

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	網点印刷の色再現とそのモデル化に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	東吉彦
Author(English)	Yoshihiko Azuma
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第8958号, 授与年月日:2012年9月25日, 学位の種別:課程博士, 審査員:内川 恵二
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第8958号, Conferred date:2012/9/25, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

網点印刷の色再現とそのモデル化 に関する研究

平成24年7月

指導教官 内川 恵二 教授

提出者 東京工業大学総合理工学研究科
物理情報システム専攻

08D33018

東 吉 彦

目次

第1章 序論

1.1	はじめに	1
1.2	印刷における出力変換	2
1.2.1	ルックアップテーブル法	3
1.2.2	ニューラルネットワーク法	4
1.2.3	逐次計算法	5
1.3	従来方式の問題点	6
1.4	本研究の目的	7
1.5	本論文の構成	8
1.6	本論文における網点の面積比の表記法	8

第2章 平面モデルに基づく CMY-L*a*b*相互変換

2.1	はじめに	9
2.2	色再現特性の解析方法	9
2.2.1	試料の作成	9
2.2.2	試料の測定	11
2.3	CMY 3色インキによる印刷物の色再現特性	12
2.4	色再現特性のモデル化	13
2.4.1	平面モデル	13
2.4.2	平面モデル式の係数の関数近似	15
2.5	L*a*b*から CMY の網点面積比への変換	21
2.6	CMY 網点面積比予測値の評価	26
2.6.1	平面モデル式を用いた再現色の予測	26
2.6.2	平面モデル式の予測精度	27
2.6.3	予測された網点面積比による再現色の評価	28
2.7	考察	29
2.7.1	予測精度の評価	29
2.7.2	グレイバランス最適化への応用	29
2.8	まとめ	30

第3章 ブラック信号を考慮した相互色変換

3.1	はじめに	31
3.2	色再現特性の解析方法	31

3.3	CMYK 4 色による色再現特性	31
3.4	色再現特性のモデル化	33
3.5	平面モデル式の係数の関数近似	38
3.5.1	K 成分の CMY への置き換え (面積置換法)	38
3.5.2	面積置換法の改良 (改良型面積置換法)	44
3.6	$L^*a^*b^*$ から CMYK の網点面積比への変換	60
3.7	考察	62
3.8	まとめ	63

第 4 章 単色網点印刷の分光反射率特性のモデル化

4.1	はじめに	64
4.2	従来モデル	64
4.3	3 成分モデル	67
4.3.1	モデルの基本概念	67
4.3.2	確率モデルによる光路比のモデル化	68
4.3.3	3 成分モデルの評価	69
4.3.3.1	光路比の算出方法	69
4.3.3.2	試料の測定	70
4.3.3.3	測定結果とデータの分析	71
4.3.3.4	光路比の理論値との比較	72
4.3.3.5	分光反射率と色度座標の予測	73
4.3.3.6	高線数印刷への適用性	75
4.3.4	考察	76
4.4	コア・フリッジモデル	78
4.4.1	モデルの基本概念	78
4.4.2	コアとフリッジの面積比の決定方法	79
4.4.3	コア・フリッジモデルの評価	79
4.4.3.1	試料とデータの分析	79
4.4.3.2	分析結果	79
4.4.3.3	高線数印刷への適用性	81
4.4.4	考察	85
4.5	まとめ	90

第 5 章 多色網点印刷の色予測モデル

5.1	はじめに	91
5.2	従来モデル	92

5.2.1	Neugebauer モデル	92
5.2.2	Yule-Nielsen 修正 Neugebauer モデル	93
5.2.3	分光 Neugebauer モデル	93
5.3	コア・フリッジモデルの多色印刷への適用	94
5.4	実験	96
5.4.1	試料	96
5.4.2	測定	96
5.4.3	モデル変数の値の決定	97
5.5	結果	99
5.5.1	コアとフリッジの面積比	99
5.5.2	単色印刷物の再現性	99
5.5.3	多色印刷物の再現性予測	99
5.5.4	従来モデルとの性能比較	100
5.5.5	DDCP に対する色予測	101
5.6	考察	102
5.6.1	色予測精度	102
5.6.2	モデル最適化のコスト	102
5.6.3	4色印刷への拡張	103
5.7	まとめ	104
第6章 総合的考察		
6.1	各章の主な成果	105
6.2	本研究の成果の有用性	107
6.3	本研究の成果の他分野への応用	109
6.4	本研究の今後の課題と展望	109
第7章 結論		110
謝辞		111
参考文献		112
本研究に関する論文		
本研究に関する国際会議発表		
本研究に関する国内学会発表		

第1章 序論

1.1 はじめに

カラー印刷技術は、文字や画像などの情報を安価で大量に、かつ高品質に複製する手段として、新聞、雑誌、カタログ、ポスターなどに広く利用されている。対象となる素材は、紙、フィルム、プラスチック、布、金属など多岐にわたるが、共通するのは原稿の情報が「版」を介してインキ像に置き換えられ、圧力によって印刷対象へ転写されることである。このとき一般的なカラー印刷では、画像の色情報が **Cyan, Magenta, Yellow, Black** (以後それぞれ **C, M, Y, K** と略す) の4つの原色成分に分解され、面積の変化する微小な点(網点)の集合に変換される。この点の大きさや密度を変えることで色の濃淡を表現することができる。このように原稿の色情報を **CMYK** の網点の分布情報に変換する処理は、写真技術、カラスキャナ、**CEPS (Color Electronic Prepress System)** という変遷を経て、現在は **DTP (DeskTop Publishing)** を中心としたデジタルワークフローの中で行われている。

図 1.1 に一般的な印刷におけるデジタルワークフローを示す。被写体はデジタルカメラで撮影され、写真、イラストなどの透過もしくは反射原稿はスキャナーから入力され、デジタルデータとしてコンピュータに取り込まれる。パソコンに集約された各種のデータは必要な編集処理を経て、**CTP (Computer to Plate)** で印刷版として出力され、印刷機にかけられて印刷が行われる。また、途中の工程において、画像データ確認のためのモニターへの表示や、印刷見本であるプルーフ作成のためのプリンタ出力が行われる。このようなデジ

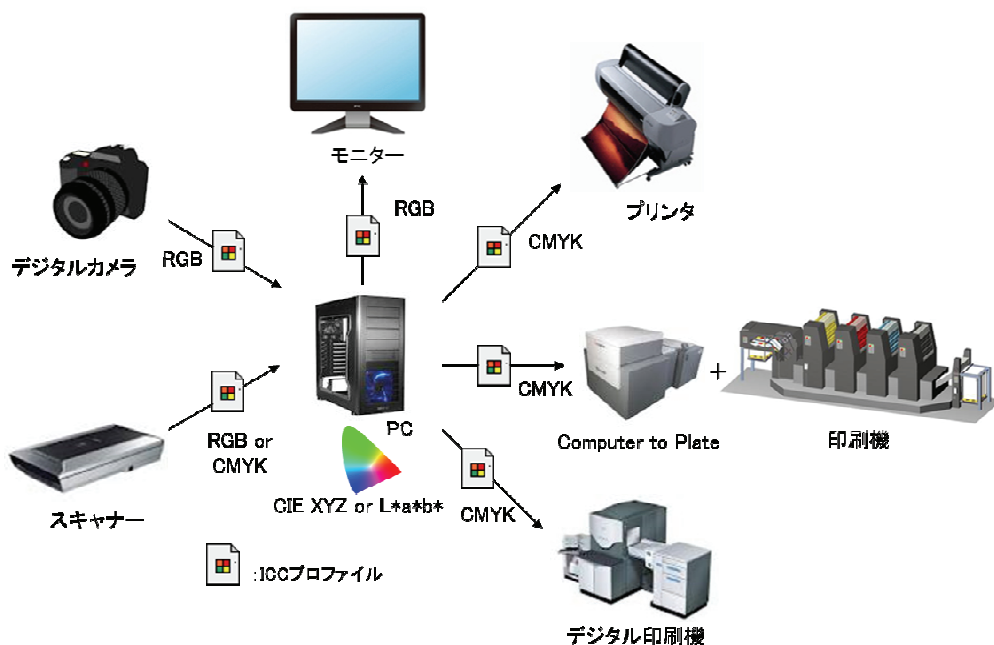


図 1.1 印刷におけるデジタルワークフロー

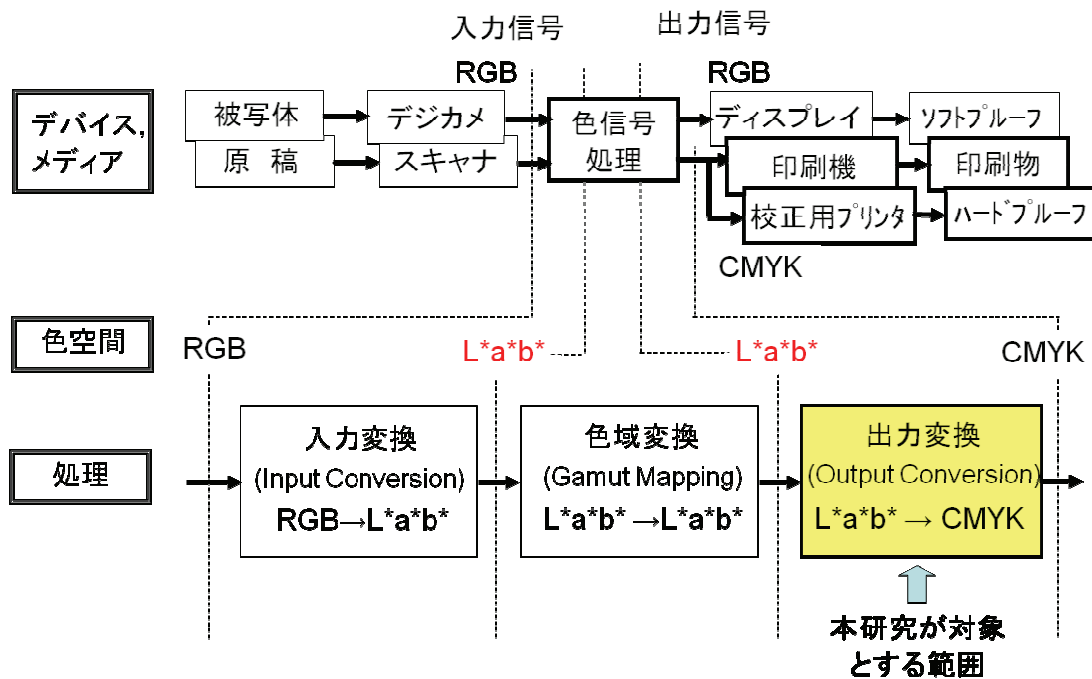


図 1.2 色信号処理の流れ

ワークフローではデバイスインディペンデントカラーの考え方に基づいた処理が行われる。すなわち、周辺デバイスとコンピュータとのデータ交換において、各デバイスの入出力特性を記述したプロファイルを介して、デバイス依存の RGB データや CMYK データと、デバイスに依存しない CIE 表色値である $L^*a^*b^*$ 値や XYZ 三刺激値との変換が行われる。プロファイルは ICC (International Color Consortium) が定めたデータ形式の ICC プロファイル¹⁾が国際標準として使用されている。

図 1.2 にこれらの色信号処理の流れを示す。色信号処理は、入力変換、色域変換、出力変換の 3 つの処理で構成される。入力変換では、デジタルカメラやスキャナーから取り込まれた RGB データが $L^*a^*b^*$ 値や XYZ 三刺激値のデータに変換される。続く色域変換では、モニターやプリンタの色再現範囲を考慮して、入力された画像の色をなるべく忠実に、または好ましい色に再現するため、 $L^*a^*b^*$ 色空間における色域のマッピングが行われる。そして最後の出力変換で、 $L^*a^*b^*$ 色空間の座標値で表された画像の色が、モニターや印刷、プリンタで再現するための駆動信号である RGB データや CMYK データに変換される。

本研究は、出力変換を対象とするものであり、特にカラー網点印刷における出力変換を扱う。

1.2 印刷における出力変換

印刷における出力変換の目的は、 $L^*a^*b^*$ などの測色値で与えられた再現目標の色を CMYK の網点面積比のデータに置き換えることである。この目的を達成するための方法は幾つかあり、代表的なものを以下で説明する。

1.2.1 ルックアップテーブル法²⁻⁶⁾

市販されているカラーマネジメント製品で一般的に採用されている方法である。この方法では、予め CMYK のデバイス値に対応する色票を作成してその測色値を測定、または計算モデルによって求め、デバイス値と測色値との対応関係をテーブル化しておき、その関係に基づいて測色値に対応するデバイス値を逆に求める。ここでは、CMY 3 色の場合を考える。まず、図 1.3 のように CMY の出力デバイス空間を格子状に分割（図では $5^3=125$ 分割）したうえで、各格子点に対応する $L^*a^*b^*$ 値（この場合 125 組の値）をルックアップテーブル内に登録する。CMY 各 8 ビットのデータを想定すると $2^8=256$ 万色の表現が可能だがテーブル用のメモリが膨大になることと、それだけの色票を作成するのは現実的でないので、通常、デバイス空間全体を $9^3\sim 17^3$ 程度に分割し、各格子点における $L^*a^*b^*$ 値を登録しておき、格子点に対応しない色の $L^*a^*b^*$ 値は、補間演算によって求める。補間演算の方法には、対象色を囲むどの格子点の情報を利用するかによって、図 1.4 に示すような立方体補間、プリズム補間、ピラミッド補間、四面体補間などがある。

出力変換では上で述べた逆方向の変換、すなわち所望の $L^*a^*b^*$ 値を実現する CMY の値を求める必要がある。この場合にも、図 1.5 に示すようにルックアップテーブルと補間演算を用いるが、先に求めた CMY 空間の格子点に対応する $L^*a^*b^*$ 空間の点が格子状に分布しないので、 $L^*a^*b^*$ 空間においてあらためて格子点をサンプリングし、逆変換用のルックアップテーブルを用意する必要がある。しかし、 $L^*a^*b^*$ 空間における色域の形状は直方体にはならないため、ルックアップテーブルの構造を工夫しないと無駄な部分が多くできてしまう。そこで、このような再サンプリングをしなくても適用可能で、計算速度も速い四面体補間が一般に使用されている。

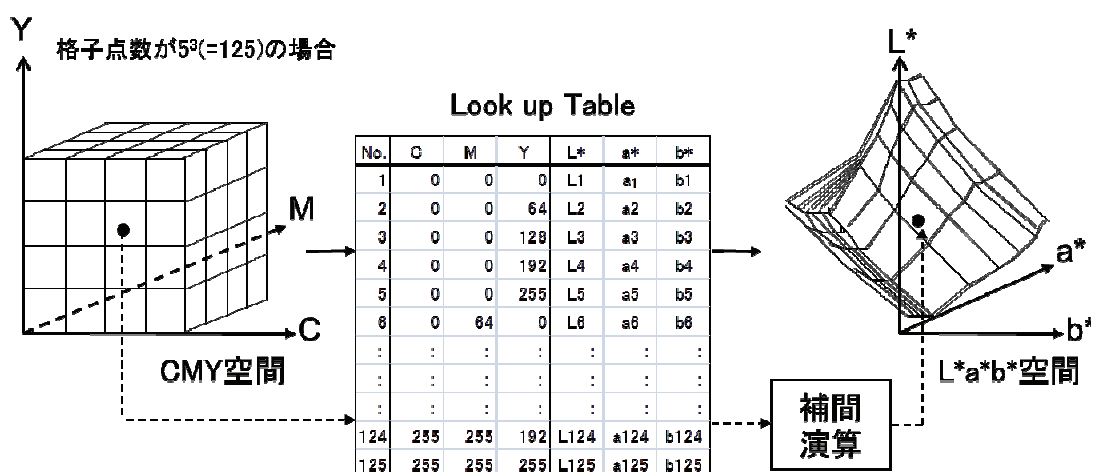


図 1.3 CMY→ $L^*a^*b^*$ 変換ルックアップテーブルの作成

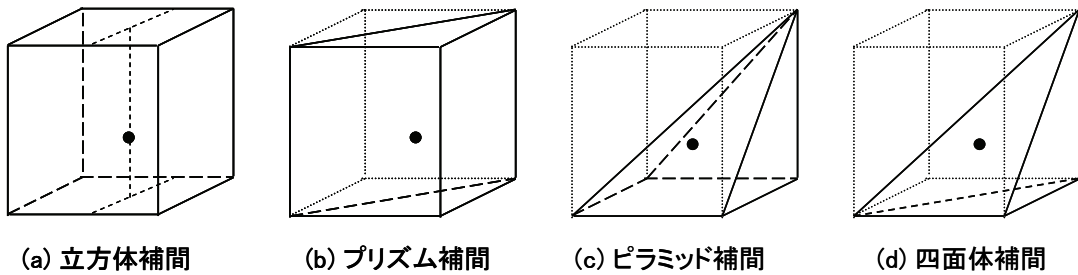


図 1.4 各種の補間演算の方法

また、 $L^*a^*b^* \rightarrow CMYK$ の出力変換では、3変数から4変数へのマッピングとなり一意には定まらない。そこで、 K の決定方法を別に定めよう。ここで、 CMY の値を求めることが行われている。

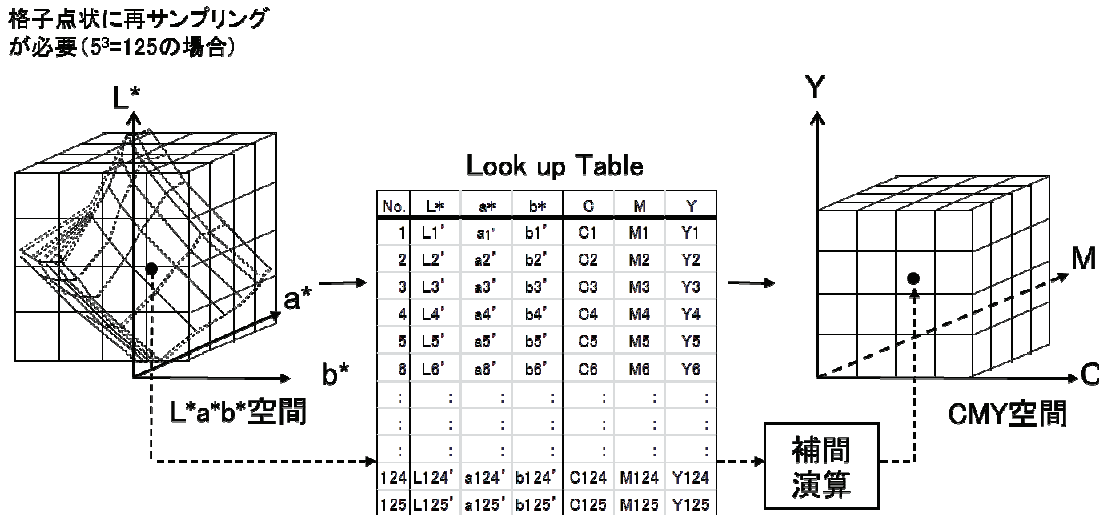


図 1.5 ルックアップテーブルを用いた $L^*a^*b^* \rightarrow CMY$ 変換

1.2.2 ニューラルネットワーク法^{7,8)}

人間の脳神経回路網の情報処理機能をシミュレートした方法である。その基本的な考え方を図 1.6 に示す。ネットワークの構成は、入力層、中間層、出力層からなる。中間層は複数で構成される場合もある。入力層には L^* , a^* , b^* の値が入力され、出力層からは C , M , Y の値が出力される。一般的な方法では、 K の値は別の異なるネットワーク、もしくは生成アルゴリズムにより求められるが、 C , M , Y , K をまとめて出力するように工夫した例もある。

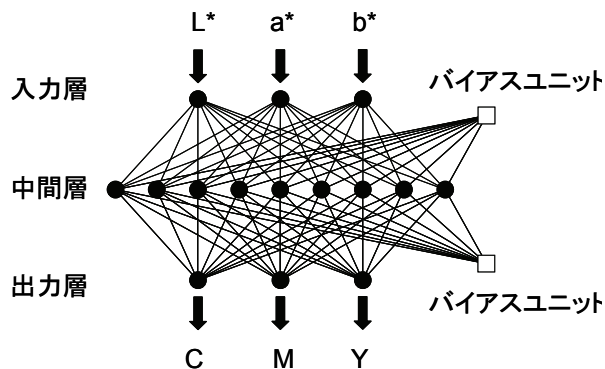


図 1.6 ニューラルネットワークの構造

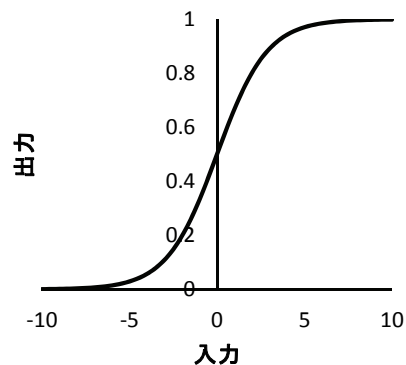


図 1.7 シグモイド関数の例

図において、中間層と出力層の個々のユニットは、前段からの入力信号に対してその重み付きの和を計算し、図 1.7 に示すような sigmoid 関数と呼ばれる非線形な入出力特性の変換を経て出力を出す。

ニューラルネットワークでは、入力値に対する出力結果が与えられた出力値（教師データ）に近づくように各ユニットへの結合重み係数の修正（学習）を繰り返すことで、未学習データに対する予測能力（汎化能力）を獲得するようになる。これにより $L^*a^*b^* \rightarrow CMY$ 変換を実現することができる。

1.2.3 逐次近似法⁹⁾

この方法ではまず、混色原理に基づくモデル式を用いて CMYK デバイス値と再原色の測色値の関係を記述する。このようなモデル式として Neugebauer 式¹⁰⁾があり、再原色の総合的な三刺激値 $\hat{T} (= \hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z})$ は次式で表される。

$$\begin{aligned}
 \hat{T} = & A_P T_P + A_C T_C + A_M T_M + A_Y T_Y + A_K T_K \\
 & + A_{CM} T_{CM} + A_{CY} T_{CY} + A_{CK} T_{CK} + A_{MY} T_{MY} + A_{MK} T_{MK} + A_{YK} T_{YK} \\
 & + A_{CMY} T_{CMY} + A_{CMK} T_{CMK} + A_{CYK} T_{CYK} + A_{MYK} T_{MYK} \\
 & + A_{CMYK} T_{CMYK}
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

ここで、右辺 T_i ($i = P, C, M, Y, K, CM, CY, CK, MY, MK, YK, CMY, CMK, CYK, MYK, CMYK$) は C, M, Y, K の 4 色の網点の重なりで生成される 16 の異なる色領域（通称 Neugebauer 原色と呼ばれる）の三刺激値で、それらの添字は、 P が用紙、 C, M, Y, K が各インキのベタの色、 $CM, CY, CK, MY, MK, YK, CMY, CMK, CYK, MYK, CMYK$ がそれらの重なりによる色を表す。 A_i は対応するそれらの面積比で、 a_C, a_M, a_Y, a_K を C, M, Y, K 各網点の面積比として、Demichel の関係式¹¹⁾に基づき次式で計算される。

$$\begin{aligned}
A_P &= (1-a_C)(1-a_M)(1-a_Y)(1-a_K) \\
A_C &= a_C(1-a_M)(1-a_Y)(1-a_K) \\
A_M &= (1-a_C)a_M(1-a_Y)(1-a_K) \\
A_Y &= (1-a_C)(1-a_M)a_Y(1-a_K) \\
A_K &= (1-a_C)(1-a_M)(1-a_Y)a_K \\
A_{CM} &= a_C a_M (1-a_Y)(1-a_K) \\
A_{CY} &= a_C (1-a_M) a_Y (1-a_K) \\
A_{CK} &= a_C (1-a_M) (1-a_Y) a_K \\
A_{MY} &= (1-a_C) a_M a_Y (1-a_K) \\
A_{MK} &= (1-a_C) a_M (1-a_Y) a_K \\
A_{YK} &= (1-a_C) (1-a_M) a_Y a_K \\
A_{CMY} &= a_C a_M a_Y (1-a_K) \\
A_{CMK} &= a_C a_M (1-a_Y) a_K \\
A_{CYK} &= a_C (1-a_M) a_Y a_K \\
A_{MYK} &= (1-a_C) a_M a_Y a_K \\
A_{CMYK} &= a_C a_M a_Y a_K
\end{aligned} \tag{1.2}$$

この式は非線形のため、C、M、Y、Kを解析的に求めることはできない。そこで、解を逐次近似計算によって求める方法が用いられている⁹⁾。

1.3 従来方式の問題点

まずルックアップテーブル方式では、L*a*b*等の測色値とCMYKのデバイス値を直接、一対一で対応づけて変換するため、十分な変換精度を確保するには、測色値を得るための多数の色票試料が必要になる。このような試料は、測色機による測定のため、1つの色票が1cm四方程度の面積を必要とする。仮に11³(=1331)枚の色票を作成とした場合、試料全体で1331 cm²の面積、すなわちA3(=1247cm²)以上の面積を必要とする。オフセット印刷では、印刷方向と垂直方向に一定間隔で配置されたインキキータによりインキ供給量を調整することで印刷濃度を制御しており、空間的に広い範囲で印刷濃度を一定に保つにはかなりの手間とスキルが必要になる。また、インキ供給量は画像面積に依存するため、印刷される場所によらず一定した濃度で印刷するには、色票の配置の工夫や十分な印刷条件の管理が必要で、決して簡単なことではない。

次に、ニューラルネットワーク法については、125色の色票データで学習したところ、未学習の色票に対して平均色差 $\Delta E^*_{ab}=2.91$ の変換精度が得られたとの報告がある⁷⁾。この場合の最大色差は13を越えていて、より高い変換精度が必要となればさらに多数の教師データを必要となり、ルックアップテーブル方式と同様の問題がある。

最後に逐次近似法であるが、解を求めるのに反復計算を行うため、多大な計算時間がかかるという問題がある。現代ではコンピュータの計算速度の飛躍的な向上により計算時間は短縮されたが、画像の色を処理する場合は画素数に比例して計算時間が増大するため、計算時間は重要である。また、再現色の予測に用いる Neugebauer 式はそのままの形で用いると予測精度が非常に低いため、十分な精度を得られないという問題もある。

1.4 本研究の目的

前節で述べたように $L^*a^*b^*$ から CMYK への出力変換の 3 方式それぞれに、最適化のための試料作成上の手間や安定性の問題、変換の精度不足、計算速度の問題があり、より手間が少なく、安定して精度が高く、実用性のある変換方法が望まれる。さらに、ここで紹介した 3 方式では、試料の直接測定、または計算によって求めた $L^*a^*b^*$ 等の測色値を基礎とするが、印刷物の色は照明光の分光分布によって変化するため、照明光が変化した場合に試料の測定をやり直すか予め分光反射率を測定しておいて測色値を計算し直す必要がある。もし、分光反射率を正確に予測できる手法があれば照明光に対応した測色値を計算で求めることができ、この測色値に基づいて出力デバイス値を求めることができる。

本研究では、上に述べたような出力変換の問題点をふまえ、以下の条件を満足する出力変換方法を開発することを目的とした。

- (1) 手間が少なく、実用上問題ない計算速度で、安定した十分な変換精度が得られること。
- (2) さまざまな分光分布の照明光条件でも柔軟に適用できること。

上記の目的を実現するために、図 1.8 に示すような研究のアプローチをとった。図には、

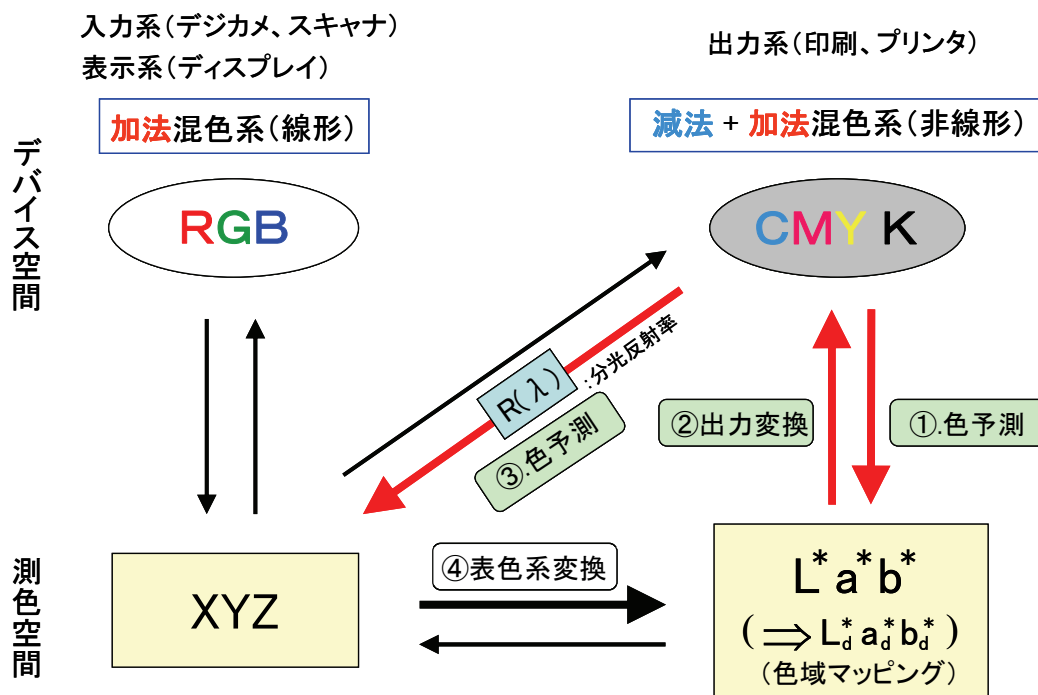


図 1.8 本研究のアプローチ方法

デジタルカメラ、スキャナー、ディスプレイなど線形な特性を示す入力・表示系と、印刷、プリンタなど非線形な特性を示す出力系について、デバイス空間と測色空間の間の変換が模式的に示されている。図において、①の色予測と②の出力変換は、一般的な印刷のワークフローでは ICC プロファイルを介して多次元ルックアップテーブルと補間演算によって行われるが、これ以外の方法として、網点印刷物の $L^*a^*b^*$ 空間における色分布特性を利用した変換式を用いる方法を検討した。この方法は、 $L^*a^*b^*$ と CMYK での双方向での変換が可能であるだけでなく、比較的簡単な計算式を用いるので、計算速度が速いという特長があり、(1)の条件を満たす方法である。また、(2)の条件については、設定された照明光源の下で、③の色予測において分光反射率を介して CMYK から XYZ へ変換することにより満足することができる。なお、④の表色系変換は CIE の規格により変換式で定義されているので、XYZ 値から $L^*a^*b^*$ 値は容易に求めることができる。

1.5 本論文の構成

本論文は、全7章から構成される。第1章では序論として、本研究の背景となる印刷分野のデジタルワークフローにおけるカラーデータ処理の現状を説明したうえで問題点を整理し、本研究の目的を述べている。第2章では、CMY 3色のインキによる網点印刷物の色再現特性を $L^*a^*b^*$ 空間における平面モデルで表し、これを基に $L^*a^*b^*$ と CMY の双方向変換を実現する方法について述べている。第3章では、第2章で構築したモデルが K インキを加えた CMYK 4色のインキによる網点印刷物の色再現特性にも適用できることを示し、このモデルに基づき、 $L^*a^*b^*$ と CMYK との双方向変換を実現する方法について述べている。第4章では、光の入出経路分類を基に、光路成分の発生確率をモデル化した3成分モデルの実験的検証を行っている。この結果をふまえて、紙中での散乱による成分光を網点構造に組み込んだコア・フリッジモデルを考案し、単色網点印刷物の分光反射率特性を予測する手法を提案している。第5章では、第4章で述べたコア・フリッジモデルを多色印刷物の色予測に応用する方法を述べ、複数の多色印刷試料に適用して色予測性能を評価した結果を述べている。第6章では、第2章から第5章までの内容を整理し、総合的に考察する。第7章では、本研究の成果についてまとめている。

1.6 本論文における網点の面積比の表記法

印刷の分野においては、単位面積あたりの網点の大きさを表すのに“網点面積率”の用語を用い、百分率(%)で表記することが多い。したがって、“網点面積率”と言えば%で表した値を意味するとの暗黙の了解がある。しかしながら、数式表現においては、百分率ではなく単なる比の値として扱う方がより合理的である。そこで本論文では、“網点面積率”ではなく“網点面積比”の用語を用い、特にことわりのない場合、“網点面積比”は百分率ではなく“比”の値を表すものとする。なお、“網点面積比”の値を百分率で表す場合には、数値に“%”を付けて用いる。

第2章 平面モデルに基づく CMY-L*a*b*相互変換

2.1 はじめに

本章では、カラー網点印刷物の色再現特性を数式モデルにより記述し、このモデルに基づいて、C, M, Yによるカラーデータと L*a*b*の測色データとの相互変換を行う方法について述べる。Kを含む場合については第3章で扱う。

2.2 色再現特性の解析方法

一般的なカラー印刷では、C, M, Y, Kのプロセスインキが用いられ、印刷の色情報は、通常これら CMYK インキによる網点面積比を%表記したデータで表される。一方、印刷再現された色は、かつては Red(R), Green(G), Blue(B)の光学フィルターを通して測定された色濃度で評価されていたが、デバイスインディペンデントカラーの考え方の普及と測色機の低価格化によって、L*a*b*等の測色値で評価されることが一般化してきている。また、そこでの評価には、国際標準規格として仕様が規定された ISO のカラーチャートをはじめ、カラーマネジメント製品のベンダーや印刷会社が独自に作成したカラーチャートが利用されている。本章では、標準化の趣旨に鑑み、ISO のチャートを用いてカラー印刷物の色再現特性を調べることにした。

2.2.1 試料の作成

図 2.1 に使用した試料の概観を示す。試料には、ISO12640 (JIS X9201 高精細カラーデジタル標準画像 (CMYK/SCID) ¹⁾) に含まれる 4 種の自然画像 N1, N3, N4, N7 とカラーチャート S7 から S10 が配置されており、16 画素/mm の解像度で出力され、全体の大きさは 939mm×636 mm である。印刷物の色再現特性を調べるにあたり、なるべく通常の条件に近い状態で印刷が行われるよう配慮して、4 種の自然画像を一緒に配置した。

カラーチャートは ISO12642 (通称 Output Color Target) で規定された色票で構成され、それらが図 2.2 のように S7～S10 のグループごとに配置されている。S7 と S8 には Neugebauer 原色と単色スケール、および色変換のモデル化に用いることを想定した色票が含まれている。S9 は CMY3 色の組合せからなる色票群 (図の①～⑥の 6 ブロック) と CMY3 色+K=20%の組合せからなる色票群 (図の⑦～⑫の 6 ブロック) で構成される。S10 は CMY3 色+K=40%の組合せからなる色票群 (図の⑬～⑰の 5 ブロック), CMY3 色+K=60%の組合せからなる色票群 (図の⑱～㉓の 5 ブロック), および CMY3 色+K=80%の組合せからなる色票群 (図の㉔～㉗の 4 ブロック) で構成される。これら全 928 個の色票により一般的な印刷の全色域をほぼカバーするように設計されている。なお、1つの色票の大きさは、色の測定に必要な計測サイズを考慮し、10 mm 四方としている。

試料用に編集した画像データは、大日本スクリーン製造製イメージセッターMTR-1120



図 2.1 研究に使用した印刷試料の概観

から 175 line/inch [lpi]のスクエア網点にて CMYK セパレーションフィルムに出力した後、PS 版（富士フィルム製，校正用ポジタイプ FPP-BII）に露光し，印刷版を作成した．PS 版への露光は Burnar Chart の 8 μ m ラインが再現されるように調整した．試料の印刷は大日本スクリーン製造製オフセット単色校正機 KF-123-GL で行った．ブランケットにはバルカン New 278 を用い，インキは Japan Color SF90，用紙は特菱アート 127.9g/m²を使用した．印刷条件は Japan Color 条件を満たすように濃度調整を行った結果，Status-T（偏光フィルタなし）の条件で C，M，Y，K それぞれのべた濃度が 1.50，1.47，0.97，1.75 であった．印刷の刷り順は C→M→Y→K である．

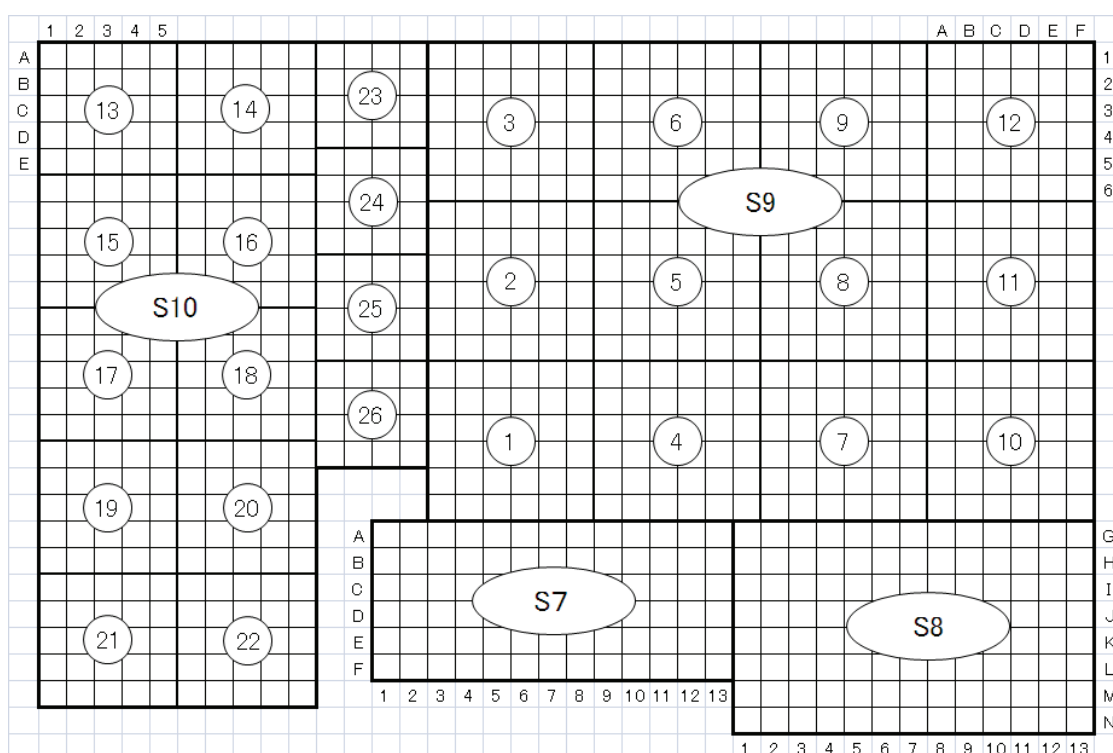


図 2.2 試料における ISO12642 の色票の配置

2.2.2 試料の測定

試料に含まれる 928 個の色票の L*a*b*値を，ISO13655²⁾に準拠した分光測色計 X-Rite938（X-Rite 社）を用いて測定した．この測色計は光学系に 0/45 ファイバーオプティクスによる環受光方式を使用し，波長 400~700nm の範囲を 20nm 間隔で分光測定し，10nm 毎に値を出力するようになっている．種々の表色系に対応した出力が得られ，今回は直接本体から出力される L*a*b*値を用いた．測色計算における測定光源は補助標準イルミナント D50，観測者条件は CIE 2 度視野標準観測者である．なお，試料は ISO13655 のブラックバックキングの条件に従って，濃度 1.3 以上の黒い紙の上に置いて測定した．

2.3 CMY3色インキによる印刷物の色再現特性

図 2.1 のカラーチャートには K を含む色票も含まれるが、K は他のインキ色と異なり無彩色であるため別途第 3 章で扱う。ここでは CMY3 色による印刷物の色再現特性について説明する。前述の通り、図 2.2 の①～⑥の 6 ブロックが CMY3 色の組合せからなる色票で、各インキ色の網点面積比は 0, 10, 20, 40, 70, 100% の 6 通り、その組合せによる色票は全部で 216 個ある。これらの色票の測定データを $L^*a^*b^*$ 空間にプロットし、 a^*b^* 平面、 a^*L^* 平面、 b^*L^* 平面に投影した結果を図 2.3 に示す。

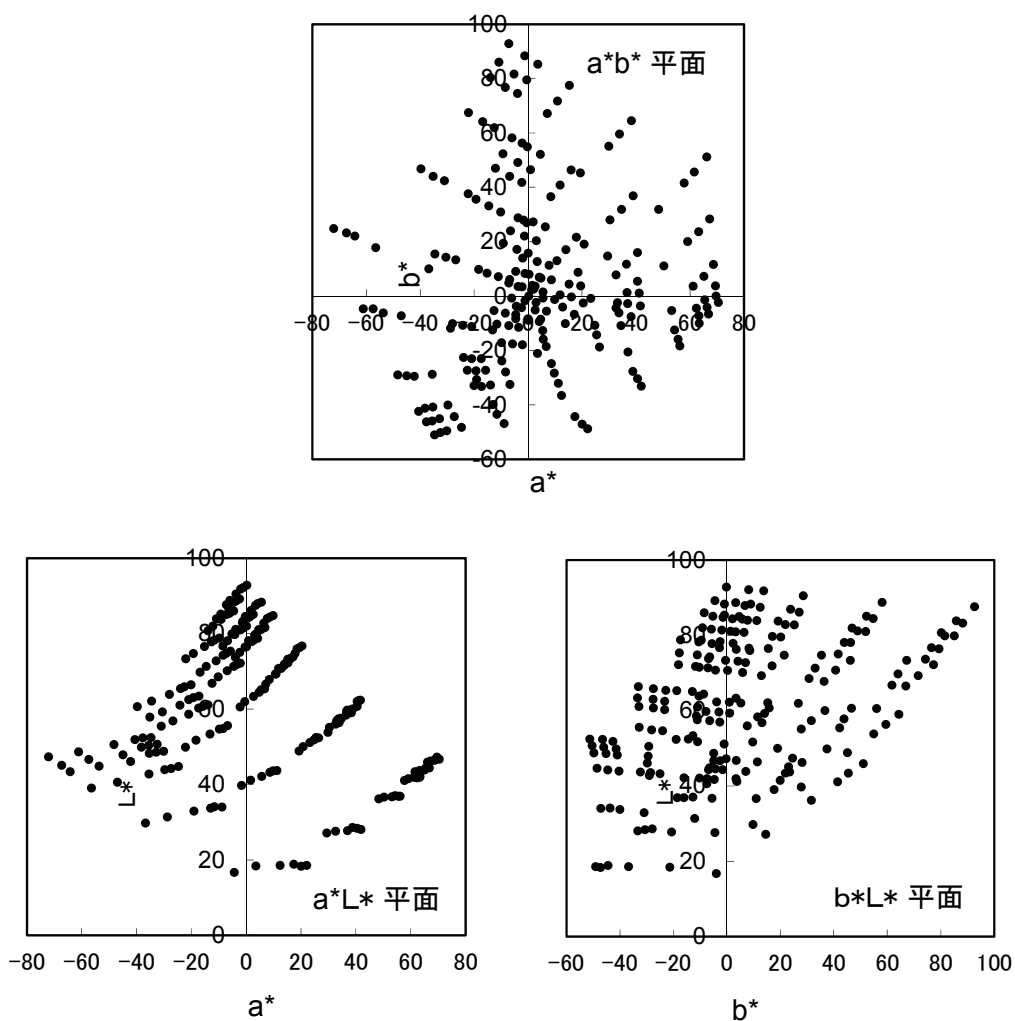


図 2.3 CMY3 色による色票の色分布

2.4 色再現特性のモデル化

2.4.1 平面モデル

図 2.3 からは色の分布の特徴が掴みにくいため、オリジナルの 3 次元表示ソフトを用いて観察角度を変えながら観察した様子を図 2.4(a)~(c)に示す。(a)では、C の網点面積比一定 (図中の数字で示す) の条件で M と Y の値が変化する色票の測定点が左上から右下に向かって直線状に分布して見える。特に、C が 0, 10, 20, 40% の測定点は、それぞれが一直線に分布し、ほぼ同一平面上にあることを示している。(b)では、M の網点面積比が一定で C と Y の値が変化する色票の測定点が、(c)では、Y の網点面積比が一定で C と M の値が変化する色票の測定点が左上から右下に向かって直線状に分布して見える。このように、 $L^*a^*b^*$ 空間内で C, M, Y の 1 つの網点面積比が一定の色票群の測定点は同一平面上にほぼ乗っており、その分布を平面で近似できることがわかった。これを平面モデルと呼ぶことにする。

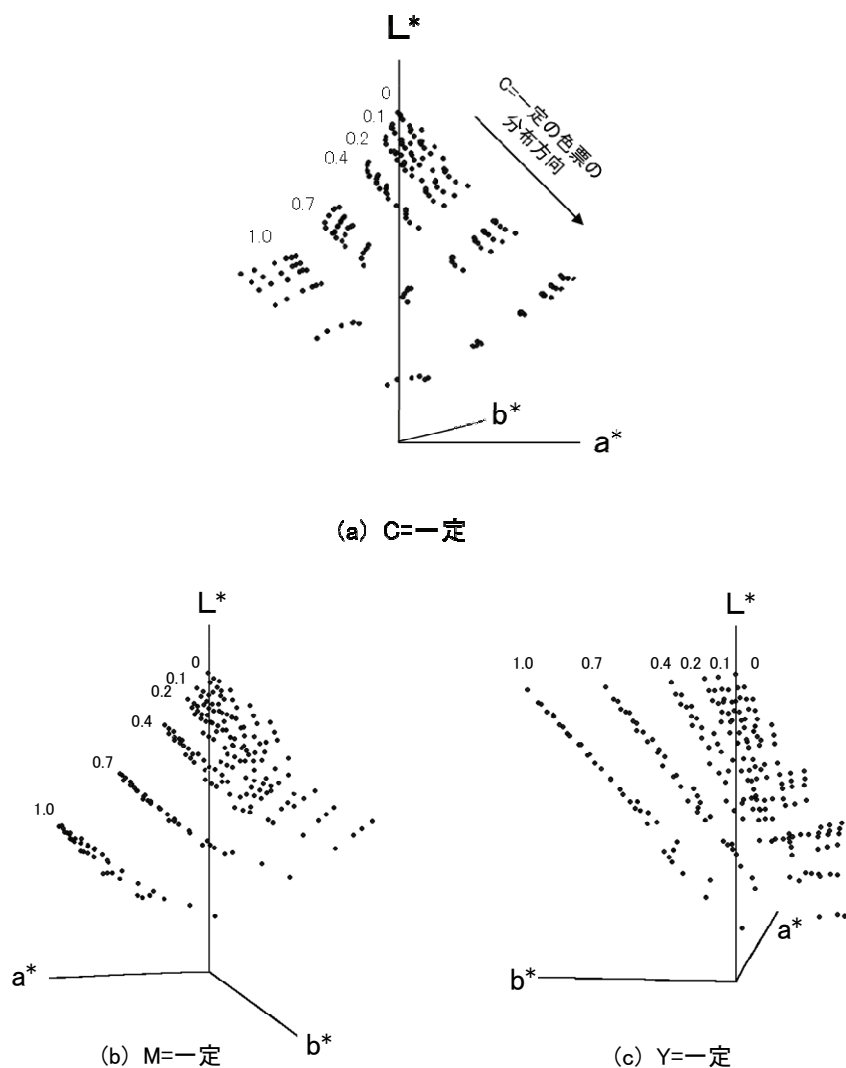


図 2.4 $L^*a^*b^*$ 空間における印刷物の色分布の特徴

ところで、このような平面モデルの式は以下のように表される。

$$L^* = \alpha \cdot a^* + \beta \cdot b^* + \gamma \quad (2.1)$$

ここで、 α 、 β 、 γ は定数である。この α 、 β 、 γ の値を求めるため、 $L^*a^*b^*$ の測定データ（付録 A 参照）に対して重回帰分析を行った。すなわち、C、M、Y の 1 つの網点面積比が同じ 36 枚の色票グループについて、それらの L^* を目的変数、 a^* と b^* を従属変数として重回帰分析を行い、 α 、 β 、 γ の値を求めた。結果を表 2.1 に示す。各インキについて、それぞれの網点面積比に対して 6 つの式が得られている。対象のデータに対する回帰式の近似精度を示す決定係数はいずれの式についても 1 に非常に近く、測定点がほぼ同一の平面上にあることがわかる。

表 2.1 重回帰分析から得られた平面モデルの式

網点面積比(%)	平面の式	決定係数
C:		
0	$L^* = -0.6361a^* - 0.0963b^* + 90.21$	0.9914
10	$L^* = -0.6308a^* - 0.1074b^* + 84.63$	0.9914
20	$L^* = -0.6269a^* - 0.1155b^* + 79.51$	0.9909
40	$L^* = -0.6132a^* - 0.1411b^* + 67.63$	0.9894
70	$L^* = -0.5902a^* - 0.2071b^* + 45.01$	0.9882
100	$L^* = -0.5815a^* - 0.3618b^* + 12.41$	0.9915
M:		
0	$L^* = 0.7338a^* + 0.0836b^* + 87.88$	0.9426
10	$L^* = 0.6851a^* + 0.0646b^* + 80.71$	0.9533
20	$L^* = 0.6470a^* + 0.0533b^* + 74.97$	0.9560
40	$L^* = 0.5516a^* + 0.0306b^* + 62.69$	0.9660
70	$L^* = 0.4533a^* + 0.0171b^* + 41.21$	0.9737
100	$L^* = 0.4288a^* + 0.0745b^* + 14.83$	0.9764
Y:		
0	$L^* = -0.6133a^* + 1.2606b^* + 93.19$	0.9944
10	$L^* = -0.5215a^* + 1.1376b^* + 82.75$	0.9947
20	$L^* = -0.4823a^* + 1.0945b^* + 76.14$	0.9948
40	$L^* = -0.3740a^* + 1.0033b^* + 60.68$	0.9956
70	$L^* = -0.2357a^* + 0.8683b^* + 38.00$	0.9965
100	$L^* = -0.1484a^* + 0.7332b^* + 18.80$	0.9971

ところで、式(2.1)の平面モデルの式は a^* と b^* の値から L^* の値を求める式となっている。そこで、この式を用いて a^* 、 b^* から L^* の値を算出し、その予測精度を検討した。結果を図 2.5～図 2.7 に示す。傾きが 1 の 45 度の直線は縦軸の予測値が横軸の実測値に一致する場合を示しており、M の場合に若干はずれる点があるものの、C、M、Y のいずれにおいてもすべてのプロット点はこの直線にほぼ一致し、高い予測精度を示した。また、 L^* の予測値と実測値の差の平均は、C、M、Y それぞれで 1.2、1.9、0.9 であった。

2.4.2 平面モデル式の係数の関数近似

平面モデルの式の係数、 α 、 β 、 γ と網点面積比の関係を分析し、定式化の可能性を検討した。図 2.8 に C、M、Y のそれぞれの網点面積比 c 、 m 、 y と α 、 β 、 γ の値の関係を示す。図において、○の記号は α を、□の記号は β を、△の記号は γ を表す。なお、ここでは、網点面積比を%値ではなく、0～1 の比の値として扱っている点に注意しておく。

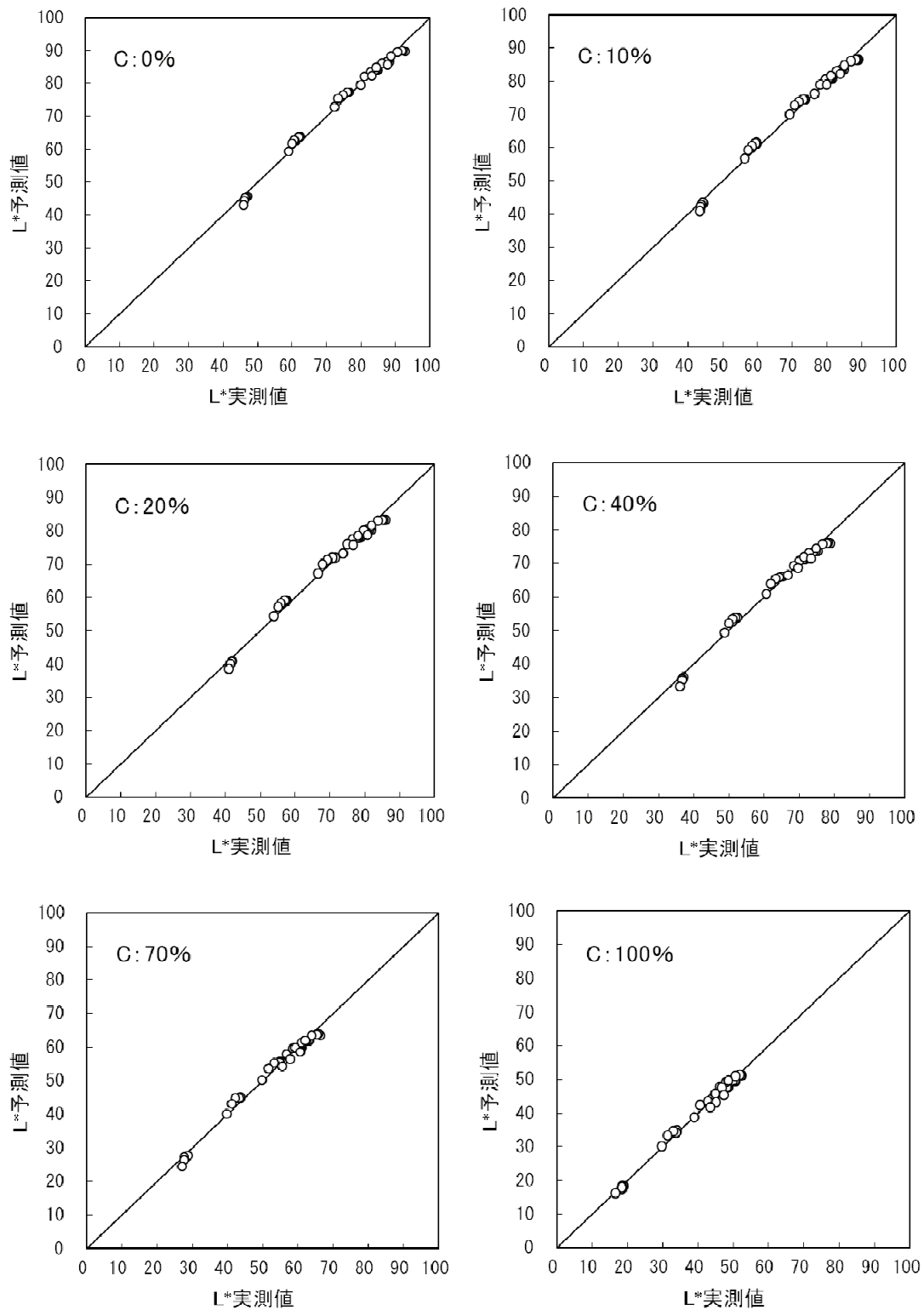


図 2.5 平面モデルの式による L* の予測精度 (C の網点面積比一定の場合)

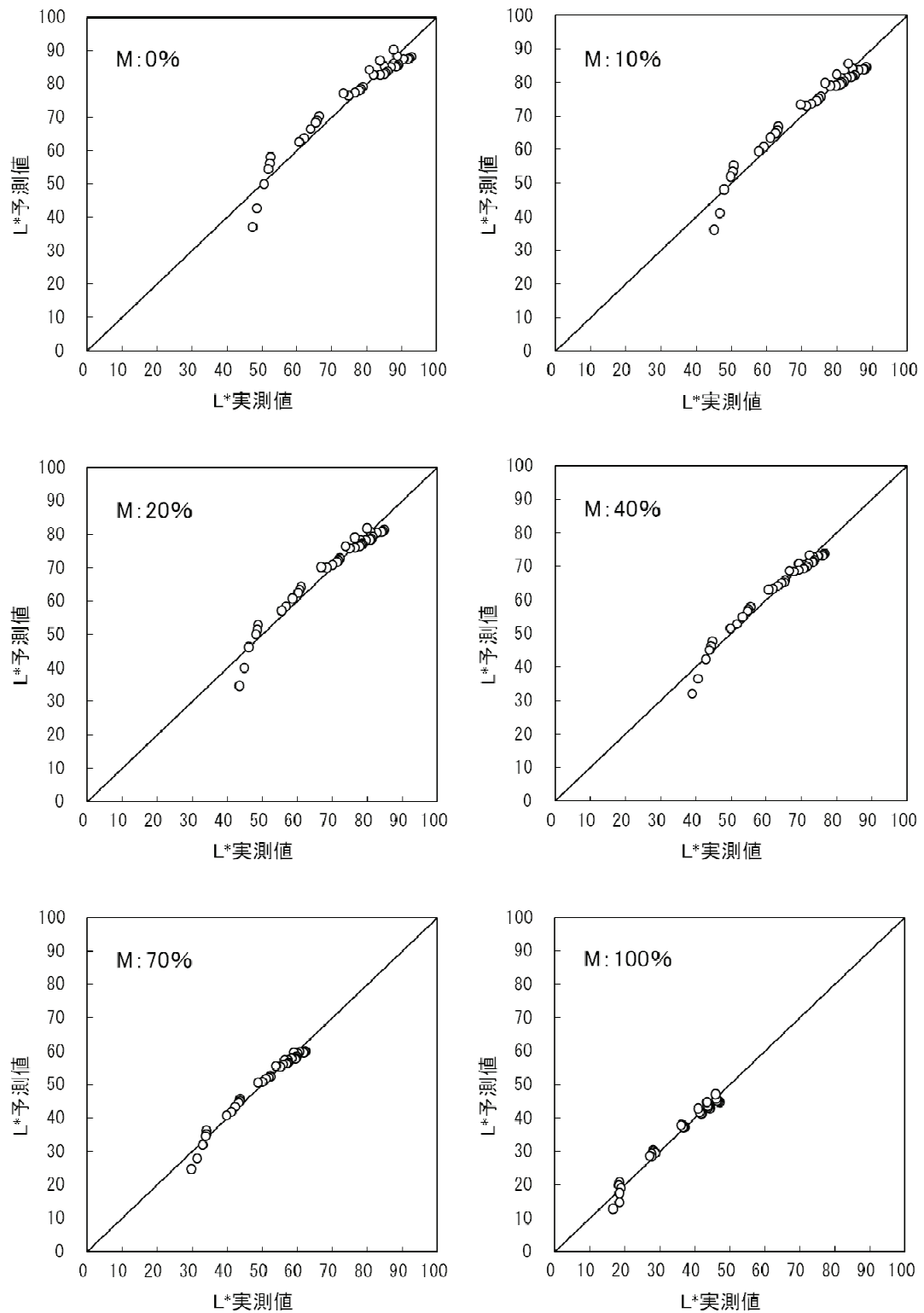


図 2.6 平面モデルの式による L^* の予測精度 (M の網点面積比一定の場合)

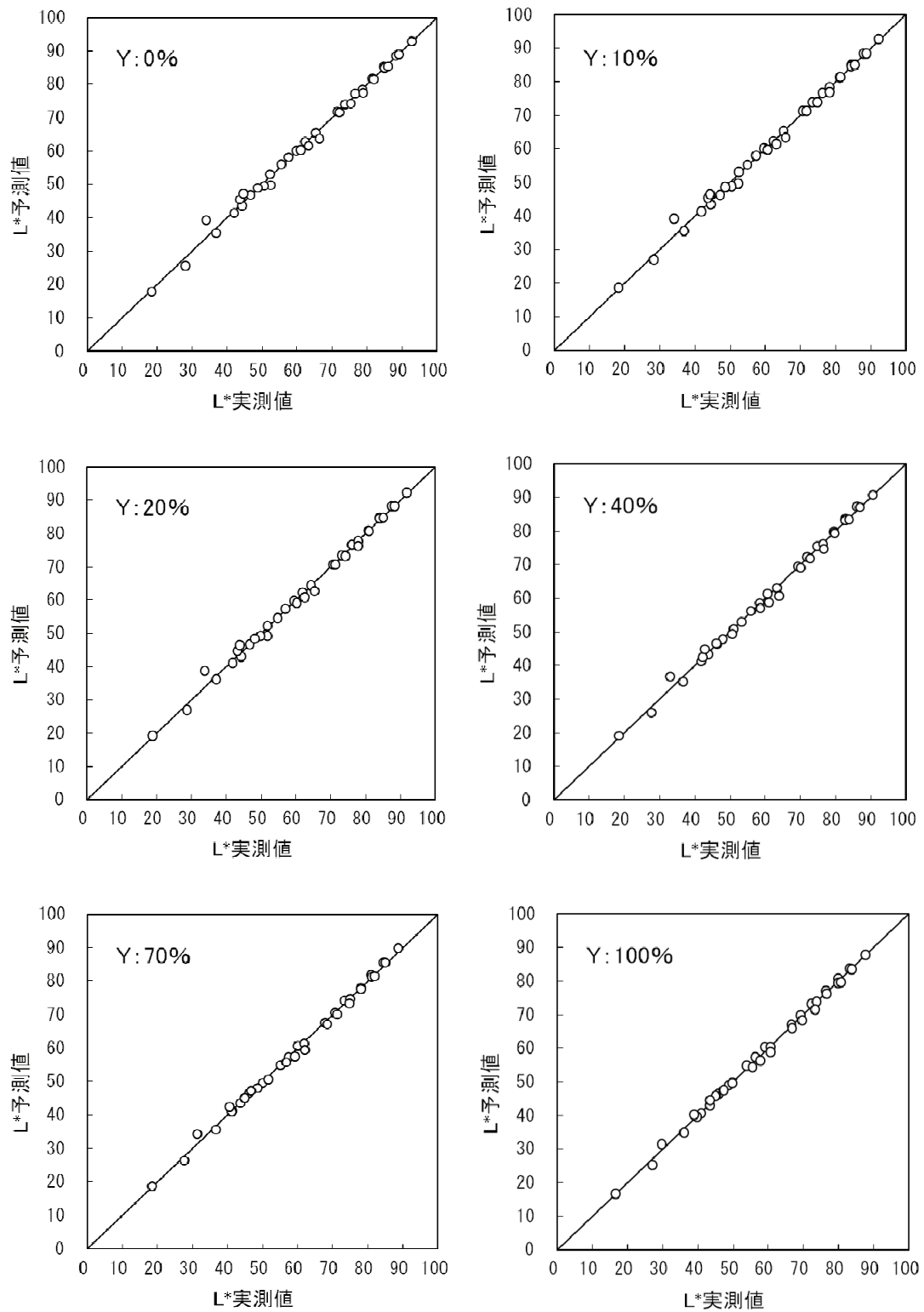
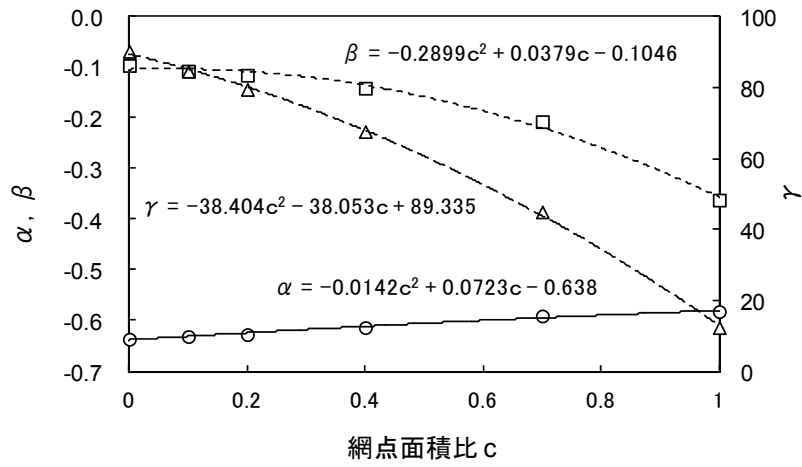
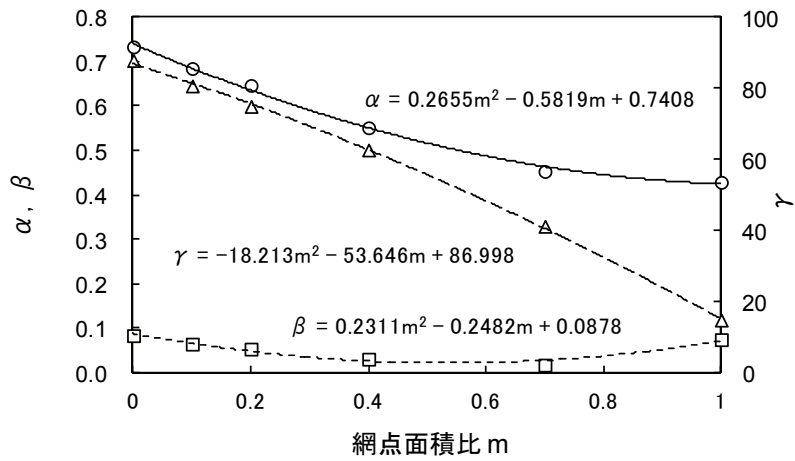


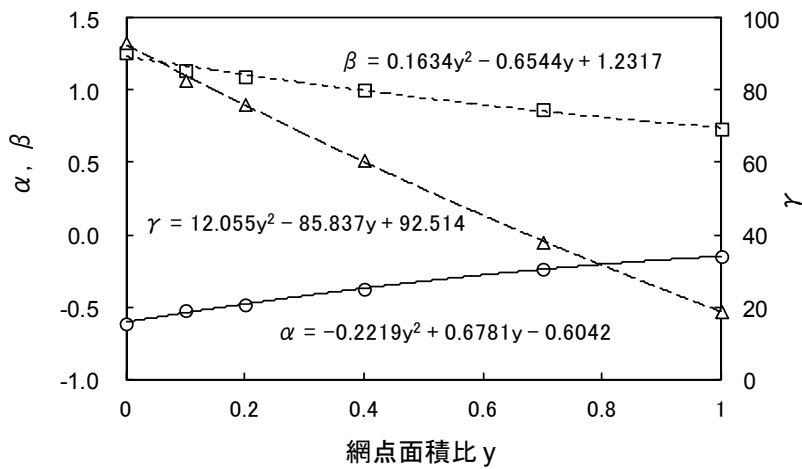
図 2.7 平面モデルの式による L* の予測精度 (Y の網点面積比一定の場合)



(a) C の平面モデル式の係数



(b) M の平面モデル式の係数



(c) Y の平面モデル式の係数

図 2.8 網点面積比と平面モデル式の係数の関係

図より、 α 、 β 、 γ は比較的滑らかな曲線状の変化を示しているのがわかる。そこで、曲線的な変化を示す関数の中で最も次数の低い2次関数での近似を試みた。いま、Cの網点面積比 c の2次関数で α 、 β 、 γ を表すと以下のようなになる。

$$\begin{aligned}\alpha &= p_1c^2 + q_1c + r_1 \\ \beta &= p_2c^2 + q_2c + r_2 \\ \gamma &= p_3c^2 + q_3c + r_3\end{aligned}\tag{2.2}$$

ここで、 p_i 、 q_i 、 r_i ($i=1\sim 3$) は定数である。回帰分析により2次関数を求め、その係数を表2.2に示す。同様に、MとYについても回帰分析を行って係数を求めた結果を併せて示す。図2.8には、これらの係数をもつ2次関数を異なる線種の曲線として示した。

表 2.2 平面モデル式係数の近似2次関数の係数

近似関数の係数 平面の式の係数	p_i	q_i	r_i
Cの平面の式:			
α	-0.0142	0.0723	-0.6380
β	-0.2899	0.0379	-0.1046
γ	-38.404	-38.053	89.335
Mの平面の式:			
α	0.2655	-0.5819	0.7408
β	0.2311	-0.2482	0.0878
γ	-18.213	-53.646	86.998
Yの平面の式:			
α	-0.2219	0.6781	-0.6042
β	0.1634	-0.6544	1.2317
γ	12.055	-85.837	92.514

2.5 L*a*b*からCMYの網点面積比への変換

式(2.2) を式(2.1)に代入して移項し c についてまとめると、以下のような c に関する 2 次方程式が得られる。

$$P \cdot c^2 + Q \cdot c + R = 0 \quad (2.3)$$

ここで、 P 、 Q 、 R は次式のように与えられる。

$$P = p_1 a^* + p_2 b^* + p_3 \quad (2.4)$$

$$Q = q_1 a^* + q_2 b^* + q_3 \quad (2.5)$$

$$R = r_1 a^* + r_2 b^* + r_3 - L^* \quad (2.6)$$

L^* 、 a^* 、 b^* の実測値、および表 2.2 の p_i 、 q_i 、 r_i の値を式(2.4)から(2.6)に代入し、式(2.3) の 2 次方程式の判別式 $Q^2 - 4PR$ の値を調べたところ、216 色すべてについて正であった。このとき、この方程式は 2 つの実数解をもち、解は公式を用いて計算できる。また、網点面積比は 0 から 1 の間の値であることから、以下の式が解の式として妥当と考えられた。

$$c = \frac{-Q - \sqrt{Q^2 - 4PR}}{2P} \quad (2.7)$$

M と Y についても同様に調べた結果、 Y では全色で判別式の値が正であったため、式(2.7) と同じ式が使えることがわかった。 M については、判別式の値が 213 色で正、他の 3 色で負となったため、この 3 色についてのみ 0 とすることで、式(2.7) と同じ式が使えることがわかった。図 2.9 に変換式による C 、 M 、 Y の予測結果をグラフに示す。

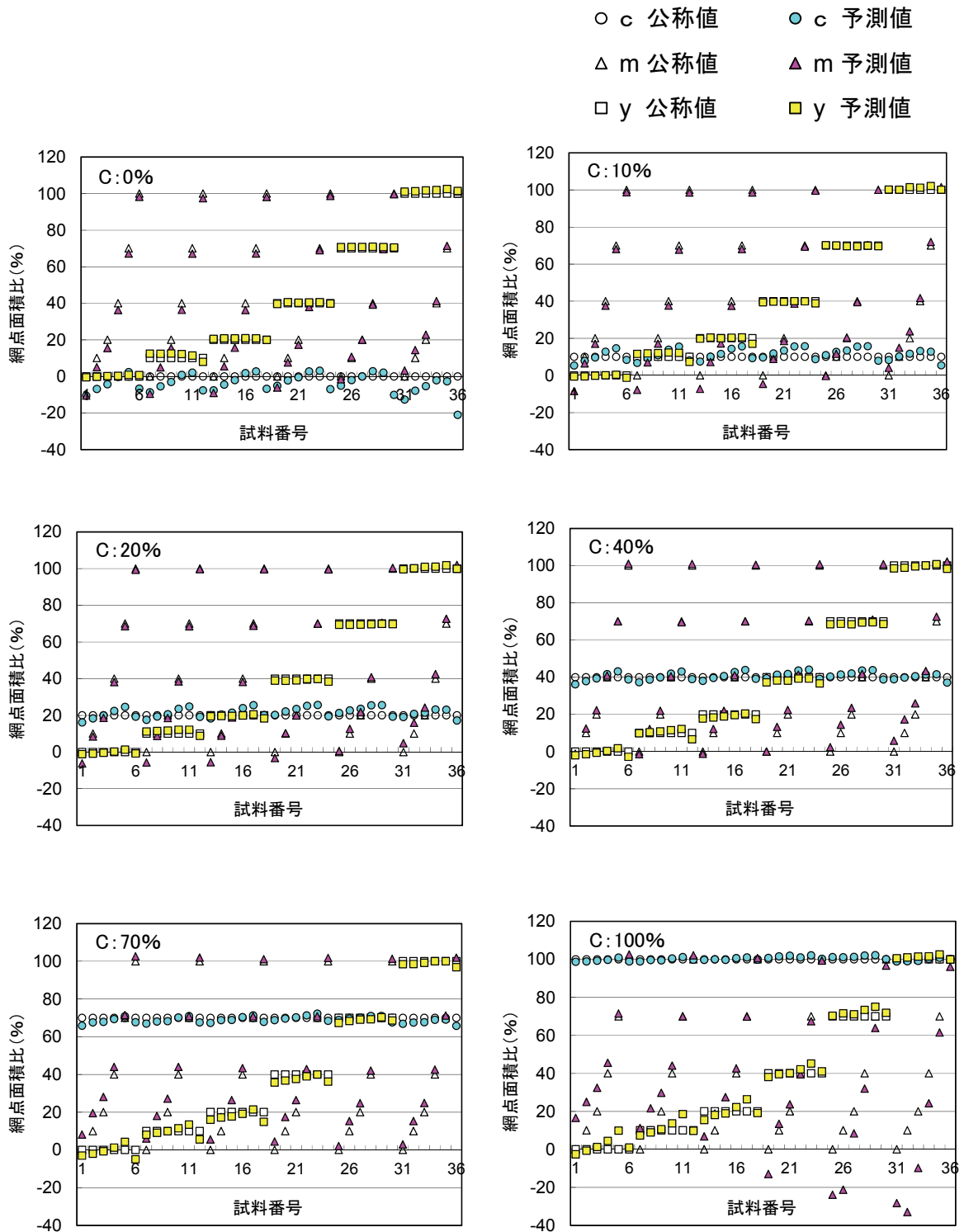


図 2.9 変換式による網点面積比の予測結果

図 2.9 には、C の網点面積比一定の色票グループの結果をまとめて、別々の図で示した。図よりわかるように、網点面積比の予測値は公称値にほぼ近い値が得られているが、公称値が 0%、または 100%付近では予測誤差が大きくなっている。また、網点面積比がマイナスとなる値や 100%以上の値もあり、特に C の網点面積比 0%の色票グループに対する C の予測結果に多くのマイナス値が見られる。本来、それらの値は適切ではないので、計算により 0%以下の値が得られた場合には 0%に修正し、100%以上の値となった場合には 100%に修正する必要がある。

このような修正を行った結果を図 2.10 に示す。また、それぞれの色票グループごとの予測誤差を図 2.11 と表 2.3 にまとめて示す。これらより、各グループで誤差が大きく出るインキは異なるものの、Y は全体的に予測誤差が小さいと言える。C は、0%および 100%の色票で誤差が最も小さい。M は、C の網点面積比が大きい 70%と 100%の色票で誤差がかなり大きくなっている。インキの色別で見ると、全色票での平均誤差の大きさは Y, C, M の順に小さく、最大誤差では C, Y, M の順に小さい。色票グループ別に比較すると、C の網点面積比が大きい 70%と 100%の色票で誤差が大きくなっており、これは M と Y の誤差が大きくなったことによる。

- c 公称値 ● c 予測値
- △ m 公称値 ▲ m 予測値
- y 公称値 ■ y 予測値

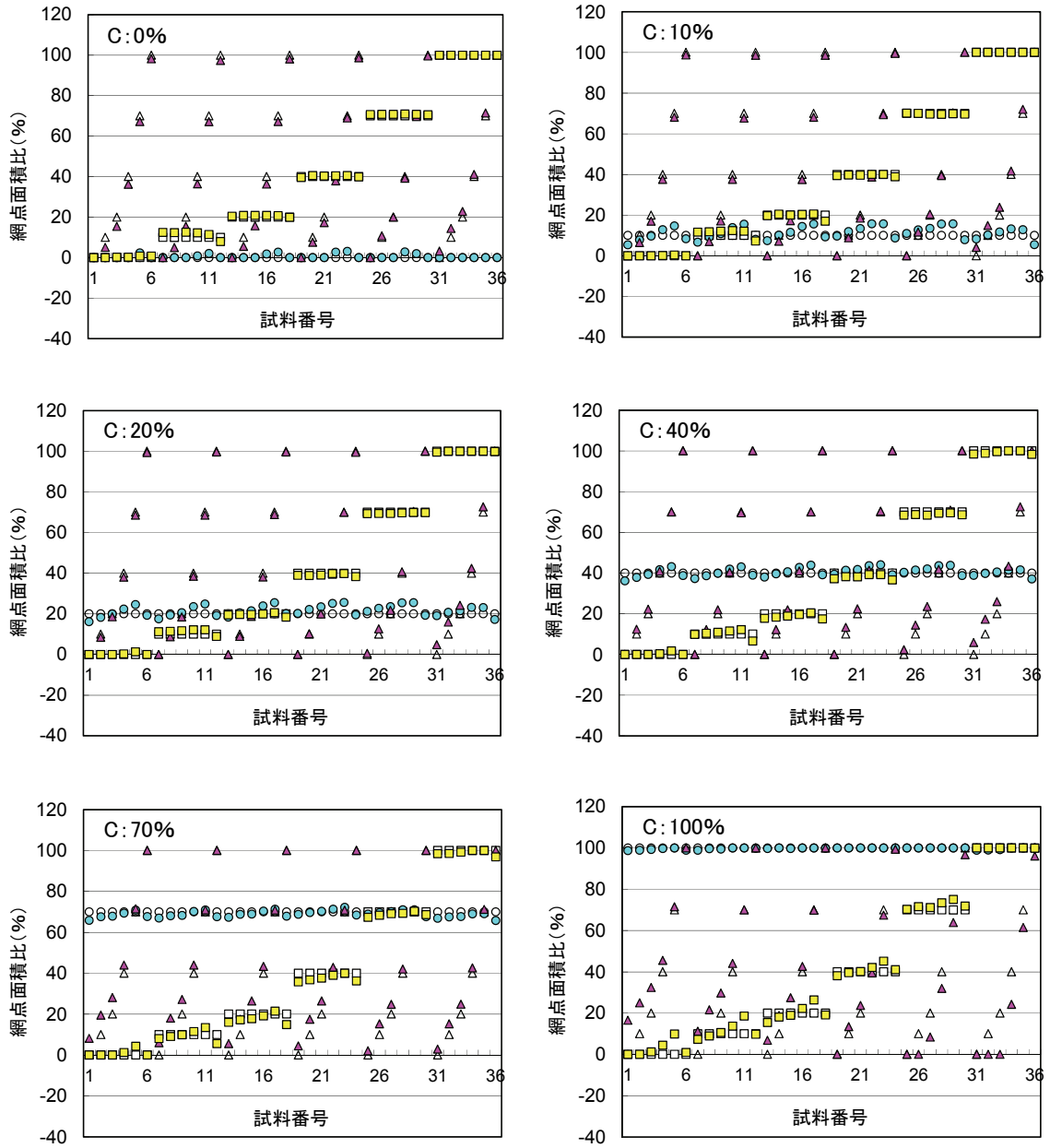


図 2.10 予測された網点面積比の修正結果

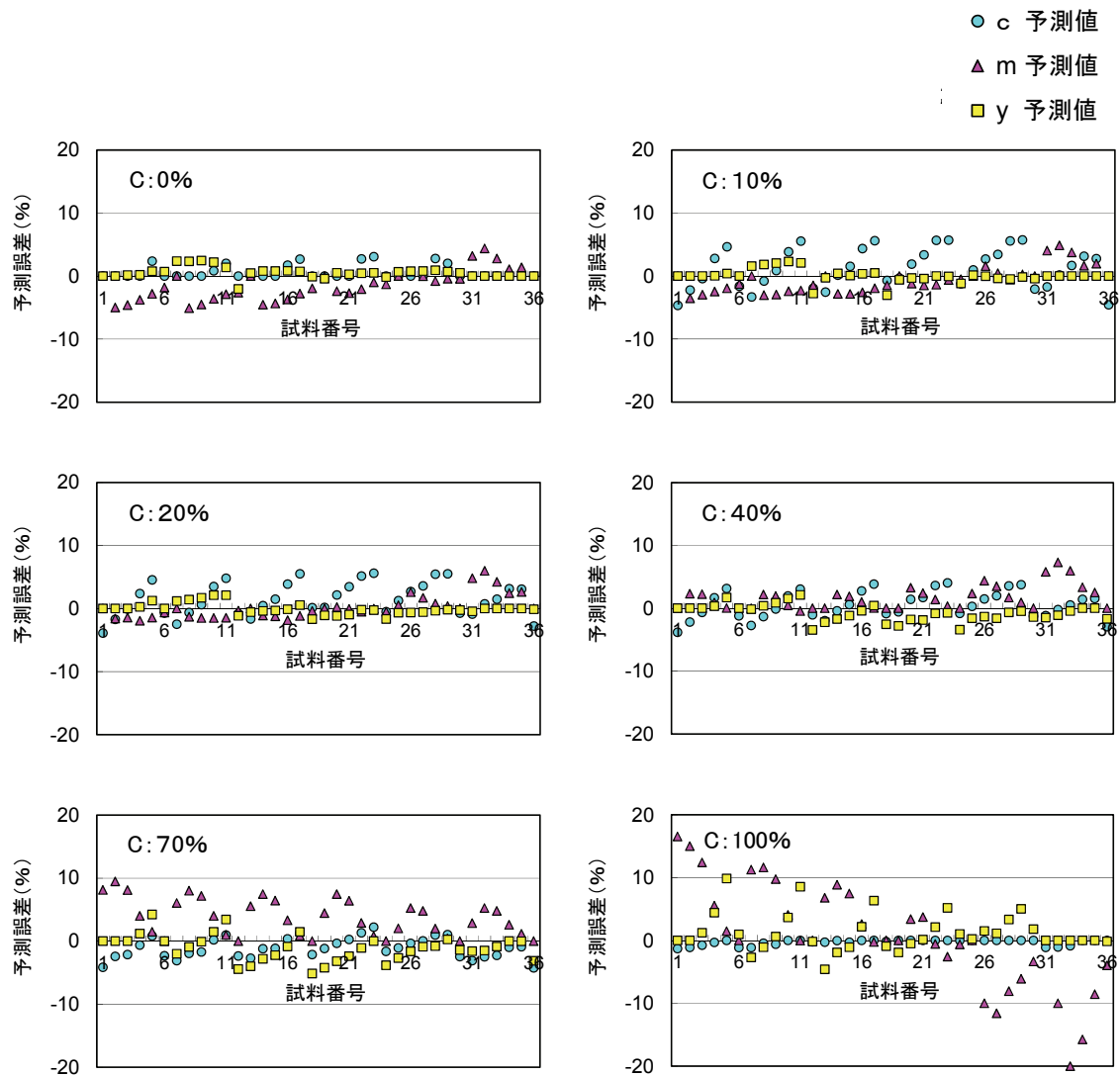


図 2.11 網点面積比の予測誤差

表 2.3 網点面積比の予測誤差 (%)

色票グループ	Cの予測誤差 (%)		Mの予測誤差 (%)		Yの予測誤差 (%)		全体 (%)	
	平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大
C : 0%	0.6	3.1	2.2	5.1	0.7	2.5	1.1	5.1
C : 10%	2.8	5.7	1.7	4.8	0.6	3.0	1.7	5.7
C : 20%	2.4	5.6	1.3	6.0	0.6	2.1	1.5	6.0
C : 40%	1.8	4.0	1.7	7.3	1.2	3.5	1.6	7.3
C : 70%	1.6	4.3	3.7	9.5	1.8	5.1	2.4	9.5
C : 100%	0.3	1.3	6.2	20.0	2.1	9.8	2.8	20.0
全体	1.6	5.7	2.8	20.0	1.2	9.8	1.8	20.0

2.6 CMY 網点面積比予測値の評価

予測された網点面積比の妥当性を検証するには、得られた網点面積比により再現される色が元の色とどの程度近いかを測色的に評価する必要がある。これには、実際にその網点面積比の色票を印刷し、その色を測定する方法と、色再現モデルによって計算で求める方法がある。前者の方法は実際的で分かり易いが、印刷時の変動もあり、印刷条件を元の色票の印刷条件と一致させることは現実的に不可能である。そこで、ここでは、平面モデルの特徴を利用して、モデル式によって再現色の測色値を求めることにした。

2.6.1 平面モデル式を用いた再現色の予測

式(2.1)の平面モデルの式において、 α 、 β 、 γ は網点面積比 c 、 m 、 y の関数で表すことができたので、あらためて、 α 、 β 、 γ をそれらの関数の形で表すと、以下のようになる。

$$\begin{aligned} L^* &= \alpha_c(c) \cdot a^* + \beta_c(c) \cdot b^* + \gamma_c(c) \\ L^* &= \alpha_m(m) \cdot a^* + \beta_m(m) \cdot b^* + \gamma_m(m) \\ L^* &= \alpha_y(y) \cdot a^* + \beta_y(y) \cdot b^* + \gamma_y(y) \end{aligned} \quad (2.8)$$

ここで、 $\alpha_F(F)$ 、 $\beta_F(F)$ 、 $\gamma_F(F)$ (ただし、 F は c 、 m 、 y のいずれかを表す) は平面モデルの式の係数で、 c 、 m 、 y の値が決まれば定数となる。式(2.8)の3つの式は L^* 、 a^* 、 b^* を変数とする3元連立1次方程式を構成する。この解はクラームルの公式を用いて、以下のように与えられる。

$$\begin{aligned} L^* &= \frac{\begin{vmatrix} \gamma_c(c) & \alpha_c(c) & \beta_c(c) \\ \gamma_m(m) & \alpha_m(m) & \beta_m(m) \\ \gamma_y(y) & \alpha_y(y) & \beta_y(y) \end{vmatrix}}{\Delta} \\ a^* &= \frac{\begin{vmatrix} 1 & \gamma_c(c) & -\beta_c(c) \\ 1 & \gamma_m(m) & -\beta_m(m) \\ 1 & \gamma_y(y) & -\beta_y(y) \end{vmatrix}}{\Delta} \\ b^* &= \frac{\begin{vmatrix} 1 & -\alpha_c(c) & \gamma_c(c) \\ 1 & -\alpha_m(m) & \gamma_m(m) \\ 1 & -\alpha_y(y) & \gamma_y(y) \end{vmatrix}}{\Delta} \end{aligned} \quad (2.9)$$

ただし、 $\Delta \neq 0$ が成り立つとする。ここで、

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & \alpha_c(c) & \beta_c(c) \\ 1 & \alpha_m(m) & \beta_m(m) \\ 1 & \alpha_y(y) & \beta_y(y) \end{vmatrix} \quad (2.10)$$

である。

2.6.2 平面モデル式の予測精度

平面モデル式に基づいて CMY の網点面積比から L*a*b*値を予測する方法の精度を評価するため、本研究で使用した色票の網点面積比の公称値から再現色の L*a*b*値を計算し、その結果と実測された L*a*b*値を比較して両者の色差を算出した。色差の算出には以下に示す CIELAB1976 色差式を用いた。

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (2.11)$$

ただし、

$$\Delta L^* = L_p^* - L_m^*, \quad \Delta a^* = a_p^* - a_m^*, \quad \Delta b^* = b_p^* - b_m^*$$

ここで、 L_p^*, a_p^*, b_p^* は予測による L^*, a^*, b^* の値、 L_m^*, a_m^*, b_m^* は実測による L^*, a^*, b^* の値である。

図 2.12 に 216 色の色票について得られた色差を棒グラフで示す。平均色差は 3.0、最大色差は 11.9 であった。

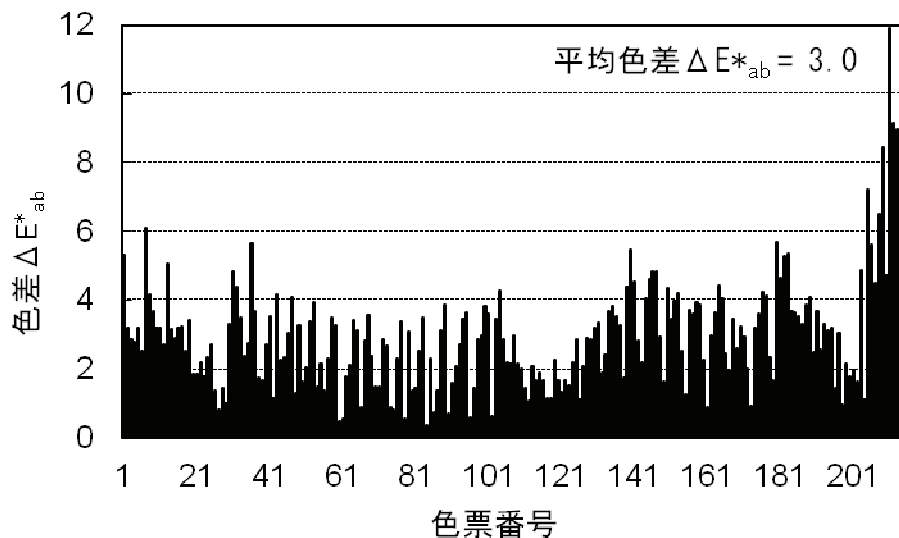


図 2.12 216 色の色票における平面モデル式の予測精度

2.6.3 予測された網点面積比による再現色の評価

L*a*b*値からの変換により得られた網点面積比の誤差を色再現の点から評価するには、この網点面積比で再現される色と元の色票色との色差を調べる必要がある。そこで、2.6.1の方法により、変換で得られた網点面積比に対応する再現色のL*a*b*値を計算し、元の色票についても同様に網点面積比の公称値からL*a*b*値を計算して、それらを比較した。網点面積比からL*a*b*値への計算には同じアルゴリズムを用いるので、L*a*b*値から変換された網点面積比の誤差による再現色への影響を評価することができる。

図2.13に216色の色票について予測された網点面積比による再現色での色差を棒グラフで示す。平均色差は2.5、最大色差は8.2であった。

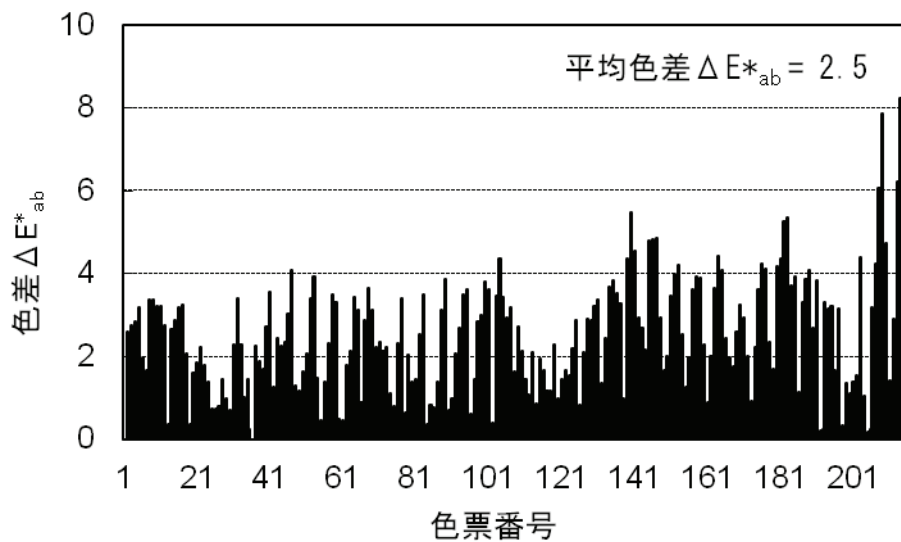


図 2.13 216 色の色票における予測網点面積比による再現精度

2.7 考察

2.7.1 予測精度の評価

得られた色差を評価するにはその基準が必要であるが、基準は対象となる製品や使用目的によっても異なると考えられる。また、メーカーによって基準が異なる場合や、明確な基準がない場合もあり、一律に判断するのは難しい。

たとえば、文献 3)に紹介されている表 2.4 の基準を参考にすると、予測された網点面積比による再現色の精度を示す平均色差 2.5 という値は、2つの試料色を離間して判定した場合にほぼ同一と認めることができるレベルで、JIS 標準色票の製造品質基準と同等である。

また、オフセット印刷物の色の標準を規定したジャパンカラーでは、インキ単色刷りベタ部の許容色差は 5 以内と規定されているが⁴⁾、今回の方法では色差は C : 4.4, M : 2.0, Y : 2.3 でこの規定を満たしている。さらに、関連の Japan Color 認証制度においては、ISO12642-2⁵⁾のチャートに含まれる 1617 色の色票における L*a*b*値の許容色差は、平均で 3 以内、95 パーセンタイル値で 6 以内とされている⁶⁾。今回用いたチャートに K を含む色票は含まれていないため単純に比較はできないが、平均色差は 2.5、95 パーセンタイル値の色差は 4.8 だったのでいずれも基準を満たしており、実用上十分なレベルと考えられる。

表 2.4 許容色差の分類³⁾

色差	名称	摘要
0.3	識別色差	同一物体の測色再現精度
0.6	1級(厳格色差)	各種の誤差要因を考えた場合の実用的な許容差の限界
1.2	2級(実用色差)	並べて判定した場合に、ほとんどの人が容易に色差を認めることができる。
2.5	3級(実用色差)	離間して判定した場合に、ほぼ同一と認めることができる。
5.0	4級	経時比較した場合に、ほぼ同一と認めることができる。

2.7.2 グレイバランス最適化への応用

CMY インキの吸収特性により、それら 3 色を等網点面積比で刷り重ねてもニュートラルなグレイにはならないため、印刷再現においては、グレイを得るための 3 色のバランス条件に配慮して色調修正などの処理が行われる。この条件を求めるには、一般に CMY の網点面積比を等量付近で少量ずつ種々に変えた色票を作成し、これを視覚的に評価するなどしてグレイバランスの条件が決定される。

このような場合に、本研究で開発した L*a*b* から CMY 網点面積比への変換式を用いれば、 $a^* = b^* = 0$ とおくことでグレイバランスの条

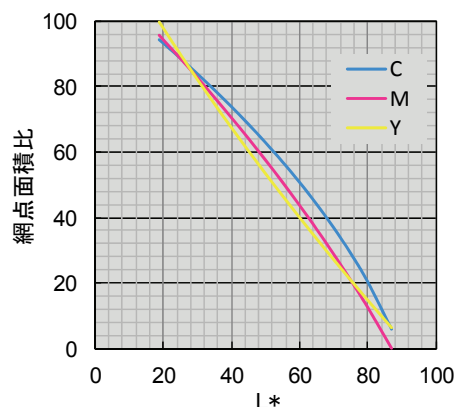


図 2.14 グレイバランス条件

件を容易にかつ測色的に最適化して求めることができる。この方法でその条件を求めた結果を図 2.14 に示す。網点面積比 50%付近で C が M と Y よりも約 7~10%大きくなる結果が示されている。一般的には C が他の 2 色よりも約 10%大きいと言われているが、この値はインキの種類やベタ濃度の条件によっても異なってくる。

2.8 まとめ

CMY3 色のうちの任意の 1 色の網点面積比が一定で、他の 2 色の網点面積比が変化する場合、それらによる再現色の $L^*a^*b^*$ 色空間内での座標点がほぼ同一平面上に乗る性質を利用して色再現特性を表す平面モデルの式をたて、 $L^*a^*b^*$ 値から CMY 網点面積比への変換式を導いた。この式による変換誤差は平均で C が 1.6%、M が 2.8%、Y 1.2%であった。

また、平面モデルの式を利用して、CMY 網点面積比から $L^*a^*b^*$ 値への変換も行えることを示した。

さらには、従来、階調レベルごとに多数の色票を印刷して決めていた CMY 3 色のグレイバランス条件が、開発した変換式を用いることで容易に求められることを示した。これは、従来の方法にはない利点と言える。

第3章 ブラック信号を考慮した相互色変換

3.1 はじめに

本章では、第2章で構築した CMY 3 色印刷の平面モデルが、K を含む CMYK 4 色印刷にも適用できることを検証し、このモデルを用いて $L^*a^*b^*$ 測色データとの相互変換を行う方法を説明する。

3.2 色再現特性の解析方法

CMYK 4 色印刷の色再現特性の解析においても第2章で用いた図 2.1 の試料を用いた。使用したのは、図 2.2 に示した⑦から⑳のブロックに含まれ、指定された CMYK の網点面積比の組合せによる 530 個の色票である。

これらの色票の測定は全 928 個の色票としてまとめて行っており、測定方法は第2章で説明したのと同じ方法による。

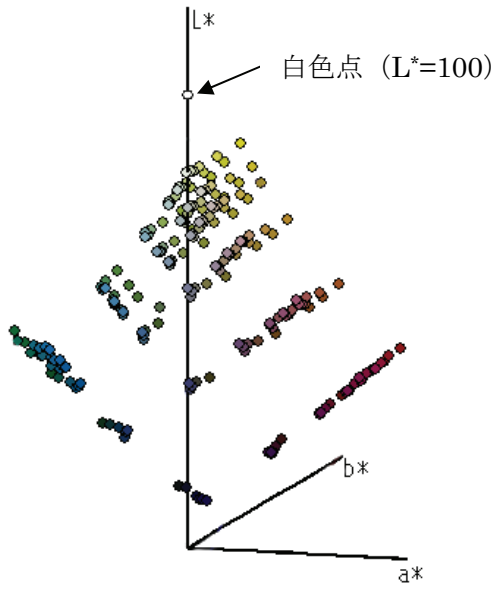
3.3 CMYK 4 色による色再現特性

K を含む CMYK 4 色の組合せによる色票は、K=20%、40%、60%、80%の4グループあり、それぞれ CMY の網点面積比は表 3.1 の値の組合せになる。これらのグループの色票の色を測定してグループごとに $L^*a^*b^*$ 空間にプロットし、同一方向から眺めた俯瞰図にして図 3.1 に示す。K の網点面積が大きくなるにつれて L^* の値が小さくなるとともに、 a^*b^* の値も小さくなる様子が見てとれる。このことは、K の網点が重なることで、再現される色の明度と彩度が低下することを意味する。これにより、暗い方での色域が拡大する。

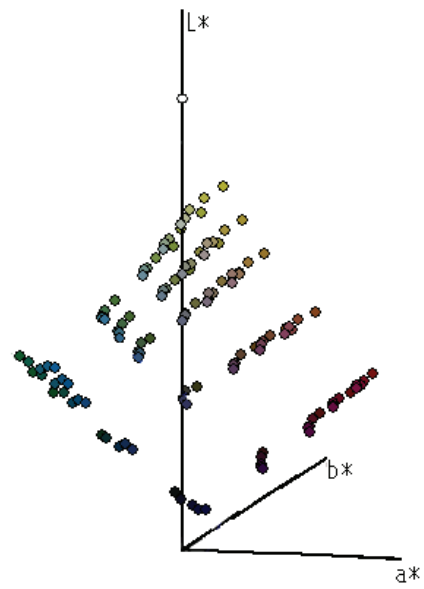
また、3次元表示ソフトでプロットした点の分布を観察した結果より、前章で示した K を含まない色票での結果と同様に、CMY いずれかのインキの網点面積比が一定の条件では、プロットした点がほぼ同一平面上に乗っている様子が確認された。

表 3.1 CMYK 4 色の組合せによる色票グループの構成

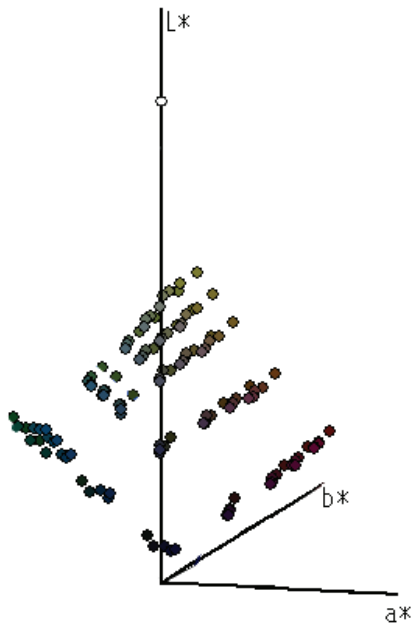
色票グループ	網点面積比 (%)						色票の数
K : 20%	0	10	20	40	70	100	216
K : 40%	0	-	20	40	70	100	125
K : 60%	0	-	20	40	70	100	125
K : 80%	0	-	-	40	70	100	64



(a) K : 20%の色票グループ



(b) K : 40%の色票グループ



(c) K : 60%の色票グループ



(d) K : 80%の色票グループ

図 3.1 CMYK 4 色の組合せによる色票の $L^*a^*b^*$ 空間における色分布

3.4 色再現特性のモデル化

CMY3 色組合せによる色票と同様に，CMYK 4 色組合せによる色票についてもその色再現特性が(2.1)式の平面モデルで記述できるかどうかを評価するため，K および CMY のうち 1 色の網点面積比が一定のそれぞれの色票グループに対して，重回帰分析により L^* と a^* ， b^* の関係を調べた．その結果を表 3.2 に示す．いずれの色票グループにおいても重回帰分析の結果，3 色の場合と同等の高い決定係数が得られ，平面モデルの式で近似できることがわかった．

得られた C，M，Y それぞれに対する平面の式により a^* ， b^* の値から L^* を予測したときの精度を評価した結果を図 3.2～図 3.4 に示す．ここでは，K の異なる 4 グループ別に，C，M，Y の網点面積比一定のグループごとに予測した結果をまとめて示した．M の平面モデルにおいて K が 20% での予測に若干のずれが認められるが，全体としてはかなり良い精度で予測できていると言える．

表 3.2 CMYK 4 色の組合せによる色票に対する平面モデルの式

網点面積比(%)	平面の式	決定係数	平面の式	決定係数
	K: 20%		K: 40%	
C:				
0	$L^* = -0.6192a^* - 0.0847b^* + 80.39$	0.9922	$L^* = -0.5809 a^* - 0.0695 b^* + 70.66$	0.9922
10	$L^* = -0.6175a^* - 0.0941b^* + 75.29$	0.9920	—	
20	$L^* = -0.6102a^* - 0.0981b^* + 70.59$	0.9917	$L^* = -0.5756 a^* - 0.0831 b^* + 62.72$	0.9941
40	$L^* = -0.5998a^* - 0.1253b^* + 60.19$	0.9900	$L^* = -0.5728 a^* - 0.1094 b^* + 53.85$	0.9955
70	$L^* = -0.5808a^* - 0.1962b^* + 40.33$	0.9885	$L^* = -0.5631 a^* - 0.1734 b^* + 36.51$	0.9967
100	$L^* = -0.5756a^* - 0.3419b^* + 11.44$	0.9924	$L^* = -0.5708 a^* - 0.3447 b^* + 9.72$	0.9925
M:				
0	$L^* = 0.6955a^* + 0.0855b^* + 79.03$	0.9562	$L^* = 0.6119 a^* + 0.0910 b^* + 69.32$	0.9659
10	$L^* = 0.6496a^* + 0.0698b^* + 72.12$	0.9592	—	
20	$L^* = 0.6121a^* + 0.0609b^* + 66.94$	0.9612	$L^* = 0.5335 a^* + 0.0684 b^* + 60.26$	0.9799
40	$L^* = 0.5312a^* + 0.0365b^* + 56.10$	0.9695	$L^* = 0.4746 a^* + 0.0536 b^* + 50.92$	0.9830
70	$L^* = 0.4744a^* + 0.0130b^* + 35.92$	0.9780	$L^* = 0.4212 a^* + 0.0484 b^* + 33.46$	0.9832
100	$L^* = 0.4537a^* + 0.0682b^* + 11.33$	0.9821	$L^* = 0.4266 a^* + 0.0851 b^* + 10.59$	0.9779
Y:				
0	$L^* = -0.5837a^* + 1.2193b^* + 82.90$	0.9943	$L^* = -0.5474 a^* + 1.1543 b^* + 73.15$	0.9866
10	$L^* = -0.5190a^* + 1.1567b^* + 73.45$	0.9934	—	
20	$L^* = -0.4793a^* + 1.1278b^* + 66.74$	0.9944	$L^* = -0.4518 a^* + 1.0412 b^* + 60.88$	0.9914
40	$L^* = -0.3641a^* + 0.9691b^* + 54.92$	0.9949	$L^* = -0.3706 a^* + 0.9507 b^* + 49.45$	0.9900
70	$L^* = -0.2504a^* + 0.8651b^* + 34.29$	0.9962	$L^* = -0.2363 a^* + 0.8457 b^* + 31.77$	0.9962
100	$L^* = -0.1439a^* + 0.7579b^* + 15.47$	0.9982	$L^* = -0.1367 a^* + 0.7406 b^* + 14.13$	0.9974
	K: 60%		K: 80%	
C:				
0	$L^* = -0.5712 a^* - 0.0671 b^* + 56.86$	0.9942	$L^* = -0.5741 a^* - 0.0881 b^* + 42.07$	0.9903
10	—		—	
20	$L^* = -0.5712 a^* - 0.0740 b^* + 50.75$	0.9953	—	
40	$L^* = -0.5689 a^* - 0.0991 b^* + 43.75$	0.9960	$L^* = -0.5588 a^* - 0.0990 b^* + 31.54$	0.9946
70	$L^* = -0.5604 a^* - 0.1711 b^* + 29.39$	0.9941	$L^* = -0.5460 a^* - 0.1501 b^* + 20.97$	0.9952
100	$L^* = -0.5649 a^* - 0.3570 b^* + 6.00$	0.9858	$L^* = -0.5476 a^* - 0.3174 b^* + 4.16$	0.9882
M:				
0	$L^* = 0.5879 a^* + 0.0959 b^* + 55.92$	0.9688	$L^* = 0.5489 a^* + 0.0858 b^* + 41.16$	0.9675
10	—		—	
20	$L^* = 0.5253 a^* + 0.0800 b^* + 49.39$	0.9831	—	
40	$L^* = 0.4554 a^* + 0.0622 b^* + 42.08$	0.9837	$L^* = 0.4243 a^* + 0.0750 b^* + 30.03$	0.9873
70	$L^* = 0.3968 a^* + 0.0550 b^* + 27.88$	0.9848	$L^* = 0.3719 a^* + 0.0732 b^* + 19.72$	0.9893
100	$L^* = 0.3942 a^* + 0.0883 b^* + 8.90$	0.9800	$L^* = 0.3665 a^* + 0.1049 b^* + 6.11$	0.9782
Y:				
0	$L^* = -0.5169 a^* + 1.1186 b^* + 59.24$	0.9906	$L^* = -0.5158 a^* + 1.1645 b^* + 44.64$	0.9675
10	—		—	
20	$L^* = -0.4511 a^* + 1.0201 b^* + 49.04$	0.9872	—	
40	$L^* = -0.3462 a^* + 0.9074 b^* + 40.58$	0.9920	$L^* = -0.3475 a^* + 0.9300 b^* + 29.30$	0.9811
70	$L^* = -0.2395 a^* + 0.8732 b^* + 24.44$	0.9945	$L^* = -0.2361 a^* + 0.8519 b^* + 17.66$	0.9911
100	$L^* = -0.1253 a^* + 0.7366 b^* + 11.16$	0.9985	$L^* = -0.1199 a^* + 0.7046 b^* + 8.04$	0.9932

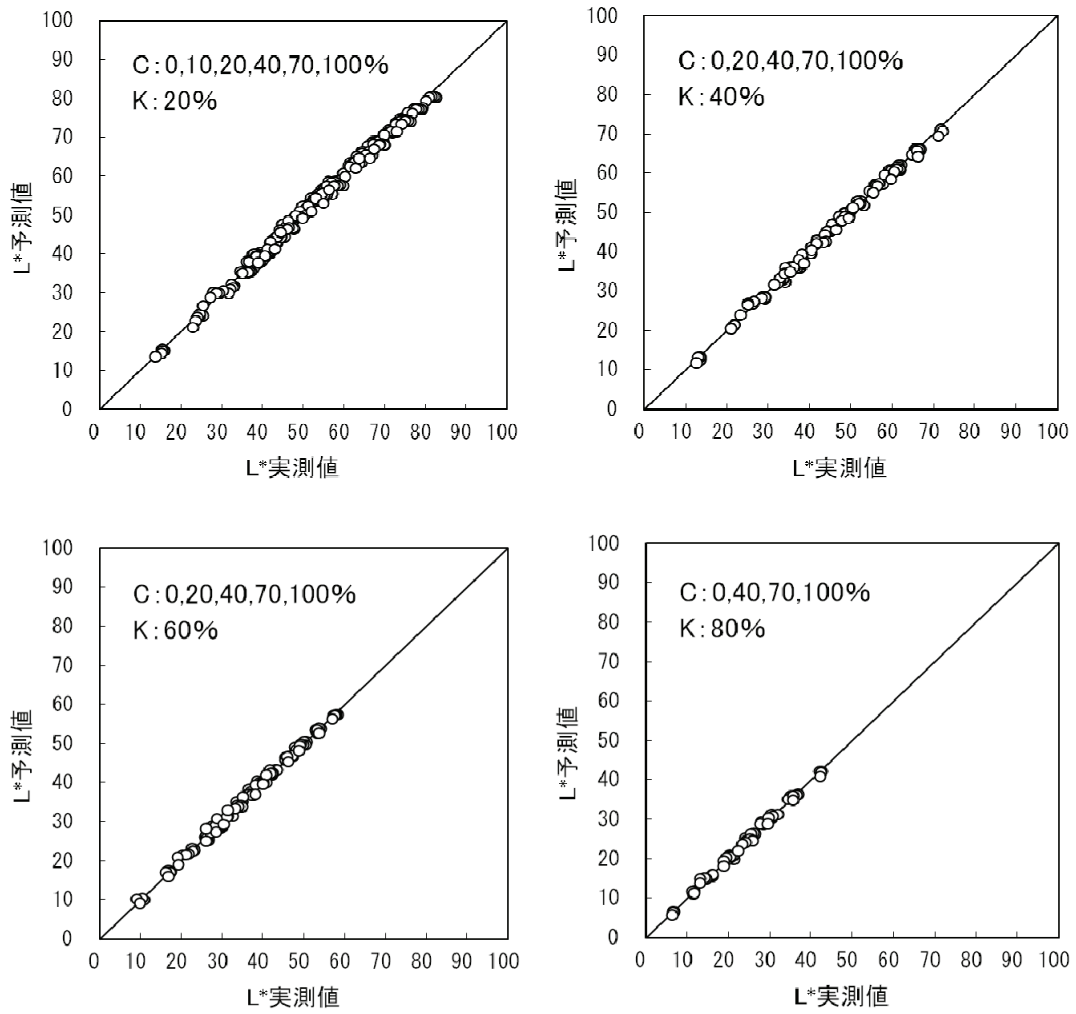


図 3.2 C の平面モデル式による L* の予測精度

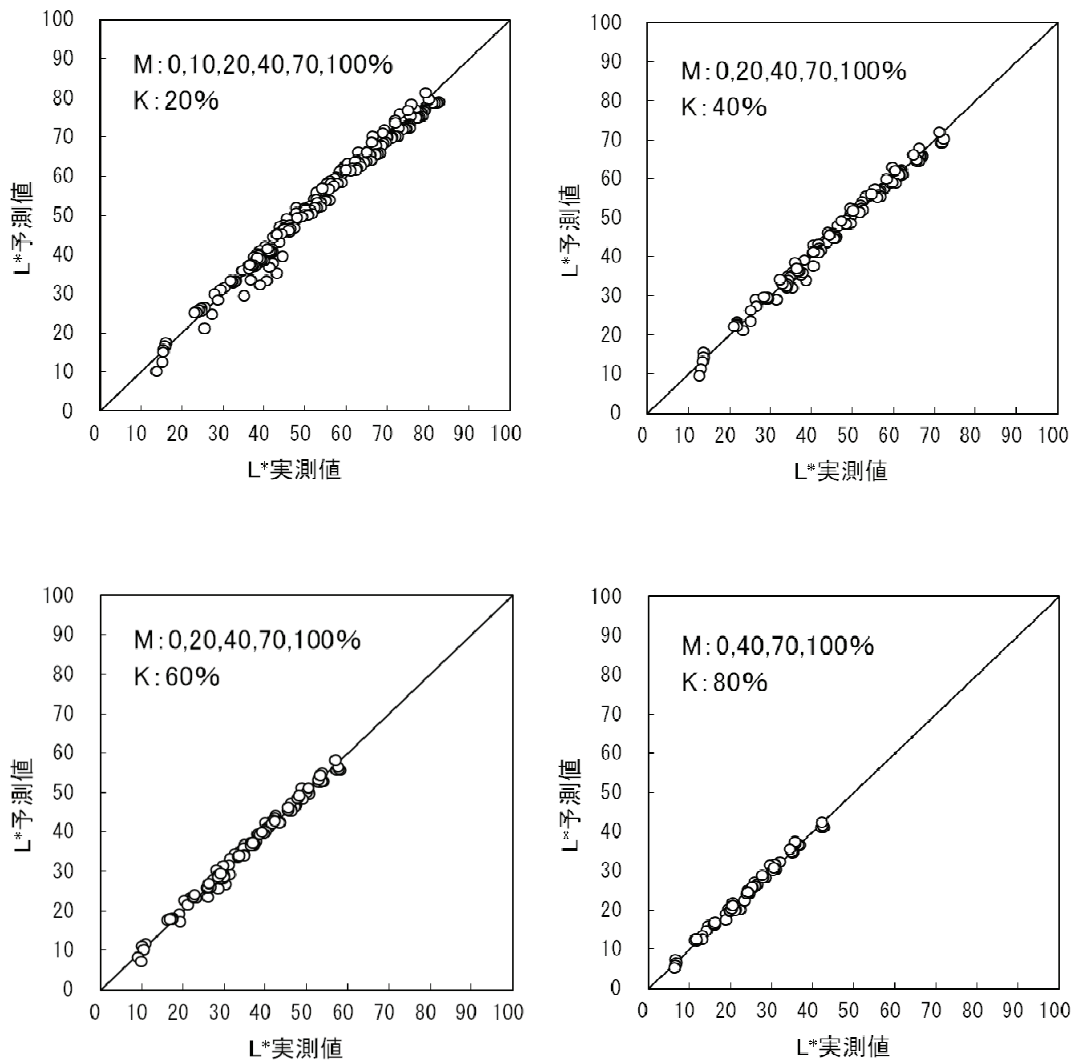


図 3.3 M の平面モデル式による L* の予測精度

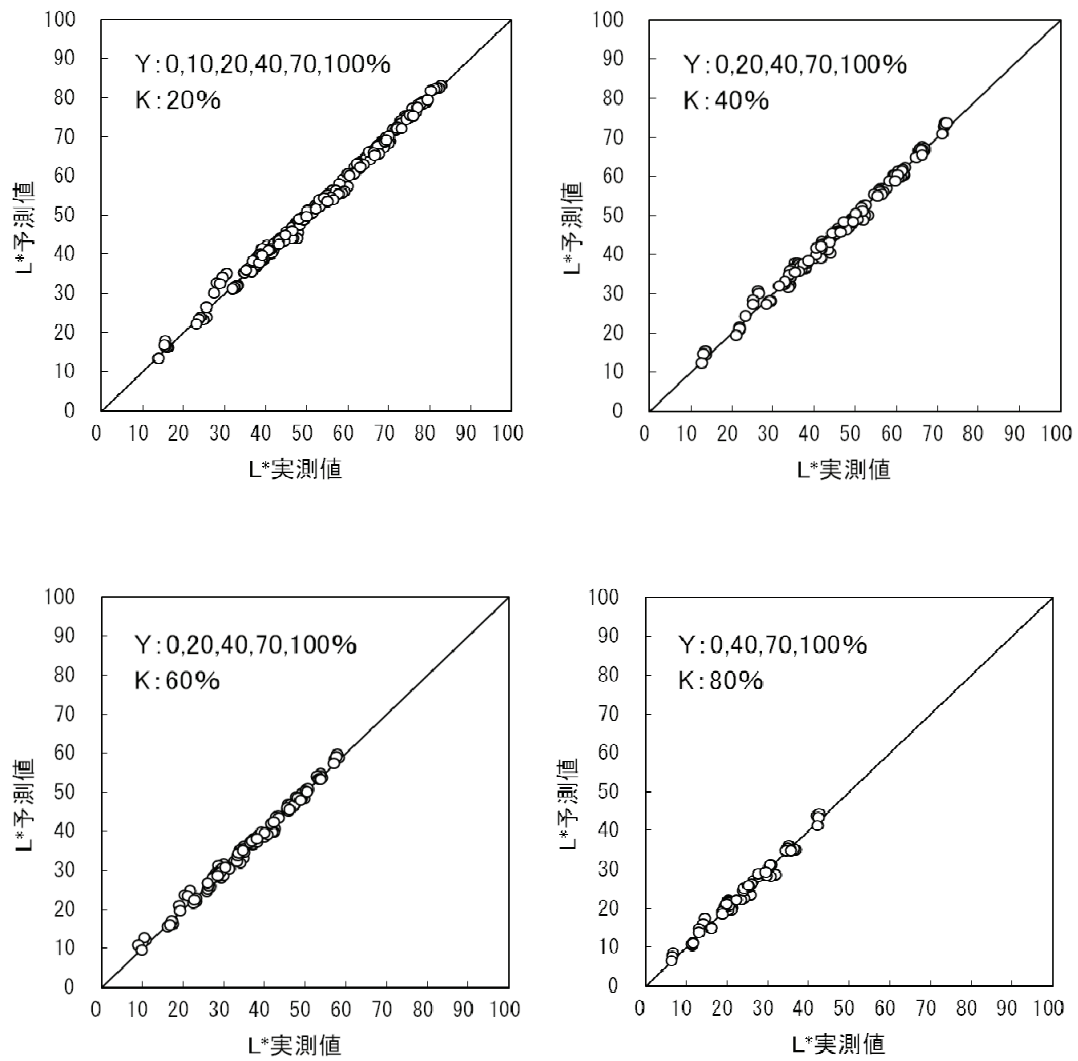


図 3.4 Y の平面モデル式による L* の予測精度

3.5 平面モデル式の係数の関数近似

CMYK 4 色の色票では，平面モデルの式の係数の値が K の網点面積比によっても影響を受けるため，(2.2)式のような単純な 2 次関数で近似することは難しい．しかしながら，複雑な関数で近似すると， $L^*a^*b^*$ の値から網点面積比を解析的に求めることが困難になってしまう．そこで， K の成分を C ， M ， Y の成分に置き換えて扱う方法¹⁾を検討した．

3.5.1 K 成分の CMY への置き換え（面積置換法）

CMY の有彩色インキ（色インキと略称）のうちの 1 つの網点面積比が固定で他の 2 色の網点面積比が変化する色票グループにおいて，網点面積比一定の K が全体の色票に加わる場合を考える．まず，図 3.5 のように，面積比 A を持つ色インキの網点に対して，面積比 B を持つ K インキの網点が重なる場合を考える． K インキの光の吸収波長域は全可視域に及ぶため色インキの吸収域も含んでおり， K の網点に加わることは，色インキの面積がある割合で増えることとほぼ同等の効果をもたらすと考えられる．むしろ， K インキの効果は他の 2 色の色インキについても現れるため，他の 2 色についても同様に扱うことにする．

つぎに， K インキの重なりによる効果を考慮した色インキの網点面積比を A' とすると， A' は色インキと K インキが重なる部分の面積比 AB を考慮して以下のように計算される．

$$A' = A + B - AB \quad (3.1)$$

なお，ここでの重なり部分の面積比の算出には，網点面積比を単位面積あたりの紙上での網点占有確率と仮定して，確率の乗法則を適用している．このように， K インキの面積を色インキの面積に置き換えて扱う方法を面積置換法と呼ぶことにする．

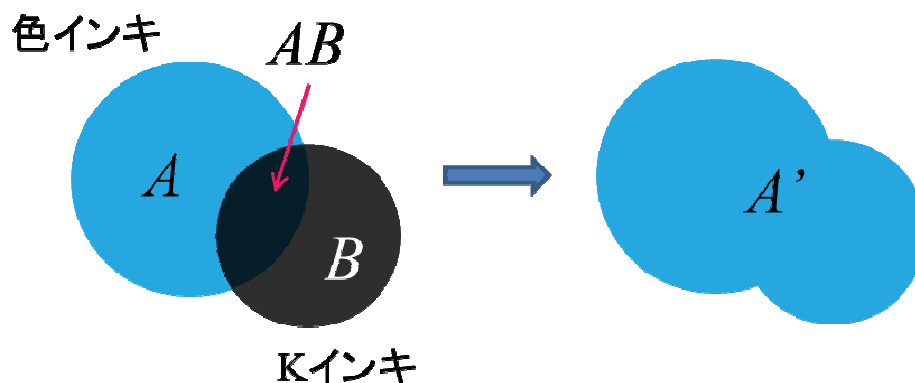
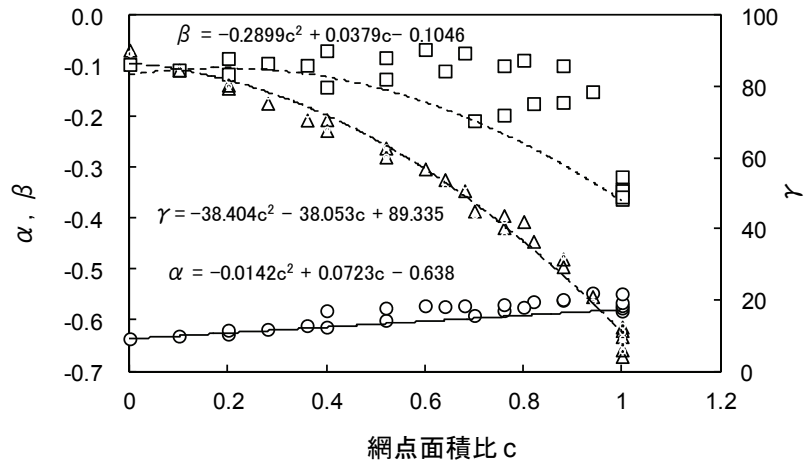
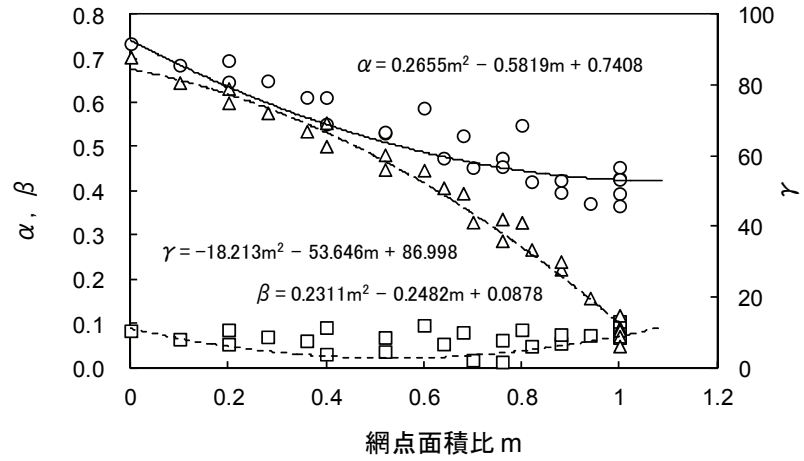


図 3.5 K インキを含む場合の網点面積の考え方（面積置換法）

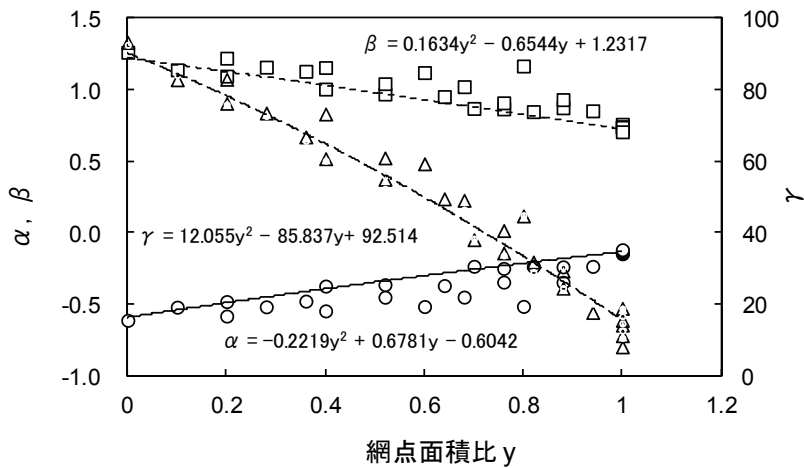
(3.1)式により計算した網点面積比 A' を色インキの新たな面積比として，CMY 3 色の場合と同様に，網点面積比と平面モデル式の係数の関係を調べた結果を図 3.6 に示す．



(a) C の平面モデル式の係数



(b) M の平面モデル式の係数



(c) Y の平面モデル式の係数

図 3.6 網点の重なりを考慮した網点面積比と平面モデル式係数の関係

図 3.6 に示す線種の異なる 3 本の曲線は、CMY 3 色の場合に求めた平面モデル式の係数 α 、 β 、 γ の近似 2 次関数である。(a) C の平面モデル式の係数の場合、 α と γ の近似関数は、網点面積比 = 1 を除けば比較的良くプロット点に合っている。 β については、K を含む場合のプロット点からのずれが大きい。また、(3.1)式において、 $A=1$ の場合には K の面積比 B にかかわらず計算結果が 1 で同じとなるが、モデル式の係数の値は K の面積比により異なるため、1 本の近似関数で表すことが難しい。(b) M の平面モデル式の係数の場合、いずれの係数についても近似関数の適合精度はそれほど良くない。網点面積比 $m=1$ においては(a)と同様の傾向が見られる。(c) Y の平面モデル式の係数の場合も、(a)、(b)と同様の傾向が見られる。

この近似関数により求めた平面モデル式の係数を用いて L^* を予測し、実測した L^* との関係を図 3.7～図 3.9 に示す。プロットした点が傾き 1 の 45 度の直線に乗っていれば予測が正確であることを意味する。図 3.2～図 3.4 に示した重回帰分析による平面モデル式の係数を用いた場合の予測と比較して、プロットした点の分布は広がっており、明らかに予測精度が低下している。また、K の面積比が大きくなるにつれてその低下度合いも大きくなっており、(3.1)式により求めた網点面積比に対してモデル式の係数を近似する方法は、精度が良くないことがわかった。

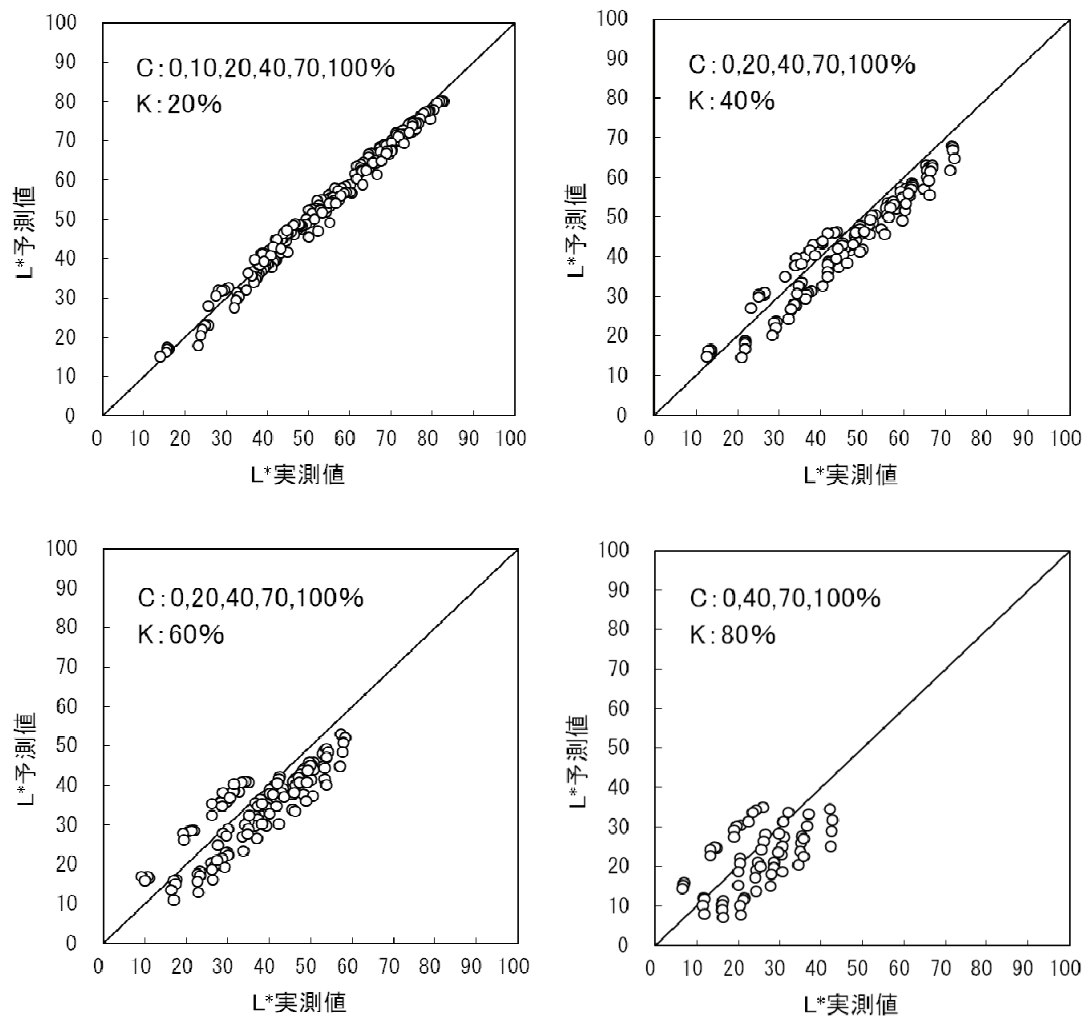


図 3.7 C の平面モデル式による L* の予測精度

—面積置換法—

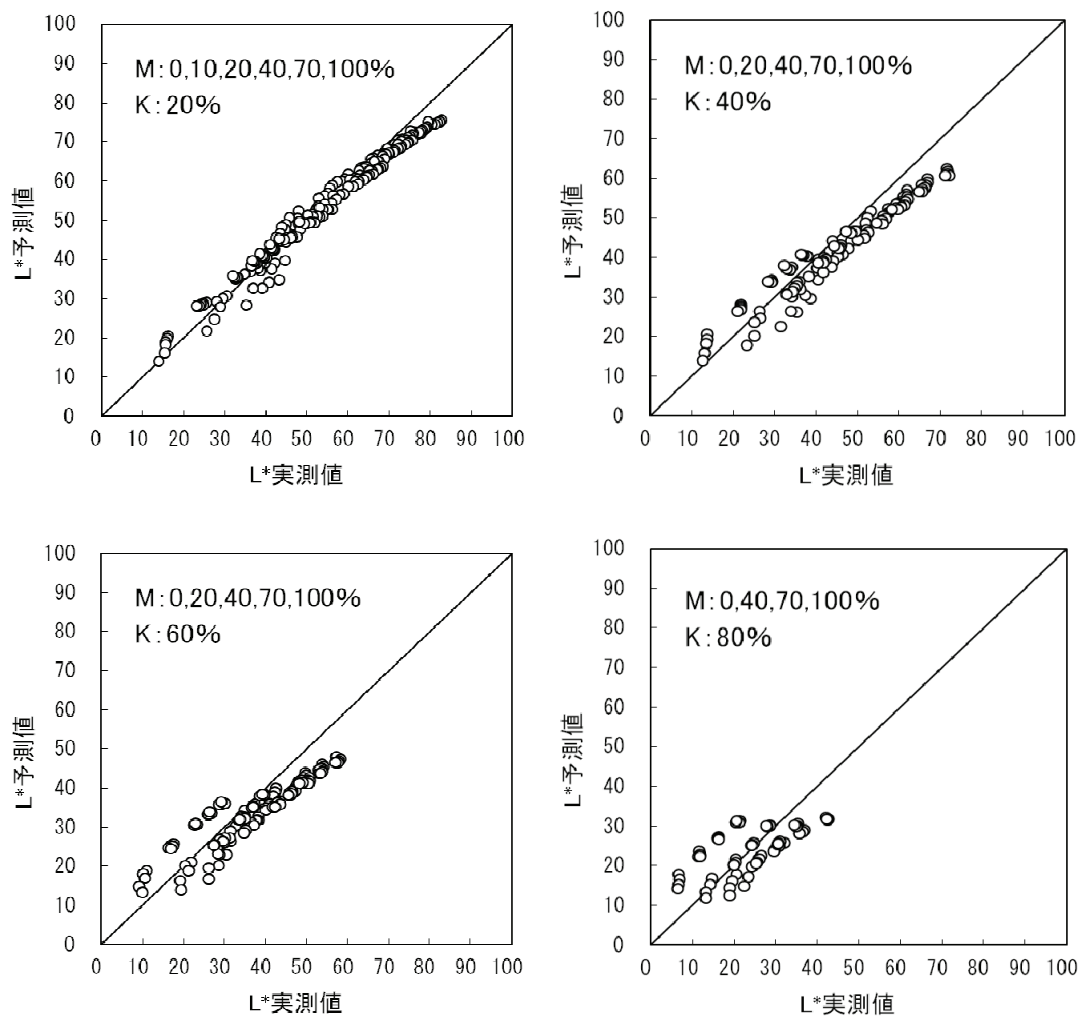


図 3.8 M の平面モデル式による L* の予測精度
—面積置換法—

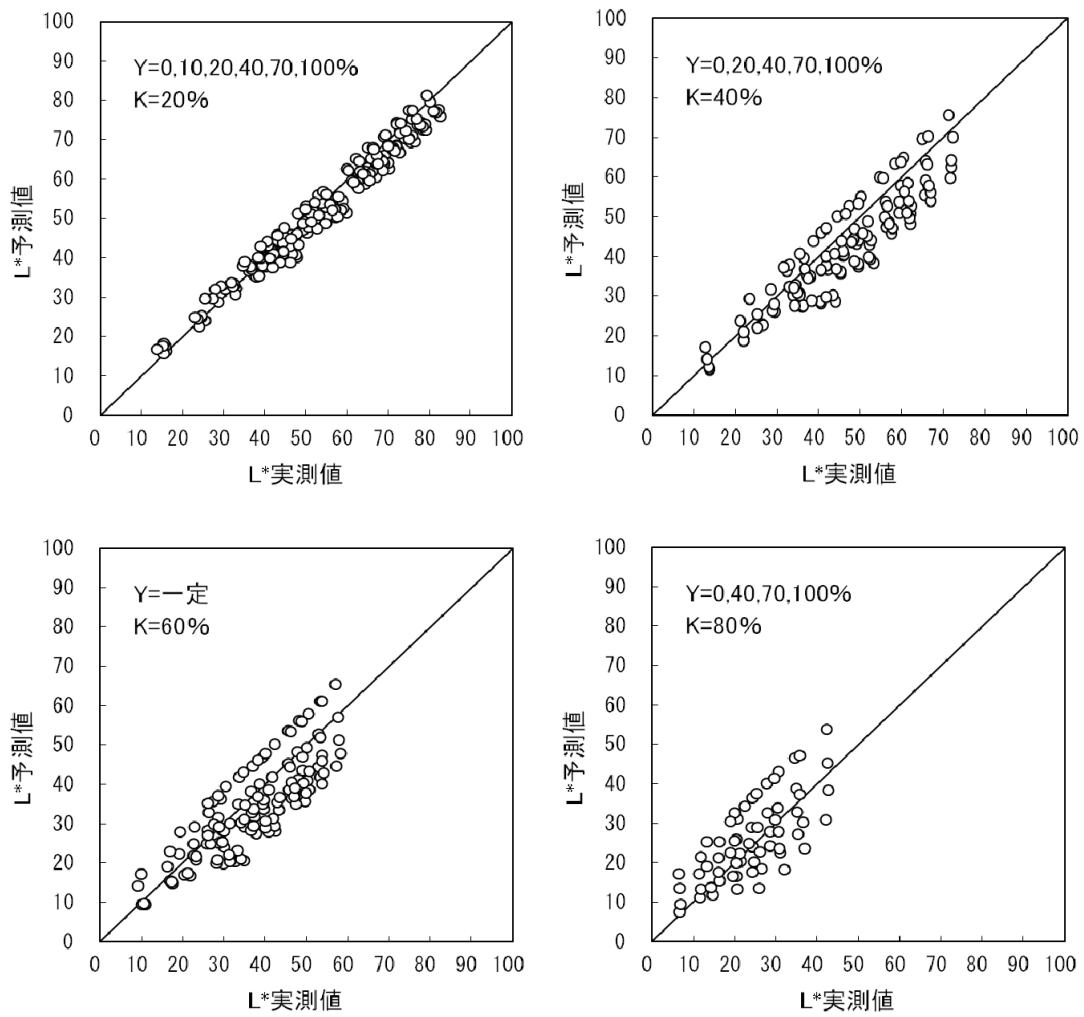


図 3.9 Y の平面モデル式による L* の予測精度
—面積置換法—

3.5.2 面積置換法の改良（改良型面積置換法）

(3.1)式で計算した網点面積比の問題は、色インキの面積比 $A=1$ の場合に K インキの面積比にかかわらず計算結果がすべて 1 になることである。また、K インキは、ほぼ全可視波長域において色インキよりも光吸収率が高いため、その吸収量を色インキで置き換えるとする、K インキの元の面積比よりも大きな面積比を必要とする。これらの点を考慮し、K インキの網点面積を以下の式により色インキの網点面積に置き換えることを検討した。

$$A' = A + k_1 \cdot B - k_2 \cdot AB \quad (3.2)$$

ここで、 k_1 と k_2 は補正係数である。その他の変数については(3.1)式と同様で、 A と B はそれぞれ色インキと K インキの網点面積比、 A' は K インキの重なりによる効果を考慮した色インキの網点面積比である。この方法を改良型面積置換法と呼ぶ。

つぎに、補正係数 k_1 と k_2 の値を求めるため、以下の 3 つの方法を検討した。

- ① CMY 3 色の色票グループから求めた平面モデル式係数の近似 2 次関数を用いて、 k_1 と k_2 の最適値を求める方法（改良型面積置換法 ①）
- ② CMYK 4 色の色票グループに対する平面モデル式係数の近似 2 次関数、および k_1 と k_2 の最適値を同時に求める方法（改良型面積置換法 ②）
- ③ CMY 3 色と CMYK 4 色の色票グループの和集合に対する平面モデル式係数の近似 2 次関数、および k_1 と k_2 の値を同時に求める方法（改良型面積置換法 ③）

本論文では、近似 2 次関数の係数および k_1 と k_2 の最適値を求めるのに非線形最小二乗法を用いた。ここで最小化する目的関数は、平面モデル式による L^* 予測値の二乗誤差の期待値で、これを e で表せば次式により計算される。

$$e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} (\hat{L}_{i,j}^* - L_{i,j}^*)^2 \right] \quad (3.3)$$

ここで、 $\hat{L}_{i,j}^*$ は色票 (i, j) の L^* の予測値で、 i が K の値で分類された色票グループの番号、 j はグループ内での色票の番号を表し、 $L_{i,j}^*$ は L^* の実測値である。

また、 m_i は色票グループ i に含まれる色票の数、 n は色票グループの数である。各色票グループに含まれる色票の数が一定でないため、各グループ内での平均二乗誤差を計算し、さらにグループ間での平均を求めることで、グループ間の色票数の違いによる偏りを補正した。

なお、上記①の方法では、 k_1 と k_2 のみを最適化するが、CMY 3 色の色票には K が含まれないため、 k_1 と k_2 の最適化には関係しない。そこで、CMYK 4 色の色票グループだけを対象として目的関数を設定した。②の方法についても同様に、CMYK 4 色の色票グループだけを対象に目的関数を設定した。③の方法では、CMY 3 色および CMYK 4 色の全ての色票データが必要となるため、両色票グループの和集合を対象に目的関数を設定した。

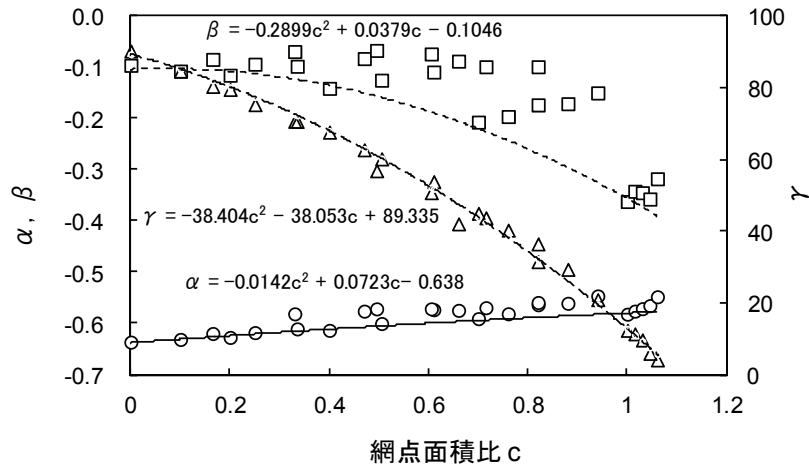
非線形最小二乗法の実行には、Excel (Microsoft 社) のソルバーの機能を用いた。①～③の方法により得られた k_1 と k_2 の値を表 3.3 に、近似 2 次関数を図 3.10～図 3.12 に示す。また、それらの関数の係数を表 3.4 に示す。

補正係数 k_1 と k_2 の値は、②の方法が最大で、ついで③、①の順に小さくなっている。色インキ間での比較ではいずれの方法でも、C が最大で、M、Y の順に小さくなる。これは、K インキの効果を色インキの面積比で表した場合の量的関係に対応していると思われる。近似 2 次関数は、網点面積比が 1 を越える範囲まで及んでいる。いずれの方法においても C の平面モデル式の係数 β でのずれが大きい。この理由は、最適化が L^* 予測値の 2 乗誤差の期待値を最小化するように行われたため、重回帰分析で求めた平面モデル式の係数に対する近似結果が最適に得られるとは限らないためである。

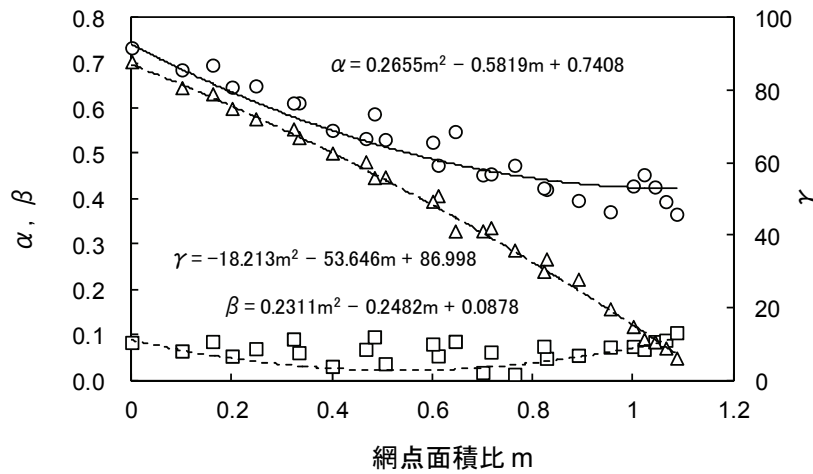
これらの得られた補正係数および近似 2 次関数を用いて、平面モデル式により L^* を予測し、実測した L^* との関係グラフ化して図 3.13～図 3.21 に示す。(3.1)式を用いた結果の図 3.7～図 3.9 と比較して明らかに予測精度の向上が認められる。また、①～③の方法による予測精度の違いをグラフから読み取ると、②、③、①の順で精度が良い。それらの予測誤差を L^* の実測値と予測値の差の絶対値 ΔL^* で示した結果を表 3.5 に示す。比較のため CMY3 色 (K : 0%) の色票グループに適用した場合も含めて示してある。①の方法は CMY3 色の条件に最適化されているため、K の面積比が 40, 60, 80% の条件で平均、最大とも予測誤差が最も大きい。逆に②の方法は、K を含む条件に最適化されているため、K の面積比が 40, 60, 80% で平均予測誤差が最も小さい。③の方法は、CMY3 色 (K : 0%) の場合も含めて平均予測誤差が 2.5 以下、最大予測誤差が 10 以下と、全ての条件で平均的に予測精度が高い。K の面積比が 0% 以外のグループを集めた 20-80% で見ると CMY いずれのインキについても②の予測誤差が最も小さく、ついで③、①の順に小さく、図 3.13～図 3.21 の結果と同じであった。

表 3.3 補正係数 k_1 と k_2 の値

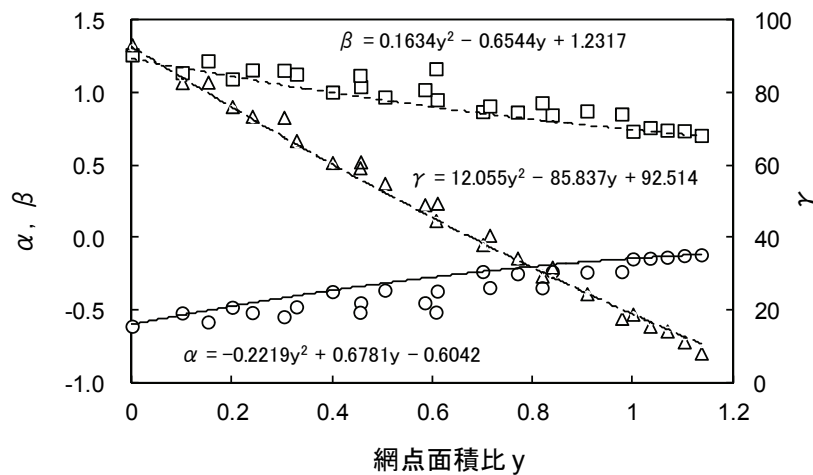
補正係数 色インキ	改良型面積置換法 ①		改良型面積置換法 ②		改良型面積置換法 ③	
	k1	k2	k1	k2	k1	k2
C	0.83	0.75	0.92	0.81	0.89	0.78
M	0.81	0.70	0.90	0.80	0.87	0.76
Y	0.76	0.59	0.86	0.76	0.82	0.72



(a) C の平面モデル式の係数

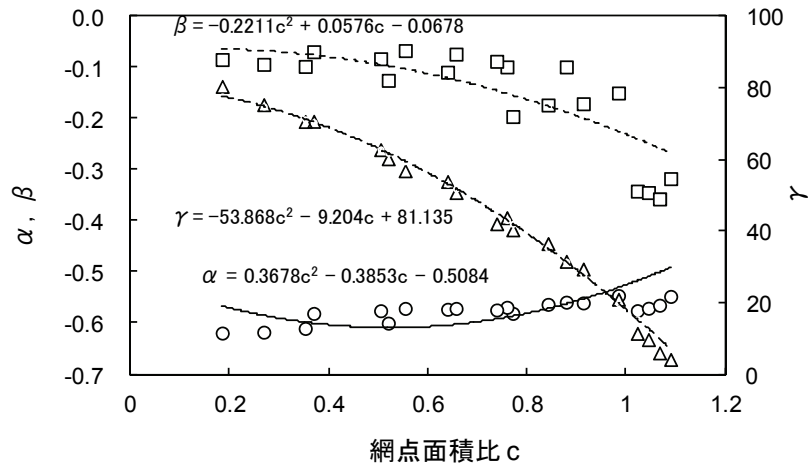


(b) M の平面モデル式の係数

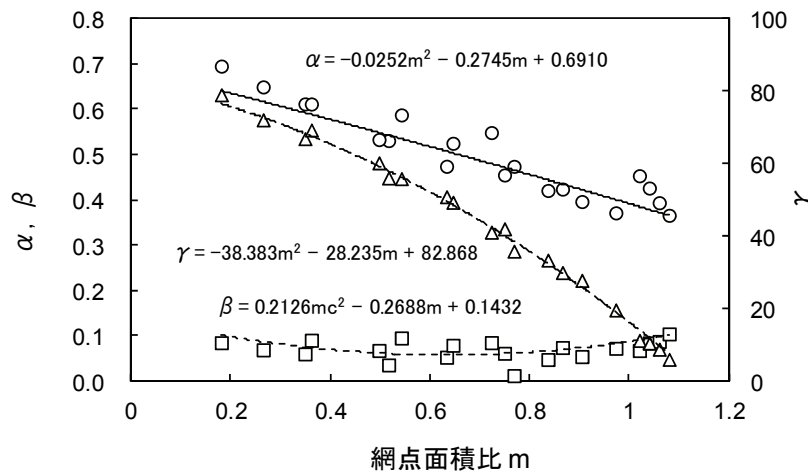


(c) Y の平面モデル式の係数

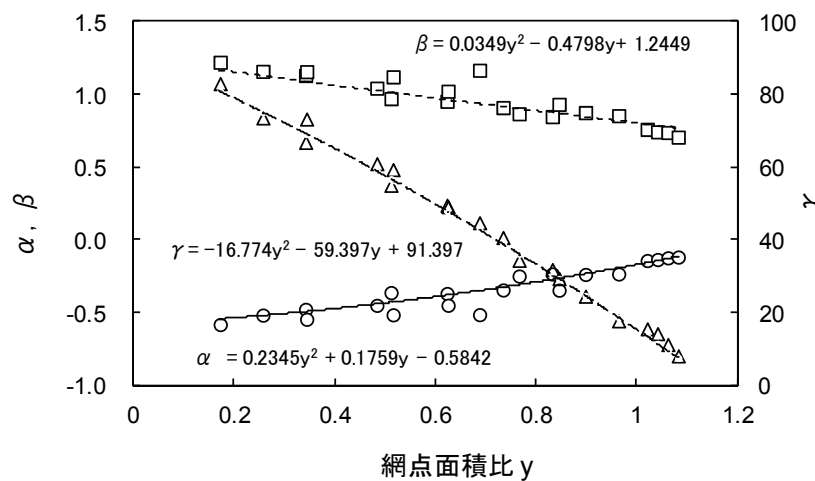
図 3.10 CMY 3 色の色票グループから求めたモデル式係数の近似 2 次関数
—改良型面積置換法①—



(a) C の平面モデル式の係数

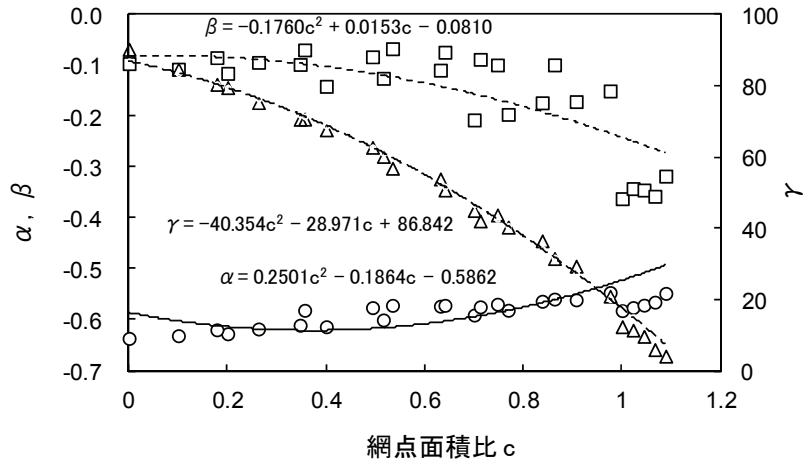


(b) M の平面モデル式の係数

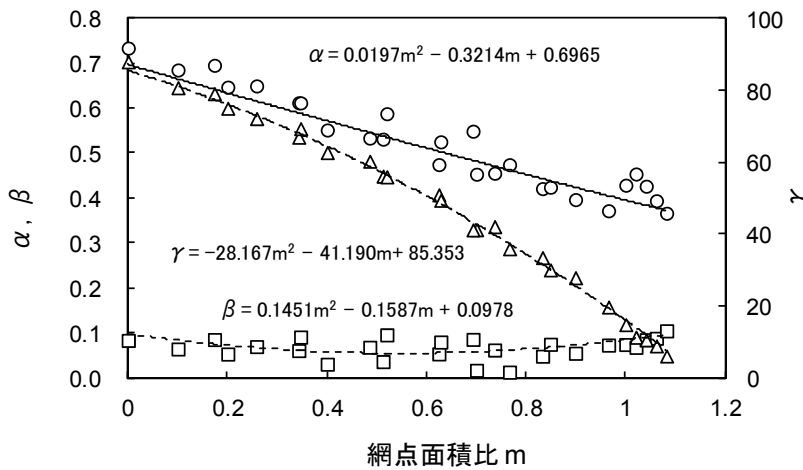


(c) Y の平面モデル式の係数

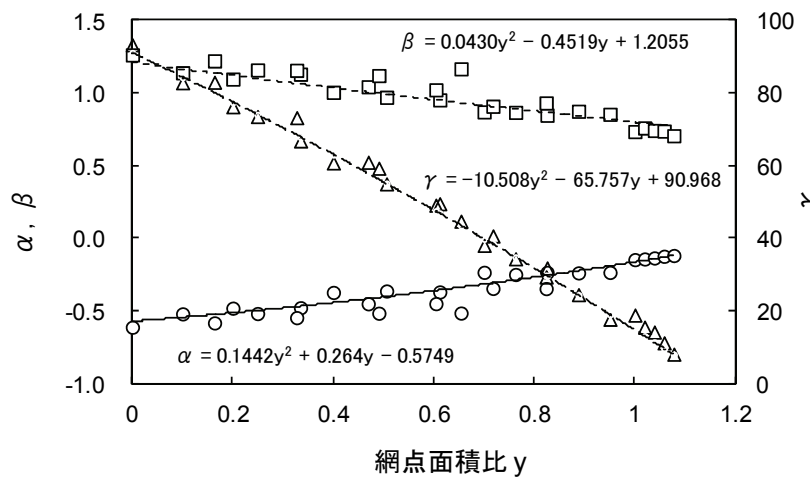
図 3.11 CMYK 4 色の色票グループから求めたモデル式係数の近似 2 次関数
—改良型面積置換法②—



(a) C の平面モデル式の係数



(b) M の平面モデル式の係数



(c) Y の平面モデル式の係数

図 3.12 CMY 3 色と CMYK 4 色の色票グループの集合から求めたモデル式係数の
近似 2 次関数 —改良型面積置換法③—

表 3.4 平面モデル式係数の近似 2 次関数の係数（改良型面積置換法による）

近似関数の係数 平面の式の係数	改良型面積置換法 ①			改良型面積置換法 ②			改良型面積置換法 ③		
	p_i	q_i	r_i	p_i	q_i	r_i	p_i	q_i	r_i
Cの平面の式:									
α	-0.0142	0.0723	-0.6380	0.3678	-0.3853	-0.5084	0.2500	-0.1864	-0.5862
β	-0.2899	0.0379	-0.1046	-0.2211	0.0576	-0.0678	-0.1760	0.0153	-0.0810
γ	-38.404	-38.053	89.335	-53.868	-9.203	81.135	-40.354	-28.971	86.842
Mの平面の式:									
α	0.2655	-0.5819	0.7408	-0.0252	-0.2745	0.6900	0.0198	-0.3214	0.6965
β	0.2311	-0.2482	0.0878	0.2126	-0.2688	0.1432	0.1451	-0.1587	0.0978
γ	-18.213	-53.646	86.998	-38.383	-28.235	82.868	-28.167	-41.190	85.353
Yの平面の式:									
α	-0.2219	0.6781	-0.6042	0.2345	0.1759	-0.5842	0.1442	0.2640	-0.5749
β	0.1634	-0.6544	1.2317	0.0349	-0.4798	1.2449	0.0430	-0.4519	1.2055
γ	12.055	-85.837	92.514	-16.774	-59.397	91.397	-10.508	-65.757	90.968

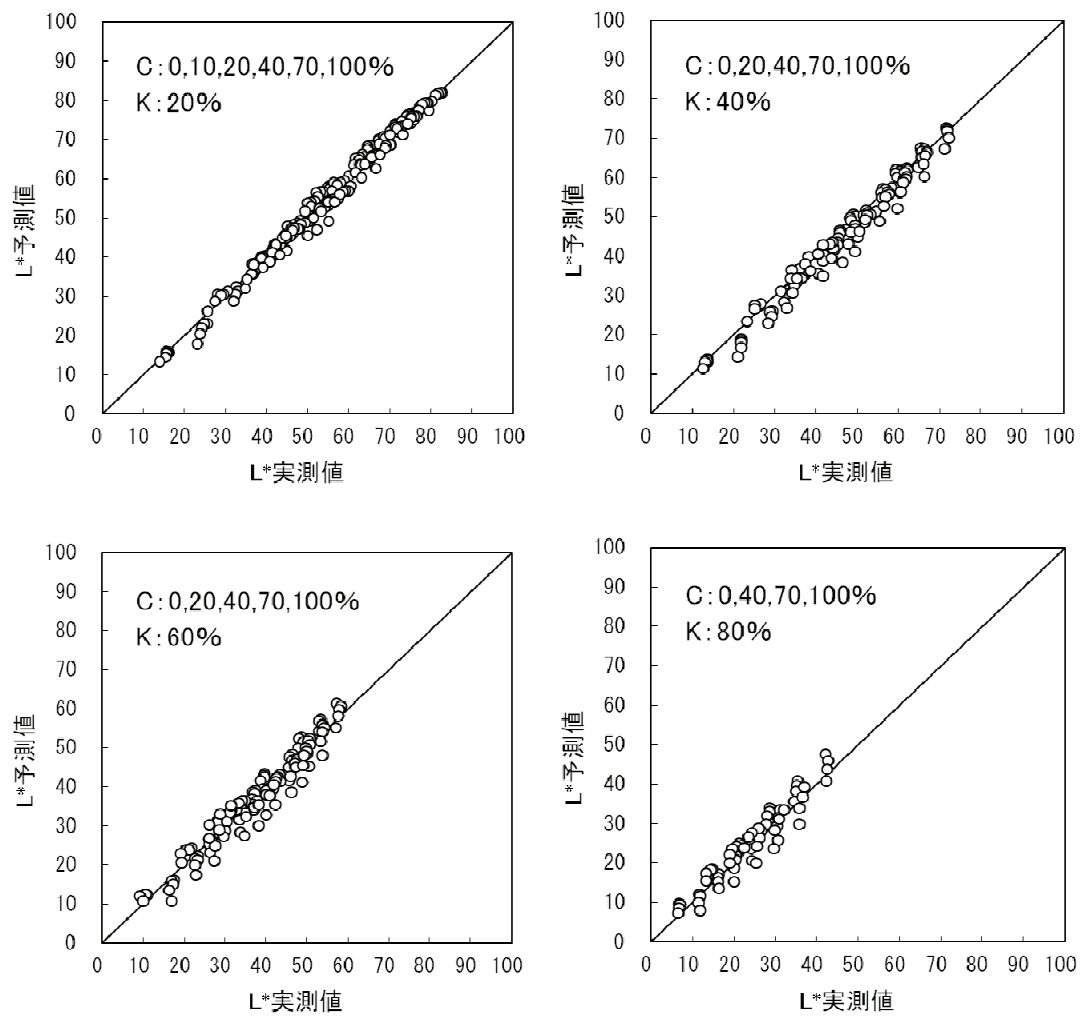


図 3.13 C の平面モデル式 (2 次関数での係数近似方式) による L* の予測精度
 —改良型面積置換法①—

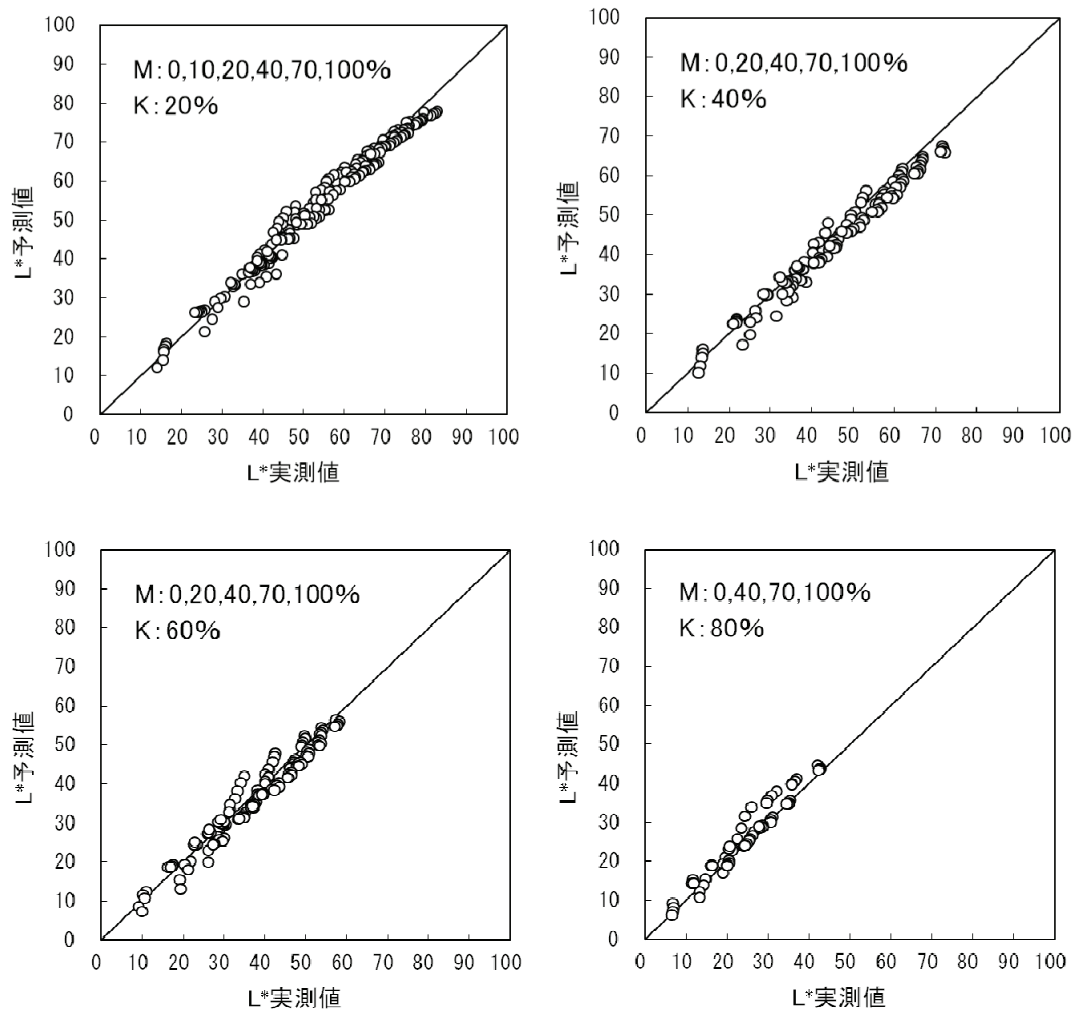


図 3.14 M の平面モデル式 (2 次関数での係数近似方式) による L* の予測精度
 —改良型面積置換法①—

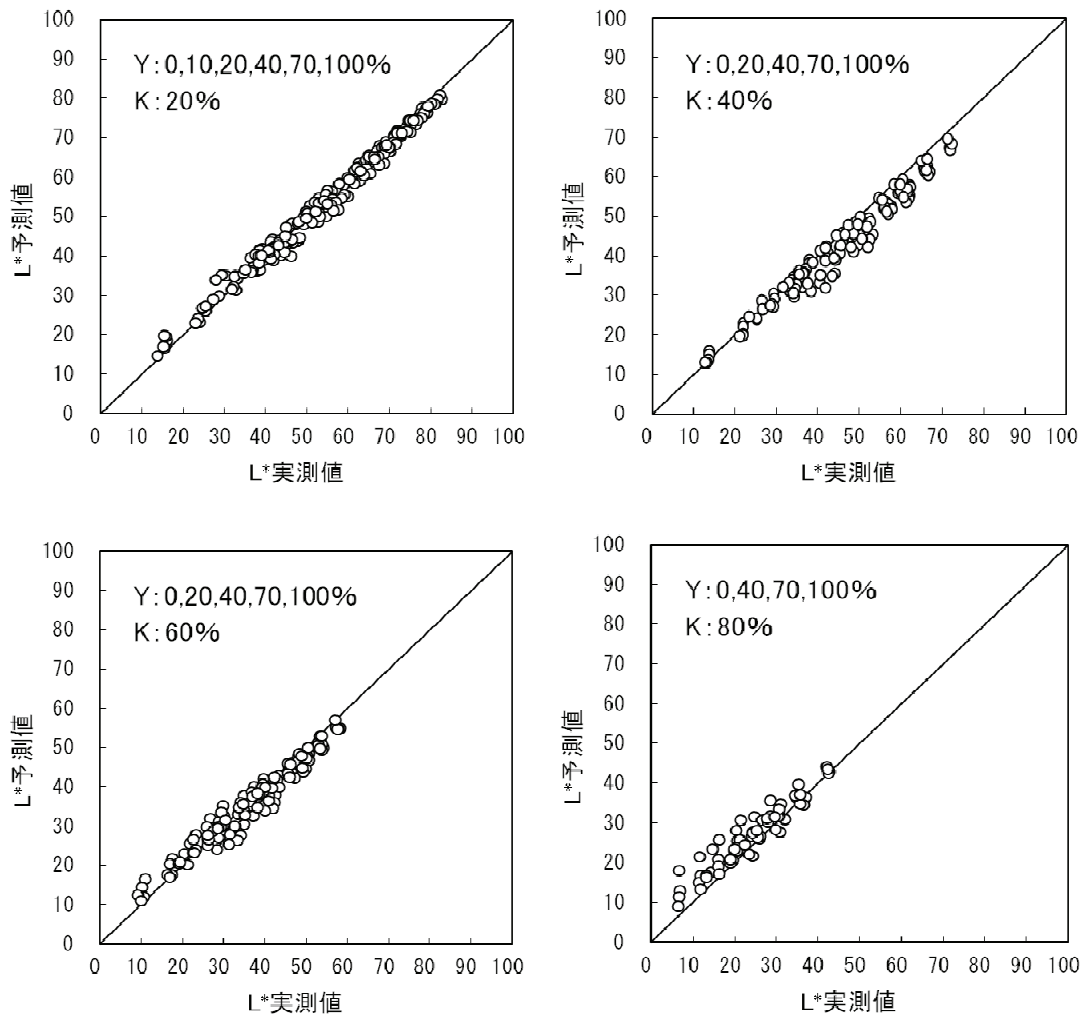


図 3.15 Y の平面モデル式 (2 次関数での係数近似方式) による L* の予測精度
 —改良型面積置換法①—

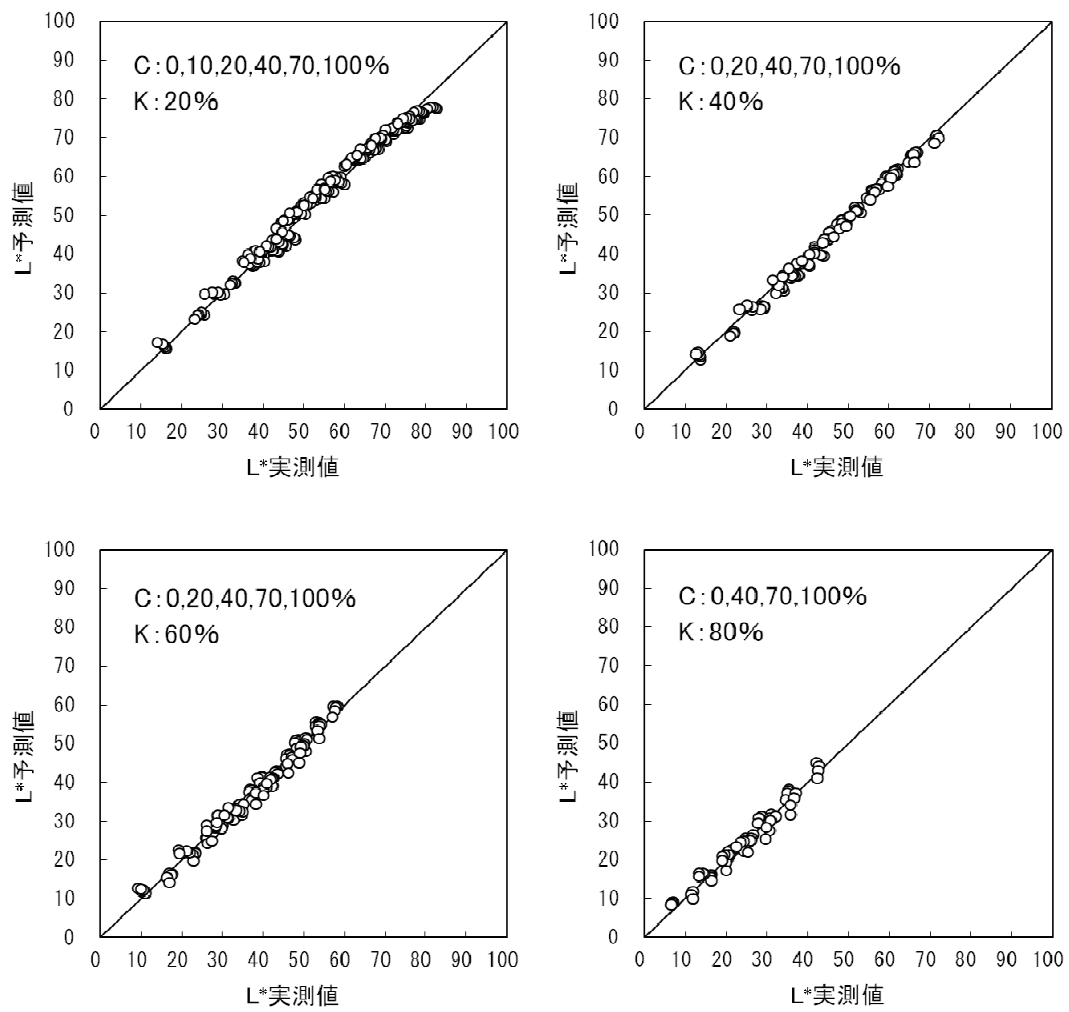


図 3.16 C の平面モデル式 (2 次関数での係数近似方式) による L* の予測精度
 —改良型面積置換法②—

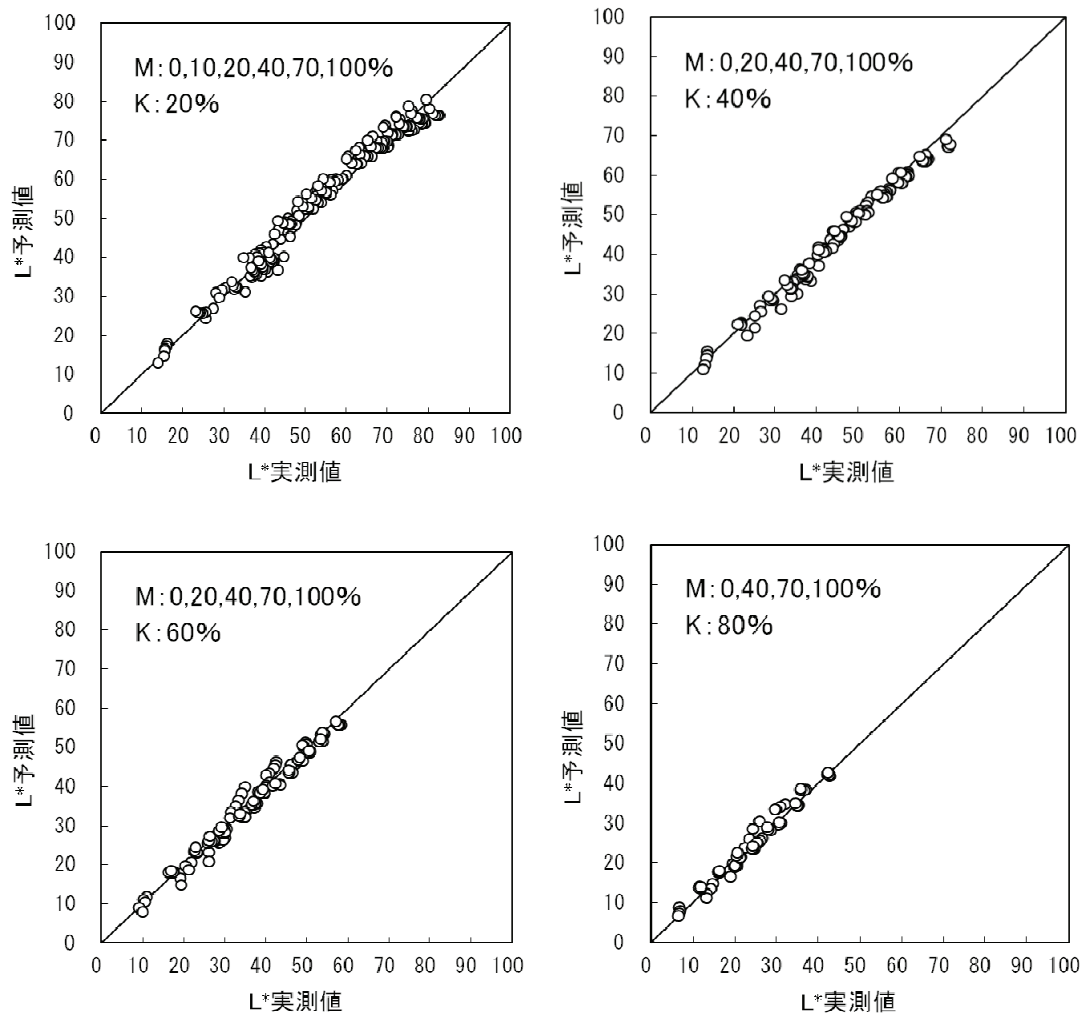


図 3.17 M の平面モデル式 (2 次関数での係数近似方式) による L^* の予測精度
 —改良型面積置換法②—

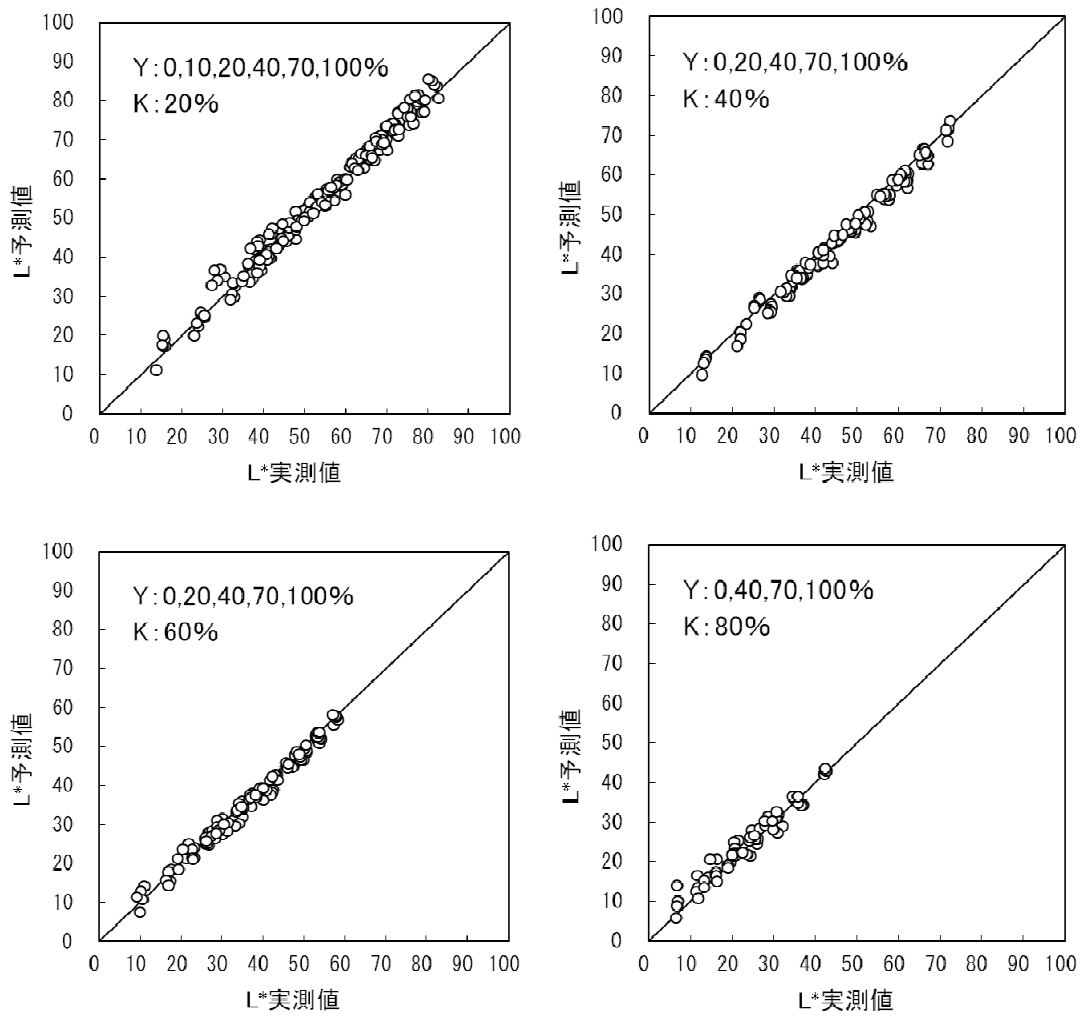


図 3.18 Y の平面モデル式 (2 次関数での係数近似方式) による L^* の予測精度
 —改良型面積置換法②—

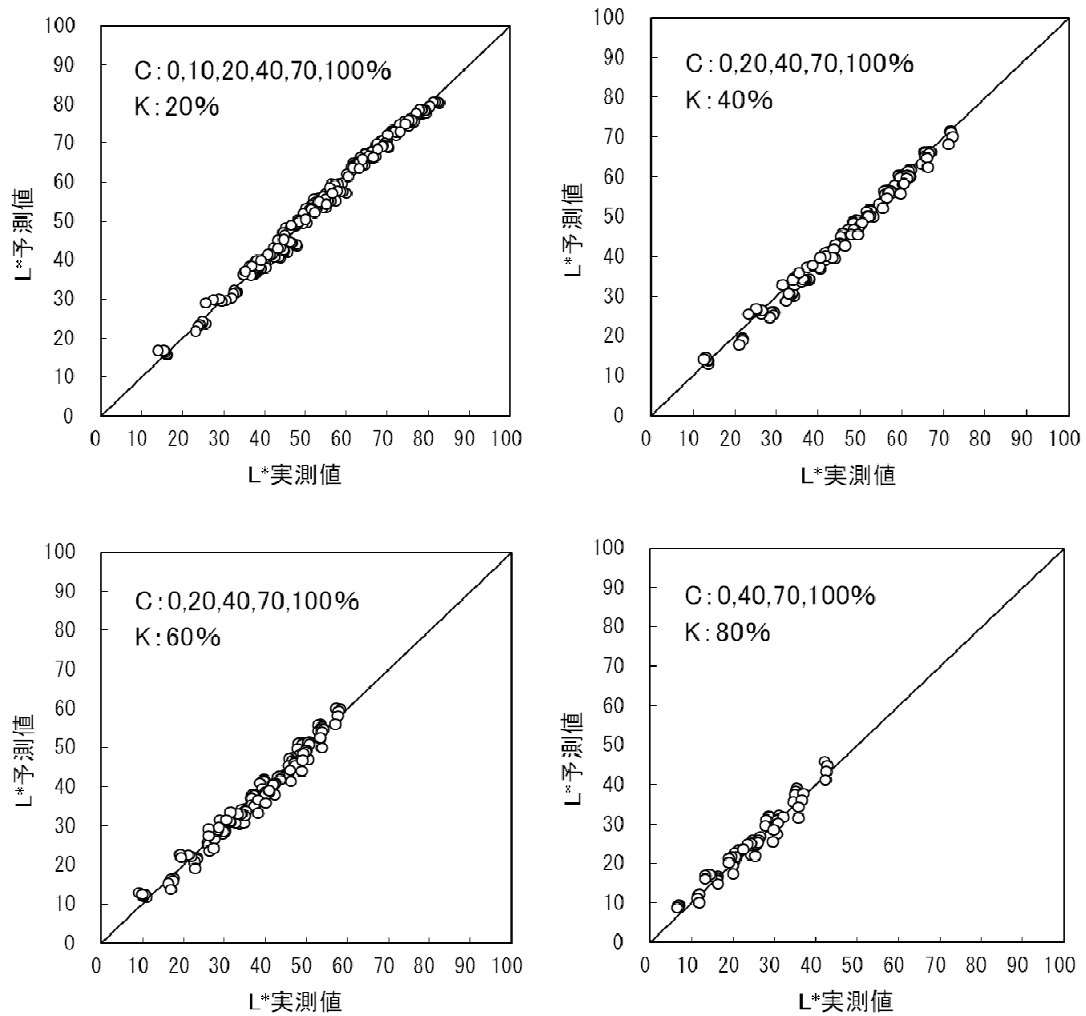


図 3.19 C の平面モデル式 (2 次関数での係数近似方式) による L* の予測精度
 —改良型面積置換法③—

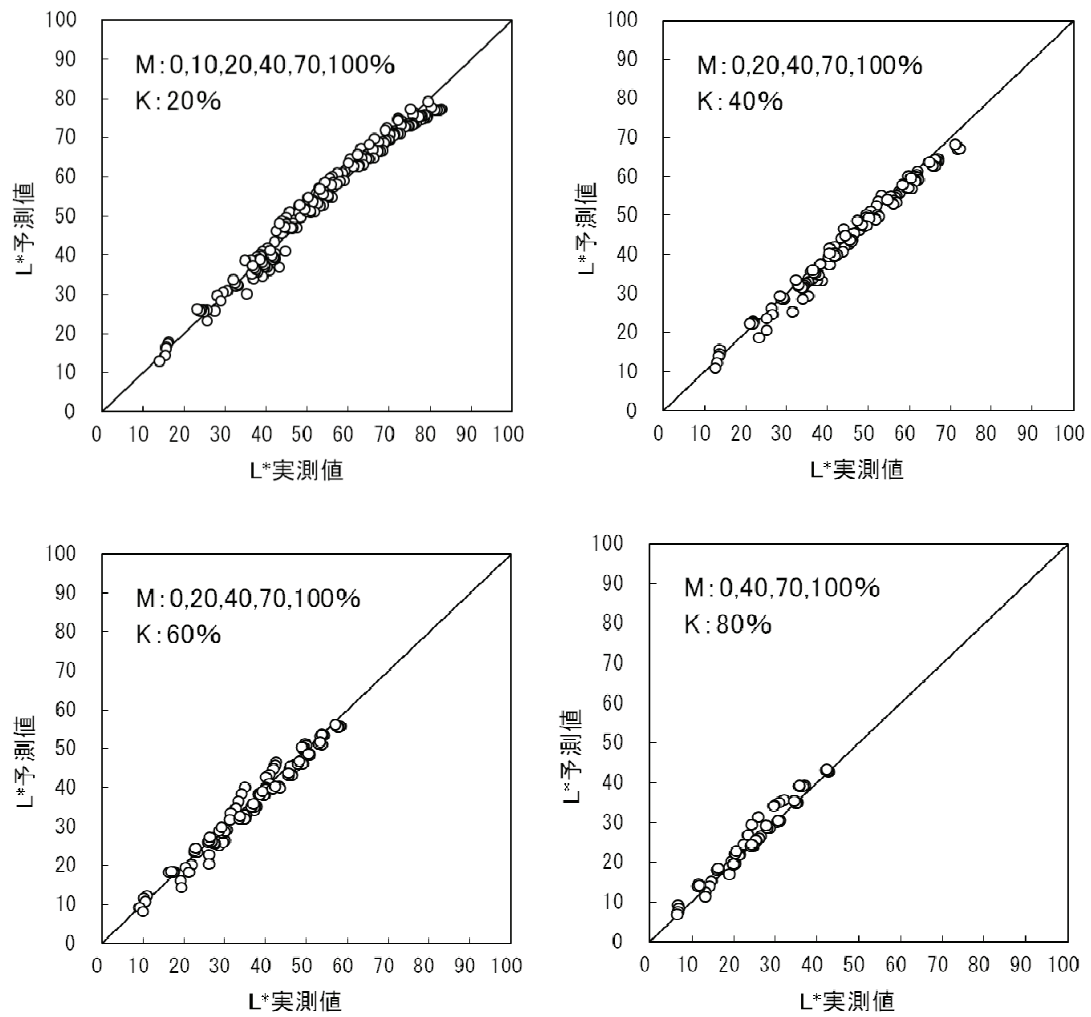


図 3.20 M の平面モデル式 (2 次関数での係数近似方式) による L* の予測精度
 —改良型面積置換法③—

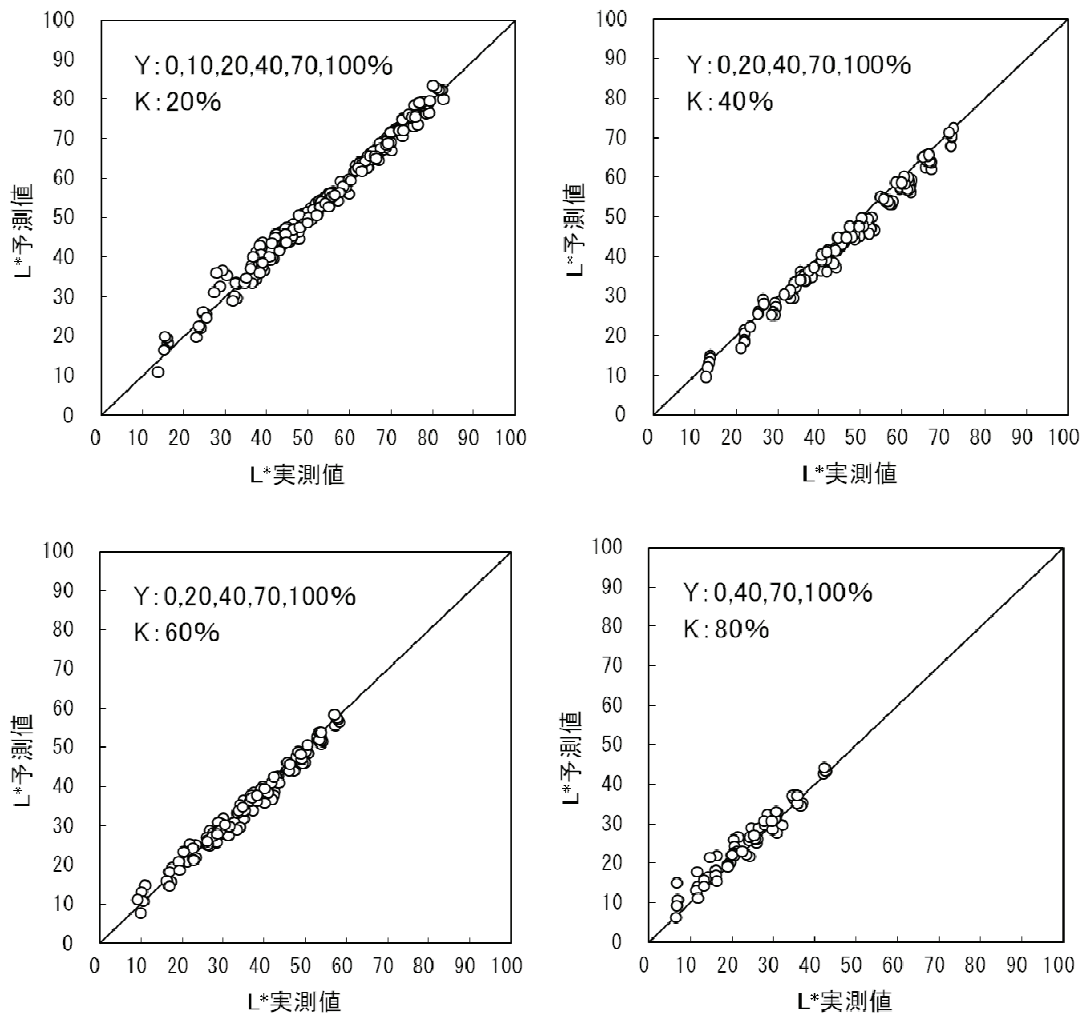


図 3.21 Y の平面モデル式 (2 次関数での係数近似方式) による L^* の予測精度
 —改良型面積置換法③—

表 3.5 平面モデル式による L*の予測誤差（改良型面積置換法による）

色インキ	Kの網点面積比 (%)	改良型面積置換法 ①		改良型面積置換法 ②		改良型面積置換法 ③	
		平均 ΔL^*	最大 ΔL^*	平均 ΔL^*	最大 ΔL^*	平均 ΔL^*	最大 ΔL^*
C	0	1.3	4.2	2.9	11.8	1.8	6.1
	20	1.4	5.7	1.6	5.0	1.3	4.3
	40	2.1	8.1	1.2	4.4	1.6	4.2
	60	2.3	7.9	1.4	3.8	1.6	4.9
	80	2.6	5.9	1.5	4.2	1.7	4.2
	20-80	2.1	8.1	1.4	5.0	1.5	4.9
M	0	2.0	11.4	3.1	10.6	2.5	9.6
	20	1.9	6.9	2.3	6.4	1.9	6.1
	40	2.7	7.0	1.5	5.3	1.9	6.1
	60	2.3	7.1	1.5	5.2	1.7	5.7
	80	2.0	8.0	1.3	4.5	1.5	5.4
	20-80	2.2	8.0	1.7	5.4	1.9	6.1
Y	0	1.0	5.9	2.9	10.5	2.0	7.6
	20	1.8	6.1	2.0	8.9	1.4	8.1
	40	3.1	9.8	1.8	6.1	2.2	6.6
	60	2.3	7.1	1.3	4.3	1.5	5.0
	80	3.3	11.4	1.8	7.3	2.2	8.3
	20-80	2.6	11.4	1.7	8.9	1.8	8.3

3.6 L*a*b*からCMYKの網点面積比への変換

K成分をCMYの網点面積比に置き換えることでCMYK4色の色再現を平面モデルで扱うことが可能になったので、CMY3色の場合と同様、2.5での方法によりL*a*b*値からCMYの網点面積比へ変換することができる。ただしこの場合、得られるCMYの値はK成分の置き換え分を含む網点面積比であるため、CMYの本来の網点面積比は図3.21の流れに従い次の式を用いて求める。

$$A = \frac{A' - k_1 \cdot B}{1 - k_2 \cdot B} \quad (3.4)$$

ここで、CMYの色インキの網点面積比Aを確定するにはKインキの網点面積比Bの値を設定する必要がある。本来、Kインキの量は、製版工程における色分解プロセスにおいて印刷適性や経済性を考慮し、UCR (Under Color Removal)²⁾ 或いはGCR (Gray Component Replacement)³⁾ の条件と共に、CMYのインキ量に対して適切となるように決めるのが一般的である。そして、Photoshop等のDTP (Desktop Publishing) ソフトを用いた近年のデジタルワークフローにおいては、プロファイルを用いて色分解プロセスを実行しているが、K信号の生成に関する基本的な考え方には変わらない。必要であれば、それらのK信号生成アルゴリズムにしたがってその量を決めればよい。ここでは、色票での比較のため、Kの網点面積比として与えられた20、40、60、80%の値を用いて、L*a*b*値からCMYのインキの網点面積比を算出し、元の網点面積比と比較することで変換アルゴリズムの精度を評価する。

表3.6に、算出された網点面積比と元の網点面積比との差の絶対値を変換誤差としたときの、平均と最大を示す。CMYいずれについても全体的にKの網点面積比が大きくなるほど、誤差も増してゆく傾向が見られ、ほとんどの場合で最大誤差は10%を越えている。CMYそれぞれでの誤差が最小となる方法は、Kの網点面積比によっても異なっているが、平均誤差で見ると、Kが40%以上ではいずれにおいても②の方法が最小で、ついで③、①の順である。この傾向は最大誤差でもほぼ同様である。Kが20%で平均誤差が最小となるのは、③または①である。総合的にみると、②の方法が比較的誤差が小さく、3種類の中では最も精度の良い方法と考えられる。

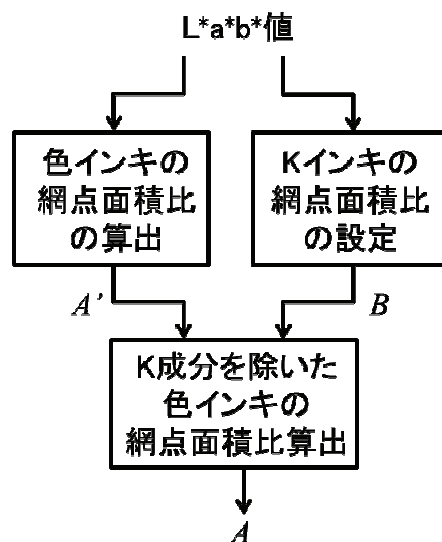


図 3.21 網点面積比への変換手順

表 3.6 L*a*b*値から CMYK 網点面積比への変換精度（網点面積比の誤差(%)）

色インキ	Kの網点面積比 (%)	改良型面積置換法 ①		改良型面積置換法 ②		改良型面積置換法 ③	
		平均誤差	最大誤差	平均誤差	最大誤差	平均誤差	最大誤差
C	20	2.2	8.8	2.3	10.0	2.1	7.9
	40	3.0	11.1	1.4	8.5	2.2	9.1
	60	3.5	13.5	2.3	8.3	2.7	9.0
	80	4.3	14.5	2.9	10.3	3.3	11.6
	全体	3.3	14.5	2.2	10.3	2.6	11.6
M	20	2.8	16.6	3.6	13.7	3.0	13.9
	40	4.1	17.6	2.1	16.0	3.0	17.4
	60	4.6	18.3	3.2	15.1	3.8	16.0
	80	4.0	23.0	3.0	16.3	3.3	16.9
	全体	3.9	23.0	3.0	16.3	3.3	17.4
Y	20	2.4	10.8	2.9	16.9	2.0	14.8
	40	4.5	16.6	2.4	10.8	3.3	10.4
	60	4.7	17.9	2.4	11.2	3.0	12.4
	80	8.6	40.0	4.7	27.6	5.4	29.7
	全体	5.1	40.0	3.1	27.6	3.4	29.7

3.7 考察

予測された網点面積比の誤差がどの程度、再現色に影響を及ぼすかを明らかにし、また、今回用いた一連の変換によってどのような誤差が生じるのかを把握するため、以下のように3種類の経路に対する変換精度を調べた。

I. 2.6.1の方法により、網点面積比の予測値および公称値から再現色のL*a*b*値を計算し、それらの色差を求める。網点面積比→L*a*b*値への変換には同じアルゴリズムを用いるため、L*a*b*値→CMYK 網点面積比への変換で生ずる誤差が明らかになる。

II. 2.6.1の方法により、網点面積比の予測値から再現色のL*a*b*値を計算し、元の色票のL*a*b*実測値との色差を求める。L*a*b*→CMYK→L*a*b*の往復による変換誤差が明らかになる。

III. 2.6.1の方法により、網点面積比の公称値から再現色のL*a*b*値を計算し、L*a*b*実測値との色差を求める。CMYK→L*a*b*への変換における誤差が明らかになる。

以上3種類の方法で調べた変換誤差をCIELAB色差として表3.7に示す。まず、I.のL*a*b*値→CMYK 網点面積比への変換では、②の方法が総合的に最も精度が高い。Kの面積比20%の場合のみ、③の方法が最も精度が高い。II.のL*a*b*→CMYK→L*a*b*の変換経路では、3種類の方法で優劣の差はあまりないが②と③の方法が同程度に優れている。さらにIII.のCMYK→L*a*b*値の変換ではやはり②の方法が総合的に優れている。ただし、Kの面積比20%では③が最も精度が高い。I～IIIの全体を通して②の方法が平均的に高い精度であり、適切と考えられる。

表 3.7 CMYK の網点面積比から L*a*b*値への変換精度 (数値は CIELAB 色差を示す)

変換経路	Kの網点面積比 (%)	改良型面積置換法 ①		改良型面積置換法 ②		改良型面積置換法 ③	
		平均色差	最大色差	平均色差	最大色差	平均色差	最大色差
I	20	3.3	7.3	3.2	9.2	2.8	7.8
	40	5.1	7.9	3.0	4.6	3.5	5.2
	60	5.4	8.5	3.3	5.2	3.7	5.8
	80	5.1	11.4	3.0	7.8	3.4	8.2
	全体	4.7	11.4	3.1	9.2	3.4	8.2
II	20	0.8	7.5	0.9	7.0	0.7	6.7
	40	2.1	6.3	1.9	4.8	2.1	5.4
	60	2.5	3.7	1.7	3.1	1.8	3.3
	80	1.9	4.7	1.4	4.1	1.4	4.3
	全体	1.8	7.5	1.5	7.0	1.5	6.7
III	20	3.6	8.3	3.6	9.2	3.2	7.7
	40	5.5	8.0	3.7	5.7	4.2	6.1
	60	6.0	8.6	4.2	5.4	4.7	6.1
	80	5.4	10.5	3.4	7.7	3.8	8.1
	全体	5.1	10.5	3.7	9.2	4.0	8.1

ところで、 $L^*a^*b^*$ 値→CMYK 網点面積比への変換精度としては、I.において②の方法を用いた場合の全体の平均色差 3.1 となる。この値は、表 2.4 の許容色差分類における 3 級よりやや劣るものの、Japan Color 認証制度での許容色差 3.0 と同程度であり、ほぼ実用レベルに達している。

3.8 まとめ

K インキの面積比を色インキの面積比に置き換えることで、平面モデル式を利用した代数変換式により $L^*a^*b^*$ 測色データと CMYK データの相互変換が可能になった。 $L^*a^*b^*$ →CMYK への変換では平均色差が 3.1、最大色差は 9.2、CMYK→ $L^*a^*b^*$ への変換では平均色差が 3.7、最大色差は 9.2 であった。K 成分を含む相互色変換としては、ほぼ実用レベルに達していると思われる。また、今回開発した代数変換方式では測色値が保持されるため、ブラック信号の生成方法の変更に対しても柔軟に対応できる利点がある。

現在のデジタル化された印刷工程では、CMYK と $L^*a^*b^*$ 間での変換は ICC プロファイルを用いて Photoshop などのアプリケーションソフトが行っているが、それらの変換精度については設定条件が複雑なこともあり、比較するための十分な検討が行えなかったため、確認することができなかった。

第4章 単色網点印刷の分光反射率特性のモデル化

4.1 はじめに

単色網点印刷の色再現特性のモデル化の試みは、網点の面積比と光学反射濃度の関係で表される階調再現特性を定式化した Murray-Davies のモデル¹⁾に始まった。その後、光散乱効果を経験的パラメータ値により補正した Yule-Nielsen モデル²⁾や、紙中での光の透過・吸収・散乱・内部反射の過程を定式化した Clapper-Yule モデル³⁾などに続く。そして、それらが分光反射率に拡張されて色再現特性を表すモデル⁴⁾へと発展していった。しかしながら、これらのモデルは予測精度の低さや物理的要因との対応関係の欠如、モデルの複雑さなどの点で問題がある。実用的観点からは構造がなるべく単純で、物理的な意味のあるパラメータによって特性が制御され、高精度の予測性能をもつモデルが望ましい。

本章では、このような要求をふまえて検討した2つのモデルについて述べる。1つは、網点印刷物への光の入出過程を確率的に扱い、観測される反射光の分光分布を記述する3成分モデル、もう1つは、光散乱効果を網点構造で仮想的に実現したコア・フリンジモデルである。なお、一般的なカラー印刷で用いられる4色印刷などの多色印刷へのモデルの拡張方法については第5章で述べる。

4.2 従来モデル

これまでに、光学濃度、または反射率を基準として記述された多くのモデルが提案されているが、いずれも分光反射率への拡張が可能で、幾つかは分光形式での検討も行われている。ここでも分光形式で論じることにする。単色刷り網点印刷物の階調再現特性を表現した最も代表的なモデルとして、Murray-Davies モデルがある。

Murray-Davies モデルを始め、これまでに提案されているほとんどのモデルでは、図4.1のように一定の厚さをもつインキ層で形成された網点を仮定している。

いま、単位面積あたりの網点の幾何学的な面積を 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、網点画像の総合的分光反射率 $\hat{R}(\lambda)$ は以下のように表される。

$$\hat{R}(\lambda) = aR_i(\lambda) + (1-a)R_p(\lambda) \quad (4.1)$$

例として、このモデル式により、網点面積比を段階的に変化させた M インキ単色刷り網点画像の総合分光反射率を計算した結果を図4.2の実線で示す。各シンボルは実測値である。モデル式による予測値は M インキの吸収波長域において実測値より高めに大きくはずれて

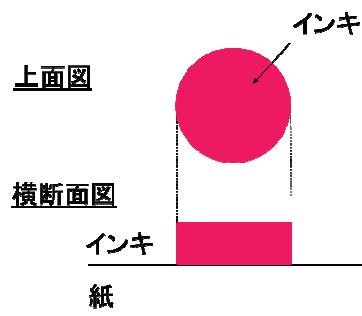


図 4.1 従来モデルの網点構造

いる。これは、実際の印刷物では紙から入射した光の一部が散乱によってインキ部分の下へ移動し、そこから外へ出る際にインキ層を通して吸収され、光量が減少するためである。この現象は、網点自体の幾何学的な大きさが増大する機械的ドットゲイン（網点の太り）とは区別され、あたかも網点の大きさが増したかのような光学的な効果をもたらすので、光学的ドットゲインと呼ばれている。この見かけ上の網点面積の増大により、幾何学的な網点面積と反射率の間には非線形な関係が生じる。

それだけでなく、光学的ドットゲインは色再現特性においても非線形な効果をもたらすことが知られている⁵⁻⁷⁾。図 4.3 のように、CIE の xy 色度図において、単色

刷り網点印刷物の色度軌跡が弓形を描く現象がそれである。本来、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の散乱がないならば、単色網点印刷物の色は、インキの色と紙の色の 2 色を原色とする加法混色に基づいて再現され、その色度点はインキと紙の色度点を結ぶ直線上を移動する。しかし、実際の印刷物では、図のように色度点が明らかに直線からはずれた軌跡を描くのである。

このような光学的ドットゲインを考慮して提案されたのが Yule-Nielsen 式で、分光反射率への拡張形式は以下ようになる。

$$\hat{R}(\lambda) = \left\{ aR_i(\lambda)^{\frac{1}{n}} + (1-a)R_p(\lambda)^{\frac{1}{n}} \right\}^n \quad (4.2)$$

ここで、 n は経験的に決められる定数で、スクリーン線数や用紙の種類などによって異なっている。この式により前述の網点画像の分光反射率を求めると図 4.4 の実線のようになり、実測値とかなりよく合うことが確認でき、その色度軌跡も図 4.3 の点線で示すように非線形な動きを示すことができる。さらに、より実測値との適合精度を上げるため、波長ごとに n の値を最適化して用いる方法^{8,9)}もある。しかしながら、これらの方法は定数 n の値を変化

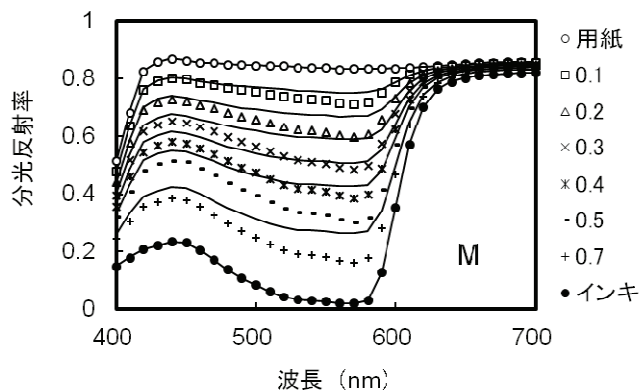


図 4.2 Murray-Davies モデルによる分光反射率の予測結果. 実線は予測値, シンボルは実測値を示す.

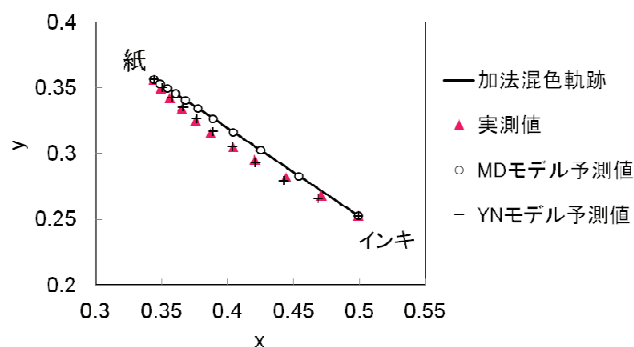


図 4.3 単色印刷物の色度軌跡の予測値と実測値

させて計算値を強制的に実測値に合わせるため、特定の値を除くと n の値自体に理論的な根拠はなく¹⁰⁾、合理性の点で問題が残る。

また、紙に入射した後の光路を追跡し、インキでの光の吸収、紙と空気、インキと紙、インキと空気のそれぞれの界面における光の反射過程を忠実にモデル化したものとして、Clapper-Yule のモデルがある。物理的な光のふるまいや

界面での多重反射による入射光の分光反射率特性の変化をうまく表すことができる。網点の配置パターンとの相互作用を考慮した精密なモデルについても検討が行われている¹¹⁾。

もう一つの物理的な記述モデルとして、用紙上の網点配置パターンの光学的観察像を用紙の Point Spread Function (PSF) を用いて表す方法がある¹²⁾。網点の形状や配置パターンを数学的に記述し、用紙の光学伝達特性を表す PSF とのコンボリューション演算によって光学反射像を計算する。この方法は、原理的には印刷物の任意の位置における分光反射率の予測が可能だが、複雑な計算を要するうえ、用紙の正確な PSF を設定することが難しいことや、インキの転移むらによる網点形状の不均一性などによって予測精度への影響を受けやすい。

さらに、これらとは異なる考え方のモデルとして、網点画像への光の入出経路を4通りに分類し、それらの経路を通る成分光の中で光学的ドットゲインの原因となる散乱光成分の特性を記述するモデル¹³⁾がある。この成分が非線形な色再現特性の原因であることは何人かの研究者が指摘しており⁵⁻⁷⁾、これを補正する方法も提案されている。このモデルの仮定に基づき、各経路を通る確率に基づいて反射光の特性を計算する確率モデル^{14,15)}がある。確率モデルは、PSF に基づくモデルに比べて考え方が直感的で理解し易く、一般にシンプルな代数関数を用いて表される。PSF や Clapper-Yule モデルと組み合わせた検討も行われている¹⁶⁾。

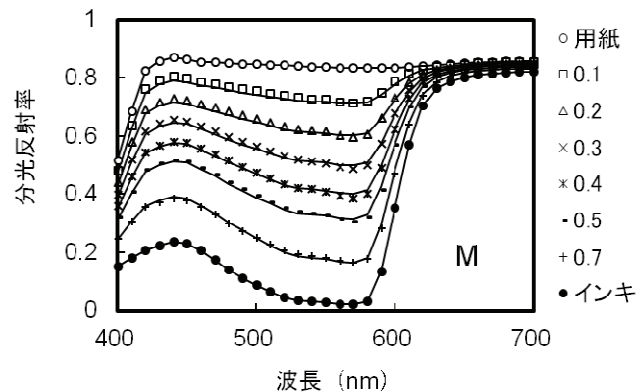


図 4.4 Yule-Nielsen モデルによる分光反射率の予測結果. 実線は予測値, シンボルは実測値を示す.

4.3 3成分モデル

光学的ドットゲインによる非線形な色再現特性を表すことが可能で、かつ物理的要因を基礎として分光反射率を予測できる方法を確認するため、確率モデルの考え方を組み込んだ3成分モデル¹⁷⁾を検討し、その性能を評価した。

4.3.1 モデルの基本概念

まず、単色網点印刷物において、インキ層内での光の散乱や、紙と空気、インキと紙、インキと空気での界面における反射がないと仮定すれば、光の入射・射出光路のパターンは図4.5に示すような4種類の光路に分類することができる。光路①は紙から入射し紙から出る経路で、この光路に対応する分光反射率を $R_p(\lambda)$ とする。次に、光路③はインキ層

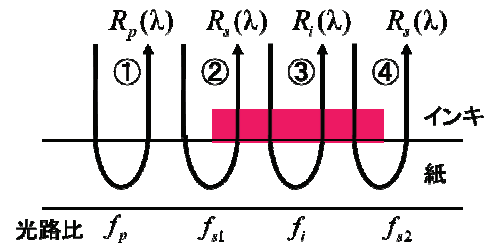


図 4.5 光の入射・射出パターン分類

へ入射後、インキ層を通過して紙の中へ入り、再びインキ層を通過して外へ出る経路で、この光路に対応する分光反射率を $R_i(\lambda)$ とする。光路②は紙へ入射後、散乱によって紙の中を移動後、インキ層を通過して外へ出る経路で、分光反射率 $R_s(\lambda)$ をもつとする。光路④は光路②とは逆の順番に、インキ層から入射し紙から出る経路で、分光反射率は同じく $R_s(\lambda)$ をもつ。図の中の、各分光反射率の記号と同じ添字をもつ f が各経路を通る光の比率を表す。これらを用いて全体の分光反射率 $R(\lambda)$ を表すと次式のようなになる。

$$R(\lambda) = f_i \cdot R_i(\lambda) + f_p \cdot R_p(\lambda) + f_s \cdot R_s(\lambda) \quad (4.3)$$

ここで $f_s = f_{s1} + f_{s2}$ である。

ところで、 $R_s(\lambda)$ はインキ層を1回だけ通る散乱光成分に対応し、次式により計算することができる。

$$R_s(\lambda) = R_p(\lambda) \cdot T_i(\lambda) \quad (4.4)$$

ここで $T_i(\lambda)$ はインキ層の透過率であり、 $R_i(\lambda) = R_p(\lambda) \cdot T_i(\lambda)^2$ の関係より $T_i(\lambda) = \sqrt{R_i(\lambda) / R_p(\lambda)}$ を(4.4)式に代入すれば、次式が得られる。

$$R_s(\lambda) = R_p(\lambda) \cdot T_i(\lambda) = \sqrt{R_p(\lambda) \cdot R_i(\lambda)} \quad (4.5)$$

この式を(4.3)式に代入して、次のような3成分モデルの基本式を得る。

$$R(\lambda) = f_i \cdot R_i(\lambda) + f_p \cdot R_p(\lambda) + f_s \cdot \sqrt{R_p(\lambda) \cdot R_i(\lambda)} \quad (4.6)$$

4.3.2 確率モデルによる光路比のモデル化

次に確率モデルを図 4.6 で説明する。確率モデルでは紙表面とインキ表面から入射する光を分けて考える。まず紙表面から入った光（図の入射光 1）について、紙中で散乱または裏面で反射した後、再び紙表面から外へ出る確率 P_{00} と、インキ表面から外へ出る確率 P_{01} のみを考えると、両者の間には以下の関係がある。

$$P_{00} + P_{01} = 1 \quad (4.7)$$

同様に、インキ表面から入った光（図の入射光 2）に対して、紙表面から外へ出る確率 P_{10} と、再びインキ表面から外へ出る確率 P_{11} が考えられ、両者の関係は以下ようになる。

$$P_{10} + P_{11} = 1 \quad (4.8)$$

また、インキの面積比、すなわち網点面積比を A とすると、入射光が紙表面とインキ表面から入る確率はそれぞれの面積比に等しく、 $1-A$ と A になる。入射光が紙表面から入ってインキ表面から外へ出る確率 $(1-A) \cdot P_{01}$ と、インキ表面から入って紙表面から外へ出る確率 $A \cdot P_{10}$ は等しいと仮定すれば次式を得る。

$$P_{10} = P_{01} \frac{1-A}{A} \quad (4.9)$$

P_{00} と F が既知であれば、(4.7)、(4.9)、(4.8) 式を順次用いて P_{01} 、 P_{10} 、 P_{11} が求められる。 A は画像入力装置とパソコンを用いた画像解析により、また P_{00} は Arney らが提案している以下の実験式¹⁴⁾を用いて求める事ができる。

$$P_{00} = 1 - A[2 - A^w - (1-A)^w] \quad (4.10)$$

ここで $w(0 \leq w \leq 1)$ は実験的に求められるパラメータで、紙中での光の散乱性に関係した値をもち、0 は全く散乱のない状態、1 は完全散乱の状態を表す。また、光路比は図 4.6 に基づいて次式で与えられる。

$$f_p = P_{00} \cdot (1-A) \quad (4.11)$$

$$f_i = P_{11} \cdot A \quad (4.12)$$

$$f_s = A \cdot P_{10} + (1-A) \cdot P_{01} \quad (4.13)$$

以上より P_{00} の値が決まれば全ての光路比を計算することができる。

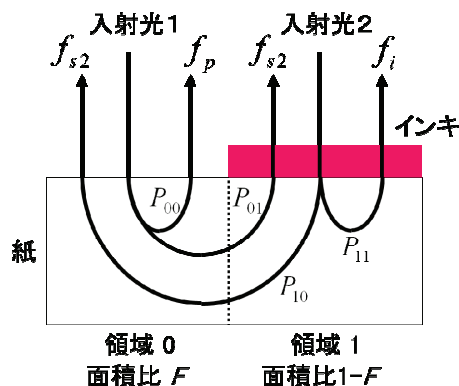


図 4.6 確率モデルの概念図

4.3.3 3成分モデルの評価

3成分モデルの予測性能を評価するため、作成した試料を基に各成分の光路比を求め、モデルの予測値との比較を行った。

4.3.3.1 光路比の算出方法

光路比を求めるにあたって、試料の分光反射率に対する主成分分析により主成分とその重みを求め、これらの値を用いて光路比を求めることにした。ここでは、分光反射率などの波長毎のデータの集合を、 $\mathbf{r}=(R(\lambda_1), R(\lambda_2), \dots, R(\lambda_N))^T$ の形式で定義される列ベクトルを用いて表すことにする。ここで、 N は正の整数で波長の数を表す。

まず、網点面積比が異なる M 個の単色印刷試料の平均分光反射率と第1、第2主成分をそれぞれ列ベクトル $\bar{\mathbf{r}}$, \mathbf{p}_1 , \mathbf{p}_2 で表し、 $\mathbf{P}_0 = (\bar{\mathbf{r}}, \mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)$ で主成分行列を定義する。次に、3成分の分光反射率 $R_i(\lambda)$, $R_p(\lambda)$, $R_s(\lambda)$ をそれぞれ列ベクトル \mathbf{r}_i , \mathbf{r}_p , \mathbf{r}_s で表し、 $\mathbf{R}_0 = (\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_p, \mathbf{r}_s)$ で3成分行列を定義する。

いま、 \mathbf{R}_0 と \mathbf{P}_0 の間に線形な関係が成り立つと仮定したとき、以下の式で表現できる。

$$\mathbf{R}_0 = \mathbf{P}_0 \mathbf{Q} \quad (4.14)$$

ここで、 \mathbf{Q} は 3×3 の行列であり、その最小二乗推定は次式で与えられる。

$$\mathbf{Q} = (\mathbf{P}_0^T \mathbf{P}_0)^{-1} (\mathbf{P}_0^T \mathbf{R}_0) \quad (4.15)$$

一方、各試料の分光反射率を列ベクトル $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_M$ で表し、 $\mathbf{R} = (\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_M)$ なる行列で試料全体を表すと、主成分行列 \mathbf{P}_0 の主成分の累積寄与率が1とみなせる場合、 \mathbf{R} は \mathbf{P}_0 を用いて以下のように表される。

$$\mathbf{R} = \mathbf{P}_0 \mathbf{W} \quad (4.16)$$

ただし、 \mathbf{W} は次式で定義される行列である。

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ w_{11} & w_{21} & \dots & w_{M1} \\ w_{12} & w_{22} & \dots & w_{M2} \end{pmatrix} \quad (4.17)$$

ここで、行列 \mathbf{W} の要素 w は主成分の重みを表し、その添字1桁目の $1 \sim M$ が対応する試料の番号を、2桁目が主成分の番号を表す。

次に、(4.3) 式の3成分モデルを行列表現により表すと次式のようなになる。

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_0 \mathbf{F} \quad (4.18)$$

ただし、 \mathbf{F} は次式で定義される行列である。

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} f_{1i} & f_{2i} & \cdots & f_{Mi} \\ f_{1p} & f_{2p} & \cdots & f_{Mp} \\ f_{1s} & f_{2s} & \cdots & f_{Ms} \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

ここで、行列 \mathbf{F} の要素 f は各成分光に対応する光路比を表し、その添字1桁目の $1 \sim M$ が対応する試料の番号を、2桁目が $R_i(\lambda)$, $R_p(\lambda)$, $R_s(\lambda)$ との対応を表す。

さて、(4.16), (4.18), (4.14)の式の関係から以下の関係が導かれる。

$$\mathbf{R} = \mathbf{P}_0 \mathbf{W} = \mathbf{R}_0 \mathbf{F} = \mathbf{P}_0 \mathbf{Q} \mathbf{F} \quad (4.20)$$

上の2番目と4番目の式の関係から次式が得られる。

$$\mathbf{P}_0 (\mathbf{W} - \mathbf{Q} \mathbf{F}) = 0 \quad (4.21)$$

すべての要素が0の場合を除く任意の \mathbf{P}_0 に対して(4.21)式が常に成り立つためには次の式が成り立たなければならない。

$$\mathbf{W} - \mathbf{Q} \mathbf{F} = 0 \quad (4.22)$$

したがって、 $|\mathbf{Q}| \neq 0$ ならば(4.15)式の関係より

$$\mathbf{F} = \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{W} = \left(\mathbf{P}_0^T \mathbf{R}_0 \right)^{-1} \left(\mathbf{P}_0^T \mathbf{P}_0 \right) \mathbf{W} \quad (4.23)$$

の式が得られ、 \mathbf{F} が求められる。

4.3.3.2 試料の測定

実際の印刷試料を用いて、前項で説明した方法により光路比の算出を行った。

(1) 試料の作成

網点面積比を0%から100%まで10%ずつ変えたC, M, Yの単色網点印刷試料をオフセット印刷で作成した。網点のスクリーン線数(以後、線数と呼ぶ)は175 line/inch, 網点の形状はラウンド(円形), 用紙には特菱アート157 g/m²を, インキは東洋インキTYハイエコーG2を使用した。印刷にはオフセット枚葉印刷機DAIYA 4G-6(三菱重工製)を用いた。

(2) 試料の測定

試料の分光反射率を分光光度計Spectrolino(GretagMacbeth社)により測定した。Spectrolinoは測定波長域が380nm~730nm, 測定波長間隔は10 nm, 照明受光条件は45度入射/0度受光, 測定開口は直径4mmの円形である。裏あてはIS013655の規定に基づきブラックバックングを用いた。

(3) 網点面積比の測定

幾何学的な網点面積比を求めるため、顕微鏡(Nikon製OPTIPHOTO)と3CCD方式

デジタルカメラ（富士写真フィルム製 HC-2500）を組み合わせた画像入力装置により RGB 各 8 ビットのデータとしてパソコンに画像を取り込んだ。分析にはインキ色の補色成分画像を使用した。すなわち、C の試料に対しては R 成分の画像を、M の試料に対しては G 成分の画像を、Y の試料については B 成分の画像を分析した。画像解析ソフト（三谷商事製 MacSCOPE）を使用し、前処理として照明むら補正を行ってから分析した。画像データはヒストグラム解析によりインキと紙の頻度ピークの間で最小頻度となるポイントを自動で判定し、このポイントを閾値としてそれ以下の画素をインキ部分と判断して網点面積比を求めた。

4.3.3.3 測定結果とデータの分析

ここでは、色度図上での非線形性が最も強く現れる M の試料についての結果を用いて説明する。図 4.7 に測定された分光反射率を異なるシンボルで示す。図の右側のシンボルの横にある数字は測定から得られた網点面積比を示す。これら 11 個の分光反射率データを主成分分析して得た平均 \bar{r} と第 1 主成分 \mathbf{p}_1 、第 2 主成分 \mathbf{p}_2 を図 4.8 に示す。基のデータに対する主成分

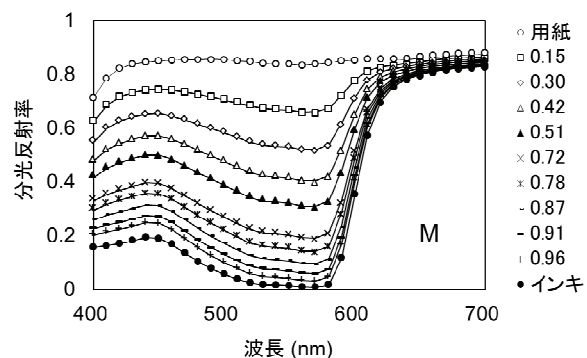


図 4.7 M 単色印刷試料の分光反射率の測定値

分による再現精度を示す累積寄与率は第 2 主成分までで 0.9999 であり、平均と第 2 主成分までで試料の十分に分光反射率特性を表現できることがわかった。図 4.9 には第 1 主成分、第 2 主成分のそれぞれに対する重み w_1 、 w_2 を示す。なお、第 2 主成分については値が小さいため、縦軸の値を 10 倍にして示してある。図 4.10 にインキ、用紙、散乱光成分それぞれの分光反射率 $R_i(\lambda)$ 、 $R_p(\lambda)$ 、 $R_s(\lambda)$ を示す。

これらのデータを用いて (4.23) 式により光路比を求めた結果を図 4.11 に示す。図でシンボルが算出された光路比を示す。散乱光成分 $R_s(\lambda)$ の光路比 f_s は網点面積比が 0.5 の付近で最大となる放物状の変化を示している。光路比の和 $f_i + f_p + f_s$ はほぼ 1 になり、得ら

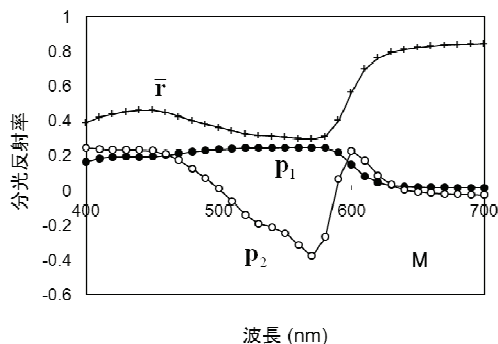


図 4.8 M 単色印刷試料の主成分分析の結果

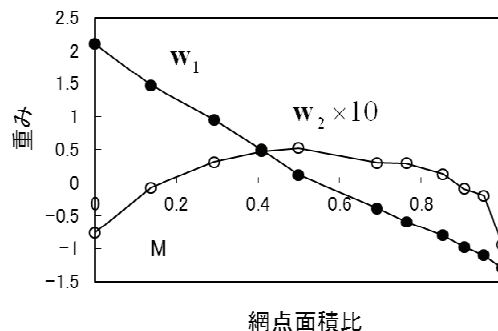


図 4.9 M 単色印刷試料の主成分の重み

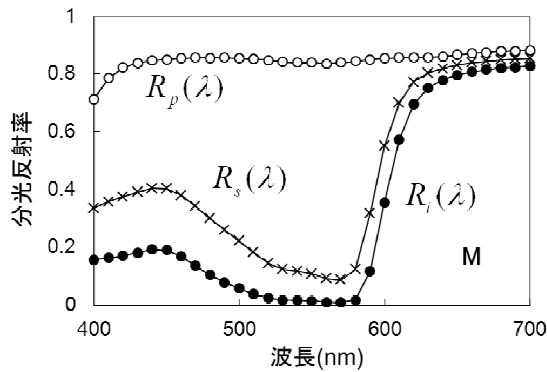


図 4.10 3成分の分光反射率特性

れた光路比が妥当なものであると考えられた。これらの値を用いて (4.3) 式により分光反射率を求め、図 4.7 に実線で示した。基データがほぼ忠実に再現されていることがわかる。

4.3.3.4 光路比の理論値との比較

確率モデルにより光路比を推定し、試料から得られた実験値との比較からモデルの性能評価を行った。まず、(4.10) 式により確率 P_{00} の理論値 P_{00t} を計算した。この計算における w の値には 0.47 を用いた。この値は、図 4.12 のように、理論値 P_{00t} と (4.11) 式に基づいて得られる P_{00} の実験値 P_{00e} の関係を調べ、回帰直線の傾きが 1 で切片が 0 となる条件から求めたものである。算出された P_{00t} の値を用いて、(4.7) ~ (4.9) 式より各確率を求め、(4.11) ~ (4.13) 式に代入して各光路比を求めた。

結果を図 4.11 に実線で示す。シンボルで示した実験値を理論値と比較すると、 f_p については理論値によく合っているが、 f_i と f_s については理論値から大きくはずれており、モデルに適合しているとは言い難い。モデルの性能や実験値との適合精度の問題はあるが、実験誤差による影響も考えられるため、あらためて実験値の見積もりをやり直した。

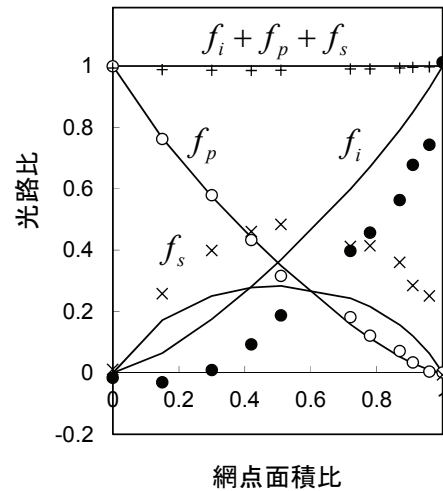


図 4.11 3成分の光路比の算出結果 (シンボルは実験値、実線は理論値)

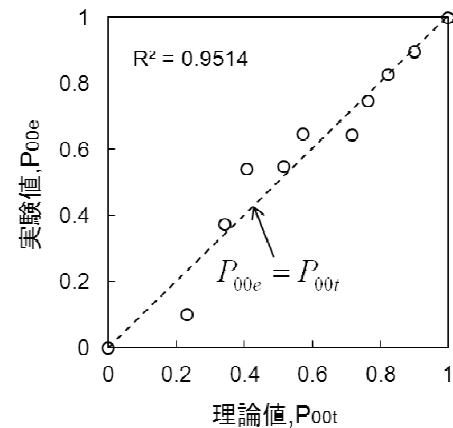


図 4.12 P_{00} の理論値 P_{00t} と実験値 P_{00e} の関係 ($w = 0.47$)

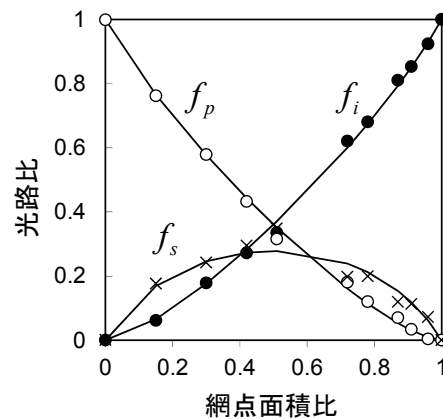


図 4.13 3成分の光路比の算出結果 (実験値から P_{00} の値を求める方法)

図 4.11 で見たように、 P_{00} については実験値が理論値に良く一致することから、(4.11) 式から導かれる以下の式を用いて P_{00} の実験値を求めた。

$$P_{00} = \frac{f_p}{1-A} \quad (4.24)$$

得られた P_{00} の実験値を用いて前述の方法により各光路比を計算し、その結果を図 4.13 に示す。実験値と理論値は良く一致しているが、これは P_{00} の実験値が理論値と非常に良く一致したため、これを基に同じ式を用いて算出された他の 2 つの光路比も、両者の間で結果的に良い一致が得られたと考えられる。

4.3.3.5 分光反射率と色度座標の予測

次にこれらの光路比と 3 成分の分光反射率を用いて M の単色印刷試料の分光反射率を予測した結果を図 4.14 に示す。図のシンボルは実測値、実線は予測値を示す。図が煩雑になるのを避けるため、網点面積比が 0.78 , 0.91 , 0.96 の試料のデータは省略した。図 4.15 に M 単色印刷試料の xy 色度座標を示す。図の直線は加法混色軌跡である。3 成分モデルによる予測結果は実測値の非線形性をうまく表現できていることがわかる。

さらに、このモデルが C と Y の単色印刷試料にも適用可能かどうかを知るため、M の試料と同様の方法、手順にしたがって分光反射率を予測し、xy 色度座標を求めた。分光反射率の予測結果を図 4.16 と図 4.17 に、xy 色度座標の予測結果を図 4.18 と図 4.19 に示す。C の場合、非線形性は小さいものの、3 成分モデルはその特性を良く表現しているように見える。Y の場合は非線形性が非常に小さいため、3 成分モデルの効果が現れているかどうかは判断がつかない。

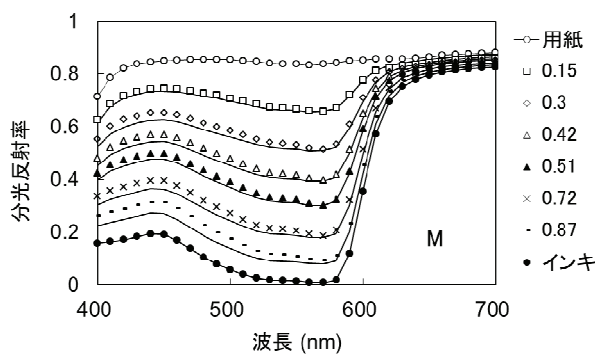


図 4.14 M の単色印刷試料の分光反射率の予測結果

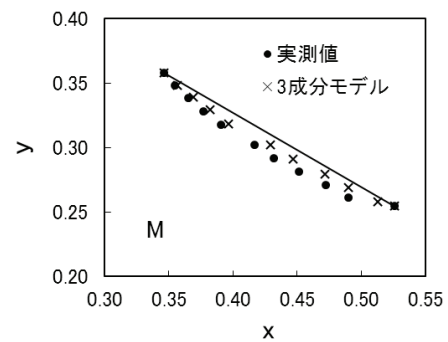


図 4.15 M の単色印刷試料の xy 色度座標の予測結果

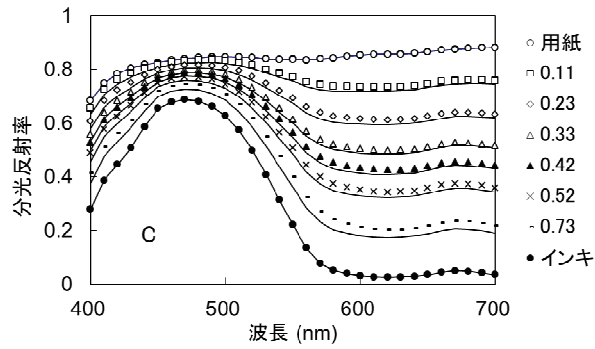


図 4.16 C の単色印刷試料の分光反射率の予測結果

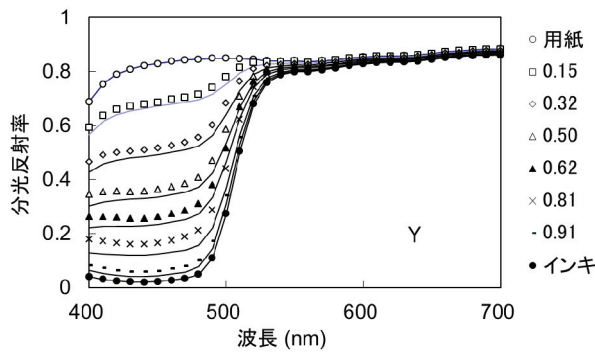


図 4.17 Y の単色印刷試料の分光反射率の予測結果

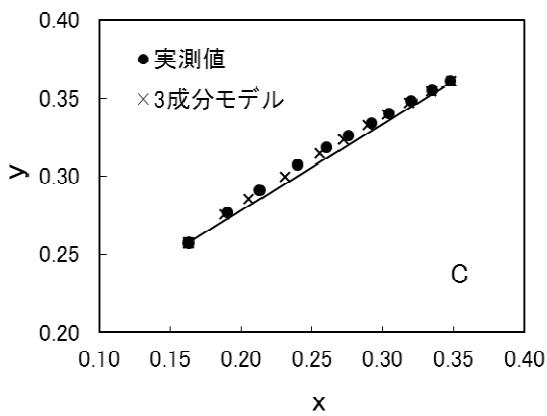


図 4.18 C の単色印刷試料の xy 色度座標の予測結果

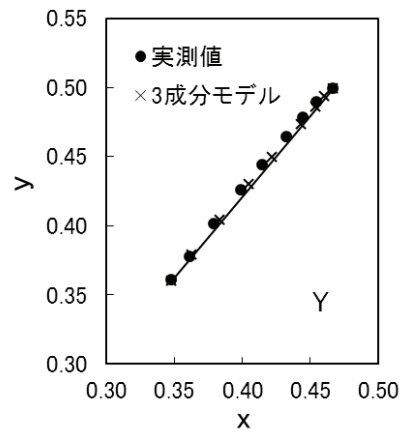


図 4.19 Y の単色印刷試料の xy 色度座標の予測結果

4.3.3.6 高線数印刷への適用性

より網点密度の高い高線数で印刷された試料に対してモデルが適用できるかどうかを調べるため、175 line/inch の試料と同じ条件で作成した 300 line/inch と 700 line/inch の単色印刷試料を用意し、同様の手順で分析を行った。M の単色印刷試料の分光反射率を図 4.20 と図 4.21 に示す。シンボルが実測値、

実線が予測値である。前述の 175 line/inch の試料に比べて予測値のずれは大きく、700 line/inch の方が 300 line/inch よりもずれは大きい。図 4.22 と図 4.23 にはそれぞれの xy 色度座標の予測結果を示す。実測値に見られる色度点軌跡の強い曲がりとはモデルでは十分に表現しきれてはいない。なお、図の点線は、(4.10) 式において $w=1$ となる完全散乱における色度軌跡を表す。また、図の太い実線は、一様連続塗膜で印刷されたインキ層の厚みを変化させた場合の色度軌跡を、インキ層の透過濃度がインキ層の厚みに比例するという

Lambert-Beer 則にしたがって計算で求めたものである。線数が高くなるにしたがい網点構造をもつ印刷物の色が連続塗膜の特性に近づく様子がわかる。

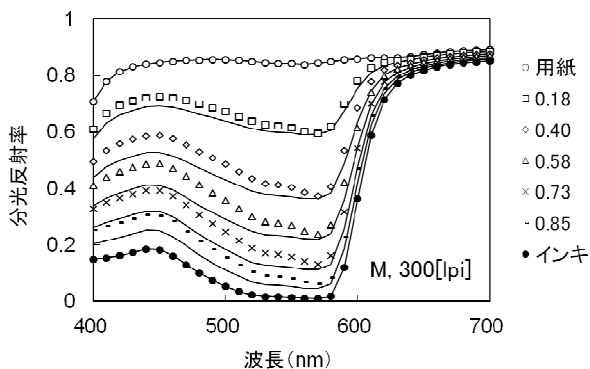


図 4.20 300 [lpi] の M 単色印刷試料の分光反射率の予測結果

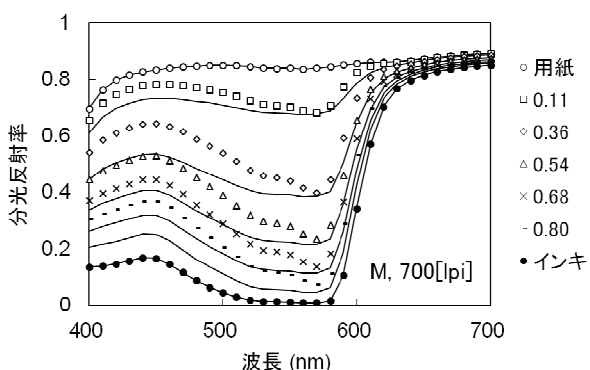


図 4.21 700 [lpi] の M 単色印刷試料の分光反射率の予測結果

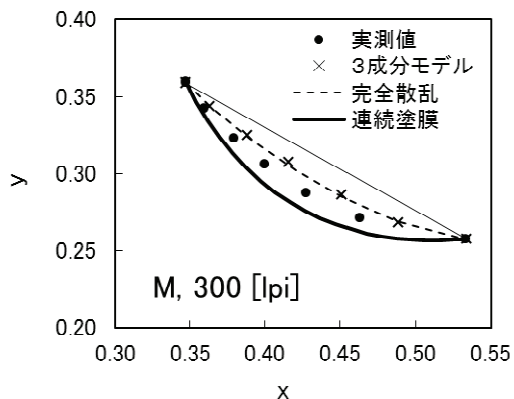


図 4.22 300 [lpi] の M 単色印刷試料の分光反射率の予測結果

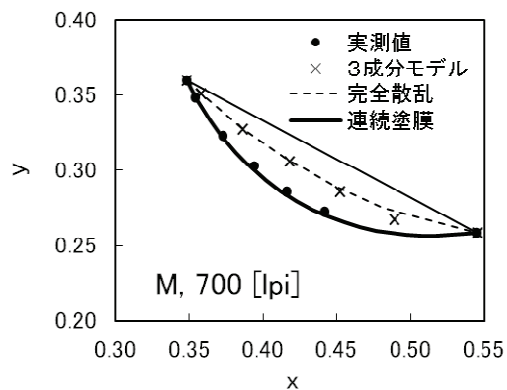


図 4.23 700 [lpi] の M 単色印刷試料の分光反射率の予測結果

4.3.4 考察

図 4.11 で示されるように 3 成分モデルによる光路比 f_p は実験値に非常に近いが、 f_i と f_s は傾向は似ているものの、値としては差がかなり認められる。 f_p はモデル式のパラメータ w を最適化して実験値に近づけたため、近い値となったのは当然という見方もあるが、 w の値を実験的に決める必要があるのはこのモデルの特徴でもあり、この値が適切なものとして議論を進める。

f_i と f_s における理論値と実験値のずれの原因には、前提条件として無視された幾つかの要因が考えられる。その一つとして、網点を構成するインキの転移状態があげられる。本研究では、図 4.24 の左側のように、均一な厚さのインキ層で構成されるシャープなエッジを持つ網点を想定しているが、実際の網点では右側の図のように、インキ層の厚さは中央部分で厚く、周辺にゆくにしたがって徐々に厚さが減ってゆくソフトなエッジを持つことが知られている。このような網点では光路 B では光路 A と同じような分光反射特性をもつと考えられるが、光路 C ではインキ層を通る長さの違いにより明らかに A とは異なる分光反射特性をもち、その特性はむしろ 3 成分モデルの $R_s(\lambda)$ に近い。

光路 D にいたっては、 $R_s(\lambda)$ よりも通るインキ層の長さは短い。このような網点画像での光路比は、平均的にみれば $R_i(\lambda)$ の割合が理論値よりも小さく、 $R_s(\lambda)$ では理論値よりも大きくなると予想される。図 4.11 はそのような予想を支持する結果を示している。

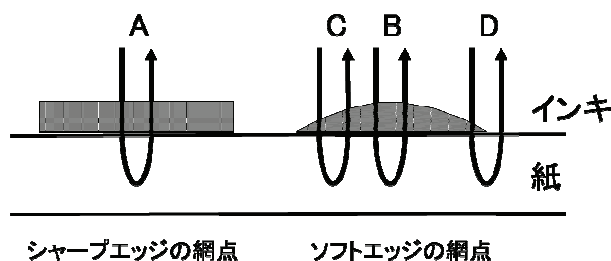


図 4.24 網点のエッジ効果. 理想的網点のエッジはシャープだが、実際の網点ではなだらかなエッジをもつ。

一方、図 4.22 と図 4.23 からわかるように、高線数印刷試料においては 3 成分モデルで予測された色度点はほとんど完全散乱の状態の色度軌跡上にある。これに対し、実測の色度点はその外側に分布しており、700 line/inch の試料にいたっては連続塗膜での色度軌跡上に分布している。このことは高線数の網点印刷物の色再現特性は、3 成分モデルでは予測できないことを物語っている。3 成分モデルでは印刷物への光の入出経路を単純な 4 通りに限定しているが、総合的な分光反射特性に寄与するのは 3 つの反射成分に限定される。そのうち、紙とインキでの反射成分は、網点面積比に依存しない特性をもつため、結果的に (4.5) 式で与えられる第 3 の成分である散乱光成分も網点面積比に依存しない特性をもつことになる。それらの光路比が確率モデルにしたがって与えられる限り、3 成分の線形和で得られる色度点は原理的に完全散乱の状態よりも外側に出ることはない。

このことは、(4.2) 式の Yule-Nielsen 式において、 $n = 2$ の完全散乱の場合を考えればわかり易い。このとき、(4.2) 式は以下のように展開される。

$$\hat{R}(\lambda) = \left\{ aR_i(\lambda)^{\frac{1}{2}} + (1-a)R_p(\lambda)^{\frac{1}{2}} \right\}^2 \quad (4.25)$$

$$= a^2 R_i(\lambda) + (1-a)^2 R_p(\lambda) + 2a(1-a)\sqrt{R_i(\lambda)R_p(\lambda)}$$

この式における右辺の $R_i(\lambda)$, $R_p(\lambda)$, $\sqrt{R_i(\lambda)R_p(\lambda)}$ は3成分モデルの成分と全く同一である。通常の印刷では n は 1 と 2 の間の値をとると言われるが、高線数の印刷では n が 2 以上の値をとると言われており、上記3つの成分で分光反射特性を表現できる保証はない。

他方、300 line/inch と 700 line/inch では網点の中心間距離はそれぞれ約 $85 \mu\text{m}$ と $36 \mu\text{m}$ であるが、これらは紙中での光の平均的な散乱移動距離として用いられる $100 \mu\text{m}$ という値以下であり、散乱の影響が複数の網点を含む範囲にまで及ぶことを示唆している。それにも拘わらず、実際の試料の色度点は完全散乱の限界を越えて、連続塗膜の色度軌跡にまで近づいている。このことは、本研究では無視したインキ、紙、空気のそれぞれの界面において多重反射¹⁸⁾が起これ、インキ層を通過する光の割合が益々増えて連続塗膜の状態に近づいたことを示唆している。さらには、高線数になるほど網点が小さくなるため、紙へのインキ転移性が悪くなるのでインキ層の厚みは小さくなり、薄膜化の効果も加わるようになる。

このようにさまざまな要因が影響した結果、理論値との差が生じたと考えられる。

4.4 コア・フリッジモデル

4.4.1 モデルの基本概念

3成分モデルでは確率モデルに基づいて光路比を算出したが、結果として色度軌跡の非線形性を予測することはできたものの、その予測精度はあまり良くなかった。この原因は、実際の網点印刷物の構造やそこでの物理現象とモデルの前提条件との違いが大きいことによると考えられる。そこで、物理現象と対応する構造を持たせつつ、理論的な厳密性より現実の特性との整合性を重視し、コア・フリッジモデルを考案した。このモデルでは、3成分モデルと同じく、図 4.5 で示される4通りの光の入射・射出パターンを想定している。この中の散乱光成分の発生要因を網点の構造として組み込んだ点に特徴がある。

図 4.25 にコア・フリッジモデルの網点構造を模式図で示す。網点は中央のコア部と、コア部よりインキ層の薄い周辺部のフリッジ部で構成される。コア部とフリッジ部の厚さはそれぞれ一定で、フリッジ部の厚さはコア部の ρ 倍 ($0 < \rho < 1$) と仮定する。また、図 4.26 に示すようにコア部、フリッジ部、用紙部に入射した光はそれぞれの領域内のみを通過し、おのお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し、異なる領域から外へ出ることはないと仮定する。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。

$$\hat{R}(\lambda) = a_c R_c(\lambda) + a_f R_f(\lambda) + (1 - a_c - a_f) R_p(\lambda) \quad (4.26)$$

ここで、 $R_c(\lambda)$ 、 $R_f(\lambda)$ 、 $R_p(\lambda)$ はそれぞれコア部、フリッジ部、用紙部の分光反射率、 a_c 、 a_f はそれぞれコア部、フリッジ部の面積比である。ただし、 $R_c(\lambda)$ は網点面積比 100% のコア部の分光反射率と等しいとする。また、フリッ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、前述の Lambert-Beer 則を適用すると、フリッジ部の分光反射率は次式で表すことができる。

$$R_f(\lambda) = R_c(\lambda)^\rho \cdot R_p(\lambda)^{1-\rho} \quad (4.27)$$

(4.27) 式を (4.26) 式に代入して次式が得られる。

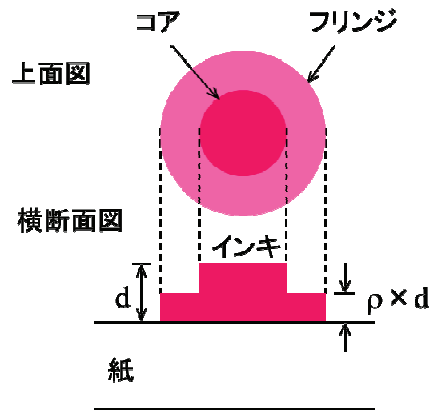


図 4.25 コア・フリッジモデルの網点構造の模式図

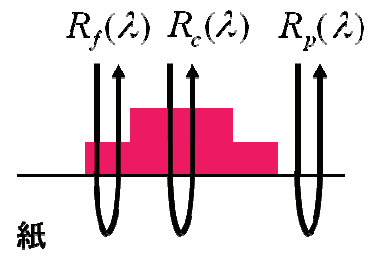


図 4.26 3種の分光反射成分

$$\hat{R}(\lambda) = a_c R_c(\lambda) + a_f R_c(\lambda)^\rho \cdot R_p(\lambda)^{1-\rho} + (1 - a_c - a_f) R_p(\lambda) \quad (4.28)$$

(4.28) 式がコア・フリッ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、フリッジ部の厚さを表すパラメータ ρ を除けば、この式は国司らが用いた予測式¹⁹⁾と同形の式となる。類似の考え方は内藤らも提案している²⁰⁾。

このモデルにおける光の入射・射出経路を図 4.5 の各光路と比較すると、コア部は光路③、フリッジ部は光路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、フリッ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・フリッジモデルでは 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ッ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。

4.4.2 コアとフリッジの面積比の決定方法

(4.28) 式において、 $R_c(\lambda)$ 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 ρ 、および a_c と a_f である。これらの値は直接測定することができないが、最小二乗法による最適化の手法を用いて決定することができる。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 $R(\lambda_j)$ 、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。

$$S = \sum_{j=1}^N \{ \hat{R}(\lambda_j) - R(\lambda_j) \}^2 \quad (4.29)$$

この S を目的関数とし、これを最小化するような ρ 、および a_c と a_f の値を求めることで、それらの最適値が得られる。

4.4.3 コア・フリッジモデルの評価

4.4.3.1 試料とデータの分析

まず、4.3.3.2 で使用した、商業印刷において代表的な 175 line/inch の試料の分光反射率データを用いて、コア・フリッジモデルによる分光反射率と xy 色度の予測性能を評価した。コアとフリッジの面積比、フリッジの厚み比は、マイクロソフト社 Excel のソルバーを使用して、最適化の手法により同時に求めた。

4.4.3.2 分析結果

表 4.1 に得られた ρ の値を示す。C、M、Y とともにほぼ同じような値であり、インキの違いによりフリッジの厚みに大きな違いは見られない。実際のインキ層の厚みは、図 4.24 のようにほぼ連続的に緩やかに減少すると考えられるので、0.5 よりやや小さな値が得られたのは妥当と思われる。

表 4.1 フリッジの厚み比 ρ の値

	C	M	Y
ρ の値	0.38	0.40	0.36

図 4.27 にコアとフリッジの面積比を示す。フリッジの面積比は、C、M、Y のいずれも

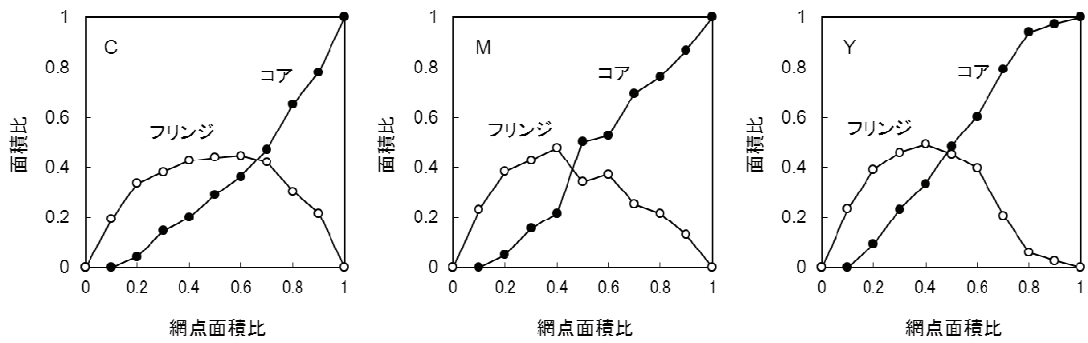


図 4.27 コアとフリンジの面積比 (175[lpi]の単色印刷試料)

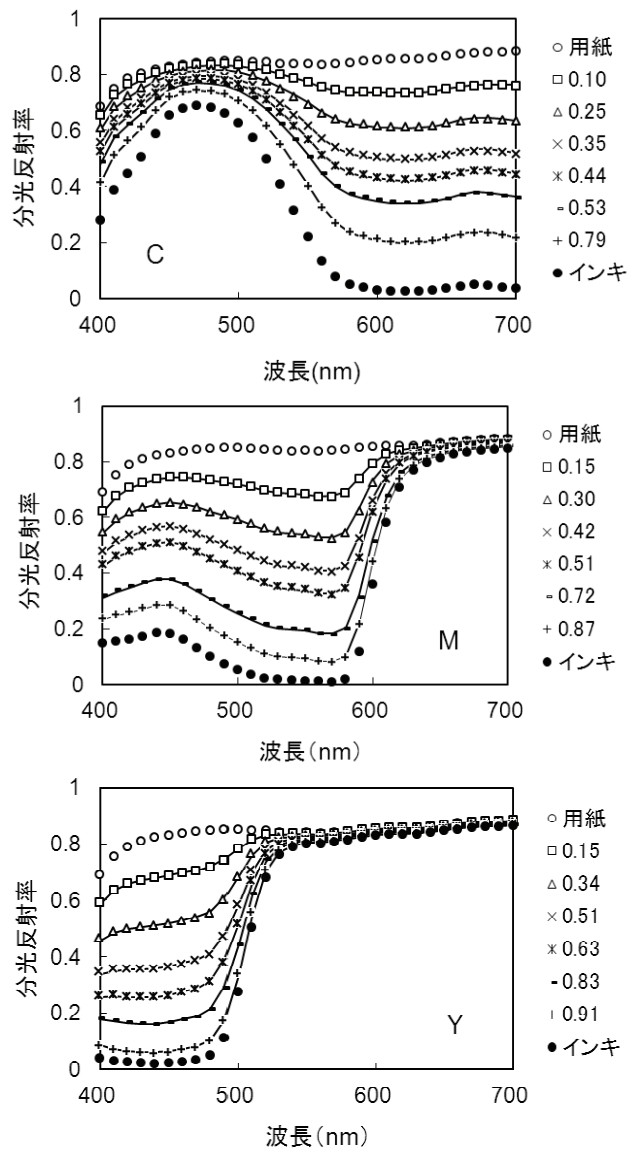


図 4.28 分光反射率特性の予測結果 (175[lpi]の単色印刷試料)

網点面積比が 0.5 前後で最大となる放物線状の変化を示す。これは、光学的ドットゲインの変化の傾向と似ている。なお、横軸の網点面積比は公称値でプロットした。

このコアとフリンジの面積比を用いて分光反射率を予測した結果を図 4.28 に示す。どの色も正確に予測が行われている。予測精度を CIELAB 色空間の色差で表した結果は表 4.2 のように最大でも 1 以下で、非常に良好であった。

図 4.29 には色度座標の予測結果を示す。○は実測値を、×がモデルによる予測値を示す。点線の直線は用紙とインキ色との加法混色軌跡である。C と Y ではわかりにくいですが、M では曲線状に分布する実測値の色度点をモデルが正確に予測できている。

表 4.2 単色試料の色予測精度(175[lpi])

インキ	平均色差	最大色差
C	0.7	0.8
M	0.4	0.6
Y	0.4	0.8

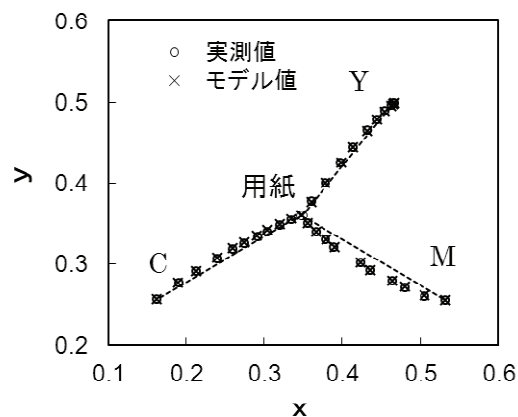


図 4.29 色度座標の予測精度 (175[lpi])

4.4.3.3 高線数印刷への適用性

高線数印刷に対するコア・フリッジモデルの適用性を評価するため、4.3.3.6 で用いた 300

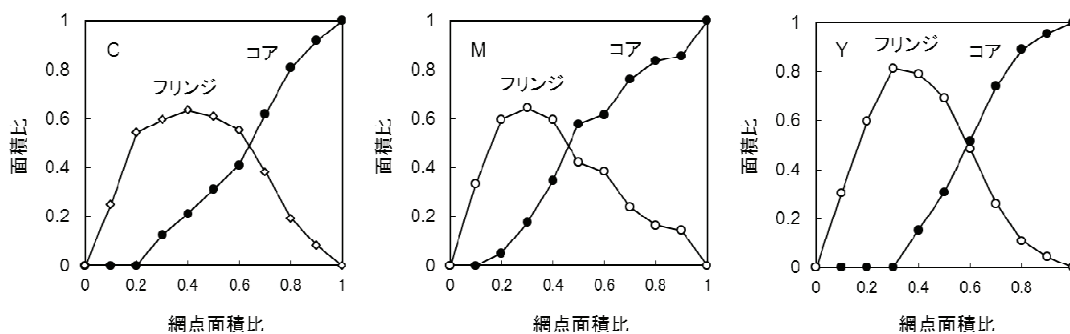


図 4.30 コアとフリッジの面積比 (300[lpi])

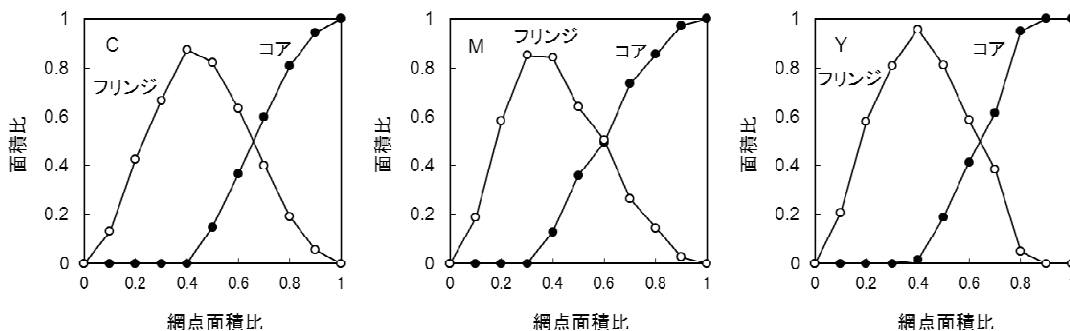


図 4.31 コアとフリッジの面積比 (700[lpi])

line/inch と 700 line/inch の単色印刷試料についても同様の分析を行った。それぞれの線数の単色印刷試料のコアとフリンジの面積比を図 4.30 と図 4.31 に示す。175 line/inch の試料に比べてフリンジの最大値が大きくなっており、線数の高い方が最大値も大きい。一方、コアの面積比は網点面積比が小さい範囲で 0 となっているが、線数が高いほどコアの面積比が 0 となる範囲が広がっている。

分光反射率特性の予測結果を図 4.32 と図 4.33 に示す。シンボルが実測値、実線が予測値

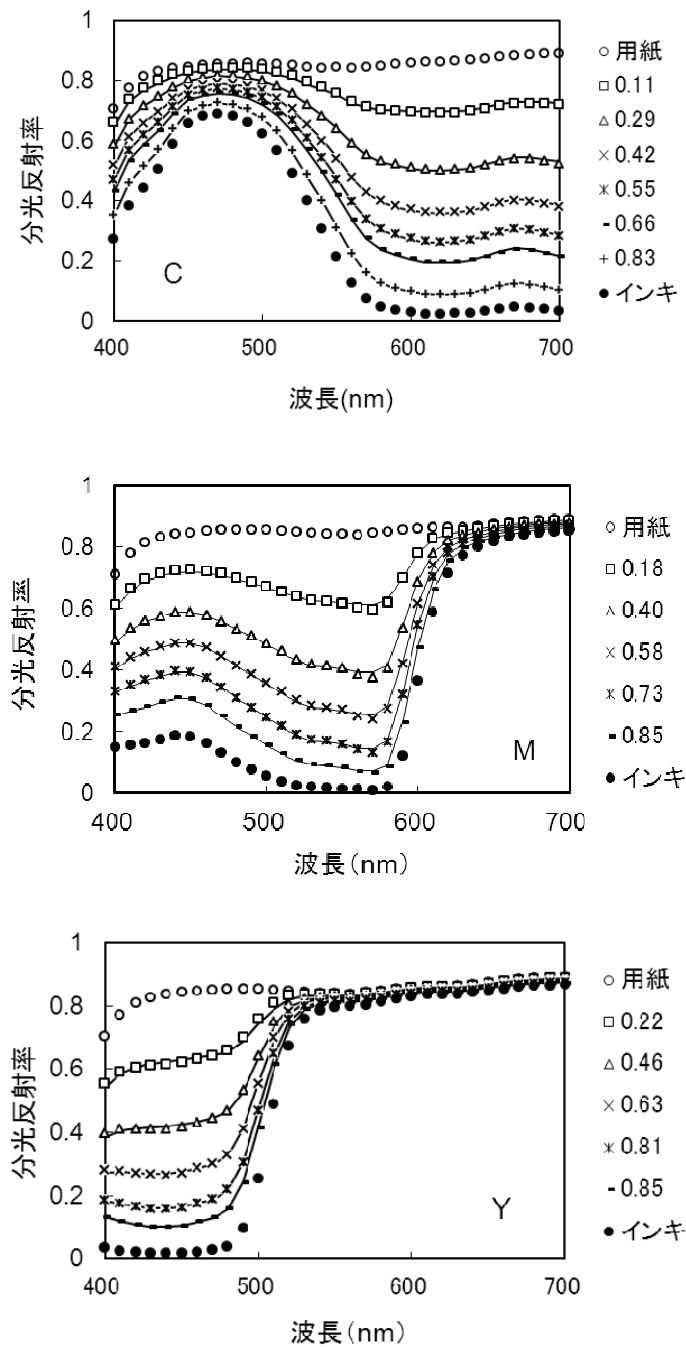


図 4.32 単色印刷試料の分光反射率特性の予測結果 (300 [lpi])

である。300 line/inch では誤差がほとんど見られず、700 line/inch では M 試料の 600nm 手前の反射率が最も下がる波長域で若干の誤差が見られる。色予測精度を CIELAB 色差で表した結果を表 4.3 に示す。全体的に 175 line/inch よりも色差は大きく、特に非線形性の大きい M の試料で顕著だが、700 line/inch においても平均色差は 3 程度に収まっている。

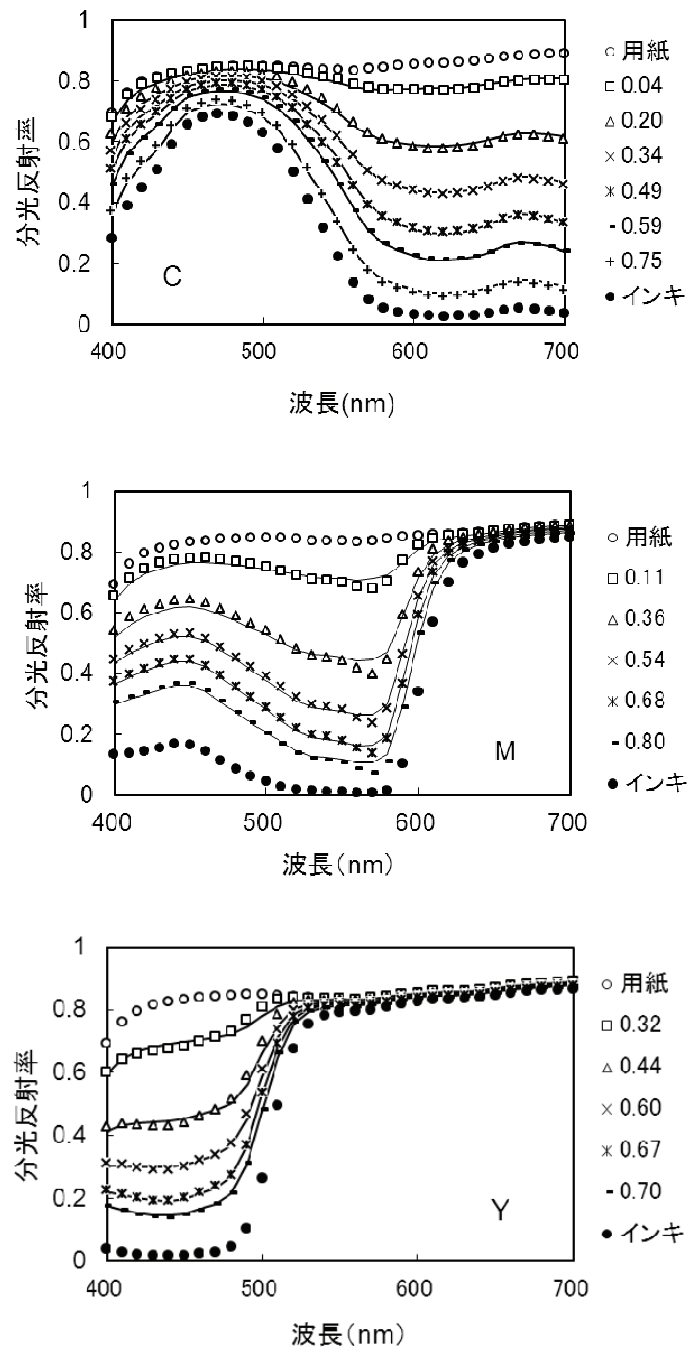


図 4.33 単色印刷試料の分光反射率特性の予測結果 (700 [lpi])

図 4.34 と図 4.35 にはそれぞれの線数において、非線形性が顕著な M の試料の xy 色度座標の予測結果を示す。実測値に見られる色度点分布の強い曲がりをコア・フリンジモデルが精度良く予測できていることがわかる。これらの点から、コア・フリンジモデルは3成分モデルよりも実際の網点印刷の特性を良く表していると判断される。

表 4.3 高線数の単色試料の色予測精度

インキ	300 [lpi]		700 [lpi]	
	平均色差	最大色差	平均色差	最大色差
C	0.5	1.2	1.3	2.6
M	1.6	3.8	3.2	6.2
Y	0.9	2.3	1.2	2.9

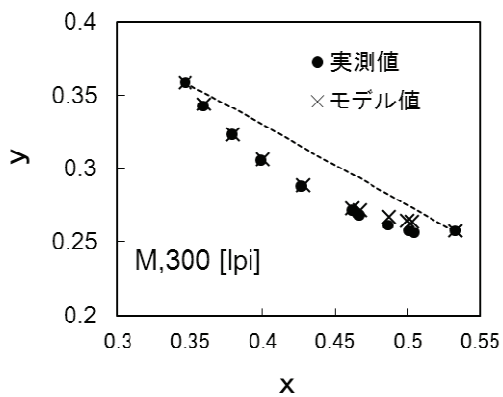


図 4.34 300 [lpi]の M 単色印刷試料の色度座標の予測結果

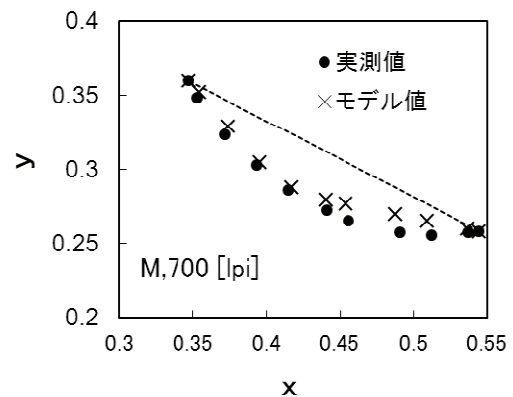


図 4.35 700 [lpi]の M 単色印刷試料の色度座標の予測結果

4.4.4 考察

線数の異なる3種のM単色試料について、図4.36に示すようにコア部、フリンジ部、用紙部ごとに、線数間でのそれらの面積比の変化を調べてみる。

コア部では、線数と面積比の間に系統的な変化の傾向は認められないが、700 line/inchでは網点面積比が0.3までの範囲で値が0で、0.4以降で急に面積が増加し、明らかに他の線数と比べて増加の傾きが大きい。また、網点面積比0.9で値がほぼ1になっていて、ほとんどベタの状態であることがわかる。これは実際の印刷試料を顕微鏡で拡大観察しても、ほぼベタの印刷部分と変わらない状態に見えることが確認された。フリンジ部は、網点面積比が中間付近で明らかに線数の増加とともに面積比が増大している様子が見てとれる。面積比が最大となるのは網点面積比が0.5より少し小さく0.4か0.3の付近である。用紙部の面積比は、300 line/inchと700 line/inchでほとんど変わりなく、175 line/inchよりも早く減少し、網点面積比が0.5で0になる。つまり、それ以上の網点面積比ではコア部とフリンジ部しか存在しない。顕微鏡での観察結果でも、この2つの線数において網点面積比が0.5以上では、用紙の白色部分が見た目でほとんど確認できなかった。図4.36のフリンジ面積のグラフからは、網点面積比が0.5以上でもフリンジは徐々に減少しつつもベタになる直前まで0にはなっていないので、単に網点がつぶれてベタと同じ状態になったとは考えにくい。つまり、光散乱、もしくはモデルでは無視した多重反射などによって見かけ上、用紙部でも色が発生し、薄いベタの状態を呈したのではないかと考えられる。

ところで、フリンジは紙中での光の散乱による効果を反映しており、それには入射した光が散乱によって紙中を移動する距離が関係する。また、フリンジ部の発生要因はインキ層を1回だけ通過する成分光であるから、網点の面積や網点相互の位置関係、特に隣接する網点との距離が強く影響すると考えられる。たとえば、図4.37に示すように線数の低い場合や網点面積が大きい場合、隣の網点との距離が短い場合では、インキ層を2回通過する確率が増えるので、コア部分の面積比が増大する。したがって、フリンジ成分が発生するには、ある程度の網点面積と隣接する網点との距離、言い換えればインキが付着していない用紙部分を光が通過するの必要があり、そのための面積が必要になる。それを満たす条件

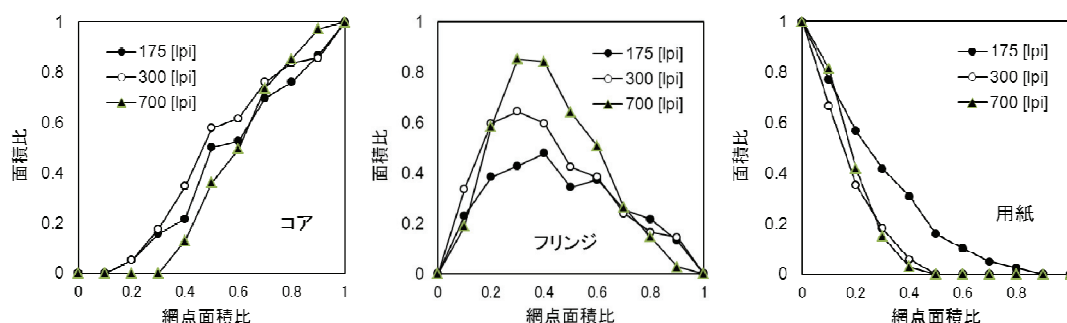


図 4.36 線数の異なる M 単色試料のコア部、フリンジ部、用紙部の面積比の比較

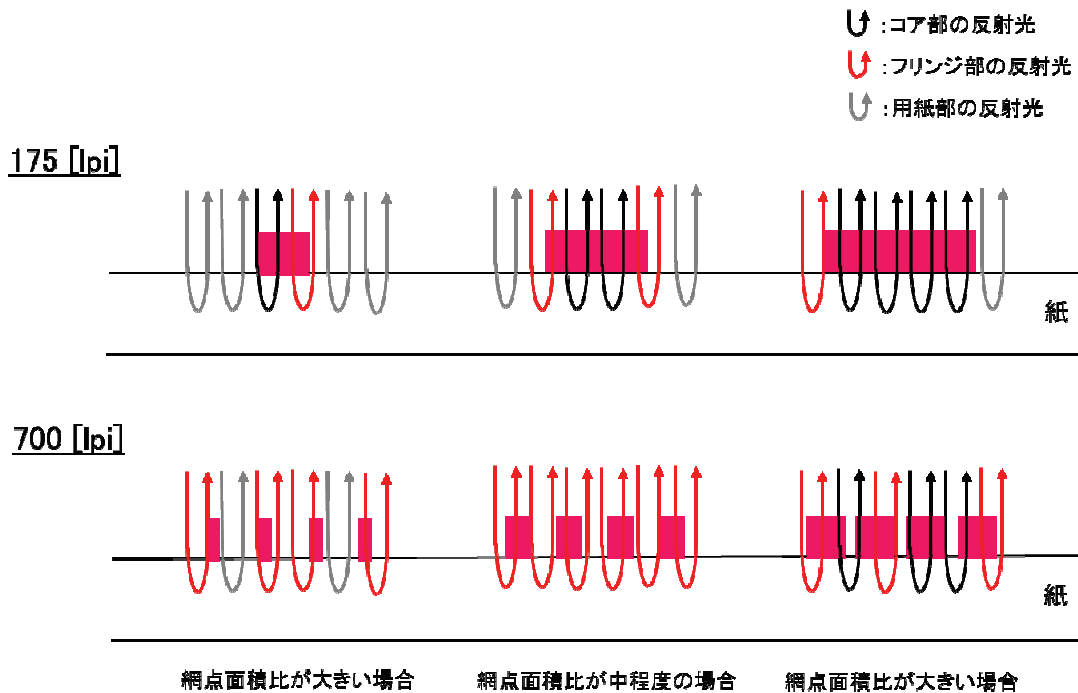


図 4.37 線数と網点面積比によるコア部，フリンジ部，用紙部の面積比の変化

の中で，網点面積比 0.3~0.4 付近でフリンジの発生確率が最大になるということであろう。これには，線数の増加に伴って網点密度が増えることでトータルの網点周囲長が増え，インキ層を 1 回のみ通過する成分光の割合が増えることも強く関係している。

次に，網点の中心間距離，すなわち網点ピッチに対してフリンジ面積比の最大値の変化を調べてみた。結果を図 4.38 に示す。網点ピッチとフリンジ面積比の最大値の関係はほぼ直線的であるが，わずかに指数関数的な変化が認められる。網点ピッチが 0 に近づくにつれてフリンジ面積比の最大値が 1.0 に近づく傾向が見られたため，縦軸切片が 1.0 の指数関数を近似式としてあてはめ，以下の式を得た。

$$a_{f,\max} = e^{-0.005p} \quad (4.30)$$

ここで $a_{f,\max}$ がフリンジ面積比の最大値， p が網点ピッチ (μm) である。この式の近似精度を示す寄与率は 0.9957 でほぼ 1 であり，式の適合度は極めて高い。網点ピッチの増大とともにフリンジ面積が 0 に近づく点も妥当と考えられる。

ところで，フリンジの面積が最大になる条件はどのようにして決まるのであろうか？

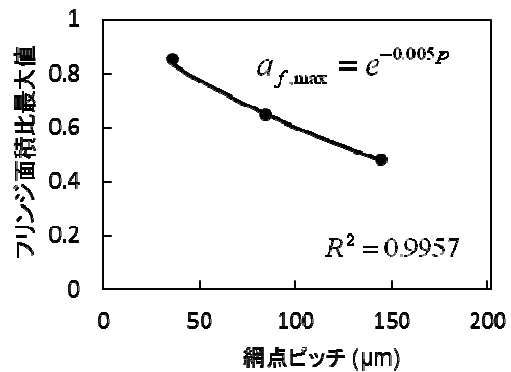


図 4.38 網点ピッチとフリンジ面積比の最大値の関係

網点面積比から計算される網点境界に対して、コア部とフリンジ部の位置関係は面積比の検討結果から図 4.39 のように表されることがわかる。フリンジ部の発生要因であるインキ層を 1 回のみ通過する光は、網点境界を中心にその両側のほぼ同じ幅の範囲で発生する。言うまでもなくこの幅は紙中での光の散乱移動距離の平均に相当すると考えられる。

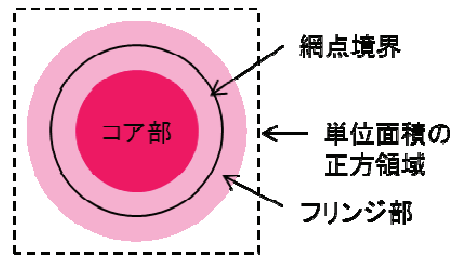
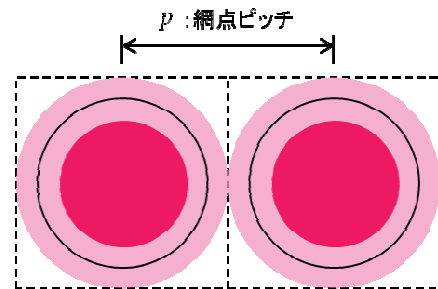
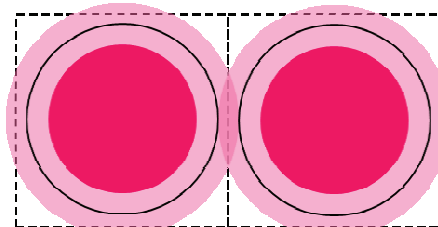


図 4.39 網点境界とコア、フリンジの位置関係

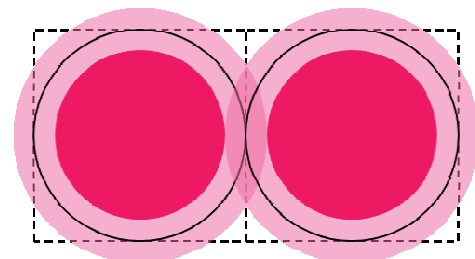
そして、網点は図 4.40 (c)に示すように、単位面積の正方領域境界に接するまでは円形のまま増大し、それと共にフリンジの面積も拡大する。このときの網点の面積比は計算上 0.785 になるが、図 4.36 の中央の図に示されるように、この付近でのフリンジの面積比は最大にはなっていない。図 4.40 (c)のように網点どうしが接する場合、フリンジ部が他方の網点に重なるため、実際にはそこでの光はインキ層をさらに 1 回通るため、コア部としての特性をもつことになるからと考えられる。



(a) フリンジどうしが接する場合



(b) フリンジが隣の網点と接する場合



(c) 網点どうしが接する場合

理論的に検討した結果、フリンジ部の面積が最大になるのは、図 4.40 (a)のフリンジどうしが接する場合と、(b)のフリンジが隣の網点と接する場合のいずれか、もしくはその間の状態にある場合と考えられた。そこで、フリンジ部の外径サイズを計算し、フリンジ面積比との関係を調べてみた。その結果を図 4.41 に示す。

3 種類の線数条件において、いずれもフリンジの外径サイズが大きくなるにつれてその面積比はしだいに増大し、最大に達した後で急激に減少している。それぞれのグラフの最大値付近に垂直方向に引かれた点線は、横軸の値が網点ピッチを示している。したがって、先に述べたように、図 4.40 の(a)、もしくは(b)の状態でフリンジの面積比が最大になることが示されていると考えられる。なお本来、フリンジの幅は線数とは直接関係ないので、線数が高くなると相対的にフリンジの面積が大きくなり、最大値もより大きくなる。

図 4.40 網点面積の増大に伴うフリンジ部の面積拡大の様子

また、ここでは網点の形状が円形として検討したが、異なる網点形状の場合、フリッジ面積の変化も多少異なったものになる。ただ、基本的な考え方に大きな違いはないと思われる。

ところで、網点の見かけ上の面積増加を示すドットゲインは、印刷の色を適切に管理・再現する上で重要な制御ファクターである。コア・フリッジモデルから得られるフリッジの面積比は紙中での光散乱効果の影響を受け

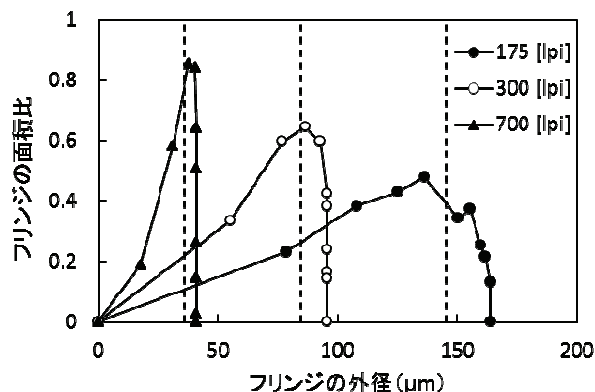


図 4.41 フリッジの外径サイズと面積比の関係

ることから、ドットゲインとも強い相関がある。そこで、フリッジの面積比とドットゲインを比較したのが図 4.42 である。ここで、各インキのドットゲイン算出に用いる見かけの網点面積比は、インキ色の補色の特性に近い等色関数から計算される XYZ 三刺激値を用いて求めた。すなわち、C インキには X の刺激値、M インキには Y の刺激値、Y インキには Z の刺激値を用いて以下の式により見かけの網点面積比を求めた。

$$a = \frac{T_t - T_p}{T_s - T_p} \quad (4.31)$$

ここで、 a が見かけの網点面積比、 T_t 、 T_s 、 T_p はそれぞれ、網点試料、ベタ刷りの試料、用紙の三刺激値である。ドットゲインは、幾何学的な網点面積が公称値に等しいと仮定して、以下の式で計算した。ただし、得られた値は機械的ドットゲインを含む可能性がある。

$$\Delta a = a - a_{nom} \quad (4.32)$$

ここで、 Δa がドットゲイン、 a_{nom} が網点面積比の公称値である。ドットゲインのグラフを見ると C は最大値 0.1 程度とやや低めだが M と Y は最大値が 0.2 を越えていて高めである。

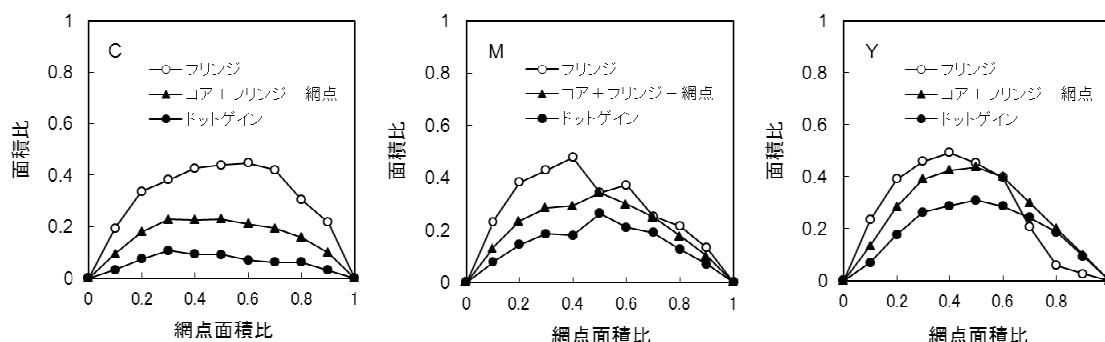


図 4.42 フリッジ面積比とドットゲインの関係

ドットゲインとフリッジ面積比の関係は共に網点面積比に対して放物線状の変化を示し、傾向は似ている。しかし、値としてはかなり小さい。これは、フリッジ部のインキ層が薄いため単位面積あたりの光吸収量が少ないこと、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、結果としてフリッジ部の割合が大きくなったと考えられる。

また、コアとフリッジの面積比の和から網点面積比の公称値を引いた結果をグラフにしてドットゲインと比較したところ、さらに傾向が良く一致していることが分かった。そこでこれらの類似性をより明確にするため、上記2種類の面積比をドットゲインに対してプロットし直したのが図 4.43 である。図からコア+フリッジの面積比-網点面積比とドットゲインの間には非常に強い相関性が認められる。そもそもドットゲインの計算に用いる見かけの網点面積比はベタ刷りの反射光成分の割合を表すもので、コア・フリッジモデルの構造をもつ網点の面積に相当するコアとフリッジの面積和とは考え方が近い。したがって、散乱光成分の割合を表すフリッジ面積比よりも一層、ドットゲインとの相関性が高くなったと考えられる。

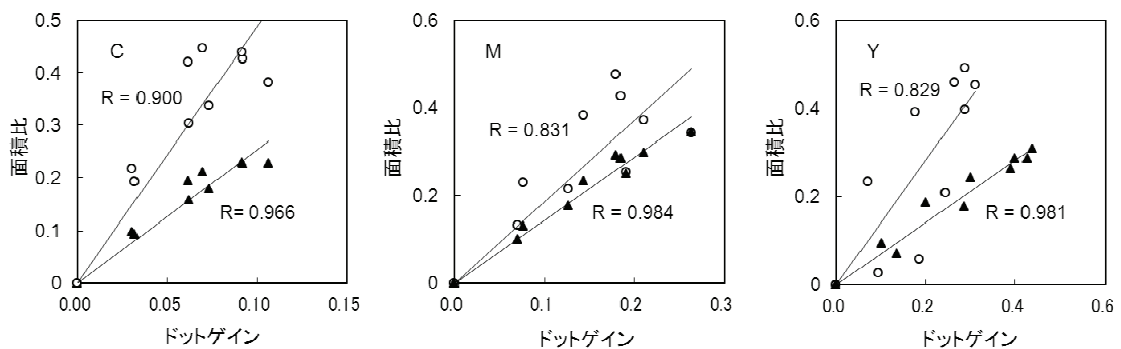


図 4.43 ドットゲインとフリッジ面積比の相関性

(○はフリッジ面積比, ▲はコア+フリッジの面積比-網点面積比を表す)

4.5 まとめ

網点印刷物への光の入射・射出経路を4種類に分類し、それらの発生確率をモデル化した3成分モデルの妥当性を評価した。その結果、単色印刷の色度軌跡に見られる非線形性をある程度は予測可能なことを示した。しかし、予測精度はあまり高くないことが分かった。この結果をふまえ、同様の光路分類を前提として、紙中での光散乱成分を網点周辺部の薄いインキ層で構成したコア・フリッジモデルを考案した。線数の異なる3種類の単色印刷試料について分光反射率特性の予測性能を評価した結果、高精度で予測できることが分かった。フリッジの面積比はフリッジの外径が網点ピッチとほぼ等しくなったときに最大となり、線数が高いほど最大値も大きくなることが分かった。

また、ドットゲインとフリッジ面積比の間には相関があり、コアとフリッジの面積比の和から網点面積比を差し引いた値はそれ以上にドットゲインと高い相関があることが分かった。

そして、光散乱効果に影響する用紙の種類や網点形状、印刷線数をコア・フリッジモデルのパラメータとして組み込むことで、さらに予測性能を向上できる可能性がある。

第5章 多色網点印刷の色予測モデル

5.1 はじめに

多色網点印刷の色予測モデルの代表例は、加法混色の1種である平均混色原理と Demichel による網点面積比の確率的扱いを組み合わせた Neugebauer モデル¹⁾である。初期の Neugebauer モデルでは光の散乱による光学的ドットゲインを考慮していなかったため、予測精度が悪くとして一時注目されなくなった時期もあるが、Yule-Nielsen 式²⁾のように補正パラメータを用いることで精度が改善されることから、その後、さまざまな改良モデルが提案されてきた。また、インキのベタ重ね刷りの原色を Kubelka-Munk モデル³⁾で求め、Clapper-Yule モデル⁴⁾や Yule-Nielsen モデルと組み合わせて混色された色を求めるハイブリッドな手法⁵⁾も提案されている。さらには Clapper-Yule モデルを用いて、紙内部での光の多重反射と網点の配列パターンとの相互作用を検討した例⁶⁾もある。これらはいずれも分光反射率への拡張が可能であるが、モデルの構造はかなり複雑なものになるという欠点がある。

Point Spread Function (PSF) を用いて、刷り重ねられた網点画像の光学反射像をモデル化する手法が種々検討されている^{7,8)}。この方法によれば、インキの分光透過率を考慮した網点配置パターンを表す関数と紙の PSF のコンボリューションによって任意の位置座標での分光反射率を与えることができる。さらには、網点の広がりによるエッジのぼけ（機械的ドットゲイン）と、光学的ドットゲインをもたらす多重散乱の両方をそれぞれの PSF で表す手法⁸⁾も提案されている。光散乱効果を表す PSF は紙の種類や波長に依存するため、分光反射率特性を正確に予測するには PSF を正確に求める必要があり、簡単に実現できる方法ではない。

インキのベタ刷り重ねにおける濃度の加法性が仮定できる場合、Neugebauer 式の因数分解形式である Pollak 式⁹⁾が利用できる。この Pollak 式に、光学的ドットゲインの特性データの 2 次関数近似を用いた補正網点面積比を適用して再現色の分光反射率特性を求める方法¹⁰⁾が提案されている。計算は比較的簡単であるが、予測精度があまり良いとは言えない。

これらをふまえ、本章では、第4章で構築したコア・フリッジモデルを多色印刷物に適用する方法¹¹⁾について述べ、その色予測性能を評価する。

5.2 従来モデル

通常のプロセス印刷では C, M, Y, 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 色の場合で説明する. 基本的な考え方は 4 色の場合でも同様である.

5.2.1 Neugebauer モデル

多色網点印刷の色予測モデルとして代表的な Neugebauer モデルでは, 総合的分光反射率 $\hat{R}(\lambda)$ は次式で表される.

$$\begin{aligned} \hat{R}(\lambda) = & A_P R_P(\lambda) + A_C R_C(\lambda) + A_M R_M(\lambda) + A_Y R_Y(\lambda) \\ & + A_{CM} R_{CM}(\lambda) + A_{CY} R_{CY}(\lambda) + A_{MY} R_{MY}(\lambda) \\ & + A_{CMY} R_{CMY}(\lambda) \end{aligned} \quad (5.1)$$

ここで, 右辺の $R_j(\lambda)$ ($j=P, C, M, Y, CM, CY, MY, CMY$) は, 図 5.1 のような C, M, Y 3 色の網点の重なりで生成される 8 つの領域 (通称 Neugebauer 原色と呼ぶ) の分光反射率で, 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, 以下の Demichel の関係式¹²⁾に基づき計算される.

$$\begin{aligned} A_P &= (1-a_C)(1-a_M)(1-a_Y) \\ A_C &= a_C(1-a_M)(1-a_Y) \\ A_M &= (1-a_C)a_M(1-a_Y) \\ A_Y &= (1-a_C)(1-a_M)a_Y \\ A_{CM} &= a_C a_M (1-a_Y) \\ A_{CY} &= a_C (1-a_M) a_Y \\ A_{MY} &= (1-a_C) a_M a_Y \\ A_{CMY} &= a_C a_M a_Y \end{aligned} \quad (5.2)$$

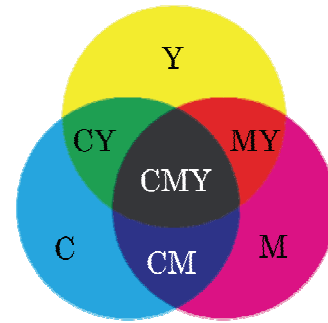


図 5.1 C, M, Y の網点の重なり

なお, N を測定波長の数とすると, 網点面積比には公称値よりも最小二乗法で最適化された実効網点面積比を次式から求めて用いる方が, より良好な予測精度が期待できる¹³⁾.

$$a_{eff} = \frac{\sum_{j=1}^N (R_t(\lambda_j) - R_p(\lambda_j))(R_s(\lambda_j) - R_p(\lambda_j))}{\sum_{j=1}^N (R_s(\lambda_j) - R_p(\lambda_j))^2} \quad (5.3)$$

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

5.2.2 Yule-Nielsen 修正 Neugebauer モデル

このモデルは単色印刷における Yule-Nielsen の補正の考え方を多色印刷に適用したもので、(5.1) 式の各分光反射率をパラメータ n で修正した次の式を用いる¹⁴⁾。

$$\begin{aligned} \hat{R}(\lambda) = & \left\{ A_P R_P(\lambda)^{1/n} + A_C R_C(\lambda)^{1/n} + A_M R_M(\lambda)^{1/n} + A_Y R_Y(\lambda)^{1/n} \right. \\ & + A_{CM} R_{CM}(\lambda)^{1/n} + A_{CY} R_{CY}(\lambda)^{1/n} + A_{MY} R_{MY}(\lambda)^{1/n} \\ & \left. + A_{CMY} R_{CMY}(\lambda)^{1/n} \right\}^n \end{aligned} \quad (5.4)$$

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 の単色階調ステップ全ての分光反射率実測値との誤差二乗和を最小化した値を用いた。

5.2.3 分光 Neugebauer モデル

Neugebauer モデルにおいて、原色の網点の面積比が波長に依存して変化すると考えに基づくもので、再現色は以下の式で表される¹⁵⁾。

$$\begin{aligned} \hat{R}(\lambda) = & A_P(\lambda)R_P(\lambda) + A_C(\lambda)R_C(\lambda) + A_M(\lambda)R_M(\lambda) + A_Y(\lambda)R_Y(\lambda) \\ & + A_{CM}(\lambda)R_{CM}(\lambda) + A_{CY}(\lambda)R_{CY}(\lambda) + A_{MY}(\lambda)R_{MY}(\lambda) \\ & + A_{CMY}(\lambda)R_{CMY}(\lambda) \end{aligned} \quad (5.5)$$

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、(5.2) 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。

$$a(\lambda) = \frac{R_t(\lambda) - R_p(\lambda)}{R_s(\lambda) - R_p(\lambda)} \quad (5.6)$$

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

である。

5.3 コア・フリッジモデルの多色印刷への適用

コア・フリッジモデルでは、C, M, Y 3色の網点を刷り重ねた場合、図 5.2 のモデル図で示すようにコアとフリッジの重なりによって 27 の異なる色領域が形成される。したがって、総合的な分光反射率は次式で表される。

$$\hat{R}(\lambda) = \sum_{k=1}^{27} A_k R_k(\lambda) \quad (5.7)$$

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、以下に示す Demichel の関係式で与えられる。

$$A_k = a_{C,l} \cdot a_{M,m} \cdot a_{Y,n} \quad (5.8)$$

網点面積比 a の添字記号 C, M, Y はインキの色を表し、 l, m, n はコア、フリッジ、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。

$$\begin{aligned} a_{C,c} + a_{C,f} + a_{C,p} &= a_{M,c} + a_{M,f} + a_{M,p} \\ &= a_{Y,c} + a_{Y,f} + a_{Y,p} \\ &= 1 \end{aligned} \quad (5.9)$$

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、フリッジ、用紙の組合せを考慮して求める必要があるが、とりわけ、フリッジを含む領域の分光反射率 $R_k(\lambda)$ は直接測定することができないため、その計算方法が鍵となる。フリッジの厚みは 4.4.3.2 の結果によれば C, M, Y ごとに異なっており、これを考慮した $R_k(\lambda)$ を用いる必要がある。また通常、インキが重なって印刷される部分では、不完全なインキ転移により、先に印刷されたインキ層の上に後から印刷されるインキが単色刷りインキ層と同じ厚さで転移することはないので、それも考慮する必要がある。それらを考慮した方法を検討した結果、手間がかかるうえそれほど良い精度が得られなかった¹⁶⁾。

そこで、Neugebauer 原色の分光反射率データのみを用いて $R_k(\lambda)$ を求めることのできる独自の方法を考えた。この方法では、フリッジの厚みはコア部の厚みの半分、すなわち $\rho = 0.5$ であると仮定した。

表 5.1 に、 $R_k(\lambda)$ の算出に用いる Neugebauer 原色の組合せを示す。表 5.1 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。

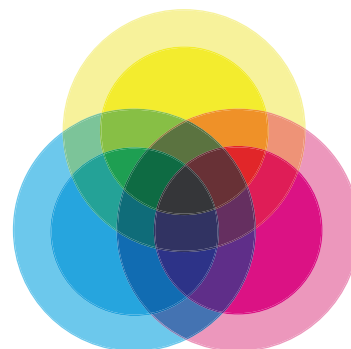


図 5.2 コア・フリッジモデルの C,M,Y の網点の重なり. 3 色のフリッジの重なりは示されていない。

表 5.1 コアとフリンジの重なりによる 27 の色領域の分光反射率計算に用いる Neugebauer 原色の組合せ

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, 表 5.1 の○印で示す Neugebauer 原色の 8 領域が相当し, 測定した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, 表 5.1 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. また, $R_p(\lambda)$ は用紙の分光反射率である.

$$R_k(\lambda) = \sqrt{R_N(\lambda) \cdot R_p(\lambda)} \quad (5.10)$$

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, 表 5.1 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.

$$R_k(\lambda) = \sqrt{R_{NA}(\lambda) \cdot R_{NB}(\lambda)} \quad (5.11)$$

5.4 実験

C, M, Y 3色の組合せで再現される色を8色の Neugebauer 原色および C, M, Y の単色階調ステップ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。

5.4.1 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色と C, M, Y の単色階調ステップ (図 5.3), およびモデルの予測性能評価用色票群 (図 5.4) 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, ブランケットは バルカン製フォリオ, インキは Japan Color 準抛の 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、商業印刷で使用される代表的用紙であるキャストコート紙, アート紙, コート紙, マット紙, 上質紙の 5 種類とし、坪量はいずれも 127.9 g/m² である。上質紙以外の用紙には平滑性を高めるための塗工剤が塗布されており、塗工剤の塗工量や表面処理の違いにより平滑性や質感, インキ受理性に違いがある。また、マット紙と上質紙については、網点形状はスクエアのみを使用した。なお、作成した試料のうち上質紙を除く 4 種類については、枚葉印刷用 Japan Color2007 の規定条件¹⁷⁾ 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 カラーデシジョン II (コニカミノルタ製) を用いて、坪量 127.9 g/m² 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。カラーデシジョン 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¹⁸⁾。

5.4.2 測定

試料の分光反射率は、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、ブラックバックキングで測定波長範囲 380~730nm, 測定波長間隔 10nm, 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、ISO13655 の方法に基づき、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。

5.4.3 モデル変数の値の決定

コア・フリンジモデルにおけるコアとフリンジの面積比, 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.



図 5.3 Neugebauer 原色 8 色と C,M,Y の単色階調ステップ

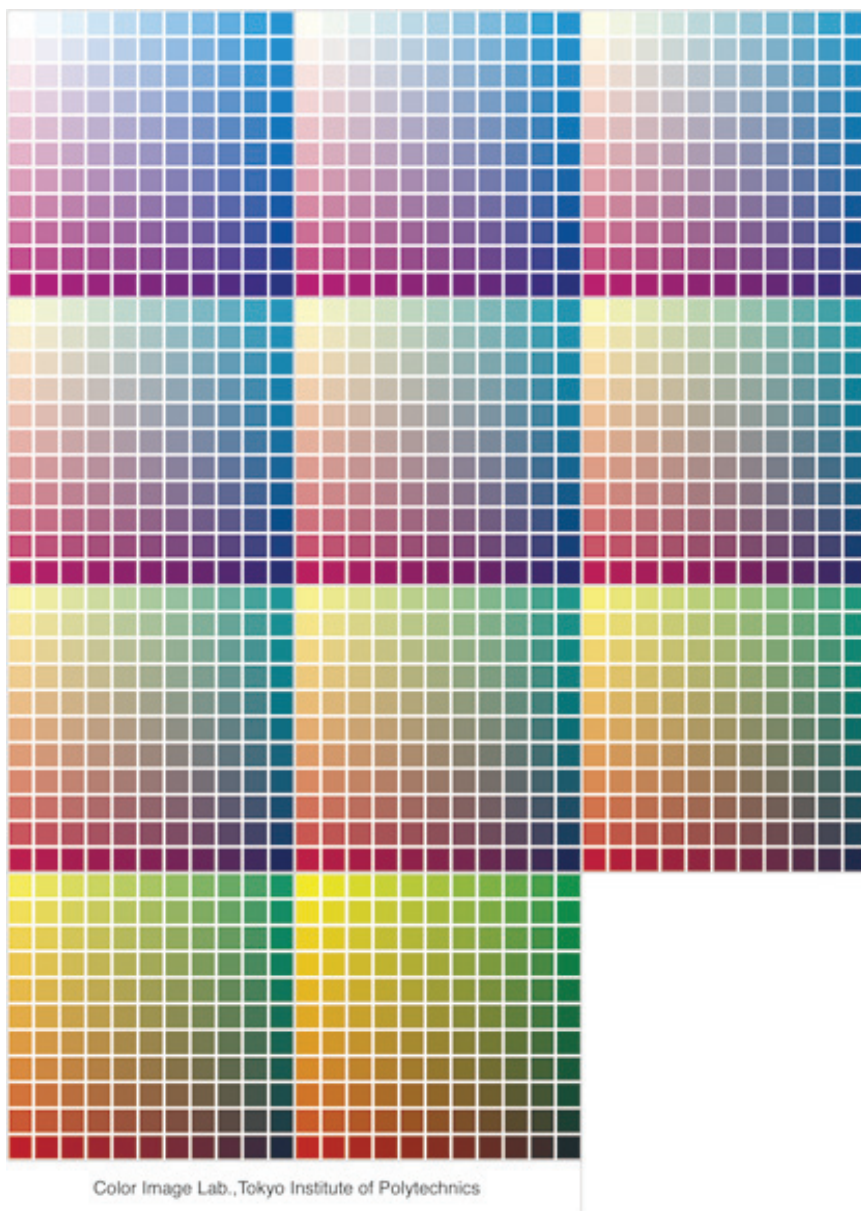


図 5.4 $11^3(=1331)$ 色からなるモデルの予測性能評価用色票群

5.5 結果

5.5.1 コアとフリンジの面積比

スクエア網点でコート紙に印刷した試料について得られた結果を例として図 5.5 に示す。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大にほぼ比例するように増大している。しかしながら、ほぼ全域にわたって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、4.4.4 で説明した方法で求めたドットゲインのグラフを一緒に示した。C, M, Y のドットゲインのグラフの形状はなだらかな変化を示し、よく似ている。

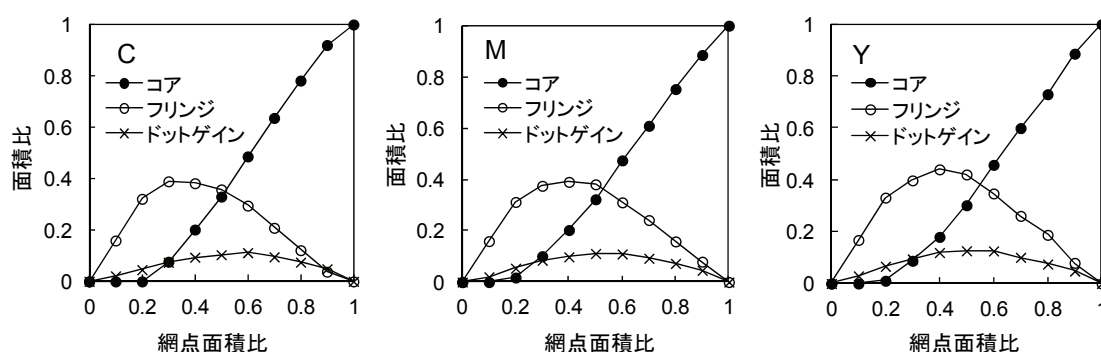


図 5.5 単色印刷試料（スクエア網点，コート紙）のコアとフリンジ面積比

5.5.2 単色印刷物の再現性

5.5.1 で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分光反射率を予測し、実測値と比較した。予測精度は CIELAB 色差で、C の場合、平均色差 0.7, 最大色差 1.3, M の場合が平均色差 0.7, 最大色差 1.1, Y の場合で平均色差 1.3, 最大色差 2.3 であった。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試料としては異なるため、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。全般に 4.4.3.2 で示した色差より大きいのは、フリンジの厚み比を 0.5 としたことが影響したと考えられる。

5.5.3 多色印刷物の再現性予測

図 5.6 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。

表 5.2 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。

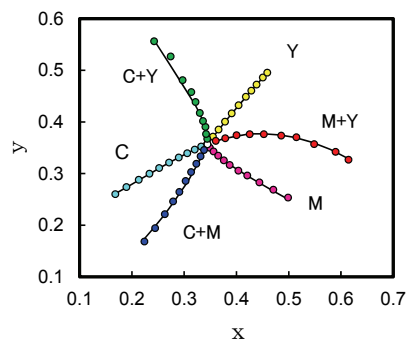


図 5.6 階調ステップの色度軌跡

表 5.2 多色印刷試料における提案手法の色予測精度

網点形状	再現条件(原色数)	キャストコート紙		アート紙		コート紙		マット紙		上質紙	
		平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大
スクエア	単色	1.1	2.3	0.9	2.5	0.9	2.3	1.1	3.4	1.0	3.6
	2色	1.4	3.7	1.3	3.9	1.3	3.6	1.4	4.4	1.3	3.3
	3色	1.5	3.0	1.5	3.6	1.4	3.1	1.3	4.2	1.4	6.4
	全体	1.5	3.7	1.4	3.9	1.4	3.6	1.4	4.4	1.4	6.4
ラウンド	単色	1.0	3.4	1.1	2.7	0.9	2.3	—	—	—	—
	2色	1.5	5.1	1.6	4.6	1.5	5.1	—	—	—	—
	3色	1.7	4.0	1.8	5.2	1.7	4.7	—	—	—	—
	全体	1.6	5.1	1.7	5.2	1.7	5.1	—	—	—	—
ラウンドスクエア	単色	1.0	3.9	1.4	2.5	1.0	2.8	—	—	—	—
	2色	1.5	3.9	1.9	4.3	1.5	3.9	—	—	—	—
	3色	1.8	4.6	2.1	4.7	1.8	4.6	—	—	—	—
	全体	1.7	4.6	2.0	4.7	1.7	4.6	—	—	—	—

3種類の網点形状と5種類の用紙の組合せに対して、いずれも平均色差は2.0以下であり、高い予測精度であった。また、網点形状の違いによる予測精度の差は少ないが、キャストコート紙、アート紙、コート紙では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。用紙の影響については、上質紙での最大色差が他の用紙に比べて若干大きい程度で、平均色差で見ると差はほとんどなかった。

5.5.4 従来モデルとの性能比較

表5.3にコア・フリンジモデルと従来モデルとの予測結果を比較して示す。網点形状はスクエアである。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、コア・フリンジ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。

表 5.3 印刷試料に対するコア・フリンジモデルと従来モデルの色予測精度の比較

予測モデル	キャストコート紙		アート紙		コート紙		マット紙		上質紙	
	平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大
コア・フリンジ	1.5	3.7	1.4	3.9	1.4	3.6	1.4	4.4	1.4	6.4
Neugebauer (実効網点面積)	2.7	5.3	2.0	4.5	2.3	4.8	2.6	5.1	2.7	5.6
Yule-Nielsen修正Neugebauer	1.3	2.2	1.4	2.5	1.3	2.3	1.5	3.2	1.3	3.5
分光Neugebauer	1.4	2.9	1.3	3.4	1.4	3.1	1.7	3.4	2.2	4.0

5.5.5 DDCP に対する色予測

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図 5.7 に示すように鮮明な網点を得られ、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、コア・フリンジモデルと従来モデルで予測性能を評価した結果を表 5.4 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 (5.6) 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 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。

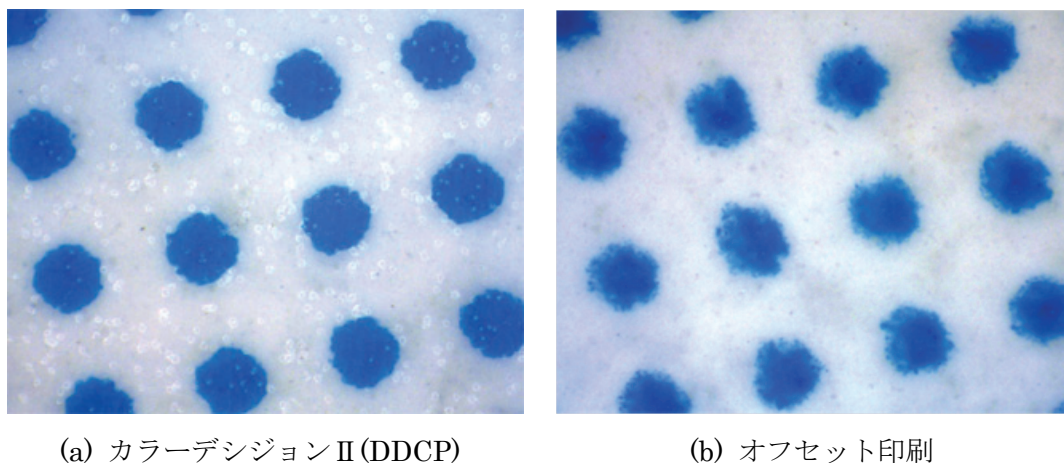


図 5.7 DDCP 試料と印刷試料の網点の比較

表 5.4 DDCP 試料に対するコア・フリンジモデルと従来モデルの色予測精度の比較

予測モデル	平均	最大
コア・フリンジ	1.3	4.5
Neugebauer (実効網点面積)	3.0	5.3
Yule-Nielsen修正Neugebauer	1.5	4.0

5.6 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とも評価の基準になる。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面からも重要である。これらの点をふまえて提案手法の結果について考察した。

5.6.1 色予測精度

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、表5.2には提案手法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程度という値は、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、印刷試料に対しては、用紙の違いによる予測精度の差がほとんどなかった。この1つの理由は網点の再現性に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された。DDCPの予測精度が印刷より高いのは網点の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。

また、5種の用紙の中で上質紙は最も散乱性が高く、表5.5に示すYule-Nielsen修正Neugebauerモデルにおけるnの値も最も高い。完全散乱の状態では $n=2$ となるので、nが2を越えているのは多重反射が起きているためと考えられる。コア・フリンジモデルを用いた提案手法は、上質紙においても予測精度が高く、散乱性の高い用紙に対しても適用可能なことが示されたと言える。

表 5.5 Yule-Nielsen 修正 Neugebauer モデルの n 値

用紙	n値
キャストコート紙	1.6
アート紙	1.5
コート紙	1.6
マット紙	1.6
上質紙	2.7

5.6.2 モデル最適化のコスト

表5.6にはコア・フリンジモデルと従来モデルの最適化に関連する項目をまとめて示す。

表 5.6 コア・フリンジモデルと従来モデルの最適化コストの比較
(N_i はインキ数, N_a は階調ステップ数, N_λ は測定波長数を示す)

予測モデル	モデル変数	変数の数	変数最適化方法	最適化に必要な試料色	予測に用いる原色
コア・フリンジ	コア, フリンジ面積比	$2N_i \cdot N_a$	反復計算	インキ単色ベタ 用紙 単色階調ステップ	Neugebauer原色
Neugebauer	実効網点面積比	$N_i \cdot N_a$	代数計算		
Yule-Nielsen修正Neugebauer	実効網点面積比, n値	$N_i \cdot N_a + 1$	反復計算		
分光Neugebauer	分光網点面積比	$N_i \cdot N_a \cdot N_\lambda$	代数計算		

コア・フリンジ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。また最適化の方法については、反復計算により最適値を求めるため多少時間がかかるが、一般的なパソコ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。最適化に必要な試料色の種類と数、および色予測に用い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 (5.6) 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。

5.6.3 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。コアとフリンジの重なり方によっては原色の組み合わせ方法が複数あるので、予測精度による吟味が必要となる。

5.7 まとめ

紙中での光散乱効果を網点構造に組み込んだコア・フリッジモデルでフリッ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た。この結果、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、マット紙、上質紙の印刷用紙 5 種の条件を組み合わせた試料条件にて、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。

また、このモデルは、パラメータであるフリッジの面積が紙中での光散乱効果と深い関係があり、光学的ドットゲインなどの網点印刷の特性を評価するのに有用である。なお、今回はフリッ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が可能であり、さらにモデルの予測性能を高められる可能性がある。

第6章 総合的考察

6.1 各章の主な成果

本研究は、大別して4つの項目からなっており、これを第2章から第5章に分けてまとめた。各章の主な成果を以下に述べる。

第2章では、まず CMY3 色のインキ量（網点面積比）の組合せによる網点印刷の再現色が、 $L^*a^*b^*$ 色空間内で規則的な色分布特性を示すことに着目し、その特性を平面モデル式により記述した。この式を利用して $L^*a^*b^*$ 値から CMY 網点面積比への変換式を導くとともに、その逆方向である CMY 網点面積比から $L^*a^*b^*$ 値への変換式も示した。この方法の特徴は、順方向、逆方向ともに簡単な代数式を用いて変換できる点である。現在普及している方法では、デバイスの特性データを記述したプロファイルを介して、計算に利用するデータの探索と補間演算を行っているが、実際にどのような変換を行うかはアプリケーションソフトや出力デバイスのドライバーソフトによって異なっていてその評価は一定していない。本研究で開発した変換方法では、 $L^*a^*b^* \rightarrow$ CMY への変換で CIELAB 空間での平均色差 2.5、CMY $\rightarrow L^*a^*b^*$ への変換では平均色差 3.0 の精度を得た。これは、従来の方式と比べても全く遜色のないレベルである。

第3章では、第2章で構築した平面モデル式がブラック (K) を含む CMYK4 色による再現色にもあてはまることを示したうえで、K の効果を CMY に置き換える方法を考案した。これにより K を含む場合には測色値としていったん等価な CMY3 色を考え、 $L^*a^*b^*$ 値から CMY 網点面積比への変換を行う。そして次の段階で CMY から CMYK への変換を行うが、この変換は 3次元空間内の1点を4次元空間内の1点へマッピングする不良設定問題であり、K を加えることで初めて発生する色の範囲を除けば、1つの $L^*a^*b^*$ 値に対してそれを再現する複数の CMYK の組が存在する。そこで通常は、何らかの制約条件を設けることで問題を解くことが行われる。本研究では、K の生成については一般に知られているアルゴリズムを使用することとして、その具体的な方法についてはふれなかった。基本的には、ある $L^*a^*b^*$ 値に対して1つの K の値を決めてしまえば、計算により CMY の値は自動的に定まる。このとき、与えられた $L^*a^*b^*$ 値を再現するという条件が保証されたまま CMY の値が決まるのが、本研究で開発した手法の大きな特徴である。前章と同様に、CMYK から $L^*a^*b^*$ 値への変換が簡単に行えることについても示し、 $L^*a^*b^* \rightarrow$ CMYK への変換では CIELAB 空間での平均色差が 3.1、CMYK $\rightarrow L^*a^*b^*$ への変換では平均色差 3.7 を達成した。

ところで、出力変換では所望の $L^*a^*b^*$ 値を実現するデバイス値を求めることが目的であるが、顧客を含めた印刷に関わる全体のワークフローでみた場合、製造側で意図した色が顧客側で再現されない状況が起こる場合がある。たとえば、顧客の環境における照明光が製造側の環境の照明光と同じであるという条件が成立していなければ、製造側が再現目標とする印刷物の $L^*a^*b^*$ 値は色の基準とはならず、意図した色が顧客側では再現されない。

このような場合、 $L^*a^*b^*$ 値で色を正確に再現するのは困難で、顧客の照明環境に柔軟に対応できる色の予測方法が必要になる。この問題の解決には、分光反射率での色の予測方法が必須である。

これをふまえ、第4章では、単色網点印刷の分光反射率特性をモデル化する方法を検討した。光の入出経路の発生確率をモデル化した3成分モデル、および、紙中での光散乱成分を網点周辺部の薄いインキ層で構成したコア・フリッジモデルの適用性を実験的に検証した。3成分モデルは非線形な色再現特性を予測できるが、その精度はあまり充分でないことが確認された。これに対し、コア・フリッジモデルは分光反射率を非常に精度良く予測でき、多色印刷の色予測にも応用可能と判断された。また、モデルの構成要素であるフリッジ部の面積比が、印刷の色の品質管理で重要なドットゲイン特性と強い相関があり、再現色の品質管理の指標となり得る可能性が示された。

第5章では、CMY3色印刷の場合を例として、コア・フリッジモデルを多色印刷に適用するための方法を考案した。この方法では、刷り重ねられた状態で発生する27色の分光反射率をNeugebauer原色8色の分光反射率の組み合わせから計算し、それ以外の色票は必要としない。予測性能を評価するため、3種の網点形状と、商業印刷で使用される5種の代表的用紙を組み合わせた条件ごとに1331色の色票を用意して予測誤差を調べた。この結果、ほとんどの条件でCIELAB空間での平均色差が1.4から1.7であった。従来の予測手法の中でも予測精度が優れていると言われるYule-Nielsen修正Neugebauerモデルや分光Neugebauerモデルと予測精度を比較した結果、ほぼ同等のレベルに達していることを確認した。網点再現性の優れたDDCP試料でも評価したところ、平均色差が1.3と極めて高い予測精度が確認され、網点品質が高い方がモデルの適用性が良いことが示唆された。

以上のように本研究により、網点印刷を対象として、 $L^*a^*b^*$ 値とCMYK網点面積比との間での代数式による相互変換方法、ならびに、光散乱を考慮した網点構造モデルを用いて多色印刷の分光反射率特性を高精度で予測する方法を確立した。

6.2 本研究の成果の有用性

第1章でも述べたとおり、デジタル化された印刷工程では、デバイスインディペンデントカラーの考え方にに基づき $L^*a^*b^*$ 色空間を介して CMYK データへの色変換が行われる。現在、色変換は ICC プロファイルを用いて行うのが一般的となっており、変換はオペレーティングシステムに内蔵、またはアプリケーションソフトに組み込まれた色管理システムが行うようになっているが、ICC プロファイルに基づいてどのような変換を行うかは色管理システムに任されており、ユーザーにとっては全くのブラックボックスと言ってよい。

本研究で開発された $L^*a^*b^*$ と CMYK の相互変換は代数式を用いて実行されるため、その変換特性は、ブラック信号の生成アルゴリズムが決まれば、一意に定まる。何より ICC プロファイルを必要とせず、変換特性はソフトに組み込まれた変換式で決定される。変換式のパラメータは、 $L^*a^*b^*$ と CMY での変換では表 2.2 に示す 27 個の数値データ、ブラックが加わった $L^*a^*b^*$ と CMYK での変換では、表 3.3 に示す 6 個の数値データがさらに必要となるだけである。必要なら変換式のパラメータを書き換え可能とすることも可能である。ICC プロファイルのように、パラメータを外部ファイルに保存しておいて、ソフトで読み出すようにしてもよい。複雑な処理も必要ないので演算コストも少なく、高速処理が可能である。演算パワーの低いマシンにも有効な方法であると考えられる。

ところで印刷会社では、最終製品の印刷を行う前に必ず、顧客に製品の仕上がり色見本であるカラープルーフを提示し、品質の確認と了解を得る。このとき使用されるカラープルーフには、インクジェットプリンタや DDCP(Direct Digital Color Proofer)が使用される。通常、印刷会社の生産現場では色温度 5000K の標準観察照明が使用されており、プルーフもその照明条件でカラーマッチング(色合わせ)されている。

しかし、顧客の照明環境は印刷会社の照明環境と異なる場合があり、印刷会社が想定した色と同じ色を顧客が見ているとは限らない。特にカラープルーフに使用される色材は印刷インキとは異なるため、照明光が変わった場合、メタメリズムからのずれにより印刷と異なる色に見える場合がある。

このような場合、本研究で提案した分光反射率の予測方法を用いれば、顧客の照明環境における色を正確に予測することができる。たとえば、プルーフの分光反射率を $R(\lambda)$ 、顧客の環境における照明光の分光分布を $S(\lambda)$ とすれば、プルーフの三刺激値

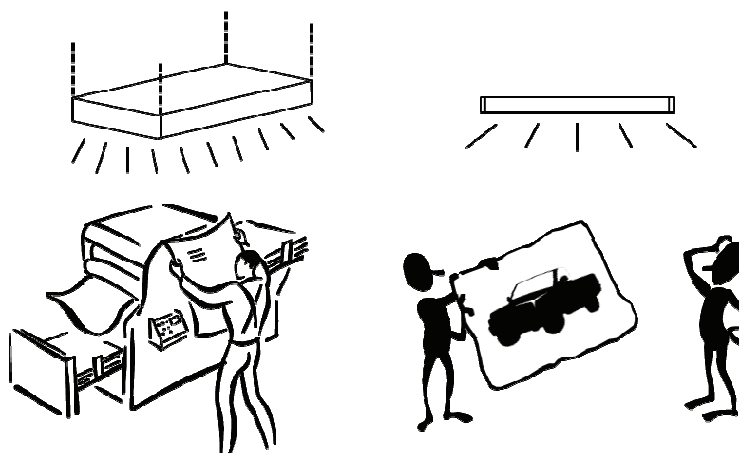


図 6.1 印刷会社(左)と顧客(右)における照明環境の違いによるメタメリズムのくずれ

X , Y , Z は以下の式で与えられる.

$$\begin{aligned} X &= K \int S(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= K \int S(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= K \int S(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda \\ (K &= 100 / \int S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda) \end{aligned} \tag{6.1}$$

ここで、 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ は XYZ 表色系の等色関数である. 同様の式を用いて印刷の三刺激値と、完全拡散反射面の三刺激値を計算し、プルーフと印刷の $L^*a^*b^*$ 値を計算すれば、両者の色差を求めることができる.

また、顧客の照明環境において、印刷の色とマッチングされたプルーフを作成するには、印刷の分光反射率をプルーフで正確に再現するか、その照明条件での印刷の三刺激値を与えるようなプルーフの分光反射率を再現すればよい. しかしながら、印刷画像に含まれるすべての色について、このような分光反射率を求めることはまず不可能であろう.

この問題を解決するには、図 6.2 に示すように分光反射率の予測方法と前述の $L^*a^*b^*$ と CMYK の相互変換を組み合わせて、以下の手順を行えばよいと考えられる. ここで、顧客の照明環境における分光分布は分かっているものとする.

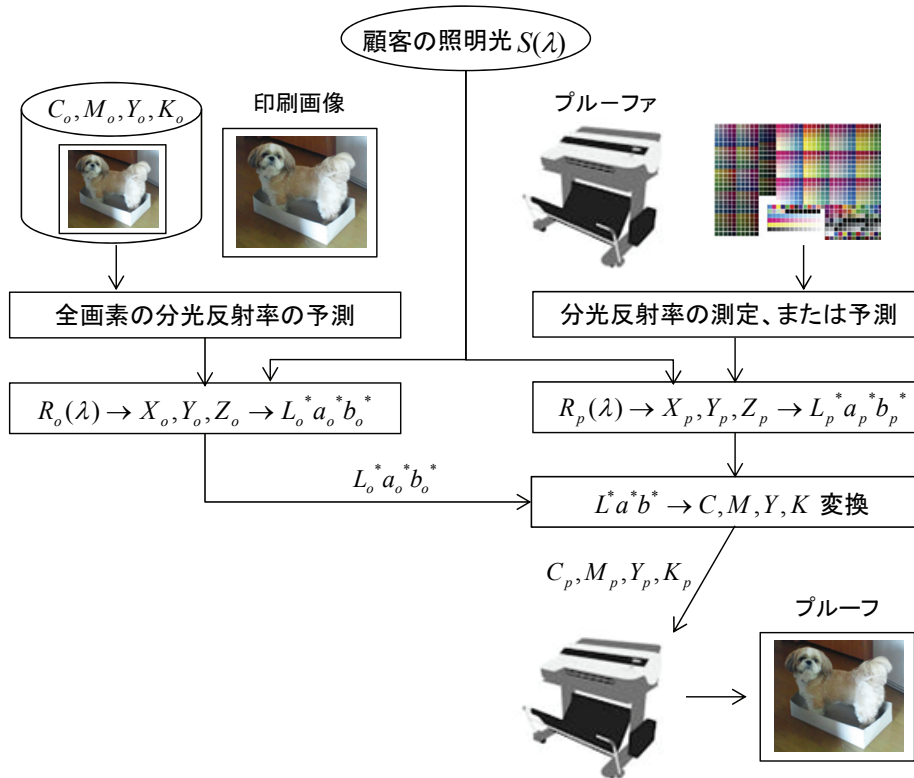


図 6.2 顧客の照明環境における印刷物の色をプルーフで再現する方法

- ① 印刷画像の全画素の分光反射率を求め、顧客の照明環境における $L^*a^*b^*$ 値を計算する.
- ② プルーフの再現色の分光反射率を求め、顧客の照明環境における $L^*a^*b^*$ 値を計算する.
- ③ プルーフにおける $L^*a^*b^*$ から CMYK への変換式を求める.
- ④ ③の変換式を用いて、①の印刷画像の $L^*a^*b^*$ 値をプルーフの CMYK 値に変換する.

以上の手順により、顧客の照明環境における印刷画像の色をプルーフで再現するための CMYK 値が得られる.

6.3 本研究の成果の他分野への応用

本研究は網点印刷を対象としたものであり、その成果は同様の網点や万線による階調再現を行うタイプのインクジェット方式や電子写真方式に対しても適用できる可能性がある. また、光の散乱現象は、FM スクリーン (Frequency Modulation Screen) を用いた印刷方式や誤差拡散などの方式で階調再現を行うインクジェット方式でも見られるので、網点でなくても適用できる可能性があり、検討が必要であろう.

6.4 本研究の今後の課題と展望

本研究で提案したコア・フリッジモデルは、単色に対しては、通常線数だけでなく高い線数でも良好な予測精度が得られた. 多色に対しては、フリッジを含む刷り重ねの部分の分光反射率を直接測定できないことから、フリッジ部分の厚みはコア部分の半分であると限定して予測を行った. 結果はかなり良好であったが、網点周辺部でのインキ膜厚の減少を考慮しフリッジ部分の厚みを薄くすることでさらに予測精度を向上できる可能性がある. 高線数での多色印刷への適用についても検討する必要があるだろう.

また、網点印刷では、網点面積が小さくなるにしたがって、インキの転移性が低下し、インキ層の厚みが薄くなる傾向がある. この点も考慮することで、さらに予測精度を向上できる可能性がある.

なお、今回のモデルでは、紙に入射した光の多重反射は考慮されていない. しかし、実際には完全散乱を越える効果が観測されており、明らかに多重反射の影響があると思われる. この点についても検討を進めることで、さらなる予測精度の向上が期待される.

第7章 結論

本研究により得られた成果を以下にまとめる。

- 1) 網点印刷を対象として、 $L^*a^*b^*$ の測色値データと CMYK 網点面積比データとの間において、代数式による相互データ変換の方法を確立した。
- 2) 光の入出経路分類に基づく光路確率モデルを用いて、分光反射率特性を記述する3成分モデルを構築し、単色印刷における色度軌跡の非線形性を説明できることを示した。
- 3) 紙中での光の散乱による効果を網点周辺部の薄いインキ層で表したコア・フリッジモデルを考案し、単色印刷の分光反射率特性を高い精度で予測できることを示した。また、印刷の色品質管理にとって重要なドットゲインの評価に応用できる可能性を示した。
- 4) コア・フリッジモデルを多色印刷に応用する方法を開発し、種々の用紙や網点形状で作成された多色印刷試料に適用して、予測精度が最も高いとされる従来方法と同等のレベルで色を予測できることを示した。
- 5) コア・フリッジモデルを多色印刷に応用した方法を用いて印刷画像の分光反射率を予測することで、照明光の分光分布特性に応じた $L^*a^*b^*$ 値を求めることができ、 $L^*a^*b^*$ 値から CMYK 網点面積比への変換と組み合わせることで、印刷画像の照明条件に応じた色をプルーフで再現できる可能性を示した。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、大学院博士課程の在学期間中、常に暖かくご指導下さった東京工業大学 内川恵二教授に心より感謝申し上げます。

また、本論文の審査にあたり、多くの貴重なご意見やご助言を戴きました東京工業大学 羽鳥好律教授、山口雅浩教授、金子寛彦准教授、国立情報学研究所 佐藤いまり准教授に深く感謝申し上げます。

東京工芸大学 犬井正男教授には、研究を進めるにあたってさまざまなご助力やご助言、激励を戴きました。厚く感謝申し上げます。

梶 光雄 東京工芸大学 元教授からは、貴重な研究資料とデータをご提供戴くと共に、データの解析方法を教えて戴きました。あらためて感謝申し上げます。

Jonathan S. Arney ロチェスター工科大学 元准教授には、米国滞在中、公私にわたって大変お世話になりました。深く感謝申し上げます。

さらに、これまで多数の印刷試料の測定を手伝ってくれた東京工芸大学 色彩画像研究室 卒業生の皆さんに感謝いたします。

このほか、研究試料の作成にご協力下さった多くの印刷会社の方々、ならびに関係企業の方々に感謝いたします。

最後に、さまざまな面で私を励まし支えてくれた妻 めぐみに心より感謝します。

皆様、本当にありがとうございました。

参考文献

第1章

- 1) ICC (International Color Consortium): Specification ICC.1:2010(Profile version (4.3.0.0) -Image technology colour management — Architecture, profile format, and data structure.
- 2) K. Kanamori and H. Kotera: Color correction technique for hard copies by 4-neighbours interpolation method, *J. Imaging Sci. Technol.*, **36**, 1, 73-80 (1992) .
- 3) 麓, 金森, 小寺, 山田, 本村, 飯川: “プリズム補間法を用いたマルチメディア対応高速カラープロセッサ”, 画像電学誌, **18**, 5, 382-393 (1993).
- 4) Po-Chieh Hung : Colorimetric calibration in electronic imaging devices using a look-up-table model and interpolations, *J. Electronic Imaging*, **2**, 1, 53-61 (1993)
- 5) J. M. Kasson, W. Plouffe and S. I. Nin: A tetrahedral interpolation technique for color space conversion, Device Independent Color Imaging Systems Integration, Proceedings of SPIE, **1909**, 127-138 (1993).
- 6) H. R. Kang: Color Technology for Electronic Imaging Devices, SPIE Optical Engineering Press (1997).
- 7) 荒井 佳文, 中野 仁貴, 伊賀 哲雄, 臼井 支朗: 3層ニューラルネットによる CIE $L^*a^*b^*$ →CMY 変換法, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J76-D-II. **5**. 967-975 (1993) .
- 8) 後藤 牧生, 田中 達哉, 南 雅範, 山本 治男: ニューラルネットワーク応用色補正システム, シャープ技報, **76**, 15-19 (2000).
- 9) C. Nakamura and K. Sayanagi: Gray Component Replacement by the Neugebauer Equations, Neugebauer Memorial Seminar on Color Reproduction, Proceedings of SPIE, **1184**, 50-63 (1989).
- 10) H. E. J. Neugebauer : *Zeitschrift fur wissenschaftliche Photographie*, **36**, 73 (1937).
- 11) M. E. Demichel: procédé, **26**, 17-21, 26-27 (1924)

第2章

- 1) JIS X 9201:2001 高精細カラーディジタル標準画像 (CMYK/SCID) .
- 2) ISO 13655:2009 Graphic technology — Spectral measurement and colorimetric computation for graphic arts images.
- 3) 日本色彩学会(編), 新編色彩科学ハンドブック第3版, 593, 東京大学出版会(2011)
- 4) ISO/TC130 国内委員会/ジャパンカラー検討委員会/一般社団法人日本印刷産業機械工業会/一般社団法人日本印刷学会: ISO 準拠ジャパンカラー枚葉印刷用 2011 解説書, 4, ISO/TC130 国内委員会 (2011).
- 5) ISO12642-2:2006 Input Data for 4-colour Process Printing Part 2.

6) 一般社団法人日本印刷産業機械工業会：Japan Color 認証制度マッチング認証オペレーションガイド Ver1.3, 17 (2012).

第3章

- 1) 梶 光雄, 大竹将治, 高橋一禎, 東 吉彦：カラー印刷物の測色的性質について, 日本印刷学会誌, **38**, 91-109 (2001).
- 2) J. A. C. Yule：Principles of Color Reproduction, John Wiley & Sons, New York (1967)
- 3) H. R. Kang: Color Technology for Electronic Imaging Devices, SPIE Optical Engineering Press (1997).

第4章

- 1) A. Murray: Monochrome reproduction in photo engraving, **221**, 721 (1936).
- 2) J. A. C. Yule, W. J. Nielsen: The penetration of light into paper and its effect on halftone reproduction, TAGA Proc., Sewickley, PA, **4**, 65–76 (1951).
- 3) F. R. Clapper and J. A. C. Yule, The effect of multiple internal reflections on the densities of halftone prints on paper, *J. Opt. Soc. Am.* **43**, 600–603 (1953).
- 4) J. A. Stephen Viggiano: The color of halftone tints. *1985 TAGA Proceedings*, 647–661, (1985).
- 5) 鈴木恒男, 田口誠一, 内田敏夫：日本印刷学会誌, **25**, 98 (1988).
- 6) 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, 69 (1999).
- 7) 井出 収：日本画像学会誌, **39**, 390 (2000).
- 8) K. Iino, R. S. Berns: Building color management modules using linear optimization I. Desktop color system. *J. Imaging Sci. Technol.*, **42**, 79–94 (1998).
- 9) K. Iino, R. S. Berns: Building color management modules using linear optimization II. Prepress system for offset printing, *J. Imaging Sci. Technol.*, **42**, 99-114 (1998).
- 10) D. R. Wyble and R. S. Berns : A Critical Review of Spectral Models Applied to Binary Color Printing, *Color Res. Appl.*, **25**, 4 (2000).
- 11) Geoffrey Rogers: A generalized Clapper–Yule model of halftone reflectance, *Color Res. Appl.*, **25**, 6, 402–407 (2000).
- 12) G. L. Rogers: Effect of light scatter on halftone color, *J. Opt. Soc. Am A*, **15**, 7, 1813-1821 (1998)
- 13) J. R. Huntsman : A new model of dot gain and its application to a multilayer color proof, *J. Imaging Technol.*, **13**, 136-145 (1987).
- 14) J. S. Arney: A probability description of the Yule-Nielsen effect, I: Tone reproduction and image quality in the graphic arts, *J. Imaging Sci. Technol.*, **41**, 6, 633-636 (1997).

- 15) J. S. Arney and M. Katsube: A probability description of the Yule-Nielsen effect, II: The impact of halftone geometry, *J. Imaging Sci. Technol.*, **41**, 6, 637-642 (1997).
- 16) Geoffrey Rogers: Optical dot gain: Lateral scattering probabilities, *J. Imaging Sci. Technol.*, **42**, 4, pp.341-345 (1998).
- 17) Yoshihiko Azuma, J. S. Arney and Jonathan S. Arney: A Three Component Model Based on Linear Color Addition in Halftones“, *J. Imaging Sci. Technol.*, **47**, 1, 60-68 (2003).
- 18) Ruckdeschel, F R, and O G Hauser: Yule-Nielsen effect in printing: a physical analysis. *Applied Optics*,. **17** , 21, 3376 -3383 (1978).
- 19) 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, 131 (1993).
- 20) 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, 3 (1983).

第 5 章

- 1) H. E. J. Neugebauer : *Zeitschrift fur wissenschaftliche Photographie*, **36**, 73 (1937).
- 2) J. A. C. Yule, W. J. Nielsen: The penetration of light into paper and its effect on halftone reproduction, TAGA Proc., Sewickley, PA, **4**, 65–76 (1951).
- 3) P.Kubelka: New contributions to the optics of intensely light-scattering materials, PartI, *J. Opt. Soc. Am.* **38**, 448-457 (1948).
- 4) F. R. Clapper and J. A. C. Yule: The effect of multiple internal reflections on the densities of half-tone prints on paper, *J. Opt. Soc. Am.* **43**, 600–603 (1953).
- 5) H. R. Kang: Computational color technology, SPIE Press (2006).
- 6) Geoffrey Rogers: A generalized Clapper–Yule model of halftone reflectance, *Color Res. Appl.*, **25**, 6, 402–407 (2000).
- 7) P Emmel and R. D. Hersch: A unified model for color prediction of halftoned prints, *J. Imaging Sci. Technol.*, **44**, 351-359 (2000).
- 8) S. Gustavson and D. B. Kruse: Evaluation of a light diffusion model for dot gain, *TAGA Proceedings*, 58 – 68. Technical Association of the Graphic Arts (1996).
- 9) F. Pollak: *J. Photogr. Sci.*, **3**, 112 (1955)
- 10) 野中通敬, 磯田真嗣: Pollak 式への分光反射率でのオプティカルドットゲイン補正項の導入, 日本印刷学会誌, **36**, 111-117 (1999).
- 11) 東 吉彦, 犬井正男, 内川恵二: 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, 日本印刷学会誌, **48**, 5, 315-324 (2011).
- 12) M. E. Demichel: procédé, **26**, 17-21, 26-27 (1924) .

- 13) D. R. Wyble and R. S. Berns : A critical review of spectral models applied to binary color printing, *Color Res. Appl.*, **25**, 4-19 (2000).
- 14) J. A. S. Viggiano : Modeling the color of multi-color halftones, *TAGA Proceedings*, 44 -62. Technical Association of the GraphicArts (1990)
- 15) 飯野浩一, Fabrice CAPIEZ : 分光 Neugebauer モデルによる再現色予測の有効性と適合条件, 日本印刷学会誌, **42**, 290-299 (2005).
- 16) 東吉彦, 犬井正男:コア・フリンジ網点モデルの適用性, 日本印刷学会第 117 回秋期研究発表会, 60-63(2006).
- 17) ISO/TC130 国内委員会/ジャパンカラー検討委員会/一般社団法人日本印刷産業機械工業会/一般社団法人日本印刷学会 : ISO 準拠ジャパンカラー枚葉印刷用 2011 解説書, ISO/TC130 国内委員会 (2011).
- 18) 前橋達一, 前島勝己, 奥沢二郎, 竹田克之 : KONICA TECHNICAL REPORT, **14**, 21 (2001).

[本研究に関する論文]

1. Yoshihiko Azuma, Mitsuo Kaji, Shoji Otake, and Jonathan S. Arney, "Evaluation of an Algebraic Technique for Colorimetric Calibration of a Printing System", *Journal of Imaging Science and Technology*, Vol. 45, No. 2, pp. 93-99 (2001) .
2. Yoshihiko Azuma, J. S. Arney and Jonathan S. Arney, "A Three Component Model Based on Linear Color Addition in Halftones", *Journal of Imaging Science and Technology*, Vol. 47, No. 1, pp. 60-68 (2003).
3. 東 吉彦, 犬井正男, 内川恵二, 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, *日本印刷学会誌*, Vol. 48, No. 5, pp. 315-324 (2011).

[本研究に関する国際会議発表]

1. Yoshihiko Azuma, Shoji Otake, Mitsuo Kaji, "Colorimetric Characteristics of the Proof Print Produced by Photographic Process and Comparison to Conventional Color Prints", *IS&T'sNIP13: International Conference on Digital Printing Technologies*, Seattle, Proceedings pp. 586-589 (1997) .
2. Yoshihiko Azuma, Kazuyoshi. Takahashi, Michitaka Nonaka, Mitsuo Kaji, "A New Approximation Algorithm for Output Device Profile Based on the relationship between CMYK Ink Values and Colorimetric Values", *Proceedings, IS&T's PICS Conference*, pp. 398-404 (1999) .
3. Yoshihiko Azuma, Hiromi Uomoto, Shunsuke Takahashi and Masao Inui, "Prediction of color in halftone prints using core-fringe model", *Proceedings of the Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision (CGIV'02)*, pp. 594-597 (2002) .

[本研究に関する国内学会発表]

1. 東 吉彦, 魚本 裕美, 犬井 正男: 単色網点印刷物の色度点の加法混色軌跡からのずれに関する考察, *日本印刷学会第 103 回秋期研究発表会*, pp. 69-72 (1999) .
2. 東 吉彦, 魚本裕美, 犬井正男, 高橋俊介: 分光反射率の主成分分析に基づくドットゲインの解析, *日本印刷学会第 104 回春期研究発表会*, pp. 100-103 (2000) .
3. 東 吉彦, Jonathan S. Arney: 確率モデルを用いたハーフトーン画像の色再現解析, *日本印刷学会第 105 回秋期研究発表会*, pp. 33-36 (2000) .
4. 高橋俊介, 犬井正男, 東 吉彦: 多色印刷物の色再現予測へのコア・フリンジ網点モデルの適用, *日本印刷学会第 107 回秋期研究発表会*, pp. 98-101 (2001) .

5. 東 吉彦, 犬井正男, 高橋俊介: コア・フリッジ網点モデルの最適化, 日本印刷学会第 107 回期秋研究発表会講演予稿集, pp. 102-105 (2001).
6. 武林征稔, 東 吉彦, 犬井正男: コア・フリッジ網点モデルの精密化 (1), 日本印刷学会第 110 回春期研究発表会, pp. 101-104 (2003).
7. 東 吉彦, 武林征稔, 犬井正男: コア・フリッジ網点モデルの精密化 (2), 日本印刷学会第 110 回春期研究発表会, pp. 105-106 (2003).
8. 東吉彦, 犬井正男: コア・フリッジモデルによる網点印刷物の色再現予測, 日本写真学会年次大会, pp. 40-41 (2004).
9. 東吉彦, 犬井正男: コア・フリッジ網点モデルの適用性, 日本印刷学会第 117 回秋期研究発表会, pp. 60-63 (2006).
10. 東 吉彦, 遠藤誠大, 犬井正男: 網点印刷物の色再現モデルの予測精度比較, 日本印刷学会第 122 回春季研究発表会講演予稿集, pp. 93-96 (2009).