

原 著

# 散乱光と反射光スペクトルの色彩からの考察とその応用

添田 麻衣, 関口 文彦, 今井 元  
日本女子大学理学研究科 数理・物性構造科学専攻

(2006年10月16日受理)

**要 旨** 物体の色は物体に照射した光が反射され、ヒトの目の網膜に決像されて判断されるものである。ここでは物体の反射光を二色性反射モデルに従い、物体から無指向性の拡散反射光を散乱光、入射光と反対の方向に強く出る鏡面反射光を反射光と定義し、いろいろな条件で測定した。色情報だけを含ま散乱光を捉えるための条件を検討し、そのデータをもとに測定系を立ち上げた。この測定系を用い、花卉の色を評価したところ、花の色を決定する吸収スペクトルの評価が可能となることがわかった。

キーワード：反射光, 測色, 色度図, 花卉

## 1. 緒 言

物体に光を照射した際、物体は光を反射、散乱させる。ここでは、この反射と散乱の方向性に関する検討をする。反射光とは、物体に照射された光が、その方向に同じ波長、位相で戻され、その結果観測されたものと考えられている。だが、実際には入射した光と反対の方向に強い光があるだけでなく、それ以外の方向にも弱い光が存在する。

そこで、二色性反射モデルに基づき、物体からの反射光は鏡面反射と拡散反射に分かれる。鏡面反射は入射面に垂直な線に対し、入射角と反対の方向に反射する光と考える。拡散反射は物体内部へ透過した光が内部での色素等の細かな要素と衝突することにより要素の反射率に依存して反射され、物体の色情報を含むものとする。そして、物体から光は上述した鏡面反射の成分と拡散反射の成分の和で表されると考える。

図1のように入射した方向と反対の向きに生じる強い光のことを反射光、それ以外の光を散乱光と定義した。散乱光と反射光をスペクトル解析し、色としての検討を行った。さらに、この検討をもとに確立した測定系を用

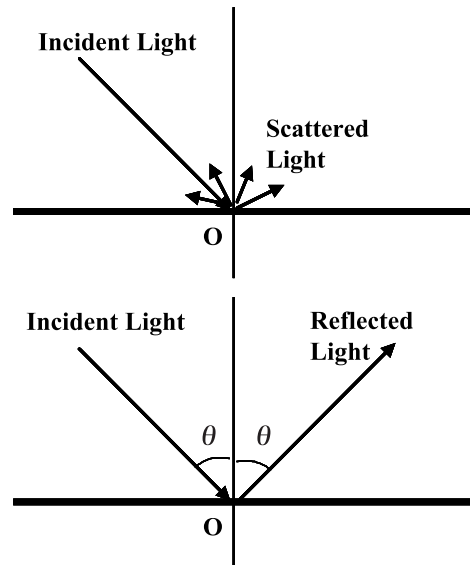


Fig. 1. Scattered and Reflected Light.

いて、花卉の色についての評価をした。

## 2. 反射光と散乱光の測定

反射光と散乱光の性質を調べるために、入射角度、受光角度の違いによる光強度の角度依存性を測定した。さらに、同じ点でのスペクトルの測定を行った。測定した

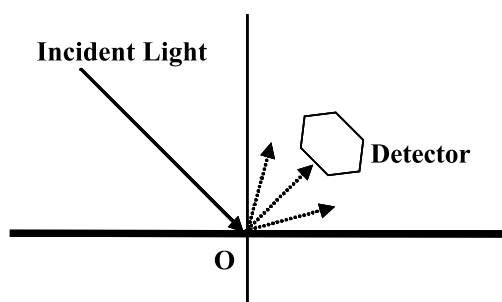


Fig. 2. Intensity of Scattered and Reflected Light.

スペクトルに対し、色度座標の計算をした。

### 2-1. 光強度の角度依存性

図2に光強度の角度依存性の測定方法を示す。入射角度を $\theta_i$ 、反射角度を $\theta_d$ とする。 $\theta_i$ 、 $\theta_d$ を任意に変化させ光の強度を測定した。試料としては緑色の色紙を用いて、光源にはタングステンランプを使用した。入射角度ごとの測定結果を図3に示す。図中にある原点から各点までの距離が光強度である。また、法線からの傾きが受光角度 $\theta_d$ である。

入射角度0度のときは測定した光の強度分布は無指向性の円の形になる。散乱光は位相が揃っているため無指向性になると考えられる。この無指向性の円にのる角度において色情報だけを含む散乱光がとらえられると推測した。従って、入射角度が0度のときはどの点でも色情報を捉えることができると考えられる。また、入射角度を15~75度にし、受光角度0度の点においては散乱光であると考えられる。従って、この点でも色情報をとらえているのではないかと予想できる。入射角度を大きくしていくと、入射角度と同じ受光角度の鏡面反射のところで強度が大きくなっている。ただし、測定器具の大きさの関係ですべての角度において光強度の測定はできなかった。入射角度と同じ受光角度の方向には、強い光が戻るのに対し、それ以外の方向では無指向性の分布が得られた。だが、図の結果では、必ずしも入射角度と等しい受光角度で最大の光強度とはなっていない。これは試料に表面が平坦ではない緑色の色紙を用いたことによるものだと考えられる。

### 2-2. スペクトルの測定

2-1. で強度を測定した点で、スペクトルを測定した。標準試料からの光のスペクトル $R(\lambda)$ で試料からの光のスペクトル $S(\lambda)$ を割り、最大値で規格化したものを試料の散乱スペクトルとした。試料の散乱スペクトルを $p(\lambda)$ とすると

$$p(\lambda) = S(\lambda) / R(\lambda) \quad (1.1)$$

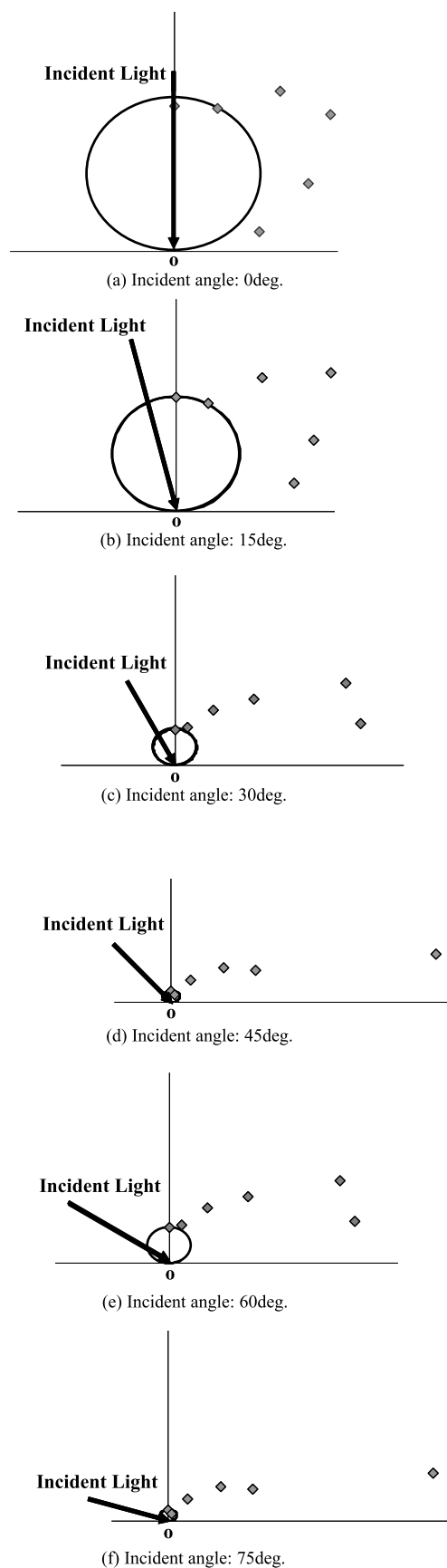
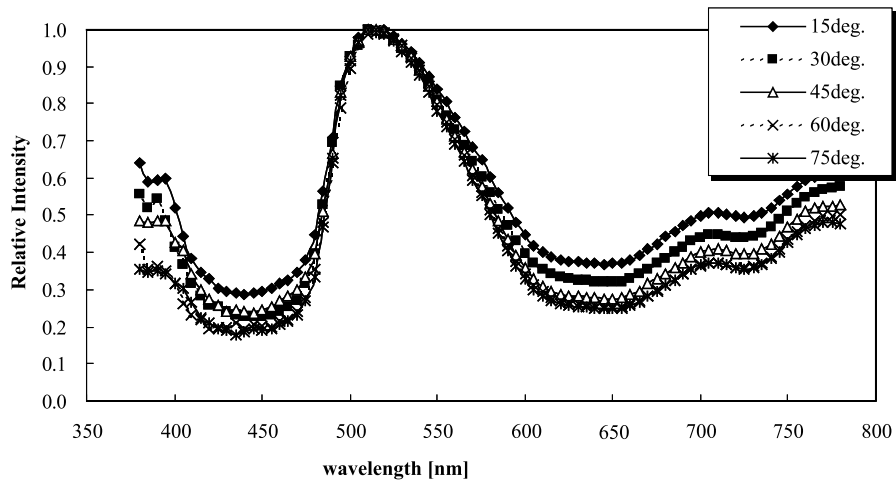
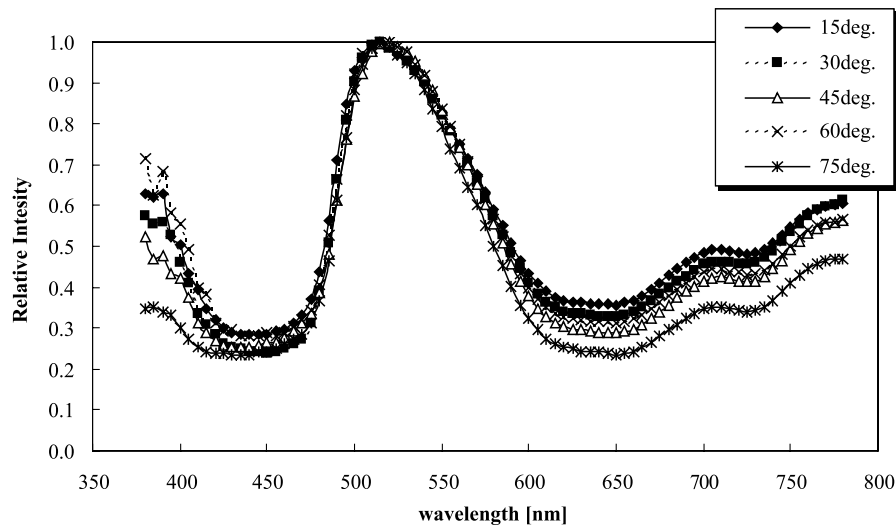


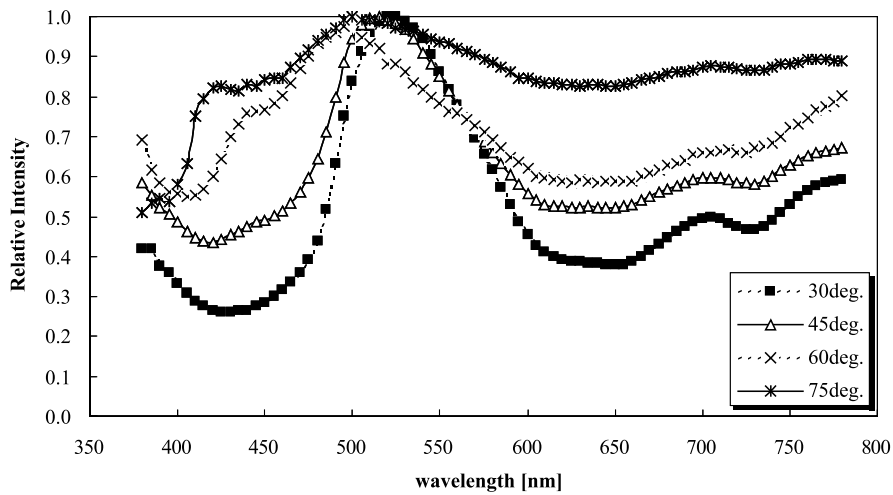
Fig. 3. Intensity of Scattered and Reflected Light.



(a) Spectra of Scattered Light (Incident angle: 0deg.)



(b) Spectra of Scattered Light (Detected angle: 0deg.)



(c) Spectra of Reflected Light

Fig. 4. Spectra of scattered and Reflected Light.

と式で表せる。

2-1. で色情報のみを含む散乱光が捉えられると推測した測定点でのスペクトルを示す。図4(a)は入射角度0度に対し、受光角度は15~75度のスペクトルである。図4(b)は入射角度を15~75度で受光角度を0度で固定したときのスペクトルである。これらのスペクトルはほぼ一致しており、この観測点での測定は色情報のみをふくむ散乱光の測定ができると推測した。

次に図4(c)に入射角度と観測角度が等しい場合のスペクトルを示す。図4(a)(b)とは異なり、スペクトルは角度によって異なっている。30度の場合、図4(a)(b)に近いスペクトルになっているが、入射角度が大きくなるに伴い、光源のスペクトルに近くなっている。入射角度が小さいと、フレネル反射の式で記述される反射率は小さくなるので、その分、散乱光の影響を受けていると考えられる。それが、入射角度が大きくなるに伴い反射率は1に近づくと、光源のスペクトルに近づいていったと考えられる。

### 2-3. 色度図の計算

図4(a)(b)(c)のスペクトルを基に色度図上での座標を求める。物体の色は、太陽光の下で観測していると仮定し、太陽光の光を $L(\lambda)$ 、求めた試料の散乱スペクトル $p(\lambda)$ 、等色関数 $x(\lambda)$ 、 $y(\lambda)$ 、 $z(\lambda)$ として、まず三刺激値 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ を求める。

$$\begin{aligned} X &= \int L(\lambda) p(\lambda) x(\lambda) \\ Y &= \int L(\lambda) p(\lambda) y(\lambda) \\ Z &= \int L(\lambda) p(\lambda) z(\lambda) \end{aligned} \quad (1.2)$$

上記で求めた三刺激値を

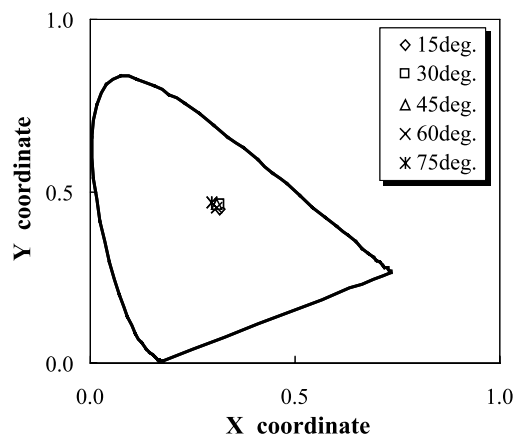
$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X+Y+Z} \\ y &= \frac{Y}{X+Y+Z} \end{aligned} \quad (1.3)$$

に代入し、色度座標を求めた。太陽光の色度座標は(0.33, 0.33)となる。

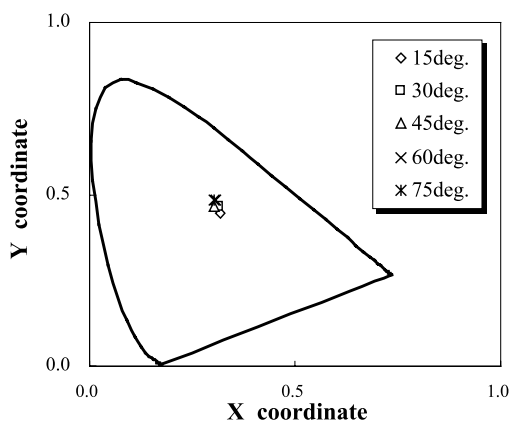
図4(a)のスペクトルから求めた色度座標を図5(a)に、図4(b)から求めたものを図5(b)に、図4(c)からのものを図5(c)に示す。図5(a)(b)からこの2つの座標はほぼ一致しており、同じ緑色を示していることが分かる。図5(c)では30度入射から入射角を大きくしていくとだんだんと白色に近づき、光源の色になっていくことが確認できる。

これまでの結果より色情報のみを含む散乱光スペクトルをとるためには、入射角度と受光角度に適正条件があ

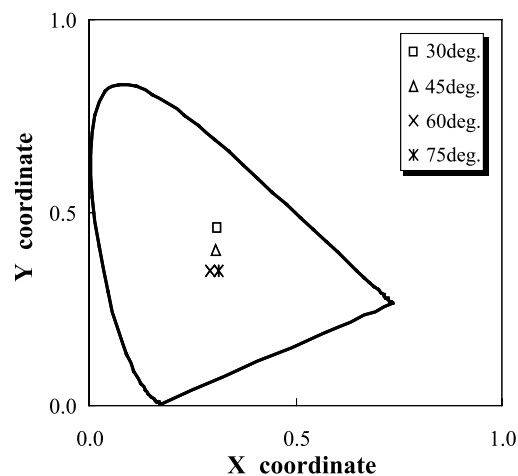
ることがわかった。測定のしやすさと色評価のJIS規格(JIS Z 8701・JIS Z 8722)に基づき、以後の実験は図6に示すように入射角度45度、受光角度0度で測定を行う。



(a) Color Coordinate of Scattered Light (Incident angle: 0deg.)



(b) Color coordinate of Scattered Light (Detected angle: 0deg.)



(c) Color coordinate of Reflected Light

Fig. 5. Color Coordinate of Scattered and Reflected Light.

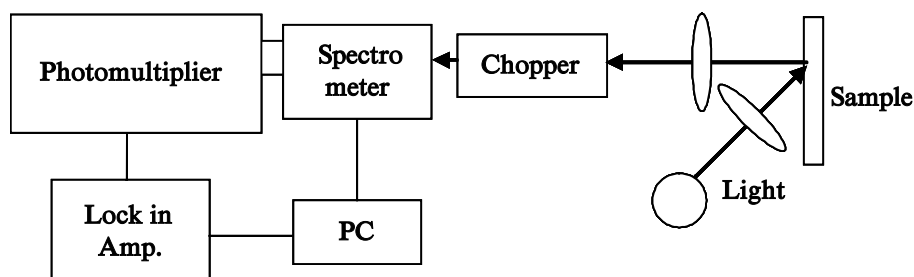
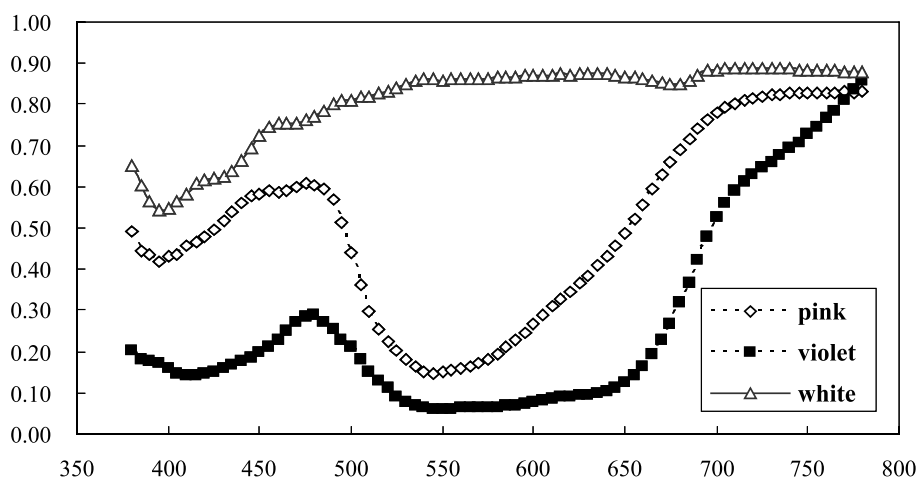
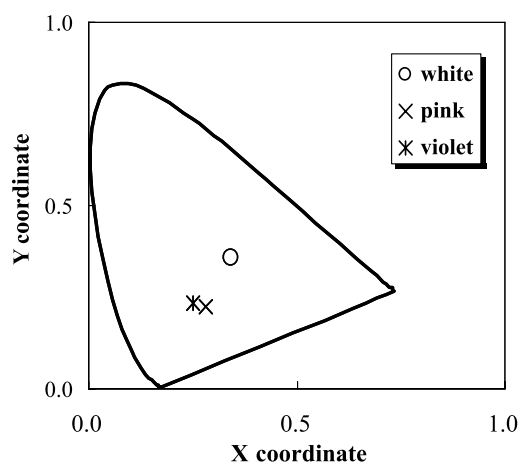


Fig. 6. Measurement of Scattered Light.



(a) Spectra of Scattered Light (*Petunia Hybrida*)



(b) Color coordinate of *Petunia Hybrida*

Fig. 7. Scattered Spectra and Color coordinate of *Petunia hybrida*.

### 3. 散乱光による色評価の応用

物体の色情報だけをもつスペクトルを実際の試料を用いて検討することにより、物体の情報を評価した。実際の試料として花卉を用いることとした。花卉には同一の品種で様々な色をもつペチュニア (*Petunia Hybrida*) を

選んだ。ペチュニアとはナス科の植物で春から夏にかけて開花する園芸用の花である。

図 7 (a) はペチュニアの白色、赤色、紫色の花弁の散乱スペクトルである。図 6 で得られた花卉のスペクトルは図 6 で測定した標準試料のスペクトルにより正規化している。これらの花卉を太陽光のもとで観測したとし、

上述と同様に色度座標を計算した。図 7 (b) はそれらの色度座標を示している。白色花卉の色度座標は白色の位置に、同様に、桃色花卉は桃色、紫色花卉は紫色の位置にある。このことから色情報だけを持つ散乱光のスペクトルをとらえられていることがわかる。

図 7 (a) のスペクトルを比較すると、白色花卉は可視光域においてほぼフラットであるのに対し、桃色では 550 nm、紫色では 550nm、650nm 付近の光の強度が弱くなっている。そこで散乱光の引き算により吸収スペクトルを求めることができると推測した。図 8 (a) は散乱光の引き算により求めた吸収スペクトルを示している。白色花卉のスペクトルより桃色のスペクトルを引き算により 545 nm をピークにした吸収スペクトルが見られた。545 nm 付近の吸収はこれまでの化学分析により裏付けられている。このことから散乱スペクトルを調べることで、花卉の吸収が得られることがわかった。この吸収スペクトルを変化させることにより、白色からどのように色が変化するかを計算した。図 8 (b) は色度座標上

での変化を示している。この吸収スペクトルの影響だけを受けて発色することのできる領域は白色から桃色までの直線を描いていることがわかる。さらに桃色花卉のスペクトルから紫色花卉のスペクトルの引き算により 450 nm、650nm の 2 つのピークを持つ吸収スペクトルが得られた。この吸収スペクトルを変化させることにより、桃色からどのように色が変化するかを計算した。図 8 (c) は拡大した色度座標上での座標の変化を示している。桃色から紫色の点を通るように色が変化していくことがわかる。

以上のことから花の発色は 545nm 付近がはじめに吸収され、その後、450nm、670nm の別の吸収が加わり発色していることがわかった。

#### 4. 結 言

物体からの反射光、散乱光を調べることで、物体の色情報を調べるには散乱光を分析することが正確であることが分った。このことをもとにペチュニアの花の色を調

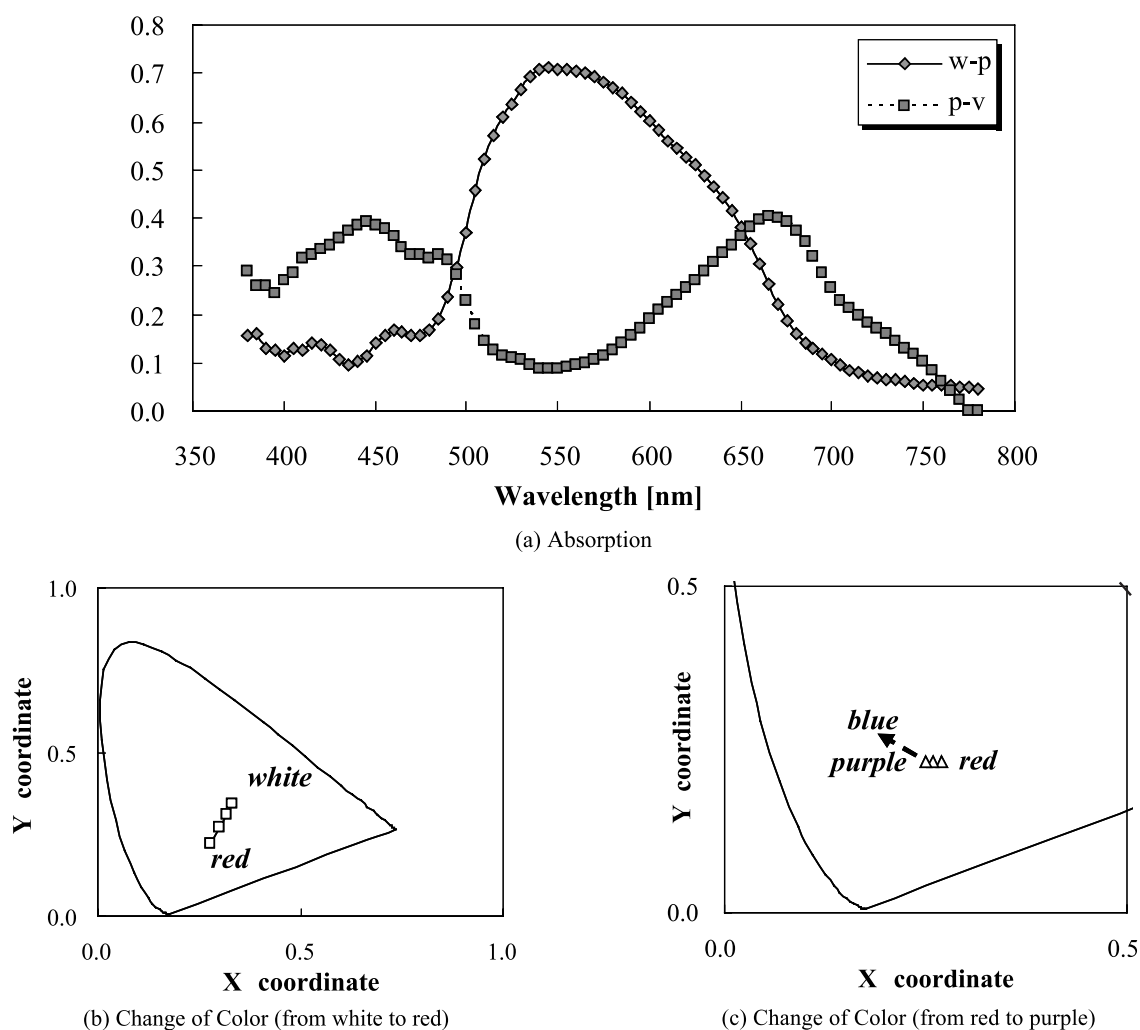


Fig. 8. Absorption and Color coordinate.

べたところ, その色素の位置が同定できることを示唆できた。従来は, 化学分析によって行われていた。化学分析は破壊分析であるので, 再現性を得ることができない。そこで, 色情報をもつスペクトルを解析することで, 吸収スペクトルを解析できないかと考えた。この方法は, 非破壊分析なので, 再現性を得ることもでき, 信頼度の高い測定となる。

#### 謝 辞

本論文をまとめるにあたり, 多方面でご支援くださいました (株) 富士通研究所の方々に御礼申し上げます。

#### 参 考 文 献

- 1) Eugene Hecht (尾崎義治, 朝倉利光 訳): 「光学」. 丸善, 2002.
- 2) 増村茂樹: 「マシンビジョン画像処理システムにおけるライティング技術 [II] - 物体認識とライティング設計の基礎 -」. 電子情報通信学会誌, **88**, 6, 445-450, 2005.
- 3) 富永昌治, 大橋伸一郎: 「物体のカラー反射モデル」. 情報処理学会論文誌, **33**, 1, 445-450, 1992.
- 4) 添田麻衣, 今井 元: 「散乱・反射・透過に関する色彩の研究」. 平成16年度 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, 63, 2005.
- 5) 大田 登: 「色彩工学」. 東京電機大学出版局, 2001.
- 6) Gunter Wyszecki, W.S., and Stiles.: (1982), Color Science, Wiley, New York
- 7) 関野加奈子: 「ペチュニアの花における色素遺伝子の発色機構解析」. 日本女子大学大学院理学研究科修士論文 (私信), 2004.
- 8) 添田麻衣, 今井 元, 関口文彦: 「スペクトルからみたペチュニア花弁色の決定」. 平成16年度 Optics Japan 2005, 662-663, 2005.
- 9) 添田麻衣, 今井 元, 関口文彦: 「散乱スペクトルを用いた花弁色の決定」. 電子情報通信学会2006総合大会講演論文集, 2006.
- 10) 添田麻衣, 今井 元, 関口文彦: 「花弁色のスペクトルから見た検討」. 園芸学会雑誌, **75**, 2006.
- 11) Hajime Imai, Mai Soeda, Fumihiko Sekiguchi: "Evaluation of scattered-light spectra to apply the estimate of absorption spectra of flowers' petals", *IEICE Electronics Express*, **3**, 12, (2006).

---

## Color Evaluating by Using Scattered and Reflected Light Spectra and Its Applications

Mai Soeda, Fumihiko Sekiguchi and Hajime Imai

The Graduate School of Science, Division of Mathematical and Material Structure Science,  
Japan Women's University

(Received October 16, 2006)

**Abstract:** It is well known that the scattered light includes the color information of the object. We examined the spectra of scattered and reflected lights changing the incident angle. We have confirmed the scattered light shows the color information of the object. And we have investigated the new method to evaluate the absorption by using the scattered light spectrum. Based on there results, we have analyzed scattered light spectra of *Petunia Hybrida*'s petal. By subtracting the two spectra of *Petunia Hybrida*, we have evaluated the change in the absorption spectrum.

**Key words:** Scattered light, Reflected light, Colorimetry, Chromaticity diagram, Petal

