

共同利用(産業利用トライアルユース:先端研究施設共用促進事業
『みんなのスパコン』TSUBAME によるベタスケールへの飛翔)
成果報告書 平成 23 年度 課題種別

利用課題名 移流/抵抗/放電を考慮した3次元電界計算の電子写真設計への適用
英文: Study of three dimensional electrostatic calculation with the consideration of convection,
conductivity and discharge, and application for frontloading design of electrophotography

利用課題責任者 白石恵美子
Emiko Shiraishi

株式会社リコー
Ricoh Company, LTD
URL: <http://www.ricoh.co.jp/about/>

邦文抄録(300 字程度)

TSUBAME を活用し、電子写真の画像形成プロセス(転写)の 3 次元シミュレーションプログラムを開発し、トナー飛散現象(転写チリ)を解析した。本シミュレーションは電界計算とトナー挙動計算からなる。電界計算では曲率を考慮可能な一般座標を採用し、またトナーに作用する力を正確に把握するために、放電とトナー付着力を考慮した。計算高速化には OpenMP と MPI のハイブリッド並列計算手法を採用し、ベルト抵抗を無視した場合には実用的な計算時間(OpenMP: 4コアで1週間以内)で解析可能となった。またベルト抵抗を考慮した場合には、計算時間が増大し、10 日~1 ヶ月を要した。本シミュレータを用いて、設計開発上のパラメータであるトナー付着力、転写ローラ位置、ベルト抵抗、転写電圧の転写チリへの影響を計算し、設計開発への有用な知見を得た。

英文抄録(100 words 程度)

A three-dimensional simulation program of a transfer process is wrought and carried out on TSUBAME, and toner scatterings are simulated with the program. This simulation consists of an electric field calculation and a toner movement calculation. Parallel calculation methods of OpenMP and MPI are used to reduce calculation time. In order to calculate electric field precisely, Boundary Fitted Coordinate (BFC) is adopted, and to estimate force on toner in detail, force from electric field, discharge phenomenon and toner adhesion force are considered. Toner separates from OPC and begins to move downward when an electrostatic force is greater than the adhesion force and toner movement is calculated according to Newton's law of motion. The effects of toner adhesion, position of a transfer roller, transfer voltage and resistivity of a transfer belt, are investigated with this simulation.

Keywords: 5つ程度 Transfer simulation, Toner scattering, OpenMP, MPI

背景と目的

複写機やプリンタに代表される電子写真機器は、現在オフィスには欠かせないものとなり、広く一般に普及している。その市場規模はますます拡大しているだけでなく、そのシェアの多くを日本企業が占めているもので、日本の製造業の中でも重要な位置付けにある。また計算機の進歩により、計算機シミュレーション技術は、日本におけるものづくりプロセスを支えるまでに発展している。しかしながら、電子写真プロセスは静電気と粉体を取り扱うため、物理モデルが複雑であり、商品開発にシミュレーション技術を適用するには大規模かつ複雑なシミュレータ開発が必要となる。本プロジェクトでは、

電子写真プロセスの転写過程において、3 次元でトナー挙動を予測するシミュレータを開発する。また並列化による計算の高速化を検討し、電子写真機器の設計開発への工学的な応用を試みる。具体的には、開発した転写シミュレータによって、主要な設計パラメータの画像品質への影響を明らかにする。計算条件によるが、概ね実用的な計算時間(5 日~1 ヶ月)で 3 次元転写シミュレーションが可能となり、設計パラメータと画像劣化の関係を検証したので報告する。

概要

本課題の目的は、電子写真装置内でのトナー挙動を 3 次元で高精度に計算し、設計開発上の課題に適用することである。トナーは直径 $4\sim 10\mu\text{m}$ の荷電粒子であり、電界で制御して紙上に画像を形成する。ローラや中抵抗部材が形成する電場内でのトナー挙動シミュレーションを行うために、移流/放電/抵抗を考慮した一般化座標上での 3 次元電界計算の新規開発を行ない、トナー粒子挙動解析機能を追加した。トナー粒子径よりも小さな計算メッシュを用いて、トナーが移動する領域(数 mm × 数 mm × 数 $100\mu\text{m}$)の計算を行う必要があるため大規模計算となるが、TSUBAME による並列計算で実現可能となった。また確立したシミュレーション技術を用いて、電子写真装置の設計上の課題に適用した。本シミュレーション技術によって、電子写真装置の設計開発ツールが現実のものとなり、試作台数低減、開発期間短縮が期待され、今後の日本のもの作りの基盤を支える技術のひとつと期待される。

結果および考察

・計算結果例

電子写真の転写プロセス(感光体からベルトへトナーを移動させるプロセス)の設計開発課題を解析する 3 次元シミュレータ(TransT3D-BFC)を開発した。本シミュレータは、物理現象を忠実に再現するために、移流/放電/抵抗を考慮した一般化座標上での 3 次元大規模電界計算手法を採用している。またトナーに作用する力を算出し、ニュートンの運動方程式によってトナー挙動を予測する。図1は計算領域全体、図2はトナー近傍の計算メッシュを示している。また図3、図4に計算結果の例を示した。図3は感光体(Organic Photoconductor: OPC)上のトナーが時間とともに転写ベルトに移動していく様子を示している。図4は各時刻でのベルト上に転写したトナー像である。ただし左上の図のみ、転写前の感光体上画像である。感光体上ではきれいなドットが、飛散しながらベルトに移動することで、乱れたドット画像となっている(転写チリと呼ぶ)ことが理解される。いかに転写チリを抑制し、きれいなドットを転写ベルト上に形成するかが設計上の課題のひとつである。

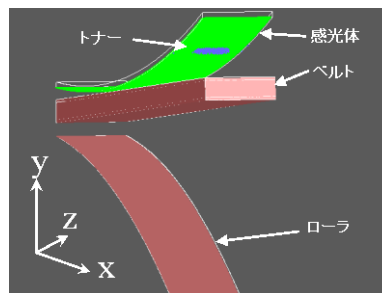


図1 計算領域全体図

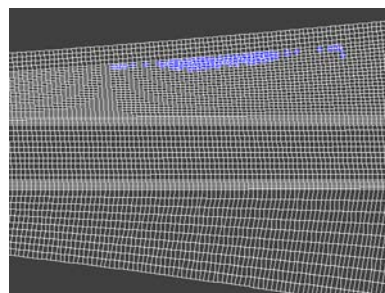


図2 計算メッシュ(トナー近傍拡大)

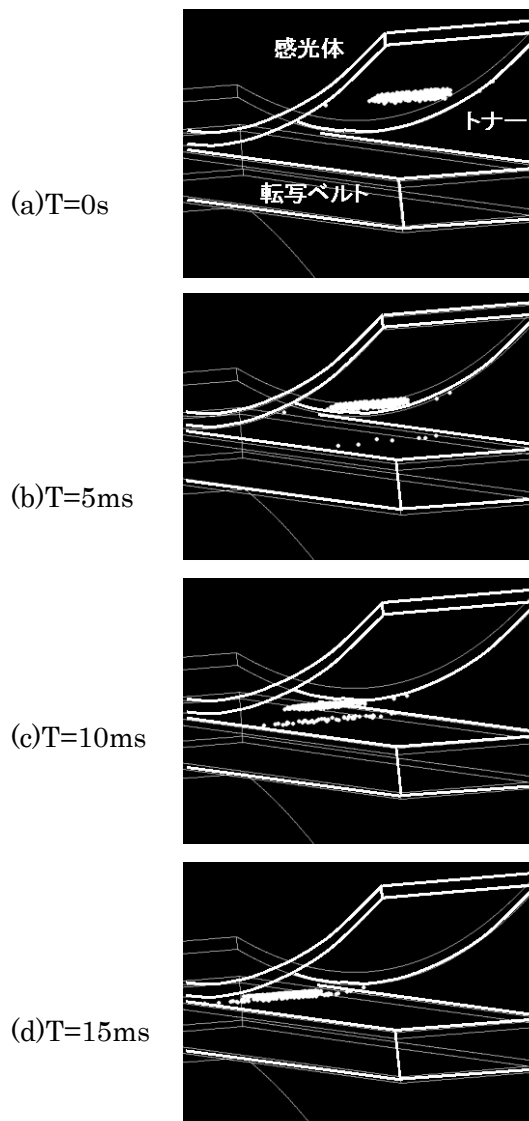


図3 トナー転写の様子

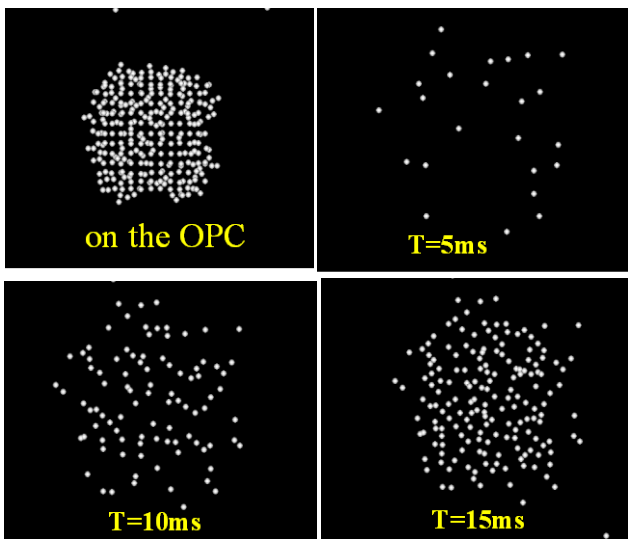


図4 転写前の感光体上トナー像とベルト上の転写トナー像

・並列化検討

物理現象が複雑であり、また多数の粉体挙動を計算するために、大規模計算となる。TSUBAME 上で OpenMP と MPI のハイブリッドによる並列化を行った。図5は OpenMP のみでの並列化コア数と計算時間の関係である。並列化しない場合(1 コア)を 1 として規格化し、高速化比率とする。コア数6で約5倍の高速化が得られていることがわかる。

さらに領域を(a,b,c)に分割し MPI による並列化を検討した。a は X 方向、b は Y 方向、Z は Z 方向の分割数である。結果を図6、7に示す。縦軸は高速化比率であり、OpenMP 1コアで MPI 未導入、すなわち(a,b,c)=(1,1,1)の場合の計算時間を1として規格化している。X 方向、または Y 方向に2分割することで、計算時間が大幅に削減されること、Z 方向にしても効果がないことがわかる。さらに分割数を変えて検討した結果(図7)、(4,3,1)分割で、OpenMP コア数1~4が最も効率がよいことが判明した。高速化率約 5%であり、20倍近い高速化となった。本検討をふまえて、以降は OpenMp コア数4、MIP 分割(4,3,1)で並列計算を行った。以上の高速化により、ベルト抵抗未考慮(絶縁ベルト)の場合には、実用的な計算時間(OpenMP:4コアで1週間以内)で転写の設計課題を解析可能となった。しかしながら、ベルト抵抗を考慮した場合には、タイ

ムステップ(dt)を小さくとる必要があるため、計算時間が増大し、高抵抗ベルトで 10 日前後、低抵抗ベルトでは1ヶ月以上となった。これは抵抗が低いほど、電荷移動の時定数が小さくなるため、計算のタイムステップをさらに小さくする必要があるためである。更なる高速化のために GPU の活用があげられるが、残念ながら本課題期間では導入には至らなかった。

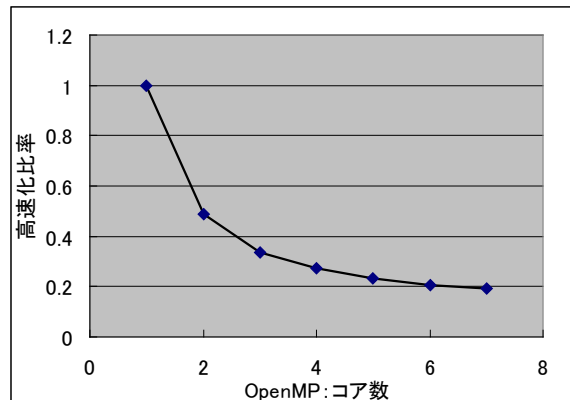


図5 OpenMP による高速化検討結果

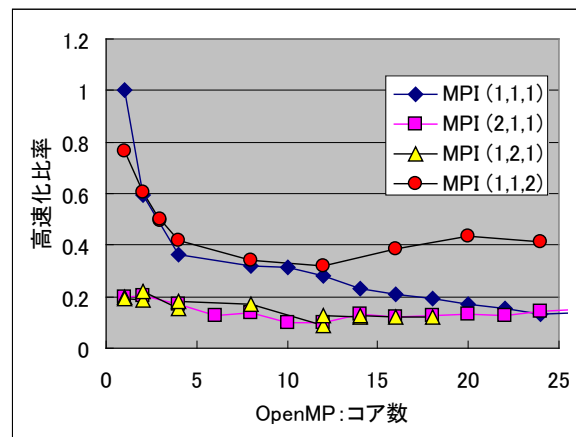


図6 OpenMp と MPI による高速化検討結果

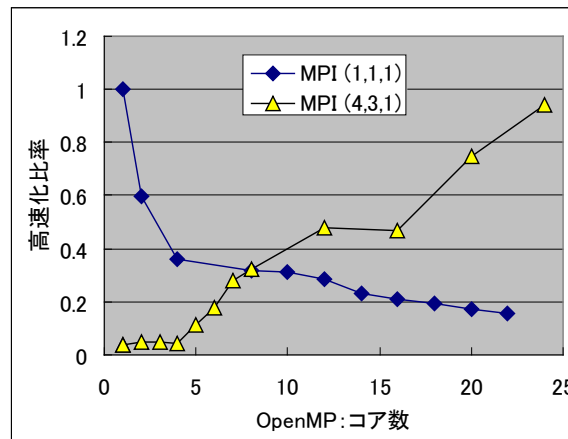
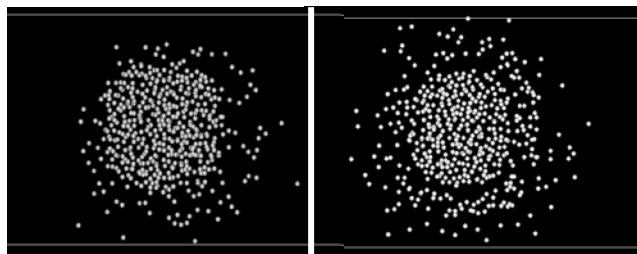


図7 OpenMp と MPI による最適化検討結果

・パラメータスタディ

開発したシミュレータを用いて、設計上の主要なパラメータの影響を解析した。図8に一例を示す。ローラを感光体中心から上流+2mmに配置した際に、転写バイアスを変えた場合のドット画像の様子である。転写バイアスが大きいとチリが悪化することがわかる。



(a) 600V (b) 1200V

図8 転写バイアスの影響

図9はローラ位置、ベルト抵抗、転写バイアスを変えた場合の結果である。表に計算条件を示す。なお図9(b)と図8(b)は同一条件である。図9より(d)がもっともチリが少なく良好な画像であることがわかる。

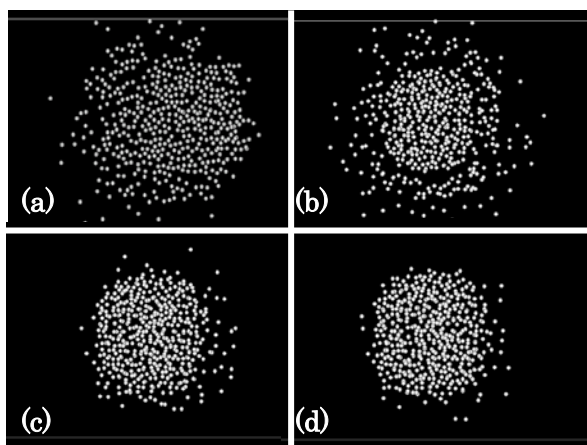


図9 ローラ位置、ベルト抵抗、転写バイアスの影響

表1 図9の計算条件

	ローラ位置	ベルト抵抗	転写バイアス
(a)	上流+2mm	$10^4 \Omega m$	1200V
(b)	上流+2mm	絶縁	1200V
(c)	下流-2mm	絶縁	1200V
(d)	下流-2mm	絶縁	600V

本シミュレータを用いることで、各種パラメータの影響を検討することが可能となり、高画質を得るための設

計開発指針を提示することが可能となった。さらなる高速化、計算領域拡大により、現実的な画像の品質を予測することが可能となるであろう。

まとめ、今後の課題

電子写真の転写プロセス(感光体からベルトや紙へ荷電粒子であるトナーを移動させるプロセス)の設計開発課題を解析する3次元シミュレータ(TransT3D-BFC)を開発した。TSUBAME2上でOpenMP+MPIによる並列化を行い、ベルト抵抗を無視した場合には、実用的な計算時間(OpenMP:4コアで1週間以内)で解析が可能となった。ただし、ベルト抵抗を考慮した計算では、より多くの計算時間が必要であり、更なる高速化(GPUの活用)の導入が必要である。本シミュレータを用いて、ローラ位置、転写電圧、トナー帯電量、トナーと感光体付着力、ベルト抵抗を変えて計算を行い、各パラメータの影響を検証し、最適条件を得ることができた。