

お知らせ

- 5/11 の週にフランス LMD の研究者 4 人 (5 人?) を招聘して惑星大気研究についてのセミナー(ワークショップ)を開催します. 興味のある方はご連絡ください.
- 候補日程
 - 5/11 の週(詳細は相談中)
- 場所
 - 惑星科学研究センター (CPS)
 - <https://www.cps-jp.org/access/>
- 来日するフランス側研究者
 - Ehouarn Millour
 - Francois Forget
 - Sebastien Lebonnois
 - Aymeric Spiga

高解像度火星大気大循環 シミュレーション

高橋芳幸



はじめに: 火星大気 / 火星表層環境

- 大気の主成分
 - $\text{CO}_2 > 95\%$
- 大気質量
 - 地球大気の $\sim 1/100$
 - $P_s \sim 6\text{-}8 \text{ hPa}$
- 寒冷・乾燥した表層環境
 - 液体の水は存在しない
 - 平均値表面温度 $T_s \sim 220 \text{ K } (-53 \text{ }^\circ\text{C})$
 - 大きな日変化
- ダスト / ダストストーム
 - 大気は
 - 大気中に浮遊するダスト,
 - ダストストームの発生,
 - から大きな影響を受けている.



図. ハッブル宇宙望遠鏡で観測された火星



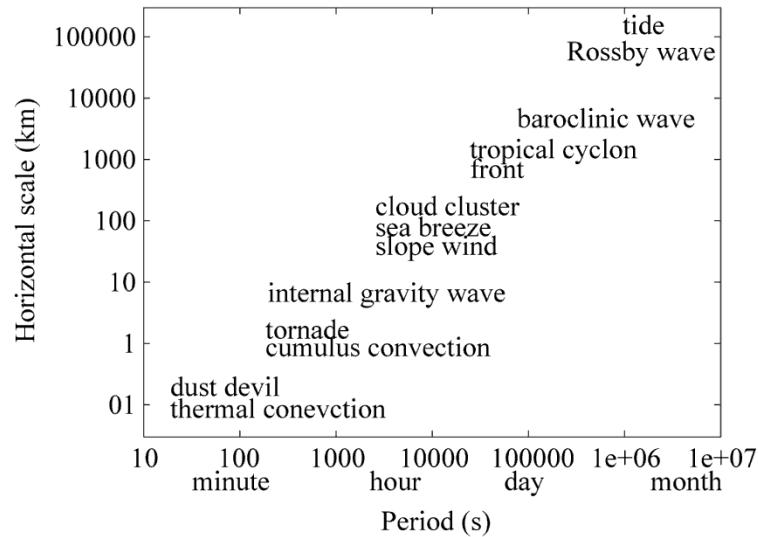
図. Mars Pathfinder によって観測された火星地表面

ダスト巻き上げ過程に関する問題

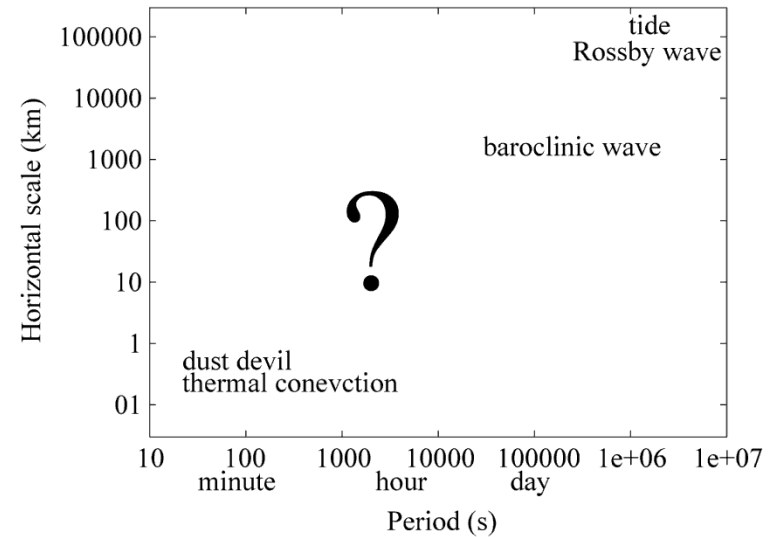
- 火星大気中に常にある程度の量のダストが浮遊していることは良く知られている。
- しかしながら、これらのダストがどのように供給されているのか / どのような条件で供給されるのか、についてはまだ良くわかっていない。
- 火星大気大循環モデルを用いた過去の研究により、中小規模擾乱による寄与の重要性が指摘されている (e.g., Wilson and Hamilton, 1997)。

火星大気中の中小規模擾乱に関する問題

地球



火星



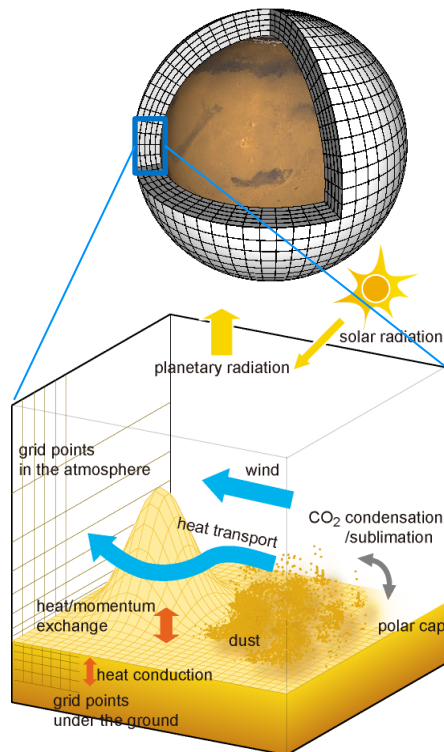
火星大気中における中小規模擾乱 / “メソスケール擾乱” についてはいまだに良くわかっていない。

本研究の目的

- 大気大循環モデルを用いて、静水圧モデルの限界付近までの高解像度計算 ($\Delta x \sim 11$ km) を実施
 1. 火星大気中の中小規模擾乱の特徴を調べる,
 2. それら擾乱のダスト巻き上げ過程への影響を調べる.
- 以下では,
 - モデル概要,
 - モデル内で見られた擾乱の特徴,
 - モデル内で見られたダスト巻き上げ過程, をしめす.

モデル概要 その1

惑星全球の温度, 風速, 密度分布を計算



- 力学過程 (AFES; Ohfuchi et al., 2004)
 - プリミティブ方程式系
 - 鉛直静水圧近似
- 物理過程 (Takahashi et al., 2003, 2006)
 - 放射過程 (CO₂, ダスト)
 - 乱流混合過程 (Mellor and Yamada, 1982, level 2)
 - CO₂ 凝結過程
 - 土壌熱伝導モデル
 - ダスト巻き上げ過程
 - Newman et al. (2002) によるパラメタリゼーションの一つ.
- AFES のおかげで高解像度計算が可能.

モデル概要 その2

移流過程：プリミティブ方程式

方程式系は、静水圧平衡を仮定し、鉛直方向に $\sigma = p/p_{\downarrow s}$ 座標を用いたプリミティブ方程式系.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -(u \cdot \nabla)u - \sigma \frac{\partial u}{\partial \sigma} - f k \times u - \nabla \Phi + RT/p_{\downarrow s} \nabla p_{\downarrow s}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = -RT/\sigma$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -(u \cdot \nabla)T - \sigma \frac{\partial T}{\partial \sigma} + \kappa T/p \frac{dp}{dt} + Q$$

$$\frac{\partial p_{\downarrow s}}{\partial t} = -\nabla \cdot (p_{\downarrow s} u) - \frac{\partial}{\partial \sigma} (p_{\downarrow s} \sigma)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -(u \cdot \nabla)q - \sigma \frac{\partial q}{\partial \sigma} + S_{\downarrow} q$$

境界条件:

$$\sigma = d\sigma/dt = 0 \quad \text{at}$$

$$\sigma = 0, 1$$

u は水平風速, p は気圧, $p_{\downarrow s}$ は惑星表面気圧, T は温度, q は物質の混合比, Φ は

ジオポテンシャル, $\kappa = R/C_{\downarrow p}$, R は気体定数, $C_{\downarrow p}$ は定圧比熱,

F , Q , $S_{\downarrow} q$ はそれ



モデル概要 その3

放射過程

$$Q_{\downarrow rad} = g/C_{\downarrow p} \partial F_{\downarrow rad} / \partial \sigma, \quad F_{\downarrow rad} = \int \lambda_{\downarrow s} \uparrow \lambda_{\downarrow e} \dots F_{\downarrow rad, \lambda} d\lambda$$

τ は光学的厚
 $\tilde{\mathcal{S}}(\tau', \tau)$ は $\tau \uparrow$,
 の透過率, $F \uparrow$ -

散乱のない大気に対する放射伝達方程式:

$$F_{\downarrow rad, \lambda}(\tau) = \pi B_{\downarrow \lambda}(\tau_{\downarrow s}) \tilde{\mathcal{S}}(\tau_{\downarrow s}, \tau) - \int_0^{\tau_{\downarrow s}} \pi B_{\downarrow \lambda}(\tau') \partial \tilde{\mathcal{S}}(\tau', \tau) / \partial \tau' d\tau'$$

はそれぞれ上
 き, 下向きフラ
 クス, $\gamma_{\downarrow 1, 2, 3, 4}$

射出のない散乱吸収大気に対する放射伝達方程式

$$\partial F_{\downarrow rad, \lambda} \uparrow + / \partial \tau = \gamma_{\downarrow 1} F_{\downarrow rad, \lambda} \uparrow + + \gamma_{\downarrow 2} F_{\downarrow rad, \lambda} \uparrow -$$

数 (詳細は, 例え
 は, Pooh et al.)

$$\partial F_{\downarrow rad, \lambda} \uparrow - / \partial \tau = \gamma_{\downarrow 2} F_{\downarrow rad, \lambda} \uparrow + + \gamma_{\downarrow 1} F_{\downarrow rad, \lambda} \uparrow -$$

(1989) を参照の

$$S \uparrow + (\tau) = \gamma_{\downarrow 3} \pi F_{\downarrow s} \omega_{\downarrow 0} \exp(-\tau / \mu_{\downarrow 0}), \quad S \uparrow - (\tau) = \gamma_{\downarrow 4} \pi F_{\downarrow s} \omega_{\downarrow 0} \exp(-\tau / \mu_{\downarrow 0})$$

太陽天頂角の
 弦, 太陽放射フ
 ラックスであり,
 $\omega_{\downarrow 0}$ は一次散

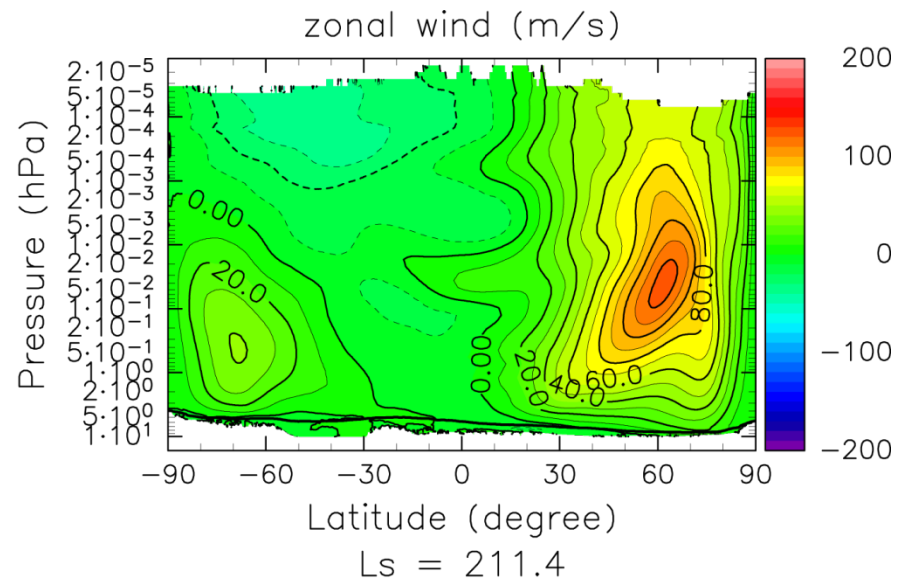
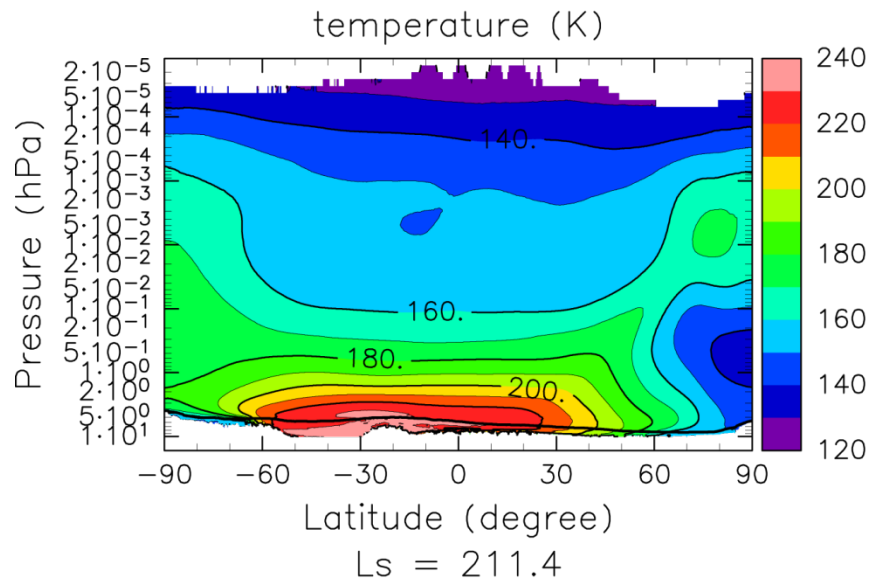
アルベドで



計算設定

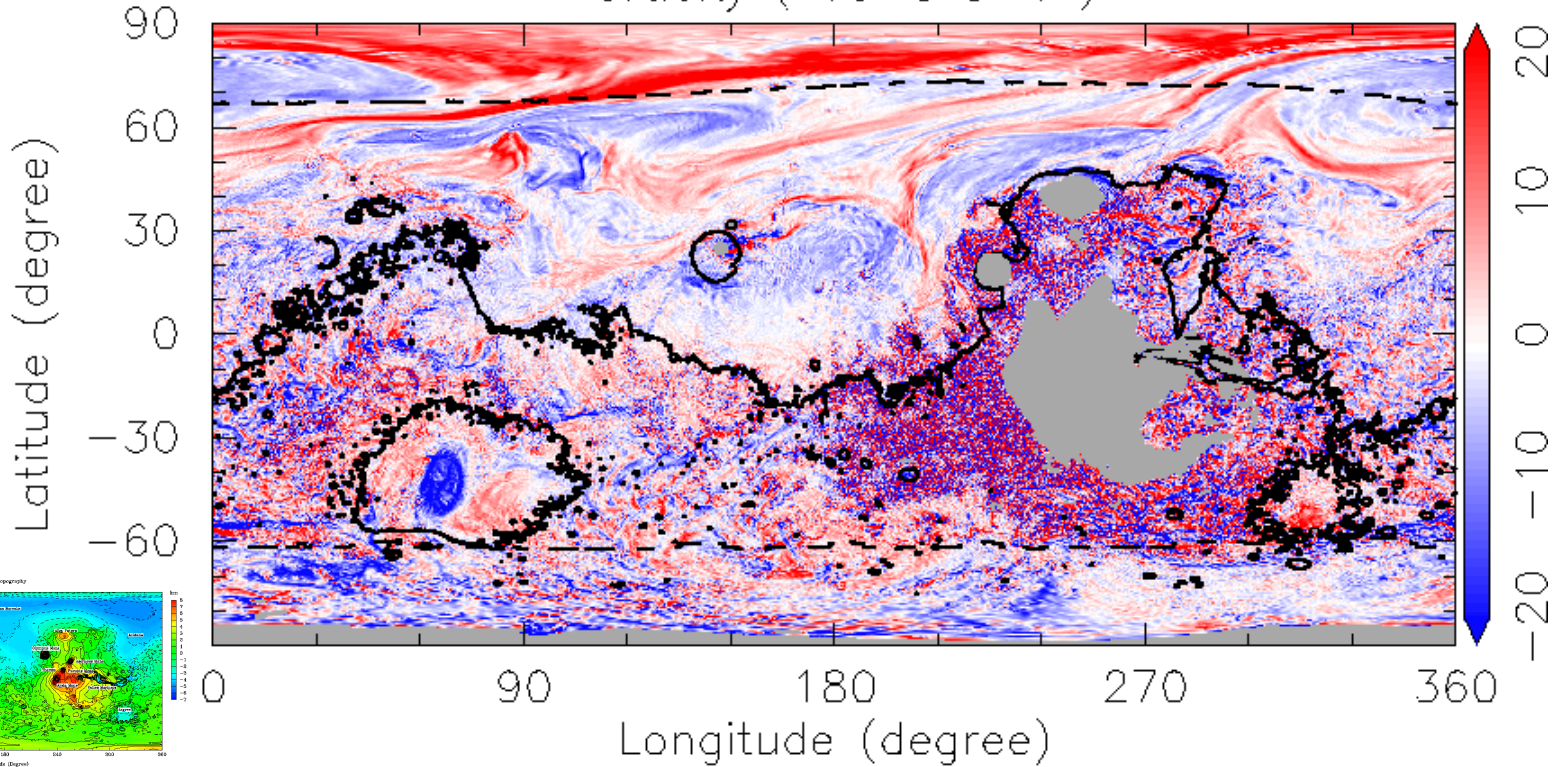
- 解像度
 - T639L96, T319L96, T159L96, T79L96
 - 水平格子点間隔 $\Delta x \sim 11, 22, 44, 89$ km
 - 鉛直 96 層 (高度 ~ 90 km まで)
- ダスト分布
 - ダスト分布は固定
 - 地表面における可視光に対する光学的厚さ 0.2.
- 積分期間・季節
 - 低解像度の計算結果のスナップショットから 40 火星日間積分
 - 北半球の秋の条件
 - 「ダストストームシーズン」
- 感度実験
 - 地表面特性一様
 - 地形の起伏なし
 - アルベド一様
 - 熱慣性一様
- 計算は地球シミュレータで実施した.

Zonal mean temperature and zonal wind in the T639L96 experiment



4 hPa 気圧面における渦度分布 T639L96 (水平格子点間隔 ~11 km)

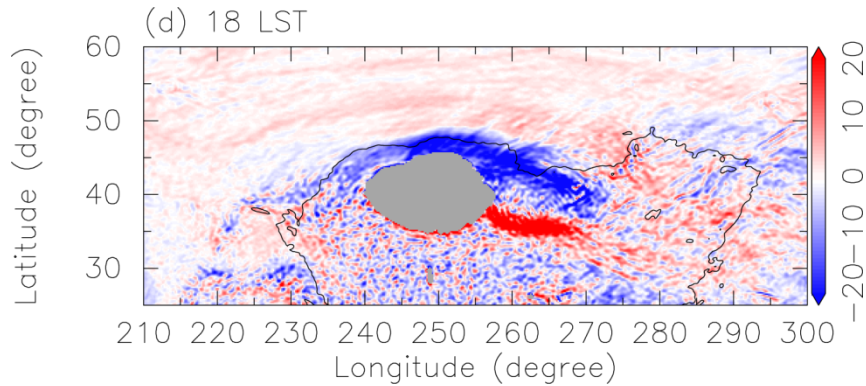
Year 1, Ls = 197.5 degrees, 1.0 hour
vorticity ($1e-5 \text{ s}^{-1}$)



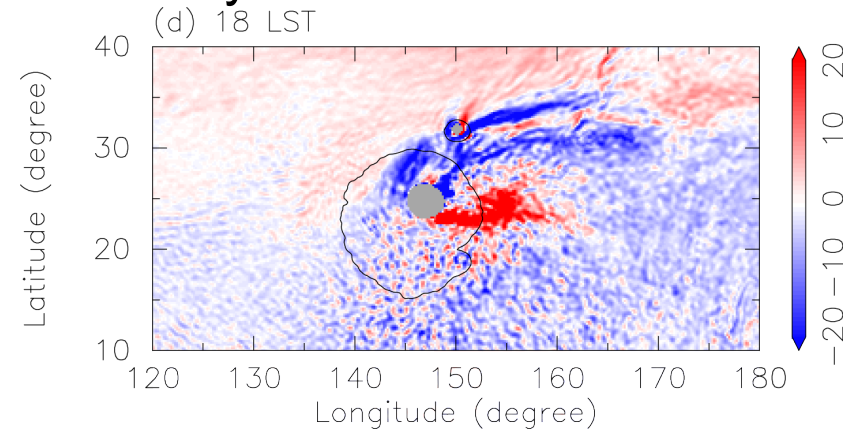
- 惑星規模から $O(10 \text{ km})$ までの様々な擾乱が表現
 - 地形性の擾乱
 - モデルで表現される熱対流に伴う多数の小規模渦

Alba Patera, Elysium, Hellas 付近の地形性擾乱

Alba Patera at 18 LST



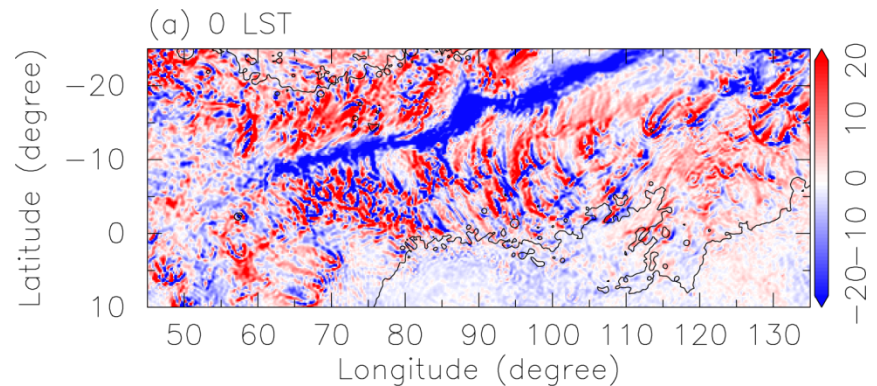
Elysium at 18 LST



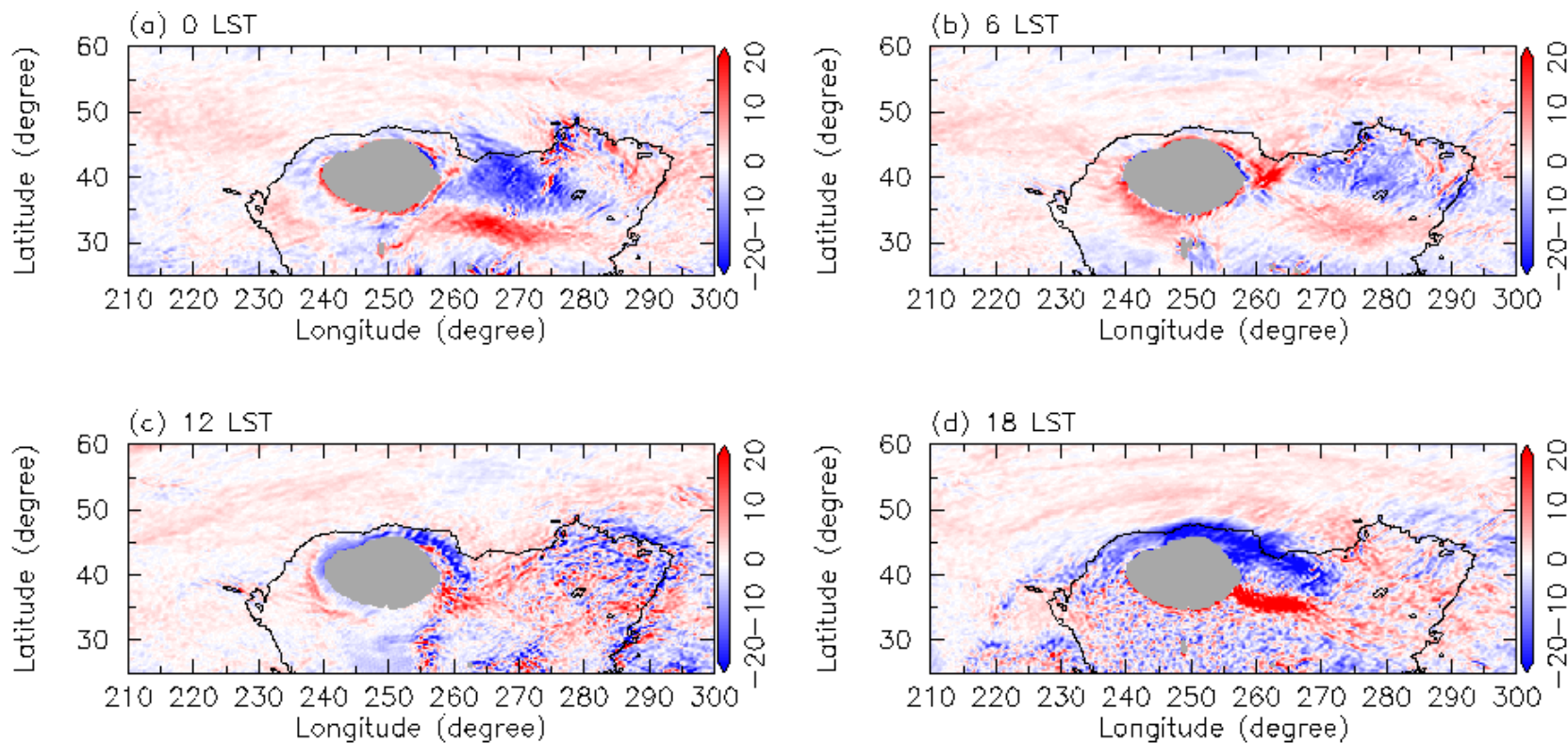
- 地形の水平スケールに対応した地形性擾乱

- いくつかは明らかな日変化を示す.
- 背景風と山との相互作用と、山の周囲の日変化する斜面風の重ね合わせとして考えられる.

north of Hellas at 0 LST



Alba Patera 付近の中規模渦 渦度のコンポジット

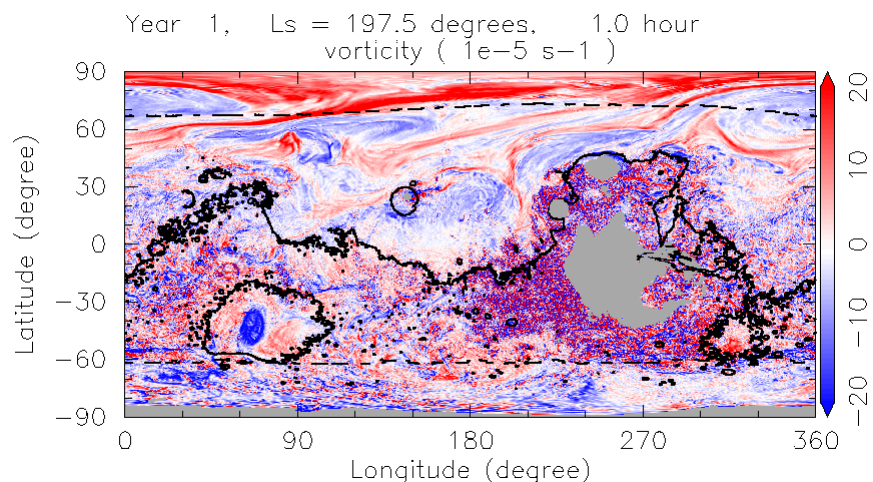


- この渦は
 - 山と背景風の相互作用,
 - 山の周囲の日変化する斜面風で生じていると考えられる.

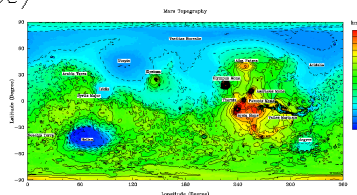
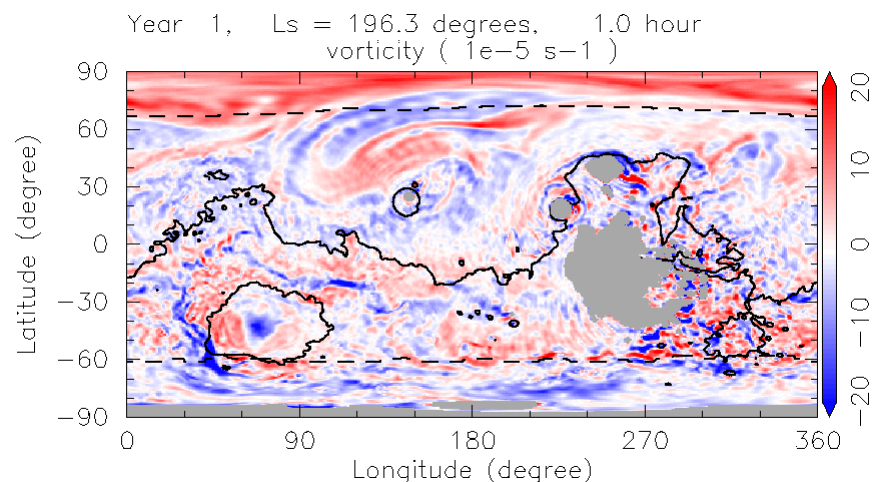
4 hPa 気圧面における渦度

T639L96 (~11 km), T159L96 (~44 km)

T639L96



T159L96

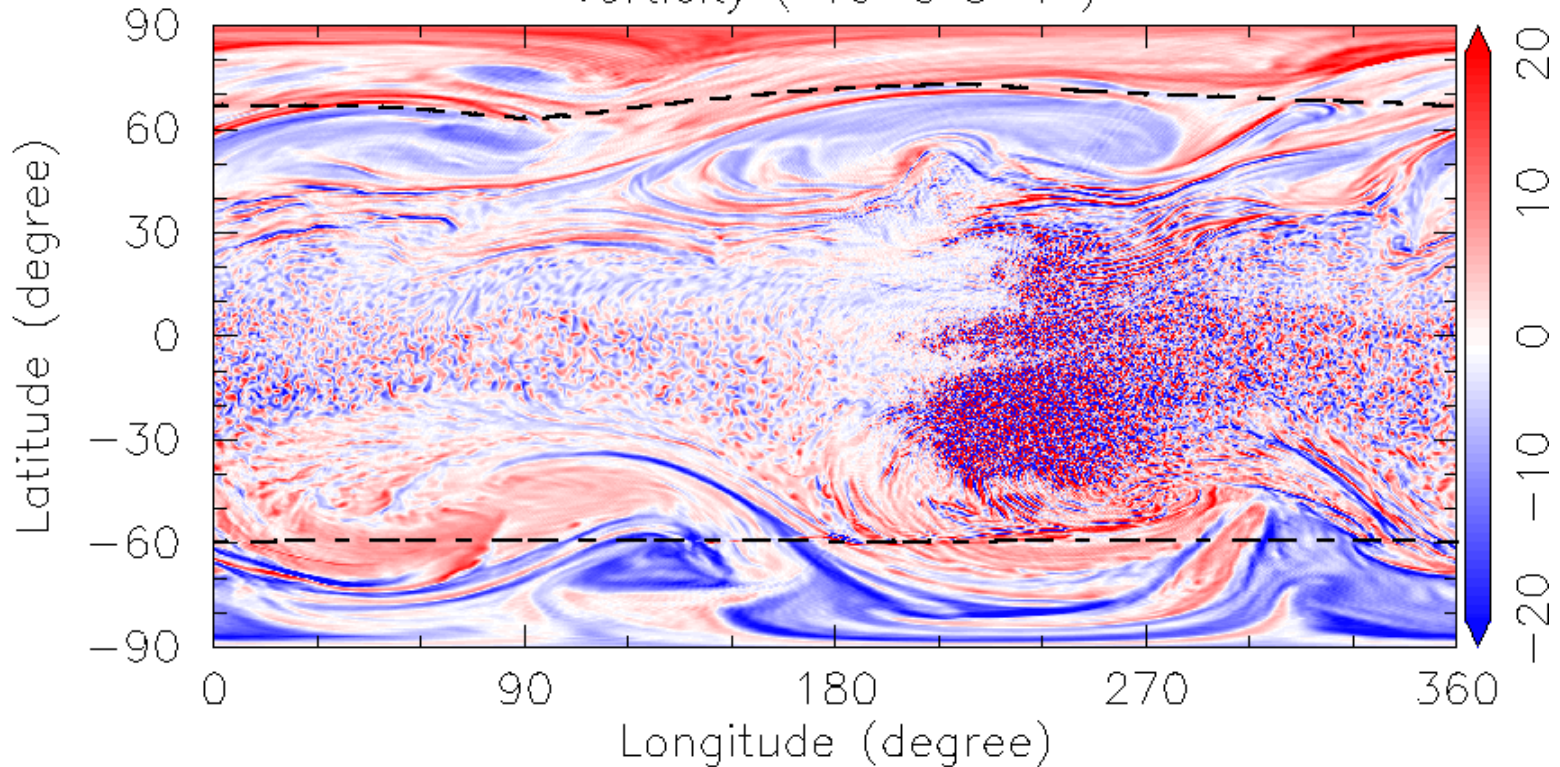


- 低緯度の小規模渦

- 渦の水平スケールは、解像度が高いほど小さい。
 - 最も高い解像度 (~11 km) でも収束していないようである、
- 渦が発達する地方時は、解像度が高いほど早い。

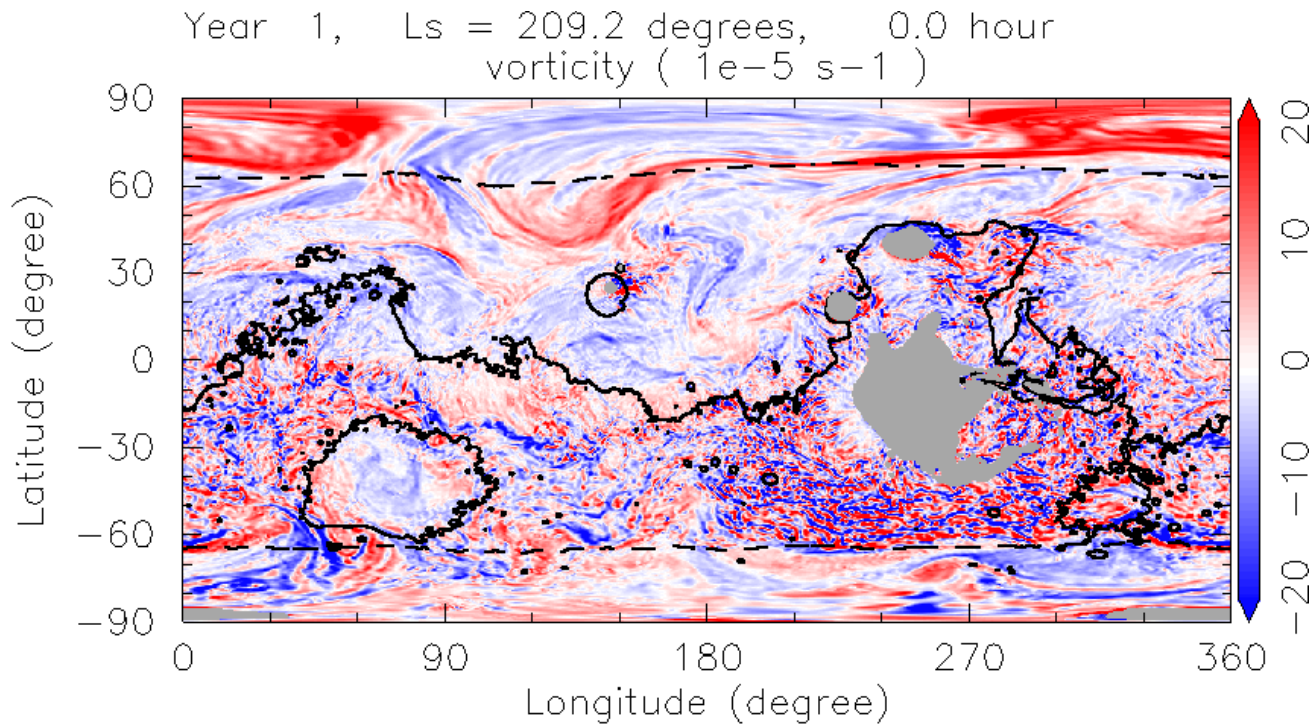
4 hPa 気圧面における渦度 T639L96, 地表面特性一様

Year 1, Ls = 197.5 degrees, 1.0 hour
vorticity ($1e-5 \text{ s}^{-1}$)



- 波動が、小規模渦生成に影響
 - 高緯度からの低温大気の移流の効果か？
 - Phoenix lander によるダストデビル観測と整合的？
- 小規模渦の組織化は見られないようである。

対流の表現に対する依存性 対流調節を用いた実験, T319L96

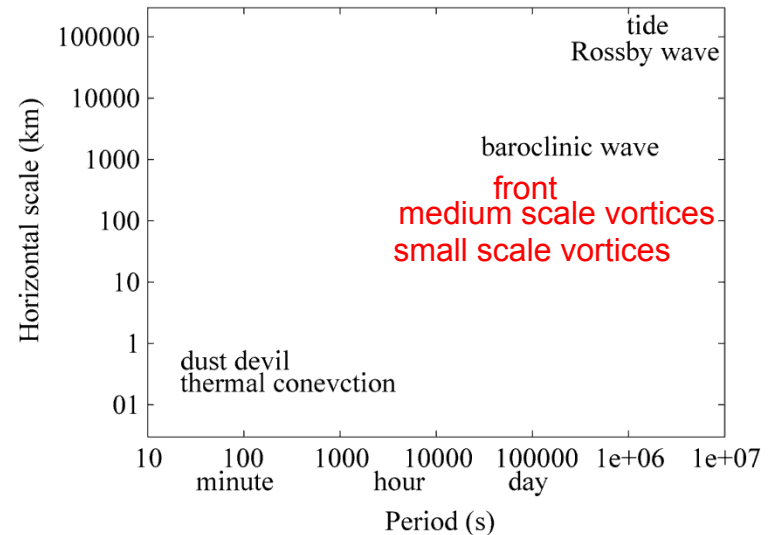


- 対流調節を用いた実験でも低緯度には渦が現れる.
 - ギリギリ表現される対流は如何にして表現するのが「正しい」か, 難しい問題.

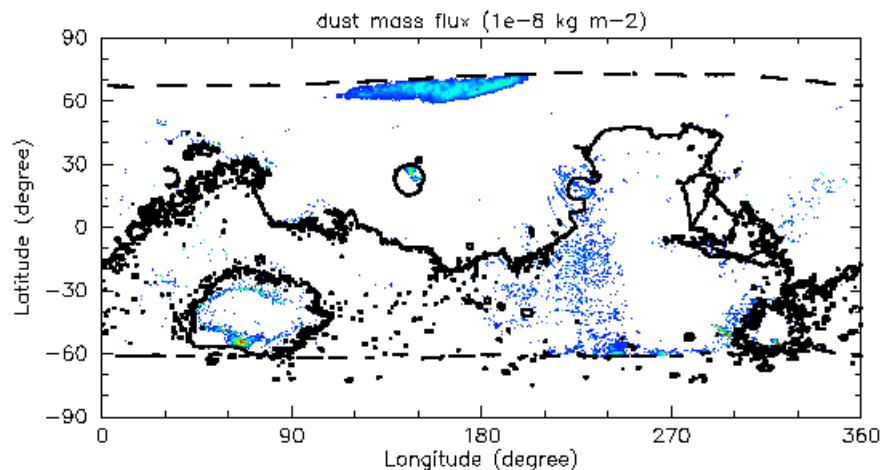
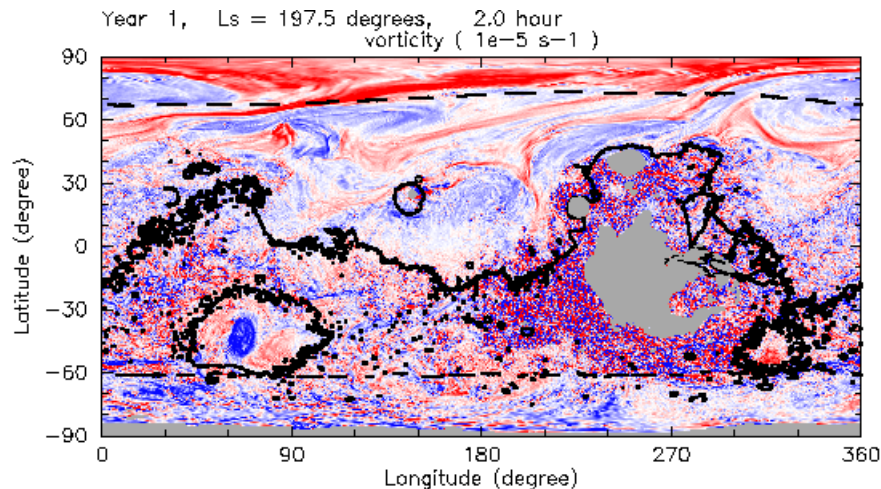
モデルで見られる擾乱

- 傾圧不安定波動に伴う前線
- 各種地形に伴う擾乱
- 地形によらない小規模渦
 - ただし, この渦の実体は明らかでない.

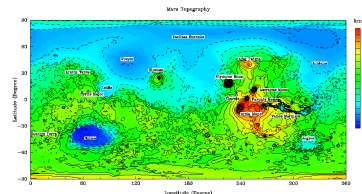
火星



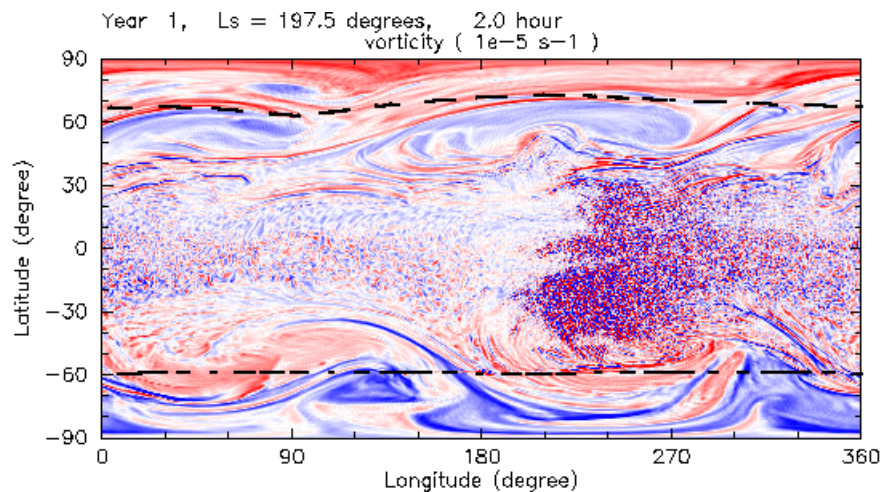
モデル内でのダスト巻き上げ過程



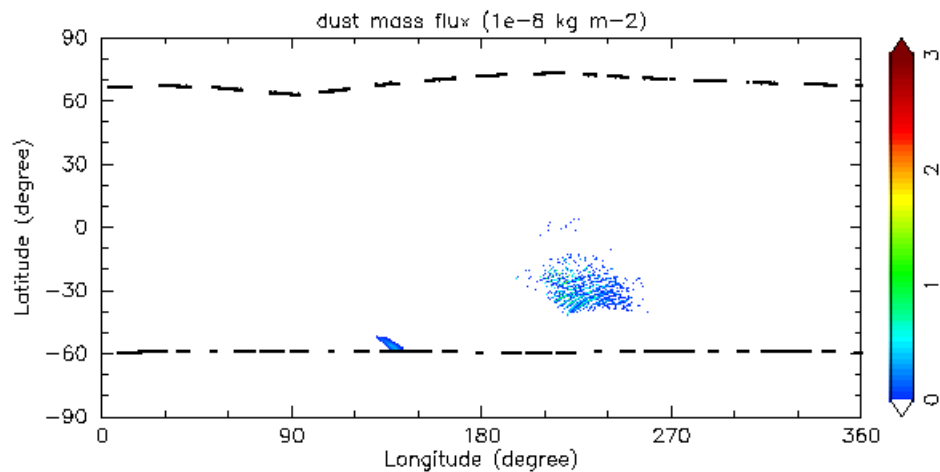
- 強いダスト巻き上げ過程は, 前線付近で発生
- いくつかの特徴的な地形に固定されたダスト巻き上げも見られる.
- 低緯度の小規模渦もダスト巻き上げに寄与しているようである.



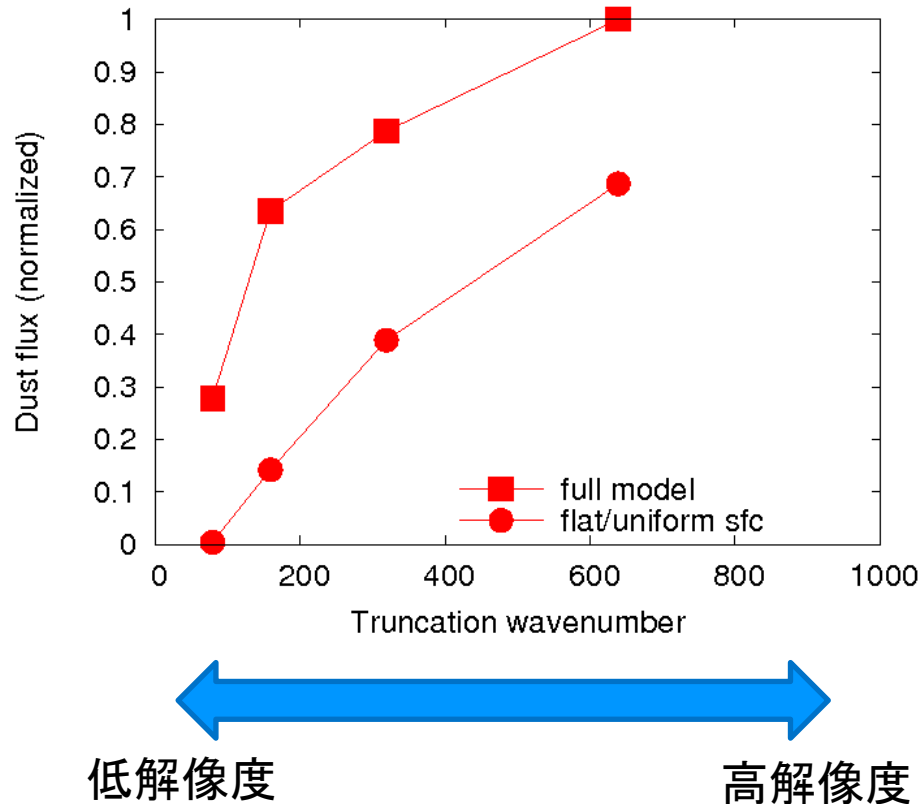
平坦火星条件でのダスト巻き上げ過程



- 地形の起伏がなくても小規模渦の存在する領域でダストが巻き上げられている。



全球積分ダスト巻き上げ量の解像度依存性



- 地表面特性の水平分布ありなしに関わらず、全球積分ダスト巻き上げ量は、解像度が高くなるほど大きくなる。
- 地表面特性の水平分布がある方が、ない場合よりも巻き上げダスト量が多い。
 - 地形性擾乱の重要性を示唆。

まとめ

- 火星大気大循環モデルを用いて, T639L96, T319L96, T159L96, T79L96 ($\Delta x \sim 11, 22, 44, 89$ km) の解像度で計算を実施した.
- モデル内では様々な水平規模の擾乱が表現された:
 - 傾圧不安定波動, 前線,
 - 地形性擾乱,
 - 山の風下における中規模渦,
 - $O(10$ km) の多数の筋状の流れ,
 - 低緯度における小規模渦.
 - 波動による, 渦生成への影響も見られた
- 小規模渦の水平スケールは, 最も高い解像においても収束していないようである.
- モデルで診断されるダスト巻き上げ量は, 解像度が高くなるにしたがって大きくなる. また, ダスト巻き上げ量もまた収束していないようである. 現在の物理過程・パラメタリゼーションは, サブグリッドスケールの擾乱の効果を理想的には表現できていない.