

# 降雨時の大気におけるばい塵粒子の 3次元拡散・沈着シミュレーション

解析事業部 環境解析2部

樋谷 克己

## 1. はじめに

降雨時に煙突から排出される煤塵粒子の拡散は洗浄効果により若干の濃度低下があるが、逆に付近の地表面に降下する量が大きくなると考えられる。そこで、降雨時の煤塵粒子の地表面への降下を評価するための拡散シミュレーションを行った。解析は、周囲の地形・建物等によって変動する局所的な流動を考慮できるよう汎用3次元熱流動拡散解析ソルバー“PHOENICS”を用いた。対象は斜面の下部にある工場から排出されるばい塵粒子の拡散である。

$$\begin{aligned} \partial U_i / \partial t + U_j (\partial U_i / \partial x_j) = & -(1/\rho) \partial p / \\ \partial x_i + \partial / \partial x_j (\nu \partial U_i / \partial x_j - u_i u_j) + F_i & \dots\dots ② \end{aligned}$$

### • エネルギー方程式

$$\begin{aligned} \partial T / \partial t + U_i (\partial T / \partial x_i) = a (\partial T / \partial x_i) & \dots\dots ③ \end{aligned}$$

### • 拡散方程式

$$\begin{aligned} \partial C / \partial t + U_i (\partial C / \partial x_i) = \partial / \partial x_i (D (\partial C / \\ \partial x_i)) - C \lambda & \dots\dots ④ \end{aligned}$$

### • k方程式

$$\begin{aligned} \partial k / \partial t + U_i \partial k / \partial x_i = \partial / \partial x_i ((\nu_t / \sigma_k) \\ \partial k / \partial x_i) - u_i u_j \partial U_i / \partial x_j - \epsilon & \dots\dots ⑤ \end{aligned}$$

### • ε方程式

$$\begin{aligned} \partial \epsilon / \partial t + U_i \partial \epsilon / \partial x_i = \partial / \partial x_i ((\nu_t / \sigma_\epsilon) \\ \partial \epsilon / \partial x_i) - C_1 (\epsilon / k) u_i u_j \partial U_i / \partial x_j \\ - C_2 \epsilon^2 / k & \dots\dots ⑥ \end{aligned}$$

ここで、 $u_i u_j = (2/3) k \delta_{ij} - \nu_t ((\partial U_i / \partial x_j) + (\partial U_j / \partial x_i))$ ,  $\nu_t = C_\mu k^2 / \epsilon$  の関係がある。

( $x_i$  : 座標成分,  $x_1 = x$ ,  $x_2 = y$ ,  $x_3 = z$ ,  $U_i$  : 平均流速成分,  $u_i$  : 変動流速成分,  $\rho$  : 流体の密度,  $p$  : 圧力,  $t$  : 時間,  $\nu_t$  : 動粘性係数,  $\nu_t$  : 乱流動粘性係数,  $F_i$  : 外力成分,  $C$  : 濃度,  $D$  : 拡散係数,  $\lambda$  : 洗浄係数,  $k$  : 乱流エネルギー ( $= (u_1^2 + u_2^2 + u_3^2) / 2$ ),  $\epsilon$  : 粘性散逸率 ( $= \nu_t (\partial u_i / \partial x_j) (\partial u_i / \partial x_j)$ ))

## 2. 解析モデル

### 2.1. 基礎方程式

空気は流速が低いので非圧縮性流体として扱い、流れは乱流である。また、座標系は直交座標を用いる。

基礎方程式をテンソル表示で書くと以下のようになる。添え字の*i, j* ( $= 1, 2, 3$ ) は座標  $x, y, z$  方向を表わす。流れは乱流なので数値シミュレーションで広く用いられている  $k-\epsilon$  モデルを使用する。

#### • 質量保存式(連続の式)

$$\partial U_i / \partial x_i = 0 \quad \dots\dots ①$$

#### • 運動方程式(ナビエーストークスの式)

また、シュミット数、乱流シュミット数は1とする。即ち、 $D = \nu_l + \nu_t$ となる。

また、以下の項は実験値である。 $C_1 = 1.44$ ,  $C_2 = 1.92$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\epsilon = 1.3$

上記微分方程式を数値的に解くための離散化手法はPHOENICSでは有限体積法を採用している。

## 2.2. 大気中のばい塵粒子の重力沈降

大気中の粒子の終末沈降速度は、以下の式を粒子レイノルズ数により使い分ける。

$$v = (\rho_p - \rho_f) D_p^2 g / 18\mu$$

:  $Re_p < 2$  ……⑦ (Stokesの式)

$$v = (4(\rho_p - \rho_f)^2 g^2 / (225\mu\rho_f))^{1/3} D_p$$

:  $2 < Re_p < 500$  ……⑧ (Allenの式)

$$v = (3D_p(\rho_p - \rho_f)g / \rho_f)^{1/2}$$

:  $Re_p > 500$  ……⑨ (Newtonの式)

( $v$  : 粒子終末沈降速度,  $\rho_p$  : 粒子密度,  $\rho_f$  : 空気密度,  $\mu$  : 空気粘性係数,  $D_p$  : 粒子径,  $g$  : 重力加速度,  $Re_p$  : 粒子レイノルズ数( $= \rho_f v_r D_p / \mu$ ,  $v_r$  : 代表空気-粒子相対速度))

ばい塵濃度計算時、運動方程式で求めた大気流速の鉛直成分に、上記⑦～⑨式で計算した終末沈降速度を加えて粒子の鉛直方向速度成分とする。

## 3. 解析例

### 3.1. 概要

図1に示すように斜面付近にある工場のばい煙が一定風速・一定風向の風に流される場合のばい塵粒子の拡散状況を数値シミュレーションによって計算を行った。

### 3.2. 計算条件

計算条件は以下の通り。解析領域を図2に示す。

- 計算領域…191m × 146m × 80m
- 風向…西(図の左から右に流れる)
- 風速…2 m/s(平均風速時)
- 空気温度…25 °C
- 空気動粘性係数… $1.54 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
- 空気密度…1.184 kg/m<sup>3</sup>
- 排ガス流量…13000 Nm<sup>3</sup>/h
- 排ガス流出速度…0.8 m/s
- 排ガス温度…150 °C
- 煙突高さ…30 m

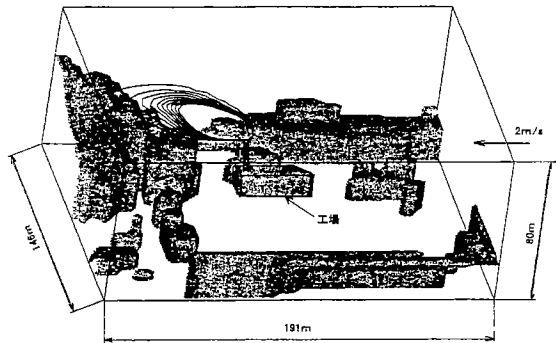


図1 粒子拡散解析概略図

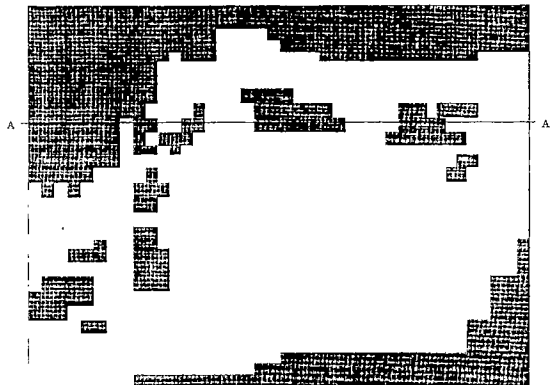


図2 計算領域平面図

- ばい塵粒子径…小さい粒子および大きい粒子の代表として1 μmおよび100 μmの粒子を対象とする
- ばい塵粒子密度…2000 kg/m<sup>3</sup>
- ばい塵排出濃度…100 mg/m<sup>3</sup>
- 降雨強度…5 mm/h

### 3.3. 浮力の影響

温度差による浮力の影響の考慮にはブシネスク近似を用いる。すなわち、鉛直方向の運動方程式の外力項として以下の式を加える。即ち②式で

$$F_i = \rho g \beta (t - t_a)$$

(i = 3, β : 体積膨張率, t : 空気温度, t<sub>a</sub> : 大気主流温度 (= 25℃))

となる。

### 3.4. 粒子沈降速度

風速2m/sを代表速度とすると、動粘性係数は1.54 × 10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/sであるから、

- 粒子径1 μmの場合

粒子レイノルズ数 :

$$Re_p = 2 \times 10^{-6} / 1.54 \times 10^{-5} = 0.13$$

Re<sub>p</sub> < 2なのでStokesの式⑦を用いると、

$$v = 6.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

となり、無視できる速度である(空気と一体となって運動する)。

- 粒子径100 μmの場合

粒子レイノルズ数 :

$$Re_p = 2 \times 10^{-4} / 1.54 \times 10^{-5} = 13.0$$

2 < Re<sub>p</sub> < 500なのでAllenの式⑧を用いると、

$$v = 0.43 \text{ m/s}$$

となる。

### 3.5. 雨滴と粒子の衝突、地面への沈着

降雨時、ばい塵粒子が雨滴に衝突し、雨滴とともに落下する。粒子と雨滴の衝突効率をE(a)とすると(aは粒子半径)、E(a)は以下の式で求められる<sup>1)</sup>。

$$E(a) = 0.05 (a < 1.5 \mu\text{m}) \quad \dots\dots\textcircled{10}$$

$$0.05 < E(a) < 1.0 (1.5 \mu\text{m} < a < 20 \mu\text{m}) \quad \dots\dots\textcircled{11}$$

$$E(a) = 1.0 (a > 20 \mu\text{m}) \quad \dots\dots\textcircled{12}$$

粒子径は1 μmおよび100 μmを対象としているので、⑩式または⑫式を用いる。

単位時間にばいじんが雨滴によって除去される割合(洗浄係数)をλ(1/s)は、降水強度をI(r)(mm/h)とすると、以下の式で表される<sup>1)</sup>。

$$\lambda = 4.65 \times 10^{-4} E(a) I^{0.79} \quad \dots\dots\textcircled{13}$$

降水強度は5mm/h、粒子径は1 μmまたは100 μmなので⑩、⑫、⑬式より、

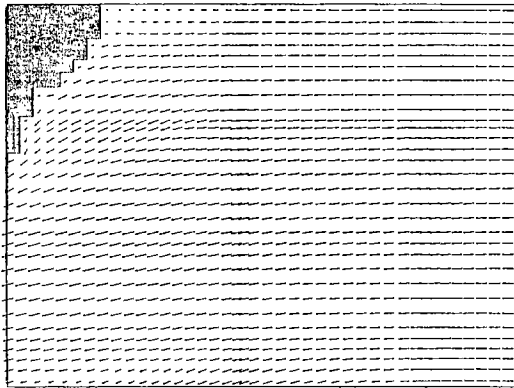
$$\lambda = 8.29 \times 10^{-5} (1/\text{s}) \quad (\text{粒子径: } 1 \mu\text{m})$$

$$\lambda = 1.66 \times 10^{-3} (1/\text{s}) \quad (\text{粒子径: } 100 \mu\text{m})$$

ばい塵粒子の拡散を計算する際、雨滴と衝突し、地面に落下するばい塵粒子は、濃度をCとすると、単位時間当たりCλの割合でばい塵が計算領域から消滅させることにより、モデル化する。また、ばい塵沈着量は、雨滴と衝突した粒子の量を鉛直方向に加えることにより計算する。

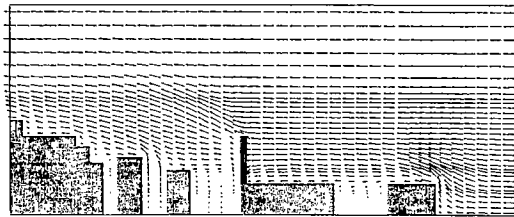
#### 4. 計算結果

計算領域の平面図を図2, 流速ベクトル図を図3, 図4に, ばい塵粒子濃度コンタ図を図5~図8に示す(図4, 図7~図8の断面A-Aは図2参照)。ま



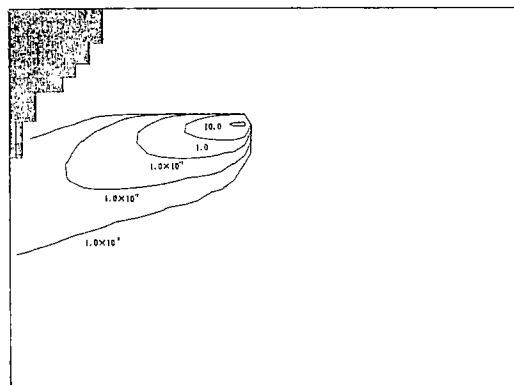
1.50 m/s

図3 流速ベクトル図(排気口より上方4m)



1.50 m/s

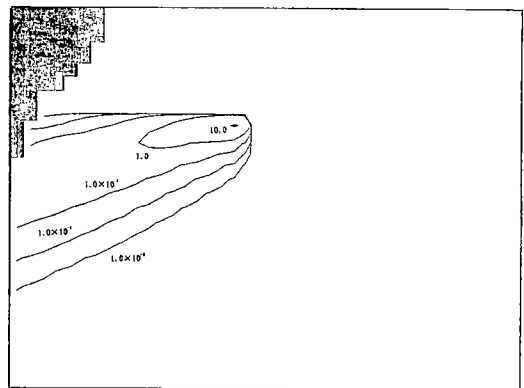
図4 流速ベクトル図(断面A-A)



単位: mg/m<sup>3</sup>

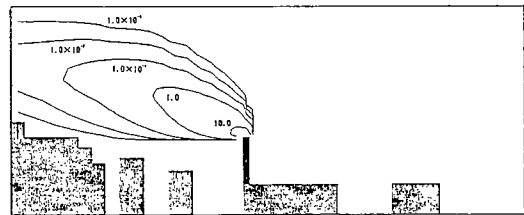
図5 粒子濃度コンタ図(粒径1 μm, 排気口より上方4m)

た, 図9~図10に粒子沈着量コンタ図を示す。図5~8から異なる粒子径による拡散の状況の違いが分かる。水平方向の濃度分布がやや南側偏っている(図5~6)のは地形の影響により南側に向かう空気の流れが原因である。これは地形変化を考慮した3次元の流れ場を計算し, その結果を3次元拡散計算に反映させることにより明らかになったものである。また, 図9~図10より沈着量の分布



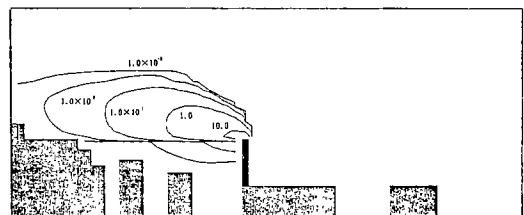
単位: mg/m<sup>3</sup>

図6 粒子濃度コンタ図(粒径100 μm, 排気口より上方4m)



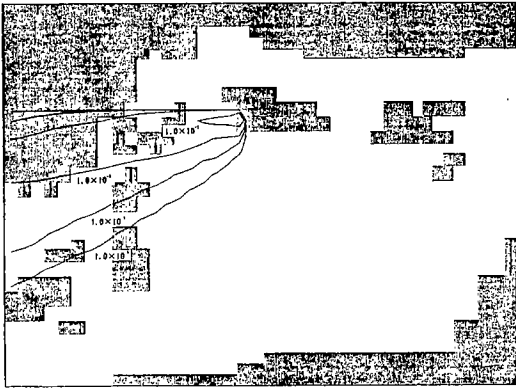
単位: mg/m<sup>3</sup>

図7 粒子濃度コンタ図(粒径1 μm, 断面A-A)



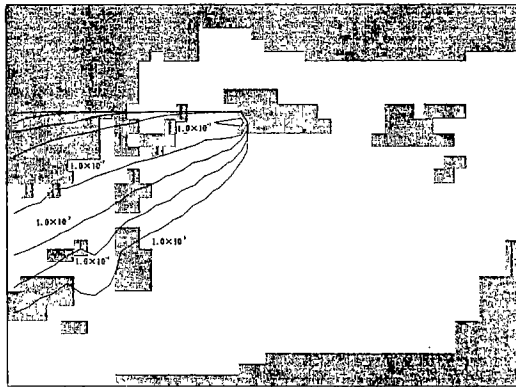
単位: mg/m<sup>3</sup>

図8 粒子濃度コンタ図(粒径100 μm, 断面A-A)



単位: mg/(m<sup>2</sup>·s)

図9 粒子沈着量コンタ図(粒径1 μm)



単位: mg/(m<sup>2</sup>·s)

図10 粒子沈着量コンタ図(粒径100 μm)

は濃度分布と同傾向であるが、それぞれの粒子径に対する衝突効率の違いにより沈着量が大きく異なることがわかる。

## 5. おわりに

地形および粒径を考慮した場合の、降雨時のばい塵粒子の拡散・沈着の状況を把握することができた。100 μm粒子の場合、沈着量 $0.01\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) = 26\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{月})$ 以上の領域がかなり広がっている。これは土地採取地域付近の降下ばい塵量(実測値例:  $4.4\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{月})$ )を参考にすると、かなり大きいように思える。但し、本計算は定常計算であり、降雨の状態がずっと続いた場合の計算値であるので直接の比較は困難である。そこで、厳密にはある期間の降雨頻度、降雨強度、風向風速を考慮した計算が必要であり、実測値との比較と合わせて今後取組みたい。

## 文 献

- 1) 藤田慎一: 降雨による粒子状物質の洗浄作用, 大気汚染学会誌 23(6) 335~341 (1988)

