

# 電波掩蔽観測と数値モデリング による惑星大気の研究

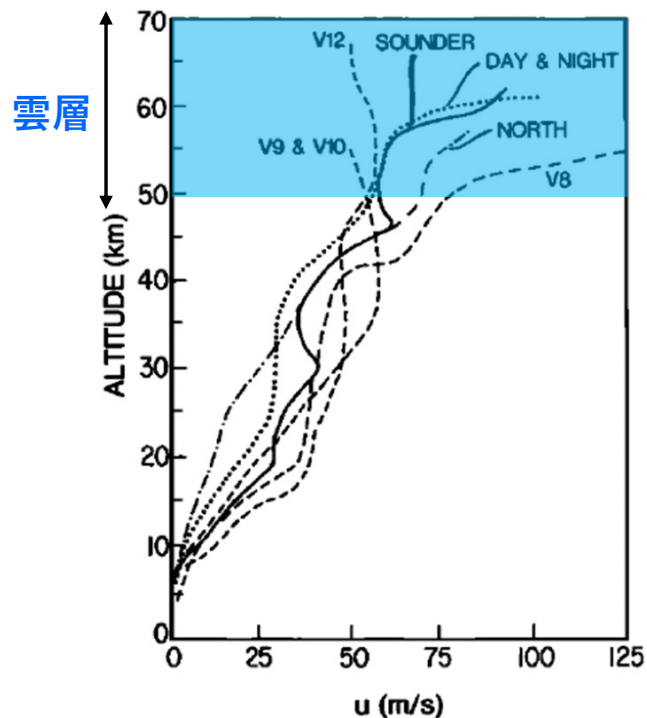
安藤 紘基

(京都産業大学 理学部)

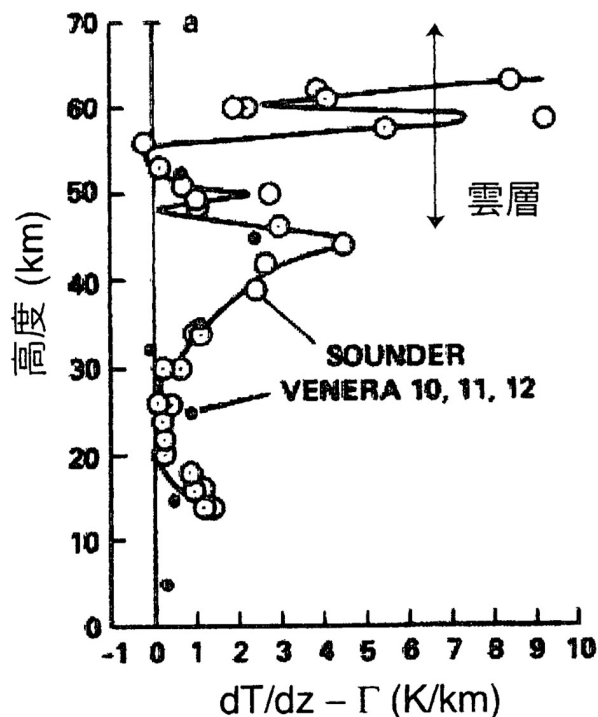
E-mail : [hando@cc.kyoto-su.ac.jp](mailto:hando@cc.kyoto-su.ac.jp)

# 金星大気の基本的な鉛直構造

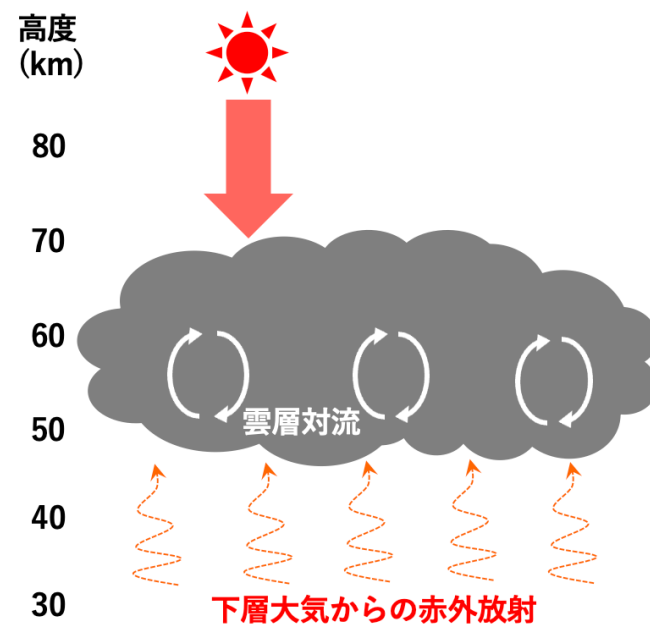
東西風の直接観測@赤道  
(Schubert, 1983)



成層度の直接観測@赤道  
(Seiff et al., 1985)



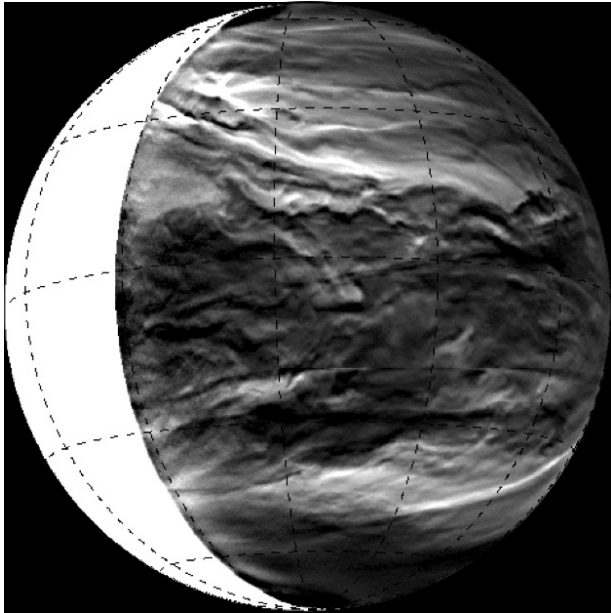
雲層周辺の熱放射のイメージ図



- 全球的に自転速度より速い東風が吹いており、風速が高度と共に増大する。雲頂高度(~70km)では100m/s程度に達し、自転速度の60倍の速さで大気が運動している(=スーパーローテーション)。
- 大気は高度50-55kmで中立安定(=鉛直対流が生じている)、その上下には高安定度層と弱安定度層が存在している。

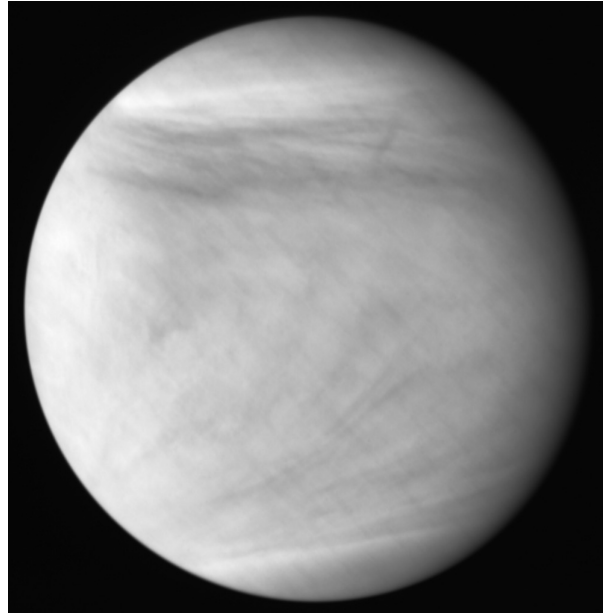
# 金星大気の観測的研究の現状

あかつき赤外線(2 $\mu$ m)カメラ  
で捉えた**雲底**の雲の動き



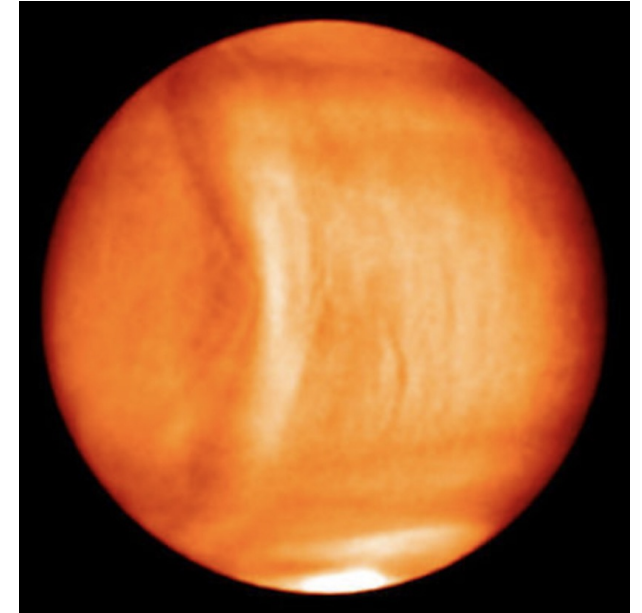
Satoh et al. (2017)

あかつき紫外線(283nm)カメラ  
で捉えた**雲頂**の雲の動きと明暗



Watanabe et al. (2017)

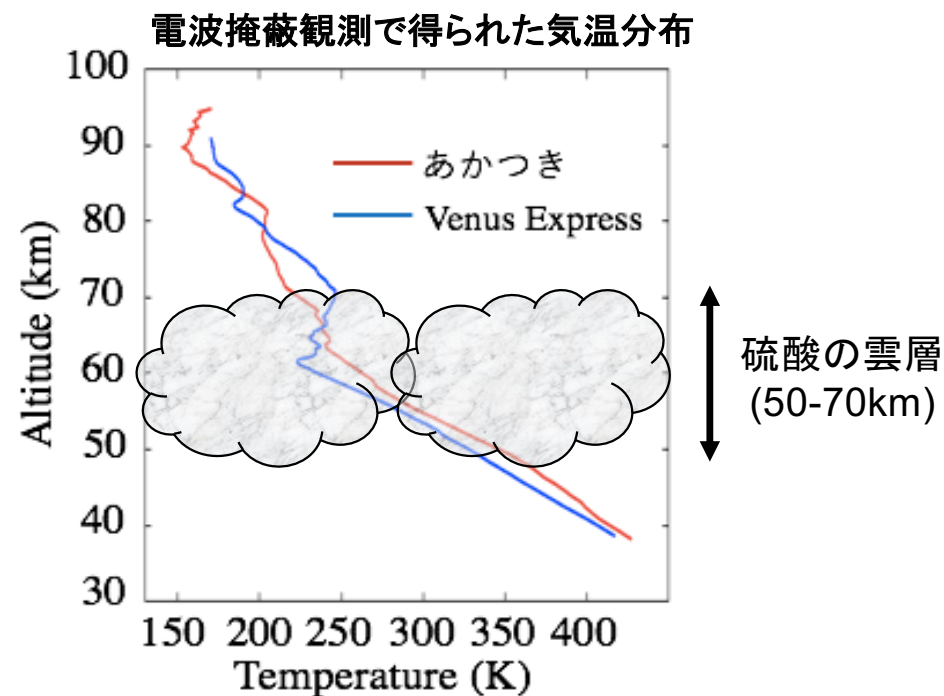
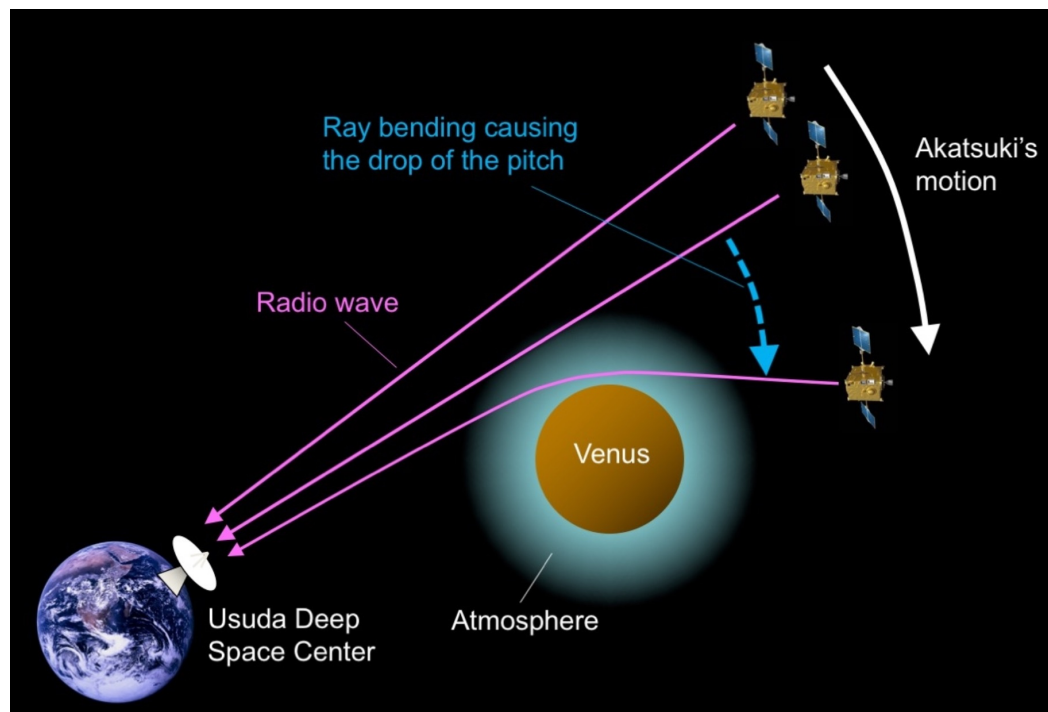
あかつき赤外線(10 $\mu$ m)カメラ  
で捉えた**雲頂**の気温の水平分布



Fukuhara et al. (2017)

- あかつきやVenus Expressに搭載されたカメラ・分光器、地上望遠鏡を用いた光学機器観測により、**主に雲頂と雲底における金星大気の水平構造**は理解が進んでいる。
- しかし分厚い雲層のせいで、金星大気の**上下方向の構造(鉛直構造)**の観測については、光学機器だと難しい。

# 電波掩蔽観測と金星大気

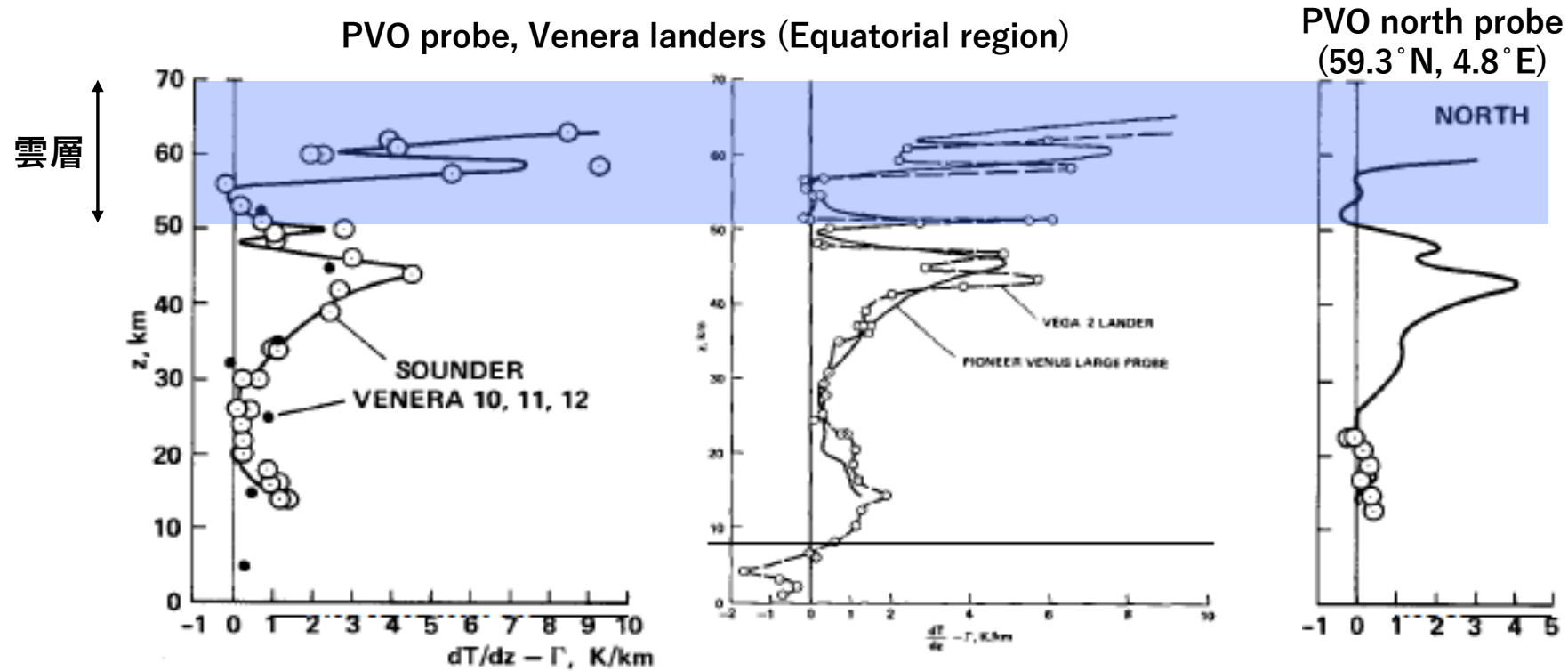


- 受信周波数の時間変化 (ドップラーシフト)
  - 気温・気圧の高度分布 (気温測定誤差 ~ 0.1 K, 鉛直分解能 ~ 1 km)
- 受信強度の時間変化
  - 硫酸蒸気混合比の高度分布

# 本日の内容

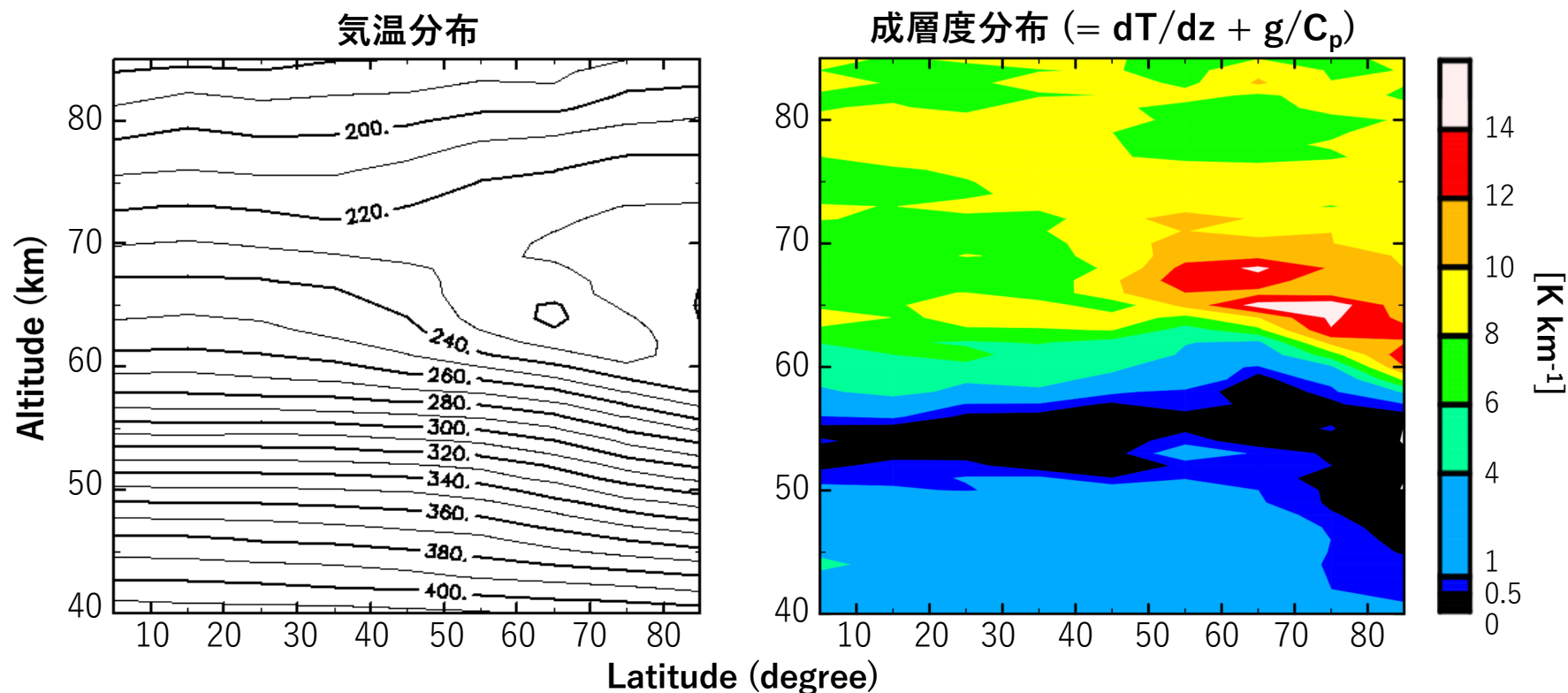
- 金星大気の平均的な熱構造 (Ando et al., 2020)
- 金星極渦の惑星規模擾乱の鉛直構造に関する研究 (Ando et al., 2017)
- 数値モデルによる金星雲分布の再現 (Ando et al., 2020)

# 過去の直接観測で得られた成層度の高度分布



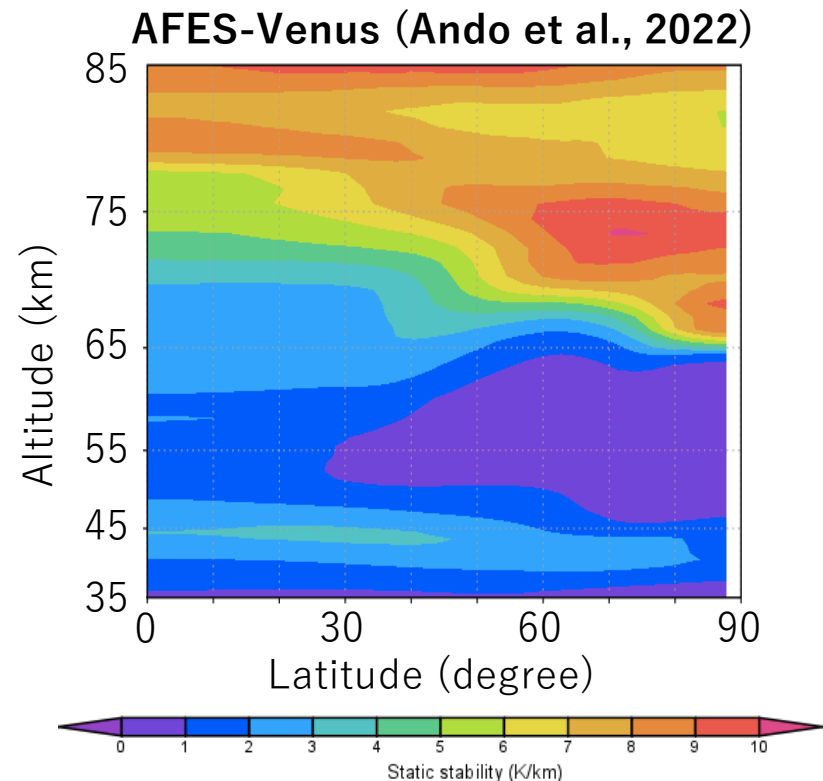
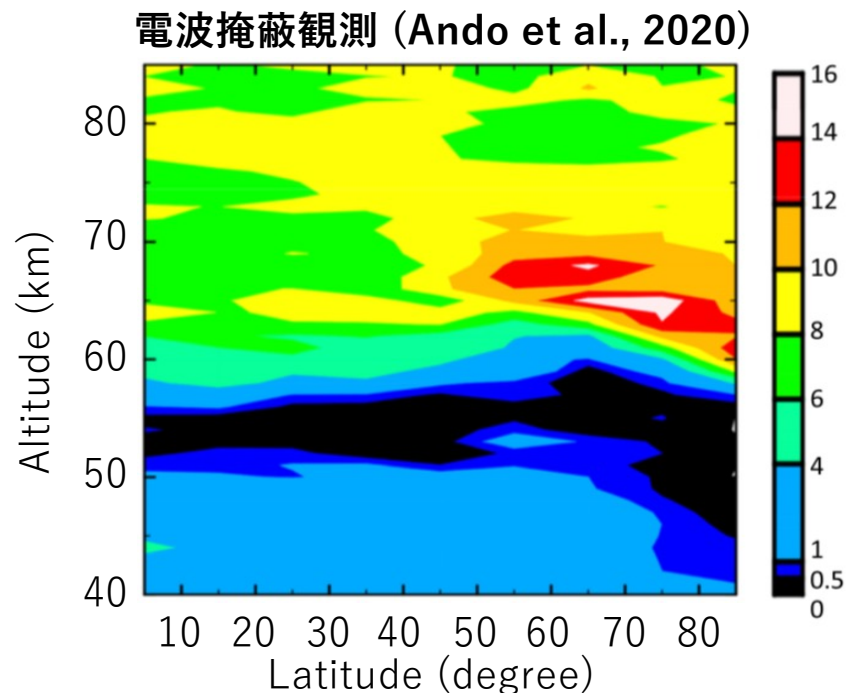
- 過去に行われた直接観測により、赤道と高緯度における気温や成層度の高度分布が測定された。その結果、高度50–55kmには低安定度層があり、その上下には高安定度層と弱安定度層が存在することが分かった。
- しかし、直接観測の数は極めて少ないため統計的有意性に欠ける。また、緯度60度以上の領域での観測結果は存在しない。
- あかつき(赤道軌道)とVenus Express(極軌道)の電波掩蔽観測データを解析して、高度40–85kmにおける金星大気の平均的な熱構造(気温と安定度の平均分布)を調べた。

# 金星大気の平均的な熱構造 (Ando et al., 2020)



- 低緯度から中緯度は低安定度層が高度50–55km辺りに存在し、その上下に高安定度層と弱安定度層がある。これは過去の直接観測と整合的であり、金星大気の熱構造が極めて安定な状態を保持していると考えられる。
- 高緯度では他の緯度帯に比べて低安定度層が深い所(高度42kmくらい)まで到達しており、過去の直接観測では見られなかった大気構造を初めて見出した。
- 気温や成層度は大気循環の構造と密接に関係するので、数値モデルの結果の妥当性を判断するための良いリファレンスになる。また、雲物理過程にも寄与するため、金星の雲分布を考察するのに必要不可欠な情報を与える（後述）。

# 電波掩蔽観測とGCMで得られた平均的な熱構造の比較 (Ando et al., 2022)



- 金星大気大循環モデルAFES-Venus (e.g., Sugimoto et al., 2014; Takagi et al., 2018) を用いて、電波掩蔽観測と定性的に整合するような気温分布や成層度分布を再現した。
- GCMの計算結果を詳しく解析したところ、高度65km以上の熱構造は温度風バランス・子午面循環による熱輸送・放射の三者が同程度に寄与することが分かった。詳しくは Ando et al. (2016, *Nature Communications*) をご参照ください。
- 一方、高度65km以下では、低緯度は子午面循環による熱輸送と放射、中・高緯度では大気波動(傾圧性ロスビー波)による熱輸送・放射・対流が重要であることを示した。詳しくは Ando et al. (2022, *JGR Planets*) をご参照ください。



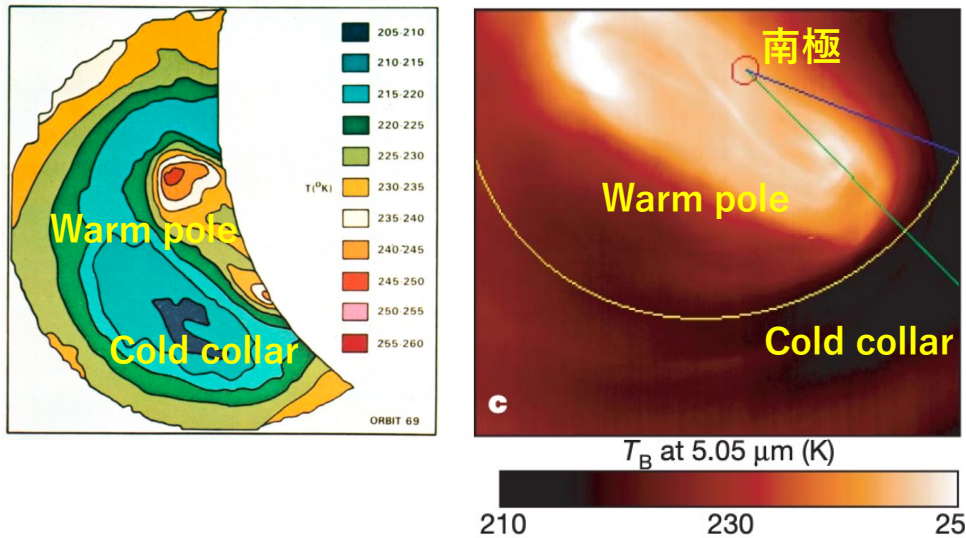
# 本日の内容

- 金星大気の平均的な熱構造 (Ando et al., 2020)
- 金星極渦の惑星規模擾乱の鉛直構造に関する研究 (Ando et al., 2017)
- 数値モデルによる金星雲分布の再現 (Ando et al., 2020)

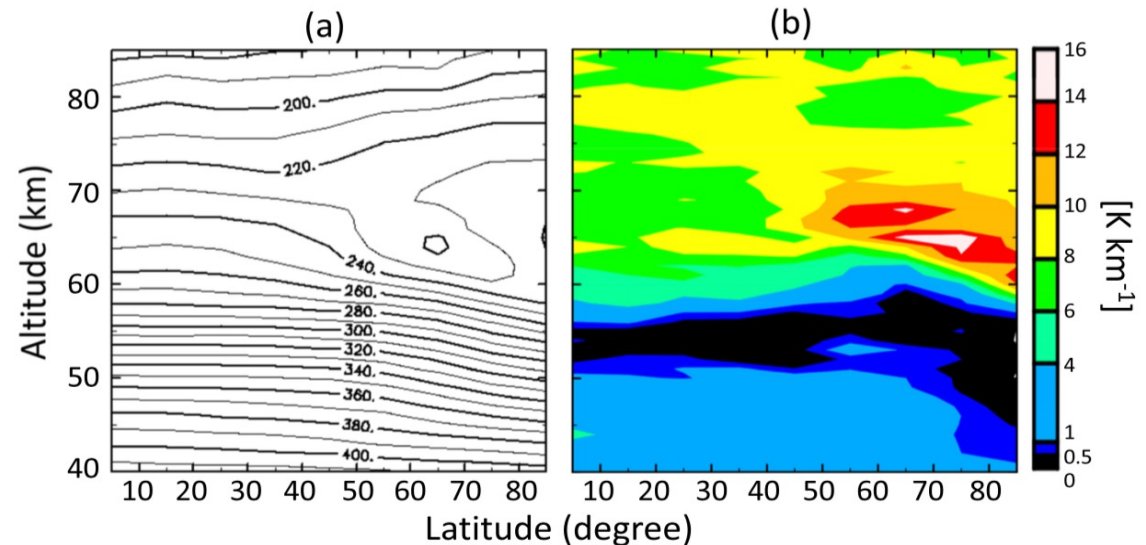
# 金星極域の非軸対称な短周期擾乱

赤外観測

(Taylor et al., 1980; Piccioni et al., 2007)



電波掩蔽観測 (Ando et al., 2020)

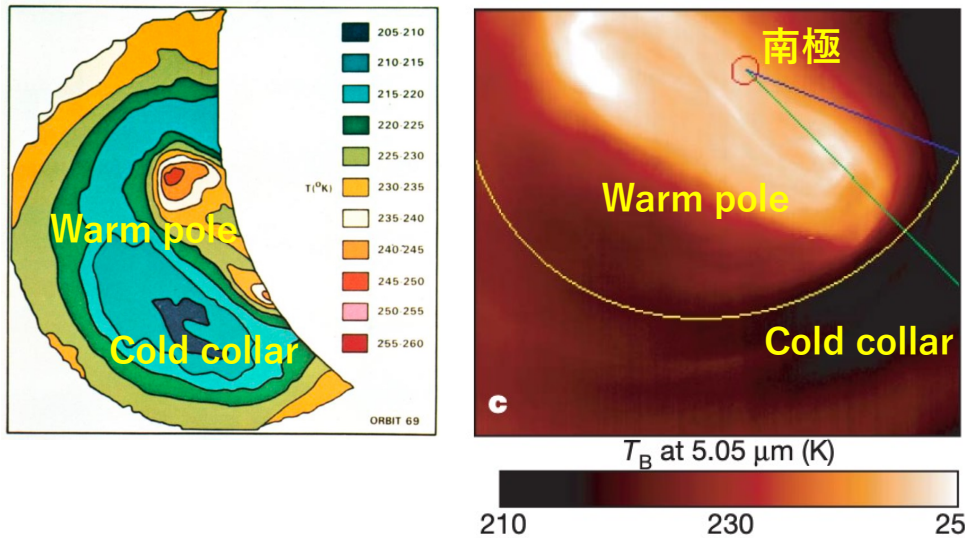


- 金星極域には、温暖な極(Warm pole)の大気が局所的に冷たい緯度帯(Cold collar)で囲まれるという地球では見られない熱構造が、高度65km辺りに半永久的に存在する(この熱構造の成因はAndo et al. (2016 & 2023) にて理論的に示された)。
- 温暖な極の中では、非軸対称な東西波数1-2の擾乱が周期3地球日程度で極を周回することが知られている。この擾乱の水平構造は赤外観測で詳しく研究されているが、鉛直構造は分からず成因も不明。

# 金星極域の非軸対称な短周期擾乱

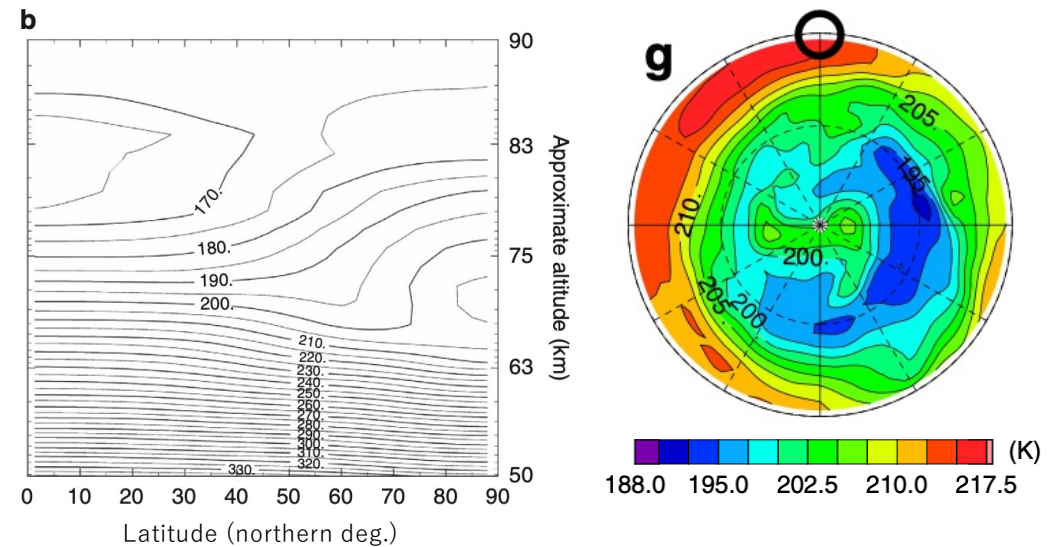
赤外観測

(Taylor et al., 1980; Piccioni et al., 2007)



AFES-Venus

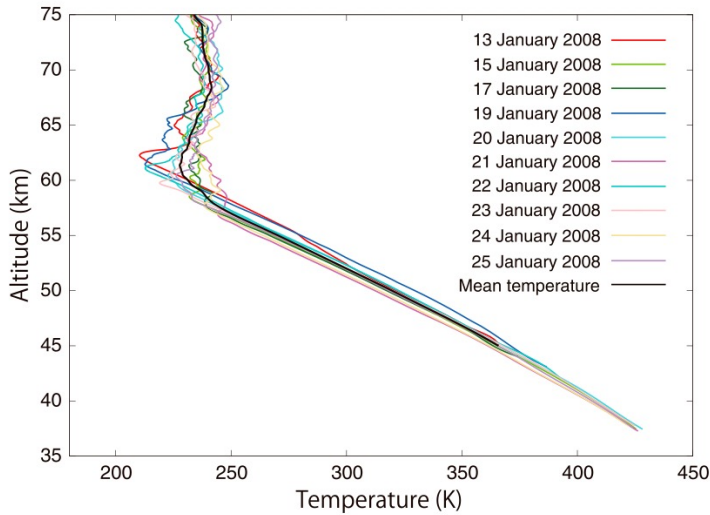
(Ando et al., 2016 & 2023)



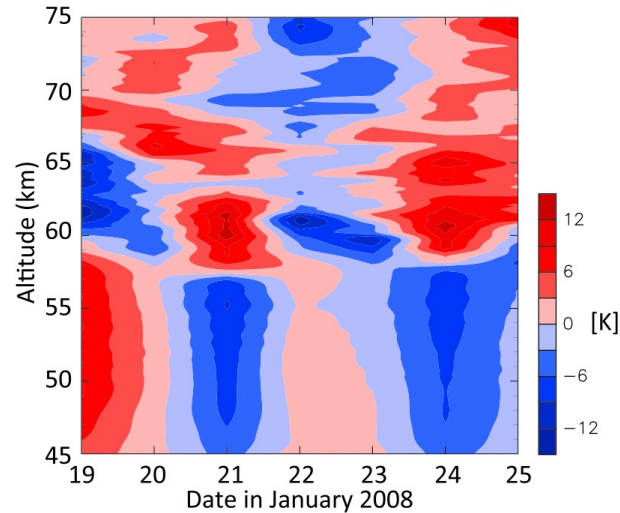
- 金星極域には、温暖な極(Warm pole)の大気が局所的に冷たい緯度帯(Cold collar)で囲まれるという地球では見られない熱構造が、高度65km辺りに半永久的に存在する(この熱構造の成因はAndo et al. (2016 & 2023) にて理論的に示された)。
- 温暖な極の中では、非軸対称な東西波数1-2の擾乱が周期3地球日程度で極を周回することが知られている。この擾乱の水平構造は赤外観測で詳しく研究されているが、鉛直構造は分からず成因も不明。

# 非軸対称な短周期擾乱の検出 (Ando et al., 2017)

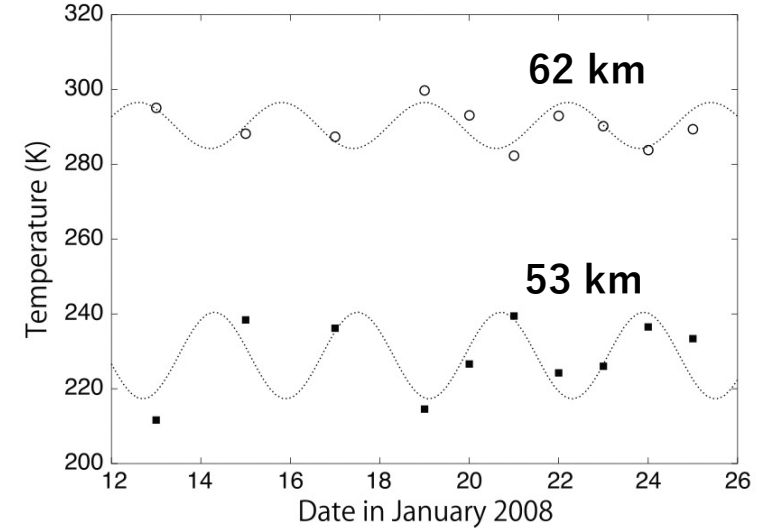
気温の全プロファイルと平均気温



気温擾乱(東西平均からのズレ)の時間-高度分布



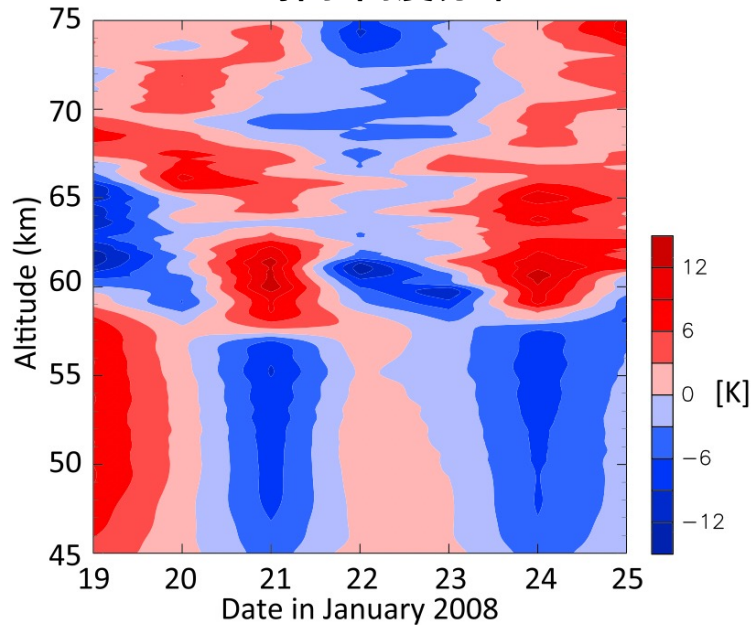
Lomb-Scargle法から求めた卓越周期・位相・振幅のfitting



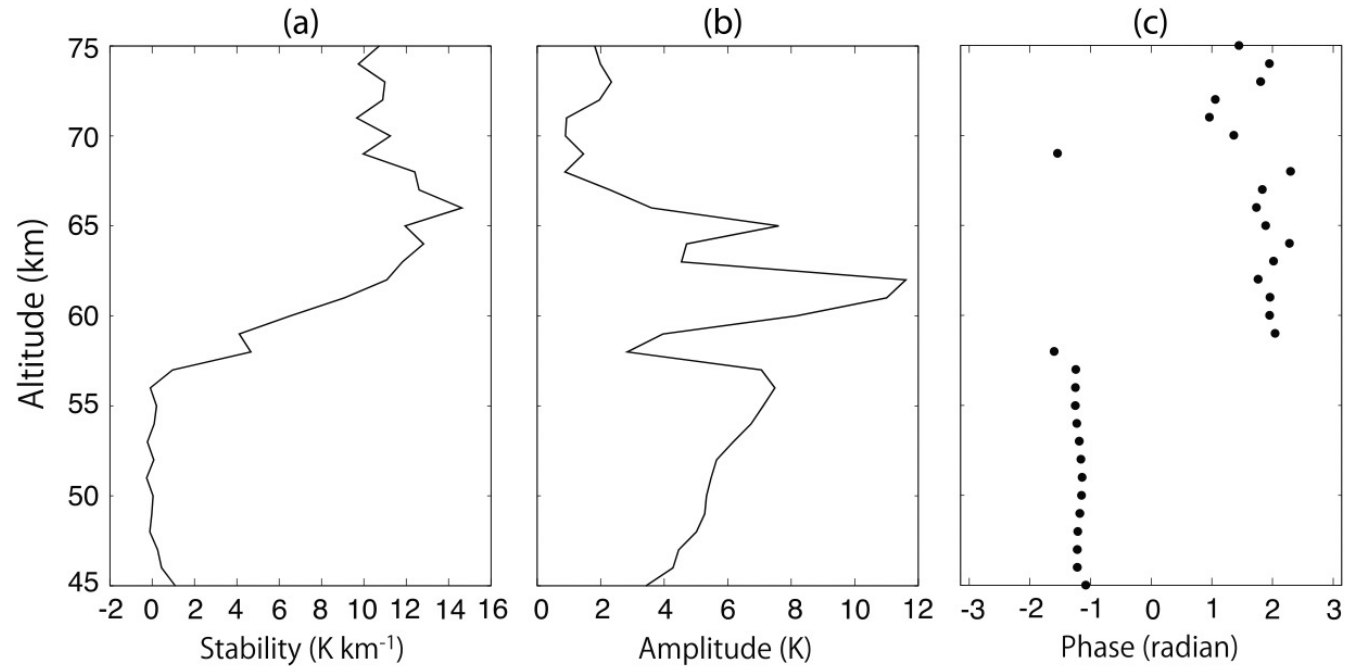
- Venus Expressの電波掩蔽観測で連続的に極域を観測した時期があり、そのときの気温データを用いて短周期の気温擾乱について解析した。
- 周期が3.1地球日程度の成分が卓越しており、赤外観測で見られる擾乱の周期と整合する。よって、周期3.1地球日の成分の鉛直構造に着目した。

# 非軸対称な短周期擾乱の鉛直構造 (Ando et al., 2017)

気温擾乱(東西平均からのズレ)  
の時間-高度分布

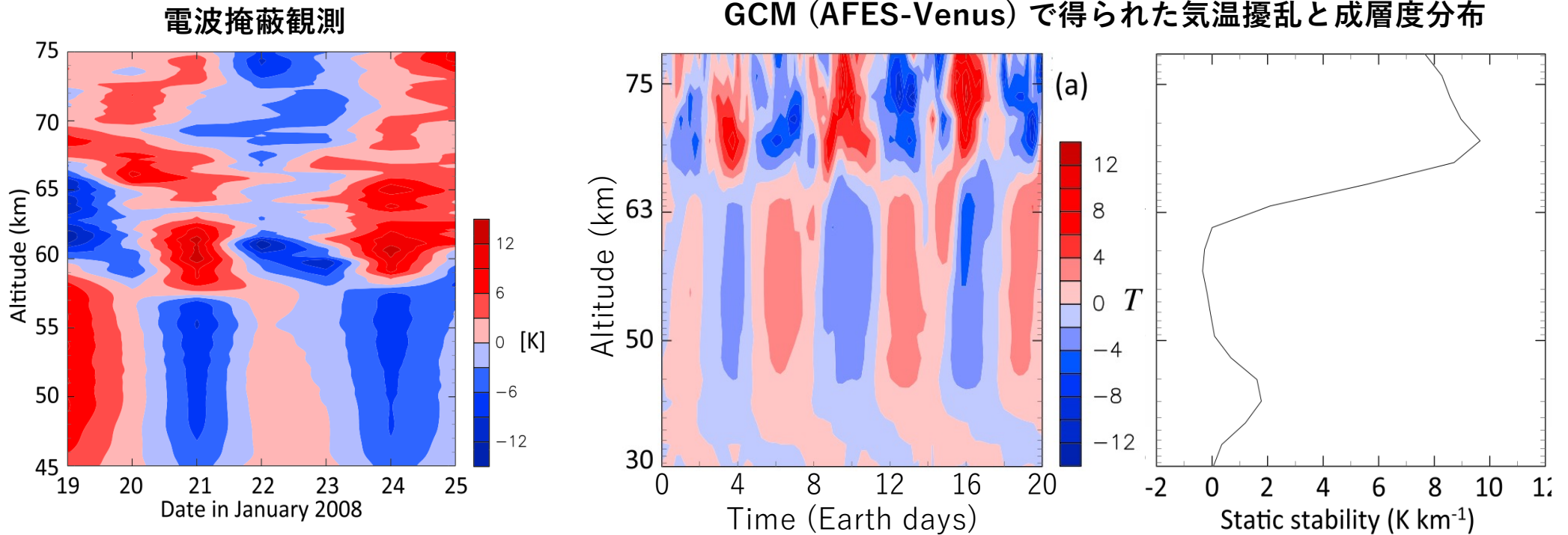


(a)大気安定度と周期3.1地球日の成分の(b)振幅と(c)位相の高度分布



- 短周期擾乱の鉛直構造に関する主な特徴として、成層度が急に増大する所で振幅が極小となり、その高度付近で位相が180度ずれる。また、位相がその高度の上下で殆ど変わらない。
- 観測だけでは擾乱の成因が分からないので、金星大気大循環モデル(AFES-Venus)を用いて擾乱を再現して成因を考察した。

# 電波掩蔽観測と数値モデルの比較 (Ando et al., 2017)



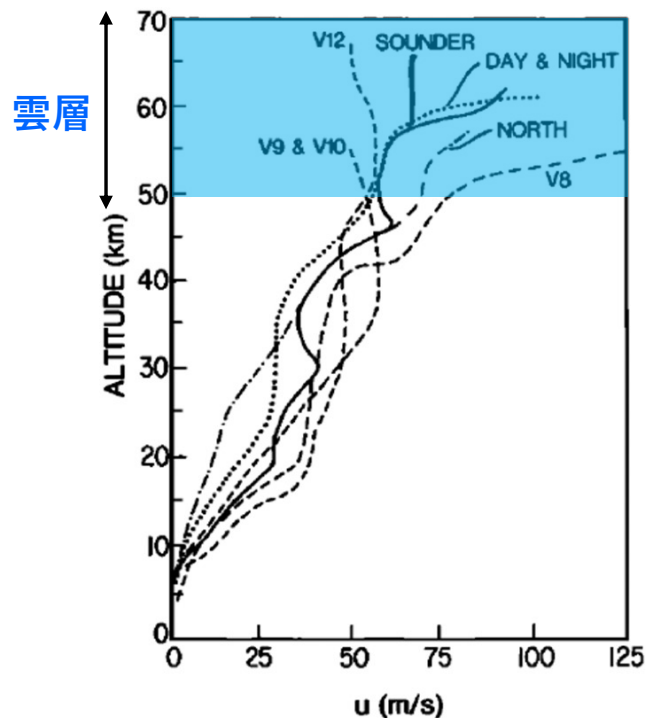
- AFES-Venusを用いて、電波掩蔽観測と定性的に整合する短周期擾乱の鉛直構造を再現した。
- AFES-Venusの計算データを詳しく解析した結果、この擾乱が順圧的かつ中立的(運動量も熱も輸送しない)なロスビー波であることが分かった。また、観測とGCMの比較から、擾乱の3次元構造を提唱した。詳しくは Ando et al. (2017, *JGR Planets*) をご参照ください。

# 本日の内容

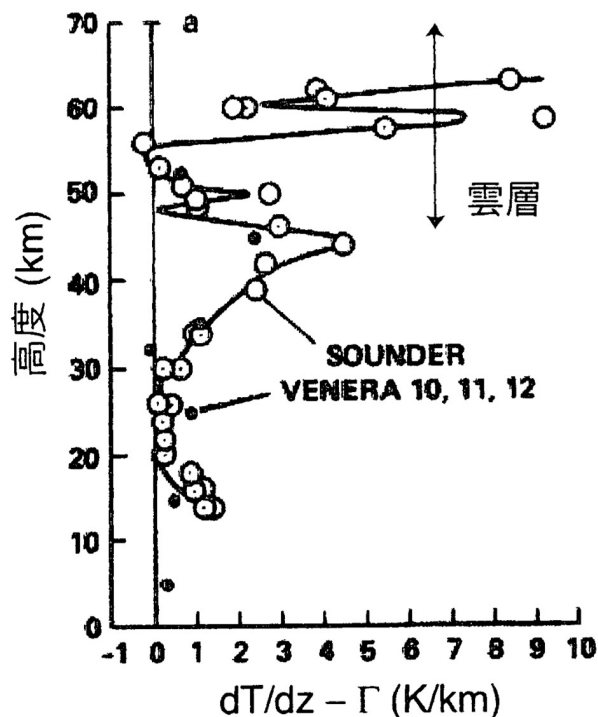
- 金星大気の平均的な熱構造 (Ando et al., 2020)
- 金星極渦の惑星規模擾乱の鉛直構造に関する研究 (Ando et al., 2017)
- 数値モデルによる金星雲分布の再現 (Ando et al., 2020)

# 金星大気の基本的な鉛直構造

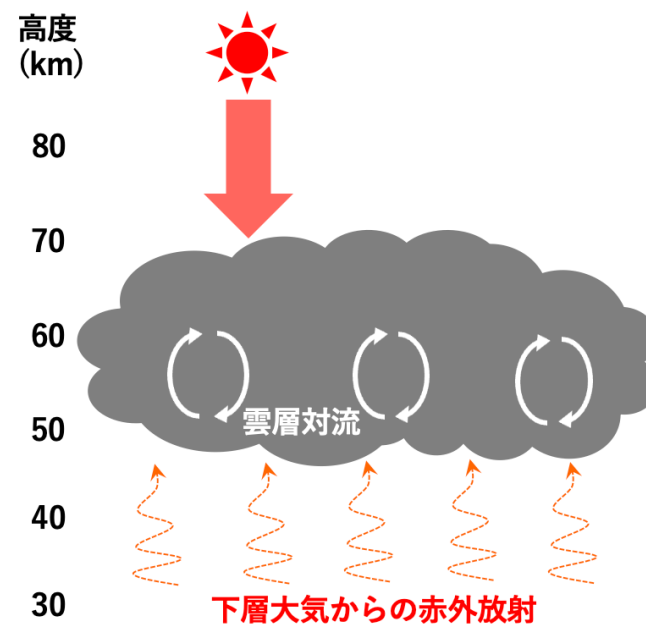
東西風の直接観測@赤道  
(Schubert, 1983)



成層度の直接観測@赤道  
(Seiff et al., 1985)



雲層周辺の熱放射のイメージ図

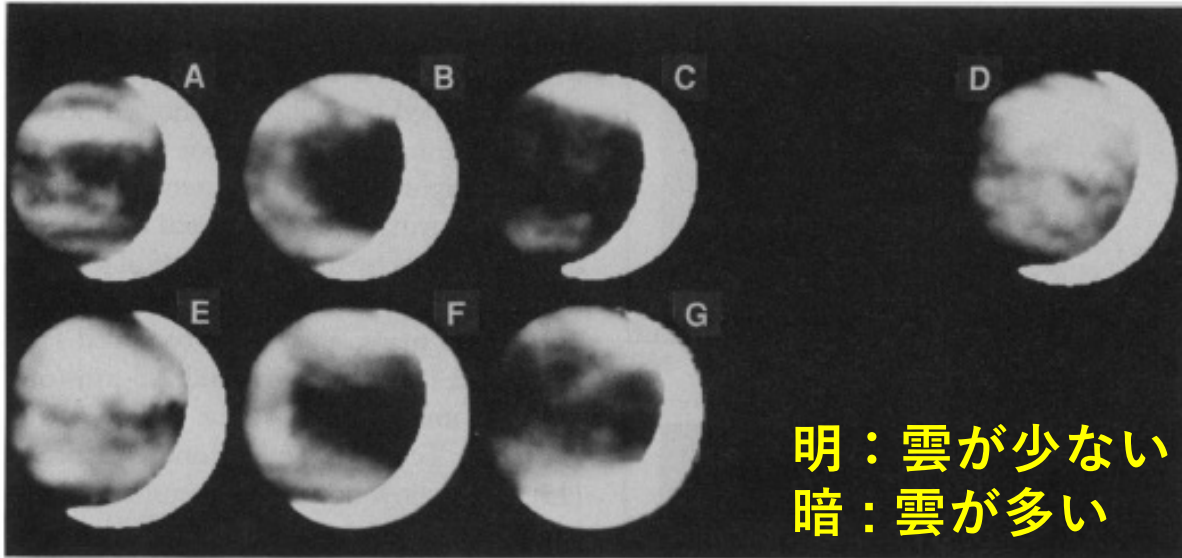


- 雲は太陽光を吸収し、大気循環や大気波動の励起を介してスーパーローテーションを駆動する。
- また、下層大気からの赤外放射を吸収し、温室効果の強化に寄与するとともに、全球的な雲層下部の対流層を形成する。
- 従って、金星の分厚い雲層は金星大気の運動や熱構造の根幹を成している。

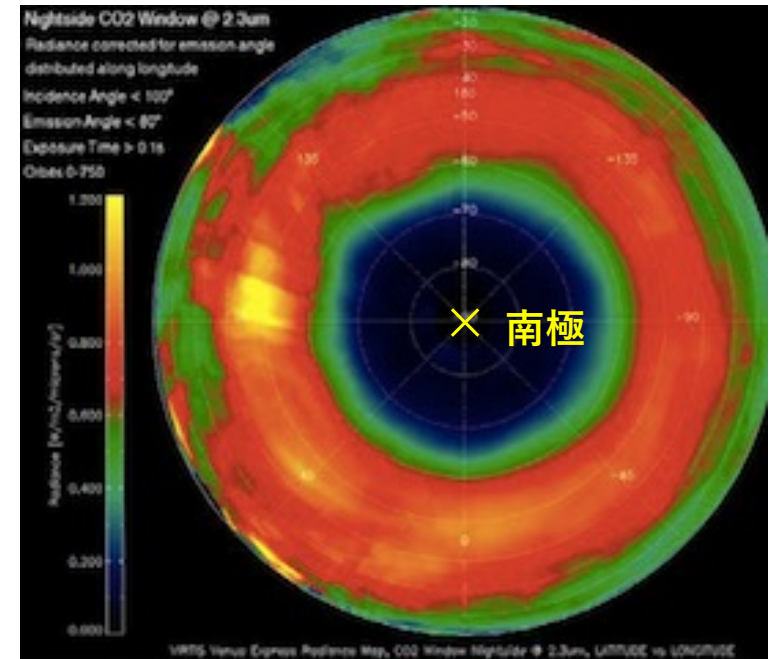


# 赤外観測で見る金星の雲量分布

地上望遠鏡で見た雲量の日変化 (Crisp et al., 1991)



赤外分光観測 (Cardesin Moinelo et al., 2020)



- 下層からの赤外放射(2 $\mu$ m帯)を測定して、雲量の水平分布を調べることができる。
- 低緯度では雲量が周期5.5地球日程度で準周期的に時間変化する、中緯度は雲量が少ない、高緯度や極域は雲が分厚いことが知られている。
- このような雲量分布がどのようにして生成・維持されるのか、観測結果のみから考察することは難しい。

# 数値モデルを用いた金星雲研究の現状

- **鉛直1次元 & 2次元(緯度-高度断面)計算**

- 雲微物理過程や光化学過程を含めて緻密に計算できるが、雲量の3次元分布は得られない。
- 大気循環や大気波動の影響を考慮できない(2次元計算では子午面循環の構造を仮定している)。

- **3次元計算(主に大気大循環モデル)**

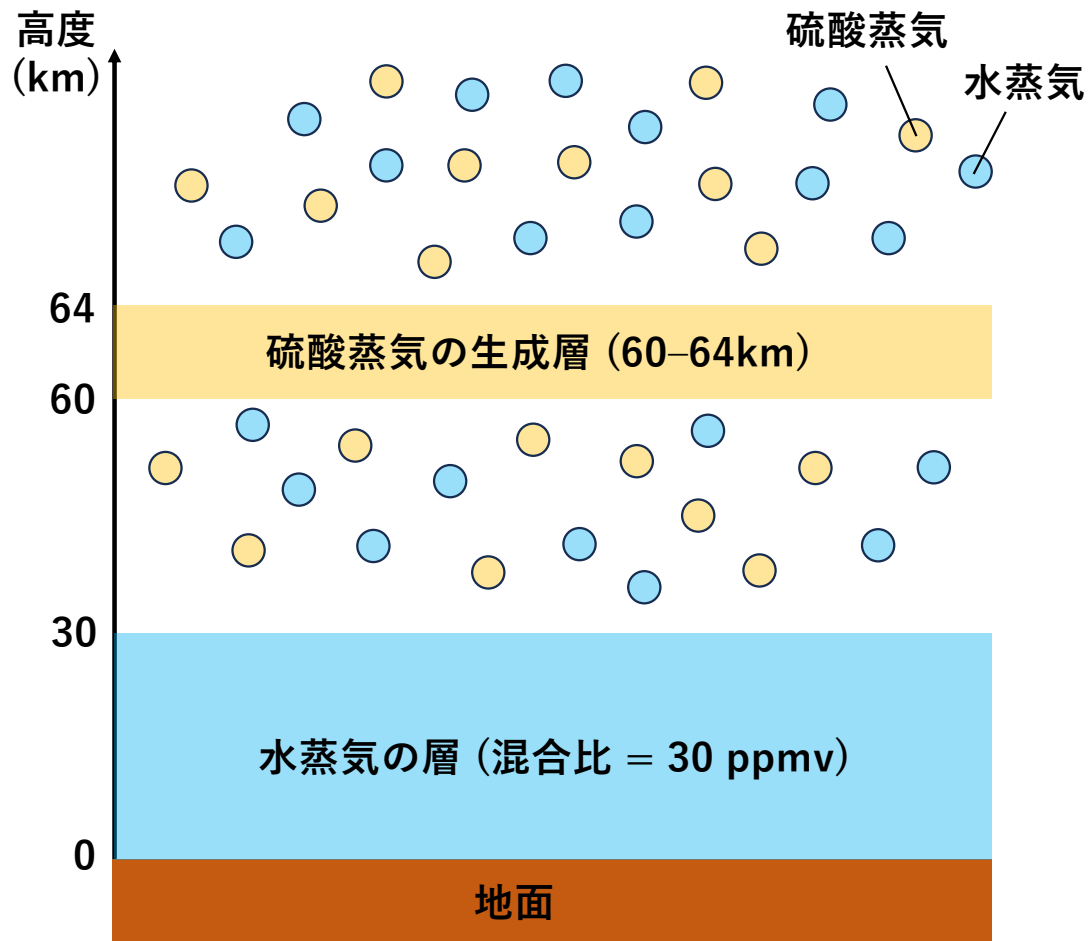
- 大気循環や大気波動の影響を考慮できる。
- モデルで得られている風速分布や気温分布が実際の観測と合わない。
- 人工的に大気波動や擾乱を組み込んだり、硫酸の海があるという仮定をしているなど、恣意的または非現実的な設定で計算している。

AFES-Venusでは、観測と統合的な風速分布 (e.g., Sugimoto et al., 2014a & 2014b), 熱構造や大気波動構造 (e.g., Ando et al., 2016, 2017, 2022, 2023; Kashimura et al., 2017; Takagi et al., 2018, 2022, 2023) が再現されている。即ち、雲分布を考える上で根本的に重要な大気運動や気温・成層度分布について、AFES-Venusは現実的に計算できていると期待。



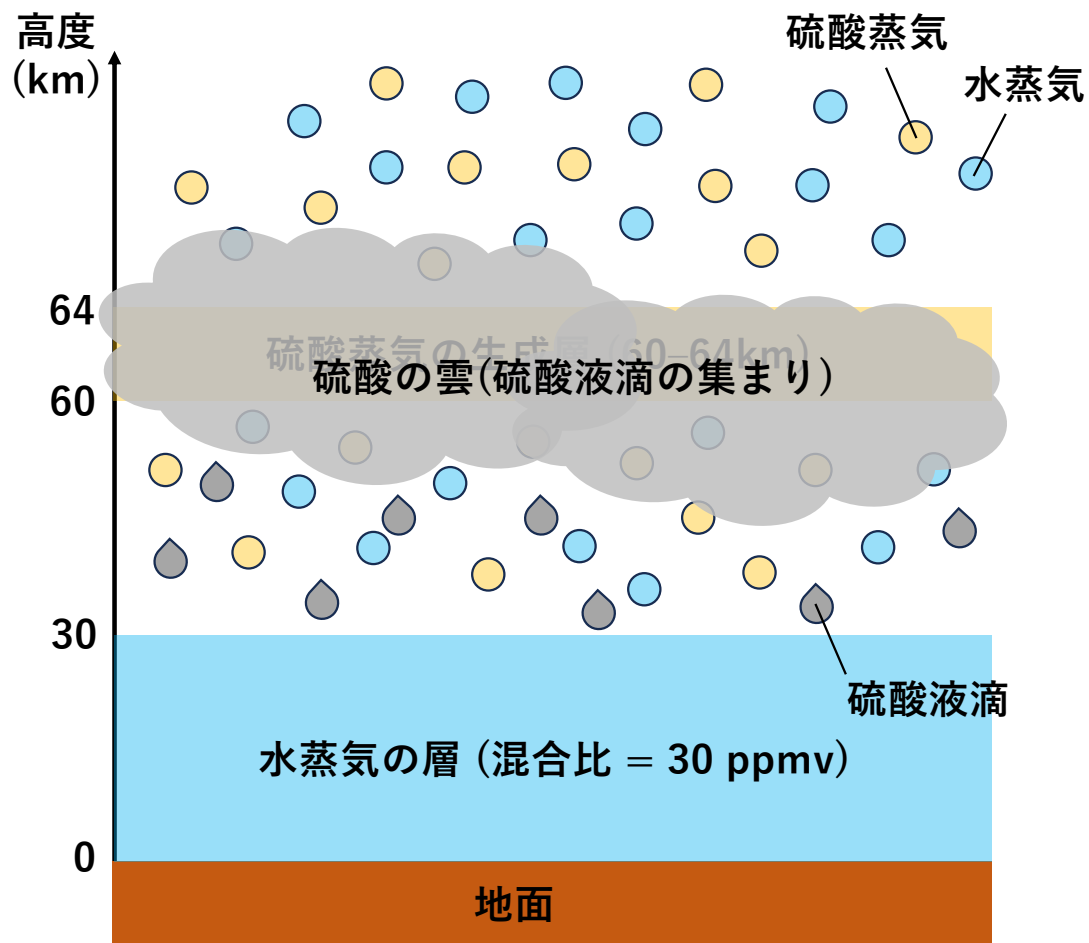
AFES-Venusに簡易的な雲物理過程を導入して、大気運動(子午面循環・大気波動・対流・拡散など)により、雲量分布をどこまで再現できるか考察した。

# AFES-Venus金星雲モデルの概要



- 水蒸気と硫酸蒸気のみを考慮。これらの化学過程は陽に解かない。ただし、硫酸蒸気の熱分解は考慮する。
- 水蒸気の層は高度0-30kmに常に存在し、硫酸蒸気は昼側の高度60-64kmにて生成されると仮定する(e.g., Yung & DeMore, 1982; Pollack et al., 1993; Hashimoto & Abe, 2001)。
- 水蒸気と硫酸蒸気が共に飽和した時に雲粒(硫酸液滴)が作られると仮定する。
- 雲粒の重力沈降は考えるが、衝突・併合や粒径の時間成長は考えない。また、雲が水蒸気または硫酸蒸気の飽和混合比を下回ると即座に蒸発して水蒸気と硫酸蒸気に分解されるとする。

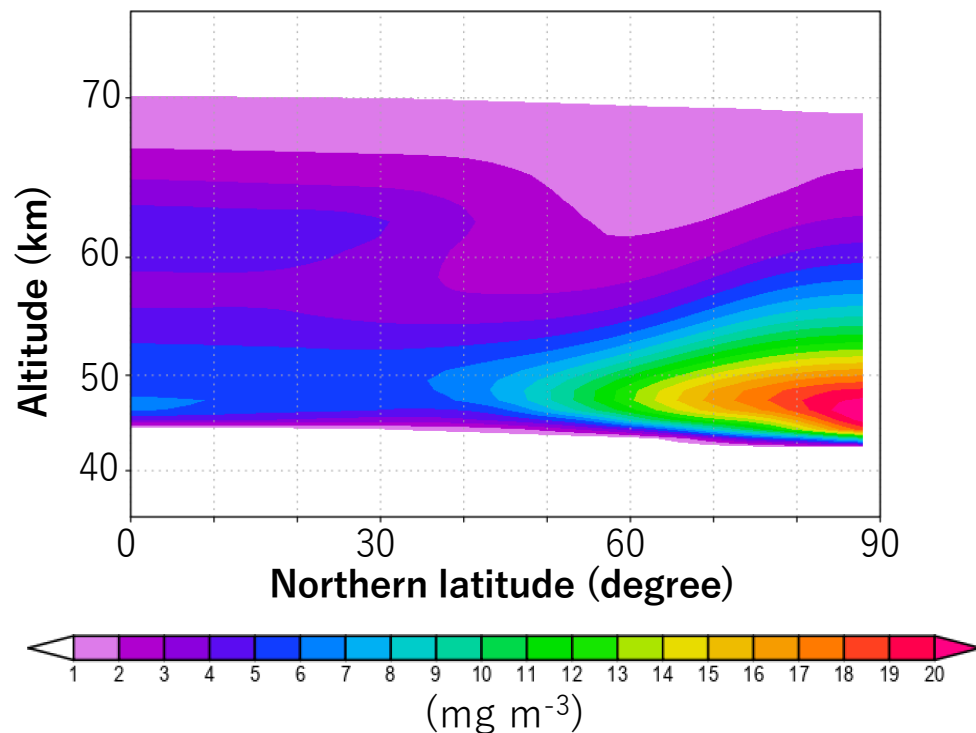
# AFES-Venus金星雲モデルの概要



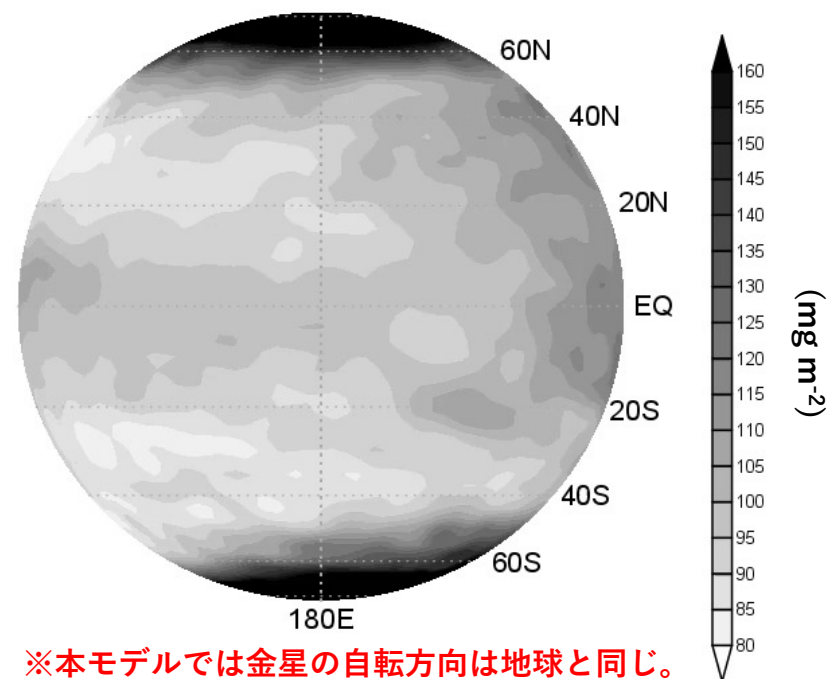
- 水蒸気と硫酸蒸気のみを考慮。これらの化学過程は陽に解かない。ただし、硫酸蒸気の熱分解は考慮する。
- 水蒸気の層は高度0-30kmに常に存在し、硫酸蒸気は昼側の高度60-64kmにて生成されると仮定する (e.g., Yung & DeMore, 1982; Pollack et al., 1993; Hashimoto & Abe, 2001)。
- 水蒸気と硫酸蒸気が共に飽和した時に雲粒(硫酸液滴)が作られると仮定する。
- 雲粒の重力沈降は考えるが、衝突・併合や粒径の時間成長は考えない。また、雲が水蒸気または硫酸蒸気の飽和混合比を下回ると即座に蒸発して水蒸気と硫酸蒸気に分解されるとする。

# AFES-Venusによる金星雲量分布の再現 (Ando et al., 2020)

東西・時間平均した雲量の緯度-高度分布



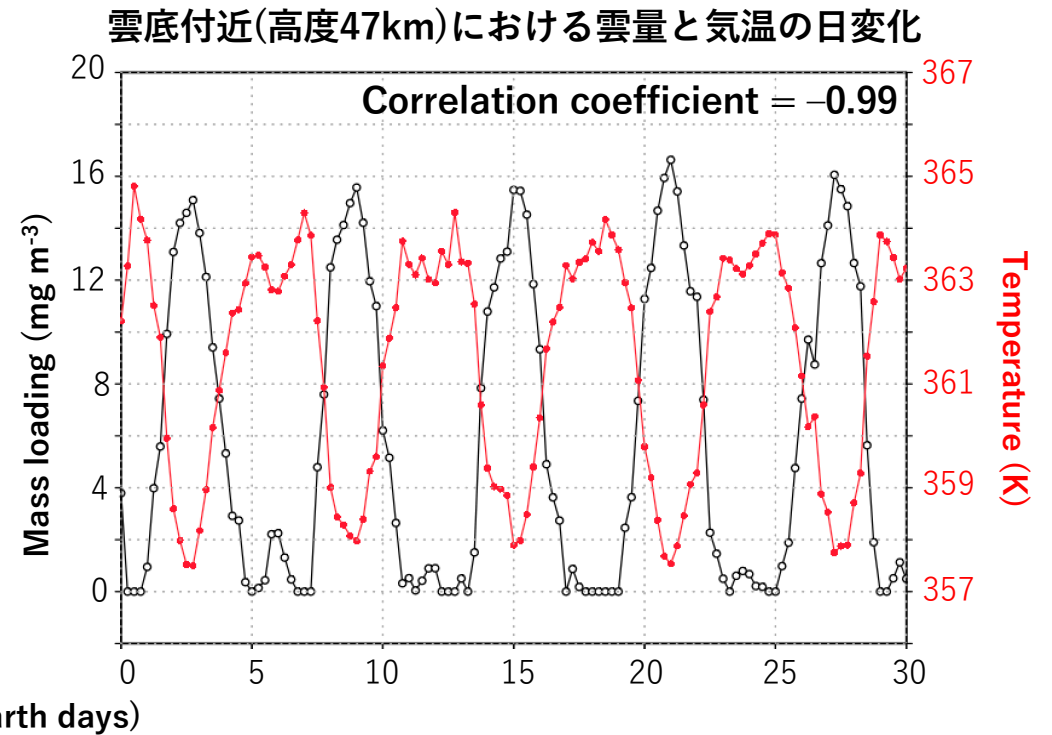
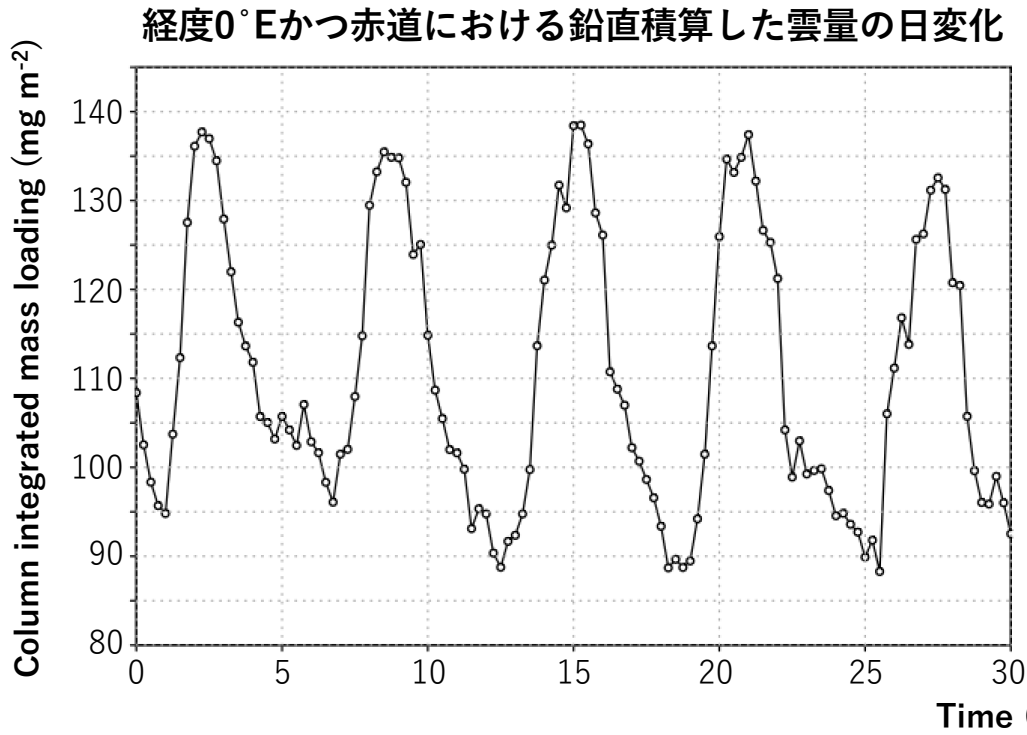
鉛直積算した雲量の時間変化(6時間ごと)



※本モデルでは金星の自転方向は地球と同じ。

- 昨今の赤外観測や電波掩蔽観測と整合するような、雲量・硫酸蒸気・水蒸気混合比の分布を再現した (改善の余地あり)。
- 極域で雲が分厚くなる理由として、極域では成層度が弱く上下方向の大気運動が活発になるので、雲材料物質が効率良く上方輸送されるためだと考えられる。

# AFES-Venusによる金星雲量分布の準周期変動の再現 (Ando et al., 2021)

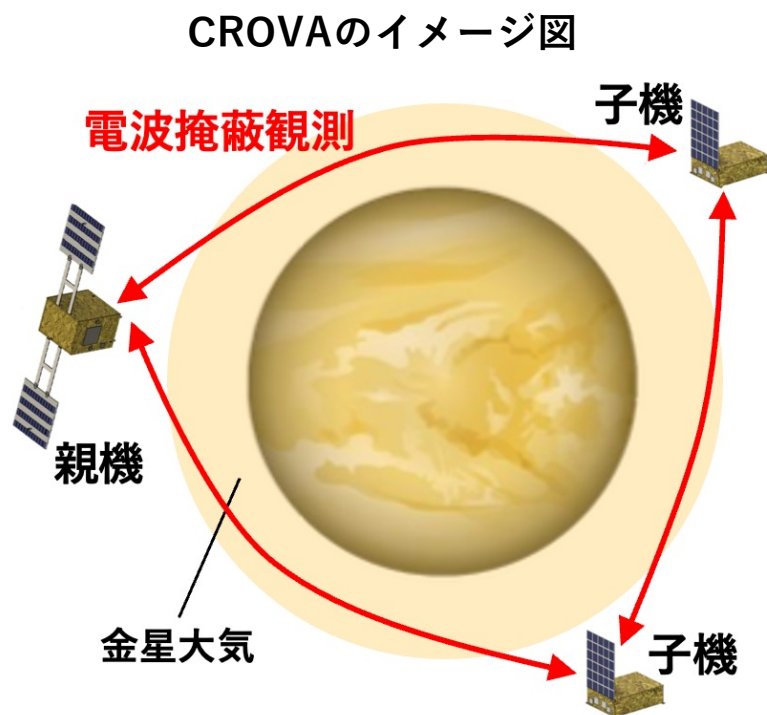


- 低緯度で見られる雲量の時間変化に着目したところ、雲底付近の雲量が周期5.5地球日程度で準周期的に変化することが分かった。これは、過去の赤外観測 (e.g., Crisp et al., 1991) と良く整合する。
- この準周期的な変動は、雲底付近に捕捉された惑星規模の大気波動（赤道ケルビン波）に伴う気温変化に起因することを示した。雲分布と大気運動（特に大気波動）が密接な関係を持つ可能性を指摘したのは、Ando et al. (2020 & 2021) が初めて。

# まとめ

- あかつきとVenus Expressの電波掩蔽観測データを解析することで、金星大気の平均的な熱構造や金星極域に見られる大気擾乱の鉛直構造を明らかにした。また、金星大気大循環モデルAFES-Venusを用いてそれらの構造を再現し、成因を解明した。
- 簡易的ではあるが雲物理過程をAFES-Venusに導入して、金星の雲量分布を再現した。改善の余地はあるものの、昨今の赤外観測と整合するような平均的な雲量分布や低緯度に見られる準周期的な雲量の準周期的変動を再現し、その成因を示した。
- 今後は、地球気象と同様に他の惑星でも4次元気象データを取得するため、電波掩蔽の長所を最大限に引き出せる複数の小型衛星を用いた衛星間電波掩蔽観測の実現を目標とする。まずは、金星大気をターゲットにした衛星間電波掩蔽観測(CROVA)の立案を目指したい。

# 金星衛星間電波掩蔽観測 (Cross-link Radio Occultation of Venus Atmosphere)



- 衛星間で電波掩蔽観測をやれば、従来の観測に付随する問題を全て解決できる。
- 地球ではGPS衛星による衛星間電波掩蔽観測が行われており、様々な緯度・経度・地方時における気温・気圧の高度分布を短期間で大量に取得している。
- 東大航空宇宙グループによって深宇宙小型衛星の開発が国内で進んでおり、その技術実証も盛んに行われている。その技術・知見を金星大気の衛星間電波掩蔽観測(CROVA)に活用する。
- 現実的な条件の下でCROVAが実施できる解が見つかり(Yamamoto et al., 2021)、それに基づいて理学・工学両面から検討を進めている。
- 現段階では親機1機+子機2機で構成し、前者はPROCYON, 後者はEQUULEUSをベースに計画。



**ご清聴ありがとうございました！**