

# 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)  
高橋芳幸(神大理)、小高正嗣(北大理)、  
納多哲史(神大理)、山下達也(北大理)

地球流体電脳倶楽部

[dcmodel@gfd-dennou.org](mailto:dcmodel@gfd-dennou.org)

2010年11月09日 国立環境研究所

平成22年度スーパーコンピュータ利用研究報告会

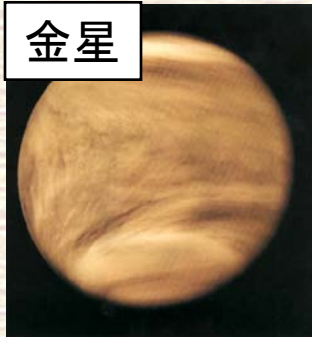


# 背景：多様な湿潤大気を想定したパラメタ研究

## ■ 地球環境(大気構造)の普遍性と特殊性の理解

- 惑星半径、日射放射量、軌道要素、大気量、...などの外的パラメタが異なる世界を仮想的に実現、その多様性を探査
- パラメタ空間へ位置づける＝多様性をもたらす構造の探究

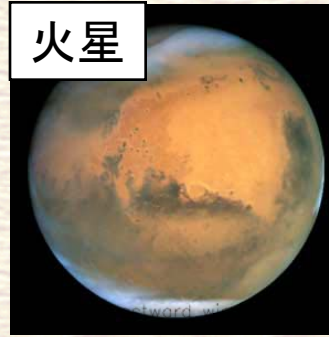
金星



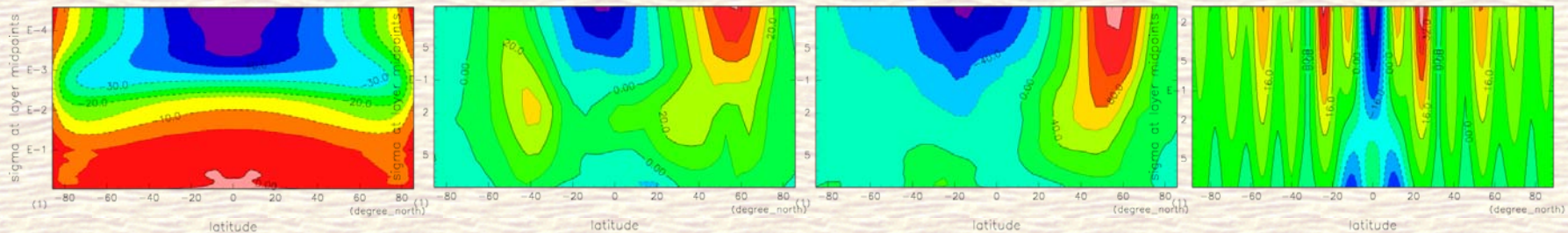
地球



火星



木星



ごく簡単な設定の下で、DCPAMによりパソコンで得られた東西風(緯度高度断面)。  
解像度は左からT21L52, T21L16, T21L16, T85L30。

注：採用した金星設定では超回転は半分ぐらい、木星的設定では赤道西風が得られていない



# 多様な湿潤大気計算に適した数値モデル整備開発

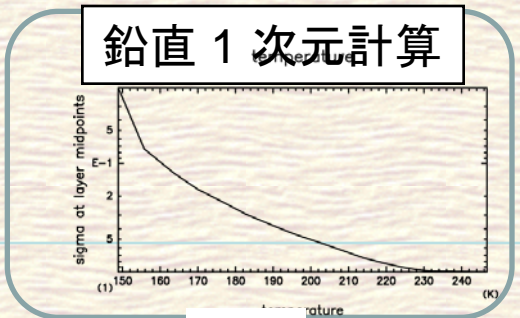
## ■ 数値的な仮想世界の探査

- 地球で得られてきた常識(モデルパラメータ等)の再検討
- 数値モデル(計算可能性)の限界の認識

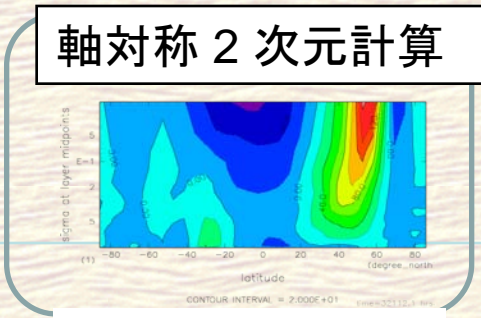
## ■ 仮想探査に必要なツール=階層的モデル群

- 解の構造的理解を得る(観測ができない世界での計算結果の正当性を担保する一方法)
  - ◆ 複雑モデルから簡単概念モデルに至る複数の階層をカバー
    - ▶ 物理過程の様々な複雑さ・力学過程の様々な複雑さ
    - ▶ 対象階層の異なるモデルを用いての相互比較、地球大気に対する大気科学的考察の再トレース

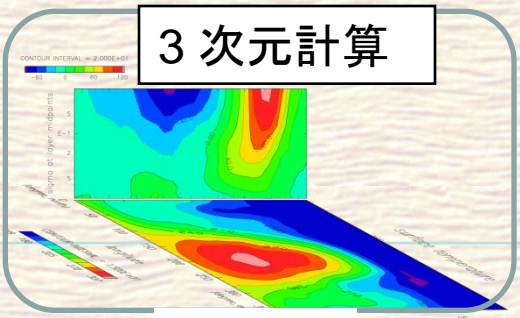
簡単火星設定  
を用いたdcpam  
による計算結果



L16



T21L16(imax=1)



T21L16

# 階層的モデル群

- 地球流体電脳倶楽部dcmode1 プロジェクト
  - <http://www.gfd-dennou.org/library/dcmode1/>
- 仮想探査のためのポータブルなツールとしてのモデル
  - 各階層の自由な行き来
    - ◆ 物理過程や力学過程の変更を容易にするためのプログラムの試み
  - 多様な惑星(外的パラメタ設定)への適用可能性
    - ◆ 柔軟なパラメタ設定を可能とするためのプログラムの試み
  - モデル群全体で統一されたコードスタイル
    - ◆ 共通のプログラミングスタイル: dcmode1 プログラミングガイドライン (<http://www.gfd-dennou.org/library/dcmode1/coding-rules.hm>)
    - ◆ 共通の数値計算インフラストラクチャー(I/Oルーチン等): gtool (<http://www.gfd-dennou.org/library/gtool/>)
    - ◆ 共通のドキュメンテーションシステム: rdoc F90/95強化版 (<http://www.gfd-dennou.org/library/dcmode1/rdoc-f95/>)

# 階層的モデル群の現段階での中心モデル

- スケーラブル・ポータブルで(大領域・高分解能)長時間積分が可能であること
- 方程式系は、伝統的な普通の“地球用” x2
- 静水圧全球大循環モデル  
DCPAM  
(Dennou Club Planetary Atmospheric Model)
- 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
- AGCM5 (沼口 他, 1992) のF95による再構築
- 准圧縮非静力学雲対流モデル  
deepconv/arare
- 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
  - 大気放射: 水平一様な冷却として表現
  - Kessler 雲微物理
  - 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
  - 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: リーフロッグ法と HE-VI 法
- 中島 他 (1998) とCReSS(坪木・榊原 2001)を参考にF95による再構築

# 基礎実験

- 地球の設定とは異なる設定における湿潤大気の振る舞いの探索
- dcpam、deepconv/arareを用いた基礎的実験における対象
  - 大循環計算：同期回転水惑星
    - ◆ 水惑星のパラメータ依存性調査の拡大
    - ◆ 系外惑星・生命生存可能(ハビタブル)惑星へ
  - 雲対流計算：主成分凝結対流
    - ◆ 地球から火星へ
    - ◆ 大気成分等の変更

# 基礎実験1: 同期回転惑星実験

- 地球の設定とは異なる設定における湿潤大気の振る舞いの探索
- dcpam、deepconv/arareを用いた基礎的実験における対象
  - 大循環計算: 同期回転水惑星
    - ◆ 水惑星のパラメータ依存性調査の拡大
    - ◆ 系外惑星・生命生存可能(ハビタブル)惑星へ
  - 雲対流計算: 主成分凝結対流
    - ◆ 地球から火星へ
    - ◆ 大気成分等の変更

# 同期回転惑星実験

## ■ 同期回転惑星

- 永続的な昼半球と夜半球が存在
- 太陽系外惑星における生命存在可能性を考える材料の1つ
- 地球とは異なる条件下にある湿潤大気の例題

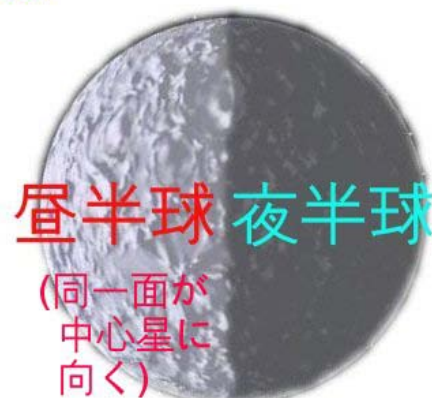
## ■ 昨年度の計算

- 低解像度実験によるパラメータ(自転公転角速度)依存性調査

## ■ 今年度の計算

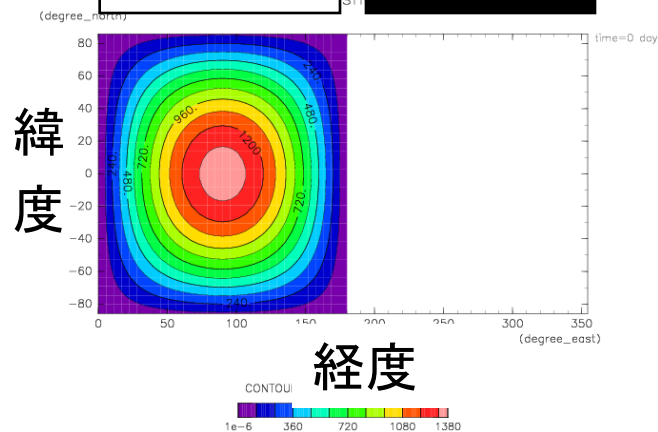
- 高分解能実験(並列計算)、低分解能計算の結果のチェック

中心星の放射



昼半球

夜半球



日射分布

# 同期回転惑星の計算設定

## ■ 外的パラメータ

- 惑星半径, 表面気圧, 自転角速度, 太陽定数等は地球の値

## ■ 放射過程

- 乾燥大気は透明、水蒸気は長波放射に対して灰色
- 雲による効果は考慮しない

## ■ 解像度、時間ステップ、初期条件

- 水平解像度: T21, T42, T85, T170, T341、鉛直層数: 16
- 時間ステップ: 1.25 分(Williamson, 2008 により同一時間ステップ)
- 初期条件
  - ◆ T85までは等温静止状態、T170とT341は低解像度計算結果を内挿して作成

## ■ 水平拡散

- 4次の超粘性、拡散係数はTakahashi et al.(2006)に基づき決定

# 同期回転惑星実験の使用計算資源

## T21(1000日積分)

- 1 CPU
- 使用メモリ: 1880 MB
- Real Time: 約70秒(1日あたり)
- ベクトル化率: 97.8%

## T42(1000日積分)

- 1 CPU
- 使用メモリ: 約1900 MB
- Real Time: 約310秒(1日あたり)
- ベクトル化率: 98.1 %

## T85(1000日積分)

- 8 CPU
- 使用メモリ: 1888(x8) MB
- Real Time: 約190 秒(1日あたり)
- ベクトル化率: 97.4%

## T170(100日積分)

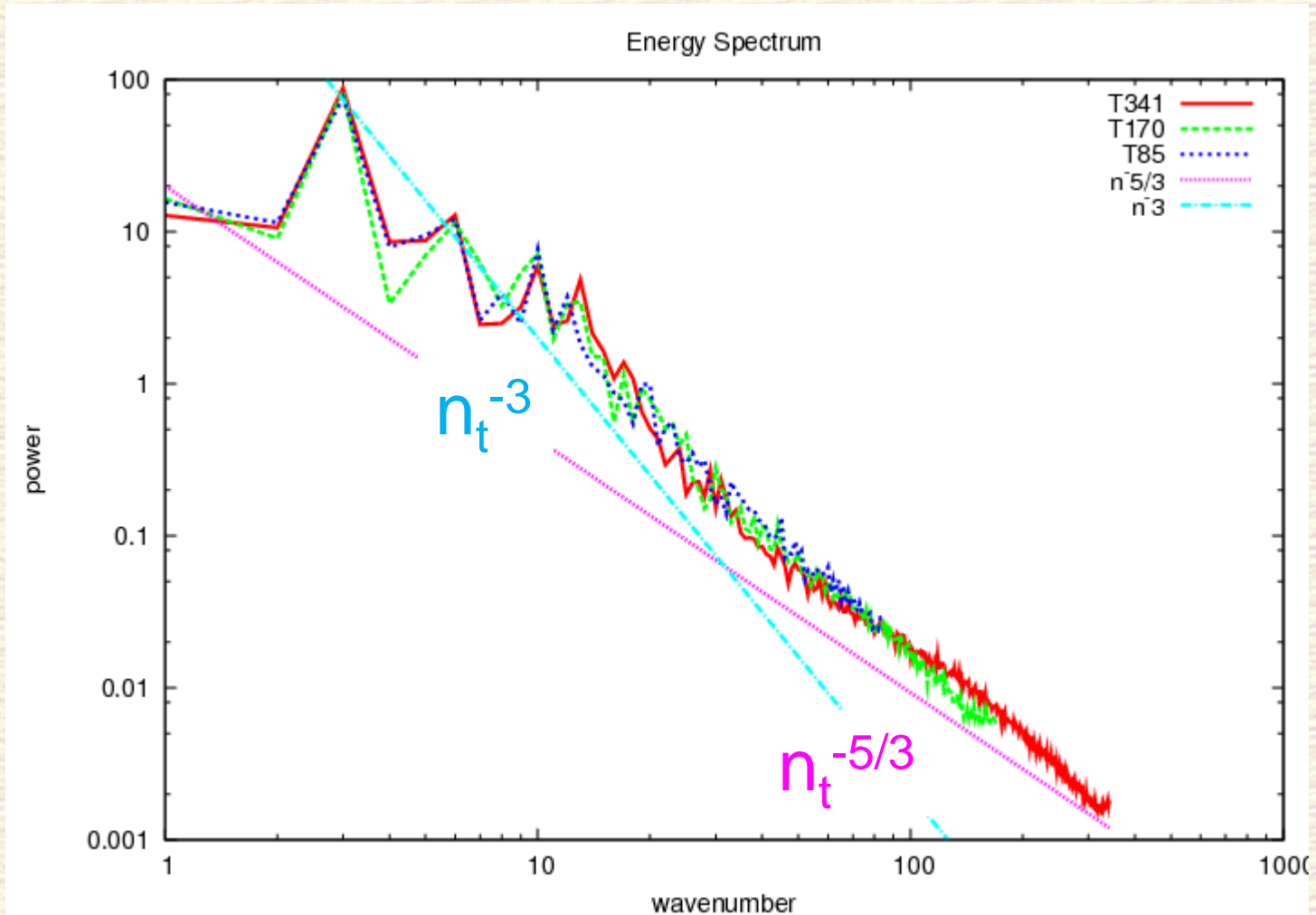
- 8 CPU
- 使用メモリ: 2240(x8) MB
- Real Time: 約790秒(1日あたり)
- ベクトル化率: 98.1%

## T341(50日積分)

- 8 CPU
- 使用メモリ: 約3600(x8) MB
- Real Time: 約4300秒(1日あたり)
- ベクトル化率: 98.6%

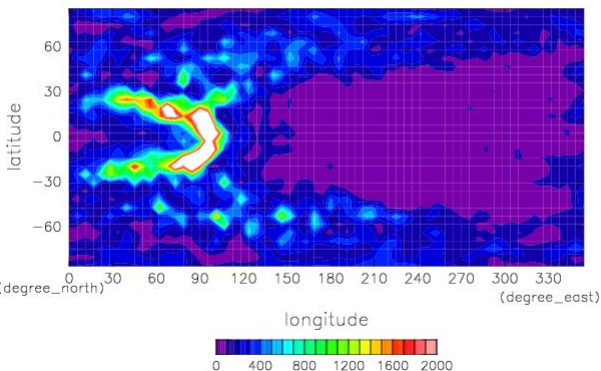
いずれの計算でも、I/O 高速化のため出力ファイルのバッファを大きめ (16MB/file) に設定した

# 同期回転設定におけるエネルギースペクトル

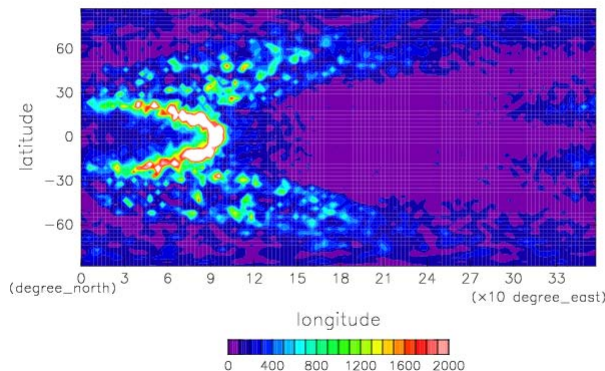


# 降水分布の解像度依存性

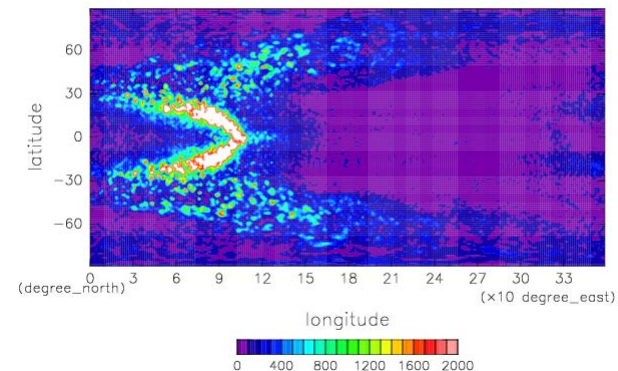
T21



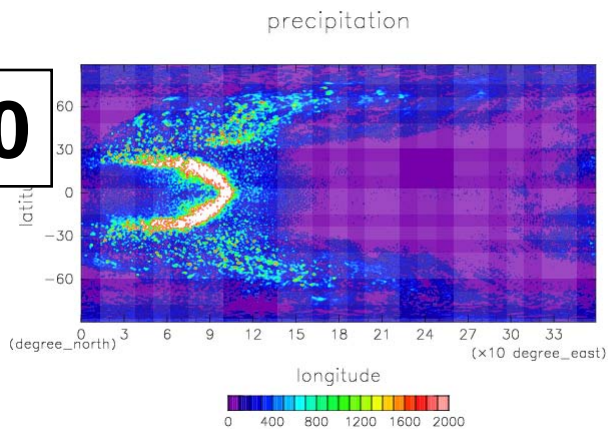
T42



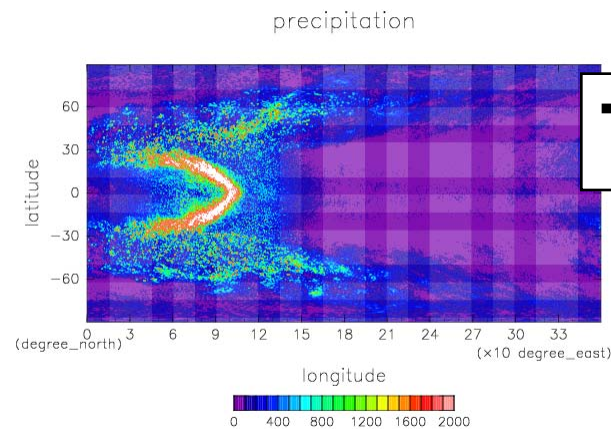
T85



T170



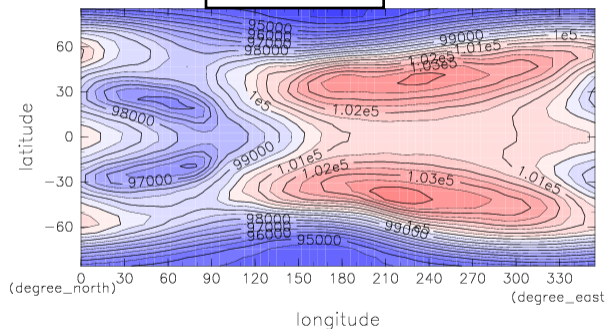
T341



# 地表面気圧

## T21

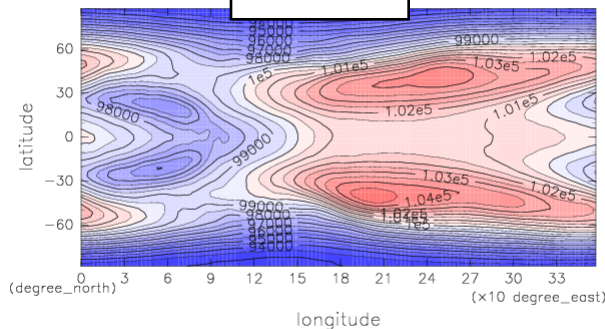
sure



CONTOUR INTERVAL = 5.000E+02  
92000 96000 100000 104000 108000

## T42

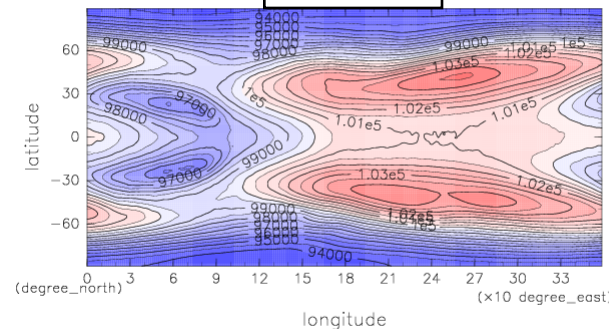
ure



CONTOUR INTERVAL = 5.000E+02  
92000 96000 100000 104000 108000

## T85

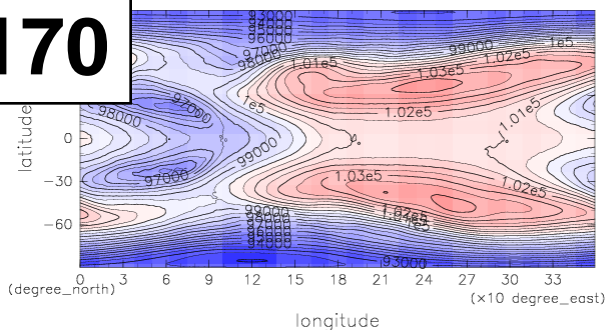
sure



CONTOUR INTERVAL = 5.000E+02  
92000 96000 100000 104000 108000

## T170

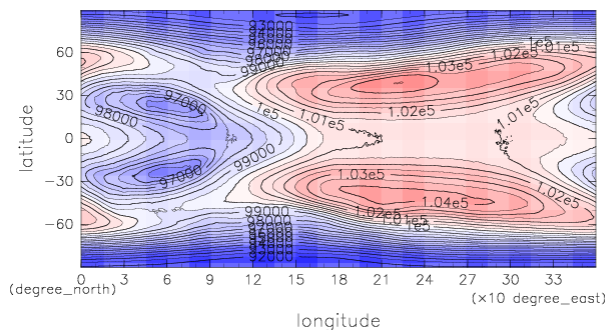
surface pressure



CONTOUR INTERVAL = 5.000E+02  
92000 96000 100000 104000 108000

## T341

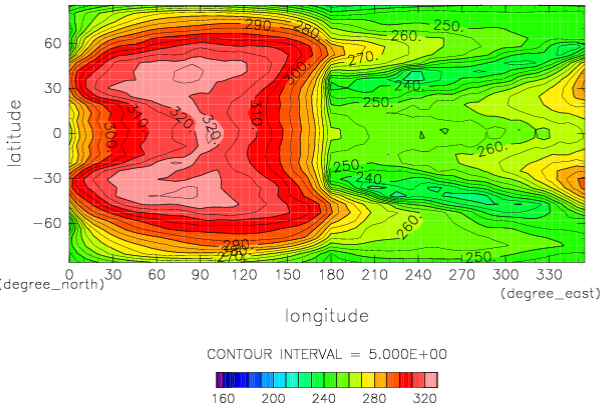
surface pressure



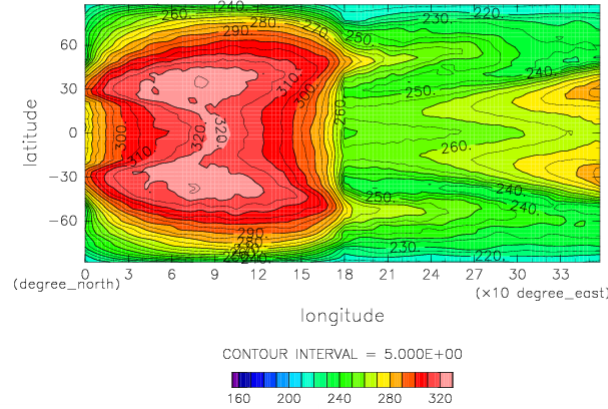
CONTOUR INTERVAL = 5.000E+02  
92000 96000 100000 104000 108000

# 地表面温度分布の解像度依存性

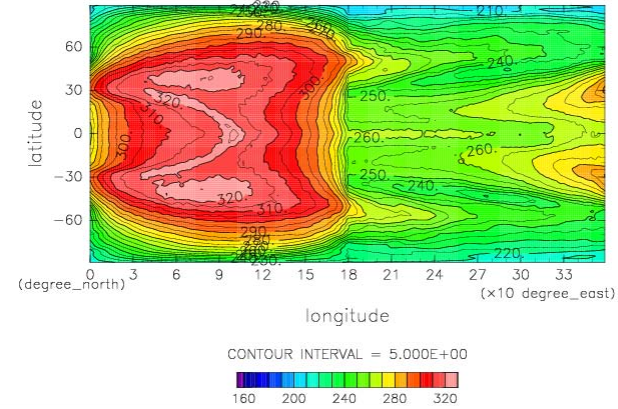
**T21**



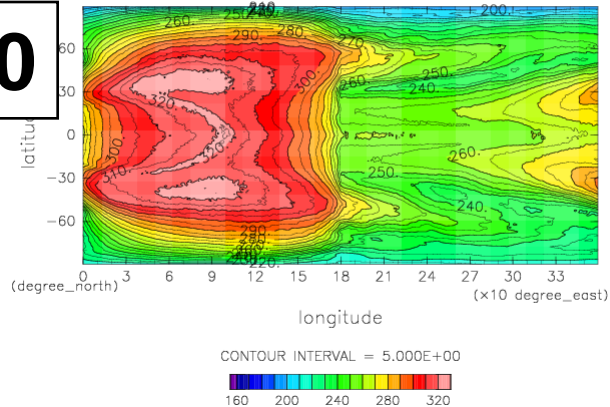
**T42**



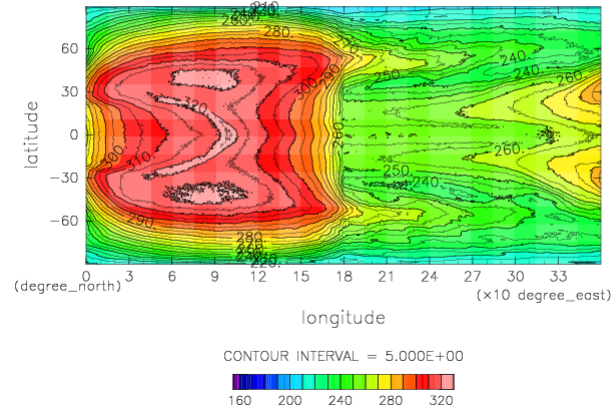
**T85**



**T170**



**T341**



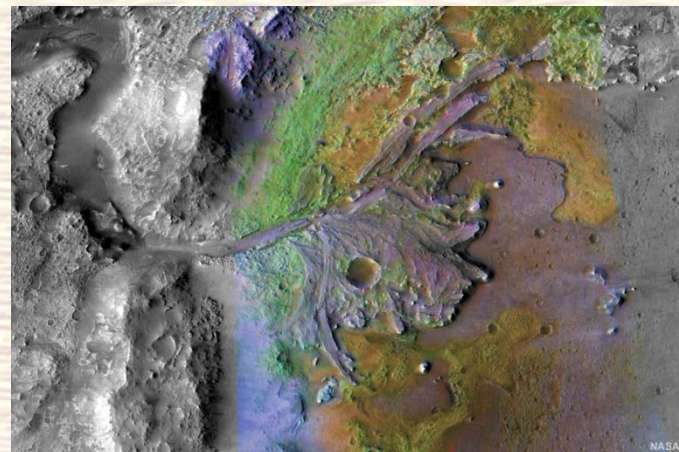
# 基礎実験2：主成分凝結対流実験

- 地球的設定とは異なる設定における湿潤大気の振る舞いの探索
- dcpam、deepconv/arareを用いた基礎的実験における対象
  - 大循環計算：同期回転水惑星
    - ◆ 水惑星のパラメータ依存性調査の拡大
    - ◆ 系外惑星・生命生存可能(ハビタブル)惑星へ
  - 雲対流計算：主成分凝結対流
    - ◆ 地球から火星へ
    - ◆ 大気成分等の変更

# 主成分凝結対流実験

## ■ 初期火星の主成分凝結対流

- 38 億年前の火星は、CO<sub>2</sub> 氷雲による散乱温室効果により温暖だった可能性(光田, 2008など)
- 地球の雲対流とは違った湿潤対流の例題(湿潤断熱線に関する自由度が1つ少ない)



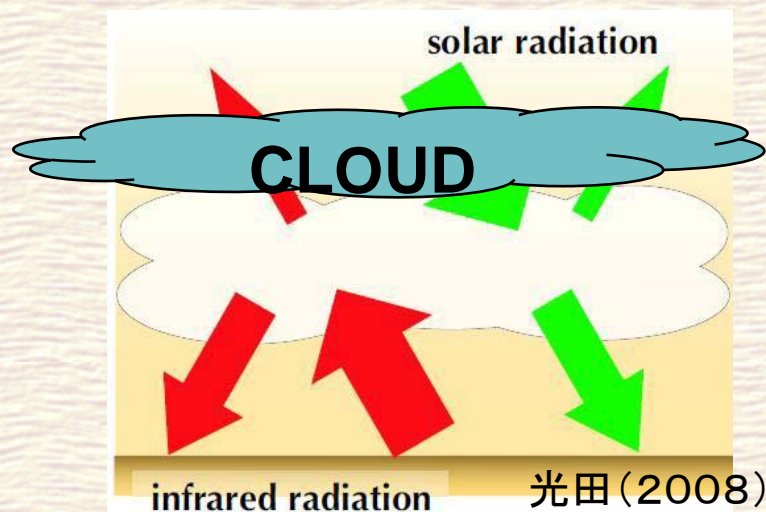
Copyright : NASA

## ■ 昨年度の計算

- 小領域でパラメタ計算(過飽和度を変える)によるモデル試験運転

## ■ 今年度の計算

- 設定ミス→熱収支・質量収支の再確認
- 統計的平衡状態を求め、更に大領域計算へ



光田(2008)

# 主成分凝結対流の支配方程式

- 2次元準圧縮方程式系(Klemp and Wilhelmson, 1978) に主成分凝結の効果を考慮 (Odaka et al., 2005)

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} - C_p \bar{\theta} \nabla \Pi' + \mathbf{D}_u + \frac{\theta'}{\bar{\theta}} \mathbf{g}$$

$$\frac{\partial \Pi'}{\partial t} = -\frac{\bar{c}_s^2}{C_p \bar{\rho} \bar{\theta}^2} \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{\theta} \mathbf{u}) + \frac{\bar{c}_s^2}{C_p \bar{\theta}^2 \bar{\Pi}} (Q_{dis} + Q_{rad}) + \frac{\bar{c}_s^2 L}{C_p^2 \bar{\rho} \bar{\theta}^2 \bar{\Pi}} M_{cond} - \frac{\bar{c}_s^2}{C_p \bar{\rho} \bar{\theta}} M_{cond}$$

熱膨張項

大気質量の減少による圧力低下

$$\frac{\partial \theta'}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla \theta' - w \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} + \frac{1}{\bar{\Pi}} \left( \frac{LM_{cond}}{C_p \bar{\rho}} + Q_{dis} + Q_{rad} \right) + D_\theta$$

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho_s \mathbf{u}) + M_{cond} + D_{\rho_s}$$

“-”の付いた量は基本場成分,  
“^”の付いた量は擾乱成分を  
表す

$\mathbf{u} = (u, w)$ : 流速,  $\theta$ : 温位,  
 $\Pi$ : Exner 関数,  $\rho$ : 気相の密度  
 $\rho_s$ : 雲密度,  $T$ : 温度,  
 $c_s$ : 音速,  $C_p$ : 定圧比熱,  
 $L$ : CO2の潜熱,  $M_{cond}$ : 凝結率,  
 $Q_{dis}$ : 散逸加熱,  $Q_{rad}$ : 放射加熱,  
 $\mathbf{D}_u = (D_u, D_w)$ ,  $D_\theta, D_{\rho_s}$ : 乱流拡散項,  
 $\mathbf{g} = (0, g)$ : 重力加速度

# 主成分凝結対流の計算設定

## ■ 計算領域, 積分時間

- 水平50km, 鉛直20km(格子間隔200m)
- 積分時間: 10 日
  - ◆ 時間ステップ: 0.125秒(短), 1秒(長)

## ■ 境界条件, 初期条件

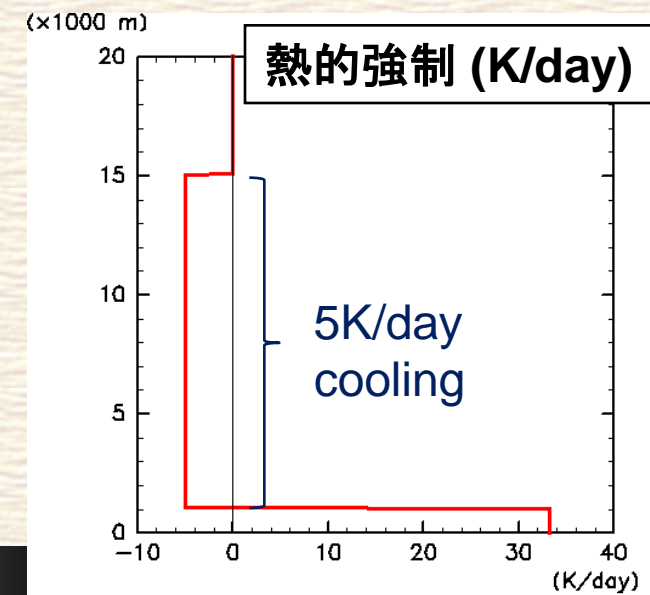
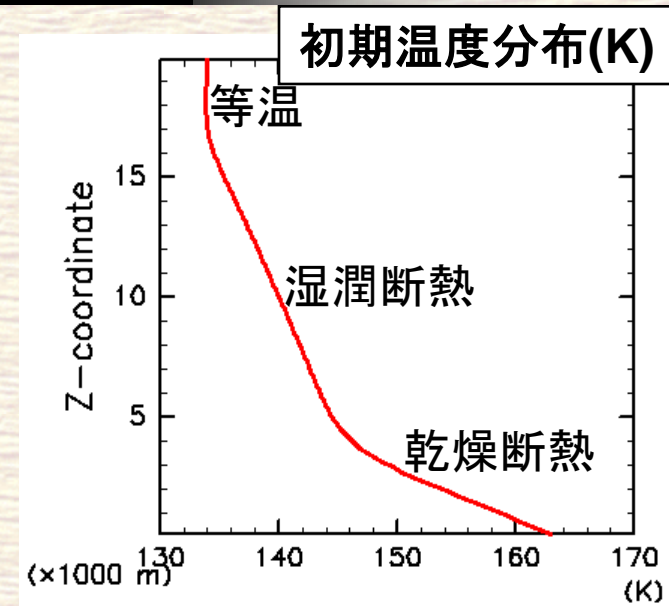
- 水平方向: 周期境界, 鉛直方向: 応力なし
- 地表面フラックス(運動量・熱)ゼロ

## ■ 初期条件

- 温度分布: 乾燥断熱・湿潤断熱
- 最下層にランダムな温位擾乱(最大 1K)

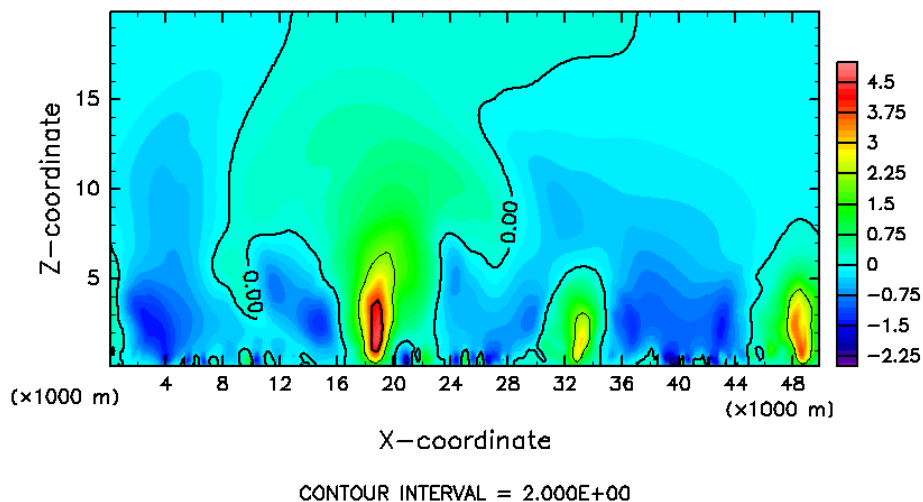
## ■ 放射強制

- 高度 1–15 km : 水平一様冷却 -5.0K/日
- 高度 0–1 km : 冷却と釣り合う一様加熱

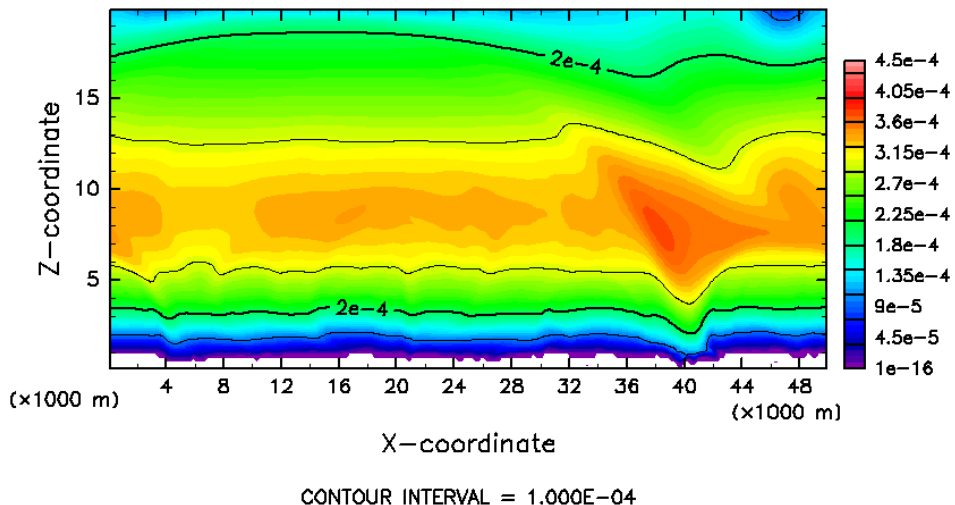


# 主成分凝結対流の流れ場・雲密度分布

鉛直流速(m/s)



雲密度



## 10日におけるスナップショット(まだ熱的にはドリフトしている)

### ■ 特徴的傾向←浮力が得られにくいことによる帰結？

- 過熱強制される下層を除き、計算領域ほぼ全総が雲領域化
- 雲域ではゆっくりとした対流(乾燥条件の場合は10m/s程度の上昇流)
- 水平スケールの増大(乾燥条件の場合は数kmサイズのセル)

# まとめ

## ■ ソフトウェア整備開発

- ようやく動きは始めている
  - ◆ 全球モデルDCPAMによるパラメタ実験
  - ◆ 雲対流モデルによる2次元計算

## ■ 基礎的実験

- 同期回転惑星設定の計算
  - ◆ 計算分解能依存性の検証(8CPU計算)、ただし鉛直分解能は変えてない(荒い)
  - ◆ 大きな構造、すなわち、地球設定の同期回転惑星は生命生存可能である、は分解能依存しない(...雲がないから影響でない?)
- 主成分凝結対流
  - ◆ 計算できるようになった(まだスパコン計算レベルでない)
  - ◆ 大領域での統計的平衡計算はこれから
  - ◆ 3次元計算による検証はさらにこれから

# 今後の展開

## ■ 今年度末までに: 基礎的実験の続行

- 同期回転惑星設定におけるパラメータ探索
  - ◆ 暴走温室状態の存在領域の決定
    - ▶ 自転(公転)角速度依存性
    - ▶ 計算分解能依存性
- 主成分凝結対流の大規模計算
  - ◆ 大領域での統計的平衡計算
  - ◆ 3次元計算による検証

## ■ 更にその先は: 大循環計算と雲対流計算の併用

- 雲対流モデルを用いた暴走温室状態の計算
  - ◆ 雲の効果を反映する放射過程の導入と雲の効果の考察
- 大循環モデルによる主成分凝結状況の計算