

# 雲解像モデル deepconv

---

杉山耕一郎, 中島健介  
deepconv 開発グループ  
2021 年 3 月 29 日

地球流体データ解析・数値計算ワークショップ

# deepconv

- 地球流体電脳倶楽部で開発している、地球も含めた惑星大気への応用を想定した雲解像モデル
  - 金星、火星、木星、…
- 直線直交座標系の格子点モデル
  - 準圧縮方程式系、等方格子、地形なし、水平周期境界
    - 現在、地形に沿った座標系へ拡張中。
- 階層モデル群の1つとして整備
  - コード書法は dcmode1 コーディングルールに沿う
  - I/O は gtool5, 可視化は gphys
- コードネーム：arare (v.6)
  - 杉山がメインで開発しているソース

# 定式化

- 状態方程式

$$\rho = \frac{p}{R_d T} \left( \frac{1/M_d}{1/M_d + \sum q_v/M_v} \right) (1 + \sum q_v + \sum q_c + \sum q_r) = \frac{p_0 \pi^{c_{vd}/R_d}}{R_d \theta_v} \left( \theta_v = \frac{\theta}{\left( \frac{1/M_d}{1/M_d + \sum q_v/M_v} \right) (1 + \sum q_v + \sum q_c + \sum q_r)} \right)$$

- 速度の式

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= - \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) - c_{pd} \bar{\theta}_v \frac{\partial \pi}{\partial x} + Turb.u \\ \frac{\partial w}{\partial t} &= - \left( u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) - c_{pd} \bar{\theta}_v \frac{\partial \pi}{\partial z} + Turb.w + g \left( \frac{\theta}{\bar{\theta}} + \frac{\sum q_v/M_v}{1/M_d + \sum \bar{q}_v/M_v} - \frac{\sum q_v + \sum q_c + \sum q_r}{1 + \sum \bar{q}_v} \right) \end{aligned}$$

- 圧力の式

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} = - \frac{\bar{C}_s^2}{c_{pd} \bar{\rho} \bar{\theta}_v^2} \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{\theta}_v u_j)$$

- 熱の式

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} &= - \left( u \frac{\partial \theta}{\partial x} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - w \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + \frac{L}{c_{pd} \bar{\pi}} (CN_{vc} - EV_{cv} - EV_{rv}) \\ &\quad + \frac{1}{\bar{\pi}} (Q_{rad} + Q_{dis}) + Turb.\bar{\theta} + Turb.\theta \end{aligned}$$

- 凝縮成分の保存式 (蒸気, 雲, 雨 × 成分)

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_v}{\partial t} &= - \left( u \frac{\partial q_v}{\partial x} + w \frac{\partial q_v}{\partial z} \right) - w \frac{\partial \bar{q}_v}{\partial x} - (CN_{vc} - EV_{cv} - EV_{rv}) + Turb.q_v + Turb.\bar{q}_v, \\ \frac{\partial q_c}{\partial t} &= - \left( u \frac{\partial q_c}{\partial x} + w \frac{\partial q_c}{\partial z} \right) + (CN_{vc} - EV_{cv} - CN_{cr} - CL_{cr}) + Turb.q_c, \\ \frac{\partial q_r}{\partial t} &= - \left( u \frac{\partial q_c}{\partial x} + w \frac{\partial q_c}{\partial z} \right) + (CN_{cr} + CL_{cr} - EV_{rv}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} V_t q_r) + Turb.q_r \end{aligned}$$

変数		上付き添え字
$p$ : 圧力	$R$ : 気体定数	$\bar{\cdot}$ : 平均成分
$\pi$ : 無次元圧力	$M$ : 分子量	
$T$ : 温度	$c_p$ : 比熱	
$\theta$ : 温位	$C_s$ : 音速	下付き添え字
$\theta_v$ : 仮温位	$V_i$ : 雨の落下速度	$d$ : 乾燥成分
$u$ : 水平風速	$L$ : 潜熱	$v$ : 凝縮成分気体
$w$ : 鉛直風速	$Turb$ : 乱流拡散項	$c$ : 雲
$q$ : 混合比	$Q_{rad}$ : 放射加熱項	$r$ : 雨
$\rho$ : 密度	$Q_{dis}$ : 散逸加熱項	

# 計算例：土星・天王星（2D）

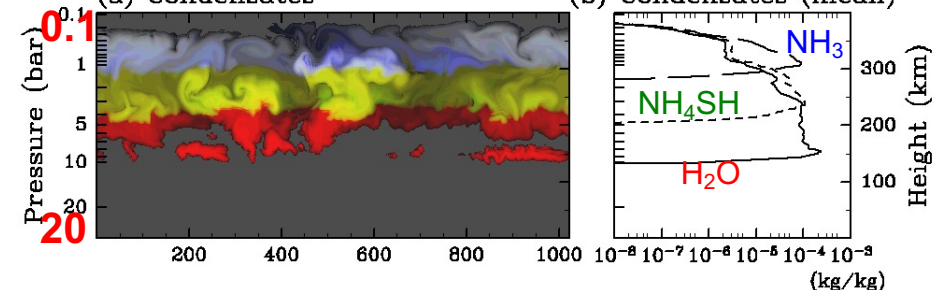
- 3種類の雲の生成を考慮した、熱強制固定計算
  - 1024 km x 500 / 650 km
  - dx = dz = 2km

## Saturn

t = 531.25 day

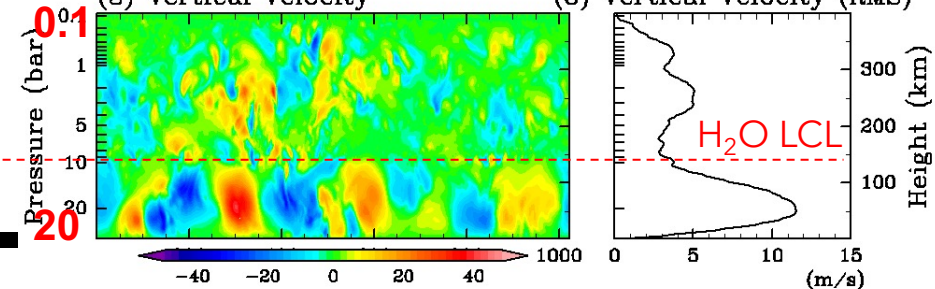
(a) Condensates

(b) Condensates (mean)



(3) Vertical Velocity

(8) Vertical Velocity (RMS)

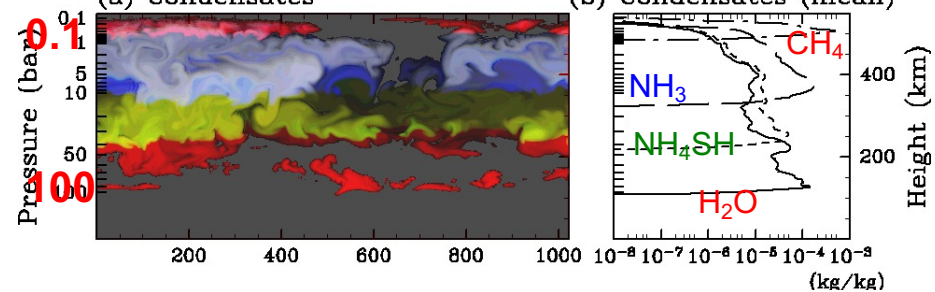


## Uranus

t = 415.05 day

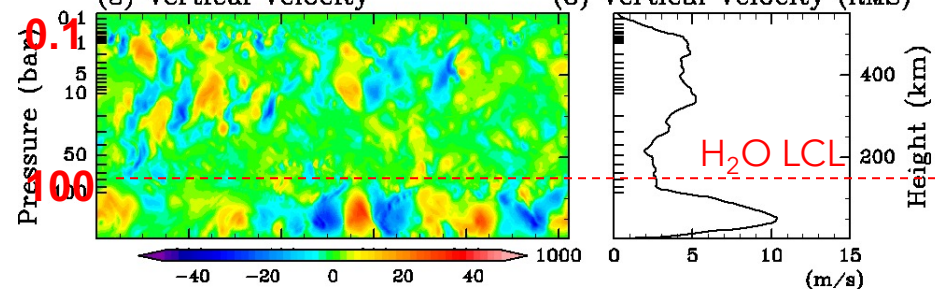
(a) Condensates

(b) Condensates (mean)



(3) Vertical Velocity

(8) Vertical Velocity (RMS)



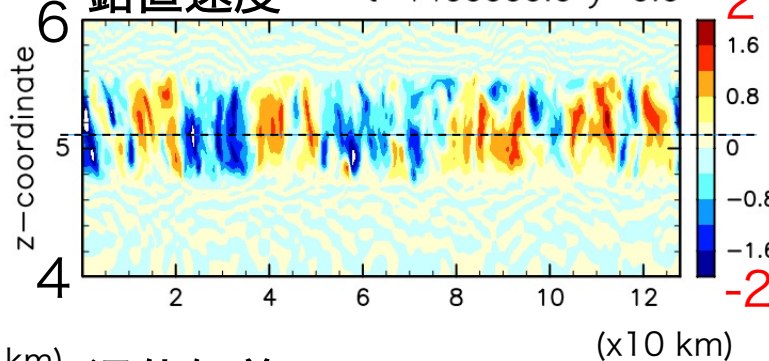
# 計算例：金星（3D）

x-z 断面

(x10 km)

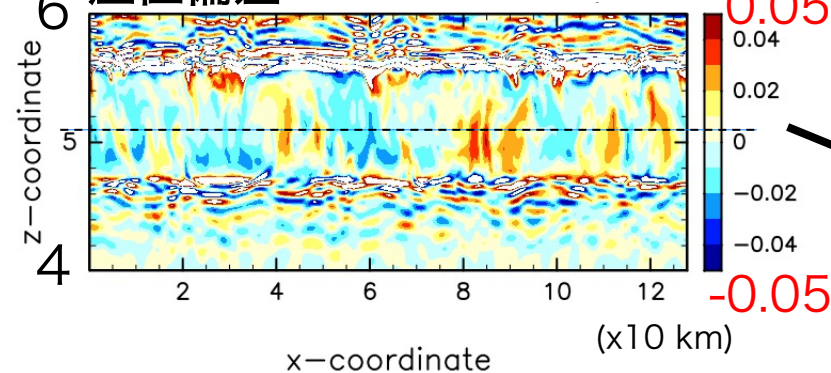
鉛直速度

t=1400000.0 y=0.0



(x10 km)

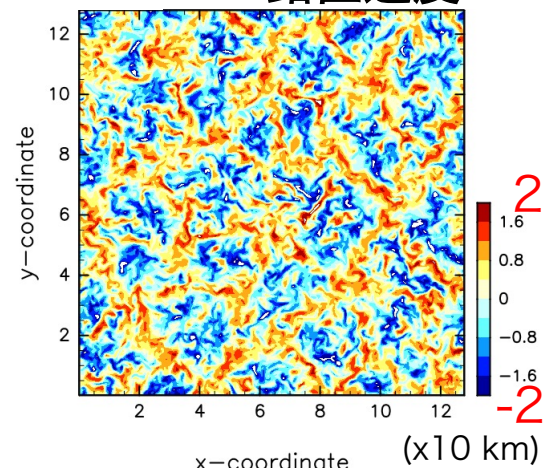
温位偏差



x-y 断面 (高度 51 km)

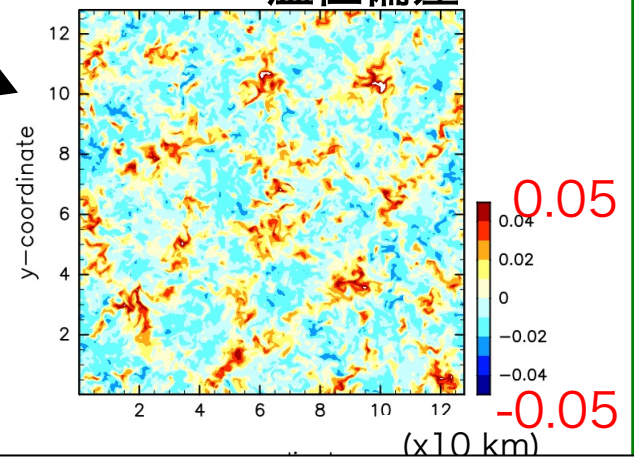
(x10 km)

鉛直速度



(x10 km)

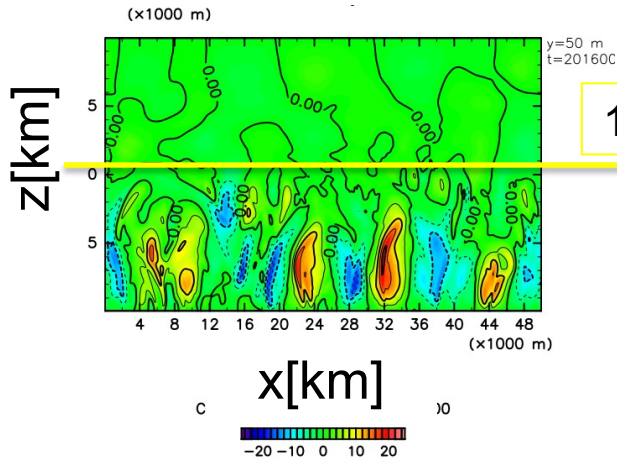
温位偏差



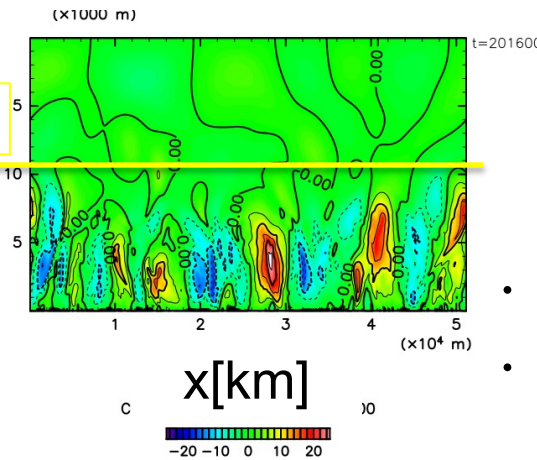
- 雲層（高度45~55km）の対流
  - 128 km x 128 km x 30 km、
  - dx=dy=200 m、 dz=125 m

# 火星計算 (2D・3D)

deepconv



Odaka et al., 2001

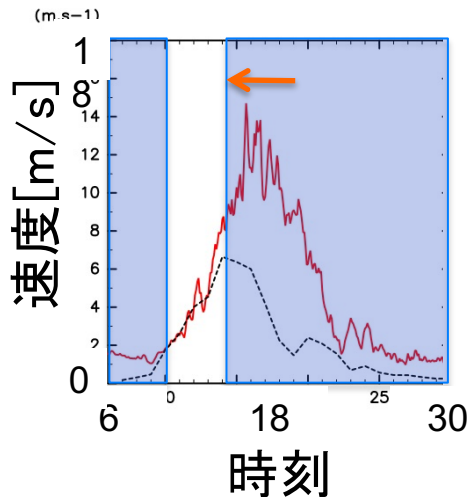


- Odaka et al. (2001) の加熱分布と地面温度の日変化を与えた計算
  - SCALE 火星計算と同じ設定
- 50 km x 20 km
- $dx = dz = 100m$

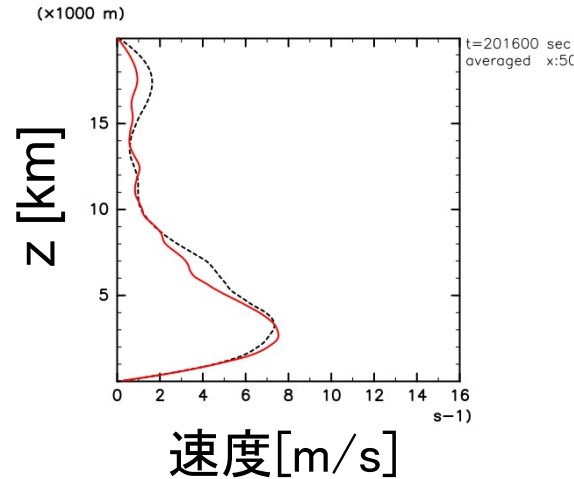
赤線 : deepconv

黒線 : Odaka et al.(2001)

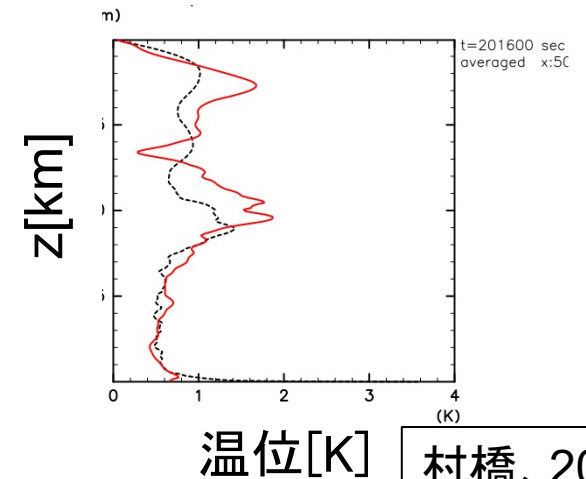
$(\overline{u^2})^{1/2}$  (z=50m)



$(\overline{w^2})^{1/2}$  (LT=14)



$(\overline{\Theta^2})^{1/2}$  (LT=14)



# 山岳波実験

・ 白濱さん@神戸大

## 問題設定・実験設定

■ Satomura et al. (2003) の理想化された山岳波モデル相互比較実験

初期場

- ・ 等温大気
- ・ 静水圧平衡の関係から圧力分布を決定
- ・ 一様な水平風速  $u = 10 \text{ m/s}$  を与える

境界条件

- ・ 計算領域の中心にローレンツ型の山
- ・ 水平: 周期境界条件
- ・ 鉛直: 上端:  $w = 0$   
下端: 風の斜面に垂直な成分が0

実験A

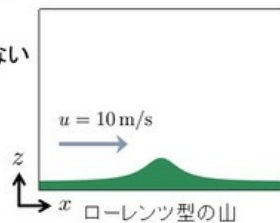
- 浮力振動数  $N = 0.02 \text{ s}^{-1}$
- 山の高さ 100 m

	山の半振幅 (m)
A1	5000
A2	500
A3	100
A4	50

実験D

- 浮力振動数  $N = 0.01 \text{ s}^{-1}$
- 山の高さ 500 m
- 非線形効果が無視できない

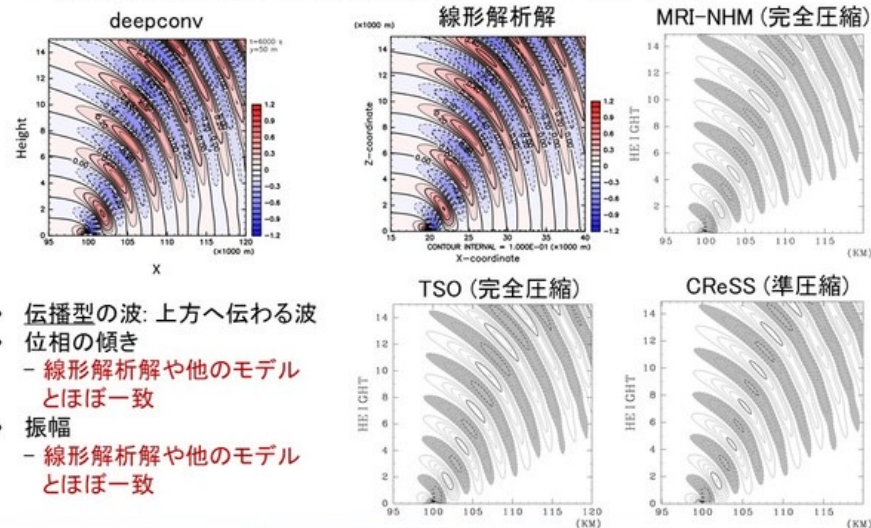
	山の半振幅 (m)
D1	500
D2	250



※本発表ではA2・A4の結果について述べる

## 結果1-1: 実験A2 波の構造 (鉛直速度)

■ 線形解析解, 他のモデルの結果との比較,  $t = 6000 \text{ s}$  の鉛直速度分布



- ・ 伝播型の波: 上方へ伝わる波
- ・ 位相の傾き
  - 線形解析解や他のモデルとほぼ一致
- ・ 振幅
  - 線形解析解や他のモデルとほぼ一致

# deepconv/arare6 的書法

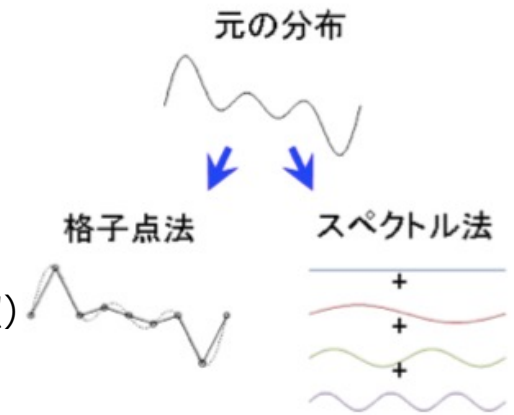


図 4.4.4 格子点法とスペクトル法の模式図

- SPMODEL を模倣 (SPMODEL チュートリアル参照)

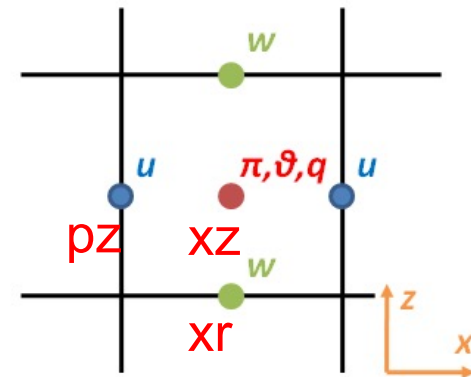
- 格子点位置を合わせて計算

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} \rightarrow \text{xz\_dx\_pz}(\text{pz\_dx\_xz}(\text{xz\_ZetaN}))$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} \rightarrow \text{xz\_dx\_pz}(\text{pz\_VelX})$$

- 位置を変更するには平均操作する

$$\frac{\partial \zeta}{\partial x} \rightarrow \text{xz\_pz}(\text{pz\_dx\_xz}(\text{xz\_ZetaN}))$$



pz\_VelX (水平速度)  
 xr\_VelZ (鉛直速度)  
 xz\_PotTemp (温位)



# deepconv/arare6 的書法

```
program diffuse_2d
  use gridset, only :: DimXMin...
  use differentiate_center4, only:xz_dx_pz...
  ...
do it=1,nt
  write(*,*) '*it = ', it
  xz_ZetaA = xz_ZetaN &
    & + dt * nu * ( &
    &   xz_dx_pz(pz_dx_xz(xz_ZetaN)) &
    & + xz_dz_xr(xr_dz_xz(xz_ZetaN)) &
    & )
  call BoundaryXcyc_xz( xz_ZetaA )
  call BoundaryZCyc_xz( xz_ZetaA )
  xz_ZetaN = xz_ZetaA
end do
```

## モジュール引用

- 格子点生成, 微分演算 (4次中央差分)モジュールを引用

## 拡散の計算

- 配列添え字を隠蔽
- 形式的に一行で書ける

- 境界条件適用
- ループ処理

実習



# 公開ページ (http://www.gfd-dennou.org/library/deepconv)

DEEPCONV /地球流体電脳倶楽部 /dcmode プロジェクト /SIGEN

/English

検索

## 地球流体電脳倶楽部 deepconv プロジェクト

deepconv プロジェクトでは、地球を含めた惑星大気への応用を想定した 雲解像モデルの開発を行っています。

### deepconv (arare6) : 開発版

現在開発中の 2 次元/3 次元雲解像モデルです(開発コードネーム arare6). ソースコードは Fortran90 で記述されています。

- ソースコード
  - <URL:<https://github.com/gfd-dennou-club/Dennou-deepconv-arare6/>>
- ドキュメント
  - 定式化マニュアル [pdf]
  - 離散化マニュアル [pdf]
- チュートリアル
  - インストール手引
  - ごらく deepconv
  - らくらく deepconv
- ライセンスと使用上の注意
- 開発グループメンバー
- 計算例

### deepconv (arare4)

2 次元/3 次元の雲解像モデルです (開発コードネーム arare4). ソースコードは Fortran90 で記述されています. deepconv (arare) は木星大気と火星大気の対流を念頭において開発が進んでいます。

# ごくらく deepconv

## ソースのコンパイル

- GitHub から git clone する  
\$ git clone https://github.com/gfd-dennou-club/Dennou-deepconv-arare6.git  
(1 行で書く)
- configure & make  
\$ cd Dennou-deepconv-arare6  
\$ export FC=gt5frt  
\$ ./configure  
\$ make
- Dennou-deepconv-arare6/bin 以下に実行ファイルが作られる  
\$ ls bin  
arere (実行用)      arare\_init-data (初期値生成用)

# じっくり deepconv

- テストプログラムを格納したディレクトリに移動

```
$ cd exp_setup_files
```

- テスト毎にディレクトリが用意されている

```
$ ls
```

```
01_sound-wave
```

(音波)

```
02_advection
```

(移流その1)

```
02_advection-Qmix
```

(移流その2)

```
03_gravity-wave
```

(内部重力波)

```
04_density-current
```

(重力流)

```
05_warm-bubble
```

(サーマルその1)

```
06_warm-bubble-kw1978
```

(サーマルその2)

# ごくらく deepconv

- ここでは「サーマル実験 I」実験を行う

```
$ cd 05_warm-bubble
```

- スクリプトを実行

```
$ ./testrun.rb
```

...

(しばらくお待ちください)

- 計算が終了すると、いくつかの netCDF ファイルと画像ファイルが作成される

```
$ ls
```

```
$ qiv (画像ファイル名)
```

# じっくり deepconv

- ・ スクリプトで実行していた計算を手で実行

```
$ cd ../
```

```
$ mkdir test
```

```
$ cd test
```

- ・ 実行ファイル、NAMELIST ファイルをコピー

```
$ cp ../../bin/arare* ./
```

```
$ cp ../05_warm-bubble/*.conf ./
```

- ・ 初期値を作成

```
$ ./arare_init-data -N=warm-bubble_160x1x80_Center4_Center2_0.0.conf
```

- ・ 計算を実行

```
$ ./arare -N=warm-bubble_160x1x80_Center4_Center2_0.0.conf
```

- ・ 計算が終了すると、いくつかの netCDF ファイルが作成される

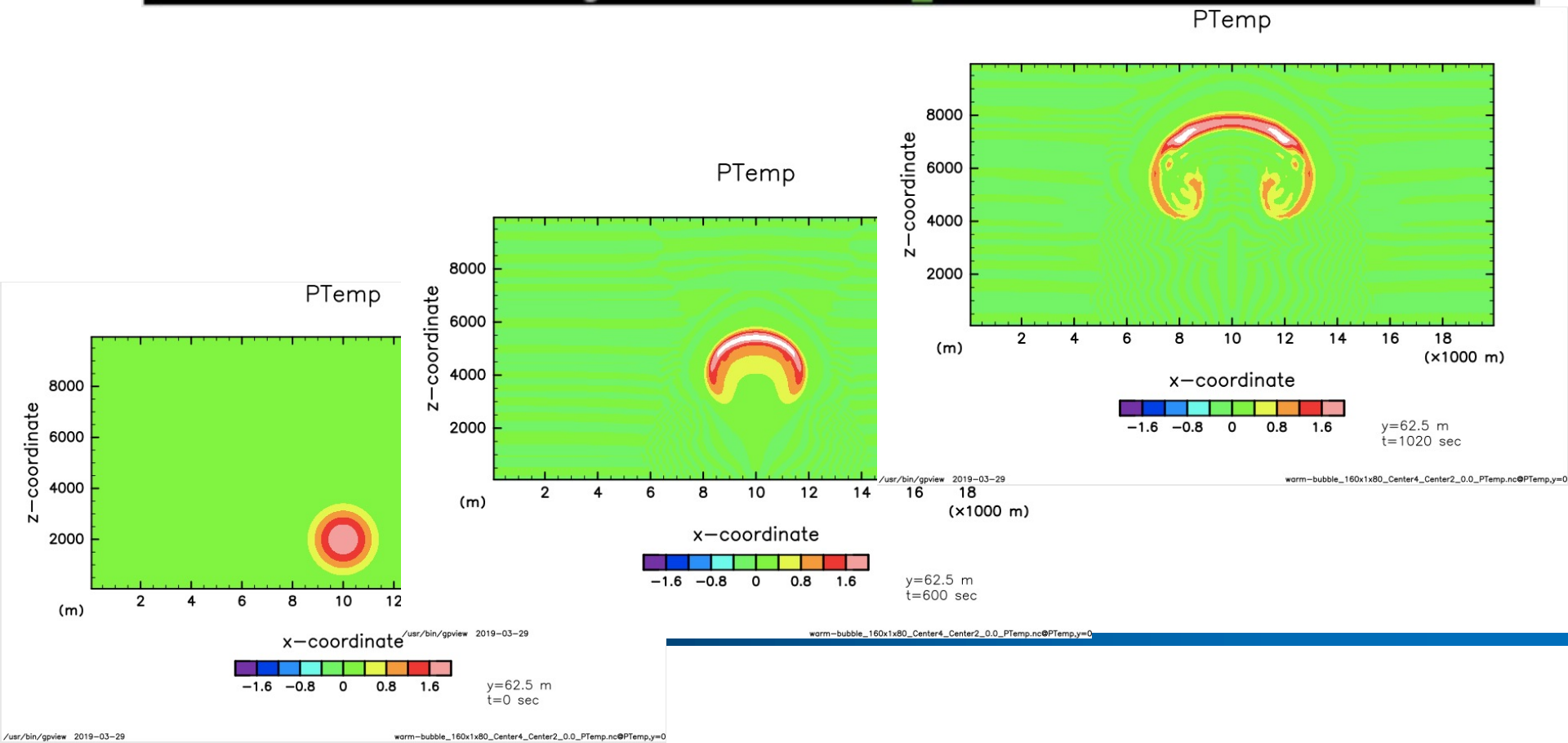
```
$ ls
```

(お手元で確認してください)

# じっくり deepconv

- 出力は netCDF 形式. gphys などでも可視化.

```
$ gpview warm-bubble_160x1x80_Center4_Center2_0.0_PTemp.nc@PTemp,y=0 --anim t --Ga --range -2:2 --nocont
```





# じっくり deepconv

- ・ 描画 (温位偏差)

```
$ gpview warm-bubble_160x1x80  
_Center4_Center2_0.0_PTemp.nc@PTemp,  
y=0,t=1020
```

- ・ 描画 (鉛直流)

```
$ gpview warm-bubble_160x1x80  
_Center4_Center2_0.0_VelZ.nc@VelZ,  
y=0,t=1020
```



# deepconvで並列計算

VirtualBox で VM に  
割り当てる CPU を  
複数にする必要あり

## ソースのコンパイル

- GitHub から git clone する  
`$ git clone https://github.com/gfd-dennou-club/Dennou-deepconv-arare6.git`
- configure  
`$ cd Dennou-deepconv-arare6`  
`$ export FC=gt5fvt.mpi`  
`$ ./configure --with-mpi`
- make  
`$ lv Config.mk` (CPPFLAGS=-DLIB\_MPI が設定されていることを確認)  
`$ make`
- Dennou-deepconv-arare6/bin 以下に実行ファイルが作られる  
`$ ls bin`  
arere (実行用)      arare\_init-data (初期値生成用)

# deepconvで並列計算

VirtualBox で VM に  
割り当てる CPU を  
複数にする必要あり

- 先ほどの「サーマル実験 I」実験の設定ファイルを利用
  - 並列数の設定  
(x, y 方向にのみ分割可)

```
&gridset_nml
xdim = 160    !x方向の格子点数
ydim = 1      !y方向の格子点数
zdim = 80     !z方向の格子点数
xsub = 2      !x方向の分割数 (MPI)
/
```

- 計算実行
  - 初期値の作成  
`$ mpiexec -n 2 ./arare_init-data  
-N=warm-bubble_160x1x80_Center4_Center2_0.0.conf`
  - 計算の実行  
`$ mpiexec -n 2 ./arare  
-N=warm-bubble_160x1x80_Center4_Center2_0.0.conf`
- 描画  
`$ gpview warm-bubble 160x1x80 Center4 Center2 0.0 Ptemp rank*.nc@Ptemp,y=0 ¥  
--anim t`

# おわりに

---

- ・ 自分で NAMELIST ファイルを編集することで、さまざまな実験ができます
- ・ くわしくは以下のページを参照
  - <http://www.gfd-dennou.org/library/deepconv/>

# 補足

- ざくらく deepconv は, 「気象庁 数値予報課報告・別冊 第60号 次世代非静力学モデルasuca」を意識
  - 2.6.6 節
  - <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpreport/nwpreport.html>

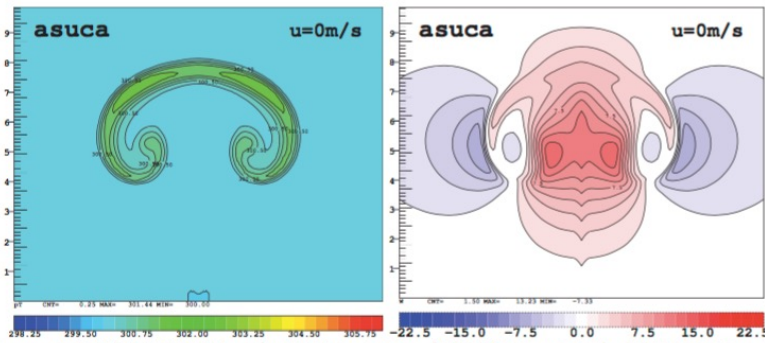


図 2.6.17 asuca の実験結果 (水平風速 0 m/s)。横軸 (x) : 4-16 km (計算領域 20 km のうち)、縦軸 (z):0-10 km。(左) (K)、(右) 鉛直速度 (m/s)

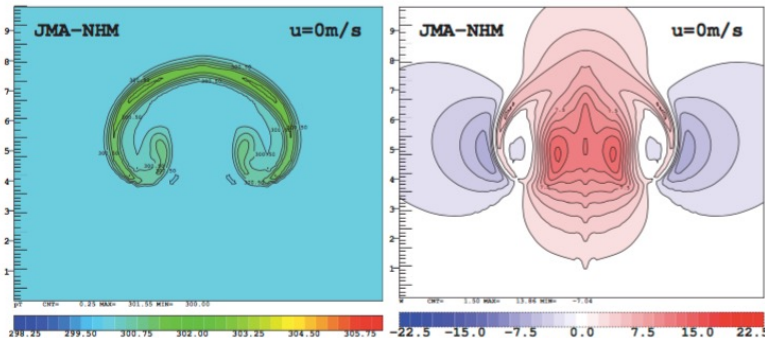
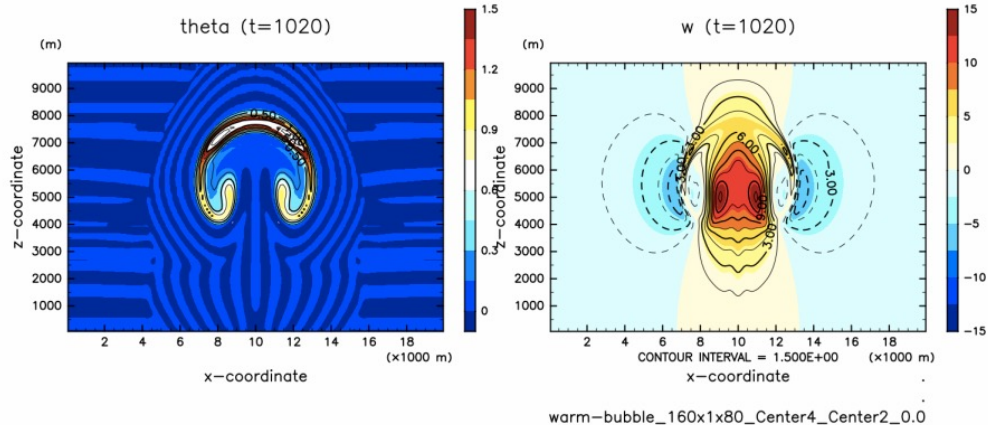
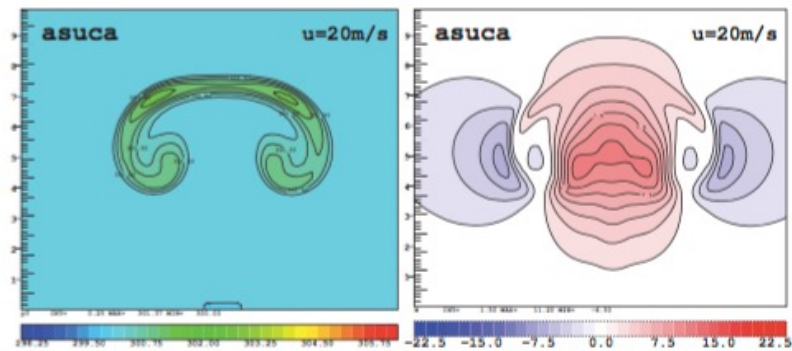


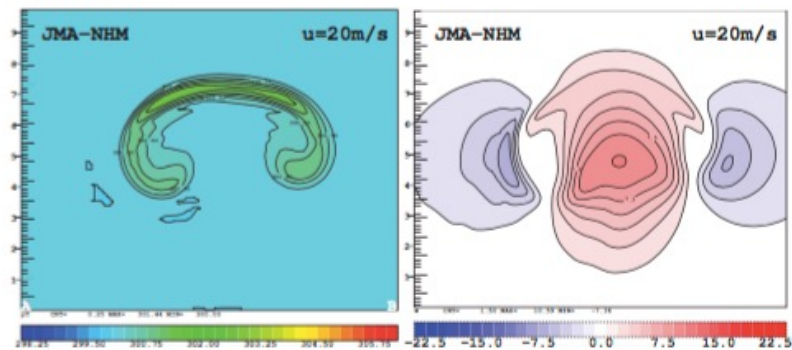
図 2.6.18 JMA-NHM の実験結果 (水平風速 0 m/s)。横軸 (x) : 4 km-16 km (計算領域 20 km のうち)、縦軸 (z):0-10 km。(左) 温度 (K)、(右) 鉛直速度 (m/s)



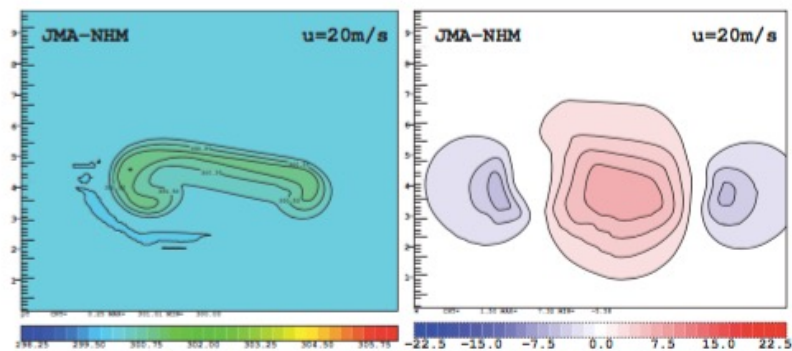
warm-bubble\_160x1x80\_Center4\_Center2\_0\_0



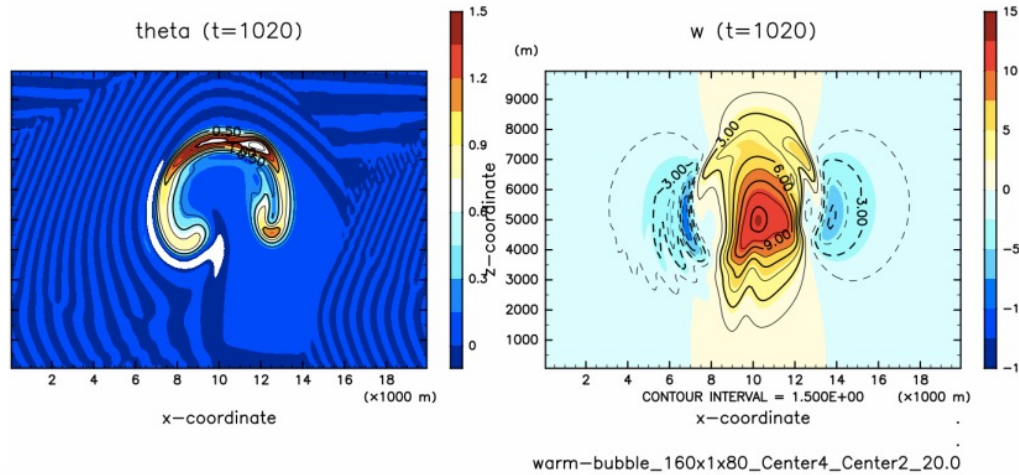
3.19 asucaの実験結果 (水平風速 20 m/s)。横軸 (x) : 4-16 km (計算領域 20 km のうち)、縦軸 (z):0-10 km。(左) 温位 (K)、(右) 鉛直速度 (m/s)



3.20 JMA-NHMの実験結果 (水平風速 20 m/s)。横軸 (x) : 4-16km (計算領域 20km のうち)、縦軸 (z):0-10 km。(左) 温位 (K)、(右) 鉛直速度 (m/s)。積分時間間隔  $\Delta t = 1$  秒。



3.21 JMA-NHMの実験結果 (水平風速 20 m/s)。横軸 (x) : 4-16 km (計算領域 20 km のうち)、縦軸 (z):0-10 km。(左) 温位 (K)、(右) 鉛直速度 (m/s)。積分時間間隔  $\Delta t = 2$  秒とした場合。



warm-bubble\_160x1x80\_Center4\_Center2\_20.0