

地球惑星情報実習

大気大循環モデル

石渡正樹

北海道大学 大学院理学研究院・理学院宇宙理学専攻

情報実習 第11回
2026年7月10日

目次

- 地球惑星科学分野における数値モデル
- 大気大循環モデルとは
- DCPAM
- データ解析:モデル実行後の作業

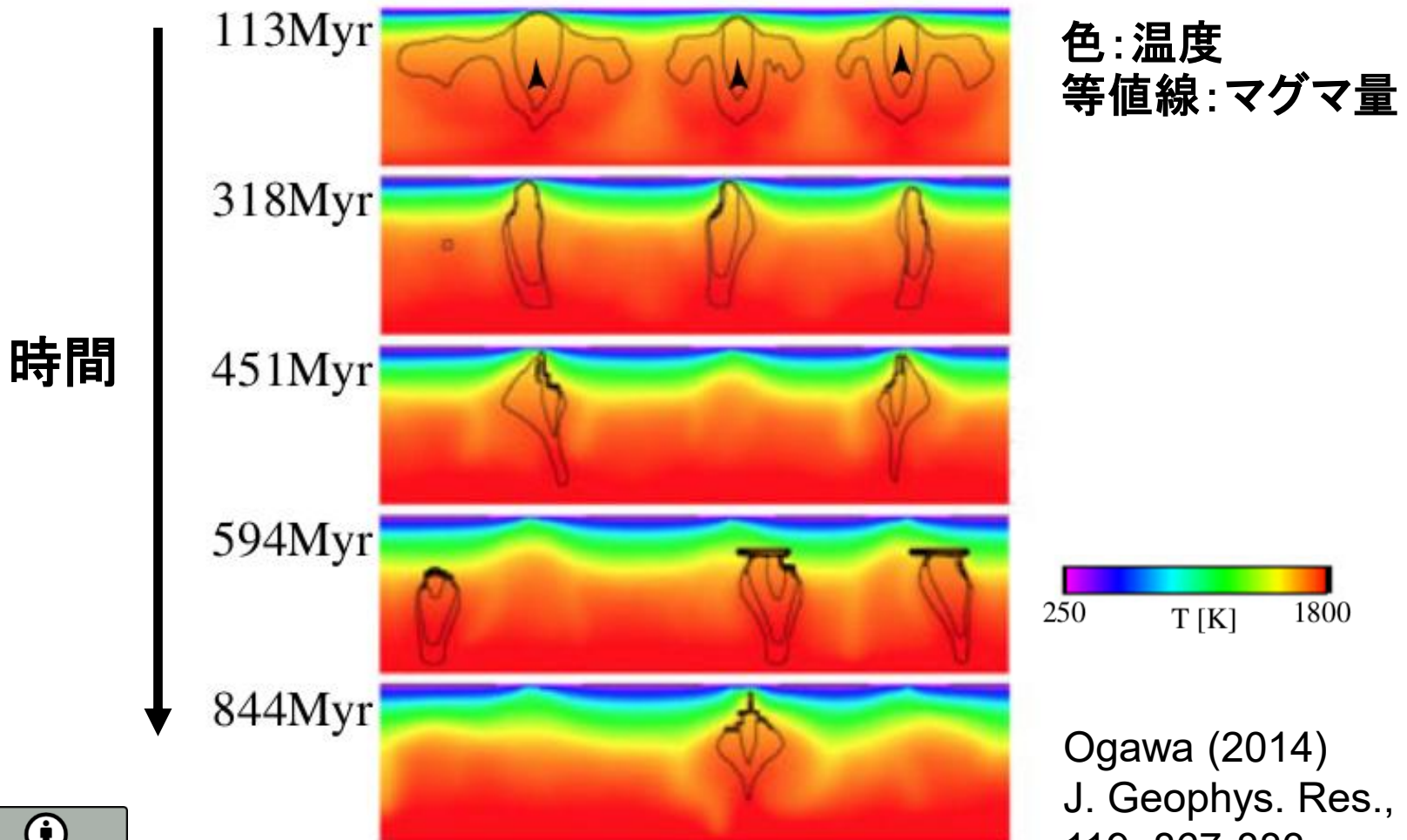
地球惑星科学分野 における数値モデル

数値モデル

- 科学技術計算をおこなうプログラムをここでは数値モデルと呼ぶことにする
- 利点
 - 観測できない量を知る
 - 観測困難な場所の状態
 - 未来の状態
 - 定量的な情報を得る
 - どのようなプロセスが最も重要か？などを考えるヒントを得る

数値モデルの応用例： 地球内部物理学分野

月を想定したマントル対流のシミュレーション

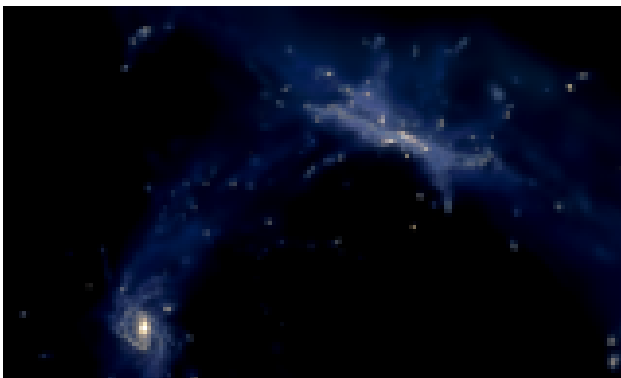


数値モデルの応用例: 天文分野

渦巻き銀河の形成のシミュレーション

青色:ガス, 黄色:恒星

(1) ガス集積
による恒星
の形成



(2) 小銀河の
合体による
成長



(3) 渦巻き
構造の形成



(4) 銀河の
出来上がり



<https://4d2u.nao.ac.jp/t/var/download/spiral2.html>

Saito and Wada (2004) ApJ, 615, L93-L96

数値モデルに共通した特徴

- 数値モデルの「実体」は巨大なプログラム
- 通常は多数のファイルの集合体
- フリーソフトウェアであるものも、そうでないものも存在する
 - 使用するにはライセンスの確認を！
(ライセンスについては INEX 第9回参照)

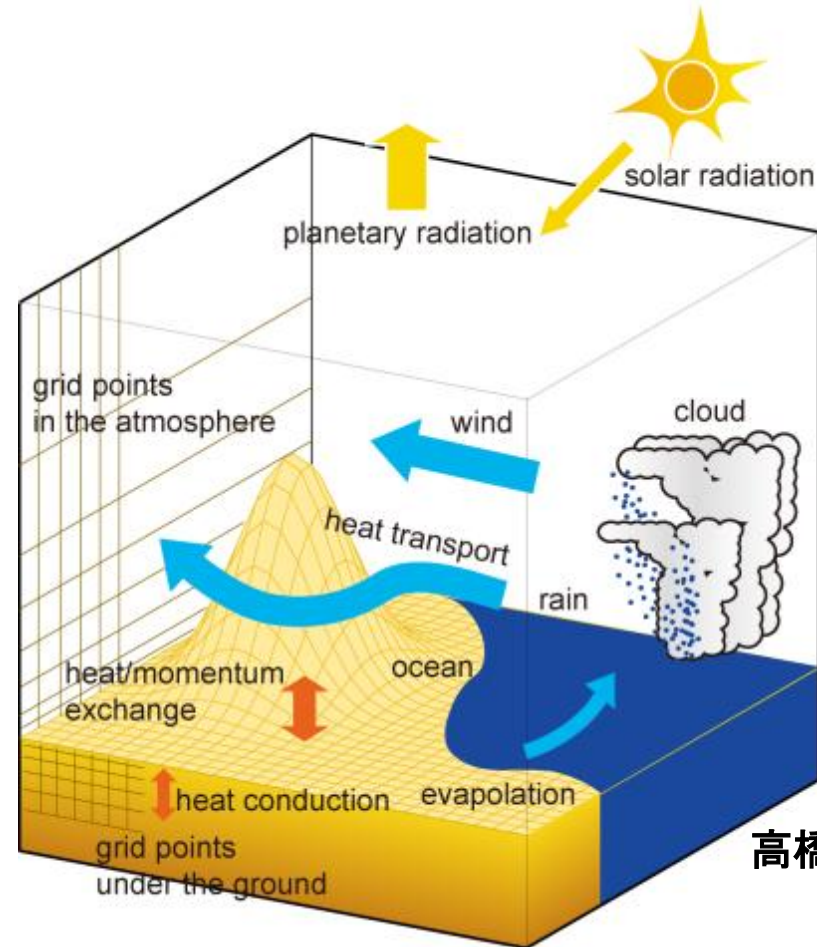
大気大循環モデルとは

大気大循環モデルとは

- 大気の循環・熱力学量・物質分布の時間発展を計算する数値モデル

- 英語では
**Atmospheric
General
Circulation
Model
(AGCM)**

– ちなみに海洋
大循環モデルは
OGCM

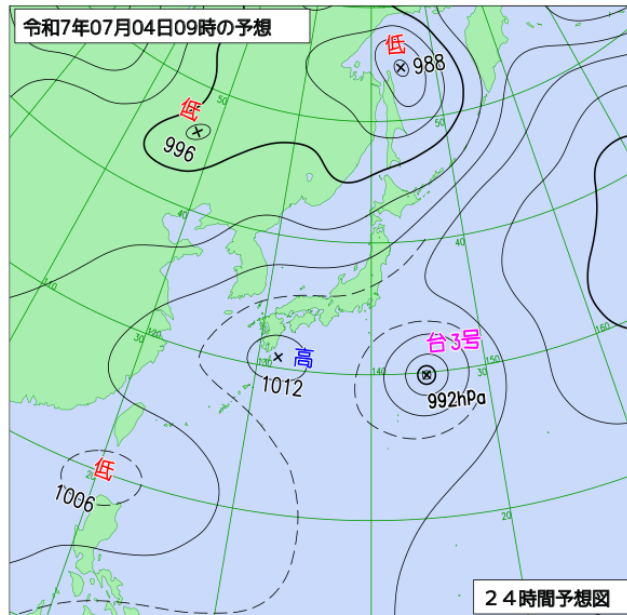


– 詳しくは教科書を参照 (Satoh, 2004など)

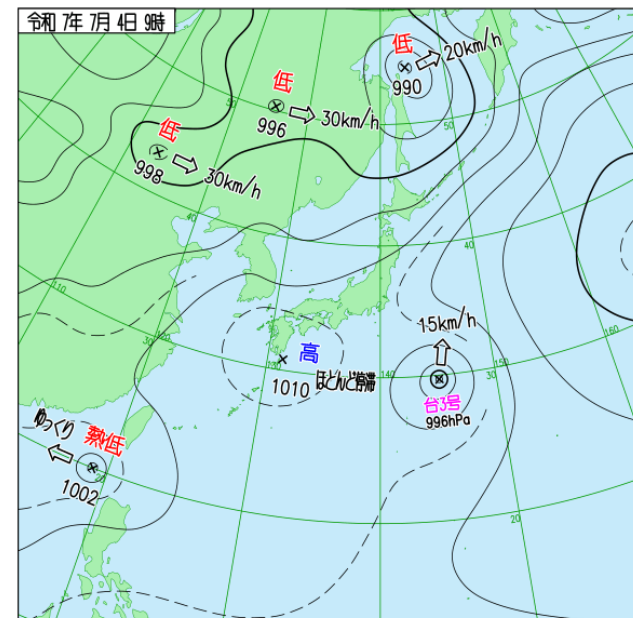
AGCM使用例 (1): 天気予報

- 短期予報

予報天気図



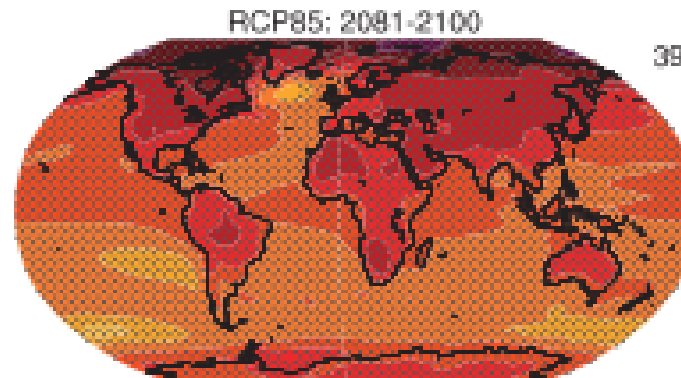
実況天気図



気象庁 https://www.jma.go.jp/bosai/weather_map/

- 温暖化予測

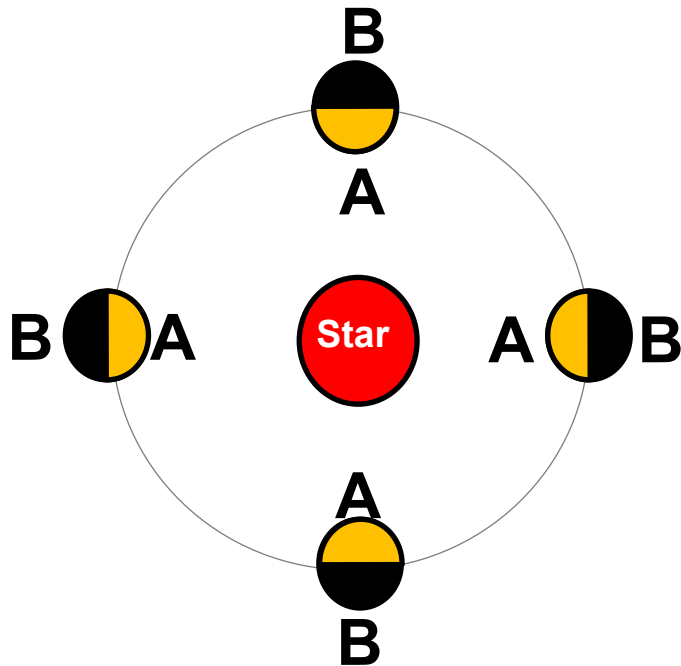
– IPCC (2021) など



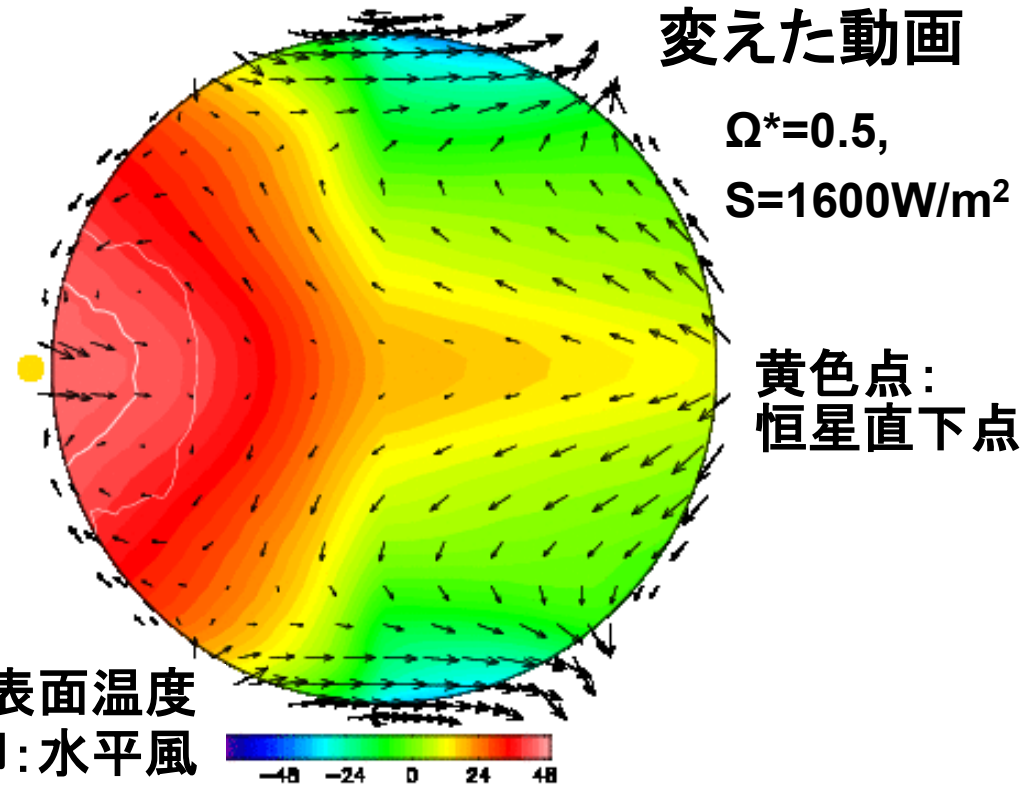
AGCM使用例 (2): 惑星気候研究

- 火星, 金星, 木星, 系外惑星など
- 同期回転惑星 (系外惑星を想定) の計算例

同期回転惑星: 固定された
夜半球と昼半球を持つ



計算結果: 365日平均場の視点を
変えた動画



黄色点:
恒星直下点

AGCM の基礎方程式

流体力学の方程式が用いられる. 以下は一例

運動方程式

(Navier-Stokes 方程式)

$$\frac{du}{dt} - \left(f + \frac{u \tan \varphi}{a} \right) v = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{a \cos \varphi \partial \lambda} + F_\lambda$$
$$\frac{dv}{dt} + \left(f + \frac{u \tan \varphi}{a} \right) u = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{a \partial \varphi} + F_\varphi$$

静水圧の式

$$0 = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g$$

質量保存則

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \left[\frac{1}{a \cos \varphi} \left\{ \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{\partial (v \cos \varphi)}{\partial \varphi} \right\} + \frac{\partial w}{\partial z} \right] = 0$$

エネルギー保存則

$$C_v \frac{dT}{dt} - \frac{p}{\rho^2} \frac{d\rho}{dt} = Q$$

水蒸気の式

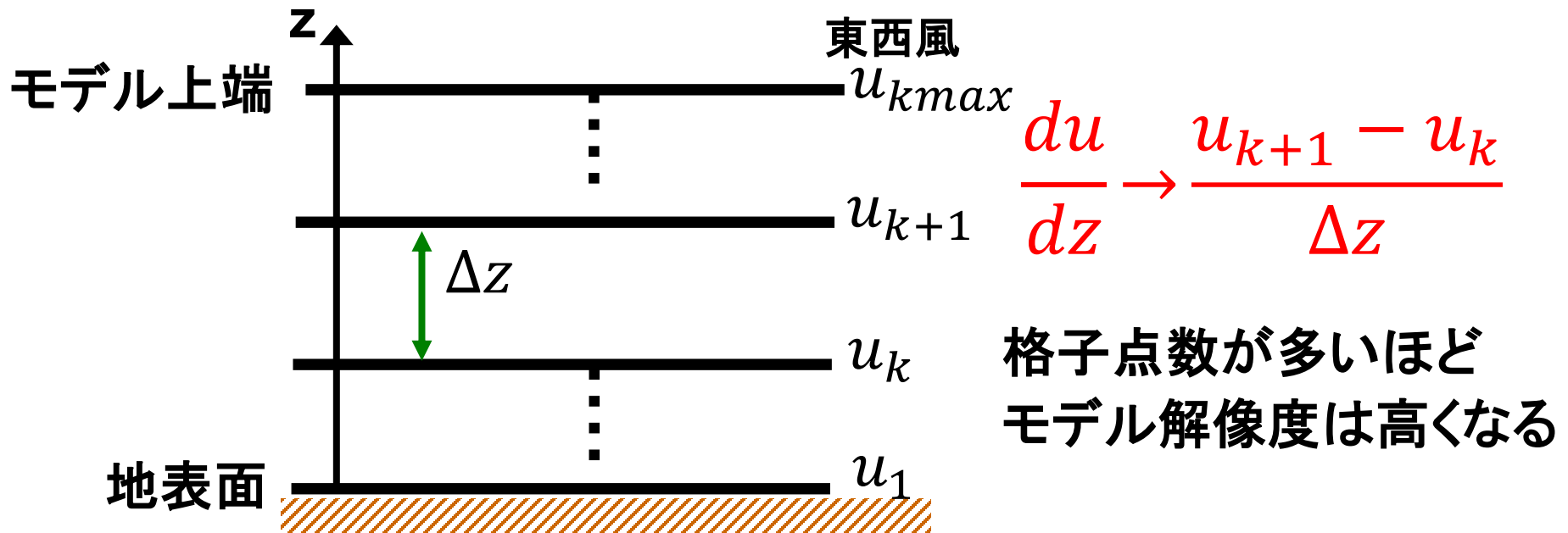
$$\frac{dq}{dt} = S$$

状態方程式

$$p = \rho R T$$

空間分布の表現

- **格子点法: 離散的な点 (格子点) の値だけ考慮**
 - 微分は格子点上の値の差で表現
 - 多くの AGCM では鉛直方向に格子点法を採用



- **スペクトル法: 物理量を直交関数系で展開**
 - 球面や球殻形状領域計算では球面調和関数を使用
 - いくつかの AGCM で採用

ここまでのまとめ

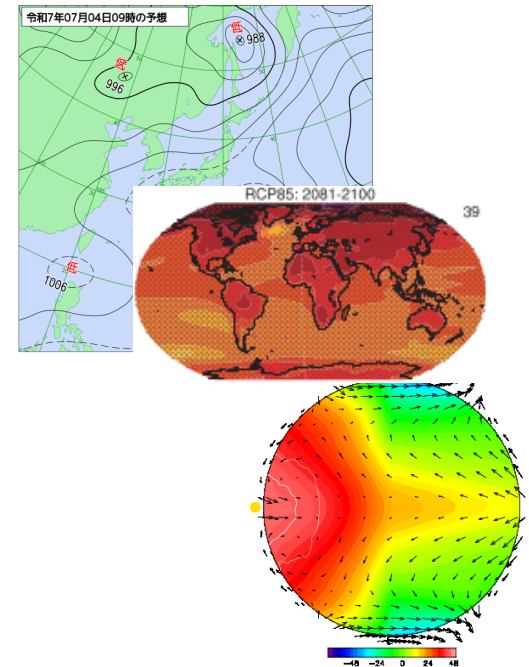
- 大気大循環モデルは風速・気温などの空間分布・時間変化を求める
- やっていることは微分方程式の数値積分
- 数値積分をおこなうには数値計算独特のやり方をしないといけない

$$\begin{aligned}\frac{du}{dt} - \left(f + \frac{u \tan \varphi}{a}\right) v &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{a \cos \varphi \partial \lambda} + F_\lambda \\ \frac{dv}{dt} + \left(f + \frac{u \tan \varphi}{a}\right) u &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{a \partial \varphi} + F_\varphi \\ 0 &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g\end{aligned}$$

⋮

数値積分

格子点法
スペクトル法



DCPAM

DCPAM とは

- 地球流体電脳倶楽部で開発している AGCM
 - <https://www.gfd-dennou.org/library/dcpam>

- DCPAM の特徴

- Fortran90 で記述
- 他の惑星への拡張を意識
- 可読性を重視
 - プログラムが読みやすくなるように数式の書き方を工夫
- フリーソフトウェア
 - 日本のAGCMでフリーソフトウェアとして公開されているものは非常に少ない



地球流体電脳倶楽部

- 知識の情報化, 知見プラットフォームの構築を目指した有志集団

- <https://www.gfd-dennou.org>

- 地球惑星科学に関する知見のネットワーク上への蓄積, そのための道具作り

- ネットワーク上の「教科書」

- 地球流体室内実験集

- 知見の集積場としての地球流体計算ソフトウェア群

- 数値データの可視化ツール開発

- それらのためのサーバ運営・管理 (全国 3 か所)

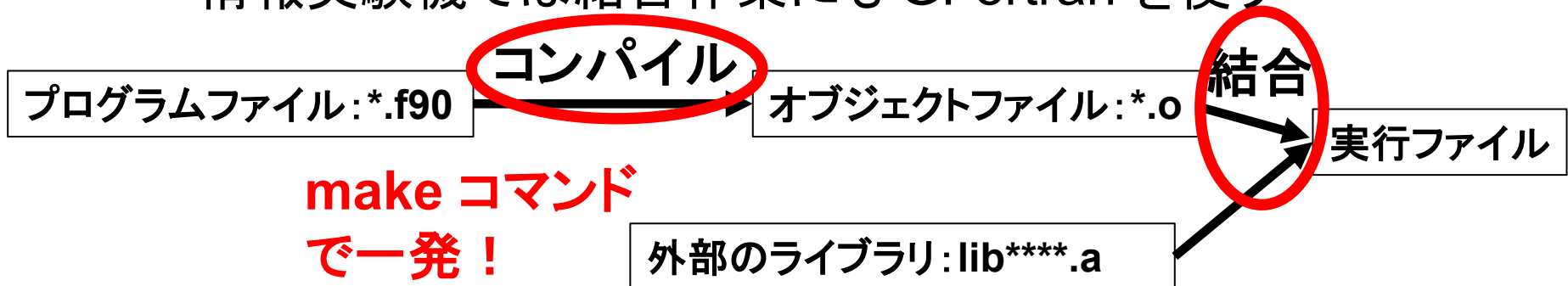
- dennou-k.gfd-dennou.org は Debian のインストールで使用



DCPAM で計算するためには

• 実行ファイルを作る (ビルド作業)

- まずプログラムファイルをコンパイル (機械語に翻訳)
 - オブジェクトファイル: コンパイルで作られる機械語ファイル
 - 情報実験機で使うコンパイラは GNU Fortran (GFortran)
- 次に使用するライブラリと結合, 実行ファイルを作成
 - ライブラリ: 複数のソフトウェアで共通して使用されるプログラムを「外から使える形で」まとめたもの
 - 情報実験機では結合作業にも GFortran を使う

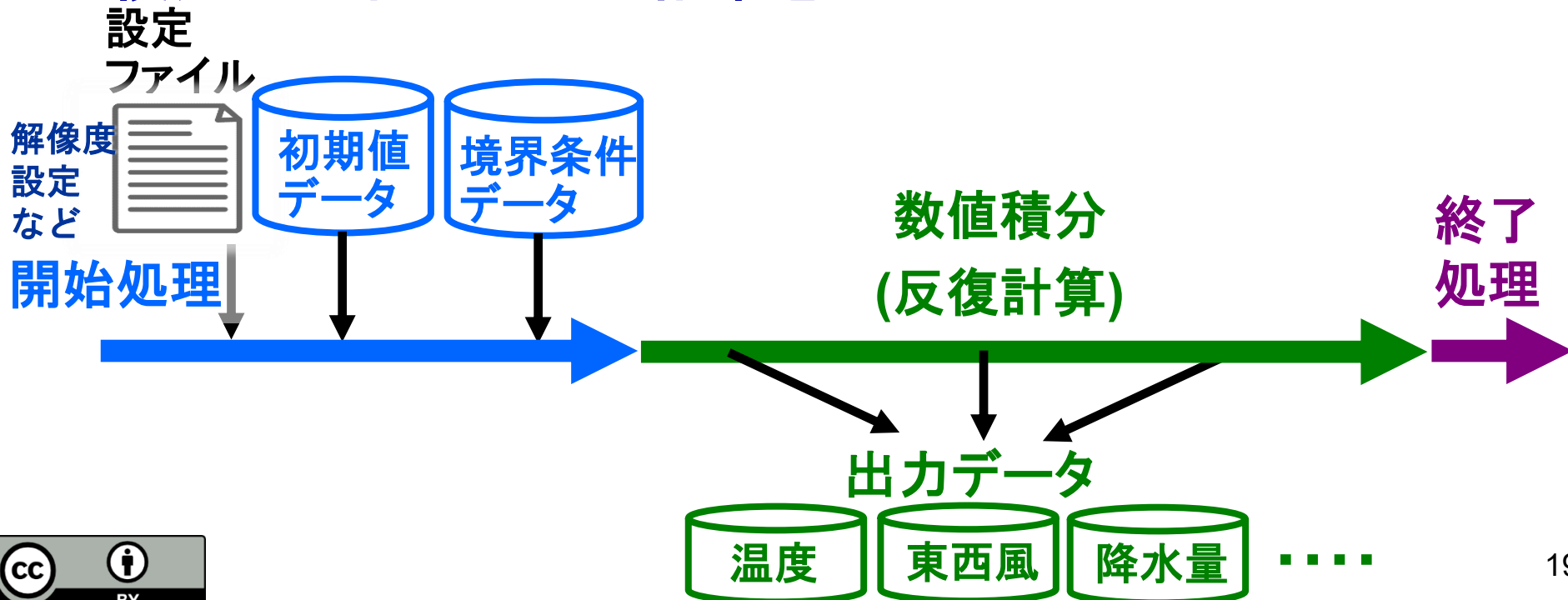


**make コマンド
で一発！**

(make コマンドについてはオライリーの書籍や実技資料を参照せよ)

DCPAM がおこなう処理の流れ

- DCPAM は数値積分の実行前に以下を読み込む
 - 設定ファイル
 - 初期値データファイル
 - 境界条件ファイル
- 積分の進行に応じて結果をデータファイルに出力

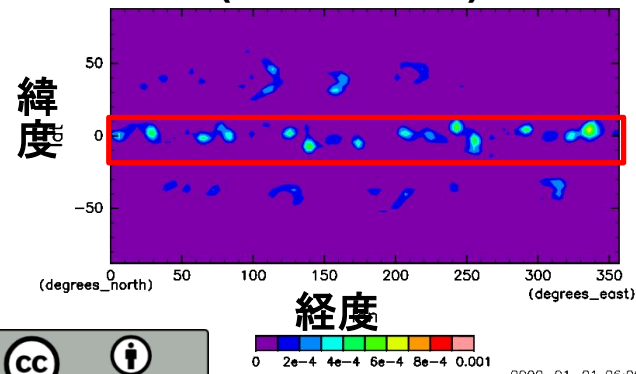


データ解析： モデル実行後の作業

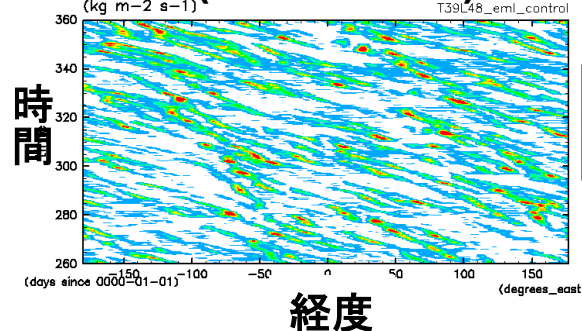
結果のデータ解析・可視化

- 数値積分終了後にはやることがたくさんある
(計算したら知りたいことがポンと出てくるわけではない！)
 - データ後処理: 必要に応じてデータを解析で使える形にする. 並列計算におけるデータ結合など
 - 解析: 出力データから必要な物理量を計算する
 - 可視化: 得られた結果を図にする

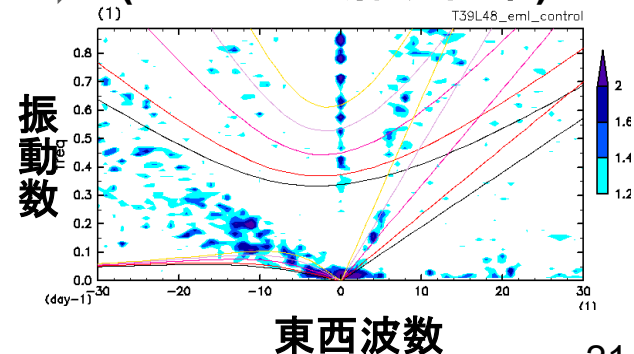
降水平面分布
(モデル結果)



赤道降水時間変化
(ホフメラー図)

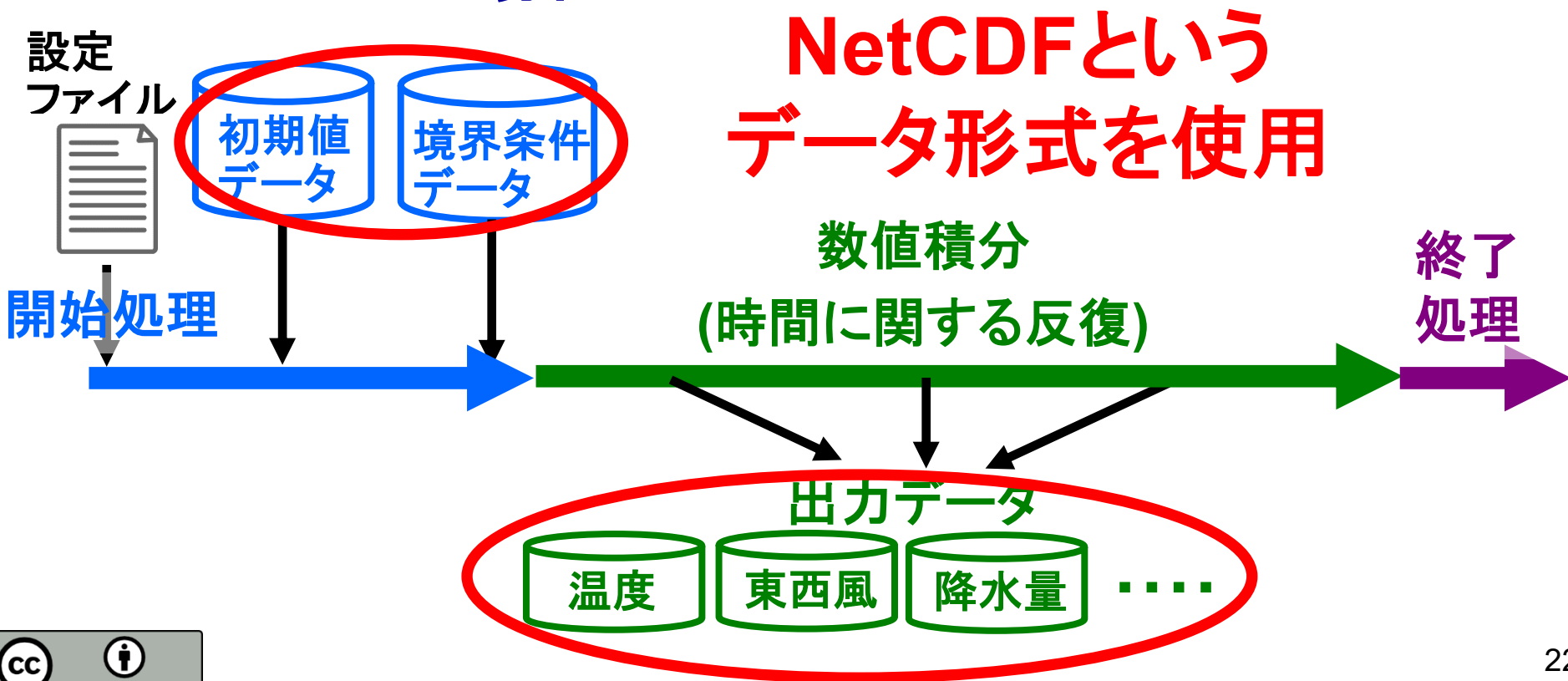


赤道降水
(スペクトル解析結果)



解析・可視化作業の前に

- 出力データファイルの中身を把握する
 - ファイルの数, データ形式, 格納された変数など
 - モデルによって扱うデータ形式は異なる
- DCPAM の場合



NetCDF (Network Common Data Form)

- 気象海洋分野で広く使われるデータの格納形式 (データ形式)

- 自己記述的な形式

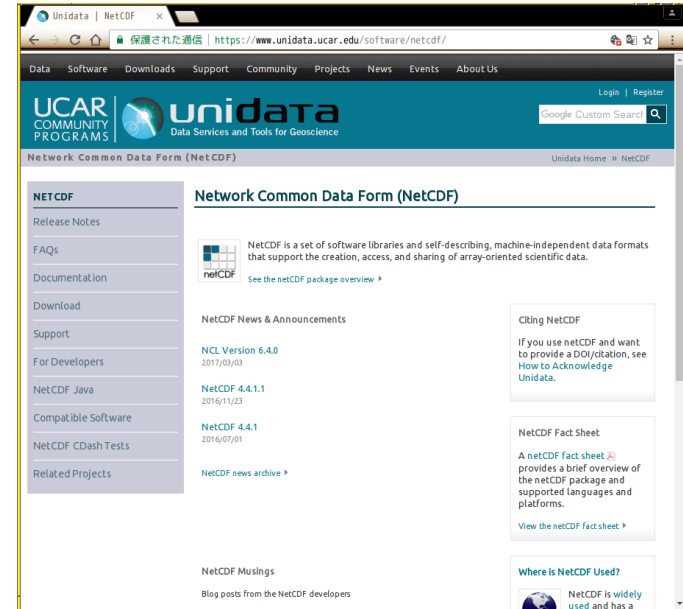
- メタデータ (データに関する情報) を持つ

- Unidata で設計開発

- <https://www.unidata.ucar.edu/>
- 地球惑星科学分野におけるデータ・ツールを開発 (1983年から)
- アメリカの複数の大学による共同研究組織

- NetCDF ファイルの中身を見るには

```
$ ncdump SurfTemp.nc | less
```



```
netcdf SurfTemp {
```

```
dimensions:
```

```
    lon = 64 ;
```

```
    .....
```

```
variables:
```

```
    float lon(lon) ;
```

次元変数の型・サイズ

```
    lon:long name = "longitude" ;
```

次元変数の属性

```
    .....
```

```
    float SurfTemp(time, lat, lon) ;
```

変数の型・サイズ

```
    SurfTemp:long_name = "surface temperature" ;
```

変数の属性

```
    .....
```

```
// global attributes:
```

```
    :title = "....." ;
```

```
    .....
```

```
data:
```

```
    lon = 0, 5.625, 11.25, 16.875, 22.5, .....
```

次元変数の値

```
    .....
```

```
    SurfTemp = 294.2712, 294.6823, .....
```

出力変数の値

```
    .....
```

```
};
```

次元
変数
サイズ

変数の
情報

大域
属性

メタデータ

数値
データ

解析・描画ツール

- 多数のツールが存在

- MATLAB, IDL:

- 地球惑星科学分野で良く使われる. 高機能, 高価格

- gnuplot:

- 簡単な図の作成に便利. INEXでも使用

- GNU Octave:

- 強力な数式処理と描画機能をもつツール

- 電脳 Ruby ツール

- 今回使用. 詳しくは次のページで

- 用途・目的・周囲の状況に応じて選択すべし

- どのツールでも訓練・習熟が必要

- ツールで欲しい絵がポンと出てくるわけではない

フリー
ソフトウェア
Debian
パッケージ
有り!

ここで使うのは電脳 Rubyツール

- **DCL, Ruby を基盤とする解析・描画ツール**

- DCL とは

- 地球流体電脳倶楽部製 Fortran の描画ライブラリ
 - 塩谷雅人・酒井敏 (京大)・乙部直人 (福岡大) を中心に開発

- Ruby とは

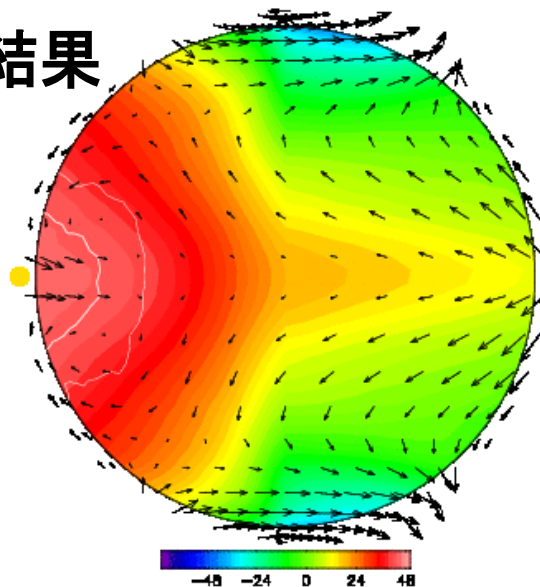
- スクリプト型言語 (インタプリタ, INEX 第 10 回参照)
 - 開発者: まつもとひろゆき (ネットワーク応用通信研究所)
 - 各種 web サービスでも広く利用されている
 - 解析から描画まで Ruby スクリプトで実行可能

- 格子点データ解析用ライブラリ (GPhys) も整備

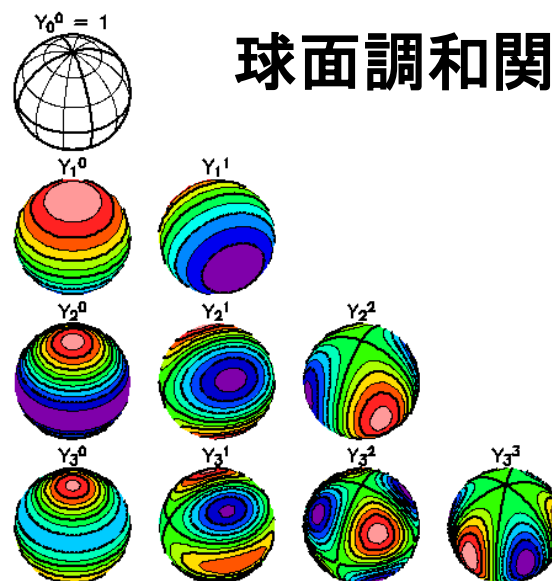
- 堀之内武 (北大・地球環境)・西澤誠也 (理研) を中心に開発

電脳 Ruby ツールを用いた描画例

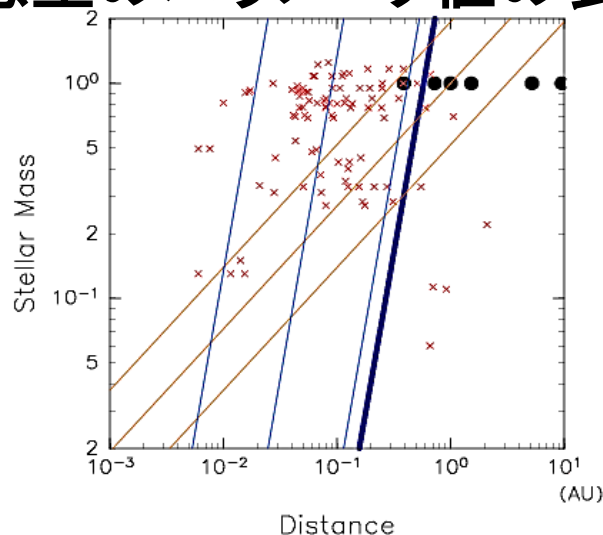
AGCM 結果



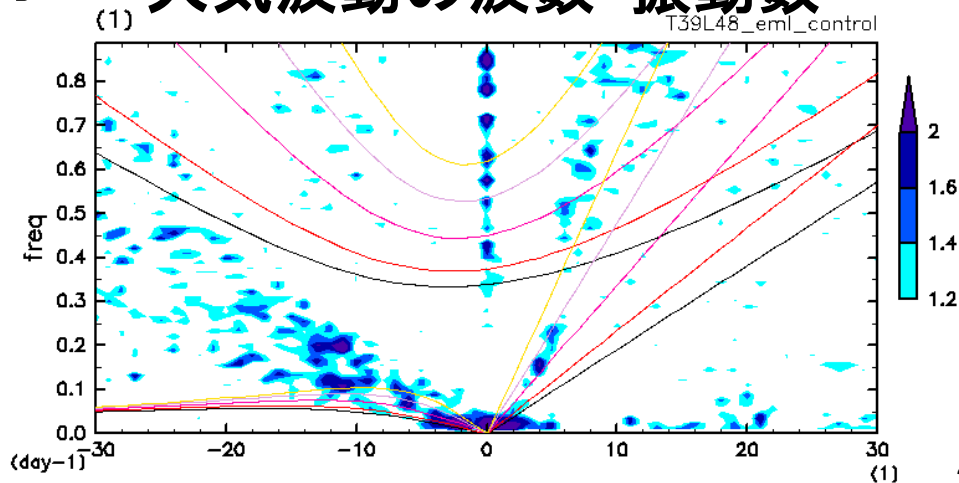
球面調和関数



系外惑星のパラメータ値の表示



大気波動の波数・振動数

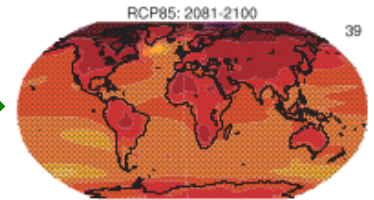


まとめ

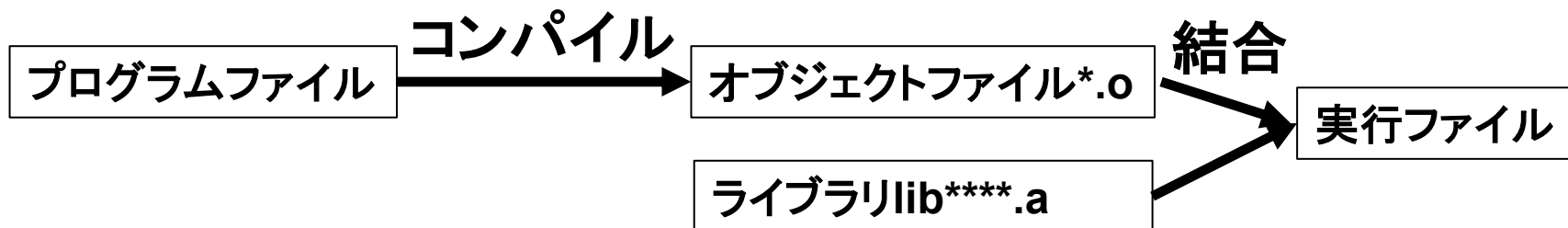
- 大気大循環モデルは微分方程式の数値積分をおこない風速・気温などの空間分布・時間変化を求める

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} - \left(f + \frac{u \tan \varphi}{a} \right) v &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{a \cos \varphi \partial \lambda} + F_{\lambda} \\ &\vdots \end{aligned}$$

数値積分



- 大気大循環モデルを実行するには, コンパイル・結合の作業が必要 (多くの数値モデルも同様)

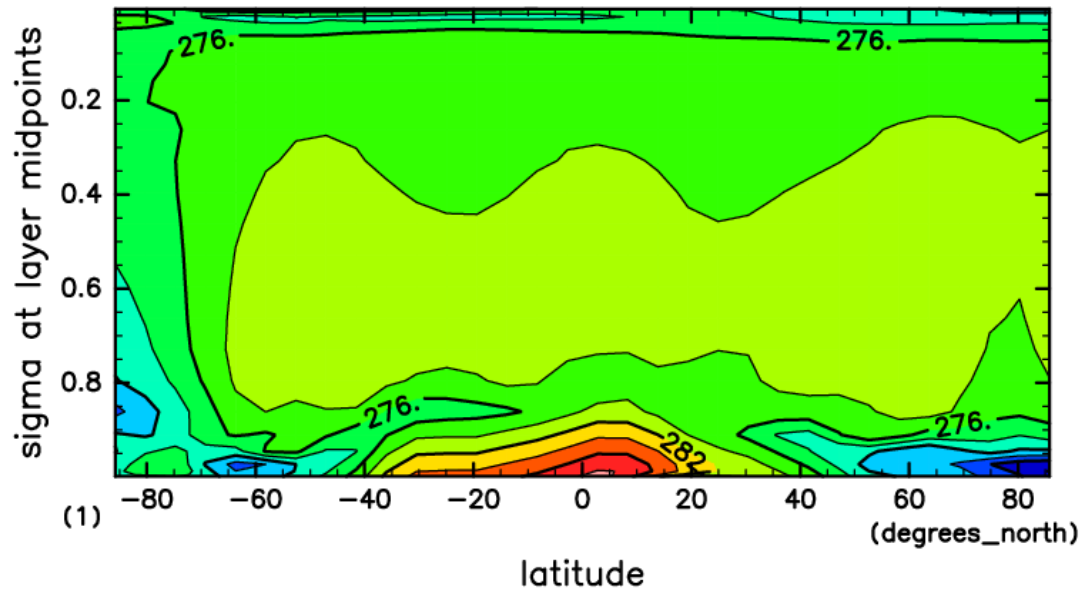


実技編では

- DCPAM のビルド作業

```
$ make
```

- 地球設定実験



CONTOUR INTERVAL = 3.000E+00



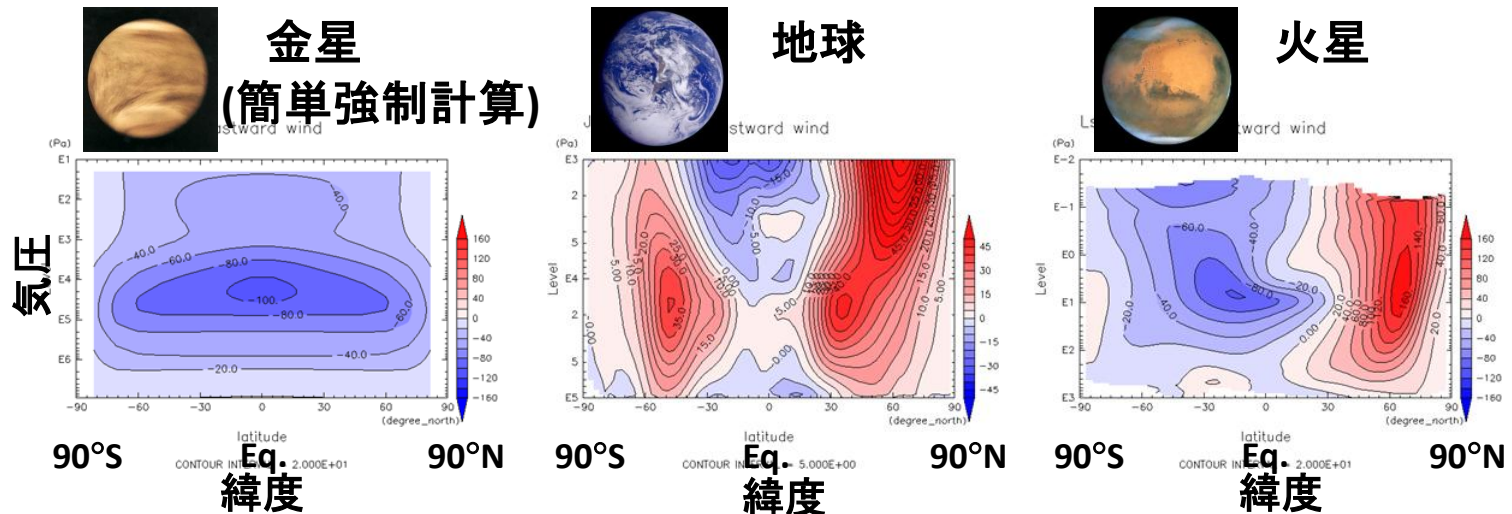
lon=0 degrees_east
time=2 day

それ以外にも

- もっと地球計算を追及することもできる
 - 解像度を上げる, 積分時間を延長する, などなど
- いろいろな計算を楽しむことができる
 - DCPAM を用いた計算例

<https://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/sample>

東西平均
東西風



注意: 色の付け方と縦軸は図によって異なる

参考書, 参考文献

- IPCC (2021) Climate change 2021. <https://www.ipcc.ch/>
- Ogawa, M. (2014) A positive feedback between magmatism and mantle upwelling in terrestrial planets: Implications for the Moon. J. Geophys. Res., 119, 867-883
- Saito, T., Wada, K. (2004) Coevolution of galactic cores and spiral galaxies. Astrophysical J., 615, L93-L96
- Satoh, M. (2004) Atmospheric circulation dynamics and general circulation models. Springer
- Yamada, Y., et al. (2005) A resolution dependence of equatorial precipitation activities represented in a general circulation model. Theor. Appl. Mech. Japan, 54, 289-297
- Mecklenburg, R. 著、矢吹道郎監訳, 菊池彰訳 (2005) GNU Make 第3版, オライリー・ジャパン
- Oram, A., Talbott, S. 著, 矢吹道郎監訳 (1997) make 改訂版, オライリー・ジャパン
- 坂井弘亮 (2010) リンカ・ロード実践開発テクニック, CQ出版社
- 伊理正夫, 藤野和建 (1985) 数値計算の常識, 共立出版
- 地球流体電脳倶楽部 dcmmodel プロジェクト (2026) 大気大循環モデル DCPAM, <https://www.gfd-dennou.org/library/dcpam>
- ピクトアーツ フリー素材 <https://pictarts.com/07/01-free/0005-clip-art.html>