II-77　熱源を伴う場合の大気拡散シミュレーション

京都大学大学院　学生員　田中宏明
京都大学工学部　正会員　平岡正勝
京都大学大学院　学生員　古市　徹

1. はじめに

火力発電所やゴミ焼却場等，排熱量の大きな固定発生源から汚染物質が排出された時、熱作用による影響は定性的には図1のように考えられる。熱と流れの場は相互に影響を及ぼし合うため、汚染物質の拡散予測のためには熱と物質の同時移動モデルを解析する必要がある。そこで、煙突から熱と物質が同時に排出された時の物質の挙動を調べるため、同時移動モデルに関する基礎式の数値シミュレーションを行なった。

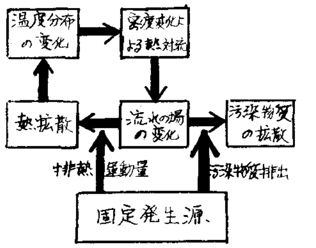


図1 熱と物質が同時排出された時の熱の影響

参考文献
1) C.C.Shir; A Pilot Study in Numerical Techniques for Predicting Air Pollution Distribution Down Wind from Line Stack : Atoms. Env. 4 (1970)
2) 藤本他；角柱周辺の気流および風圧力に関する数値解析的研究 建築学会論文報告集 No.281
3) J.E.Fromm; Practical Investigation of Convective Difference Approximations of Reduces Dispersion : Physics of Fluids Supplement II (197-)

2. モデル及び基礎式

時刻 $t=0$ に煙突から熱量 Q_t，汚染物質量 Q_c，運動量 Q_v を一定の割合で排出し始めたとする。簡単のため二次元流について考え、流れは非圧縮性で物質は反応性がなく、またブジネスク近似を行なう等の仮定を置いて連続・運動量・熱・拡散の基礎式を導き、物理量を空間平均値とそれからの変動量の和で表わし、Smagorinsky-Deardoff モデルにより変動量を平均量で表現すると右の様になる。ここで u，v は x，y 方向の風速，P は圧力，T は温度，C は濃度でそれぞれ空間平均量である。また Γ は乾燥断熱減率 g は重力加速度、ρ_0，C_{pa} は空気の密度及び定圧比熱で添字0は初期状態量を示す。K_v は

(連続式)
$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \tag{1}$$

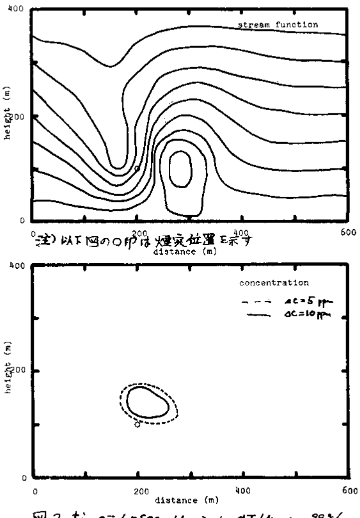
(運動量式)
$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial P}{\partial x}+2\frac{\partial}{\partial x}\left(K_v\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left\{K_v\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right\} \tag{2}$$
$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}=-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial P}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left\{K_v\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right\}+2\frac{\partial}{\partial y}\left(K_v\frac{\partial v}{\partial y}\right)-\frac{T}{T_0}g+\frac{Q_v}{\rho_0} \tag{3}$$

(熱方程式)
$$\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(K_t\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_t\frac{\partial T}{\partial y}\right)-v\left(\frac{dT_0}{dy}+\Gamma\right)+\frac{Q_t}{\rho_0 C_{pa}} \tag{4}$$

(拡散方程式)
$$\frac{\partial C}{\partial t}+u\frac{\partial C}{\partial x}+v\frac{\partial C}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(K_c\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_c\frac{\partial C}{\partial y}\right)+Q_c \tag{5}$$

(渦動粘性係数)
$$K_v=(C_1\Delta)^2\left[2\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+2\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{6}$$

Subgrid Scale 渦動粘性係数と呼ばれ Deardoff らは格子スケール以下の乱れ作用を格子スケール以上の流動に結びつけ、(6)式の様に表現した。ここで Δ は格子間隔の平均値で $\Delta=\sqrt{\Delta x\Delta y}$，$C_1$ は普遍定数で0.12とした。渦熱伝導度 K_t、渦拡散係数 K_c については，$K_v=K_c=K_t$ としている。尚、$K_v=K_c=K_t=$ 一定とした時の計算も行なった。基準速度 u_0、基準長 H を用いて(1)～(6)を無次元化し、流れ関数 ψ，渦度 Ω を導入すると(7)～(14)式の様になる。



注) 以下図の○印は煙突位置を示す

図2 time=60sec u_0=2m/s dT_0/dy=−0.0098℃/m Q_t=1Kcal/ms Q_c=1g/ms (中立)

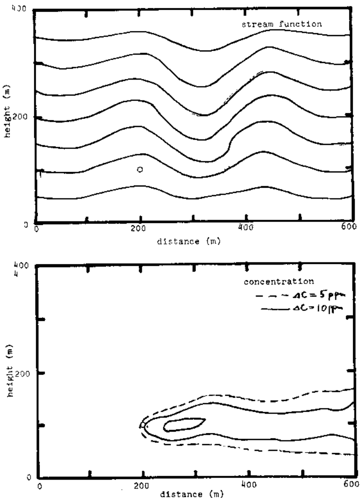


図3 time=600sec u_0=4m/s dT_0/dy=0.0℃/m Q_t=1Kcal/ms Q_c=1g/ms (安定)

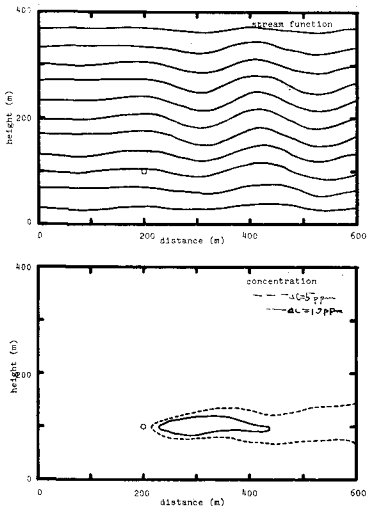


図4 time=450sec u_0=6m/s dT_0/dy=0.0℃/m Q_t=1Kcal/ms Q_c=1g/ms (安定)

ここで$U, V, \tau, K_\nu, K_t, K_c$は無次元化されたX, Y方向の風速、時間、渦動粘性係数、渦熱伝導度、渦拡散係数である。また濃度と温度についても基準温度T_s基準濃度C_s及び基準温度差ΔT, 基準濃度差ΔCを用いて$\theta=(T-T_s)/\Delta T$ $C^*=(C-C_s)/\Delta C$と無次元化している。

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial X^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial Y^2}=-\Omega \quad (7) \qquad \frac{\partial\psi}{\partial X}=-V \quad (8) \qquad \frac{\partial\psi}{\partial Y}=U \quad (9)$$

$$\frac{\partial\Omega}{\partial\tau}+U\frac{\partial\Omega}{\partial X}+V\frac{\partial\Omega}{\partial Y}=K_\nu\left(\frac{\partial^2\Omega}{\partial X^2}+\frac{\partial^2\Omega}{\partial Y^2}\right)+2\left(\frac{\partial K_\nu}{\partial X}\frac{\partial\Omega}{\partial X}+\frac{\partial K_\nu}{\partial Y}\frac{\partial\Omega}{\partial Y}\right)-4\frac{\partial^2 K_\nu}{\partial X\partial Y}\frac{\partial^2\psi}{\partial X\partial Y}$$
$$-\left(\frac{\partial^2 K_\nu}{\partial X^2}-\frac{\partial^2 K_\nu}{\partial Y^2}\right)\left(\frac{\partial^2\psi}{\partial X^2}-\frac{\partial^2\psi}{\partial Y^2}\right)+\frac{\Delta T g H}{T_0 u_0^2}\frac{\partial\theta}{\partial X}+\frac{Q_\nu}{\rho_0}\frac{H^2}{u_0^2} \quad (10)$$

$$\frac{\partial\theta}{\partial\tau}+U\frac{\partial\theta}{\partial X}+V\frac{\partial\theta}{\partial Y}=K_t\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial X^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial Y^2}\right)+\frac{\partial K_t}{\partial X}\frac{\partial\theta}{\partial X}+\frac{\partial K_t}{\partial Y}\frac{\partial\theta}{\partial Y}-V\left(\frac{1}{\Delta T}\frac{\partial T_0}{\partial Y}+\frac{\Gamma H}{\Delta T}\right)+\frac{H}{u\Delta T}\frac{Q_t}{\rho_0 C_p} \quad (11)$$

$$\frac{\partial C^*}{\partial\tau}+U\frac{\partial C^*}{\partial X}+V\frac{\partial C^*}{\partial Y}=K_c\left(\frac{\partial^2 C^*}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 C^*}{\partial Y^2}\right)+\frac{\partial K_c}{\partial X}\frac{\partial C^*}{\partial X}+\frac{\partial K_c}{\partial Y}\frac{\partial C^*}{\partial Y}+\frac{H}{u_0\Delta C}Q_c \quad (12)$$

$$K_t=K_c=K_\nu=(C\Delta)^2\left[4\left(\frac{\partial^2\psi}{\partial X\partial Y}\right)^2+\left(\frac{\partial^2\psi}{\partial X^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial Y^2}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

3. 計算方法

差分法で行ない、移流項にはFrommの差分方式を用いて(10)～(12)式までを陽解法で解く。また$K_{\nu,c,t}$及びU, Vは時間的空間的に変動するので移流項と拡散項についての計算安定条件を設定し、差分時間ステップを変えた。(7)式についてはS.O.R.法を用いた。初期条件は風速をU=一定V=0とし温度は高さにより与え$\theta=\theta_0(Y)$また濃度については$C^*=C^*(Y)=0$を与える。境界条件とフローチャートを図5と図6に示す。

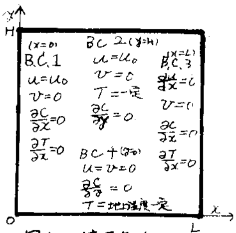


図5 境界条件

4. 結果

風速・安定度(dT_0/dY)・排熱量等を変えて計算を行なった。その一部を示す。$K_{\nu,c,t}$=一定とした時の結果を図2～4に、Deardroffモデルを用いた時の結果を図7～9に示す。計算結果から次の事柄が得られた。①Plumeの蛇行現象や熱対流による渦の発生等の現象が現われた。②風速が小さい時は渦の発生が顕著に現われ風速が大きいほど渦は現われにくい。渦の発生の有無により濃度分布もかなり異なる。③排熱量が大きいほどPlumeの上昇は大きくなる。④大気安定度が不安定なほど熱による流れの場の乱れは大きくなる。⑤$K_{\nu,c,t}$を一定とした時とDeardroffモデルにより変化させた時では同じ様な傾向を示すが、後者の場合の方が風速変動(特に鉛直方向)を強く反映するため、Plumeの上昇が大きくなるようだ。

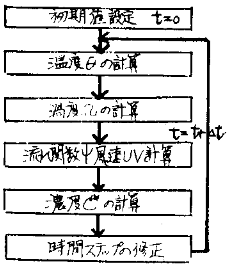


図6 フローチャート

5. おわりに

Deardroffモデルを用いる場合、計算の安定性を保つために時間ステップを小さくせざるを得ないため、計算時間が長くかかり、短時間のシミュレーションとなった。また$K_{\nu,c,t}$一定の時の設定条件を若干変えている。煙源で運動量Q_νは加えていないが、その効果による煙突での吐出速度として境界条件を与えることを考慮中である。

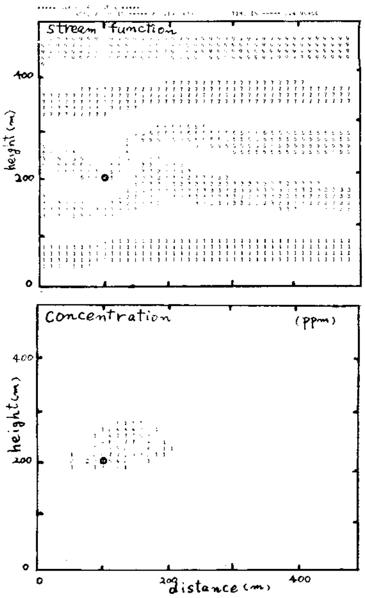


図7 time=48.9 sec. u_0=5m/s dT_0/dy=0.0℃/m Q_t=1 Kcal/ms (安定) Q_c=1 g/ms

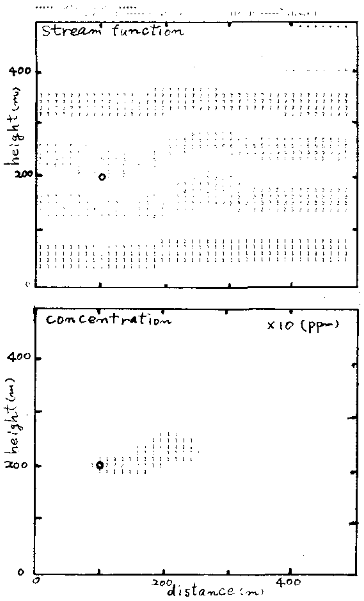


図8 time=124 sec u_0=5m/s dT_0/dy=0.0℃/m Q_t=0.1 Kcal/ms (安定) Q_c=1 g/ms

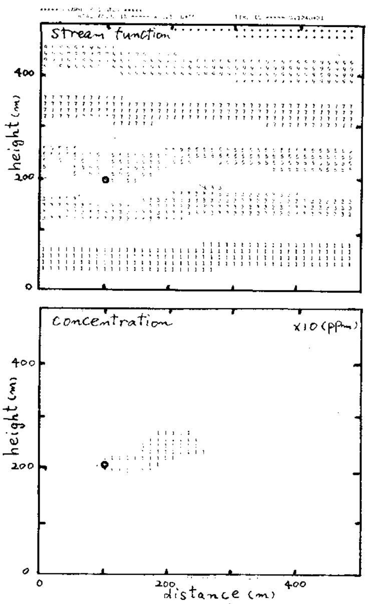


図9 time=124 sec u_0=5m/s dT_0/dy=−0.0098℃/m Q_t=0.1 Kcal/ms (中立) Q_c=1 g/ms