

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)

地球流体電脳倶楽部

dcmodel@gfd-dennou.org

2009年11月11日 国立環境研究所
平成21年度スーパーコンピュータ利用



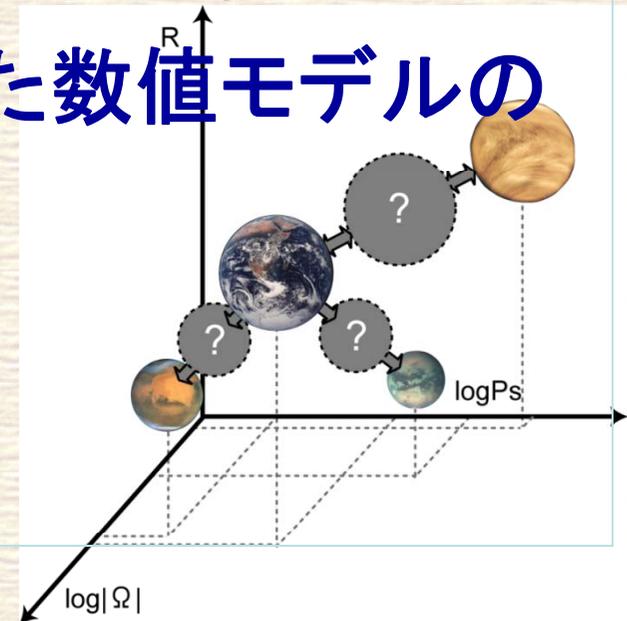
多様な湿潤大気を想定したパラメタ研究

■ 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、大気成分、日射スペクトル、...、などの外的パラメタが異なる世界を仮想的に実現
- 大気構造の多様性を探査する
- パラメタ空間に位置づける = 多様性をもたらす構造の探究

■ 多様な湿潤大気の計算に適した数値モデルの開発

- 地球で得られてきた常識の再検討
- 数値モデルの限界の認識



階層的モデル群

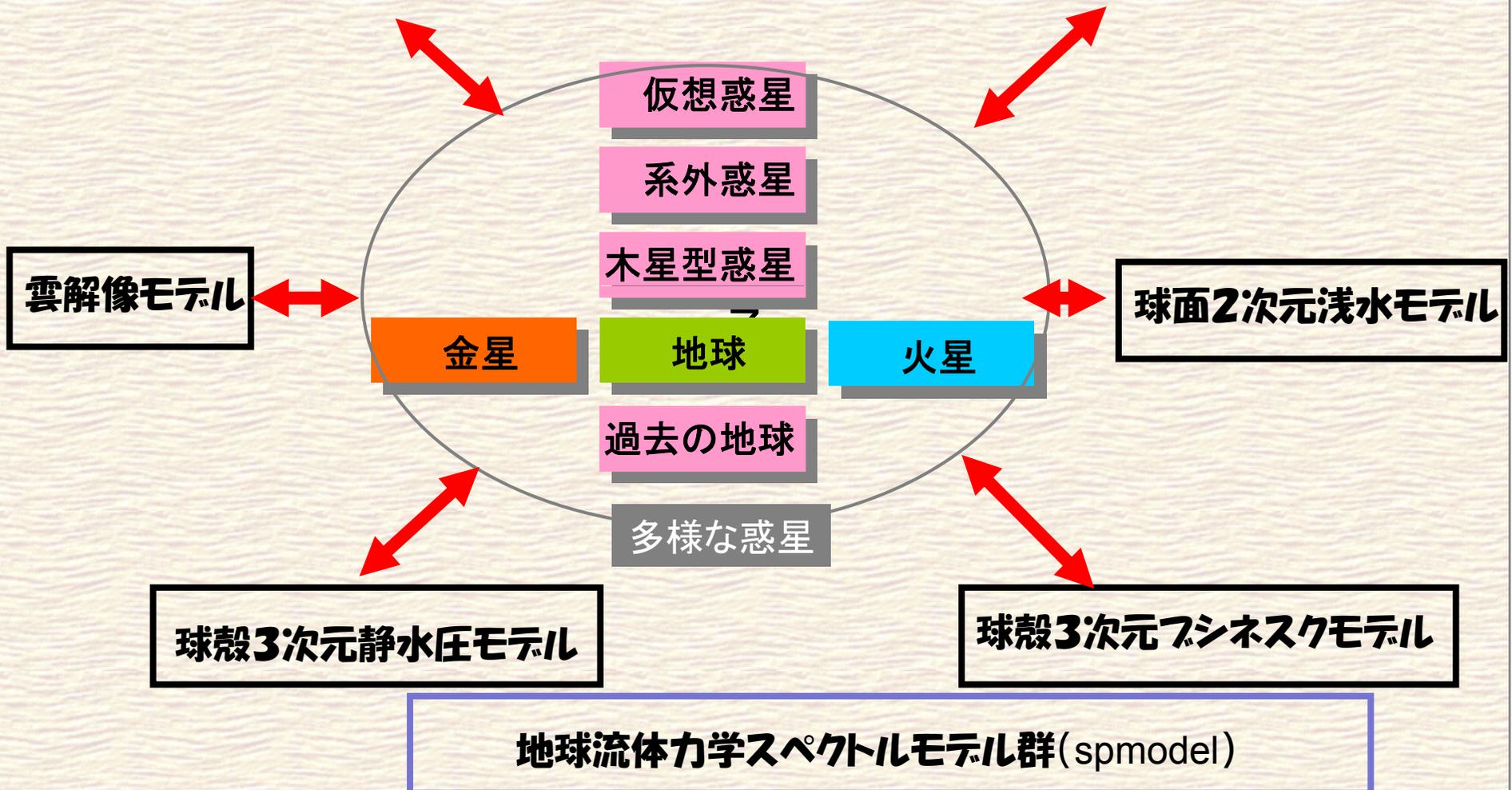
■ 仮想探査に必要なツール=階層的モデル群

- 解の構造的な理解＝観測ができない世界での計算結果の正当性の担保
 - ◆ 複雑モデルから簡単概念モデルまでのラインアップ
 - ▶ 力学過程の複雑さ
 - ▶ 物理過程の複雑さ
 - ◆ 対象階層の異なるモデルを用いての相互比較
 - ▶ 大気科学が地球大気に対して行ってきた考察のトレス
 - ▶ 静水圧大気大循環モデル vs 雲解像鉛直対流モデル
 - ◆ パラメタ研究に耐える軽量性
 - ▶ 対象に応じた方程式系に基づく数値モデルたち
 - ▶ (パラメタを変えての)たくさんの計算による解のふるまいの面的掌握
 - ▶ (同じパラメタに対する)たくさんの計算による解のふるまいの面的掌握

階層的モデル群 (予定)

鉛直1次元放射対流平衡モデル

南北1次元エネルギーバランスモデル



階層的モデル群のソフトウェア

- <http://www.gfd-dennou.org/library/dcmodel/>
- 可変性・可読性
 - モデル群全体としてコードスタイルを統一
 - ◆ プログラミングスタイル、文書のガイドライン
 - ◆ 共通のI/Oルーチン等数値計算インフラストラクチャーの整備 gtool (<http://www.gfd-dennou.org/library/gtool/>)
 - いろいろな惑星(外的パラメタ設定)に適用可能になるとうれしい
 - ◆ そのままで使えなくても、改造が容易であればよい
 - 各階層を自由に行き来できればうれしい
 - ◆ 簡単概念モデルから複雑モデルまで
 - ◆ 物理過程や力学過程の自由な変更
- 現段階では方程式系は、普通の“地球用”を踏襲
 - 2つの中心モデルの再構築
 - ◆ 静水圧大気大循環モデル(GCM)→dcpam (<http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>)
 - ◆ 非静力学鉛直対流モデル→deepconv/arare(<http://www.gfd-dennou.org/library/deepconv/>)
 - ◆ 地球流体力学概念モデル群spmodel (<http://www.gfd-dennou.org/library/spmodel/>)との連携

基礎実験

■ 水惑星・湿潤対流実験を統合：二つの中心モデル

- 水惑星実験(代表:林)→静水圧大気大循環モデル(GCM)
- 積雲対流実験(代表:中島)→非静力学鉛直対流モデル

■ 地球大気での経験を生かす、地球大気への理解に貢献する

- 静水圧全体モデルと非静力学局地モデルの組み合わせによる対象へのアプローチ
- 乱流、対流、...、についての知識がそのまま使える、あるいは、これをチェックする

■ 現在の対象

- 水惑星から砂惑星への拡張(地球から火星へ)
- 水惑星のパラメタ拡張(系外惑星・生命生存可能(ハビタブル)惑星)

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)

■ 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) を参考に実装

■ 非静力学モデル 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) を参考に実装

昨年度は

■ 二つのモデルを中心にモデル群として開発・整備を開始

- データ入出力および共通モジュールの再整備:
gtool5 ライブラリ <http://www.gfd-dennou.org/library/gtool/>
- プログラム構造の再設計・書式の統合・gtool5 を用いた入出力
- dcpam の再構成
dcpam5 実装 <http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>

本年度の研究内容

■ 階層モデル群の開発の継続

- 火星と地球の比較実験に向けたdcpam5用地表面モジュールの開発
- 非静力学モデルdeepconv/arareの再構成
 - ◆ gtool5ライブラリを基盤として、昨年度のプログラム構造に関する検討結果をもとに再構成中
- dcpam5の軸対称モデルの開発
 - ◆ 軸対称モデル用微分演算モジュールは完成

■ dcpam、deepconv/arareを用いた基礎的実験

- 水惑星から砂惑星への拡張(地球から火星へ)
 - ◆ dcpam (GCM) の地球-火星化
 - ◆ deepconv/arare の地球-火星化(主成分凝結対流)
- 水惑星のパラメタ拡張(生命生存可能惑星)
 - ◆ dcpam (GCM) による同期回転水惑星計算

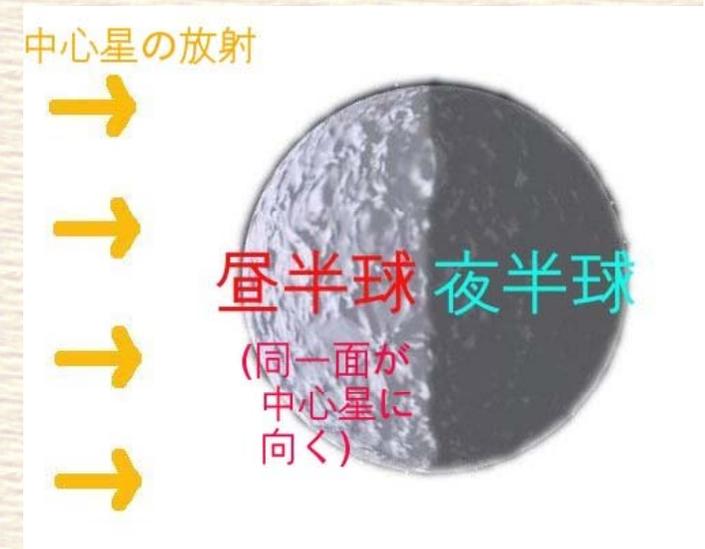
同期回転惑星実験

■ 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 (M型星近傍における惑星)
- 乾燥大気: Joshi et al(1987)

■ 計算

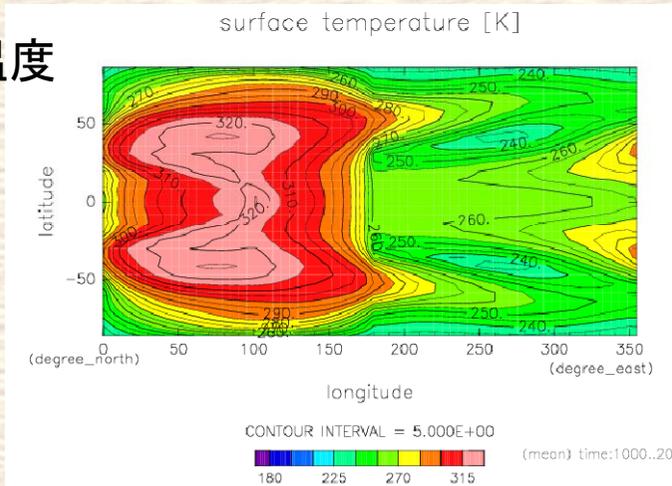
- 雲なし、対流調節、灰色大気、T21L16
- 昨年度は地球と同じ自転角速度(公転周期)を持つ場合の計算
- 今年度は自転角速度を変更した場合の計算
- 乾燥大気: Joshi et al(1987)



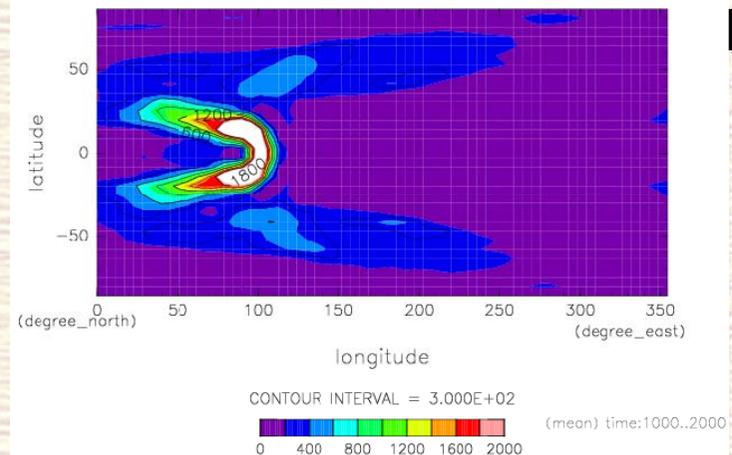
同期回転惑星実験：今年の結果

■ $\Omega^*=1$

地表面温度

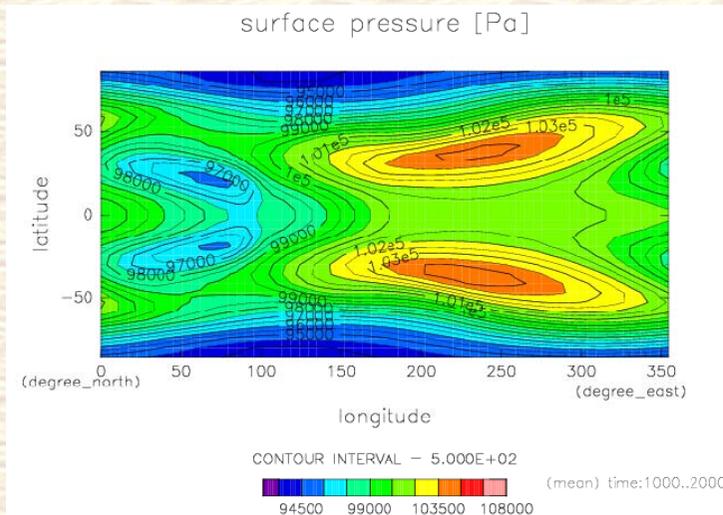


precipitation [W m⁻²]

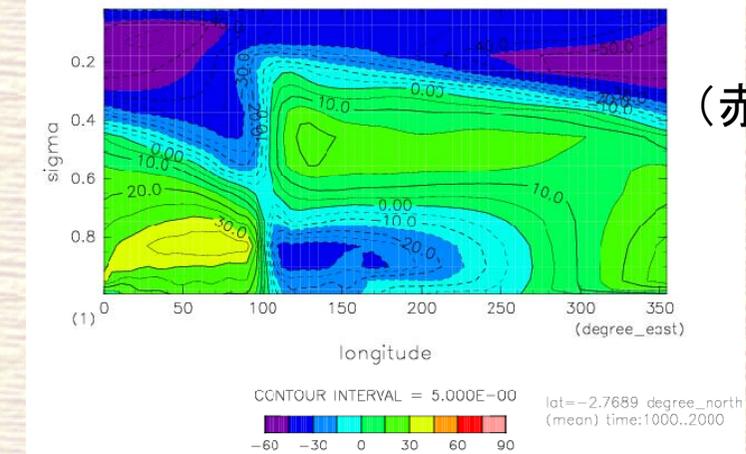


降水分布

表面気圧



eastward wind [m s⁻¹]

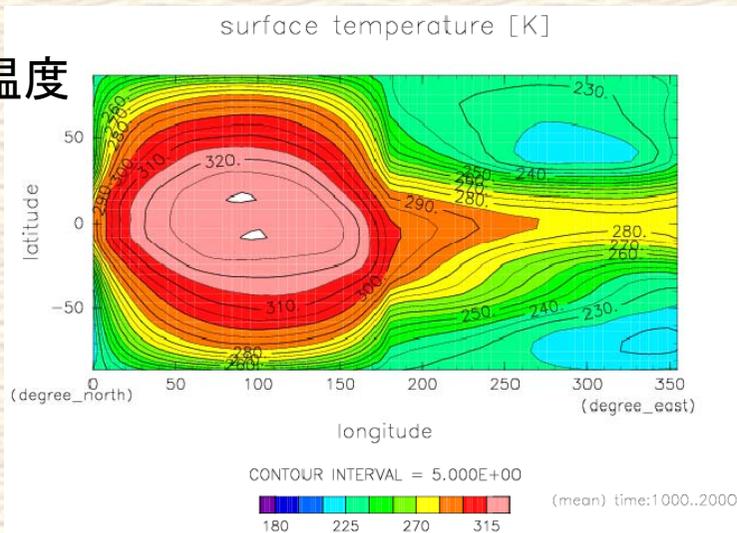


東西風
(赤道断面)

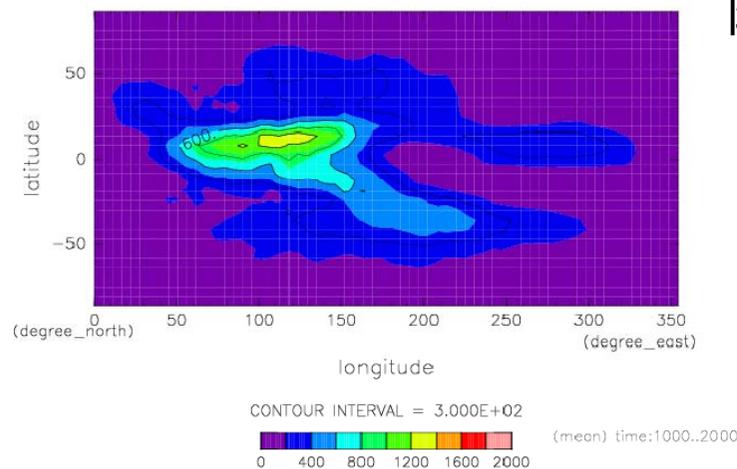
同期回転惑星実験：自転角速度変更実験

■ $\Omega^*=2/3$ とすると南北非対称構造が発現

地表面温度

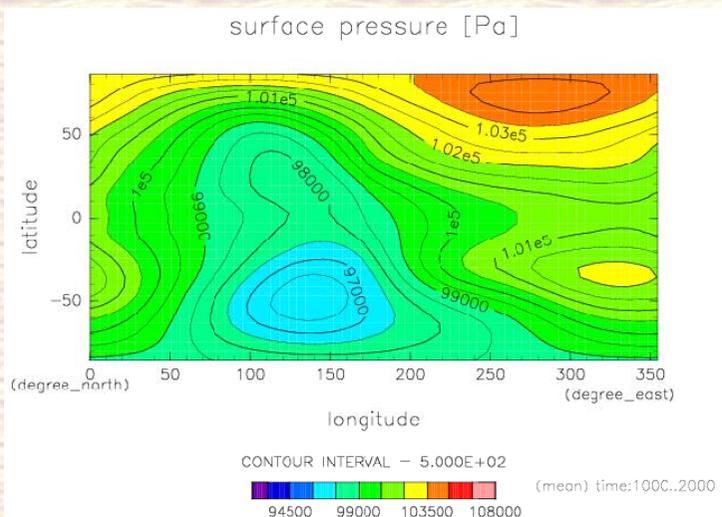


precipitation [W m⁻²]

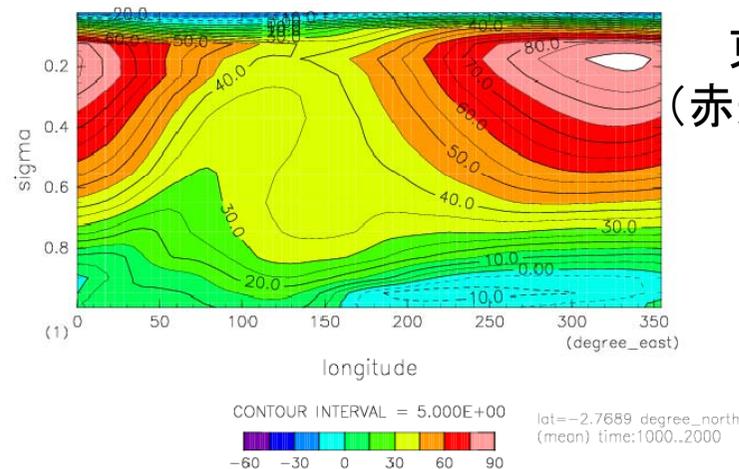


降水分布

表面気圧



eastward wind [m s⁻¹]

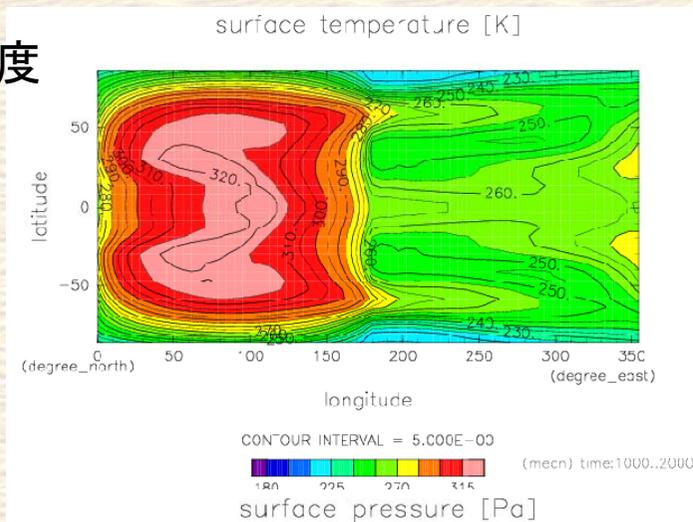


東西風
(赤道断面)

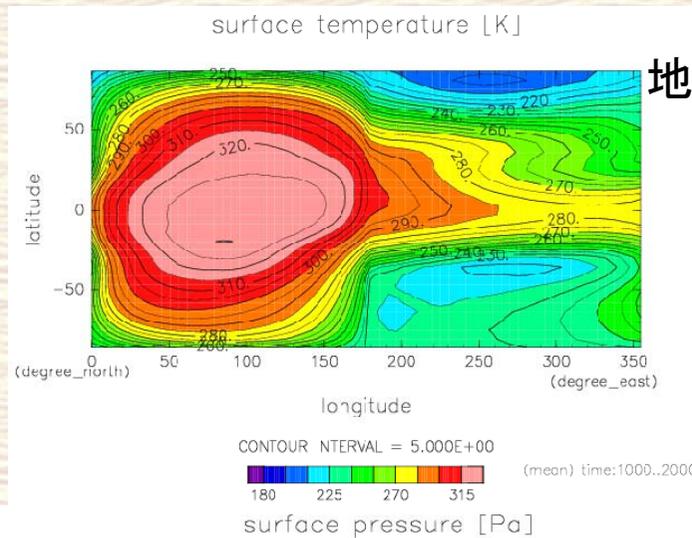
同期回転惑星実験：自転角速度変更

■ $\Omega^*=4/5$ では初期値依存

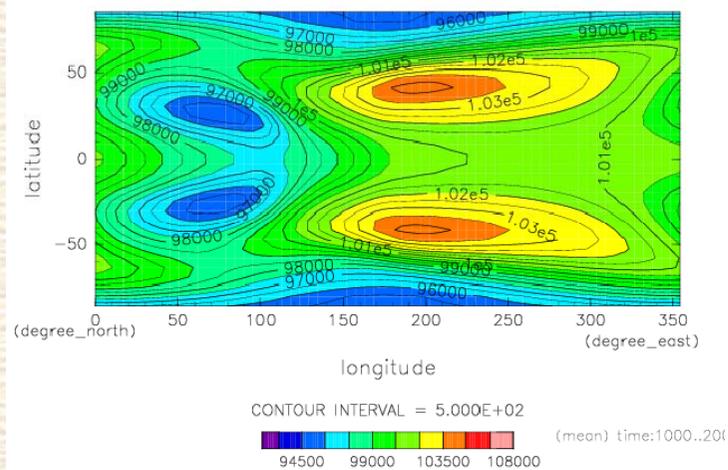
地表面温度



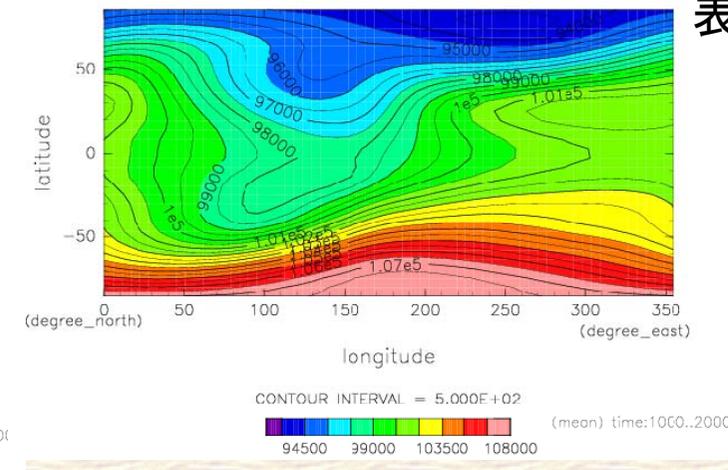
地表面温度



表面気圧



表面気圧



同期回転惑星実験

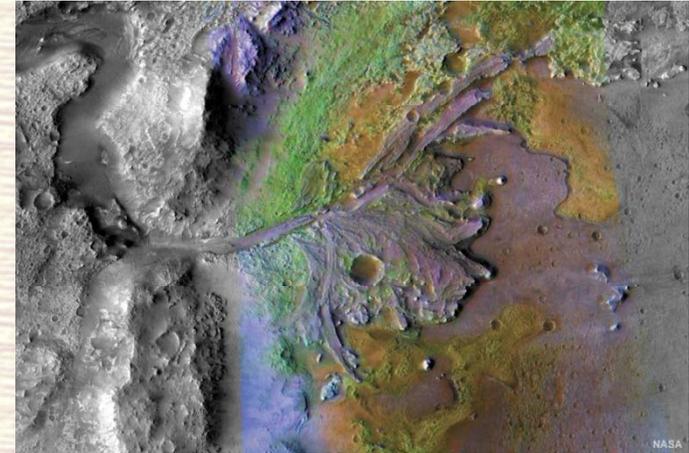
■ 使用計算資源

- 未並列！（PCから持ってきたところ）
- 使用メモリ： 320MB
- ElapsedTime： 約38000sec（2000日計算）
- ベクトル化率： 93.1%
- 1job における出力データサイズ： 2GB

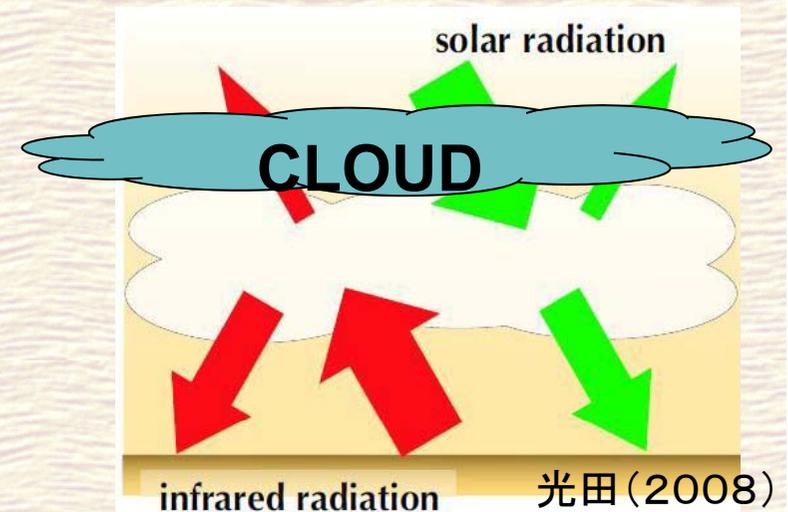
主成分凝結対流実験

■ 初期火星の主成分凝結対流

- 38 億年前の火星は液体の水が存在できるほど温暖だった
- 大気主成分である CO₂ の氷雲による散乱温室効果(Forget and Pierrehumbert, 1997 ; 光田, 2008)
- 地球の雲対流とは違った湿潤対流の例題

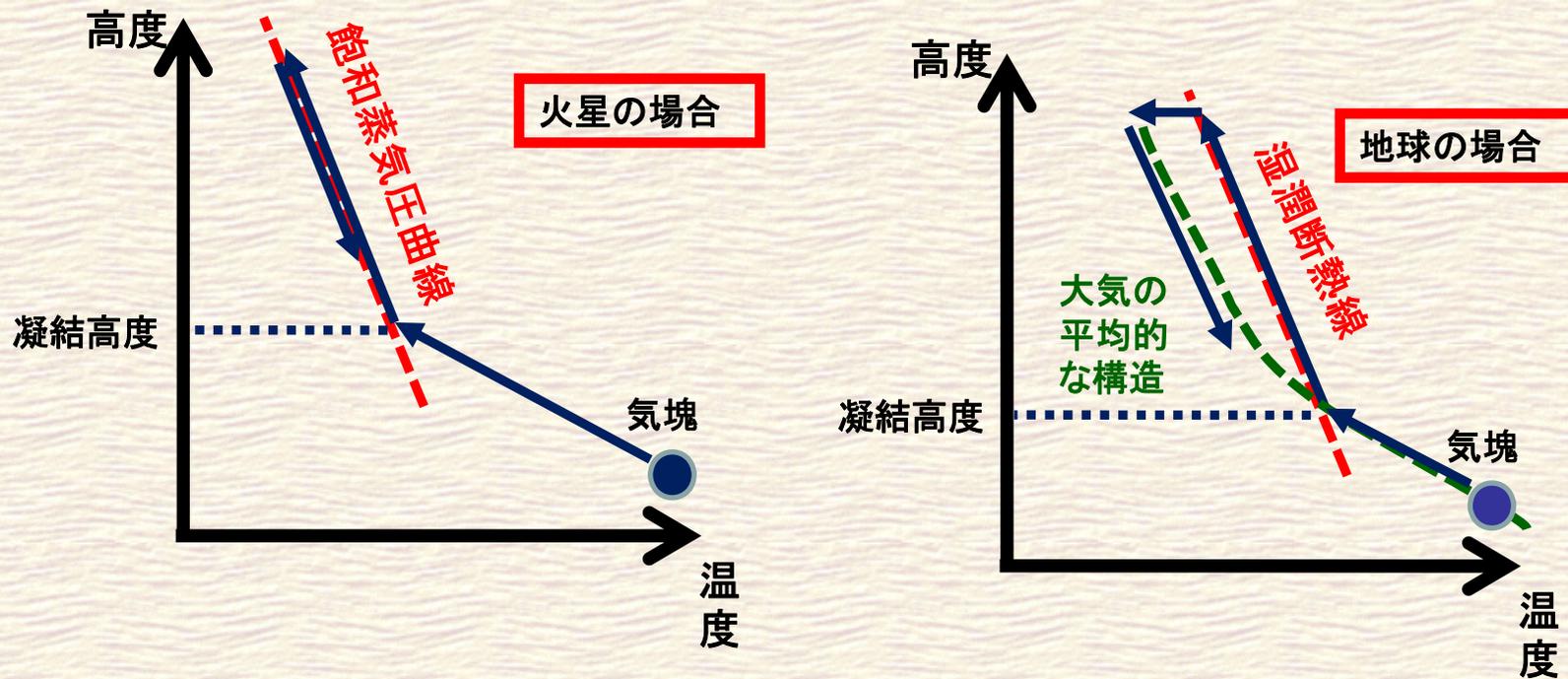


Copyright : NASA



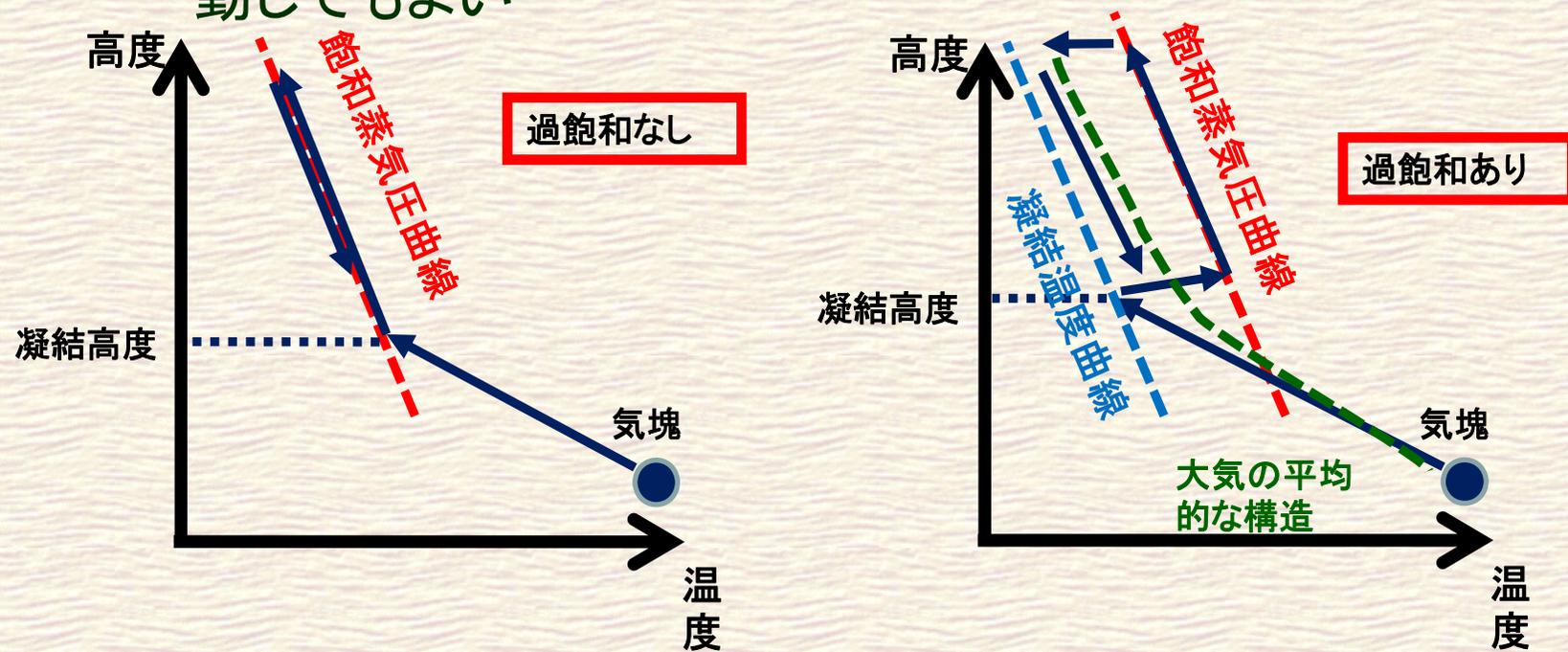
地球と火星の湿潤対流の違い

- 地球では微量成分, 火星では主成分が凝結
 - 火星では湿潤断熱線に関する自由度が1つ少ない
 - ◆ 気塊は上昇・下降時に同じ湿潤断熱線(飽和蒸気圧曲線)に沿って移動
 - ◆ その結果浮力を得られない



過飽和の有無による違い

- 火星の場合, 過飽和があると浮力が得られるかもしれない
 - 火星の場合, 過飽和度は0.35(地球ではせいぜい0.05)
 - 過飽和があると下降時に飽和蒸気圧曲線に沿わずに移動してもよい



主成分凝結対流支配方程式

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

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

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

熱膨張項

大気質量の減少による圧力低下を表す項

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

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

“-”の付いた量は基本場,
“'”の付いた量は擾乱場

$\mathbf{u} = (u, w)$: 流速, $\mathbf{D}_u = (D_u, D_w), D_\theta, D_{\rho_s}$: 乱流拡散項, $\mathbf{g} = (0, g)$: 重力加速度,
 θ : 温位, Π : エクスター関数, ρ : 大気密度, c_s : 音速, T : 温度, C_p : 定圧比熱,
 L : CO_2 の潜熱, M_{cond} : 単位時間単位体積あたりの凝結量,
 M_{fall} : 単位時間単位体積あたりの雲粒落下項,
 Q_{dis} : 散逸加熱項, Q_{rad} : 放射加熱項, ρ_s : 雲密度

主成分凝結対流実験設定

■ 計算領域・計算時間

- 水平 50 km, 鉛直 20 km(格子間隔 200 m)
- 30 or 40 日

■ 境界条件

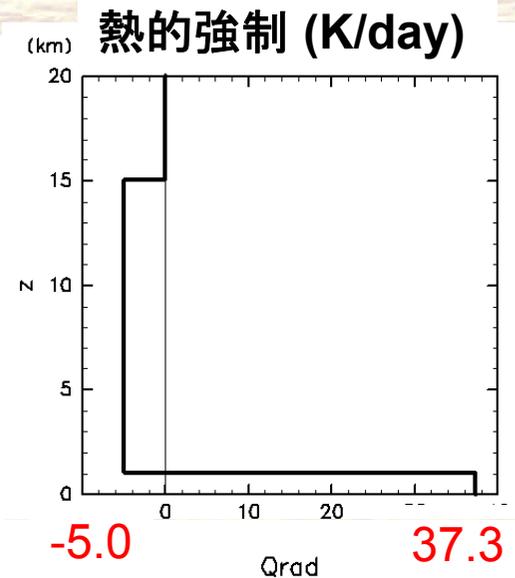
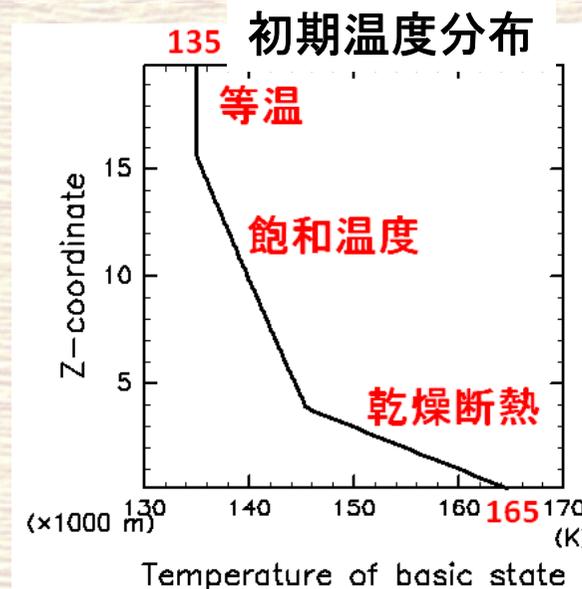
- 水平方向 : 周期境界
- 鉛直方向 : 応力なし

■ 初期条件

- 温度分布 : 右図参照
- 最下層にランダムな温位擾乱(最大 1 K)

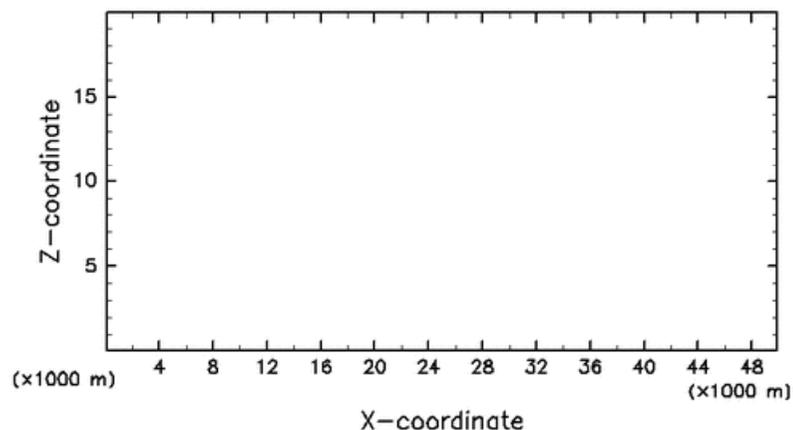
■ 放射強制 : 右上図参照

- 高度 1 – 15 km で一様冷却, 高度 0 – 1 km で一様加熱
- 加熱と冷却は, 領域積分で常時バランス



計算結果、物理的検討が1.0の場合

vertical velocity



CONSTANT (0.000E+00) FIELD.

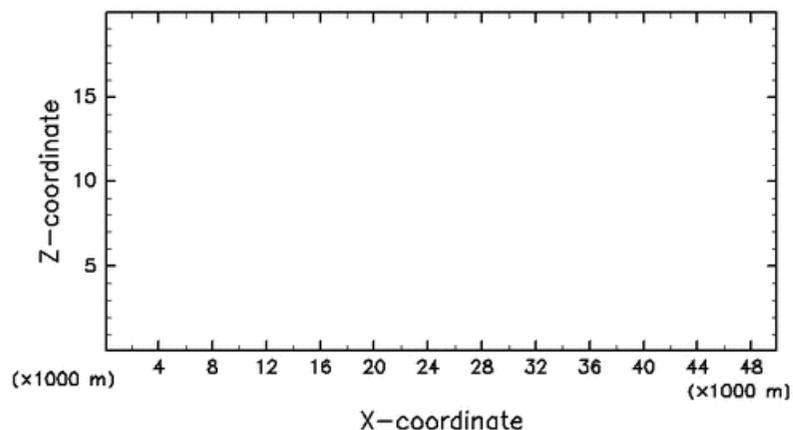


t=0 s

MarsCond_VelZ.nc@VelZ,x=0:50000,z=0:20000,t=000000

/usr/bin/gvview 2008-12-20

density of cloud



CONSTANT (0.000E+00) FIELD.

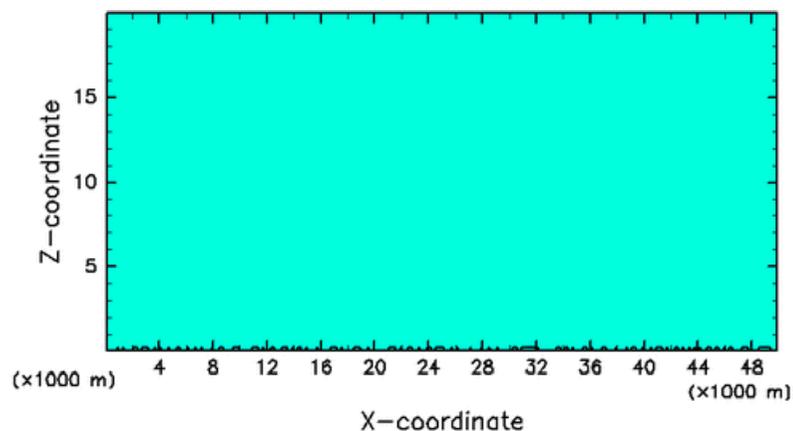


t=0 s

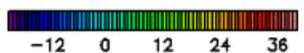
MarsCond_DensCloud.nc@DensCloud,x=0:50000,z=0:20000,t=000000

/usr/bin/gvview 2008-12-20

disturbance of potential temperature



CONTOUR INTERVAL = 3.000E+00

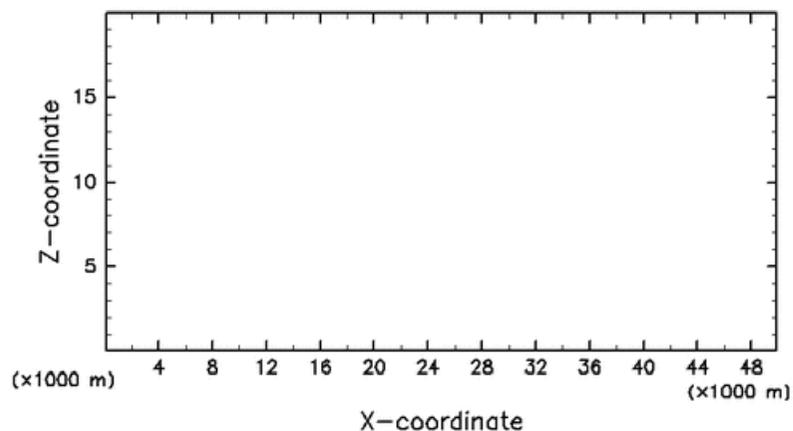


t=0 s

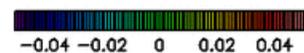
MarsCond_PotTemp.nc@PotTempDist,x=0:50000,z=0:20000,t=000000

/usr/bin/gvview 2008-12-20

disturbance of Exner



CONSTANT (0.000E+00) FIELD.



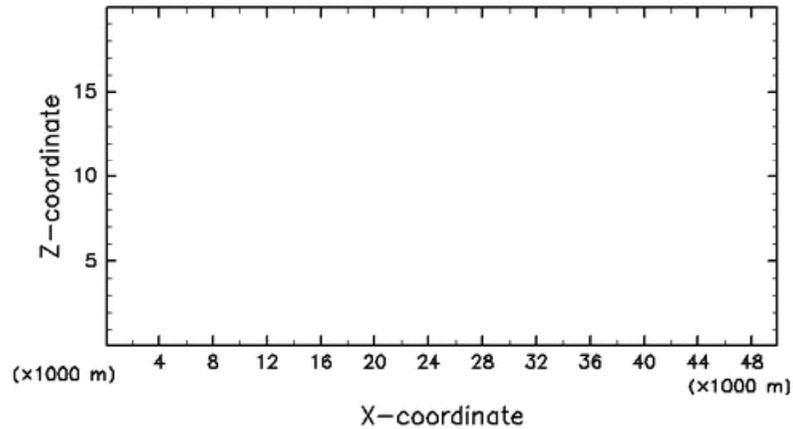
t=0 s

MarsCond_Exner.nc@Exner,x=0:50000,z=0:20000,t=000000

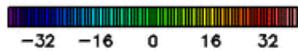
/usr/bin/gvview 2008-12-20

計算結果、物理的検討が1.25の場合

vertical velocity



CONSTANT (0.000E+00) FIELD.

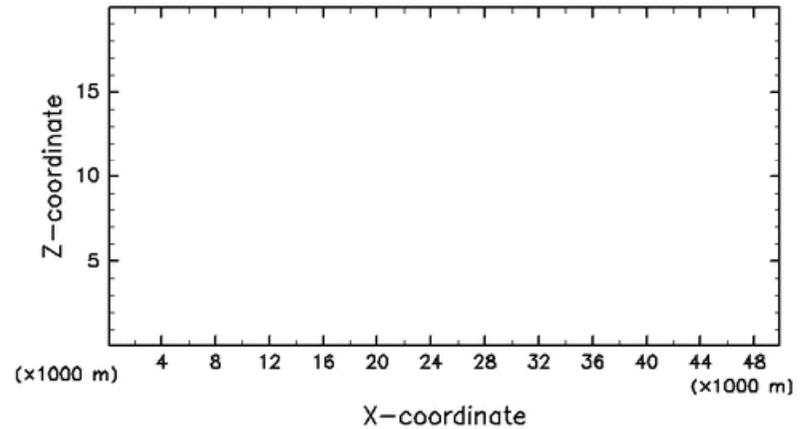


t=0 s

MarsCond_VelZ.nc@VelZ,x=0:50000,z=0:20000,t=000000

/usr/bin/gvview 2008-12-21

density of cloud



CONSTANT (0.000E+00) FIELD.

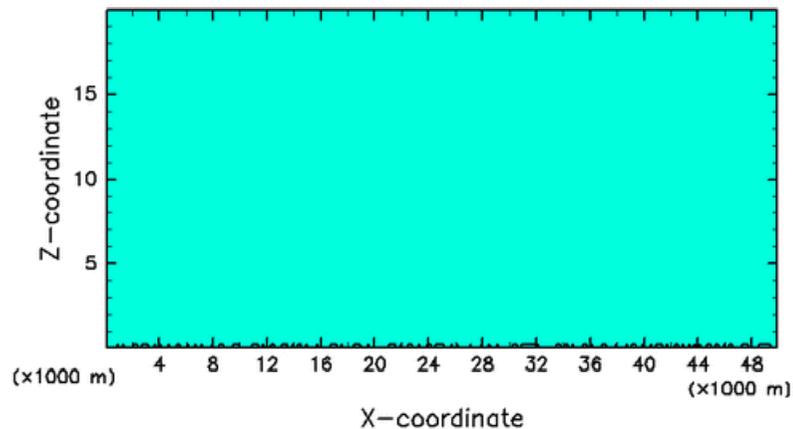


t=0 s

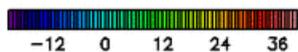
MarsCond_DensCloud.nc@DensCloud,x=0:50000,z=0:20000,t=000000

/usr/bin/gvview 2008-12-21

disturbance of potential temperature



CONTOUR INTERVAL = 3.000E+00

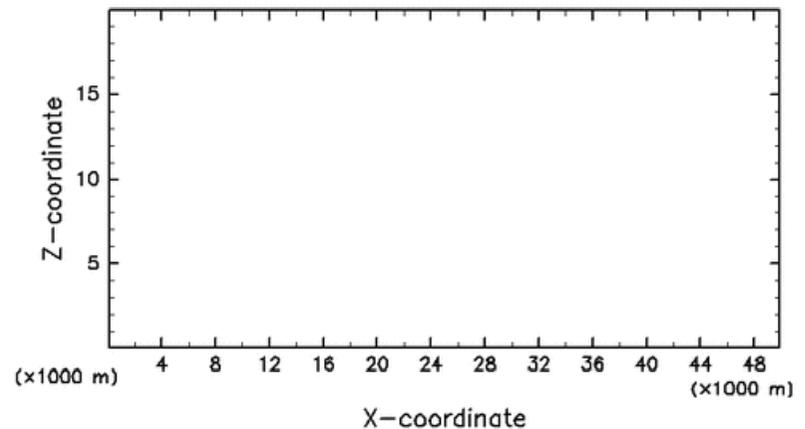


t=0 s

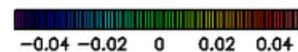
MarsCond_PotTemp.nc@PotTempDist,x=0:50000,z=0:20000,t=000000

/usr/bin/gvview 2008-12-21

disturbance of Exner



CONSTANT (0.000E+00) FIELD.



t=0 s

MarsCond_Exner.nc@Exner,x=0:50000,z=0:20000,t=000000

/usr/bin/gvview 2008-12-21

主成分凝結対流実験

■ 使用計算資源

- 未並列！（PCから持ってきたところ）
- 使用メモリ 192MB
- ElapsedTime 約40000sec（10日計算）
- ベクトル化率： 98.1%
- 1job における出力データサイズ： 5GB

火星—地球系モジュール開発

- 海と陸がある惑星の計算をおこなうために以下の伝統的なモジュールを整備
 - バケツモデル (Manabe, 1969)
 - 地下熱伝導モデル
 - 海氷 1 層熱伝導モデル

火星—地球系地表面モジュールの実装

■ 解像度

- T31L16

- ◆ 水平格子点間隔 ~3.75°
- ◆ 鉛直層数 16 層

■ 以下の 4 種類惑星大気の計算を行った.

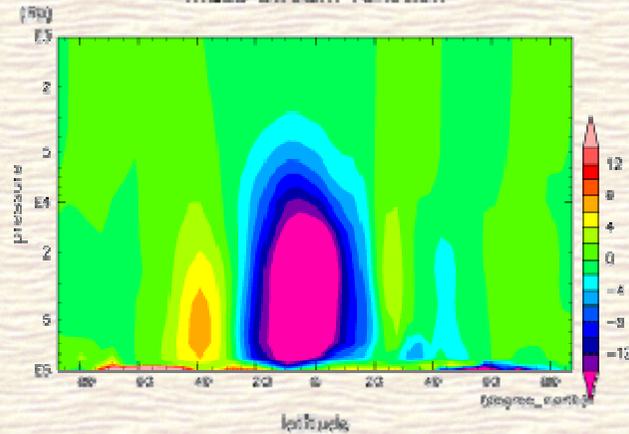
	海	半径	1 年の日数
Case 1「海と陸」	あり	地球	地球
Case 2「海なし」	なし	地球	地球
Case 3「火星半径」	なし	火星	地球
Case 4「火星の 1 年」	なし	火星	火星

- すべての計算で地球の地形の起伏を与えた.
- Case 1 の計算では地球の海陸分布と AMIP の海表面温度の気候値を与えた.

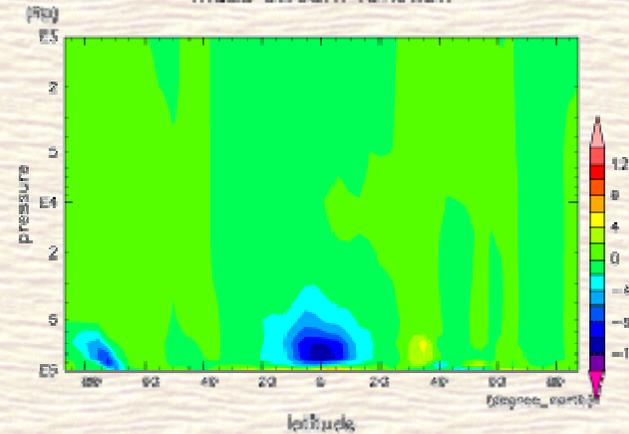
火星—地球系計算結果

子午面循環(“8月”)

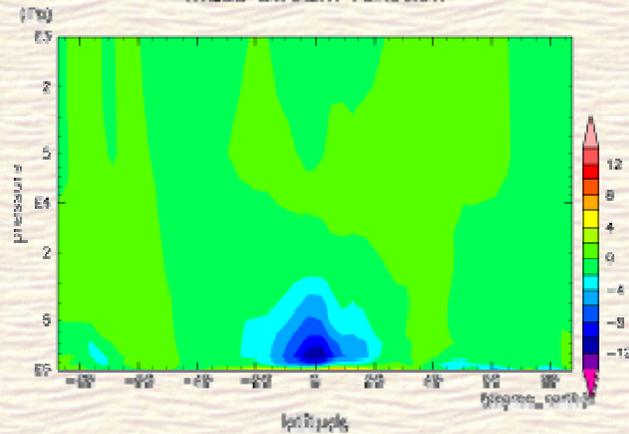
Case 1「海と陸」
mass stream function



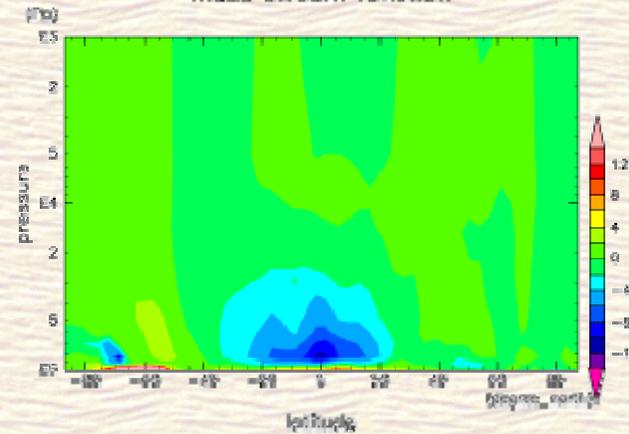
Case 2「海なし」
mass stream function



Case 3「火星半径」
mass stream function



Case 4「火星の1年」
mass stream function



注: 流線関数の大きさをそろえるため, Case 3, 4 の質量流線関数の計算には地球の半径の値を用いました

今後の展開

■ 階層的なモデル群の整備の継続

- 軸対称モデルは今年度中に開発予定
- GCM計算と対流モデル計算の連携計算の実現
- I/O速度の向上
- 並列計算における効率向上の検討

■ 基礎的実験の続行(「正しい」スパコンの利用へ)

- 地球-火星(金星)パラメタ領域の探索
 - ◆ 主成分凝結対流の大領域での統計的平衡計算
 - ◆ 暴走凝結から暴走温室まで
- 水惑星の自公転パラメタ依存性探索
 - ◆ 高水平解像度化
 - ▶ 解の対称性低下の分解能依存性確認(自由度の増加による安定解の消滅?)
 - ▶ 自転速度を上げると分解能も高くする必要
 - ◆ パラメタ計算・アンサンブル計算による解の面的掌握

結果: Case 1 「海と陸」降水量

