

地球惑星情報学

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
2019年7月12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

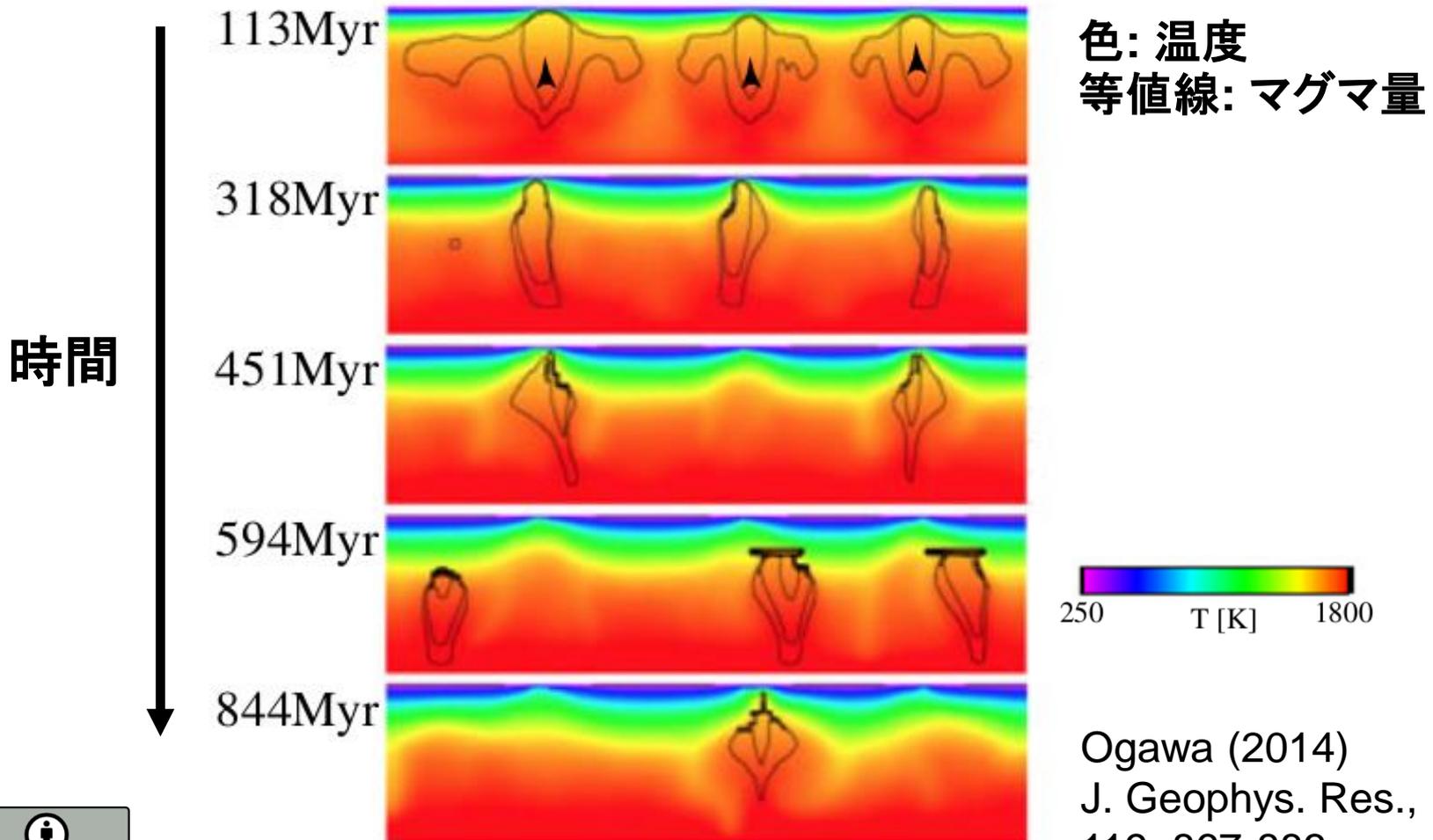
地球惑星科学分野 における数値モデル

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

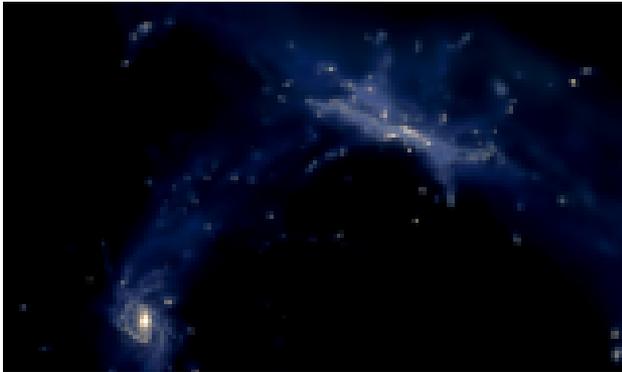


数値モデルの応用例: 天文分野

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)

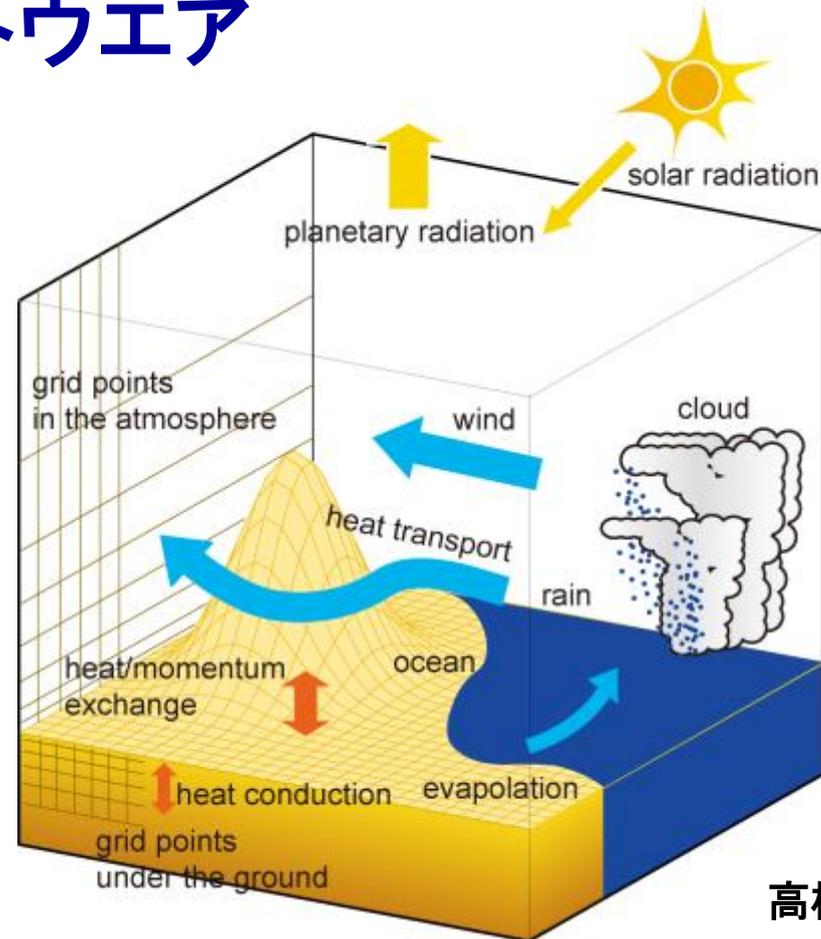
大気大循環モデルとは

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

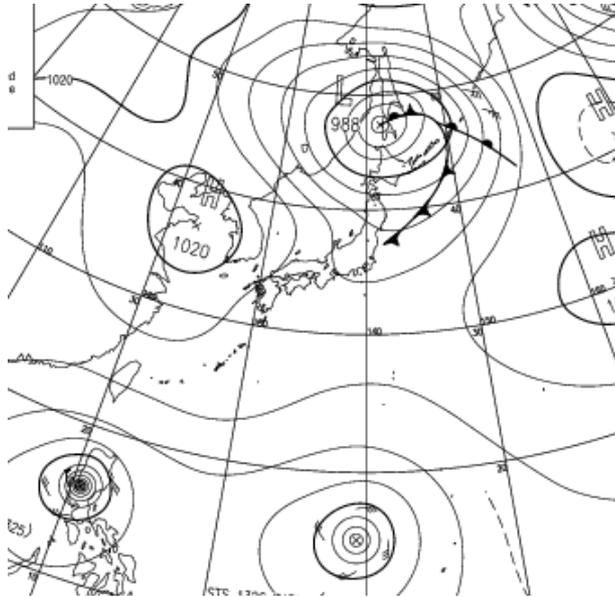


高橋他(2012)

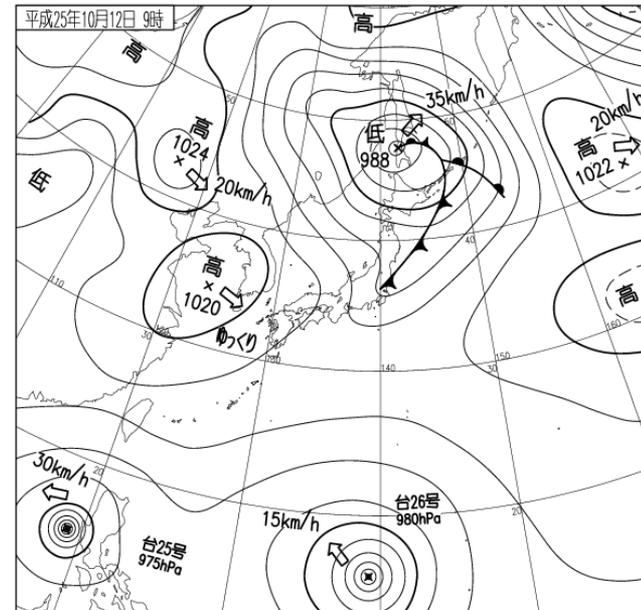
AGCM使用例(1):天気予報

- 短期予報

予報天気図



実況天気図



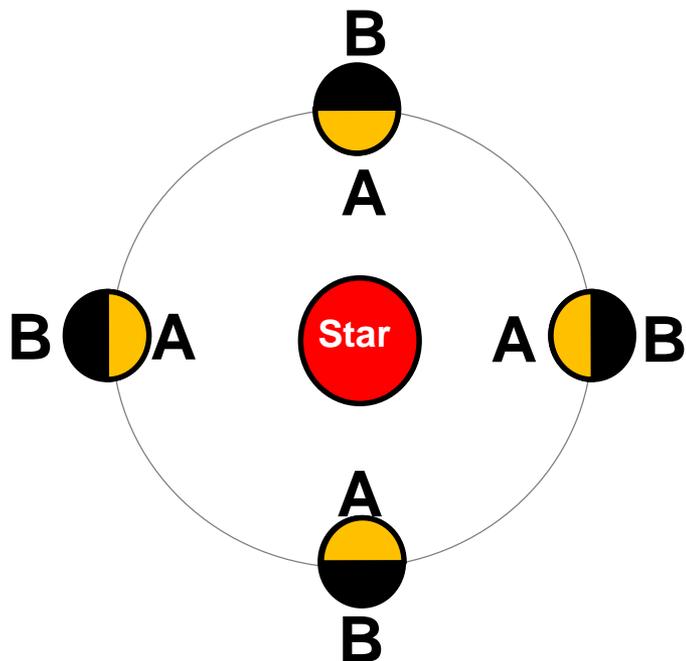
気象庁 天気図 (<https://www.jma.go.jp/jp/g3/>)

- 温暖化予測
– IPCC(2013)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)

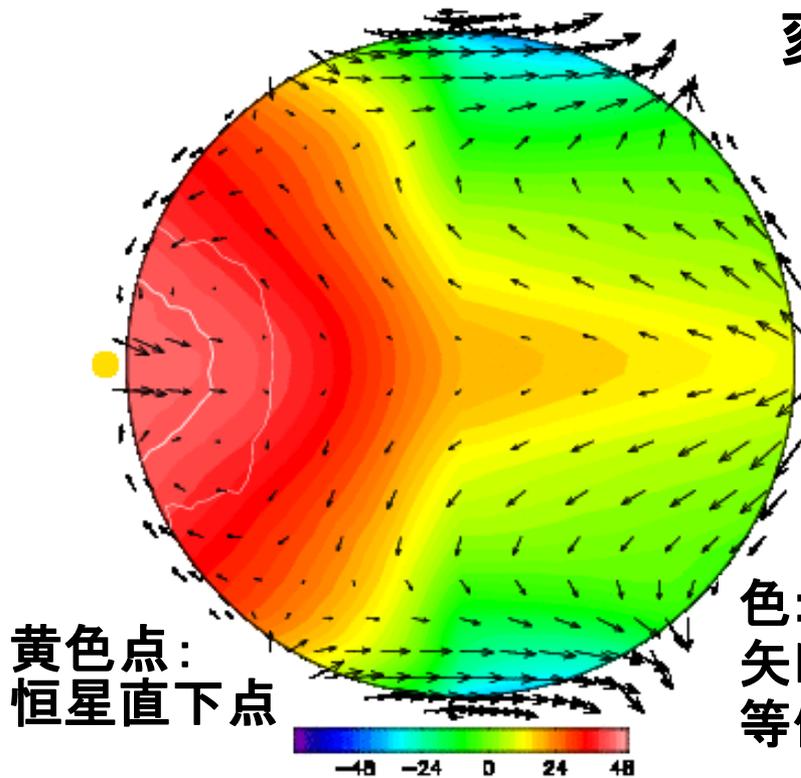
同期回転惑星: 固定された
夜半球と昼半球を持つ



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

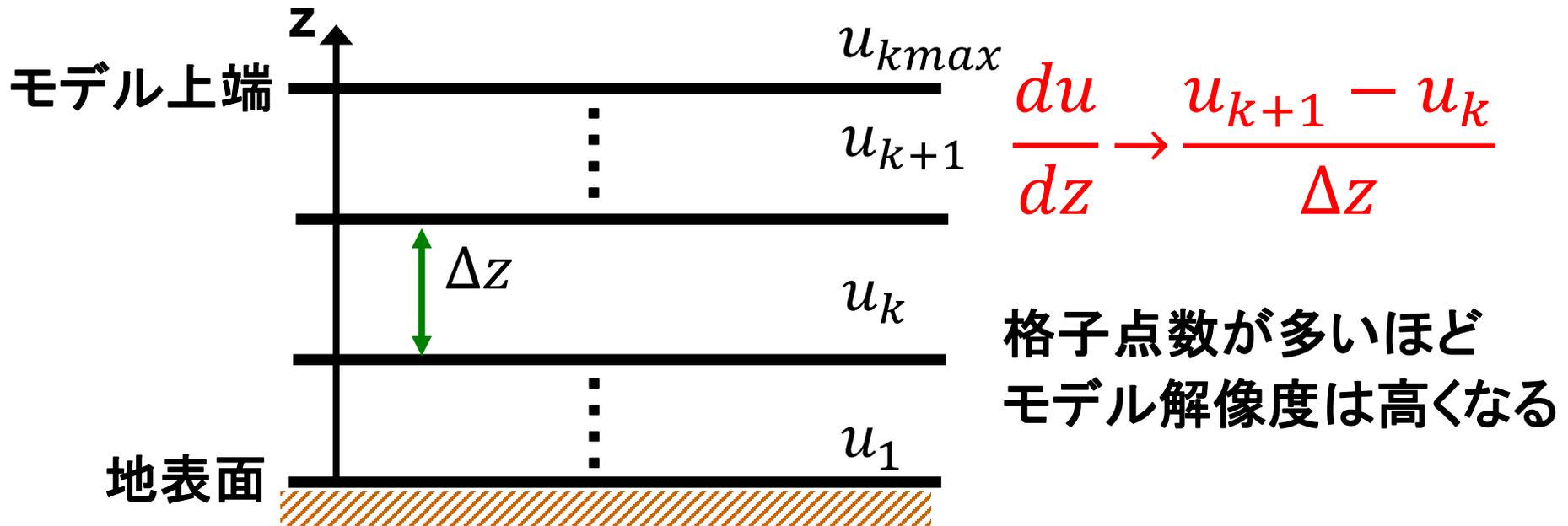
$$\frac{dq}{dt} = S$$

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**
 - 球面・球殻形状内の計算で多く使用

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

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

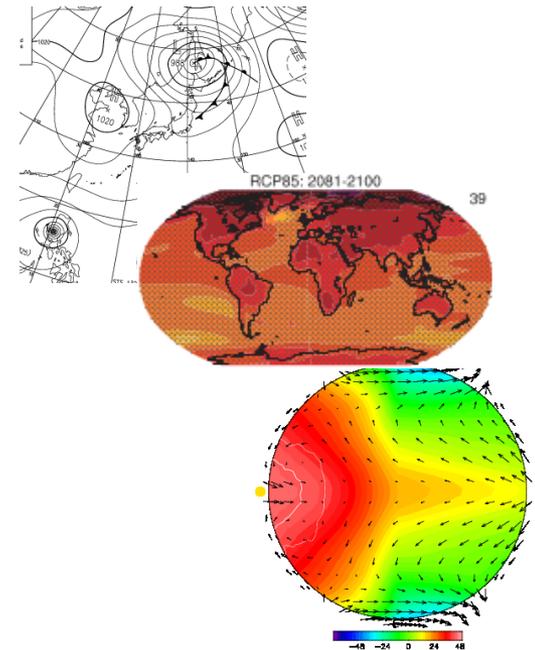
$$\frac{dv}{dt} + \left(f + \frac{u \tan \varphi}{a} \right) u = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{a \partial \varphi} + F_\varphi$$

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

⋮

数値積分

差分法
格子点法
スペクトル法



DCPAM

DCPAMとは

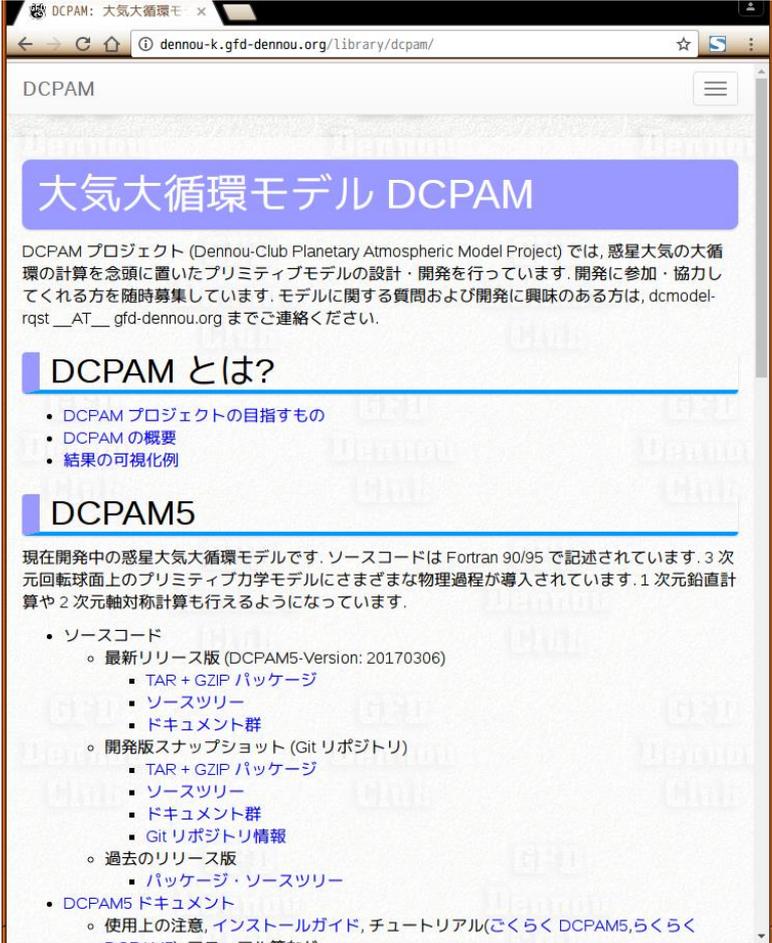
- 地球流体電脳倶楽部で開発しているAGCM
 - <https://www.gfd-dennou.org/library/dcpam>

- 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 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

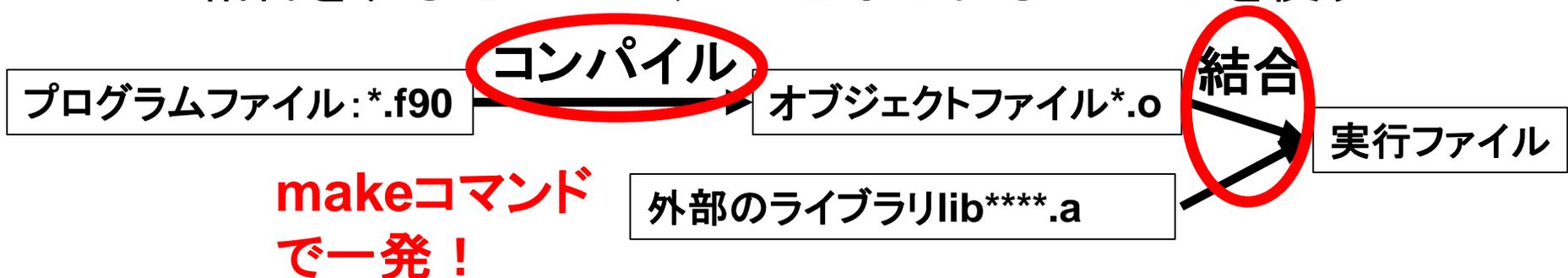
• 実行ファイルを作る(ビルド作業)

– 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)

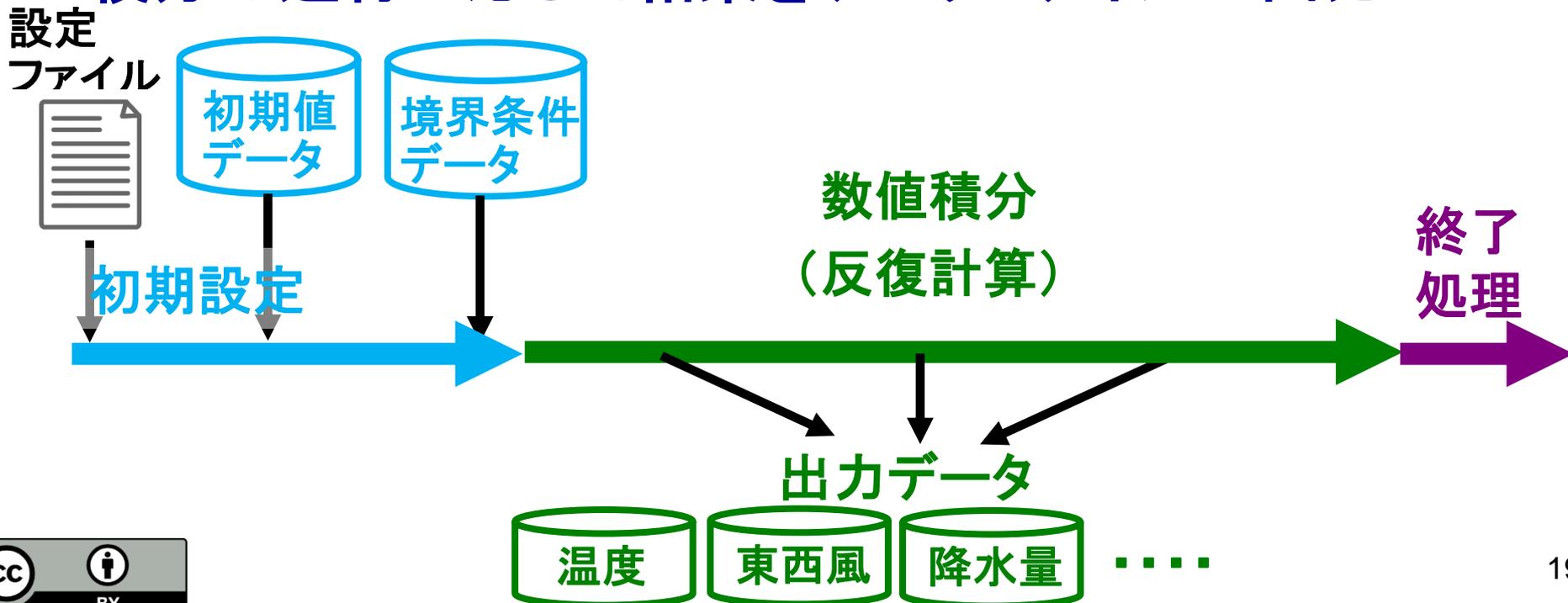
– 使用するライブラリと結合して実行ファイルを作る

- 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



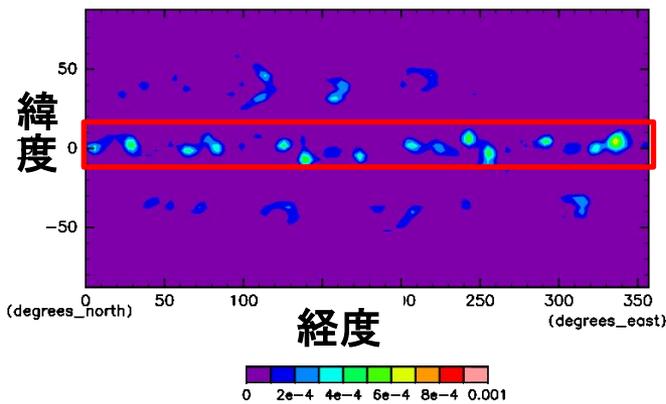
データ解析： モデル実行後の作業

結果のデータ解析・可視化

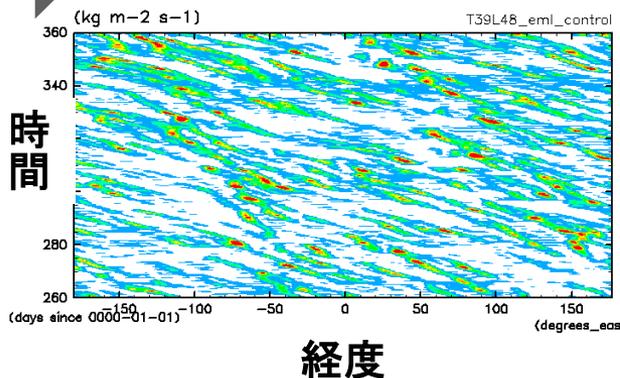
- 数値積分終了後にはやることがたくさんある
(計算したら知りたいことがポンと出てくるわけではない！)

- 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

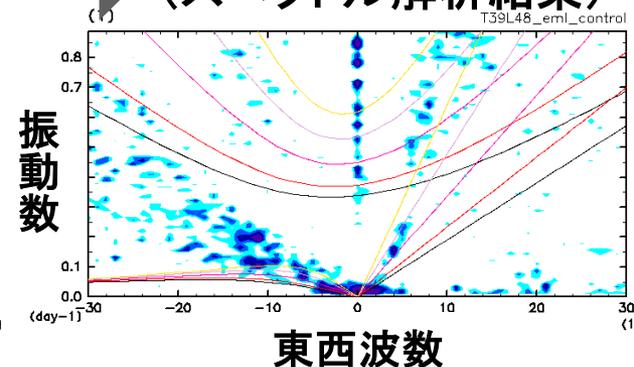
降水平面分布
(モデル結果)



赤道降水時間変化



赤道降水
(スペクトル解析結果)



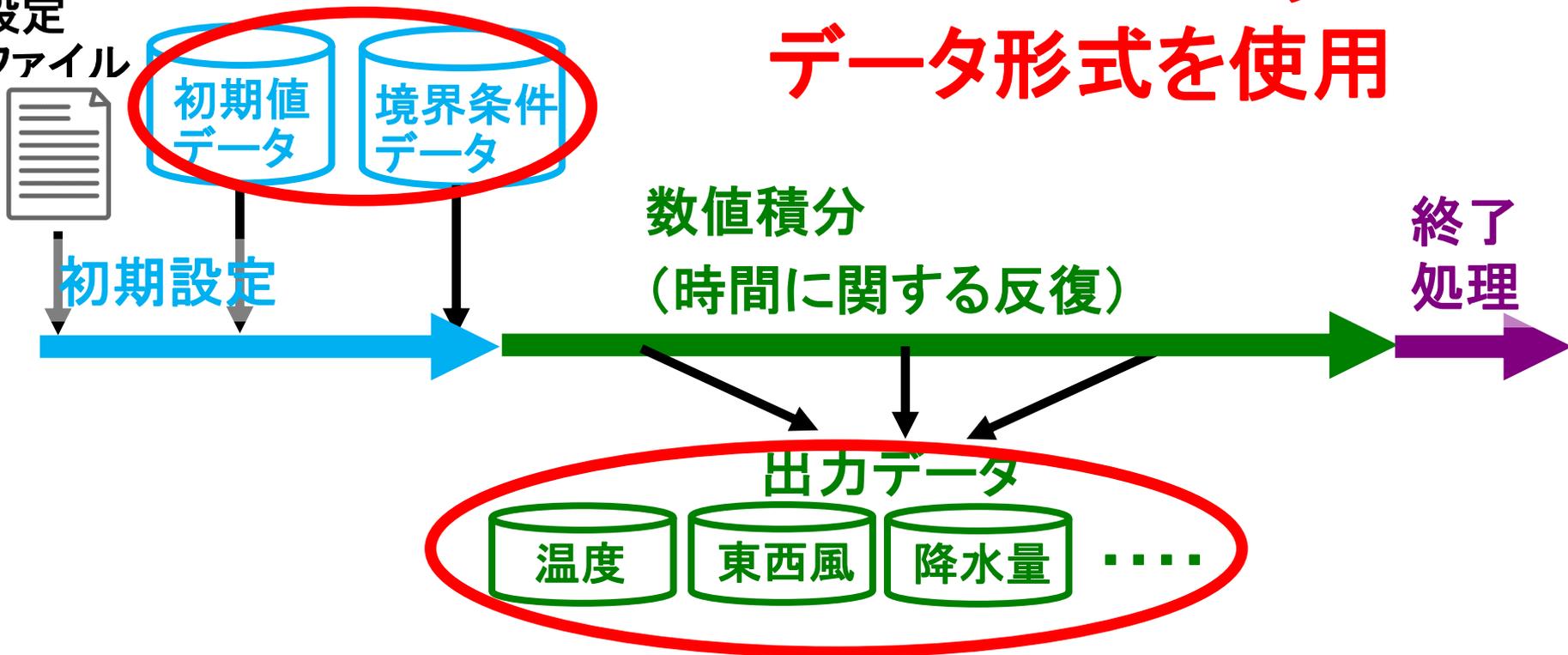
解析・可視化作業の前に

- 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



netCDFという
データ形式を使用

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

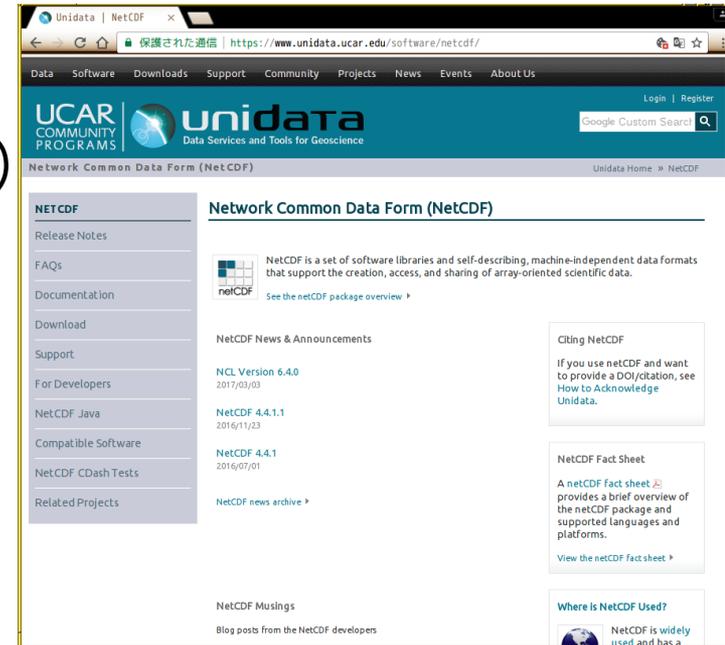
- <https://www.unidata.ucar.edu/>

- 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 = 128 ;
```

```
    .....
```

```
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。高機能だし高価格

- 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

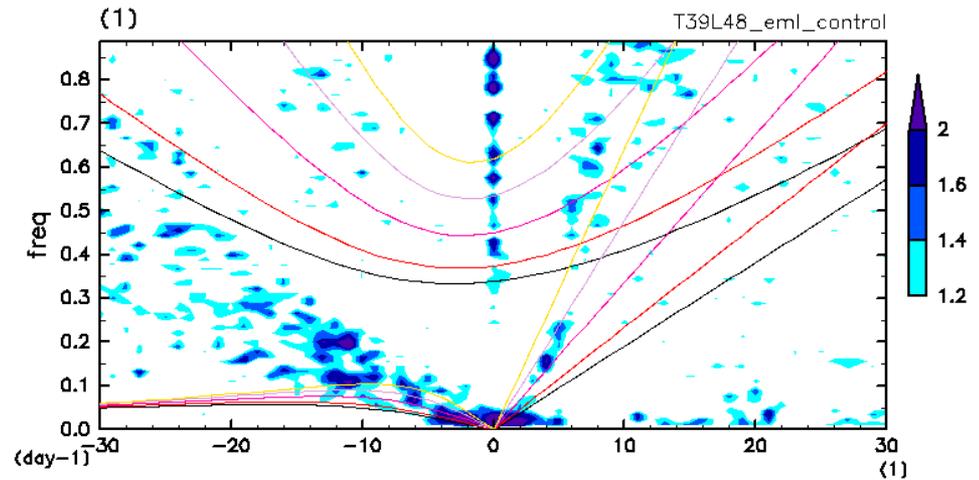
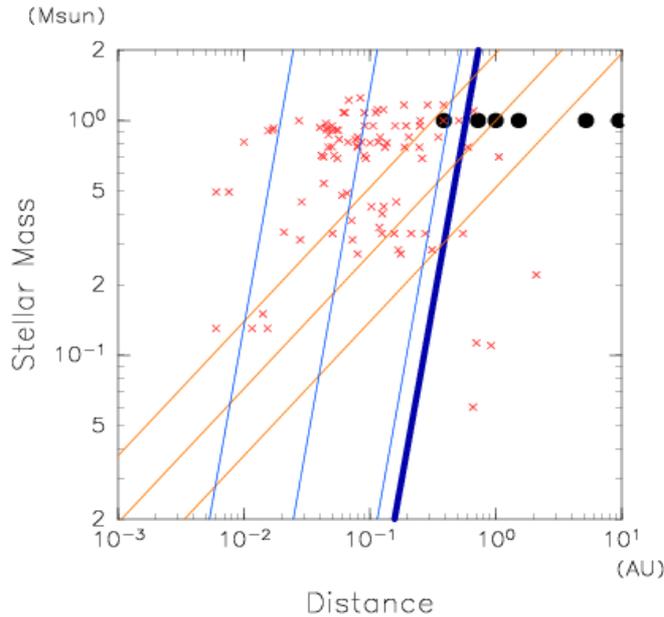
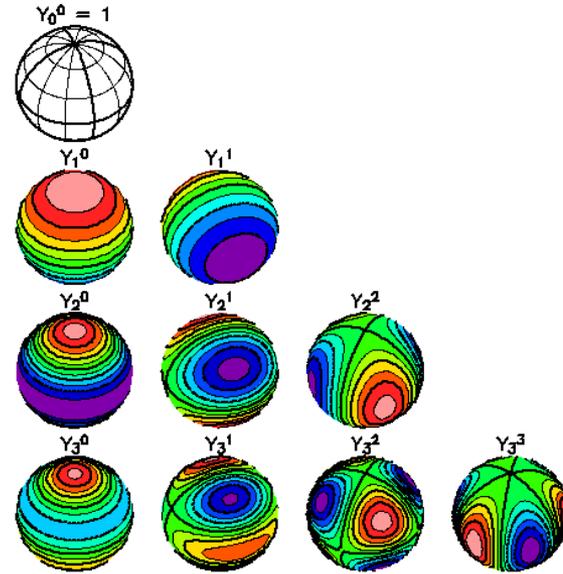
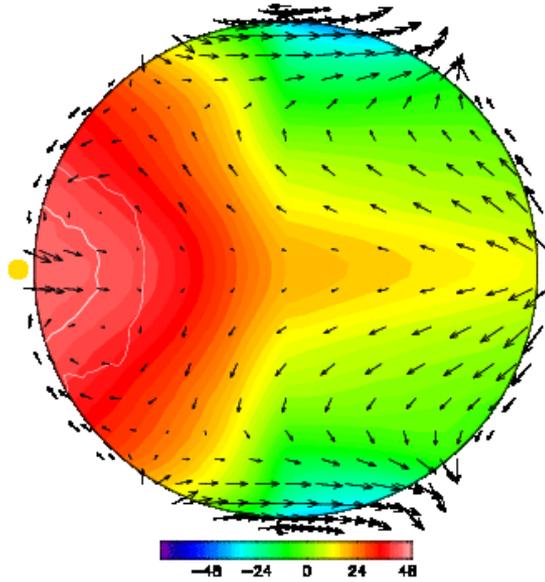
- スクリプト型言語。
逐次翻訳をしながら実行(コンパイルはしない)
- 各種webサービスでも広く利用されている

– 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

電脳 Ruby ツールを用いた描画例

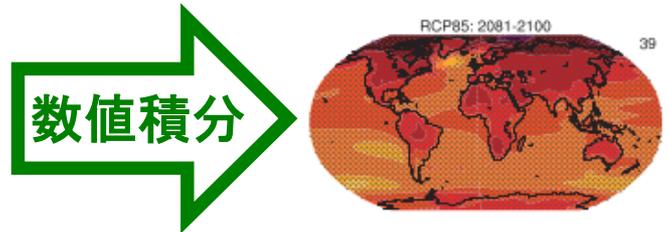


まとめ

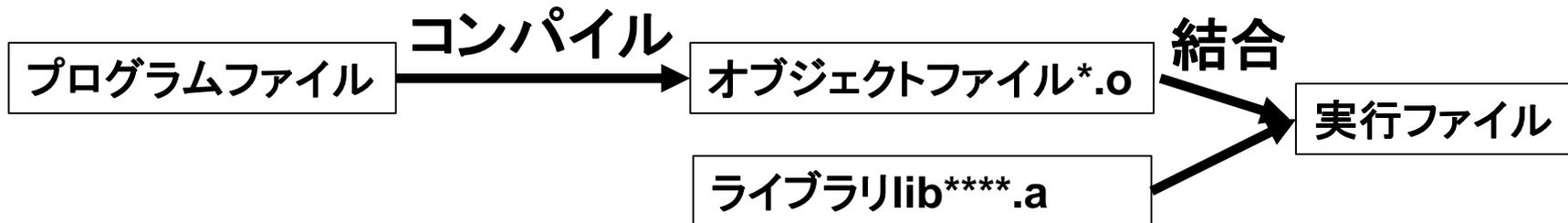
- 大気大循環モデルは微分方程式の数値積分をおこない風速・気温などの空間分布・時間変化を求める

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

⋮



- 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)

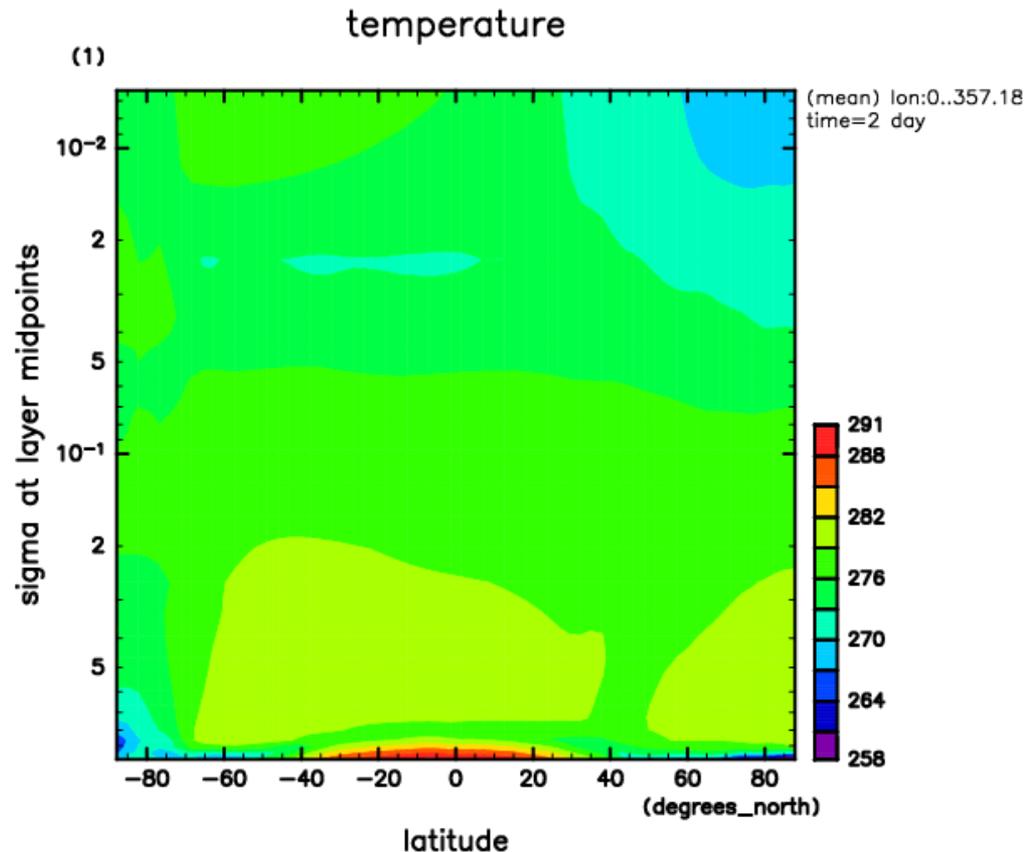


実技編では

- DCPAMのインストール作業

```
$ make
```

- 地球設定実験



参考書, 参考文献

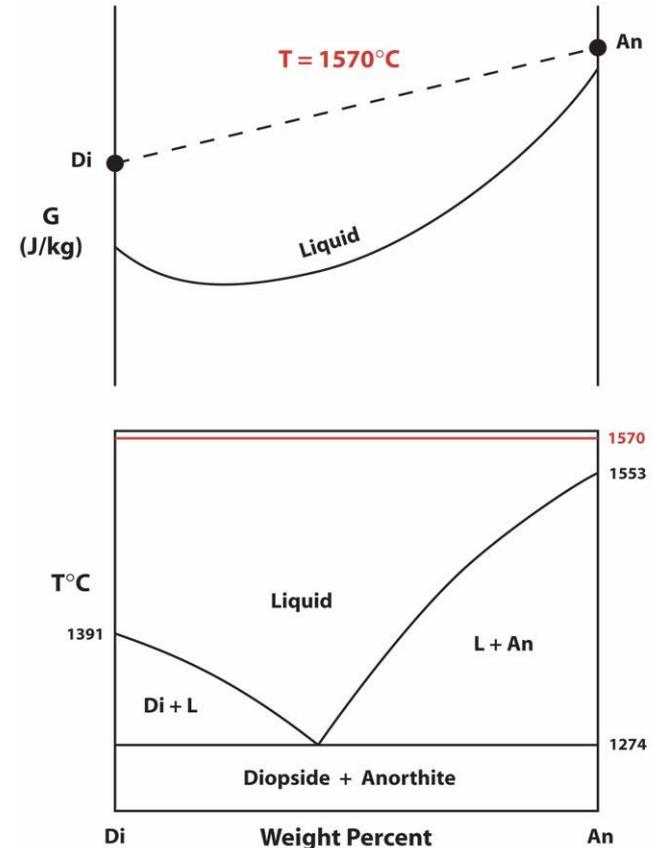
- Oram, A., Talbott, S. 著, 矢吹道郎監訳, 1997: make 改訂版, オライリー・ジャパン
- IPCC, 2013: Climate change 2013 The physical science basis.
<http://www.ipcc.ch/>
- Saito, T., Wada, K., 2004: Coevolution of galactic cores and spiral galaxies. Astrophysical J., 615, L93-L96
- Wirth, K., Advanced Modeling Programs: MELTS.
https://serc.Carleton.edu/research_education/equilibria/melts.html
- 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

付録

数値モデルの例： 地球化学分野

• MELTS

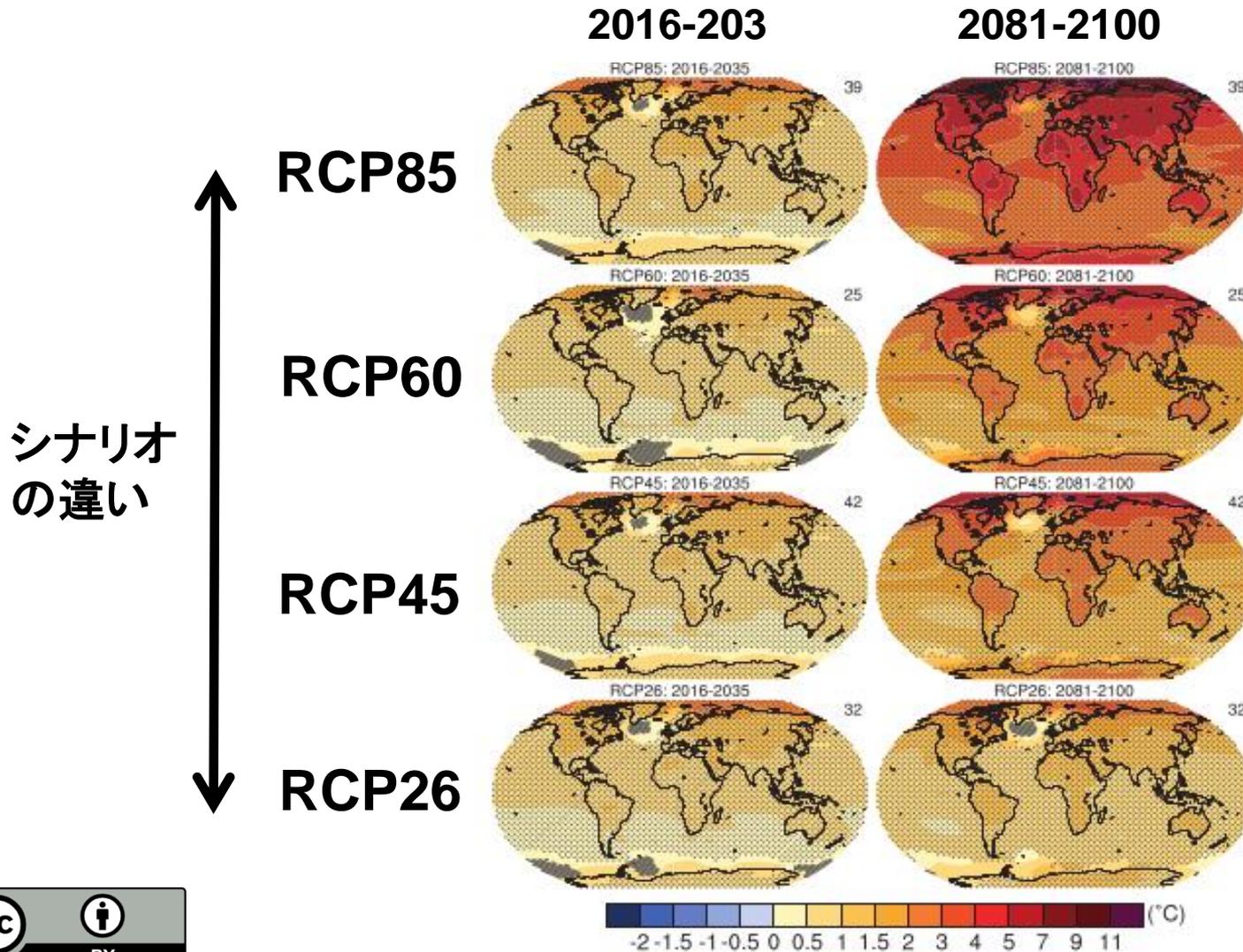
- <http://melts.ofm-research.org>
- 鉱物組成を与えると熱力学方程式を用いた第一原理計算により相図を作成
- 開発者は Mark Ghiorso氏 (OFM Research, ワシントン大学)らしい



灰長石-透輝石系の相図
1570°C の場合

AGCM使用例(2):温暖化予測

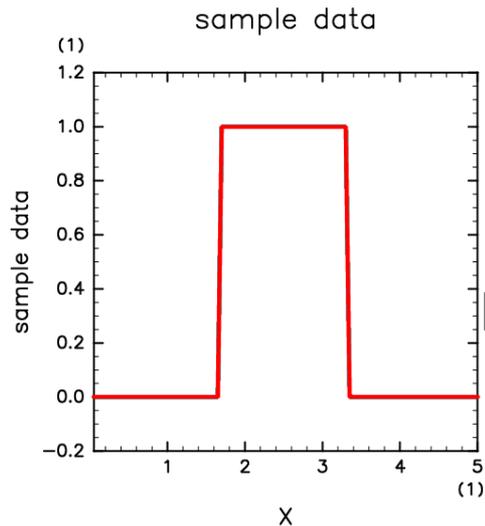
年平均表面気温変化
(モデル平均、1986-2005 平均からの差)



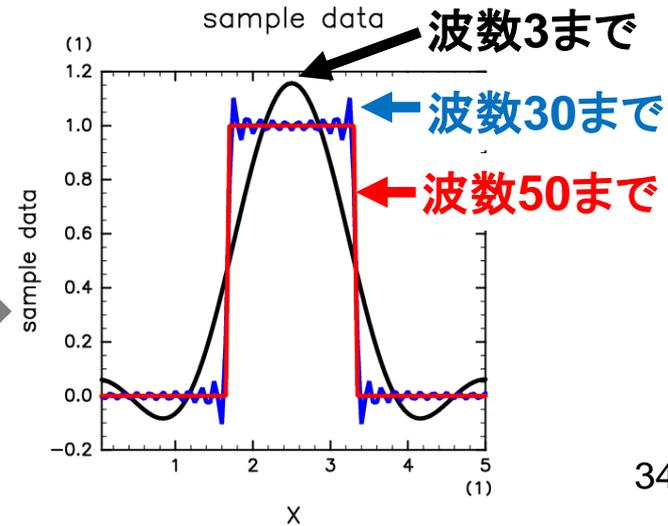
空間分布の表現(2): スペクトル法

- 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

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

λ : 経度, φ : 緯度

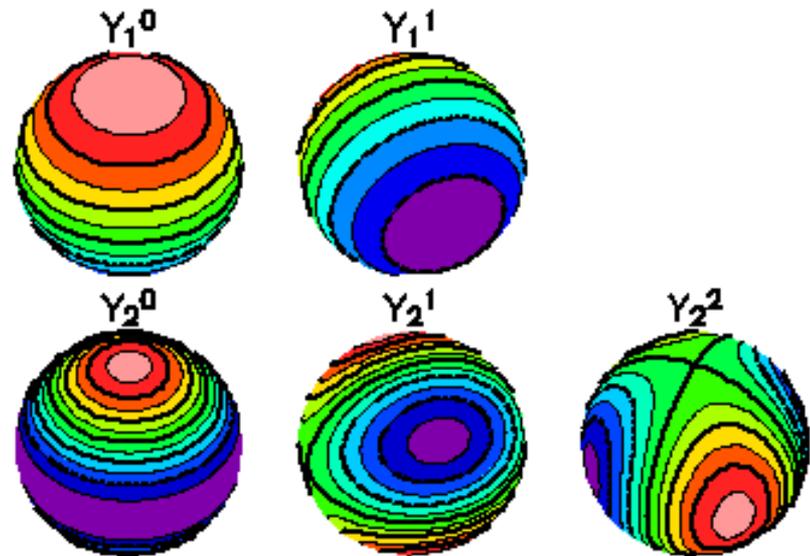
m : 東西波数, n : 全波数

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

知見の集積場としての 大気大循環モデル

基礎方程式(前回の復習)

力学過程: 流れの計算部分

運動方程式

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

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

外力

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

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

熱源

物理過程

水蒸気の式

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

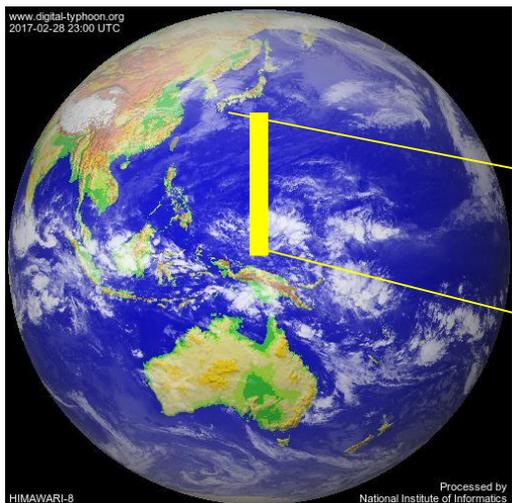
水蒸気ソース

物理過程
の表現が
問題!

状態方程式

$$p = \rho RT$$

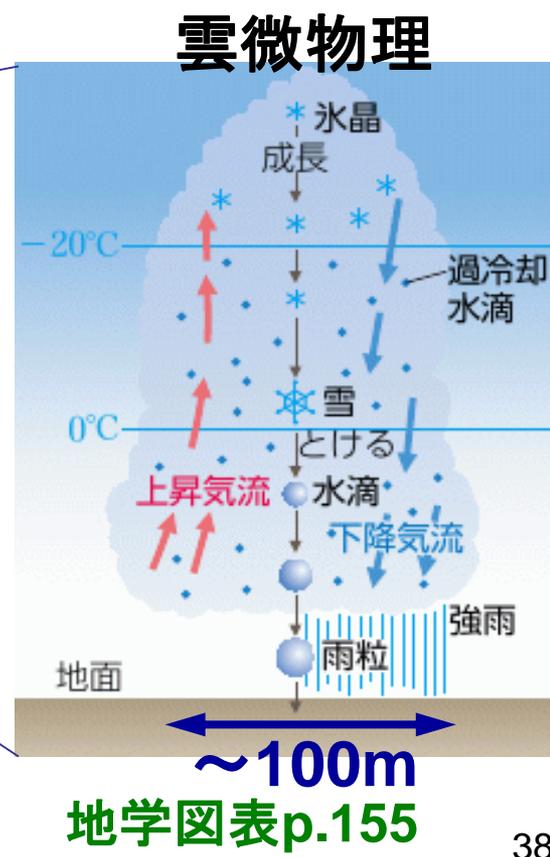
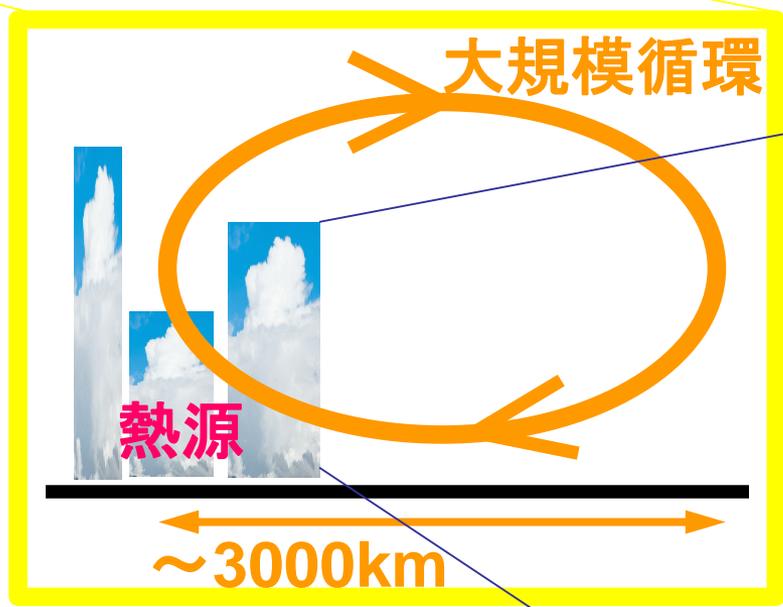
物理過程の例：雲過程



<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/>

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

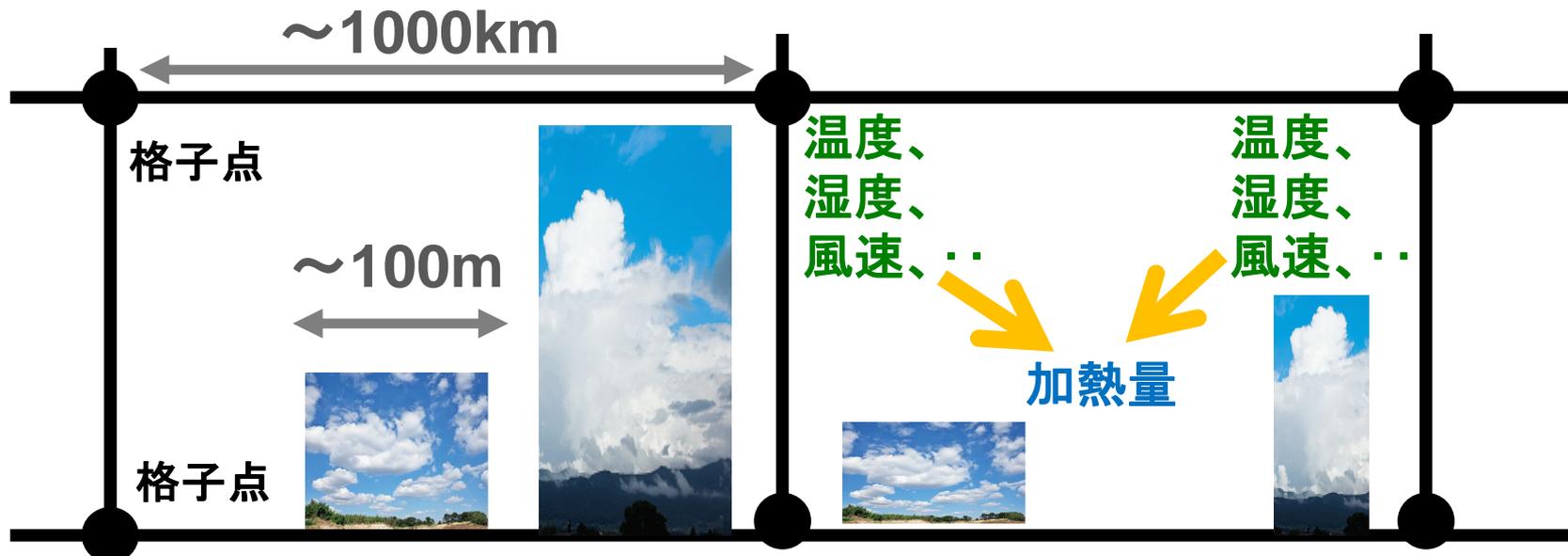
温度変化 熱源



- 非常に小さなスケールの雲過程が大規模循環に影響

物理過程を表現する方法

- 個々の雲のスケールは格子点間隔より小さい
 - 個々の雲は直接モデルで表現できない
- そこで格子点間隔より小さいスケールの現象の効果を格子点値のみで表現する
 - そのために、理論や観測結果を駆使する
 - この方法を**パラメタリゼーション**という



更にパラメタリゼーションについて

- 雲だけでなく、乱流、大気波動などに関するパラメタリゼーションも存在する
- パラメタリゼーションの方法には理論・観測結果などの知見が盛り込まれている
- 大気大循環モデルは「気象学の知見の集積場である」と言える
 - 数値モデルの開発改良は地球惑星科学の情報化を進める活動の1つ
- 用いる理論・観測結果によって複数の種類のパラメタリゼーションの方法が存在する

数値モデルに関する 問題提起

数値モデルに関する問題

- 最先端モデルはあまりにも複雑

 - モデル結果の理解が難しい

 - 多数の過程(パラメタリゼーション)が複雑に(非線形に)相互作用する

- モデルギャップ問題: Held (2005)

 - 複雑なAGCMと簡単モデルの間に大きな溝ができた



モデルギャップ問題への対応

- 各パラメタリゼーションを単純化あるいは取り外した様々な種類のモデルの整備・それらの結果の相互比較
- このような問題意識を持って開発されているモデルも存在
 - FMS (Flexible Modeling System): 米国の Geophysical Fluid Dynamics Laboratory において開発
- 日本でも同様の活動が存在
 - 「共通基盤ライブラリ」
 - 理研・気象庁を中心

まとめ

- **データの解析**
 - データ構造を良く把握することが必須
 - 目的・状況にあわせたツールを選択すべき
 - データ解析は結構大変。数値計算と同じくらいあるいはそれ以上の計算機資源・労力が必要
- **大気大循環モデルは気象学の知見の集積場**
 - その振る舞いを理解するための努力も必要
 - 1つの方向性は様々なモデルの相互比較・検討
 - そういうことに取り組む人材が登場することに期待

実技編では

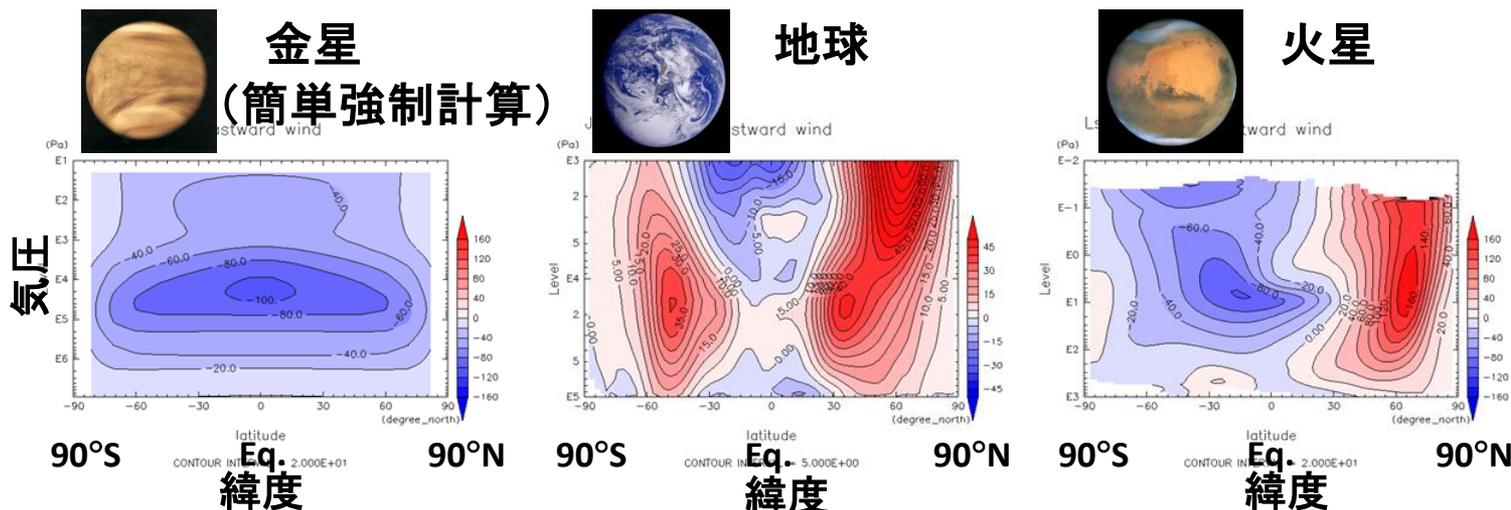
- データに触れる・確認する
 - netCDFファイルの中をしてみる
- **DCPAMのデータを使った解析・描画**
 - Rubyスクリプトを用いた描画

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、積分時間をのばす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



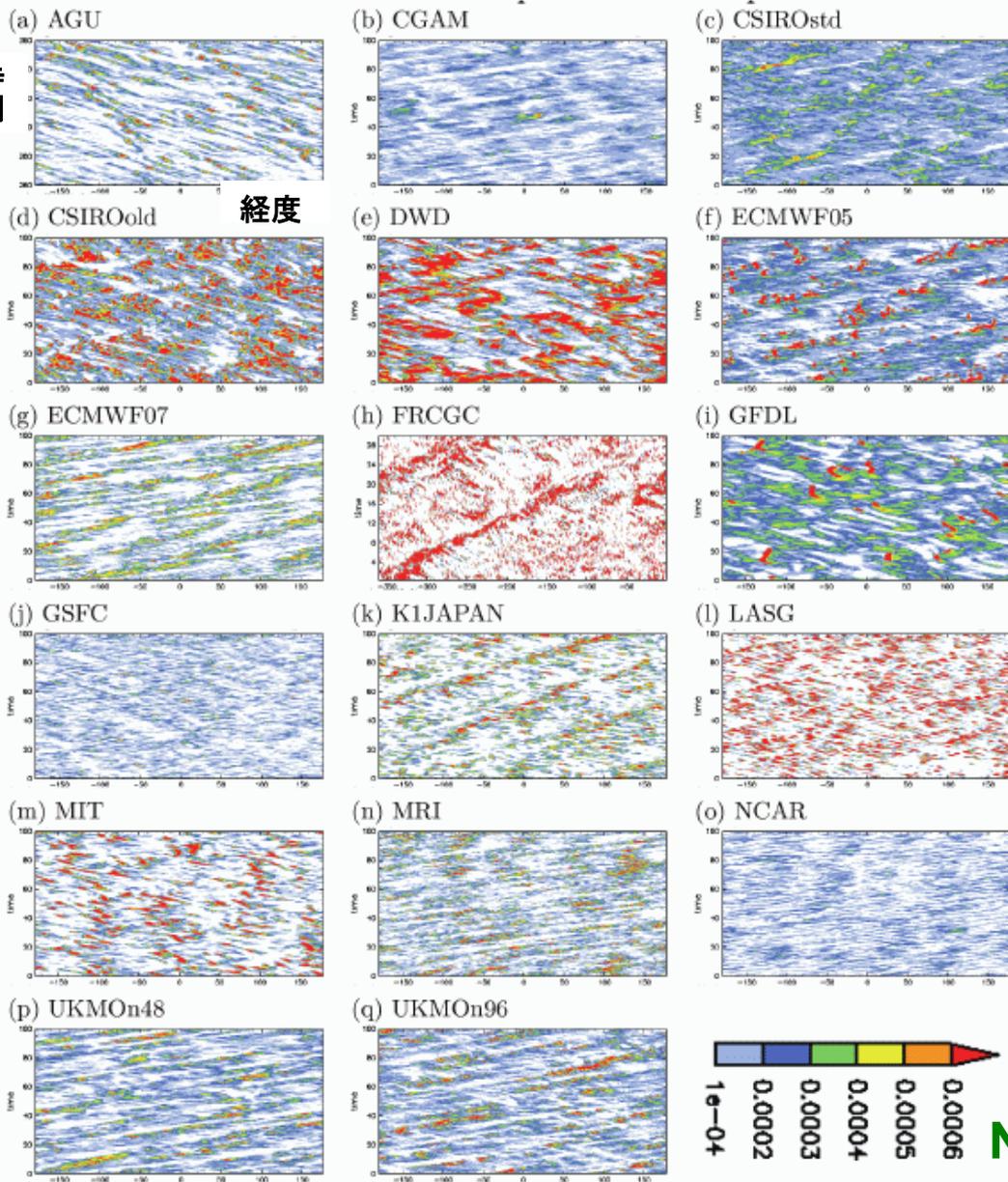
注意: 色の付け方と縦軸は図によって異なる。

参考書・参考文献

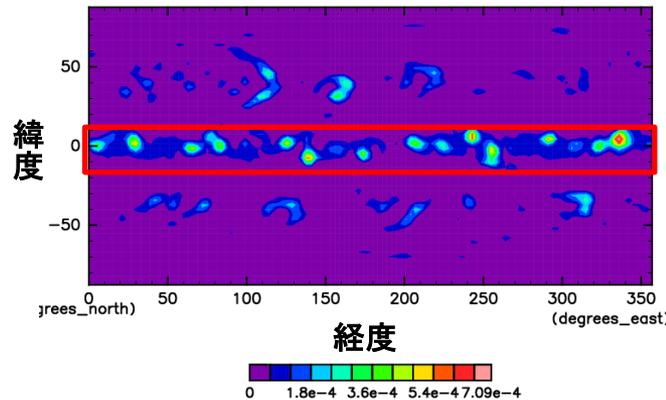
- Arakawa, A., Schubert, W. H., 1974: Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I. J. Atmos. Sci., 31, 674-701.
- Held, I. M., 2005: The gap between simulation and understanding in climate modeling. Bull. Amer. Meteor. Soc., 86, 1609-1614.
- Ikawa, M., Saito, K., 1991: Description of a nonhydrostatic model developed at the forecast research department of the MRI. Tech. Rep. Meteorol. Res. Inst., 28, pp. 238.
- Nakajima, K., Yamada, Y., Takahashi, Y.O., Ishiwatari, M., Ohfuchi, W., Hyashi, Y.-Y., 2013: The variety of spontaneously generated tropical precipitation patterns found in APE results. J. Meteorol. Soc. Japan, 91A, 91-141.
- Flanagan, D., まつもとゆきひろ著, ト部昌平監訳, 2009: プログラミング言語 Ruby, オライリー・ジャパン
- Yogui, 2008: はじめてのRuby, オライリー・ジャパン
- まつもとゆきひろ, 石塚圭樹, 1999: オブジェクト指向スクリプト言語 Ruby, アスキー出版局
- 浜島書店編集部, 2013: ニューステージ 新地学図表, 浜島書店

使われている知見に応じて結果が変わる

↑ 時間
Oday



- 表面全部海の場合
- 赤道上の降水の時間変化



Nakajima et al. (2013)