

# R2C (Reflectance to Color) 分光反射率ベースの色変更 デジタルデザインツール

“R2C” Translator to Convert Reflectance into Color



CD 研究所  
第4研究部  
増田 豊  
Yutaka  
Masuda



CD 研究所  
第1研究部  
藤枝 宗  
Tsukasa  
Fujieda



CD 研究所  
(現自動車塗料本部)  
技術開発部  
江川隆夫  
Takao  
Egawa

## 1. はじめに

前報149号<sup>1)</sup>では自動車に塗り塗色の意匠開発におけるデジタルデザインツール(ItoC: Image to Color)の開発とその応用について報告した。このツールは塗色開発の目標イメージ(この目標イメージは質感のイメージ画像によって提示されることが多い)から色を抽出し、多角度のRGB値を使って、塗色データベースを検索し、画像に近い質感を有するメタリック色を検索する技術であった。この技術はカラーデザイナーの頭の中にある抽象的な塗色イメージを早く具体的な塗色として実現するツールとして有用である。しかし、検索された塗色が不満足な場合には再度イメージ画像に戻り、再び希望する画像の部位から色を選択し直す必要があった。つまり、イメージ画像の中にある色の範囲から逃れられないという制限があった。そこで、検索された1次候補の塗色を元色とし、希望の色に合うようにPCの画面上でシミュレーション(色の編集操作)し、変更色を得る方法を開発した。本方法は、塗膜の物理光学的な性状を反映している分光反射率を基にし、実際のメタリック塗色の色再現の限界を光学的制限として設けて色を変更する方法なので、以下の3つの利点がある。①塗膜として実現不可能な無理な色変更を防止することができる。②変更した色の分光反射率を基にしてCCMにより配合計算が可能である。③また、測色値L\*a\*b\*を基にした色検索ができるため、RGB値を用いるよりも高い精度の検索が可能である(\*)。このように分光反射率を基にした色修正は、RGB値を基にした方法に比べてモノ作りとしての利点が多いが、反面、人間は分光反射率を見る事も感じる事もできない。つまり、分光反射率の数値群またはグラフから実際の色や質感を想像することは難しい。そこで、カラーデザイナーが日常よく用いるメタリック塗色の質感を表わすパラメータをヒューマンインターフェイスとして設け、間接的に分光反射率を変更する方法を開発した<sup>2)</sup>。なお、本方法は分光反射率から新しい色を創造するので、名称を「R2C(Reflectance to Color)」としている。

(\*) L\*a\*b\*は、RGB値に比べてダイナミックレンジが広く、表示デバイスに依存しない心理物理量である。

## 2. ツールの設計と結果

分光反射率を基にして色を変更するシステムは以下の構成となっている。

(1) 既存の塗色の分光反射率を得る。

測色計を用いて実際の塗色を測定し、または塗色データベースを検索して、塗色(以下、元色と称す)の多角度分光反射率を得る。

(2) 分光反射率を加工して色をシミュレーションする。

メタリック塗色のデザインの質感を表す用語を用いて、PCの画面上で元色の色と質感を変更したシミュレーション色(以下、変更色と称す)を得る。

(3) 変更色を塗色として実現する。

分光反射率をCCMで処理し、色材の配合を得て実現する。または、色度値L\*a\*b\*を用いて塗色データベースを検索し、変更色に近似の色を検索する。

ここではツールの色修正機能を実現している(2)のシミュレーションのアルゴリズムを仔細に説明する。

### 2.1 多角度分光反射率を表す記号

多角度測色可能な分光光度計で測定した分光反射率を $R(x, \lambda)$ で表す。ここで、Rは分光反射率(Reflectance)であり、測定機付属の校正板で校正した分光反射率%で表す。xは受光角度であり、正反射光からの偏角で表す(図1)。 $\lambda$ は波長であり、可視光範囲400~700 nmを10 nm間隔(波長数31個)で測定する。正確には、更にこの中に入射角度の変数が必要であるが、一般に用いられている-45度入射を標準とするので省略する。

受光角度xの範囲は測定機器の種類によって異なるが、ここでは広く用いられているx-rite社の携帯型多角度分光光度計MA68-II(以下MA68と表記)が採用している5角度を用いる。その光学条件は、入射角度-45度、受光角度15、25、45、75、110度の5角度である。通常のメタリック塗色ならば、この5角度でハイライトhigh-light(15度、25度)、フェースface(45度)からシェードshade(75度、110度)まで必要かつ十分に測定できる。故に5角度の分光反射率は以下の記号で示される。

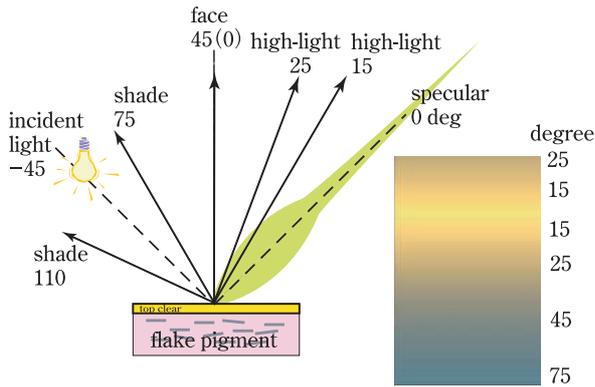


図1 メタリック色の変角測色

$R(x_i, \lambda_j)$   $i=1,2,\dots,5$   $j=1,2,\dots,31$

受光角度: $x_1=15$ 度, $x_2=25$ 度, $x_3=45$ 度, $x_4=75$ 度, $x_5=110$ 度

波長: $\lambda_1=400$ nm, $\lambda_2=410$ nm, $\dots$ , $\lambda_{31}=700$ nm

## 2.2 メタリック塗色の質感パラメータ

メタリック塗色の質感を表現する言葉として「陰影感」、「金属感」、「透明感」等々がある。この中で最も基本的な質感が材質感を決めている「陰影感」である。図1のメタリック塗色の反射率分布図を用いてメタリック塗色の陰影感を表すパラメータについて説明する。一般的にはハイライトの明度(IV)、フェースの明度(SV)、その比のコントラスト(FF)であらわす。IVが高い程、SVが低いほど、ハイライトとフェースの明度コントラストが高いため陰影感が増す。明度が校正白板の $L^*$ を越えるメタリック色の場合は「輝度」とも称するが、ここでは用語の統一のために明度と表記する。これを分光光度計MA68に当てはめると、IV68はハイライト側 $x_1$ (15度)の明度Y値、SV68はフェースの $x_3$ (45度)の明度Y値、最後にFF68はIV68とSV68から(式1)を用いて計算できるパラメータである。FF68は0.0~2.0の範囲の値をとり、0.0がソリッド調、理論値の最大値2.0に近づく程、金属調を示す。

$$FF68 = 2 \times (IV68 - SV68) / (IV68 + SV68) \quad (式1)$$

## 2.3 分光反射率による質感の変更

元色のメタリック塗色の分光反射率に係数を乗じてシミュレーションし、変更色を作成する方法について述べる。元色と変更色の色差 $\Delta E^*$ はおおよそ10以下を、つまりデザイン的に近似色の範囲を想定している。色差が10を越えるような大幅な色変更は想定しない。その場合は、元色をふたたび選び直すのが妥当である。図2は、メタリック塗色を分光反射率を基にして変更するプログラムの画面である。

図中に塗板のCS(Color Simulation)画像を配置した(測定角度との対応は図1を参照)。左が元色であり、右側がその分光反射率を操作して得られる変更色である。また、様々なメタリック質感を変更するパラメータ変更ボタンを配置し、[+]あるいは[-]のボタンを押すたびに指定した質感が優先的に増加、減少する仕組みである。この質感を変更するパ

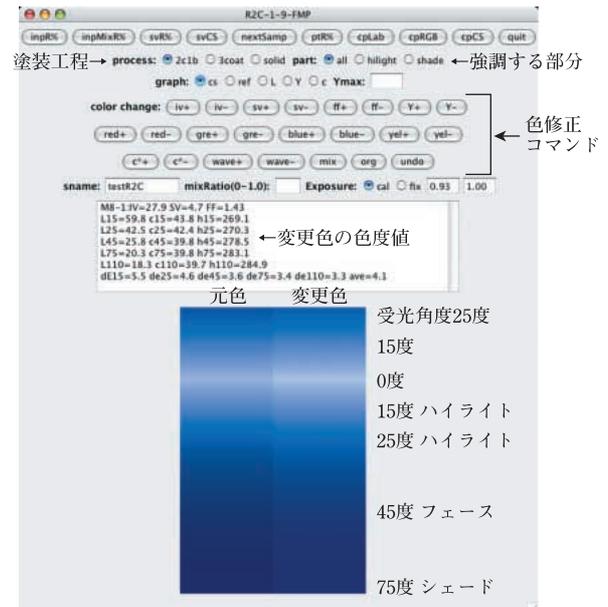


図2 R2C (Reflectance to Color) の実行画面

ラメータとアルゴリズムを説明する。なお、このプログラムはJava言語で作成されており、任意のOSで動作する。

### 2.3.1 全角度の分光反射率を変更する演算

元色の分光反射率 $R$ を変更し、変更色(例えば明度を高くした)の分光反射率 $R'$ を得る方法として、元の分光反射率 $R(x, \lambda)$ に正の実数係数 $k$ を乗じる方法が最も簡便である(式2)。正の実数ならば、分光反射率がマイナスになることはなく、実際の色に適用できるからである。

$$R'(x, \lambda) = k \times R(x, \lambda) \quad (式2)$$

5角度の受光角度に適用すると(式3)となる。

$$R'(x_i, \lambda_j) = k \times R(x_i, \lambda_j) \quad i=1,2,\dots,5 \quad j=1,2,\dots,31 \quad (式3)$$

全角度の分光反射率を一律に $k$ 倍する方法は、メタリック塗色の分光反射率を増加、減少方向に移動することであり、3刺激値XYZの明るさY値が、即ちCIE  $L^*a^*b^*$ では明度 $L^*$ 値が変わり、色相と彩度の変化は少ない。図3では元色(青メタリック色)のY値を増加させた例である。

ここでは $k=1.05$ として図2の[Y+(プラス)]のボタンを4回押したので、最終的には $k=1.05^4=1.22$ となる。全角度の分光反射率に1.22を乗じて変更色の分光反射率を得る。図3にハイライト15度(上)とフェース45度(下)の分光反射率曲線を示した。(a)の分光反射率グラフでは元色の黒線から変更色の青線へ増加している。(b)の受光角度に対するY値のグラフから変更色の明度が増加している。数値的にはIV68が23.0から27.9へ、SV68が3.8から4.7へ増加したが、FF68は1.43と同じである。逆に、[Y-(マイナス)]のボタンを

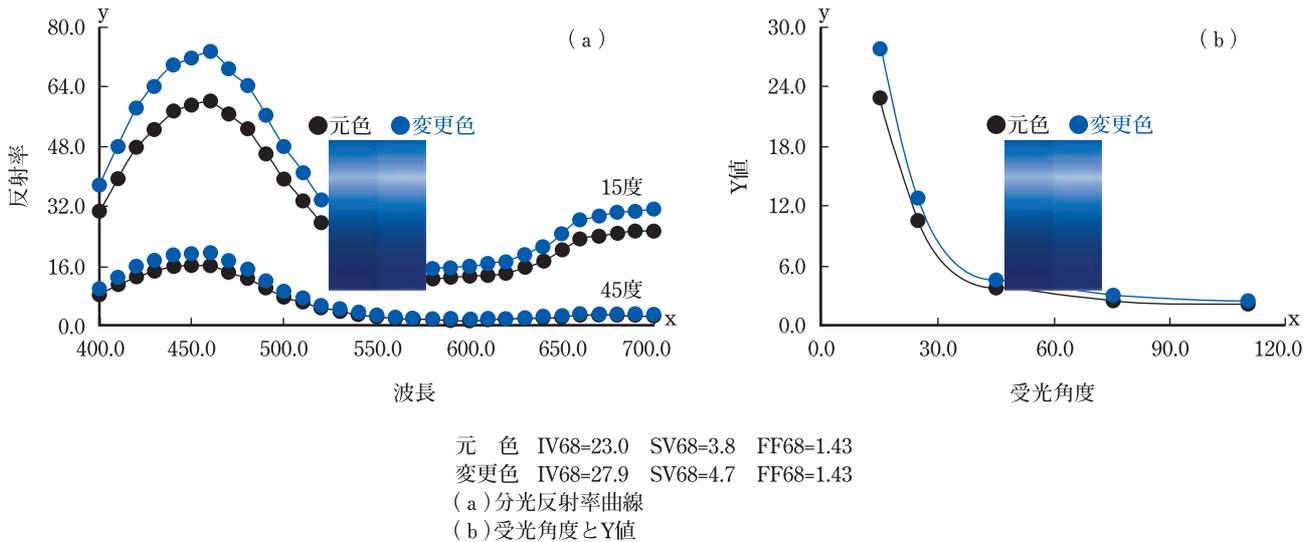


図3 明度増加[Y+]の操作

押すと  $1/1.05=0.952$  倍ずつ減少する。つまり、[Y-]ボタンを4回押すと、元色に戻る。

### 2.3.2 角度毎に分光反射率を変更する演算

メタリック塗色の色を変える時に、「ハイライトの色を強く変えたい」、または「シェードの色だけを変えたい」というような要望がある。このように特定の角度  $x_i$  の係数  $k_i$  だけを変えることは、デザイン的には面白いが色彩工学的には不適である。なぜならば、メタリック塗色では特定の角度の分光反射率だけを任意に変えることはできず、分光反射率はハイライトからシェードまで、連続的に変化する。そこで分光反射率に乗じる係数  $k$  を角度  $x$  に対する一次関数で近似する。つまり、ハイライト  $x_1$  度における係数を  $k_1$ 、シェード  $x_5$  度における係数を  $k_5$  とすると、中間の  $k_2, k_3, k_4$  は、まず、 $x_1$  度と  $x_5$  度の間の傾き  $s$  を求めた後、それらの係数を計算する(式4)。

$$\left. \begin{aligned} s &= (k_5 - k_1) / (x_5 - x_1) \\ k_2 &= k_1 + s \times (x_2 - x_1) \\ k_3 &= k_1 + s \times (x_3 - x_1) \\ k_4 &= k_1 + s \times (x_4 - x_1) \end{aligned} \right\} \quad (式4)$$

一般に  $k_i = k_1 + (x_i - x_1) \times (k_5 - k_1) / (x_5 - x_1)$  となる。この係数の値を1.0よりも大きくすると分光反射率は増大し、1.0よりも小さければ分光反射率は減少する。元色の色質感を損なわずに変更する範囲  $k_1 \sim k_5$  は、0.5~1.5の間が妥当である<sup>2)</sup>。

### 2.4 メタリック塗色の陰影感を変える演算

ハイライトの明度を増やすボタン[iv+]は、 $k_1=1.05$ 、 $k_5=1.0$ 、 $x_1=15$ 、 $x_5=110$ とし、(式4)から中間の  $k_2, k_3, k_4$  を求める。 $x_1$  度の新たな分光反射率  $R'$  は(式3)で求める。また、逆にIV68を減らす場合は  $k_1=1/1.05$ 、 $k_5=1/1.0$  とし、ハイライトの係数倍率を1.0よりも小さくし、(式4)によって各角度の  $k_i$  を

求めて(式3)で計算する。シェードの明さを増やすボタン[sv+]は  $k_1=1.0$ 、 $k_5=1.2$  として同様に計算する。FF68を増やすボタン[ff+]は  $k_1=1.1$ 、 $k_5=0.7$  として計算する。図4にペー ジメタリックの陰影感を変化させた3つのグラフを示す。

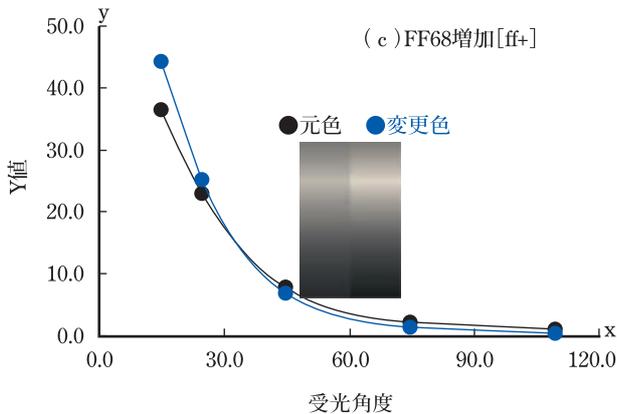
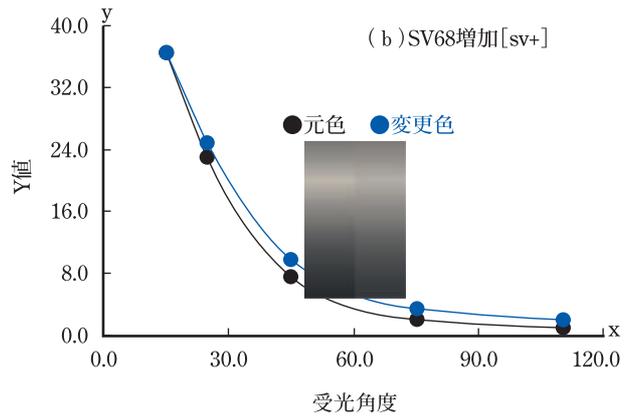
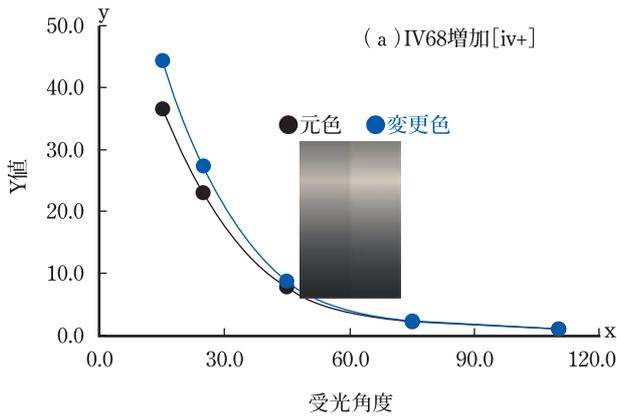
(a)は[iv+]のボタンを4回押してIV68を増加させた。変更色は、受光角度15度から25度の範囲が特に高くなっており、その結果、CS画像ではハイライトの明度が増加し、より金属調になった。数値ではIV68が元色の36.6から変更色の44.5に増大した。(b)は[sv+]のボタンを4回押してSV68を増加させた。(a)とは逆に45~110度のシェード側が高くなり、CS画像では陰影感が減少している。IV68は36.6と変わらないが、SV68は元色の7.7から9.8へ増加した。それによってFF68値は低下し、ソリッド調に近づいた。(c)は[ff+]のボタンを4回押してFF68を増加させた。ハイライト15度のY値が増加し、逆に45度のY値は減少し、FF68が1.31から1.47へ増大している。CS画像ではハイライトの明度が高く、シェードが黒くなり、より金属感が強調された。

### 2.5 彩度を増減する演算

色彩学的に分光反射率の山谷(最大値と最小値)の勾配を急峻にすれば、主波長付近の波長の純度が増加するので彩度は増加し、逆に山谷を狭めれば彩度は減少する。この操作を行う方法は以下の通りである。

<手順>

- (1) 現在の分光反射率  $R(x, \lambda)$  におけるある角度  $x$  での波長方向での分光反射率の最大値  $R(x, \max)$  と最小値  $R(x, \min)$  を得る。
- (2)  $R(x, \max)$  と  $R(x, \min)$  の中点を計算し、これを  $R_c(x)$  とする。 $R_c(x) = [R(x, \max) - R(x, \min)] / 2$
- (3)  $R_c$  を0.0とし、 $R_{\max}$ 側を正、 $R_{\min}$ 側を負として山側が正、谷側が負の新たな仮想の分光反射率  $R_{\text{new}}$  を作成し、これに角度毎の係数  $k$  を乗じる。係数  $k$  が1.0より



元色	IV68=36.6	SV68=7.7	FF68=1.31
(a)IV68増加	IV68=44.5	SV68=8.8	FF68=1.34
(b)SV68増加	IV68=36.6	SV68=9.8	FF68=1.15
(c)FF68増加	IV68=44.5	SV68=6.8	FF68=1.47

図4 ベージュメタリックの陰影感変更

も大きければ、山谷が広がり、より強い彩度が得られる。逆にkが1.0よりも小さい場合は、山谷の間隔が狭まり、彩度が低下する。

$$R_{\text{new}}(x, \lambda) = k \times [R(x, \lambda) - R_c(x)]$$

(4) 再度、 $R_c$ を $R_{\text{new}}$ に足し、彩度変更後の分光反射率 $R'$ を得る。その際、kが1.0よりも大きい場合は、 $R'$ が負値をとる可能性がある。その場合は、実用性に不具合を生じるので測定機が測定できる最小の分光反射率(例えば0.001%)とする。

$$R'(x, \lambda) = R_{\text{new}}(x, \lambda) + R_c(x) \quad R'(x, \lambda) \geq 0.001$$

(5) ここで角度毎のkは以下のように設定する

ハイライトからシェードまで全角度の彩度を増加させたい時は、 $k_1=k_2=k_3=k_4=k_5=1.05$ とし、減少させたい時は、 $k_1=k_2=k_3=k_4=k_5=1/1.05$ とする。主にハイライトの彩度を上げたい時は、 $k_1=1.05$ 、 $k_5=1.0$ とし、(式4)で中間の係数 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $k_4$ を計算する。逆にハイライトの彩度を下げたい時は、 $k_1=1/1.05$ 、 $k_5=1.0$ とする。同様にシェードの彩度を上げたい時は、 $k_1=1.0$ 、 $k_5=1.2$ 、下げたい時は、 $k_1=1.0$ 、 $k_5=1/1.2$ とする。図5はレッドパール塗色の彩度を増減した図である。(a)は $[c^*+]$ を3回押し、彩度を増加させた。変更色の分光反射率曲線は元色の曲線に比べて両側に位置していることが分かる。

数値的には25度の彩度 $c^*$ を比べると27.3から34.4へ増加した。それに伴い、若干色相 $h^*$ の角度は増加しているが、わずかである。(b)は $[c^*-]$ を3回押し、彩度を減少させた。変更色の分光反射率曲線は元色の曲線に比べて内側に位置し彩度は27.3から22.1へ減少した。

## 2.6 色相を変える演算

色相を変えるには2つの方法がある。波長をシフトする方法とカラーフィルターの分光反射率を乗算する方法である。

### 2.6.1 波長をシフトする方法

色相を変えることを分光反射率で考えると、長波長側にシフトすれば赤味になり(red shift)、短波長側にシフトすれば青味(blue shift)になる。ここで測定波長間隔の10 nmを $\Delta\lambda$ で表す。 $\Delta\lambda$ でシフトさせると、色が極端に変わるので、波長 $\lambda_1$ 番目と $\lambda_2$ 番目の分光反射率 $R(\lambda_1)$ 、 $R(\lambda_2)$ の間を直線近似し、この間隔 $(\lambda_2 - \lambda_1)$ をp分割し、測定波長間隔よりも小さい量で分光反射率を動かす方式をとる。 $\Delta\lambda$ をpで割った値がシフトさせる波長移動量 $d\lambda = \Delta\lambda/p$ となる。この分割数pは整数でなくても任意の正の実数でもかまわない。 $d\lambda$ の範囲は2~4 nmが適当である<sup>2)</sup>。

MA68による測定では波長範囲が400~700 nm、波長間隔が10 nmの31波長である。 $\Delta\lambda$ を5分割し、 $10/5=2$  nm毎に動かすと(式5.1)のように書ける。

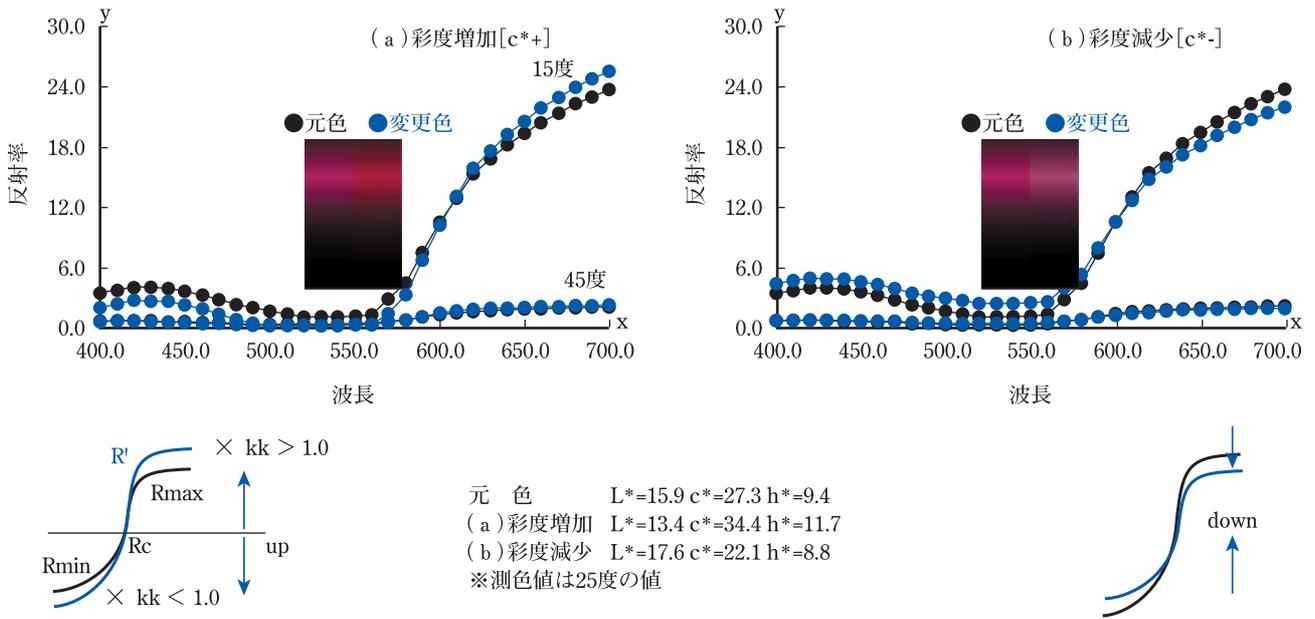


図5 彩度を(a)増やす、(b)減らす操作

$$R'(\lambda) = R(\lambda) + [R(\lambda+1) - R(\lambda)]/5 \quad \lambda = 1, 2, \dots, 30 \quad (\text{式5.1})$$

最後のR(31)番目は長波長の端の700 nmであり、R(31+1)=R(32)番目は存在しないので、R(31)は固定であり、添字はλ=30が最終である。

逆に短波長にシフトさせるには(式5.2)を用いる。

$$R'(\lambda) = R(\lambda) + [R(\lambda-1) - R(\lambda)]/5 \quad \lambda = 2, 3, \dots, 31 \quad (\text{式5.2})$$

最初のR(1)は短波長の端の400 nmであり、R(1-1)=R(0)番目は存在しないので、R(1)は固定であり、添字はλ=2から開始する。

ここで、角度毎に色のシフト量を変えたい場合は、分割数pを変えればよい。つまり分割数pが小さければ、大きく分光

反射率がシフトし、結果として色のシフト量が大きくなる。例えば、5角度の全角度を一律2 nm毎に波長をシフトさせる場合は、x1角度の分割数p1、x2角度の分割数p2、...、x5角度の分割数p5を同じ値に設定する。

$$p1 = p2 = p3 = p4 = p5 = 5$$

ハイライトを主に変えたい時は、ハイライト側の角度の分割数を小さくし、シェード側の分割数を大きくし、その間の角度の波長の分割数は(式4)で求めて行なう。例えば、以下のように設定する。

$$\text{分割数 } p1=2, p2=3, p4=4, p5=10$$

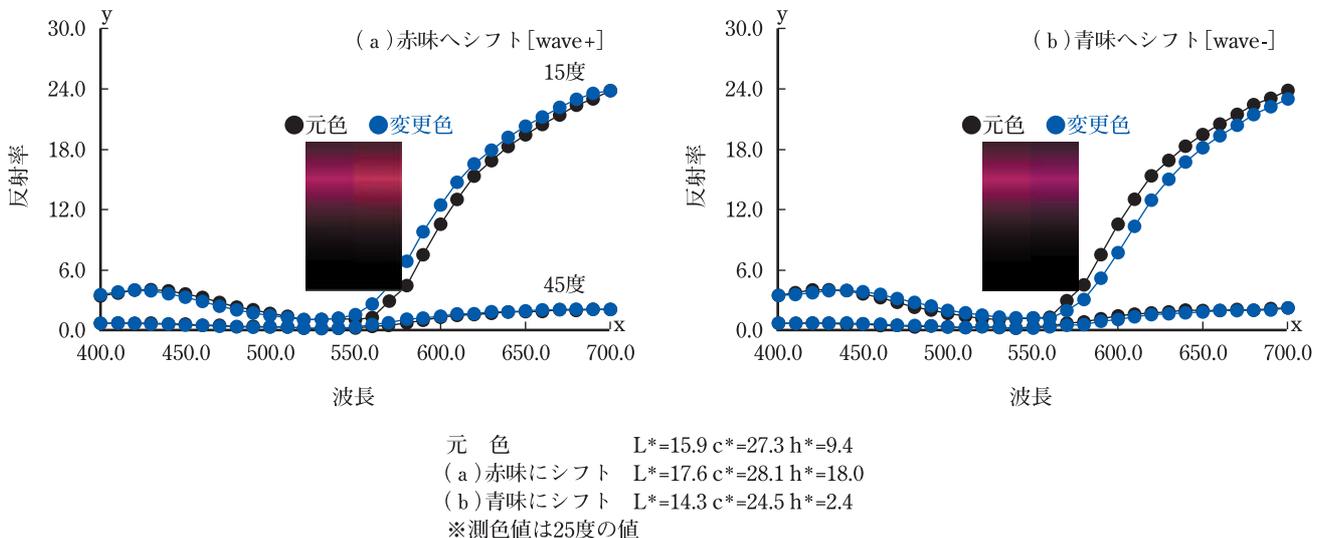


図6 波長をシフトして色相を変える

測定波長間隔 $\Delta\lambda=10\text{ nm}$ とするとハイライト側の角度 $x1^\circ$ での波長シフト量 $d\lambda$ は $10\text{ nm}/2=5\text{ nm}$ になり、シェード側の角度 $x5^\circ$ では $d\lambda$ は $10/10=1\text{ nm}$ になる。図6にレッドパール塗色の色相を変えた例を示す。

(a)は[wave+]を4回押し、長波長側にシフトして変更色が赤味になった。分光反射率グラフでは変更色の青線が長波長側で上昇し、短波長側で減少した。数値では25度の色相角度 $h^*$ が9.4から18.0へ増大し、Yの色相方向へ移動した。(b)は逆に[wave-]を4回押し、青味にシフトした例である。長波長側が減少し、短波長側が若干増大している。数値では色相角度 $h^*$ が9.4から2.4へ減少し、RP(レッドパープル)の色相へシフトした。

### 2.6.2 カラーフィルターの分光反射率を乗算する方法

色味を変えるもう一つの方法は、カラーフィルターモデル分光反射率を元色の分光反射率に乗じる方法である。特に無彩色の場合は、反射率が全波長範囲に渡って一定の値を示すため、波長をシフトしても色は変わらない。無彩色の場合はこのカラーフィルター法が有効である。予め、赤(r)、緑(g)、青(b)、黄色(y)のカラーフィルターである $Fr(\lambda)$ 、 $Fg(\lambda)$ 、 $Fb(\lambda)$ 、 $Fy(\lambda)$ を用意し、これを元色の分光反射率 $R(\lambda)$ に乗じて、変更色 $R'(\lambda)$ を得る。例えば、青味にするためには(式6)のようにする。

$$R'(x, \lambda) = R(x, \lambda) \times Fb(\lambda) \quad (\text{式6})$$

図7にシルバーメタリック色を青フィルターを用いて青味に変更した例を示す。

(a)の仮想青フィルターは、乗算する強度係数が短波長側の1.01から長波長側の0.995の間にある。着色したい波長のみ係数を1.0より大きな値にし、逆に減少させたい波長の

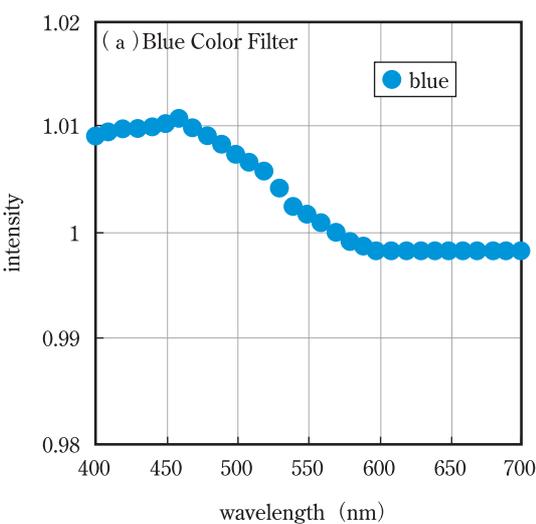
係数を1.0より小さくする必要がある。この強度係数を乗じると(b)のように短波長側が強調され、長波長側が若干減少し、青味のシルバーメタリック色が得られる。(b)は[blue+]を5回押し、[Y-]を4回押し、明度を調整した結果である。数値では25度の彩度 $c^*$ が1.0から3.5へ増大し、色相角度 $h^*$ は207からより青の方向にシフトして241になった。

これらの実施例をまとめると、メタリック塗色の色質感を変える基本操作は表1になる。表には増加指示しか示していないが、減少の指示と、更に強調するメタリックの角度の3領域の指示を組み合わせると、図2の20個の操作ボタンとなっている。操作を組み合わせることにより、カラーデザイナーが希望する色変更のシミュレーションを満足に行うことができた。

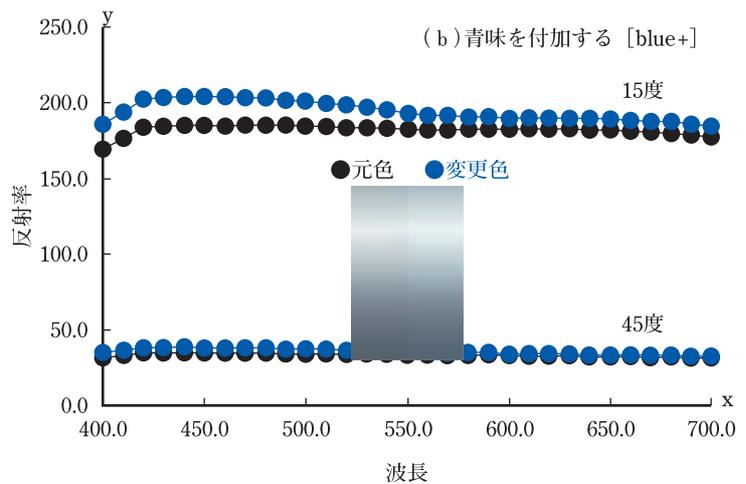
### 2.7 色変更の制限機能

このように分光反射率を基にして任意に色を変えることができるが、無制限に変更することはできない。変更色が現実に自動車塗色として実現可能か否かの保証がない。そこで色域オーバーのチェックをし、利用者に上限を警告する必要がある。具体的に弊社が過去に開発した自動車塗色3,900色を調べ、実現色域をマップ化した。このマップを用いて、様々な質感パラメータ(IV68, SV68, FF68, 彩度 $c^*$ )を塗装工程(例ソリッド色, 2C1B, 3Coat)と共にプログラムでチェックして警告するようにした。図8はその1つであり、2C1B工程のFF68に対するIV68の上限を破線で示した。

実際に適用した例を図9に示した。元色IV68=184、FF68=1.38、 $L^*25^\circ=104$ のハイライトの明度を増加させるために、[iv+]のボタンを2回、4回、6回押しした時の変更色①、②、③を図9(a)に示した。CS画像を見ると、順番に変更色のハイライトの明度が白くなり幅が広がって金属感が強



(a) 青のカラーフィルター 係数グラフ

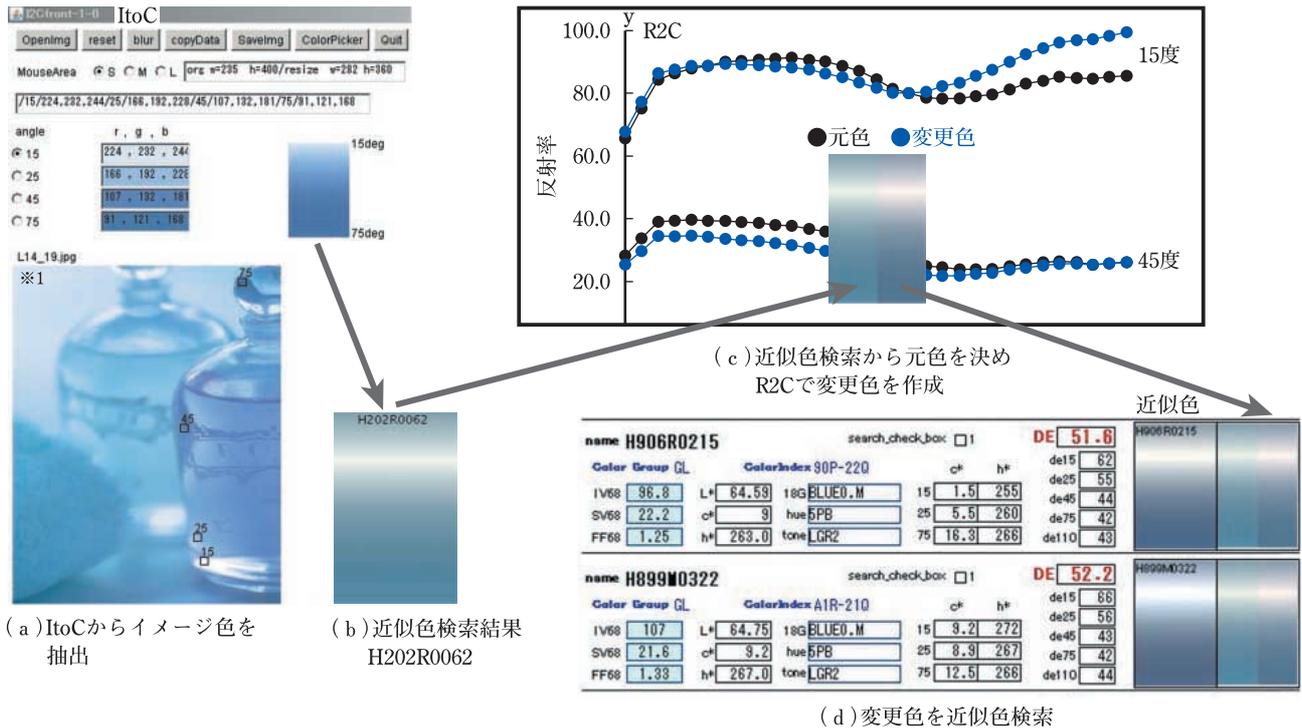


元色  $L^*=103.7$   $c^*=1.0$   $h^*=207.4$   
 変更色  $L^*=106.1$   $c^*=3.5$   $h^*=240.6$

(b) シルバーメタリックに青味を付加  
 ※測色値は25度の値

図7 カラーフィルターを用いて色相を変える





※1 Visual Disk 朝のイメージ (イシイ株式会社)

図10 ItoCと連動したR2Cの使い方例

イライトに赤味を加え、FF68を強調し変更色を得た。変更色のCS画像はハイライトの赤味が増加している。(d)再度この変更色の5角度のL\*a\*b\*を塗色データベースにペーストして変更色を近似色検索し、デザイナーが意図する赤味で金属感が強い色(近似色H906R0215)を得る事ができた。このようにItoCとR2Cを連動することにより、デザイナーが頭の中で想像する色を「見える化」し、それを塗色データベースやCCMの力を用いて具体的な塗色として評価できるデザインワークフローを構築することができた。

### 3. まとめ

メタリック塗色の色変更を、デジタル的に分光反射率を基にしてコンピュータの画面上でシミュレーションすることができた。また、シミュレーションによって作成した塗色を現実で作成できるか否かを判断し、工業的に作成が妥当な色を分光反射率レベルで作りに出した。更なる分光反射率を用いて近似色検索や、メタリックCCMを行うことにより実際の配合にすることができ、短時間で変更色を現実の塗板として作成するデザインワークフローができた。この方法を自動車会社のカースタイリストと塗料会社のカラーデザイナーが共有することによって、新色の色開発を効率化することができる。

### 参考文献

- 1) 藤枝 宗, 増田 豊: 塗料の研究, 149, 25-30 (2008)
- 2) 特開2004-258854 (関西ペイント)