

CPSセミナー-2020-10-08
金星大気の超回転の維持機構について：
あかつきからの示唆

堀之内 武（北大地球環境）（共同研究者多数）



堀之内 武

- 専門：気象学・地球流体力学
- 大学（院）：京大地球惑星（気象学; 廣田・余田），
職：ワシントン大(PD), 京大生存圏（助手,助教），北
大地球環境（准教授，教授）
- 研究対象
 - 台風（ごく最近）
 - 金星大気（近年）
 - 中緯度の気象学（夏季の降水と水輸送の力学など）（近年）
 - 大気重力波，波動－平均流相互作用（古くから）
 - 熱帯気象，成層圏力学（古くから）
- 手法
 - 数値シミュレーション，観測データ利用，理論－基本は力学屋。

あかつき

- 日本金星探査機
- 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）。
- 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

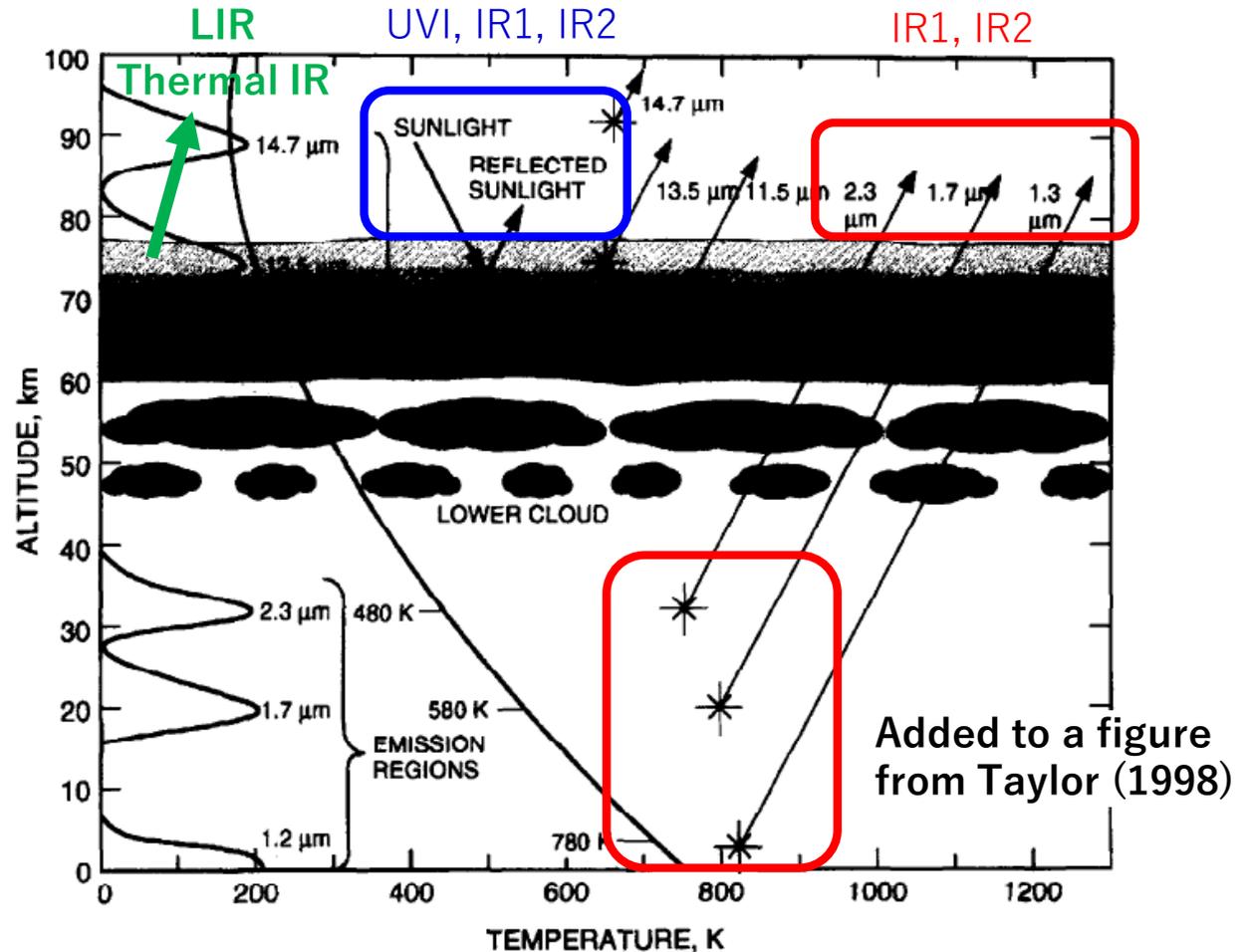


Figure 2. Schematic of a proposed sounding experiment for Venus as part of a proposed 'Discovery' mission (courtesy Dr. K.H. Baines, JPL).

あかつきによる紫外画像の例

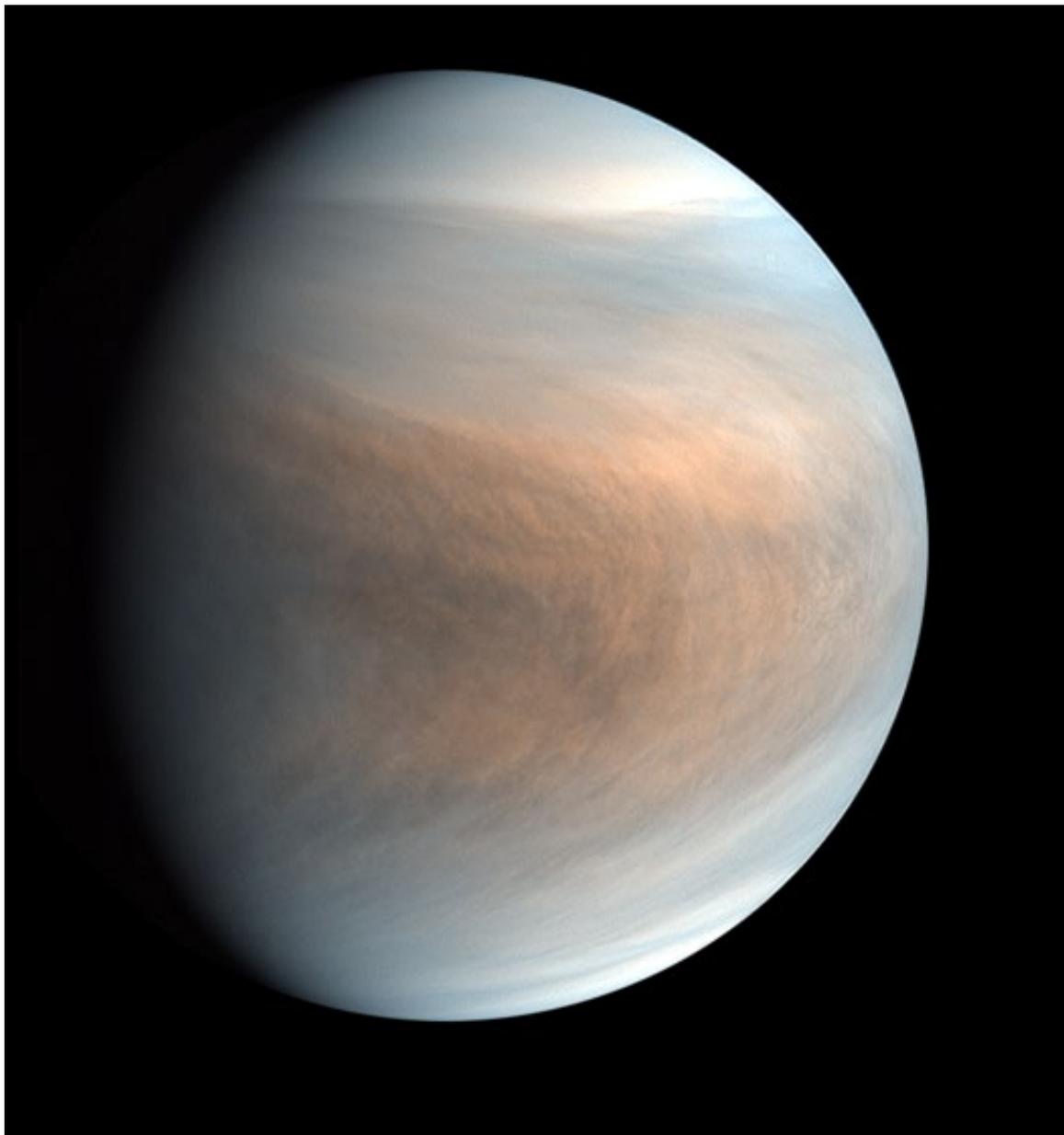
<http://akatsuki.isas.jaxa.jp/gallery/> より

HP掲載のキャプション：

UVIの283 nm画像と365 nm画像から作成した金星昼面の合成擬似カラー画像。283 nm → 青、365 nm → 赤、両者の混合 → 緑として着色し合成している。UVIが観測している283 nmには二酸化硫黄

(SO_2)、365 nmにはまだ正体ははっきり分かっていない化学物質の吸収帯がある。例えば、この金星画像で青っぽい場所は SO_2 が比較的少ないと考えられる。この画像のように、金星を紫外線で見ると横倒しのV字模様が見える。

© PLANET-C Project Team



あかつきによる赤外画像の例（夜面, $2\mu\text{m}$ 帯）

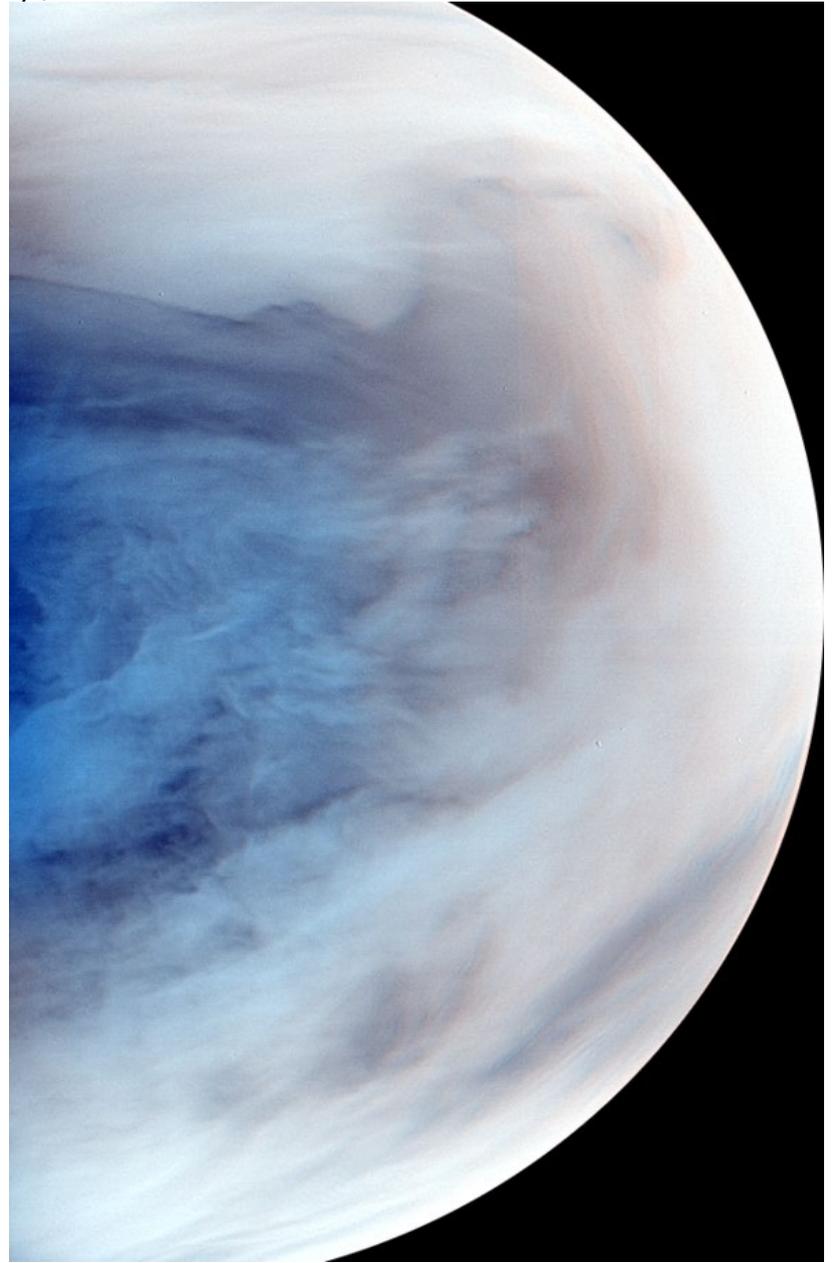
<http://akatsuki.isas.jaxa.jp/gallery/> より

HP掲載のキャプション：

IR2の $1.735\mu\text{m}$ 画像と $2.32\mu\text{m}$ 画像から作成した金星夜面の合成擬似カラー画像。金星の昼面は明るすぎてノイズの原因になるため、金星の夜面だけが視野に入るように「あかつき」の姿勢を制御して撮影を行った。

$1.735\mu\text{m}$ → 青、 $2.32\mu\text{m}$ → 赤、両者の混合 → 緑として着色し合成している。IR2は夜面の雲を透過してきた赤外線を観測するため、雲が影絵のように暗く写る。ここでは雲が白く見えるように、明暗反転して表示している。

© PLANET-C Project Team



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

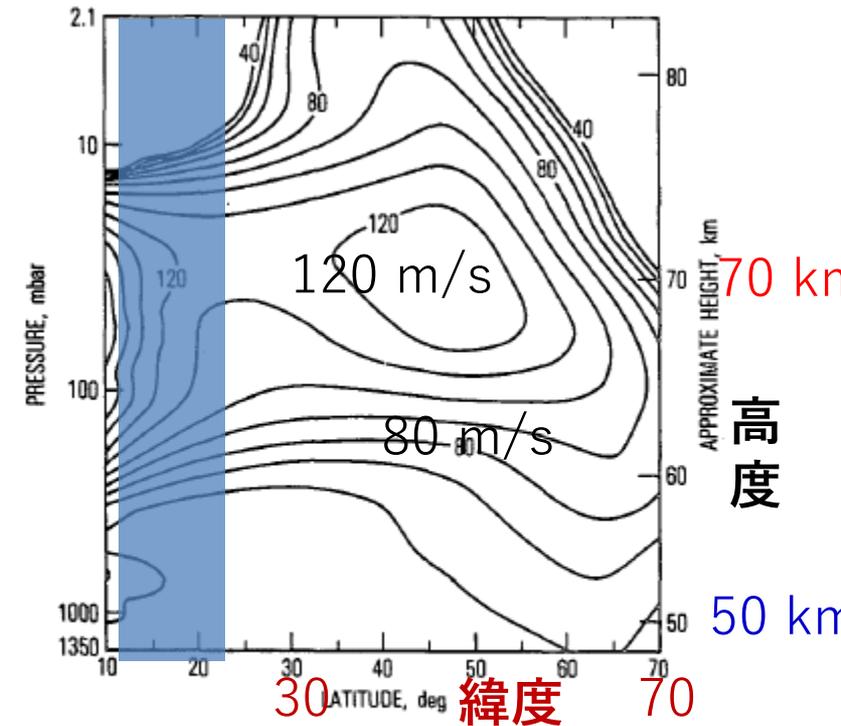
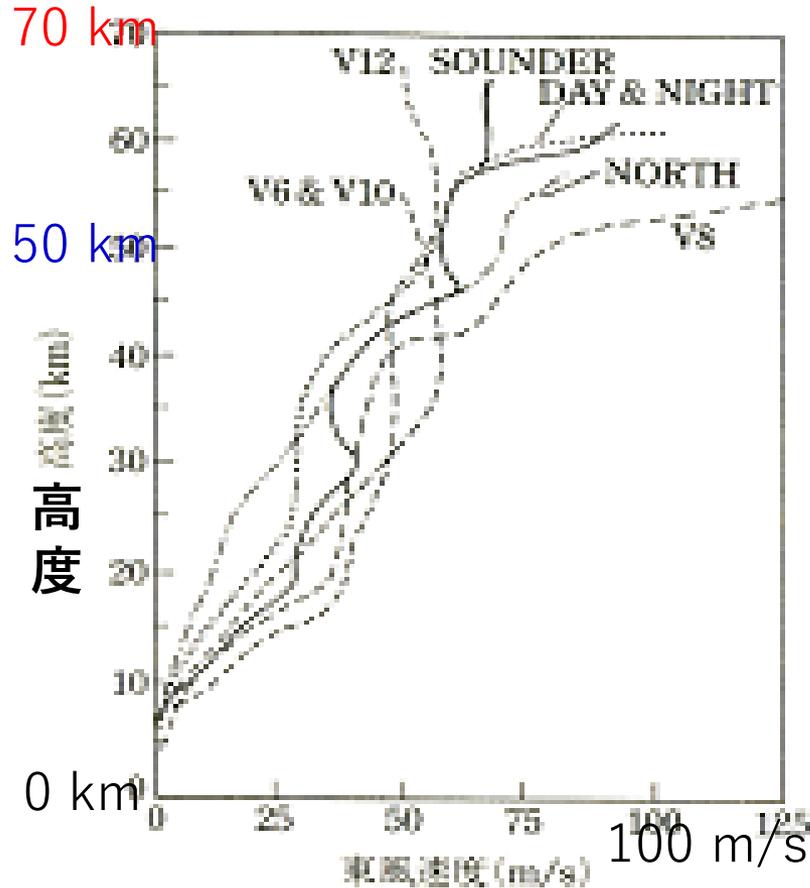


FIG. 4. Contours of westward zonal wind speed (m s^{-1}) for the Northern Hemisphere derived from temperature data assuming cyclostrophic balance. Contour interval is 10 m s^{-1} . Contours have been smoothed.

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)

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

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

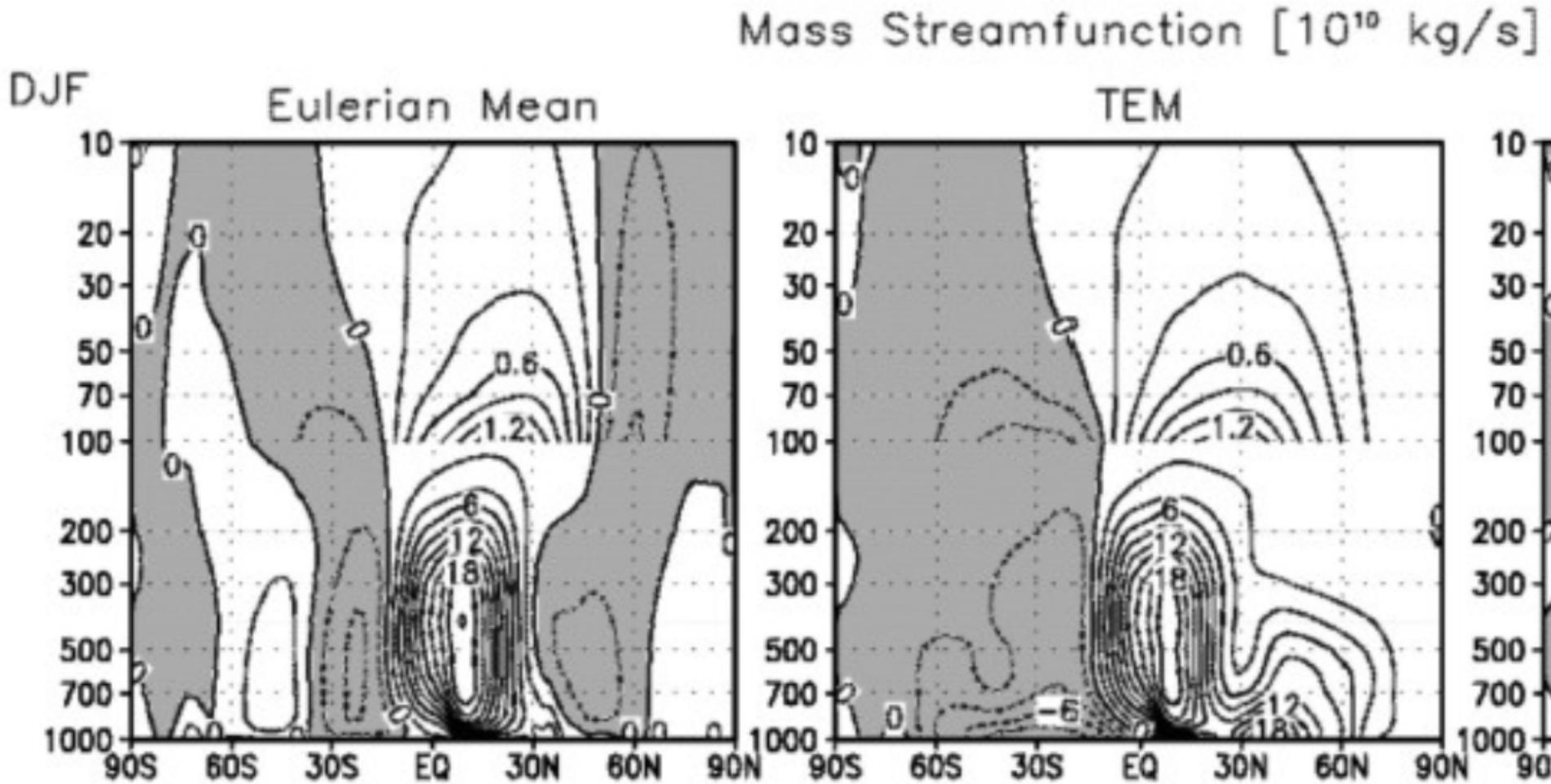
変形オイラー平均(TEM)方程式

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

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

FYI: Eulerian mean meridional circulation vs the “residual circulation” in the transformed Eulerian mean (TEM) (example: boreal winter on the Earth)



Hideの定理

- 軸対称な流れのみでは、大気内部に赤道地表面の角運動量（質量あたり）の極大値を超える箇所は作れない:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\boldsymbol{v} \cdot \nabla M \text{ より自明}$$

雲追跡による風速推定

- マニュアル追跡

- 手作業。精度は良いと考えられてきた。結果はまばらになりがち。作業者等に依存。

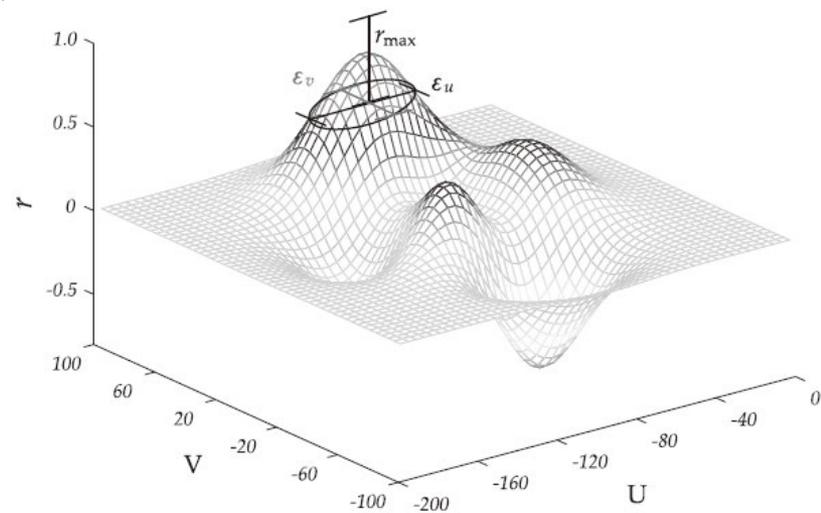
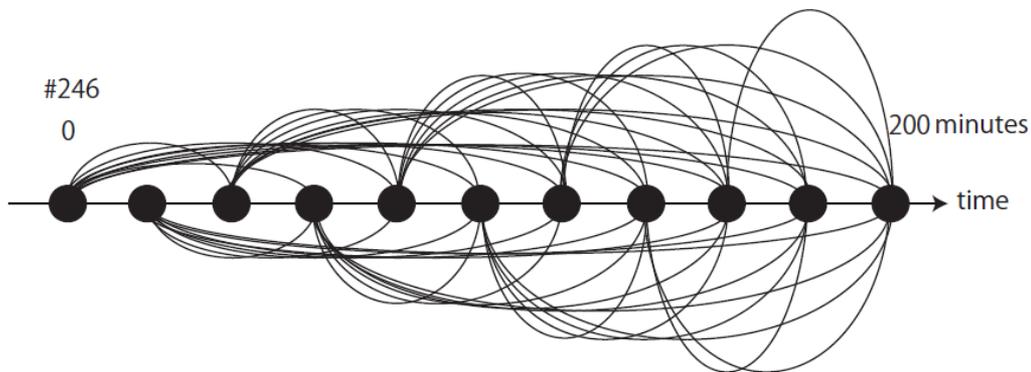
- 自動追跡（本研究）

- 大量処理に適。精度は悪いと考えられてきた。
- しかし我々はマニュアル越え：**本研究の基盤**

Ikegawa&Horinouchi (2016)

3枚以上の画像を用いた推定

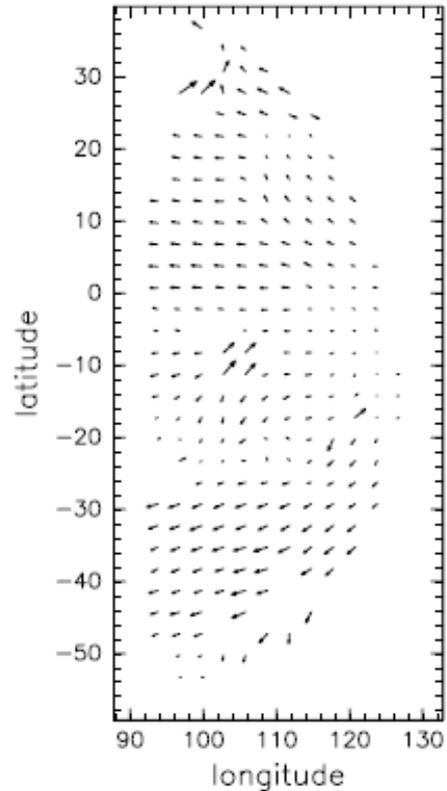
- (一定時間間隔以上の) 二画像を用いた相関曲面を重ね合わせる。
 - 移動速度 (u,v) を揃えて重ねるのがポイント
- 相関曲面ピークの先鋭度より精度推定



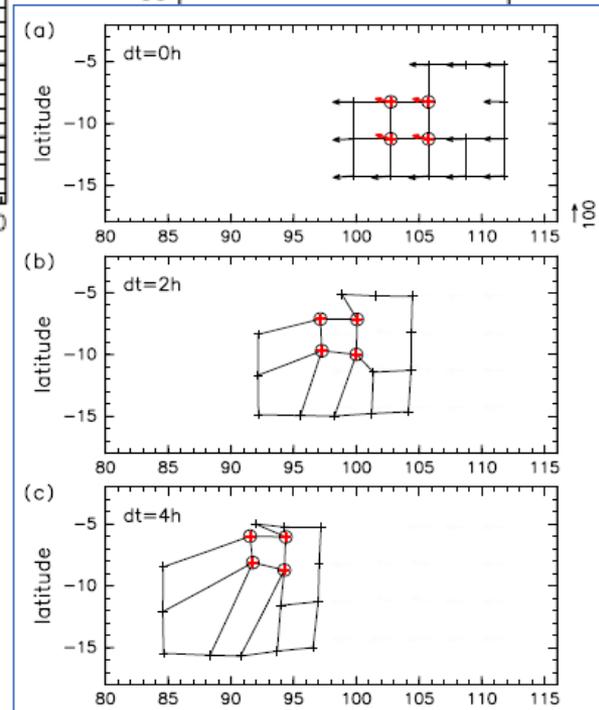
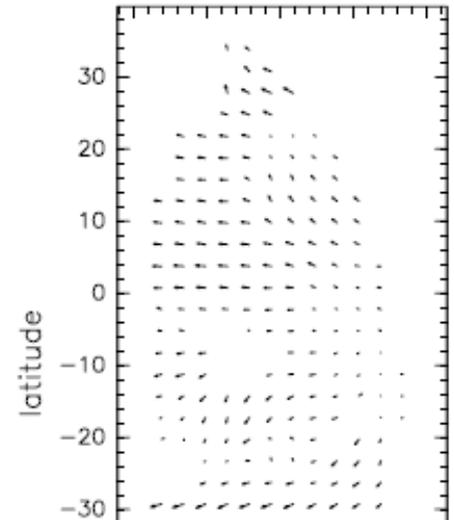
Horinouchi et al. (2017)

- Ikegawa & Horinouchi (2016) をベースに”Deformation consistency” (変形一貫性) という概念を導入して
 - 結果を改良 (複数候補から解を選択する「緩和ラベリング」法に, 「解なし」を適切に組み込む新手法) …
- 右図
- 大域的な変形一貫性によるスクリーニング
 - 複数種の運動の検出 (「流れ」と「波」など)

(b) [u+100,v] w/o NM

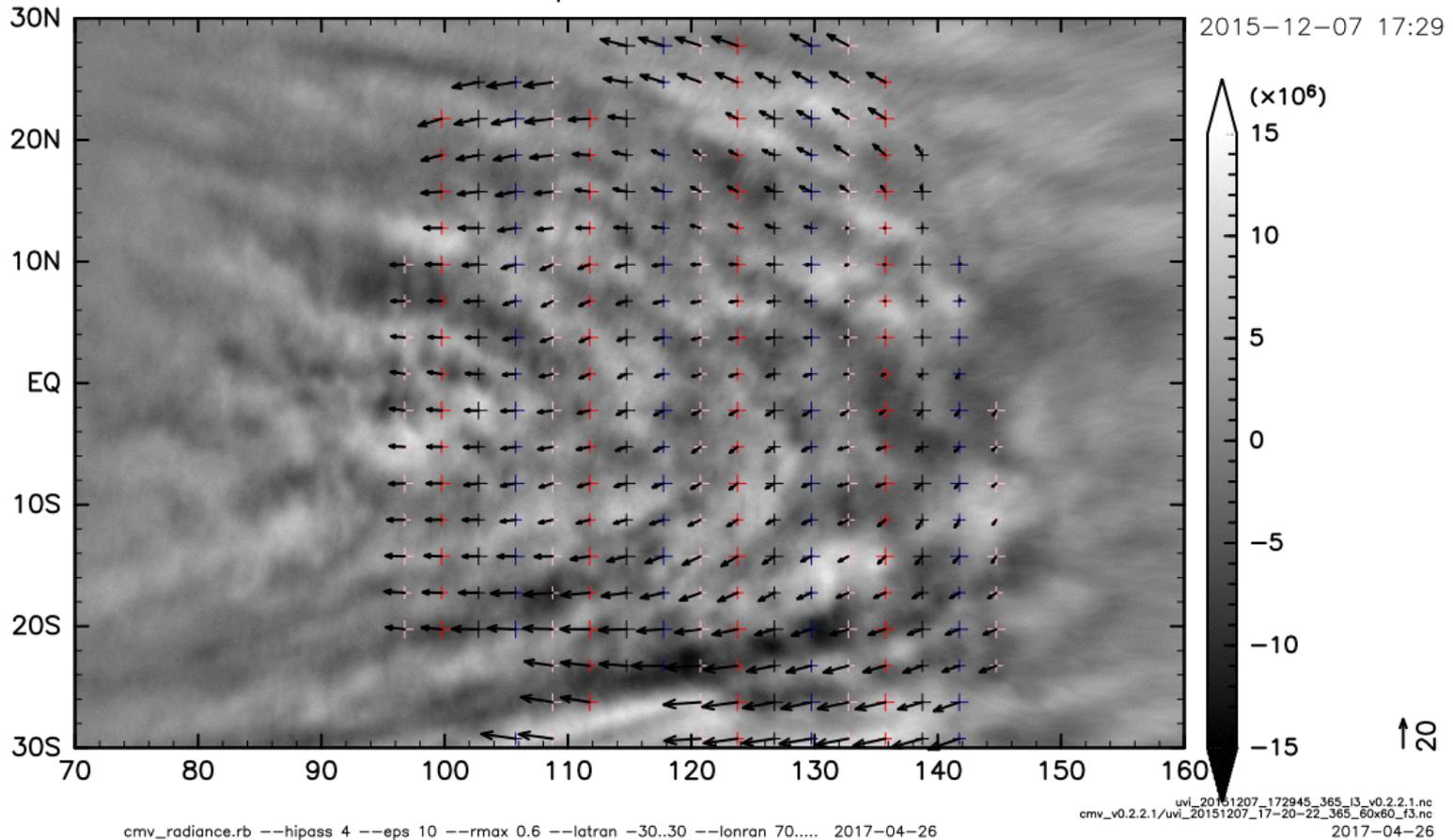


(c) [u+100,v] w/ NM



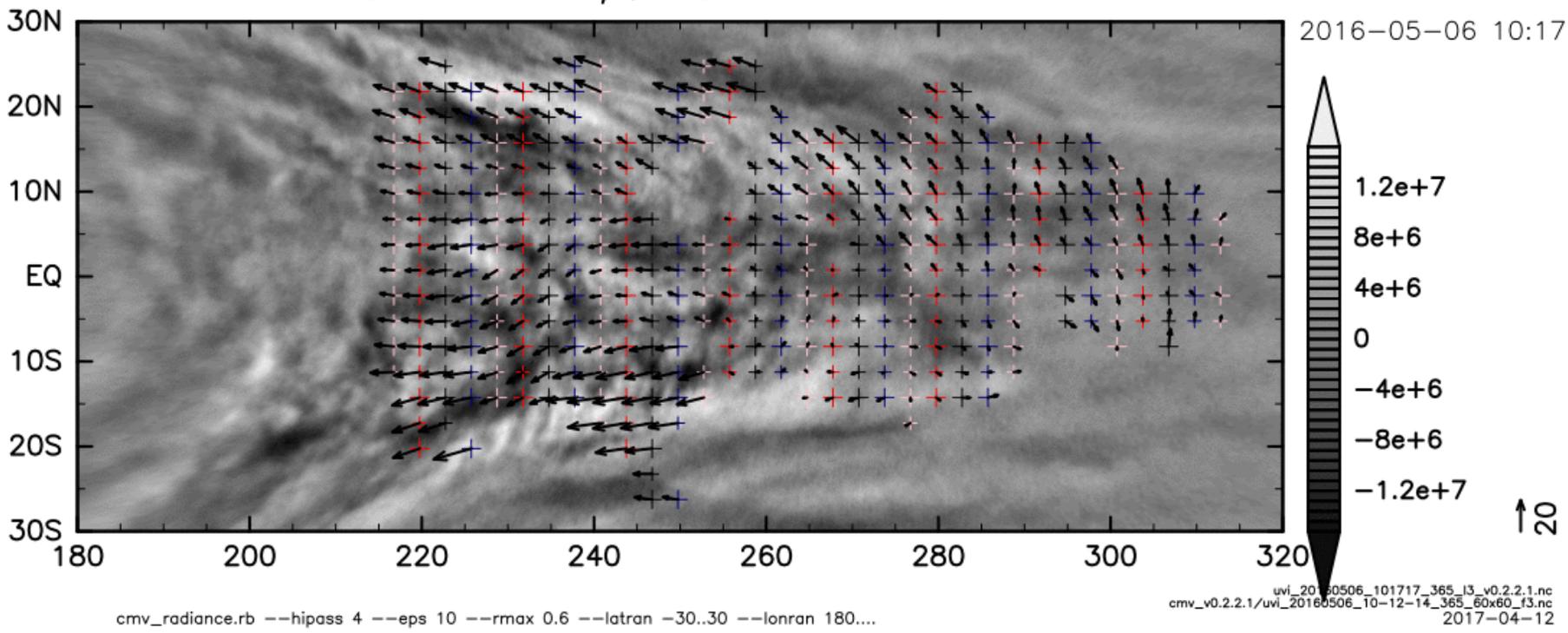
Example 2015-12-07 365nm (deviation from a solid-body rotation: 90 m/s at EQ)

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



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

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



あかつきによる超回転の研究

Horinouchi et al (2020): H20 より

- Horinouchi, T., Y.-Y. Hayashi, S. Watanabe, M. Yamada, A. Yamazaki, T. Kouyama, M. Taguchi, T. Fukuhara, M. Takagi, K. Ogohara, S. Murakami, J. Peralta, S. S. Limaye, T. Imamura, M. Nakamura, T. M. Sato, and T. Satoh(2020) :

How waves and turbulence maintain the super-rotation of Venus' atmosphere.

Science, 368 (6489), 405-409.

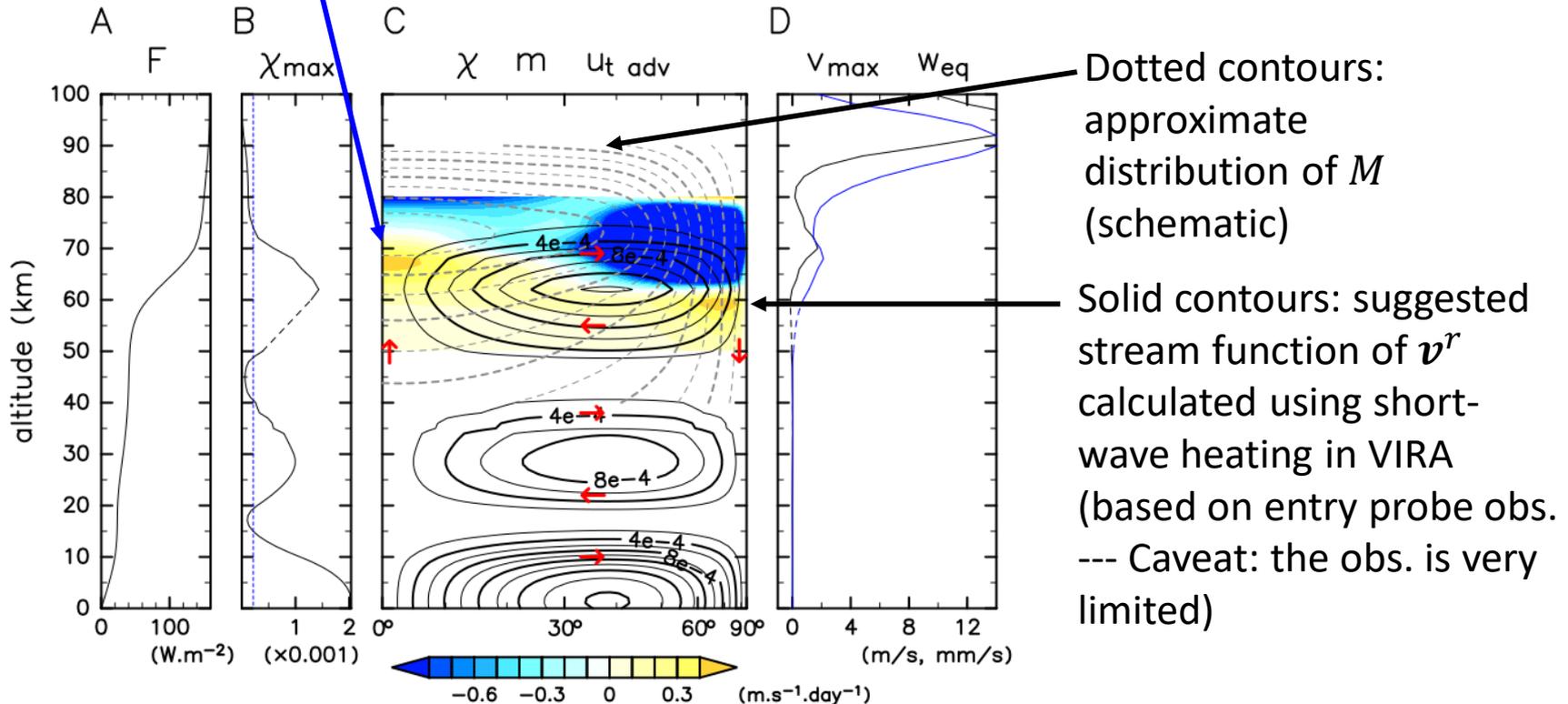
- 解説文 (Web上にPDFあり)
 - プレスリリース (ISAS, 北大, 北海道情報大共同)
 - 遊星人2020年第2号
 - ISASニュース2020年9月号

まずは過去(20C)のデータから子午面
循環についてざっくりと

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

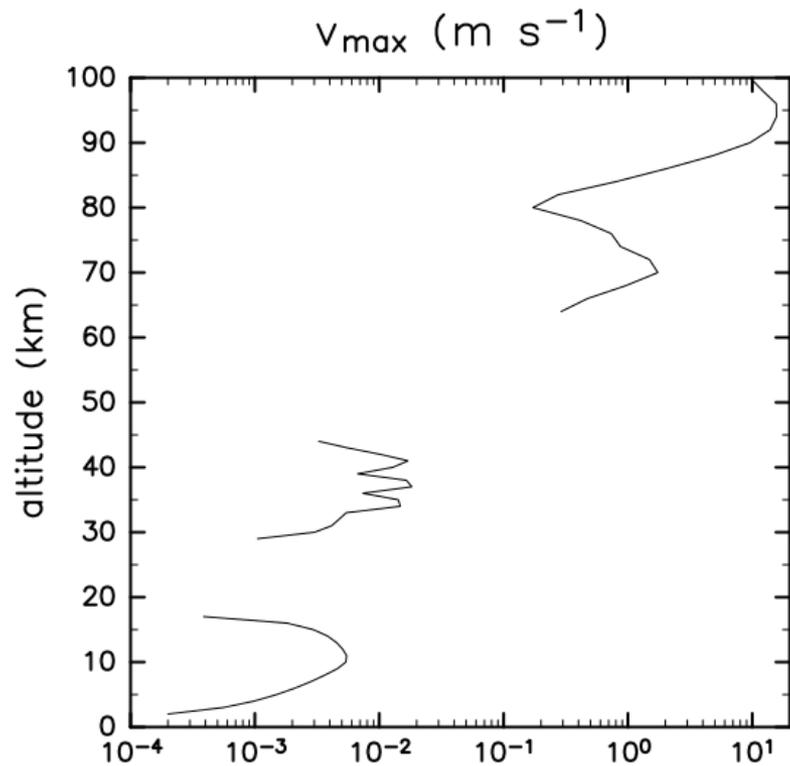
$$-\mathbf{v}^r \cdot \nabla M + \rho_0^{-1} \nabla \cdot \mathbf{F} \sim 0 \quad (2)$$

- 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 $\text{div}\cdot\mathbf{F}$



- ちなみに、赤道から極まで
 - 1 m/s で進めば~100日
 - $1\text{e-}2$ m/s で進めば~1万日

ざっくり見積もった子午面循環は，超短波の過不足から予想される熱輸送によく合う

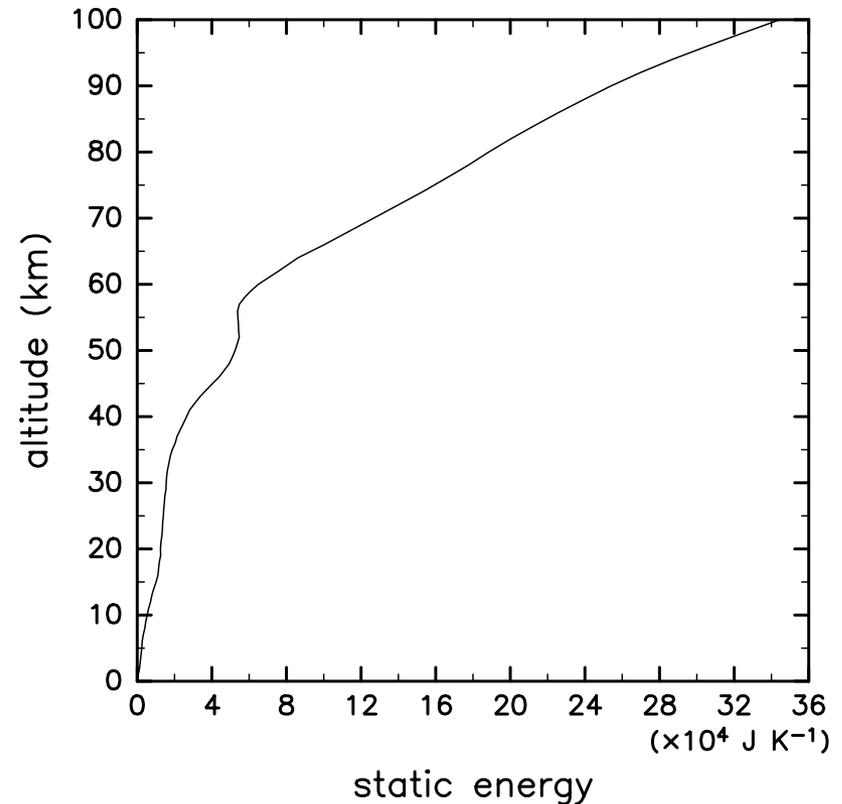
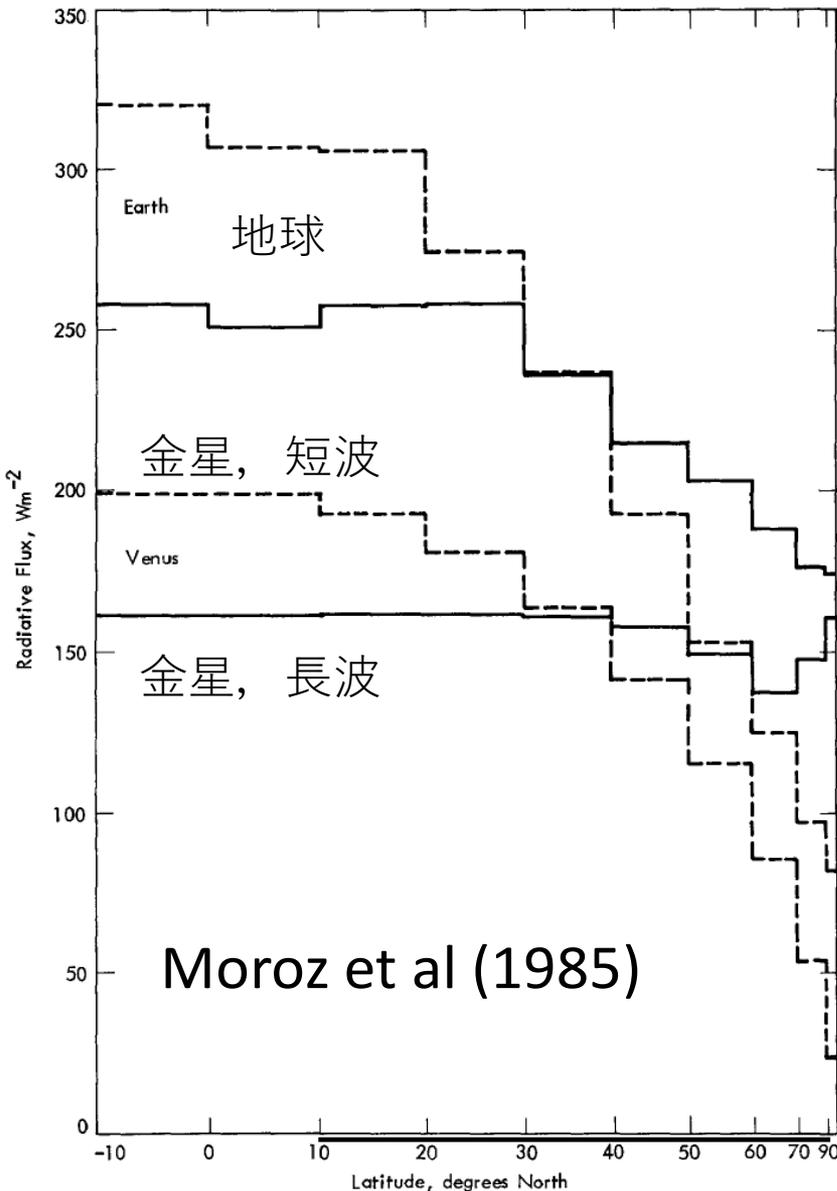


Fig. S1. A vertical distribution of static energy. It is obtained from the VIRA data (39), and is expressed as the difference from the surface value, $s' \equiv s - s(z=0 \text{ km})$. This profile was used to compute the meridional heat transport shown in subsection S13. Its theoretical basis is found in (54)

あかつきを使って

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。

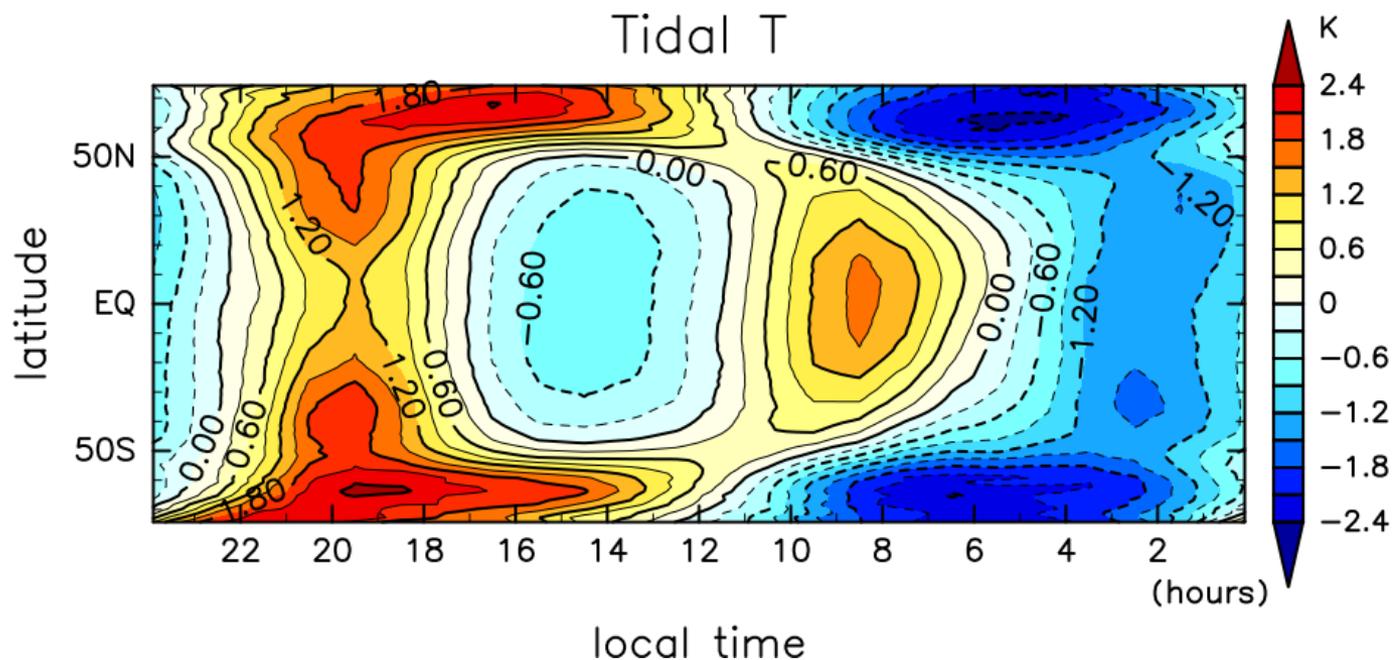


Fig. S11 of H20 (あかつきの熱赤外カメラLIRによる雲頂付近の潮汐の温度場)

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

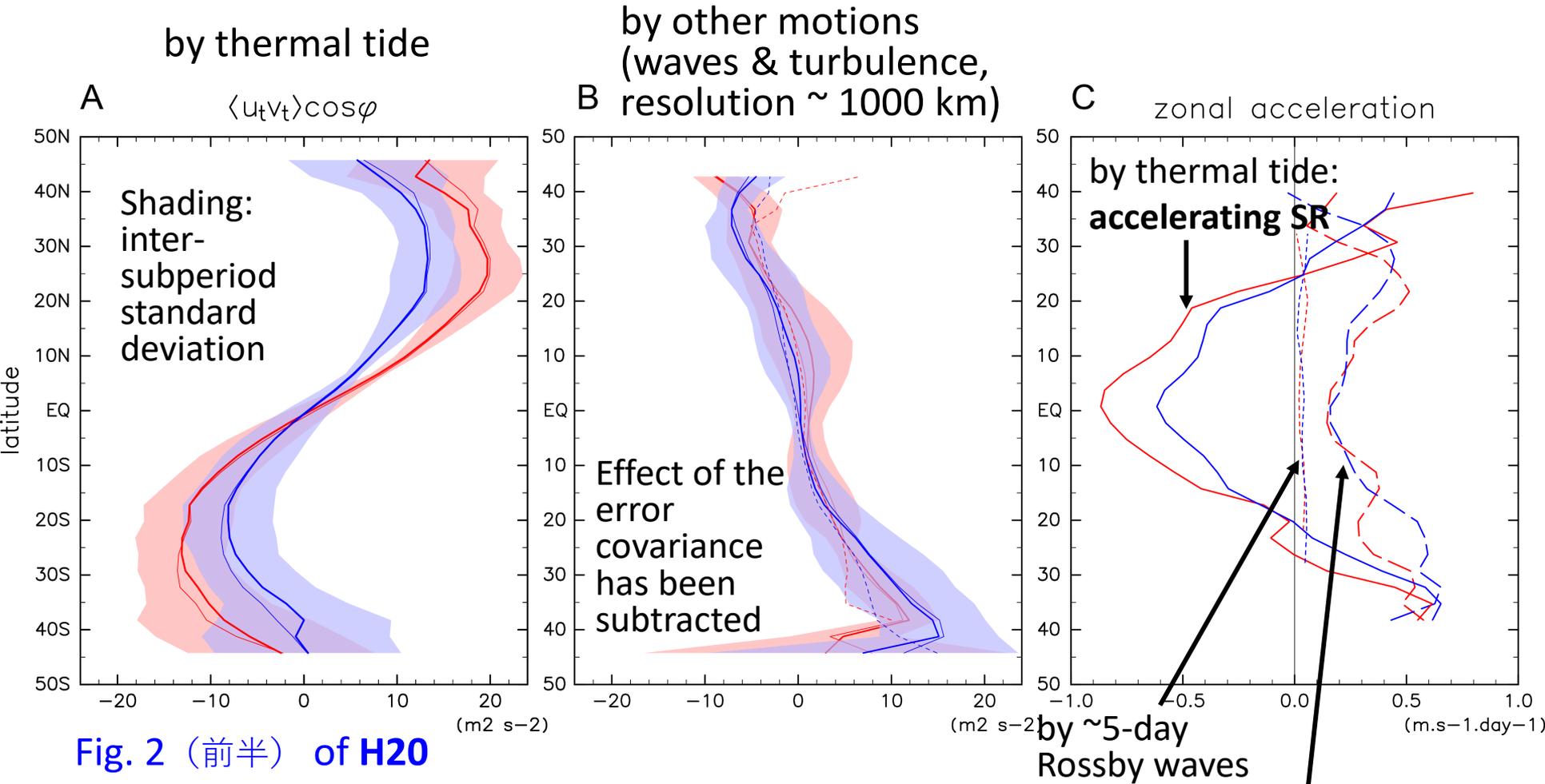


Fig. 2 (前半) of H20

Caution: observations are available only on dayside

Caution: results are limited to low lat

by other motions (waves & turbulence): decelerating SR

365 nm

Fig. S9 of H20

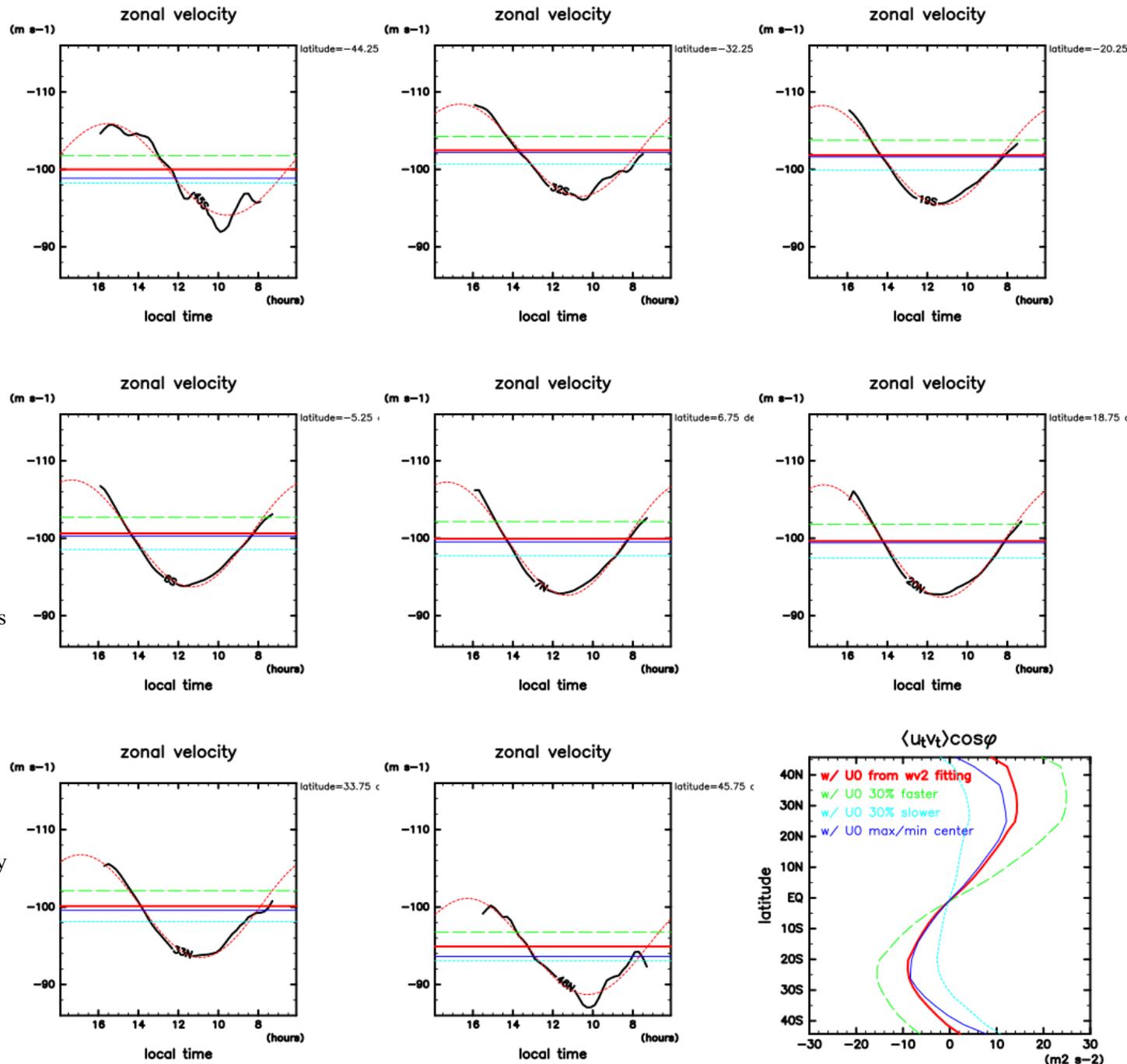
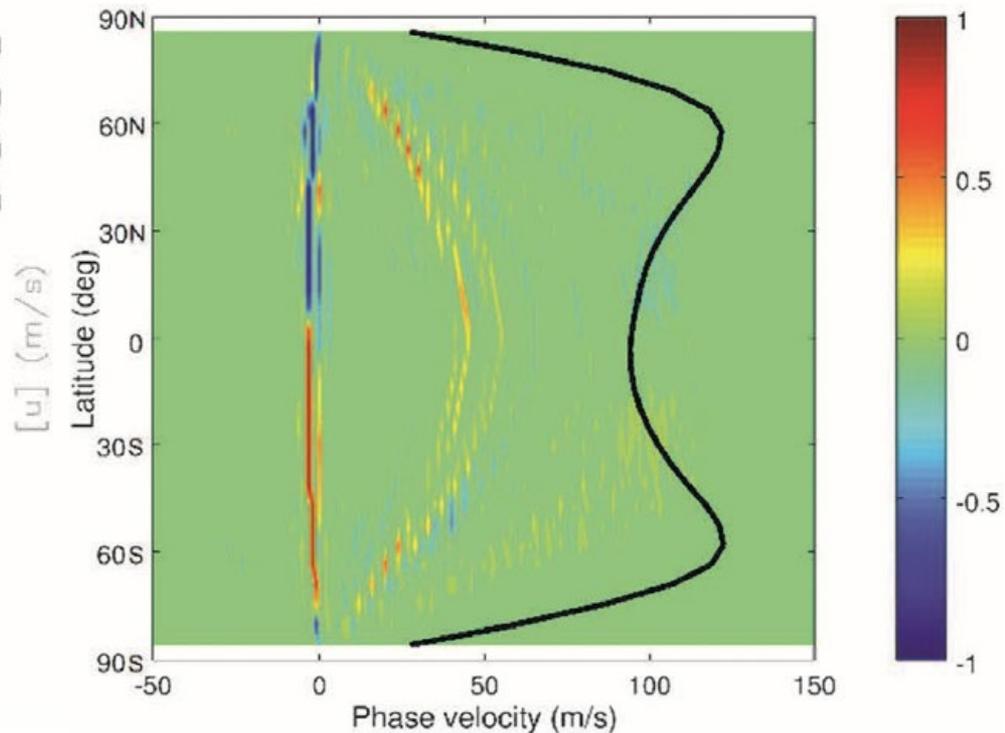
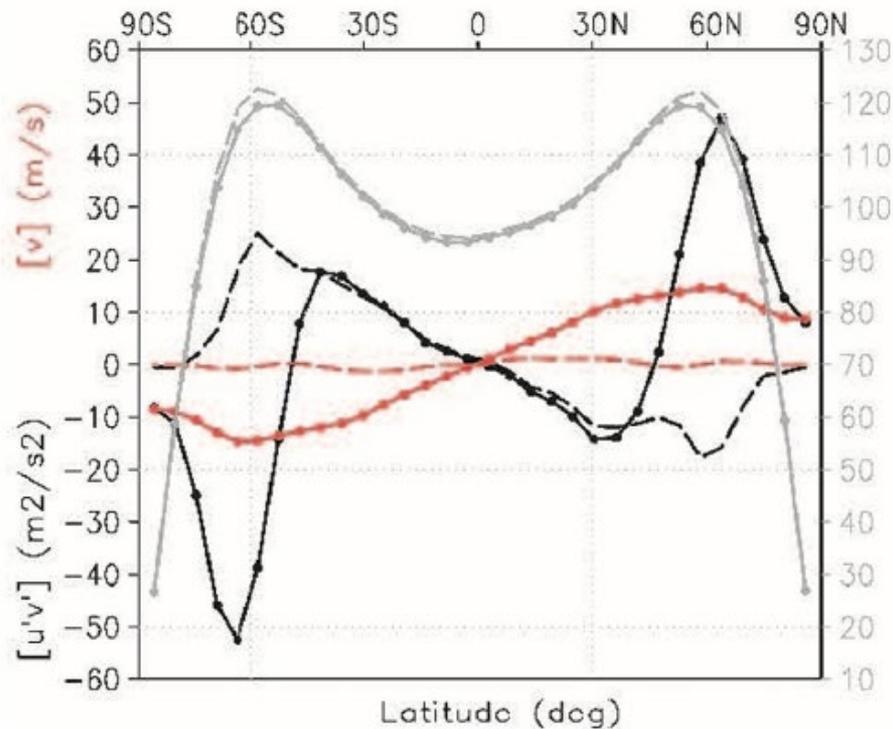


Fig. S10. Illustration of the sensitivity test to investigate the dependence of tidal angular momentum flux on the assumption of u_0 . A–H: mean zonal wind \bar{u} obtained from the three-year period (black curves) at latitudes shown on their upper-right corners. The red lines indicate the values of u_0 obtained by the least-square fitting of the wavenumber-2 sinusoidal curve. I, $\langle u_t v_t \rangle \cos \varphi$ obtained from this assumption (red curve), which is the same as the thin solid blue curve in Fig. 2A. All panels: the green and cyan lines (A–H) and curves (I) show the cases in which u_0 defined this way is shifted by ± 0.3 times the fitting-based tidal amplitude (green: the faster; cyan: the slower). The blue lines (A–H) and curve (I) show the case in which u_0 is defined as the center in between the maximum and the minimum of \bar{u} .

Yamamoto et al (2019) Venus GCM results

(c) 4.54×10^3 Pa (~ 69 km)



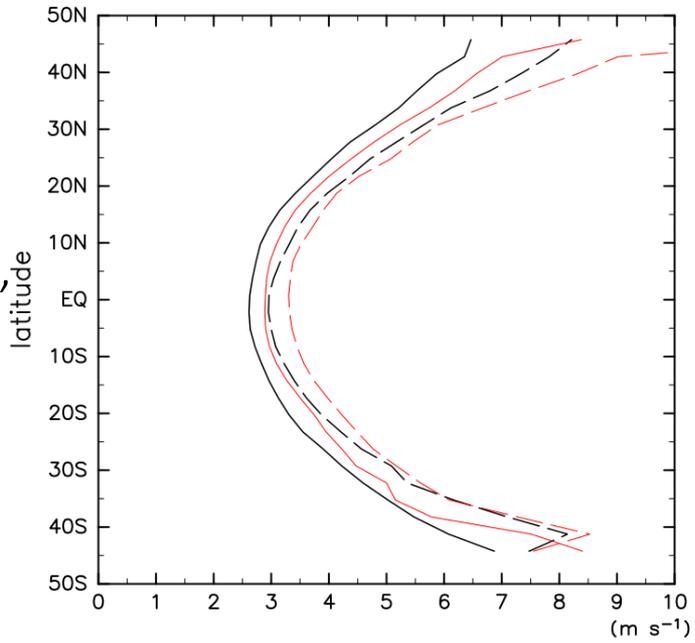
Dashed: true zonal mean

Solid: mean over dayside

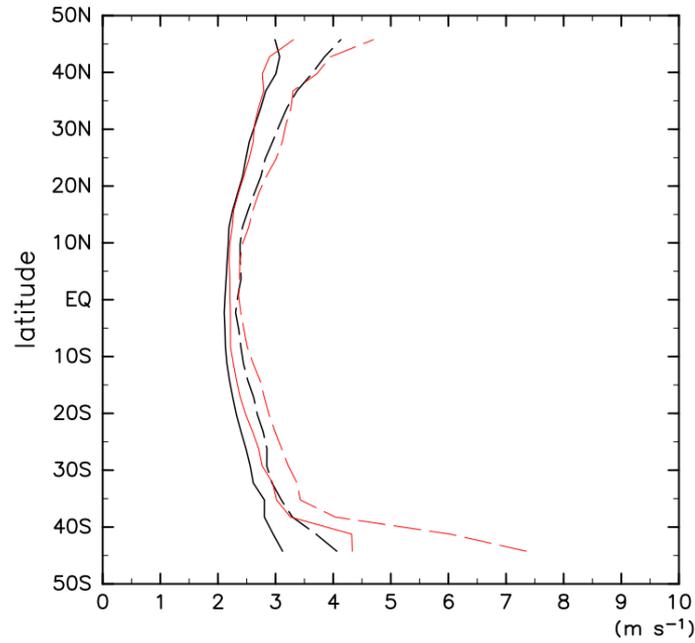
$u'v'$: major contribution is from tides

誤差の大きさ
の見積もり

(実線。黒: 365nm,
赤: 283 nm)



estimated standard errors (U)



estimated standard errors (V)

Fig. S4 of H20

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

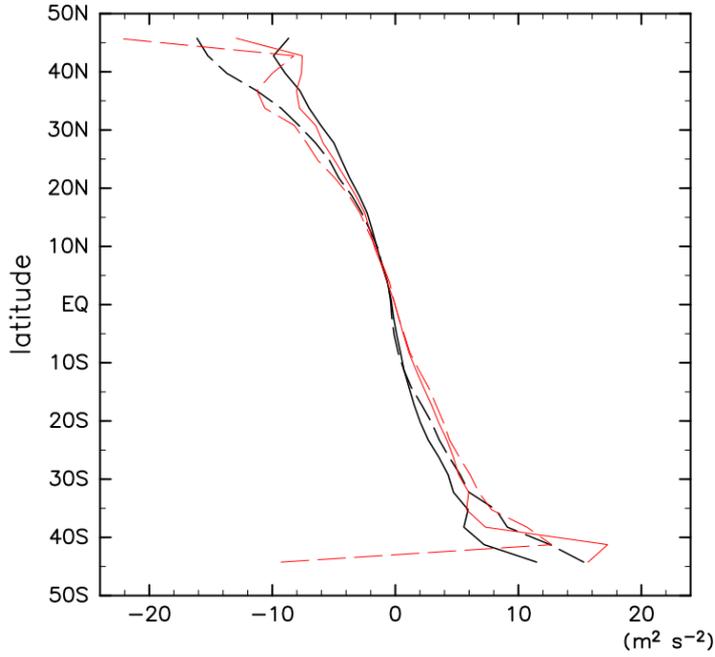


Fig. S5 of H20

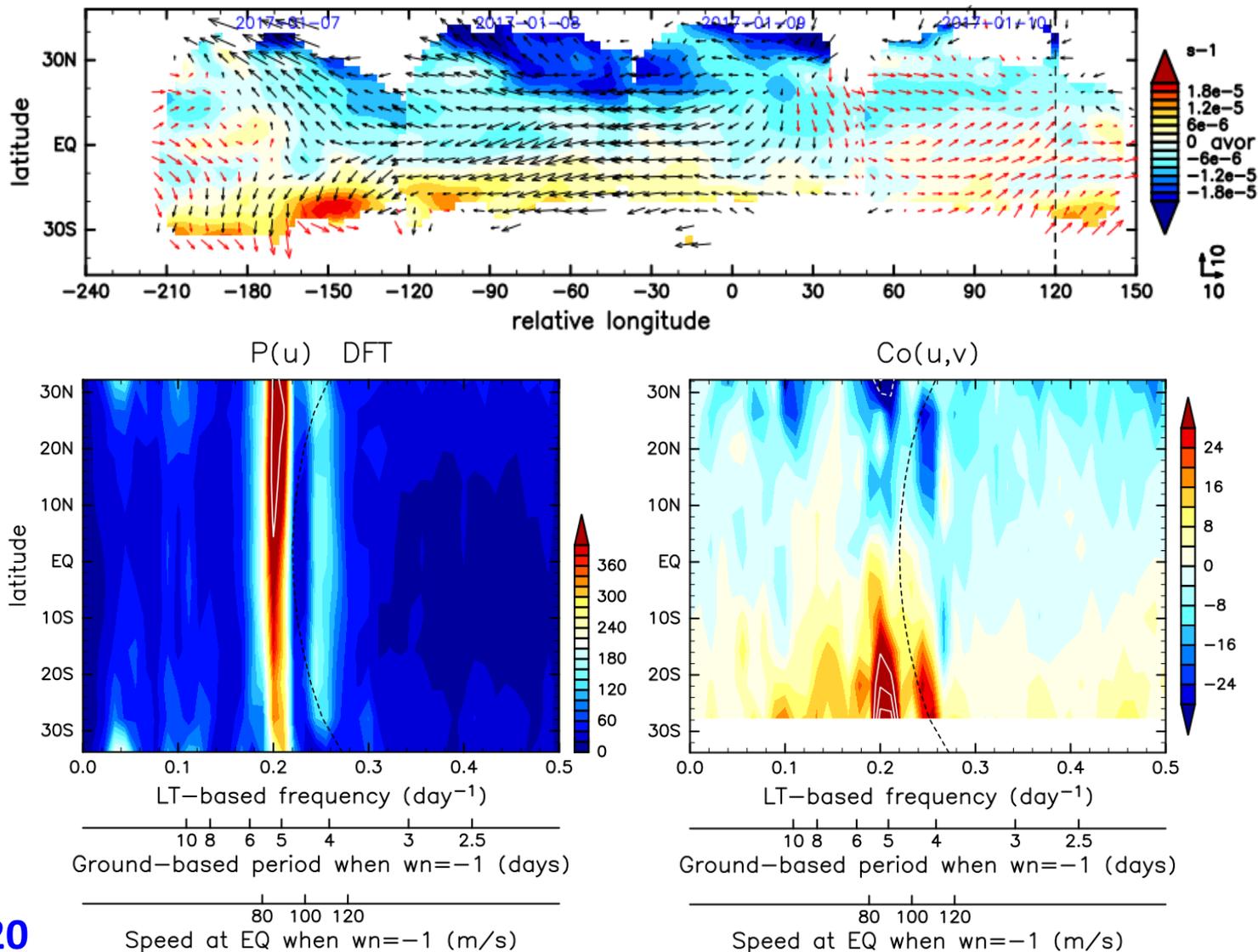


Fig. 3 of H20

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)

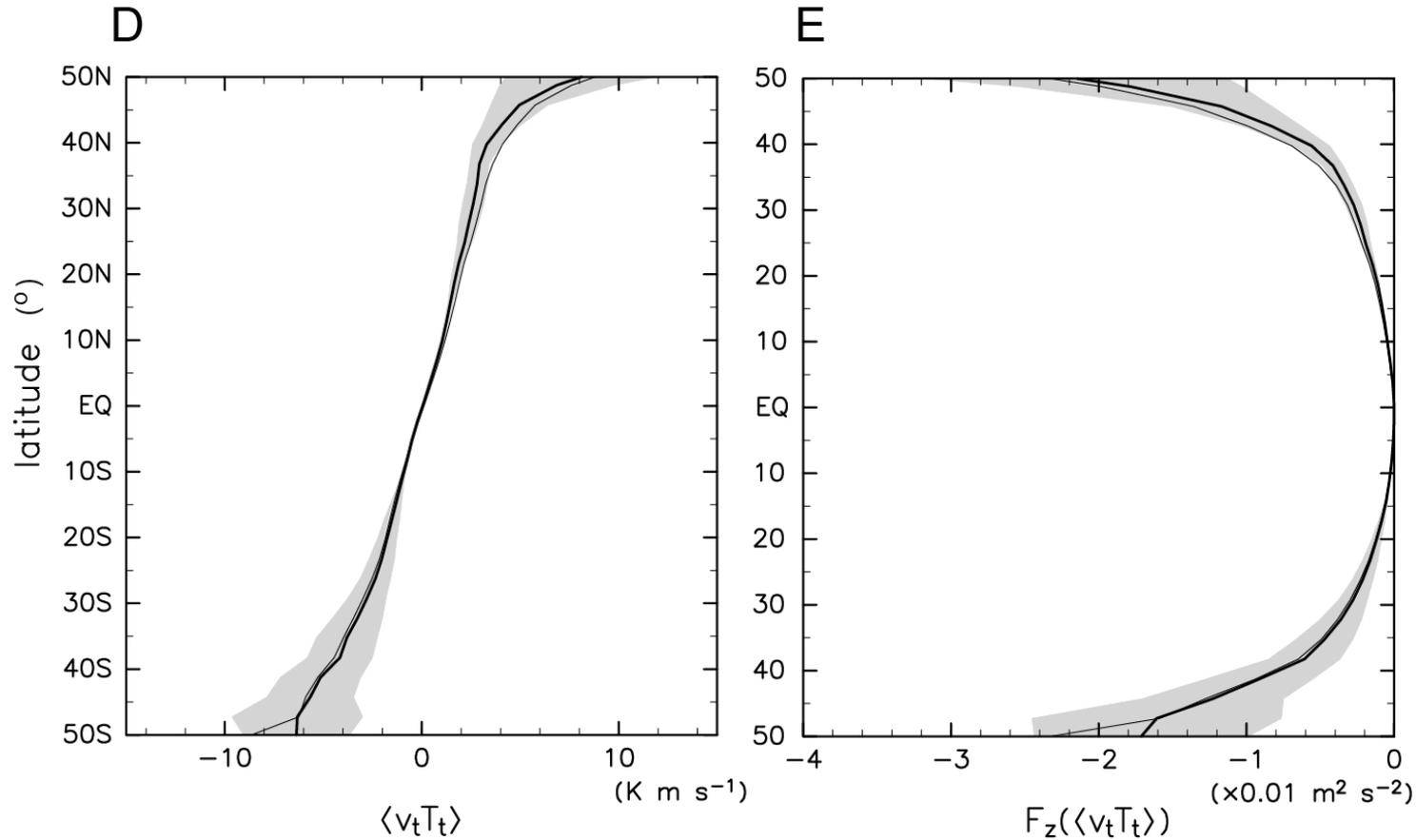


Fig. 2 (後半) of H20

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

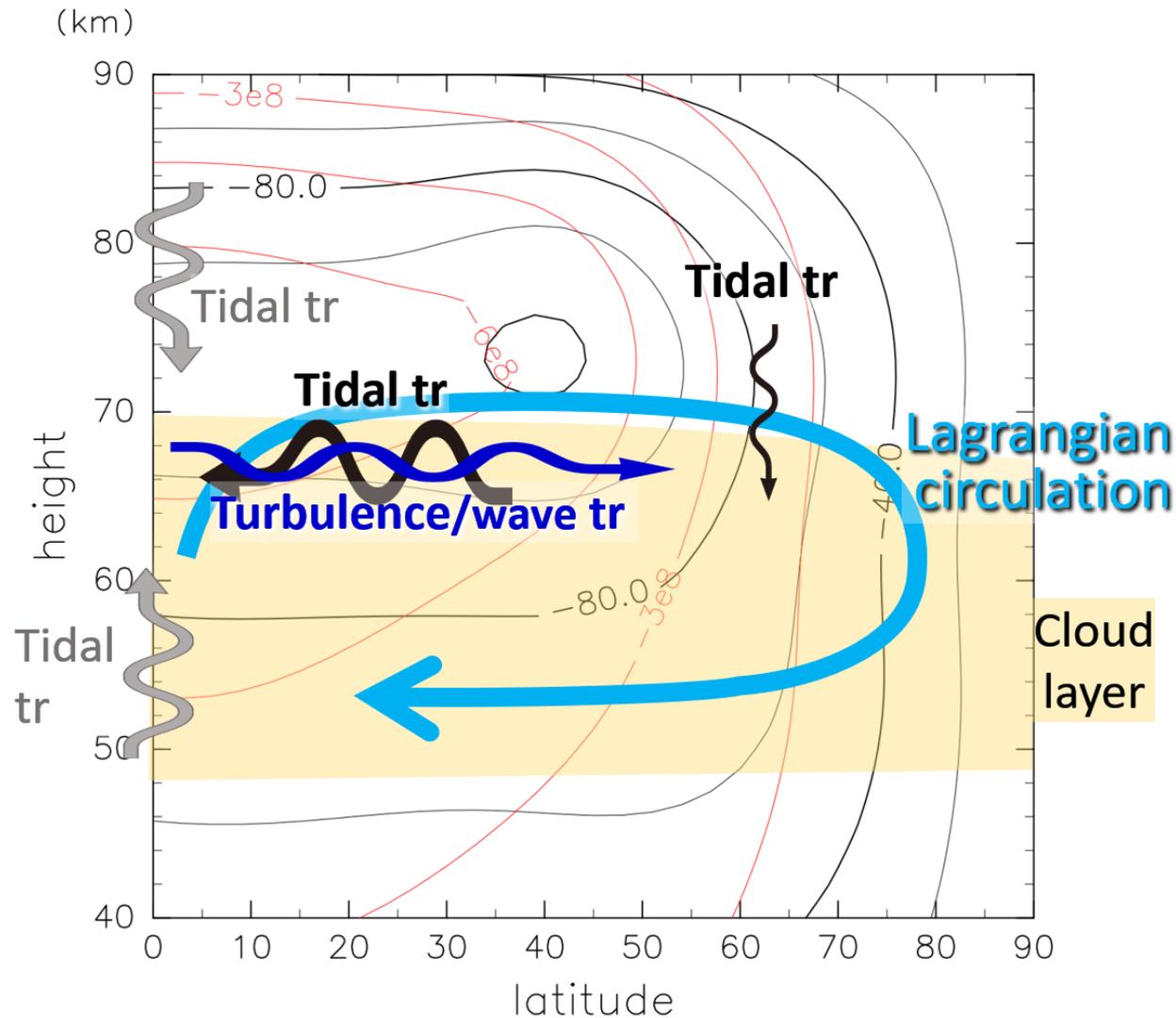


Fig. 4A of H2O

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

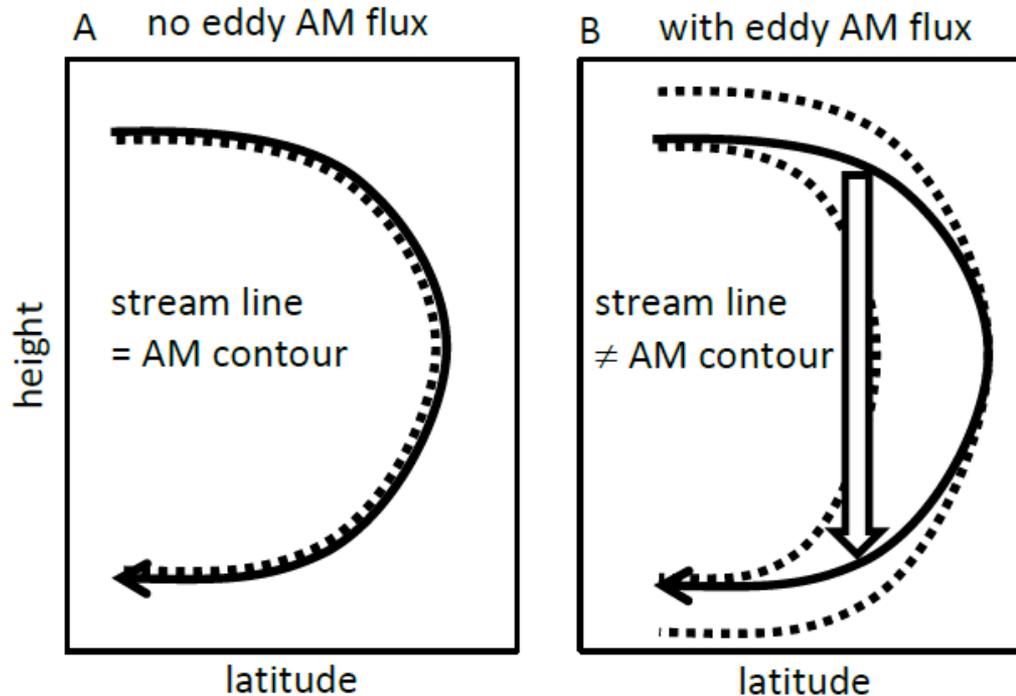


Fig. S2 of **H20**

Fig S2. Schematic illustration of possible steady-state distribution of AM and meridional circulation at mid-to-high latitude (subsection S12). (A) When eddy AM transport is absent. In this case, the iso-lines of M (dotted) must coincide with streamlines of mean Lagrangian meridional circulation (solid arrow). (B) When eddy AM flux associated with baroclinic instability (hollow arrow) is present. In this case, AM is transported by the eddy AM flux as well as the meridional circulation, so M can change along the meridional circulation stream line. In this particular instance, M is decreased and increased along the upper and lower branches, respectively, due to the instability, so the eddy AM transport acts as if the AM flow partly shortcuts the meridional circulation.

AM balance suggested from observation plus speculation

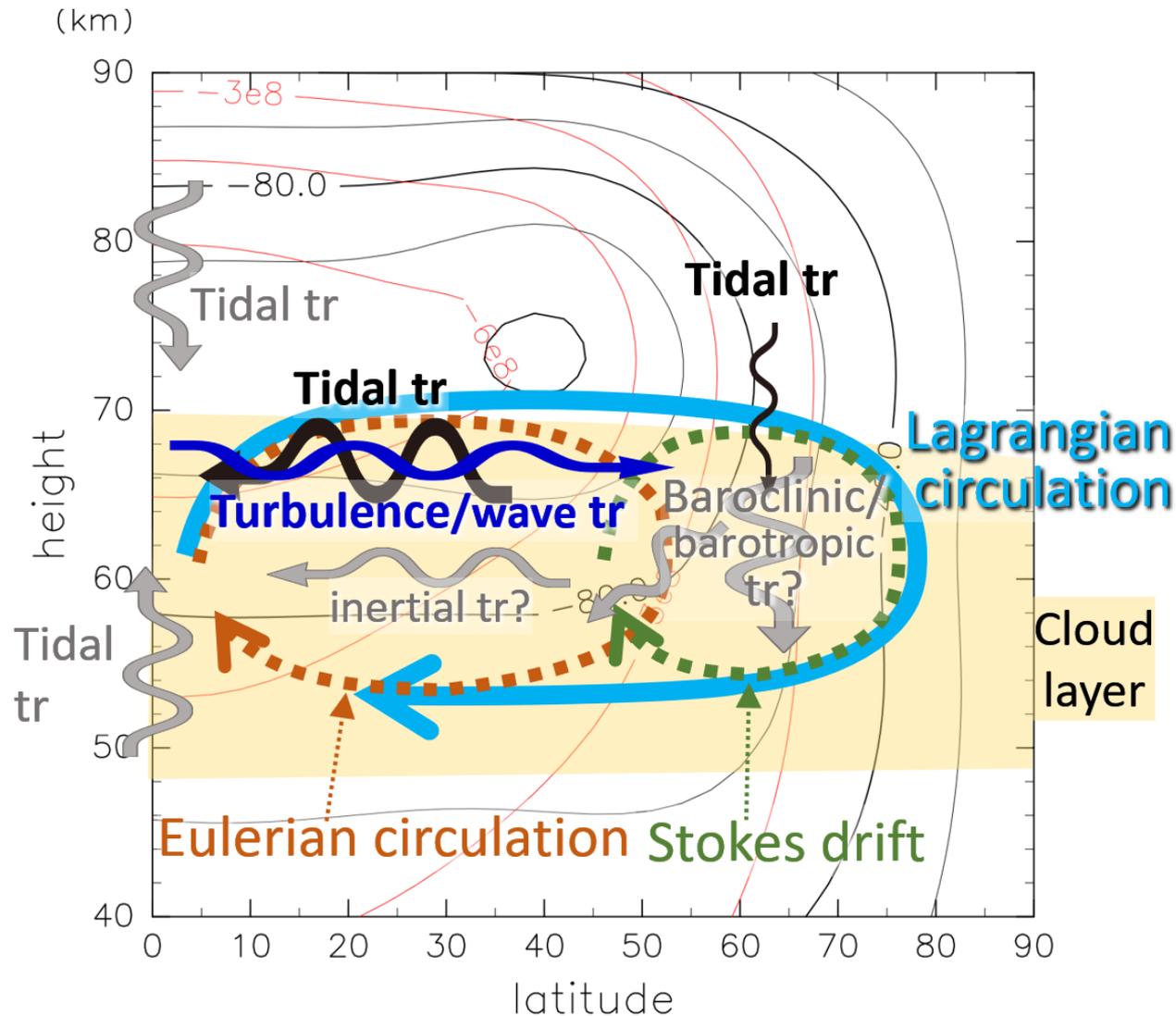
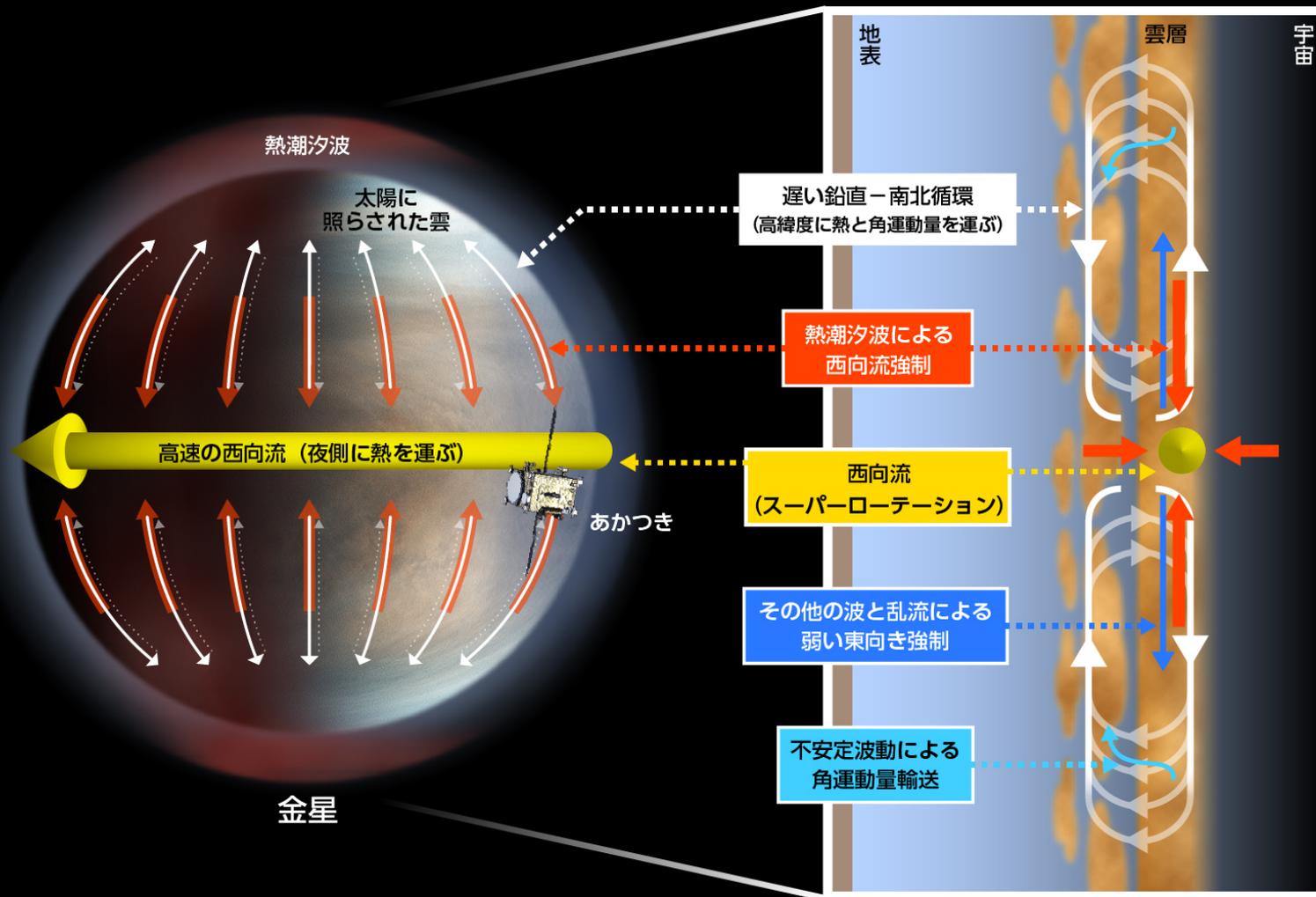


Fig. 4B of H20

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



大気大循環の一部としての超回転

- 地球大気の大循環論：太陽から届く非一様なエネルギーの再分配がどのように起こり、どのような流れが形成されるかを論じる。
- 金星大気の大循環論もそうあるべき。SRではいままでも角運動量の再配分ばかりが（or運動方程式ばかりが）強調され過ぎたきらいがある。Hideの定理の呪縛というか。

超回転と子午面循環

- 日射は低緯度 > 高緯度（太陽日の長さに関係なく）。
- 東西の流れだけでは、南北に熱は運べない。∴別途南北の輸送も必要。→ 子午面循環
- 超回転と子午面循環は、渦角運動量輸送があれば両立しうる（なければ両立しない）。

- 地球大気の大循環

- 熱を南北に運ぶ

- その中で、ハドレー循環と傾圧不安定にともなう循環が起き（子午面循環），それに見合った帯状流が形成する（全角運動量保存のため偏西風と偏東風の両方ができるなど）。（水も絡む。潜熱大きいので。）

- 金星大気の大循環

- 雲層では熱を南北と東西に運ぶ

- その中で子午面循環とSRによる東西の循環で運ぶ。二つが両立するよう渦角運動量が起こる（潮汐が低緯度で、傾圧不安定等の不安定が重要な役割を果たす）。

- 下層では熱を南北に運ぶ

- 全角運動量保存（定常性実現）のための辻褄がどうなっているかは不明（子午面循環だけを考えればいいのか、潮汐も重要かとか、決着ついてないのでは？）

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。
- 解決していないこと，直接観測していないこと：沢山
- 大気大循環論：金星のSRを熱輸送過程として位置づけよう