

山間部における安定成層崩壊に関する数値シミュレーション

Numerical simulation of morning breakup between the mountains

佐々木祥平, 金沢大(院), 石川県金沢市角間町, E-mail : sasaki@ryuko.ms.t.kanazawa-u.ac.jp
 木村 繁男, 金沢大環セ, 石川県金沢市角間町, E-mail : skimura@t.kanazawa-u.ac.jp
 木綿 隆弘, 金沢大工, 石川県金沢市角間町, E-mail : kiwata@t.kanazawa-u.ac.jp
 小松 信義, 金沢大工, 石川県金沢市角間町, E-mail : komatsu@t.kanazawa-u.ac.jp
 Shohei SASAKI, Dept. Mech. Sys. Eng., Kanazawa Univ., Kanazawa 920-1192, Japan
 Shigeo KIMURA, INET, Kanazawa Univ., Kanazawa 920-1192, Japan
 Takahiro KIWATA, Dept. Mech. Sys. Eng., Kanazawa Univ., Kanazawa 920-1192, Japan
 Nobuyoshi KOMATSU, Dept. Mech. Sys. Eng., Kanazawa Univ., Kanazawa 920-1192, Japan

A stably-stratified air layer formed in a valley at night under fine weather conditions is destroyed by radiation heating of the rising sun. During the morning transition, turbulent convection and upslope flow gradually destroy the stable air layer. The process known as a “morning breakup” demonstrates many interesting features, depending on the strength of atmospheric stratification, radiation heating rate and geometry of the valley. In this paper, we particularly investigate the non-uniform, non-symmetric and time-dependent heating on the ground of the valley, which are actual phenomena when the valley lies in the north-south direction. Moreover the above result is compared with the standard result when the valley lies in the east-west direction and is uniformly heated. The mechanism of “morning breakup” for two different heating processes is discussed.

1. 緒論

大気環境に注目が集まる現在, 大気汚染物質の滞留, 拡散のメカニズムを解明することは, 自然環境を改善するために, 非常に重要である. 特に, 盆地や山岳地帯など, 山に囲まれた地域では大気汚染物質が滞留しやすいことが知られている. その要因の一つとして, 谷間に形成される安定成層化した大気が挙げられる. すなわち, 晴れた日の夜, 放射冷却によって地表面が冷却されると, 徐々に谷間の大気が成層化し, 大気流れが抑制されるため, 汚染物質の拡散が妨げられる. しかし, 翌朝, 谷間が日射を受けると, 上昇気流が発生し, 夜間に形成された大気安定成層が崩壊する(Morning breakup)⁽¹⁾⁽²⁾. このような大気安定成層の崩壊過程は, 汚染物質の輸送メカニズムに大きな影響を及ぼすと予想され, 研究例も多数存在する. しかし, 山によって日射が遮蔽され, 山間部に日陰の領域が存在する具体的なケースを想定した研究は少ない. 例えば, 東西に谷が走っている山間部では地表面は一律に暖められるが, 南北に谷が走っている場合は山の斜面に日陰が形成され, 地表面が非一律に暖められるため, 大気安定成層の崩壊過程が大きく変化すると考えられる. 従って, 本研究では, 地表面の日射の一律性/非一律性と日変化が山間部の安定成層崩壊に与える影響を明らかにするため, 2次元数値流体解析を実施した.

2. 解析手法

2.1 支配方程式

本研究では, 2次元性の強い山間部の安定成層崩壊を想定する. 従って, 流れ場は2次元の非圧縮性層流流れを仮定し, 支配方程式として, 以下の連続の式 Eq.(1), プシネスク近似を適用した Navier-Stokes 方程式 Eqs.(2), (3), エネルギー方程式 Eq.(4)を用いる.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial wu}{\partial z} = -c_p \bar{q} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ K_h \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_{vm} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial ww}{\partial z} = -c_p \bar{q} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ K_h \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_{vm} \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} + \frac{q'}{q} g \quad (3)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial uq}{\partial x} + \frac{\partial wq}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ K_h \left(\frac{\partial q}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_{vh} \left(\frac{\partial q}{\partial z} \right) \right\} \quad (4)$$

ここで, t は時間, u, w は x 方向 (水平方向), z 方向 (鉛直方向) 方向の速度成分, p はエクスター関数 (標準大気圧で無次元化された圧力) である. また, q は温度であり, 基準温度 \bar{q} , 変動温度 q' を用いて $q = \bar{q} + q'$ と記述される. c_p は定圧比熱, g は重力加速度, K_h は水平方向渦拡散係数, K_{vm} は運動量の鉛直方向渦拡散係数, K_{vh} は熱の鉛直方向渦拡散係数を表す⁽³⁾. 尚, 流体は乾燥空気を仮定した.

2.2 計算方法

本計算では, 流れ場の計算格子に有限差分法, 圧力と速度のカップリングに SMAC 法を使用する. また, 支配方程式の離散化は, 時間項にオイラー陽解法, 対流項に QUICK 法, 拡散項に 2 次精度中心差分を用いた.

Fig.1 に示すように, 計算領域は主流方向に 50000[m], 鉛直方向に 18000 [m] と設定し, 地表面上の中央部に次式で与えられる同一のベル形状の山を二つ配置した.

$$h(x) = \frac{h_0}{1 + \left(\frac{x-b}{a} \right)^2} \quad (5)$$

ここで, h_0 は山の高さ, a は山の半値幅, b は各山の頂上の水平方向位置であり, $h_0 = 1000$ [m], $a = 500$ [m], $b = 23800, 26200$ [m] に設定した. 計算格子点数は, 主流方向に 250 点, 鉛直方向に 150 点とした.

2.3 境界条件

本解析の側面、上層、地面の境界条件を以下にまとめる。尚、本研究では、日射量の日変化、山の斜面に形成される日陰の影響を地表面の温位境界条件を用いて模擬した(以下の(3)に記述)。

(1) 側面 ($x=0, 5000[m]$):

側面境界は、水平方向速度 u 、鉛直方向速度 w 、温位 q 、エクスナー関数 p を次式のように勾配ゼロに設定した。

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

(2) 上層 ($z=18000[m]$):

上層境界は、速度に対称境界を設定し、温位 q 、エクスナー関数 p に勾配ゼロを設定した。

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

$$w = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

尚、重力波反射の影響を避けるため、計算領域の上層 3 分の 1 には Rayleigh damping によるスポンジ層⁴⁾を配置した。

(3) 地面:

地面には、no-slip 条件を用い、地表面で速度ゼロ、エクスナー関数 p の勾配がゼロになるように設定した。

$$u = w = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

本解析では、地表面の温位境界を、非加熱部と加熱部に分け、Fig.2 の領域の $x = 21000[m] - 29000[m]$ の区間を加熱部とした。更に、非加熱部は温位を固定するが、加熱部は日変化を模擬するため、次式のように $q [K]$ の振幅で温位変動を与えた⁵⁾。

$$q_n = q_g \quad (12)$$

$$q_h = q_g + \Delta q \sin\left(\frac{2\pi t}{24}\right) \quad (13)$$

ここで、 q_n 、 q_h は非加熱部、加熱部の温位、 q_g は地表面温位である。また、Eq.(13)の時刻 $t [h]$ は加熱開始からの経過時間を表し、日の出の時刻を $t=0$ とする。本研究では、日陰の影響を模擬するため、加熱部の地表面を Fig.3 のように 5 つの領域に分割した。

$$21000[m] \leq x \leq 23800[m],$$

$$23800[m] \leq x \leq 24400[m],$$

$$24400[m] \leq x \leq 25600[m],$$

$$25600[m] \leq x \leq 26200[m],$$

$$26200[m] \leq x \leq 29000[m].$$

日陰が形成されない日射が一般的なケースとして、谷が東西に走っている場合をケース A とする。ケース A では日の出直後 ($t=0$) から、 \quad の全ての領域に、Eq.(13)の条件を与える。一方、山陰の影響により日射が非一般的なケースとして、南北に谷が走っている場合をケース B とする。ケース B では東から太陽が昇るため、 \quad の領域がはじめに暖められ、 \quad の領域は日陰になる。従って、この日陰の影響を模擬するため、本研究では各領域を、 \quad の順に Eq.(13)の条件を与えることにした。但し、日の出から 6 時間後に太陽が南中する条件を設定するため、日の出 ($t=0$) から、1.9 時間後に \quad の領域、2.6 時間後に \quad の領域、5 時間後に \quad の領域、5.5 時間後に \quad の領域に時間差を考慮して Eq.(13)を適用した。

2.4 計算条件

本計算では、基準温位の鉛直分布変化は線形と仮定し、寒暖差の大きい秋季の一例とし、温位変動、地表面温位を $q = 10[K]$ 、

$q_g = 290[K]$ に設定した。また、渦拡散係数は $K_h = 20[m^2/s]$ 、 $K_m = K_h = 10[m^2/s]$ 、風速の初期条件は全領域 $u = w = 0 [m/s]$ とした。尚、Brunt-Vaisala 振動数 N の次式に基づき、 N の値を設定することで温位の初期条件を与えた。

$$N^2 = \frac{g}{q_0} \frac{d\bar{q}}{dz} \quad (14)$$

ここで q_0 は参照温位で $z = 0.5h_0$ における \bar{q} の値を用いる。Brunt-Vaisala 振動数とは、微小流体塊が成層流において断熱的に振動する場合の振動数を表す。尚、Eq.(14)から、 N が増加し、基準温位勾配が大きくなると、大気安定度が高くなる。一方、 N が減少し、基準温位勾配がゼロまで減少すると、大気の状態は中立となり、全領域で温位は一定となる。本計算では、大気安定度を表す Brunt-Vaisala 振動数を $N = 0.0083 [1/s]$ と設定した。この場合の初期温位の分布を Fig.4 に示す。

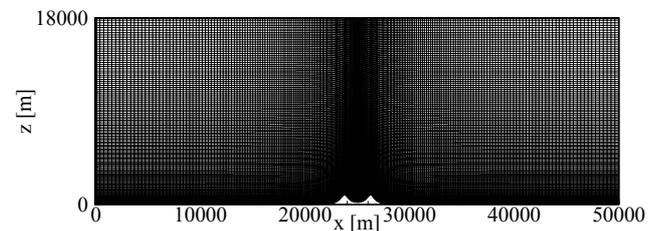


Fig.1 Computational grid.

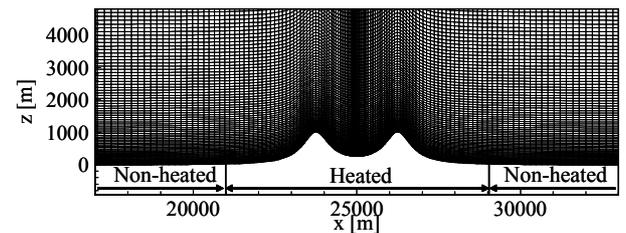


Fig.2 Closeup of computational grid around the mountains.

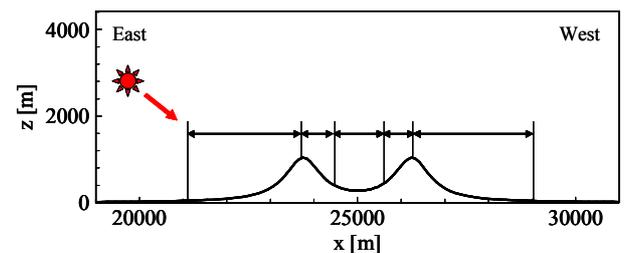


Fig.3 Five regions for setup of potential temperature on the ground. Note that, for case B, the valley lies in the north-south direction.

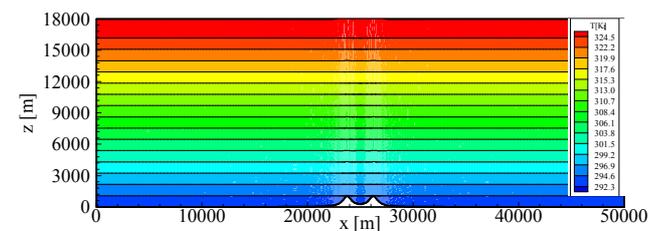
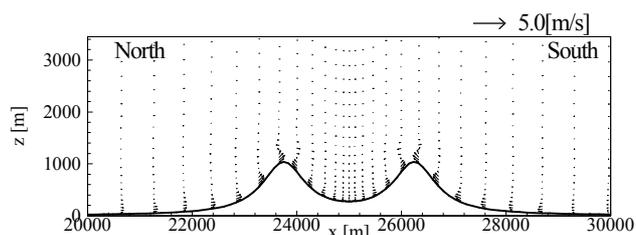
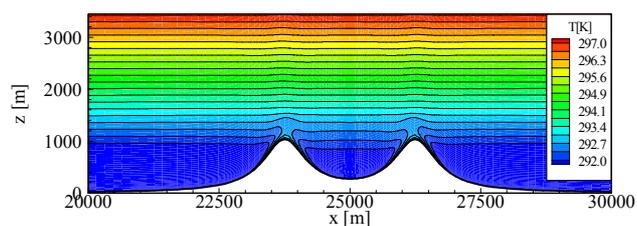


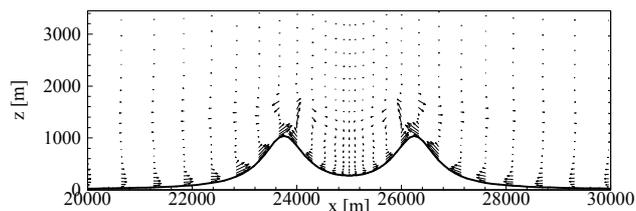
Fig.4 Potential temperature contour for initial conditions. ($N = 0.0083 [1/s]$)



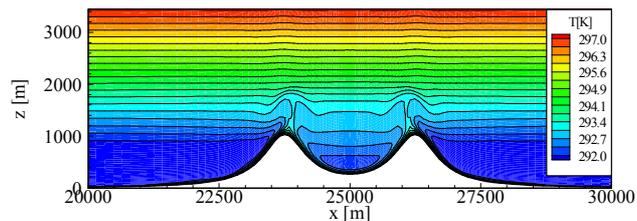
(a) $t = 0.5$ [h].



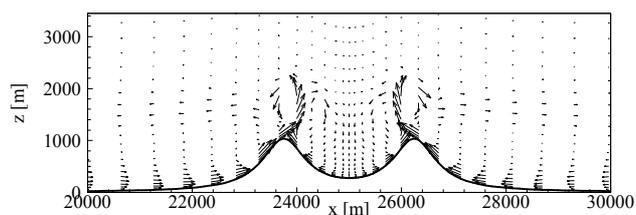
(a) $t = 0.5$ [h].



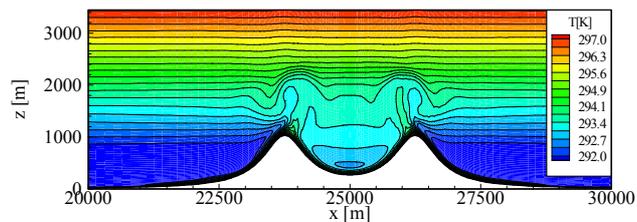
(b) $t = 1.0$ [h].



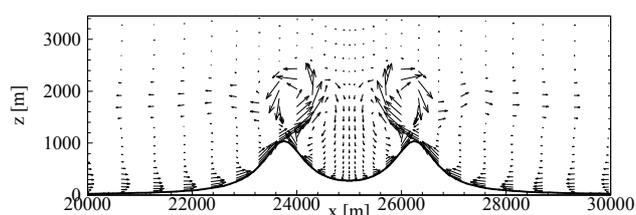
(b) $t = 1.0$ [h].



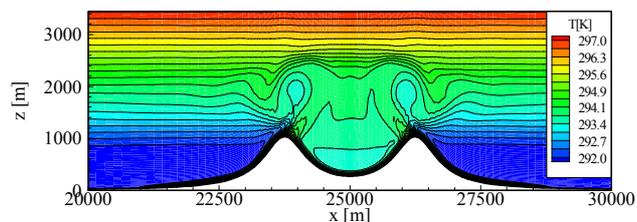
(c) $t = 1.5$ [h].



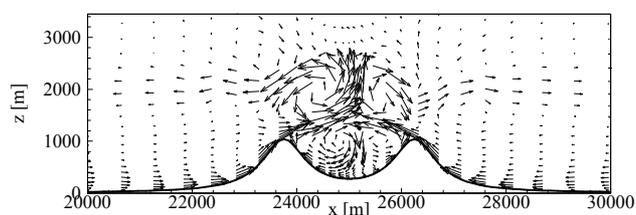
(c) $t = 1.5$ [h].



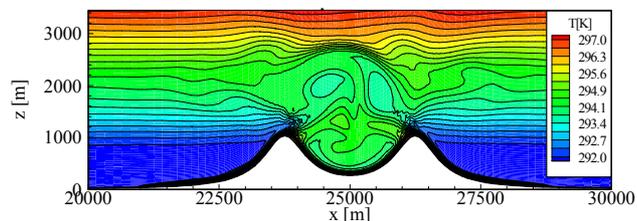
(d) $t = 2.0$ [h].



(d) $t = 2.0$ [h].



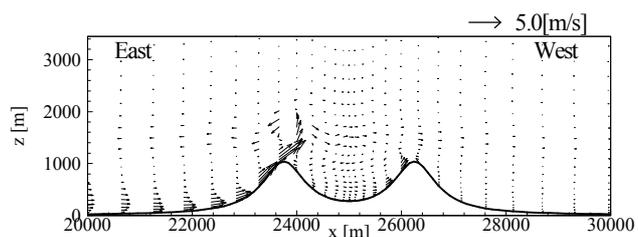
(e) $t = 2.5$ [h].



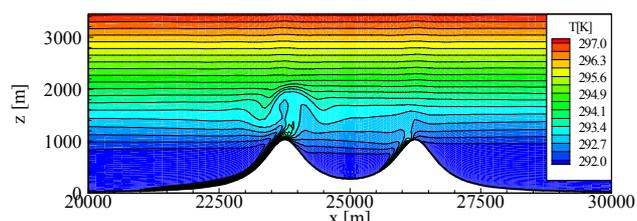
(e) $t = 2.5$ [h].

Fig.5 Velocity vectors. Case A: Valley in the East-West direction.
($N = 0.0083$ [1/s], $q = 10$ [K])

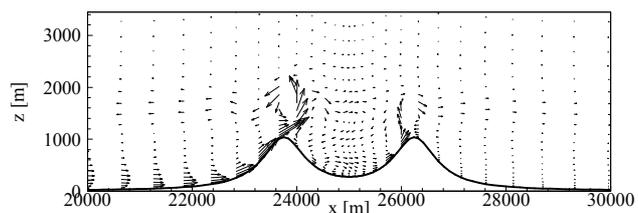
Fig.6 Potential temperature contours. Case A: Valley in the East-West direction.
($N = 0.0083$ [1/s], $q = 10$ [K])



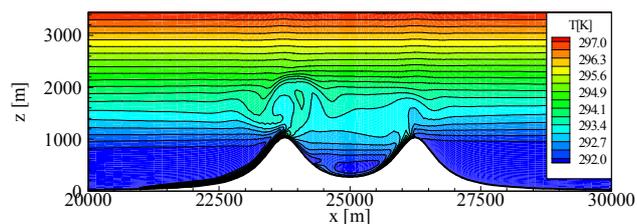
(a) $t=2.0$ [h].



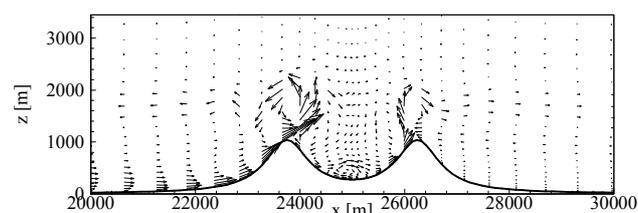
(a) $t=2.0$ [h].



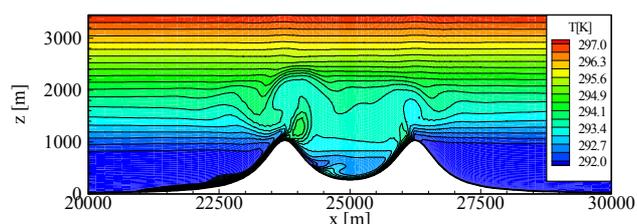
(b) $t=2.5$ [h].



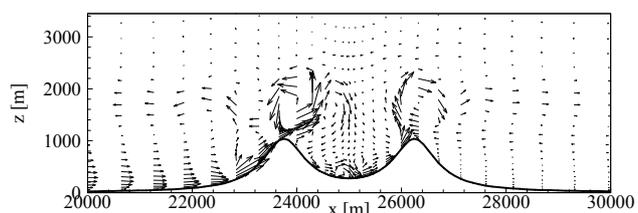
(b) $t=2.5$ [h].



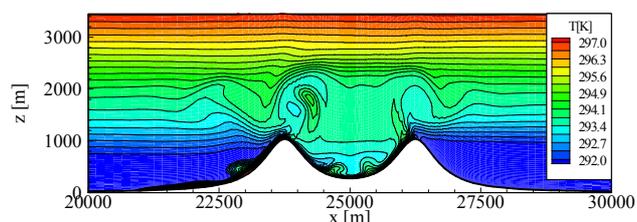
(c) $t=3.0$ [h].



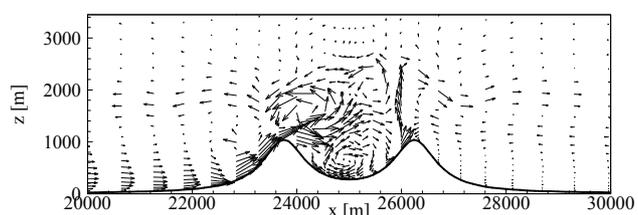
(c) $t=3.0$ [h].



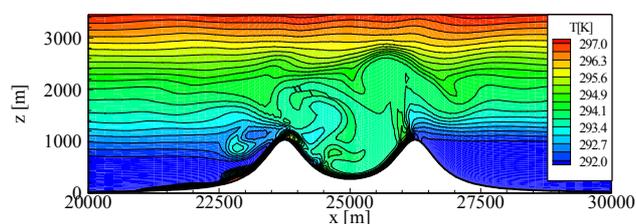
(d) $t=3.5$ [h].



(d) $t=3.5$ [h].



(e) $t=4.0$ [h].



(e) $t=4.0$ [h].

Fig.7 Velocity vectors. Case B: Valley in the North-South direction.
($N=0.0083$ [1/s], $q=10$ [K])

Fig.8 Potential temperature contours. Case B: Valley in the North-South direction.
($N=0.0083$ [1/s], $q=10$ [K])

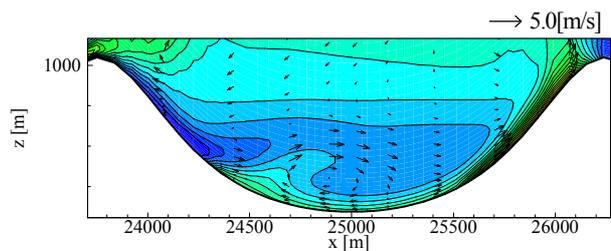


Fig.9 Velocity vectors and potential temperature of the valley shown in Fig.7(c) and 8(c). The color bar is given in Fig.(8).

3. 計算結果及び考察

本稿では、日射の一樣性/非一樣性が安定成層崩壊に与える影響を検討するため、日射が一樣な条件を模擬した東西に谷が走っているケース A と、日射が非一樣な条件を模擬した南北に谷が走っているケース B について解析した結果を報告する。

3.1 [ケース A] 一樣日射: 東西に谷が走っているケース

日射が一樣な場合を検討するため、東西に谷が走っているケース A の結果を Fig.5 (速度ベクトル図), Fig.6 (温位の等値線図) に時系列毎に示す。地表面が一樣に加熱される場合、谷間の中央部 ($x = 25000[m]$) を境に、南北対称な上昇気流によって、安定成層が崩壊することが分かる。日の出直後 (Fig.5(a), Fig.6(a)) に、山の斜面を上る流れが発生し、地表面に沿って大気混合層が発達する。日照時間が増加するにつれて、地表面近傍の混合層は更に発達し、山の斜面に沿って上昇した気流が、高度 $z = 2000[m]$ - $3000[m]$ 付近の大気安定成層に押し返されるようにして、谷間の中央部に向かう下降流に変化する (Fig.5(b), Fig.6(b))。この下降流によって、谷間の大気が徐々に混合し、安定成層が崩壊することが明確に示された (Fig.5(c) (e), Fig.6(c) (e))。今回の解析条件では、日の出から 2.5 時間後には谷間に形成されていた安定成層は、完全に崩壊したと確認できる。

3.2 [ケース B] 非一樣日射: 南北に谷が走っているケース

山陰の影響により日射が非一樣な場合を検討するため、南北に谷が走っているケース B の結果を、Fig.7, Fig.8 に時系列毎に示す。非一樣な日射を模擬しているため、非対称な流れが形成され、谷間の大気が混合する様子が確認できる。Fig.7(a), Fig.8(a) では、地表面を上る流れが、上空の大気によって押し返され、谷間の上層部の大気安定成層から徐々に混合する。しかし、Fig.7(b) (d), Fig.8(b) (d) の時間経過で、中央付近の谷底の流れを詳しくみると、地表面に沿って上昇する流れが、中央部の安定成層に浸入し、混合していることが分かる (Fig.9 の $x = 24500[m]$ 付近)。これは、上層部の混合により、谷間中央部の大気の成層化が低減したために生じた流れであると考えられる。また、Fig.7(e), Fig.8(e) より日の出から 4 時間後には安定成層が完全に崩壊している。従って、本解析条件では、日射が一樣の場合と比べ、日射が非一樣な場合は安定成層崩壊に 1.5-2.0[h] の時間遅れが生じることが示された。

4. 結論

地表面の日射量の一樣性/非一樣性と日変化が、山間部の安定成層崩壊の過程に及ぼす影響を明らかにするため 2 次元数値流体解析を実施し、以下の結論を得た。

- (1) 日射が一樣な場合 (東西に谷が走る山) は、南北対称な上昇気流が安定成層にはね返され、下降気流が発生し、この下降気流により谷間の大気安定成層が崩壊する。
- (2) 日射が非一樣な場合 (南北に谷が走る山) では、大気安定成層は、非対称な崩壊をし、日射が一樣な場合と比較すると、安定成層崩壊に要する時間も長くなる。

今後、拡散の影響などを詳しく検討するために、乱流モデルを組み込んだ解析を行う予定である。

参考文献

- (1) M. Princevac, H. J. S. Fernando, Morning breakup of cold pools in complex terrain, *J Fluid Mech.*, 616(2008), pp99-109.
- (2) T. Kuwagata, F. Kimura, Daytime Boundary Layer Evolution in a Deep Valley part2: Numerical Simulation of the Cross-Valley Circulation, *Journal of Applied Meteorology*, 36(1997), pp.883-895.
- (3) W. Sha, T. Kimura, H. Ueda, Numerical Study on Sea / Land Breezes as a Gravity Current: Kelvin-Helmholtz Billows and Inland Penetration of the Sea-Breeze Front, *Journal of the atmospheric sciences*, 48 (1991), pp.1649-1645.
- (4) J. P. Pinty, R. Benoit, E. Richard, R. Laprise, Simple Tests of a Semi-Implicit Semi-Lagrangian Model on 2D Mountain Wave Problems, *Monthly Weather Review*, 123(1995), pp.3042-3058.
- (5) H. Ozoe, T. Shibata, H. Sayama, Characteristics of air pollution in the presence of land and sea breeze - a numerical simulation, *Atmospheric Environment*, 17(1983), pp.35-42.
- (6) 高木賢二, 山田大彦, 植松康, 局地風数値シミュレーションモデルの計算方法及び乱流モデルの比較検討 - 大気と海洋の 3 次元数値シミュレーションに関する研究 その 1 - , *日本風工学会誌*, 72 (1997), pp.59-72.
- (7) A. Colette, F. K. Chow, R. L. Street, A Numerical Study of Inversion-Layer Breakup and the Effects of Topographic Shading in Idealized Valleys, *Journal of Applied Meteorology*, 42(2003), pp.1255-1272.