

高分解能数値実験による 地球ダストデビルの 強化・維持過程の解析

竹見哲也

京都大学防災研究所

気象・水象災害研究部門

内容

- ダストデビル(塵旋風)とは
 - 形態・構造
 - 形成メカニズム
 - 大気境界層の特徴
 - 環境場の特徴
- ダストデビルの高分解能数値シミュレーション
 - 渦の強化・維持のメカニズム
 - 一般風の影響

ダストデビル(塵旋風)とは

- ダストデビル:晴天時に平坦地での大気境界層内に発生する鉛直軸回りの渦
 - 砂漠など乾燥地で頻発(平坦地形が好条件)
 - 強い地面加熱による対流混合層の発達が重要(絶対不安定な接地層の存在)
 - 強風下では発生しにくい
 - 湿潤過程は関与しない



竜巻:積乱雲に伴う渦



(Balme and Greeley 2006)

古くから存在は知られていた

ロシアの探検家によるツアイダム盆地のダストストームの観察
(Przheval'skii 1883, 絵はRoborovskii)

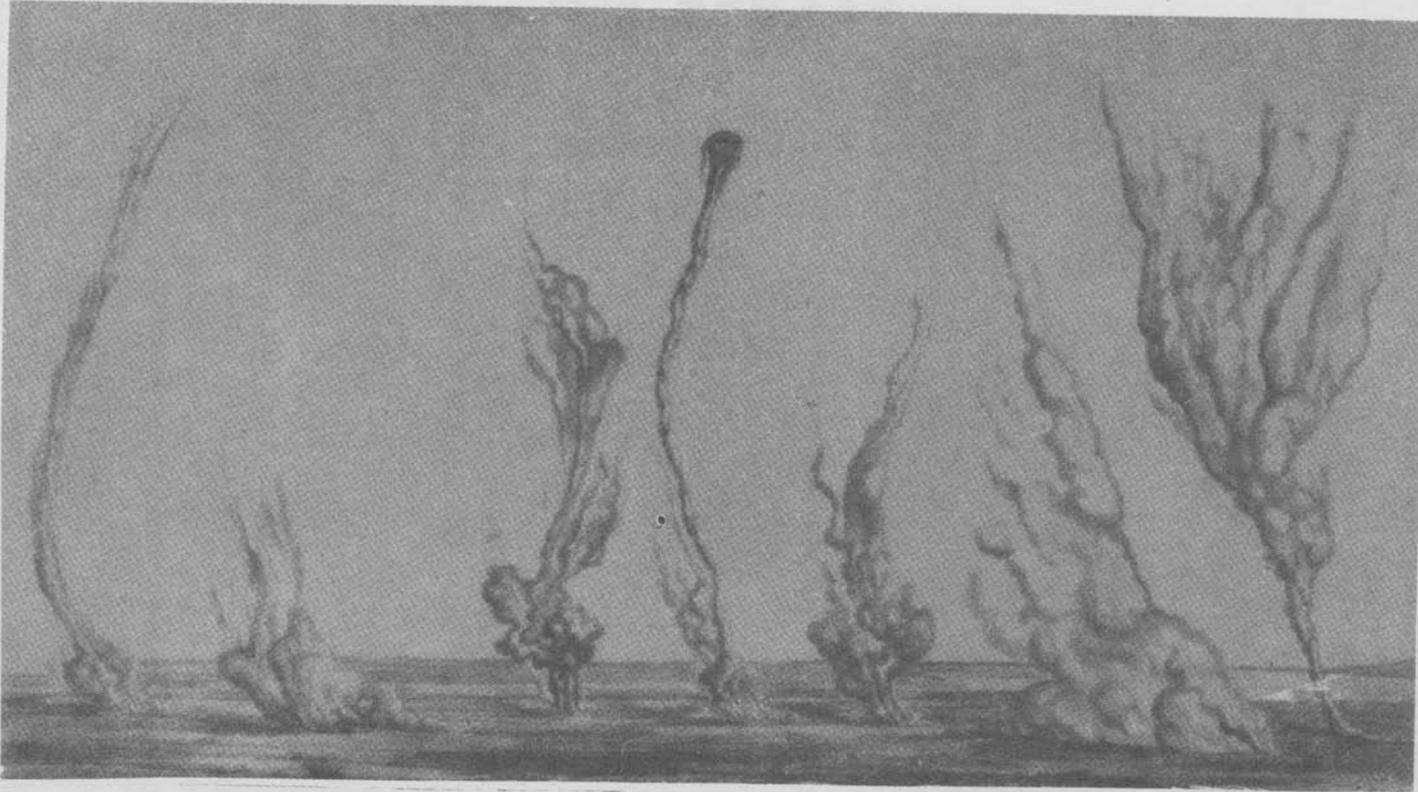


Fig. 216. Dust storm in Tsaidam. Drawings by V. Roborov (Przheval'skii, 1883, p. 162). 440

(Nalivkin 1983, Fig. 216)

北極圏でも発生しうる

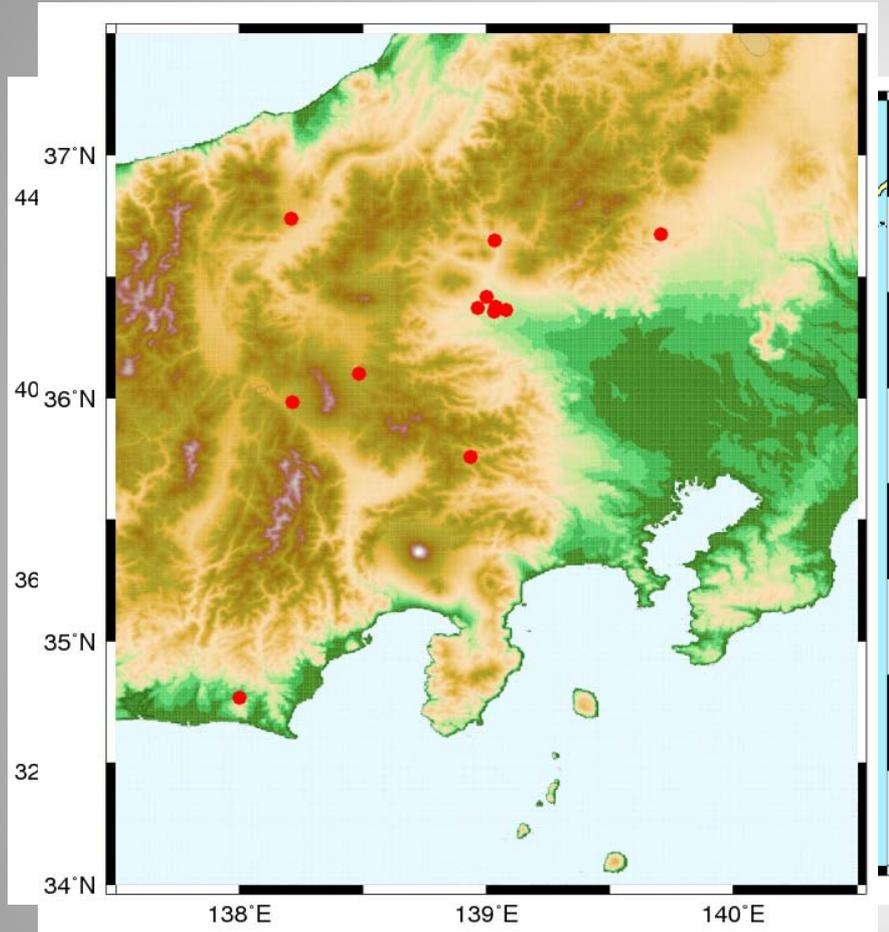
エルズミア島(カナダ)でのダストデビル



Fig. 219. Dust vortex in the Arctic. Northern part of Ellesmere Island. Height of vortex 60 m, width at base 9 m (*Weather*, vol. 18, No. 3, 1963, cover).

(Nalivkin 1983, Fig. 219)

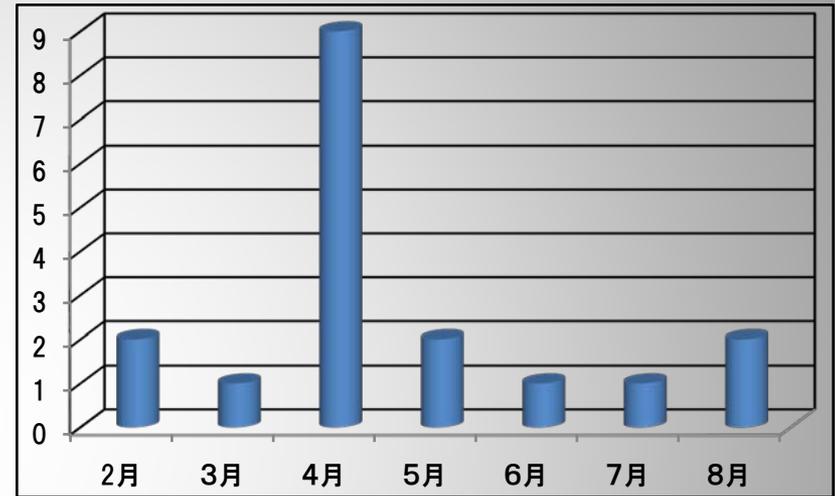
日本におけるダストデビルの発生状況



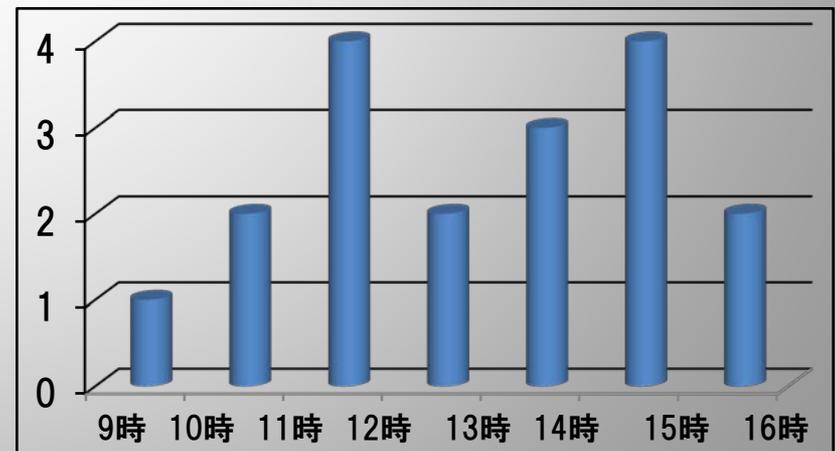
強さは藤田スケールでF0程度

(気象庁「竜巻等の突風データベース」より)

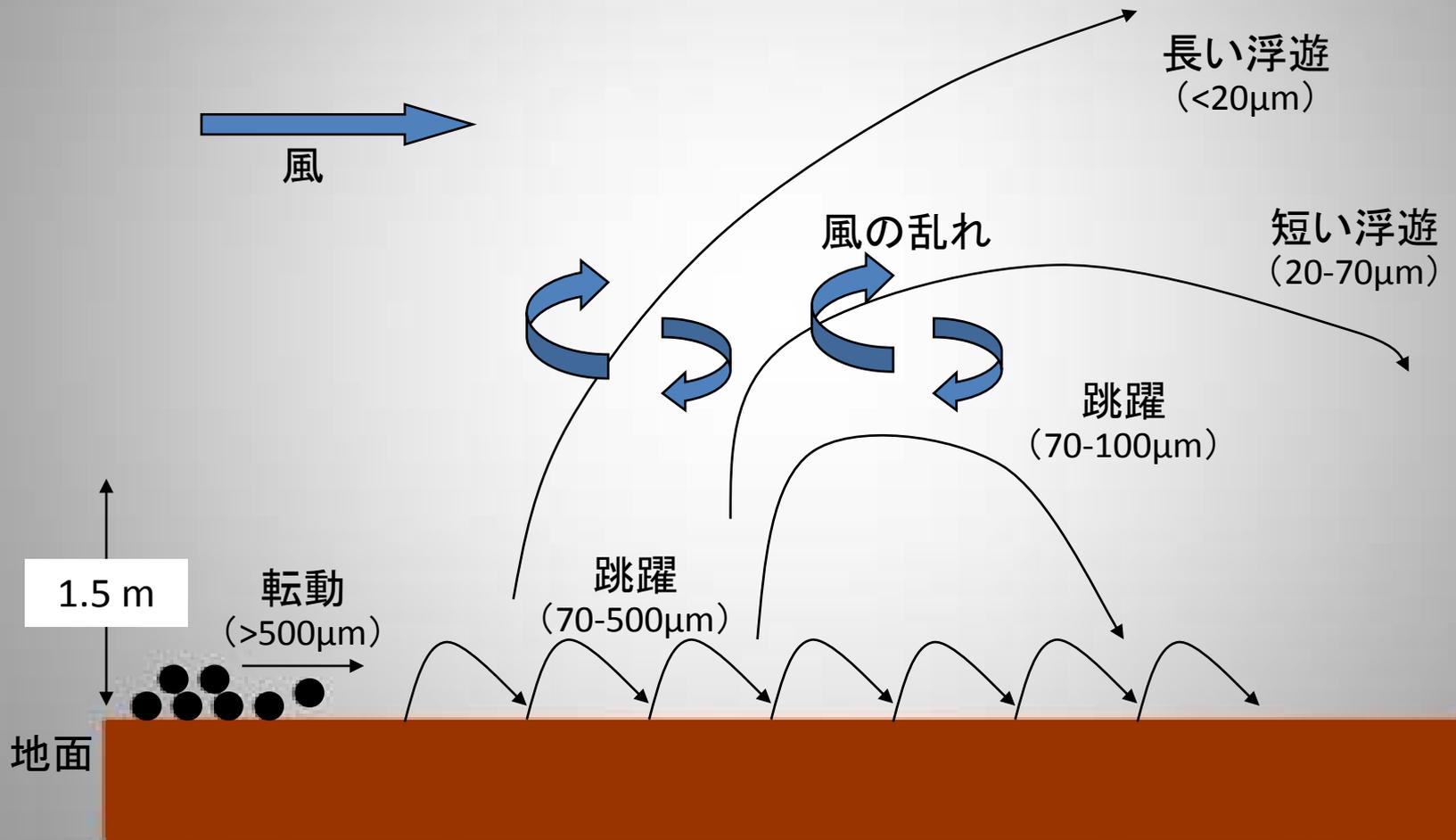
(件) (a) 発生時期



(件) (b) 発生時間帯



ダストの舞い上がり過程



ダストデビルに関する研究

- 観測 : Sinclair (1969, 1973), Carroll and Ryan (1970), Kaimal and Businger (1970), Hess et al. (1988), Hess and Spillane (1990), Bluestein et al. (2004), Markowski and Hannon (2006)
- 高分解能モデリング
 - Kanak et al. (2000), Kanak (2005), Ito et al. (2010)
 - 対流境界層のLESにより渦の発生・強化過程について研究 : stretching (引き伸ばし), tilting (立ち上げ) 効果
- 環境条件
 - 一般風の影響 : Toigo et al. (2003), 田中ら (2008)
 - Toigo et al. では一般風の影響は小さい vs 田中らでは弱風が好条件
 - 安定度の影響 : Hess et al. (1988), Hess and Spillane (1990)
 - 不安定度指数 $w_*/u_* > 5$ を満たす時に塵旋風が発生
 - 地面粗度の影響 : Lyons et al. (2008)

ダストデビルの観測的特徴

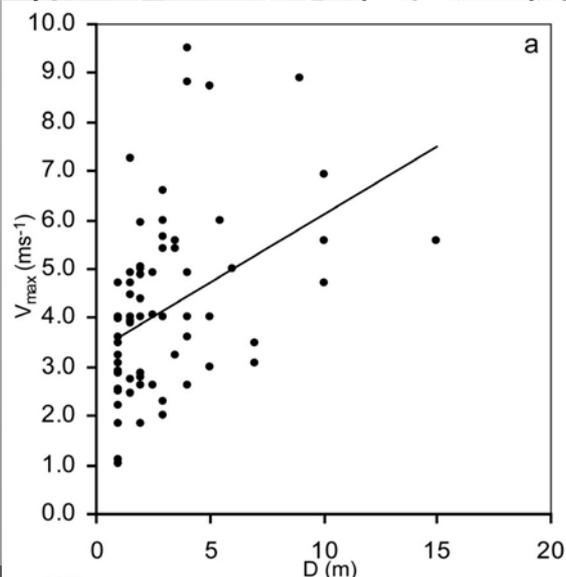
接線風速・水平風速・鉛直風速の特徴

TABLE 4. In Situ Wind Speed Measurements in Dust Devils^a

Study Reference	N	接線風速		水平風速		上昇速度	
		$V_{\text{mean}}, \text{m s}^{-1}$	$V_{\text{max}}, \text{m s}^{-1}$	$V_h \text{ mean}, \text{m s}^{-1}$	$V_h \text{ max}, \text{m s}^{-1}$	$W_{\text{mean}}, \text{m s}^{-1}$	$W_{\text{max}}, \text{m s}^{-1}$
<i>Sinclair</i> [1964]	4	-	-	9.3	13	-	-
<i>Ryan and Carroll</i> [1970]	80	4.2	9.5	-	-	0.7	2
<i>Fitzjarrald</i> [1973]	11	7.3	11.5	-	-	1.3	4.25
<i>Sinclair</i> [1973]	3	10.8	11.5	-	-	13.3	15
<i>Metzger</i> [1999]	5	13.6	22	-	-	5.2	7
<i>Balme et al.</i> [2003a]	10	-	-	17.0	25	-	-
<i>Tratt et al.</i> [2003]	3	-	-	8.8	11.0	3.3	3.5

^aEach measurement represents the largest value measured from that component within each dust devil. All measurements are taken at ~ 2 m height above surface except those of *Tratt et al.* [2003], which are made at ~ 3.5 m. N is the number of dust devils sampled, V is the peak tangential component of the wind speed, V_h is the peak total horizontal wind speed, and W is the peak vertical wind speed. Subscript “mean” represents the average value for the whole study; subscript “max” represents the greatest measurement in the study.

接線風速と大きさ(直径)の関係



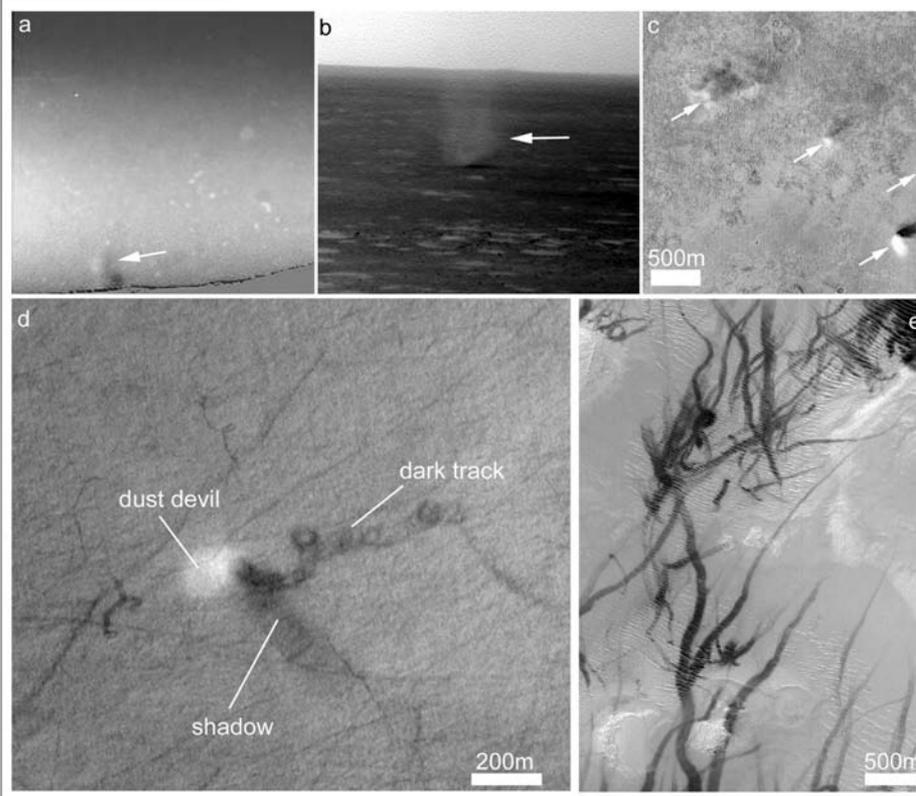
気圧偏差

TABLE 6. In Situ Pressure-Well Measurements in Dust Devils^a

Study Reference	N	$\Delta P, \text{mbar}$
<i>Ives</i> [1947] ^b	1	-15 to -80
<i>Sinclair</i> [1964]	4	-2.5 to -4.5
<i>Sinclair</i> [1973]	3	-2 to -7.0
<i>Metzger</i> [1999]	~ 20	0 to < -15
<i>Ringrose</i> [2003]	10	-1.5 to -10^c
<i>Tratt et al.</i> [2003]	5	-0.3 to -1

(Balme and Greeley 2006)

火星のダストデビル



(Balme and Greeley 2006)



(NASA's Mars Exploration Rover Spiritによる)

地球と火星のダストデビル

	直径 (m)	高さ (m)	接線 風速 (m/s)	鉛直 速度 (m/s)	回転の 向き	気温偏差 (K)	気圧偏差 (Pa)
地球	1-150 (5-30)	1-2400 (250- 1500)	5-20	3-15 (4)	ランダム	2-8 (3-4)	250-450
火星	5-1750 (250)	<8000 (2000- 6000)	2-93	N/A	ランダム	0.5-6	1.1-4.6 (2-3)

(カッコ内の数値は平均値または典型値)

(Kanak 2006)

ドップラーレーダーによる観測



FIG. 1. Photograph of a dust devil just west of Tell, TX, on 25 May 1999, looking to the south-southeast, between 1514 and 1522 CDT. The antenna of the University of Massachusetts W-band radar, which is mounted on a pickup truck, is seen scanning the dust devil, which is moving away from the radar. The yellow structure mounted just to the right of the antenna is the boresighted video camera. Note the scattered cumulus clouds above the dust devil. (Photograph copyright H. Bluestein)

- Wバンド(3 mm波長)ドップラーレーダ観測:
- 方位角方向分解能: 3-5 m
 - 動径方向分解能: 30 m

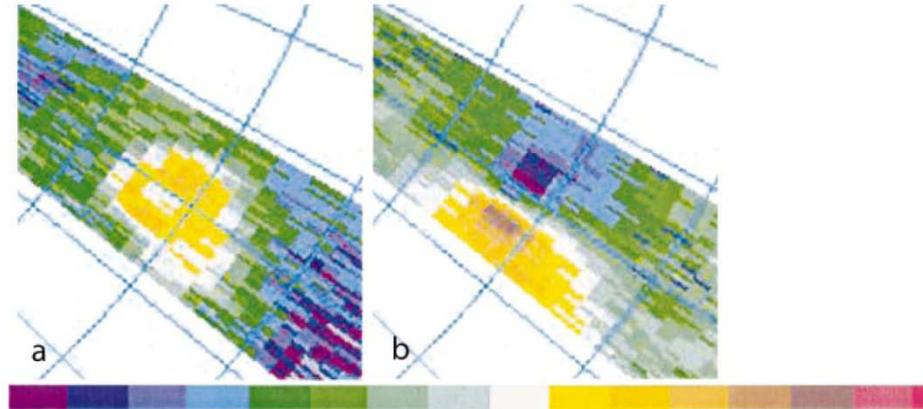
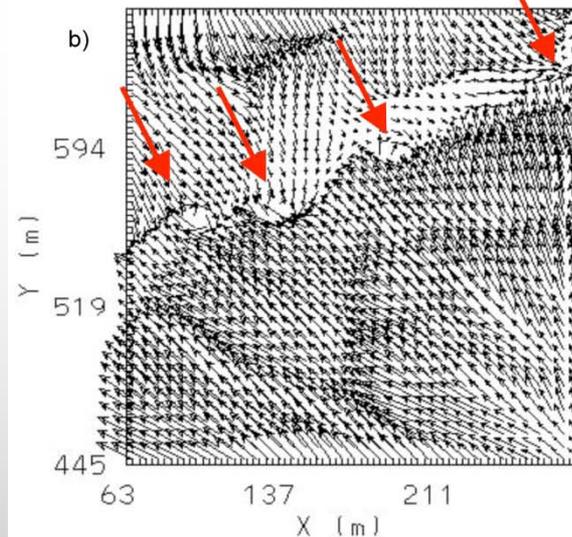
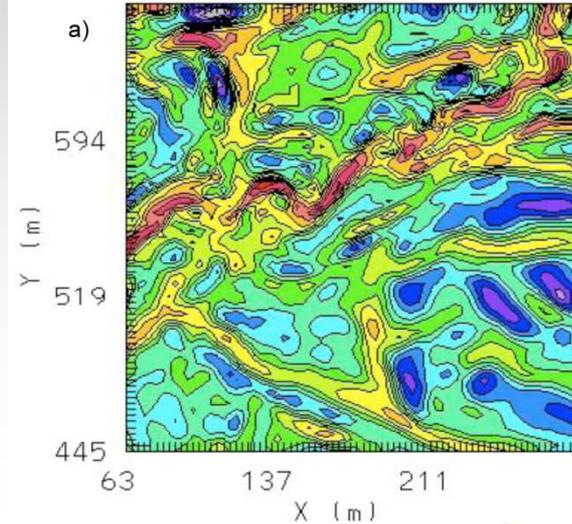


FIG. 4. (a) Radar reflectivity and (b) Doppler velocity at the lowest elevation angle possible at 1515:33, 25 May 1999, of the relatively narrow dust devil A. Constant-range rings are plotted at 100-m increments; constant-azimuth spokes are plotted at 5° increments. In (a), a yellow dust-devil reflectivity ring at 850–900-m range is seen to the southeast (north is located toward the top); color code for the reflectivity is shown below. Values should be regarded in a relative sense, with reflectivity increasing to the right (far-left color corresponds to -30 dBZ; far-right color corresponds to 0 dBZ). In (b), an orange–purple couplet marks the cyclonic–vortex signature of the dust devil. Color code for the Doppler velocity is shown below; values range from -10 (far-left color) to $+15$ m s^{-1} (far-right color).

(Bluestein et al. 2004)

ダストデビルの多重発生



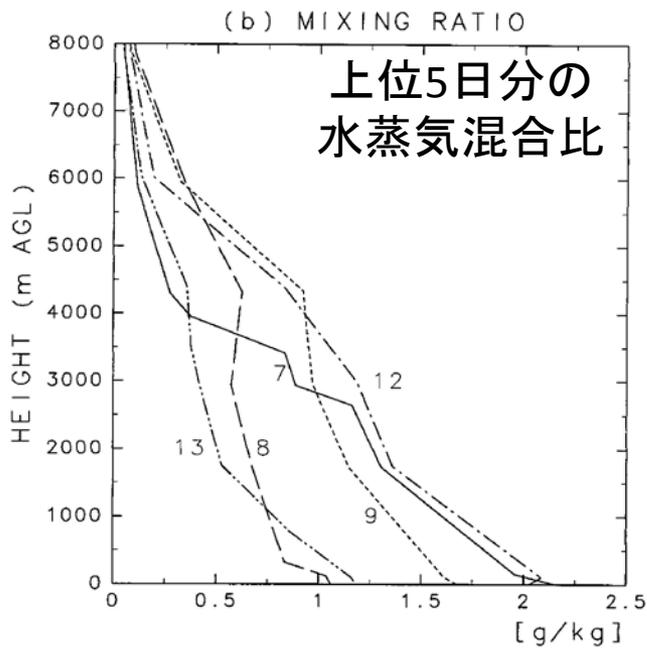
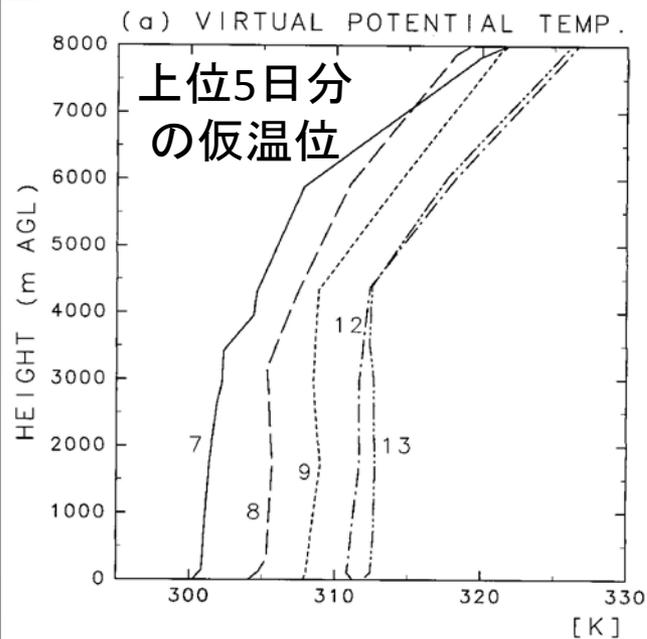
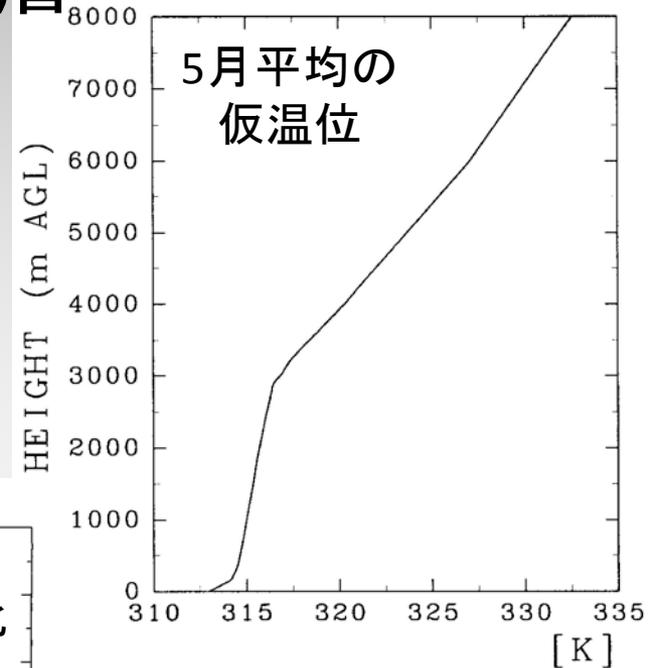
水平格子幅
2.75 mでのLES

Fig. 12. 2.75M XY plane at $z = 2$ m and $t = 1800$ s. a) Vertical velocity (m s^{-1}). Minimum value is -0.86 m s^{-1} , maximum value is 0.89 m s^{-1} with interval 0.13 m s^{-1} . b) Horizontal velocity vectors. Vortices are denoted by red arrows

(Kanak 2008)

砂漠域の対流混合層

1991年5月の中国ゴビ砂漠南部のMinqin
における20時BSTの鉛直プロファイル



(Takemi 1999)

(Takemi and Satomura 2000)

ダストデビル時の摩擦速度と安定度

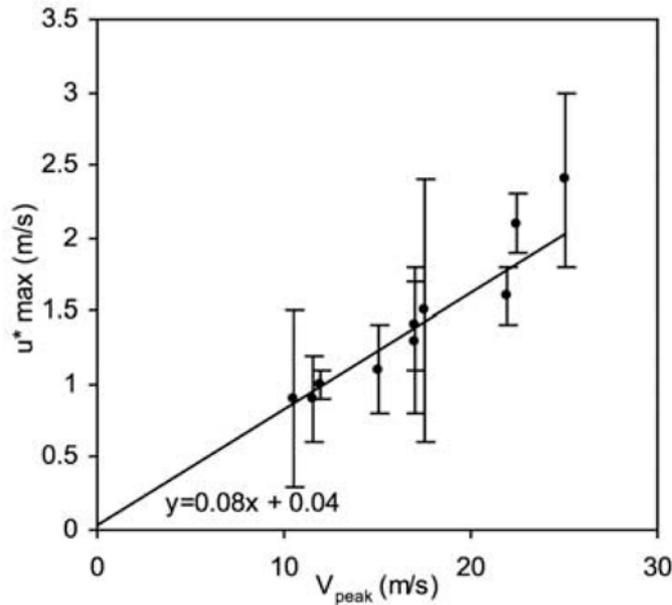


Figure 3. Peak wind velocity vs. peak u_* for dust devils sampled in this study. Best-fit line is linear least-squares fit, weighted for uncertainty in u_* .

(Balme et al. 2003)

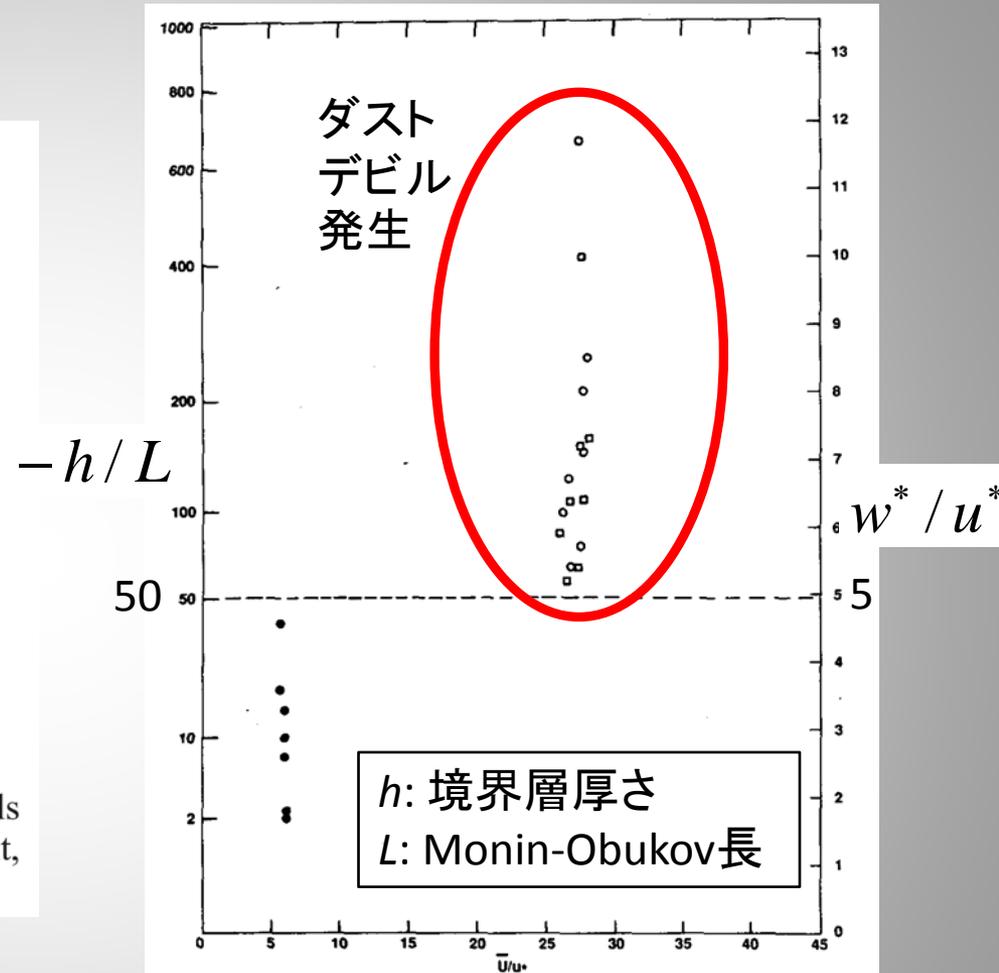
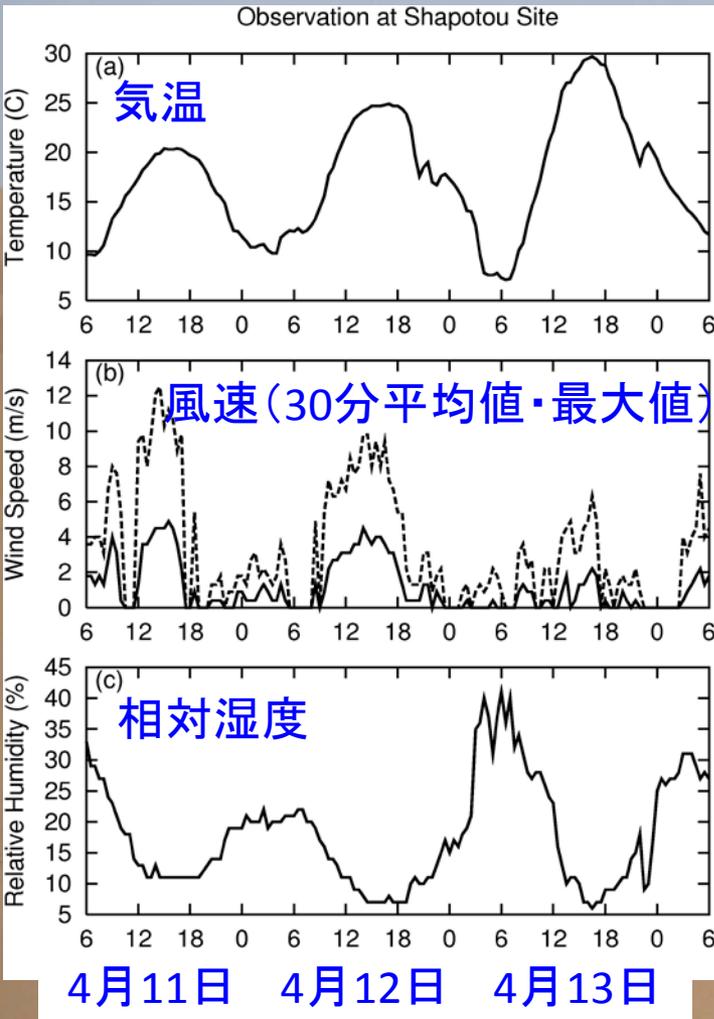


FIG. 8. The variation of $-h/L$ and w_*/u_* as a function of \bar{U}/u_* over Port Phillip Bay and over land. The results based on the wind speed over the bay estimated from the U.S. Army Corps of Engineers' relation are shown by the circles, the results from the cubic spline fit to the NOAA data are shown by squares, and the results over land are shown by dots. A demarcation between the two convection regimes, over land and over the sea, occurs at $-h/L \approx 50$ or $w_*/u_* \approx 5$.

(Hess et al. 1988)

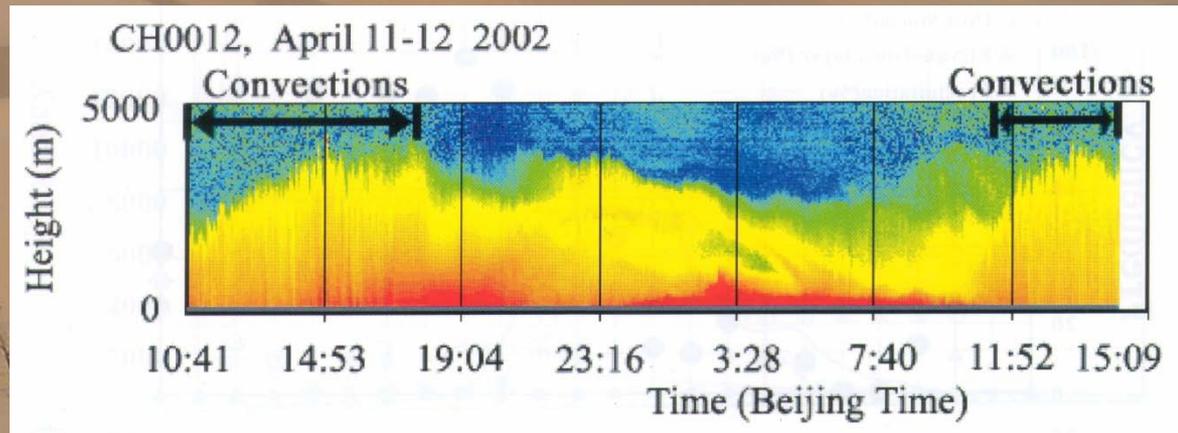
晴天時の境界層日変化とダスト輸送

地上気象変化



ADEC観測時にライダーで観測されたゴビ砂漠南部における晴天時のダストの鉛直分布の変化。

期間:2002年4月11日-12日



(Yasui et al. 2005)

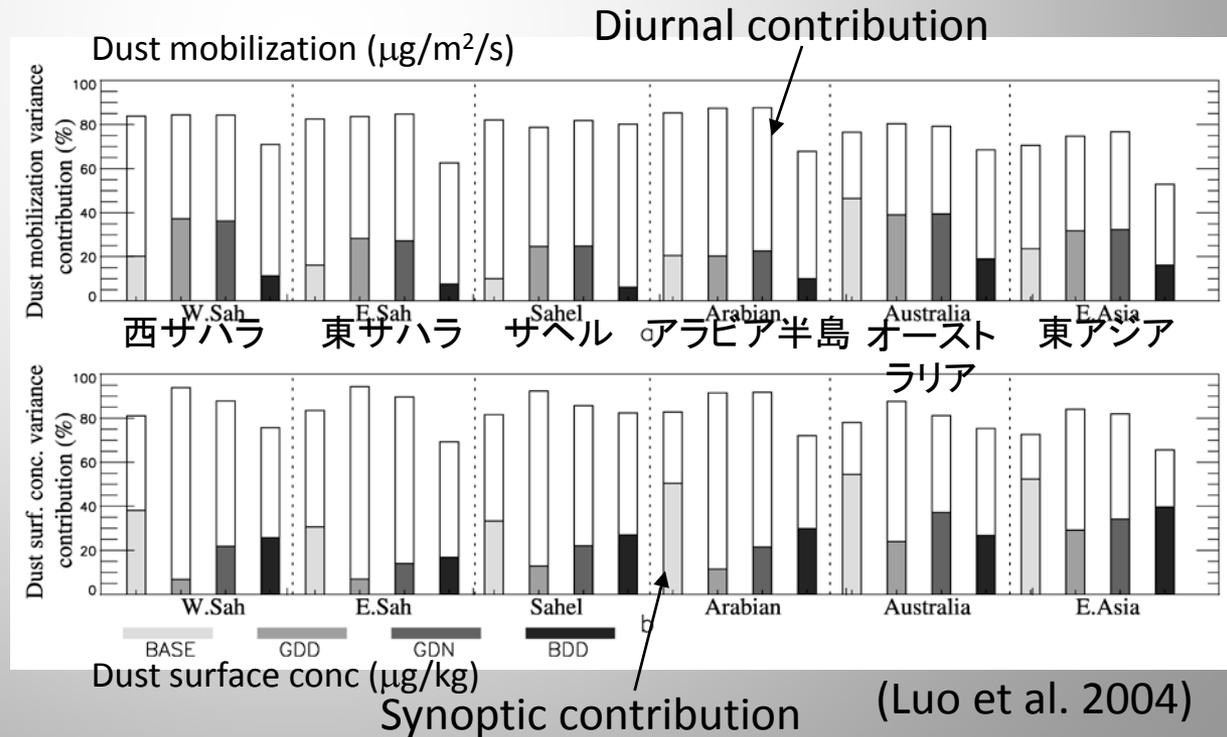
(背景写真:情報通信研究機構 安井氏提供)

(Takemi et al. 2005)

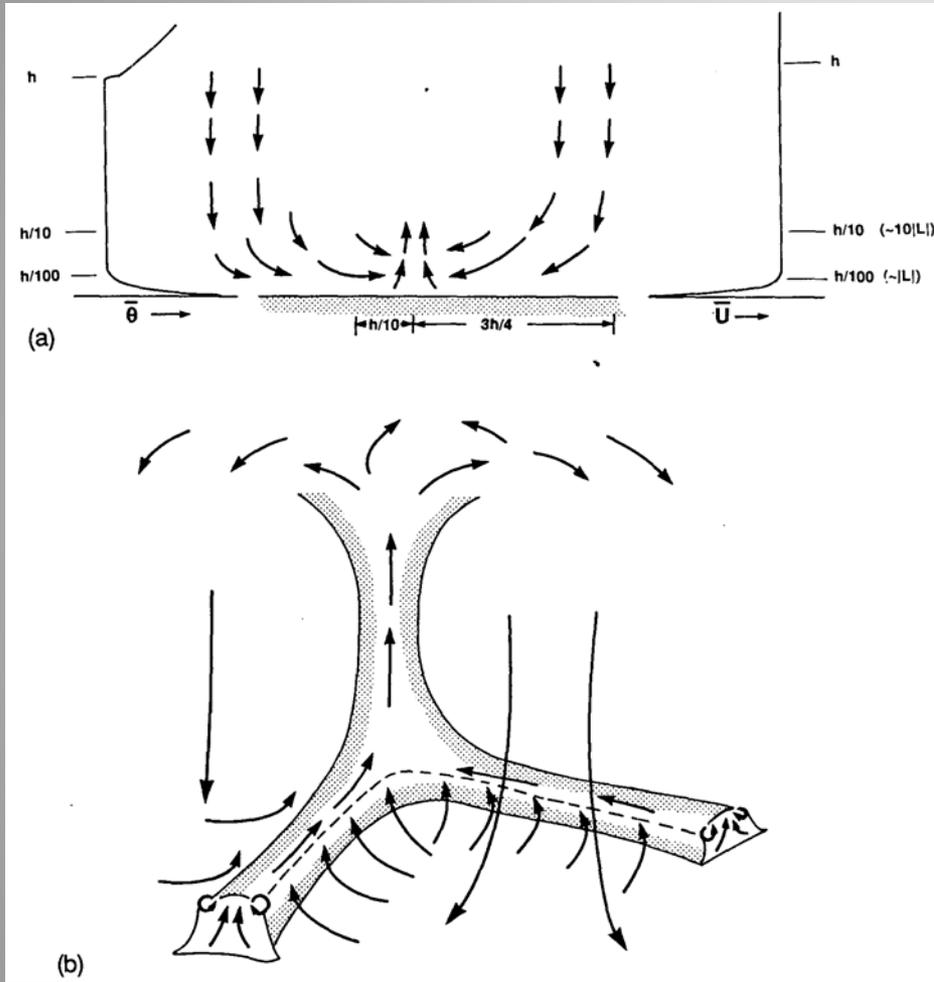
境界層過程とダスト輸送

Table 3. Global Dust Fluxes (Koch and Renno 2005)

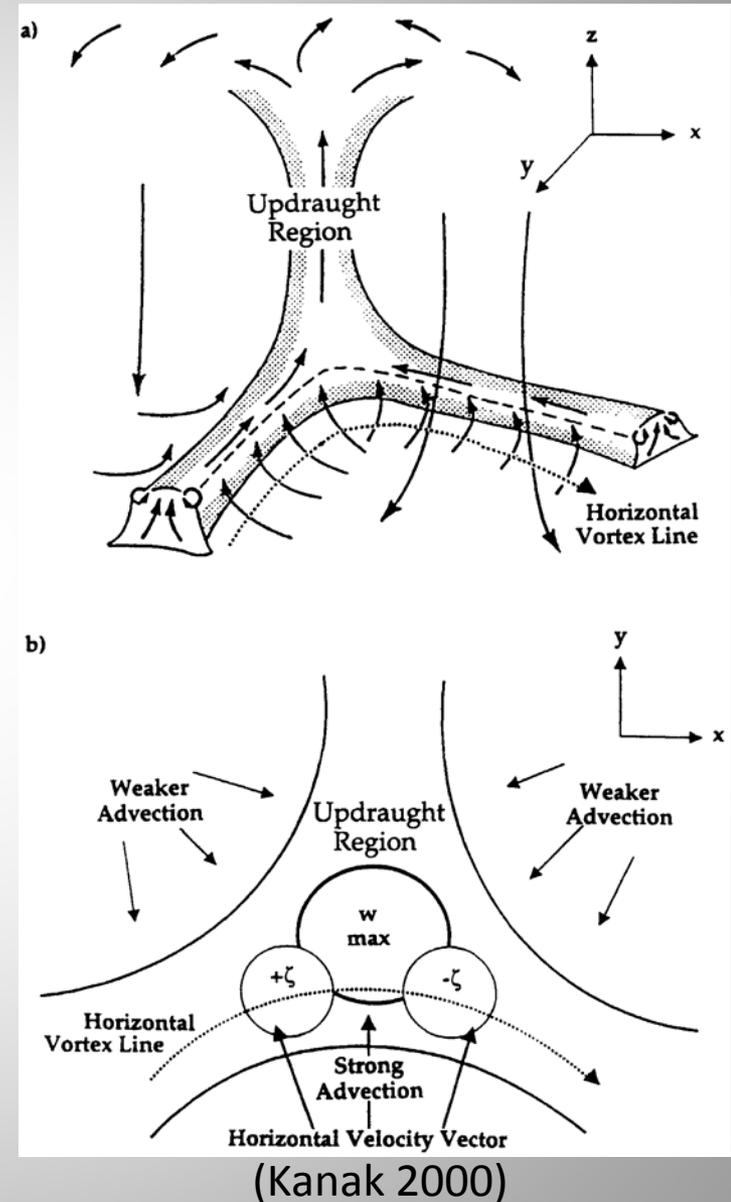
	Dust Flux, g $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Fractional Updraft Area	Contribution to Global Mineral Dust Production, %
Dusty Plumes	0.1 ± 0.03	$5 \times 10^{-5} \pm 4 \times 10^{-5}$	8 ± 6
Dust Devils	0.7 ± 0.3	$3 \times 10^{-5} \pm 2 \times 10^{-5}$	26 ± 18
Total	—	—	34 ± 19



対流混合層の構造とダストデビルの発生機構



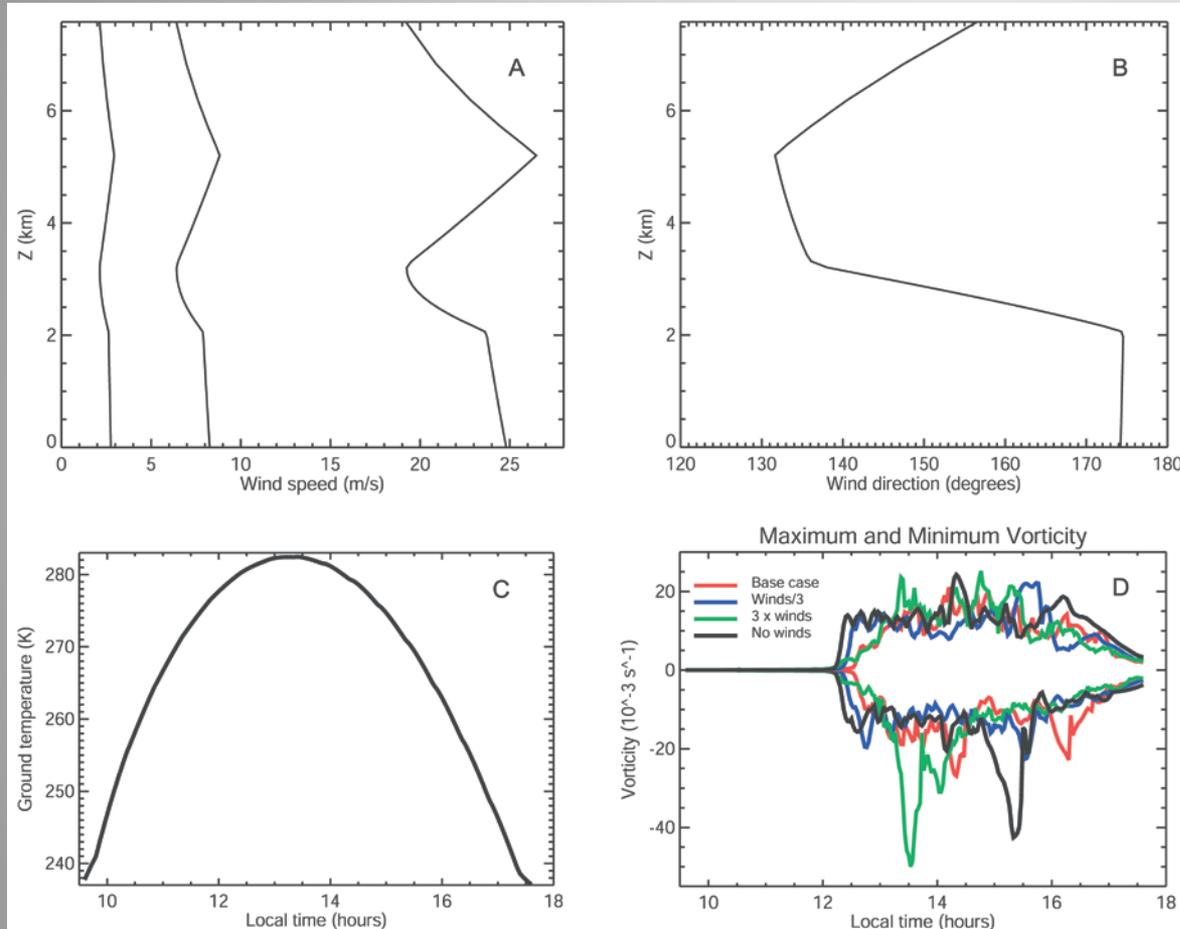
(Hess and Spillane 1990)



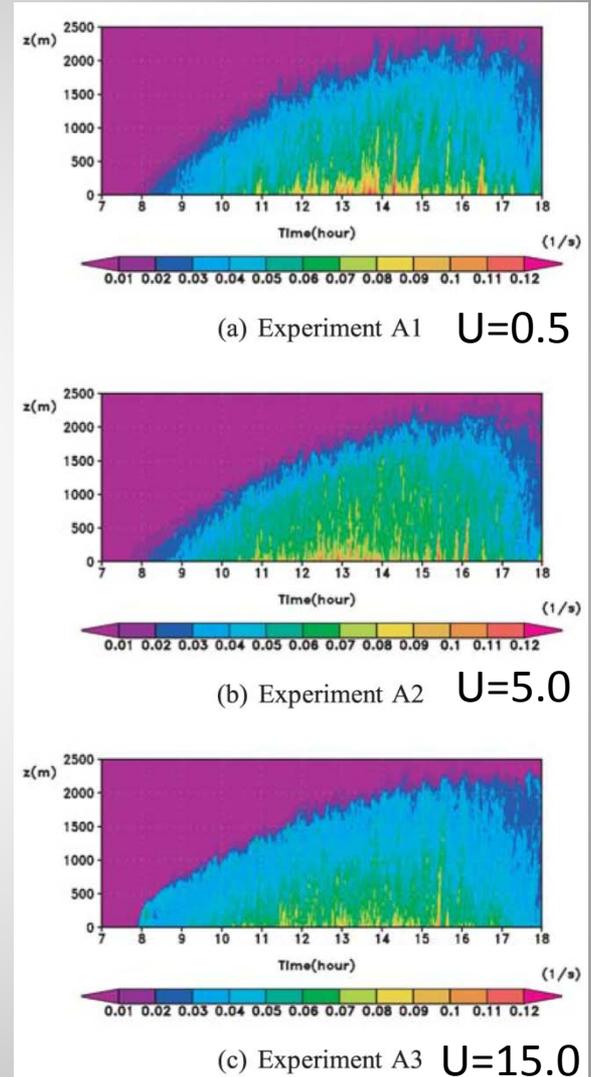
(Kanak 2000)

一般風の影響

高度別の渦度の最大値



(Toigo et al. 2003)



(Ito et al. 2010)

本研究で調べること

- 対流混合層中に発生した多数の渦のうち強い渦に発展するものは数が限られている。強い渦に強化され維持されるのはなぜか？
- 一般風があるとダストデビルの発生にもなんらかの影響をもたらす：
 - 弱風時が好条件（観測、数値実験：Ito et al. 2010）
 - 弱風時のみならず強風時でも発生する（数値実験：Toigo et al. 2003）



高分解能数値実験により

- 渦の強化・維持過程
- 一般風の影響

を調べる

既往の高分解能モデル研究の諸元

Table 1. Summary of Terrestrial and Martian Simulation Parameters^a

Study	Equations	Grid Points	Domain, km	Grid Spacing, m	Boundary Conditions	Ambient Wind
<i>Mason</i> [1989]	B	64 × 64 × 98	3.2 × 3.2 × 5	50 × 50 × 5–150	NS	none
<i>Cortese and Balachandar</i> [1993]	B	96 × 96 × 97	Non-dimensional	Non-dimensional	NS	none
<i>Kanak et al.</i> [2000]	SC	86 × 86 × 48	3 × 3 × 2.1	35 × 35 × 10–80	NS	none
<i>Fiedler and Kanak</i> [2001]	B	128 × 128 × 33	Non-dimensional	Non-dimensional	FS	none
<i>Kanak</i> [2005a]	SC	370 × 370 × 86	0.740 × 0.740 × 1.2	2 × 2 × 4.12–24	NS	none
<i>Rakfin et al.</i> [2001]	FC	180 × 180 × 36	18 × 18 × 9	100 × 100 × 12–250	NS	Backing wind profile
<i>Toigo et al.</i> [2003]	FC	100 × 100 × 57	10 × 10 × 7.5	100 × 100 × 10–100	NS	Both wind and no wind
<i>Michaels and Rafkin</i> [2004]	FC	200 × 200 × 61	6 × 6 × 2.3	30 × 30 × 4–45	NS	5 m s ⁻¹ mean wind
<i>Kanak</i> [2005b]	SC	150 × 150 × 60	6 × 6 × 10	40 × 40 × 40–295	NS	none

B=Boussinesq, SC=supercompressible, FC=fully compressible
FS=free slip, NS=no slip

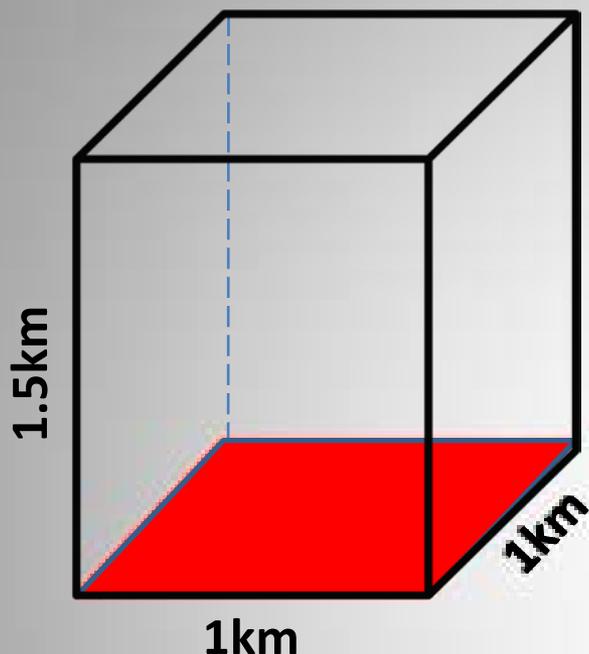
(Kanak et al. 2006)

	方程式系	格子点数	領域 (km)	格子間隔 (m)	境界条件	一般風 (m/s)
田中ら (2008)	B	90 x 90 x 60 200 x 200 x 130	4.5 x 4.5 x 3 4 x 4 x 2.6	50 20	NS	0.5, 5.0, 15.0 0.5
Ito et al. (2010)	B	210 x 210 x 130	4.2 x 4.2 x 2.6	20	NS	0.5, 5.0, 15.0

数値実験

- 数値モデル: Weather Research and Forecasting (WRF) model
 - Large-eddy simulation (LES)モードで利用
 - 乱流モデルはSmagorinsky-Lilly
- 問題設定の簡略化:
 - 水平一様な基準状態
 - 境界層スケールの計算領域
 - 側面境界は周期条件
 - 物理過程は乱流以外は考慮しない
- 実験1: 水平格子幅3 m; 一般風なし
 - 渦の強化・維持過程の解析
- 実験2: 水平格子幅10 m; 一般風 $U_0=0, 5, 10, 15$ (m/s)
 - 一般風に対する感度の解析

実験1の設定



領域	水平1km・鉛直1.5km
水平解像度	3m
鉛直解像度	下層3mで上層は粗い Stretch grid
境界条件	水平:周期境界 下端:バルク法
地表面の熱Flux	$0.24(\text{K m/s}) \doteq 290\text{W}/\text{m}^2$
初期温位(左図)	高度800mまで300K 以高 10K/kmで上昇
乱流モデル	Smagorinsky-Lillyモデル
一般風	なし
雲物理	なし

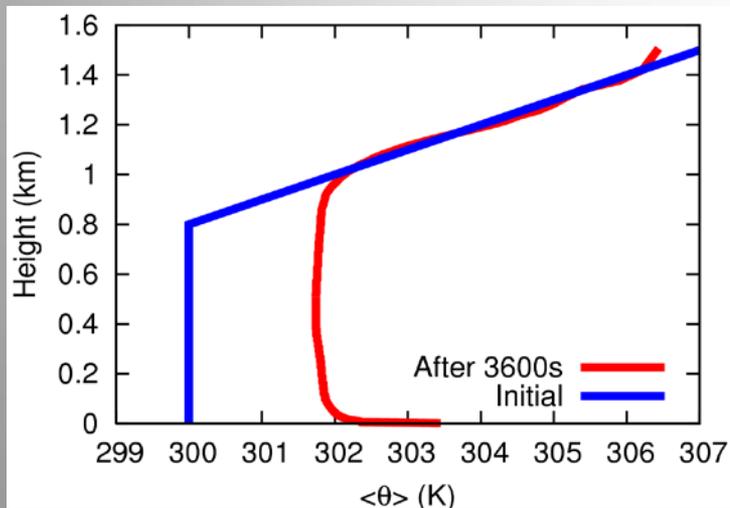
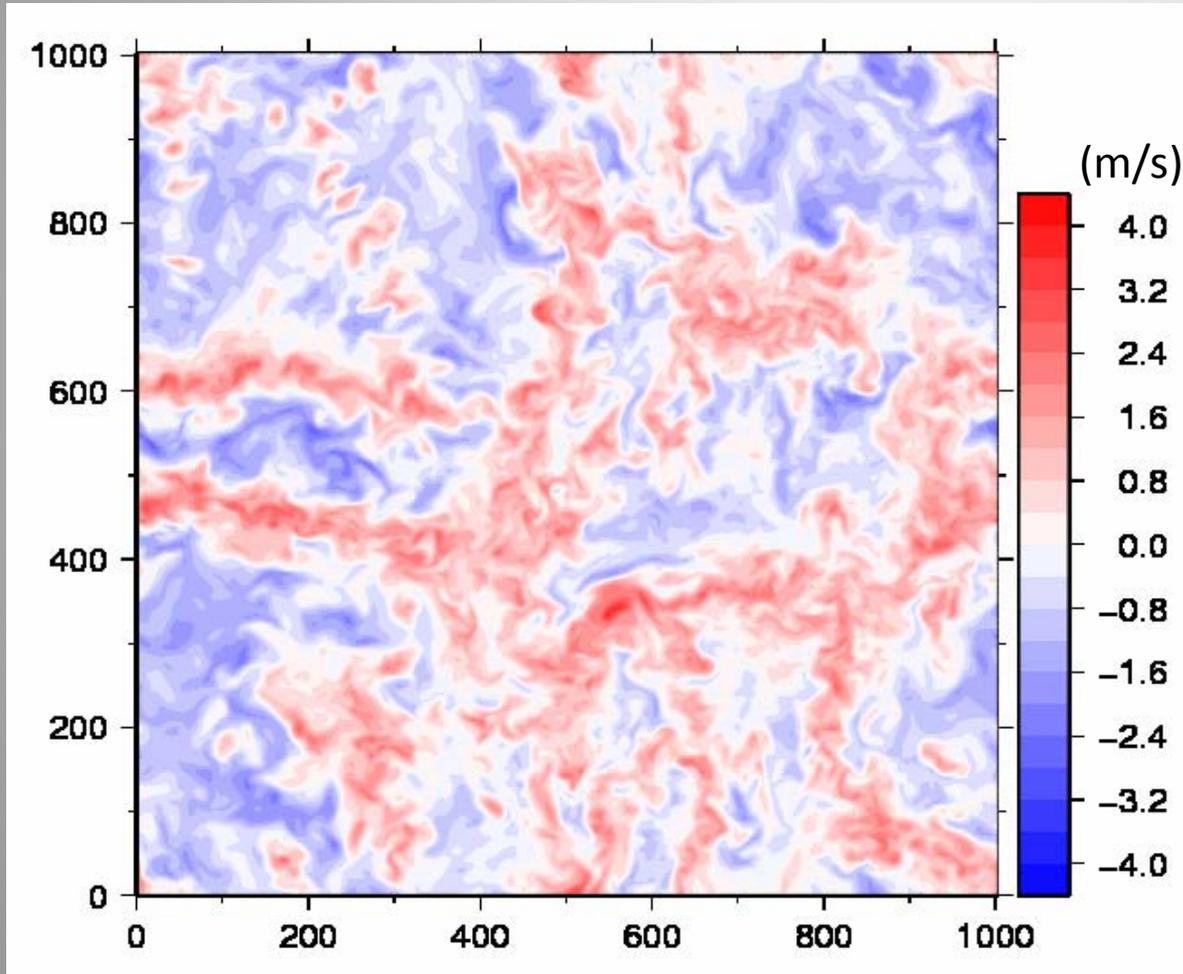


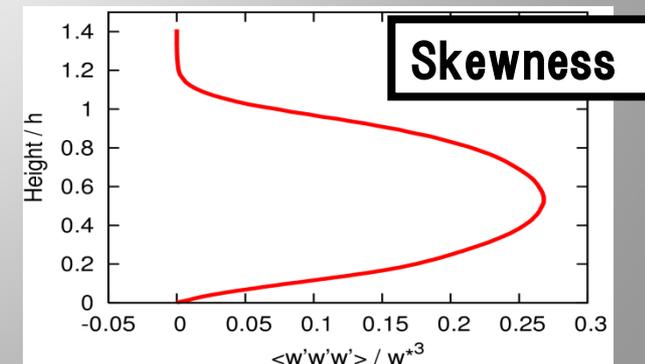
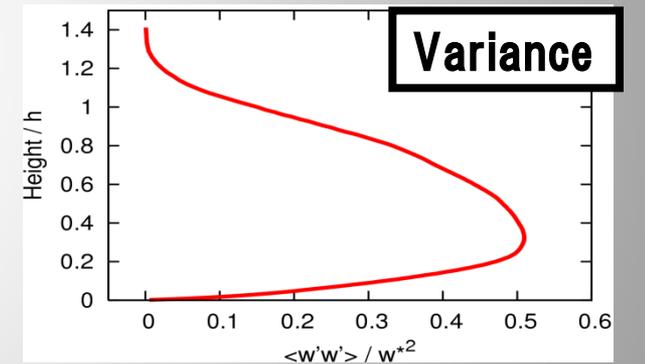
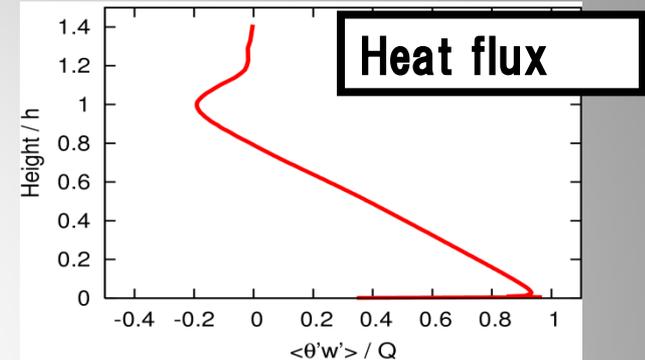
図:初期・3600s後の鉛直温位分布

対流混合層の構造

時刻5100 sでの高度50 mにおける鉛直速度の水平断面



乱流統計量



対流混合層内の鉛直渦

対流セル

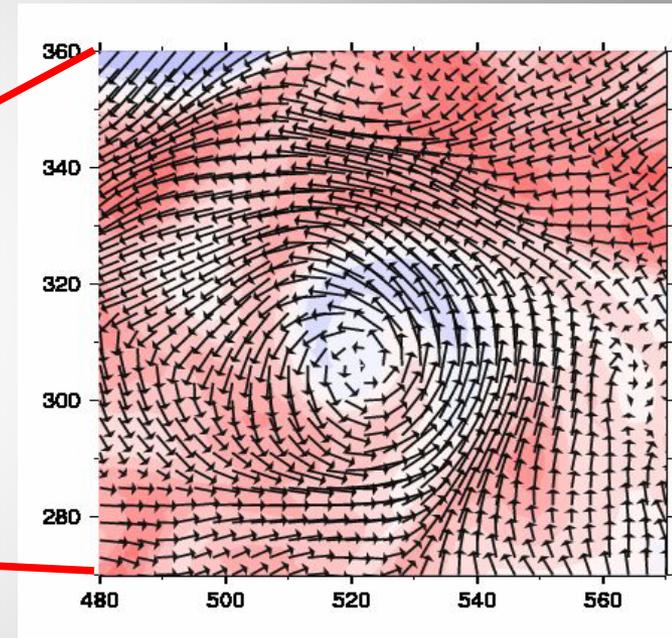
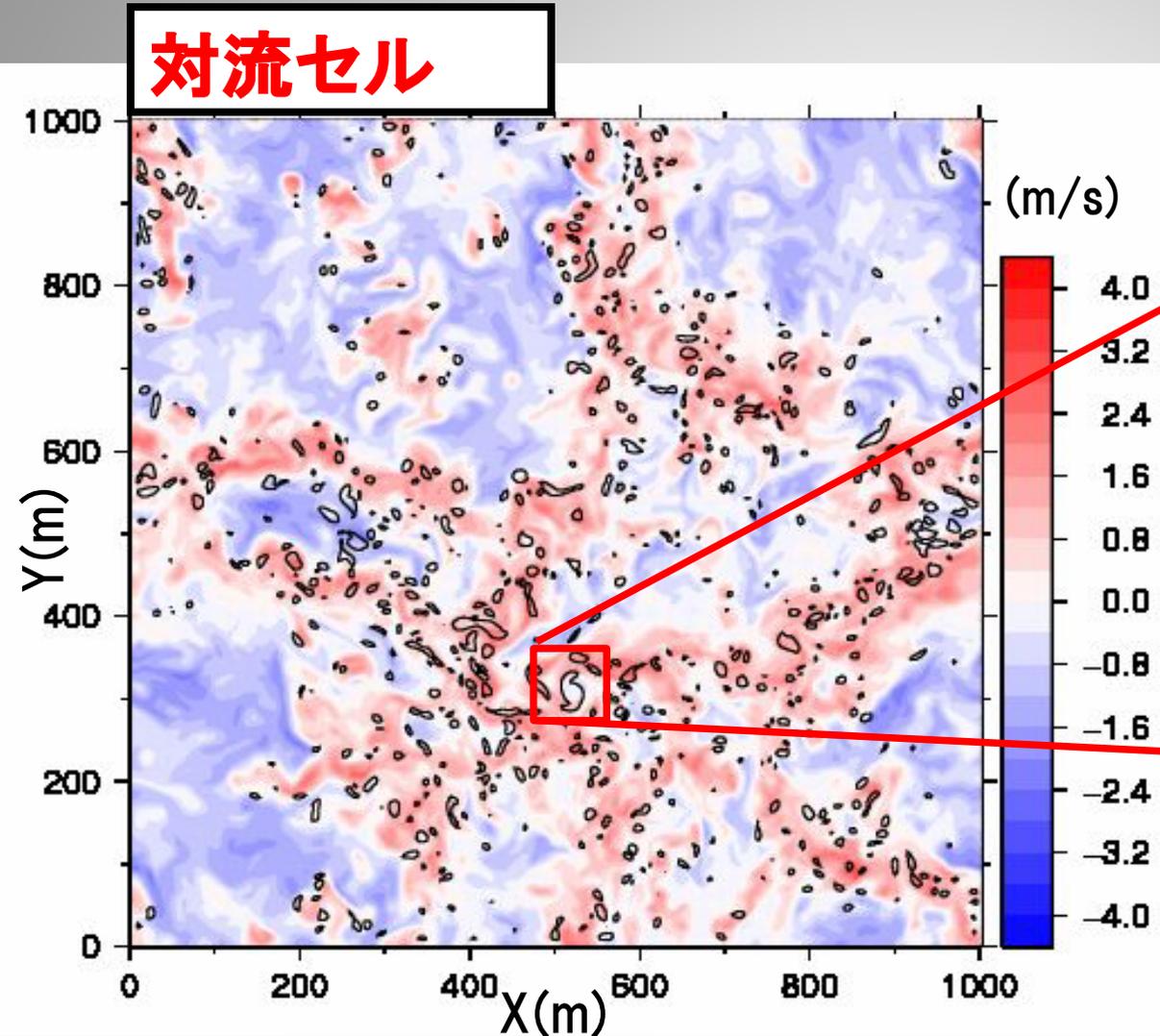


図: $t=5100\text{s}$ の高度50mにおける鉛直速度(色付)と鉛直渦度(等値線:絶対値 $0.20(1/\text{s})$ 以上)の水平断面図。

圧力偏差と最大風速半径

10秒間隔で180time step間(計算開始後60-90分)に発生していた渦を抽出した結果

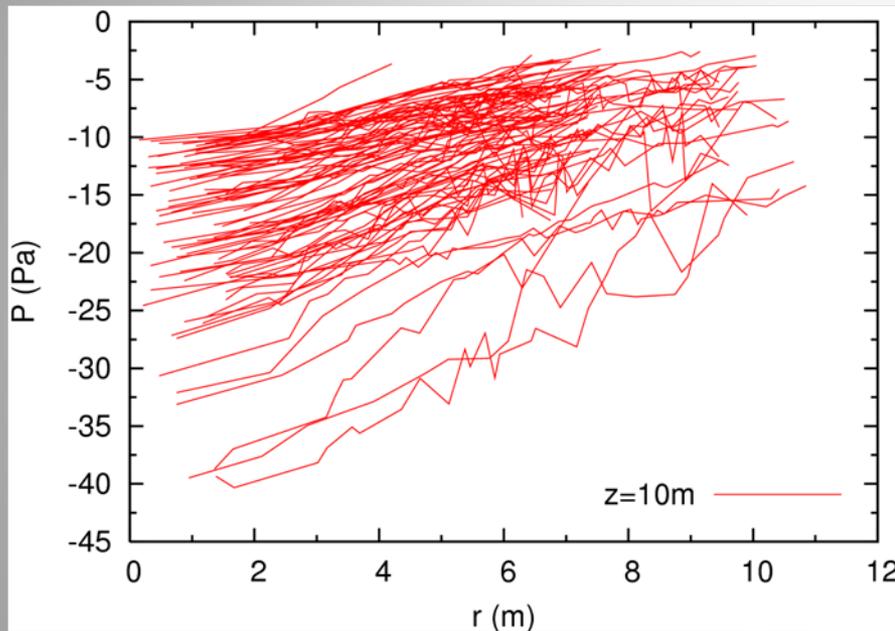


図:横軸が中心からの距離で縦軸が圧力偏差を表す。

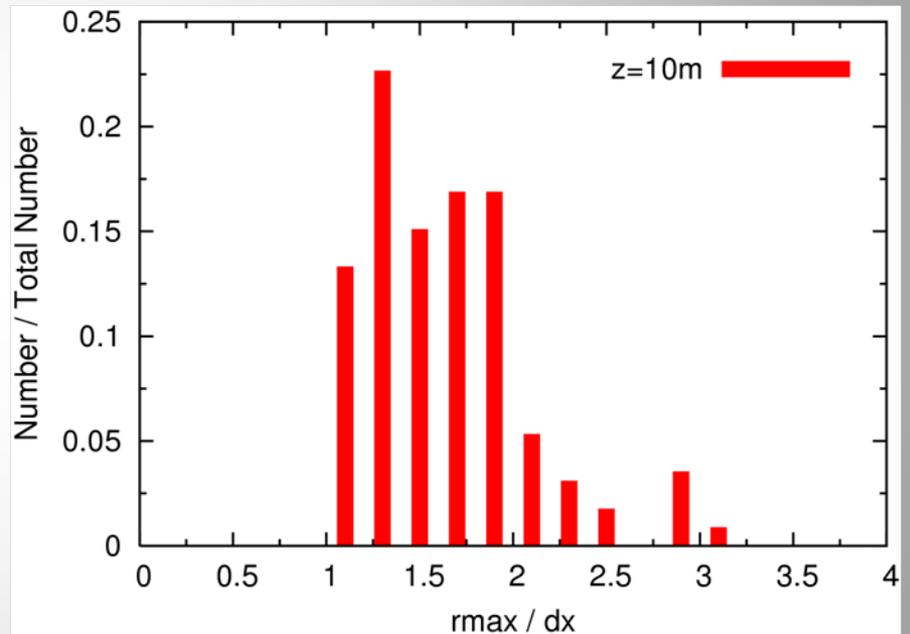
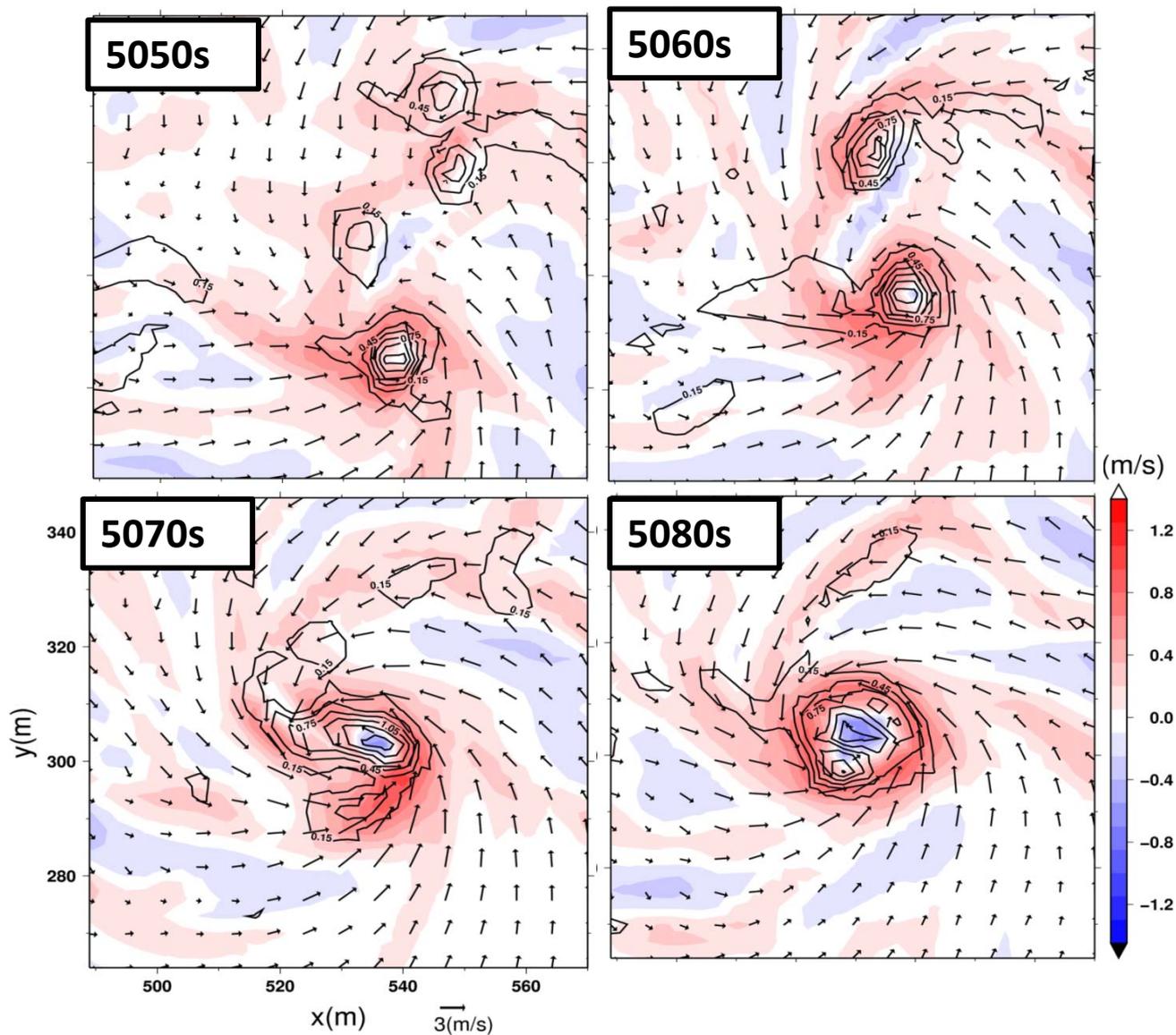


図:横軸が最大風速半径を格子幅で、縦軸が渦の発生数を総数(225)で規格化したもの

- ・発生していた渦の大多数は弱くて小さい渦。ごくまれに強大な渦が発生。

渦の融合

高度1.5mの鉛直流
(色付)と渦度(等値
線:間隔は 0.15 s^{-1})
と風速ベクトル

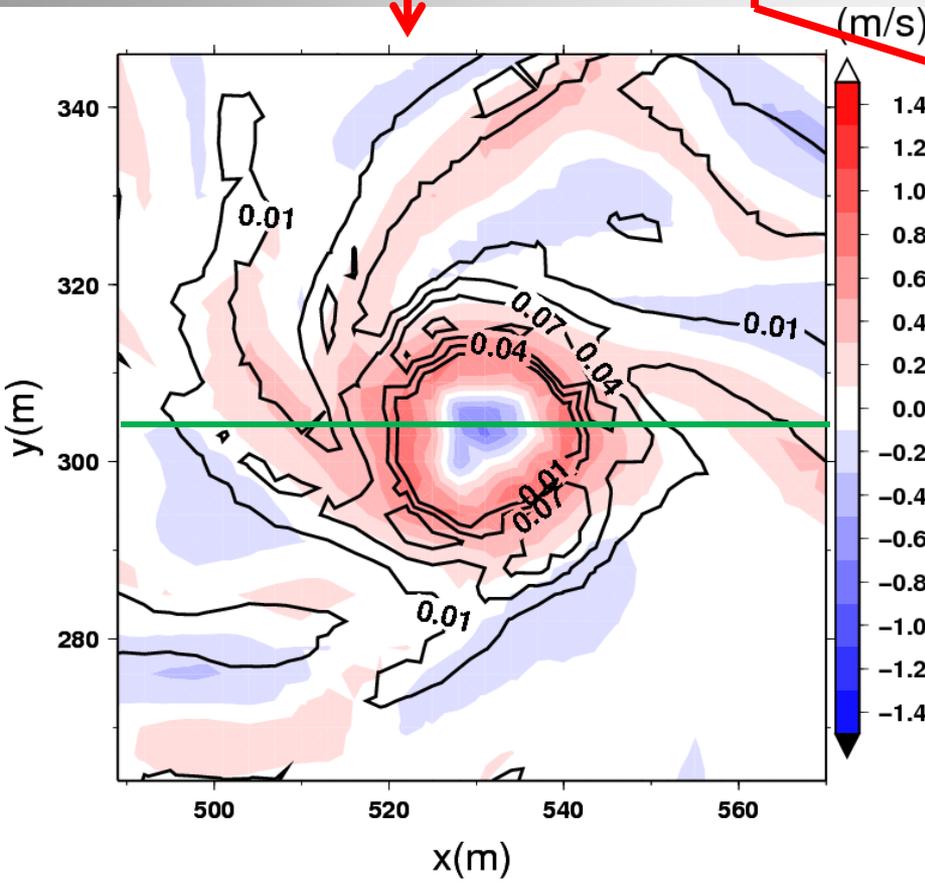


渦の強化過程：立ち上げと引き伸ばし

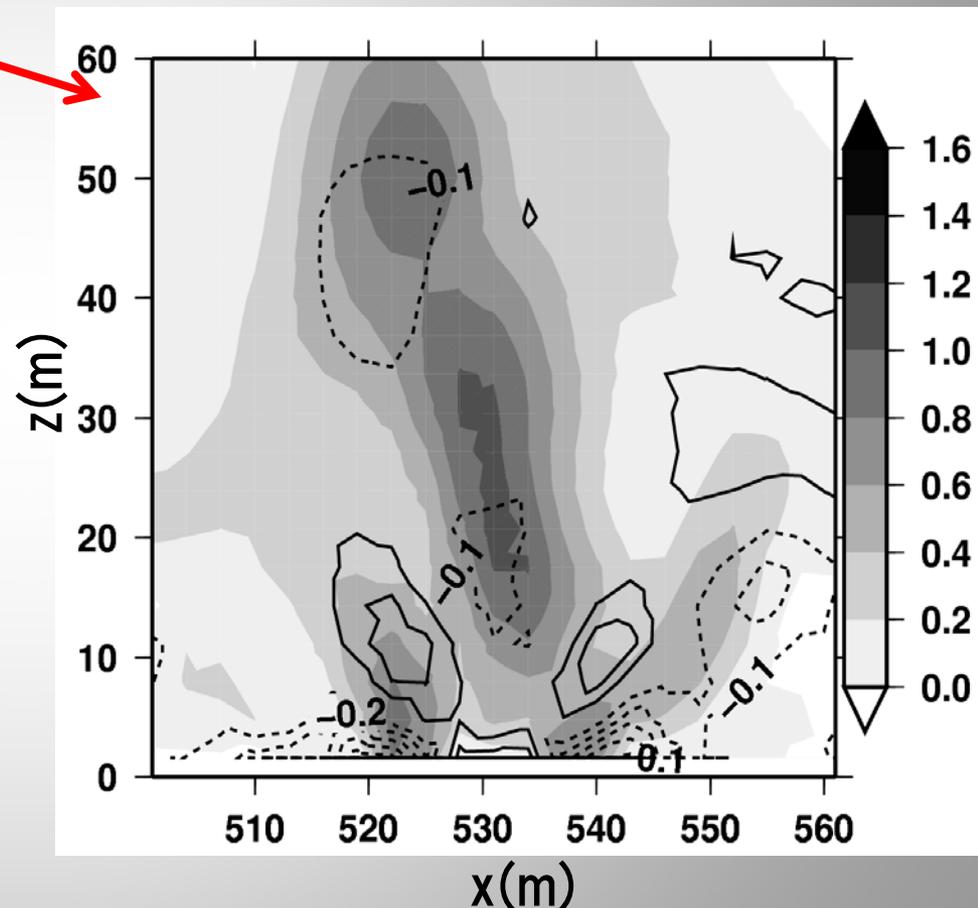
$$\frac{D\zeta}{Dt} \approx \underbrace{\xi \frac{\partial w}{\partial x} + \eta \frac{\partial w}{\partial y}}_{\text{鉛直流(色付)と立ち上がり項}} - \underbrace{\zeta \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)}_{\text{渦度(影)と水平発散(等値線)}} \quad (\text{m/s})$$

$$\vec{\omega} = (\xi, \eta, \zeta)$$

$$u = (u, v, w)$$

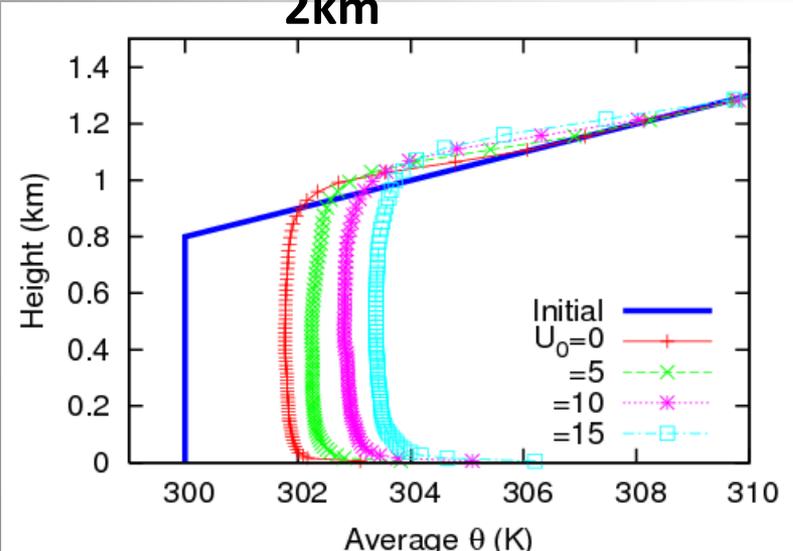
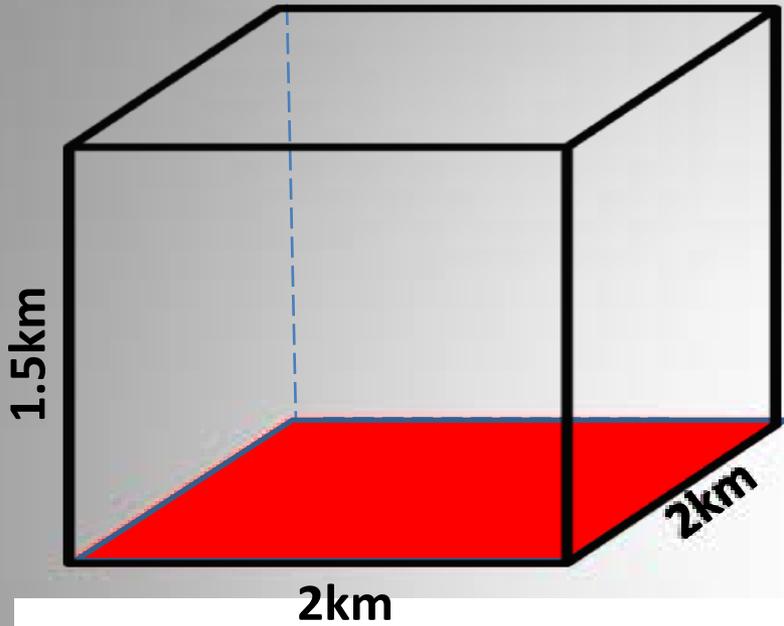


鉛直流(色付)と立ち上がり項
(等値線: 間隔は0.03 s⁻²)



渦度(影)と水平発散(等値線:
間隔0.1 s⁻¹)の鉛直断面

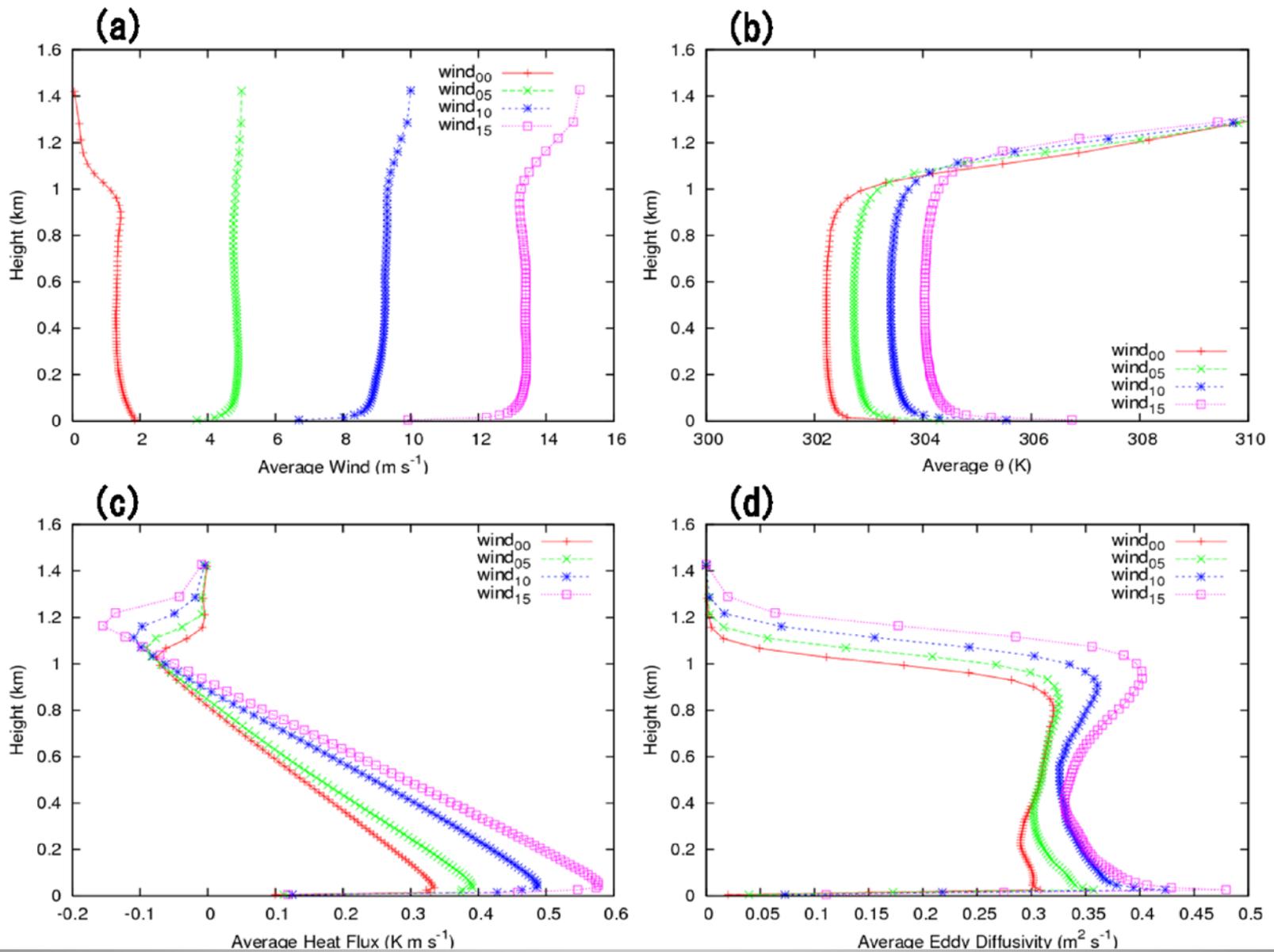
実験2



領域	水平2km・鉛直1.5km
水平解像度	10m
鉛直解像度	下層10mで上層は粗い Stretch grid
境界条件	水平:周期境界 下端:バルク法(熱・運動量)
地表面温度	320K (Ryan 1972)
初期温位	高度800mまで300K 以高20K/kmで上昇
一般流 U_0	0; 5; 10; 15 m/s
乱流モデル	Smagorinsky-Lillyモデル
雲物理	なし

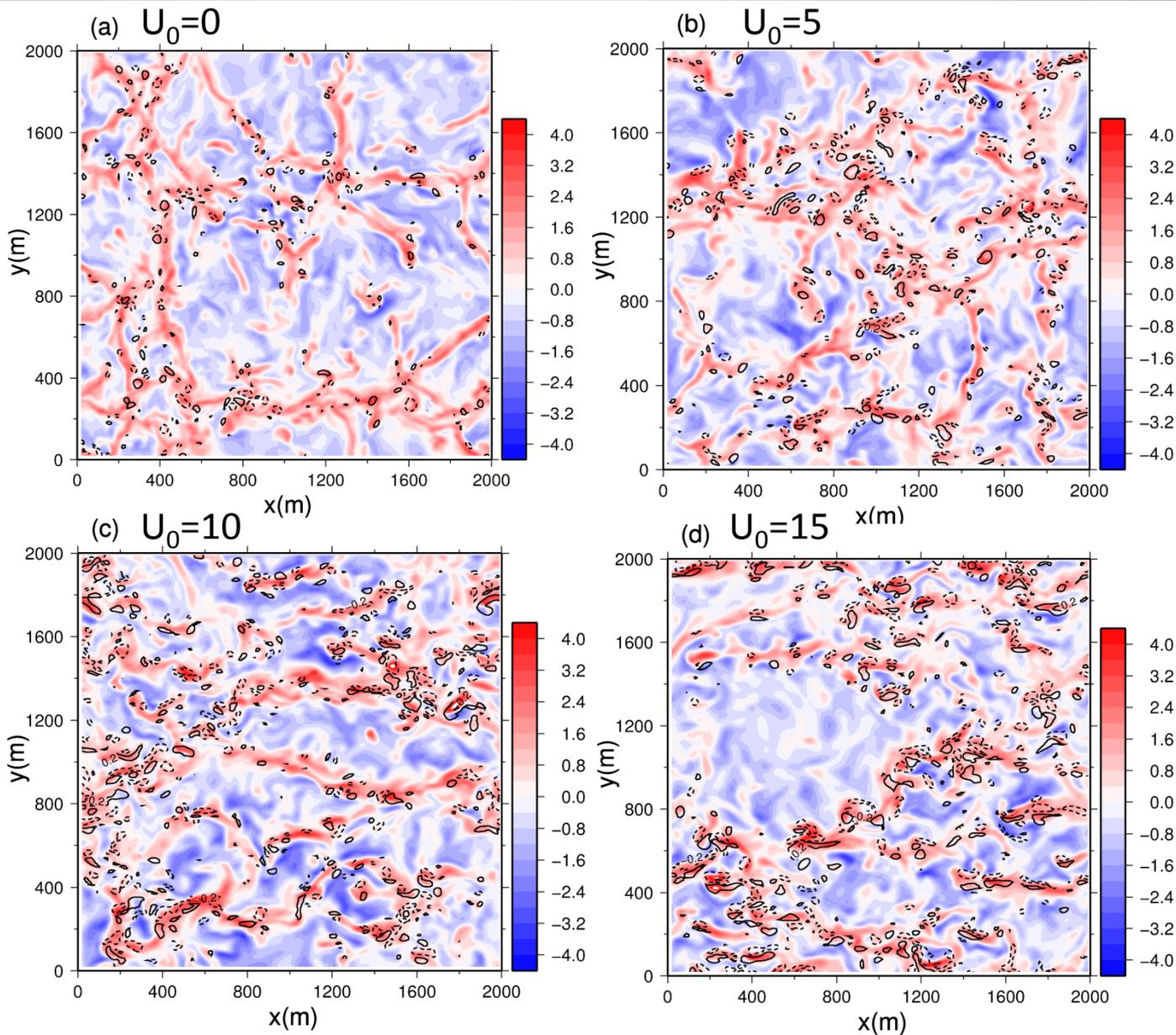
図: $t=3600s$ における温位の鉛直分布

平均プロファイル

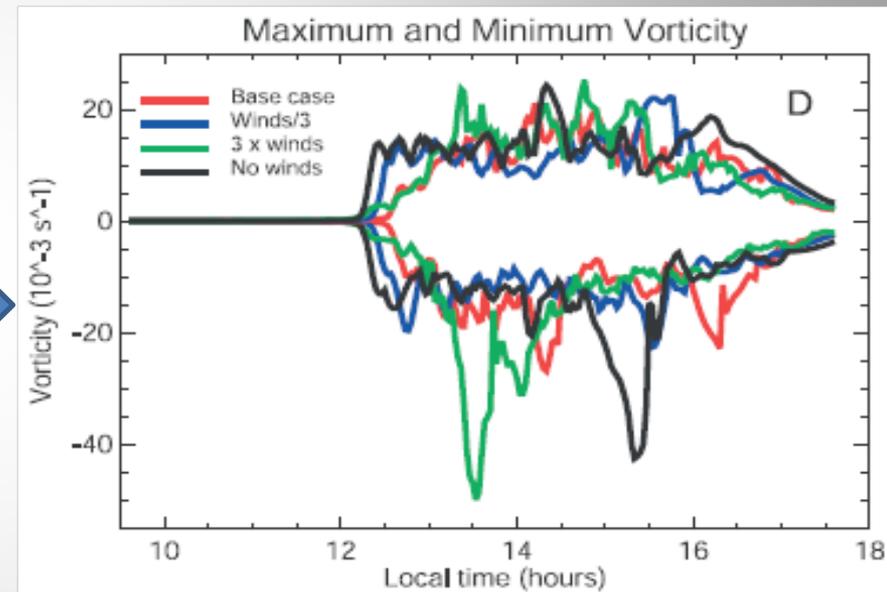
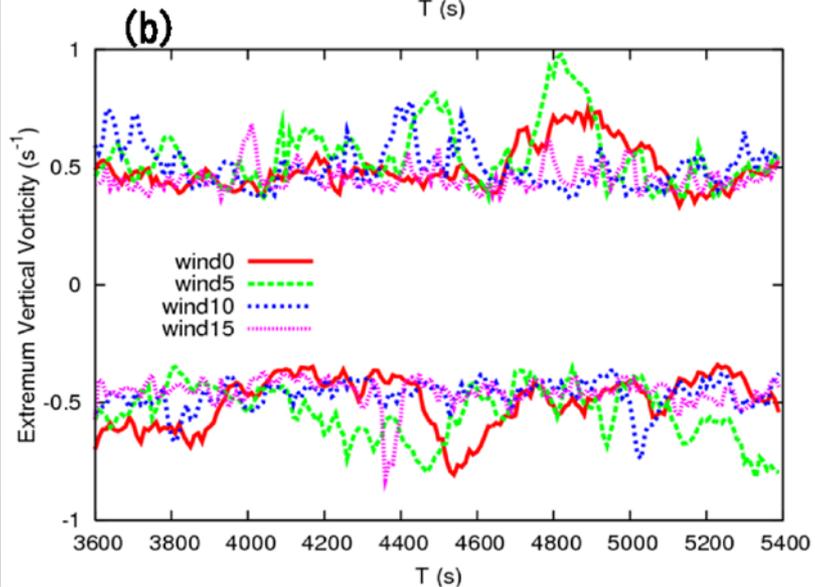
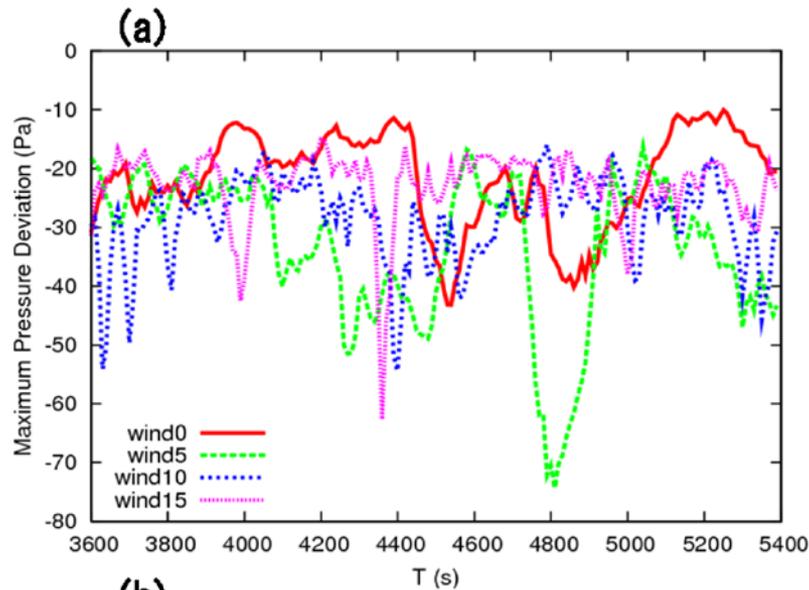


一般風の違いによる対流構造の変化

高度50 mでの鉛直速度(カラー)および渦度の鉛直成分(実線)



気圧偏差と渦度の最大値の違い

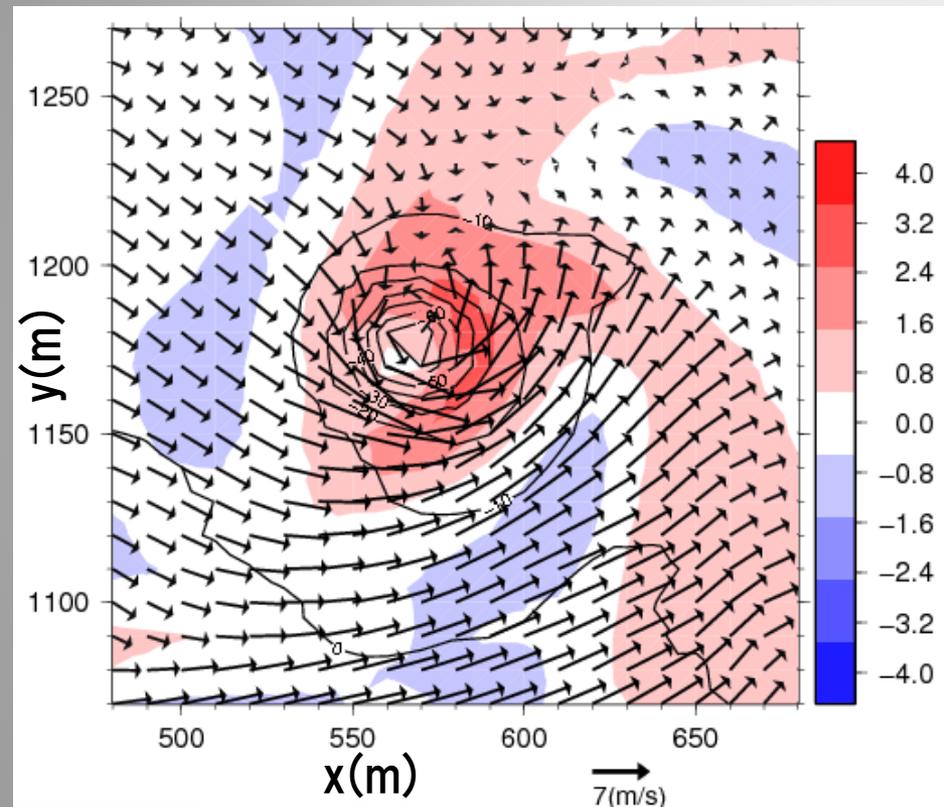


(Toigo et al. 2003)

渦の構造 ($U_0=5$)

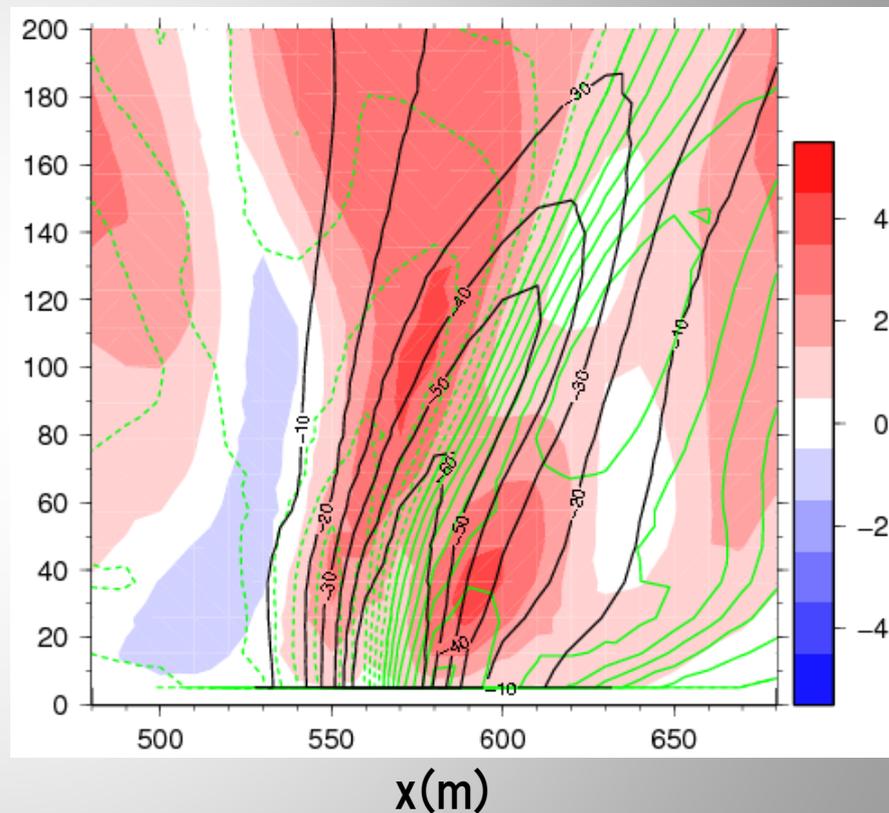
$T=4800s$

$Z = 15m$



鉛直流(色付)と圧力偏差(10Paごと)

$z(m)$

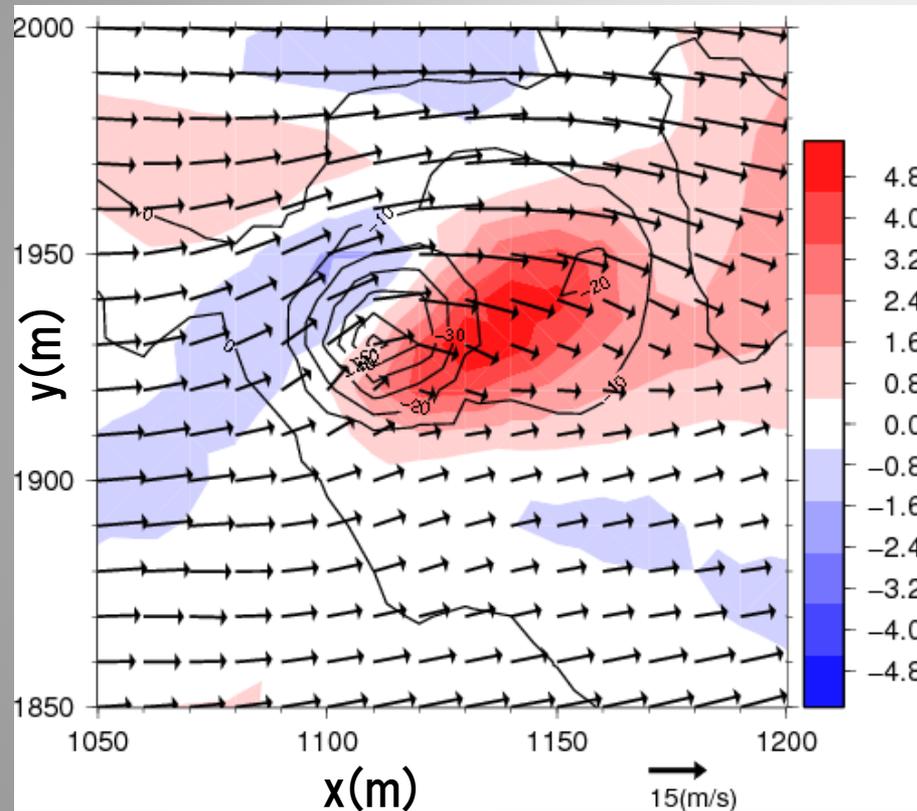


$Y=1180$ の鉛直断面(緑: v 1(m/s)ごと)

渦の構造 ($U_0=15$)

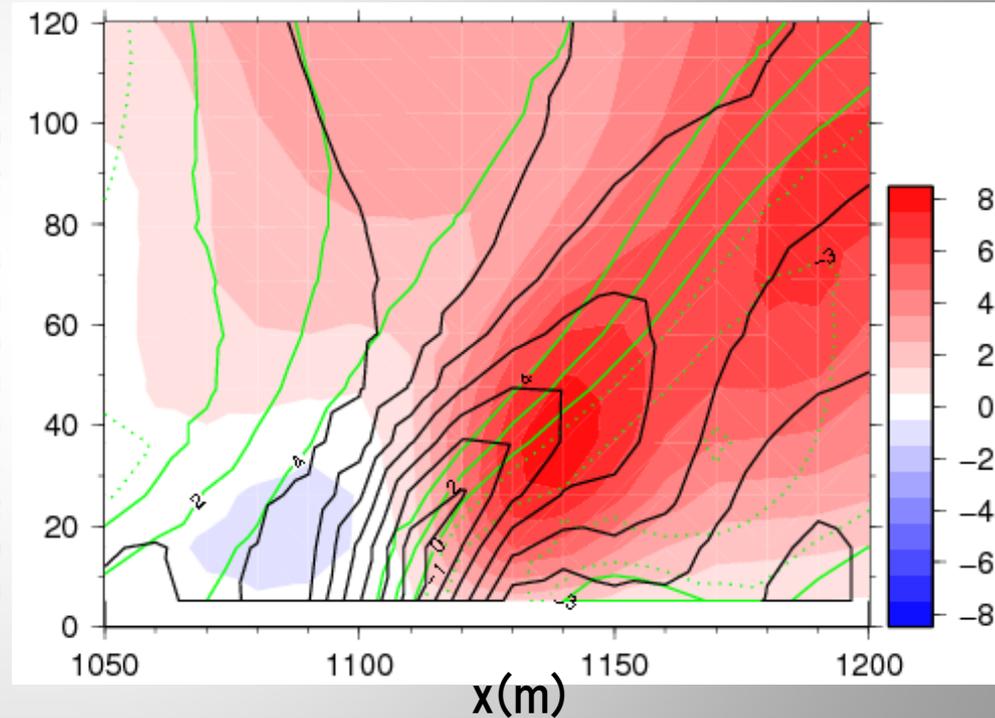
$T=4800s$

$Z=15m$



鉛直流(色付)と圧力偏差(10Paごと)

$z(m)$



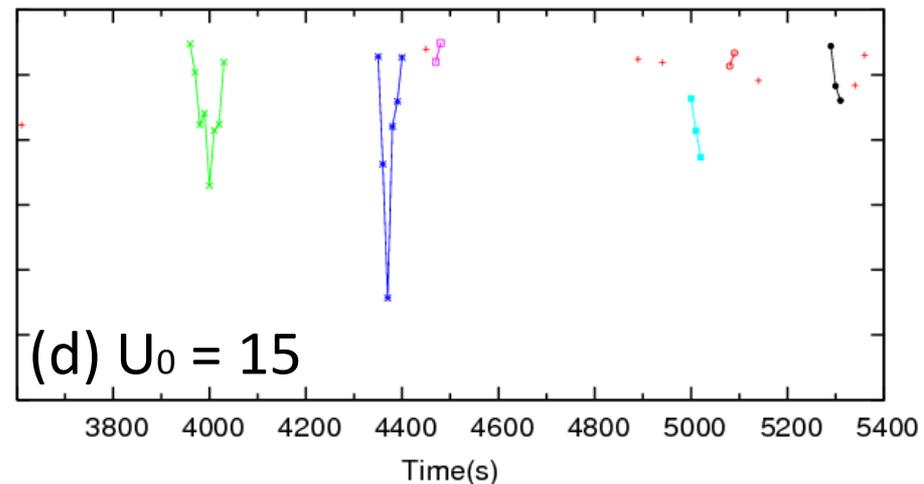
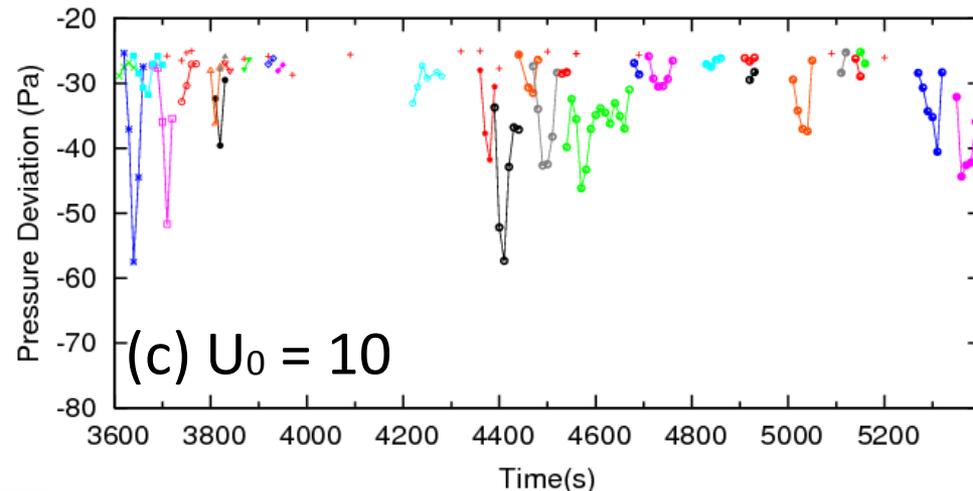
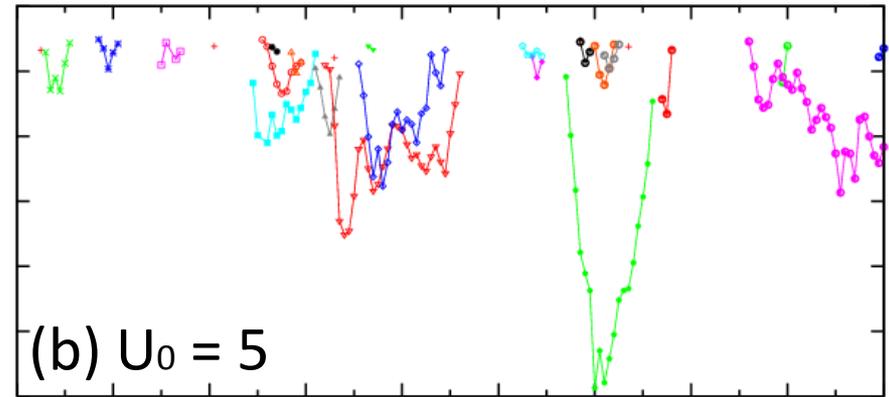
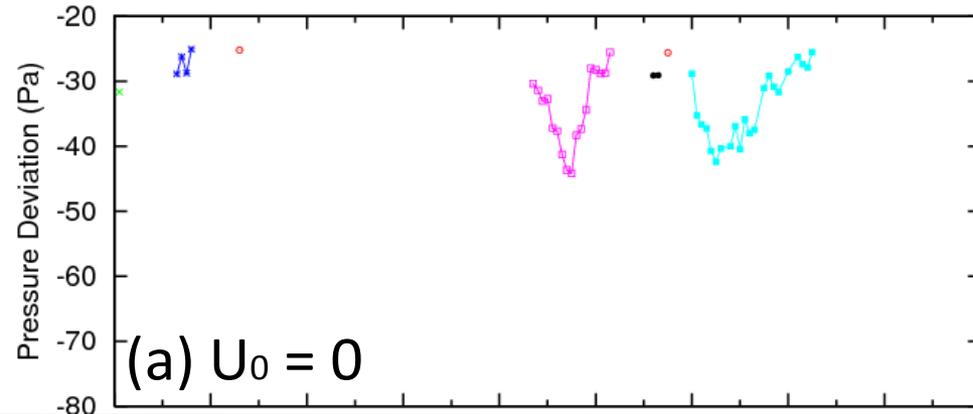
$Y=1930$ の鉛直断面(緑線は $v: 1(m/s)$ ごと)

一般風の違いによる渦の強度変化

閾値

$$|p'| > 25 \text{ Pa}_{s^{-1}}$$

$$|\xi| > 0.15 \text{ s}^{-1}$$



閾値を超える強い渦の中心における圧力偏差の時間発展の図。
各色線が一つ一つの渦を示している。

一般風ごとに違いが見られた要因

考えられる要因

風速が強くなると...

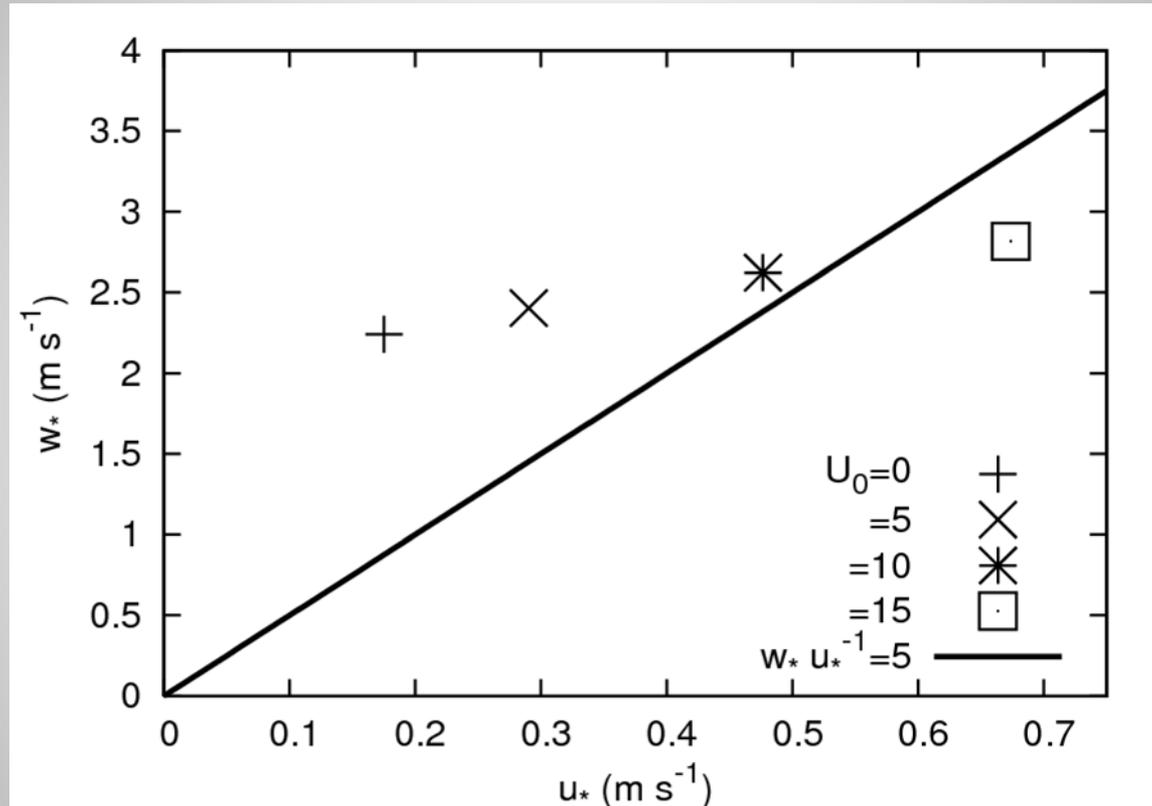
- ・組織的な(セル状)対流構造が壊れてくる
- ・風速変動が大きくなり、拡散性が強まる

Negative
role

- ・地表面からの熱フラックスが増大する

Positive
role

安定度との関係



$$w_* = \left(g H_0 h \theta_0^{-1} \right)^{\frac{1}{3}} : \text{対流速度スケール}$$

$$u_* = C_D |U|_{k=1} : \text{摩擦速度}$$

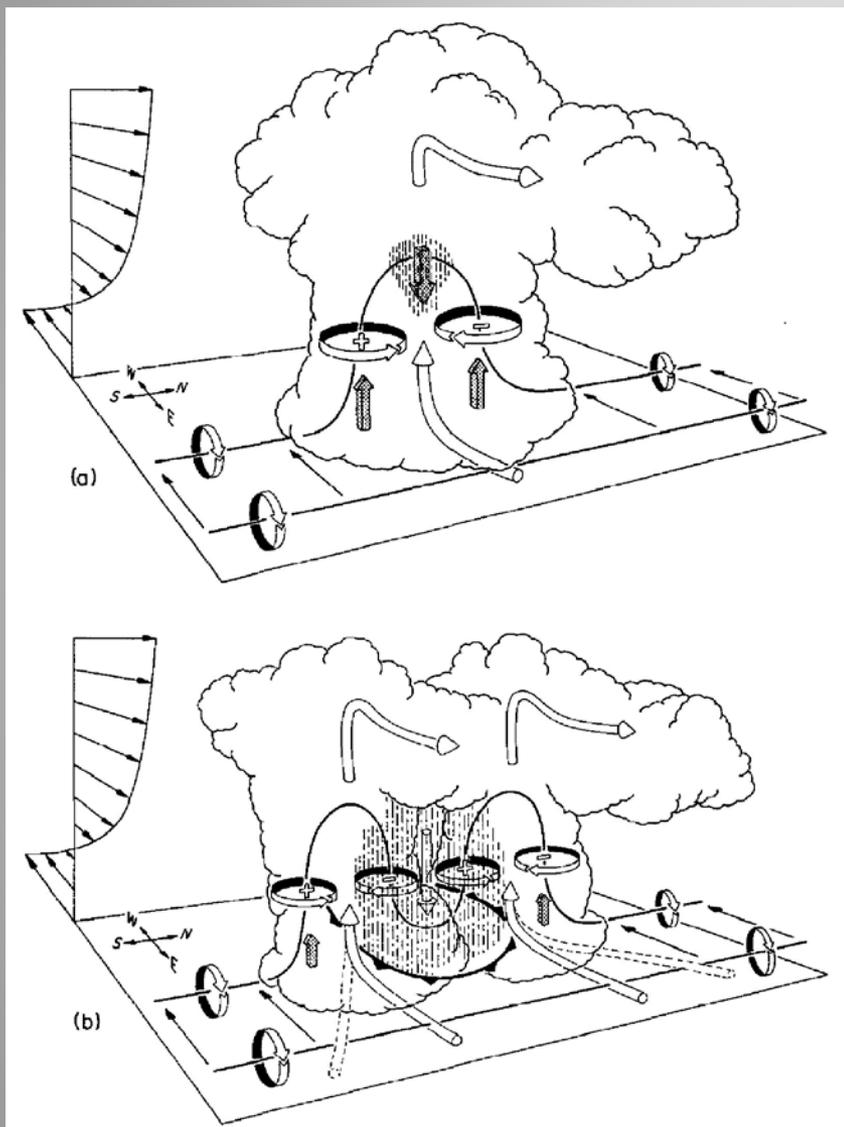
まとめと今後の展開

- 渦の強化・維持においては、複数の渦の融合により強い渦が形成されること、立ち上げ・引き伸ばしによる強い渦の維持、が重要なメカニズム
- 一般風の影響は、弱から中程度の風速の場合に最も多数・最も強い渦が形成される、ということに表れる
- 渦の強さは混合層の深さによってどう変化するか？
- 空気密度の違いはどう影響するか？

参考論文

- Ohno, H., and T. Takemi, 2010a: Mechanisms for intensification and maintenance of numerically simulated dust devils. *Atmospheric Science Letter*, Vol. 11, pp. 27-32., doi: 10.1002/asl.24. . . . 渦の強化・維持過程
- Ohno, H., and T. Takemi, 2010b: Numerical study for the effects of mean wind on the intensity and evolution of dust devils. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, Vol. 6A, pp. 5-8, doi:10.2151/sola.6A-002. . . . 一般風の影響
- 大野 洋, 竹見 哲也, 2009: 数値計算パラメータによって変化する塵旋風の構造の感度実験. 京都大学防災研究所年報, 第52号B, pp. 465-470. (available online at <http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/nenpo/no52/ronbunB/a52b0p49.pdf>) 解像度依存性

参考：積乱雲による渦の形成



(Klemp 1987, cf. Rotunno 1981)

風の鉛直シアー(dv_h/dz)が水平方向に軸を持った渦度場を表現している。

簡単のため、風向変化がない鉛直シアーの場を考えると、立ち上げ効果による渦度変化は次式で表せる：

$$\frac{d\zeta}{dt} = \frac{dU}{dz} \frac{\partial w}{\partial y} \quad (5)$$

この式によれば、

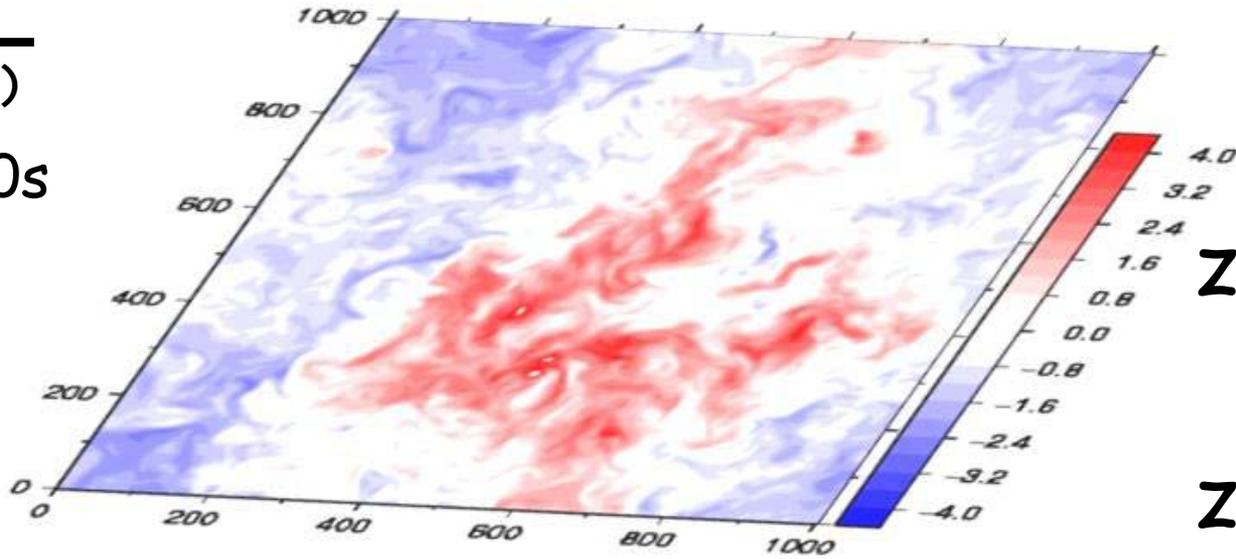
- 上昇流の南側($\partial w/\partial y > 0$)では正の渦度(低気圧性循環)が生成され、
- 北側($\partial w/\partial y < 0$)では負の渦度(高気圧性循環)が生成される。

さらに、立ち上げられた渦度は上昇流による引き伸ばし効果により強化される。

CBL

(対流混合層)

$T = 5100s$



$z = 300m$

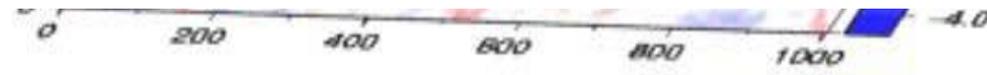
$z = 200m$



$z = 100m$



$z = 50m$



$z = 10m$



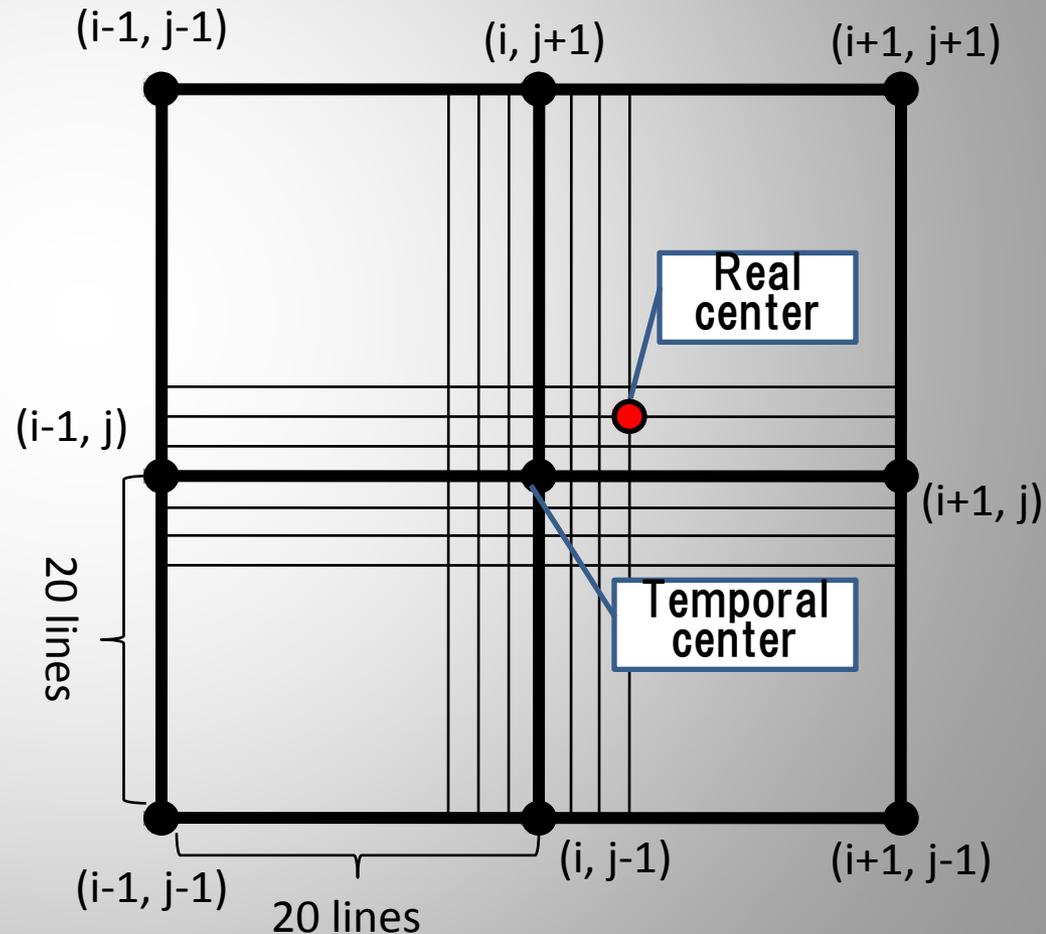
X(m)

渦の選出の方法

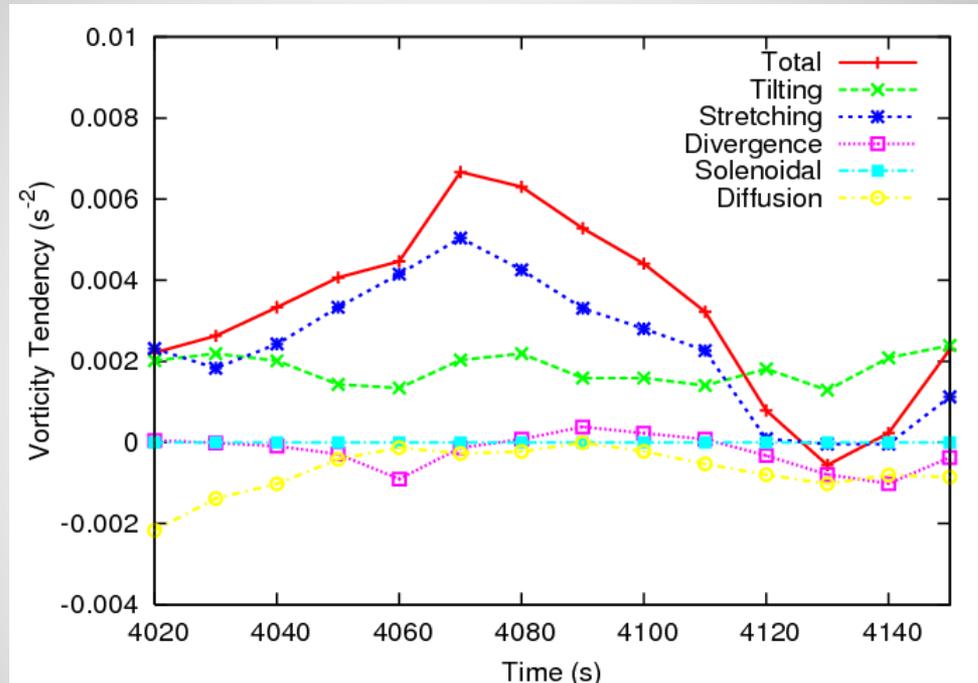
閾値

圧力偏差 ... 10(Pa)
渦度の絶対値 ... 0.15(1/s)

- 1) 閾値を超え、なお且つ周囲よりも圧力偏差が大きい地点を仮の中心とした。
- 2) 格子間を40等分し、ランキン渦の圧力分布からのずれを最小二乗法で評価することにより真の中心を決定する。
- 3) 各格子点の風速を動径方向と回転方向に分解して、周囲の中から最大風速半径を決める。
- 4) これらの操作を180time step繰り返す。



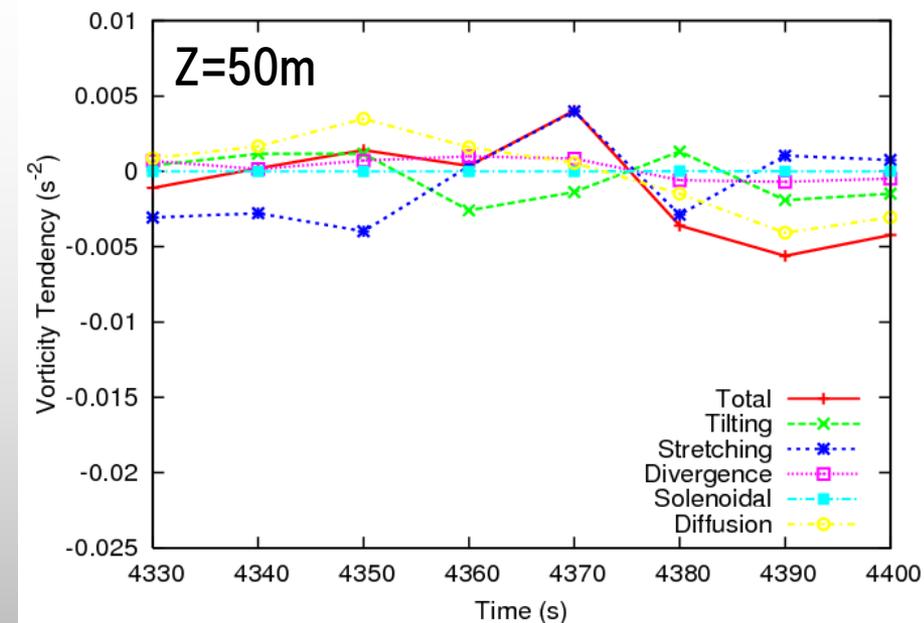
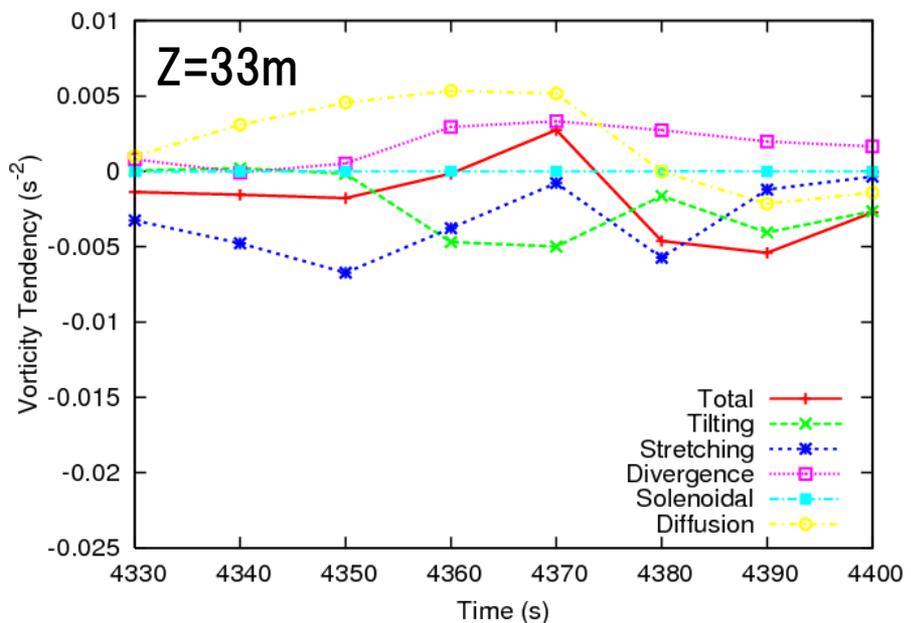
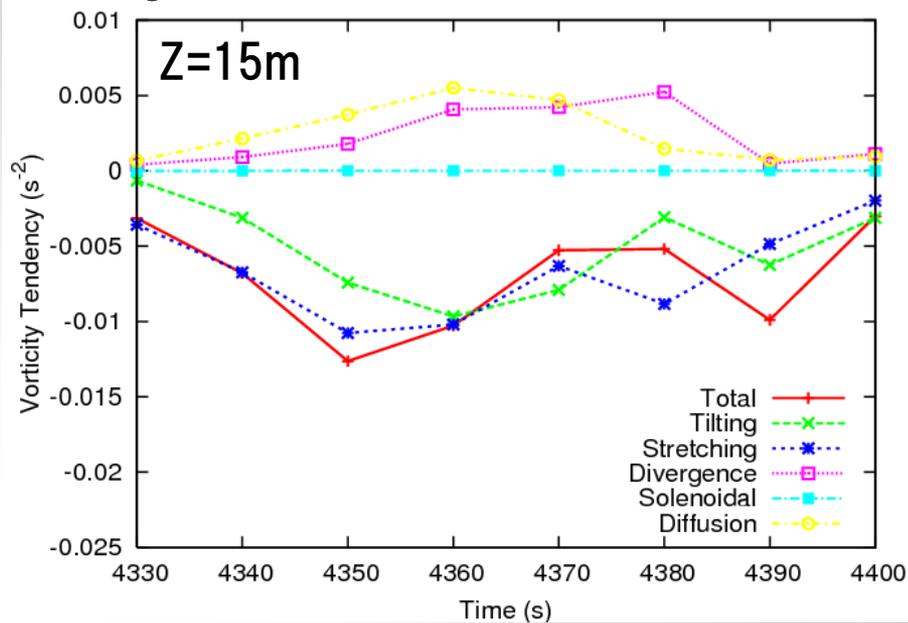
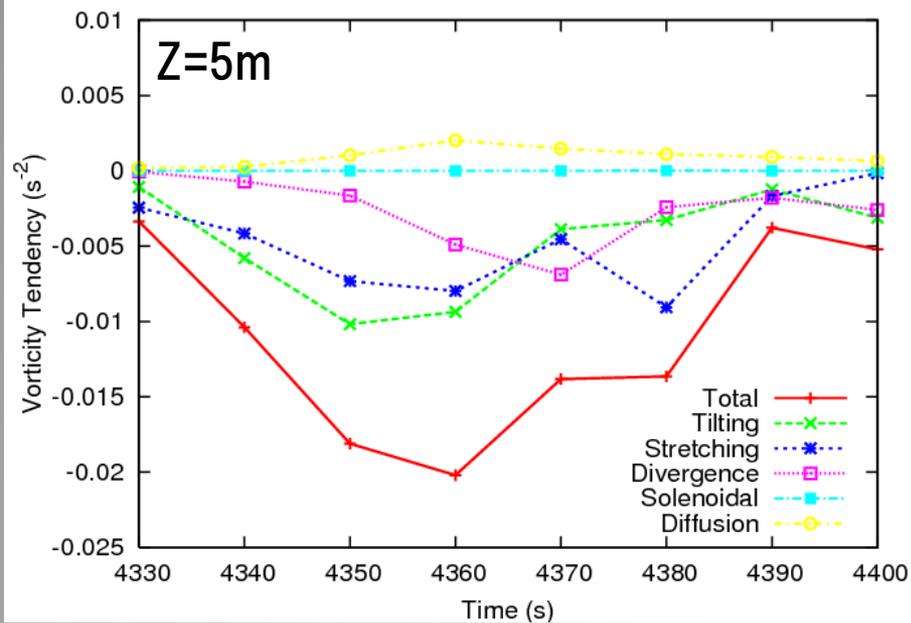
渦度収支 ($U_0=5$)



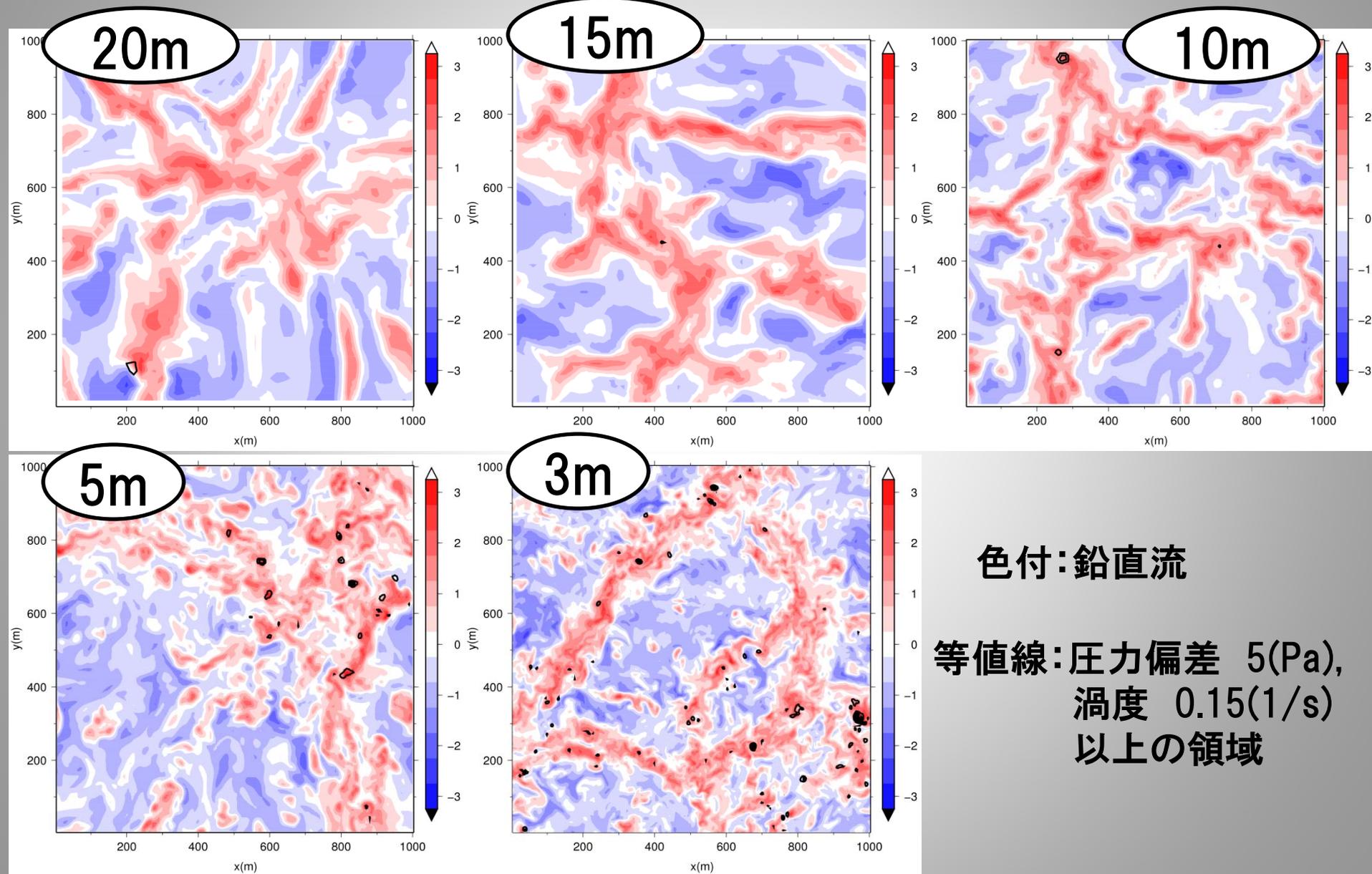
$$\underbrace{\frac{D\zeta}{Dt}}_{\text{Total}} = \underbrace{\left(\eta \frac{\partial}{\partial x} + \xi \frac{\partial}{\partial y}\right)w}_{\text{Tilting}} + \underbrace{\zeta \frac{\partial w}{\partial z}}_{\text{Stretching}} - \underbrace{(\nabla \cdot \vec{u})\zeta}_{\text{Divergence}} + \underbrace{\frac{R}{P}(\nabla T \times \nabla P)}_{\text{Solenoidal}} + \underbrace{K\Delta\zeta}_{\text{Diffusion}}$$

渦中心を中央にして、9格子×9格子の領域で各項を平均した時系列

渦度収支 ($U_0=15$)



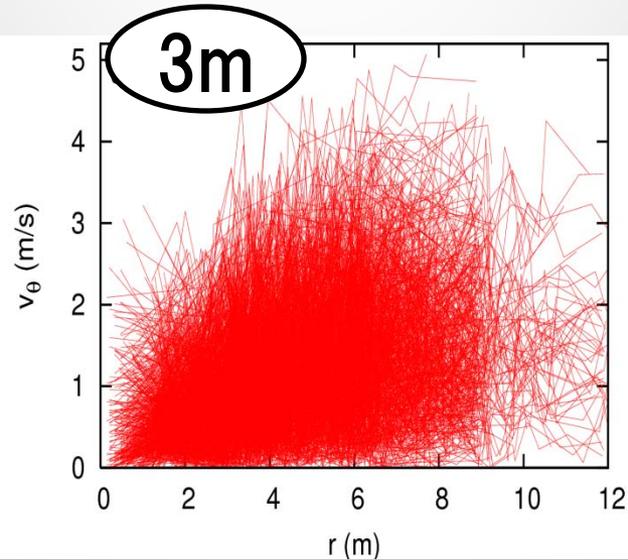
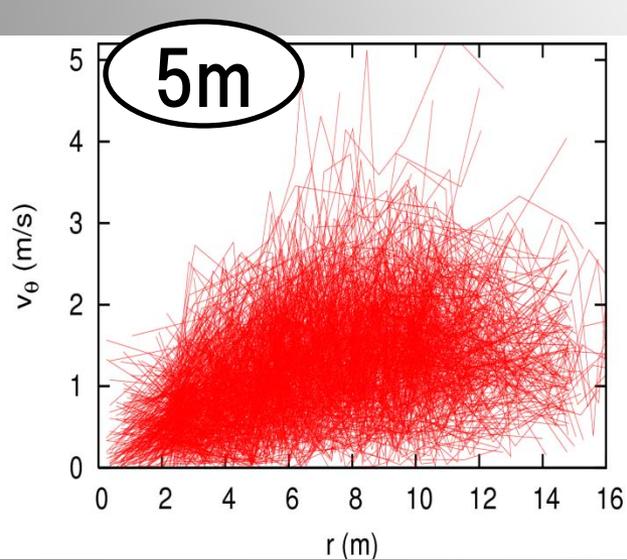
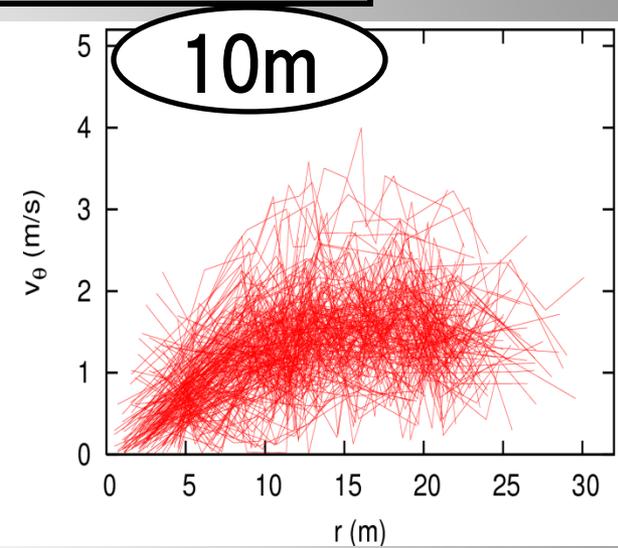
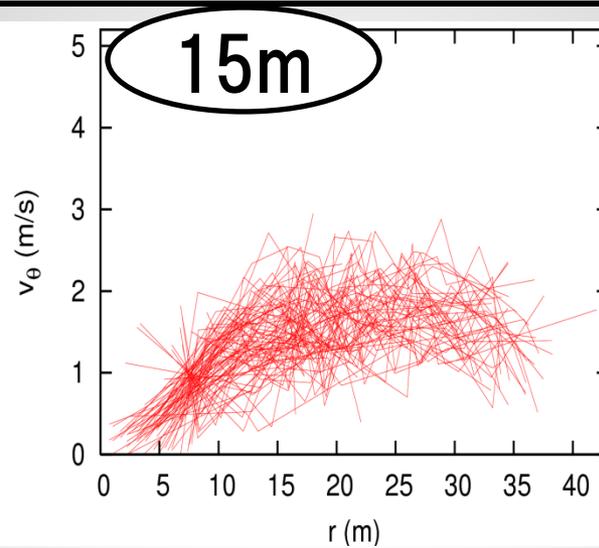
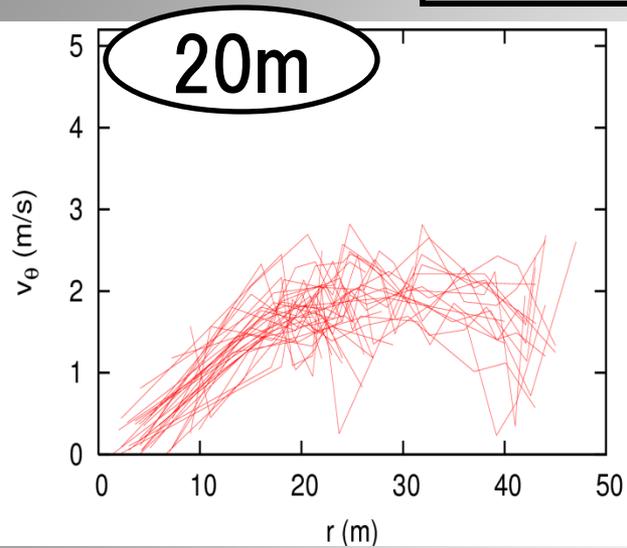
水平断面：セル状構造(高度約50m)



風速分布

横軸: 中心からの距離

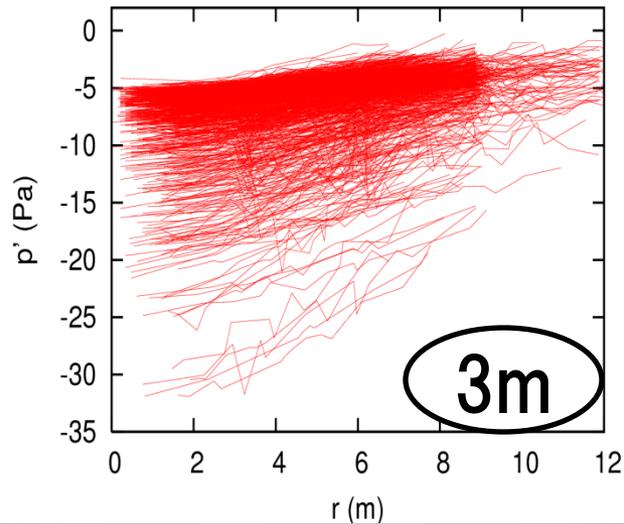
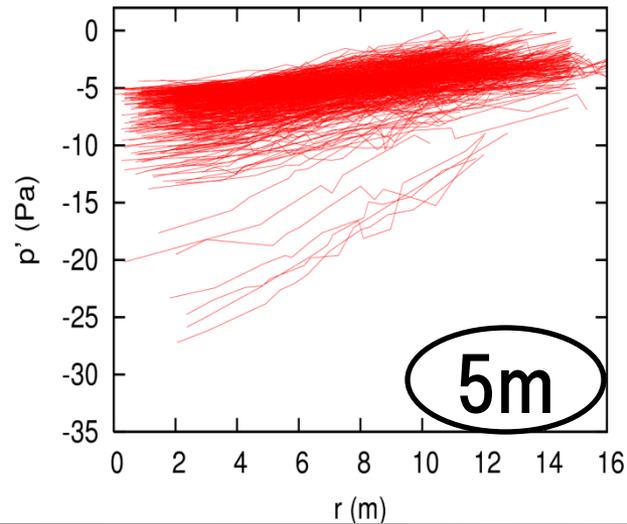
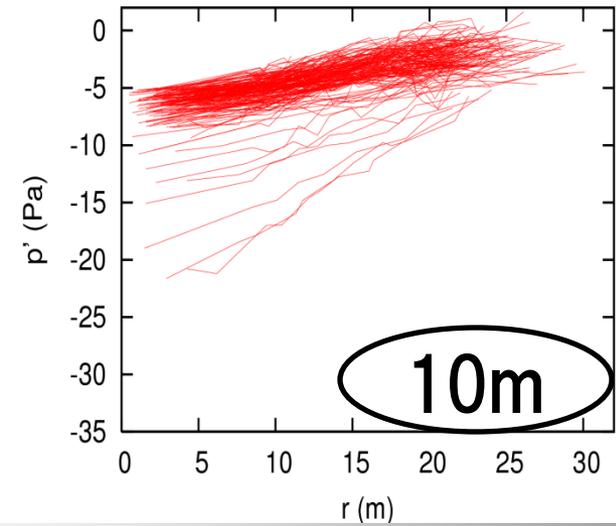
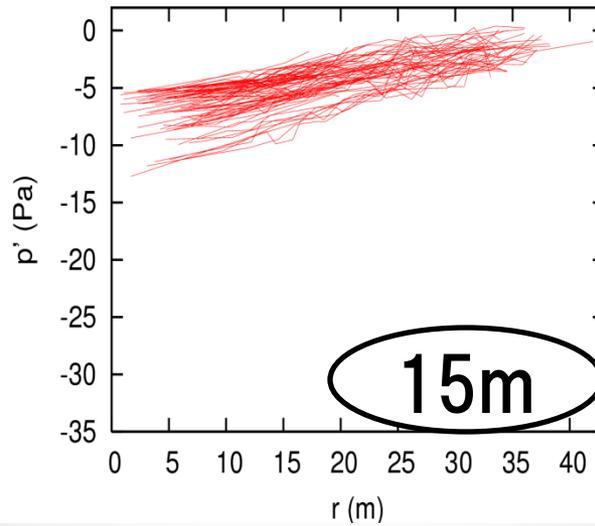
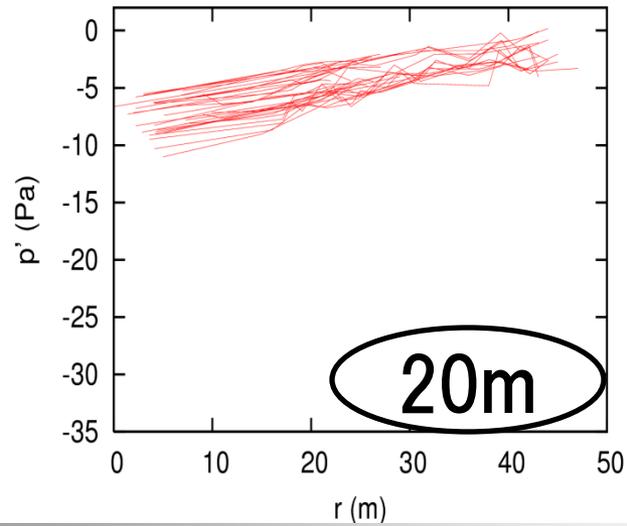
縦軸: 速度の回転成分



圧力分布

横軸: 中心からの距離

縦軸: 圧力偏差



最大風速半径の頻度分布

横軸: 最大風速半径/格子幅

縦軸: 全渦数に対する割合

