

可視化システムを用いたシミュレーション技術の高度化

(シミュレーションを用いた地場企業の製品開発工程支援)

機械システム科 主任研究員 入江直樹

近年における高性能かつ廉価で使いやすいパーソナルコンピュータやオペレーティングシステムの普及は、流体分野において汎用計算力学ソフトウェアの利便性を高め、流れ現象に関連するシミュレーション技術の発展に大きく寄与している。地場企業からは当該汎用計算力学ソフトウェアを用いたシミュレーション技術を自社製品開発に活かし、製品開発期間の短縮化や差別化技術の創出につなげたいとの要望を受けている。地場企業が取り扱う気流及び粒子の特性を計測可能とする可視化システムについて研究開発を行い、その計測結果を汎用計算力学ソフトウェアに入力してシミュレーション技術の計算精度向上を図るとともに、地場企業のシミュレーション技術を用いた製品開発工程に貢献することを本研究の目的とした。

1. 緒言

流れ現象の解明と制御は船舶、自動車などの輸送機械の性能や安全性、高層ビルの耐風性や風害などに対策を講じる上で非常に重要である。その流れ現象の速度分布を計測し可視化する手法として、速度分布を構成する各速度ベクトルを計測する際に、画像相関法とよばれる所定領域の輝度パターンの移動を追跡して求める手法：PIV (Particle Image Velocimetry：粒子画像流速測定法) と、個々の粒子像の移動を追跡して求める手法：PTV (Particle Tracking Velocimetry：粒子追跡法) がある^[1]。

本研究においては平成 30 年度から令和元年度にかけて図 1 に示す可視化システムを試作し、画像相関法を用いて送風機 (模型) 内部の速度分布を計測した。そして、その送風機内部の速度分布計測結果と流体解析シミュレーションの結果を比較することによって、研究開発した可視化システムの計測精度と流体解析シミュレーションの解析精度について検証した^{[2]、[3]}。

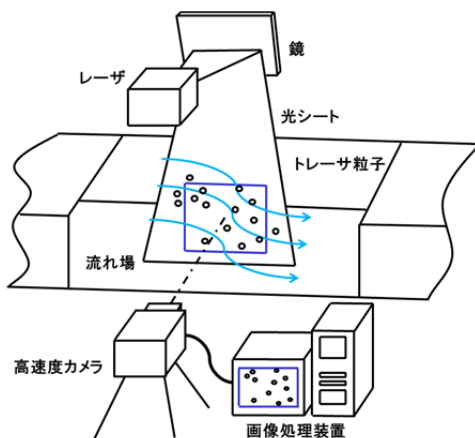


図1 可視化システム

令和2年度は新たにPTVの手法を導入して、個々の粒子像の移動を追跡することにより各粒子像の速度を計測する可視化システムを検討し、粒子の特性となる抵抗係数と反発係数を算出した。さらに、送風機内部に当該粒子が混入した際の粒子挙動をその算出した抵抗係数と反発係数を用いて流体解析シミュレーションした。

この結果、地場企業のシミュレーション技術を用いた製品開発工程に貢献できる可視化システムを開発したので報告する。

2. 実験方法と結果

2.1 粒子について

本研究において対象とした粒子は、石松子 (ヒカゲノカズラの胞子)^[4] である。その特性を表 1 に示す。石松子は粒子径がそろっている、吸湿しない性質を持ち湿度による密度変化が少ない、非付着性であるといった特性を有している^[5] ことから選定した。

表1 石松子の特性^[4]

粒子径	30~40 μm
安息角	32~34度
密度	1.05 g/cm^3

2.2 終端速度の計測

本研究においては石松子の粒子径の範囲からストークス則に従い、対象粒子の終端速度を計測して空気動力学径と抵抗係数を算出する。これは送風機内部を浮遊する粒子を考慮するにあたり、粒子の沈降速度が影響を及ぼすと考えているためである。図 2 に粒子の終端速度を計測するために開発した可視化システムを示

す。篩から測定対象の粒子を自由落下させ、シートビームレーザ（可視化照明用シートビームレーザ3Wタイプ、ウシオ電機(株)製）をシート面が重力方向に対して垂直となるように照射する。照明された粒子は散乱されるため粒子像をハイスピードカメラ（型番：PL3、シナノケンシ(株)製）により撮影でき、記録媒体に二つの時刻の瞬間的な粒子画像として記録する。その二つの時刻の粒子画像から求めた移動量と画像間の時間間隔から、粒子の終端速度を計算する。図3に終端速度の測定実験を、図4に撮影した画像を示す。ハイスピードカメラの撮影速度は8,000フレーム毎秒、画素数は288ピクセル×160ピクセルである。

測定対象の石松子はミクロン単位の微粒子であり、空気中における自由落下では落下後瞬時に終端速度に達することが報告されている^[6]。篩の位置はシートビームレーザの上面から約10 cmとした。予めハイスピードカメラの画角におけるシートビームレーザの厚さを校正しておき、その厚さに相当する距離を通過するために要した時間は粒子が散乱して撮影できている時間とし、シートビームレーザの厚さに相当する距離を粒子が散乱している時間で除することにより終端速度を求めた。

その求めた終端速度と、重力加速度、空気の粘性係数、水の密度を用いて空気動力学径を算出した。各パラメータと計測結果を表2に示す。抵抗係数については粒子レイノルズ数により計算式が異なるため、本研究における標記は省略する。

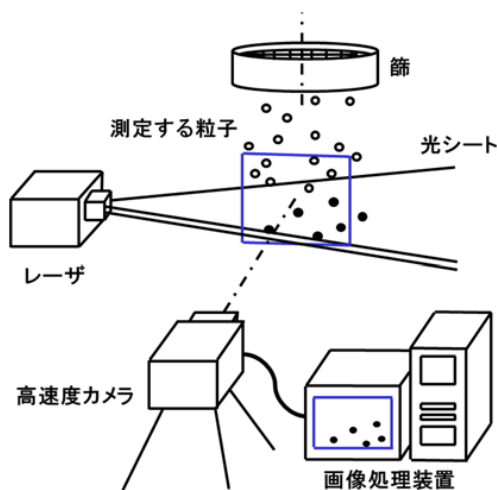


図2 終端速度を計測するための可視化システム

2. 3 反発係数の計測

反発係数を計測するための実験も、図2に示した終



図3 終端速度の測定実験

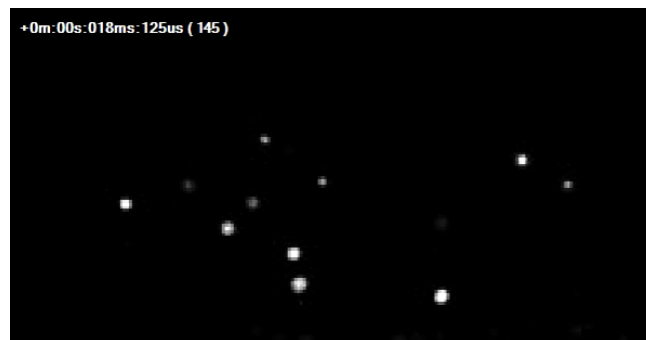


図4 自由落下する粒子の画像

表2 各パラメータと計測結果

終端速度	$2.96 \times 10^{-1} \text{ m/s}$
重力加速度	9.81 m/s^2
粘性係数(空気)	$1.82 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
密度(水)	$1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
空気動力学径(平均値)	$31.76 \text{ }\mu\text{m}$

端速度を計測するための可視化システムと同様の実験装置で実施した。本計測においては、シートビームレーザのシート面が重力方向に対して略平行となるように所定の面に照射して、当該シートビームレーザで散乱する粒子像をハイスピードカメラにて撮影する。図5は反発係数の測定実験を示しており、先端にスリット状の開口を有するノズルを取り付けた噴霧器（ニューポーレングスター、型番：PD-1GN、(株)アグリ製）から測定対象の粒子を噴出して所定の面に吹き付ける。当該粒子が反発する様子を時系列に並べた画像を図6に示す。反発係数は粒子が所定の面に衝突する前後における速度比（衝突後の速度を衝突前の速度で除する）から計算できる。本研究の計測結果から反発係数の平均値は0.53であった。

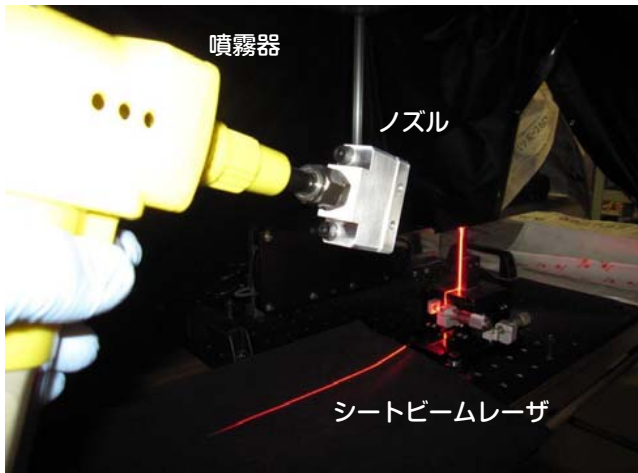


図5 反発係数の測定実験

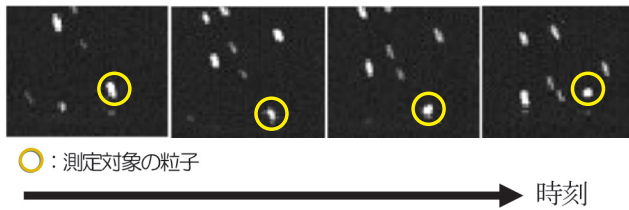


図6 所定の面で反発する粒子の画像

2. 4 粒子の噴出条件に係る測定

送風機内部の粒子挙動を流体解析シミュレーションするにあたり、送風機のエア吸入口から粒子を混入するモデルを設定する。これを受けて、図5に示す噴霧器から噴出する粒子の噴出量と噴出速度を測定した。噴出量については噴霧器の粒子吹き出し口をビニール袋で塞ぎ、1秒間にわたり粒子を噴出して採取した。図7に示すように電子天秤(型番:FZ-200i、(株)オー・アンド・デイ製)を用いて粒子を包含したビニール袋の重さを測定し、予め粒子を噴出する前に測定しておいた粒子を包含していないビニール袋の重さとの差分をとることにより粒子の噴出量を測定した。

また、噴出速度については風速計のセンサユニットに噴霧器の粒子吹き出し口から噴出される風を当てることにより測定した。その計測結果を表3に示す。

2. 5 送風機内部の粒子挙動観察

図8に示す送風機(模型)内部のインペラを一定の回転数で回転させ、エア吸入口から粒子を混入して送風機内部における粒子の挙動を観察した。当該送風機は羽根枚数8枚、出口外径φ104mmのインペラをケーシングに格納した構造をしており、送風機とケー



図7 粒子の噴出量測定

表3 噴出速度の計測結果

噴出量	0.0836 g/s
噴出速度(平均値)	4.0 m/s

シングは可視化のためにアクリルを用いて製作した。実験時の送風機の回転数は440 rpmである。送風機のエア吸入口から、図5に示す噴霧器を用いて表3に示す噴出条件と同様に粒子を1秒間噴出し、シートビームレーザを送風機の吹き出し口から照射した。当該シートビームレーザ上で散乱する粒子像を高速カメラで撮影した。粒子を噴出してから10ミリ秒経過した画像を図9に示す。

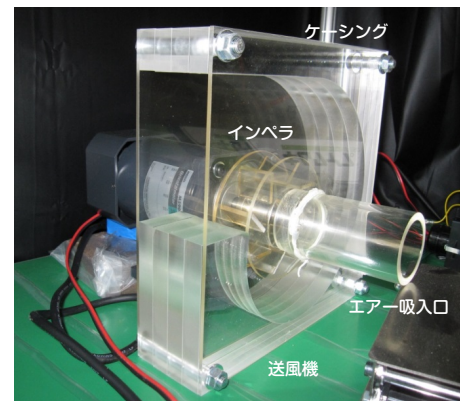


図8 送風機(模型)の外観

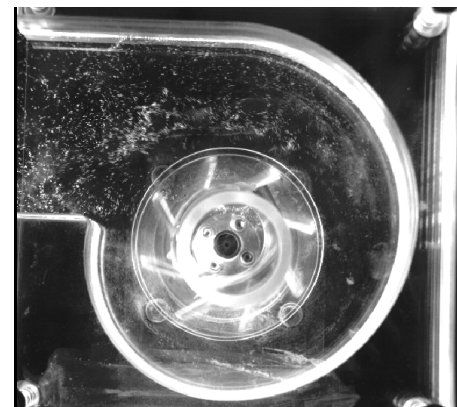


図9 送風機(模型)内部の粒子挙動

2. 6 流体解析シミュレーションを用いた数値解析

図10は送風機の3次元デジタル形状データである。当該モデルを対象として、流体解析シミュレーションを用いた数値解析を実施した。流体解析シミュレーションはアンシス・ジャパン(株)製のFluent(R17.1)を使用している。送風機のインペラが一定の回転数で回転する際における送風機内部の流れは、非圧縮性定常流れ、乱流モデルをk- ϵ モデル、非構造格子(テトラメッシュ)の計算格子を用いて全体の格子数を54万点程度とした条件にて解析している。当該送風機の内部流れにおける粒子挙動の解析は混相流モデルとなり、個々の粒子の動きをラグランジュ的手法で追跡するDPM(Discrete Phase Model)を用い、粒子特性として本研究の計測結果である空気動力学径(表2記載)、反発係数の平均値0.53、送風機のエア吸入口における粒子の噴出条件(表3記載)を用いて数値解析した。その結果を図11に示す。色付けた流線は送風機の内部流れを示しており、白色の流線は粒子の移動軌跡である。

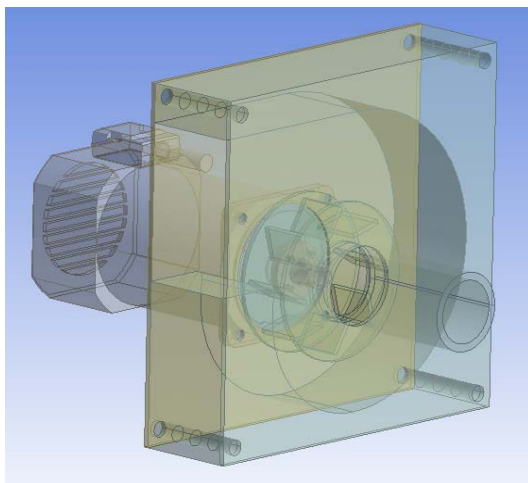


図10 送風機(模型)の3次元デジタル形状データ

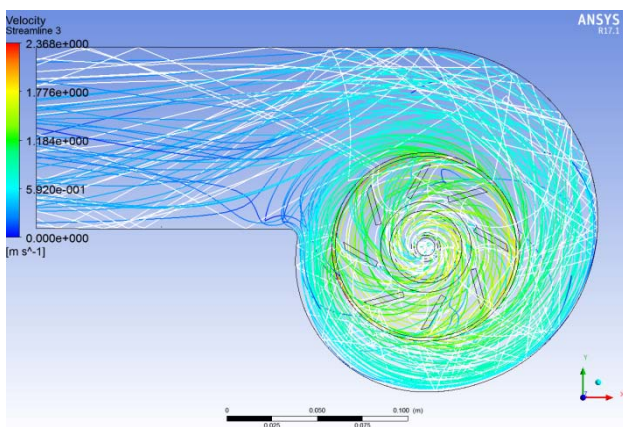


図11 流体解析シミュレーションの結果

3. 考 察

3. 1 終端速度の計測

本研究にて計測した終端速度を用いて算出した空気動力学径の平均値は $31.76 \mu\text{m}$ であった。石松子の空気動力学径の測定は先行文献に $33 \mu\text{m}$ (平均値)と報告されており^[7]、本研究の結果はほぼ同等であることから信頼性の高い数値と考えられる。

3. 2 反発係数の計測

本研究にて計測した反発係数の平均値は0.53であった。計測値のバラツキは0.42から0.66の範囲にあり、反発係数は粒子が面に衝突する直前の自転の有無によって異なることが考えられ、より高速、高感度なハイスピードカメラにて粒子内の輝度分布を追跡しながら反発する現象を撮影するなどの検討が必要である。

3. 3 送風機(模型)内部の粒子挙動観察

エア吸入口から混入した粒子は、送風機内部のインペラに設けた羽根間を通過してケーシングに放出される。ケーシング内部の壁面に当たり反発する粒子の領域と、粒子が壁面をなぞりながら移動する領域を観察できた。壁面をなぞりながら移動する粒子の運動は粒子の特性である流動性や付着性に関連すると考えられ、送風機内部の摩耗による劣化対策を講じる上で考慮すべき現象である。

3. 4 流体解析シミュレーションを用いた数値解析

送風機内部における粒子挙動の流体解析シミュレーションを行った結果、粒子が反発する領域について検討することができた。実際の送風機の現象で見受けられるケーシング内部において粒子が壁面をなぞりながら移動する現象については、解析可能なソフトウェアが異なり今後検討していく予定である。

4. 結 言

本研究の成果について以下に要約する。

- 1) 粒子が浮遊する際により深く関連する粒子特性である空気動力学径と反発係数を実測する可視化システムを提案した。
- 2) 実測した空気動力学径、反発係数、粒子の噴出条件を用いて送風機を対象とした実験と流体解析シミュレーションを実施し、送風機内部における粒子挙動を考察した。その結果、粒子が反発する領域と壁面をなぞりながら移動する領

域が見受けられた。

平成30年度から令和2年度にかけて研究開発した可視化システムと流体解析シミュレーション技術は、地場企業との共同技術開発などの技術支援に活用している。

謝 辞

本研究事業を推進するにあたり、株式会社ツバキ・ナカシマ世知原工場の古田浩之課長から多大なるご協力とご支援を頂いた。

参考文献

- [1] 一般社団法人 可視化情報学会、PIVハンドブック(第2版), 2016. 10.
- [2] 入江：可視化システムを用いたシミュレーション技術の高度化、長崎県工業技術センター研究報告, No. 48, pp. 11-12, 2019. 10.
- [3] 入江：可視化システムを用いたシミュレーション技術の高度化、長崎県工業技術センター研究報告, No. 49, pp. 9-11, 2020. 7.
- [4] http://appie.or.jp/introduction/organization/technical_center/testpowders/sekishoshi/020, Accessed 2018-05.
- [5] 山田：粉体入門、日刊工業新聞社, 2020. 6
- [6] 椿：粒子・粉体工学改訂第2版、日刊工業新聞社, 2016. 12.
- [7] 中根：スギ花粉の浮遊飛散挙動と落下後の跳躍挙動に関して、日本機械学会論文集 B 編, Vol. 78, No. 790, pp. 1220-1234, 2012. 6.