

II-1 山岳性降雨の生起場の解析

京都大学防災研究所 正員 中北 英一 池淵 周一
 京都大学大学院 学生員 筒井 雅行

1. 概要 レーダ雨量計の3次元降雨情報を、短時間降雨予測などに有効に利用するためには、諸々の気象因子が降雨場に及ぼす影響を把握しておく必要があり、特に、単純な運動学的外挿だけでは予測が困難な地形性降雨についてこのことが言える。そのためには、まず降雨に関わる基礎方程式系を習得しその計算方法にも慣れておく必要がある。その第1ステップとして、本研究では総観スケールの温度場が山岳性降雨の生起場に及ぼす影響を、有限要素法を用いた数値計算によって調べる。

2. 基礎方程式 乾燥空気の運動方程式および熱力学方程式は、 x, z 軸を各々水平、鉛直方向として、

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \zeta}{\partial z} = \rho_0 g \frac{1}{T_0} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0^2} \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial^2 \rho_0}{\partial z^2} - \frac{2}{\rho_0} \frac{\partial \psi}{\partial x} \left(\zeta - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial \rho_0}{\partial z} \right) \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial z} + \nu \nabla^2 \zeta \quad (1)$$

$$\zeta = \nabla^2 \psi \quad (2), \quad \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \psi}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \Gamma_d \right) + \nu \nabla^2 T \quad (3)$$

で表される。ただし、ここではScale Analysisによる近似を行っており、添字 0 は、総観場における物理量を表す。 ψ は流れ関数で、風速ベクトルを (U, W) とすると、 $\partial \psi / \partial z = \rho_0 U$ 、 $-\partial \psi / \partial x = \rho_0 W$ である。 ζ は渦度、 ρ は乾燥空気の密度、 T は絶対温度、 Γ_d は乾燥断熱減率である。また、 ν は渦拡散係数で、その値は $10^5 \sim 10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ のオーダーなので、分子の熱運動に伴う粘性は無視することができる。

3. 境界条件および温度勾配を無視した乾燥空気の定常流れ まず、大台が原を想定した山岳地形における温度勾配を無視した乾燥空気の定常流れを求めておく¹⁾。これは、総観スケールの温度場の影響を調べるにあたって、初期の流れ場で温度以外に流れを変動させる要因がないようにするためである。

大規模場の流れは、山がない場合には x 軸方向に一樣であるとする。地表の境界条件は、地面と空気との間に運動量のやりとりがないことから、 $\psi = \text{const.}$ 、 $\zeta = 0$ とする。上方の境界条件は、境界を十分上方にとって、 $\psi = \text{const.}$ 、 $\zeta = \text{const.}$ とする。側方の境界条件は、Neumann型 $\partial \psi / \partial x = 0$ と、運動量の鉛直プロファイルから求めた ζ の節点値をDirichlet型で与える。このとき、少なくとも、山岳地形の存在しない平坦な領域で定常流れが存在するように境界条件を設定する必要がある。温度勾配を無視した乾燥空気の定常流れを求めるとき、(1)式の両辺の第1項は0となり、平坦な地形の場合、上下の境界条件は、 $\partial \psi / \partial x = 0$ 、 $\partial \zeta / \partial x = 0$ なので、 $\partial^2 \zeta / \partial z^2 = 0$ であることが必要となる。この条件を満足する側方境界の運動量の鉛直プロファイルとして z の2次関数になるものなどを選び定常解を求めた¹⁾。計算の結果、運動量の流出部(左側)における渦度の等値線が振動していたが、これは境界条件を必要以上に与えたためと考えられる²⁾。そこで側方境界では、渦度のDirichlet境界条件は運動量の流入部(右側)にあたる節点にのみ与え、運動量の流出部(左側)ではNeumann境界条件に変更した。

本報告では、定常解を求めた運動量の鉛直プロファイルのうち z 軸方向に一樣なもの($\rho_0 U = -10 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$)を用いて山岳付近の流れに温度場が及ぼす影響を調べる。このときの定常流れを流れ関数の等値線を用いて図1に示す。ここで、

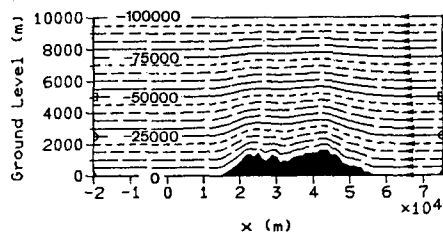


図1. 定常解<流れ関数の等値線(kg/m²・s)>

渦拡散係数は, $500\text{m}^2/\text{sec}$ とした。

4. 温度場が山岳付近の流れに及ぼす影響 3. で得られた定常流れを初期の流れ場として温度変化を考慮に入れて時間を更新させながら計算を進める。(1),(3)式の時間微分は時間ステップを m として中央差分 $(\partial \zeta / \partial t)_m \approx (\zeta_{m+1} - \zeta_{m-1}) / 2\Delta t$ 等で表し他の項の ∂ 等は $(\zeta_{m+1} - \zeta_{m-1}) / 2$ として, 各時間ステップで $\max\{ |i-1\psi_{m+1-i} - \psi_{m+1}| / i\psi_{m+1} \} \leq 0.05$ が満たされるまで繰り返す。iは繰り返回数を表す。また, Δt は1秒とした

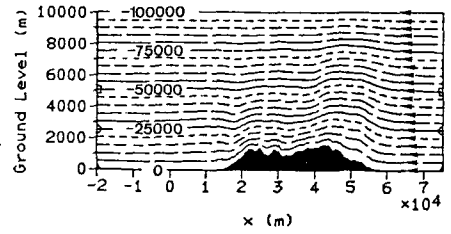
温度の境界条件は, 地表および上方は Dirichlet型, 側方は Neumann型 ($\partial T / \partial x = 0$) とし, 気温減率 Γ (deg./m)は, 乾燥断熱減率($\Gamma_a = 9.8/1005 = 0.00975$)との大小で,

- ① $\Gamma = 0.008$ ($0 \leq z \leq 3000\text{m}$), $\Gamma = 0.007$ ($3000 \leq z \leq 10000\text{m}$),
- ② $\Gamma = 0.01$ ($0 \leq z \leq 10000\text{m}$), ③ $\Gamma = 0.015$ ($0 \leq z \leq 10000\text{m}$)

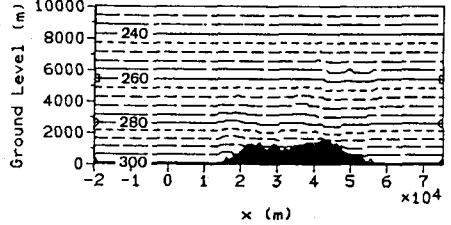
の3ケースとした。ただし, 地上の温度は 28°C に統一した。

Case①については15分後と30分後, Case③については5分後の結果を, 流れ関数の等値線と温度の等値線で図2~図4に示す。Case②は30分後においても初期場とほとんど同じであったのでここには示していない。 Γ_a が Γ より大きいCase①では発生した山岳波が次第に下流に伝播しているものの, 大きな上昇流は存在しない。特に大きな上昇流が発生すると予想された山岳風上部でも流れ関数の等値線の間隔が大きく, あまり強風にはなっていない。これは空気が上昇すると周りより気温が下がり, 鉛直方向の運動方程式 $dW/dt = (T'/T_0)g + \dots$ (ただし, $T' = T - T_0$) において T' が負となるので, 鉛直方向の速度成分 W が減少して安定だからである。反対にCase③では, Γ_a が Γ より小さいために上昇によって T' が正となり, 上昇流は鉛直方向に益々加速されることになる。その結果, わずか5分後で図4のように大きな上昇流が生じる。これは, 大雨の生起を予想させる。

このように総観スケールの温度場は山岳性降雨の生起場に大きな影響を与えるので, 決定論的あるいは確立論的な(予測も含めた)降雨の分布特性の議論には, 温度場の考慮は不可欠である。

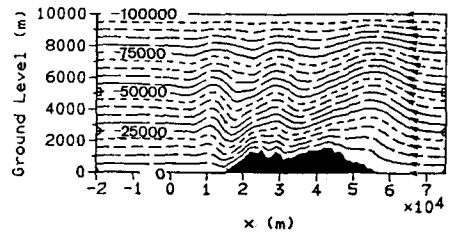


(a) 流れ関数の等値線(kg/m*s)

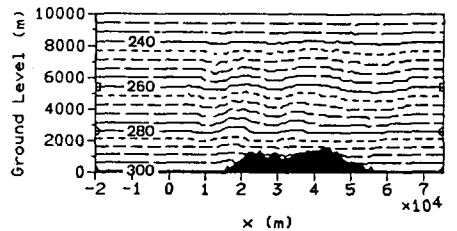


(b) 温度の等値線(deg.)

図2. 15分後の流れ(Case①)

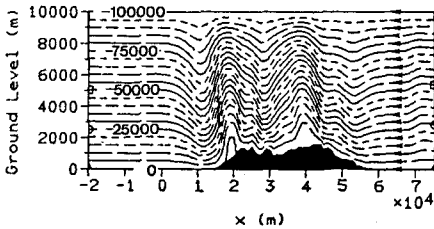


(a) 流れ関数の等値線(kg/m*s)

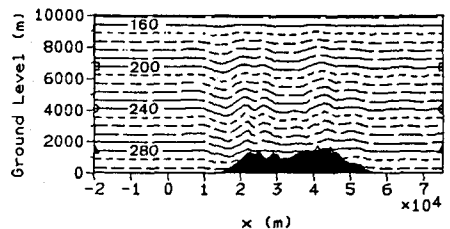


(b) 温度の等値線(deg.)

図3. 30分後の流れ(Case①)



(a) 流れ関数の等値線(kg/m*s)



(b) 温度の等値線(deg.)

図4. 5分後の流れ(Case③)

参考文献 1)池淵・中北・筒井:地形性降雨の基礎方程式系とそのシミュレーション, 昭和61年度土木学会関西支部年次学術講演会, II-5. 2)Pielke(1984):Mesoscale Meteorological Modeling, Academic Press.