
数値シミュレーションによるトナー分級工程の生産性向上

Productivity Improvement of a Toner Classification Process by a Numerical Simulation

田中 哲也* 斉藤 芳浩*
Tetsuya TANAKA Yoshihiro SAITOH

要 旨

トナー製造工程において、気流及び粒子の「流れ」が重要であり、流れの変化が生産効率に大きな影響を及ぼすため、装置内部の気流解析を、数値シミュレーション技術を活用して実施した。特に、分級工程に着目して気流解析を実施し、分級機内部形状と流れの関係を明確にした。この数値シミュレーション解析結果に基づいて、新しい分級機の形状モデルを提案し、分級精度の向上を達成した。

ABSTRACT

In a process of toner production manufacturing, a flow of air including toner particle is important so as to give the high efficiency of production. Numerical simulation for the toner classification device, which is set after the pulverization process, is carried out. The relation of the device shape and the internal flow is clearly obtained. A new design is proposed based on the simulation results and the practical testing, and higher efficiency of classification is accomplished.

* 化成品事業本部 化成品技術研究所
Chemical Products R&D Center,
Chemical Products Business Group

1. 背景と目的

近年の高画質化の要求に伴い、画像を形成するトナーの小粒径化および、粒度分布の狭い、より均一な粒径のトナーが求められている。

トナー製造は様々な工程を経て製品となるが、本報告では、粉碎トナーの篩い分け工程である「分級工程」に着目した。分級工程は、分級機内部の旋回流による遠心分離作用によって、粉碎されたトナー粒子を粗粉、微粉、超微粉に分類し、製品規格に合うものと、そうでないものとに分類する工程である。分級されるトナー粒子は数 μm ～数十 μm のサイズであるが、制御項目が多く、その精度管理は難しい。一方、数%の生産歩留りがトナーのコストに大きく影響するとともに、エネルギー使用量の大きな差につながるため、分級の効率化はこれまで強く望まれてきた。

しかしながら、分級機内部の旋回流分布や、トナー粒子の動き等、内部の様子は明確になっていない。そこで、本報告では、数値シミュレーションにより分級機内部流れを明確化し、分級精度向上を達成できる条件を提示することを目的とする。

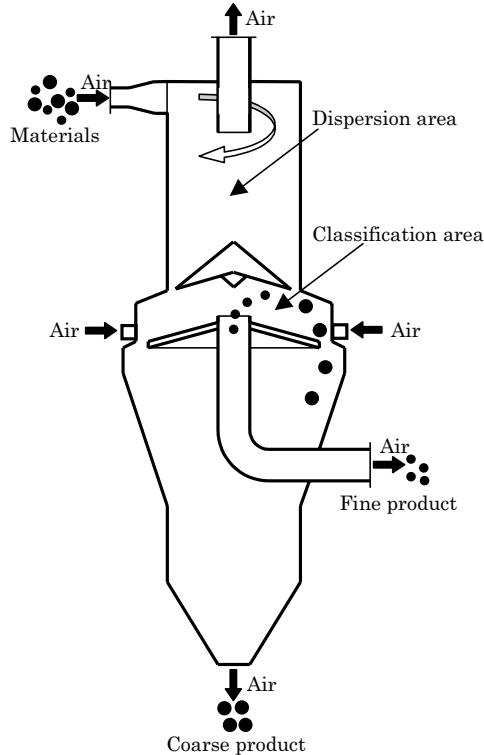


Fig.1 Dispersion separator classifier.

2. シミュレーション方法

2-1 物理モデル

数値シミュレーションには、汎用流体解析ソフトを使用し、二次元軸対称計算を実施した。すべての流れに対して、非圧縮性の質量保存方程式と運動量保存方程式を解いている。また、今回の解析対象である分級機内部は、旋回流場で形成されていることが知られている¹⁾²⁾。その流れの特徴として、内部円周流れは、分級機中心から外周までの間に、円周方向速度が回転半径に逆比例する自由渦に近い半自由渦が形成されている。また、レイノルズ数は 10^5 のオーダーとなるため、乱流場と考える必要がある。そこで、数値シミュレーション解析を行うためには、この旋回流場の特徴を考慮した乱流モデルを導入する必要がある。等方性乱流を表現するk- ϵ モデルはふさわしくなく、この旋回乱流場の特徴である非等方性を考慮できるレイノルズ応力モデル(Reynolds Stress Model RSM)を使用した³⁾。

また、分級機内部流れを解析した後に、トナー粒子を想定した粒子軌跡計算も実施した。粒子軌跡は、粒子の慣性と粒子に働く力を考慮した次式によって求めた。

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + g_x(\rho_p - \rho) / \rho_p + F_x \dots \dots \dots (1)$$

$F_D(u - u_p)$ は単位粒子質量あたりの抵抗力であり、以下の式が成り立つ。

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} \frac{C_D R_e}{24} \dots \dots \dots (2)$$

ここで

u : 流れの速度, u_p : 粒子速度, μ : 流体粘度, ρ : 流体密度

ρ_p : 粒子密度, D_p : 粒子直径, C_D : 抵抗係数

g_x : 重力加速度, F_x : 外部体積力である。

また、 R_e は相対レイノルズ数であり、次式で定義される。

$$R_e = \frac{\rho D_p |u_p - u|}{\mu} \dots \dots \dots (3)$$

2-2 シミュレーションモデル

Fig.2に示したように、分級機中心を対称軸とし、2次元軸対称領域を計算した。また、この場合は複雑な形状に加えて、乱流場で形成されているため、あらかじめ流れが複雑であると思われる場所は、特にメッシュの大きさや配列に注意した。また、乱流計算の収束を向上させるために、速度、圧力等の緩和計算において、その緩和係数を不足緩和となるよう、小さく設定することが重要であり、計算の収束に大きく影響した。総メッシュ数は約1万メッシュであり、境界条件は入口2箇所を速度境界条件、出口を圧力境界条件と速度境界条件にそれぞれ設定して計算を実施した。境界条件に用いた値は、実測値を使用した。

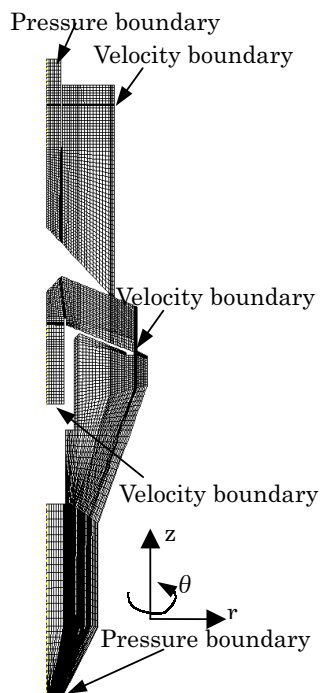


Fig.2 Computational grid.

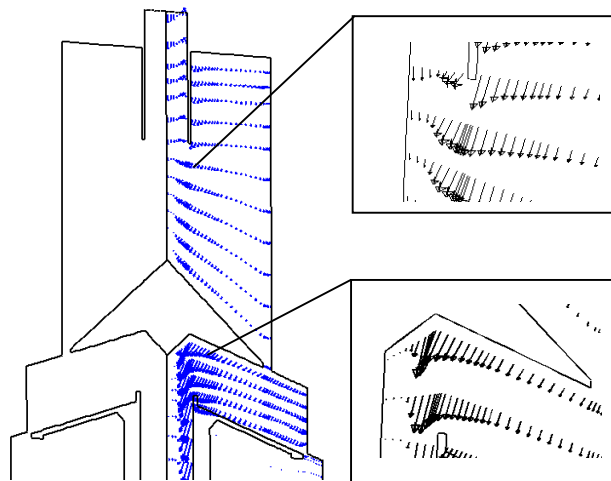


Fig.4 Velocity vectors.

ここで検討した分級機は、中央を圧力で引くことにより、旋回流場を形成させており、Fig.1に示したように、分散室で粒子が分散され、分級室において、粒子は遠心力と向心力のバランスによって分級される。シミュレーションの結果、Fig.3に示したように中央の圧力が低く、特に分級室内部での圧力変動が著しいため、強い旋回流場が形成されていることが予想できる。

また、旋回流場の形成は、Fig.4の速度ベクトルを見てもわかるように、中心付近の速度が速く、半径方向外側に向かって速度は小さくなっている。この速度分布は、前述のように旋回流場を示す大きな特徴の一つである。

3. シミュレーション結果

3-1 従来型分級機シミュレーション結果

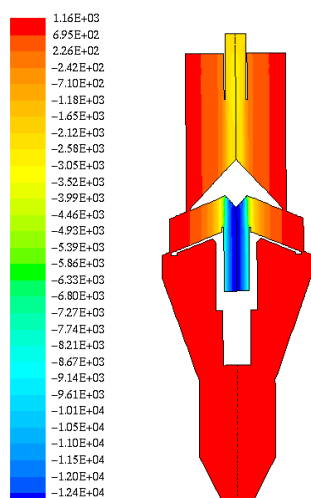


Fig.3 Static pressure contours (Pa).

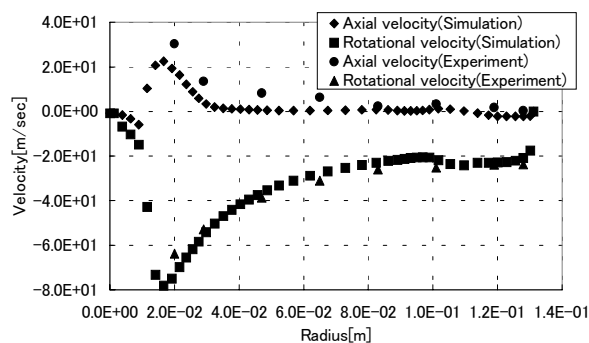


Fig.5 Velocity profiles in classification area.

また、Fig.5は数値シミュレーション結果検証のため、分級室内部の回転方向速度および、軸方向速度を実測し、計算結果と比較した図である。両者の結果は良い一致を示しており、RSMモデルを用いた気流解析が、分級機内部の旋回流場

を良く現わしていると言える。

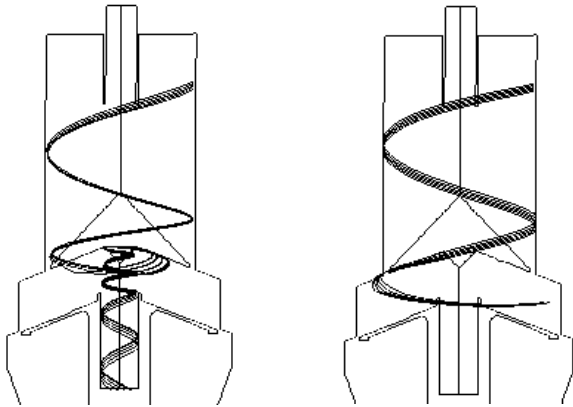


Fig.6 Fine particle tracks. Fig.7 Coarse particle tracks.

次に、流れの中でのトナー粒子軌跡を予測した。Fig.6, Fig.7に示したように、トナー粒子は分散室を巡回しながら下降し、分級室に導かれ、遠心力と向心力のバランスによって、微粉は中央から排出され、粗粉は外側を巡回しながら下降して行く様子がわかる。

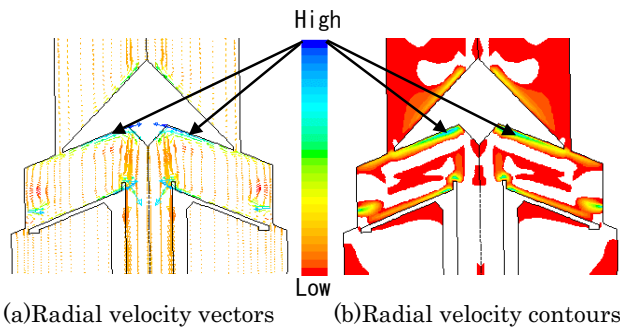


Fig.8 Conventional type.

さらに、分級精度を左右すると思われる分級室付近について詳しく解析してみると、Fig.8に示したように分級室内で、半径方向速度分布が大きく変化していることがわかった。分級機において分級室は最も重要な部分であり、分散室から導かれたトナー粒子は、分級室内に形成された巡回速度による遠心力と、中心方向流れによる向心力のバランスによって分類されるため、分級室内部の速度分布が分級精度に大きく影響する。したがって、Fig.8の結果は、分級室内部で微粉と粗粉とに分類されるトナー粒子径が、場所によって異なることを示しており、特に矢印で示した分級室上部付近では、速度が速くなっていることがわかった。

ここで、分級室内部の速度分布と分級精度の関係を考えると、例えば、トナー製品の粒径を決定する微粉分級機の場合は、Fig.9に示したように、遠心力によって分級室外側に導かれた粗粒子が製品となるため、Fig.8に示した分級室上部付近の半径方向速度が速い領域に本来製品となる粒子が導かれると、微粉回収側に製品が混入する可能性があり、分級精度を低下させている一つの原因となっていることが考えられる。

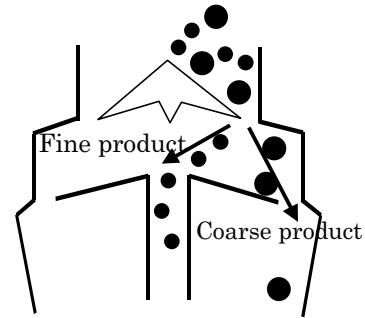


Fig.9 Fine product classifier.

3-2 改良型分級機シミュレーション結果

そこで、前節の考察から、筆者らは分級室上部の流れを変化させるためにリング状部材を設置することを考案した。

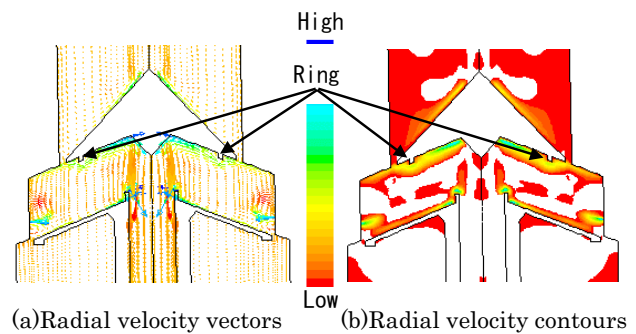


Fig.10 Improved type.

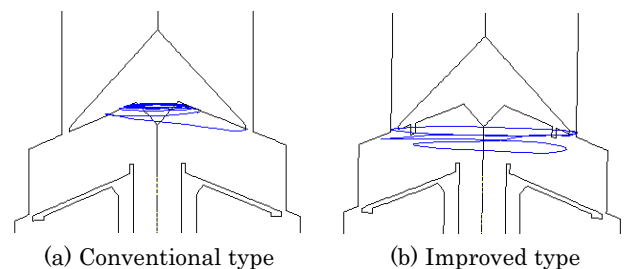


Fig.11 Coarse particle track.

リング状部材を設けることで、分級室上部の流れを変化させ、製品となる粒子が中心の微粉回収側に導かれることを防止することで分級精度が向上すると考えた。そこでFig.10に示したように分級室内部の流れの速度が速い部分にリング状部材を設け、シミュレーションを実施した。その時のトナー粒子軌跡を比較した結果が、Fig.11である。Fig.11(a)のように従来型の時、分級室入口付近のある場所では、製品粒子が中心に導かれてしまう場合があるのに対し、同じ場所において、分級室上部にリング状部材を設置した改良型の場合には、リング状部材によって流れを変化させたため、製品粒子は中心に向かうことはないことがわかる。したがって、トナー製品粒子の微粉回収側への入り込みを少なくできるため、分級精度が向上する可能性があることが、数値シミュレーションの結果からわかった。

4. 分級実験結果

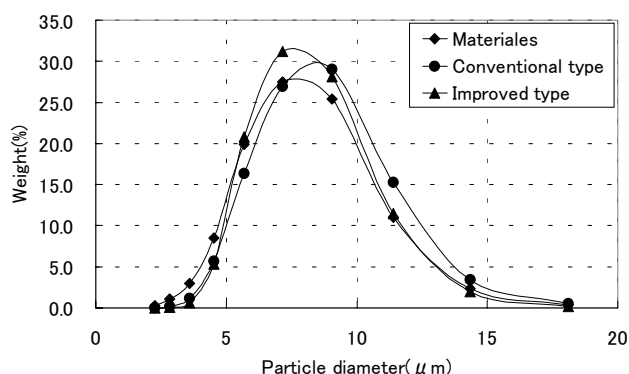


Fig.12 Particle size distribution (Experimental Result).

シミュレーション解析で得られた改良型分級機の効果を、実験用分級機によってテストした結果がFig.12である。体積平均粒径7~8 μm 程度のトナー粒子を分級した結果、従来型に比べて、改良型の方がシャープな粒度分布が得られており、分級精度が向上した。

5. 結論

分級工程において、分級機内部の流れ及び、トナー粒子の流れを数値シミュレーションによって、予測することが可能になった。これに基づいて、流れ場を制御するリング状部

材を設置することにより、分級精度向上を達成した。

また、数値シミュレーション解析で得られた改良形状を実機ラインに展開し、連続生産を実施した結果、従来と比較すると、生産歩留りが約3%向上した。

本報告で提示した改良型形状に至るまでは、分級機形状や分級条件を変化させたシミュレーション解析を数十件実施し、流れの変化及び、粒子軌跡の変化を確認してきた。このようなことを実験ですべて確認することは、研究開発の時間及びコストが膨大にかかってしまう。そこで、数値シミュレーション解析の活用が重要になってくる。数値シミュレーション解析により、コンピュータ上で「模擬実験」を行うことで現象の理解、次への予測を行うことが可能となり、開発時間の短縮等が可能になる。

しかしながら、現状では数値シミュレーション解析のみで解決する問題は少なく、特に今回のように流れが複雑で且つ、粉体の流れを伴う場合は、問題解決が困難であるため、可視化実験や実粉実験と比較検討することが必要である。

6. 今後の展開

数値シミュレーション技術と、可視化技術のレベルアップを図り、更に分級精度向上に寄与する条件を見つけ出したい。また、粉碎工程等を含め、トナー製造工程全体で生産性向上に、数値シミュレーションが活用できるように努めたい。

謝辞

改良型分級機の実機展開にご協力頂きました、トナー製造五課、トナー技術課の皆様、流速測定の検証にご協力頂きましたRS事業部関係者、中央研究所関係者の方々、また、数値シミュレーション解析を行うにあたり、日頃より大変お世話になっている中央研究所第四研究センターの皆様に、心から厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 大山：化学工業II，岩波全書(1992) p.27, p.163
- 2) (社)日本粉体工業協会：粉体分級技術マニュアル(1990) p.22, p103
- 3) 荒川：数値流体工学，東京大学出版会(1994) p203