系外惑星大気シミュレーションモデルの開発：火星ダスト循環過程の実装実験

（H24年度課題：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）

石渡正樹(北大・理)、林祥介(神大理)、中島健介(九大理)、荻原弘尭(北大理)

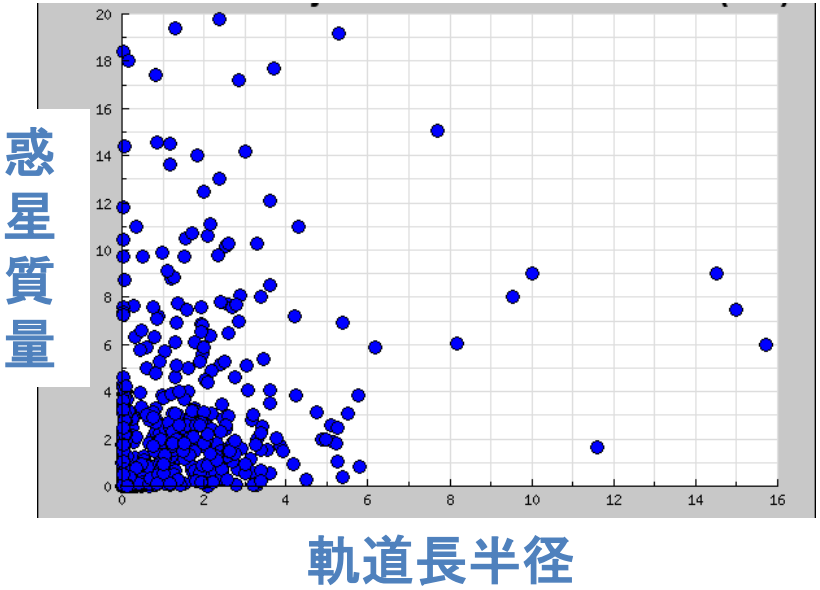
dcmodel@gfd-dennou.org

2013年12月19日　国立環境研究所
平成25年度スーパーコンピュータ利用研究報告会

本課題の研究目的

http://exoplanet.eu/

- 背景：多様な系外惑星の発見
  - 気候研究対象の拡大：地球型惑星も見えるようになりつつある
  - 観測精度の向上：大気成分も見えるようになりつつある

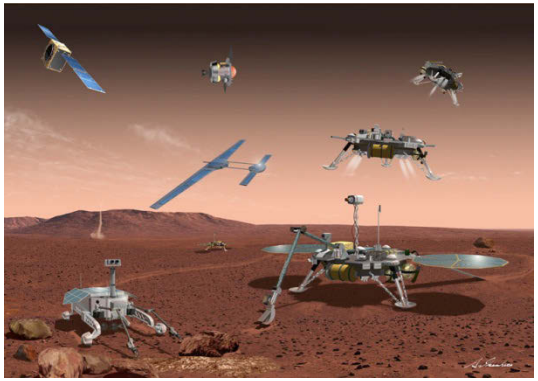


- 目的：地球型惑星大気シミュレーションモデルの開発と気候多様性実験
  - 多様な設定(地球大気、惑星大気、仮想大気)における数値計算
  - 地球モデルにおける各種スキーム、ノウハウに関する再検討
- 本課題では、火星的な物理過程の増強整備に注力

本課題で火星を扱う理由

- 火星は乾燥惑星の１事例
  - 陸惑星(Abe et al., 2005)：ハビタブル条件に関する考察にとって重要
- 火星条件における数値計算をおこなうためのモデル整備
  - 地球以外の惑星における検証
- 高解像度実験による火星ダストの動態のシミュレーション
  - 各種パラメタリゼーションの検証
  - 動的なダストを導入した火星高解像度実験の実施。過去の高解像度計算(高橋他 , 2011)では動的なダストが導入されていなかった。
- 日本の火星探査計画への貢献

MELOS 計画



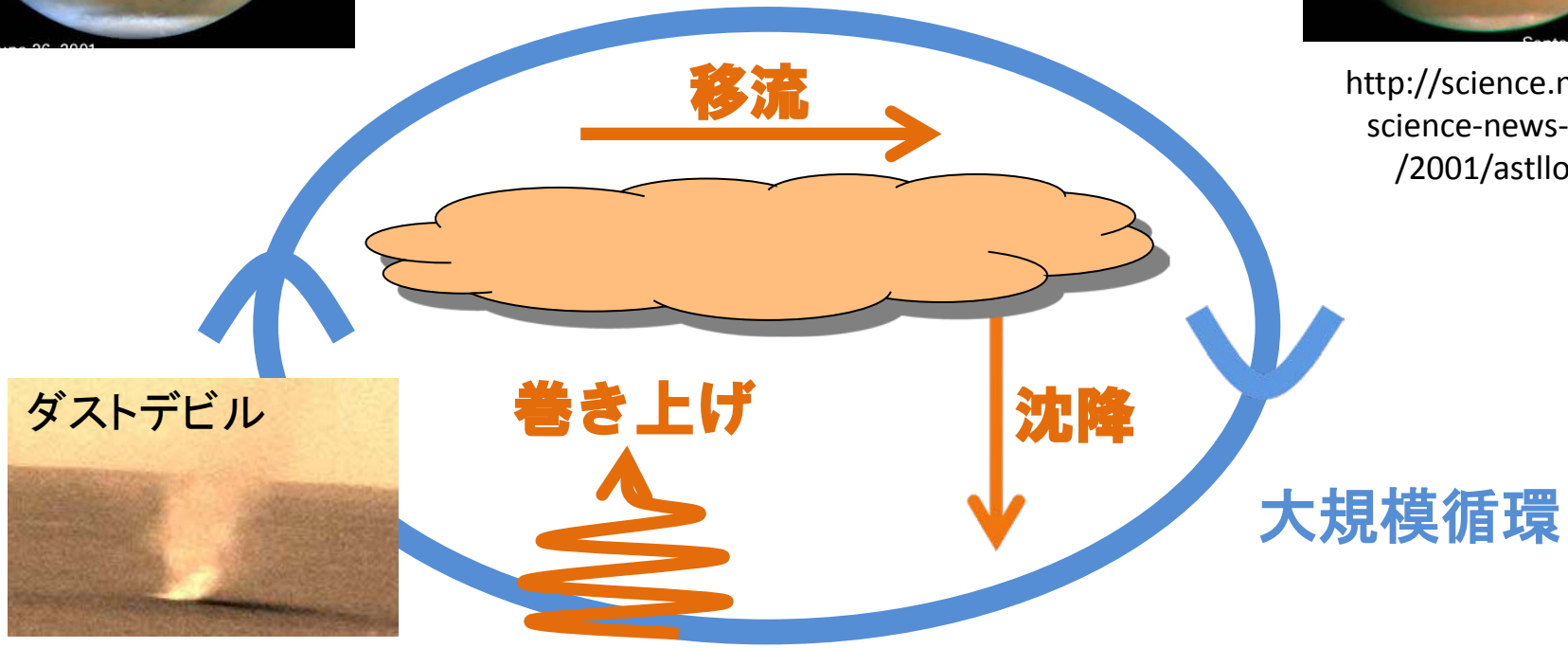
http://www.um.u-tokyo.ac.jp/exhibition/2010MARS_forewords2.html

火星のダスト過程

ダスト
減少期
(2001年6月)

グローバル
ダストストーム期
(2001年9月)

http://science.nasa.gov/science-news-at-nasa/2001/astlloct_2/



ダストデビル

http://www.nasa.gov/vision/universe/solarsytem/2005_dust_devil.html

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

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

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

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

λ : 経度, φ : 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,
ζ : 渦度, D : 発散, $\Phi = gz$, $\pi = \log p_s$, $\mu = \sin\varphi$,
$U = u\cos\varphi$, $V = v\cos\varphi$, $KE = \frac{U^2 + V^2}{2(1-\mu^2)}$,
$U_A = (\zeta + f)V - \dot{\sigma}\frac{\partial U}{\partial \sigma} - \frac{RT}{a}\frac{\partial \pi}{\partial \lambda} + \mathcal{F}_\lambda \cos\varphi$,
$V_A = -(\zeta + f)U - \dot{\sigma}\frac{\partial V}{\partial \sigma} - \frac{RT}{a}(1-\mu^2)\frac{\partial \pi}{\partial \lambda} + \mathcal{F}_\varphi \cos\varphi$,
∇_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, $\mathcal{D}$: 水平拡散項,
$\mathcal{F}$: 乱流拡散項, $\mathcal{D}'(v)$: 摩擦熱,

物理過程

- 火星用物理過程
  - 放射過程： CO_2, 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：バルク法(Louis et al., 1982)
  - CO_2凝結過程
  - 土壌熱伝導モデル（地下18層）
- 地球用物理過程
  - 放射過程：Chou and Lee (1996), Chou et al (2001)
  - 積雲対流：Relaxed Arakawa-Schubert (Moorthi and Suarez, 1992)
  - 簡単な雲モデル（雨水に変わるまでの時定数を仮定）

昨年度の研究内容

- ダスト分布固定実験
  - 大気の平均的な構造が火星の観測結果とは大きく違っていないことを確認
- 風応力ダスト巻き上げスキームの導入、ダストフラックス診断実験
  - ダスト巻き上げスキーム：Kahre et al. (2006)

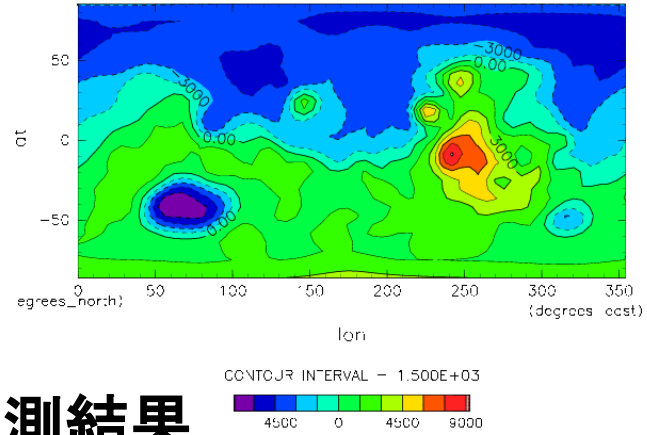
$$F = 2.3\times10^{-3}\,\tau^{2}\,\frac{\tau-\tau^{*}}{\tau^{*}},$$

τ : 表面応力, τ^{*} : 巻き上げ応力の閾値

昨年度の計算設定

- 火星計算設定
  - 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 による観測値を与えた場合
    - 季節変化しない一定値を与えた場合

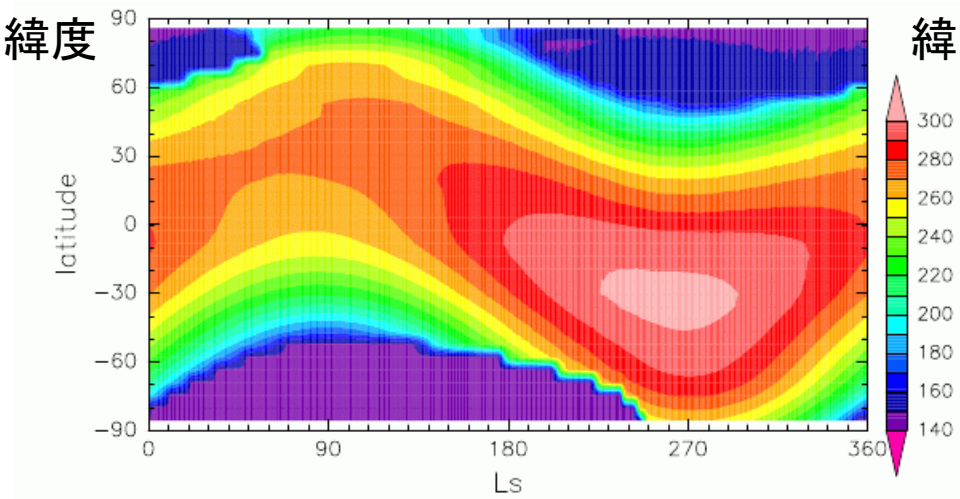
計算で用いる地形分布



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）

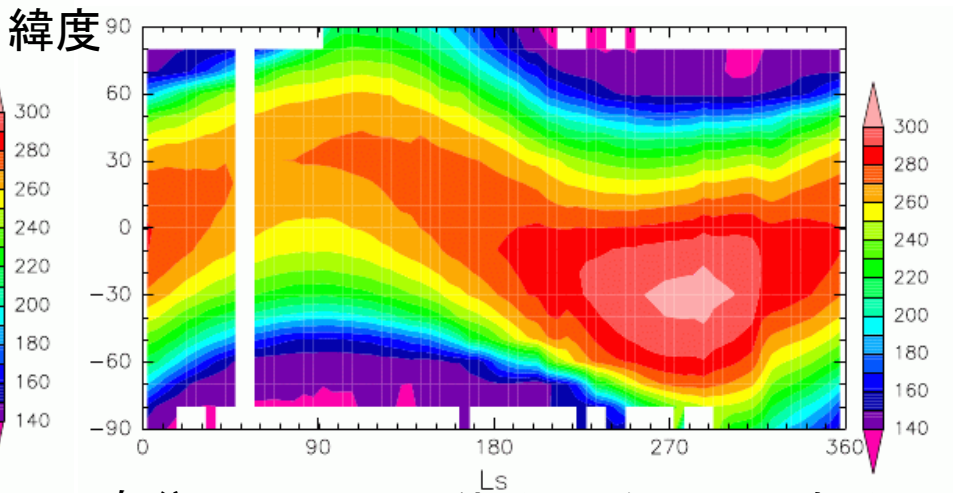
Dcpam結果



春分　夏至　秋分　冬至　春分

軌道上の位置〈時間軸〉

MGSの観測結果

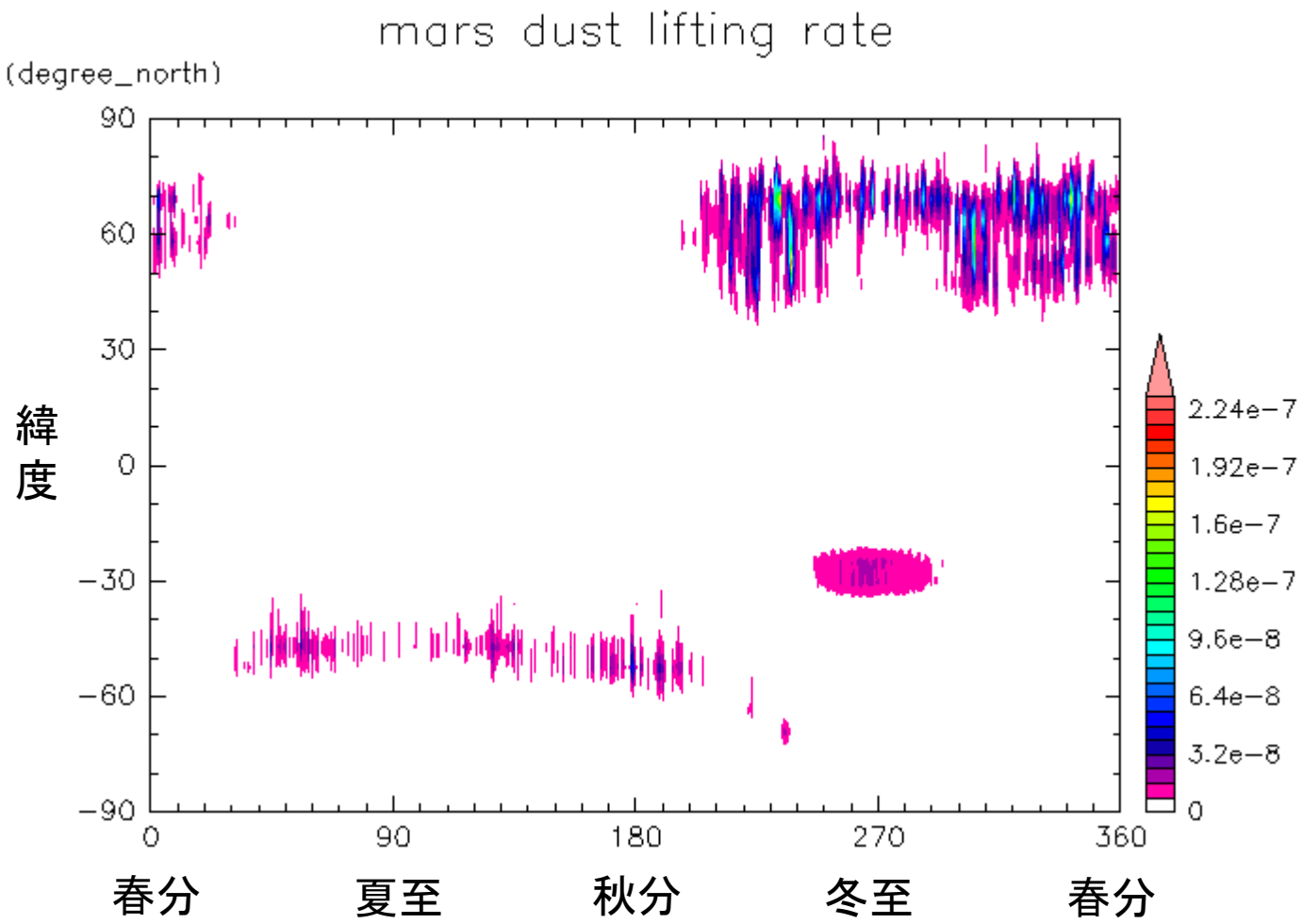


春分　夏至　秋分　冬至　春分

軌道上の位置（時間軸）

ダスト巻き上げフラックスの季節変化

放射計算に与えるダストとしてMGSシナリオを用いた場合



軌道上の位置〈時間軸〉

今年度の研究の現状

- セミラグランジュ法物質移流スキームの導入
  - Kashimura et al. (2013)のスキームを導入
  - 実装実験：火星のダスト移流、地球の水蒸気移流
- 火星大気物理過程の増強
  - ダスト沈降過程: Lin and Rood (1996)
  - 風応力巻き上げスキーム:Newman et al. (2002)
  - 水循環過程
- 火星境界層に関する検討
  - 境界層内の鉛直層数の決定
  - 乾燥対流調節の導入、乱流拡散スキームの改良

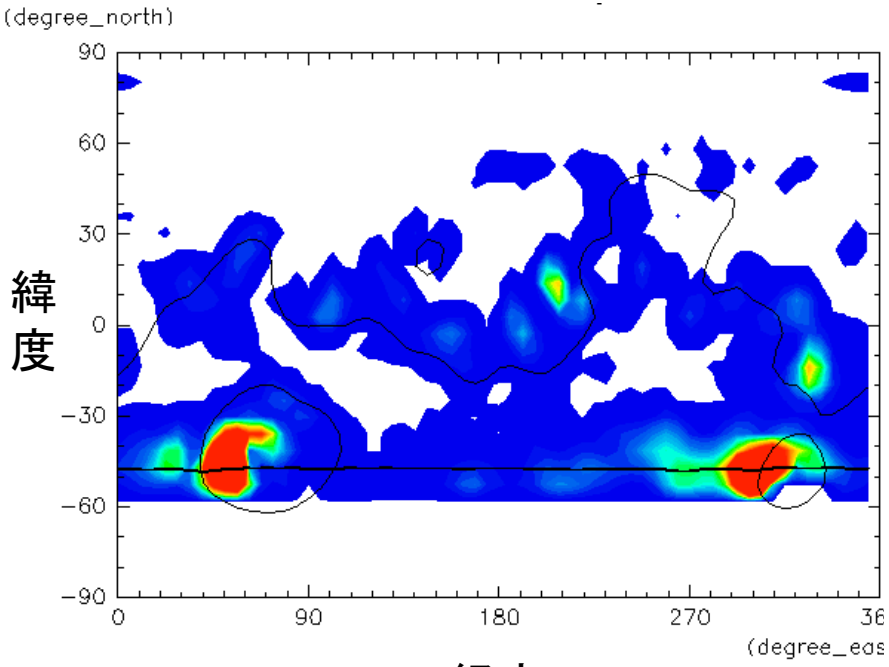
モデル設定

- 火星計算設定
  - 解像度：T21L36, T31L32,T21L32
  - 積分時間：3火星年(予定)
  - 地面アルベド, 地面熱慣性分布, 地形：MGS観測結果
- 地球計算設定
  - 解像度：T42L60
  - 積分時間：２地球年
  - 地球の地形、季節変化日変化あり
- 計算資源(地球計算の場合)
  - CGER SX9　1 CPU
  - 使用メモリ： 2782MB(平均値)
  - 実行時間　: 約8時間（100地球日あたり）
  - ベクトル化率 : 95.1%

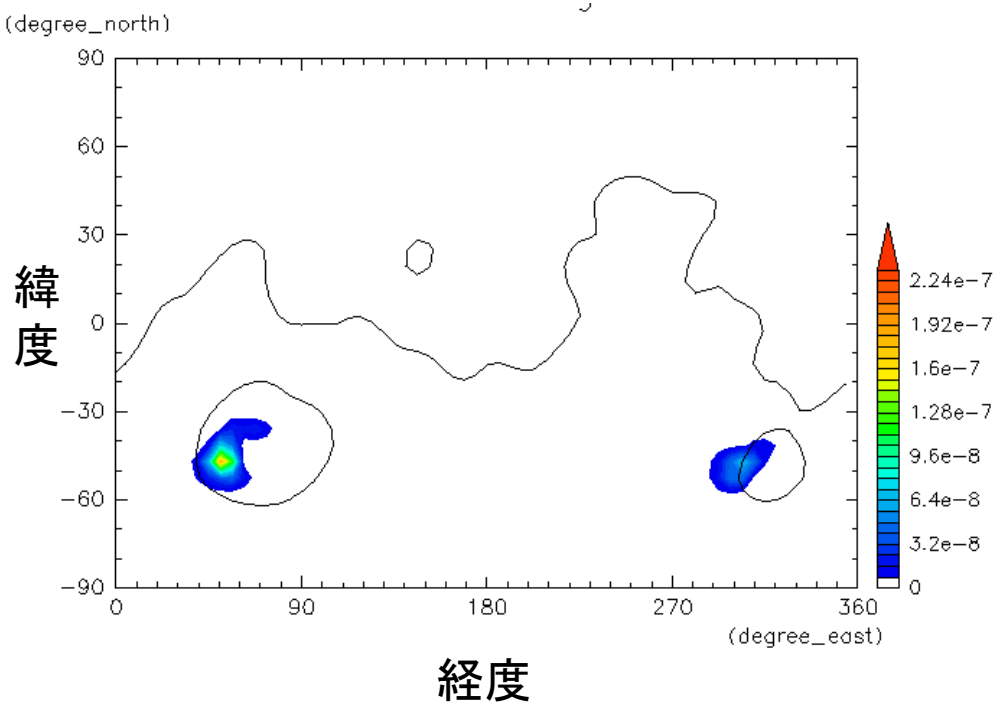
火星設定における実装実験：ダスト巻き上げフラックスの比較

北半球夏季における1カ月平均

今年度の結果



昨年度の結果

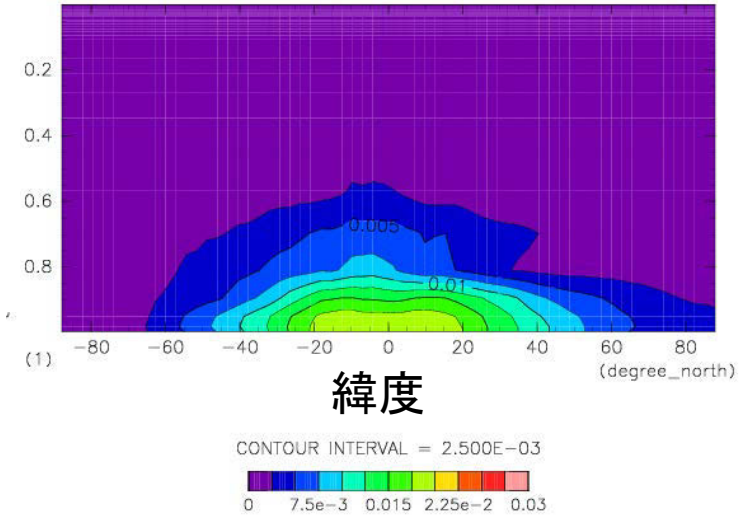


地球設定における実装実験

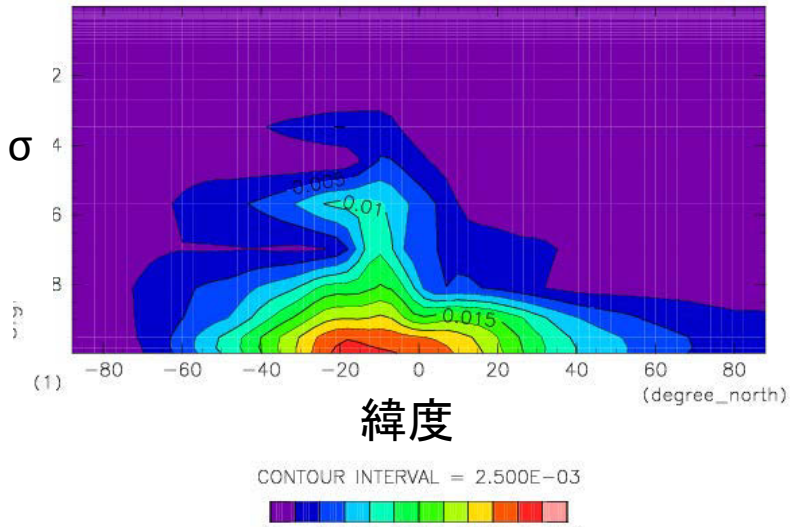
北半球春季における東西平均分布

物質移流スキームあり　　物質移流スキームなし

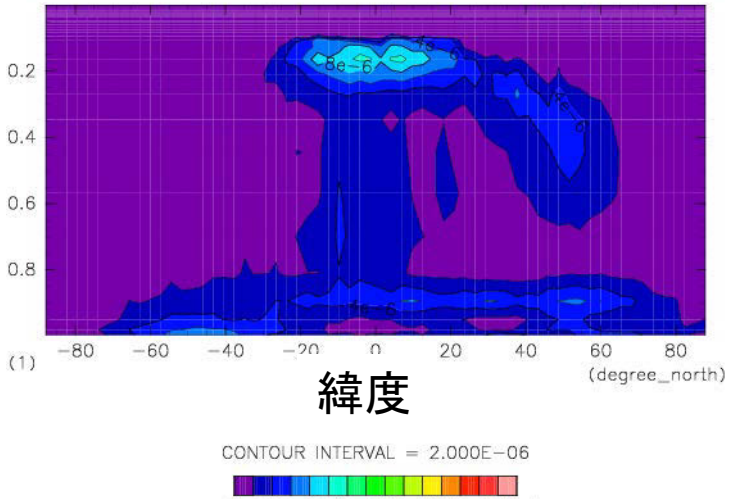
比湿　σ



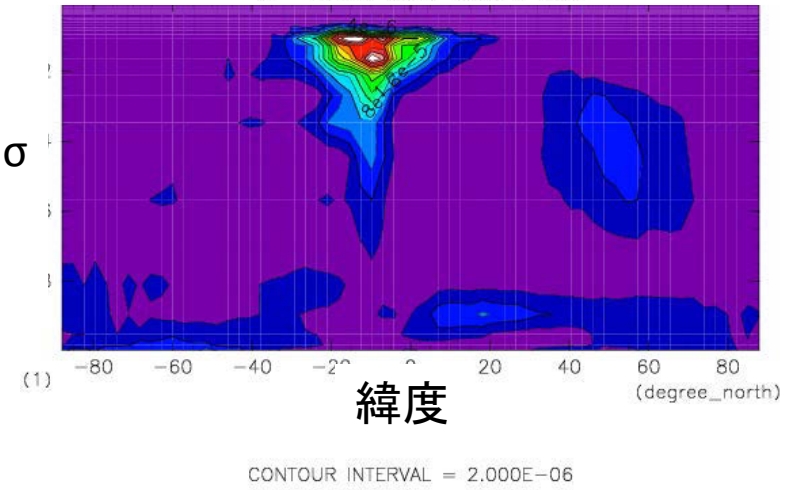
σ



雲水量　σ



σ



まとめ･次の課題

- ここまでの結果：惑星大気を想定した物理過程の増強およびその実装実験
  - セミラグランジュ法物質移流スキーム
  - 火星ダスト過程：(風応力ダスト巻き上げ)、重力沈降
  - 火星水循環過程
- 次の課題
  - 火星ダスト過程の実装完了：残るはダストデビル巻き上げ過程
  - ダスト動態の解像度依存実験