

II-206

非静力学モデルによる急斜面を下る重力流の数値解析

—— 平地上を流れる重力流との比較 ——

豊橋技術科学大学 学生会員 国井 克彦
豊橋技術科学大学 正会員 北田 敏廣

1.はじめに 小規模領域を対象にした大気流れの解析では、大きな地形勾配が無視できなくなる。本研究では、急な斜面地形(傾斜角 $\phi=45^\circ$)に対して静力学平衡の仮定を用いず、境界(地形)適合の座標変換(格子生成)を行い、斜面上を流下する大気の重力流を数値解析した。急な斜面地形の流れに対する力学的効果を調べるため、比較の対象として、平地上を流れる重力流も数値解析した。重力流は、海風、陸風、山風など環境大気中ではしばしば見られ、大気汚染物質輸送の担い手などとして、大気環境にとって注目される流れである。非静力学モデルにより求めた圧力変動量は、静圧(静力学平衡)・動圧成分に分解し、流れに対する寄与を考察した。

2.解析モデル 基礎方程式系には非静力学平衡の式系を用いた。圧力の補正計算は式(1)¹⁾によった。 P_h', P_d' は基礎方程式系が収束後、式(2), (3)から求めた。これらの式は、式(4)で表される境界に適合した一般座標系上に座標変換される。この一般座標系(格子網)は、式(5)を用い数値計算により生成され²⁾、座標変換に伴う数値誤差が少なく、座標線(格子点)の粗密が調整できるなどの利点がある。数値計算法としては有限差分法を用い、時間積分を完全陰伏的に行った。図1に、鉛直二次元の斜面地形および初期の温度場を示す。初期には静力学平衡を仮定し、流速をゼロとした。重力流の解析に対して、地表面ではno-slip条件、断熱条件を用い、運動量・熱の渦拡散係数は、共に水平方向 $50 \text{ m}^2/\text{s}$ 、鉛直方向 $5 \text{ m}^2/\text{s}$ の比較的小さい値(一定値)とした。

3.結果および考察

(1) 斜面地形の場合 図2a, b, c, dに、重力流が平地に達する直前の10分後の温度変動(θ')場、圧力変動($P_r' = P - P_0$)場、 P_r' の静力学平衡成分 P_h' 場、動圧成分 P_d' 場を示す。 θ' 場からは、重力流が完全に斜面に沿って流下していないことがわかる。これは重い流体の台地から流出する速度が 5.7 m/s と速く、斜面-台地の接点付近で、 P_r' はその周辺より小さく P_d' の寄与が大きくなっていることから、慣性のためと考えられる。なお、この重力流の下方に広がる斜面との間の空間は、そこでの P_r' を通じ間接的に斜面の力学的効果を、重力流に伝えていると考えることができるが、14分後には、この空間は重力流に覆われ消滅している。図3a, b, c, dに、20分後の θ' 場、 P_r' 場、 P_h' 場、 P_d' 場を示す。重力流ヘッドの下部および前方で高い P_r' は、それぞれ P_h' 、 P_d' の寄与によると考えられる。また、平地-斜面の接点上付近で P_r' が高いのは、その付近に流下してくる重い流体による P_h' の増加、

圧力補正式: $P' = P'_{st} + \frac{\omega}{\Delta t} \nabla \cdot \vec{U} / \left(\frac{2}{\rho} \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right) \right)$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_h'}{\partial z} + \frac{\rho_{BN}}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} - 1 \right) g = 0 \quad (2)$$

$$P' = P_h' + P_d' \quad (3)$$

$$\xi = \xi(X, Z) \quad \xi_{xx} + \xi_{zz} = P(\xi, \zeta) \quad (4)$$

$$\zeta = \zeta(X, Z) \quad \zeta_{xx} + \zeta_{zz} = R(\xi, \zeta) \quad (5)$$

ここで、 (ξ, ζ) :一般座標系、 ρ_{BN} : ρ_{BN} 、初期の静力学平衡状態での温度、圧力、密度(図1参照)、 P_0 :初期に重い流体を設定していない状態での圧力、 P'_{st} :補正前の圧力変動量、 $\vec{U}$:流速ベクトル(U, V)、 $\Delta X, \Delta Z, \Delta t$:X方向、Z方向の格子サイズ、タイムステップ、 ω :緩和係数、 P_h' : P' の静圧(静力学平衡)成分、 P_d' : P' の動圧成分、 $P(\xi, \zeta), R(\xi, \zeta)$:格子点の粗密を調整するパラメータ

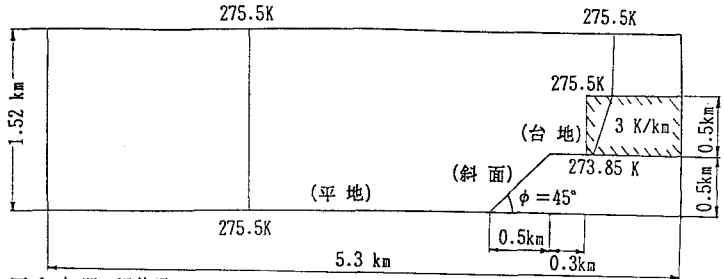


図1 初期の温度場
($\phi=0^\circ$ の場合は、斜面・台地を平地の高さにそのまま降ろした状態とした)

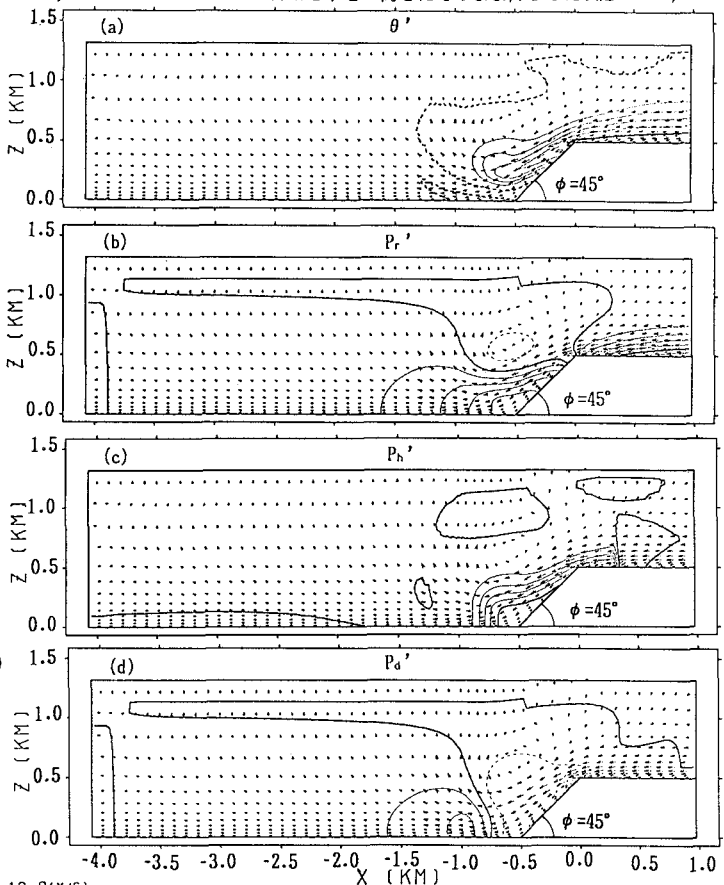


図2 10分後の(a) θ' 場、(b) P_r' 場、(c) P_h' 場、(d) P_d' 場 ($\phi=45^\circ$ の場合)
(等温度線は -0.3 K 毎、等圧線(実線: +, 破線: -)は 0.03 mb 毎に引かれている)

および平地がその重い流体の進行を妨げるために生じる P_d' の増加による寄与と考えられる。図4a,bに重力流ヘッドの進行速度およびヘッドの大きさの時間変化を示す。ヘッドの進行速度は、10分後:2.4 m/s→20分後:3.75 m/s、ヘッドの大きさは12分後:0.175 km²→20分後:0.475 km²と大幅に増加している。これらは、ヘッド後方で重い流体の流入速度の増加(10分後:3.5 m/s→20分後:5.8 m/s)が直接的な原因と考えられる。20分後には、台地上で重い流体のもっていた位置エネルギーが、(重力流が完全に平地に降りることによって)十分に運動エネルギーに変換され、この速度の増加をもたらしたと考えられる。さらに、適当な斜面地形は、この初期の位置エネルギーを水平方向の運動にうまく変換する装置として作用していると考えられることができる。

(2) 平地の場合 図5a,bに20分後の θ' 場、 P_r' 場を示すが、 $P_r'_{max}$ は0.08 mbである。図4a,bでは20分後でヘッドの進行速度およびヘッドの大きさが、2.3 m/s、0.2 km²となっている。これらの値は斜面地形の場合に対し、0.08 mb/0.13 mb、2.3 m/s/3.75 m/s、0.2 km²/0.475 km²と小さく、平地の場合、重力流の規模は、斜面地形の場合に比べて大幅に小さいといえる。これは基本的に、平地の場合、斜面地形の場合に比べて初期の位置エネルギーが小さく、流れの大規模化を引き起こす効果が生じ得ないためと考えられる。

このような斜面地形の場合での重力流の大規模化は、平面上を流れる重力流に対する斜面地形の力学的効果であると考えられることができる。すなわち、本研究で設定したような環境大気中の重力流においては、平地のみを流れる場合に対し、その途中に急な下降斜面($\phi=45^\circ$ 、下降距離(台地高さ)は初期の重力流高さと同じ程度)がある場合では、重力流は大きく変化し大規模化すると考えられる。

(参考文献) 1) 樹橋隆彦, 機械の研究, 37-3 (1985), 383~388, 501~506, 2) Thompson, J.F. (1980): Numerical Solution of Flow Problems Using Body-fitted Coordinate Systems, Computational Fluid Dynamics (W.Kollmann, ed.), Hemisphere Publishing Corp., 1-98.

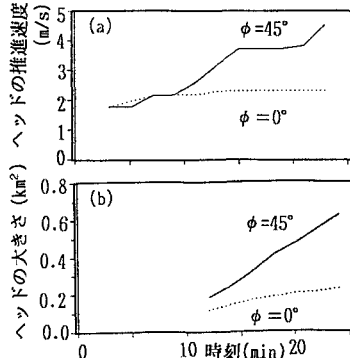


図4 重力流ヘッドの(a) 進行速度, (b) 大きさの時間変化

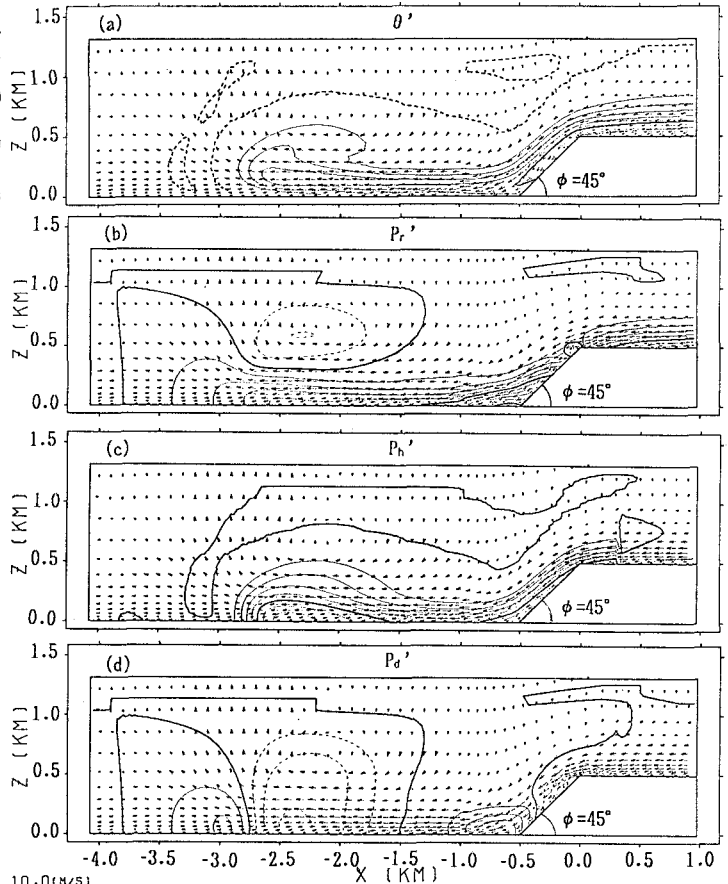


図3 20分後の(a) θ' 場, (b) P_r' 場, (c) P_h' 場, (d) P_d' 場 ($\phi=45^\circ$ の場合) (等温線は-0.3 K毎, 等圧線(実線:+, 破線:-)は0.03 mb毎に引かれている)

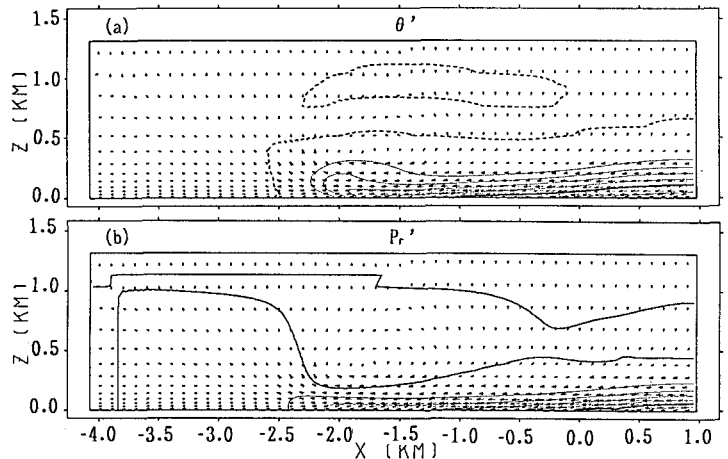


図5 20分後の(a) θ' 場, (b) P_r' 場 ($\phi=0^\circ$ の場合) (等温線は-0.3 K毎, 等圧線(実線:+, 破線:-)は0.03 mb毎に引かれている)