

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

情報実験第11回
2025年7月11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

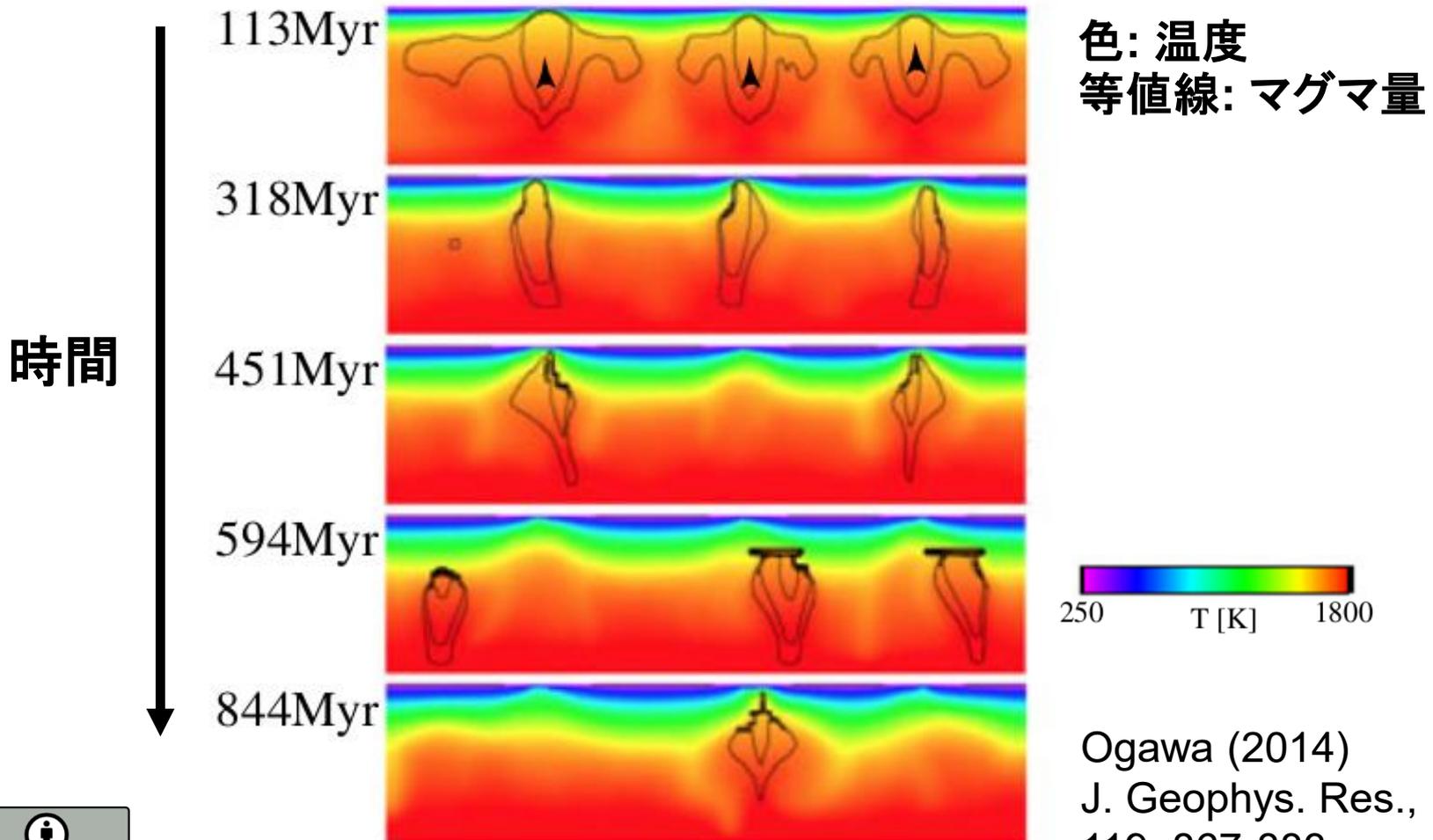
地球惑星科学分野 における数値モデル

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
- 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

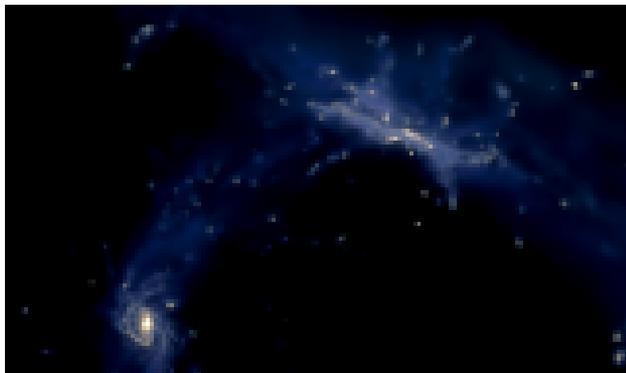


数値モデルの応用例: 天文分野

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



<http://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
 - 使用する場合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)

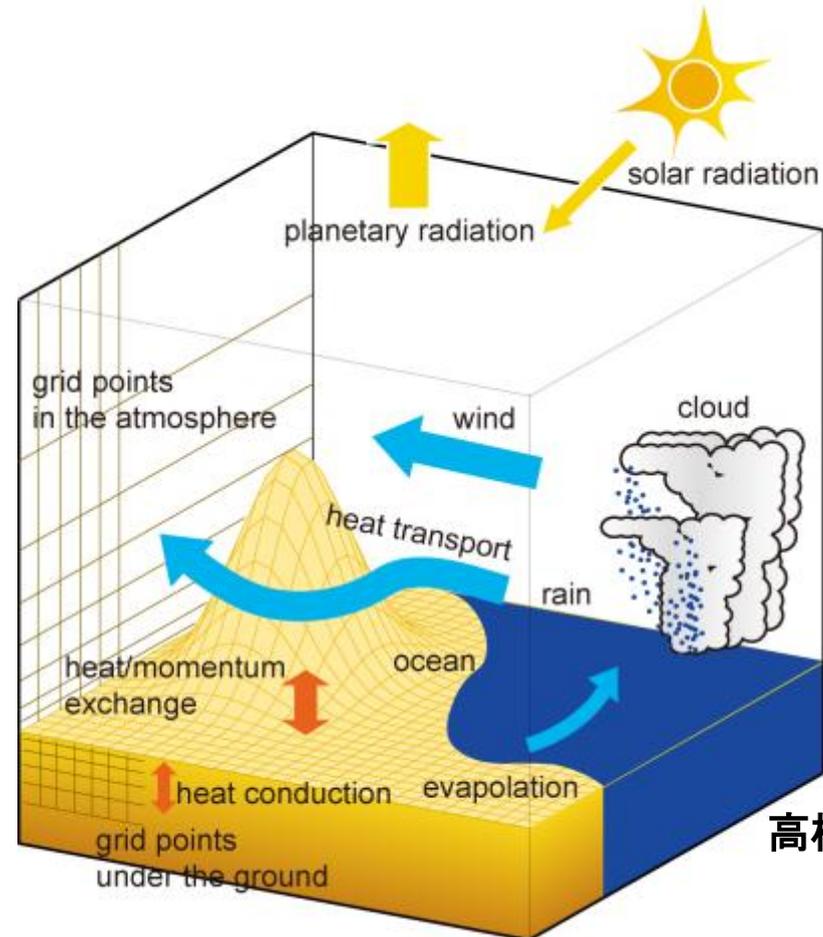
大気大循環モデルとは

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ソフトウェア

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

– ちなみに海洋大循環モデルは OGCM



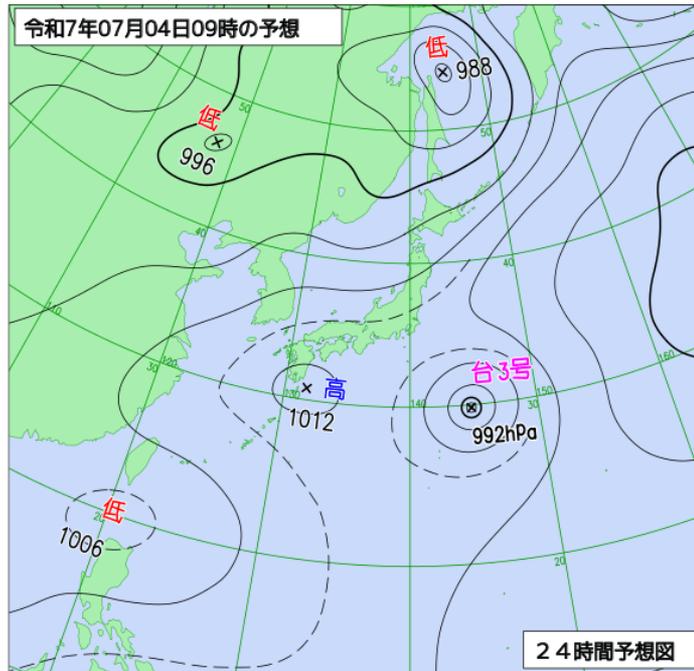
高橋他(2012)

– 詳しくは教科書を参照 (Sato, 2004など)

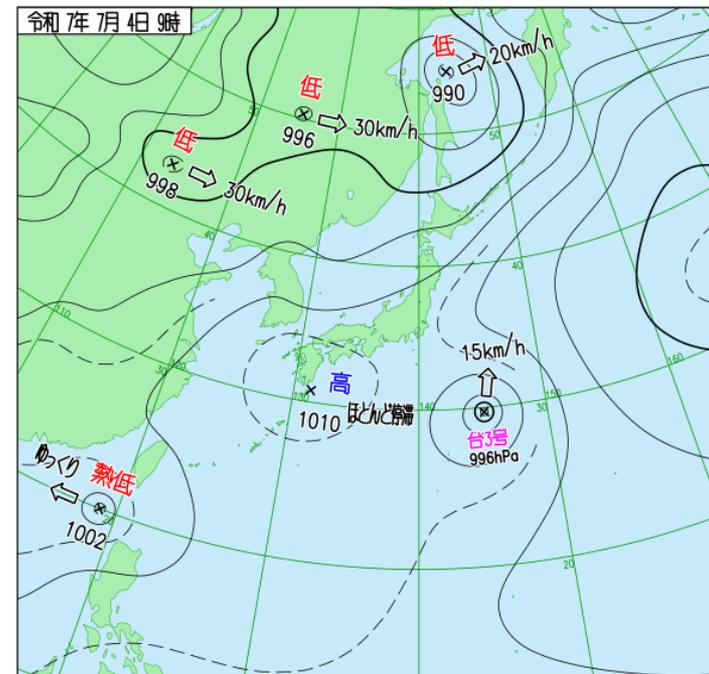
AGCM使用例(1):天気予報

- 短期予報

予報天気図



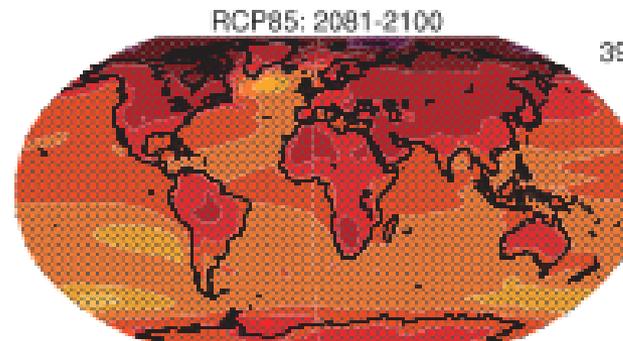
実況天気図



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

- 温暖化予測

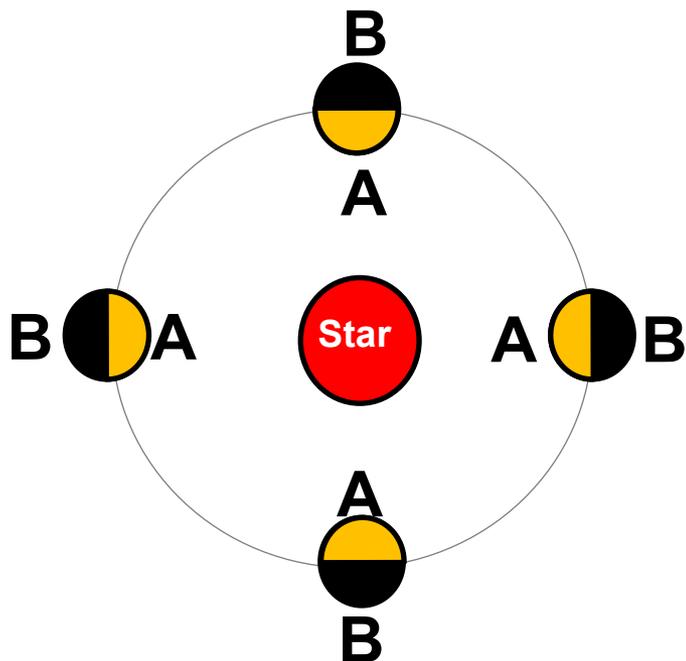
– IPCC(2021)など



AGCM使用例(2): 惑星気候研究

- 火星、金星、木星、系外惑星など
- 例: 同期回転惑星(系外惑星の1種)

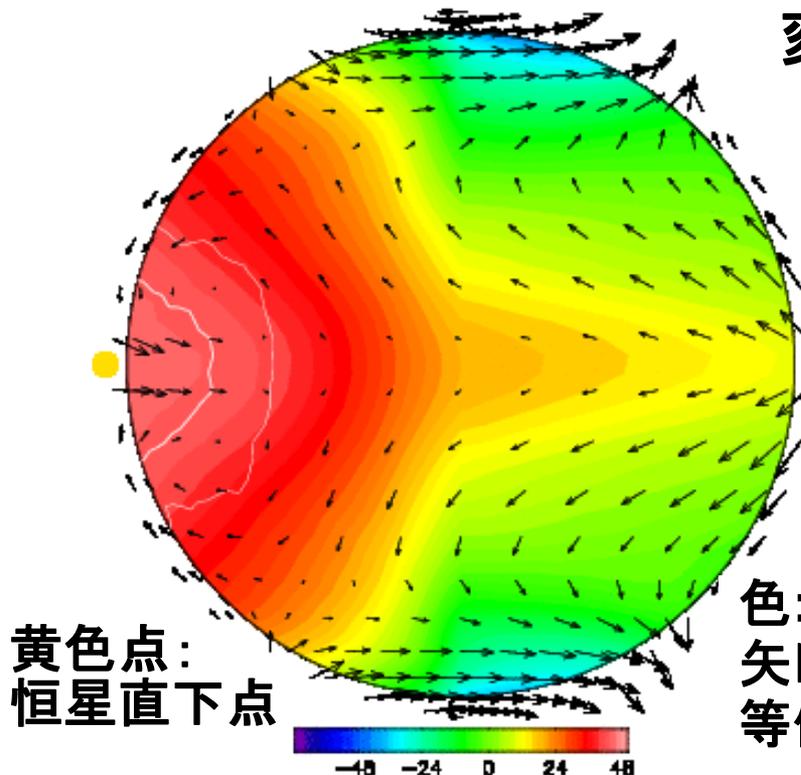
同期回転惑星: 固定された
夜半球と昼半球を持つ



計算結果: 365日平均場の視点を
変えた動画

$\Omega^*=0.5,$

$S=1600W/m^2$



黄色点:
恒星直下点

色: 表面温度
矢印: 水平風
等値線: 降水

基礎方程式

流体力学の方程式

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

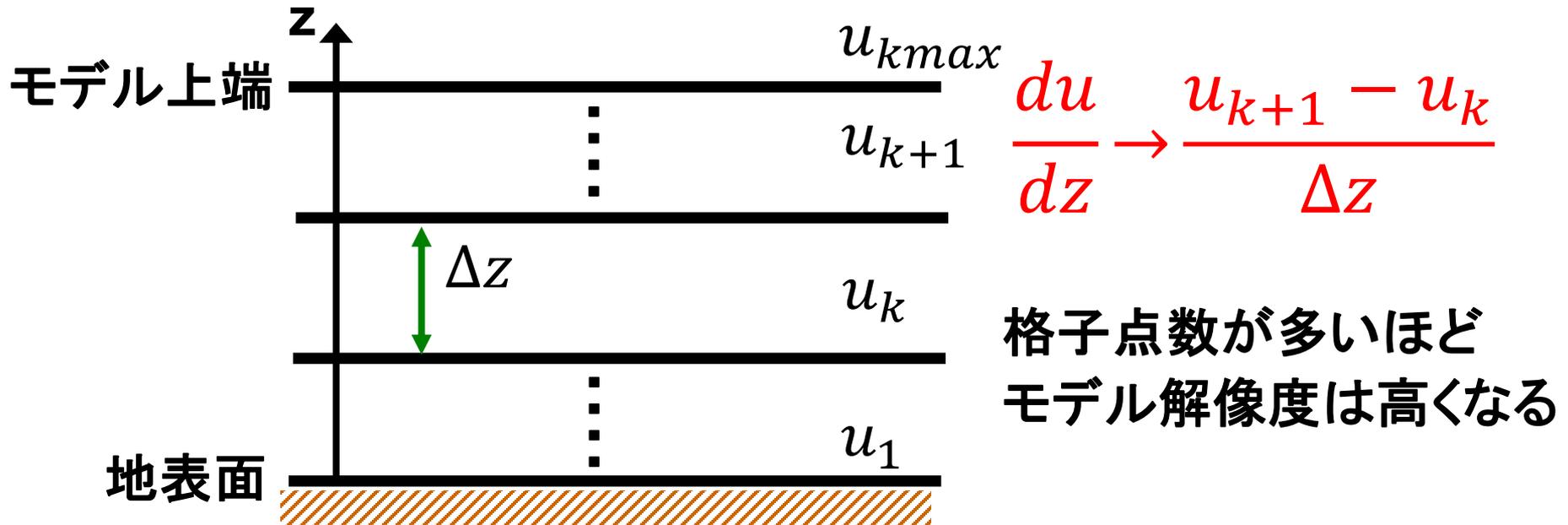
$$\frac{dq}{dt} = S$$

状態方程式

$$p = \rho RT$$

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GCM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**
 - 球の表面や球殻形状領域の計算では球面調和関数が使われる

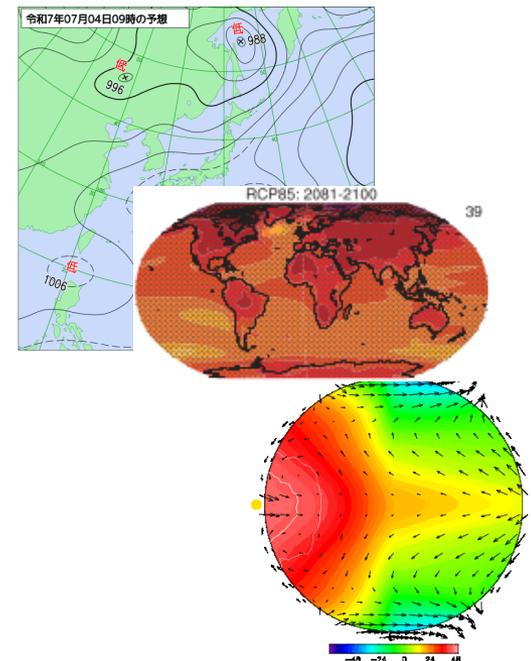
ここまでのまとめ

- 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

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

数値積分

差分化
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



The screenshot shows a web browser displaying the DCPAM website. The page title is "大気大循環モデル DCPAM". Below the title, there is a paragraph of introductory text. A section titled "DCPAM とは?" contains a list of links: "DCPAM プロジェクトの目指すもの", "DCPAM の概要", and "結果の可視化例". Another section titled "DCPAM5" contains a paragraph of text and a list of links: "ソースコード" (with sub-links for "最新リリース版 (DCPAM5-Version: 20170306)", "ソースツリー", "ドキュメント群", "開発版スナップショット (Git リポジトリ)", "過去のリリース版"), and "DCPAM5 ドキュメント" (with sub-links for "使用上の注意, インストールガイド, チュートリアル(ごくらく DCPAM5, らくらく)").

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

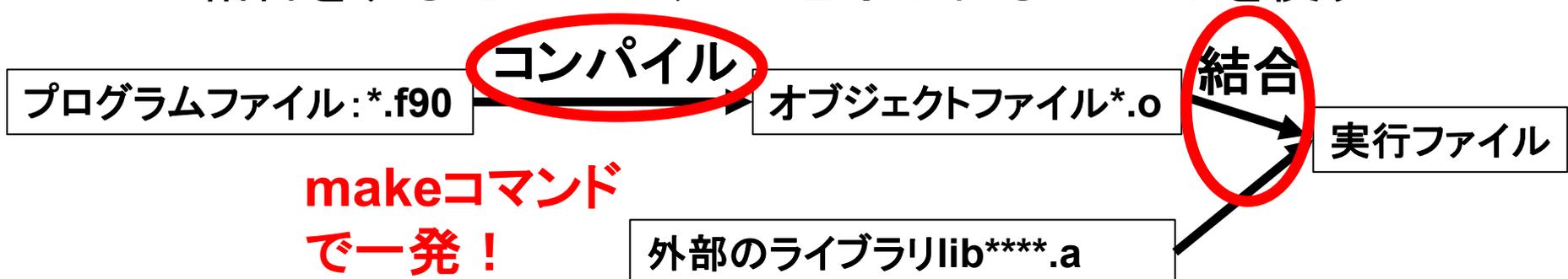
• 実行ファイルを作る(ビルド作業)

– プログラムファイルをコンパイル(機械語に翻訳)する

- 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)

– 使用するライブラリと結合して実行ファイルを作る

- 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
- 実行ファイル:計算機が命令を実行できるファイル
- 結合をするためにはリンカと呼ばれるコマンドを使う

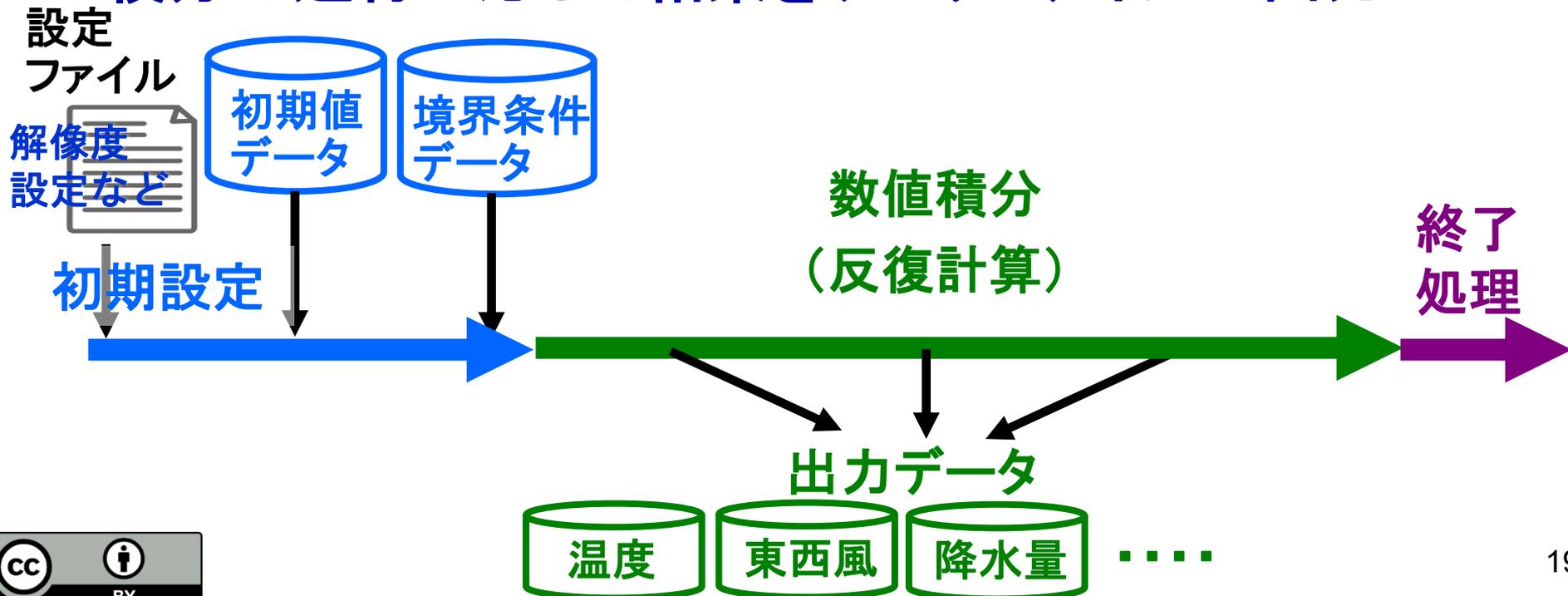


**makeコマンド
で一発!**

(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



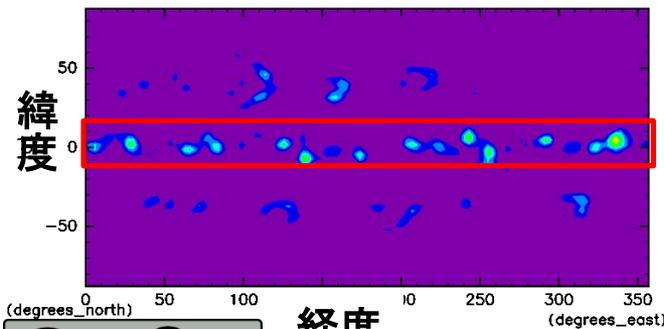
データ解析： モデル実行後の作業

結果のデータ解析・可視化

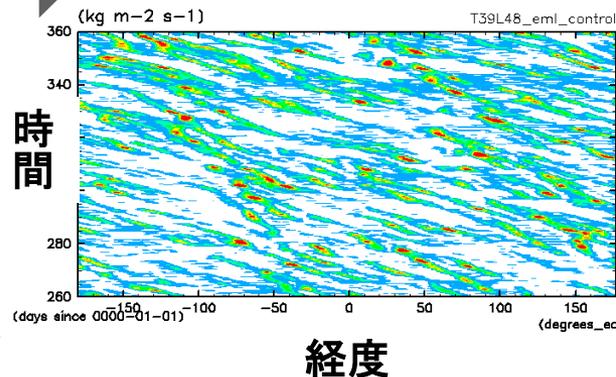
- 数値積分終了後にはやることがたくさんある
(計算したら知りたいことがポンと出てくるわけではない！)

- 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

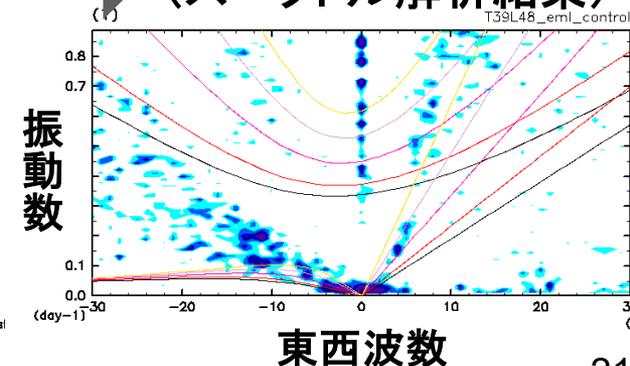
降水平面分布
(モデル結果)



赤道降水時間変化



赤道降水
(スペクトル解析結果)



0000-01-01 06:00:00+0000

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

設定
ファイル



初期値
データ

境界条件
データ

初期設定

NetCDFという
データ形式を使用

数値積分
(時間に関する反復)

終了
処理

出力データ

温度

東西風

降水量

....

NetCDF(Network Common Data Form)

- 気象海洋分野で広く使われるデータ形式
- 自己記述的な形式

- メタデータ(データに関する情報)を含む

- Unidataで設計開発

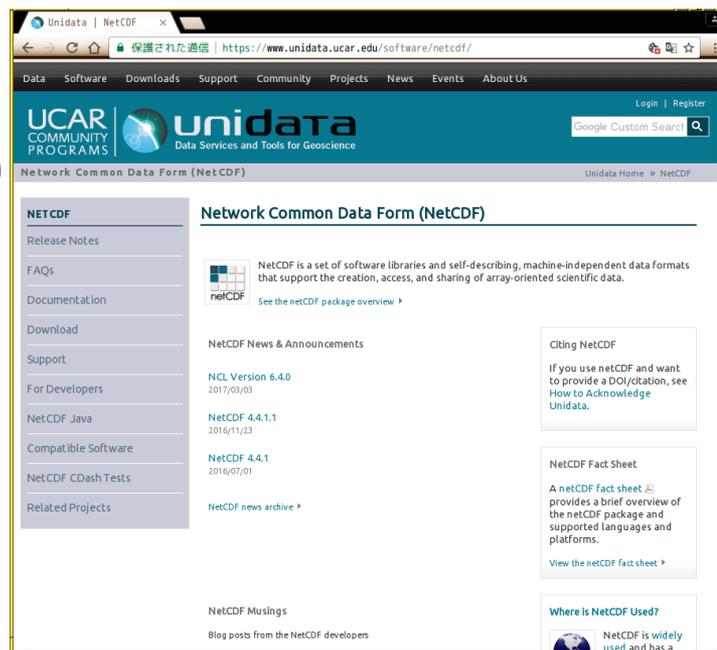
- <https://www.unidata.ucar.edu/>

- 地球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**

**数値
データ**

メタデータ

解析・描画ツール

- 多数のツールが存在

- MATLAB, IDL:

- 地球惑星分野で良く使われる。高機能だが高価格

- gnuplot:

- 簡単な図の作成に便利。INEXでも使用した

- 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

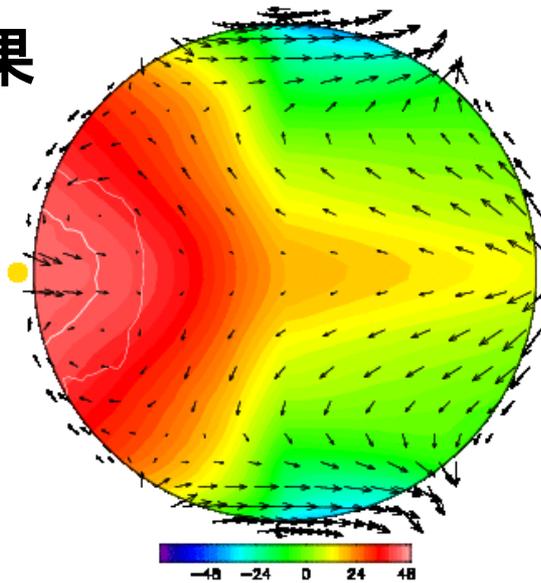
- スクリプト型言語。
逐次翻訳をしながら実行(コンパイルはしない)
- 日本人が開発
- 各種webサービスでも広く利用されている
- 解析から描画までRubyスクリプトで実行可能

– 格子点データ解析のためのライブラリ(GPhys)も整備

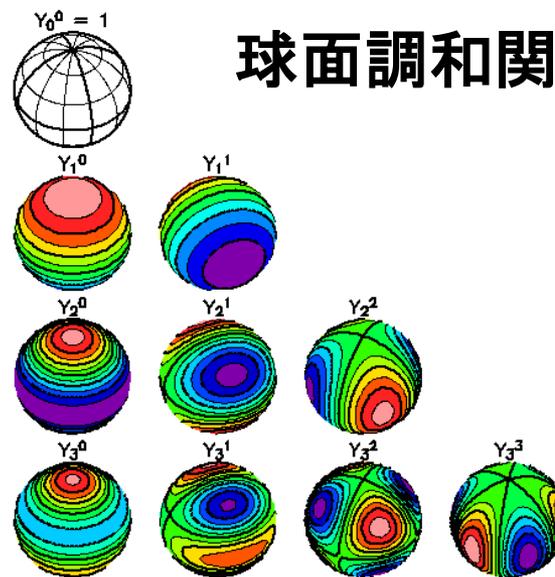
- 堀之内武(北大・地球環境)、西澤誠也(理研)を中心に開発

電腦 Ruby ツールを用いた描画例

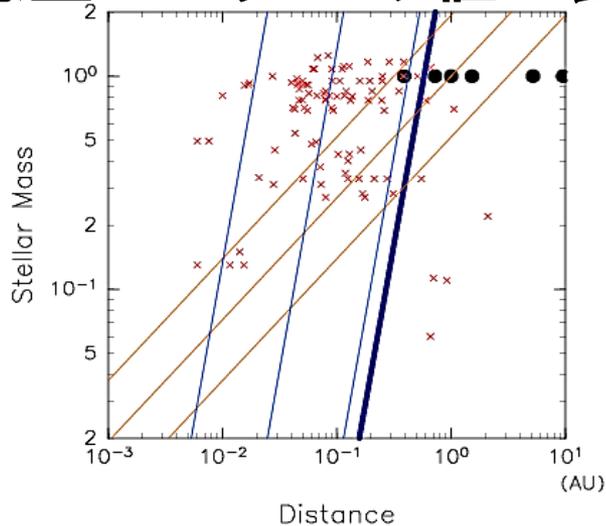
GCM結果



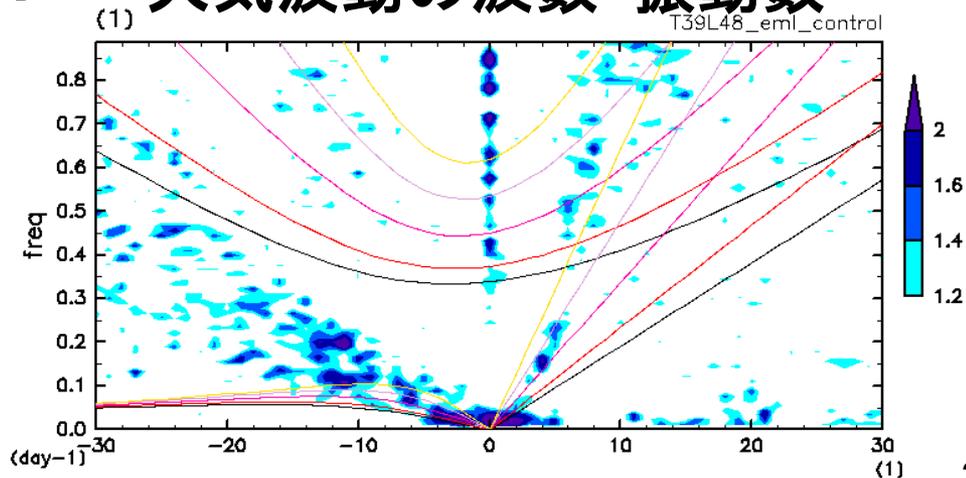
球面調和関数



系外惑星のパラメータ値の表示



大気波動の波数・振動数

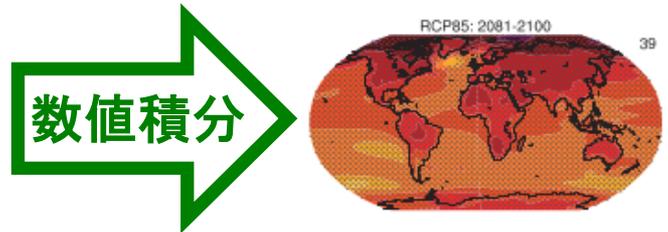


まとめ

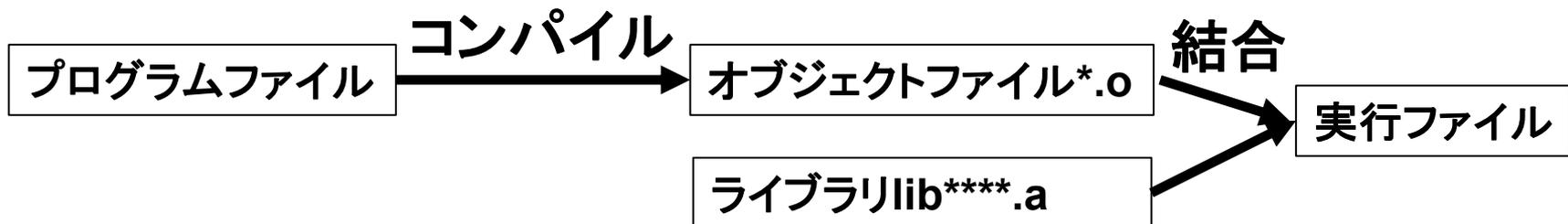
- 大気大循環モデルは微分方程式の数値積分をおこない風速・気温などの空間分布・時間変化を求める

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

⋮



- 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(多くの科学計算ソフトウェアも同様)

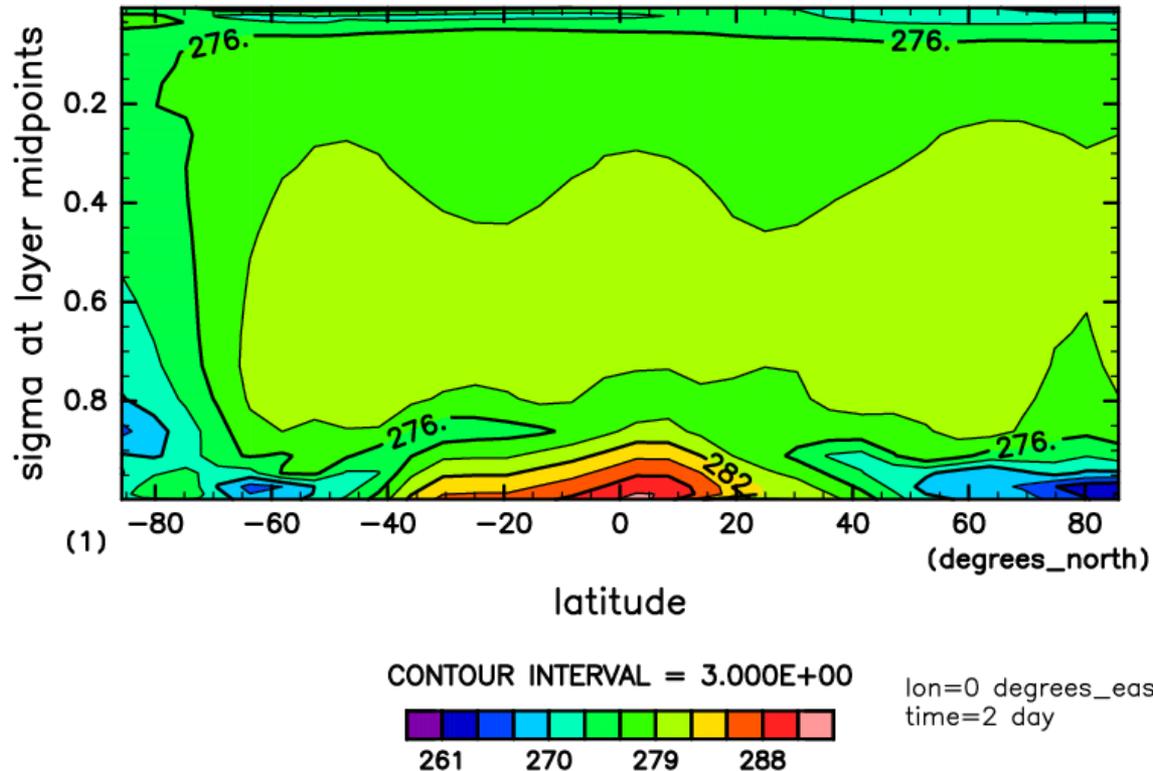


実技編では

- DCPAMのビルド作業

```
$ make
```

- 地球設定実験

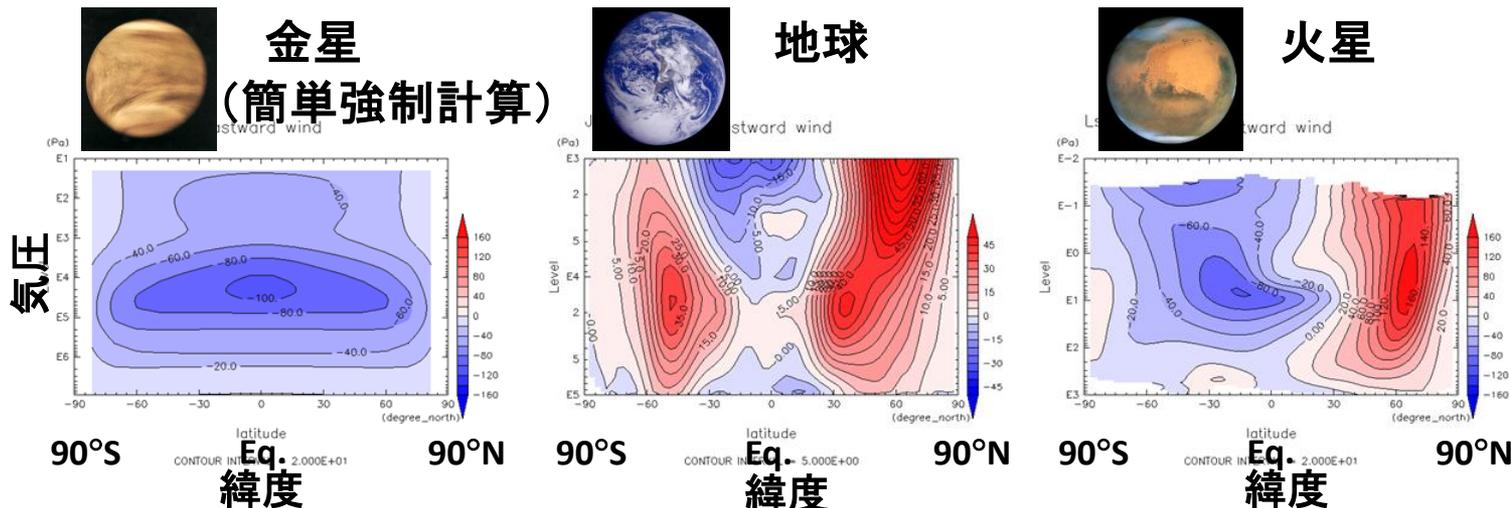


それ以外にも

- 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etc
- いろいろな計算を楽しむことができる
 - DCPAM5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

- 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
- IPCC, 2021: Climate change 2021. <http://www.ipcc.ch/>
- Saito, T., Wada, K., 2004: Coevolution of galactic cores and spiral galaxies. Astrophysical J., 615, L93-L96
- Ogawa (2014) A positive feedback between magmatism and mantle upwelling in terrestrial planets: Implications for the Moon. J. Geophys. Res., 119, 867-883
- Satoh, M., 2004: Atmospheric circulation dynamics and general circulation models. Springer
- 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
- 坂井弘亮, 2010: リンカ・ローダ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dcmodeプロジェクト, 2017: 大気大循環モデルDCPAM, <http://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>