



GFDセミナー2024 特別編
@休暇村支笏湖
2024年3月16日(土)10:00-11:00



金星大気の研究 AFES-VenusとALEDAS-Vの紹介

杉本憲彦 (慶大)

藤澤由貴子(慶大), 小守信正(慶大),
AFES-Venus & ALEDAS-V チーム

AFES-Venus; Atmospheric GCM For the Earth Simulator for Venus
ALEDAS-V; AGES LETKF Data Assimilation System for Venus

簡単な自己紹介



杉本憲彦 1977年5月24日生 京都府出身

➤ 学歴

1996年 奈良女子大学 文学部附属 高等学校 卒業

2000年 京都大学 理学部 物理学科 卒業(学士)

2005年 京都大学大学院 理学研究科 地球惑星科学専攻 博士課程修了(理博)
(廣田勇、余田成男、石岡圭一)

➤ 職歴

～2008年 名古屋大学大学院 工学研究科「計算科学フロンティア」 COE研究員
(金田行雄、石井克哉、石原卓)

～現在に至る 慶應義塾大学 法学部 日吉物理学教室 教授
(～2015年 専任講師 ～2020年 准教授) (下村裕、小林宏充)

途中 東大(新野宏、佐藤薫)、京産大(高木征弘)の客員研究員、フランス留学など

➤ 研究分野 地球物理学、気象学、地球流体力学、流体力学、惑星大気科学、計算科学

2006年 気象予報士 (2021年 ワインエキスパート)

2017年 日本流体力学会 2016年度学会賞(竜門賞)受賞

「地球流体における渦からの自発的な重力波放射の研究」

f平面浅水系(矩形領域)

- ・ジェットの線形解析(修論&FDR2007a)
- ・ソースの近似(博論&TAMJ2005)
- ・ジェットからの重力波放射(博論&FDR2007b)
- ・パラメータ走査実験(博論&JAS2008)*

球面浅水系(全球)

- ・ジェットからの重力波放射(JMSJ2012)

3次元プリミティブ系(周期領域)

- ・放射理論(JAS2015a)
- ・数値的検証(JAS2015b)

f平面浅水系(円盤領域)

- ・渦対の解析解と数値的検証(JFM2015)*
- ・渦の併合過程への拡張(PoF2015)*
- ・エネルギー輸送(GRL2016)
- ・楕円渦への拡張(FDR2017)

浅水系、3次元プリミティブ系(円筒領域)

- ・台風の壁雲の交換理論(JAS2019)

熱潮汐波からの自発的放射(NCom2021)

*日本流体力学会「竜門賞」受賞論文

計算科学(手法開発)

自己組織化マップ(SOLA2008...)

可視化手法(JACIII2009)

円柱列の遅い流れ(TAMJ2008)

台風追跡(TAMJ2009...)

金星大気力学

モデルの開発(TAMJ2013...)

超回転(GAFD2013), 雲層対流(Icarus2014)

傾圧不安(JGR14)と惑星波(GRL14)

LMD-GCMの惑星波(Icarus2016)

コールドカラー(NCom2016)と極渦(JGR2017)

データ同化の開発(SRep2017)

熱潮汐波の解析と観測比較(JGR2018a, b)

Vex風同化(GRL19a), あかつき風(Srep22)

惑星規模筋状構造(NCom2019)

超回転(GRL19b), 水平粘性(EPS23)

下層安定度(SRep2020), 雲(JGR2020, 2021)

OSSE(Atmos21, 22, GeoSciLett22...)

安定度, 4日波, 熱潮汐波(JGR2022a, b, c...)

教育

➤ 本務

慶應義塾大学 法学部 日吉物理学教室（物理学I・II、自然科学研究会I~IVなど）

文系の学生向けの教養の物理(文・経・法・商学部の共通科目)を担当。

日常の不思議をなるべく数式を使わずに、物理的な視点で解説。

前期「地球と環境の物理」、後期「気象を物理で語る」

半期15コマ(90分×約60名×3クラス)分を10年以上担当。

➤ 非常勤講師

岡山大学 環境理工学部「環境数理モデル特論A(集中講義)」2018, 2020, 2023年度

東京都市大学 環境創生学科「現代の物理(a)・(b)」2023-24年度

昭和女子大学 生活科学部「基礎科学B(力学)」2017-18年度

東京家政学院大学 現代生活学部「物理学入門」「地球の科学」2012-13年度

工学院大学 情報学部 情報デザイン科「情報処理概論及演習」2010年度

東邦学園短期大学 経営情報科「オフィスソフトウェアI・II」2007年度

大同工業大学 教養部 物理学教室「基礎工学実験」2006-7年度

**専門的知識: 物理学(流体力学)、数学(微積・線形代数)、
計算科学(プログラミング)、地学(気象学)など...**

著書 (I)

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



「法学・経済学・自然科学から考える環境問題」
 共著(慶應義塾大学出版会, 2017/08, 164pp.)

著書 (II)

「はじめて学ぶ大学教養地学」
共著(慶應義塾大学出版会, 2020/05, 336pp.)

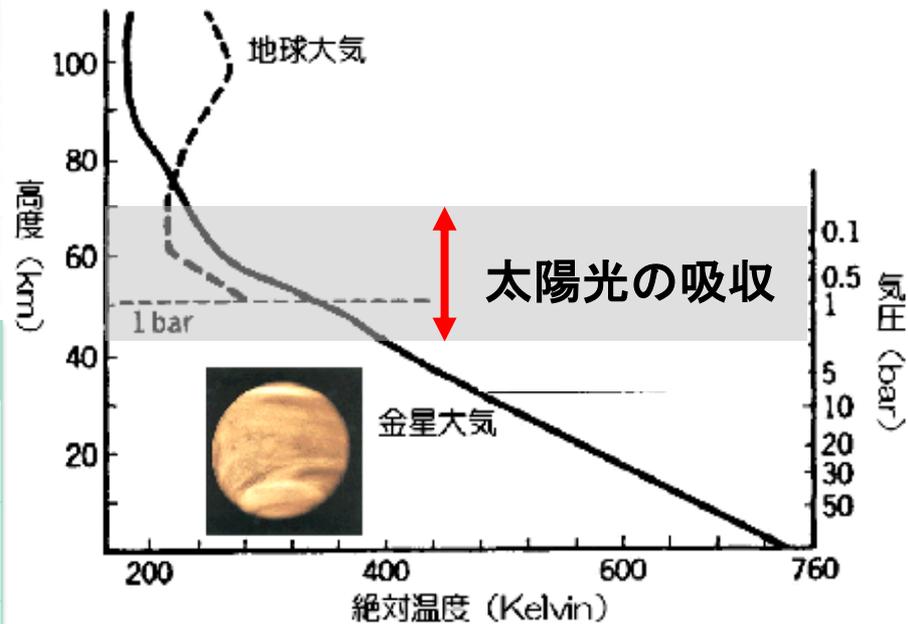
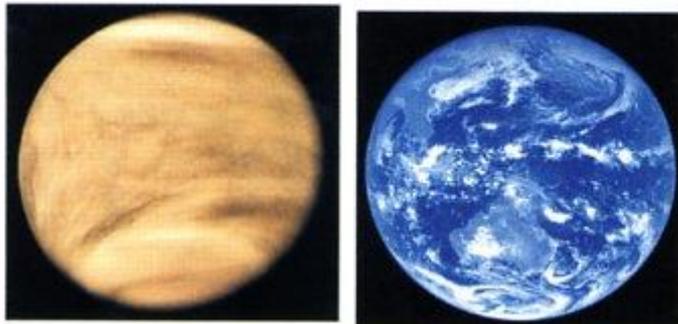


「空があるから(月刊たくさんのふしぎ)」
本文担当(福音館書店, 2020/07, 40pp.)

1. はじめに

金星と地球

紫外線観測

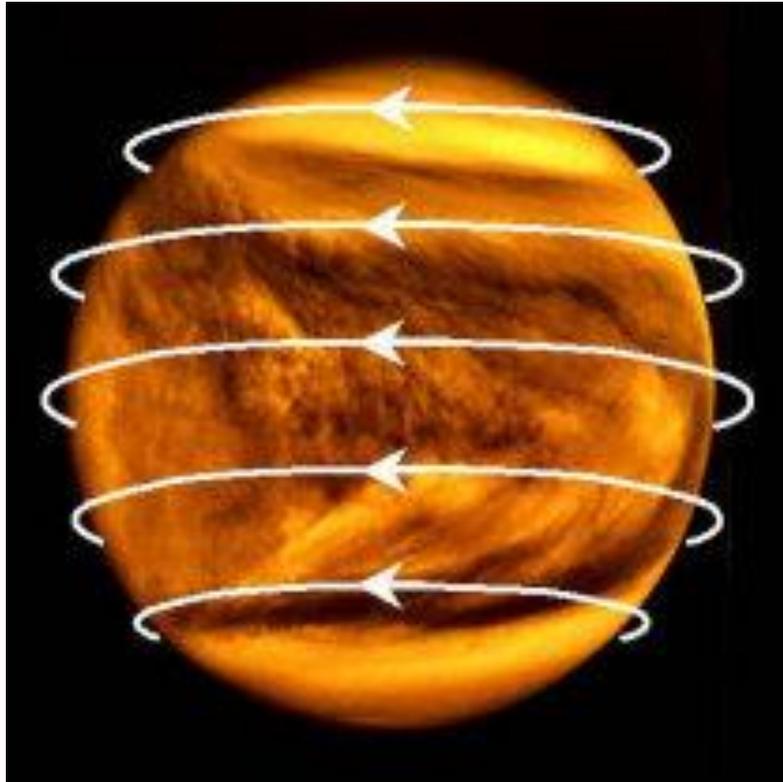


	金星	地球
半径	6050 km	6378 km
公転周期	224日	365日
自転周期	243日(1.8m/s)	1日(460m/s)
1太陽日	117日	1日
大気組成	CO ₂	N ₂ , O ₂
アルベド	0.78	0.3
地表面気圧	92 bar	1 bar

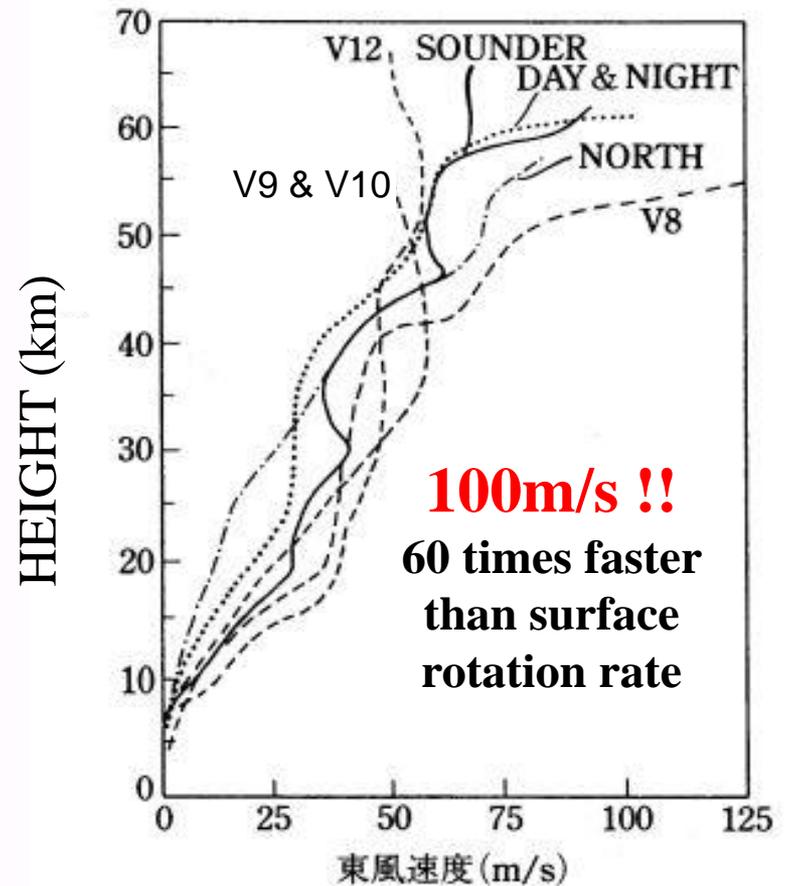
- ✓ 自転が極めて遅い
- ✓ CO₂の濃密な大気
- ✓ 厚い雲層(45~70km)

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

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

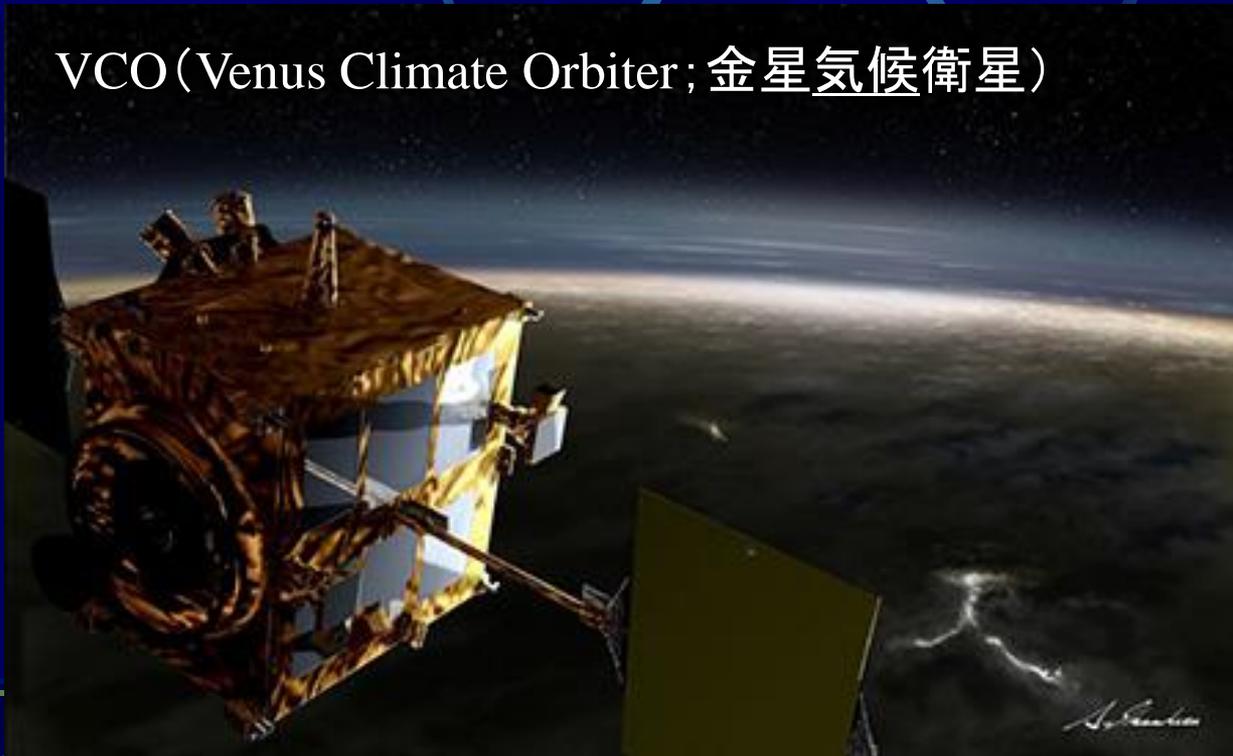
2010年12月7日 金星周回軌道への投入失敗。

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

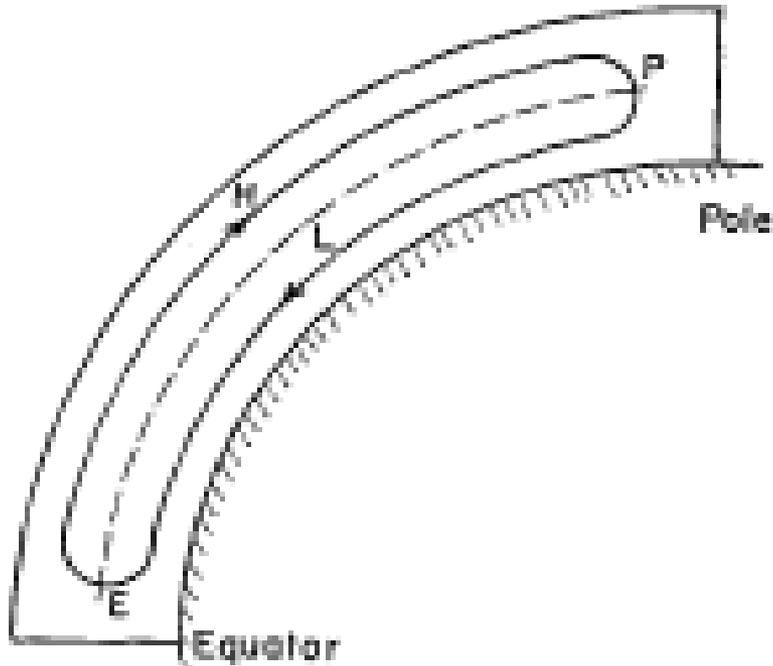
VCO (Venus Climate Orbiter; 金星気候衛星)



金星の風の成因

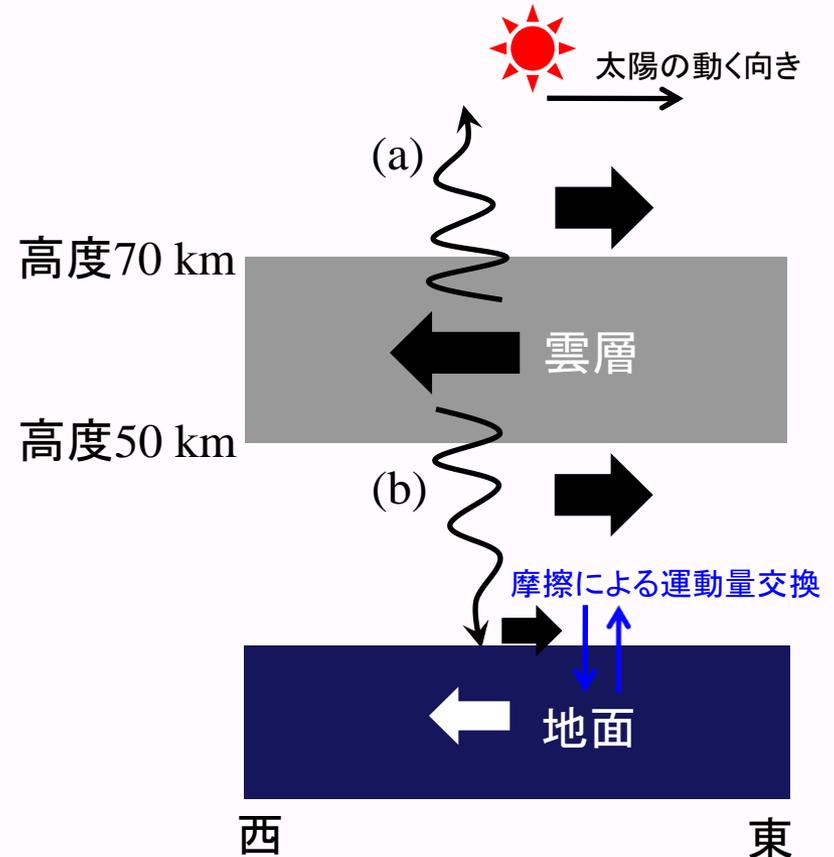
二つの代表的なメカニズム (低解像度GCMで再現)

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

当時の金星GCM研究

● スーパーローション(SR)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

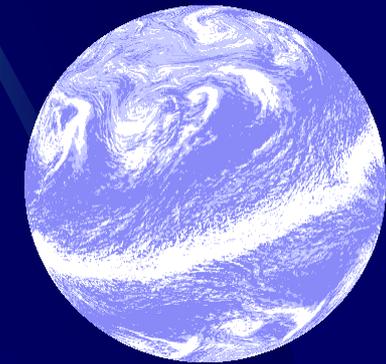
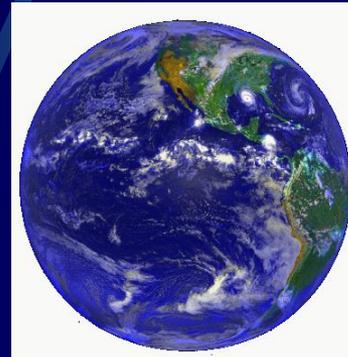
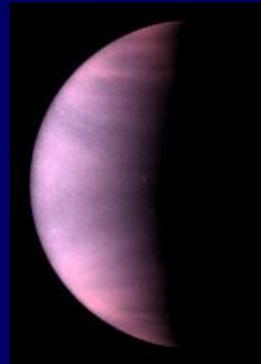
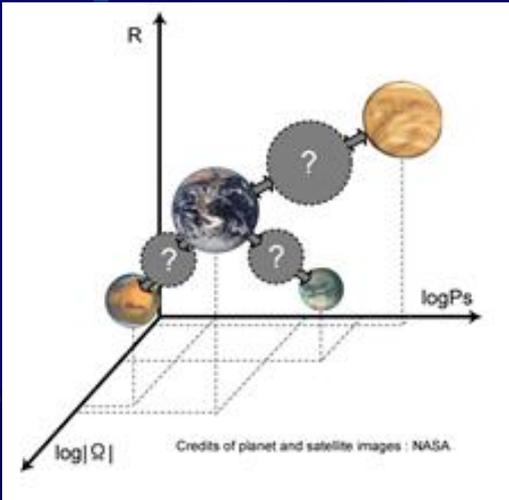
AFES惑星大気プロジェクト

(Atmospheric GCM For the Earth Simulator)



● 地球型惑星大気の比較(2006?-)

- ✓ 林先生(当時・北大、現・神大)、大淵さん、榎本さん...
- ✓ 共通の力学コア(AFES)を用いて多様な惑星大気の差異・類似性の理解を目標とする。
- ✓ 火星(高橋さん)、金星(高木さん)、水惑星(中島さん)...
 - ・ 私が金星グループに入ったのは2010?くらいから



計算性能

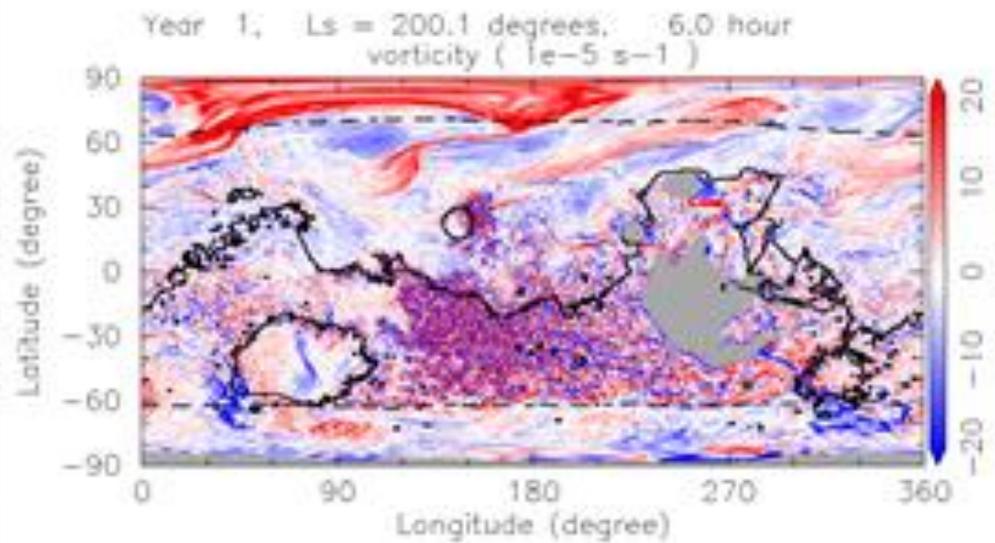
● AFES (Earth SimulatorのためのGCM)

- ✓ ベクトル型並列計算機 ES2 (現在ES4)に最適化
- ✓ 火星でT639L96解像度の計算実績(Takahashi et al.)
グリッド間隔 ~11 km (1920 × 960 grids with 96 layers)

ノード数	64ノード
ベクトル化効率	99.4%
並列化効率	99.8%
CPU時間	1火星日 / ~4時間



火星高解像度計算結果の例
(渦度分布)



Strategy

- 初期に理想化したスーパーローテーションを設定
 - ✓ 高解像度での計算コストを削減
- 現実的な設定でスーパーローテーションを維持
 - ✓ 現実的な太陽加熱と大気安定度、赤外放射はニュートン冷却

Targets

- 雲層付近の大気擾乱に焦点を絞る
 - ✓ 傾圧波; 過去に観測例はないが理論的に存在が予見 (*Sugimoto et al., JGR2014*)
 - ✓ 中立波; 雲画像などで存在が示唆 (*Sugimoto et al., GRL2014*)
 - ✓ 熱潮汐波; 水平、鉛直構造とその働き (*Takagi et al., JGR2018; Ando et al., JGR2018*)
 - ✓ エネルギースペクトル; 金星では未着手な伝統的解析 (*Kashimura et al., in preparation*)
 - ✓ 極渦; “S字” 構造の観測(VIRTIS)、順圧不安定が起源? (*Ando et al., JGR2017*)
 - ✓ コールドカラー; GCMで再現例のない周極低温緯度帯 (*Ando et al., Nature Com.2016*)
 - ✓ 筋状構造; あかつき観測の再現 (*Kashimura et al., Nature Com. 2019*)

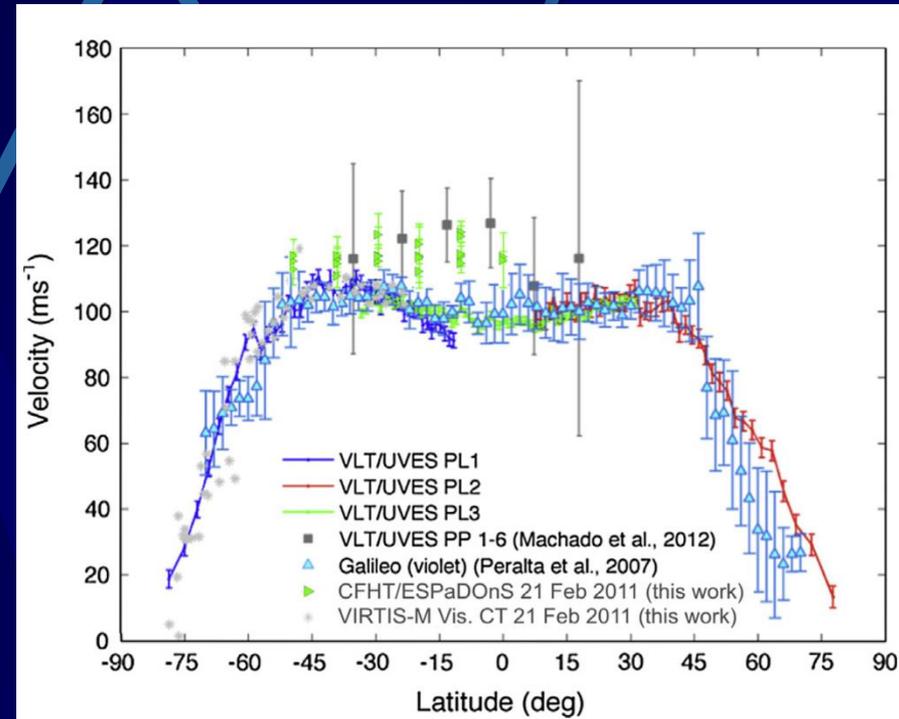
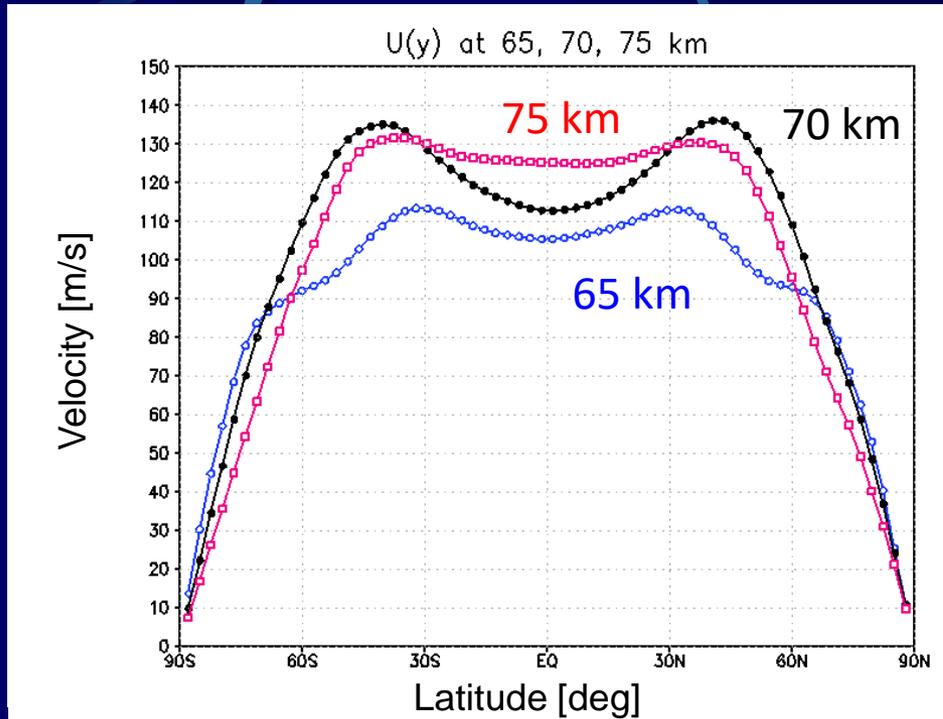
これまでの成果(AFES-Venus)

● 観測と統合的なスーパーローテーション (T63L120 run)

- ✓ 赤道域が等速になる構造は過去のGCMでは再現されていない

AFES-Venus

Observations: Doppler measurements



熱潮汐波による赤道加速 (Takagi et al., JGR2018)

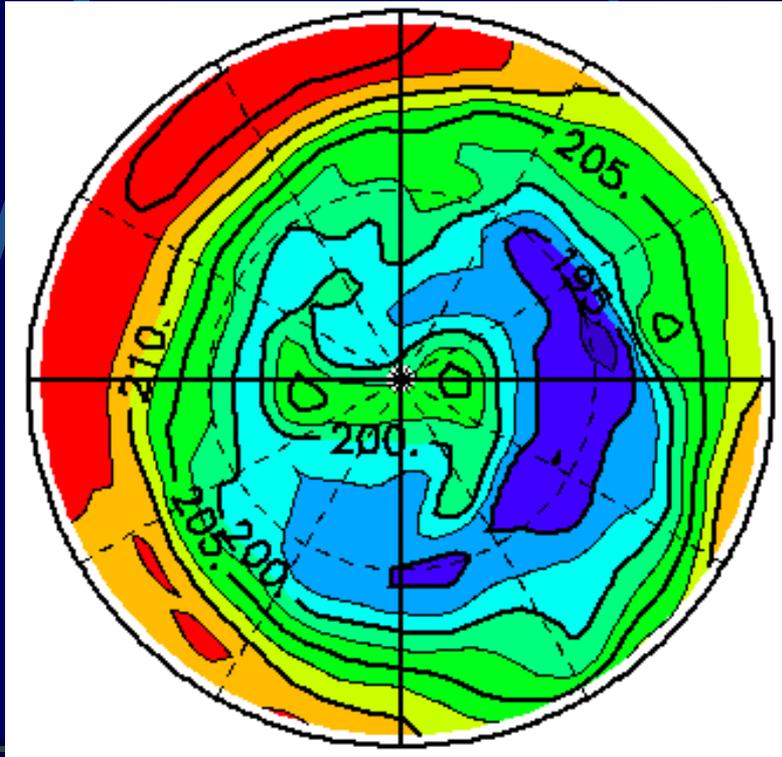
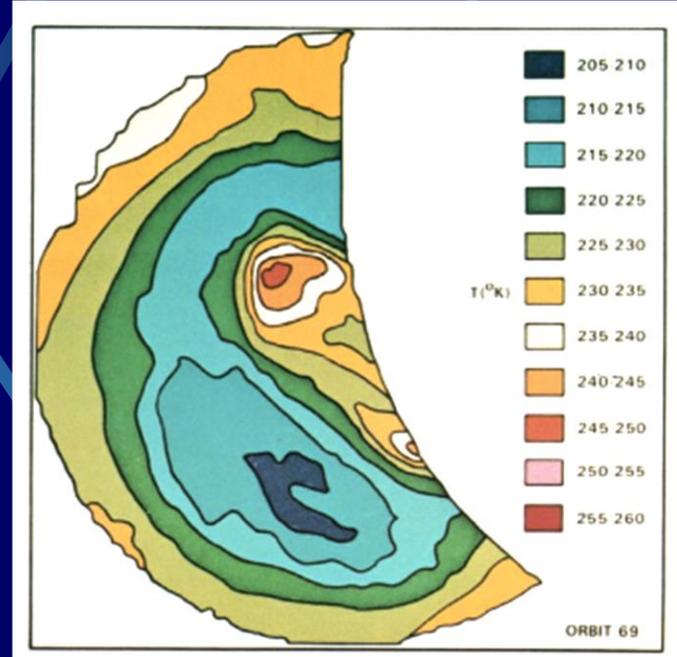
Machado et al. (2014)

傾圧波によるロスビー波の発生 (Sugimoto et al., JGR2014 & GRL2014)

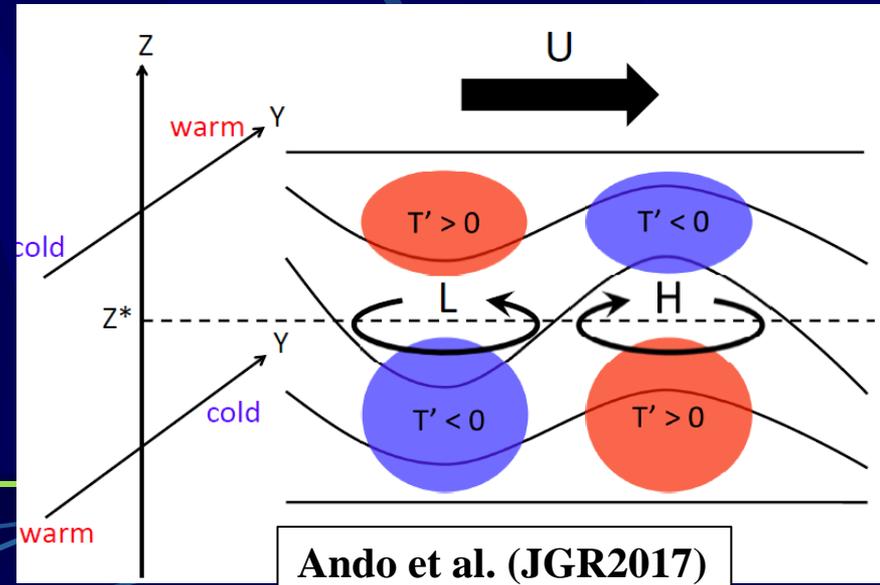
● 極域の渦構造を再現 (T42L60 run)

- ✓ 暖かいS字の極渦
- ✓ コールドカラー(周極低温緯度帯)

GCMによる世界初の再現例
熱潮汐波が構造の発現に効く



Ando et al. (Nature Com. 2016)

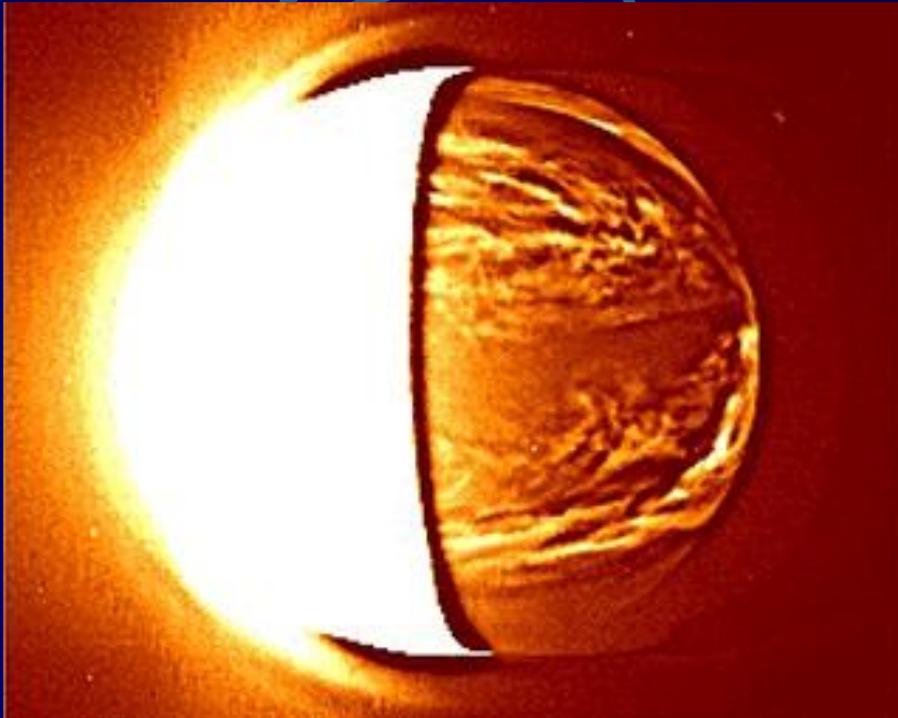


Ando et al. (JGR2017)

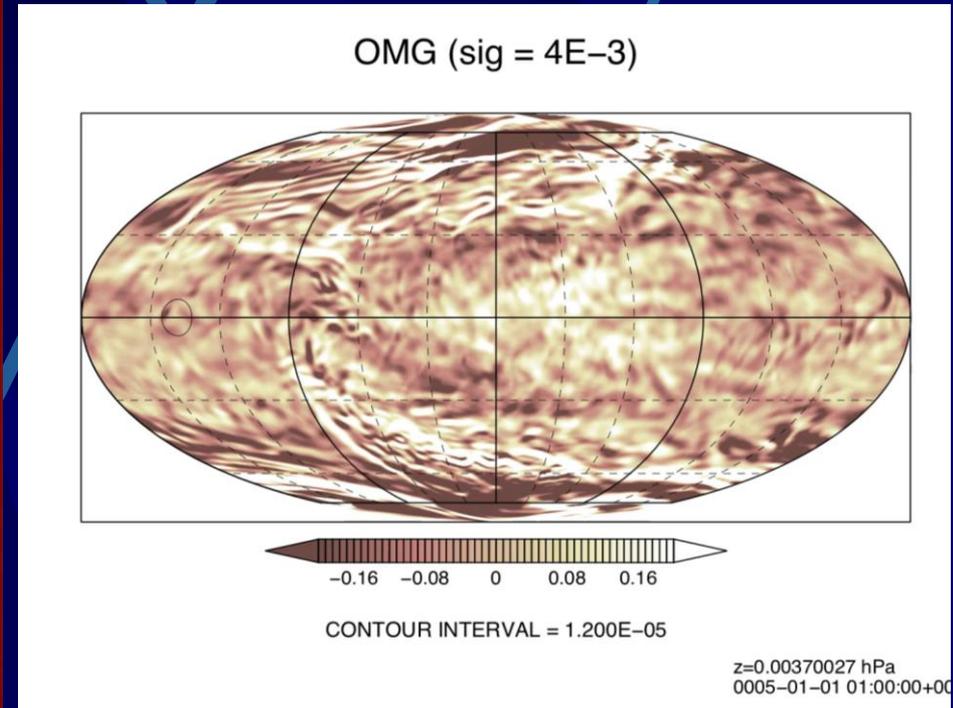
● あかつきIR2画像と金星AFESの比較 (T159L120 run)

✓ 筋状構造の再現と発生メカニズム

Akatsuki IR2



AFES-Venus



Kashimura et al. (Nature Com. 2019)

<http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missions/akatsuki/compile/gallery.shtml>

Rotation

現実の金星大気はかなり近い状態をAFES-Venusで再現可能になってきた。

地球の気象/気候の理解

観測：眼



気象衛星「ひまわり」

(<http://www.jma-net.go.jp/sat/data/web/satenkaku.html>)

- ・風速や気温の計測
- ・雲や水蒸気の分布
- ・火山灰が広がる様子など・・・

数値計算：頭



©RIKEN

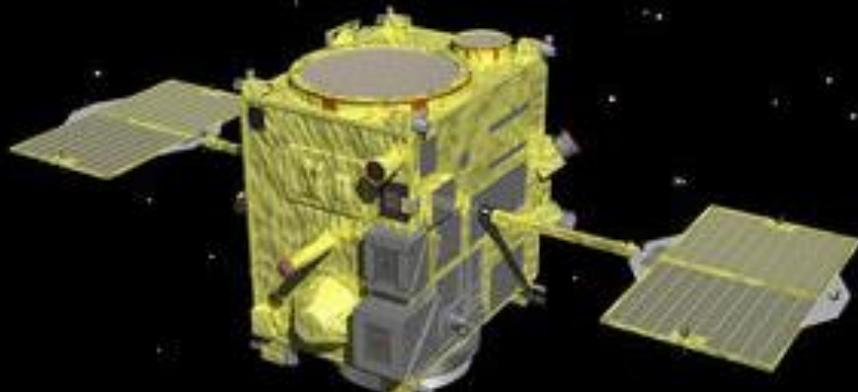
スーパーコンピュータ「富岳」

<https://www.fujitsu.com/jp/about/businesspolicy/tech/fugaku/>

観測された現象や構造の
生成・維持される理由を解明

金星の気象/気候を知るために

観測：眼



Venus Climate Orbiter「あかつき」since 2016

- ・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：頭



スーパーコンピュータ「地球シミュレータ」
ES4 since 2021

観測された現象や構造の
生成・維持される理由を解明

データ同化の試み (「ALEDAS-V*」基盤S; 林祥介代表=>next)

*ALEDAS-V (AFES-LETKF Data Assimilation System for Venus)

- 金星初の客観解析プロダクトの作成 (T42L60; 31 member)
 - ✓ あかつきの高頻度、多高度の気象観測データ

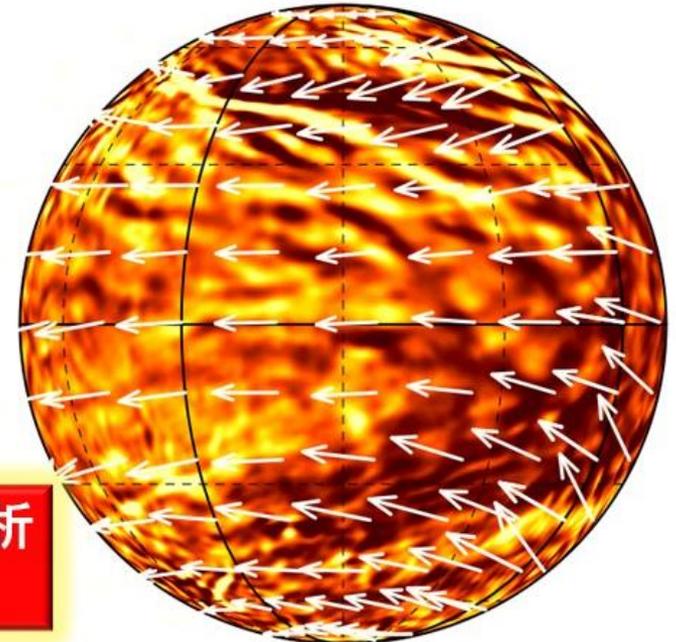
「あかつき」の観測



AFES-Venusの予報



金星初の客観解析
プロダクト



Sugimoto, N. et al., **Development of an ensemble Kalman filter data assimilation system for the Venusian atmosphere**, *Scientific Reports*, Vol. 7, (2017), 9321, 9pp.

2. 最近の進展

● AFES-Venus

- ✓ 静止状態からのスーパーローテーションの再現 (*Sugimoto et al., GRL2019a*)
- ✓ スーパーローテーションの水平粘性依存性 (*Sugimoto et al., EPS2023*)
- ✓ 熱潮汐波からの自発的な重力波放射 (*Sugimoto et al., Nature Com., 2021*)
- ✓ 大気安定度の再現と観測比較 (*Ando et al., Sci. Rep.2020, JGR2022*)
- ✓ 安定度分布の改良による熱潮汐波の位相改善 (*Suzuki et al., JGR2022*)
- ✓ ケルビン波の再現と励起メカニズム (*Takagi et al., JGR2022, 2023*)
- ✓ Bred Vectorによる擾乱の調査 (*Jiang et al., JGR2024*)
- ✓ 雲物理過程の導入と赤道雲層下部の雲量変動 (*Ando et al., JGR2020, 2021*)...

● ALEDAS-V

- ✓ Venus Expressの風速データ同化 (*Sugimoto et al., GRL2019b*)
- ✓ あかつきの風速データ同化 (*Fujisawa et al., Sci. Rep.2022*)
- ✓ 衛星間電波掩蔽のOSSE (*Sugimoto et al., JSCE2019, Fujisawa et al., Icarus2023*)
- ✓ 紫外(UVI)のOSSE (*Sugimoto et al., Atmosphere2021, 2022, Komori et al., in prep.*)
- ✓ 中間赤外(LIR)のOSSE (*Sugimoto et al., GeoSci. Lett.2022*)

OSSE(Observing System Simulation Experiment): 観測システムシミュレーション実験

AFES-Venus see Sugimoto et al. (JGR2014a, GRL2014b...)

● モデル概要

- ✓ 3次元球面プリミティブ方程式 (静水圧平衡) 乾燥大気
- ✓ 解像度: T42L60 (Δx & $\Delta y \sim 300$ km, $\Delta z \sim 2$ km) \Rightarrow T639L260
- ✓ 比熱: C_p 一定値 ($1000 \text{ Jkg}^{-1}\text{k}^{-1}$)
- ✓ 水平超粘性: 0.1地球日のe-folding time (水平解像度で変更) \Rightarrow 感度実験
- ✓ 鉛直渦粘性: $0.0015 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ (標準) $\Rightarrow 0.15 - 0.0015 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$; 10パラメータ
- ✓ レイリー摩擦: 最下層(0.1地球日)と80kmより上空(スポンジ層; 擾乱のみ散逸)
- ✓ 地形や惑星境界層はなし + 雲物理過程

● 太陽加熱

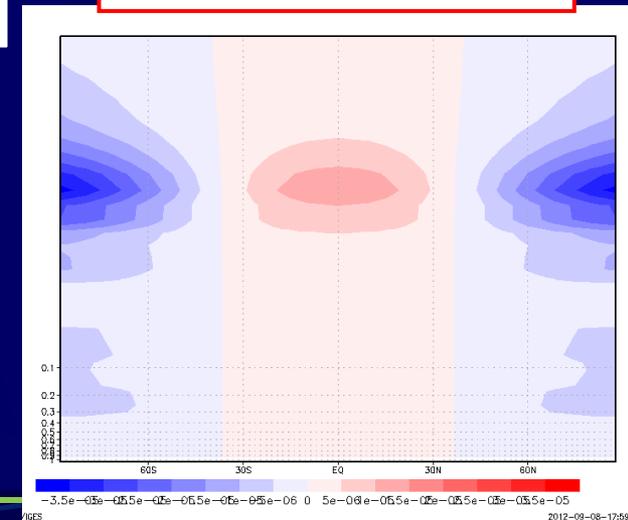
- ✓ 現実的な加熱; 熱潮汐波のon/off 実験が可能
- ✓ Tomasko et al. (1980)とCrisp (1986)に基づく

● 赤外放射過程

- ✓ ニュートン冷却で簡略化: $dT/dt = -\kappa (T - T_{\text{ref}}(z))$
- κ : Crisp (1986)に基づく

$T_{\text{ref}}(z)$: 水平一様な温度場, 現実的な安定度分布

東西平均太陽加熱



80km

0km

緯度

金星GCM研究

- Qz+ = 非現実的強度の東西平均加熱
- Q3D+ = 非現実的強度の3次元加熱
- NC = ニュートン加熱・冷却

Paper	強制	解像度	結果
YT2003	Qz+	T10L50	スーパーローテーション(SR)再現。低緯度等速型
YT2004a	Qz+	T21L50	SR再現。
YT2004b	Q3D+	T21L50	SR再現。下層の加熱強度はかなり強い
YT2006	Q3D+	T21L52	SR再現。55km以下の加熱強度はかなり強い
Ho2007	Qz+, Qz	~T21L56	SR再現, QzでSR再現できず(3セル構造)
TM2007	Qt	T10L60	SR再現。赤道ジェット型。鉛直粘性依存性
Lee2005	NC	~T21L32	NCの緩和時間短い。SR弱い
Lee2007	NC	~T21L32	NCの緩和時間短い。SR弱い
KW2008	Qz	T21L60	U50の多重平衡。下層SR弱い
KW2009	Q3D	T21L60	U50の多重平衡は消えそう。下層SR弱い
YT2009	Q3D+	T21L52	下層の加熱強度を変化。現実強度でSR消失
Leb2010	Q3D	~T21L50	SR生成に地形必要。Qt offでSR消失
Leb2016	Q3D	~T42L50	放射入り。赤道ジェット。上層SRのみ顕著

YT(Yamamoto & Takahashi), Ho(Hollingsworth et al.), TM(Takagi & Matsuda),
Lee(Lee et al.), KW(Kido & Wakata), Leb(Lebonnois et al.)

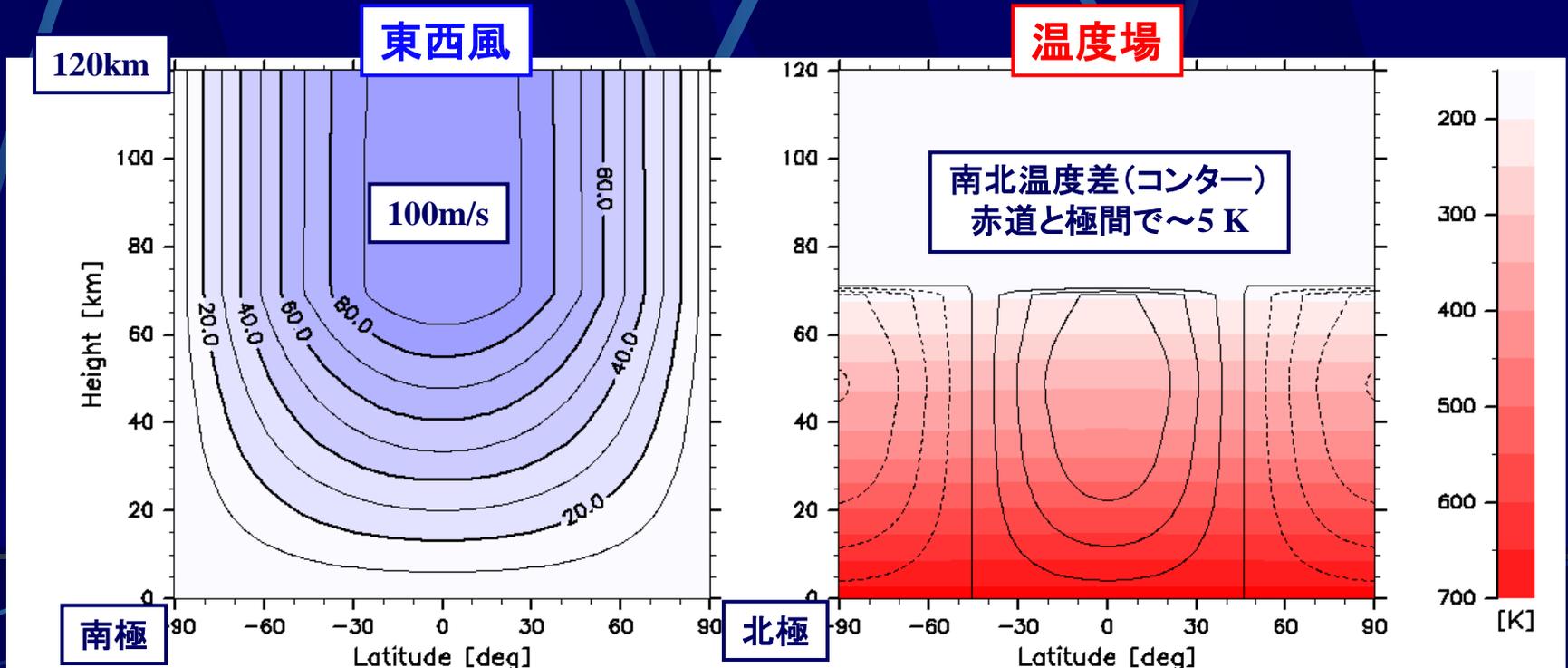
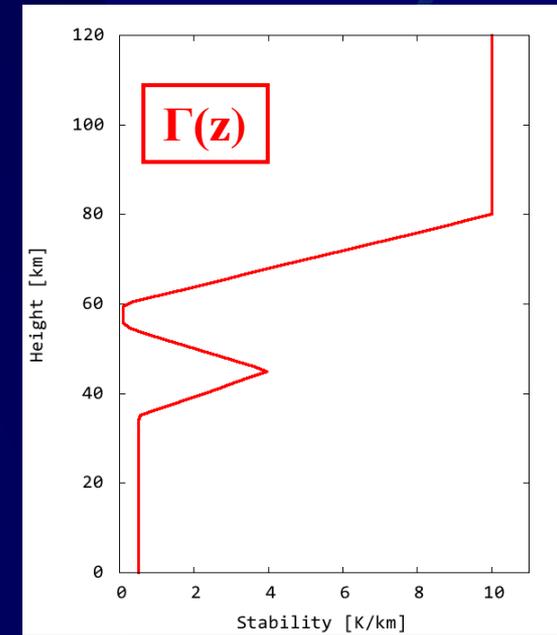
● 初期条件:

① 静止

- 雲層の低安定度層を含む($\Gamma(z) = dT/dz + g/C_p$)
- 温度場: 現実的な安定度分布を模擬(水平一様)

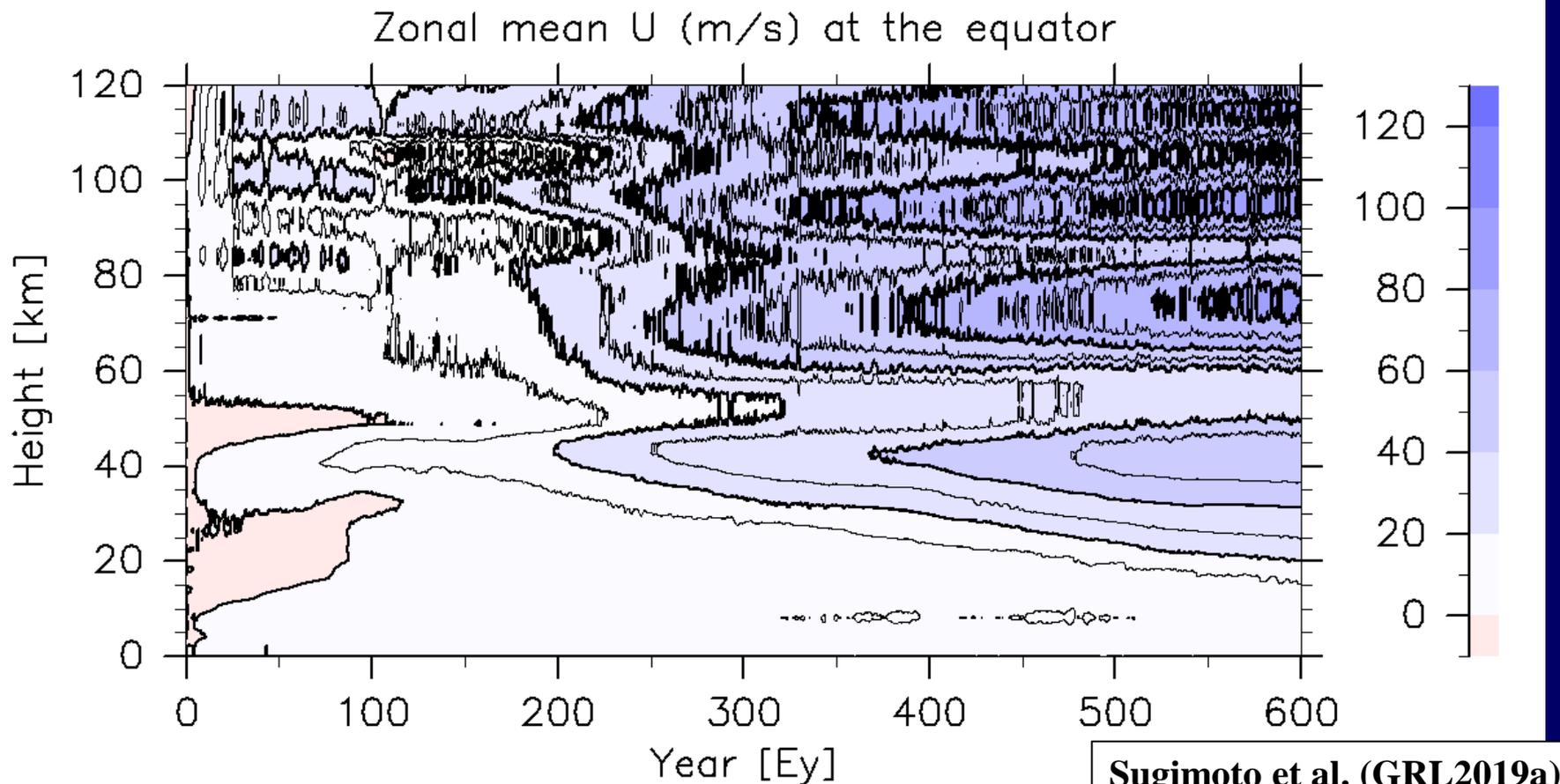
② スーパーローテーション(剛体回転)

- 東西風: 地表から70 kmまで線形に増加
70 kmより上空では100 m/s (一定値)
- 温度場: 東西風とバランス (傾度風)



● 静止状態からのスーパーローテーション再現① (T42L60 run)

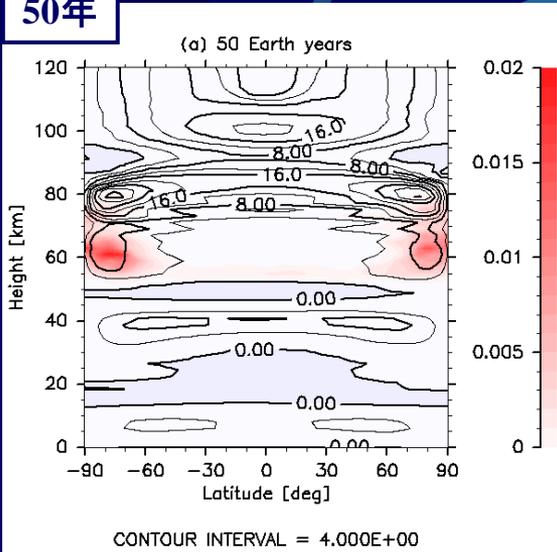
- ✓ 赤道における東西平均風の時間発展
- ✓ 100年以降:スーパーローテーション(SR)の成長



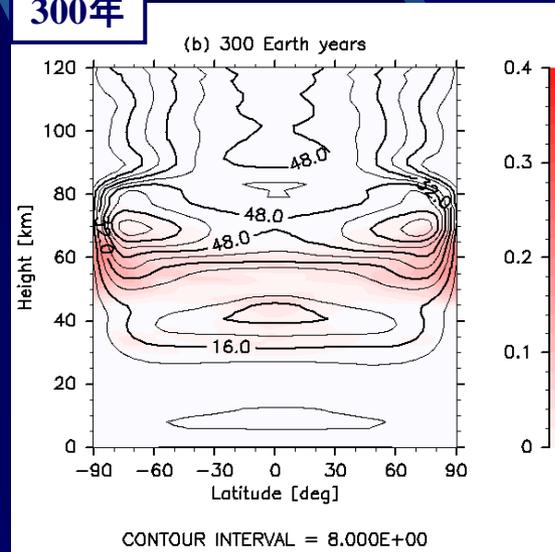
鉛直渦粘性が小さい計算では、子午面循環メカニズムのみでスーパーローテーションが再現した

● 静止状態からのスーパーローテーション再現② (T42L60 run)
 ✓ 東西平均風の緯度高度断面; 高速スーパーローテーションの発達・維持

50年



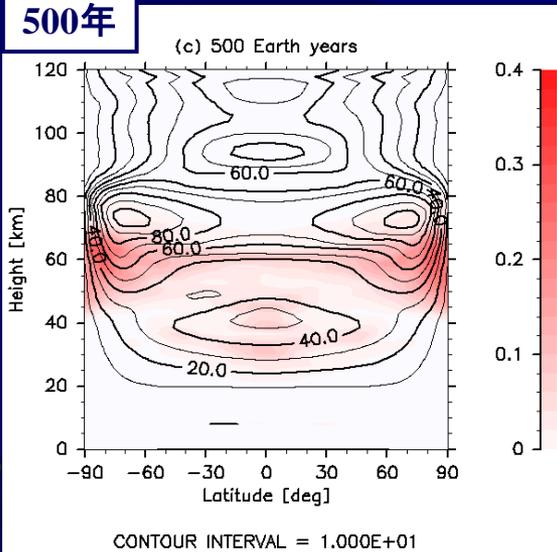
300年



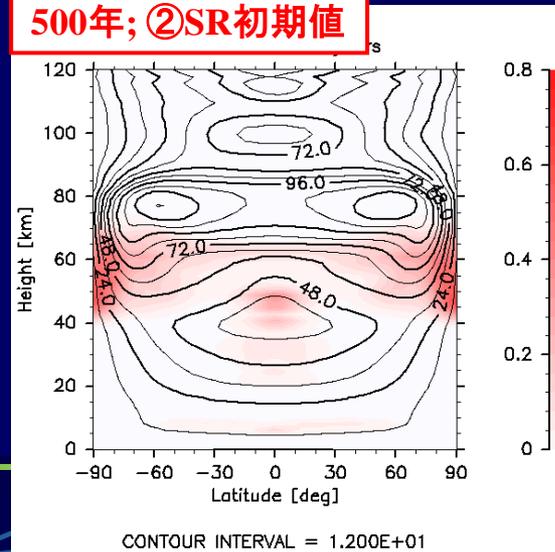
風速(コンター)

短周期擾乱のエネルギー(カラー)

500年



500年; ②SR初期値



①静止状態、

②スーパーローテーション、

2つの初期値が収束

⇒ 多重平衡は存在しない?

0.02 m²/s以下で高速SR
 0.025 m²/s以上で弱いSR

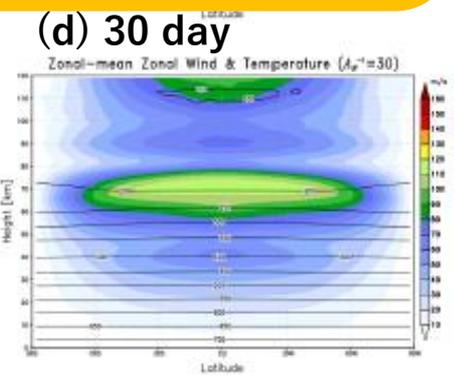
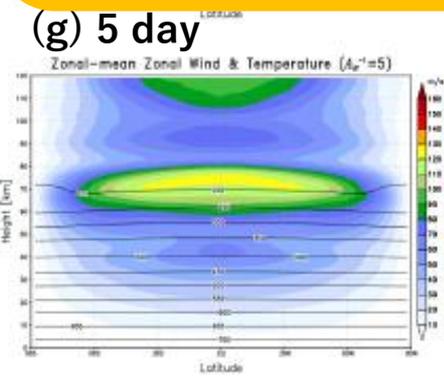
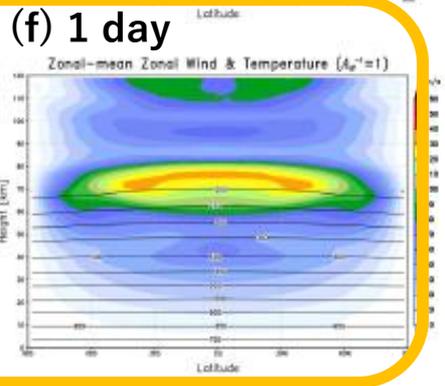
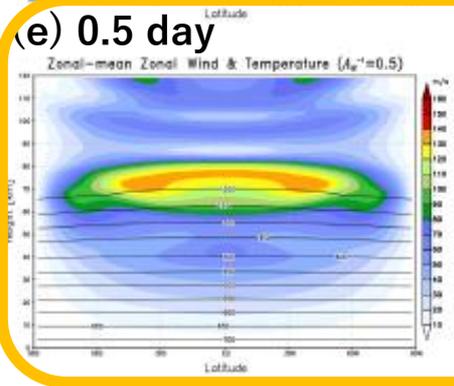
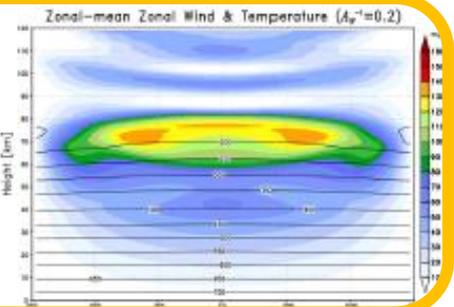
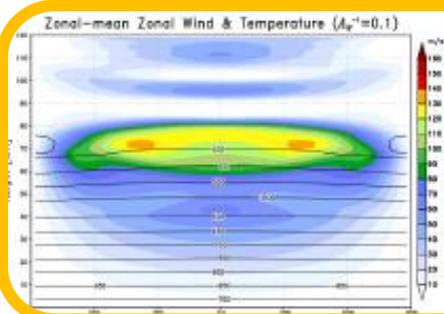
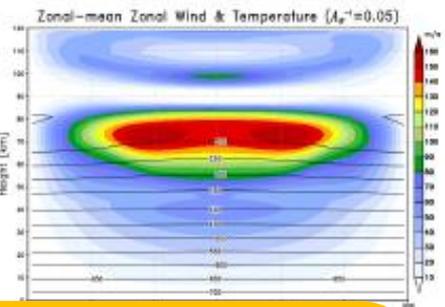
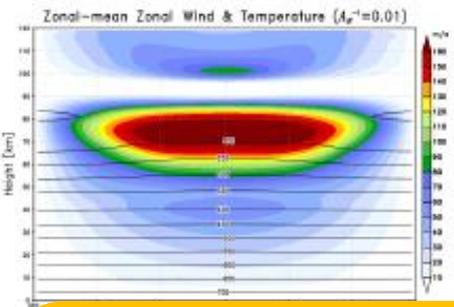
● スーパーローテーションの水平粘性依存性① (T42L60 run)

(a) 0.01 day

(b) 0.05 day

(c) 0.1 day

(d) 0.2 day



(e) 0.5 day

(f) 1 day

(g) 5 day

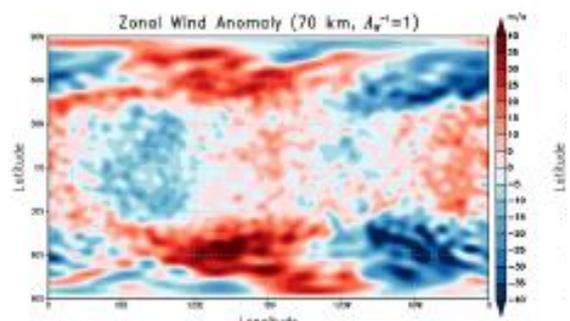
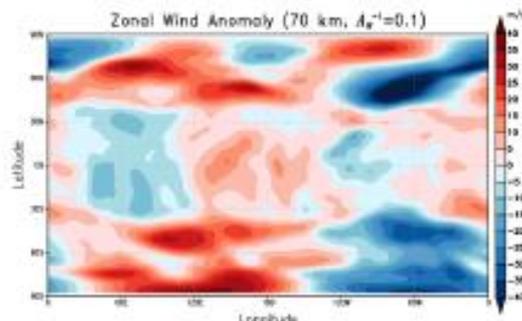
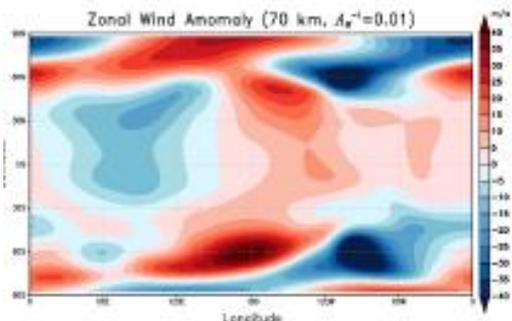
(d) 30 day

From 0.1 to 1 day, SR is almost robust: independent of the horizontal diffusion

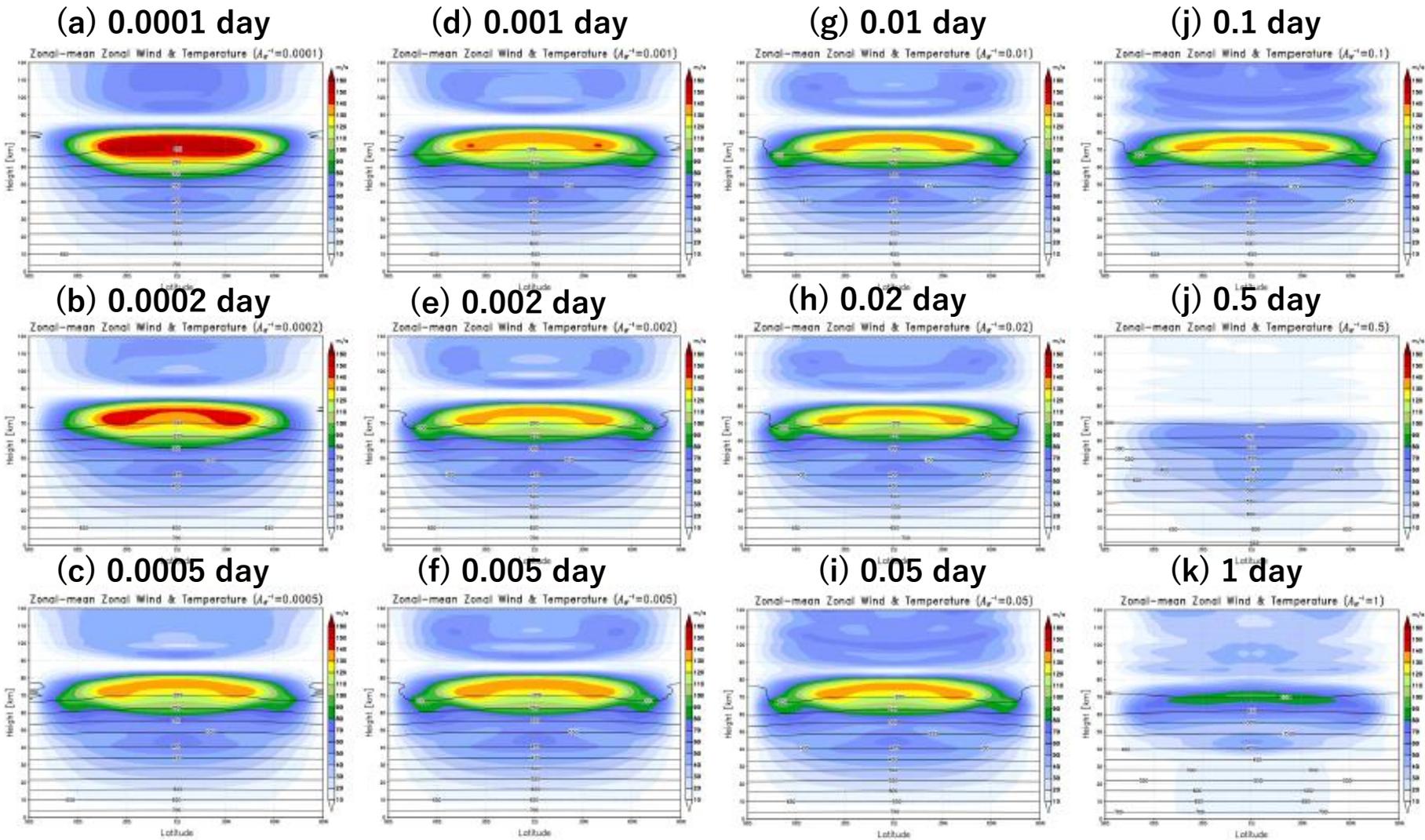
(a) 0.01 day

(c) 0.1 day

(f) 1 day

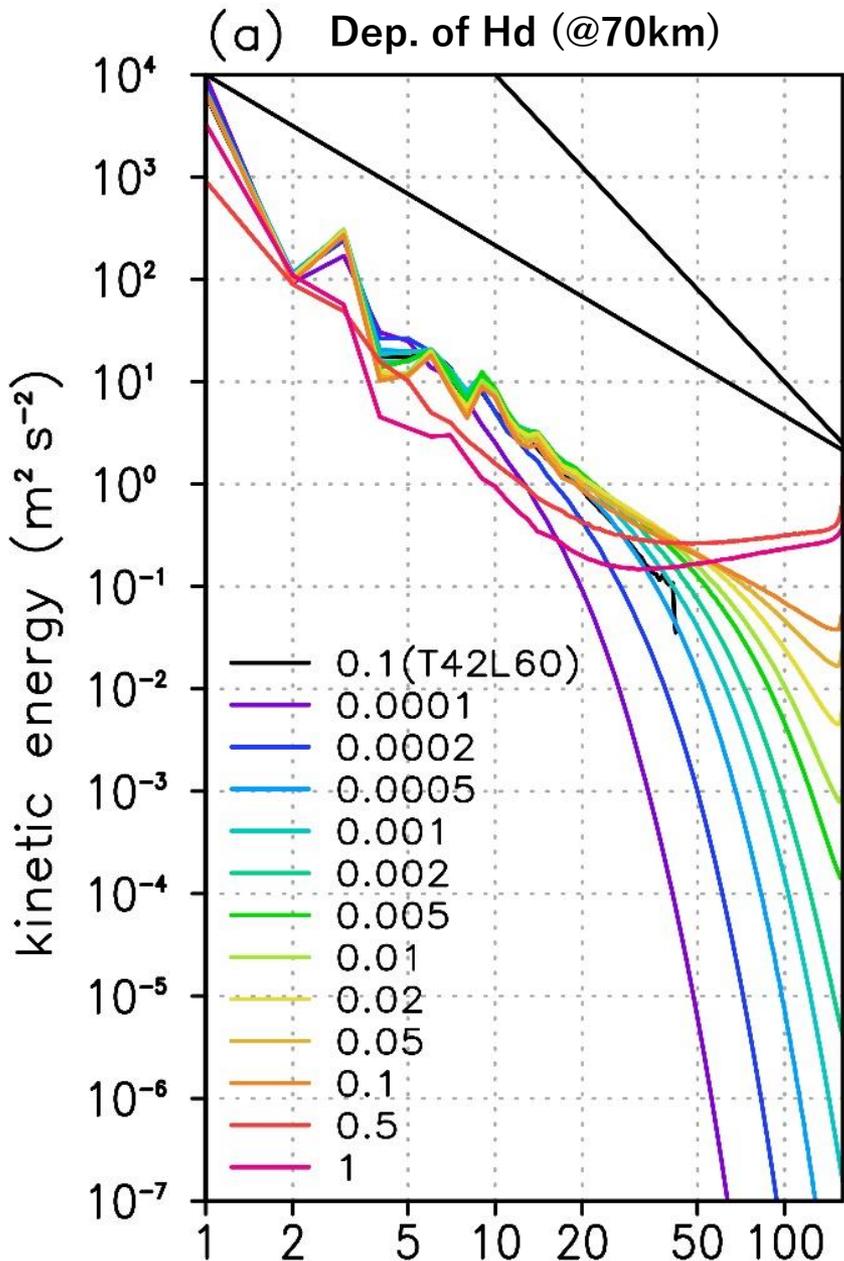


スーパーローテーションの水平粘性依存性② (T159L60 run)



From 0.0005 to 0.1 day, SR is robust: independent of horizontal diffusion

● スーパーローテーションの水平粘性依存性③



0.0005から0.1日まで 高度70 kmではほぼ同様。
T42L60(T42Qt)の結果(黒線)がT159Qtの良い結果にほぼ重なる。

強すぎる水平粘性(0.0001 or 0.0002 day)では、大規模スケールにまで影響あり。

[議論]水平粘性の表現

$$\mathcal{D}(\zeta) = K_{MH} \left[(-1)^{N_D/2} \nabla^{N_D} - \left(\frac{2}{a^2} \right)^{N_D/2} \right] \zeta$$

$$\mathcal{D}(\delta) = K_{MH} \left[(-1)^{N_D/2} \nabla^{N_D} - \left(\frac{2}{a^2} \right)^{N_D/2} \right] \delta$$

$$\mathcal{D}(T) = (-1)^{N_D/2} K_{HH} \nabla^{N_D} T$$

$$\mathcal{D}(q) = (-1)^{N_D/2} K_{EH} \nabla^{N_D} q$$

4次の水平粘性: T159はT42の4倍の解像度のため、水平粘性は4⁴~256倍強くなる。

このため、T42の1日はT159の0.004日に相当(両ケースで妥当)。

一方で、T159の0.02日はT42の5日に相当(T42のケースは妥当でない)。

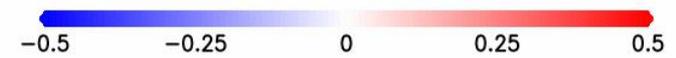
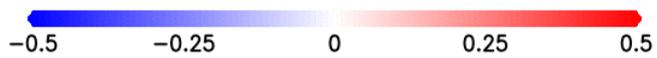
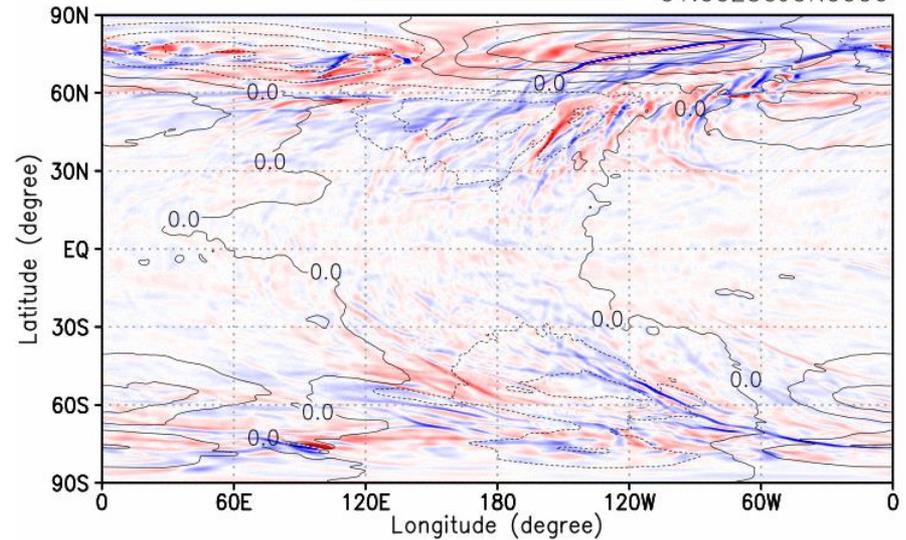
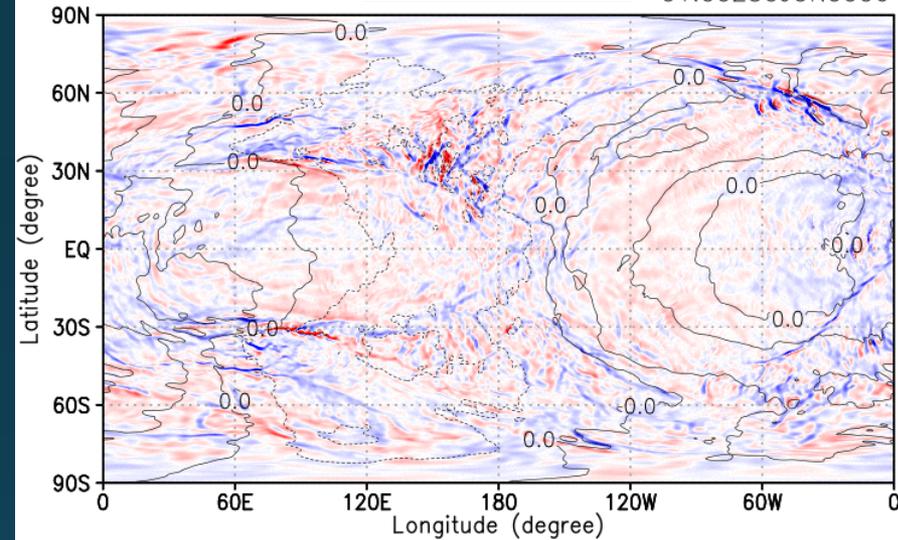
金星大気中での自発的な重力波放射① (T639L260 run)

✓ 雲層上端(~70km)の水平断面

Vertical wind velocity (color, m/s), Geopotential disturbances (contours; $1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$)

(S1) **熱潮汐波あり** 70km
01:00Z30JUN0006

(S2) **熱潮汐波なし** 0km
01:00Z30JUN0006



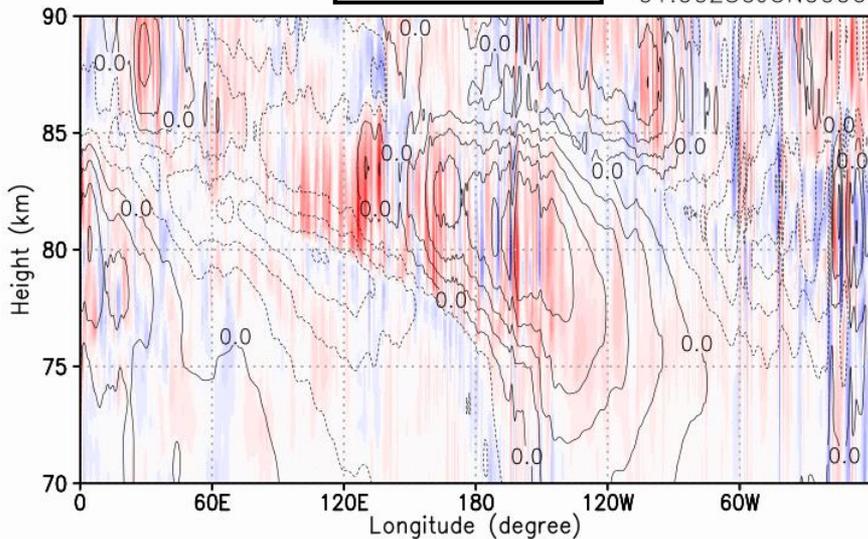
Sugimoto et al. (Nature Com. 2021)

金星大気中での自発的な重力波放射② (T639L260 run)

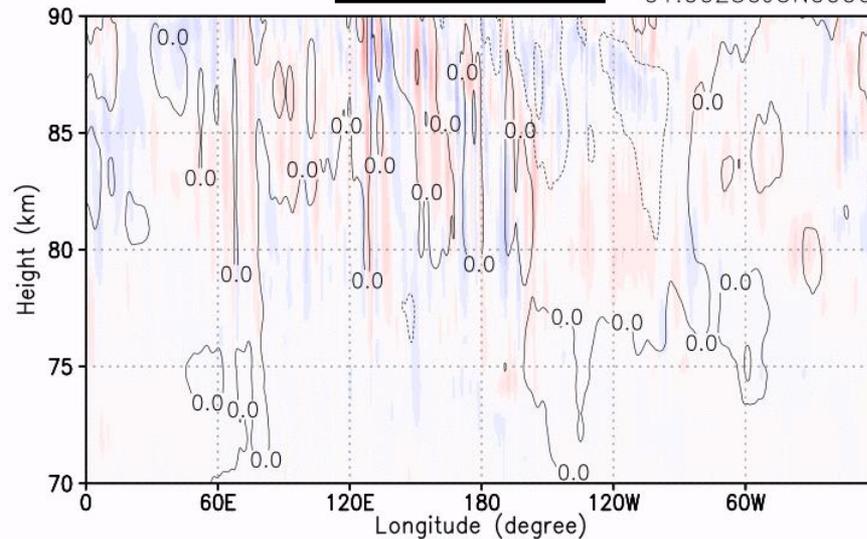
✓ 赤道での鉛直断面

Vertical wind velocity (color, m/s), Geopotential disturbances (contours; $1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$)

(S3) **熱潮汐波あり** Equator
01:00Z30JUN0006



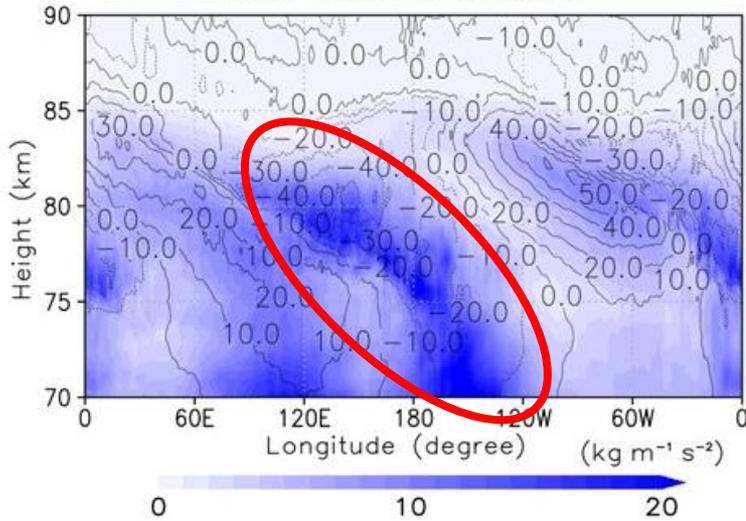
(S4) **熱潮汐波なし** Equator
01:00Z30JUN0006



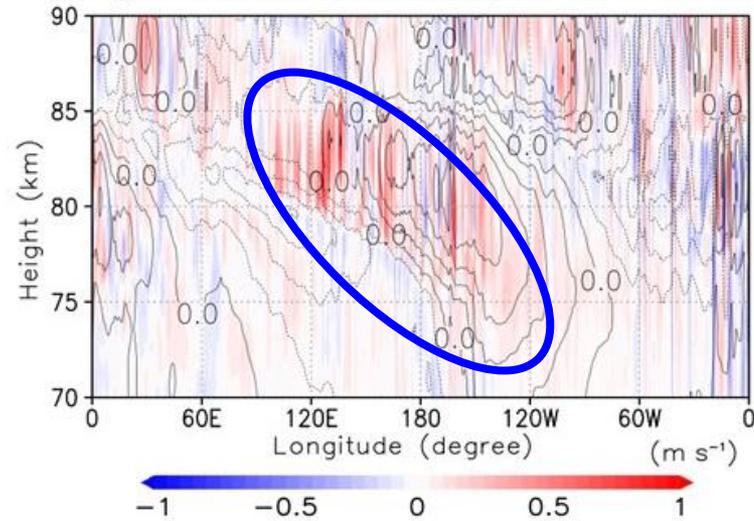
地球のジェット出口での自発的放射と同様なメカニズム

赤道での断面

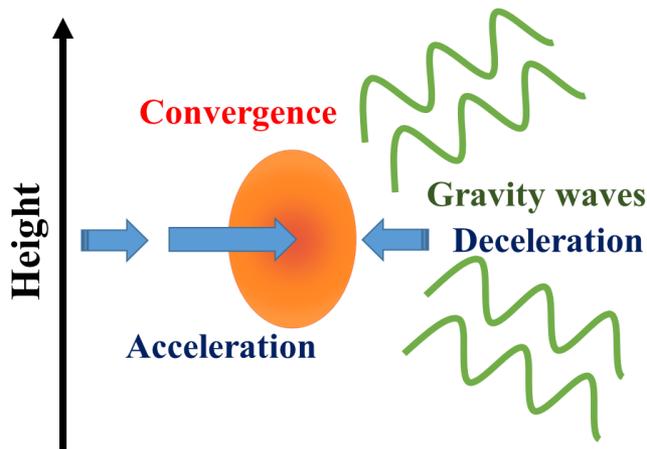
zonal flow (contour, m/s)



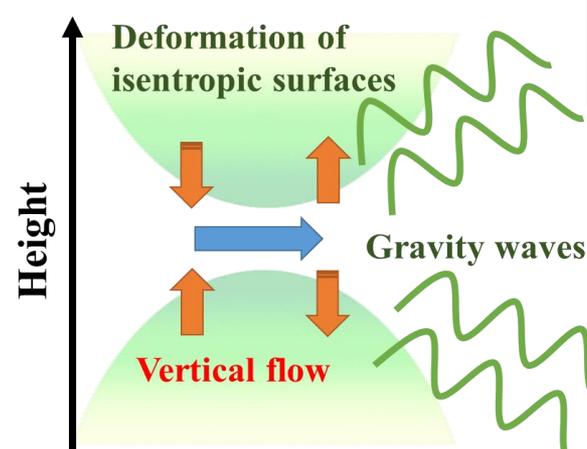
Geopotential (contours; 1000 m²/s²)



① Velocity-variation mechanism



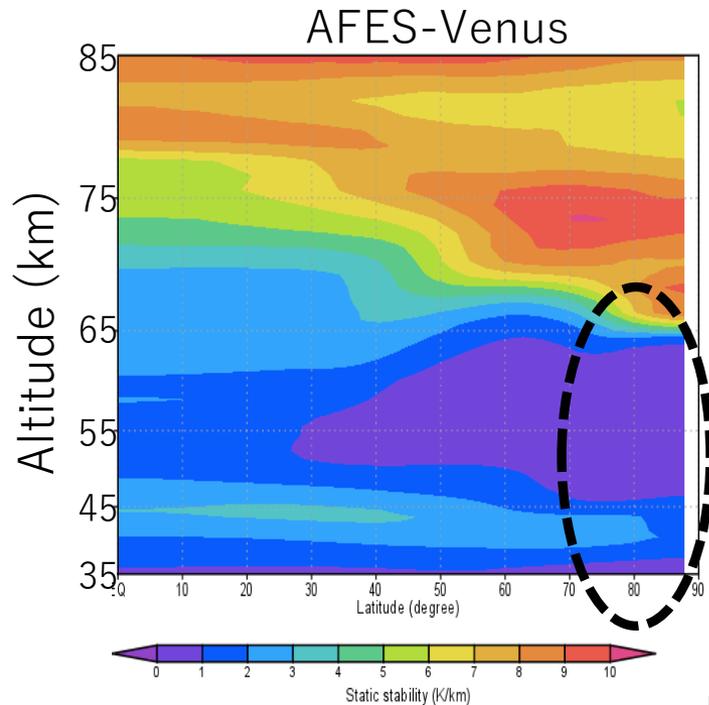
② Mountain-wave-like mechanism



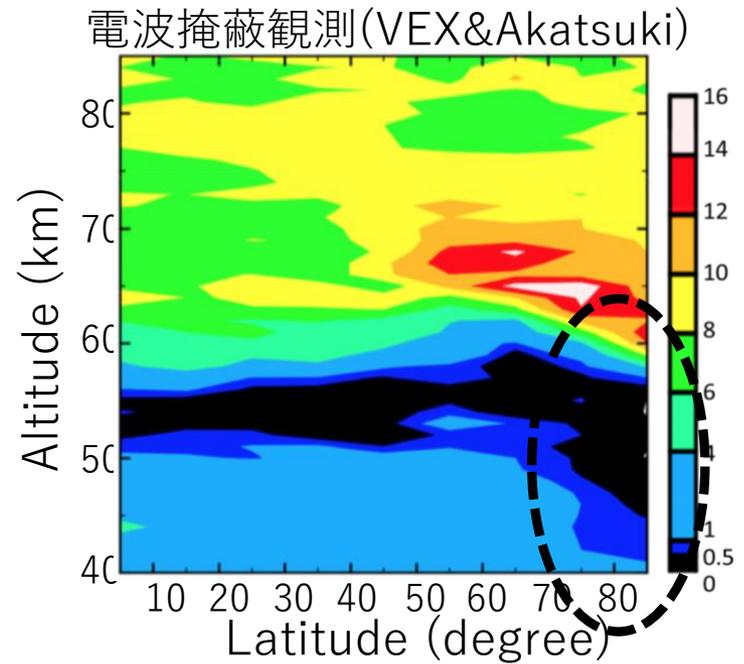
Plougonven & Zhang (14)
Yasuda et al. (15)

熱潮汐波に伴う①加速減速、②上下流による温位面の歪み、が励起源

大気安定度の再現と観測比較 (T63L120 run)



Ando et al. (JGR; 2022)

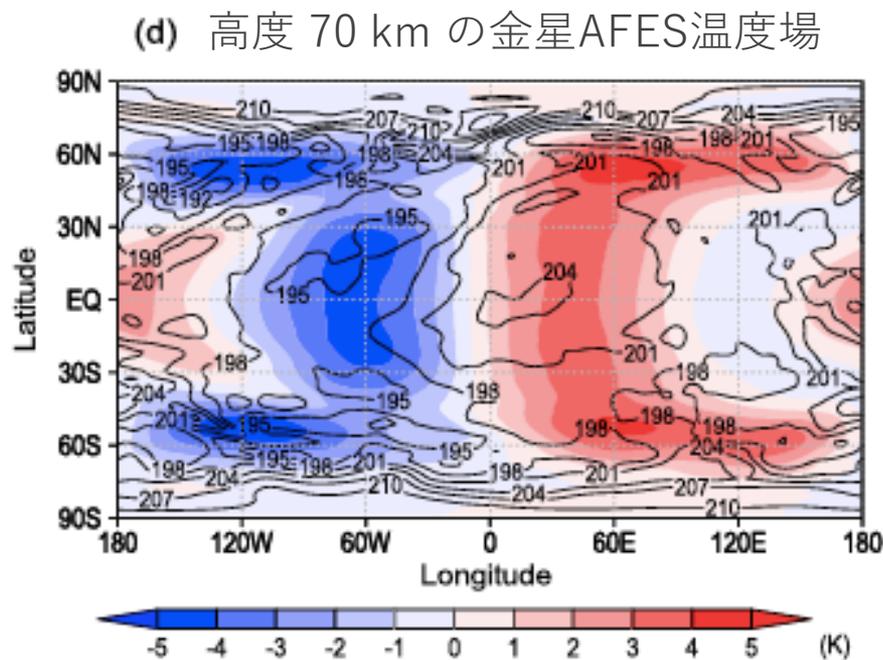
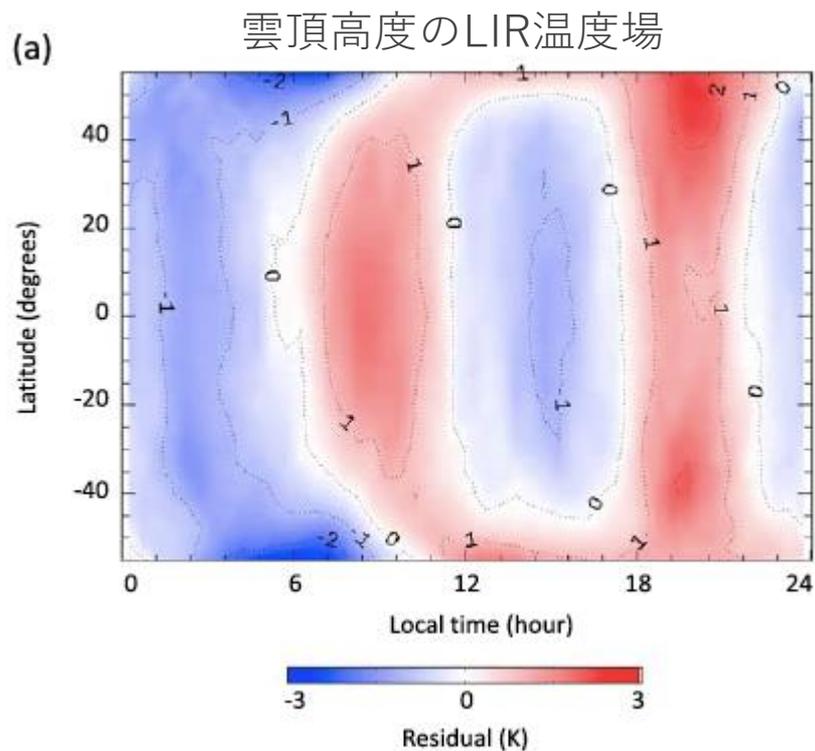


Ando et al. (Sci. Rep., 2020)

電波掩蔽観測と整合的な安定度の再現とその成因の調査

● 安定度分布の改良① (T42L60 run)

- ✓ あかつきLIR観測 (Kouyama et al., 2019) との比較

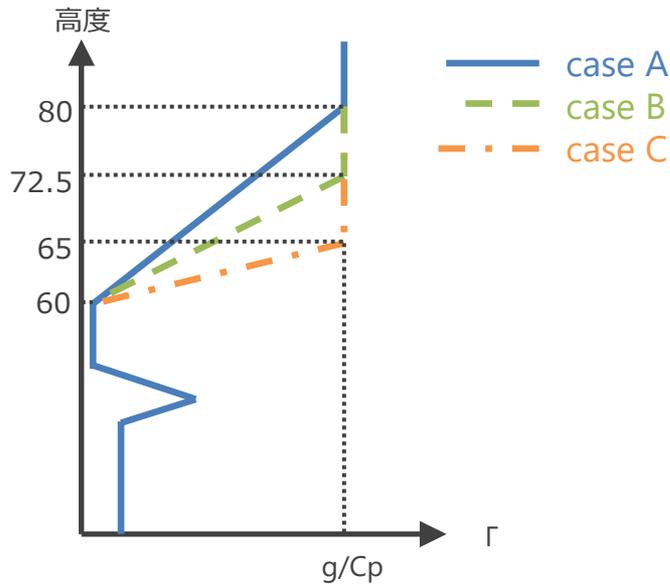


Takagi et al. (JGR2018)

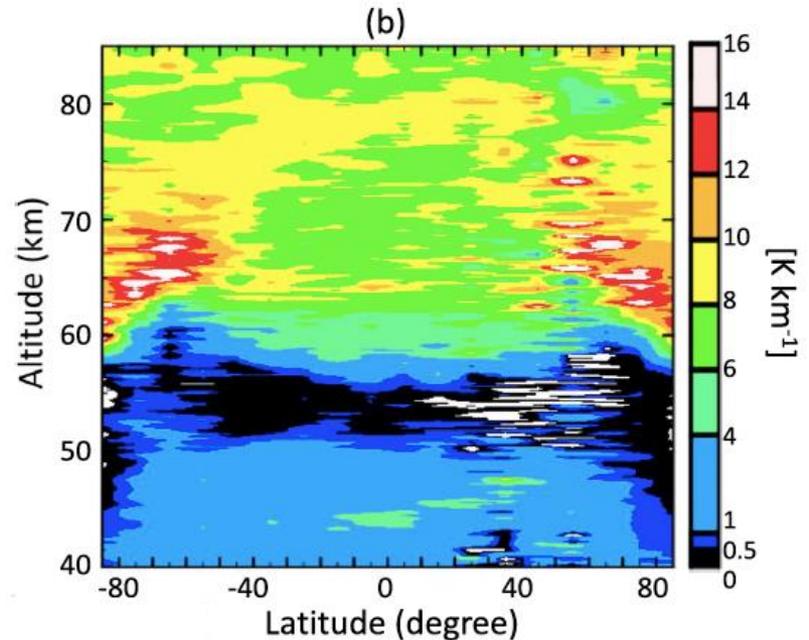
高温・低温域が逆の関係

● 安定度分布の改良② (T42L60 run)

- ✓ 基本場の大気安定度を再検討



これまでのAFES-Venusの安定度は case A に相当

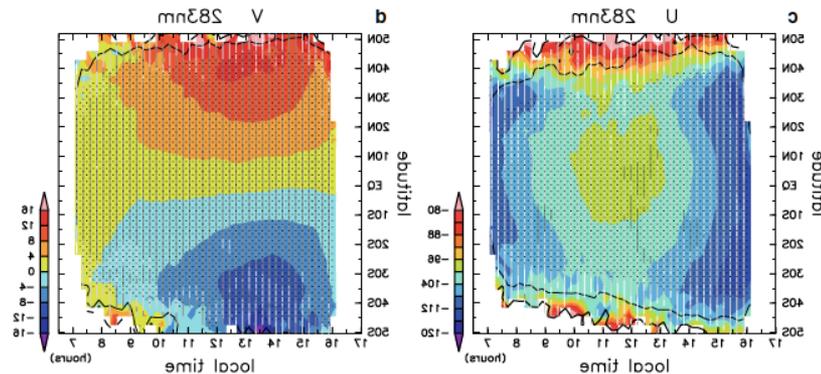
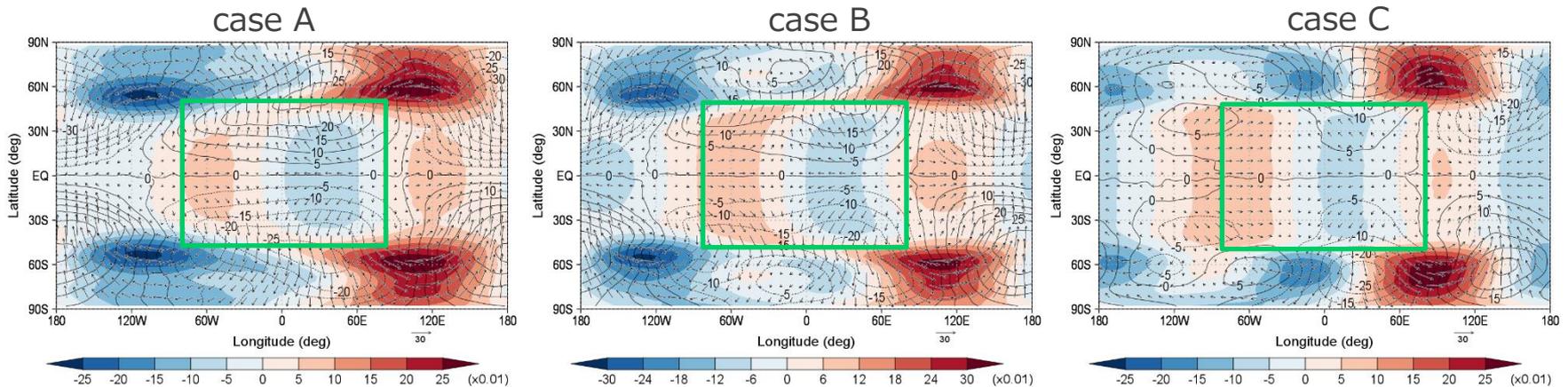


Venus Express とあかつきの電波掩蔽観測から得られた大気安定度

Ando et al. (Sci. Rep. 2020)

● 安定度分布の改良③ (T42L60 run)

高度 70 kmにおける熱潮汐波の東西風 (color), 南北風 (contour)



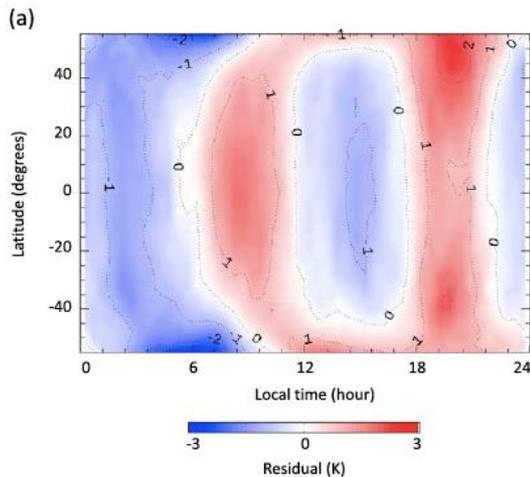
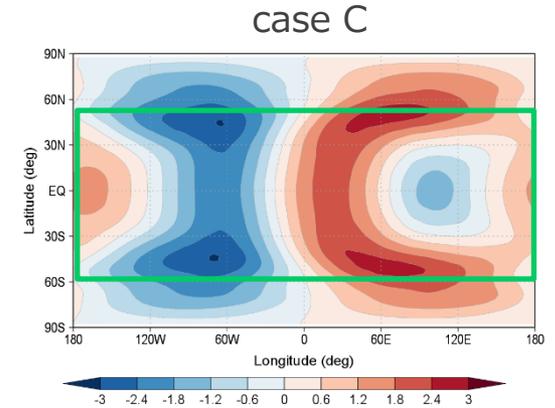
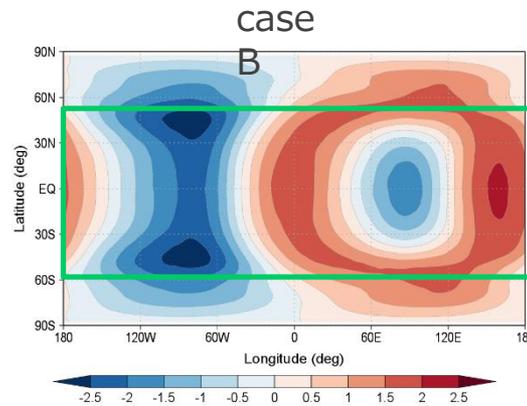
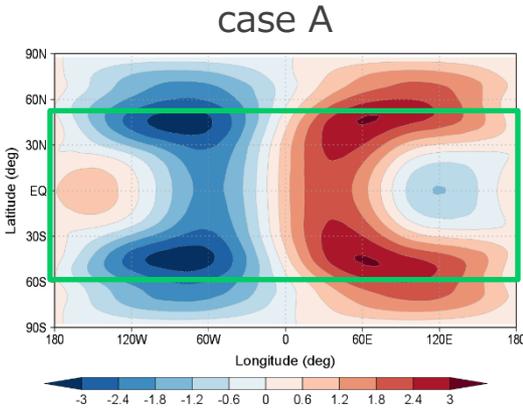
- 雲層上層の大気安定度が高くなると、位相が西にずれる
- 東西風の減速の様子や南北風のピーク時間のずれは **case C が近い?**
- 観測範囲が限られているために、一日潮と半日潮を分離することが困難。

比較のために UVI 観測結果 (Horinouchi et al., 2018) を東西反転

Suzuki et al. (JGR2022)

● 安定度分布の改良④ (T42L60 run)

熱潮汐波の温度偏差の水平構造 (LIR 観測との比較)

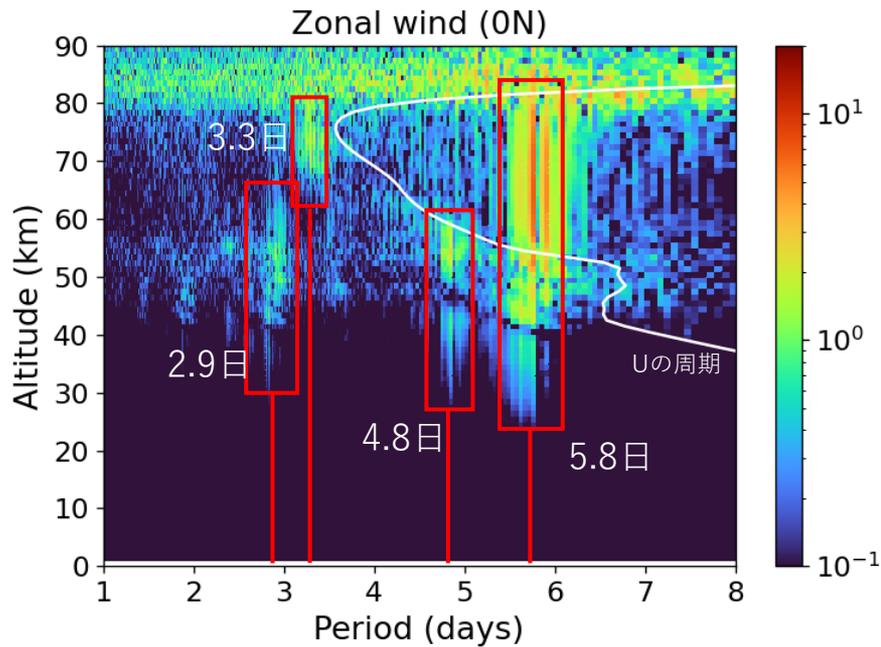


LIR の観測結果 (Kouyama et al., 2019) と比較するために、荷重関数 (Taguchi et al., 2007) を考慮して作図

- どの場合も水平分布は LIR 観測に似ている。
- ただし、低緯度の位相が 6 LT くらいずれている。
- 雲層上層の大気安定度が高くなると、低緯度の位相が西にずれ、**LIRとの位相のずれが 3 LT 程度改善**。
- 高緯度側はほとんど変化しない。
- 荷重関数が仮定した雲構造に強く依存することに注意。

● ケルビン波の再現と励起メカニズム① (T42L120 run)

周期解析 (赤道上の東西風)



(白線は東西平均流の回転周期を示す)

Takagi et al. (JGR2022)

赤道の東西風で周期解析

- **3.3日: 65–80 km** **4日(ケルビン)波?**
- 5.8日: 25–80 km 5日(ロスビー)波?
- 4.8日: 30–60 km
- 2.9日: 30–65 km
- 7.0日: 45–70 km (中高緯度のみ)

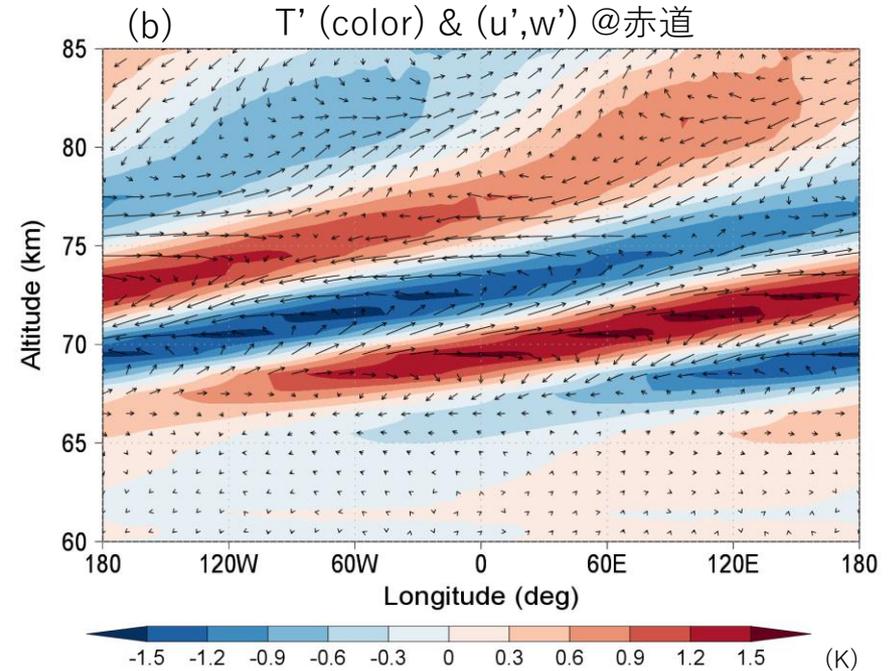
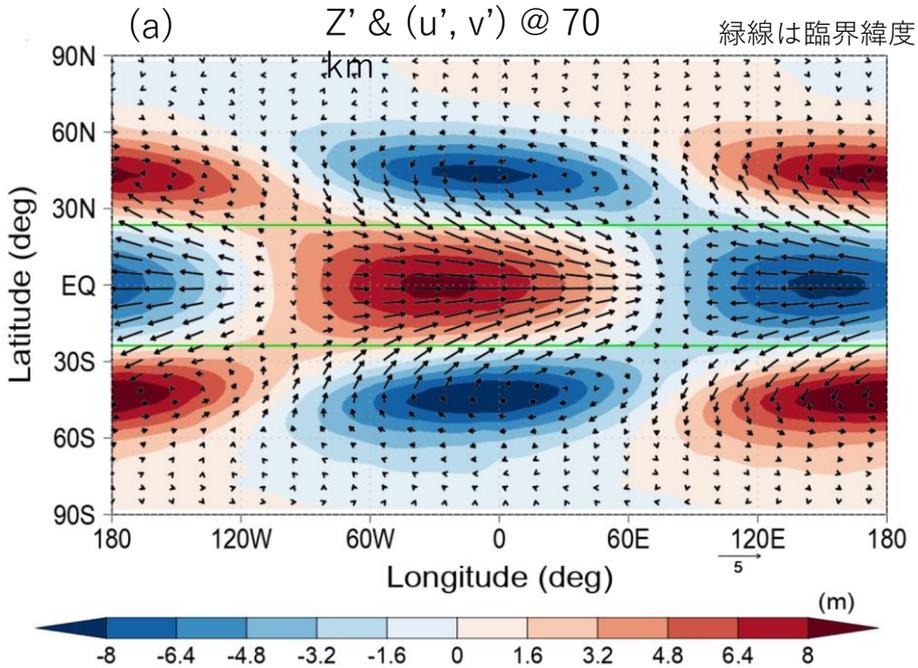
周期の不整合はSR風速の違い?

- 70 km では観測よりやや速い (110–130 m/s > 100–110 m/s)
- 50 km では観測よりやや遅い (60–70 m/s < 70–80 m/s)

● ケルビン波の再現と励起メカニズム② (T42L120 run)

3.3日波(ケルビン波): 合成図解析 (585日平均)

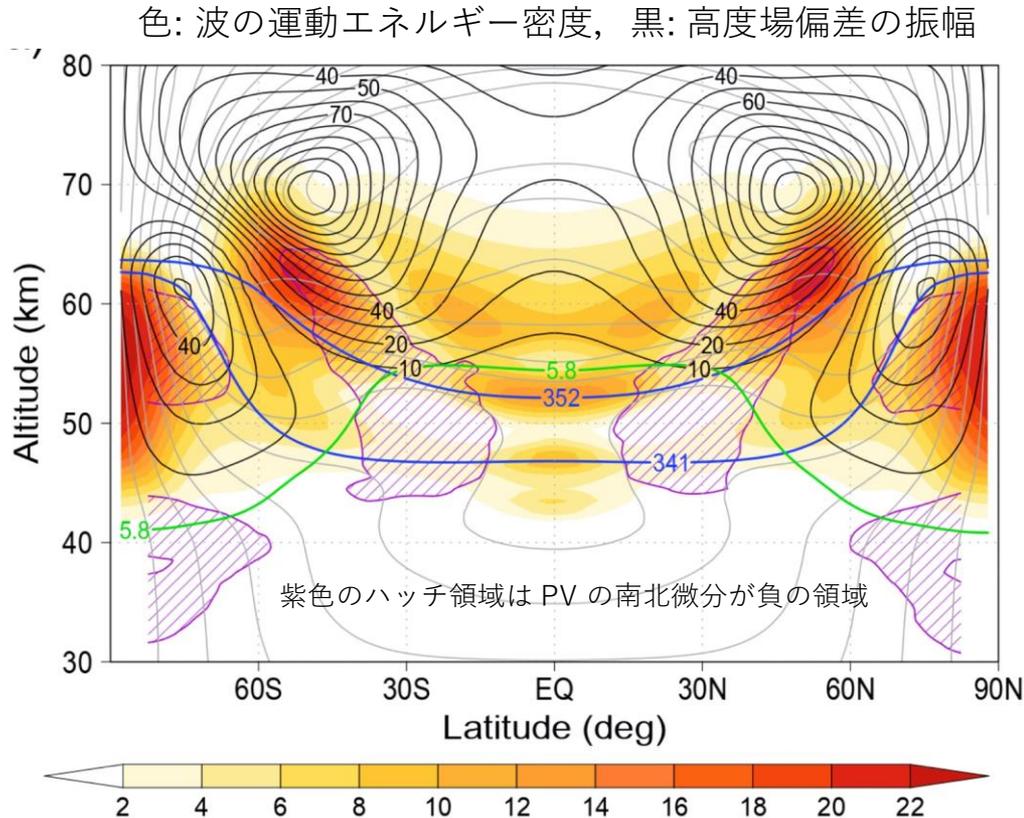
高度 70 km, 赤道域の東西風でコンポジット



- 低緯度：東西波数1のケルビン波。(鉛直群速度は正, 励起高度は約 65 km 付近?)
- 中緯度：地衡風的な渦(ロスビー波?)が中緯度に南北対称に存在し, 赤道向きの運動量輸送を伴う。
- **Rossby-Kelvin 不安定による励起を示唆** (Iga and Matsuda, 2005)

● ケルビン波の再現と励起メカニズム③ (T42L120 run)

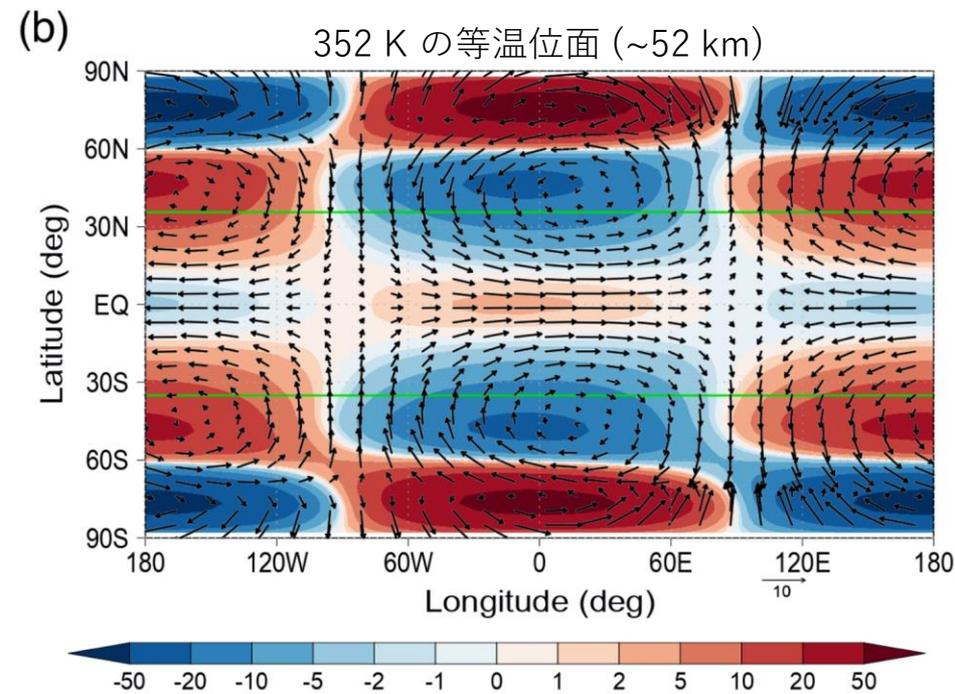
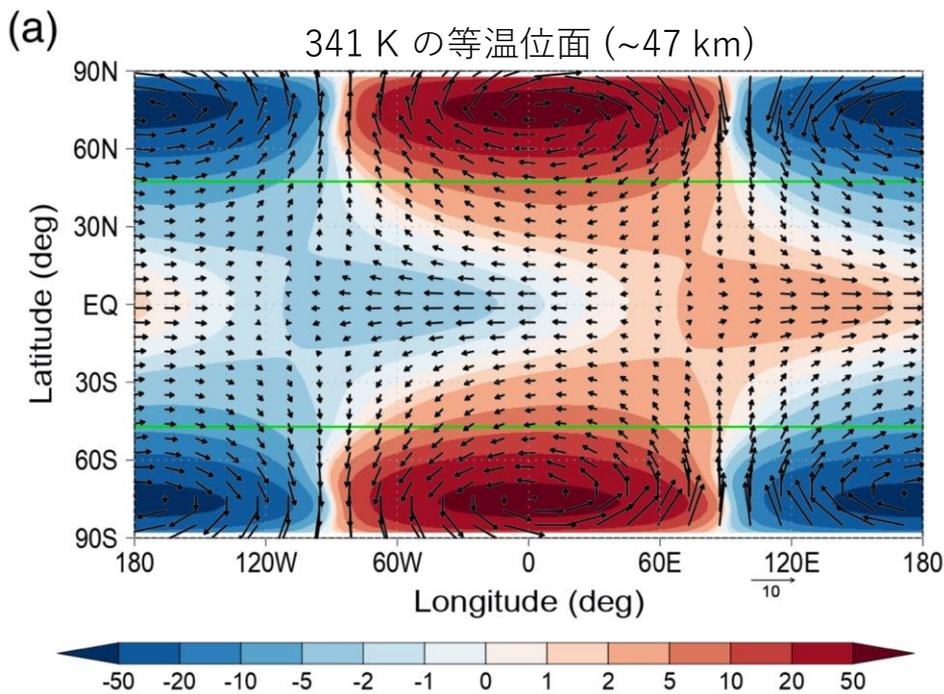
5.8日波(ロスビー波)の南北・高度構造



- 臨界面（臨界緯度・臨界高度）を境界にして、**ケルビンモードと2つのロスビーモード（中緯度ロスビーモードと高緯度ロスビーモード）**が存在。
- 臨界面より上の低緯度の風速はケルビンモードではなく、**中緯度ロスビーモード**によるもの。
- ケルビンモードの運動エネルギーには2つの極大がみられる。（47 km 付近と 52 km 付近）
- この2つの高度（等温位面，左図の青線）で**ケルビンモードとロスビーモードが結合**しているように見える。

● ケルビン波の再現と励起メカニズム④ (T42L120 run)

5.8日波の等温位面上の構造 → 結合の様子が明確に



- 赤道ケルビンモードと高緯度ロスビーモードの結合によって、赤道向き運動量輸送が生じている。

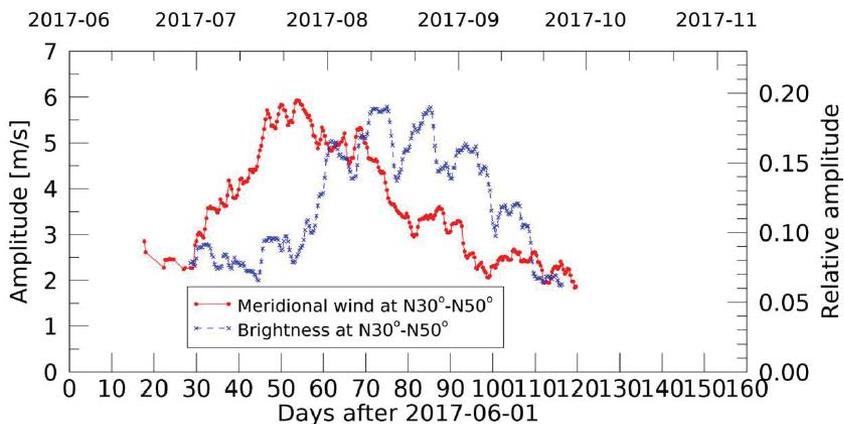
- 赤道ケルビンモードと中緯度ロスビーモードの結合によって、赤道向き運動量輸送が生じている。高緯度ロスビーモードとは結合していない。

Rossby-Kelvin結合不安定による励起メカニズム

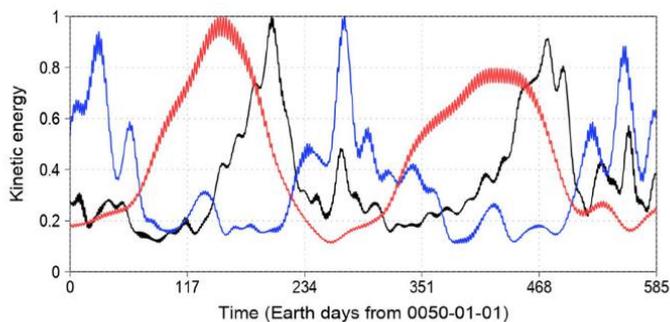
● 波の時間変化 (T42L120 run)

平均流と波のエネルギーの時間変化

KE：赤上層、緑中層、黒下層
 青北中高緯度、紫南中高緯度
 風速：マゼンタ

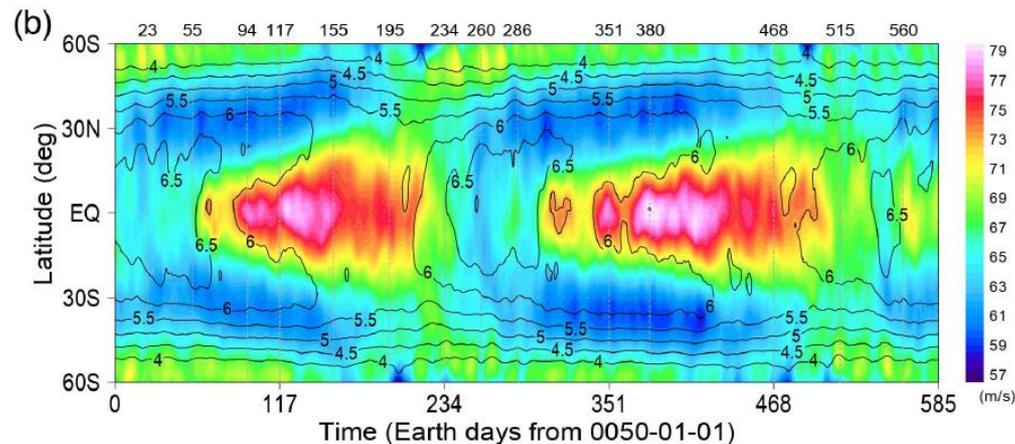
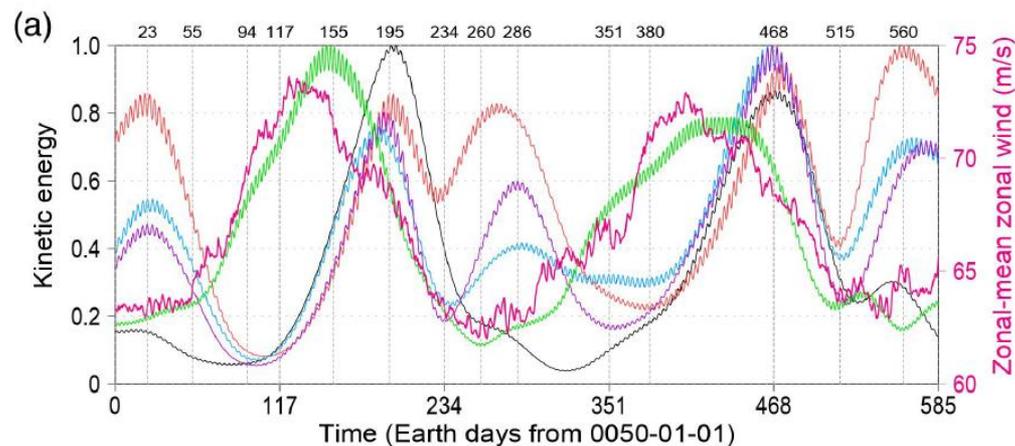


Imai et al. (JGR2019)



KE：赤5.8日、黒3.3日、青4.8日波

Takagi et al. (JGR2022)

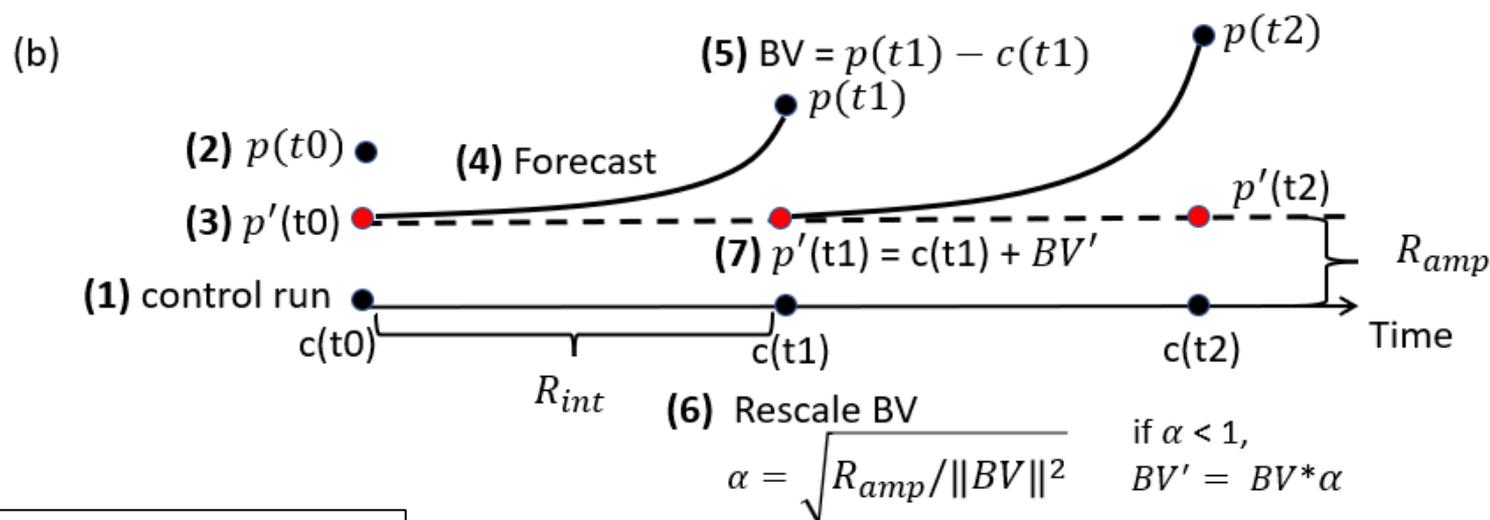
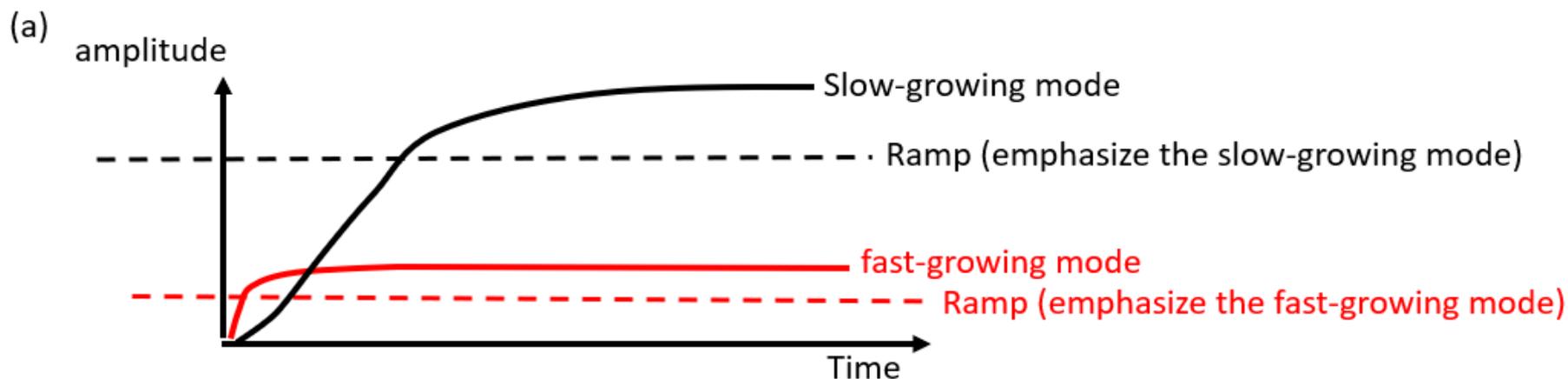


Takagi et al. (JGR2023)

平均流の加速減速(不安定)の準周期的サイクル

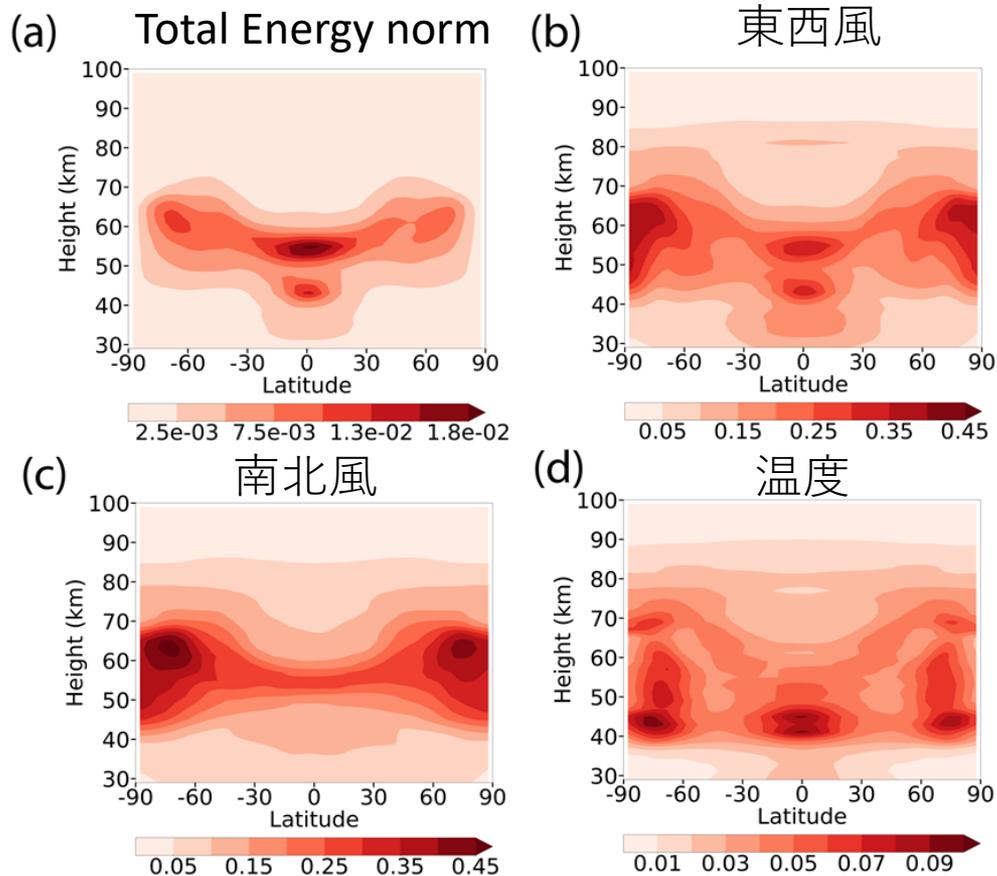
● Bred Vector ① (T42L60 run)

金星大気(AFES-Venus)中の擾乱の性質の調査

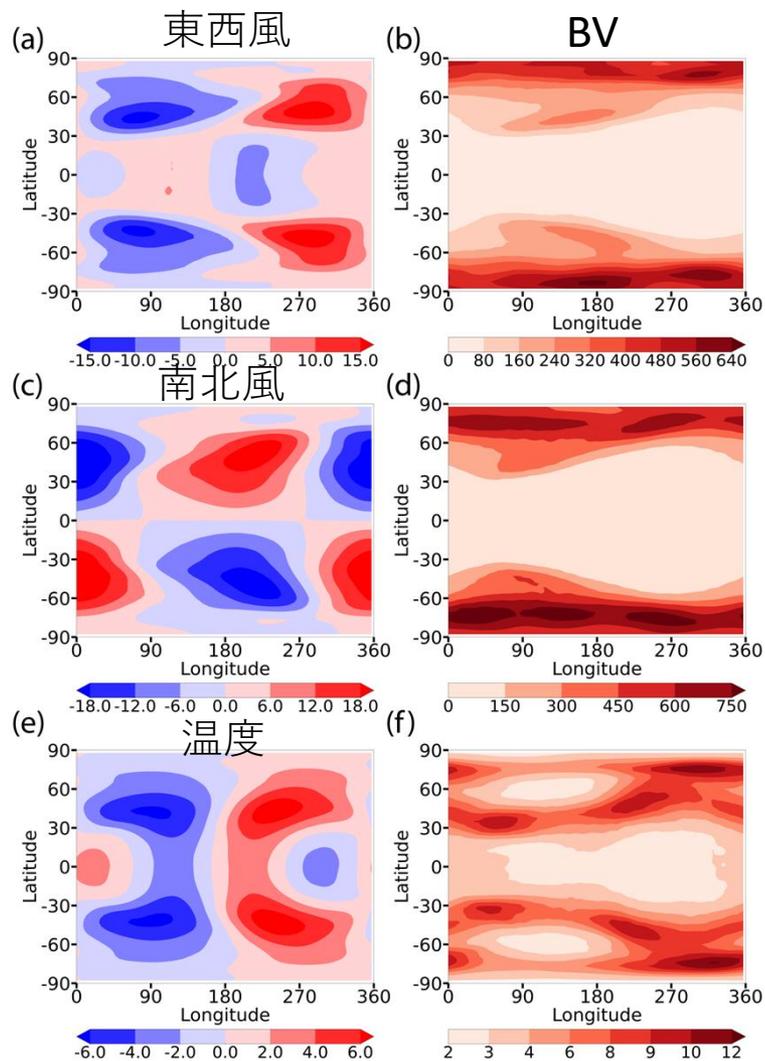


● Bred Vector ② (T42L60 run)

緯度経度断面(左)と水平断面(右@65km)



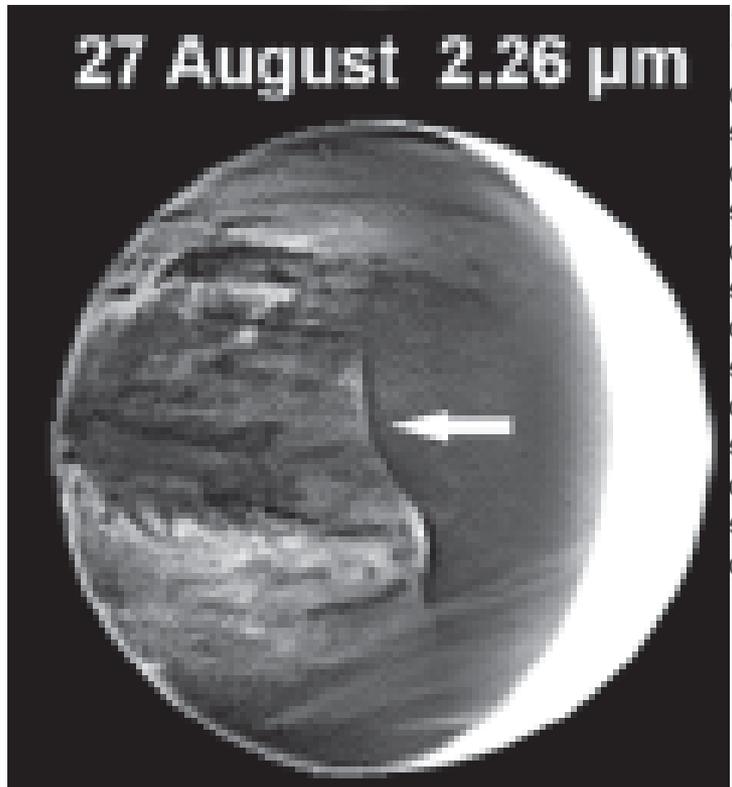
Jiang et al. (JGR2024)



● 雲物理過程の導入 (T42L120 run)

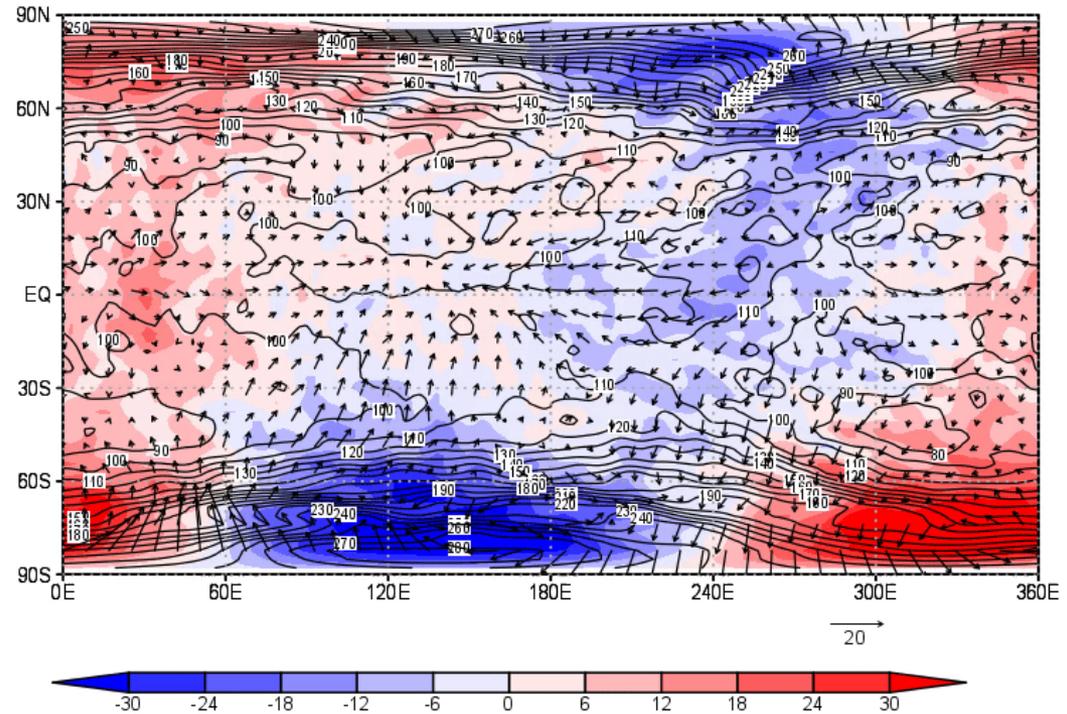
- ✓ ケルビン波により雲層下部(~50km)の雲量変動が起こる

あかつきIR画像
で見られた不連続



Peralta et al. (GRL2020)

42-75 kmで鉛直積算した雲密度 (コンター) と
48kmでの風速 (矢印)、高度 (カラー) 擾乱

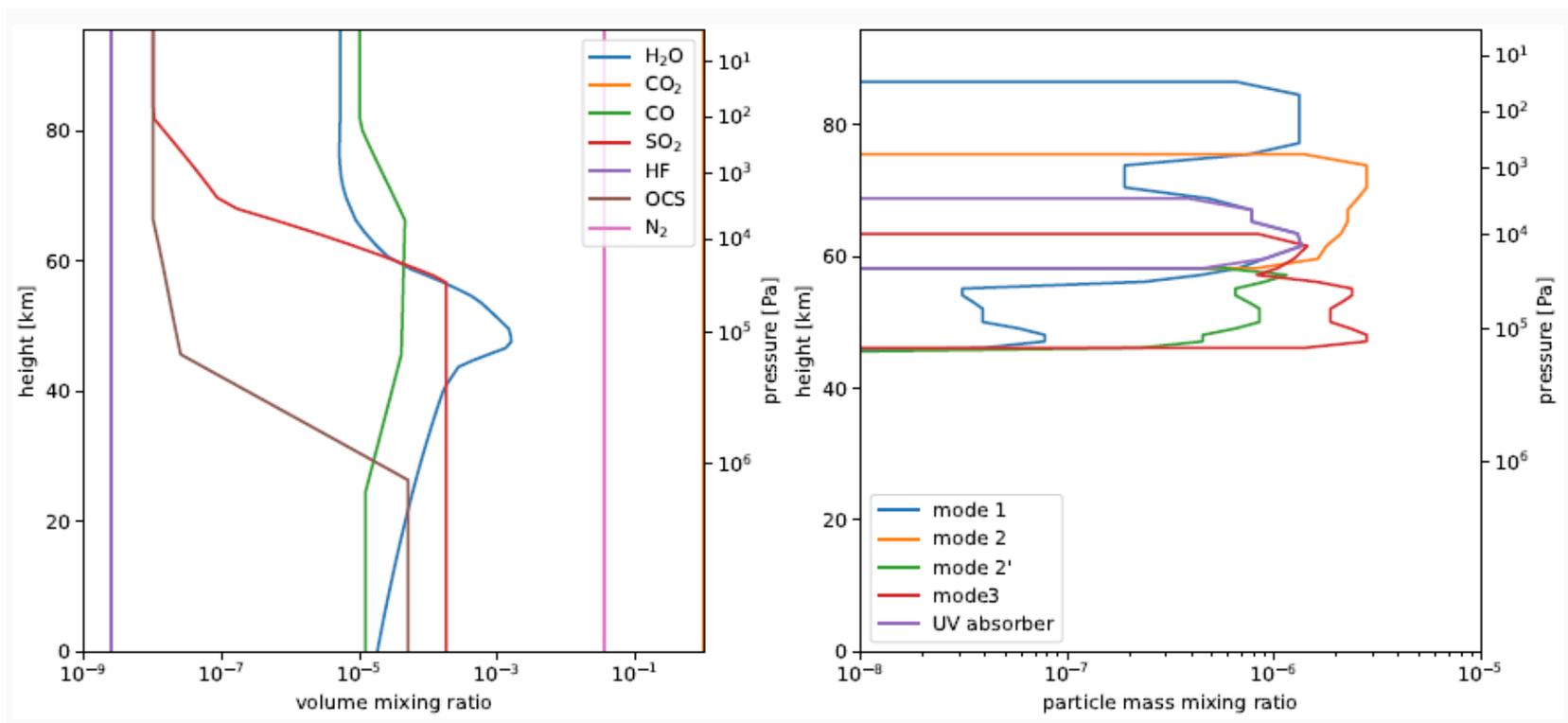


Ando et al. (JGR2021)

- ✓ **放射過程**も導入されつつある (by Dr. Sagawa and Sekiguchi)

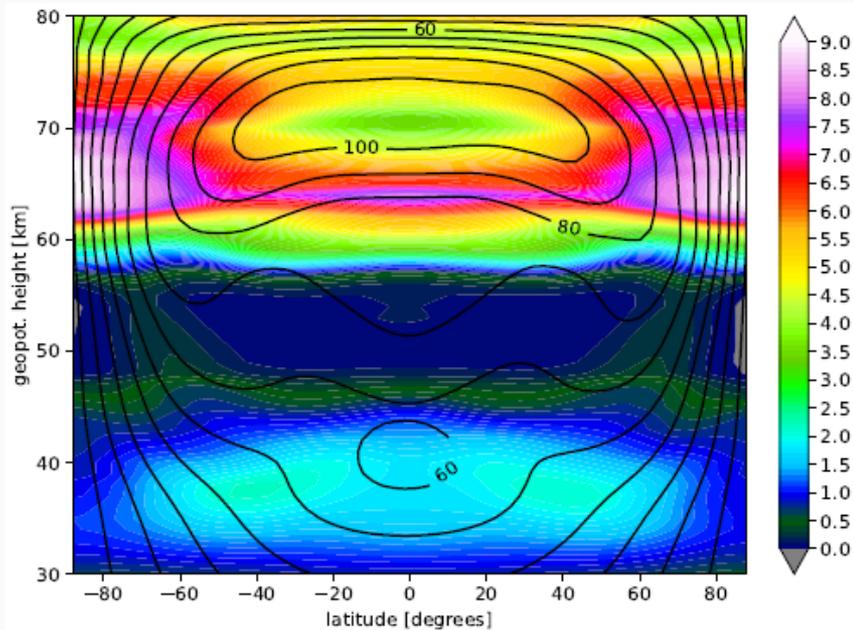
AFES-Venus+放射過程 (松嶋さん@神戸大)

- 物質・雲: 圧力面で水平一様に固定された分布を仮定 (Crisp, 1986, 1989; Pollack et al., 1993)
 - 物質: H_2O , CO_2 , SO_2 , CO , HF , OCS , N_2 , UV absorber, 雲: mode 1, 2, 2', 3
- 放射: Takahashi et al., 2023 により開発された惑星用放射スキーム
 - k 分布法に基づく光学計算。金星パラメータ: 26 バンド、171 波数 (積分点)
 - 一般化された 2 流近似方程式系 (Meador and Weaver, 1980)
 - 太陽定数 2635 W m^{-2} (太陽光スペクトル: Gueymard, 2004). 年変化なし・日変化 (117 日) あり。
 - 約 95 km を TOA として計算。放射フラックスの更新時間 120 min.
 - (95 km 以上は、暫定的にニュートン冷却を導入している)

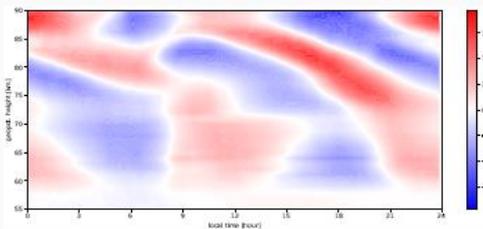
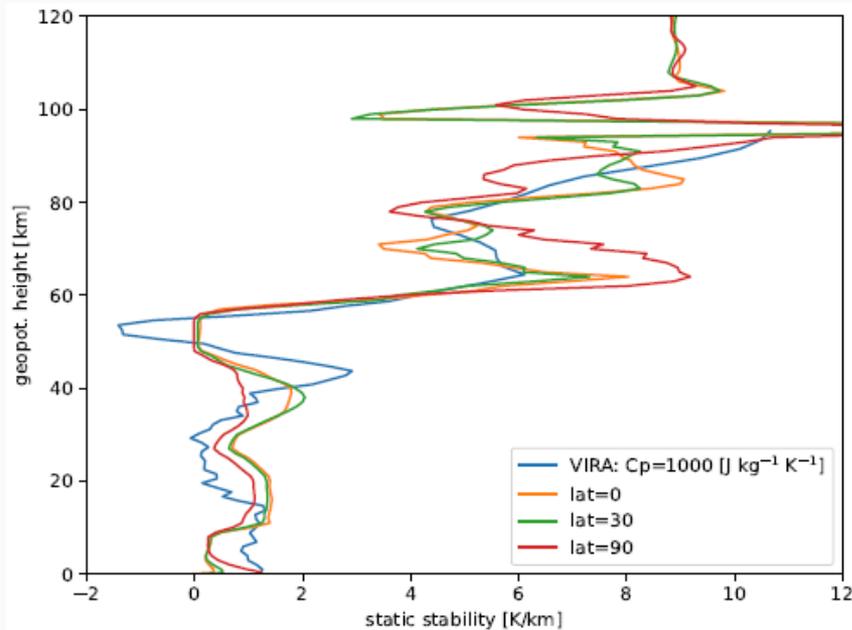


AFES-Venus+放射過程 (松嶋さん@神戸大)

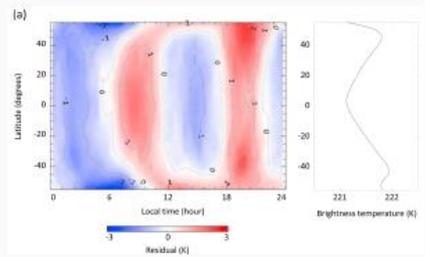
(a) 静的安定度 (トーン) と東西風 (コンター)



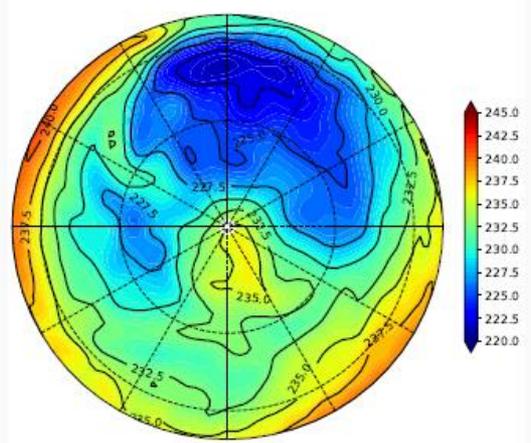
(b) 緯度ごとのプロファイル



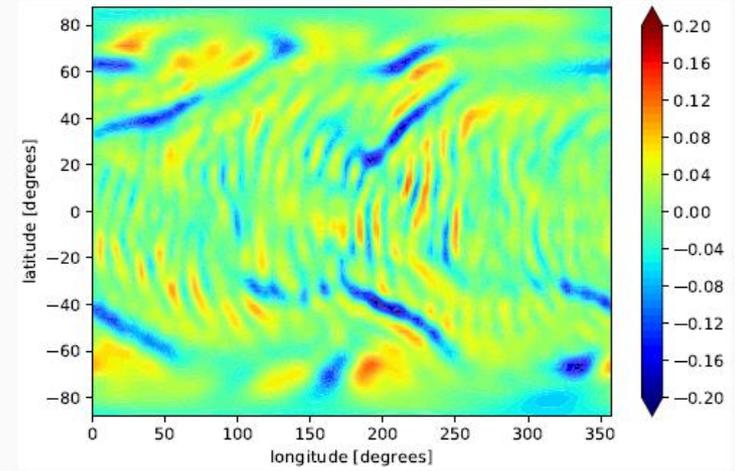
赤道上における温度偏差の LT-高度断面



温度場 @ 高度68km



(a) 高度 50 km での鉛直流 (スナップショット)



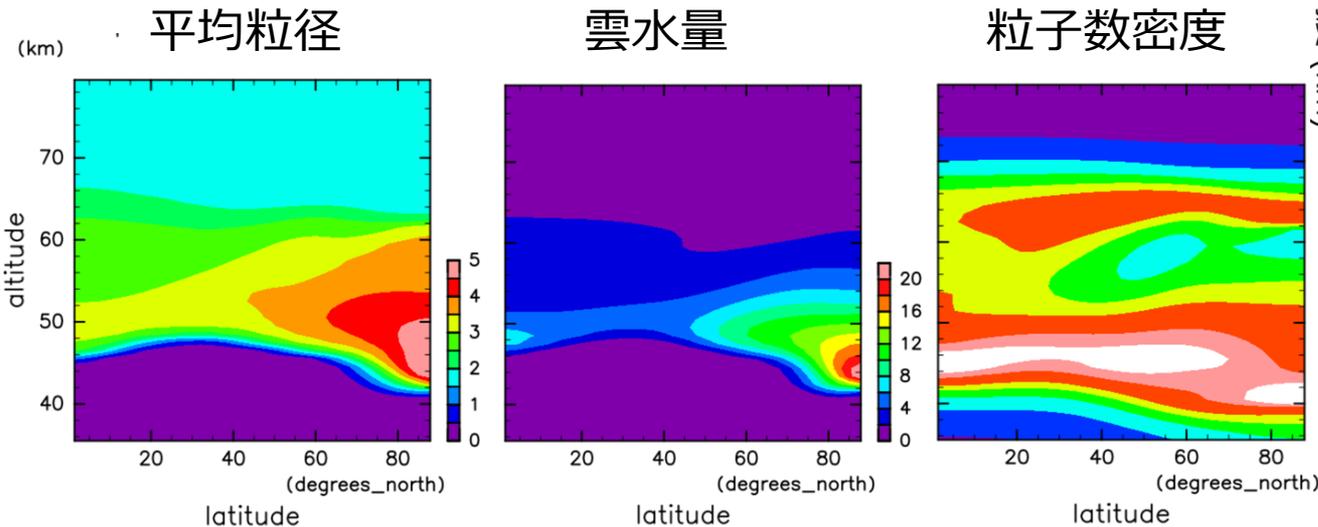
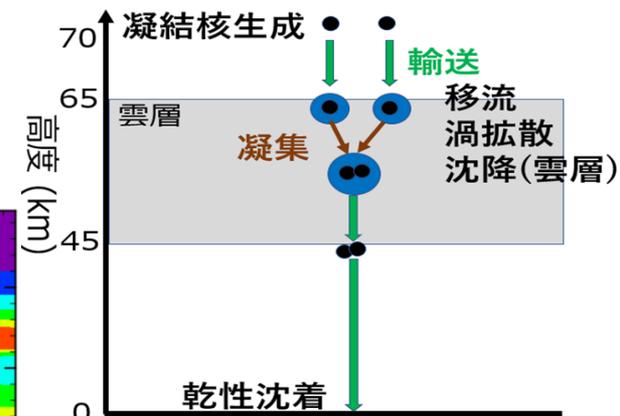
化学過程の実装と化学種分布、粒子分布の計算

- 化学過程：**液滴の沈降, 化学反応, 雲微物理** (実装過程)
- 化学種： H_2O , CO , H_2SO_4 , OCS , S_2 , $(SO)_2$, S , SO_3 , 粒子

化学種 l の混合比 q_l の時間変化率

$$\frac{\partial q_l}{\partial t} = \text{移流} + \text{拡散} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial (\rho W q_l)}{\partial z} \text{ (沈降)} \quad \rho \text{ 大気密度, } W \text{ 沈降速度}$$
$$+ R_l \text{ (化学)} \quad z \text{ ジオポテンシャル高度}$$

- 凝結核生成、凝集(粒子同士の合体)、乾性沈着

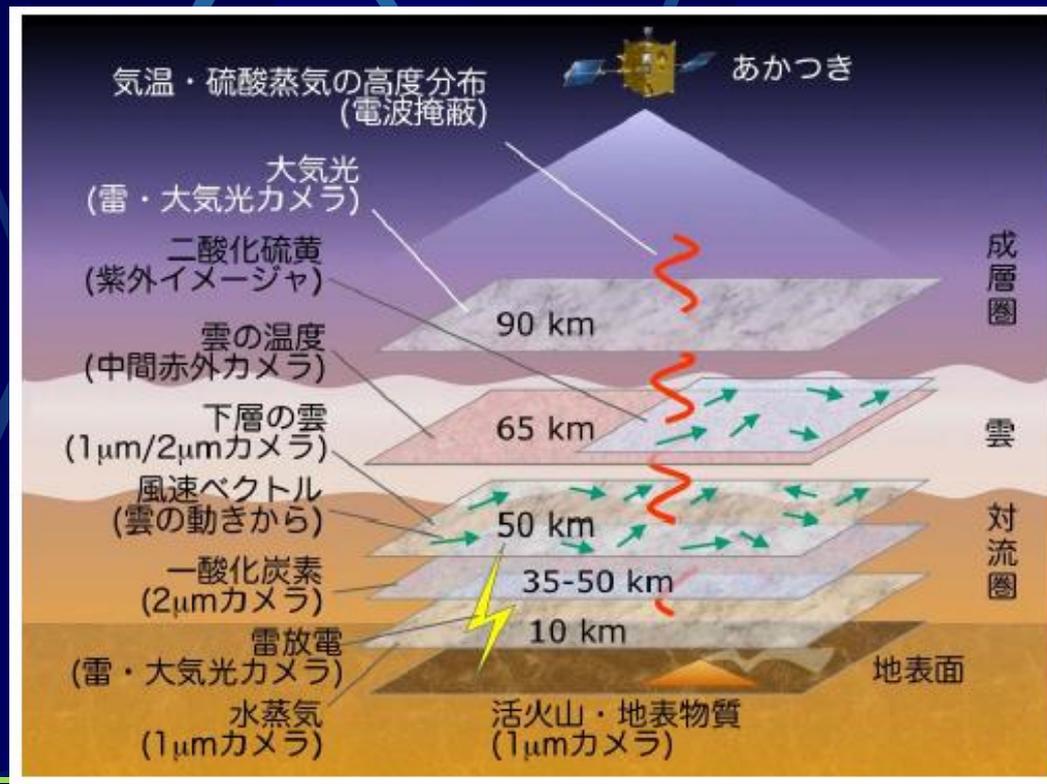
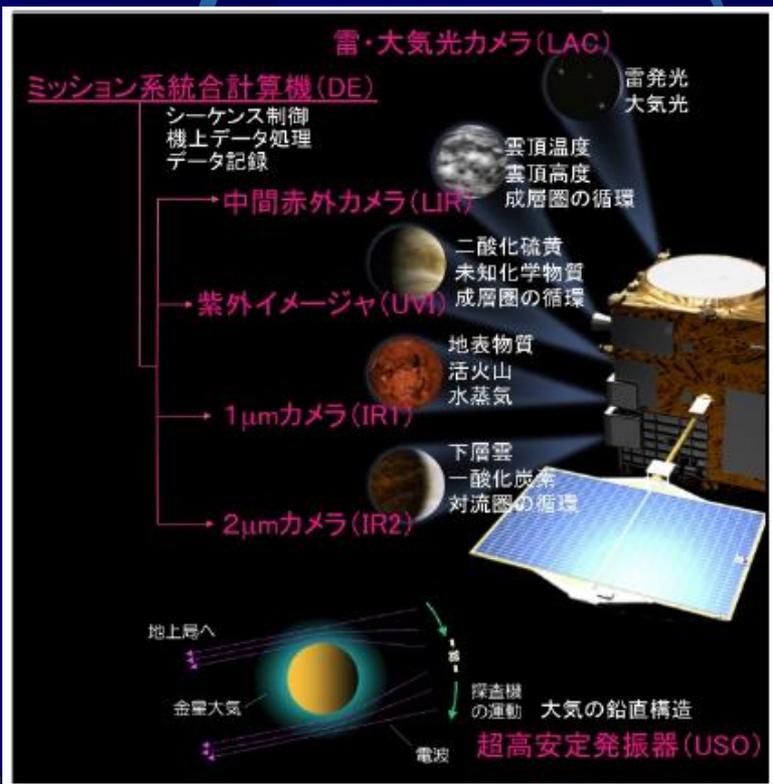


✓ 放射と雲のカップリングも導入されつつある

ALEDAS-V (AFES-LETKF data assimilation system for Venus)

● 「あかつき」用のデータ同化システムの開発

- ✓ 金星探査機「あかつき」: 高頻度、多高度の気象観測 (Nakamura et al., 2011, 2014...)

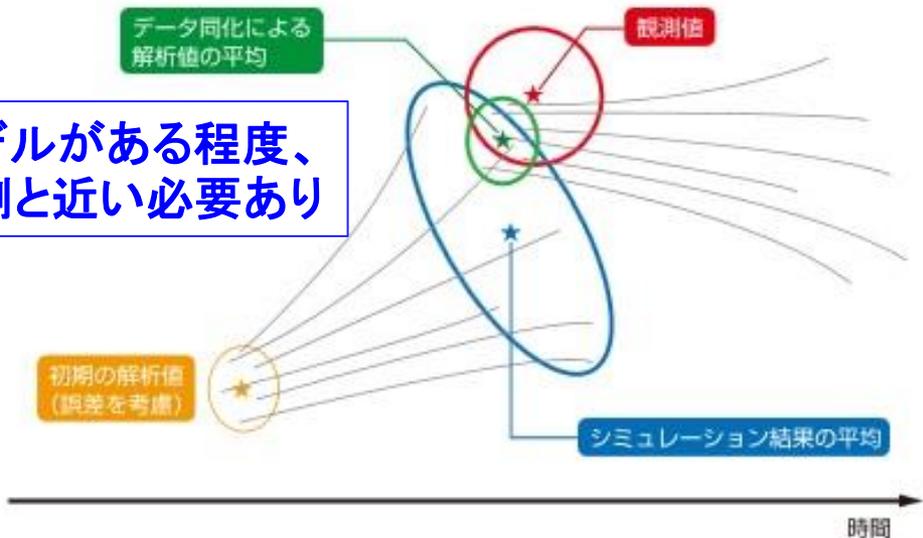


データ同化とは

シミュレーションを実際の観測データとつきあわせ、シミュレーションの軌道を修正して「確からしさ」を高めること



モデルがある程度、観測と近い必要あり



LETKF (Local Ensemble Transform Kalman Filter: 局所アンサンブル変換カルマンフィルタ) 少しばらつきをもった複数の初期値 (オレンジの楕円) からシミュレーションを行うと、結果のばらつきは大きくなる (青の楕円)。そこで観測値 (赤の円) とつきあわせて結果を絞り込み (緑の楕円)、それをこの時点からのシミュレーションの初期値とする。

<http://www.data-assimilation.riken.jp/jp/research/research.html>

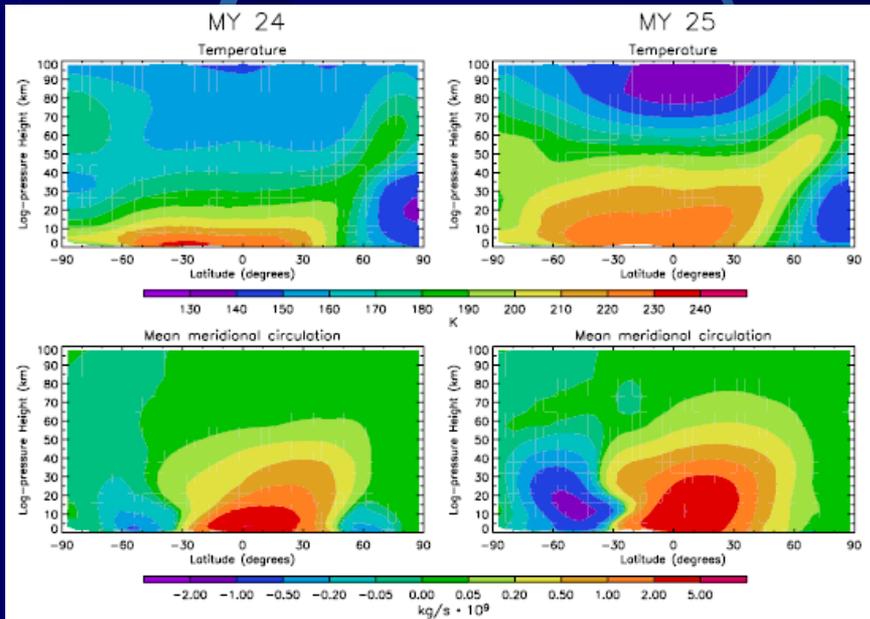
地球大気: NCEP再解析データ (RA), ERA, JRA など

火星のデータ同化

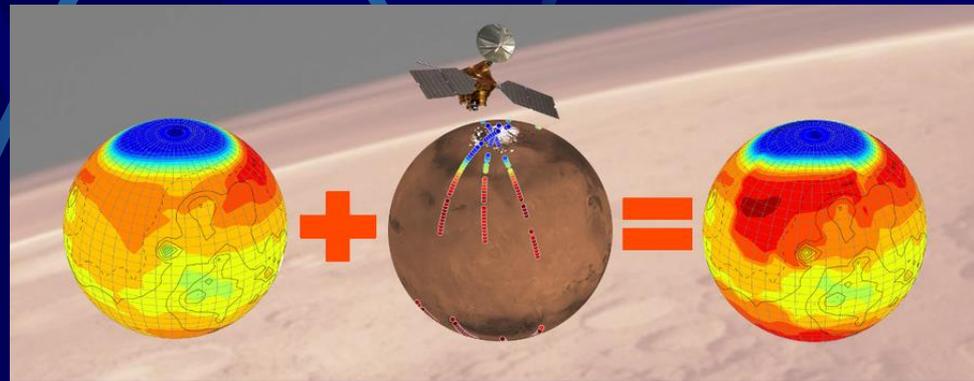
火星大気探査の観測データを用いた同化実験

Oxford Univ./Open Univ./LMD/Caltech/Maryland Univ.など

- ✓ 金星より観測データが豊富
- ✓ モデルに大気構造の再現性



Mars Global Surveyorの温度、ダスト量の同化
温度(上)と質量流線関数(下) (Montabonne+05)



Mars Atmosphere Data Assimilation workshop
on August, 2018, at Savoie-Technolac, France.

MACDA (Mars Analysis Correction Data Assimilation); Montabone+2013

EMARS (Ensemble Mars Atmosphere Reanalysis System); Greybush+2019

OpenMars...

近年、惑星大気でもデータ同化が可能になってきた

金星のデータ同化システム: ALEDAS-V

(AFES-LETKF data assimilation system for Venus)

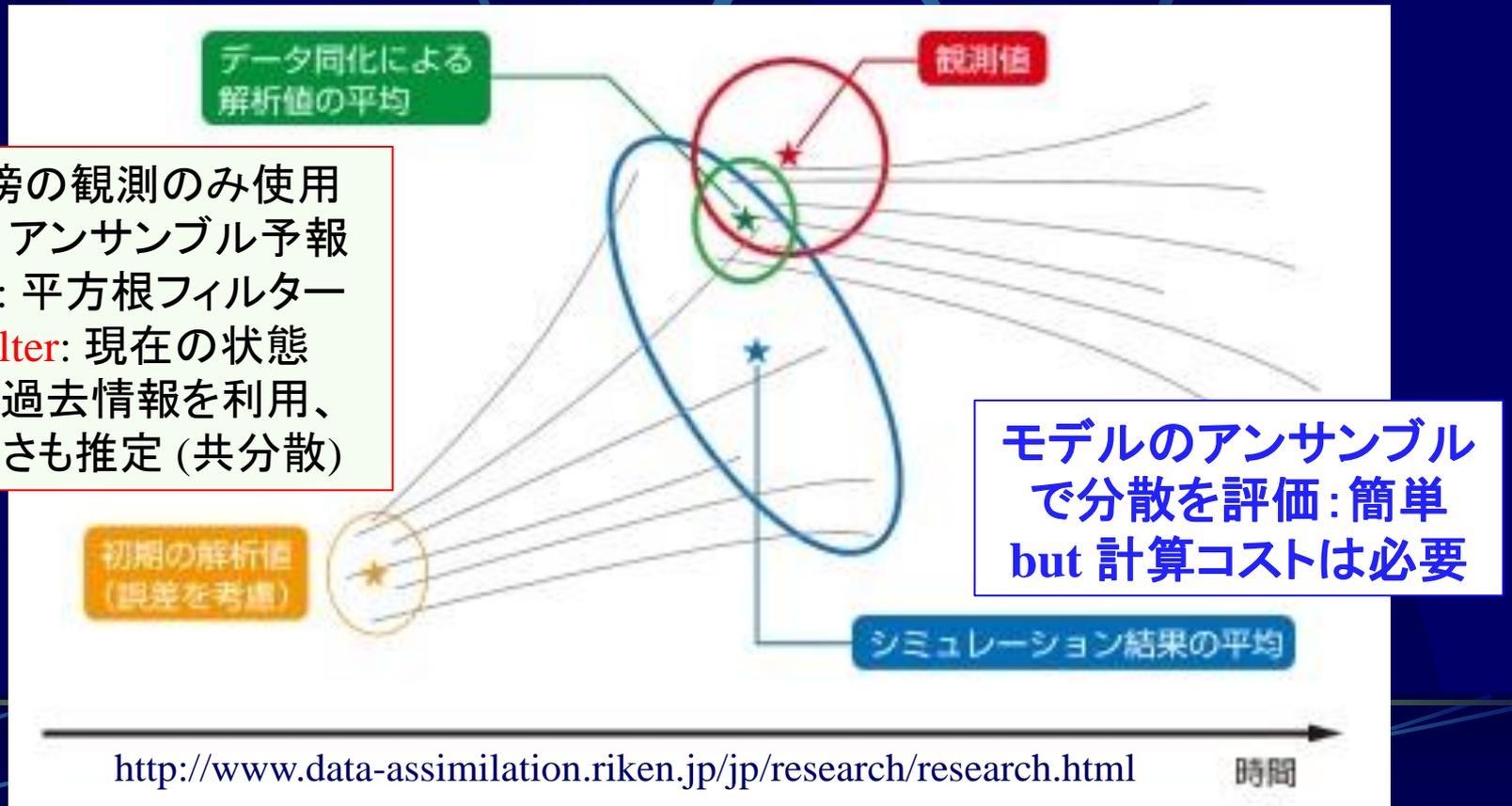
LETKF (Local Ensemble Transform Kalman Filter)

● 地球(ALERA*)や火星での適用例

(Hunt et al., 2007; Miyoshi et al., 2007...; Hoffman et al., 2010)

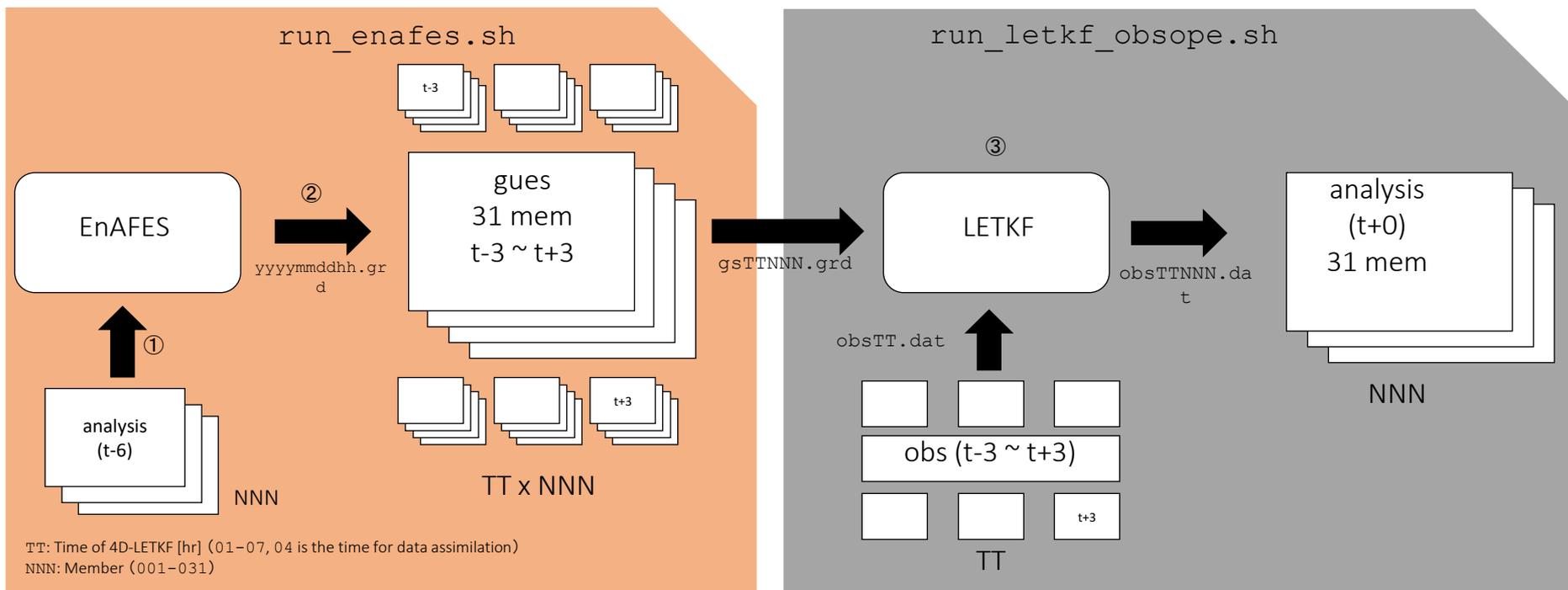
*AFES-LETKF experimental ensemble reanalysis: 地球の再解析データ

Local: 近傍の観測のみ使用
Ensemble: アンサンブル予報
Transform: 平方根フィルター
Kalman Filter: 現在の状態推定に過去情報を利用、不確かさも推定 (共分散)



● ALEDAS-Vの概要

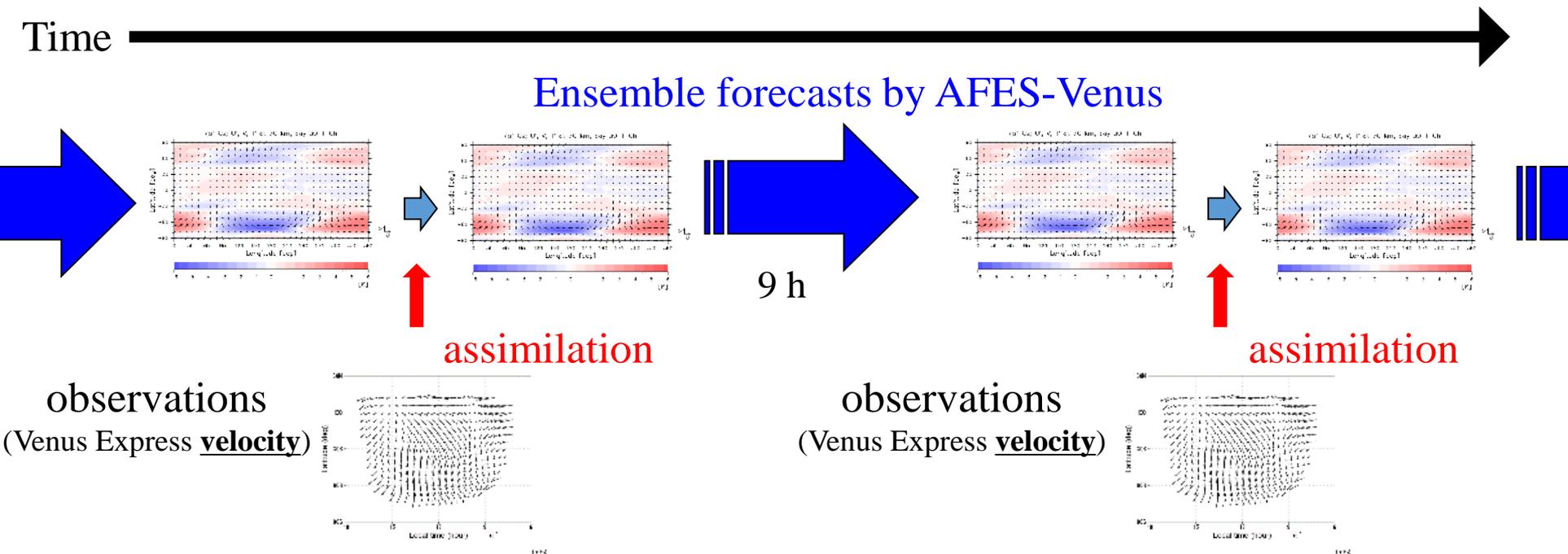
- アンサンブルメンバー: 31
- データ同化サイクル: 6h
- 局所化: 水平400 km, 鉛直lnP~0.4
- 観測誤差: 4.0 m/s
- インフレーション: 10 %



- 9時間予報(t=0から)して、t=3からt=9を同化に使う。
- t=3からt=9の観測を入力して同化、t=6を再解析値とする。(=4D LETKF)

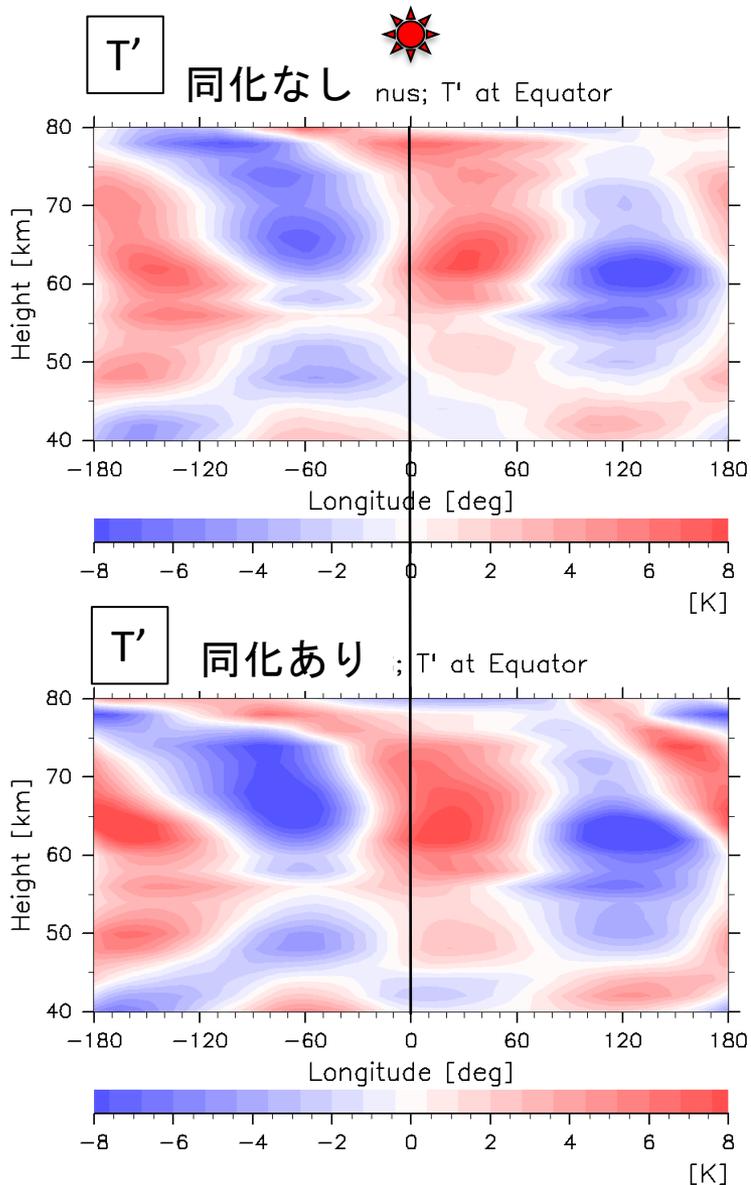
● ALEDAS-Vの概要

- ・ アンサンブルメンバー: 31
- ・ データ同化サイクル: 6h
- ・ 局所化: 水平400 km, 鉛直lnP~0.4
- ・ 観測誤差: 4.0 m/s
- ・ インフレーション: 10 %

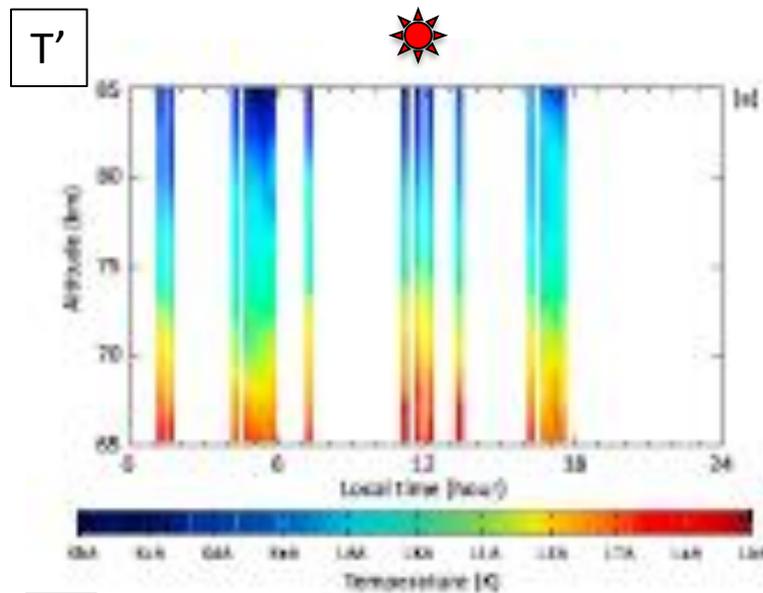


- ・ 9時間予報($t=0$ から)して、 $t=3$ から $t=9$ を同化に使う。
- ・ $t=3$ から $t=9$ の観測を入力して同化、 $t=6$ を再解析値とする。(=4D LETKF)

● VEX (UVI) 風速の同化

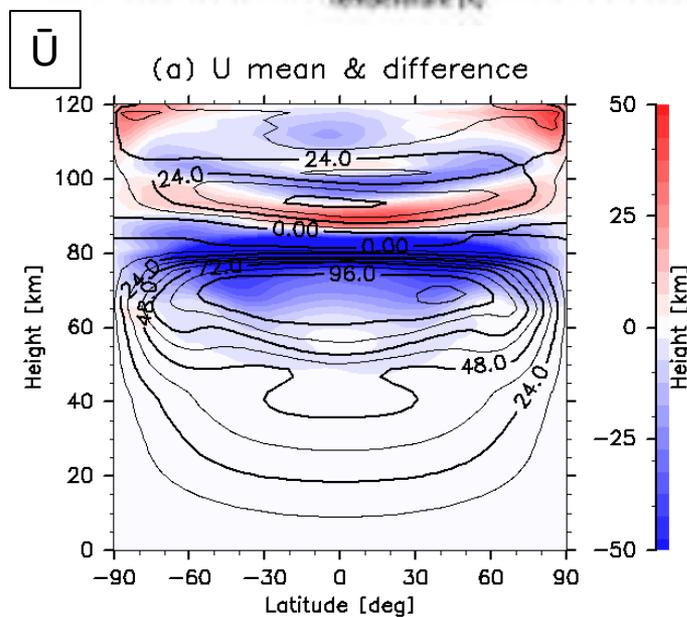


熱潮汐波の位相が改善



あかつきの
電波掩蔽観測

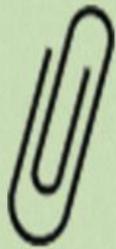
Ando et al.
(JGR2018)



**全球の風速
(大気大循環)
も大きく変化**

Sugimoto et al.
(GRL2019b)

CONTOUR INTERVAL = 1.200E+01



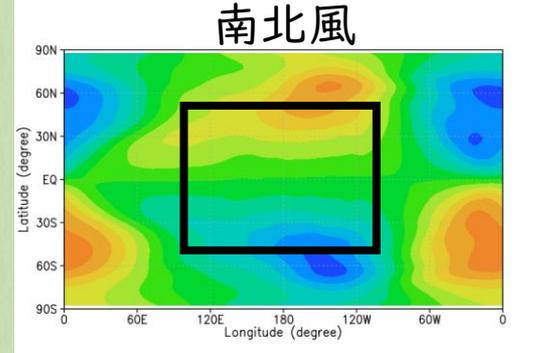
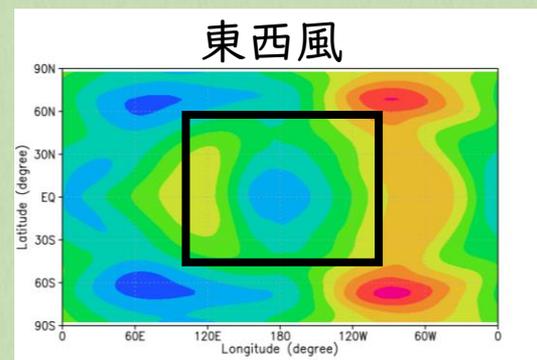
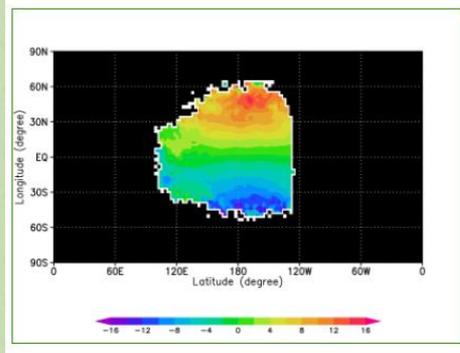
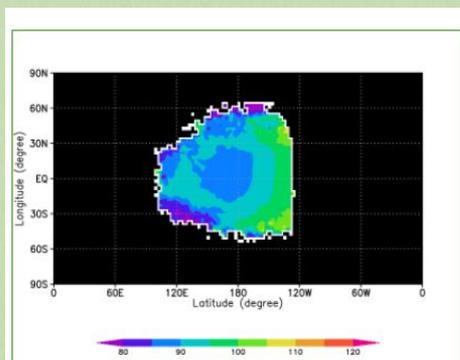
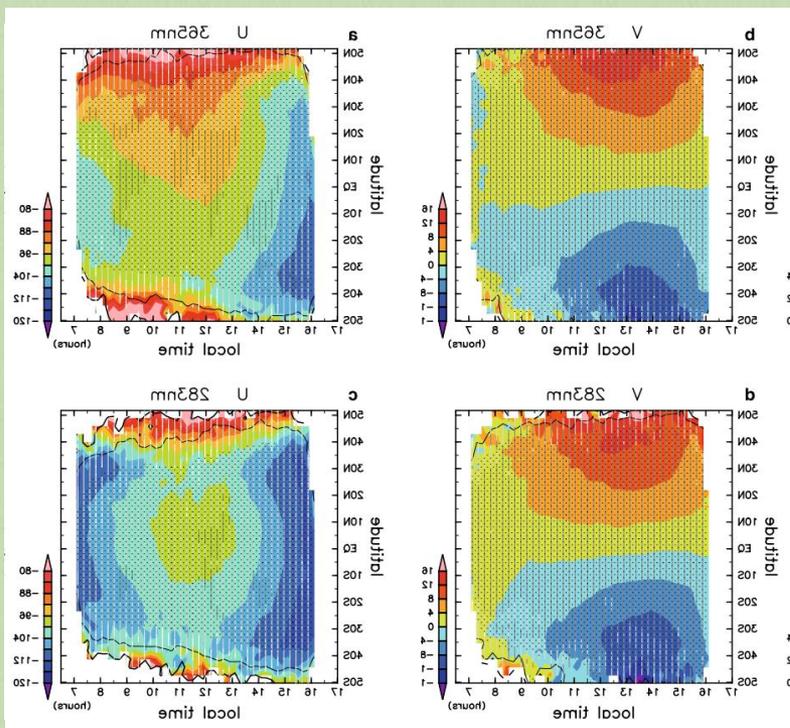
● あかつき (UVI) 風速の同化①

水平風 コンポジット平均@70 km 観測との比較

Horinouchi et al. (2018)

観測 365nm (2018.11)

同化結果



熱潮汐波の位相の改善に成功

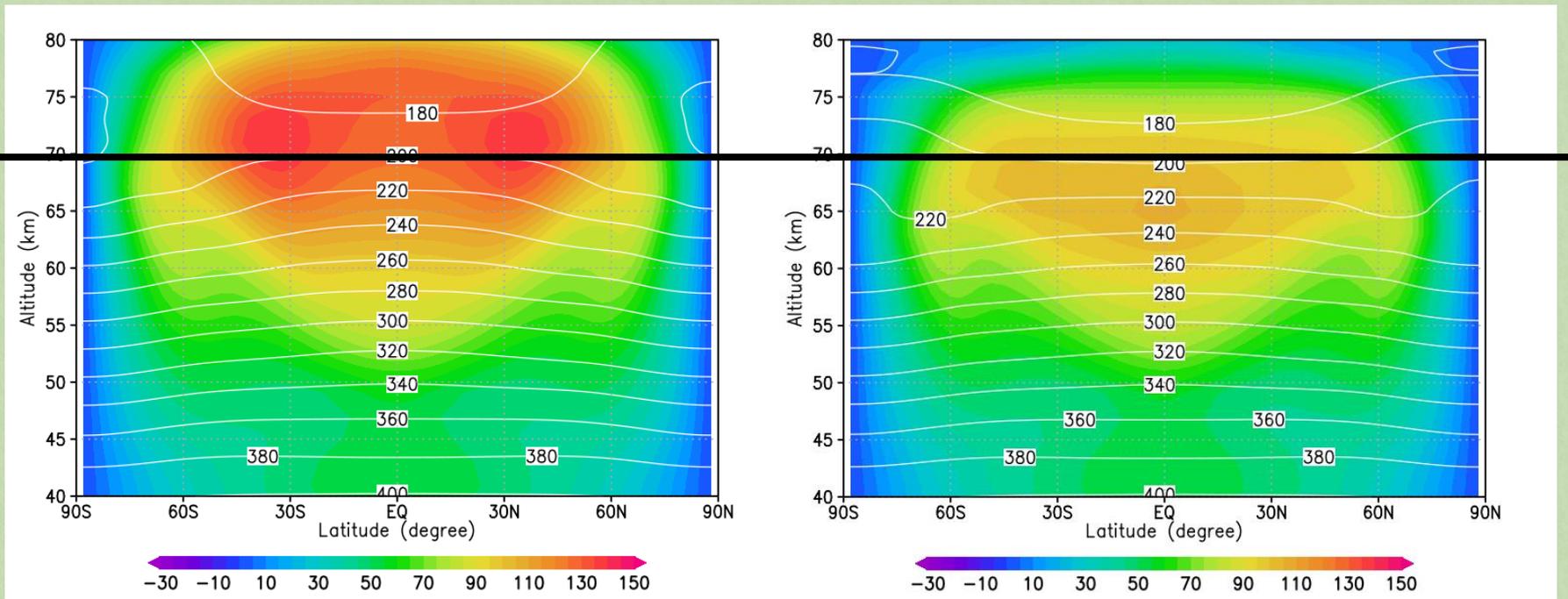
Fujisawa et al.
(SREP2022)

● あかつき(UVI)風速の同化②

東西風 緯度高度断面 (時間東西平均)

同化なし

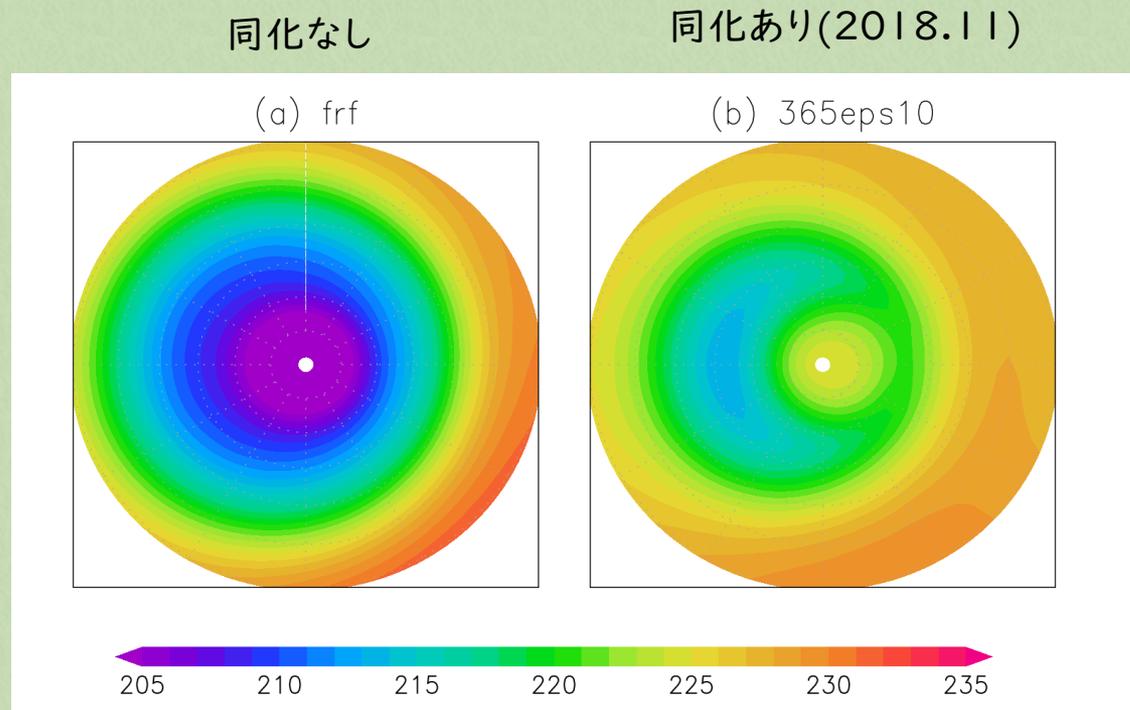
同化あり (365eps10_201811)



全球風速(大気大循環)が大きく修正

● あかつき(UVI)風速の同化③

温度場 高度65km 30-90° N コールドカラーの再現



赤道ケルビン波も再現できている可能性が高い (Liang et al., in preparation)

データ同化の使い方

- ✓ 数値シミュレーションの初期値の推定
 - **将来の予測** (天気予報, 季節予報, 海況予報...)
 - 数値シミュレーションによるメカニズムの解明
- ✓ 4次元データセットの作成
 - 長期(再)**解析** (調査・研究の基礎データ)
- ✓ **モデルパラメータ(や境界値)の推定**
 - 物理過程のパラメタリゼーションの経験的な定数
 - 数値モデルのバイアス
 - トレーサーの発生や吸収
- ✓ **観測システムのデザインと評価**
 - 観測シミュレーション実験(Observation simulation experiment; OSE)
 - 観測システムシミュレーション実験
(Observation system simulation experiment; OSSE)

観測システムシミュレーション実験 (OSSE)

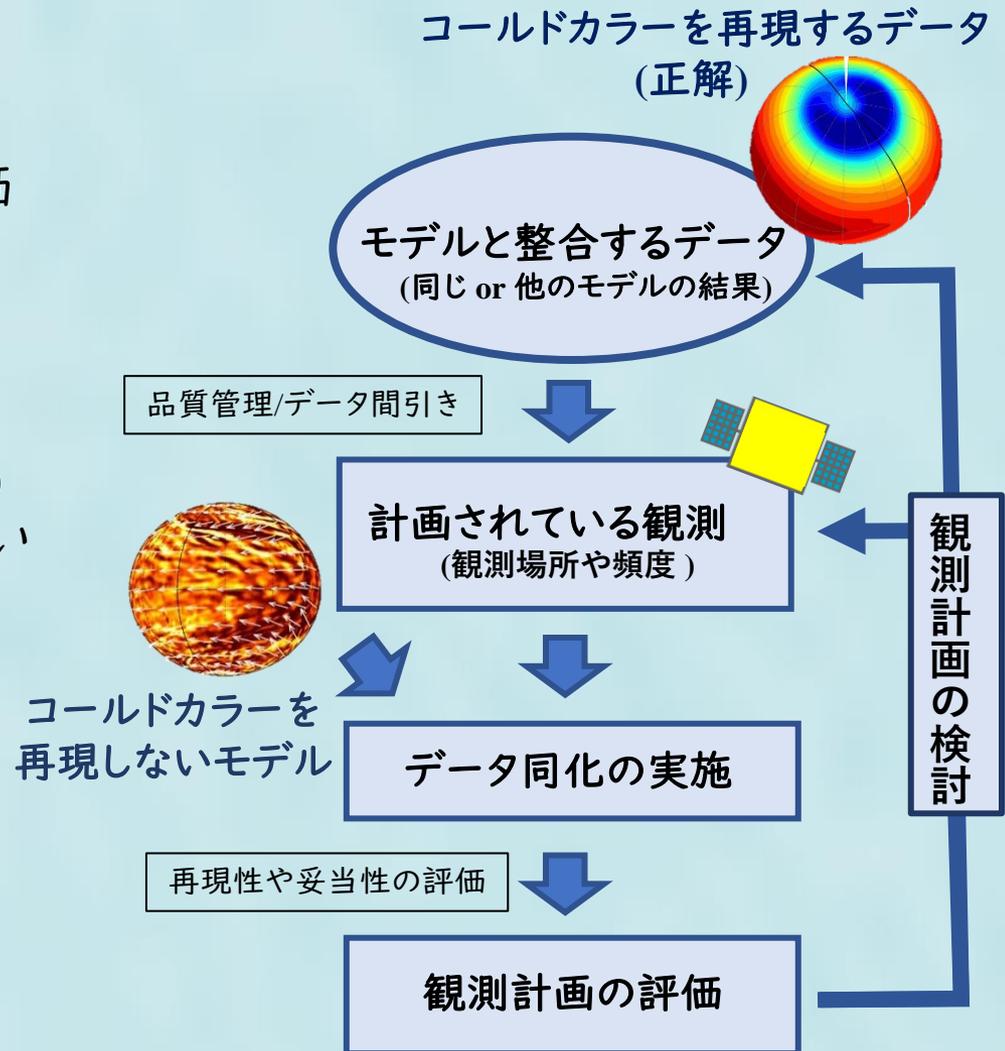
- ① 仮想的な観測を準備
- ② データ同化実験の試行
- ③ ターゲット現象の再現性を基に観測(システム)の有効性を評価

観測計画を事前に評価することで
観測機器や計画を最適化できる

地球では頻繁に実施 (Matsutani+2010)
e.g., 新たな観測機器の導入がどれくらい
天気予報の改善に役立つかを調査

地球以外でOSSEの実施例は
ほとんどない

火星ではOSSEのフレームワークが
提唱され始めた段階 (Reale+2021)



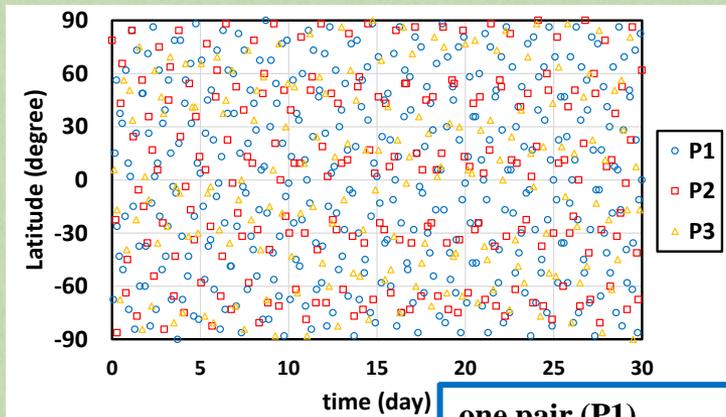
OSSEの例

衛星間電波掩蔽観測のOSSE①：コールドカラー

*OSSE(Observing System Simulation Experiment)：観測システムシミュレーション実験

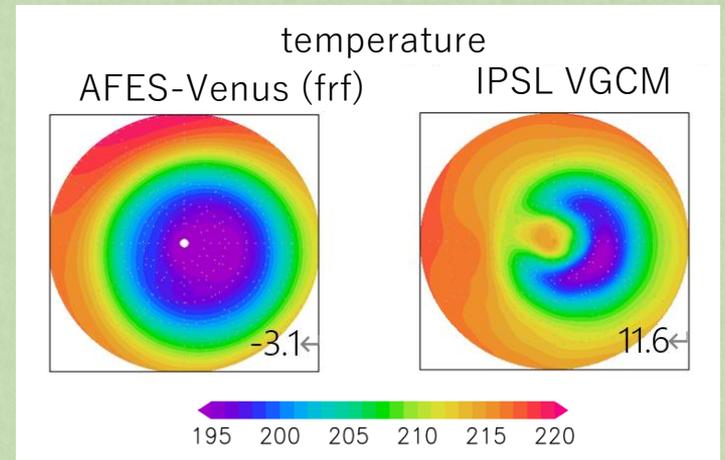
固定点での結果(Sugimoto et al., JSCE2019)を実軌道に拡張

I. 【擬似観測】IPSL Venus GCMの温度, 【実軌道】Chi AO(NASA)

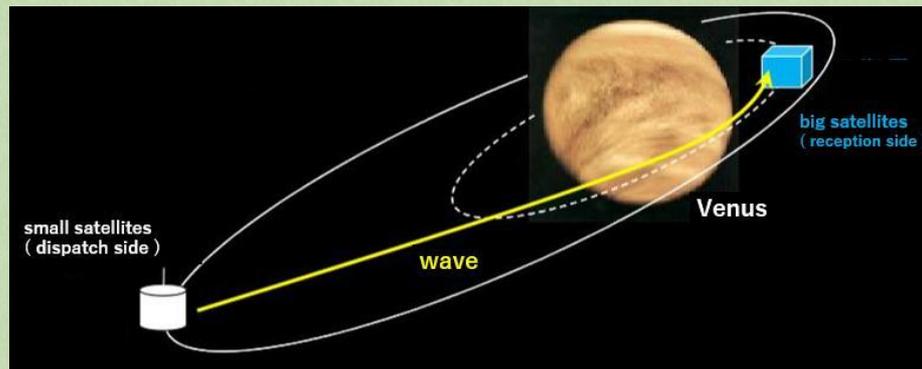


◆ observational points

one pair (P1) : 12.4 obs. /day
two pair (P1P3) : 18.1 obs. /day
three pair (P1P2P3): 24.8 obs. /day

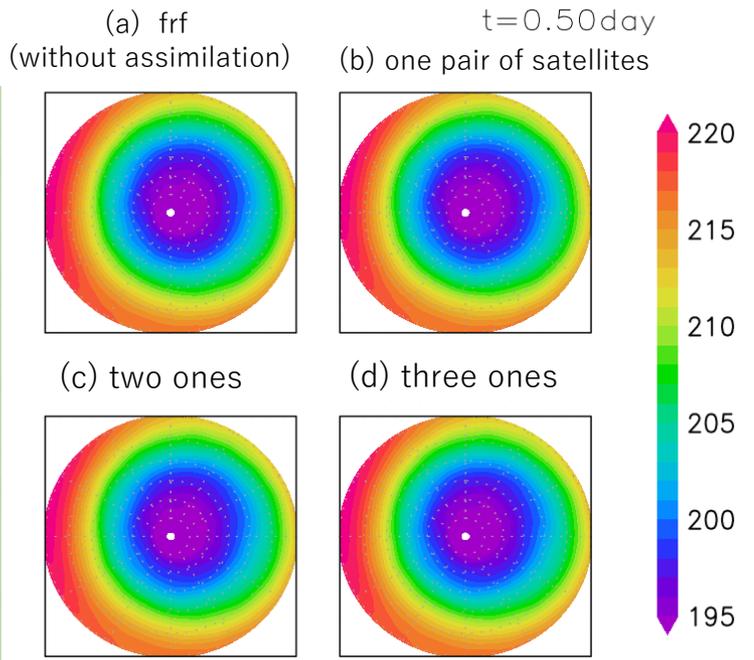


◆ model and observation (al. 67km, NH)

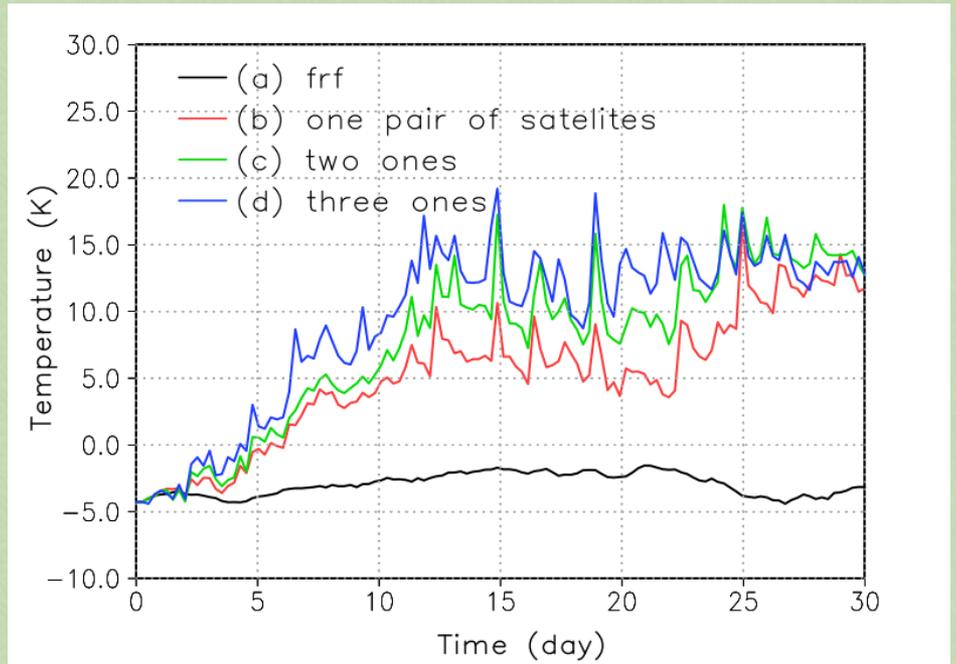


衛星間電波掩蔽観測のOSSE②：コールドカラー

I. 【擬似観測】 IPSL Venus GCMの**温度**, 【実軌道】 Chi AO(NASA)



◆ Temperature at 67 km altitude in 30-90° N



◆ Zonal mean temperature difference from 87.9° N to 71.2° N

1ペア(2機)でも再現可能

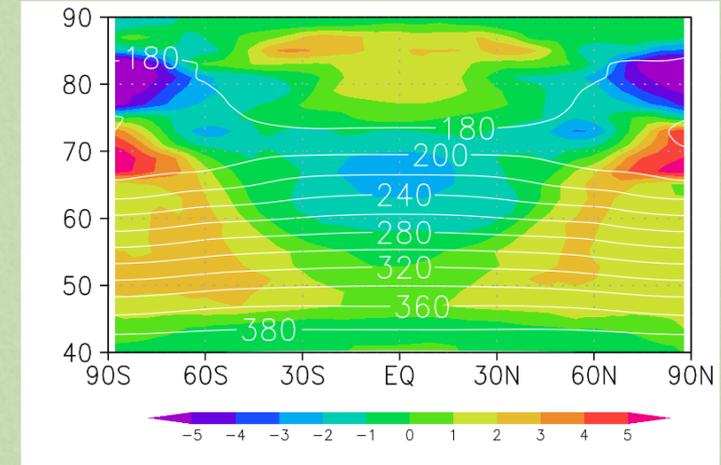
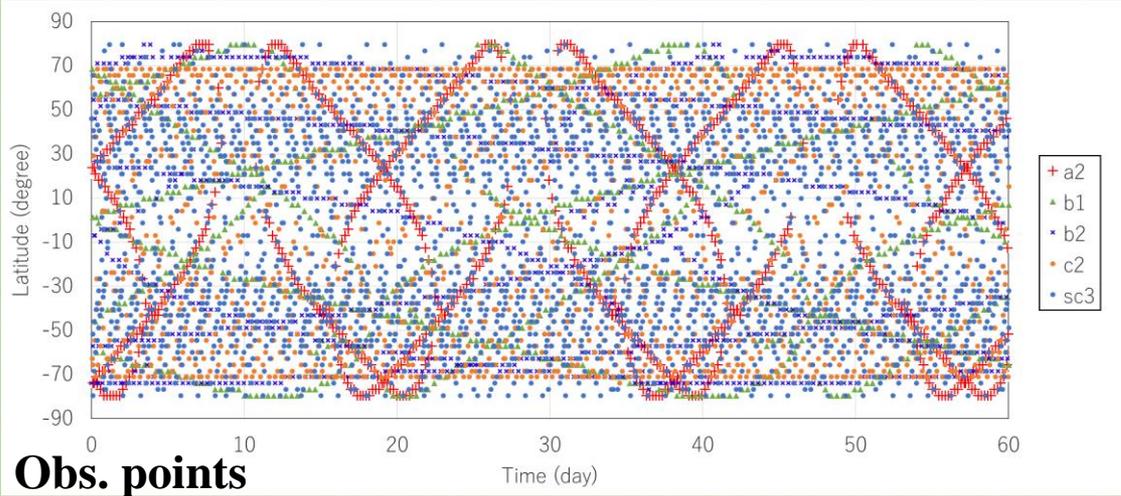
Fujisawa et al. (Icarus2023)

衛星間電波掩蔽観測のOSSE③：SR

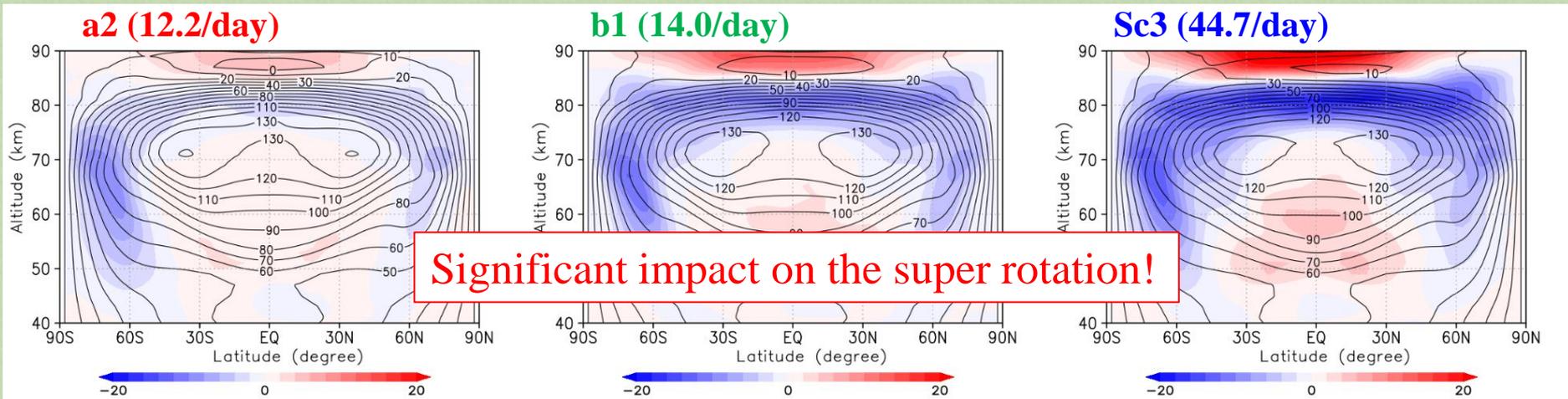
Fujisawa+ in prep.

II. 【擬似観測】 AFES-Venusの**温度**(80% solar heating, 弱スーパーローテーション)

【実軌道】 CROVA (Yamamoto+2021)



Temperature difference
[solar heating 80% run] – [AFES-Venus]



Significant impact on the super rotation!

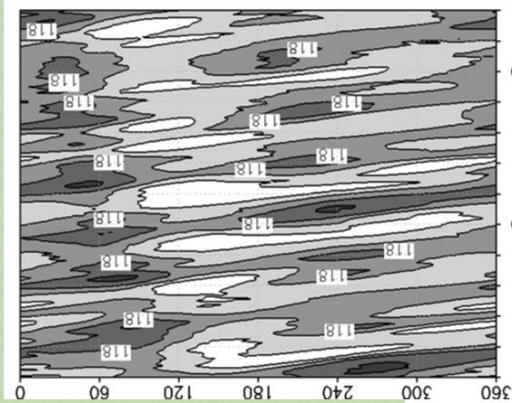
Zonal mean zonal wind (contour) and its difference from AFES-Venus

紫外カメラ観測(UVI風速)のOSSE①：ケルビン波

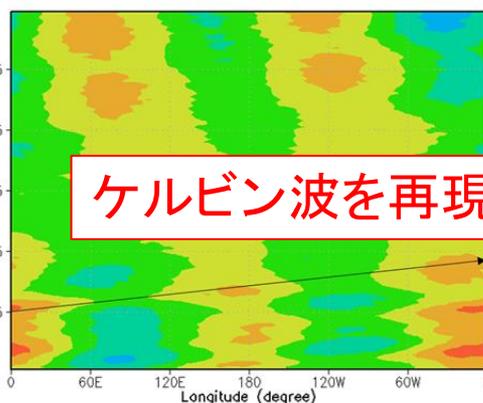
I. 【擬似観測】CCSR/VGCMの風速(九大・山本) 基本場風速がかい離

東西風の赤道上経度時間断面

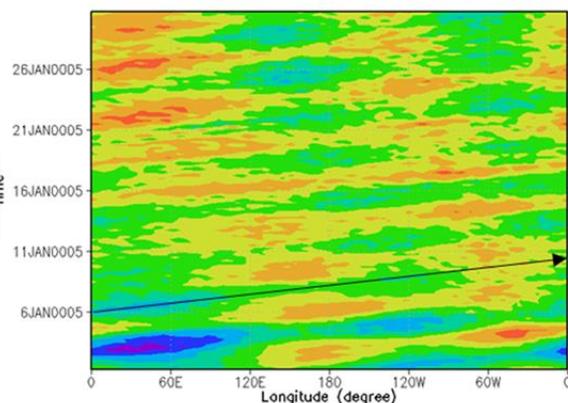
Sugimoto et al., (Atmosphere2021)



擬似観測



(a) frf

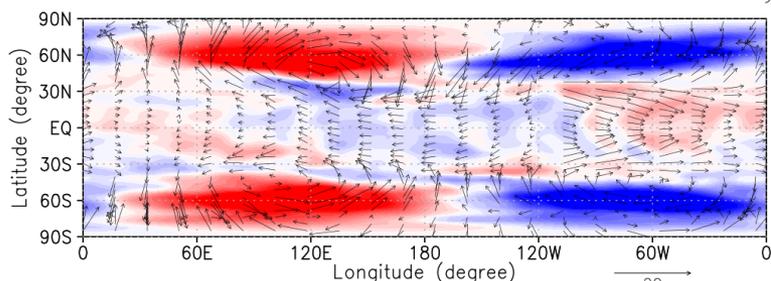


(b) z70115h6

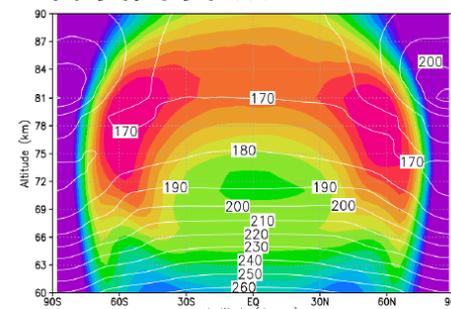
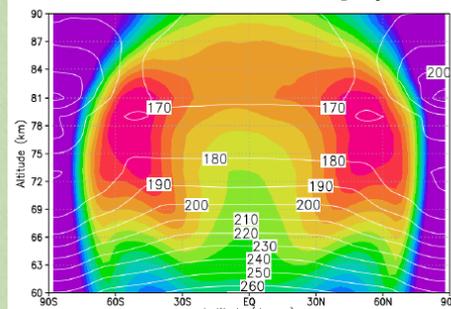
II. 【擬似観測】3D-線形波伝播モデルの風速(AIST・神山)

70kmでの温度(カラー)と水平風速(ベクトル)

t=0.50day



平均東西風の緯度高度断面



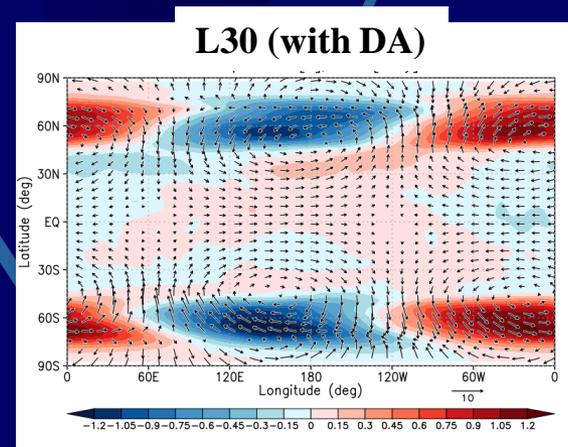
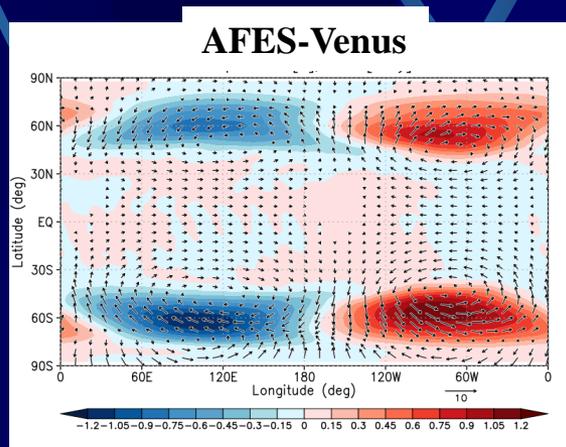
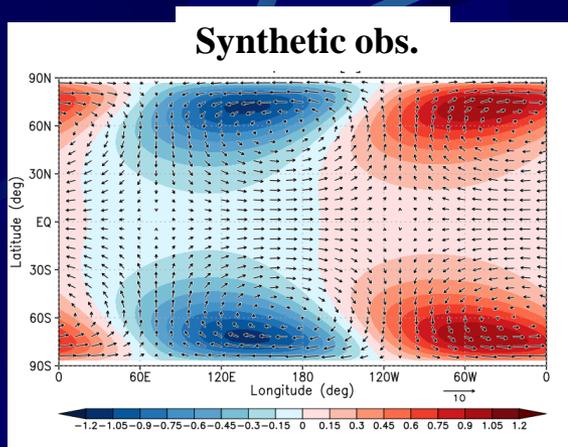
(b) control

ケルビン波のインパクト調査

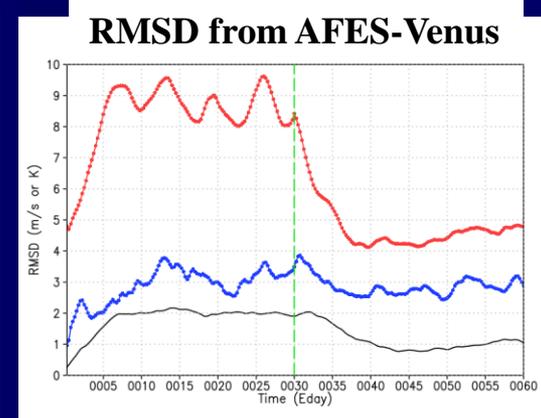
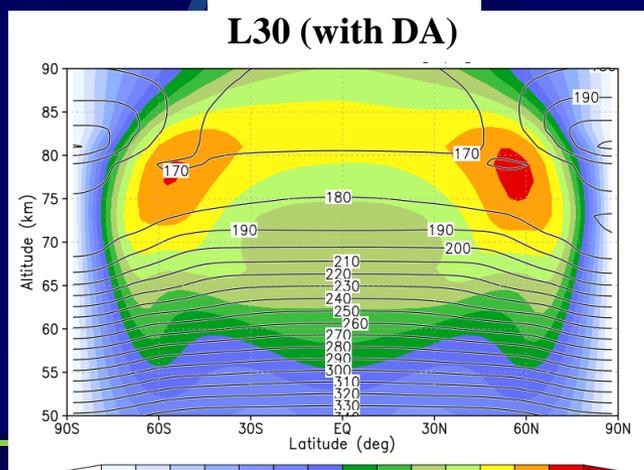
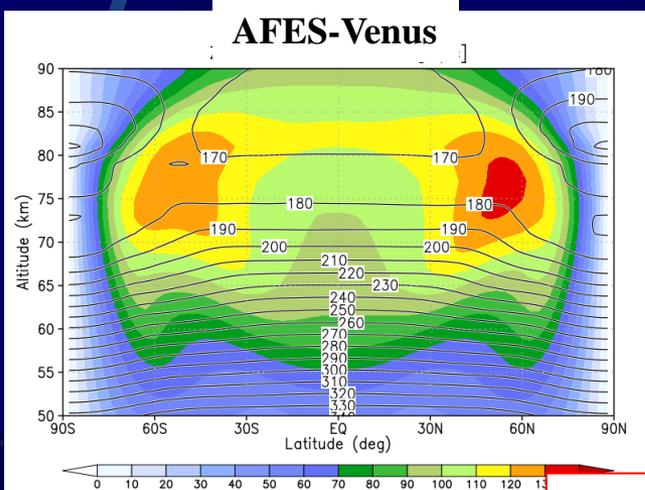
Sugimoto et al., (Atmosphere2022)

紫外カメラ観測(UVI風速)のOSSE②: ロスビー波

III. 【擬似観測】 3D-線形波伝播モデルの風速(AIST・神山)



Rossby wave can be reproduced

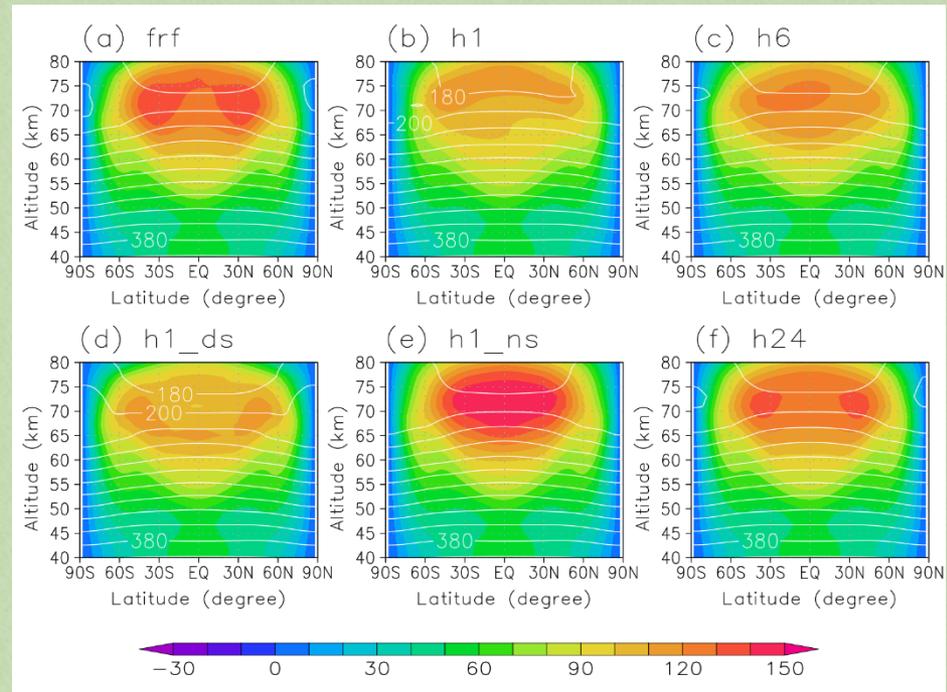
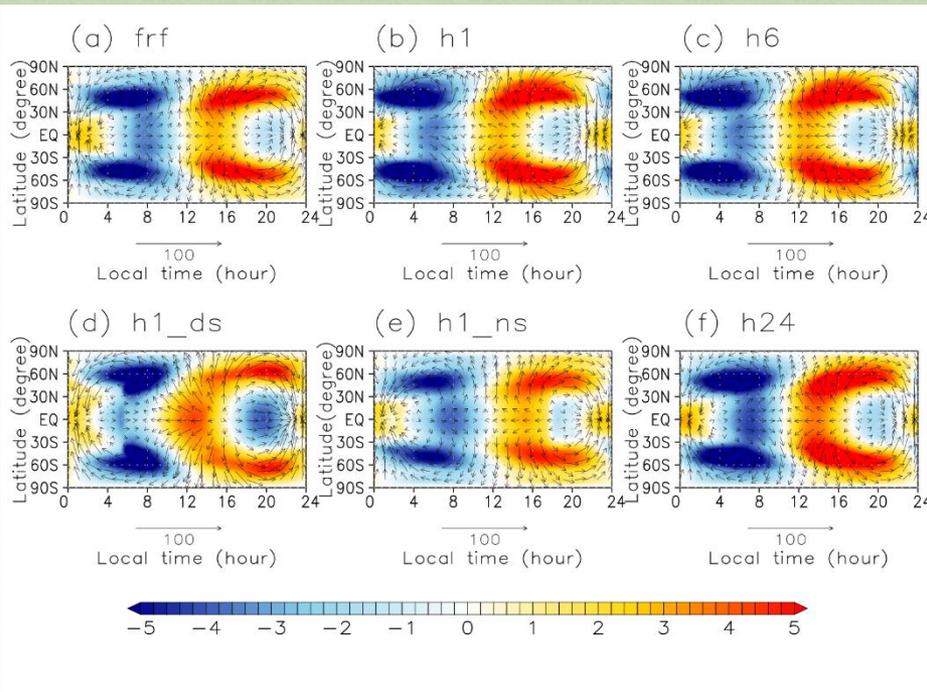


Impact of Rossby wave and its duration

Komori+ in prep.

中間赤外カメラ観測(LIR温度)のOSSE：熱潮汐波

① 【擬似観測】 AFES-Venusの**温度**(@高度70 km, 位相30度ずらす)



◆ 高度70 kmの水平風速と温度のコンポジット

◆ 帯状平均東西風の緯度高度断面

6時間ごとや昼面のみでも改善可能

温度場のみ同化でも風速が大きく変化

Sugimoto et al. (GeoSci.Lett.2022)

4. おわりに (1)

金星大気の研究: 大循環モデル(AFES-Venus)と データ同化システム(ALEDAS-V)の紹介

- ✓ AFES-Venusは、現実的なスーパーローテーションの再現・維持、雲層付近の大気擾乱の再現、新現象の発見に成功し、雲(化学)や放射過程(さらにそのカップリング)の導入も進めている。

最近のAFE-Venusの成果として、

- 静止状態からのスーパーローテーションの再現と粘性依存性
- 熱潮汐波からの自発的放射
- 下層大気安定度分布の再現と観測比較
- 雲物理過程の導入と赤道雲層下部のケルビン波に伴う雲量変動
- 安定度分布の改良による熱潮汐波の位相改善
- ロスビー・ケルビン波の結合不安定
- Bred Vectorによる擾乱調査
- 放射過程、化学過程の導入、カップリング

を紹介した。

4. おわりに (2)

- ✓ ALEDAS-Vは、世界唯一の金星大気データ同化システムであり、実観測の同化のみならず、観測システムシミュレーション実験(OSSE)を進めている。

最近のALEDAS-Vの成果として、

- Venus Expressの風速データ同化
- あかつきの風速データ同化
- 衛星間電波掩蔽のOSSE: コールドカラー、スーパーローテーション
- 紫外(UVI)のOSSE: ケルビン波、ロスビー波
- 中間赤外(LIR)のOSSE: 熱潮汐波

を紹介した。

- ✓ 特に観測システムシミュレーション実験では、実観測の前に同化の成否に関する諸条件を調査可能であり、衛星間電波掩蔽、集中観測、今後の金星探査ミッション立案のツールとなる。

金星初の客観解析データ (2022/9/2 プレスリリース)

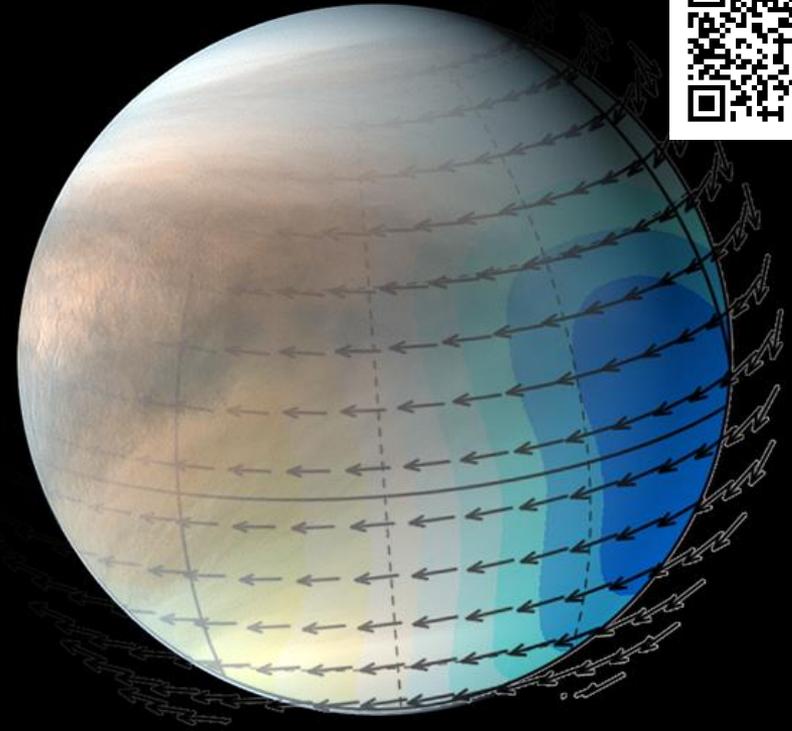
あかつき観測データ
@ISAS/JAXA



データ同化
ALEDAS-V



金星大気大循環モデル AFES-Venus
地球シミュレータ: <https://www.jamstec.go.jp/es/jp/>



世界初の金星大気の客観解析データ
(気象データセット)

Y. Fujisawa, S. Murakami, N. Sugimoto, M. Takagi, T. Imamura, T. Horinouchi, G. L. Hashimoto, M. Ishiwatari, T. Enomoto, T. Miyoshi, H. Kashimura, and Y-Y. Hayashi,
The first assimilation of Akatsuki single-layer winds and its validation with Venusian atmospheric waves excited by solar heating, *Scientific Reports*, Vol.12, 14577, 11pp, (2022)

データ公開に向けて

- あかつきwebサイトに初期解析は近日公開予定.

Murakami+ in prep.

- データ形式: NetCDF
- 同化期間:
 - epoch1: 201612 – 201701
 - epoch2: 201707 – 201709
 - epoch3: 201802 – 201804
 - epoch4: 201809 – 201811

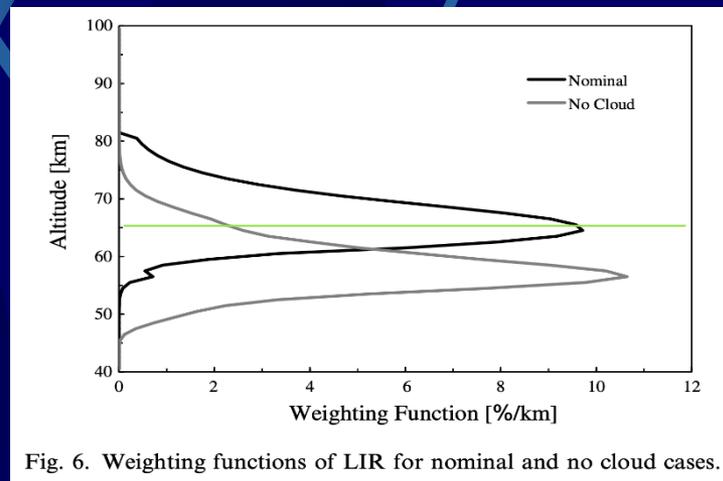
**初期解析はVCD3.0に同梱される予定
(Venus climate database provided by LMD)**

- Ver.2に向けて

- データ同化の技術的な改善(パラメータなど)
- UVI(283nm) and/or LIRの同化
- 同化期間の再検討(短周期擾乱の解析に適した期間など)

Fujisawa+ in prep.

AFES-Venusに物理過程を導入し雲の光学的厚さ・放射輝度の直接同化も可能



Taguchi et al. (2007)

● 今後の金星探査ミッション

- NASA、ESA、中国、インド...

Mission Timelines

2027

2028

2029

2030

2031



VERITAS
[Selected]

2027 - 2028 launch
3-year operation

*打ち上げ年等は
古い情報の可能性あり

Rocket lab
2023?

2029 - 2031 launch
20** Flyby
20** descent
20** Orbital phase



DAVINCI
[Selected]

2029 Operation?

Venera-D
[Phase II]

JAXAに提案予定

CROVA
衛星間電波掩蔽



Akatsuki

2015/12~

中国 (2026~)

VOICE

インド

Shukrayaan-1



EnVision
[Selected]

2031 - 2032 launch

火星探査の時代から金星探査の時代に移りつつある

● 金星探査ミッションへのデータ提供が可能

- 観測システムシミュレーション実験の実施も可能

Geology

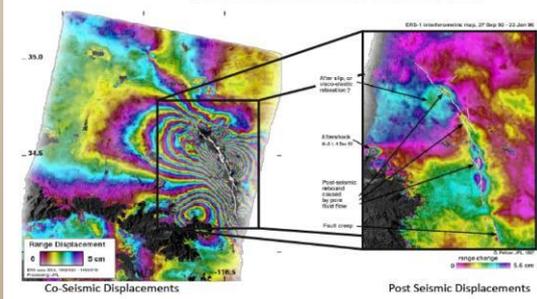
VERITAS



Core and mantle structure, signs of past geologic processes and looking for evidence of the past existence of oceans



Figure 11 Identifying Ground Deformation with D-InSAR



Deep atmosphere

DAVINCI



Novel gases:
Origin of atmosphere
and how it evolved



Climate

Akatsuki

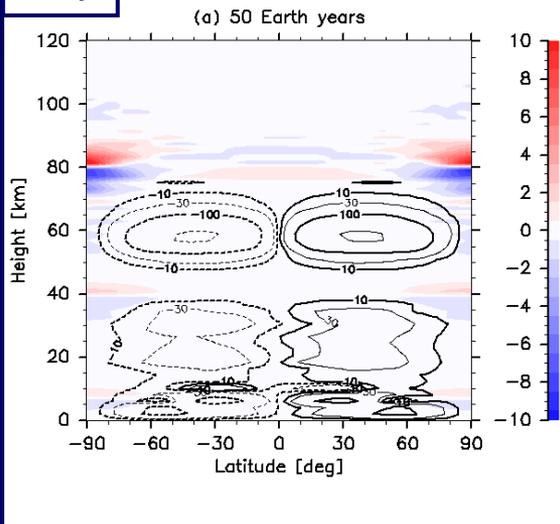


金星研究のますますの進展が期待される

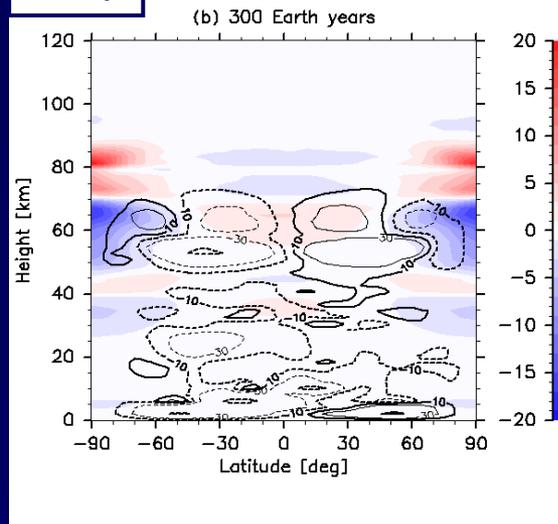
● 子午面循環の時間発展 緯度高度断面

✓ 初期:3セル構造 ⇒ 100年以降:中層以下が結合(時空間的に大きく変動)

50年



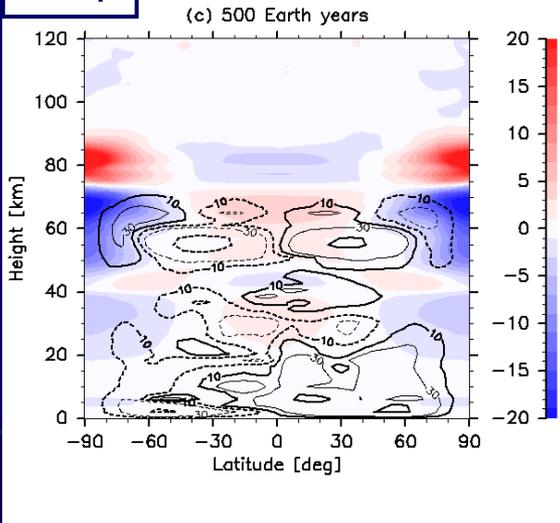
300年



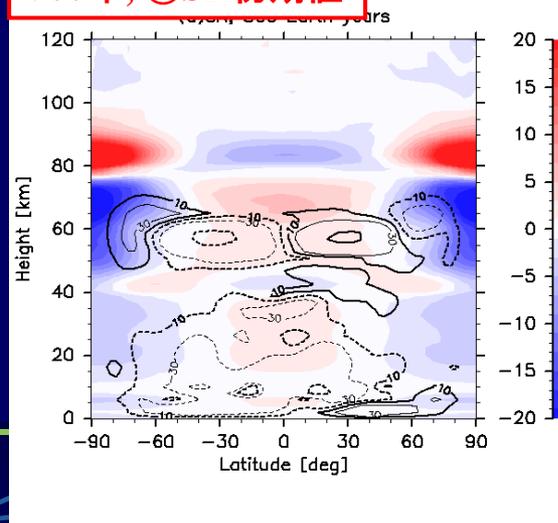
子午面循環(コンター)
南北温度勾配(カラー)

3セルに伴う角運動量分配
⇒ 弱いSRと負の領域

500年



500年; ②SR初期値

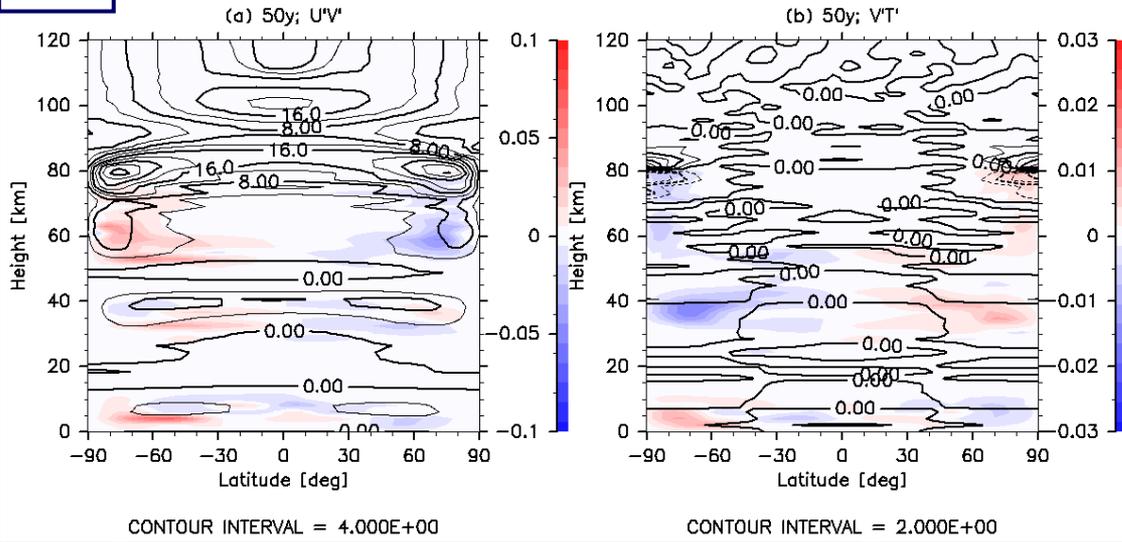


傾圧波によるフェレルセル
(Sugimoto et al., GRL2014)

● 運動量(左)・熱(右)フラックス 緯度高度断面

✓ 初期(上): 擾乱による赤道方向への運動量輸送変化(MMCメカニズム)

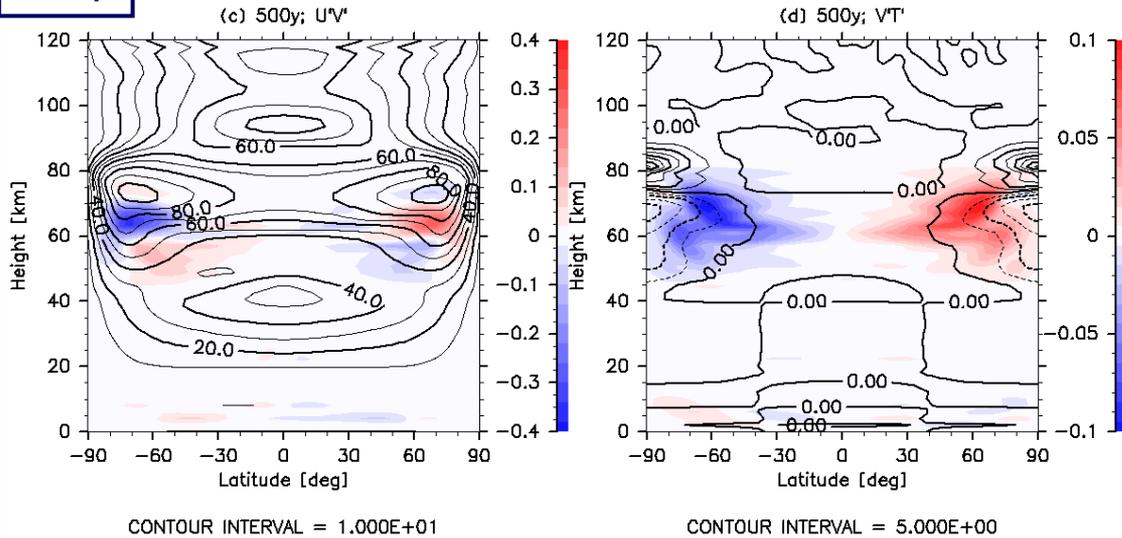
50年



左図: 風速(コンター)
運動量フラックス(カラー)

左図: 南北温度傾度(コンター)
熱フラックス(カラー)

500年

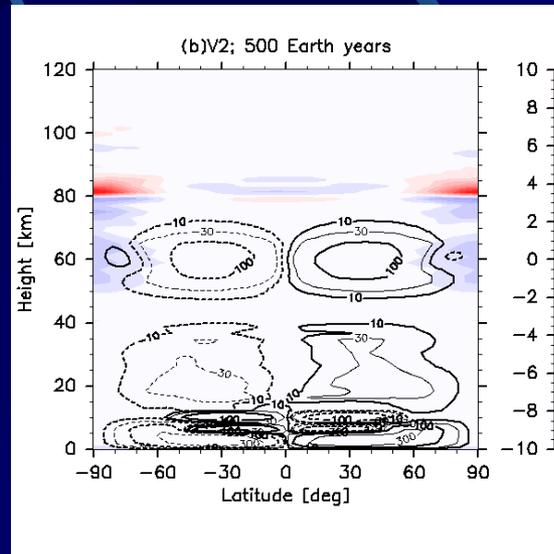
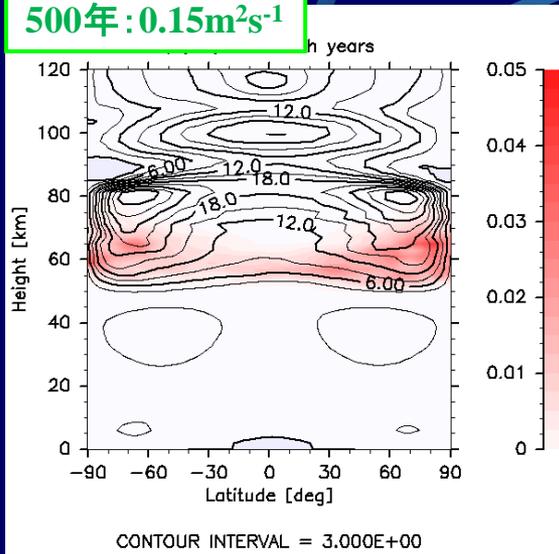


傾圧波によるジェットの構造
(Sugimoto et al. GRL2014)

● 感度実験の結果 緯度高度断面

✓ 鉛直渦粘性大(上)では、スーパーローテーションが十分に成長できない

500年: $0.15\text{m}^2\text{s}^{-1}$



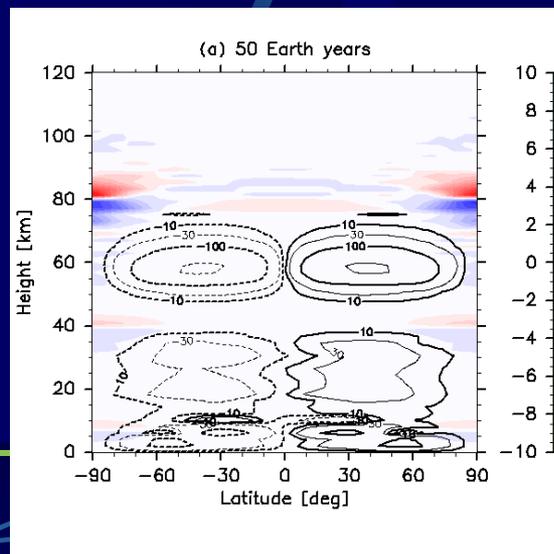
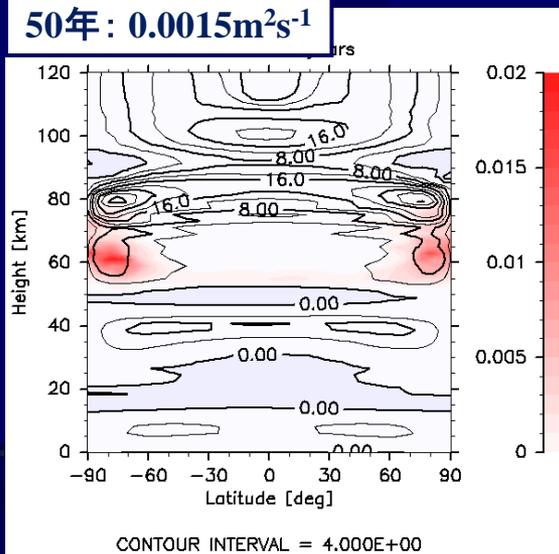
左図: 風速(コンター)

短周期擾乱のエネルギー(カラー)

右図: 子午面循環(コンター)

南北温度傾度(カラー)

50年: $0.0015\text{m}^2\text{s}^{-1}$



3セル構造の維持 ⇒
高速SRへ遷移できない?

$0.02\text{ m}^2/\text{s}$ 以下で高速SR
 $0.025\text{ m}^2/\text{s}$ 以上で弱いSR