

AFES を用いた 地球型惑星の大気大循環シミュレーション

発表者・プロジェクト責任者

林祥介（神戸大学大学院理学研究科）

主要参加機関

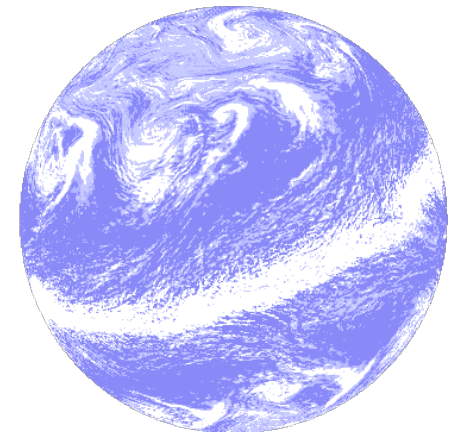
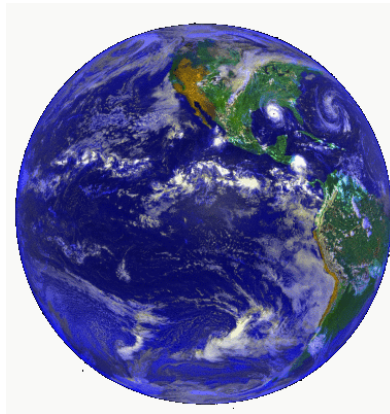
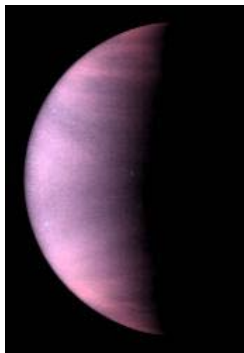
北海道大学, 東京大学, 神戸大学, 九州大学

協力機関

地球シミュレータセンター



- 惑星大気循環構造の多様性の理解を目指す。
 - 火星, 金星, 水惑星(地球の全球を海で覆った仮想的な惑星)における大気大循環の個別の数値実験
 - 今年度は火星, 金星に焦点をおいて研究を実施



- 火星大気数値実験
 - 観測の難しい中小規模擾乱
 - 数百キロメートル～10キロメートルの表現.
 - それらによる自然なダスト巻き上げ過程の表現.
 - 今年度は...
 - 昨年度末に発見されたコーディングミス~~を修正し~~, 昨年度までに得られた結果を検証.
 - 昨年度まで以上に高い解像度での実験を目指す.

● 金星大気数値実験

- 金星大気大循環(スーパーローテーション)の形成機構を考える上でのポイント.
 - 大気の成層度
 - 鉛直・水平対流の有無・形態・相互作用
 - 平均子午面循環
 - 実在するか?(観測的な証拠はない)・構造・Gieraschメカニズム
 - 運動量を輸送する擾乱
 - 熱潮汐波による鉛直輸送
 - 重力波
 - 現実的な放射強制
 - 既存のスーパーローテーション再現数値実験はすべて人工的な過剰の加熱冷却分布による強い子午面循環が駆動
- 現実的な放射過程を含む力学モデルが不可欠
 - 放射モデルは存在しない:新規開発が必要
 - 鉛直波長の短い熱潮汐波, 重力波など, 関与が予想される運動量輸送過程をできるだけ陽に表現
- 今年度は...
 - 高精度の放射モデルの開発改良の継続(非地球シミュレータ研究)
 - 簡単放射モデルを用いて3次元計算実行可能性を担保し, 順次放射モデルの実装へ

- 力学過程（流体運動の記述）
 - AFES (AGCM (Atmospheric General Circulation Model) for the Earth Simulator, Ohfuchi et al., 2004)
 - CCSR/NIES AGCM version 5.4.02 を元に地球シミュレータ向けに最適化
 - “伝統的/古典的”なスペクトルモデル, セミインプリシット時間積分
 - 火星, 金星, ...の高分解能静力学モデルの共通の枠組みとして利用(あるいは利用可能にする)
- 物理過程（流体運動以外の記述）
 - 火星, 金星独自の物理過程モジュールを開発
 - AFES と組み合わせることで各惑星大気実験を実施

- 更新後の地球シミュレータへの最適化に失敗
 - 十分な性能を引き出せていない
 - 高解像度計算に進めない
 - 時間の浪費
 - 地球シミュレータセンターの AFES グループの方に助言を頂いて、最適化作業に継続して取り組んでいる。
- 現状例：火星モデル解像度 T79L96[†] の実験
 - †格子間隔~89 km; Nx=240, Ny=120, 鉛直 96 層

使用ノード数	4 node
メモリサイズ	68 GB
ベクトル化率	99.359%
並列化率	<u>97.1% (ノード申請にも支障)</u>
CPU 時間	100 火星日積分 / 8 時間

並列化率を改善して高い解像度の実験を実施したい。

- 物理過程 (Takahashi et al. (2003, 2006) の火星モデルの物理過程)
 - 放射 (CO₂, ダスト)
 - 乱流混合 (Mellor and Yamada (1982))
 - 地面過程
 - CO₂ 相変化過程 (熱, 質量に対する効果を含む)
 - ダストの分布は仮定 (水平一様)
- 季節: 北半球の秋
 - ダストストームが起こりやすい季節

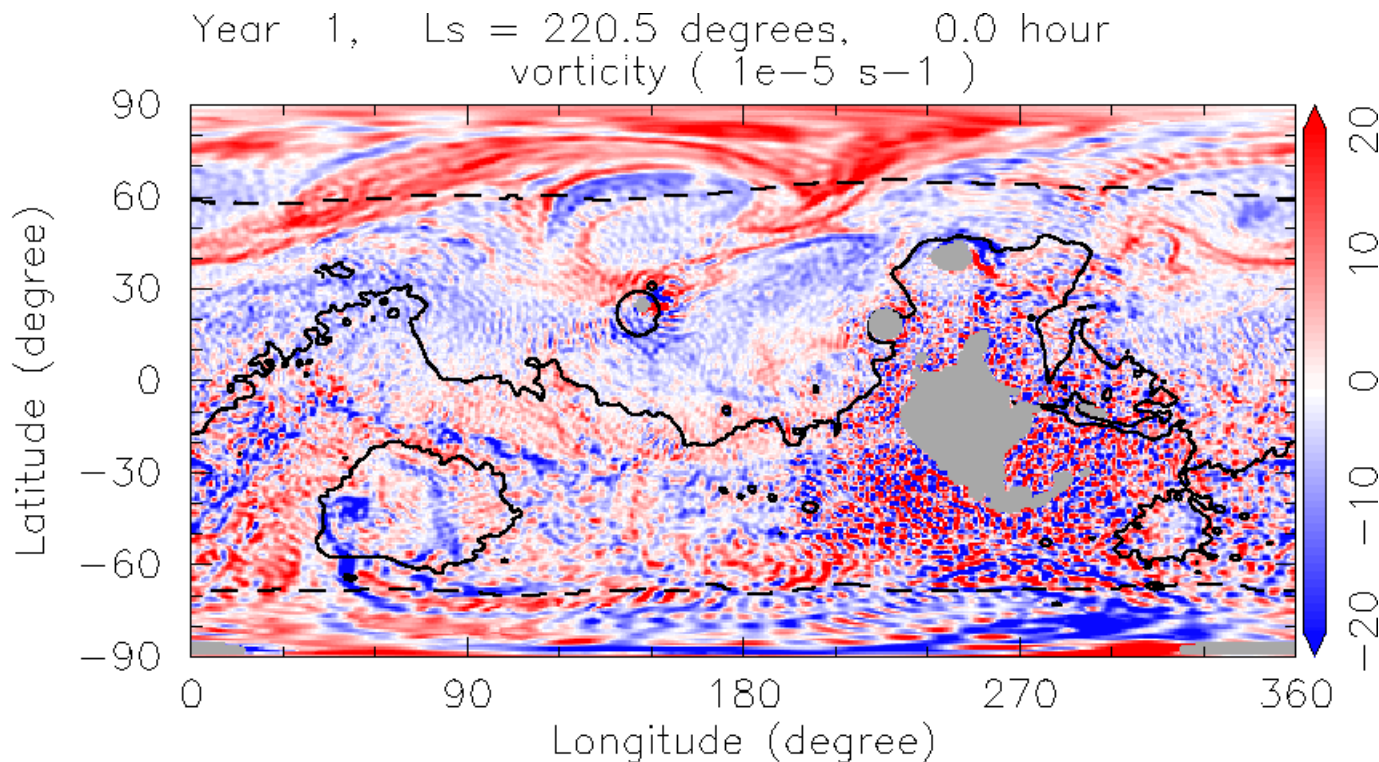
- 解像度

		昨年度実行		今年度当初の目標	
		T79	T159	T319	T639
水平		89 km	44 km	22 km	11 km
鉛直 96 level		○	○	×	×

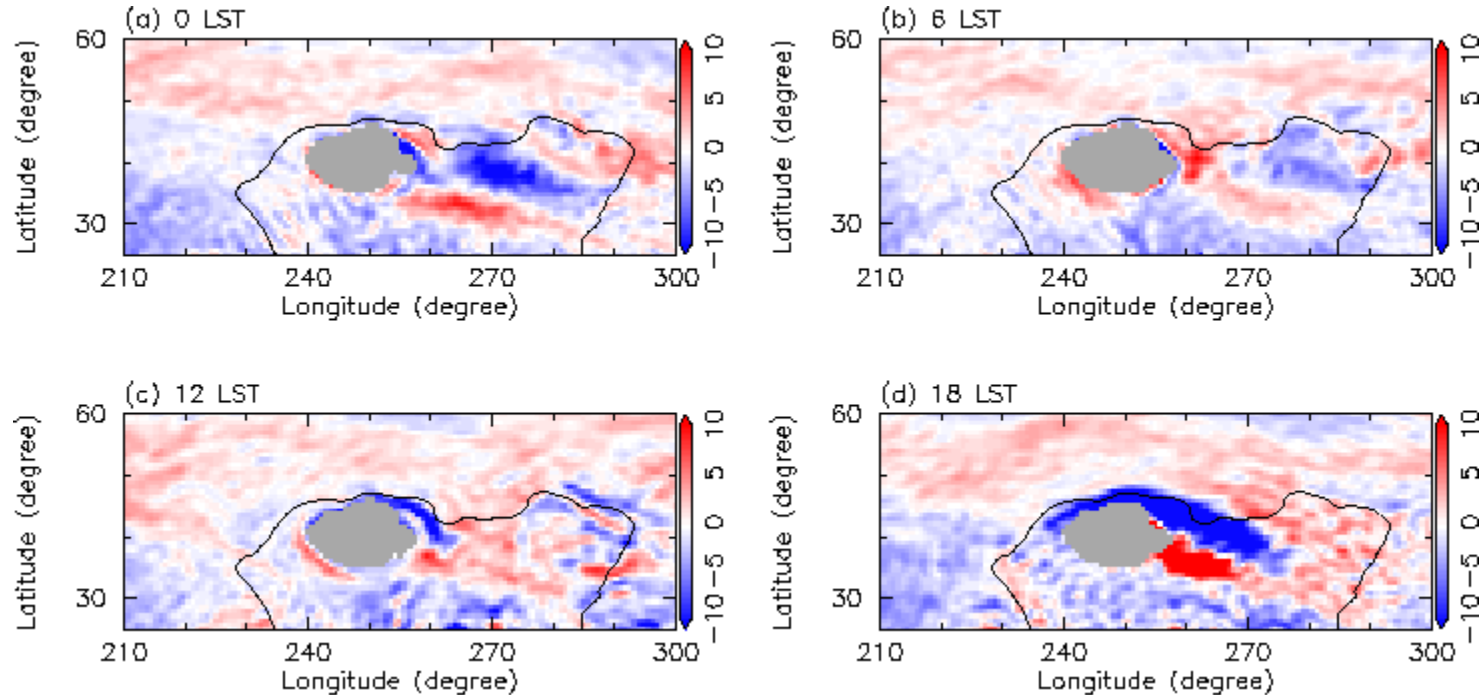
水平解像度の上段は打ち切り波数, 下段は水平格子点間隔

- コーディングミスの修正と確認実験
 - 地表面応力は速度の二乗に比例するが, 三乗に比例するとしていた!
 - T159L96 の確認実験までは再計算実施
 - 修正後も定性的には大きな変化がなさそうであることを確認 (次に例示).

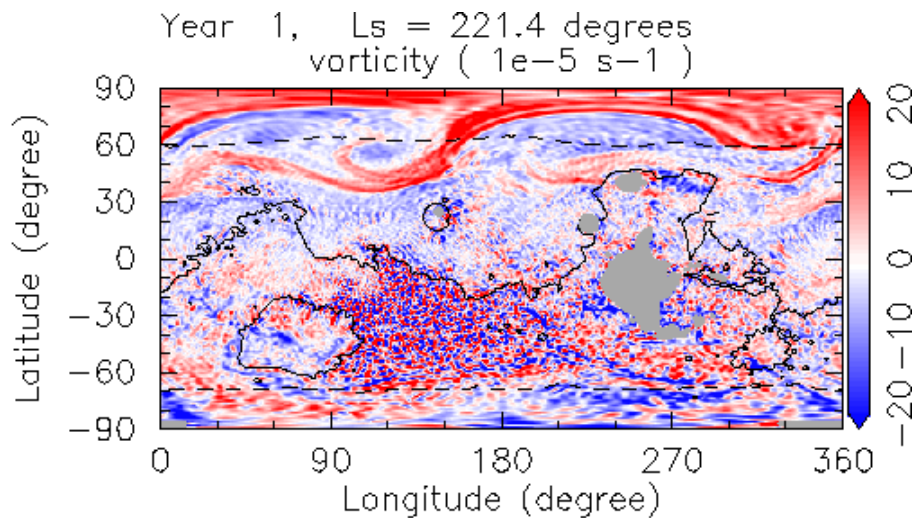
- 4 hPa 気圧面での渦度分布: 動画



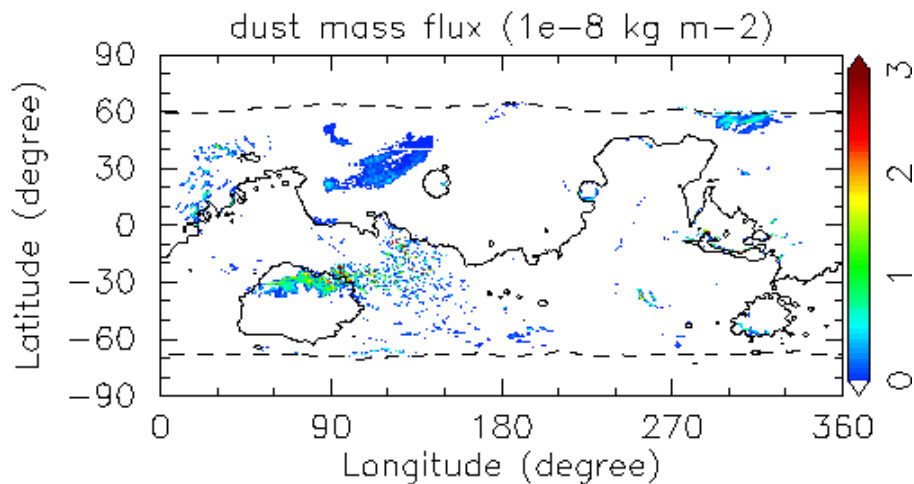
昨年度までに見られた特徴的な構造は、地表面応力評価における表現の間違いに致命的な影響を受けていないようだ？！



- 平均風と山の相互作用, および山の周囲の日変化する斜面風の重ね合わせで渦が生じる.



- 強いダスト巻き上げは, 前線の領域で発生.
- 低緯度の小規模渦もダスト巻き上げに寄与しているようだ.



火星実験 地表面応力の解像度依存性

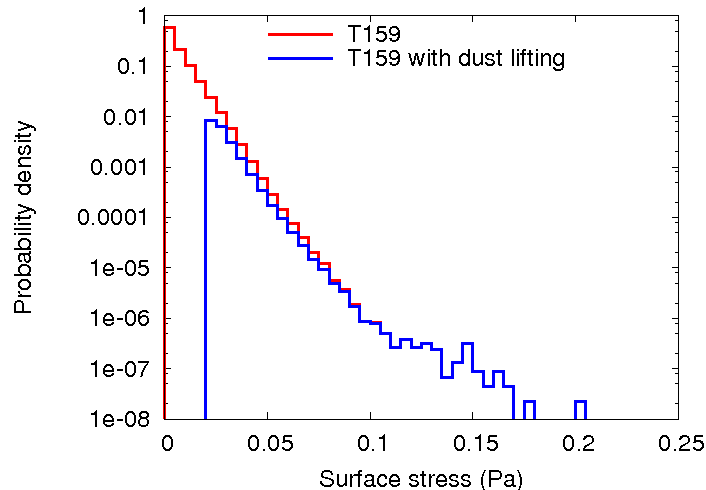
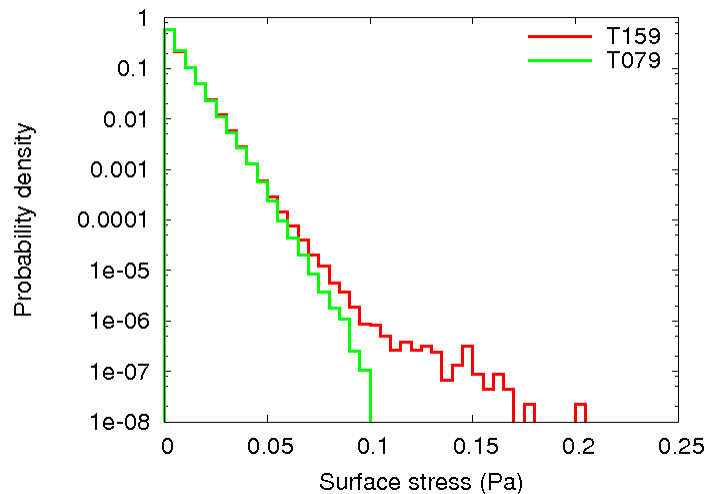
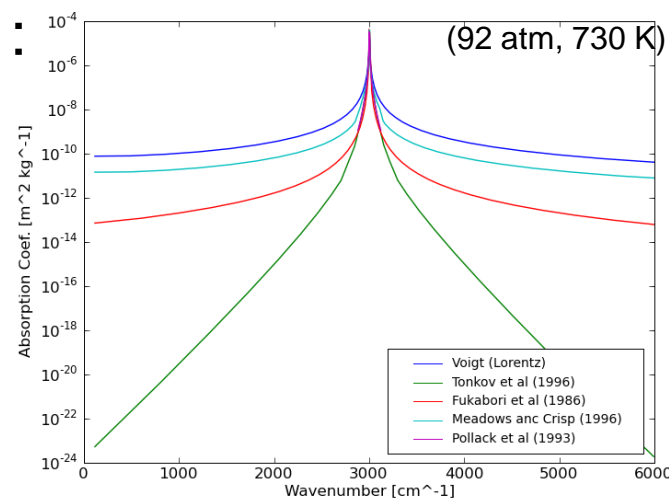


図. 地表面応力のヒストグラム.

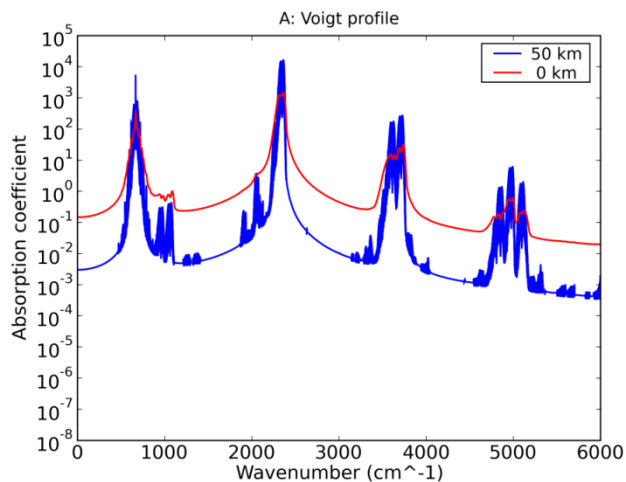
- 高解像度モデルの方が、大きな地表面応力を表現。
 - 中小規模擾乱によって大きな応力が表現.
 - T159 のモデルにおける最大値は、T79 の最大値の ~1.7 倍.
- 大きな地表面応力がダスト巻き上げに確かに寄与している.

- 昨年度の高解像度 (T319L96) 計算に深刻なコーディングミスがあったので、低・中解像度 (T79L96, T159L96) で、北半球の秋の季節における火星大気大循環実験の検証再実験を行った。
 - コーディングミスは、幸いにも定性的には(不思議なことに?)大きな影響を与えていないようだ。
 - 地表面応力の分布を調べた結果、解像度を高くすることで、中小規模擾乱に伴う大きな応力がダストの巻き上げに寄与していることを改めて示した。
- 現在は、まだモデルを現在の地球シミュレータに最適化する作業中であり、今後地球シミュレータにふさわしい高い解像度での実験を実現したい。

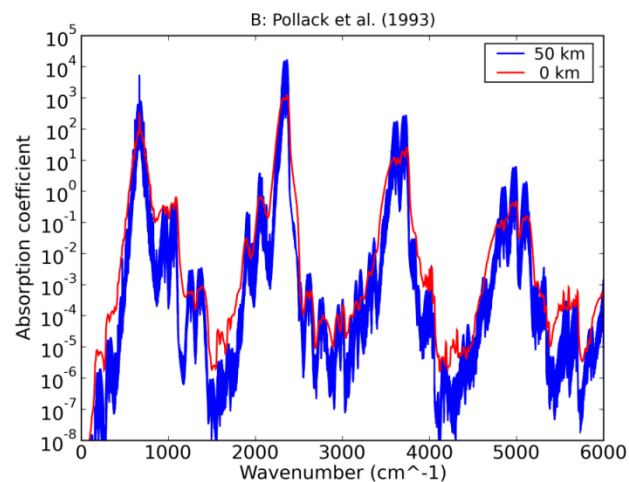
- 高温・高圧条件下での CO_2 や H_2O の吸収線型がわからないため、様々な吸収線型を用いて放射平衡・放射対流平衡を計算して結果を比較する。
- CO_2 の吸収線型には以下を採用：
 - Voigt (Lorentz) profile
 - Pollack et al. (1993)
 - Tonkov et al. (1996)
 - Fukabori et al. (1986)
 - Meadows and Crisp (1996)
- CO_2 の連続吸収 (collision induced absorption) は Moskaleiko et al. (1979) に準拠。
- H_2O の吸収線型には Voigt profile を採用。



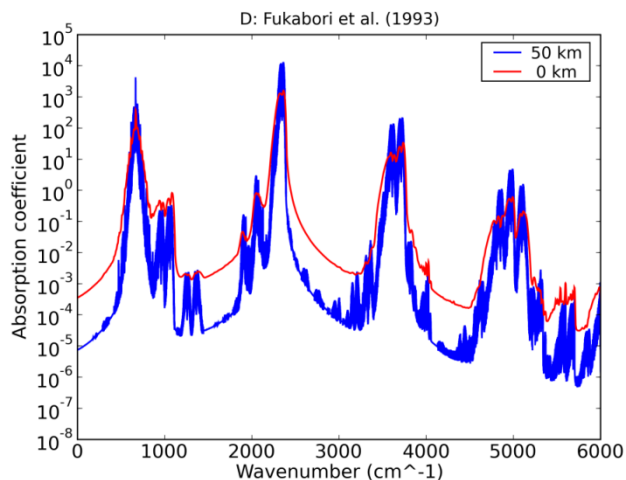
CO₂ の吸収係数の線型依存性



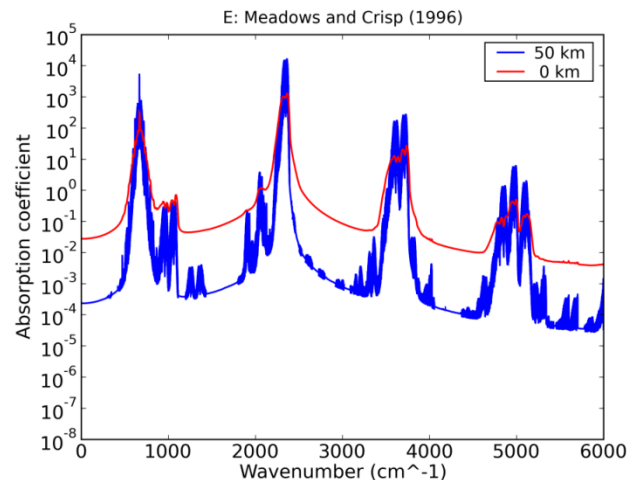
Voigt (Lorentz)



Pollack et al. (1993)



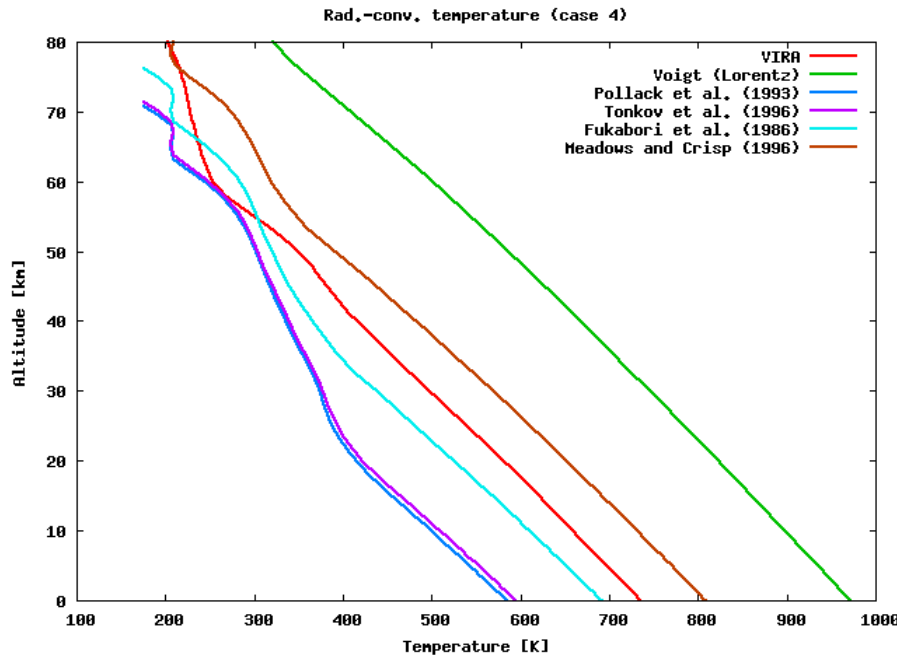
Fukabori et al. (1993)



Meadows and Crisp (1996)

- 相関 k 分布法
 - 波数領域: 0-6000 cm^{-1} (30 channels)
 - CO_2 , H_2O と H_2SO_4 エアロゾルの雲を考慮
 - 吸収係数は, 吸収線データベース HITEMP, HITRAN 2004 を用いて, line-by-line 法によって評価
- 鉛直領域
 - 高度 0–80 km を 50 層に分割
- 太陽加熱
 - 太陽光吸収による大気の加熱分布は観測結果で固定 (Tomasko et al., 1980)
- 鉛直対流
 - 鉛直対流による熱輸送は混合距離理論に基づく渦粘性で表現
- 時間積分
 - 等温大気 (300 K) から定常状態まで数値積分

放射対流計算結果の一例

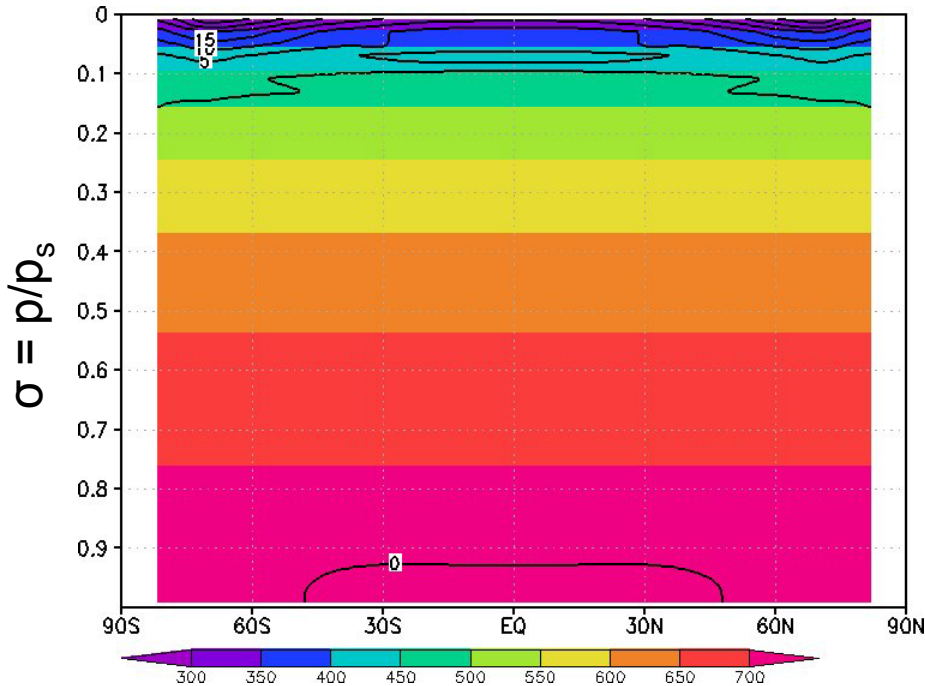


- 以下の効果を考慮
 - CO₂ による吸収
 - H₂O による吸収
 - 雲
 - 光学的厚さは 10
 - 30 でもほぼ同様の結果が得られる。
- 結果は吸収線型の選び方に敏感.
- Fukabori et al. (1983) と Meadows and Crisp (1996) の中間的な吸収線型を用いることで、ある程度現実的な放射輸送モデルを構築できる可能性.

- AFES に簡単な放射モデル(灰色)を導入して大循環計算の予備実験を実施.
 - 対流調節
 - 鉛直渦拡散 (拡散係数: $1.0 \text{ m}^2/\text{s}$)
 - 放射過程
 - 赤外放射モデル (松田・高木, 2008)
 - 吸収係数: 波長依存性なし
 - 雲なし
 - 太陽光吸収 (Tomasko et al., 1980)
- 解像度: 残念ながらパソコンレベル
 - T21L50
 - 水平格子点間隔 ~600 km, 鉛直 50 層
- 積分期間
 - 30 地球年間

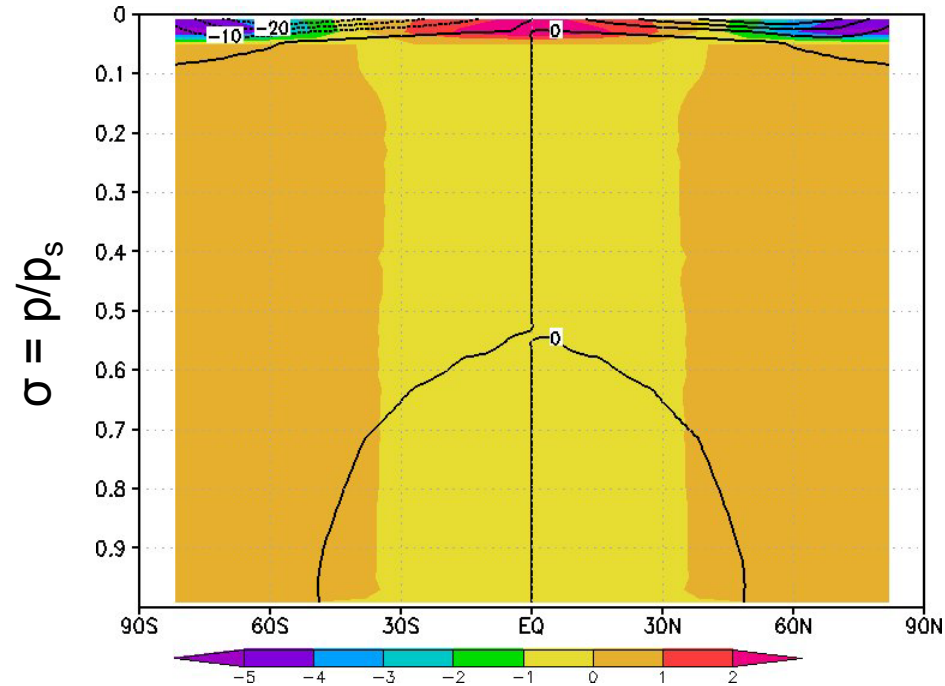
得られた東西平均循環

東西流と温度の分布



- 上層 (~40-50 km) に 15 m/s 程度の平均東西流
- 下層の平均東西流は非常に弱い

南北流と温度偏差の分布



- 最上層に強い南北流 (10-20 m/s)
- 最上層の南北温度差は 7 K 程度
- 下層の平均子午面循環は $V=0.5$ m/s 程度

- 現実的な金星放射モデルの開発
 - 時間をとってしまった...
- 簡単な放射モデルを AFES に導入して予備的な実験を実施.
 - とりあえず動く(低解像度30年の時間積分)
- 以下の計算を今後行いたい:
 - 開発した精密な放射モデルを用いた実験を実施したい.
 - 定常状態の計算 (数百年の時間積分)
 - 鉛直領域の拡大: 高度 0-80 km は必要
 - できるだけ高分解能
 - 最低T79L160程度からより高い分解能に

- 更新後の地球シミュレータへの“AFES”の最適化＝急務
 - － 地球シミュレータセンター AFES グループから助言を頂き実行する
- 火星大気数値実験
 - － 高解像度実験の実行
 - フラットな「火星」の場合の地表面応力解像度依存性
 - ダスト巻き上げ量, 中小規模擾乱の季節依存性
- 金星大気数値実験
 - － 詳細な放射モデルを用いた長時間積分の実行
 - 放射モデルの完成・実装、高分解能化
 - 「あかつき(Planet-C)」の前に, 現実的な金星大気スーパーローテーションの再現?