

論文

光散乱を考慮した網点モデルによる多色印刷物の色予測 *

Color Prediction of Multi-Color Prints Using a Halftone Dot Model with Consideration of Light Scattering*

東 吉彦 **, *** · 犬井正男 ** · 内川恵二 ***

Yoshihiko AZUMA**, ***, Masao INUI** and Keiji UCHIKAWA***

** Department of Media and Image Technology, Faculty of Engineering, Tokyo Polytechnic University

1583, Iiyama, Atsugi, Kanagawa, 243-0297 JAPAN

*** Department of Information Processing, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

4259, Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, 226-8503 JAPAN

Abstract

In halftone printing, the halftone dot size must be precisely controlled to reproduce target colors. Therefore the relationship between dot area fractions and printed colors needs to be described qualitatively. We created a color prediction model in which the ink layer of a halftone dot is thinner in the peripheral region than in the central region; the peripheral region represents the effect of light scattering inside paper on the color reproduction of halftone prints. By using this model, the nonlinearity in the color reproduction of halftone prints could be approximated with a high accuracy. We also developed a method to apply the model to the prediction of a multi-color print and evaluated the method with 9 different print samples made using a combination of 3 types of paper and 3 types of dot shapes. As a result, the proposed method achieved almost the same prediction performance as the Yule-Nielsen modified Neugebauer model and the spectral Neugebauer model. The proposed model is useful not only in the color prediction of halftone prints, but also in understanding their color reproduction characteristics. This is because it uses only physical parameters.

1. はじめに

ドットの面積変調により階調再現を行う網点印刷方式では、再現目標となる色に応じて網点の面積を正確に制御することが重要となる。そのためには、網点面積と再現色の関係を定量的に記述する必要があり、種々の方法が提案されてきた¹⁻⁵⁾。それらの方法を大別すると、網点面積と再現色間での因果関係をブラックボックスとして扱う方法と、色再現に関わる物理現象の全体や一部を、物理的な変量或いは経験的パラメータも組み合わせてモデル化する方法の2通りに分類できる。前者の方法では、種々の網点面積の組合せに対応した色票を含むカラーチャートを印刷

し、その測色結果を基に、網点面積と測色値の数値的対応関係を、ルックアップテーブルと補間演算の組合せ^{2, 3)}、回帰分析に基づく代数演算^{2, 4)}、ニューラルネットワーク^{2, 5)}などを用いて求める。この場合、印刷材料や印刷条件が異なるごとに数百色から千数百色の色票を含むカラーチャートを印刷して測色しなければならず、手間と時間がかかる。また、ある程度の面積内に色票を配置して印刷する必要があり、材料特性の不均一性や印刷条件の変動の影響を受けやすい。後者の方法では、モデルに基づいて色を予測するため、モデルの変数値の決定に必要な色票数も少なく、材料や印刷条件などの影響をモデルに組み込むことでそれらを反映した測色値が得られるため、毎回、多数の色票を印刷して測色する必要はない。本研究では、後者のような色再現のモデルを利用した色の予測方法を検討した。

色再現のモデルの基礎となる、単色網点印刷物における

* 2011年6月20日受理

** 東京工芸大学工学部メディア画像学科
(〒243-0297 神奈川県厚木市飯山1583)

*** 東京工業大学大学院総合理工学研究科物理情報システム専攻
(〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

階調再現モデルの古典的かつ代表的な例は Murray-Davies モデル⁶⁾で、網点印刷物の総合反射率は、印字部の反射率と非印字部である支持体の反射率にそれぞれの面積比を重み付け平均して求められる。しかしながら、実際の網点印刷物の反射率はモデルによる計算値よりも低い値を示し、幾何学的網点面積から予想されるよりも多くの光を吸収する、いわゆる光学的ドットゲインを生ずる。光学的ドットゲインの現れ方はスクリーン線数、網点形状、支持体の種類によっても異なり、これらの効果を1つの無次元定数によって表したもののが Yule-Nielsen モデル⁷⁾で、種々の条件に応じて経験的に求められた値が用いられ、実際の結果をよく近似すると言われている。しかし、特定の値の場合を除けば定数の値自体に理論的な根拠はない¹⁾。Murray-Davies モデルを多色印刷物に拡張したのが Neugebauer モデル⁸⁾で、光学的ドットゲインを考慮した種々の改良モデルが提案されている^{9, 10)}。さらには、ドットの広がりも加味したモデルも提案されている¹¹⁾。

ところで、網点印刷物では光学的ドットゲインにより階調再現特性に非線形性が現れるが、これは色再現特性においても観察される¹²⁻¹⁴⁾。その端的な例は、単色網点印刷物の網点面積比を段階的に変えていった場合に、その xy 色度図上での色度軌跡が弓形を描く現象である。本来、印刷されたインキ層の厚さが一定で、インキ層内および被印刷体である紙内部での光散乱がないならば、単色網点印刷物の色は、印字部のインキの色と非印字部の紙の色の2色を原色とする加法混色に基づいて再現されるので、その色度点はインキと紙の2色の色度点を結ぶ直線上を移動すると予想される。しかし、実際の印刷物の測定結果によれば Fig.1 のように色度点は明らかに直線からはずれた軌跡を描く。このような曲線的な軌跡を描くためには、少なくとも

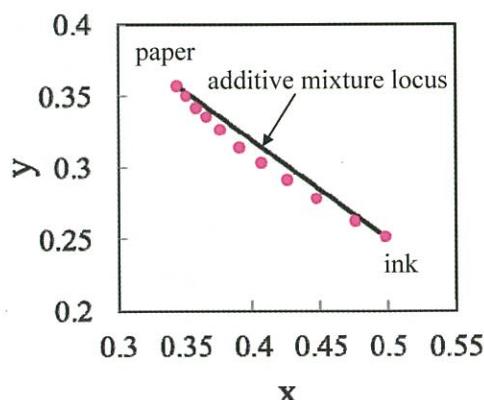


Fig.1 CIE xy chromaticity coordinates of a magenta halftone ramp.

も3つの原色、つまり、インキと紙の色以外に、もう1つの原色に相当する成分が必要と考えられる。鈴木ら¹²⁾は、Fig.2 に示すように、一般的の紙のような光散乱性支持体の網点印刷物へ光が入射した際の光路を4種類に分類し、そのうち、光散乱によって生じる紙→インキ（光路②）、インキ→紙（光路④）の2種類の成分光が第3の原色に相当することを示唆した。Huntsman¹⁵⁾や本庄ら¹⁶⁾はこれらの散乱光成分が光学的ドットゲインの原因であることを指摘している。また、内藤ら¹⁷⁾は、網点の境界部に中間濃度域を設けることで、この成分光を考慮した光学的ドットゲインの補正方法を提案している。

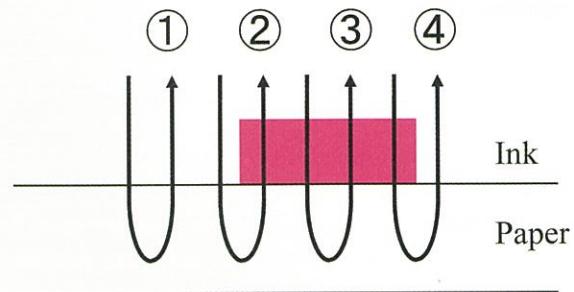


Fig.2 Illustration of the four paths that light can take in passing through the halftone print.

一方、国司ら¹⁸⁾は紙上のインキの転移状態に着目し、網点中央部から周辺部に向かってインキ層の厚さが連続的に減少する状態を、インキ層の厚さが2段階で変わるモデルで近似した。これにより、網点印刷物の非線形な色再現特性を高い精度で予測できる可能性を示した。このモデルでは、周辺部の薄いインキ層が第3の原色成分に相当する。周辺部の薄いインキ層の厚さが中央部の1/2と1/3の場合について検討されたが、インキ層と紙の面積比が負になる場合が生じるという問題があった¹⁸⁾。また、周辺部の厚さとして1/2と1/3を選んだ根拠は示されていないが、おそらく1/2という値はインキ付着状態（厚さ=1）と非付着状態（厚さ=0）の中間状態を想定したものと思われる。なお、多色刷り印刷物への適用については充分な検討がなされておらず、可能性を示すにとどまっている。また、反射率を分光データで扱っているが波長間隔が40 nmと広いため、分光データとしては精度的に不充分で、結果の信頼性について疑問が残っている。

われわれは、前述の光路分類における散乱光成分を第3の原色成分としてモデルに組み込む方法を検討し、国司らとは異なる観点から網点周辺部に厚さの薄いインキ層（フリンジ）をもつ網点構造モデル（以後コア・フリンジモデル）

ルと呼ぶ)を考案した¹⁹⁾。各部の面積比は、中央部(コア部)と周辺部(フリンジ部)の面積比が常に正の値をとるよう制約条件を設けて、最適化計算により求めた。このモデルを用いて単色網点印刷物の色再現特性を記述した結果、非線形な特性を記述できることを確認した。つぎにこのモデルを多色印刷物に適用するための方法を開発し、多色印刷物の色予測性能を評価した結果、良好な予測精度が得られることを確認した。本論文では、これらの成果について報告する。

2. コア・フリンジモデル

2.1 基本概念

Murray-Davies モデルや Yule-Nielsen モデルでは、Fig.3 (a) のように網点は一定厚さのインキ層で形成されていることを仮定している。いま、網点の幾何学的な面積比を a ($0 \leq a \leq 1$)、波長を λ 、インキと用紙の分光反射率をそれぞれ $R_i(\lambda)$, $R_p(\lambda)$ と表せば、網点画像の総合的な分光反射率 $\hat{R}(\lambda)$ はそれぞれのモデルでは以下のように表される。

[Murray-Davies モデル]

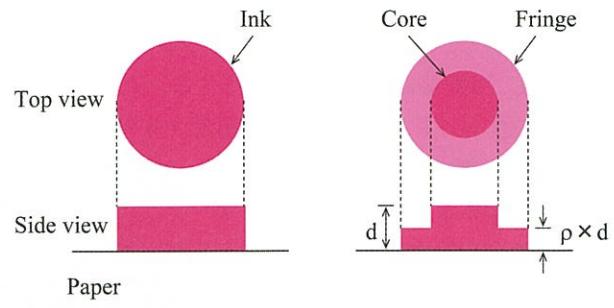
$$\hat{R}(\lambda) = aR_i(\lambda) + (1-a)R_p(\lambda) \quad \dots (1)$$

[Yule-Nielsen モデル]

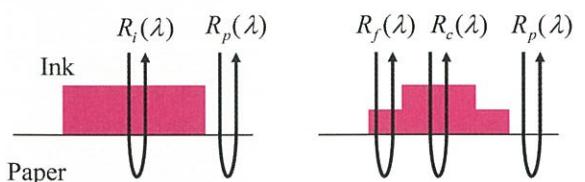
$$\hat{R}(\lambda) = \left\{ aR_i(\lambda)^{\frac{1}{n}} + (1-a)R_p(\lambda)^{\frac{1}{n}} \right\}^n \quad \dots (2)$$

ここで、(2) 式における指数 n はスクリーン線数や被印刷体によって異なる定数で、その値は経験的に決められる。

一方、コア・フリンジモデル¹⁹⁾では、Fig.3 (b) のように網点は中央のコア部と、コア部よりインキ層の薄い周辺のフリンジ部で構成される。コア部とフリンジ部の厚さはそれぞれ一定で、フリンジ部の厚さはコア部の ρ 倍 ($0 < \rho < 1$) と仮定する。また、Fig.4 に示すようにコア部、フリンジ部、用紙部に入射した光はそれぞれの領域内のみを通過し、おののの分光特性に応じて選択的に吸収・反射された後、入射した領域と同じ領域から外へ出るものと仮定し、異なる領域から外へ出ることはない。また、紙とインキでの表面反射、インキ内での光散乱、紙と空気、およびインキと空気の界面における多重反射などについては考えない。このモデルにおいて、総合的な分光反射率 $\hat{R}(\lambda)$ は次式で表される。



(a) Murray-Davies model (b) Core-Fringe model
Fig.3 Illustration of halftone dot structures of Murray-Davies model and Core-Fringe model.



(a) Murray-Davies model (b) Core-Fringe model
Fig.4 Reflection components in Murray-Davies model and Core-Fringe model.

$$\hat{R}(\lambda) = a_c R_c(\lambda) + a_f R_f(\lambda) + (1-a_c - a_f) R_p(\lambda) \quad \dots (3)$$

ここで、 $R_c(\lambda)$, $R_f(\lambda)$, $R_p(\lambda)$ はそれぞれコア部、フリンジ部、用紙部の分光反射率、 a_c , a_f はそれぞれコア部、フリンジ部の面積比である。ただし、 $R_c(\lambda)$ は $R_i(\lambda)$ と等しいとする。フリンジ部の光路はコア部の光路に比べてインキ層を通る距離が ρ 倍となるから、インキの透過濃度がインキ層の厚さに比例するという Lambert-Beer 則を適用すると、フリンジ部の分光反射率は次式で表すことができる。

$$R_f(\lambda) = R_c(\lambda)^\rho \cdot R_p(\lambda)^{1-\rho} \quad \dots (4)$$

(4) 式を (3) 式に代入して次式が得られる。

$$\hat{R}(\lambda) = a_c R_c(\lambda) + a_f R_c(\lambda)^\rho \cdot R_p(\lambda)^{1-\rho} + (1-a_c - a_f) R_p(\lambda) \quad \dots (5)$$

この (5) 式がコア・フリンジモデルにより単色網点印刷物の再現色を表す一般式である。なお、フリンジ部の厚さを表すパラメータ ρ を除けば、(5) 式は国司らが用いた予測式と同形の式となる。

このモデルにおける光の入射・射出経路を Fig.2 の各光路と比較すると、コア部は光路③、フリンジ部は光路②と光路④、用紙部は光路①に対応する。ただし、光路②と光路④はインキ層を1回だけ通過するので、正確には、フリンジ部の厚さがコア部の半分、すなわち $\rho=0.5$ の場合が対応する。このように、コア・フリンジモデルでは3種類の分光特性の光路だけを考えるが、光学的ドットゲインの原因となる散乱光成分がフリンジ部として網点の物理的な構造に組み込まれている点に特徴がある。本研究では上記光路分類との対応を考慮して $\rho=0.5$ の場合を検討した。

2.2 コアとフリンジの面積比の決定方法

(5) 式において、 $\rho=0.5$ とし、 $R_c(\lambda)$ は単色のベタ部、 $R_p(\lambda)$ は用紙を測定して得られるので、未知の変量は a_c と a_f である。これらの値は直接測定することはできないため、本研究では最小二乗法による最適化の手法を用いて決定する。すなわち、任意の印刷色票について、 N を測定波長数とするとき、波長 λ_j ($j=1 \sim N$) の分光反射率の実測値を $R(\lambda_j)$ 、(5) 式による予測値を $\hat{R}(\lambda_j)$ とすると、すべての測定波長における予測誤差の二乗和 S は次式で与えられる。

$$S = \sum_{j=1}^N \{\hat{R}(\lambda_j) - R(\lambda_j)\}^2 \quad \cdots (6)$$

この S を目的関数として最小化するような a_c と a_f の値を求ることで、最適値が得られる。

2.3 多色印刷物への展開

通常のプロセス印刷ではシアン (C)、マゼンタ (M)、イエロー (Y)、ブラック (K) の4色のインキを用いるが、ここでは簡単のため C, M, Y の3色の場合を説明する。基本的な考え方は4色の場合でも同様である。多色刷りの色予測モデルとして代表的なのは Neugebauer モデルで、総合的な分光反射率 $\hat{R}(\lambda)$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} \hat{R}(\lambda) = & A_p R_p(\lambda) + A_C R_C(\lambda) + A_M R_M(\lambda) + A_Y R_Y(\lambda) \\ & + A_{CM} R_{CM}(\lambda) + A_{CY} R_{CY}(\lambda) + A_{MY} R_{MY}(\lambda) \\ & + A_{CMY} R_{CMY}(\lambda) \end{aligned} \quad \cdots (7)$$

ここで、右辺の $R_j(\lambda)$ ($j=P, C, M, Y, CM, CY, MY, CMY$) は C, M, Y 3 色の網点の重なりで生成される 8 つの異なる色領域（通称 Neugebauer 原色と呼ばれる）の分光反射率で、それらの添字は、P が用紙、C, M, Y が

各インキのベタによる 1 次色、CM, CY, MY がそれらの重なりによる 2 次色、CMY が 3 次色を表す。 A_j は対応するそれらの面積比で、 a_C, a_M, a_Y を C, M, Y 各網点の面積比として、Demichel の関係式に基づき次式で計算される。

$$\begin{aligned} A_p &= (1-a_C)(1-a_M)(1-a_Y) \\ A_C &= a_C(1-a_M)(1-a_Y) \\ A_M &= (1-a_C)a_M(1-a_Y) \\ A_Y &= (1-a_C)(1-a_M)a_Y \\ A_{CM} &= a_C a_M(1-a_Y) \\ A_{CY} &= a_C(1-a_M)a_Y \\ A_{MY} &= (1-a_C)a_M a_Y \\ A_{CMY} &= a_C a_M a_Y \end{aligned} \quad \cdots (8)$$

なお、網点の面積比には公称値よりも、最小二乗法により最適化された実効網点面積比を以下の式より求めて用い方方が、より良好な予測精度が期待される¹⁾。

$$a_{eff} = \frac{\sum_{j=1}^N (R_t(\lambda_j) - R_p(\lambda_j))(R_s(\lambda_j) - R_p(\lambda_j))}{\sum_{j=1}^N (R_s(\lambda_j) - R_p(\lambda_j))^2} \quad \cdots (9)$$

ここで、

a_{eff} : 実効網点面積比

$R_t(\lambda)$: 網点印刷部の総合分光反射率

$R_s(\lambda)$: ベタ印刷部の分光反射率

$R_p(\lambda)$: 用紙の分光反射率

一方、コア・フリンジモデルでは、C, M, Y 3 色を重ね刷りした場合、Fig.5 のモデル図に示すようにコアとフリンジの重なりによって 27 の異なる色領域が形成される。

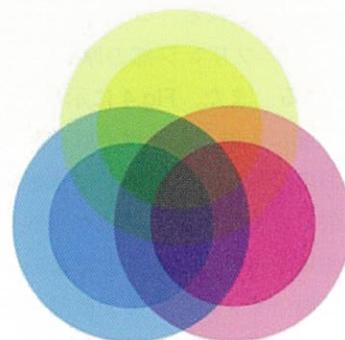


Fig.5 Illustration of the overlap of C, M, and Y halftone dots in Core-Fringe model. There also exists the overlapped region of the C, M, and Y fringe regions, though not shown in the figure.

したがって、総合的な分光反射率は次式で表される。

$$\hat{R}(\lambda) = \sum_{k=1}^{27} A_k R_k(\lambda) \quad \cdots (10)$$

ここで、 $R_k(\lambda)$ は 27 の色領域 k ($k=1 \sim 27$) の分光反射率、 A_k は対応するそれらの面積比で、Demichel の関係式から次式で与えられる。

$$A_k = a_{C,l} \cdot a_{M,m} \cdot a_{Y,n} \quad \cdots (11)$$

網点面積比 の添字記号 C, M, Y はインキの色を表し、 l, m, n はコア、フリンジ、用紙のそれぞれを示す記号 c, f, p のいずれかに対応する。なお、 a に関しては以下の関係がある。

$$\begin{aligned} a_{C,c} + a_{C,f} + a_{C,p} &= a_{M,c} + a_{M,f} + a_{M,p} \\ &= a_{Y,c} + a_{Y,f} + a_{Y,p} \quad \cdots (12) \\ &= 1 \end{aligned}$$

つぎに、 $R_k(\lambda)$ についてはその領域において重なり合うコア、フリンジ、用紙の組合せを考慮して求める必要があるが、とりわけ、フリンジを含む領域での $R_k(\lambda)$ は直接測定することができないので、その計算方法が鍵となる。検討の結果、Neugebauer 原色の分光反射率データのみを用いて求める独自の方法を採用した。Table 1 に、 $R_k(\lambda)$ の算出に用いる Neugebauer 原色の組合せを示す。Table 1において、A 行と B 列に Neugebauer 原色を示し、使用する組合せに該当する箇所に○、○、△の記号が示してある。以下に $R_k(\lambda)$ の算出方法を 3 つの領域に分けて説明する。

Table 1 Combination of Neugebauer primary colors used for calculation of the spectral reflectances of the 27 regions generated by the overlaps of cores and fringes.

A B	P	C	M	Y	CM	CY	MY	CMY
None	○	○△	○△	○△	○△	○△	○△	○△
C	-	-	-	-	○	○	-	○
M	-	-	-	-	○	-	○	○
Y	-	-	-	-	-	○	○	○
CM	-	-	-	-	-	-	-	○
CY	-	-	-	-	-	-	-	○
MY	-	-	-	-	-	-	-	○

i) フリンジ部のインキ層を含まない領域

用紙部、重なりのないコア部、およびコア部どうしが重なる領域で、Table 1 の○印で示す Neugebauer 原色の 8 領域が相当し、測定した Neugebauer 原色の分光反射率の値をそのまま用いる。

ii) フリンジ部のインキ層だけを含む領域

重なりのないフリンジ部、およびフリンジ部どうしが重なる 7 つの領域で、Table 1 の△印で示す 1 次色、2 次色および 3 次色の分光反射率を $R_N(\lambda)$ で代表すると、 $R_k(\lambda)$ は Lambert-Beer 則を用いて次式で求められる。

$$R_k(\lambda) = \sqrt{R_N(\lambda) \times R_p(\lambda)} \quad \cdots (13)$$

ここで、 $R_p(\lambda)$ は用紙の分光反射率である。

iii) フリンジ部のインキ層とコア部のインキ層を共に含む領域

フリンジ部のインキ層とコア部のインキ層が重なる 12 の領域で、Table 1 の○印に対応する A 行の Neugebauer 原色の分光反射率を $R_{NA}(\lambda)$ 、B 列の Neugebauer 原色の分光反射率を $R_{NB}(\lambda)$ とすると、 $R_k(\lambda)$ は Lambert-Beer 則を用いて次式で求められる。

$$R_k(\lambda) = \sqrt{R_{NA}(\lambda) \times R_{NB}(\lambda)} \quad \cdots (14)$$

3. 従来モデルとの比較

従来モデルとの比較のため Neugebauer モデルを含めて以下の 2 つを選び、提案モデルと比較した。

3.1 Yule-Nielsen 修正 Neugebauer モデル^{9, 10)}

このモデルでは次の予測式を用いる。

$$\begin{aligned} \hat{R}(\lambda) &= \left\{ A_p R_p(\lambda)^{1/n} \right. \\ &+ A_C R_C(\lambda)^{1/n} + A_M R_M(\lambda)^{1/n} + A_Y R_Y(\lambda)^{1/n} \\ &+ A_{CM} R_{CM}(\lambda)^{1/n} + A_{CY} R_{CY}(\lambda)^{1/n} + A_{MY} R_{MY}(\lambda)^{1/n} \\ &\left. + A_{CMY} R_{CMY}(\lambda)^{1/n} \right\}^{1/n} \quad \cdots (15) \end{aligned}$$

ここで、 n はスクリーン線数や紙の種類で異なる定数で、本研究では C, M, Y 単色階調ステップ全体の分光反射率実測値との二乗誤差を最小化する値を用いる。

3.2 分光 Neugebauer モデル²⁰⁾

Neugebauer モデルにおいて、原色の面積比が波長に依存して変化するとの考えに基づくもので以下の式で予測される。

$$\begin{aligned}
 \hat{R}(\lambda) = & A_p(\lambda)R_p(\lambda) \\
 & + A_C(\lambda)R_C(\lambda) + A_M(\lambda)R_M(\lambda) + A_Y(\lambda)R_Y(\lambda) \\
 & + A_{CM}(\lambda)R_{CM}(\lambda) + A_{CY}(\lambda)R_{CY}(\lambda) + A_{MY}(\lambda)R_{MY}(\lambda) \\
 & + A_{CMY}(\lambda)R_{CMY}(\lambda)
 \end{aligned} \quad \cdots (16)$$

ここで、 $A_k(\lambda)$ ($k=P, C.M.Y, CM, CY, MY, CMY$) は Neugebauer 原色の面積比で、C, M, Y の各分光網点面積比を $a_C(\lambda)$, $a_M(\lambda)$, $a_Y(\lambda)$ と表せば、(8) 式の分光形式の式より求められる。これらを代表して $a(\lambda)$ で表せば、 $a(\lambda)$ は次式で与えられる。

$$a(\lambda) = \frac{R_t(\lambda) - R_p(\lambda)}{R_s(\lambda) - R_p(\lambda)} \quad \cdots (17)$$

ただし、

$R_t(\lambda)$: 網点印刷部の総合分光反射率

$R_s(\lambda)$: ベタ印刷部の分光反射率

$R_p(\lambda)$: 用紙の分光反射率

4. 実験

C, M, Y 3 色の組合せで再現される色票の色を 8 色の Neugebauer 原色の分光反射率データを用いて予測し、モデルの性能を評価した。

4.1 試料

実験に使用した試料は、1 次色、2 次色、3 次色と用紙の色を含む Neugebauer 原色 8 色、C, M, Y の単色階調ステップ、およびモデルの予測性能評価用色票群からなり、1 枚のシート上に印刷した。単色階調ステップには、C, M, Y それぞれの網点面積比を 0.1 から 0.9 まで 0.1 間隔で変えた 9 段階のステップ 27 色が含まれる。これに用紙の色と 1 次色 3 色を含めた 31 色がモデルの変数値の決定に使用される。予測性能評価用色票群には、C, M, Y それぞれの網点面積比を 0 から 1 まで 0.1 間隔で変えたそれらの組合せで構成される $11^3 = 1331$ 色の色票が含まれる。

試料はオフセット印刷を用いて作成した。印刷機は三菱重工製枚葉印刷機 ダイヤ 3H-4、刷版はフジフィルム製サーマルタイプ CTP 版 HP-F、プランケットはバルカン製フォリオ、インキは Japan Color 準拠の DIC 製 FusionG EZ N タイプを使用した。スクリーン線数は商業印刷において最も一般的な 175 line/inch とした。網点の形状はラウンド、スクエア、ラウンドスクエアの 3 種を用いた。印刷用紙はキャストコート紙、アート紙、コート紙の 3 種類で、坪量はいずれも 127.9 g/m^2 である。なお、作成した試料は、

枚葉印刷用 Japan Color 2007 の規定条件を満たしていることを確認した。

また、印刷試料との比較のため、レーザー溶融型熱転写方式の DDCP カラーディジョン II (コニカミノルタ製) を用いて、坪量 127.9 g/m^2 のアート紙にラウンドスクエアにて同様の試料を作成した。カラーディジョン II は、通常の印刷に比べて網点形状のばらつきが小さく、インキ濃度も一定に出力できるという特徴がある²¹⁾。

4.2 測定

試料の分光反射率を、GretagMacbeth 社の分光測色機 Spectrolino と自動測定装置 Spectroscan を用いて測定した。測定条件は、ブラックバッキングで測定波長範囲 380 ~ 730 nm、測定波長間隔 10 nm、測定幾何条件は 45/0 である。1 色票あたり 5 回測定したデータの平均より分光反射率データを得て、ISO 13655 の方法²²⁾に基づき、補助標準イルミナント D50、 2° 視野標準観測者条件で測色計算を行い、三刺激値 XYZ、xy 色度座標、および L*a*b* 値を求めた。

4.3 モデル変数の値の決定

コア・フリンジモデルと Yule-Nielsen 修正 Neugebauer モデルにおける変数の値は解析的に直接求めることができない。そこで、Microsoft 社 Excel のソルバーを用いて繰り返し計算により予測誤差の二乗和を最小化する最適値を求めた。ソルバーでは、予め設定した制約条件の下で、目的関数を最小にする最適な変数の値を得ることができる。

5. 結果

5.1 コアとフリンジの面積比

Fig.6 に例として、スクエアの網点でコート紙に印刷した試料について得られたコア部とフリンジ部の面積比を示す。C, M, Y のいずれの試料においても、コア部の面積比は網点面積比の増加にほぼ比例するよう增加している。しかしながら、網点面積比の公称値よりは少し小さい。一方、フリンジ部の面積比は、網点面積比 0.5 付近で最大値となるような放物線状の変化を示す。図には後に説明する方法で求めたドットゲインのグラフも示されているが、フリンジ部の面積比の変化は、ドットゲインの特性に類似している。

5.2 単色印刷物の再現性予測

得られたコアとフリンジの面積比を用いて単色印刷物の

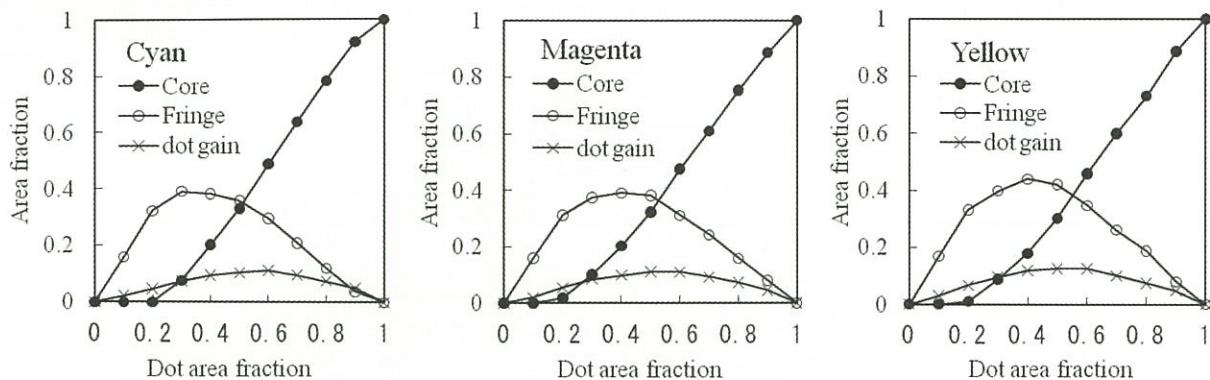


Fig.6 Core and fringe area fractions versus dot area fraction for cyan, magenta, and yellow halftone ramps printed on coated paper.

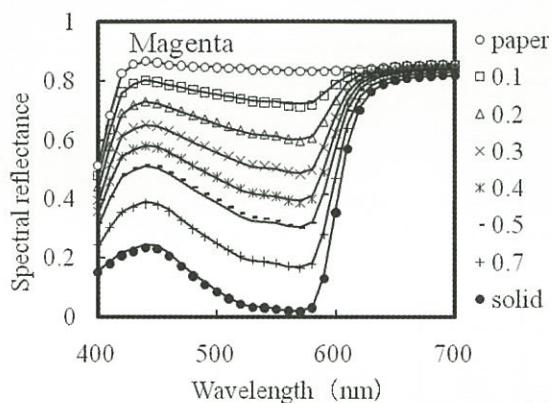


Fig.7 Spectral reflectance for magenta halftone ramp. Symbols represent the measured values and solid lines represent the predicted values from the Core-Fringe model.

分光反射率を予測した結果を、Mの場合を例として Fig.7 に示す。シンボルが測定値、実線が予測値を示す。見易いように網点面積比 0.6, 0.8, 0.9 の色票のデータを省いてある。予測値はほぼ実測値を近似しており、その精度は CIELAB 色差で平均色差 0.7、最大色差 1.1 であった。C の場合には平均色差 0.7、最大色差 1.2 で M と同程度だったが、Y では平均色差 1.3、最大色差 2.3 と誤差が大きかった。これらの誤差の原因は、モデルの変数値の決定に用いた試料とモデル性能評価用試料とでは、網点面積比の公称値が同じでも異なる試料であるため、材料の不均一性や印刷条件の変動により異なる特性値となったことと、モデルの精度不足が考えられる。

5.3 多色印刷物の再現性予測

Fig.8 に単色刷りと 2 色刷りの階調ステップの色度座標軌跡を示す。シンボルは実測値で、実線が予測値である。予

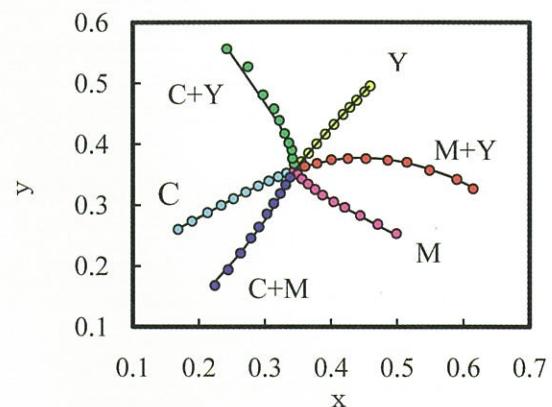


Fig.8 CIE xy chromaticity coordinates values for cyan (C), magenta (M), yellow (Y), cyan+yellow (C+Y), and magenta+yellow (M+Y) halftone ramps. Symbols represent the measured values and solid lines represent the predicted values from the Core-Fringe model.

測値は曲線状の非線形な再現特性を良好に近似していることがわかる。

Table 2 にモデル予測性能評価用 1331 色の試料について、提案モデルにより予測した $L^*a^*b^*$ 値と実測での $L^*a^*b^*$ 値を比較した結果を CIELAB 色差で示す。3 種類の網点形状と 3 種類の用紙の組合せに対していずれも平均色差 2.0 以下であり、高い予測精度であった。網点形状の違いによる予測精度の差は少ないが、いずれの用紙でもスクエアの網点が最も精度が良く、平均色差 1.5 以下、最大色差 4.0 未満であった。用紙の違いによる予測精度の差はほとんど認められなかった。

5.4 従来モデルとの性能比較

Table 3 に従来モデルと提案モデルでの予測結果を比較

Table 2 Color prediction accuracy of the proposed model for three different halftone dot shapes of offset printing samples that were printed on three different types of paper. The result is expressed in CIELAB color difference units. All the color patches used for evaluation were classified into single-color print, two-color overprint, and three-color overprint and were evaluated.

halftone dot shape	color patch	cast coated paper		art paper		coated paper	
		Ave.	Max.	Ave.	Max.	Ave.	Max.
square	single-color print	1.1	2.3	0.9	2.5	0.9	2.3
	two-color overprint	1.4	3.7	1.3	3.9	1.3	3.6
	three-color overprint	1.5	3.0	1.5	3.6	1.4	3.1
	total	1.5	3.7	1.4	3.9	1.4	3.6
round	single-color print	1.0	3.4	1.1	2.7	0.9	2.3
	two-color overprint	1.5	5.1	1.6	4.6	1.5	5.1
	three-color overprint	1.7	4.0	1.8	5.1	1.7	4.7
	total	1.6	5.1	1.7	5.1	1.7	5.1
round square	single-color print	0.9	3.8	1.4	2.5	1.0	2.8
	two-color overprint	1.5	4.0	1.9	4.3	1.5	3.9
	three-color overprint	1.8	4.7	2.1	4.7	1.8	4.6
	total	1.7	4.7	2.0	4.7	1.7	4.6

Table 3 Comparison of color prediction accuracy of the proposed model and the other typical models for square halftone dot. The result is expressed in CIELAB color difference units.

prediction model	cast coated paper		art paper		coated paper	
	Ave.	Max.	Ave.	Max.	Ave.	Max.
Core-Fringe (proposed model)	1.5	3.7	1.4	3.9	1.4	3.6
Neugebauer (nominal dot area)	9.1	16.0	7.5	14.0	8.3	15.5
Neugebauer (effective dot area)	2.7	5.3	2.0	4.5	2.3	4.8
Yule-Nielsen modified Neugebauer (n=1.7)	1.3	2.2	1.4	2.5	1.3	2.3
spectral Neugebauer	1.4	2.9	1.3	3.4	1.4	3.1

して示す。使用した網点はスクエア、用紙はキャストコート紙、アート紙、コート紙の3種類である。いずれも予測性能評価用1331色の分光反射率を求めてからL*a*b*値を計算して実測値との色差を算出した。結果から、提案モデルは平均色差で実効網点面積を用いたNeugebauerモデルの6~7割、Yule-Nielsen修正Neugebauerおよび分光Neugebauerの両モデルに対しては同程度となっていることがわかる。最大色差は両モデルより大きく4.0未満となっている。今回用いた試料には、それぞれ、同一網点面積条件の色票が35組含まれ、同一条件の色票間の色差平均は0.9~1.2、最大値は2.1~3.2であった。これらは一例に過ぎないものの、この色差と比較して、最大色差4.0未満という値は印刷の色再現精度の範囲に近いものと考えられる。

5.5 DDCPとの比較

オフセット印刷では、網点形状の乱れや網点サイズの

変動、網点の素抜け、インキ膜厚の変動と不均一性など、多くの要因が色再現性に影響を及ぼすため、これらがモデルの変数の値や予測精度に影響する可能性が高い。一方、カラーデシジョンはレーザー溶融熱転写記録方式によるDDCP (Direct Digital Color Proof) で、インキ膜厚もほぼ一定で鮮明な網点が得られ、安定した色再現特性を有している。また、印刷インキと同系の顔料インキを用いているので、両者での色予測性能を比較することで網点再現性の違いによる影響を知ることができる。カラーデシジョンによる試料に対して、提案モデルと従来モデルで予測性能を評価した結果をTable 4に示す。網点形状はラウンドスクエア、使った用紙はアート紙である。同じ条件での印刷試料の結果と比べて、提案モデルの予測誤差は平均で7割以下に減っており、網点品質が良い方がモデルとの適合性が良いことが示された。分光Neugebauerモデルについては(17)式で計算された分光網点面積比の値が適切な範囲に収まらなかったため、評価できなかった。これは、M

Table 4 Comparison of color prediction accuracy of the proposed model and the other typical models for the DDCP sample of round square halftone dot. The result is expressed in CIELAB color difference units.

prediction model	Ave.	Max.
Core-Fringe (proposed model)	1.3	4.5
Neugebauer (effectivel dot area)	3.0	5.3
Yule-Nielsen modified Neugebauer	1.5	4.0

インキと Y インキの非吸収波長帯において用紙との反射率の差が非常に小さかったため、何らかの変動要因により計算精度が極端に低下したためと考えられる。

6. 考察

色予測モデルにおいては、その予測精度に加え、色再現プロセスの特性理解に役立つかどうかも評価の基準になるとを考えられる。また、モデルを最適化するために必要なコストと性能の安定性は、実用の面からも重要である。これらの点をふまえ提案モデルの結果について考察した。

6.1 色予測性能

予測性能評価用の色票群には用紙の白色を含めて、C, M, Y 各原色 1 色のみで再現される色票 30 色、2 色で再現される色票 300 色、3 色で再現される色票 1000 色が含まれており、Table 2 には提案モデルによる各色票群別の予測精度も示されている。原色の数が増えるにしたがって予測誤差は大きくなるが、極端な予測精度の低下はない。単色色票群での予測誤差の色差 1 度という値は、単色の予測モデルとすればやや大きいと思われるが、モデル変数の値の最適化は別の変数決定用色票に基づいており、その色票で評価すると予測誤差は平均色差で約 0.3 と小さかった。前述のように、使用した試料において同一網点面積の色票間の色差平均は 0.9 ~ 1.2 であり、この色差から考え

て、提案モデルにおける平均色差 2.0 以下という予測性能はかなり良好なものと考えられる。

ところで、用紙の違いにより予測精度の差がほとんどなかったのは網点の再現性にはほとんど違いがないからで、顕微鏡による観察画像でも確認した。DDCP での予測精度が印刷より高いのは網点再現性が優れていて、モデルによく適合したためと考えられる。

6.2 光学的ドットゲインとの関係

提案モデルにおけるフリンジ部の面積はインキ層を 1 回のみ通過した成分光の量に相当するが、これは光学的ドットゲインにも関連し、色再現プロセスの特性を示す指標ともなる。網点印刷物における光学的ドットゲインの量を正確に知るには、光散乱のない状態で幾何学的な網点面積を測定する必要があり、通常の印刷物では簡単ではない。そこで、幾何学的な網点面積が公称値に等しいと仮定し、Murray-Davies モデルに基づき (9) 式により光学的な実効網点面積比を求め、公称値との差から光学的ドットゲイン量を推定してフリンジ部の面積比と比較した。結果は前出の Fig.6 に示されている。ドットゲインの変化はフリンジ部の面積と類似の傾向を示しているが、値としてはかなり小さい。これは、フリンジ部のインキ層が薄いため単位面積あたりの光吸収が少ないと、および、光吸収量の多いコア部の面積が網点面積の公称値よりも小さいので、結果としてフリンジ部の割合が大きくなつたと考えられる。

6.3 モデル最適化のコスト

Table 5 に提案モデルと従来モデルの最適化に関する項目をまとめて示す。提案モデルでは最適化すべき変数が Neugebauer モデルの 2 倍必要となるが、分光 Neugebauer モデルに比べればはるかに少ない。最適化の方法については、提案モデルでは繰り返し計算により最適値を求めるため多少計算時間がかかるが、一般的なパソコン

Table 5 Optimization cost of color prediction models. In the column "number of variables" of the table below, Ni is the number of inks used, Na is the number of dot areas used for each halftone ramp, and $N\lambda$ is the number of measurement wavelengths.

prediction model	model variables	number of variables	optimization method
Core-Fringe (proposed model)	core area, fringe area	$2Ni \cdot Na$	iterative calculation
Neugebauer	effective dot area	$Ni \cdot Na$	algebraic calculation
Yule-Nielsen modified Neugebauer	effective dot area, n-value	$Ni \cdot Na + 1$	iterative calculation
spectral Neugebauer	spectral dot area	$Ni \cdot Na \cdot N\lambda$	algebraic calculation

ンで数分程度の処理で済み、計算時間は問題と考えられない。最適化に必要となる試料色の種類と数、および色予測の基礎になる原色の種類と数は他のモデルと同じである。なお、分光 Neugebauer モデルでは、波長ごとの分光網点面積比が(17)式により一意に得られるが、材料特性や印刷条件の変動、測定誤差などにより、波長によっては網点面積比が1以上やマイナスとなるなど、適切な分光網点面積比が得られない場合があり、安定性に問題があった。

6.4 4色印刷への拡張

ブラックを含む4色印刷に提案モデルを適用する場合、3色の場合と同様に単色でコアとフリンジの面積比を求め、多色での重ね刷りに拡張する。この場合、重ね刷りによって $3^4=81$ 色の領域が発生するが、Neugebauer 原色は16色となるので、これらの原色の組合せにより、81色の領域の分光反射率を求めることになる。

7.まとめ

紙中の光散乱の効果を網点構造に組み込んだコア・フリンジモデルについて、その色予測性能を評価した。このモデルでは、網点中央部（コア部）はベタ印刷物と同じ厚さのインキ層、周辺部（フリンジ部）は中央部より厚さのうすいインキ層を持ち、周辺部で中央部や紙での反射光と分光特性が異なる散乱光成分を生成すると仮定した。つぎにフリンジ部のインキ層がコア部の半分の場合について、モデルを多色網点印刷物に適用するための方法を検討し、従来の Neugebauer モデル、Yule-Nielsen 修正 Neugebauer モデル、分光 Neugebauer モデルと同じ原色を用いて、色予測を行う方法を開発した。ラウンド、スクエア、ラウンドスクエアの網点形状3種と、キャストコート紙、アート紙、コート紙の印刷用紙3種の条件を組み合わせた9種の試料条件にて、C、M、Yそれぞれ11段階の網点面積比の組合せで構成される1331色の色票の分光反射率を予測し、その結果と実測値との違いを CIELAB 色差で評価したところ、平均色差 1.4 ~ 2.0 の高い予測精度が得られた。この値は、予測性能が優れていると言われる Yule-Nielsen 修正 Neugebauer モデルや分光 Neugebauer モデルと比べてほぼ同等であった。

なお、今回はフリンジの厚さをコア部の半分と仮定した

が、これを変えることで周辺部インキ層の厚さ低下の効果をモデルに反映させることも可能である。また、このモデルは、パラメータが物理的な量に関連付けられているため、網点印刷の色再現プロセスの特性を理解するうえでも有用と考えられる。今後、より光散乱性の大きいマット紙や上質紙での評価、スクリーン線数を変えた場合の適用性などについても検討する必要がある。

参考文献

- 1) D. R. Wyble and R. S. Berns: *Color Res. Appl.*, **25**, 4 (2000).
- 2) H.R.Kang: *Color Technology for Electronic Imaging Devices*, SPIE Optical Engineering Press (1997).
- 3) 宇佐見良徳、大久保彰人、依田 章: FUJIFILM RESEARCH & DEVELOPMENT, **43**, 81 (1998).
- 4) 梶 光雄、大竹将治、高橋一嶺、東 吉彦:日本印刷学会誌, **38**, 91 (2001).
- 5) 特開 2000-69301
- 6) A. Murray: *Franklin Inst.*, **221**, 721 (1936).
- 7) J. A. C. Yule and W. J. Nielsen: TAGA Proc., p.65 (1951).
- 8) H. E. J. Neugebauer: *Zeitschrift fur wissenschaftliche Photographie*, **36**, 73 (1937).
- 9) J. A. S. Viggiano: TAGA Proc., p.44 (1990).
- 10) R. Balasubramanian: *J. Electron. Imaging*, **8**, 156 (1999).
- 11) R. Rossier, T. Bugnon, R. D. Hersch: Proc. of IS & T/SID 18th Color Imaging Conference, p.295 (2010).
- 12) 鈴木恒男、田口誠一、内田敏夫:日本印刷学会誌, **25**, 98 (1988).
- 13) 東 吉彦、魚本裕美、犬井正男:日本印刷学会第103回秋期研究発表会講演予稿集, p.69 (1999).
- 14) 井出 収:日本画像学会誌, **39**, 390 (2000).
- 15) J. R. Huntsman: *J. Imaging Technol.*, **13**, 136 (1987).
- 16) 本庄 知、田口誠一:日本印刷学会誌, **24**, 178 (1987).
- 17) 内藤郁夫、鈴木浩徳、金沢一嘉、木下堯博:日本印刷学会第70回春期研究発表会講演要旨集, p.3 (1983).
- 18) 国司龍郎、斎藤了一、佐藤圭介:日本印刷学会第90回春期研究発表会講演予稿集, p.131 (1993).
- 19) Yoshihiko Azuma, Hiromi Uomoto, Shunsuke Takahashi, and Masao Inui: Proceedings of The First European Conference on Colors in Graphics, Imaging and Vision (CGIV), Poitiers, France, April 2002, p.594.
- 20) 飯野浩一、Fabrice CAPIEZ:日本印刷学会誌, **42**, 290 (2005).
- 21) 前橋達一、前島勝己、奥沢二郎、竹田克之:KONICA TECHNICAL REPORT, **14**, 21 (2001).
- 22) ISO 13655:2009 Graphic technology - Spectral measurement and colorimetric computation for graphic arts images.