試料に対する測定注意点

測定試料の中には、材質によって、周囲温度で色が変化するサーモクロミズムと呼ばれる現象があり、測定値に温度依存性を生じさせることになります。このような試料に対して安定した測定を行うためには、温度が一定の範囲内に管理されている所で測定することが必要となります。

ムラのある試料の場合、測定する場所や方向によって測定値が異なるため、一定の条件で測定するように注意を払う必要があります。このようにムラのある試料には、大口径の積分球を持ち、測定面積の大きい測色機器を使用することで、測定値の安定性が得られます。

半透明性の試料を測定すると、照明光のエッジ部分で発生する光散乱の影響で、エッジロスエラーという測定値誤差が生ずる場合があります。このような試料についても、測定面積の大きい測色機器が有利となり、

また、照明径が測定径に比べて十分に大きい測色機器の使用が有効となります。

厚みが薄いか、透過性のある試料においては、試料の下に置かれるものの影響を受けてしまいますので、試料を何枚か重ねるとか、植毛紙のような極力反射率の低い均一なものを置くことで、背景の影響を受けないようにして、条件を一定にする必要があります。

4) 標準白色板の管理

最初に物体色は基準となる白色との対比として数値化される、ということを説明しましたが、物体色用測色機器には1台ずつ、標準白色板が付属品として付いてきます。標準白色板は、予めメーカーによって値付けされており、測定のたびにこの標準白色板を測定して、値付けされたデータに校正するシステムになっています。したがって、この標準白色板は物体色用測色機器の精度を司る基準であるため、ホコリやキズが付かないように十分に注意を払うことが必要であり、また外光を避けて冷暗所で保管するとともに、定期的に値付けをし直すなどの管理が重要になります。

終わりに

以上、明るさ・色を測定するための計測機器を使用する際の注意点を列挙いたしました。これらの注意点を留意し、正確で再現性の高い色彩測定を行うことで、皆様の研究成果が上がりますことを願っております。

今回は、測色機器を使用することを観点に説明いたしました。色とはどのようなアルゴリズムで測定されるか等、より技術的な話につきましては、弊社のホームページに「色色雑学」が掲載されておりますので、ご興味のある方は、ぜひ以下のURLからご確認いただければと思います。

<http://www.konicaminolta.jp/instruments/knowledge/color/index.html>

<参考文献>

- [1] 日本光学測定機工業会：光計測ポケットブック、朝倉書店
- [2] JIS Z8722 解説図1 反射試料の変角反射光曲線、解説図2 反射物体測定の場合の照明及び受光の幾何学的条件
- [3] コニカミノルタ(株)：色を読む話、第22版
- [4] コニカミノルタ(株)：KONICA MINOLTA TECHNOLOGY REPORT Vol.9 Jan. 2012