

分光吸光度の演算処理に基づく電子写真画像の色再現性シミュレーションの検討

Study of a Simulation for Color Reproduction of Electrophotographic Image Based on Arithmetic Processing of Spectral Absorbance

一谷 修司* 牧野 徹**
Shuji ICHITANI Tohru MAKINO

近藤 芳昭** 原島 隆***
Yoshiaki KONDOH Takashi HARASHIMA

要旨

電子写真プロセスの変動要素をシミュレーションして生成した画像から画質評価を行う、既報のシミュレーションシステムに、定着温度や色材の差による色調の変化を、分光波長ごとの吸光度で演算して色重ねを行う色度算出部をフローに追加した。

吸光度の定着温度による変化の算出では、実測値のフィッティング曲線を用い、線形補間で任意の温度における吸光度を求める。

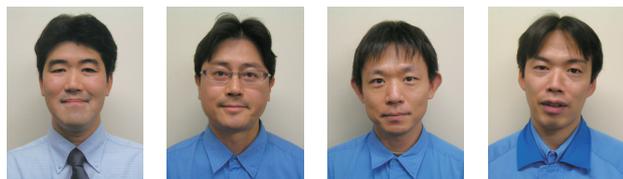
色重ねによる色度の算出には、各色の紙上の平均トナー付着量を元に、単色のグラデーションとの距離で線形補間することで、任意のトナー付着量の組み合わせの色度を計算する。吸光度演算の補正関数は、モデルトナーの各グラデーションの分光吸光度の実測値から用意される。

色度算出部の精度確認を、実測値と計算値の平均色差と、実測色域と計算色域の相関係数で評価した。色差は2.7、色域の相関係数は0.94～0.98となった。モデルトナーと分光吸光度の大きく異なるトナーでの再現性の向上が課題である。

Abstract

For treating changes in color caused by difference of fixing temperature or color material, a chromaticity calculating section to simulate color mixture by operating wavelength-specific absorbance has been added to the flow of a previously reported simulation system, which simulates fluctuation elements in the electrophotographic process and evaluates the simulated quality of image. For simulating change of absorbance influenced to fixing temperature, fitting curves to measured correlations are prepared and absorbance at any fixing temperature is calculated by linear interpolation. For simulating chromaticity in mixing colors, chromaticity in combination with arbitrary toner amount is calculated from averaged toner amount of each color by linear interpolation in the distance from the nearest gradient of the monochromatic. A correction function for the spectral absorbance of each gradient color is prepared by referring measured value of a set of model toners. The accuracy of the chromaticity calculating section was evaluated by two criteria: average color difference between measured and calculated data, and the correlation coefficients of the measured color gamut and the calculated color gamut. The former was 2.7, and the latter ranged from 0.94 to 0.98. A further challenge is to improve the accuracy of chromaticity calculation for a widely different set of toners in spectrum absorbance from the referred model toner.

執筆者



一谷修司

牧野 徹

近藤芳昭

原島 隆

* コニカミノルタテクノロジーセンター(株)
要素技術開発センター オプティカルイメージング開発室

** コニカミノルタビジネステクノロジーズ(株)
品質保証統括部 評価技術部

*** コニカミノルタビジネステクノロジーズ(株)
開発本部PP製品開発センター 第1PP製品開発部

1 はじめに

プロダクションプリント市場をターゲットとしたデジタル印刷機、オンデマンド印刷機では、オフセット印刷並みの色再現性、階調性、粒状性、先鋭性を安定して実現できることが要求される。電子写真方式において、これらの画質は、画像処理、露光、現像、転写、定着といったほぼすべてのサブプロセスが影響を及ぼすため、開発の初期段階で、各サブプロセスの画質に対する影響を確認することは、高画質、安定性、信頼性の高い製品を後戻りすることなく、効率的に実現する上で重要である。

弊社ではこれまでに、サブプロセスである画像処理、露光、現像時の物理量の変換過程を計算し、計算された感光体上のトナーの付着量分布を色度分布に対応付け、粒状性を評価する技術を確認してきた¹⁾。

今回我々は、トナーの色材や溶融状態の色再現性への影響を把握して、色再現域の設計ができるようにすることを目的として、既報のシミュレーションフローに、紙上のトナー付着量を算出する転写部と、定着温度による発色の差や使用する色材の差を、分光吸光度で与えて分光データ間の補間演算から色度を算出する色度算出部を追加した。

本報では、追加した転写部、色度算出部の計算モデルを説明し、既報のプロセスシミュレーション部との組み合わせにおいて得られた算出結果と、実画像評価との比較による精度検証結果を基に、トナー画像の溶融状態や表面反射や層内散乱に関連する計算モデルの課題について考察を行ったので報告する。

2 シミュレーション

Fig. 1 に、提案する電子写真のプロセスシミュレーション部、色度算出部、色評価部で構成されるフローを示す。

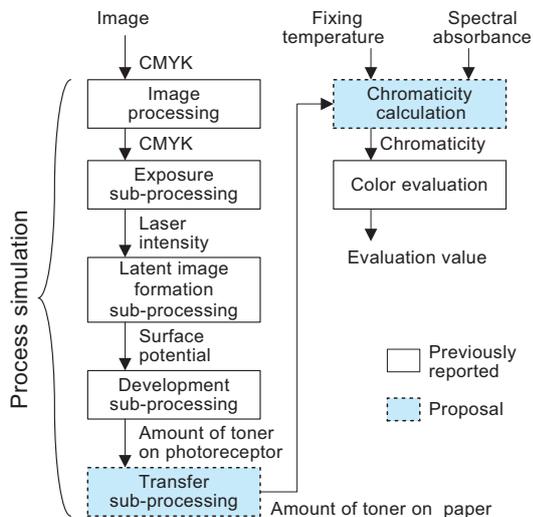


Fig. 1 Flow chart of numerical simulation-aided color evaluation. The flow chart is composed of a process simulation, a chromaticity calculation, and a color evaluation.

新規部分は、水色のハッチングで示したプロセスシミュレーション部の転写部と、色度算出部である。

2.1 プロセスシミュレーション部

プロセスシミュレーション部では、プリントする画像信号を入力し、各サブプロセスでの物理量の変換特性を模した計算を行い、計算画素ごとの紙上の各色のトナー付着量を算出する。

画像処理部では、入力された画像信号に対し、実機と同じガンマ、スクリーン処理を適用する。露光部では、レーザーパワー、ビーム径、パルス幅、及び走査速度をパラメータとして露光エネルギー分布を算出する。潜像形成部では、感光体の光放電曲線を元に表面電位分布を算出する。現像部では、表面電位と現像トナー量の関係から、感光体上のトナー付着量分布を算出する¹⁾。

転写部の処理は、Fig. 2 に示すタンデムエンジン、中間転写方式を想定し、1次転写部で発生する逆転写現象(下流色の転写ニップでベルト上の上流色トナーが感光体へ転移する現象)を計算モデルに加える²⁾。紙上のトナー付着量は、感光体から中間転写ベルトに転写する1次転写効率、中間転写ベルトから感光体に戻る1次逆転写効率、中間転写ベルトから紙に転写する2次転写効率を、Fig. 2 に示す転写フローにそって掛け合わせて算出する。ただし、1次逆転写は、感光体から中間転写ベルトに転写するトナーが存在する時は適用しない。

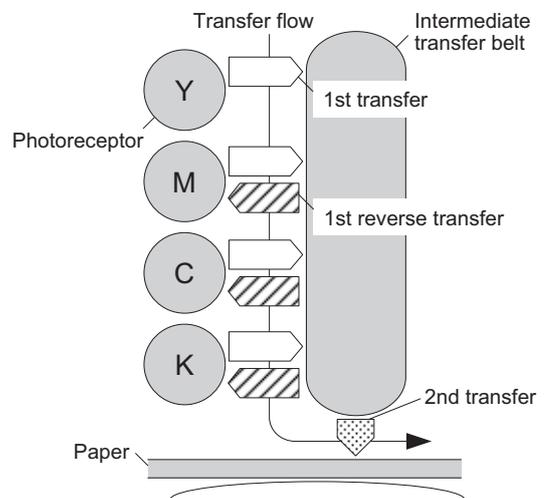


Fig. 2 Conceptual diagram of a transfer sub-process. According to the flow, amount of toner on paper is sequentially calculated by adding amount of each toner on photoreceptor multiplied by each 1st transfer efficiency, and 2nd transfer efficiency.

2.2 色度算出部

色度算出部は、面積率100%のCyan, Magenta, Yellow, Black各トナーの分光吸光度を定着温度に応じて変化させる定着部と、任意の面積率の各トナーの重ね合わせによる画像の色度を各分光吸光度間の演算結果から算出する色導出部で構成される。

2.2.1 定着部

定着部は、実機の標準定着温度での面積率100%の各トナーの分光吸光度と、任意の定着温度を入力すると、その定着温度での面積率100%の各トナーの分光吸光度を算出するものである。

Fig. 3 に評価に使用したトナー種Aを、標準定着温度から±20°C変化させたときの分光吸光度を示す。定着温度による変化は、標準定着温度での吸光度が高い波長域で大きく、吸光度が低い波長域では小さい。Fig. 4 に、同じデータを、X軸に標準定着温度での吸光度、Y軸に±20°Cでの吸光度をプロットし、プロットしたデータからフィッティング曲線を求めたものを示す。Fig. 4 から、吸光度変化の温度依存性は、波長に依らず、標準定着温度での吸光度の大きさに依存していることがわかる。

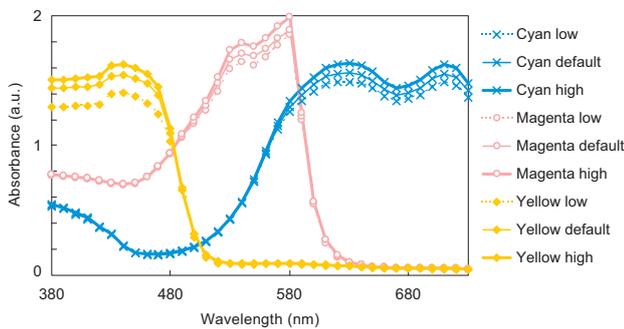


Fig. 3 Change in spectral absorbance of various toners influenced by fluctuation of fixing temperature. In the legend, "Low" shows 20 degree lower than the default fixing temperature, and "High" shows 20 degree higher.

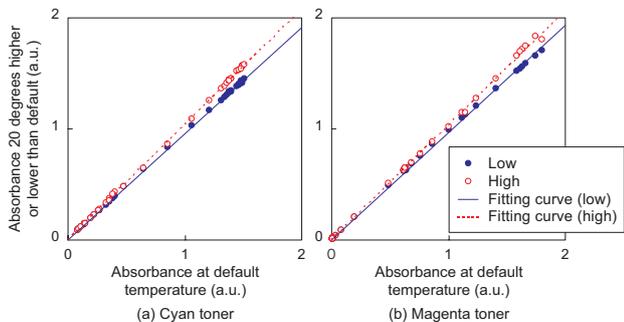


Fig. 4 Relationships of absorbance between default and different temperature of (a) cyan toner and (b) magenta toner. Plots represent measured data in lower and higher temperatures, lines represent fitting curves to measured data.

Fig. 5 に、標準定着温度の吸光度が、任意の定着温度に変化したときの吸光度を算出する概念図を示す。はじめに、標準温度の吸光度を入力し、標準温度の吸光度が、高温側と低温側に变化したときの吸光度を、各フィッティング曲線から求める。次に、任意の定着温度が、標準温度より高いか低いかを判別し、低い場合は、低温側の吸光度と標準温度の吸光度を、温度で線形補間して、任意の定着温度での吸光度を算出する。定着温度が高い場合は、高温側の吸光度を用いて、同様に算出する。

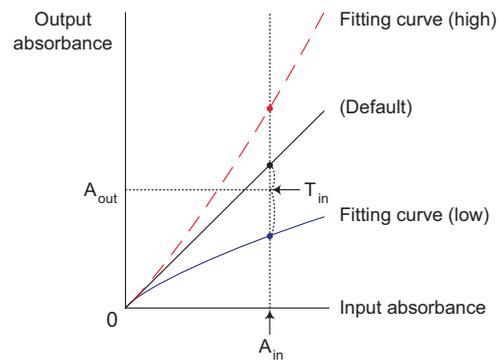


Fig. 5 Conceptual diagram for calculating absorbance at any fixing temperature. First, absorbance value is calculated from the fitting curve for the higher or the lower target of fixing temperature according to the magnitude relation between the intended and the default fixing temperatures. Second, the output absorbance is calculated between the value and the input absorbance by linear interpolation according to the ratio of temperature difference from the default.

2.2.2 色導出部

色導出部は、転写部で算出した紙上の画素ごとの各トナー付着量と、定着部で計算した面積率100%の各トナーの分光吸光度から、トナーを重ね合わせた際の色度(L*, a*, b*)を単位面積ごとに算出するものである。

色導出部では、色調の異なる色材の導入や定着溶融状態の異なるトナー樹脂にも対応するために、波長ごとに各トナーの吸光度間の演算を行い、結果として得られた分光吸光度からL*a*b*空間上の色度に変換する。合成色の演算には、スクリーンパターンやトナー粒子の凹凸など、紙上の画素ごとのトナー付着量分布に対する考慮は重要であるが、表面形状の複雑な電子写真方式によるトナー画像については、実用的な混色モデルが確立されていないため、今後の研究に委ね、単位面積あたりの各トナー付着量の平均値を入力値として、計算上必要な補正関数は、モデルとして使用したトナーの実測値から導出している。

本報では、各トナーの紙上トナー付着量の分光吸光度を、式(1)のように、波長ごとにモデルトナーの実測値と計算値の比率から導出した補正関数 $FuncI_{p,\lambda}$ を用いて表す。

$$AI_{p,\lambda} = FuncI_{p,\lambda} \left(A max_{p,\lambda} \times \frac{h_p}{h max_p} \right) \quad (1)$$

ここで、 $AI_{p,\lambda}$ は、各トナーの紙上トナー付着量の分光吸光度。 p はCyan, Magenta, Yellow, Black。 λ は波長。 $A max_{p,\lambda}$ は、面積率100%の分光吸光度。 h_p は任意の紙上トナー付着量。 $h max_p$ は、面積率100%の紙上トナー付着量。

$(h_p/h max_p)$ を0～1の正規化付着量として、各トナーで同じ正規化付着量をもつ分光吸光度を、Lambert-Beerの法則³⁾により足し合わせた例をFig. 6に示す。Fig. 6は、

Cyan と Magenta の分光吸光度，Blue の実測分光吸光度と， Lambert-Beer の法則による計算分光吸光度である。本報では，各トナーで同じ正規化付着量をもつ合成色の分光吸光度を，単色の時と同様に，式(2)のように，波長ごとにモデルトナーの実測値と計算値の比率から導出した補正関数 $Func2_{q,\lambda}$ として導出している。

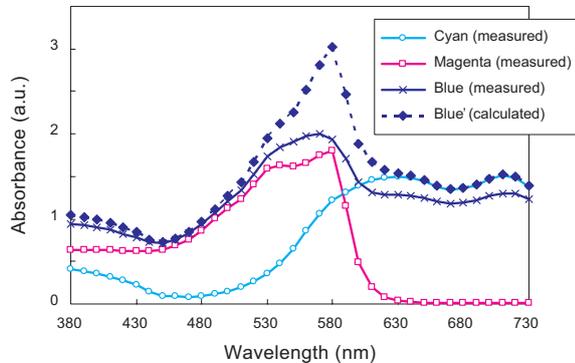


Fig. 6 Comparison of measured and calculated spectral absorbance. Cyan, magenta, and blue are the measured values for the model toner set. Blue' is the calculated value based on Lambert-Beer's law from the measured values for cyan and magenta.

$$A2_{q,\lambda} = Func2_{q,\lambda} \left(\sum_p A1_{p,\lambda} \right) \quad (2)$$

ここで $A2_{q,\lambda}$ は，同じ正規化付着量をもつトナーの組み合わせの分光吸光度。 q は，CM, CY, CK, MY, MK, YK, CMY, CMK, CYK, MYK, CMYK の 11 種類 (C, M, Y, K は，Cyan, Magenta, Yellow, Black のこと)。

次に，各トナーが異なるの正規化付着量をもつ場合の，分光吸光度の算出方法を示す。Fig. 7 は，説明を単純化するために，Cyan と Magenta の正規化付着量平面で示したもので，正規化付着量が $i_c < i_m$ の関係にある場合の例である。まず， i_m と式(1)，式(2)から， $A1_{m,\lambda}(i_m)$ ， $A2_{b,\lambda}(i_m)$ を求める。次に， i_c から式(3)の線形補間により $A3_{\lambda}(i_c, i_m)$ を算出する。

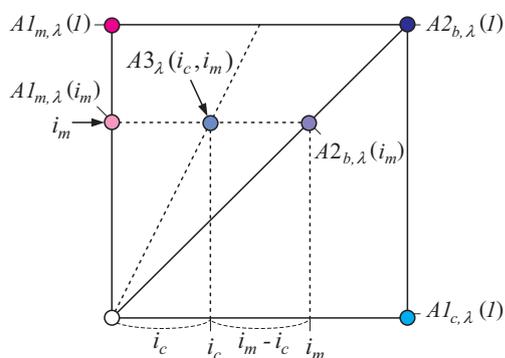


Fig. 7 Example of conceptual diagram to calculate the spectral absorbance of mixed cyan and magenta with an arbitrary combination of a normalized amount of toner for each color. First, $A1_{m,\lambda}(i_m)$ and $A2_{b,\lambda}(i_m)$ are calculated by Equation 1 and Equation 2. Then $A3_{\lambda}(i_c, i_m)$ is calculated by Equation 3.

$$A3_{\lambda} = (i_m - i_c) \times A1_{m,\lambda}(i_m) + (i_c) \times A2_{b,\lambda}(i_m) \quad (3)$$

ここで， $A3_{\lambda}$ は，Cyan と Magenta の正規化付着量が i_c, i_m での分光吸光度。

以上の計算を，Yellow と Black の正規化付着量の軸を追加した 4 次元で同様に行うことで，任意の正規化付着量を持つトナーの組み合わせでの分光吸光度を算出している。

2.3 色再現性評価

色再現性評価では，上述のシミュレーションに，Japan Color 2001 チャートの 928 色の画像を入力し，計算された L^* ， a^* ， b^* から色域情報を得て（以後，計算色域），計算色域の体積と，表面積の大きさを評価する。

Fig. 8 に，計算色域と，Japan Color 2001 チャートの規格値から計算した色域（以後，ターゲット色域）を示す。計算色域がターゲット色域をカバーしている割合を評価するために，式(4)のように，ターゲット色域の体積と，両色域の共通体積の比を，体積カバー率として評価した。同様の比を，式(5)のように，表面積で算出したものを表面積カバー率とする。体積カバー率，表面積カバー率は，単純に体積，表面積を広げることだけでは評価できない，ターゲット色域をカバーしているかどうかを確認することができる⁴⁾。

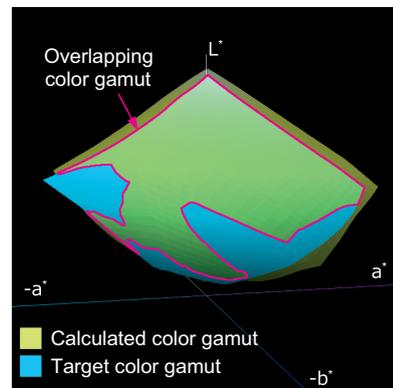


Fig. 8 Three-dimensional graph presenting relation between calculated color gamut and target color gamut. Overlapping color gamut is an intersection of the calculated and the target color gamuts. Coverage is the ratio of the overlapping color gamut to the target color gamut.

$$Volume\ Coverage = \frac{V_{Overlap}}{V_{Target}} \times 100 \quad (4)$$

$$Surface\ Coverage = \frac{S_{Overlap}}{S_{Target}} \times 100 \quad (5)$$

ここで， V_{Target} ， S_{Target} は，Japan Color 2001 チャートの規格値から算出したターゲット色域の体積，表面積。 $V_{Overlap}$ ， $S_{Overlap}$ は，図中の計算色域が，ターゲット色域をカバーしている部分の体積，表面積。

3 検証方法

上述のシミュレーションを用いて、定着部、色導出部のブロックごとの検証を行った。Table 1 に検証条件を示す。

定着部の検証では、面積率100%の紙上トナー付着量設定が標準状態で、定着温度を3条件に変化させたもので、定着温度による影響をフィッティングした。色導出部の補正関数の導出は、標準定着温度で行った。シミュレーションは、上記パラメータを用いて、異なるトナー付着量設定で定着温度が変化した際の色度を算出した。

色導出部の検証では、トナー種Bの標準の紙上トナー付着量設定で、色導出部の補正関数の導出を行い、トナー種Bで異なる紙上トナー付着量設定時と、色材の異なるトナー種C, Dの各紙上トナー付着量設定時の色度を算出した。

精度の確認は、Japan Color 2001のチャートを、各条件で実際にプリントし測色した実測値と、シミュレーションにより求めた計算値から、Japan Colorの928色の色差(ΔE_{00})の平均値を求めた。また、実測値、計算値それぞれで、色域の体積、表面積、体積カバー率、表面カバー率を求め、相関係数を求めた。カバー率算出時のターゲット色域にはJapan Color 2001コート紙の規格値を用いた。

また、総合的な検証として、定着部、色導出部のすべての計算結果から、同様の平均色差、相関係数を求めた。

Table 1 Verification conditions.

No.	Simulation item	Fixing temperature difference (°C)	Toner type	Maximum toner amount	Note (referred condition for fitting)
1	Fixing temperature	-20°C	A	Low	Fixing temperature part: No.4,5,6 Color material part: No.5
2		0°C			
3		20°C			
4		-20°C		Default	
5		0°C			
6		20°C			
7		-20°C		High	
8		0°C			
9		20°C			
10	Color material	0°C	B	Low	Color material part: No.11
11				Default	
12				High	
13				Low	
14				Default	
15				High	
16				Low	
17				Default	
18				High	

4 検証結果

検証結果を、Table 2 に示す。平均色差は、約2～3で、色導出部が定着部より悪かった。相関係数は、色域の体積、表面積、体積カバー率で0.95以上の相関を示し、表面カバー率のみ0.91～0.95となった。

Fig. 9 に体積カバー率と、表面積カバー率の実測値と計算値との相関図を示す。どちらの相関図も傾き1の直線に近いことから、ターゲット色域と比較したカバー率は、実測に近い値（体積カバー率は実測よりやや大きめな傾向）に計算されたことがわかる。また、実測値、計算

値ともに、体積カバー率の変化範囲より、表面積カバー率の変化範囲が広がった。これは、体積カバー率より、表面積カバー率の方が、色域の変化の影響が現れやすい評価項目であることを示している。

Table 2 Verification results.

Simulation item	Averaged color difference (ΔE_{00})	Correlation coefficient			
		Gamut volume	Gamut surface area	Gamut volume coverage	Gamut surface area coverage
Fixing temperature	2.26	0.97	0.96	0.99	0.95
Color material	3.19	0.99	0.99	0.97	0.91
Total	2.72	0.98	0.97	0.98	0.94

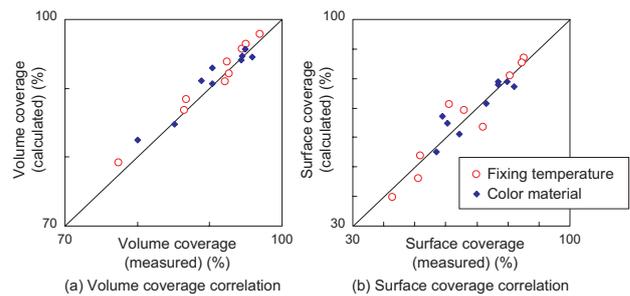


Fig. 9 Correlation diagram of calculated coverage to measured coverage: (a) volume coverage correlation, and (b) surface coverage correlation.

定着部のシミュレーション結果の例として、標準より低い紙上トナー付着量設定で、定着温度を3条件に変えたときの色域のa*-b*平面投影図をFig. 10 に示す。投影図からわかるように、定着温度が高いほど実測値のC*が広がる傾向が、計算値でも再現された。

色導出部のシミュレーション結果の例として、Fig. 11 に、標準トナー付着量設定でトナー種を変化させた Yellow, Magenta, Cyan, Red, Green, Blueのa*-b*平面投影図を示す。Fig. 11 の2次色の結果からわかるように、色域形状が、トナー種B, Cと大きく異なるトナー種Dで計算値と実測値の乖離が大きかった。色導出部の補正関数はトナー種Bで設定したため、色域形状が大きく異なるトナー種Dでは、補正関数が適合しなかったことが考えられる。

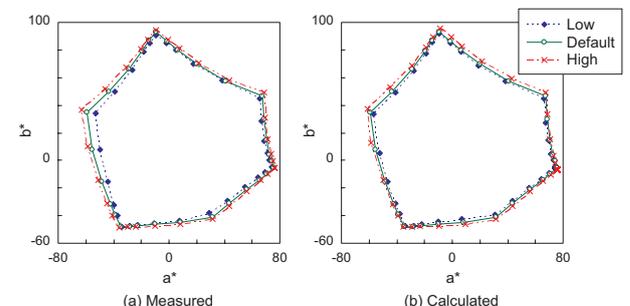


Fig. 10 Result of validation for influence of fixing temperature to color gamut volume in a condition of lower amount of toner: (a) measured projection view to a*-b* plane, (b) calculated projection view to a*-b* plane.

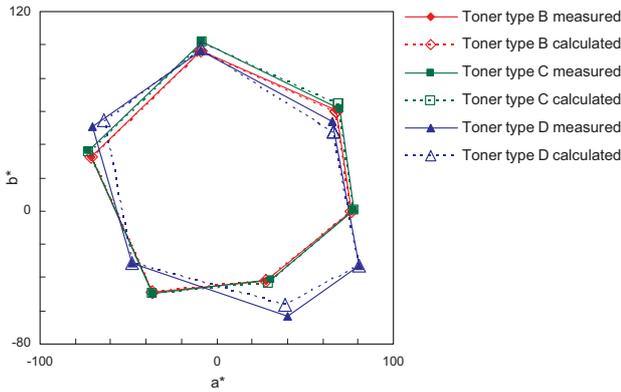


Fig. 11 Result of validation for influence of toner type with different spectral absorbance to color gamut in a projection view to a^* - b^* plane. Toner types B and C resulted in good agreement to the measured gamut. Toner type D resulted in a larger difference between measured and calculated gamuts.

5 考察

色導出部のトナーを重ね合わせた際の分光吸光度が実測値と計算値で乖離する例として、Fig. 12 に、トナー種 B, C, D の Blue の実測値と計算値の分光吸光度を示す。Fig. 12 からわかるように、トナー種 D はトナー種 B, C とは分光吸光度が大きく異なっており、特に 550 nm 以上の波長域で計算と実測の差が大きかったことがわかる。これはトナー種 B で導出した波長ごとの補正関数の補正量が大きかったため、分光吸光度が異なっているトナー種 D に対しては、適切な補正量とはならず、計算値が実測から乖離したと考えられる。今後、補正関数の波長依存性や吸光度依存性の傾向を分析し、実際には凹凸のあるトナー画像の表面反射や層内拡散と関連があるか解析することが必要である。

一方、定着部で、定着温度による分光吸光度の変化を、波長に依らない吸光度の関数として導入できたのは、定着温度により色材層表面が変化し、散乱や反射のジオメトリックな影響を受けたことが示唆される。

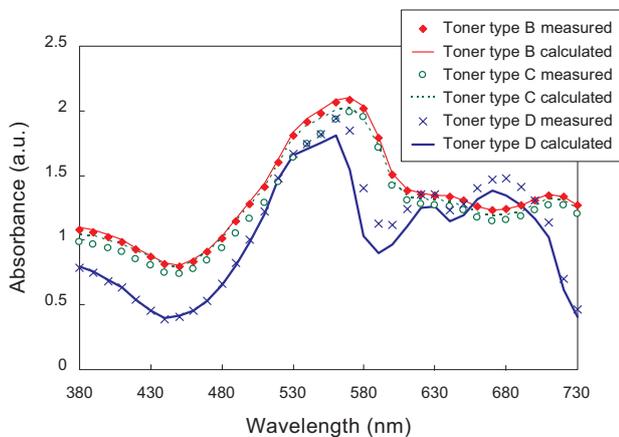


Fig. 12 Comparison of spectral absorbance of blue (cyan + magenta) among toner types B, C, and D. In toner D, calculated spectral absorbance differed from the measured spectral absorbance in the region of wavelengths above 550 nm.

6 まとめ

本報では、既報のシミュレーション評価フローに、転写部と、定着温度による発色の差や使用する色材の差を分光波長ごとの吸光度間の演算により色度を算出する色度導出部を追加し、色再現性の観点で精度確認を行った。平均色差は約 2 ~ 3、色域の評価値は、体積カバー率、表面積カバー率のいずれにおいても相関 0.9 以上となり、開発初期段階での傾向把握や関連因子の探索には適用可能な感触を得た。

トナー色材の差を補正するために導入した補正関数は、色材の分光吸光度の差が大きい場合に実測値と計算値の乖離が大きかった。今後は、補正関数の波長依存性や吸光度依存性の傾向を分析し、トナー画像の表面反射や層内拡散との関連を解析することで、電子写真トナー画像の色再現メカニズムに適合した、重ね合わせモデルの立案につなげたい。

●参考文献

- 1) 伊藤, 牧野, 梅津, KONICA MINOLTA Tech. Rep., Vol. 5, 50-56(2008)
- 2) 酒向, 第61回, 日本画像学会技術講習会, 163-172.
- 3) 日本色彩学会編, 新編 色彩科学ハンドブック, 562(1998)
- 4) 近藤, 牧野, 石毛, Imaging Conference Japan 2012 論文集, 217-220.