



Dust Devilの数値的再現と 生成メカニズムの考察

伊藤純至

東京大学・大気海洋研
究所

2012年6月20日 CPSセミナー

1. はじめに

Dust Devil(塵旋風)

- 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



漏斗雲なし(竜巻と異なる)

熱フラックス
による浮力
(気温46°C)

@Arizona

2011年度 東京大学大気海洋研究所フォトコンテスト所長賞

ダストデビルの観察1



ダストデビルの観察2



@Oklahoma

ダストデビルの観察3



ダストデビルの観察4



@Arizona

ダストデビルの観察5



ダストデビルの生成

- 対流混合層では、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、[火星でも](#)
- 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)

本研究の目的

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

目次

1. はじめに

2. ダストデビルの数値的再現

3. ダストデビルの生成メカニズム

— 循環の解析

4. 環境場の回転の影響

— 3.で調べた生成メカニズムを確認

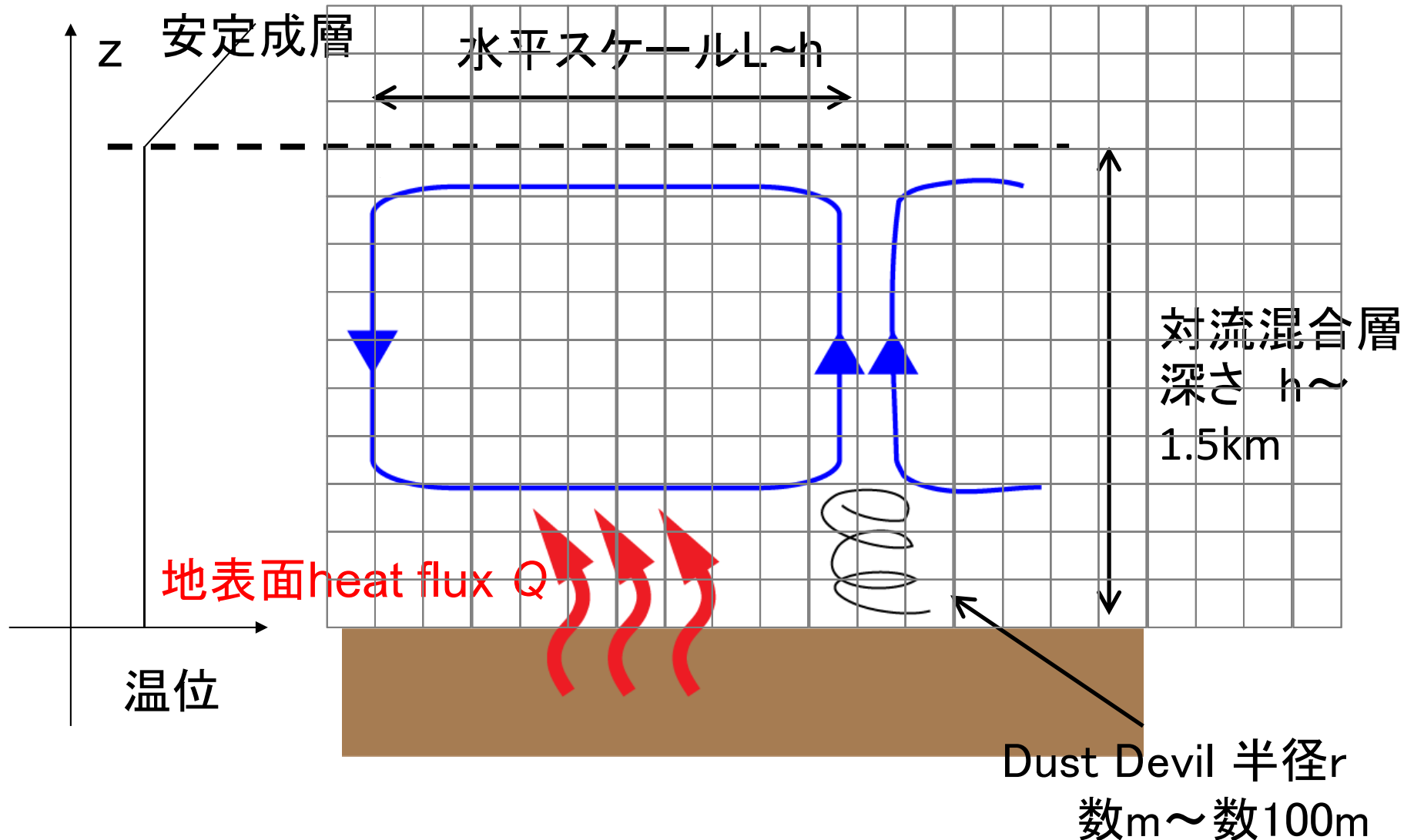
5. まとめ

2. ダストデビルの数値的再現

対流混合層とダストデビルの模式図

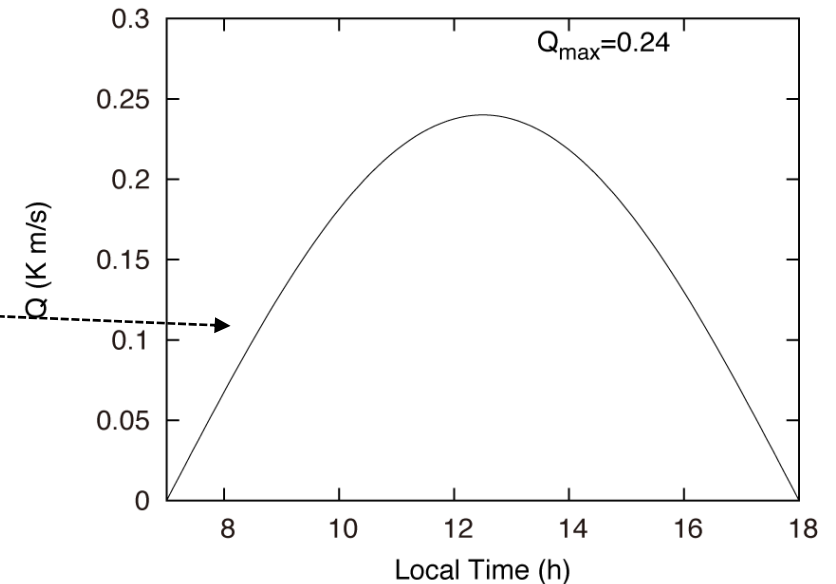
数値的再現

Large Eddy Simulation (LES) → 格子間隔
以上の乱流は解像、以下はモデル化



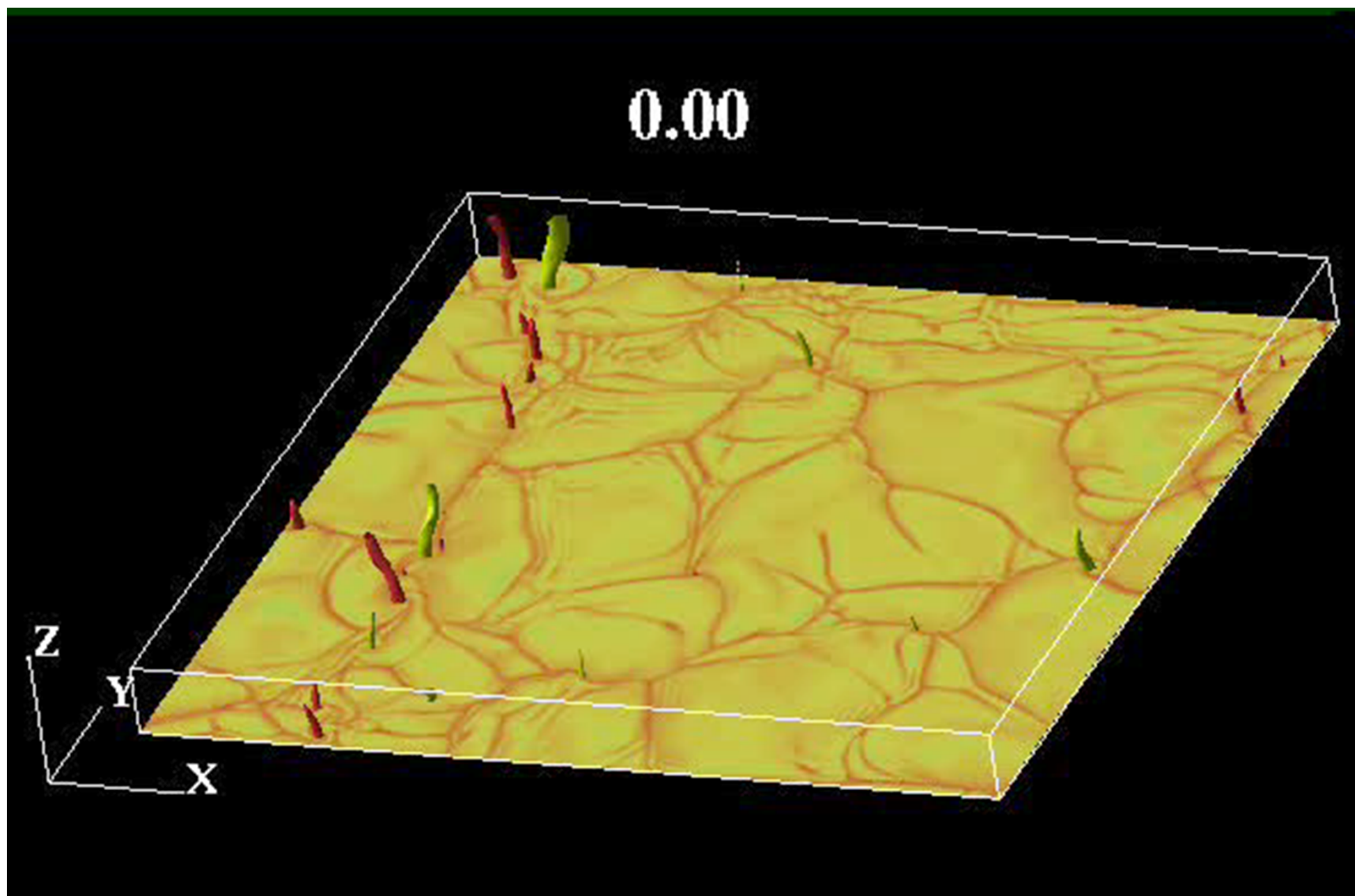
LESモデル (Ito et al. 2010)

- 運動方程式: 3次元・ブシネスク近似
- Subgrid-Scaleモデル: Smagorinskyモデル
- 格子間隔: 5m (Sec. 3)、50m (Sec. 4)
- 計算領域: 1.8km × 1.8km × 1.6km (Sec. 3)、4.5km × 4.5km × 3.0km (Sec. 4)
- 側面境界: 2重周期
- 地表面境界:
 - Sec. 3はFree-slip
 - 熱フラックス: 日変化
- 初期条件: 一般風なし、安定成層
- 時間積分:
 - 7:00～、0.2sステップ



LESによるダストデビルの再現

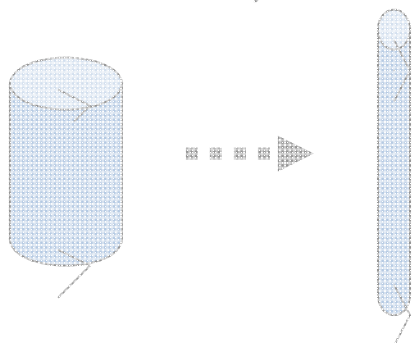
12:00-12:30、赤は正の鉛直渦度、緑は負の鉛直渦度



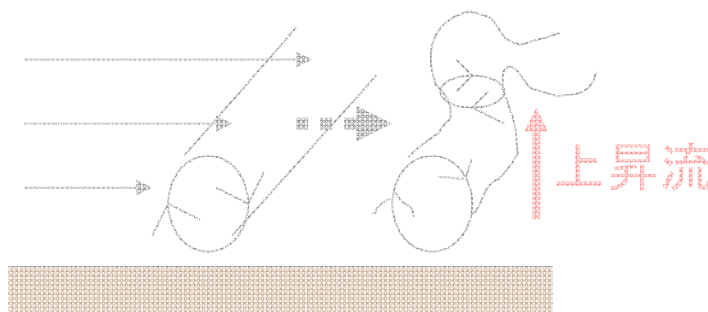
3. ダストデビルの生成メカニズム — 循環の解析

ダストデビルの生成メカニズムの提案

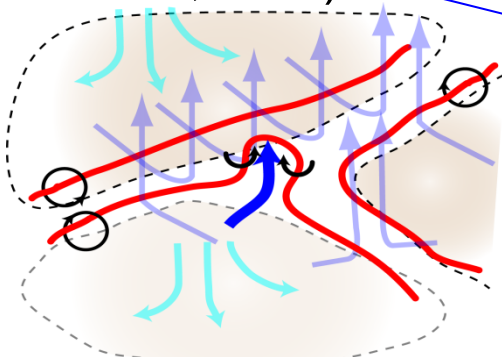
(1) 環境場の鉛直渦度の引き伸ばし
(Williams, 1948)



(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)

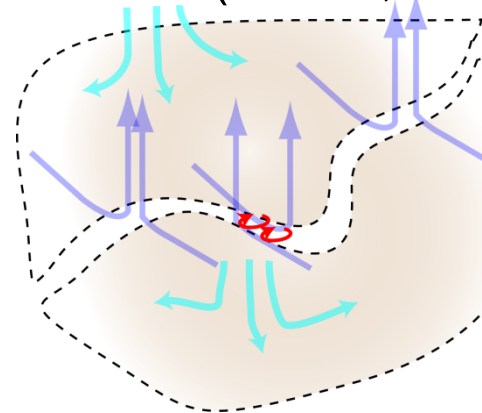


(3) セル状対流に伴う水平渦度の対流セル自身の上昇流による立ち上げ
(Kanak et al., 2000)



(1)、(2)はなくてもよい

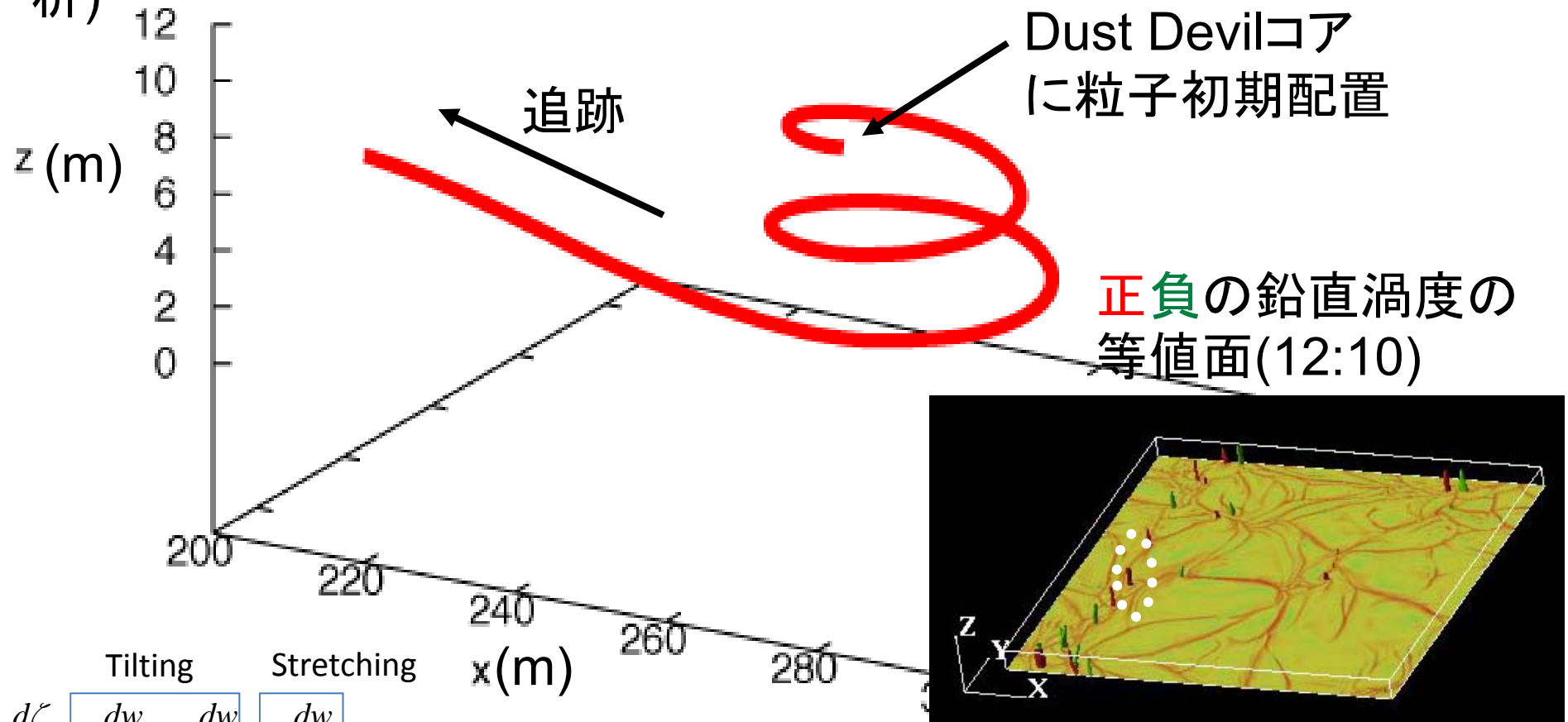
(4) セル状対流の隣接するセルからの非対称な収束(Kanak, 2005)



辺では(4)、頂点では(3)

ダストデビルの回転の起源は？

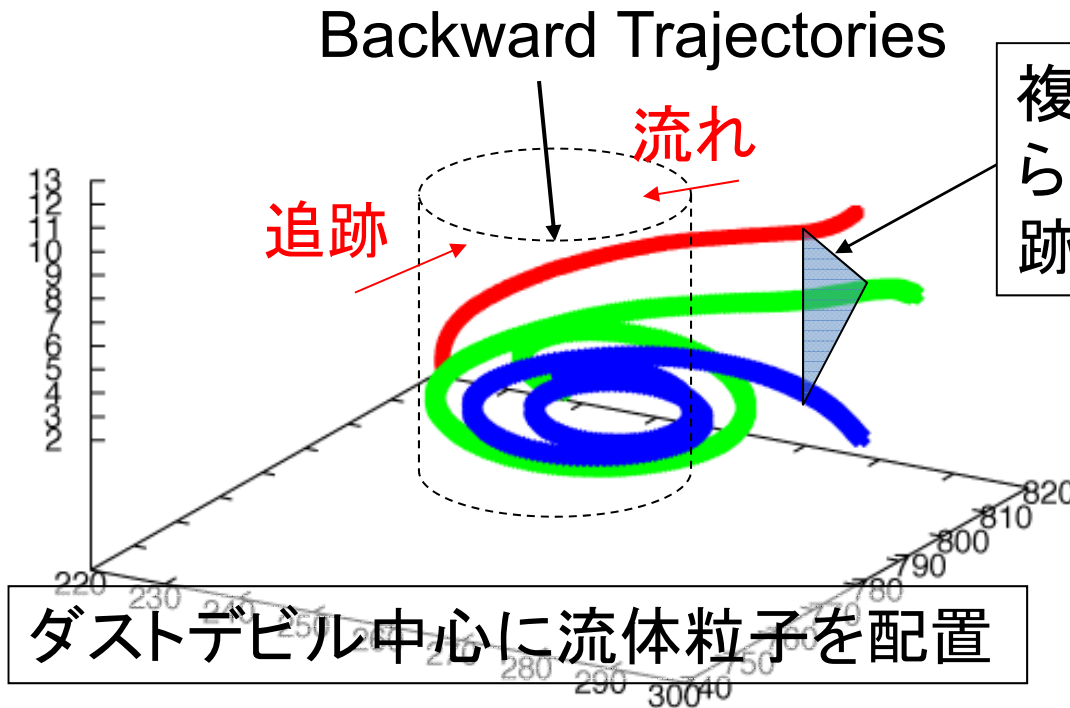
0.2sステップのデータをもとに12:10のダストデビルのコア付近の高度7.5mでの流体粒子の時間を遡ったトラック(Backward Trajectory解析)



$$\frac{d\zeta}{dt} = \underbrace{\varepsilon \frac{dw}{dx} + \eta \frac{dw}{dy}}_{\text{Tilting}} + \underbrace{\zeta \frac{dw}{dz}}_{\text{Stretching}} + \dots$$

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



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

MSに伴う循環 Γ

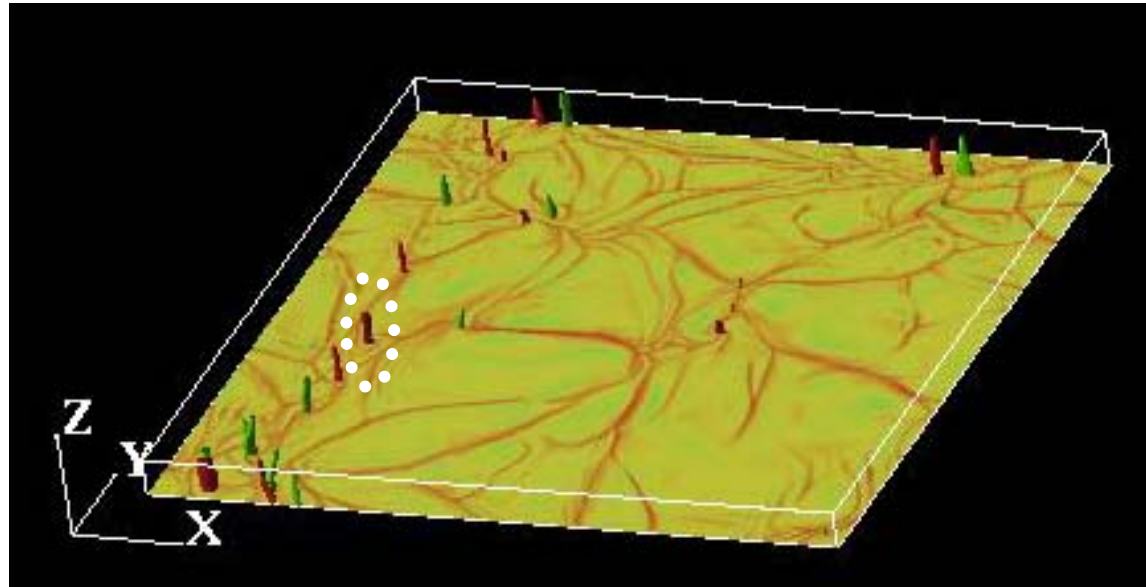
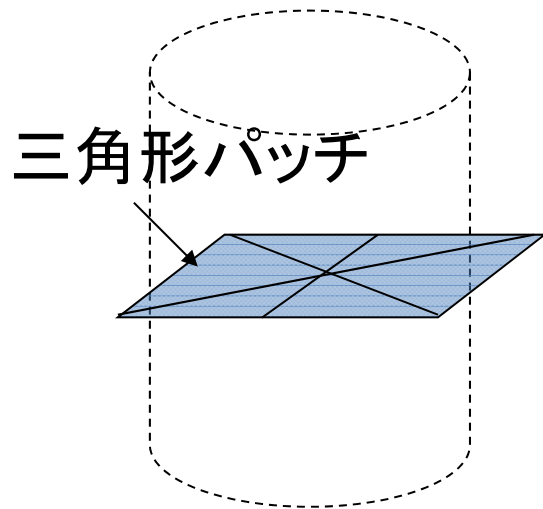
$$\Gamma = \int_S \vec{\omega} \cdot \vec{x} ds$$

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 → 渦度収支でのStretching
 MSの傾斜 → 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)

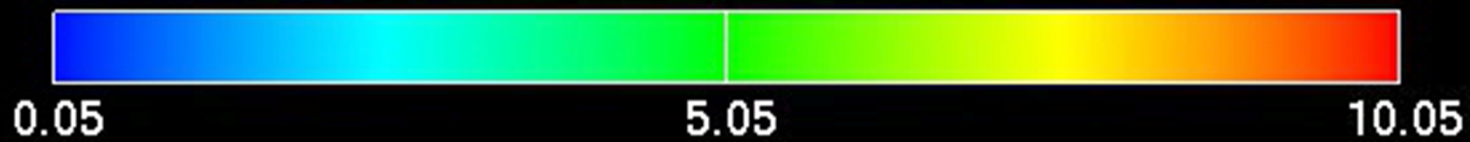


約20000本のBackward Trajectoriesが構成する、約40000個(1辺40cm)の三角形のパッチで追跡

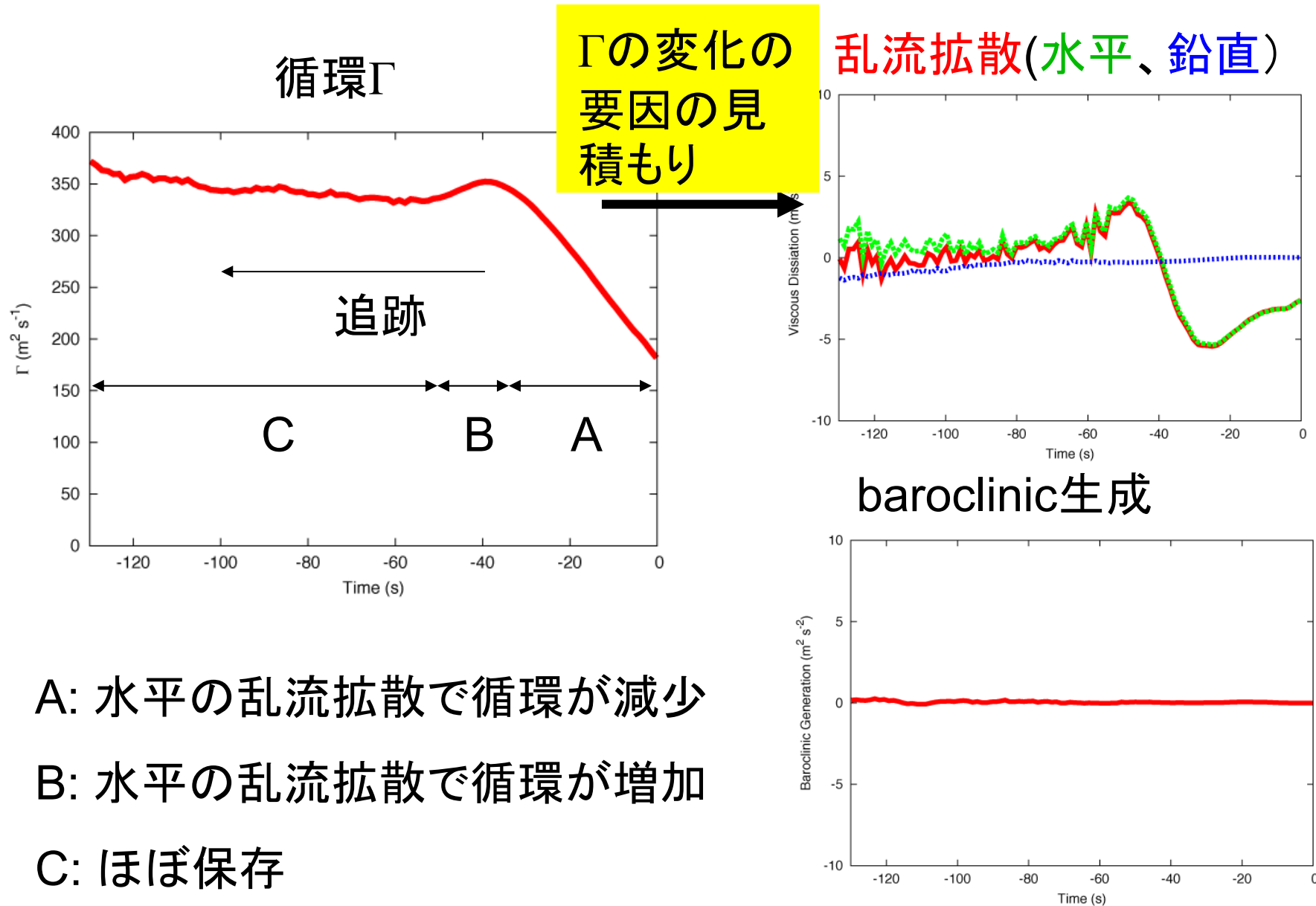
-0.0s



シェードはz
座標(m)



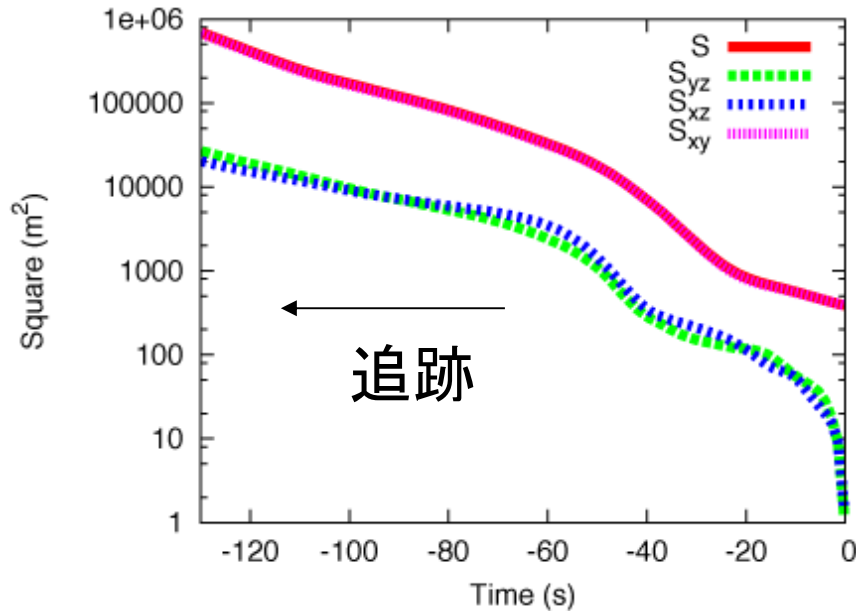
MSに伴う循環の時間変化



MSのStretching、Tilting

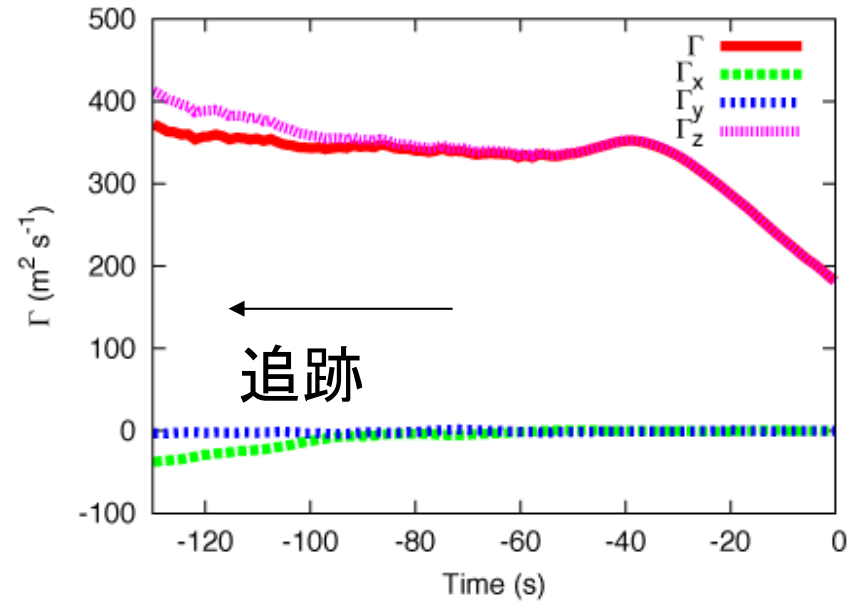
$$\Gamma = \int \vec{\omega} \cdot d\vec{S} = \underbrace{\int \omega_x dS_{yz}}_{\Gamma_x} + \underbrace{\int \omega_y dS_{xz}}_{\Gamma_y} + \underbrace{\int \zeta dS_{xy}}_{\Gamma_z}$$

MSの面積とyz、xz(鉛直)、xy(水平)断面への投影



MSは1/1000に収束→強い
Stretching

循環への水平、鉛直渦度の寄与

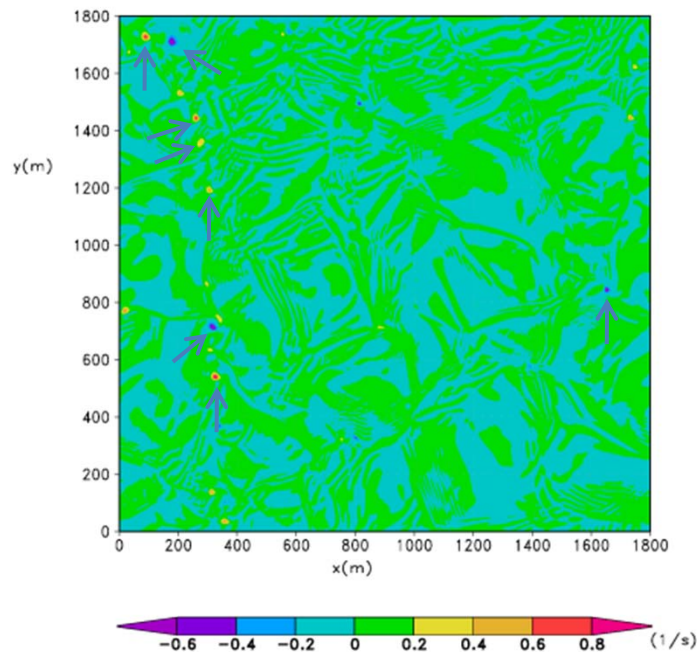


$\Gamma_x \rightarrow \Gamma_z$ というTiltingもあるが、
鉛直渦度の生成には寄与
していない

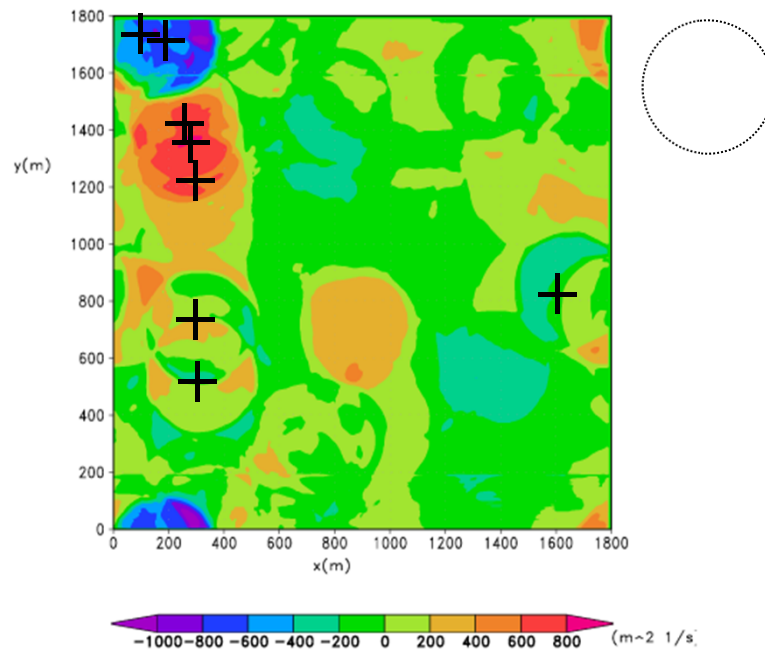
ダストデビルの強い回転の成因

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

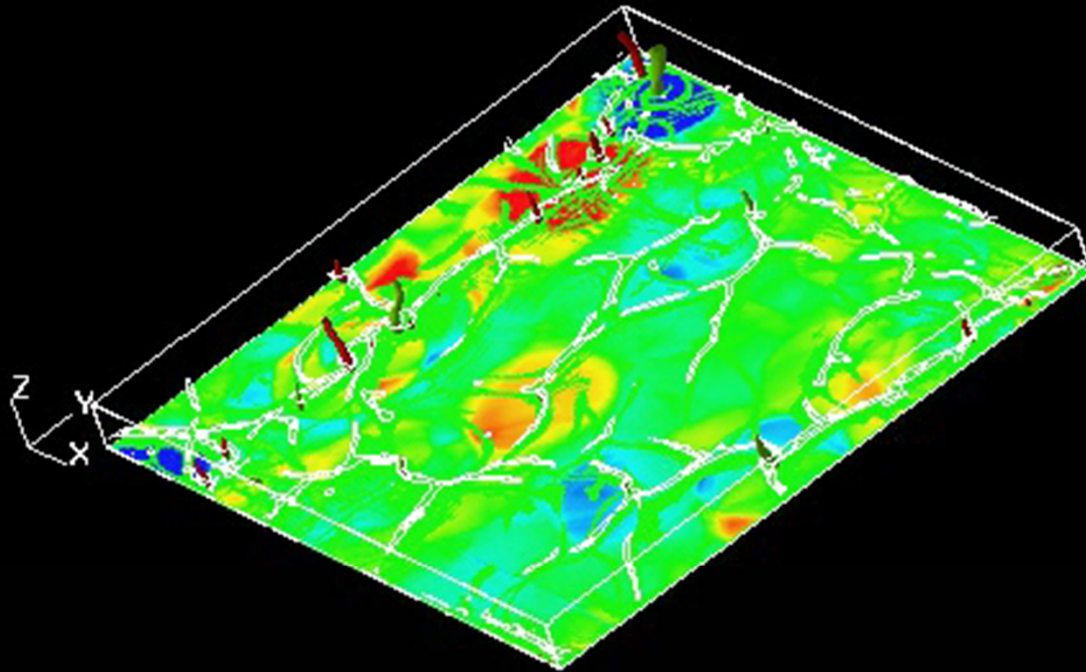


最下層、水平面で各点での半径200mの範囲の循環



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

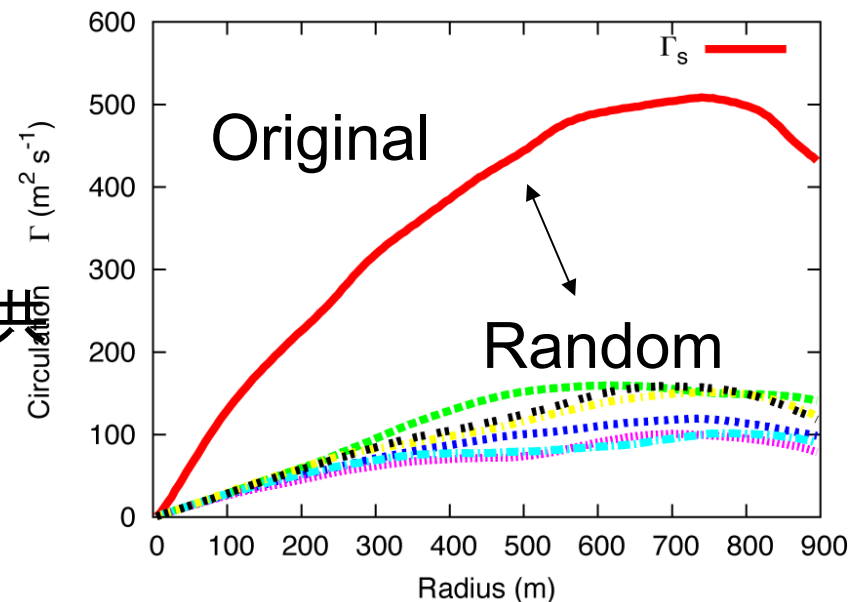
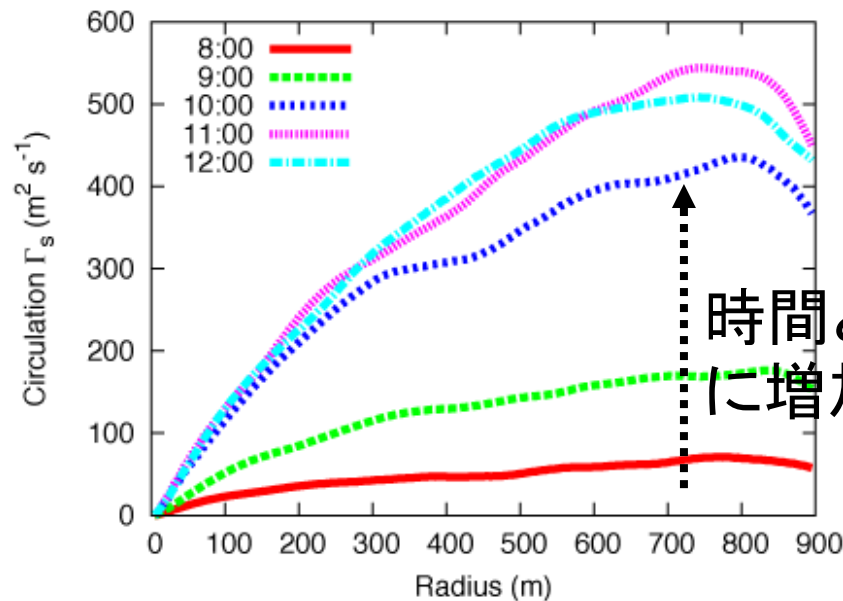
→(数分後)ダストデビルの生成



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!

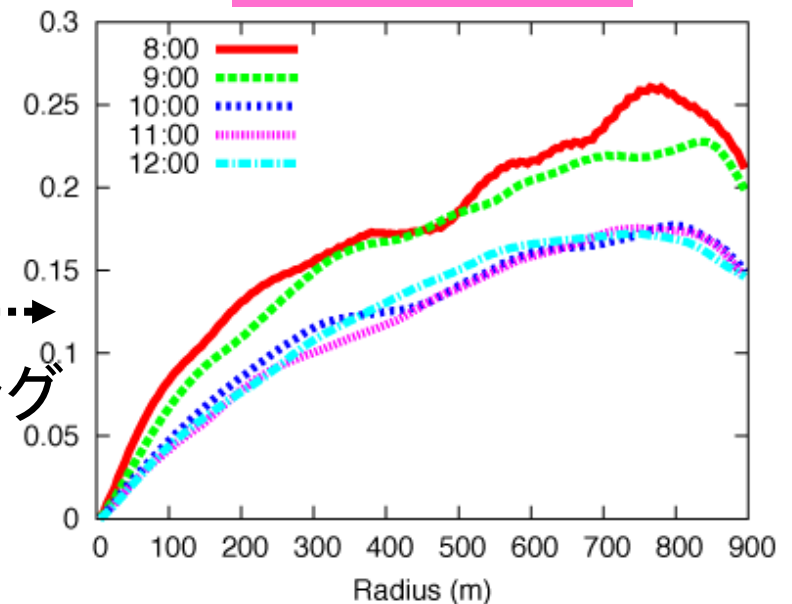
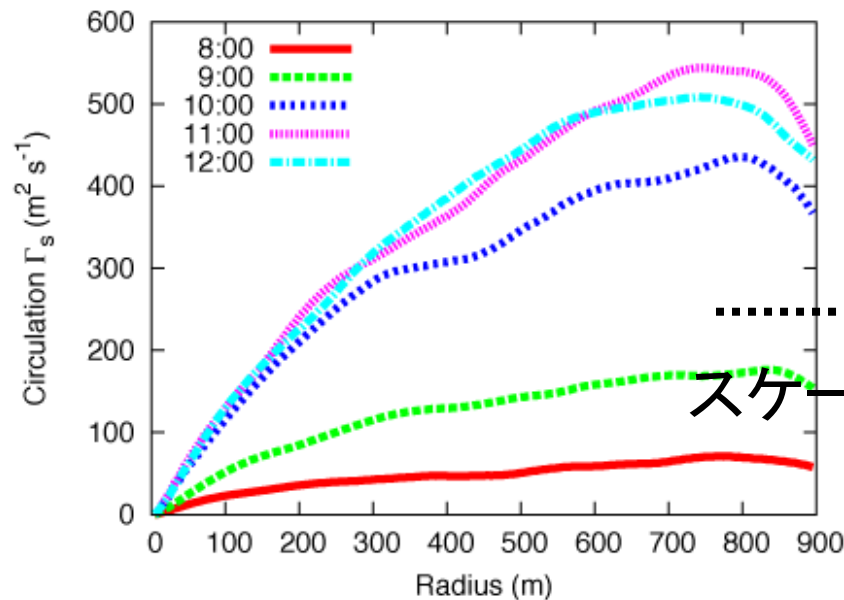


混合層の発達と共に、ダストデビルの生成に利用できる、循環 $\sigma(\Gamma)$ が組織的に分布

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 $\sigma(\Gamma)$

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

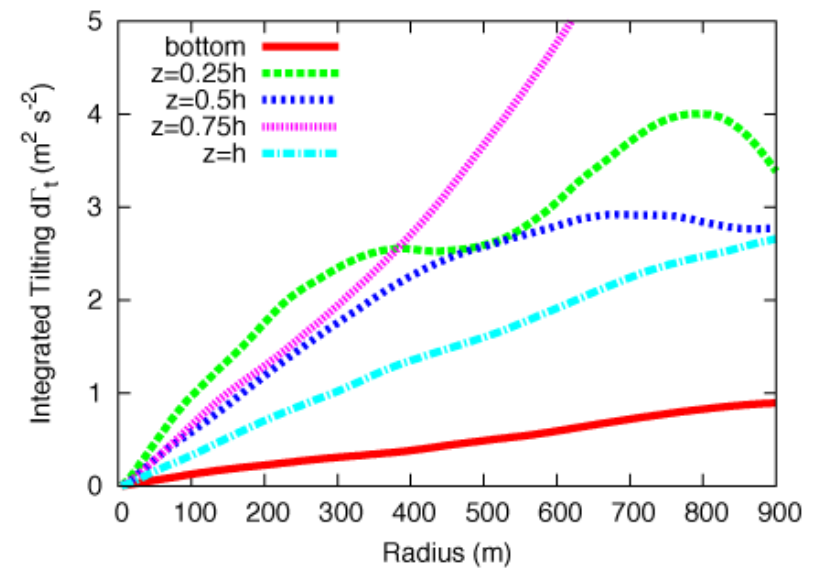
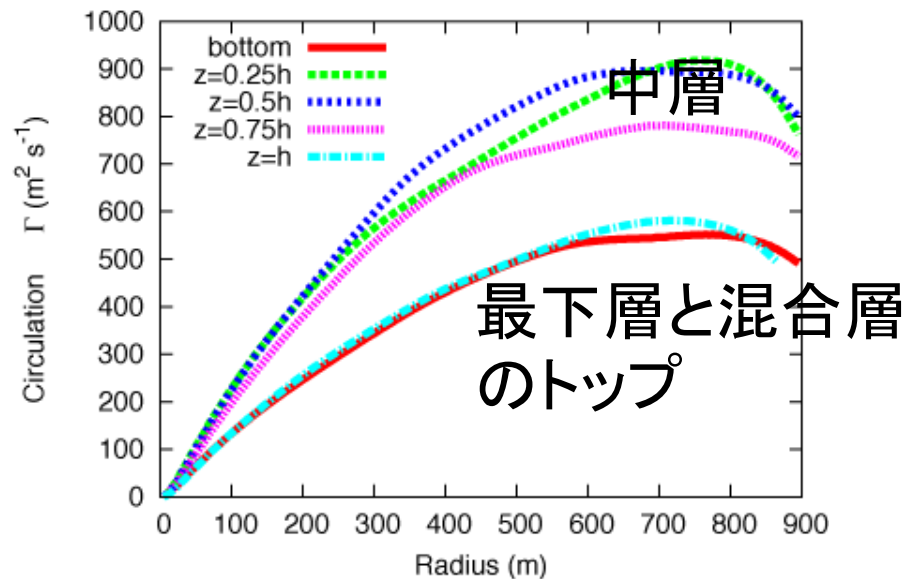


- 対流混合層には**循環 $\sigma(\Gamma)$ が内在**
- (初期を除き) $h \times w_*$ でスケール

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

4. 環境場の回転の影響

4. 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

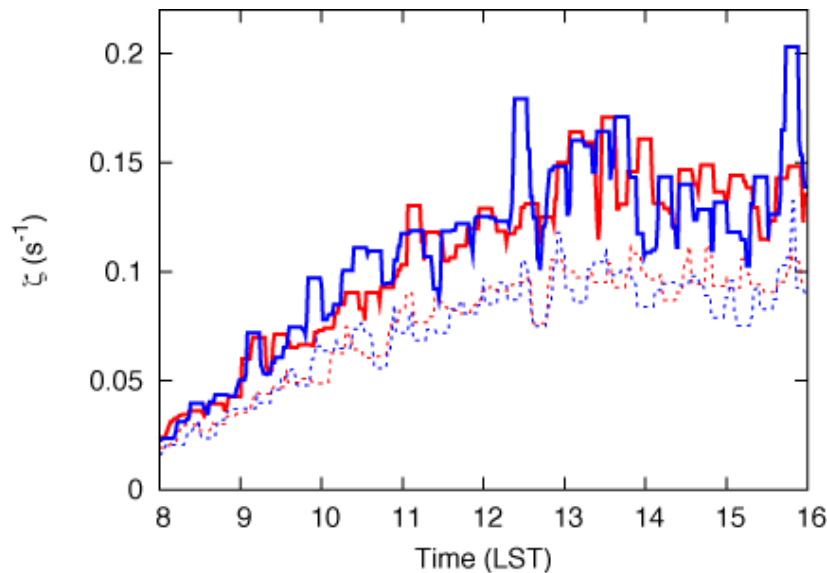
コリオリ効果の導入 = 環境場の水平面内の循環を課す

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))

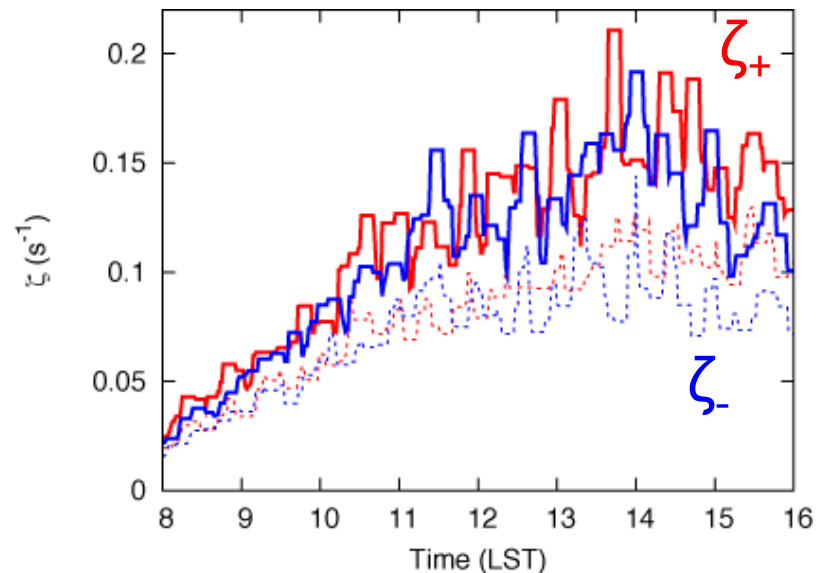
$f=0$ (回転なし)



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

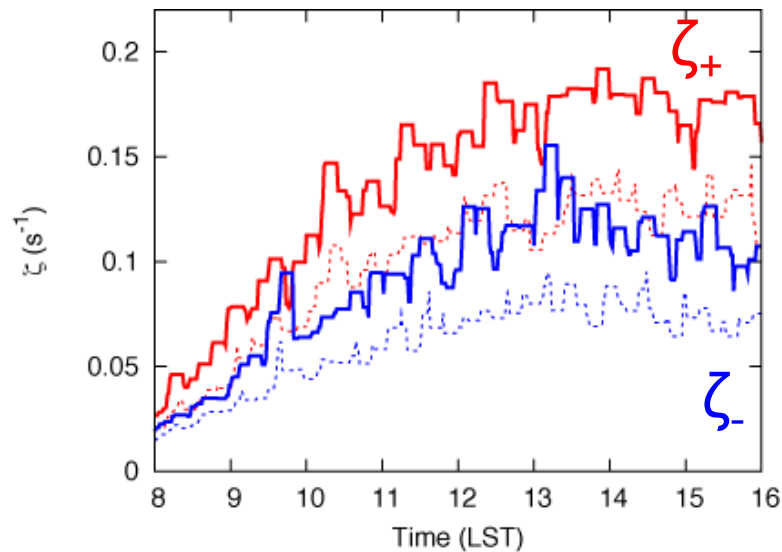


正負の鉛直渦度に僅かな差

より強い回転の影響

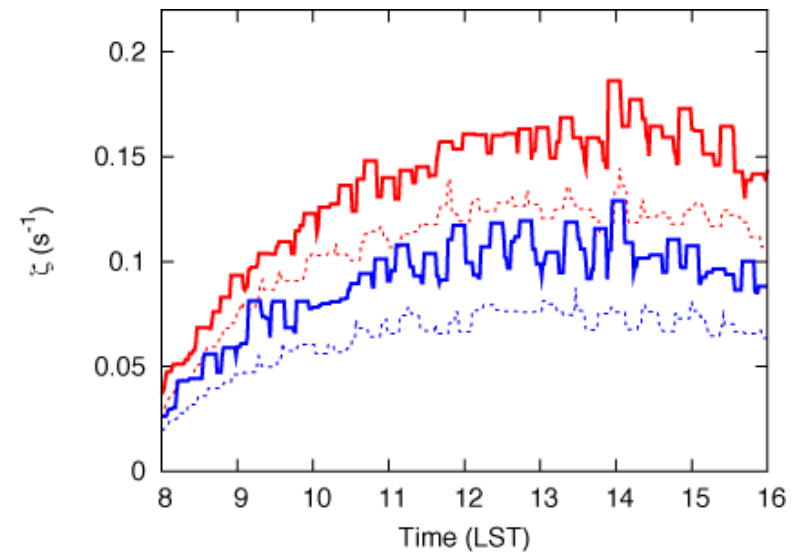
モデル最下層の**正の鉛直渦度 ζ_+** ・**負の鉛直渦度 ζ_-** の最大値の時系列の包絡線(前後5分間の最大値(実線)と最小値(点線))

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



正負の鉛直渦度に大きな差

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

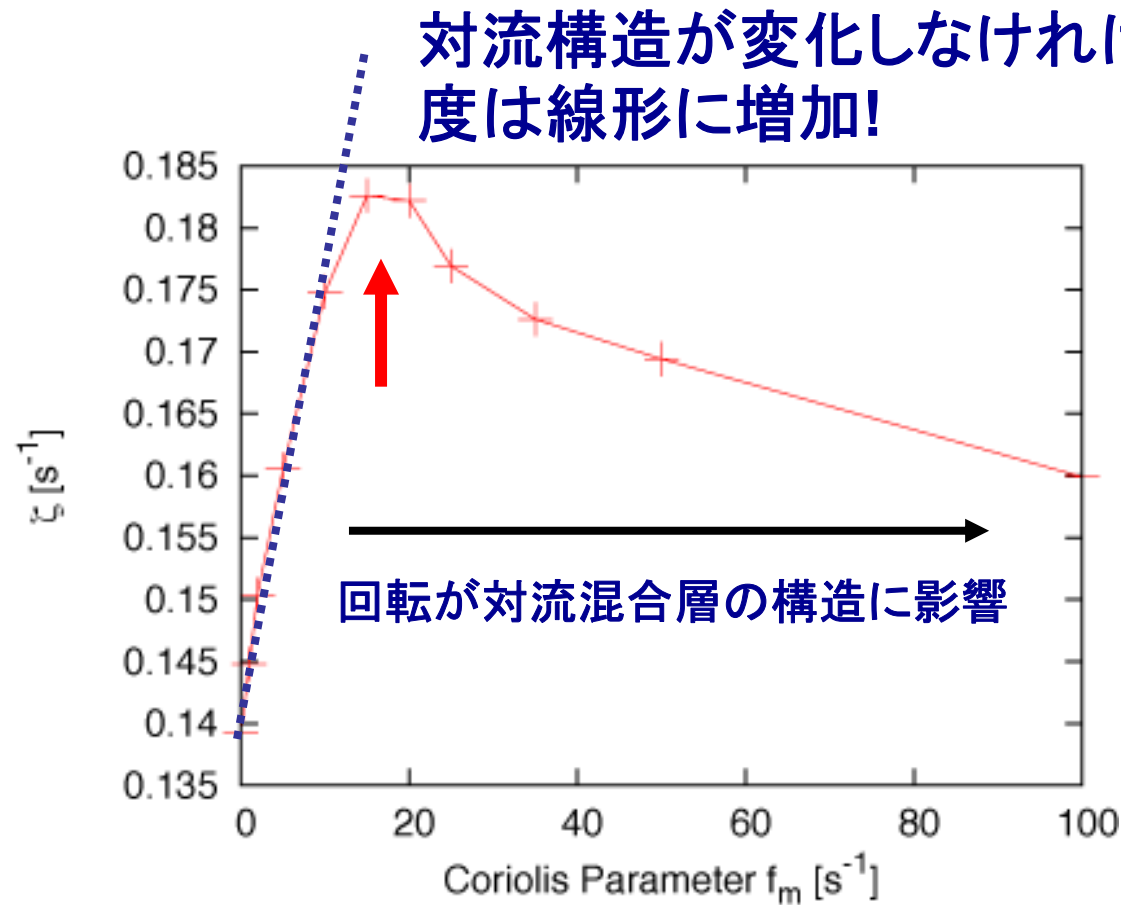


正負の鉛直渦度に大きな差
はあるが、絶対値が小

→ **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



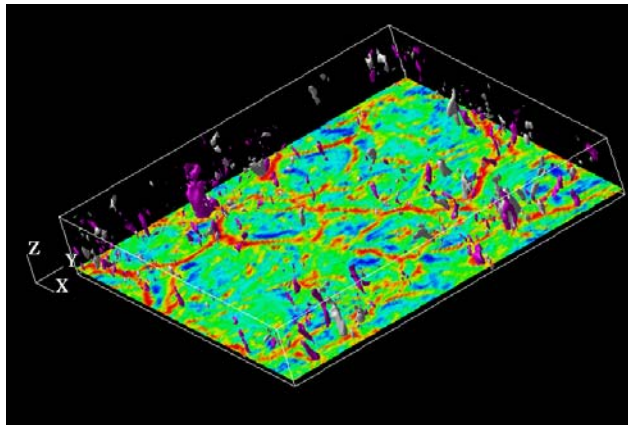
最適な f : $15f_m \sim 20f_m$

対流構造の違い

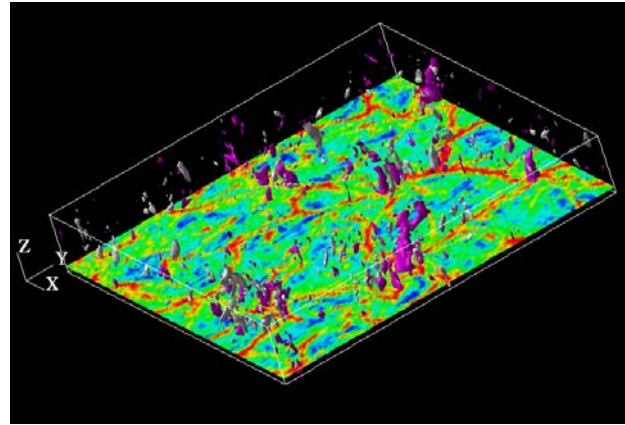
等値面 紫: $\zeta > 0.04 \text{ s}^{-1}$ 、白: $\zeta < -0.04 \text{ s}^{-1}$

地表面のShade: 最下層の鉛直速度

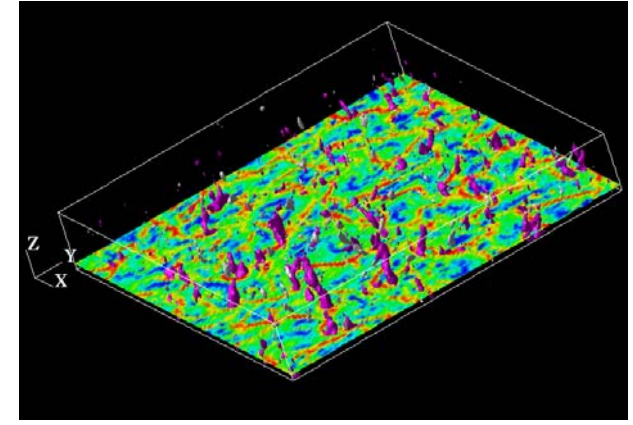
$f=f_m$



$f=10f_m$



$f=100f_m$



最も強い正の ζ 生成

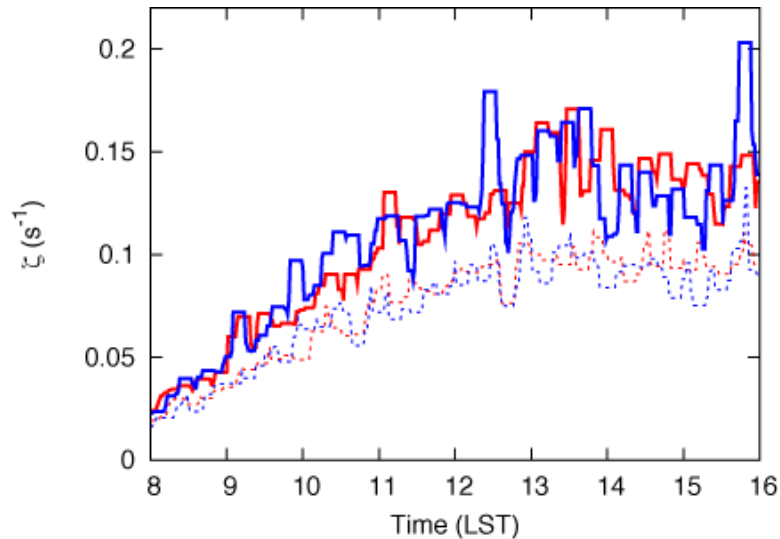


回転が強くなると、対流セルの水平スケールは小さく
→ 広範囲からの循環の収束が起きにくい

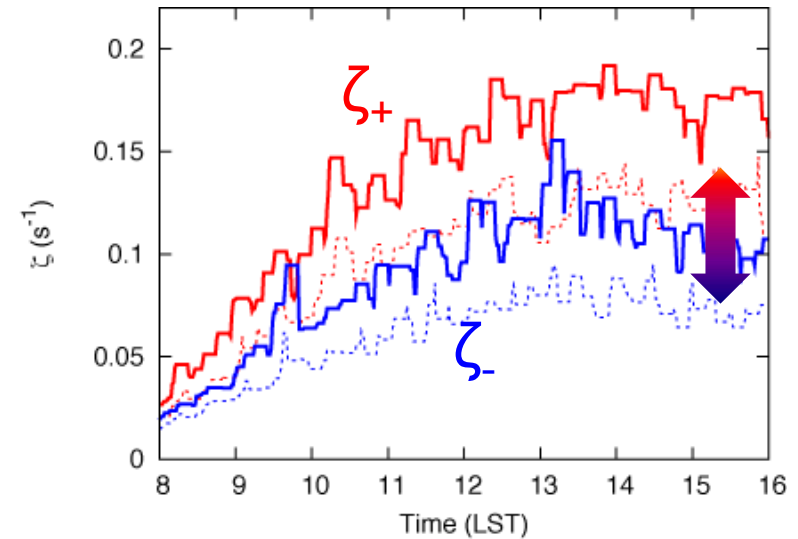
ダストデビルの生成メカニズムの考察

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 $\Gamma = \int \vec{\omega} \cdot \vec{x} ds$ 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)**
 → Sec. 3で調べた生成メカニズムと整合

5. 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