

平成 26 年度 TSUBAME 産業利用トライアルユース 成果報告書

電子写真システム設計における電磁場計算の高速化  
The Study of Speed up for an electrostatic field simulation  
in electrostatic photography system design

利用課題責任者 羽山 祐子  
Yuko Hayama

株式会社 リコー  
RICOH Co.Ltd  
<http://www.ricoh.co.jp>

電子写真方式を利用した画像装置内での用紙詰まりの要因となる、用紙巻き付きのメカニズムを解明する為に、電界計算と用紙変形計算を連成した解析ツールを開発した。このツールは、用紙の搬送速度と電荷の移動速度の差が大きく、連成時に膨大な計算回数が必要となり、計算時間が実用的な解析ツールとしてのレベルに達していなかった。今回の利用課題では、並列化と数値解析ライブラリを利用し、用紙巻き付きシミュレータの計算速度の向上を目指した。その結果、計算速度の向上が実現し、巻き付き解析ツールとしての、実用的な適用の可能性を確認することが出来た。

The simulation tool has been developed to figure out the mechanism of paper deformation at second transfer processes in electrophotography system. The simulation demands enormous time steps, because the electric charge speed is almost million times faster than the paper feeding speed. It is difficult to practically use at design stage. In use challenge of TSUBAME, we aimed to improve computational speed of the simulation tool by using parallelization and numerical analysis library. As a result, it could be showed the possibility of practical applying of the numerical methods.

*Keyword: paper deformation, electrophotography system, numerical calculation, parallelization*

## 背景と目的

用紙に文字や画像を印刷する画像形成装置では、高い品質を提供し続けるために、用紙の搬送状態を管理することが重要である。Fig.1 に示すような電子写真方式では、電界を利用して画像形成を行うことから、用紙が周囲の電界によって変形するため、用紙挙動はより複雑なものとなる。例えば、中間転写ベルトから用紙に画像を転写するプロセスでは、用紙周辺に高い電界が生じるため、適切なバイアスを用いなければ、用紙がローラに巻きつく不具合が生じる。このような用紙の静電巻き付きは、電子写真方式の不安定性をもたらす要因であり、高品質を達成するためには、そのメカニズムを解明することが重要となる。

このような静電巻き付きのメカニズムを解明するために、我々はこれまでに、電界計算と用紙の変形計算による連成解析ツールを開発してきた。このツールは、電

界計算にオームの法則による部材内の電荷移動や、ローラと用紙間の放電現象を考慮しており、実機内の詳細な現象まで再現するように設計された。

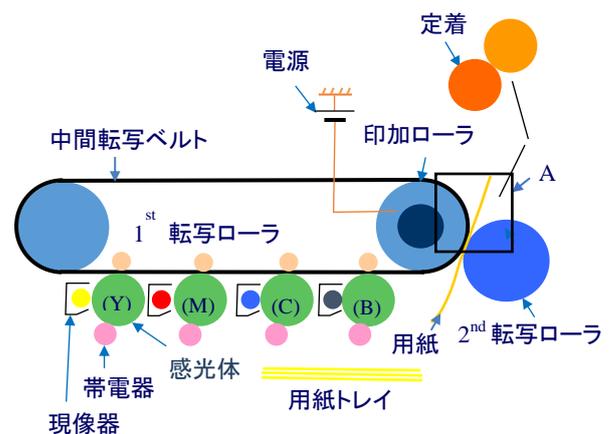


Fig.1 電子写真装置の概略図

一方でこのツールには計算時間に課題を残す。本ツールは一回の計算に数日程度の計算時間を要する。よって、用紙やローラの物性値、プロセス条件等を振って

計算が可能な、解析ツールとしての実用化にまでは至っていない。これは、用紙の搬送がミリ秒オーダーで起こるのに対して、電荷移動がナノ秒オーダーの現象であることから、十分な計算精度を得るためには膨大な計算ステップが必要になることが原因である。

今回の利用課題では、TSUBAME を利用して、並列化と数値計算ライブラリを利用したチューニングによる用紙巻き付きシミュレータの計算速度の向上を確認し、静電巻き付き解析への実用化の見込みを得ることを目的とする。

## 概要

電子写真プロセスでは、画像が形成される過程で、電場が重要な役割を果たす。その為、電場の状態を管理することが重要である。しかし一方で、電場を直接観察、計測することが困難である。したがって、シミュレーションを利用した現象解析、予測のニーズは高い。

### 《解析対象となる現象》

解析対象である、Fig.1内のAの領域について、Fig.2に実験機による可視化結果を示す。用紙は正しく搬送され、正常に次のプロセスに送られていることが分かる。



Fig.2 転写プロセス内の用紙搬送状態可視化結果

しかしながら、搬送される用紙が薄く腰が弱い場合には、印加した電圧により発生した電界により、用紙が変形して搬送される。Fig.3に印加電圧を、 $-1000\text{V}$ ～ $-5000\text{V}$ の範囲で異ならせた条件での、用紙搬送の可視化結果を示す。 $-1000\text{V}$ の印加条件では、用紙が印加ローラ側に大きく変形していることが分かる。印加電圧を下げると、変形量が小さくなり、 $-4000\text{V}$ では変形方向が2次転写ローラ側に変化する。

このように、用紙の変形挙動は、印加する電圧によっても変形度合いや、変形方向が異なってくる。また、用紙

の電気抵抗、厚み、などによっても異なることが分かっている。

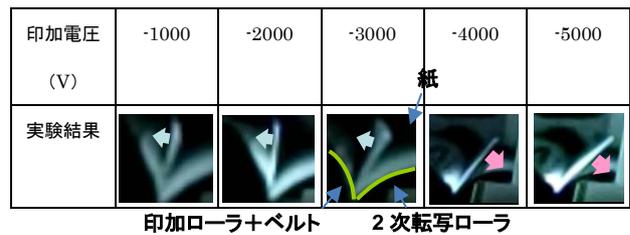


Fig.3 印加電圧による用紙変形の違い

### 《解析モデルと手法》

静電気力による用紙の変形計算の概要と手順を説明する。

計算の対象は、Fig.1内のAの転写領域であり、印加ローラ、転写ベルト、用紙、各物質間の空気層、2次転写ローラの層により形成される。Fig.4に今回対象とした、解析モデルのメッシュ例を示す。このモデルにて、各ローラ、転写ベルト、用紙内の電荷移動と、パッシェンの法則に基づく各物質間での電荷移動を考慮した差分法による電界計算が実施される[1][2][3]。静電気力は、計算された電界強度と用紙上に発生した電荷により計算される[4]。

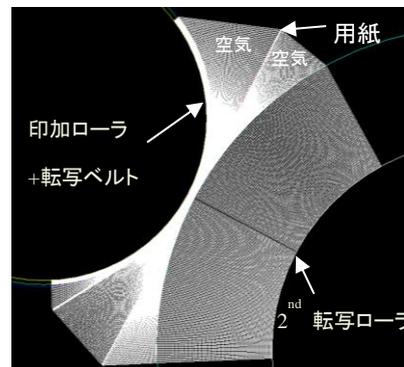


Fig.4 解析モデルメッシュ例

用紙変形は、用紙を梁とみなし、計算された用紙上の静電気力により、一次元のFEM計算で求める[5]。

全体の計算のフローをFig.5に示す。初期は用紙がローラ間のニップ部から排出した時の解析モデルを作成する。そのモデルに対し、オームの法則、放電を考慮した電界解析を行う。電界解析では、電荷の移動時間を考慮して、計算のタイムステップは $10^{-6}$ ～ $10^{-8}$ 秒に設定している。電界解析の計算を一定時間実施し、計算が収束した後、電界内で用紙に働く静電気力を計算する。次にその静電気力に対して、用紙変形計算を行う。その変形位置に合わせて、電界計算

の領域のメッシュを作りなおし、次の静電界解析を行う。このサイクルを一定の用紙排出量ごとに繰り返した。計算は所定の排出量において終了させる。

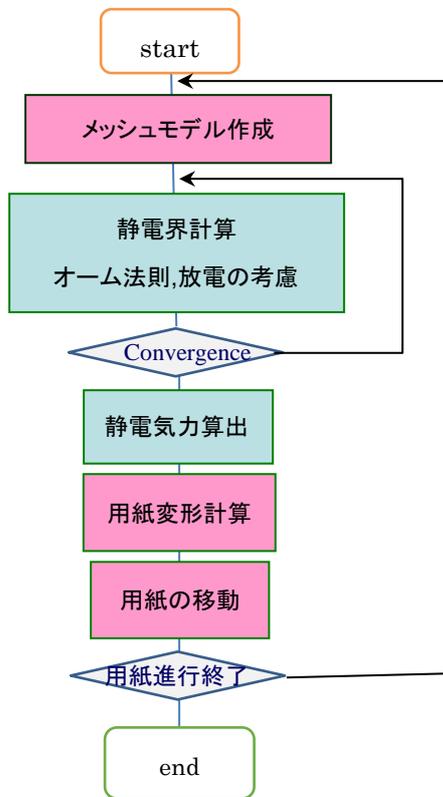


Fig.5 静電気力による用紙変形計算のフロー

## 結果および考察

本計算手法のホットスポットである、電界計算の連立方程式ソルバについて2種類の高速度化を検討した。

一つ目は、Red-Black SOR 法を用いた並列化である。差分法の領域を 4 分割して、OpenMP を利用した並列化を行った。

二つ目は、数値計算ライブラリである LAPACK[6]を利用した方法である。本計算モデルでは係数行列が帯行列となるので、帯行列用の直接法ソルバを利用した。また、本ソルバは標準で OpenMP の並列化に対応しており、並列化による高速化も検討した。

以上の高速化手法を静電巻き付き解析シミュレータに実装した。以下にテスト計算の結果について説明する。

まず、二つのソルバの並列化効率を確認した。Fig.6 に 16 スレッドまでの計算速度倍率を示す。Fig.6 より、両ソルバで 16 スレッドまで並列化による計算速度向上が確認できる。それぞれ、16 スレッドで SOR 法は 3.8 倍、

直接法では 2.3 倍の計算速度向上を達成した。

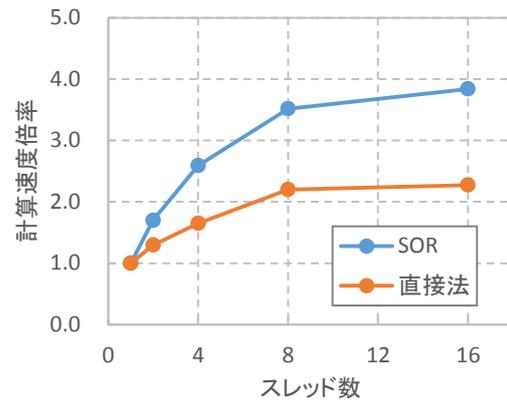


Fig.6 電界計算の計算速度

次に、二つのソルバを利用して計算速度向上の最適化を行った。検討の結果、Red-Black SOR 法をベースとして、一定の反復回数を超えたときのみ、直接法を利用するハイブリッドソルバが最も計算時間を短縮できることが分かった。SOR 法の計算時間は、その反復計算の初期値に大きく依存する。よって、電界計算内で放電判定が生じた場合や、用紙変形計算を行った直後は電界が大きく変化するため、前計算結果を初期値として利用した場合、収束には多くの反復が必要になる。一方で、直接法は常に一定の計算時間で解を得ることができる。よって、SOR 法の反復回数に閾値を設けて、一定回数を超えたときのみ直接法を利用するように最適化した。

最後に、本シミュレータを利用して印加電圧条件を振った際の用紙巻き付きの傾向について、実験結果との比較を行った。計算条件は Table.1 の通りである。各印加電圧の用紙巻き付きの計算結果を Fig.7 に示す。結果を、Fig.3 に示した実験結果と比較すると、本シミュレータにより、用紙巻き付き方向の傾向を再現できたことが分かる。また、本計算は先述したハイブリッドソルバを利用することで、高速化を行う前と比べて、計算時間を 8 分の 1 に短縮することが出来た。

Table 1 計算条件

印加電圧[V]	-1000, -2000, -3000, -4000, -5000
用紙特性	
厚み[um]	70
電気抵抗[Ω m]	$5 \times 10^8$
ヤング率[N/m <sup>2</sup> ]	$6.48 \times 10^9$
密度[kg/m <sup>3</sup> ]	845

印加電圧[V]	-1000	-2000	-3000	-4000	-5000
計算結果					

Fig. 7 用紙巻き付き計算結果

### まとめ、今後の課題

本プロジェクトでは、TSUBAME を利用し、静電巻き付きシミュレータの高速化を確認した。電界計算に、Red-Black SOR 法と、直接法のハイブリッド化を利用し計算速度の向上を図り、最終的に、8 倍の高速化を達成した。本結果により、静電巻き付きシミュレータの実用化への見込みが得られたと判断する。

今後、本シミュレータをメカニズム解析や、設計開発へ展開していく。

### 参考文献

- [1] 長尾剛次他, 静電転写部における用紙変形の基礎的解析 Japan Hardcopy 2003 Fall 論文集 P.53-56
- [2] Toyoshige Sasaki etc. Second Transfer Process Simulation II Society for Imaging Science and Technology Nip24 and Digital Fabrication 2008 p.342—345
- [3] 門永雅史 中間転写ベルトの2次元電界シミュレーション 日本画像学会誌 244号 2003 p.128—135
- [4] H.H.ウッドソン, J.R.メルヒャー MIT コアカリキュラム電気力学 II 産業図書
- [5] 大学課程 材料力学 オーム社 中山秀太郎
- [6] Anderson E., Bai Z., Bischof C., Blackford S., Demmel J., Dongarra J., Du Croz J, Greenbaum A., Hammarling S., McKenney A., Sorensen D., LAPACK User's Guide 3<sup>rd</sup> edition, SIAM, 2000