

今日の予定

ダストデビル

- シミュレーション
 - ダストの巻き上げ
 - 発生環境
 - ダストデビルの生成機構
 - スケーリング
- ダストデビルの観測
 - PIV

対流混合層のシミュレーション

- 水平拡散
- カルマン渦

ダストデビル

Dust Devil (塵旋風、つむじ風)

- 晴天時の日中、発達した対流混合層で生ずる、小スケールの強い鉛直軸周りの渦
- 地表面からダストを巻き上げ、可視化



ダストデビルワークショップ @ISSI(2015年3月)

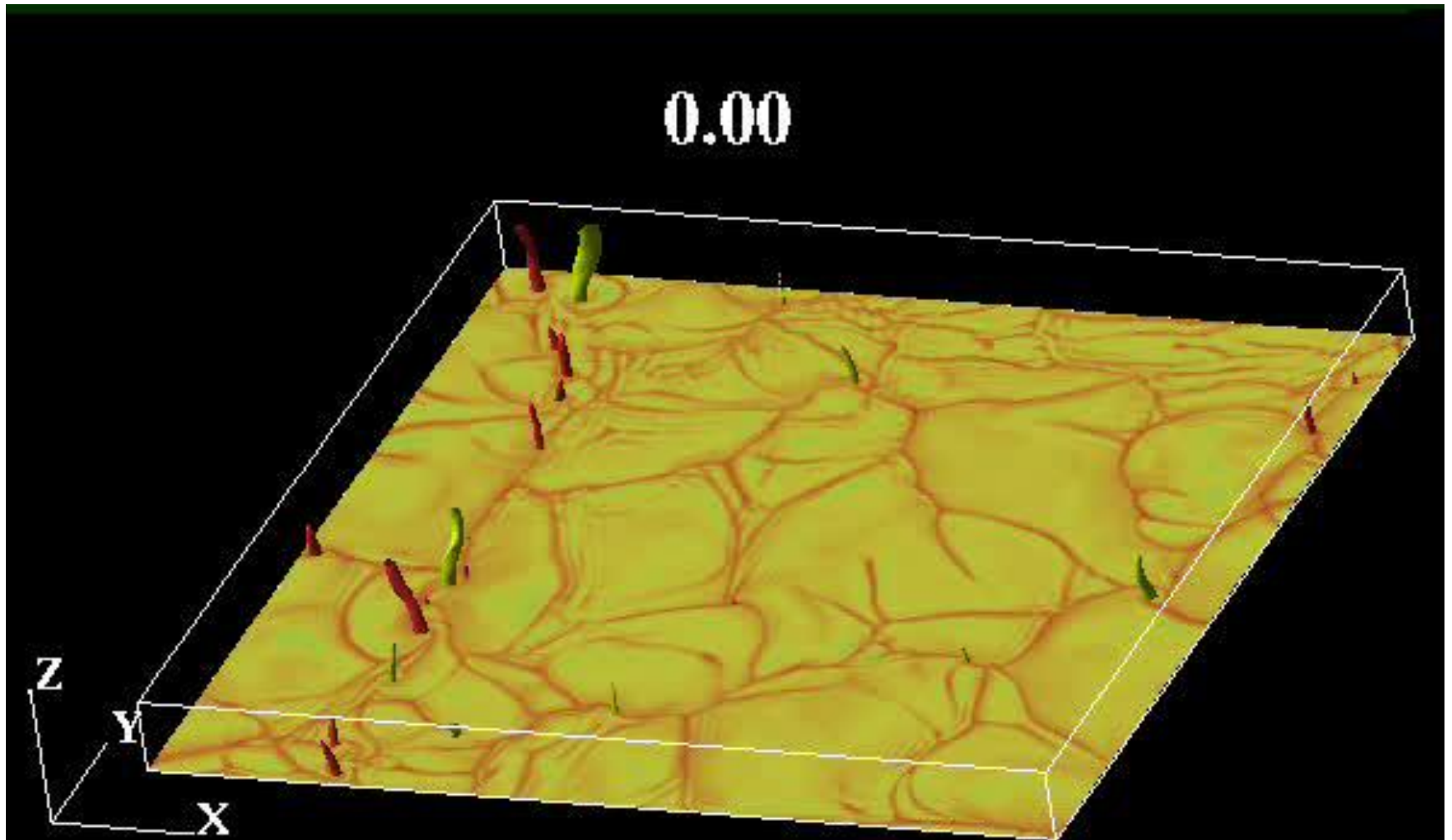


Dust deviのテキスト

<https://www.amazon.com/Dust-Devils-Space-Sciences-ISSI/dp/940241133X>

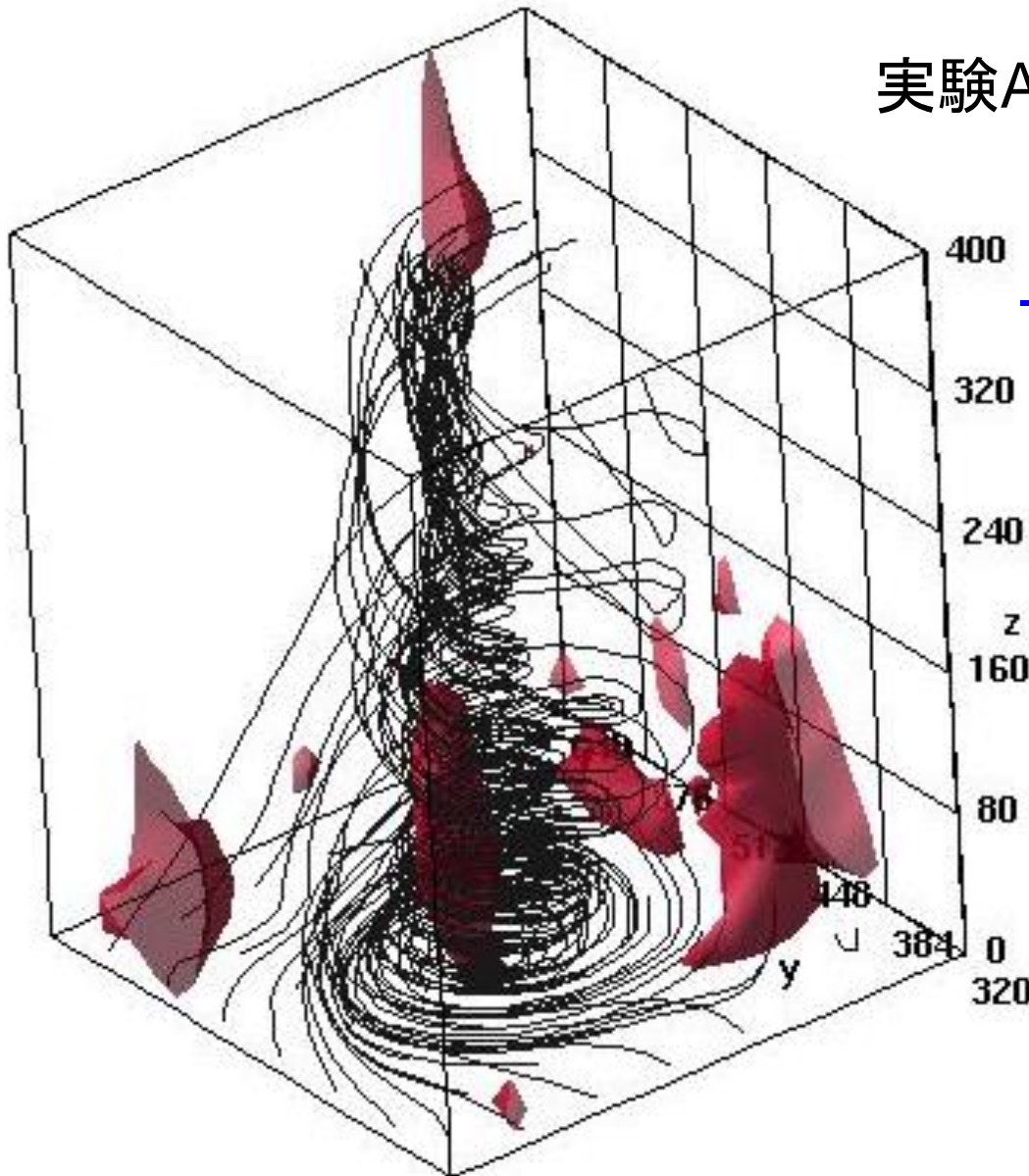
LESによるダストデビルの再現

12:00-12:30、赤は正の鉛直渦度、緑は負の鉛直渦度



再現されたダストデビルの構造

実験A1・格子間隔20m 15:18



一部の渦はtwo-cell型の構造

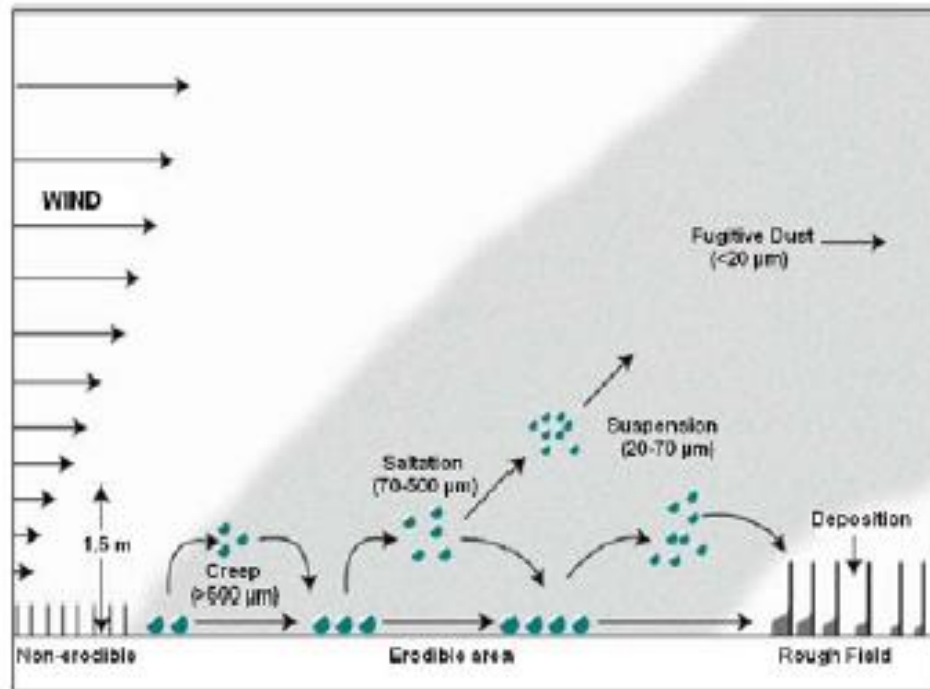


発達した渦のコアで
下降流

渦の周りの流線と鉛直
速度 $w < -0.2\text{m/s}$ の領域

ダスト舞い上がりの
シミュレーション

地面からの輸送・巻き上げ

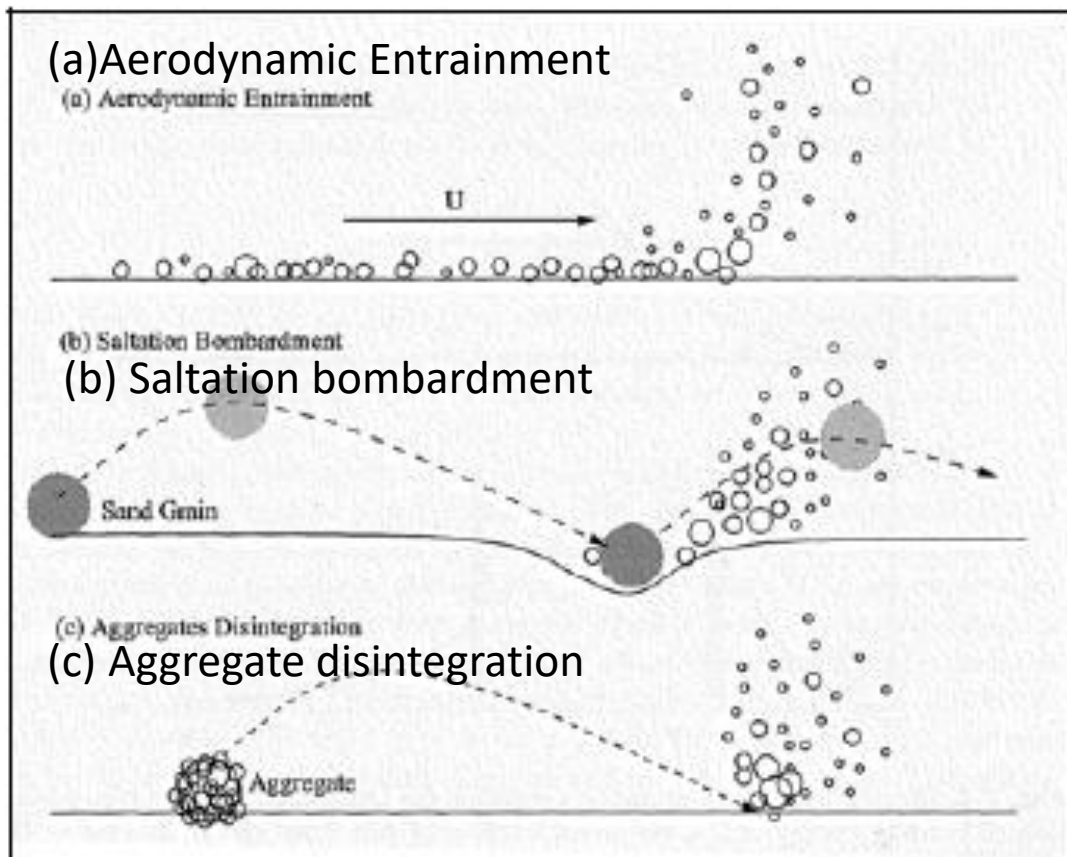


Shao (2004)

- 舞い上がりのプロセスのパラメタリゼーション（強風ほど大量の舞い上がり）
- 地面近くの風の分布パラメタリゼーション

→ 両者に大きな不確実性

ダスト舞い上がりの3つのモード



- 弱風時の舞い上がり
- パラメタリゼーションの不確実性の一因

- 強風 ($> 7\text{m/s}$) 時の舞い上がり
- グローバルスケールへの寄与大
- 従来のパラメタリゼーションが想定

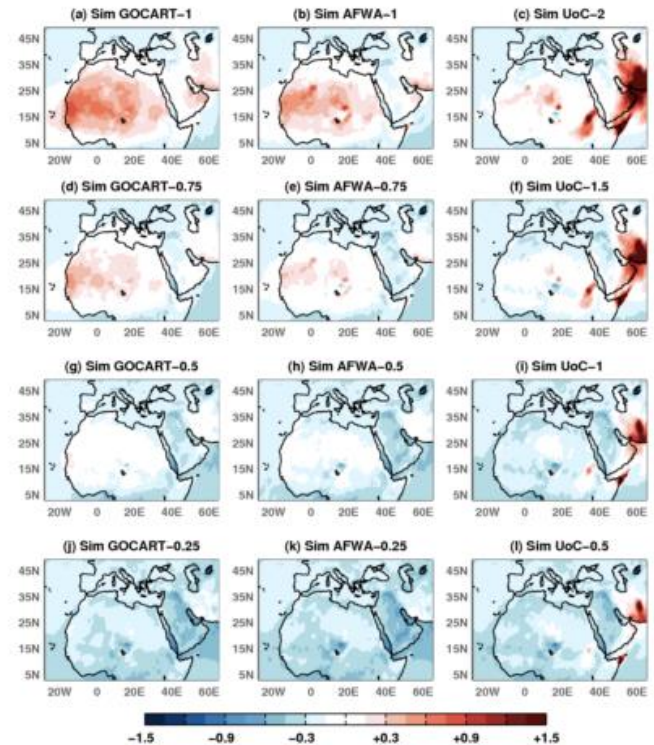
Shao (2004)

地表面状態(wet or dry) にも依存

ダスト舞い上がりのパラメタリゼーションの不確定性(Flaounas et al., 2017)

- WRF-CHEMに導入済みの3種類のダスト巻き上げパラメタリゼーションを比較と観測。
- 相関係数が高いものと誤差が小さいものが異なる
- ダストフラックスの最適な比例係数は地域ごとに異なる、単純なチューニングでは観測とのギャップを埋めることができない

比例
係数
大



過小
評価

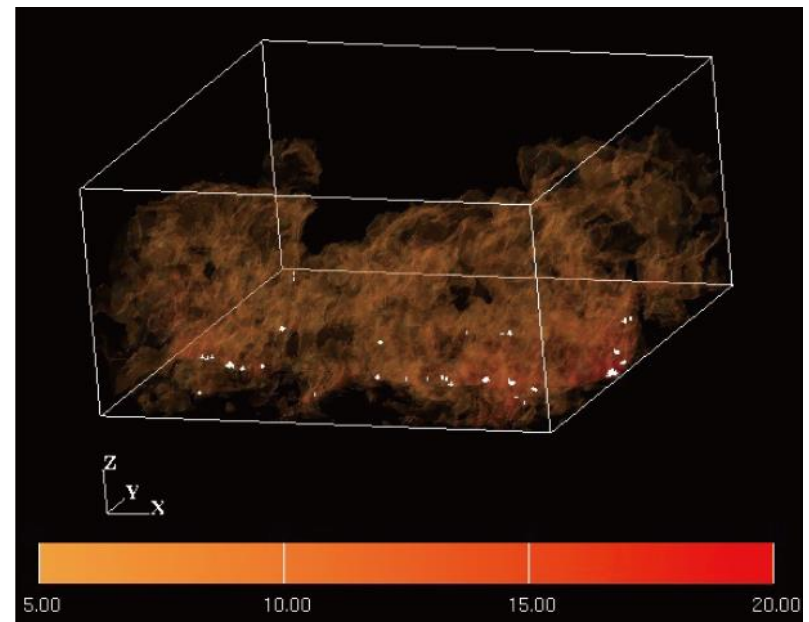
過大
評価

LES of dust suspension (Ito et al. 2010)

- Include dust processes
 - Bulk formula for upward dust flux F_d at lowest level (Loosmore and Hunt, 2000)
$$F_d \equiv 3.6(u_*)^3, \quad u_*: \text{frictional velocity} \quad (\text{実験式})$$
 - Gravitational settling
 - Prognostic equation of dust concentration c
- No ambient wind (環境風0のときに、ダストがどの程度舞い上がるか?)
- $dx=25\text{m}$

3D image of dust concentration c at 1500 LST

Shade: dust concentration
White circles: larger vertical vorticity



粒径ごとのダスト濃度の日変化

地表面ヒートフラックスの最大値 $270\text{W}/\text{m}^2$
各高度の水平平均

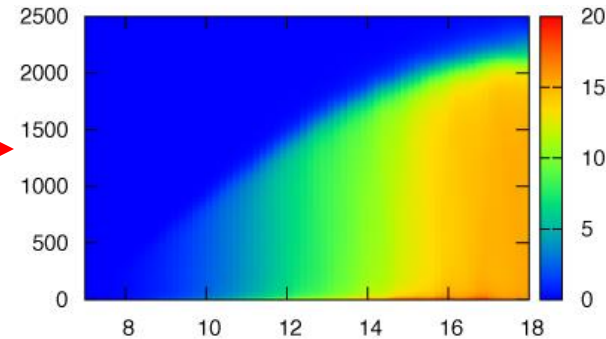
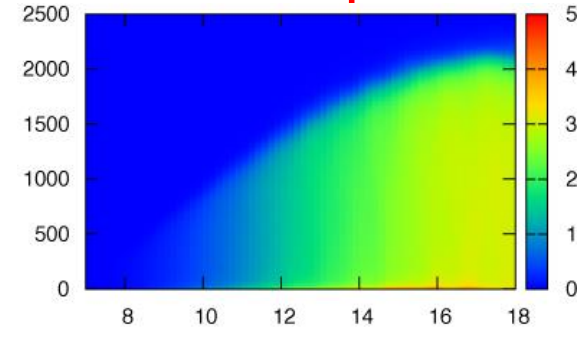
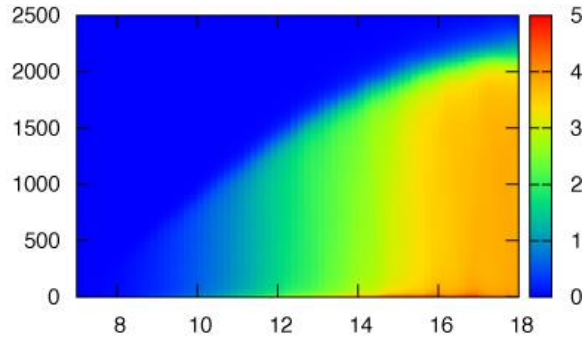
高度(m)

1 μm

$\mu\text{g}/\text{m}^3$

3 μm

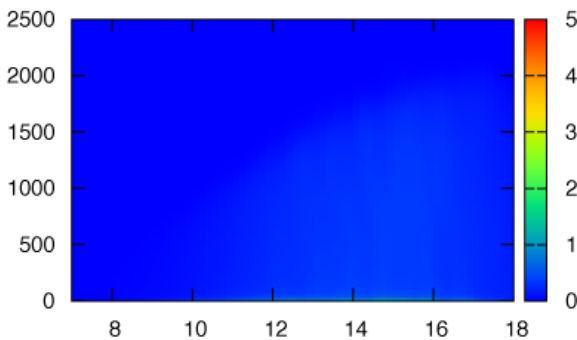
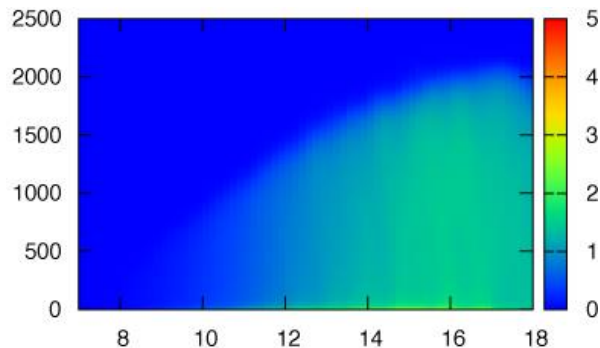
合計



時間

6 μm

10 μm



地表面ヒートフラックスによる ダスト濃度の違い

地表面ヒートフラックスの最大値

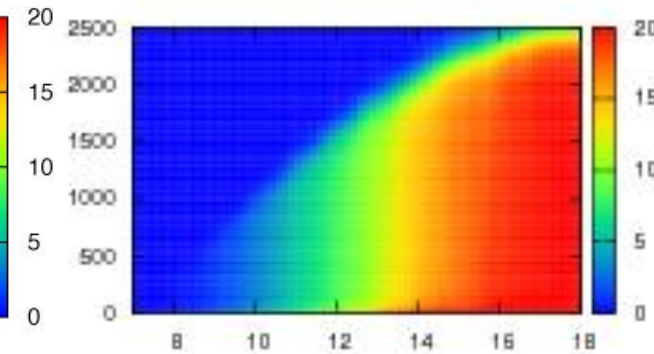
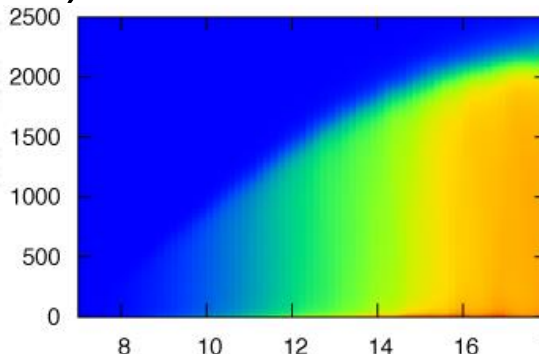
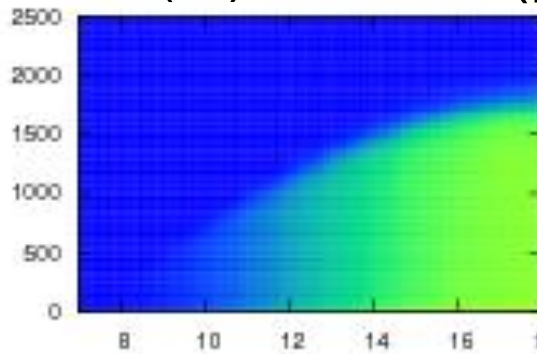
180 W/m²

270 W/m²

359 W/m²

水平平均した
ダスト濃度
($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

高度(m)



時刻

Dust amount in CBL

Horizontally averaged dust concentration

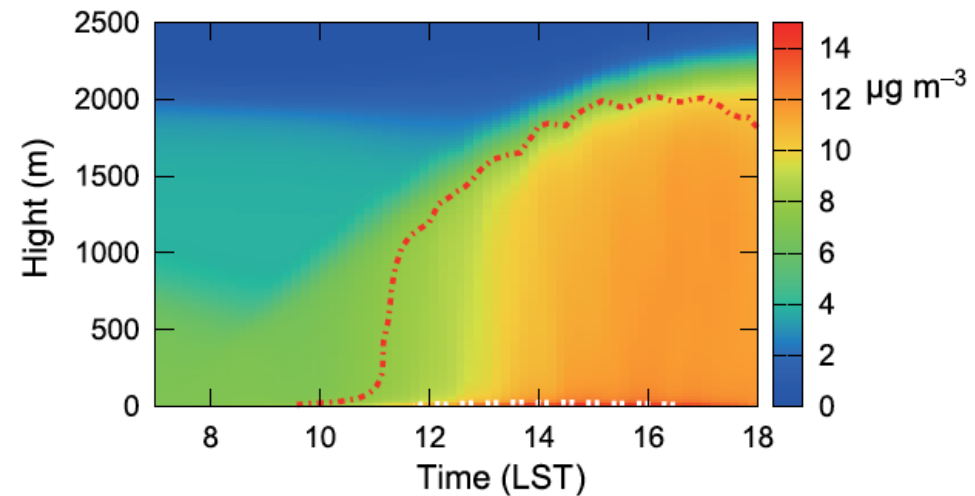
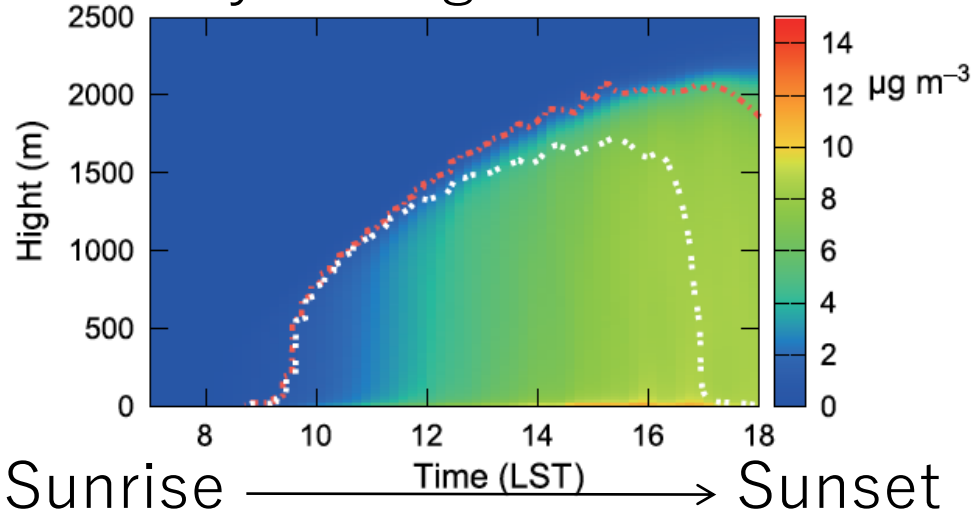
1st day

Assume
gravitational
settling at night

2nd day

1.86 times larger
concentration

→ ∞ day



$$c_1 + 0.86c_1 + 0.86^2c_1 + 0.86^3c_1 + \dots + 0.86^\infty c_1 \rightarrow 7.16c_1$$

Shao et al. (2013)のダスト舞い上げパラメタリゼーション

$$w_p = -\frac{w_t}{2} + \frac{T_p}{2} \left(\frac{f}{m_p} - \frac{f_i}{m_p} \frac{d}{D} \right) \quad \text{for } f > f_i, D > d \quad (6)$$

where w_t is the particle terminal velocity. If we assume N is inversely proportional to D , i.e., $N = \alpha_N/D$ with α_N being a coefficient to be determined, Eq. (4) leads to a flux of the form

$$\bar{F} = \begin{cases} \frac{\alpha_N}{2D} \{-w_t m_p + T_p (f - f_i \frac{d}{D})\} & f > f_i, D > d \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

The dust emission for a given particle size d_j can now be estimated as

$$F_j = \int_0^\infty \left[\int_0^f \bar{F} \cdot p_j(f_i) \cdot df_i \right] p(f) \cdot df \quad (8)$$

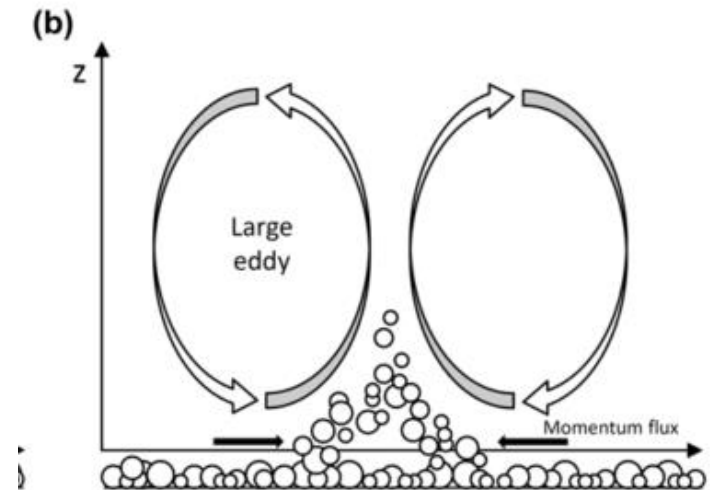
Eq. (7) and (8) can be simplified for specific distributions of $p_j(f_i)$ and $p(f)$. For example, for

$$p_j(f_i) = \delta(f_i - f_{i0})$$

$$p(f) = \delta(f - f_0)$$

we have

$$F_i = \begin{cases} \frac{\alpha_N}{2D} \{-w_t m_p + T_p (f_0 - f_{i0} \frac{d}{D})\} & f_0 > f_{i0}, D > d \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$



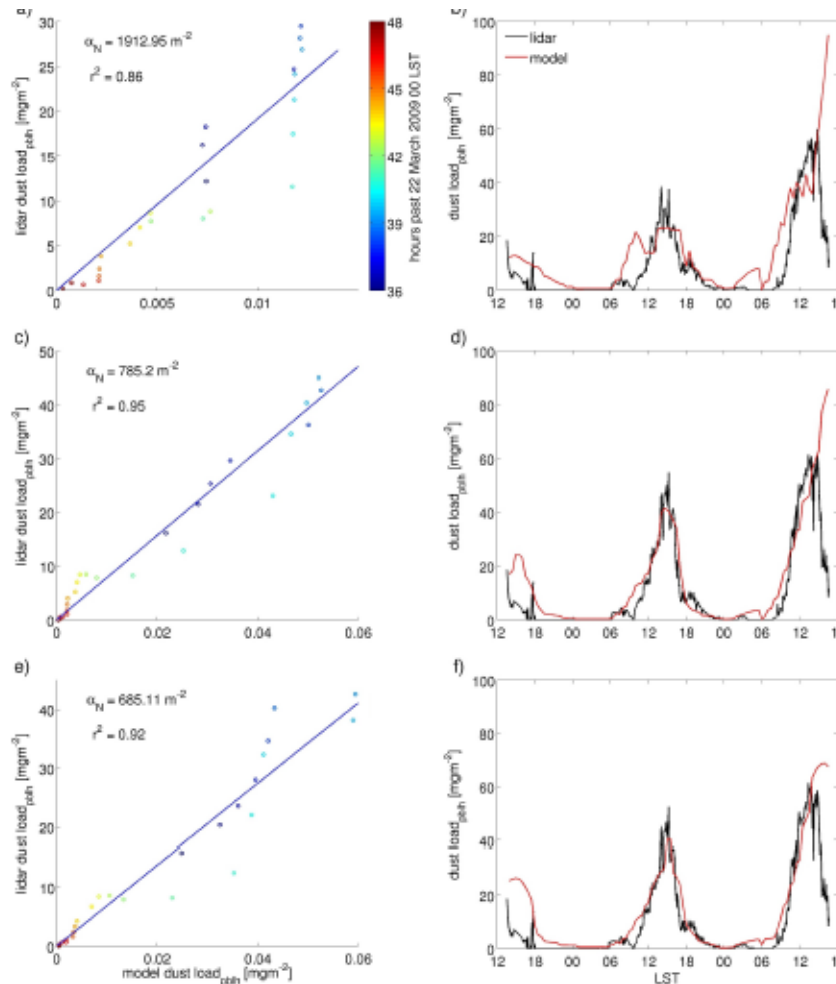
$p(f)$ 、確率分布関数を 3 種類

- ダスト分布
- ダスト同士の結合の大きさ (電磁気力)
- 乱流変動

→依然、経験的要素は大きい

Stochastic parameterization of dust emission and application to convective atmospheric conditions

M. Klose and Y. Shao (2013)



黒線、タクラマ
カン砂漠での甲
斐（名大）グ
ループのライ
ダー観測
赤線、モデル

Thermal creeping

Kupper and Wurm (2015)

- 気圧の低い火星では、クヌーセン数（気体の平均自由行程/粒子サイズ） ~ 1

→ 熱せられた地面から粒子が飛び出しやすくなる

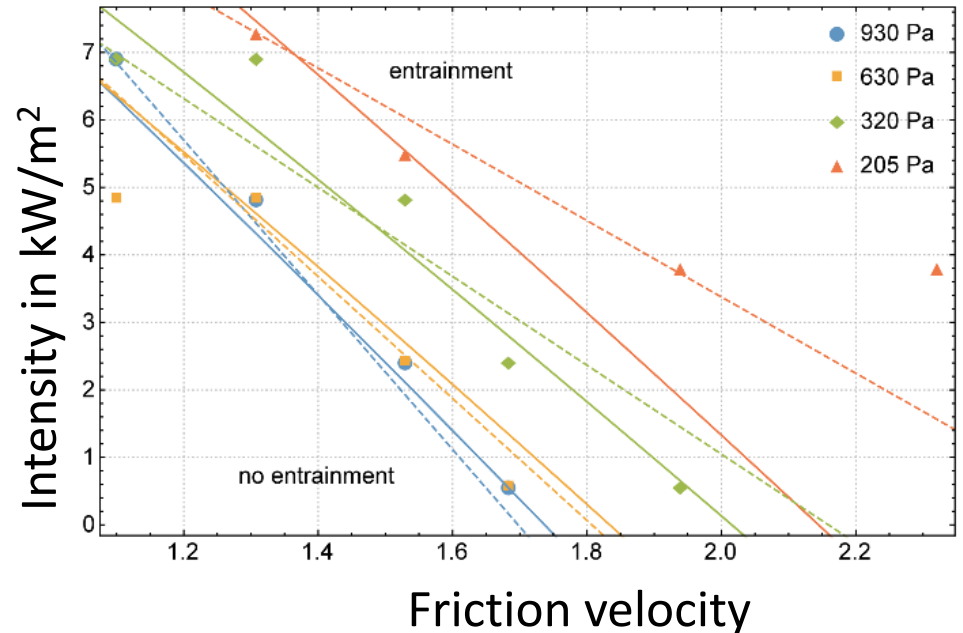
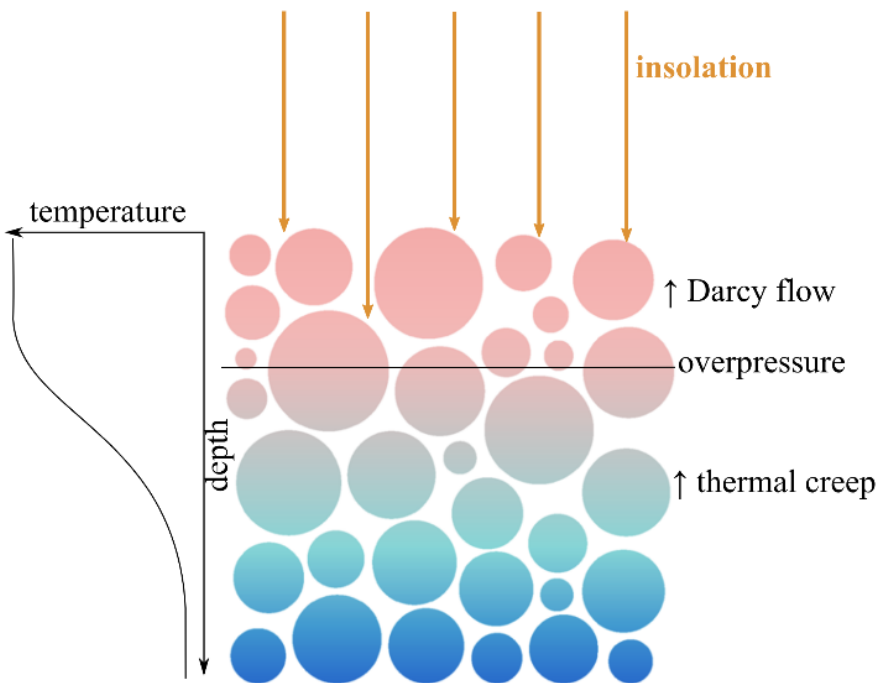


Figure 6. Model fits to the entrainment threshold obtained at $\geq 30\text{Pa}$, 630Pa and 320Pa. The data at 205Pa were not used for fitting. The Newtonian drag fit is shown as solid lines, and the slip flow fit as dashed lines. Both models have a similar fit quality. For details we refer to the text.

ダストデビルの発生環境

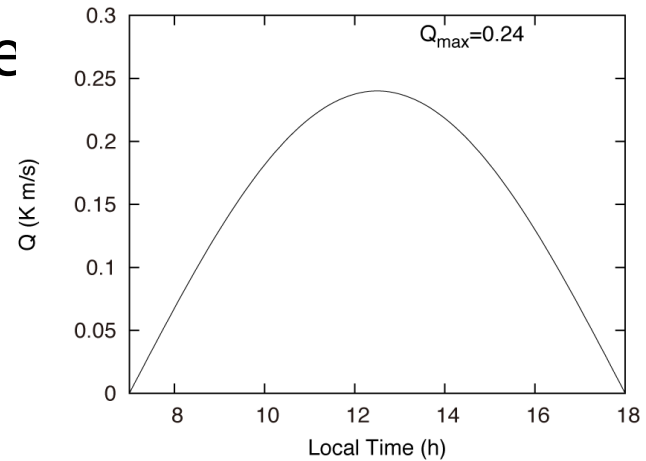
LESの設定

- **Basic equations:** 3D, Boussinesq approximation
- **Sub-grid model:** Smagorinsky model
- **Grid interval:** uniform $\Delta = 50 \sim 5$ m
- **Domain:** e.g. 4.5 km \times 4.5 km \times 3.6 km (90 \times 90 \times 60 grids) for $\Delta = 50$ m; 1.8 km \times 1.8 km \times 1.6 km (360 \times 360 \times 320 grids) for $\Delta = 5$ m
- **Boundary conditions**
 - **Surface**
 - **Momentum:** Bulk-method or Free-slip
 - **Heat:** Prescribe Horizontally uniform forcing with diurnal variation or constant
 - **Lateral:** Doubly-periodic
 - **Top:** Free-slip
- **Initial conditions**
 - Stable stratification $\Gamma (= 4.0\text{K/km})$
- **Time integration:** 0.2s step

Sensitivity test on diurnal variation, surface heat flux, and ambient wind

- Impose diurnal-varying surface flux

$$Q = Q_{\max} \times \sin\left(\frac{\pi}{11} \times (t - 7)\right)$$



- Various sensitivity tests

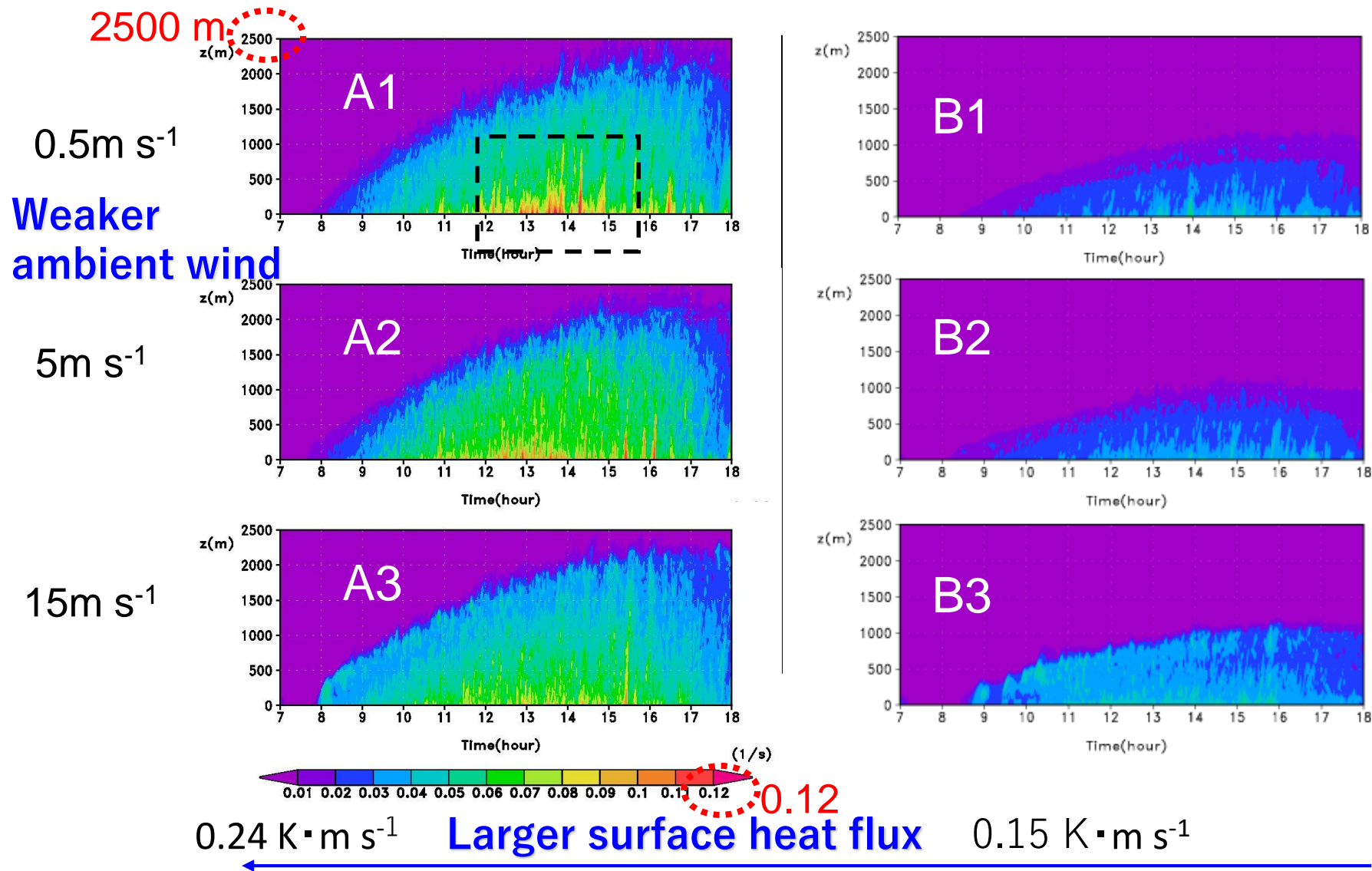
Maximum of surface heat flux Q_{\max}

Ambient
wind

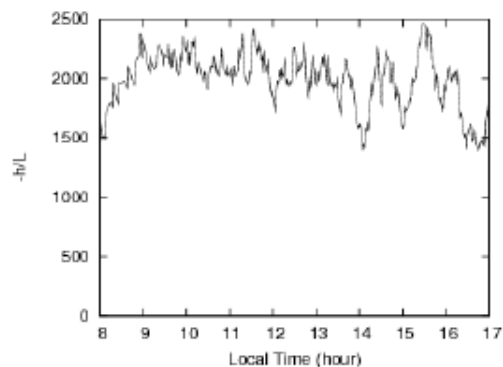
	0.24K·m s ⁻¹	0.15K·m s ⁻¹
0.5m s ⁻¹	A1	B1
5m s ⁻¹	A2	B2
15m s ⁻¹	A3	B3

Results

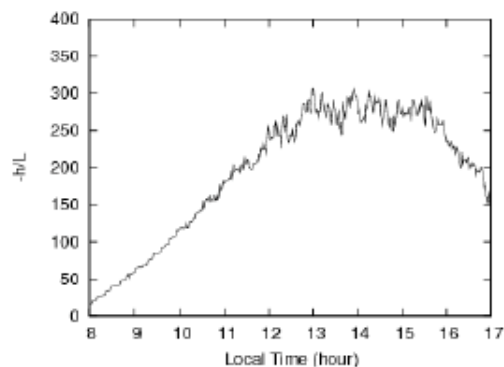
Maximum vertical vorticity ζ (s^{-1}) in horizontal sections at each height



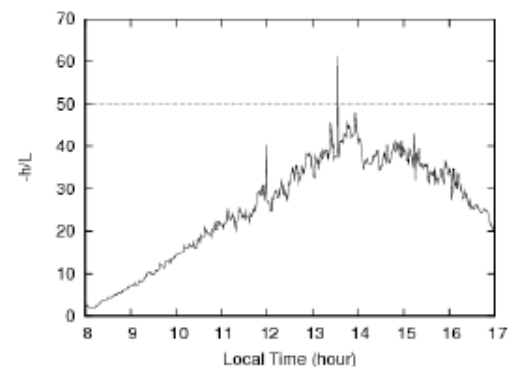
-h/Lの時間変化



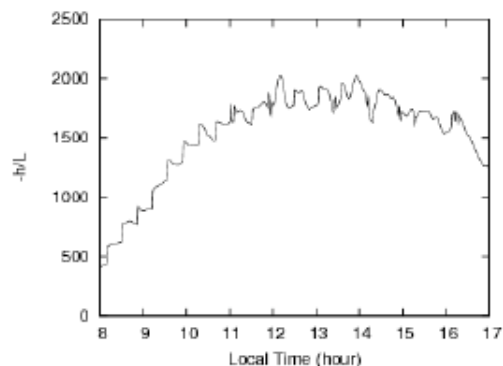
(a) Experiment A1



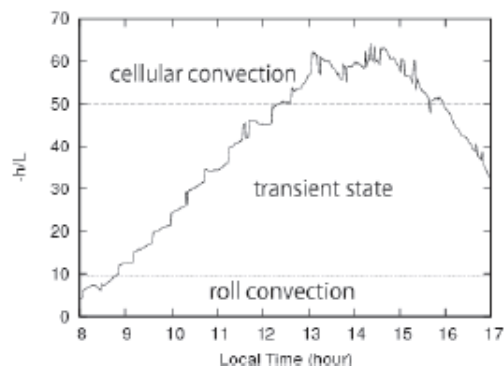
(b) Experiment A2



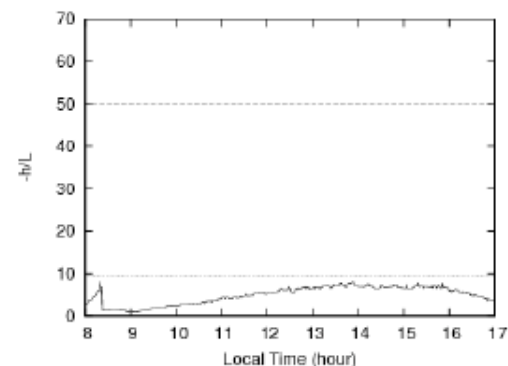
(c) Experiment A3



(d) Experiment B1



(e) Experiment B2



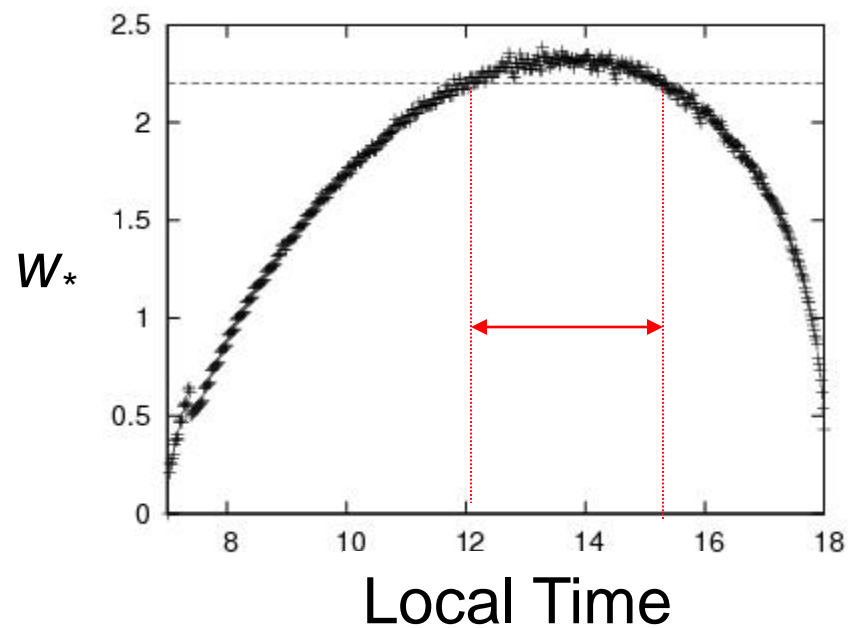
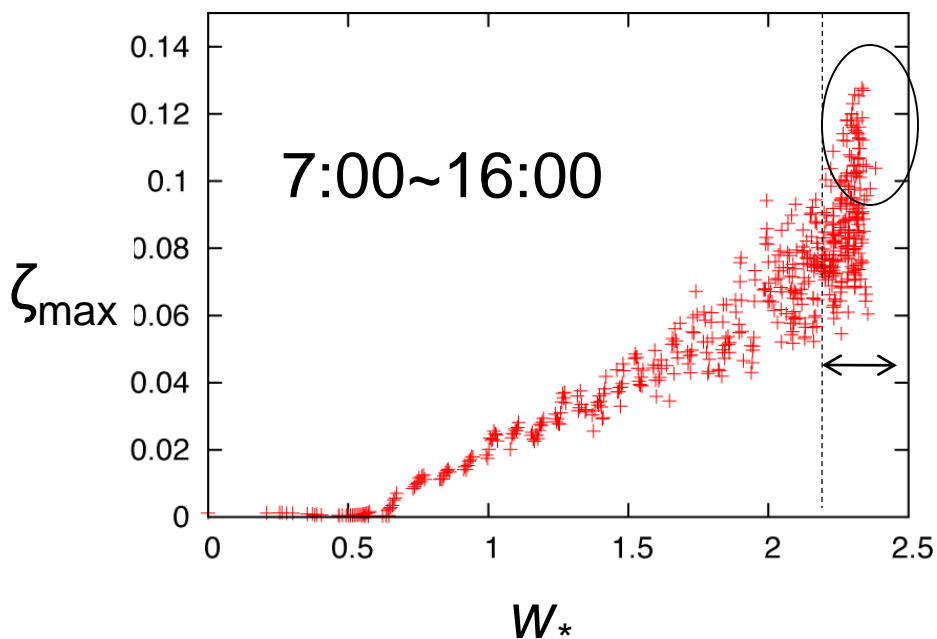
(f) Experiment B3

□ール: $-h/L < 10$, セル: $-h/L > 50$

A1 (一般風が弱く、地表面Heat flux強) における w_* の時間変化と ζ_{max} との関係

$w_* \equiv (gQh/\theta_0)^{1/3}$: 対流速度

ζ_{max} : 鉛直渦度の最大値 (z=75m)



$w_* > 2.2 \text{ms}^{-1}$ をみたす12:00から15:20に
 $\zeta_{max} > 0.1 \text{s}^{-1}$ となっている

DDの熱輸送への寄与

z=100m 12:30	$ \zeta > \zeta_{\max} \times 0.5$ (DDに相当)	上昇流域	全計算領域
格子点数	66	15602	44100
合計heat flux (K·m/s)	99.2 (全領域の約1%)	5000	9060
1格子当りの平均heat flux (K·m/s)	1.5 (領域平均の約7倍)	0.32	0.21

ダストデビルの生成メカニズム ：循環の解析

ダストデビルの生成

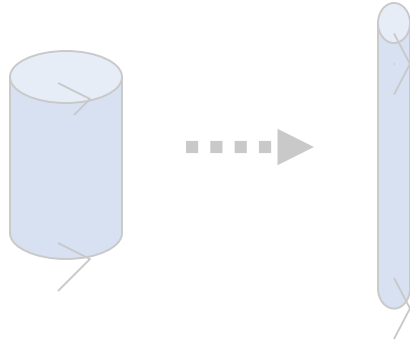
- 対流混合層（地球・火星）では、**ダストデビル**や“**Invisible Dust Devil**”(札幌、Fujiwara et al. 2011)の生成が一般的にみられる
- 数値的研究
 - **水平一様、理想的な対流混合層**でダストデビルに対応する渦が生成 (e.g. Kanak et al. 2000, [Toigo et al. 2003](#), [Gheynani and Taylor 2010](#), Ohno and Takemi 2010, Raasch and Franke 2011)

目的

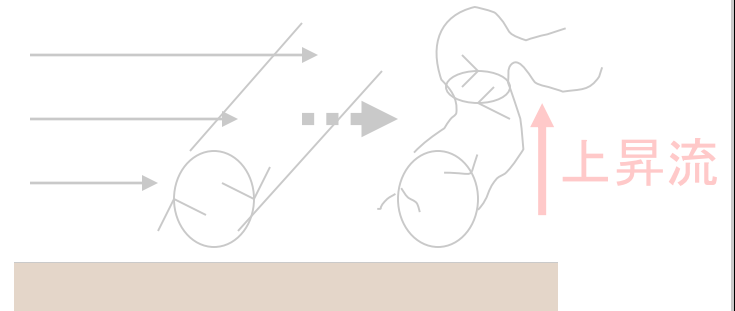
理想的な対流混合層で、ダストデビルの成因を定量的に調べる

ダストデビルの生成メカニズムの提案

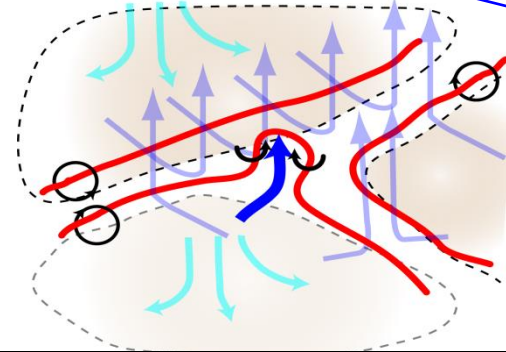
(1) 環境場の鉛直渦度の引き伸ばし
(Williams, 1948)



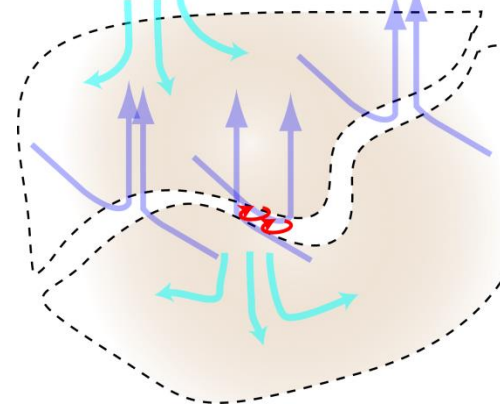
(2) 一般風の鉛直シアに伴う水平渦度の対流セルの上昇流による立ち上げ
(Maxworthy, 1973)



(3) セル状対流に伴う水平渦度の対流セル自身の上昇流による立ち上げ
(Kanak et al., 2000)



(4) セル状対流の隣接するセルからの非対称な収束(Kanak, 2005)

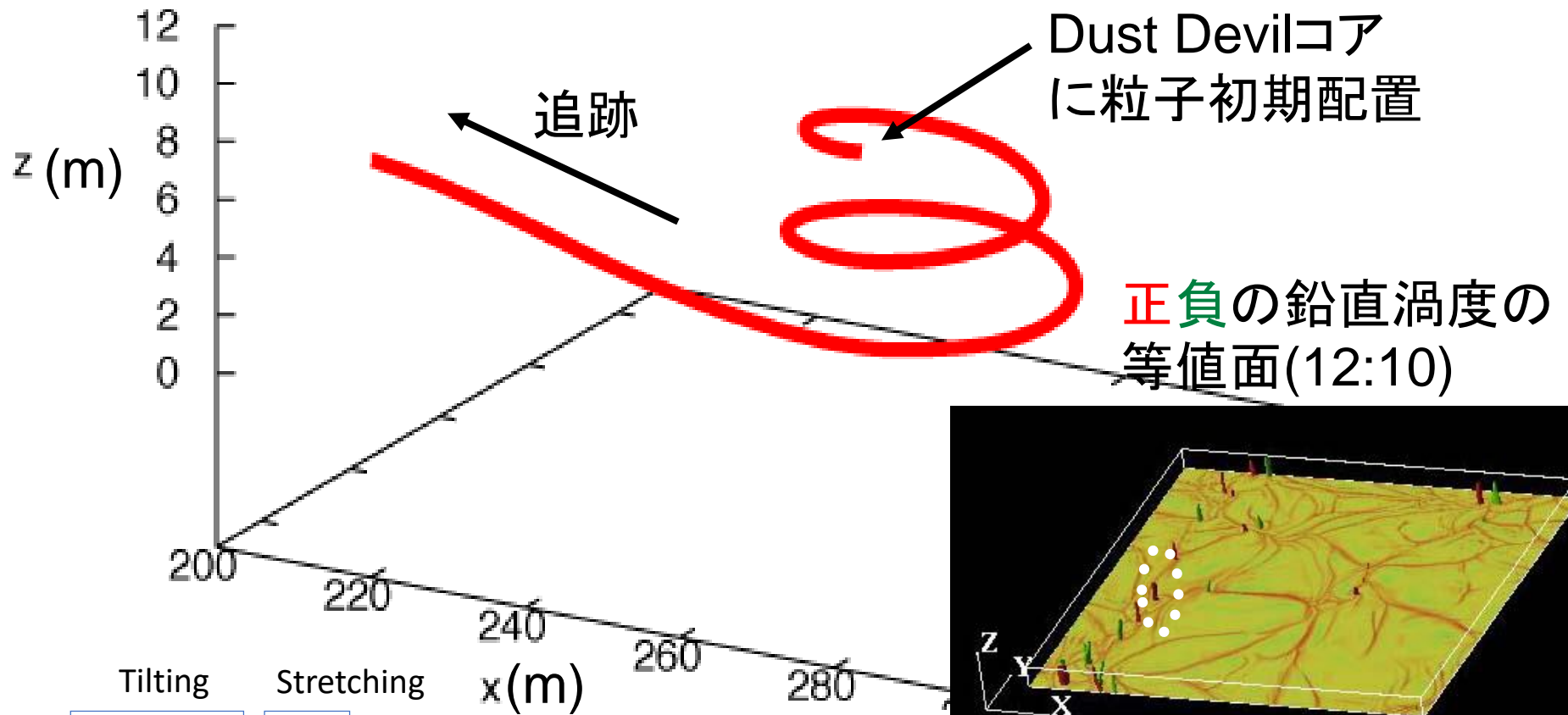


(1)、(2)はなくてもよい

辺では(4)、頂点では(3)

ダストデビルの回転の起源は？

0.2sテップのデータをもとに12:10のダストデビルのコア付近の高度7.5mでの流体粒子の時間を遡ったトラック(Backward Trajectory解析)

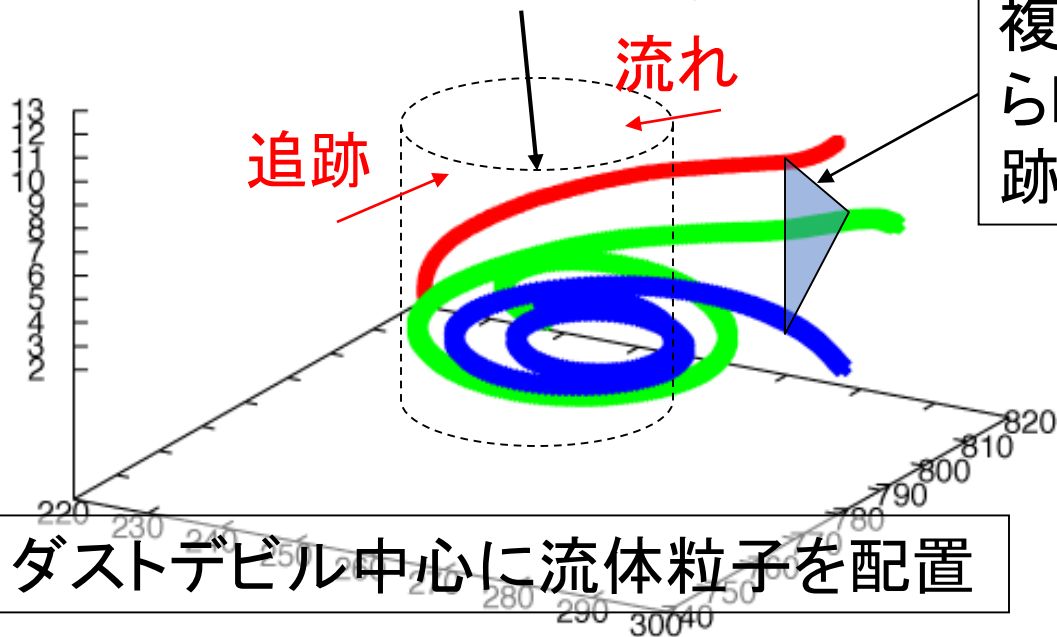


$$\frac{dz}{dt} = \underbrace{e \frac{dw}{dx} + h \frac{dw}{dy}}_{\text{Tilting}} + \underbrace{z \frac{dw}{dz}}_{\text{Stretching}} + \dots$$

トラック上で渦度収支解析？ → 定量的な説明難しい

「循環」の解析

Backward Trajectories



複数のBackward TrajectoryからMaterial Surface(MS)が追跡可能

MSに伴う循環 Γ

$$G = \oint_S \vec{W} \times \vec{x} ds$$

ダストデビル中心に流体粒子を配置

Γ の変化 $\frac{d\Gamma}{dt} = F_d + B$

MS内でのサブグリッドの乱流拡散の寄与 F_d + Baroclinic生成 B

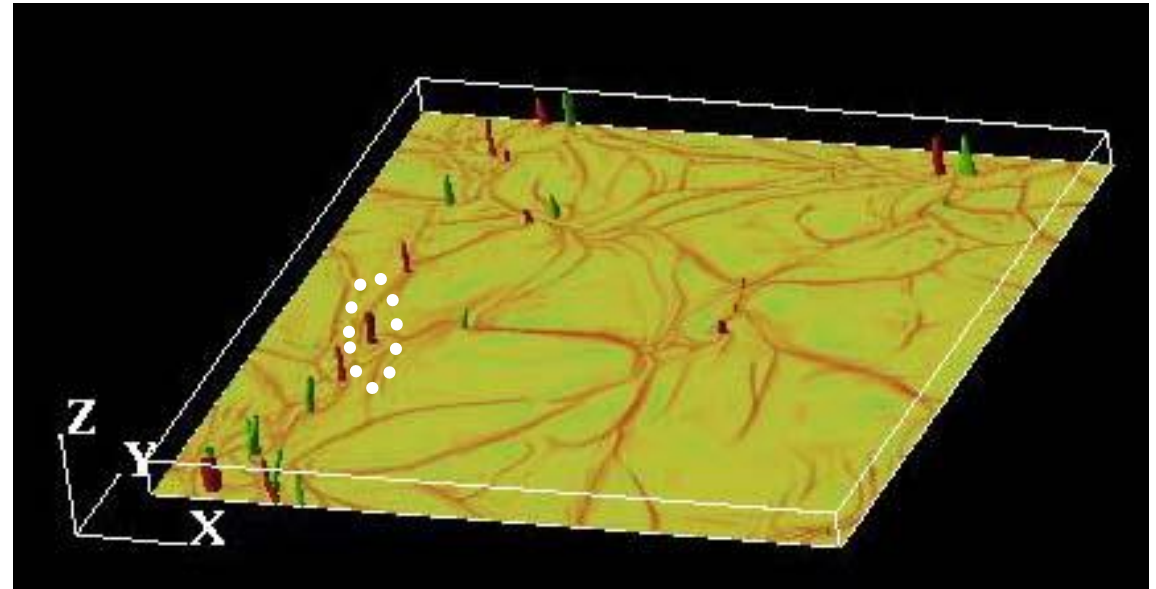
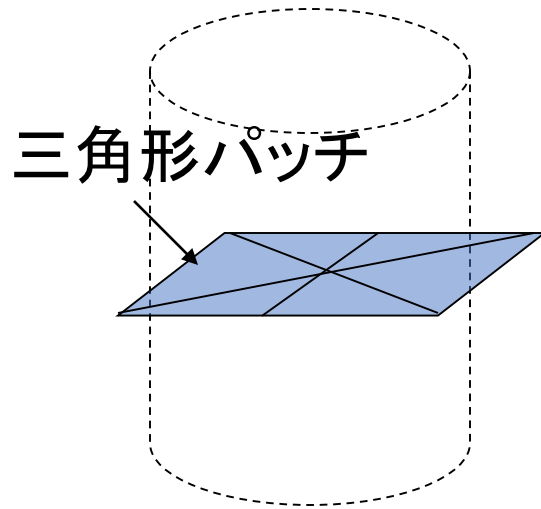
浮力項の勾配による水平渦度生成

MSの面積の変化 \rightarrow 渦度収支でのStretching

MSの傾斜 \rightarrow 渦度収支でのTilting

MSの追跡の手順

正負の鉛直渦度の等値面(12:10)



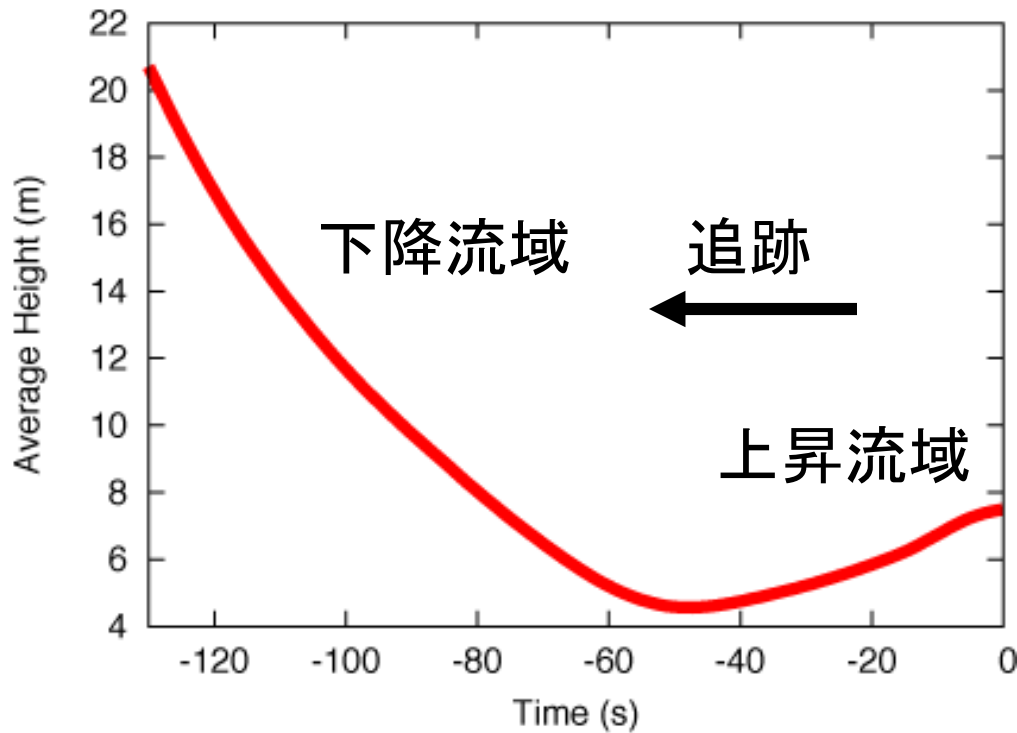
ダストデビル(対流セルの頂点、最も鉛直渦度が大きい)を横切る高度7.5mの水平の20m×20mのMS(12:10)



約20000本のBackward Trajectoriesが構成する、約40000個(1辺40cm)の三角形のパッチで追跡

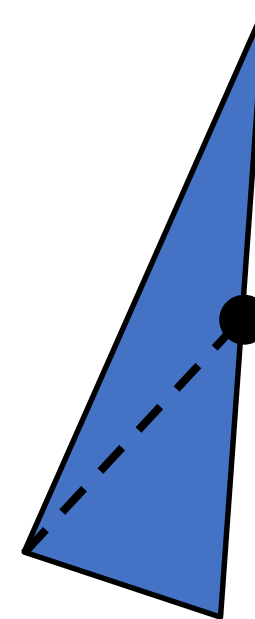
MSの平均高度・高精度化

MSの平均高度



以降のMSの解析は
高精度化

渦の周囲でパッチが細長くなる



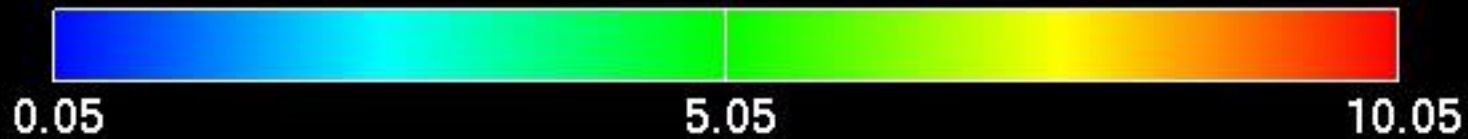
60秒程度遡ると平均的に下降流域へ

長くなりすぎた辺の midpoint でパッチを分割

120秒遡るとパッチの数は数100倍に

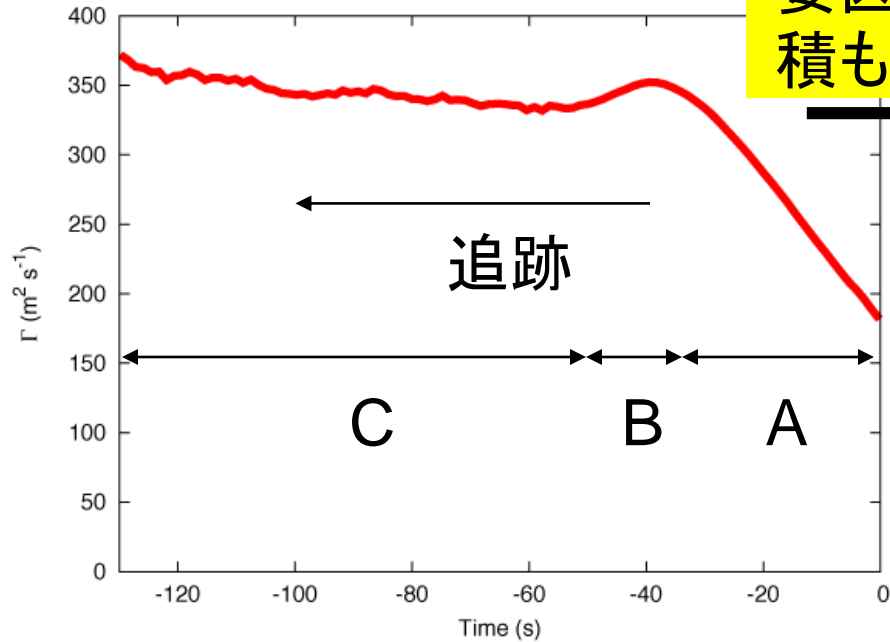
-0.0s

シェードはz
座標(m)



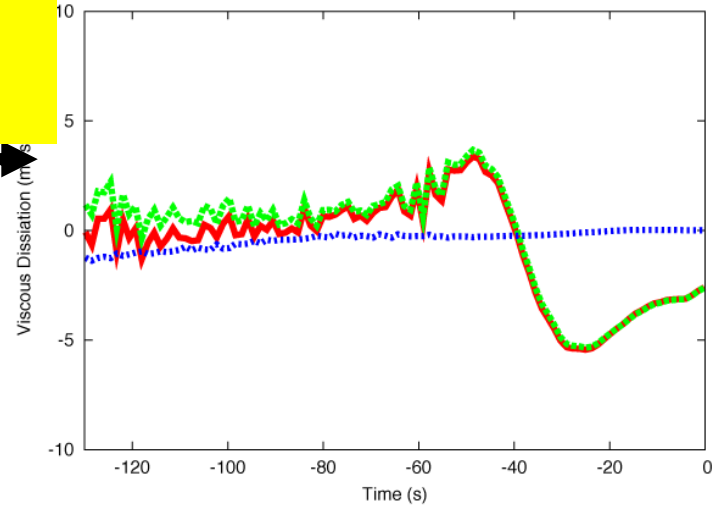
MSに伴う循環の時間変化

循環 Γ

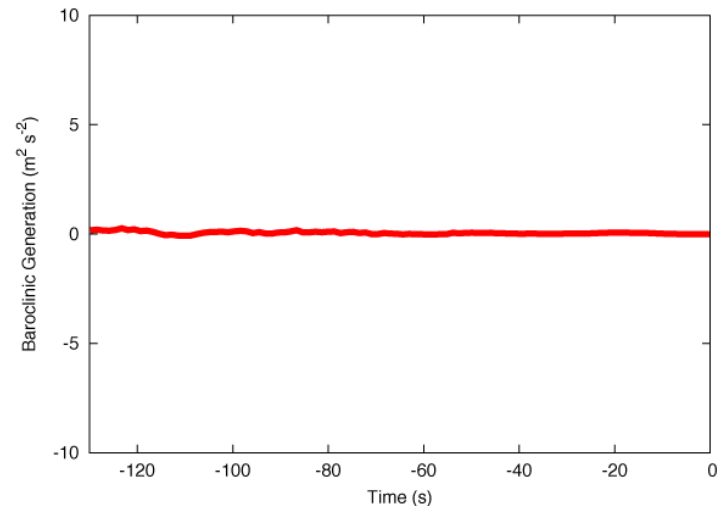


Γ の変化の
要因の見
積もり

乱流拡散(水平、鉛直)



baroclinic生成

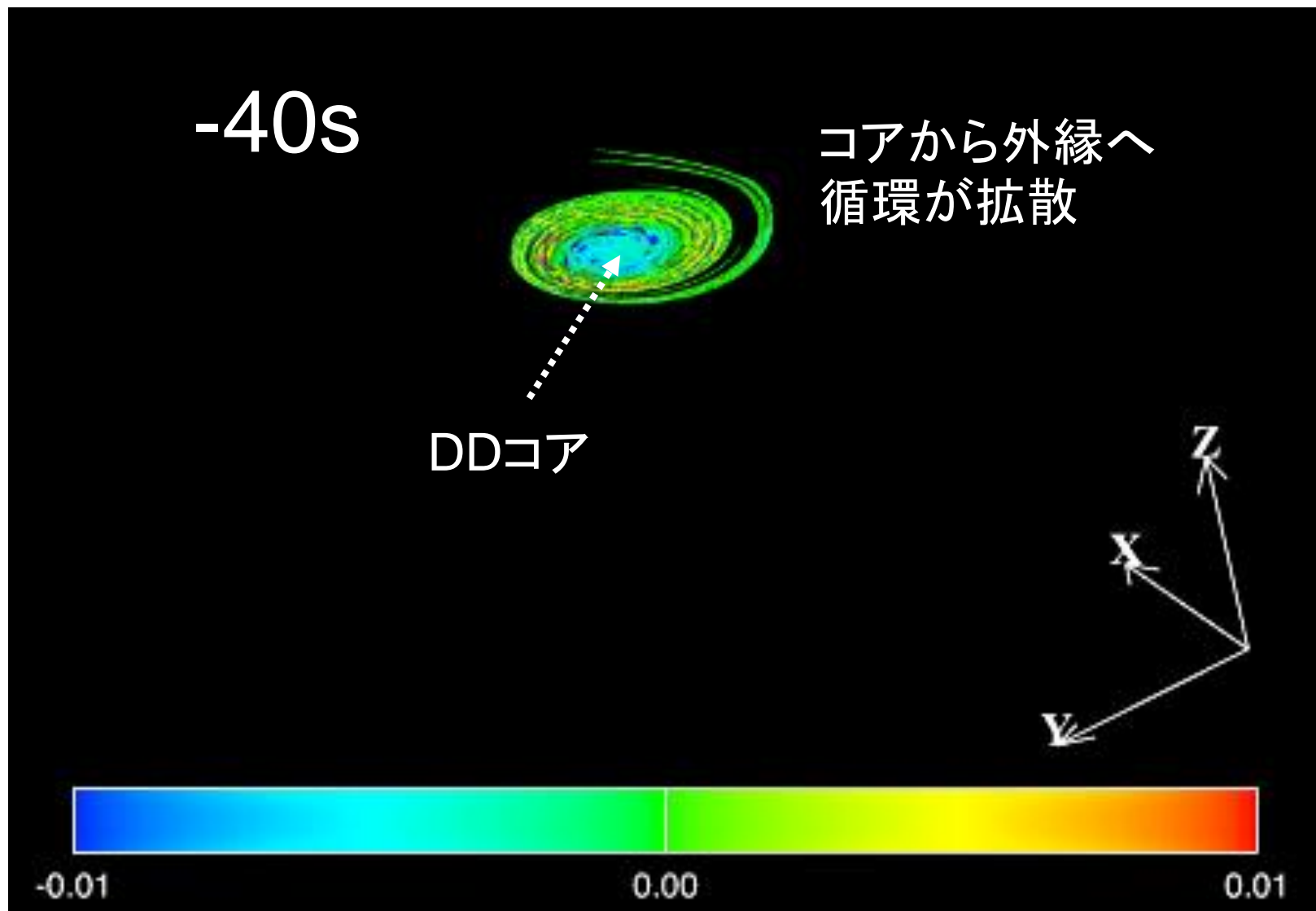


A: 水平の乱流拡散で循環が減少

B: 水平の乱流拡散で循環が増加

C: ほぼ保存

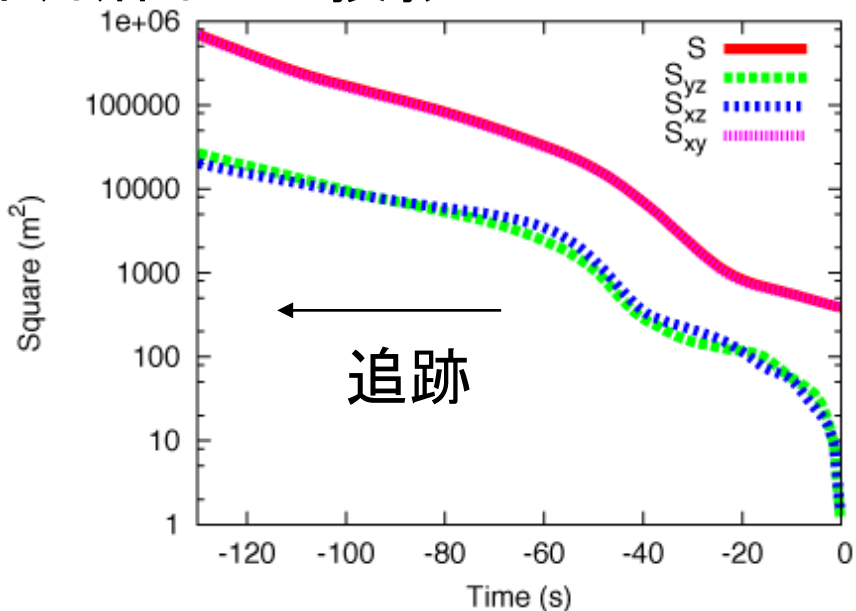
循環の乱流拡散の分布



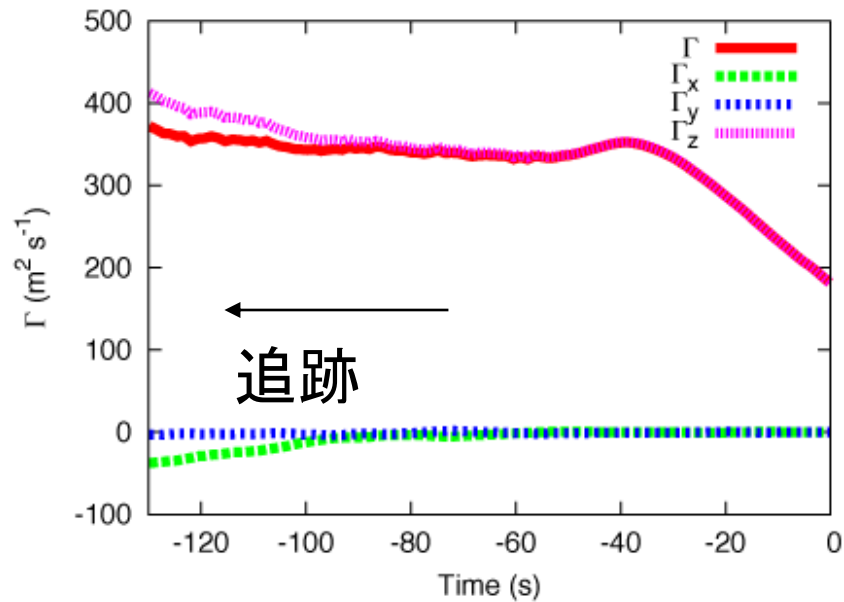
MSのStretching、Tilting

$$G = \dot{\vec{W}} \times d\vec{S} = \underbrace{\dot{W}_x dS_{yz}}_{\Gamma_x} + \underbrace{\dot{W}_y dS_{xz}}_{\Gamma_y} + \underbrace{\dot{W}_z dS_{xy}}_{\Gamma_z}$$

MSの面積とyz、xz(鉛直)、xy(水平)断面への投影



循環への水平、鉛直渦度の寄与



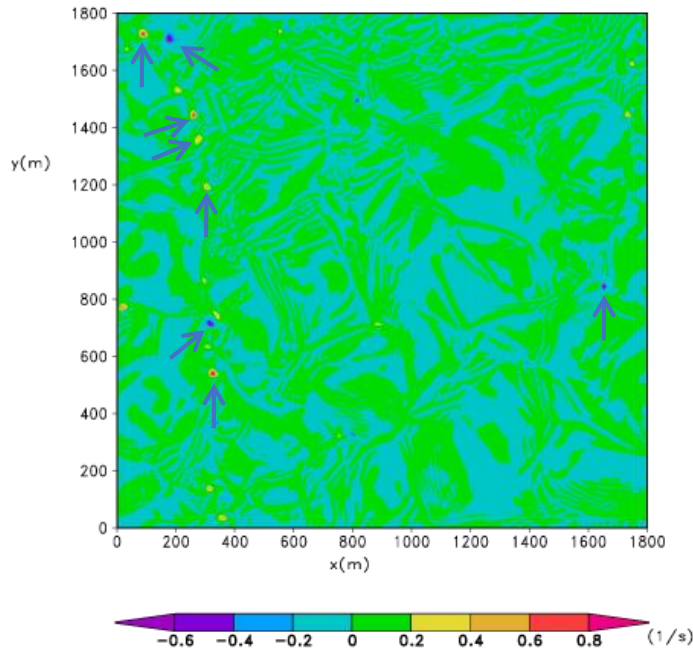
MSは1/1000に収束→強い
Stretching

$\Gamma_x \rightarrow \Gamma_z$ というTiltingもあるが、鉛直渦度の生成には寄与していない

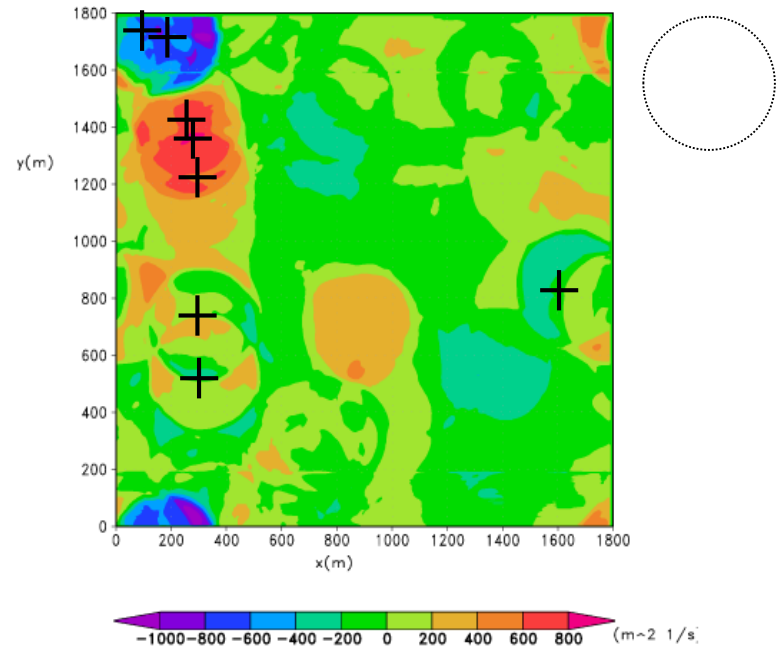
ダストデビルの強い回転の成因

もともとダストデビルの周囲にあった循環が保存しながら収束し、大きな鉛直渦度を生成

最下層、水平面の鉛直渦度

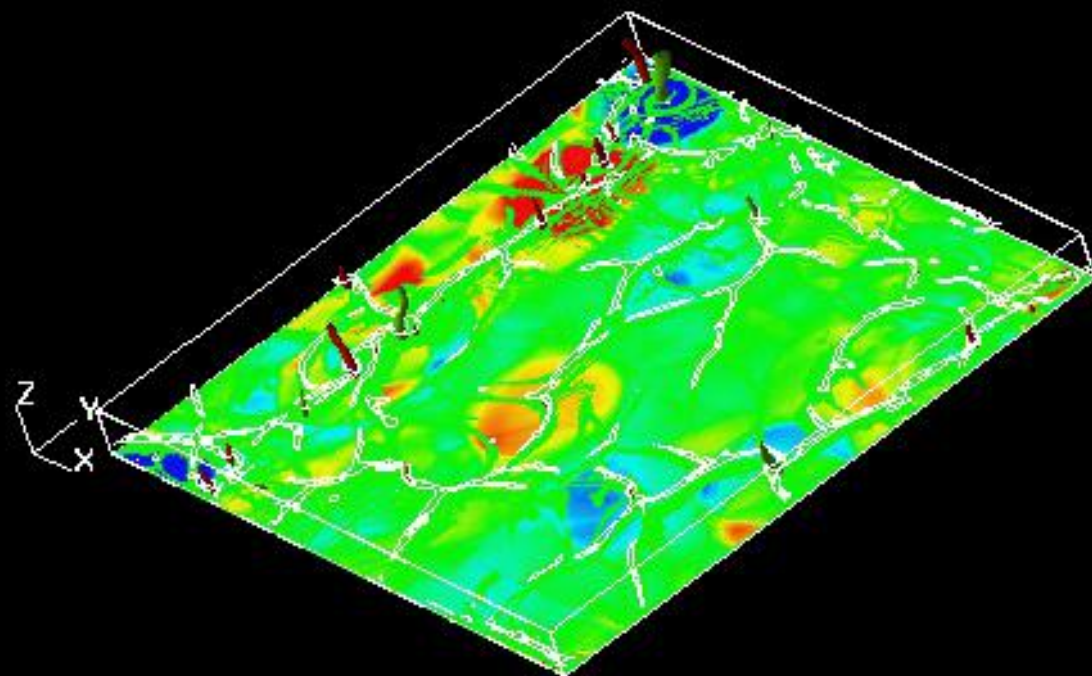


最下層、水平面で各点での半径200mの範囲の循環



DD生成のもととなる循環

0.00



12:00~12:30

鉛直渦度(正・負)

上昇流の等値線

最下層・水平面内の半径200mの範囲に入る循環(shade)、下降流域で表示

ダストデビル周囲の下降流域での循環の増大

→(数分後)ダストデビルの生成

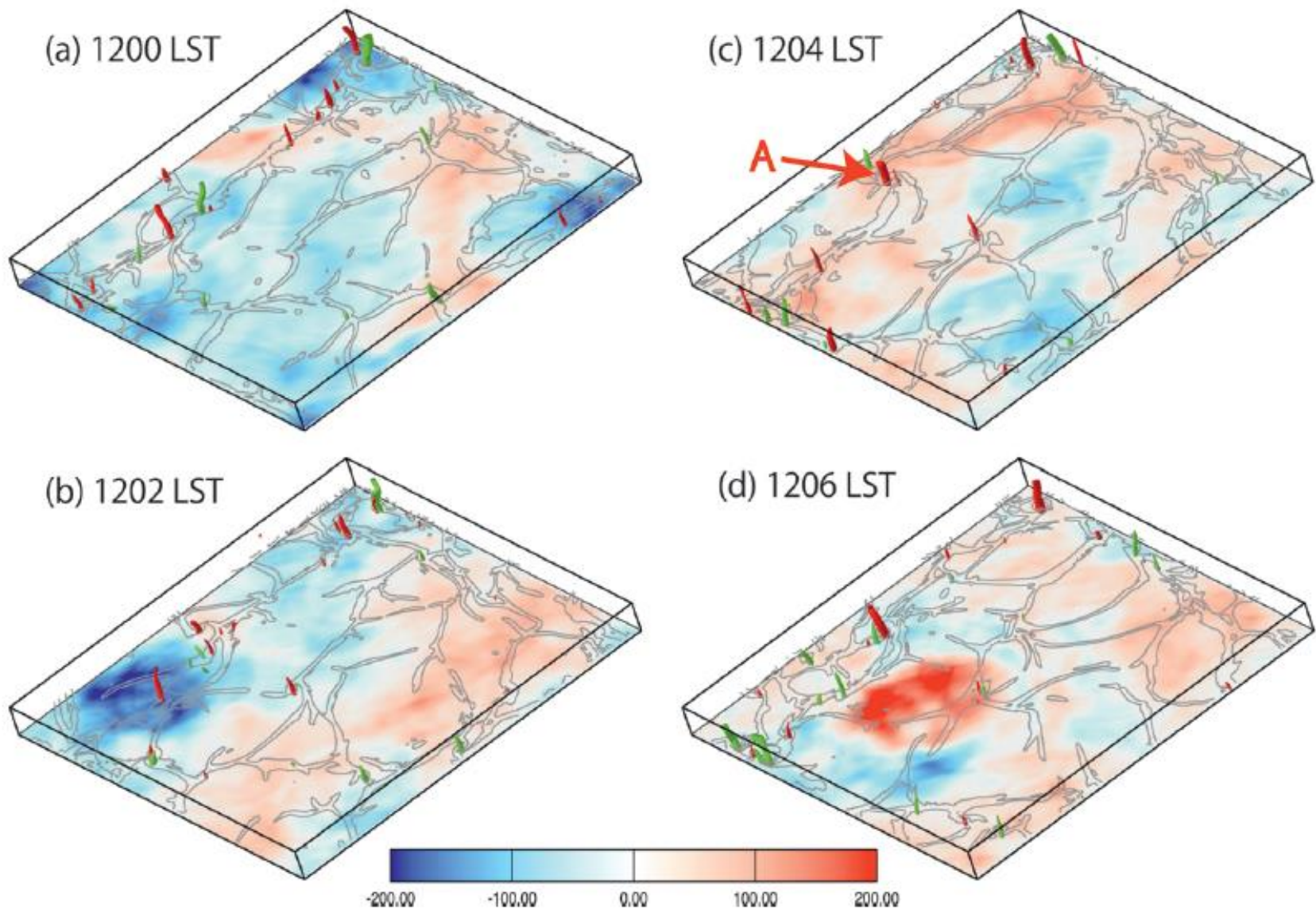


FIG. 10. Time series of vertical vorticity iso-surfaces of 0.25 (red) and -0.25 s^{-1} (green) from (a) 1200 to (h) 1214 LST, at 2-min intervals. The lower domain at heights < 100 m is displayed. Circulation, calculated only for downdraft regions within a horizontal circle of radius 300 m at each grid point at $z = 2.5$ m, is shown by color shading ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$). Regions where vertical velocities are > 0.1 m s^{-1} at the lowest model level are shown by gray isolines.

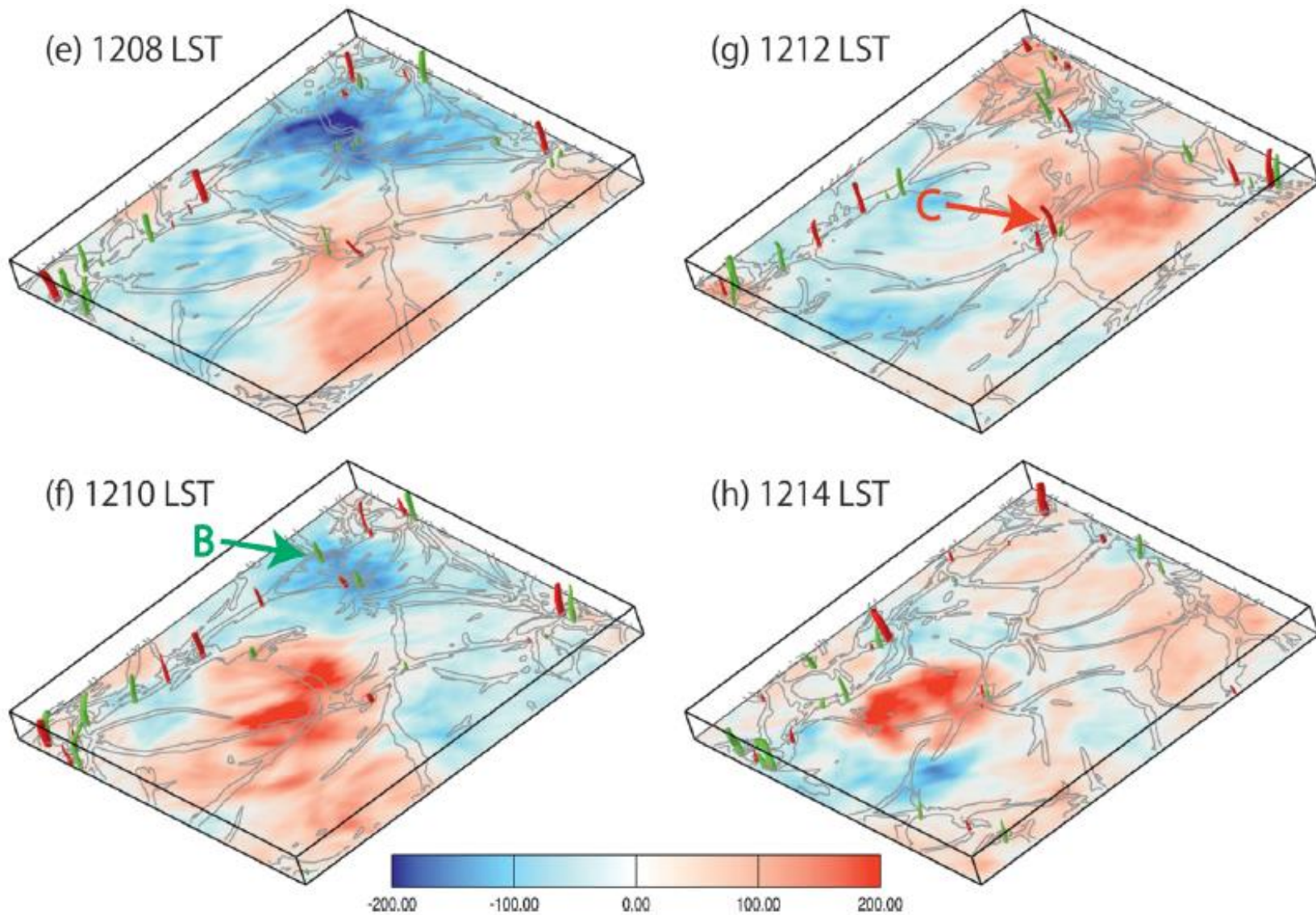
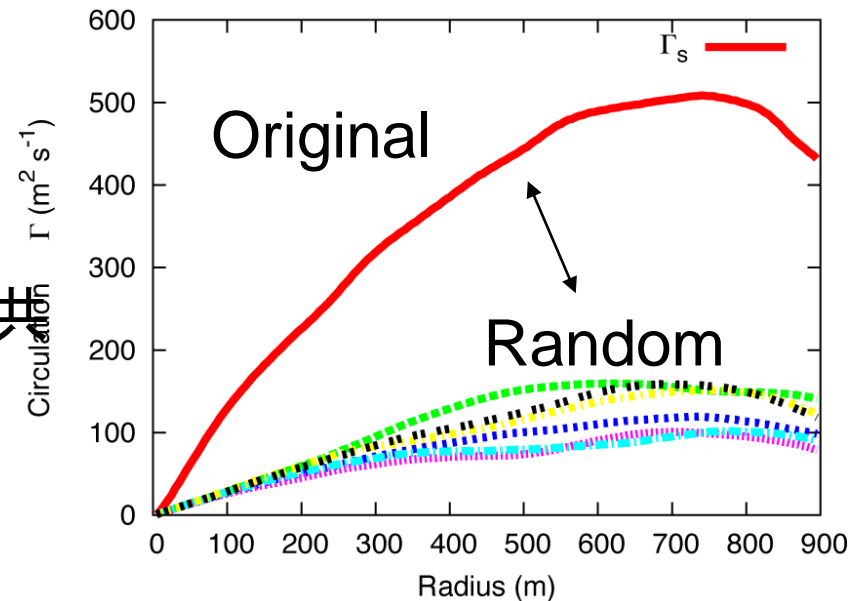
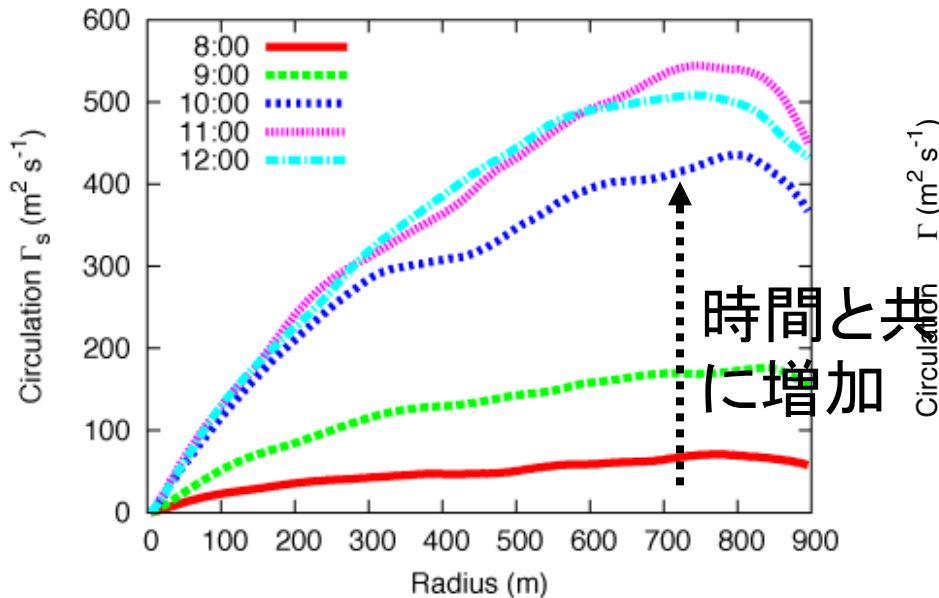


FIG. 10. (Continued)

対流混合層のもつ水平面内の循環の統計的性質

最下層、各格子点を中心とする円内に含まれる循環(円内の格子点での鉛直渦度の積分)の標準偏差 $\sigma(\Gamma)$

12:00の格子点ごとの鉛直渦度の値をランダムに入れ替え



対流混合層は循環0の状態から発達!

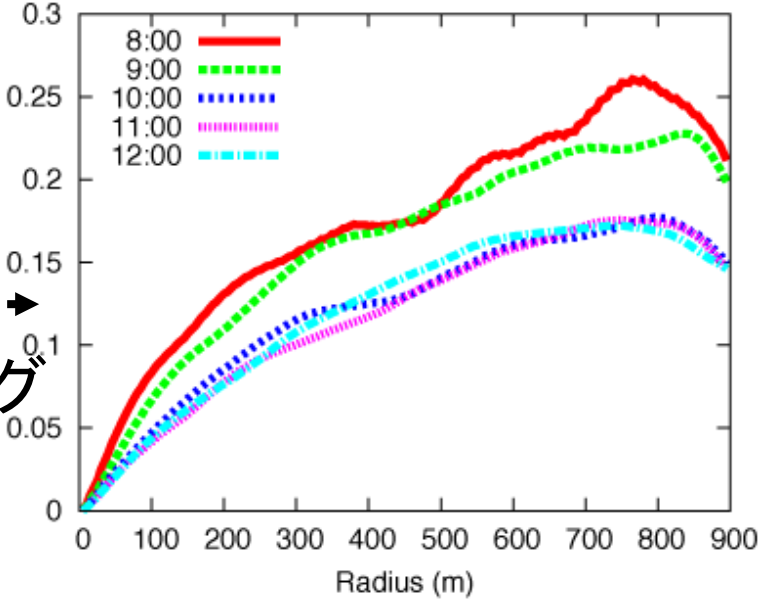
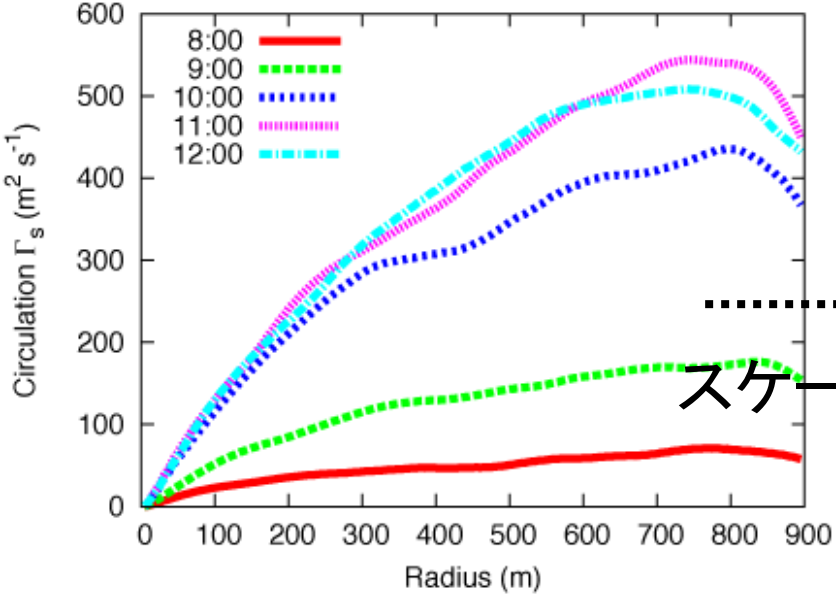


混合層の発達と共に、ダストデビルの生成に利用できる、循環 $\sigma(\Gamma)$ が組織的に分布

統計的に分布する循環のスケーリング

最下層、各格子点を中心とする円内に含まれる循環(円内の格子点での鉛直渦度の積分)の標準偏差 $\sigma(\Gamma)$

対流のスケール速度
混合層高さ
 $\sigma(\Gamma)/(h \times w_*)$

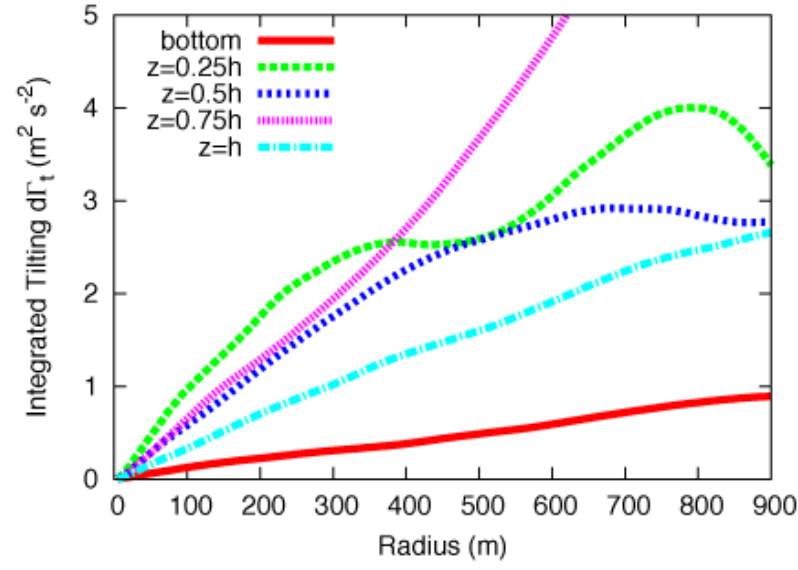
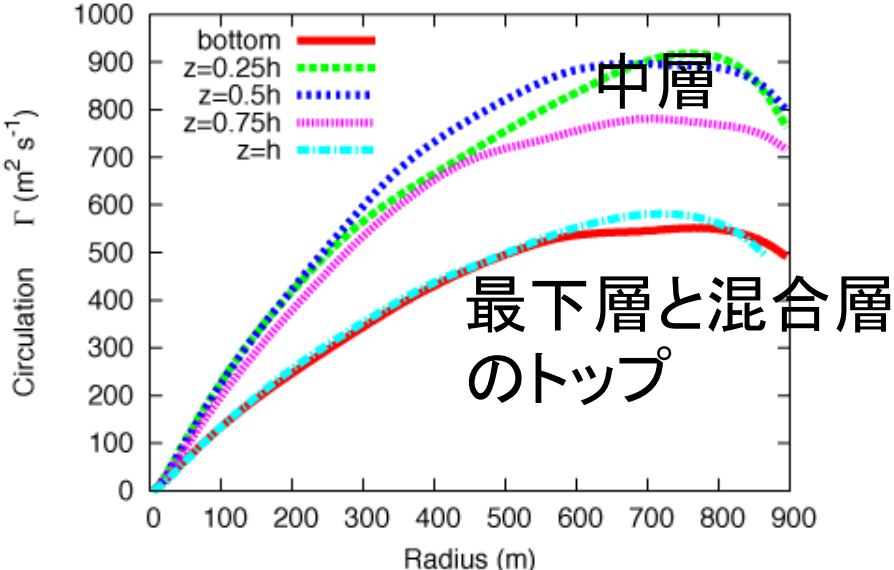


- 対流混合層には**循環 $\sigma(\Gamma)$** が内在
- (初期を除き) $h \times w_*$ でスケール

循環と水平渦度のTiltingの高度分布

最下層、各格子点を中心とする円内に含まれる循環の標準偏差 Γ_s (各高度@12:00から12:30平均)

円内に含まれる**水平渦度から鉛直渦度へのTilting項の積分**の標準偏差 (各高度@12:00)



対流混合層の**中層**で循環、Tilting項とも最も大きい
 → 対流がBaroclinicに生成する水平渦度のTiltingにより、
 水平面内での循環が生成

循環の解析の現状

- 竜巻の生成機構解明のため、循環の解析が行われる(Mashiko 2016など)
- 線積分を利用した例が多い

$$C(t) = \oint \mathbf{v} \cdot d\mathbf{l},$$



$$G = \int_0^s \vec{W} \times \vec{x} ds$$

$$\frac{d}{dt} C(t) = - \oint \frac{dp}{\rho} + \oint \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l},$$

$$\frac{d\Gamma}{dt} = F_d + B$$

Stretchingとtiltingの区別が可能

- 面積分を利用した例はない
- 私自身もつくば竜巻のシミュレーションを行った・・・

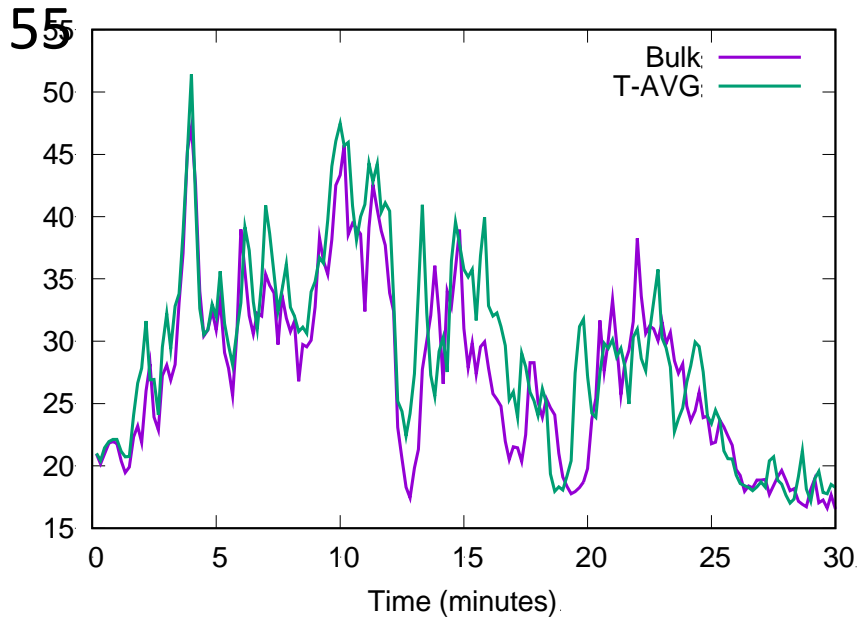
実験設定

各解像度の格子数	Mashiko (2016)	今回の実験
dx=1km	1000 × 1000 × 62	800 × 800 × 60
dx=250m	1200 × 1100 × 70	800 × 800 × 80
dx=50m	1300 × 1100 × 100	1100 × 1100 × 100

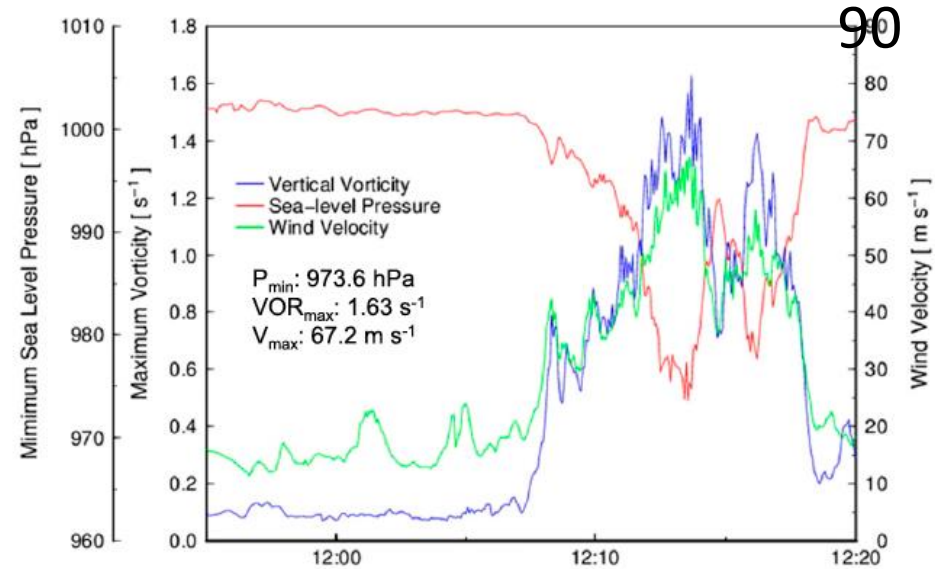
* ネスト計算に初期値・境界値を渡す時間ステップも異なる

Maximum wind speed

Wind speed @ z=10m



Mashiko(2016)の再現



環境場の回転の影響

環境場の回転の影響

- 時計回り、反時計回りのダストデビルがほぼ同数生成 (Sinclair 1969、Holtonの教科書)



- ヒートアイランド循環の影響で、単一の回転方向の渦を観測 (Fujiwara et al, 2011, SOLA)

LESにコリオリ効果を導入し、ダストデビルへの影響をみる

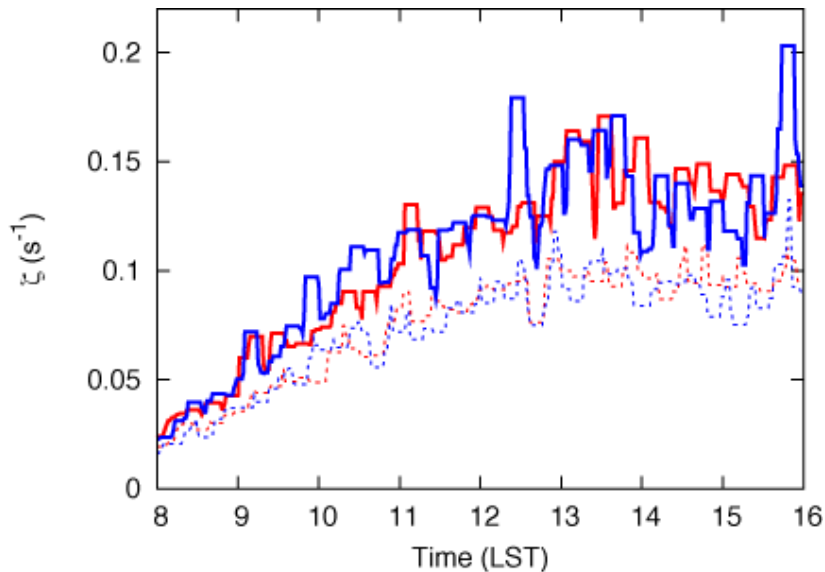
コリオリ効果の導入＝環境場の水平面内の循環を課す

環境場の回転のダストデビルへの影響+ダストデビルの生成メカニズムを考察

地球自転程度の環境場の回転の影響

モデル最下層の**正の鉛直渦度 ζ_+** ・**負の鉛直渦度 ζ_-** の最大値の時系列の包絡線(前後5分間の最大値(実線)と最小値(点線))

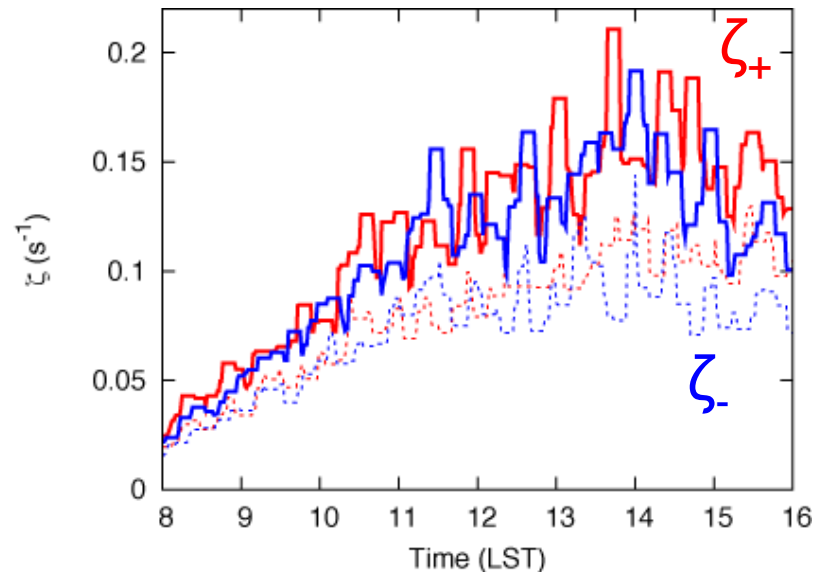
$f=0$ (回転なし)



正負の鉛直渦度の生成は同等

$f=f_m \sim 10^{-4} s^{-1}$

典型的な中緯度の値

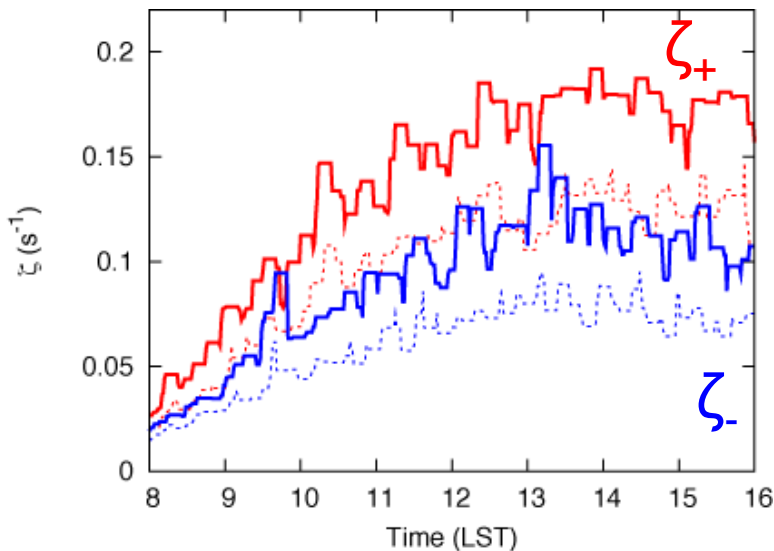


正負の鉛直渦度に僅かな差

より強い回転の影響

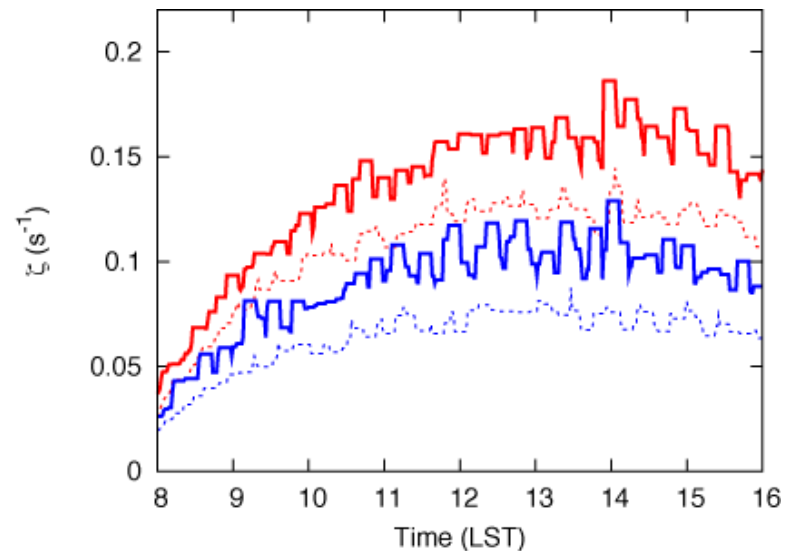
モデル最下層の**正の鉛直渦度 ζ_+** ・**負の鉛直渦度 ζ_-** の最大値の時系列の包絡線(前後5分間の最大値 (実線) と最小値 (点線))

$$f=10f_m \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$



正負の鉛直渦度に大きな差

$$f=100f_m \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$$

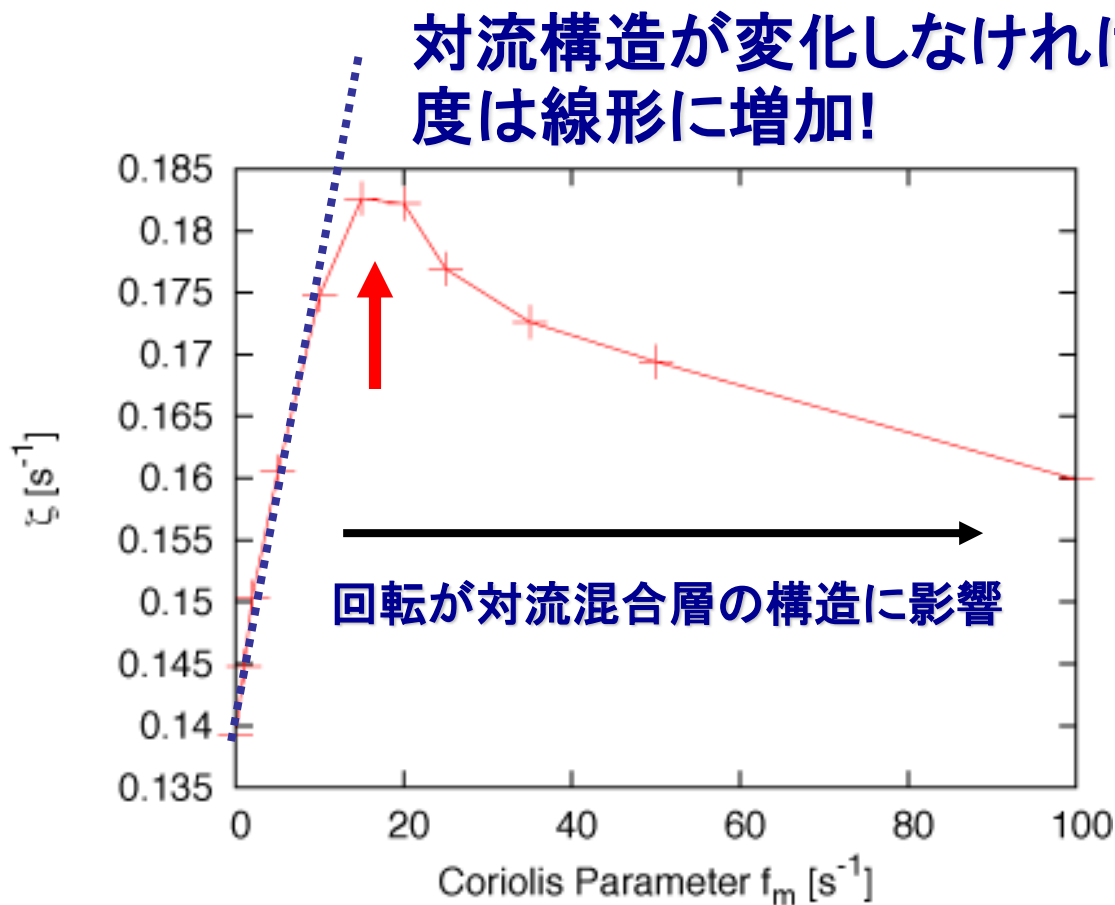


正負の鉛直渦度に大きな差はあるが、絶対値が小

→ 強い回転により大きな ζ_- の生成が抑制？

強いダストデビル生成に最適な環境場の回転

最下層水平面の正の鉛直渦度の最大値の12:00~16:00の平均



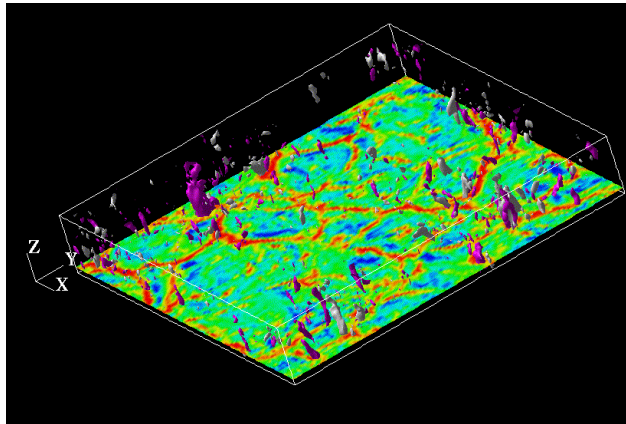
最適な f : $15f_m \sim 20f_m$

対流構造の違い

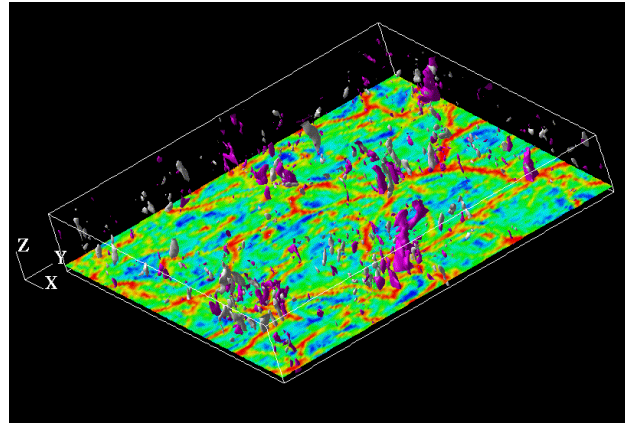
等値面 紫: $\zeta > 0.04 \text{ s}^{-1}$ 、白: $\zeta < -0.04 \text{ s}^{-1}$

地表面のShade: 最下層の鉛直速度

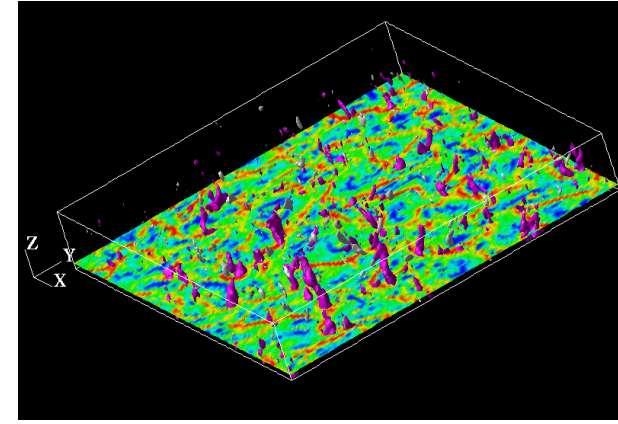
$f=f_m$



$f=10f_m$



$f=100f_m$



最も強い正の ζ 生成

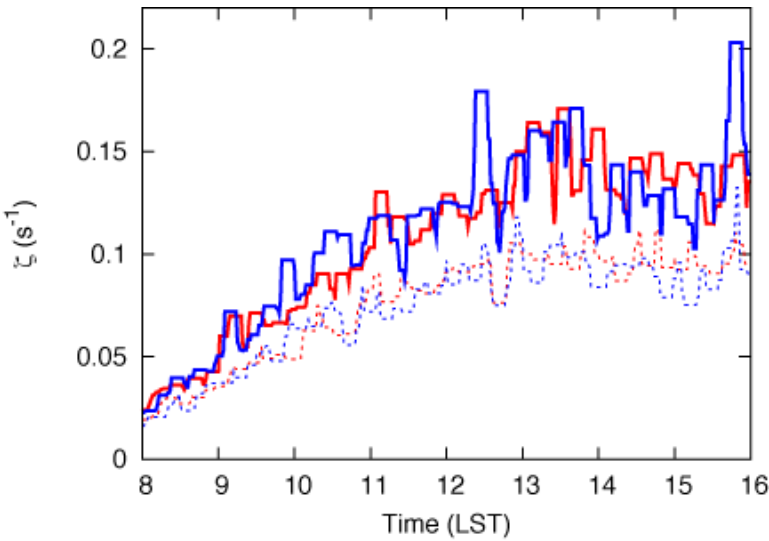
.....→

回転が強くなると、対流セルの水平スケールは小さく
→ 広範囲からの循環の収束が起きにくい

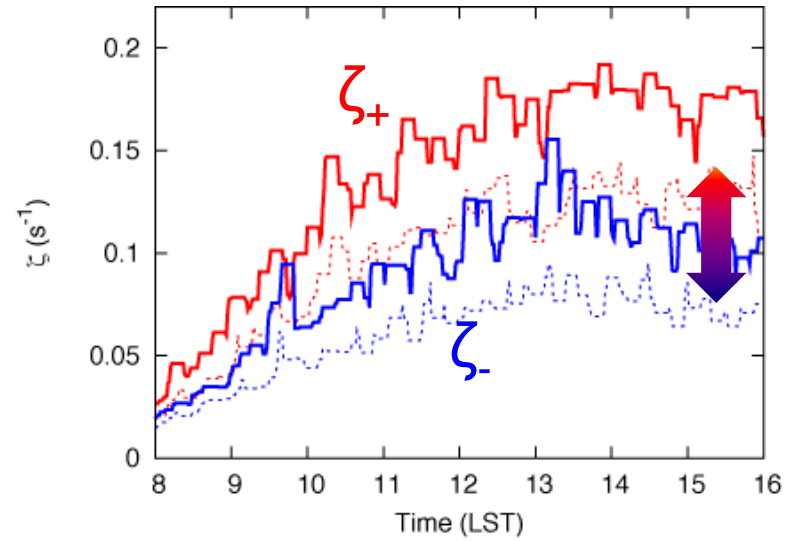
ダストデビルの生成メカニズムの考察

モデル最下層の正の鉛直渦度 ζ_+ ・負の鉛直渦度 ζ_- の最大値の時系列の包絡線(前後5分間の最大値(実線)と最小値(点線))

回転なし



$f=10f_m \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$



正負の鉛直渦度最大値の出現に符号間偏りなし



生成される強い渦度に符号間で偏り $\sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$

環境場の 10^{-3} s^{-1} の鉛直渦度が、ダストデビルにおいて 10^{-1} s^{-1}
 → 循環 $G = \oint \vec{v} \times \vec{x} ds$ の保存を考慮すれば、水平に100倍の面積からダストデビルに収束 (i.e. 鉛直渦度の引き伸ばし)
 → 循環解析によって調べた生成メカニズムと整合

まとめ

理想的な対流混合層におけるダストデビルの生成をLESで再現

【循環の解析】

- 地表面付近の広い水平面から循環をほぼ保存しながら収束→ダストデビル生成
- 対流混合層はダストデビルの生成につながる循環を内在

【環境場の回転の影響】

- 環境場の循環がダストデビルにおいて収束、上述の結論を支持

ダストデビルの スケーリング

対流混合層のスケーリングと ダストデビルとスケーリング

対流混合層の構造は相似的: 混合層深さ h や対流速度 w_* でスケール可能(e.g. Deardroff 1970, JAS)

ダストデビルの強さ (鉛直渦度) もスケール可能?

鉛直渦度のスケール \sim (速度スケール)/(長さスケール)

• 速度スケールは**対流速度 w_*** ? $w_* \propto (gQh/q_0)^{1/3}$

• 長さスケールは**混合層深さ h** ?

→ 渦度のスケール $\frac{w_*}{h} \propto h^{-3/2}$

g : 重力加速度
 Q : 地表面ヒート
フラックス
 θ_0 : 基準温位

→ 対流混合層が成長するほど、鉛直渦度は小さくなってしまふ!

目的

LESを用いた感度実験を行い、ダストデビルの鉛直渦度のスケーリングを試み、鉛直渦度を決定づける速度スケールと長さスケールを見いだす

2. LESによる感度実験の設定

LES(Ito et al. 2010)を利用

領域サイズ：水平4.5km*4.5km、高さ3km、無風
変化させるパラメータ

- 格子間隔 Δ : (50m \rightarrow 6.25m)
- 地表面ヒートフラックス Q : 一定(0.005K \cdot m/s, 0.1K \cdot m/s, 0.2K \cdot m/s, 0.3K \cdot m/s)、日変化
- 初期の安定成層の強さ Γ
- 基準温位 θ_0

Qが一定のとき混合層深さ h は時間 t の1/2乗で成長 $h = \sqrt{\frac{2Qt}{G}}$

様々な感度実験

- 初期安定成層への感度実験(3.1)
- 基準温位への感度実験(3.2)
- 地表面ヒートフラックス Q への感度実験
 - Q 一定、 Q の大きさを変化(3.3)
 - Q 日変化と Q 一定を比較(3.4)
 - スケーリングが成り立たない場合
(混合層発達初期、減衰期)

格子間隔50m

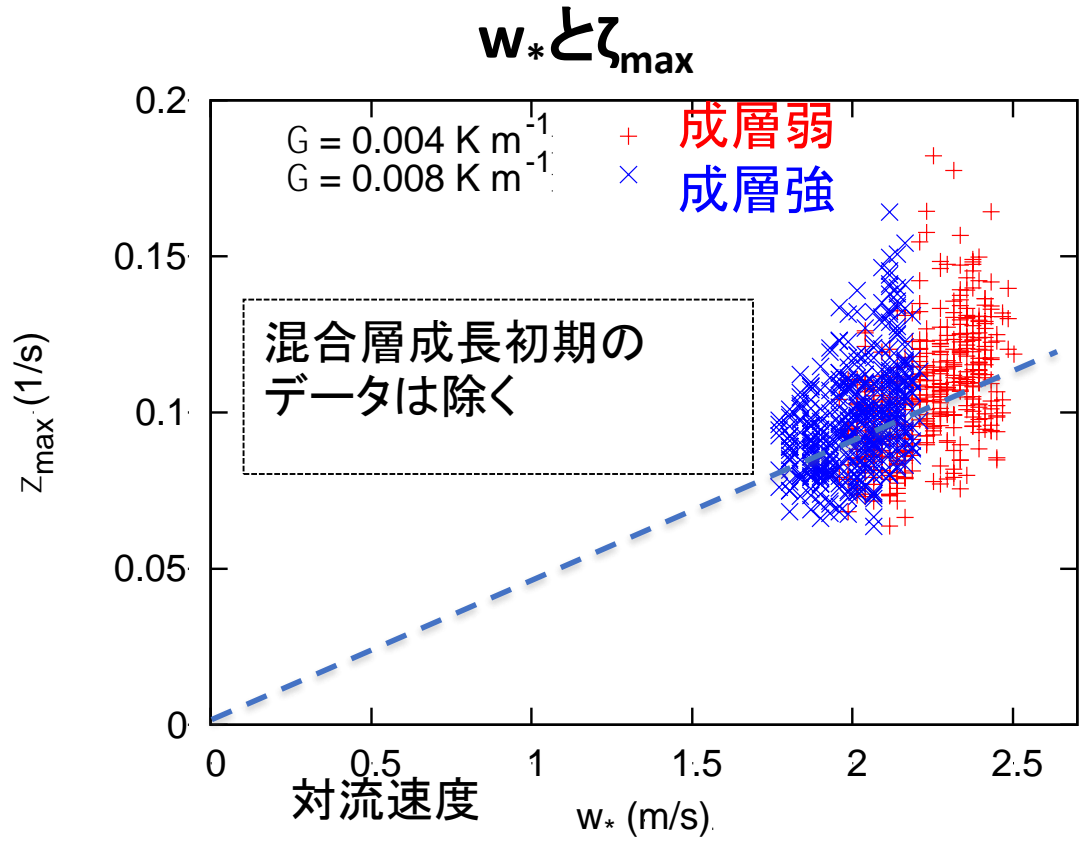
→ 速度スケール

- 格子解像度への感度実験(4.) → 長さスケール

3.1 初期安定成層の強さ Γ への依存性

格子間隔 $\Delta=50\text{m}$ 、ヒートフラックス $Q=0.2\text{K}\cdot\text{m/s}$

ζ_{max} : 高さ75mでの鉛直渦度の最大値
↑ダストデビルの強さの指標

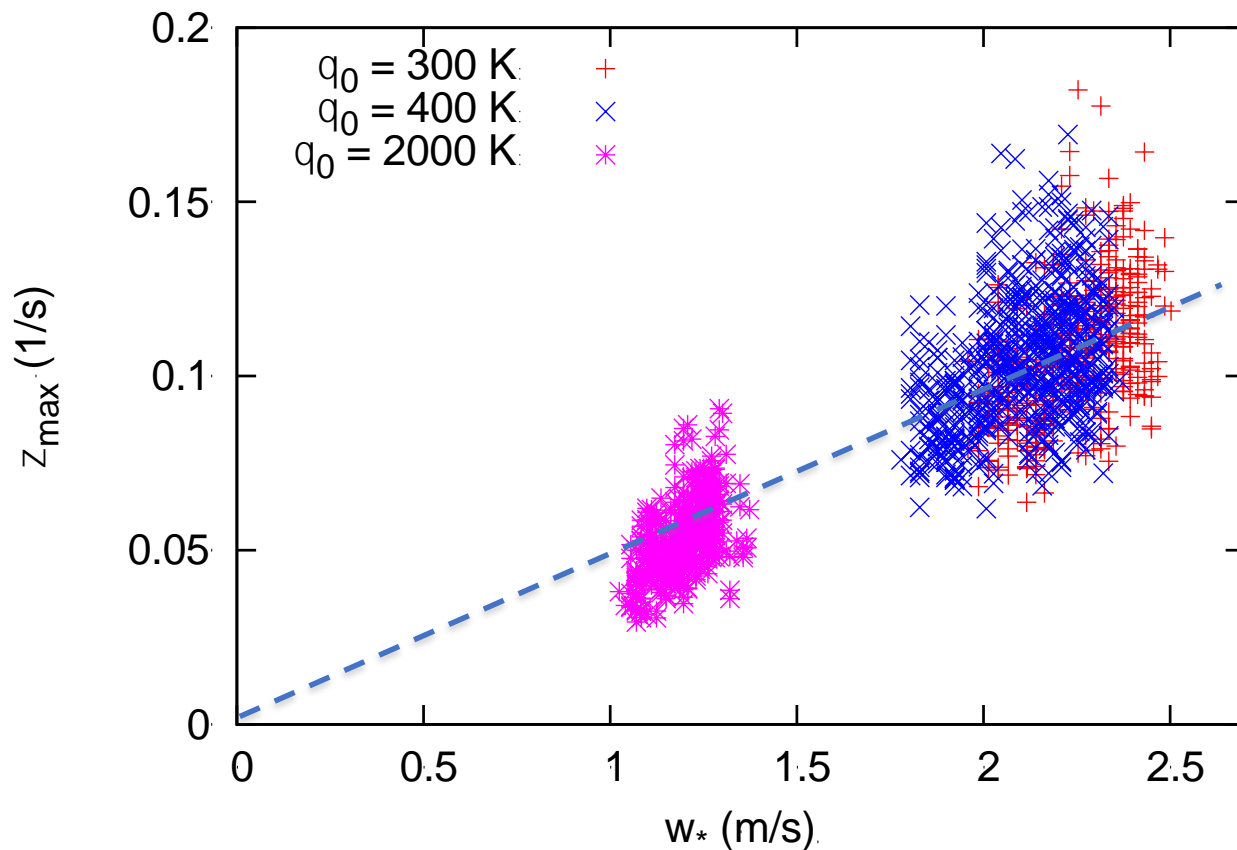


対流速度の増加とともに ζ_{max} は大きく: ほぼ $\zeta_{\text{max}} \propto w_*$
初期成層の強さには依存しない

3.2 基準温位 θ_0 への依存性

$Q=0.2\text{Kms}^{-1}$, $\Gamma=0.004\text{K/km}$,

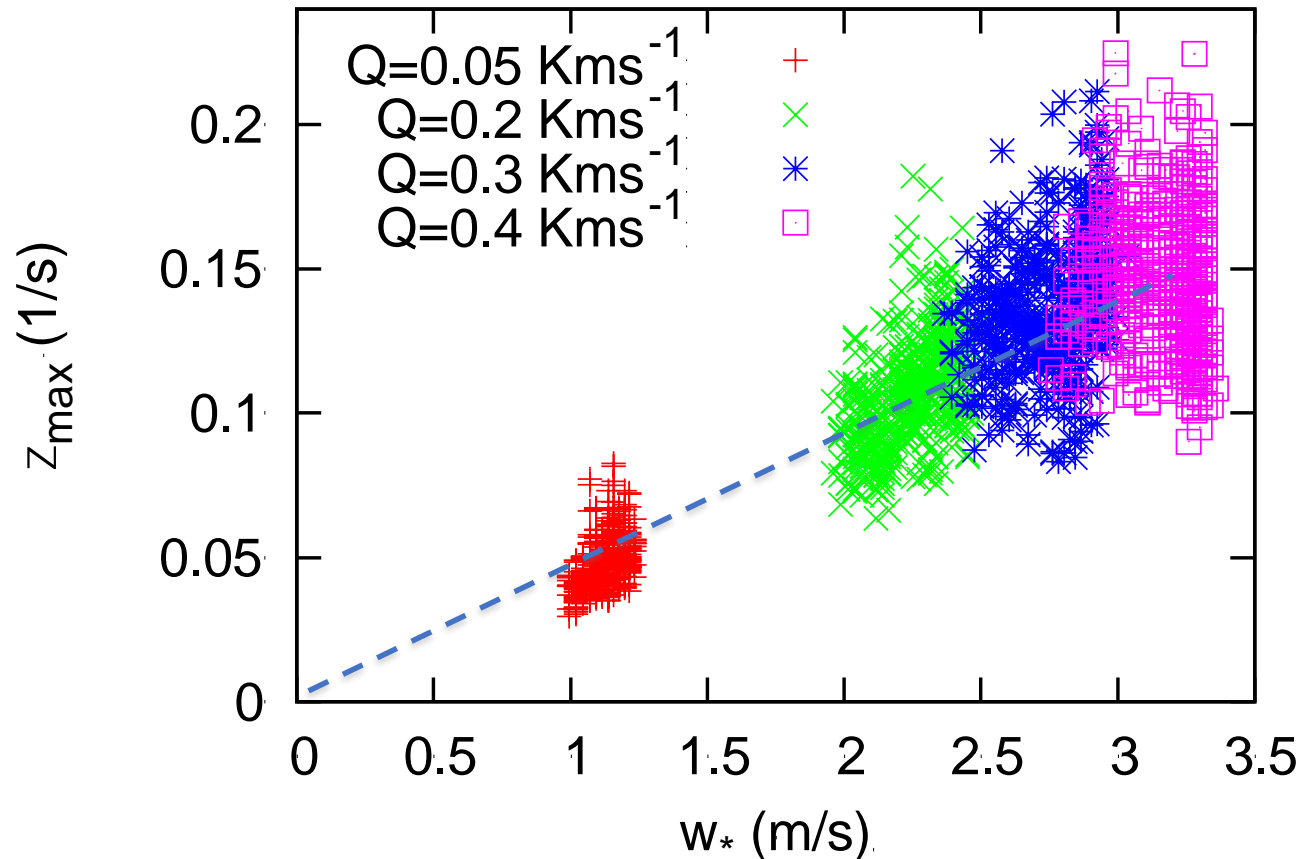
$\theta_0=300\text{K}$, $\theta_0=400\text{K}$, $\theta_0=2000\text{K}$ の比較



z_{\max} と w_* の関係は基準温位に依らない

3.3 異なる大きさのQへの依存性と速度スケール

格子間隔 $\Delta=50\text{m}$ 、 $\Gamma=0.004\text{K/m}$

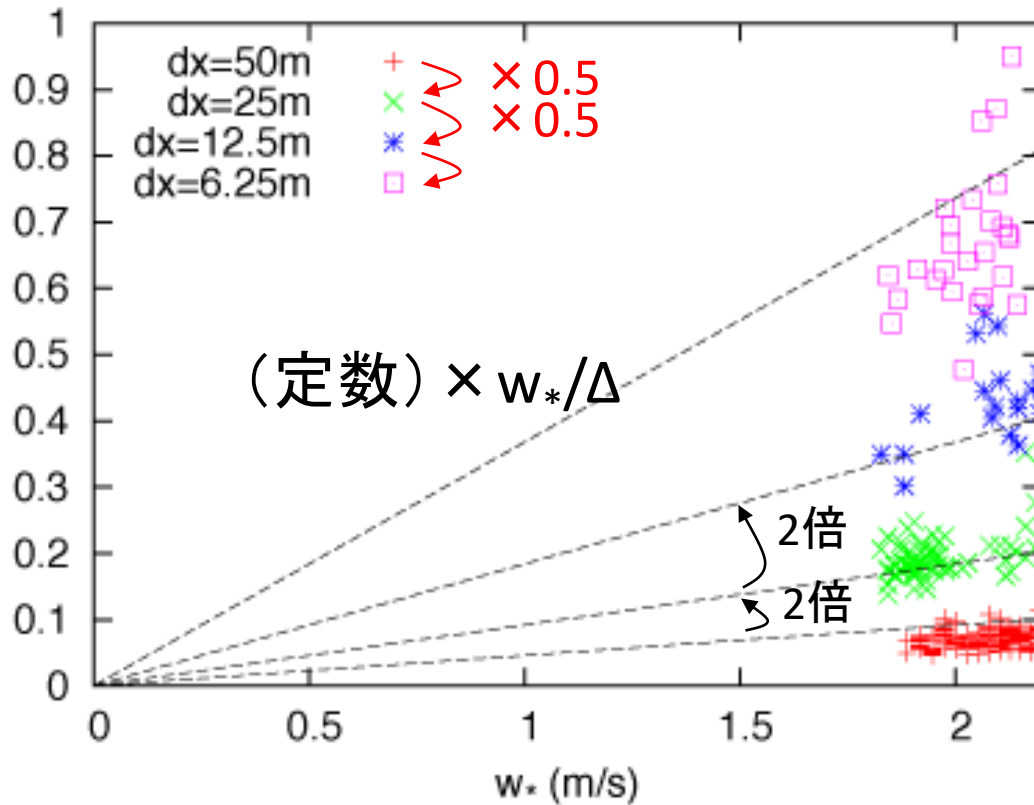


Qに関わらず、鉛直渦度 z_{\max} は対流速度 w_* におおよそ線形に依存 → 速度スケールは w_* が有力

4. 時間的に変化しない長さスケールは?: 鉛直渦度の格子間隔 Δ への依存性

$Q=0.2K \cdot m/s$ 、 $\Gamma=0.004K/m$ 、格子間隔のみを変える

ζ_{max} : 高さ
75mの水平
面での鉛直
渦度の最大
値



格子間隔50m \rightarrow 12.5mでは、解像度0.5倍で渦度は2倍(長さスケールは格子間隔) \Leftrightarrow 12.5m \rightarrow 6.25mでは2倍ではない

格子間隔ではないDust Devil固有な長さスケールの出現??

循環のスケールと鉛直渦度のスケール

ダストデビルの鉛直渦度は対流混合層の循環が収束
 → $h \times w_*$ でスケール

鉛直渦度のスケール

循環 Γ

$h \times w_*$ 速度スケール
 w_*

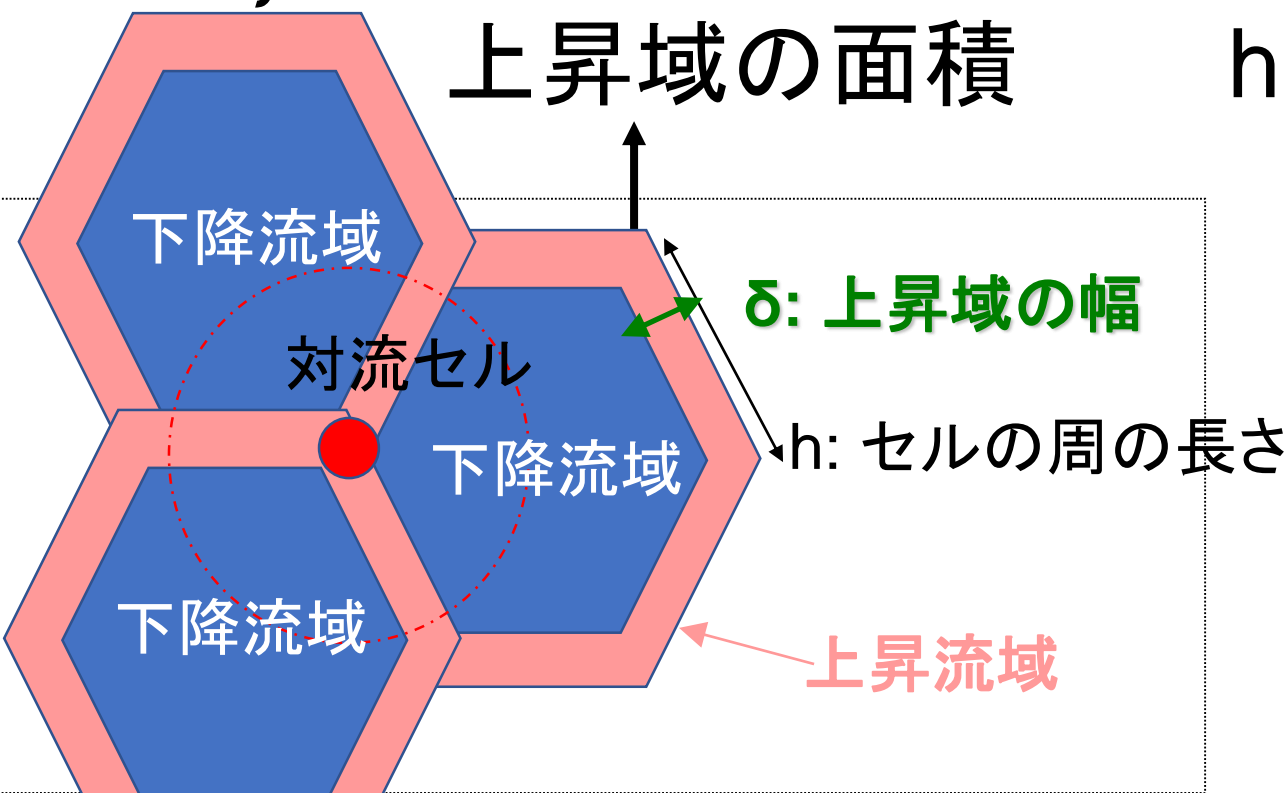
$\zeta \propto$

\propto

$\frac{h \times w_*}{h \times \delta} =$

$\frac{\delta}{\delta}$ 長さスケール

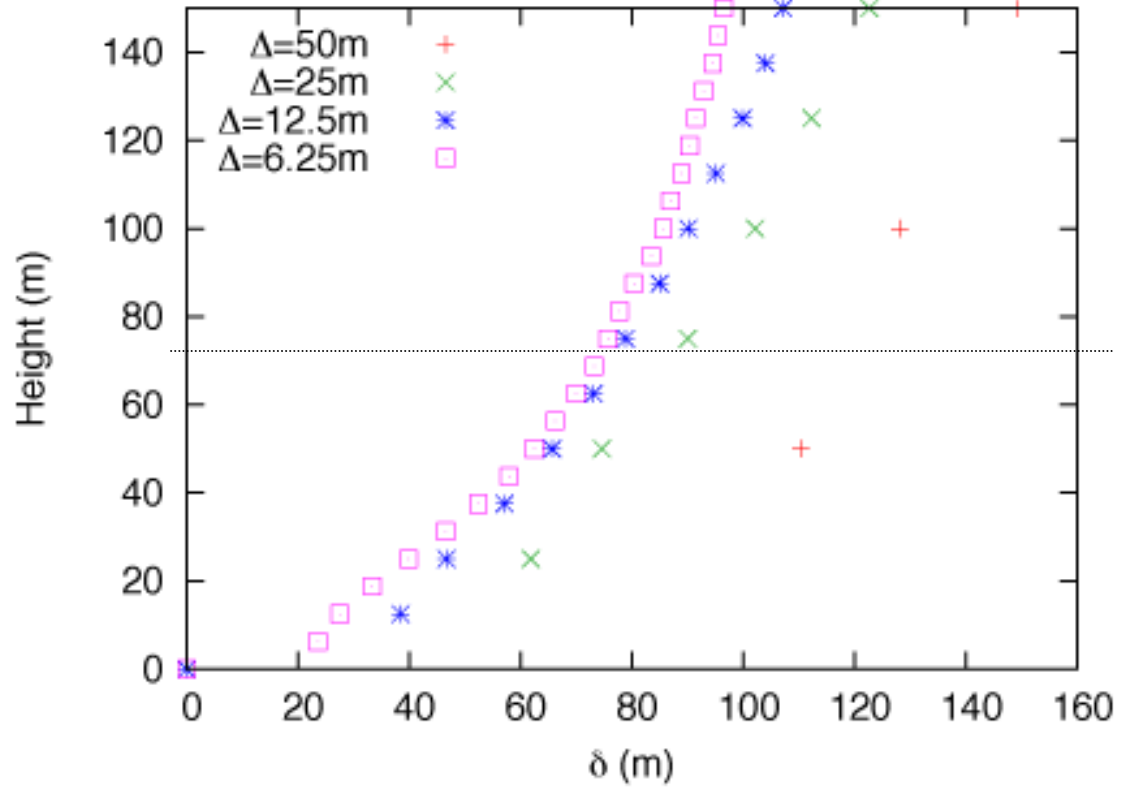
上昇域の面積



上昇域の平均的な幅 δ_m の見積もり

3.5h後 上昇域の平均的な幅

上昇域の面積
 (上昇域の外周の長さ)/2



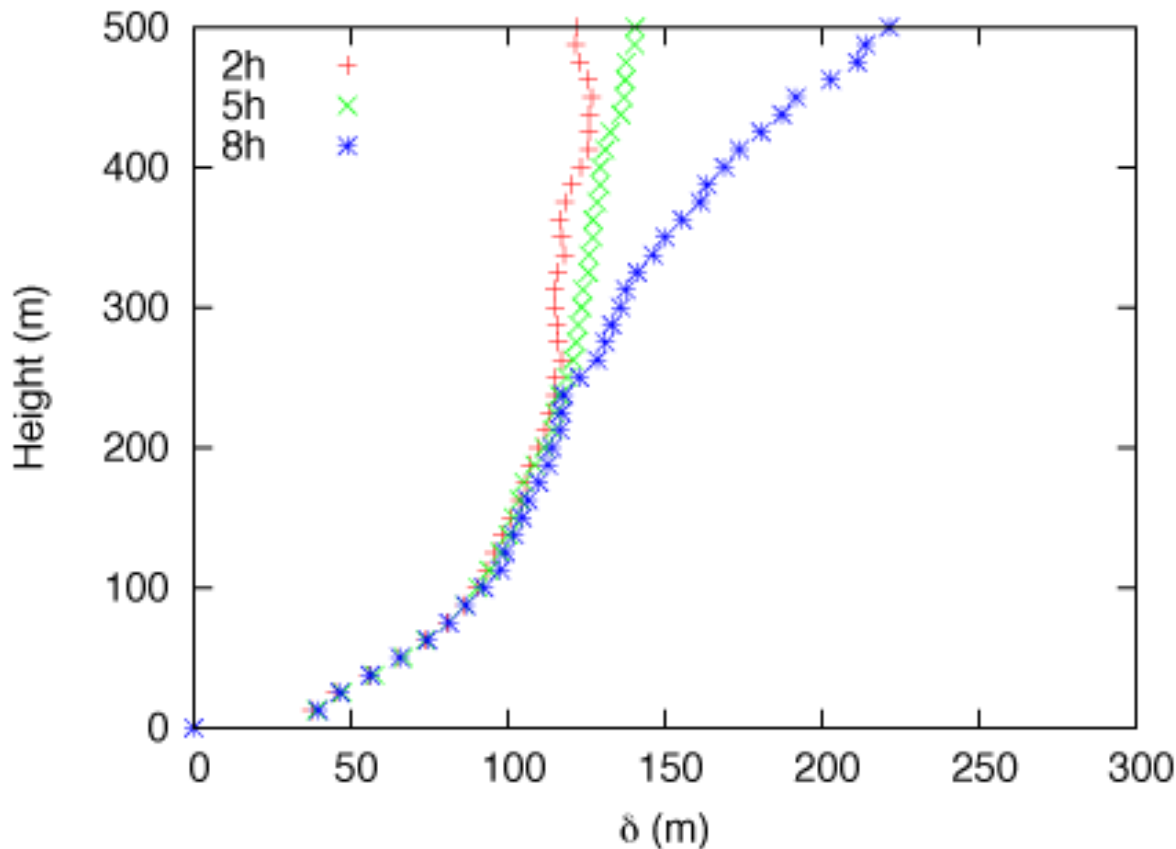
ζ_{max} の実現する付近の上昇域の幅 δ はもう少し小さくなっているはず

Δ が小さくなると δ_m が収束する傾向

→固有の長さスケールをもつことで、 ζ_{max} が収束

δ_m の時間変化

δ_m の各時間での鉛直分布(格子間隔12.5m)

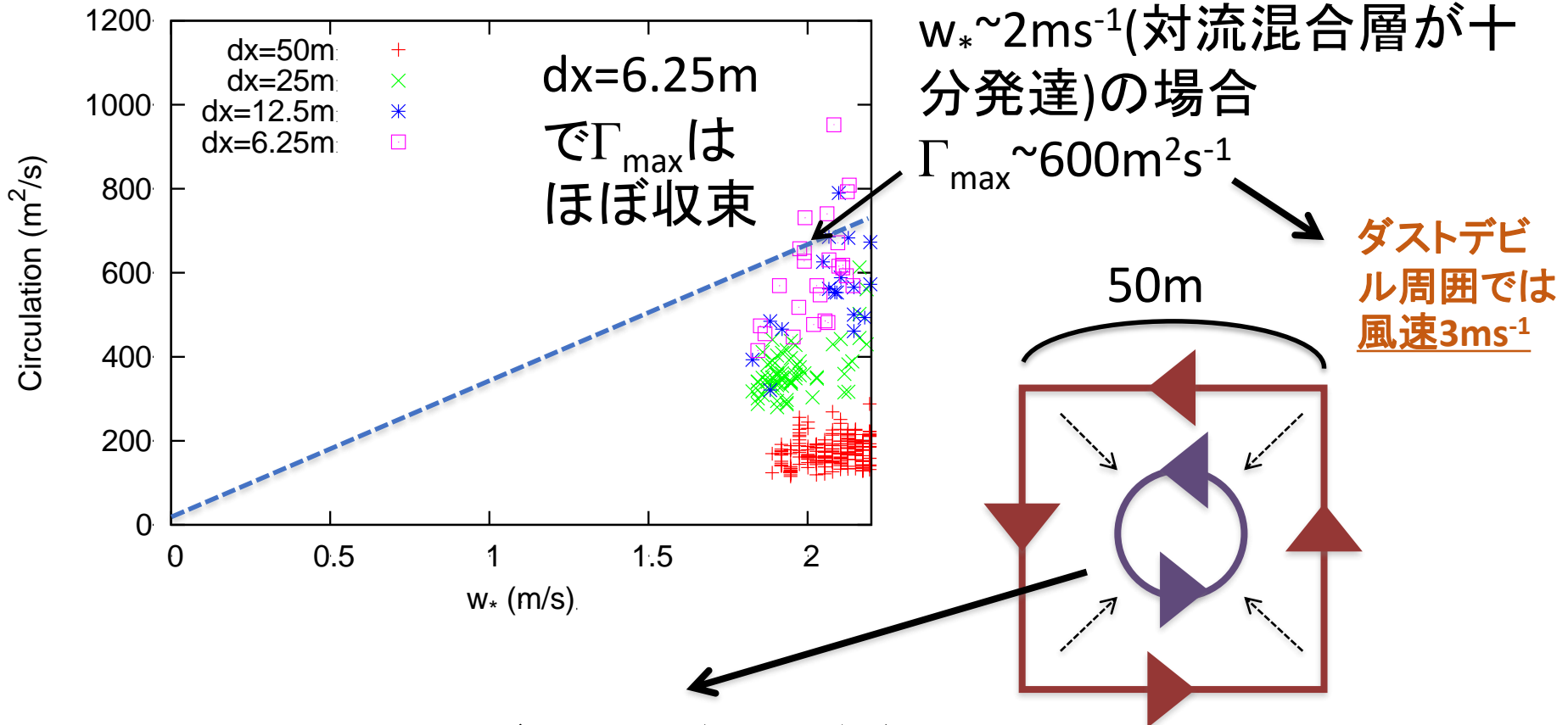


$$\zeta_{\max} \propto w_* / L$$

下層では δ_m はあまり時間変化しない(h に依存しない)+上昇流域の幅は固有の幅をもつ → **長さスケールになりうる**

課題: 上昇流の幅を決める物理は?

ダストデビル周囲50m × 50mの範囲の循環の最大値 Γ_{\max}



長さスケールを決定づける、ダストデビルの渦構造をLESで精緻に再現のためには、さらに高解像度のLESが必要(e.g. $dx=1\text{m}$, [Rasch et al. 2011](#))

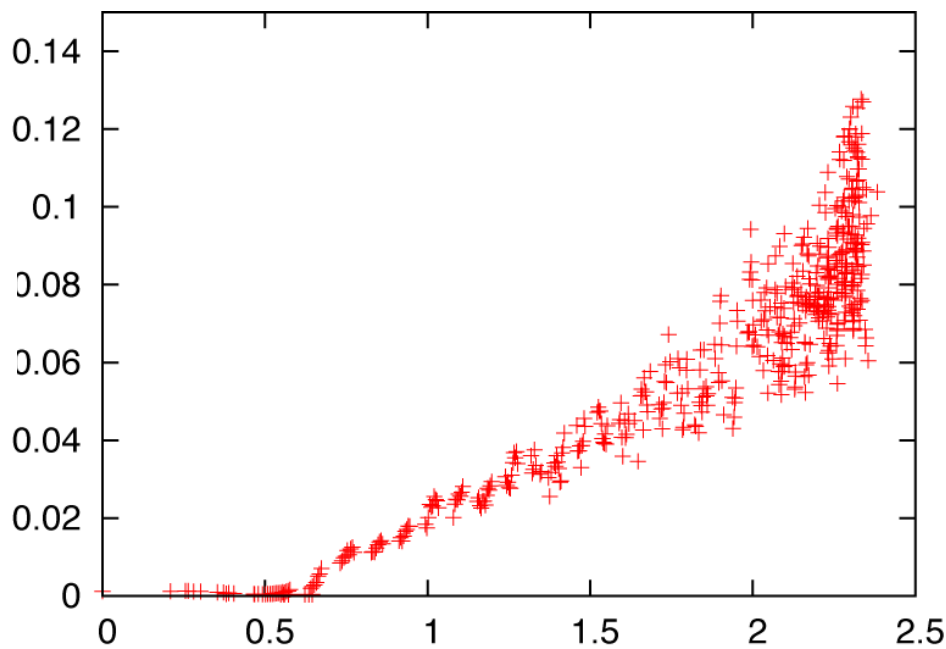
混合層発達初期 のスケーリング

強い鉛直渦度 ζ_{\max} と w_* (日変化なし)

(Ito et al., JSMJ, 2010)

格子間隔50m、日変化あり

ζ_{\max} : 高度75mの鉛直渦度の最大値



$$w_* \equiv (gQh/\theta_0)^{1/3} : \text{対流のスケール速度}$$

Q : 地表面ヒートフラックス

h : 混合層高さ

ζ_{\max} は w_* の単調増加関数

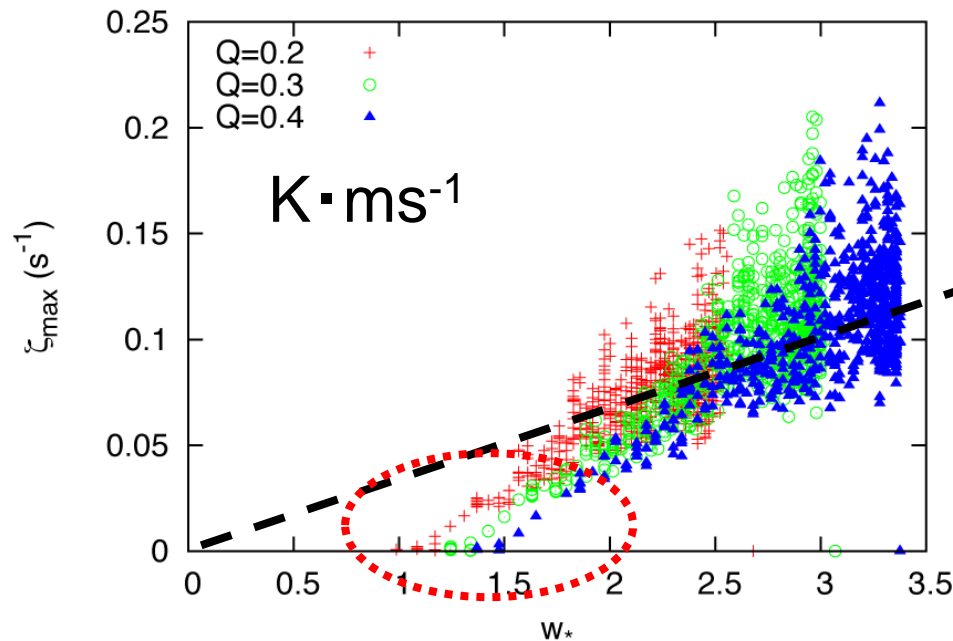
w_* の切片が存在

鉛直渦度のスケーリング

(2009春、気象学会)

w_* と ζ_{\max} の関係

格子間隔50m、Q一定(日変化なし)



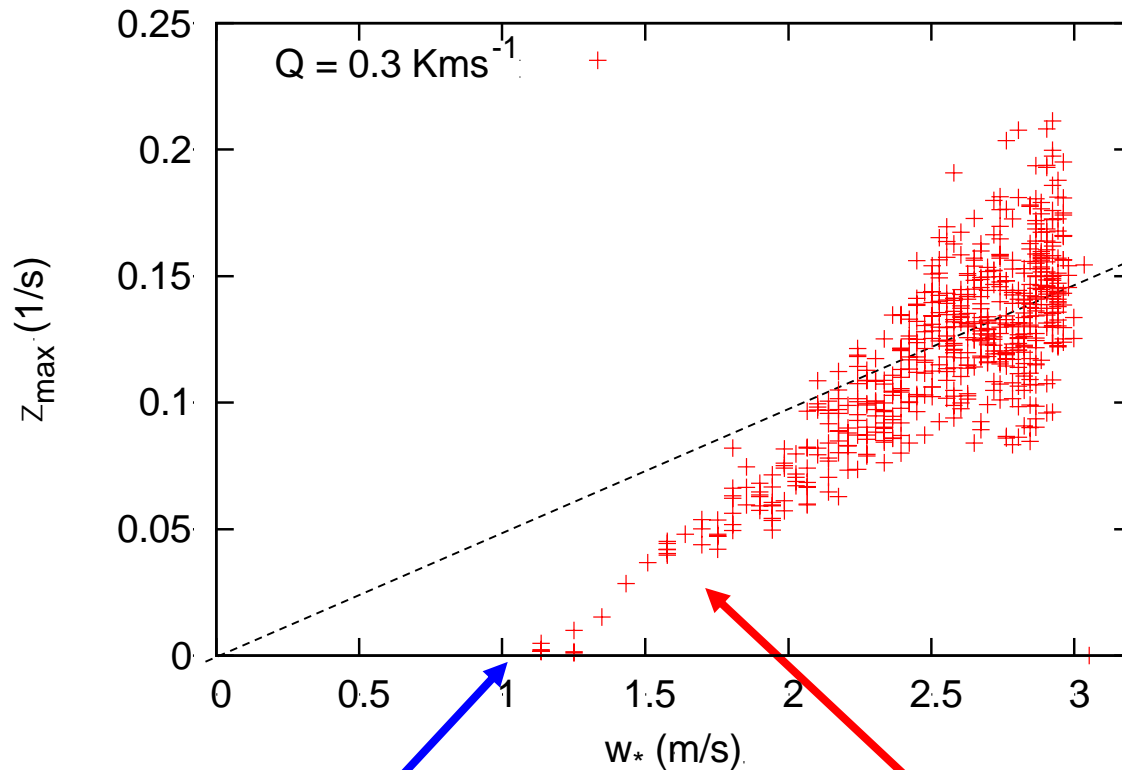
ζ_{\max} は w_* に線形に依存 $\rightarrow \zeta_{\max}$ は w_* でスケール

\Leftrightarrow 小さな w_* の区間(混合層発達初期)の特異性

1. 切片の存在(発達ごく初期の15分)
2. ζ_{\max} が小さく、スケールに乗らない(発達初期の3時間)

スケーリングが適用できない場合1: 対流混合層の発達初期

w^* と z_{\max}

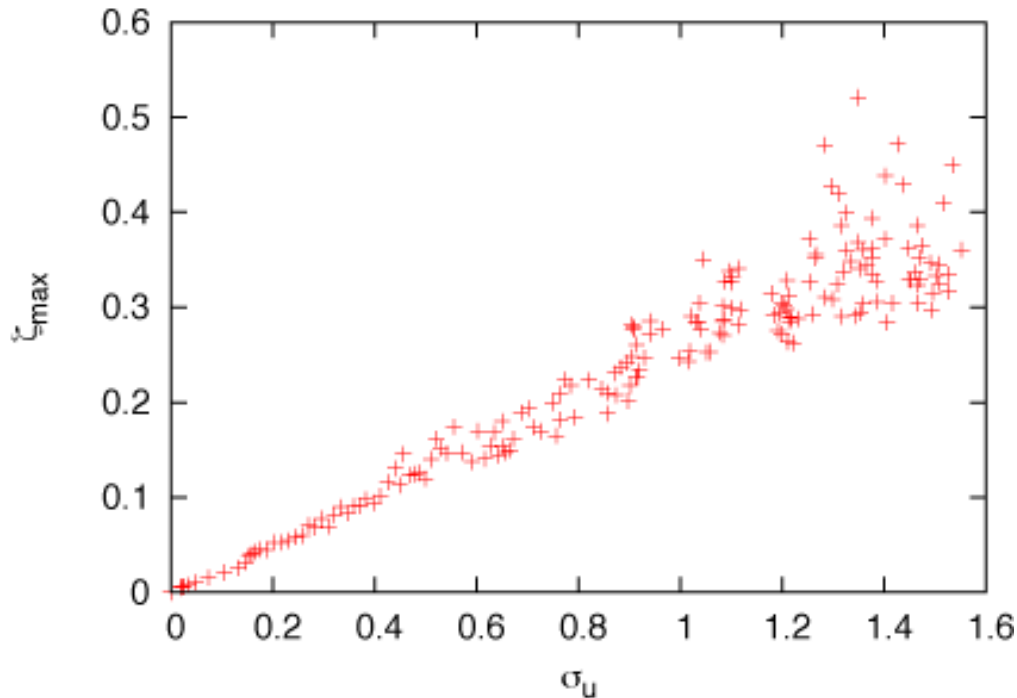


1. w^* の切片(最初の15分)

2. w^* によるスケールより小さい(最初の3時間)

最下層の水平速度 $\langle u'u' \rangle^{1/2}$ によるスケーリング

強い鉛直渦度 ζ_{\max} と水平風速の変動成分 $\sigma_u = \langle u'u' \rangle^{1/2}$ の関係



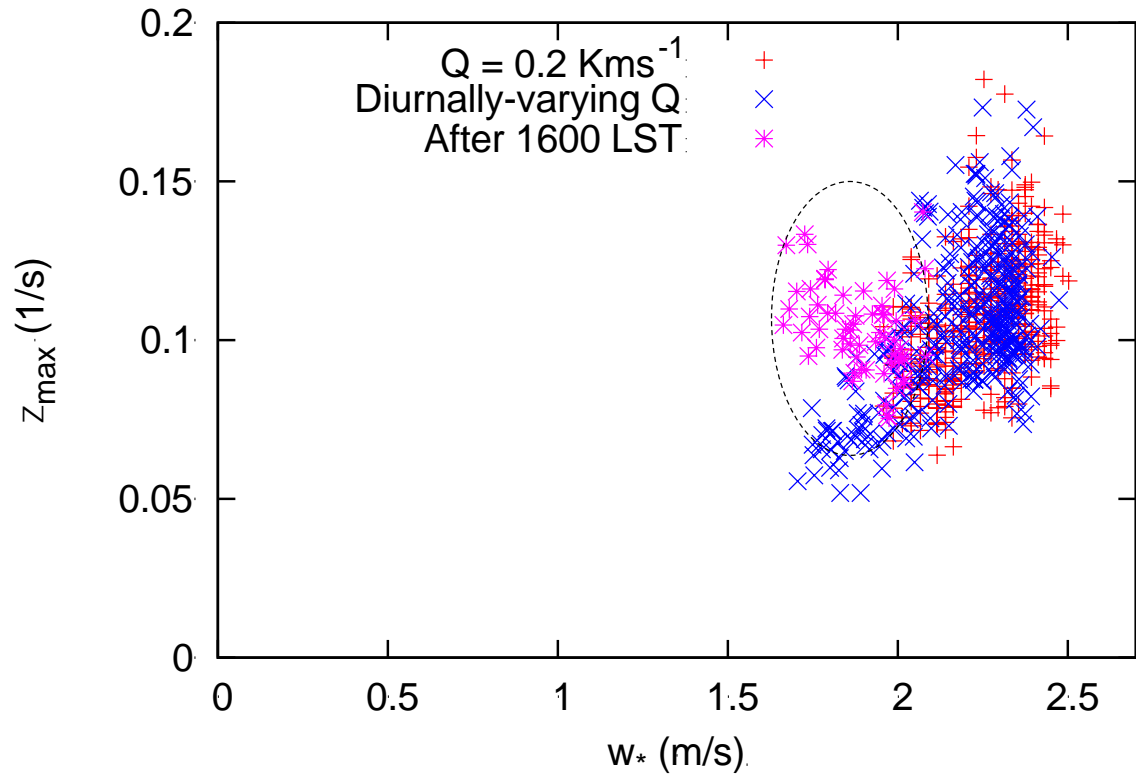
切片はない→発達初期に特異性はない

発達した混合層では σ_u は w_* でスケールされる(Deardroff 1970)

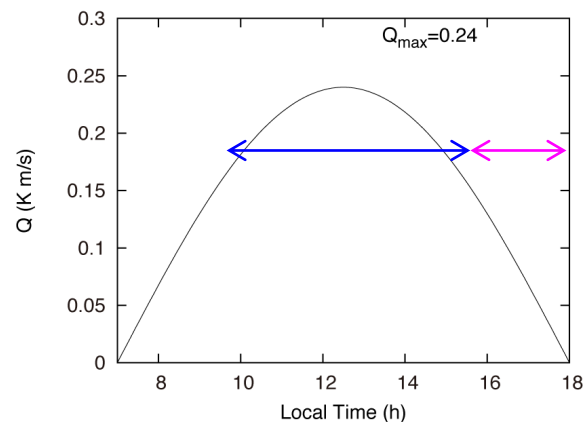
⇔ 発達初期は w_* による対流のスケーリングが不適切

スケーリングが適用できない場合 2: 対流混合層減衰期

w_* と ζ_{\max} 、 Q 一定と Q 日変化の16時以前と16時以後



地表面ヒートフラックス
 Q の日変化



対流混合層の減衰期も ζ_{\max} が w_* でスケールできない

相似則が成立する条件

相似則→混合層の準平衡状態を仮定

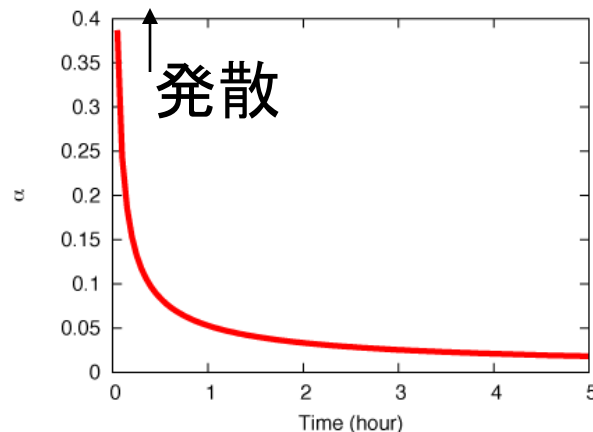
混合層の成長速度 dh/dt が、対流運動を表す w_* と比較して小さい必要

$$\frac{dh}{dt} \sim \sqrt{\frac{q}{2\gamma t}} \quad \alpha = \frac{dh}{w_*} \sim C\gamma^{-1/3}t^{2/3} \quad C: \text{定数}$$

速度比 α が一定値 α_c より小さくなければならない

→ α_c は γ と t のみで決まる

α_c の時間変化の見積もり ($\gamma=0.004\text{K/m}$)



→最初の1時間(t_c)のデータは相似則があてはまらないと考え、取り除く

t_c 以降は $\alpha_c < 0.05$: w_* が混合層の成長速度の20倍以上

渦の性質の調査

渦のトラック

- Ohno and Takemi (2010, SOLA): LESの計算結果における鉛直渦を目でトラック、渦の合併の重要性
- Gheynani and Taylor (2011, Pla. Spa. Sci.); Raasch and Franke (2011, JGR): LESにトラッキングのルーチンを組み込む。一般風の与える影響

ダストデビル $U=2.5\text{m/s} > U=0\text{m/s} > U=5\text{m/s}$

→本研究の目的

日変化を再現したLESに、トラッキングのルーチンを組み込み、一般風(0~5m/s)や対流の強さの影響をみる。渦の合併についても調べる

Dust Devilのトラッキングの手法


LES(Ito et al., 2010)

- 計算領域 $4.2\text{km} \times 4.2\text{km} \times 4.0\text{km}$
- 格子間隔 20m
- 地表面ヒートフラックス（7時から17時までの日変化を水平一様に強制）：

$$Q = 0.24 * \sin((t-7)/11) \quad \text{または} \quad 0.34 * \sin((t-7)/11)$$

[K*m/s] 対流弱 \Leftrightarrow 対流強

- 一般風: 0m/s , 2.5m/s , 5m/s
- 時間積分: 0.2s

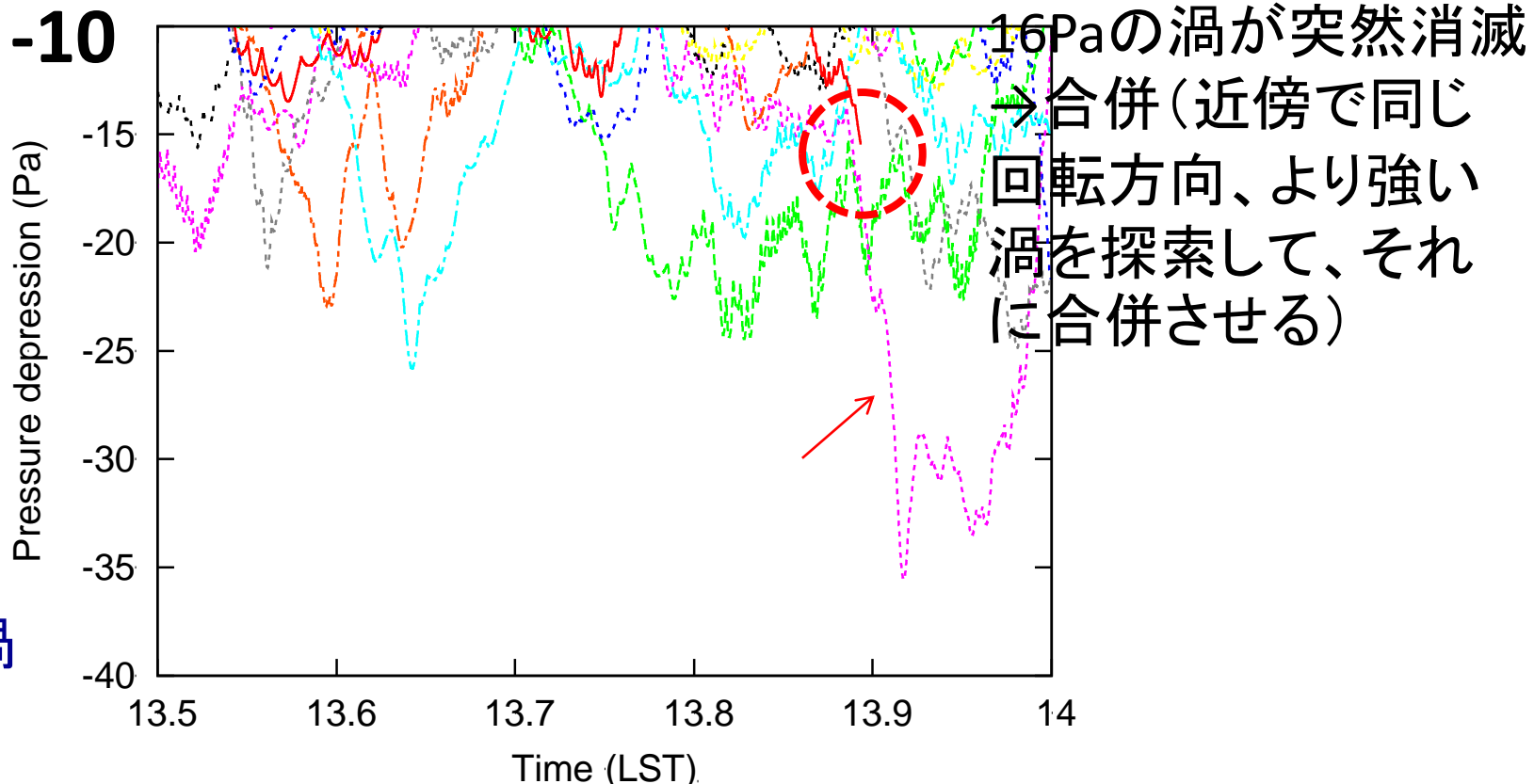


毎ステップで、モデル最下層の1) 5Pa 以下の圧力の極小値、2) 極小値をもつ座標、3) 最大風速半径、4) 最大接線風速を出力

典型的な鉛直渦の圧力降下の時系列(13:30~14:00)

便宜的に10Pa以上の圧力降下をDust Devilと定義

ひとつのDust Devilとする



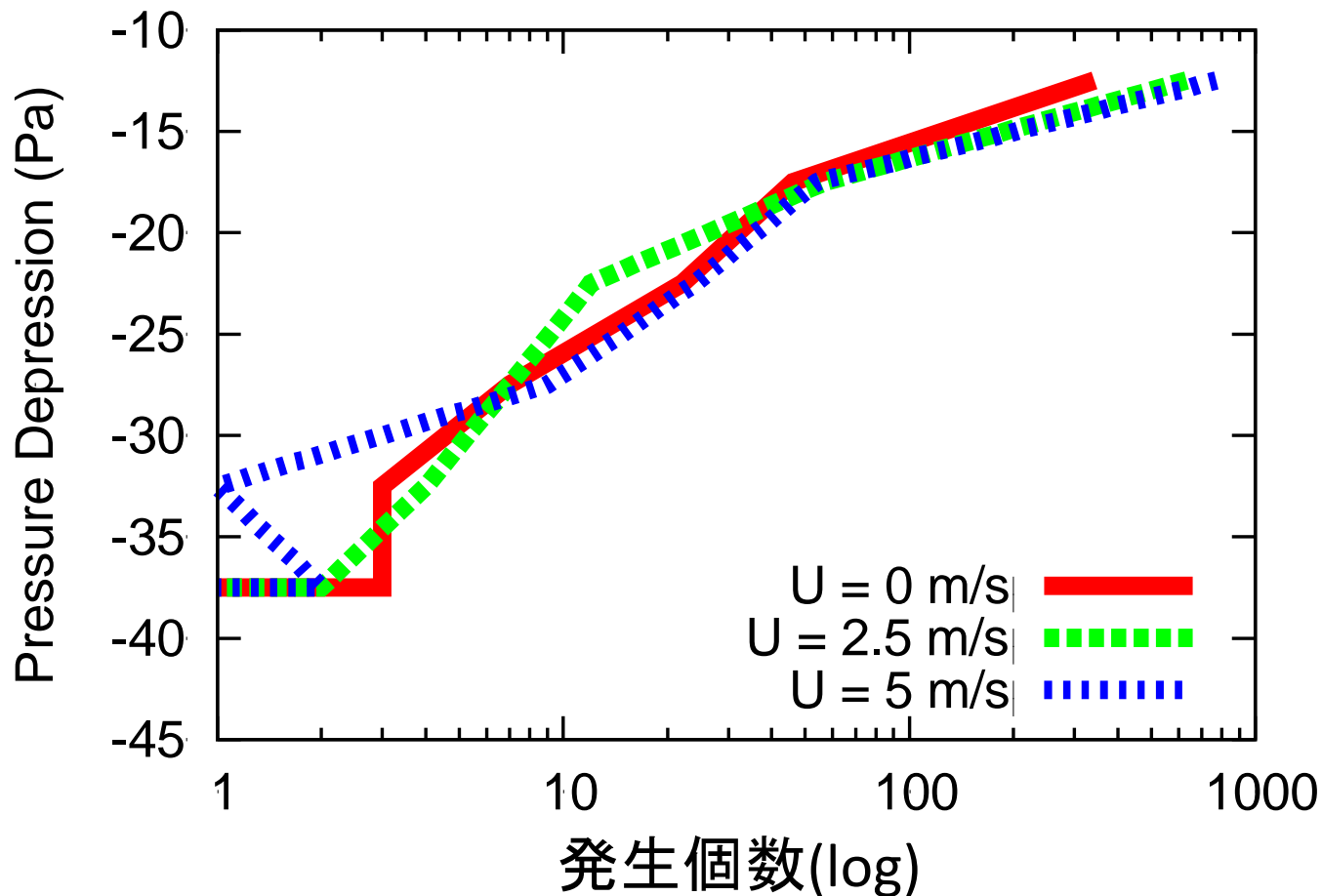
検出した鉛直渦($P < -5\text{Pa}$) と Dust Devil($P < -10\text{Pa}$)の個数

	$Q=0.24*\sin(\dots)$ 対流弱	$Q=0.34*\sin(\dots)$ 対流強
$U=0\text{m/s}$ 一般風弱	423個 (検出した5Pa鉛直渦は 2016個)	757個 (8248個)
$U=2.5\text{m/s}$	715個 (2686個)	
$U=5\text{m/s}$ 一般風強	861個 (5445個)	

→ 一般風が強い方が渦の数は多い

渦の強さの頻度分布

Dust Devilの
寿命のうち、
最大の圧力
降下(Pa)

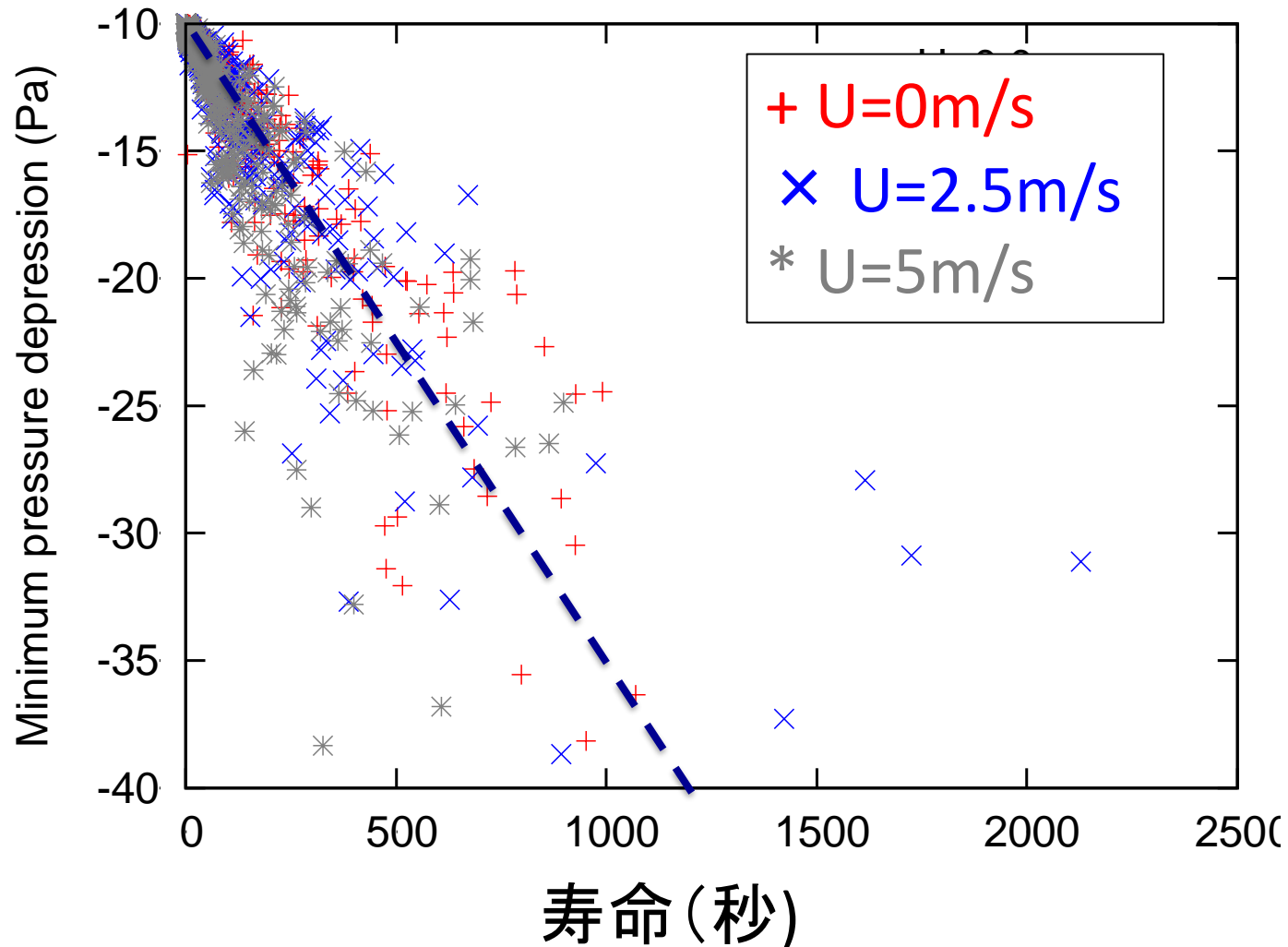


弱い渦: $5\text{m/s} > 2.5\text{m/s} > 0\text{m/s}$

強い渦: $0\text{m/s}, 2.5\text{m/s}$ (有意な差なし) $> 5\text{m/s}$

Dust Devilの強さと寿命の関係1 (一般風の強さの影響)

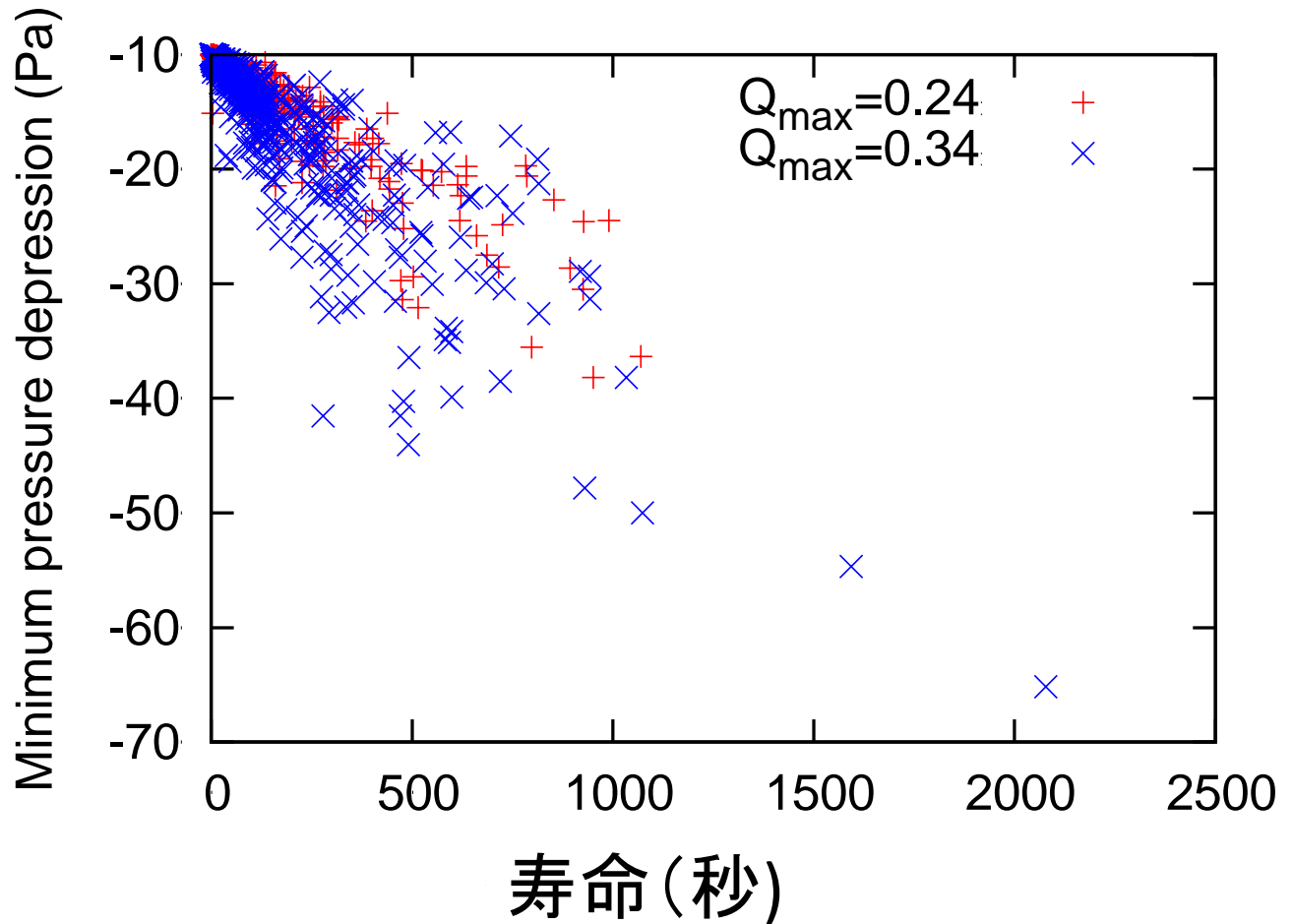
Dust Devilの
寿命のうち、
最大の圧力
降下(Pa)



- 寿命 $\sim 40 \times (\text{圧力降下} - 10)$ 、ほぼ線形
- ただし $U=2.5\text{m/s}$ では、並外れて長寿命の渦が存在

Dust Devilの強さと寿命の関係2 (一般風なし、対流の強さの影響)

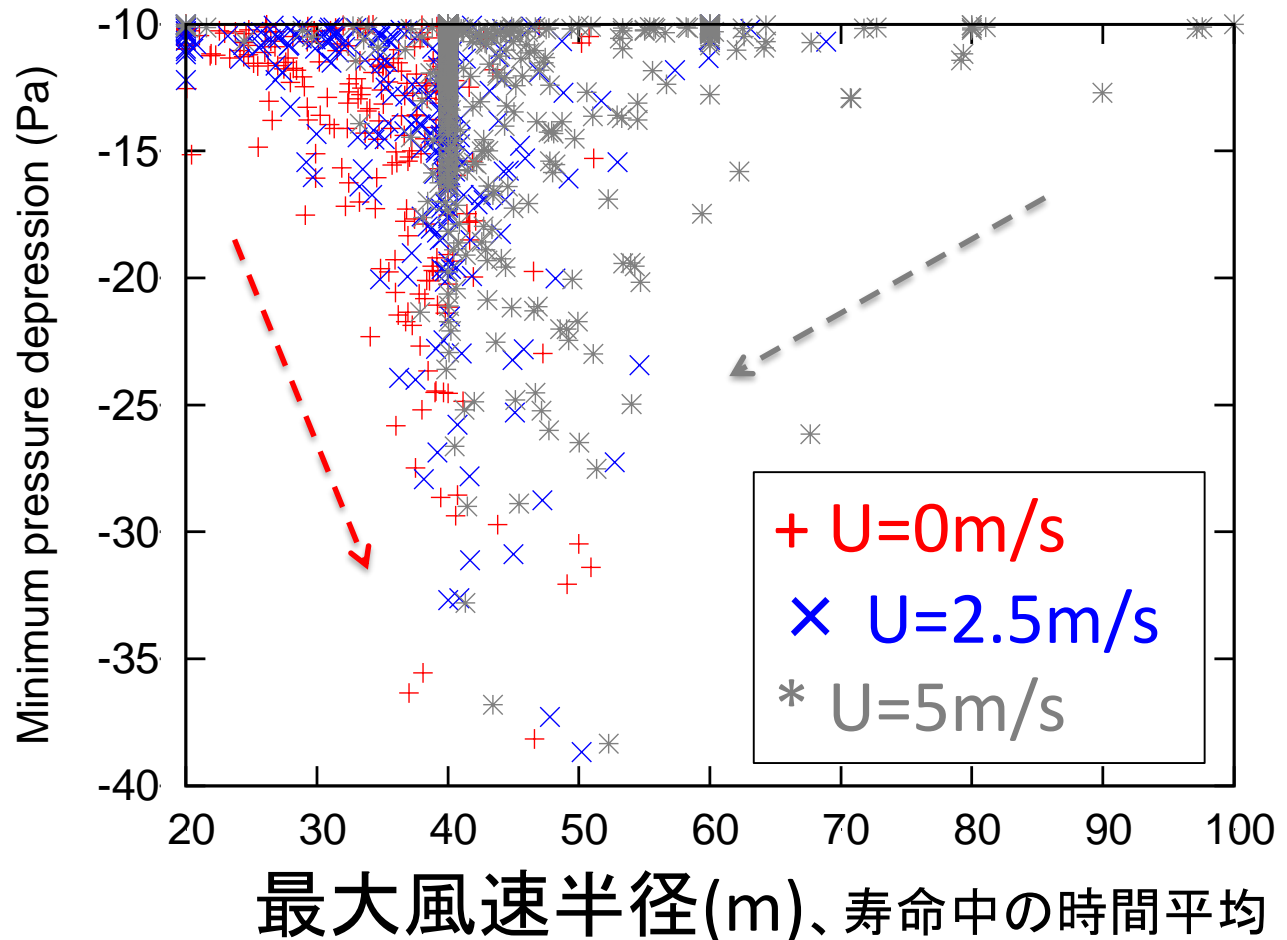
Dust Devilの
寿命のうち、
最大の圧力
降下(Pa)



- 対流が強くなっても、寿命 $\sim 40 \times$ (圧力降下-10)、ほぼ線形

Dust Devilの強さと最大風速半径

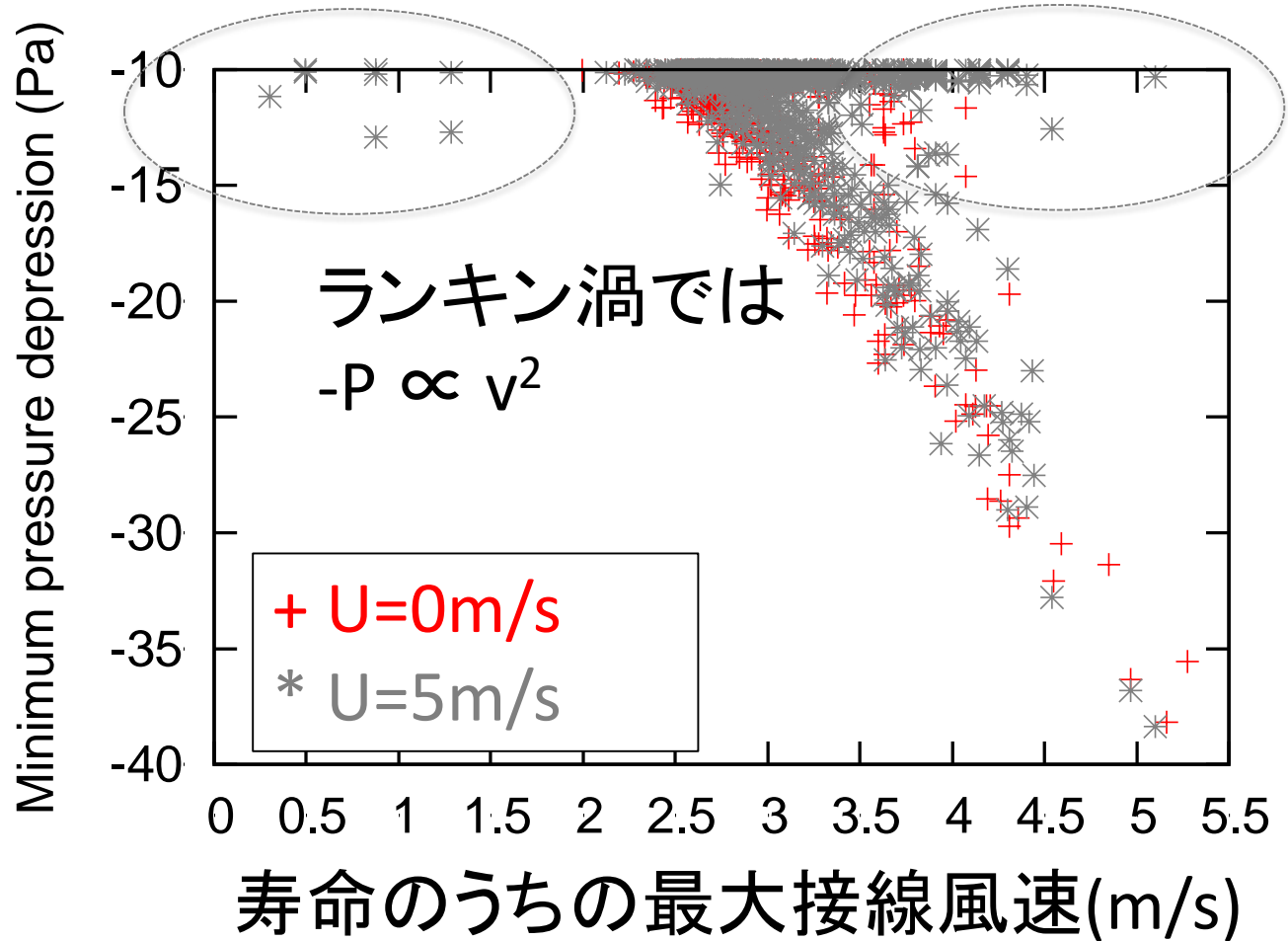
Dust Devilの
寿命のうち、
最大の圧力
降下(Pa)



- (一般風弱) 強い渦ほど最大風速半径が大
- (一般風強) 強い渦ほど最大風速半径が小

圧力降下と接線風速

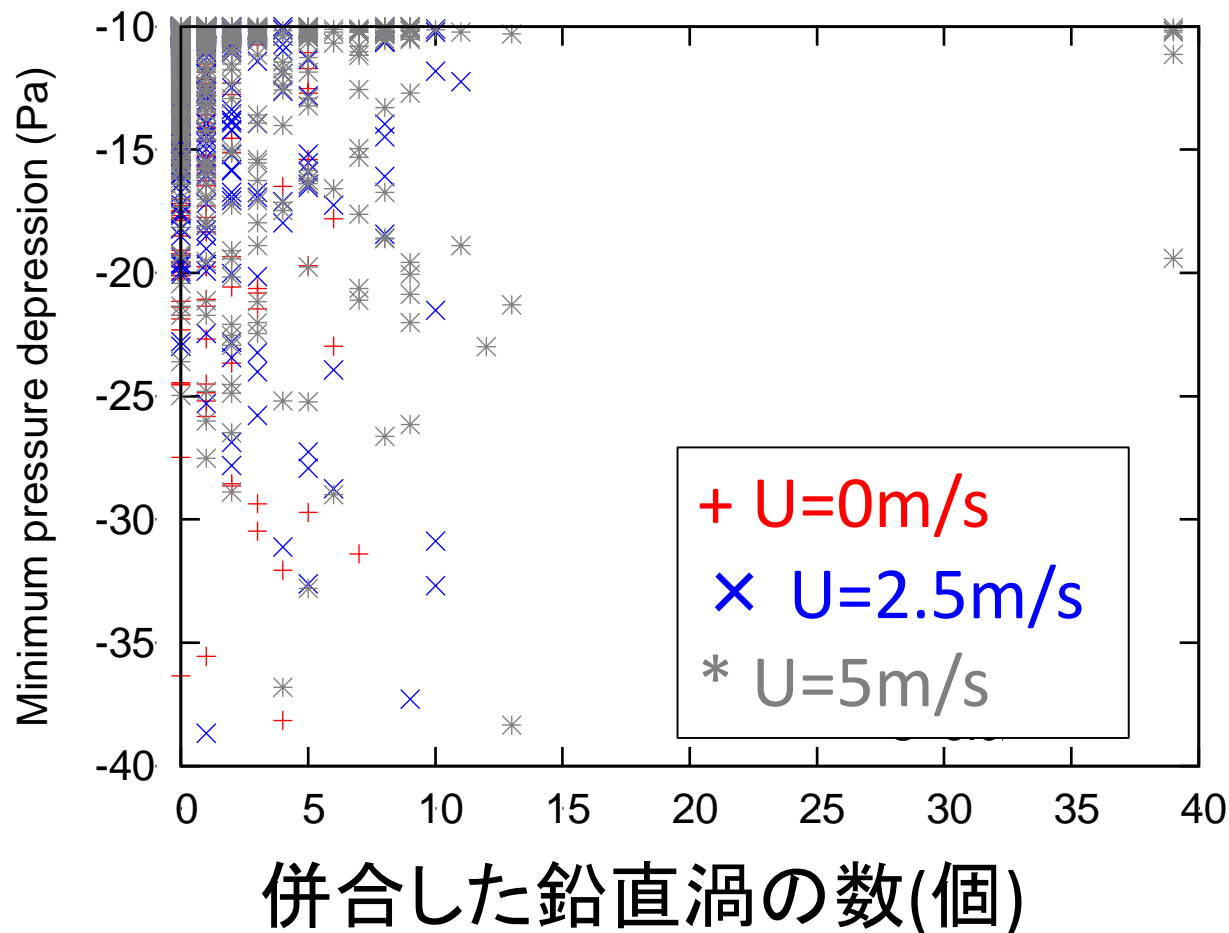
Dust Devilの
寿命のうち、
最大の圧力
降下(Pa)



一般風が強い場合、鉛直シアによって弱い渦
がランキン渦から変形？

Dust Devilの強さと併合した鉛直渦の個数

Dust Devilの
寿命のうち、
最大の圧力
降下(Pa)



- 併合した渦の数と、渦の強さはあまり関係ない
- 環境風が強いほど、併合する渦の数は多い

ダストデビルのトラッキングまとめ

- LESで再現した、すべてのDust Devilのトラッキングを行った

<寿命と、対流の強さの影響>

- 寿命は渦の強さにほぼ線形に依存
→対流が強くなっても、↑の関係は変わらない

<一般風の影響>

- 一般風弱： 強い渦がより多く生成、強い渦ほど半径大
- 一般風中： 寿命が並外れて長い渦
- 一般風強： 弱い渦がより多く生成、非軸対称な構造、合併がより多い

メモ：「渦」の寿命は相当長い

ダストデビルのシミュレーションのまとめ

- **生成環境、生成機構、スケーリング、ダストデビルの挙動を解析**
- 建物、地形がある場合のダストデビル
- 実際のダストデビルとの対応
- ダストデビル予報？
- 渦同士の相互作用
- 解像度依存性
- サブグリッド乱流モデルの影響

ダストデビルの観測











@Arizona













おまけ（現地観察後）



おまけ



おまけ







オクラホマのダストデビル







おまけ



ダストデビルのPIV

はじめに

- 2011年7月18日から19日、米国アリゾナ州ツーソン付近の砂漠で、ダストデビルを撮影



Google Mapより



ダストデビルの撮影

7/18



7/19



2日X数時間の滞在で数10個みられた

ダストデビルの動画撮影

近距離（推定約100m）で発生したダストデビルを動画に収めた！



PIV映像用カメラ



ビクター
GC-PX1

三脚に固
定

手持ちカメラ



Kodak
Play Sport

防塵仕様

ダストデビルに伴う風速

【フィールド観測】トラックに搭載した計器で、ダストデビル内で風速を観測

接線風速～15m/s (Sinclair 1973)、ダストデビルによる突風被害から20m/s以上と推定

ダストデビル内の風速の観測例は少ない

【数値シミュレーション】LESによる塵旋風の再現 (Ito et al. 2013など多数)

再現されたダストデビルの接線風速は8m/s程度しかない

目的と目標

- **PIVにより、ダストデビル内の風速の推定を試みる**
- 気象現象へのPIVへの応用例は少数（竜巻、佐々ほか
2013年度気象学会大会）→ 市販のビデオカメラのみによる、非常に容易な「気象観測」
- 「長さ」の計測はないので、風速ベクトルの相対的な値しか求まらない
 - 手持ちカメラによるステレオ画像を活用し、「長さ」を推定
- ダストの濃淡がトレーサ。解像度不足により各瞬間・位置での風速ベクトルの正確な推定は困難
 - **代表的な接線風速と上昇流速の見積もりを目指す**

発表の構成

1. はじめに
2. PIVの手順と結果
3. 「長さ」スケールの決定
4. ダストデビルのもつ風速
 - 4.1 接線風速
 - 4.2 上昇流速
5. まとめ

2. PIVの手順

- PIV用ビデオ映像（60フレーム/s）を1920 × 1080ピクセルのビットマップへ変換
- バックグラウンドのRGB値との差分D（ダスト濃度に相当）が高いピクセルを選別



—



バックグラウンド
（約1分後）

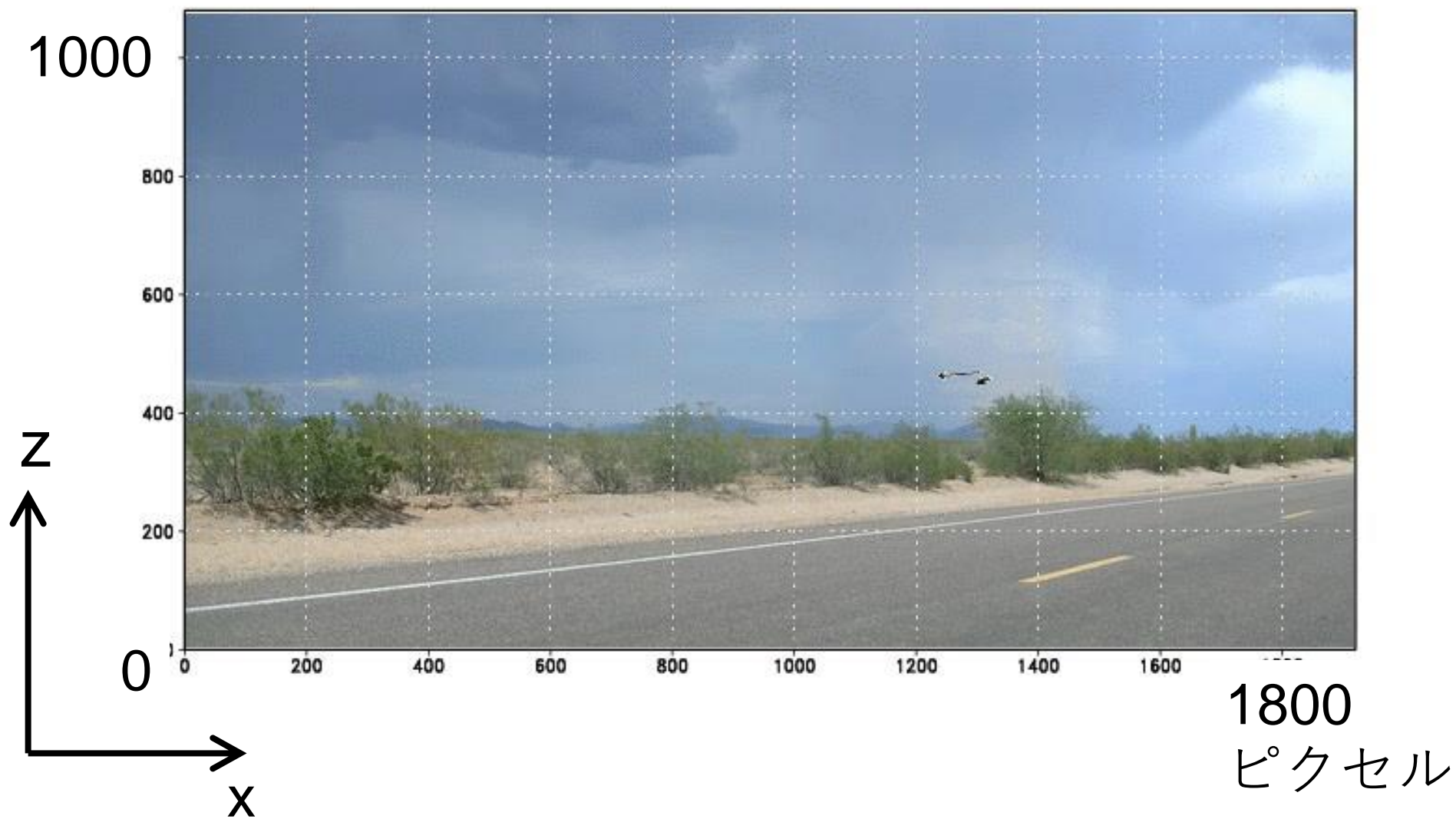
- Dの重心付近のみで、5×5ピクセルのテンプレート上でDの1/6s（10フレーム）後との相関から風速ベクトル $\vec{v}(t) = (u, w)$ を求める
- $\vec{v}(t)$ と $\vec{v}(t+1/12s)$ （1フレーム後）間の変動が少ない、 $\bar{\vec{v}}(t)$ のみを解析に用いる

PIV用ビットマップ例



PIVの結果

RGB値Dの重心付近、フィルター後の風速ベクトルのみ表示



発表の構成

1. はじめに
2. PIVの手順と結果
3. 「長さ」スケールの決定
4. ダストデビルのもつ風速
 - 4.1 接線風速
 - 4.2 上昇流速
5. まとめ

3. 「長さ」 スケールの決定

PIV映像用カメラ



手持ちカメラ (同時刻)



手持ちカメラ

PIV映像用カメラ → 撮影者の身長より、**6.5cm/ピクセル**



ダストデビル

撮影者までの距離の**2倍**

無限遠



背景の雲

ダストデビル付近は**6.5 × 2 ~ 約 13cm/ピクセル**

ダストデビルの特徴、距離

約13cm/ピクセル

→ 直径 ~ 18m

→ 高さ ~ 数10m

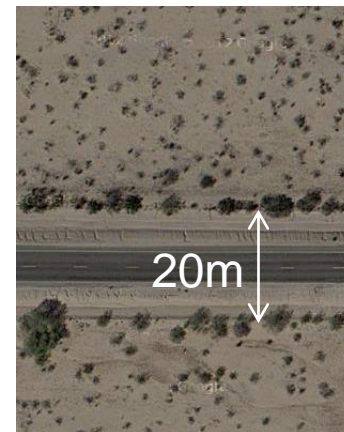


衛星画像の道路の幅は約10m

& 撮影者の身長のパピクセル数の

の比

→ ダストデビルまでの距離 ~ 100m

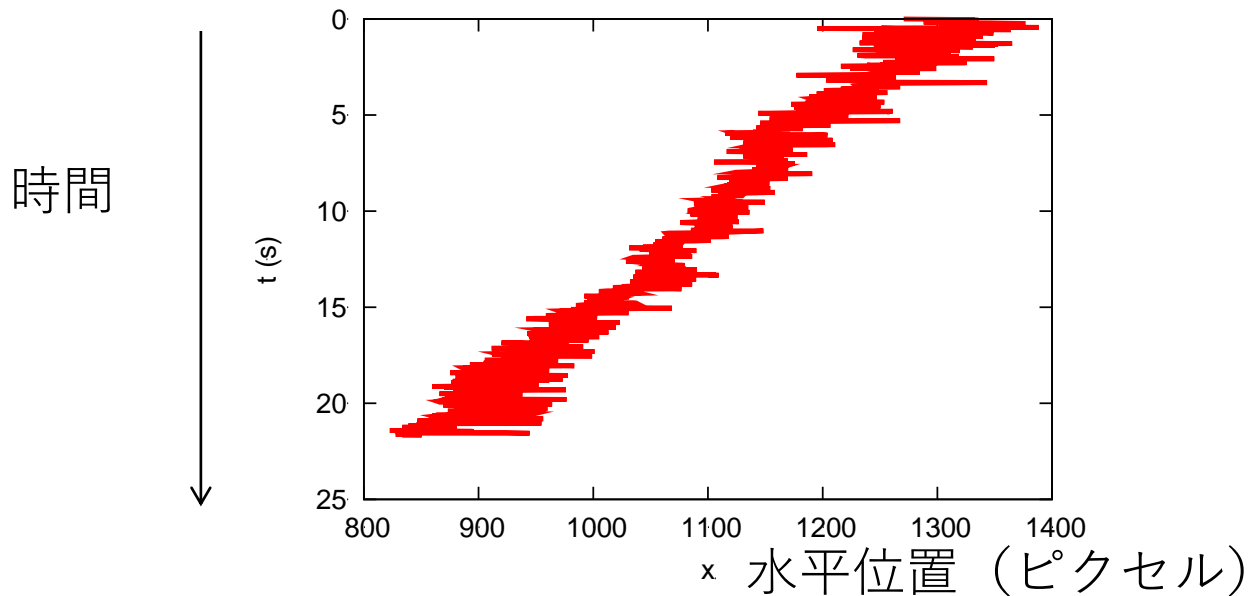


Google Mapより

ダストデビルの移動速度Uと特徴

- **直径**～18m・**高さ**～数10m

画素の差分Dの重心（ダストデビルの水平位置）の時間変化



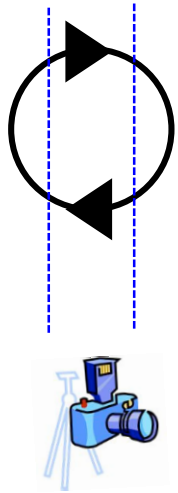
- 移動速度Uは**-20ピクセル/s**～**-3 m/s**
- Uは大気下層の環境風速とほぼ一致、環境風速が弱い方がダストデビルが生じやすい事実(Sinclair 1969など)と整合
- Uはほぼ一定→奥行き方向の速度は無視できる

発表の構成

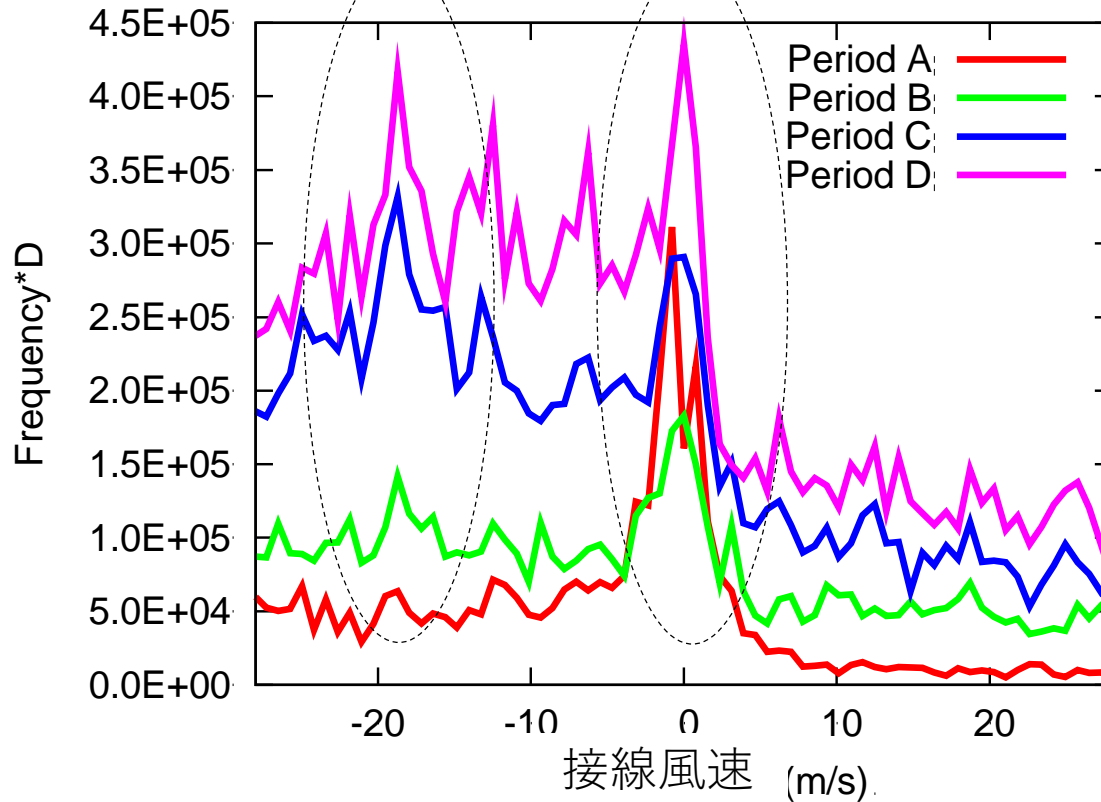
1. はじめに
2. PIVの手順と結果
3. 「長さ」スケールの決定
4. ダストデビルのもつ風速
 - 4.1 接線風速
 - 4.2 上昇流速
5. まとめ

4.1 ダストデビルの接線風速

ダストデビルを上から見た図



RGB値の差分Dの重心付近、
Dで重み付けした、風速ベクトルの水平成分uの頻度分布



3.3秒毎の4
つの期間



- 0m/s付近のピーク→背景の雲の変化、ダストデビルと関係ない
- Period A以外で-19m/s付近にピーク→ 代表的な接線風速は-19m/s-(移動速度:3m/s)で16m/s

高度ごとの接線風速

色素の差分Dの重心から水平±25ピクセル内、
Dで重み付けした、風速ベクトルの水平成分uの頻度分布

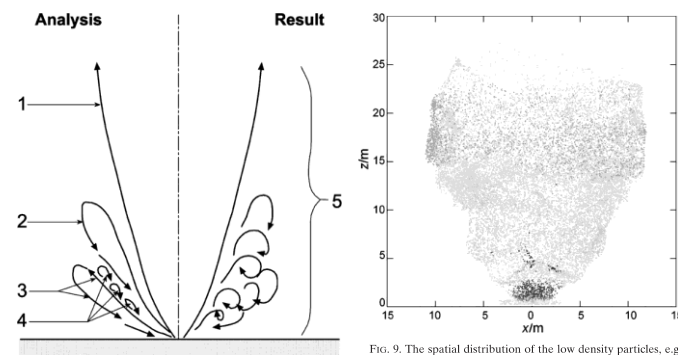
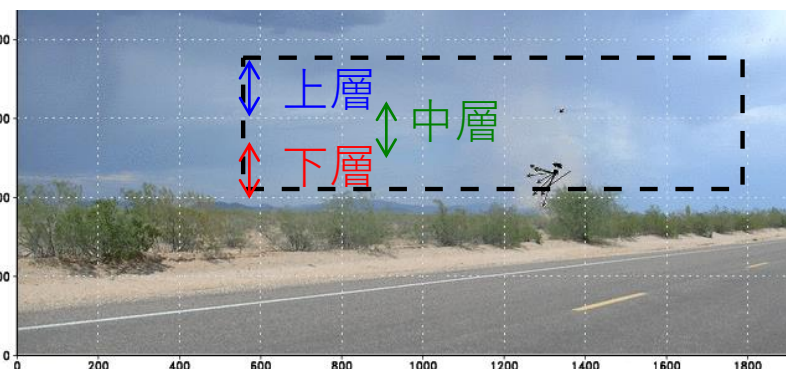
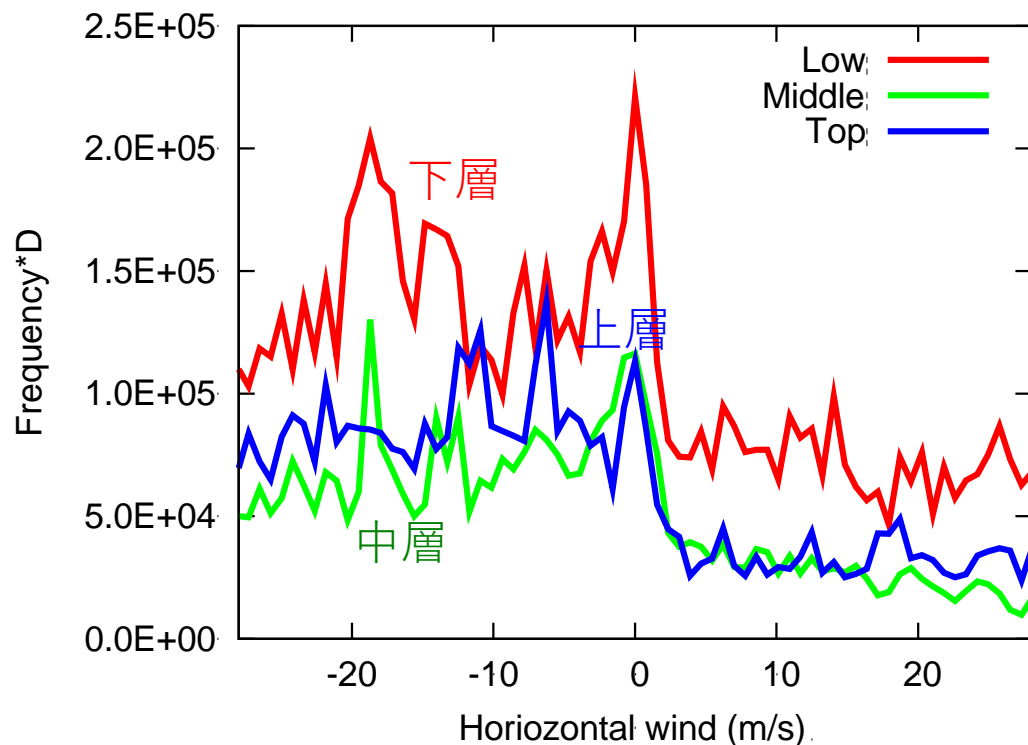


FIG. 8. The dust-lifting patterns in a dust devil.

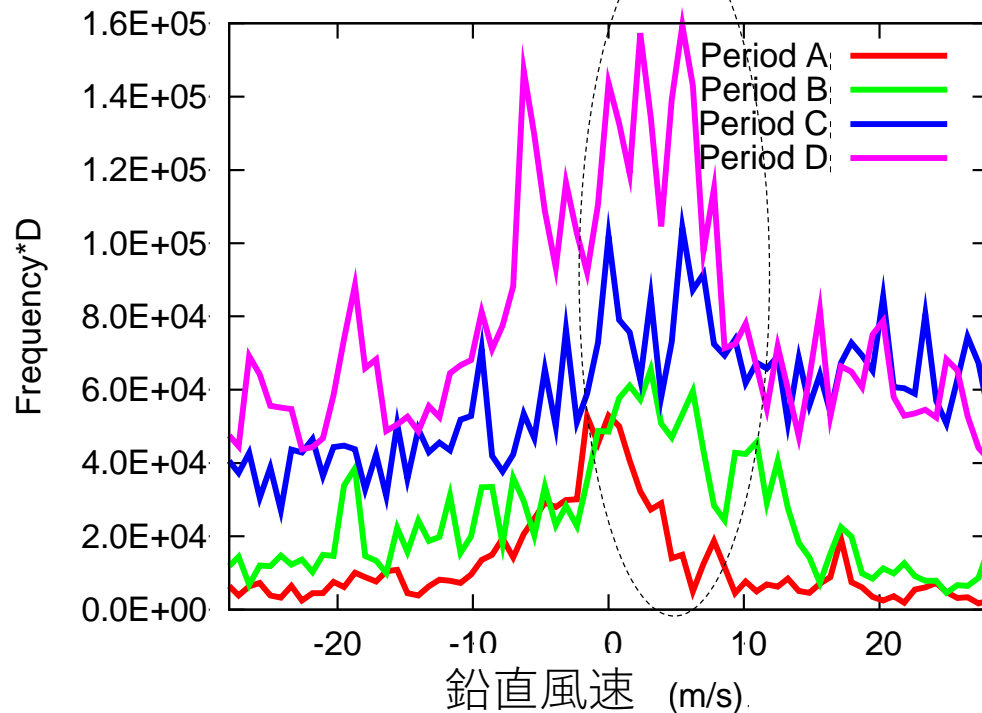
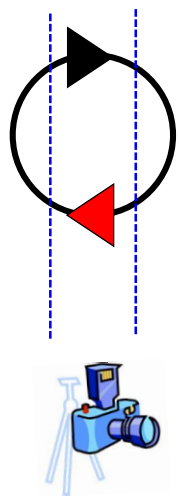
FIG. 9. The spatial distribution of the low density particles, e.g. wood particles, with diameter 300 μm in the modeled dust devil at $\Delta t = 5$ s. The grains with low density could reach higher levels than those with heavier density.

- 下・中層ではピークが $u \sim 19\text{m/s}$ に存在
- 上層はダストが遠心力で渦コアからはじき出され(Gu et al. 2006)、小さい風速が観測

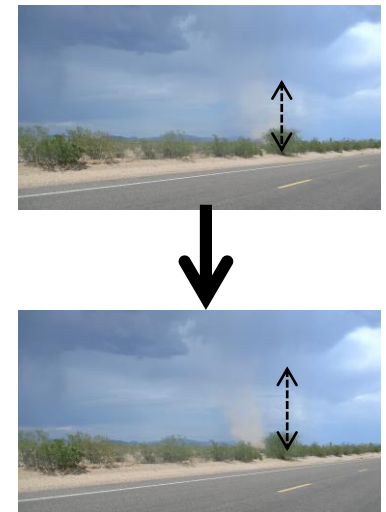
Gu et al. 2006より

4.2 ダストデビルの鉛直風速

RGB値の差分Dの重心付近で $-27 < u < -14 \text{ m/s}$ をみたす、
Dで重み付けした、風速ベクトルの鉛直成分wの頻度分布



3.3秒毎の4
つの期間



全Periodで正の鉛直速度wが卓越、ピークは約6m/s
鉛直渦が上に成長する速度も約6m/s

→ ダストデビルの代表的な上昇流速は6m/s

5. まとめ

- 市販のビデオカメラを用いて、砂漠でダストデビルを撮影
- **PIV解析 + ステレオ画像により、観測例の少ないダストデビルのもつ接線風速や上昇流速を見積もった**
- 移動速度 $\sim 3\text{m/s}$ 、直径 $\sim 18\text{m}$
- **ダストデビルの代表的な接線風速 $\sim 16\text{m/s}$ 、
上昇流速 $\sim 6\text{m/s}$**

課題

- より高解像度のカメラが望ましい↔高フレームレートは必要ない
- 低木がない裸地では地表面付近の風速も観測できる
- 空・雲とのコントラストが強い、濃い色の土壌が好ましい

