

地球流体電脳倶楽部 DCMODEL プロジェクトと数値モデルを用いた 惑星大気研究について

竹広 真一

京都大学数理解析研究所

2013 年 2 月 15 日

with 高橋 芳幸 (神戸大), 西澤 誠也 (理研), 林 祥介 (神戸大),
地球流体電脳倶楽部 (<http://www.gfd-dennou.org/>)

平成 24 年度 宇宙科学情報解析シンポジウム at JAXA 宇宙科学研究所

目次

- ① 数値モデルを用いた惑星大気研究
- ② 海外の例
- ③ 日本の現状
- ④ われわれ (地球流体電脳倶楽部) の現状
- ⑤ まとめ

数値モデルを用いた 惑星大気研究

数値モデルを用いた(惑星大気)研究

観測(惑星探査)と密接に関連

- 観測データの解釈
- 観測データを取り込んでモデルの改良, 精緻化
- 数値モデル出力のデータベース: 平均的描像の提供
- データの再解析, データ同化
 - ⇒ 観測の穴を埋めるデータを生成
- 観測計画への寄与
 - (例) 疑似観測データによる同化実験
 - ⇒ 探査計画におけるデータ同化による計画評価

シミュレーションモデルは, 観測と種々の基礎過程に関する知見の集大成

データ同化

観測データと数値モデルから、時間発展する系の状態を推定する方法

- 良くできたシミュレーションモデルは
 - 観測のない時空間領域における物理量
 - 観測できない物理量の情報を提供できる
- データ同化結果 $\Rightarrow$ モデルの検証, 現象の理解

データ同化

- 数値天気予報の初期値生成のために開発・発達
- 地球の気象海洋業界では基本的なデータセット
 - 長期 (～50 年) にわたる観測データの同化・再解析データの提供 ⇒ 気象・気候研究に利用
 - 地球の気象・海洋学において、数値モデルと観測データは不可分の道具
- 同化 (再解析) データセットの果たしている役割
 - 観測データの再利用/ 有効利用
 - 研究者人口の拡大 ⇒ 研究内容の進化
- 惑星大気研究：火星大気の同化データが公開
⇒ 地球と同様のデータセットを利用した研究が広がるだろう

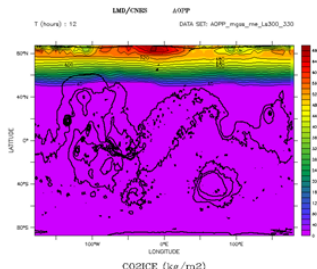
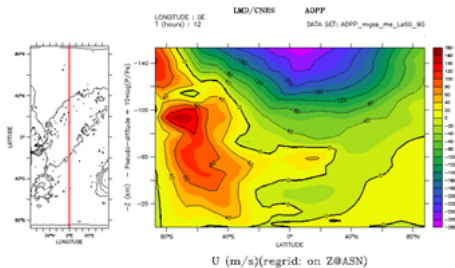
海外の例

Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) (France)
と Oxford Univ., Open Univ. (UK) のグループが協力し
て行ってきた事例

- 火星気候モデルデータベース
 - Mars Climate Database (MCD,
<http://www-mars.lmd.jussief.fr/>)
- 火星大気データ同化
 - Mars Analysis Correction Data Assimilation (MACDA)

Mars Climate Database

- 大気大循環モデルの計算結果をコンパイルしたもの
 - 様々な季節, 地方時, 緯度, 経度, 高度における物理量(風速, 温度, 密度, 物質の量など)のデータを集約
- オンラインで提供
 - <http://www-mars.lmd.jussieu.fr/>
- 提供されるデータ例 (Lewis et al., 1999)



火星大気データ同化

- 欧米の火星 (惑星) 大気探査の観測データを用いた同化実験
 - Oxford Univ. / Open Univ. (UK) / LMD (France)
 - Caltech (US)
 - Maryland Univ. (US)
- データ例 (Montabone et al., 2005)
 - 左: ダストストーム時のダスト量. 右: 平均子午面場

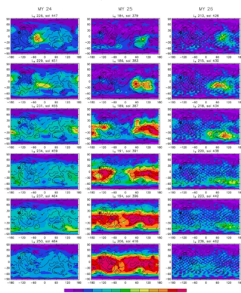


Fig. 3. Evolution of dust storms in MY 24, 25, and 26. All the composites show the latitude-longitude distribution of the dust total optical depth normalized to 100 Pa. Note the dramatic time scale of the growth of the regional storms between 00h and 06h. Panels top to bottom show the dust optical depth at 00, 06, 12, 18, 00, 06 UTC. The color scale is the same for all panels.

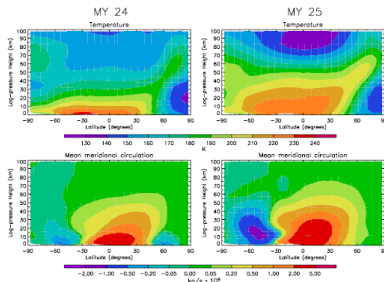


Fig. 7. Effects of the planet-encircling dust storm in MY 25 on the global circulation, in comparison with the previous Martian year. The plots show the temperature and mean meridional circulation averaged over 30° of areocentric longitude ($L_s=195-225$).

国内では...

国内の現状

- 個々がバラバラに研究
 - 解釈学がメイン
 - 好きな内容で小さな予算規模で研究
- データ同化, 探査へのフィードバックには届いていない
 - ちなみに電磁圏環境ミッションではシミュレーションと関連したプロジェクトがある?
 - GEMSIS 実証型ジオスペース環境モデリングシステム
<http://st4a.stelab.nagoya-u.ac.jp/gemsis/>
 - SCOPE (Scale COupling in Plasma Environment)
次期磁気圏探査ミッション, ミッションの一部にシミュレーションが位置付けられている?

われわれ (地球流体電脳倶楽部) の現状

地球流体電脳倶楽部とは

- 地球惑星科学研究に必要な計算機 (電脳) 資源の開発や収集 ⇒ 研究基盤の維持, 知識・技術の伝承
 - 描画 (DCL) やデータ解析ツールなど (Dennou-ruby)
 - データ収集 (衛星画像, 数値予報・再解析データなど)
 - 数値モデル (地球流体・惑星大気モデルなど)
 - 関連セミナー資料 (発表資料, ビデオなど)
 - その他メンバーが開発した電脳資源など
- 大学等の組織を越えた有志による (ボランティア的) 活動
 - 最初は気象海洋分野 (地球流体力学) の人々が立ち上げ
 - 一部の活動 (メンバー) は地球から惑星へシフト

地球流体電脳倶楽部

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

われわれ(地球流体電脳倶楽部)の現状

- モデルを開発・維持・管理するのはけっこう大変
- 正当性, 理解が大変(モデルギャップ問題)
⇒ 地球流体電脳倶楽部 DCMODEL プロジェクト

シミュレーションモデルの掌握は大変

- シミュレーションモデルは巨大化し複雑
 - 単純な流体計算 + 多くの物理素過程 (放射・乱流過程, 雲・降水などの構成物質の相変化などなど)
- ひとりで掌握するのは容易ではない
 - プログラムを理解することが難しい
 - モデルの正しさをチェックするのが難しい
 - 素過程モデルとの比較検討
 - 概念モデルを作るためのシステムの抽出

⇒ “モデルギャップ” 問題 (Held 2005)

dcmodel プロジェクト

- この“ギャップ”を埋めるために...
 - さまざまなレベルの複雑度のモデルを階層的に使い、結果を比較していくことが必要
 - 複数の数値実験を同時に円滑に行える計算環境が必要

dcmodel プロジェクト

さまざまな複雑度の階層的数値モデル群を開発・維持

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

dcmodel のモデルの特徴

- 様々な複雑度のモデル
 - 簡単なモデル (素過程モデル・概念モデル) から複雑なシミュレーションモデルまで
 - 現象の理解と複雑なモデルの正当性のチェックのため
- 共通の「型」を持ったモデル
 - ⇒ プログラムコードの可読性を上げる
 - 共通の書式・変数名規則・入出力ルーチン・データ書式
 - 複雑度の異なる多数のプログラムを用いた数値実験を同時に効率的に行うために重要
 - 一つプログラムを学習 ⇒ 他のプログラムの理解が加速
 - 複数のモデルの数値計算結果の後処理・可視化の共通化
 - モデルのユーザーにとっても可読性は重要
 - 元となる物理モデルとの比較確認

dcmodel のモデルの特徴

- 誰でも使える/改造できるモデルプログラム
 - ソースコードから全てインターネット上で公開
 - 他の研究者の結果を誰でも追試できることが重要
- 様々な規模の計算機で実行できるモデル
 - パソコンからスーパーコンピュータまで
 - 学生が学部・大学院教育で用いた教材を、そのまま最先端の研究として用いることができる
- 解説文書の整備されたモデル
 - チュートリアル文書・参考書・モデル解説書をモデル開発と共通の形式で整備
 - プログラムの維持管理にとっても解説文書は重要
 - 元の物理モデルの確認のため

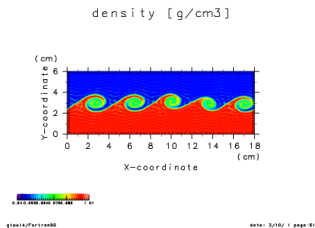
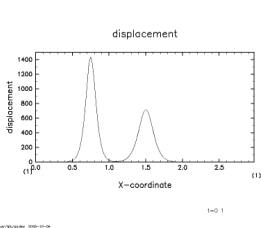
- **スペクトル法による地球流体プログラム集**
 - 比較的簡単な地球流体数値実験が容易に可能
 - 支配方程式から容易に想像できる表現をもったプログラムソースコードを構築
- **例：1次元 KdV 方程式**

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

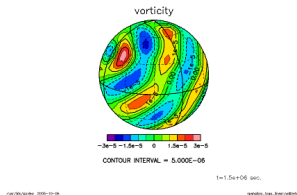
を spmodel 書法でプログラムをかくと

```
e_DZetaDt = -e_g(g_e(e_Zeta)*g_e(e_Dx_e(e_Zeta)))  
            -e_Dx_e(e_Dx_e(e_Dx_e(e_Zeta)))
```

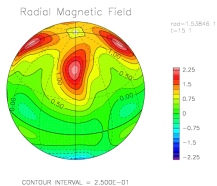
spmodel の出力例



KdV 方程式のソリトン解



Kelvin-Helmholtz 不安定



回転球面上のロスビー波伝播

回転球殻 MHD ダイナモモデル

- 地球を含めた惑星大気の応用を想定した, 非静力学雲解像モデル
 - 複数の大気構成分子の化学変化と相変化を導入, 惑星大気の雲をシミュレート
 - 2次元 3次元計算を容易に切り替え可能

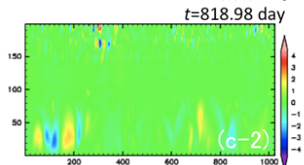
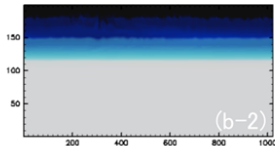
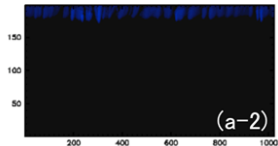
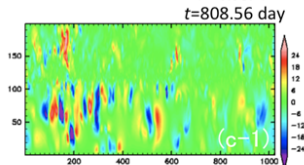
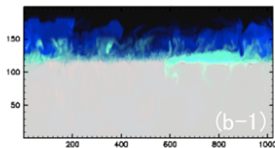
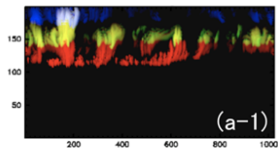
力学過程	準圧縮系 (Klemp and Wilhelmson, 1978) 水平 : 等間隔格子点 鉛直 : 不等間隔格子点
物理過程	
乱流過程	1.5 次のクロージャ (Klemp and Wilhelmson, 1978)
湿潤過程	複数凝結成分, 主成分凝結を考慮 Kessler (1969) のパラメタリゼーション 雲粒の拡散成長
放射過程	一様冷却/加熱 地球用放射モデル
地表面フラックス	バルク法 拡散

Table: 雲解像度モデル deepconv の主な仕様

deepconv の計算例

- 木星の雲対流

- 上段：活発期, 下段：静穏期

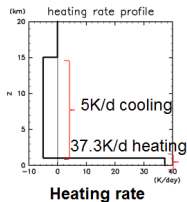
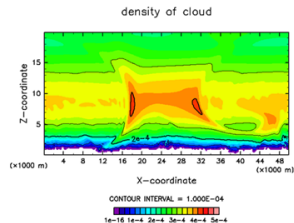
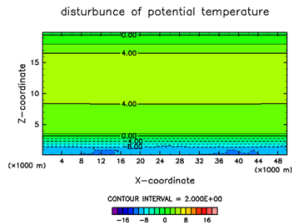
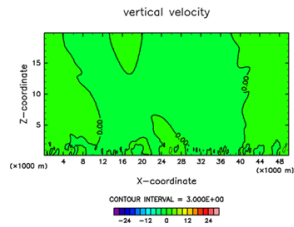
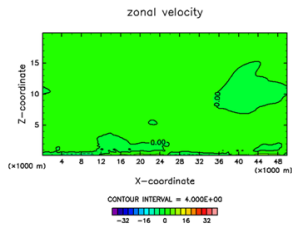


雲混合比

水蒸気混合比

鉛直速度

● 火星極域の雲対流



- 汎用惑星大気大循環モデル (GCM)
 - 地球・火星・(簡略化された) 金星の大気大循環を計算
 - 鉛直 1 次元計算と 2 次元軸対称計算も可能

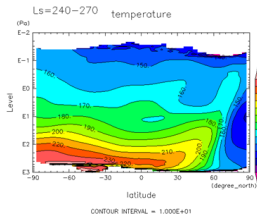
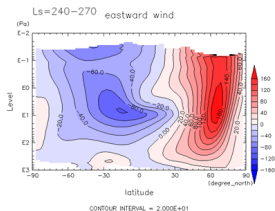
力学過程	プリミティブ方程式系 水平: スペクトル変換法 (ispack/spml 使用) 鉛直: Arakawa and Suarez (1983) の鉛直差分法
物理過程	
放射過程	地球大気放射モデル: CO ₂ , H ₂ O, O ₃ , 雲 (Chou et al, 1996) 火星大気放射モデル: CO ₂ , ダスト 灰色放射モデル
乱流混合	乱流: Mellor and Yamada (1974, 1982) 惑星表面フラックス: Louis (1982)
凝結過程	積雲対流: Relaxed Arakawa-Schubert (Moorthi and Suarez, 1992) 大規模凝結: Manabe et al. (1965) CO ₂ 凝結過程
陸面モデル	バケツモデル (Manabe, 1969) 土壌熱伝導モデル
雲モデル	簡単な予報方程式により雲水密度を予報 雲氷を無視 積雲対流と大規模凝結による生成, 定数寿命による消失, 乱流混合を考慮, サブグリッドスケールの部分雲は考慮しない (雲量 1)

Table: 汎用惑星大気大循環モデル (GCM) dcpam の主な仕様

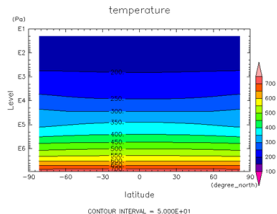
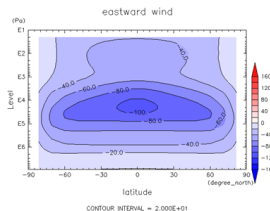
dc pam の計算例

- 各地球型惑星大気の大循環計算例
 - (上段:東西風, 下段:温度)

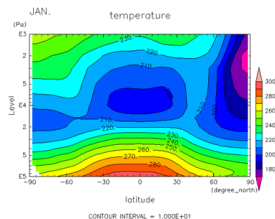
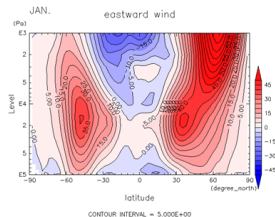
火星



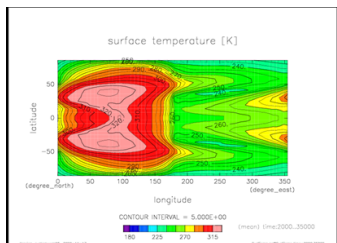
金星



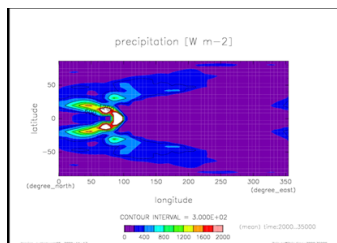
地球



● 同期回転惑星の大気大循環計算例



表面温度



降水量

まとめ

まとめ

- 惑星探査するにはシミュレーションモデルが必須
- 数値モデルの開発維持運用の中核となるグループが必要
 - 片手間では届かない.
- 惑星探査観測と密に関連させて運用
 - 既存の地球環境科学 (天気予報, 気候予測) とは独立した組織と予算で
 - 惑星 (大気) 科学のためのシミュレーション/データ解析のソフトウェアチームによる業界へのサービス
- 今後大気だけでなくあらゆるセクターでモデルが必要となるだろう

参考文献

- Lewis, S. R., Collins, M., Read, P. L., Forget, F., Hourdin, F., Fournier, R., Hourdin, C., Talagrand, O. Huot, J.-P., 1999 : A climate database for Mars. *J. Geophys. Res.*, **104**, 24177–24194.
- Montabone, L., Lewis, S. R., Read, P. L., 2005: Interannual variability of Martian dust storms in assimilation of several years of Mars global surveyor observations. *Advances in Space Research*, **36**, 2146–2155.
- Held, I.M., 2005: The gap between simulation and understanding in climate modeling. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **86**, 1609–1614.