

2017/11/20
大気境界層乱流ミニワークショップ

火星大気境界層 LES で表現された 対流と渦

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

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
(Gierasch and Goody, 1972 など)
- 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		

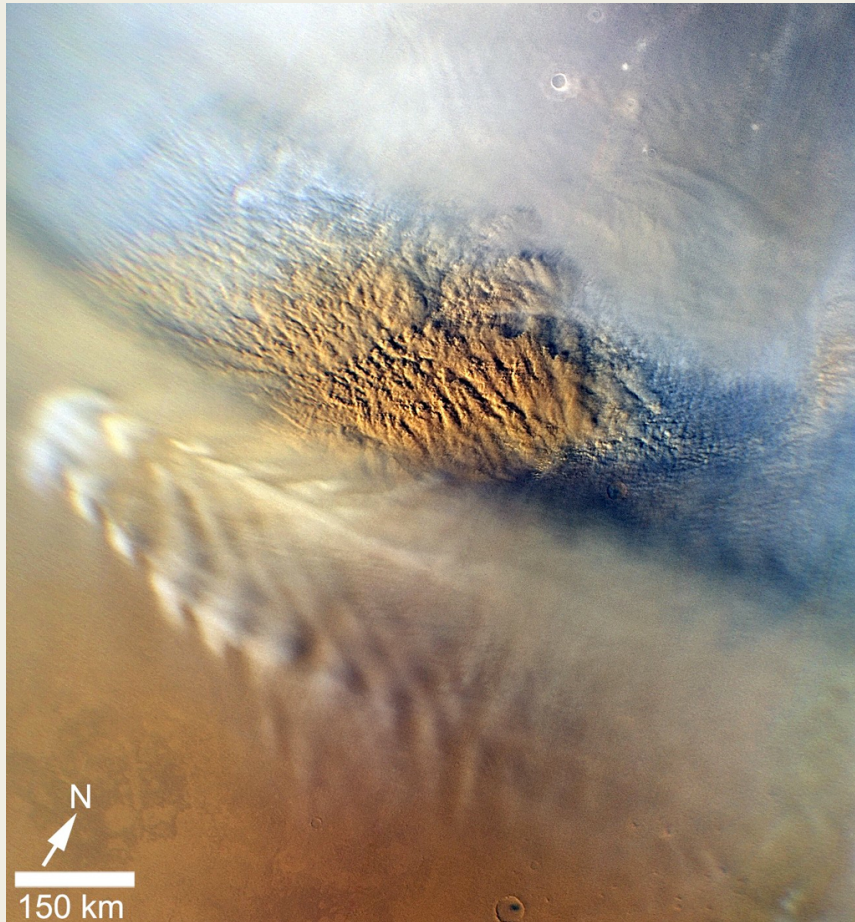
ダストデビル (探査機 Spirits 撮影)

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

10 m 10 km 10,000 km

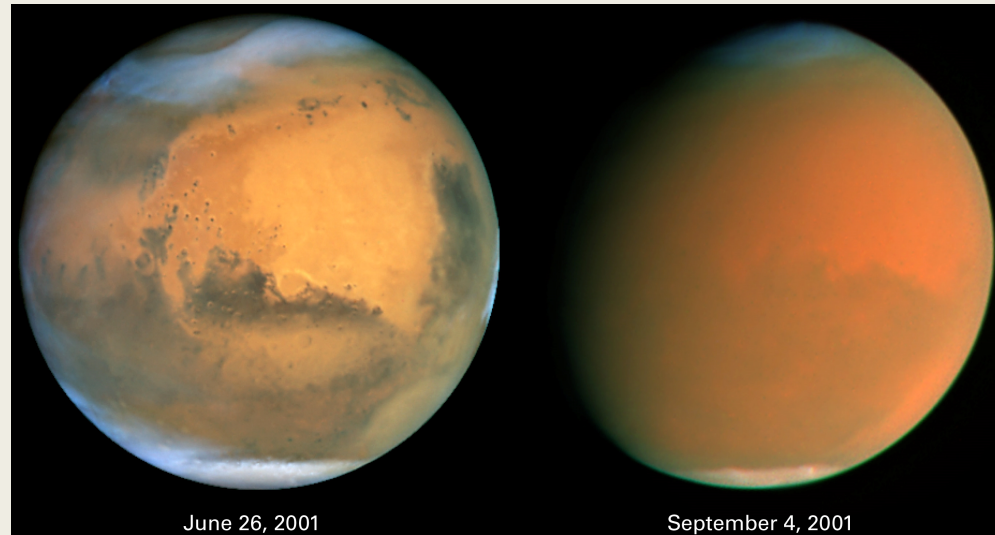
はじめに

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



June 26, 2001

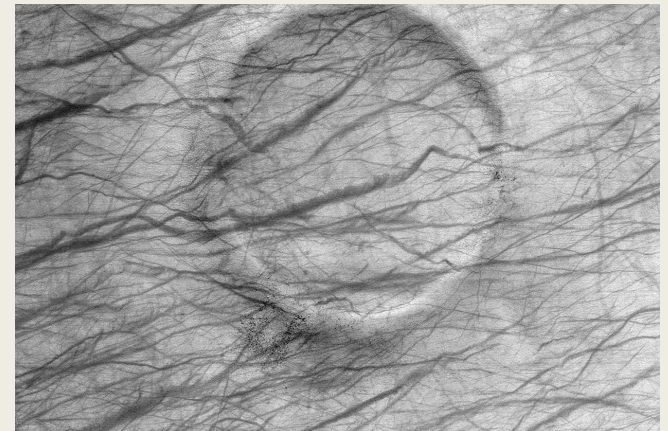
September 4, 2001

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

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

火星 GCM 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
 - GCM 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
- 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

<https://apod.nasa.gov/apod/ap031230.html>

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)

$$F_D = \alpha_D F_s \eta$$

F_D : ダストフラックス [kg/(m² s)]

F_s : 顕熱フラックス [W/m²]

η : 熱効率

α_D : 効率因子 [kg/J]

$$\eta \approx \frac{T_h - T_c}{T_h} = \frac{T_h - bT_h}{T_h}$$

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

T_h : 地表気温 [K]
(高温熱源)

T_c : 対流層上端の気温 [K]
(低温熱源)

p_s : 地表面気圧 [Pa]

p_{con} : 対流層上端の
気圧 [Pa]

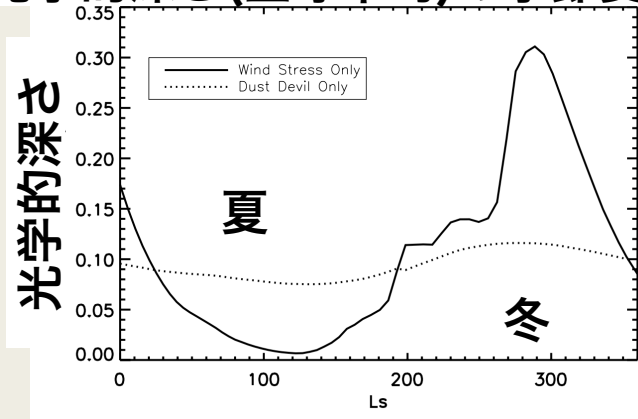
R : 気体定数

c_p : 定圧比熱

ダスト巻き上げを考慮した GCM 計算

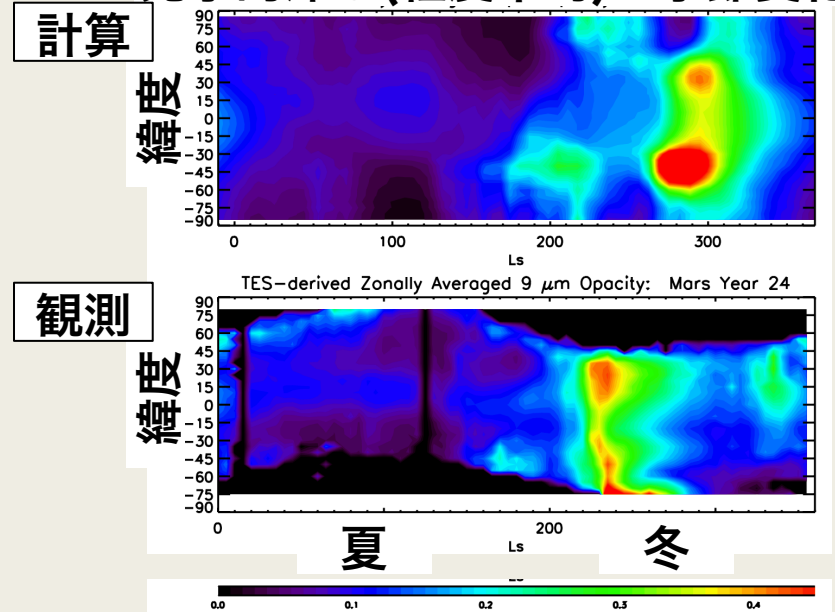
- Kahre et al. (2006) : 二つのダスト巻き上げスキーム
 - ダストデビル
 - 効率因子パラメータ α_D によっては, 背景ダスト量が表現可能
 - 平均風応力
 - ダスト量 (~ 光学的深さ) の季節変動が表現可能
 - ただし臨界風応力を下げている

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)

ダストデビルパラメタリゼーション

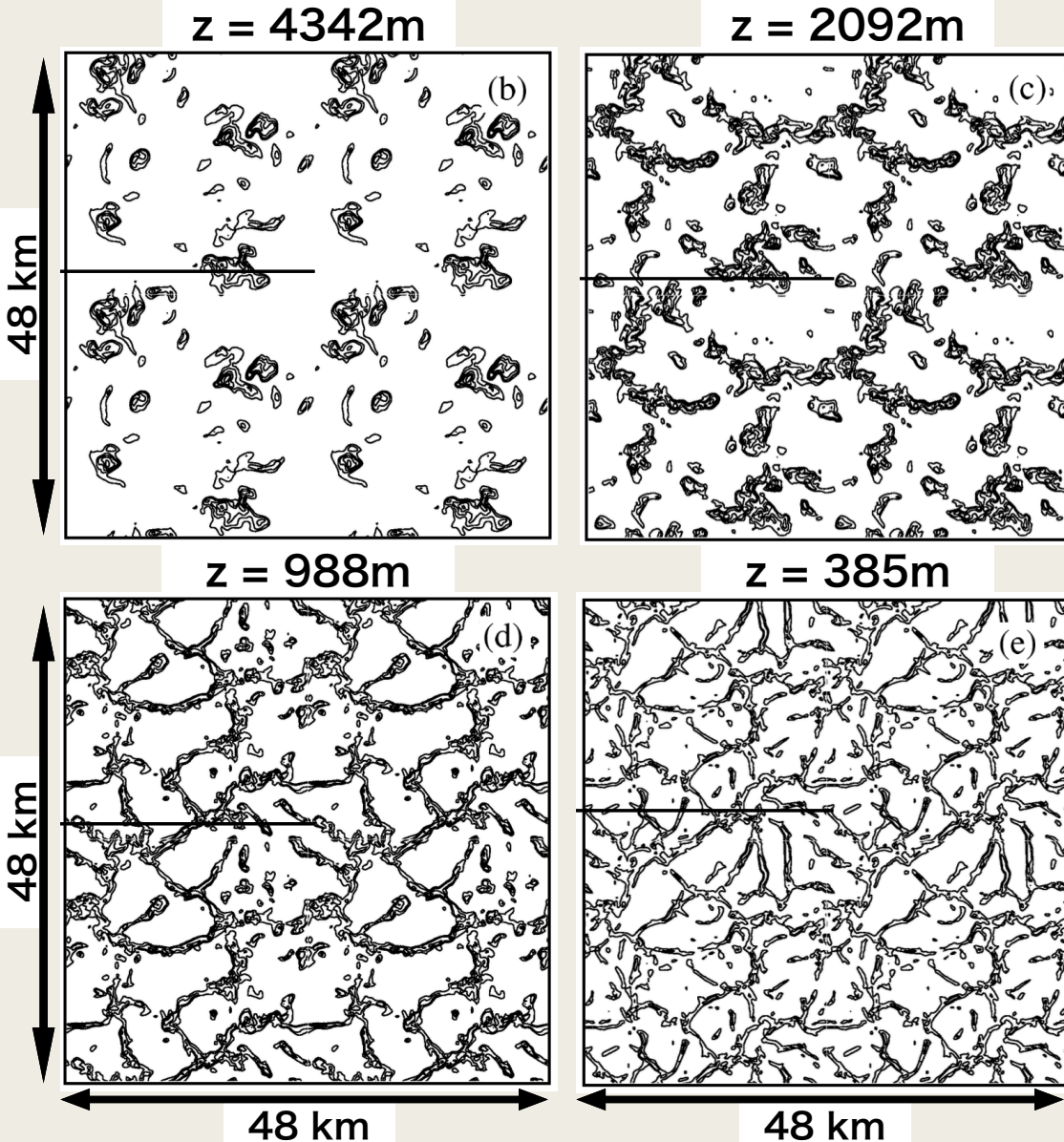
- 対流運動のエネルギーの一部がダストデビルに寄与すると大雑把に考えてダスト巻き上げ量を見積もっている
- ダストデビルを持たらすような渦と対流運動との関係について詳しく知られていない
 - α_D がどのように決まっているのか
 - 対流に伴って渦はどの程度生じているのか
 - 渦にともなう応力はダストを巻き上げるのに十分か
- まずは LES を用いて対流運動と渦を詳しく調べたい
 - その結果をもとにパラメタリゼーションの妥当性を検討したい
 - LES で計算した流れに伴う巻き上げ量を粗視化したときに GCM で評価される巻き上げ量に近づくか

火星大気 LES で得られた渦

■ 先行研究による対流渦一覧

Paper	Dyn. core	渦内部							
		水平格子点数		鉛直格子点数		接線風速		渦度	
		水平解像度	モデル高度	鉛直風速	圧力降下				
		dx (m)	$N_{x,y}$	Z (km)	N_z	w' (m/s)	v' (m/s)	P' (Pa)	ζ (s^{-1})
Rafkin et al. (2001)	RAMS	100	180	9	36	10	10	2	0.3
Toigo et al. (2003)	MM5	10	200	6	140	7	9	1	0.06
Toigo and Richardson (2003)	MM5	100	100	7.5	57	7	5	–	–
Michaels and Rafkin (2004)	RAMS	30	200	2.3	61	5	10	2	0.2
Michaels (2006)	RAMS	25	102	8	120	12	19	6.5	–
Spiga and Forget (2009)	WRF	100	150	9.5	71	8	10	1.5	–
Spiga and Lewis (2010)	WRF	50	145	12	201	12	10	2	–
Gheynani and Taylor (2011)	NCAR	25	200	10	60	4	15	2.5	0.7
Nishizawa et al. (2016)	SCALE	5	4000	21	4000	10	20	4.2	2

火星大気 LES 計算



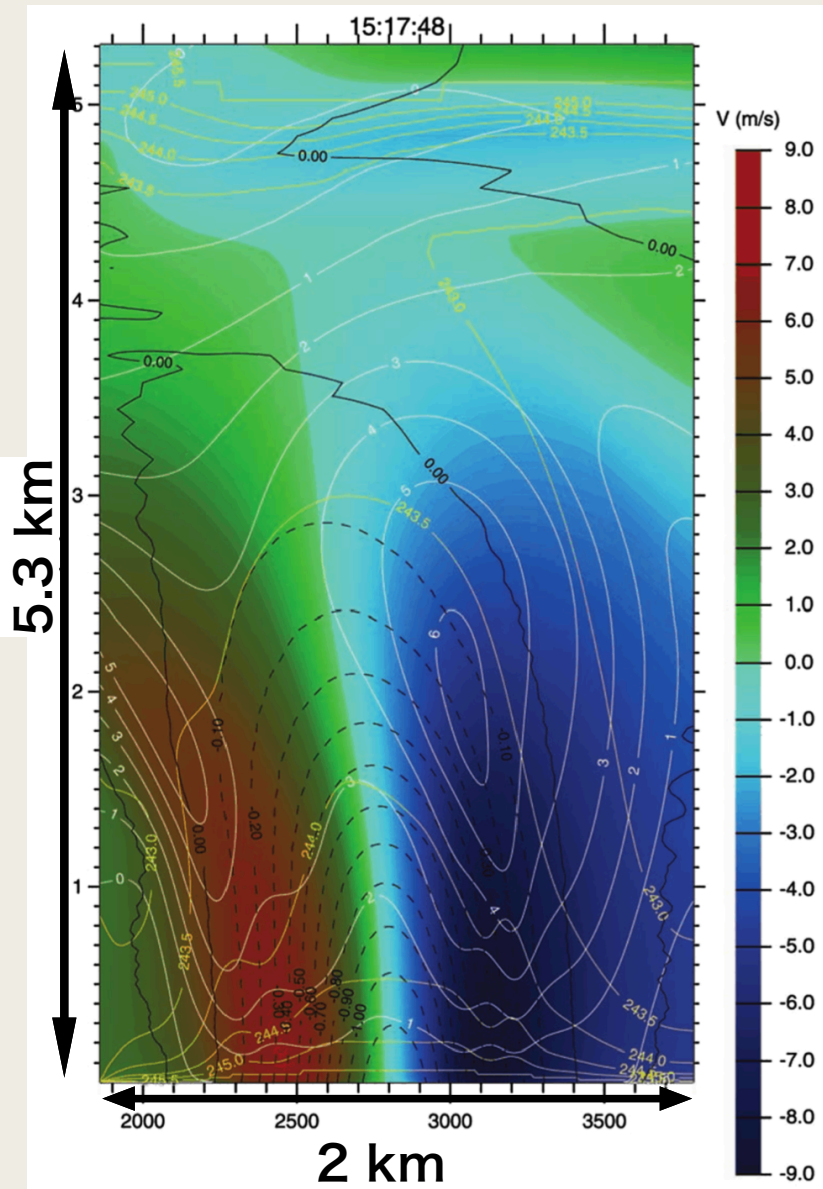
■ Michael and Rafkin (2004) による上昇流水平分布

- 水平解像度 150 m
- 2 m/s 以上の鉛直風領域

■ 水平スケール数 km の対流セルが生じている

48 km
Michael and Rafkin (2006)

火星大気 LES 計算

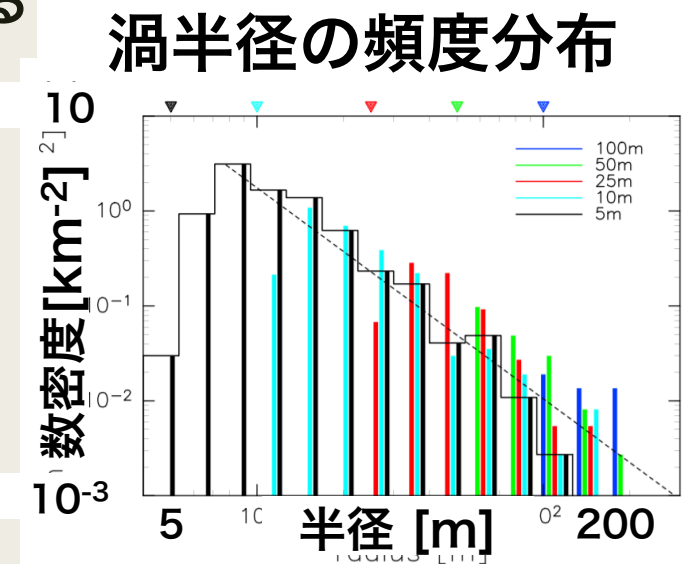
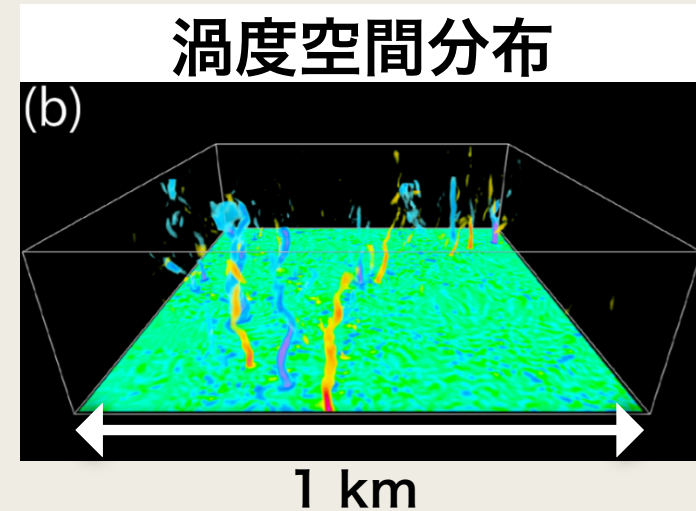


Toigo et al. (2003)

- Toigo et al. (2003) による渦
 - トーン：接線風速
 - 黒線：圧力擾乱
 - 黄線：温位
 - 計算解像度
 - 水平：10 m, 鉛直：3 - 90 m
- 高さ 4 km, 直径 500 m 程度の渦
- 最大 9 m の接線風速

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

■ 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

解析結果

■ 流れ場

- 対流セルの水平構造, 鉛直構造

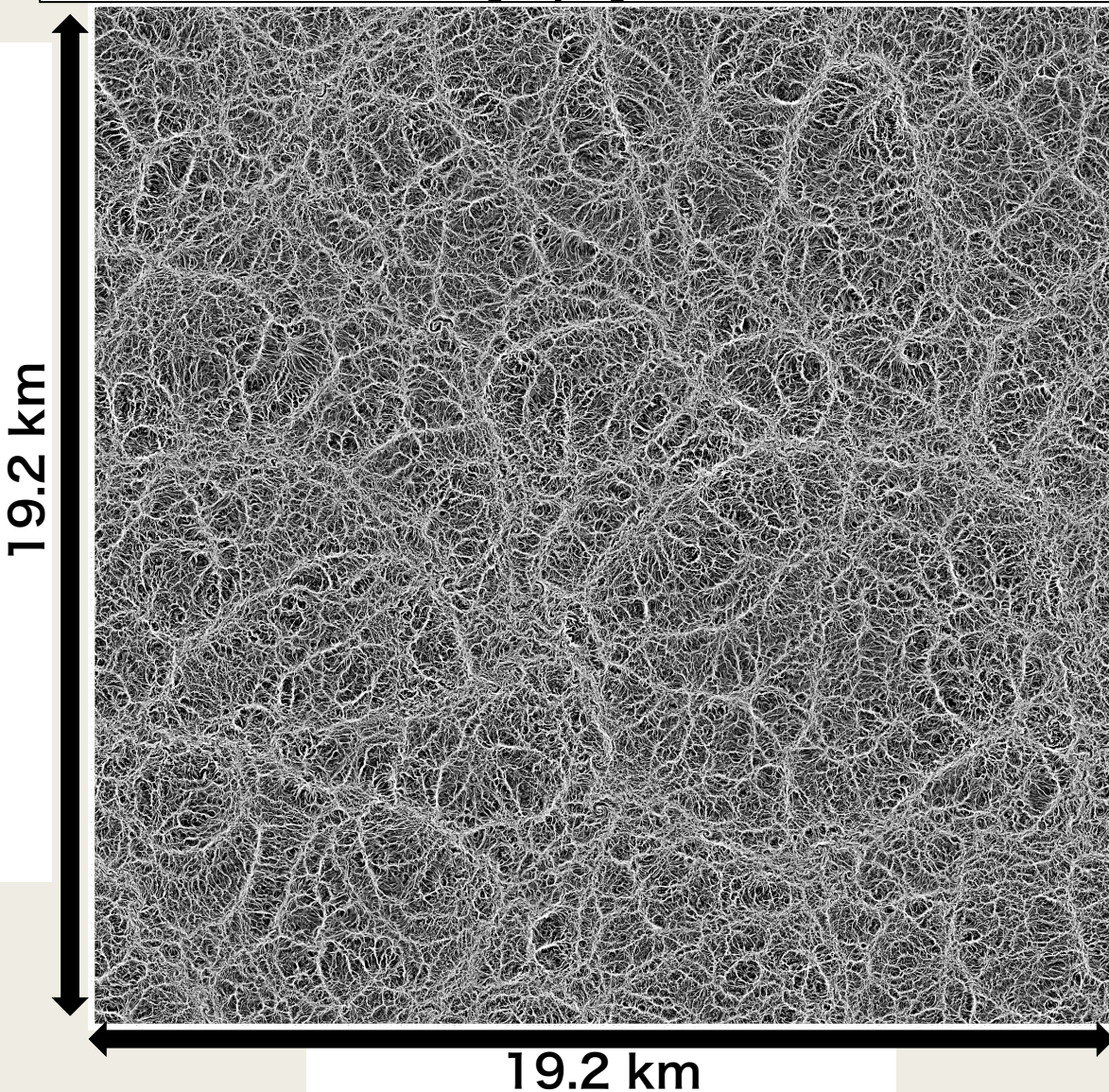
■ 地表面応力

- 確率密度分布
- 強応力地点の水平空間分布
 - 渦度場, 上昇流場と比較
 - 水平風強度場との比較
- 強応力地点付近の流れ場詳細
 - 鉛直構造

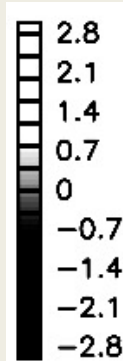
■ 計算解像度別の比較

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

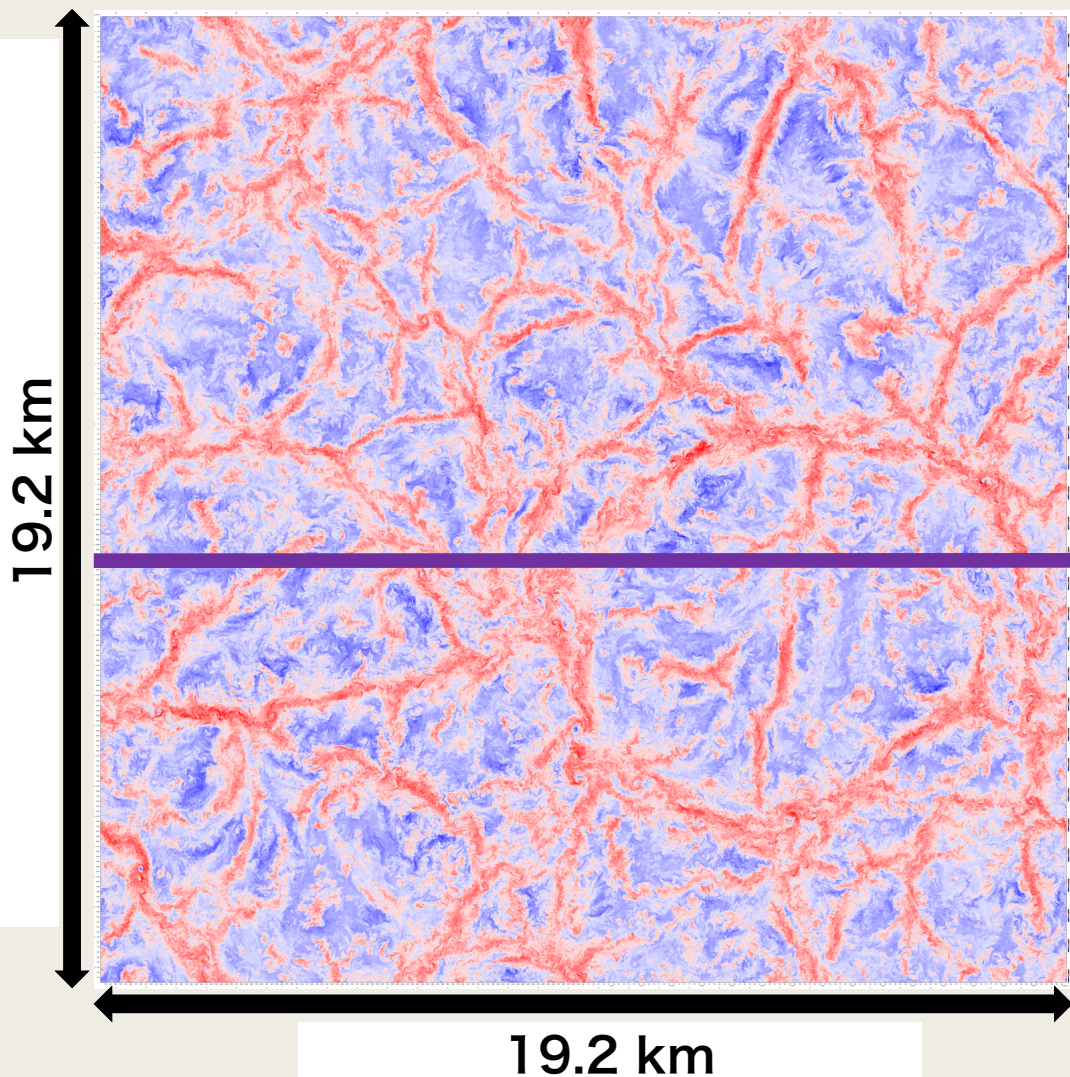


- ネットワーク状の上昇流領域が見られる
 - 高度 1 km の対流セル境界に対応する構造もある
 - そのような構造に埋め込まれる小さな構造もある



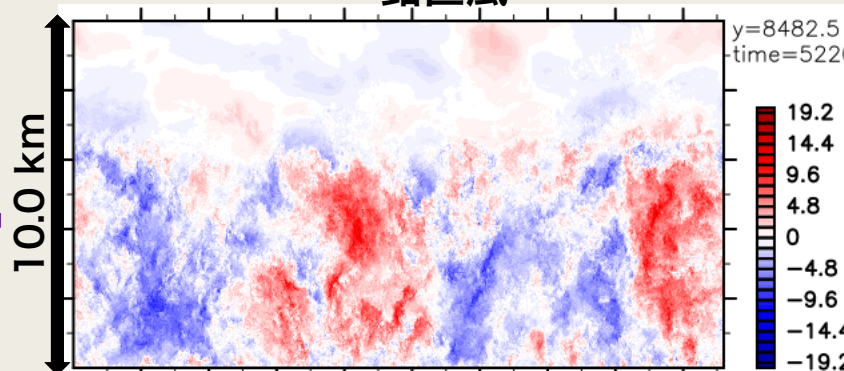
流れ場空間分布概観 (z = 197.5)

鉛直風 [m/s] 水平分布

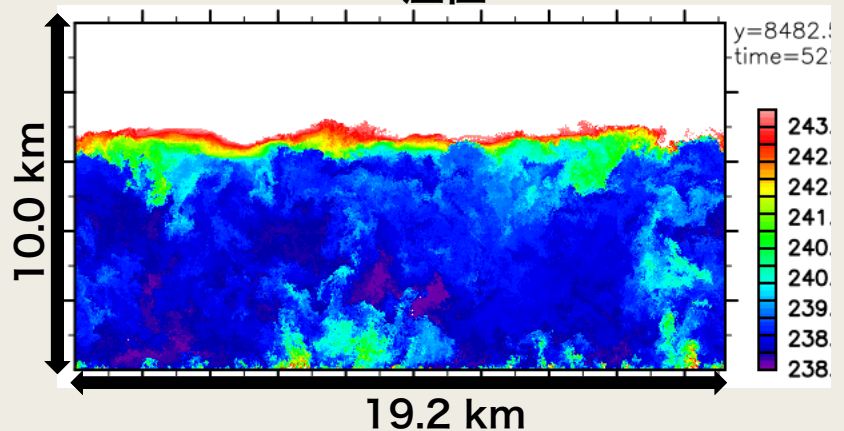


- 対流セルサイズ
 - 水平 : 数 km
 - 鉛直 : 6 km 程度

鉛直風

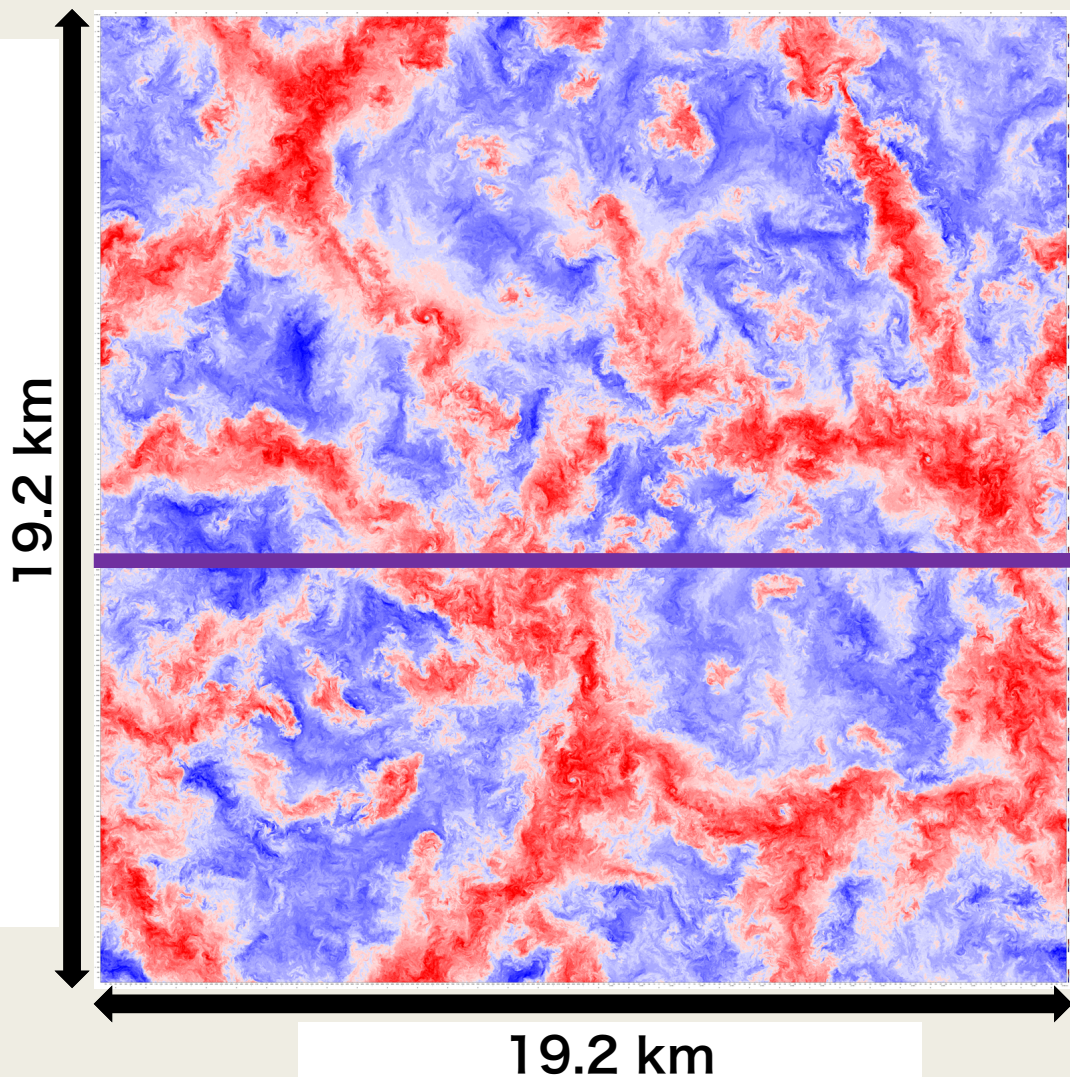


温位



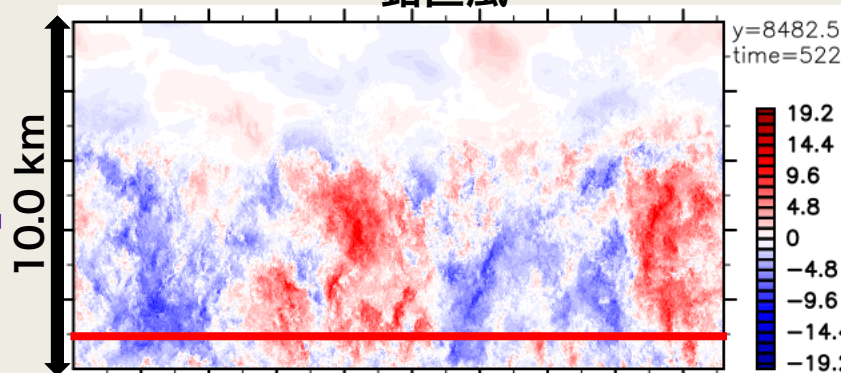
流れ場空間分布概観 (z = 997.5)

鉛直風 [m/s] 水平分布

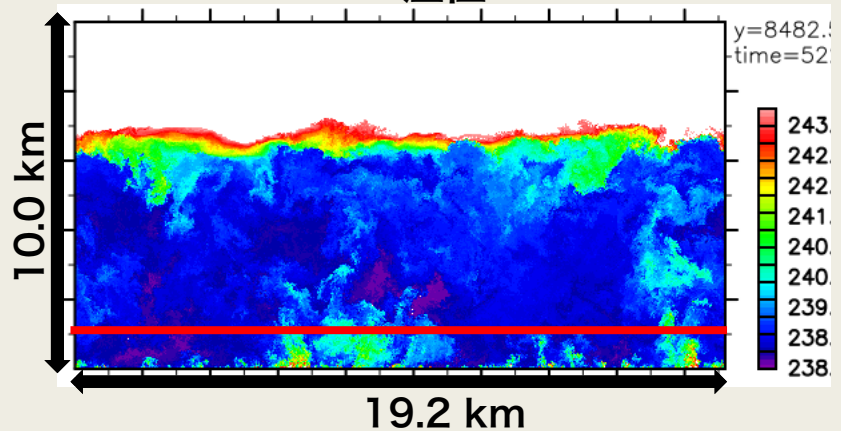


- 対流セルサイズ
 - 水平 : 数 km
 - 鉛直 : 6 km 程度

鉛直風

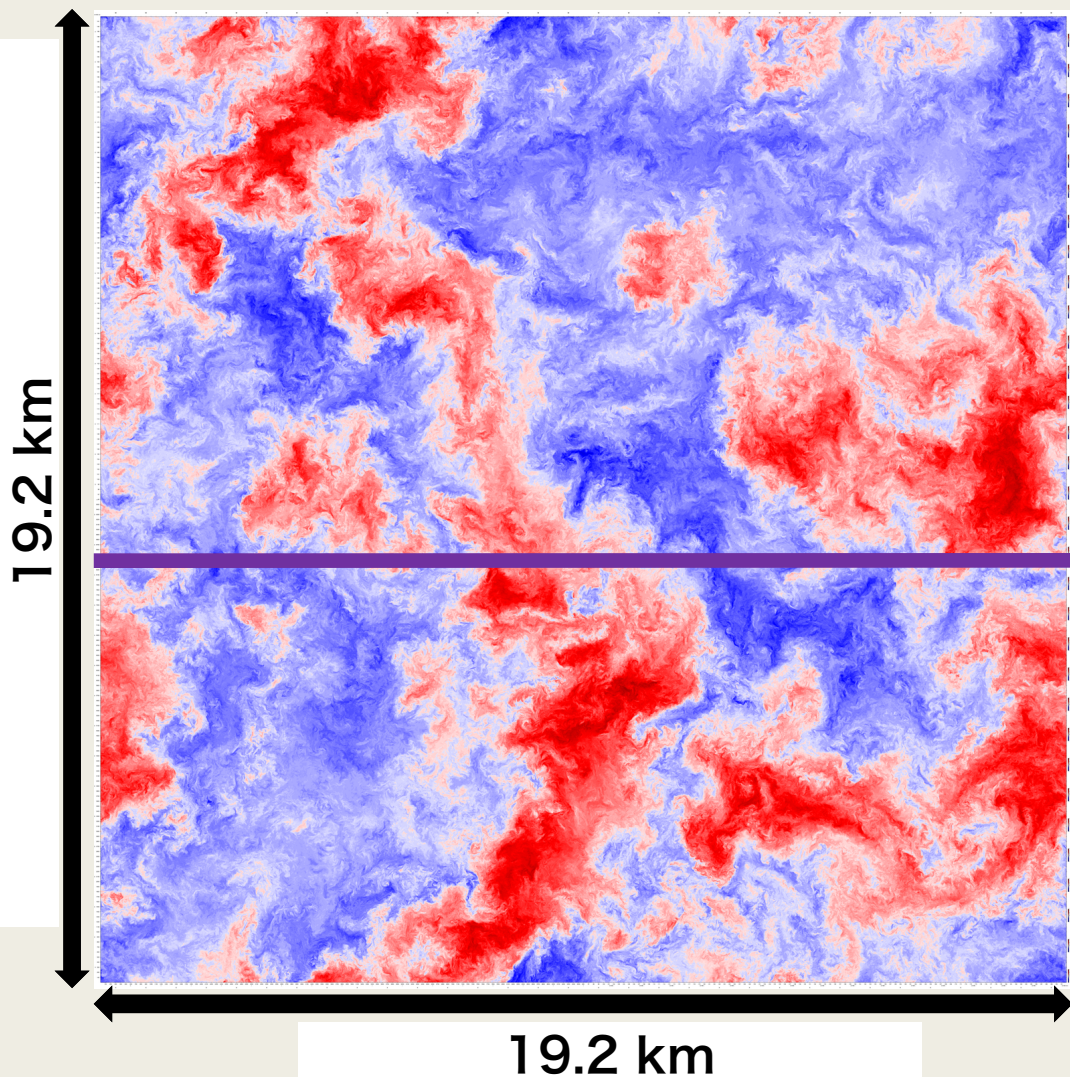


温位



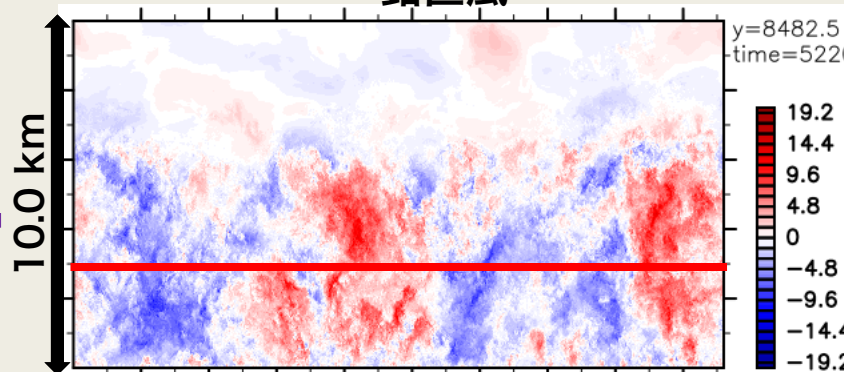
流れ場空間分布概観 (z = 2997.5)

鉛直風 [m/s] 水平分布

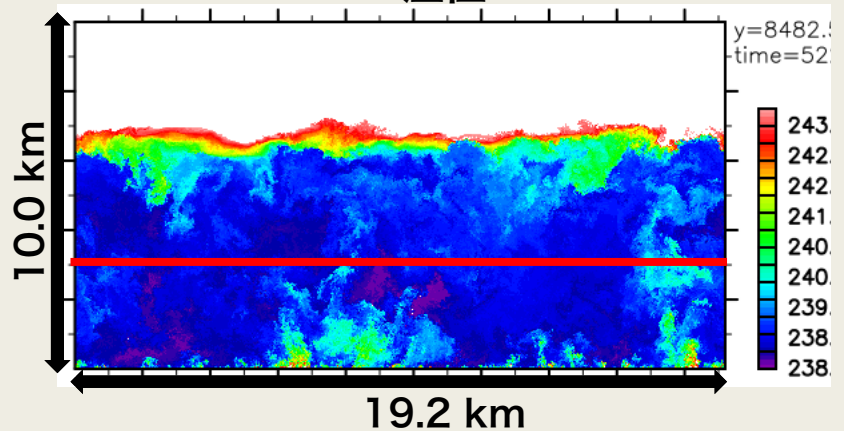


- 対流セルサイズ
 - 水平 : 数 km
 - 鉛直 : 6 km 程度

鉛直風

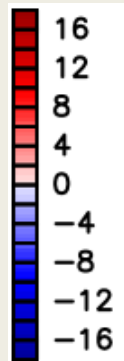
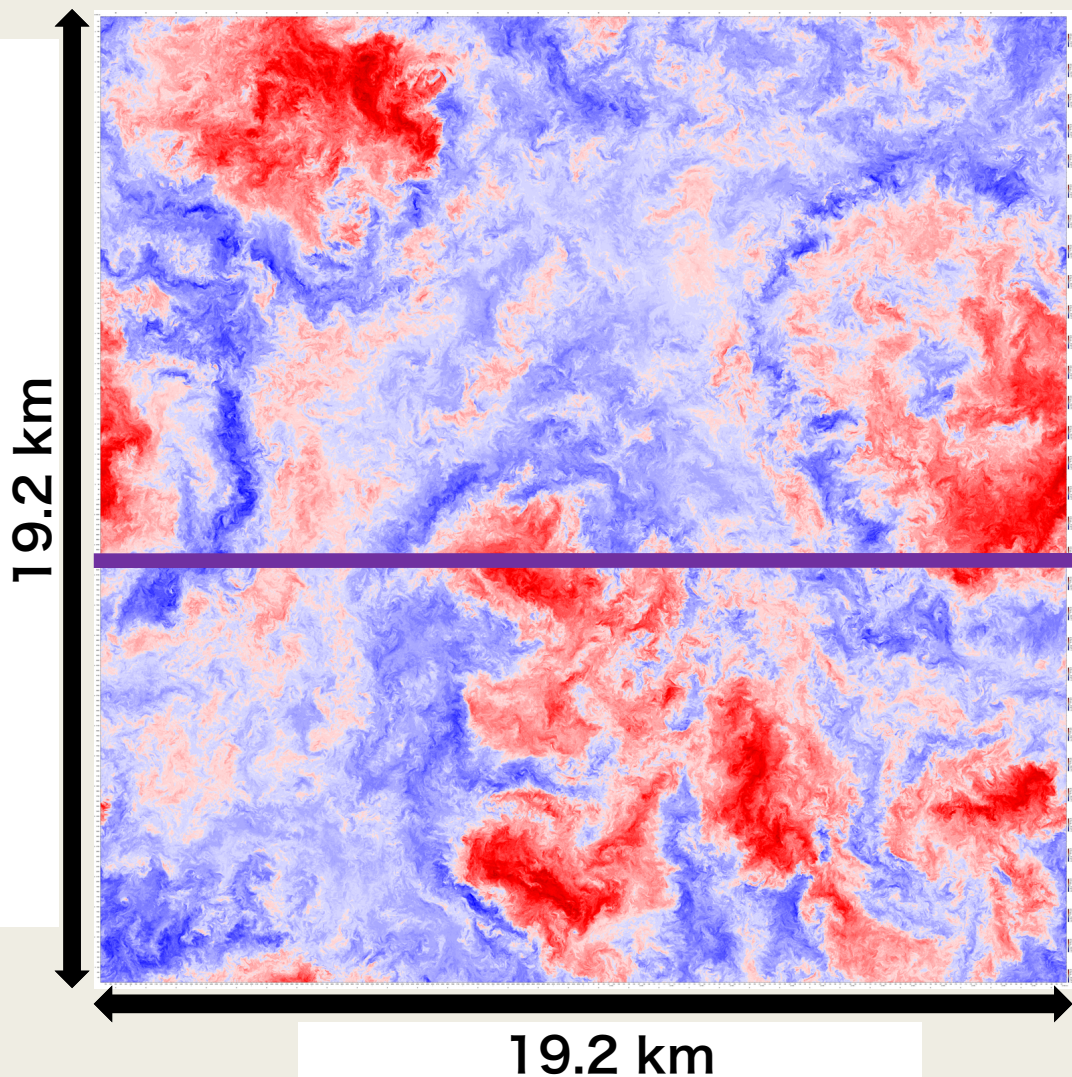


温位



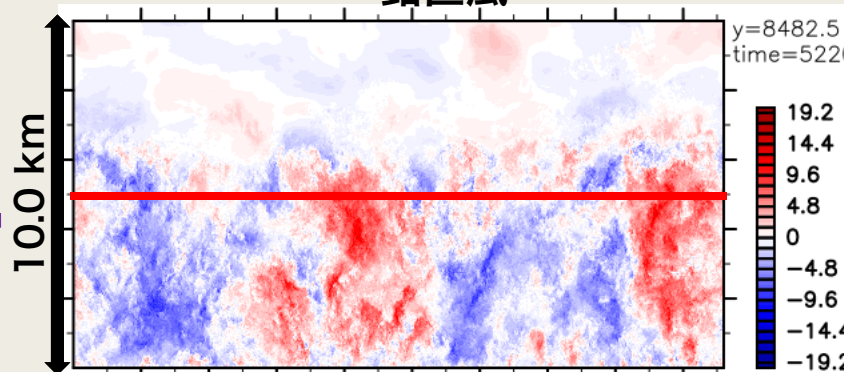
流れ場空間分布概観 (z = 4997.5)

鉛直風 [m/s] 水平分布

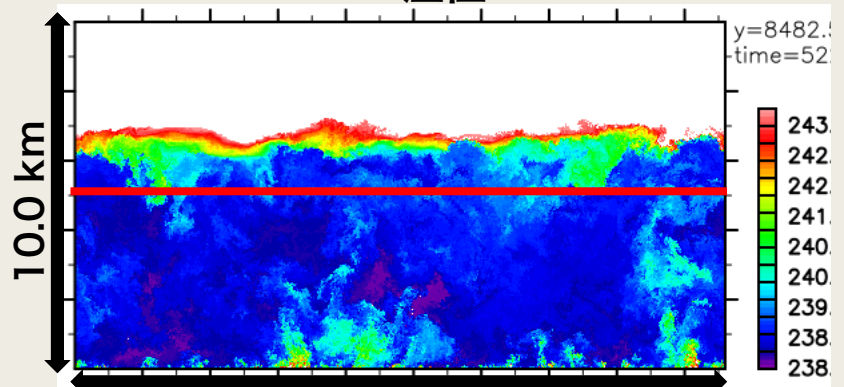


- 対流セルサイズ
 - 水平 : 数 km
 - 鉛直 : 6 km 程度

鉛直風



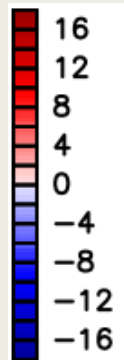
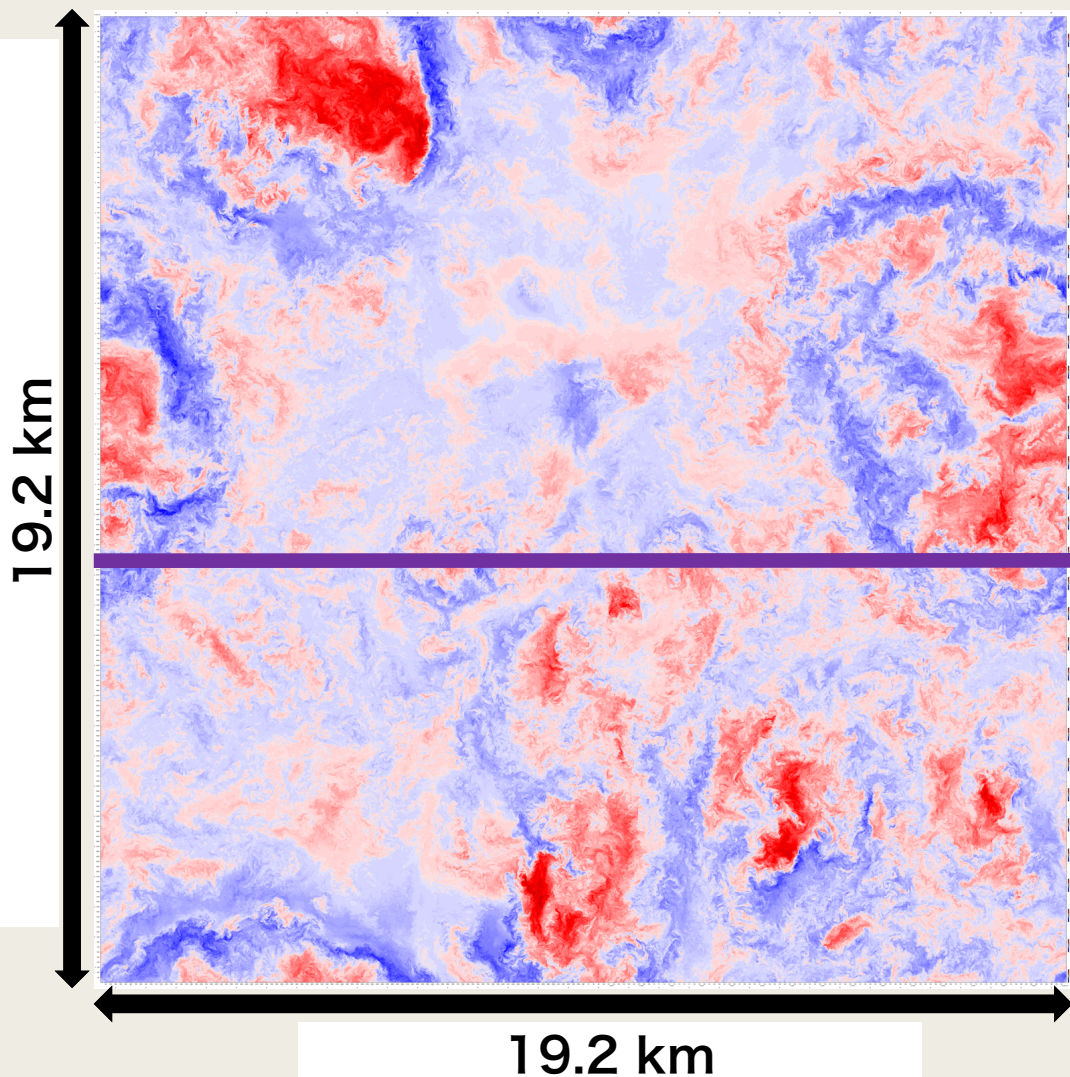
温位



19.2 km

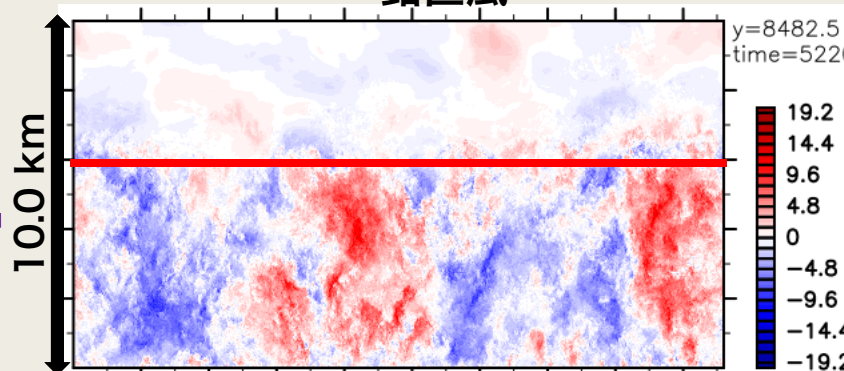
流れ場空間分布概観 (z = 5997.5)

鉛直風 [m/s] 水平分布

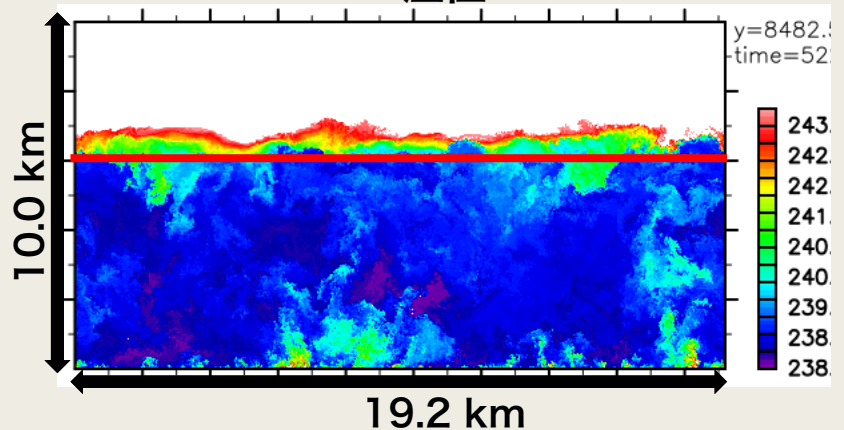


- 対流セルサイズ
 - 水平 : 数 km
 - 鉛直 : 6 km 程度

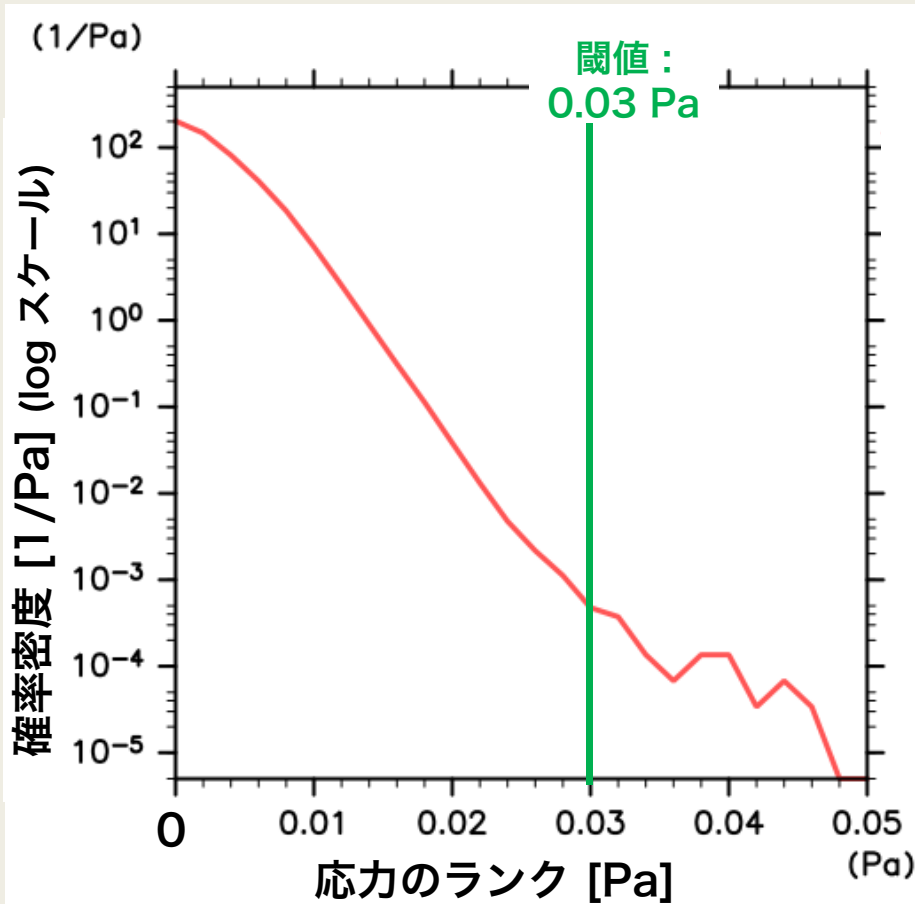
鉛直風



温位



解析結果：地表面応力確率密度分布



確率密度 $\frac{dn}{Ndr}$

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)

■ ダスト巻き上げの閾値を超える点がある

- 閾値 : 0.03 Pa
(Greeley and Iversen, 1985)

■ 地表面フラックス (Louis, 1979)

応力 : $\rho u_*^2 = \rho a^2 u^2 F$

大気安定時

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

大気不安定時

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

バルクリチャードソン数

$$Ri_B = \frac{gz(\theta - \theta_s)}{\theta u^2}$$

g 重力加速度

θ 温位

θ_s 地表温位

u 風速

z 高度

ρ 密度

$$c = C^* a^2 b \sqrt{\frac{z}{z_0}}$$

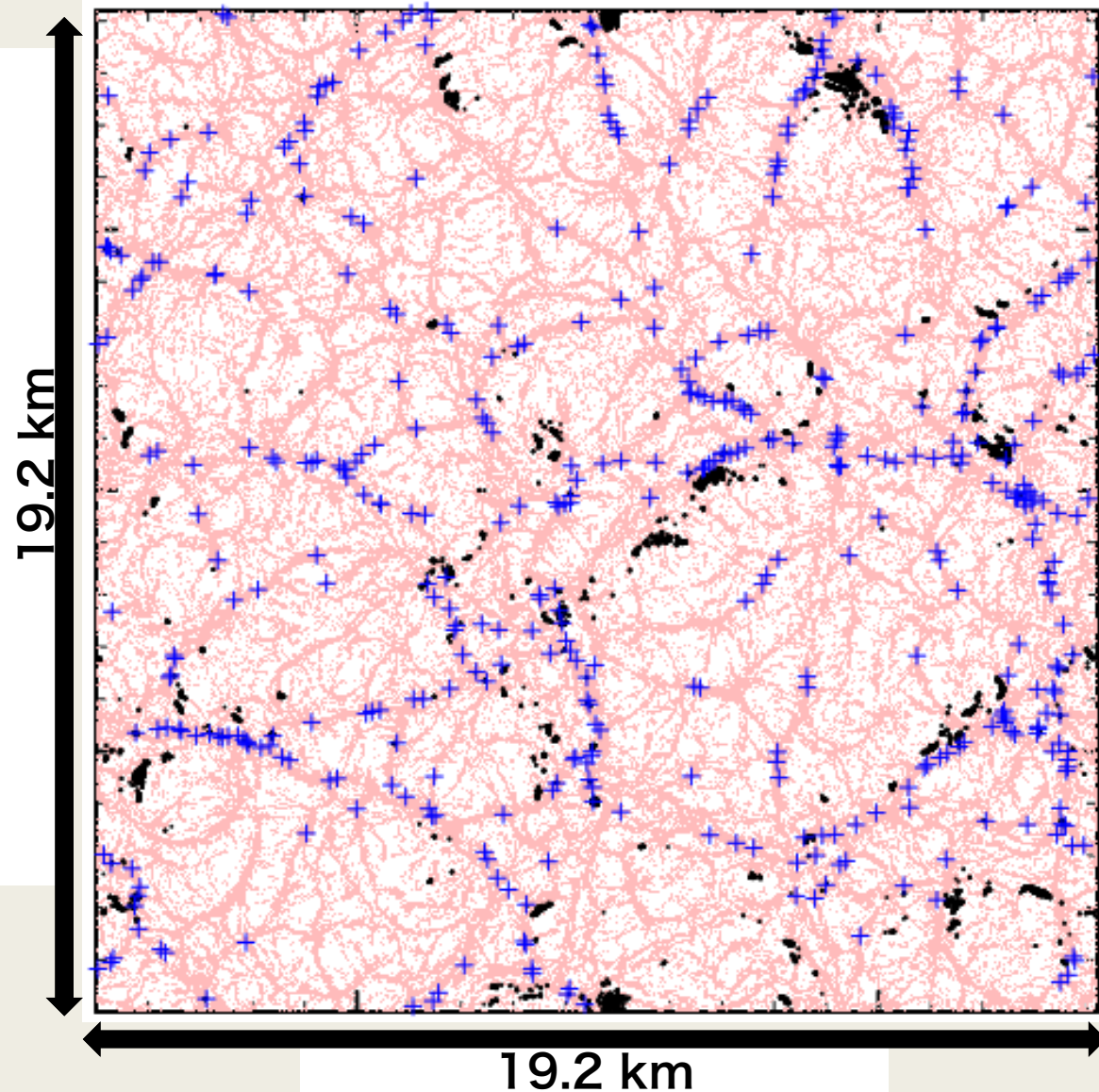
$$a^2 = \frac{k^2}{\{\ln(z/z_0)\}^2}$$

$C^* = 7.4$ $b = 2b' = 9.4$

$k = 0.4$ $z_0 = 1 \times 10^{-2}$

地表面応力と渦の空間分布 (高度 52.5 m)

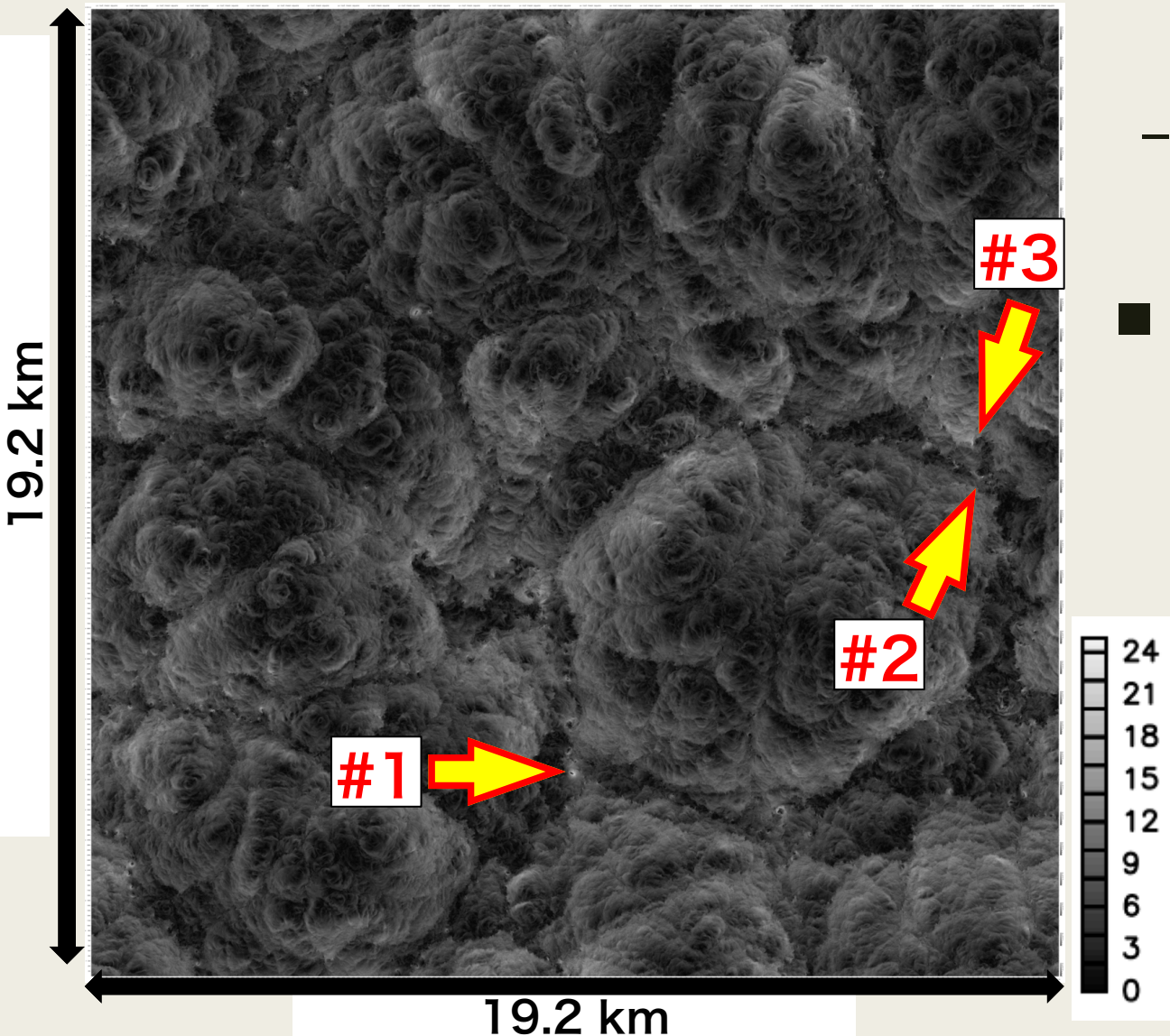
応力 > 0.015 Pa (黒), 渦 (青), 上昇流 (赤)



- 応力の大きい箇所の分布は局在
- 渦の分布と一致する場所もある
 - 渦は 453 点
 - Nishizawa et al. (2016) が用いた渦判定法を使用
 - 渦度の強度偏差が 5σ 以上である場所 (絶対値 約 0.48 s^{-1} 以上)

地表面応力が強い場所

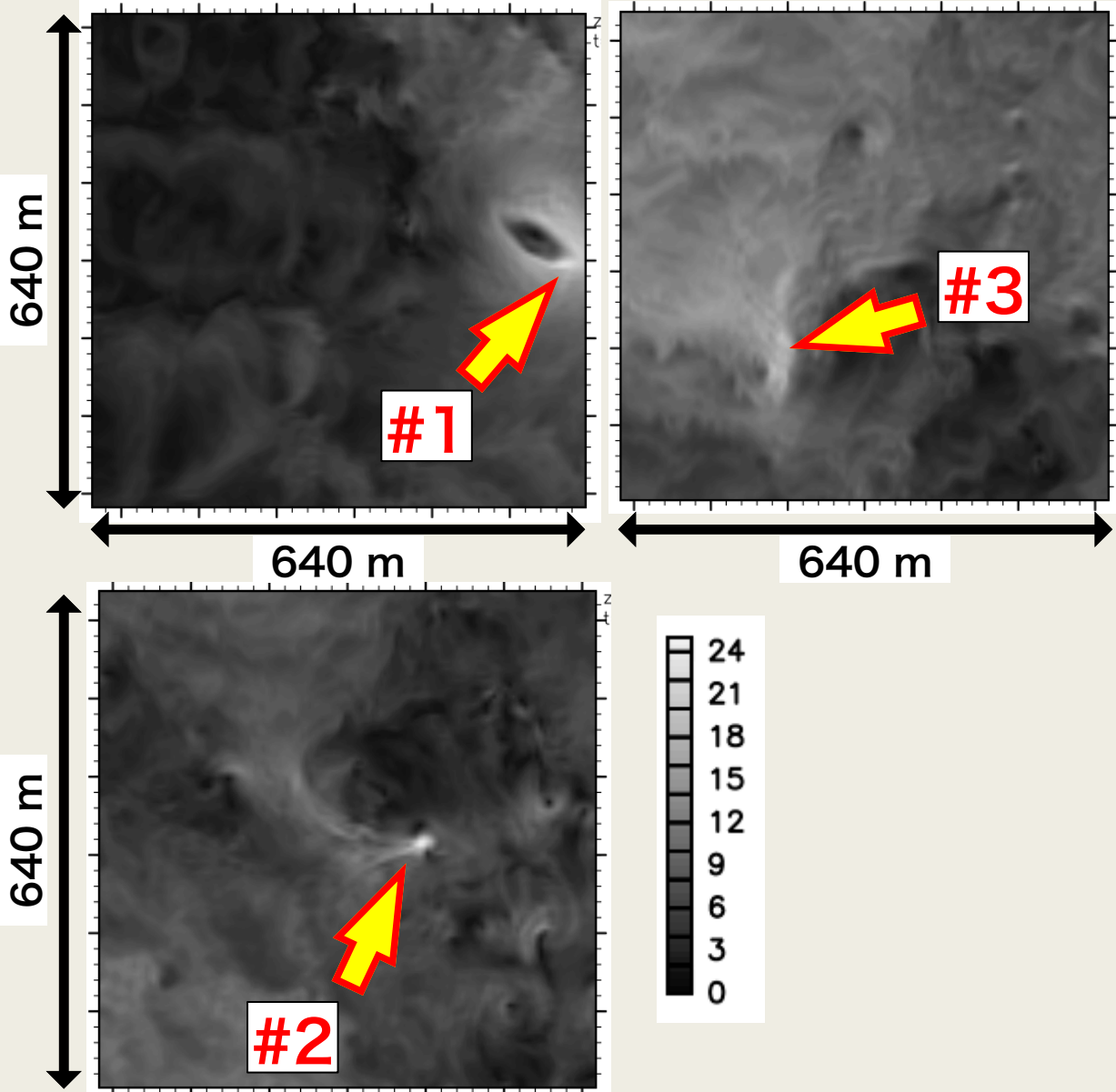
水平風絶対値 [m/s] 空間分布 (z = 2.5 m)



- 水平風の収束域付近に対応
 - ネットワーク状の上昇流領域
- 応力が 0.03 Pa を超える場所は 3箇所 (矢印部分)
 - #1 : 34 格子点
 - #2 : 6 格子点
 - #3 : 3 格子点

地表面応力が強い場所：拡大図

水平風絶対値 [m/s] 空間分布 ($z = 2.5$ m)

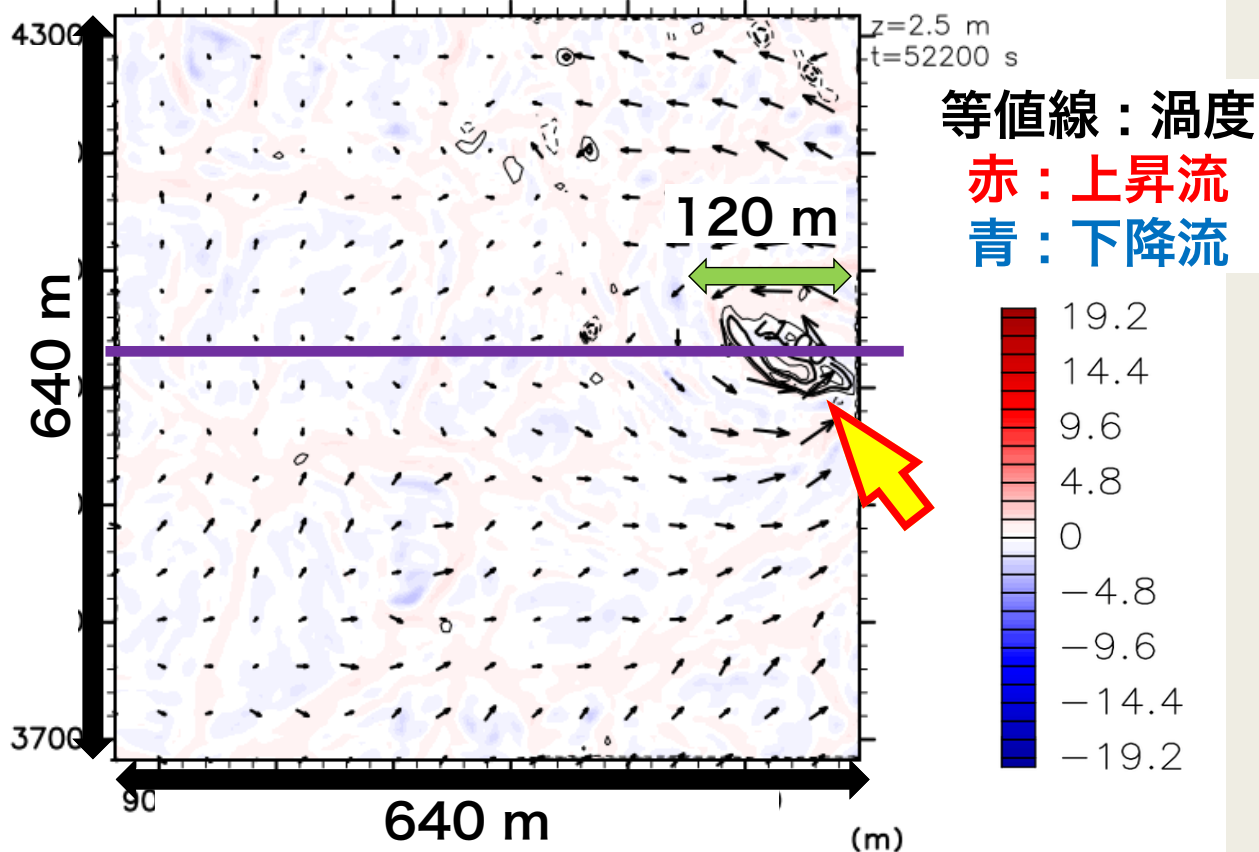


- 水平風の収束域付近に対応
 - ネットワーク状の上昇流領域
- 応力が 0.03 Pa を超える場所は 3箇所 (矢印部分)
 - #1 : 34 格子点
 - #2 : 6 格子点
 - #3 : 3 格子点

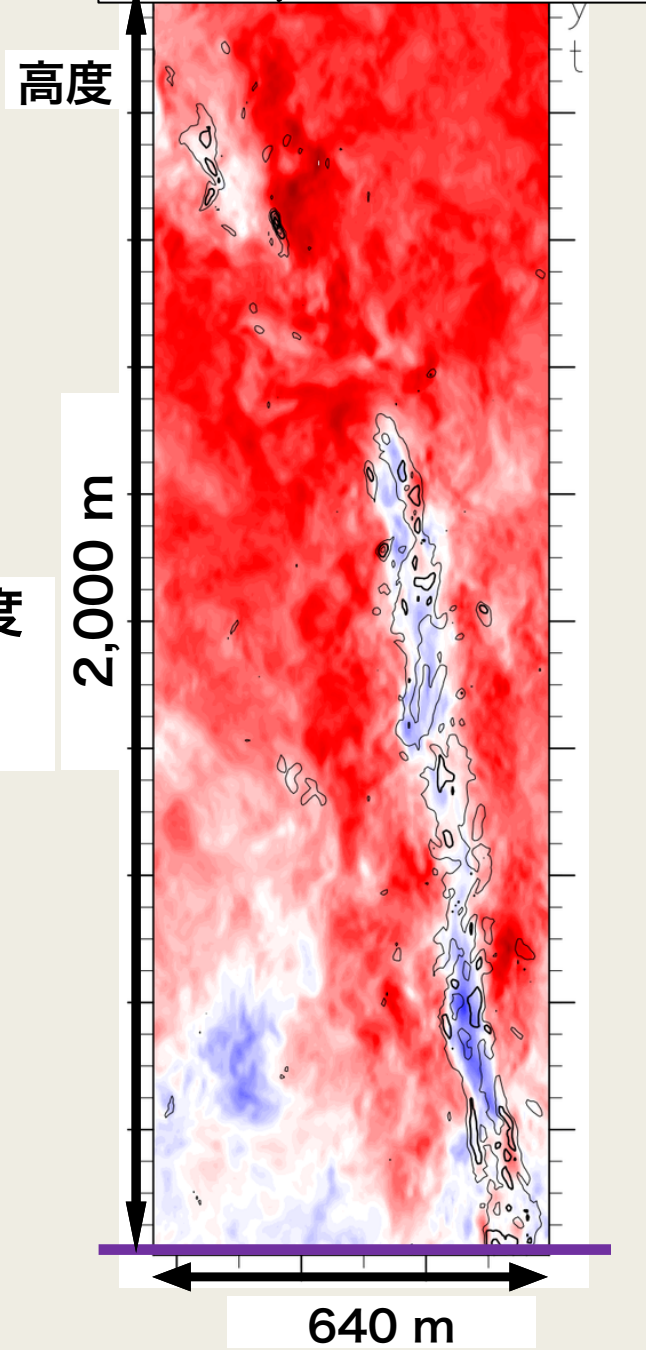
応力が強い箇所の流れ場

- 孤立渦があるように見える
 - 半径 60 m 程度, 高さ 1,500 m 程度

鉛直風, 水平風, 渦度 水平断面 ($z = 2.5 \text{ m}$)



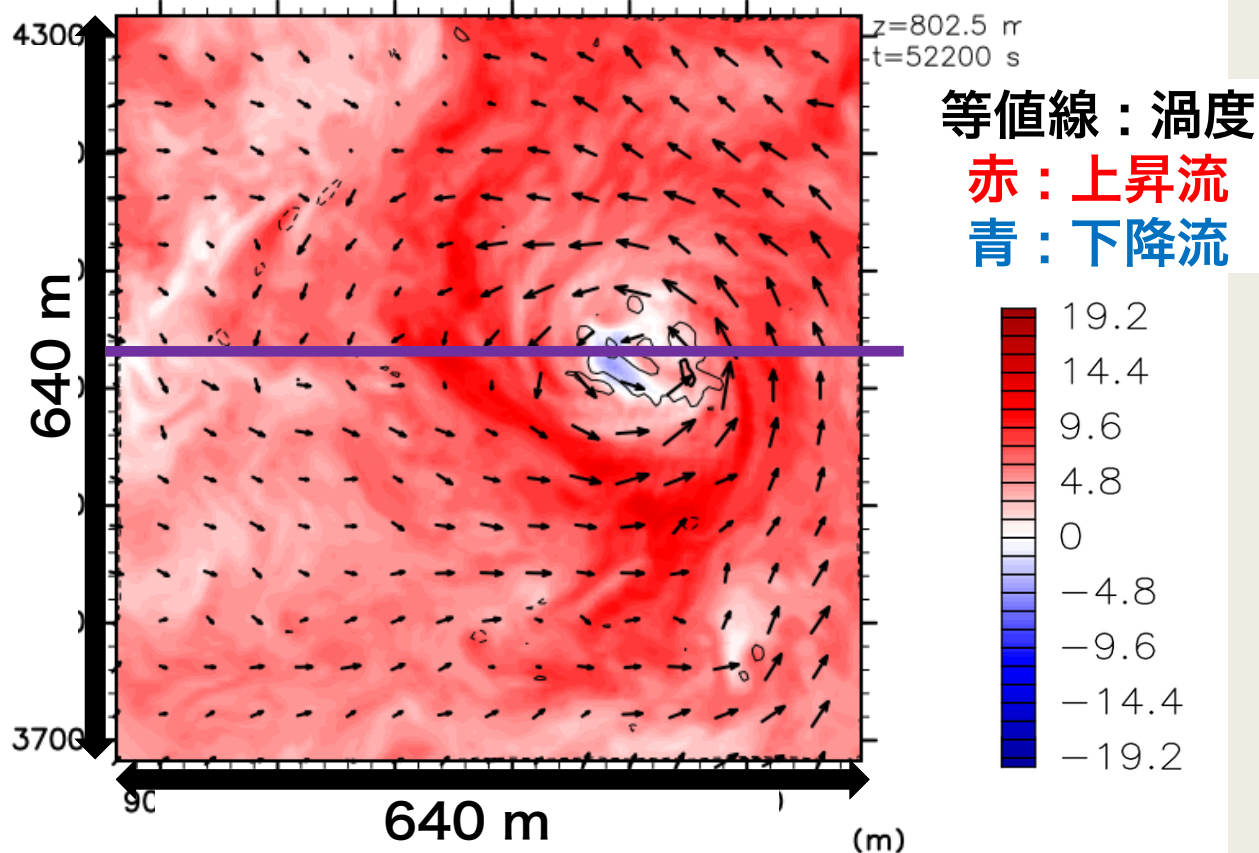
鉛直風, 渦度 鉛直断面



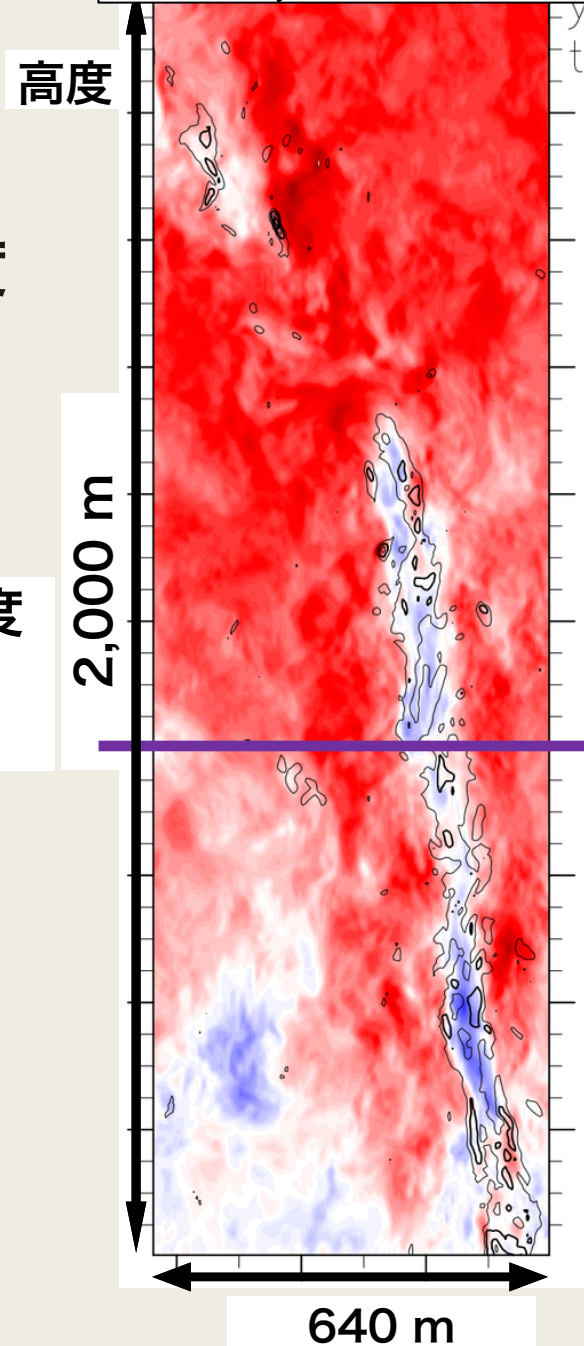
応力が強い箇所の流れ場

- 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 ($z = 802.5 \text{ m}$)



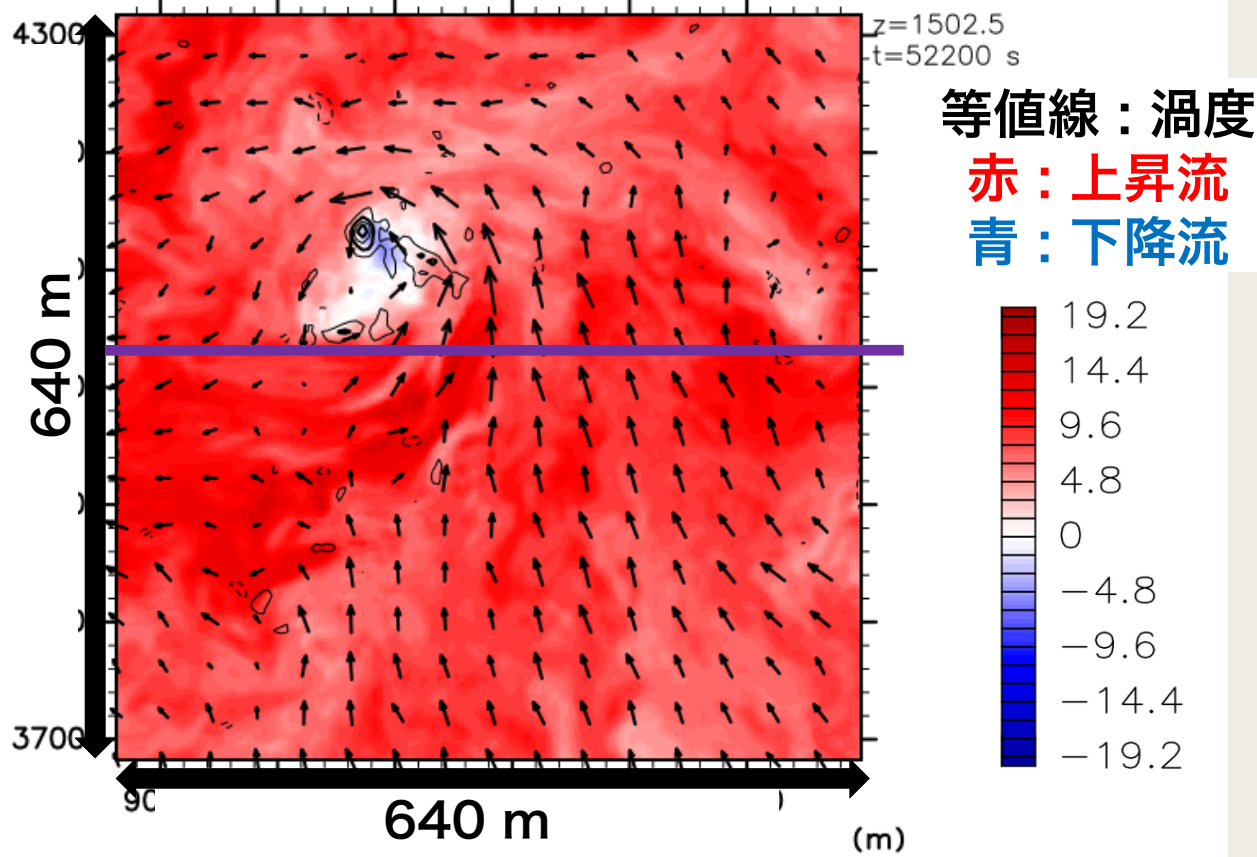
鉛直風, 渦度 鉛直断面



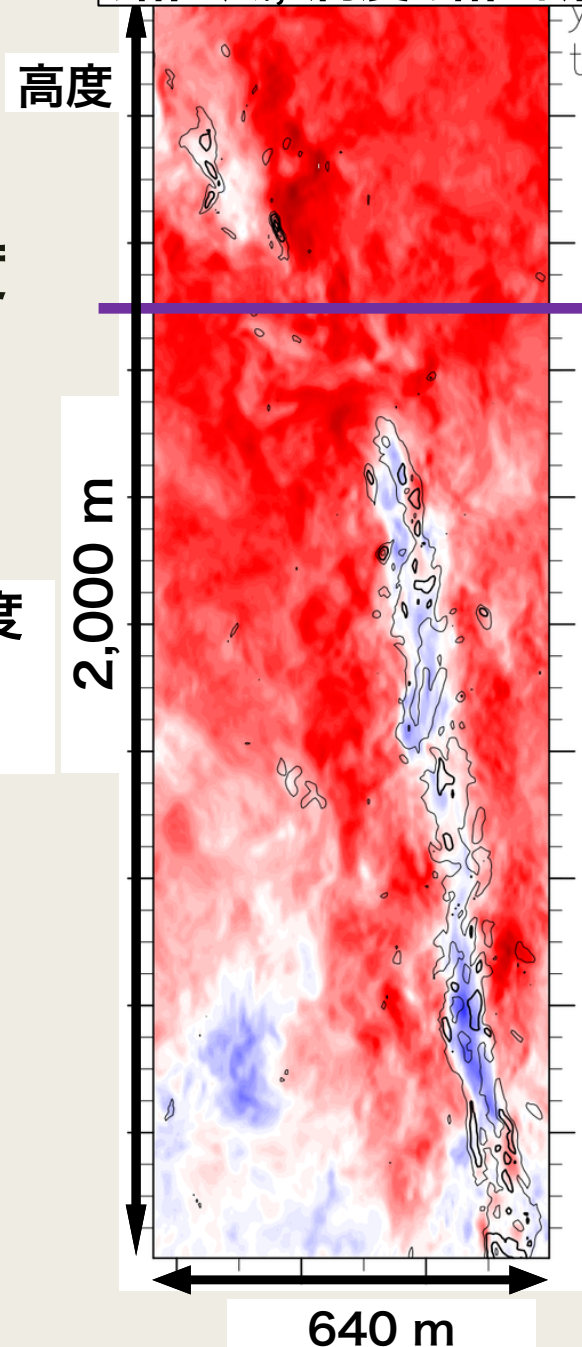
応力が強い箇所の流れ場

- 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 ($z = 1502.5$ m)



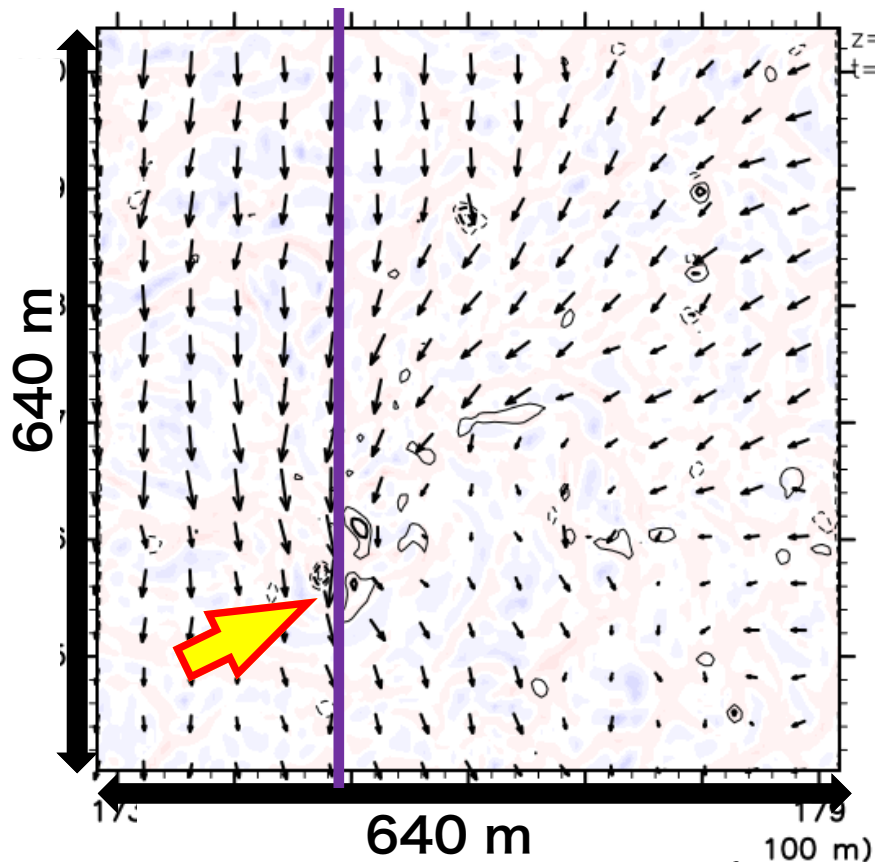
鉛直風, 渦度 鉛直断面



地表面応力が強い箇所 #3

- 明確な渦構造はみられない

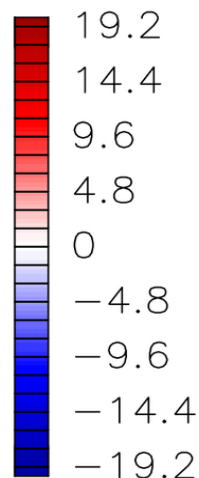
鉛直風, 水平風, 渦度 水平断面 ($z = 2.5 \text{ m}$)



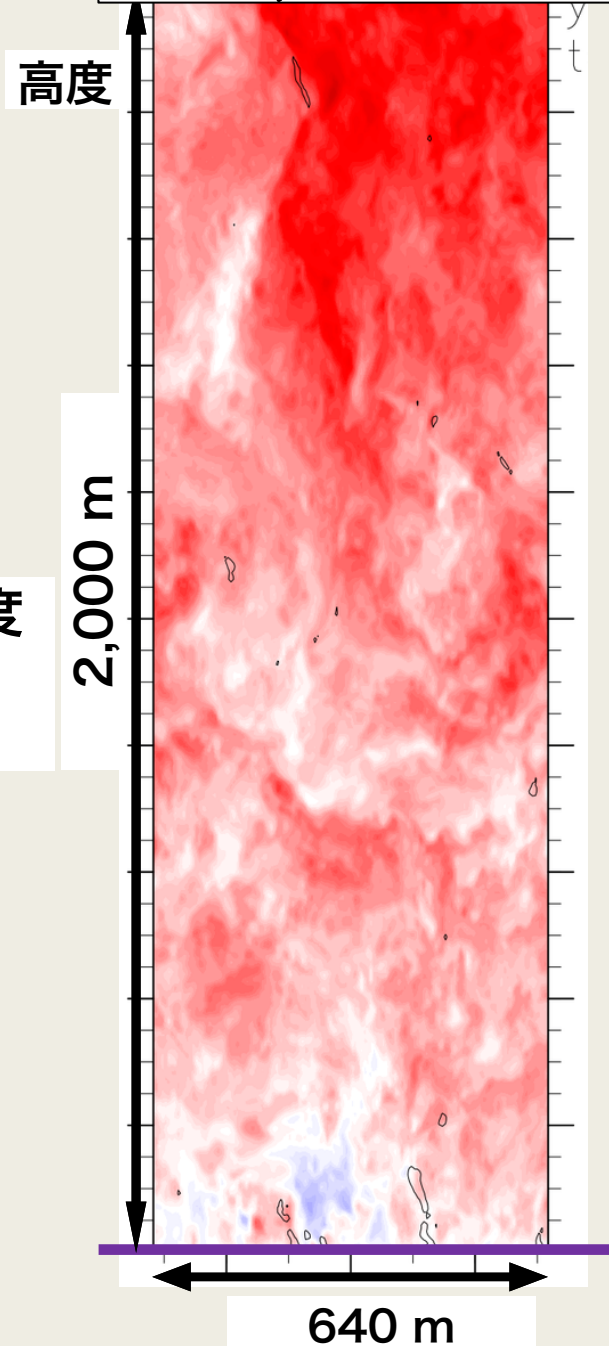
等値線：渦度

赤：上昇流

青：下降流



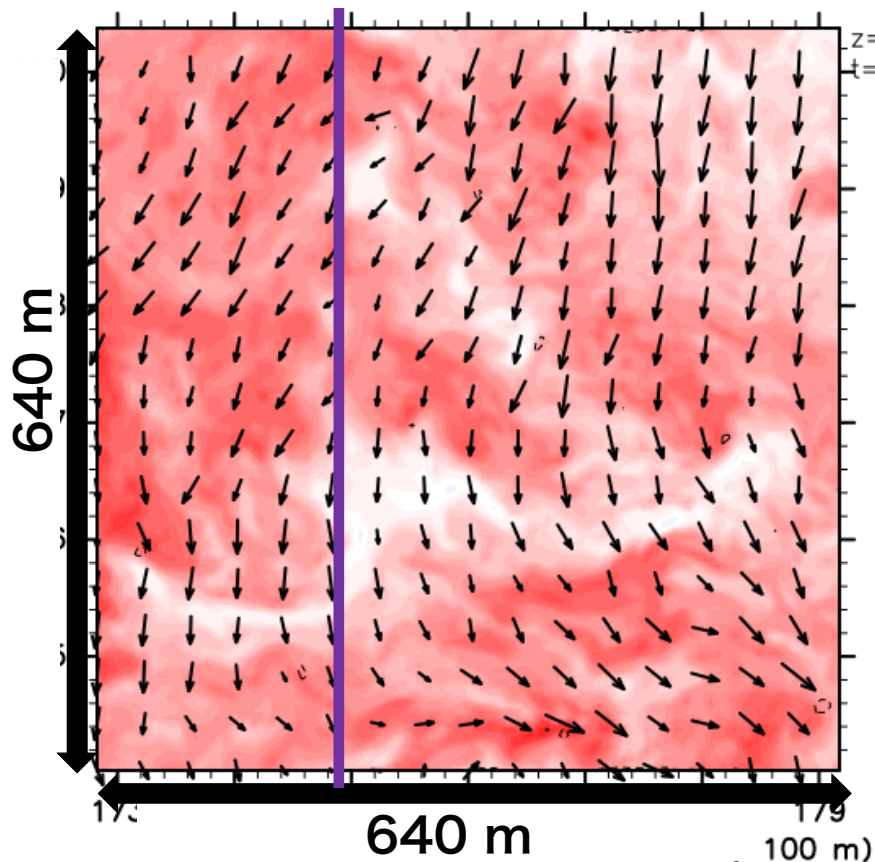
鉛直風, 渦度 鉛直断面



地表面応力が強い箇所 #3

- 明確な渦構造はみられない

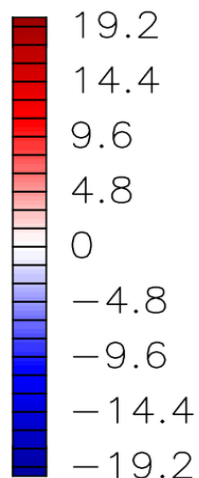
鉛直風, 水平風, 渦度 水平断面 ($z = 802.5 \text{ m}$)



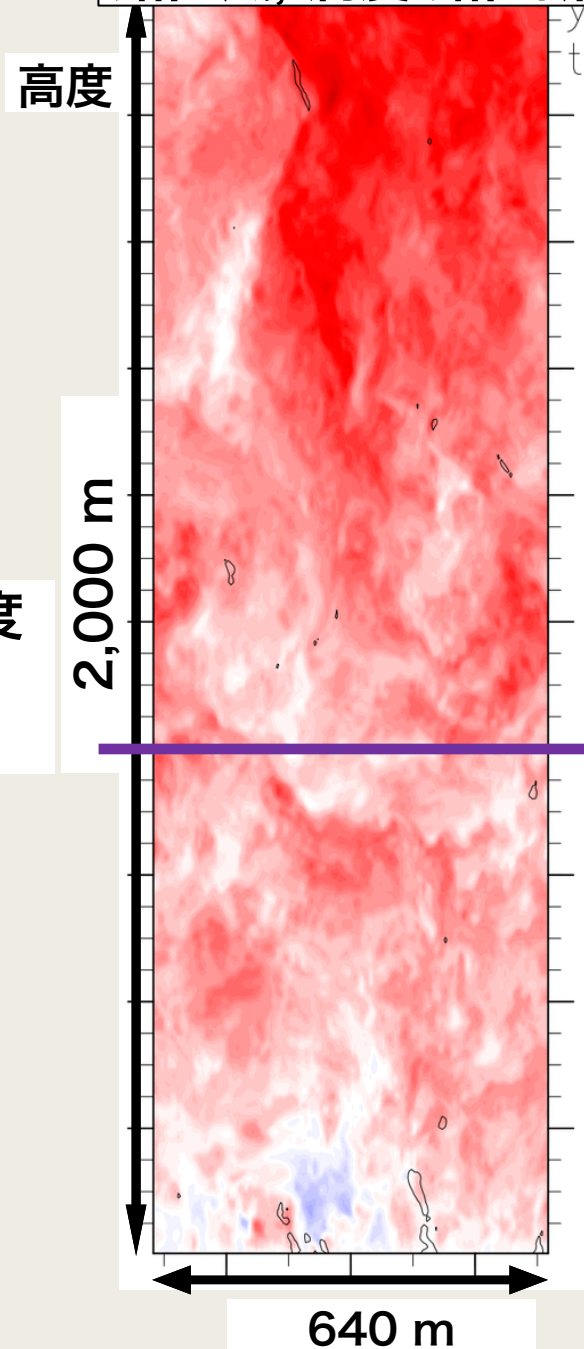
等値線 : 渦度

赤 : 上昇流

青 : 下降流



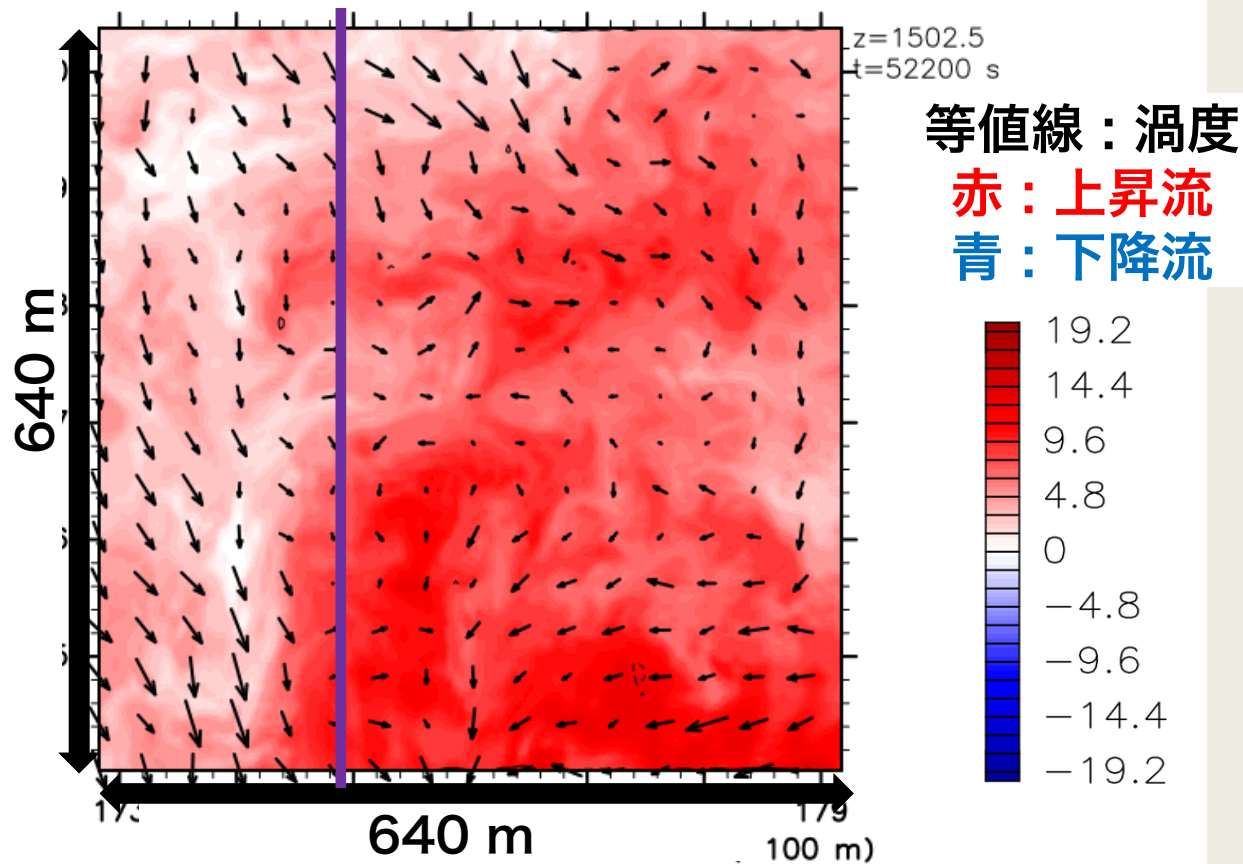
鉛直風, 渦度 鉛直断面



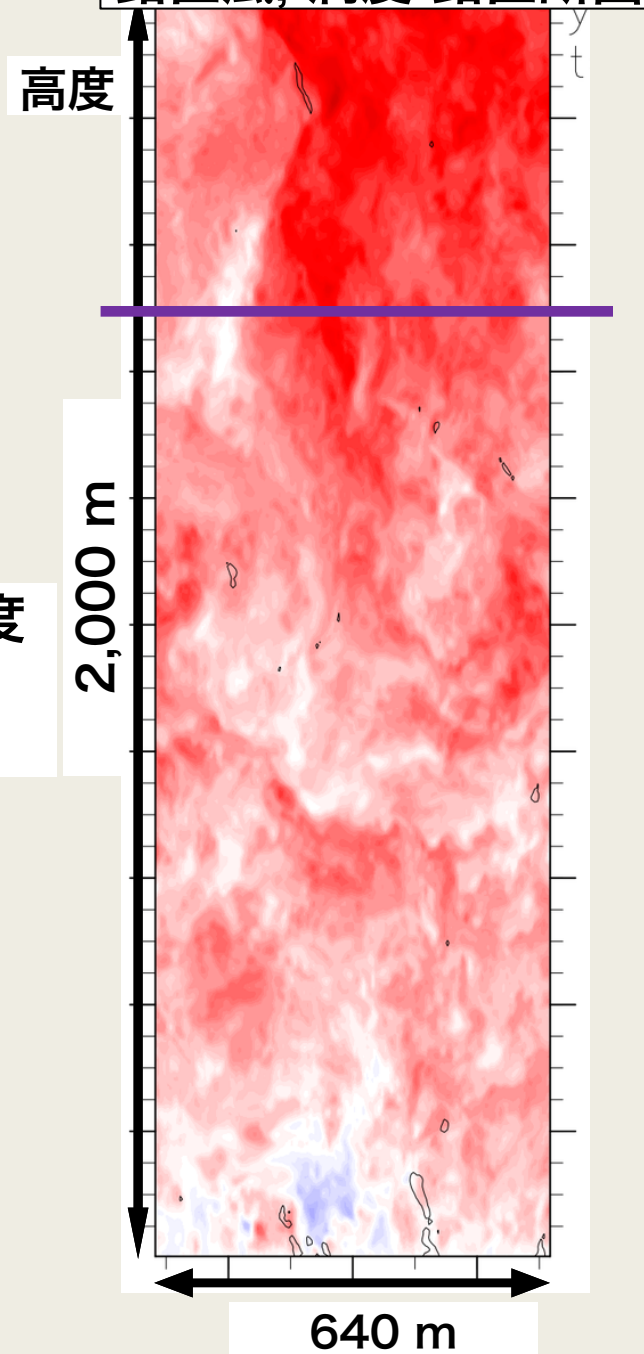
地表面応力が強い箇所 #3

- 明確な渦構造はみられない

鉛直風, 水平風, 渦度 水平断面 ($z = 1502.5$ m)



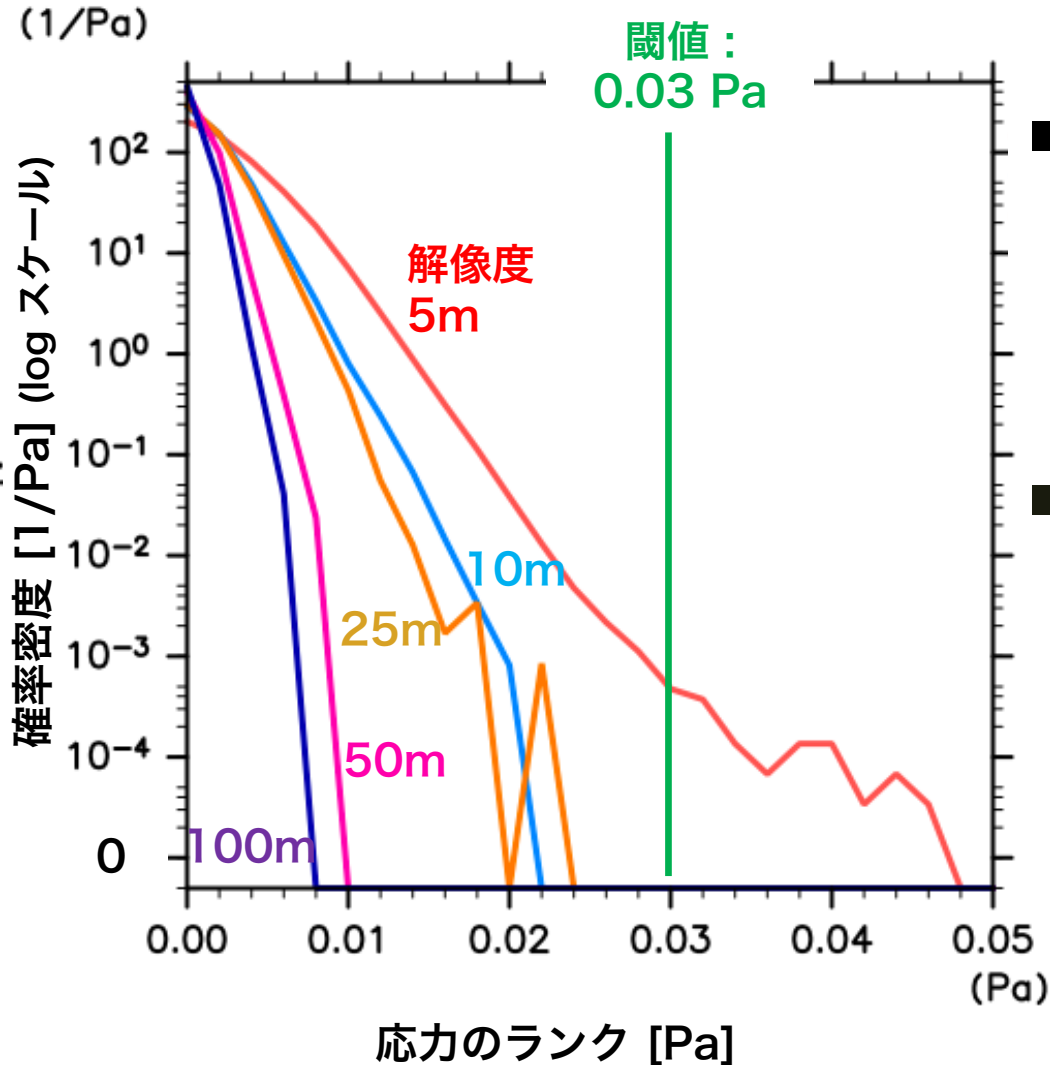
鉛直風, 渦度 鉛直断面



計算解像度別比較

解析結果：地表面応力確率密度分布

応力確率密度分布



■ 他の解像度では閾値を超えない

■ ダスト巻き上げの閾値
0.03 Pa
(Greeley and Iversen, 1985)

■ 解像度 5 m と 10 m
では概形が大きく異なる

$$\text{確率密度} \frac{dn}{N dr}$$

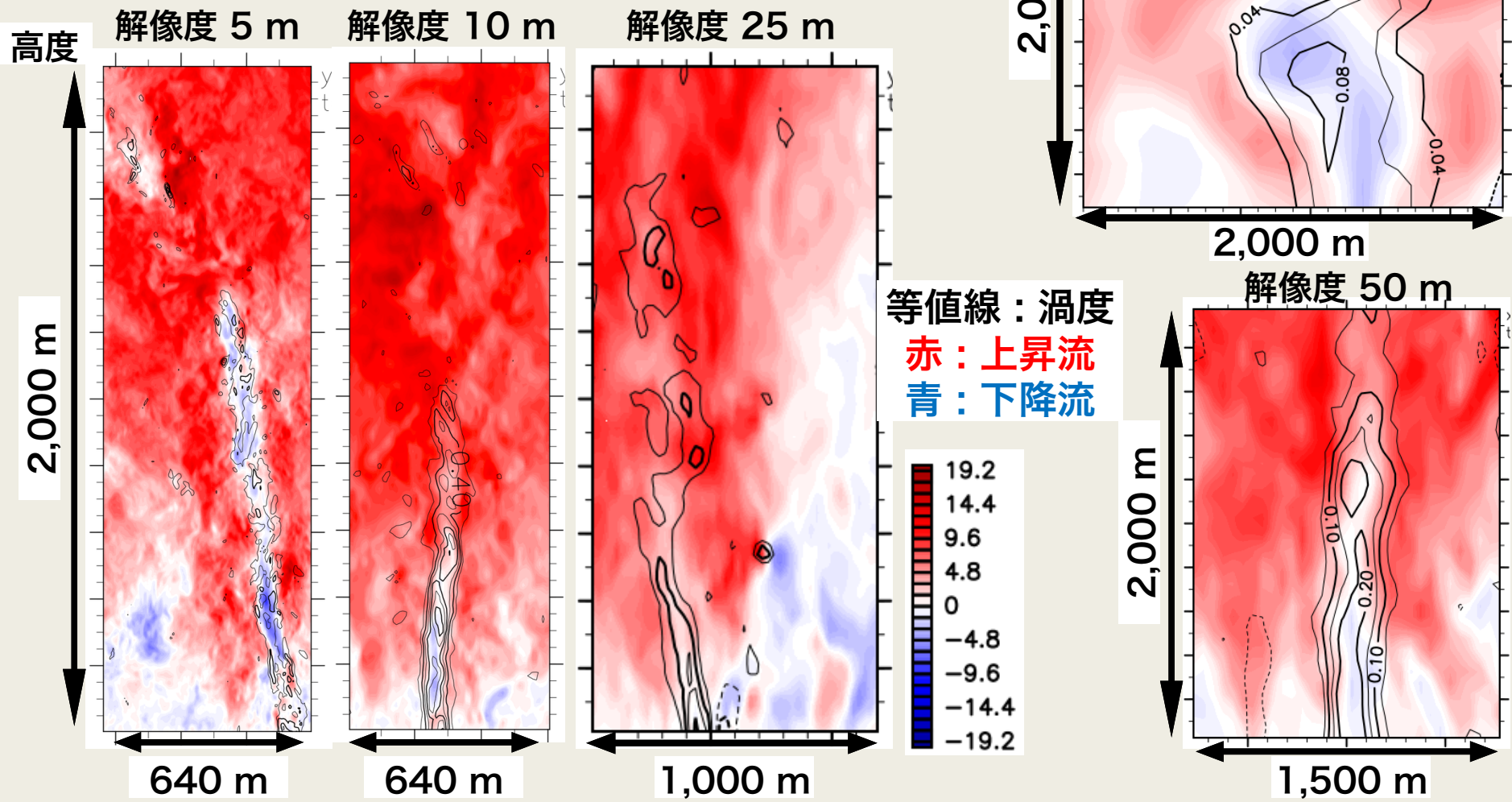
dn : ビンに含まれる格子点数

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



地表面応力が強い場所の流れ場 (解像度別)

■ 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 m : 5/10
- dx = 10 m : 5/10
- dx = 25 m : 3/10
- dx = 50 m, 100 m : 調査中

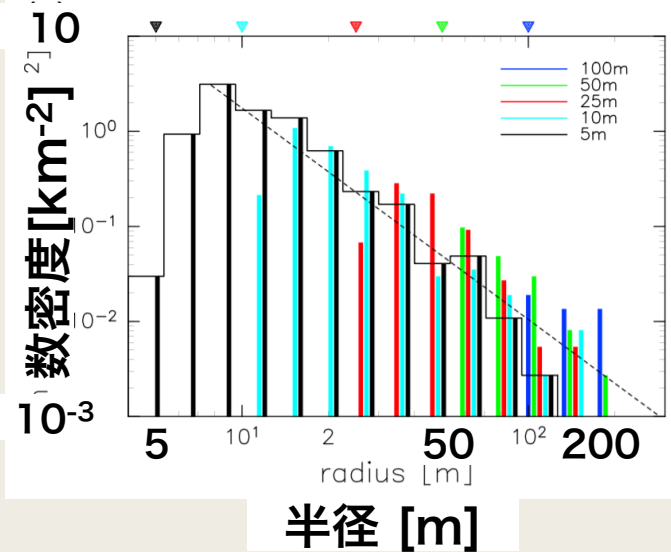
■ 渦を伴っているかどうかはおおよそ半々

- 一番強い場所には渦が伴っている

■ 応力が一番強い場所における渦の半径

- dx = 5 m, 10 m, 25 m : r = 50 m
- dx = 50 m : r = 150 m
- dx = 100 m : r = 200 m

渦半径の頻度分布



Nishizawa et al. (2016)

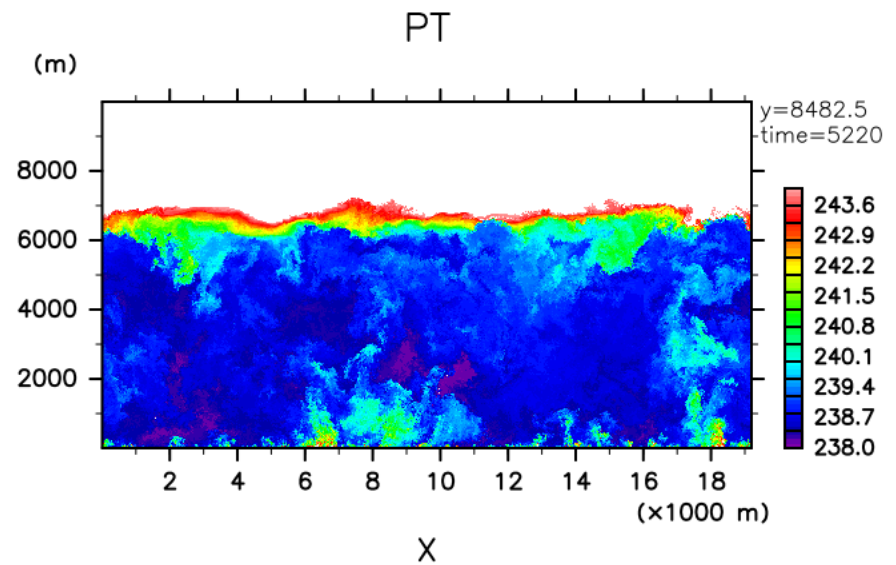
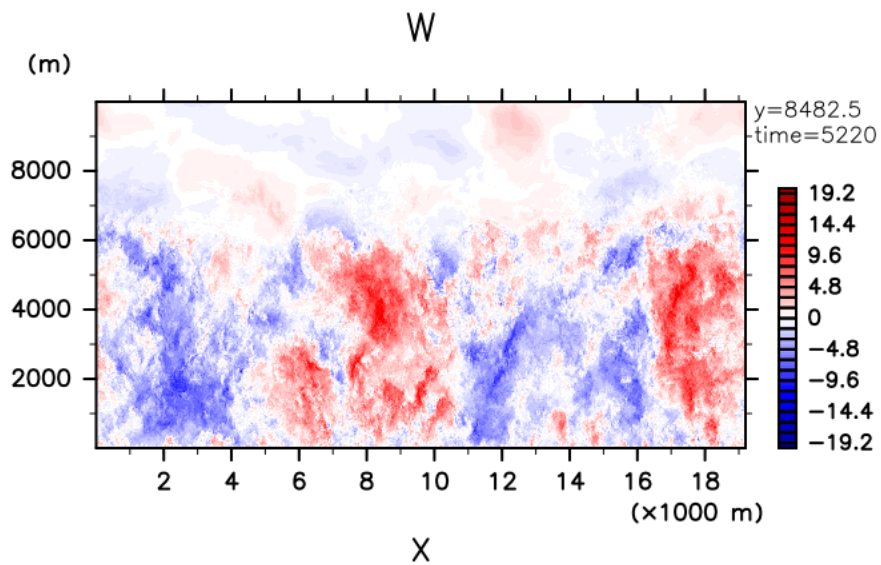
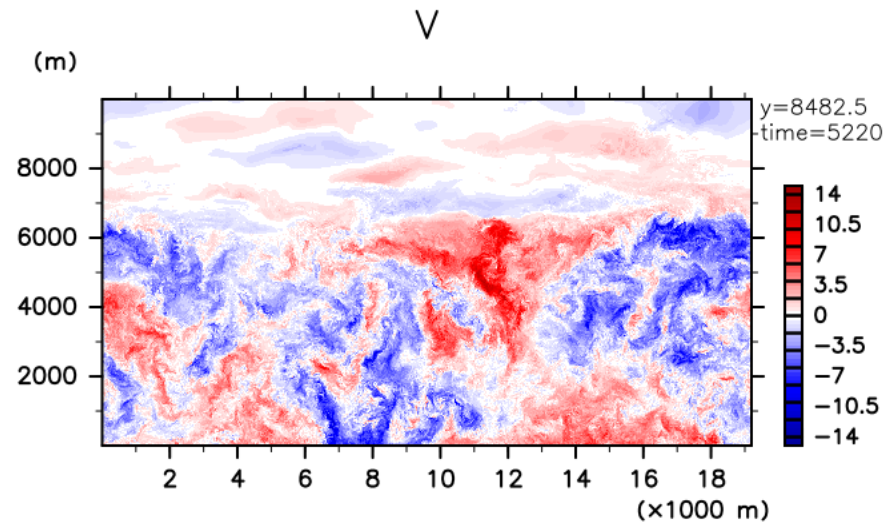
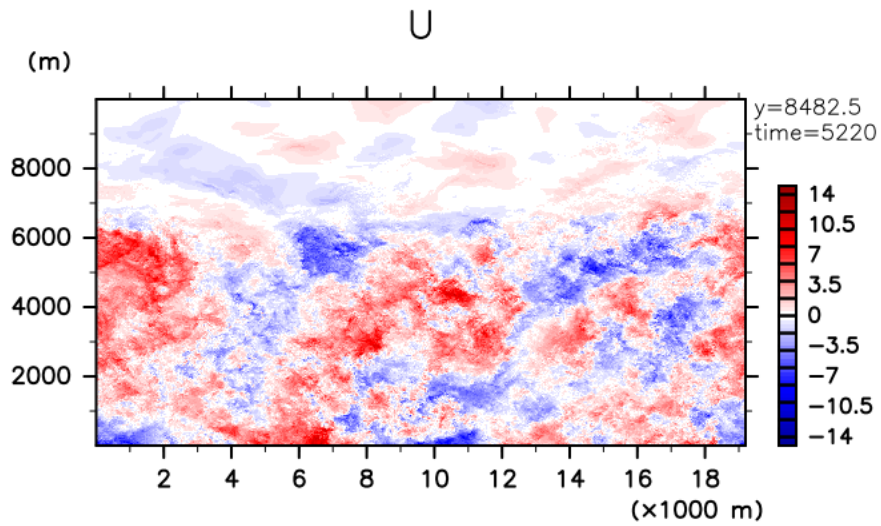
まとめ

- 火星境界層高解像度 LES 実験で得られたデータを用いて流れ場と地表面応力について調べた
 - 直径数 km, 高さ 6 km 程度の対流セルが見られた
 - ダストの巻き上げの閾値を超える点があった
- 地表面応力が強い場所における流れ場を調べた
 - 応力分布と渦の存在分布には対応している場所があった
 - 一部では明確な渦を伴わない場所もある
 - 瞬間値の解析しか行っていないため
渦の発達前後である可能性がある
 - 応力が強い上位 10 箇所で渦構造を伴うのは半分程度
- α_D がどのように決まるか検討したい
 - 細かい解像度の結果を粗視化して比較

参考文献

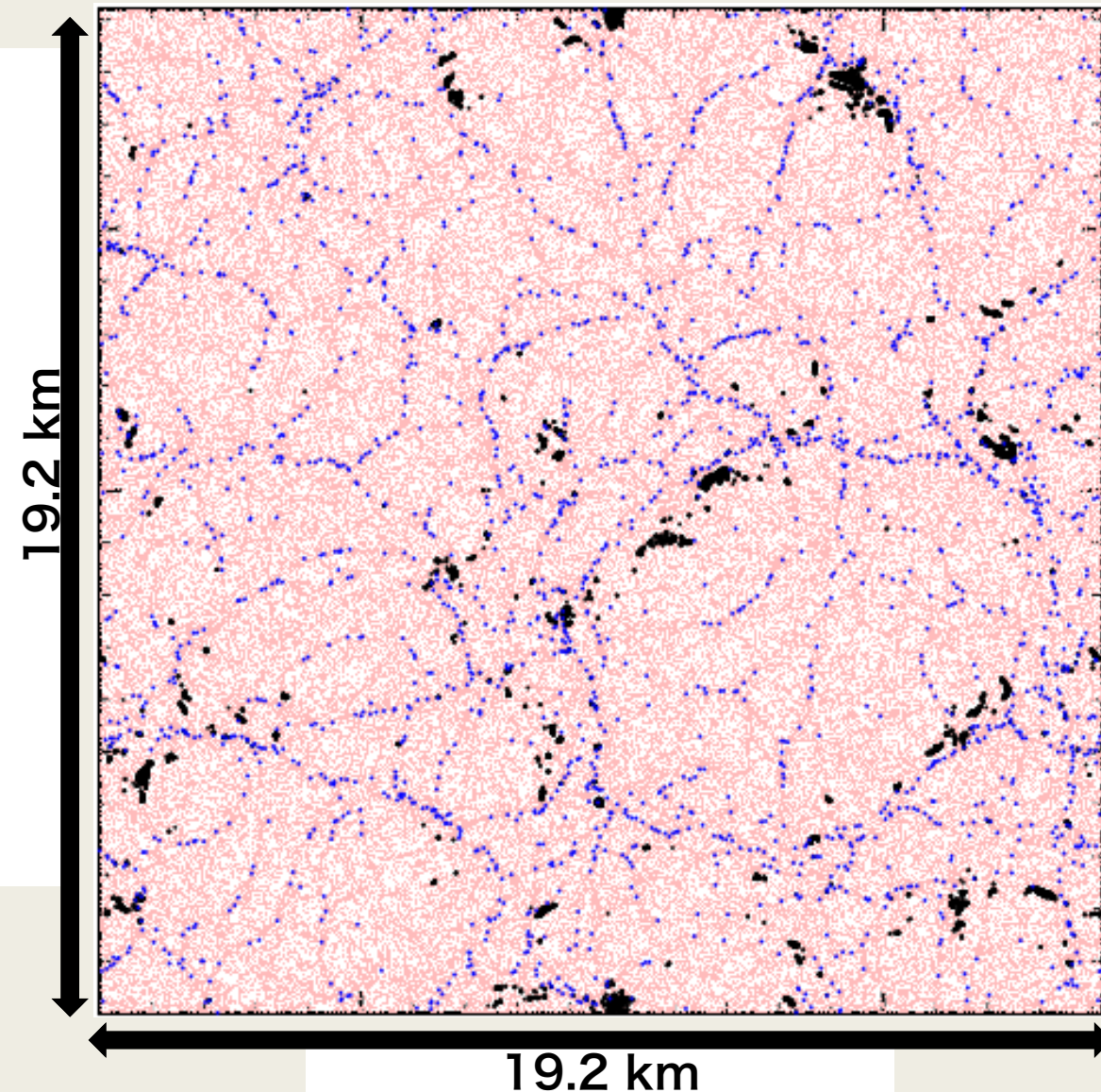
- Gierasch, P. J., and R. M. Goody, 1972: The effect of dust on the temperature of the Martian Atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 29, 400-402.
- Greeley, R., and J. D. Iversen, 1985: *Wind as a Geological Process on Earth, Mars, Venus, and Titan.*, Cambridge Univ. Press., 333 pp
- Louis, J.-F., 1979: A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere, *Boundary Layer Meteorol.*, 17, 187-202.
- Michaels, T.I., Rafkin, S.C.R., 2004: Large eddy simulation of atmospheric convection on Mars. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 130, 1251-1274
- Montabone, L., et al., 2005: Interannual variability of Martian dust storms in assimilation of several years of Mars global surveyor observations, *Adv. Space. Res.*, 36, 2146-2155
- Newman, C. E., et al., 2002: Modeling the Martian dust cycle 1. Representations of dust transport processes, *J.G.R.*, 107, 2156-2202
- Nishizawa, S., et al., 2016: Martian dust devil statistics from high-resolution large-eddy simulations, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 4180-4188
- Odaka M., et al., 2001: A numerical simulation of thermal convection in the Martian lower atmosphere with a two- dimensional anelastic model. *Nagare multimedia* 2001
- Petrosyan, A., et al., 2011: The Martian atmospheric boundary layer, *Rev. Geophys*, 49

流れ場鉛直断面



地表面応力と渦の空間分布 (高度 2.5 m)

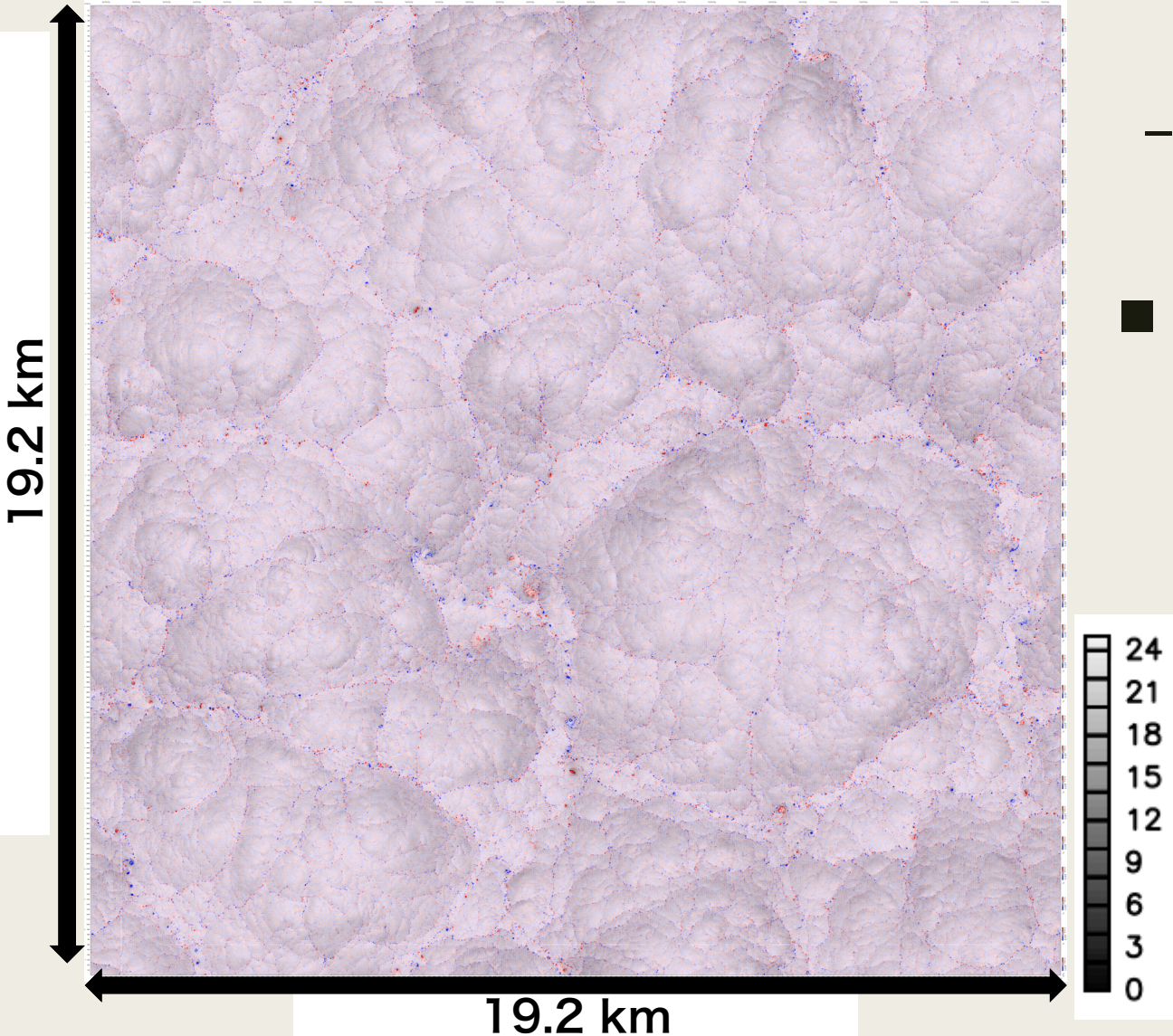
応力 > 0.015 Pa (黒), 渦 (青), 上昇流 (赤)



- 応力の大きい箇所の分布は局在
- 渦の分布と一致する場所もある
 - 渦は 2,173 点
 - Nishizawa et al. (2016) が用いた渦判定法を使用
 - 渦度の強度偏差が 5σ 以上である場所 (絶対値 約 0.48 s^{-1} 以上)

流れ場空間分布 (渦度)

渦度 [1/s] 空間分布 ($z = 2.5$ m)



■ 水平風の収束域
付近に対応

- ネットワーク状
の上昇流領域

■ 応力が 0.03 Pa
を超える場所は
3箇所
(矢印部分)

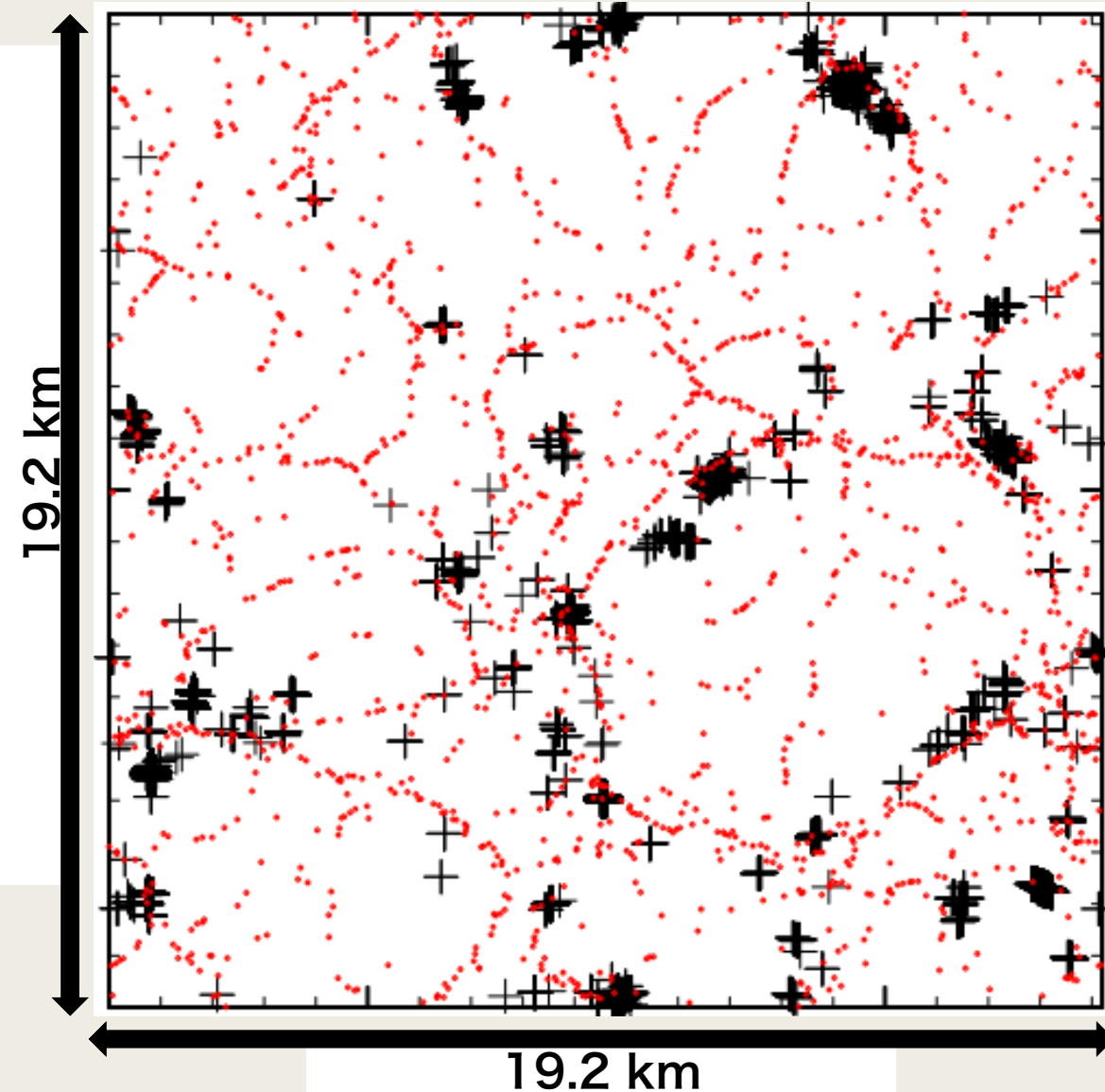
#1 : 34 格子点

#2 : 6 格子点

#3 : 3 格子点

地表面応力と渦の空間分布 (高度 2.5 m)

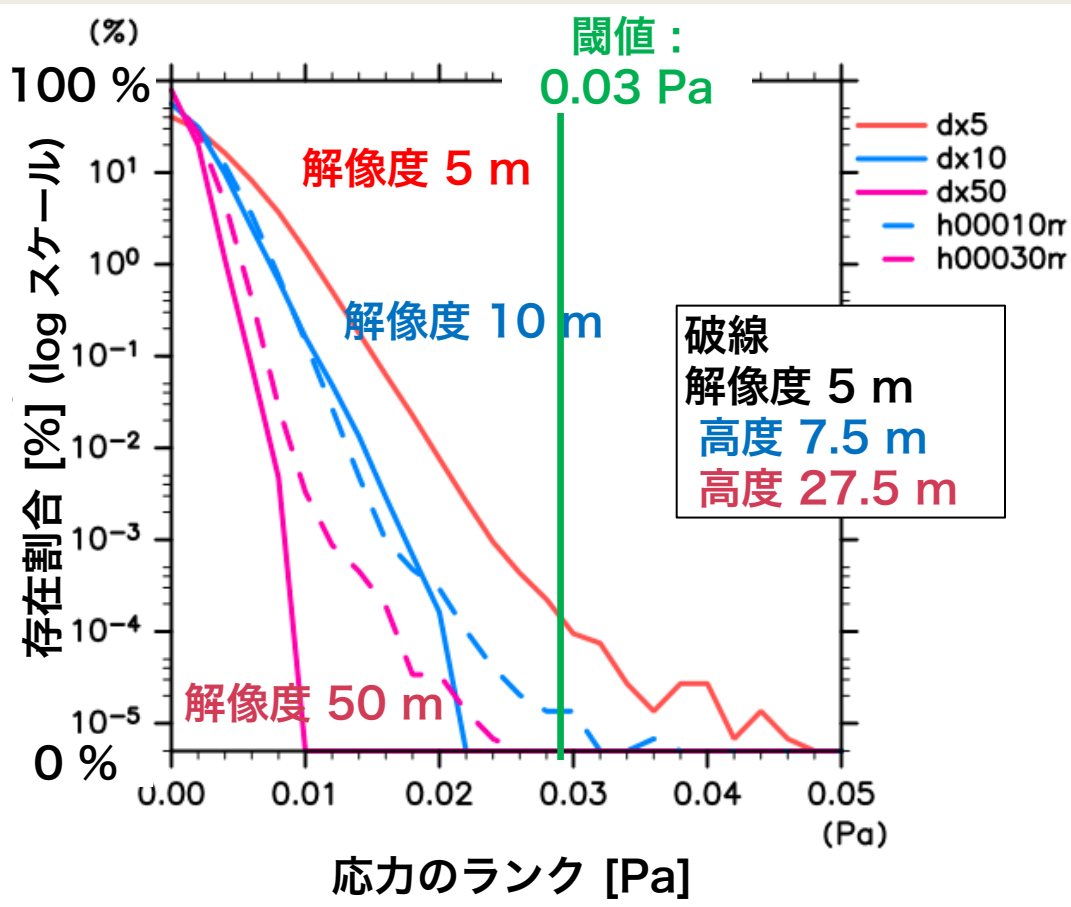
応力 > 0.017 Pa (+ 印), 渦 (赤点)



- 応力の大きい箇所の分布は局在
- 渦の分布と概ね対応
 - 渦は 1,673 点
 - 渦度の強度分布中, 5σ 以上の場所 (絶対値 約 0.48 s^{-1} 以上)

解析結果

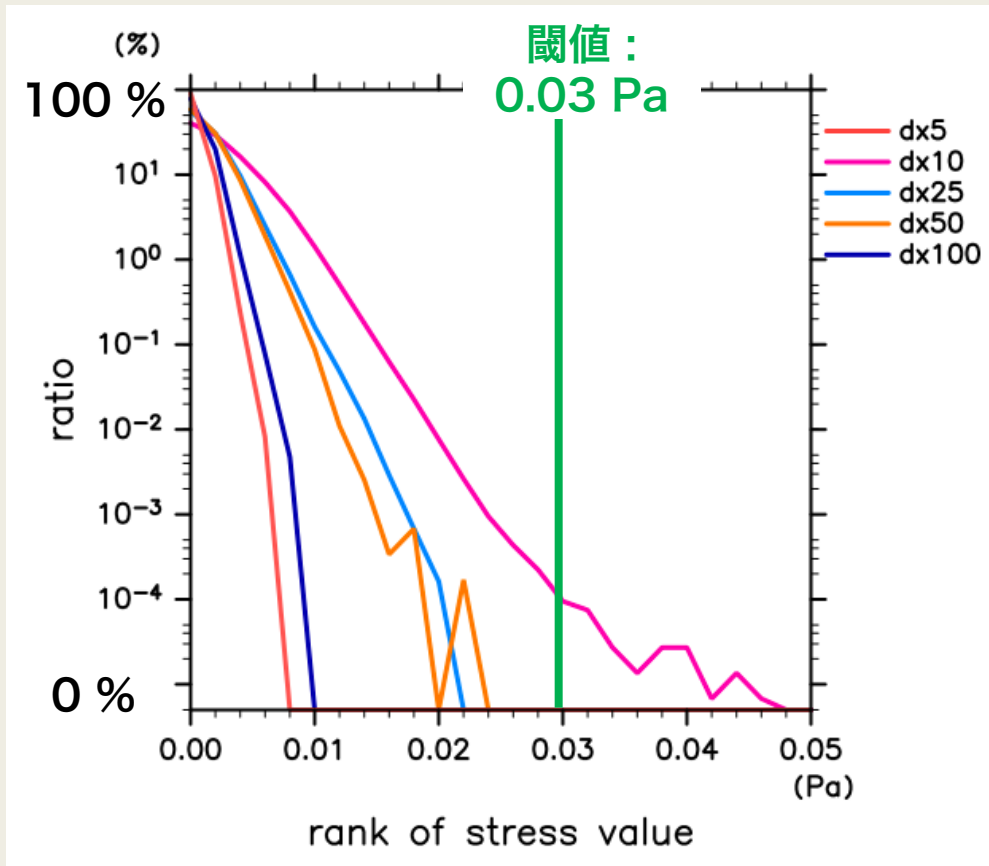
■ 地表面応力頻度分布：解像度別，高度別重ね書き



- 解像度のモデル最下層及び、5 m 解像度における各高度のデータから求めた応力の頻度分布
 - 0.002 Pa 刻みで分類
 - ダスト巻き上げの閾値 0.03 Pa (Greeley and Iversen, 1985)
- 閾値を超える箇所は 5 m 解像度の場合にのみ現れる
- 同じ高度相当のデータでも高解像度の方が大きな値を持つ

解析結果

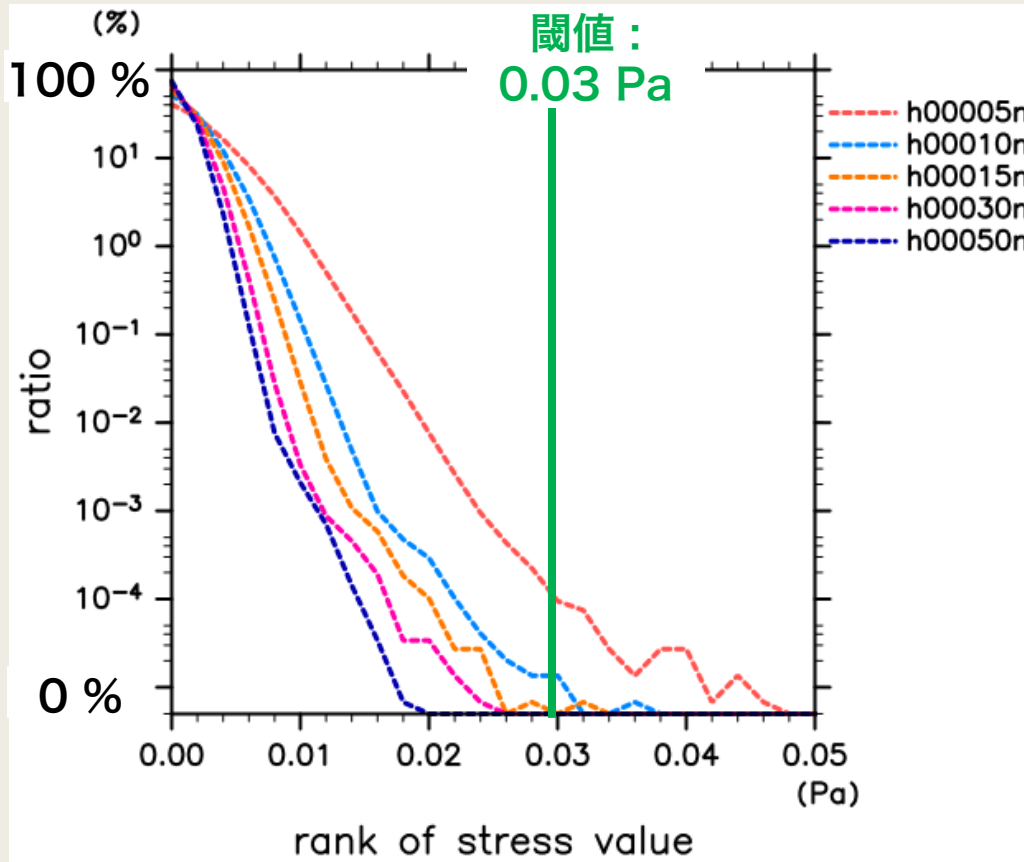
■ 地表面応力頻度分布：空間解像度別比較



- 各解像度の計算結果におけるモデル最下層のデータを用いて求めた応力毎の発生頻度分布
 - 0.002 Pa 刻みで分類
- ダスト巻き上げの閾値である 0.03 Pa を超える点は 5 m 解像度実験にのみ現れる (Greeley and Iversen, 1985)
- 5 m 解像度で閾値を超える値は 1,500 万点中、数十点程度
 - 水平分布を分けると、おおまかに 3 箇所ある

解析結果

■ 地表面応力頻度分布：5 m 解像度高度別比較



- 5 m 解像度の計算結果において他の解像度の高度に対応したデータを用いて求めた応力毎の発生頻度分布
 - 2.5 m, 12.5 m, 17.5 m, 27.5 m, 47.5 m 相当
- 地面に近いデータを用いた方がより強い応力を持つ

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

■ 地表面フラックス：Louis モデル (Louis, 1979)

$$Ri_B = \frac{gz(\theta - \theta_s)}{\theta u^2} \quad \text{Press} = \rho u_*^2 = \rho a^2 u^2 F$$

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

$$\text{Press} = \rho u_*^2 = \rho a^2 u^2 F$$

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

$$Ri_B > 0$$

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

$$c = C^* a^2 b \sqrt{\frac{z}{z_0}}$$

$$a^2 = \frac{k^2}{\{\ln(z/z_0)\}^2}$$

$$C^* = 7.4$$

$$b = 2b' = 9.4$$

$$k = 0.4$$

$$z_0 = 1 \times 10^{-2}$$

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

火星大気 LES で得られた渦

- 10 ~ 20 m/s 程度の接線風速
 - 火星衛星からの測定と対応 (Choi and Dundas, 2011)
- 渦の中央で約 2 Pa 程度の圧力降下
 - 探査機による測定と一致 (Schofield et al., 1997; Ellehoj et al., 2010)
 - ダストデビルトラックの形成や探査機のソーラーパネルを綺麗にするような 5 ~ 10 Pa には至っていない (Lorenz and Reiss, 2015)
- 地球 LES と火星 LES における渦の接線風速と圧力降下を比較すると火星の方が激しく強い
- 渦の持続時間は顕著なもので約数千秒 (Toigo and Richardson, 2003; Spiga and Forget, 2009)