

論文

選択表面反射の導入による Kubelka-Munk 関数の改良

鈴鹿 正和・村田 幸男

Improvement of the Kubelka-Munk Function by introducing Selective Surface Reflection

Masakazu Suzuka, Yukio Murata

Color System Division of Sumika Chemical Analysis Service Co., Ltd.

Abstract

The Kubelka-Munk function is widely used for CCM, however, the predicting accuracy cannot be satisfied in a higher dye concentration range (R' is below 5%).

Many reports to improve the linear correlation between dye concentrations and K/S values have been published, such as Pineo, Aspland, Fink-Jensen and L-O-G, etc. These improvements were only based on introducing internal or external Fresnel's reflections. However, the effect is not still satisfied.

In this paper we intend to improve the correlation by introducing selective surface reflection (SSR). For this purpose the following formula is proposed.

$$R = R' - f2[(n-1)^2 + (n \cdot f1 \cdot K/S)^2] / [(n+1)^2 + (n \cdot f1 \cdot K/S)^2]$$

Where R' and R are the measured and real reflectances, $f1$ and $f2$ are the appropriate coefficients, K/S is the real Kubelka-Munk value which is supposed to be calculated by R , and n is the refractive index of the material. By applying the Kubelka-Munk function using calculated R , a better linear correlation was able to be found even in a higher dye concentration range.

要旨

Kubelka-Munk 関数は、コンピュータ・カラーマッチングに広く利用されている。しかしながら、この関数では、高濃度染色領域（反射率が 5% 以下）に於いては、十分な精度が得られない。

染色濃度と K/S 値との直線性を改良する方法が、Pineo, Aspland, Fink-Jensen, Love-Oglesby-Gailey 等により提案されている。これらの改良は、Fresnel の反射光だけに着目して、なされたものである。しかしながら、この方法では、中程度の染色濃度以下の場合には、効果があるが、高濃度染色領域では、その効果は小さい。

筆者らは、この問題について、研究を行ない、実測分光反射率に、選択表面反射率 (SSR) の補正を加えた以下の式を提案することにより、

$$R = R' - f2[(n-1)^2 + (n \cdot f1 \cdot K/S)^2] / [(n+1)^2 + (n \cdot f1 \cdot K/S)^2]$$

この式で、 R' は、実測分光反射率、 R は、真の分光反射率、 n は、屈折率、 $f1$, $f2$ は係数、 K/S は、真の分光反射率から計算された K/S 値

淡色から濃色にいたる広範囲な染色濃度範囲で、染色濃度と K/S の直線関係が、著しく改良されることを見いだした。

1. はじめに

Kubelka-Munk の理論は、着色層をその厚さ方向の一次元的なモデルを用いて解析し、着色層に含まれる着色

剤に固有の吸収係数 K 及び散乱係数 S を仮定して種々の厚さにおける着色層の反射率を、この K 及び S を用いて記述したものである。

この理論によれば、裏透けや空気との境界面の影響が全くない着色層のある特定波長における反射率を R とすれば、この R と K, S との間には、次の関係が成立することが知られている。

$$K/S = (1-R)^2 / 2R \quad (1)$$

コンピュータ・カラー・マッチング (CCM) を行なう際に、この Kubelka-Munk の式は、次に示す Duncan の式と組み合わせて用いられる。

$$(K/S)_m = (K_0 + \sum C_i \cdot K_i) / (S_0 + \sum C_i \cdot S_i) \quad (2)$$

で表わされる。

ここで $(K/S)_m$ は、その吸収係数及び散乱係数がそれぞれ K_i, S_i なる n 個の着色剤をそれぞれ C_i なる濃度で混合して作った着色層の K と S との比である。 K_0, S_0 は、それぞれ着色剤を保持するビヒクル又は、繊維の吸収係数及び散乱係数である。

繊維の染色関係における CCM では、繊維の散乱係数 S_0 に比して染料の散乱係数 S_i は、無視出来る程に小さいので、 $S_i \equiv 0$ として、Duncan の方程式を次のように変形して用いられる。

$$(K/S)_m = (K/S)_s + \sum C_i (K/S)_i \quad (3)$$

$$\text{ここで } (K/S)_i = [(1-R)^2 / 2R - (K/S)_s] / C_i \quad (4)$$

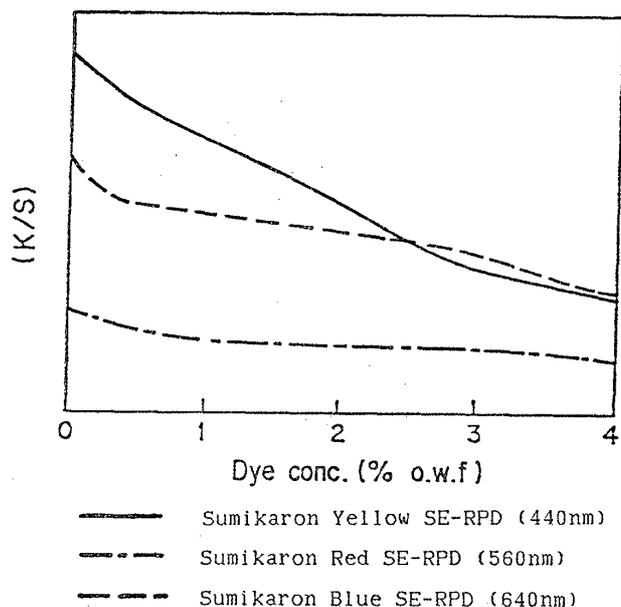
R は、染色物の分光反射率

$(K/S)_s$ は、被染色物の K/S 値

C_i は、配合染色濃度

$$R_m = 1 + (K/S)_m - \sqrt{[(K/S)_m^2 + 2(K/S)_m]} \quad (5)$$

上記のように、繊維の染色における配合染色物の分光反



図中の K/S は、単位染色濃度当たりの K/S を表わす。

図1 Kubelka-Munk の式による K/S の直線性

射率 R_m は、(1)–(5)式を用いることにより予測する事ができる。

次に、この予測分光反射率が与えられた色見本の分光反射率と可視光の全波長帯で一致するような各染料の濃度 C_i を求める計算をおこなう。

従って、CCM で予測される処方、この計算過程に大きく左右される。

予測精度向上のためには淡色から濃色にわたってこの $(K/S)_i$ の値が一定になることが必要である。

ところが、図1に示すように高濃度染色領域になるにつれて、この関係から、はずれる事がわかる。

この問題を解決するために、繊維の屈折率に起因する表面反射光に対する補正式が、Pineo, Fink-Jensen, Love-Oglesby-Gailey, Aspland らによって提案されている。これらの補正式を表1に示す。

表中の R は分光反射率、 $r, K1$ は表面反射率、 $K2$ は内面反射率、 k_0 は定数をあらわす。

表1 Kubelka-Munk の式と各種式

名称	式
Kubelka-Munk	$K/S = (1-R)^2 / 2R$
Pineo	$K/S = [1-R]^2 / [2(1-r)(R-r)]$
Fink-Jensen	$K/S = [1-R]^2 / [(R-K1)(1+K2 \cdot R)]$
Love-Oglesby-Gailey	$K/S = [K_0 - R]^2 / [(R-K1)(1+K2 \cdot R)]$
Aspland	$K/S = [1-(R-r)]^2 / [2(R-r)]$

例えば Pineo の補正式をつかった例を図3-1に、Kubelka-Munk 式の例を図3-2に、示したが、この図から明らかなように、これらの補正効果は、弱吸収帯領域では良好ではあるが、強吸収帯領域では、その効果は小さく、不十分であるといえる。

Fresnel の反射率において、垂直入射時の垂直反射では、非吸収面での反射率 rg は、

$$rg = (n-1)^2 / (n+1)^2$$

であらわされる。

また、強吸収面での反射率 rg は、

$$rg = [(n-1)^2 + (k \cdot n)^2] / [(n+1)^2 + (k \cdot n)^2]$$

ここで n は屈折率、 k は吸収係数をあらわす。

であらわされ、屈折率または吸収係数が高いと、この反射率は、大きくなる。

筆者らは、高濃度に均一に染色された繊維表面で、吸収係数が高くなり、その結果、選択表面反射光 (SSR) が生じたものと考えて、研究をおこない、実測分光反射光に、この選択表面反射の補正を加えることにより、著しい改良効果が得られることを見いだしたので報告する。

2. 方法

特に、強吸収帯領域における K/S の直線関係を改良するためには、素材の屈折率 n と、着色物の吸収係数 k の影響を受ける選択表面反射率 (SSR) R_g を考慮する必要がある。

繊維の染色の場合、この吸収係数 k は、真の K/S に比例するはずであるから、選択表面反射率 R_g は、(6)式で与えられる。

$$R_g = f_2 \cdot [(n-1)^2 + (k \cdot n)^2] / [(n+1)^2 + (k \cdot n)^2] \quad (6)$$

但し n : 素材の屈折率

$$K = f_1 \cdot (K/S)$$

真の K/S は、選択表面反射及び鏡面反射の影響を受けない真の分光反射率 R から (7) 式で求める事ができる。

$$k/S = (1-R)^2 / 2R \quad (7)$$

又、真の分光反射率 R と実測された分光反射率 R' との関係は、(8)式で与えられる。

$$R = R' - R_g \quad (8)$$

上式より、(9)式が導きだされる。

$$R = R' - f_2 \cdot [(n-1)^2 + (n \cdot f_1 \cdot K/S)^2] / [(n+1)^2 + (n \cdot f_1 \cdot K/S)^2] \quad (9)$$

ここで f_1 は、選択表面反射の影響を受けない真の K/S を吸収係数に変換するための係数で、0.04 が適当である。又、 f_2 は、物体の表面構造及び種類によって定まる係数であり、ポリエステル繊維の場合は、0.018 が適当である。

以上の関係式から、真の分光反射率 R 、 K/S 及び選択表面反射率 R_g をもとめることができる。

3. 手順

試料の準備

(1) 水 300 部に、分散染料である Sumikaron Blue SE-RPD (住友化学工業 (株) 社製) 0.025 部をポリエステル布 10 部とともに加え、130°C で 60 分間染色する。

染色後、染色物を水洗、還元洗浄、乾燥して 0.25% owf (on the weight of fiber の略で、繊維重量に対する百分率で表わした染料の量) の染色物を調製する。同様にして、0.5%、1%、2%、4%、6% owf でそれぞれ染色した染色布を調製する。

(2) Sumikaron Yellow SE-RPD, Sumikaron Red SE-RPD, Sumikaron Blue SE-RPD をそれぞれ、0.25% owf で水 300 部、ポリエステル布 10 部と共に 130°C 60 分間配合染色する。

染色後、水洗、還元洗浄、乾燥して、配合染色物を調製する。

同様にして、0.5%、1%、2% の配合染色物を調製する。
(3) Sumikaron Yellow Brown S-2RL, Sumikaron Rubine S-3GF, Sumikaron Navy Blue S-GL 200% をそれぞれ、1% owf で水 300 部、ポリエステル布 10 部と共に 130°C、60 分間配合染色する。

染色後、水洗、還元洗浄、乾燥して配合染色物を調製する。

測定と計算

(株)住化分析センター製の SICOMUC 20 システム (分光光度計は、マクベス MS-2020 プラス、コンピュータは、NEC PC-9801 シリーズを使用) を利用して (1)、(2)、(3) で調製された染色布の分光反射率の測定及び Kubelka-Munk 関数と SSR の補正を加えた関数から、それぞれの分光反射率の予測とその配合処方をもとめ、続いてそれぞれの方法で予測した分光反射率と実測分光反射率から、その色差を求め比較した。

4. 結果と考察

選択表面反射光の補正式として、Pineo らの式を用い分散染料 Sumikaron Blue SE-RPD で 6 段階の濃度で染色したポリエステル染布の分光反射率 (図 2) を用いて検討したが、染色濃度と K/S の関係は、強吸収帯領域で、直線関係から大きくはずれ、その補正効果は小さ

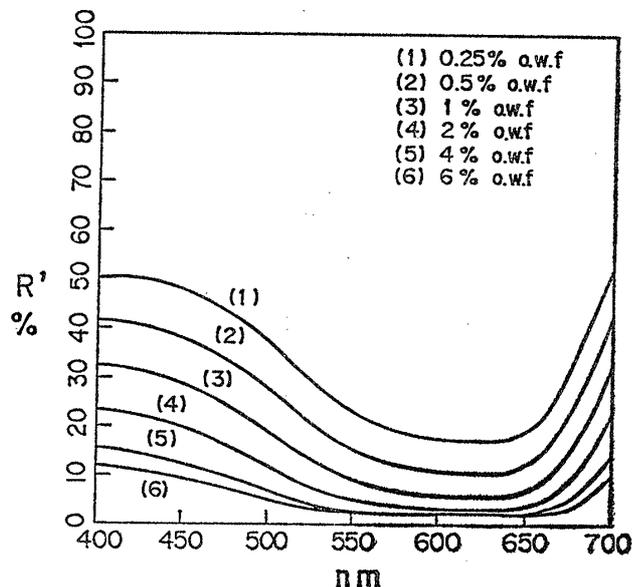


図 2 各濃度で染色された染色布の分光反射率

いことがわかった。(図 3-1, 図 3-2)

一方(6)―(9)式より、選択表面反射率を求めること、染色濃度の増加に従って、この反射率が増加することがわかった。更に、吸収係数が高くなる波長帯においてこの反射率が増加する事もわかった。(図 4)

又、実測分光反射率 R' に対する選択表面反射率 R_g の関係をプロットすると、実測分光反射率が 5% 以下から

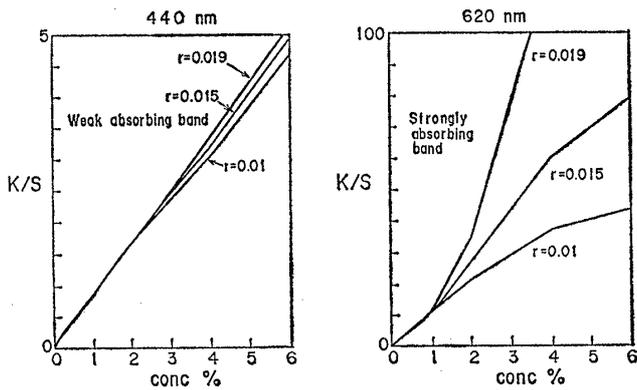


図3-1 Pineo の補正式をつかった各染色濃度に対する K/S

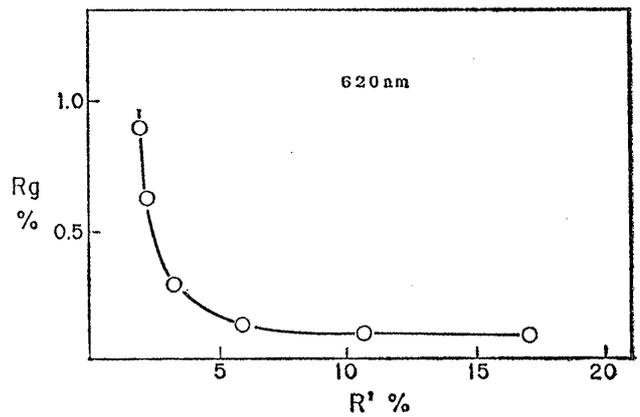


図5 実測分光反射率に対する選択表面反射率

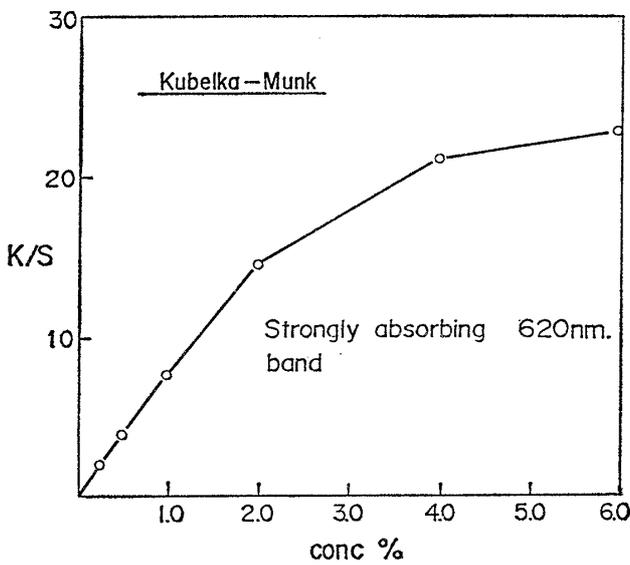


図3-2 Kubelka-Munk の式をつかった各染色濃度に対する K/S

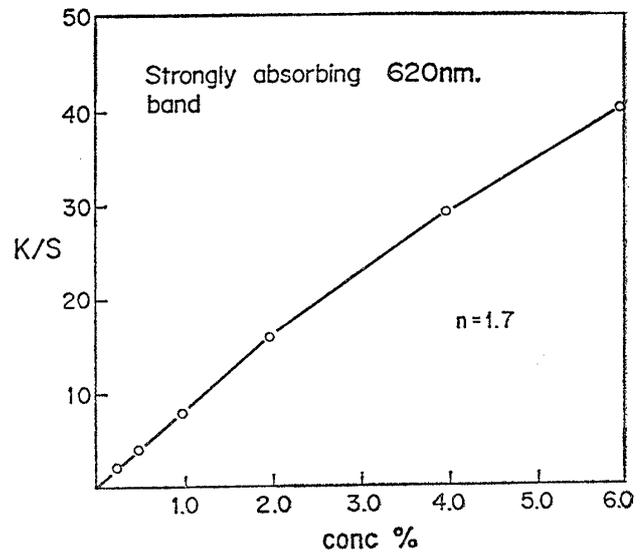


図6 各染色濃度に対する選択表面反射を補正したK/S

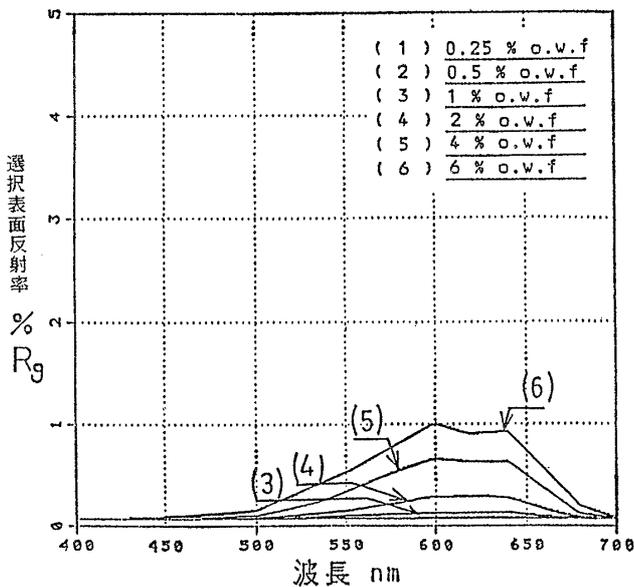


図4 各濃度で染色された染色布の選択表面反射率

この影響が非常に大きくなることがわかった。(図5) この選択表面反射率の補正を行なった真の分光反射率から求めた K/S と染色濃度との間の関係は、淡色から濃色にいたる広い範囲の染色濃度領域で、著しく良好な直線関係となった。(図6)

更に、Sumikaron Turquoise Blue S-GL, Sumikaron Yellow Brown S-2RL について Kubelka-Munk 法, Pineo 法, 選択表面反射補正法 (SSR 法) 別に各波長毎に、この関係をプロットした図を 7-12 にしめす。

これらの結果から、SSR 法は、Kubelka-Munk, Pineo らの方法よりも、はるかにすぐれた改良効果があることが認められた。

また、これらの改良効果は、実測の配合染色物の分光反射率と SSR の補正を加えた式から計算された分光反射率を比較することで、評価できるので 0.5% owf および 2% owf の等量配合で染色した染色配合物の実測分光反射率と、Kubelka-Munk 法及び SSR 法で計算されたそれぞれの分光反射率をプロットしたものを図13に示す。

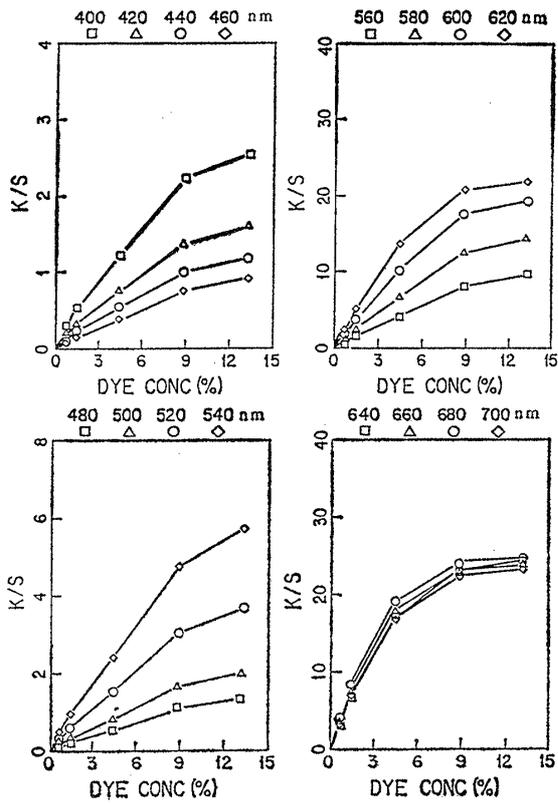


図7 Kubelka-Munkの式をつかった各染色濃度に対する K/S (Sumikaron Turquoise Blue S-GL)

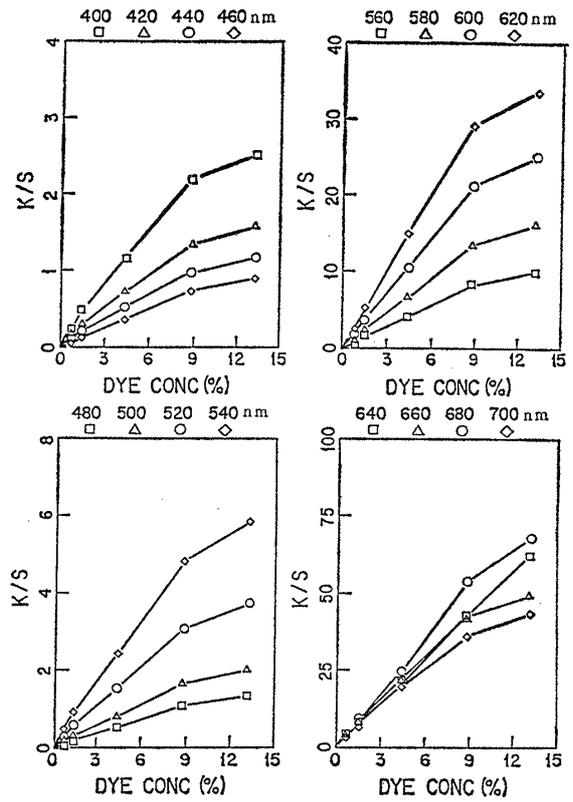


図9 SSR法の式をつかった各染色濃度に対する K/S (Sumikaron Turquoise Blue S-GL)

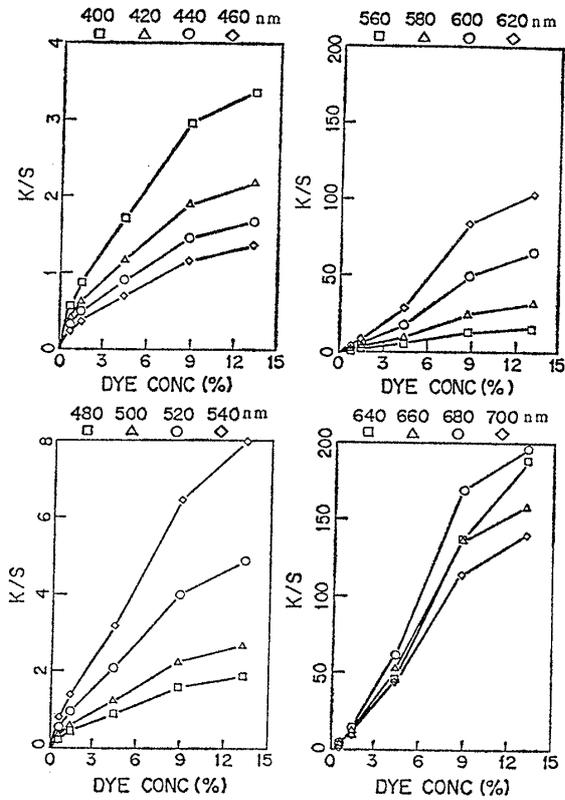


図8 Pineoの式をつかった各染色濃度に対する K/S (Sumikaron Turquoise Blue S-GL)

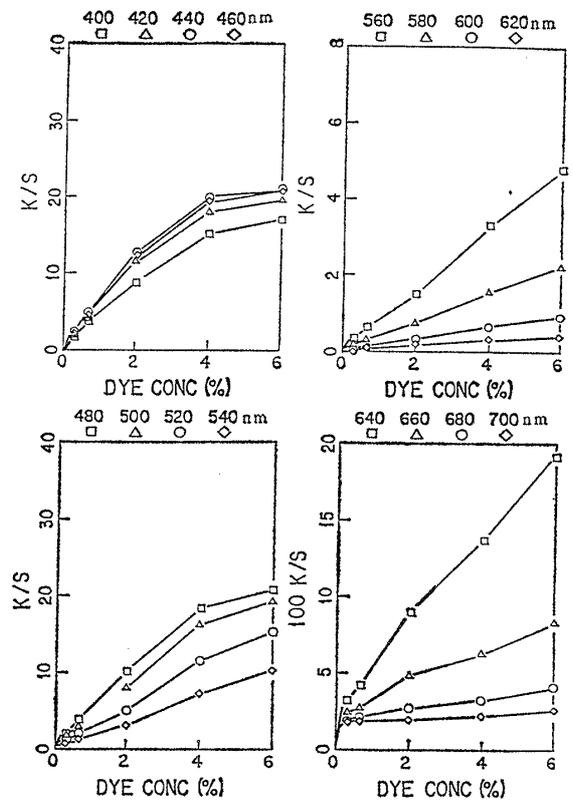


図10 Kubelka-Munkの式をつかった各染色濃度に対する K/S (Sumikaron Yellow Brown S-2RL)

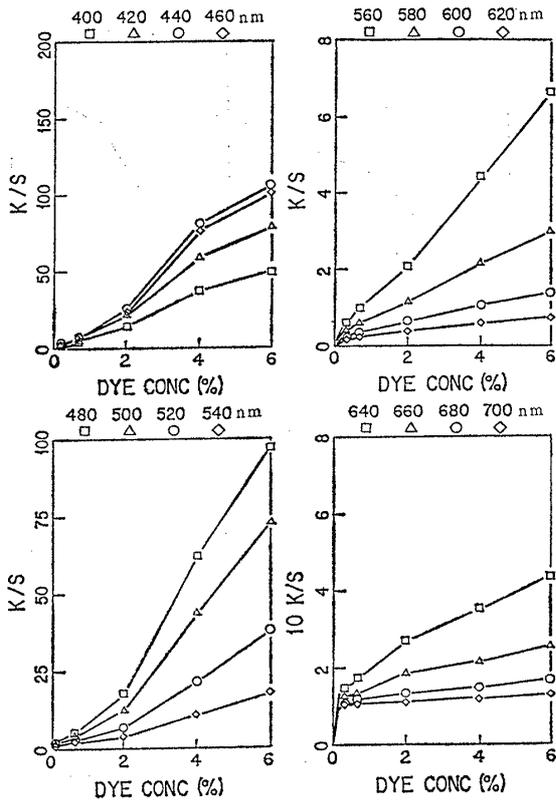


図11 Pinea の式をつかった各染色濃度に対する K/S (Sumikaron Yellow Brown S-2RL)

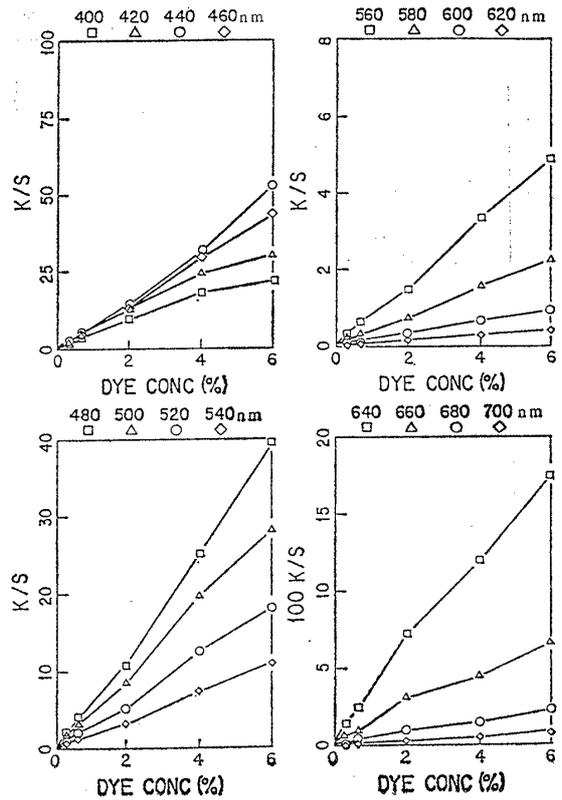


図12 SSR 法の式をつかった各染色濃度に対する K/S (Sumikaron Yellow Brown S-2RL)

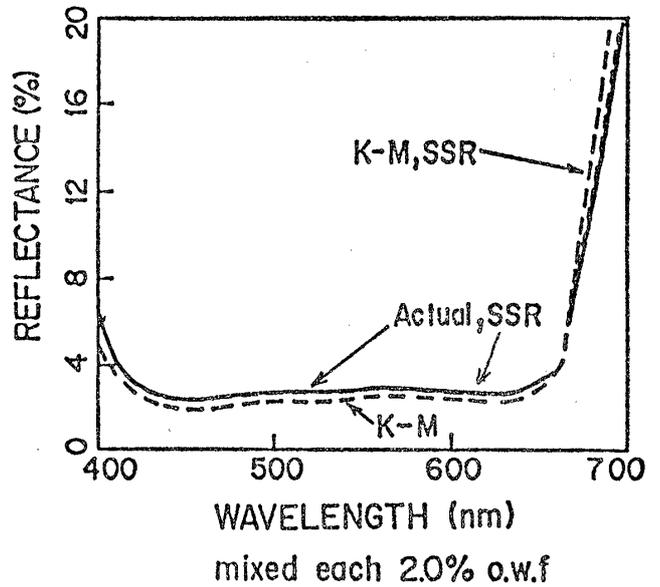
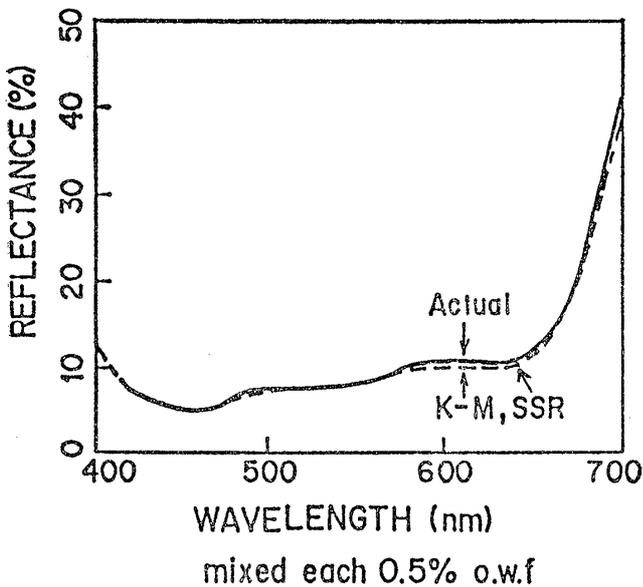


図13 実測分光反射率と SSR 法および Kubelka-Munk 法から予測された反射率の比較

この図からも明らかなように、予測精度は、著しく良好であることがわかった。

さらに、これらを 1976 CIE $L^* a^* b^*$ 色差で比較した例を表 2、表 3 に示す。

これらの結果からわかるように、選択表面反射光 (S

SR) の補正を加えることにより、明らかに K/S と染色濃度との間の直線関係は、改良され、その予測精度も著しく向上することが認められた。

表2 Kubelka-Munk の式及び SSR の補正式から予測された分光反射率と実測分光反射率との色差

染料名	処方 % owf	色差 (1976 CIE L*a*b*)	
		Kubelka-Munk 法	SSR 法
Sumikaron			
Yellow SE-RPD	0.25	1.44	1.46
Red SE-RPD	0.25		
Blue SE-RPD	0.25		
Sumikaron			
Yellow SE-RPD	0.5	1.55	1.69
Red SE-RPD	0.5		
Blue SE-RPD	0.5		
Sumikaron			
Yellow SE-RPD	1.0	1.21	1.32
Red SE-RPD	1.0		
Blue SE-RPD	1.0		
Sumikaron			
Yellow SE-RPD	2.0	2.48	0.72
Red SE-RPD	2.0		
Blue SE-RPD	2.0		

表3 Kubelka-Munk の式及び SSR の補正式から予測された処方とその色差

濃色 Blue

染料名	処方 % owf	Kubelka- Munk % owf	色差	SSR法 % owf	色差
Sumikaron					
Yellow Brown S-2RL	1.0	1.174		0.992	
Sumikaron					
Rubine S-3GF	1.0	0.654		0.983	
Sumikaron					
Navy Blue S-GL 200%	1.0	0.987		1.006	
			1.87		0.45

謝辞

本研究にあたり、協力を頂いた当事業部の井上良夫氏、野崎博史氏に感謝の意を表する。

参考文献

- (1) P. Kubelka and F. Munk, Z. Tech. Phys., 12, (1931) 593
- (2) O. W. Pineo, U. S. Patents 2194910 and 2218357

(1940)

- (3) B. R. Love, S. Oglesby and I. Gailey, J. Soc. Dyers Colourists 81 (1965) 609
- (4) J. R. Aspland, Textile Chemist and Colorist Vol 5 No. 10 (1973) 222
- (5) S. Minato, Color research and application Vol 2 No. 3 (1977) 124
- (6) G. Kortüm, Reflectance Spectroscopy, Springer-Verlag, Berlin (1969)

(受付日：昭和60年10月30日)



鈴鹿 正和

昭和21年11月17日生

昭和44年3月 京都工芸繊維大学色染工芸学科卒業

昭和46年3月 同上大学院修士課程修了

住友化学工業(株)大阪研究所に勤務後、現在(株)住化分析センターカラーシステム事業部 次長 日本色彩学会



村田 幸男

昭和2年8月10日生

昭和24年3月 桐生工業専門学校色染科業

(株)住化分析センター顧問

学会設立時より会員となり、現在学会副会長(関西支部長) 繊維学会、繊維機械学会、日本繊維技術士会