

II-224 有限要素法による海陸風の数値解析

長野県 正員 越野 武一
信州大学工学部 正員 富所 五郎

1. はじめに 工場や車両等からの排出物による近年の大気汚染は、地球規模の大きな問題として取り沙汰されている。これら汚染物質の大気中に於ける挙動において、風による移流・拡散の影響は絶大であり、このため風の流れについての研究が数多く行われている。本研究では、局地風の中でもとりわけその挙動及び役割が重要視されている海陸風について地形を考慮した数値解析を行う。数値解析法は風速等、空間変数の形状関数として水平方向の区分多項式と鉛直方向の余弦関数の積を用いたGalerkin有限要素法¹⁾を適応する。

2. 基礎方程式 局地風の支配方程式は、鉛直方向の運動方程式に静力学平衡を仮定すると以下である。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + L' \cdot u + w \frac{\partial u}{\partial z} = -C_p \bar{\theta} \frac{\partial \xi}{\partial x} + D' \cdot u + f_v$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + L' \cdot v + w \frac{\partial v}{\partial z} = -C_p \bar{\theta} \frac{\partial \xi}{\partial y} + D' \cdot v - f_u$$

$$C_p \frac{\partial \xi}{\partial z} = -\frac{g}{\bar{\theta}} (\bar{\theta} - \theta')$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \theta'}{\partial t} + L' \cdot \theta' + w \frac{\partial \theta'}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (K_h \frac{\partial \theta'}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_h \frac{\partial \theta'}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_v \frac{\partial \theta'}{\partial z})$$

ただし、 $L' = u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y}$, $D' = \frac{\partial}{\partial x} (A_h \frac{\partial}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_h \frac{\partial}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_v \frac{\partial}{\partial z})$

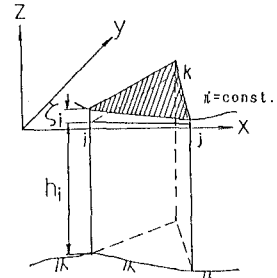


図-1 座標および三角柱要素

また、状態方程式； $P = \rho RT$ の関係がある。ここに、 x 軸は東、 y 軸は北に、 z 軸は上空境界面（大気境界層と自由大気境界）を原点とし上方向にとり、初期状態で、 $z=0$ において $\xi = \text{const.}$ を満足するものとする。 u, v, w はそれぞれ x, y, z 軸の風速成分、温位 $\theta (= \bar{\theta} + \theta')$ については、 $\bar{\theta}$ を平均値、 θ' をそれからの偏差とする。更に、 C_p は空気の下圧比熱、 ξ はExner関数、 f はコリオリ係数、 A_h, A_v はそれぞれ水平、鉛直渦動粘性係数、また K_h, K_v は水平、鉛直方向の熱量の拡散係数である。

つぎに、上記の $\xi = \text{const.}$ な面の高さを $z = \zeta$ とし、連続式を地上からこの面まで z 方向に積分するなどにより上式を簡単化すると u, v, ζ, θ' を未知量とする準三次元モデル式²⁾が得られる。 $z = \zeta$ 面は開水路の流れの自由水面に対応するもので、この面下の風の収束・発散にしたがって上下する。更に、この面と地上の境界条件は

$$z = \zeta: \tau_x(\zeta) = A_v \frac{\partial u}{\partial x}, \tau_y(\zeta) = A_v \frac{\partial v}{\partial y}, Q(\zeta) = K_v \frac{\partial \theta'}{\partial n}, \quad z = -h: \tau_x(-h) = A_v \frac{\partial u}{\partial x}, \tau_y(-h) = A_v \frac{\partial v}{\partial y}, Q(-h) = K_v \frac{\partial \theta'}{\partial n}$$

である。ここに、 τ_x, τ_y は摩擦速度の2乗の x, y 成分、 Q は温位フラックス、 n は境界に立てた外向きの法線方向である。次にGalerkin有限要素法に従い離散化を行うにあたって、未知量の形状関数として、鉛直方向の余弦関数と水平方向の三角形一次要素の形状関数 N_i の積を用いる。ここでは、近似関数として未知量 u についてのみ示す。

$$u = N_i \cdot \cos\{B_p(z - \zeta)\} \cdot u_{pi}, \quad B_p = \frac{p-1}{h + \zeta} \pi = \frac{p-1}{d} \pi, \quad (p=1, 2, \dots, m) \\ (i=i, j, k)$$

ここに、 m は各変数に対する展開項数である。時間変数 t に対しては two-step Lax-Wendroff法に従って定式化し、各時間毎の未知量を求める。

3. 数値解析結果 a) 解析条件 x 軸原点を海岸線にとり、 $v=0$ とした二次元の海陸風の数値解析を進める。余弦関数の展開数を4項とし、早朝6時に一般風が存在せず気温減率 $0.6\text{K}/100\text{m}$ の状態を初期条件とする。地形の起伏がない地点で、接地層を地表面から $z_c=50\text{m}$ 、大気境界層を 2000m とする。渦動粘性係数は $A_h=20.0\text{m}^2/\text{s}$ 、鉛直渦動粘性係数は接地層内で $A_v=1.0\text{m}^2/\text{s}$ 、Exman層内で $A_v^{(3)} = \exp(-3.0(z-z_c/z_c)^2)\text{m}^2/\text{s}$ とし、熱量の拡散係数 K_h, K_v については渦動粘性係数のそれぞれと同値とする。次に温位の境界条件として陸地

面上では場所に依らない、24時間を周期とする正弦関数により温位フラックスを評価し、また上空境界面、海面では熱の授受は無いものとする。更に地上での摩擦係数を0.01、上空でのそれを0.005とする。

b) 解析結果 以下に示す各図は、陸地に起伏がない場合 (図2-1~図2-3)、起伏がある場合 (図3-1~図3-3) のそれぞれ10時、15時の風速ベクトル図と15時の気温分布図である。地形の起伏を考慮しない場合、10時頃に海風循環の形成がみられる (図2-1)。これに対して地形の起伏が存在する場合 (図3-1) では図2-1よりも広範囲な流れが出現しており、山頂部分 ($x=24\text{km}$) で上昇流が発生している。更に計算を進めた15時の結果では図2-2において海風前線が内陸部 $x=24\text{km}$ の地点まで進入しているのに対し、図3-2における海風前線は内陸部 ($x=39\text{km}$) まで進入しており、更に地表面上の海風に対する帰還流が、地表面から $z=1000\text{m}$ より上空に出現している。またこの時の気温分布には、両者に特徴的な違いは見られない。

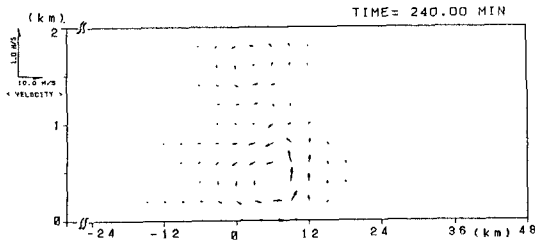


図2-1 10時の風速ベクトル図

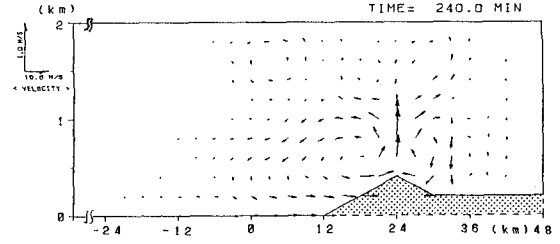


図3-1 10時の風速ベクトル図

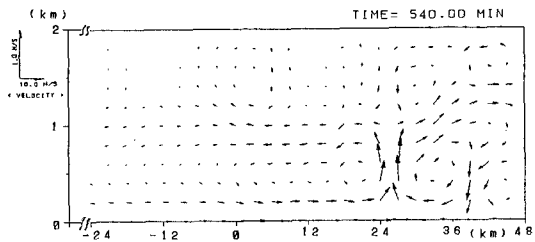


図2-2 15時の風速ベクトル図

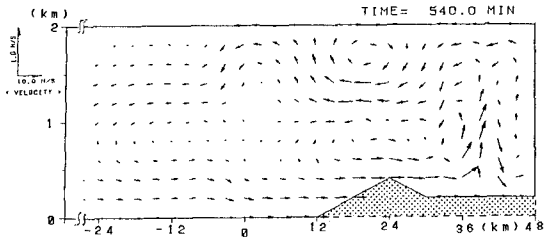


図3-2 15時の風速ベクトル図

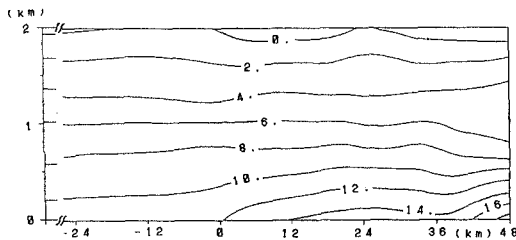


図2-3 15時の気温分布図

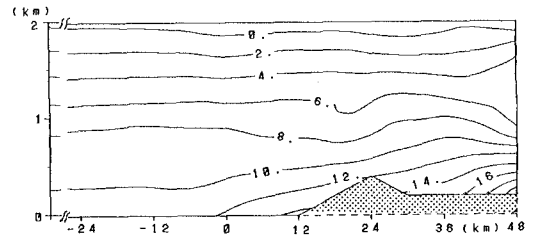


図3-3 15時の気温分布図

4. まとめ 本研究は、鉛直方向の形状関数に余弦関数を用いた三次元Galerkin有限要素法により海陸風の二次元数値計算を行ったものである。温位フラックスを陸地面において場所に依らない、24時間を周期とする正弦関数を用いて評価したが、得られた流れは海陸風の特徴をほぼとらえている (図2-1~図2-3)。また、内陸部に地形起伏が存在するとき (図3-1~図3-3)、海風前線は地形起伏がない場合に比べて内陸部まで進んでおり、海風循環の流れのスケールが大規模なものとなっている。今後は一般風、及びコリオリ力を考慮した三次元の数値解析を進めて行くことを考えている。

【参考文献】

- 1). 富所、荒木、吉田：開水路の流れの三次元数値解析法、第29回水理講演会論文集, pp. 729~732, 1985.
- 2). 越野、富所：局地風の三次元数値解析法、第44回土木学会年講2部, pp. 582~583, 1989.
- 3). 菊池幸雄：海陸風循環の数値シミュレーション、気象研究ノート125, pp. 21~49, 1975.