

GFDセミナー 2024-03-16

「あかつき」による金星 大気の力学の研究

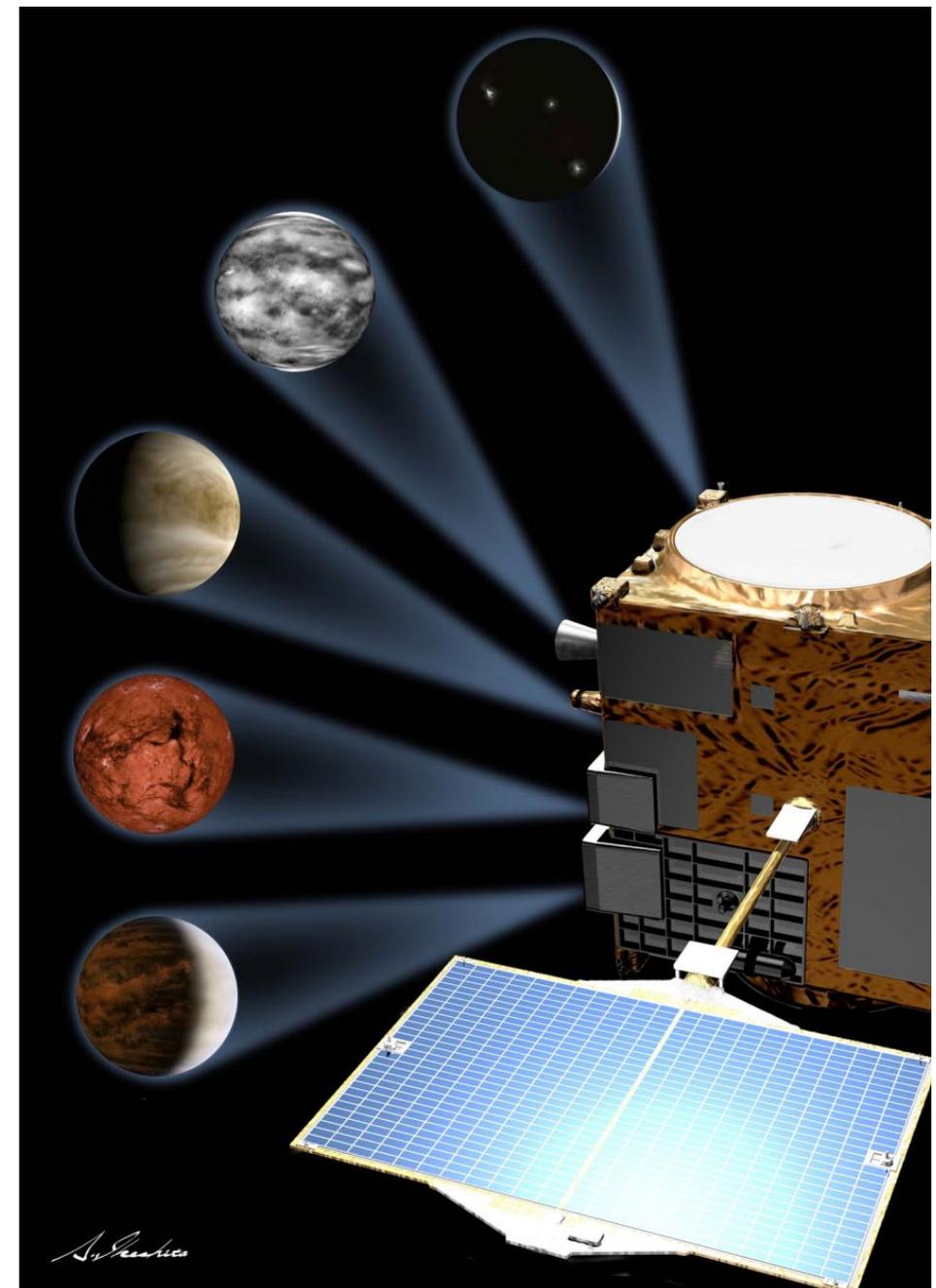
堀之内武（北大地球環境）

目次

- 主に：スーパーローテーションの維持機構に関する研究
- ちょっとだけ：スーパーローテーションと惑星規模波動の長期変動に関する研究(new)

あかつき

- 日本の金星探査機
- 2015年12月7日軌道投入成功・観測開始
- 金星の「気象衛星」
 - 5つのカメラを搭載。紫外～赤外線で大気・雲・地面を観測。
 - これまでに2つのカメラ（1 μ mカメラと2 μ mカメラ）が観測を休止。他のカメラの状態は良好。
 - 他に電波掩蔽観測も（密度/温度プロファイル）。
 - 機器にも北大の貢献大(UVI, LACなど)
- 金星大気が観測できる周回衛星としては、Pioneer Venus Orbiter (PVO) (1978-1992), Venus Express (VEx) (2006-2014)に続く三機目



Venus clouds & observational wavelengths

- Reflected sunlight, thermal IR → cloud top
- IR “window” wavelengths → silhouette of clouds, surface

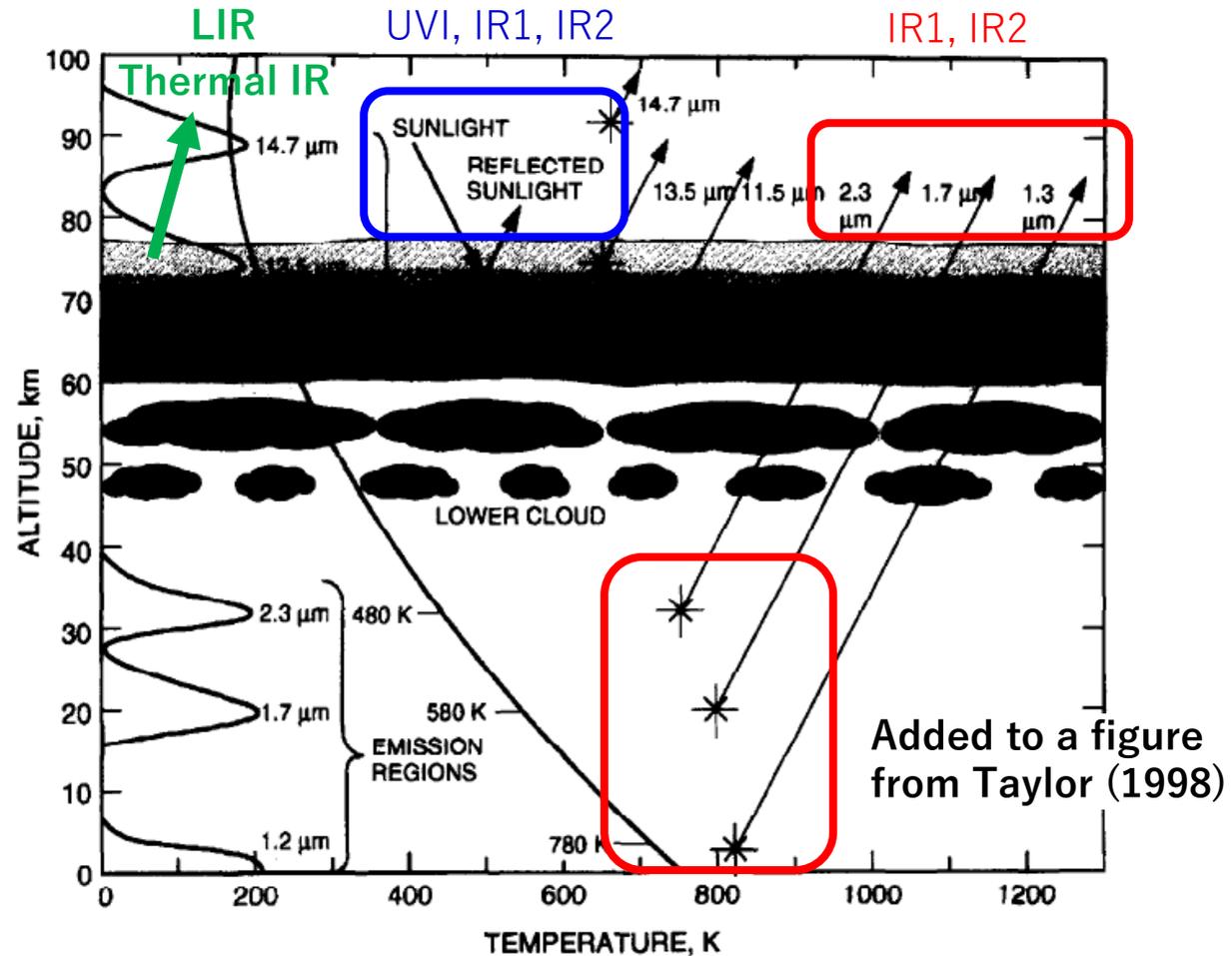
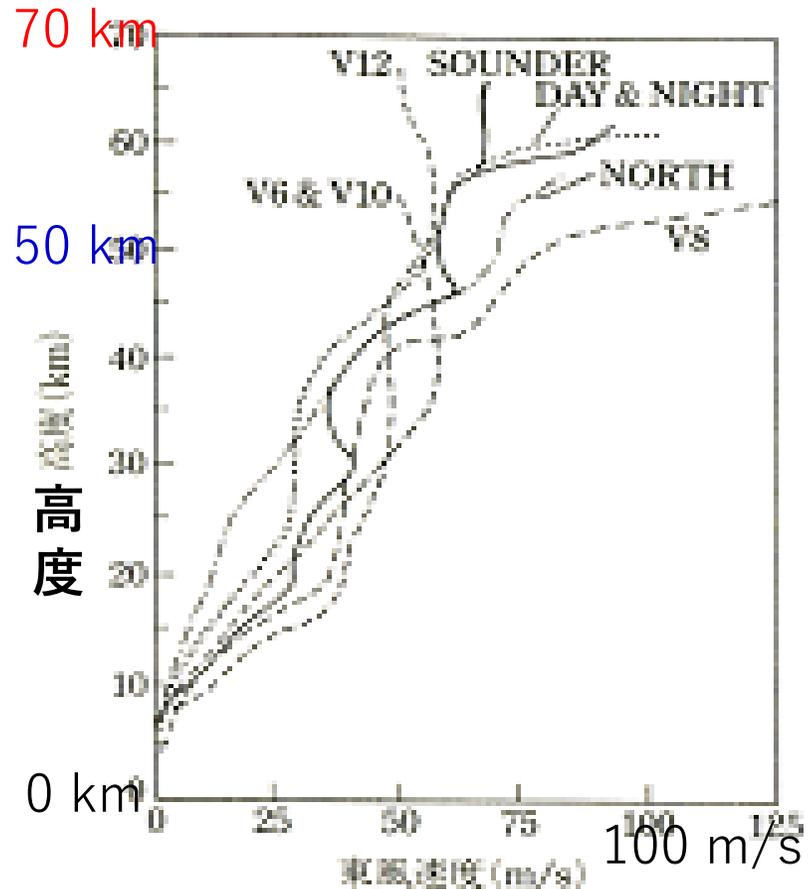


Figure 2. Schematic of a proposed sounding experiment for Venus as part of a proposed 'Discovery' mission (courtesy Dr. K.H. Baines, JPl).

金星大気の超回転 (スーパーローテーション)

以後SRとも表記

- 固体惑星の数10倍の角速度に達する



直接探査(プローブ)により測定された風速の鉛直分布(惑星気象学,松田,2000,Schubert,1983)

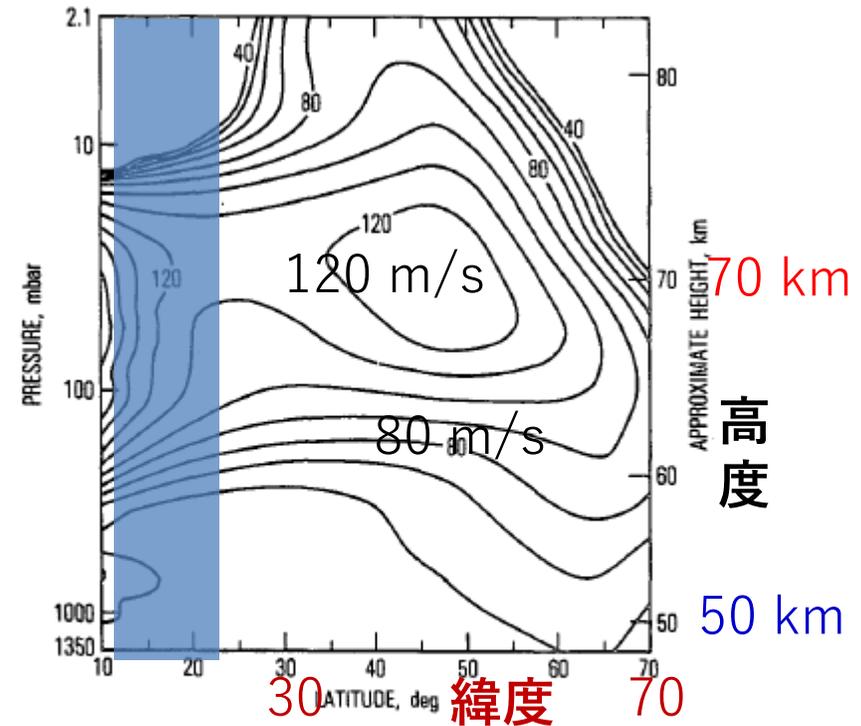


FIG. 4. Contours of westward zonal wind speed (m s^{-1}) for the Northern Hemisphere derived from temperature data assuming cyclostrophic balance. Contour interval is 10 m s^{-1} . Contours have been smoothed.

Walterscheid et al (1985)
PVOの伝播掩蔽より求めた旋衡風

あかつきの科学目標（2001年の探査計画書1,2章より）

1. **スーパーローテーションのメカニズムの解明**
2. 子午面循環の構造の解明
3. メソスケール現象のサーベイ観測
4. 雲生成と雷放電のメカニズムの解明
5. 地表面放射率測定と活火山探索
6. 大気散逸メカニズムの解明と流出量の定量的観測



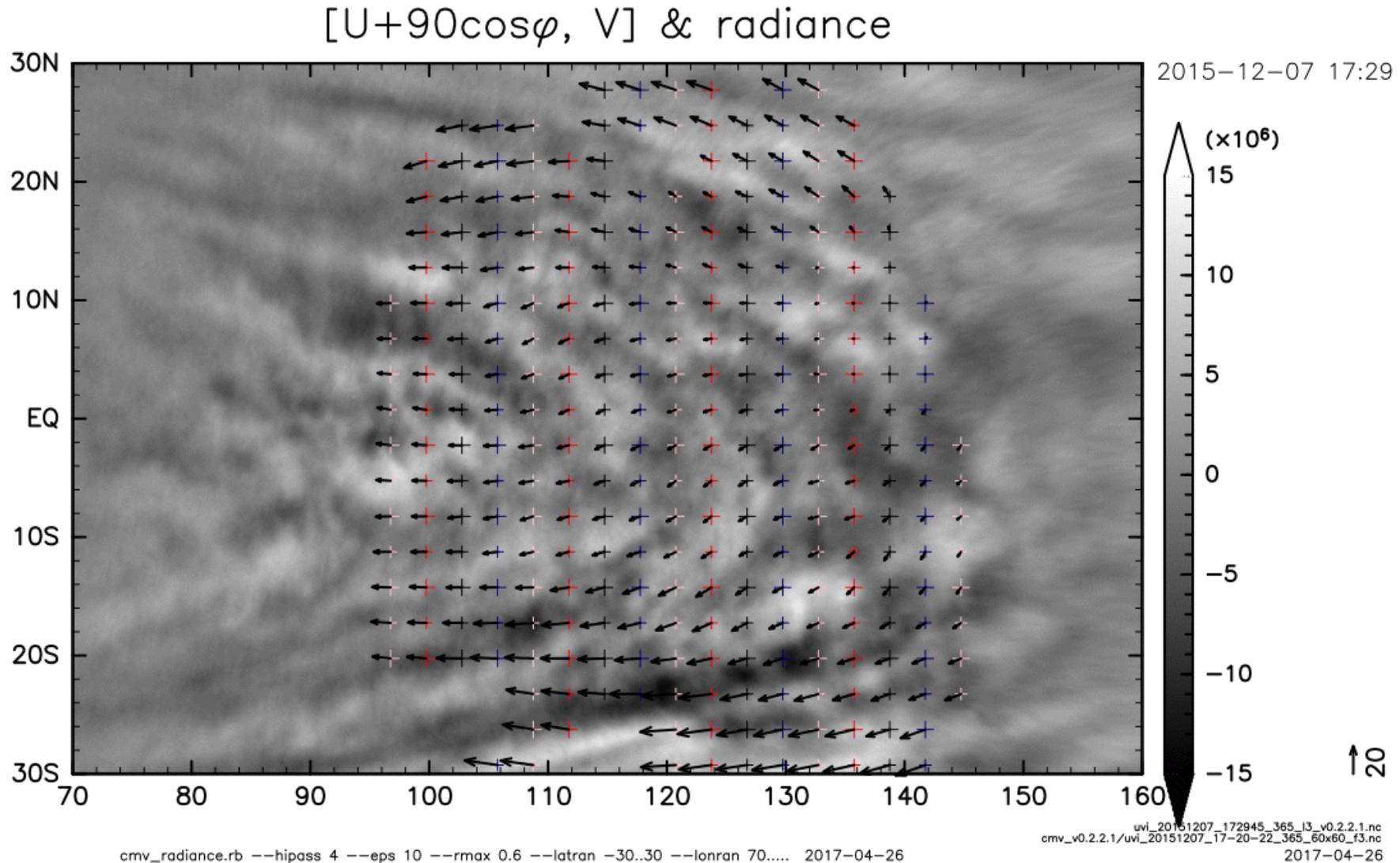
スーパーローテーションの解明って...

- 観測で見える領域、できることは限られる。不安しか... (^_^;)
- が、ともかく取り組むとしたらということで、角運動量バランス等の観点から雲追跡による風速導出に求められる精度をあらためて（えいやっと）考えた。
 - 2015-04-25（あかつき到着8カ月前）の検討会での私の資料より：

- **Desired accuracy (next page)**
 - 2-3 m/s (at the resolution of 1000 km) – want sub-pixel accuracy.

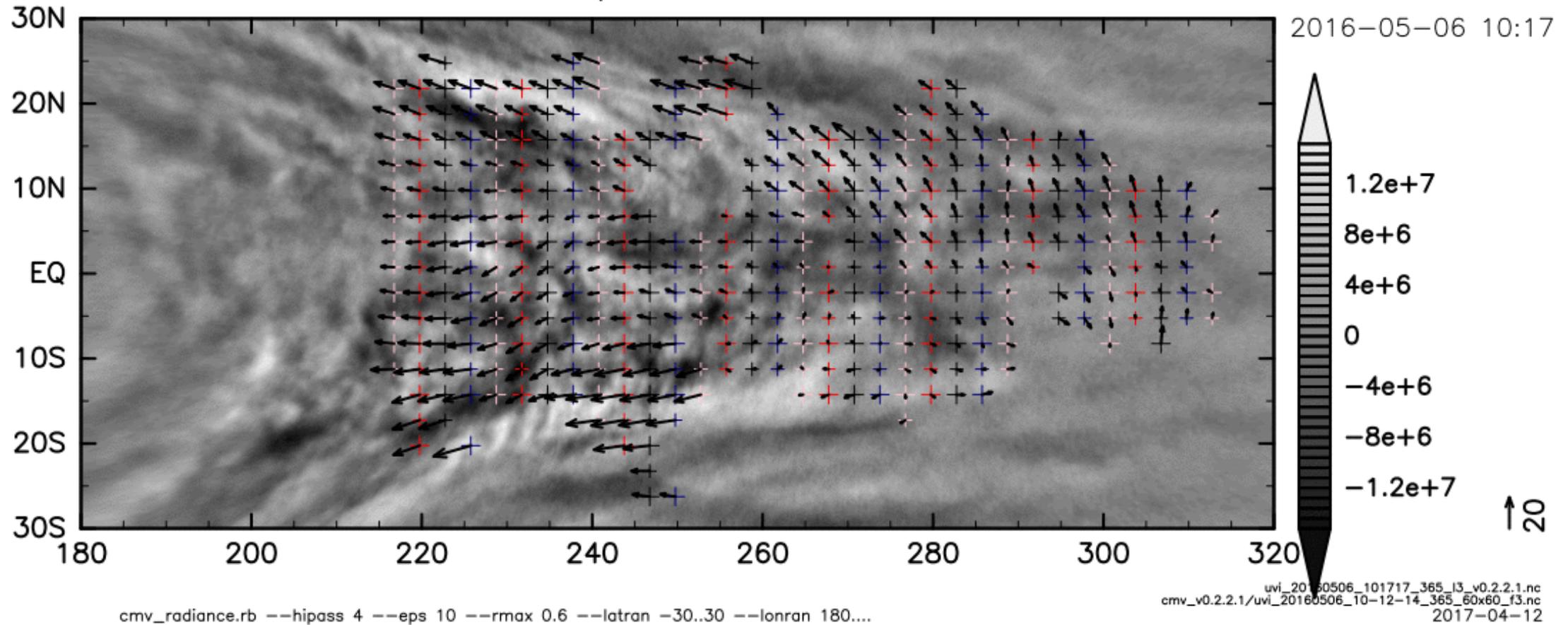
- このときまでにベースとなる Ikegawa & Horinouchi (2016) *Icarus* の手法開発はしていたが、まだ性能が足りない気がしていた。→
 - 村上真也さんが、既存手法（by 神山さん 小郷原さん）と IH16 の差分を実装
 - 堀之内はさらなる手法開発（後に Horinouchi+ 2017, Meas.Sci.Tech. として出版）

Example 2015-12-07 365nm
(deviation from a solid-body rotation: 90 m/s at EQ)



Example 2016-05-06 365nm
(deviation from a solid-body rotation: 90 m/s at EQ)

$[U+90\cos\varphi, V]$ & radiance



スーパーローテーションの維持メカニズムに
関する研究 Horinouchi+(2020) *Science* (本文+オンライン付録)

超回転を理解するとは？

- 生成問題

- 例えば「超回転がない(惑星に対し静止した)状態からどうできるか」。但し、そのような状態がそもそもあったのか不明。仮想的な問題ともいえる。

- 維持問題

- A: 上空に非常に強い超回転率を含む風速構造がどのように成り立つか。 (**本研究**)
 - (子午面循環存在下で) 一様でない角運動量分布は如何に保てるか。大気内部の問題。時間スケール短
- B: それが長期的に保てるか。
 - 大気と固体惑星の角運動量バランスの問題：地表面が重要。時間スケール長。

- 参考：放射緩和時定数のオーダー。雲層上部は10日，地表付近は万日

変形オイラー平均(TEM)方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\mathbf{v}^r \cdot \nabla M + \rho_0^{-1} \nabla \cdot \mathbf{F}, \quad (1)$$

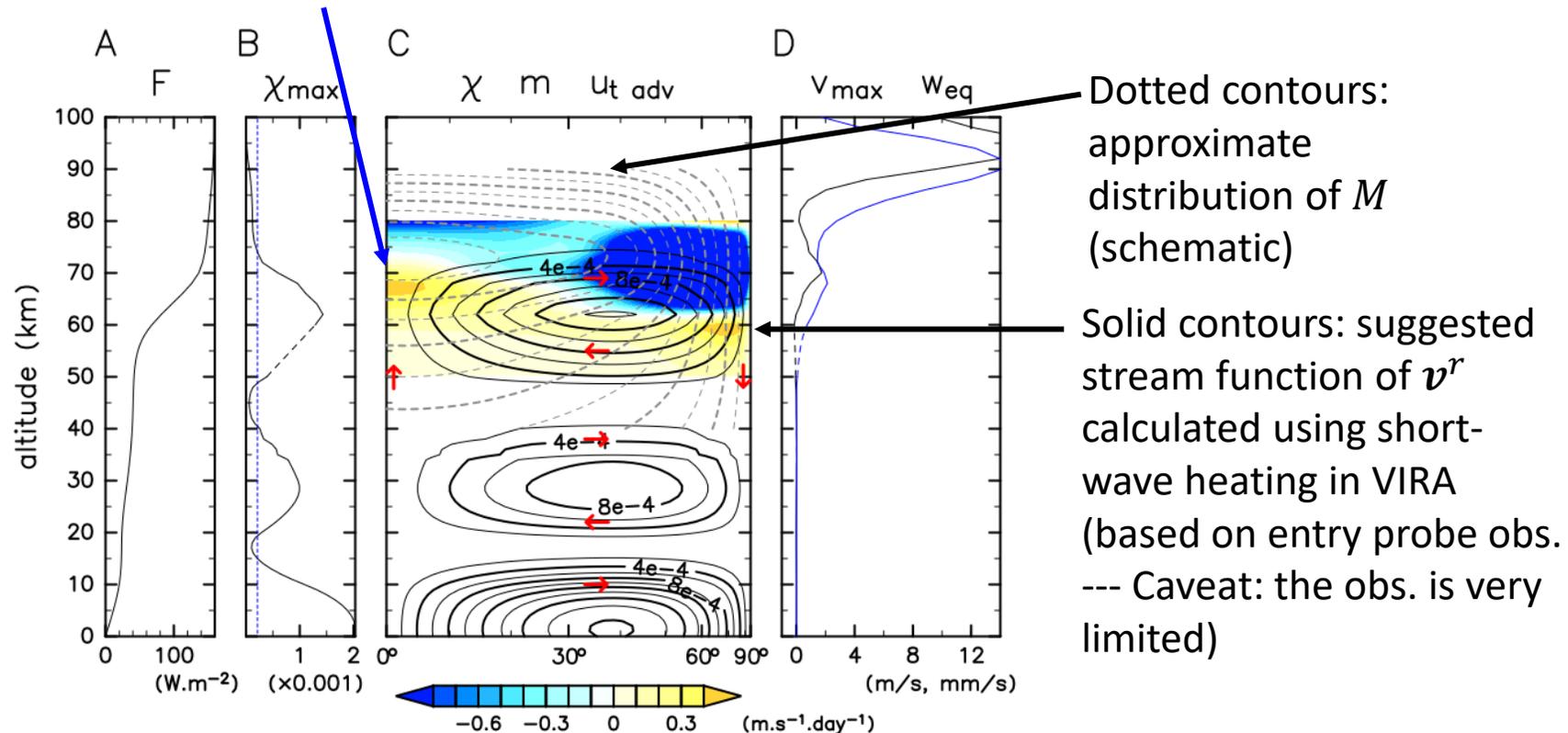
ここで

- $M \equiv a\bar{u} \cos \varphi + a^2 \Omega \cos^2 \varphi$: 質量あたりの東西 (帯状) 平均AM (角運動量)
- $\mathbf{v}^r \equiv (0, v^r, w^r)$: 「残差循環」速度: 「渦成分」 (帯状平均からのずれ = 波や乱流を含む) によるStokesドリフトの効果に対応する項を含む子午面循環速度
 - $v^r \equiv \bar{v} - \rho_0^{-1} (\rho_0 \overline{v'\theta'} \bar{\theta}_z^{-1})_z$, $w^r = \bar{w} + (\rho_0 \overline{v'\theta'} \bar{\theta}_z^{-1})_y$
- $\mathbf{F} \equiv (0, F_y, F_z)$: Eliassen-Palm (EP) flux: 「渦成分」によるAM輸送.
 - $F_y \equiv \rho_0 a \left(-\overline{u'v'} + \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial z} S^{-1} \overline{v'T'} \right) \cos \varphi$, $F_z \equiv \rho_0 a \left(-\overline{u'w'} + \zeta_a S^{-1} \overline{v'T'} \right) \cos \varphi$
 - S : 温度勾配 + 断熱減率で表した安定度. ζ_a : 絶対渦度

Maintenance problem (where $\frac{\partial M}{\partial t} \sim 0$)

$$-\mathbf{v}^r \cdot \nabla M + \rho_0^{-1} \nabla \cdot \mathbf{F} \sim 0 \quad (2)$$

- Since $-\mathbf{v}^r \cdot \nabla M$ is always down-gradient and works to homogenize M , the question is how and by what $\nabla \cdot \mathbf{F}$ is provided to maintain the inhomogeneity of M ; a particularly important question is how and by what M 's peak (at \sim the cloud top at low lat) is revived.



ほほ Fig. 1 of H20

Color-shading: advective zonal acceleration $-(a \cos \varphi)^{-1} \mathbf{v}^r \cdot \nabla M$ (in m/s/day), which needs to be compensated by $\text{div}\cdot\mathbf{F}$

風速成分3分割

- $u = u_0 + u_t + u^*$
- $\tilde{u} \equiv u_0 + u_t$: 地方時を固定した時間 (移動) 平均
 - うち帯状平均が u_0 , それからのずれ (潮汐成分) が u_t
 - 真の u_0 は不明: 範囲で押さえる。
- $u^* = u - \tilde{u}$ は潮汐以外の擾乱 (波や乱流) + 誤差
- v も同様。ただし以下の見積もりでは $v_0 = 0$ として支障なし (確認済み)。

熱潮汐波

- 太陽日は117日→太陽直下点の移動はゆっくり
- 超回転があるので、背景風に対する位相速度は遅くない（一周4日程度）：地球大気の熱潮汐波（一周1日）とさほど変わらない。

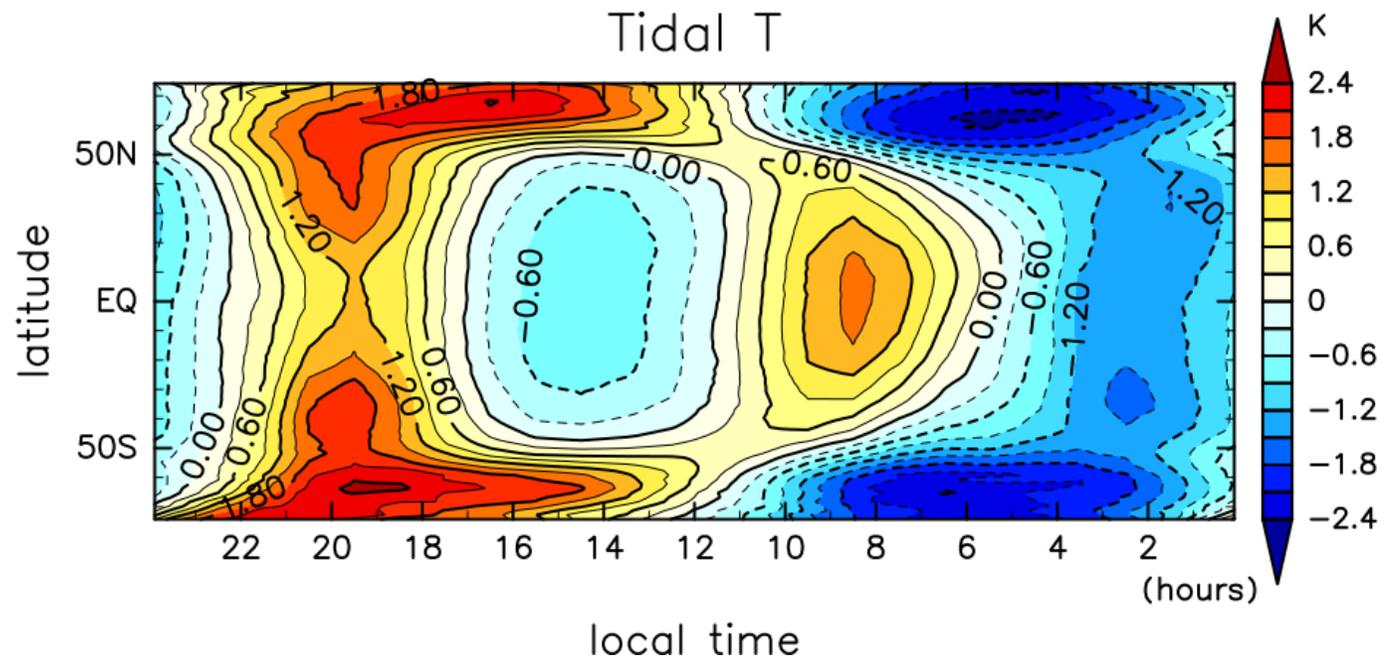


Fig. S11 of H20 (あかつきの熱赤外カメラLIRによる雲頂付近の潮汐の温度場)

Horizontal AM transport (by F_y) & acceleration

- $F_y \equiv \rho_0 a \left(-\overline{u'v'} + \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial z} S^{-1} \overline{v'T'} \right) \cos \varphi$
- The first term is likely dominant at low latitude (from order estimation etc).

Horizontal AM transport (A,B) and its convergence (C; acceleration at low lat) estimated from UVI images (dayside, near cloud-top). Red: 283 nm; Blue: 365 nm

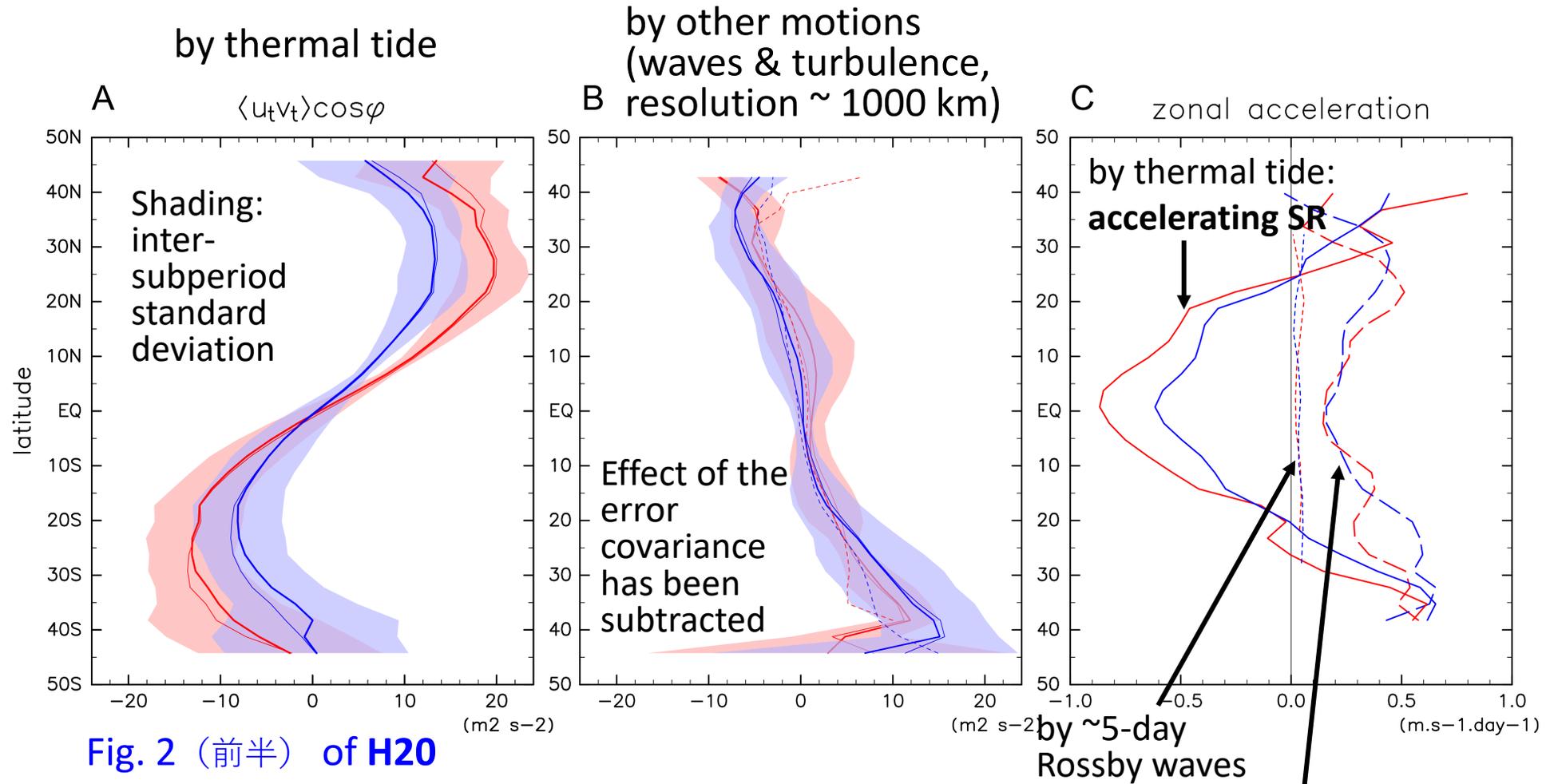


Fig. 2 (前半) of H20

Caution: observations are available only on dayside

Caution: results are limited to low lat

by other motions (waves & turbulence): decelerating SR

誤差の大きさ
の見積もり
(実線。黒: 365nm
赤: 283 nm)

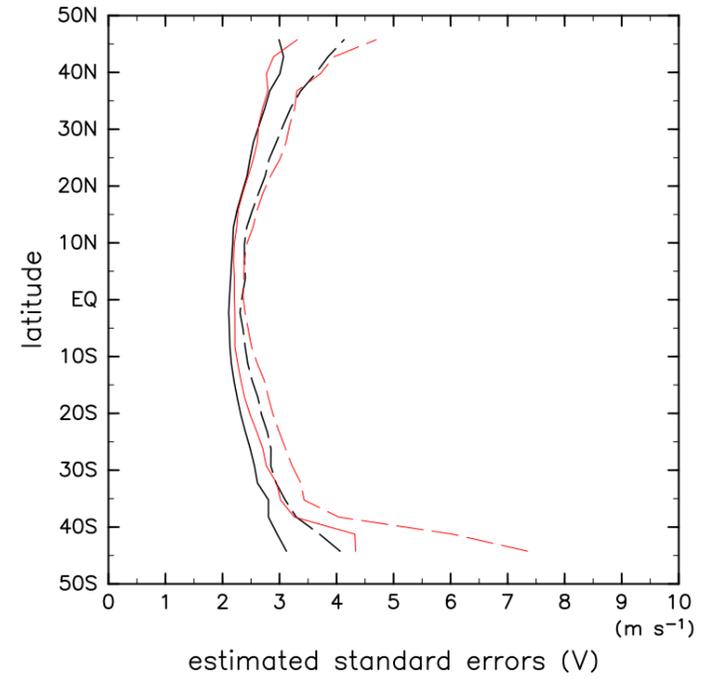
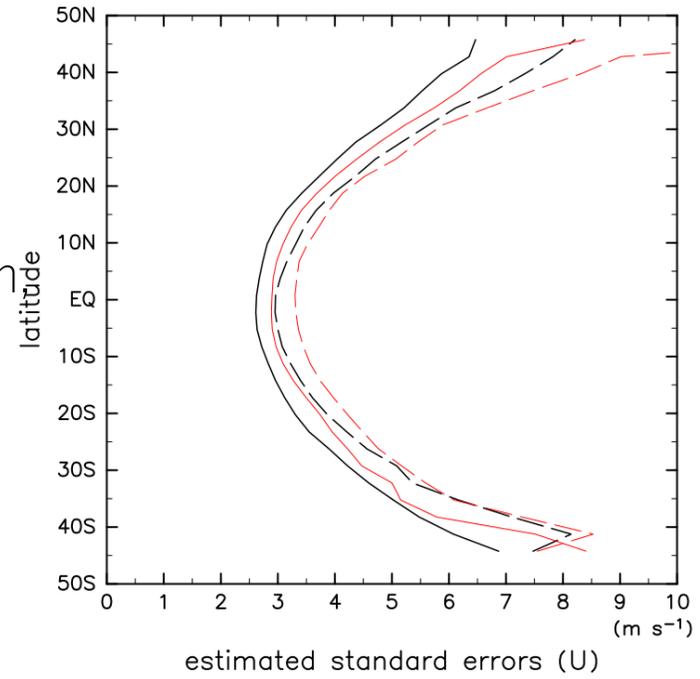


Fig. S4 of H20

誤差相関
($\overline{\epsilon_u' \epsilon_v'}$) daily
mean 適用前

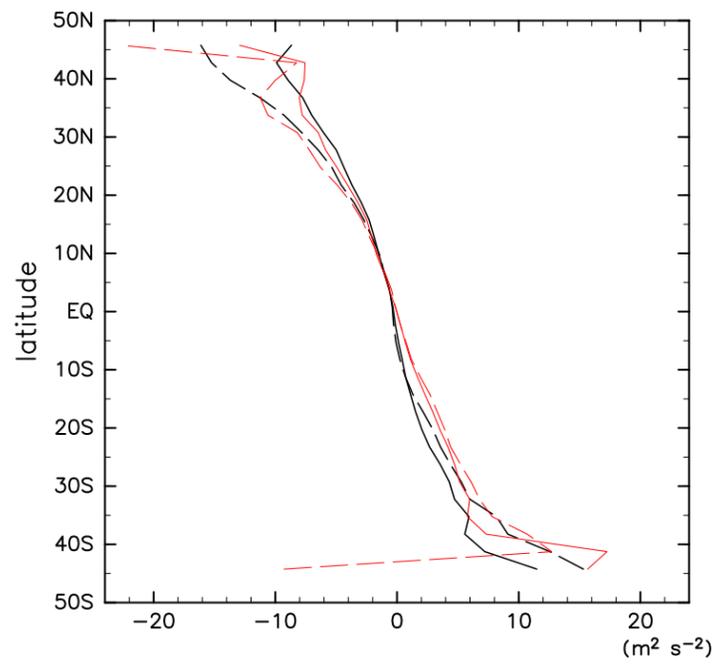


Fig. S5 of H20

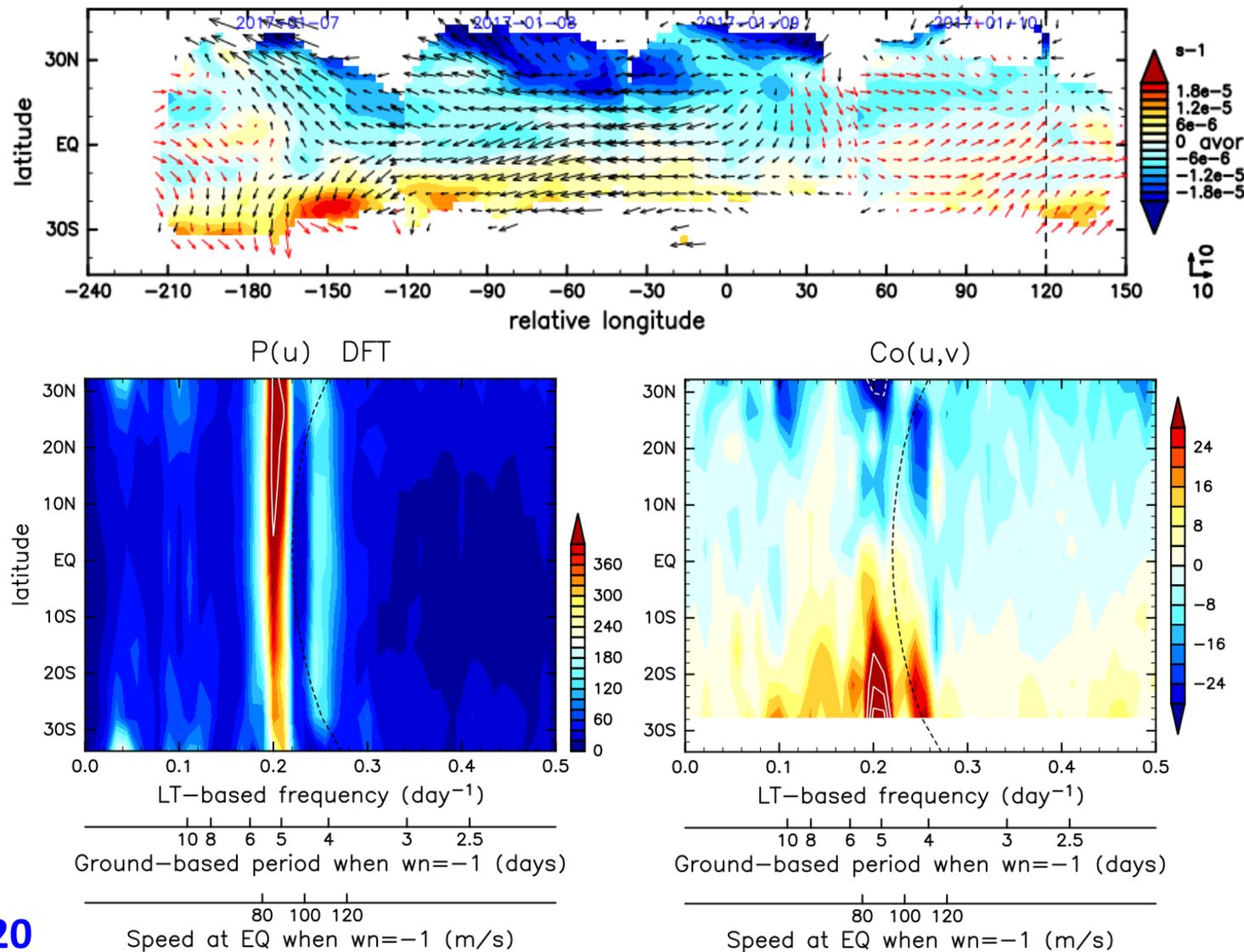


Fig. 3 of H20

Example and spectra of wind disturbances (365-nm). (A) daily-mean transient winds ($u^\#$, $v^\#$) and absolute vorticity (color shading) over Jan 7–10, 2017, overlaid by shifting 90° per day. (B) power spectra of $u^\#$ obtained from the second to the fourth subperiods; corresponding ground-based period (days) and zonal propagation speed at the equator when the disturbance moves westward and zonal wavenumber is 1 are shown on the abscissa. (C) as in (B) but for co -spectra between $u^\#$ and $v^\#$.

Vertical AM transport (by F_z) & acceleration

- $F_z \equiv \rho_0 a (-\overline{u'w'} + \zeta_a S^{-1} \overline{v'T'}) \cos \varphi$
- Gravity waves (incl. Kelvin waves): the $u'w'$ term is dominant;
Rossby waves: the $v'T'$ term is dominant
- The $u'w'$ term: cannot be directly measured (because w is unavailable).
 - By tidal gravity-wave modes (at low lat): estimated from the theoretical vertical wavelengths (confirmed by Kouyama et al. with LIR for wavenumber=2). (but acceleration is unavailable anyway, so only a simple order estimation was made.)
 - By other motions: not available
- The $v'T'$ term: can be estimated by using LIR T (caveat: LIR's mean sensing altitude is lower than UVI when nadir \rightarrow limit data at high emission angle).
 - By tidal Rossby-wave modes: next page
 - Its vertical convergence is not available
 - By other motions: estimation unsuccessful (results among the sub-periods were inconsistent)

S=1 Tidal heat flux (from UVI 365-nm U & LIR T at emission angle 50°-80°) (right) & the $v'T'$ term in the vertical component of the EP flux (left)

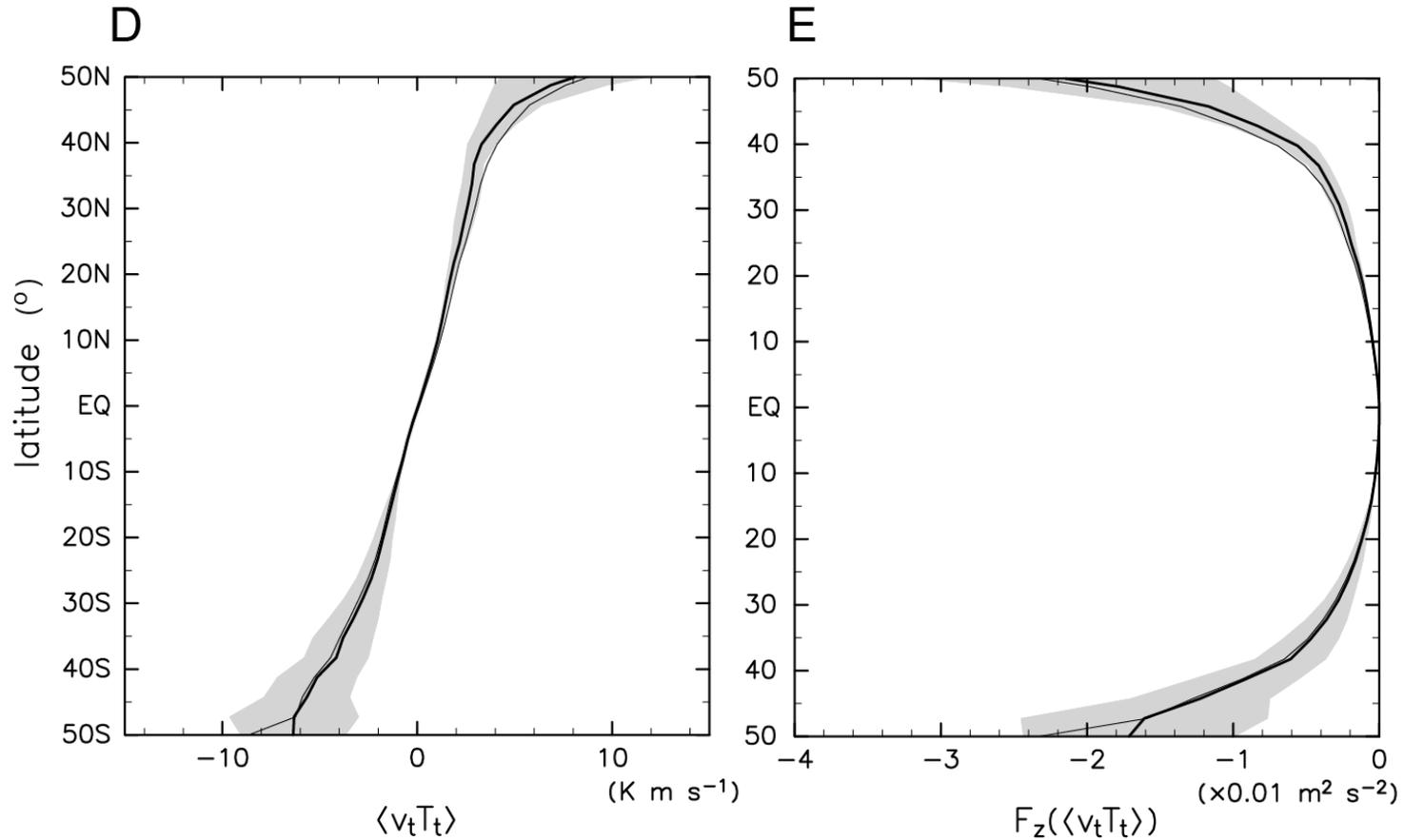


Fig. 2 (後半) of H20

Fig. 3. Meridional heat flux associated with thermal tide at the cloud top and vertical AM flux. (A) Mean tidal heat flux by the diurnal tide obtained by averaging $\langle v_t T_t \rangle_1$ estimated for the five subperiods (thick solid curve). Shading shows \pm the inter-subperiod standard deviation. Thin solid curve: $\langle v_t T_t \rangle_1$ obtained from u_t and T_t derived by averaging over the entire three years. (B) As in (A) but for $f_{zT1} \equiv \zeta_a S^{-1} \langle v_t T_t \rangle_1 \cos\varphi$ (using ζ_a in Fig. S1B and $S=$

Summary of suggested acceleration due to the vertical AM transport (order estimation only)

- Thermal tides
 - Wavenumber-2 gravity-wave mode: accelerates SR on $O(1)$ m/s/day or smaller (comparable to tidal horizontal acceleration)
 - Extratropical wavenumber-1 Rossby-wave mode: weak
 - Low-latitude wavenumber-1 gravity-wave mode: weak
- Other disturbances: no indication from Akatsuki

AM balance suggested from observation by Akatsuki

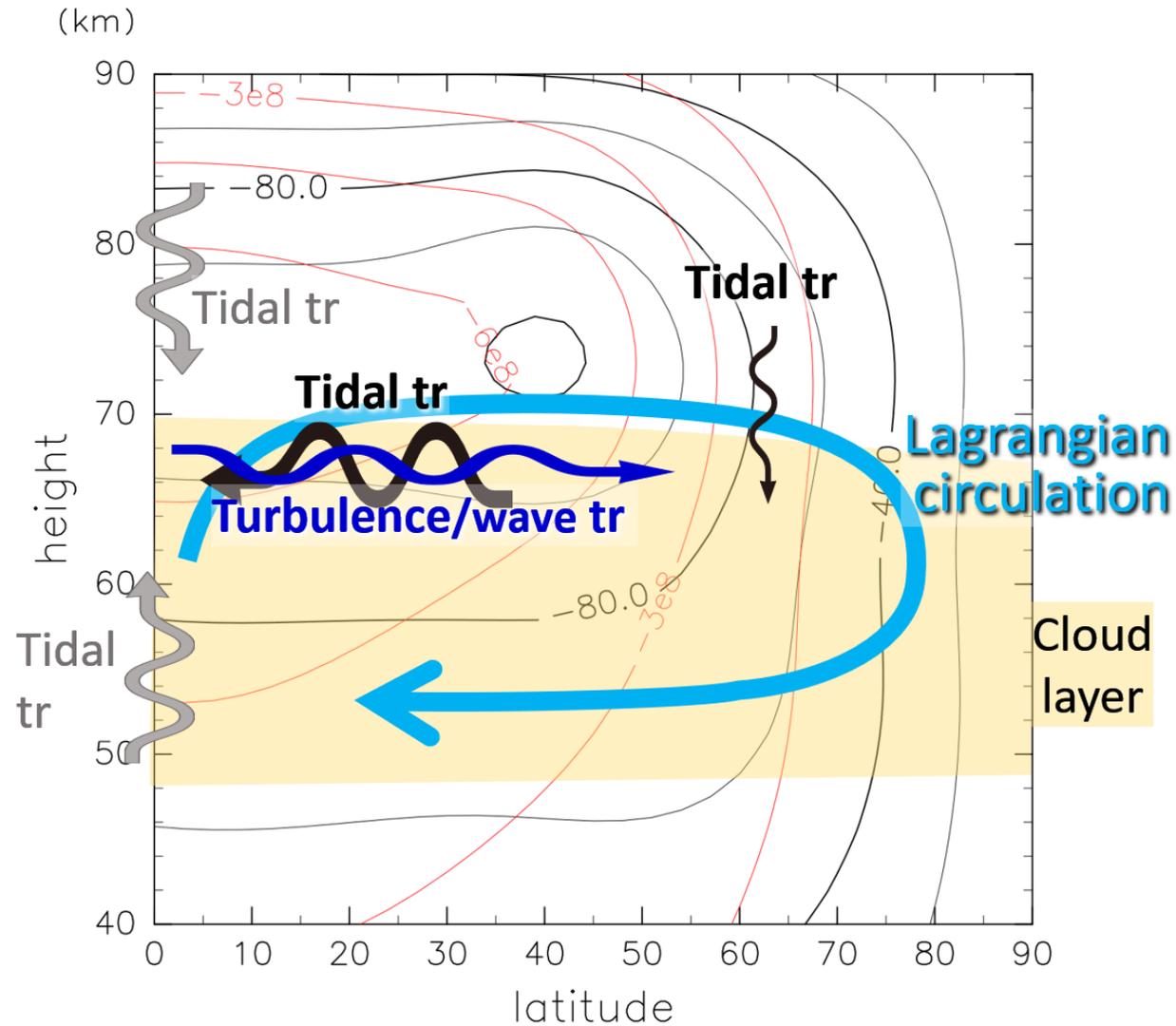


Fig. 4A of
H2O

Schematic illustration of suggested AM balance in the cloud layer of Venus. A: those quantified or order-estimated in this study; Wavy arrows indicate eddy transports of SR's negative AM; items with "tr" represent transports quantified (black, blue) or order-estimated (gray) in this study

Mid-latitude / deep in the clouds (not yet observationally quantified)

- AM redistribution by hydrodynamic instability is expected
 - Baroclinic-barotropic instability
 - Inertial instability
 - Kelvin-Rossby formation

AM balance suggested from observation plus speculation

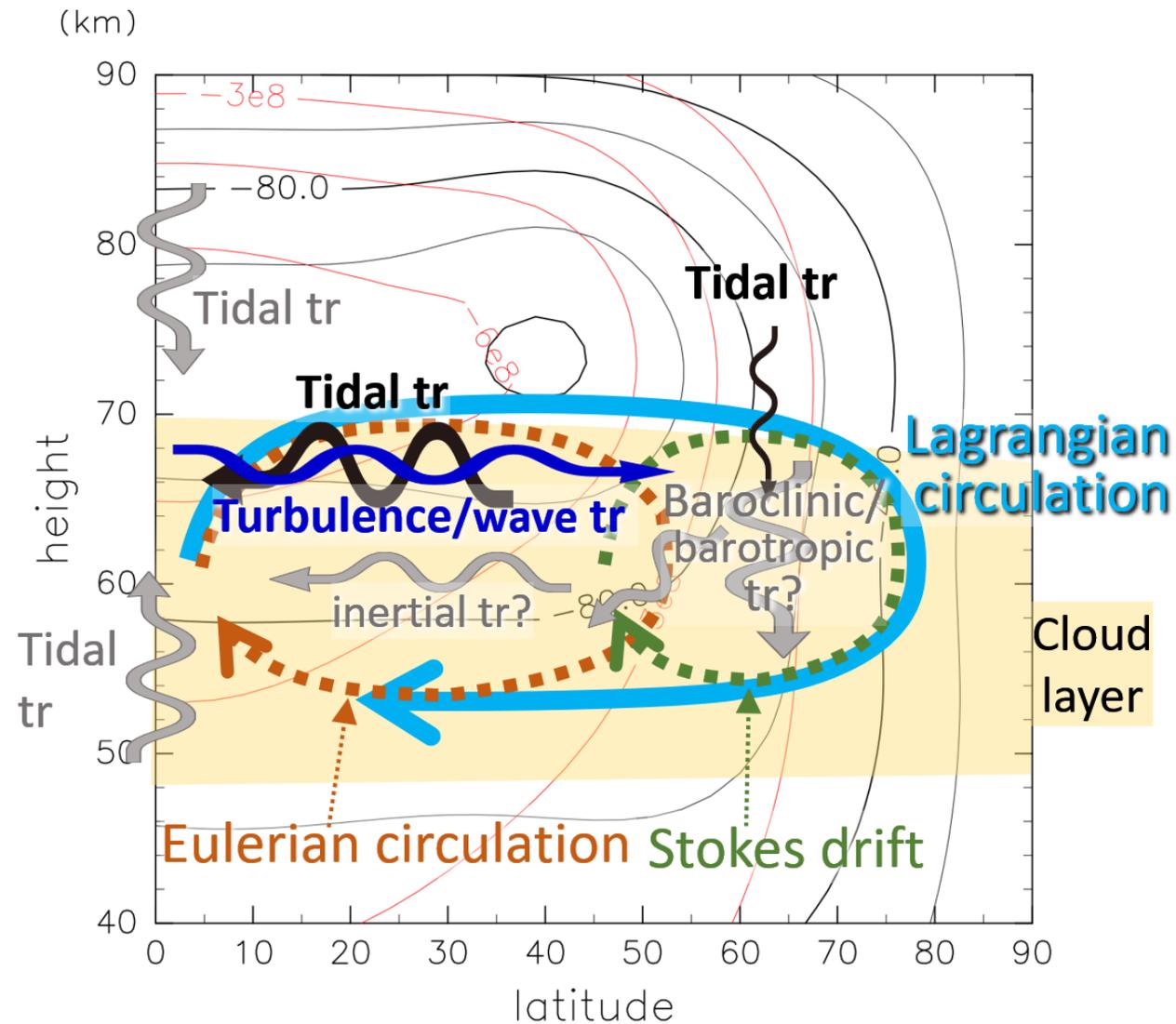
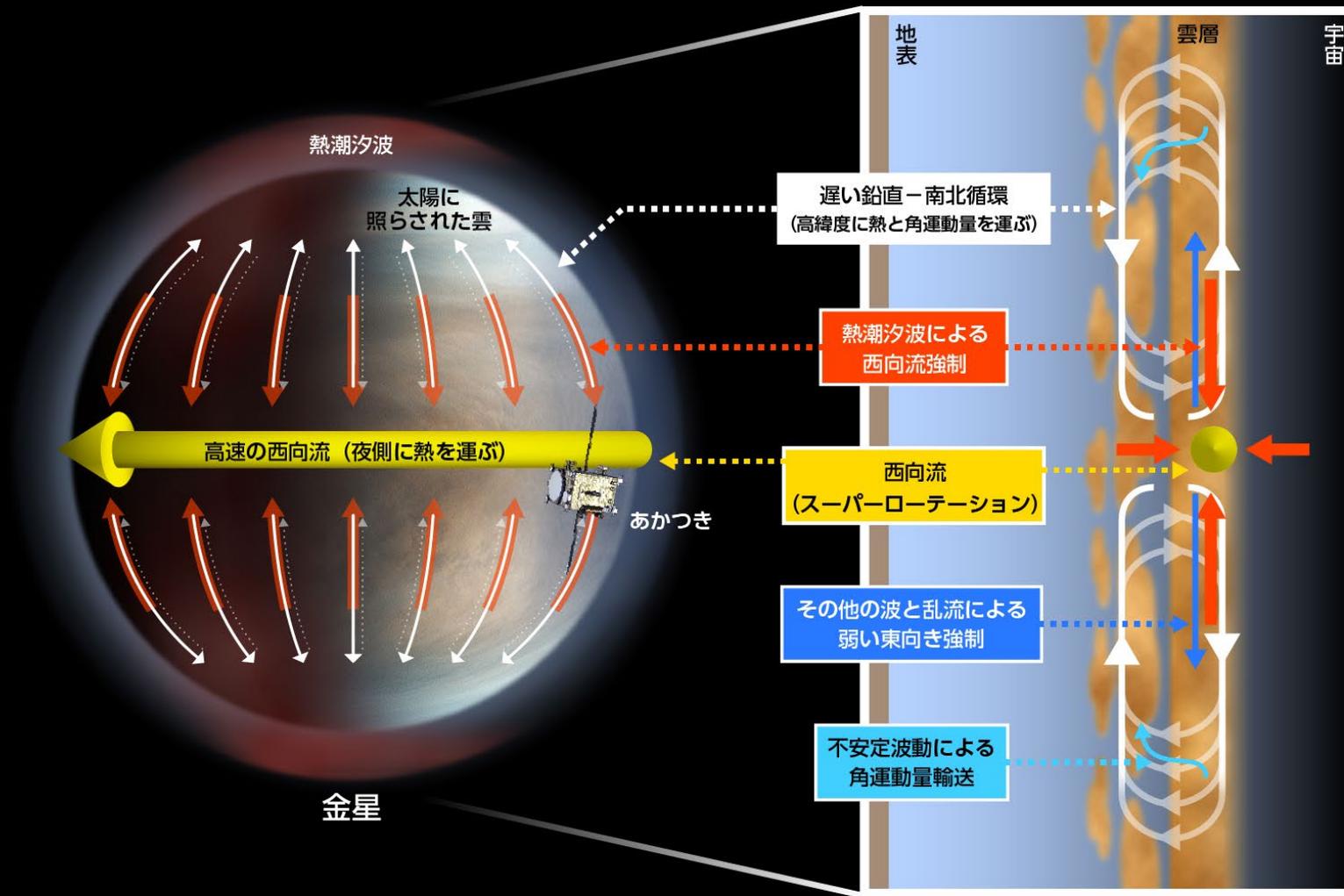


Fig. 4B of
H20

Schematic illustration of suggested AM balance in the cloud layer of Venus. B: A plus speculation. Wavy arrows indicate eddy transports of SR's negative AM; items with "tr" represent transports quantified (black, blue) or order-estimated (gray) in this study, and those with "tr?" (in B) represent suggested ones.

プレスリリース用模式図



まとめ

- 「あかつき」のデータを使って金星大気の超回転の維持機構を研究。
- 赤道域雲頂付近の角運動量(AM)極大値がいかに再生されるかに焦点。
 - 熱潮汐波：水平及び鉛直にAMを輸送し，再生に貢献（加速センス）
 - それ以外の波＋大規模水平乱流：その逆（減速センス）
- 中低緯度（示唆のみ）：不安定擾乱による角運動量輸送で子午面循環をショートカット（AM分布形成に貢献）
- 全般シナリオ：「潮汐波が重要な役割を果たすnon-classicalなGierasch機構」という言い方ができる
- その他の話題：子午面循環の確認（再考），大規模乱流存在の示唆，Rossby波等の役割など。

最近の研究：SRと惑星規模波動の長期変動

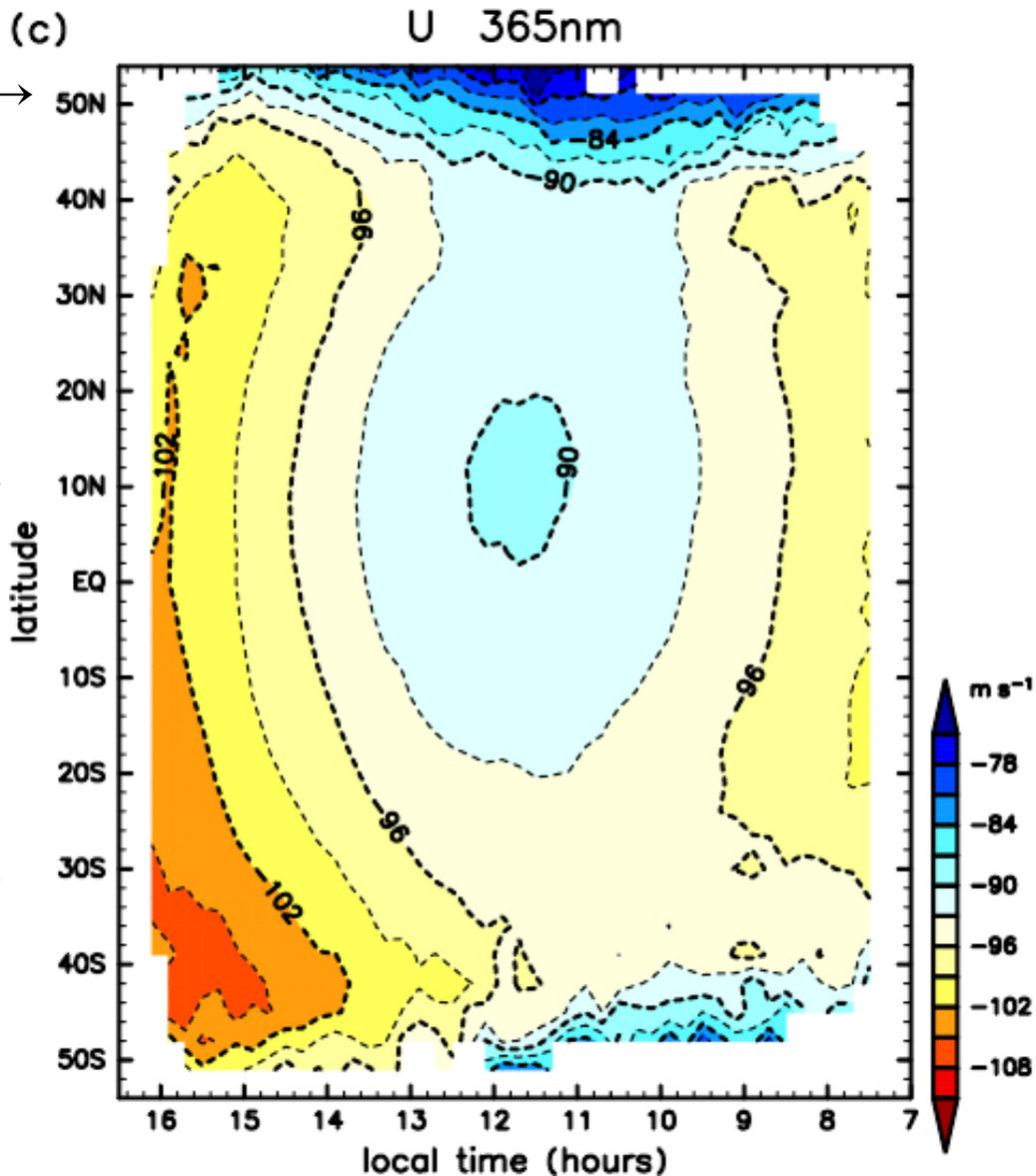
Horinouchi+ (2024) JGR-Planets in press

長期平均 → 平均的SR風 & 潮汐の構造

365 nm風
(283nmは略)

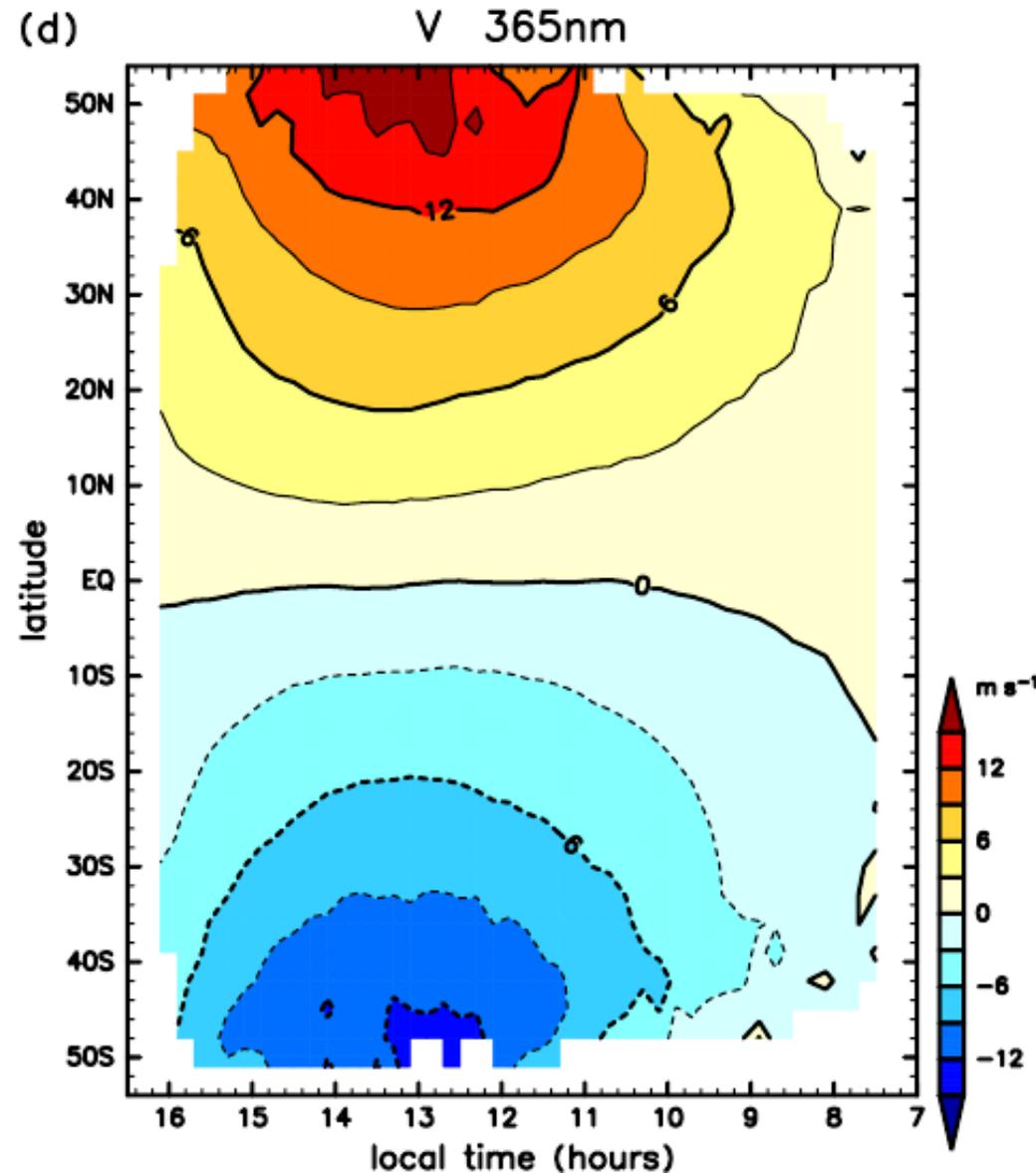
← 経度140度分 →

波数 1 的 →



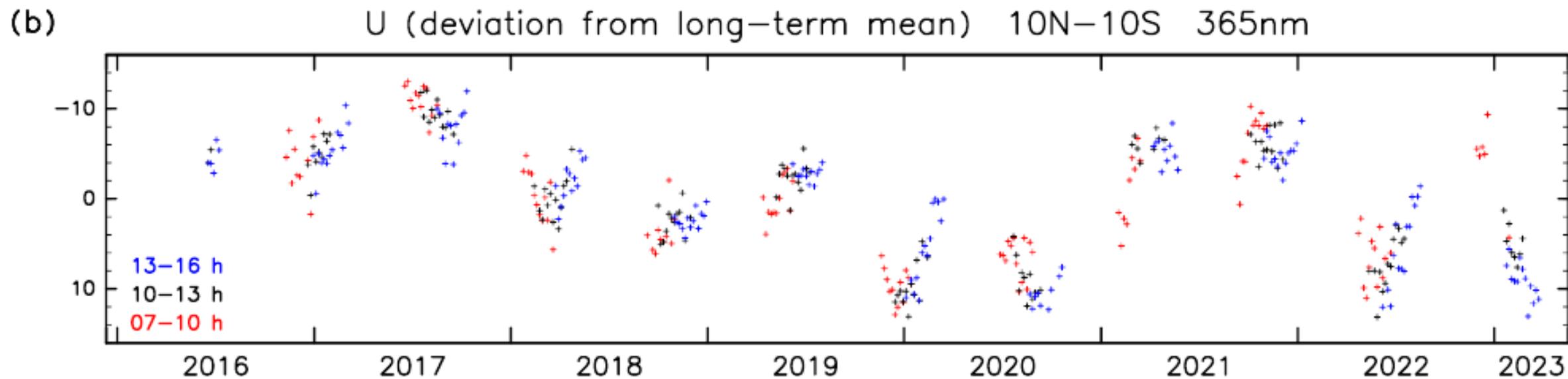
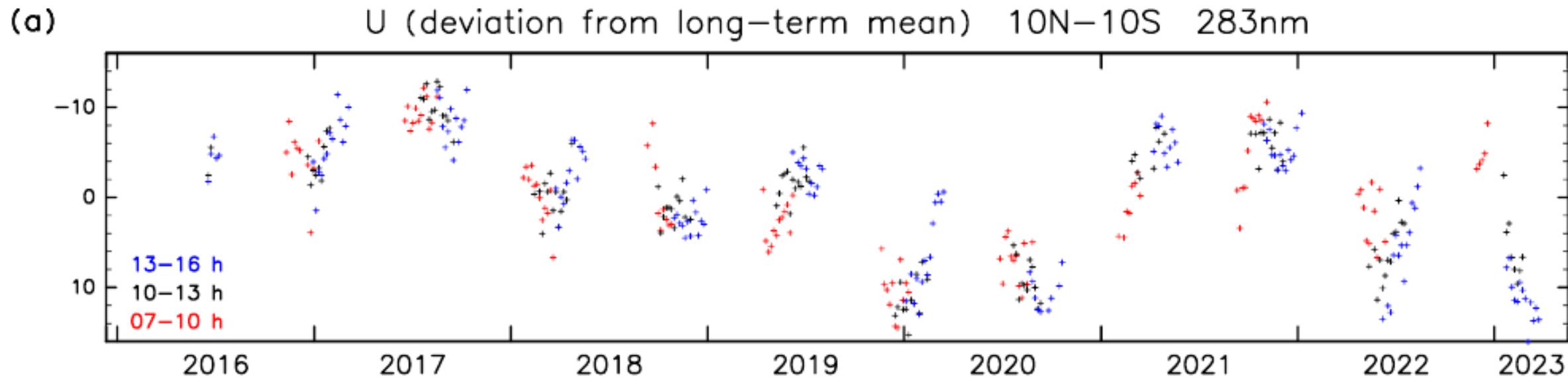
波数 2 的 →

南半球のほうが速い。
真の非対称か計測高度の
違いかは不明。

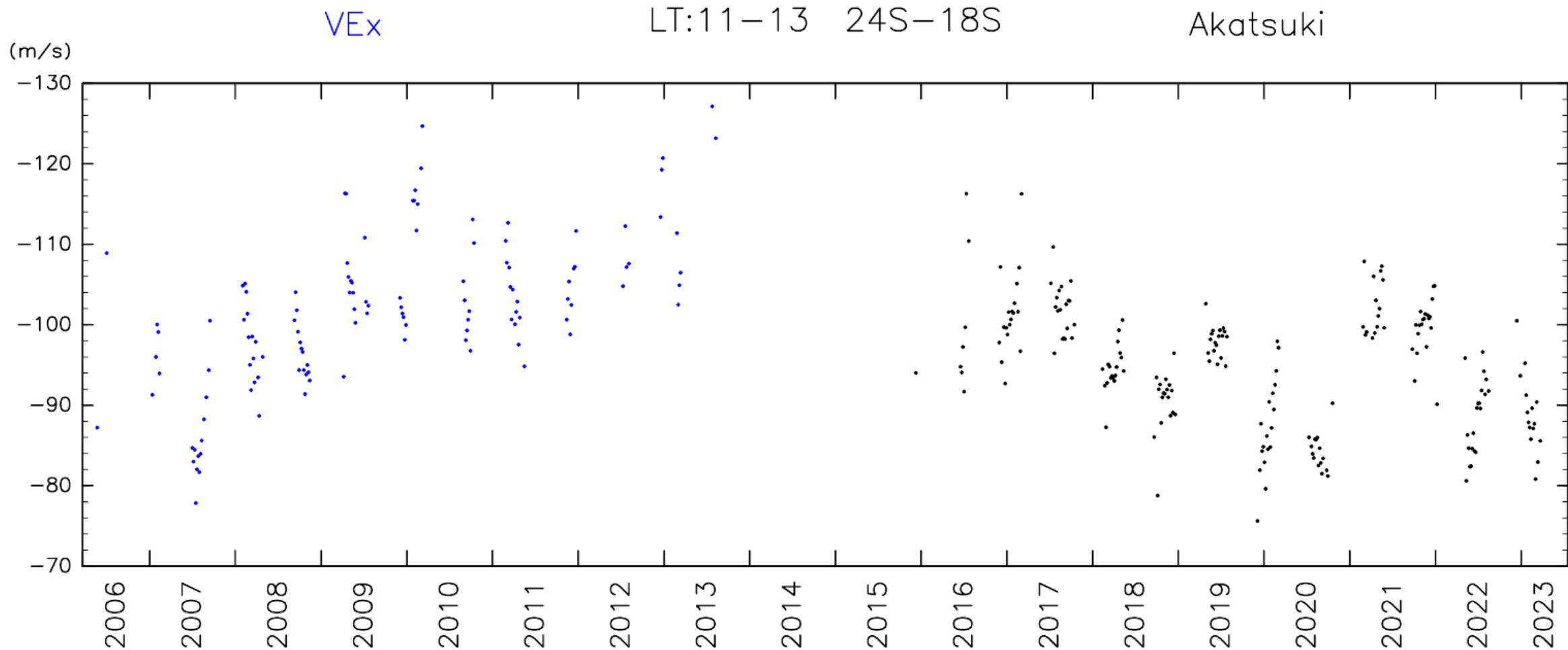


東西風（の長期平均からずれ）の推移

- 複雑な変動：単純な周期性はない。両波長の結果は同期。赤道域以外でも。



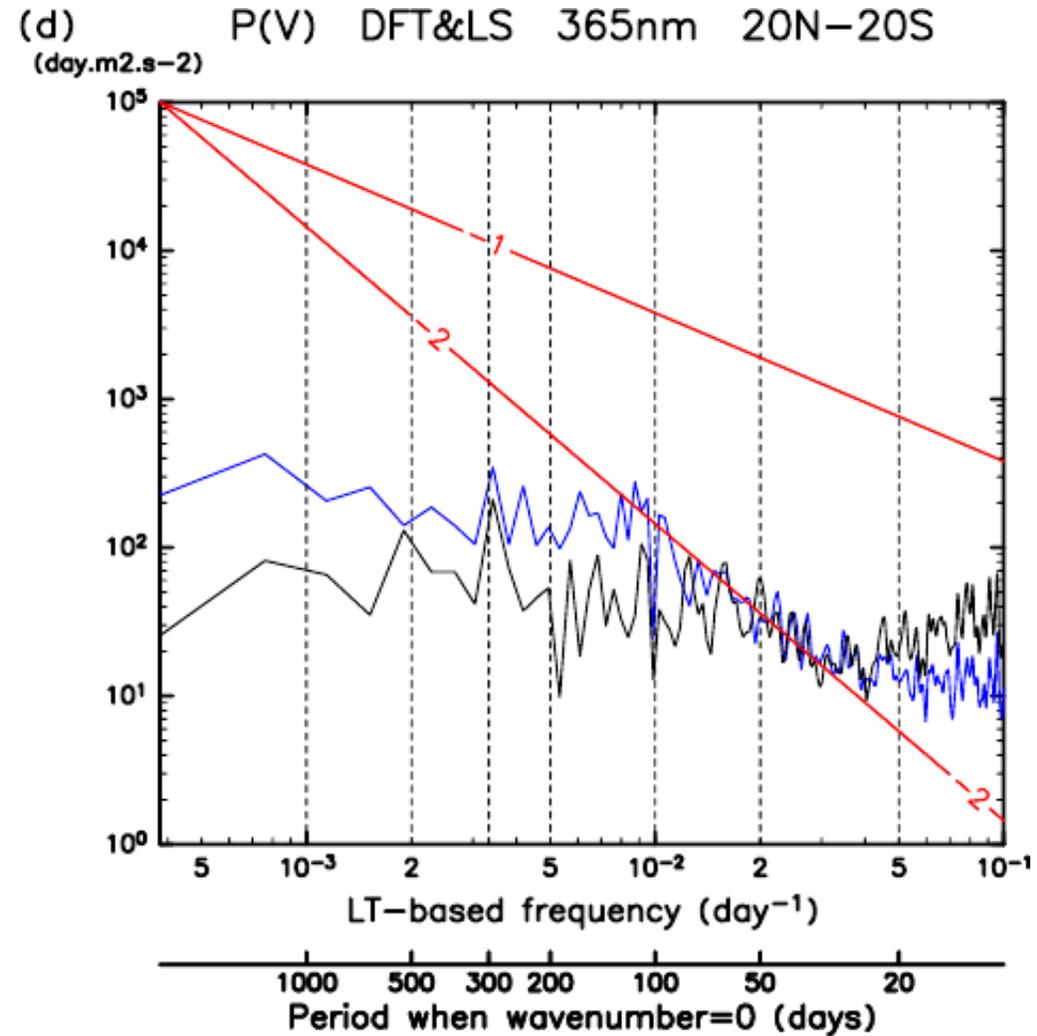
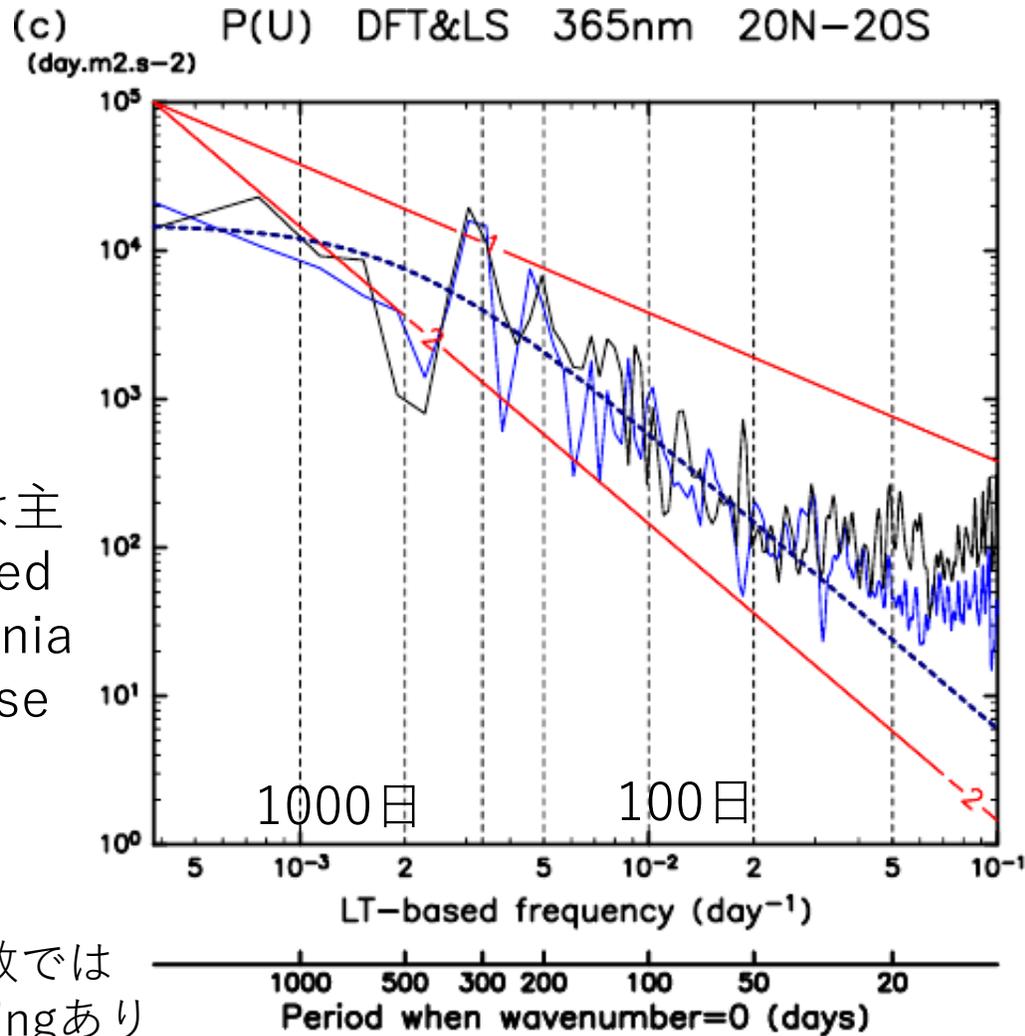
雲頂付近のSRの長期変動 Venus Express + Akatsuki



~全期間の東西風のパワースペクトル (DFT, Lomb&Scargle)

- U: redノイズ的→内部変動?

- V: Uよりホワイト(DFTではデータギャップによりホワイト度減)

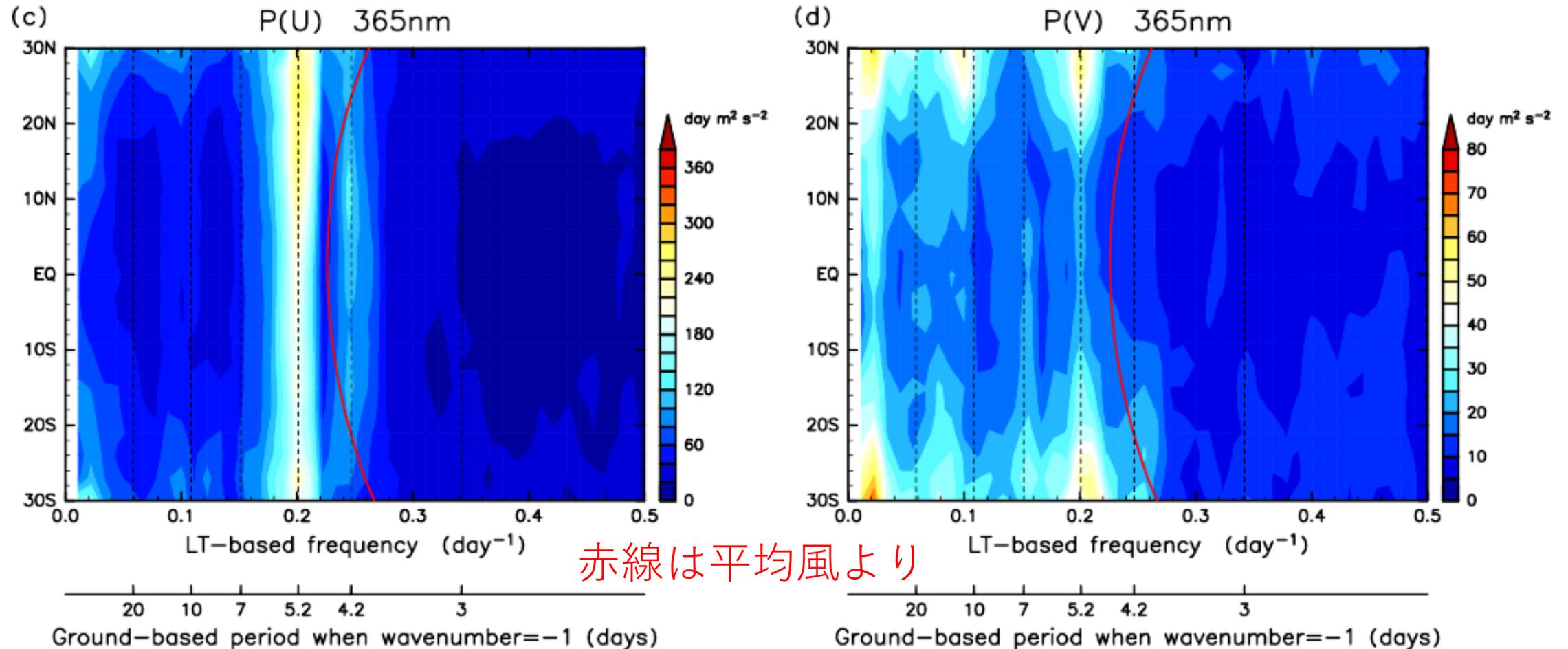


高振動数では smoothingあり

惑星規模波動等のスペクトル

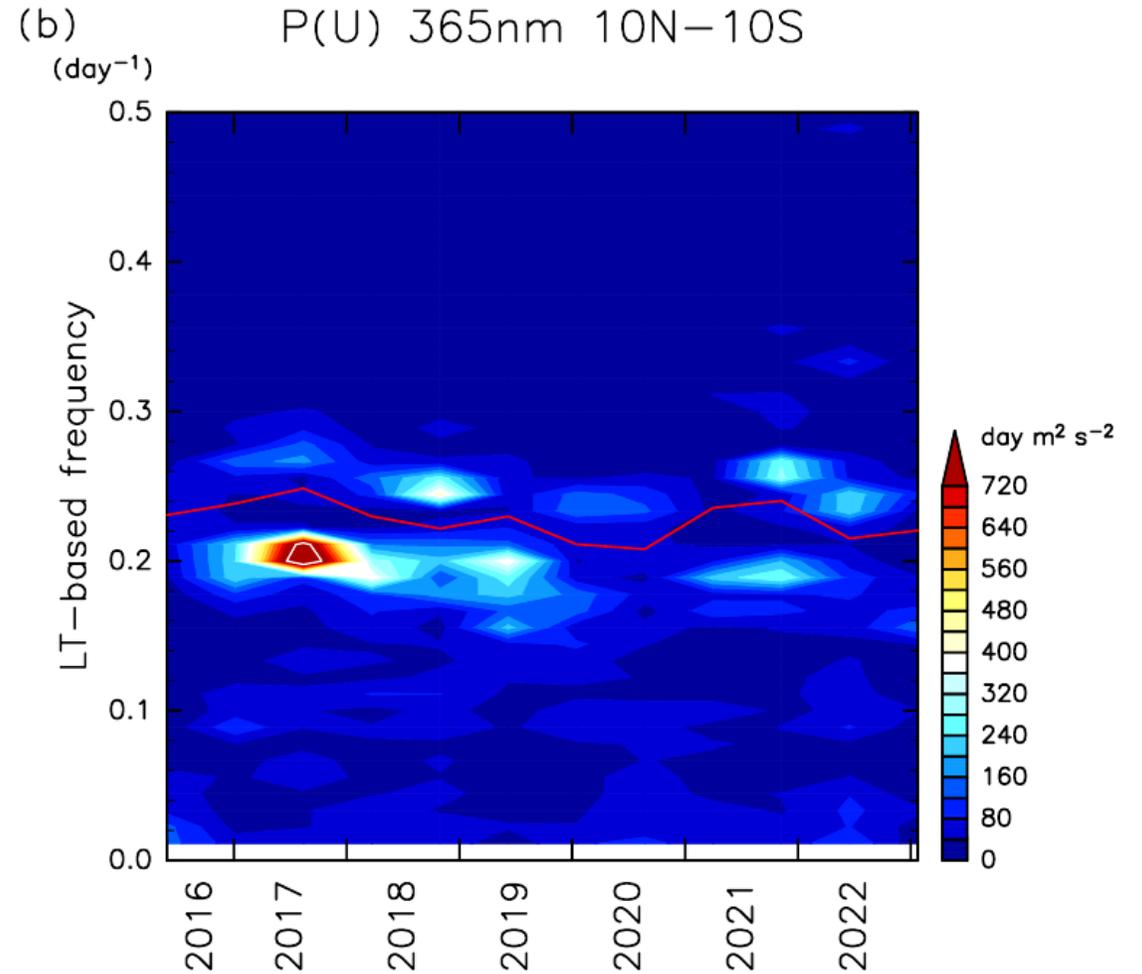
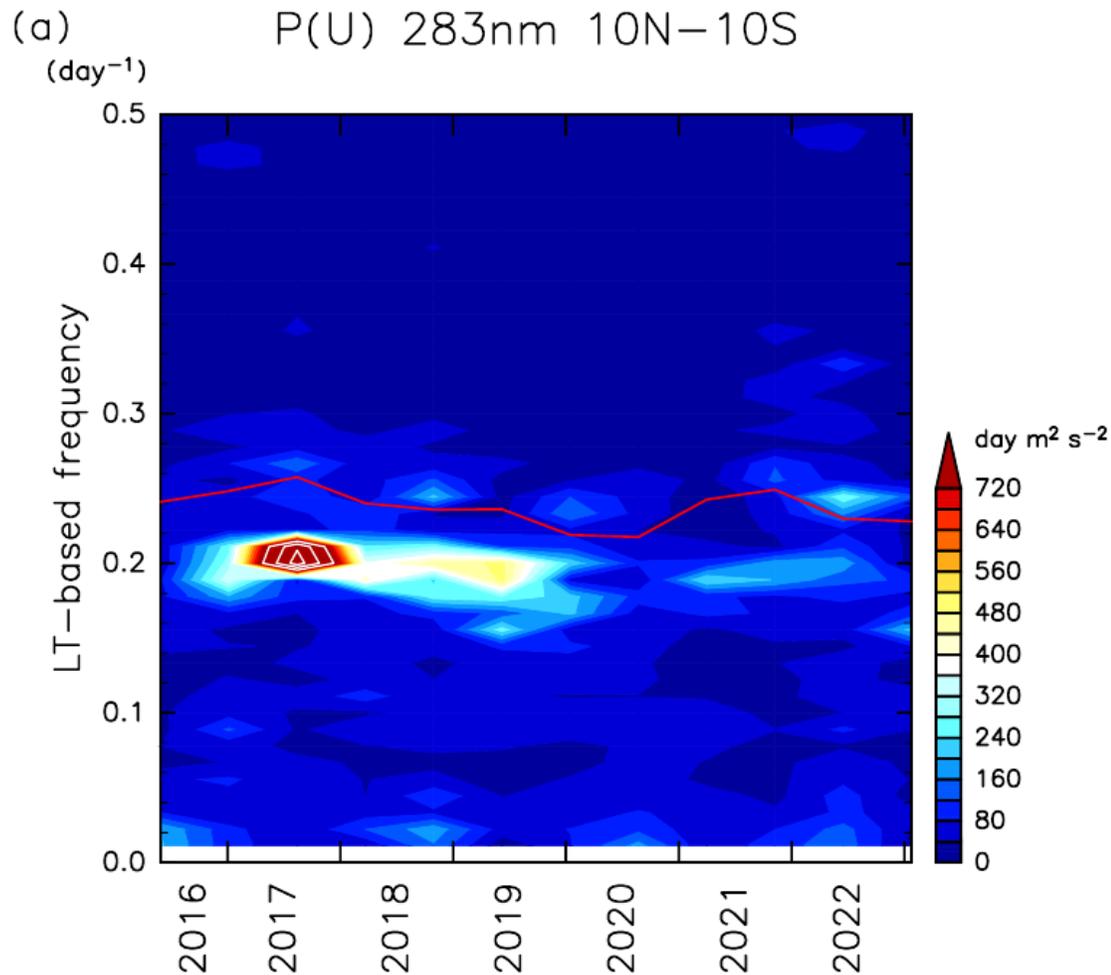
(90日毎のスペクトルの平均, 365nm)

- ~5日波 (伝統的にRossby波と解釈されてきた), ~4日波 (同赤道Kelvin波と), 弱い10~15日周期にもシグナル



東西風スペクトル(from 90日)の推移

- ~5日波の周期はほぼ一定，~4日波の周期はSRの回転周期（赤線）をフォロー：主に存在する高度の違いを示唆。



まとめと議論

- 雲頂付近の平均東西風(SRの風)は複雑に変動
 - 南北非対称性 (風速の非対称か計測高度の非対称かは不明)
 - 時間変化はred (Brownian)ノイズ的：内部変動の存在を示唆
 - 過去の研究は単一周期での変動の有無を議論：周期的外力想定？
実際はそうはなっていない
- 惑星規模波動
 - ~4日波の振動数はSRの変動をフォロー：主に雲頂付近に存在？
 - ~5日波の振動数はほぼ一定：より深くから存在
 - 励起源候補 (AFES結果等を参考に)：4日波は主に水平のRossby-Kelvin結合 (ただし結果に一部矛盾もある), 5日波は主に鉛直のそれ