X線による可視化及びシミュレーションを用いた 現像器内現像剤の挙動解析

Analysis of Developer Motion in Developing Unit by Visualization with X-ray and Numerical Simulation

斎	藤	和	広*	伊	藤	孝	幸 **		
Kazuhiro SAITO				Takayuki ITO					
村	内	淳	<u>-</u> * * * *	加	藤	智	宏 ****		
Junji MURAUCHI				Tomohiro KATO					

要旨

現像器内現像剤の挙動シミュレーションの精度向上や 開発したシミュレーションの妥当性を確認するため、現 像剤を実際に観察したいという要望があった。現像器規 制部の現像剤の挙動については、目視による観察は不可 能であり、X線による透過撮影を試みた。しかし、規制 部周辺では、奥行き方向に現像剤が厚く、また現像剤の 流れが比較的緩やかであるため、現像剤の挙動を観察す ることが困難であった。そこで、X線可視化手法に様々 な工夫を施すことによって、それらの課題を克服した。X 線による可視化から得られた情報を基に、以前よりコニ カミノルタで開発を行い、循環搬送領域の設計に利用し ている粒子法シミュレーションの適用領域拡大を図った。 その結果、規制部周辺領域において、シミュレーション とX線動画に良い相関を得たことを報告する。

Abstract

Actual observation of developer in a developing unit had been demanded to verify validity of a numerical simulation for the developer behavior as well as to improve its accuracy. Radiographic X-ray equipment has been applied to observe the motion of developer in a regulating area of a developing unit where the direct observation is impossible. But it was difficult to get clear image because the cross-sectional thickness was large and the developer motion was relatively slow. To solve these problems, several ingenuities for radiographic X-ray observation technique have been exercised. Numerical simulation by particle method, which was previously developed as an application of design for circular conveying system by Konica Minolta, has been expanded by applying the experimental information from the X-ray observation. A good agreement has been confirmed between the simulated animation and the X-ray movie around the regulating area.

ЛН		н	F20	•		•				
Tetsuya KAGAWA										
出	水	—	郎	*	*	*	*			
Ichiro DEMIZU										

加川哲哉***

髙 田 洋 朗******* Hiroaki TAKADA

1 はじめに

トナーとキャリアから成る現像剤を用いた2成分現像 方式は,現像,層形成,循環,撹拌が主な機能である。近 年,長寿命化が求められる中,規制部においては,現像 剤への負荷軽減の技術開発が求められている。層形成機 能に関する技術開発は,規制部近傍で現像剤を供給,規 制する現像剤挙動,現像ローラーから現像剤を剥離する 現像剤挙動を把握することが重要であり,そのために現 像剤の挙動の可視化が有効である。

規制部の現像剤挙動について、シミュレーションによ る流動解析結果を可視化によって示した報告¹⁾はある が、ある程度計算負荷の低減も考慮してモデル化された 粒子の流動性が、実際の現象を再現しているかの判断は 難しい。

一方,現像剤挙動を可視化する手段として,X線透過 装置による観察が検討されている²⁾。現像剤の主成分で ある鉄は,樹脂製の現像器ハウジングよりもX線の吸収 係数が高く,現像剤が存在する箇所を濃く撮影すること ができる。しかしながら,現像剤自体はX線吸収係数が 均一なため,液面状態の確認はできるものの,現像器内 部の流動確認ができない。一般的に,流体力学などでは トレーサーが用いられる。トレーサーとして鉄よりX線 吸収係数の高い粉体を用いると,現像剤よりも濃く撮影 される。X線で撮影された動画上で,その箇所を追跡す ることによって,現像器内の現像剤挙動を観察できる。

本報告では,現像器内現像剤の挙動解析を目的とし,X 線による可視化を行い,撮影されたX線画像を基にシ ミュレーションに用いるパラメーターの同定を試みた。 その一般性を確認するため,複数の現像器構成を用いて, X線画像とシミュレーションの相関性を検証した。

2 シミュレーション及びX線実験方法

2.1 シミュレーション

加川らの報告¹⁾による粒子法を用いたシミュレーションを行った。以下に、内容を簡単に説明する。

現像プロセス領域で主に利用されている個別要素法で は粒子数が多く計算時間が膨大になる。そのため,現像 剤を流体近似した。一般的には流体解析に格子法を用い るが,数値拡散の回避や,計算時間短縮のため,本シミュ レーションでは粒子法を用いた。粒子法を用いると計算

 ^{*}コニカミノルタビジネステクノロジーズ(㈱ PP FUM 開発部
**コニカミノルタビジネステクノロジーズ(㈱ PF デバイス開発部
***コニカミノルタビジネステクノロジーズ(㈱ CAE 推進部
****コニカミノルタビジネステクノロジーズ(㈱ 作像技術開発部

メッシュを作成する必要がないメリットもある。粒子法 にはSPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法を用 いた。粒子 j が座標 x_j に存在し、質量 m_j を有するとき の密度分布を (1) 式に示す。

$$\rho(x) = \sum_{j=1}^{N} m_j W(x - x_j, h)$$
 (1)

偏微分方程式に使用する任意の変数fの分布を式(2)に 示す。

$$f(x) = \sum_{j=1}^{N} \frac{f_j m_j}{\rho_j} W(x - x_j, h)$$
(2)

Wはカーネル関数である。現像剤は(3)式に示す塑性 流体として扱う。

$$\mu = \mu_r \qquad \left(\dot{\gamma} \le \frac{\tau_y}{\mu_r - \mu_0} \right)$$
$$\mu = \mu_0 + \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} \qquad \left(\dot{\gamma} > \frac{\tau_y}{\mu_r - \mu_0} \right) \qquad (3)$$

ここで, μ は粘度, $\dot{\gamma}$ はずり速度, μ_0 は塑性粘度, μ_r は立ち上がりの粘度, τ_y は降伏応力とする。せん断応力が降伏値以下では流動しないことを表す。

現像剤の磁界中での振る舞いを考慮するため,(4)式 で表す力を磁性体粒子に見立てた計算点に付加した。

$$f_j = (p_j \cdot \nabla) B_j \tag{4}$$

ここで、 p_j は粒子jの磁気双極子、 B_j は粒子jの中心における磁束密度、 f_j は粒子jの磁気双極子 p_j の受ける力とする。

Fig.1 に計算のアルゴリズムを示す。



Fig. 1 Flow chart to simulate behavior of developer.

2.2 X線透過動画撮影

Fig.2を用いてX線透過動画撮影の方法を説明する。X 線源から発生したX線は測定対象物を透過する過程で吸 収されI.I.管(イメージインテンシファイア)表面に到 達する。I.I.管で可視光に変換,増幅された画像をCCD で撮影することで,現像器内の観察が可能となる。測定 対象物がもつ吸収率の違いから画像のコントラストを得 ることが出来る。X線透過装置は東芝ITコントロールシ ステム社製を用いた。



Fig. 2 Schematic of radiographic X-ray equipment.

現像剤中の流動挙動を追跡するためには,現像剤と同 じ挙動を示し,且つコントラストが得られるようX線吸 収係数が高いトレーサーが必要となる。

初期検討段階では重金属を含む粉体などを使用し,比 重により調整したが,現像剤とは明らかに異なる挙動を 示した。そのため比重以外のパラメーターも加えてト レーサーの最適化を行った。

Fig. 3 に最適化実験で行った沈降実験の様子を示す。 特に,規制部周辺のように流れが緩やかな領域では,重 要な特性である。実験はビーカーに充填した現像剤表面 にトレーサーを載せ,一定の時間,振動を加えた後の沈 降量を評価した。トレーサーAは振動による沈降量が大 きく不適合な例であり,トレーサーBは振動による沈降 が見られなかった。



Fig. 3 Example of sedimentation test for tracer particle optimization; (a) improper tracer, (b) optimized tracer.

3 規制部における可視化

3.1 シミュレーション結果の可視化

2.1の手法を用い、シミュレーションを実施した。シ ミュレーションを行った2成分現像器構成の一例をFig.4 に示す。規制部周辺の挙動を予測するために、現像器の 中央断面をモデル化した。スクリュー(Sc)の回転及び磁 力により、現像剤は現像剤量を制御する規制部に供給さ れ、順に現像ローラー上を搬送され、最下流で現像ロー ラーから剥離され、現像器に回収される。計算時間を考 慮して、流体近似した計算上の粒子点間隔は400µmと した。計算時間刻みは20µsとし、計算精度を確保しつ つ、データの書き出し刻みは2msとし、データ書き出し による時間ロスを避けた。粒子1個1個の2次元データを 書き出し, Fig. 4 に示す画像として表現した。その画像 をつなげることによって,動画として現像剤挙動を観察 できる。フレーム間隔が2msであれば,目視で十分滑ら かな動画となり、現像剤挙動を概ね把握できる。Sc回転 数を6rpsとして計算すると、Fig.4の下図に示すScの位 相変化はフレーム間に4.32°となる。



Fig. 4 Model of developing unit and means for making animation.

3.2 X線透過装置による可視化

X線は物質の吸収係数と通過する距離に依存して吸収 されるため、実際の現像器では、可視化したい領域に対 して通過距離が長過ぎるという課題がある。また、X線 は線源から円錐状に広がるため、鮮明な断面像を得るに は被写体の奥行き寸法は短い方が望ましい。一方、現像 器は端部付近の流れが壁面の影響で中央付近と異なる流 れを示す。そこで、本実験では、Fig. 5 に示す断面寸法 に対する適切な奥行き比率の現像器を作成した。その結 果、規制部近傍で現像剤中のトレーサーの流れを可視化 することに成功した。Fig. 6 に示す規制部近傍を拡大し た写真の黒点がトレーサー、その周りが現像剤である。



Fig. 6 Snapshot of regulating area by X-ray radiography.

また、現像剤の影からも現像器設計に重要な情報を得 ることができる。規制部に現像剤を供給している状態に 着目すると、Fig.7の現像器構成では、ラインで示す現 像剤液面が動画上でSc周期の変動をしていることがわ かった。ここで、下矢印は現像剤が剥離される軌跡を示 す。上矢印は、規制部近傍に現像剤の溜まりがなく、現 像剤が現像ローラーに吸い込まれるように供給されてい る様子を示す。上矢印が発生する状態では、現像ローラー への現像剤供給が不安定となり、Scムラが発生すると考 えられる。このようにX線動画により現像剤挙動を可視 化すれば、画像品質を予測することが可能となる。



Fig. 7 Observation of developer fluid level by X-ray radiography.

一方,X線透過撮影ではX線源のゆらぎや検出器の感 度ばらつきによって,X線動画にちらつきが発生し,粒 子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry) や粒子 追跡速度計測法 (ParticleTrackingVelocimetry) といっ た定量的に流れを計測する技術の適用が困難という課題 もある。

4 シミュレーションのパラメーター取得

本シミュレーションでは現像剤を流体近似しているた め、現像剤粒子としての現像ローラーとの摩擦係数や空 気抵抗などが使用できない。これらは現像剤挙動のシ ミュレーションを行う上で必要だが測定困難なため、X 線透過動画を利用し、各パラメーターを同定した。

複数のパラメーターを最適化するために直交表を使用 し調整した結果,現像剤剥離の軌跡はFig.8の矢印で示 すX線動画と合わせ込むことができた。



Fig. 8 Comparison of angle of departure between X-ray imaging and simulation.

改良したシミュレーションの一般性を確認するため, 現像ローラーや現像器構成に関するパラメーターの水準 を振った6個の現像器を作製した。X線透過撮影にて実 物確認を行うと同時にシミュレーションも行った。Fig.8 に示す角度を剥離角度として,6つの現像器の計測結果 をFig.9のグラフにプロットし,X線透過とシミュレー ションの相関を表した。



Fig. 9 Correlation of angle of departure by X-ray and simulation.

相関を評価するために,相関係数rを求めた。相関係数r=0.978となり,X線動画とシミュレーションの対応 を確認できた。

また,規制部近傍の現像剤挙動について,X線動画と シミュレーション動画を比較した。X線動画のトレー サーの動きはFig.10の上図に示す流れであった。シミュ レーション動画上の現像剤の流れは,パラメーターの取 得によって,Fig.10の(a)から(b)へ改良され,X線動 画と同じ動きになったことを確認できた。



Fig. 10 Comparison of trajectory of developer flow between X-ray imaging and simulation; (a) default, (b) after improvement.

5 まとめ

X線透過装置を用いて、トレーサーや現像器を最適化 することにより、規制部近傍の現像剤挙動を可視化する ことが可能となった。

粒子法を適用したシミュレーションにより,規制部の 現像剤挙動の予測が実用レベルであることが確認された。

今後,シミュレーションの活用により,特に開発初期 の設計段階では,試作レスによる開発効率の向上が期待 できる。一方,開発中盤以降の課題発生時では,実機が 存在しているため,X線撮影の方が効率的である。X線 を用いた可視化技術の更なる向上による,実機サイズで の現像剤挙動の観察が望まれる。

●参考文献

- 加川哲哉,村内淳二,斎藤和広,高田洋朗,芝田兆史:現像剤 の運動挙動への粒子法シミュレーションの適用, Imaging Conference JAPAN 2010 論文集,日本画像学会,pp. 271–274 (2010).
- 内田圭亮,岡本孝司:スクリュー搬送機内粉体のX線可視化画像 による拡散係数測定,可視化情報学会論文集,Vol. 27 No. 5, pp. 23–30 (2007).

●出典

本稿は日本画像学会"Imaging Conference JAPAN 2011"論文 集からの転載である。本稿の著作権は日本画像学会が有する。