

「金星大気大循環モデルとデータ同化システムの紹介」

杉本憲彦 (慶大), 藤澤由貴子(慶大), 安藤紘基(京産大), 高木征弘(京産大),

AFES-Venus チーム, ALEDAS-V チーム

金星探査機「あかつき」の観測データの活用を目標に、我々の研究グループでは地球シミュレータ上で動作する金星大気大循環モデル「AFES-Venus」[1,2]と、局所アンサンブルカルマンフィルタを用いて観測データを AFES-Venus へと同化するデータ同化システム「ALEDAS-V」[3]を開発してきた。2018年の報告からの進展として、AFES-Venus では、超長時間積分による静止状態からのスーパーローテーションの再現[4]、超高解像度計算による熱潮汐波からの大気重力波の自発的な放射の発見[5]、雲物理過程の導入[6,7]、低安定度層などの温度構造の再現[8,9]、加熱や安定度の改良によるケルビン波や熱潮汐波の現実的な再現[10,11]、などに成功している。また、ALEDAS-V では、「あかつき」や Venus Express の紫外画像で得られた水平風を同化し[12,13]、金星大気初の現実的かつ時空間的に偏りのないデータセットの公開への準備が進めているほか、仮想的な観測データを同化することにより観測の「有効性」を検証するための観測システムシミュレーション実験[14-17]なども実施している。これらの成果を紹介し、今後の展望についても報告した。

[1] Sugimoto, N. et al., 2014, J. Geophys. Res.-Planets 119, 1950.

[2] Sugimoto, N. et al., 2014, Geophys. Res. Lett. 41, 7461.

[3] Sugimoto, N. et al., 2017, Sci. Rep., 7, 9321.

[4] Sugimoto, N. et al., 2019, Geophys. Res. Lett. 46, 1776.

[5] Sugimoto, N. et al., 2021, Nature Comm., 12, 3682.

[6] Ando, H. et al., 2020, J. Geophys. Res.-Planets, 125, 6208.

[7] Ando, H. et al., 2021, J. Geophys. Res.-Planets, 126, 6781

[8] Ando, H. et al., 2020, Sci. Rep., 10, 3448.

[9] Ando, H. et al., 2022, accepted, J. Geophys. Res.-Planets.

[10] Takagi, M. et al., under minor revision, J. Geophys. Res.-Planets.

[11] Suzuki, A. et al., submitted, J. Geophys. Res.-Planets.

[12] Sugimoto, N. et al., 2019, Geophys. Res. Lett. 46, 4573.


[13] Fujisawa, Y. et al., to be submitted, Nature Geo.

[14] Sugimoto, N. et al., 2019, J. JSCE (J. Applied Mech.), 75, 477.


[15] Fujisawa, Y. et al., under revision, Icarus.

[16] Sugimoto, N. et al., 2021, Atmosphere, 12, 14.

[17] Sugimoto, N. et al., 2022, Atmosphere, 13, 182.

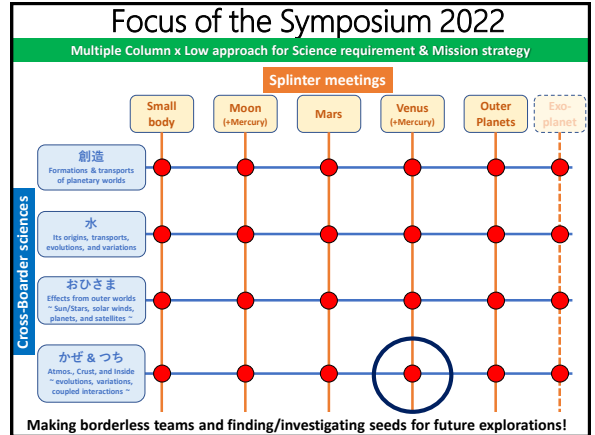


第23回 惑星圏研究会
東北大学 青葉キャンパス
合同C棟 青葉サイエンスホール
2022年2月9日(水) 11:00-11:25 (オンライン)




金星大気大循環モデル(GCM)とデータ同化システムの紹介

杉本憲彦 (慶大)
 藤澤由貴子(慶大), 安藤紘基(京産大), 高木征弘(京産大)
 AFES-Venusチーム, ALEDAS-Vチーム

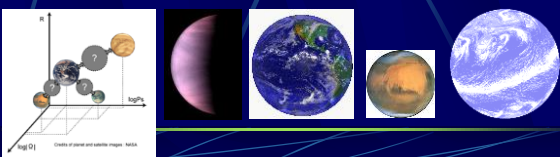


1. はじめに



Center for Planetary Science


- 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

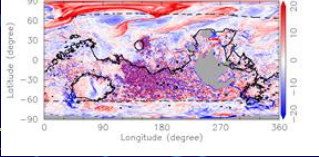
- AFES (Earth SimulatorのためのGCM)
 - ✓ ベクトル型並列計算機 ES2 (現在ES4)に最適化
 - ✓ 火星でT639L96解像度の計算実績(Takahashi et al.)
グリッド間隔 ~11 km (1920 x 960 grids with 96 layers)

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

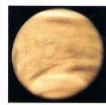
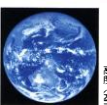


火星高解像度計算結果の例
(温度分布)

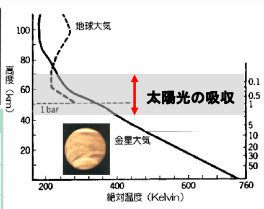
Year 1, Ls = 200.1 degrees, 6.0 hour
vorticity (z = 1)



金星と地球

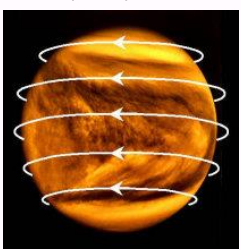
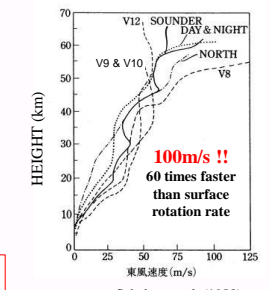
	金星	地球
半径	6050 km	6378 km
公転周期	224日	365日
自転周期	243日(1.8m/s)	1日(460m/s)
1太陽日	117日	1日
大気組成	CO ₂	N ₂ , O ₂
アルベド	0.78	0.3
地表面気圧	92 bar	1 bar



✓ 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

100m/s !!
60 times faster than surface rotation rate

✓ 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

- 平均子午面循環 (Gierasch 1975)
- 熱潮汐波 (Fels & Lindzen, 1986)

- ✓ 子午面循環による鉛直輸送
- ✓ 渦による赤道方向への輸送

- ✓ 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GCM研究

● スーパーローテーション(SR)の再現に一応、成功...

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

静止状態からスーパーローテ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テーションが**出ない**
観測: 子午面循環や雲層内部の観測が**困難**

金星AFES: 地球シミュレータで高解像度の金星GCM計算を実行

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(前回までの成果)
 - 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)、傾圧不安定が起源? (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)

● 観測と整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)

Taylor et al. (1980)

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>

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; 代表 林祥介)

*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

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)
 - 大気安定度の再現と観測比較 (Ando et al., Sci. Rep.2020, JGR, minor revision)
 - 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., in preparation)
 - ケルビン波の再現と励起メカニズム (Takagi et al., JGR, minor revision)
- 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., in preparation)
 - 衛星間電波掩蔽のOSSE (Sugimoto et al., JSCE2019, Fujisawa et al., Icarus, revision)
 - 紫外画像のOSSE (Sugimoto et al., Atmosphere2021, 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 ($\Delta x \ \& \ \Delta y \sim 300 \text{ km}$, $\Delta z \sim 2 \text{ km}$) \Rightarrow T639L260
 - 比熱: C_p 一定値 ($1000 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
 - 水平超粘性: 0.1地球日での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: $dT/dt = -\kappa(T - T_{\text{ref}}(z))$
 - 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

- 初期条件:
 - 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)
 - 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

Sugimoto et al. (GRL2019a)

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

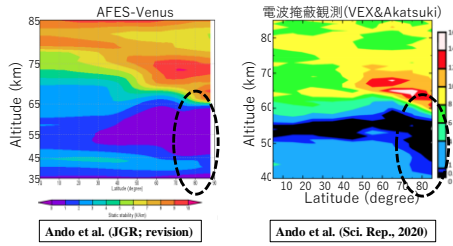
- 静止状態からのスーパーローテーション再現② (T42L60 run)
 - 東西平均風の緯度高度断面: 高速スーパーローテーションの発達・維持

風速(コンター) 短周期擾乱のエネルギー(カラー)

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 \Rightarrow 多重平衡は存在しない?

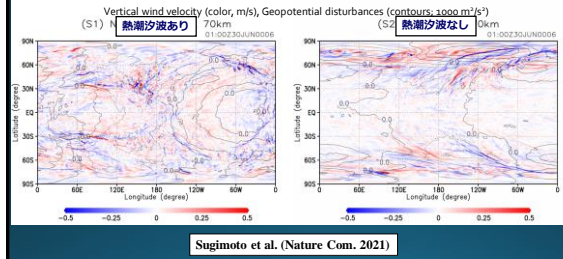
0.02 m²/s以下で高速SR, 0.025 m²/s以上で弱いSR

大気安定度の再現と観測比較 (T63L120 run)



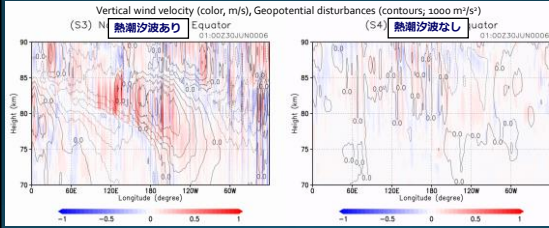
電波掩蔽観測と整合的な安定度の再現とその成因の調査

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

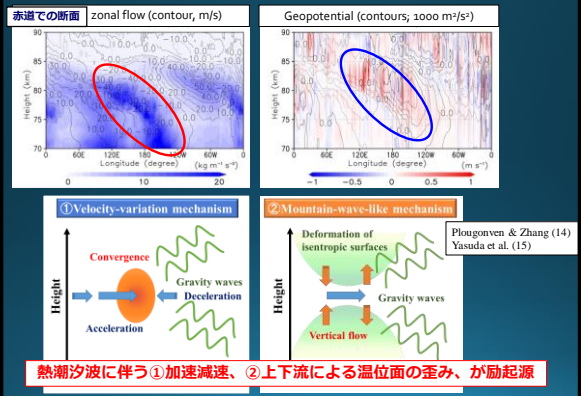


Sugimoto et al. (Nature Com. 2021)

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



地球のジェット出口での自発的な放射と同様なメカニズム



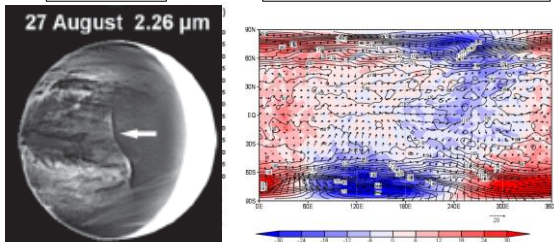
熱潮汐波に伴う①加速減速、②上下流による温位面の歪み、が励起源

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

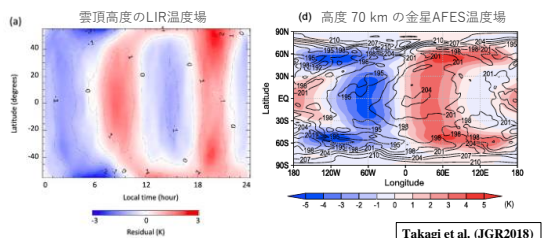
42-75 kmで鉛直積算した雲密度 (コンター) と
 48kmでの風速 (矢印)、高度 (カラー) 擾乱



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

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 UV1 観測結果 (Horinouchi et al., 2018) を東西反転

Suzuki et al. (in preparation); next talk

● 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 (T42L60 run)

周期解析 (赤道上の東西風)

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)

(白線は東西平均流の回転周期を示す)

Takagi et al. (JGR, minor revision)

● ケルビン波の再現と励起メカニズム② (T42L60 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: 地衡風の渦 (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)

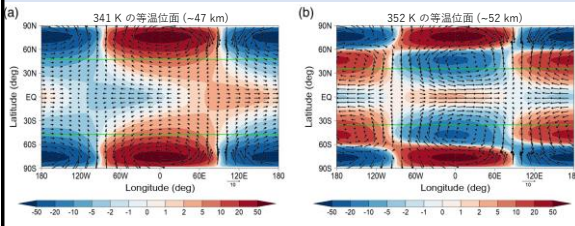
● ケルビン波の再現と励起メカニズム③ (T42L60 run)

5.8日波(ロスビー波)の南北・高度構造

- 臨界面 (臨界緯度・臨界面高度) 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 (T42L60 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。

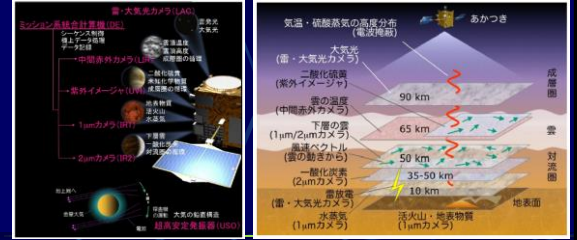
赤道ケルビンモードと中緯度ロスビーモードの結合によって、赤道向き運動量輸送が生じている。高緯度ロスビーモードとは結合していない。

Rossby-Kelvin結合不安定による励起メカニズム

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ぎあわせ、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



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) とつぎ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

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: considers only observations within a certain distance.
Ensemble: uses an ensemble of GCM forecasts.
Transform: uses a square-root filter.
Kalman Filter: uses past information to update the present state, and estimates both the state and its uncertainty (covariance)

$$\frac{1}{\sigma_a^2} = \frac{1}{\sigma_b^2} + \frac{1}{\sigma_o^2}$$

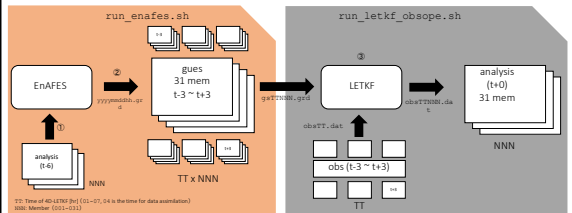
$$T_a = T_b + \frac{\sigma_o^2}{\sigma_b^2 + \sigma_o^2} (T_o - T_b)$$

From Dr. T. Navarro (personal com.)

モデルのアンサンブルで分散を評価、簡単 but 高計算コスト

● Flow chart of the ALEDAS-V*

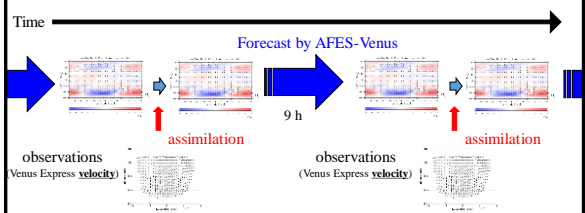
- ✓ Ensemble size: 31-member *AFES LETKF Data Assimilation System for Venus
- ✓ assimilation cycle: 6-hourly interval
- ✓ Localization: horizontally 400 km, vertically lnP-0.4
- ✓ Observational errors: 4.0 m/s
- ✓ Inflation: 10 %



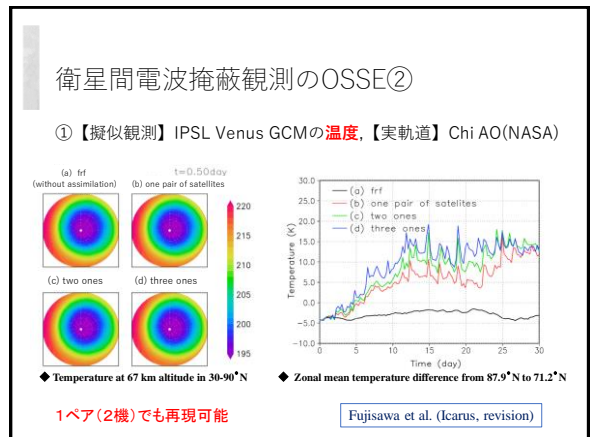
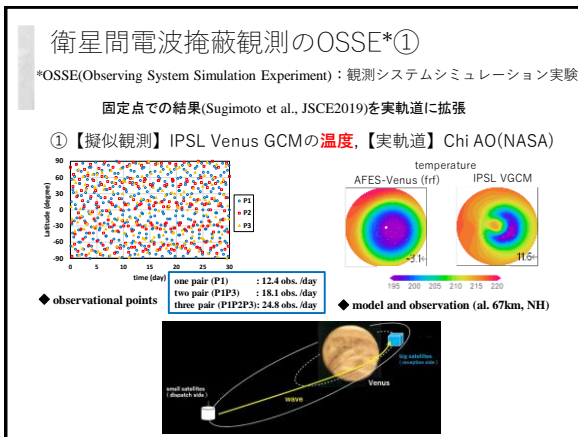
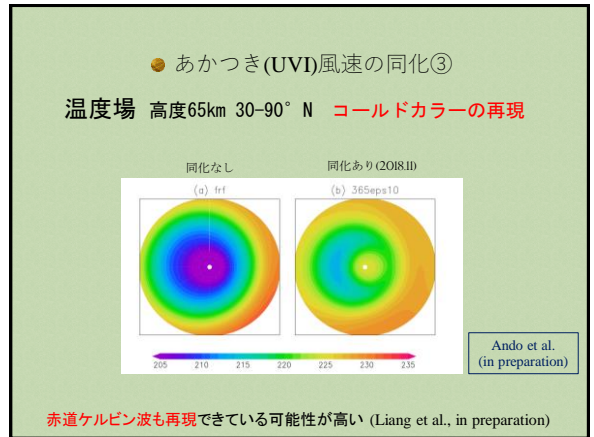
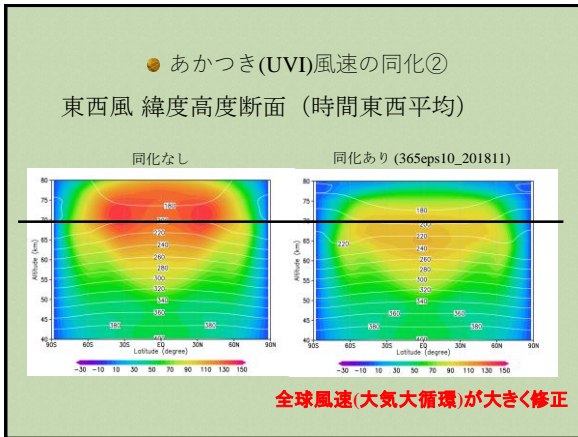
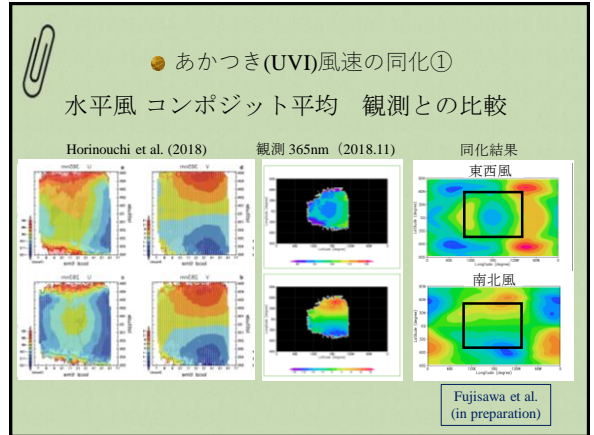
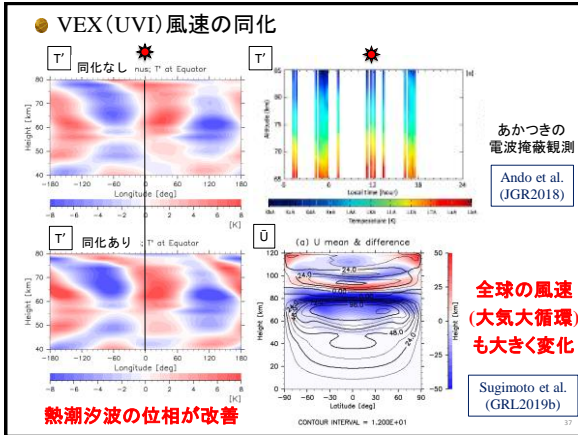
- ✓ 9-hour forecast from t=0 and use from t=3 to t=9 for the assimilation
- ✓ Input observations from t=3 to t=9 and output reanalysis at t=6 (=4D LETKF)

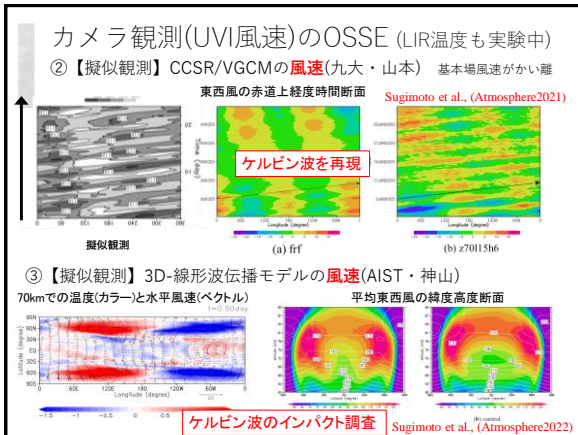
● Flow chart of the ALEDAS-V*

- ✓ Ensemble size: 31-member *AFES LETKF Data Assimilation System for Venus
- ✓ assimilation cycle: 6-hourly interval
- ✓ Localization: horizontally 400 km, vertically lnP-0.4
- ✓ Observational errors: 4.0 m/s
- ✓ Inflation: 10 %



- ✓ 9-hour forecast from t=0 and use from t=3 to t=9 for the assimilation
- ✓ Input observations from t=3 to t=9 and output reanalysis at t=6 (=4D LETKF)





4. おわりに

金星大気大循環モデル(AFES-Venus)とデータ同化システム(ALEDAS-V)の最近の研究成果の紹介

- 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、新現象の発見などに成功しており、雲や放射の物理過程の新規導入など、モデルの改良も進めている。
- ALEDAS-Vは、世界唯一の金星大気データ同化システムであり、VEX観測の同化で熱潮汐波の位相改善、風速・温度場の修正などに成功した。あかつき観測データを同化し、金星大気初の客観解析データを作成、公開予定であり、金星大気の3次元構造の理解の進展が期待される。
- 特に観測システムシミュレーション実験(OSSE)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。

