

湿润惑星大気用数值モデル群 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

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

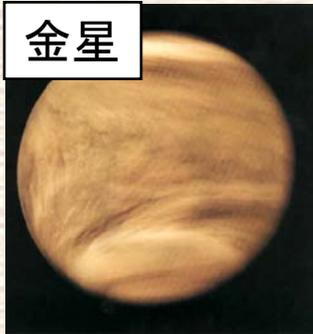


背景：多様な湿潤大気を想定したパラメタ研究

■ 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

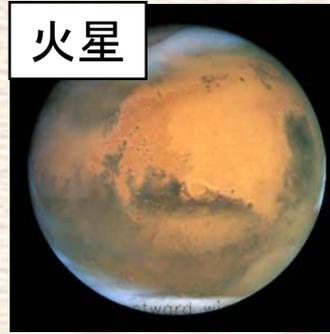
金星



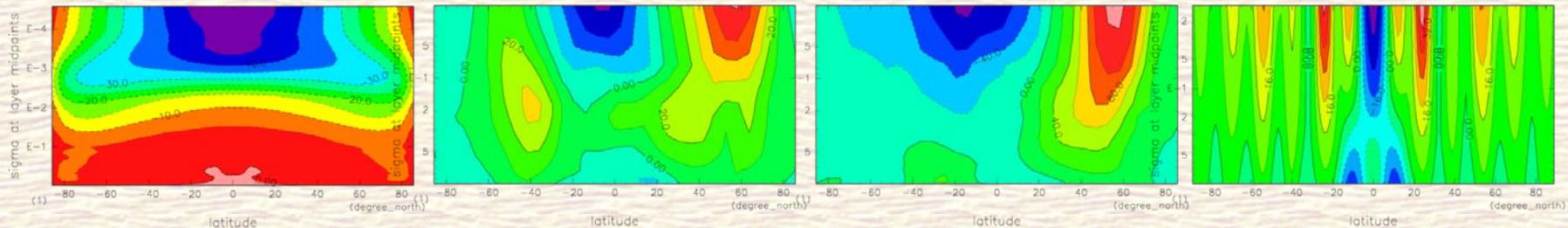
地球



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

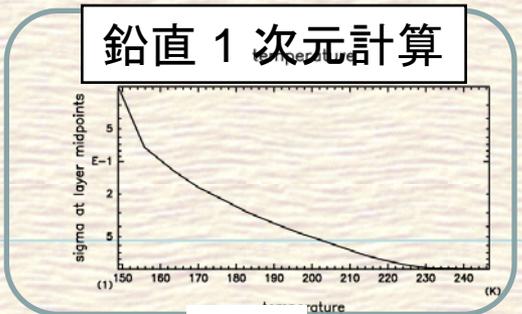
■ 数値的な仮想世界の探査

- 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

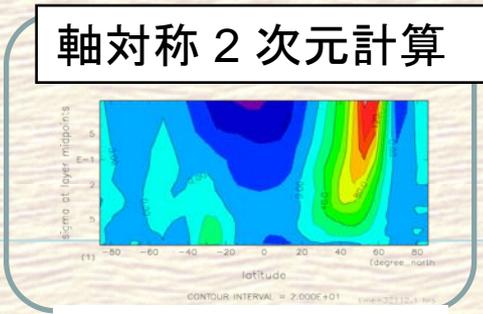
■ 仮想探査に必要なツール=階層的モデル群

- 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

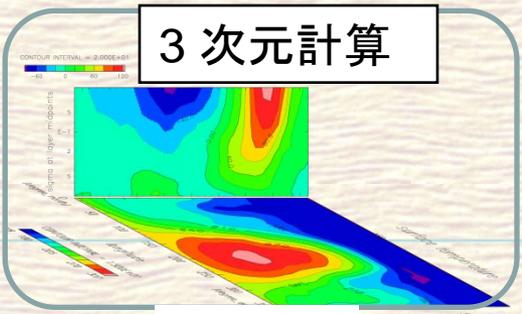
簡単火星設定
を用いたdcpam
による計算結果



L16



T21L16(imax=1)



T21L16

階層的モデル群

- 地球流体電脳倶楽部dcmmodel プロジェクト
 - <http://www.gfd-dennou.org/library/dcmmodel/>
- 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
 - ◆ 柔軟なパラメー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: dcmmodel プログラミングガイドライン (<http://www.gfd-dennou.org/library/dcmmodel/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/dcmmodel/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

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

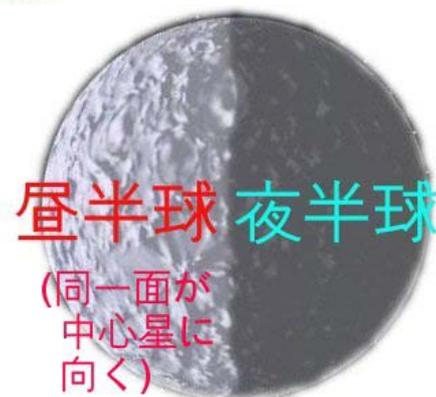
■ 昨年度の計算

- 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

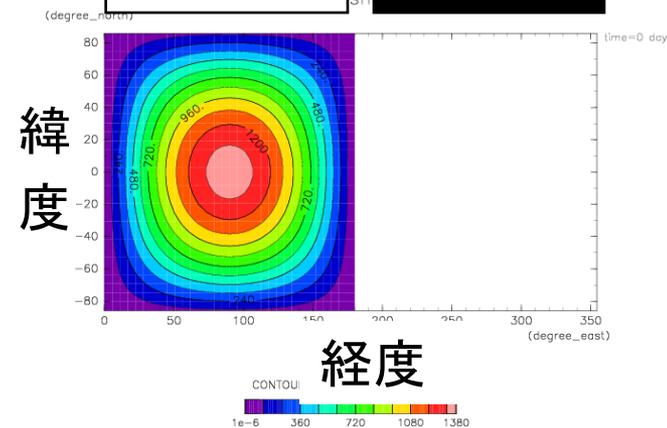
- 高分解能実験(並列計算)、低分解能計算の結果のチェック

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)

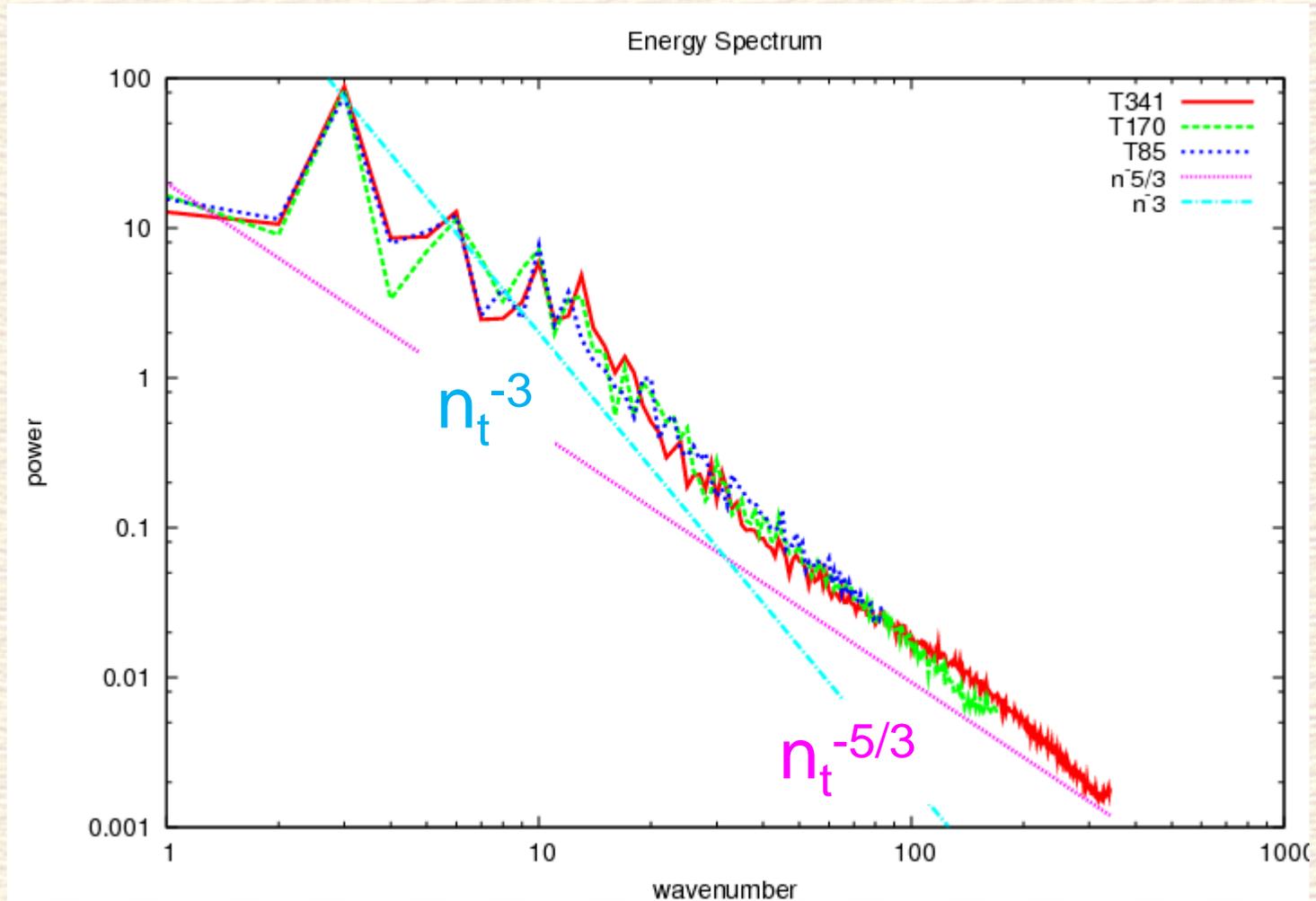
- 8 CPU
- 使用メモリ: 2240(x8) MB
- Real Time: 約790秒(1日あたり)
- ベクトル化率: 98.1%

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%

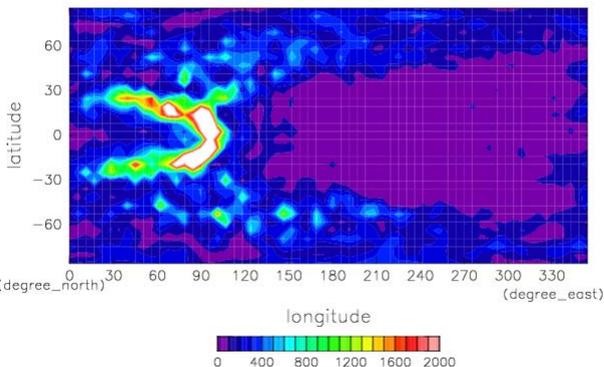
いずれの計算でも、I/O 高速化のため出力ファイルのバッファを大きめ (16MB/file) に設定した

同期回転設定におけるエネルギースペクトル

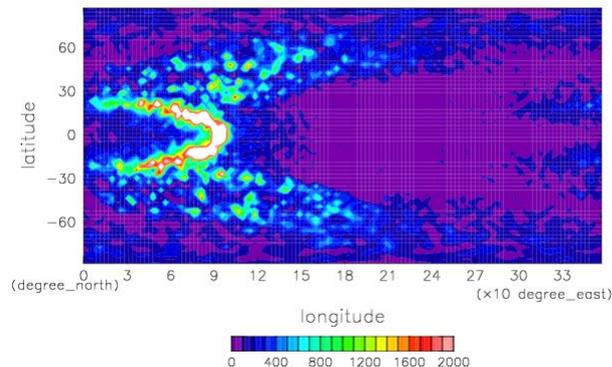


降水分布の解像度依存性

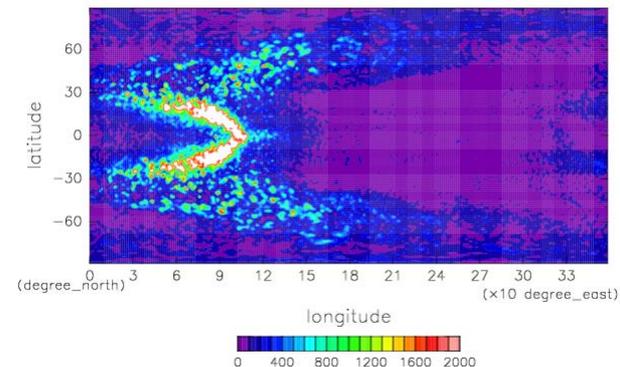
T21



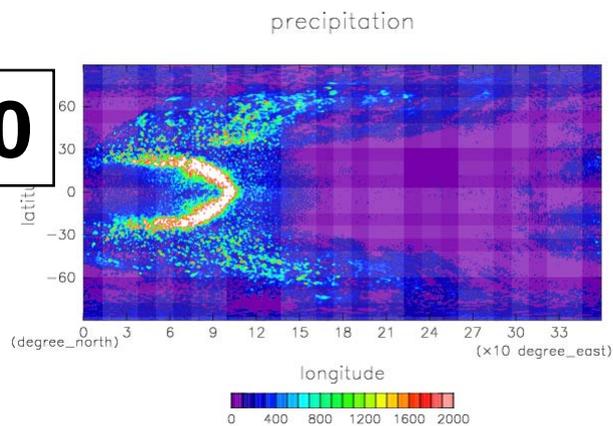
T42



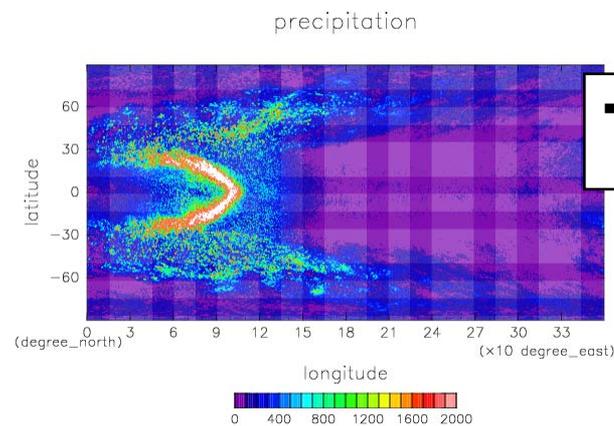
T85



T170



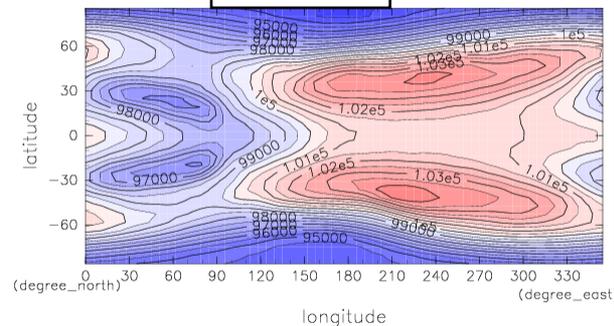
T341



地表面気圧

T21

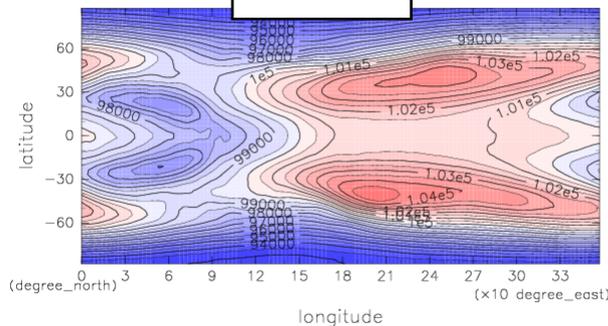
sure



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

T42

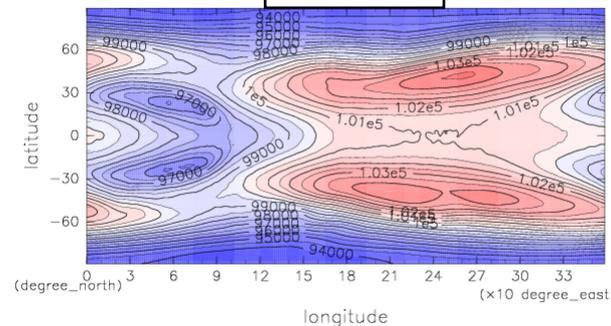
ure



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

T85

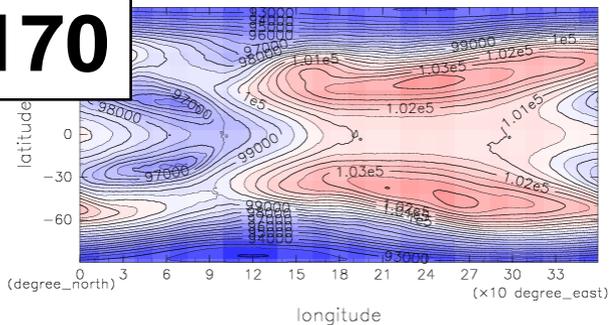
sure



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

T170

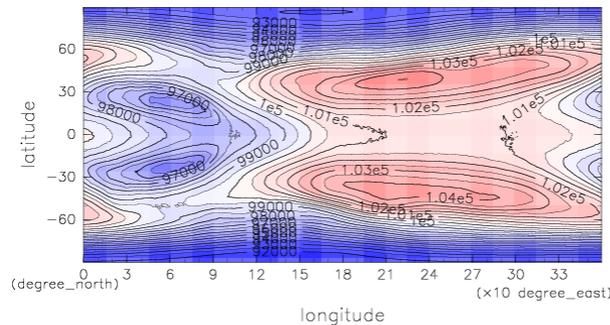
surface pressure



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

T341

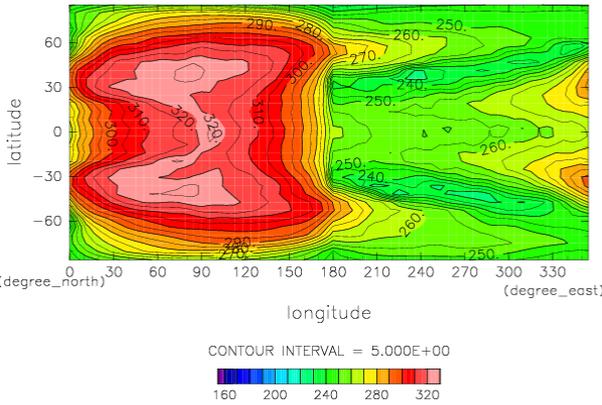
surface pressure



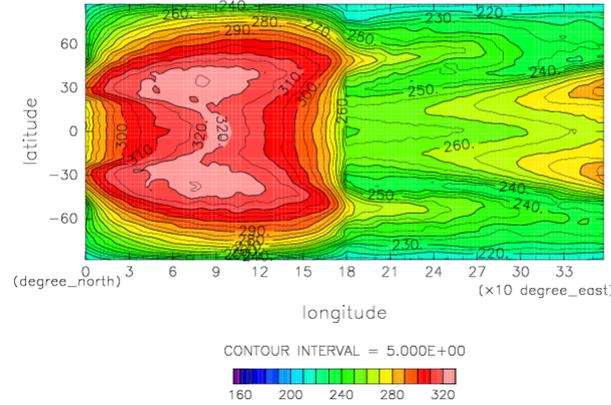
CONTOUR INTERVAL = 5.000E+02
92000 96000 100000 104000 108000

地表面温度分布の解像度依存性

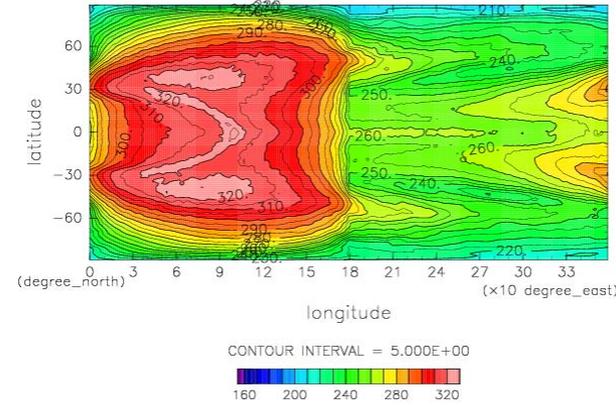
T21



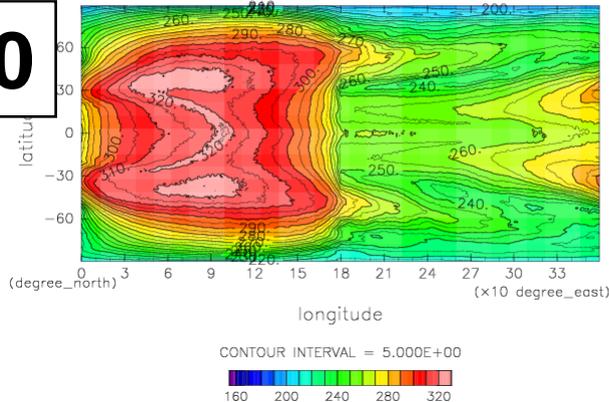
T42



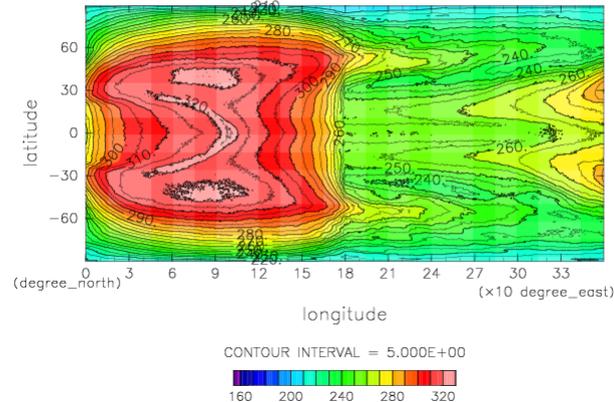
T85



T170



T341



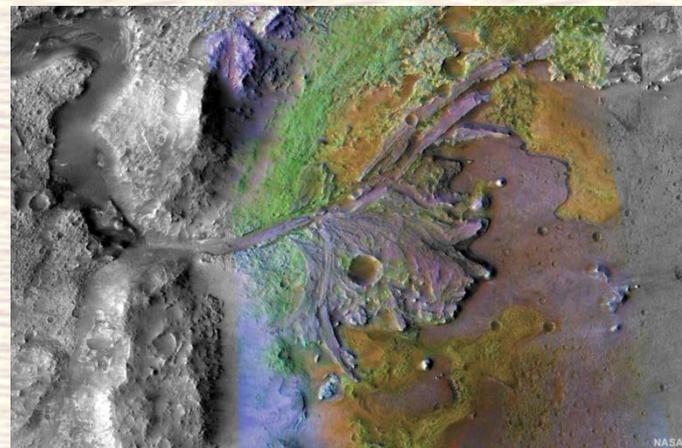
基礎実験2: 主成分凝結対流実験

- 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_2 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)



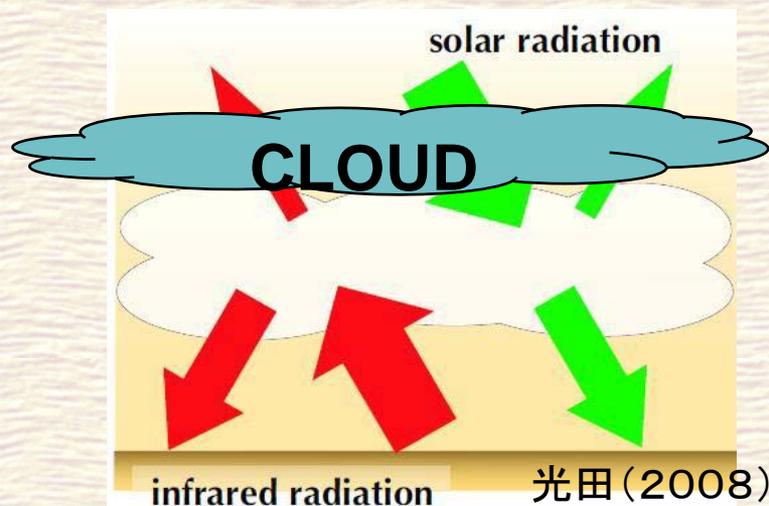
Copyright : NASA

■ 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, θ : 温位,
 Π : Exner 関数, ρ : 気相の密度
 ρ_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_θ, D_{ρ_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

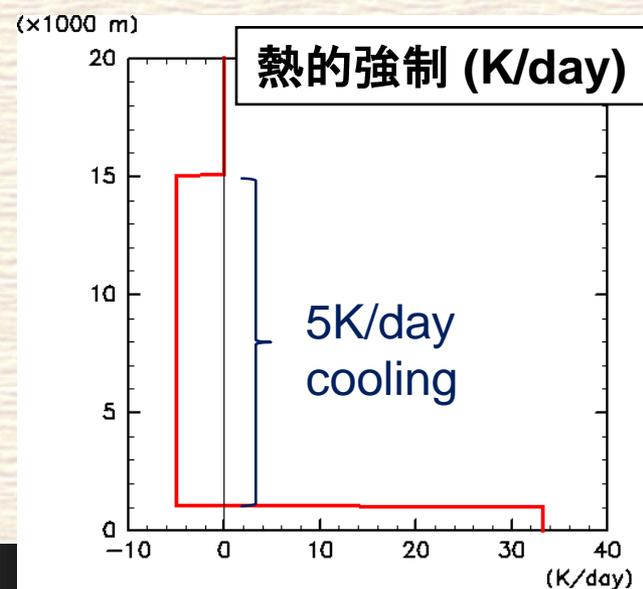
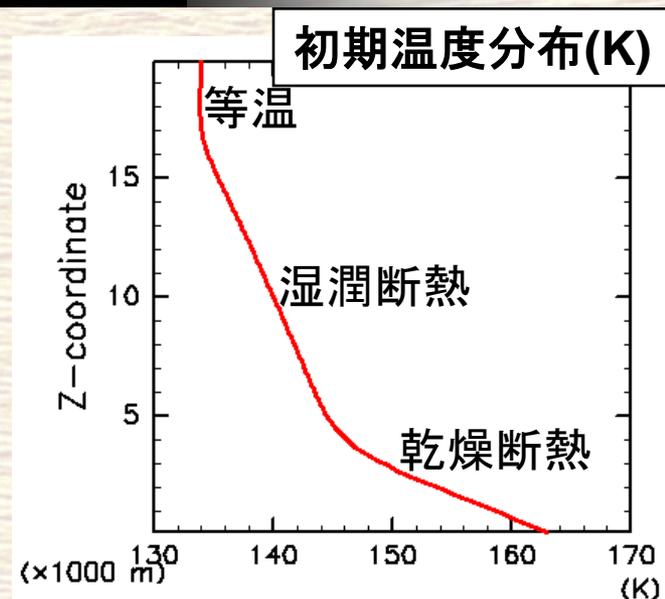
- 水平方向: 周期境界, 鉛直方向: 応力なし
- 地表面フラックス(運動量・熱)ゼロ

■ 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)

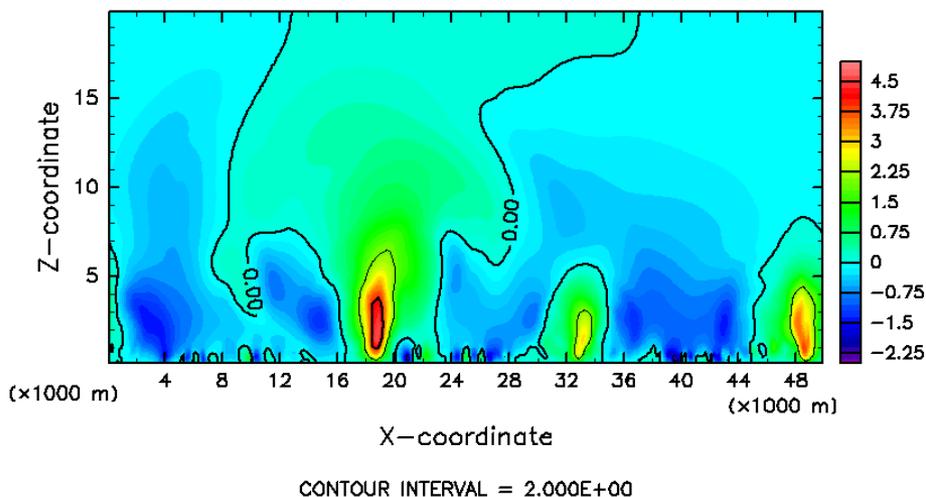
■ 放射強制

- 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

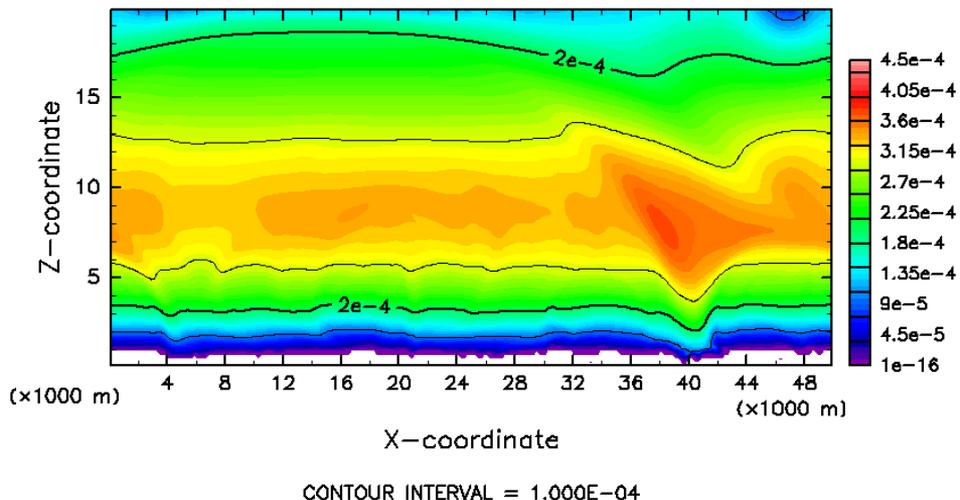


主成分凝結対流の流れ場・雲密度分布

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