

II-400

斜面を下る重力流の数値解析

日本気象協会 正会員 高木久之
豊橋技術科学大学 正会員 北田敏廣

1. はじめに 山谷風や山越え流等、地表面の形状が局地風に及ぼす地形の効果を無視することはできない。差分法による解析にこのような地形の効果を精度良く導入するには、何等かの座標変換が必要となる。大気流れの解析の分野では、地表に沿った座標系が使われることが多い¹⁾²⁾。この座標系は鉛直方向のみに座標変換を行うもので、次式で表される。

$$\sigma = \frac{z - z_g(x, y)}{H(x, y) - z_g(x, y)} \quad (1)$$

ここで、 z_g は地表面の高さ、 H は上方境界の高さを表す。本研究ではこの座標変換を導入し、地形効果を受ける局地風の例として、台地上にある冷たい空気が斜面に沿って下っていく重力流の数値解析を行った。解析結果より重力流に及ぼす地形効果、特に温位勾配による効果を考察し、この座標変換導入の妥当性を検討した。

2. 解析方法 計算領域は図1に示す斜面を持つ2次元計算領域である。支配方程式系を(2)~(7)に示す。本研究では座標変換導入により現れる項を一切省略していない。今回の計算では渦拡散係数は水平方向には(8)式より格子幅により変化させ、鉛直方向には熱的に安定な状態を仮定した一定値を用いた。数値計算に際しては、方程式系の安定な解を得るために空間微分項に対す数値解析を行った。解析結果より重力流に及ぼす地形効果、特に周辺大気の温位プロファイルによる効果を考察し、この座標変換導入の妥当性を検討した。

x方向運動方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\Delta H U)}{\partial t} + \frac{\partial (\Delta H U U)}{\partial x} + \frac{\partial (\Delta H U \sigma)}{\partial \sigma} \\ & = -C_\theta \Delta H \left(\frac{\partial \pi}{\partial x} + \phi_v \frac{\partial \pi}{\partial \sigma} \right) + f_1 \Delta H V + f_2 \Delta H W \\ & + 2 \Delta H \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(v_{1H} \frac{\partial U}{\partial x} + v_{1H} \phi_v \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right) + \phi_v \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_{1H} \frac{\partial U}{\partial x} + v_{1H} \phi_v \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_{1v}}{\Delta H} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

y方向運動方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\Delta H V)}{\partial t} + \frac{\partial (\Delta H U V)}{\partial x} + \frac{\partial (\Delta H V \sigma)}{\partial \sigma} \\ & = -f_1 \Delta H U \\ & + \Delta H \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(v_{1H} \frac{\partial V}{\partial x} + v_{1H} \phi_v \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) + \phi_v \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_{1H} \frac{\partial V}{\partial x} + v_{1H} \phi_v \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_{1v}}{\Delta H} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

連続の式

$$\frac{\partial (\Delta H U)}{\partial x} + \frac{\partial (\Delta H \sigma)}{\partial \sigma} = 0 \quad (4)$$

静力学平衡の式

$$\frac{\partial \pi}{\partial \sigma} = \frac{g \Delta H}{C_\theta \Theta \Theta_0} \theta \quad (5)$$

熱輸送の式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\Delta H \theta)}{\partial t} + \frac{\partial (\Delta H U \theta)}{\partial x} + \frac{\partial (\Delta H \theta \sigma)}{\partial \sigma} \\ & + \frac{\partial (\Delta H U \Theta_0)}{\partial x} + \frac{\partial (\Delta H \theta \Theta_0)}{\partial \sigma} \\ & = + \Delta H \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_{1H}}{\sigma_1} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{v_{1H}}{\sigma_1} \phi_v \frac{\partial \theta}{\partial \sigma} \right) + \phi_v \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_{1H}}{\sigma_1} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{v_{1H}}{\sigma_1} \phi_v \frac{\partial \theta}{\partial \sigma} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_{1v}}{\sigma_1} \frac{1}{\Delta H} \frac{\partial \theta}{\partial \sigma} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

状態方程式

$$p = \rho R^* T \quad (7)$$

$$\begin{aligned} v_{1H} &= 1.5 \times \Delta x \quad \text{m}^2 \text{s}^{-1} \quad (8) \\ v_{1v} &= 1.0 \quad \text{m}^2 \text{s}^{-1} \quad (9) \end{aligned}$$

ここで、 ϕ_v は座標変換導入により現れる係数で、次の式で定義される

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma}{\partial x} &= - \frac{\frac{\partial z_g}{\partial x} \Delta H + (z - z_g) \frac{\partial \Delta H}{\partial x}}{(\Delta H)^2} = - \frac{1}{\Delta H} \left(\frac{\partial z_g}{\partial x} + \sigma \frac{\partial \Delta H}{\partial y} \right) \\ &= \phi_v \end{aligned}$$

σ は変換後の座標系での鉛直流速を表し次式で定義される。

$$\sigma = \frac{W}{\Delta H} + \phi_v U$$

圧力にはエクスター関数を用いている。

$$\pi = (p/p_0)^{R^*/C_\theta}$$

Θ_0 は、基本場の温位を表し、次の関係がある。

$$\Theta_0 = \Theta - \theta$$

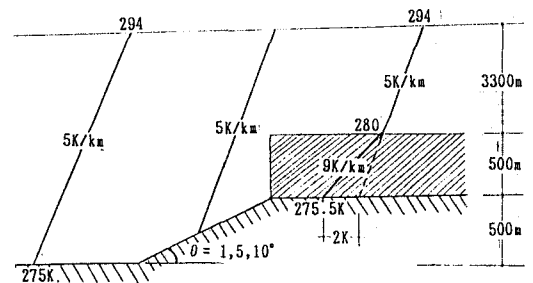


図1 計算領域と温位の初期分布

表1 シミュレーションケース

	case 1	case 2	case 3	case 4	case 5
v_{1v}	$1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
初期の温位差	2 K	2 K	2 K	5 K	5 K
斜面の傾斜角	1°	5°	10°	5°	5°

3. 結果及び考察 case 1~3 の角度を変えて計算した結果の比較より、斜面に沿った重力流の流下距離は角度により異なることがわかった。その流下距離は鉛直流速最大の位置を重力流の前線と考えれば、case 2では3.3km case 3では1.9kmである。この位置の斜面の高さはそれぞれ 210m, 170mである。また、台地上の冷気の温位と周辺大気の温位プロファイルの交わる高さ、つまり、台地上を下る冷気が断熱変化をすると考えた場合に温度勾配がゼロになる高さは、ほぼ200mになる。

case 2では、この高さよりやや高い位置で重力流の前線が止まっているが、これは、流下する冷気は断熱変化のみでなく、拡散によっても暖められるからと考えられる。また、case 3では、重力流の到達する位置が低いのは、このケースでは下向きの流れが強いため慣性力により、温度勾配がゼロになる位置を越えてしまうからと考えられる。重力流の先では、このオーバーシュートにより、逆に温位が高くなっている (図 2)。case 4では初期の温位差が5 Kと大きく、この温位差では台地上の温位は周辺大気の温位プロファイルとは交わらない。従って、計算結果からもわかるように、重力流の先端は、斜面上では止まらず斜面の下まで到達している (図 3)。また、case 5では、同様に初期の温位差は5 Kであるが、鉛直方向の拡散係数が大きくなっている。このケースの結果では、重力流は、斜面の下まで達しておらず、冷気はむしろ水平方向に移動している (図 4)。これは、拡散係数が大きいため拡散によって周囲の大気から暖められことにより温位差を失うからと考えられる。以上の考察より本研究の数値解析により得られた結果は、台地上の冷気の温位と周辺大気の温位プロファイルにより、ほぼ合理的に説明されることがわかった。

4. おわりに 本研究では、(1)式の座標変換を導入することにより、地形の効果を表すことができることがわかった。また、斜面を下る重力流には温位プロファイルが大きく影響していることが明らかになった。

<参考文献>

- 1) Y. Mahrer and R. Pielke(1975): A Numerical study of the air flow over mountains using the two-dimensional version of the university of Virginia mesoscale model., J. Atmos. Sci., 32, pp. 2144-2155
- 2) N. Mannouji (1980): A Numerical Experiment on the Mountain and Valley Wind., J. Meteor. Soc. Japan, 60, pp. 1095-1105

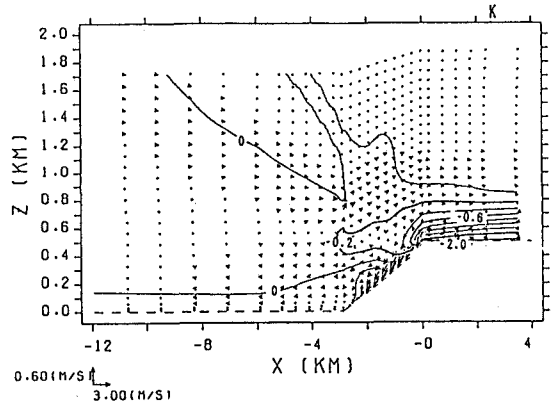


図 2 case 3 の温位分布図(30分後)

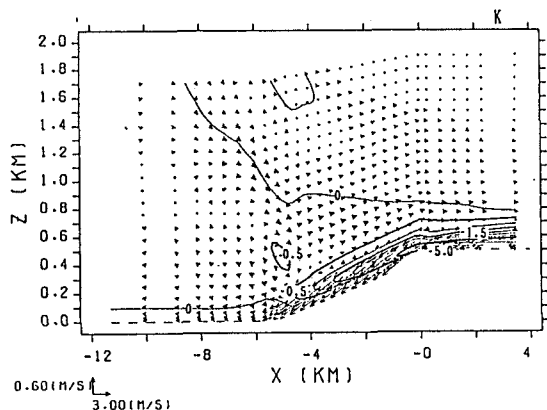


図 3 case 4 の温位分布図(30分後)

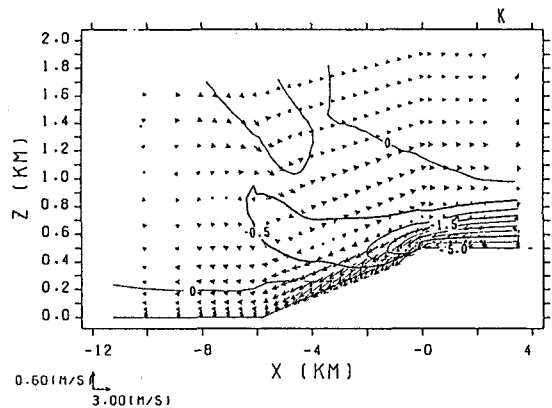


図 4 case 5 の温位分布図(30分後)