

AFES-Venus GCM を用いた金星大気中層に 見られる総観規模渦の考察

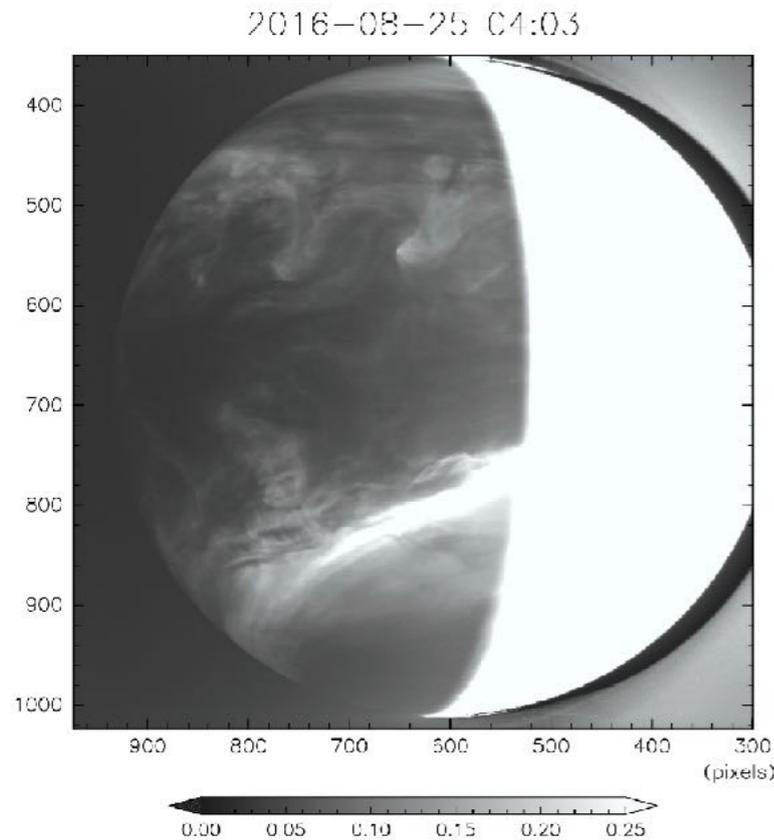
今井 正堯 (東大 天文学教育研究センター)

mstk-a.imai@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

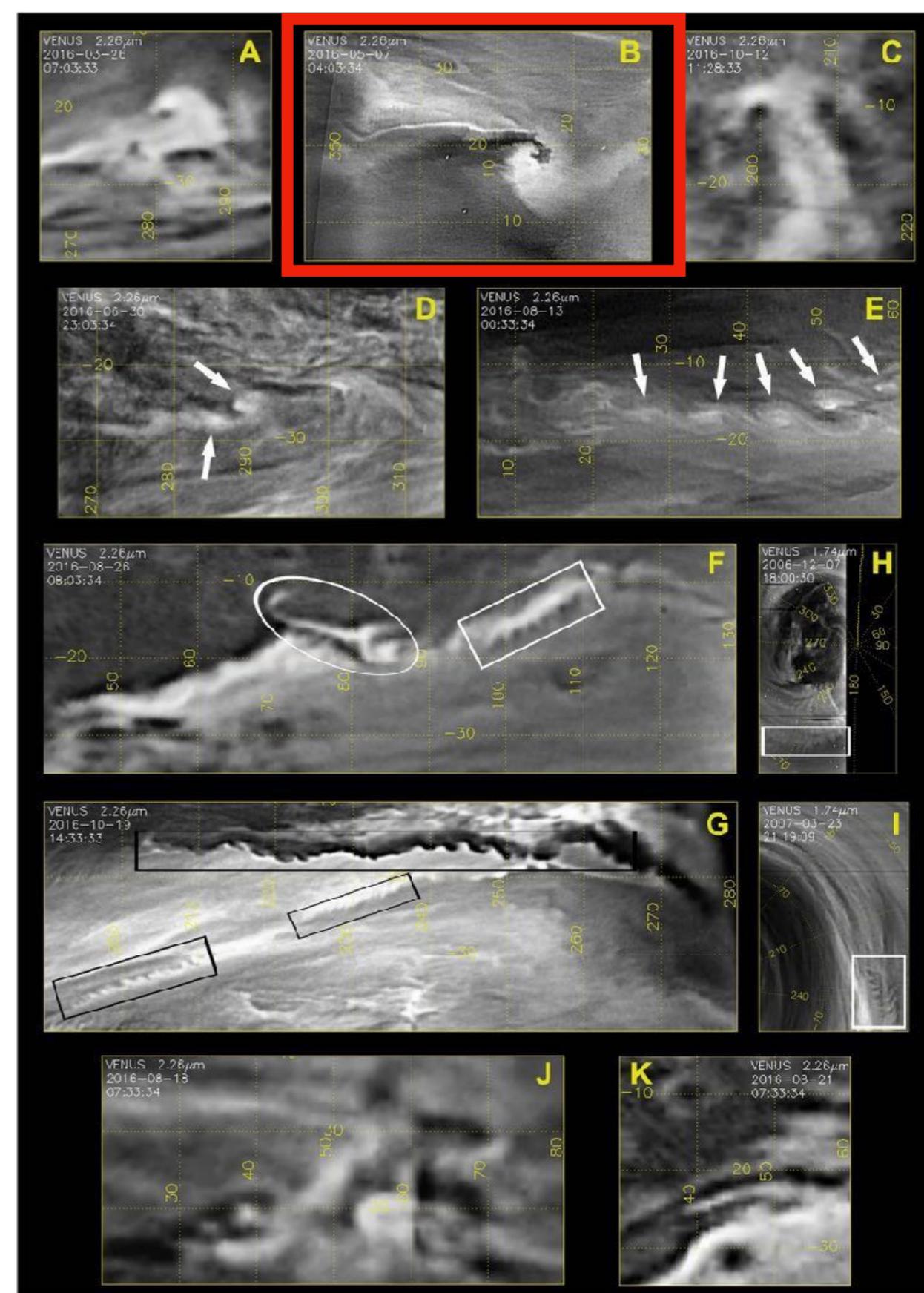
共同研究者: 高木 征弘, 安藤 紘基, 佐川 英夫 (京産大)

1. Introduction

- 従来, 金星の下部・中部雲層は力学的にquietと考えられていた
- しかし, 近年のIR2/あかつき観測やGCM研究によって~50 kmの赤道ジェット*1, 2 や, 100 – 1000 kmの vorticies, waves, discontinuous といった特徴的な模様*3 が相次いで発見され動的な姿も明らかに
- ~1000 km size/~2500 km spacingの渦列 (下図) については雲追跡による風速データを用いた解析によって順圧不安定による形成が示唆されている*4



[Horinouchi et al. (2023)]



[Peralta et al., 2018]

*1: Horinouchi et al. (2017b); *2: Takagi et al. (2023)
 *3 Peralta et al. (2018); *4: Horinouchi et al. (2023)

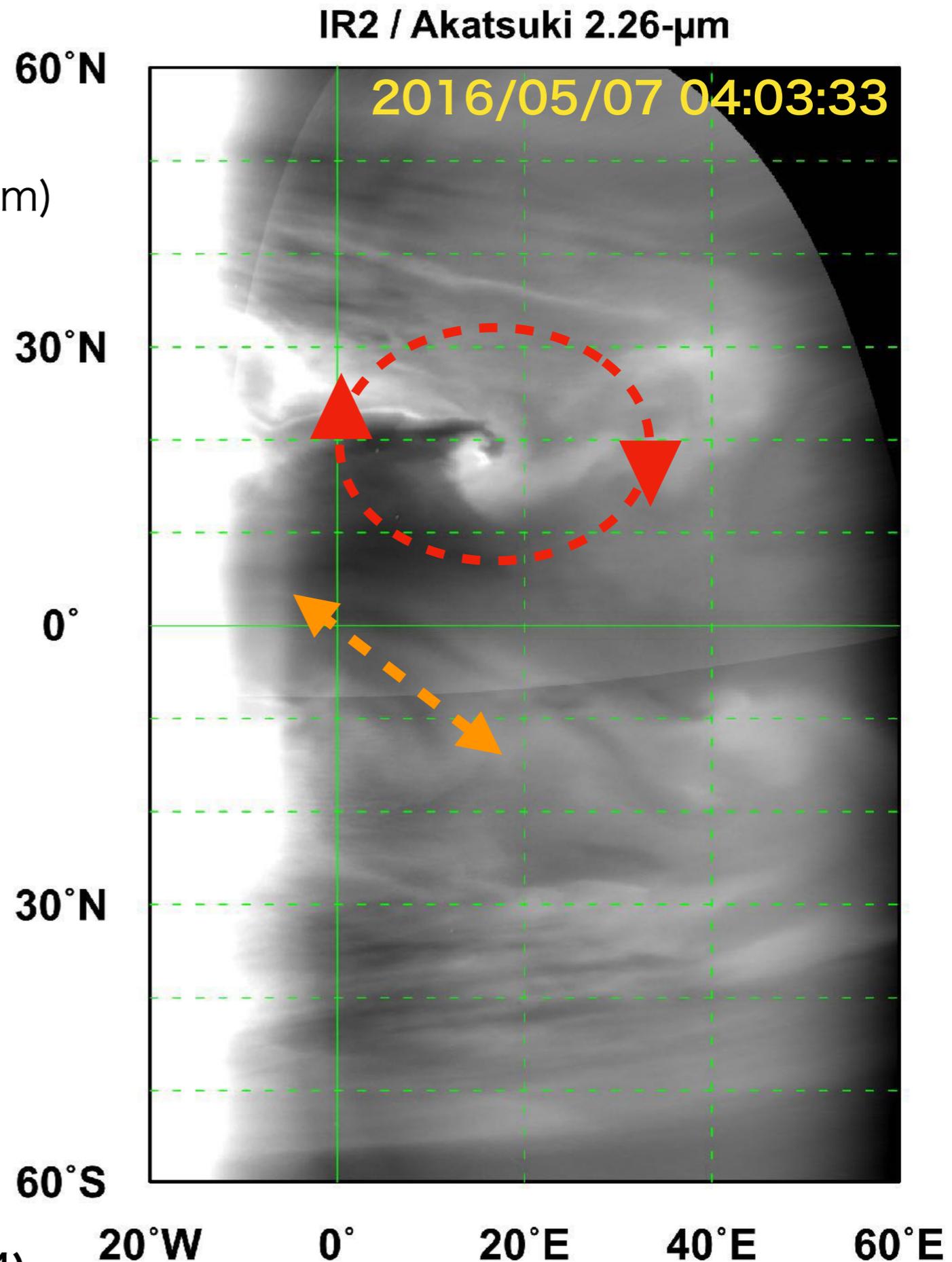
1. Introduction

- 本研究では, IR2/あかつき観測画像に見られた”総観規模”の渦構造に着目
- 2.26 μm (CO₂窓領域) はLower (48–51 km) からMiddle (51–57 km) cloud layerの光学的厚さを反映*5
 $\Delta\tau \sim 25\text{--}40 @ 1.7, 2.3 \mu\text{m}^*6$
- 黒: 雲が厚い (下層からの放射を遮蔽)
白: 雲が薄い
- 南北20°帯に経度幅 ~40°の渦状構造
- 低気圧性 (金星: 時計回り) の渦で南北非対称
- 渦の寿命は不明
- 赤道上に斜めに伸びる雲構造あり

<研究目的>

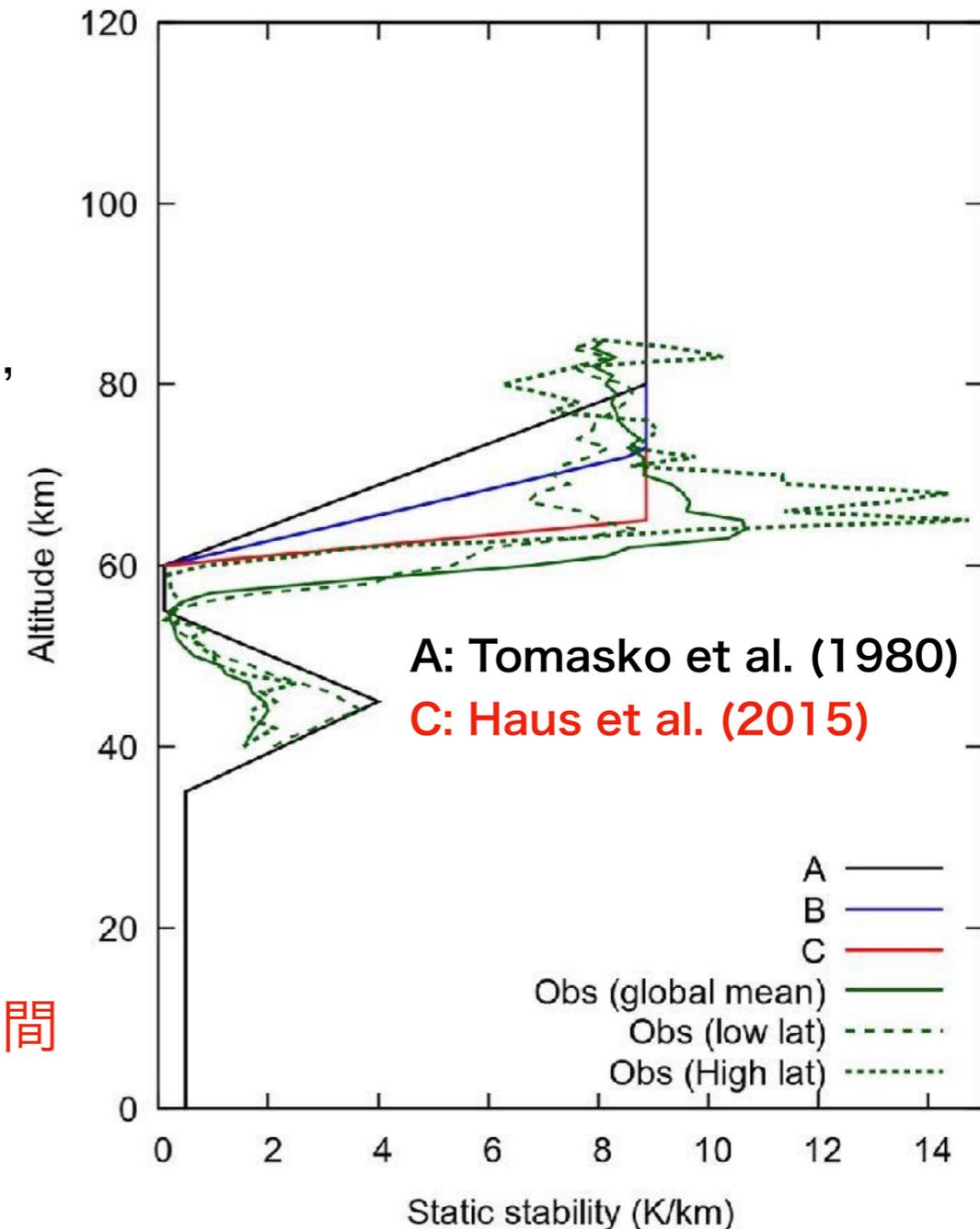
- 総観規模渦との関係が深そうな現象を大循環モデル (GCM) 内でも発見
- 雲構造やその変化の背景にある大気運動の詳細を調査

*5: Carlson et al. (1991); *6: Haus et al. (2014)



2. Model (AFES-Venus GCM)

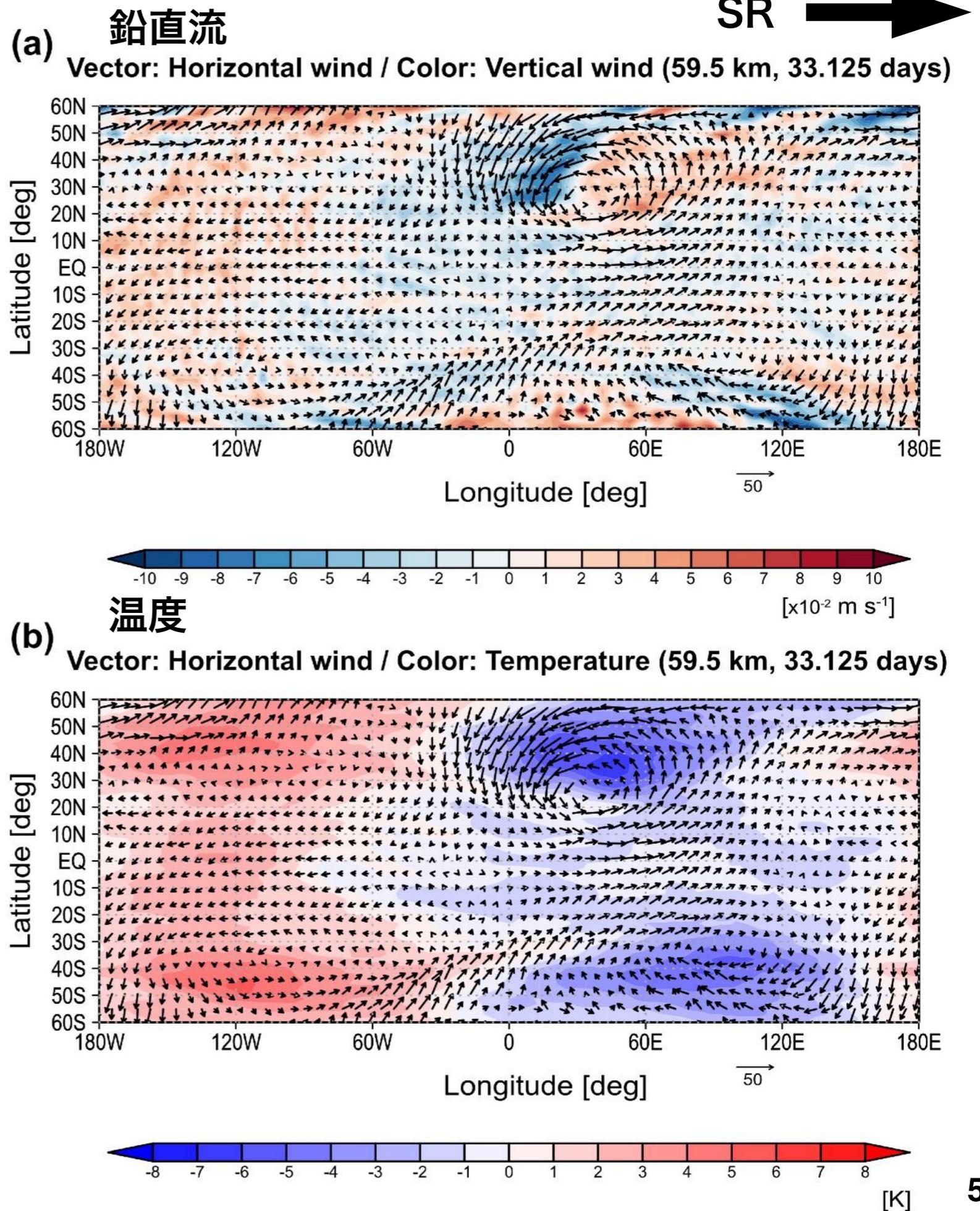
- σ 座標系, Altitude: 0–120 km (120 layers), T42 (128 × 64 horizontal points)
- 地形無し
- 水平渦拡散: 緩和時間~1日の2次超粘性
鉛直渦拡散: 0.015 m²/s const.
- 対流調整 (温度のみ), 最下層にレイリー摩擦を適用し
地表摩擦による運動量の減衰を再現
- 太陽加熱の3次元分布はHaus et al. (2015) に基づき,
90 km以上で加熱を無視 (数値的不安定を回避)
Suzuki et al. [2022] におけるCase Cを採用
- 赤外放射: ニュートン法を採用
(緩和時間はCrisp (1989) を参照)
- 初期状態: 70 kmで100 m/sのSRを想定し
温度分布は傾度風バランスで決定
- **GCM内では金星の自転方向が実際とは逆の東向き
31地球年分を積分, 準平衡状態に達した最後の117日間
(1金星日) のデータを解析**



[Suzuki et al., 2022]

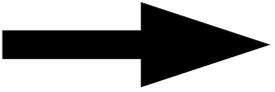
3. Results: 水平構造

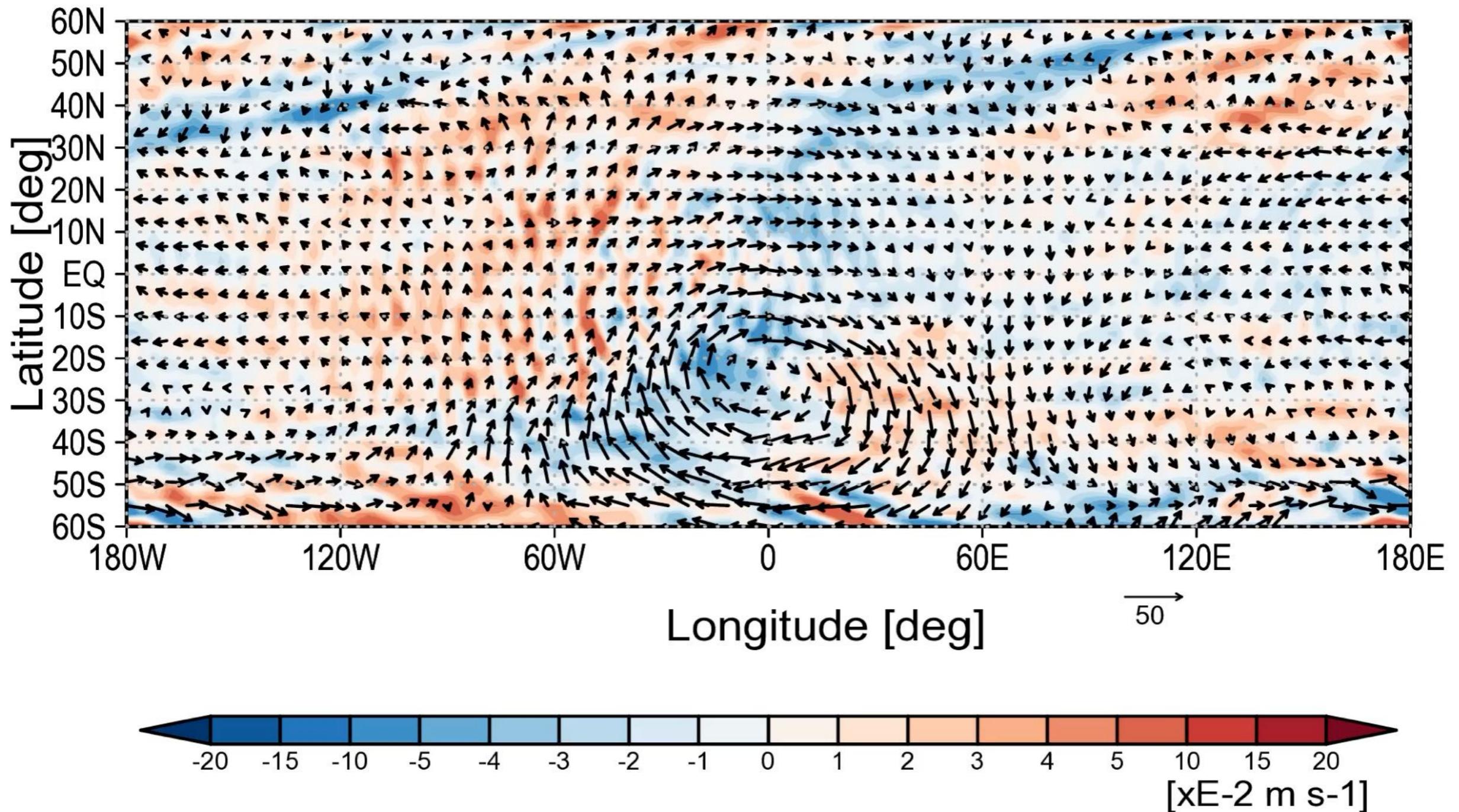
- 高度~55-60 kmに片側半球にのみ存在する渦状構造を発見
- 北緯30°に渦中心, 経度幅は~60° (東西スケール ~5500 km)
- 渦状の構造、水平スケールなどが観測と定性的に類似
- 低気圧性の渦 (GCM内北半球で反時計回り)
- 時間とともに消長、10-20日間程度の寿命が見えている
- 渦は南北非対称、南北半球が入れ替わるように発生 (後述, 次項アニメーション)



3. Results: 水平構造アニメーション

W & (U,V) z=60 T=360 (14.958 days)

SR 

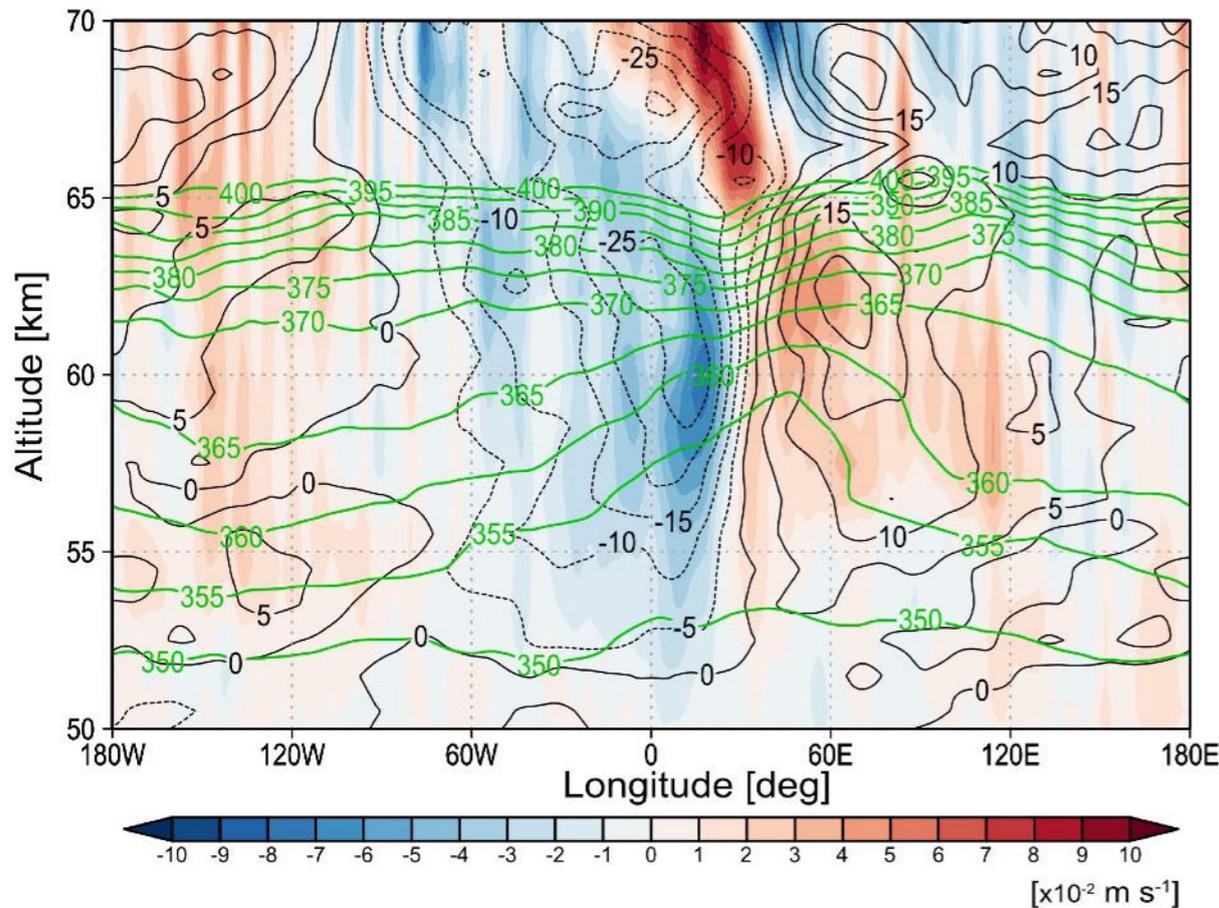


3. Results: 鉛直構造

- 渦の構造は53kmから65kmの範囲に広がっている
- 渦に伴う南北風: ~ 20 m/s, 鉛直風: 30 mm/s
- 渦の東側 (30°E – 90°E) には極向きの風と上昇流, 渦の西側 (30°W – 30°E) には赤道向きの風と下降流が存在
- 等圧面が 40°E 付近の53~62kmで上昇しており、渦の下層で負の温度偏差

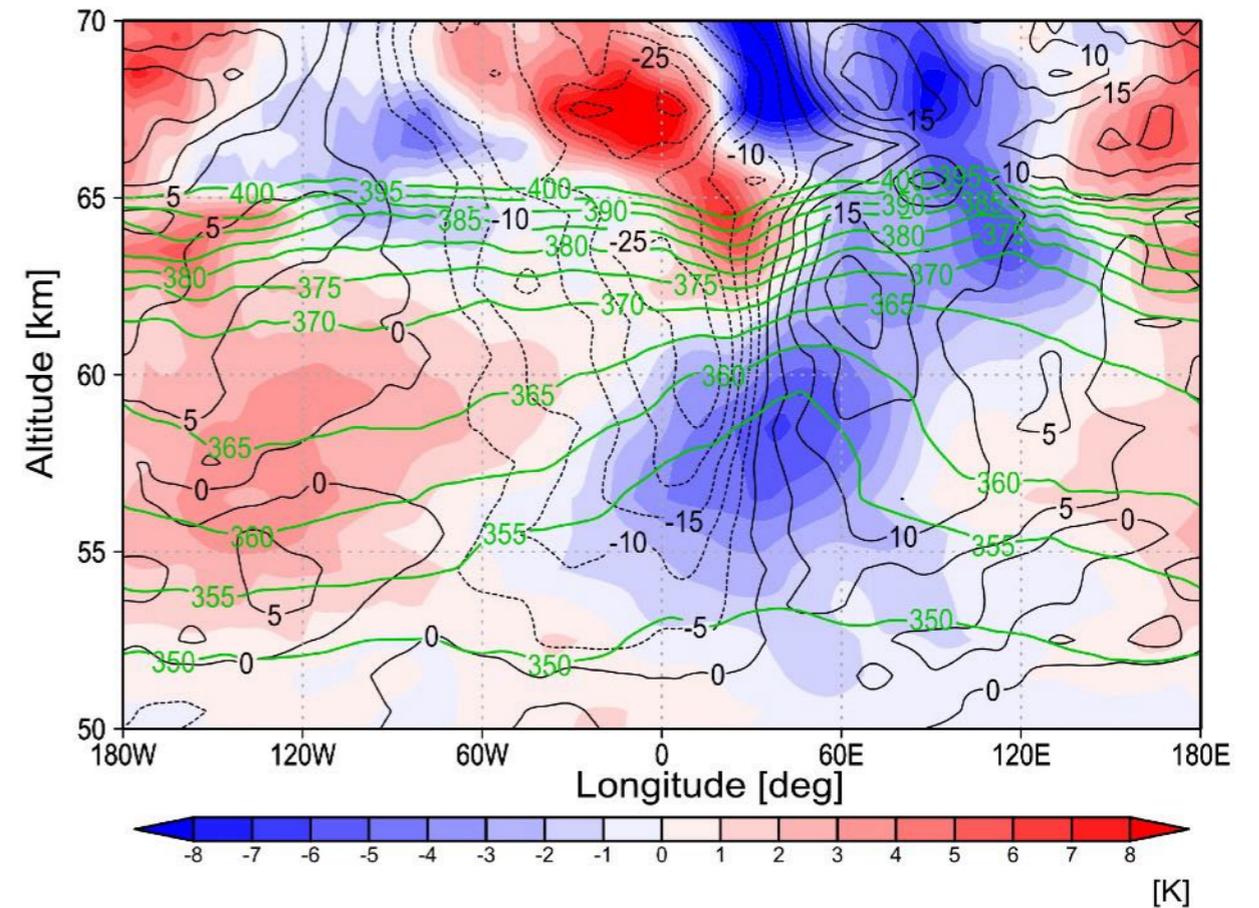
鉛直流

(a) Black: Meridional wind / Green: Potential temperature / Color: Vertical wind (30°N , 33.125 days)



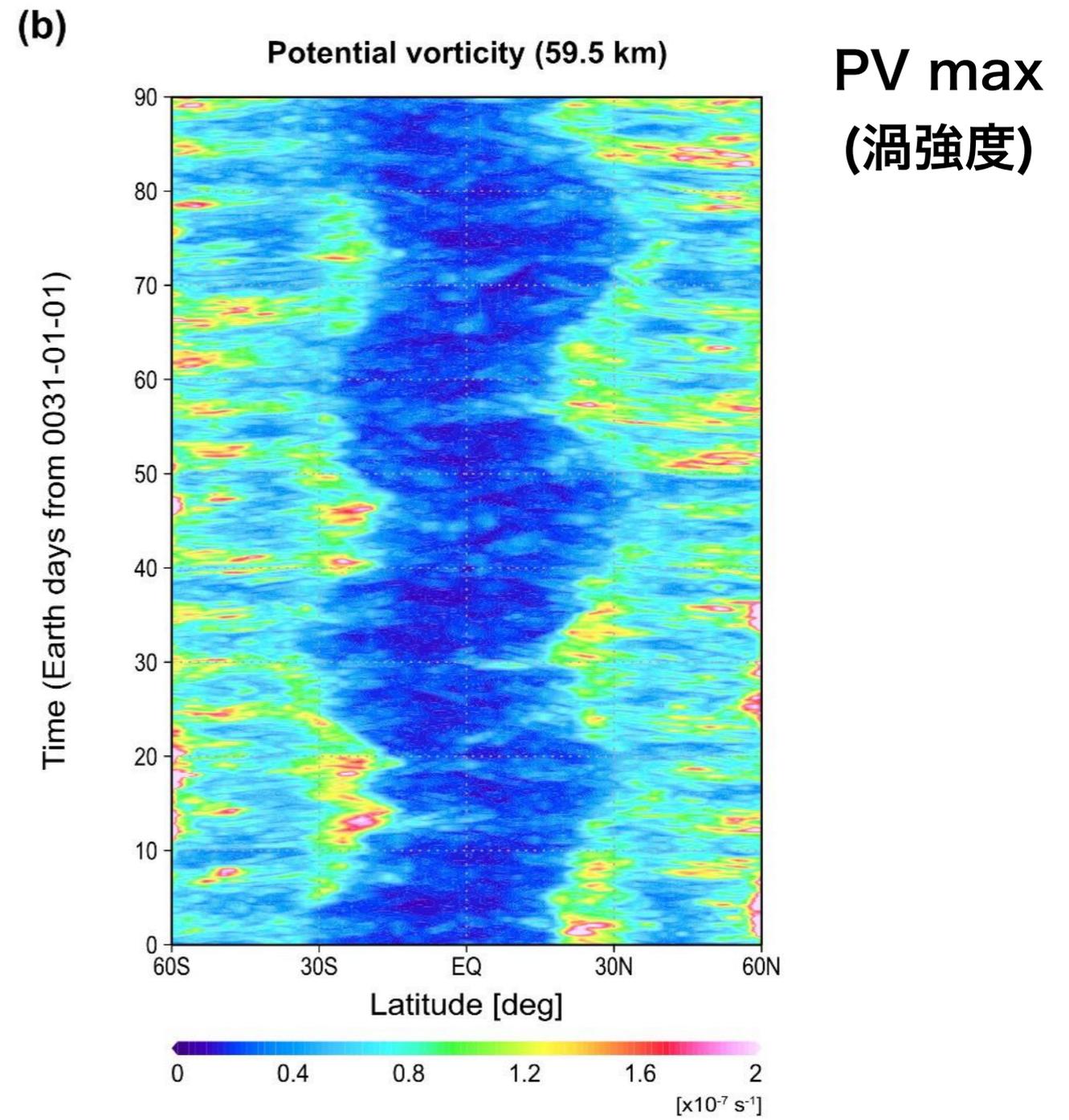
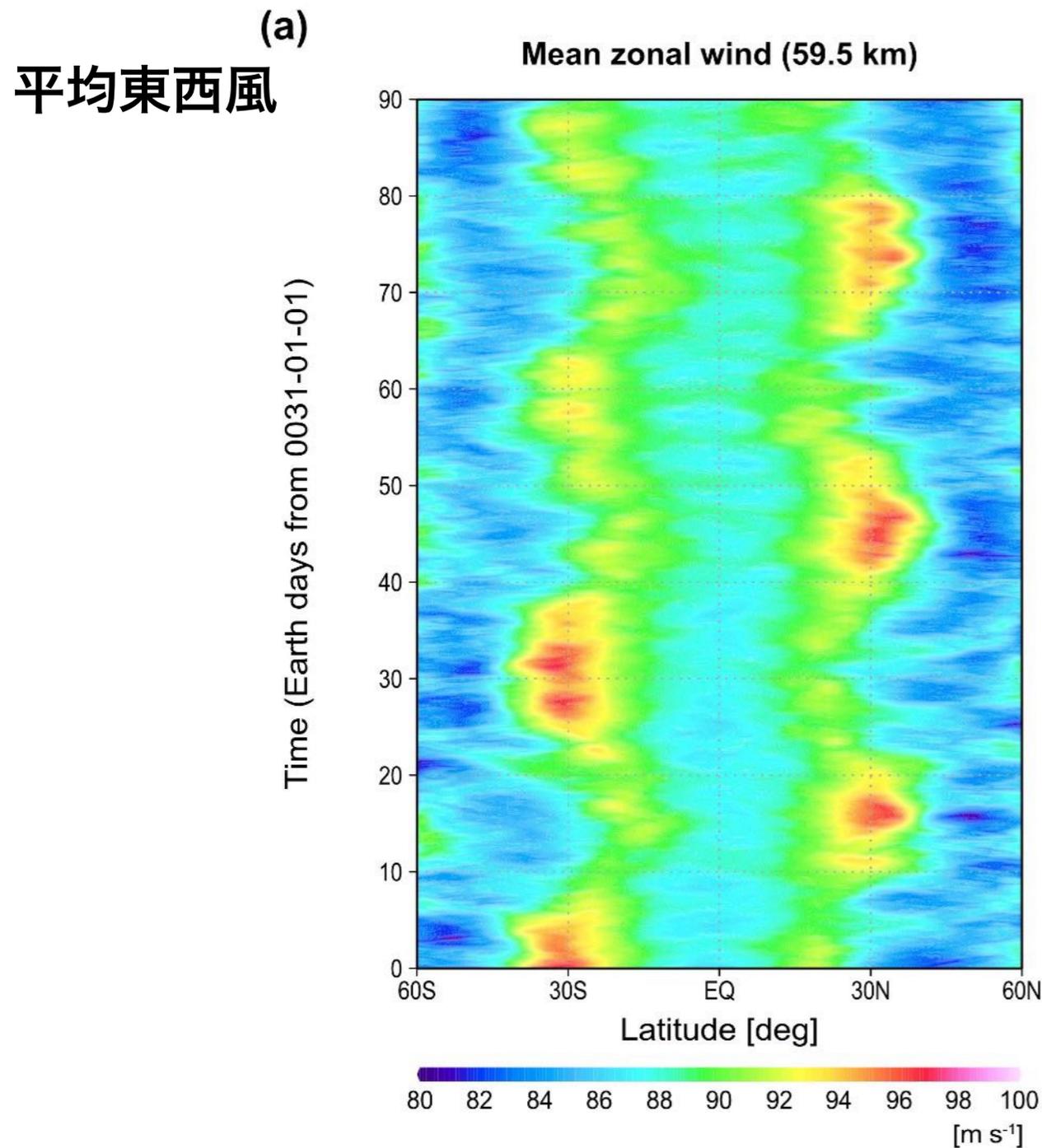
温度

(b) Black: Meridional wind / Green: Potential temperature / Color: Temperature (30°N , 33.125 days)



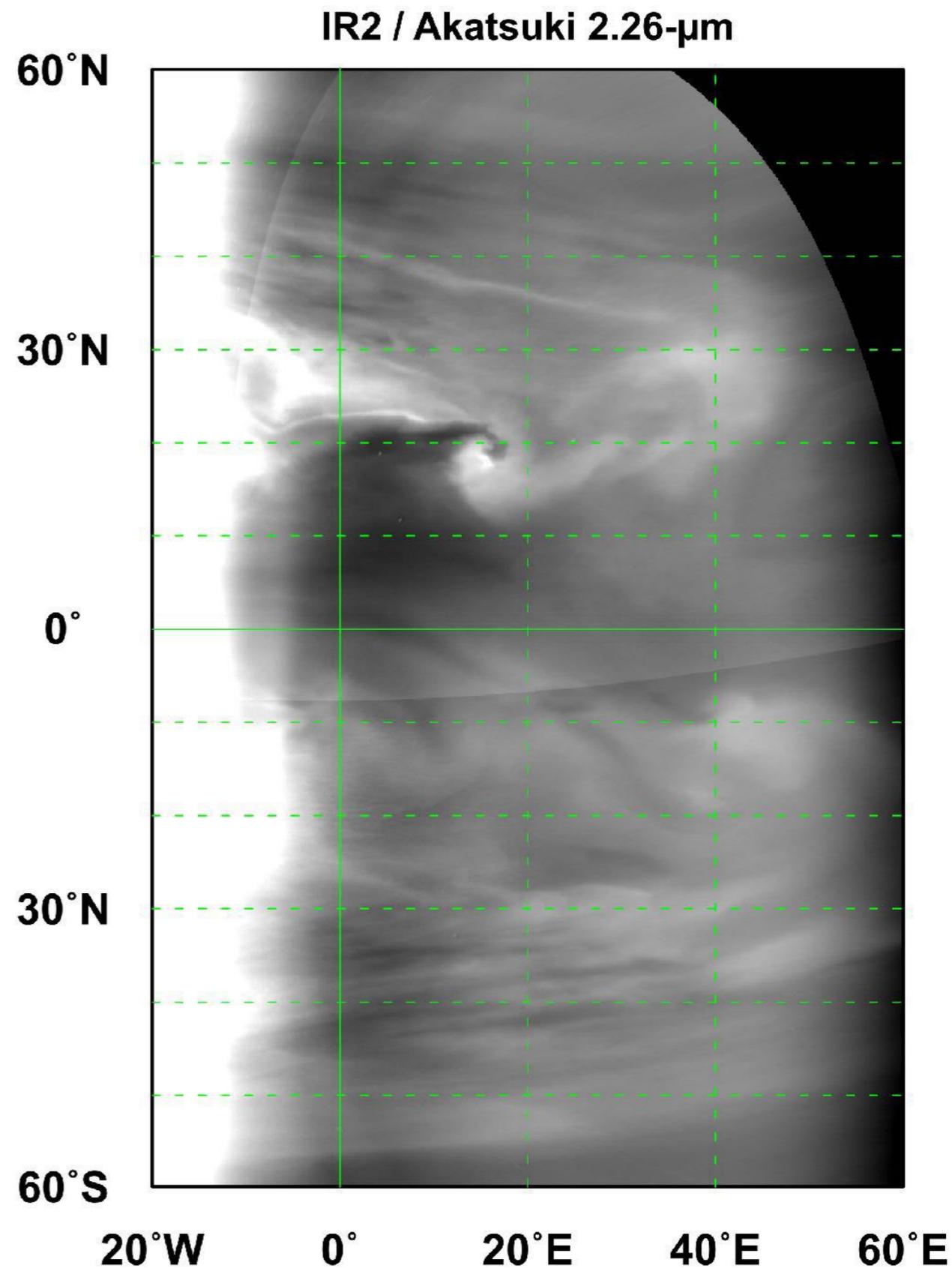
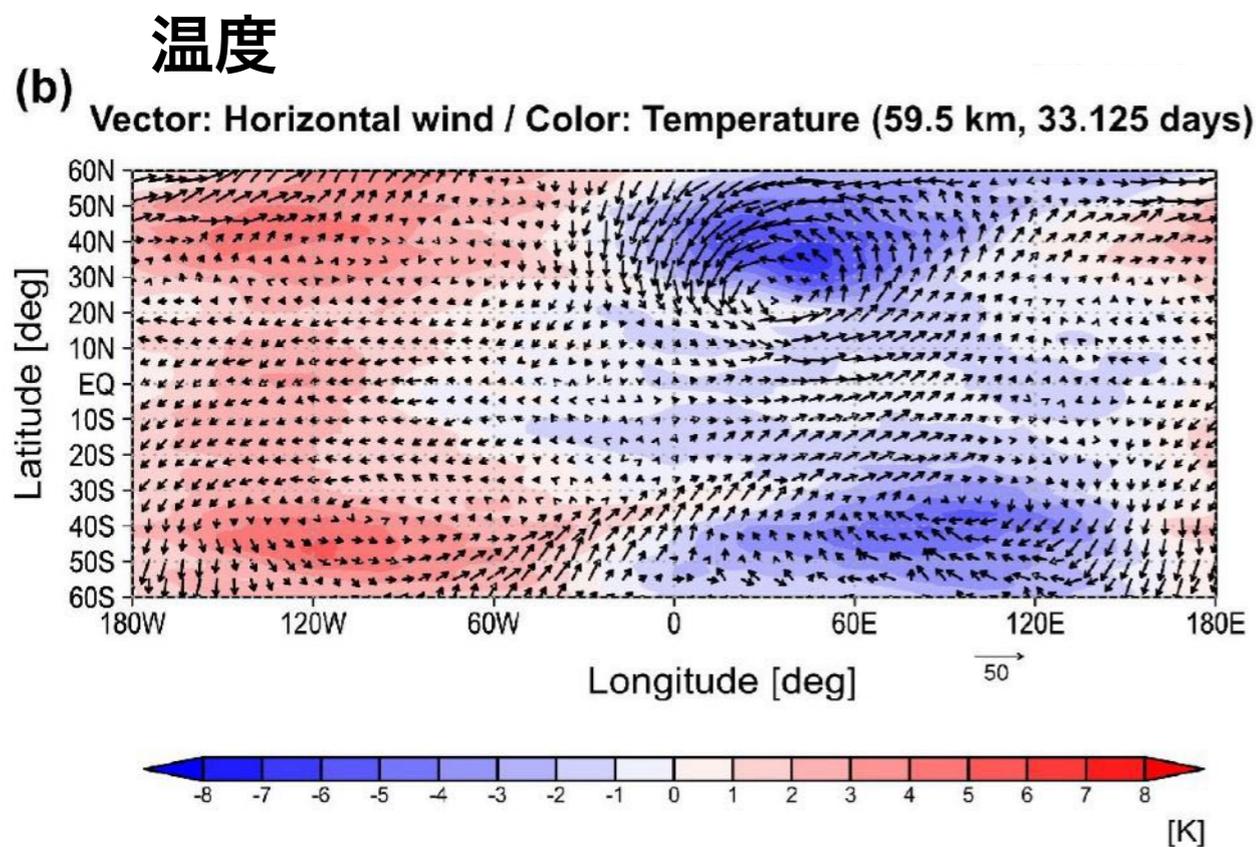
3. Results: 時間変化

- GCM内では総観規模渦は30日程度の時間スケールで準周期的に現れては消えている
- 平均東西風 (中緯度ジェット) も同緯度帯にて準周期的に変動 (存在する南北半球は逆)
- 渦はすべて低気圧性で毎回ほぼ同じ構造, 渦の時間変化と中緯度ジェットの関連を示唆



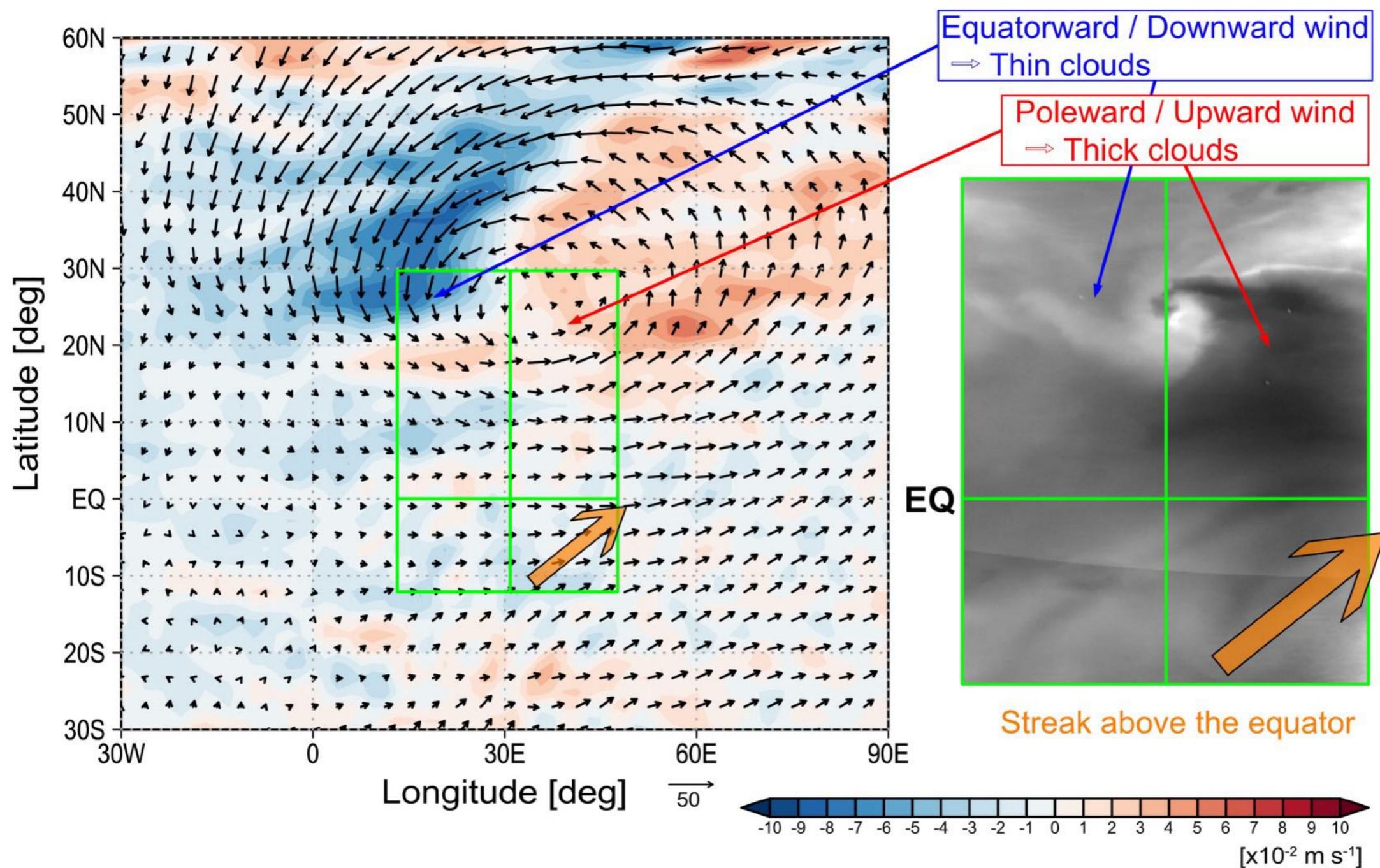
4. Discussion: IR2雲構造との比較

- 南半球では北半球に比べて雲のコントラストが低く，鉛直流も弱い特徴と一致
- 渦全体が負の温度偏差の中に存在し，温度偏差の南北非対称性も弱い
= 温度はコントラストの主要な原因ではない
- IR2の渦模様は，東西に伸びる帯状構造（白）が水平風によって巻き込まれて形成されうる
- 一方で，鉛直流によって特に東西方向のコントラストが増強されたと可能性がある



4. Discussion: IR2雲構造との比較

- 渦の東西で, 上昇流 (下降流) 領域がIR2画像の暗い (明るい) 領域に対応
- IR2の渦模様は, 東西に伸びる帯状構造 (白) が水平風に巻き込まれて形成されうる一方で, 鉛直流による雲形成が渦周辺のコントラストを強化している可能性を示唆
- 赤道域では薄く白い模様が南東から北西に伸びており, GCMの赤道越えの風と良い対応



モデルに合わせ
東西反転済み

4. Discussion: 上昇流による光学的厚さの変化検証

- 空気塊が等温位面に沿って移動する過程で発生する温度変化を調べる
- 高度60 kmの空気塊が南北流 v' に移流され、渦中心緯度 30°N を挟んで $25^\circ\text{N} \rightarrow 35^\circ\text{N}$ に移動した場合

惑星半径 $a = 6051.8 \text{ km}$

南北風の典型値 $v' = 20 \text{ m/s}$

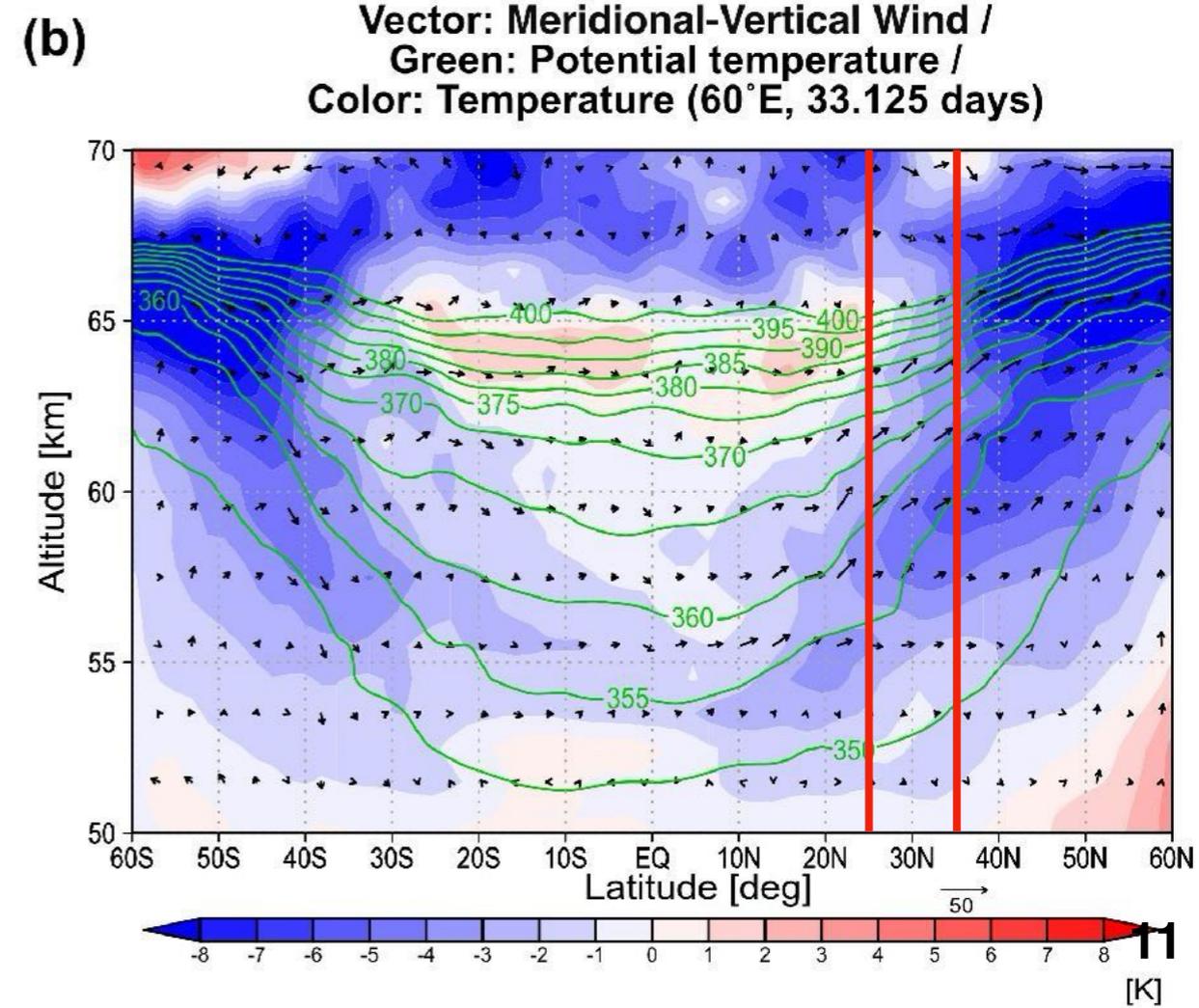
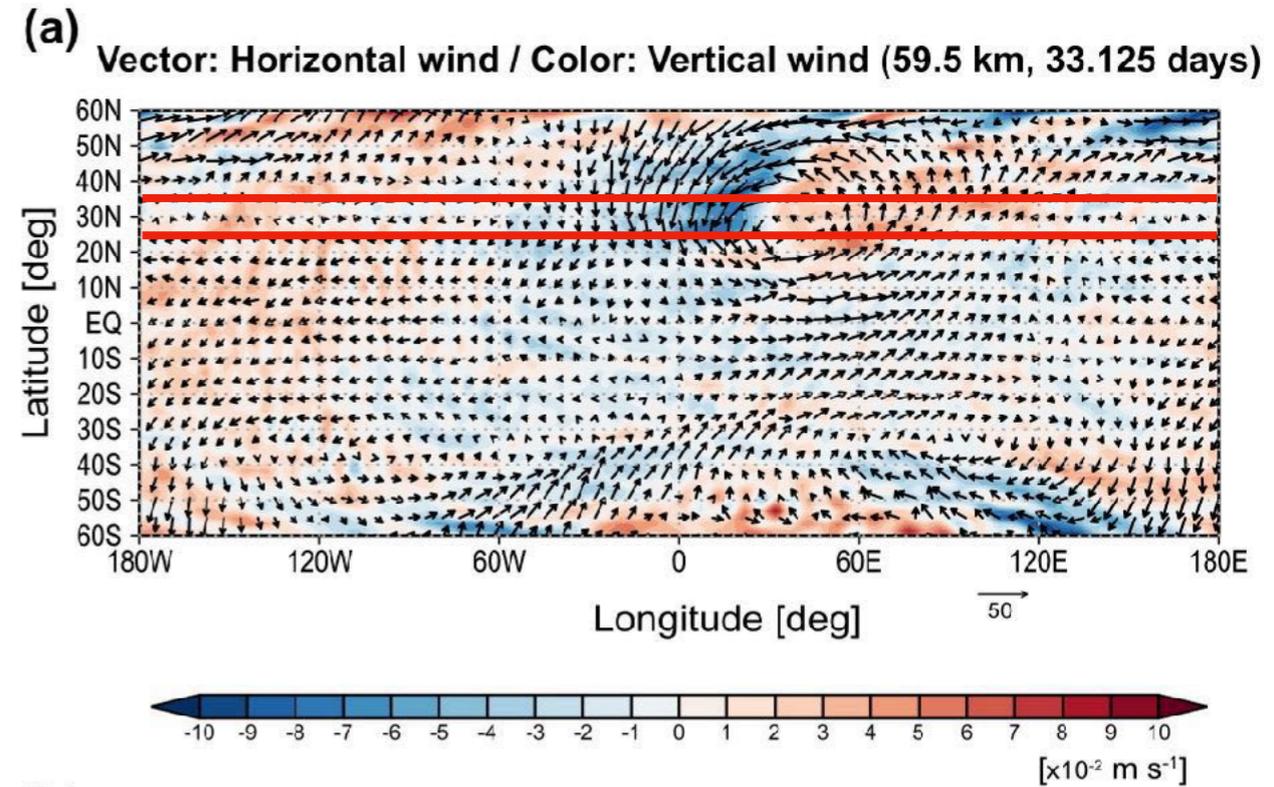
とすると、の空気塊の移動に必要な時間は $\Delta t \sim 53300 \text{ s}$ (= **0.62 day**)

- 鉛直風の典型値 $w' = 0.030 \text{ m/s}$ とすると、 $\Delta z = w' * \Delta t \sim 1600 \text{ m}$ となり、Fig.11b の60 kmにおいて $25^\circ\text{N} \rightarrow 35^\circ\text{N}$ の上昇とも整合的

- 上記 Δt を用いて、空気塊が経験する温度低下を評価

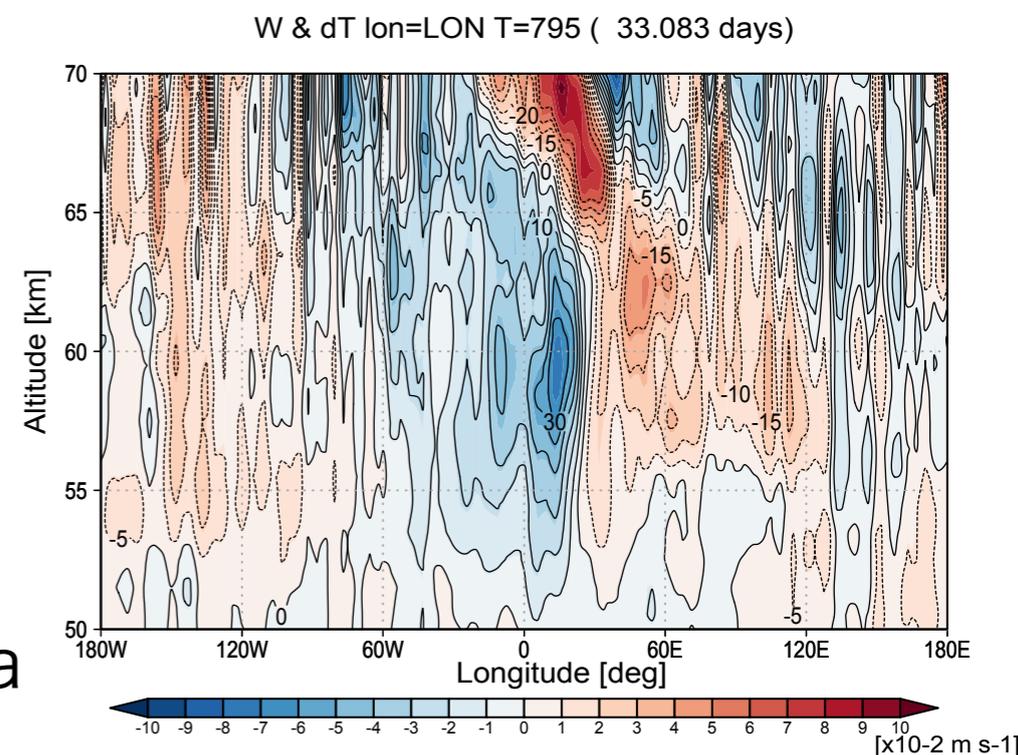
$$\Delta T = -g/C_p * w' * \Delta t = -14.1 \text{ K}$$

(AFESの設定より $g = 8.87$, $C_p = 1000$)



4. 光学的厚さの変化検証 (続き)

- 60 kmで見ると、45°Eで温度低下量が最大 (-15.8 K @ $w' = 0.033$ m/s)
- 60 km, 45°E 地点の気温は262.3 K
- $P_{sat}(262.3 \text{ K})$ の飽和蒸気圧は、 1.27×10^{-8} Pa
 $P_{sat}(246.5 \text{ K})$ の飽和蒸気圧は、 8.40×10^{-10} Pa



- 単位体積 (m^3) あたりの分子数は ($R = 8.31 \text{ Pa} \cdot m^3 / K / mol$)

$n = P_{sat} / R / T$ より

$n1 = 5.83 \times 10^{-12} \text{ mol} / m^3$

$n2 = 4.11 \times 10^{-13} \text{ mol} / m^3$

- $\Delta n = n1 - n2 = 5.42 \times 10^{-12} \text{ mol} / m^3$
 硫酸のモル質量 98.079 g/mol
 雲の硫酸質量濃度85% (モル濃度 51%; Hashimoto and Abe, 2001) を仮定すると
 雲の増加質量は
 $\Delta m = 3.32 \times 10^{-8} \text{ g} / m^3$ @ 高度 60 km

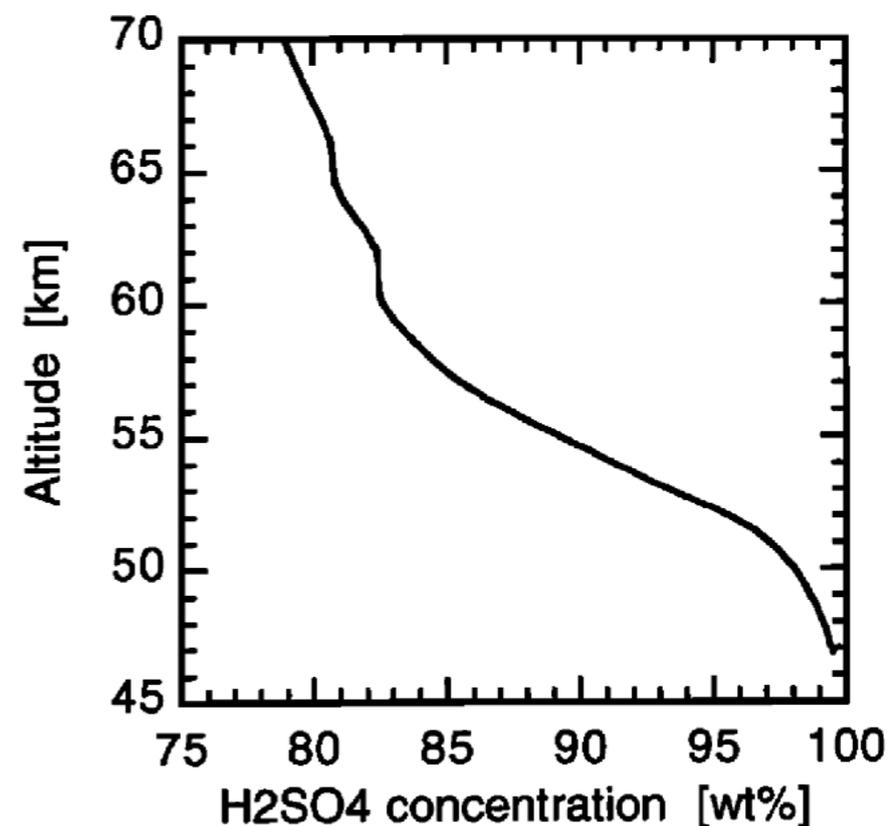


Figure 5. Concentration of H₂SO₄ in cloud particles.

4. 光学的厚さの変化検証 (続き)

- 下表より54.5–65.5 kmで Δm を鉛直積分して得られる新しくできた雲の質量
 $\Delta M = 5.73 \times 10^{-3} \text{ g/m}^2$
- Mode 2 粒子の粒径 (半径) 1.0 μm , above 57 km (variance 1.29)
 Mode 3 粒子の粒径 (半径) $r = 3.65 \mu\text{m}$ (variance 1.28) [Pollack et al., 1993]
 今回は簡単のため発生する雲粒を全てMode 2 or 3とし、varianceは無視
- Sulfuric acid density : $\rho = 1.84 \times 10^6 \text{ g/m}^3$

ケース1	質量濃度85% = モル濃度51% (モデルの結果を素直に計算したケース、温度 300 K 想定)										
	lev	Wdash	dT	T1	T2	Psat1	Psat2	n1	n2	Δm	integ
	[m]	[m/s]	[K]	[K]	[K]	[Pa]	[Pa]	[mol/m ³]	[mol/m ³]	[g/m ³]	[g/m ²]
	50000	-0.0046599	2.20341986	341.478	343.68142	8.31E-03	1.01E-02	2.93E-06	3.54E-06	-7.08E-05	
	51000	-0.0057605	2.72385172	333.839	336.562852	4.11E-03	5.30E-03	1.48E-06	1.90E-06	-4.79E-05	
	52000	-0.0042642	2.01630403	325.603	327.619304	1.85E-03	2.25E-03	6.82E-07	8.28E-07	-1.68E-05	
	53000	-0.0009028	0.42690042	318.165	318.5919	8.61E-04	9.00E-04	3.26E-07	3.40E-07	-1.67E-06	
	54000	0.00277001	-1.3097966	310.986	309.676203	3.97E-04	3.43E-04	1.53E-07	1.33E-07	2.34E-06	
	55000	0.00883521	-4.1777207	304.114	299.936279	1.82E-04	1.11E-04	7.20E-08	4.45E-08	3.16E-06	
	56000	0.0127683	-6.0374786	295.426	289.388521	6.41E-05	2.98E-05	2.61E-08	1.24E-08	1.58E-06	
	57000	0.0133482	-6.3116838	287.154	280.842316	2.22E-05	9.47E-06	9.32E-09	4.06E-09	6.07E-07	
	58000	0.018068	-8.5434367	278.368	269.824563	6.70E-06	1.92E-06	2.90E-09	8.57E-10	2.35E-07	
	59000	0.0270732	-12.801537	270.37	257.568463	2.09E-06	2.73E-07	9.29E-10	1.28E-10	9.24E-08	
	60000	0.0333789	-15.783181	262.302	246.518819	5.94E-07	3.93E-08	2.73E-10	1.92E-11	2.93E-08	
	61000	0.0416179	-19.678985	255.776	236.097015	2.02E-07	5.27E-09	9.51E-11	2.69E-12	1.07E-08	
	62000	0.0507527	-23.998366	251.047	227.048634	8.90E-08	7.83E-10	4.27E-11	4.15E-13	4.88E-09	
	63000	0.0489897	-23.164733	245.224	222.059267	3.09E-08	2.55E-10	1.52E-11	1.38E-13	1.74E-09	
	64000	0.0438653	-20.741666	241.564	220.822334	1.55E-08	1.91E-10	7.71E-12	1.04E-13	8.78E-10	
	65000	0.0371915	-17.585966	240.29	222.704034	1.21E-08	2.96E-10	6.06E-12	1.60E-13	6.81E-10	5.73E-03

4. 光学的厚さの変化検証 (続き)

- **Case 1:** 54.5–65.5 kmの鉛直積分で得られる柱密度は、
 $\Delta M = 5.73 \times 10^{-3} \text{ g/m}^2$ からMode 3粒子の場合で計算して、
 $1.53 \times 10^3 \text{ 個/cm}^2 \Rightarrow \Delta \tau \sim 0.001$
- **Case 2:** 上昇流による温度変化が49.5–60.5 kmで起こった場合を考えると
 $\Delta M = 3.53 \text{ g/m}^2$ (下表)
- 高度49.5–60.5 kmの鉛直積分で得られる柱密度は、Mode 3粒子の場合で、
 $9.41 \times 10^5 \text{ 個/cm}^2$

ケース2	質量濃度100% = モル濃度100% (高度50 kmぐらいに渦があることを想定したケース、電波掩蔽でも100%を使用, 雲底 350 K)										
	lev	Wdash	dT	T1	T2	Psat1	Psat2	n1	n2	Δm	integ
	[m]	[m/s]	[K]	[K]	[K]	[Pa]	[Pa]	[mol/m ³]	[mol/m ³]	[g/m ³]	[g/m ²]
	50000	-0.0046599	-4.17772	341.478	337.30028	1.32E-01	9.02E-02	4.65E-05	3.22E-05	1.41E-03	
	51000	-0.0057605	-6.03746	333.839	327.80154	6.53E-02	3.65E-02	2.35E-05	1.34E-05	9.95E-04	
	52000	-0.0042642	-6.3117	325.603	319.2913	2.93E-02	1.54E-02	1.08E-05	5.80E-06	4.94E-04	
	53000	-0.0009028	-8.54342	318.165	309.62158	1.37E-02	5.41E-03	5.17E-06	2.10E-06	3.01E-04	
	54000	0.00277001	-12.8015	310.986	298.1845	6.30E-03	1.43E-03	2.44E-06	5.76E-07	1.83E-04	
	55000	0.00883521	-15.7832	304.114	288.3308	2.89E-03	4.12E-04	1.14E-06	1.72E-07	9.52E-05	
	56000	0.0127683	-19.679	295.426	275.747	1.02E-03	7.32E-05	4.15E-07	3.19E-08	3.75E-05	
	57000	0.0133482	-23.9984	287.154	263.1556	3.53E-04	1.08E-05	1.48E-07	4.95E-09	1.40E-05	
	58000	0.018068	-23.1647	278.368	255.2033	1.06E-04	2.91E-06	4.60E-08	1.37E-09	4.38E-06	
	59000	0.0270732	-20.7417	270.37	249.6283	3.31E-05	1.10E-06	1.48E-08	5.30E-10	1.39E-06	
	60000	0.0333789	-17.586	262.302	244.716	9.44E-06	4.47E-07	4.33E-09	2.20E-10	4.03E-07	3.53E+00

4. 光学的厚さの変化検証 (続き)

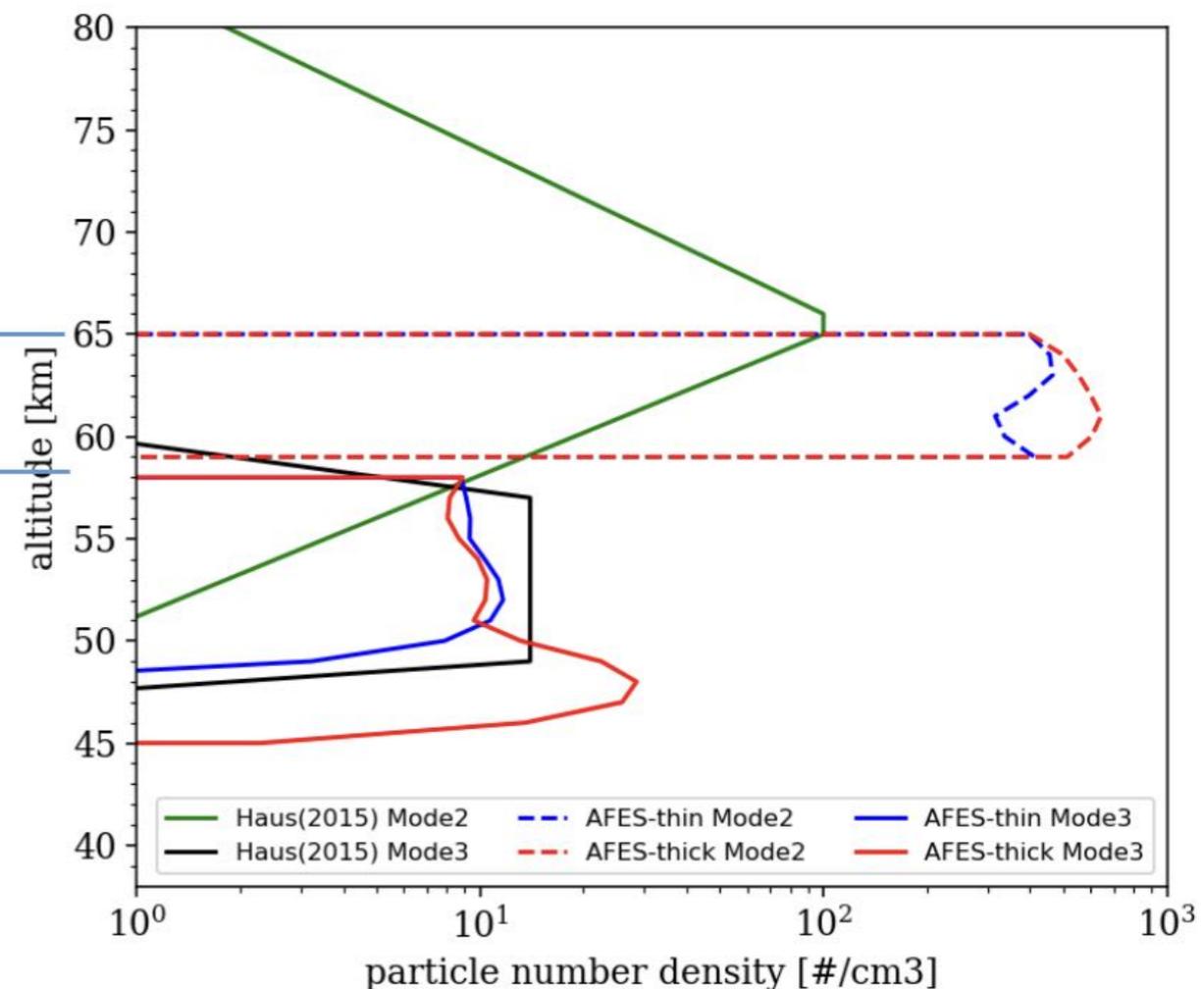
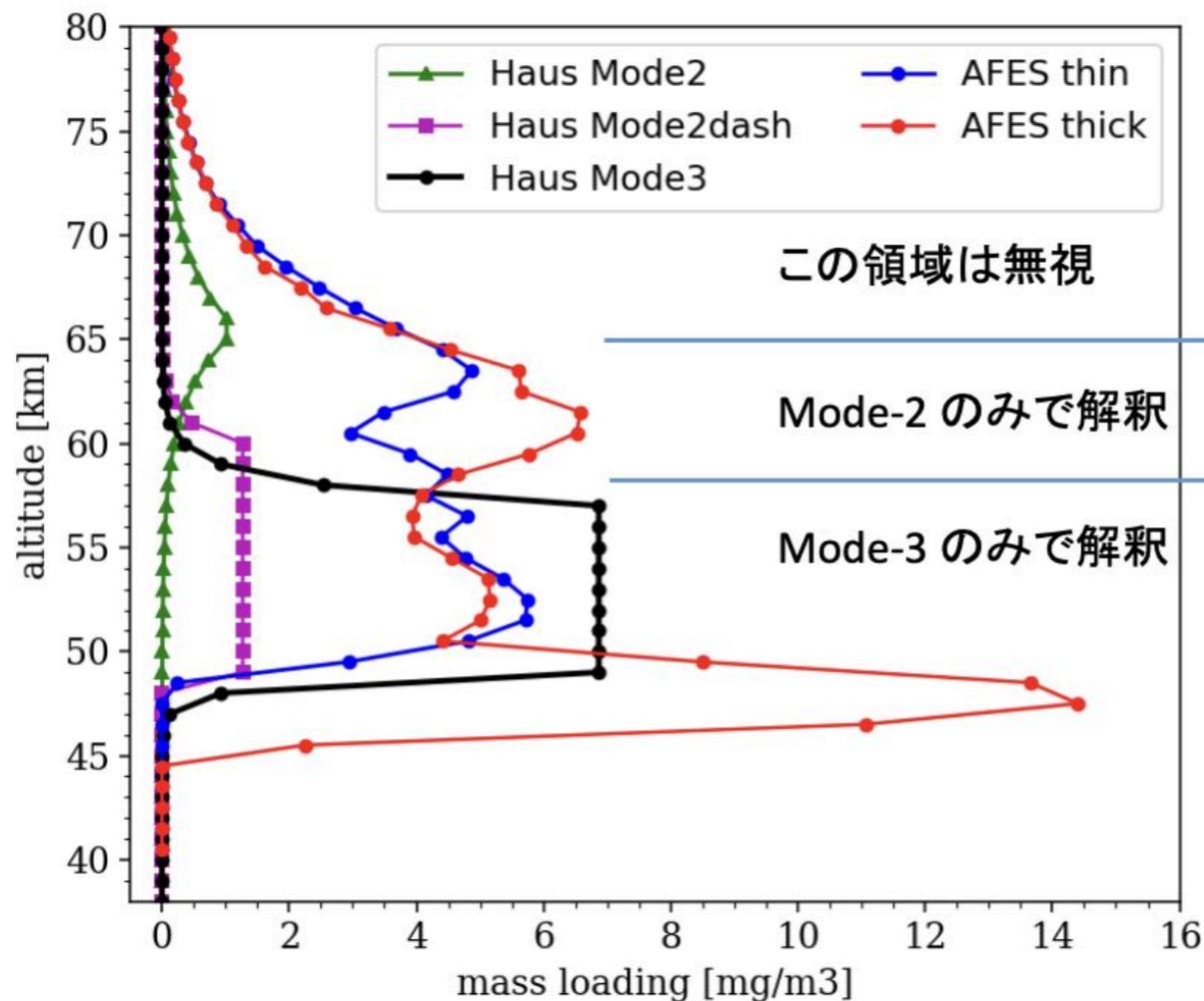
- Mode2粒子の方が光学的厚さに対する寄与が大きい

Mode2粒子とMode3粒子で Q_{ext} はあまり変わらない一方で、粒子半径に対して消散断面積が減る効果より粒子数が増える効果の方が大きい

	Mode 2	Mode 3
雲質量 ΔM (ケース2)	3.53 g/m ²	3.53 g/m ²
硫酸密度 ρ	1.84×10^6 g/m ³	1.84×10^6 g/m ³
粒子半径 r	1.00 μm	3.65 μm
Mie散乱の消散効率因子 $Q_{\text{ext}} @ 2.3 \mu\text{m}$	3.138	2.331
消散断面積 $\sigma_{\text{ext}} = Q_{\text{ext}} * \pi r^2$	9.86×10^{-8} cm ² /個	9.76×10^{-7} cm ² /個
雲粒質量 ($m_{\text{雲粒}} = 4\pi/3 * r^3 \rho$)	7.71×10^{-12} g/個	3.75×10^{-10} g/個
雲粒数 ($\Delta n_{\text{雲粒}} = \Delta M / m_{\text{雲粒}}$)	4.58×10^7 個/cm ²	9.41×10^5 個/cm ²
光学的厚さの変化量 $\Delta \tau = \sigma_{\text{ext}} * \Delta n_{\text{雲粒}}$	6.0	0.92

4. 光学的厚さの変化検証 (続き)

- ケース1 (54.5–65.5 km)、ケース2 (49.5–60.5 km)
- Mode2粒子の寄与が増えてくると $\Delta \tau \sim 5$ ぐらいになっても良い?
- 渦によって南北流による雲の移流の効果に加えて、鉛直流による雲の生成・消滅によって上昇流と下降流領域で比較して $\tau < 10$ のコントラストをつくる可能性がある



4. Discussion: ジェットの形成とAM輸送

- 中緯度ジェットは、波や擾乱などの効果をトータルして形成されている (東西風加速率)
- 一方、角運動量が赤道を越えて南北半球間で交換されており、方向が~30日周期で反転
- 中緯度ジェットは、運動量輸送の方向が反転するときに成熟
- 赤道越えの風が南北半球間の運動量輸送に寄与, ジェットの変動には渦も密接に関与

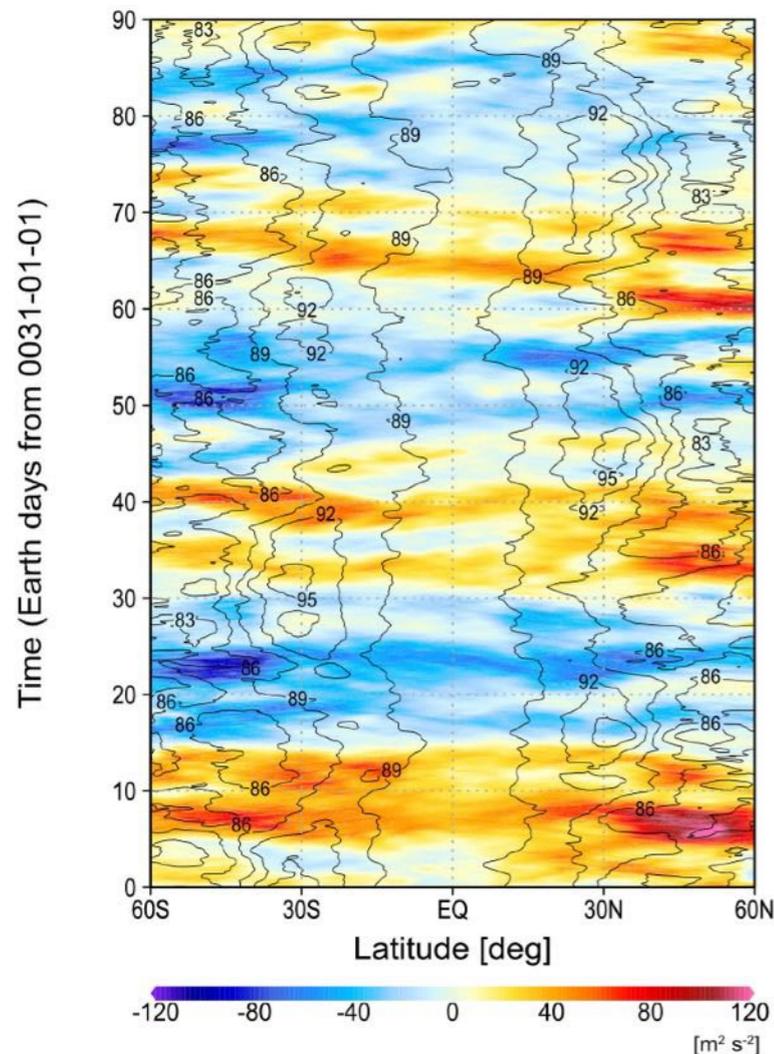
東西風加速 (EPフラックスの発散)

南北AMフラックス

$$\overline{u'v' \cos \phi}$$

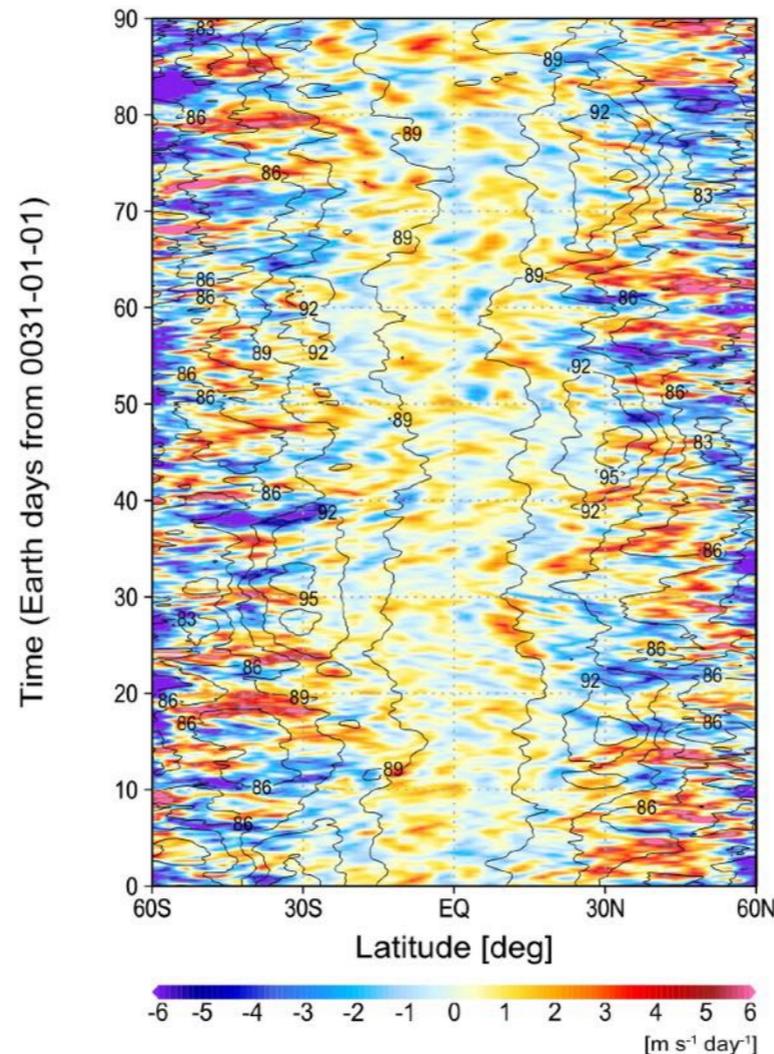
(a)

Meridional AM flux (59.5 km)



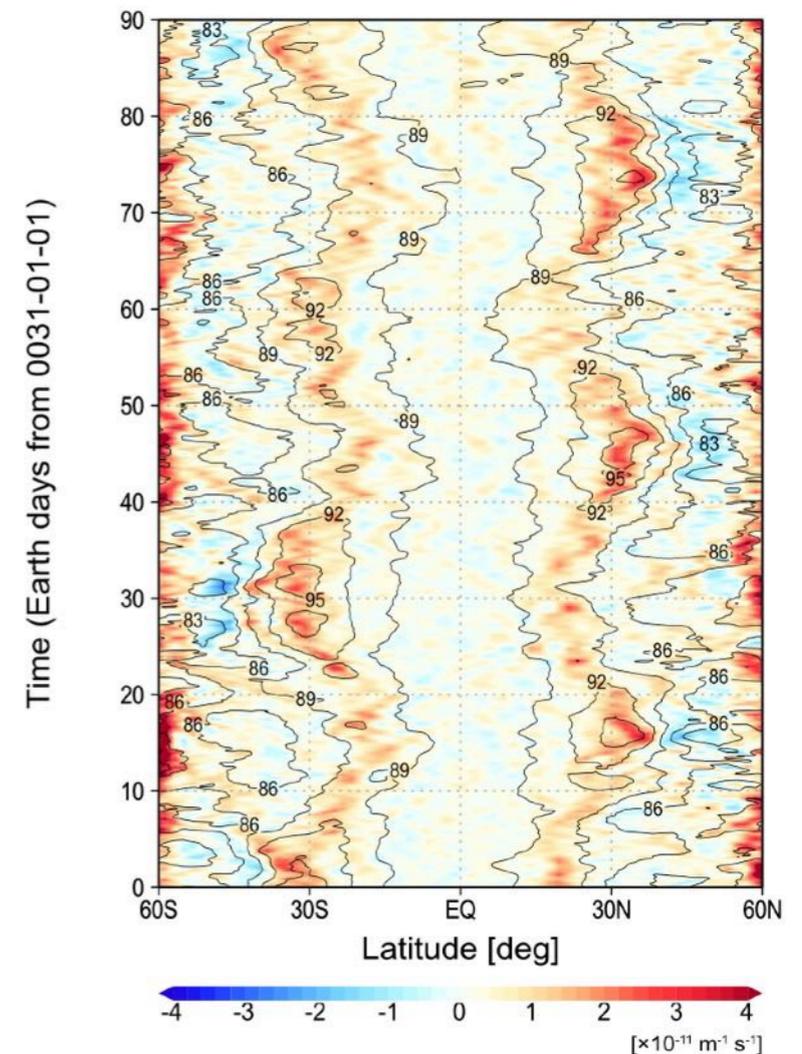
(b)

EP flux zonal wind acceleration (59.5 km)



(c)

Effective beta (59.5 km)



$$F^{(y)} = \rho_0 a \cos \phi \left(\overline{u_z' \frac{v'\theta'}{\theta_{z'}}} - \overline{u'v'} \right),$$

$$F^{(z)} = \rho_0 a \cos \phi \left\{ \left[f - \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial(\bar{u} \cos \phi)}{\partial \phi} \right] \frac{v'\theta'}{\theta_{z'}} - \overline{u'w'} \right\},$$

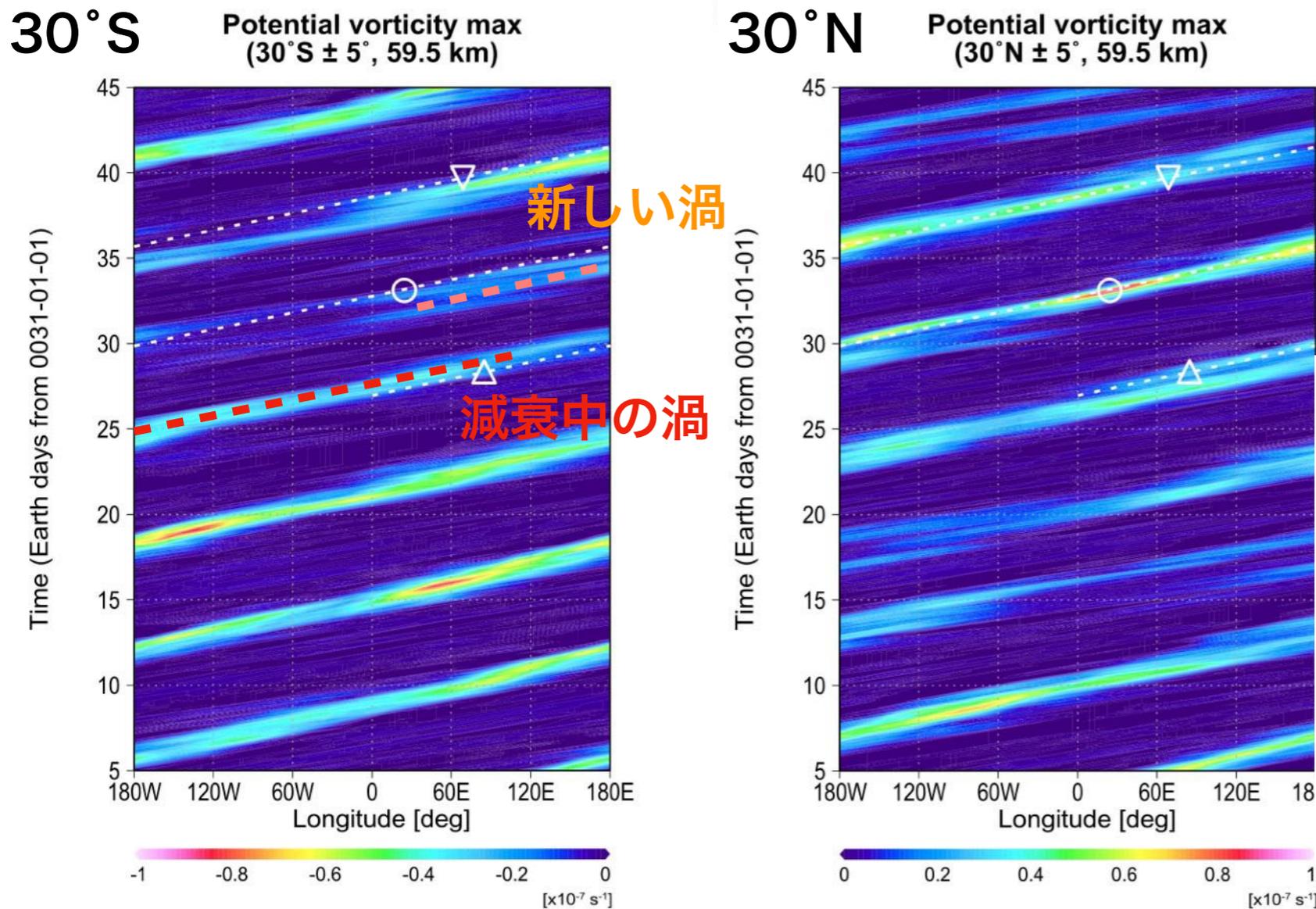
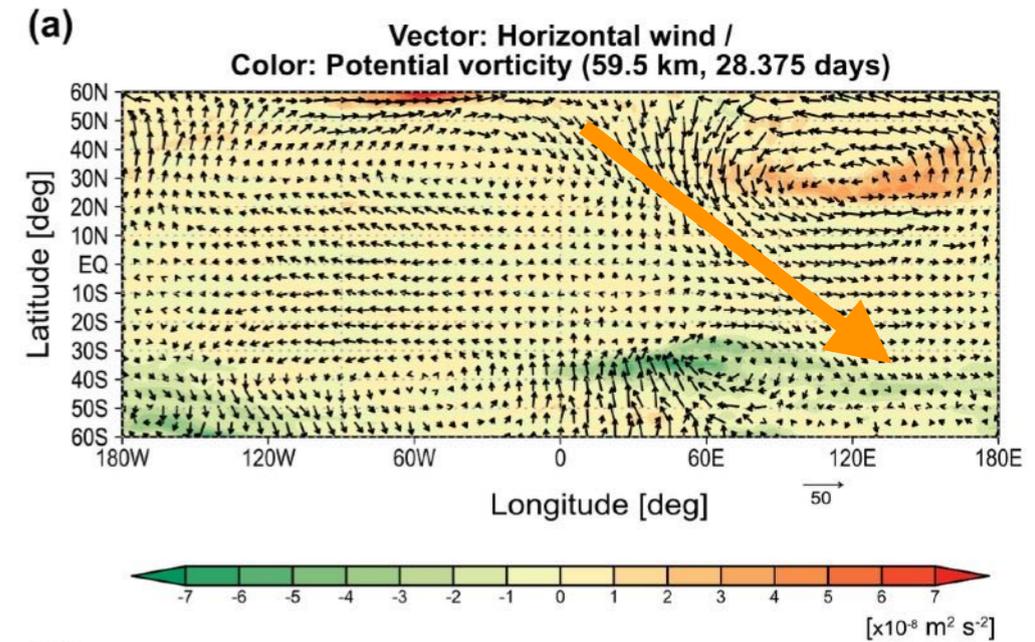
effective- β

$$\hat{\beta} = \beta - \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial U \cos \phi}{\partial \phi} \right)$$

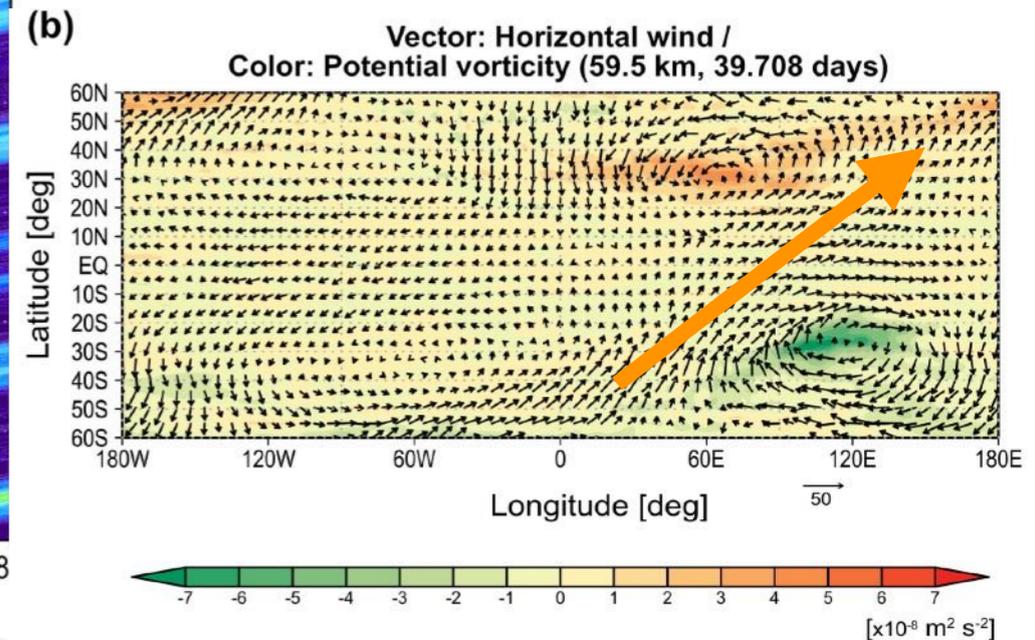
4. Discussion: 渦によるAM輸送

- 北半球の渦が最大成長する前には, 南半球で減衰中の渦が西側に存在
- 北半球の渦 (大: 成長中) と南半球の渦 (小: 減衰中) が結合し, 南半球への運動量輸送を形成
- 南向きの運動量輸送によって南半球の中緯度ジェットが成長 → 南北シアーを強化し新しい渦を形成
- 新しい渦は北半球の渦の東側 = 運動量輸送の反転

北半球渦の最大成長5日前



北半球渦の最大成長5日後



4. Discussion: 順圧不安定による渦形成

- 中緯度ジェットが発達する $\sim 30^\circ\text{N/S}$ では, 順圧不安定性の必要条件が満たされている
- 非発散順圧渦度方程式を用いた線形安定性解析を実施

$$\frac{\partial^2 \hat{\psi}}{\partial y^2} - k^2 \hat{\psi} + \frac{1}{\bar{U} - c} U_{yy} \hat{\psi} = 0$$

- 背景流は北半球で中緯度ジェット最大期におけるGCMの結果から定義

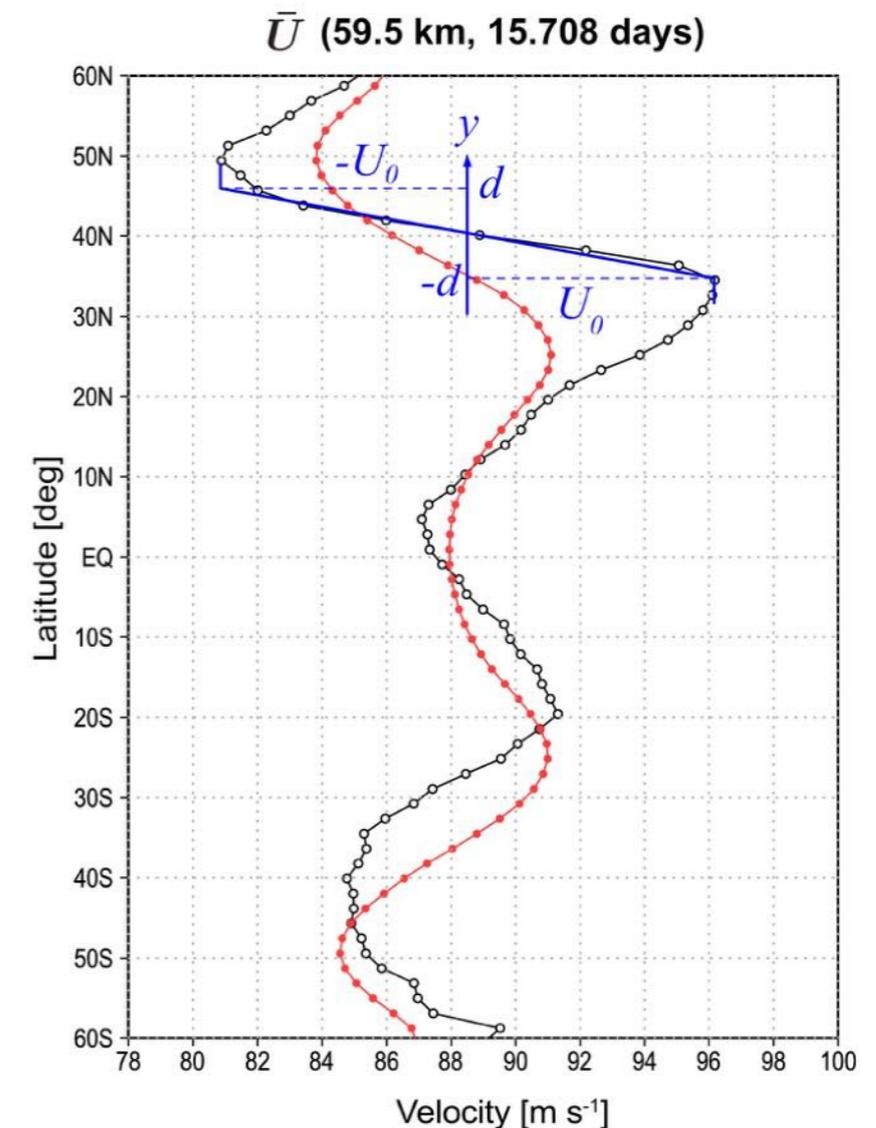
$$U(y) = \begin{cases} U_0 & (y \geq d) \\ U_0 y/d & (-d \leq y \leq d) \\ -U_0 & (y \leq -d) \end{cases}$$

- 得られる分散関係式

$$c^2 = \left(\frac{U_0}{2kd} \right)^2 \left[(1 - 2kd)^2 - e^{-4kd} \right]$$

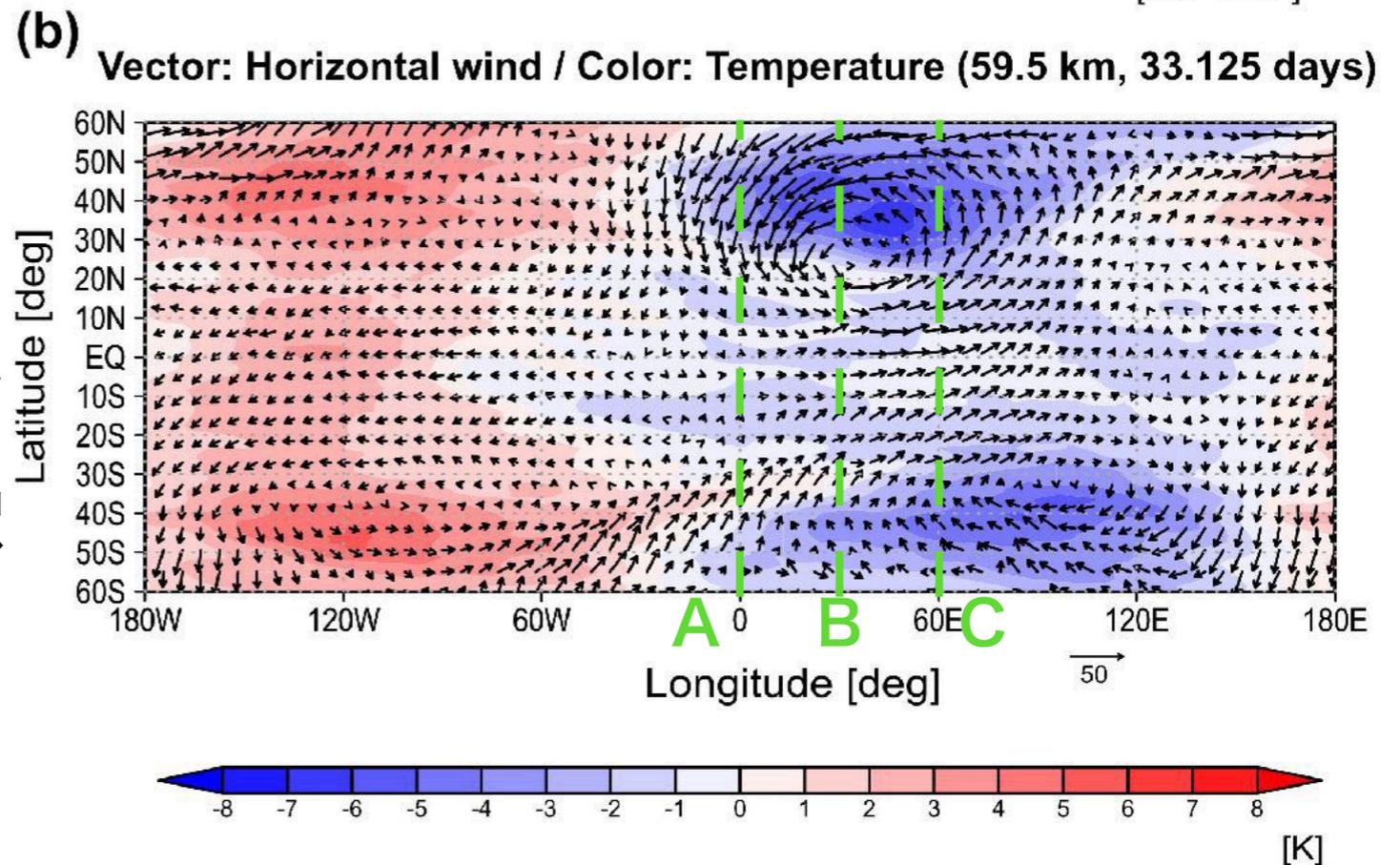
からmost preferred mode ($kd = 0.39$) における擾乱成長のe-folding timeは ~ 4.3 日
この時の渦の東西スケールは 9300 km

- GCM内では10–15日程度で渦が成長 (最大風速 > 20 m/s) 初期振幅の7–20倍まで成長する計算
- GCM (観測) の渦の東西スケール ~ 5000 kmは線形計算で得られた東西波長の半分で, 低気圧のスケールと解釈すると整合的



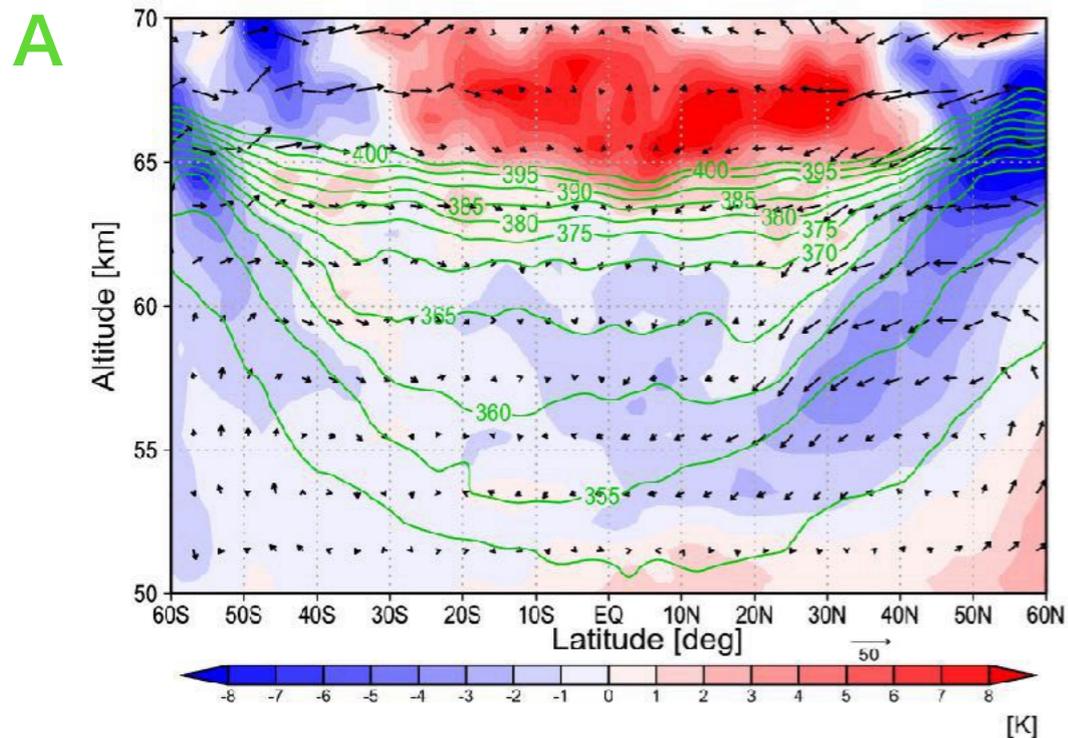
4. Discussion: 渦に伴う上昇流 ()

- 北半球に存在する渦がピーク時
- 等温位面 (下図緑)
- 順圧 (南北シアー) 不安定によって渦が成長するが、実際の大気場には傾圧性があるため等温位面に沿って風が吹くことで鉛直流を伴うと解釈



渦西側(下降域)

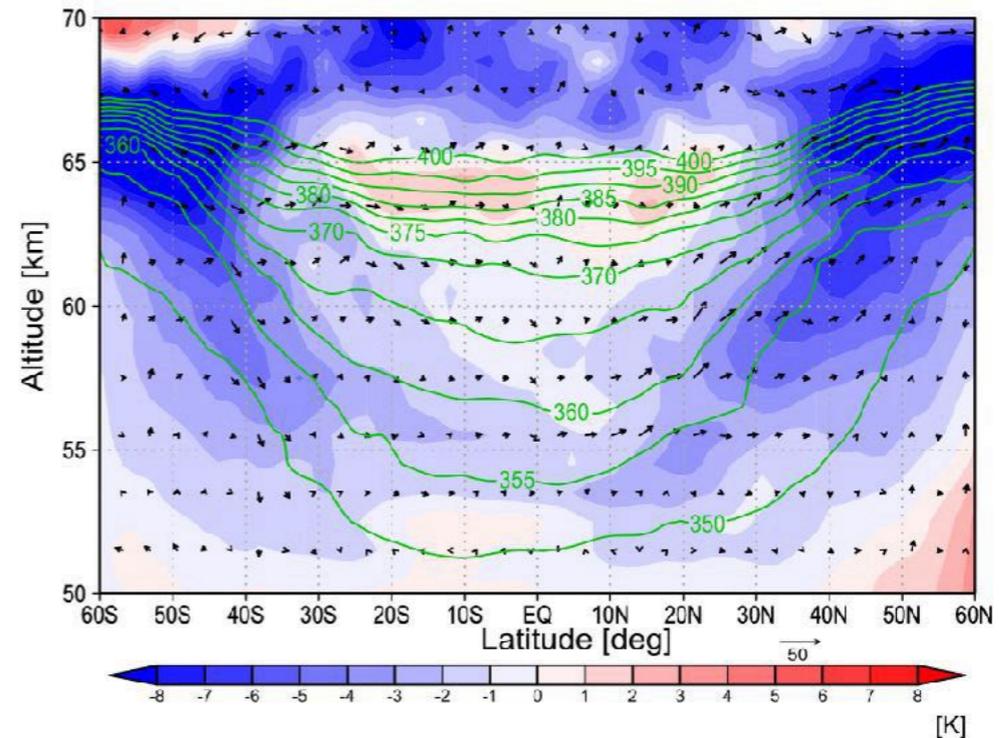
Vector: Meridional-Vertical Wind /
Green: Potential temperature /
Color: Temperature (0°E, 33.125 days)



(b)

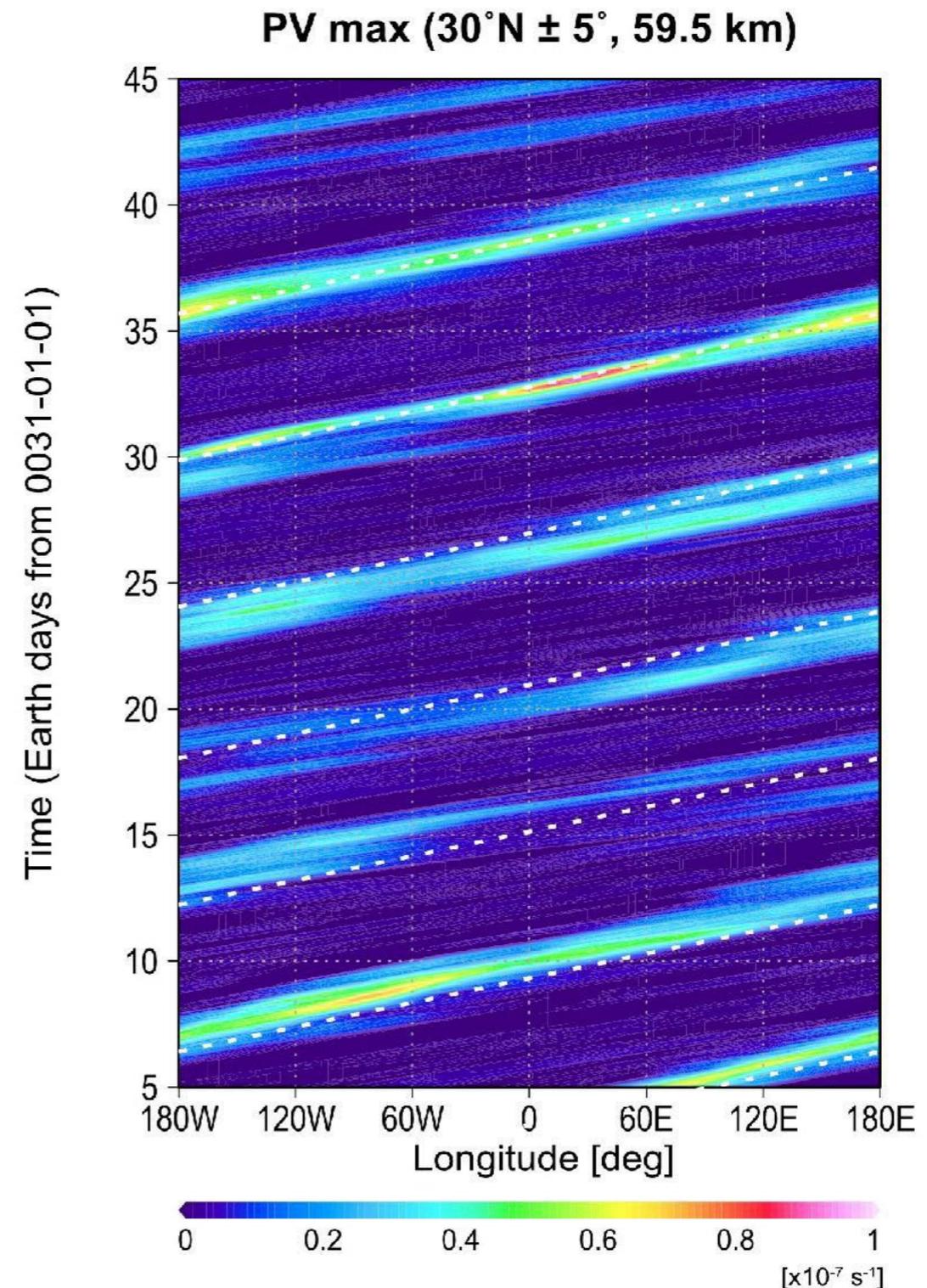
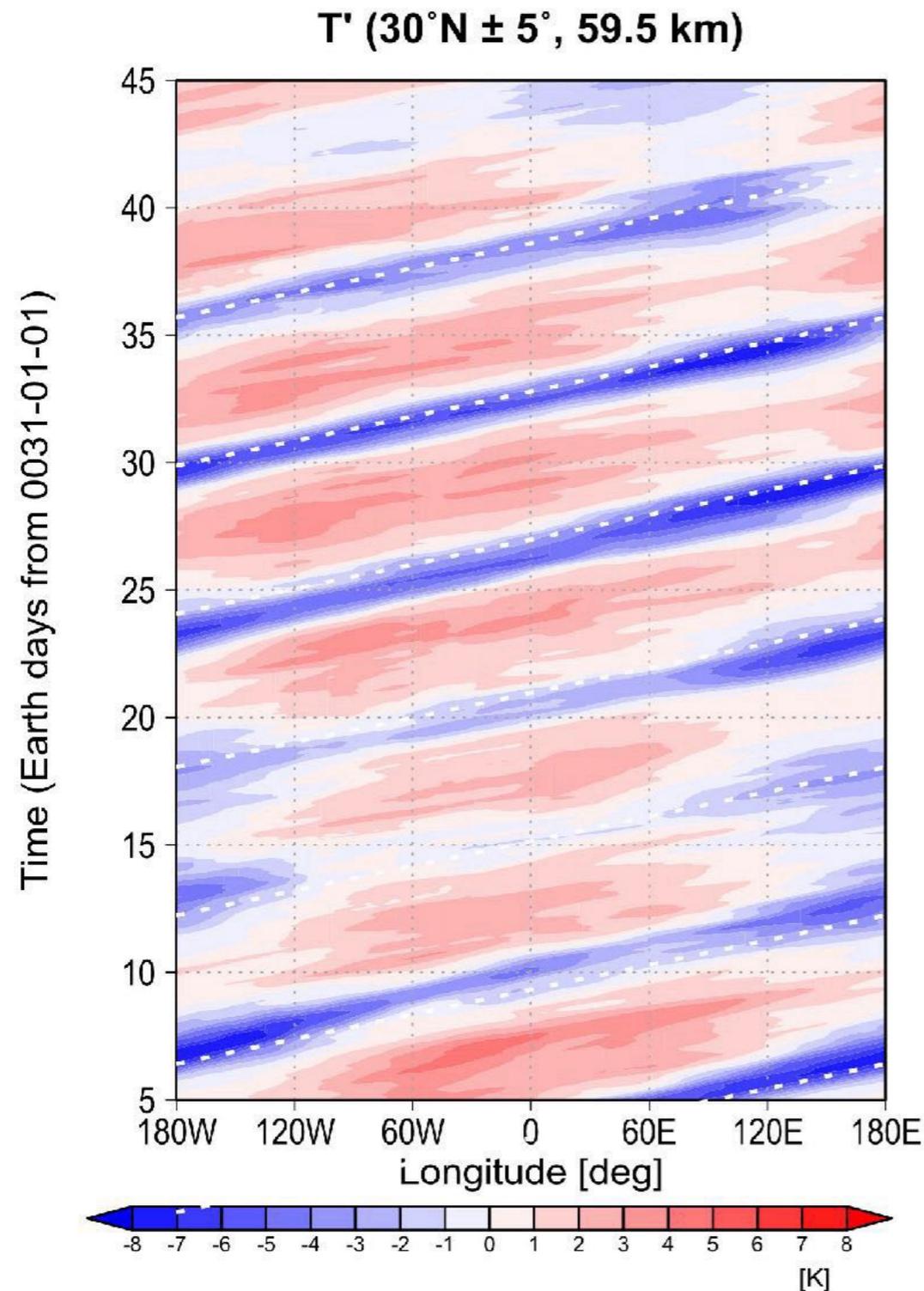
Vector: Meridional-Vertical Wind /
Green: Potential temperature /
Color: Temperature (60°E, 33.125 days)

渦東側(上昇域)



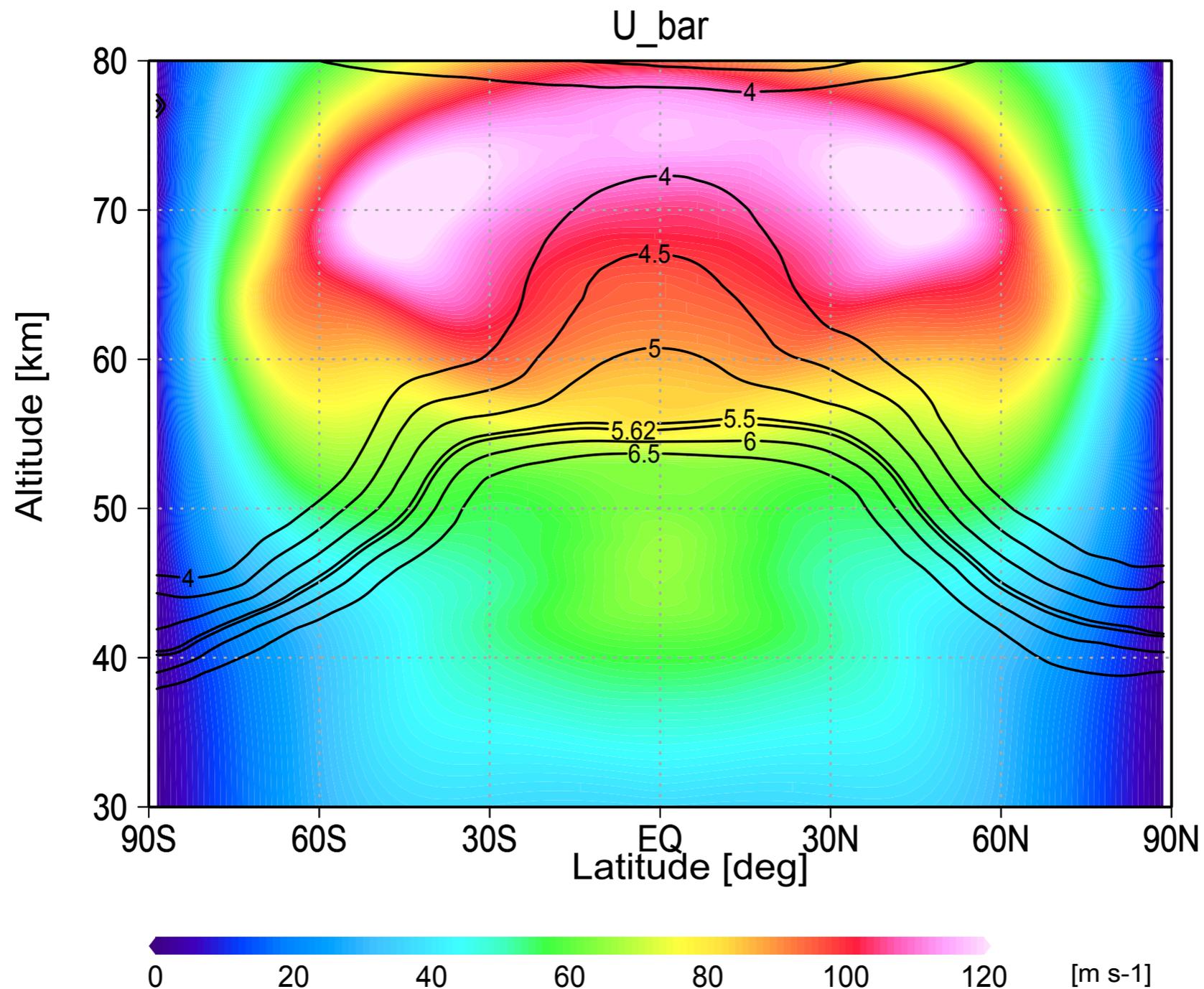
4. Discussion: 渦周辺の低温構造と波との関連

- 渦の位置は基本低温、渦が強まると負の温度偏差が強まる
- 渦不在時は東西波数1の構造が弱い、渦の伝搬周期 (5.62日) とほぼ一致



4. Discussion: 渦周辺の低温構造と波との関連

- 渦の伝搬周期は約5.6日、高度60 km 緯度30°の背景風 (約4日) とは一致せず
- Takagi et al. (2022) で調べられた5.8日波が作る擾乱場が関係する可能性はあるが、現時点で詳細は不明 (Future work)

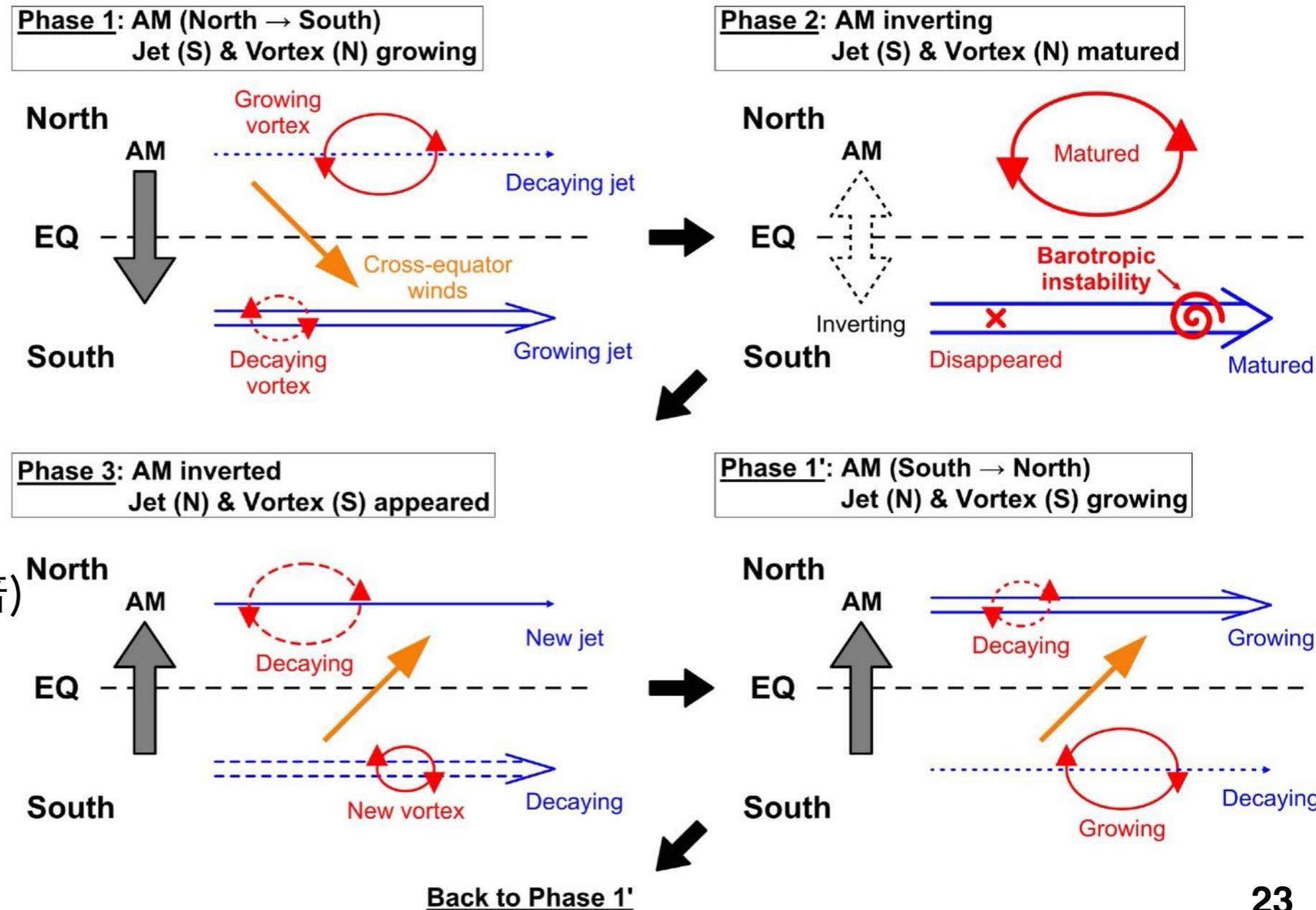


5. まとめ

- AFES-Venus GCMで再現された低気圧性の総観規模渦の構造と時間変化を調査
- 渦の東側（西側）には上昇流（下降流）が存在。
IR2/あかつきが観測した金星夜側高度60km付近の渦状雲との比較から、上昇流が雲形成を引き起こし渦模様のコントラストを強化している可能性
- 渦と中緯度ジェットは、北半球と南半球の間で交互に~30日スケールで準周期的に出現

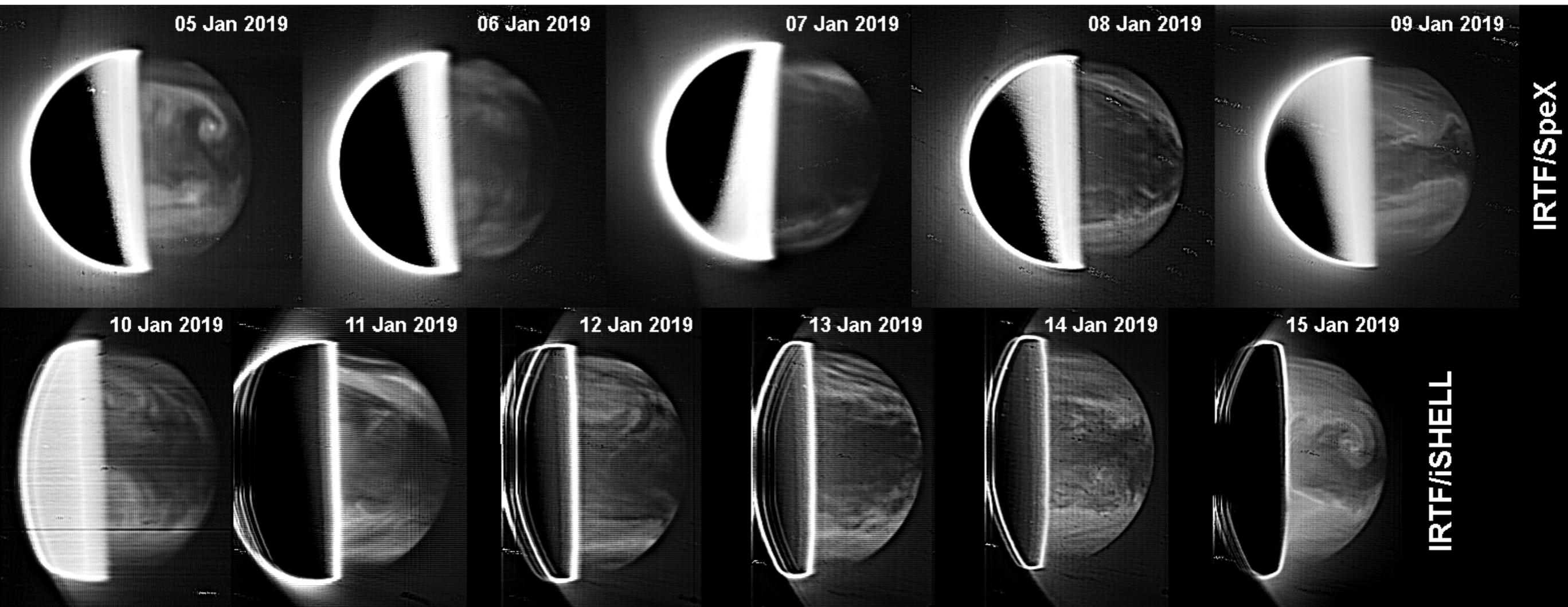
南北の渦の結合と 中緯度ジェットによる 順圧不安定が鍵

- 線形安定性解析の結果、
総観規模渦は
e-folding time: ~5日
東西スケール: ~10000 km
(観測される低気圧性渦の倍)
でGCMや観測と整合的
- 渦の発生領域の決定要因や
5.8日波 (背景の波数1擾乱)
との関係は今後の研究課題



今後 (観測的なフォローアップ研究について)

- 地上望遠鏡 (IRTF) 観測からも、今回の総観規模渦と思われる現象が捉えられている
- ~1ヶ月のモニタリング観測が実現すれば、渦の成長と減衰フェーズ (反対半球への移動) が捉えられるか?
- ~50-60 kmの東西風 (南北シア) や渦周辺のエアロゾル観測の可能性も検討したい



Observed by Peralta et al.