

# 金星衛星間電波掩蔽観測について

安藤 紘基

(京都産業大学 理学部 宇宙物理・気象学科)

# 本日の発表の概要

- 東大宇宙航空(中須賀・船瀬研究室)と協力し、**複数の小型衛星による金星衛星間電波掩蔽観測**を検討中。
- 金星衛星間電波掩蔽観測により、「何ができるか?どのようなサイエンスを目指すべきか?」議論を深めたい。

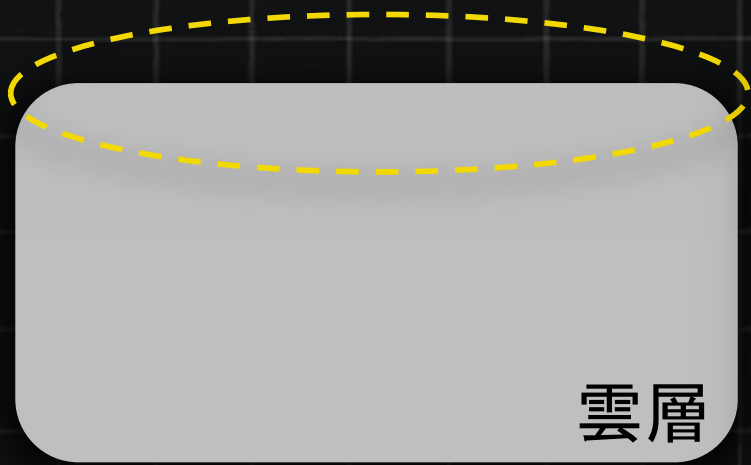
# 金星大気科学の諸問題

- **金星大気スーパーローテーションの生成・維持メカニズム**
  - 子午面循環や大気波動の構造
- **金星大気運動の長期変動**
  - アルベドの長期変動、風速の準周期的変動
- **金星硫酸雲の物理**
  - 雲物理・化学過程、物質輸送、雲の粒径分布、雲粒の組成
  - 紫外で見たY字模様、未知の紫外吸収物質
- **金星CO<sub>2</sub>大気の維持メカニズム**
- **過去の金星に水はあったのかどうか？**

他にもたくさんある・・・。

# これまでの金星観測

雲頂付近



雲層

地面

赤道

極

## ➤ 風速分布やSRメカニズム

- Kouyama et al. (2013), Khatunsev et al. (2013), Horinouchi et al. (2020)...

## ➤ 大気構造

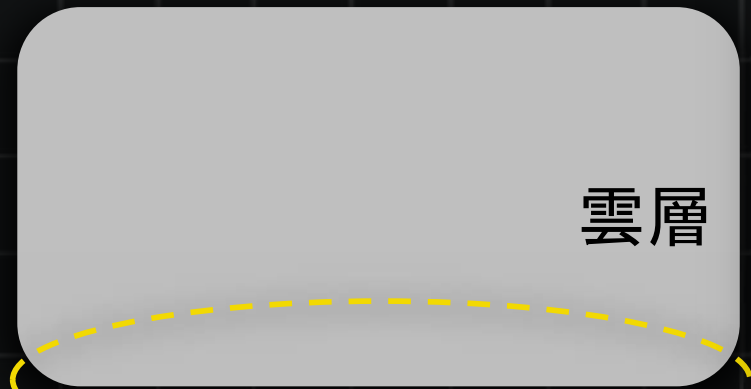
- Taylor et al. (1980), Piccioni et al. (2007), Garate-Lopez et al. (2013) ...

## ➤ 大気波動・雲模様

- Rossow et al. (1990), Fukuhara et al. (2017), Lee et al. (2019), Kouyama et al. (2019), Imai et al. (2019) ...

雲頂付近の観測はとても充実している。

# これまでの金星観測



雲底付近

地面

赤道

極

## ➤ 風速分布

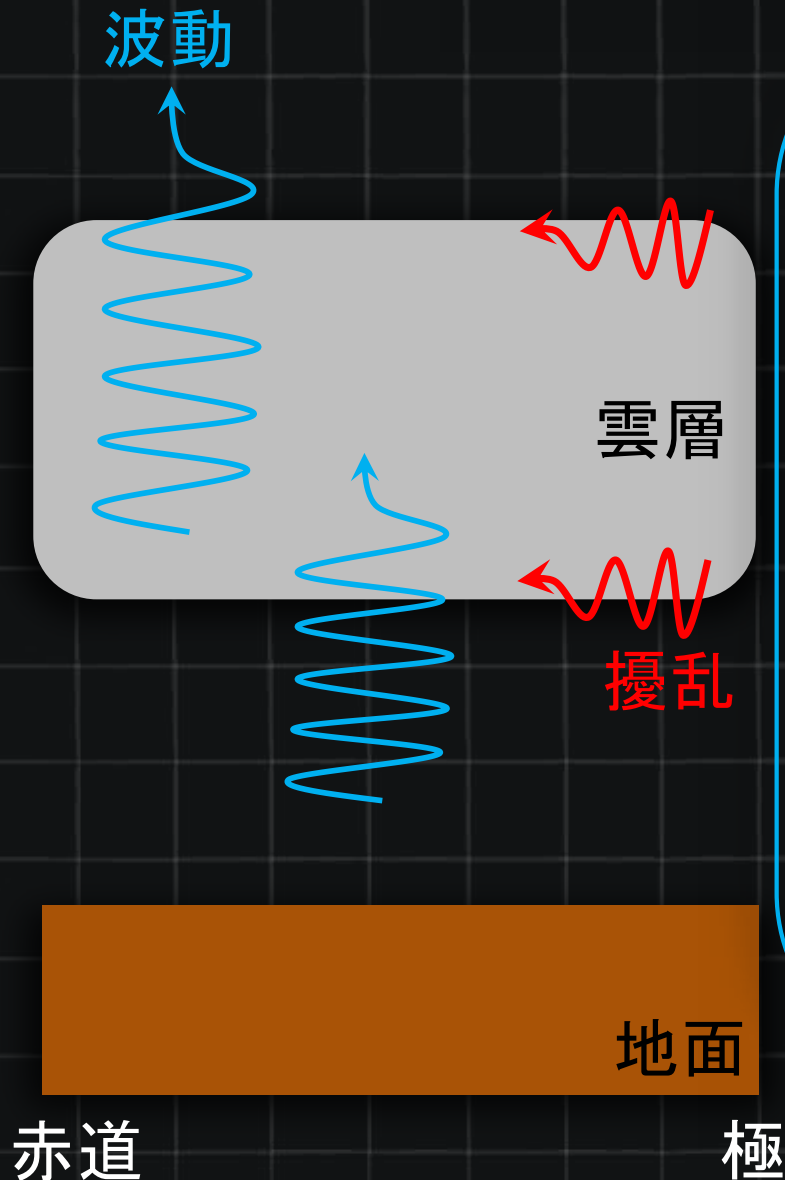
- Horinouchi et al. (2017)

## ➤ 大気波動・雲模様

- Crisp et al. (1991), Carlson et al. (1991), Satoh et al. (2018)

- ・ 雲底付近の観測も増えてつつある。
- ・ 雲層の中や下は微量物質（水蒸気とかCO）の混合比の観測もある。

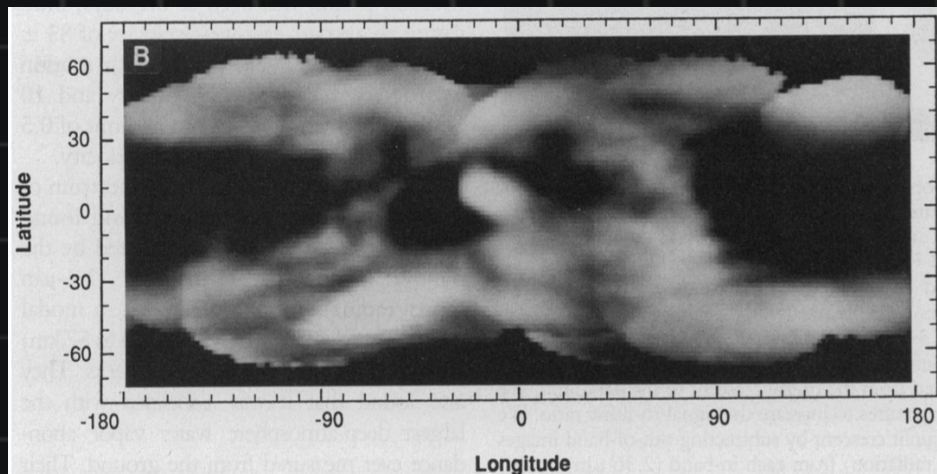
# これまでの金星観測



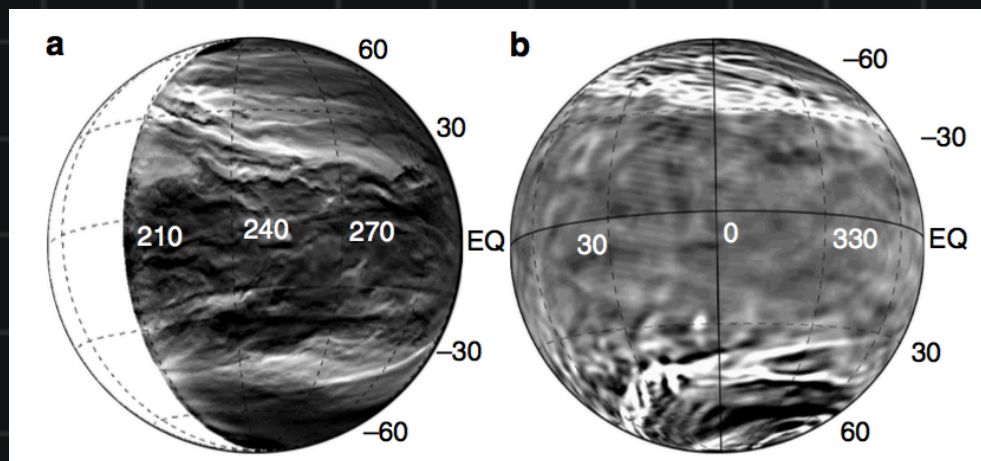
- 雲層の中やその上下を高度方向に結ぶもの(大気波動や擾乱)に関する観測的知見が殆どない。
- 雲層の中やその下における波動や擾乱(ロスビー波, ケルビン波, 順圧・傾圧不安定など)の励起・構造・伝播も不明。
- 波動や擾乱は、大気運動だけでなく雲量や雲模様にも影響を及ぼすと考えられているが、それらの性質は不明。

# 雲層の中や下の大気波動と雲

赤外線 (2.3  $\mu\text{m}$ ) で見た輝度分布



雲底付近のストリーク構造



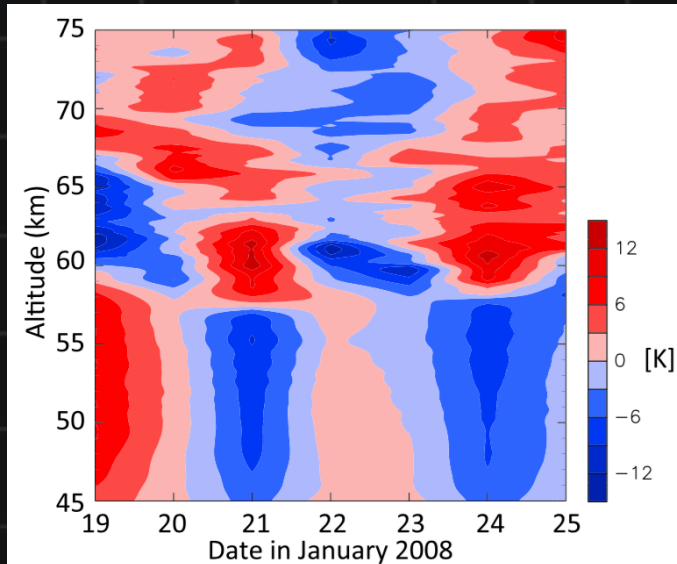
Crisp et al. (1991), Carlson et al. (1991),  
Peralta et al. (submitted)

Kashimura et al. (2019)

- **雲層の中やその下にある大気波動が、雲量や雲分布・雲模様**に影響を及ぼすと考えられている。
- しかし、それらの**励起・構造・伝播は不明**。そもそも、本当に存在するかどうかも分からない。

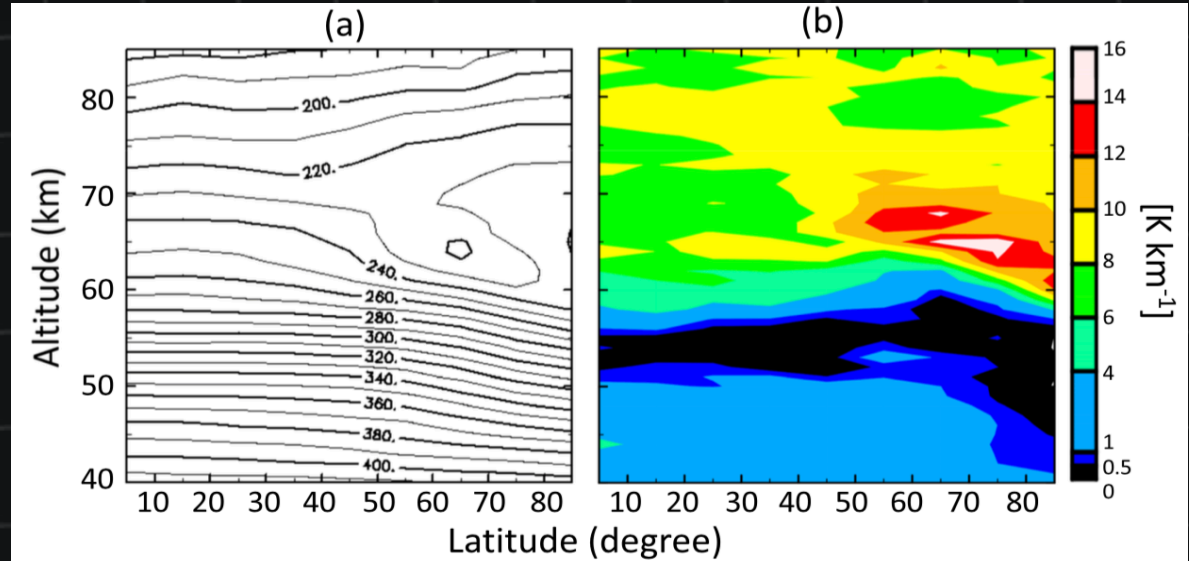
# 金星電波掩蔽観測の現状

極域の中立ロスビー波



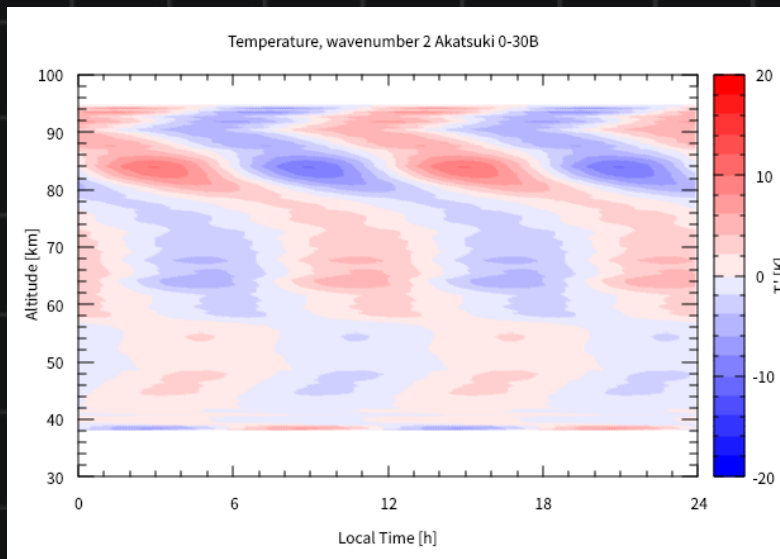
Ando & Imamura et al. (2017)

平均的な気温分布・成層度分布



Ando & Imamura et al. (2020)

赤道域の熱潮汐波



Ando & Takagi et al. (2018)

- **平均的な大気構造は分かってきた。**
- 大気波動の全球構造や大気構造の日々の変動までは明らかにできていない。
- 衛星の軌道や地球との位置関係で、観測できる範囲や時期が限定される。



# 金星大気科学の現状と課題

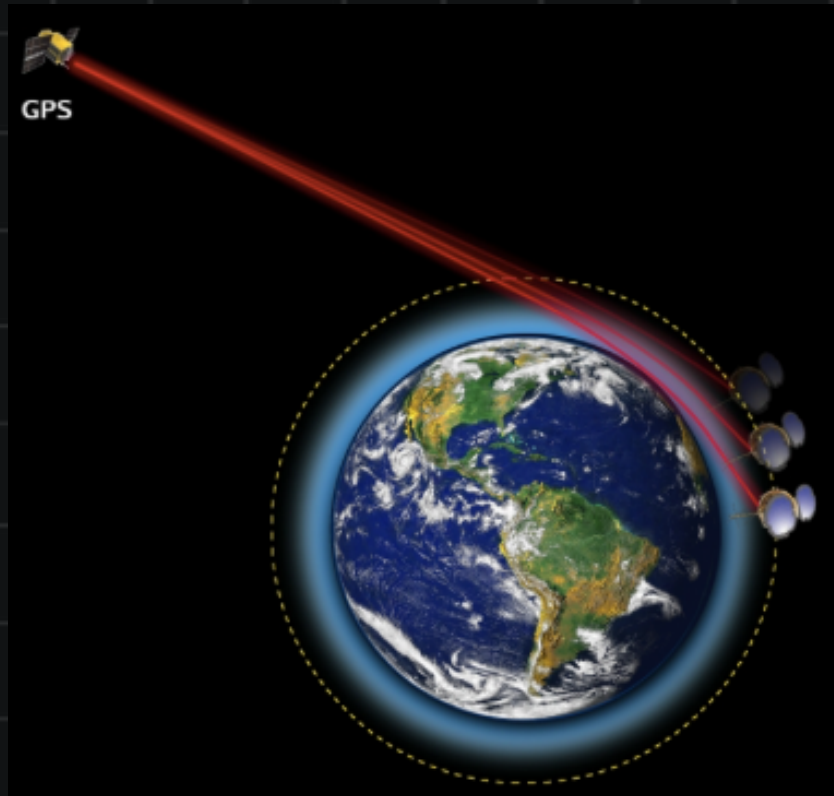
- 金星大気中に見られる様々な現象を、定性的ではあるが捉えつつある。また、平均的な構造も分かりつつある。
- 一方、雲層の下から上までを結ぶもの(大気波動や擾乱)の励起・構造・伝播に関する知見が不足している。
- 光学機器観測のデータは、主に雲頂や雲底付近に限定される。電波掩蔽観測は軌道による観測範囲の制約を受ける。3次元に密な観測データがない。
- 発展著しい数値モデルを使った研究との比較も難しい。



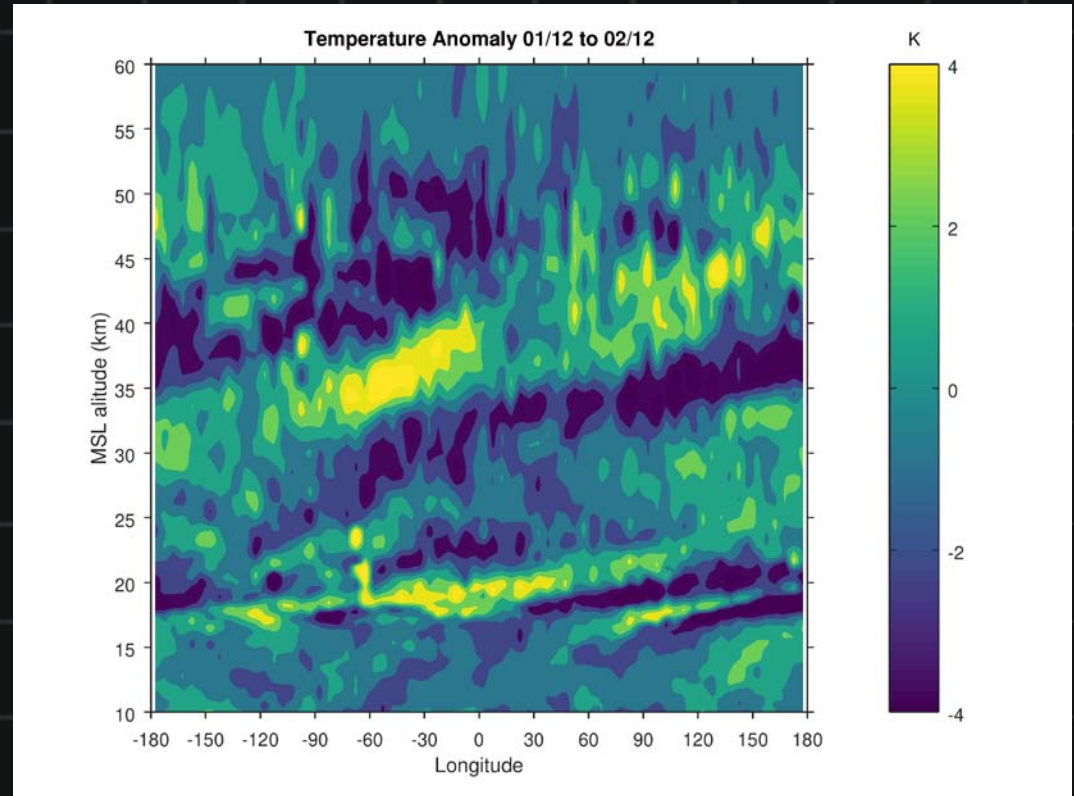
「衛星間電波掩蔽観測」

# 地球GPS掩蔽観測

GPS掩蔽観測のイメージ

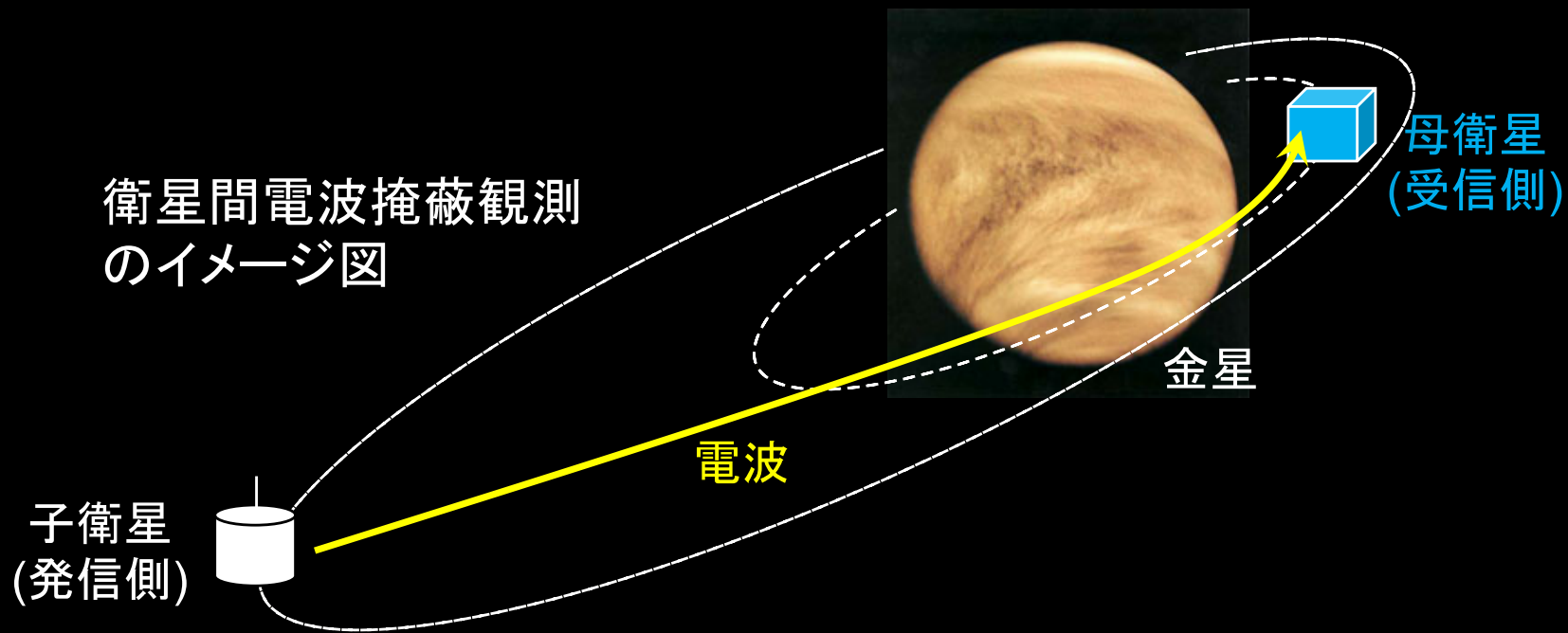


ケルビン波のホフメラー図のアニメーション



津田先生のご厚意で提供

- 複数個のGPS衛星間で電波掩蔽観測を行い、**短期間で様々な経度・緯度・地方時の気圧・気温データを高度方向に連続的に取得**できる。
- この技術を金星や他の惑星に応用することができないか？

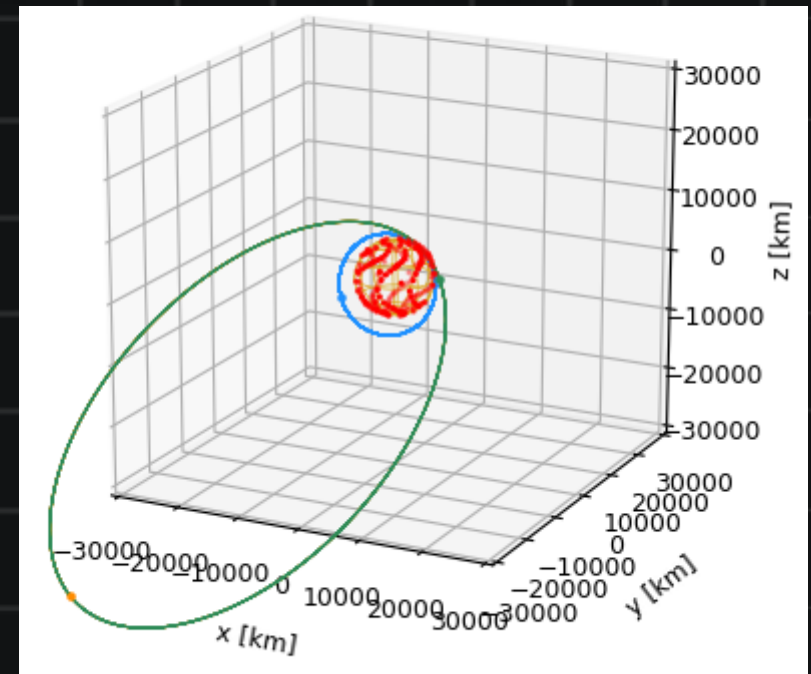
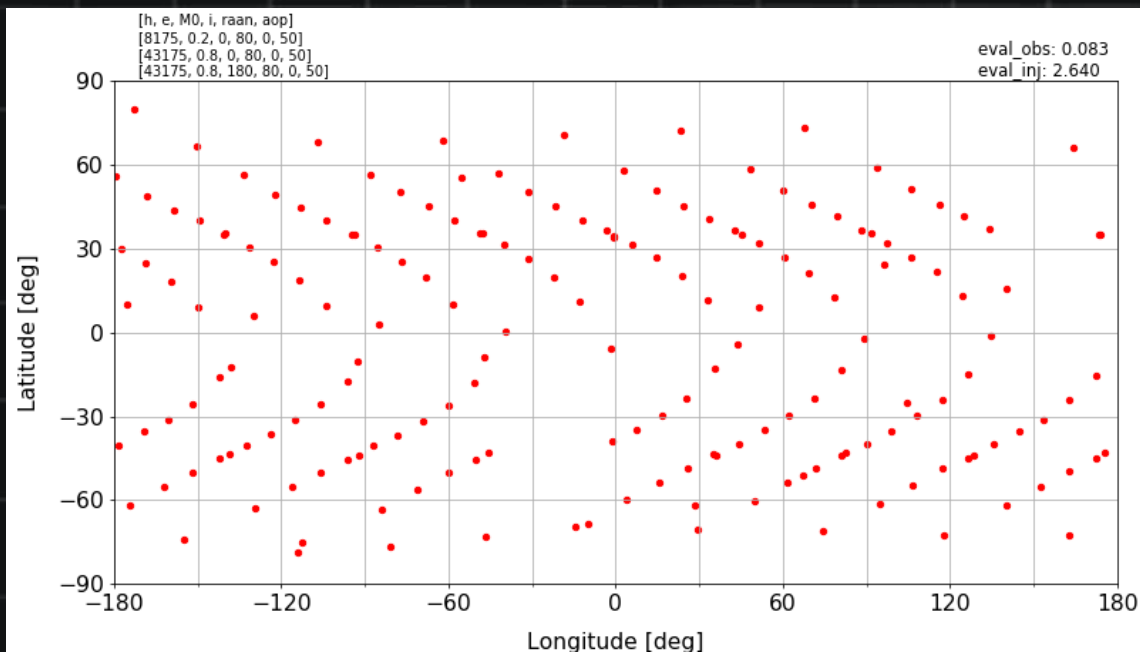


- 東大航空宇宙(中須賀・船瀬研究室)と協力して、金星での衛星間電波掩蔽観測について検討中。
- JPL/NASA が推進する小型金星ミッション(Venus Bridge)にて、地球GPS電波掩蔽観測チームとも共同で立案中。

# 観測点の分布

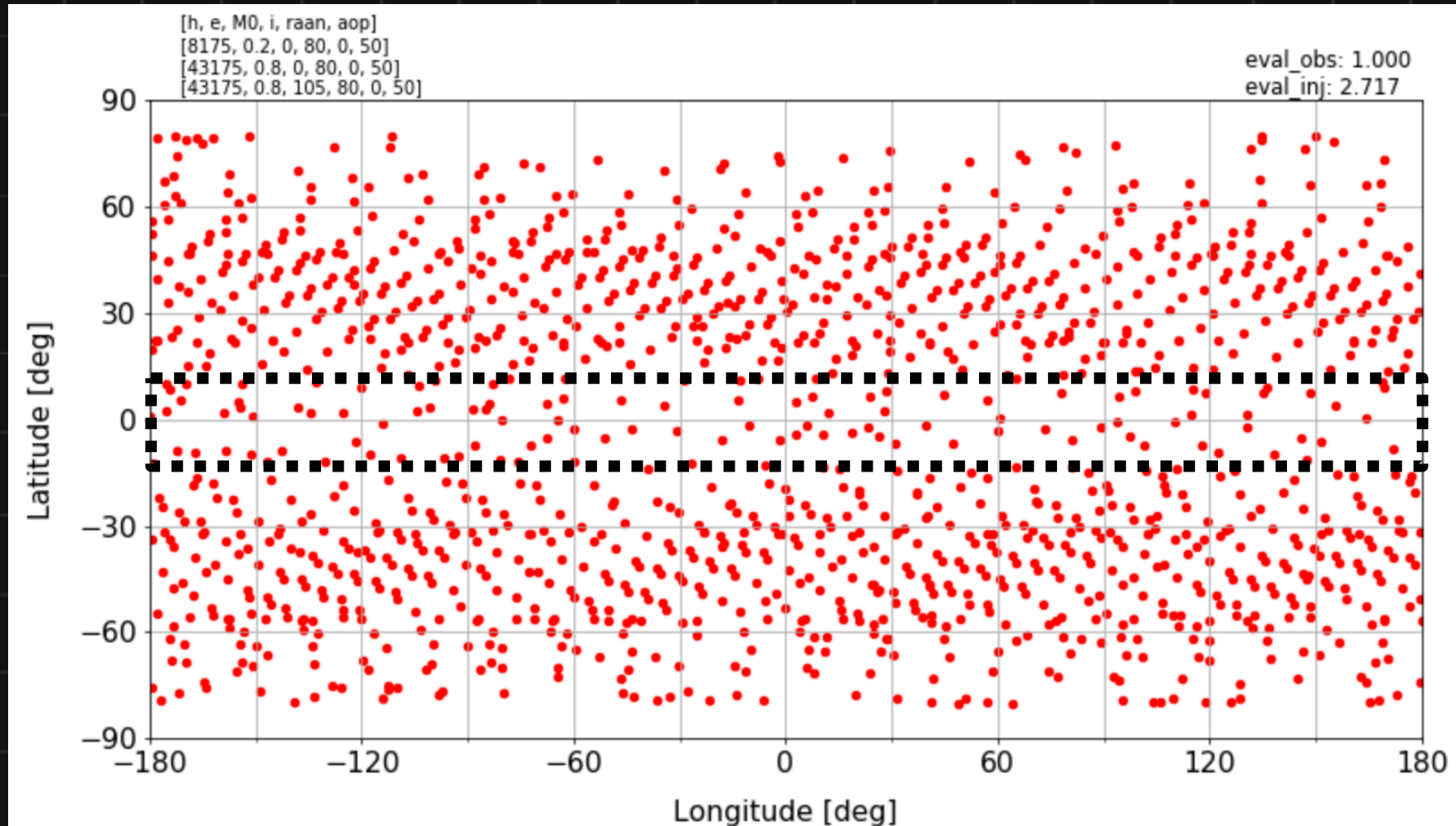
(計算: 東大 中須賀・船瀬研究室)

- 構成は **親機1機+子機2機** とする。
- 近金点高度: 300 km, 遠金点高度: 10000 km (親) & 80000 km (子), 周期: 2 h (親) & 27 h (子), 軌道傾斜角: 80 deg
- 4地球日で179回観測できる (親-子A: 83, 親-子B: 82, 子A-子B: 14)



スーパーローテーションに乗った系で見た  
ときの観測点の分布

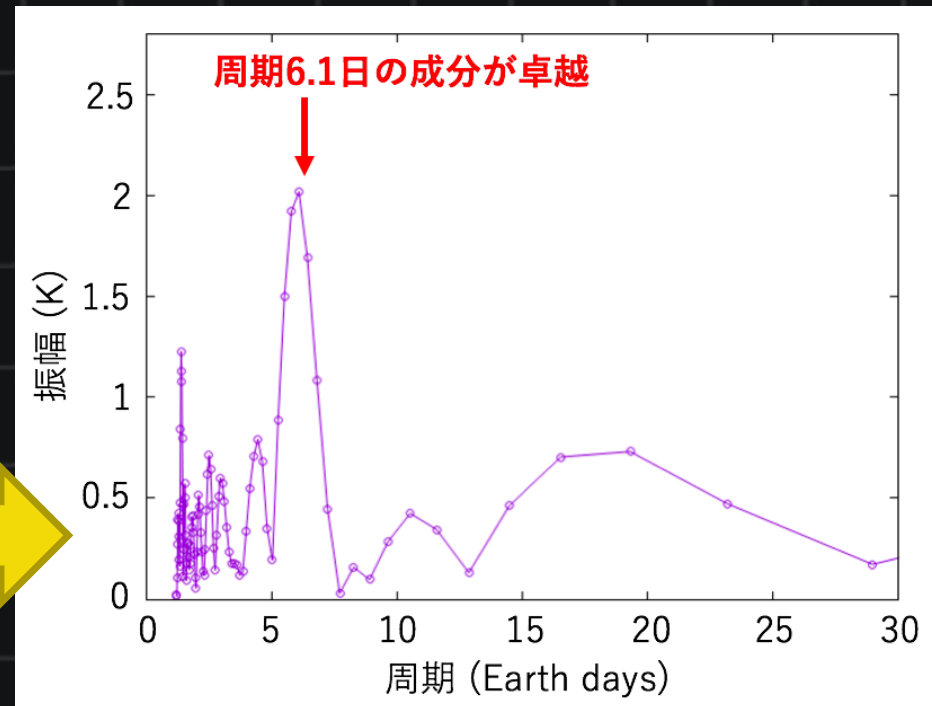
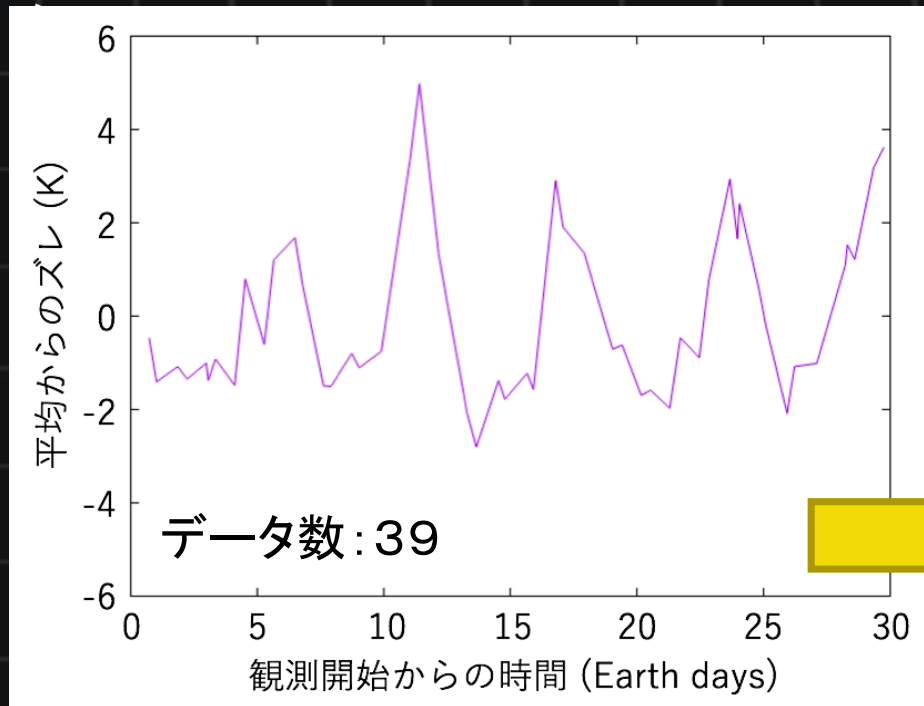
# 実軌道を考慮したAFESデータの解析



- 東大航空宇宙が計算した衛星間電波掩蔽観測の軌道・観測点分布のもとで、AFES-Venusのデータから波が抽出できるか試した。
- 観測期間は30地球日、範囲は緯度 $15^{\circ}\text{S}$ – $15^{\circ}\text{N}$ 、高度 40–60 km とする

# 温度偏差 => 周期・振幅・位相

高度50kmにおける温度偏差の時系列データ

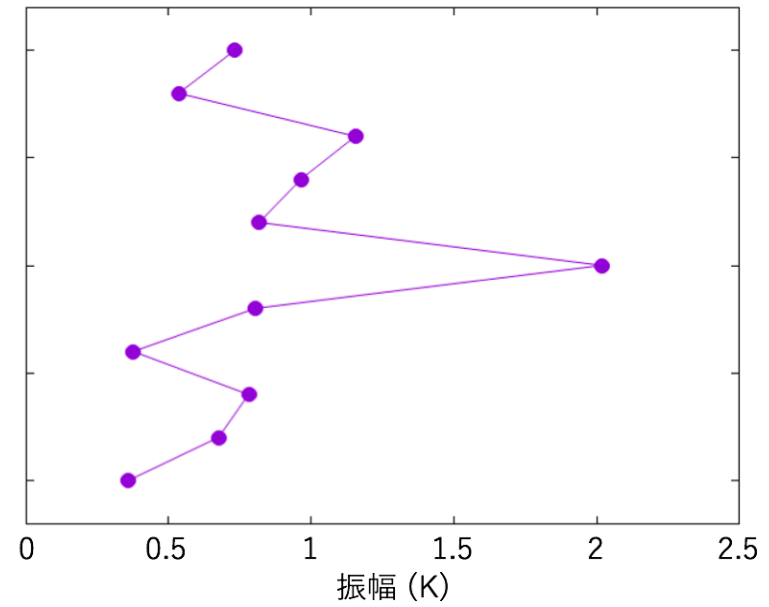
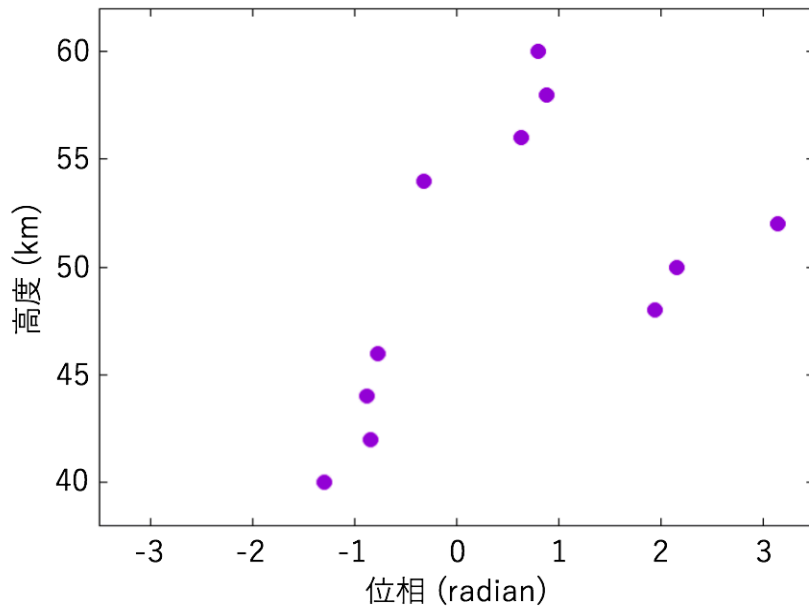


Lomb-Scargle法で周期・位相・振幅を決める

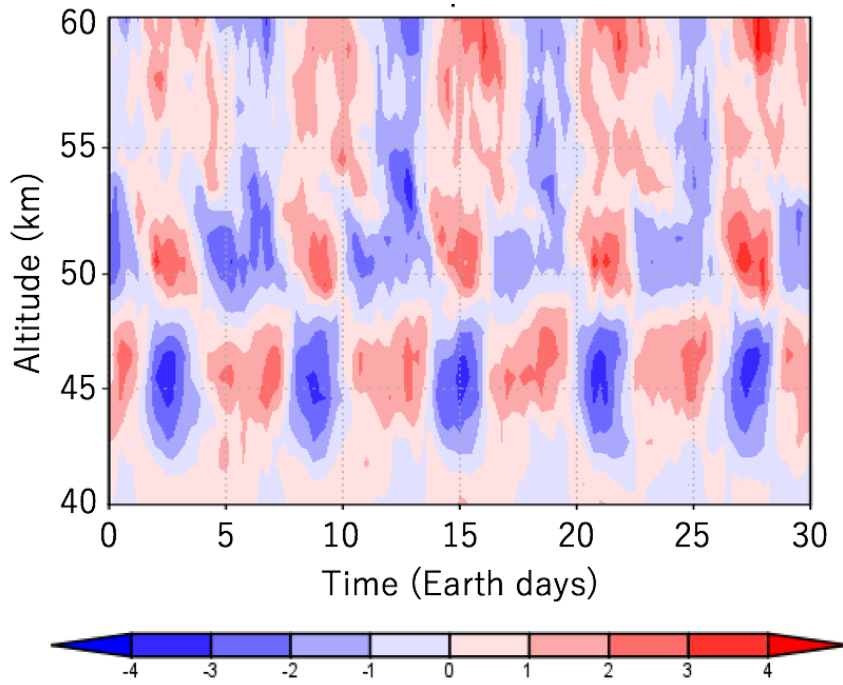
。

# 6.1日波の位相・振幅の高度分布

衛星間電波  
掩蔽観測  
(T42L60)



AFES  
(T42L120)



- 周期や位相の鉛直構造は整合してる？
- 振幅は過小評価している。理由は良くわからない。

# 金星衛星間電波掩蔽観測で何ができるか？

## ➤ 大気波動や擾乱の3次元構造・伝播の解明

- 様々な時間・空間スケールの波動・擾乱の生成・伝播・消滅過程を、雲層の下から上(高度 40–85 km)まで調べる。それらに伴う熱輸送量や運動量輸送量の定量する。
- 紫外・赤外カメラ画像と比較して雲量・雲模様との関連性を調べる。
- データ同化への組み込み

## ➤ 風速(U, V)の3次元分布の導出

- 気圧分布と旋衡風バランスから風速(U, V)の3次元分布を、雲層の下から上(高度 40–85 km)まで導出する。
- データ同化との合わせ技で、残差子午面循環の構造を推定できる？(平均子午面循環は難しい？)

## ➤ 全球的な硫酸蒸気・水蒸気混合比分布の導出

- サブミリ波観測(CO, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, HDO, HCl, OSSOなど)との融合
- 地球成層圏化学との比較

## ➤ 電子密度分布の計測

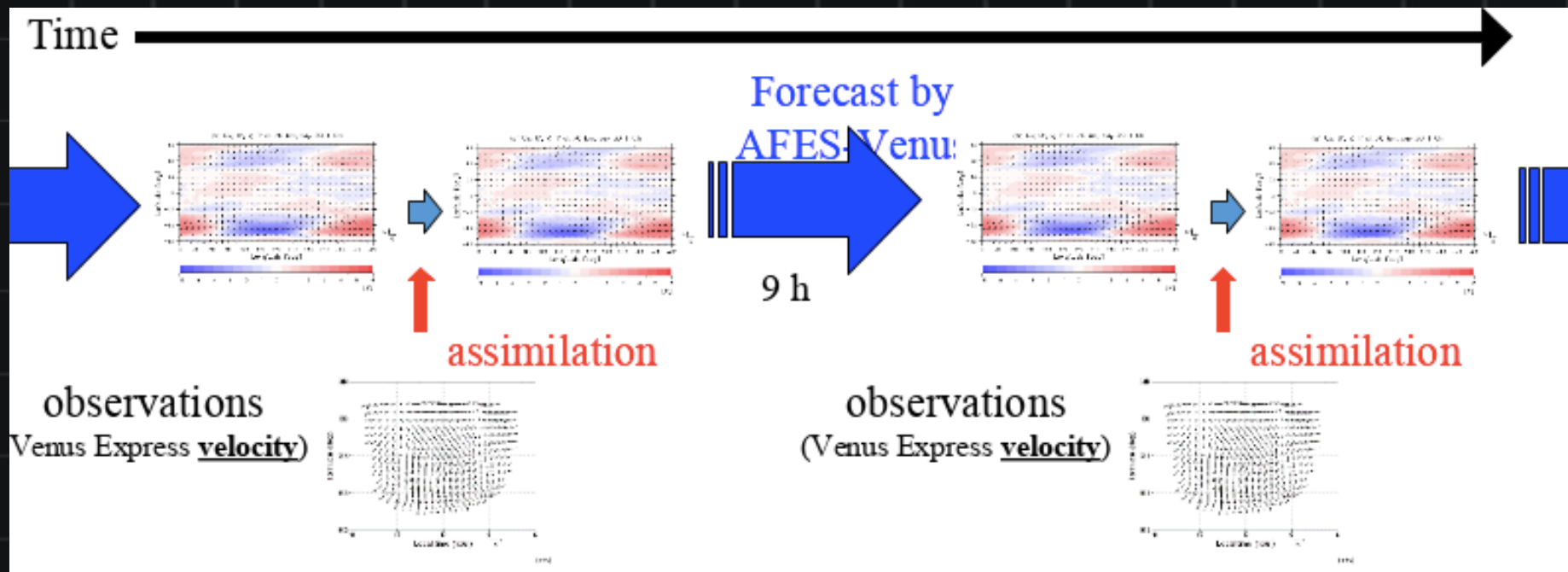
- 磁力計や質量分析器などのプラズマ測器を使って電磁環境を調べる。



# 理論的手法(データ同化)との融合

## ➤ データ同化:

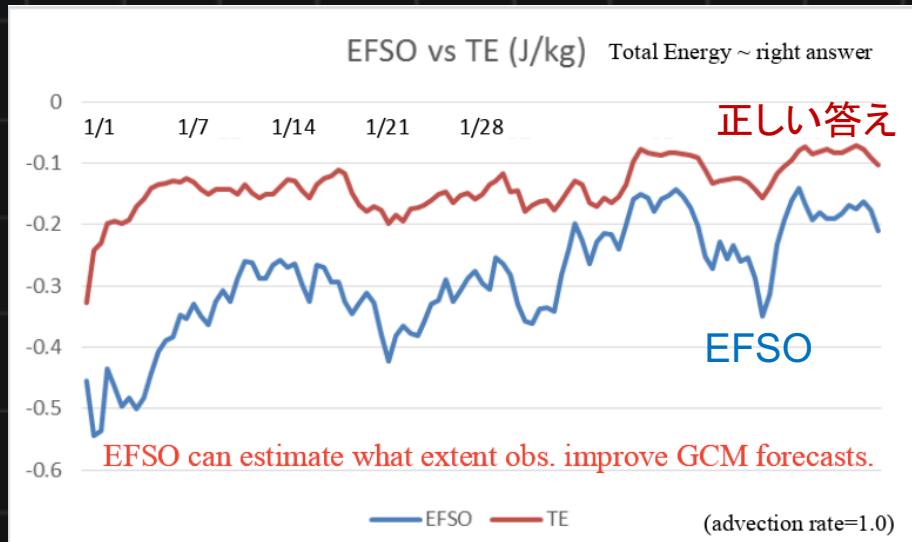
観測データを用いて数値モデルによる計算を修正し、より現実的かつ時空間的に偏りのないデータセットを生み出す手法。



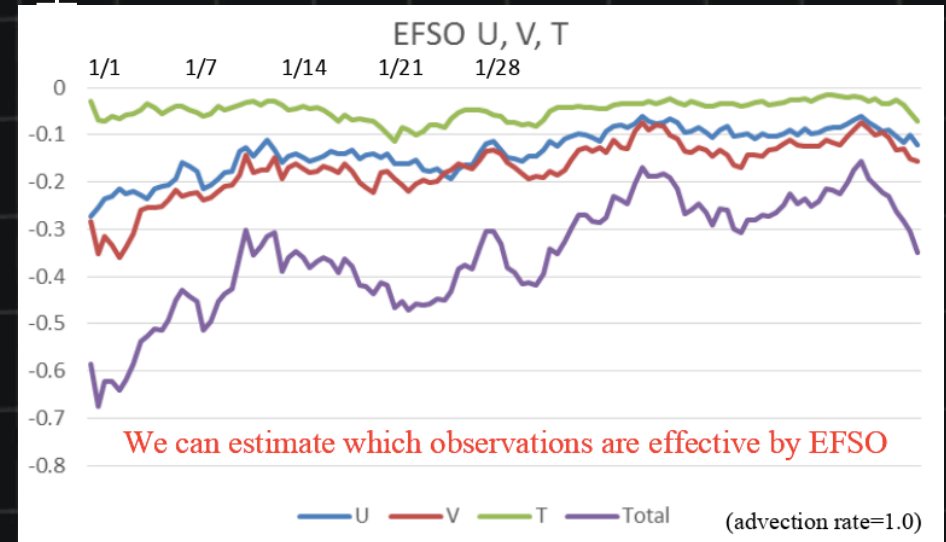
- すでに、風速データを利用した金星のデータ同化が試行されている (Sugimoto et al. 2017)。気温・気圧分布の4次元データを導入して、より精密な金星気象モデルの構築につなげる。

# 理論的手法(データ同化)との融合

## EFSOを用いた観測期間の要求



## EFSOを用いた個々の観測の重要度の調



Sugimoto et al. (in prep)

- JPL/NASA (Dr. Ao Chi) と協力して、実軌道で得られた電波掩蔽観測のデータ同化に対するインパクトを調べた (Observing System Simulation Experiments, Sugimoto et al. 2019)。
- 必要な観測期間・観測点の分布や個々の観測の重要度を数値モデルの中で調べることで、**ミッションの計画立案(軌道や観測領域の要求など)を定量的に論ずる** (Ensemble Forecast Sensitivity of Observation, Sugimoto et al. in prep.)。

# まとめ

- 次の金星探査ミッションの一つとして、**雲層の下から上まで網羅するような全球的な観測**を考えても良いのではないか。
- 観測手段の候補として、**衛星間電波掩蔽観測**が考えられる。2次元から発展して**3次元に密な観測データ**を取得する。
- 数値モデル(データ同化など)との合わせ技によって、高精度かつ隙間のない気象データ(再解析データもどき?)を作成する。
- 火星やタイタンなど大気を持つ他の天体の観測にも応用可能。

# 進捗状況

- 東大航空宇宙と月1で定期的に議論しており、日本で独自に打ち上げる or 他国のミッションの相乗り、という両方の可能性を検討。
- 東大航空宇宙と協力し、リサーチグループ(RG)を設立することも視野に入れている。
- 理学側のメンバーを増やして、サイエンスの中身をもっと深く議論していく必要あり(今のところ10人弱)。  
。