



GFDセミナー 分科会
休暇村 支笏湖
21:00-23:00, 27 Aug, 2016



金星AFESの紹介

杉本憲彦 (慶應義塾大学)

M. Takagi¹, H. Ando², H. Kashimura³, T. Imamura², Y. Matsuda⁴,
W. Ohfuchi³, T. Enomoto⁵, Y.-O. Takahashi⁶, and Y.-Y. Hayashi⁶

(¹Kyoto Sangyo Univ., ²ISAS/JAXA, ³JAMSTEC, ⁴Tokyo Gakugei Univ., ⁵DPRI/Kyoto Univ., ⁶CPS/Kobe Univ.)

This study is conducted under the joint research project of the Earth Simulator Center with title “Simulations of Atmospheric General Circulations of Earth-like Planets by AFES.”

塾派遣留学

2014年3月末～2016年3月末まで

Visiting researcher, LMD, Ecole Polytechnique/UPMC



拙著

「風はなぜ吹くのか、どこからやってくるのか」
杉本憲彦著 (ベレ出版, 2015/05, 391pp.)



風が吹く仕組みを数式を使わずに物理の視点で解説。

During 2 years' sabbatical leave

➤ Geophysical Fluid Dynamics (地球流体力学)

✓ Spontaneous Gravity Wave Radiation (自発的重力波放射)

1. Sugimoto, N. and R. Plougonven, **Generation and impact of spontaneously emitted inertia-gravity waves**, *Geophysical Research Letters*, Vol. 43, (2016), p3519-3525.
2. Sugimoto, N., **Inertia-gravity wave radiation from the merging of two co-rotating vortices in the f-plane shallow water system**, *Physics of Fluids*, Vol. 27, (2015), 121701
3. Sugimoto, N., K. Ishioka, H. Kobayashi, and Y. Shimomura, **Cyclone-anticyclone asymmetry in gravity wave radiation from a co-rotating vortex pair in rotating shallow water**, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 772, (2015), p80-106.
4. Yasuda, Y., K. Sato, and N. Sugimoto, **A theoretical study on the spontaneous radiation of inertia-gravity waves using the renormalization group method. Part I: Derivation of the renormalization group equations**, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 72, No. 3, (2015), p957-983.
5. Yasuda, Y., K. Sato, and N. Sugimoto, **A theoretical study on the spontaneous radiation of inertia-gravity waves using the renormalization group method. Part II: Verification of the theoretical equations by numerical simulation**, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 72, No. 3, (2015), p984-1009.

- ✓ Sugimoto, N., **Inertia-gravity wave radiation from the elliptical vortex in the f-plane shallow water system**, *Fluid Dynamics Research*, submitted.

During 2 years' sabbatical leave

➤ Planetary Atmosphere (惑星大気)

✓ Venus Simulation (金星の数値計算)

1. Lebonnois, S., N. Sugimoto, and G. Gilli, **Wave analysis in the atmosphere of Venus below 100-km altitude, simulated by LMD Venus GCM**, *Icarus*, Vol. 278, (2016), p38-51.
 2. Ando, H., N. Sugimoto, M. Takagi, H. Kashimura, T. Imamura, and Y. Matsuda, **The puzzling Venusian polar atmospheric structure reproduced by a general circulation model**, *Nature Communications*, Vol. 7, (2016), 10398, p1-8.
 3. Sugimoto, N., M. Takagi, and Y. Matsuda, **Waves in a Venus general circulation model**, *Geophysical Research Letters*, Vol. 41, (2014), p7461–7467.
 4. Sugimoto, N., M. Takagi, and Y. Matsuda, **Baroclinic modes in the Venus atmosphere simulated by GCM**, *Journal of Geophysical Research: Planets*, Vol. 119, (2014), p1950-1968.
- ✓ Ando H., N. Sugimoto, M. Takagi, T. Imamura, H. Kashimura, S. Tellmann, M. Pätzold, and B. Häusler, **Vertical structure of the axi-asymmetric feature of Venus polar vortex, Part II: Comparison with radio occultation measurement**, in preparation.
 - ✓ Ando H., T. Imamura, S. Tellmann, M. Pätzold, B. Häusler, H. Kashimura, N. Sugimoto, and M. Takagi, **Vertical structure of the axi-asymmetric feature of Venus polar vortex, Part I: Observation by Venus Express radio occultation measurement**, in preparation.
 - ✓ Kashimura, H., N. Sugimoto, M. Takagi, W. Ohfuchi, T. Enomoto, Y. O. Takahashi, and Y.-Y. Hayashi, **Energy spectra of atmospheric motions simulated by a high-resolution general circulation model of Venus**, in preparation.

Ando, H., N. Sugimoto, M. Takagi, H. Kashimura, T. Imamura, and Y. Matsuda, **The puzzling Venusian polar atmospheric structure reproduced by a general circulation model**, *Nature Communications*, Vol. 7, (2016), 10398, p1-8.



2016/02/01 プレスリリース

[プレスリリース]
金星極域の高温の生成・維持メカニズムを理論的に解明

研究

2016/02/01 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構
慶應義塾大学
京都産業大学

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の安藤紘基宇宙航空プロジェクト研究員および慶應義塾大学の杉本憲彦准教授らによる研究チームは、大規模なコンピュータシミュレーションから、金星の極域上空の大気に生じている特異な気温分布を世界で初めて再現し、その生成・維持メカニズムを理論的に解明することに成功しました。

朝日新聞 3面

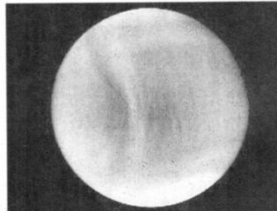
2日の朝刊

金星上空 赤道から南北に気流

金星の北極や南極の上空の気温が周りより高いのはなぜか。謎に迫るシミュレーション結果を宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の安藤紘基研究員らがまとめた。赤道から南北に向かう大きな気流の流れがあり、これが影響していると考えられるという。4月から本格的に始まる金星探査機「あかつき」の観測で実際の気流の流れを確かめる。1日付の英科学誌ネイチャーコミュニケーションズに発表した。

金星の気流は二酸化炭素が多くを占め、星全体を巡る高速の風が吹くなど気象は地球と大きく異なる。1970年代の探査で、高度60~70kmの気温は、北極や南極のほうが周囲よりも20度ほど高い零下30度ほどであ

探査機「あかつき」で観測へ



あかつきが撮影した金星の赤外線画像。北極や南極が白く写り、周辺より温度が高いことが分かる。JAXA提供

ることが分かっていた。研究チームが高度120kmまでの大気の動きをコンピューターで再現したところ、高度80km以上に赤道から南北に向かう大きな気流があり、北極と南極の上空で強い下降気流を起こし、温度を上げているとみられるという。(奥村輝)

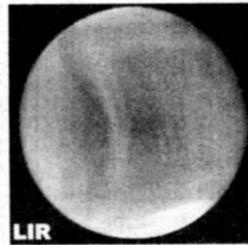
2日の朝刊

日本経済新聞

金星極域の高温解明

JAXAなど 大気圧縮で加熱

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) など1日、金星の北極と南極が高温になる仕組みをコンピュータシミュレーションで解明したと発表した。



探査機「あかつき」が撮影した金星。画面下の南極域など温度の高い部分が白く写っている (昨年12月7日) JAXAの安藤紘基研

金星の軌道には昨年12月、日本の探査機「あかつき」が到着しており、4月からの本格観測で裏付けを目指す。論文は1日付の英科学誌ネイチャー・コミュニケーションズに掲載された。地球の極域は寒冷だが、金星の極域は温度が高くて、日本が観測で判明している。赤道などに比べ、極域は太陽からのエネルギーが少なく寒冷になるはずなのに、なぜ金星では温度が高いのか分かっていなかった。

影パにとをの算究

Keio Research Highlights
“Simulation solves Venus atmosphere mystery”
(2016年4月28日発表)。

Today's topics

金星AFESの簡単な紹介

Outline

1. はじめに

- 金星と地球
- スーパーローテーション
- これまでのGCM研究

2. 実験設定

- 研究の作戦

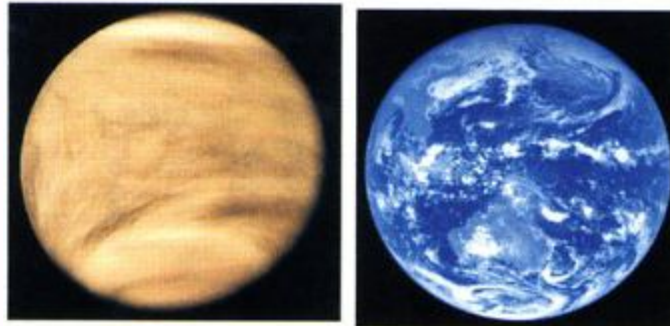
3. 結果

- スーパーローテーションの再現・維持
- 傾圧波、水平構造、極域の渦、エネルギースペクトル

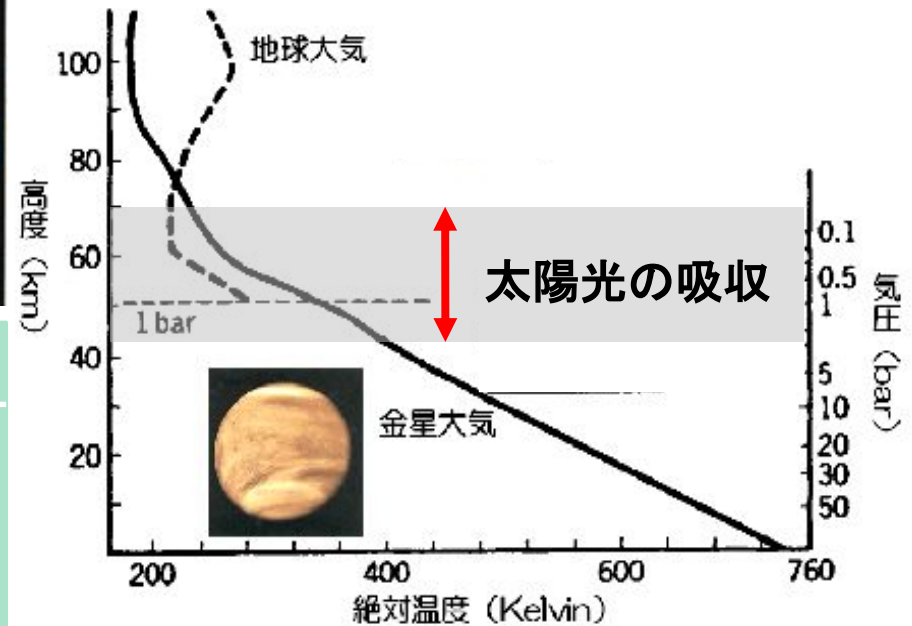
4. おわりに

1. はじめに

金星と地球

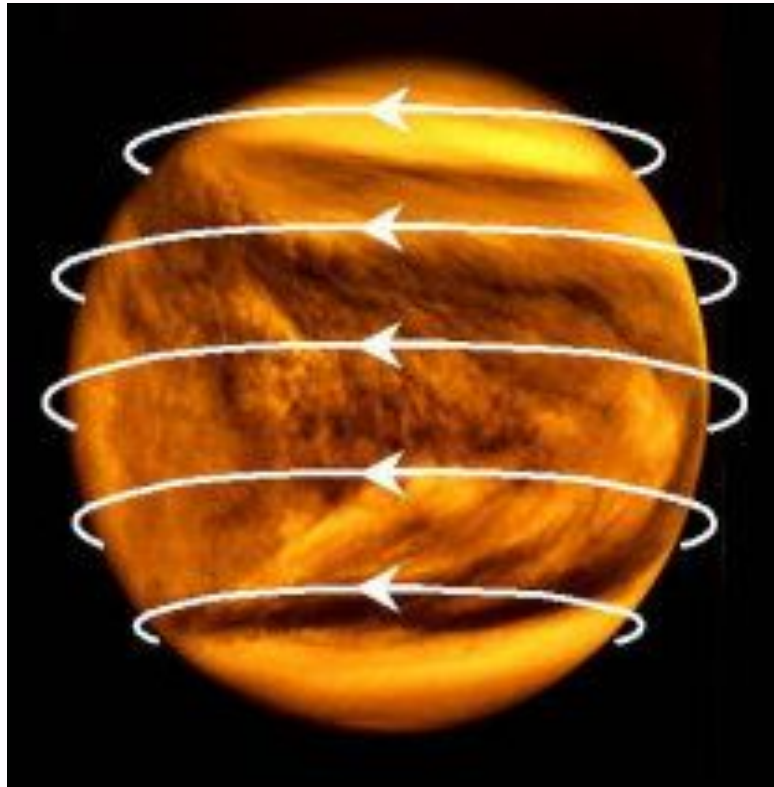


	金星	地球
半径	6050 km	6378 km
公転周期	224日	365日
自転周期	243日(1.8m/s)	1日(460m/s)
1太陽日	117日	1日
大気組成	CO ₂	N ₂ , O ₂
アルベド	0.78	0.3
地表面気圧	92 bar	1 bar

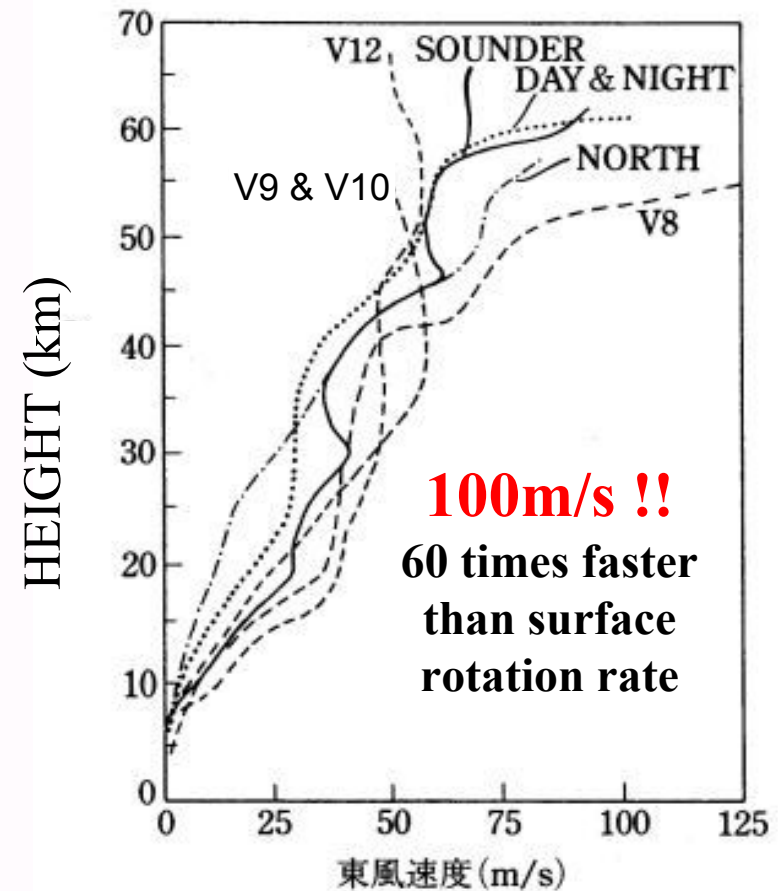


- ✓ 自転が極めて遅い
- ✓ CO₂の濃密な大気
- ✓ 厚い雲層(45~70km)

金星大気の謎： 高速東西風（スーパーローテーション）の存在



✓ 赤道から高緯度まで大気全体が
自転を追い越す高速の東風に



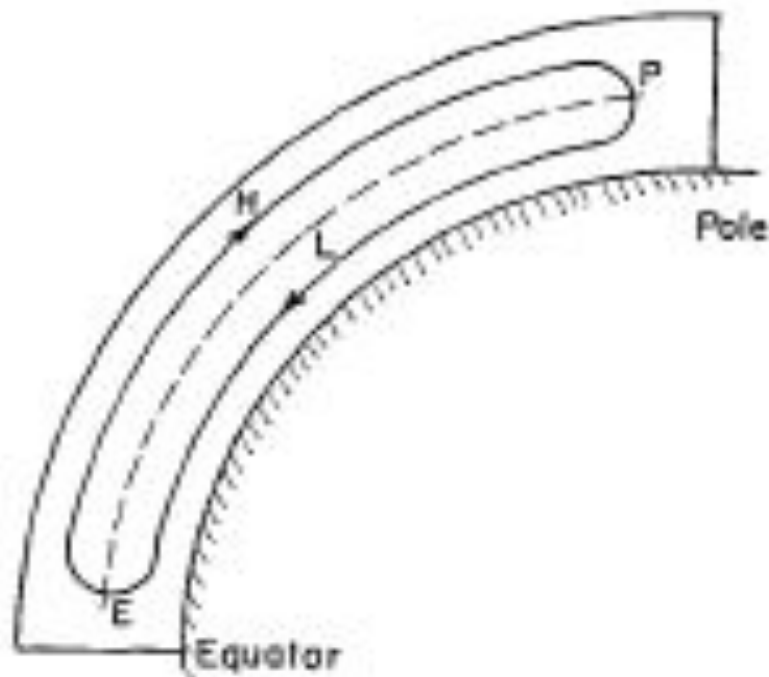
Schubert et al. (1980)

* 金星の自転は地球と逆向きのため、地球の西風に相当

金星の風の成因

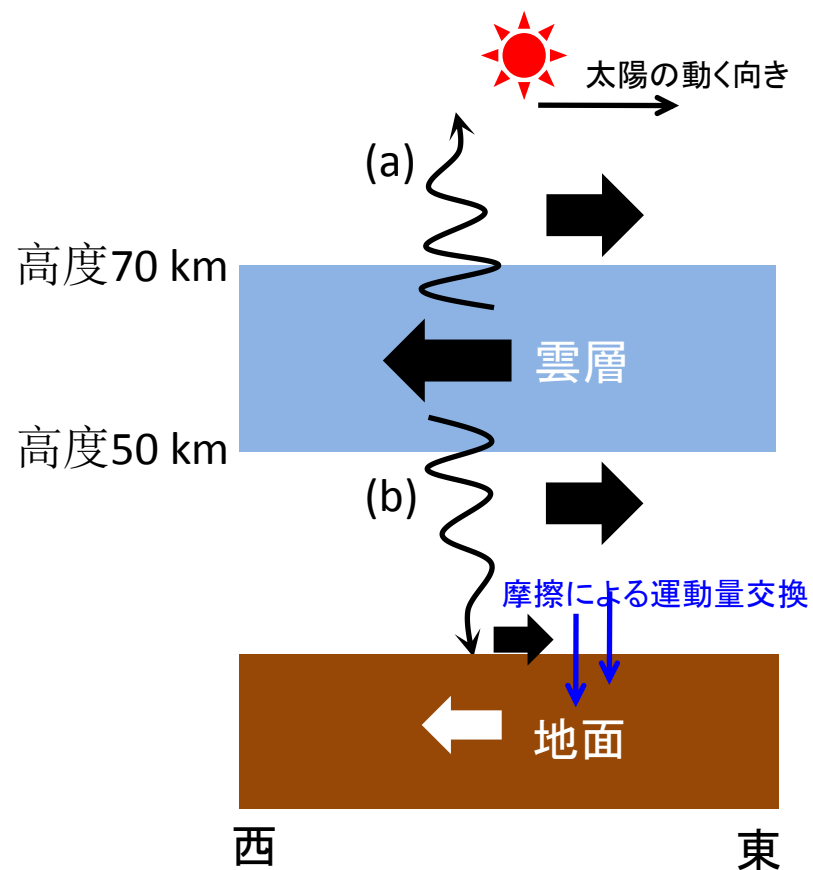
二つの代表的なメカニズム

1. 平均子午面循環
(Gierasch 1975)



- ✓ 子午面循環による鉛直輸送
- ✓ 渦による赤道方向への輸送

2. 熱潮汐波 (Fels & Lindzen, 1986)



- ✓ 太陽加熱が雲層で波を励起
- ✓ 上下で波が散逸し雲層が加速

これまでの金星のGCM研究

● スーパーローションの再現に一応、成功...

1. 平均子午面循環(Yamamoto & Takahashi, 2003...)
2. 熱潮汐波(Takagi & Matsuda, 2007...)

静止状態からスーパーローションを再現するために、
低解像度で長時間積分、非現実的な加熱や温度場を設定

References	Horizontal resolution		Vertical grid
Yamamoto & Takahashi (2003)	T10 (~ 11° × 11°)	32 × 16 grids	50 levels
Lee et al. (2005)	5° × 5°	72 × 36 grids	32 levels
Kido & Wakata (2008)	T21 (~ 5.6° × 5.6°)	64 × 32 grids	60 levels
Takagi & Matsuda (2007)	≤ T21 (~ 5.6° × 5.6°)	64 × 32 grids	60 levels
Lebonnois et al. (2010)	7.5° × 5.6°	48 × 32 grids	50 levels
Parish et al. (2011)	1.2° × 0.9°	300 × 200 grids	50 levels

**数値計算: 高解像度計算でのコストの増大。
現実的設定でスーパーローションが出ない。
観測: 子午面循環や雲層内部の観測が困難。**

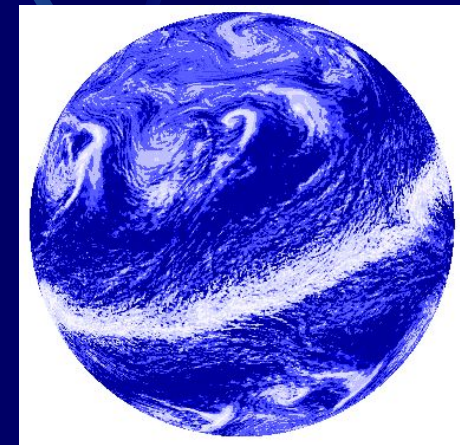
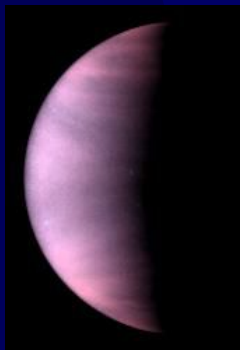
AFESプロジェクト

(Atmospheric GCM For the Earth Simulator)

(Y.-Y. Hayashi, Y. O. Takahashi, W. Ohfuchi, T. Enomoto, etc)



- 様々な惑星の大気大循環を理解したい
 - ✓ 火星、金星、木星、水惑星...
 - ・ 共通の大気大循環モデルとしてAFESを使用



私は金星グループのメンバーとして金星計算を実行

計算性能



● AFES (ベクトル型並列計算機のためのAGCM)

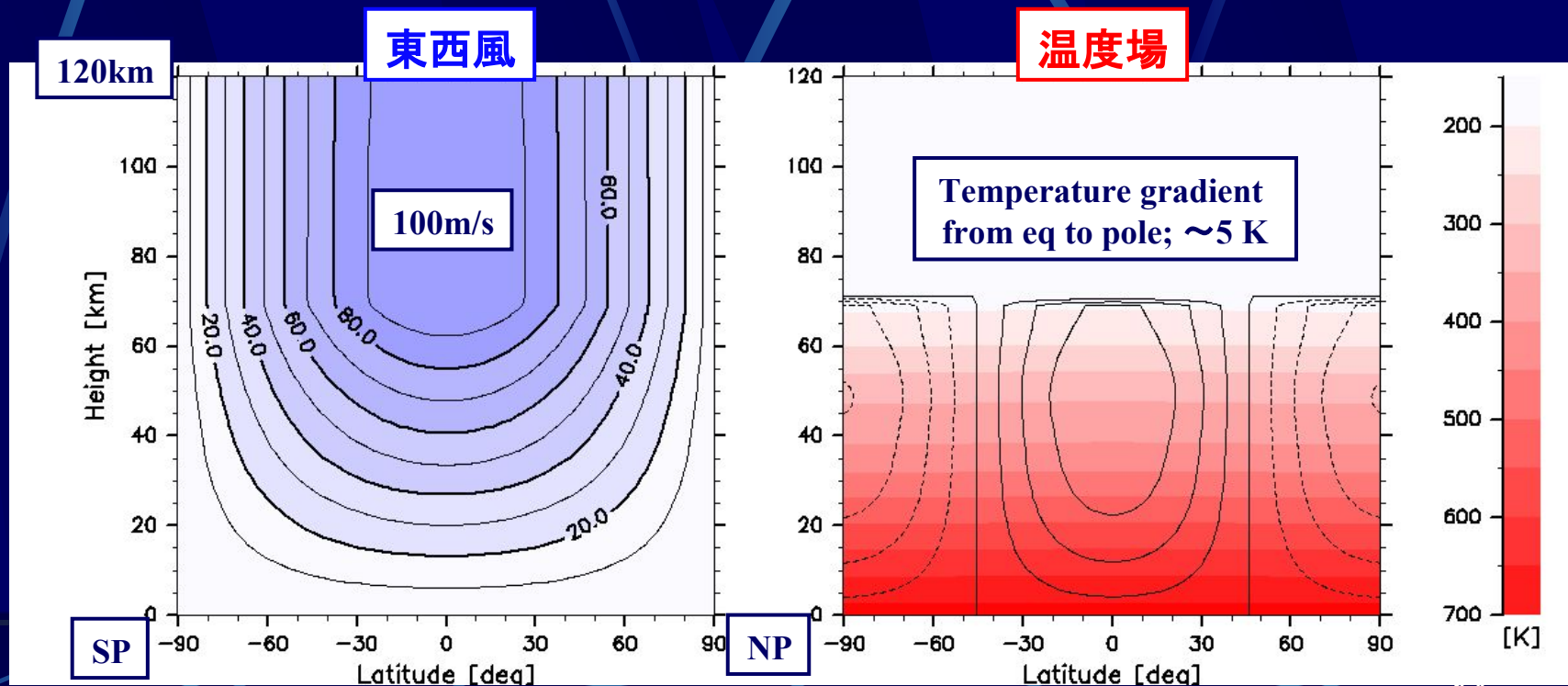
- ✓ ES2 (Earth Simulator、現状ES3)に最適化
- ✓ 火星でT639L96解像度の計算実績(Takahashi et al.)

Node number	64 node
Vector efficiency	99.4%
Parallel efficiency	99.8%
CPU time	1 martian days / ~4 hours

火星計算; 水平格子間隔 "11 km, $N_x=1920$ grids, $N_y=960$ grids, $N_z=96$ layers

2. 実験設定 「作戦」

- 高解像度のAFES数値計算を地球シミュレータで行う。
- ✓ 初期にスーパーローテーションを設定、計算時間を節約する。
- ✓ 現実的な設定でスーパーローテーションの再現・維持を目指す。
- ✓ その状況下で現れる中小規模擾乱の構造や働きに着目する。



実験設定の詳細

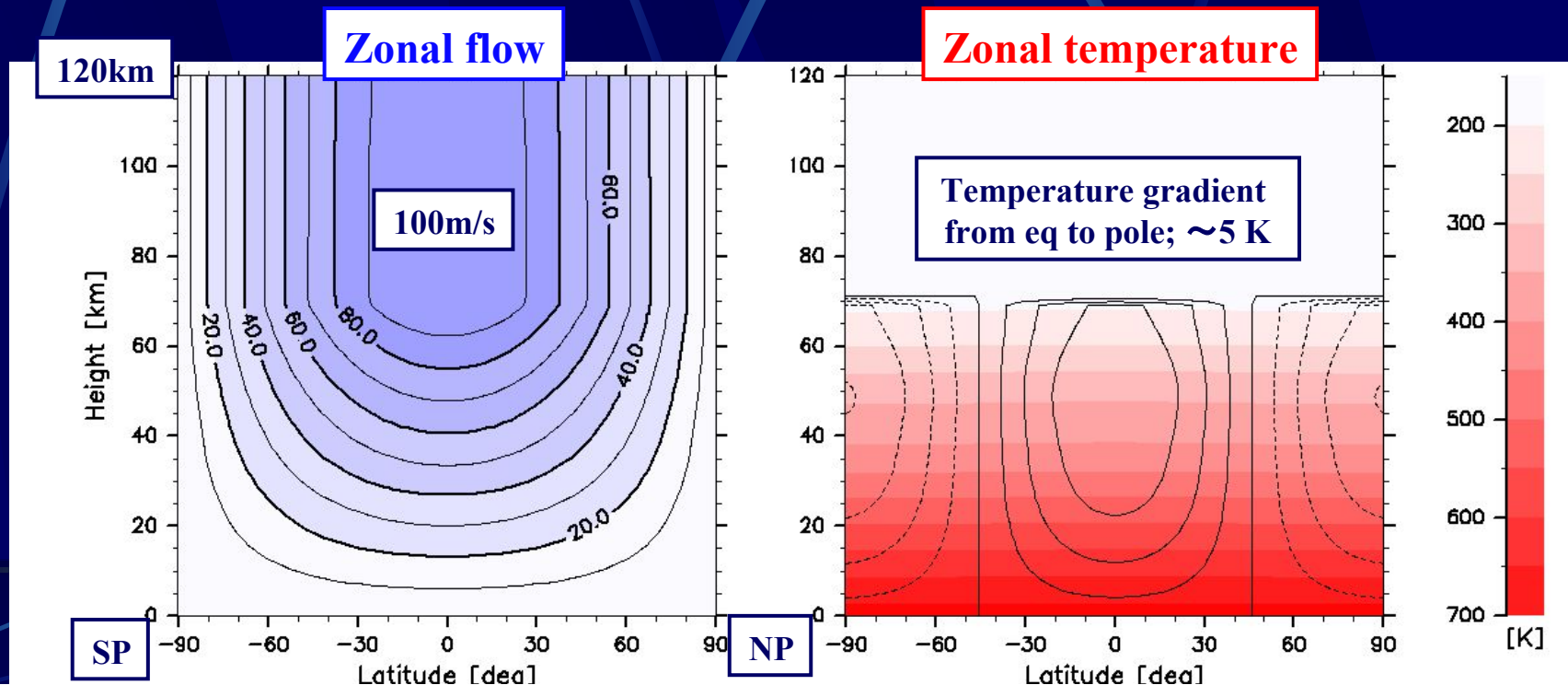
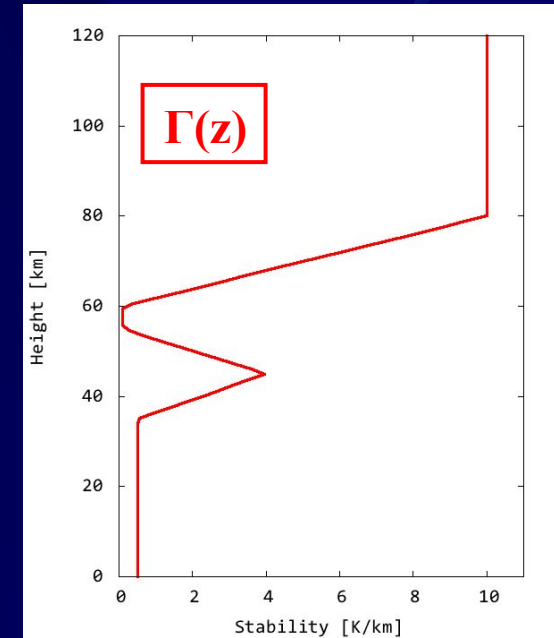
- AFES (Atmospheric GCM for Earth Simulator) for Venus
 - 3-D Primitive equation on sphere (hydro static balance) without moist process
 - Resolution: T42L60 (0-120km, $\Delta z \sim 2\text{km}$), T63L120, T159L120, T159L240, T319L120, T319L240, T639L120 ($\Delta x \sim 20\text{km}$, 1 Ed ~ 3 hour with 320 core)
 - Specific heat: C_p is constant ($1000 \text{ Jkg}^{-1}\text{k}^{-1}$)
 - Horizontal hyperviscosity: e-folding time 0.1(T42), 0.01(T159) 0.003(T639)Ed
 - Vertical eddy viscosity: $0.15\text{m}^2\text{s}^{-1}$
 - Rayleigh friction: lowest and above 80km(sponge layer except for zonal flow)
- Solar heating
 - Excluded in control run (to investigate baroclinic instability)
 - Prepare zonal (Q_z) and diurnal (Q_t) component of heating
- Radiative process
 - Simplified by Newtonian cooling: $dT/dt = -\kappa (T - T_{\text{ref}}(z))$
 - κ : based on Crisp (1986)
 - $T_{\text{ref}}(\theta, z)$: latitudinal gradient field for control run
zonally uniform field for runs with solar heating

- Static stability: $\Gamma(z) = dT/dz + g/C_p$

- To mimic observed realistic static stability

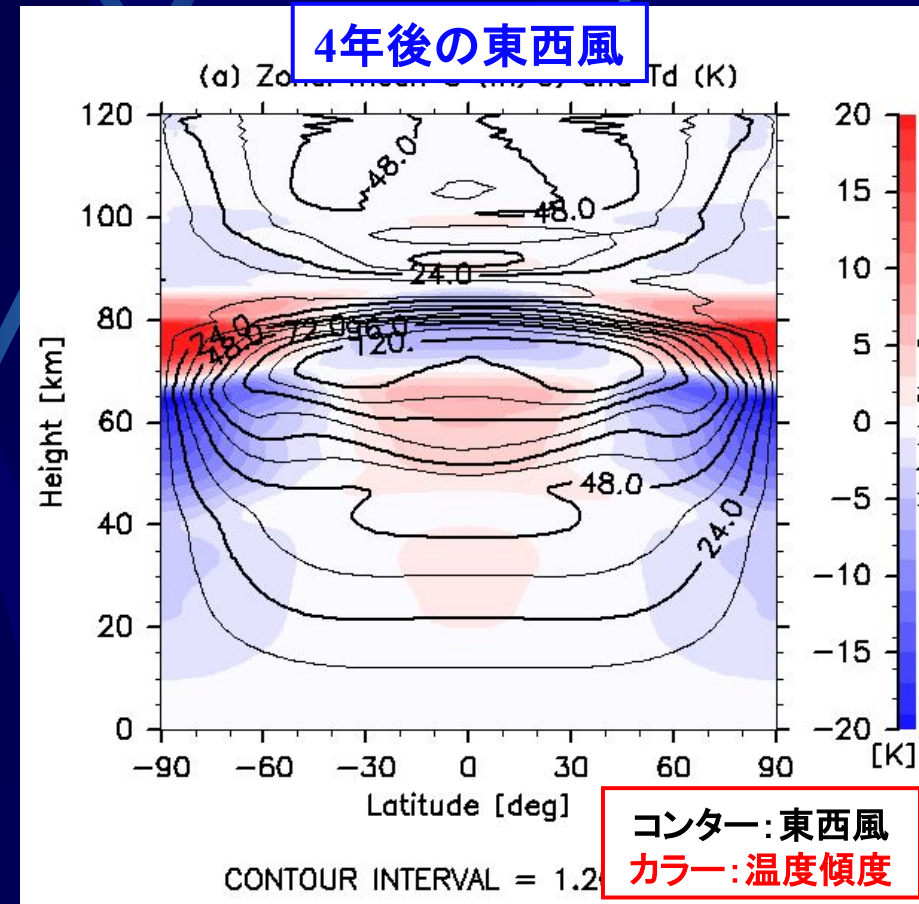
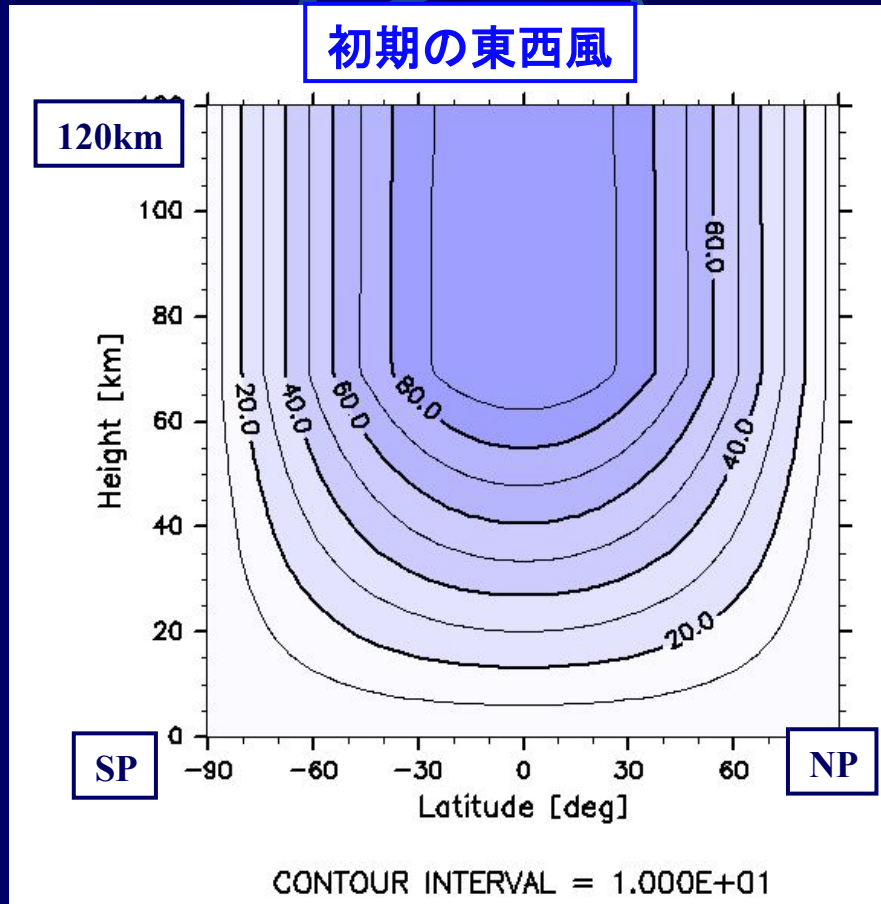
- Initial condition: Super-rotation

- Zonal flow increases with height linearly from ground to 70 km. 100 m/s above 70 km (const.).
- Meridional distribution: solid body rotation.
- Temperature is in balance with zonal flow (gradient wind balance).



3. 結果

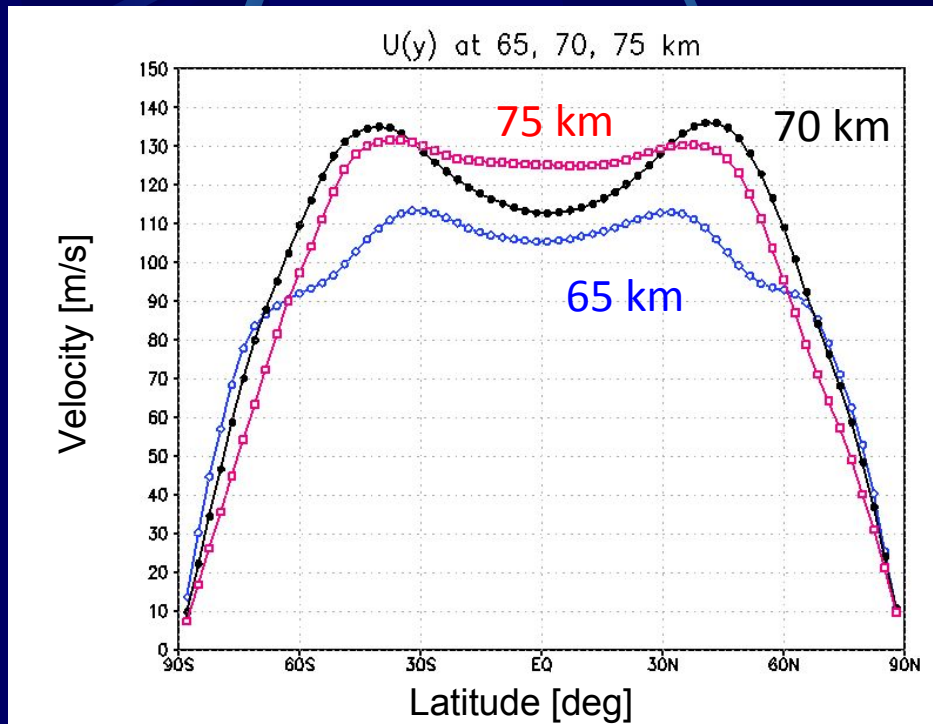
● スーパーローテーションの再現・維持に成功



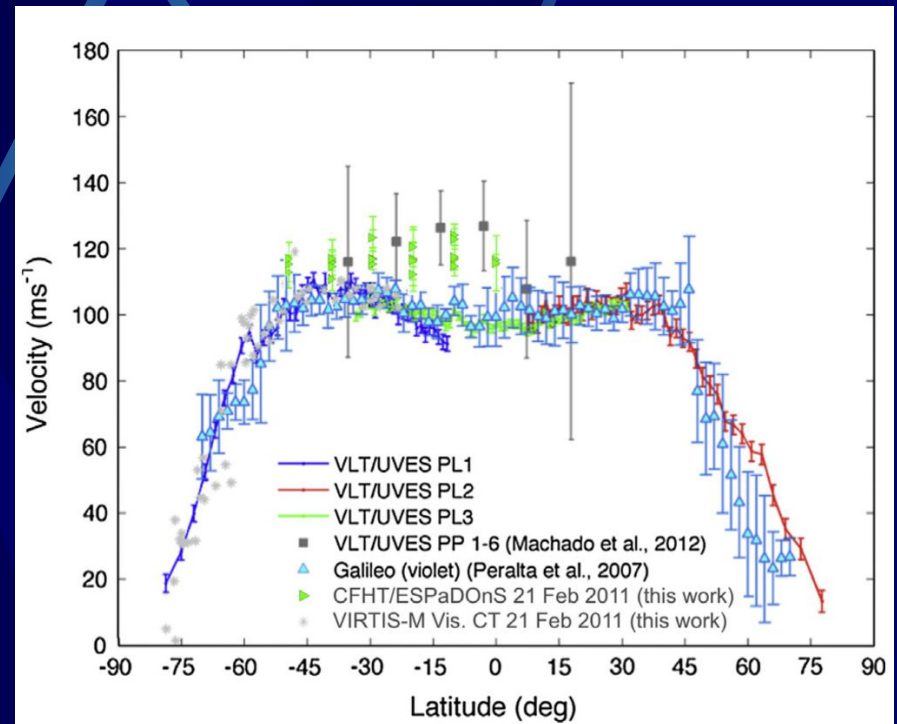
現実的な温度場では傾圧波が発生 (Sugimoto et al., JGR2014)

観測と統合的なスーパーローテーションの構造

AFES results



Observations: Doppler measurements

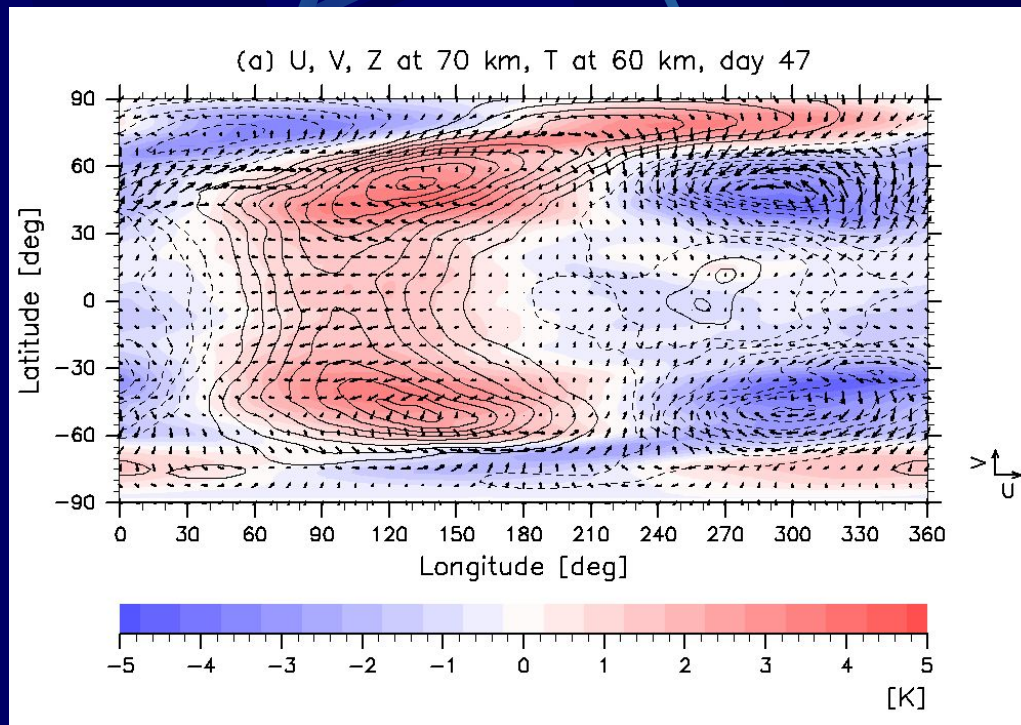


熱潮汐波と傾圧波による赤道方向への角運動量の輸送

Machado et al. (2014)

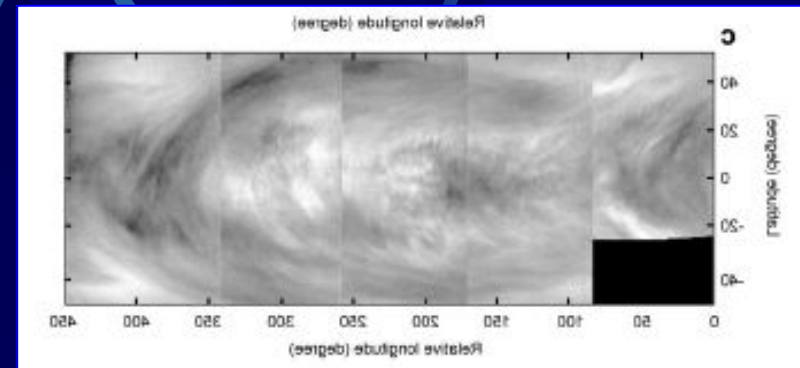
観測(雲の模様)と整合的な水平構造

AFES results



高度(コンター)、風速(ベクトル)、温度(カラー)

Observations: Cloud brightness distribution



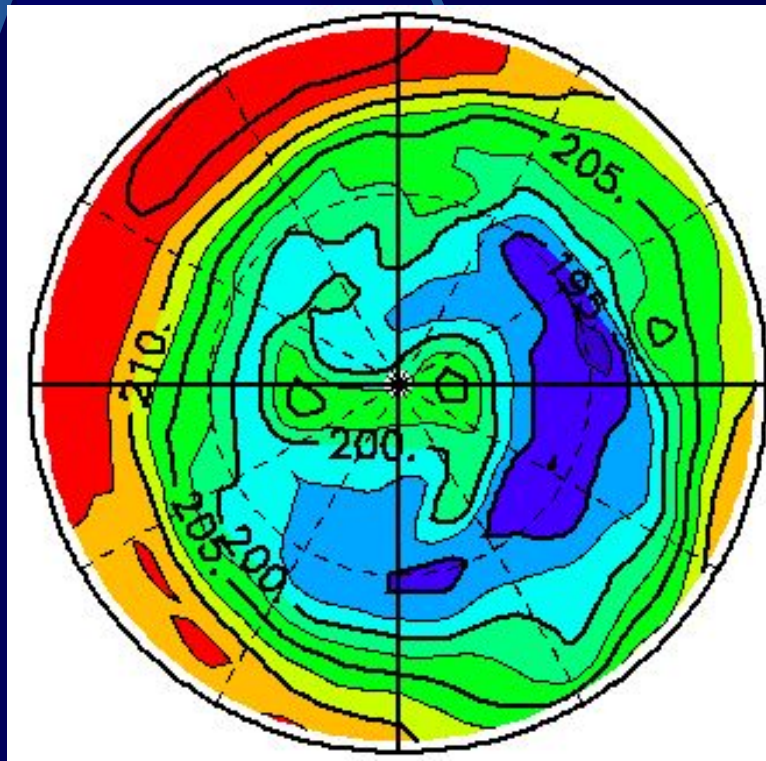
Belton et al. (1991)

傾圧波による水平構造の発生 (Sugimoto et al., GRL2014)

● 極域の渦構造の再現

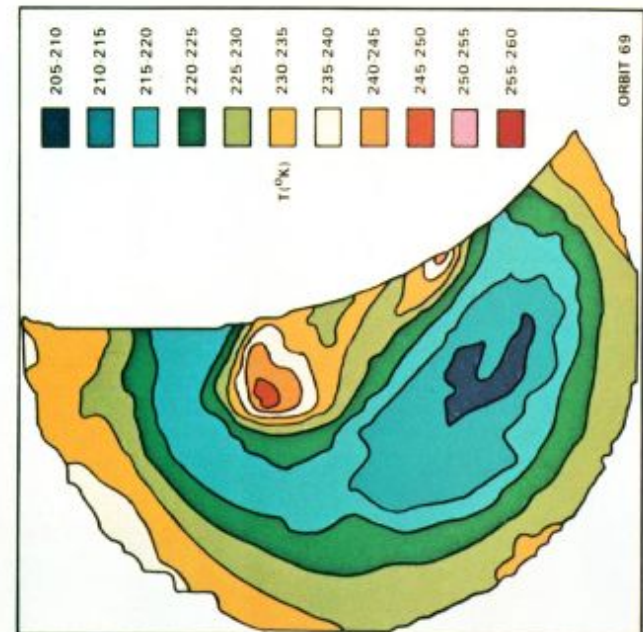
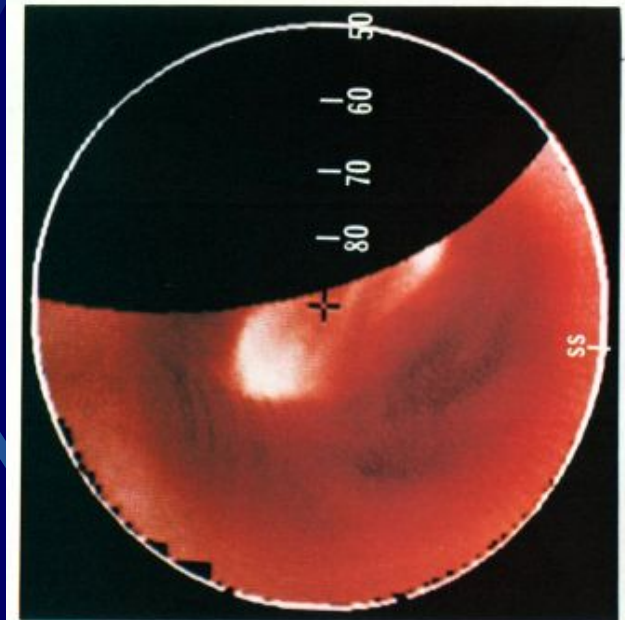
- ✓ 暖かいS字の極渦
- ✓ コールドカラー(低温な緯度帯)

Ando et al. (Nature Com. 2016)



**GCMによる初の再現例
熱潮汐波が構造の発現に効く**

Taylor et al.(1980)



● 大気重力波の重要性を示唆

✓ エネルギースペクトル解析

$$E_n = \frac{1}{4} \frac{a^2}{n(n+1)} \sum_{m=-n}^n (|\tilde{\zeta}_m^n|^2 + |\tilde{D}_m^n|^2)$$

✓ 回転 & 発散成分への分離

$$E_n^R \equiv \frac{1}{4} \frac{a^2}{n(n+1)} \sum_{m=-n}^n |\tilde{\zeta}_m^n|^2$$

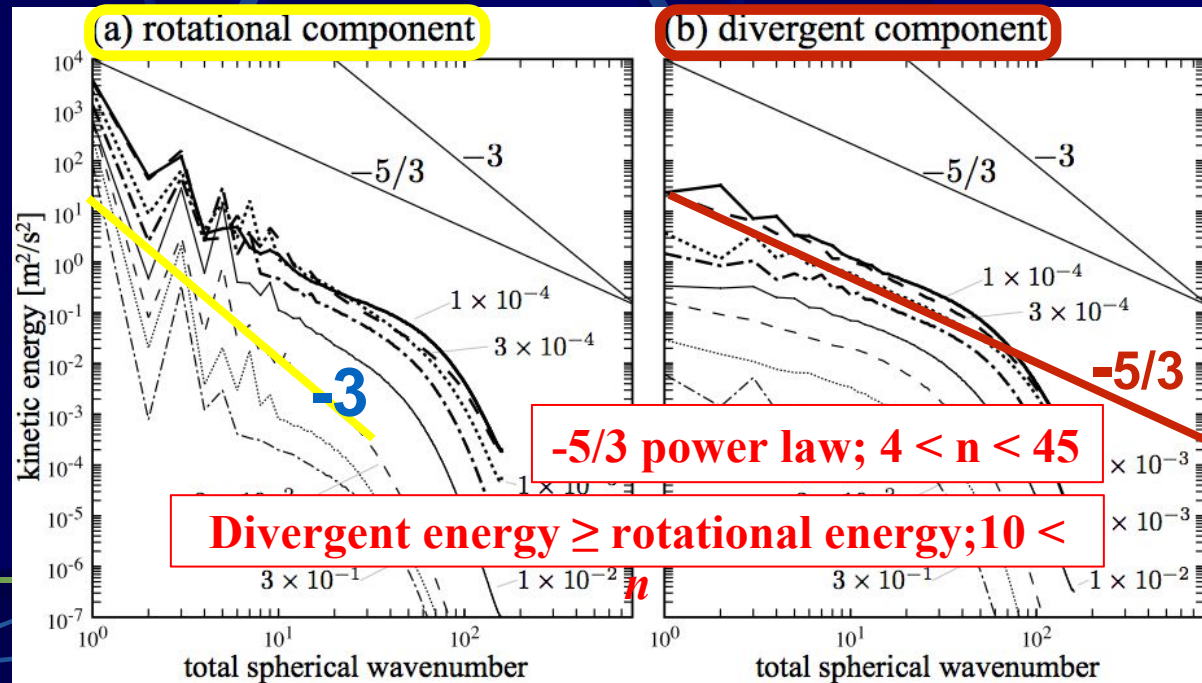
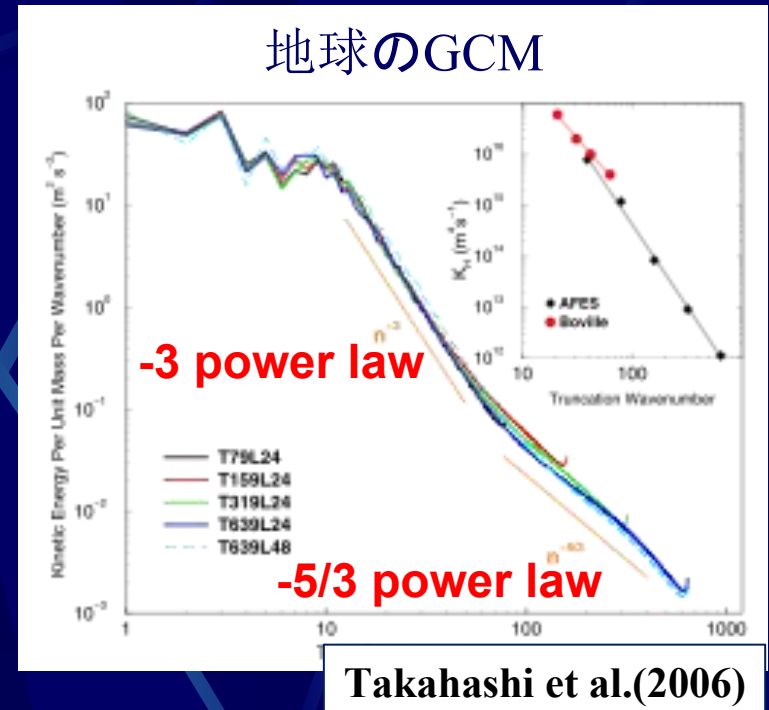
balanced flow; Rossby waves

$$E_n^D \equiv \frac{1}{4} \frac{a^2}{n(n+1)} \sum_{m=-n}^n |\tilde{D}_m^n|^2$$

unbalanced flow;
gravity waves

Gravity waves might be more important than those on Earth

Kashimura et al. (in preparation)



4. おわりに

金星に吹く風の謎と研究内容の簡単な紹介をした。

✓ 金星大気のスーパーローテーションの謎は現在でも解明されていない。

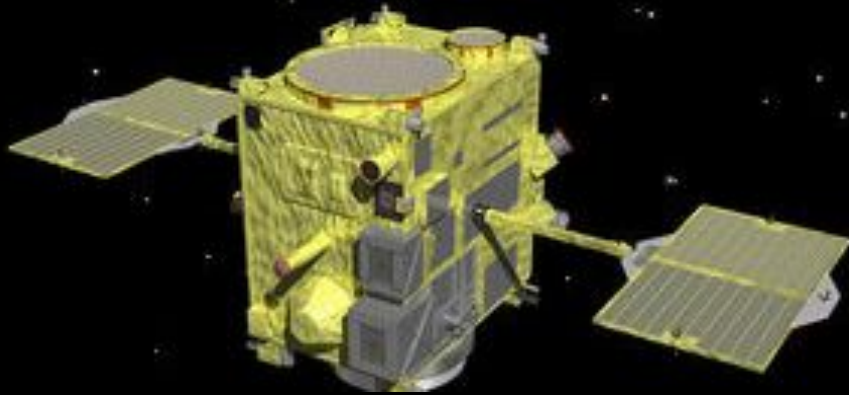
- 初期に静止した状態から現実的な設定のもとに長時間積分して、スーパーローテーションを再現した例はない。

✓ 我々の大気大循環モデル(AFES)は現時点で世界一の金星GCMの一つである。

- フランスのGCMは放射や地形などの詳細な物理過程が入っているが、再現されるスーパーローテーションの構造などに観測と不整合な点がある (Lebonnois, S., N. Sugimoto, and G. Gilli, Icarus2016)。
- 観測およびGCMの結果の比較を行いながら、より現実的な設定を検討し、改良していかなくてはならない。モデルの改良は現在進行中である。

金星の気象を知るために

観測



「あかつき」の大気観測装置(今年4月頃から)

- ・風速や気温の計測
- ・雲や大気成分の分布
- ・雷の有無 など...

数値計算



スーパーコンピュータ(本研究)

(https://www.jamstec.go.jp/j/kids/press_release/20101117/)

観測された現象や構造の
生成・維持される理由を解明

あかつき

2010年5月 H-IIAロケット17号機によって打ち上げ

2010年12月7日 金星周回軌道への投入失敗。

軌道制御用の主エンジンの故障

2015年12月7日 金星周回軌道への投入に成功。

姿勢制御用エンジンを噴射

