

2024-03-16 GFDセミナー

# 「ひまわり」高頻度観測による台風 の内部コアの力学の探求

堀之内武（北大・地球環境）

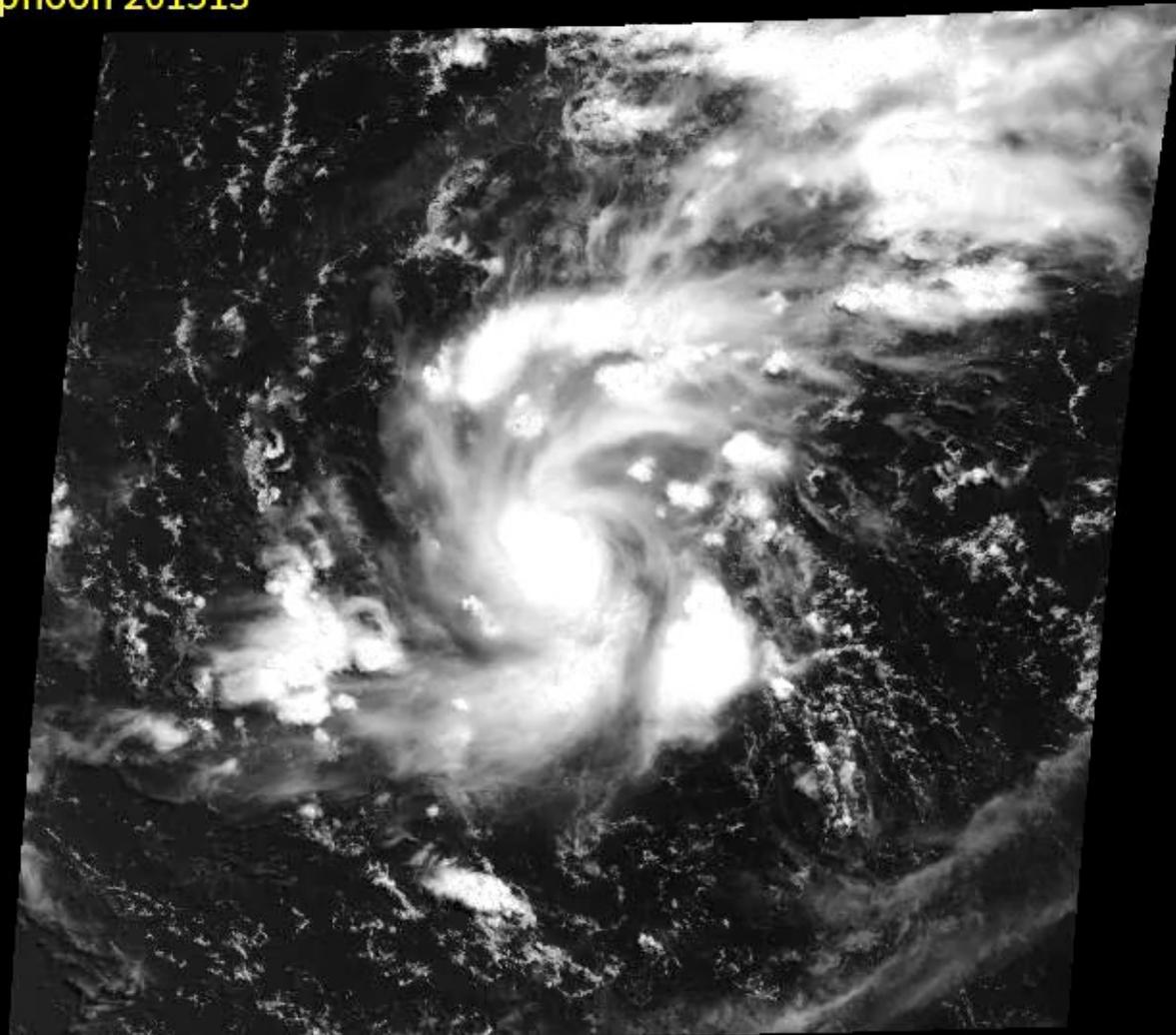
# はじまり：ひまわり 8 号の台風機動観測動画 (2015年夏)

デジタル台風より：  
2015年13号  
(Soudelor)の動画  
(可視)。

当時堀之内は金星探査機「あかつき」用の雲追跡（風速推定）プログラムを共同で開発中。動画に感動し、あかつきの次はひまわりで台風の研究をしたいと思った。

2015-07-30 01:25:00 UTC  
Typhoon 201513

[www.digital-typhoon.org](http://www.digital-typhoon.org)



Himawari-8 [B01]

NII/NICT

## 第3世代静止気象衛星による高頻度観測

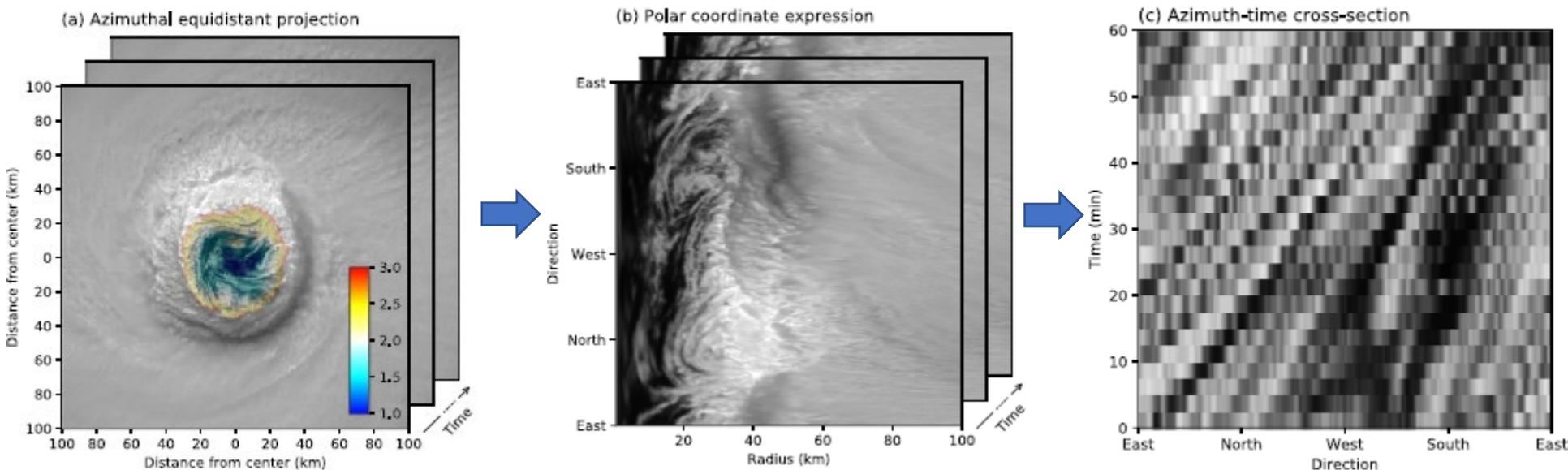
- ひまわり8号：台風があれば常に(2.5分)
- GOES-16など：強い台風など(1分)
- 基盤A研究（2019-22年度）。目標：高頻度観測を活かして，
  - 台風の強度推定を改善し将来の予報向上に繋げる（防減災，科学）
  - これまで観測では捉えられなかった現象を捉えて，台風の理解を増進（科学）

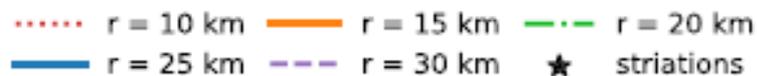
# 目の中の下層雲による回転計測

## Tsukada & Horinouchi (2020) *GRL*

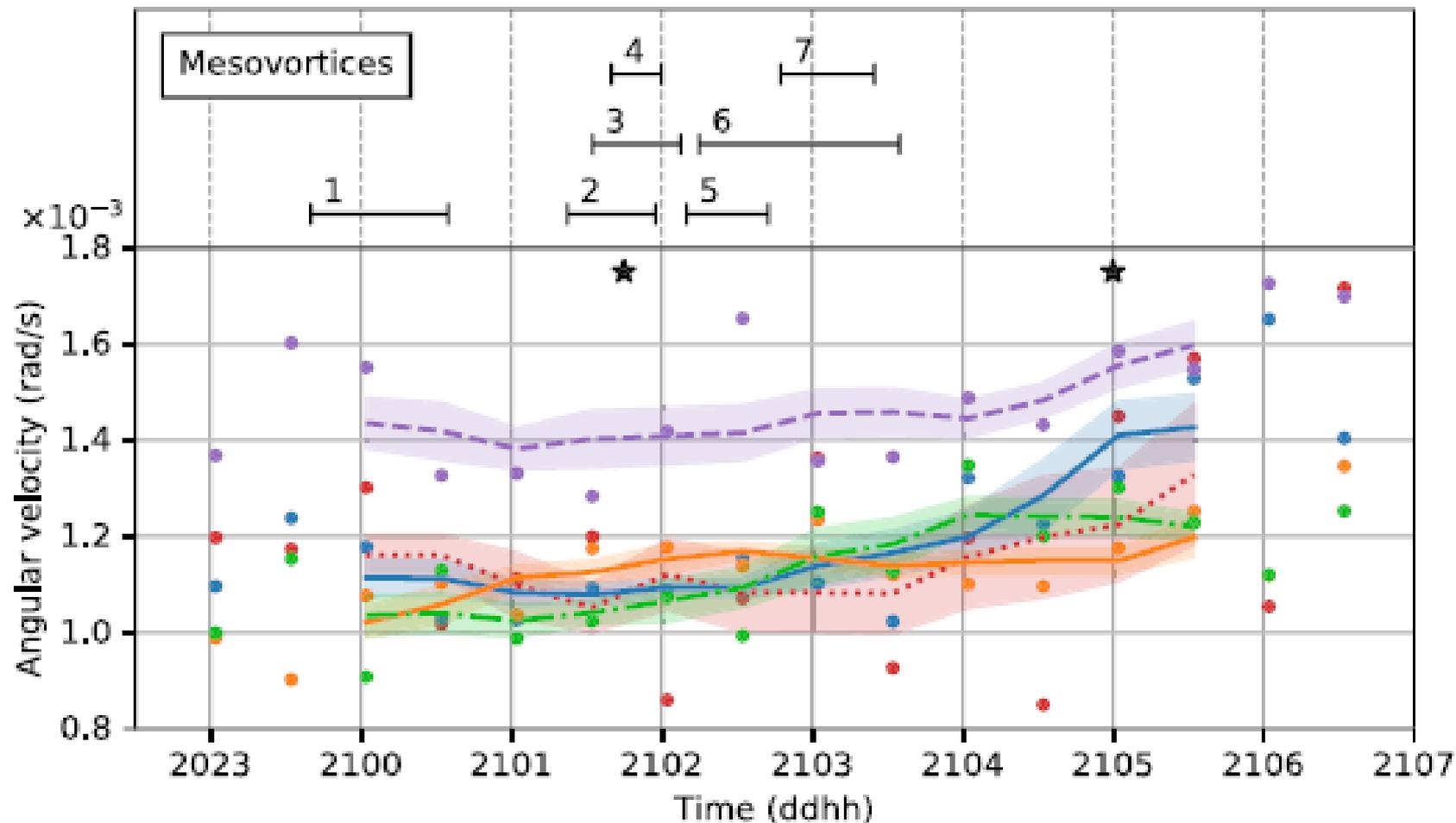
(塚田大河: 2024年1月からコロラド州立大CIRA PD)

- 高頻度観測を活かし，輝度の方位角-時間断面を2次元FFTして，目の中の下層雲の動きから，大気境界層の回転角速度を直接推定（衛星では初）。
  - 注：下層の回転は，台風の強度に直結





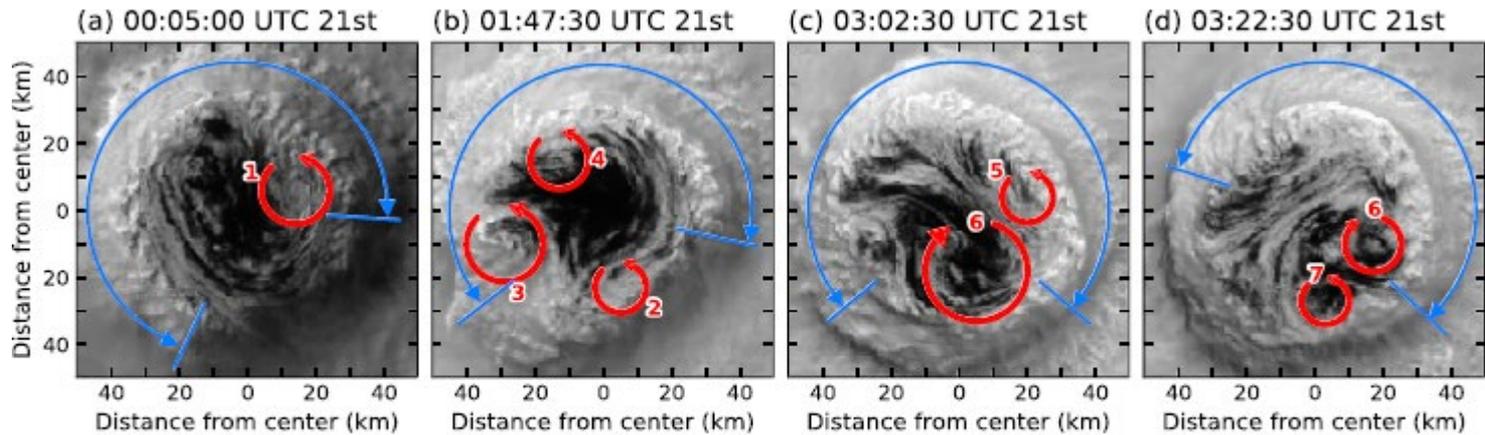
(b) Rotational angular velocity and Mesovortices



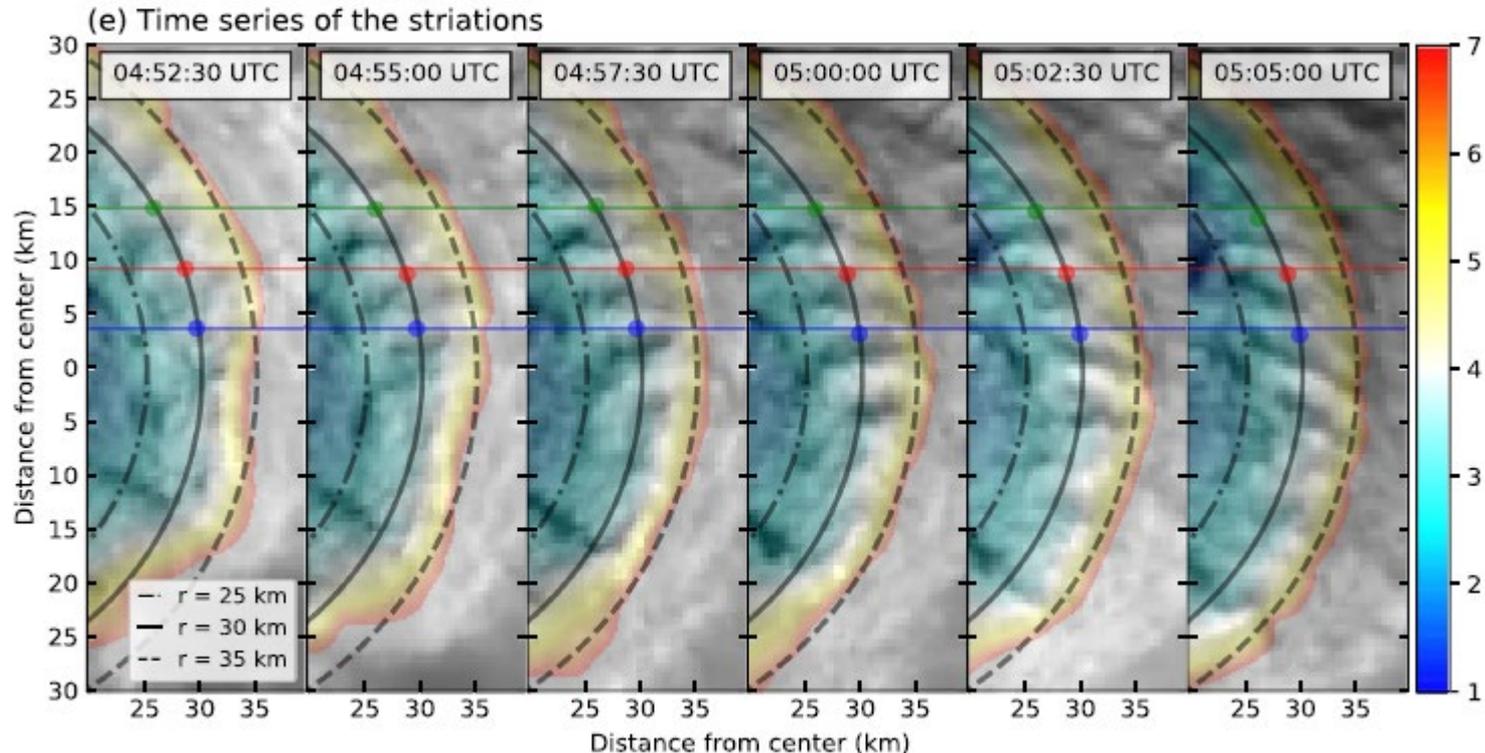
# Tsukada & Horinouchi (2020)

## 様々な雲の形と内部コア力学の関連も議論

メソ渦



Striations  
/ 蛇腹



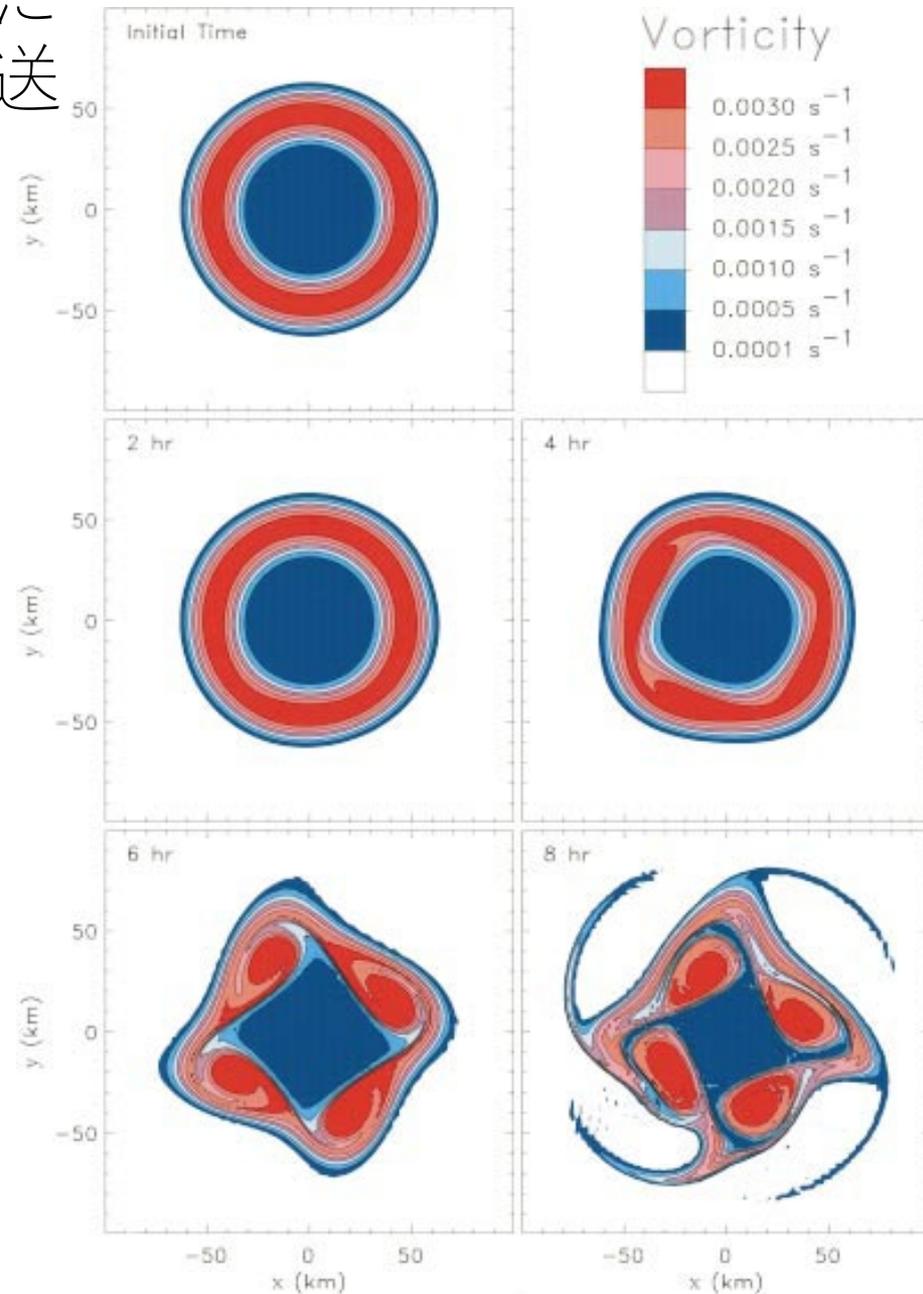
# ひまわり 8 号の30秒観測を用いた目の中の風速分布とその変動に関する研究

- Horinouchi et al. (2023):

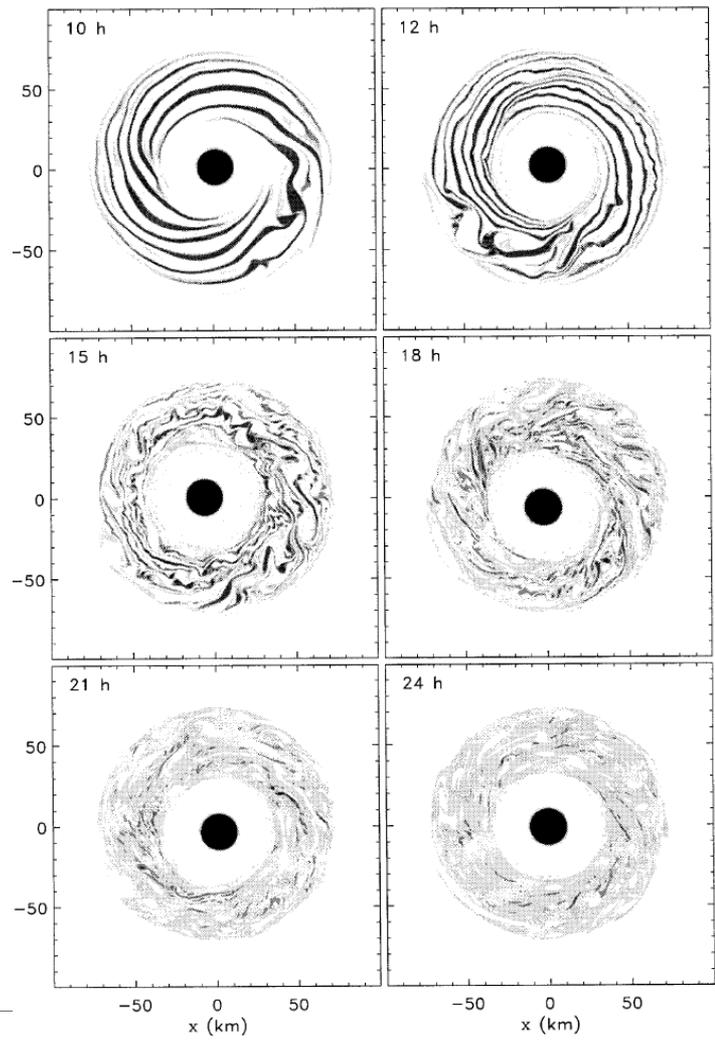
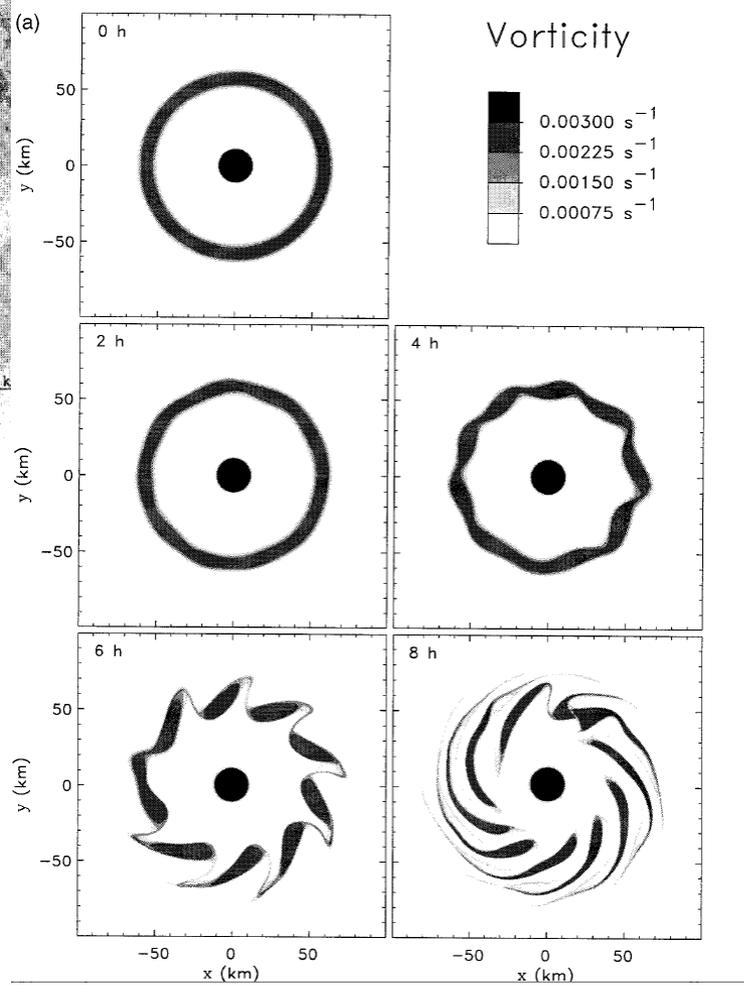
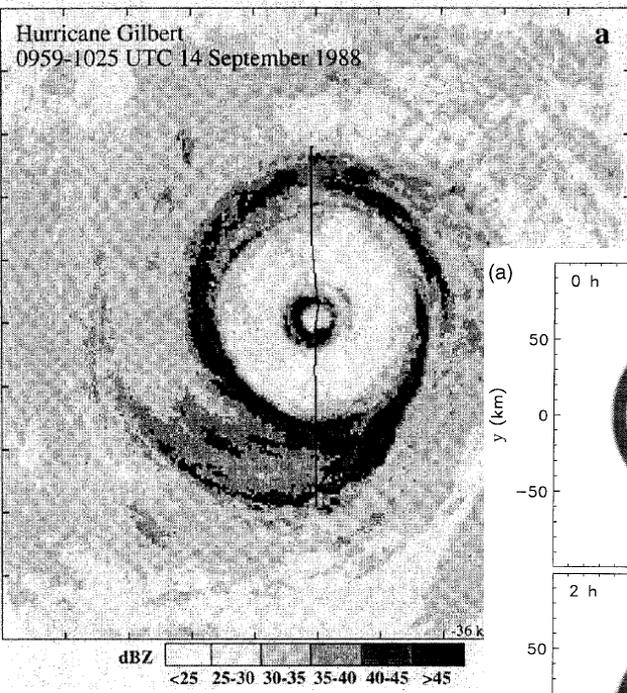
Horinouchi, T., S. Tsujino, M. Hayashi, U. Shimada, W. Yanase, A. Wada, and H. Yamada, (2023) Stationary and transient asymmetric features in tropical cyclone eye with wavenumber-one instability: Case study for Typhoon Haishen (2020) with atmospheric motion vectors from 30-second imaging. *Monthly Weather Review*

# イントロ：台風の内層コアにおける不安定と角運動量輸送

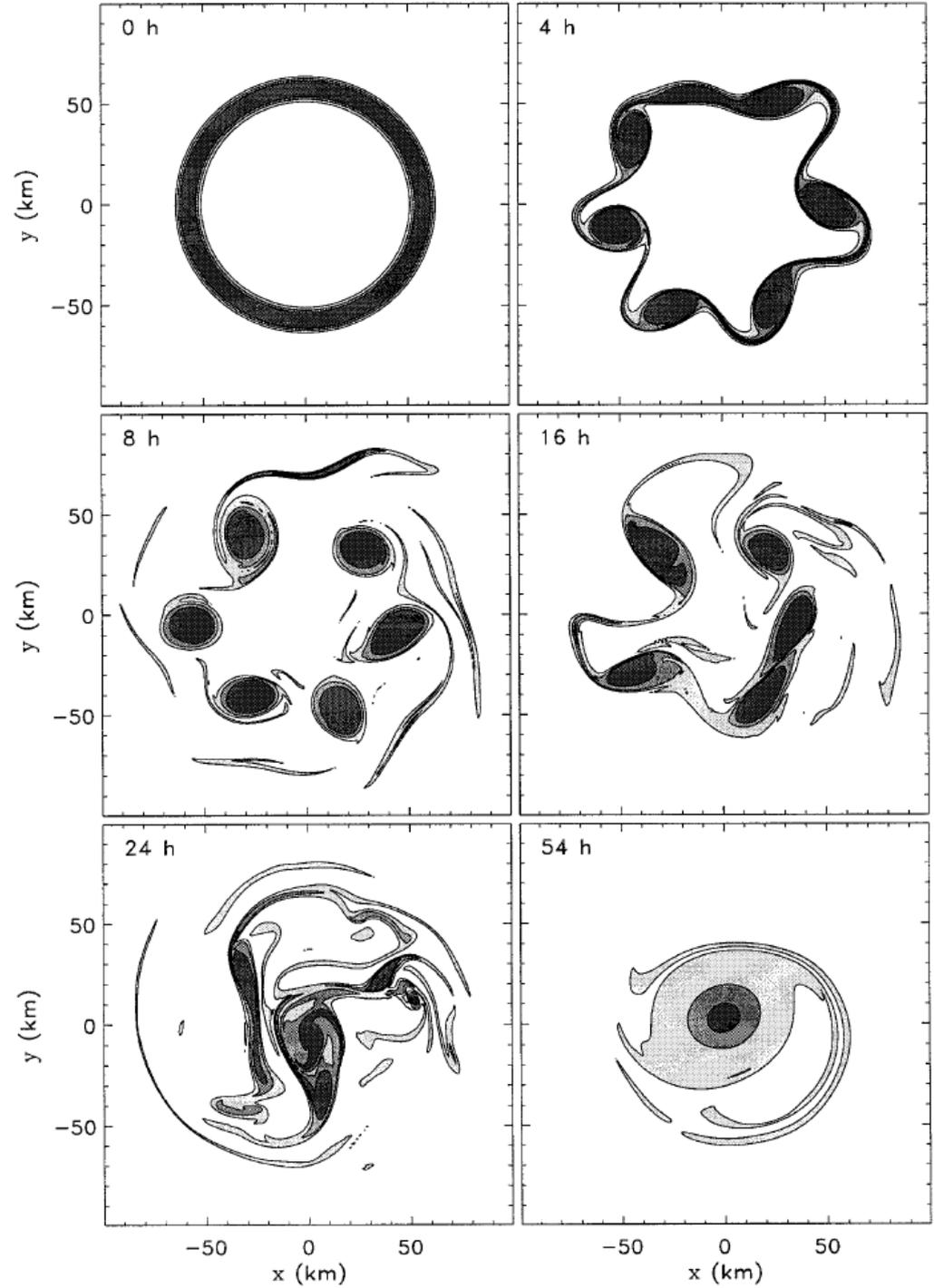
- 20C末～2000年代初頭に順圧安定性解析と順圧モデルで随分研究された。



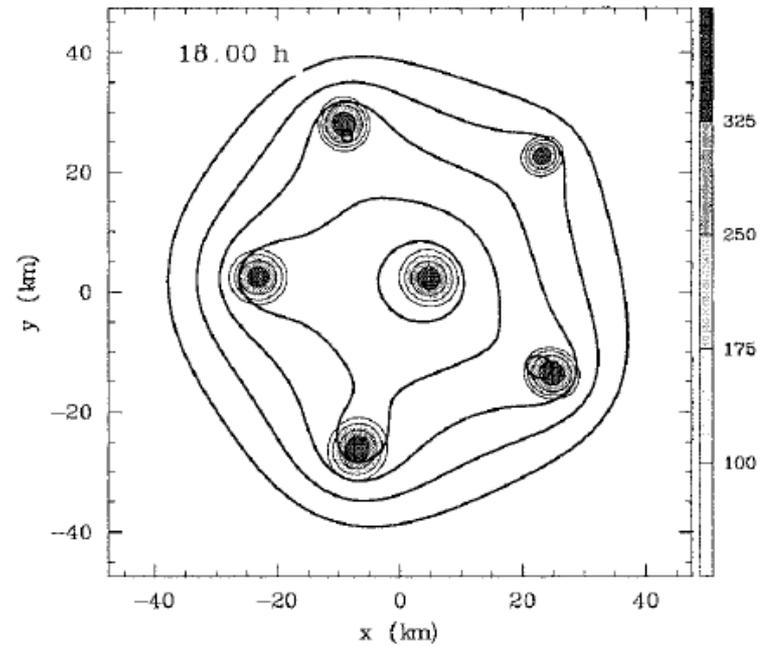
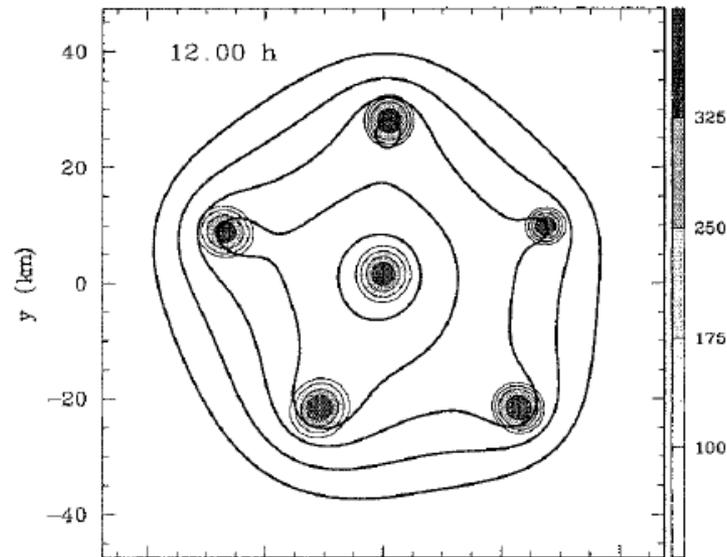
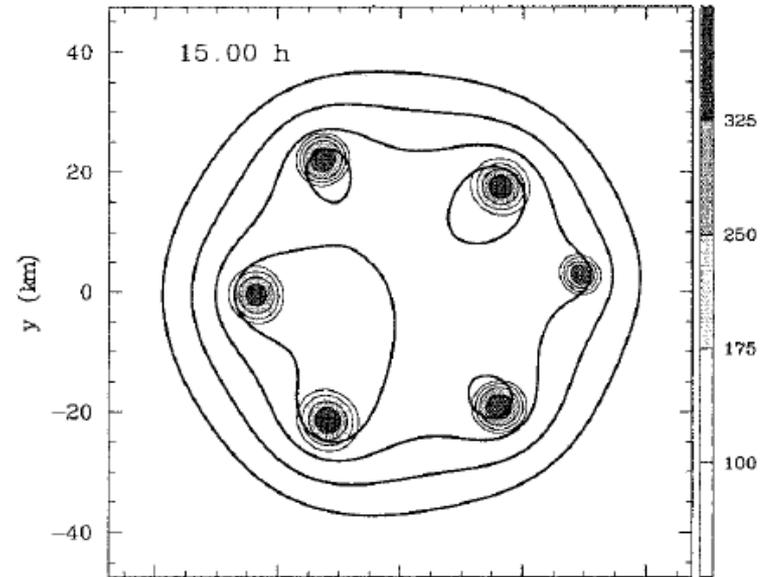
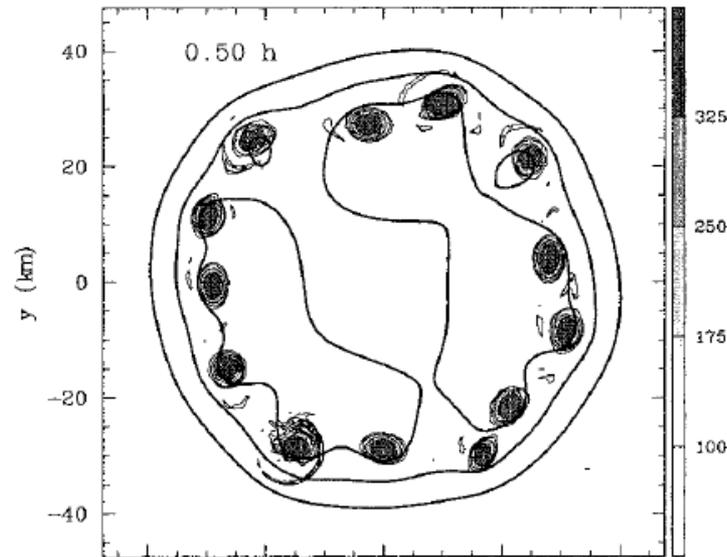
# Kossin et al (2000)



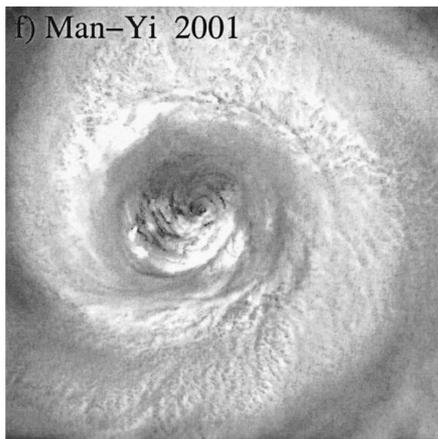
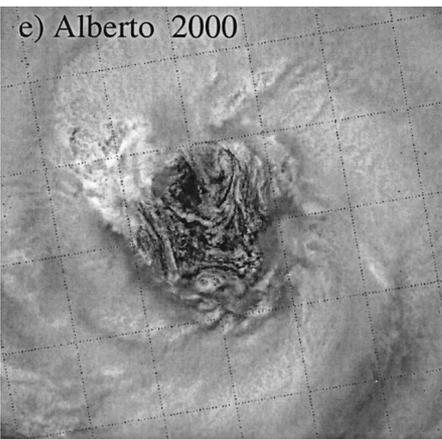
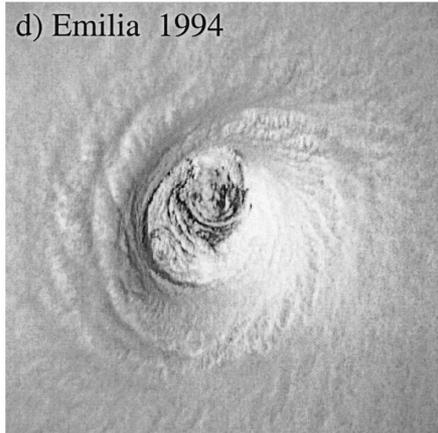
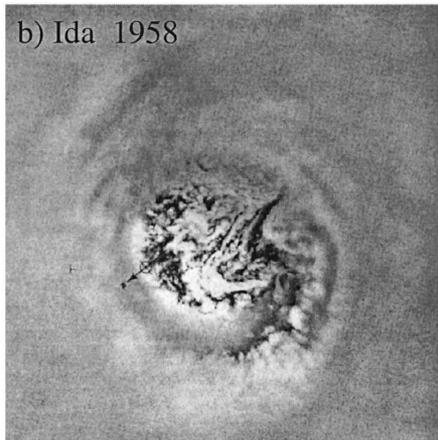
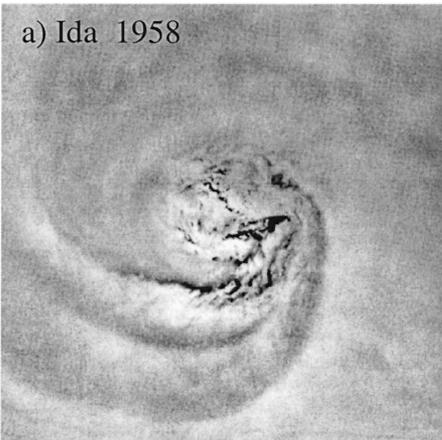
Kossin et al (2000)



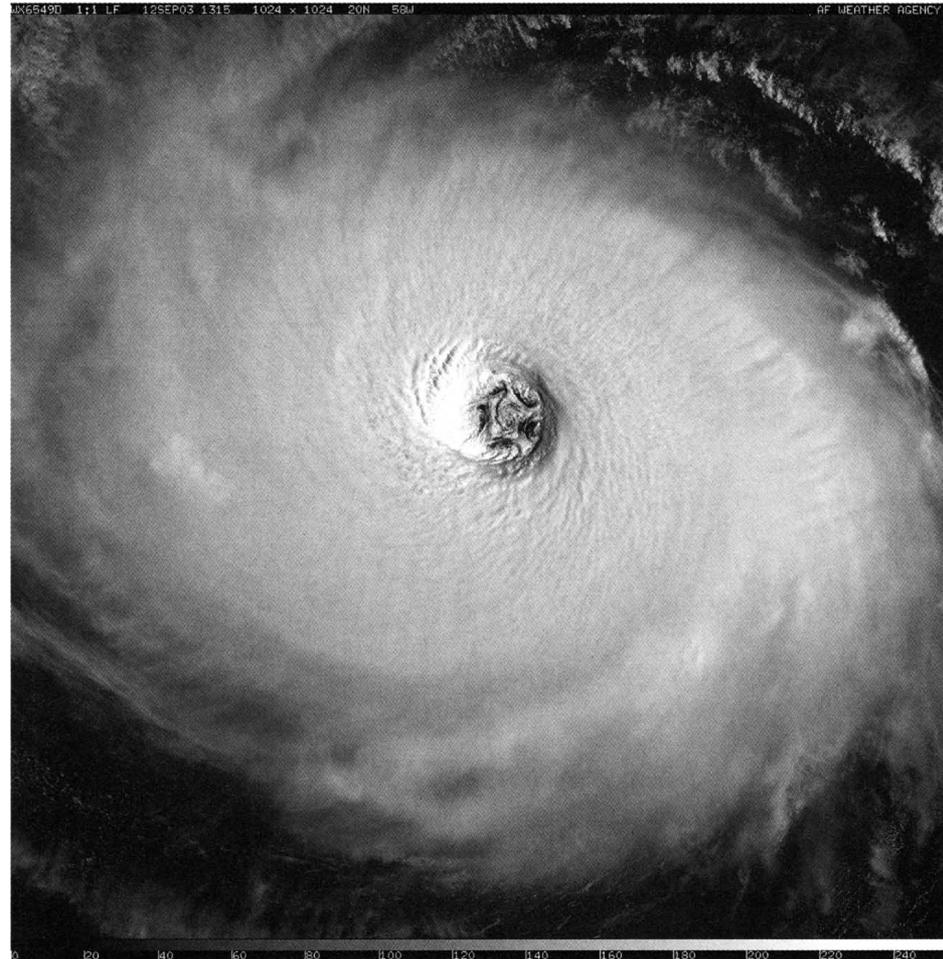
# Kossin & Schubert (2001)



# Kossin (2002)



# Kossin & Schubert (2004)



# Kossin and Eastin (2001)

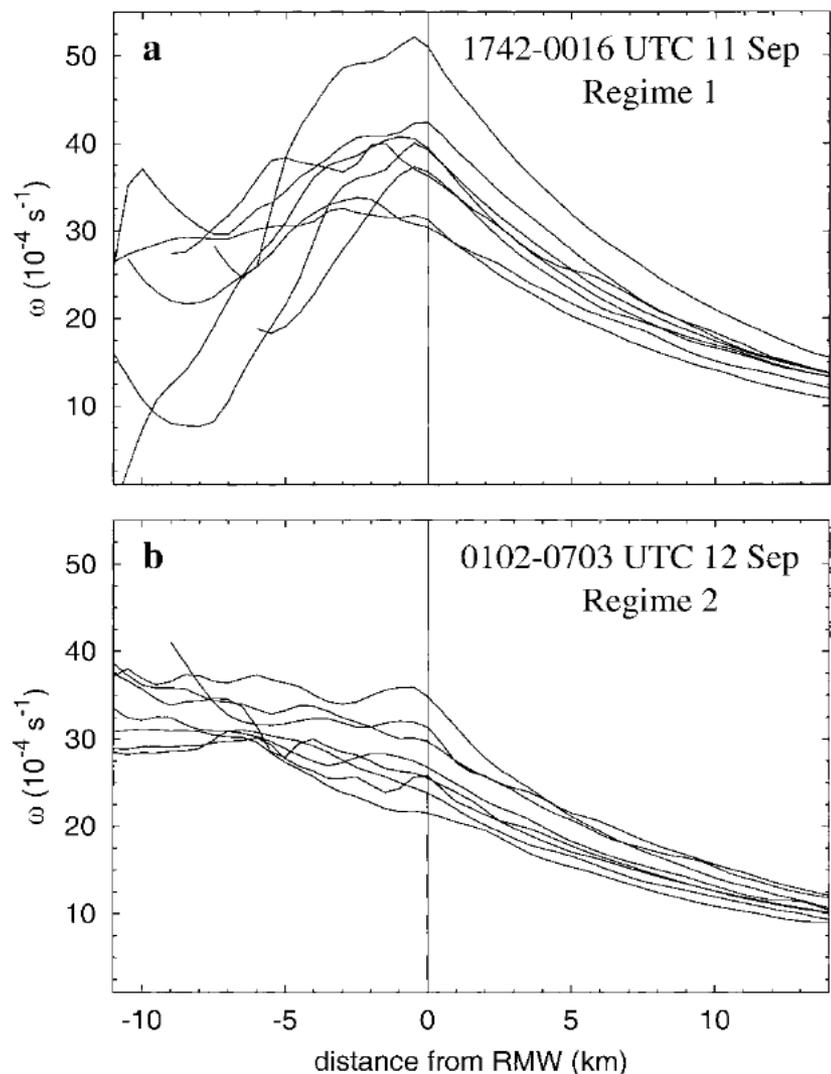


FIG. 1. Observed flight-level angular velocity at 850 mb in Hurricane Diana (1984). Each angular velocity profile is positioned with respect to distance from the radius of maximum tangential wind (RMW) for that particular radial flight leg. Negative distance represents distance inward (into the eye) from the RMW. (a) Eight radial legs flown prior to maximum intensity during 1742–0016 UTC 11–12 Sep. The profiles are indicative of regime 1. (b) Eight radial legs

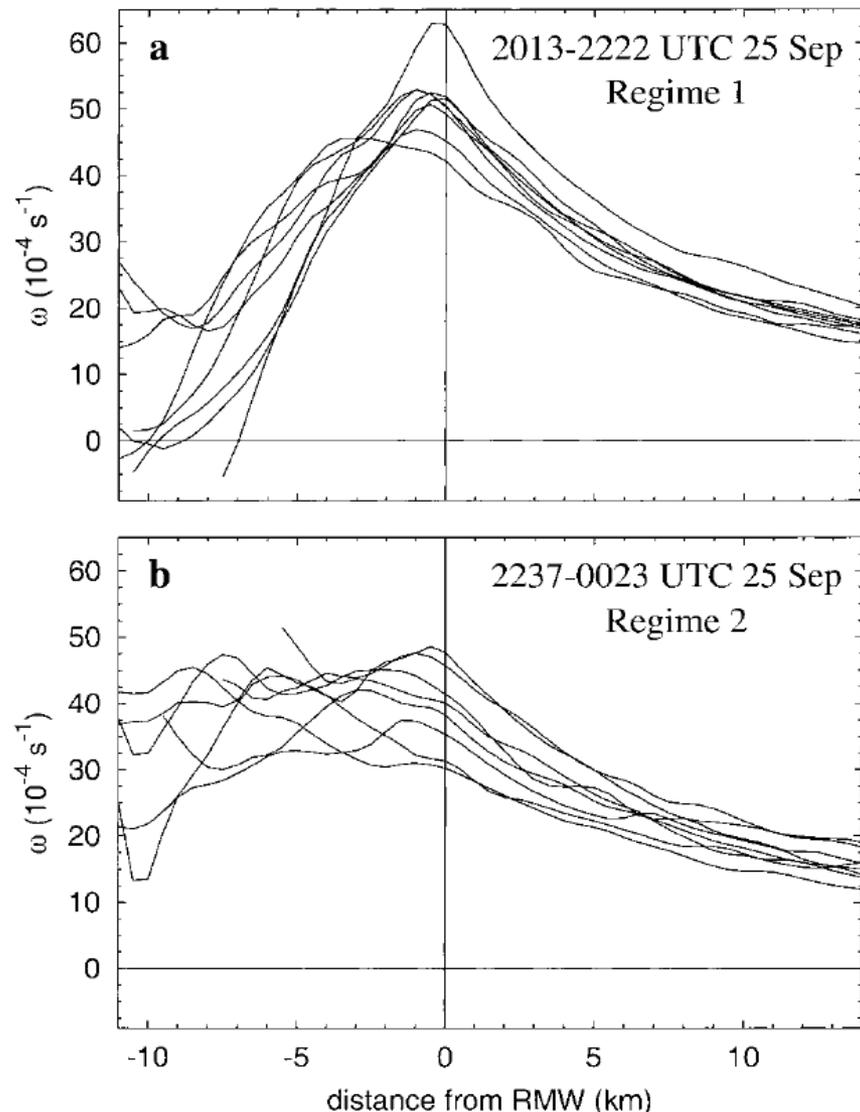


FIG. 3. Similar to Fig. 1 but for Hurricane Olivia (1994) at 600 mb.

# ひまわり30秒観測（特別観測）

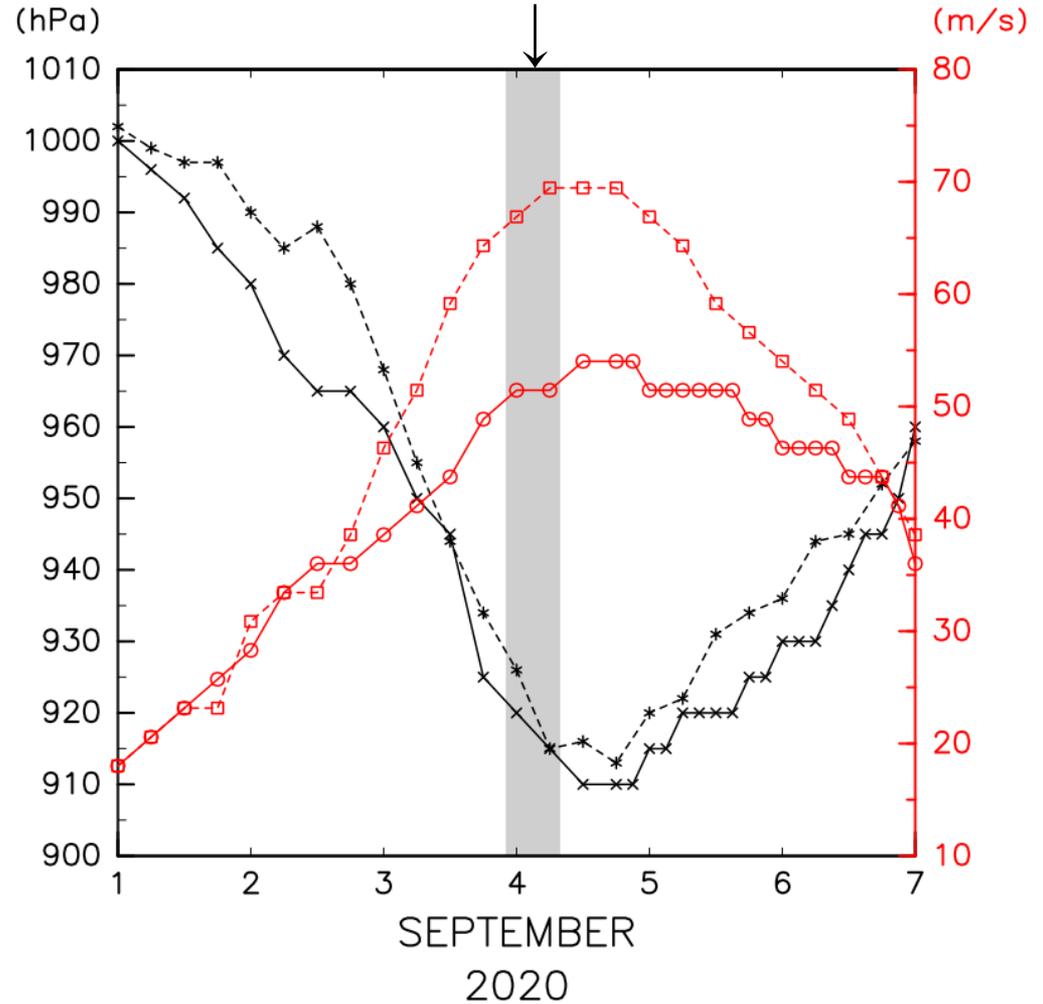
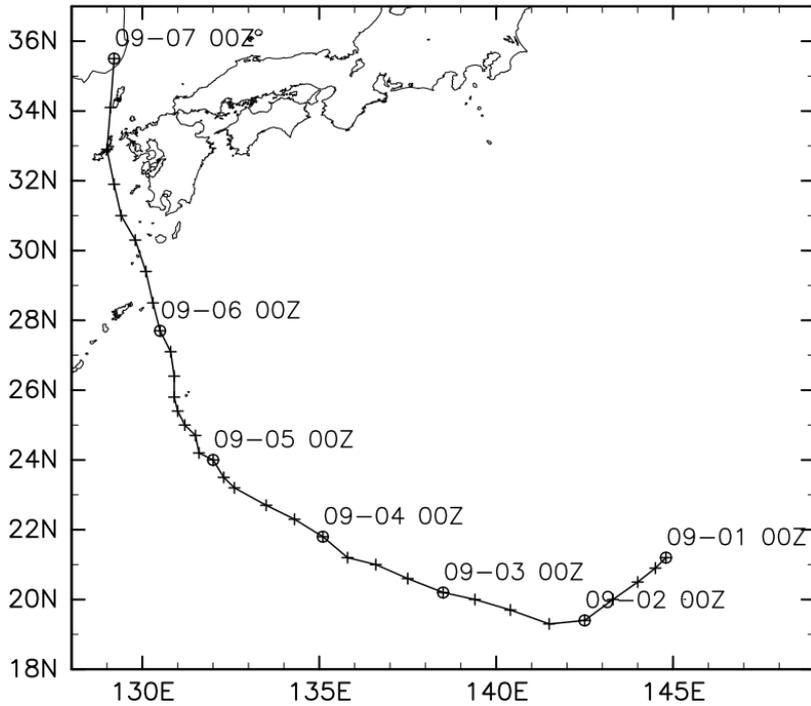
- ひまわり8号の機能：500 km 幅の単一swathで30秒間隔で観測することが可能
  - 定常観測では実施してない：通常の台風機動観測は2.5分, 1000 km Swath
- 気象研・気象庁の連携により，台風研究用にマニュアル設定で特別運用
- いくつかの台風で実施済み(incl. 2019T10 Haishen, 2021T16 Mindulle, 2022T14 Nanmadol)

# 使用データ

- 30秒観測データ（気象庁 & 気象研による特別観測）
  - 観測期間: 9/3～ 9/6
  - 使用した期間：9月3日22 UTC ～ 4日08 UTC
  - 主に可視画像バンド3を使用: 分解能～500 m
- 視差補正
  - 約 $0.005^\circ$ （～500 m）間隔の緯度経度格子データに
- 中心位置合わせ & 正距方位図法に投影
  - ベストトラックを目視で補正：ベストトラックの3次スプライン補間 + 1時間おきに与えた補正值の3次スプライン補間。中心のとり方は以下の2通り
    - 壁雲下部中心：IR (Band13)による高度4-5 kmの壁雲の内壁がなす形状の中心に
    - 下層循環中心：雲追跡結果をもとに循環中心に

# 2020年10号(Haishen)

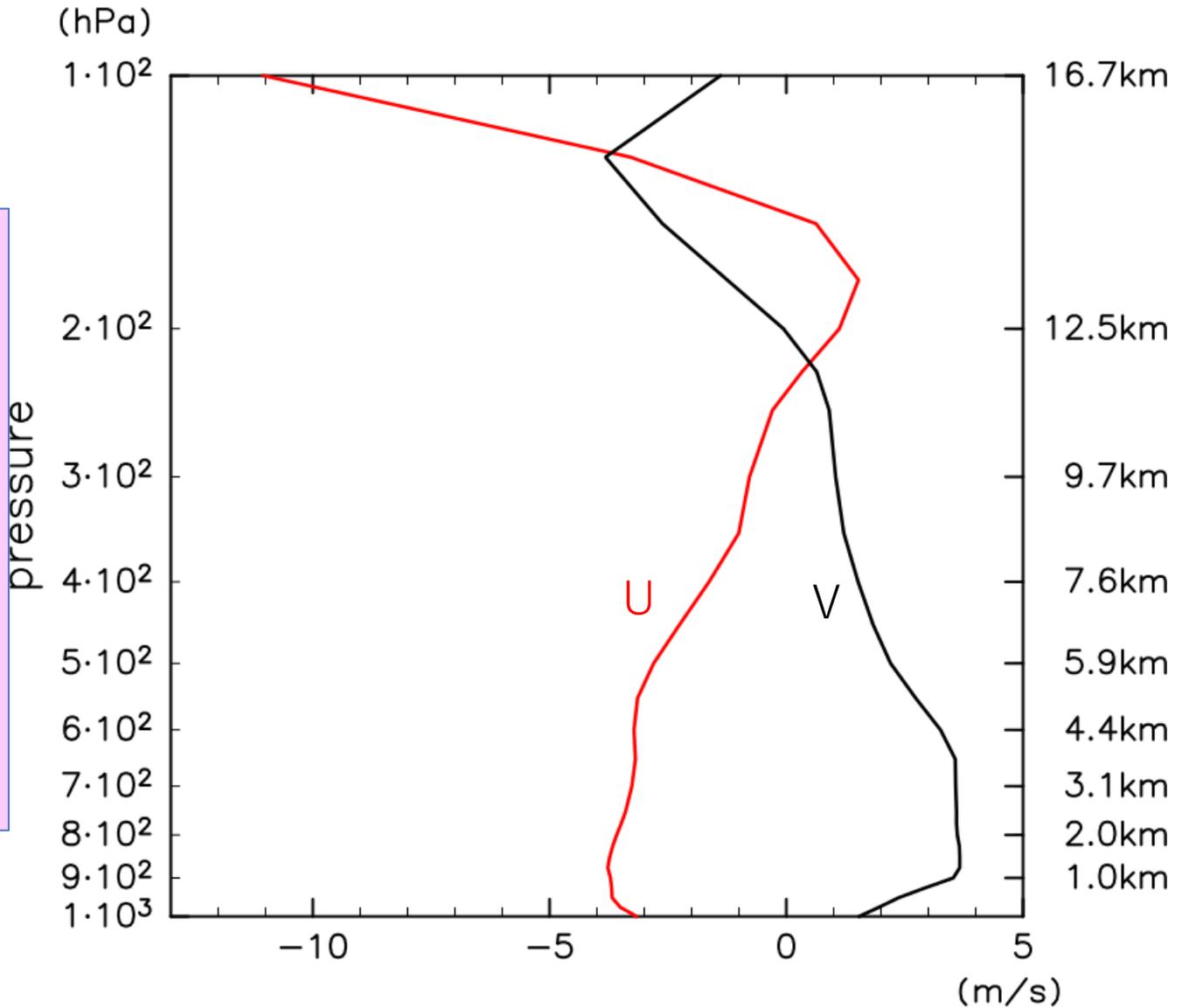
## 解析期間 (発達後期)



実線: JMA, 点線: JTWC

環境風 (JRA-55) 緯度経度  $\pm 7^\circ$  平均の00~06UTCの平均  
 U V 2020-09-04 00Z-06Z

- ✓ 移動: 北西
- ✓ 対流圏のシアー: 南東 (両者逆向き)
- ✓ 150 hPaより上で強い西向きシアー



200-850shear=(4.9,-3.7) translation=(-3.8,2.6) m/s



# 雲追跡（渦の動きに相対的な風の推定）

- Githubで公開してます（名称 VTTrac）
- 相互相関法
  - ただし，ラグランジュ的に前方／後方に2ステップずつ追跡し，2分間の平均速度を求める。
  - 1分毎に実施（結果はさらに時間平均）
    - スクリーニングはいろいろ（相関係数 $\geq 0.8$ ，コントラスト下限，速度変化上限）
    - サブピクセル推定有
    - テンプレートサイズ(内部コア用): 11x11 pix (約5km四方)
- 後処理
  - 雲頂が光学的にやや薄い(Band13と14のTbb差が2 K以上)箇所のトラッキング結果を不採用に。
- 今回は目の中の結果を利用：境界層の流れを代表すると考えられる（雲間があるところでは雲底～境界層トップぐらい。恐らく雲底は一声100 mほどと予想される）

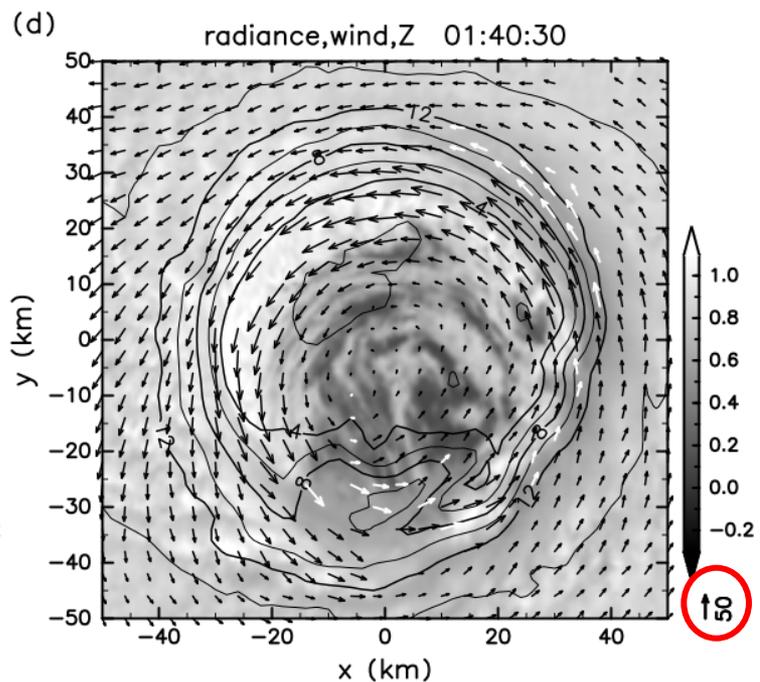
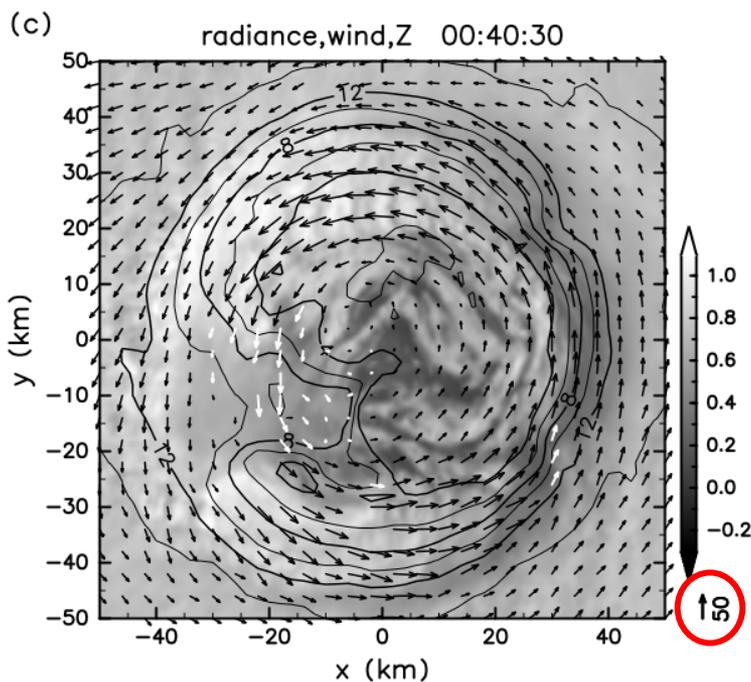
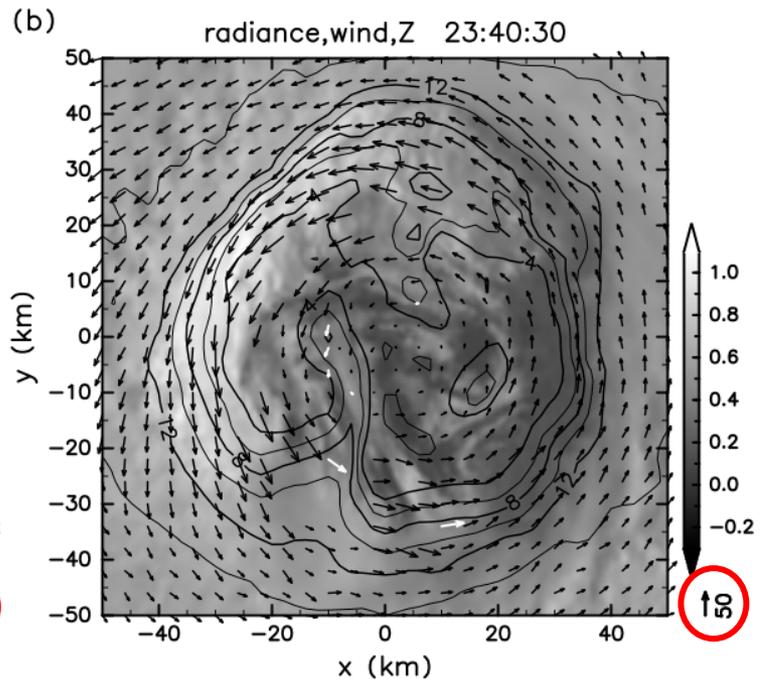
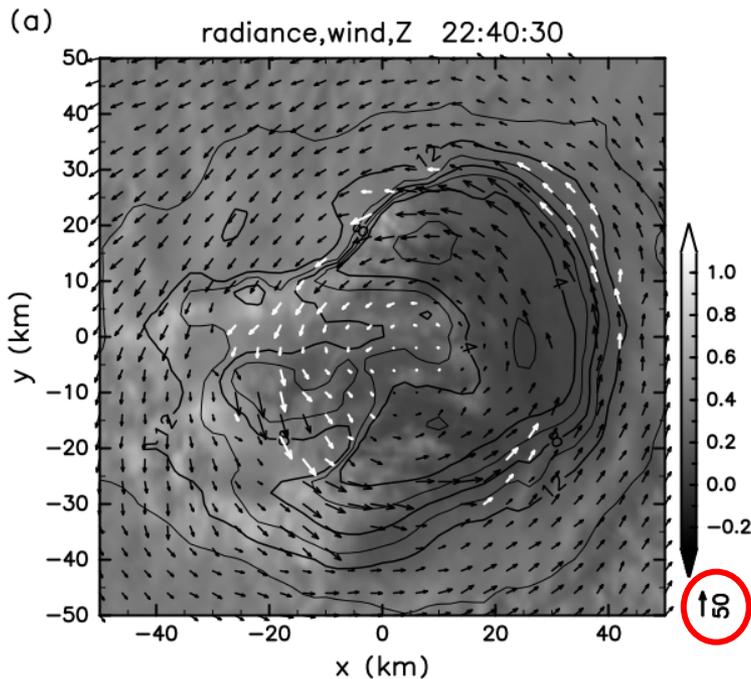
雲追蹤



# 結果の例 (生データ)

コンターは高度  
(2 km間隔)

白矢印はB13-  
B14差分が2 K  
以上で除去す  
るところ (上  
層のやや光学  
的に薄い雲の  
入り込み)

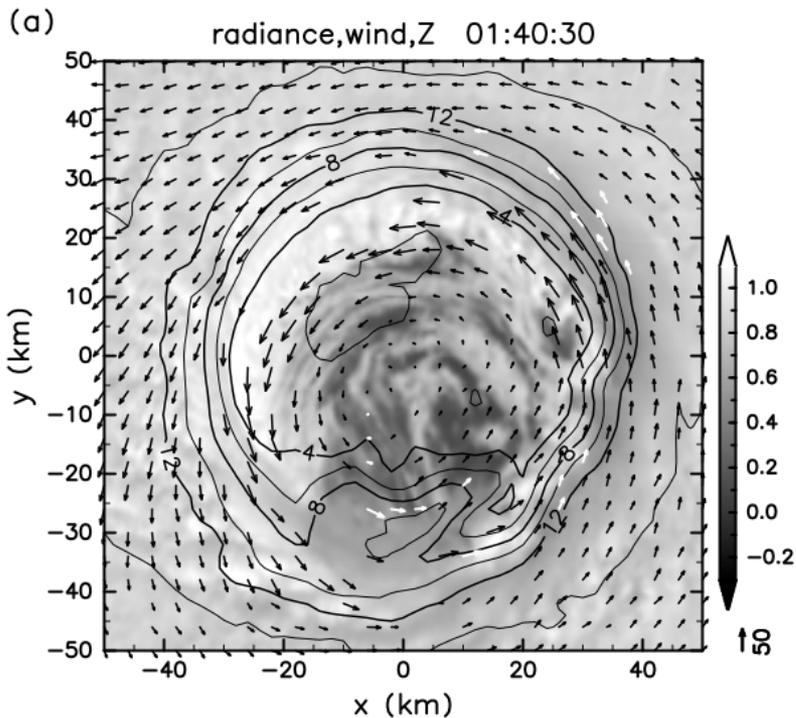


# 時間間隔依存性

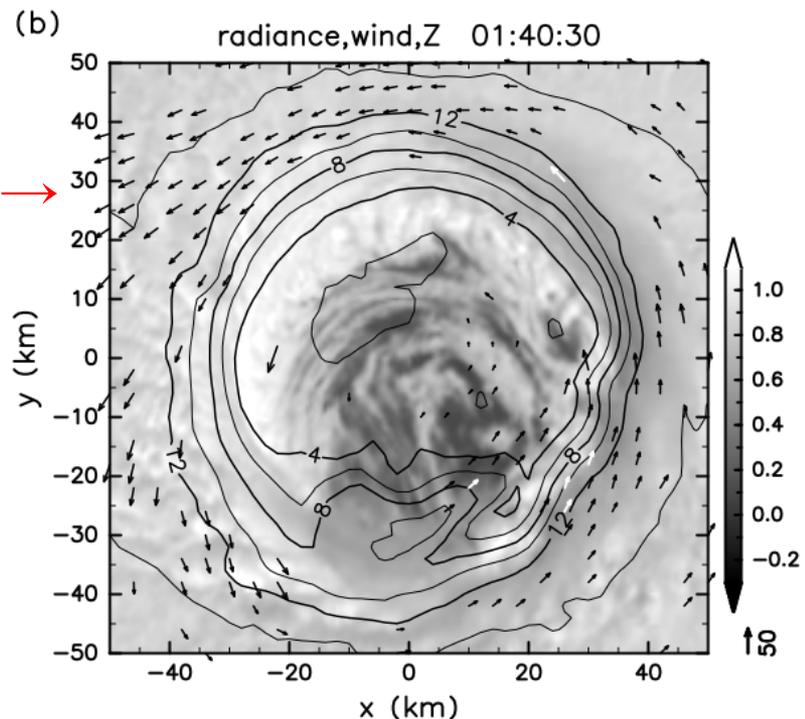
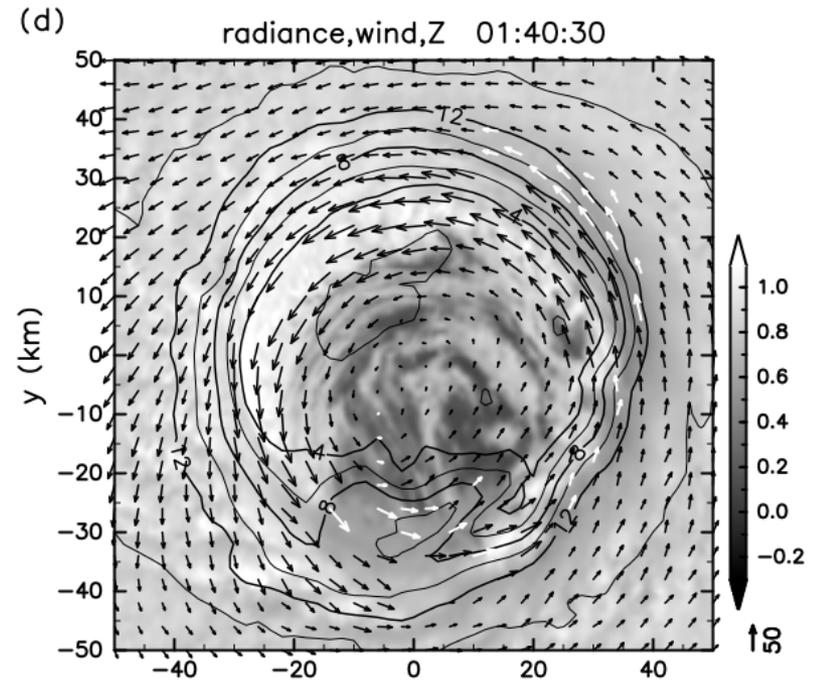
(前掲) 30秒間隔(±1分5画像より) →

↓ 1分間隔観測相当

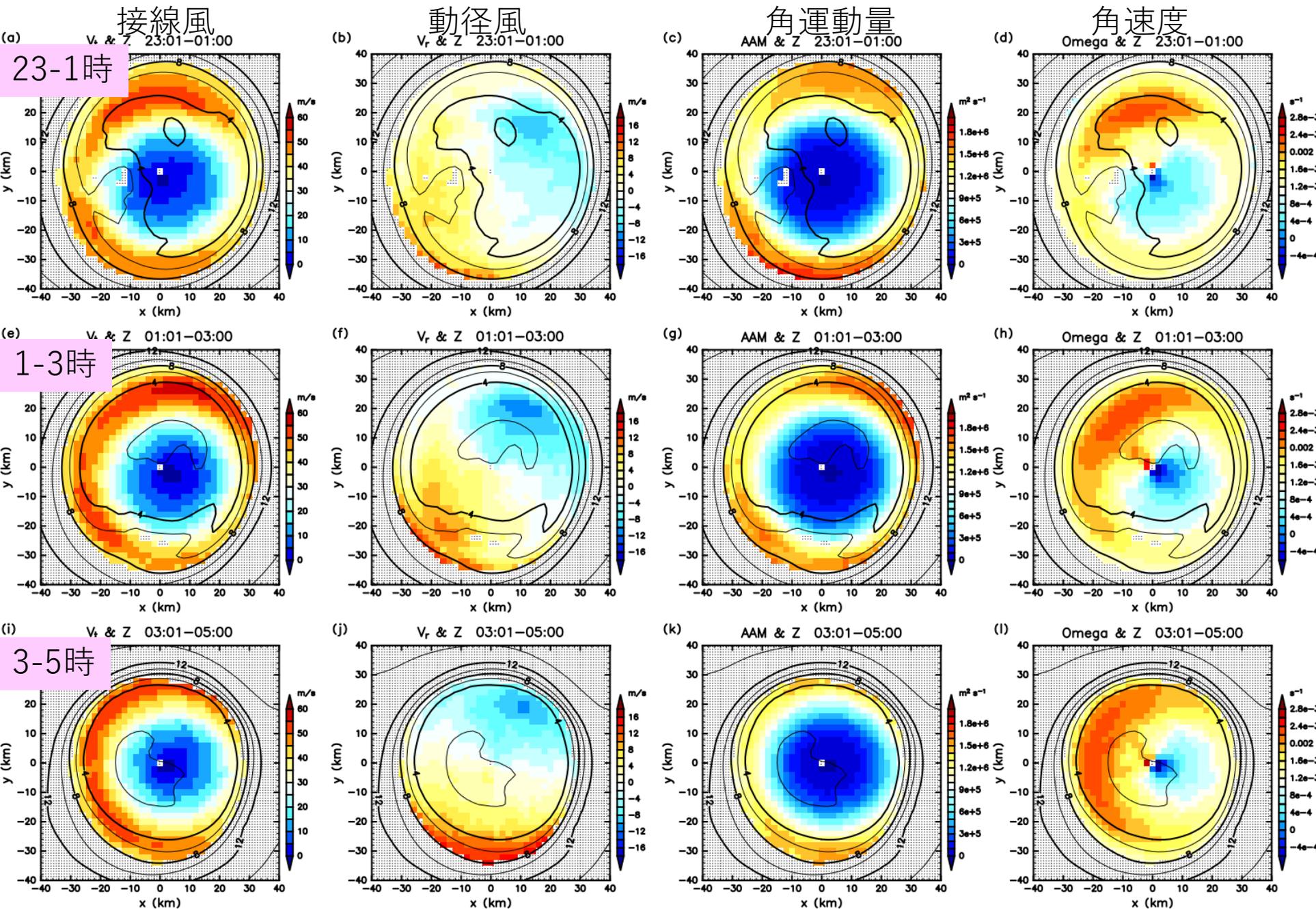
(±1分5画像使用だが初期テンプレート画像を更新せず：探索範囲は同じなので純粹に相関係数の悪化による)



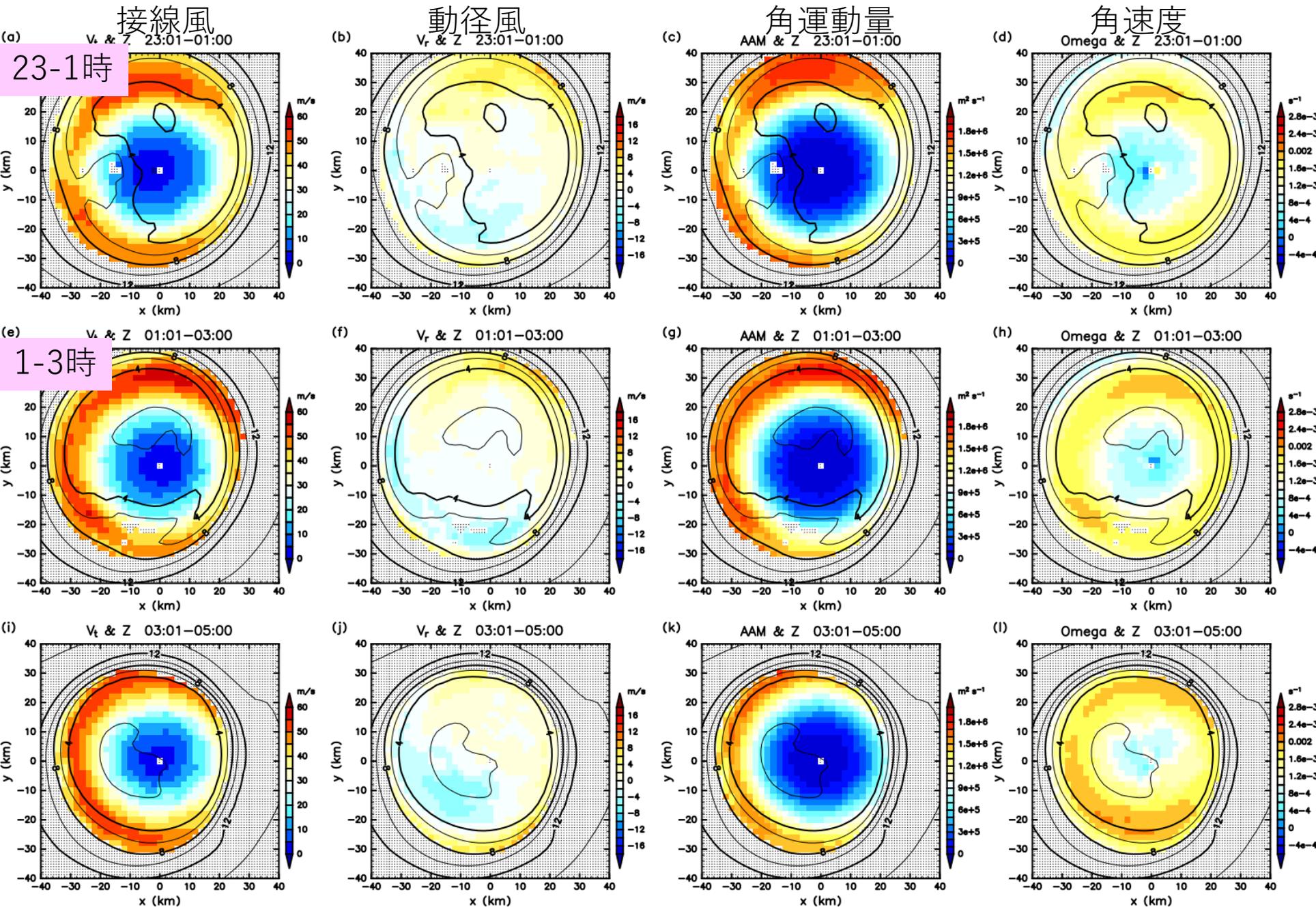
2分間隔  
観測相当 →



2時間平均風の推移 (壁雲下部中心で位置合わせ, 260K以下マスク)  
 コンターはハイト (km)



2時間平均風の推移 (下層循環中心で位置合わせ, 260K以下マスク)  
 コンターはハイト(km)



# 議論：台風移動の効果

- 台風移動による動径風の非対称化
  - Shapiro (1983) Slab BL: 移動方向前面 & 右で内向き
  - Keport (2010) 多層BL: 移動方向右で内向き
  - いずれも原因は地表面摩擦（応答の形はSlabと多層で少し異なる）
- Haishen（本研究）
  - Keport (2010)と合う
  - 解釈：循環中心が下流にずれることで説明できる（前2頁）。

Shapiro (1983) 左：波数 2 までの BL モデル，移動速度 10 m/s  
 右：観測（ブイのよう），Frederic，移動は ~5 m/s

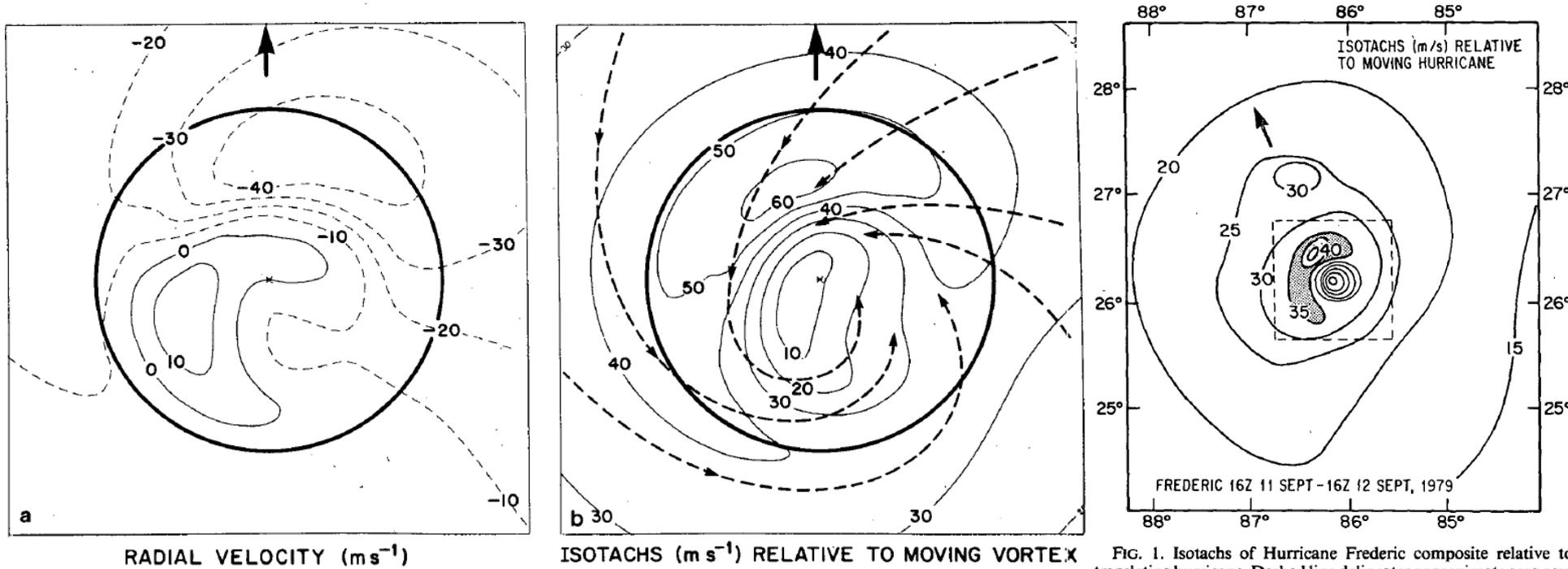


FIG. 1. Isotachs of Hurricane Frederic composite relative to translating hurricane. Dashed line delineates approximate area covered by Fig. 2. Courtesy of Mark Powell.

- 動径風は中心が右～右下にずれた場合に近い。

# Slab vs height resolving (Kepert 2010 ibid)

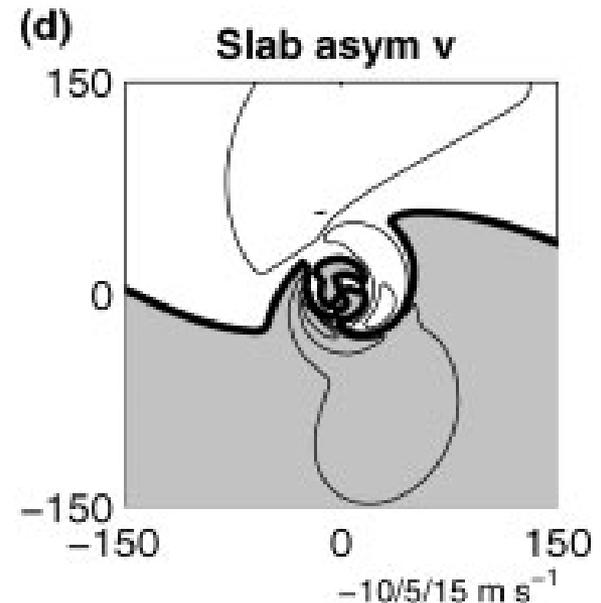
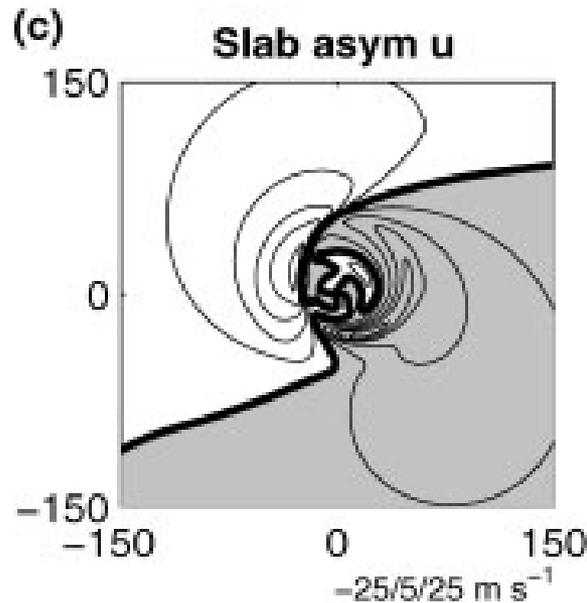
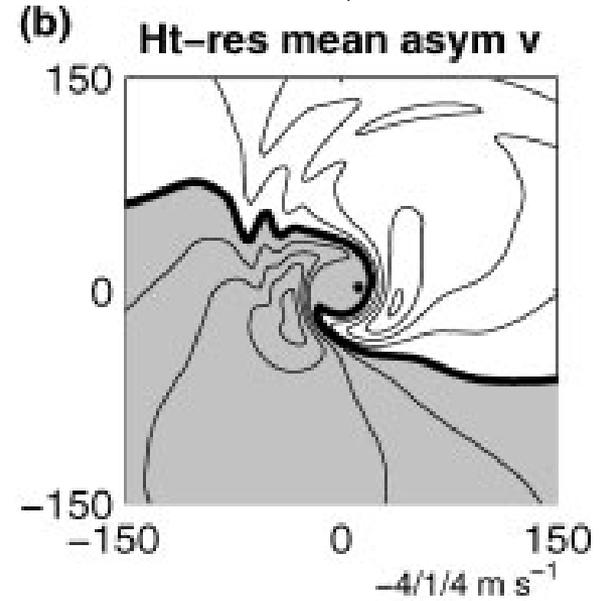
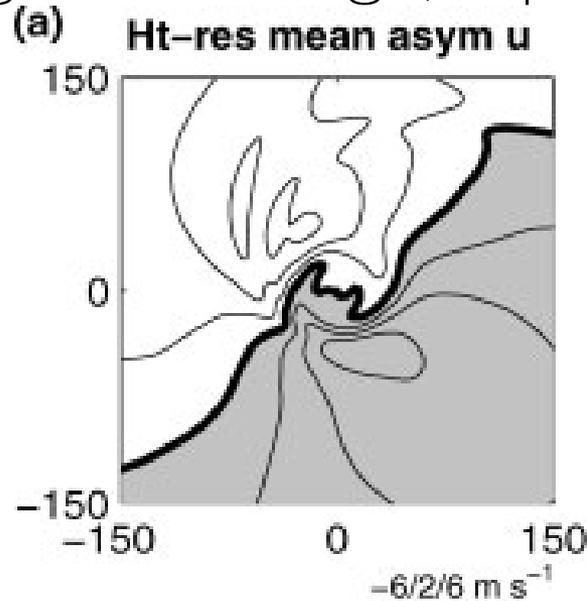
5 m/sで西に移動



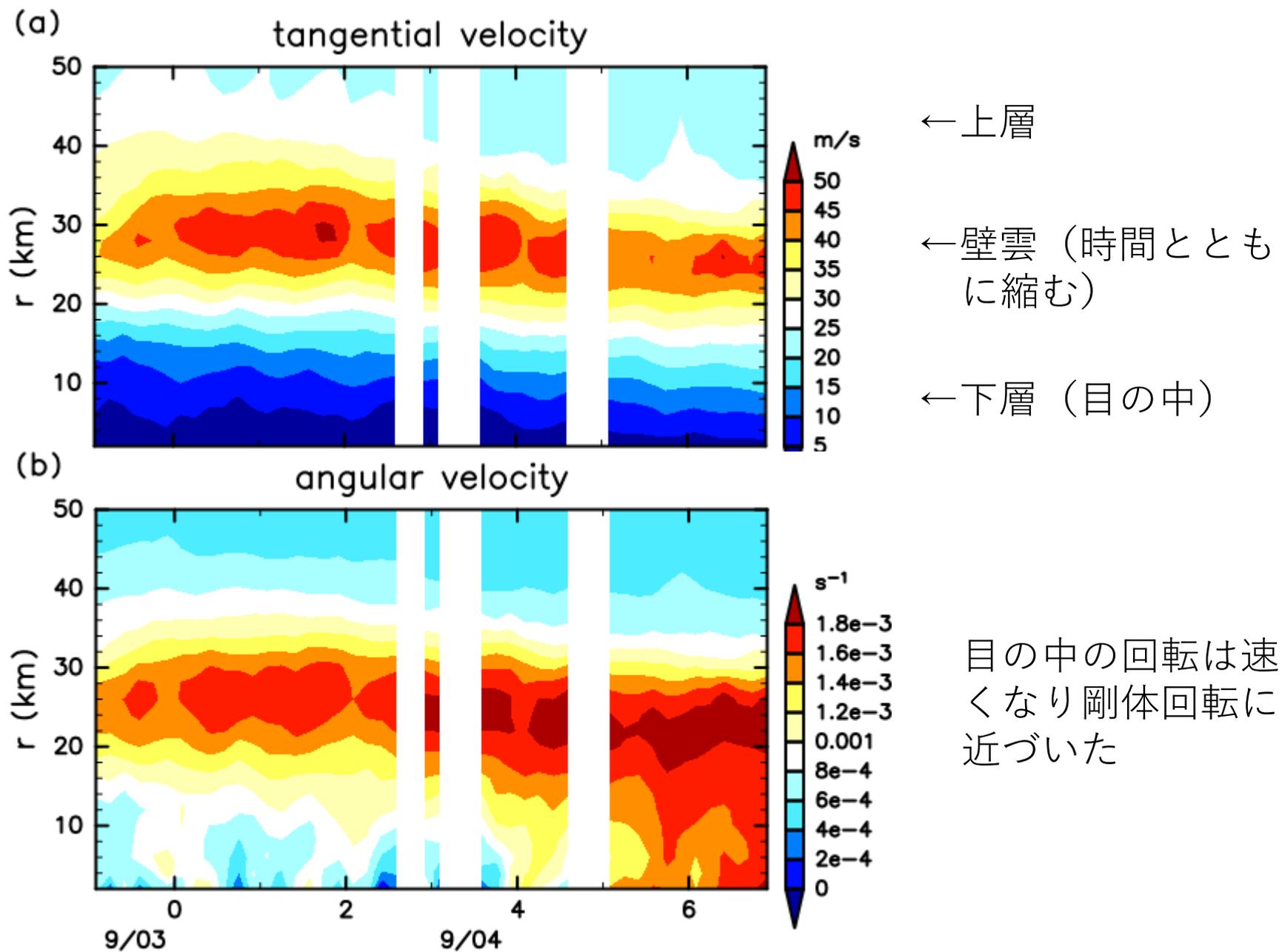
正偏差に影。方位角平均は引いてある。

3D(a)では移動方向  
右にinflow: 今回の  
結果とあう

上空RMW ~ 40 km。  
移動ありで方位角平均の図はない..

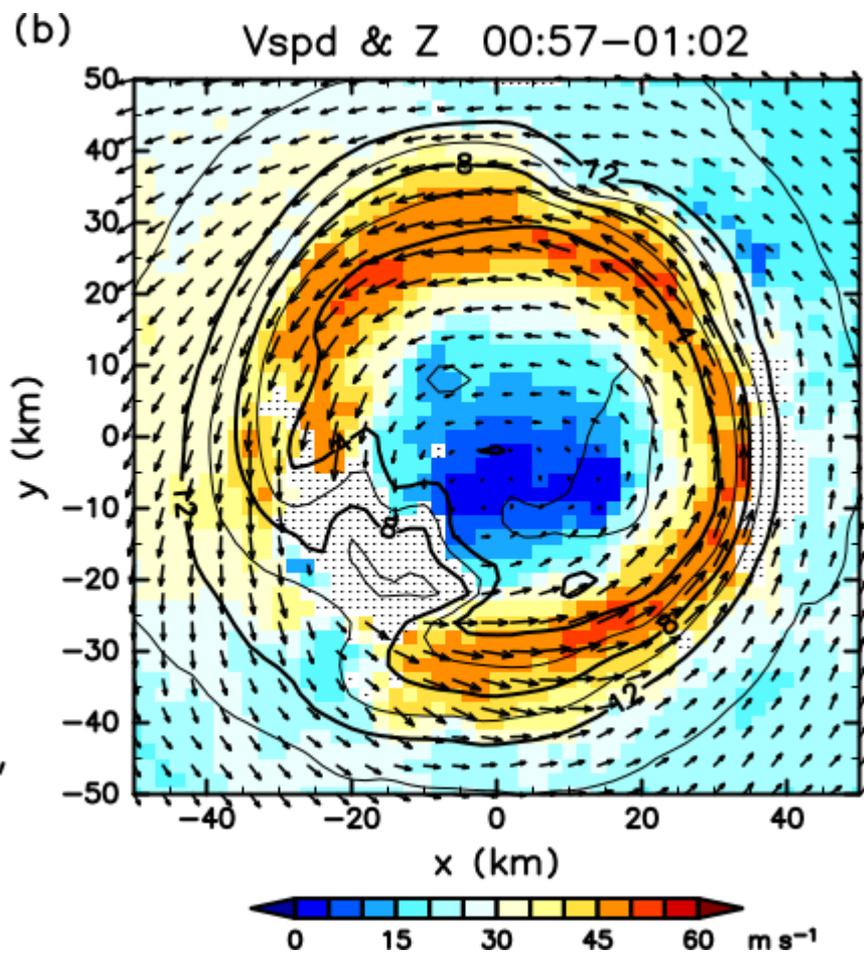
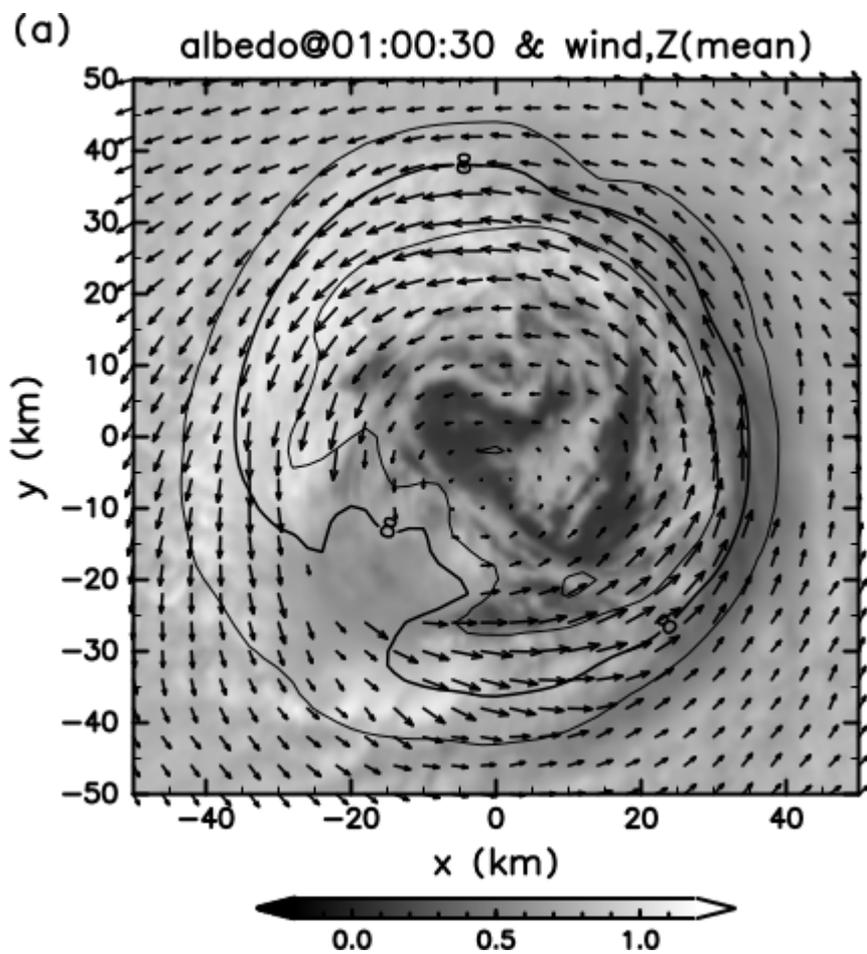


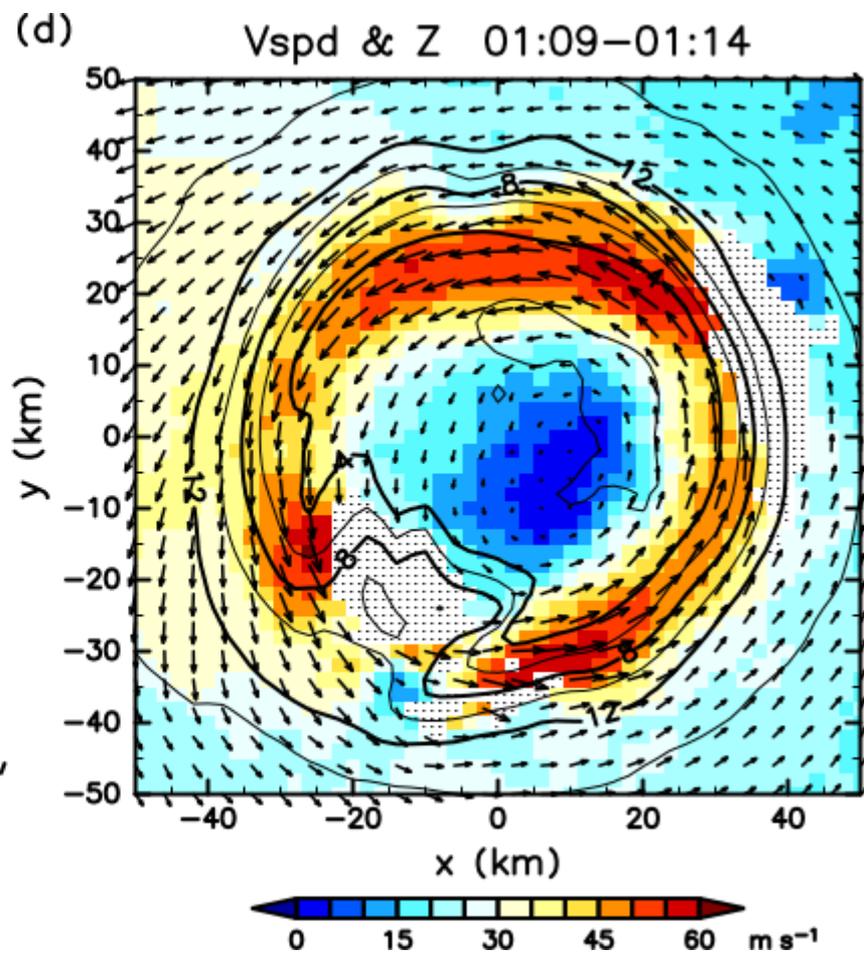
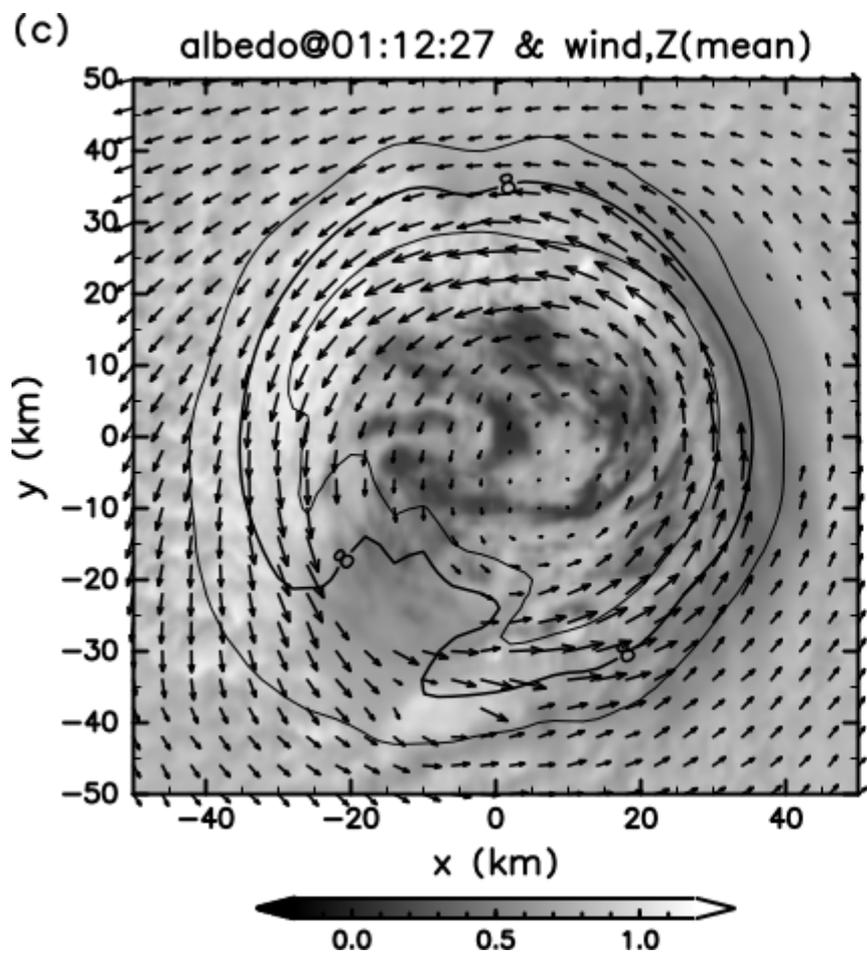
# 10分 & 方位角平均接線風と回転角速度 (回転下層循環中心基準)

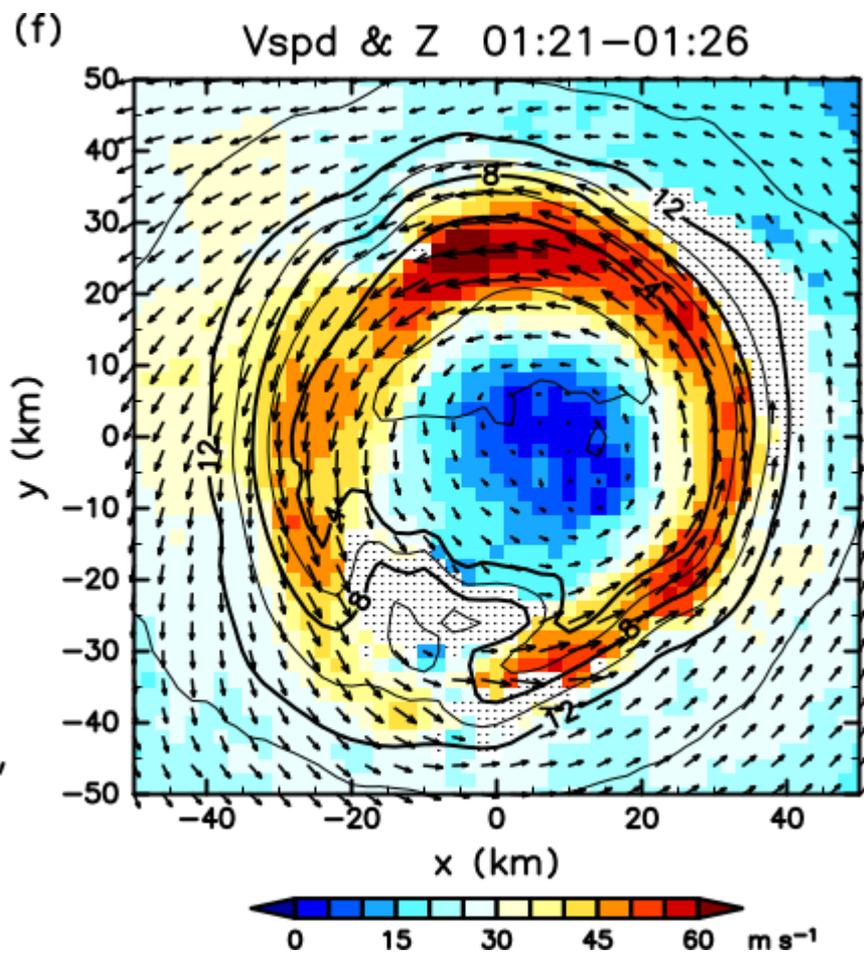
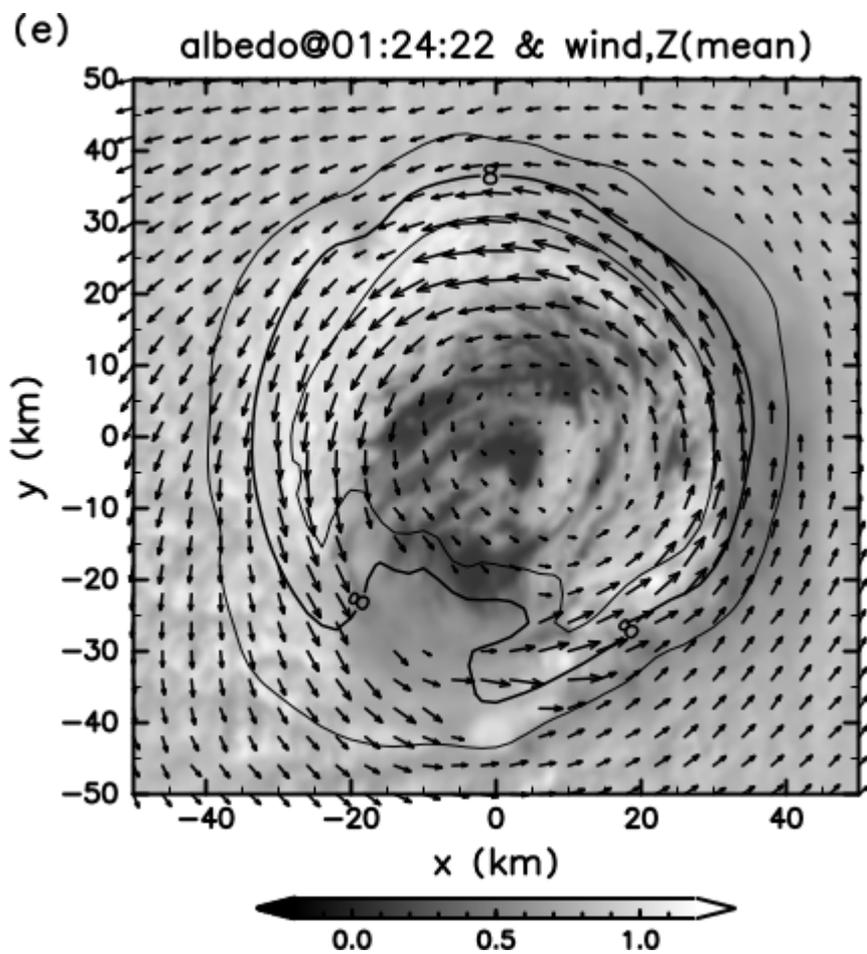


# 波数 1 の移動性擾乱と角運動量

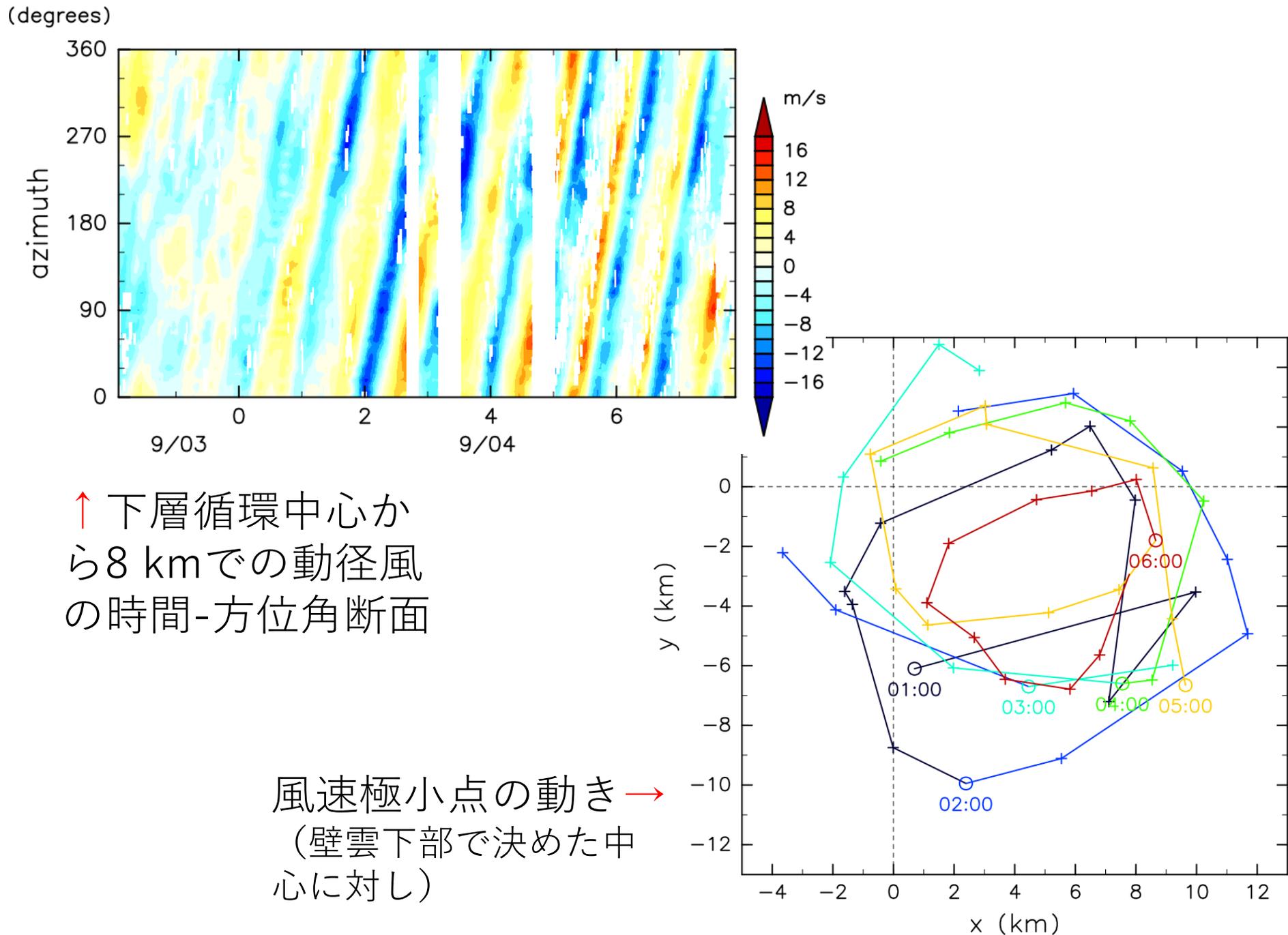
Horinouchi et al. (2023) Mon. Wea. Rev.







# $V_r$ at $r=8\text{km}$



↑ 下層循環中心から8 kmでの動径風の時間-方位角断面

風速極小点の動き →  
(壁雲下部で決めた中心に対し)

中心から半径 $r$ までの角運動量の支配方程式

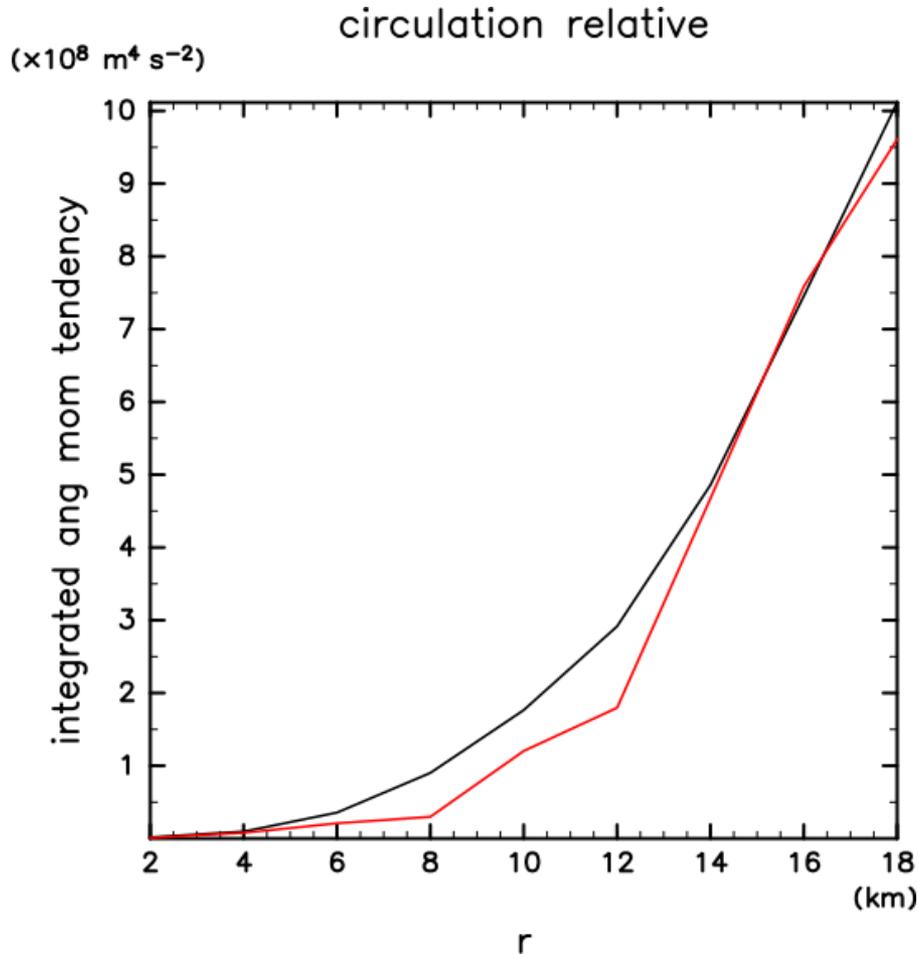
$$\bullet \frac{d}{dt} \int_0^r r \bar{m} dr = -r \overline{m u} - \int_0^r r \frac{\partial(\overline{m w})}{\partial z} dr + \int_0^r r \bar{X} dr$$

• バーは方位角平均，ダッシュはずれ

•  $m \equiv r v + \frac{f r^2}{2}$ ,  $X$ は摩擦などの外力

• 右辺第一項の渦成分は $-r \overline{m' u'}$ 。

期間中の角運動量積分の時間変化率（黒）と波数1の角運動量輸送（赤）



- 量的に合う。
- 注意：波数1の効果が全てではない。
  - 摩擦による減速
  - 波数0成分の内向き輸送（大）
  - 鉛直輸送（定量できない）

# 議論：波数 1 の緩やかな順圧不安定

- Nolan & Montgomery (2000, 順圧) :
  - プラズマ分野でのSmith&Rosenbluth (1990)の理論を台風解釈に応用。時間十分大での、鞍点法による漸近解。
  - 指数関数的な成長モードがなくても、擾乱のエネルギーが時間に比例して成長する（振幅は $t^{1/2}$ に比例）  
“algebraically growing instability” が存在。
  - 渦度分布の詳細によらない汎用性:
    - 角振動数 = 流れの角速度の最大値! (その半径を $RM\Omega$ と表記)
    - 擾乱は $RM\Omega$ 内に限られる（渦度 & 流線関数も!)
    - 基本場は $RM\Omega$ まででRayleigh&Fjørtoft条件を満たす
- Nolan et al (2001, 主に浅水, 3Dも)
  - 3Dでも同様

# NM00によるSR90解レビュー

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + i\bar{\Omega}\right)\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}r\frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r^2}\right)\psi_1 - \frac{i}{r}\psi_1\frac{\partial\bar{\zeta}}{\partial r} = 0, \quad (2.2)$$

a Laplace transform,

$$\psi_p(r) = \int_0^\infty e^{-pt}\psi_1(r, t) dt, \quad (2.5)$$

$$(p + i\bar{\Omega})\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}r\frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r^2}\right)\psi_p - \frac{i}{r}\psi_p\frac{\partial\bar{\zeta}}{\partial r} = \zeta_1(r, 0), \quad (2.6)$$

SR90 were able to explicitly integrate (2.6)

$$\psi_1(r, t) = -r \int_r^R e^{-i\bar{\Omega}(\rho)t} [1 + i\bar{\Omega}(r)t - i\bar{\Omega}(\rho)t] h(\rho) d\rho,$$

where  $R$  is the radius of the outer boundary

$$\zeta_1(r, t) = \zeta_1(r, 0) - it\frac{\partial\bar{\zeta}}{\partial r} \int_r^\infty e^{-i\bar{\Omega}(\rho)t} h(\rho) d\rho. \quad (2.9)$$

$$h(r) = \frac{1}{r^3} \int_0^r \rho^2 \zeta_1(\rho, 0) d\rho. \quad (2.8)$$

$h$ は $\zeta_1$ の初期値の関数であることに注意

At long times, the integrals in (2.7) and (2.9) are dominated by the contributions from any stationary points where  $\partial\bar{\Omega}/\partial r = 0$ , and also by a contribution from the upper limit. For the particular case where there is a single angular velocity maximum at  $r = r_j$ , SR90 used the method of stationary phase to deduce the following longtime behavior of the solution:<sup>2</sup>

Method of stationary phase:  
鞍点法（停留位相法）

$$\begin{aligned} \psi_1(r, t) \sim & e^{3\pi i/4} t^{1/2} h(r_j) \left( \frac{2\pi}{|\bar{\Omega}''(r_j)|} \right)^{1/2} H(r_j - r) \\ & \times r [\bar{\Omega}(r_j) - \bar{\Omega}(r)] e^{-i\bar{\Omega}(r_j)t} \\ & + r [\bar{\Omega}(R) - \bar{\Omega}(r)] \frac{h(R)}{\bar{\Omega}'(R)} e^{-i\bar{\Omega}(R)t} \\ & + O(t^{-1/2}), \quad \text{and} \end{aligned} \quad (2.10)$$

←  $\sqrt{t}$  比例（エネルギー  $-t$  比例）成長擾乱。  
RM  $\Omega$  での ( $\because$  最大の) 角速度  $\bar{\Omega}(r_j)$  で回転。  
渦度だけでなく流線関数も RM  $\Omega$  まで。

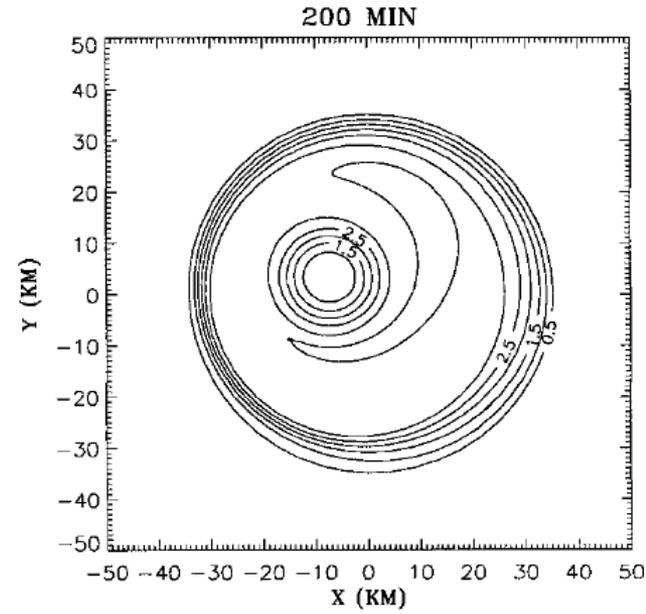
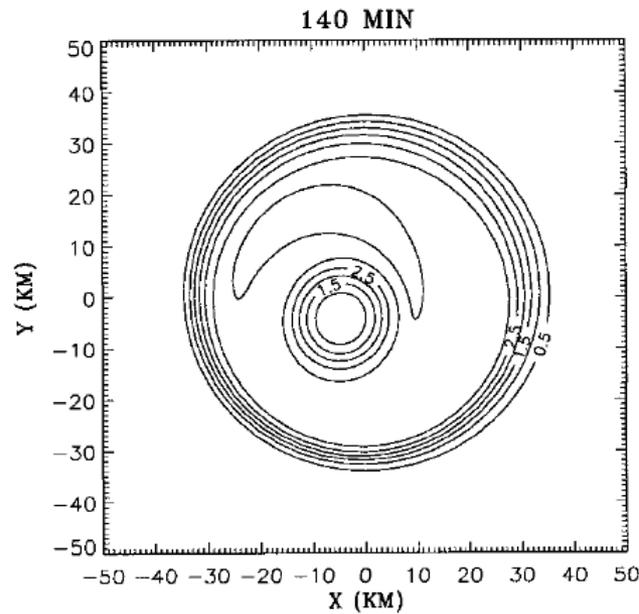
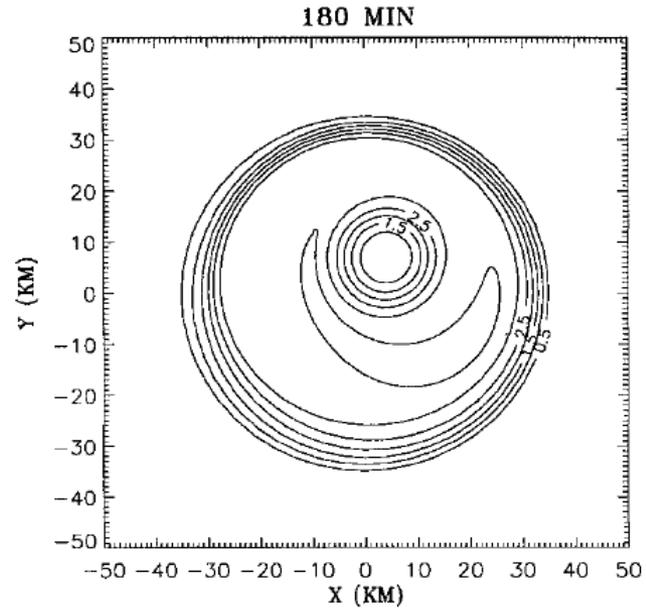
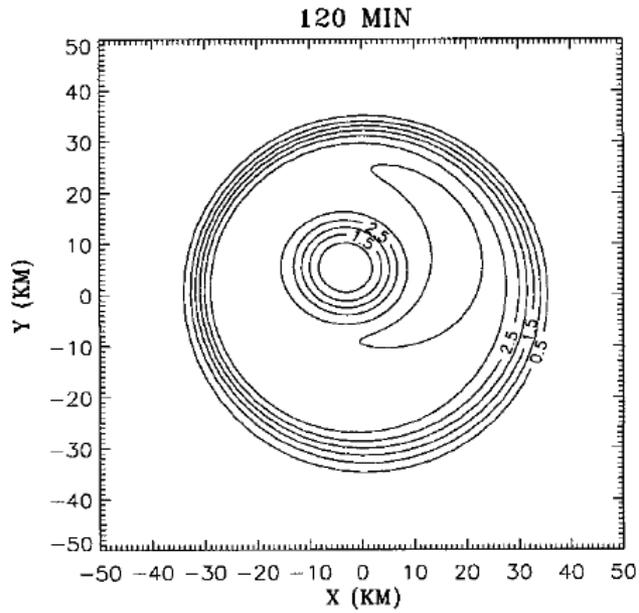
← 中立（境界  $R \rightarrow \infty$  で消える）

← 残差項（これがゼロなら  $h(r_j) = 0$  になり成長擾乱が不在に。擾乱が変形していくことを意味。）

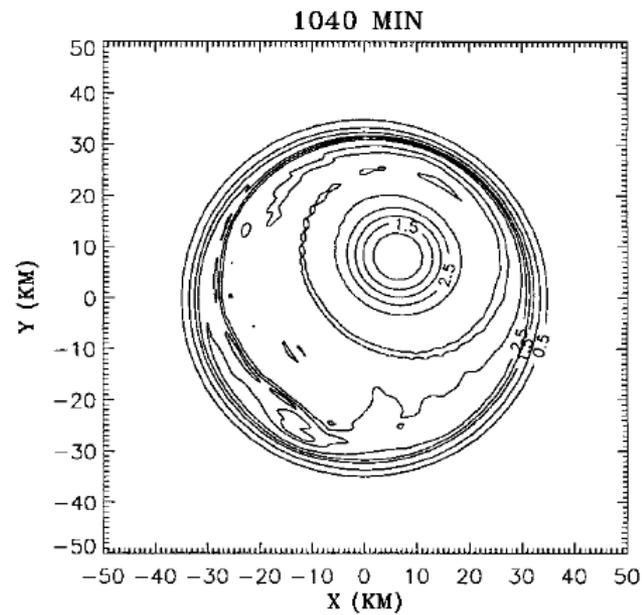
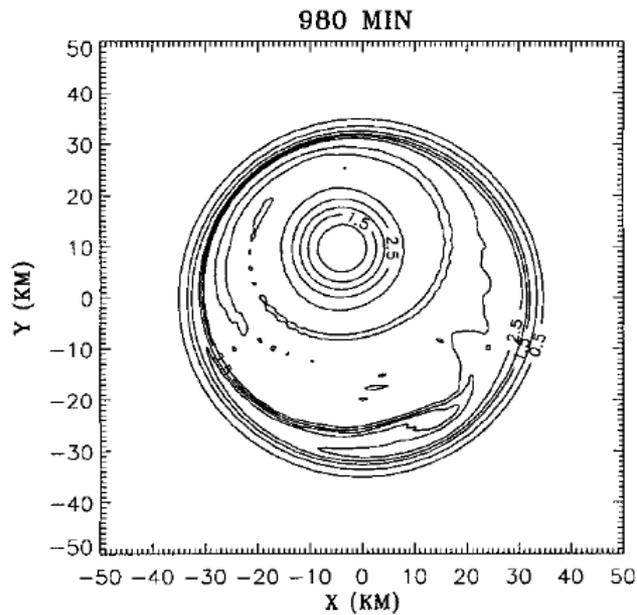
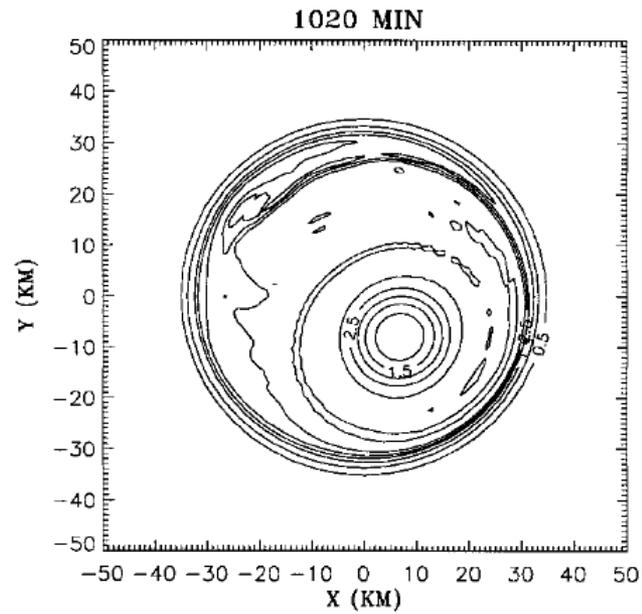
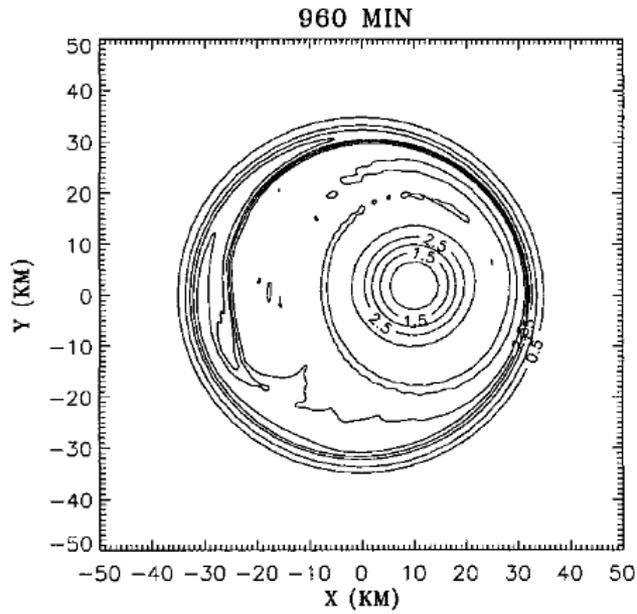
$$\begin{aligned} \zeta_1(r, t) \sim & -e^{3\pi i/4} t^{1/2} h(r_j) \left( \frac{2\pi}{|\bar{\Omega}''(r_j)|} \right)^{1/2} H(r_j - r) \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial r} e^{-i\bar{\Omega}(r_j)t} \\ & + \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial r} \frac{h(R)}{\bar{\Omega}'(R)} e^{-i\bar{\Omega}(R)t} + O(t^{-1/2}), \end{aligned} \quad (2.11)$$

where  $H$  is the Heaviside step function,  $\bar{\Omega}''(r_j)$  is the second derivative of the angular velocity at the location of the angular velocity maximum,  $\bar{\Omega}'(R)$  is the first derivative of the basic-state angular velocity at the outer boundary, and the remaining terms in the solution decay as  $t^{-1/2}$ .

# Nolan & Montgomery (2000)



# Nolan & Montgomery (2000)



# Nolan & Montgomery (2000)

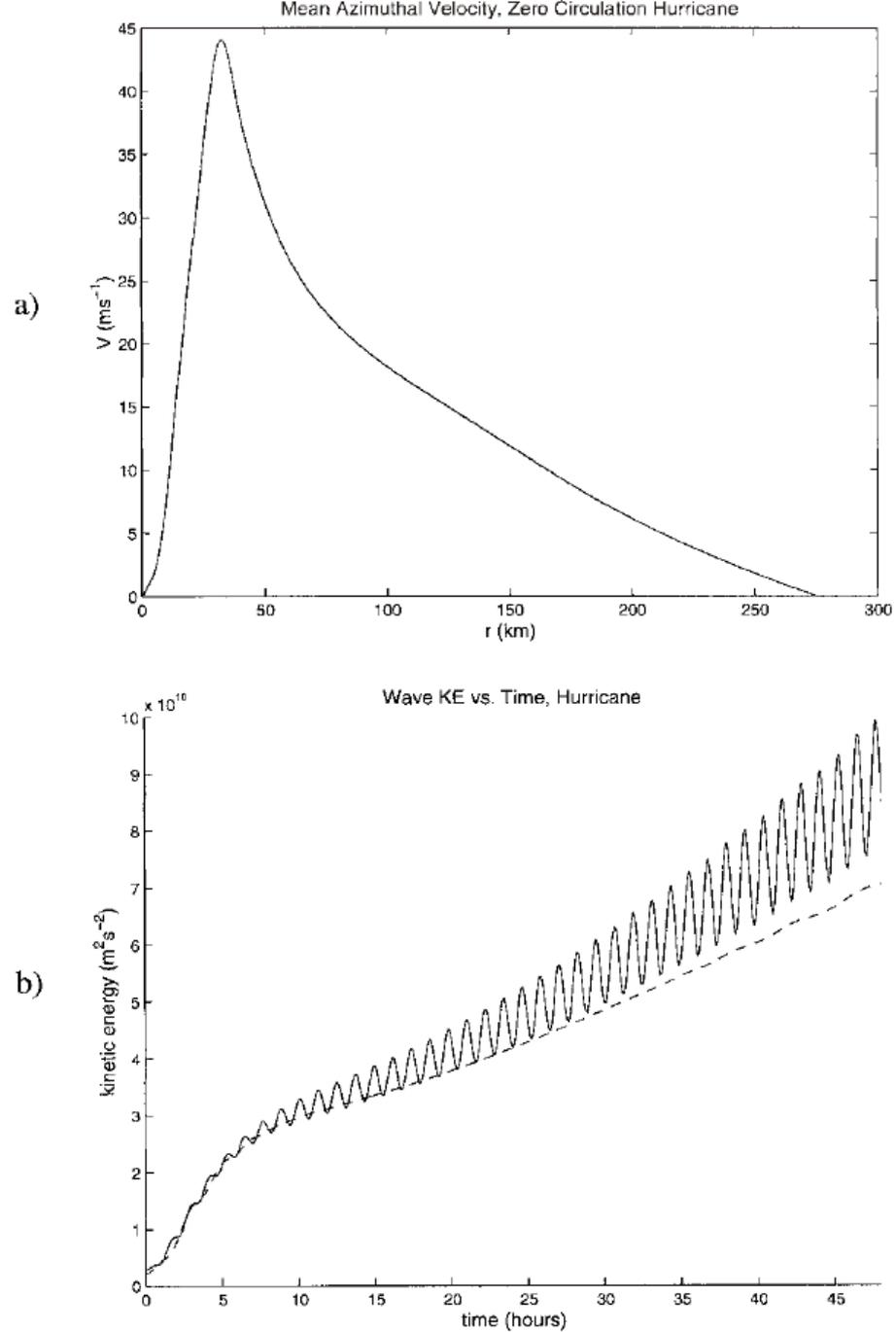
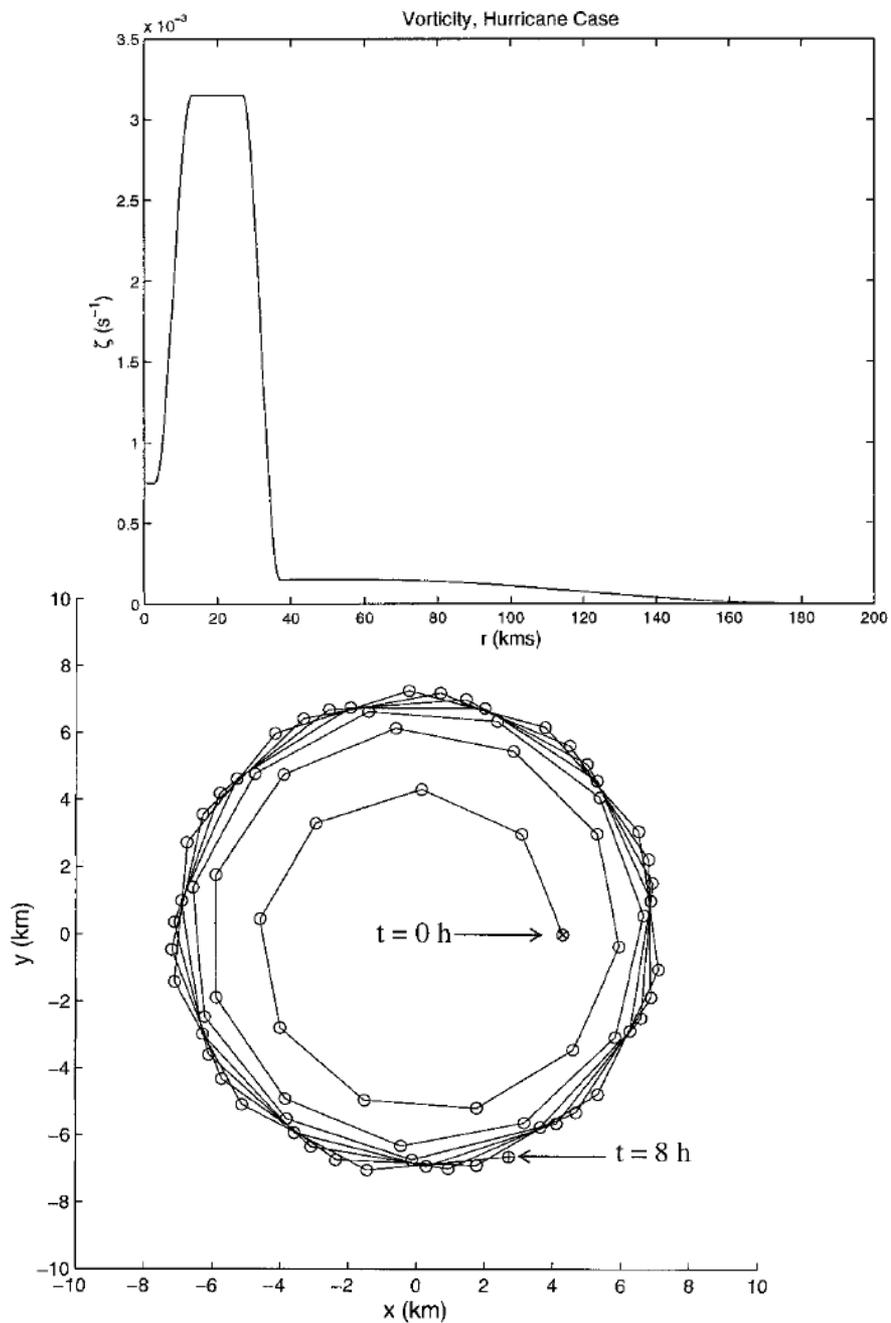
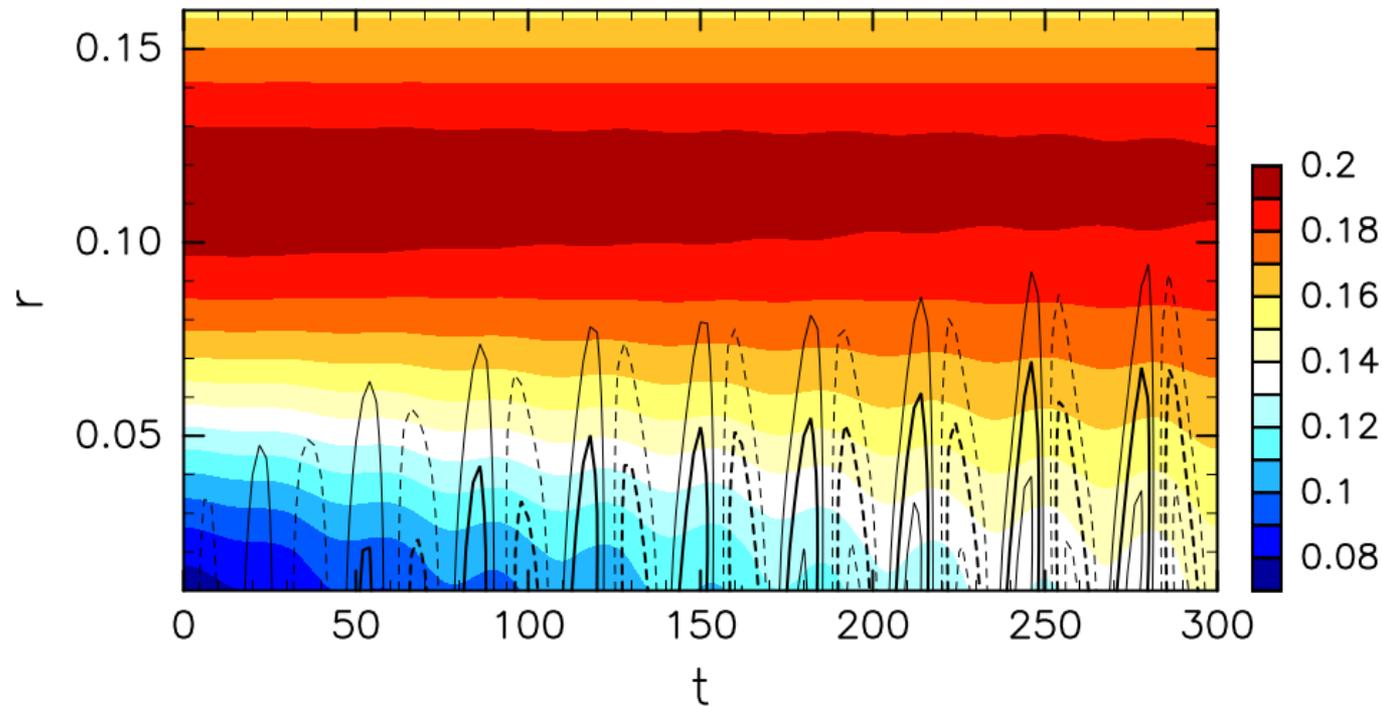


FIG. 17. Zero-circulation hurricane vortex and results: (a) mean

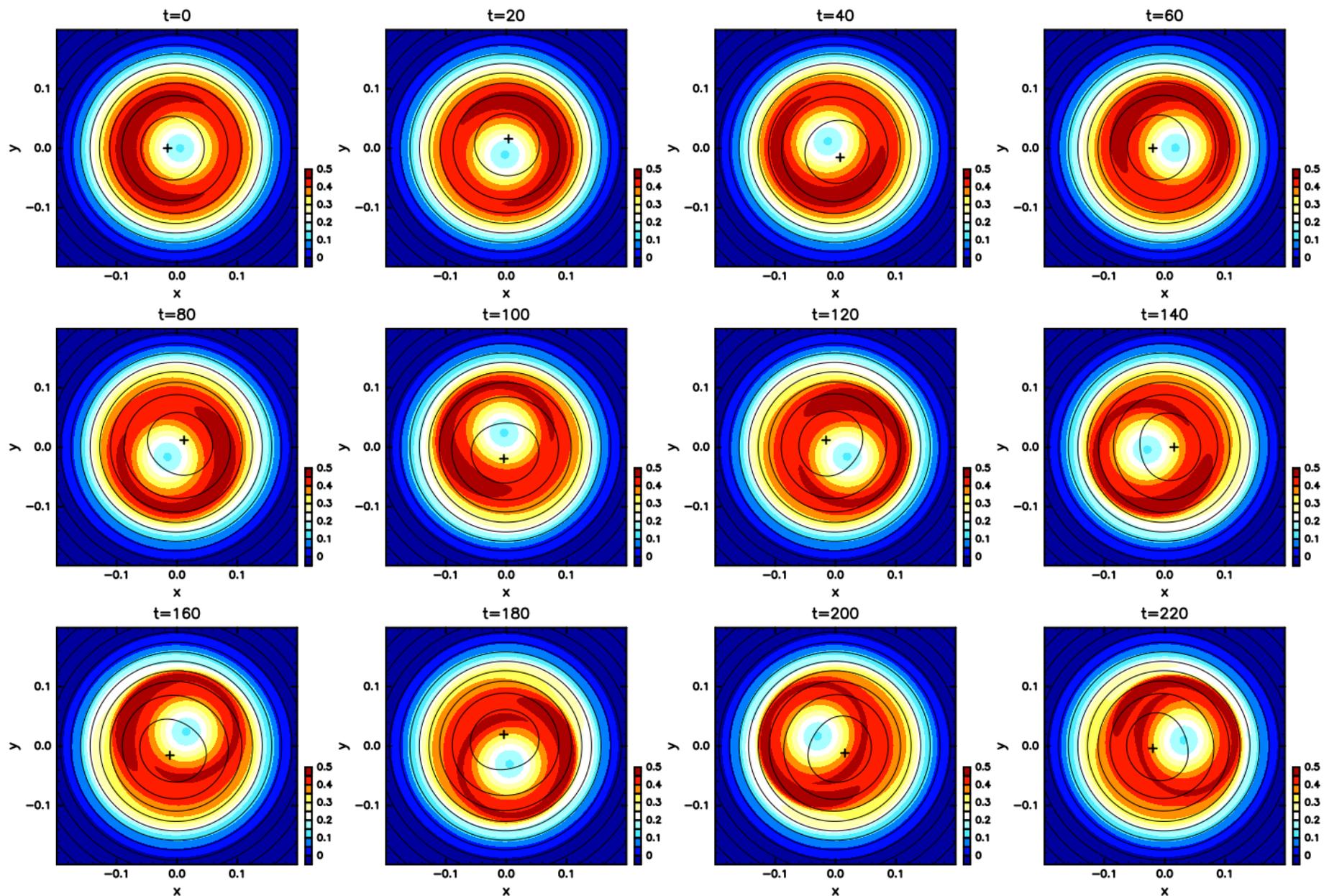
# 順圧モデルによるデモ（本研究）

- 初期の渦度  $a_1 e^{-r^4/\sigma_1^4} - a_2 e^{-\{(x-x_0)^2+y^2\}/\sigma_2^2}$  の形。
- 無次元（次元付きへの換算は簡単）
- 不安定擾乱がゆっくり成長し，中心付近を加速し角速度を一様に近づける。
- 指数関数的に成長する不安定のような急激な変化はない。

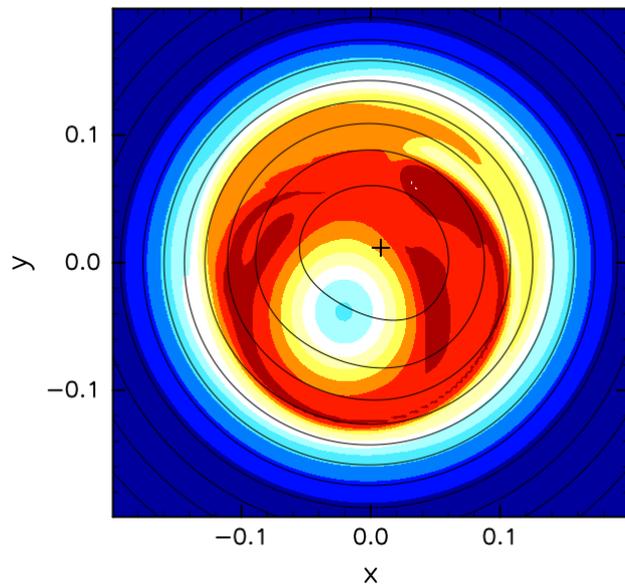
mean omega & vr(theta=0)



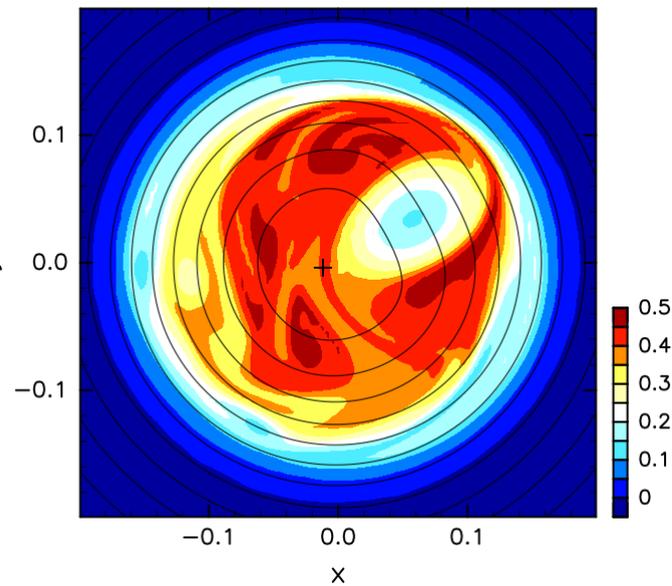
# 渦度（色）と流線関数（コンター，極大点に+マーク）



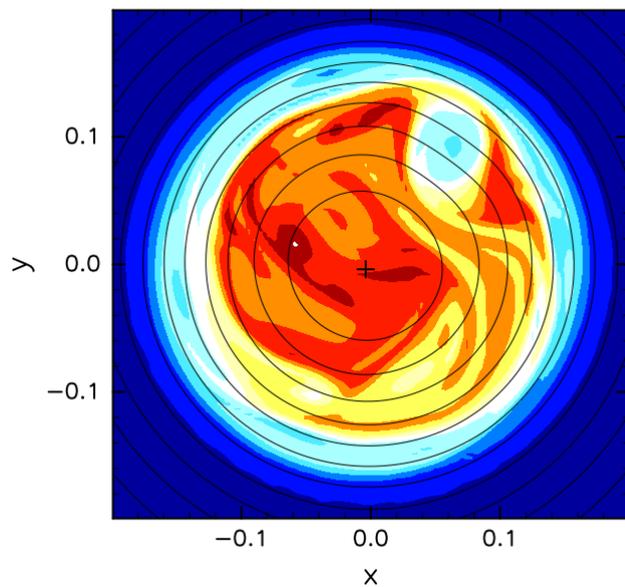
t=400



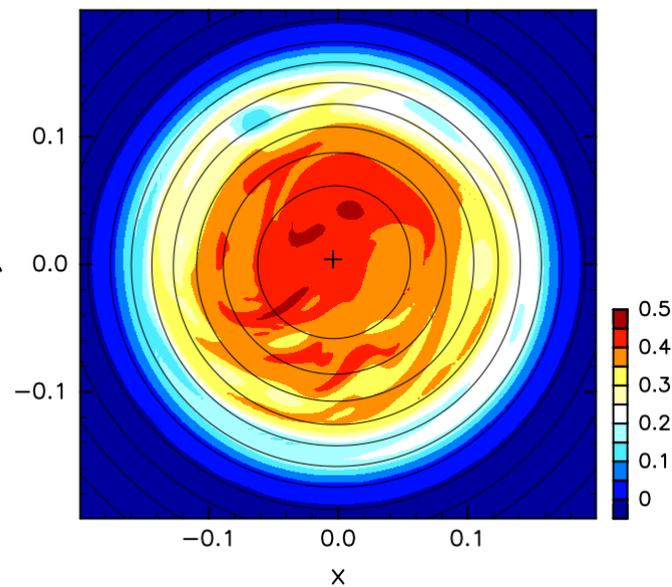
t=800



t=1200



t=1600

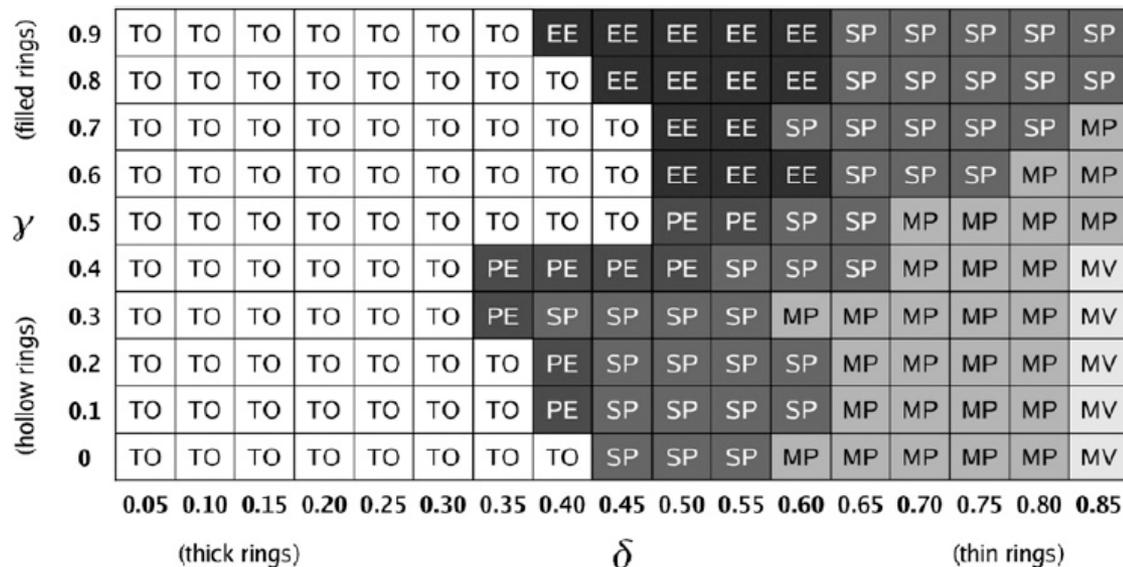
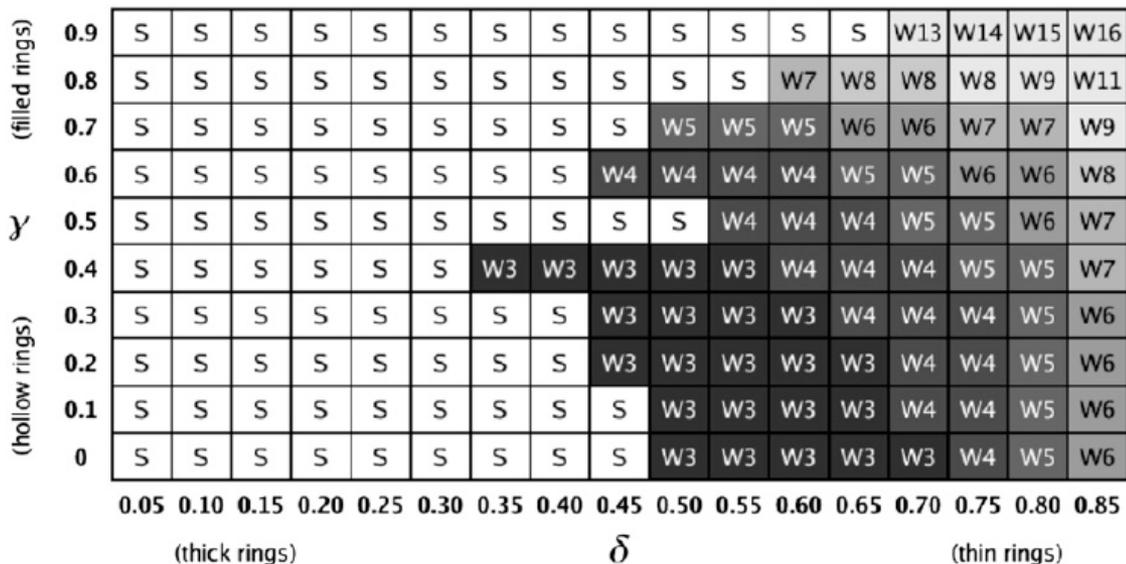


# 議論：Haishenの波数 1 移動性擾乱

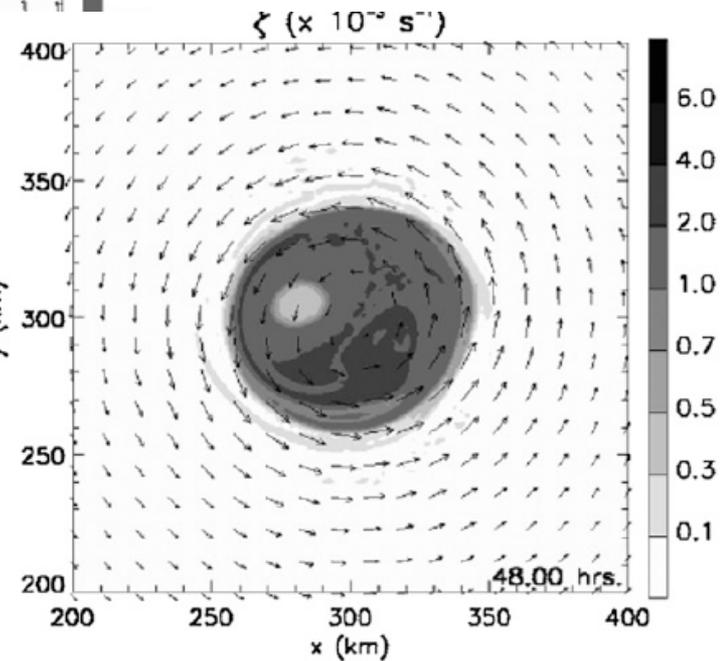
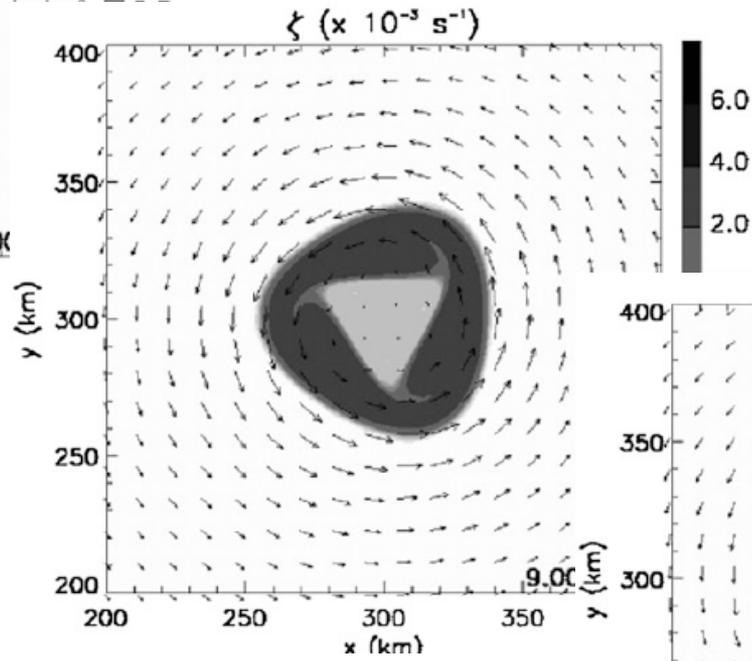
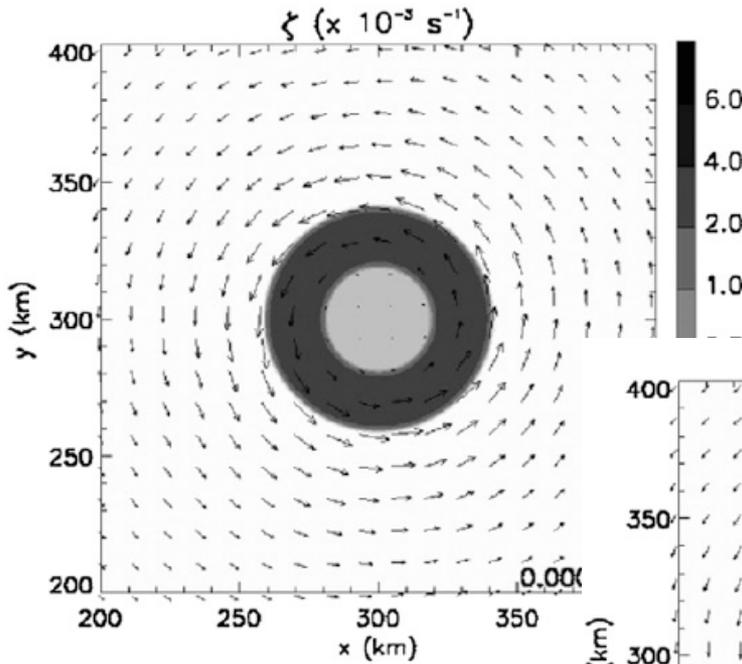
- Nolan & Montgomery (2000)のKEが線形に増加する緩やかな順圧不安定で解釈できる。
  - 伝播角速度  $\sim$  角速度ピーク（中心付近では伝播：渦ロスビー波）
  - 目の中の回転角速度の増加が定量的に説明可能
  - （ただし，他に軸対称輸送もあるはずだが，鉛直も含む2次循環の見積もりは困難。）
- この不安定は渦度を再分配  $\Rightarrow$  渦がコンパクトになって中心気圧の低下が起こり得る。（目が縮むのは不安定とは別）
- 様々な台風の目の衛星画像からは，波数 1 擾乱はとてもよくあるように見える。その多くがこのメカニズムで説明できそうに思えるが，これまでそのような議論はない。
- NM00, Nolan et al 2001以後の研究
  - 角運動量輸送の話はなく，不安定文脈での研究もない模様
  - 渦ロスビー波，トロコイド運動がらみので引用ばかり
  - Marks et al (2008): Hurricane Hugoの航空機観測による渦中心の周期的振動を報告し，周期を議論

# Hendrics et al. (2009)の再解釈

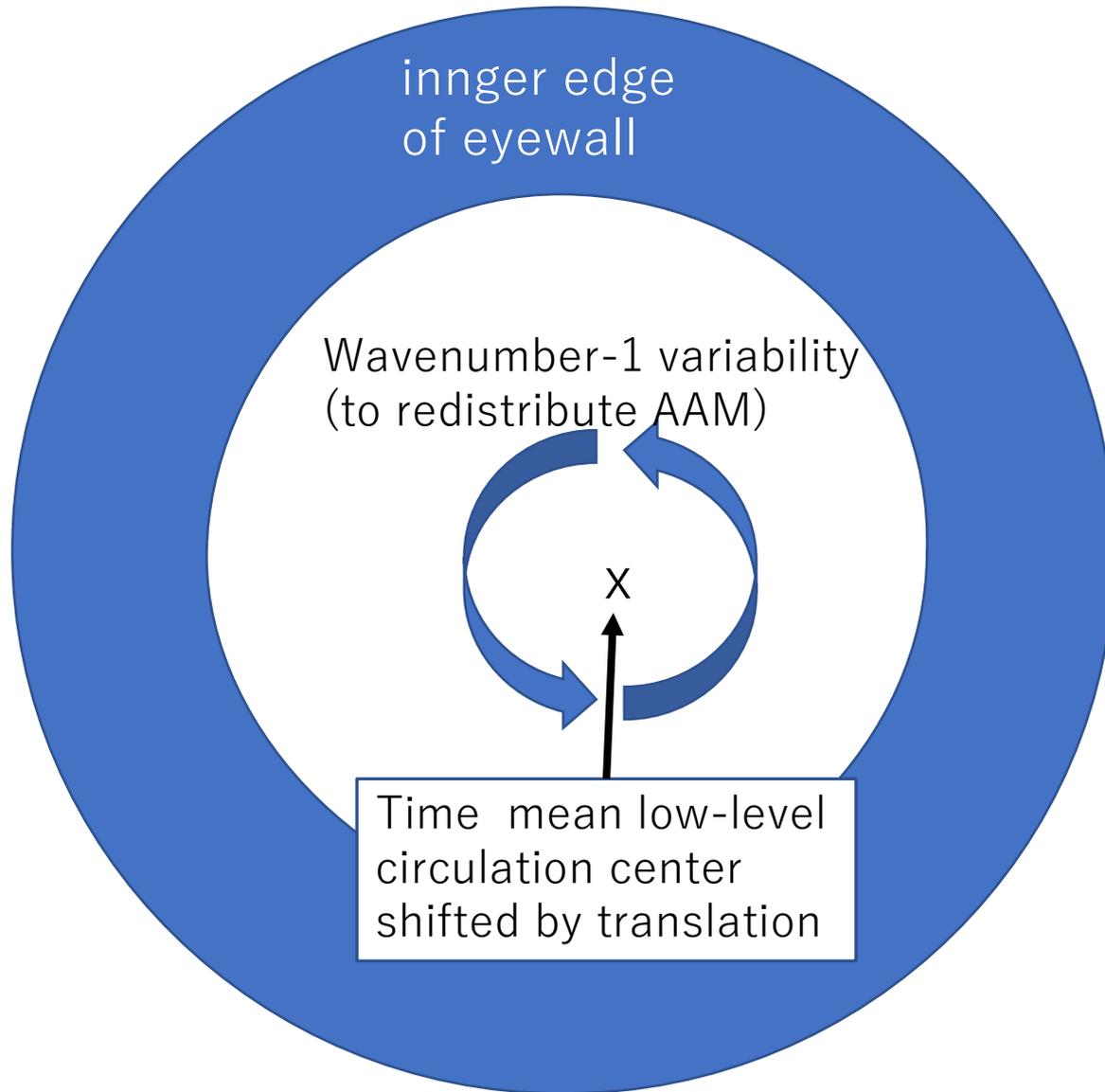
- 台風理解のため，リング状渦の長期の振る舞いを研究
  - 数値実験は微小擾乱で（指数関数的不安定想定）
- 著者が“slow monopole” (SP) と呼ぶケースが多数：高波数指数関数的成長成熟後に残った低渦度域がやがて排出される。
- 代数的成長不安定に似る：後期に起こるこの過程が本質的と言える場合が多いのでは？



# Hendrics et al. (2009) SP事例



# 目の中の波数 1 擾乱まとめ



# まとめ

- 30秒可視観測(分解能 $\sim 0.5\text{km}$ )を用いると、台風の目の中、壁雲、上層雲の動きから詳細な風速分布とその時間発展が導ける。
- 理論的考察を組み合わせることで、これまでに以下が明らかになった／示唆された。
  - 台風移動による下層風の非対称化
  - 内部コアの強度構造変動要因の検出（代数的に成長する波数 1 不安定と角運動量輸送、目の中での混合と輸送に伴う下層での直接加速：**いずれも事例を超えて重要？**）
  - （紹介せず）目の中、壁雲内側、目の外上層でのentrainment, detrainmentと乱流輸送、二次循環の構造。
- 以上はたった1ケース、8hの観測による。**30秒観測のポテンシャルは非常に大。**

## その後の発展 (by塚田大河; submitted)

- [手法開発] 2.5分観測でも風速分布が結構求まるように。
- [科学面] 波数 1 擾乱はやはり多くのケースで存在→やはり恐らく重要