



金星大気の観測・シミュレーション・データ同化に関する研究会  
神戸大学理学研究科惑星科学研究センター (CPS) セミナー室  
2023年3月28日 10:00-



# LIR(あかつき中間赤外カメラ)の 観測システムシミュレーション実験 による熱潮汐波再現性

杉本憲彦 (慶大)

藤澤由貴子(慶大), 小守信正(慶大),  
安藤紘基(京産大), 神山徹(産総研), 高木征弘(京産大)

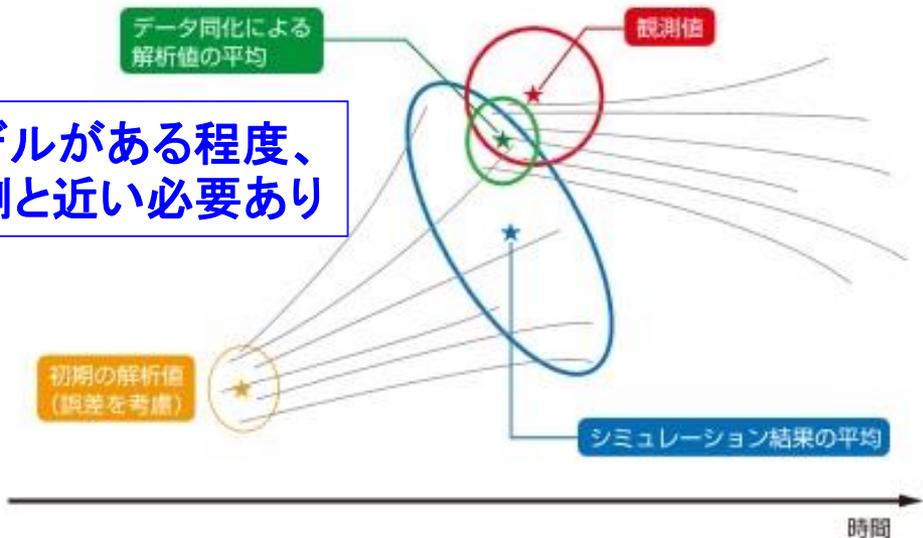
AFES-Venus; Atmospheric GCM For the Earth Simulator for Venus  
ALEDAS-V; AFES LETKF Data Assimilation System for Venus

# 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>

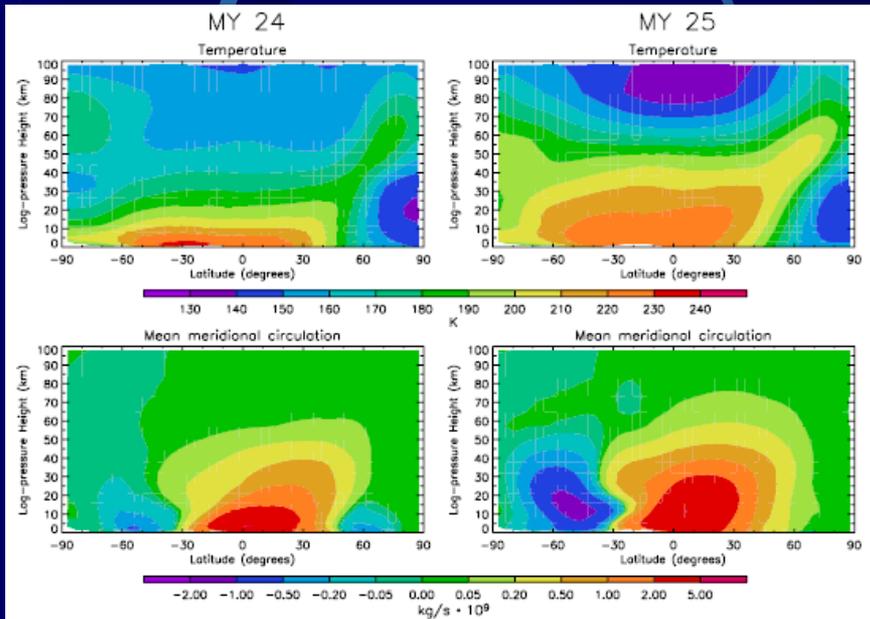
**地球大気: NCEP再解析データ (RA), ERA, JRA など**

# 火星のデータ同化

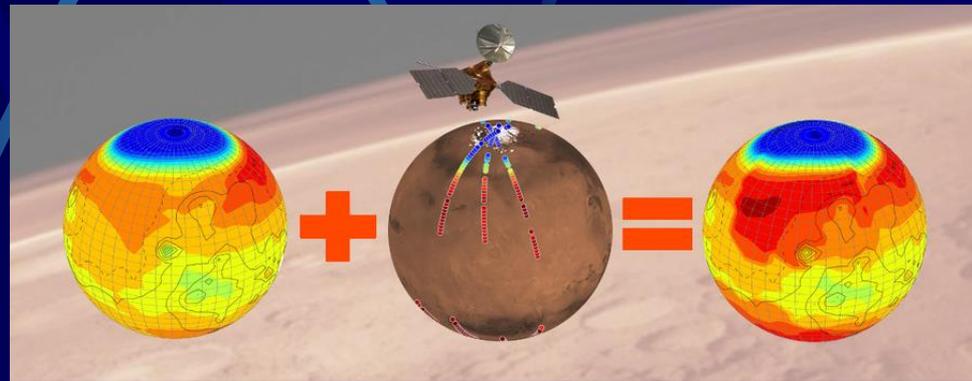
火星大気探査の観測データを用いた同化実験

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

# 金星の観測:「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

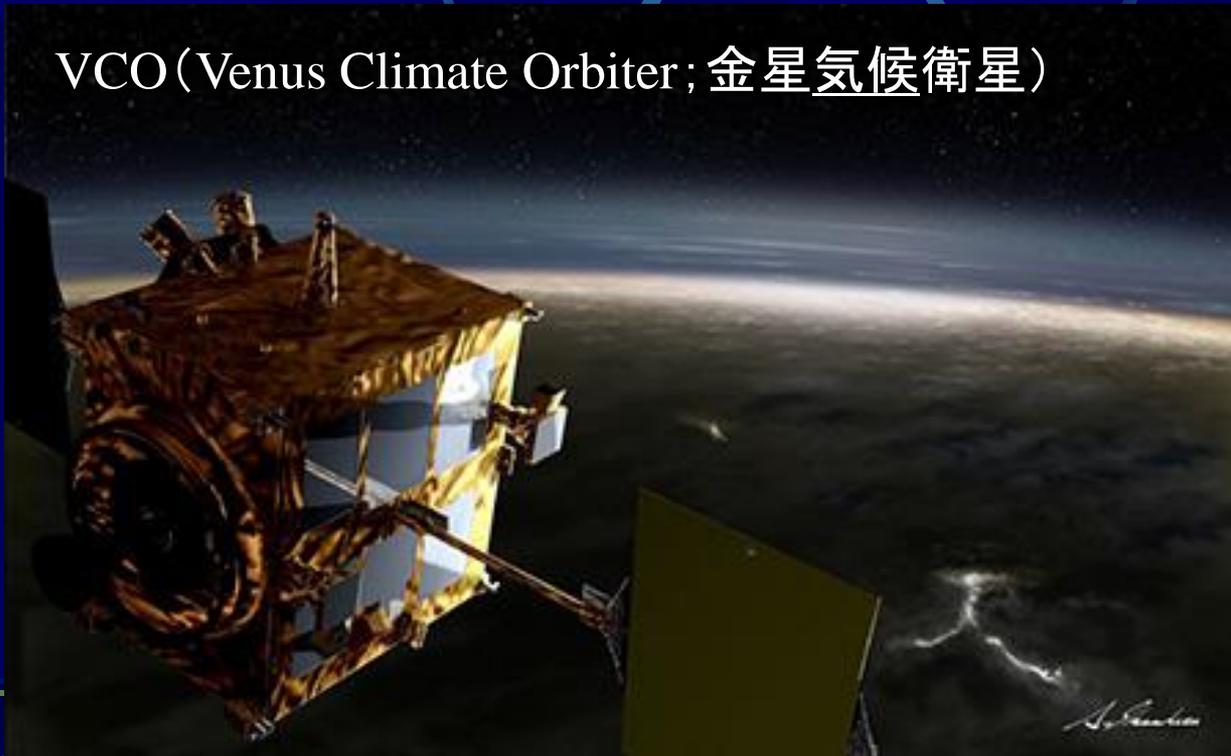
2010年12月7日 金星周回軌道への投入失敗。

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。

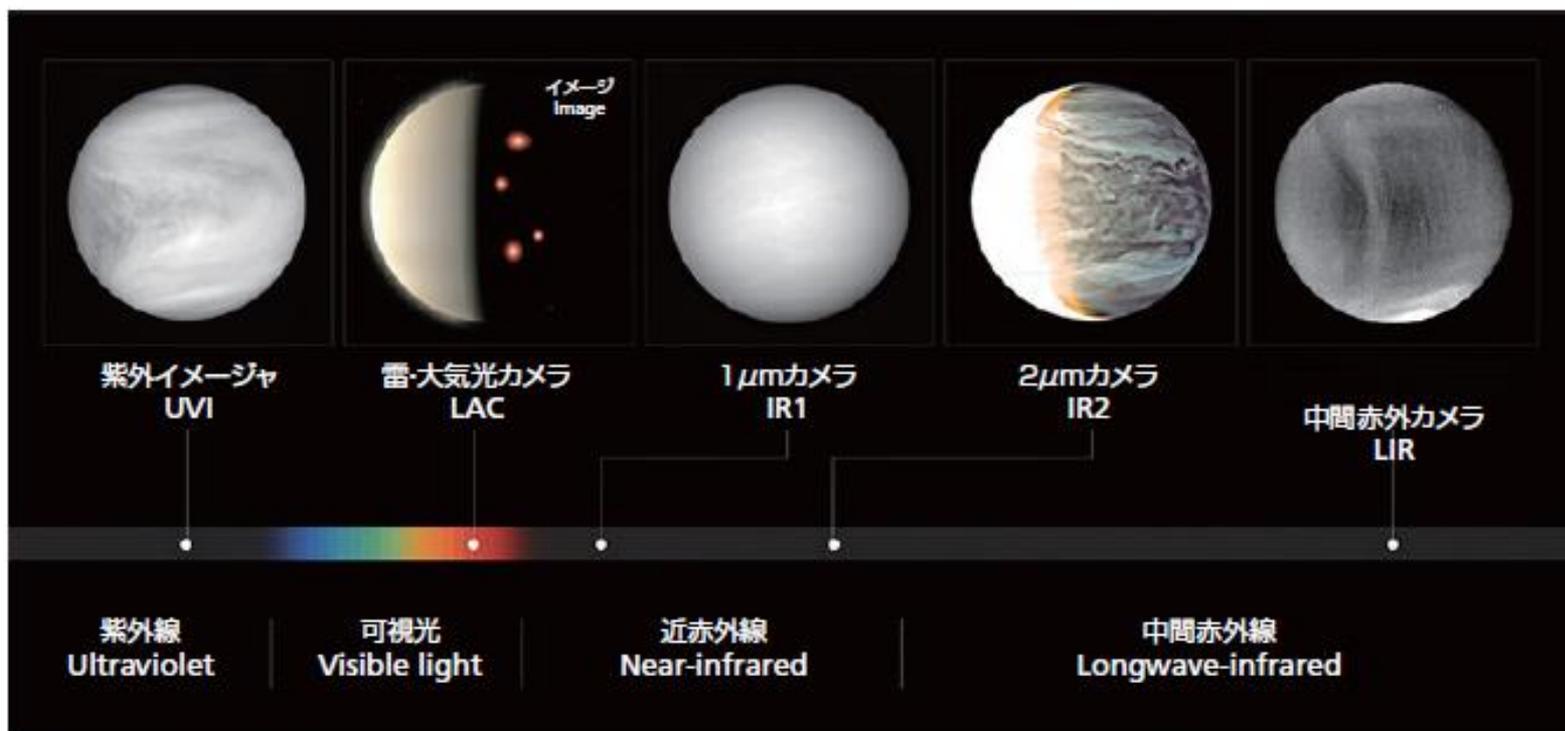
姿勢制御用エンジンを噴射

VCO (Venus Climate Orbiter; 金星気候衛星)



# あかつきの特徴 (Venus climate orbiter)

- 高頻度、多高度の気象観測 (Nakamura+2011, 2014...)



「あかつき」の観測波長  
Wavelengths observed by Akatsuki

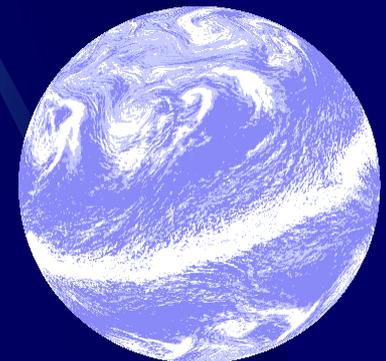
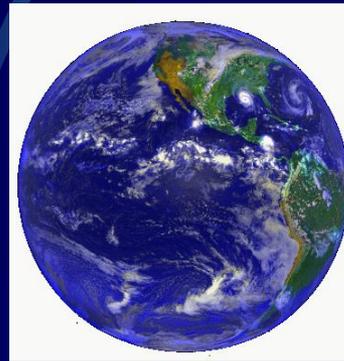
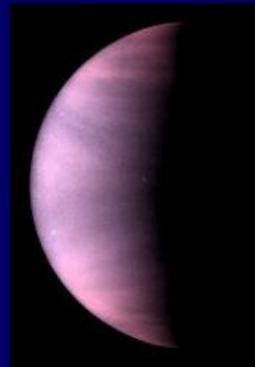
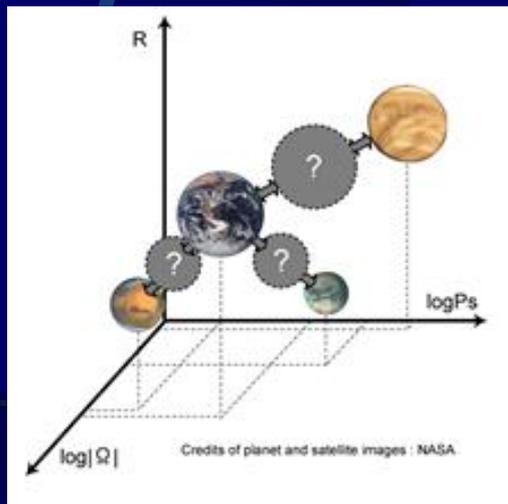
雲追跡風と温度場が力学データ同化に利用可能

# 金星のモデル: AFES-Venus

## ● 地球型惑星大気\*AFESプロジェクト(2006?-)

(\*AFES; Atmospheric GCM For the Earth Simulator)

- ✓ 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

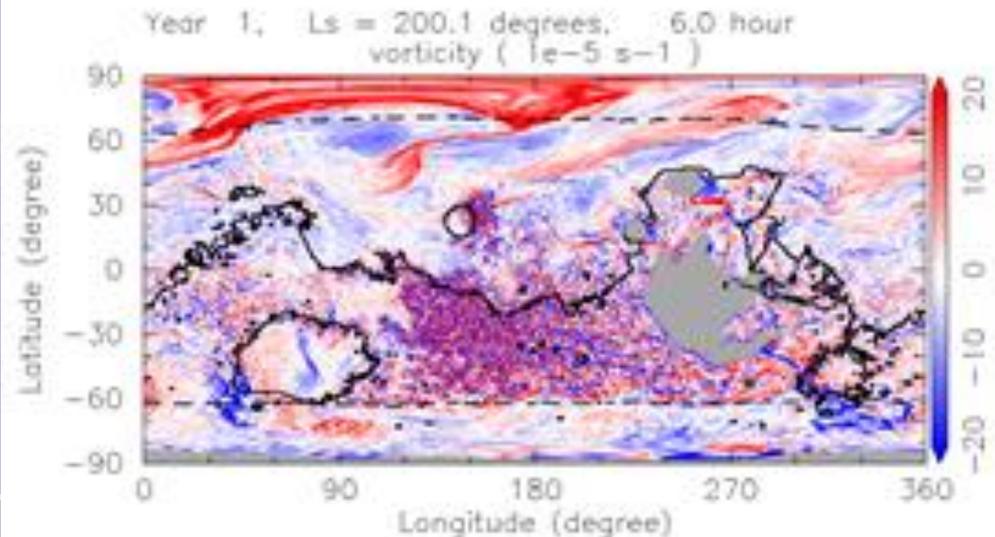
## ● AFES (Earth SimulatorのためのGCM)

- ✓ 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*)

\* 下層大気的时间スケールはとても長いはず...

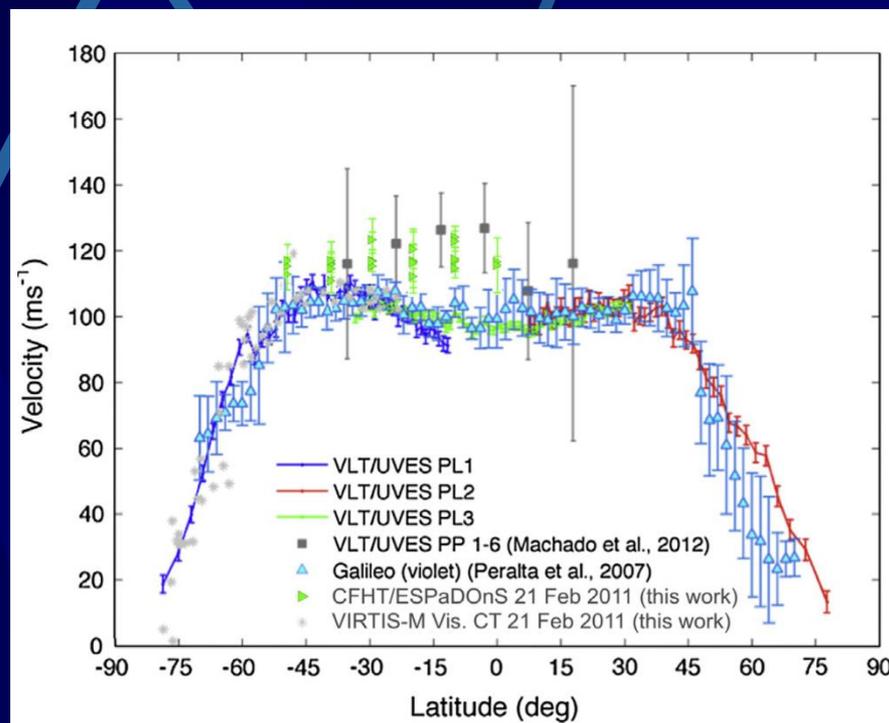
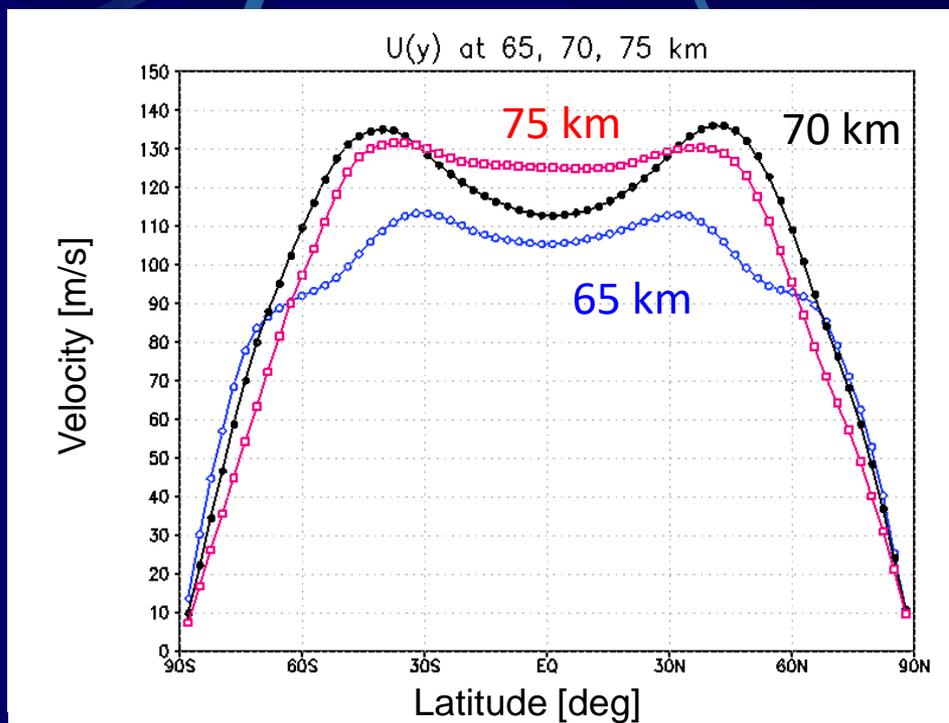
# これまでの成果(-2019, AFES-Venus)

## ● 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)

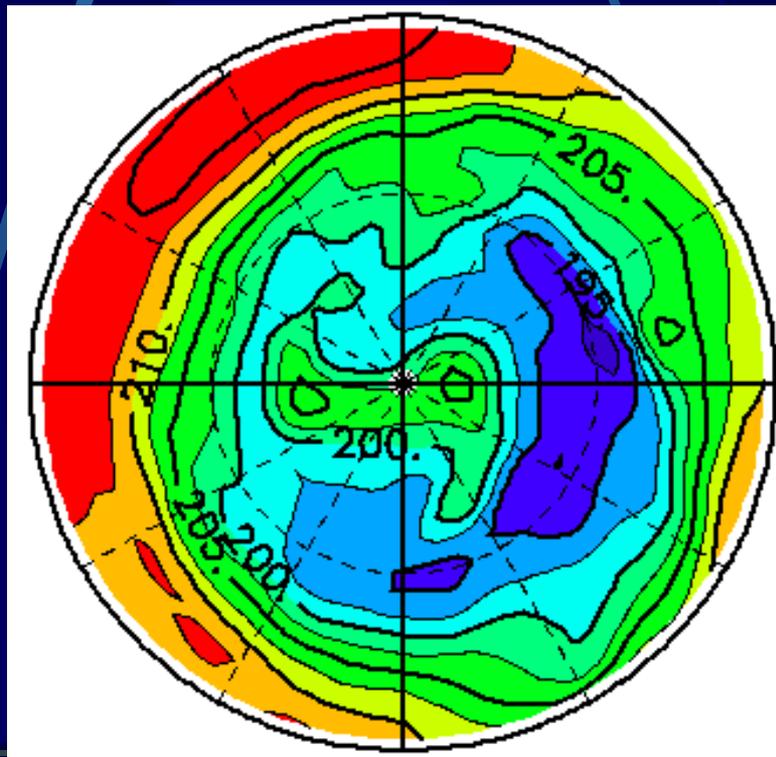
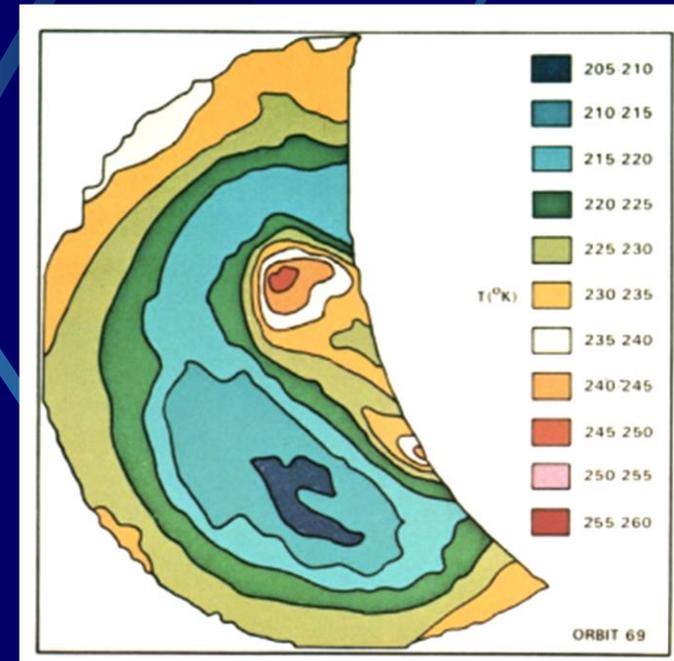
Machado et al. (2014)

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

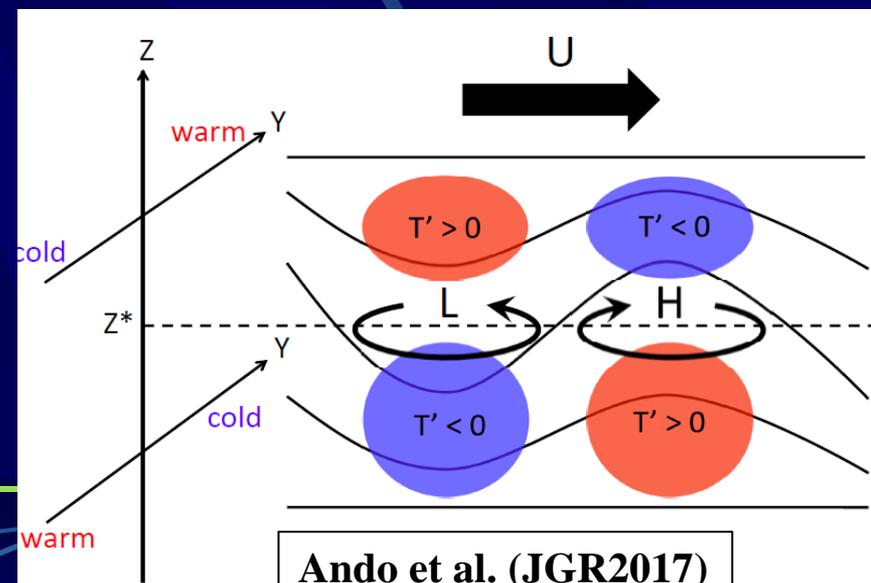
● 極域の渦構造を再現 (T42L60 run)

- ✓ 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)

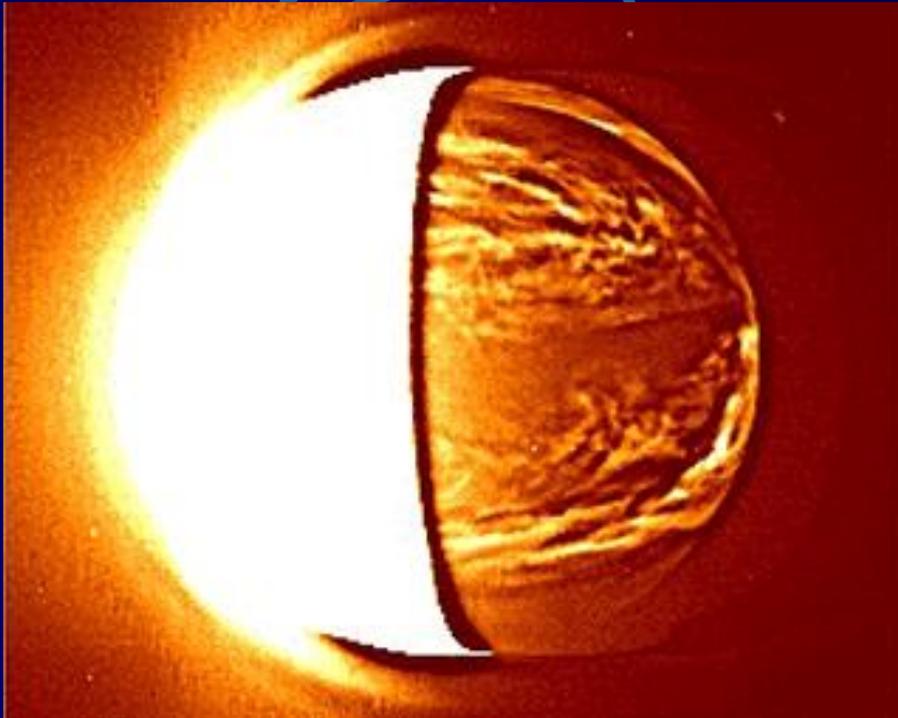


Ando et al. (JGR2017)

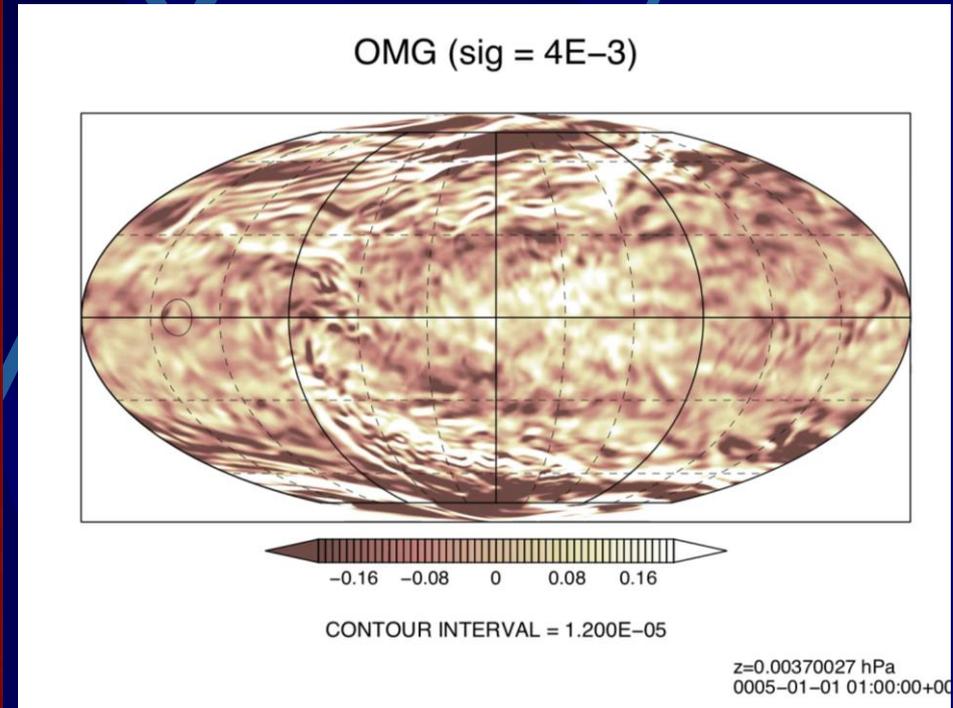
# ● あかつきIR2画像と金星AFESの比較 (T159L120 run)

✓ 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

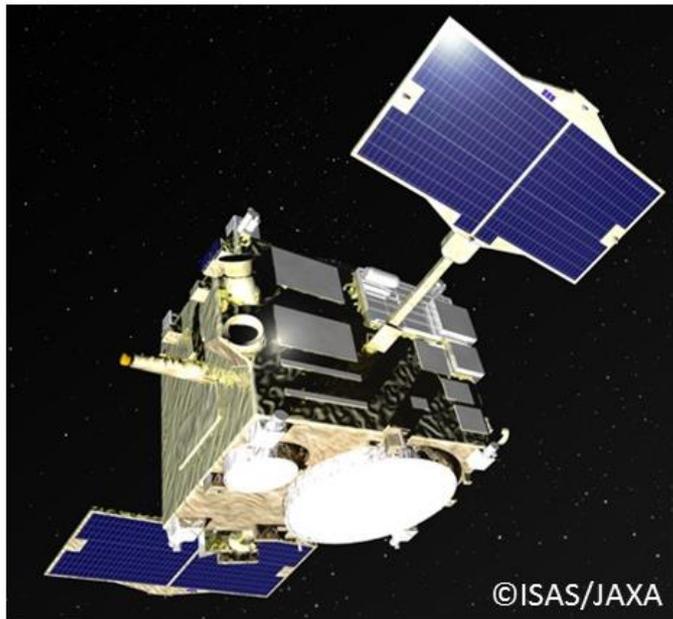
現実の金星大気はかなり近い状態をAFES-Venusで再現可能になってきた。

# データ同化の試み (「ALEDAS-V\*」基盤S; 林祥介代表)

\*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を利用

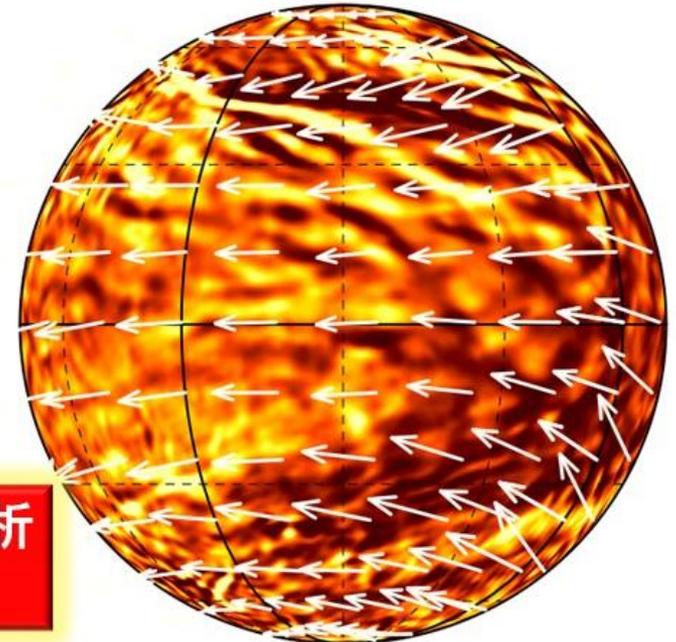
「あかつき」の観測



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.

# 最近の進展(2019-)

## ● 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)
- ✓ 大気安定度の再現と観測比較 (Ando et al., Sci. Rep.2020, JGR2022)
- ✓ 熱潮汐波からの自発的な重力波放射 (Sugimoto et al., Nature Com., 2021)
- ✓ 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)
- ✓ 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)
- ✓ スーパーローテーションの水平粘性依存性 (Sugimoto et al., EPS2023)

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

- ✓ 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)
- ✓ 解析データ中のコールドカラー (Ando et al., JGR, minor revision)
- ✓ 衛星間電波掩蔽のOSSE (Sugimoto et al., JSCE2019, Fujisawa et al., Icarus, revision)
- ✓ 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)

# 金星のデータ同化システム: ALEDAS-V

(AFES-LETKF data assimilation system for Venus)

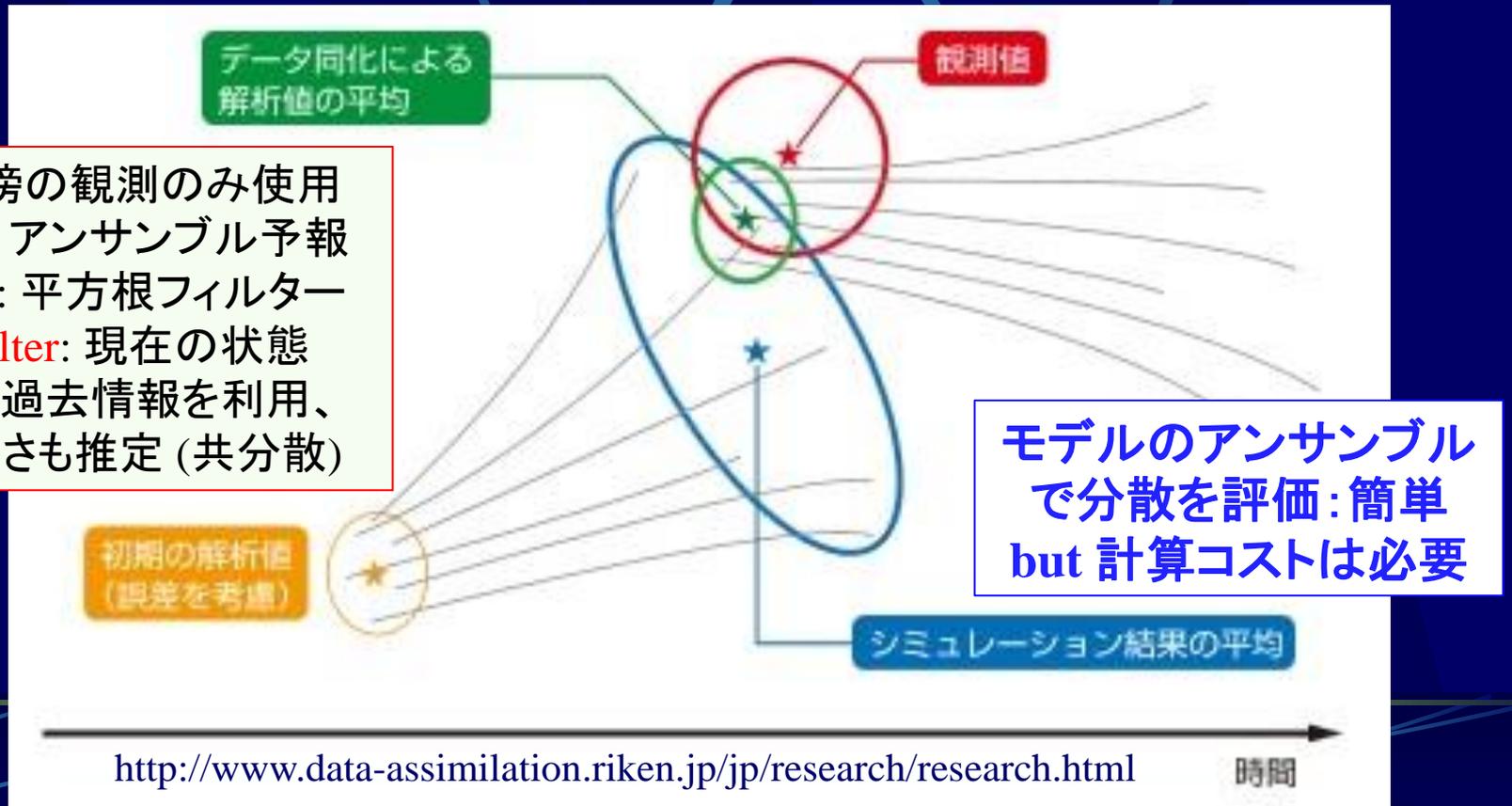
## LETKF (Local Ensemble Transform Kalman Filter)

### ● 地球(ALERA\*)や火星での適用例

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

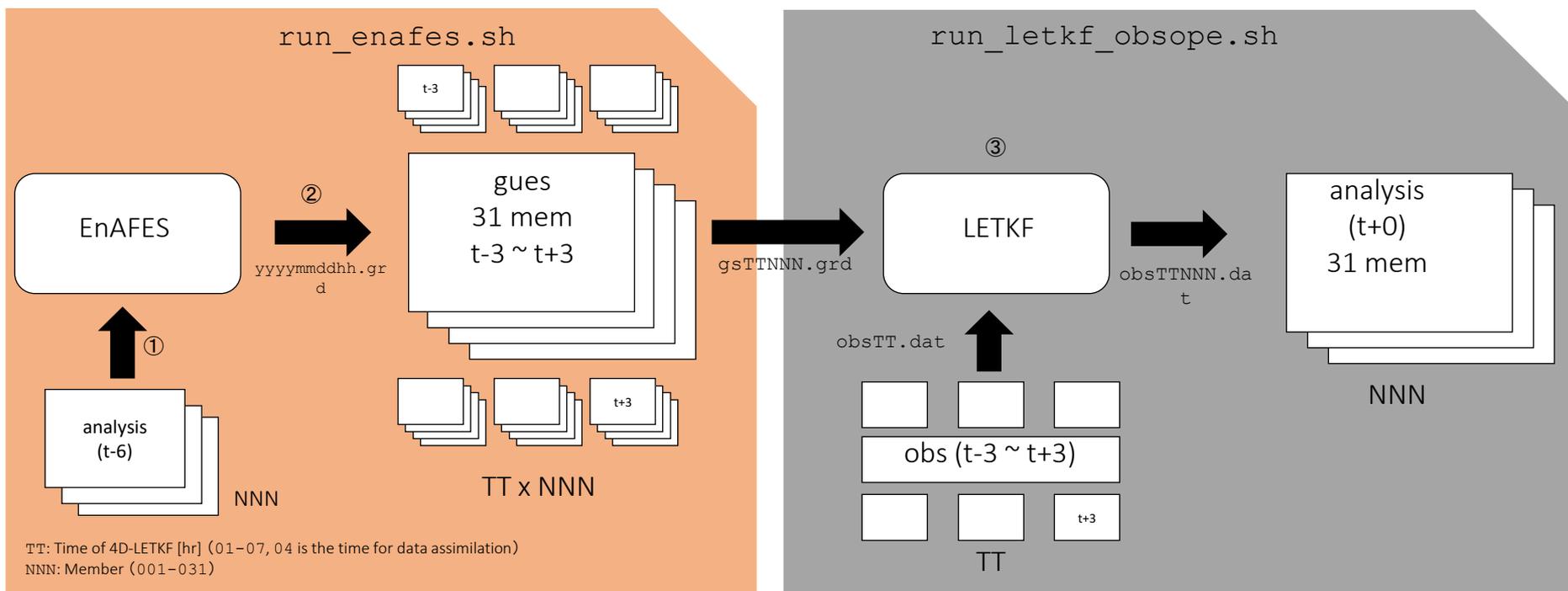
\*AFES-LETKF experimental ensemble reanalysis: 地球の再解析データ

**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

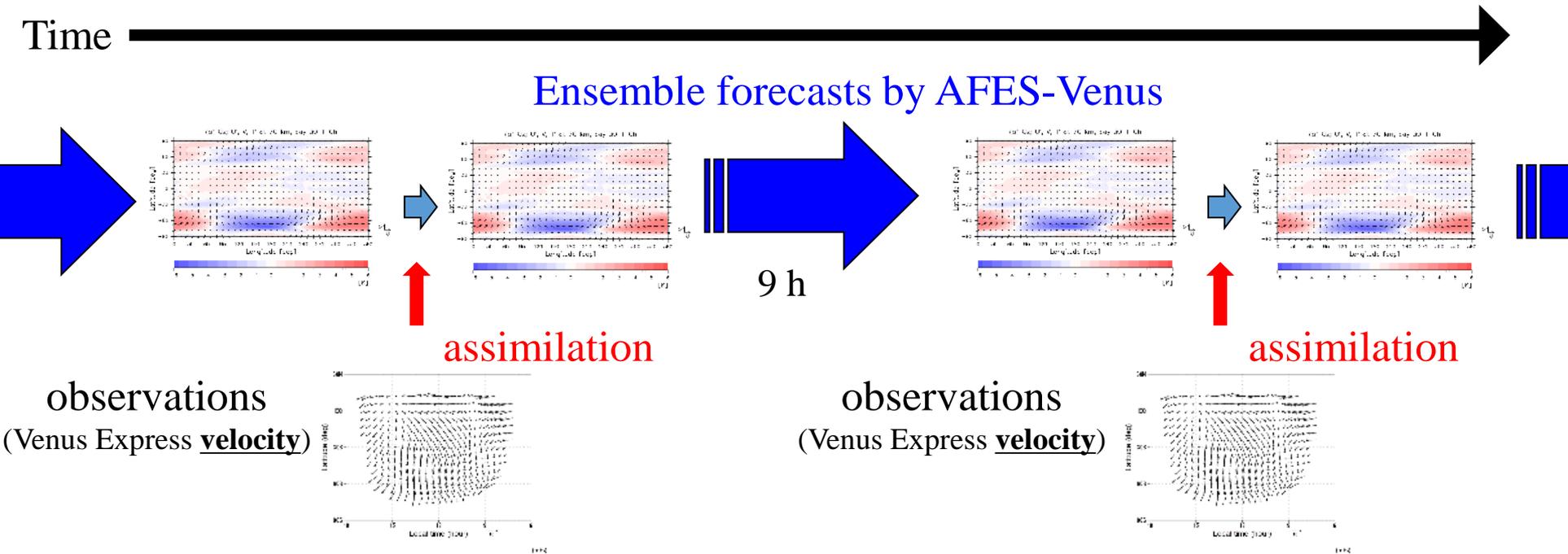
- アンサンブルメンバー: 31
- データ同化サイクル: 6h
- 局所化: 水平400 km, 鉛直lnP~0.4
- 観測誤差: 4.0 m/s
- インフレーション: 10 %



- 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 %



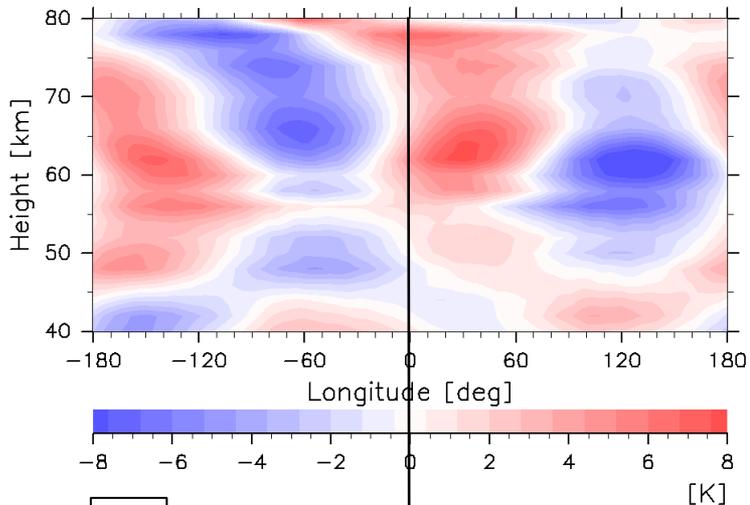
- ・ 9時間予報( $t=0$ から)して、 $t=3$ から $t=9$ を同化に使う。
- ・  $t=3$ から $t=9$ の観測を入力して同化、 $t=6$ を再解析値とする。(=4D LETKF)

# ● VEX (UVI) 風速の同化



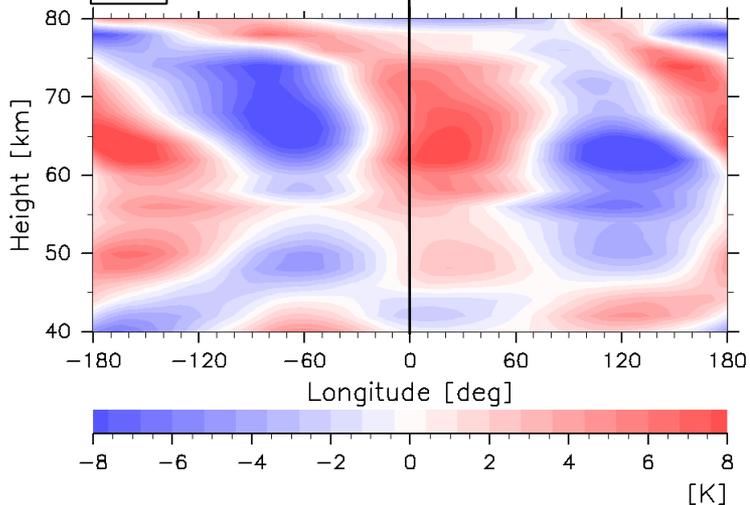
$T'$

同化なし nus;  $T'$  at Equator



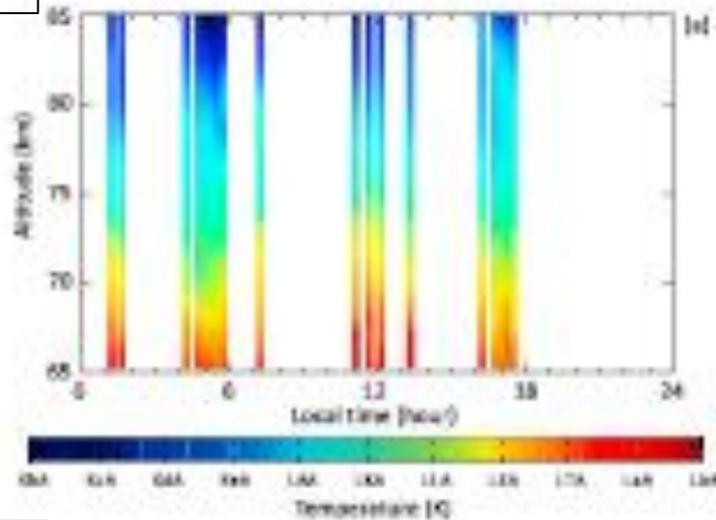
$T'$

同化あり ;  $T'$  at Equator



**熱潮汐波の位相が改善**

$T'$

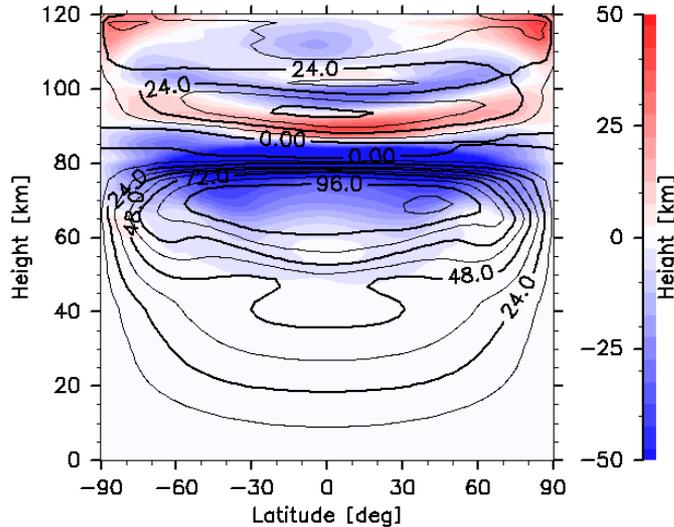


あかつきの  
電波掩蔽観測

Ando et al.  
(JGR2018)

$\bar{U}$

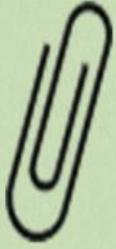
(a)  $\bar{U}$  mean & difference



CONTOUR INTERVAL = 1.200E+01

**全球の風速  
(大気大循環)  
も大きく変化**

Sugimoto et al.  
(GRL2019b)



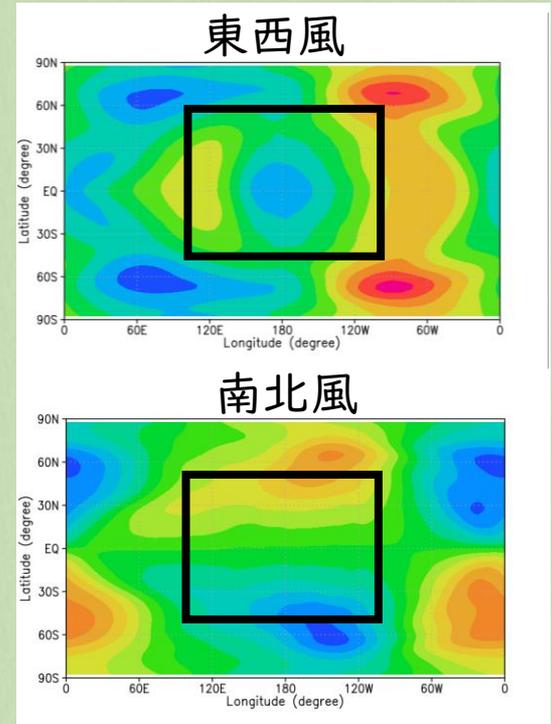
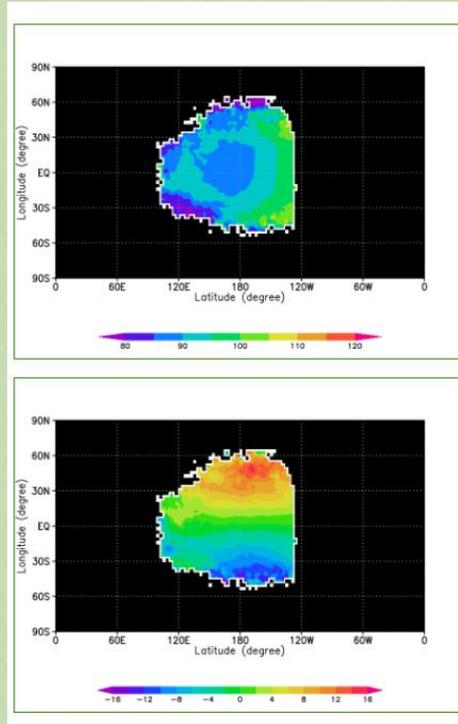
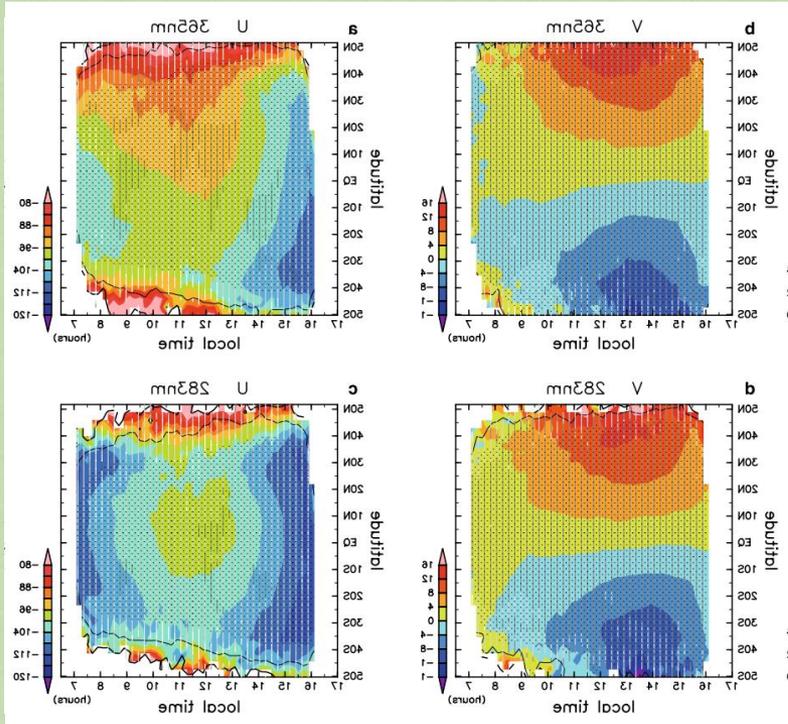
● あかつき (UVI) 風速の同化①

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

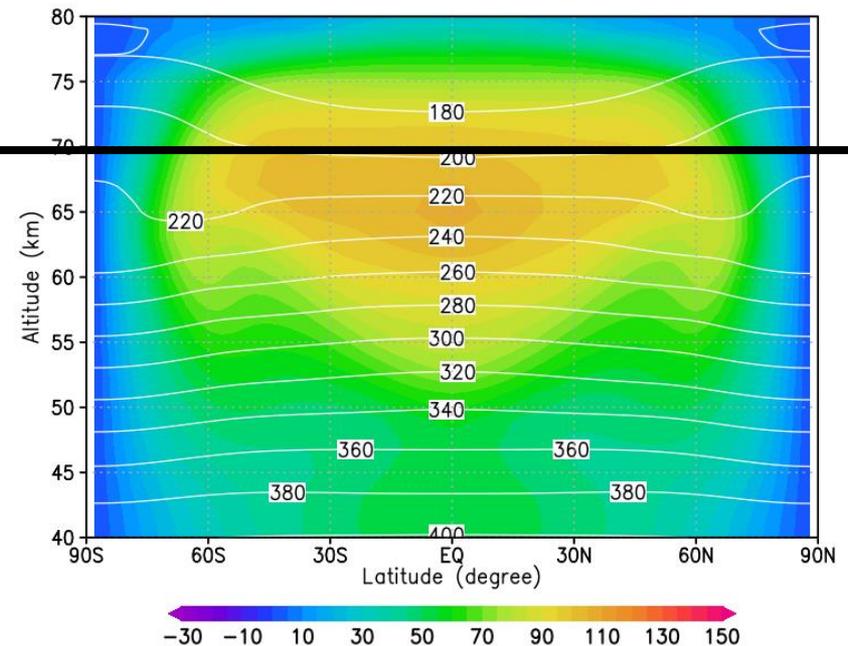
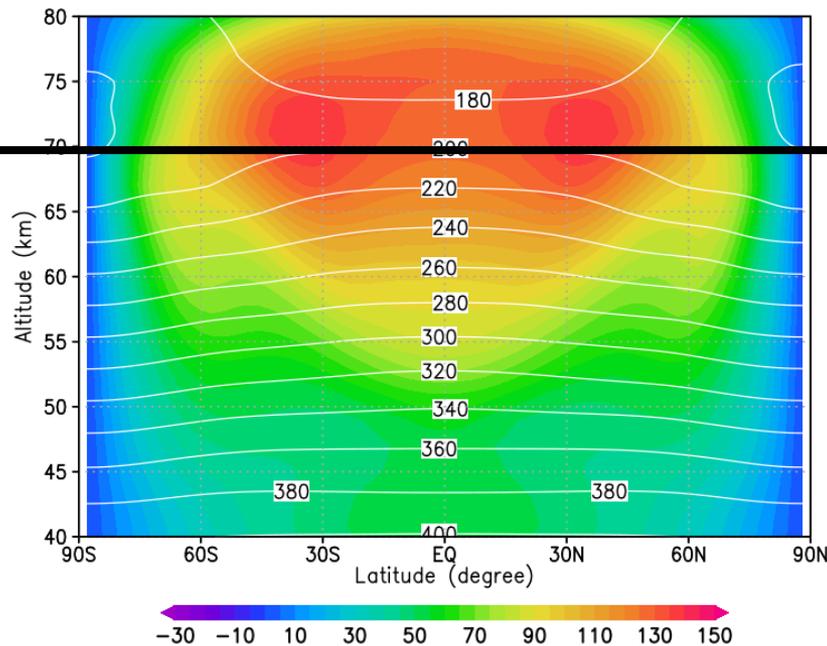
Fujisawa et al.  
(SREP2022)

● 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

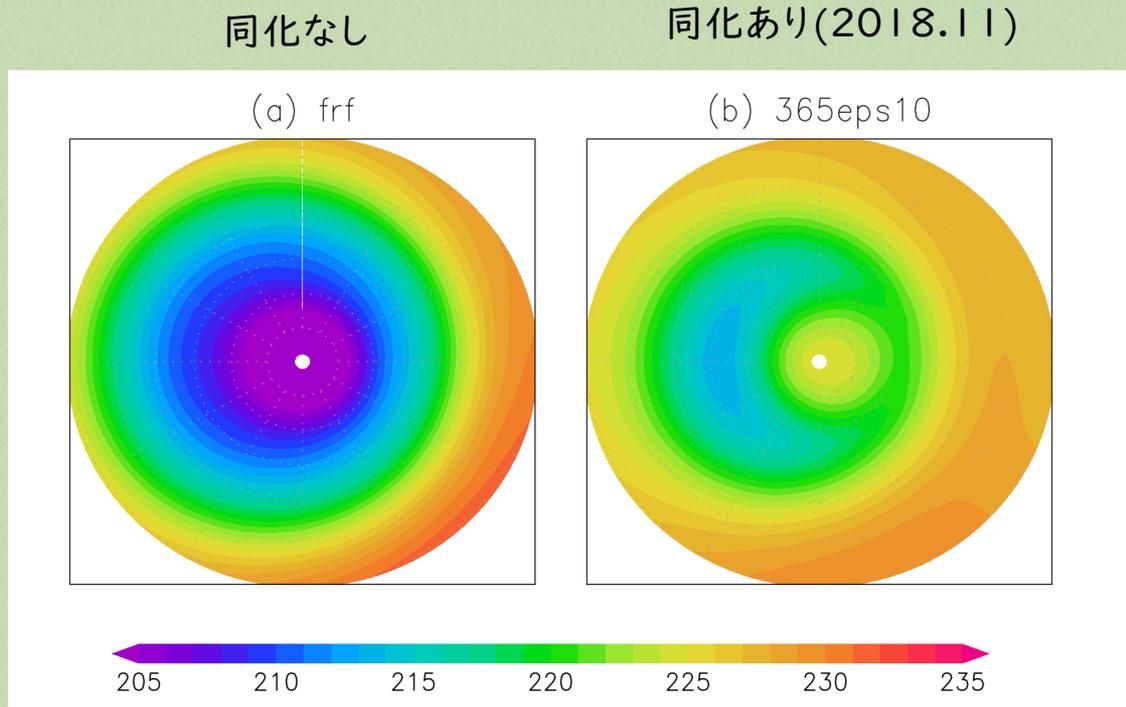
同化あり (365eps10\_201811)



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)

# 金星初の客観解析データ (2022/9/2 プレスリリース)

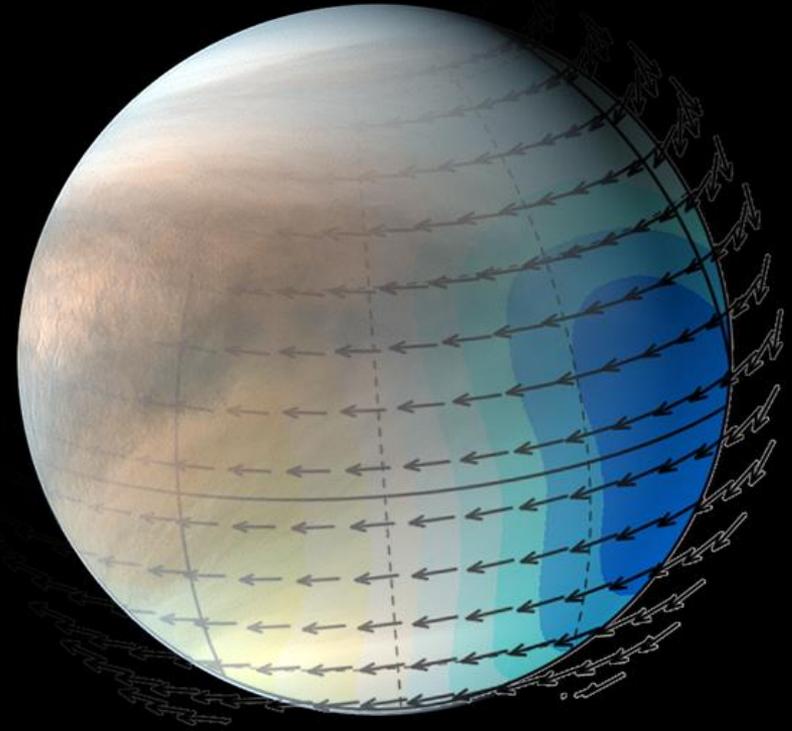
あかつき観測データ  
@ISAS/JAXA



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)

# 本研究の流れ

## 熱潮汐波の位相改善をターゲット

### ● あかつき紫外画像(UVI)風速

1. 熱潮汐波なしのテスト (*Sugimoto et al., Sci. Rep. 2017*)
2. Venus Expressデータ (*Sugimoto et al., GRL2019b*)
3. あかつきデータ(客観解析) (*Fujisawa et al., Sci. Rep.2022*)

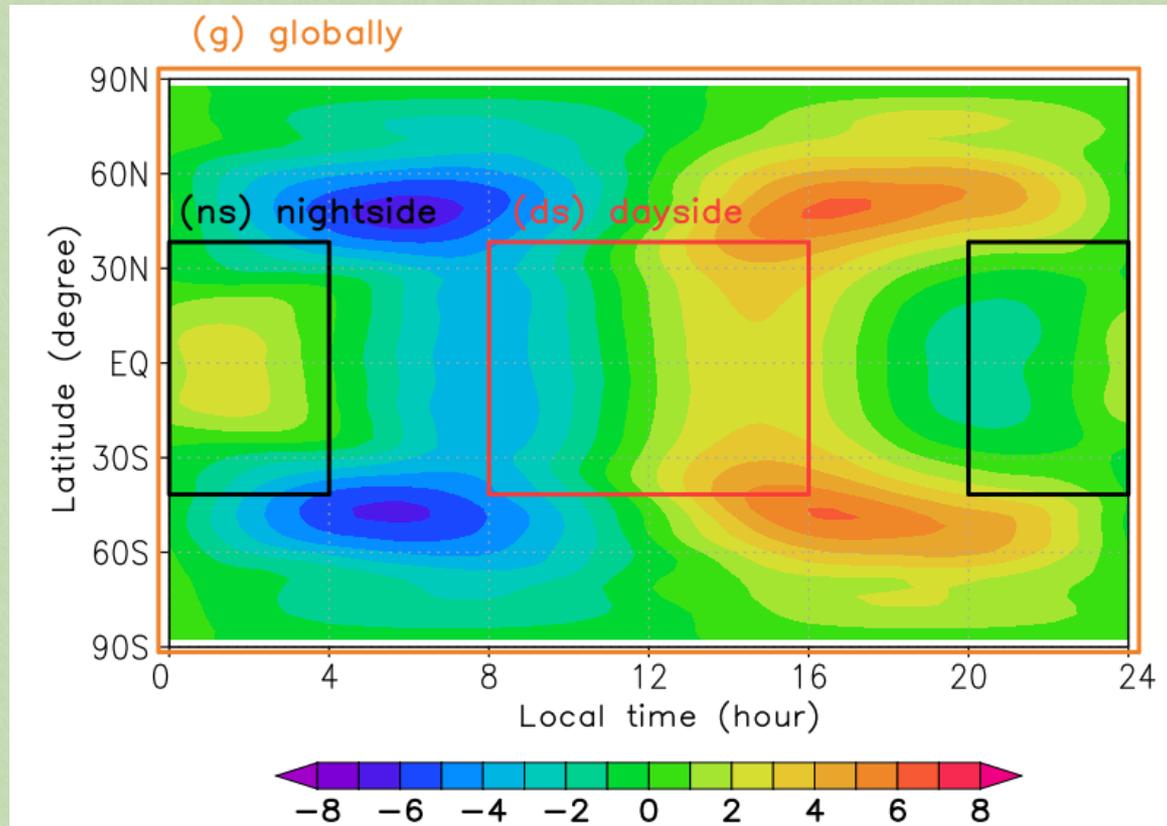
### ● あかつき中間赤外(LIR)温度

1. OSSE\* (*Sugimoto et al., GeoSci. Lett., 2022*)
2. あかつきデータ(客観解析Ver.2)

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

# 【擬似観測】 AFES-Venusの温度(@高度70 km)

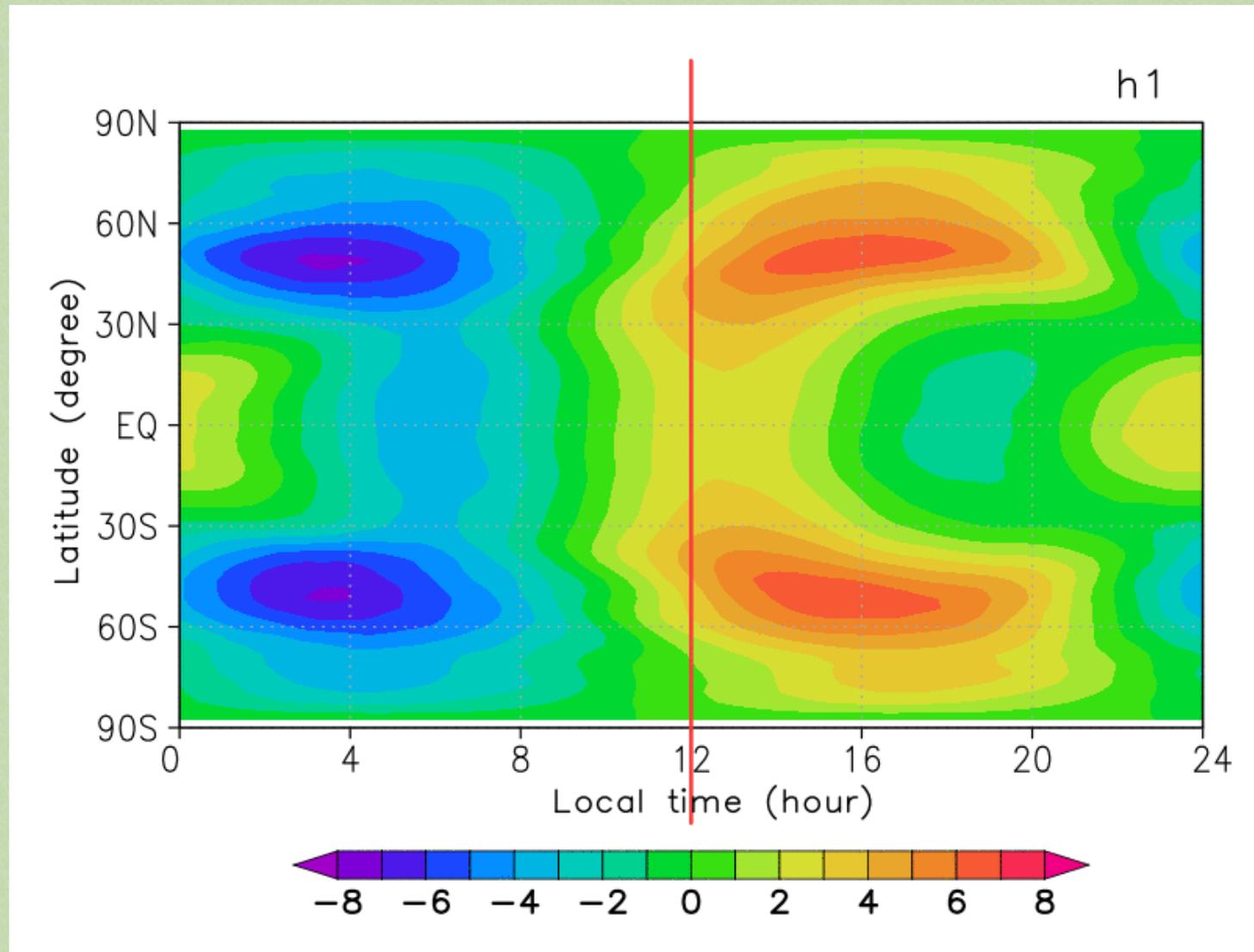
位相を30度ずらし、観測領域や頻度を変えて感度実験を行う



Frequency / Area	Hourly	2-hourly	4-hourly	6-hourly	12-hourly	24-hourly (daily)
Global	h1	h2	h4	h6	h12	h24
Dayside	h1_ds	h2_ds	h4_ds	h6_ds	h12_ds	h24_ds
Nightside	h1_ns	h2_ns	h4_ns	h6_ns	h12_ns	h24_ns

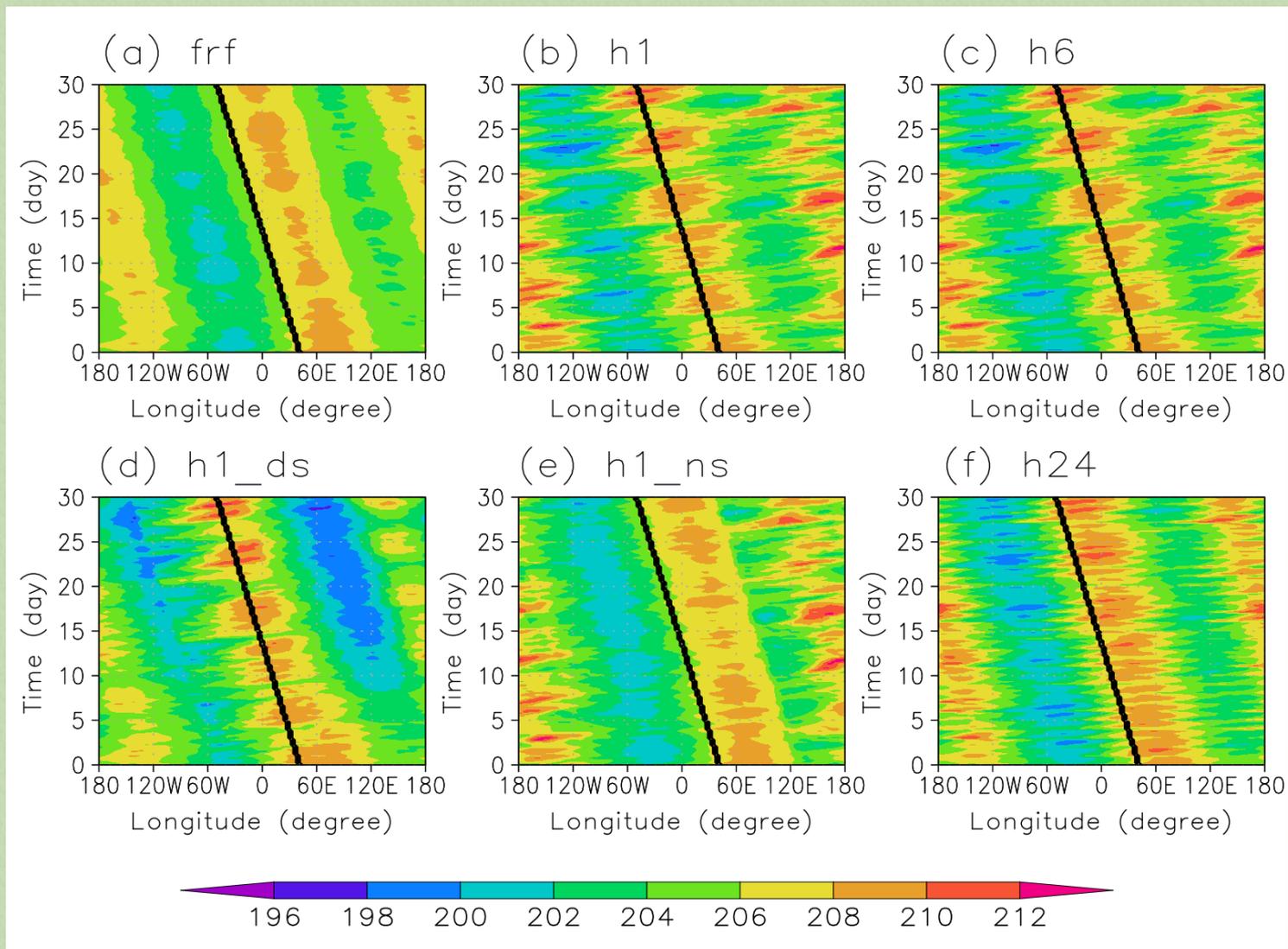
# 高度70 kmの温度の水平(ローカルタイム緯度)断面

6hごとに観測があれば位相が十分に改善される



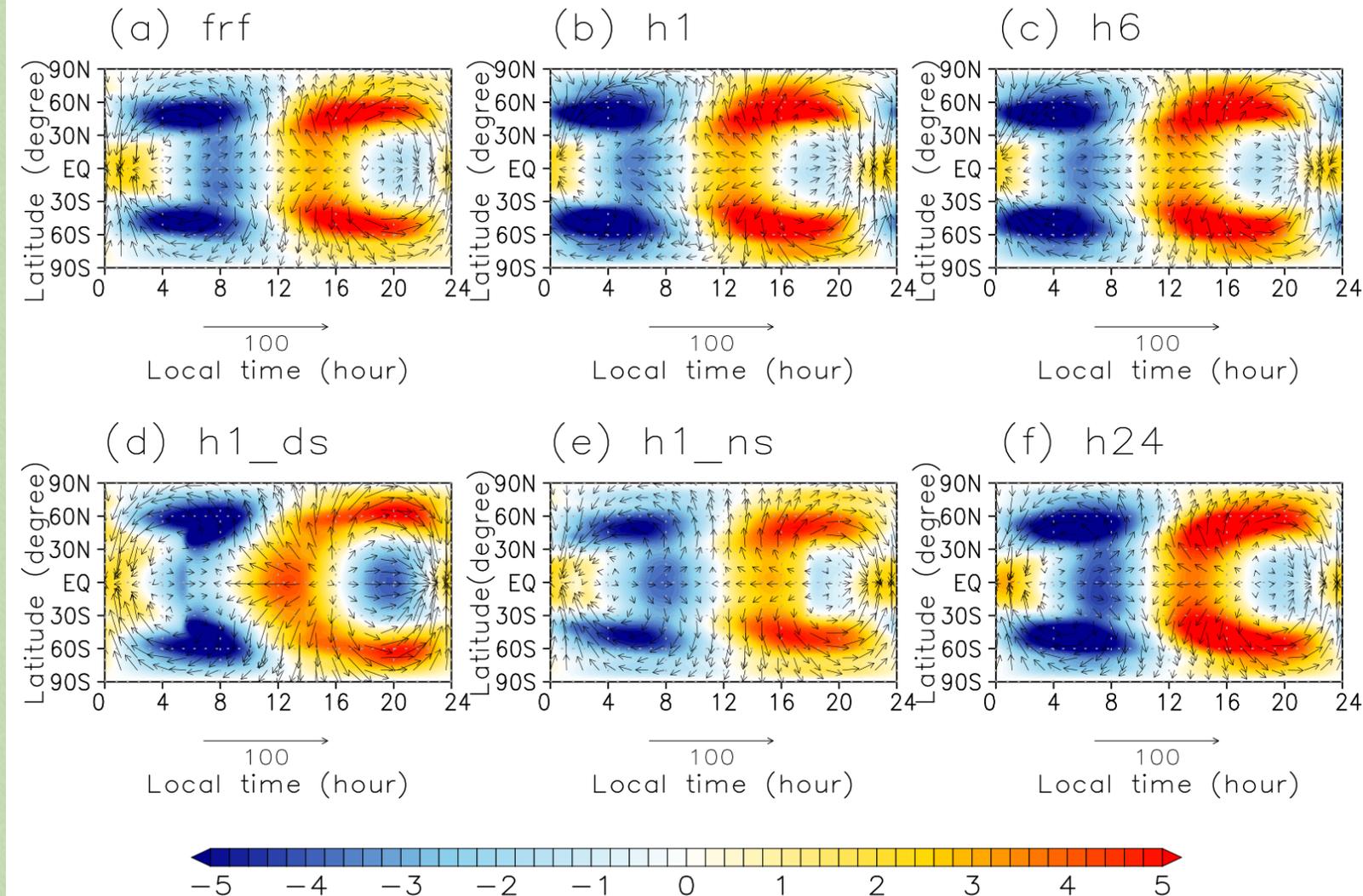
# 高度70 kmの温度の経度時間断面 (ホフメラー図)

観測のある領域で位相が改善 (ある程度の頻度は必要)



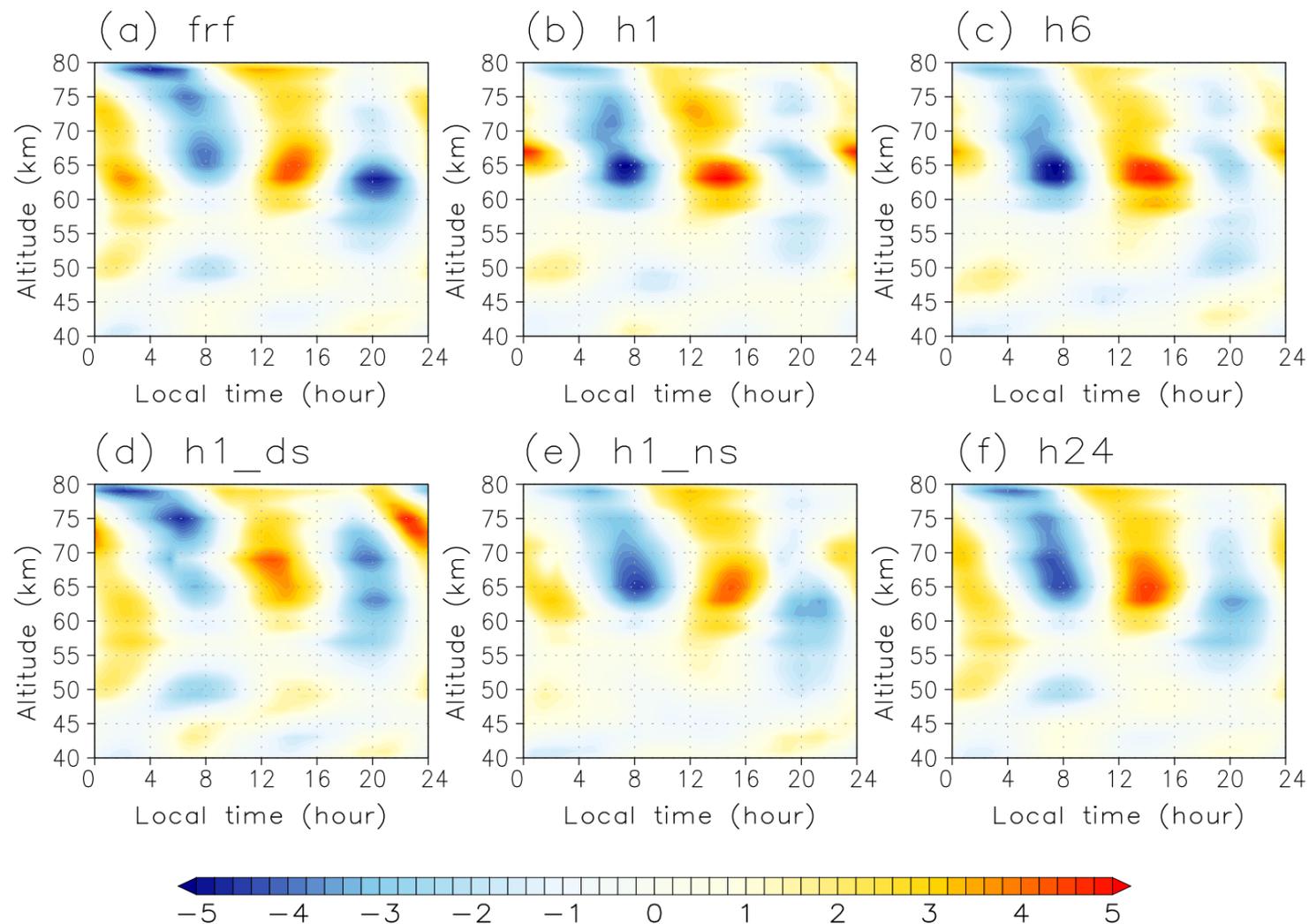
# 高度70 kmの水平風速(矢印)と温度(色)のコンポジット

6時間ごとや昼面のみでも改善可能(風速も修正される)



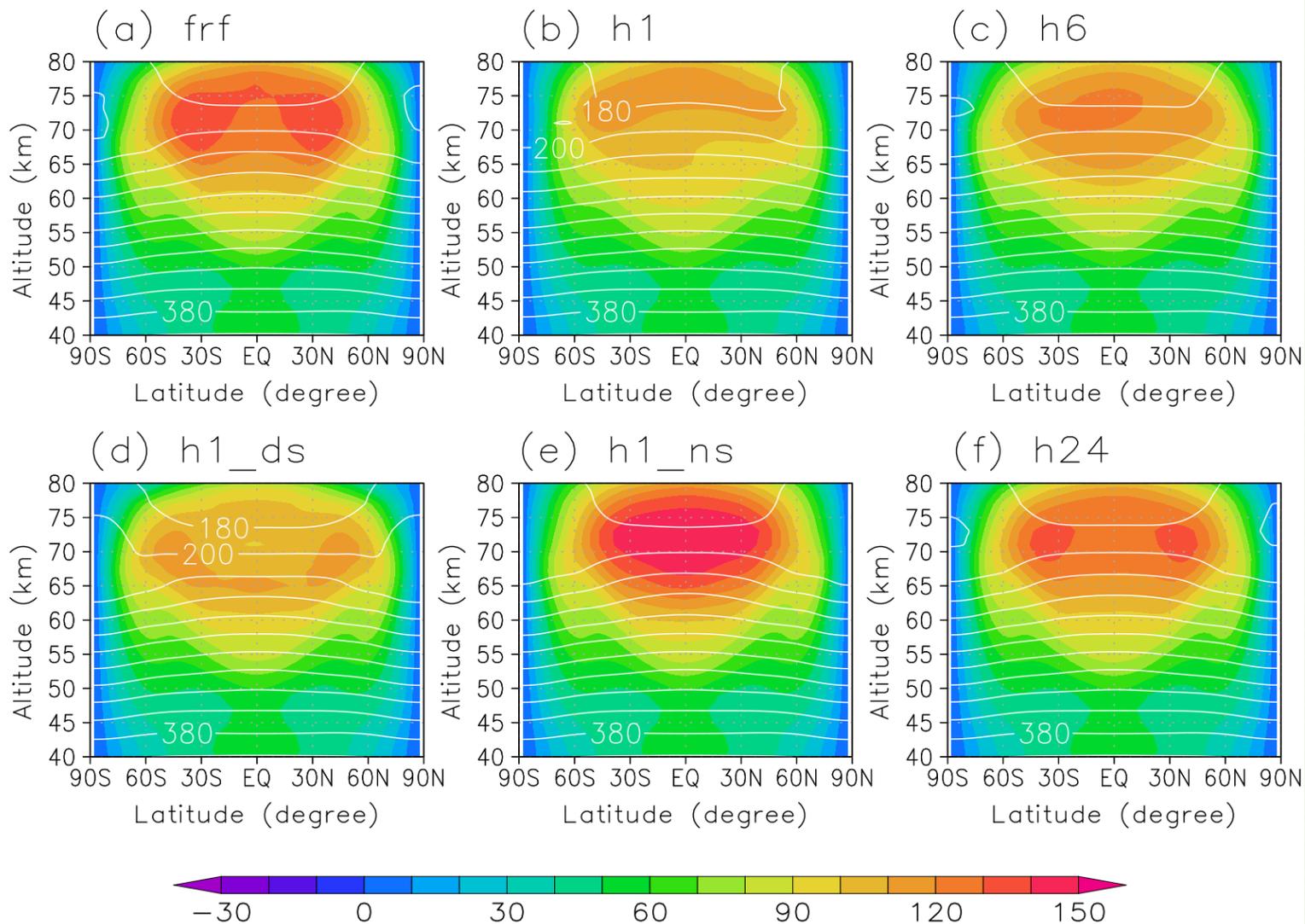
# 温度偏差のローカルタイム高度断面@赤道

上空の位相(伝播特性)も修正されている



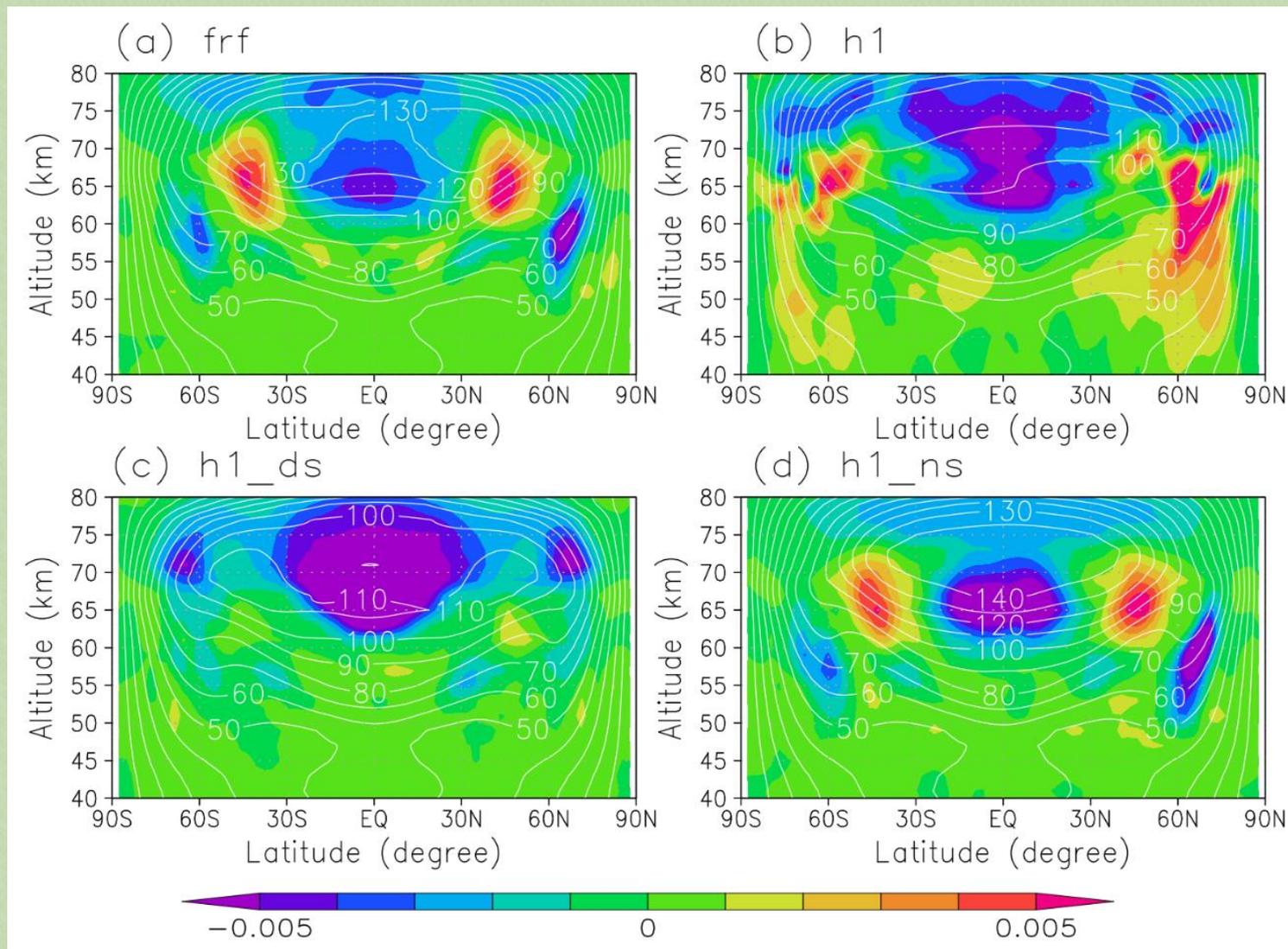
# 带状平均東西風の緯度高度断面

温度場のみ同化でも風速が全球的に変化している



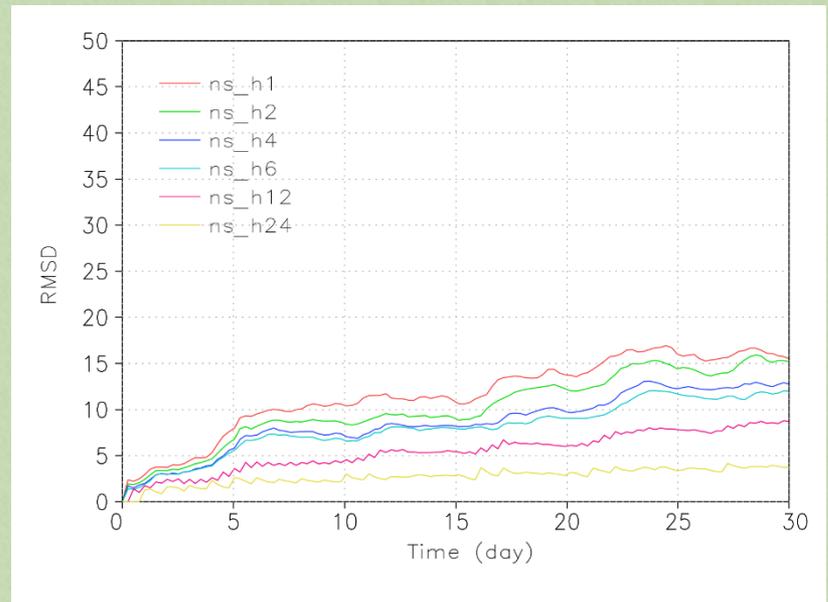
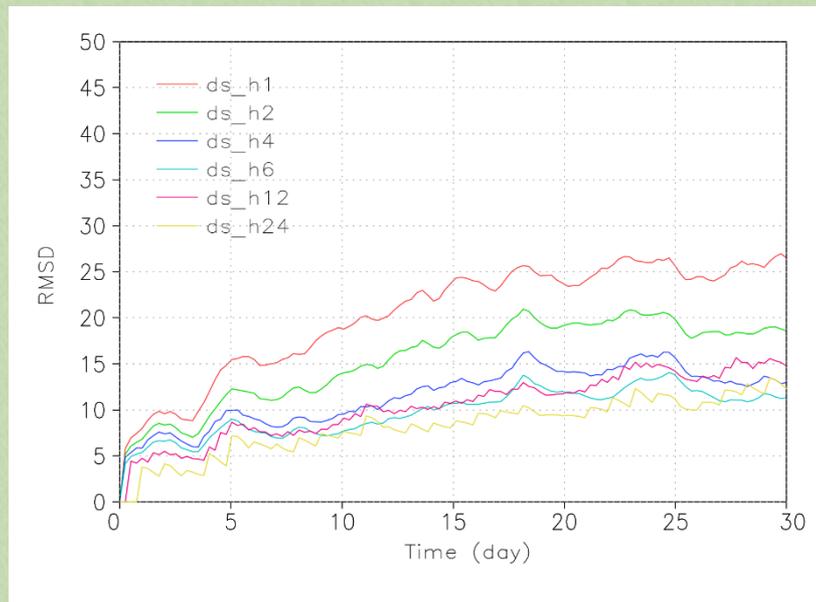
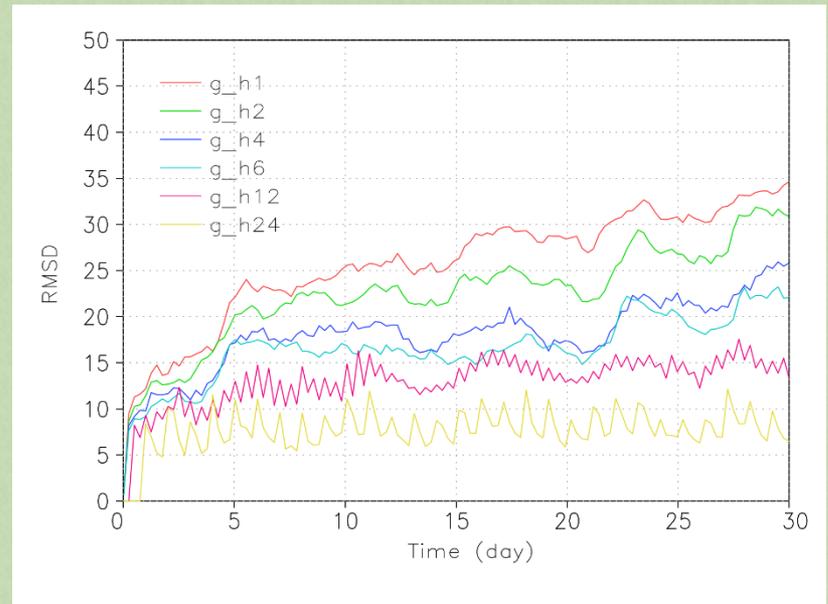
# 鉛直運動量フラックスの緯度高度断面

## 熱潮汐波の運動量フラックスの変化

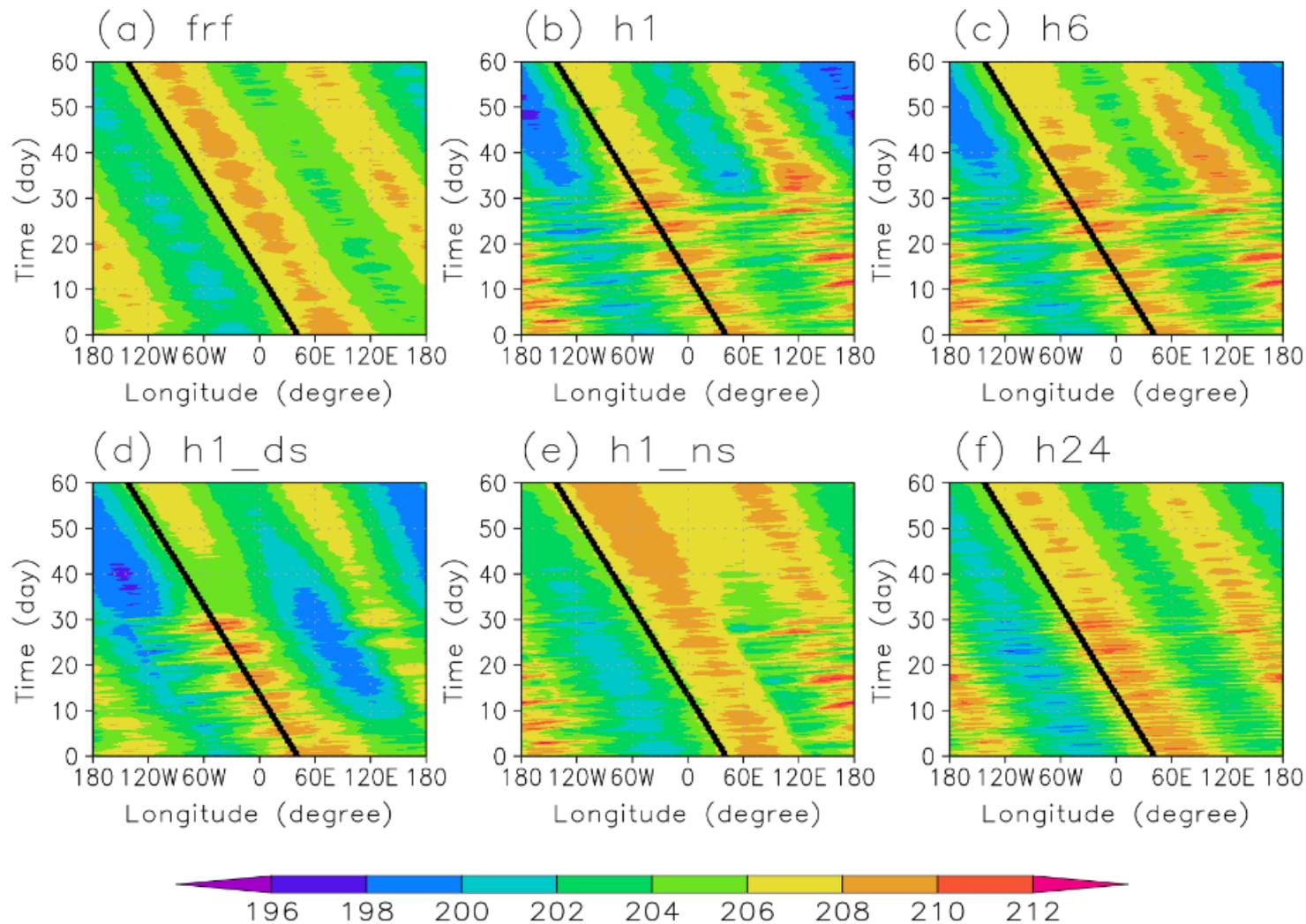


# RMSD(Frfからの差)の時間変化

- ✓高頻度の方が大
- ✓全球 > 昼面 > 夜面

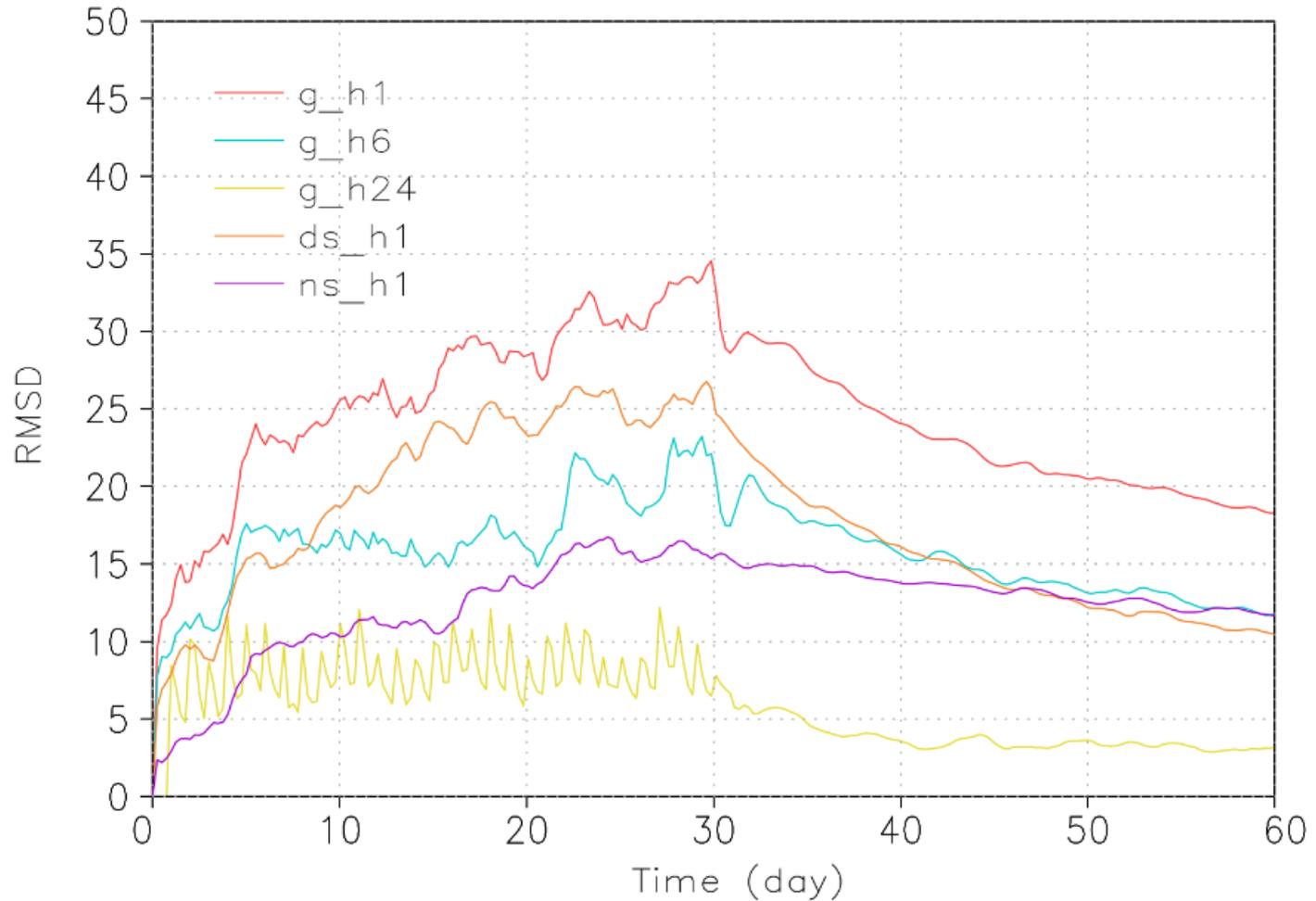


# 同化オフ実験(30日以降は同化なし)のホフメラー ～10日程度は位相の改善が維持されている



# 同化オフ実験(30日以降は同化なし)のRMSD

一か月後でも修正は維持されている



# まとめ

## 金星大気データ同化システム(ALEDAS-V) の研究成果を紹介した

特に熱潮汐波の位相改善をターゲットとして、あかつき中間赤外(LIR)温度の観測システムシミュレーション実験(OSSE)を行った。

- ✓ 温度の同化でも風速を含めて位相は改善。
- ✓ 位相改善を通して、全球的な風速場も修正可能。
- ✓ 昼面、6時間ごと、赤道周辺の現実的な観測でも改善が期待。
- ✓ 修正は観測がなくてもある程度は維持される。

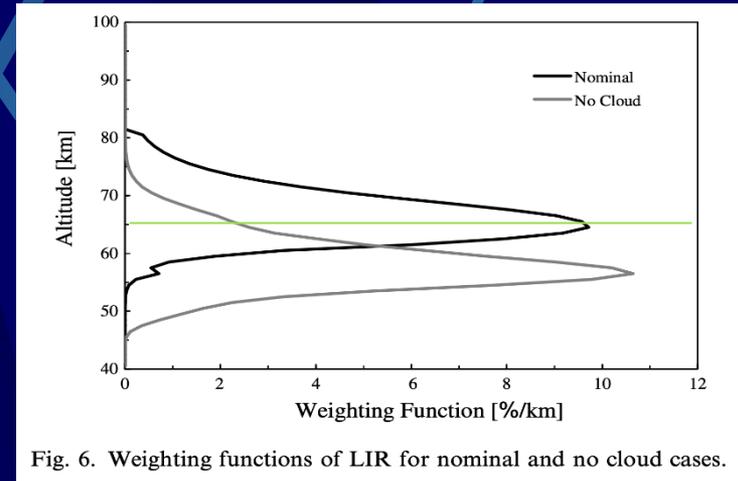
LIR温度同化の有効性が確認  
⇒ あかつきデータ(客観解析Ver.2)へ

# Venus first analysis

- We plan to release the analysis on the web soon.
  - Data format: NetCDF
  - Assimilation periods:
    - epoch1: 201612 – 201701
    - epoch2: 201707 – 201709
    - epoch3: 201802 – 201804
    - epoch4: 201809 – 201811

- Towards the Ver.2 product

- Technical improvements in data assimilation
- Assimilation of UVI(283nm) and/or LIR
- Revisiting the assimilation period (Periods suitable for analysis of short-period disturbances, etc.)



Taguchi et al. (2007)

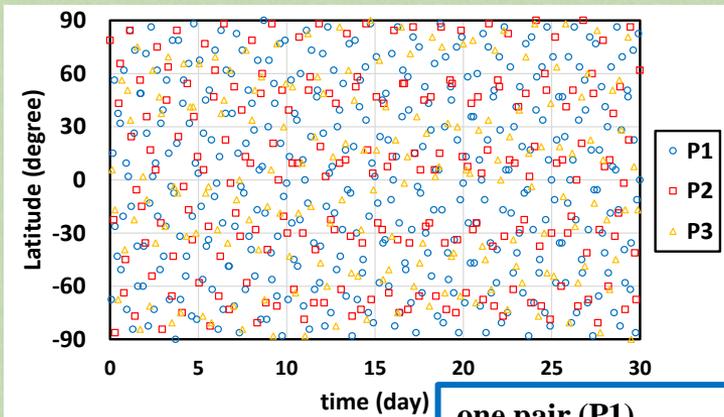
**It would be possible to assimilate other obs. directly, such as cloud opacity and radiance, by improvement of physical processes of AVES-Venus...**

# 衛星間電波掩蔽観測のOSSE\*①

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

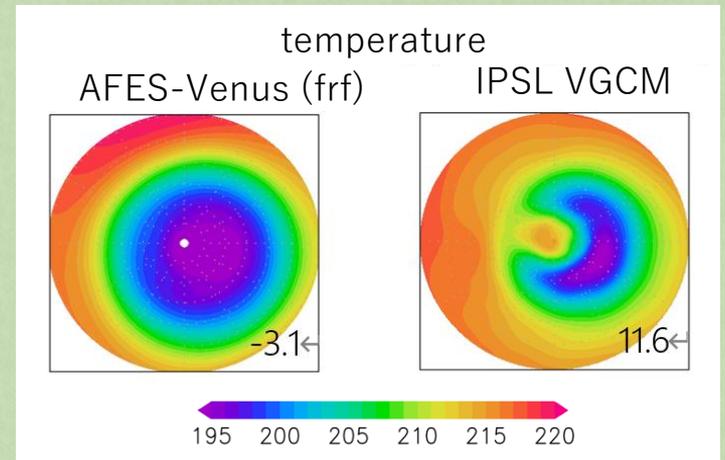
固定点での結果(Sugimoto et al., JSCE2019)を実軌道に拡張

① 【擬似観測】 IPSL Venus GCMの**温度**, 【実軌道】 Chi AO(NASA)

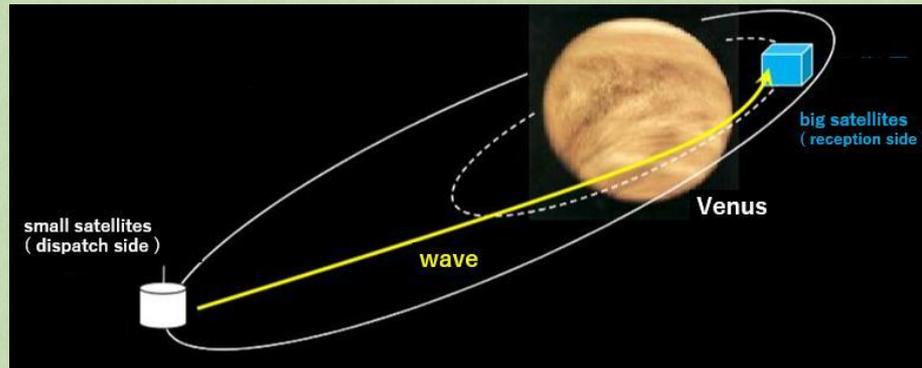


◆ observational points

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

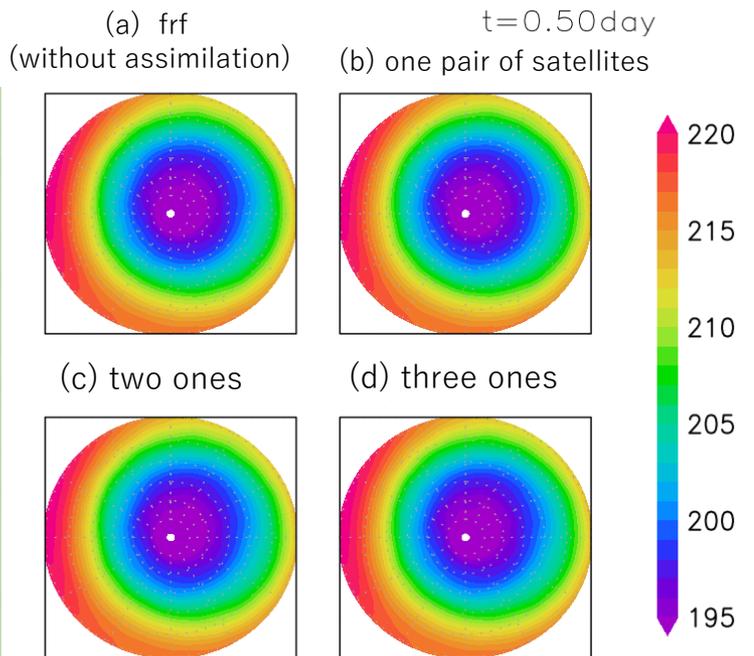


◆ model and observation (al. 67km, NH)

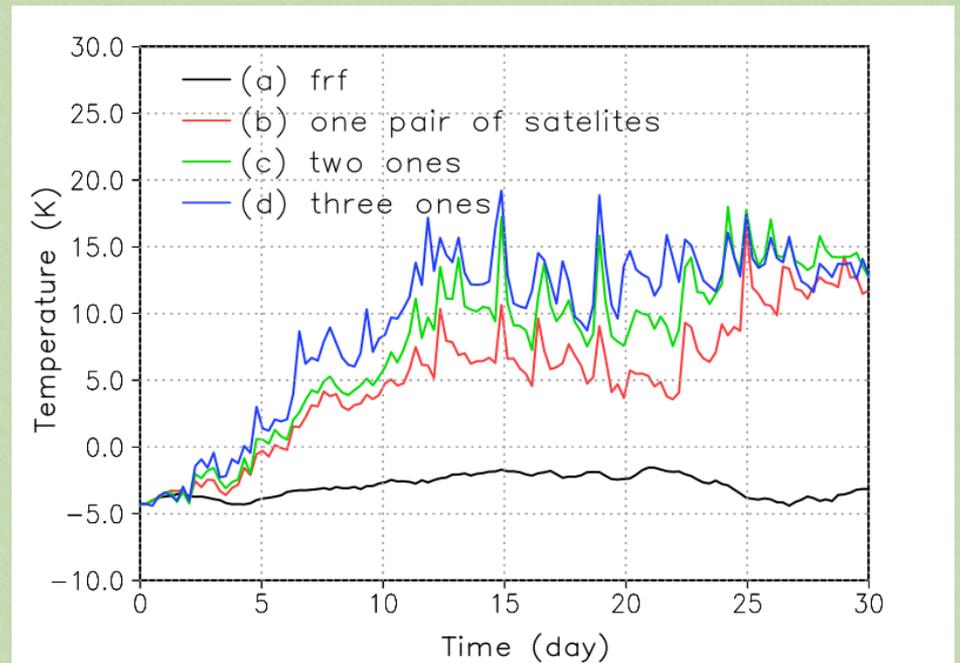


# 衛星間電波掩蔽観測のOSSE②

① 【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

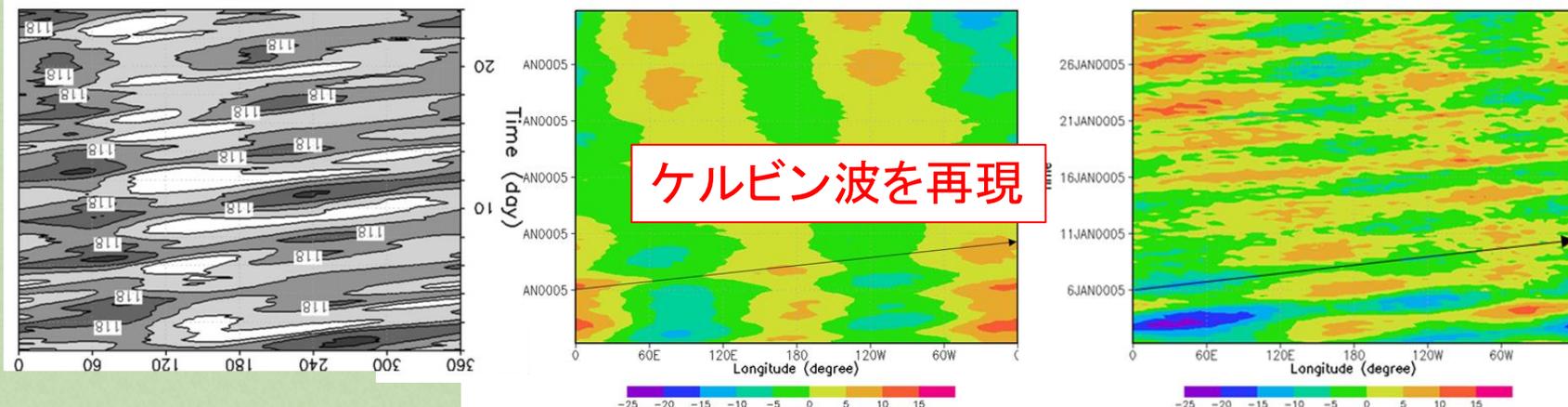
1ペア(2機)でも再現可能

Fujisawa et al. (Icarus, revision)

# 紫外カメラ観測(UVI風速)のOSSE

② 【擬似観測】 CCSR/VGCMの**風速**(九大・山本) 基本場風速がかい離

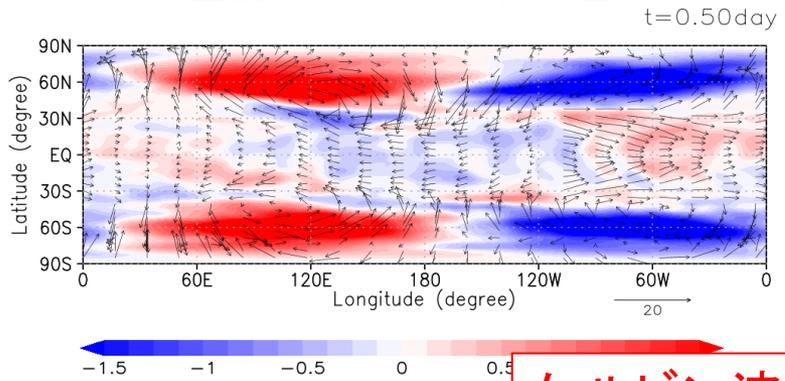
東西風の赤道上経度時間断面 Sugimoto et al., (Atmosphere2021)



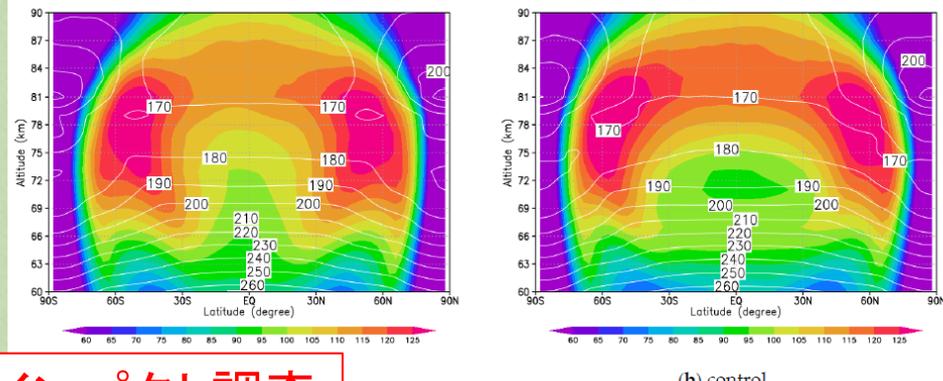
ロスビー波の再現に向けたOSSEも実施中 (Komori et al., in preparation)

③ 【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)



平均東西風の緯度高度断面



ケルビン波のインパクト調査

Sugimoto et al., (Atmosphere2022)

# OSSEシリーズ

## ● 衛星間電波掩蔽(RO)温度

1. コールドカラー、固定点 (*Sugimoto et al., JSCE 2019*)
2. コールドカラー、実軌道 (*Fujisawa et al., Icarus, under revision*)
3. 熱潮汐波、全球温度場、安定度...

## ● あかつき紫外画像(UVI)風速

1. ケルビン波の再現 (*Sugimoto et al., Atmosphere, 2021*)
2. ケルビン波のインパクト (*Sugimoto et al., Atmosphere, 2022*)
3. ロスビー波の再現とインパクト (*Komori et al., in prep.*)

将来の金星探査ミッションの立案や観測ターゲットの選定に有効

## 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
- 紫外(UVI)のOSSE
- 中間赤外(LIR)のOSSE

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。

# 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 ( $\Delta x$  &  $\Delta y \sim 300$  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)
- ✓ 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

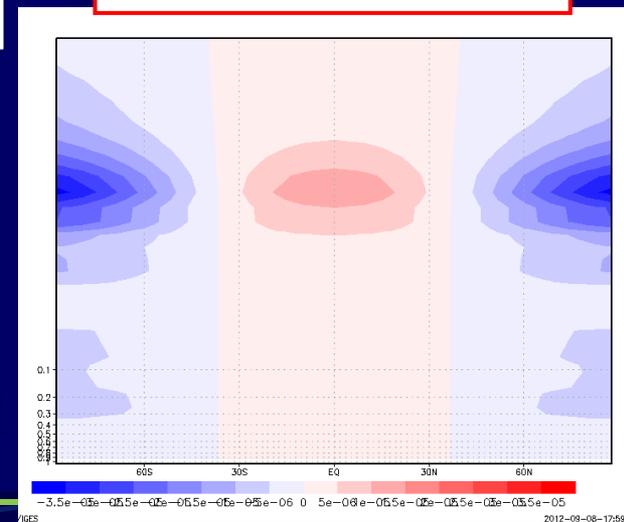
- ✓ 現実的な加熱; 熱潮汐波のon/off 実験が可能
- ✓ Tomasko et al. (1980)とCrisp (1986)に基づく

## ● 赤外放射過程

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

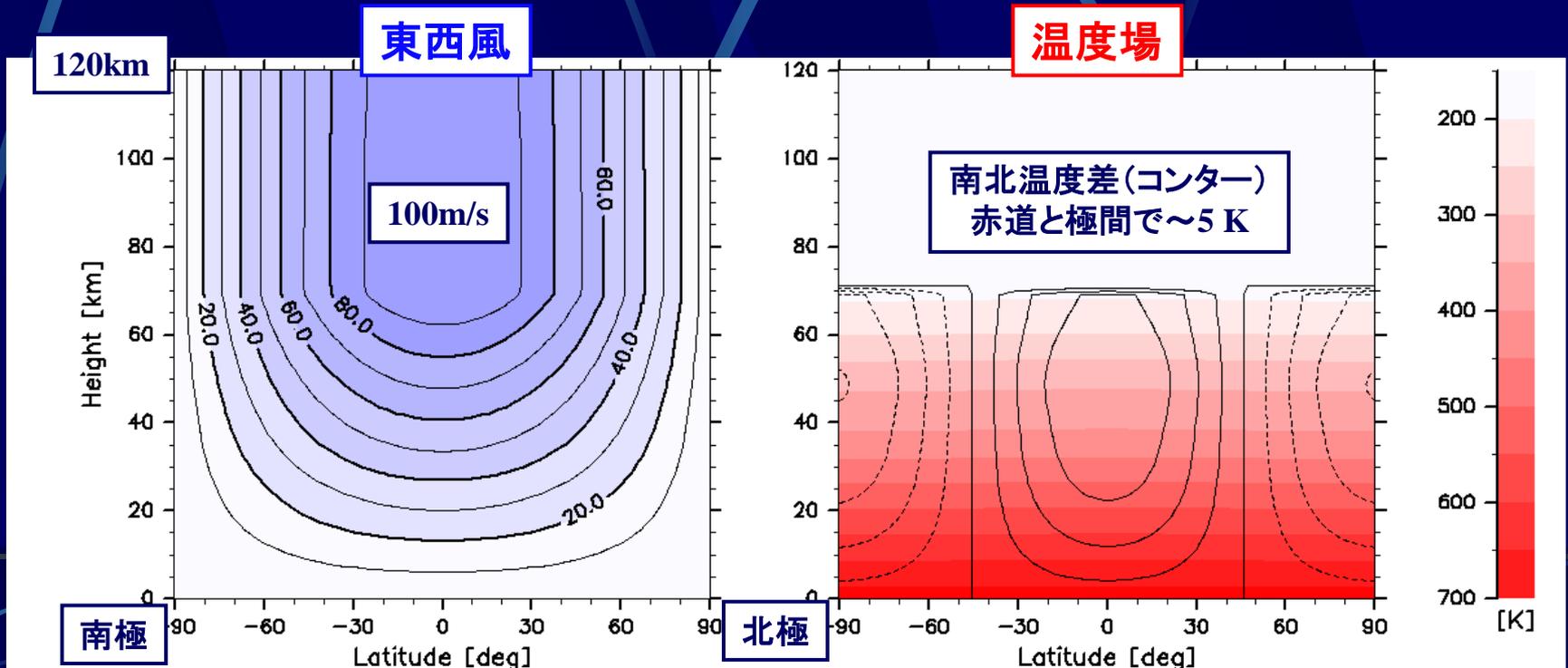
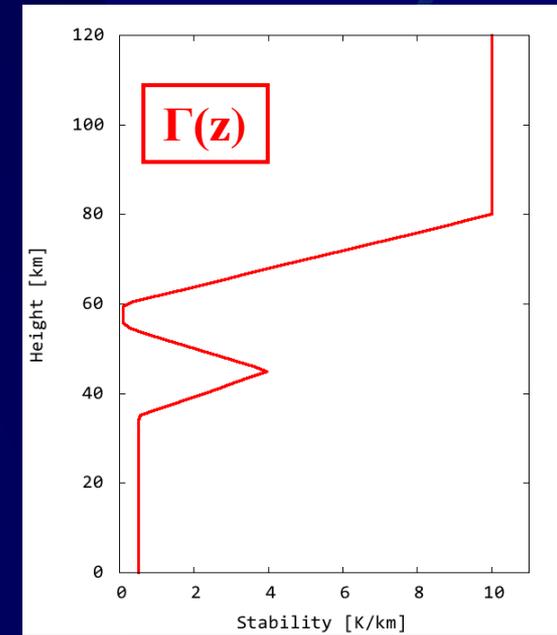
# ● 初期条件:

## 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)

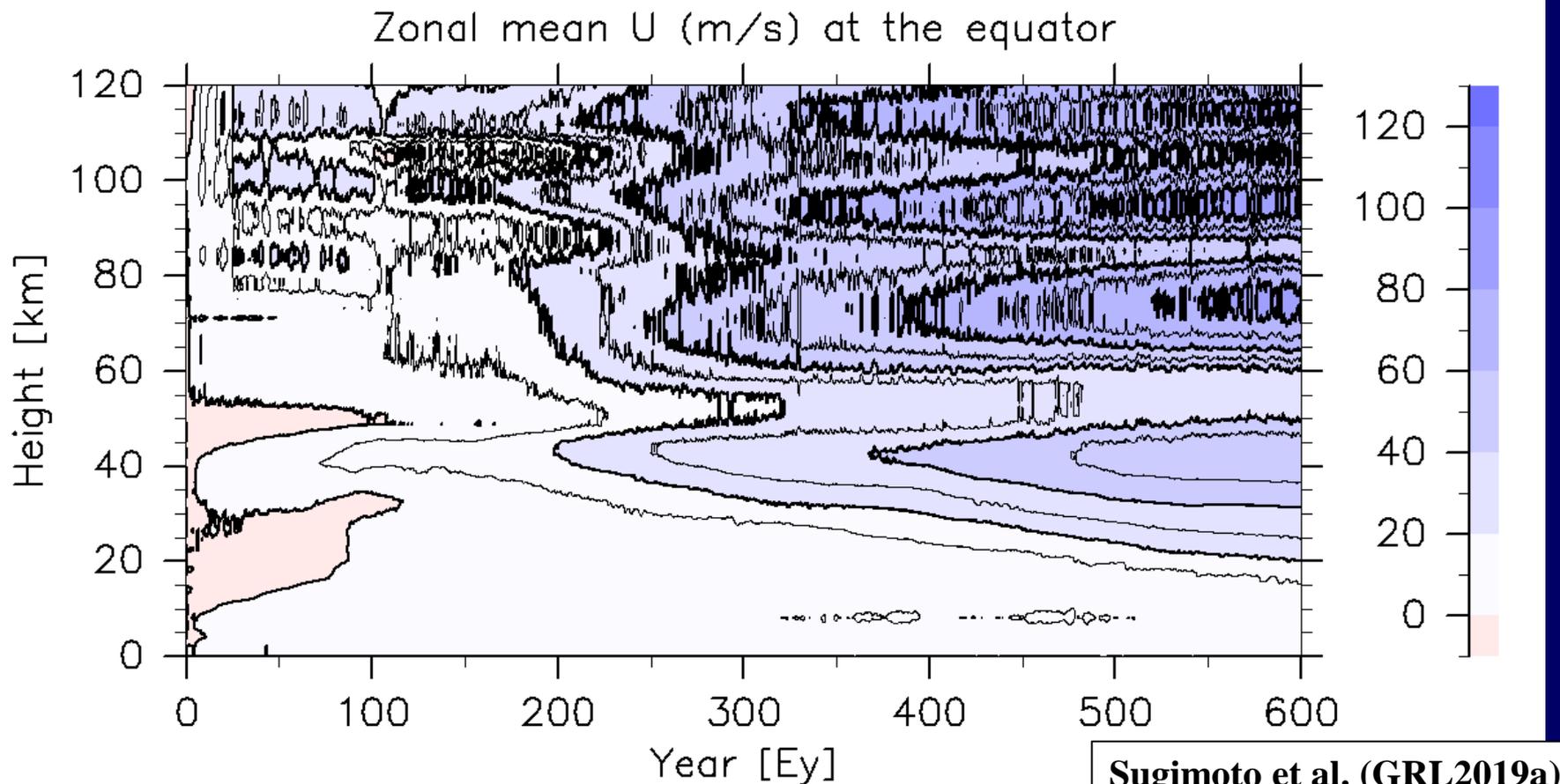
## ② スーパーローテーション(剛体回転)

- 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

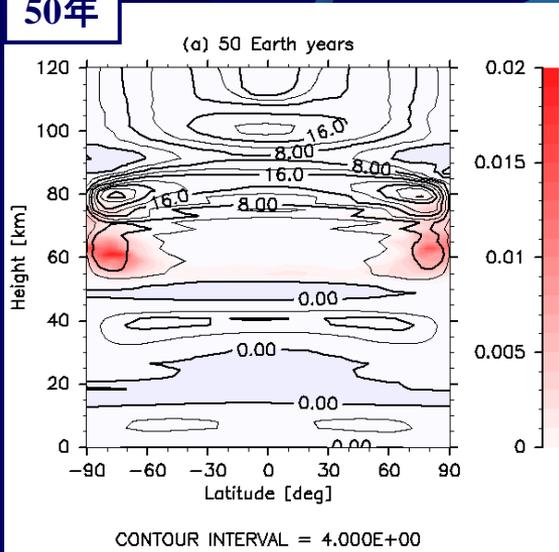


鉛直渦粘性が小さい計算では、子午面循環メカニズムのみでスーパーローテーションが再現した

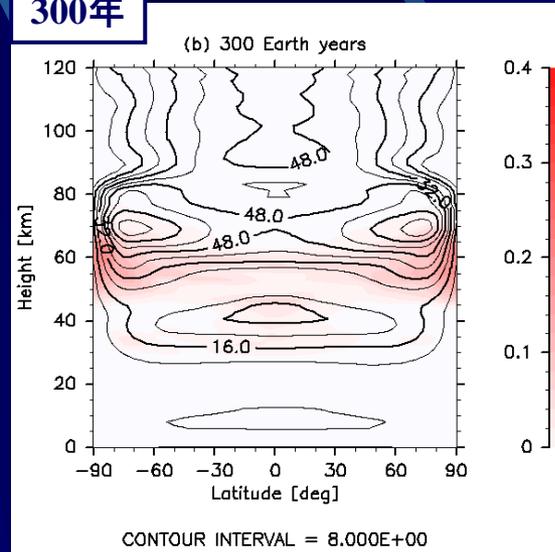
# ● 静止状態からのスーパーローテーション再現② (T42L60 run)

✓ 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



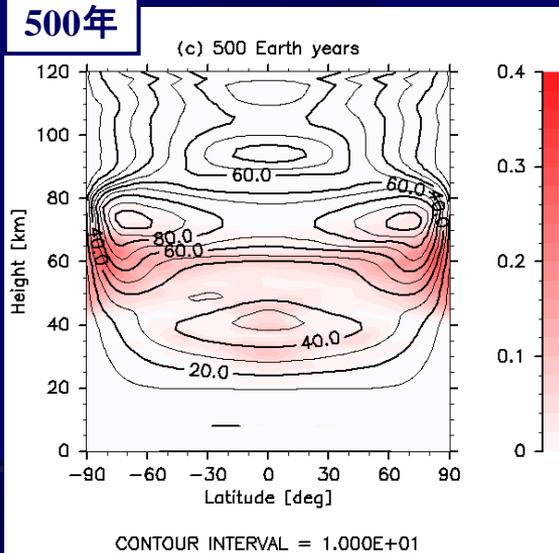
300年



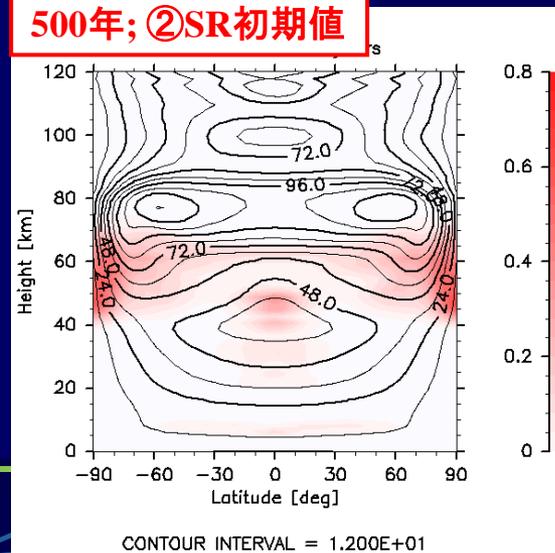
風速(コンター)

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 m<sup>2</sup>/s以下で高速SR  
0.025 m<sup>2</sup>/s以上で弱いSR

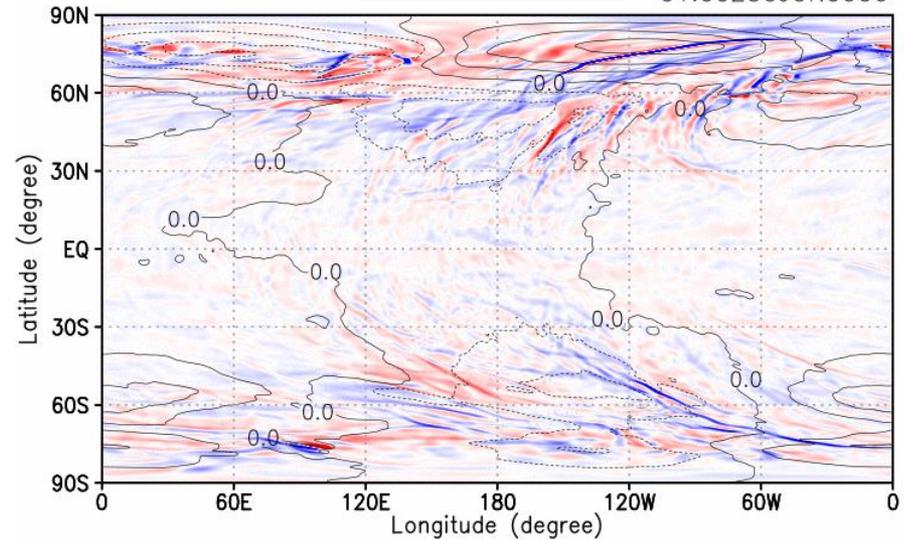
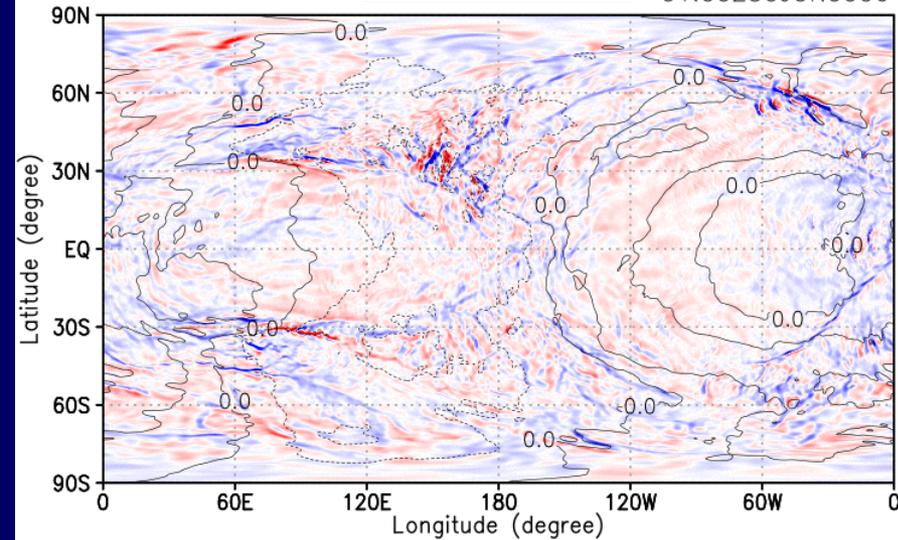
# 金星大気中での自発的な重力波放射① (T639L260 run)

## ✓ 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



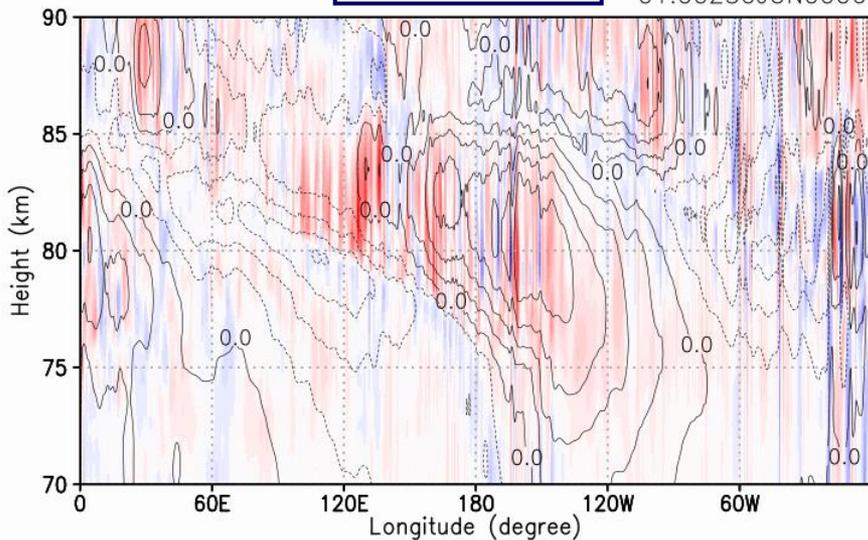
Sugimoto et al. (Nature Com. 2021)

# 金星大気中での自発的な重力波放射② (T639L260 run)

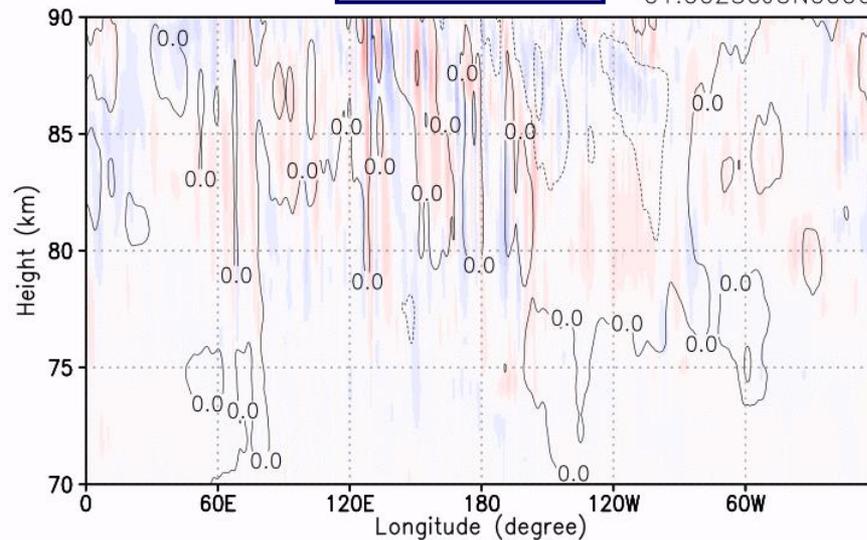
## ✓ 赤道での鉛直断面

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

(S3) No **熱潮汐波あり** Equator  
01:00Z30JUN0006



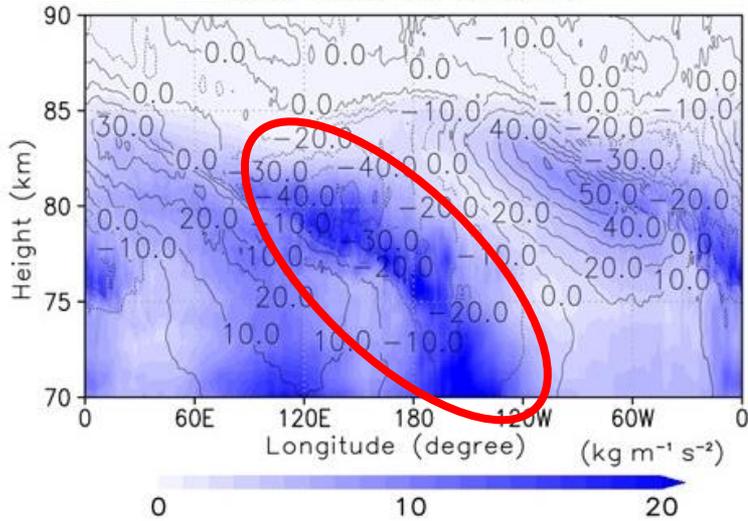
(S4) **熱潮汐波なし** Equator  
01:00Z30JUN0006



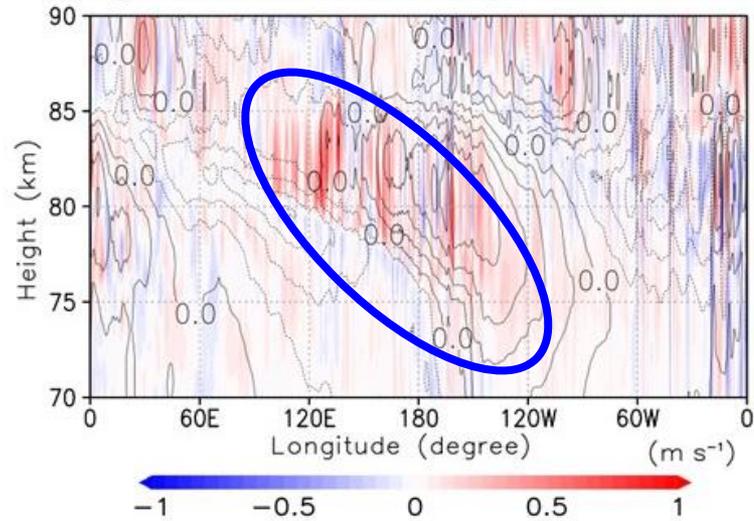
# 地球のジェット出口での自発的放射と同様なメカニズム

赤道での断面

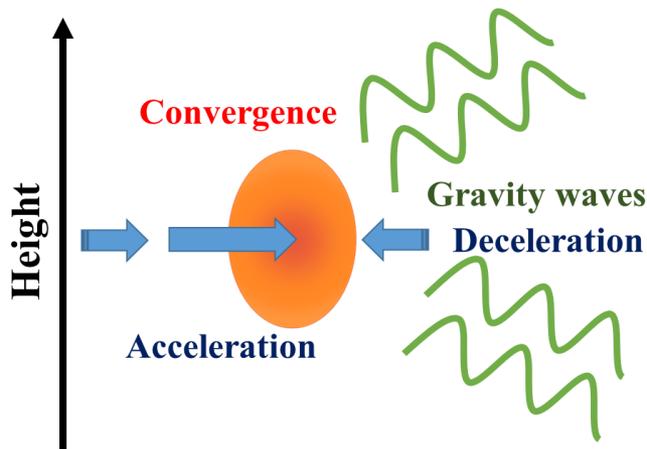
zonal flow (contour, m/s)



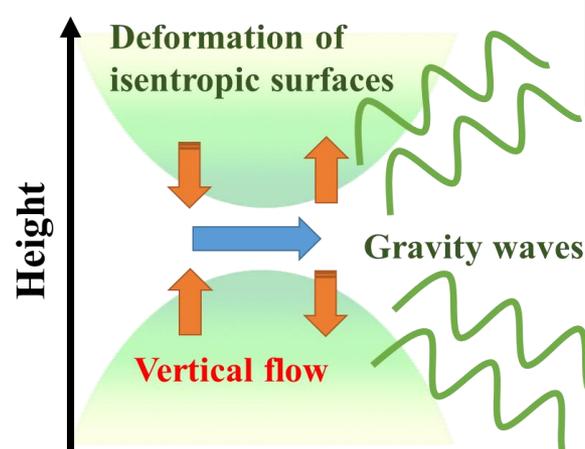
Geopotential (contours; 1000 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>)



## ① Velocity-variation mechanism



## ② Mountain-wave-like mechanism



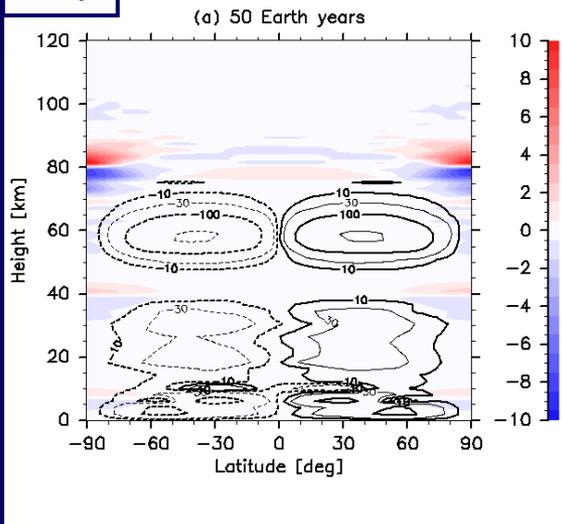
Plougonven & Zhang (14)  
Yasuda et al. (15)

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

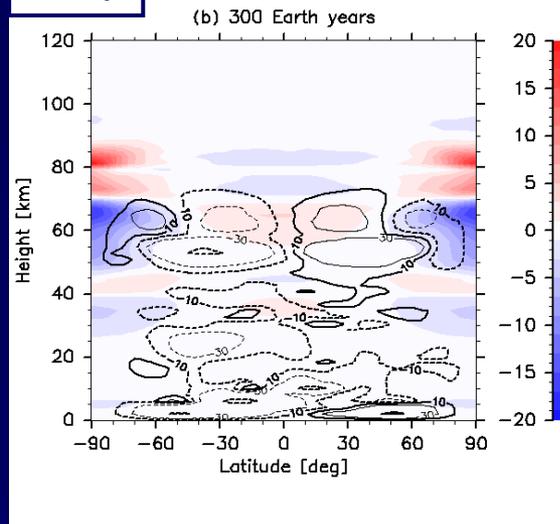
# ● 子午面循環の時間発展 緯度高度断面

✓ 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

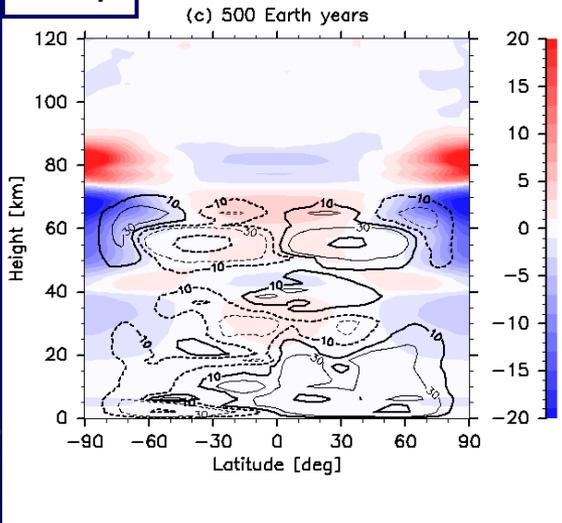


子午面循環(コンター)

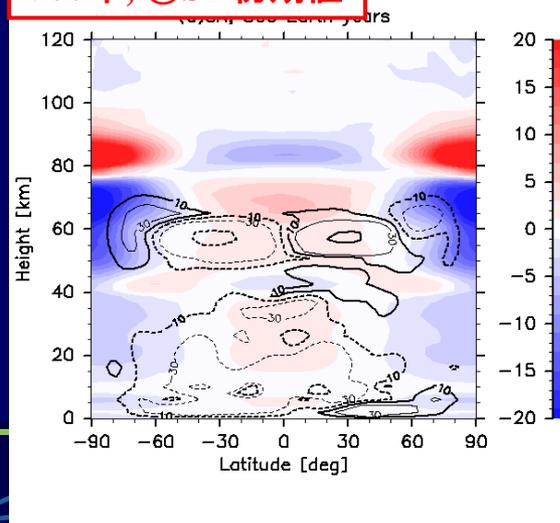
南北温度勾配(カラー)

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

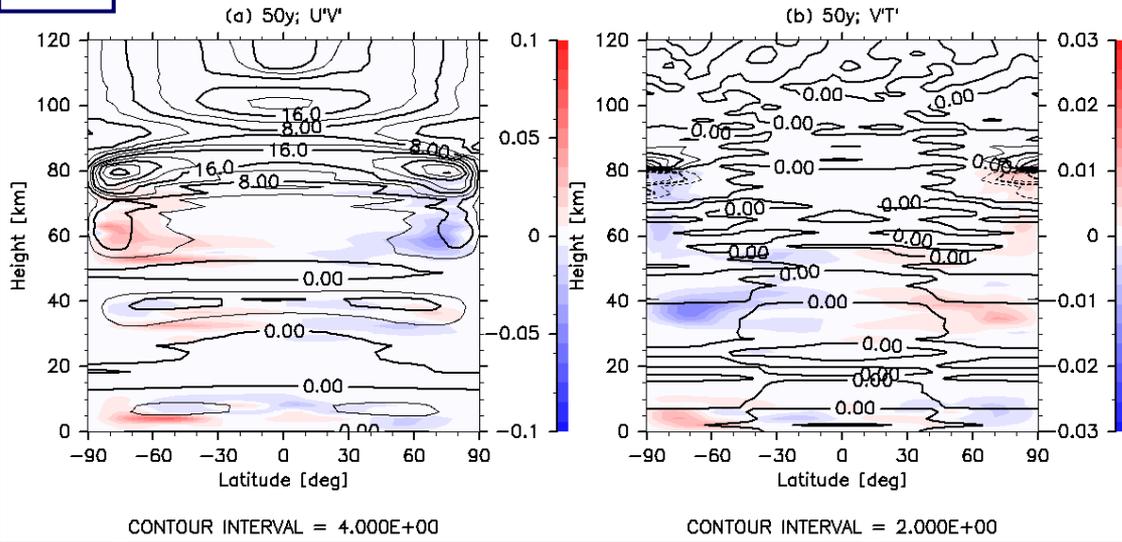


傾圧波によるフェレルセル  
(Sugimoto et al., GRL2014)

# ● 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)

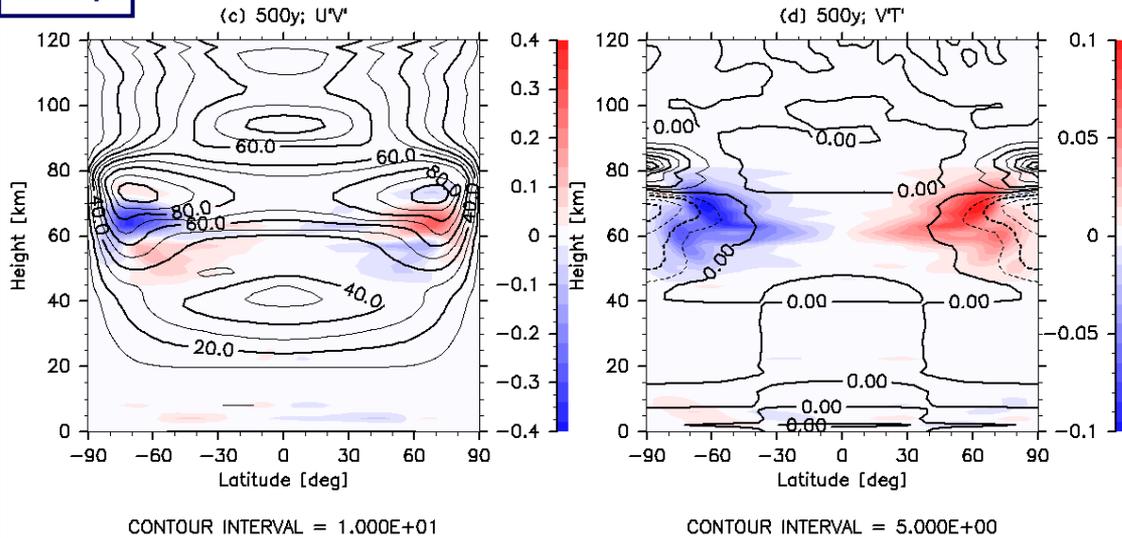
50年



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

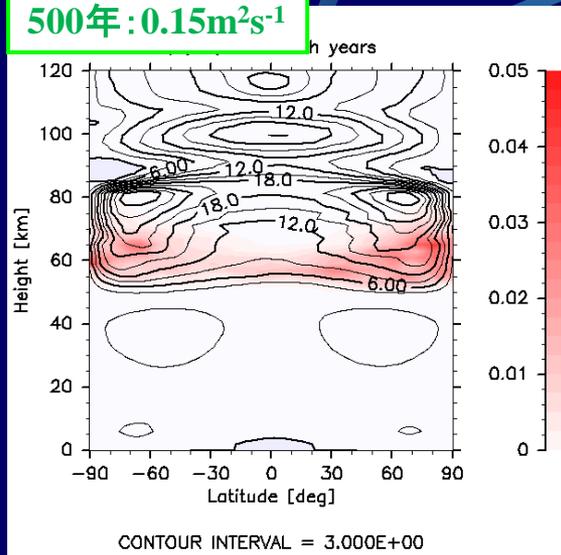


傾圧波によるジェットの構造  
(Sugimoto et al. GRL2014)

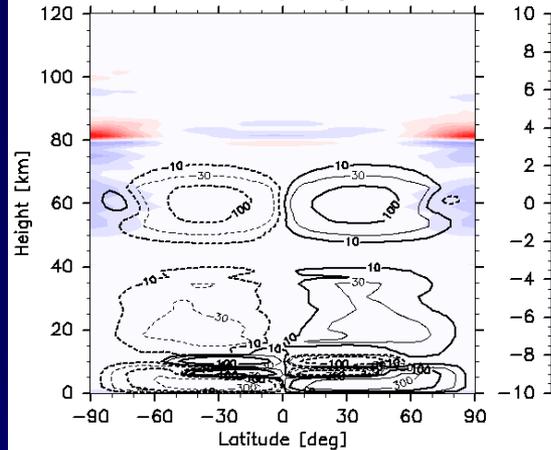
# ● 感度実験の結果 緯度高度断面

✓ 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:  $0.15\text{m}^2\text{s}^{-1}$



(b)V2; 500 Earth years



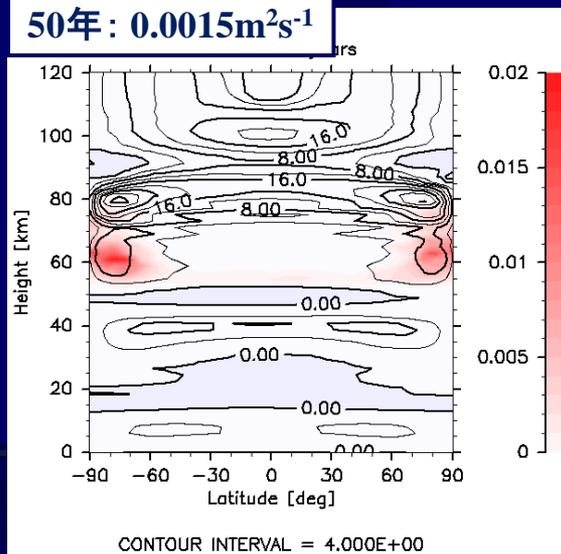
左図: 風速(コンター)

短周期擾乱のエネルギー(カラー)

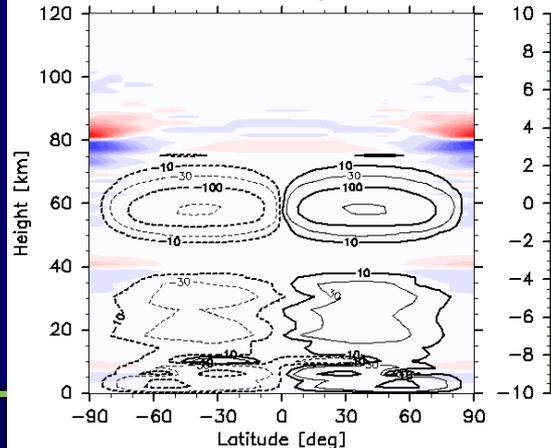
右図: 子午面循環(コンター)

南北温度傾度(カラー)

50年:  $0.0015\text{m}^2\text{s}^{-1}$



(a) 50 Earth years



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