

# 電子写真における1DCAEモデルの開発と 画像シミュレーションへの応用

Development of 1DCAE Model for Electrophotography, and Application to Numerical Simulation

畔柳 祐一\* 藤原 康司\* 大島 亮\*  
Yuichi KUROYANAGI Kouji FUJIWARA Ryo OSHIMA

## 要旨

電子写真方式の製品開発では、製品機能を仮想的に評価するコンピューターシミュレーションが広く活用されている。我々はシミュレーションをさらに効果的に活用すべく、電子写真方式の1DCAEモデルの開発を進めている。1DCAEは製品開発プロセスの初期において、複数の機能を総合的に評価するシミュレーションの手法である。我々は1DCAEモデルの設計フローを定義し、電子写真プロセスの1DCAEモデルを開発した。本稿では、開発した1DCAEモデルの一例と、1DCAEモデルの画像シミュレーションへの応用について述べる。

いくつかの機能からなる定着部を適切にモデル化するために、設計フローに従い、定着部の機能を分解し、1DCAEモデルを構築した。構築した1DCAEモデルの妥当性を確認するため、従来から実績のある2次元シミュレーションと紙温度の比較を行った。1DCAEモデルによる連続通紙時の紙温度は従来の手法を再現し、かつ、短時間化できたことを確認した。

さらに、これらの電子写真方式の1DCAEモデルを、入力情報から出力画像を予測する画像シミュレーションの各処理プロセスに組み込んだ。その際、関連するプロセス間で1DCAEモデルのパラメーターや出力情報を共有することで、相互影響を加味した結果が得られる。1DCAEモデルを組み込んだ画像シミュレーションを用いて、転写部の部品の物性値を変更して転写効率と出力画像品質を評価した。転写効率は実験と同一傾向に変化し、画像品質の変化も見られ、1DCAEモデルを組み込むことの有効性が確認できた。

このシミュレーションの精度や機能をさらに向上させ、製品開発に積極的に活用することで、製品品質の向上や製品開発における環境負荷低減、お客様への価値提供などさまざまな効果が期待できる。

## Abstract

In the development of electrophotographic products, the virtual evaluation of product functions through computer simulation is in wide use. We are developing 1DCAE (one-dimensional computer aided engineering) models for electrophotography. 1DCAE is a simulation method of comprehensively evaluating multiple functions in the early stages of product development. Presented here is an example of the development of a 1DCAE model and its application to numerical simulation.

In our design flow, we deconstructed fixing unit functionally and constructed a 1DCAE model. To confirm the validity of the constructed 1DCAE model, we compared paper temperatures using two-dimensional simulation. This confirmed the ability of our 1DCAE model to successfully both reproduce the results of conventional methods and to shorten the time to obtain those results.

Further, we applied 1DCAE models of electrophotography to each process of the numerical simulation used to predict output image from input information. Using these 1DCAE models in numerical simulation, we evaluated transfer efficiency and output image quality by changing the physical property values of the first stage of the transfer process. Experimental values exhibited the same tendencies of variation as actual transfer efficiency, variations in image quality were observed, and the effectiveness of employing 1DCAE models was confirmed.

By further improving the accuracy and functions of such simulations, and by actively utilizing them in product development, product quality can be improved, the environmental burden in product development can be lightened, and greater value to customers can be provided.

\*情報機器開発本部開発イノベーションセンター CAE推進部

## 1 はじめに

電子写真方式によるMFPやプロダクションプリント機の製品開発において、シミュレーションが広く活用されている。求める機能の検証にシミュレーションを用いることで、実験の準備や作業にかかる期間の短縮やコスト削減が見込まれるほか、観察や測定が困難な現象を評価できるからである。我々はシミュレーションをさらに効果的に活用すべく、製品開発初期の段階に適用可能な1DCAEモデルの開発を進めてきた。本稿では開発した1DCAEモデルの事例を紹介する。

また、我々は入力画像と製品機能仕様から出力画像の濃度分布や色再現性を推定し評価する画像シミュレーションを開発してきた。構築した1DCAEモデルを画像シミュレーションにおける画像情報の変換処理に応用した例を報告する。

## 2 電子写真における1DCAEモデルの開発事例

### 2.1 電子写真におけるシミュレーション

電子写真プロセスの技術開発に用いられるシミュレーションの多くは有限要素解析に代表されるような対象物や対象の空間を2次元や3次元に離散化して計算する手法である。この手法は実物の形状を模擬しているため、注目箇所の可視化や詳細な評価ができる点で優れている。一方で、開発初期の技術検討では様々な条件で計算することが求められるため、解析モデル作成や計算処理に長時間を要し、シミュレーションのメリットを十分に生かすことができないことがある。また、電子写真においては、各プロセスに関わる現象や制御が複雑に絡み合うため、それらの相互影響を加味したシミュレーションは大規模かつ複雑になり、計算時間が膨大になるなど、シミュレーションが活用できない場面がしばしばある。

近年、シミュレーションの手法の1つとして、1DCAEが注目されている。1DCAEとは対象の機能に注目し、構成するパラメーターと入出力の関係を物理法則や実験データをもとに数式化（モデル化）して計算する手法である<sup>1)</sup>。機能をシンプルに表現することで、複数のモデルの連携が容易になり、製品開発初期において機能の成立性の検証を行う際にも、複数プロセスの相互影響による不具合等の抽出が可能になる。今回、我々は製品開発におけるシミュレーションの活用範囲を拡大すべく、電子写真プロセスの1DCAEモデルを構築した。

### 2.2 1DCAEモデルの設計フロー

1DCAEモデルは構成要素であるコンポーネントや、それらを組み合わせたサブシステムを適切に設計することで、複雑なモデルの連携や他モデルへの流用が可能となる。我々は1DCAEモデルを構築するにあたり、Fig. 1に示す設計フローを定めた。初めに開発対象とするユニットやプロセス、技術課題について、それを構成する

機能に分解し、機能単位で1つのモデル（基本モデル）を定義する。次に機能を物理法則や実験式に細分化し、係わる部材やパラメーター、入出力情報を明確にする。この物理法則や実験式が1つのコンポーネントとなる。これらの入出力情報を連結したブロック図を作成し、情報や機能の過不足を確認したうえで、各コンポーネントおよびサブシステムの実装に移る。

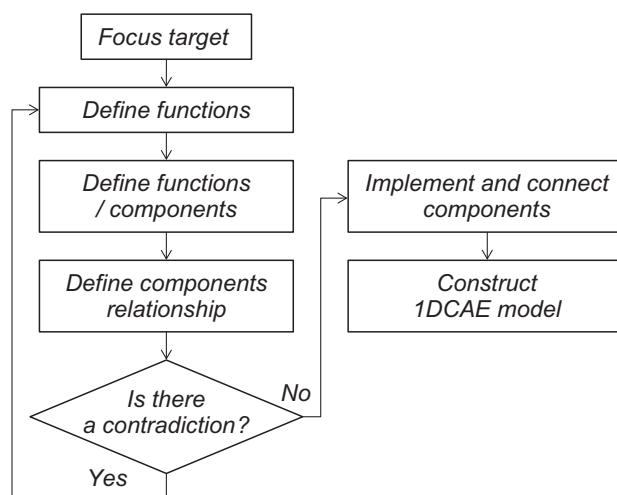


Fig. 1 Design flow in the development of a 1DCAE model. This allows proper design of a 1DCAE model of a complicated system.

### 2.3 定着部のモデル化

ここでは定着部を例に挙げる。我々はまず定着部の機能を分解し、6つの基本モデルを定義した。定着部の機能とは、「取り込んだ紙と紙上のトナーとを密着させながら熱を加え定着し、紙を送り出す」ことである。この機能を分解すると、1. トナーを密着させる「圧力」、2. トナーに熱を与える「伝熱」、3. トナーが溶ける「熔融」、4. ベルトや紙を送る「搬送」、5. ベルトから紙を引き離す「分離」、6. 熱の伝達や紙の挙動に影響する「気流」と表現できる（Fig. 2）。それらを基本モデルとして構築し、相互に連携させることで定着部の1DCAEモデルを構築した。

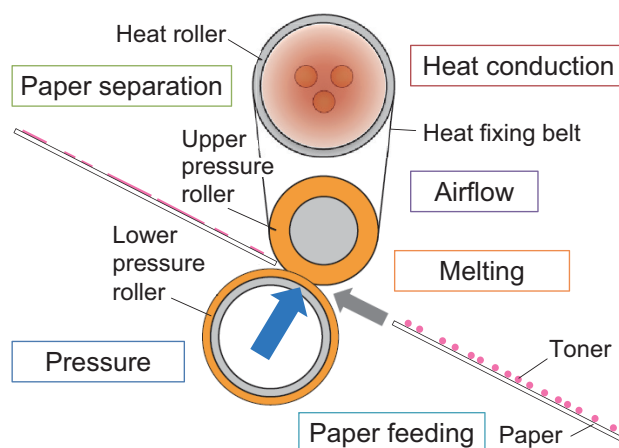


Fig. 2 Six functions composing the fixing process. Models of these six functions are coordinated to construct a 1DCAE model of the fixing unit.

## 2.4 定着ニップ部の熱伝導

定着ニップ部の熱伝導について、6つの基本モデルから、伝熱モデルと圧力モデルを例に述べる。定着部で考慮する必要がある伝熱機能を、ヒーター部による発熱、定着部を構成するローラーやベルトの内部への熱伝導、周囲の空気への放熱（熱伝達）、定着ニップ部など接触を介した熱伝導、ローラーの回転やベルト搬送の運動による熱移動と定義し、これらの伝熱モデルを作成した。

例えば、伝熱モデルにおいて、定着ニップ部のベルトと紙との接触における熱移動 $Q_c$ は、一般的に式(1)で表される。

$$Q_c = \frac{1}{R_c} (T_{\text{belt}} - T_{\text{paper}}) \quad (1)$$

ここで $R_c$ は部材間の接触熱抵抗であり、実験的に求められる。また、接触熱抵抗は接触部に仮想的な厚さの空気層があると見なして、式(2)で表される。

$$R_c = \frac{D_v}{KA} \quad (2)$$

$K$ は空気の熱伝導率、 $A$ はニップ幅、 $D_v$ は空気層の仮想厚さを表す。空気の仮想厚さは紙の凹凸によって異なり、Fig. 3に示すように、紙のベック平滑度と相関が得られている。一方、ニップ幅はニップを形成するローラーの変形によって決まるため、圧力モデルにて求めた値を用いる。

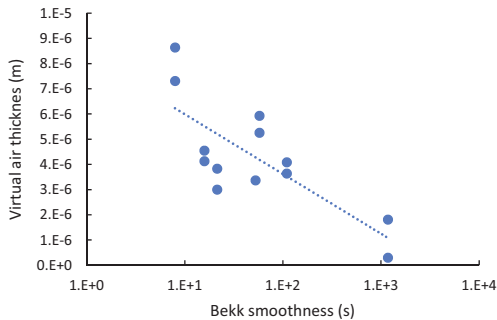


Fig. 3 Correlation between Bekk smoothness and virtual air thickness. Using this correlation, virtual air thickness  $D_v$  is determined from the roughness of the paper to obtain contact thermal resistance  $R_c$  in Equation (2).

圧力モデルにおいて、定着ニップ幅を求める構成則には、ヘルツの公式を適用した。接触長さ $L$ 、半径 $R_1$ 、 $R_2$ の2つの円柱を垂直荷重 $W$ で押しつけた際の平面ひずみのニップ幅 $A$ は式(3)で求められる。

$$A = 4 \sqrt{\frac{R_1 R_2 \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) W}{(R_1 + R_2) \pi L}} \quad (3)$$

ここで $E_1$ 、 $E_2$ は定着ニップを形成するローラーのヤング率、 $\nu_1$ 、 $\nu_2$ はポアソン比である。ローラーの剛性は温度の影響を受けるため、伝熱モデルとの連携により剛性を決定している。このように機能モデル間で必要な情報を互いに受け渡ししながら熱伝導を解く。

## 2.5 1DCAEモデルの妥当性

構築した1DCAEモデルの妥当性を検証するために、紙通過による定着ニップ温度の変化について、社内で実績のある2次元解析との比較を行った。

Fig. 4は有限要素解析による2次元の簡略化した定着部のモデルである。加熱ローラー内のヒーターが発熱し、ベルトへの熱伝達とベルト搬送からなる熱移動により、上下の加圧ローラーで挟まれたニップ部に熱が伝えられる。ここに紙が通ると紙に熱が伝わる。ベルト温度は温度センサーにて検知し、温度に応じてヒーターのON/OFFを制御する。

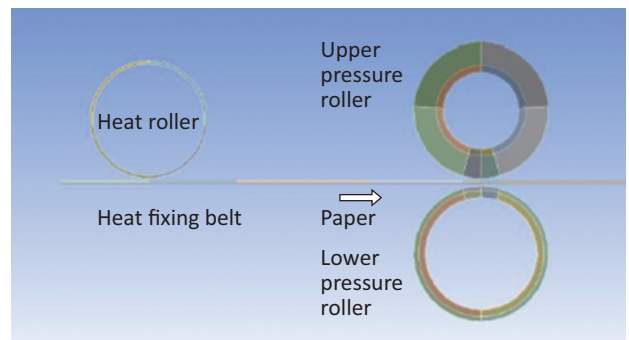


Fig. 4 Simple two-dimensional fixing process model by FEA (finite element analysis).

この2次元解析モデルと同様の計算を行う1DCAEモデルの伝熱機能のブロック図をFig. 5に示す。実線矢印は熱の移動を表す。部材間の熱の移動は先述の接触を介して熱が伝わる。また、周囲の空気にも同様に熱が伝わる。空気への熱の移動は空気との熱伝達係数によって決まる。熱伝達係数は周囲の空気の流れによって変化するため、気流モデルによって流速を求め、決定した。

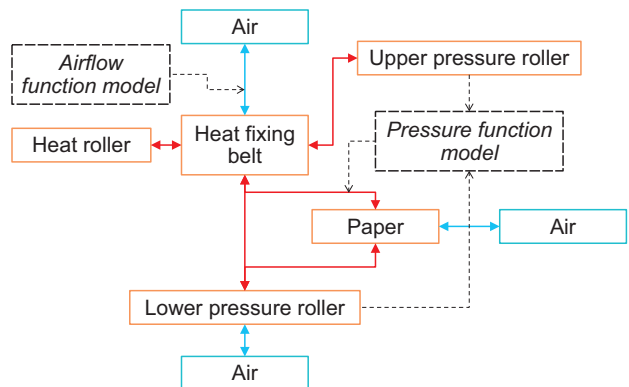


Fig. 5 1DCAE model of fixing nip heat transfer function. Heat transfer among parts is calculated by the fixing nip heat function in conjunction with pressure and airflow function models.



これらのモデルを用いて、温度センサーによる温調温度200℃における連続通紙時の用紙温度を計算した。Fig. 6は紙毎の定着通過後最大温度について、両モデルの相関図を示している。両モデルの用紙温度のずれは最大2.6%とほぼ一致しており、1DCAEモデルで2次元解析を代用できることを確認した。また、計算時間は2次元解析がおよそ60分を要したのに対し、1DCAEでは2分ほどと1/30となり、大幅に短縮された。我々は定着部以外も同様に1DCAEモデルへの置き換えを進めている。

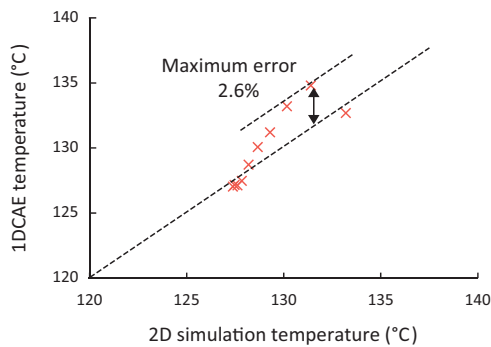


Fig. 6 Correlation of maximum paper temperature during continuous paper feeding.

### 3 画像シミュレーションへの1DCAEモデルの適用

#### 3.1 画像シミュレーションとは

我々は以前から、入力画像と機能仕様から出力画像品質を推定するシミュレーター（画像シミュレーション）を開発してきた<sup>2)</sup>。入力画像情報に対し、電子写真の各プロセスにて発生する、色ずれやトナーの付着むら等の画像劣化を推定し、出力画像の濃度分布や色再現性等の品質を予測し、評価するものである。画像シミュレーションは開発初期の製品仕様検討時に出力画像の評価に活用される。

#### 3.2 従来の画像シミュレーションの課題

従来の画像シミュレーションの処理フローをFig. 7に示す。入力された画像情報について、各プロセスでは入出力特性を利用し、他の物理量への変換処理を行う。例えば1次転写部の入出力特性は転写効率であり、これを用いて感光体上から転写ベルト上へとトナーの付着量を変換する。この転写効率は、製品機能仕様として想定する値が用いられる。ただし、従来の画像シミュレーションには内部に物理現象を解く計算処理は含まれておらず、その転写効率を満たすための設計検討には有効でない。そこで我々は画像シミュレーションを設計検討においても有効に活用すべく、さらにはプロセス間の相互影響も考慮すべく、画像シミュレーションの各プロセスに対し、機能をモデル化した1DCAEモデルを組み込み、機能を構成するパラメーターに応じて画像情報の変換が行われるよう変更した。

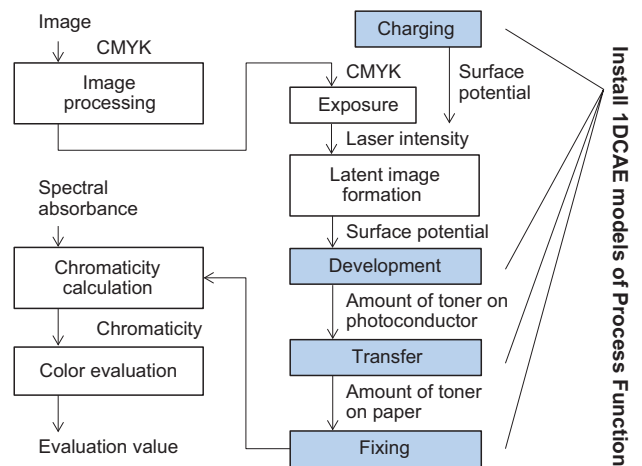


Fig. 7 Numerical simulation.

Blue rectangles indicate process functions that employ 1DCAE models instead of conventional models.

#### 3.3 1DCAEモデルによる入出力特性の変換

Fig. 8は画像シミュレーションの1次転写プロセスに使用した1DCAEモデルのブロック図である。以下に処理を説明する。

入力画像は露光部と現像部を経て、感光体上のトナー量として1次転写部に入力される。2色目以降であれば、上流色からも中間転写ベルト上トナー量が同様に入力される。出力はベルト上のトナー量となる。入出力の変換処理として、1次転写条件に従って、感光体とベルトに挟まれたトナー部にかかる電界強度を計算する。それによるクーロン力と、感光体の付着力とのつり合いからベルト上に移動するトナー量を求める。得られたベルト上トナー量は、1次転写部の出力として、次の転写部へと渡す。

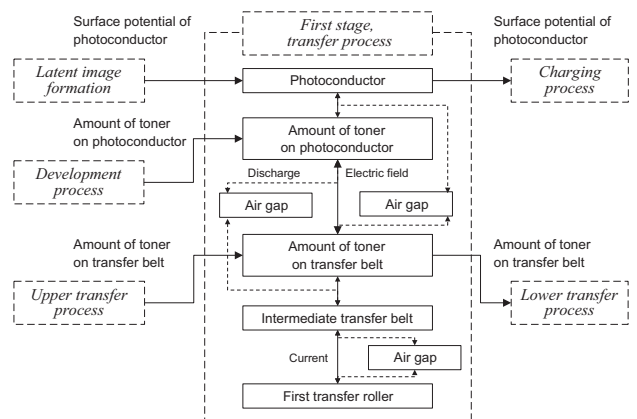


Fig. 8 1DCAE model used for first stage of the transfer process in numerical simulation.

また、転写中の電流や放電により、電荷が感光体表面へと移動し、1次転写部通過後には感光体の表面電位が変化している。この表面電位を帯電部に渡すことで、1次転写の影響を帯電部やそれ以降のプロセスに及ぼすことが可能となる。本検討では、Table 1に示す1次転写部以外のプロセスについても機能をモデル化した1DCAEモデルを組み込んだ。

Table 1 Characteristics and 1DCAE model replaced in process of numerical simulation.

Process	Characteristics	1DCAE model
Charging	Charging voltage	Discharge model
Development	Development curve	Charge transport equilibrium
Transfer (1 <sup>st</sup> and 2 <sup>nd</sup> stages)	Transfer efficiency	Electric field model
Fixing	Spectral absorbance	Melting model

### 3.4 1DCAEモデル組み込みの効果確認

新たな画像シミュレーションの効果確認のために、Table 2に示す1次転写ローラーの抵抗値を用いて、1次転写効率および出力画像濃度を確認した。

Table 2 First transfer stage condition.

Transfer current ( $\mu\text{A}$ )	Resistance ( $\log\Omega$ )
Constant	5.8
	7.3
	9.0

Fig. 9によると、1次転写ローラーの抵抗値に応じて、1次転写効率に変化することが確認でき、それに応じて出力画像濃度を表す明度 $L^*$ の変化もみられる。参考と同条件の実測による1次転写効率と比較すると、傾きに乖離はあるが、同一方向に変化することが確認できた。乖離の理由はトナーの付着や帯電変化に関するモデルの妥当性が不十分であると考えられる。精度に課題は残るが、構成部品のパラメーターによる入出力特性の変化が確認でき、設計検討にも使用できる見込みを得た。また、パラメーターや出力情報を各プロセス間で共有することで、プロセス間の相互影響を加味した検討が期待できる。

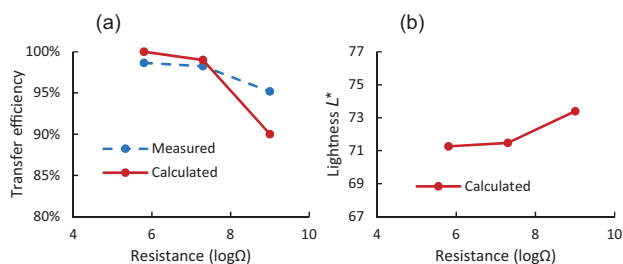


Fig. 9 (a) First transfer stage efficiency, (b) lightness  $L^*$  of output image.

## 4 まとめ

製品開発初期におけるシミュレーションの有効性の向上のため、これまでの2次元、3次元解析に代わる1DCAEモデルを開発した。実機適用の実績のある2次元解析と同様の計算結果が得られた。また、計算時間が短縮し、複数モデルの連携ができるなど、シミュレーションの活用範囲が広がった。さらに、開発した1DCAEモデルを画像シミュレーションに適用したことで、機能を構成するパラメーターから入出力特性が変化するようになり、画像シミュレーションを設計検討段階においても活用できる見込みを得た。

今後は、1DCAEモデルの精度向上とともに、制御やプロセス間の連携をさらに強め、より多くの技術課題を抽出できるシミュレーションへと拡張していきたい。

### ●参考文献

- 1) K.Otomi, T.Hato: Design Innovation Applying 1DCAE, Toshiba Review Vol.67 No.7, pp.7-10 (2012) [in Japanese].
- 2) S.Ichitani, T.Makino, Y.kondoh, T.Harashima: Study of a Simulation for Color Reproduction of Electrophotographic Image Based on Arithmetic Processing of Spectral Absorbance, KonicaMinolta Technology Report Vol.10, pp.24-29 (2013) [in Japanese].

### ●出典

本稿は日本画像学会“Imaging Conference JAPAN 2018”論文集の予稿を加筆修正して転載したものである。本稿の著作権は日本画像学会が有する。