

地球流体電脳倶楽部 dcmode! プロジェクトについて

竹広 真一

京都大学数理解析研究所

2012 年 12 月 12 日

with 高橋 芳幸 (神戸大), 杉山 耕一朗 (北大), 小高 正嗣 (北大), 石渡 正樹 (北大), 佐々木 洋平 (京大), 西澤 誠也 (理研), 石岡 圭一 (京大), 中島 健介 (九大), 林 祥介 (神戸大), 地球流体電脳倶楽部 (<http://www.gfd-dennou.org/>)

地球流体データ解析・数値計算ワークショップ at 名古屋大学

はじめに

- シミュレーションモデルは巨大化し複雑になってしまった
 - 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)

はじめに

- 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

dcmodel の構成要素

入出力ライブラリ

- gtool5

スペクトル変換ライブラリ

- ISPACK/spml

さまざまなモデル

- spmodel
- deepconv
- dcpam

文書開発ツール

- rdoc-f95

- 入出力と各種のユーティリティーを提供する
Fortran90 ライブラリ
 - データフォーマット : NetCDF
 - gtool4 netCDF Convention を策定 ← 地球流体科学用に考慮
 - ソフトウェアやデータ対象の規模によらずプログラム上での出力処理を同じ形式で簡略に実装可能
 - データ出力手続き
 - 可視化等の後処理のための情報付加 (メタデータ) の手続き
- ⇒ ソフトウェアの可読性が向上
- 複数のソフトウェアによる同時数値実験や解析が容易
 - 結果の比較検討の効率化

スペクトルモデルのためのスペクトル変換ライブラリ

- ISPACK : Fortran77 ライブラリ
 - (おそらく) 世界最速の FFT 変換ルーチンを含む
- spml : ISPACK の Fortran90 ラッパーライブラリ
 - 独特の命名法に基づいた関数と書法
 - ← 配列関数を独自に定義できる Fortran90 の特徴
 - 接頭子と接尾子 : テンソル計算での添字の縮約規則
 - `g_e(e_Data)` ! スペクトルから格子点への変換
 - `e_g(g_Data)` ! 格子点からスペクトルへの変換
 - `e_Dx_e(e_Data)` ! x 微分 (波数をかける)
 - `g_Data2 = g_e(e_Dx_e(e_g(g_Data1)))`
 - 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することができる

spml モジュール例

module 名	geometry	展開関数系
ae module	1 次元周期領域	FFT
at module	1 次元有限領域	Chebyshev
l module	1 次元有限領域	Legendre
aq module	1 次元有限領域	Matsushima Marcus 多項式
ee module	2 次元 2 重周期領域	FFT
esc module	2 次元チャンネル領域	FFT + sin, cos 展開
et module	2 次元チャンネル領域	FFT + Chebyshev
eq module	2 次元円盤領域	FFT + Matsushima Marcus 多項式
w module	2 次元球面領域	球面調和函数
wa module	2 次元球面領域多層版	球面調和函数
wt module	3 次元球殻領域	球面調和函数 + Chebyshev
wq module	3 次元球領域	球面調和函数 + Matsushima Marcus 多項式
wtq module	3 次元球及び球殻領域	球面調和函数 + Chebyshev + Matsushima Marcus 多項式

Table: spml のモジュールと geometry 一覧

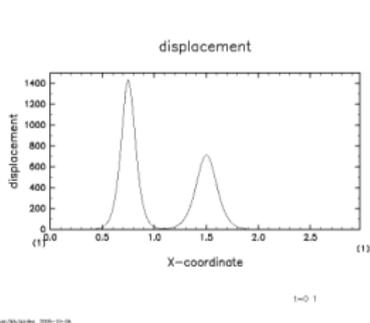
- spml を用いたサンプルプログラム集
 - 比較的簡単な地球流体数値実験が容易に可能
 - spml の書法に従う \Leftarrow 支配方程式から容易に想像できる表現をもったプログラムソースコードを構築
- 例：1次元 KdV 方程式

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

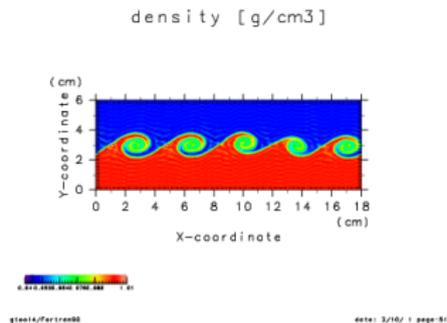
を spmodel 書法でプログラムをかくと

```
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)))
```

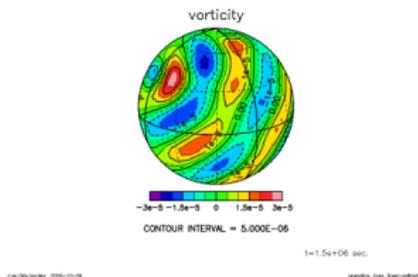
spmodel の出力例



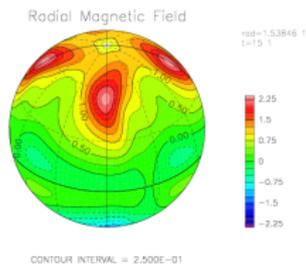
KdV 方程式のソリトン解



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

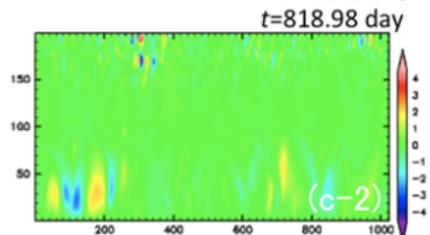
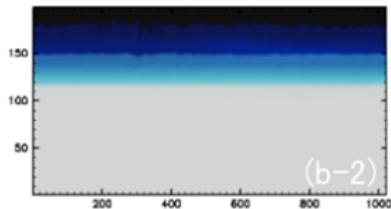
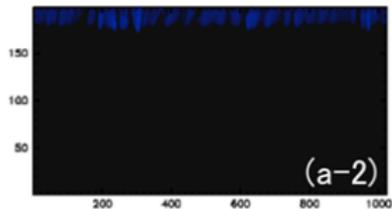
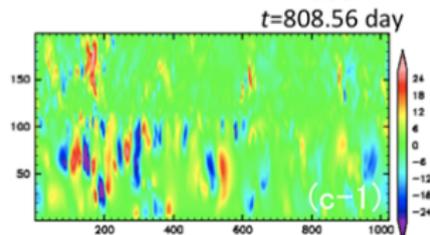
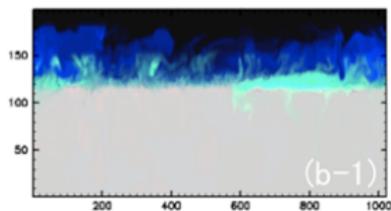
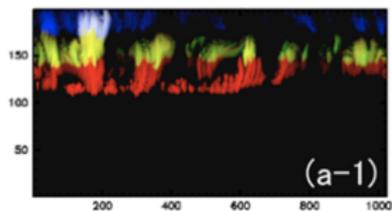
力学過程	準圧縮系 (Klemp and Wilhelmson, 1978) 水平: 等間隔格子点 鉛直: 不等間隔格子点
物理過程	
乱流過程	1.5 次のクロージャ (Klemp and Wilhelmson, 1978)
湿潤過程	複数凝結成分, 主成分凝結を考慮 Kessler (1969) のパラメタリゼーション 雲粒の拡散成長
放射過程	一様冷却/加熱 地球用放射モデル
地表面フラックス	バルク法 拡散

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



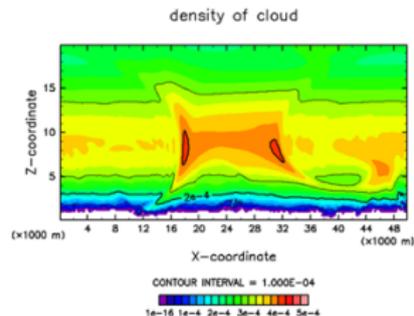
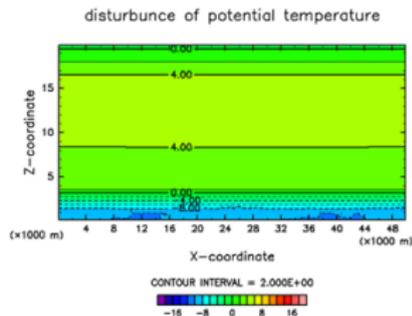
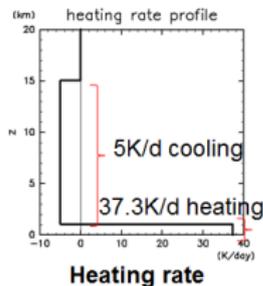
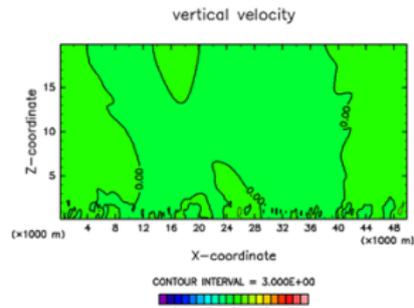
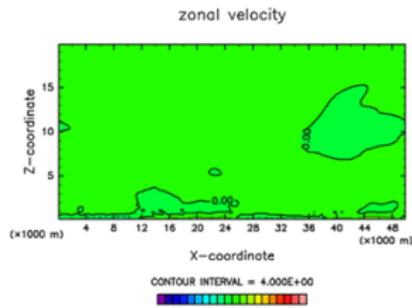
雲混合比

水蒸気混合比

鉛直速度

deepconv の計算例

● 火星極域の雲対流



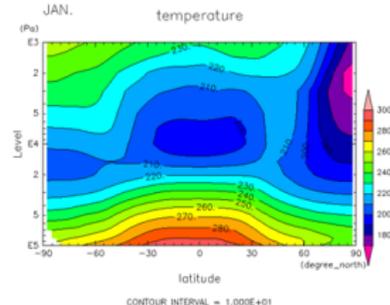
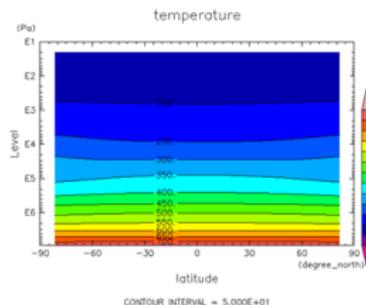
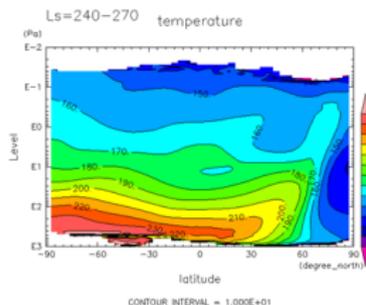
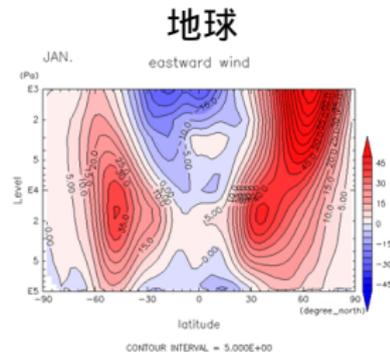
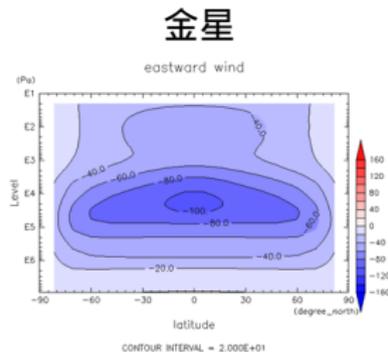
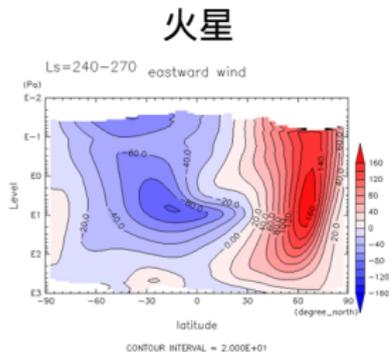
- 汎用惑星大気大循環モデル (GCM)
 - 地球・火星・(簡略化された)金星の大気大循環を計算
 - 鉛直 1 次元計算と 2 次元軸対称計算も可能

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)

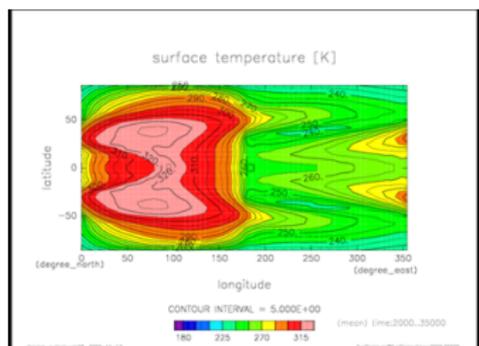
Table: 汎用惑星大気大循環モデル (GCM) dcpam の主な仕様

dcpam の計算例

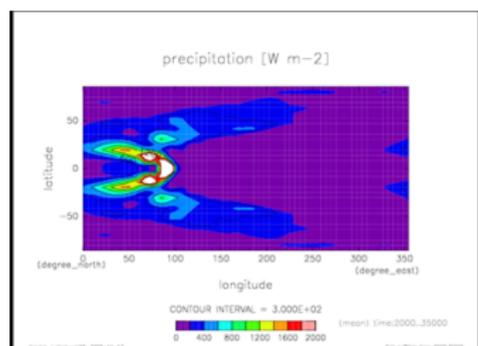
- 各地球型惑星大気の大循環計算例
 - (上段:東西風, 下段:温度)



- 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

- dcmode1 プロジェクト
 - 複雑モデルから簡単モデルまで階層的に整備
- 共通の「型」を持った簡単なモデル（素過程モデル・概念モデル）と複雑なモデルの相互運用
 - ← 現象の理解を深めるための数値実験を容易に行うことができる
- モデルの「巨大化」を乗り越えるための試み
 - 巨大化したソースコード自体がモデル利用者にとって「情報爆発」
 - 階層モデル群の構築と運用で対応できるか？

dcmode1 プロジェクトホームページ

<http://www.gfd-dennou.org/library/dcmode1/>