

2019/3/11
ゲリラコロキウム

火星大気LESによって得られた 対流運動と渦

北海道大学 大学院理学院
宇宙理学専攻 惑星宇宙グループ
地球流体力学研究室
村橋 究理基

目次

■ はじめに

- 火星大気におけるダスト
- MGCM におけるダストの取り扱い
- 微細な流れ場構造に注目した LES

■ 解析するデータ

- Nishizawa et al. (2016) の計算結果

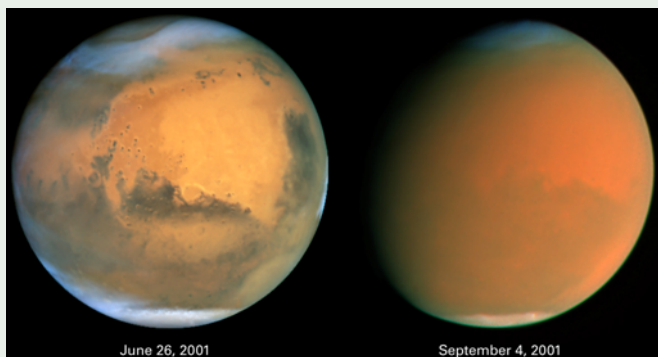
■ 解析結果

- 風速場 - 対流と渦構造
- 応力強度分布
- 渦構造と応力の関係

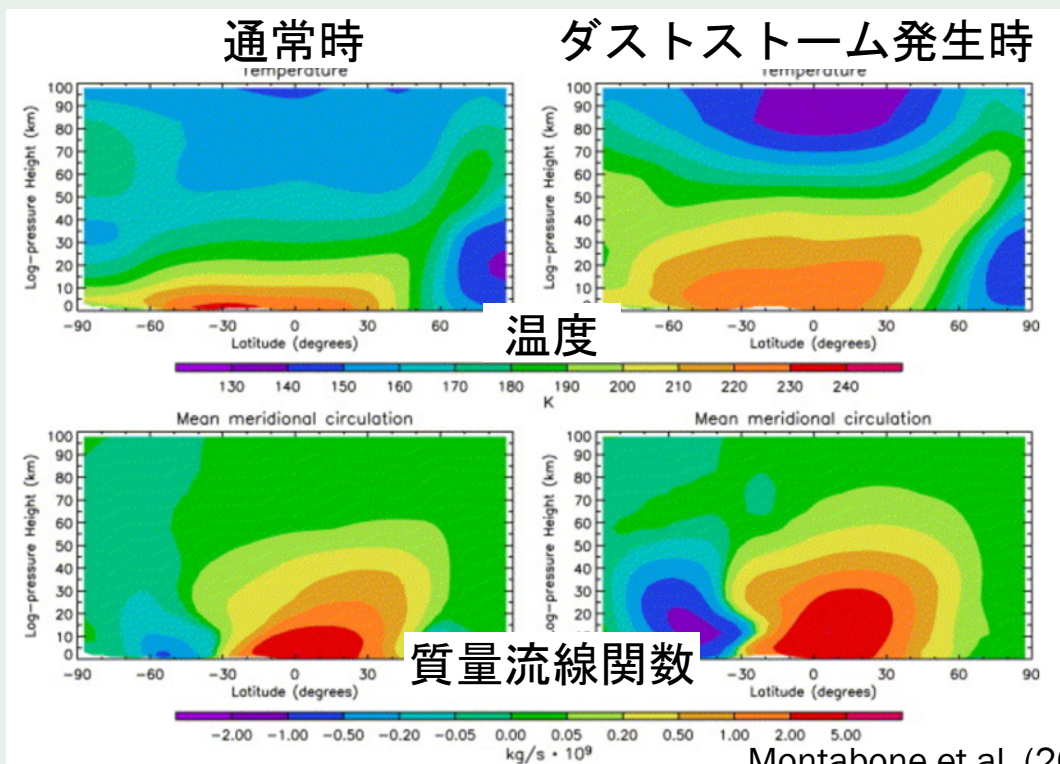
■ まとめ

はじめに - 火星大気におけるダスト

- 火星大気中のダストは太陽放射を散乱, 吸収するため, 温度構造や大気循環に影響を与えている
 - ダストが多い時期には地表面や大気が温暖になる (Montabone et al., 2005)
 - 大気循環が変化することで H_2O や CO_2 の循環に影響し, 極冠の形成に変化をもたらす可能性がある (Basu et al., 2006)

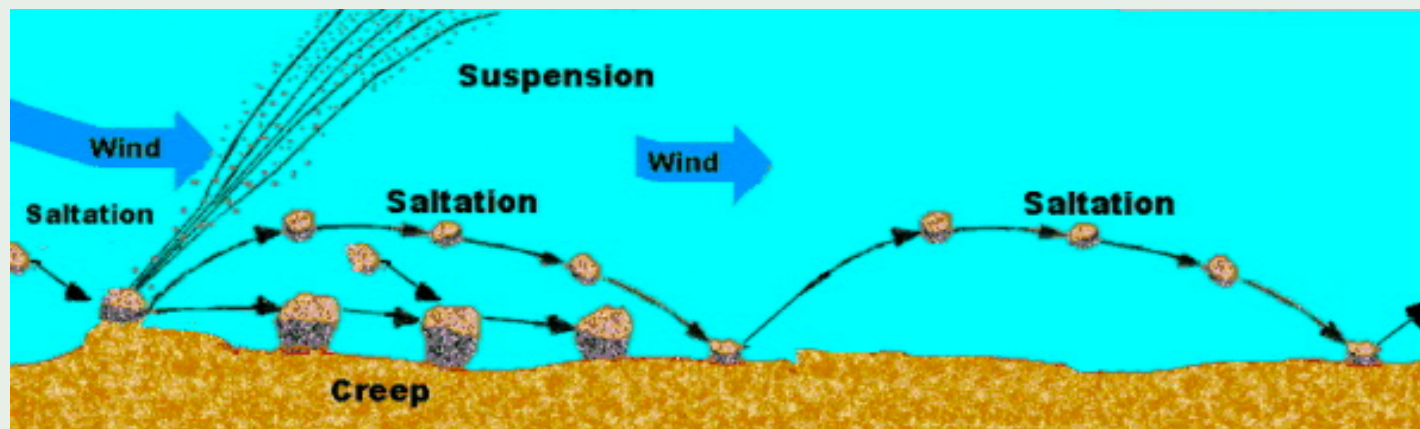


グローバルダストストーム
<https://www.jpl.nasa.gov/>



火星におけるダストの巻き上げ過程

- 大気中のダスト巻き上げプロセスとして想定されているもの
 - 風応力：Saltation



By Po ke jung CC BY 3.0

- ダストデビル：渦構造



0000

ダストデビル (探査機 Spirits 撮影) <http://mars.nasa.gov/mer/gallery/press/spirit/20050819a.htm>

MGCM におけるダストの取り扱い

■ KMH スキーム (風応力)

- 地球の観測から得られた結果を元にする
- 地表面応力から巻き上げ量を決定

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

F_W : ダストフラックス [kg/(m² s)]
 α_W : 効率因子
 τ : 地表面風応力 [N/m²]
 τ^* : 風応力閾値 [N/m²]

■ DDA スキーム (ダストデビル)

- ダストデビルを熱機関だと見立てる
- 顕熱フラックスと熱効率から巻き上げ量を決定

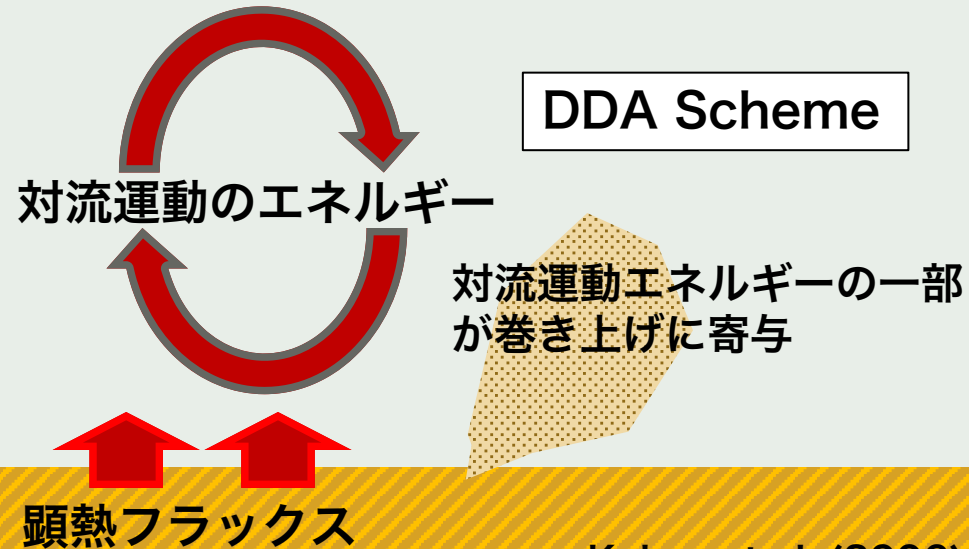
$$F_D = \alpha_D F_s (1 - b)$$

F_D : ダストフラックス [kg/(m² s)]
 F_s : 顕熱フラックス [W/m²]
 α_D : 効率因子 [kg/J]

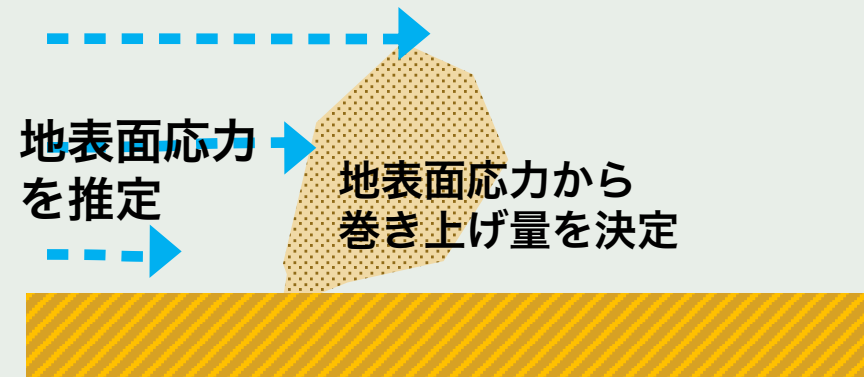
モデルで解像できる風速

KMH Scheme

DDA Scheme



Kahre et al. (2006)



ダスト巻き上げスキームの問題点

- 実際のダスト巻き上げプロセスはよく理解されていない
 - 観測によって風速や地表面応力の強さを見ることはできない
 - 時間的に短い/空間的に小さい現象
- ダスト巻き上げスキームは具体的な流れ場を解析することによる検証ができていない
 - 以下二つのスキームに関する説明は不要かもしれない。ただし未検証である理由については記述しておいてもよいかも
 - (DDA スキームは顕熱フラックスから推定した運動エネルギーで見積もっている)
 - KMH スキームのように風速によってダスト巻き上げ量を推定するのに、GCM で解像可能な平均化されたスケールにおける風速では不十分と考える
 - 風速分布は一様ではない：場所によってダストデビルなどが存在
- LES を用いて得られる流れ場の細かい構造を調査し、ダストの巻き上げがどのような流れ場によってもたらされるのか検討する必要がある

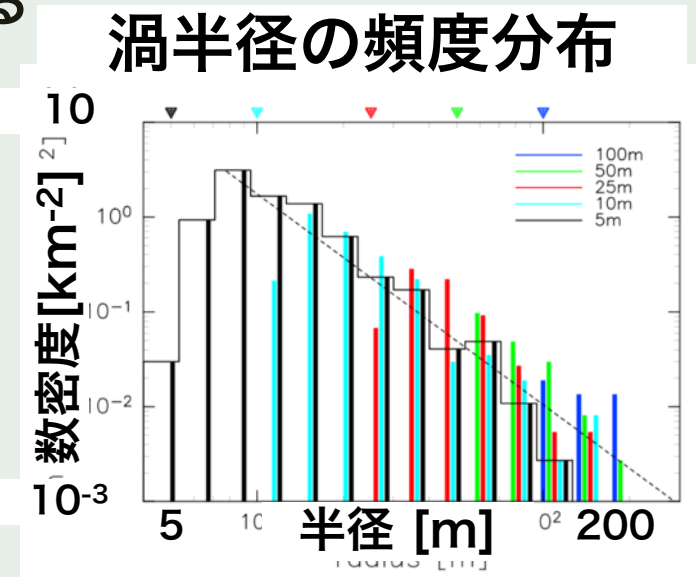
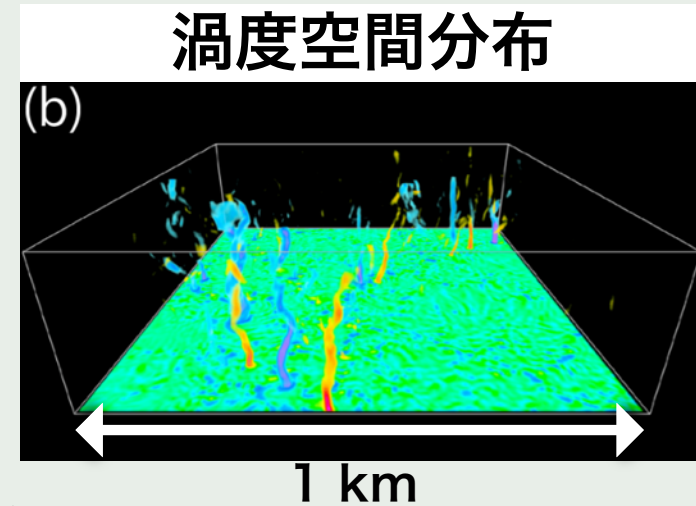
本研究の目的

- **ダスト巻き上げ量を決定する強い地表面応力がどのような流れ場と関係があるのか調べる**
 - 対流運動に伴ってどのぐらいの強さの風速が生じるのか
 - ダストデビルのような渦がどれぐらい生じるのか
 - どのような流れ場構造に伴って応力の強さが決まるのか

- **仮説：ダストデビルのような渦構造がダスト巻き上げに重要なのではないだろうか**
 - 衛星観測によって多くのダストデビルが見つまっているため
- **どれぐらいの強さの渦/流れ場がダスト巻き上げに寄与するのか調べたい**
 - さらに粗視化した結果用い, 5 m 解像度で得られた結果が粗い解像度の結果で推定できるか調べることで, ダスト巻き上げスキームを検討したい

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 4.8×10^{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

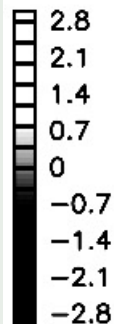
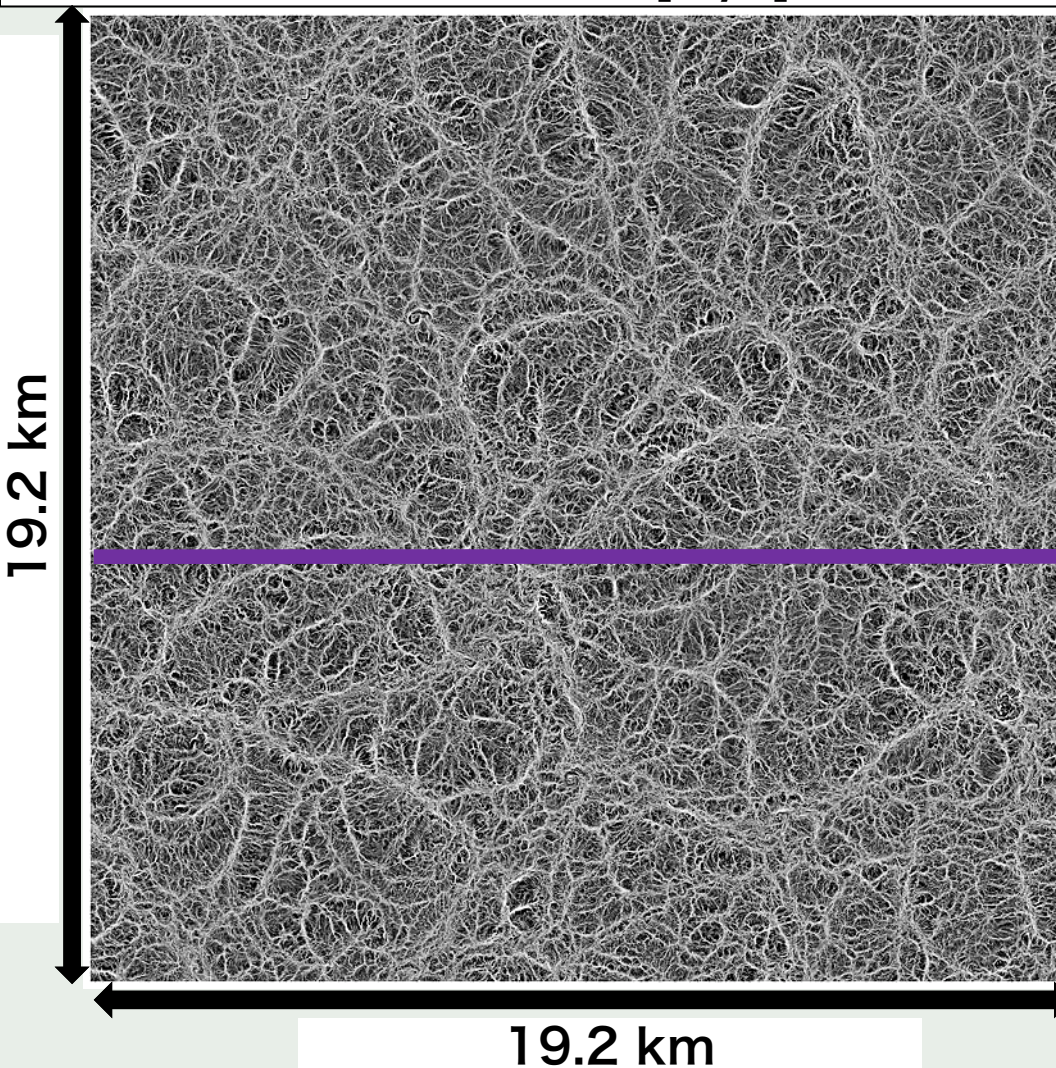
- Odaka et al. (2001) の1次元計算から得られた地表面温度及び大気加熱率分布を与える

■ 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

対流セル構造(14:30)

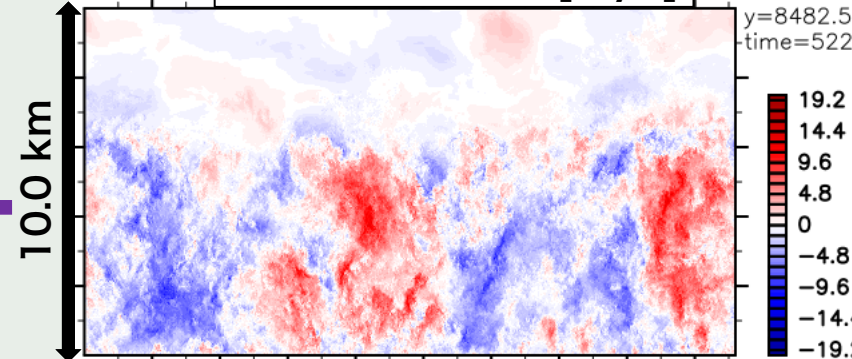
鉛直風 水平分布 [m/s]



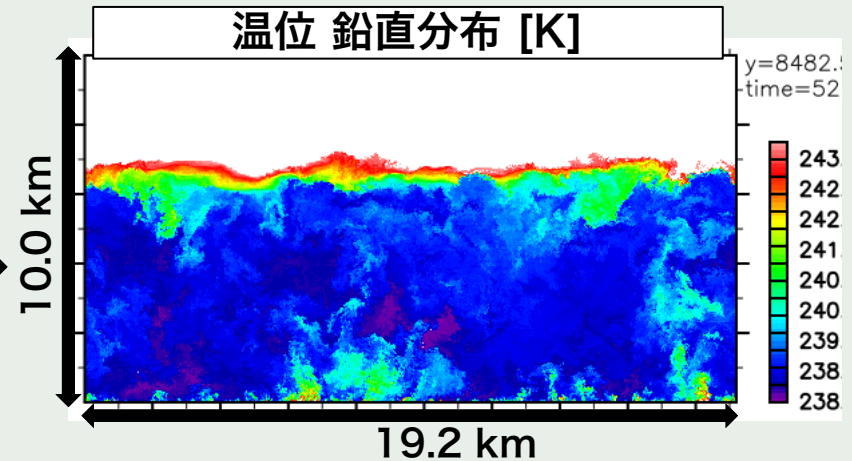
■ 対流セルの特徴

- 水平方向：数 km
- 鉛直方向：6 km 程度

鉛直風 鉛直分布 [m/s]



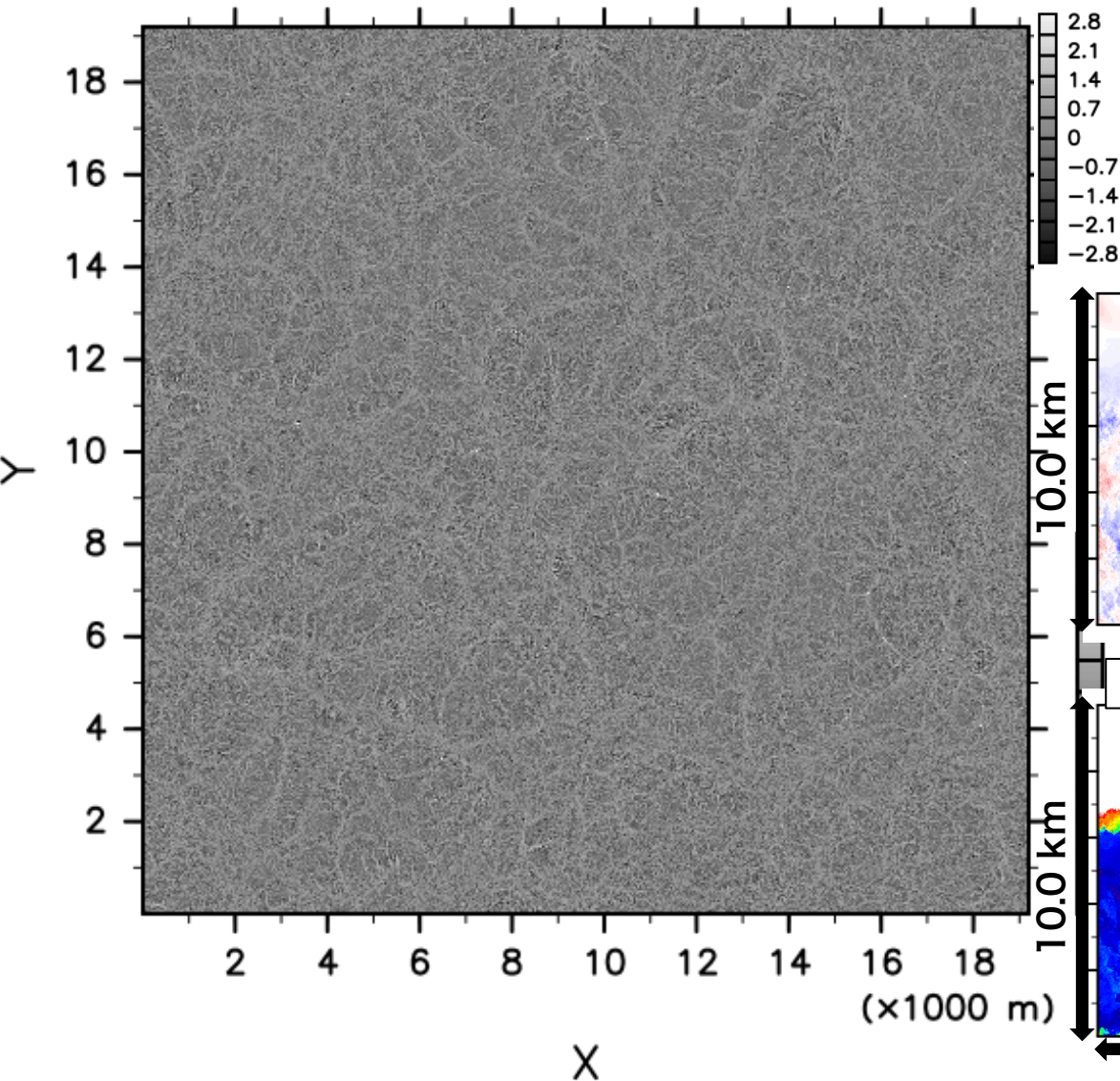
温位 鉛直分布 [K]



対流セル構造(14:30)

鉛直風 水平分布 [m/s]

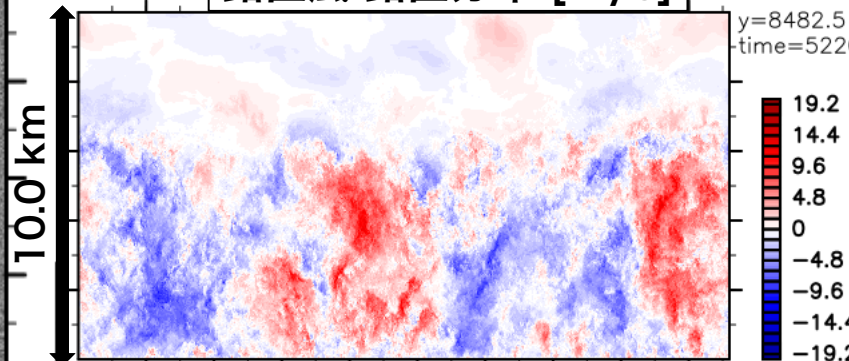
1000 m)



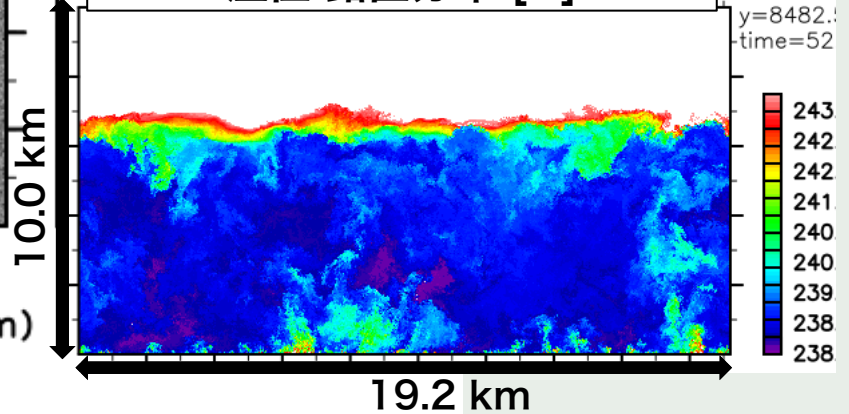
■ 対流セルの特徴

- 水平方向 : 数 km
- 鉛直方向 : 6 km 程度

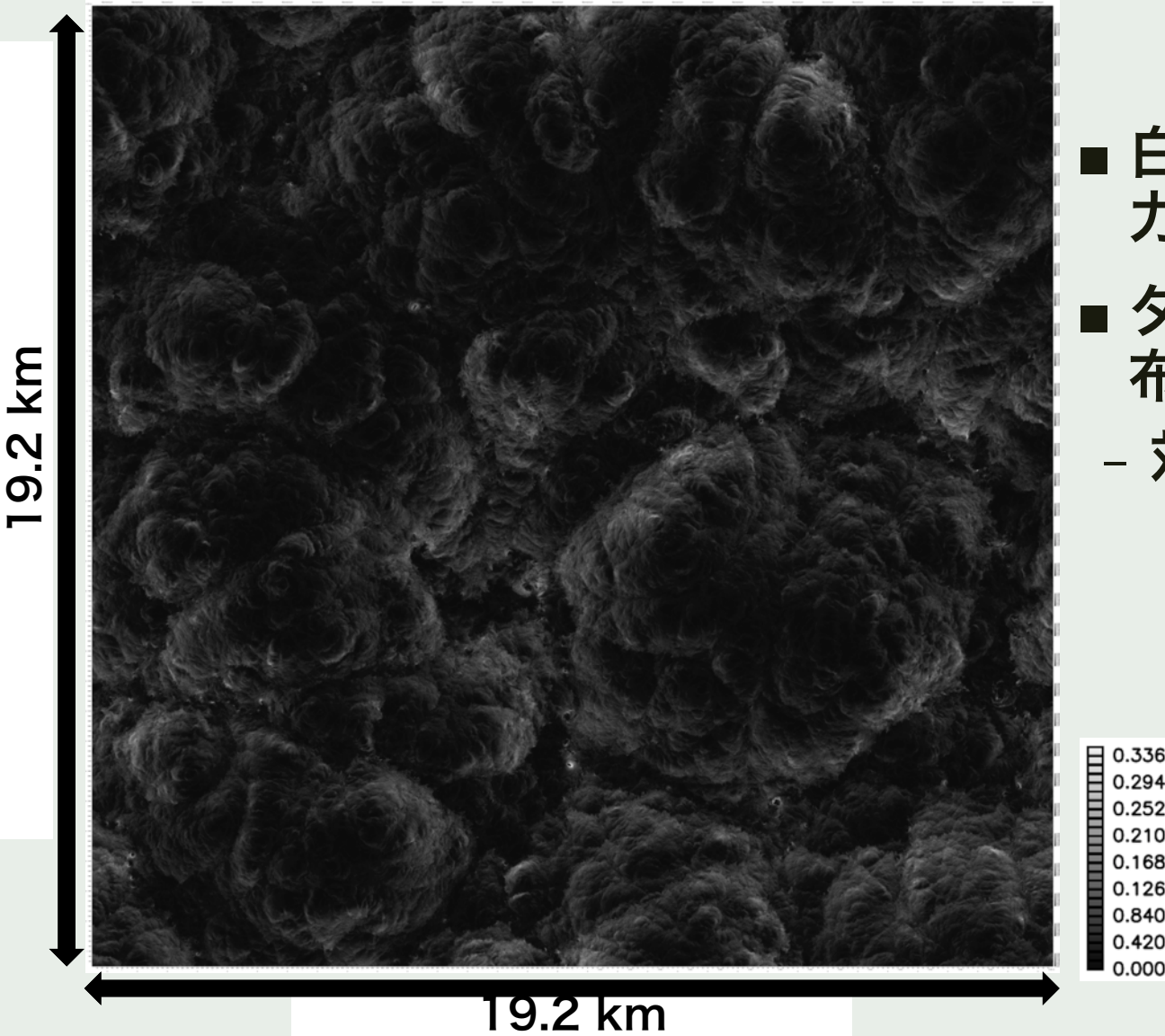
鉛直風 鉛直分布 [m/s]



温位 鉛直分布 [K]



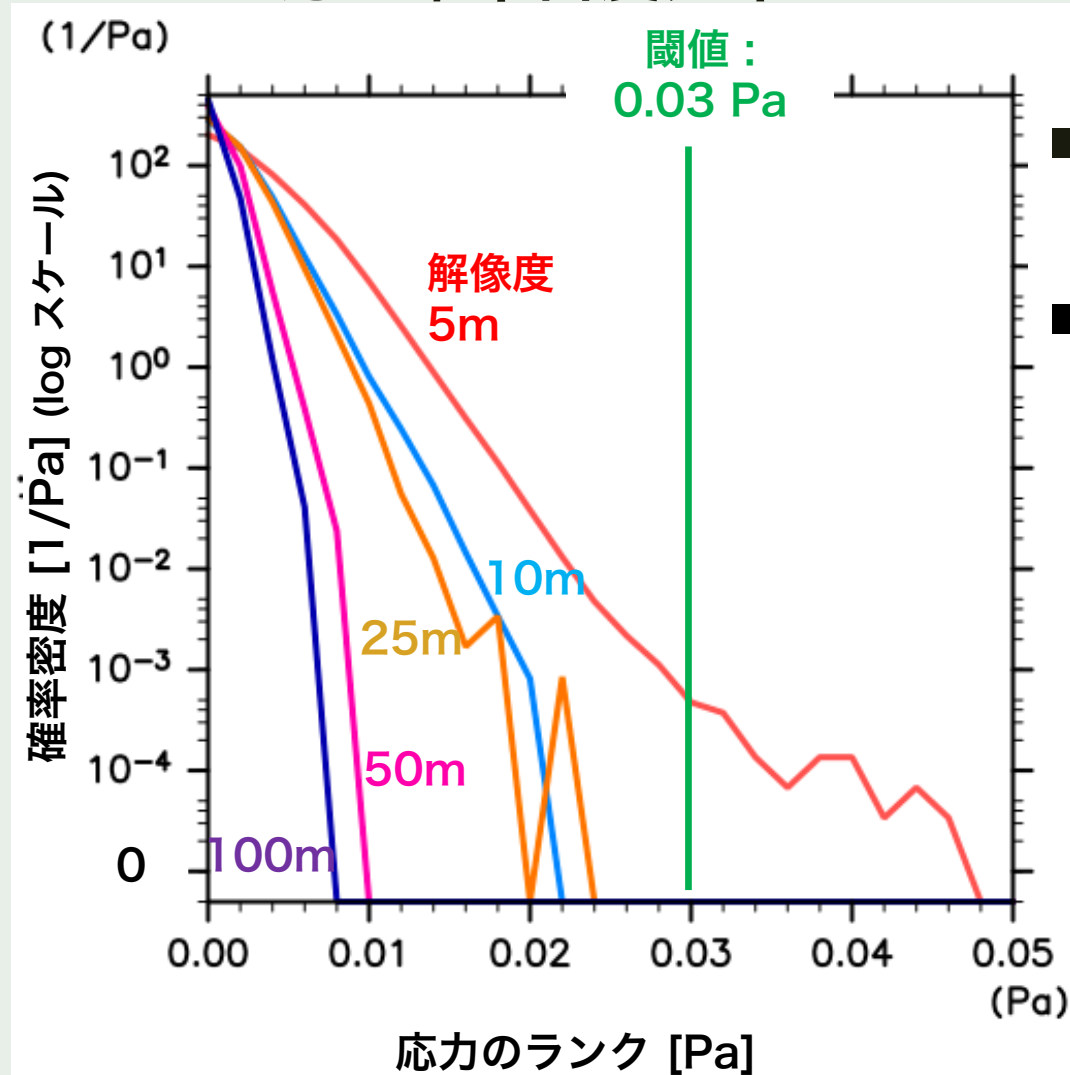
地表面応力の空間分布 (14:30)



- 白いところが地表面応力が強い
- ダストフラックスの分布は局在している
 - 対流セルの境界付近

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)

$$\text{確率密度} \frac{dn}{N dr}$$

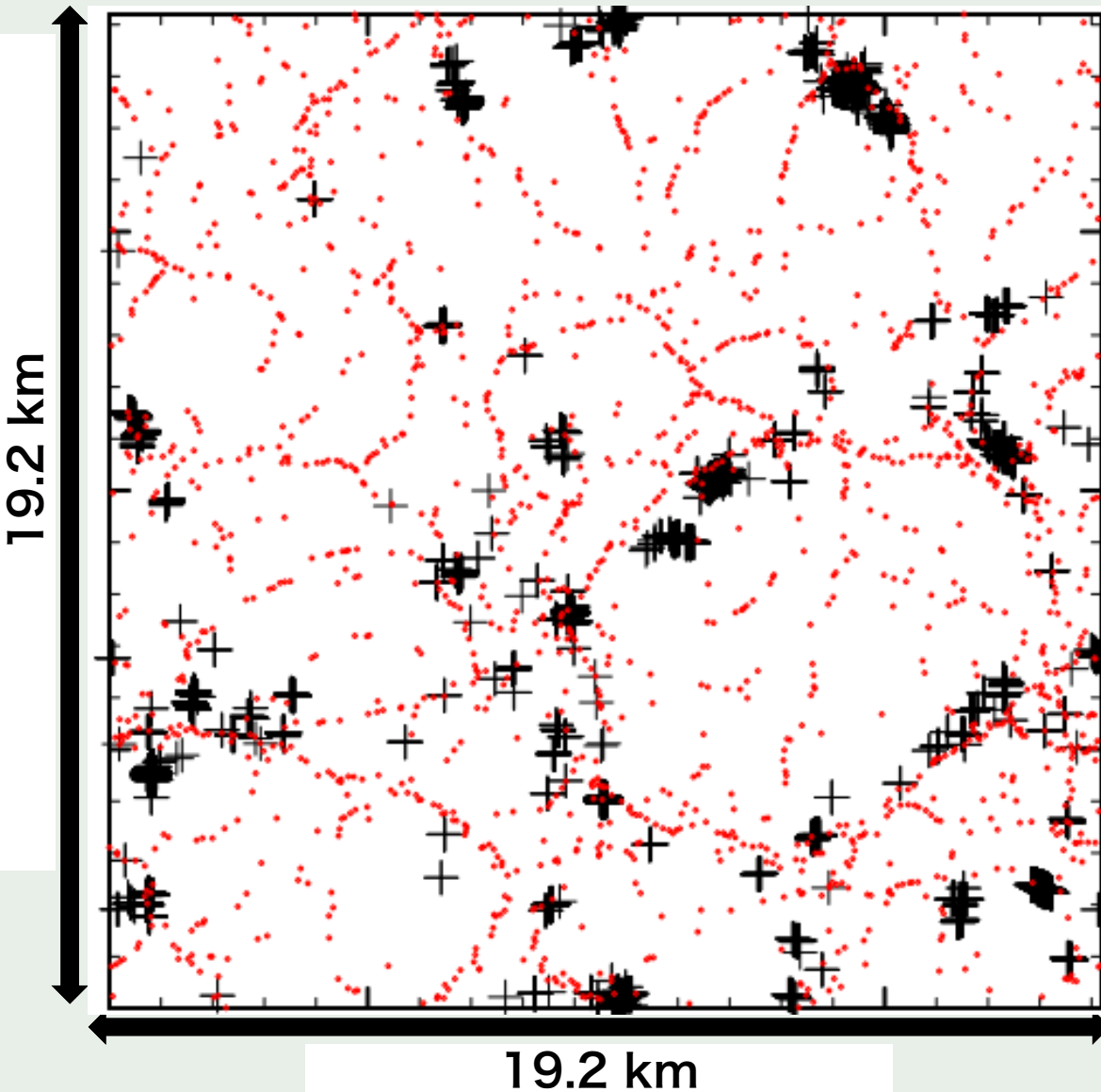
dn : ビンに含まれる格子点数

N : 全格子点数

dr : ビンの幅 (0.002 Pa)

渦と応力が強い点の空間分布

赤点：渦，黒十字：応力が強い点 ($> 0.017 \text{ Pa}$)



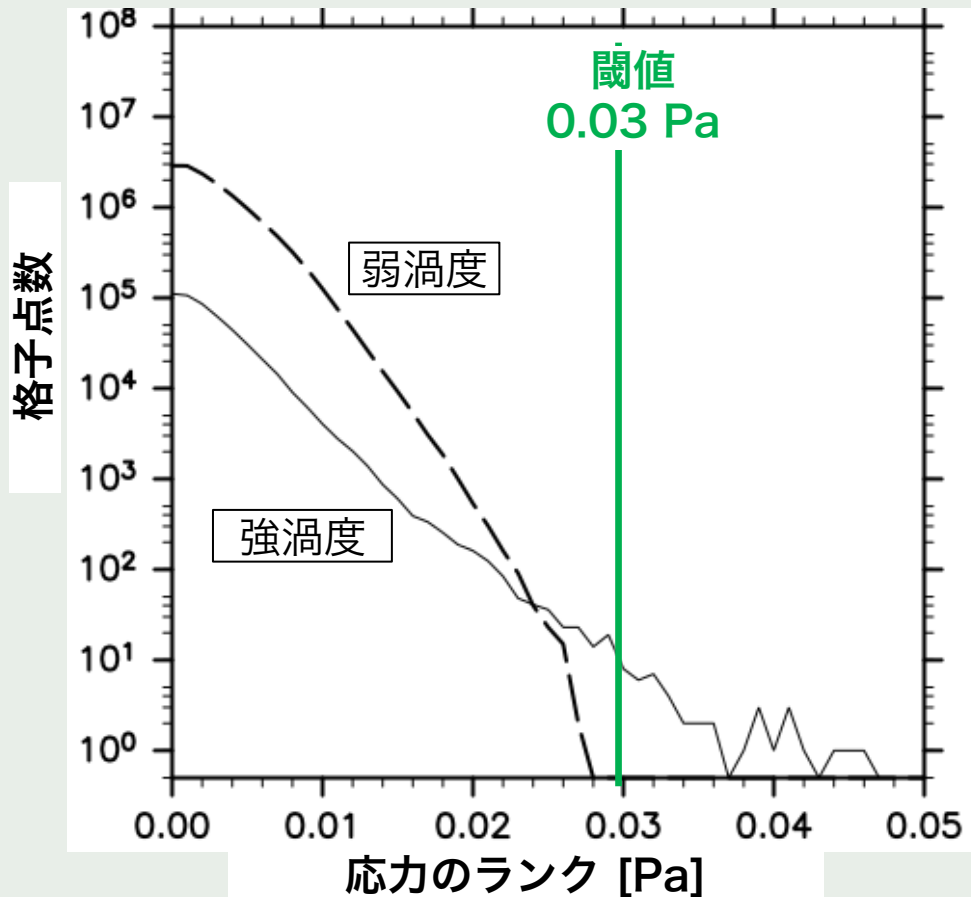
渦は対流セルの壁付近に存在

応力が強い点も対流セルの壁付近に存在

渦付近の地表面応力強度分布

■ 渦の有無による応力強度分布の違い

- 強渦度領域：渦度の大きさが $15 \times \sigma$ を超える渦の周囲 50 m 以内の領域
- 弱渦度領域：強渦度領域以外の領域



強渦度領域の方が
強い応力を持つ傾向

縦軸は対数スケール

横軸

上限：0.05 Pa

下限：0.00 Pa

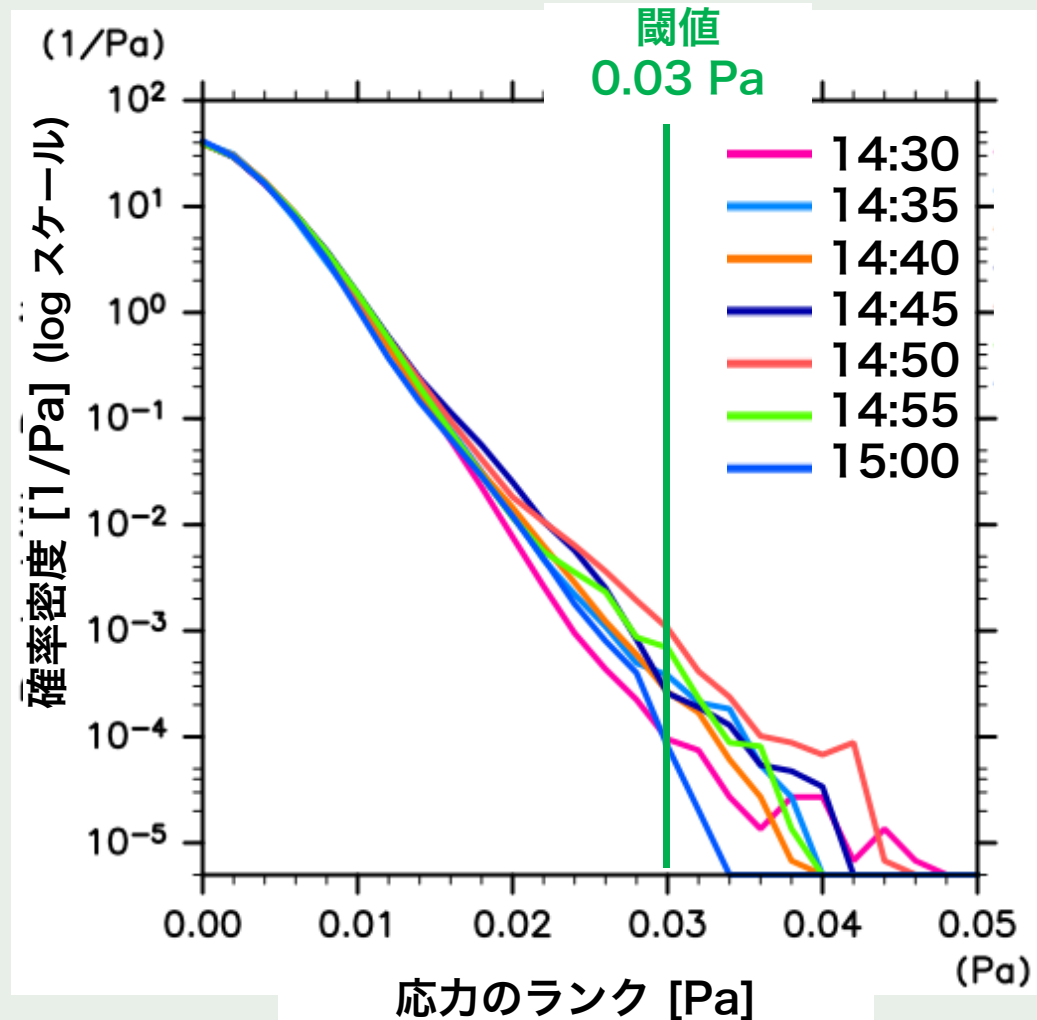
ビン幅：0.01 Pa

実線：強渦度領域

破線：弱渦度領域

地表面応力確率密度分布 時刻別

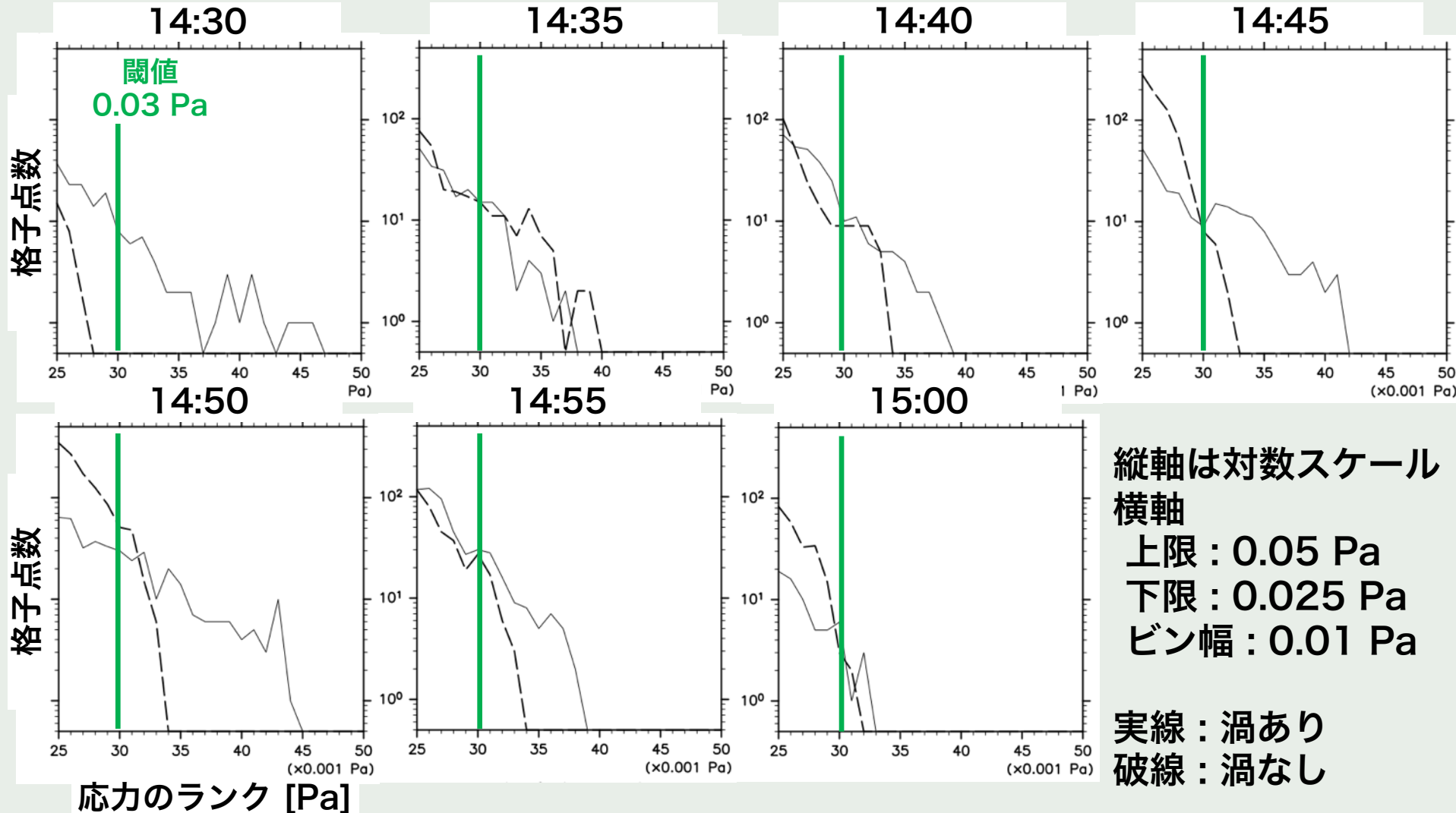
応力確率密度分布 時刻別



- 14:30 から 15:00 のどの時刻においても閾値を超える
- 閾値を超える点の数は時刻によって差がある

渦付近の地表面応力強度分布 (時刻別)

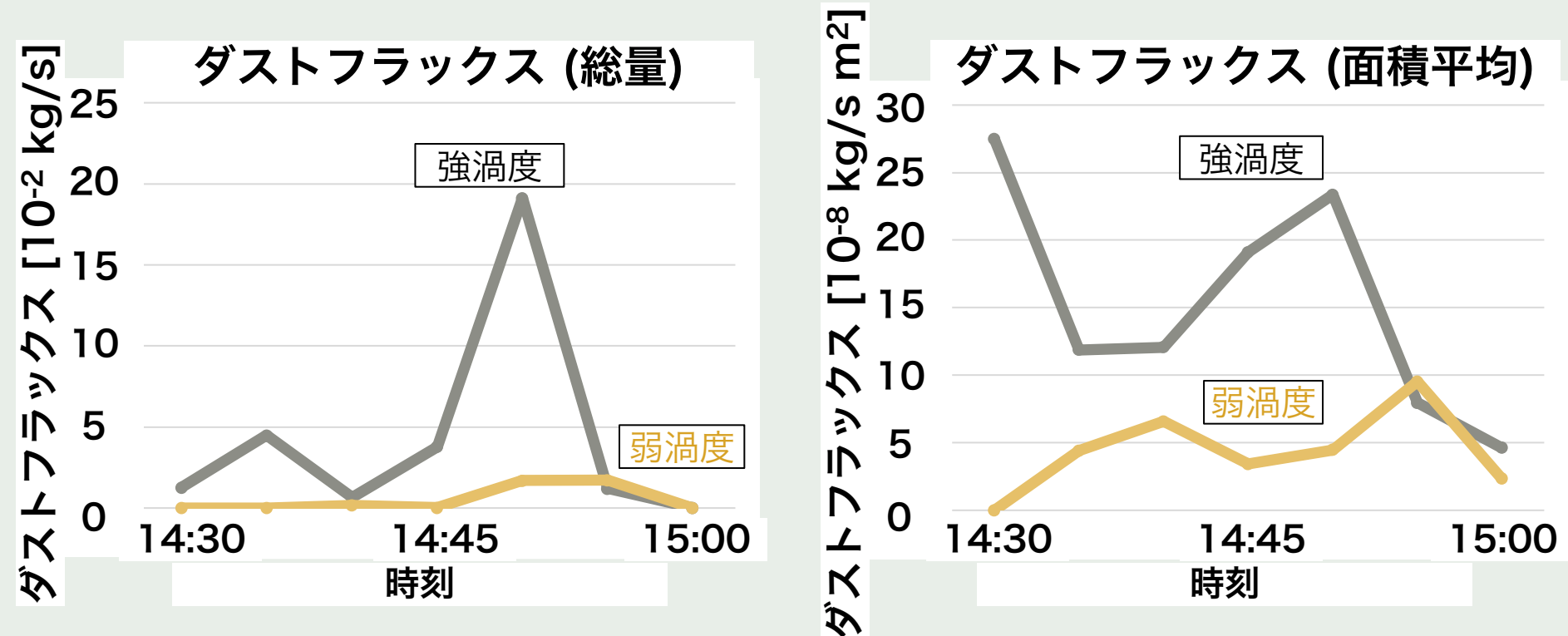
- 概ね強渦度領域の方が強い応力を持つ傾向
 - しかしそうでない時刻や弱渦度領域の方が強い時刻もある



ダストフラックスの時間変化

■ KMH スキームを用いてダストフラックスを推定

- 閾値 τ^* : 0.03 Pa



■ 時刻によって総量に変動が見られる

■ 平均をとると強渦度領域の時間変化は大きくない

- 強い応力が生じる面積が大きいと思われる (14:50)

まとめ

- 火星大気境界層数値シミュレーションにおいて、渦の判定と強い地表面応力を持つ場所について調査した
 - 強渦度領域が強い応力をもたらす傾向にあるように見える
 - 時刻によって特徴が異なるため、検証方法を考える必要がある

今後の方針

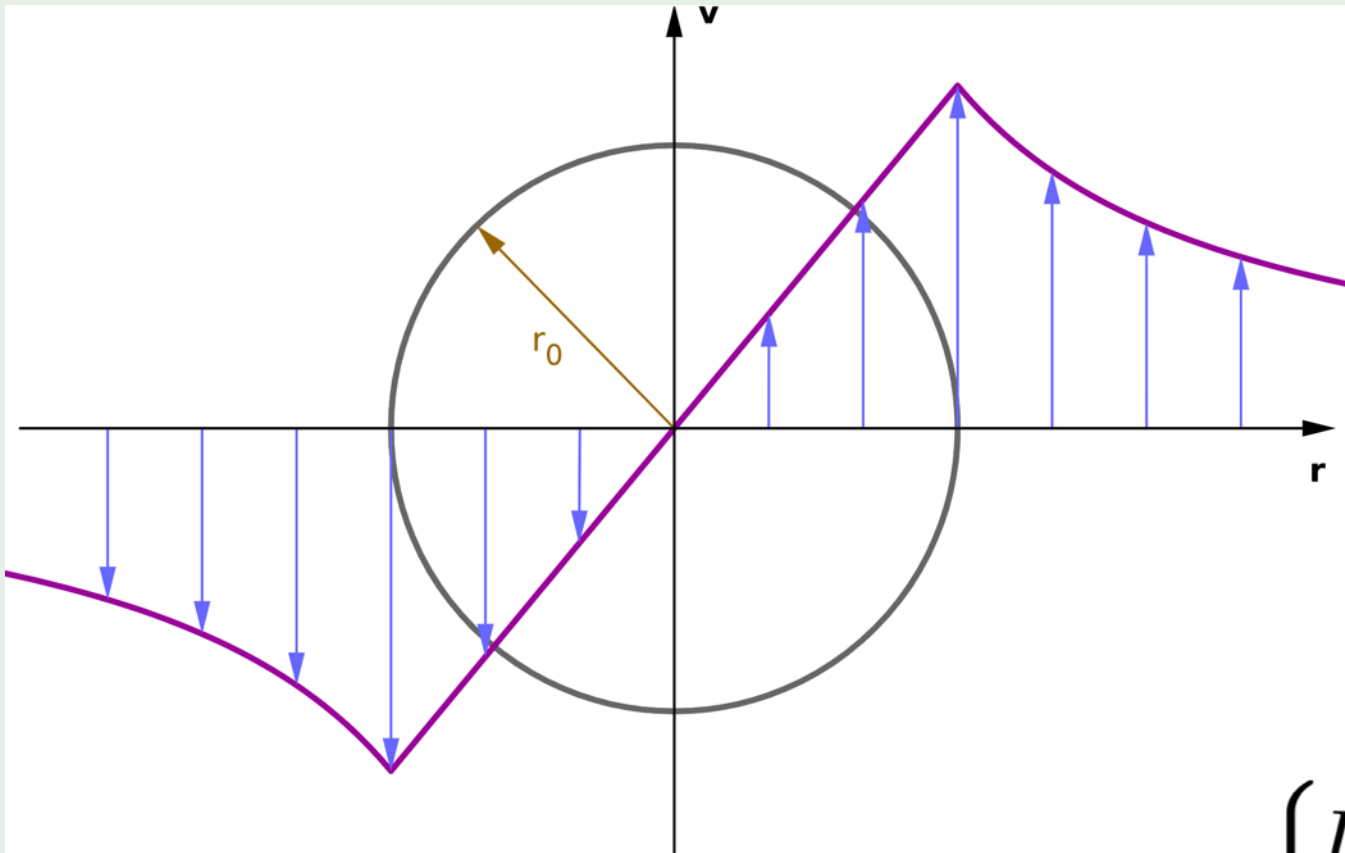
- 渦と応力の関係について調査を続ける
 - 渦度と応力が強い領域の関係を調べるため、個々の渦を中心に領域平均した応力との比較を行なっている
- 5 m の結果が粗い解像度の結果を用いて推定する方法を検討する
 - 対流セルの大きさは似ているため、そこから推定できると考えている

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
- 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 Mars using 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

ランキン渦

- 接線方向の風速が渦の境界までは中心からの距離に比例し、境界より外では反比例するような速度分布を持つ渦



$$u(r) = \begin{cases} Ur/R & r < R \\ UR/r & r > R \end{cases}$$

ダスト巻き上げスキームの問題点

- 流れ場の構造に基づいた定式化がなされたわけではない
 - DDA スキームは単純に熱効率で巻き上げ量を決めてしまっている
 - ダストデビル構造と対流セル運動に伴う風に区別がない
 - KMH スキームと DDA スキームでダスト量をダブルカウントしている可能性がある
 - 循環構造のどの部分が寄与しているのか不明瞭
- 具体的な流れ場を詳しく調査する必要がある
- 詳細に流れ場を見る方法として LES を用いることが考えられる

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
- ダストに関する問題意識
 - GDS について何が問題だと思われるのか確認
 - 風速もこんなに違ってくるだろう (Smith, 2009)
- 火星のダスト量がどのように決まるのかが問題である



		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	

ダストデビル (探査機 Spirits 撮影)

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

10 m 10 km 10,000 km

火星 GCM におけるダスト巻き上げスキーム

- 地表面応力からダスト巻き上げ量をパラメタライズするスキーム (KMH スキーム)

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

F_W : ダストフラックス [kg/(m² s)]

α_W : 効率因子

τ : 地表面風応力 [N/m²]

τ^* : 風応力閾値 [N/m²]

- 対流運動の運動エネルギーの一部がダスト巻き上げに寄与するとして巻き上げ量をパラメタライズするスキーム (DDA スキーム)

- 対流運動の運動エネルギーを顕熱フラックスと対流層高さにより評価

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

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

F_D : ダストフラックス [kg/(m² s)]

F_s : 顕熱フラックス [W/m²]

α_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 [J/(K kg)]

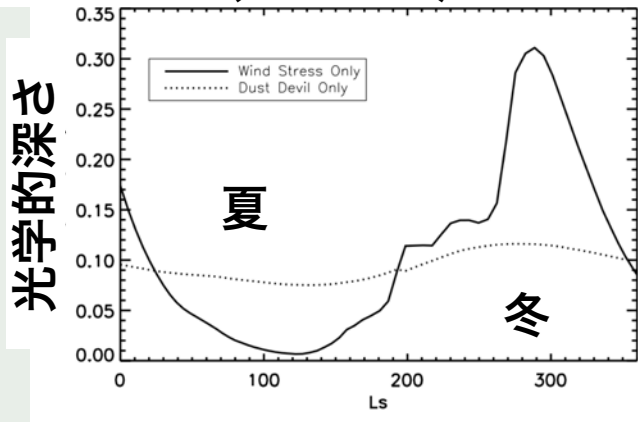
c_p : 定圧比熱 [J/(K kg)]

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 α_D によっては, 背景ダスト量が表現可能

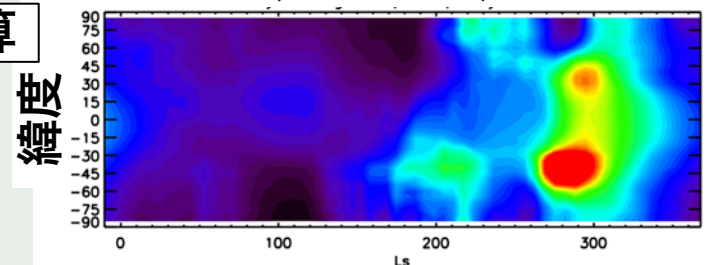
光学的深さ(経度平均)の季節変化

光学的深さ(全球平均)の季節変化

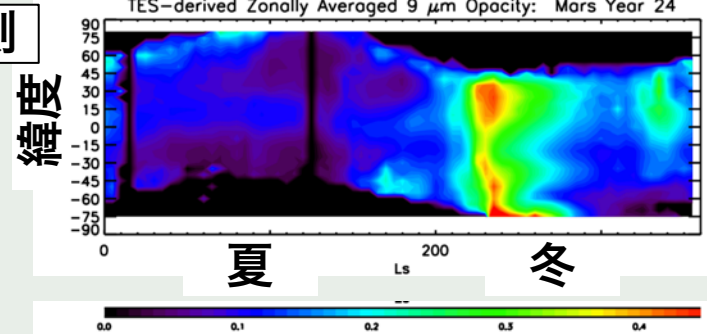


パラメタリゼーション
実線 : 平均風応力
点線 : ダストデビル

計算



観測

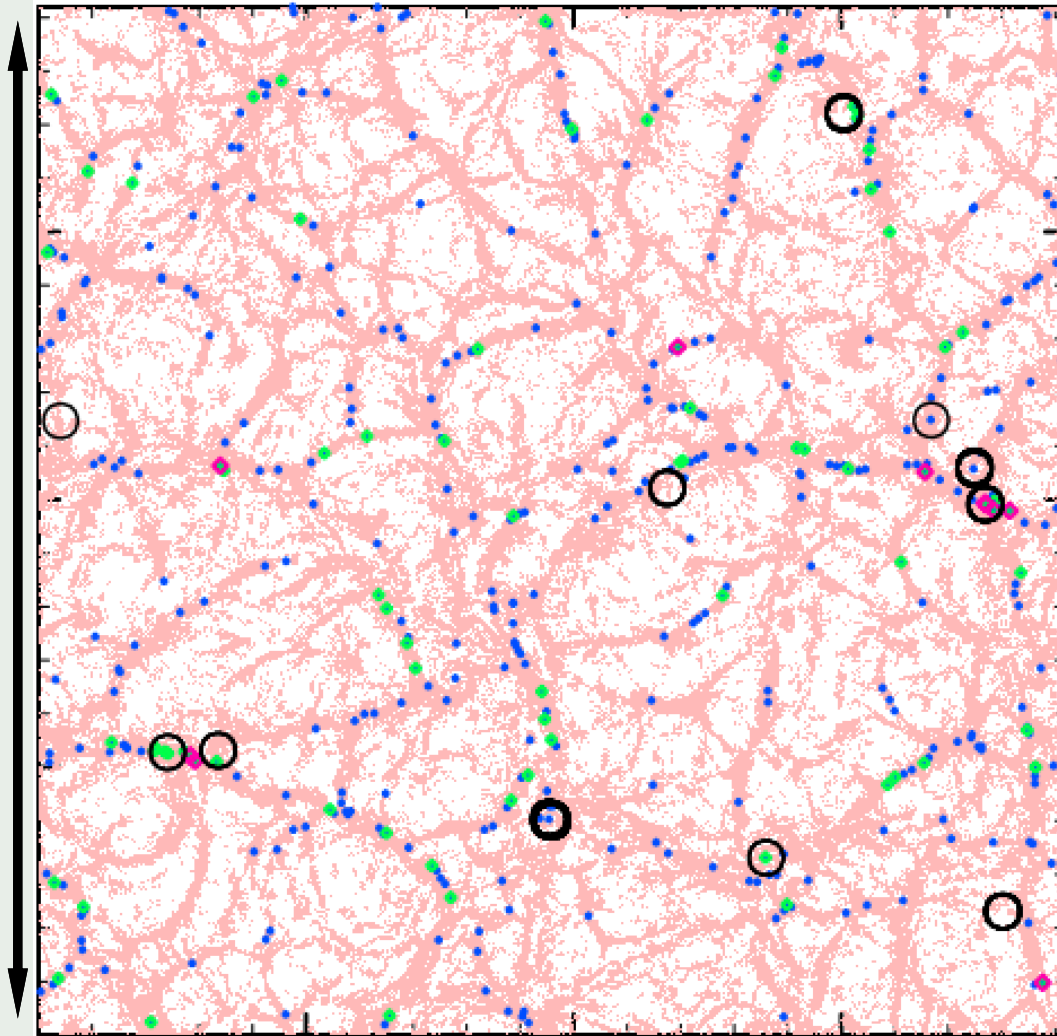


Kahre et al. (2006)

これまでの結果

■ 地表面応力が強い場所と渦の対応について調査

19.2 km



■ 黒丸：応力 0.025 Pa 以上の点
- 丸の中心が該当する格子点

■ 判定強度別の渦の位置

■ 青点：15 σ

■ 緑点：20 σ

■ 赤点：25 σ

■ ピンク：高度 100 m における上昇流の分布

19.2 km

渦の数の時間変化

- Nishizawa et al. (2016) と同じ方法で孤立渦を判定
 - 鉛直渦度の大きさをを用いて抽出
 - 標準偏差 σ を用いて 15, 20, 25 σ 区間に含まれない 大きさの渦度を持つ点を選択
 - ランキン渦を仮定した渦半径とその接線風速から渦の中心位置を判定
- 判定された渦の数は大きく時間変化しない

	14:30	14:35	14:40	14:45	14:50	14:55	15:00
15 σ	438	428	459	442	419	415	342
20 σ	77	63	87	68	65	65	51
25 σ	10	7	12	13	7	10	--

強い地表面応力を持ち、渦を伴う場所

- 地表面応力 > 0.025 Pa である点を 200 m の範囲でグループ化
 - 各グループの中心から 100 m 範囲における渦の有無を確認
- およそ半数のグループが渦を伴っている

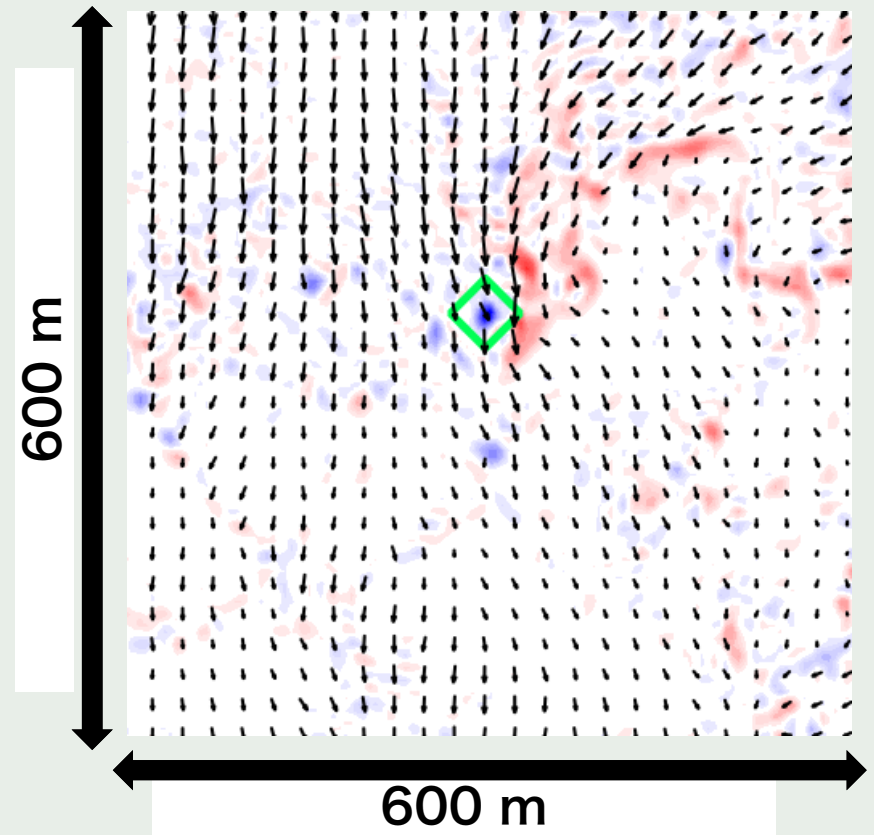
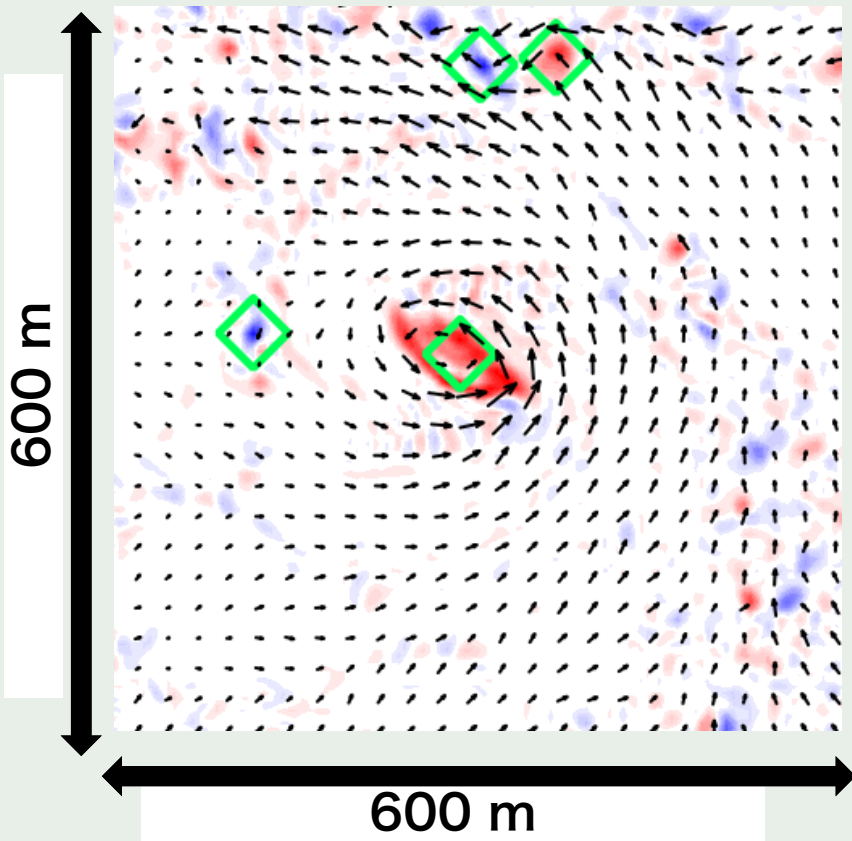
時刻	応力値 > 0.025 Pa のグループの数	判定された渦が伴う場所の数
14:30	10	6 (60 %)
14:35	12	5 (42 %)
14:40	21	11 (52 %)
14:45	15	7 (47 %)
14:50	20	9 (45 %)
14:55	18	8 (44 %)
15:00	14	6 (43 %)

強い地表面応力を持ち、渦を伴う場所

■ 渦判定された結果の確認

- 左図は水平風ベクトルから明確に渦構造が見られる
- 右図はよくわからない
 - 水平風シアーが存在するため渦度は大きい

色：渦度(正負)
矢印：水平風
枠：渦の位置

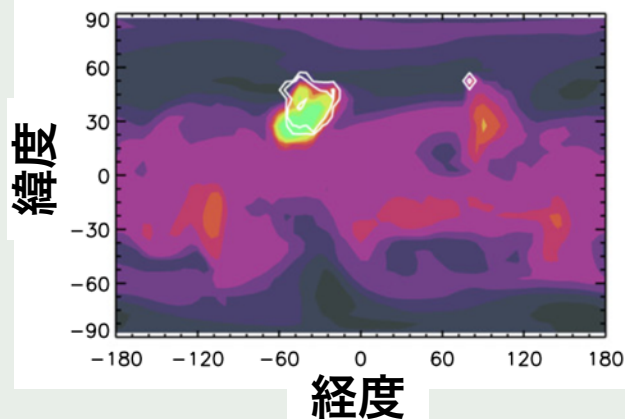


ダスト巻き上げを考慮した MGCM 計算

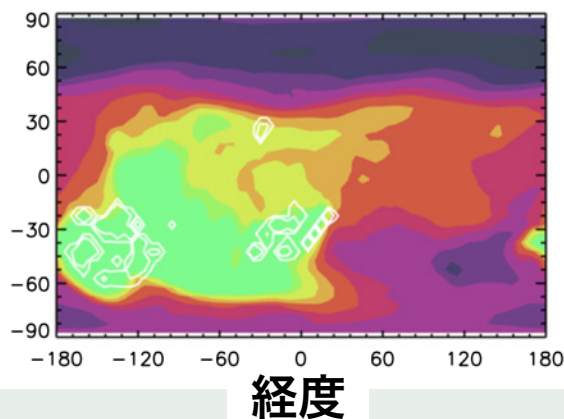
- Mulholland et al. (2013) : グローバルダストストームによる大気中ダスト量の年々変動が再現できたと主張

全球の光学的深さ (610 Pa 面, 対数プロット)

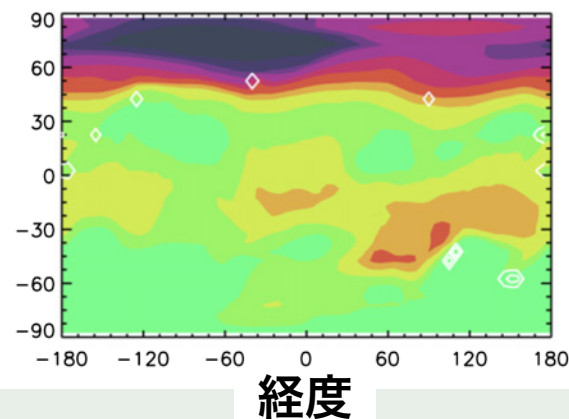
$L_s = 231^\circ$, sol 455



$L_s = 236^\circ$, sol 463



$L_s = 242^\circ$, sol 471



0.0 0.05 0.10 0.15 0.20 0.25 .38 0.50 0.75 1.00 1.50 2.0

Mulholland et al. (2013)

- どの程度の量のダストが巻き上がるのかということは地表面付近の流れ場を詳細に検討した上で決められてはいない

渦に伴う強い地表面応力を持つ点

- ・ 閾値を超える点のうち、抽出された孤立渦の100m 範囲内にある点の数

	14:30	14:35	14:40	14:45	14:50	14:55	15:00
15 σ	438	428	21	442	419	415	342
	8	10	15	11	12	15	5
運動量	5.172	7.818	7.944	14.72	12.47	13.26	1.711
全運動量	5.696	14.19	14.40	25.67	43.33	24.17	7.926

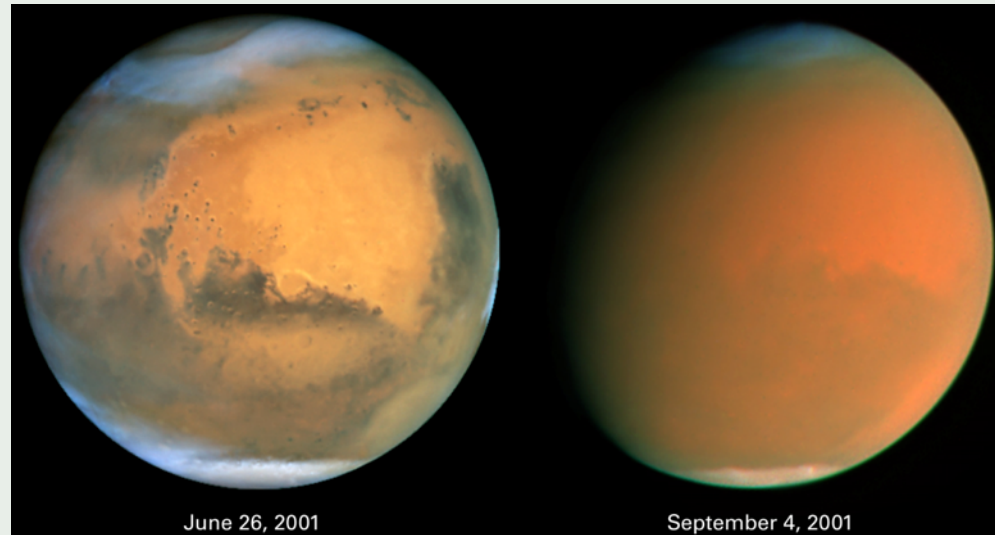
はじめに

ローカルダストストーム



		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

グローバルダストストーム

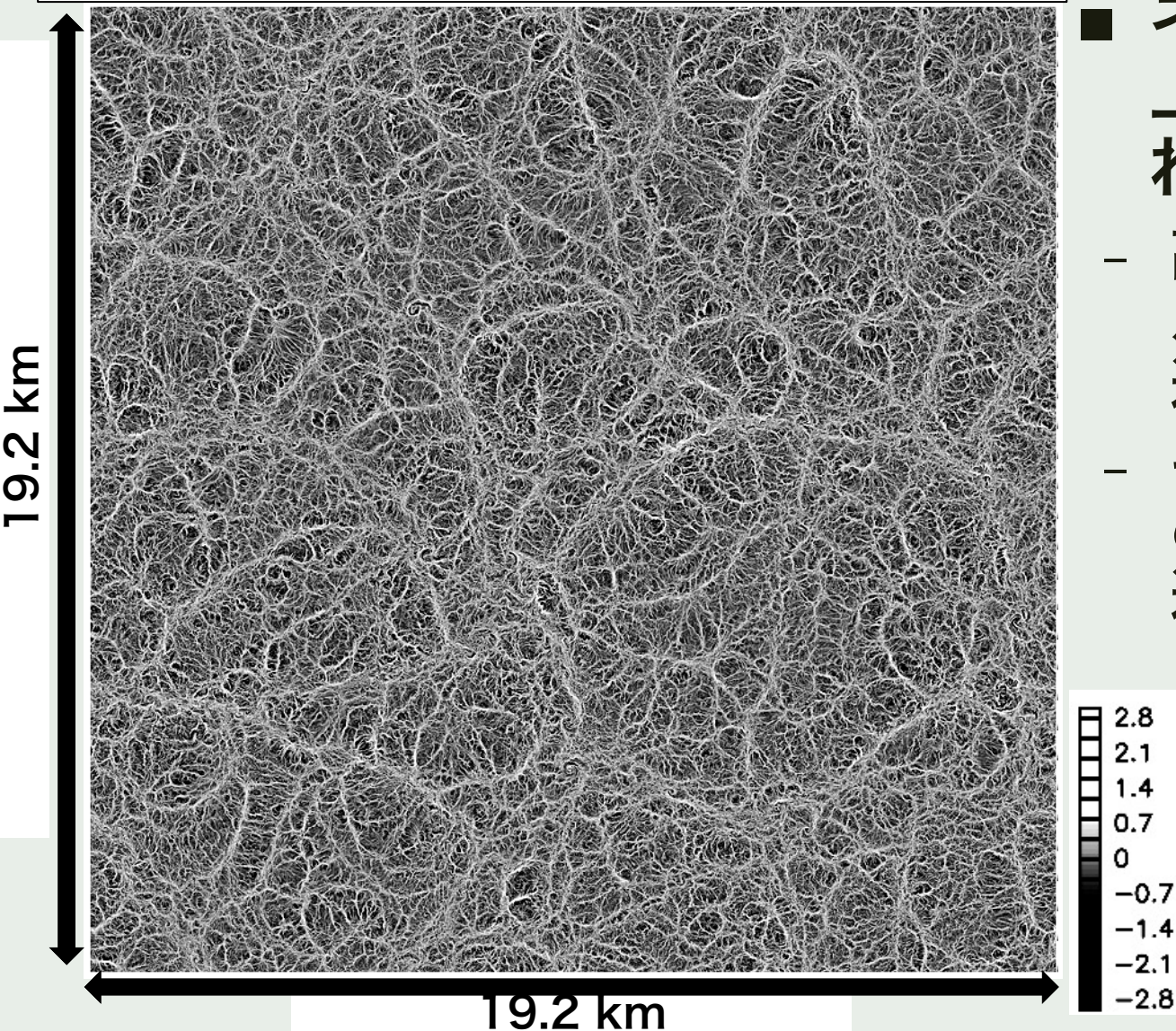


<https://www.jpl.nasa.gov/>

https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/images/largesize/PIA15959_hires.jpg

流れ場空間分布 (モデル最下層 $z = 2.5$ m)

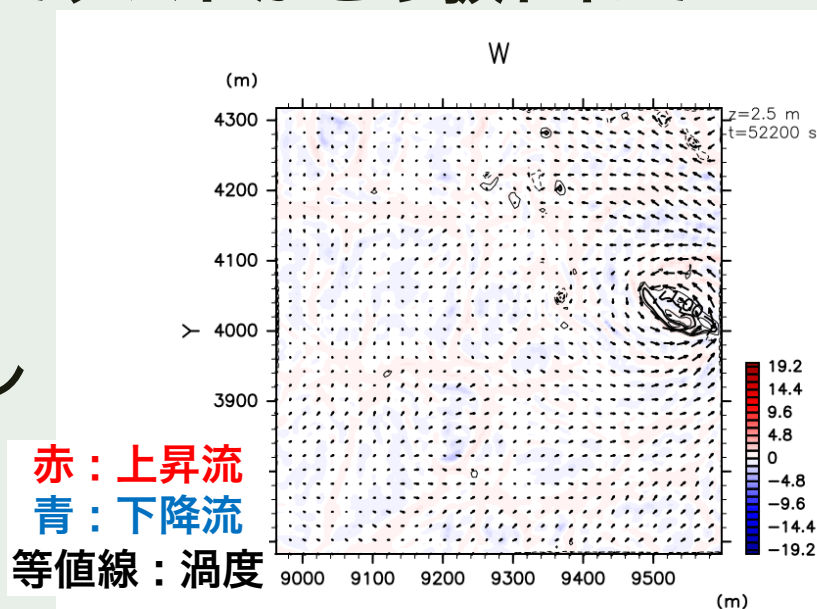
鉛直風 [m/s] 水平分布



- ネットワーク状の上昇流領域が見られる
 - 高度 1 km の対流セル境界に対応する構造もある
 - そのような構造に埋め込まれる小さな構造もある

今日の話

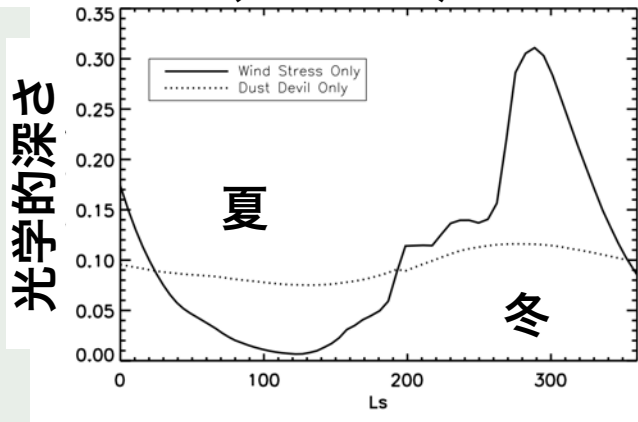
- ラージエディシミュレーション (LES) を用いて, 火星のダスト巻き上げ過程に関する調査を行っている
- 火星のダスト巻き上げパラメタリゼーションスキームの改良を検討したい
 - ダストデビルがどの程度生じているのか
 - ダストデビルではない構造が関係しているのか
- これまでに火星大気の数値計算でダストがどう扱われているか調べる必要がある
- 火星大気大循環モデルにおけるダスト巻き上げパラメタリゼーションのレビューを行う
 - ダスト巻き上げパラメタリゼーションの現状把握



ダスト巻き上げを考慮した GCM 計算

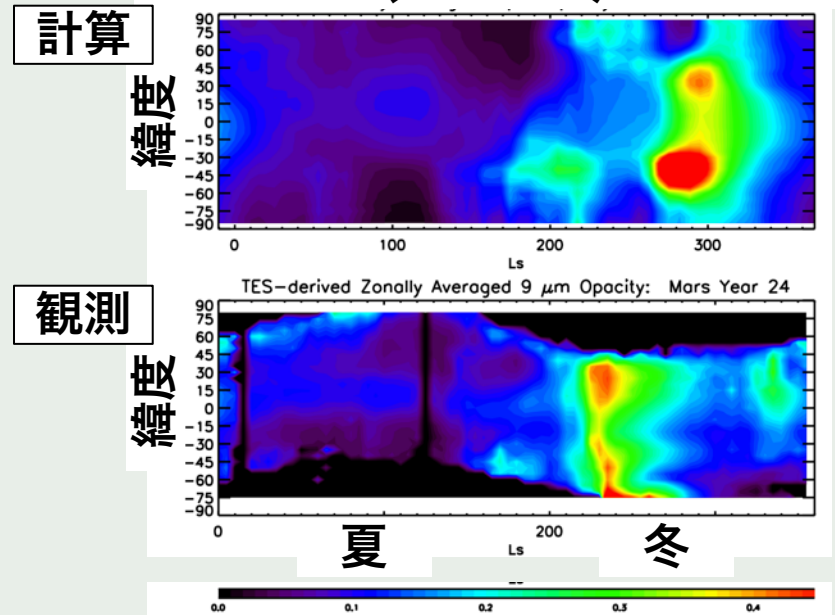
- Kahre et al. (2006) : 二つのダスト巻き上げスキーム
 - ダストデビル
 - 効率因子パラメータ α_D によっては, 背景ダスト量が表現可能
 - 平均風応力
 - ダスト量 (~ 光学的深さ) の季節変動が表現可能
 - ただし臨界風応力を下げている

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

光学的深さ(経度平均)の季節変化



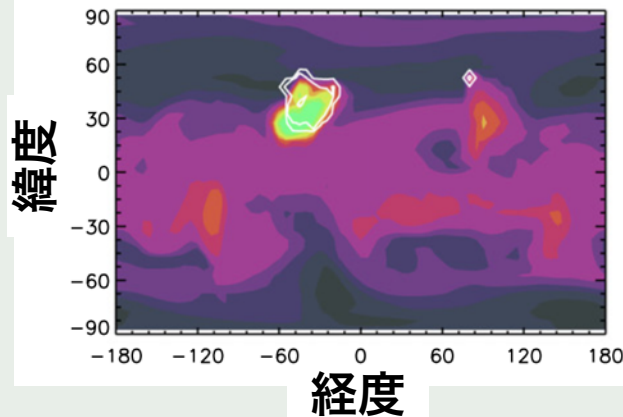
Kahre et al. (2006)

ダスト巻き上げを考慮した MGCM 計算

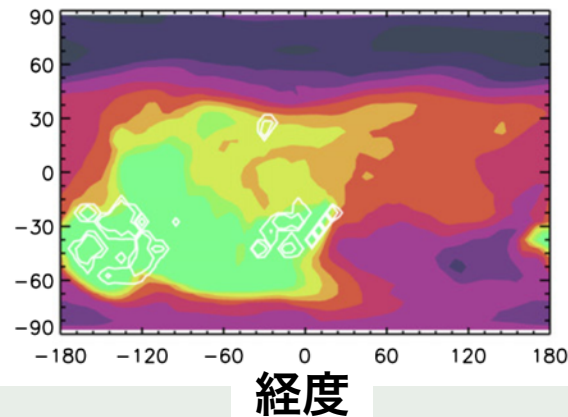
- Mulholland et al. (2013) : ダストストームにおけるダスト量の年々変動が再現できたと主張
 - グローバルダストストームの隔年変動を大雑把に再現 (4 ~ 7 年周期)
 - 平均風応力閾値をダスト量に合わせて変化することを仮定
 - 南半球から北半球へのダスト輸送を仮定

全球の光学的深さ (610 Pa 面, 対数プロット)

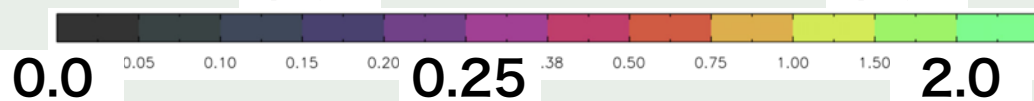
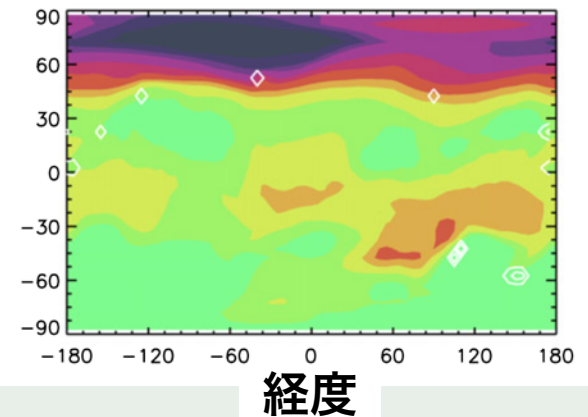
$L_s = 231^\circ$, sol 455



$L_s = 236^\circ$, sol 463



$L_s = 242^\circ$, sol 471



Mulholland et al. (2013)

ダスト巻き上げパラメタリゼーション

風応力による 巻き上げスキーム

Saltation を起こす
臨界摩擦速度の推定

Bagnold (1941)

砂フラックスの
定式化

White (1979)

効率因子を導入し、
ダスト巻き上げ量推定

Newman et al. (2002)

ダストデビルによる 巻き上げスキーム

ダストデビルを熱エン
ジンとしてモデル化

Rennò et al. (1998)

効率因子を導入し、
ダスト巻き上げ量推定

Newman et al. (2002)

ダストデビル中心の気圧降下
によるダスト吸い上げ

Newman et al. (2002)

境界層の話

■ Monin-Obukhov の相似則

- 理想化された定常で水平方向に一様な接地層における乱流状態にある風速, 気温の統計量が地表面の摩擦応力と鉛直熱フラックスと浮力パラメタのみで一義的に決定されるとした

- 場除則は何かの説明を理解する

$$u_* \equiv \left(\frac{\tau_p}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \equiv (-\overline{uw})^{\frac{1}{2}}$$

$$T_* \equiv -\frac{Q_0}{u_*} \equiv -\frac{\overline{\theta w}}{u_*}$$

$$L \equiv -\frac{u_*^3 \Theta_0}{\kappa g Q_0}$$

u_* : 摩擦速度

T_* : 摩擦温度

L : Monin - Obukhov 長さ

τ : 摩擦応力

Θ : 平均温度

$$F/F_* = g_F \frac{z}{L}$$

F : 風速と気温に関する任意の統計量

F_* : F と同じ次元を持つ摩擦速度, 摩擦温度による量

g_F : F に関する普遍関数

境界層の話

■ 地表面付近の風による摩擦速度

- 風応力と密度で定義される (Bagnold, 1954)

$$u_{\text{drag}} = \sqrt{\frac{\zeta}{\rho}}$$

ζ : 風応力 [Pa]

- 全ての風は地表面付近で 0 m/s になり, 対数則で表現できる
 - 以下は中立の場合

$$u(z) \simeq \frac{u_{\text{drag}}}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

k : カルマン定数

z_0 : 粗度長 [m]

$$u_{\text{drag}} = \frac{ku(z)}{\ln \left(\frac{z}{z_0} \right)}$$

風応力による巻き上げスキーム

- Saltation による砂の臨界摩擦速度の経験式 (Bagnold, 1954)
- 臨海摩擦を求めた Bagnold はどのように見積もって, u_{drag} がどれほど意味があるのか述べているか調べる
- この臨海速度を使って Kahre, Newman は計算しているので, 具体的な値やその決め方を記述
- ダストは分子間力 (大きさはいくつ?) によって簡単に巻き上がらない. それより砂つぶが飛ばされた後の着地の衝撃でダストが巻き上がる
- 式のイメージを語れるようにしておく (Bagnold 1954, Greely & Iversen 1985 確認)
- Greely & Iversen 1985 で 火星条件における Bagnold のパラメタを決めた話をする

$$u_{\text{drag}}^t = A \sqrt{\left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right) g D_p}$$

u_{drag}^t : 臨界摩擦速度 [m/s]

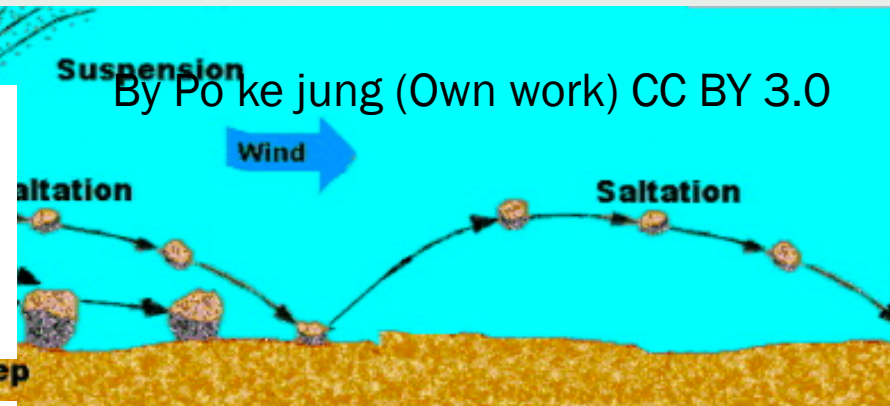
A : 経験的係数

ρ_p : 砂粒子密度 [kg/m³]

ρ : 大気密度 [kg/m³]

g : 重力加速度 [m/s²]

D_p : 砂粒子径 [m]



風応力による巻き上げスキーム

■ パラメタを風洞実験によって決めた (White, 1979)

- 火星想定 of 風洞実験の条件

- 地面温度 200 K
- 地表面気圧 750 Pa
- 直径 0.208 mm のガラス玉を厚さ 1 cm 敷いた

$$H = 2.61 \frac{\rho}{g} (u_{\text{drag}})^3 \left(1 - \frac{u_{\text{drag}}^t}{u_{\text{drag}}} \right) \left(1 + \frac{u_{\text{drag}}^t}{u_{\text{drag}}} \right)^2$$

H : 水平砂フラックスの鉛直傾角 [kg/(m s)]

u_{drag}^t : 臨界摩擦速度 [m/s]

u_{drag} : 摩擦速度 [m/s]

ρ : 大気密度 [kg/m³]

g : 重力加速度 [m/s²]

■ ダスト巻き上げ量推定 (Newman et al., 2002)

- 砂フラックスにダスト巻き上げ量が比例するとして見積もり

- U_{drag} を帰るとどのようか振る舞いをするかグラフ化しておく

$$V_N = \alpha_N H$$

V_N : 鉛直ダストフラックス [kg/(m s)]

α_N : 効率因子

摩擦速度の見積もり

- 全ての風は地表面付近で 0 m/s になり, 対数則で見積もることにする

■ 以下は中立の場合

$$u(z) \simeq \frac{u_{\text{drag}}}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

k : カルマン定数

z_0 : 粗度長 [m]

$$u_{\text{drag}} = \frac{ku(z)}{\ln \left(\frac{z}{z_0} \right)}$$

ダストデビルによる巻き上げスキーム 1

- ダストデビルのエネルギーを、顕熱を熱源に持つ熱機関としてモデル化 (Rennò et al., 1998)

$$\Lambda \approx \eta F_s$$

$$\eta = 1 - b$$

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

Λ : エネルギーフラックス [J/(m² s)]

η : 熱効率

F_s : 顕熱フラックス [W/m²]

p_s : 地表面気圧 [Pa]

R : 気体定数

p_{con} : 対流層頂点の
気圧 [Pa]

c_p : 定圧比熱

Newman et al. (2002)

- ダスト巻き上げ量推定 (Newman et al., 2002)

$$V_D = \alpha_D \Lambda$$

V_D : ダストフラックス [kg/(m² s)]

α_D : 効率因子 [kg/J]

ダストデビルによる巻き上げスキーム 2

- ダストデビル中心の気圧降下から渦の接線風速の見積もり (Newman et al., 2002)

$$v_{\text{tang}}^2 \approx \frac{\Delta p}{\rho}$$

v_{tang} : 接線風速 [m/s]

Δp : 気圧降下 [Pa]

ρ : 大気密度 [kg/m³]

- 実験式によるダスト巻き上げ臨界接線風速 (Greeley and Iversen, 1985)

$$v_{\text{tang}}^t = \left(1 + \frac{15}{\rho_d g D_p}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\rho_d g D_p}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$$

v_{tang}^t : 臨界接線風速 [m/s]

ρ_d : ダスト密度 [kg/m³]

D_p : ダスト粒子径 [m]

- 地面からダストを巻き上げる層数を仮定 (Newman et al., 2002)

$$v_{\text{tang}} = \left(1 + \frac{15}{\rho_d g n D_p}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\rho_d g n D_p}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$$

n : 層数

ダストデビルによる巻き上げスキーム 2

- ダストデビル中心の気圧降下から渦の接線風速の見積もり (Newman et al., 2002)

$$v_{\text{tang}}^2 \approx \frac{\Delta p}{\rho}$$

v_{tang} : 接線風速 [m/s]

Δp : 気圧降下 [Pa]

ρ : 大気密度 [kg/m³]

- ダストデビルによる気圧降下は Rennò et al. (1998) を用いて見積もり

$$\Delta p \approx p_s \left\{ 1 - \exp \left[\left(\frac{\gamma \eta}{\gamma \eta - 1} \right) \left(\frac{\eta_H}{\chi} \right) \right] \right\}$$

$$\eta = 1 - b$$

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

$$\eta_H = \frac{T_{\text{air}} - T_s}{T_s}$$

T_{air} : モデル最下層温度 [K]

T_s : 地表面温度 [K]

ダストデビルによる巻き上げスキーム 2

- ダストを巻き上げる層数の式に書き換え

$$v_{\text{tang}} = \left(1 + \frac{15}{\rho_d g n D_p}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\rho_d g n D_p}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \Rightarrow \quad n = \frac{\rho v_{\text{tang}}^2 - 15}{\rho_d D_p g}$$

- 単位面積当たりの巻き上げ質量の見積もり

$$\Sigma = n \rho_d D_p = \frac{\rho v_{\text{tang}}^2 - 15}{g}$$

Σ : 巻き上げ質量 [kg/m²]

$$v_{\text{tang}}^2 \approx \frac{\Delta p}{\rho}$$

- ダスト巻き上げ量推定 (Newman et al., 2002)

$$V_D = \alpha_D \Sigma$$

V_D : ダストフラックス [kg/(m² s)]

α_D : 効率因子 [1/s]

- Westphal の観測結果に関する情報

ダスト巻き上げパラメタリゼーション

風応力

Saltation 巻き上げ
スキーム

$$V_N = \alpha_N H$$

V_N : 鉛直ダストフラックス
[kg/(m s)]

α_N : 効率因子

ダストデビル

熱機関巻き上げ
スキーム

$$V_D = \alpha_D \Lambda$$

V_D : ダストフラックス [kg/(m² s)]

α_D : 効率因子 [kg/J]

気圧降下巻き上げ
スキーム

$$V_D = \alpha_D \Sigma$$

α_D : 効率因子 [1/s]

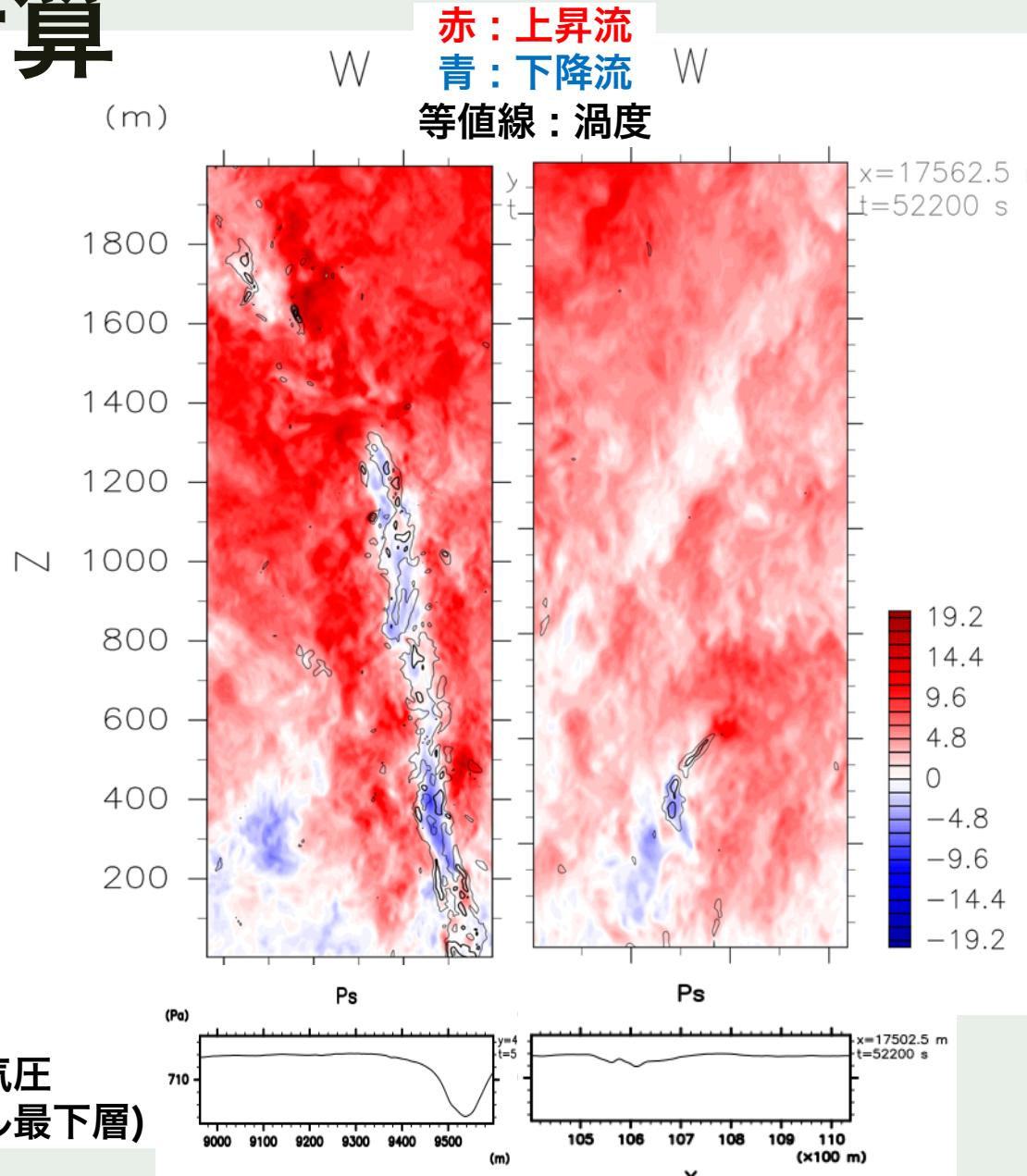
Newman et al. (2002)

- どのスキームにおいても最終的には
効率因子を用いて結果をチューニングするしかない
(Newman et al., 2002)
 - 理論的に決められていない

LES による計算

- ダストを巻き上げるのに十分な摩擦速度 (地表面応力) を持つ地点の流れ場 (一部)
- 渦 (ダストデビル) を伴う場所と伴わない場所が混在
- パラメタリゼーションスキームの検証ができる可能性がある

気圧
(モデル最下層)



まとめ

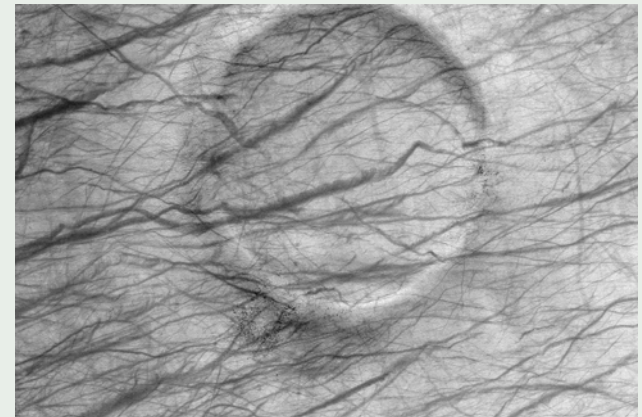
- 火星のダスト巻き上げパラメタリゼーションスキームは大きく分けて 2 種類ある
 - 風応力の Saltation による巻き上げスキーム
 - 実験による砂フラックスからダスト巻き上げ量を見積もり
 - ダストデビルによる巻き上げスキーム
 - 熱機関としてモデル化し, ダスト巻き上げ量を見積もり
 - 中心の気圧降下から, ダスト巻き上げ量を見積もり
- ダスト巻き上げ量は, 効率因子で概ね見積もられている
 - 風応力スキーム: 砂フラックスとダスト巻き上げ量の関係
 - ダストデビルスキーム: 観測結果に合わせてチューニング
 - ダストデビルスキームの効率因子の決め方ははっきりしていない
- 風応力による巻き上げスキームの結果を正しいものと考え, ダストデビルによるスキームの妥当性について検討を行う予定

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

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



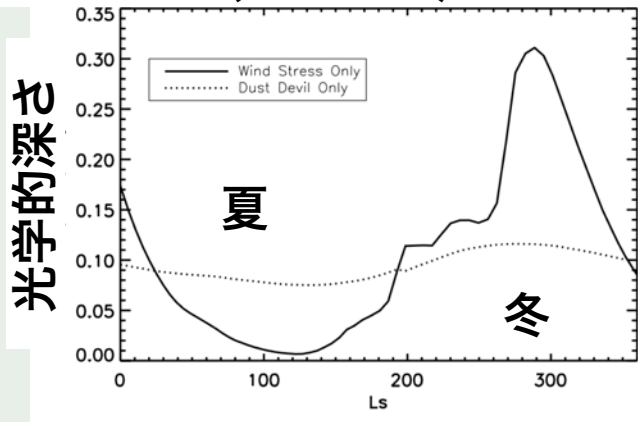
ダストデビルの通った跡

ダスト巻き上げを考慮した MGCM 計算

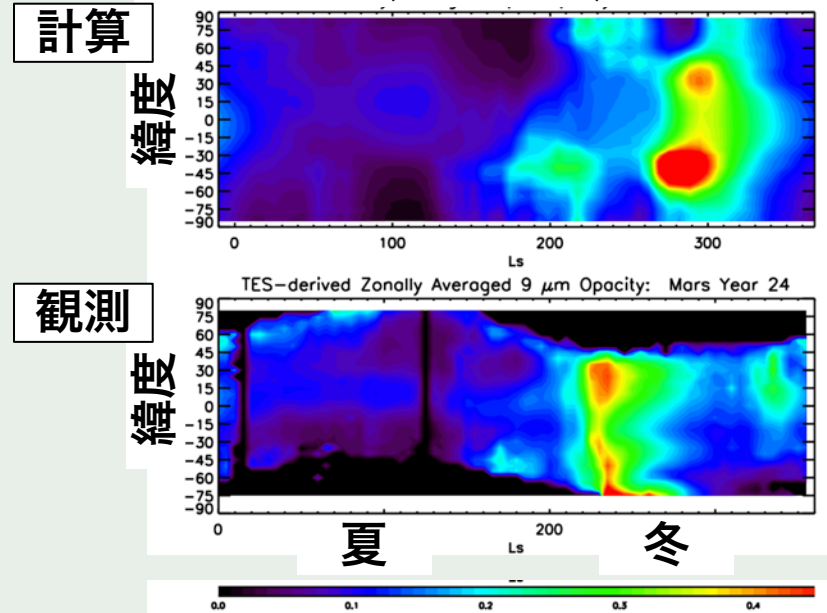
- Kahre et al. (2006) : 二つのダスト巻き上げスキーム
 - 平均風応力
 - ダスト量 (~ 光学的深さ) の季節変動が表現可能
 - ただし風応力閾値を下げている. 臨界風応力は一定
 - ダストデビル
 - 効率因子パラメータ α_D によっては, 背景ダスト量が表現可能

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



Kahre et al. (2006)

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/(m² s)]

α_W : 効率因子

τ : 地表面風応力 [N/m²]

τ^* : 風応力閾値 [N/m²]

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

τ^*	α_W
10×10^{-3}	0.02
22.5×10^{-3}	0.1
35×10^{-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/(m² s)]

F_s : 顕熱フラックス [W/m²]

α_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)

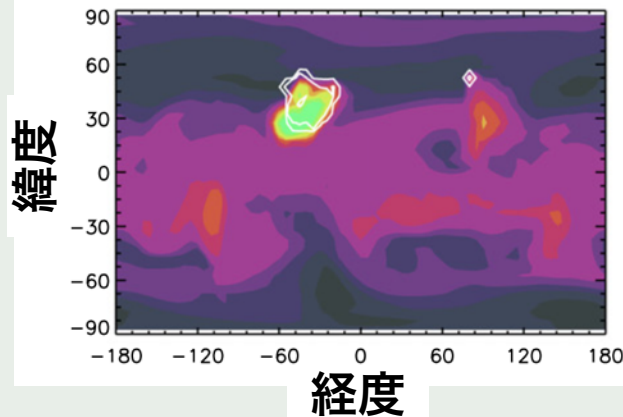
- 顕熱フラックスが大きいほど, 対流が活発になりダスト巻き上げ量が多くなる
- 対流層が厚いほど, 顕熱の運動エネルギーへの変換率が高くなり, ダスト巻き上げ量が多くなる

ダスト巻き上げを考慮した MGCM 計算

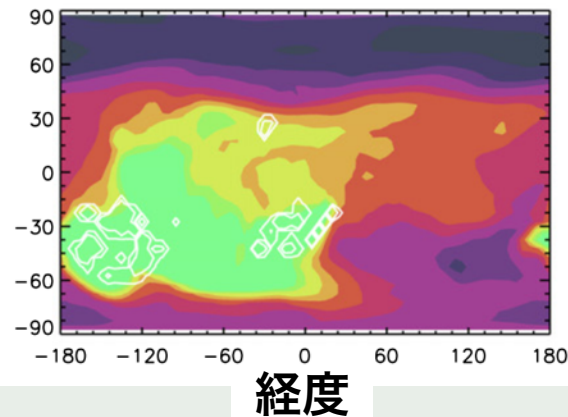
- Mulholland et al. (2013) : ダストストームにおけるダスト量の年々変動が再現できたと主張
 - グローバルダストストームの隔年変動を大雑把に再現 (4 ~ 7 年周期)
 - 平均風応力閾値をダスト量に合わせて変化することを仮定
 - 南半球から北半球へのダスト輸送を仮定

全球の光学的深さ (610 Pa 面, 対数プロット)

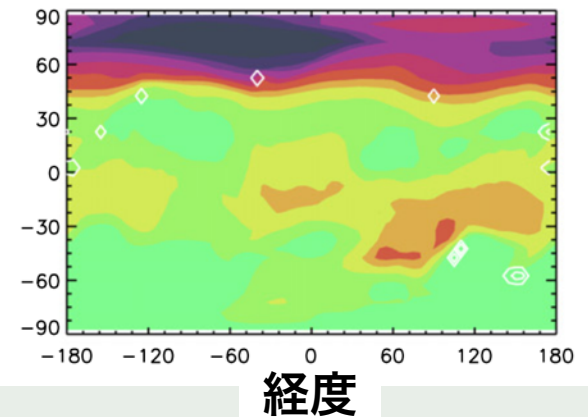
$L_s = 231^\circ$, sol 455



$L_s = 236^\circ$, sol 463



$L_s = 242^\circ$, sol 471

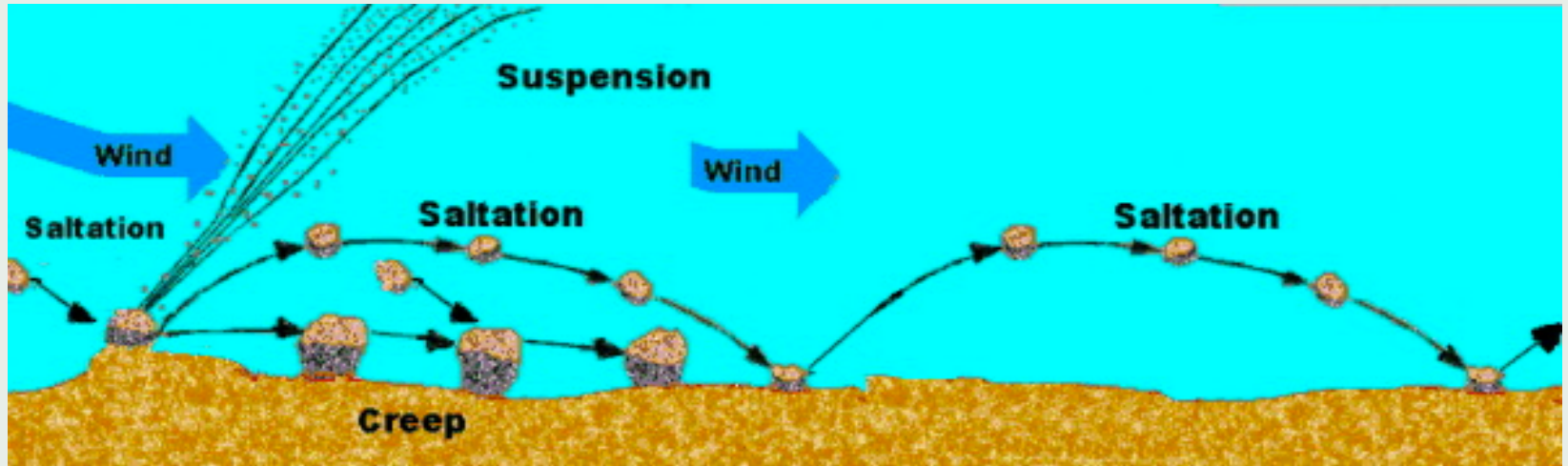


0.0 0.05 0.10 0.15 0.20 0.25 .38 0.50 0.75 1.00 1.50 2.0

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

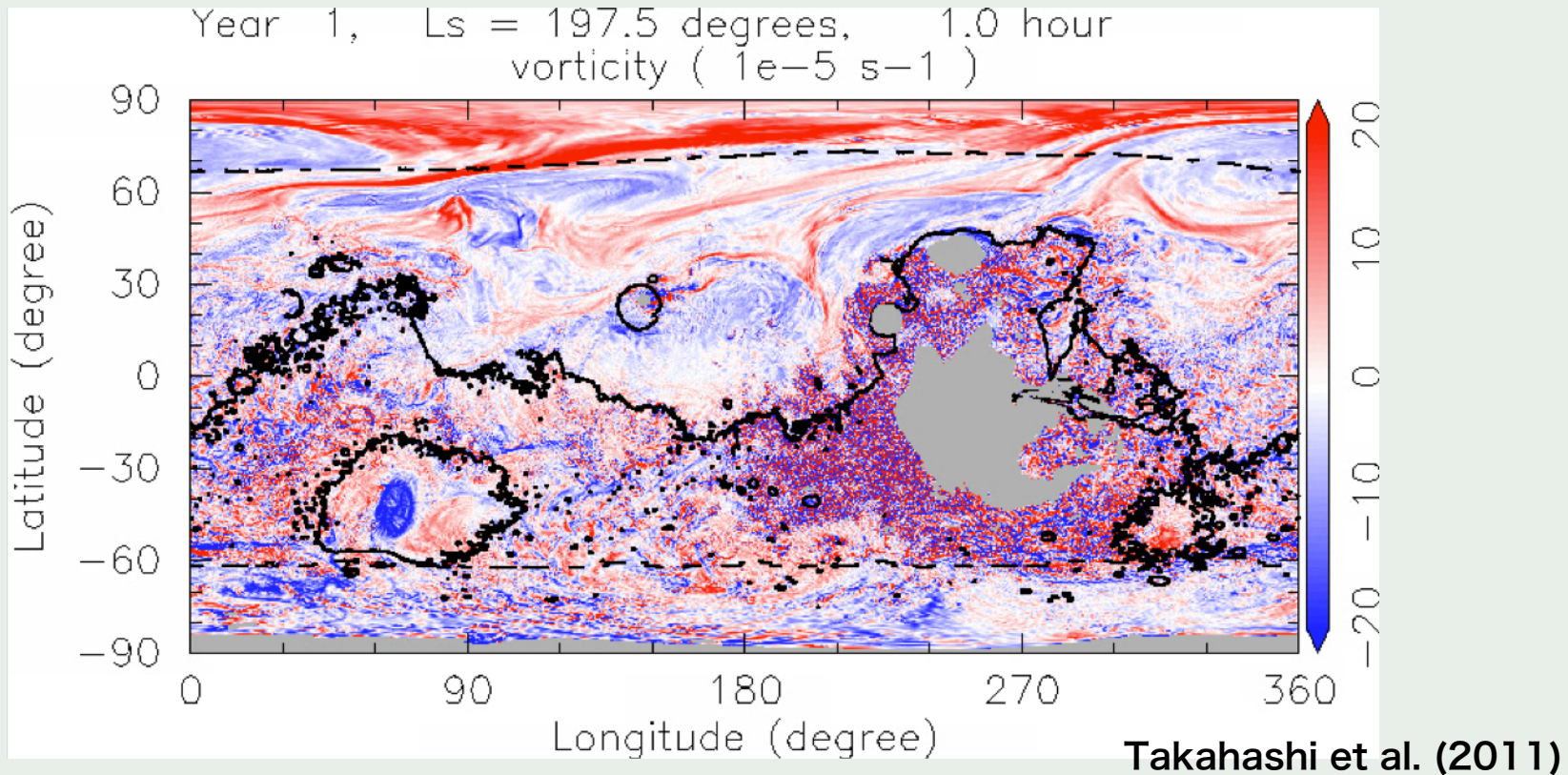
- 観測結果に合うようにパラメータを調整している
 - Kahre et al. (2006)
 - 実験的に得られた応力閾値 (Greeley and Iversen, 1985) ではダストが巻き上がらないため、閾値を下げている
 - Mulhollnad et al. (2013)
 - ダスト量に応じて巻き上げ閾値の調整を行っている
- 詳細な流れ場の情報なしに考案されている
 - 対流運動のエネルギーの一部がダストデビルに寄与すると大雑把に考えてダスト巻き上げ量を見積もっている (Rennò et al., 1989)
- 平均風応力パラメタリゼーションは、ダストデビルパラメタリゼー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

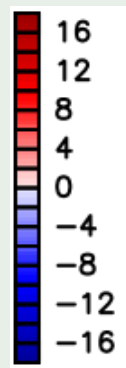
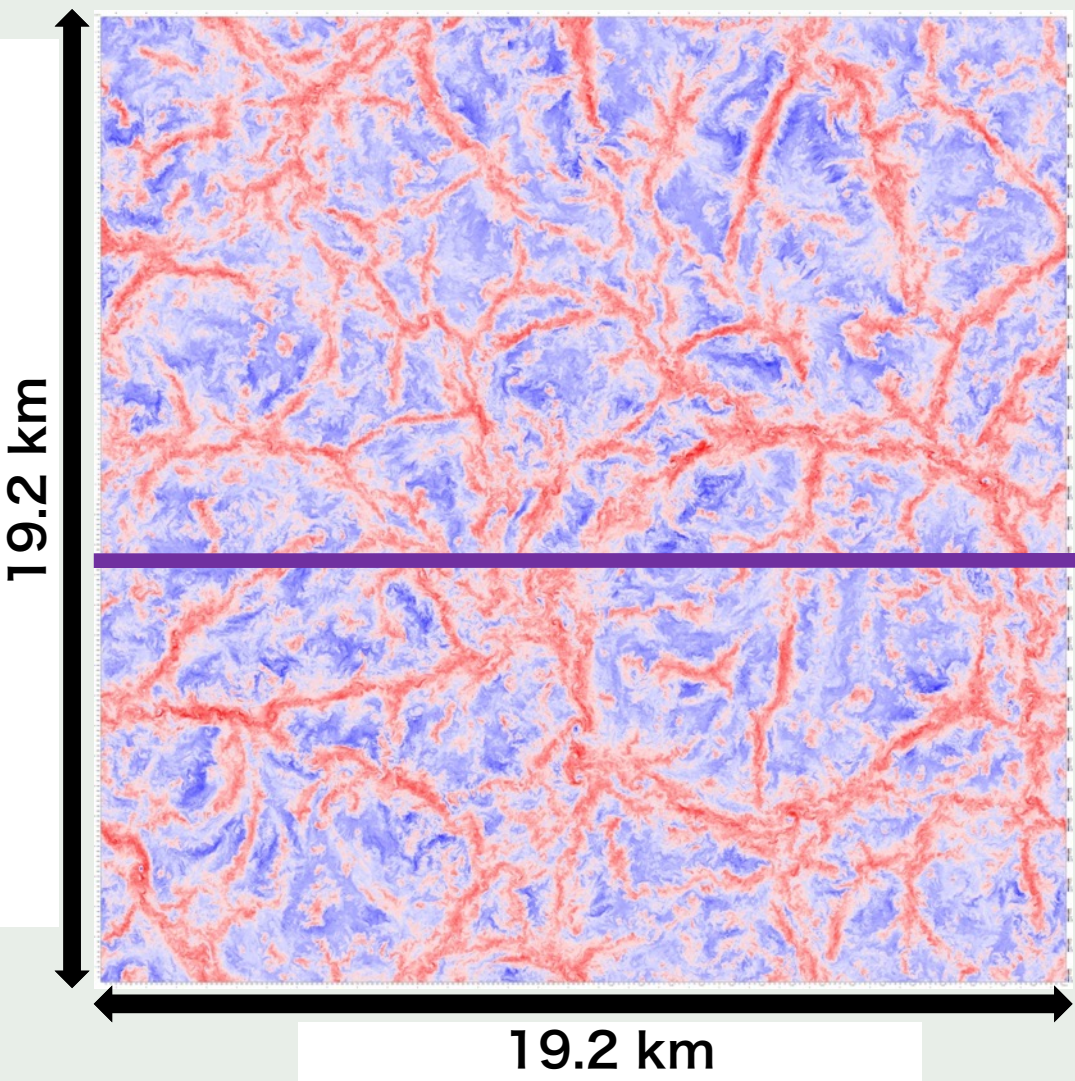
- MGCM には数 km サイズまで解像可能なものがある (~ 11 km; Takahashi et al., 2011)



- 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

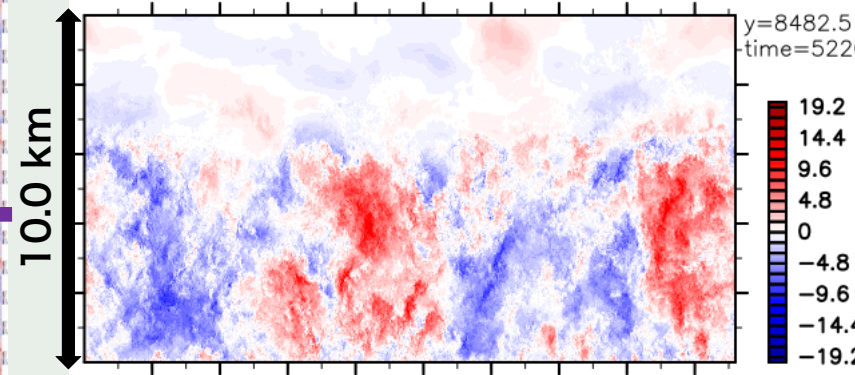
流れ場空間分布概観 (z = 197.5)

鉛直風 [m/s] 水平分布

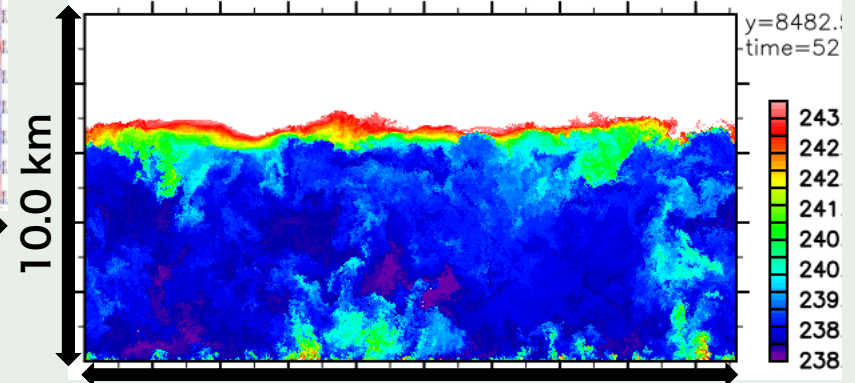


- 対流セルサイズ
 - 水平 : 数 km
 - 鉛直 : 6 km 程度

鉛直風



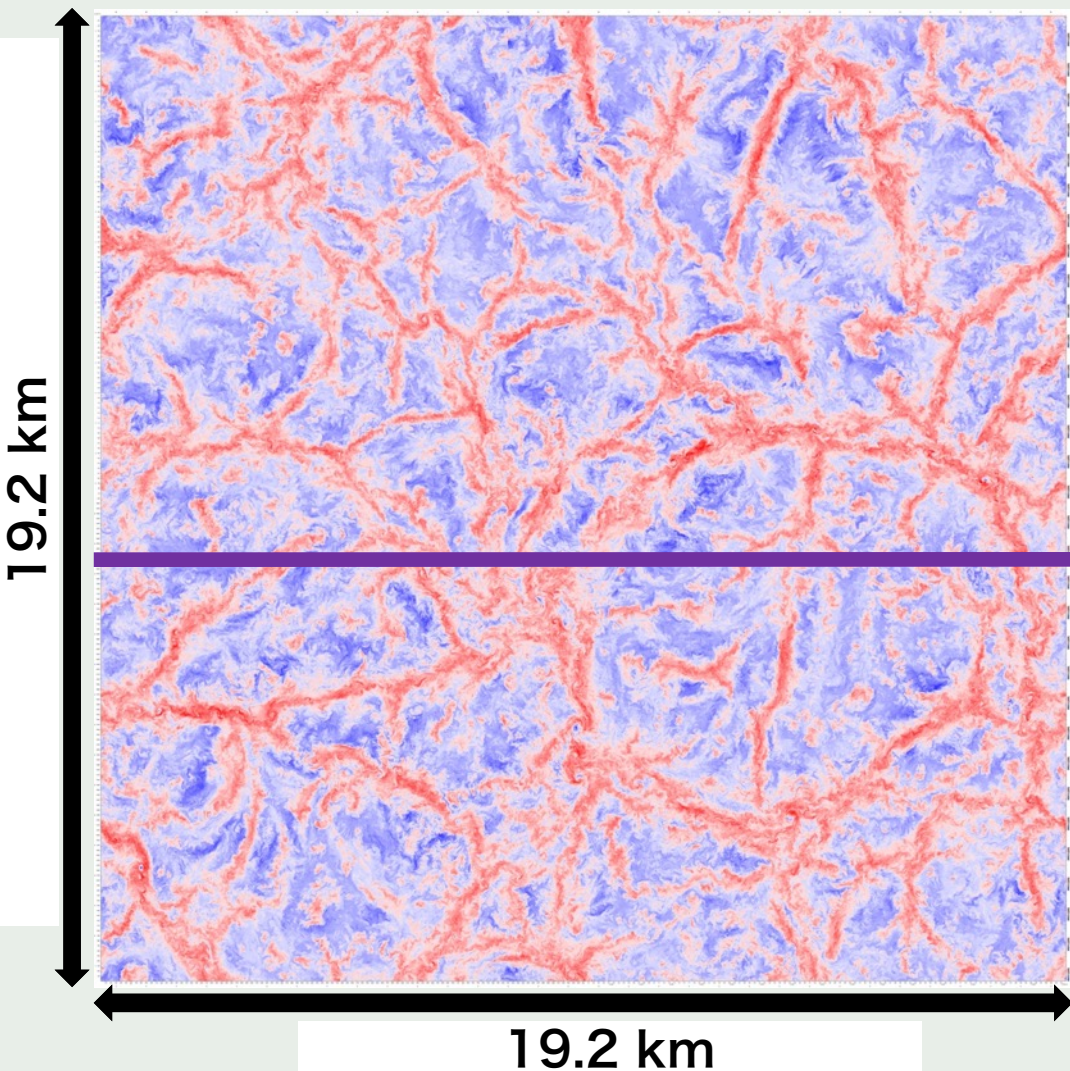
温位



19.2 km

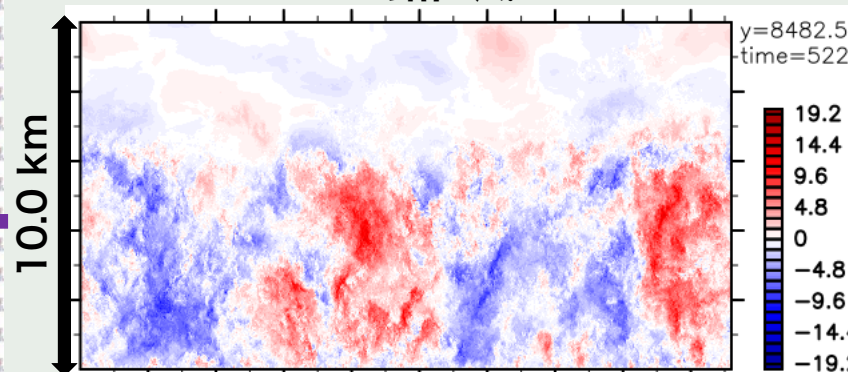
流れ場空間分布概観 (z = 197.5, LT = 14:30)

鉛直風 [m/s] 水平分布

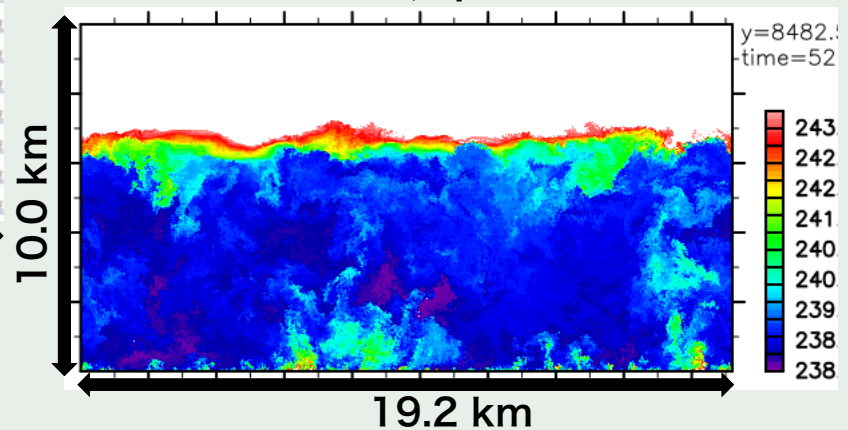


- 対流セルサイズ
 - 水平 : 数 km
 - 鉛直 : 6 km 程度

鉛直風

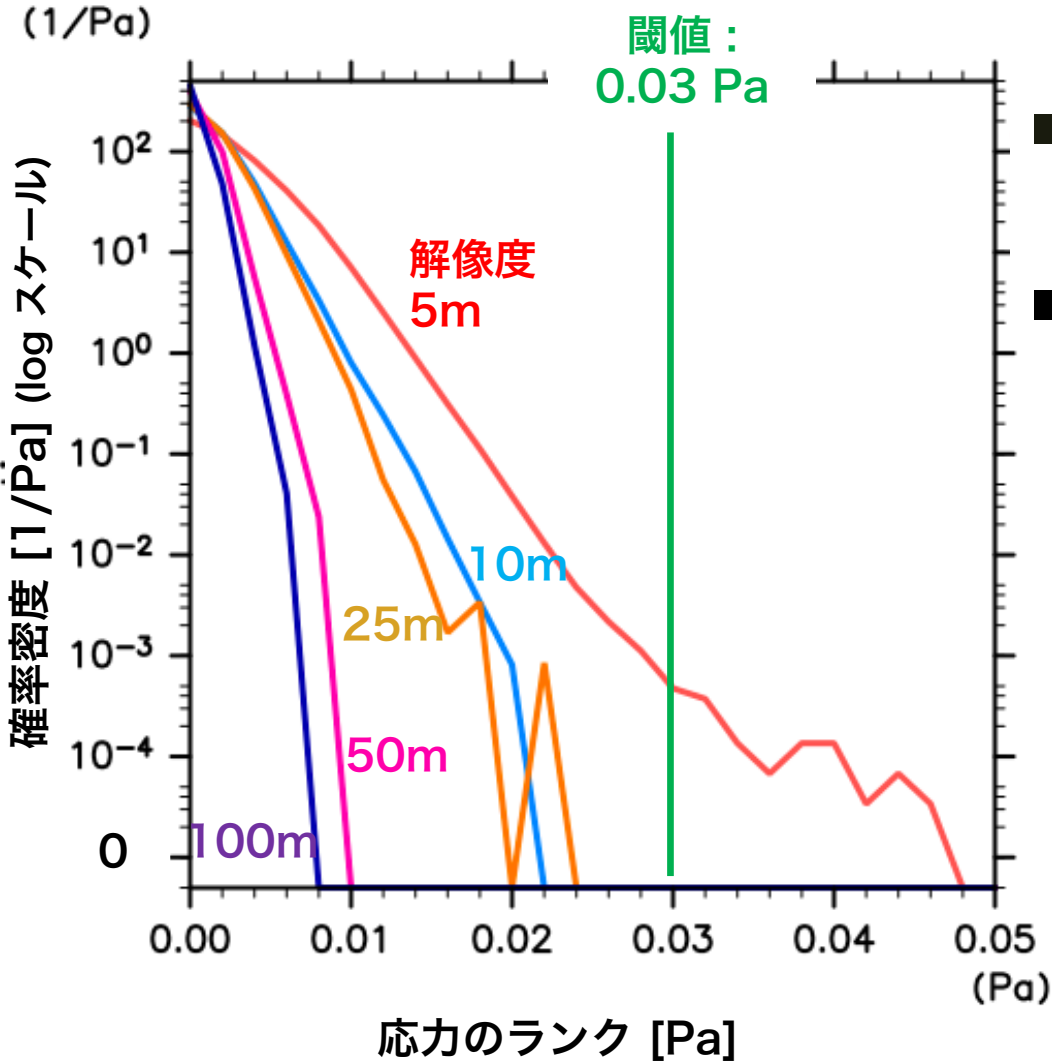


温位



これまでの解析：地表面応力確率密度分布

応力確率密度分布 (LT=14:30)



- 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

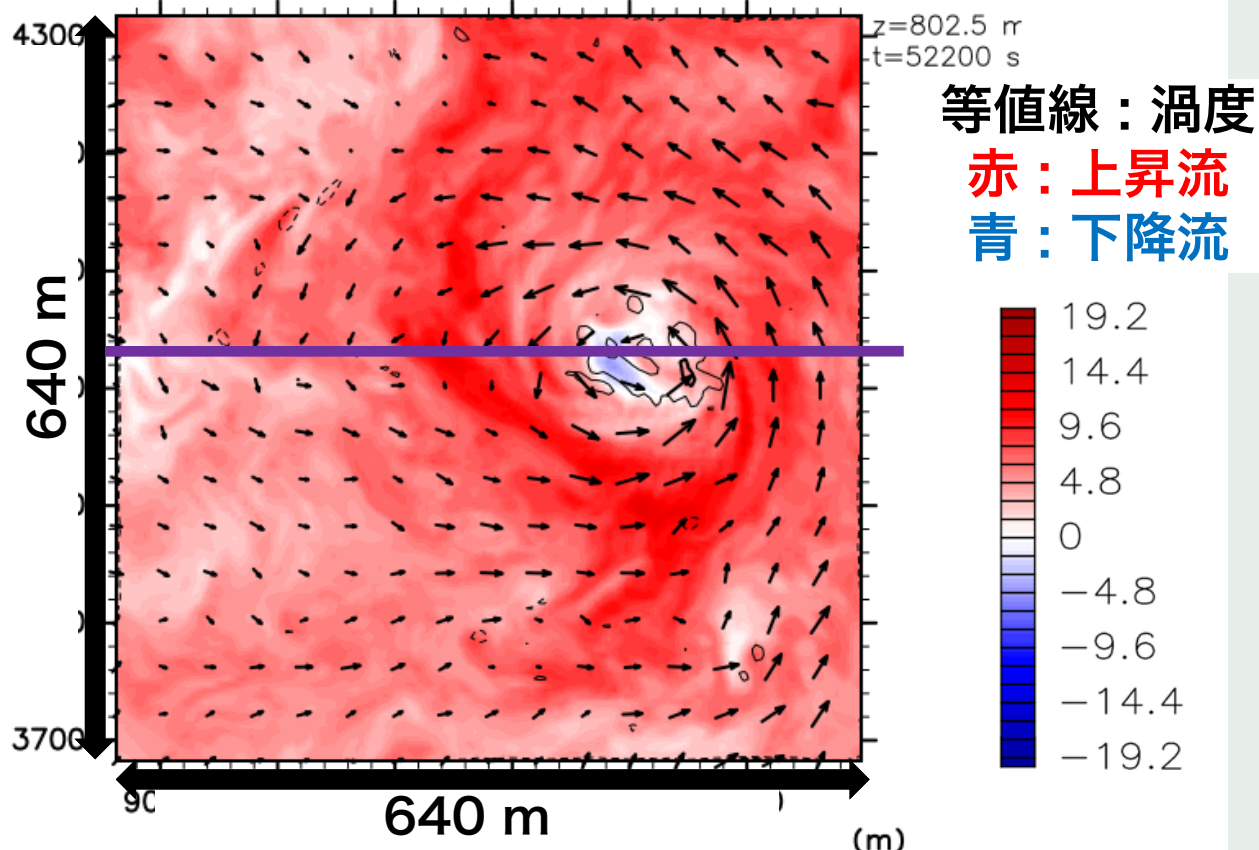
N : 全格子点数

dr : ビンの幅 (0.002 Pa)

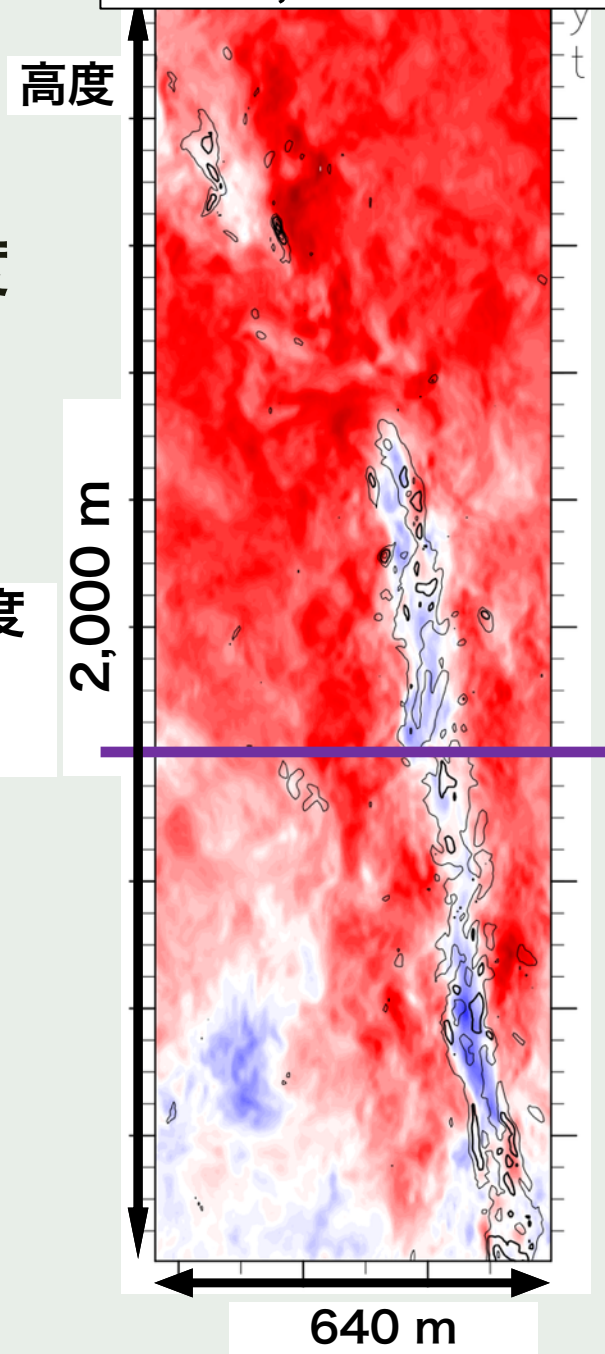
応力が強い箇所の流れ場

- 孤立渦があるように見える
 - 直径 120 m 程度, 高さ 1,500 m 程度

鉛直風, 水平風, 渦度 水平断面 (z = 802.5 m)



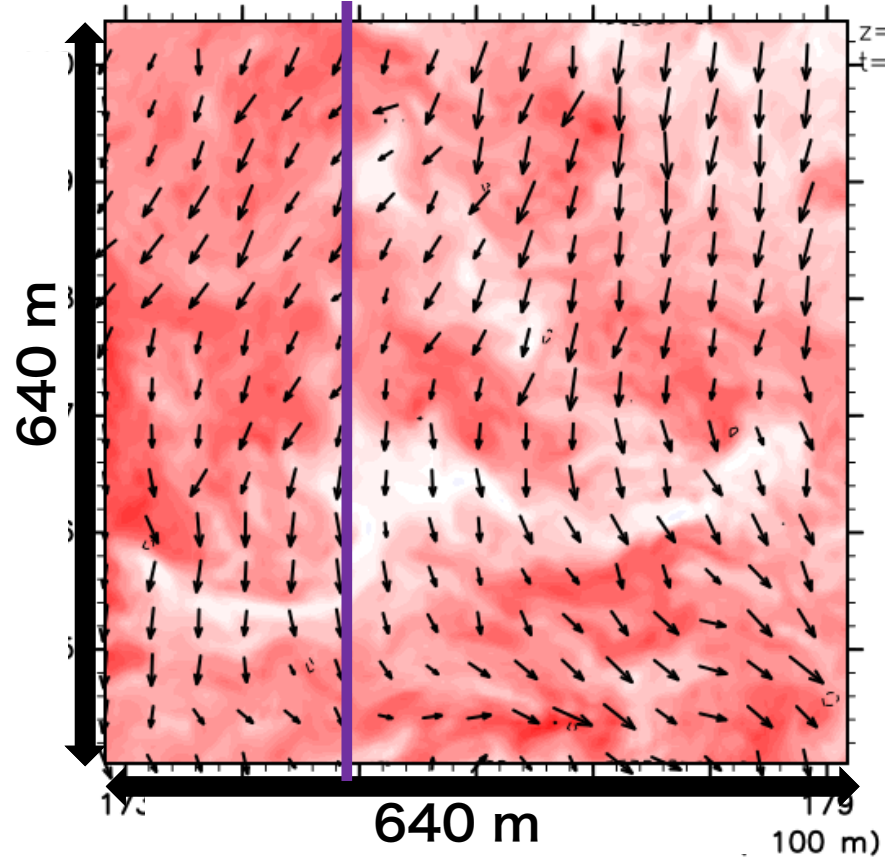
鉛直風, 渦度 鉛直断面



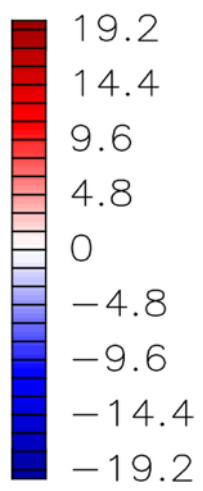
応力が強い箇所の流れ場

- 明確な渦構造はみられない

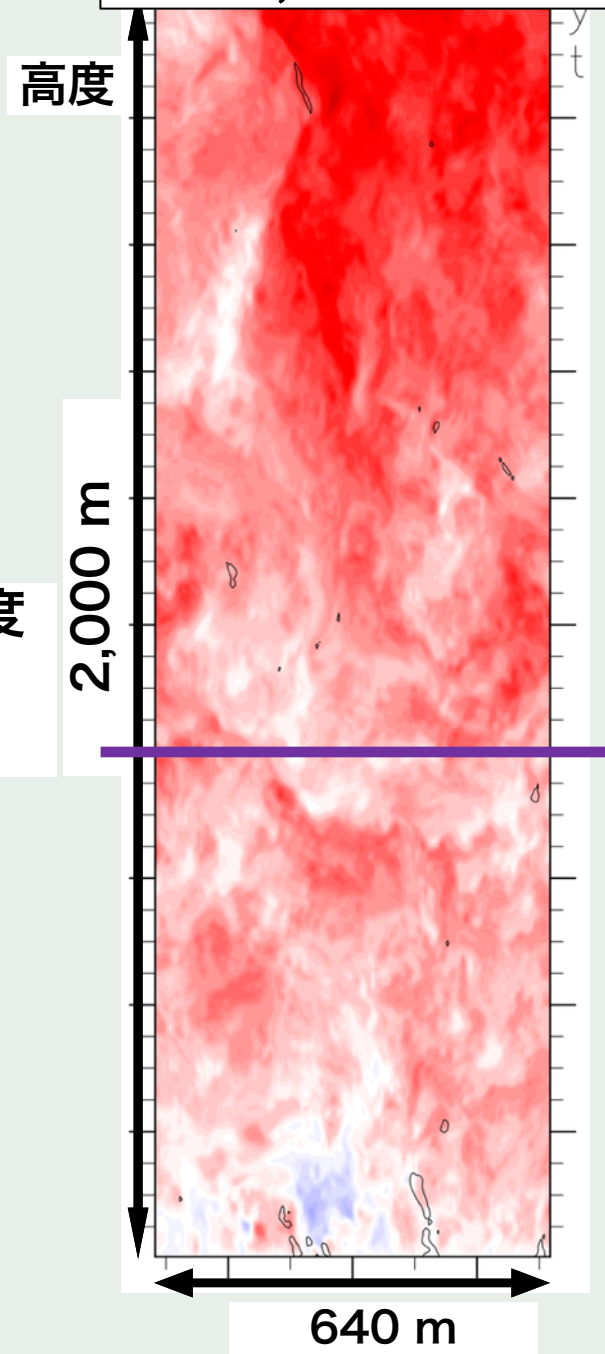
鉛直風, 水平風, 渦度 水平断面 ($z = 802.5 \text{ m}$)



等値線 : 渦度
赤 : 上昇流
青 : 下降流

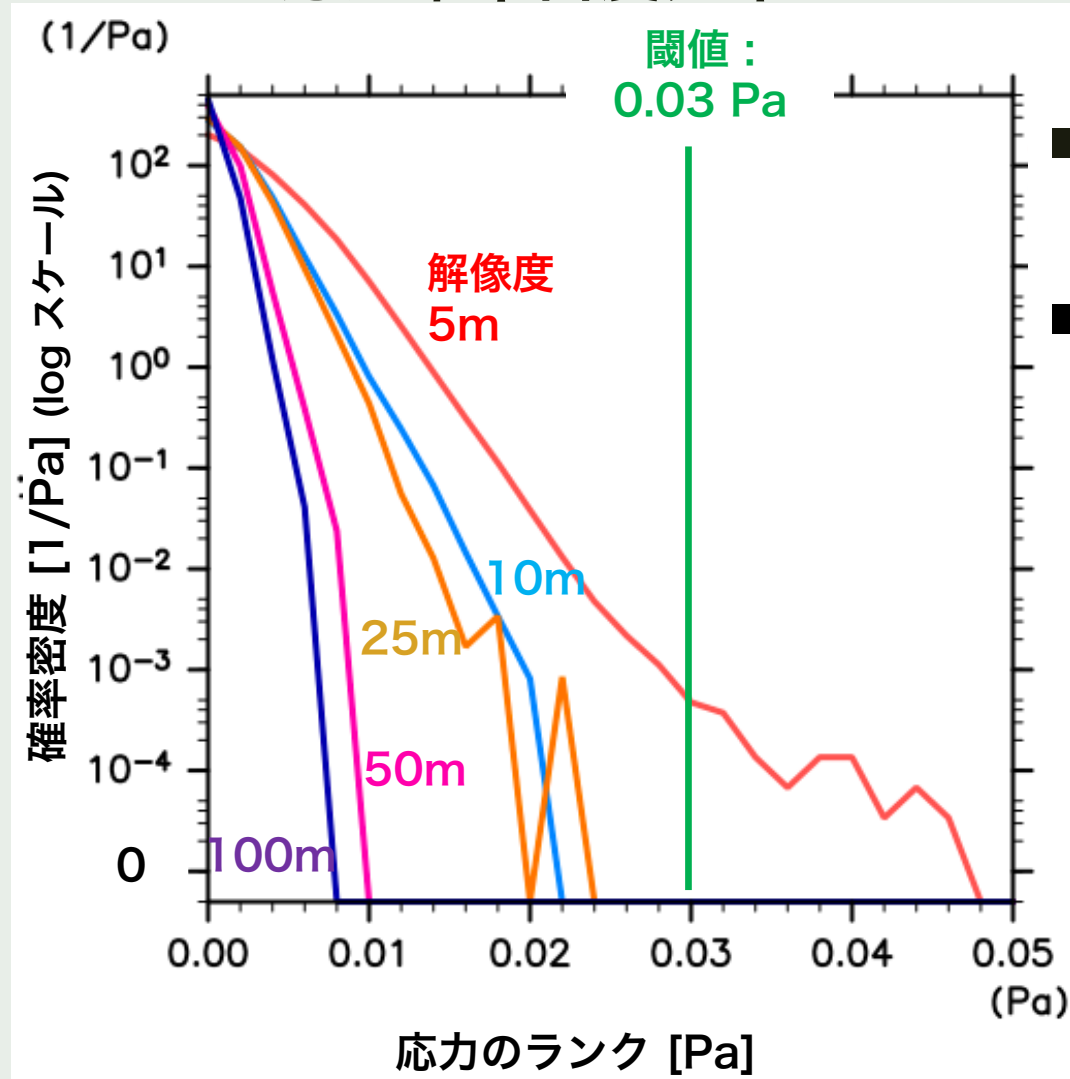


鉛直風, 渦度 鉛直断面



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)

$$\text{確率密度} \frac{dn}{N dr}$$

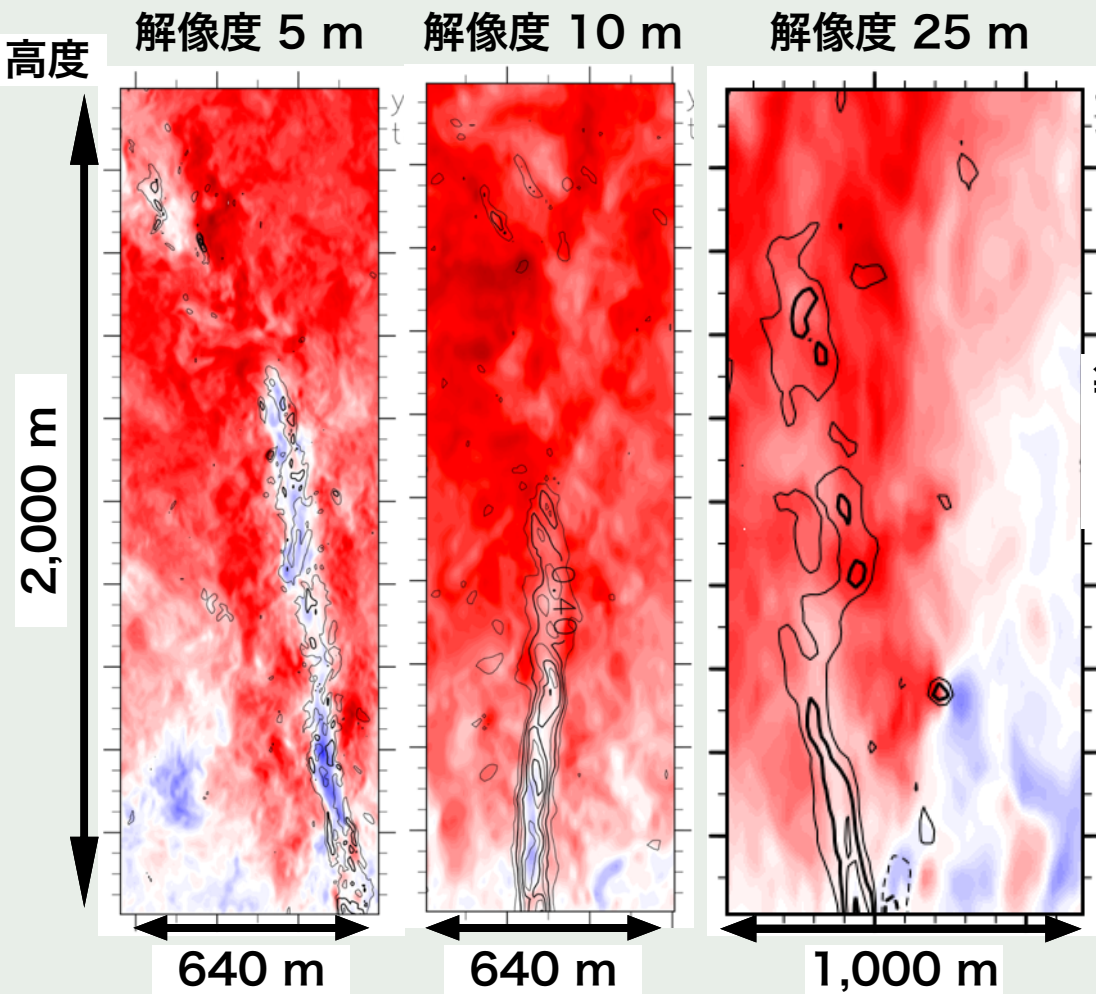
dn : ビンに含まれる格子点数

N : 全格子点数

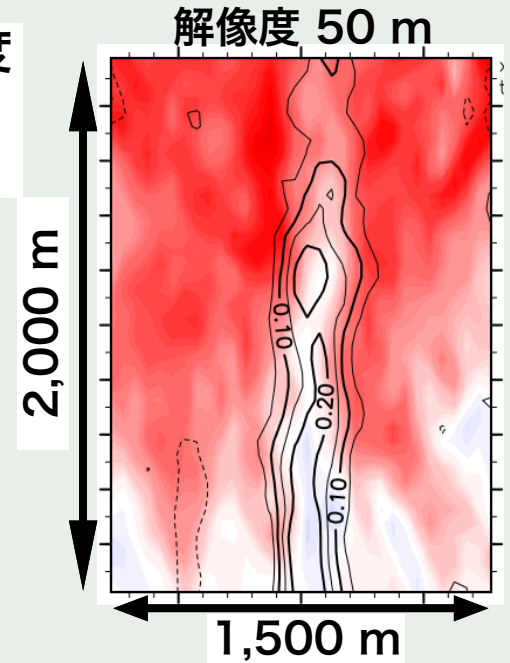
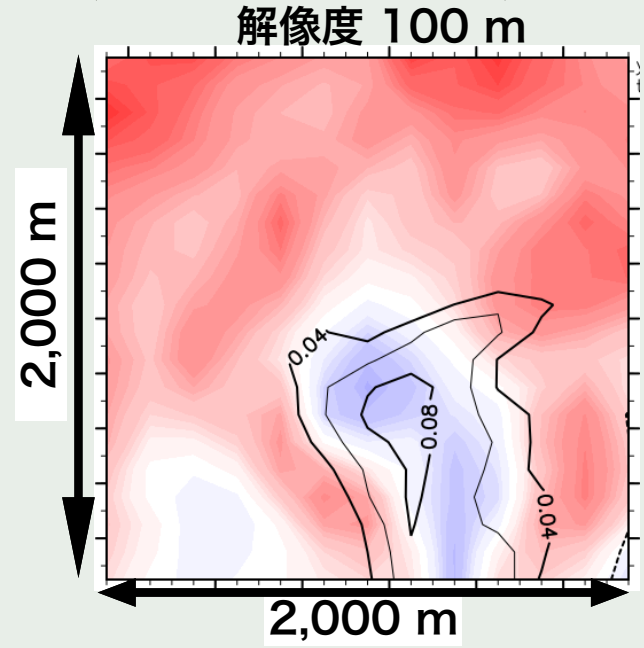
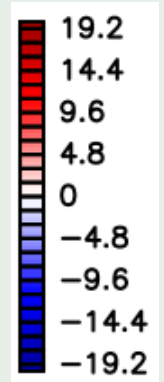
dr : ビンの幅 (0.002 Pa)

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

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

使用データの計算モデル

■ SCALE-LESモデル

■ 方程式系：3次元完全圧縮流体方程式

- 連続の式
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) + \frac{\partial \rho q_l w_l}{\partial z} + \frac{\partial \rho q_s w_s}{\partial z} = 0.$$

- 運動方程式
$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) + \left(\frac{\partial \rho q_l w_l}{\partial z} + \frac{\partial \rho q_s w_s}{\partial z} \right) \mathbf{e}_z$$
$$= -\nabla p - \rho g \mathbf{e}_z + \text{DIFF}[\mathbf{u}]$$

- 熱力学方程式
$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{u}) + \frac{\partial \rho q_l e_l w_l}{\partial z} + \frac{\partial \rho q_s e_s w_s}{\partial z} + p \nabla \cdot \mathbf{u}$$
$$= Q + \text{DIFF}[T^*]$$

地表面応力の計算

- 地表面フラックスを計算し，地表面応力の値を調べる
 - Louis モデル (Louis, 1979)

バルクリチャードソン数 $Ri_B = \frac{gz(\theta - \theta_s)}{\theta u^2}$

地表面応力 $Press = \rho u_*^2 = \rho a^2 u^2 F$

g 重力加速度
 θ 温位
 θ_s 地表温位
 u 風速
 z 高度
 ρ 密度

不安定時 $Ri_B < 0$

$$F = 1 - \frac{b Ri_B}{1 + c \sqrt{|Ri_B|}}$$

安定時 $Ri_B > 0$

$$F = \frac{1}{(1 + b' Ri_B)^2}$$

$$c = C^* a^2 b \sqrt{\frac{z}{z_0}}$$
$$a^2 = \frac{k^2}{\{\ln(z/z_0)\}^2}$$

$$C^* = 7.4 \quad b = 2b' = 9.4$$
$$k = 0.4 \quad z_0 = 1 \times 10^{-2}$$

ダストデビル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/(m² s)]

F_s : 顕熱フラックス [W/m²]

α_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