

# 地球惑星情報学I

## 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  
2018年7月13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

# 地球惑星科学分野 における数値モデル

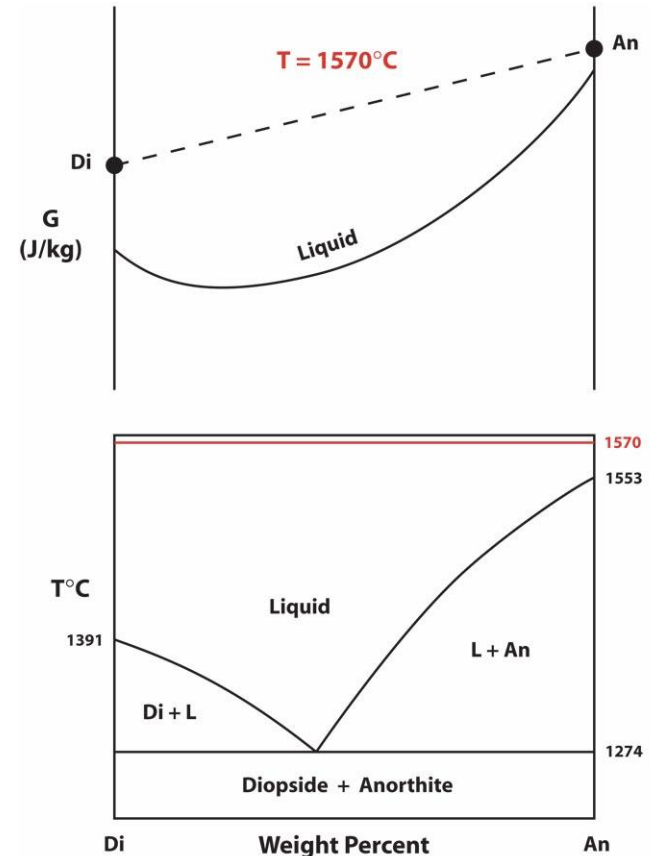
# 数値モデル

- 数値計算の重要性はどんどん増加
  - 科学の第4の手法と呼ばれることもある
- 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
- 数値モデルは知見の集積場(これについては次回に)

# 数値モデルの例： 地球化学分野

## • MELTS

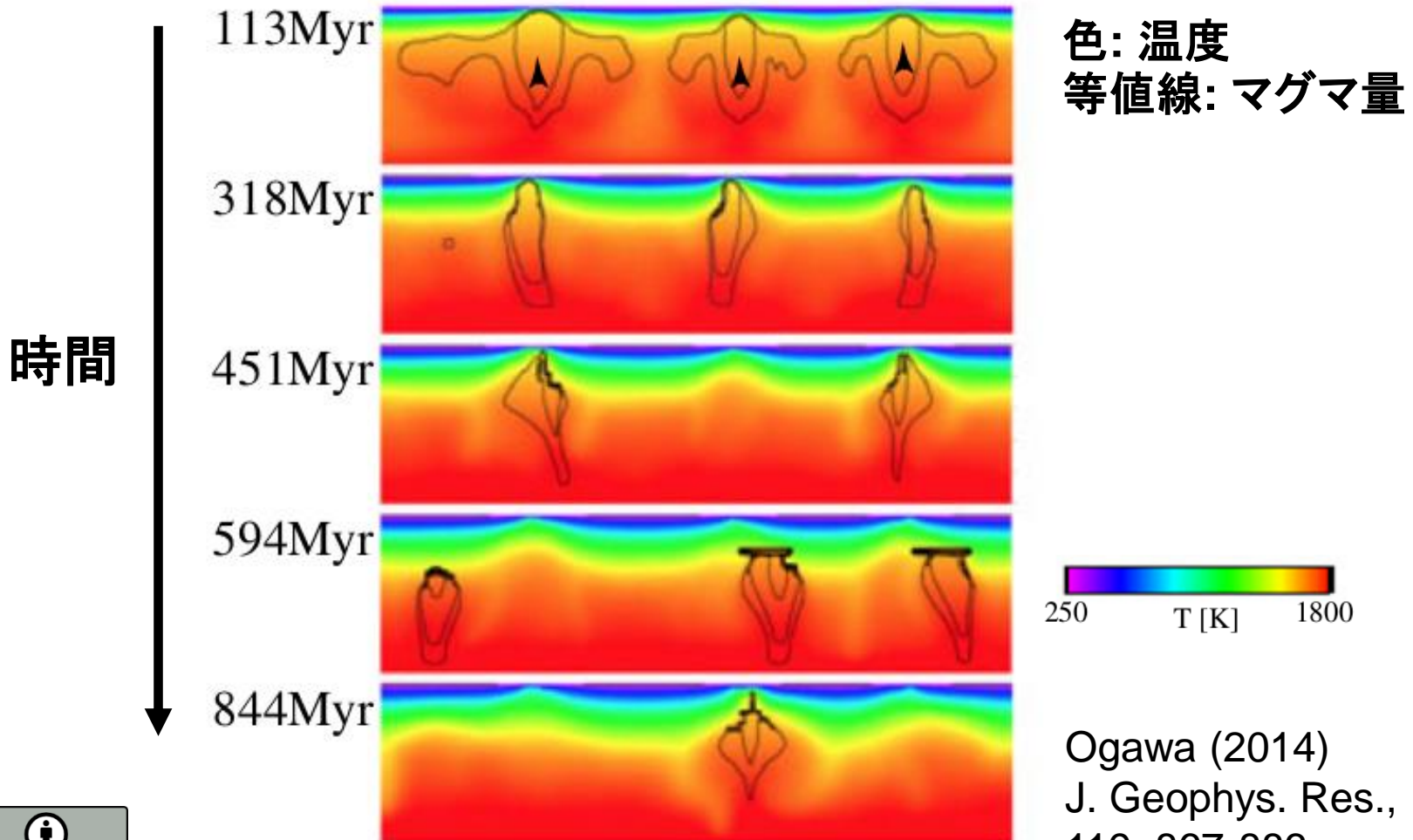
- <http://melts.ofm-research.org>
- 鉱物組成を与えると熱力学方程式を用いた第一原理計算により相図を作成
- 開発者は Mark Ghiorso氏 (OFM Research, ワシントン大学)らしい



灰長石-透輝石系の相図  
1570°C の場合

# 数値モデルの応用例: 地球内部物理学分野

## マントル対流のシミュレーション

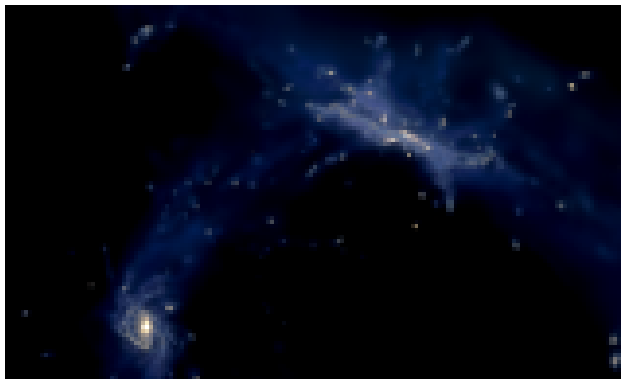


# 数値モデルの応用例: 天文分野

## 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



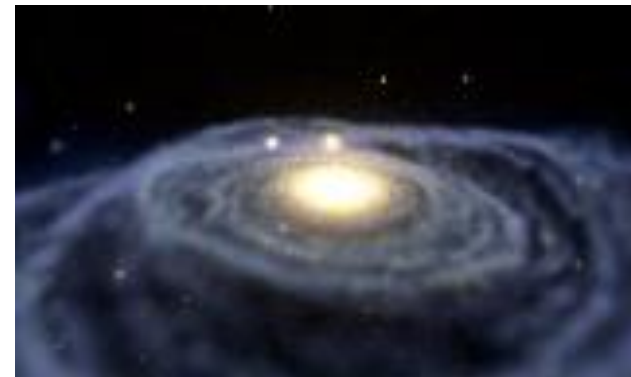
(2) 小銀河の  
合体による  
成長



(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)



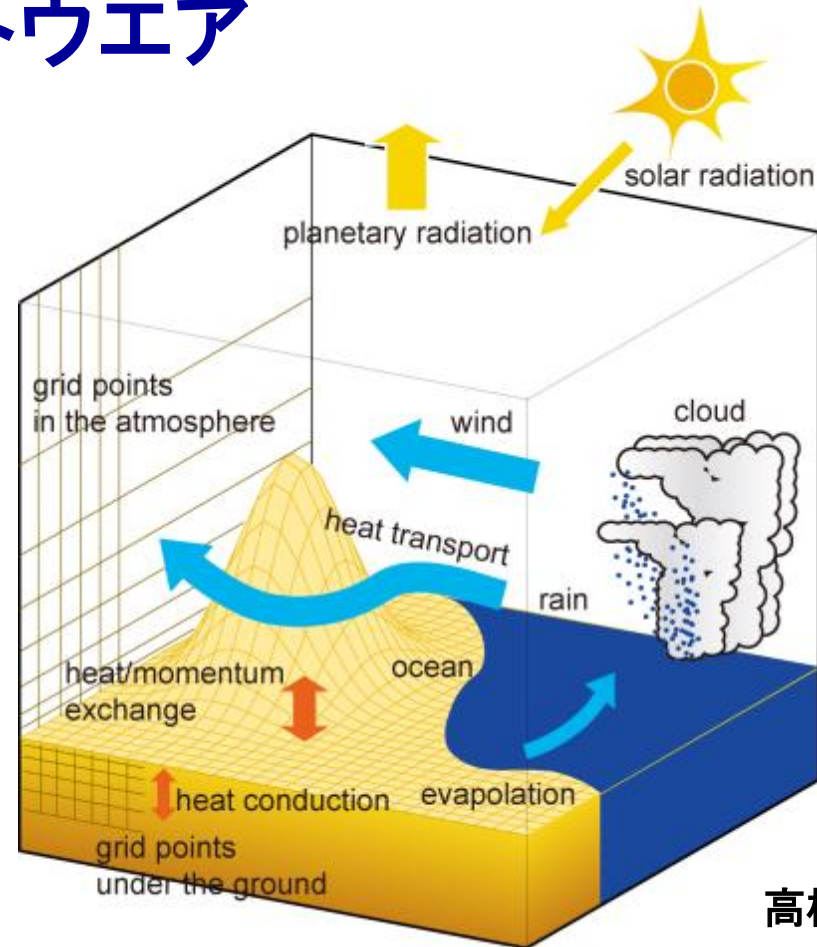
# 大気大循環モデルとは

# 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)**

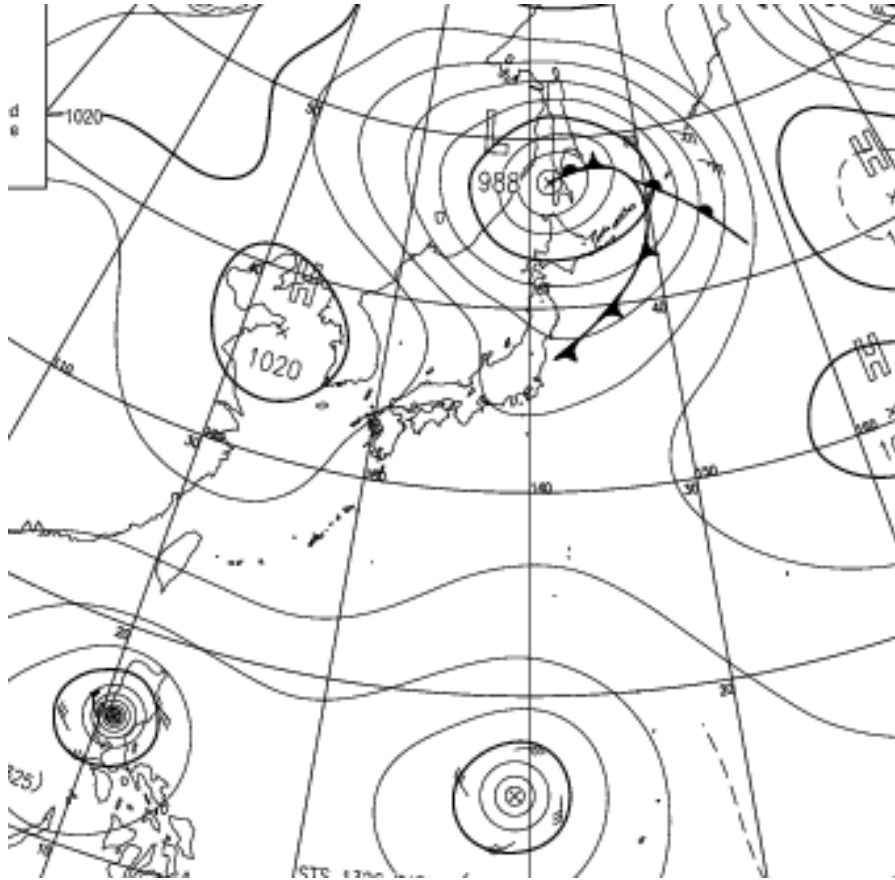
– ちなみに海洋  
大循環モデルは  
OGCM



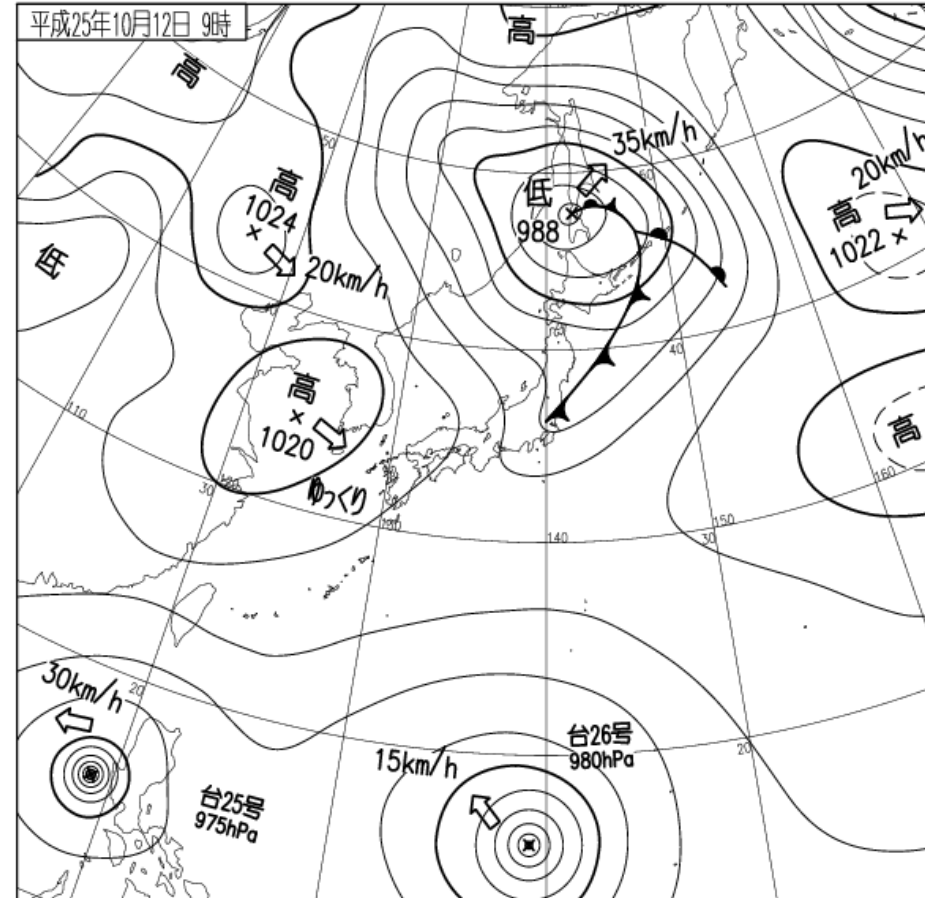
高橋他(2012)

# AGCM使用例(1):天気予報

## 予報天気図



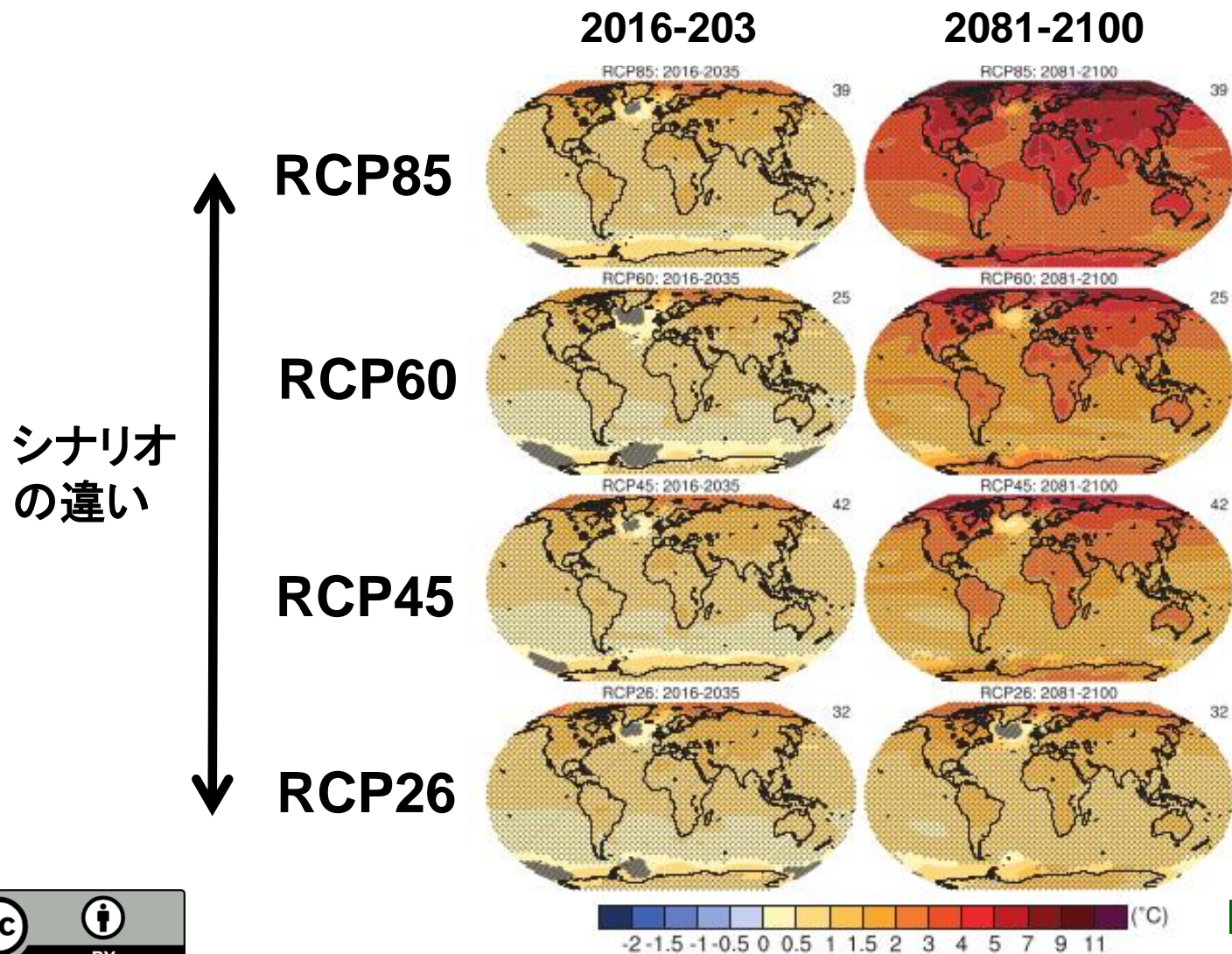
## 実況天気図



気象庁 天気図 (<https://www.jma.go.jp/jp/g3/>)

# AGCM使用例(2):温暖化予測

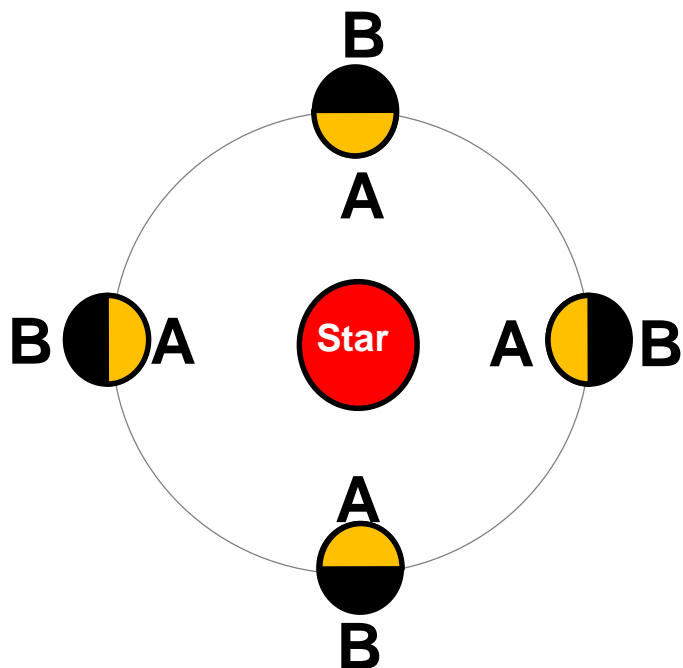
年平均表面気温変化  
(モデル平均、1986-2005 平均からの差)



# AGCM使用例(3): 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

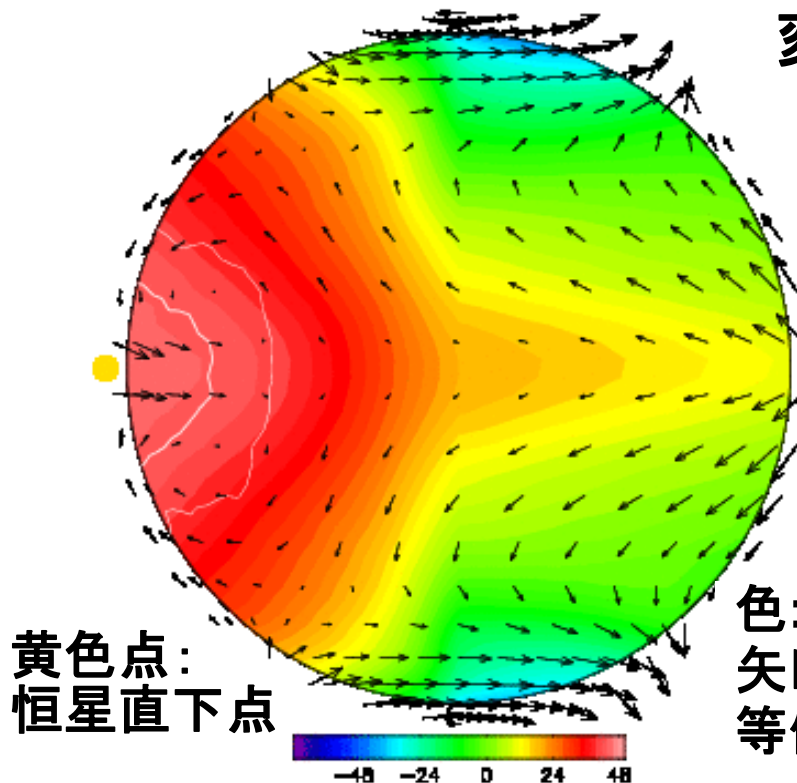


計算結果: 365日平均場の視点を

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

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

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

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

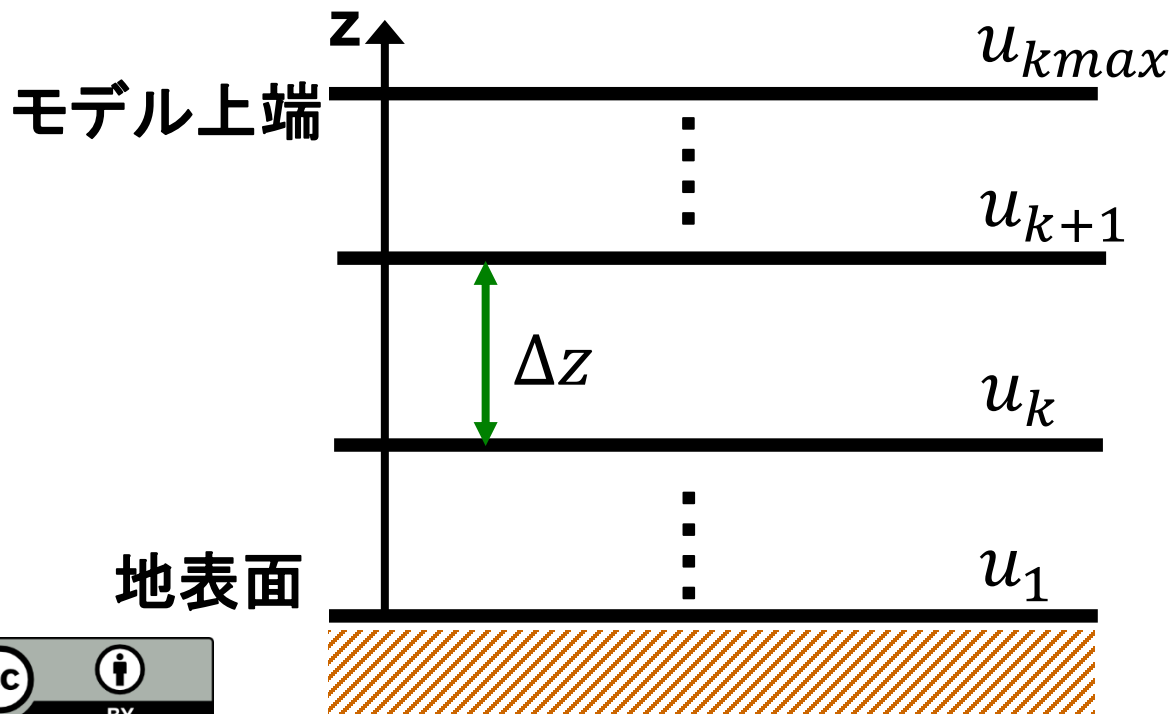
$$\frac{dq}{dt} = S$$

状態方程式

$$p = \rho RT$$

# 空間分布の表現(1): 格子点法

- 離散的な点(格子点)上の値のみを考える
  - 微分は格子点上の値の差であらわす
  - 多くのGCMでは鉛直方向には格子点法を採用
  - 格子点間隔より小さいスケールの現象は表現できない



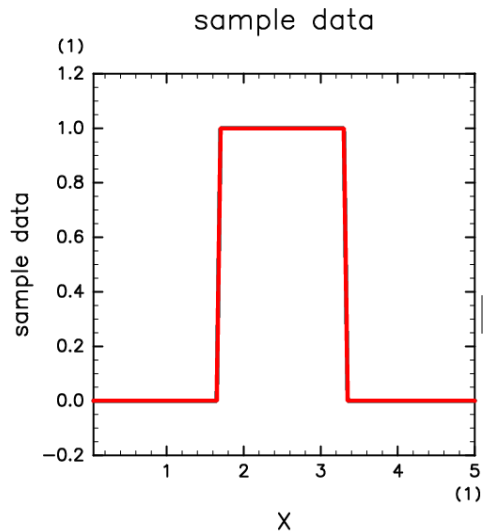
$$\frac{du}{dz} \rightarrow \frac{u_{k+1} - u_k}{\Delta z}$$

格子点数が多いほど  
モデル解像度は高くなる

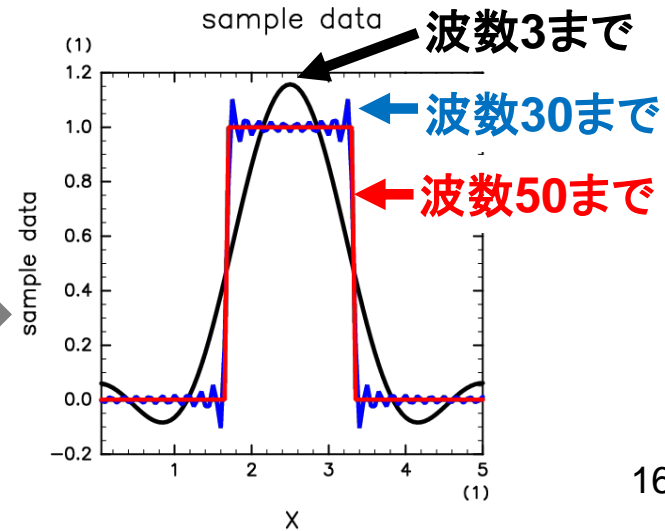
# 空間分布の表現(2): スペクトル法

- 物理量を直交関数系で展開
  - 使う関数系によっては、微分の計算が楽になる、空間積分が高精度でできる
  - 用いる関数(項)の数が多いほど解像度が高くなる
- 例: 1次元問題、三角関数で展開(フーリエ級数)

$$u(x) = a_0 + \sum_{k=1}^K a_k \sin kx + \sum_{k=1}^K b_k \cos kx$$



こんな関数も  
フーリエ展開  
できる





# 空間分布の表現(2): 球面のスペクトル法

## 物理量を球面調和関数で展開

物理量 $A(\lambda, \varphi)$ の展開式

$$A_{ij} = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=|m|}^N \widetilde{A}_n^m Y_n^m(\lambda_i, \varphi_j)$$

$\lambda$ : 経度,  $\varphi$ : 緯度

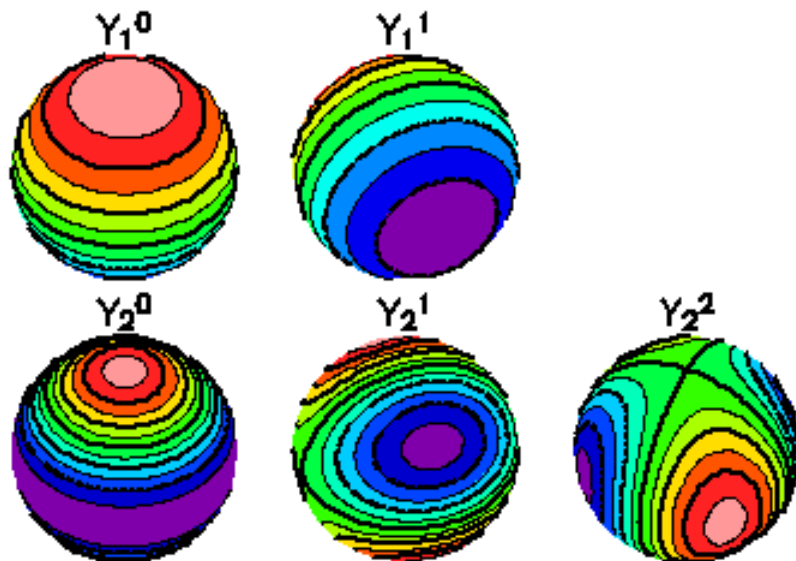
$m$ : 東西波数,  $n$ : 全波数

球面調和関数:

$$Y_n^m(\lambda_i, \varphi_j) = P_n^m(\sin \varphi) e^{im\lambda}$$

ルジャンドル陪関数

$$P_n^m(\mu) = \sqrt{\frac{(n+1)(n-|m|)!}{(n+|m|)!}} \frac{(1-\mu)^{|m|/2}}{2^n n!} \frac{d^{n+|m|}}{d\mu^{n+|m|}} (\mu^2 - 1)^n$$



## 水平積分を高精度で行うことができる

気象庁モデル、DCPAMなどで利用されている

# 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

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

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

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

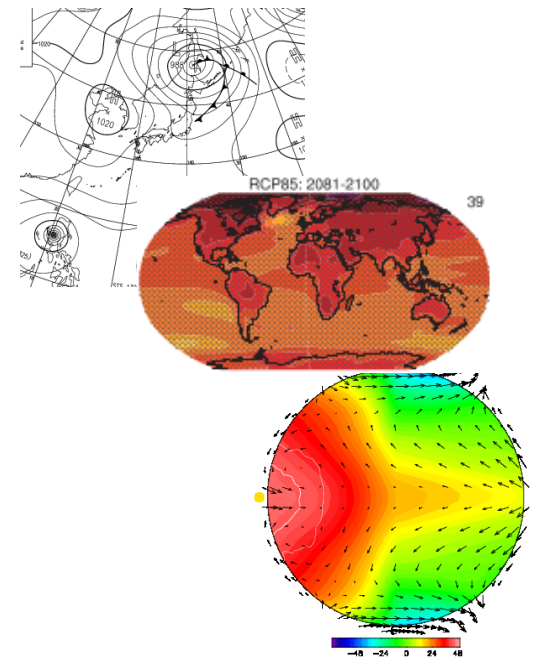
⋮

数値積分

差分法

格子点法

スペクトル法



# DCPAM

# DCPAMとは

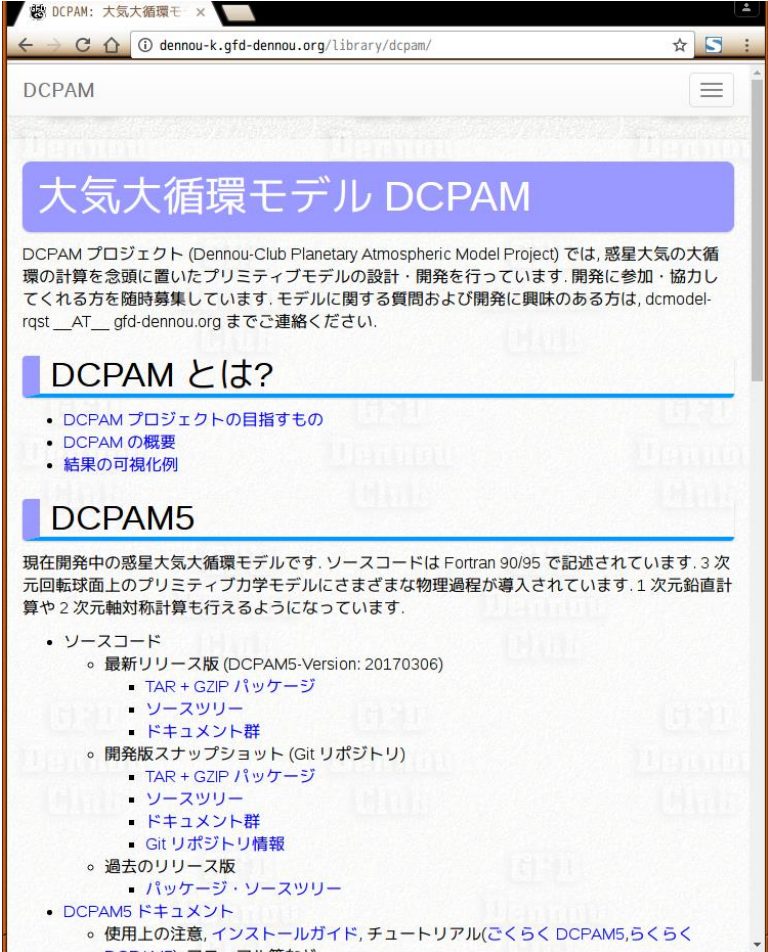
- 地球流体電脳倶楽部で開発しているAGCM
  - <https://www.gfd-dennou.org/library/dcpam>

- DCPAMの特長

- 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



DCPAM: 大気大循環モ x

dennou-k.gfd-dennou.org/library/dcpam/

## DCPAM

### 大気大循環モデル DCPAM

DCPAM プロジェクト (Dennou-Club Planetary Atmospheric Model Project) では、惑星大気の大循環の計算を念頭に置いたプリミティブモデルの設計・開発を行っています。開発に参加・協力してくれる方を随時募集しています。モデルに関する質問および開発に興味のある方は、[dcmodel-rqst\\_\\_AT\\_\\_gfd-dennou.org](mailto:dcmodel-rqst__AT__gfd-dennou.org) までご連絡ください。

#### DCPAM とは?

- DCPAM プロジェクトの目指すもの
- DCPAM の概要
- 結果の可視化例

#### DCPAM5

現在開発中の惑星大気大循環モデルです。ソースコードは Fortran 90/95 で記述されています。3次元回転球面上のプリミティブ力学モデルにさまざまな物理過程が導入されています。1次元鉛直計算や2次元軸対称計算も行えるようになっています。

- ソースコード
  - 最新リリース版 (DCPAM5-Version: 20170306)
    - TAR + GZIP パッケージ
    - 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)
    - TAR + GZIP パッケージ
    - ソースツリー
    - ドキュメント群
    - Git リポジトリ情報
  - 過去のリリース版
    - パッケージ・ソースツリー
- DCPAM5 ドキュメント
  - 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 DCPAM5,5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 はDebian のインストールで使用



# DCPAMで計算するためには

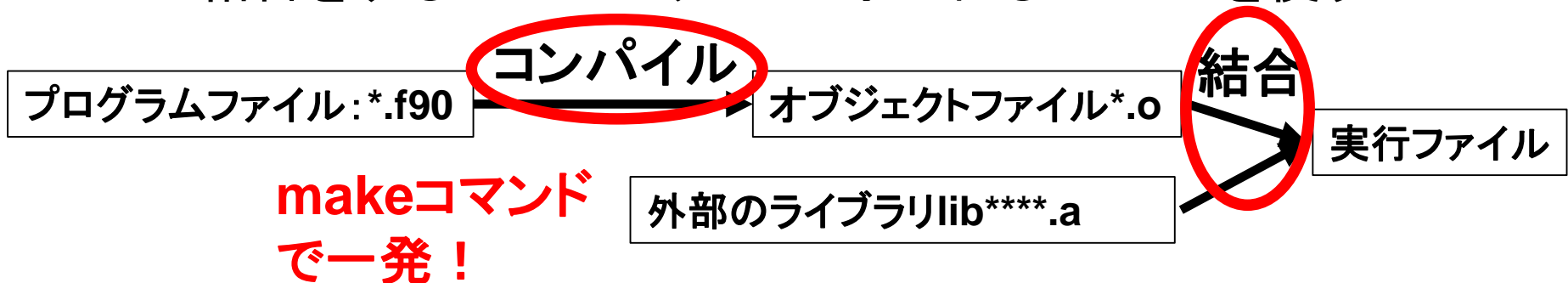
## • 実行ファイルを作る(ビルド作業)

– 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)

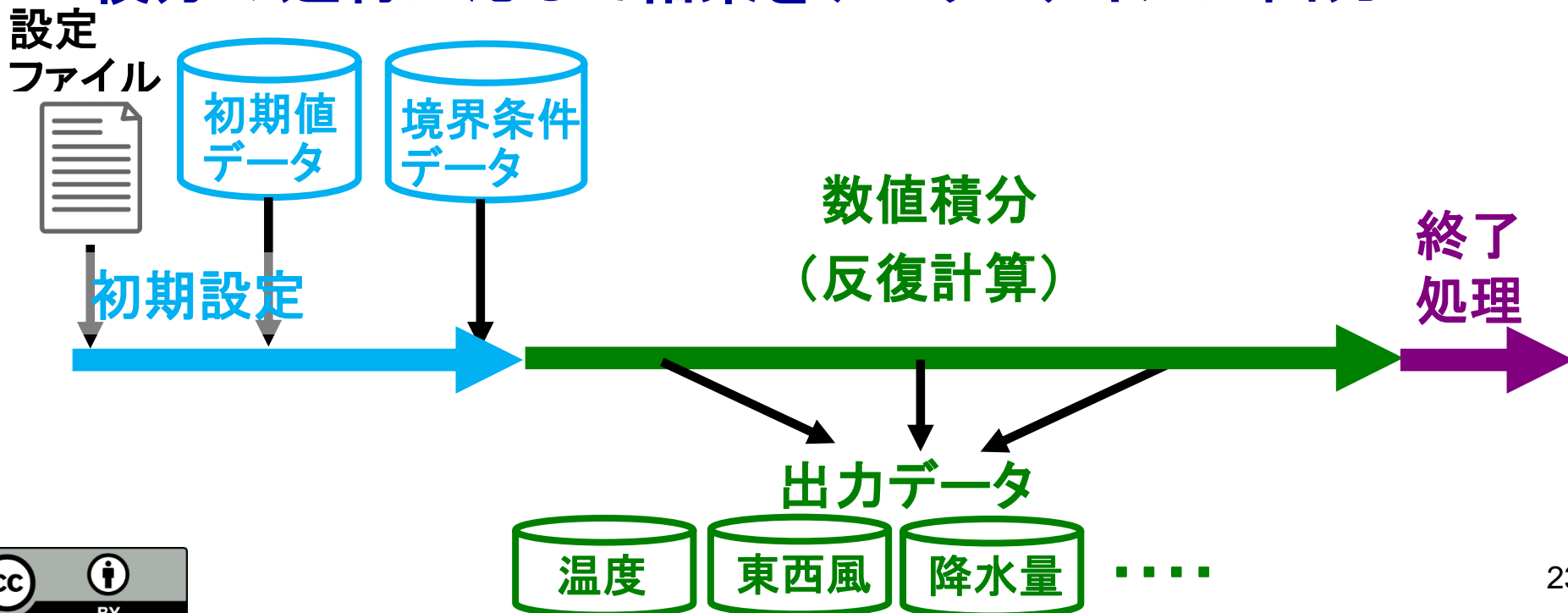
– 使用するライブラリと結合して実行ファイルを作る

- 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



# 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





# 出力データの 例

```
$ ncdump -h SurfTemp.nc
netcdf SurfTemp {
dimensions:
    lon = 128 ;
    (略)
variables:
    float lon(lon) ;
        lon:long_name = "longitude" ;
        (略)
    float SurfTemp(time, lat, lon) ;
        SurfTemp:long_name = "surface temperature" ;
        (略)

// global attributes:
        :title = "....." ;
        (略)

data:

lon = 0, .....
    (略)
SurfTemp = 237.6823, ....
}

```

詳しくは次回に！

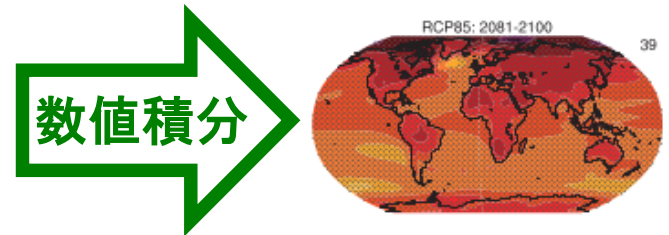


# まとめ

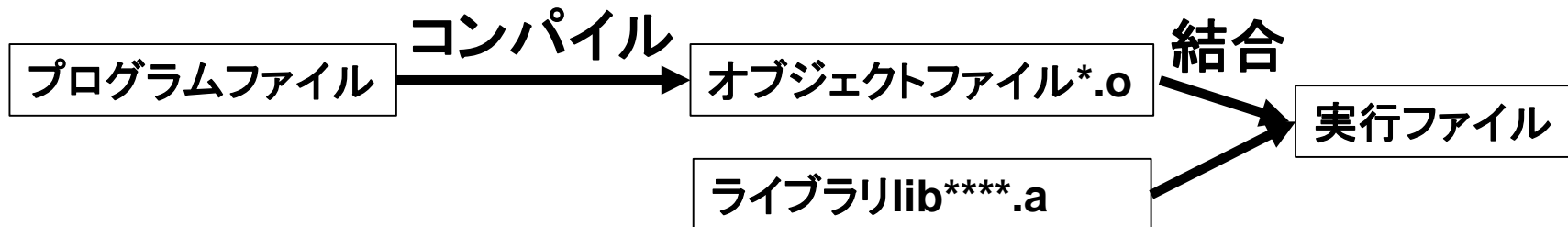
- 大気大循環モデルは微分方程式の数値積分をおこない風速・気温などの空間分布・時間変化を求める

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

⋮



- 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)

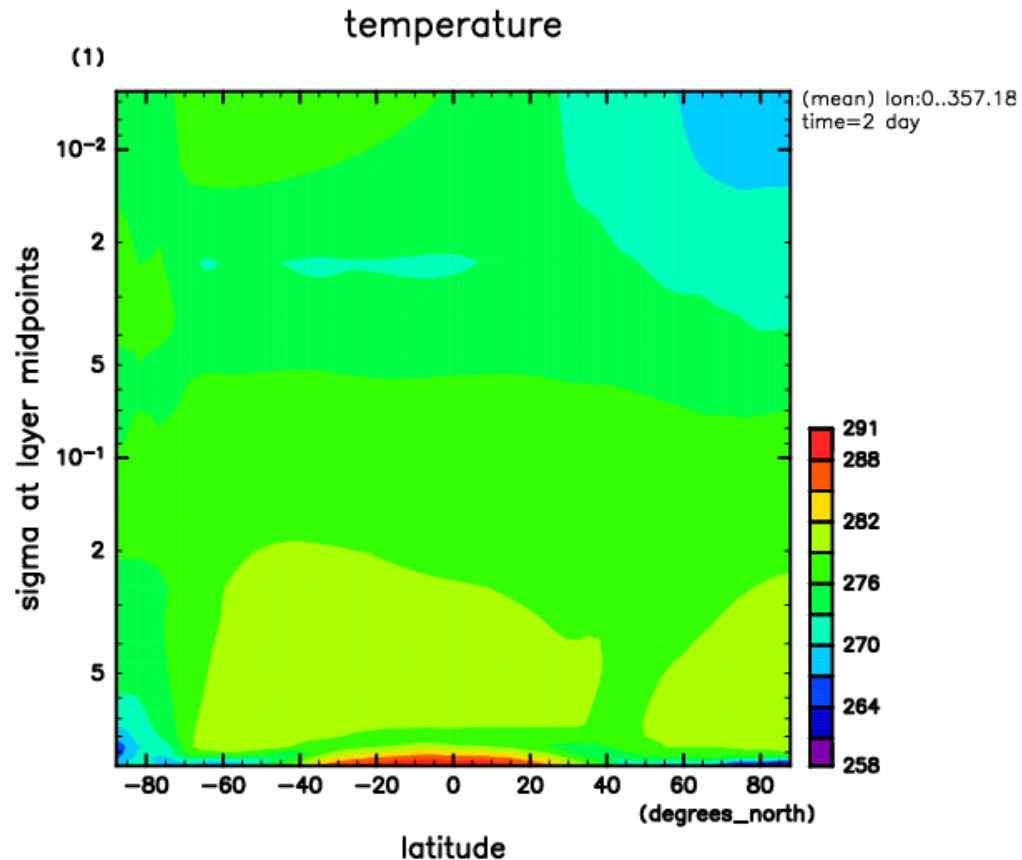


# 実技編では

- DCPAMのインストール作業

```
$ make
```

- 地球設定実験



# 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, 2013: Climate change 2013 The physical science basis.  
<http://www.ipcc.ch/>
- Saito, T., Wada, K., 2004: Coevolution of galactic cores and spiral galaxies. Astrophysical J., 615, L93-L96
- Wirth, K., Advanced Modeling Programs: MELTS.  
[https://serc.Carleton.edu/research\\_education/equilibria/melts.html](https://serc.Carleton.edu/research_education/equilibria/melts.html)
- 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>
- ビジネスアイコン無料素材[http://business-icon.com/highresolution/l\\_005.png](http://business-icon.com/highresolution/l_005.png)