

2018/02/09

惑星宇宙グループ 比較惑星学コロキウム

# 火星におけるダスト巻き上げ パラメタリゼーションのレビューと 流れ場の考察

<sup>くりき</sup>  
\*村橋究理基<sup>1</sup>, 須藤康平<sup>1</sup>, 西澤誠也<sup>2</sup>, 石渡正樹<sup>1</sup>,  
小高正嗣<sup>1</sup>, 中島健介<sup>3</sup>, 竹広真一<sup>4</sup>, 杉山耕一郎<sup>5</sup>,  
荻原弘堯<sup>1</sup>, 高橋芳幸<sup>6</sup>, 林祥介<sup>6</sup>

1. 北大・理, 2. 理研 AICS, 3. 九大・理,  
4. 京大 数理研, 5. 松江高専・情報工, 6. 神大・理

# はじめに

- 火星大気中のダスト量変化は, 大気の光学的深さを  
変化させ, 温度場に影響を与えている  
(Smith, 2009)
- 実際の火星では様々な時空間スケールのダスト現象が存在



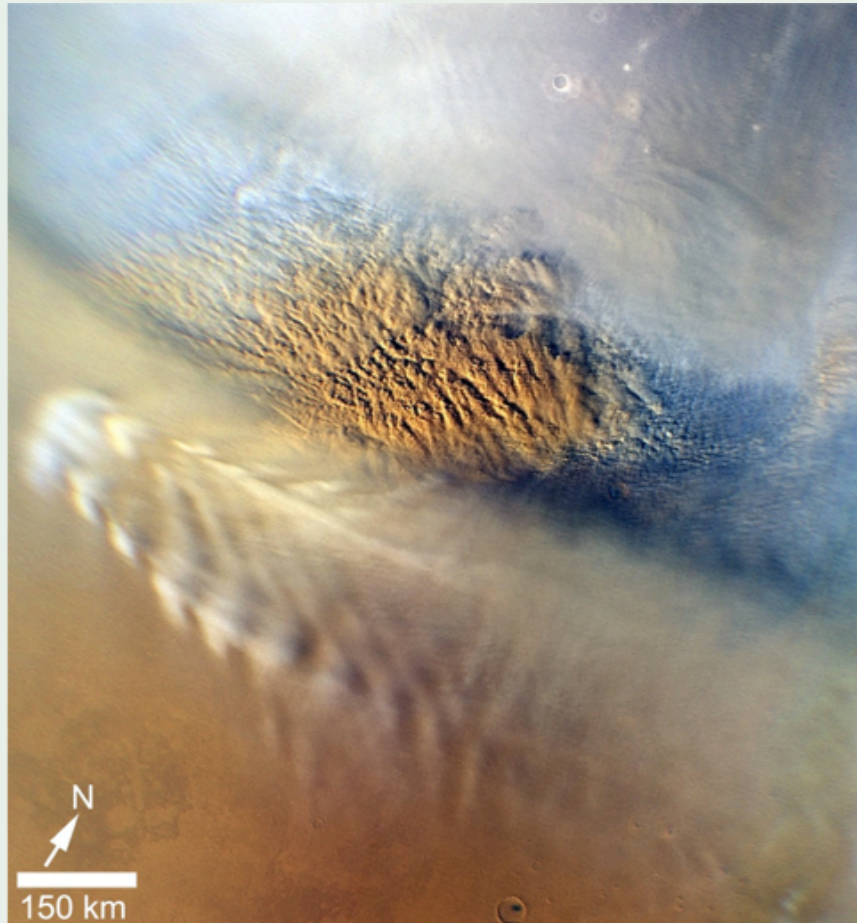
		グローバル ダストストーム	
月		リージョナル ダストストーム	
日		ローカル ダストストーム	
分	ダストデビル		
	小規模乱流		
		10 m	10 km 10,000 km

ダストデビル (探査機 Spirits 撮影)

<http://mars.nasa.gov/mer/gallery/press/spirit/20050819a.html>

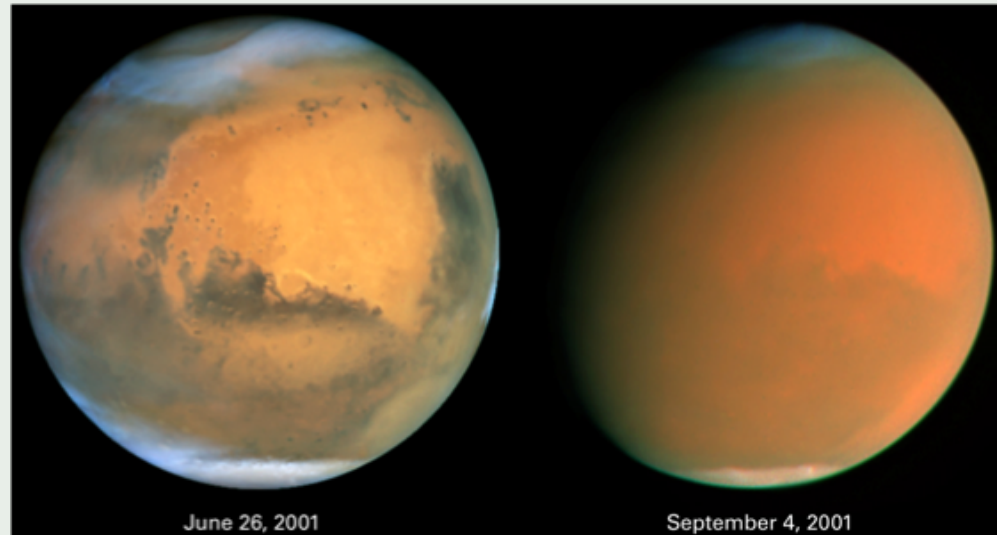
# はじめに

## ローカルダストストーム



月		グローバル ダストストーム	
日		リージョナル ダストストーム	
分	ダストデビル	ローカル ダストストーム	
	小規模乱流		
	10 m	10 km	10,000 km

## グローバルダストストーム



<https://www.jpl.nasa.gov/>

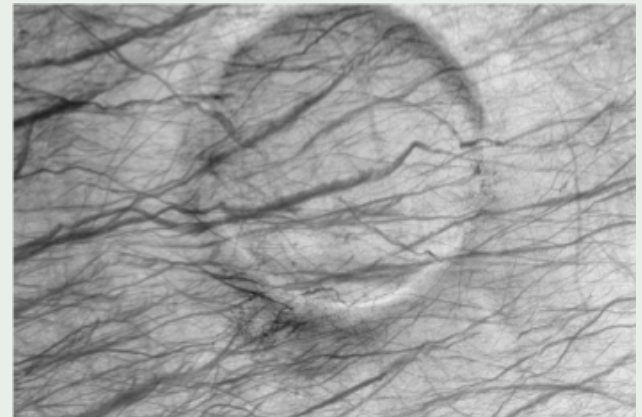
[https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/images/largesize/PIA15959\\_hires.jpg](https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/images/largesize/PIA15959_hires.jpg)

# 今日の話

- 最初に火星大気大循環モデル (MGCM) におけるダスト巻き上げパラメタリゼーションのレビューを行う
  - ダスト巻き上げパラメタリゼーションの現状と問題点の確認
  - ラージエディシミュレーションを用いた詳細な流れ場の分析とダスト巻き上げ量の関連の調査へ進む予定
- 次にパラメタリゼーションの検証を目的としたラージエディシミュレーションの解析結果を報告する

# 火星大気大循環モデル (MGCM) におけるダスト

- かつてはダスト分布を固定して火星の大気循環が調べられてきた  
(Wilson and Hamilton, 1996)
  - ダストストームが発生するのに十分な風速が得られなかった
  - MGCM の中でダストストームを起こすには、小スケール (<~ 100 km) な風の揺らぎが重要であることを示唆
  - 細かい風の流れを考慮する何らかの仕組みが必要
- 領域モデルによる対流計算によって、小スケールの流れを考慮すれば十分な風速が得られることがわかった  
(Odaka, 2001)
- Mars Global Surveyor によって数多くのダストデビルが見つかる  
(2000 年以降)
  - GCM で表現できない小さな風の揺らぎをもたらす現象としてダストデビルが注目されはじめた



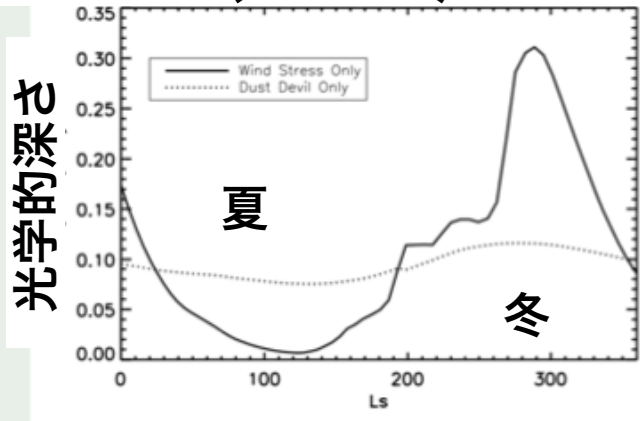
ダストデビルの通った跡

# ダスト巻き上げを考慮した MGCM 計算

- Kahre et al. (2006) : 二つのダスト巻き上げスキーム
  - 平均風応力
    - ダスト量 (~ 光学的深さ) の季節変動が表現可能
      - ただし風応力閾値を下げている. 臨界風応力は一定
  - ダストデビル
    - 効率因子パラメータ  $\alpha_D$  によっては, 背景ダスト量が表現可能

光学的深さ(経度平均)の季節変化

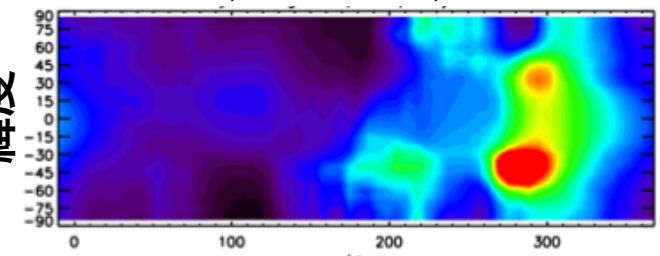
光学的深さ(全球平均)の季節変化



パラメタリゼーション  
実線 : 平均風応力  
点線 : ダストデビル

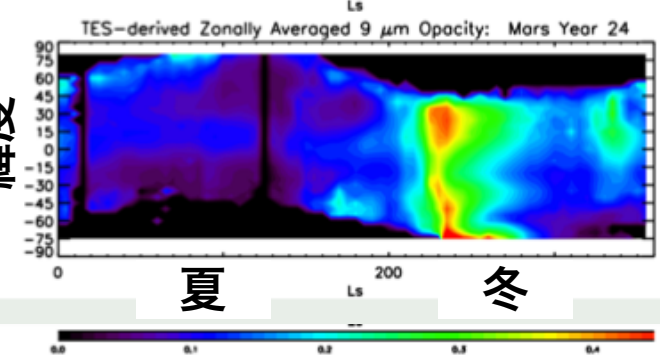
計算

緯度



観測

緯度





# 平均風応力巻き上げパラメタリゼーション

- 地球における観測経験式 (Westphal et al., 1987) に基づく
  - サハラ沙漠のダストストームの地上観測結果を数値シミュレーションで表すために定式化
- 火星用に調整 (Kahre et al., 2006)
  - 火星の大気密度, 重力を考慮

$$F_W = \alpha_W \times 2.3 \times 10^{-3} \tau^2 \left( \frac{\tau - \tau^*}{\tau^*} \right)$$

$F_W$  : ダストフラックス [kg/(m<sup>2</sup> s)]

$\alpha_W$  : 効率因子

$\tau$  : 地表面風応力 [N/m<sup>2</sup>]

$\tau^*$  : 風応力閾値 [N/m<sup>2</sup>]

Kahre et al. (2006) で用いられた  
パラメータ値の組み合わせ

$\tau^*$	$\alpha_W$
$10 \times 10^{-3}$	0.02
$22.5 \times 10^{-3}$	0.1
$35 \times 10^{-3}$	0.45

# ダストデビル巻き上げパラメタリゼーション

- 対流運動を熱源が顕熱である熱機関と仮定し, その仕事量からダストデビルによる巻き上げをパラメタライズ (Rennò et al., 1998)

$$F_D = \alpha_D F_s (1 - b)$$

$$b = \frac{p_s^{\chi+1} - p_{con}^{\chi+1}}{(p_s - p_{con})(\chi + 1)p_s^\chi}$$

$$\chi \equiv \frac{R}{c_p}$$

$F_D$  : ダストフラックス [kg/(m<sup>2</sup> s)]

$F_s$  : 顕熱フラックス [W/m<sup>2</sup>]

$\alpha_D$  : 効率因子 [kg/J]

$p_s$  : 地表面気圧 [Pa]

$p_{con}$  : 対流層頂点の  
気圧 [Pa]

$R$  : 気体定数

$c_p$  : 定圧比熱

Kahre et al. (2006)

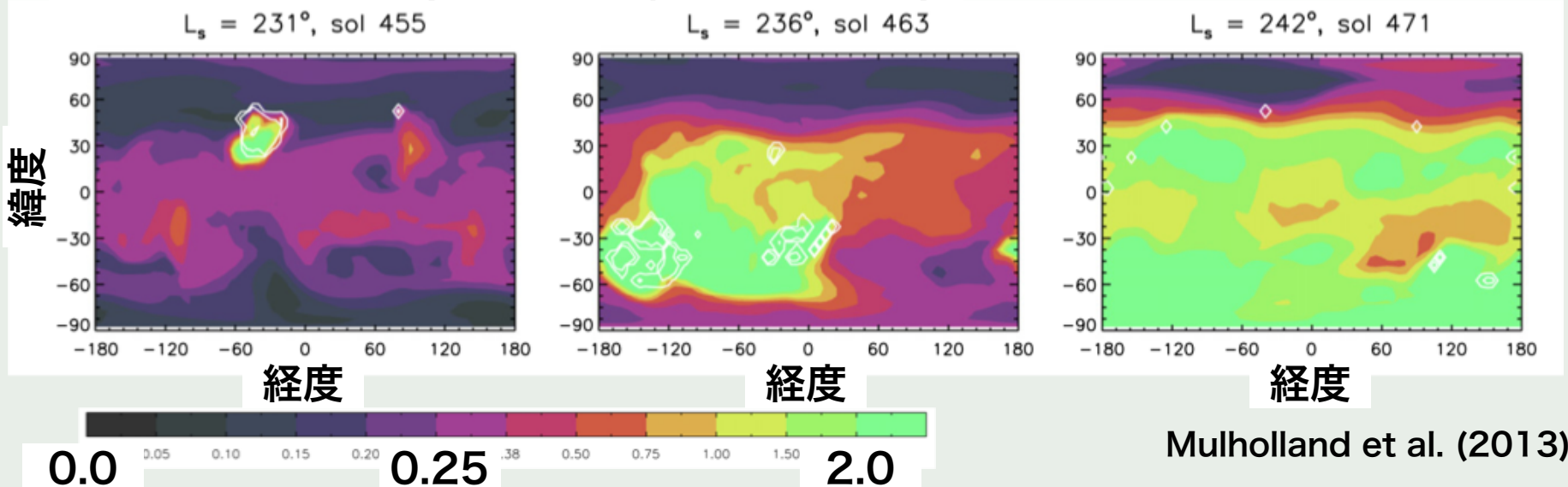
- 顕熱フラックスが大きいほど, 対流が活発になりダスト巻き上げ量が多くなる
- 対流層が厚いほど, 顕熱の運動エネルギーへの変換率が高くなり, ダスト巻き上げ量が多くなる



# ダスト巻き上げを考慮した MGCM 計算

- Mulholland et al. (2013) : ダストストームにおけるダスト量の年々変動が再現できたと主張
  - グローバルダストストームの隔年変動を大雑把に再現 (4 ~ 7 年周期)
  - 平均風応力閾値をダスト量に合わせて変化することを仮定
  - 南半球から北半球へのダスト輸送を仮定

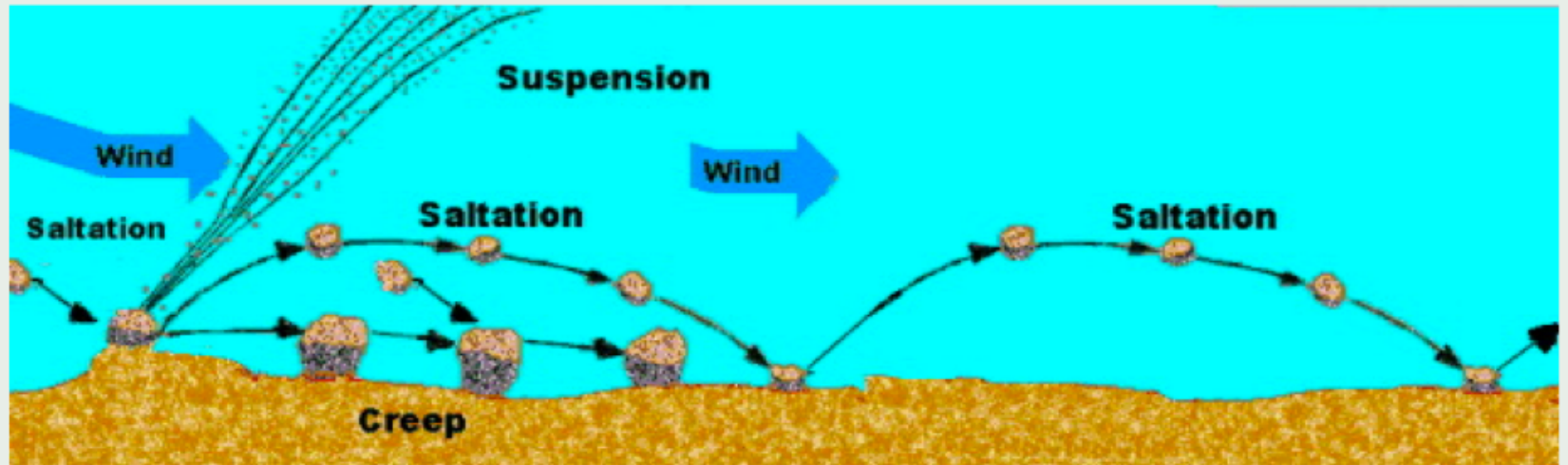
全球の光学的深さ (610 Pa 面, 対数プロット)



Mulholland et al. (2013)

# Mulholland et al. (2013) における仮定

- 平均風応力閾値をダスト量に合わせて変化することを仮定
  - ダストが多く溜まると saltation が生じにくくなり, 巻き上げの風応力閾値を下げられると仮定



By Po ke jung (Own work) CC BY 3.0

- 北半球から南半球へのダスト輸送を仮定
  - MGCM の計算では北半球へのダストの偏在化が進むので, ダストデビルなど何らかの小スケール現象によって南半球へダストの輸送が生じていることを仮定

# ダスト巻き上げパラメタリゼーションの問題

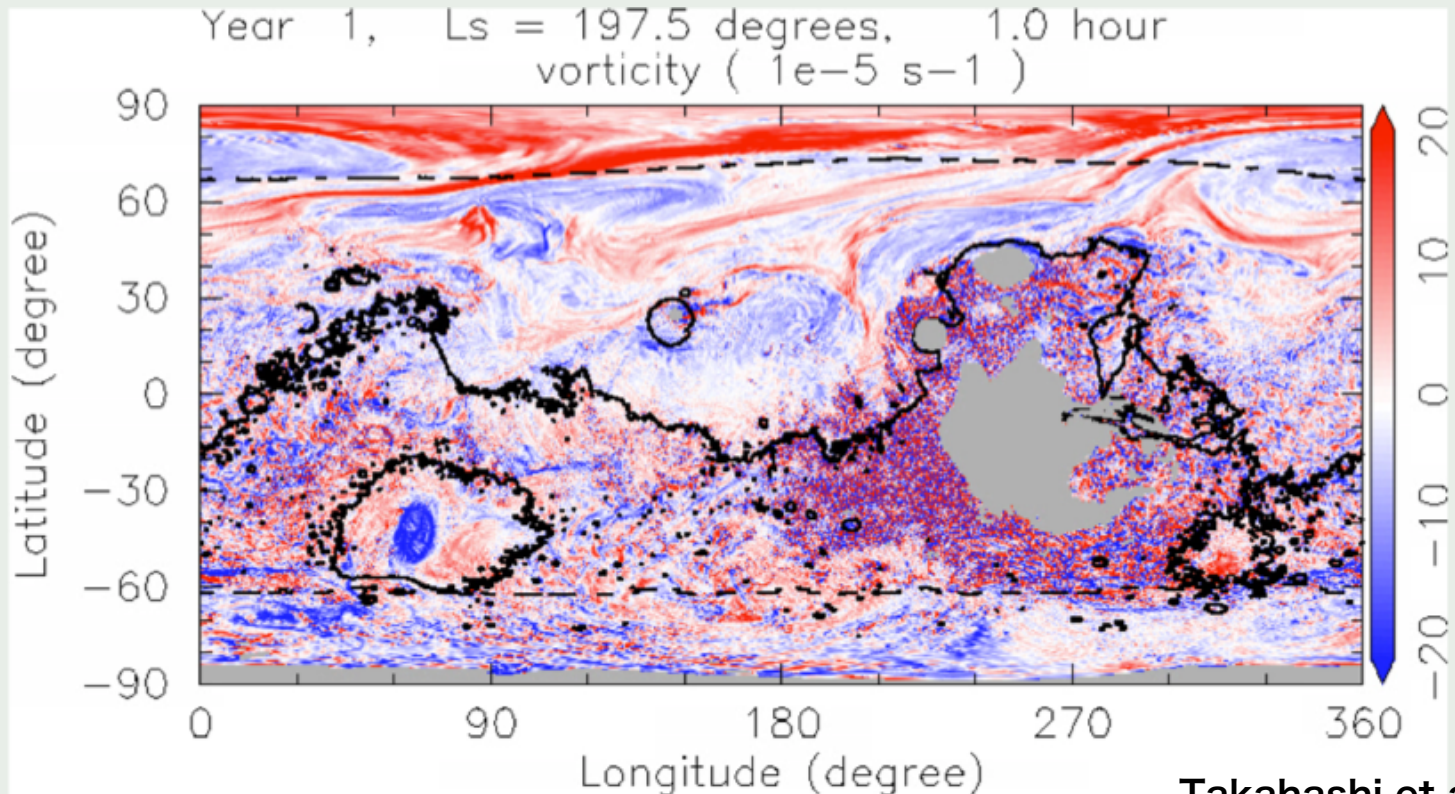
- 観測結果に合うようにパラメータを調整している
  - Kahre et al. (2006)
    - 実験的に得られた応力閾値 (Greeley and Iversen, 1985) ではダストが巻き上がらないため、閾値を下げている
  - Mulhollnad et al. (2013)
    - ダスト量に応じて巻き上げ閾値の調整を行っている
- 詳細な流れ場の情報なしに考案されている
  - 対流運動のエネルギーの一部がダストデビルに寄与すると大雑把に考えてダスト巻き上げ量を見積もっている (Rennò et al., 1989)
- 平均風応力パラメタリゼーションは、ダストデビルパラメタリゼーションの効果を二重に取り入れている可能性
- 詳細に流れ場の分析を元にした力学的な議論がされていない

# ダスト巻き上げパラメタリゼーションの検討

- 詳細な流れ場についてよく調査した上でパラメタリゼーションを考えた方がよい
- ダストデビルを持たらすような渦や細かい流れと対流運動との関係について詳しく知られていない
  - 対流運動の中でダストデビル (渦) はどの程度生じているのか
  - 流れ場に現れる応力はダストを巻き上げるのに十分か
- ラージエディシミュレーション (LES) を用いて対流運動と渦を詳しく調べる
  - その結果をもとにパラメタリゼーションの妥当性を検討したい

# 流れ場に関する考察

- MGCM には数 km サイズまで解像可能なものがある (~ 11 km; Takahashi et al., 2011)

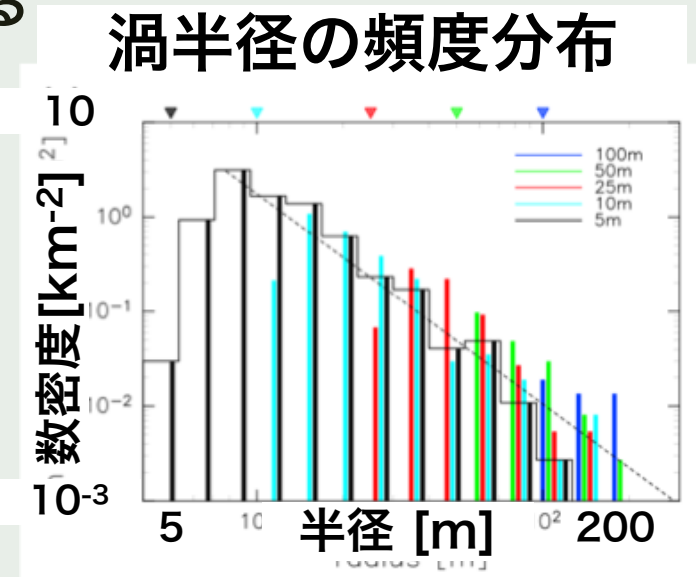
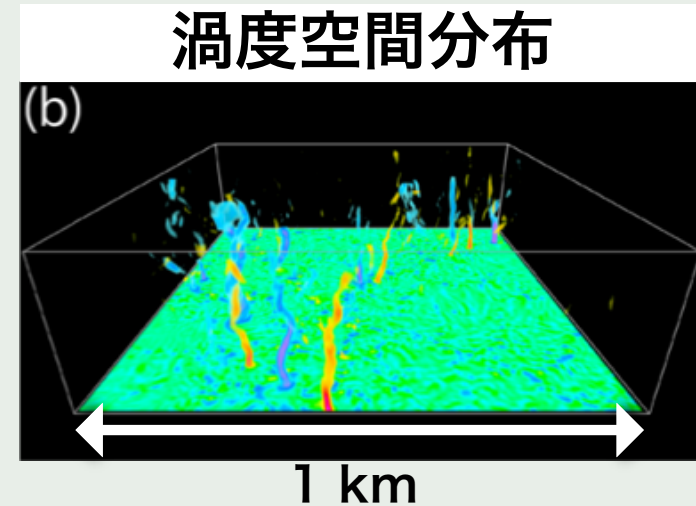


- 数 km 程度の計算領域における高解像度 LES の結果を解析し、流れ場の特徴を調べることで、パラメタリゼーションの検討できることが期待される



# もっとも高解像度な火星大気境界層の LES 計算

- Nishizawa et al. (2016)
  - 計算領域 水平 19.2 km, 鉛直 21 km
  - 空間解像度 5, 10, 25, 50, 100 m
  - 日変化する熱強制を外部から与える
  - LT = 0:00 から計算開始 (LT : 現地時刻)
- 渦に関する統計量を調べた
  - LT = 14:30 の高度 62.5 m 付近における渦のサイズ分布など
- しかし、地表付近における速度場や応力場については未調査
  - ダストの巻き上げを考える上では地表付近を観察する必要がある



Nishizawa et al. (2016)



# 使用データ

## ■ 使用モデル：SCALE-LES

- 方程式系：3次元完全圧縮流体方程式
- 地表面フラックス：Louis モデル (Louis, 1979)

## ■ 計算領域

- 水平方向 19.2 km × 19.2 km, 鉛直方向 21 km
- 側面境界には周期境界条件

## ■ 空間解像度

- 等方 5 m, 10 m, 25 m, 50 m, 100 m
- 5 m 解像度の格子点数は約  $4.8 \times 10^{10}$  点  
(1 時刻 1 スナップショットのデータ量は 1.2 TB)

## ■ 熱強制

- Odaka et al. (2001) の1次元計算から得られた地表面温度及び大気加熱率分布を与える

## ■ 初期状態

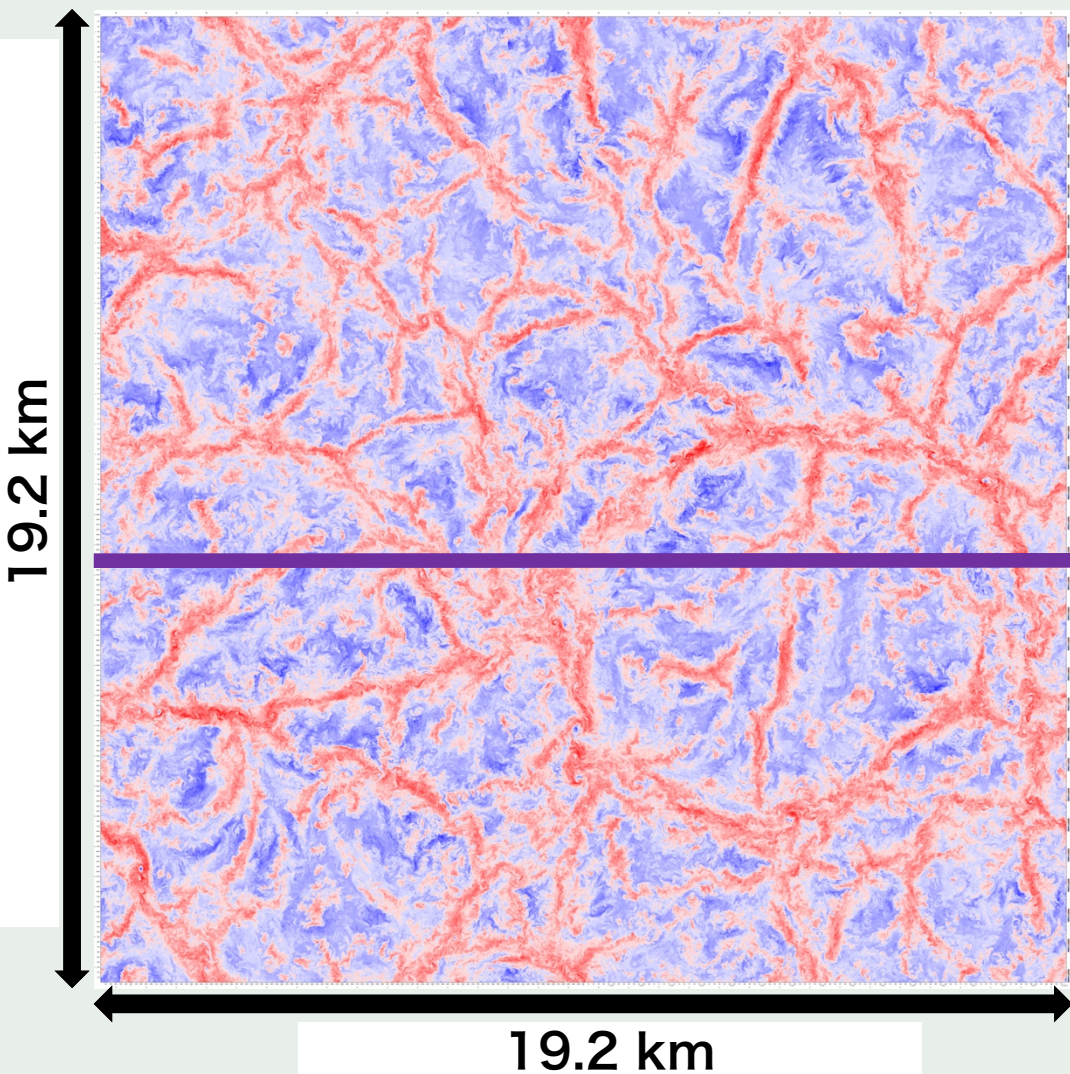
- 安定成層した静止大気に微細な温度擾乱を加えたもの

## ■ 今回の解析では LT = 14 : 30 のデータを用いる

- Nishizawa et al. (2016) で解析されている時刻

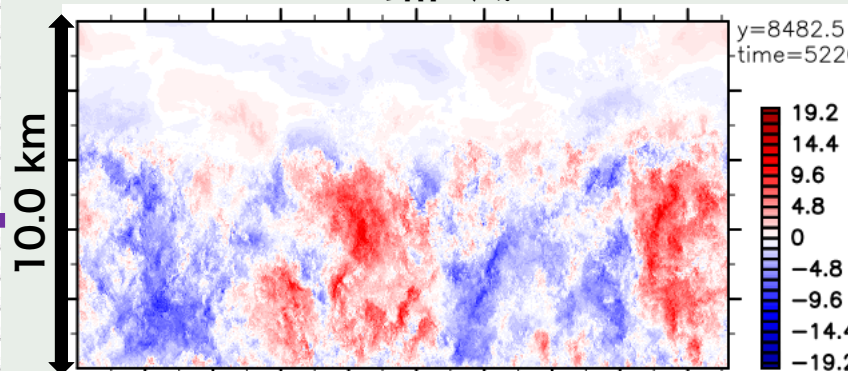
# 流れ場空間分布概観 (z = 197.5)

鉛直風 [m/s] 水平分布

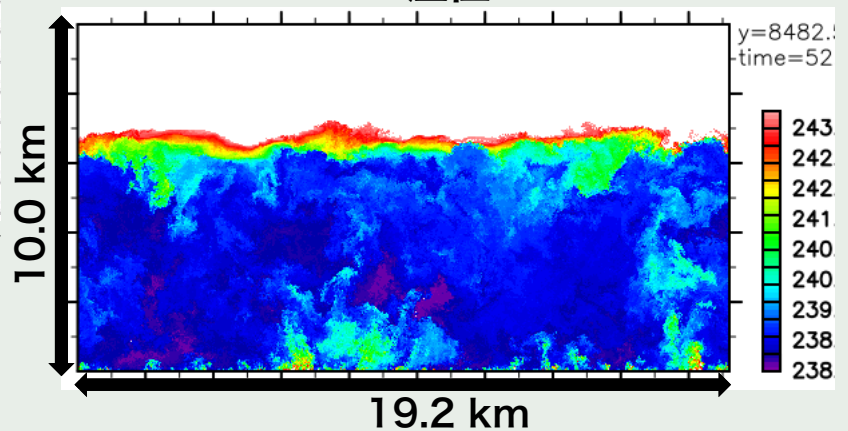


- 対流セルサイズ
  - 水平 : 数 km
  - 鉛直 : 6 km 程度

鉛直風



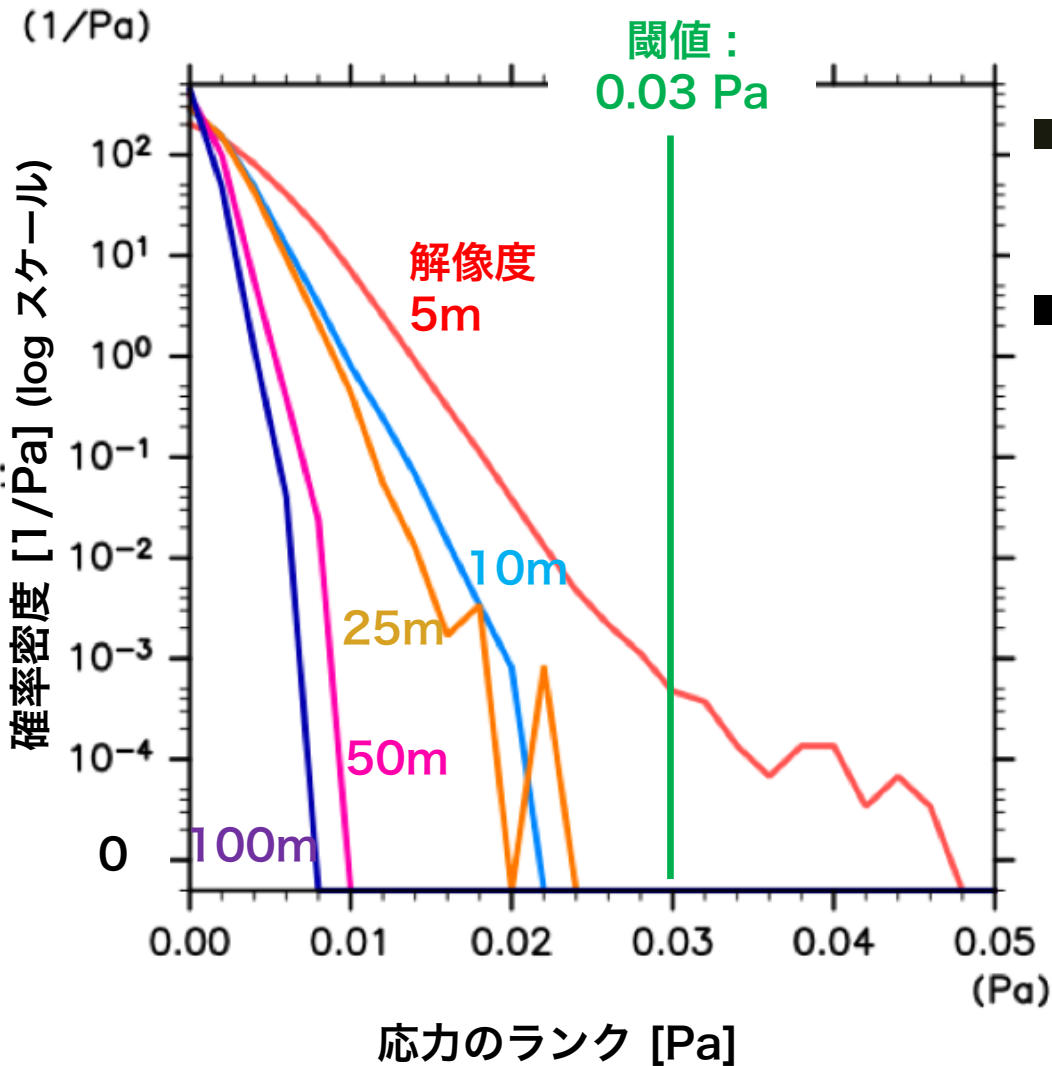
温位



19.2 km

# 解析結果：地表面応力確率密度分布

## 応力確率密度分布



- 解像度 5 m と 10 m では概形が大きく異なる
- 他の解像度では閾値を超えない

実験によるダスト巻き上げの閾値 0.03 Pa (Greeley and Iversen, 1985)

$$\text{確率密度} \frac{dn}{N dr}$$

$dn$  : ビンに含まれる格子点数

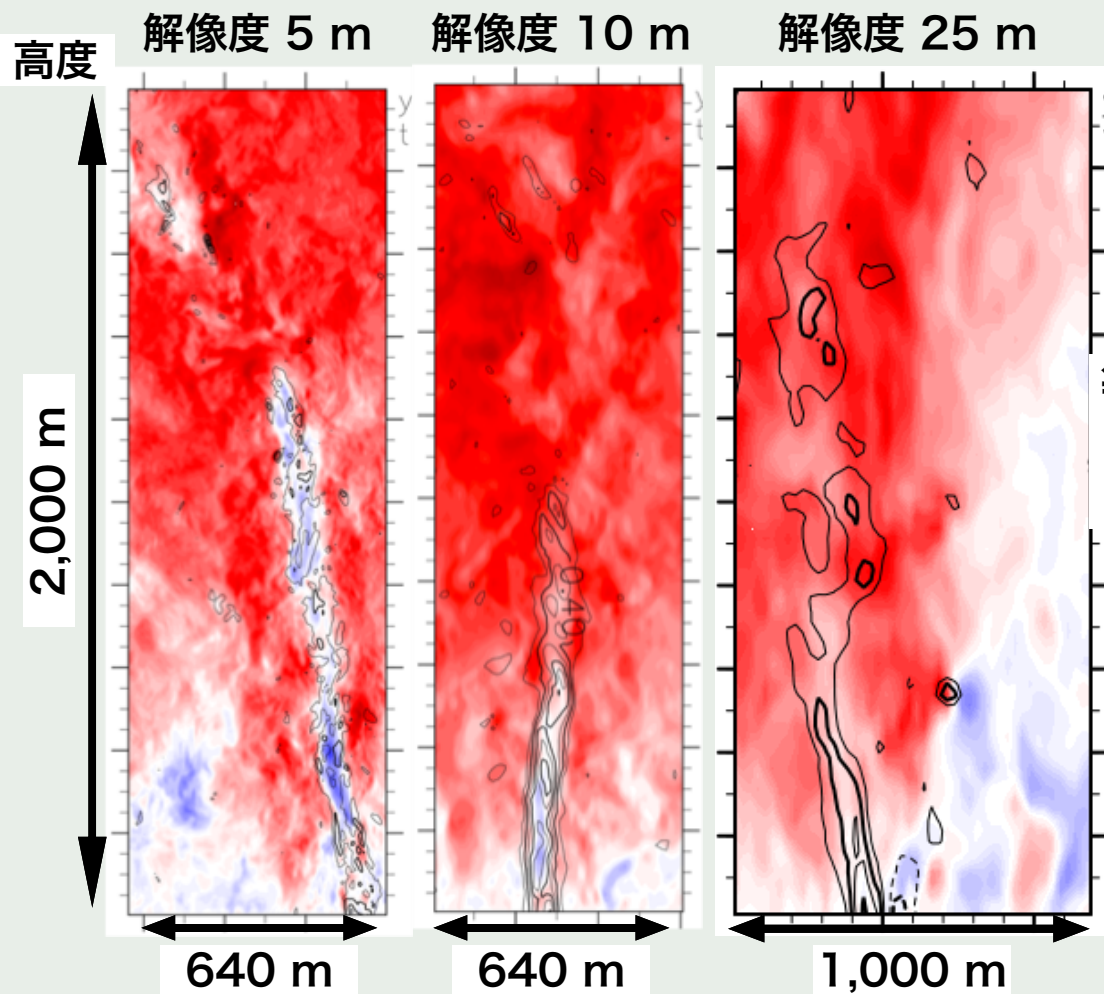
$N$  : 全格子点数

$dr$  : ビンの幅 (0.002 Pa)

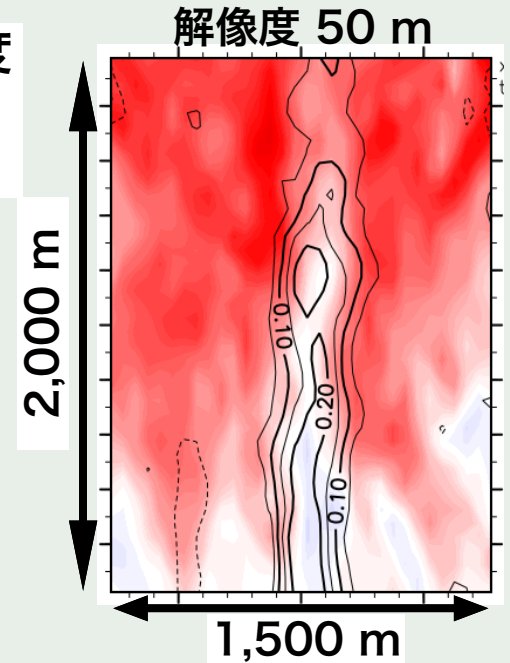
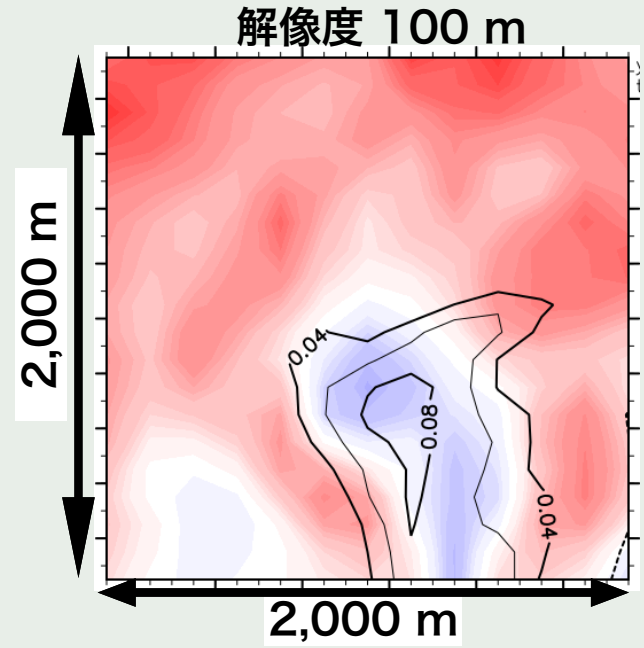
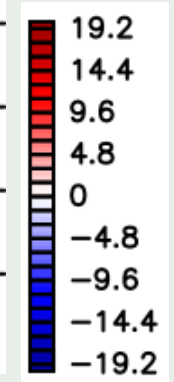


# 応力が最も強い箇所の流れ場 (解像度別)

- それぞれ 1,000 m 以上の高さを持つ孤立渦が見える



等値線：渦度  
赤：上昇流  
青：下降流

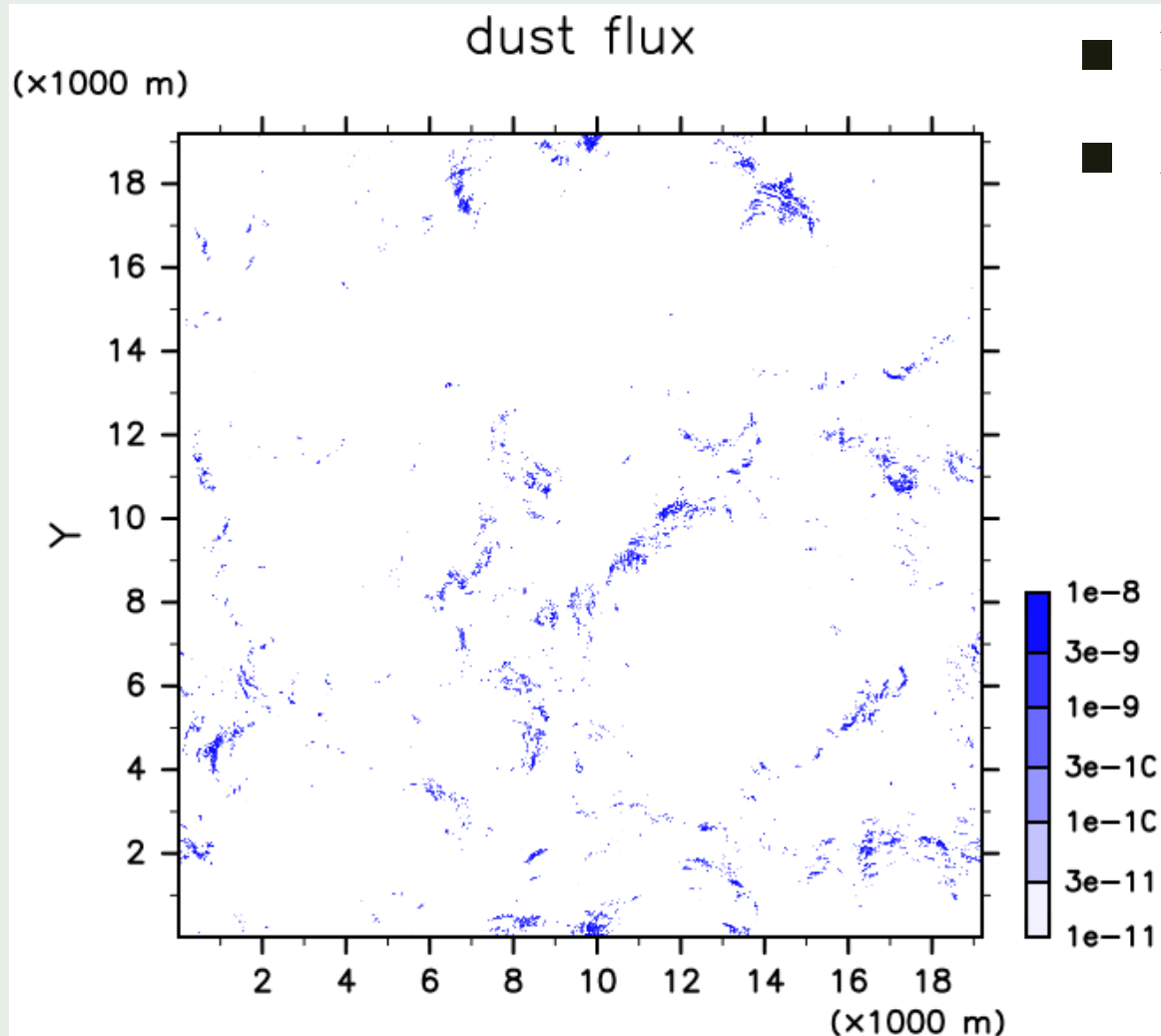


# 地表面応力が強い場所の流れ場 (須藤, 2018)

- 応力が強い場所上位 10 箇所について, 孤立渦の有無を比較
  - $dx = 5 \text{ m}$  : 5/10
  - $dx = 10 \text{ m}$  : 5/10
  - $dx = 25 \text{ m}$  : 6/10
  - $dx = 50 \text{ m}$  : 6/10
  - $dx = 100 \text{ m}$  : 5/10
- 渦を伴っているかどうかはおおよそ半々
  - 一番強い場所には渦が伴っている
- 応力が強い場所はダストデビル (渦) だけではない

# ダストフラックス空間分布

- Kahre et al. (2006) のパラメタリゼーションで計算したダストフラックス [ $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ ] の分布



- 解像度 5 m

- 用いたパラメータ

$$\tau^* : 0.001 \text{ Pa}$$

$$\alpha_W : 0.02$$



# まとめ

- 火星のダスト巻き上げパラメタリゼーションには問題がある可能性がある
  - ダストデビル：具体的に流れの微細構造に基づいた検討がなされていない
  - 平均風応力：ダストデビルの効果を含んでいる可能性あり
- パラメタリゼーションの妥当性検討のため、高解像度 LES を利用した検証を行っている
  - 計算解像度 5 m で大きな地表面応力が生じる点を持つ
  - 強い地表面応力を持つ点に、必ずしもダストデビルのような構造が見られるわけではない
- 今後の展望
  - MGCM で使われているパラメタリゼーションを適用するなどして、ダストフラックスと流れ場の特徴の関連を探る

# 参考文献

- Greeley, R., and J. D. Iversen, 1985: Wind as a Geological Process on Earth, Mars, Venus, and Titan., Cambridge Univ. Press., 333 pp
- Kahre, M. K., et al., 2006: Modeling the Martian dust cycle and surface dustreservoirs with the NASA Ames general circulationmodel, J.G.R, 111, 25
- Louis, J.-F., 1979: A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere, Boundary Layer Meteorol., 17, 187-202.
- Mulholland, D. P., et al., 2013: Simulating the interannual variability of major dust storms on Marsusing variable lifting thresholds, Icarus, 223, 344-358
- Nishizawa, S., et al., 2016: Martian dust devil statistics from high-resolution large-eddy simulations, Geophys. Res. Lett., 43, 4180-4188
- Odaka M., 2001: A numerical simulation of Martian atmospheric convection with a two-dimensional anelastic model: A case of dust-free Mars, Geophys. Res. Lett., 28, 895-898
- Rennò, N. O., et al., 1998: A simple thermodynamical theory for dust devils, A.M.S., 55, 3244-3252
- Smith, M. D., 2009: THEMIS observations of Mars aerosol optical depth from 2002-2008, Icarus, 202, 444-452
- Westphal, D. L., et al., 1987: A two-dimensional numerical investigation of the dynamics and microphysics of saharan dust storms, J.G.R., 92, 3027-3049
- Wilson, R. J., and Hamilton, K., 1996: Comprehensive model simulation of thermal tides in the Martian atmosphere, J.A.S, 53, 9, 1290-1326