

第19回 惑星圏研究会
東北大学 合同C棟
青葉サイエンスホール
2018年2月27日(火)17:05-17:30

REC for NS

データ同化の現状と将来展望

杉本憲彦 (慶應義塾大学 日吉物理学教室)

山崎哲(JAMSTEC), 神山徹(AIST), 櫻村博基(神大理), 榎本剛(京大防災研), 高木征弘(京産大理) + AFES/ES project team

Sugimoto, N., A. Yamazaki, T. Kouyama, H. Kashimura, T. Enomoto, and M. Takagi, Development of an ensemble Kalman filter data assimilation system for the Venusian atmosphere, Scientific Reports, Vol. 7, (2017), 9321, 9pp.

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

観測データ
データ同化
モデルがある程度観測と近い必要あり
データ同化による観測値の平均
観測値
観測データの平均
観測値の平均
シミュレーション結果の平均

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

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、ダスト量の観測を同化(SCM) 温度(上)と質量流線関数(下) (Montabonne et al., 05)

惑星大気でもデータ同化が可能になってきた

MADA2018

Mars Atmosphere Data Assimilation workshop (MADA2018) on August 29-31, 2018, at Savoie-Technolac, Le Bourget-du-Lac, France.

<https://montabon.wixsite.com/marsdaworkshop>

概要

金星大気で初めてデータ同化を試みた。

- はじめに
 - AFES#プロジェクト #Atmospheric GCM For the Earth Simulator
 - あかつき
- AFES-Venus (or VAFES; Venus AFES)
 - 実験設定
 - これまでの成果
- VALEDAS* *VAFES-LETKF data assimilation system
 - 初期成果
- 今後の展望
 - あかつき再解析データ
 - EFSO
- まとめ

1. はじめに

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違い・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

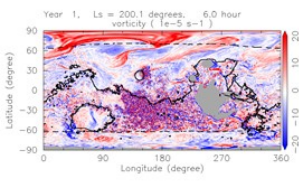
計算性能

AFES (ベクトル型並列計算機のためのAGCM)

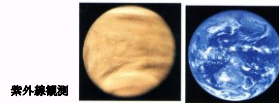
- ✓ ES2 (Earth Simulator、現在ES3)に最適化
- ✓ 火星でT639L96解像度の計算実績(Takahashi et al.)
グリッド間隔 ~11 km (1920 × 960 grids with 96 layers)

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

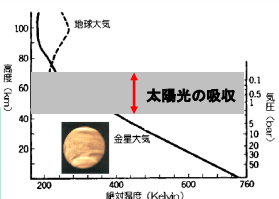
火星高解像度計算結果の例
(渦度分布)



金星と地球



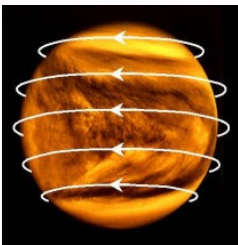
	金星	地球
半径	6050 km	6378 km
公転周期	224日	365日
自転周期	243日(1.8m/s)	1日(460m/s)
1太陽日	117日	1日
大気組成	CO ₂	N ₂ , O ₂
アルベド	0.78	0.3
地表面気圧	92 bar	1 bar



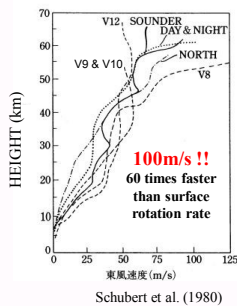
- ✓ 自転が極めて遅い
- ✓ CO₂の濃密な大気
- ✓ 厚い雲層(45~70km)

金星大気の謎:

高速東西風(スーパーローテーション)の存在



- ✓ 赤道から高緯度まで大気全体が自転を追い越す高速の東風に

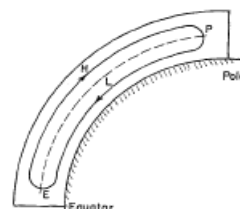


* 金星の自転は地球と逆向きのため、地球の西風に相当

金星の風の成因

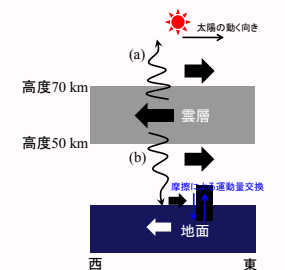
二つの代表的なメカニズム

1. 平均子午面循環 (Gierasch 1975)



- ✓ 子午面循環による鉛直輸送
- ✓ 渦による赤道方向への輸送

2. 熱潮汐波 (Fels & Lindzen, 1986)



- ✓ 太陽加熱が雲層で波を励起
- ✓ 上下で波が散逸し雲層が加速

これまでの金星GCM研究

スーパーローテーションの再現に一応、成功...

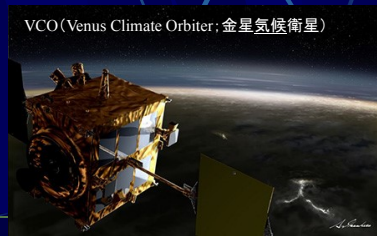
1. 平均子午面循環 (Yamamoto & Takahashi, 2003...)
 2. 熱潮汐波 (Takagi & Matsuda, 2007...)
- 静止状態からスーパーローテーションを再現するために、低解像度で長時間積分、非現実的な加熱や温度場を設定

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

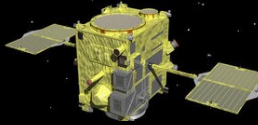
あかつき

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




金星の気象を知るために

観測



「あかつき」の大気観測装置 (2016年4月頃から)

数値計算



スーパーコンピュータ (ES3, 本研究)
(https://www.jamstec.go.jp/fhdv/press_release/20101117/)

・風速や気温の計測
・雲や大気成分の分布
・雷の有無 など...

観測された現象や構造の
生成・維持される理由を解明

本プロジェクト: 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、人工的な強制は入れない

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., JGR2018)
 - ✓ 熱潮汐波: 水平、鉛直構造とその働き (Takagi 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)

現在の計算: T42L60 ~ T319L240, T639L260まで

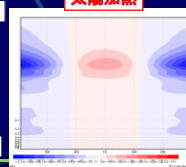
2. AFES-Venus see Sugimoto et al. (JGR2014a)

■ 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, T63L120, T159L120 (Δx & $\Delta y \sim 79\text{km}$ $\Delta z \sim 1\text{km}$)
- ✓ 比熱: C_p 一定値 ($1000 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
- ✓ 水平超粘性: $0.1(T42), 0.03(T63), 0.01(T159)$ 地球日目のe-folding time
- ✓ 鉛直渦粘性: $0.15 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
- ✓ レイリー摩擦: 最下層と80kmより上空 (スポンジ層: 平均東西風には働かない)
- ✓ 地形や惑星境界層はなし

■ 太陽加熱

- ✓ 現実的な東西平均加熱と日変化成分
- ✓ Tomasko et al. (1980)とCrisp (1986)に基づく



太陽加熱

80km

0km

緯度

■ 赤外放射過程

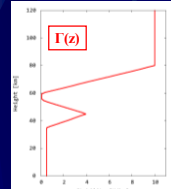
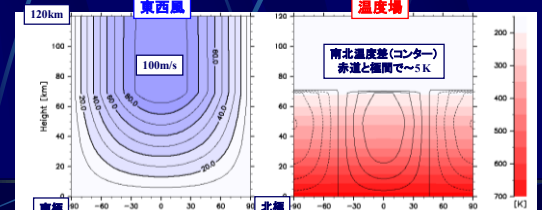
- ✓ ニュートン冷却で簡略化: $dT/dt = -\kappa(T - T_{\text{ref}}(z))$
- ✓ κ : Crisp (1986)に基づく
- ✓ $T_{\text{ref}}(z)$: 水平一様な温度場

■ 初期条件: スーパーローテーション

- ✓ 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)
- ✓ 緯度分布: 剛体回転
- ✓ 温度場: 東西風とバランス (傾度風).

■ 大気安定度: $\Gamma(z) = dT/dz + g/C_p$

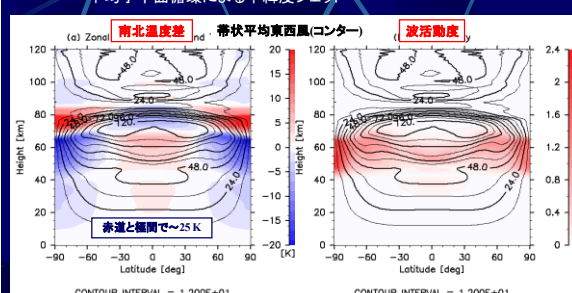
- ✓ 現実的な分布を模擬

これまでの成果 (T63L120 run) see Sugimoto et al. (GRL2014b)

■ 現実的なスーパーローテーションを再現 (10年以上維持)

- ✓ 熱潮汐波による赤道加速 (120m/s).
- ✓ 平均子午面循環による中緯度ジェット

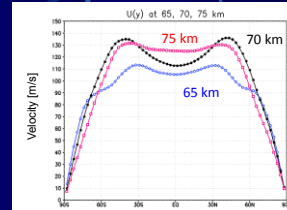


CONTOUR INTERVAL = 1.200E+01

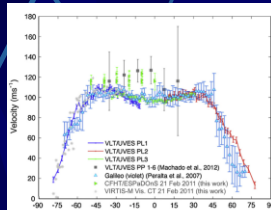
■ 観測と整合的なスーパーローテーションの構造

- ✓ 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



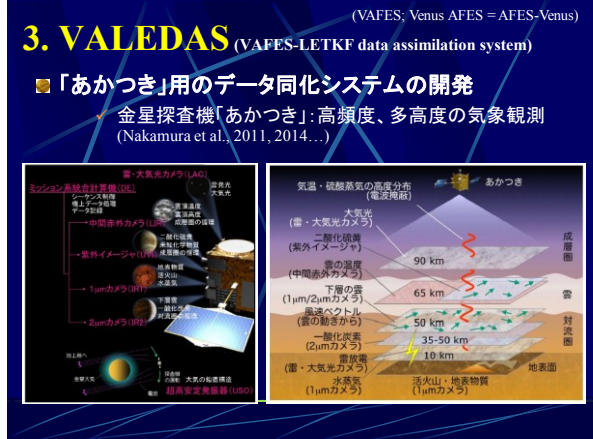
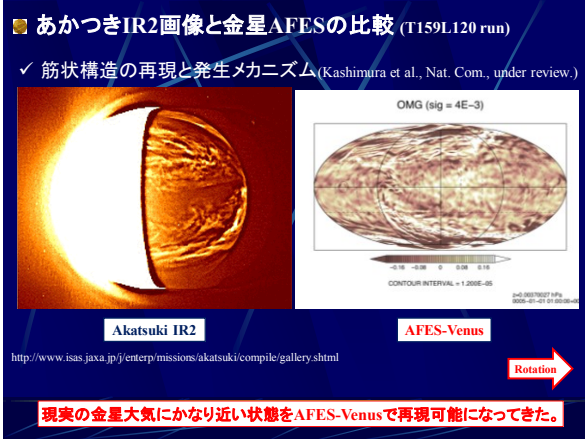
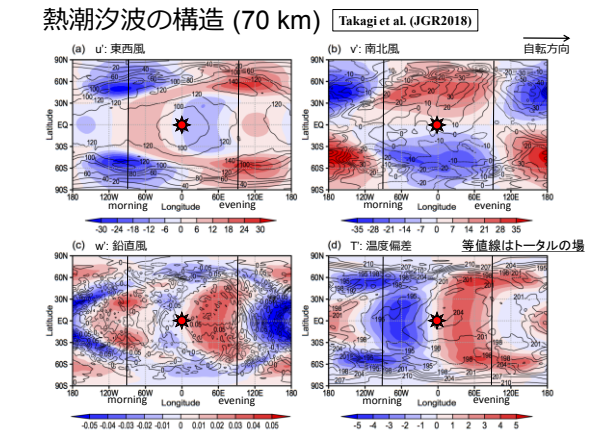
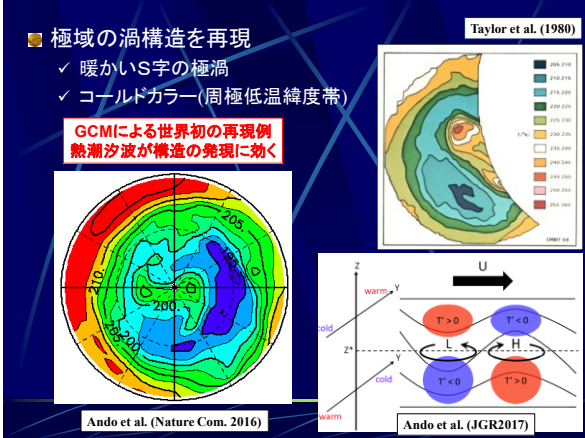
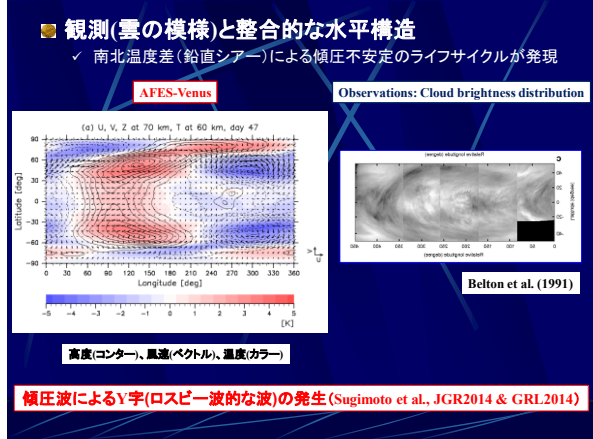
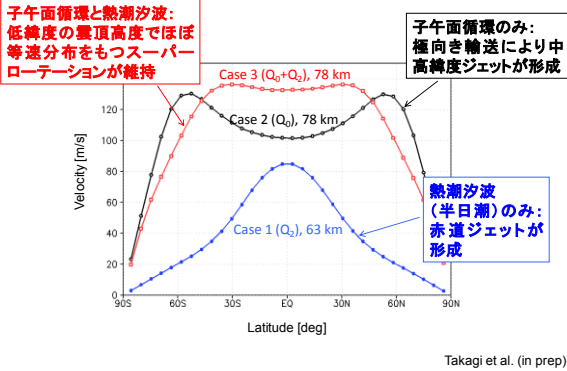
Observations: Doppler measurements



熱潮汐波による赤道方向への角運動量の輸送

Machado et al. (2014)

子午面循環+熱潮汐波メカニズム



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)

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

初期成果の概要

金星大気GCMのアンサンブルデータ同化システム (VALEDAS; VAFES-LETKF data assimilation system)を開発した。

テストとして、雲層上端の風速データを2種類用意

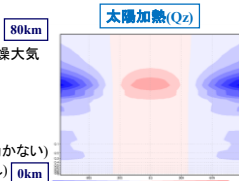
- ①GCMで作成した仮想データ
- ②VMC/VEXの現実データ

どちらも観測データに熱潮汐波を含むが、同化させるGCMは熱潮汐波なしで計算する。
⇒同化後、熱潮汐波が現れれば、同化システムが機能!

実験設定

●金星AFES(AFES-Venus)

- 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 (128 × 64 × 60 grids)
- 比熱: Cp一定値 (1000 Jkg⁻¹k⁻¹)
- 水平超粘性: 0.1地球日のe-folding time
- 鉛直渦粘性: 0.15m²s⁻¹
- スポンジ層: 80kmより上空 (平均東西風には働かない)
- レイリー摩擦: 最下層 (地形、惑星境界層はなし)



✓太陽加熱

- 現実的な東西平均加熱(Qz)と日変化成分(Qt)
- Tomasko et al. (1980)とCrisp (1986)に基づく

✓赤外放射過程

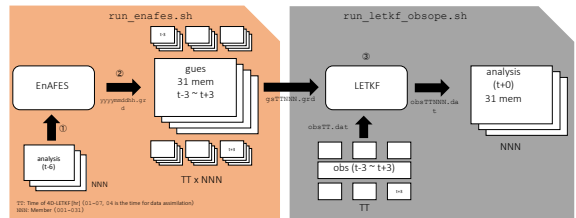
- ニュートン冷却で簡略化: $dT/dt = -\kappa(T - T_{ref}(z))$
- κ : Crisp (1986)に基づく
- $T_{ref}(z)$: 水平一様な温度場

金星AFESの設定

Cases	太陽加熱
Qz	東西平均加熱のみ
Qt	日変化成分を含む

●VALEDAS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)

●観測データ: 雲層上端(70km)の水平風

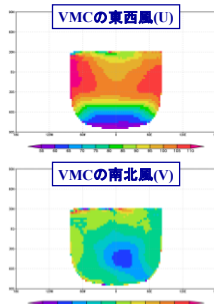
- 仮想データ: AFES-VenusのQt (太陽加熱に日変化成分を含む)設定で作成
- 現実データ: VMC; Venus Monitoring Camera (73 obs. in Epoch 4: 28 Jan to 26 Apr 2008)

観測データ

Case	Obs	interval	AFES
H1	Qt	1h	Qz
H6	Qt	6h	Qz
H24	Qt	24h	Qz
Vmc	VMC	~24h	Qz
Frf	None	None	Qz

金星AFESの設定

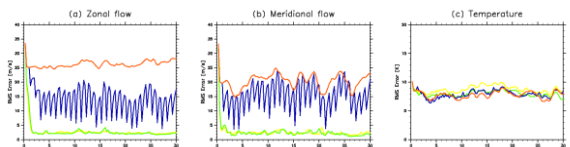
Cases	太陽加熱
Qz	東西平均加熱のみ
Qt	日変化成分を含む



Kouyama et al. (JGR 2013)

同化結果

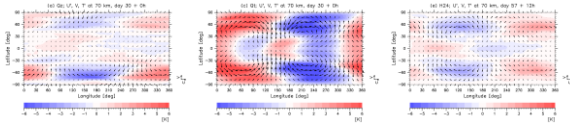
●高度70kmのRoot-mean-square error (U, V, T)



Red: Frf Blue: H24 Green: H6 Yellow: H1

Cases H1 と H6 はすぐに収束
Case H24に同化サイクル(1日1回)
温度場は収束せず

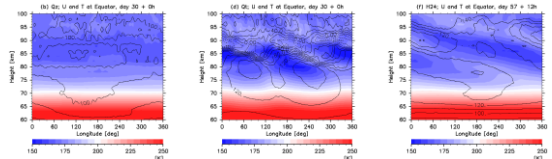
●高度70kmの水平構造(Cases Qz, Qt, H24)



Qz:東西平均加熱のみ ~ Frf Qt:日変化成分を含む ~ Obs. H24: VALEDASの同化結果

Case H24の温度場にも熱潮汐波の水平構造
風速場を1日1回のみ同化した結果

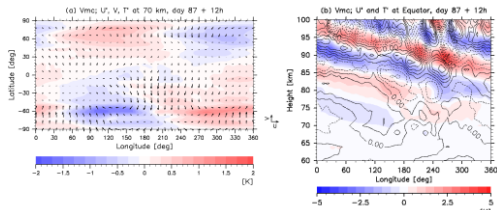
●赤道の鉛直構造(Cases Qz, Qt, H24)



Qz:東西平均加熱のみ ~ Frf Qt:日変化成分を含む ~ Obs. H24: VALEDASの同化結果

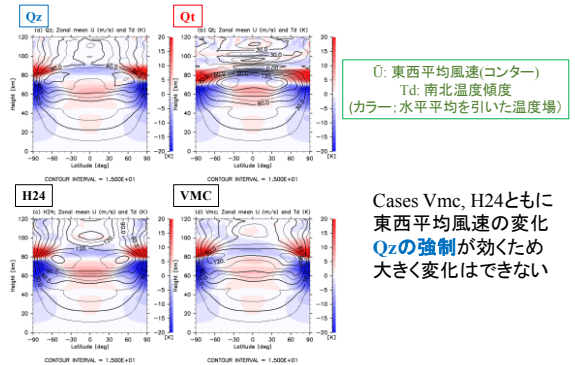
Case H24の温度場に熱潮汐波の鉛直伝播
高度70kmの風速場を1日1回のみ同化した結果

●Case Vmcの水平、鉛直構造



温度場に熱潮汐波の水平構造、鉛直伝播(振幅小)
高度70kmの屋面の風速場を1日1回のみ同化した結果

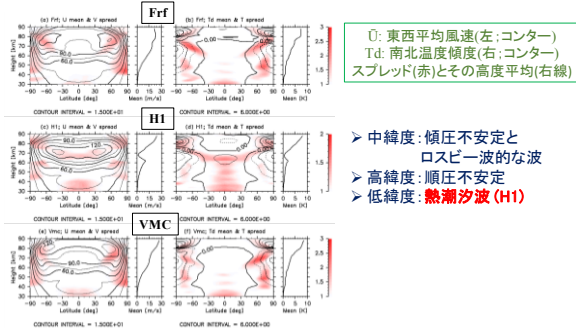
●緯度高度断面(Cases Qz, Qt, H24, Vmc)



U: 東西平均風速(コンター)
Td: 南北温度傾度(右;コンター)
(カラー: 水平平均を引いた温度場)

Cases Vmc, H24ともに
東西平均風速の変化
Qzの強制が効くため
大きく変化はできない

●スプレッドの緯度高度断面(Cases Frf, H1, Vmc)



U: 東西平均風速(左;コンター)
Td: 南北温度傾度(右;コンター)
スプレッド(赤)とその高度平均(右線)

- 中緯度: 傾圧不安定とロスビー波のな波
- 高緯度: 傾圧不安定
- 低緯度: 熱潮汐波(H1)

Case H1は東西平均風速の変化が顕著
高頻度の観測データは大気大循環を大きく変える可能性がある

初期成果のまとめ

➤AFES-Venusのデータ同化システム

VALEDAS (VAFES-LETKF data assimilation system)を開発した。

➤雲層上端の風速の観測データを2種類用意し、同化のテストを実行。

- ①GCMで作成した仮想データ(1h毎、6h毎、24h毎)
- ②VMC/VEXの現実データ(ほぼ24h毎だが水平領域は一部)

両観測データは熱潮汐波を含むが、
同化させるGCMは熱潮汐波なしで実験。

⇒ 熱潮汐波の構造(水平、鉛直)を再現できた。


予備実験: Qt設定で同化、温度データの同化、63メンバーの計算(収束性を確認)、
局所化や観測誤差を変えた感度実験(影響が小さいことを確認)

4. 今後の展望

■ あかつきデータ同化による金星初の客観解析プロダクト


- ✓ あかつきの高頻度、多高度の気象観測データ
- ✓ 金星AFES(日変化加熱成分を入りに)同化

「あかつき」の観測



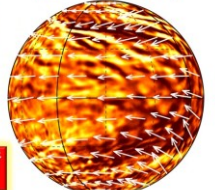
©ISAS/JAXA

データ同化



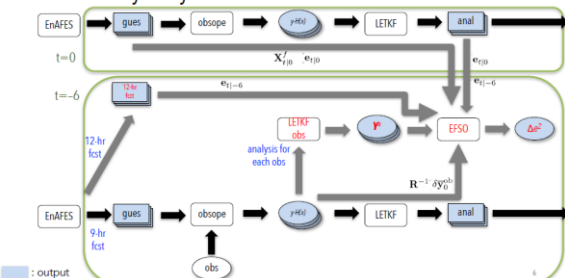
金星初の再解析プロダクト

AFES-Venusの予報



Forecast-analysis cycle w/ EFSO

$$\Delta e^2 = (\delta y_0^{obs})^T \frac{1}{K-1} R^{-1} Y^d (X_{t|0}^T)^T C(e_{t|0} + e_{t-6})$$



Yamazaki et al. (2018)*

● EFSO (Ensemble Forecast Sensitivity to Observations)の導入

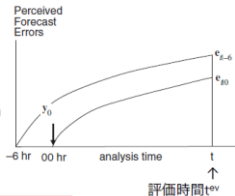
Kalnay et al. (2012 Tellus), Ota et al. (2013 Tellus), Hotta et al. (2017 MWR)

$$\Delta e^2 = e_{t|0}^T C e_{t|0} - e_{t|0-6}^T C e_{t|0-6}$$

$$\Delta e^2 = (\bar{x}_{t|0} - \bar{x}_{t|0-6})^T C (e_{t|0} + e_{t|0-6})$$

$$\approx \delta y_0^{obs} \frac{1}{K-1} R^{-1} Y^d X_{t|0}^T C (e_{t|0} + e_{t|0-6})$$

$y=H(x)$ 観測値 (O-B innov) (at t=0)
 $[H(x^*)]^T$ 解析ens摂動 (t=0)
 $[X_{t|0}^T]$ 予報ens摂動 (t=t*)



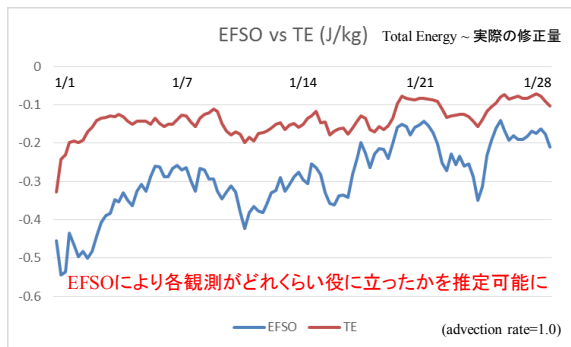
Yamazaki et al. (2018)*

観測があったことで、どれくらい良くなったかをそれぞれの観測について自動的に調べられる。

- ✓ アンサンブルベースのForecast Sensitivity to Observations (FSO)
- ✓ 診断的に観測のインパクトを推定できる
- ✓ 観測のインパクトを個々に見積もることができる
- ✓ Observation System (Simulation) Experiment (OS(S)E)の必要がない

● EFSOのテスト結果 (Case H1)

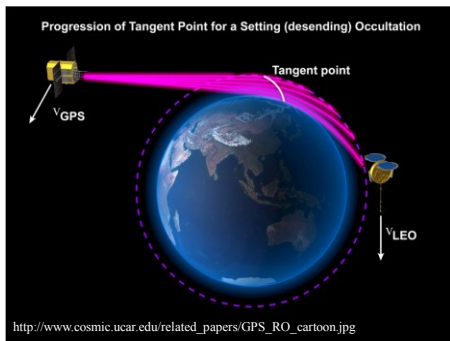
- ✓ 相関は80.64%; EFSO値の計算に成功(やや過大評価?)



(advection rate=1.0)

● 電波掩蔽(複数衛星)の金星への応用 (NASA/JPL)

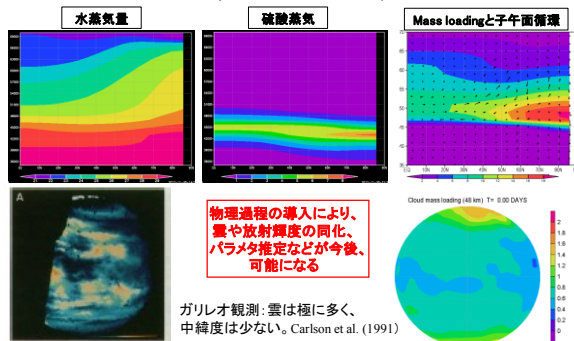
- ✓ 疑似観測データを同化し、EFSO値から高い観測インパクトの位置や時間を選定 ⇒ 今後の金星探査ミッションに



http://www.cosmic.ucar.edu/related_papers/GPS_RO_cartoon.jpg

● AFES-Venusの改良

- ✓ 雲物理過程の導入 (安藤さん、高木さん)
- ✓ 放射過程の導入 (佐川さん、関口さん)



ガリレオ観測: 雲は極に多く、中緯度は少ない。Carlson et al. (1991)

5. まとめ

金星大気データの現状と今後の展望を紹介した。

- ✓ **金星スーパーローテーションの謎は現在でも解明されていない。**
 - ・ 初期に静止した状態から現実的な設定のもとに長時間積分して、スーパーローテーションを現実的に再現した例はない。
- ✓ **我々の大気大循環モデル(AFES-Venus)は現時点で世界一の金星GCMの一つである。**
 - ・ フランスのGCMは放射や地形などの詳細な物理過程が入っているが、再現されるスーパーローテーションなどに観測と不整合な点がある。(Lebonnois, S., N. Sugimoto, and G. Gilli, Icarus2016)。
 - ・ 観測およびGCMの結果の比較を行いながら、より現実的な設定を検討し、改良していかなくてはならない。モデルの改良は現在進行中である。
- ✓ **我々のデータ同化システム(VALEDAS)は現時点で世界唯一の金星大気データ同化システムである。**
 - ・ あかつきの観測データ同化(再解析プロダクトの作成)、EFSOを使った観測インパクトの推定、モデルの改良による他の観測量の同化など。

今後、惑星大気の研究において、ますますデータ同化の重要性が高まるであろう。

Sugimoto, N., A. Yamazaki, T. Kouyama, H. Kashimura, T. Enomoto, and M. Takagi, **Development of an ensemble Kalman filter data assimilation system for the Venusian atmosphere**, *Scientific Reports*, Vol. 7, (2017), 9321, 9pp.

プレスリリース

2017/08/22 プレスリリース

報道関係者各位

金星の大気の流れを再現する仕組みの開拓に世界で初めて成功
—金星探査機「あかつき」観測データの革新的な活用が可能に—

慶應義塾大学の杉本肇准教授らの研究チームは、金星の大気の流れをコンピュータでシミュレーションする大気大循環モデル(第1)に観測データを同化する手法を導入し、世界で初めて金星大気大循環モデルに対するデータ同化(第2)システムを開発に成功しました。金星は深い厚みによって気体を覆われており、大気内部の循環についてはほとんどわかっていません。また、大気大循環モデルを用いた大気運動の数値シミュレーションが試みられていますが、金星大気の流れを正確に再現できておらず、観測データを利用した研究はこれまでありませんでした。今回の研究では、金星の大気を用いられている観測データの同化手法を金星大気大循環モデルAFES-Venusに導入し、過去の金星探査機による観測データを取り込むことによって、開発したデータ同化システムの有用性を示しました。現在、金星探査機「あかつき」(第3)によって高精度かつ高頻度の観測データが得られています。これによって本データ同化システムを運用することにより、金星の謎の解明が革新的な進捗を遂げられると見込まれます。本研究の成果は、英語ネイチャー・パブリッシング・グループ(NPG)発行の学術雑誌 *Scientific Reports*、2017年8月24日付(英国時間)のオンライン版で公開されます。

日刊工業新聞

金星大気の流れ再現

25日の朝刊

References

- ✓ M. Takagi, N. Sugimoto, H. Ando, and Y. Matsuda, **Three dimensional structures of thermal tides simulated by a Venus GCM**, *Journal of Geophysical Research: Planets*, Vol. 123, (2018), 18pp.
- ✓ N. Sugimoto, A. Yamazaki, T. Kouyama, H. Kashimura, T. Enomoto, and M. Takagi, **Development of an ensemble Kalman filter data assimilation system for the Venusian atmosphere**, *Scientific Reports*, Vol. 7, (2017), 9321, 9pp.
- ✓ H. Ando, T. Imamura, N. Sugimoto, M. Takagi, S. Tellmann, M. Pätzold, B. Häusler, H. Kashimura, and Y. Matsuda, **Vertical structure of the axi-symmetric temperature disturbance in the Venusian polar atmosphere: Comparison between radio occultation measurements and GCM results**, *Journal of Geophysical Research: Planets*, Vol. 122, (2017), 17pp.
- ✓ S. Lebonnois, N. Sugimoto, and G. Gilli, **Wave analysis in the atmosphere of Venus below 100-km altitude, simulated by LMD Venus GCM**, *Icarus*, Vol. 278, (2016), p38-51.
- ✓ H. Ando, N. Sugimoto, M. Takagi, H. Kashimura, T. Imamura, and Y. Matsuda, **The puzzling Venusian polar atmospheric structure reproduced by a general circulation model**, *Nature Communications*, Vol. 7, (2016), 10398, 8pp.
- ✓ N. Sugimoto, M. Takagi, and Y. Matsuda, **Waves in a Venus general circulation model**, *Geophysical Research Letters*, Vol. 41, (2014), p7461-7467.
- ✓ N. Sugimoto, M. Takagi, and Y. Matsuda, **Baroclinic modes in the Venus atmosphere simulated by GCM**, *Journal of Geophysical Research: Planets*, Vol. 119, (2014), p1950-1968.
- ✓ T. Imamura, T. Higuchi, Y. Maejima, M. Takagi, N. Sugimoto, K. Ikeda, and H. Ando, **Inverse insolation dependence of Venus' cloud-level convection**, *Icarus*, Vol. 228, (2014), p181-188.
- ✓ A. Yoshizawa, H. Kobayashi, N. Sugimoto, N. Yokoi, and Y. Shimamura, **A Reynolds-averaged turbulence modeling approach to the maintenance of the Venus superrotation**, *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics*, Vol. 107, No.6, (2013), p614-639.
- ✓ N. Sugimoto, M. Takagi, Y. Matsuda, Y. O. Takahashi, M. Ishiwatari, and Y-Y Hayashi, **Baroclinic modes in the atmosphere on Venus simulated by AFES**, *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, Vol.61, (2013), p11-21.

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

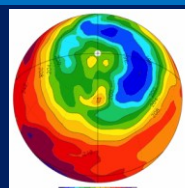
慶應義塾 Keio University

2016/02/01 プレスリリース

[プレスリリース]
金星極域の高層の生成・維持メカニズムを理論的に解明

2016/02/01 慶應義塾大学 宇宙航空研究開発機構 慶應義塾大学 宇宙航空研究開発機構

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA)の金星探査機プロジェクト研究員および慶應義塾大学の杉本肇准教授らによる研究チームは、大規模なコンピュータシミュレーションから、金星の極域上層の大気がどのように形成され維持されるかを解明しました。



朝日新聞 3面

2日の朝刊

金星上空 赤道から南北に気流

日本経済新聞

金星極域の高層解明

著書

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



風はなぜ吹くのか、どこからやってくるのか

杉本肇著



法学・経済学・自然科学から考える環境問題

杉本肇著

**「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.)**