湿潤惑星大気用数値モデル群の開発および基礎的実験

林祥介(神大理)、中島健介(九大理)、石渡正樹(北大理)
小高正嗣(北大理)、高橋芳幸(神大理)、森川靖大(北大理)

平成20年度スーパーコンピュータ利用研究報告会
2008年11月28日

昨年度まで

- 研究背景：湿潤過程を含む系の収束問題
  - 分解能をあげれば「解」は得られるのか？
    - 輸送表現問題、乱流表現問題、積雲パラメタリゼーション問題
  - モデルの振る舞いに対する一致した見解は得られるか
    - モデルの実装に応じた理解（現実との違い方の理解）
  - そもそもモデルがとりえる多様性が掌握されていない
- 水惑星実験(APE)
  - 簡単な境界条件（地表面が全部海洋）での大気モデルの振る舞いを観察して知見を得る
  - 具体的な問題としては、多様な降水構造の発生と維持のメカニズムの記述
- 同時に，パラメタ研究に都合のよい大循環モデルの開発（DCPAM:地球型惑星大気モデル）

赤道域の降水階層構造

観測: **OLR**の経度-時間図 (Nakazawa, 1988)

水惑星実験:降水の経度-時間図 (Hayashi and Sumi, 1986) T42L12

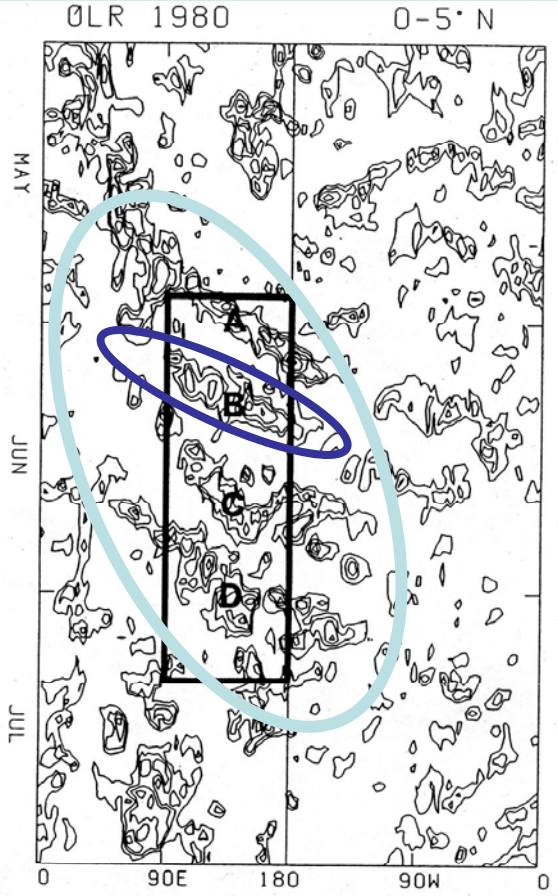
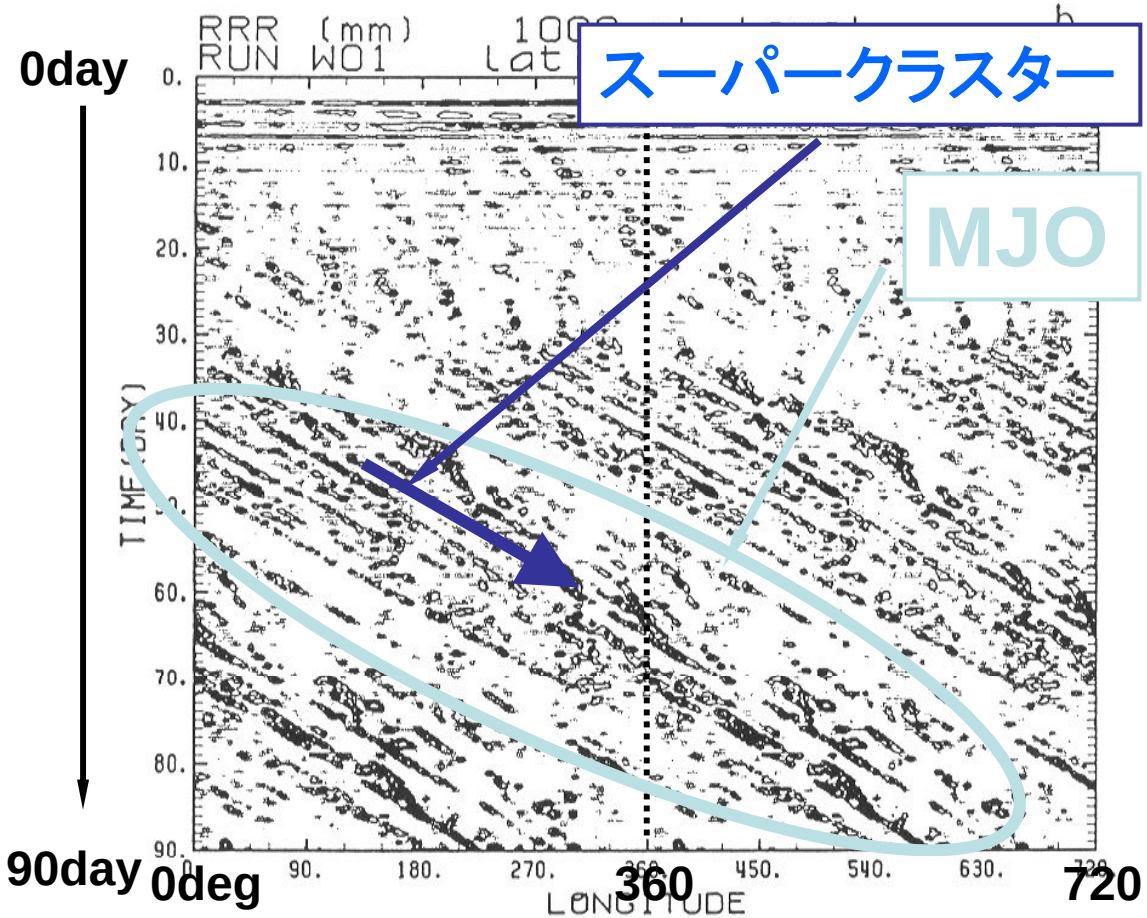


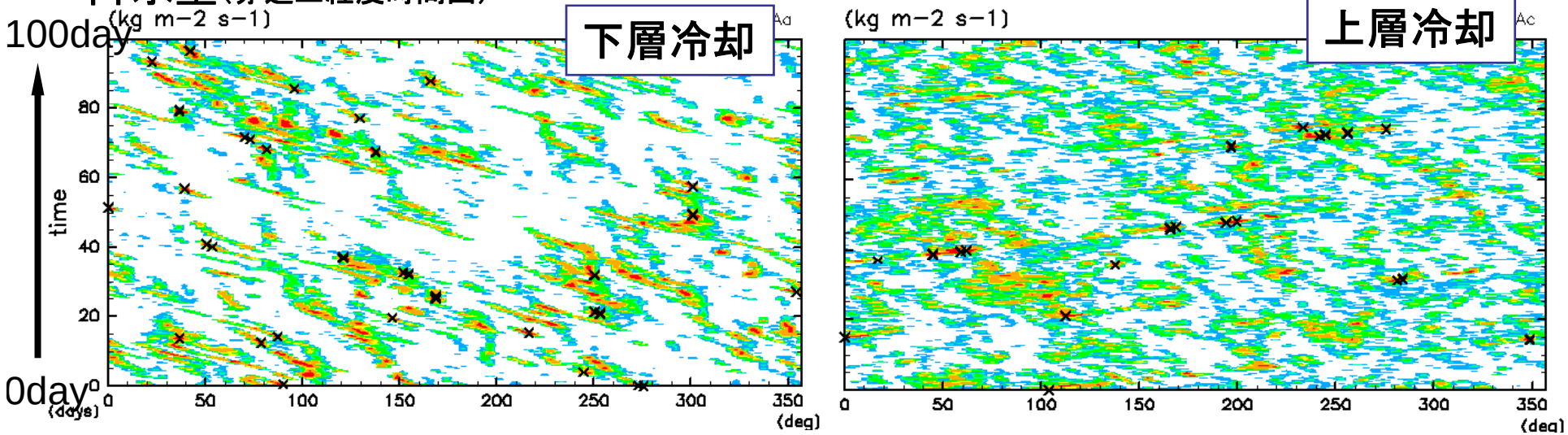
Fig. 1. Time-longitude section of transient (seasonal trend removed) OLR averaged between the equator and 5°N from May to July in 1980. Negative (active convective) regions are contoured. Contour interval decrements of 30 Wm^{-2} starting at -15 Wm^{-2}. Symbols A to D indicate super clusters.



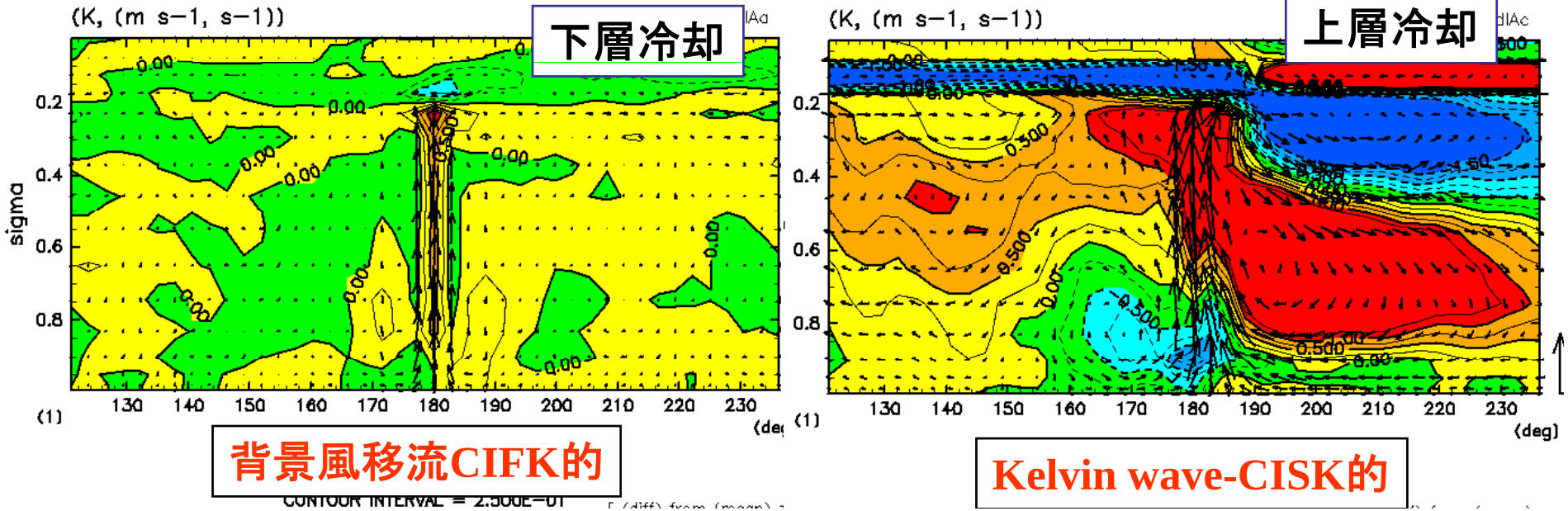
放射冷却率依存性実験

林他 (2006)

降水量(赤道上経度時間図)

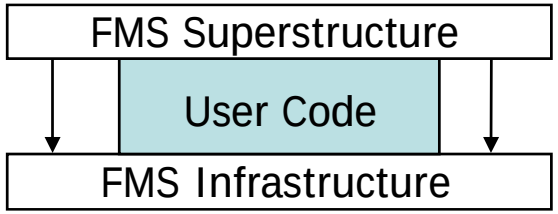


温度場、風速場の合成図(赤道上経度高度図、東西平均偏差)



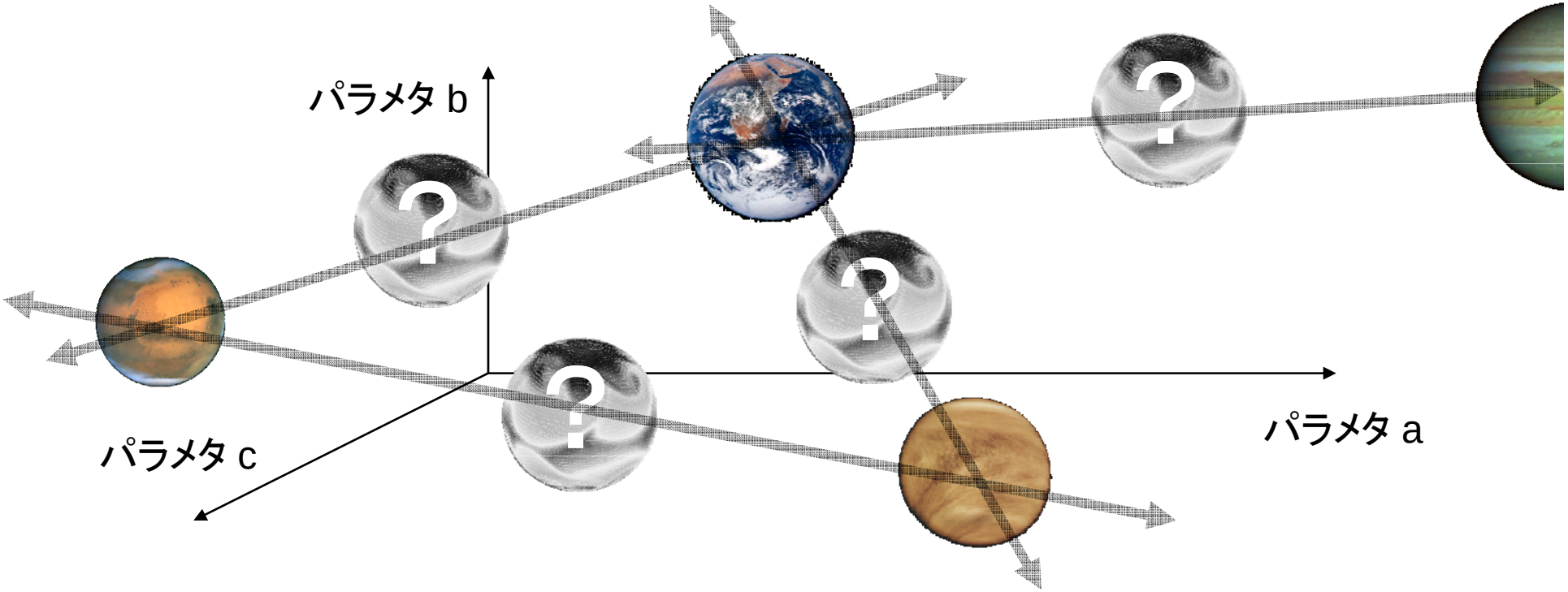
今年度は

- ２課題を統合
  - GCMを用いた水惑星実験（代表：林）
  - 非静力学モデルを用いた積雲対流実験（代表：中島）
- それぞれのモデルを中心にモデル群として開発・整備
  - 書式を統合・物理過程の着脱共有
- 大規模複雑モデルと簡単な理論のギャップを埋める
  - 同様の思想に基づくモデルとしてはFMS (I. Held, V. Balaji, *et al.*, 2002)がある
    - 米国・地球流体力学研究所で開発された気候モデル統合フレームワーク
    - 並列化、データ入出力などを吸収するソフトウェア基盤を整備
    - モジュールや構造型を活用した設計
- 並行して、基礎的実験の続行



多様な湿潤大気を想定した パラメータスタディ

- 惑星大気の普遍性と特殊性の掌握をめざして
  - 大気構造の多様性をパラメタ空間に位置づける
    - パラメタ: 惑星半径、日射放射量、軌道要素、大気成分、大気量など



中心となる2つの数値モデル

- 大気大循環モデルDCPAM
  (Dennou Club Planetary Atmospheric Model)
- AGCM5 (沼口 他, 1992) を参考に実装
- 支配方程式、離散化手法
  - 球面3次元プリミティブ方程式
  - 大気成分: 水蒸気と乾燥空気
  - 放射: バンドモデル
  - 積雲パラメタリゼーション: 湿潤対流調節 (Manabe et al., 1965)
  - 鉛直拡散: Mellor and Yamada (1974)
  - 地表面フラックス: バルク法
  - 水平離散化: スペクトル法
  - 鉛直離散化: Arakawa and Suarez (1983)
  - 時間積分法: セミインプリシット法

- 非静力学モデル deepconv/arare
- 中島 他 (1998) を参考に実装
- 支配方程式、離散化手法
  - 平面2次元・3次元準圧縮方程式系
  - 大気成分: 複数の凝結成分と乾燥空気
  - 乱流混合: 1.5 次のクロージャモデル
  - 地面からの熱と運動量のフラックス: バルク法
  - 大気放射: 水平一様な冷却として表現
  - 空間離散化: 交互格子の中心差分
    - 移流項は 4 次精度, その他は 2 次精度
  - 時間積分法: リープフロッグ法と HE-VI 法

本年度の研究内容

- データ入出力インターフェースの検討
  - 簡単モデル～大規模モデルへの適用
- オブジェクト指向設計についての検討
  - モジュールや構造型の活用
- 大気大循環モデル DCPAM、非静力学モデル deepconv/arareの再構成・実装実験を兼ねた基礎的実験

データ入出力インターフェースの検討

- これまでに開発してきたGt4f90io ライブラリ(森川他, 2007)の再検討・改良

- 共通の入出力インターフェース
  - 一つが読めれば、他も読める
- 相互参照に必要なメタデータの付与
  - メタデータ: 物理量の名称, 単位, 座標, …
- 様々な座標を持つデータ入出力が可能
  - 格子点データ、スペクトルデータ、etc...
- 簡潔な入出力インターフェース
  - NAMELIST を用いた入出力設定コードの隠蔽、出力変数の手軽な追加・削除

ソースコードの簡潔さを重視したインターフェース

小規模モデル用

- HistoryCreate
  - 初期設定: 座標設定、…
- HistoryAddVariable
  - 変数定義: 依存する座標、…
    物理量の名称、…
- HistoryPut
  - 変数出力: 出力値 …
- HistoryClose
  - 終了処理

大規模モデル用

- HistoryAutoCreate
  - 初期設定: 全てのファイルの座標設定、…
- HistoryAutoAddVariable
  - 変数定義: 依存する座標、…
    物理量の名称、…
- HistoryAutoPut
  - 変数出力: 出力値 …
- HistoryAutoClose
  - 終了処理

NAMELIST

```
&gtool_historyauto
  Name      = "Ps"
  IntValue = 10.0
  IntUnit  = "hrs" /
```

入出力ライブラリで
時間間隔等の設定

HistoryXXXX(A, B, C, ...) ⟷ **HistoryAutoXXXX(A, B, C, ...)**

サブルーチンの名称と
引数を対応付けて
共通性を維持

- 出力ファイル一つ追加に
  4つのサブルーチン
- モデル側での出力時間等の
  設定

- 変数定義、変数出力の2 つでの
  出力ファイル追加
- 入出力ライブラリ側での出力時間等の設定
  - NAMELIST 読み込み
  - 出力時間間隔、精度、出力先ファイル名、時間・空間
    方向の平均出力・切り出し出力、出力開始・終了時間、
    時間方向のファイル分割

データ入出力まとめ

- サブルーチンを介した座標設定
- メタデータは変数設定サブルーチンで明示的に指定
  - **物理量の名称, 単位, 座標, etc...**
- 4つの最低限サブルーチン (初期設定、変数設定、出力、終了処理)
- 2階層の入出力インターフェース
  - モデル側で出力設定 ⇔ 入出力ライブラリ側で出力設定
  - サブルーチンの名称と引数を対応付けることで共通性を維持

- Gtool5 ライブラリとして実装・公開
  - http://www.gfd-dennou.org/library/gtool

オブジェクト指向設計についての検討

- Fortran90/95機能の活用
  - モジュールの活用 (室井 他, 2002: 標準コーディングルール. 天気)
    - サブルーチン、変数、定数のパッケージ管理
    - USE 文を用いた個別的参照
  - 構造型、利用者定義総称名称の活用
    - Akin (2003)『Object-Oriented Programming Via Fortran 90/95』
      - Fortran 90/95 によるオブジェクト指向的プログラミング
      - 手続き (サブルーチン・関数) とデータ (変数・定数)を一体に
- モデル群への適用可能性の検証
  - 演算プログラムとパラメータの一体管理

オブジェクト指向設計についての検討結果

- プログラムのレベルに応じた設計が必要
  - 問題は「どこでレベルを切り分けるのが良いのか？」
- 入出力などのための汎用ライブラリ
  - 構造型、ポインタ、利用者定義総称名称の利用により汎用性を向上
  - 例: Gtool4, Gtool5
- 演算プログラム
  - モジュールによるサブルーチンや変数のパッケージ管理、USE 文による言語要素の参照は活用
    - USE 文の仮称指定によるパラメタの名称衝突の回避
  - 構造型変数の使用と初期設定手続へ多数の引数渡しはソースコードの可読性を低下

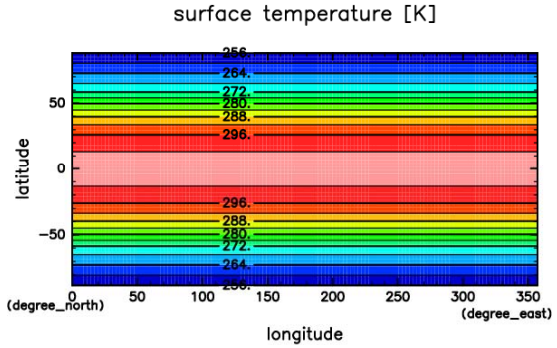
大気大循環モデル・非静力学モデルの実装・再構成

- 大循環モデルdcpam
  - Gtool5を基盤として、プログラム構造に関する検討結果をもとに再構成
  - dcpam5 として実装・公開
    - http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam
  - 今後は
    - パフォーマンスチェック
    - 並列コードの隠蔽方法に関する検討
    - 熱帯降水構造の物理過程依存性の調査
    - 多様な湿潤大気を想定したパラメータスタディ
- 非静力学モデルdeepconv/arare
  - Gtool5を利用する形へ再構成中

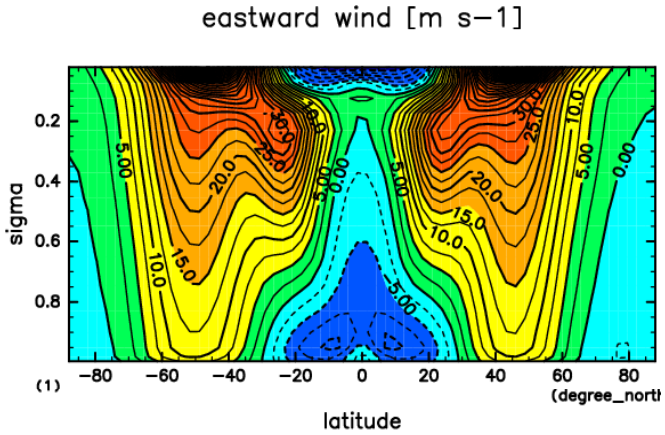
水惑星実験

- 水惑星実験

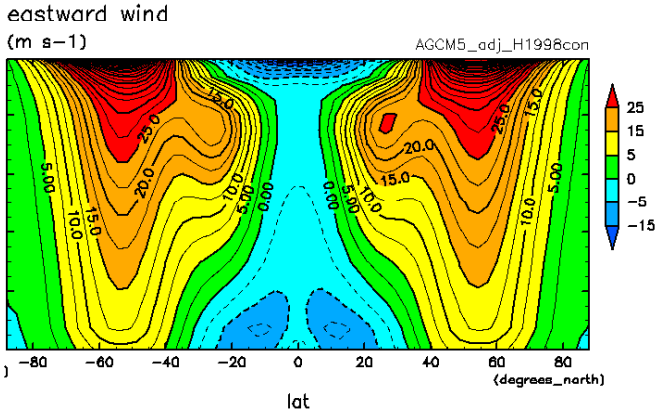
SST分布
Hosaka et al. (1998)

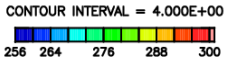


dcpam5

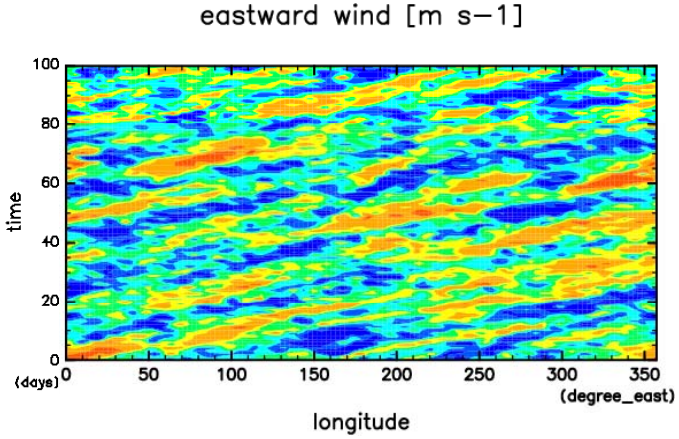


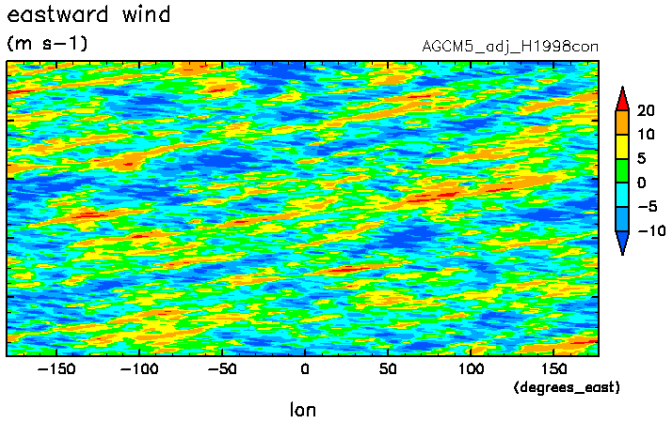
agcm5





東西風速
(1000 日平均
東西平均)





東西風速
(緯度=0°
P≒250 hPa)

多様な湿潤大気を想定した パラメータスタディに向けて

- 同期回転惑星
  - 多くの太陽系外惑星は同期回転
  - 地球とは異なる気候状態の1例
    - 循環構造、熱構造、エネルギー輸送

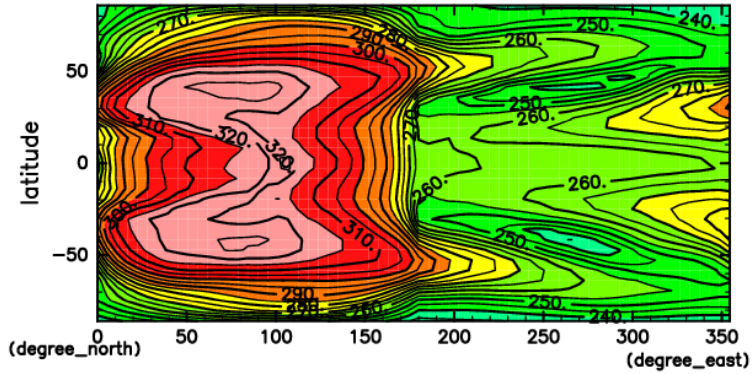
- これまでの研究例
  - 乾燥大気：Joshi et al(1987)
  - 湿潤大気：石渡他（2007)
- 今後パラメータ依存性の調査（自転角速度変更実験など）を継続する予定

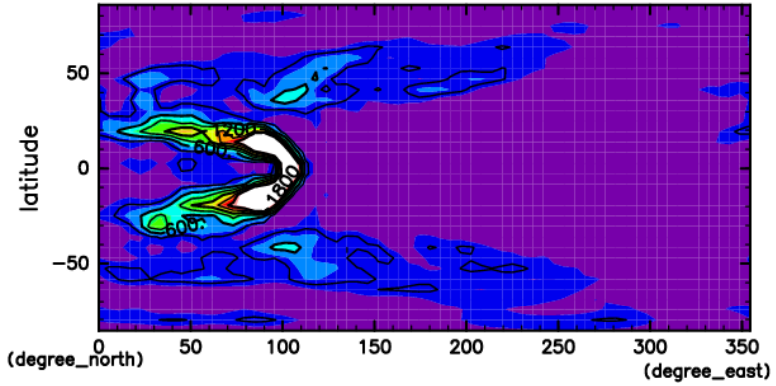
同期回転惑星実験

- Dcpam5による実験結果

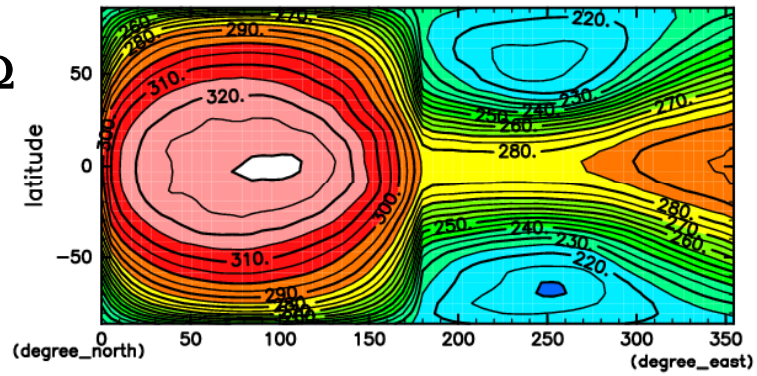
地表面温度　　降水分布

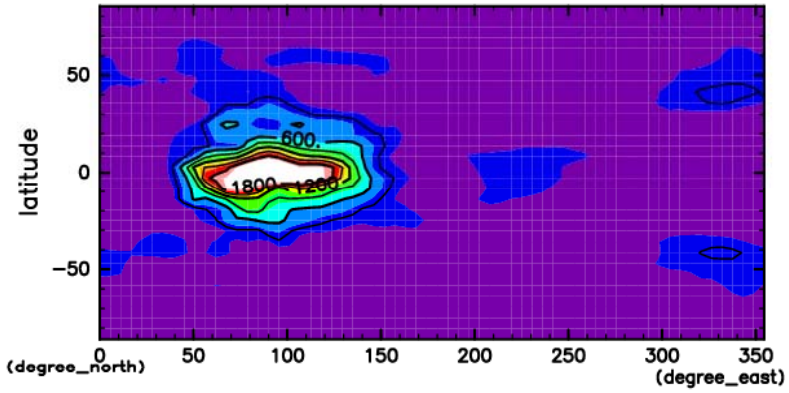
1Ω

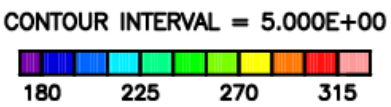


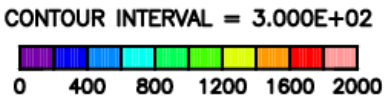


0.25Ω









今後の展開

- 並列化コードに関する書法・隠蔽方法の検討
- パフォーマンス向上のための方策の検討
- 階層的なモデル群の整備（鉛直１次元モデル、軸対称モデル、・・）

- 基礎的実験の続行
  - 水惑星実験
  - 多様な湿潤大気を想定したパラメータスタディ