

バーチャルクリーンルームの開発

浦野 明^{*1}・大黒 雅之^{*1}・森川 泰成^{*1}・山崎 喜郎^{*2}・長瀧 慶明^{*3}・佐藤 康弘^{*3}・本橋 比奈子^{*1}

Keywords : cleanroom, particle, simulation, minienvironment, rapid prototype, virtual reality

クリーンルーム、微粒子、シミュレーション、局所清浄空間、ラピッドプロトタイプ、仮想現実感

1. はじめに

クリーンルームの建設では、設計の段階から製品品質に直接影響する生産装置内外の気流、発生した微粒子の挙動、静電気などの変動要因を正確に予測し、これらの変動要因を的確に制御する構造物や生産装置の計画が必要である。すなわち、建築的要因（天井、床、壁の形状や寸法等）と設備的要因（空気の吹出口、吸込口の位置や気流性状等）、および生産装置や搬送装置の形状・動き等の数多くのパラメータを総合的に考慮しなければならない。

気流分布などの環境物理要素を正確に予測するには空間の形状設定やメッシュ生成などの準備に多大な労力を要するため、従来は解析対象となる空間形状が決定されない計画初期段階では、解析結果を提示できないことが普通であった。また、クリーンルームの清浄性に直接影響している微粒子の挙動は、気流のみならず静電気の影響も受けるので、両者の影響を考慮した予測手法が必要である。

以上の背景から、本研究ではVirtual Reality（仮想現実感；以下VR）技術を用いてクリーンルームの計画案の形状・レイアウト変更・吹出し・吸込み配置の影響を初期段階で把握するシステム「バーチャルクリーンルーム」を開発した。本システムはVRによる計画変更と気流解析を連動させた機能および計画案と気流・温熱・微粒子挙動・静電気等の数値解析結果を融合して表示できる機能を有している。

本システムにより、クリーンルームの計画や設計段階で、施設の利用者、設計者、施工者が一同に会し、速やかに合意形成することが可能となった。

* 1 技術センター建築技術研究所環境研究室

* 2 エンジニアリング本部生産施設グループ

* 3 技術センター建築技術開発部ニューフロンティア
技術開発室

2. システムの概要

開発した「バーチャルクリーンルーム」は下記の特徴を持つ。

- ① VR 空間内を自由に移動しながら建物内部やそれに融合したシミュレーション結果が体感できるため、問題に応じたキーポイントの発見が可能となる。
- ② 建物の計画や設計の初期段階で、建物の利用者・設計者・施工者が一同に会して体感できるため、意思合意が迅速にできる。
- ③ 様々なシミュレーション結果を同時に表現できるため、多種の要因が複雑に絡むケースでも最適案の検討が容易となる。
- ④ 三次元 MMI (Man Machine Interface : マンマシンインターフェイス) により、立体画像を見ながらクリーンルームの設備や装置のレイアウトを変更し、気流解析結果を連動して提示できる対話型のラピッドプロトタイプ解析技術を有するため、最適配置計画が迅速にできる。

システムの機能は、気流解析を行う対話型のラピッドプロトタイプ解析機能、および気流解析結果と静電気解析結果を用いて逐次型で解析する微粒子挙動解析機能に大別される。

次節以降、それぞれの機能と解析例を紹介する。

3. ラピッドプロトタイプ解析機能

3.1 システム概要

システム概念図を図-1に示す。また、環境物理要素を予測する気流解析は表-1に示す標準 $k-\epsilon$ モデルに基づくものである。

以下にシステムの主な機能を述べる。

表-1 気流解析の基礎方程式
Table 1 Primitive equation of CFD analysis

a) 連続の式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \tilde{u}_j) = s_m \quad (1)$$

b) Navier-Stokes 方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \tilde{u}_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + s_i \quad (2)$$

c) 乱流モデル

乱流エネルギー k 及び、エネルギー散逸率 ε の輸送方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \tilde{u}_j k - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \mu_t (P + P_B) - \rho \varepsilon - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \tilde{u}_j \varepsilon - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) =$$

$$C_{s1} \frac{\varepsilon}{k} \left[\mu_t P - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] + C_{s3} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t P_B - C_{s2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{s4} \rho \varepsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (4)$$

各定数の値は以下の通りである。

| C _u | σ_k | σ_ε | σ_h | σ_m | C _{s1} | C _{s2} | C _{s3} | C _{s4} |
|----------------|------------|----------------------|------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0.09 | 10 | 1.22 | 0.9 | 0.9 | 1.44 | 1.92 | 0.09144 | -0.33 |

$P_B > 0$ の場合は $C_{s3} = 1.44$, それ以外の場合は $C_{s3} = 0$

t : 時間

x_i : 直交座標 ($i=1, 2, 3$),

u_i : x_i 方向の流体の絶対速度成分

\tilde{u}_j : 速度 u_{cj} で移動する局所 (移動) 座標系に対する流体の相対速度 $u_j - u_{cj}$,

p : ピエゾ圧力 $= p_s - \rho_0 g_m x_m$

p_s : 静圧

ρ_0 : 参照密度

g_m : 重力場成分

x_m : ρ_0 が定義される基準座標

ρ : 密度

τ_{ij} : 応力テンソル成分

s_m : 質量ソース

s_i : 運動量ソース成分

T: 温度

m_m : 混合成分 m の質量分率

H_m : 成分 m の標準生成エンタルピー

Σ : すべての混合成分の和

\bar{C}_p : 温度 T での平均定圧比熱

c_p : 温度 T_0 での基準比熱

$F_{ht,j}$: x_j 方向の熱拡散エネルギー フラックス

S_h : エネルギーソース

h_t : 熱的エンタルピー

$$\mu_t = f_\mu \frac{c_\mu \rho k^2}{\varepsilon}, \mu_{eff} = \mu + \mu_t, P \equiv 2s_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, P_B = -\frac{g_i}{\sigma_{h,t}} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}$$

① 解析形状定義

部材は、天井、床、壁、内壁、アイリッド、窓、エアコン、外気取入口、製造装置・照明・人体などの発熱体、障害物である。形状モデルは図-2 のもの

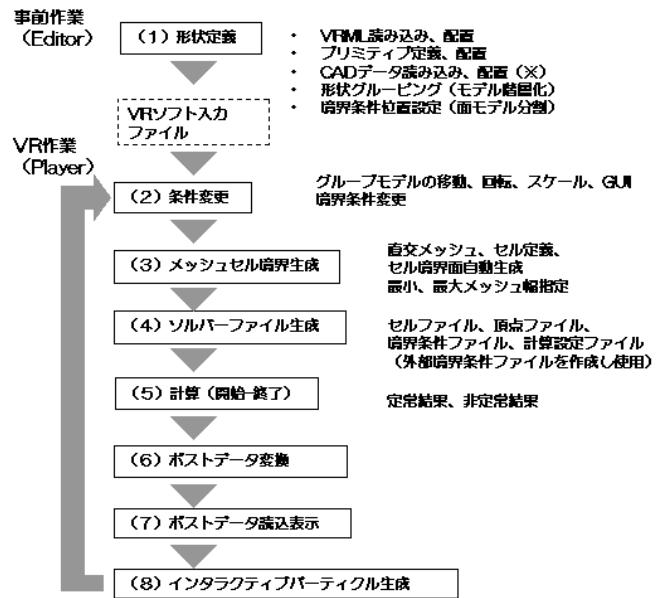


図-1 システム概念図
Fig. 1 Configuration of the system

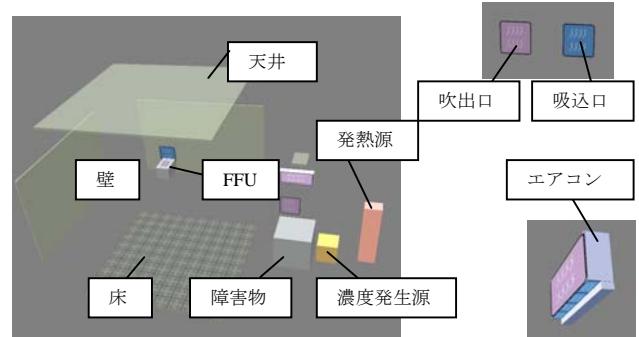


図-2 部材形状モデル
Fig. 2 Models of simulation geometry parts

を作成し、必要に応じて追加する。基本となる解析対象の形状モデルは、エディタ（編集機能）で事前に作成済みとする。

② 条件変更

VR操作で、対象モデルや解析領域を指示し、移動、回転、スケールできる。操作は、三次元指示デバイスによるピック、移動、回転と Joy PAD ボタンによる。また、風速、温度、発熱量の境界条件の制御を行う。

③ メッシュ・セル生成

メッシュ・セル生成は、モデルデータと初期設定ファイルの内容に従い自動で行われる。

④ ソルバーファイル生成、計算

メッシュ・セル・境界条件を生成後、ソルバー入力ファイルを作成し、ソルバーを起動する。

⑤ ポストデータ生成

計算が終了したことを検知し、結果データをコピ

一する。その後、VR上で気流、圧力等の解析結果が提示される。その結果をみて、再度②の条件変更に戻り、繰り返す。この結果表現もベクトル、センター、視野角、視点変更等、自由自在である。

3.2 システムの適用例

本システムを用いて、クリーンルームの局所清浄空間の計画に伴う気流性状の性能検証を行った。

空調方式の異なる2ケースを検討対象とした。

case-1 亂流方式： ISO クラス 7~8 (クラス 1万~10万) レベル。天井面に点在する FFU より吹出し、壁面より吸込む(図-3)。

case-2 亂流方式に局所対策を施した方式： 全体は乱流方式であるが、局所対策として生産装置の上部にアイリッド (垂れ壁) と FFU をつけた方式(図-4)。

解析対象の形状を図-5に示す。W:14.4m×D:7.2m×H:4mの空間の中央に作業台、台の上に製品を設置し、天井に9ヶ所のFFU、壁に4ヶ所の吸込口を設けた。システムの操作に際して case-1 から case-2 への形状変更は、VR システムの画面上で対話的に行うことができる。

生成メッシュは直交メッシュ (メッシュ数約 62,000) とする。

図-6、7に解析結果の表現例を示す。トレーサ運動は、作業台の横に人間が立つ場合の上半身相当の位置に発生したトレーサ (質量・抵抗なし) の移流について、気流ベクトルによる流線を元に表現した。

case-1は作業台の右に渦が発生しており、トレーサ運動をみると、一部が製品に付着する恐れがある。一方case-2では気流が順調に右下に排出されている。

本システムを用いて、以上の結果表現を条件作成・解析実行と同様にVR画面上で行うことができる。

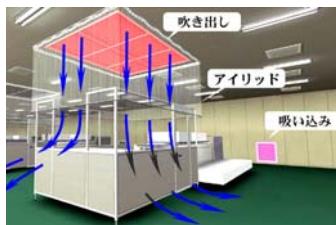
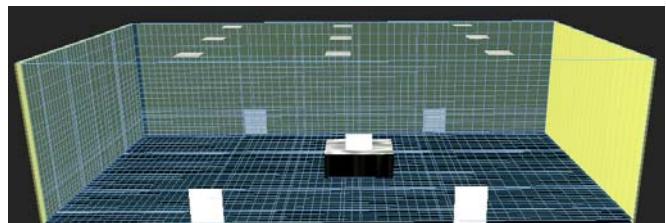


図-3 亂流方式

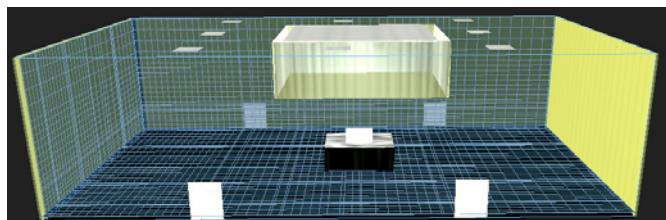
Fig.3 Nonunidirectional airflow

図-4 亂流方式+局所対策

Fig.4 Nonunidirectional airflow and minienvironment



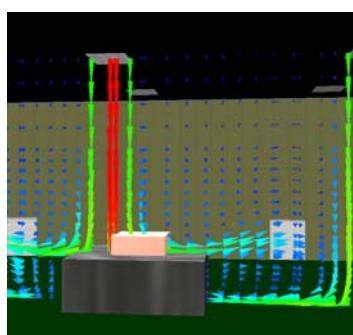
(1) case-1: 亂流方式
(1) case-1: Nonunidirectional airflow



(2) case-2: 亂流方式+局所対策
(2) case-2: Nonunidirectional airflow and minienvironment

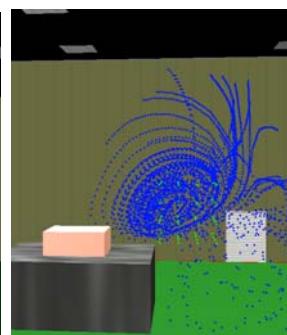
図-5 解析対象の形状

Fig.5 Simulation model geometry



(1) 気流ベクトル

(1) Air flow vector



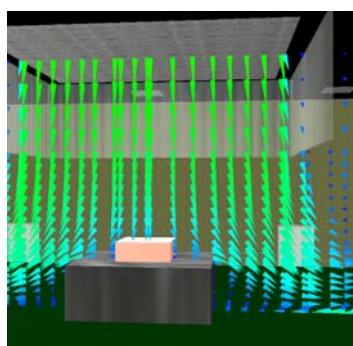
(2) トレーサ運動

(2) Tracer movement

図-6 case-1: 亂流方式 の解析結果表現例

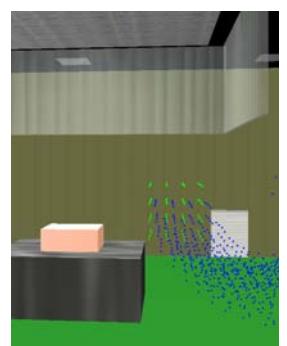
Fig. 6 System output example of case-1

: Nonunidirectional airflow



(1) 気流ベクトル

(1) Air flow vector



(2) トレーサ運動

(2) Tracer movement

図-7 case-2: 亂流方式+局所対策 の解析結果表現例

Fig. 7 System output example of case-2

: Nonunidirectional airflow and minienvironment.

4. 微粒子挙動解析機能

4.1 システム概要および微粒子挙動の解析手法

本解析機能は、気流の流れ・静電気を考慮した微粒子（エアロゾル）の運動を予測する。

流体中を運動する微粒子の解析手法として、オイラー法とラグランジュ法がある¹⁾。オイラー法は流体の運動方程式中にガス状に拡散する濃度として粒子群を考慮する方法であり粒子の濃度が濃い場合に適当である。一方、ラグランジュ法は、粒子一つ一つの運動方程式を解く方法であり、粒子の濃度が薄い場合に適当である。今回は、粒子の濃度が薄く、慣性の影響を考慮可能である、ラグランジュ法を採用した。

また、クリーンルームでは存在する粒子径が主に数 $10 \mu\text{m}$ 以下であり、その数も気体分子の数に比べるとはるかに少ないため、粒子の存在が気流や電界、他の粒子に与える影響は少ないと考える。このため、気流・電界を先に個別に解析し、その結果を用いて粒子の運動方程式を解く方法を用いるのが適当であるとした。

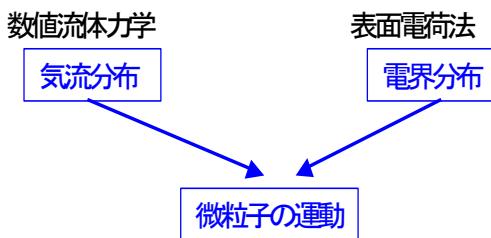


図-8 解析システムの流れ
Fig.8 Configuration of simulation system

以上の検討に基づき、図-8 のような解析システムを構築した。数値流体力学による気流解析と、表面電荷法による電界解析をそれぞれ独立して行う。気流による抗力と、電界によるクーロン力を外力として与えることにより、微粒子挙動を予測する。気流解析は、ラピッドプロトタイプ解析に用いた基礎方程式（表-1）に基づき実施する。電界解析の手法は次節で述べる。

ラグランジュ法による流速 u の流体中にある質量 m_d 、体積 V_d 、断面積 A_d の粒子の運動量方程式は、(5)式で示される。

$$m_d \frac{du_d}{dt} = \frac{1}{2} C_d \rho A_d |u - u_d| (u - u_d) - V_d \nabla p + F_b \quad (5)$$

ここで右辺第1項は抵抗力 (C_d は抵抗係数)、第2項は搬送流体の圧力勾配 (∇p) の影響、第3項は体積力である。第3項にクーロン力の影響を考慮する。

微粒子と固体表面の境界条件として以下を仮定した。

- ・微粒子が流体の運動量に及ぼす影響は無視する。
- ・微粒子の(粒子同士、流体、固体に対する)熱的影響は無視する。

4.2 電界強度分布の解析手法

電界（電場）の計算手法として、領域分割法は空間に電場に影響を与える物体が存在する場合、境界分割法は、空間の物体が電場に与える影響を無視できる場合に適当であると考えられる。

ここでは、空中の微粒子による電界が他の微粒子に与える影響は無視し、境界分割法の一つである表面電荷法を用いることを検討する。微粒子による汚染が懸念される対象物であるワーク（製品）表面を多数の微小三角形に分割し、それぞれの多角形が粒子 P に与える電場は代数式により求められる。重ね合わせ法により、それぞれの微小多角形による電界の合計値が点 P の電場である。電界の勾配を解析することにより、電位が求められ、これから物体に加わる力がクーロン力により求められる。

ワーク表面を分割した微小三角形要素の表面電荷密度を σ とする。ここで、微小三角形要素内の電荷の密度は一定とする。この三角形表面電荷が空間中の任意の点 $P(x, y, z)$ に生じる電位 ϕ は下式で与えられる。

$$\phi_i = \frac{\sigma \Delta S}{4\pi\epsilon_0 l_i} \quad (6)$$

ここで ΔS は微小要素 i の面積であり、表面電荷は $\sigma \Delta S$ であらわされる。また、

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \left[\text{C}^2 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-2} \right] \quad (7)$$

である。距離 l_i は、微小多角形の中心点と点 P との距離である。

空間の電界 E [N/C, $\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}/\text{A} \cdot \text{s}$] (ベクトル量) は、電位 V (スカラ量) の勾配で求められ、次式で表される。

$$\vec{E} = -(i \frac{\partial V}{\partial x} + j \frac{\partial V}{\partial y} + k \frac{\partial V}{\partial z}) = -\nabla V \quad (8)$$

点電荷 q を有する空間中の点 A にかかるクーロン力 \vec{F} (ベクトル量) は電界 E を用いて

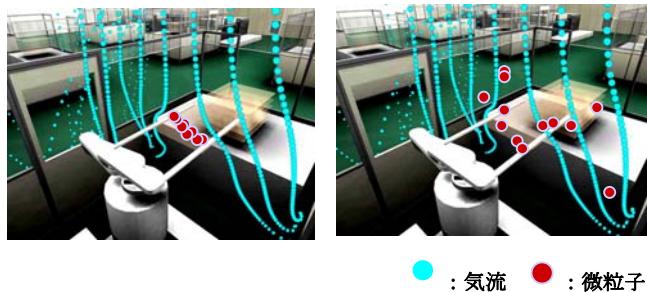
$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (9)$$

で表される。

4.3 微粒子挙動解析機能の適用例

乱流方式に局所対策を施した方式(図-4)を対象に微粒子挙動を解析した。

ガラス基板の表面に静電気が帯電している場合とイオナイザなどにより除電した場合のそれぞれについて、



(1) 帯電した場合 (2) 除電した場合
 (1) Charged plate (2) Non-charged plate
 図-9 ガラス基板の上部で発生した微粒子挙動解析結果
 Fig.9 Simulation output of particle movement which outbreaked above glass plate.

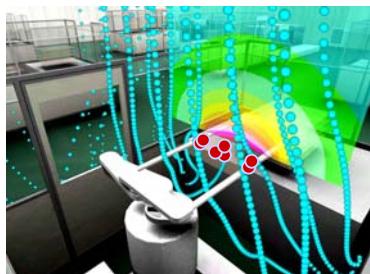


図-10 電界と気流・微粒子の同時表示結果
 Fig.10 Simultaneous expression of electric field, air current, and particle movement.

ガラス基板の150 mm上部で発生したと想定した微粒子の挙動の解析を行った。図-9に結果を示すが、帶電している場合は微粒子がガラス基板の上に付着するのに対して、除電すると微粒子は気流に従って基板の上を外側に流れ去る結果が得られた。

ガラス基板が帶電した場合の静電気による空間の電界分布を気流・微粒子と同時に表示したものが図-10である。

このように、高度なシミュレーション技術とVR技術を融合させることにより、設計の精度を向上させるだけでなく、計画変更などへの速やかな対応、関係者間での意思合意が期待できる。

5. おわりに

本研究により開発されたバーチャルクリーンルームにより、クリーンルーム空間に計画案だけでなく様々なシミュレーション結果を融合させて体感することが可能になった。

今後は本システムを用いて、製造装置・人体からの発塵状況を可視化して把握することにより、製品に微粒子が付着しないようにするための空調計画・建築・製造装置のレイアウト計画に反映していく予定である。

参考文献

- 田之上健一郎ほか：荷電粒子の壁面沈着シミュレーション，静電気学会誌，26，2，71-77，2002.