

# 領域大気モデルを用いた 地球大気の実験

神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻 M2

流体地球教育研究分野

入場 柚太

# 目次

1. はじめに
2. 使用したモデルの説明
3. 実験内容とその結果
4. まとめ

# はじめに①

## • 研究内容

- 火星の惑星境界層を数値計算してその構造を明らかにする.

## • 惑星境界層とは

- 大気層の中で地表面に最も近い層.
- 地表面の摩擦や熱の影響を受ける層.
- 上層に地面摩擦の影響が無視できる高さの大気である自由大気.
- 惑星の気候や気象現象を理解する上で重要.

## 研究する理由

- 火星の惑星境界層を領域モデルを使って計算しているものが少ないため.

# はじめに②

## 研究方法

- 領域大気モデル SCALE-RM で数値計算を行う。

## 今回のセミナー内容

- 領域大気モデル SCALE-RM に慣れるため, SCALE-RM をインストールした際に用意されていたテスト計算を行ったものの紹介.
  - いずれも地球設定での計算.
- 実験① 放射対流を観察する実験
- 実験② gabls2 研究との比較実験
  - gabls2 は大気境界層スキームの比較評価を目的とした研究(Svensson et al., 2011)

# 使用したモデル

- 領域大気モデル SCALE-RM
  - 理化学研究所で開発された SCALE ライブラリを利用した数値モデル.

# 力学コア

- 支配方程式系：三次元完全圧縮非静力学方程式系
- 空間離散化：有限体積法
- 時間離散化：「完全陽解法」(HEVE) または「水平陽解法-鉛直陰解法」(HEVI) から選択
  - 陽解法：計算が完了した現在の時刻から1つ未来の時間ステップの解析を行う際に、現在の値のみを使って解析を行う方法
  - 陰解法：現在の値と1つ未来の時間ステップの値を使って解析を行う方法

# 支配方程式系

- 連続の式 
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) + \frac{\partial \rho q_l w_l}{\partial z} + \frac{\partial \rho q_s w_s}{\partial z} = 0$$
- 運動方程式 
$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \times \mathbf{u}) + \left( \frac{\partial \rho q_l w_l}{\partial z} + \frac{\partial \rho q_s w_s}{\partial z} \right) \mathbf{e}_z = -\nabla p - \rho g \mathbf{e}_z + DIFF[\mathbf{u}]$$
- 熱力学の式 
$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{u}) + \frac{\partial \rho q_l e_l w_l}{\partial z} + \frac{\partial \rho q_s e_s w_s}{\partial z} + p \nabla \cdot \mathbf{u} = Q + DIFF[T^*]$$

$\rho$  : 密度,  $\mathbf{u}$  : 速度,  $q_l$  : 液体水の質量濃度,  $q_s$  : 固体水の質量濃度

$w_l$  : 液体水の気体に対する相対速度,  $w_s$  : 固体水の気体に対する相対速度

$P$  : 気圧,  $DIFF[]$  : 乱流による拡散項,  $Q$  : 断熱加熱,  $T^*$  : 温位,  $t$  : 時間,

# 物理過程

- 乱流過程

- Smagorinsky (1963) & Lilly (1962) 型のサブグリッドスケール乱流モデル
  - 乱流フラックスを表現するために, サブグリッドスケールの乱流粘性係数や乱流拡散係数を導入.
  - 乱流スケール以下の小さな構造や未解決のエネルギー輸送を近似的にモデル化.
- Mellor and Yamada (1982); Nakanishi and Niino (2004) による level 2.5 境界層乱流パラメタリゼーション
  - 乱流エネルギーの輸送方程式と関連する運動量フラックスのパラメータ化.
  - 境界層内の乱流エネルギーの生成, 拡散, 消失をモデル化.



# 物理過程

- 雲微物理

- Seiki and Nakajima (2014) による 6-class 2 モーメントバルクモデル
  - 粒径分布関数は雲粒の数密度とそれらの質量濃度によって表現される.

- 放射過程

- Sekiguchi and Nakajima (2008) による 相関 k 分布法ブロードバンド大気放射伝達モデル
  - 相関 k 分布法：大気ガス吸収を迅速に評価する方法. 数値的に波数積分を正確に実施するには, 膨大な数の積分点が必要であるが, 吸収係数の波数分布は鉛直方向に相関があると仮定し, 積分点数を削減した.

# 物理過程

- 地表面モデル
  - 陸面モデル: 熱拡散・バケツモデル
  - 海洋モデル: 板海モデル

# 実験① 放射対流実験

## • 計算設定

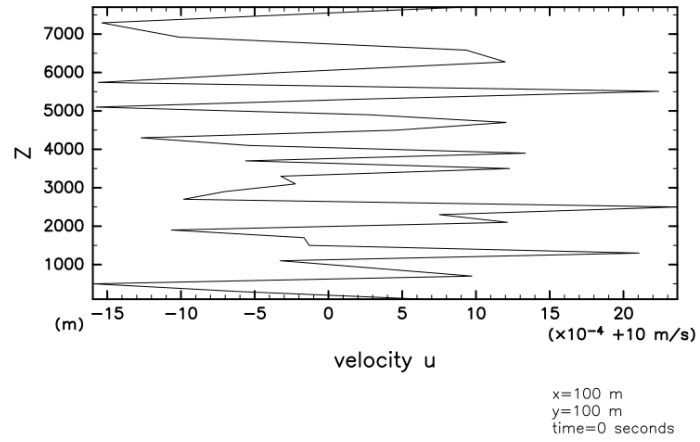
- MPI プロセス数 東西 2 南北 2
- 格子間隔  $x=y=200\text{m}$   $z=200\text{m}$
- 格子点数  $x=20$   $y=20$   $z=40$
- 領域  $x$  8km  $y$  8km  $z$  8km
- 積分期間 72 hour
- 時間刻み幅 0.6s
- データ出力間隔 600s
- 時間積分の数値解法は完全陽解法
- Seiki and Nakajima (2014) による 6 class 2 モーメントバルクモデル
- Smagorinsky—Lilly 型のサブグリッドスケール乱流モデル
- 板海モデル

## • 緩和領域

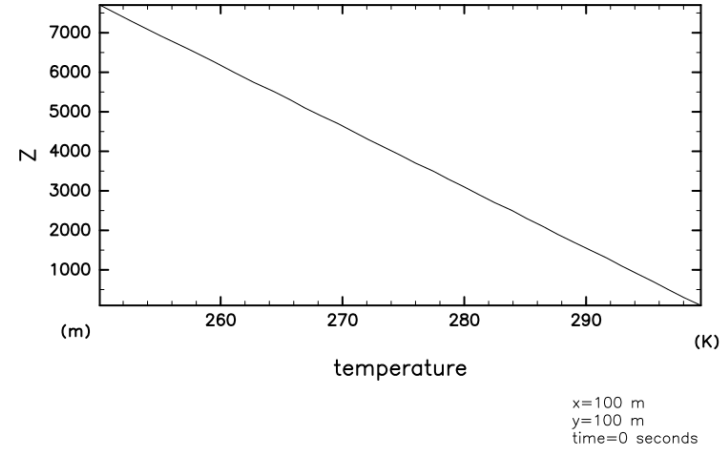
- Z 方向（モデル上端から下向き方向）の緩和領域の幅 5000m

# 初期条件

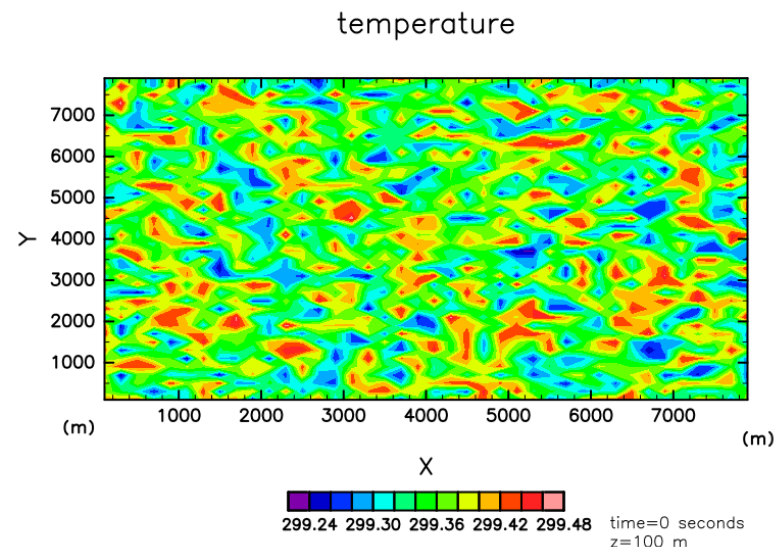
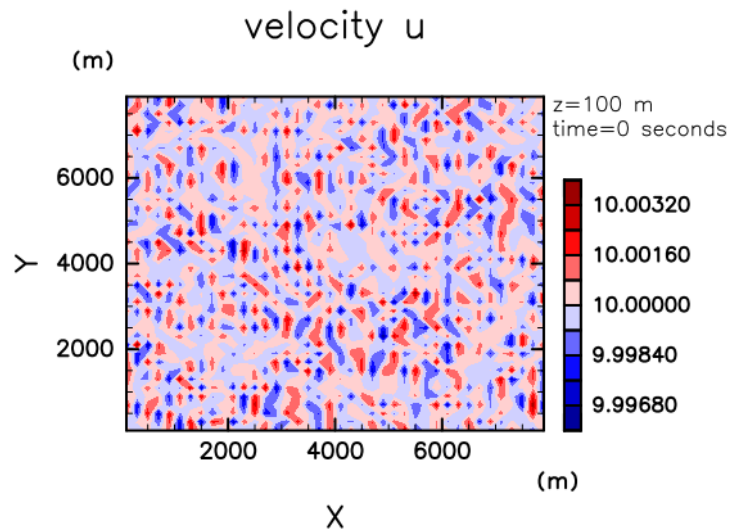
## 東西風速



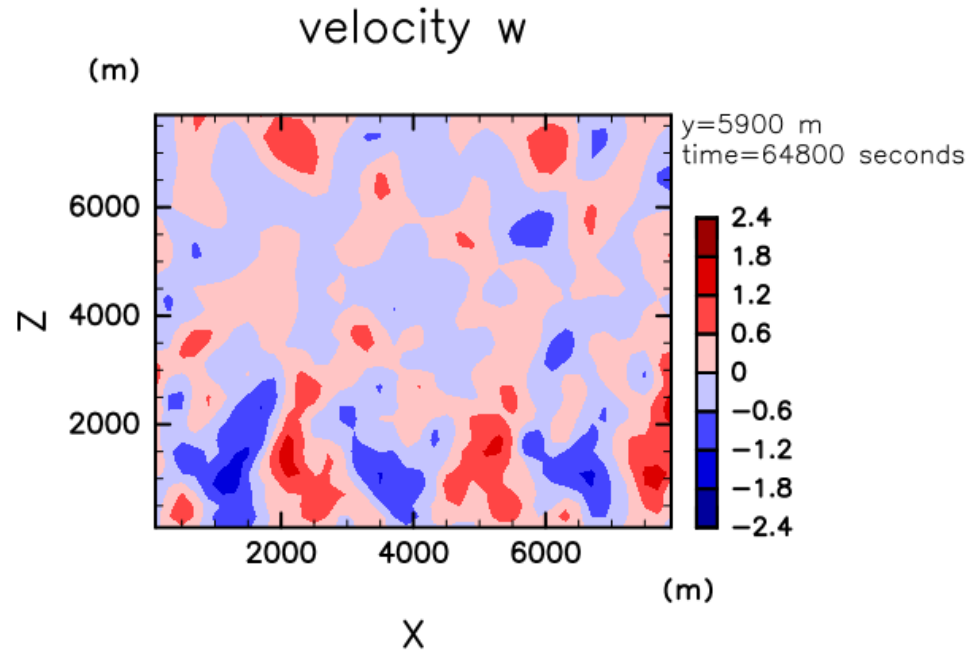
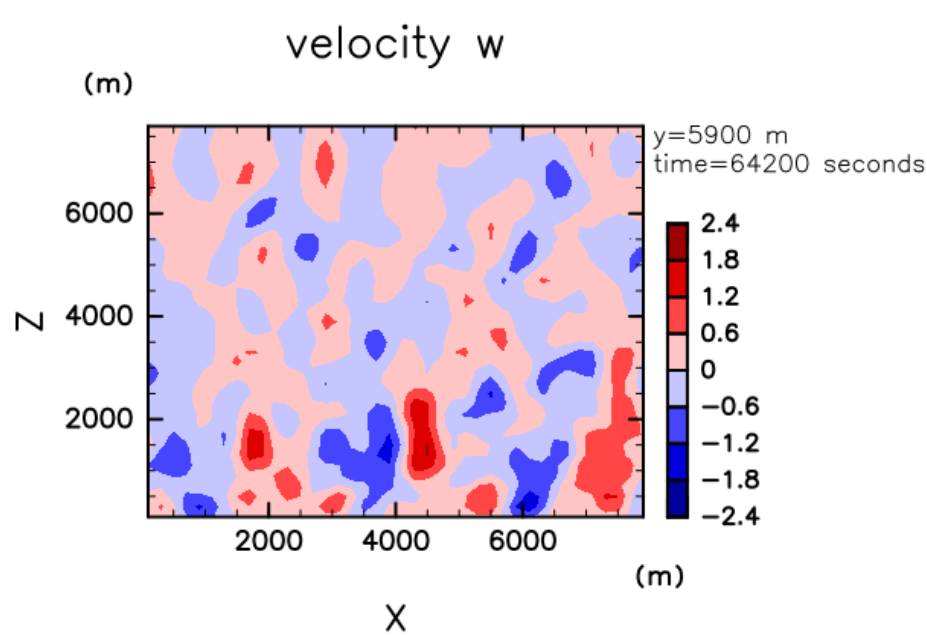
## 温度



- 南北/鉛直風速はゼロ



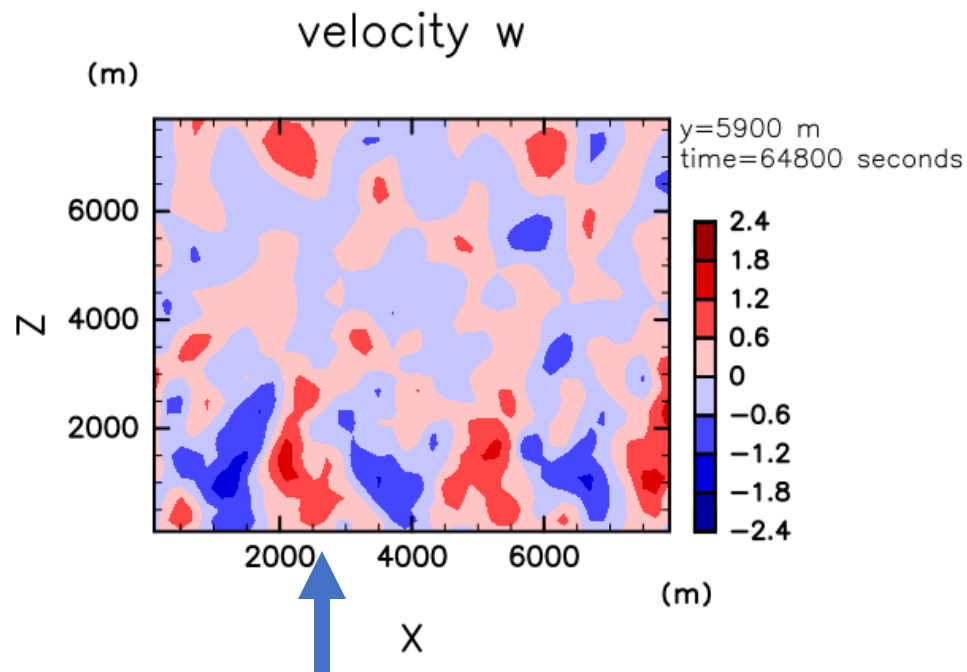
# 結果① 鉛直風



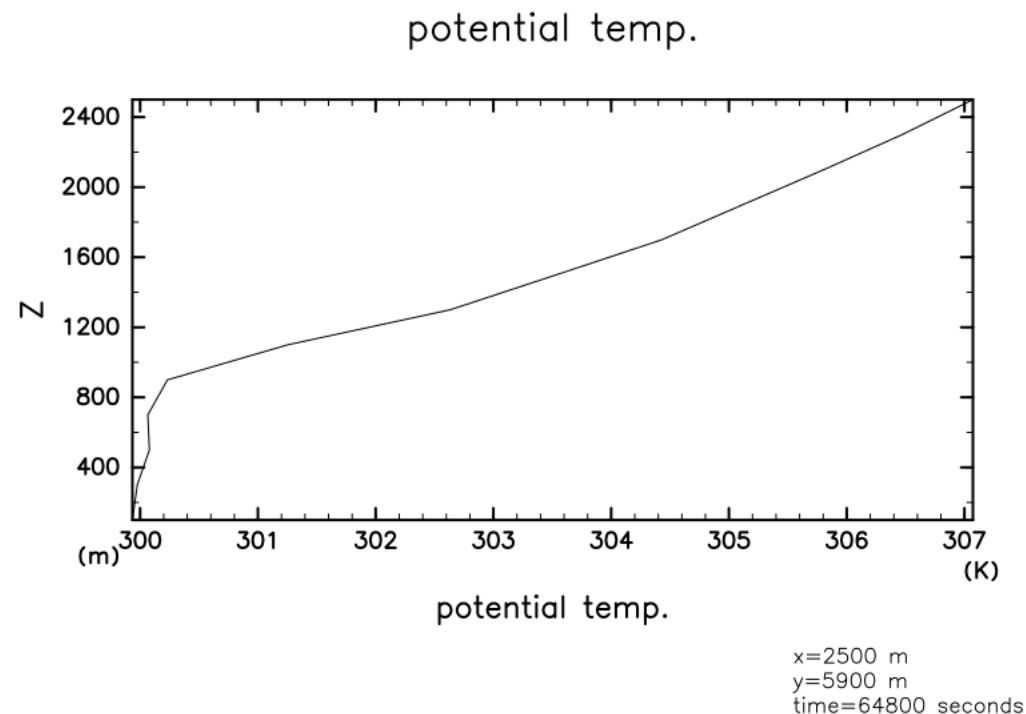
- 計算開始後約 19 時間後に上図のような鉛直風が発生した。
  - 上図は特に顕著に鉛直風が発生していた時間と場所を切り出した。
  - なお以降の図もこの時間と場所の図を用いている。

# 結果①

## 鉛直風



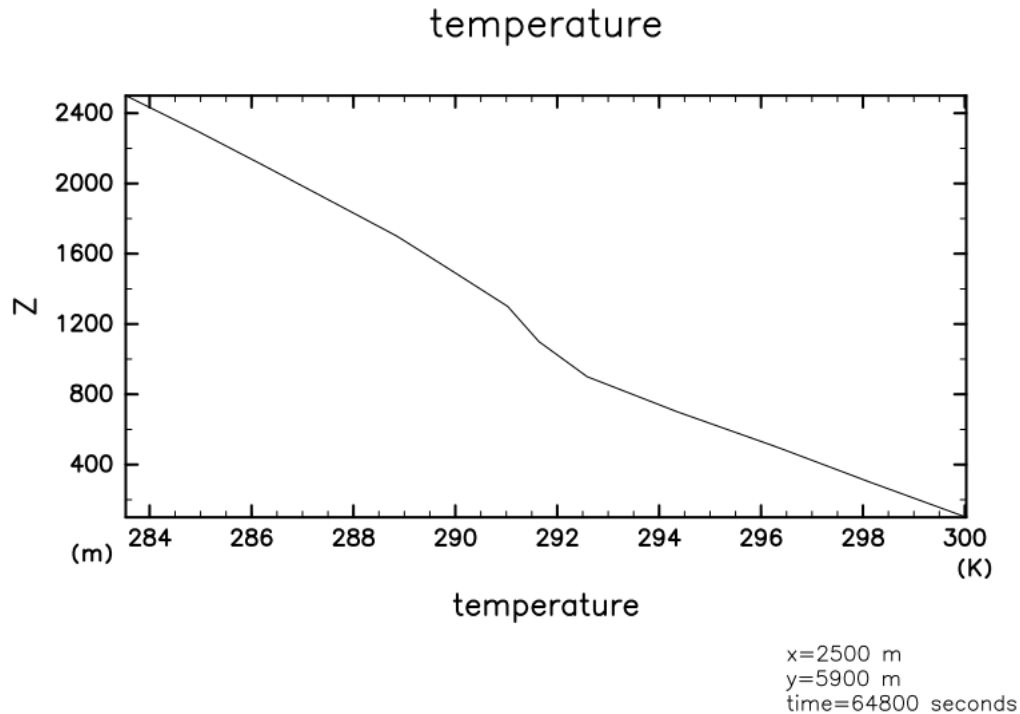
## 温位



- ・ この時間帯, 場所では大気が不安定となっており, 鉛直対流が発生していると考えられる.

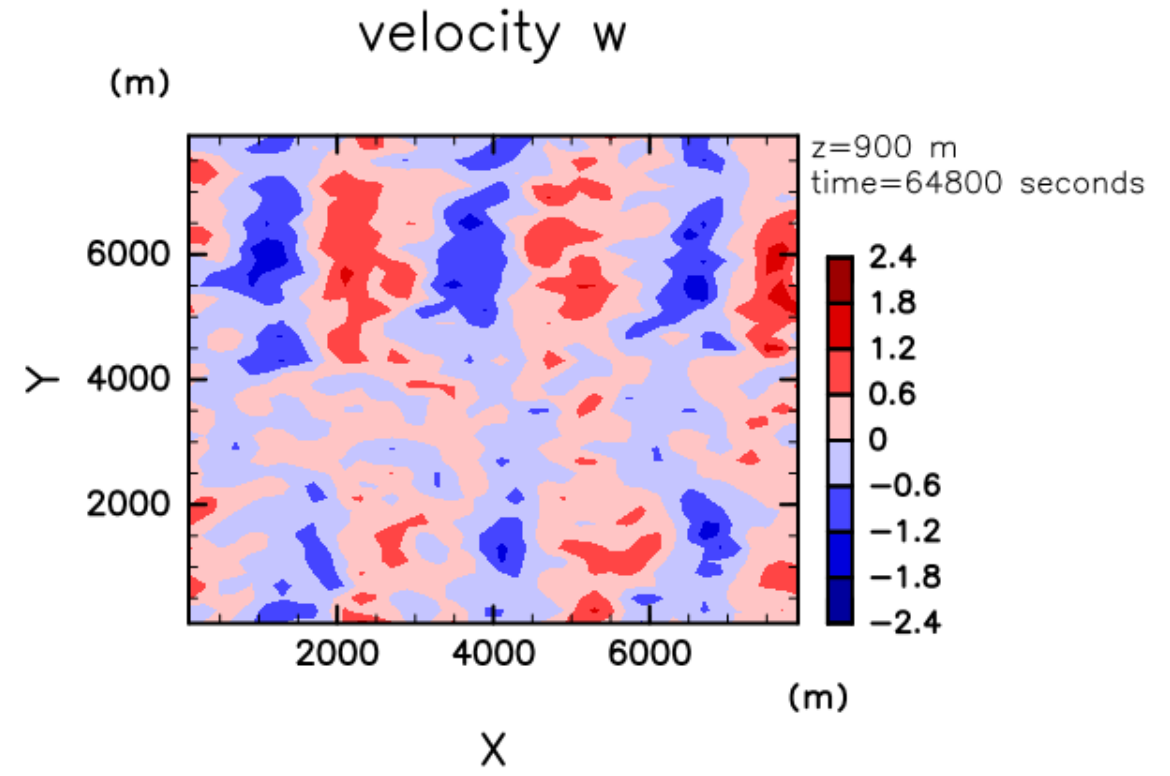
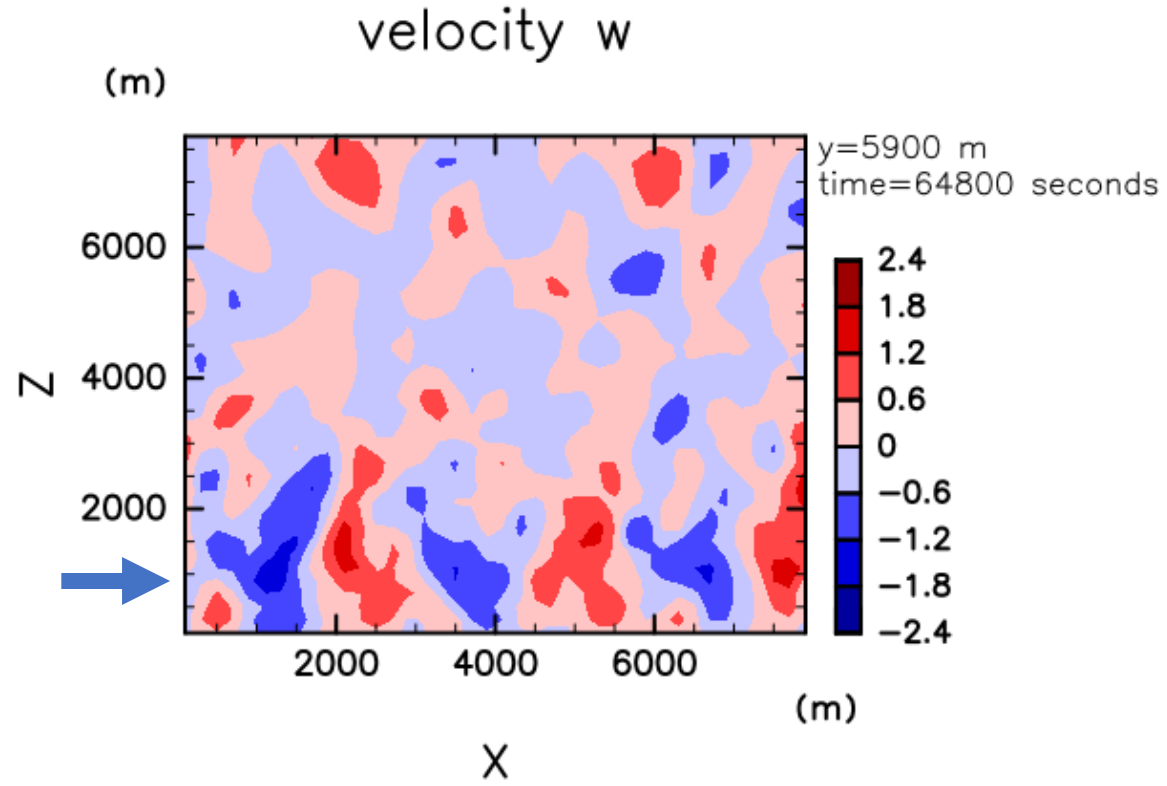
# 結果①

## 温度の高度分布



- 前ページの温位の図で  $z=1000\text{m}$  付近から温位が上昇していたが、温度もこの高度付近の前後で傾きが変化している。
- この温度の高度分布の図からも、この高度より低い場所で対流が起きていると考えられる。

# 結果① 鉛直風



- X方向に上昇流領域と下降流領域が交互に並んでいる。



# 実験② GABLS2 実験

- 大気境界層スキームの比較評価を目的とした研究である。本実験では Mellor and Yamada の境界層スキームを用いて大気境界層の鉛直構造と乱流輸送を再現し、gabls2 での乱流運動エネルギーの研究結果との比較を行った。
- 初秋にアメリカカンザスで行われた観測に基づいており、比較的乾燥した地域で強い日周変動を示す連続した2つの晴天日を選んで相互比較を行った研究。
- Svensson et al., 2011 では、モデルは一定の地衡風, 所定の表面温度, 大規模発散で強制されている。30 種類のモデルシミュレーションと 1 種類のラージエディシミュレーション (LES) の結果を解析し, 観測結果と比較している。

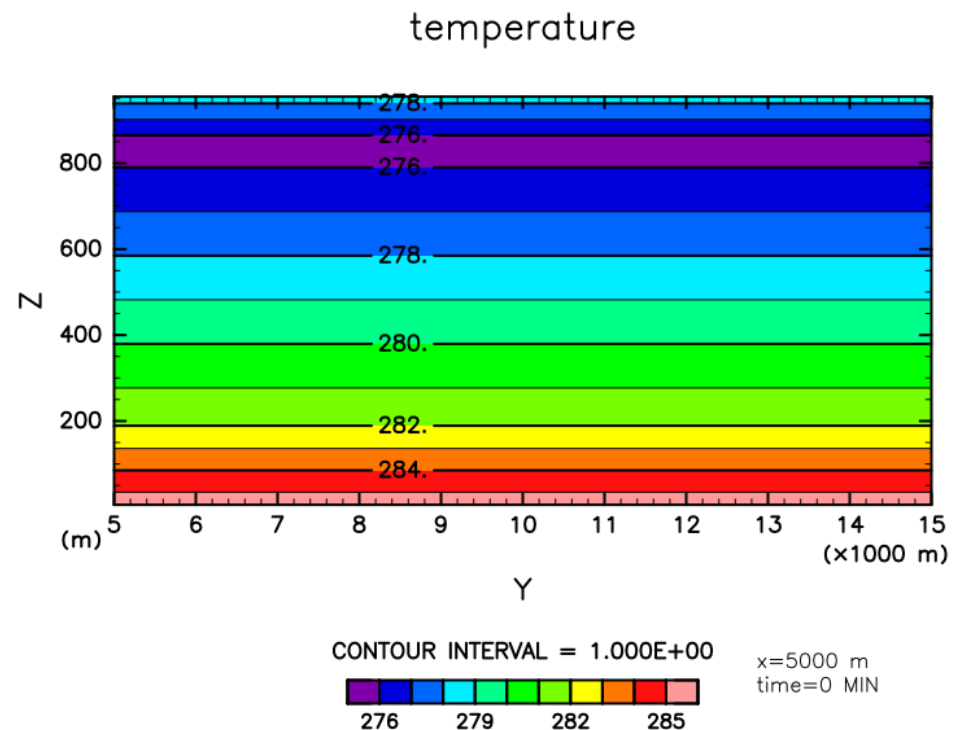
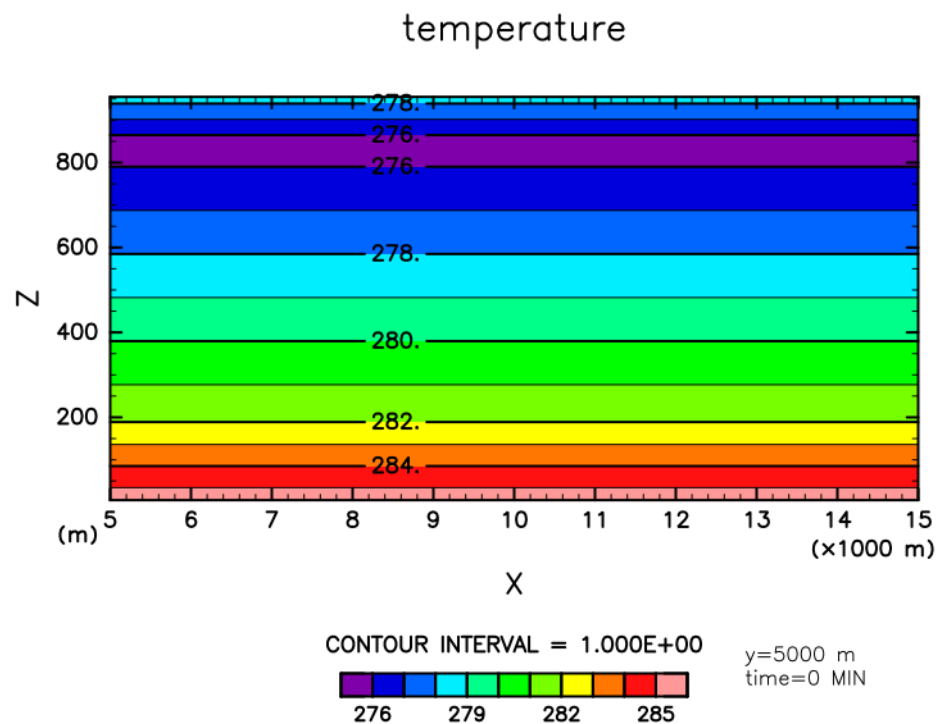
# 実験② GABLS2 実験

## • 計算設定

- MPI プロセス数 東西 1 南北1
- 格子間隔  $x=y=10\text{km}$
- 格子点数  $x=y=2$
- 鉛直層数 65 (10m から 24.861km までの 65 層)
- 層積分期間 36 hour
- 時間刻み幅 60s
- データ出力間隔 10 min
- 領域  $x\ 20\text{km}\ y\ 20\text{km}$
- 緩和領域
  - Z 方向 (モデル上端から下向き方向) の緩和領域の幅 5000m
  - 水平陽解法-鉛直陰解法
  - Mellor and Yamada (1982)による level 2.5 境界層乱流パラメタリゼーション
  - 地表面フラックスをバルクモデルで計算 (蒸発効率 0.025)
  - TKE (乱流運動エネルギー) は  $10^{-5}$

# 初期条件

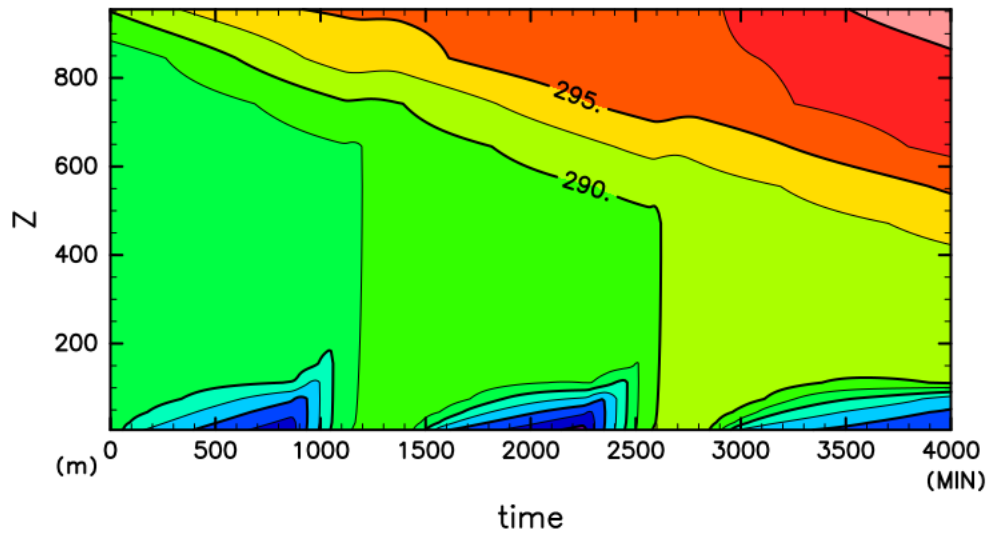
- 温度は下図, 風速はゼロ



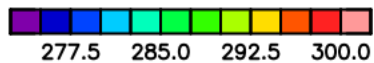
# 結果②

## 温位

potential temp.



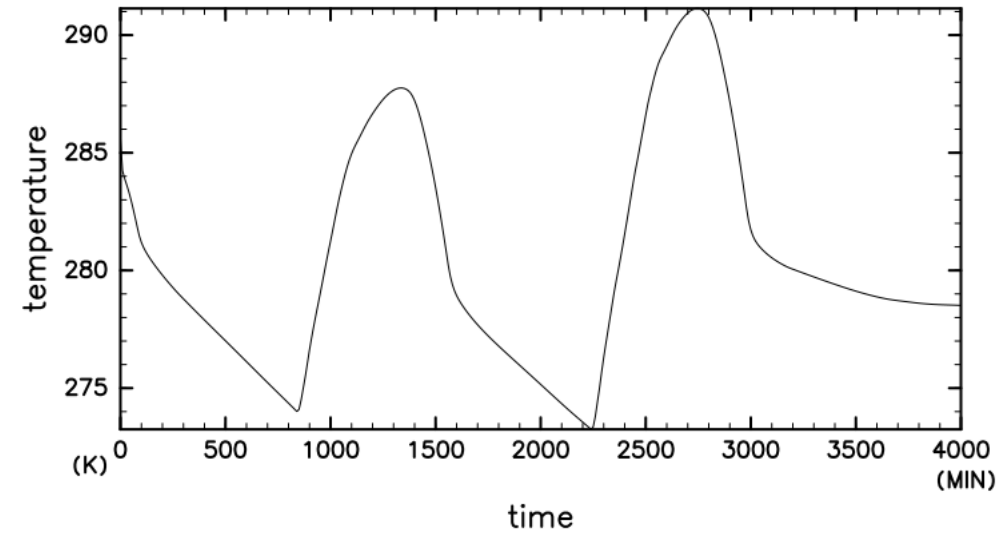
CONTOUR INTERVAL = 2.500E+00



x=5000 m  
y=5000 m

## 地表温度

temperature

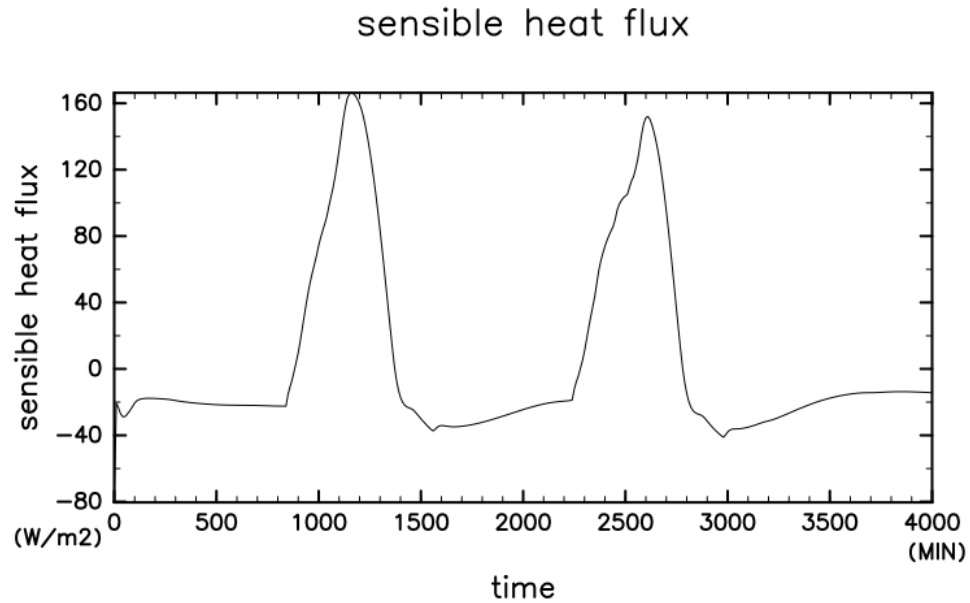


x=5000 m  
y=5000 m  
z=5 m

- 900, 2200MIN あたりで地表温度・地表付近の温位が増加.

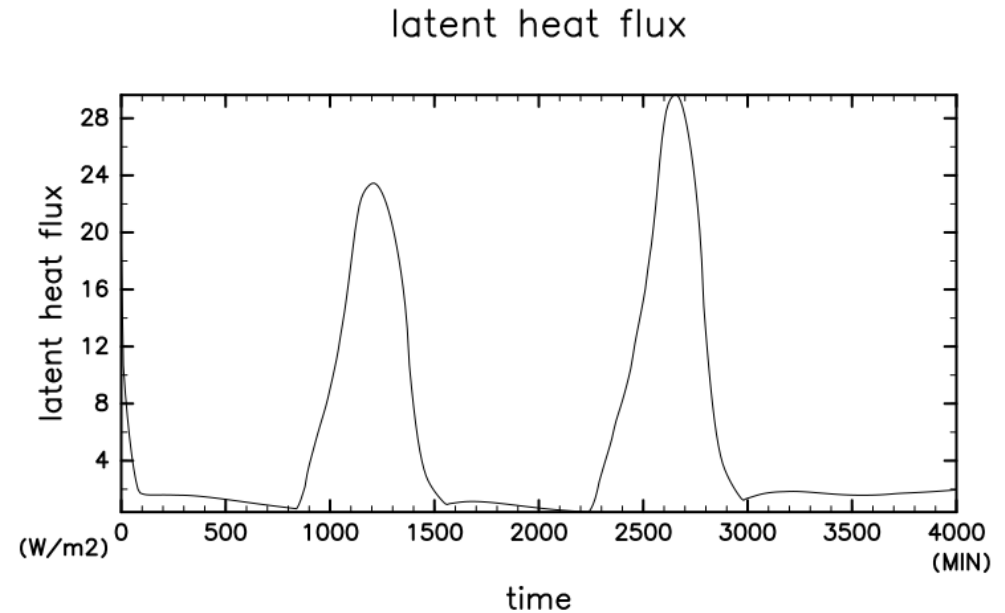
# 結果②

## 顕熱フラックス



x=5000 m  
y=5000 m

## 潜熱フラックス

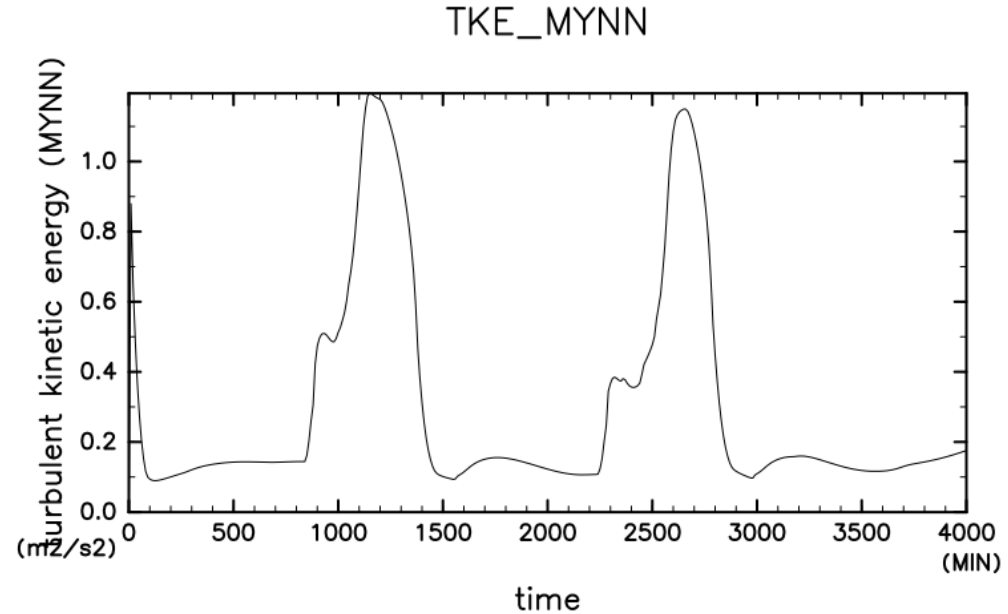
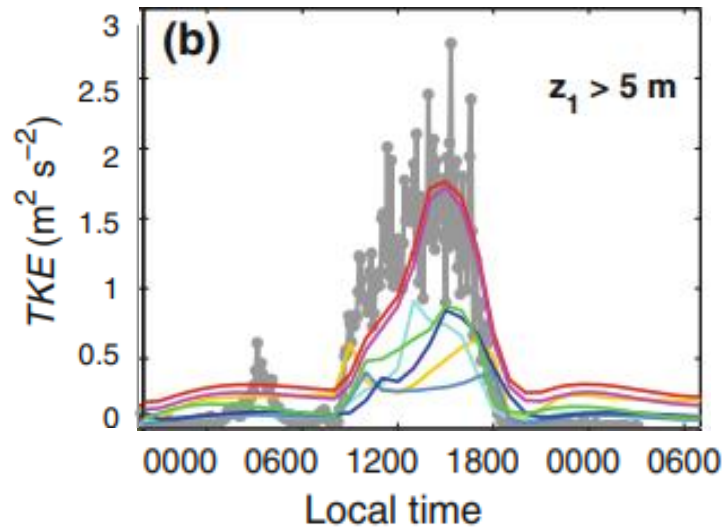


x=5000 m  
y=5000 m

- ・ 顕熱フラックスが上昇する時間になると地表温度が増加した。
- ・ 900, 2200 MIN 付近で顕熱フラックスが0以下でも温度が上昇しているのは潜熱フラックスの影響と考えられる。

# 結果②

## 乱流運動エネルギー



x=5000 m  
y=5000 m  
z=5 m

Svensson et al., 2011より引用  
グレーは観測結果である。

## SCALE-RM での計算結果

- MYNN の乱流運動エネルギーは Svensson et al., 2011の結果と比べると、ISAC-Oper, JMA より小さく、他の5つよりも大きく表現された。

# まとめ

- 領域大気モデル SCALE-RM に慣れるため, SCALE-RM をインストールした際に用意されていたテスト計算を行ったものの紹介を行った.
- 実験①では放射対流を鉛直流の観点から観察した.
- 実験②では gabls2 研究結果と SCALE-RM での MYNN のスキームとの間で, 乱流運動エネルギーを比較した.
- この計算の経験をもとに, 次は SCALE-RM を火星設定にして, 火星の惑星境界層を調べてみる.

# 参考文献

- [SCALE Regional Model \(SCALE-RM\) \(riken.jp\)](#)
- [scale\\_rm\\_description-5.4.5.pdf \(riken.jp\)](#)
- H. Tomita. New microphysical schemes with five and six categories by diagnostic generation of cloud ice. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 86:121–142, 2008.
- M. Sekiguchi and T. Nakajima. A k-distribution-based radiation code and its computational optimization for an atmospheric general circulation model. *J. of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 109:2779—2793, 2008.
- J. Smagorinsky. General circulation experiments with the primitive equations. *Mon. Weather Rev.*, 91:99—164, 1963.



- G. L. Mellor and T. Yamada. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20:851—875, 1982.
- G. Svensson et al., (2011) Evaluation of the Diurnal Cycle in the Atmospheric Boundary Layer Over Land as Represented by a Variety of Single-Column Models: The Second GABLS Experiment. *Boundary-Layer Meteorol* (2011) 140:177–206.
- [https://dennou-h.gfd-dennou.org/library/dcpam/sample/2015-02-14\\_yot/GABLS2/](https://dennou-h.gfd-dennou.org/library/dcpam/sample/2015-02-14_yot/GABLS2/)