

# 系外惑星大気シミュレーションモデル の開発:ダスト過程の実装と 火星大気実験

(H23年度課題:非静力対流モデルを用いた  
湿潤大気構造の太陽定数依存性  
に関するパラメータ実験)

石渡正樹(北大・理),林祥介(神大理)、中島健介(九大理)、  
高橋芳幸(神大理)、小高正嗣(北大理)、  
地球流体電脳倶楽部

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



2012年12月11日 国立環境研究所  
平成24年度スーパーコンピュータ利用研究報告会



# 研究背景

- めざしてきたことは湿潤大気の振る舞いに関する知見の蓄積
  - 多様な設定(地球大気、惑星大気、系外惑星大気、仮想的設定)における大気に関する数値計算
  - これらを通じた湿潤対流に関する知見の蓄積、および地球大気に関して得られてきた知見の再検討
  - このためのモデル開発
    - 入出カライブラリ、準圧縮系雲解像モデル、静水圧大気大循環モデル
- これまでの計算は簡単設定における気候探索
  - 水惑星実験(SST応答、暴走温室状態)、雲対流
  - 火星乾燥対流、火星主成分凝結対流
- 次のステップとして、より「現実的な」設定へ

# 昨年度の研究

## 非静力対流モデルを用いた 湿潤大気構造の太陽定数依存性 に関するパラメータ実験

課題代表者: 林祥介(神戸大・理)

共同研究者: 中島健介(九州大・理)

石渡正樹(北大・理)

高橋芳幸(神戸大・理)

小高正嗣(北大・理)

# 昨年度の研究目的

- 雲解像モデルによる、雲の放射吸収を考慮した放射対流平衡計算
  - 我々のこれまでの計算：  
雲無し・単純放射を用いた気候多様性の探索
  - 雲と放射の相互作用を考慮した計算へと進む
- もともとの目標は温度構造・雲分布の太陽定数依存性の調査
  - 高温・高湿度大気での雲対流の振る舞い・雲と放射の相互作用は不明
    - GCM計算はIshiwatari et al. (2002, 2007)
  - まずは太陽定数固定・SST固定から開始。SST固定の雲解像長時間計算はかなりおこなわれているが (Rappin et al. 2010など)、SST固定でないものはまだ少数
- しかし、質量保存性が破れる問題が発現
  - 基礎方程式に立ち戻った検討を実施

# モデル・支配方程式

- 雲解像モデルdeepconv/arare
  - <http://www.gfd-dennou.org/library/deepconv/>
- 基礎方程式：準圧縮方程式
  - Klemp Wilhelmson(1978)に準拠（膨張項なし）
- 地球放射モデル
  - Chou et al. (1996), Chou et al. (2001)
  - 太陽定数：1366W/m<sup>2</sup>、太陽天頂角：60度
  - オゾン鉛直分布:地球の赤道域を想定した分布
- 暖かい雨のパラメタリゼーション
  - Kessler (1969)
  - 氷相は無し

# モデル・支配方程式

- 雲解像モデルdeepconv/arare 一応式残しておきます

– <http://www.gfd-dennou.org/library/deepconv/>

- 基礎方程式：準圧縮方程式(Klemp and Wilhelmson, 1978)

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

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

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

水蒸気の式: 
$$\frac{\partial q_s}{\partial t} = -\nabla \cdot (q_s \mathbf{u}) + M_{cond} + D_{q_s}$$

$\mathbf{u} = (u, w)$ : 速度,  $\theta$ : 温位,  
 $\Pi$ : エクスター関数,  $\rho$ : 気相密度,  
 $q_s$ : 水蒸気混合比,  $T$ : 温度,  
 $c_s$ : 音速,  $C_p$ : 定圧比熱,  
 $L$ : 潜熱,  $M_{cond}$ : 凝結率,  
 $Q_{dis}$ : 散逸加熱率,  $Q_{rad}$ : 放射加熱率,  
 $\mathbf{D}_u = (D_u, D_w)$ ,  $D_\theta$ ,  $D_{\rho_s}$ : 乱流拡散項,  
 $\mathbf{g} = (0, g)$ : 重力加速度

# 計算設定・計算資源

- 計算設定

- 2次元領域 : 512km × 30km
- 格子間隔 : 水平1km、鉛直300m
- 下部境界 : 固定 S S T (302K)
- 積分時間 : 80日

- 計算資源

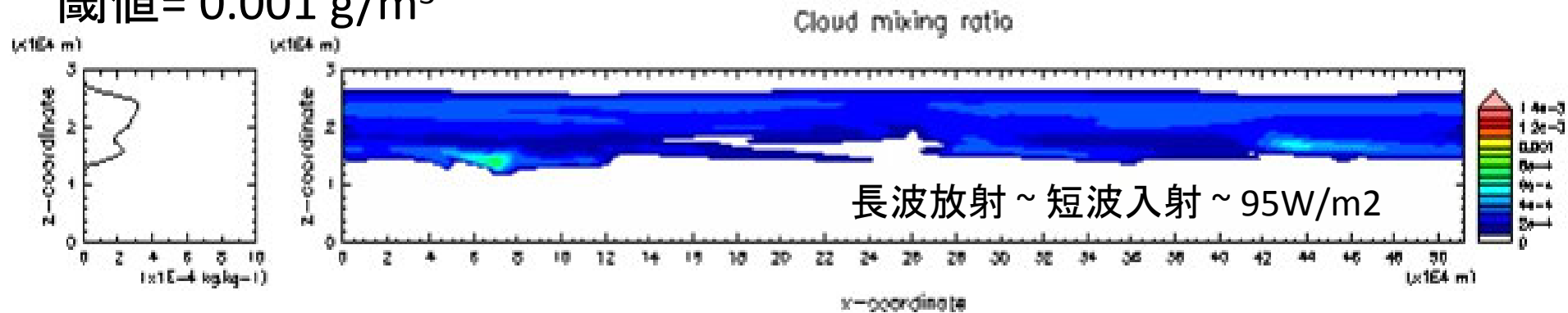
- CGER SX-8 2 CPU
- 使用メモリ : 1184 MB
- 実行時間 : 約 106時間 (80日分)
- ベクトル化率 : 92.6%

# 放射対流平衡計算の結果

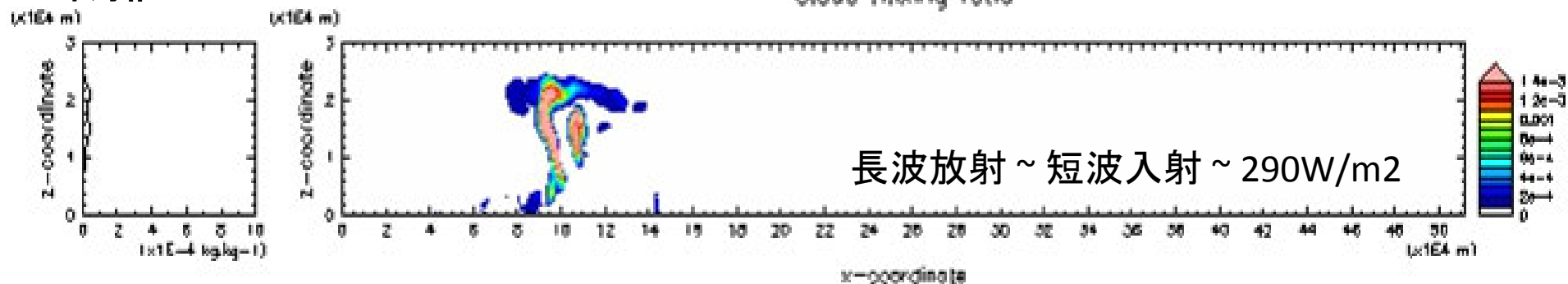
## 雲微物理パラメタへの大きな依存性を確認

- 雲水から雨への変換しきい値により、雲量・放射収支が非常に異なる。雨量にも大差がある（値を確認中）。

閾値 =  $0.001 \text{ g/m}^3$



閾値 = 0



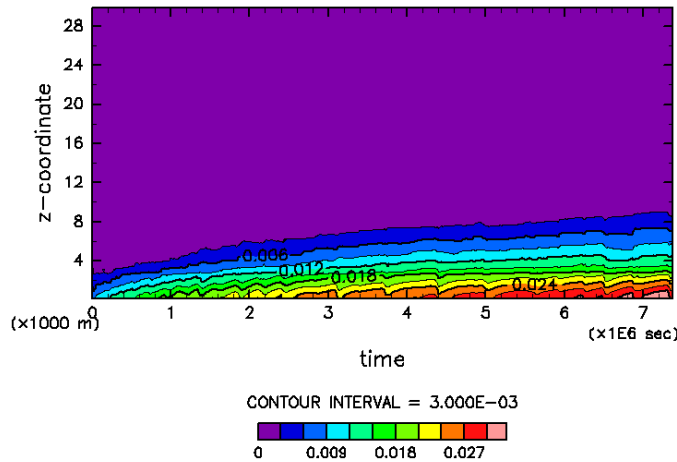


# 放射対流平衡計算の結果

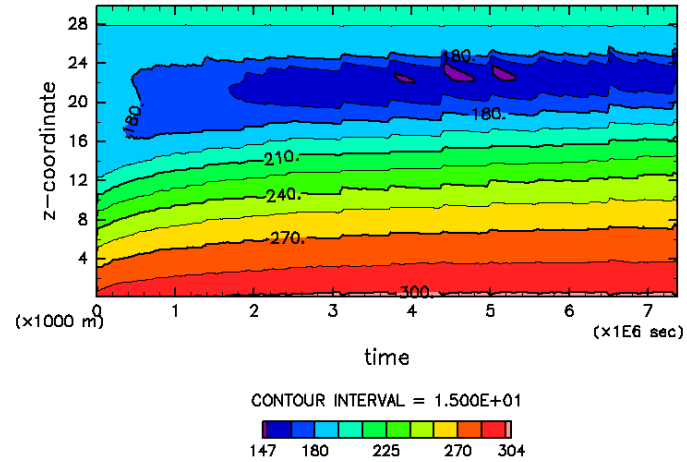
- 質量保存の破れが発現

物理量の領域水平平均の時間発展

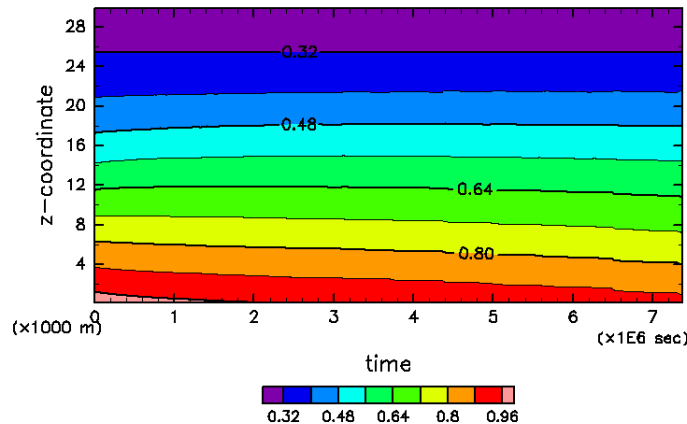
水蒸気混合比



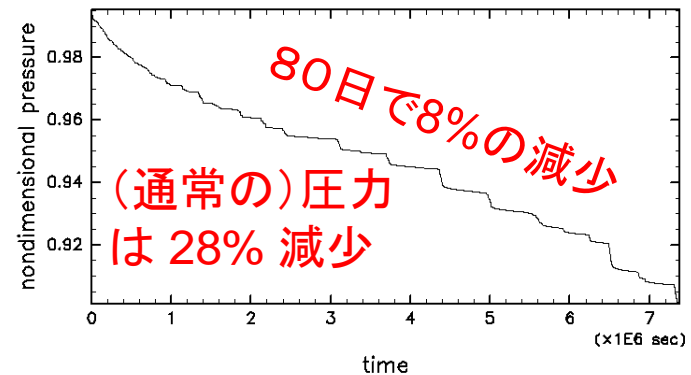
温度



Exner関数(無次元圧力)



最下層の Exner 関数



# 質量保存性に関する検討

## 圧力方程式の近似で落とした項

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} = \frac{\bar{c}_s^2}{C_p \bar{\rho} \bar{\theta}} \left\{ -\nabla \cdot (\bar{\rho} \mathbf{u}) \boxed{-M_{cond}} + \left( \boxed{\frac{Q}{\bar{\theta}}} - \frac{1}{f \bar{\rho}} \left( \frac{\partial f}{\partial q_v} - \frac{\partial f}{\partial q_l} \right) M_{cond} \right) \right\}$$

凝結による  
気体の消失

非断熱加熱  
(凝結潜熱、放射、  
乱流など全て。)

凝結による  
分子量変化

$$f \equiv \left( \frac{1/M_d}{1/M_d + q_v/M_v} \right) (1 + q_v + q_c + q_r)$$

- 温度変化から非断熱加熱の寄与を概算すると、気圧誤差のオーダーが説明できる事を確認。
- 現在、他の項も含めて定量的に検討中。

# 昨年度研究のまとめ

- 雲解像モデルを用いた、雲の放射吸収を考慮した長時間計算を実行
  - 「放射対流平衡」に至らない
  - 本格的計算のための課題が判明
    - 圧力方程式の近似の度合いを高めねばならない
    - 雲微物理過程のチューニング or 高度化が必要
- これらの解決の後に本来の問題へ
  - 太陽定数の大幅な変化に対する応答
  - 3次元計算
  - etc.

# 今年度の研究

系外惑星大気シミュレーションモデル  
の開発：  
ダスト過程の実装と火星大気実験

課題代表者：石渡正樹(北大・理)

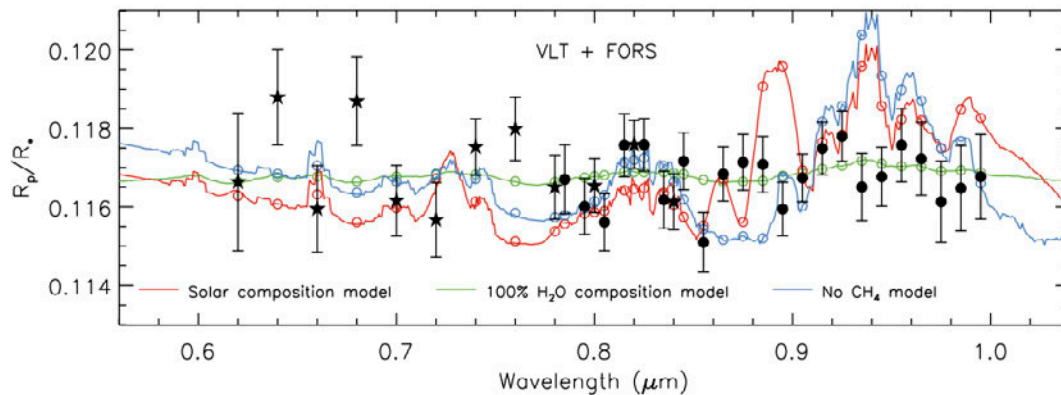
共同研究者：林祥介(神戸大・理)

中島健介(九州大・理)

# 今年度の研究目的

- 背景：系外惑星も念頭に置いた惑星大気シミュレーションモデル開発の必要性
  - 系外惑星の高精度観測による大気成分推定
  - 日本でも惑星探査が実施・計画：あかつき、火星探査
- ここでは、火星に固有な物理過程の増強整備
  - 火星ダスト過程の実装とダストの振る舞いに関するパラメータ実験

スーパーアースの分光観測



Bean et al (2011)

MELOS 計画



[http://www.um.u-tokyo.ac.jp/exhibition/2010MARS\\_forewords2.html](http://www.um.u-tokyo.ac.jp/exhibition/2010MARS_forewords2.html)

# 火星のダスト過程



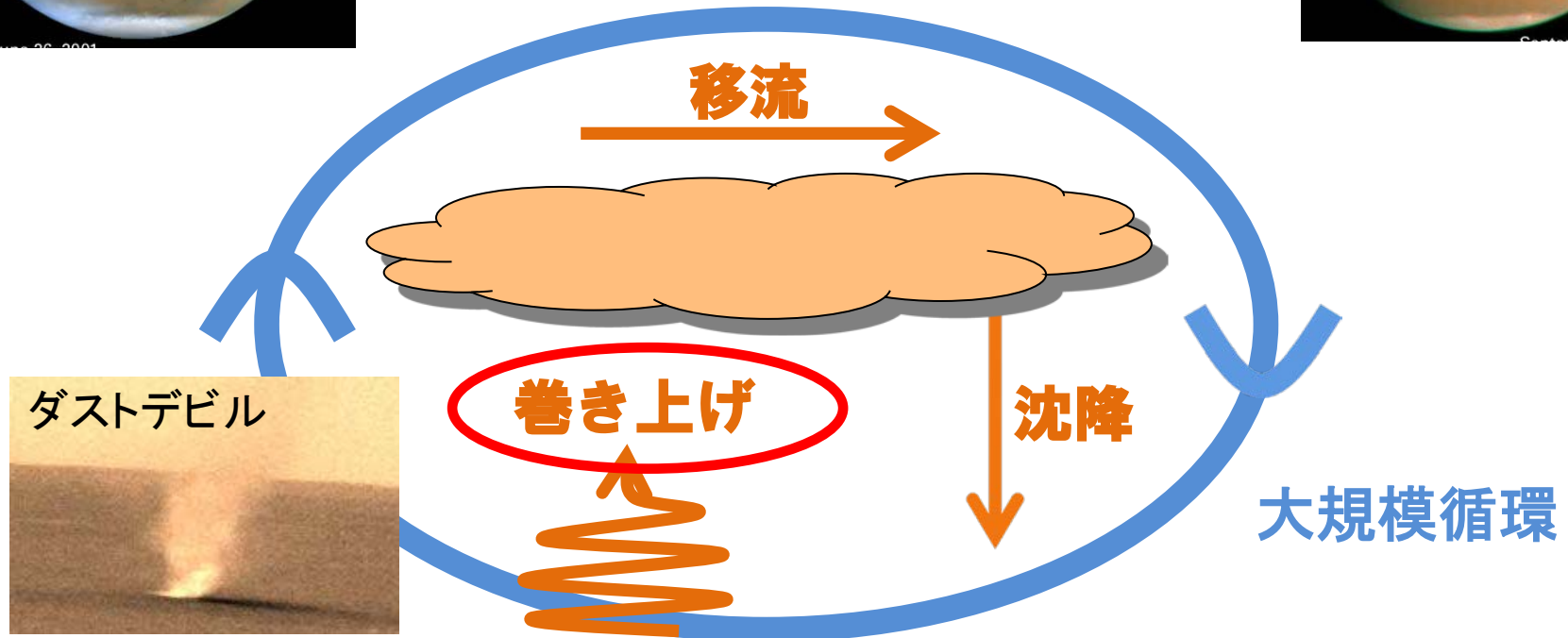
大気ダストが  
少ない時期  
(2001年6月)

グローバル  
ダストストーム期  
(2001年9月)



ハッブル宇宙望遠鏡による撮影

[http://science.nasa.gov/science-news-at-nasa/2001/astlloct\\_2/](http://science.nasa.gov/science-news-at-nasa/2001/astlloct_2/)



# モデル・基礎方程式

- 大気大循環モデルdcpam5

– <http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>

- 基礎方程式：3次元球殻中のプリミティブ方程式

連続の式: 
$$\frac{\partial \pi}{\partial t} + \mathbf{v}_H \cdot \nabla_H \pi = -D - \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma}$$

渦度方程式: 
$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{1}{a} \left( \frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial V_A}{\partial \lambda} - \frac{\partial U_A}{\partial \mu} \right) + D(\zeta)$$

発散方程式: 
$$\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{1}{a} \left( \frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial U_A}{\partial \lambda} - \frac{\partial V_A}{\partial \mu} \right) - \nabla^2 (\Phi + RT \bar{\pi} + KE) + D(D)$$

熱力学の式: 
$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{a} \left( \frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial UT'}{\partial \lambda} - \frac{\partial VT'}{\partial \mu} \right) + T'D - \dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} + \kappa T \left( \frac{\partial \pi}{\partial t} + \mathbf{v}_H \cdot \nabla_H \pi + \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} \right) + \frac{Q}{C_p} + D(T) + D'(\mathbf{v})$$

静水圧の式: 
$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = -\frac{RT}{\sigma}$$

$\lambda$ : 経度,  $\varphi$ : 緯度,  $\sigma = p/p_s$  ( $p_s$ : 表面気圧),

$\mathbf{v}_H = (u, w)$ : 水平速度,  $\dot{\sigma} = d\sigma/dt$ ,  $T$ : 温度,

$\zeta$ : 渦度,  $D$ : 発散,  $\Phi = gz$ ,  $\pi = \log p_s$ ,  $\mu = \sin \varphi$ ,

$$U = u \cos \varphi, V = v \cos \varphi, KE = \frac{U^2 + V^2}{2(1-\mu^2)},$$

$$U_A = (\zeta + f)V - \dot{\sigma} \frac{\partial U}{\partial \sigma} - \frac{RT}{a} \frac{\partial \pi}{\partial \lambda} + F_\lambda \cos \varphi,$$

$$V_A = -(\zeta + f)U - \dot{\sigma} \frac{\partial V}{\partial \sigma} - \frac{RT}{a} (1-\mu^2) \frac{\partial \pi}{\partial \lambda} + F_\varphi \cos \varphi,$$

$\nabla_H$ : 水平勾配,  $\nabla^2_H$ : 水平ラプラシアン

$f$ : コリオリパラメータ,  $a$ : 惑星半径,

$R$ : 乾燥空気の気体定数,  $g$ : 重力加速度,

$Q$ : 放射加熱率,  $D$ : 水平拡散項,

$F$ : 乱流拡散項,  $D'(\mathbf{v})$ : 摩擦熱,

# 物理過程・計算設定

## ● 物理過程

- 放射過程 : CO<sub>2</sub>, ダストによる吸収(高橋他, 2012)
- 乱流混合 : Mellor and Yamada(1974, 1982)
- 表面乱流フラックス : Louis (1982)
- CO<sub>2</sub>凝結過程
- 土壌熱伝導モデル (地下18層)
- ダスト巻き上げ : Kahre et al. (2006)

$$F = 2.3 \times 10^{-3} \tau^2 \frac{\tau - \tau^*}{\tau},$$

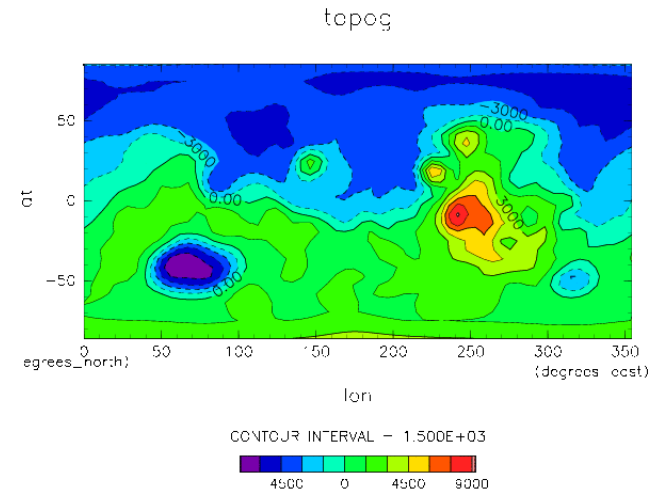
$\tau$ : 表面応力,  $\tau^*$ : 巻き上げ応力の閾値



# 計算設定・計算資源

- 計算設定

- 解像度 : T21L32
- 積分時間 : 3-5火星年
- 地面アルベド, 地面熱慣性分布
  - Mars Global Surveyor による観測結果
- 地形
  - Mars Global Surveyor による観測結果
  - 地形なしの場合についても計算実行
- 放射計算で用いるダスト分布
  - Mars Global Surveyor 観測による「気候値」を与えた場合
  - 季節変化しない一定値を与えた場合についても計算実行



計算で用いる地形分布

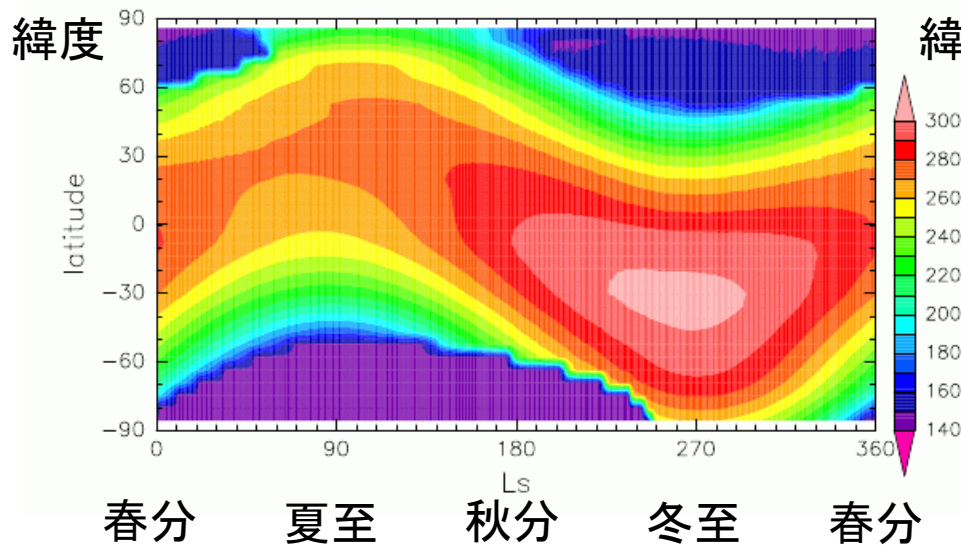
- 計算資源

- CGER SX-8 1 CPU
- 使用メモリ : 624 MB
- 実行時間 : 約11時間 (0.5火星年あたり)
- ベクトル化率 : 96.7%

# 表面温度の季節変化

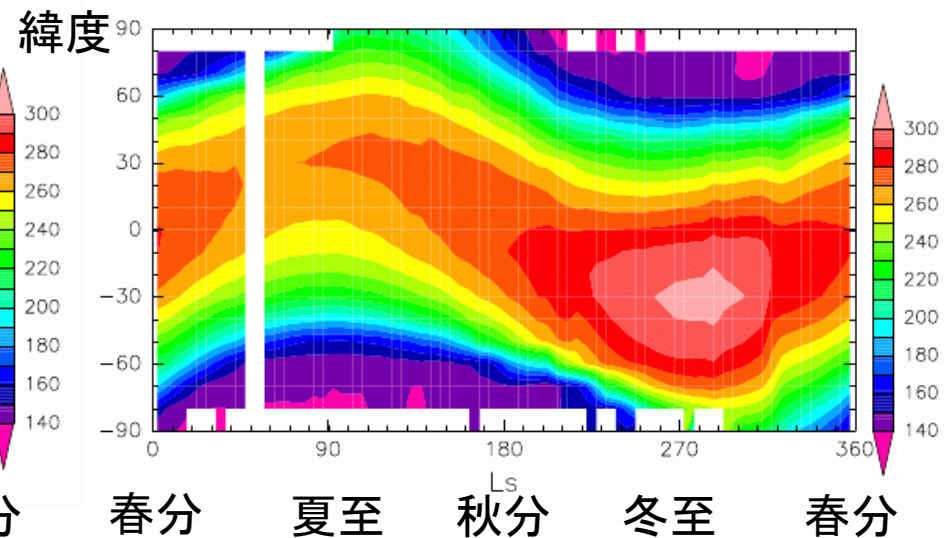
MGSで得られたダスト光学的深さを放射計算に与えた場合  
14LSTにおける地表温度(5年目)

Dcpam結果



軌道上の位置(時間軸)

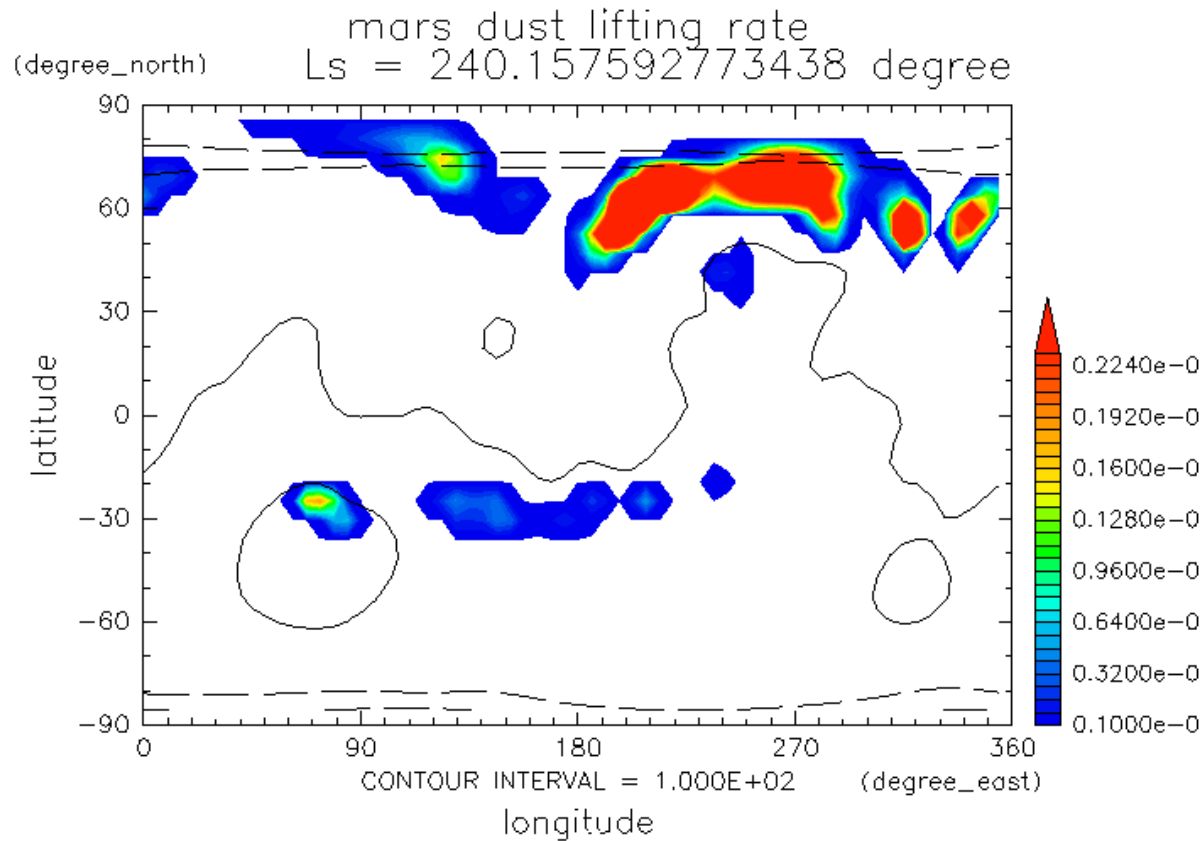
MGSの観測結果



軌道上の位置(時間軸)

# ダスト巻き上げフラックス

放射計算に与えるダストの $0.67\mu\text{m}$ における光学的深さを一定(0.2)とした場合  
3年目の $L_s = 240 - 270$  (北半球の秋の約1ヶ月の期間) の動画



# 今年度研究の現状と課題

- **ダストの巻き上げ量の診断計算を実施**
  - 秋の時期における緯度60度付近の領域における巻き上げフラックスが増加(他の火星モデルの結果と同様)
- **次の課題**
  - ダスト巻き上げ過程の詳細を把握すること：  
傾圧不安定、潮汐波に伴う風によって巻き上げられると言われているが、このモデルでは何が起きているのか
  - ダスト過程の増強の継続：  
dust devil parameterizationの導入、  
移流スキームの改良
  - 高解像度計算、観測で得られたダスト季節変化との比較