

地球流体電脳倶楽部 dcmode1 プロジェクトでのモデル開発

高橋芳幸,
dcmode1 プロジェクトメンバー



dcmode1 プロジェクト

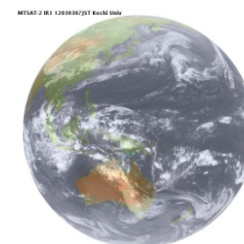
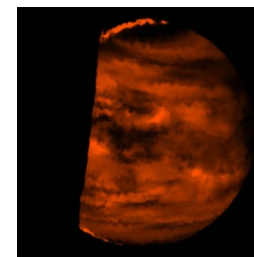
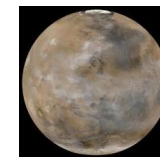
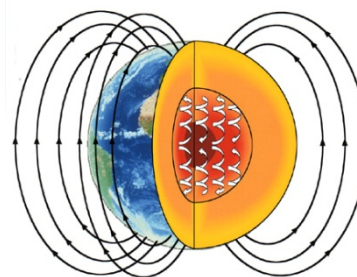
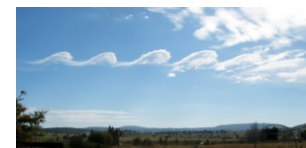
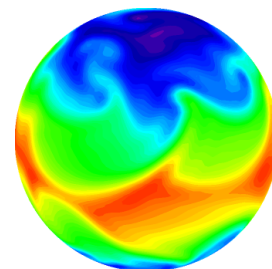
<http://www.gfd-dennou.org/library/dcmode1/>

様々な「地球流体」

- 惑星大気,
- 海洋,
- 惑星内核,
- これらを理想化した系

の振る舞いを理解することを旨とした基盤・道具の整備.

地球流体: 密度成層と回転の効果が働いた流体



金星, 地球, 火星の表層環境・東西風

金星

厚い大気を持つ高温高圧な環境
 全ての緯度で東風(自転方向)
 スーパーローテーション

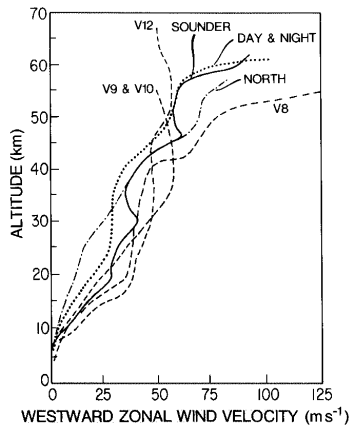
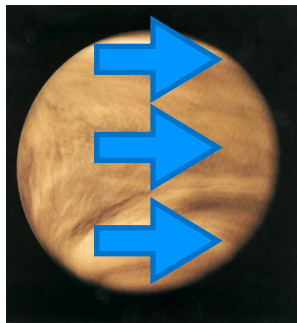
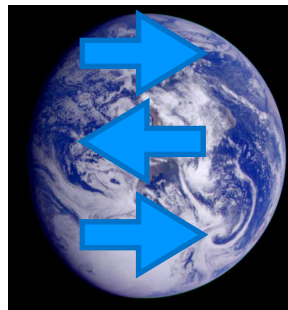


Fig. 9. Vertical profiles of east-to-west wind speed from Doppler tracking of Veneras 8, 9, 10, and 12 (V8, V9, V10, V12) and interferometric tracking of Pioneer Venus probes (from Schubert et al. 1983a).

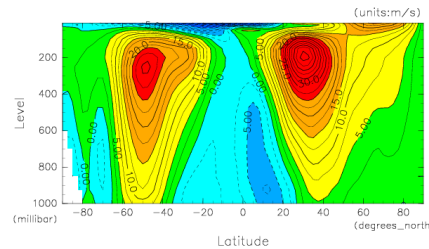
Schubert, 1983: in Venus, Arizona Press, 684, Fig. 9.

地球

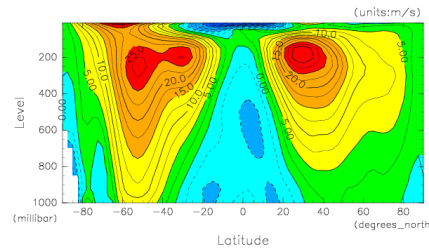
温暖湿潤な環境
 両半球中緯度西風
 赤道東風



UWWD_2003-DJF_NCEP



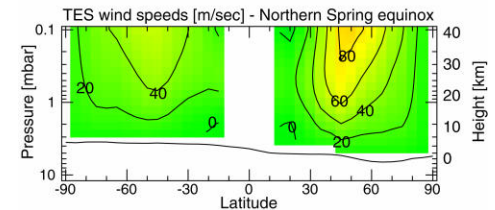
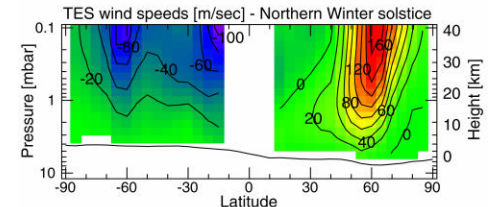
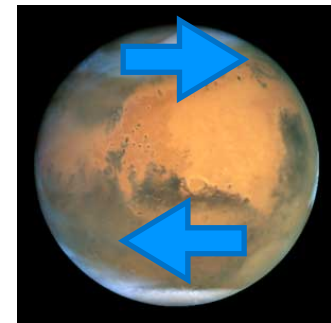
UWWD_2003-MAM_NCEP



dcchart project,
<http://www.gfd-dennou.org/library/dcchart/>

火星

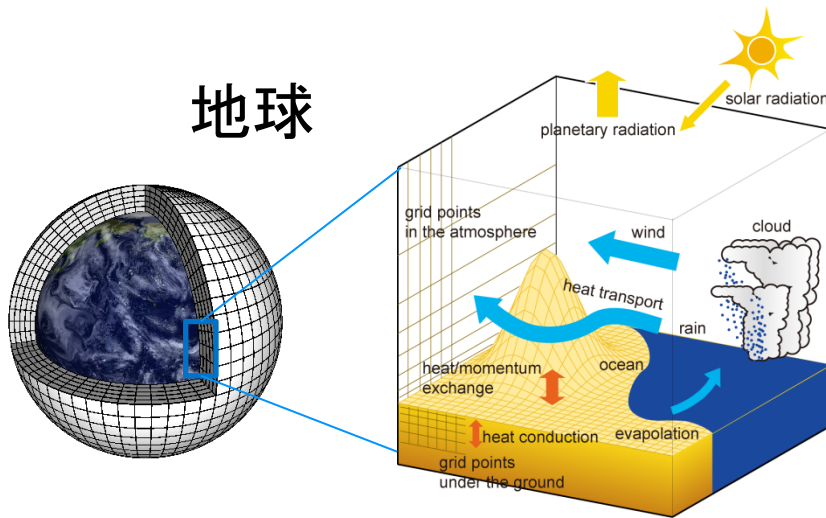
大気が薄く乾燥した環境
 冬半球中高緯度西風,
 夏半球中高緯度東風



Photojournal, JPL,
<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA01340>



地球流体の数値モデルの例: 大循環モデル



- 流体の方程式系 (プリミティブ方程式系)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - (u \cdot \nabla) u - \sigma \frac{\partial u}{\partial \sigma} - f k - \nabla \Phi + RT/p \downarrow s \nabla p \downarrow s + F$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = - (u \cdot \nabla) T - \sigma \frac{\partial T}{\partial \sigma} + \kappa$$

$$\frac{\partial p \downarrow s}{\partial t} = - \nabla \cdot (p \downarrow s u) - \frac{\partial}{\partial \sigma} (p \downarrow s \sigma u)$$

...

- 様々な過程を考慮して地球全体の温度, 風速, 密度分布を計算

- 移流過程
- 放射過程
- 乱流混合過程
- 凝結過程
- 地表面過程

- 放射伝達方程式 (散乱無を仮定した場合)

$$F \downarrow rad, \lambda (\tau) = \pi B \downarrow \lambda (\tau \downarrow s) \mathfrak{S}(\tau \downarrow s) - \int_0^1 \uparrow \tau \downarrow s \cdot \pi B \downarrow \lambda (\tau) \partial \mathfrak{S}(\tau)$$

- ...

数値モデル研究が直面する課題

- シミュレーションモデルは巨大化, 複雑化してしまった.
- シミュレーションした結果を理解することは簡単ではない.
 - そもそもモデルの正しさを検証することが難しい.
 - プログラムを理解することも難しい.
 - 現実に近いモデルを使うほど, (高密度)観測しているのと変わらない.
- “The Gap between Simulation and Understanding in Climate Modeling” (Held, 2005)

dcmodel が目指すプログラム/モデル

- 様々な複雑度のモデル
 - 簡単なモデルから複雑なモデルまでの比較により現象の理解に近づく.
- 共通の「型」を持ったモデル群
 - 共通の
 - 変数名規則
 - 入出力ルーチン
 - データ書式
 - スペクトル変換ルーチン.
 - 複数のモデルの利用を簡易に.
- 解説文書の整備されたモデル
 - 計算内容の学習, 理解の助けに.
- 誰でも使えるモデル・プログラム
 - 使用に制限がない
 - 自由に利用・改変・再配布
 - 誰にでも追試を可能に.
 - 地球流体電脳倶楽部 <http://www.gfd-dennou.org/> の「数値モデル」からアクセス
- 様々な規模の計算機で実行できるモデル
 - パソコンでもスパコンでも計算可能に.



dcmode1 プログラム/モデル ラインアップ

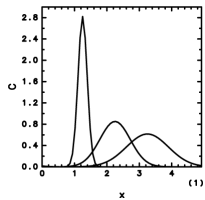
- 入出カライブラリ
 - gtool5 (佐々木)
- スペクトル変換ライブラリ
 - ispack (石岡)
 - spml (ispack のラッパー) (竹広, 佐々木)
- 各種モデル
 - spmodel サンプルプログラム (竹広, 佐々木, 他)
 - deepconv (惑星大気雲解像モデル) (杉山, 小高, 中島, 他)
 - DCPAM (惑星大気大循環モデル) (高橋, 石渡, 他)
- 文書整備ユーティリティ

dcmodel モデル

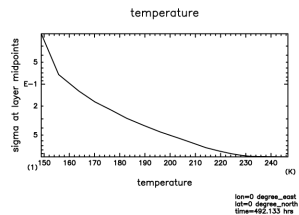
簡単モデルから複雑モデルまで

1D

- 移流拡散方程式等

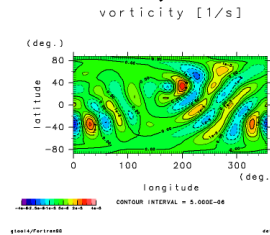


- 鉛直一次元カラム (DCPAM)

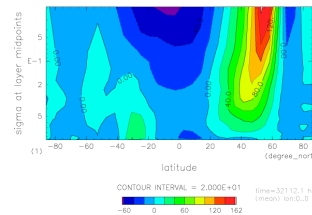


2D

- 順圧方程式, 浅水方程式等

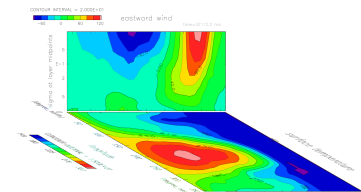
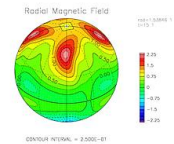


- 軸対称/球面上のプリミティブ方程式 (DCPAM)



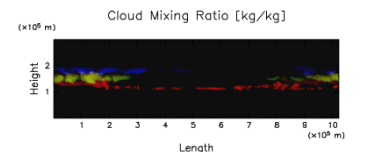
3D

- 球殻中の磁気流体力学方程式



ispack/spml 使用

- 二次元/三次元 準圧縮方程式 (deepconv)



gtool 使用

gtool5

<http://www.gfd-dennou.org/library/gtool/gtool5.htm>

- Fortran90 による入出力ライブラリ
- 自己記述型フォーマット NetCDF のデータを比較的簡単に入出力することを目指して設計
 - 数値データの入出力に合わせて、メタデータを簡略に付加
 - 複数のモデルで共通利用
 - 複数のモデルを扱う時に中身が分かりやすくなることを期待
 - NetCDF:
 - <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>



ispack/spml

- ispack: <http://www.gfd-dennou.org/library/ispack/>
 - Fortran77 で書かれたスペクトル変換ライブラリ
 - FFT はおそらく世界最速 on Intel Processors
- spml: <http://www.gfd-dennou.org/library/spmodel/>
 - ispack の Fortran90 ラッパーライブラリ
 - 「数式のようなプログラム」を可能にすることを目指して設計
 - 変数名ルール
 - Fortran90 の配列関数を利用した関数群

spml の変数名ルール・ライブラリ関数

- 変数名
 - 接頭詞を用いた次元の表現
 - (次元を表す接頭詞)_(物理的意味)
 - 例
 - x_Temp : x 次元温度配列
 - xyz_Dens : xyz 次元密度配列
 - e_Temp : 波数空間次元温度配列
 - w_Press : 球面調和関数次元圧力配列
- ライブラリ関数
 - 例
 - e_g(g_Data) : 実空間から波数空間への変換
 - g_e(e_Data) : 波数空間から実空間への変換
 - e_Dx_e(e_Data) : 波数空間での微分演算
 - 使用例
 - g_Data2 = g_e(e_Dx_e(e_g(g_Data1)))

spml を用いた数式のようなプログラム 1

Example : 1D KdV equation

1D KdV equation

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\zeta \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{\partial^3 \zeta}{\partial x^3},$$

is transformed to

$$\tilde{\zeta}_m^{\tau+1} = \tilde{\zeta}_m^\tau + (\Delta t) \times \left\{ - \left[\zeta \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right]_m^\tau - \left[\frac{\partial^3 \zeta}{\partial x^3} \right]_m^\tau \right\},$$

where the Euler scheme is applied to time derivative and

$$\tilde{\zeta}_m(t) = \frac{1}{L} \int_0^L \zeta(x, t) e^{2\pi i m x / L} dx, \quad \zeta(x, t) = \sum_m \tilde{\zeta}_m(t) e^{-2\pi i m x / L}$$

spml を用いた数式のようなプログラム 2

By the use of spml, the discretized equation shown left is coded as follows:

```
do it=1,nt
  e_Zeta = e_Zeta + dt * &
    ( -e_g(g_e(e_Zeta)*g_e(e_Dx_e(e_zeta))) &
      - e_Dx_e(e_Dx_e(e_Dx_e(e_zeta))) )
end do
```

```
e_Zeta   :  $\tilde{\zeta}_m$ 
dt       : time step
e_g      : spectral transformation
g_e      : inverse spectral transformation
e_Dx_e   : x derivative in spectral space
```

spml を用いた数式のようなプログラム 2

By the use of spml, the discretized equation shown left is coded as follows:

```
do it=1,nt
  e_Zeta = e_Zeta + dt * &
    ( -e_g(g_e(e_Zeta)*g_e(e_Dx_e(e_zeta))) &
      - e_Dx_e(e_Dx_e(e_Dx_e(e_zeta))) )
end do
```

$$\tilde{\zeta}_m^{\tau+1} = \tilde{\zeta}_m^{\tau} + (\Delta t) \times \left\{ - \left[\zeta \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right]_m^{\tau} - \left[\frac{\partial^3 \zeta}{\partial x^3} \right]_m^{\tau} \right\},$$

smodel

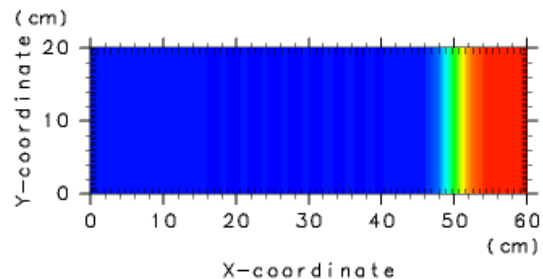
- <http://www.gfd-dennou.org/library/smodel/>
- spml を用いて, 地球流体力学に登場する様々な方程式を用いて解くサンプルプログラム集.
 - 移流方程式, 浅水方程式, ブシネスク方程式など.
- 目指すもの
 - 地球流体力学の理解と普及
 - 数式での理解と数値計算での理解をつなぐ
 - より複雑なモデルの理解の道具

smodel の計算例

(<http://www.gfd-dennou.org/library/spmodel/gallery/index.htm.ja>)

球面上の浅水方程式系

density [g/cm³]

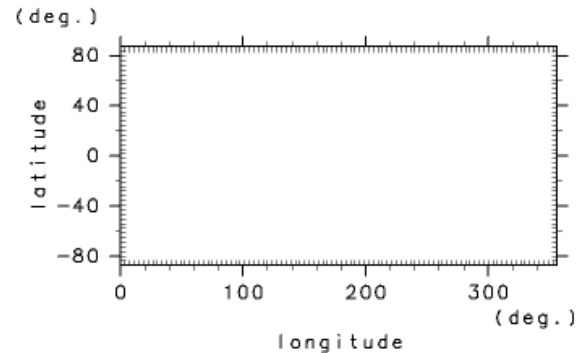


gtool4/Fortran80

date: 2/ 9/26 page: 1

球面上の浅水方程式系

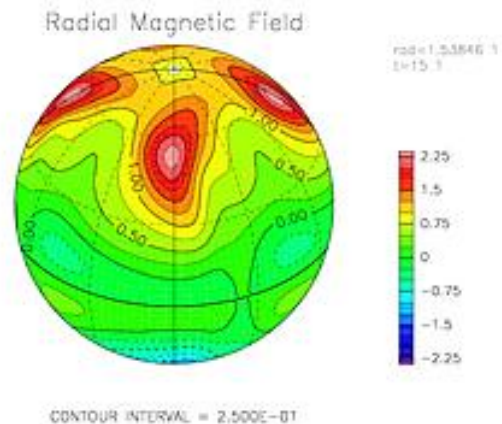
vorticity [1/s]



gtool4/Fortran80

date: 2/ 9/26 page: 1

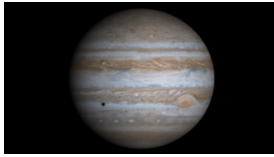
球殻内の磁気流体の ブシネスク方程式系



deepconv

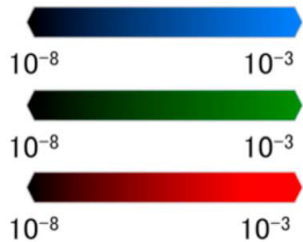
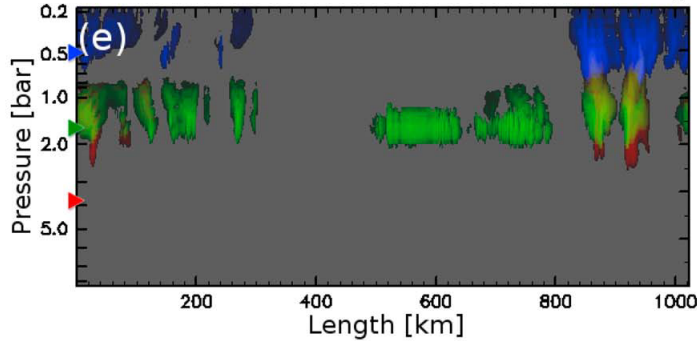
- <http://www.gfd-dennou.org/library/deepconv/>
- 惑星大気への応用を想定した雲解像モデル
 - 2次元 / 3次元の非静力学流体モデル
- 目指すもの
 - 様々な惑星大気の雲を伴う対流現象の理解
- 考慮する過程
 - 移流過程
 - 準圧縮方程式系
 - 移流項以外のいくつかの項を線形化
 - 簡単な熱強制
 - 鉛直乱流混合過程
 - 1.5次クロージャ (Klemp and Wilhelmson, 1978)
 - バルク法による下部境界フラックス計算
 - 雲微物理過程
 - 「温かい雨」のパラメタリゼーション (中島, 1998; Kessler, 1969)

deepconv の計算例



木星

t = 876.44 day

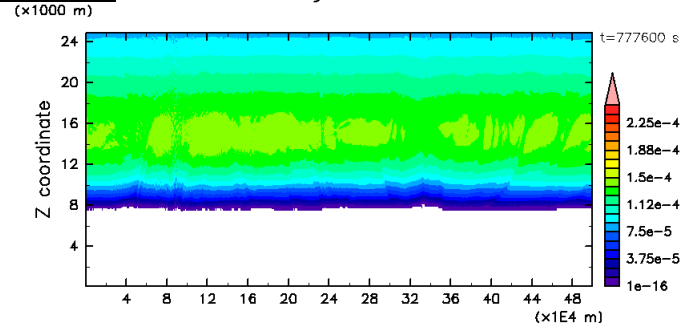


Cloud mixing ratio



古火星

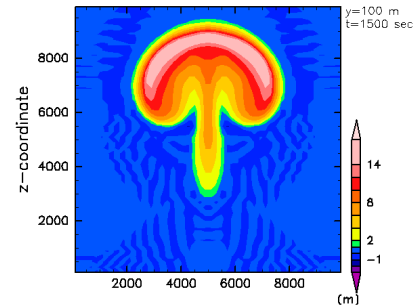
density of cloud



Cloud density

非粘性サーマル上昇実験

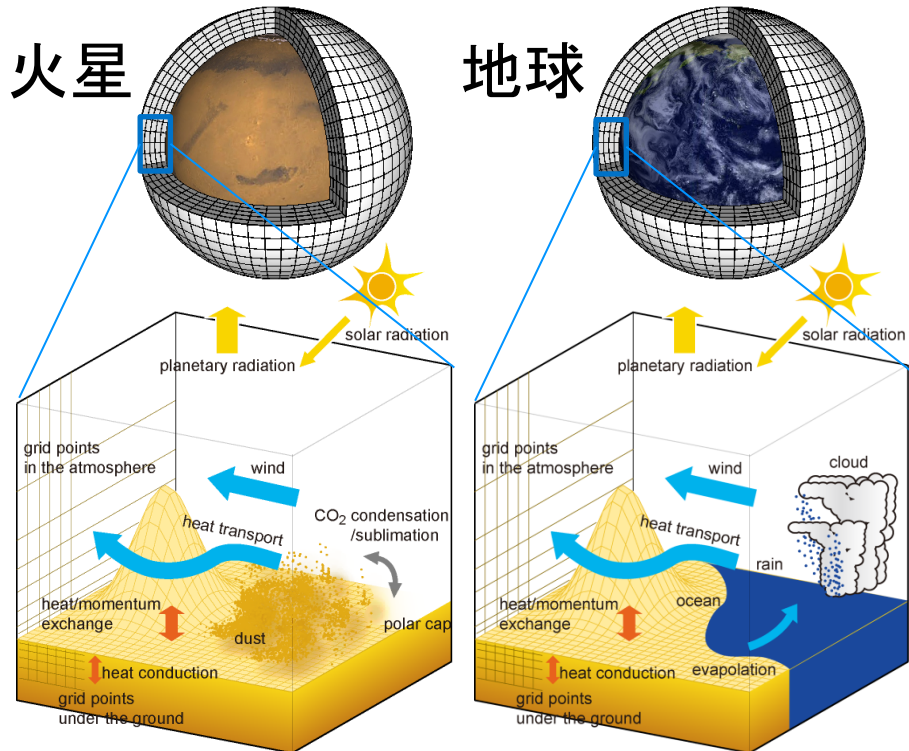
disturbance of potential temperature (m)



Potential temperature

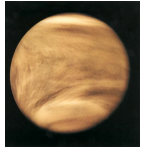
DCPAM

- <http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>
- 惑星大気大循環モデル



- 惑星全球の温度, 風速, 密度分布を計算
- モデル構成
 - 移流過程
 - プリミティブ方程式系
 - 鉛直静水圧近似
 - 放射過程
 - 地球 / 火星放射モデル
 - 灰色大気
 - 新しいモデルを開発中(大西他)
 - 乱流混合過程
 - 凝結過程
 - 地表面過程
- spmodel, gtool5 使用

DCPAM による計算例 その 1: 金星, 地球, 火星計算



金星
(簡単強制計算)

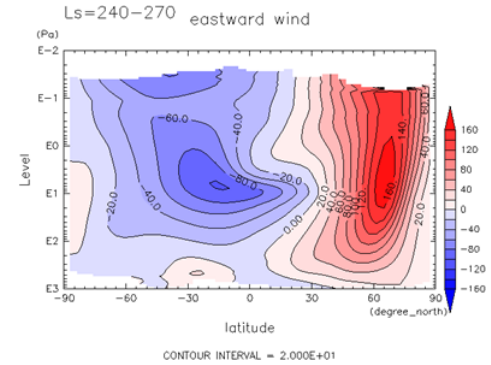
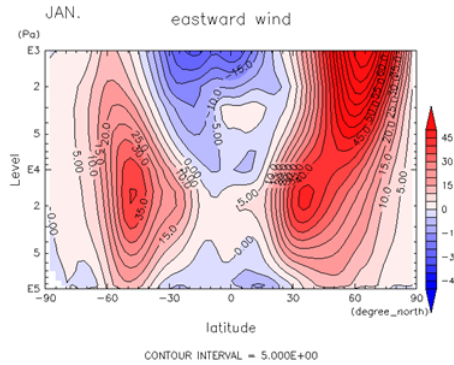
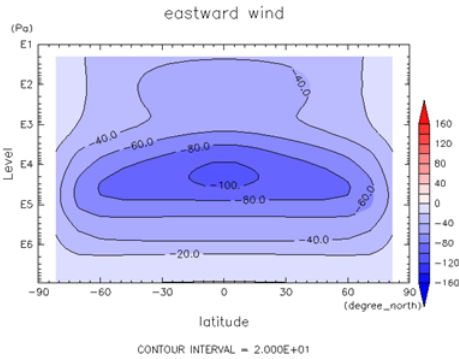


地球

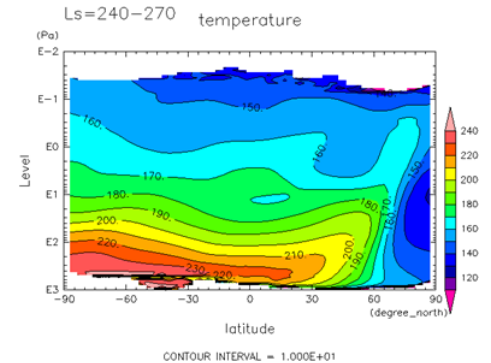
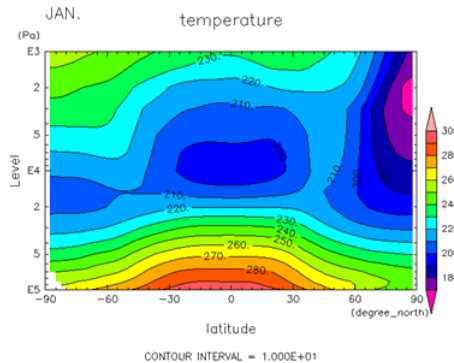
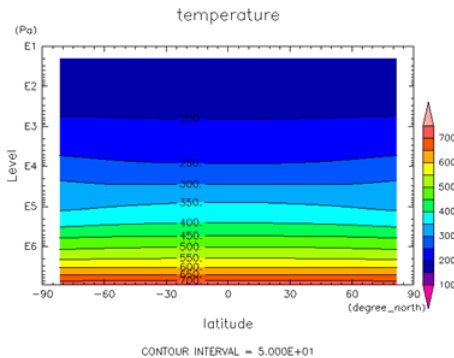


火星

東西風



温度

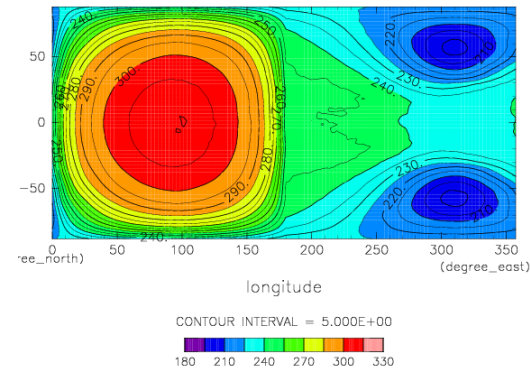


注意: 色の付け方と縦軸は図によって異なる。

DCPAM による計算例 その 2: (理想化)系外惑星, 地球流体実験

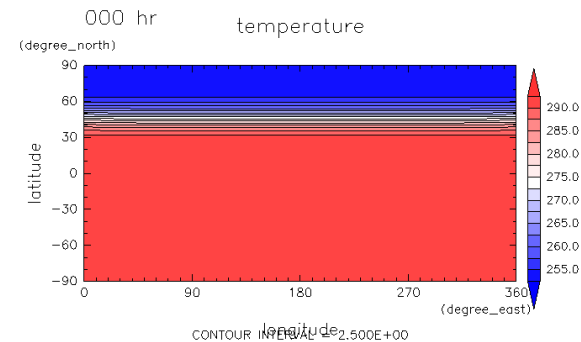
- 仮想惑星の計算
 - 水惑星計算
 - 同期回転惑星の計算
- 理想的条件における数値計算
 - 強制なし計算
 - 傾圧不安定波動計算 (Polvani et al., 2004)
 - 力学コア実験 (Held and Suarez, 1994)

同期回転惑星の計算



Time mean Surface temperature, T42L22 (石渡 他)

傾圧不安定波動計算



Temperature at lowest level, T341L20

dcmode1 説明文書の例

www.gfd-dennou.org/library/dcpam/dcpam5/dcpam5_latest/doc/code_reference/html/

SRC_LIST
Path: SRC_LIST
Last Update: Sun Apr 05 09:31:14 +0900 2009

Fortran 90/95 ソースコードファイルリスト
List of Fortran 90/95 source code files

Note that Japanese and English are described in parallel.
src ディレクトリは以下のファイル、ディレクトリから構成されています。

SRC_LIST : 本ファイル
Makefile : 以下の各ディレクトリの Makefile を呼び出すための Makefile
TAGS : Emacs 用の TAGS ファイル
main/ : 主プログラムと NAMELIST ファイル

main/dcpam_main.F90 :	実験用主プログラム
main/init_data.F90 :	初期値データファイル生成
main/sst_data.F90 :	地表面データファイル生成
main/dcpam_ape_T21L16.nml, ... :	水惑星実験用 NAMELIST ファイル
main/dcpam_hs94_T21L20.nml, ... :	Held and Suarez (1994) ベンチマークテスト用 NAMELIST ファイル
main/init_data_T21L16.nml, ... :	初期値データファイル生成用 NAMELIST ファイル
main/sst_data_T21.nml, ... :	地表面データファイル生成用 NAMELIST ファイル

setup/ : 各種基本設定

setup/gridset.f90 :	格子点数・最大波数設定
setup/fileset.f90 :	出力ファイルの基本情報管理
setup/axesset.f90 :	座標データ設定

基礎方程式系の解説 (TeX)

basic_equations.pdf - Adobe Reader

10 dcpam5 基礎方程式系とその離散化 第3章 力学過程

3.2.2 静水圧の式

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\frac{HT_c}{\sigma} \quad (3.2)$$

3.2.3 運動方程式

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial U_x}{\partial p} \right) + D(C), \quad (3.3)$$
$$\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial U_x}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial p} \right) - \nabla_x^2 (\phi + HT_c + KE) + D(D), \quad (3.4)$$

3.2.4 熱力学の式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial U_T}{\partial x} - \frac{\partial VT}{\partial p} \right) + T'D - \frac{\partial \sigma T}{\partial t} + \kappa T \left(\frac{\partial \sigma}{\partial t} + v_{\theta} \cdot \nabla_{\theta} \sigma + \frac{\partial}{\partial t} \right) + \frac{Q}{C_p} + D(T) + D'(T), \quad (3.5)$$

3.2.5 水蒸気の式

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial U_q}{\partial x} - \frac{\partial V_q}{\partial p} \right) + qD - \frac{\partial \sigma q}{\partial t} + S_q + D(q), \quad (3.6)$$

ここで、独立変数は以下の通りである。

φ :	緯度 [deg],	(3.7)
λ :	経度 [deg],	(3.8)
$\sigma = p/p_s$:		(3.9)
t :	時間 [s],	(3.10)

ここで、 p は気圧、 p_s は地表面気圧である。また $\mu = \sin \varphi$ である。

2010/02/04(地球院 休電実験室) basic-equation.tex (dynamic/dcpo-equation.tex)

ハードウェアの安全な取り外し

リファレンスマニュアル
(rdoc-f95)

ただし、今後どのようにリファレンスマニュアルを作成していくかは要検討。



まとめ

- 様々な地球流体現象を数値計算を通して理解することを目指して、簡単モデルから複雑モデルまで一連のモデル群を構築。
 - 誰でも使えるモデル・プログラム
 - 共通の「型」を持ったモデル群
 - 解説文書の整備されたモデル
 - 計算内容の学習, 理解の助けに.
- モデル・ユーティリティ群
 - gtool5
 - ispack / spml (ispack のラッパー)
 - spmodel サンプルプログラム
 - deepconv (惑星大気雲解像モデル)
 - DCPAM (惑星大気大循環モデル)
 - 文書整備ユーティリティ