

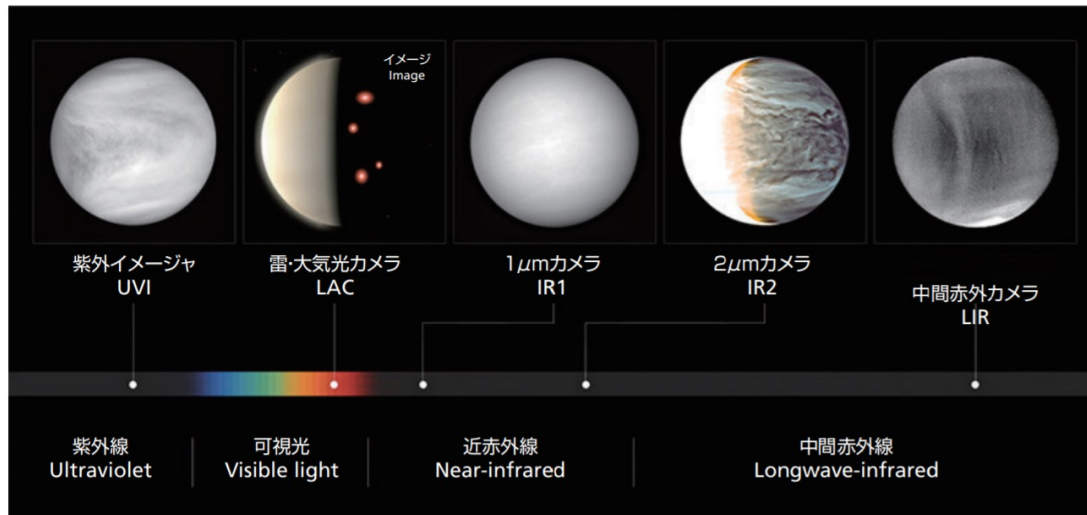
金星データ同化システム ALEDAS-V による 客観解析データの作成と 観測システムシミュレーション実験

藤澤 由貴子、杉本 憲彦(慶應大)、
ALEDAS-V 同化チーム

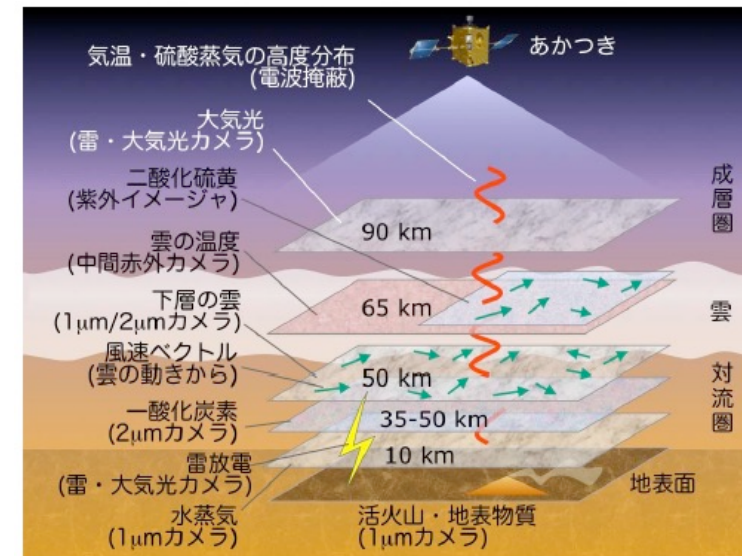
客観解析データの作成

金星探査機あかつき

- 金星大気は厚い雲に覆われており、大気大循環の全体像を捉えることは困難
- あかつきに搭載されたカメラにより、雲追跡による水平風速(紫外イメージャ; UVI)や温度場(中間赤外カメラ; LIR)等の観測データが蓄積
- 観測高度、観測面(昼側あるいは夜側に偏る)、観測頻度に制約



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



Venus Climate Orbiter “AKATSUKI” (PLANET-C) https://global.jaxa.jp/projects/sas/planet_c/

金星における世界初の解析プロダクト

- 火星では、現在2つの解析データが公開されている
 - Ensemble Mars Atmosphere Reanalysis System (EMARS)
 - Mars Analysis Correction Sata Assimilation (MACDA)
- 金星大気は、観測範囲が狭く、大気モデルも未熟なため、火星大気に比べてデータ同化の応用はまだ初期段階
- 我々は、世界で初めての金星のデータ同化システムを開発してきた。

① 数値モデル

→ AFES-Venus (Sugimoto et al. 2014) (Atmospheric GCM For the Earth Simulator)

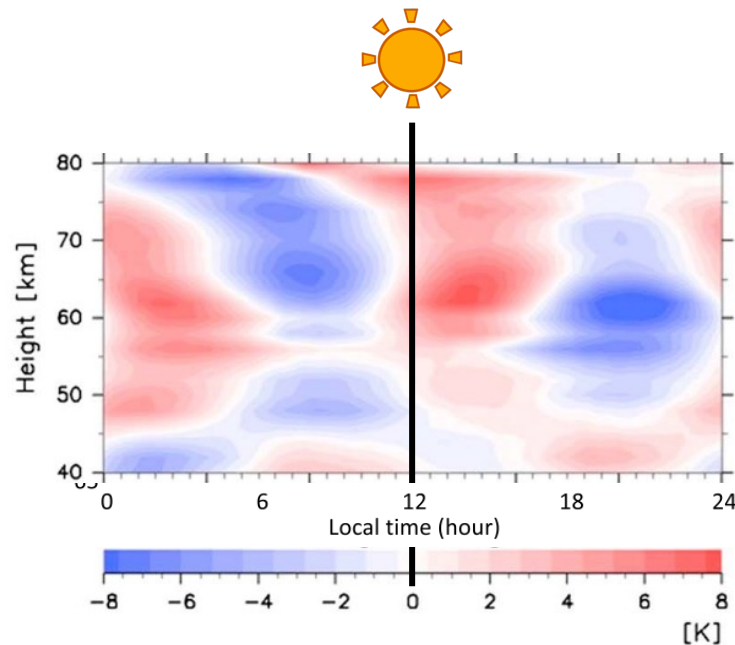
② データ同化システム

→ ALEDAS-V (Sugimoto et al. 2017) (AFES LETKF Data Assimilation System for Venus)

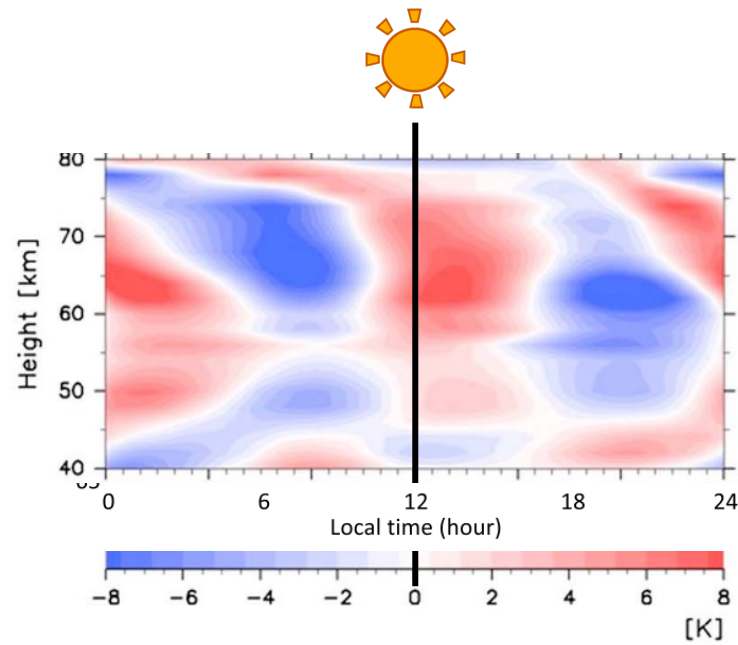
熱潮汐波の位相改善 (Sugimoto et al. 2019)

• 温度のローカルタイム高度断面(赤道上)

- Venus Express 水平風速をALEDAS-Vの高度70kmに同化、温度の位相が改善

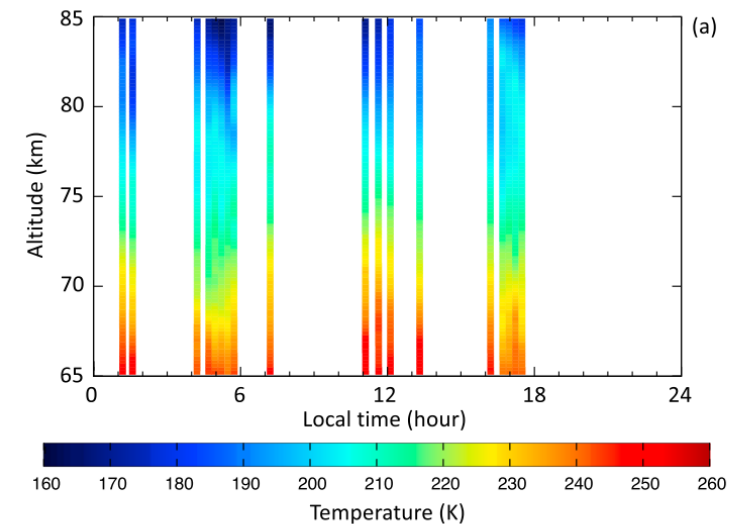


FR (free run)



analysis

30地球日平均。東西平均からの偏差



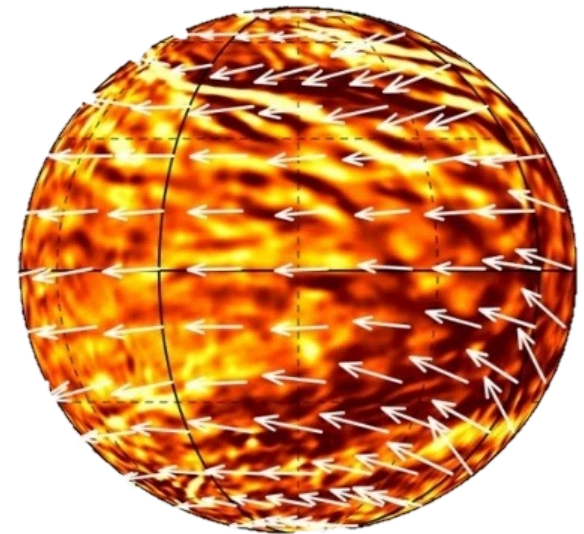
あかつきの電波掩蔽観測(Ando et al. 2018)

本発表では

- 金星の解析データを作成公開
- あかつき観測により得られる水平風速を同化
- 作成した解析データについて、
熱潮汐波を中心にして以下について検証
 - 熱潮汐波の位相・振幅
 - 東西平均風速場（スーパーローテーション）

AFES-Venus (金星版大気大循環モデル)

- 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; 赤道付近で300km格子)
- 初期値: スーパーローテーションを仮定した東西風(4地球年スピナップ)
- 比熱: C_p 一定 (1000 J/kg/k)
- 水平超粘性: 0.1地球日の e-folding time
- 鉛直超粘性: $0.15 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$
- 地形や惑星境界層はなし
- 太陽加熱:
 - 日変化成分を含む
 - Tomasko (1980) と Crisp (1989) に基づく
- 赤外放射過程: ニュートン冷却で簡略化
$$dT/dt = -\kappa (T - T_{\text{ref}}(z)) \text{ (Crisp, 1986)}$$



Kashimura+2019

◆ Sugimoto+2019

ALEDAS-V (データ同化システム)

- アンサンブルメンバー: 31
- データ同化サイクル: 6時間
- 観測ウィンドウ: 1時間
- インフレーション: 10 %
- 局所化パラメータ (水平): 400 km
- 局所化パラメータ (鉛直): $\log P=0.4$ (P: 圧力) ~ 4km
- 観測誤差 (風速): 4.0 m/s
- 9時間予報をして(t=0)、t=3からt=9を同化に用いる。
- 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)

◆ Sugimoto+2017

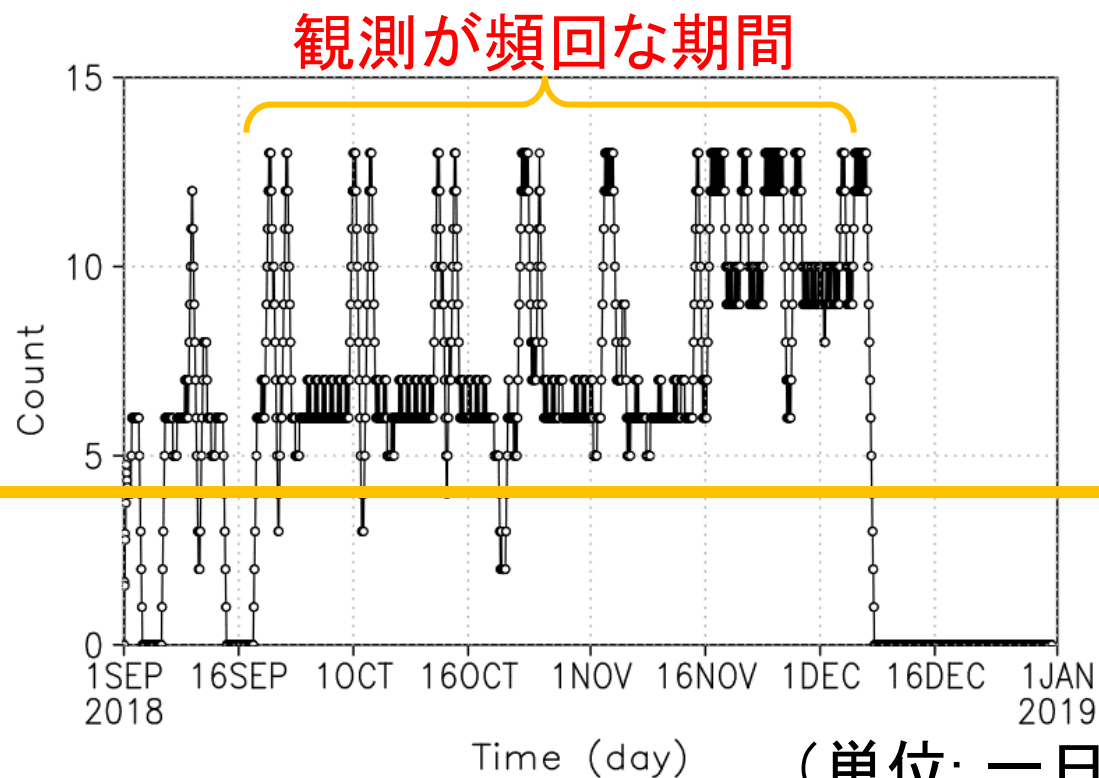
観測データと同化期間

- 使用データ: あかつき紫外イメージャ(365nm)の雲追跡(水平風速)
 - Release : 20190903/CMV_UVI_201512-201812/
 - Filename : concat_365_eps10_pphvlen2.nc
 - Resolution : 120x60
 - Produced by : Horinouchi et al. (2021) <https://doi.org/10.17597/isas.darts/vco-00020>
 - References : Ikegawa and Horinouchi (2016), Horinouchi et al. (2017), Horinouchi et al. (2018)
- 高度70kmに同化。加工は特にしていない。
- 同化期間
 - epoch1: 201612 – 201701
 - epoch2: 201707 – 201709
 - epoch3: 201802 – 201804
 - epoch4: 201809 – 201812(今日の発表)

観測 (201809-12) 観測頻度

- 今回のデータ同化の設定では6時間に1回以上の観測が望ましい
- 9月下旬から12月上旬にかけて観測が頻回

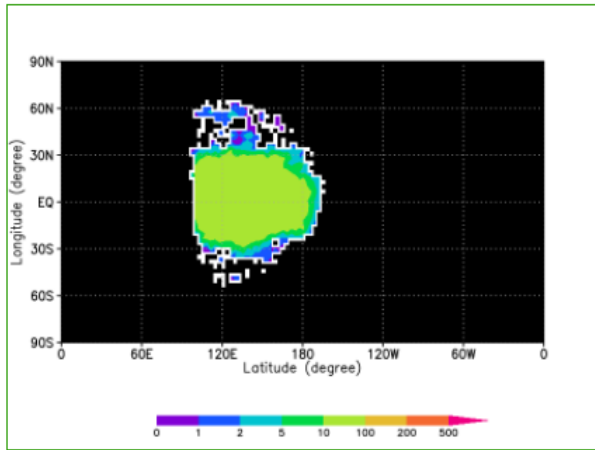
1日に4回
(6時間に1回)
の観測



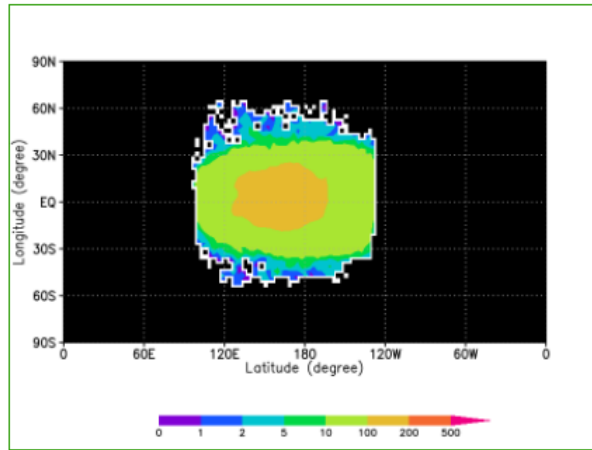
観測(201809-12) データ数(1か月あたり)

- 一番データ回数の多い11月では、1か月あたり赤道付近では200回以上500回未満。
- 観測の少ない9月と12月は、100回弱。

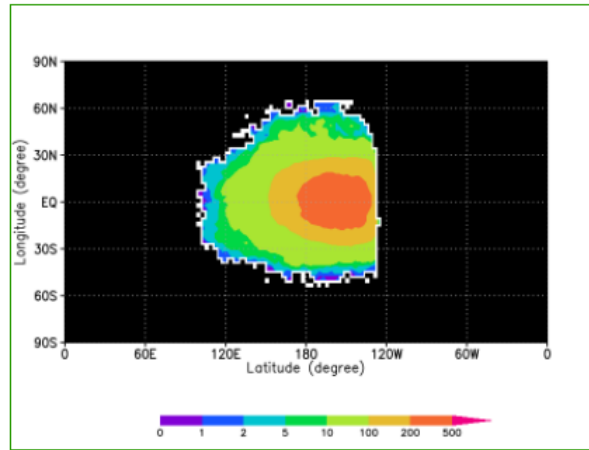
201809



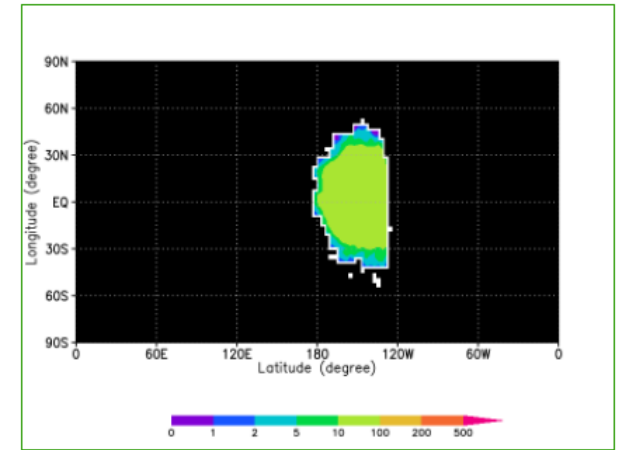
201810



201811



201812

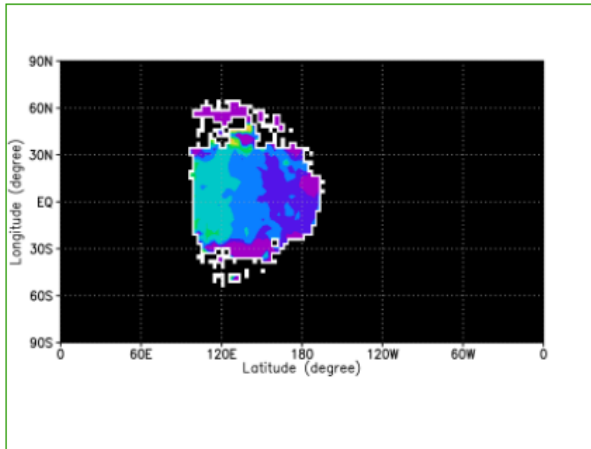


(単位: 1か月あたりの観測回数)

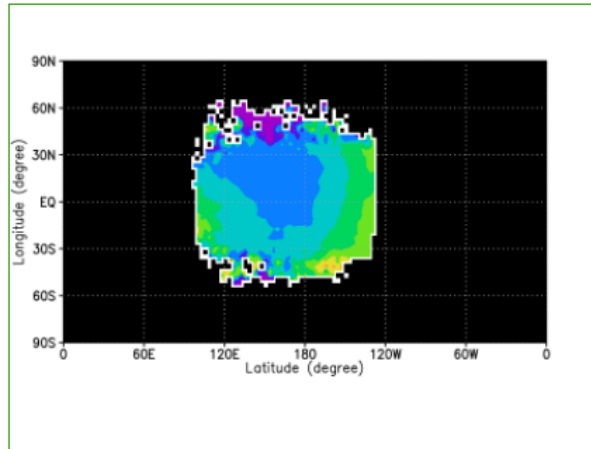
観測 (201809-12) 東西風

- 東西風は、太陽直下点付近に極小値が来る構造。
- 風速は80~100m/s

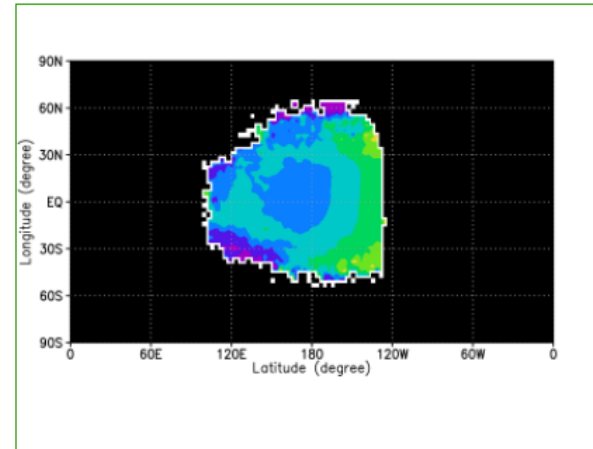
201809



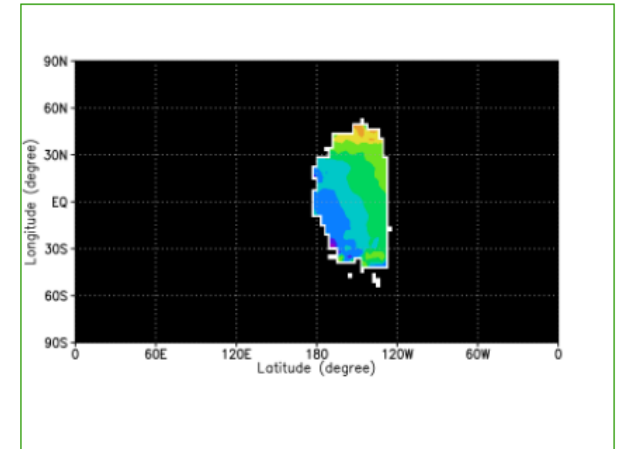
201810



201811



201812

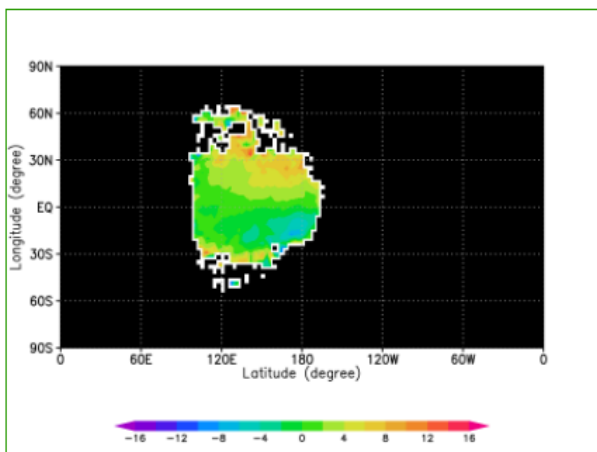


(m/s)

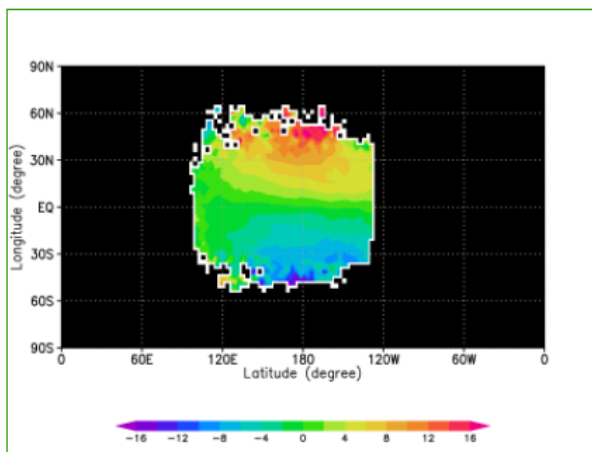
観測(201809-12) 南北風

- 南北風は、極大値(極小値)は、北緯(南緯)60度付近にある構造

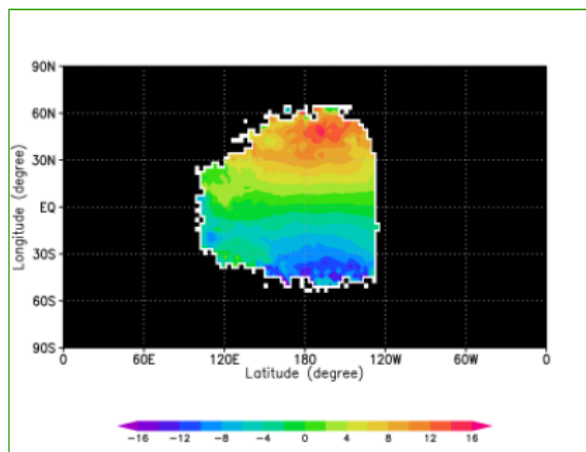
201809



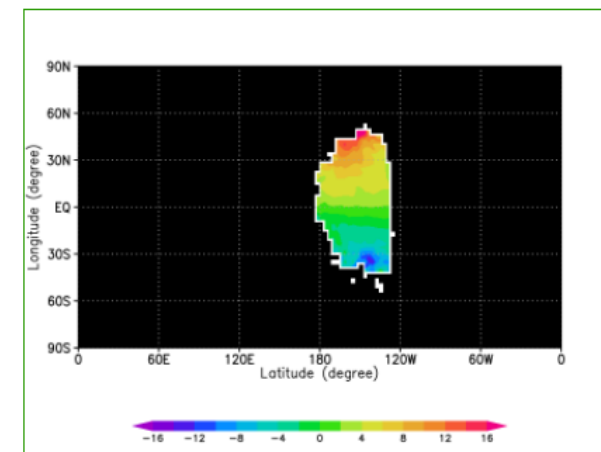
201810



201811



201812



(m/s)

同化のインパクト RMSD(高度70km)

- RMSD(平均二乗偏差)

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - x_i)^2}$$

X_i : FR (free run; 同化なし)

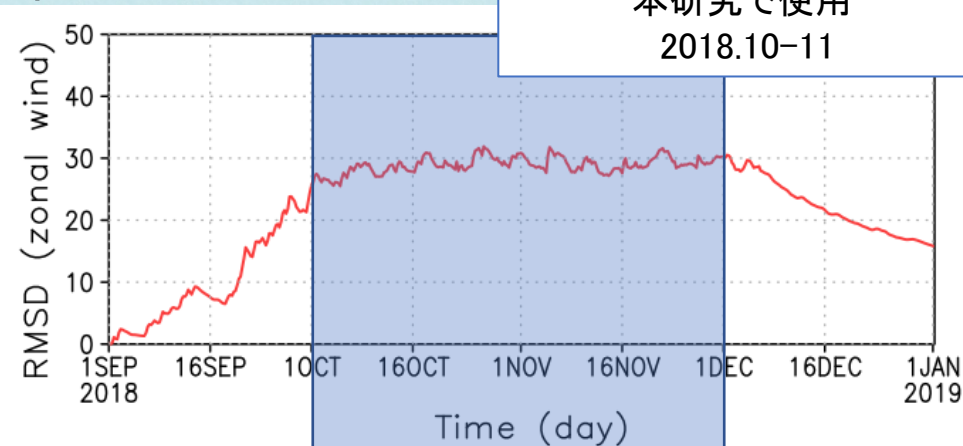
x_i : 解析データ(同化あり)

N : 格子点数

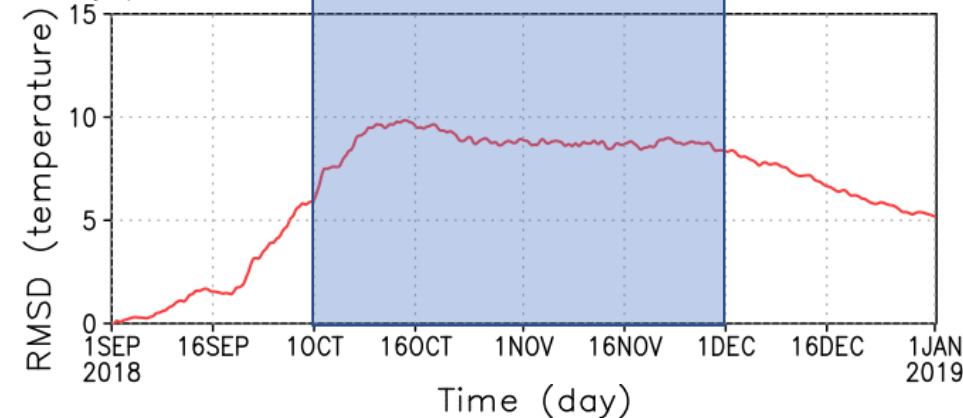
- 結果(高度70km)

- 観測が頻回になる9月の下旬以降に値が大きくなり、一定の値を保持し、12月に値が小さくなる。
- 観測がなくなれば、モデル本来の挙動(RMSD=0)に徐々に戻っていく。
- 温度も風速と同じような動きをする。風速を同化することで温度場も変化する。
- → 今後は、同化の効果が現れているとみられる、2018年10-11月の結果について見ていく。

東西風



温度



水平風東西偏差 ローカルタイム緯度断面(高度70km)

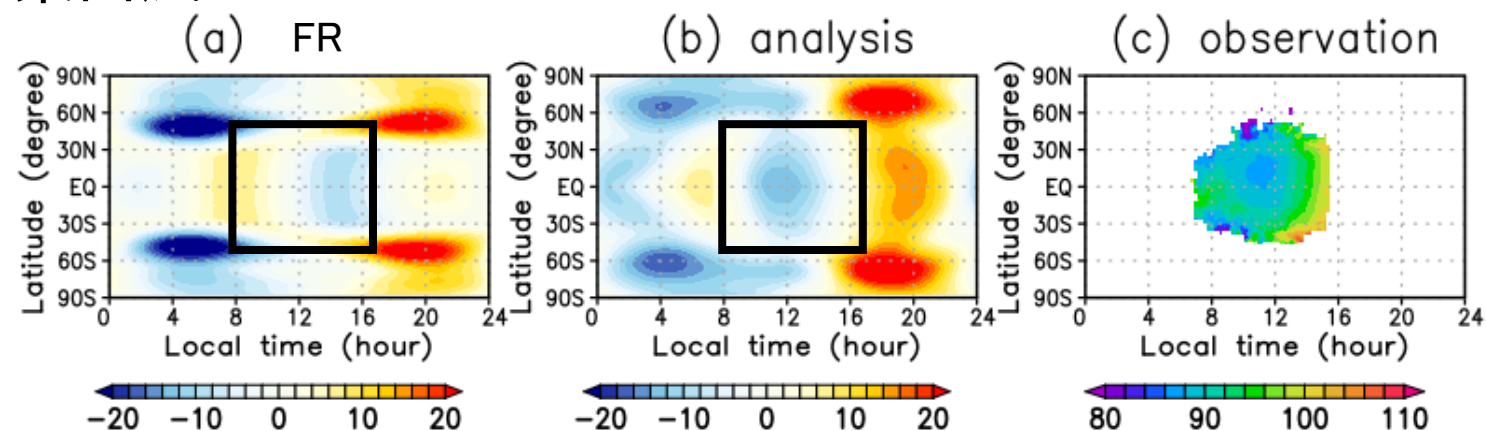
- FR(free run) との比較

- (位相) 東西風の極小値は、14時→正午にシフト
- (位相) 南北風の極大値は、午後側にシフト
- (振幅) 大きくなった

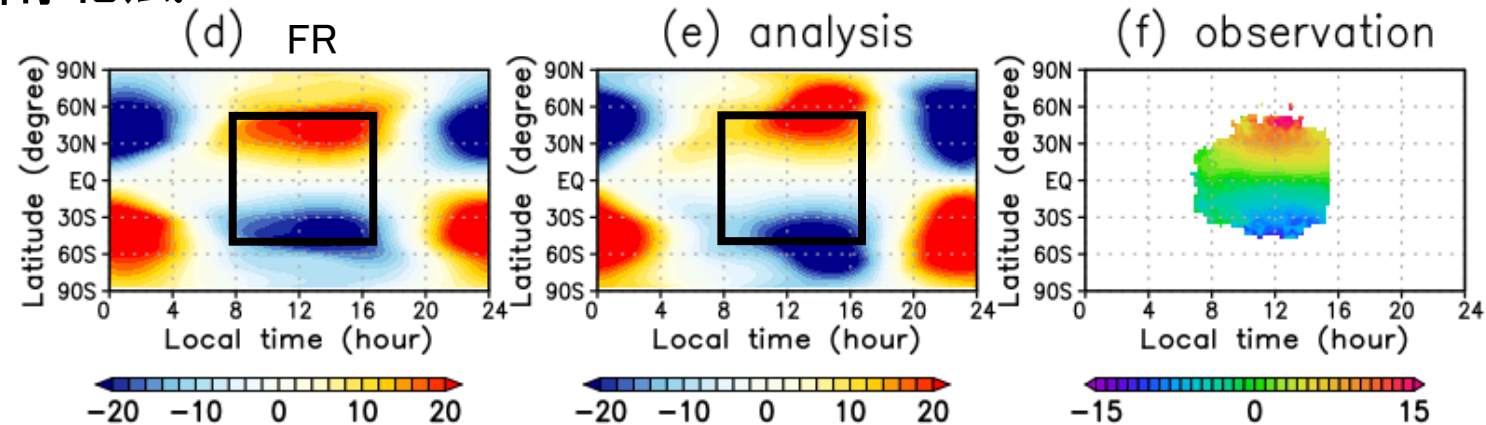
- 観測との比較

- (位相) 東西風、南北風ともに、観測と近い形になった。

東西風



南北風

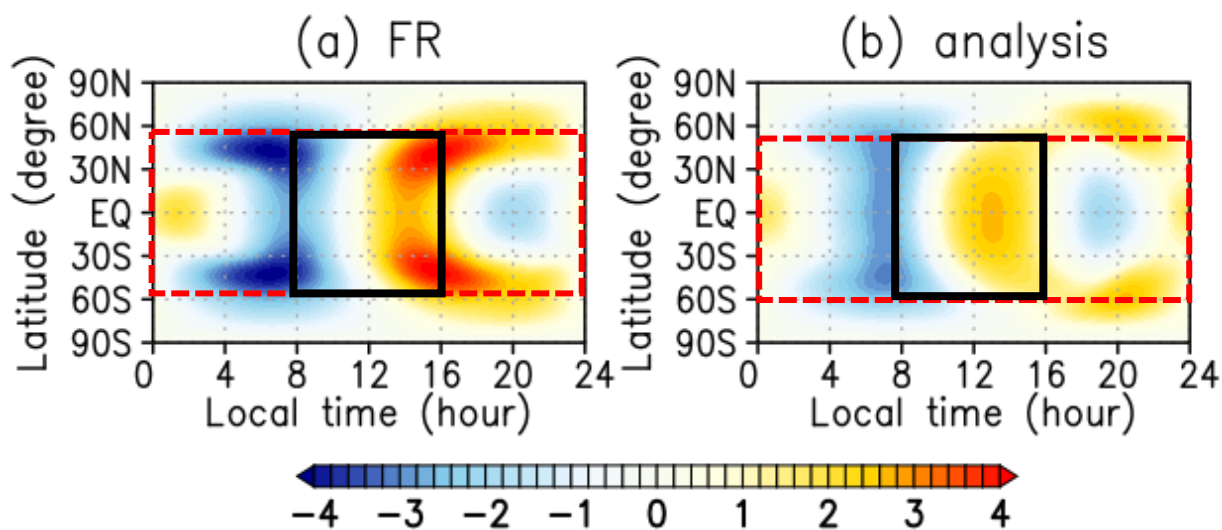


(10-11月平均。(a,b,d,e)東西平均からの偏差 (c,f) 生の値)

温度東西偏差ローカルタイム緯度断面

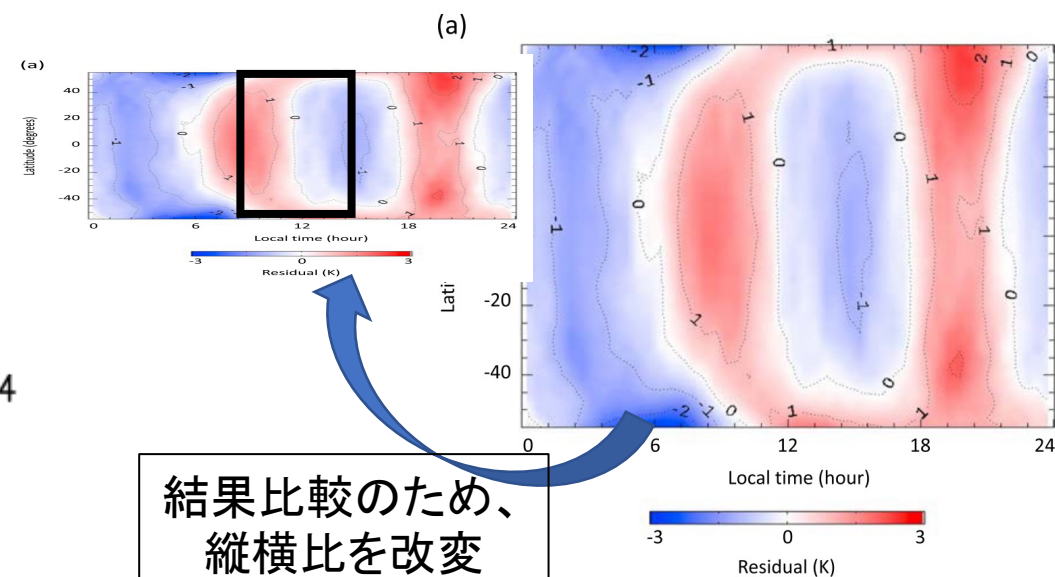
観測との比較

- 同化した結果、温度分布は観測とよく似た形になった。
- しかし、赤道付近における東西波数2の位相は、約6時間ほど異なる。



(10—11月平均。東西平均からの偏差。

Taguchi et al. (2017)の加重関数を用いて鉛直方向に平均)



結果比較のため、
縦横比を改変

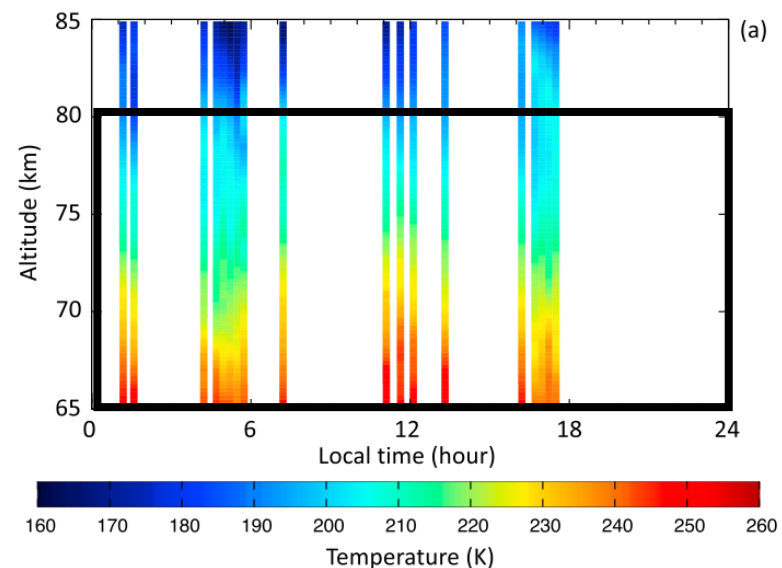
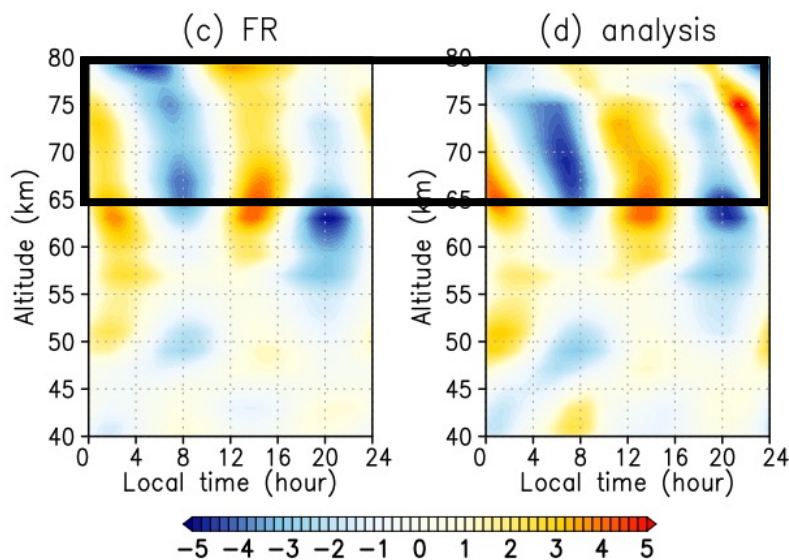
LIR 観測

(Kouyama et al., 2019)

温度東西偏差 赤道上ローカルタイム高度断面

観測との比較

- (位相) 電波掩蔽観測では、東西波数2の構造が、高度が高くなるにつれてローカルタイムが早くなるように傾いている。同化した結果、観測と同様の傾きが再現された。
- (振幅) 高度70km付近では大きくなり、80km付近では小さくなっている。

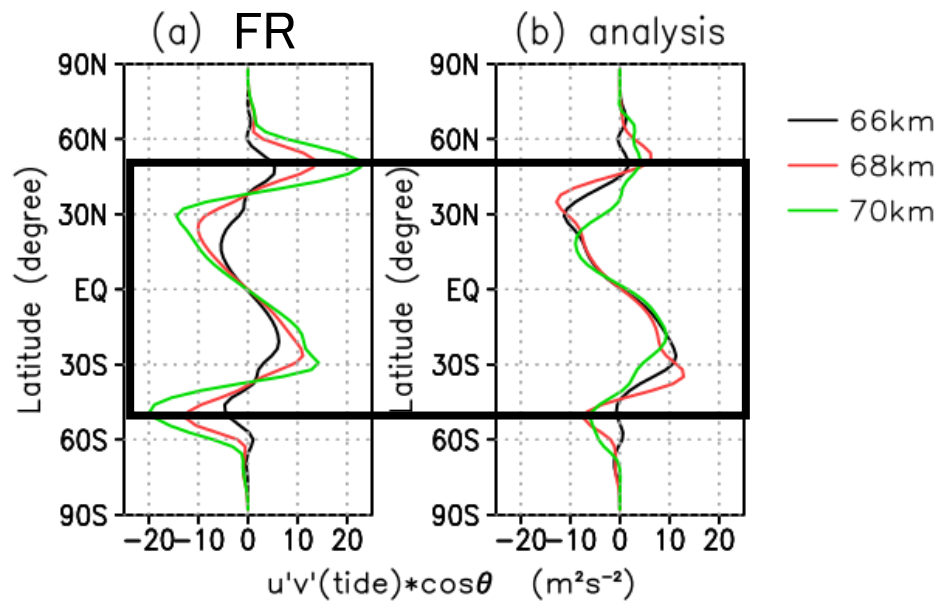


(東西平均偏差。波の視認性のため $\sqrt{\rho / \rho_{70\text{km}}}$ をかけている)

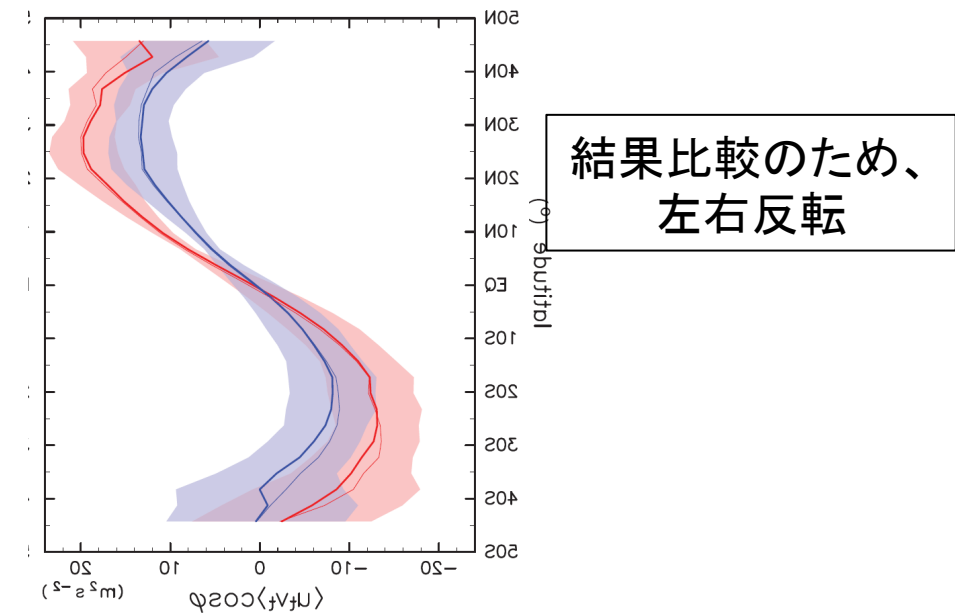
電波掩蔽観測(Ando et al., 2018)

角運動量フラックス $\langle u' v' \rangle \cos \theta$ 熱潮汐波成分

- Horinouchi et al. (2020; H2020) は、あかつきUVI観測を用いて、熱的潮汐が角運動量を雲頂部で赤道方向に輸送することを示した。
- FRで北緯50° (S)付近の正(負)の値であるが、解析データではほぼゼロになり、H2020と同様の結果が得られた。



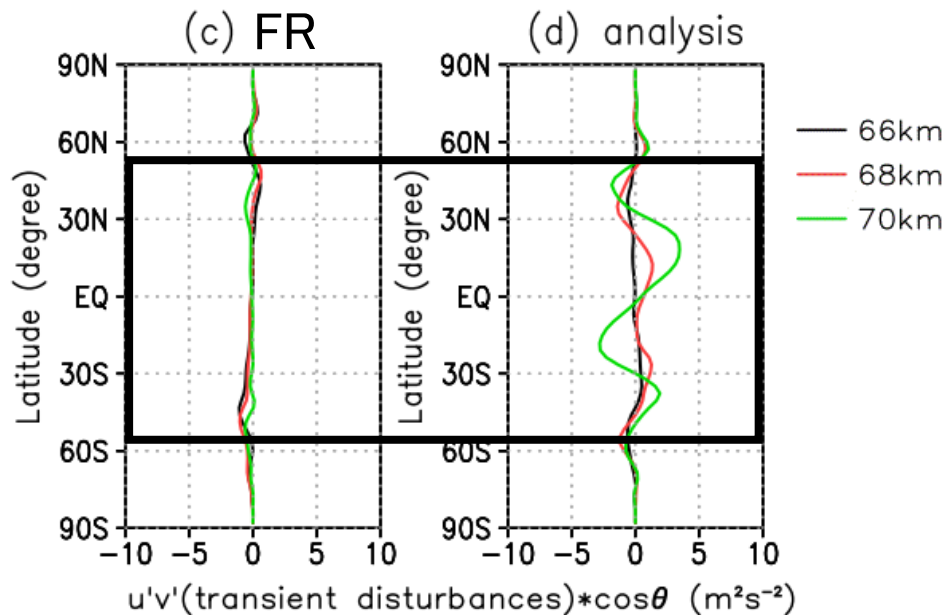
角運動量フラックスの熱潮汐波成分



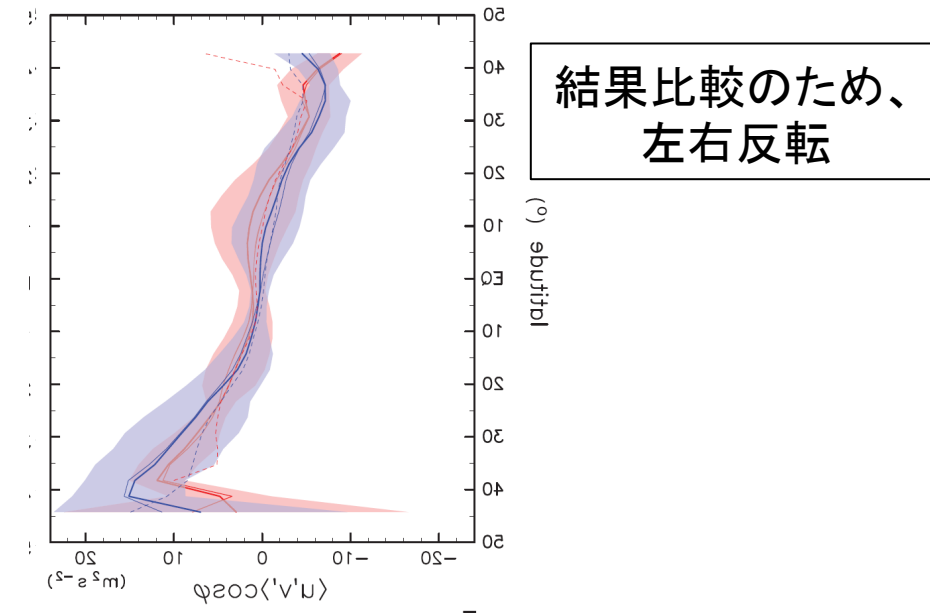
あかつきUVI観測から得られる角運動量フラックスの熱潮汐波成分 (Horinouchi et al. 2020)

角運動量フラックス $\langle u' v' \rangle \cos \theta$ 熱潮汐波以外

- Horinouchi et al.(2020; H2020)は、擾乱成分が雲頂で角運動量を極方向に輸送することを示した。
- FRおよび解析データでは、角運動量フラックスはH2020のものよりも小さい。



角運動量フラックスの擾乱成分

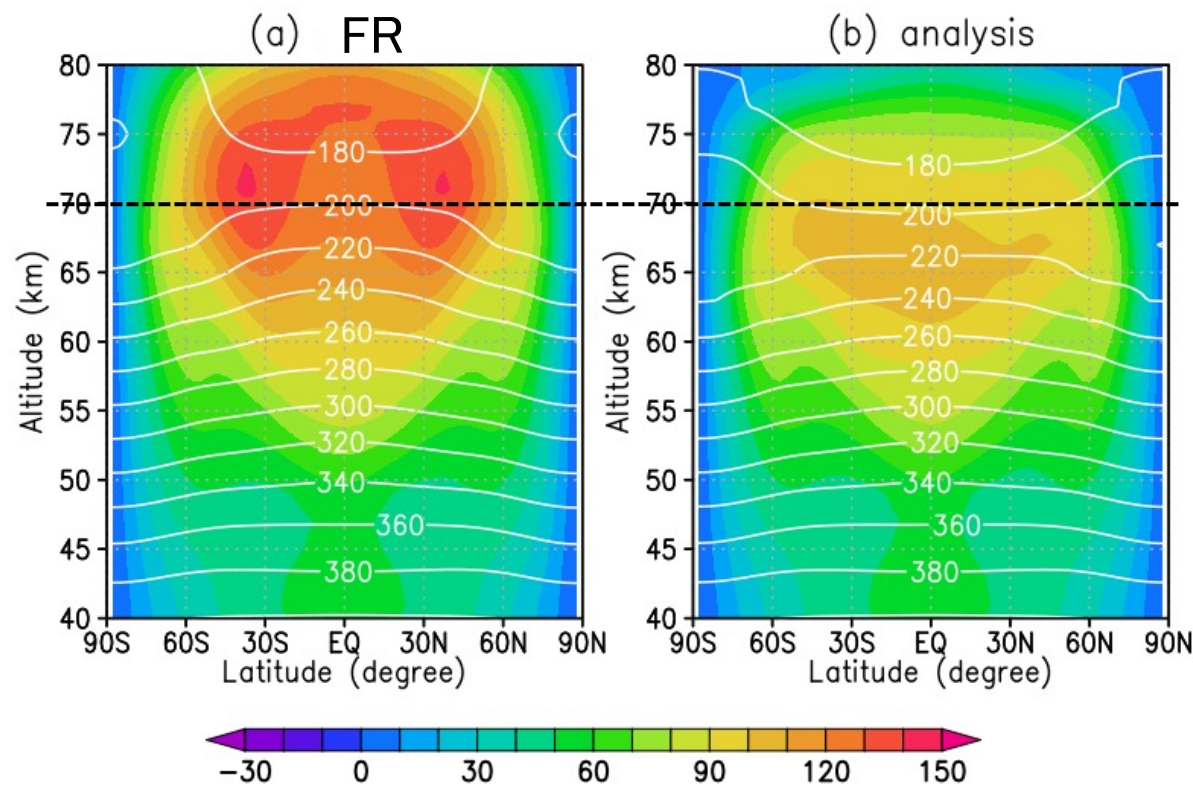
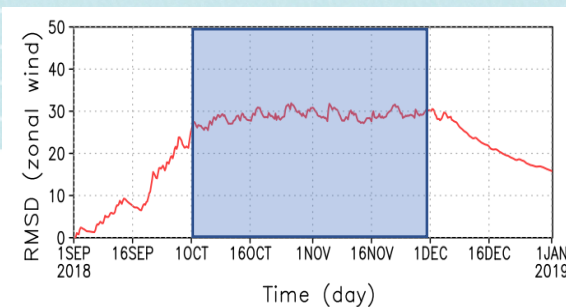


あかつきUVI観測から得られる角運動量フラックスの擾乱成分 (Horinouchi et al. 2020)

時間東西平均東西風・温度 緯度高度断面

- FR(free run) との比較
 - FR:
高度約70km付近で約130m/s
中緯度ジェット強い
 - 解析データ:
高度約60km付近で約100m/s
中緯度ジェット弱
- RMSD 偏差は平均東西風によるもの
- 特に高度80km付近で大きく減速

高度70km東西風RMSD



(時間東西平均。カラーは東西風、コンターは温度)

まとめ：金星解析データ

- あかつきのUVI観測で得られた水平風速のデータ同化により、
 - 風速場・温度場の熱潮汐波の位相が改善された。
 - 熱潮汐波の振幅が大きい方に修正。
 - 平均東西風が減速され、スーパーローテーションが改善された。
- 金星解析データにより、
 - 時間・空間的に様々なスケールの全球的な現象の分析
(惑星規模の短周期波動群、コールドカラー、
スーパーローテーションの時間変動)
 - 観測との答え合わせやその成因の調査

まとめ：金星解析データの公開

- 今回の同化結果をファーストアナリシスとしてweb公開
 - データフォーマット: NetCDF
 - 同化期間:
 - epoch1: 201612 – 201701
 - epoch2: 201707 – 201709
 - epoch3: 201802 – 201804
 - epoch4: 201809 – 201811
- Ver2 の作成
 - UVI(283nm)・LIRの同化
 - 同化期間を検討(短周期擾乱の解析に適した期間等)

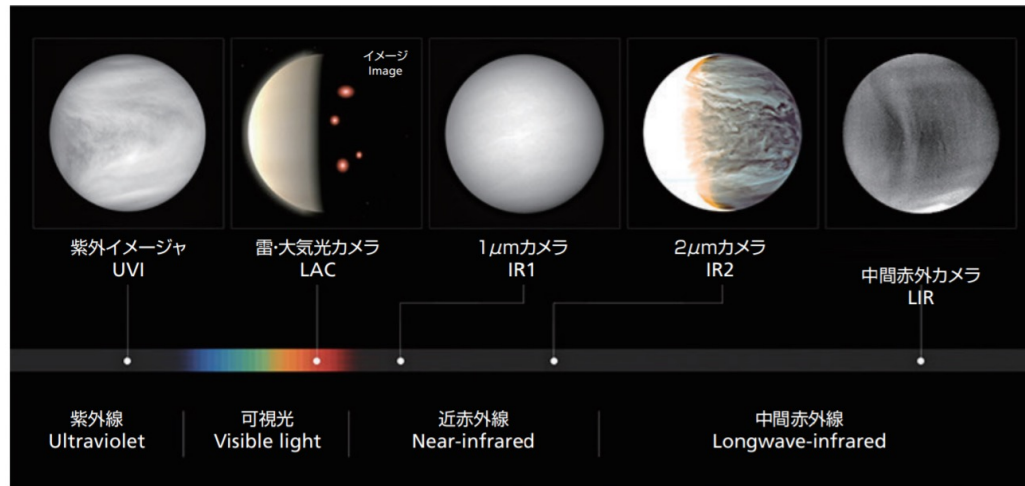
観測システムシミュレーション実験

金星の衛星観測計画(カメラ観測)

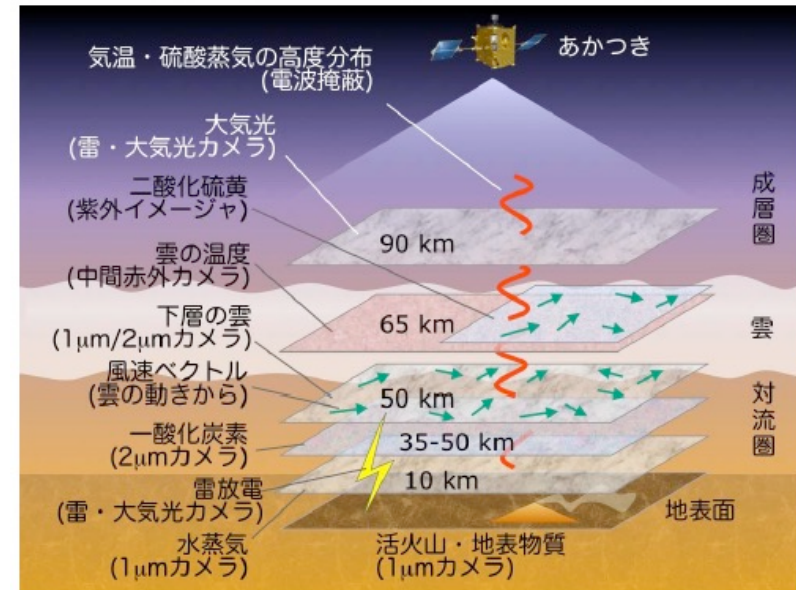
金星探査機あかつき

- あかつきに搭載されたカメラにより、2015年12月以来、雲追跡による水平風速(紫外イメージャ; UVI)や温度場(中間赤外カメラ; LIR)等の観測データが蓄積されている

⇒金星であかつきの後継となる衛星計画を実施する場合に、その観測条件をOSSEで評価できるとよい



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



Venus Climate Orbiter "AKATSUKI" (PLANET-C) https://global.jaxa.jp/projects/sas/planet_c/

金星の衛星観測計画（衛星間電波掩蔽観測）

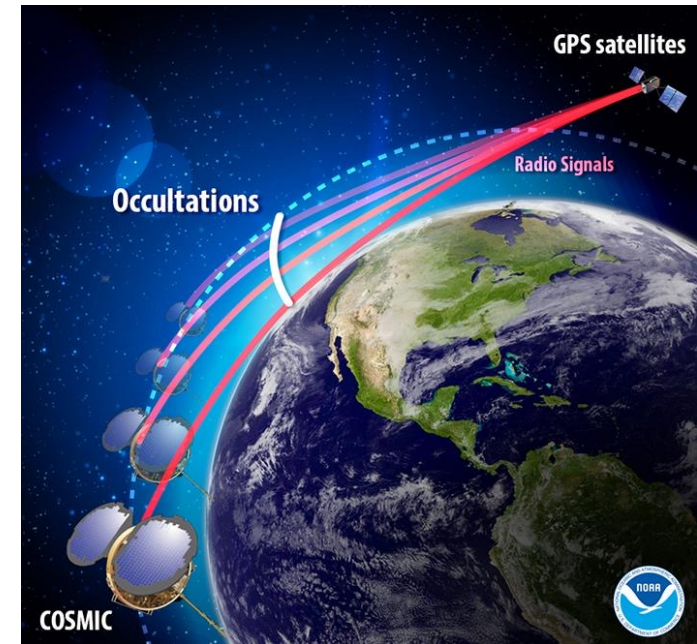
• 電波掩蔽観測

- 金星は、全球的に厚い雲層に覆われ(48–70 km)、下層を観測することが困難
- 金星では、電波掩蔽観測により高度40–90 kmの温度を観測することが可能
- 地球地上局⇔衛星間での観測では、観測範囲・観測頻度に限界

• 衛星間電波掩蔽観測

- 数機の小型の衛星を周回させ、その衛星間で電波掩蔽観測を行うことにより、高頻度・広範囲の観測が可能
- 地球では、GPS衛星を利用して実施されている
(COSMIC@NOAA)

⇒ 金星で衛星間電波掩蔽観測を実施する場合に、その観測条件をOSSEで評価できるとよい



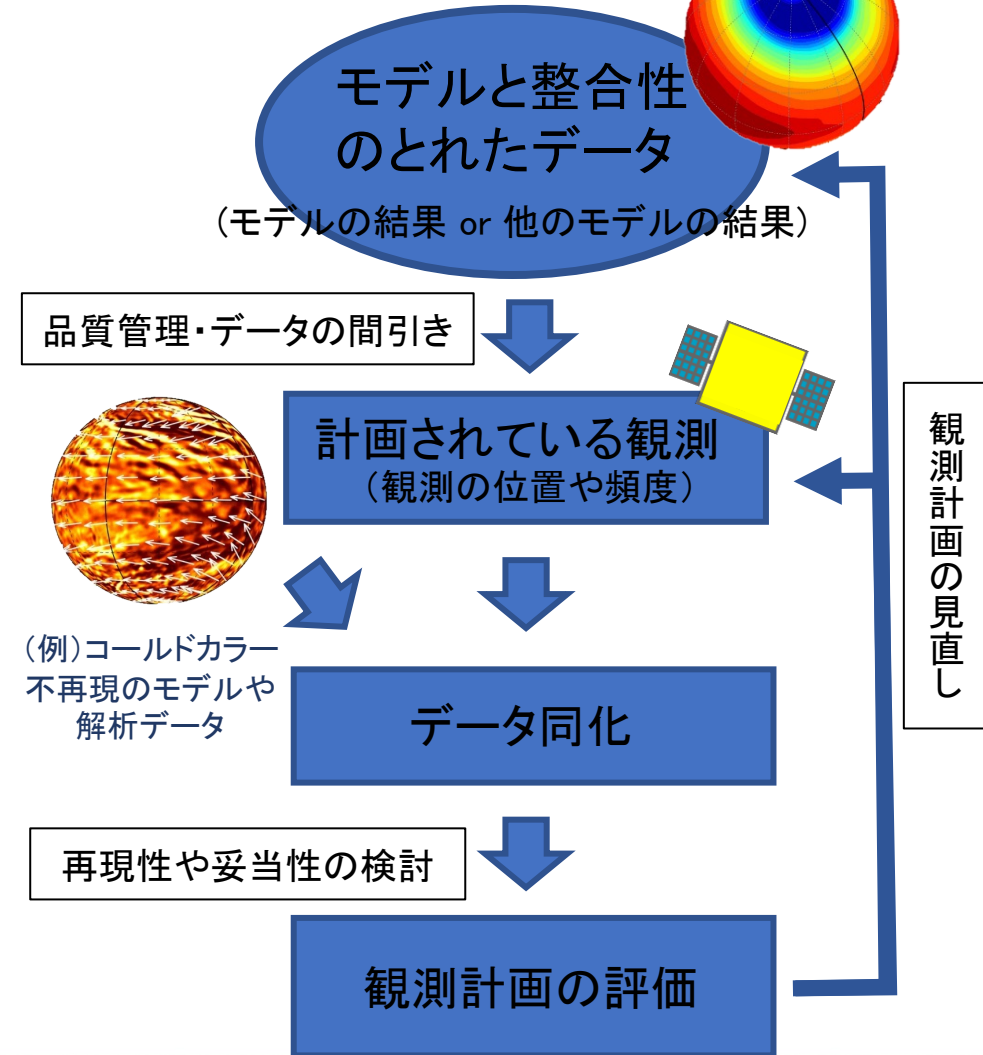
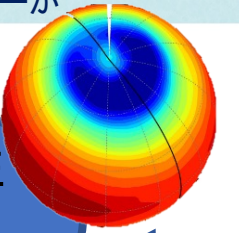
地球における衛星間電波掩蔽観測(COSMIC@NOAA)

観測システムシミュレーション実験 (OSSE)

観測システムシミュレーション実験 (OSSE)

- 仮想の観測を用意してデータ同化実験を行い、対象とする現象の再現性により、観測の有効性を評価する手法
- 地球では、積極的に利用されている(Masutani et al., 2010)
(例)新しい観測機器の導入により、
気象予測能力がどれほど向上するか調査する
- 観測計画の評価を事前に行うことで、観測機器や観測計画の最適化を図ることができる
- 地球以外の惑星では、OSSEの実施例はまだ多くない
 - OSSEの実施に際しては、データ同化システムと観測とある程度ふるまいの近い数値モデルが必要
 - 観測やモデル研究が盛んな火星では、OSSEに関するフレームワークが提唱されている段階(Reale et al., 2021)

(例)コールドカラーが再現された結果



本発表では

- 金星の仮想の衛星観測計画について行った
4つのOSSEのテストケースについて、その概要を紹介する。

実験	仮想の観測データ	軌道
I 小型衛星を用いた衛星間電波掩蔽観測		
① コールドカラー再現	温度 (IPSL Venus GCM)	極付近にも多く観測が存在する軌道
② スーパーローテーション速度改善	温度(AFES-Venus)	低緯度に多く観測が存在する軌道
II カメラ観測 (e.g.あかつき UVI LIR 観測)		
③ 4日周期ケルビン波再現	水平風速(CCSR/GCM)	複数の観測緯度や観測頻度
④ 熱潮汐波の位相改善	温度(AFES-Venus)	複数の観測経度や観測頻度

表: 観測システムシミュレーション実験の種類、及び実験に用いた仮想観測データと軌道

実験結果(衛星間電波掩蔽観測)

① コールドカラー再現実験

Sugimoto et al. (2019)

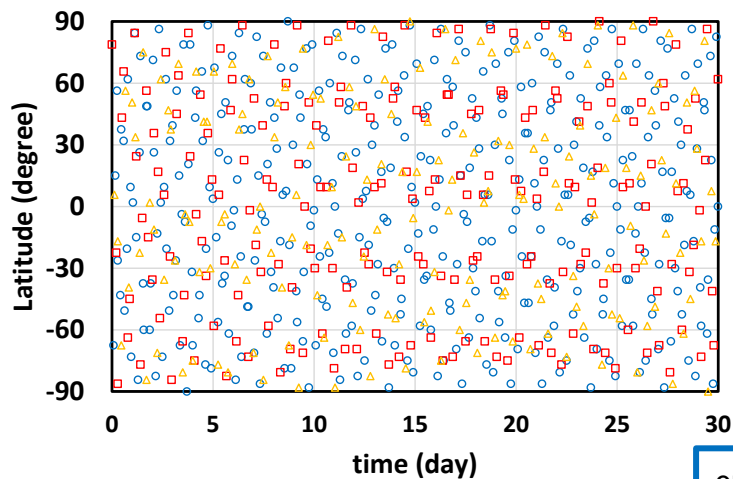
Fujisawa et al. (Icarus改訂中)

• コールドカラー

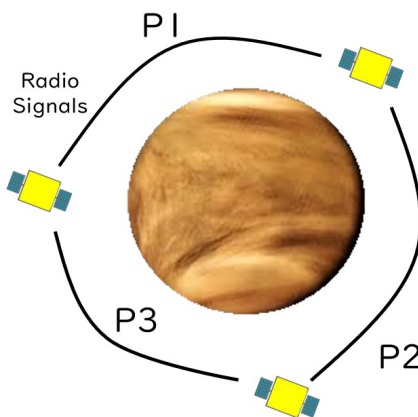
- 金星大気の高度約60-70kmの極域における周辺に比べて温度が高い現象
- GCMにおいて、これまでに適切に表現されていない

• 実験設定

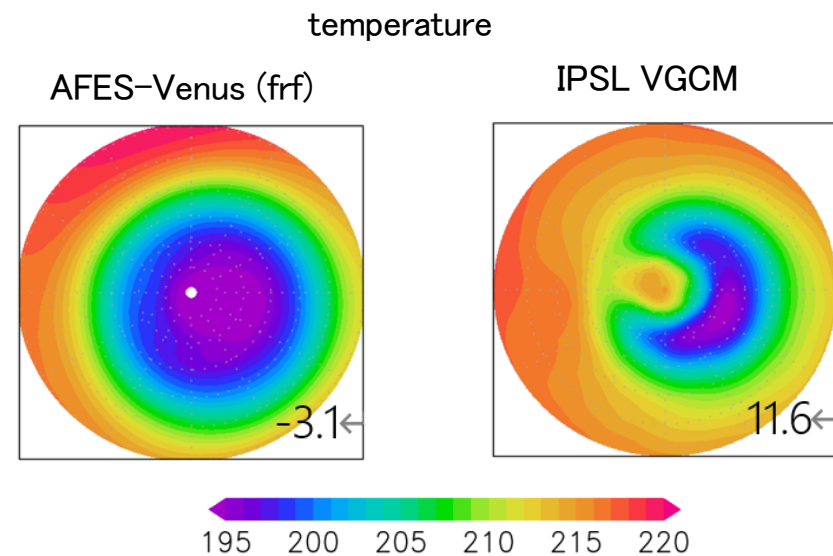
- 疑似観測データ: IPSL Venus GCM(放射強制によりコールドカラーを再現)
- 観測軌道データ: Chi Ao氏作成(3基の衛星)



観測点の緯度時間図



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



モデルと疑似観測データの比較(温度、高度67km, 30-90° N)

実験結果(衛星間電波掩蔽観測)

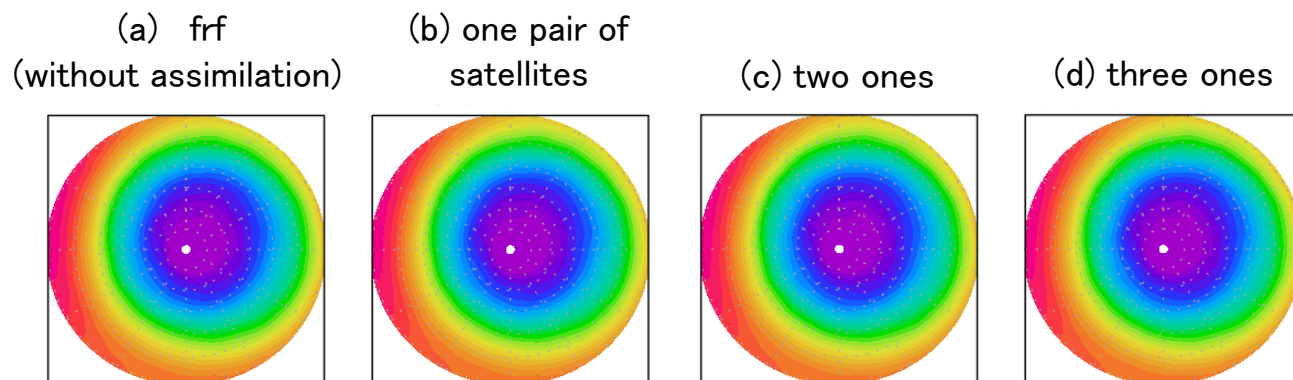
① コールドカラー再現実験

Sugimoto et al. (2019)

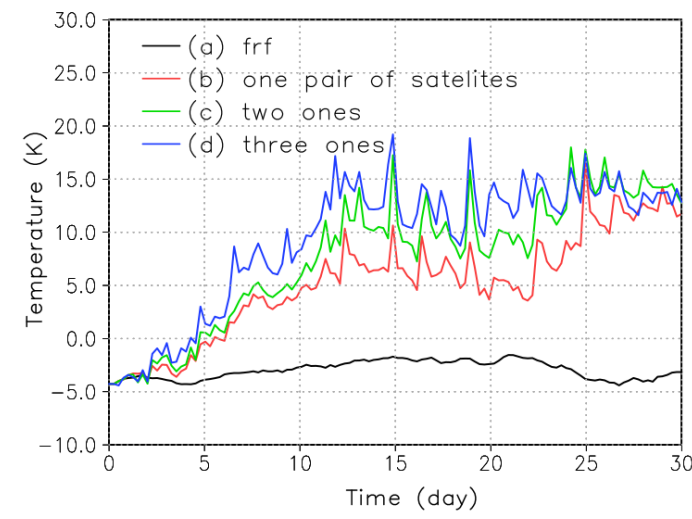
Fujisawa et al. (Icarus改訂中)

• 実験結果

- 今回用いた衛星軌道では、どの衛星ペアの観測を同化した実験の場合でも、周囲よりも極域が温かくなった(左図)
- 3つの衛星ペアの観測をすべて用いたケースでは、他の観測ケースの場合に比べて最も早く極域が温かい状態になり、それが持続した(右図の青線)



温度(高度67km, 30-90°N, 同化開始から30地球日目)



東西平均温度の 87.9°N と 71.2°N との差の時間変化

実験結果(衛星間電波掩蔽観測)

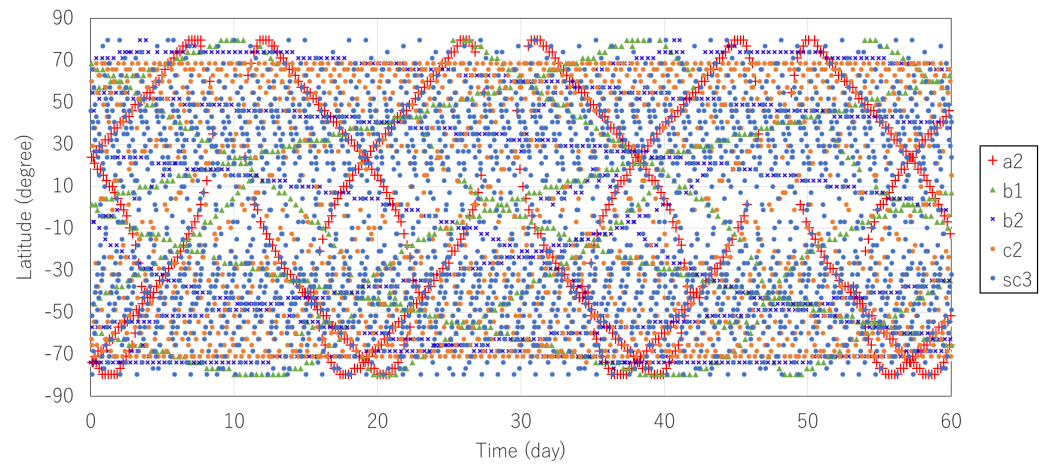
② スーパーローテーション速度改善実験

• スーパーローテーション

- 金星大気における自転方向の高速の風。高度約60kmで約100m/sにも達する
- AFES-Venus の Nature Run は、観測に比べてこの風速が速すぎる

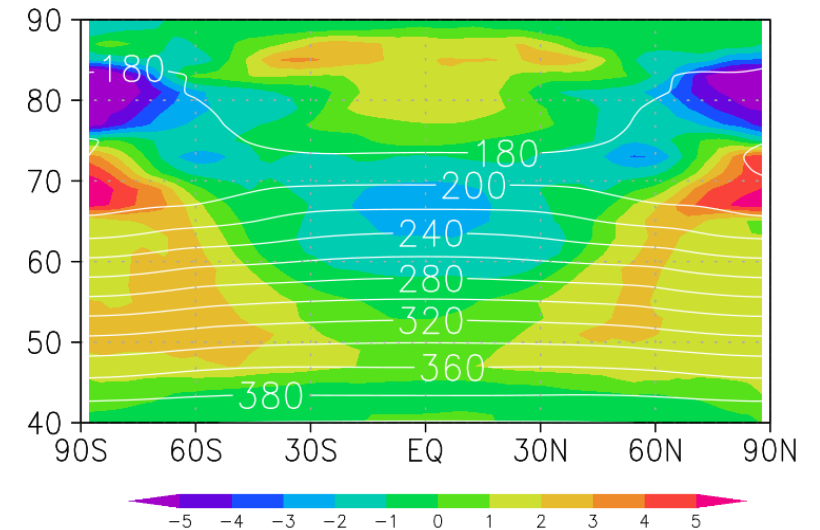
• 実験設定

- 疑似観測データ: AFES-Venus (太陽加熱率をNature Runの80%にしたもの)
- 観測軌道データ: 山本(東大・工学部) (3基の衛星)



観測点の緯度時間図

衛星数	実験名	観測回数
2基	a2	12.2
	b1	14.0
	b2	16.5
	c2	29.8
3基	sc3	44.7



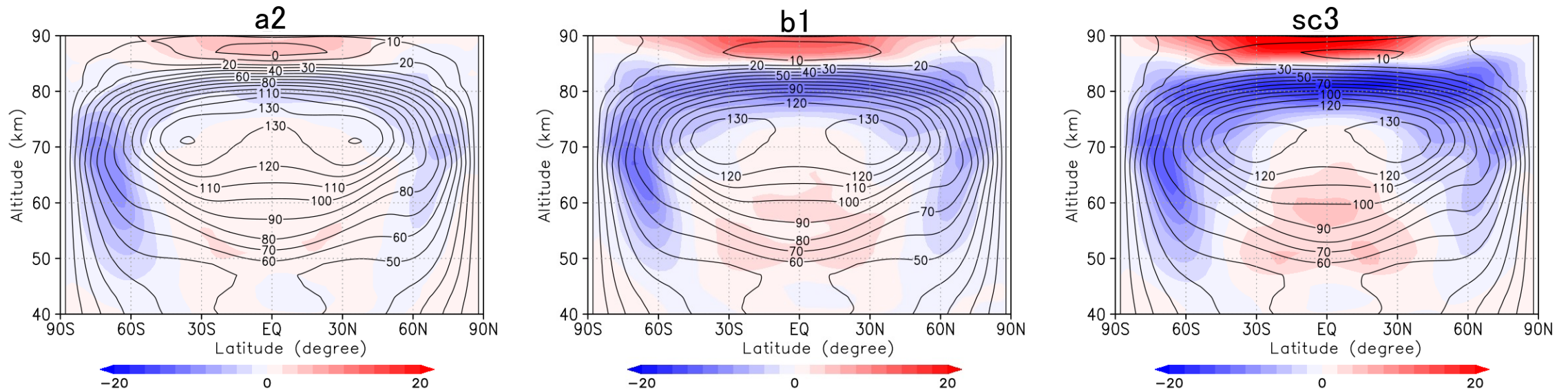
モデルと疑似観測データの温度差
[solar heating 80% run] - [nature run]

実験結果(衛星間電波掩蔽観測)

② スーパーローテーション速度改善実験

実験結果

- 電波掩蔽観測による温度を同化することで、東西平均東西風(スーパーローテーション)が減速
- 観測の多いsc3で減速
- 今後は、子午面循環・南北温度傾度との関係、熱潮汐波との関係について分析をする



東西平均東西風(コンター)及び frf (without assimilation) との差(カラー)の緯度高度図(同化開始から30地球日目)

実験結果 (カメラ観測)

③ 4日周期赤道ケルビン波改善実験

Sugimoto et al. (2021)

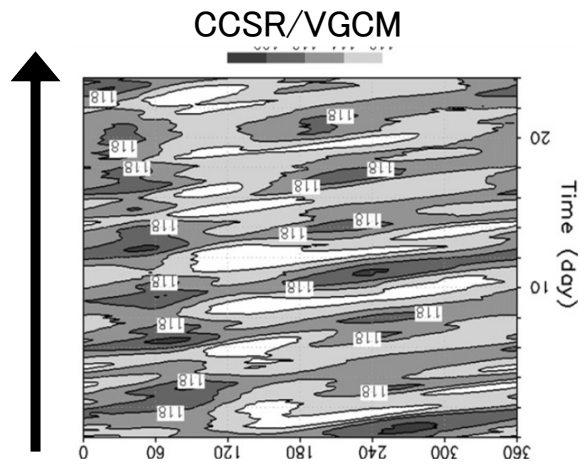
Sugimoto et al. (2022)

• 4日周期赤道ケルビン波

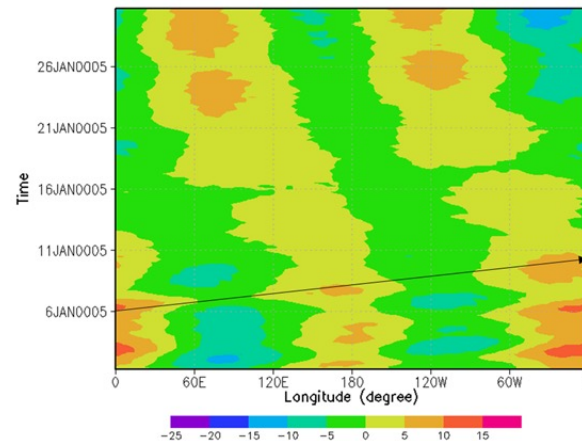
- 金星大気には、観測時期によって雲層上端に赤道ケルビン波が観測される
- AFES-Venusでは、赤道ケルビン波は表現されていない

• 実験設定 (Sugimoto, 2021)

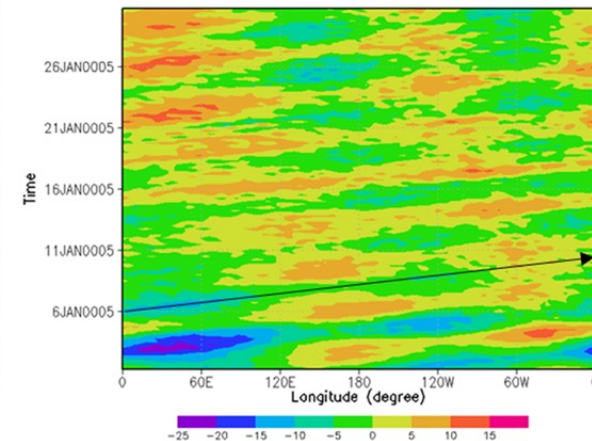
- 疑似観測データ: CCSR/VGCM (山本・九大) (下部強制によりケルビン波を再現)
- 想定する観測 : あかつきUVI観測から得られる雲追跡風 (高度70km, 水平風速)



(a) frf (without assimilation)



(b) 南北0~15度に
6時間に一回の頻度の観測



疑似観測データと同化結果: 東西風の赤道上経度時間断面 (高度70km)

実験結果(カメラ観測)

③ 4日周期赤道ケルビン波改善実験

Sugimoto et al. (2021)

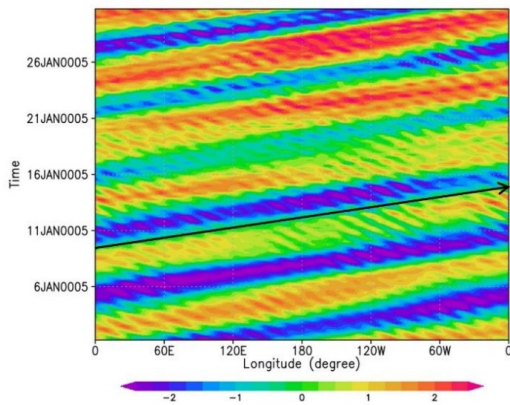
Sugimoto et al. (2022)

• 実験設定 (Sugimoto, 2022)

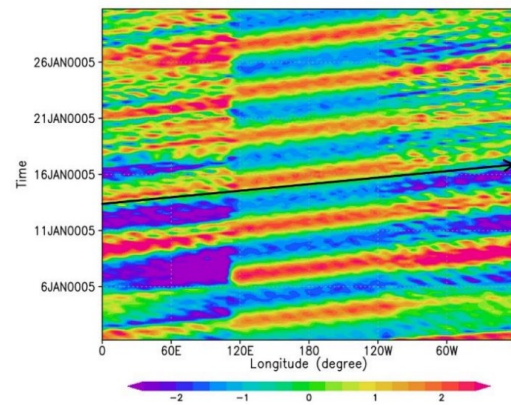
- 疑似観測データ: 今村2006, 神山2015 (線形モデル・60kmから上方伝播ケルビン波)
- 想定する観測 : あかつきUVI観測から得られる雲追跡風 (高度70km, 水平風速)

• 実験結果

- 高度70km、昼間側、6時間に1回の頻度の観測で、4日周期の擾乱が再現された(右図)。FRFは5日周期ロスビー波的構造、同化結果はケルビン波的構造(左図)。

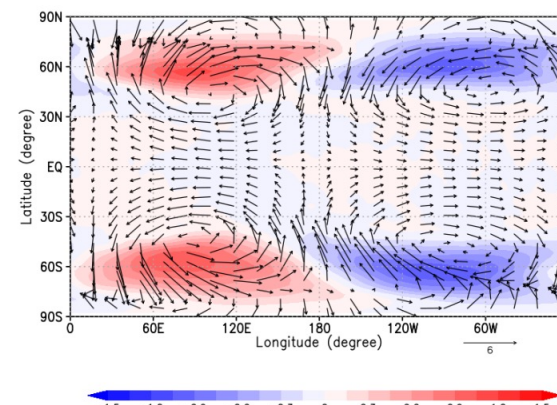


(a) frf

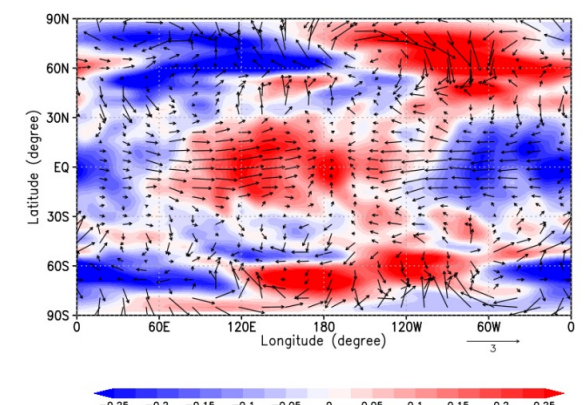


(b) control

東西風の赤道上経度時間断面(高度70km)



(a) frf



(b) control

東西風と温度の緯度経度コンポジット図(高度70km)

実験結果(カメラ観測)

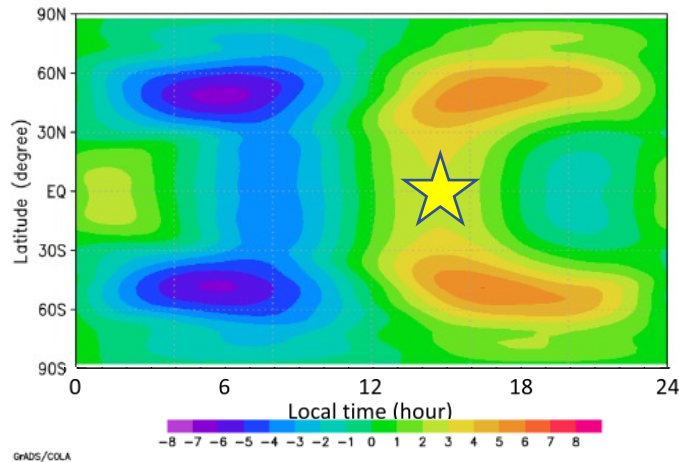
④ 熱潮汐波の位相改善実験

熱潮汐波

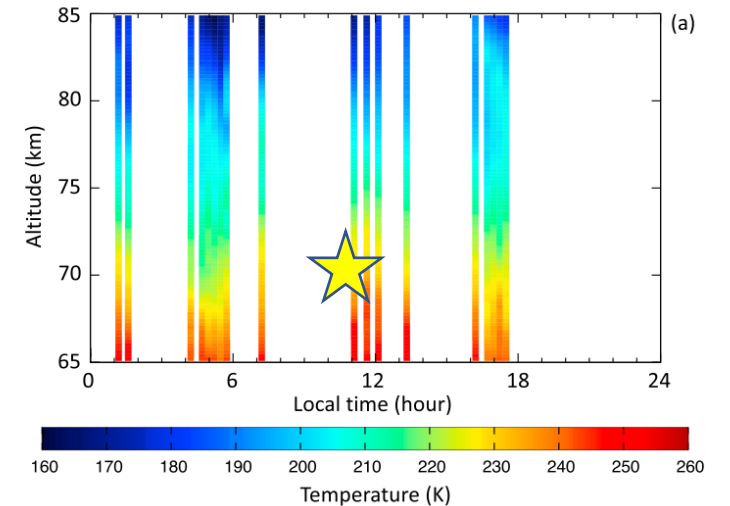
- 雲層上端で顕著に見られる、太陽加熱により励起され太陽の動きとともに移動する波
- AFES-Venusは観測と比べて位相がずれる(★印: 赤道上高度70kmの温度極大値)

実験設定

- 疑似観測データ: AFES-Venus(データを全体的に30度午前側に移動)
- 想定する観測 : あかつきLIR観測(高度70km, 温度)



AFES-Venusの結果について、
太陽直下点を参照点にコンポジット平均した水平断面(高度70km)



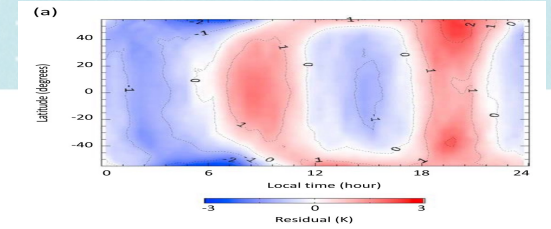
赤道上時間高度断面
あかつきによる電波掩蔽観測の結果
(Ando et al. 2018)

実験結果 (カメラ観測)

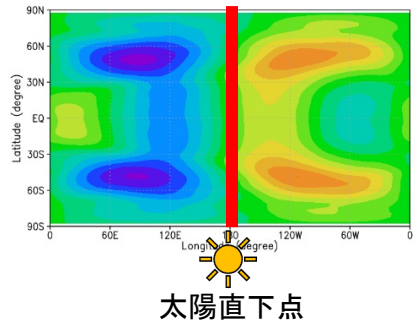
④ 熱潮汐波の位相改善実験

実験結果

- 24時間おき以上の頻回な観測により熱潮汐波の位相が改善
- 温度の同化により東西平均東西風(スーパーローテーション)が減速

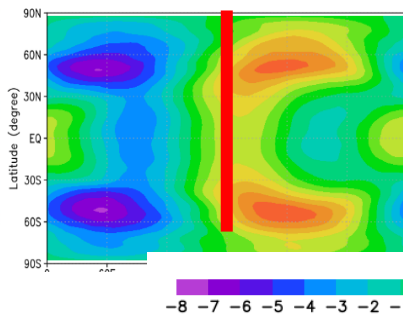


(a) frf
(without data assimilation)

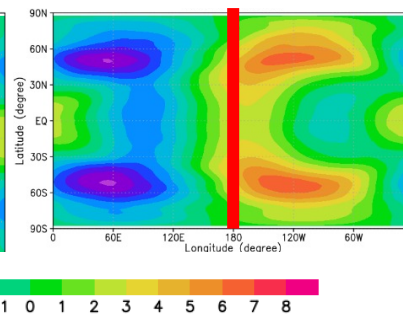


太陽直下点

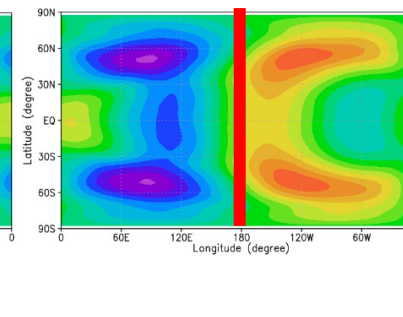
(b) 1時間おき



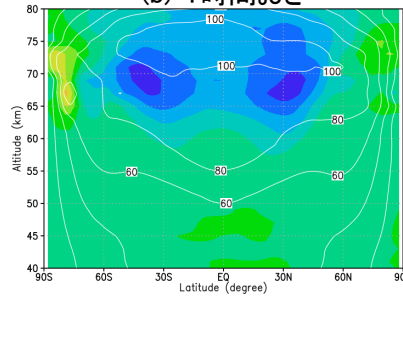
(c) 6時間おき



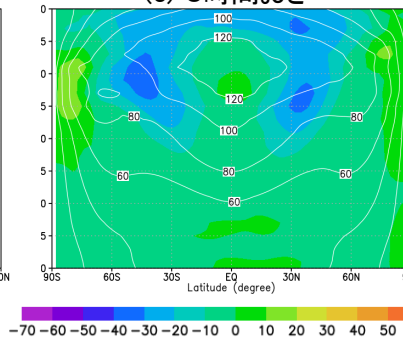
(d) 24時間おき



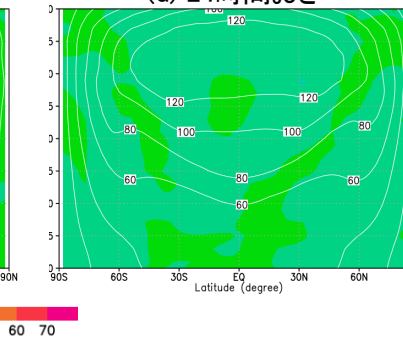
(b) 1時間おき



(c) 6時間おき



(d) 24時間おき



太陽直下点を参照点にコンポジット平均した温度の水平断面(高度70km)

東西平均東西風(コンター)及びfrf (without assimilation) との差(カラー)の緯度高度図(同化開始から30地球日目)

まとめ：観測システムシミュレーション実験

• ALEDAS-Vにより

- 金星大気データ同化システムALEDAS-Vにより、衛星間電波掩蔽観測やカメラ観測について観測条件を仮定して、様々なテスト実験を行っている。
 - コールドカラーやスーパーローテーションといった風速・温度場の修正
 - 熱潮汐波の位相改善
 - 赤道ケルビン波の再現

• 観測システムシミュレーション実験(OSSE)

- 今後、さらにOSSE実験方法を精査することにより、衛星観測ミッションに際して、ミッション実施前に同化の成否に関する諸条件を調査可能(大風呂敷)。
- 解析データを作成するにあたって、モデル結果・同化結果のクセを事前に知っておくことができる。