

金星探査機「あかつき」搭載紫外イメージャ  
を使った金星上層雲の特性導出

眞子 直弘<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISAS/JAXA

2018年3月9日

CPS/WTK 惑星大気放射計算

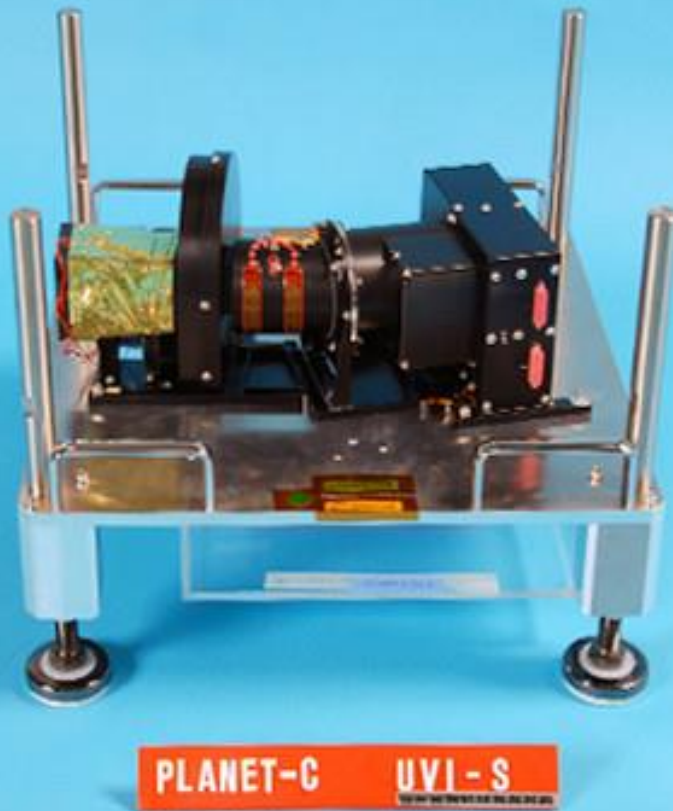
ミニワークショップ@CPS

# 研究のモチベーション

- 「あかつき」で観測される金星大気からの太陽散乱光は、位相角が大きい（散乱角が小さい）ほど高高度にあるエアロゾル（雲）からの散乱の寄与が大きくなると考えられる。
- 高位相角におけるUVIデータを使って高度70-90 kmに存在すると言われている”upper haze”（小粒径雲粒）の粒径分布等の特性や、その長期変動について調べたい。

この研究は始めたばかりで、まだたいした結果はありませんが、最新の現状をお知らせいたします。

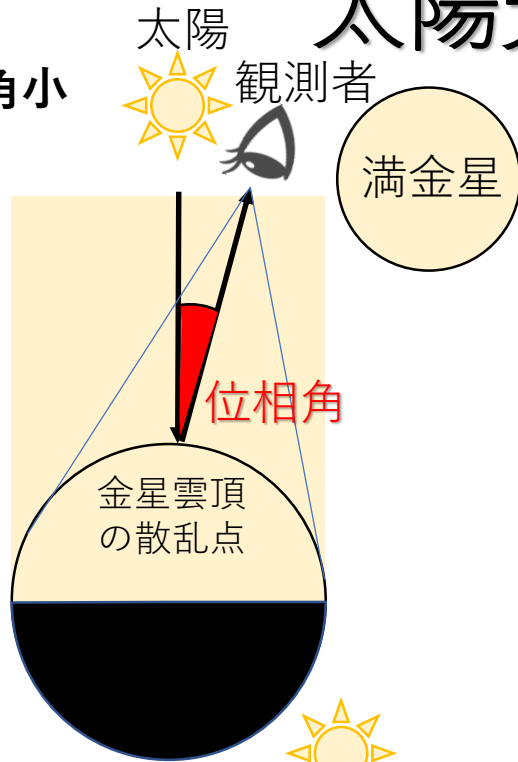
# 紫外イメージャ (UVI)



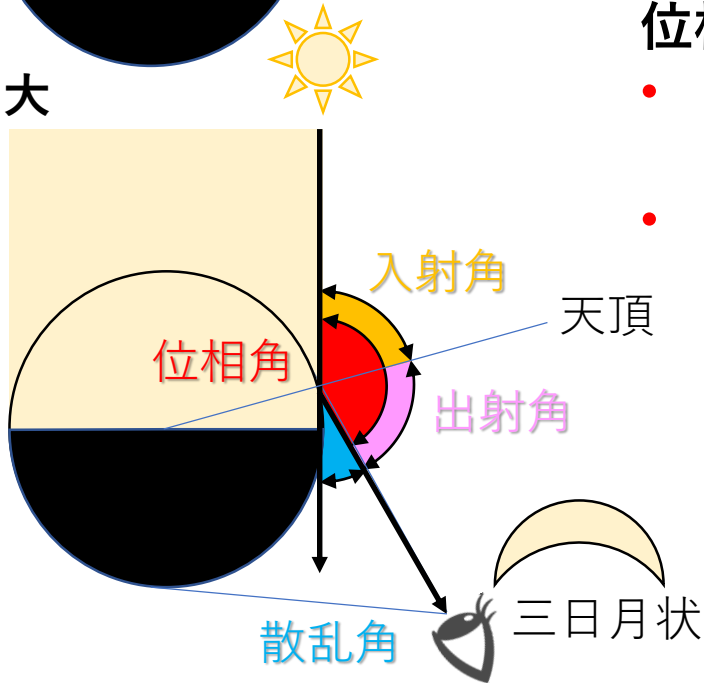
質量	約 4.1 kg
視野角	12° × 12°
検出器	Si-CCD (1024 画素 × 1024 画素)
観測波長と観測対象	283 nm (昼面：雲頂の二酸化硫黄) 365 nm (昼面：未同定吸収物質)

# 太陽光の散乱と位相角

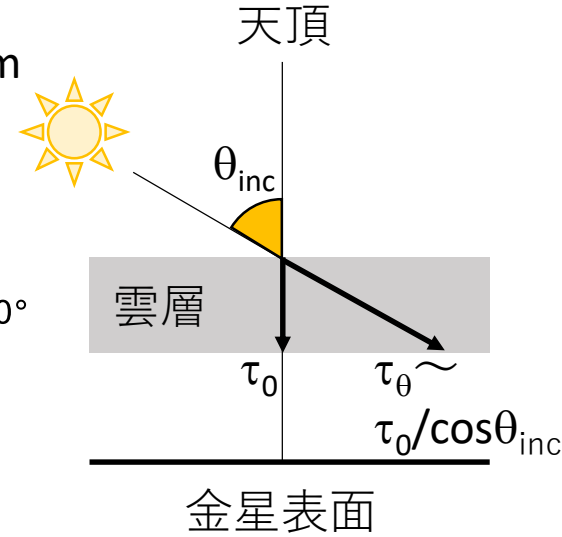
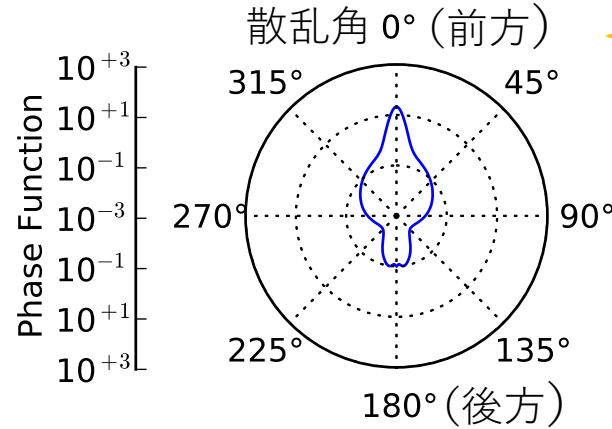
位相角小



位相角大



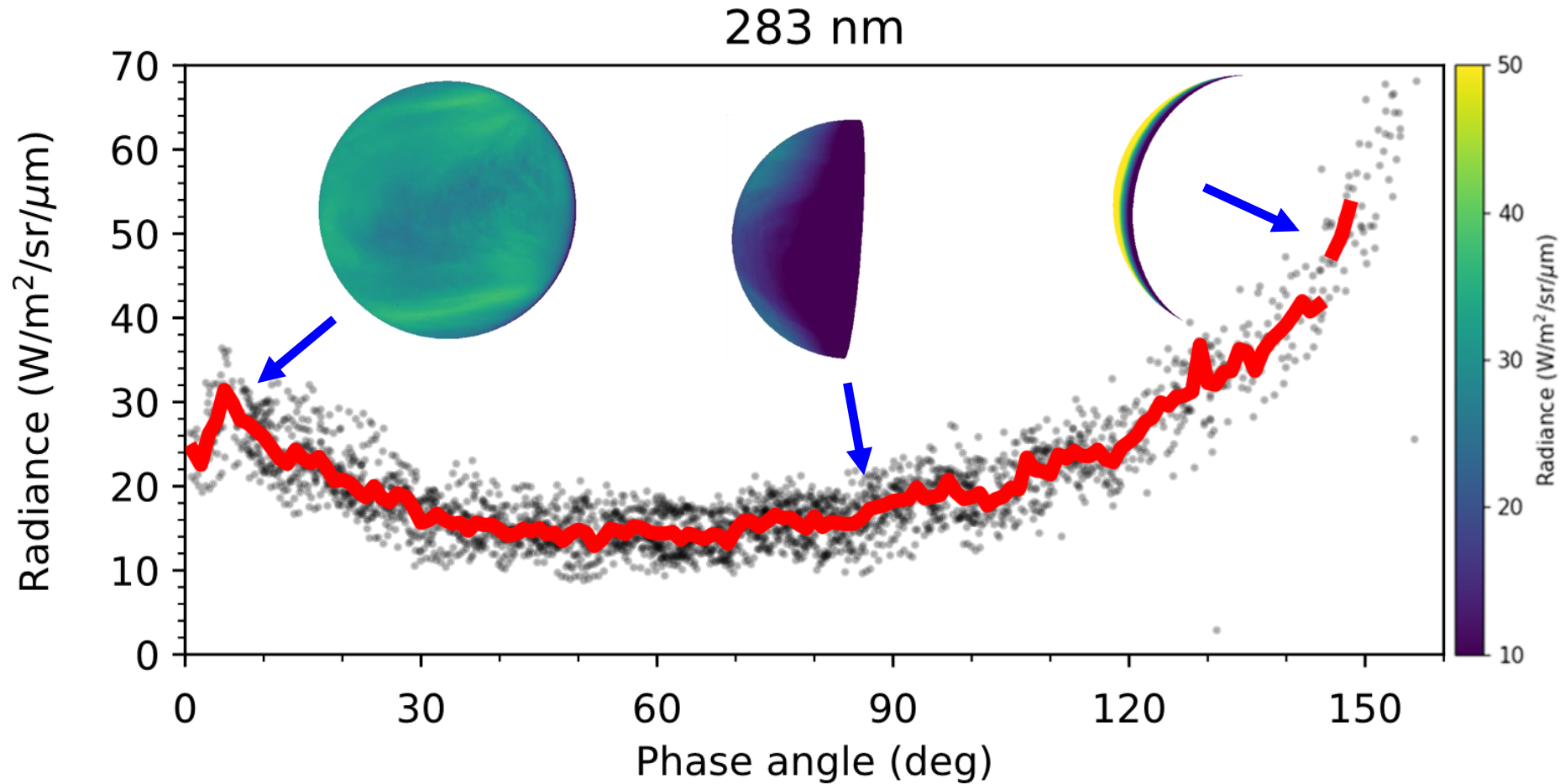
モード半径 $1\mu\text{m}$ , 波長 $0.55\mu\text{m}$



位相角大 → 観測者は太陽から離れた方向

- **散乱角小**
  - 雲の前方散乱大
- **入射角、出射角ともに $90^\circ$ に近くなる**
  - 雲の光学的厚さ $\sim \tau_0 / \cos \theta_{inc}$ が大きくなるため、深くまで透過しなくなり、**気体吸収の影響を受けにくくなる**
  - ランバート散乱を仮定した場合の**輝度** ( $\rho E_0 \cos \theta_{inc} / \pi$ ) は小さくなる

# UVIで得られた観測輝度 vs. 位相角



- データ期間：2015年12月7日～2017年5月31日
- 位相角70° 付近で輝度が最小値となる
- 位相角0° 付近に比べ、位相角150° の輝度が大きい

# 解析方法

- 放射伝達シミュレーションを行って様々な位相角におけるUV輝度を計算する
- UVIによる観測データを再現するように雲の特性パラメータを最適化する
- 放射伝達計算コードの候補：MODTRAN、DISORT、RSTAR

# MODTRAN

- MODerate resolution atmospheric TRANsmission
  - Modtran 4.2.1 または Modtran 5.2.0
    - 4種類のカスタムエアロゾルを入力できる
    - 多重散乱計算にDISORT・Isaacs法を使える
    - 実行に必要な主な入力パラメータ:
      1. 4種類の雲粒 (Mode1、Mode2、Mode2'、Mode3) について
        - **消散係数、吸収係数、非対称性パラメータ** (波長の関数)
        - **位相関数** (波長、散乱角の関数)
        - **消散係数の鉛直プロファイル** (波長550nm)
      2. **気温、気圧**の鉛直プロファイル
      3. 太陽定数の倍率
      4. 観測ジオメトリ
  - 気体分子・雲の鉛直分布にはHaus 2013/2015, etc. のモデルを使用 (thanks to Sato Takao-san)
  - 雲粒の消散係数、吸収係数、位相関数の計算 (Mie散乱計算) にはMIEV0 (Wiscombe)を使用
- 境界層
  - 対流圏
  - 成層圏
  - 流星塵層

# DISORT

- Discrete Ordinates Radiative Transfer
- DISORT 3.0 (Stamnes, et al.)
  - 計算効率向上のため、delta-M transformation (Wiscombe ,1977)、TMS/IMS intensity correction (Nakajima and Tanaka, 1988)といった手法が取り込まれている。
  - 実行に必要な主な入力パラメータ:
    1. **気体分子、雲粒の混合物について**
      - **光学的厚さ** (散乱・吸収の和) の鉛直プロファイル (波長の関数)
      - **単一散乱アルベド** の鉛直プロファイル (波長の関数)
      - **位相関数** の鉛直プロファイル (波長の関数、Legendre展開係数)
    2. **気温、気圧** の鉛直プロファイル
    3. **大気上端太陽放射照度** (波長の関数)
    4. 観測ジオメトリ
- 気体分子・雲の鉛直分布: Haus 2013/2015, etc.
- Mie散乱計算: MIEVO (Wiscombe)
- 気体分子の吸収断面積: HITRAN or HITEMP

未同定吸収物質の  
吸収も考慮できる



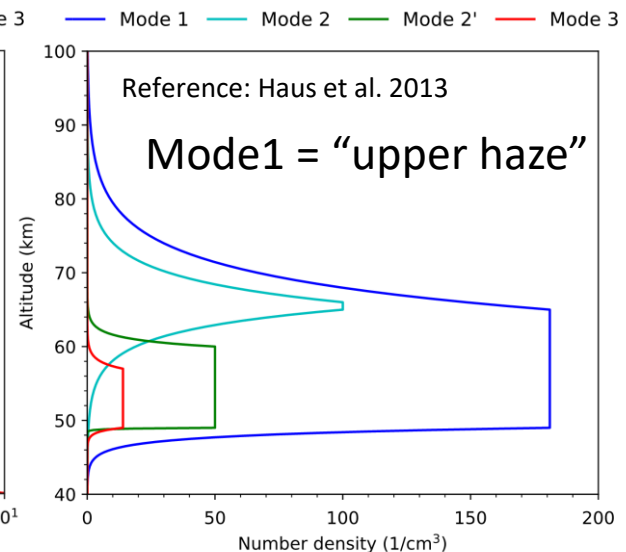
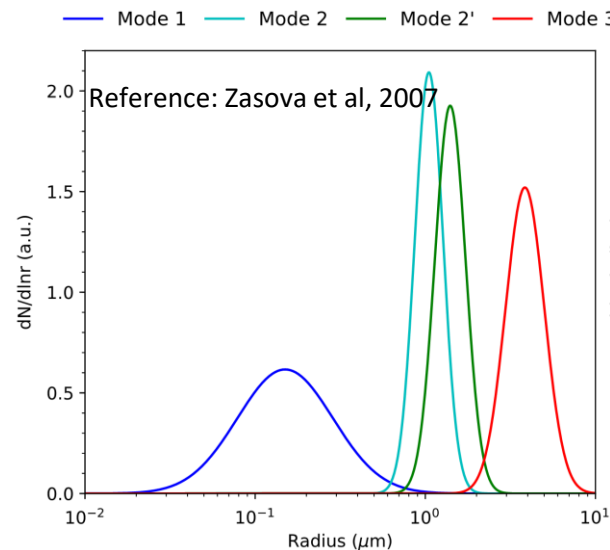
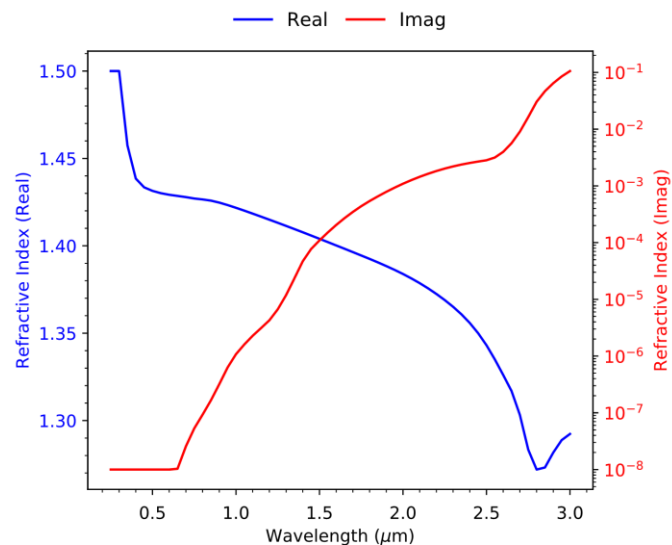
# RSTAR

- rs7aktk\_170809

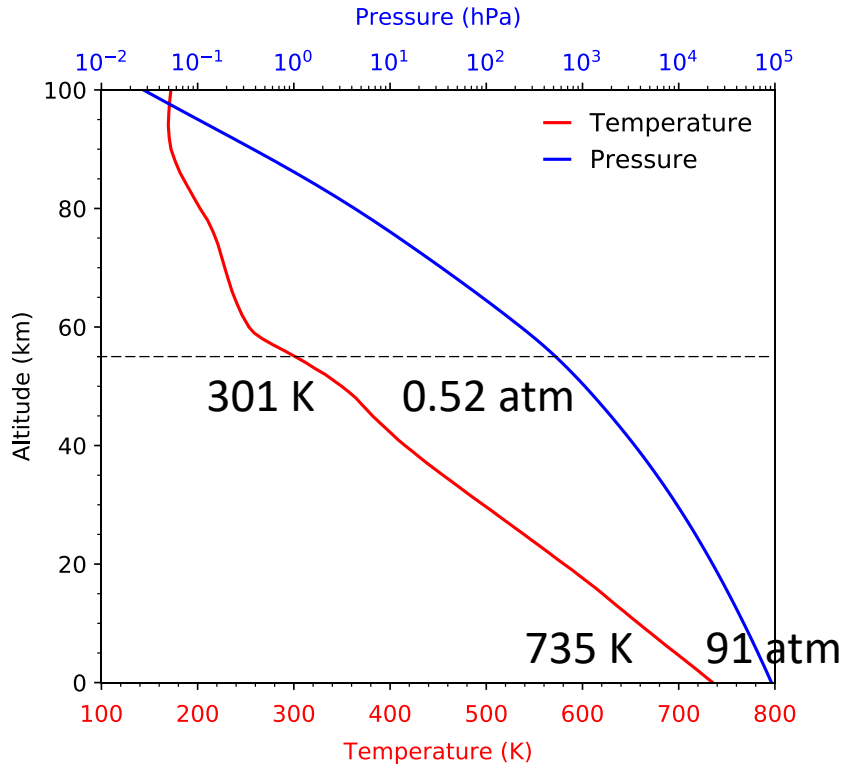
- 地球大気の放射伝達コードRSTARを元に、金星大気を観測する「あかつき」用にカスタマイズしたもの
- 開発メンバー：関口先生@海洋大、はしもと先生@岡山大、佐藤隆雄さん@宇宙研、etc.
- IR1、IR2、LIRについては実装済み
- UVIについては未実装
- 今回はDISORTの動作確認のために使用（IR2）
- 組み込みモデル:
  1. 金星大気モデル
    - 低緯度 ( $< 30^\circ$ )、緯度 $45^\circ$ 、緯度 $60^\circ$ 、緯度 $75^\circ$ 、緯度 $85^\circ$
  2. 金星雲モデル
    1. 成分組成：75%  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、84.5%  $\text{H}_2\text{SO}_4$
    2. 鉛直分布：Haus et al. 2013
- 実行に必要な主な入力パラメータ:
  1. 観測ジオメトリ

# 金星の雲モデル

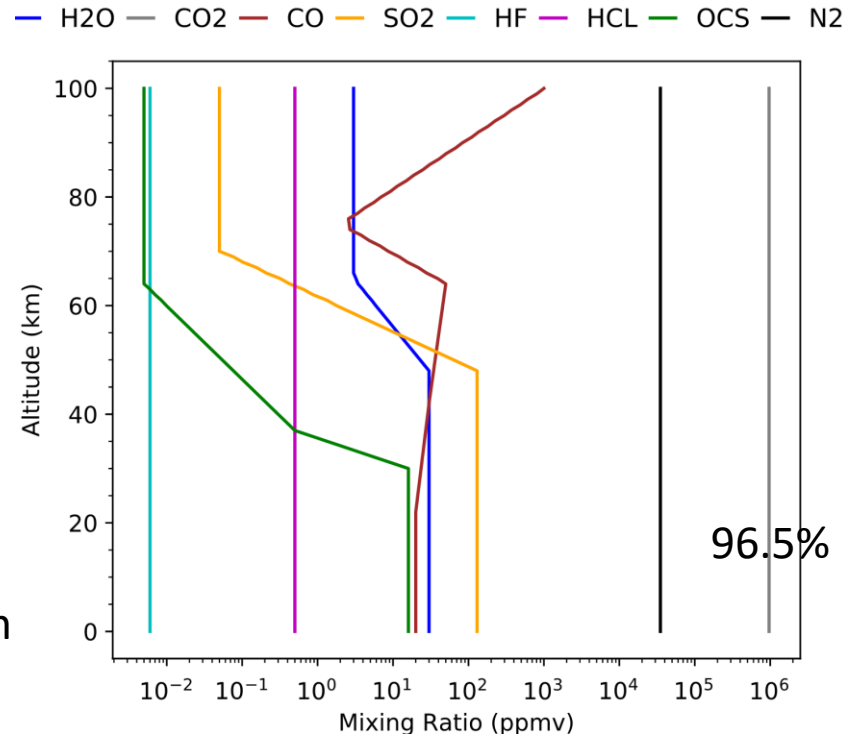
	パラメータ	Mode 1	Mode 2	Mode 2'	Mode 3
成分組成	複素屈折率	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 75%, H <sub>2</sub> O 25%			
粒径分布	モード半径 (μm)	0.15	1.05	1.40	3.85
	広がり幅	1.91	1.21	1.23	1.30
高度分布	ベース高度 (km)	49	65	49	49
	厚み (km)	16	1	11	8
	上スケール高度 (km)	5	3.5	1	1
	下スケール高度 (km)	1	3	0.1	0.5
	数密度 (個/cm <sup>3</sup> )	181	100	50	14



# 金星大気モデル

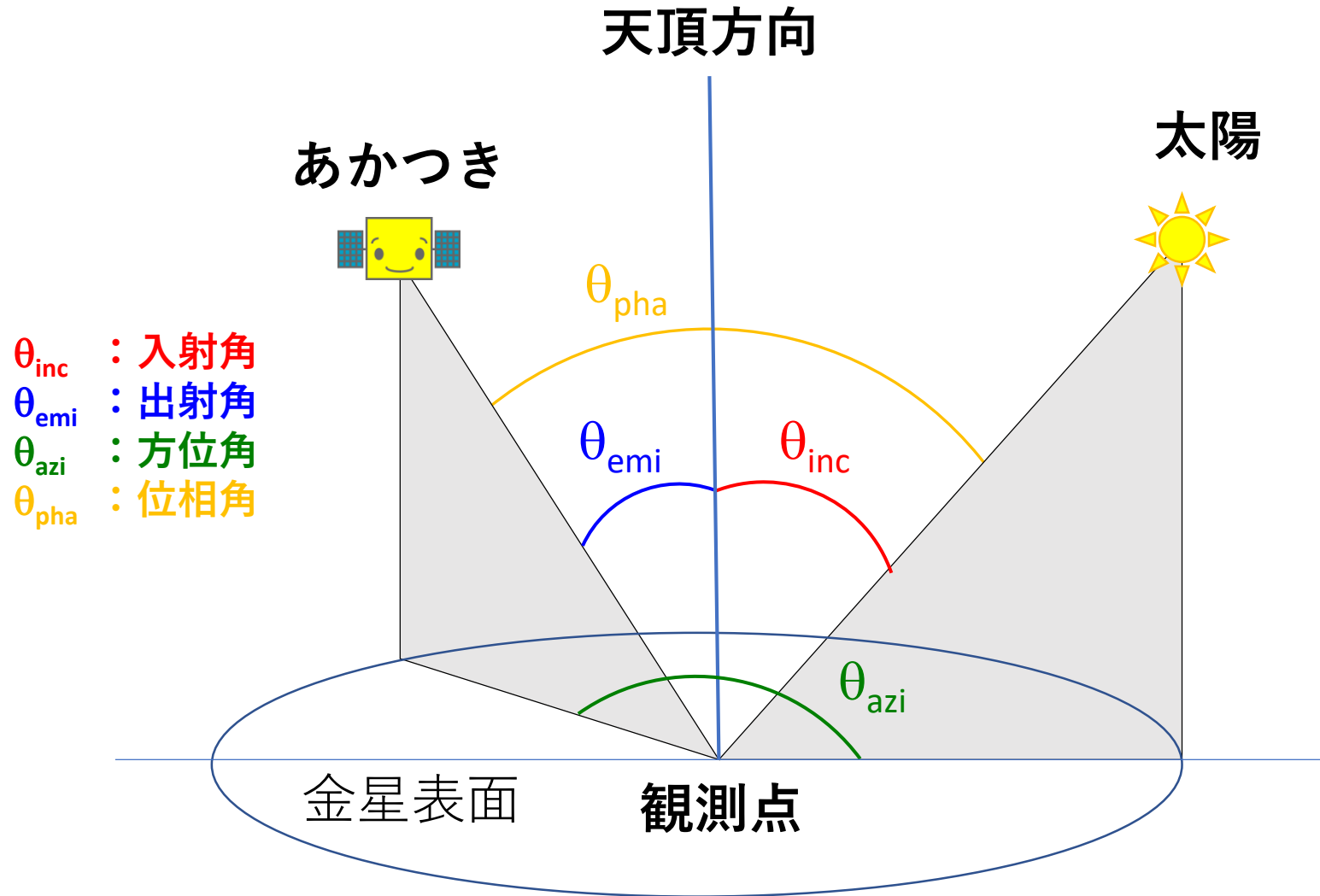


Venus International Reference Atmosphere (VIRA) の気温・気圧プロファイル [Seiff et al., 1985]



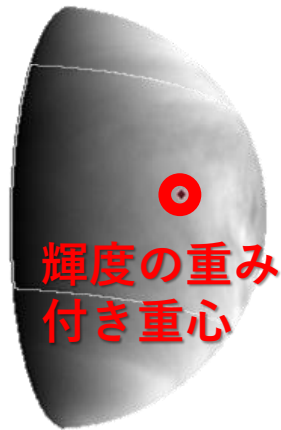
気体分子の鉛直プロファイル [Marcq et al., 2005; Haus et al., 2010]

# 観測ジオメトリ

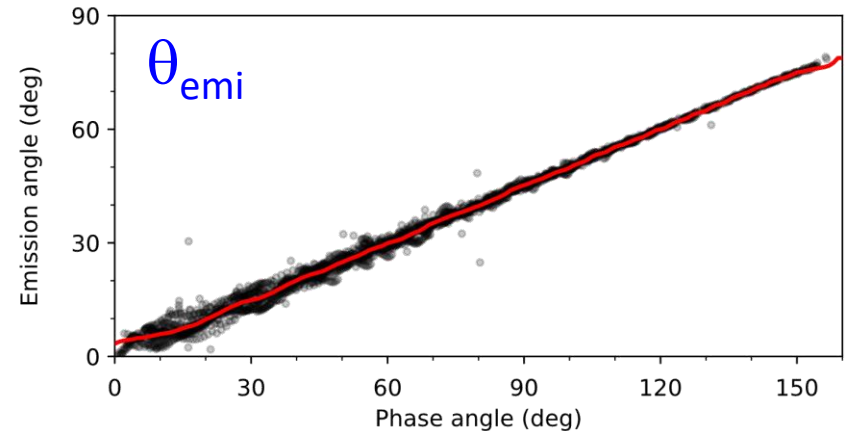
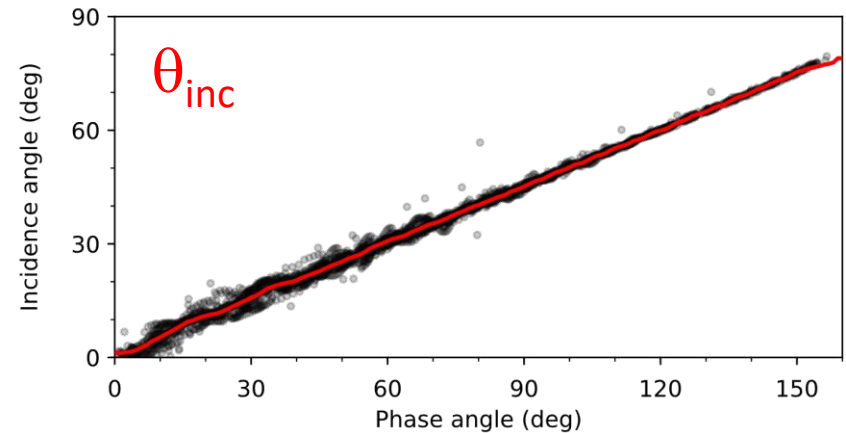
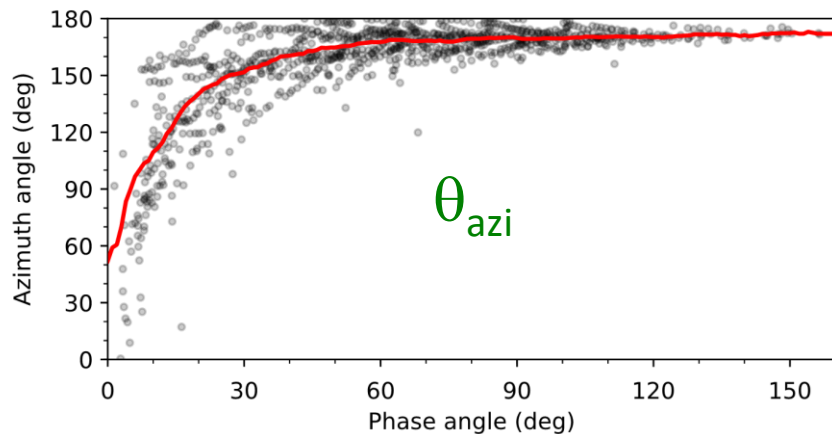


# 観測ジオメトリ

- 画像中の全画素のジオメトリについて放射伝達計算をするのは大変
  - 画像ごとに、観測点の重心のジオメトリを求める
  - **位相関数ごとに、典型的なジオメトリについて放射伝達計算を行う**

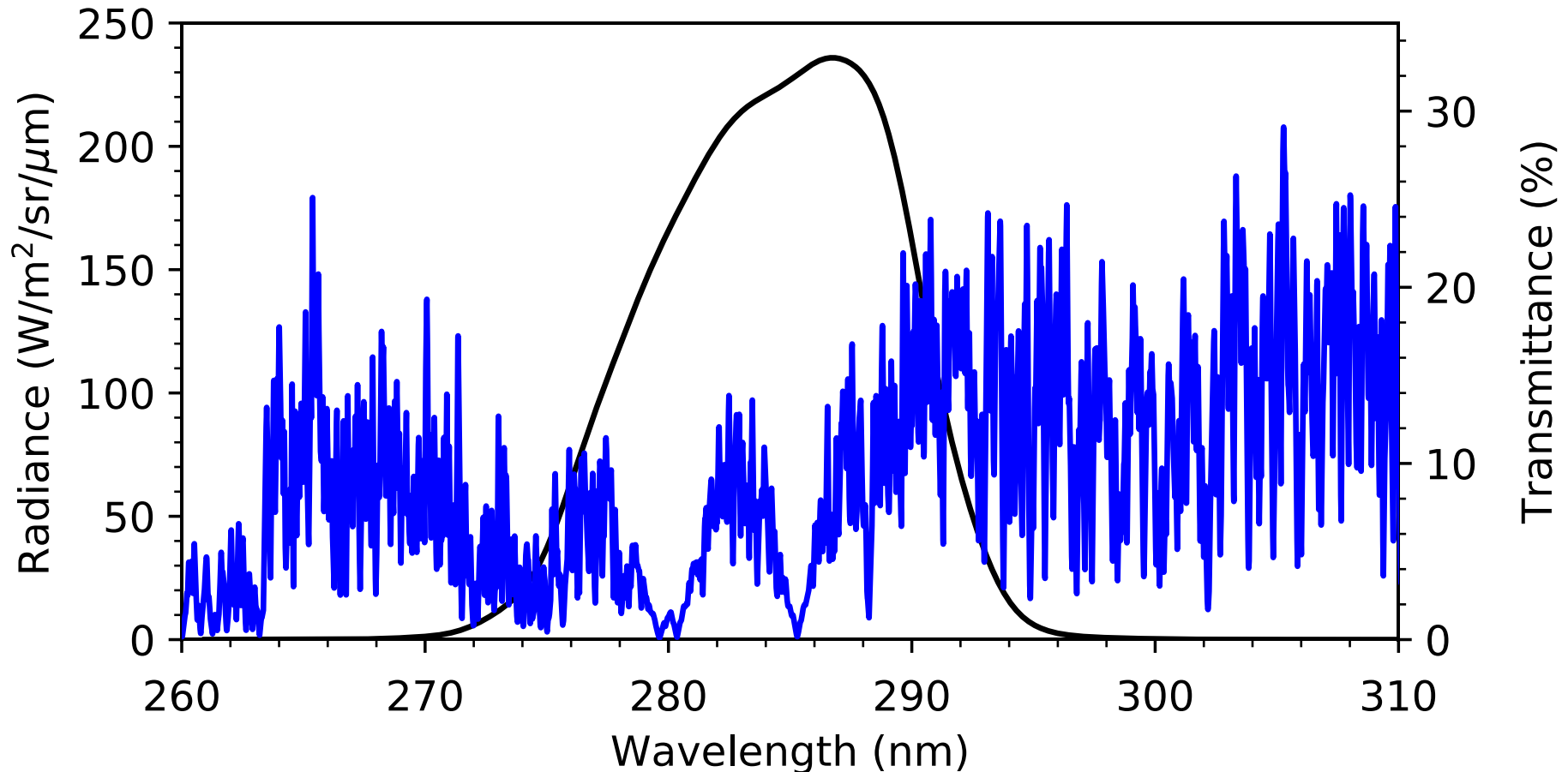


輝度の重み付き  
重心の位相角 vs. →  
入射角、出射角、  
方位角の散布図  
(2015年12月7日～  
2017年5月31日)



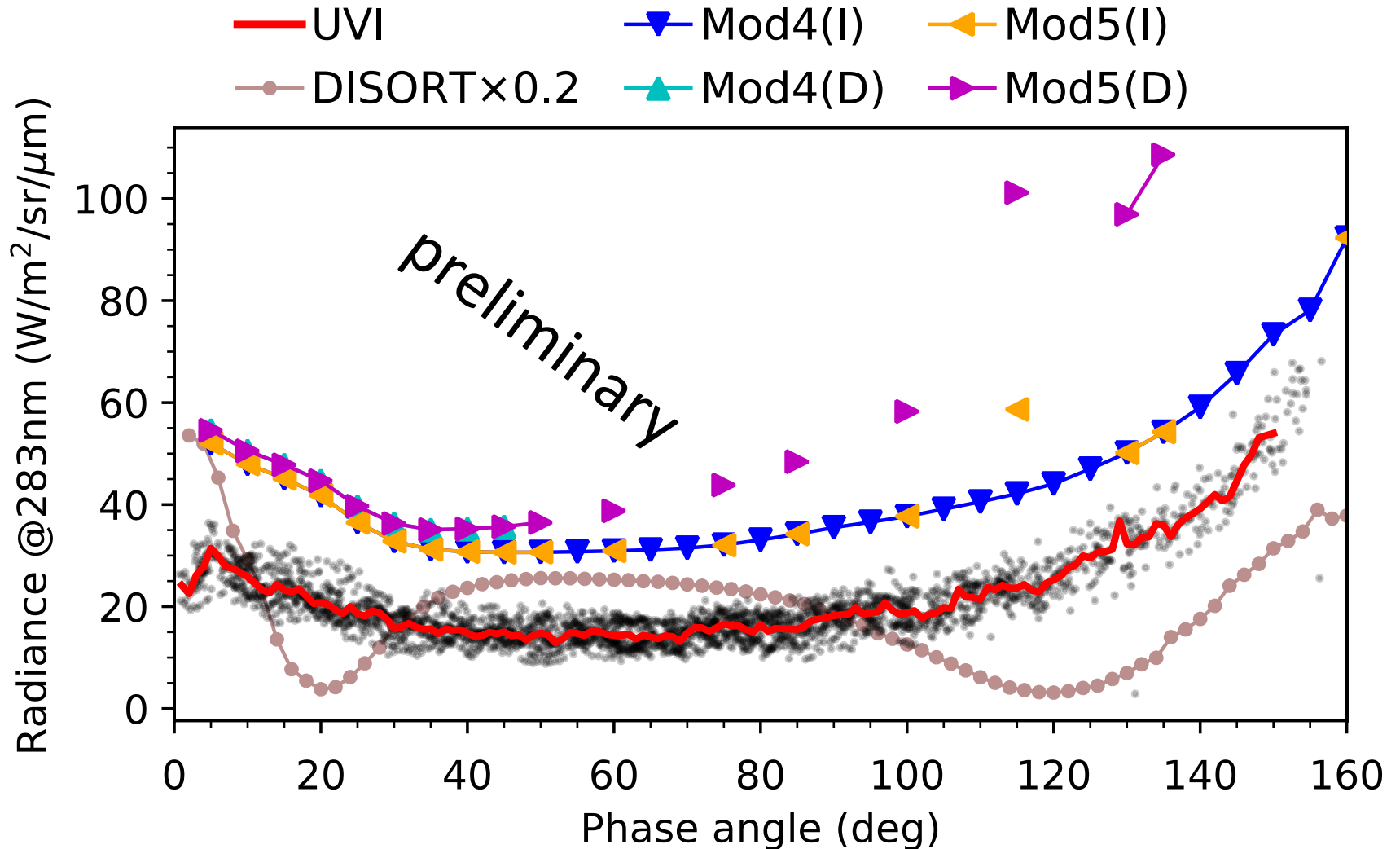
# UV (283 nm) 放射輝度計算結果

— Radiance — Transmittance



- MODTRAN5.2.0を使用
  - 位相角 $5^\circ$ の場合
- 位相角ごとに透過率の重み付き平均輝度を求める

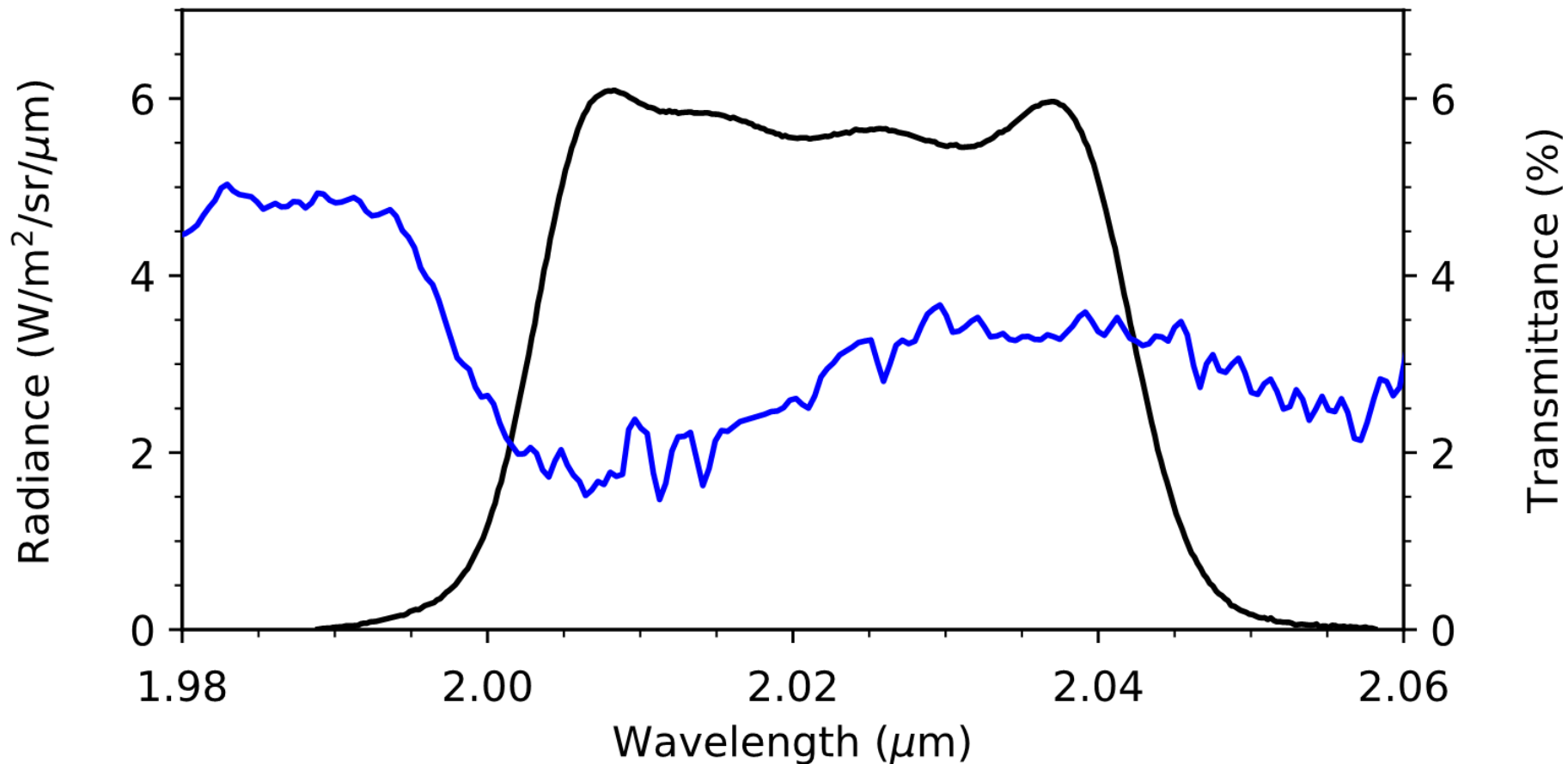
# UV (283 nm) 放射輝度の比較



- MODTRANは高位相角における輝度増加が再現できている
- 絶対値はMODTRANの方がUVIより大き目
- DISORTは正しく計算できていない
- 高位相角ではDISORT/Isaacs法の違いが大きい

# IR(2.02 $\mu\text{m}$ ) 放射輝度計算結果

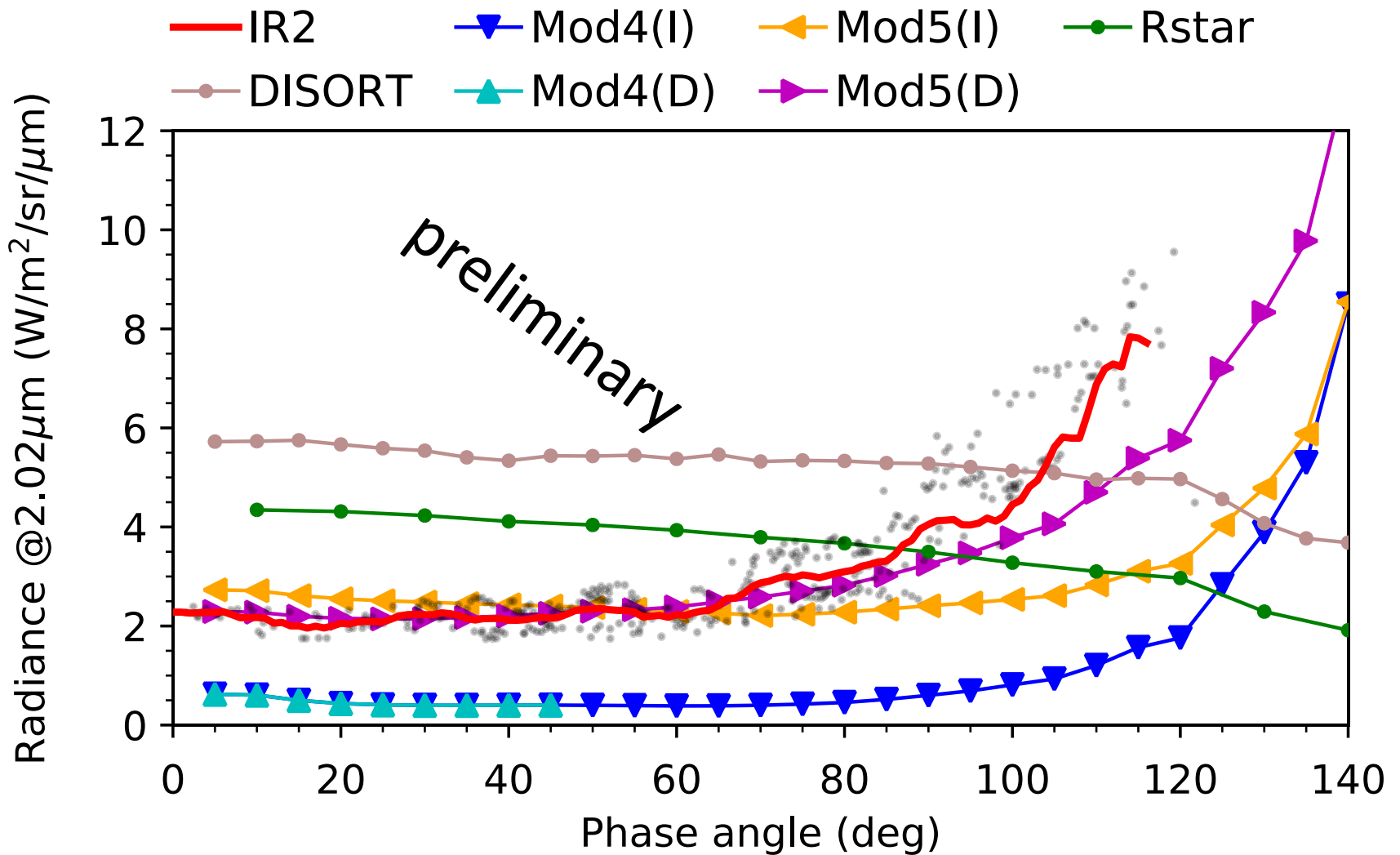
— Radiance — Transmittance



- MODTRAN5.2.0を使用
- 位相角 $5^\circ$  の場合



# IR (2.02 $\mu\text{m}$ ) 放射輝度の比較



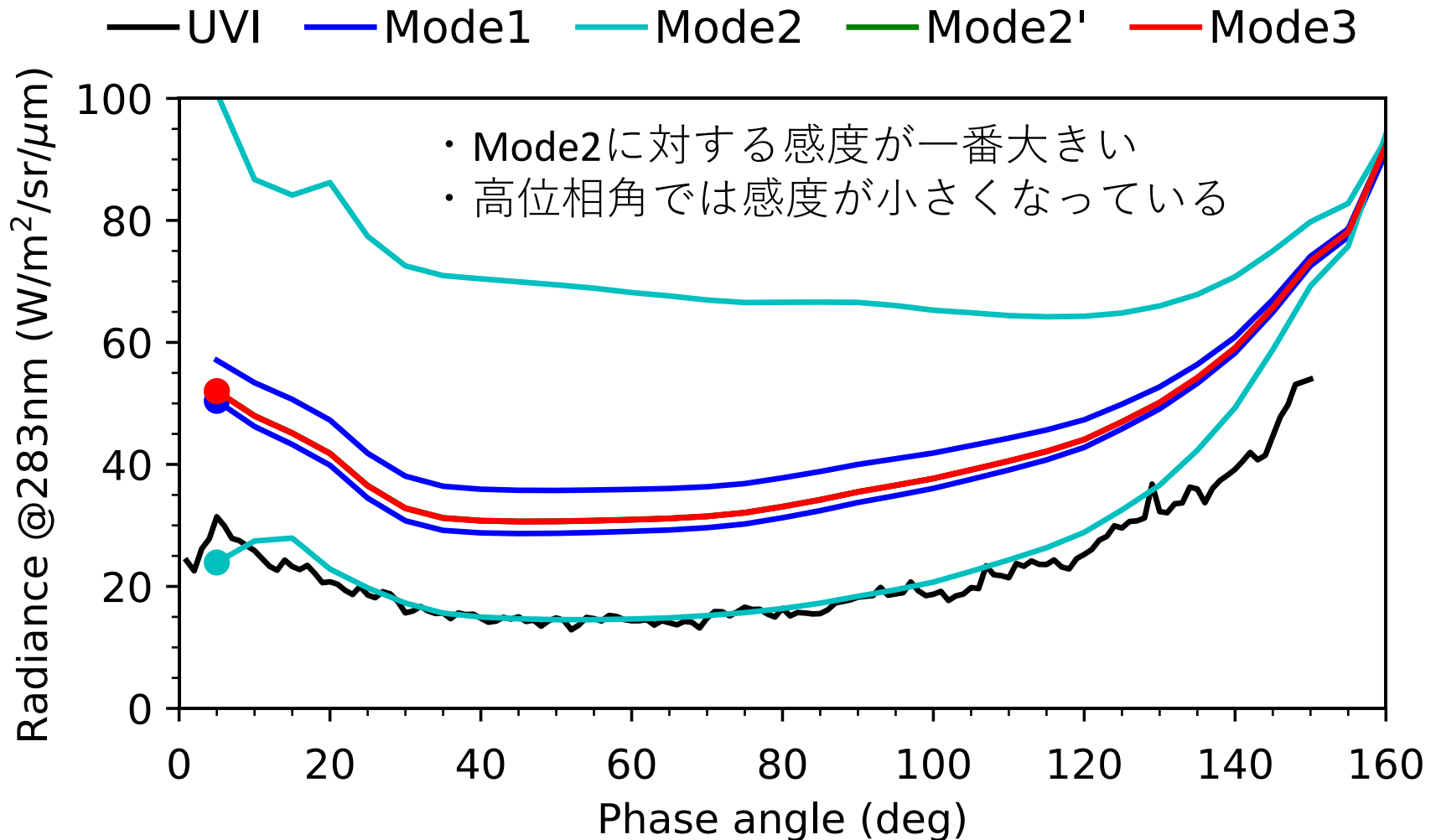
- MODTRAN5は絶対値も含めてUVIの観測輝度をそこそこ再現できている
- MODTRAN4はMODTRAN5より輝度が小さ目
- DISORT、RSTARは似たような傾向を示し、どちらも正しく計算できていない

# 雲特性の最適化（感度解析）

- Mode1、Mode2、Mode2'、Mode3のそれぞれについて、以下のパラメータを考慮する
  - **成分組成**：複素屈折率（実部、虚部）
  - **粒径分布**：対数正規分布の**モード半径**、広がり幅
  - **高度分布**：**ベース高度**、厚み、**上スケール高度**、下スケール高度、**数密度**
- 複素屈折率、粒径分布の広がり幅、高度分布の厚み、下スケール高度は固定して、他のパラメータに対する感度を調べる
  - **モード半径**（1/2～2倍）
  - **ベース高度**（-5km～+5km）
  - **上スケール高度**（1/2～2倍）
  - **数密度**（1/2～2倍）

# 感度解析結果 (モード半径)

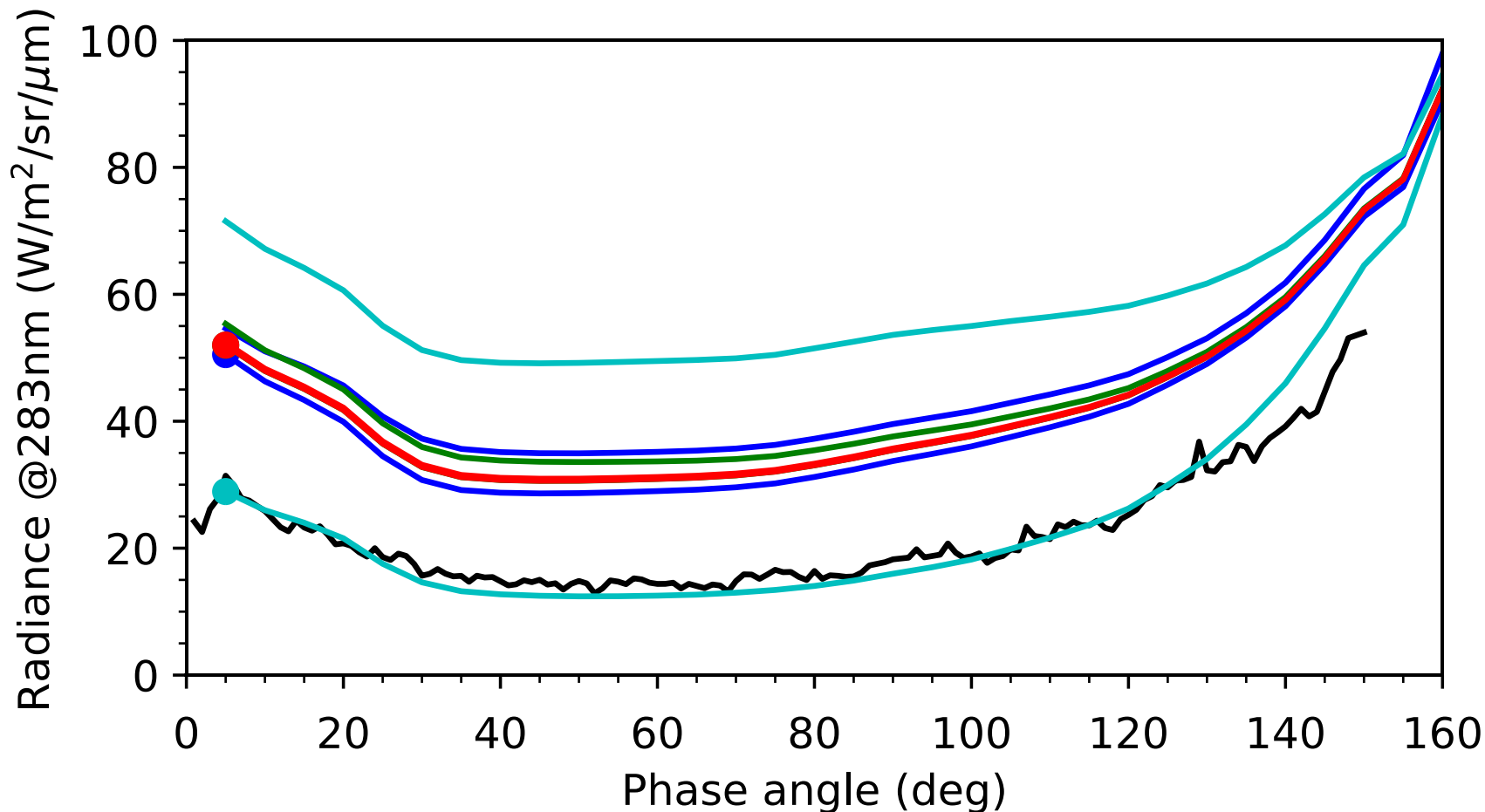
モード半径 1/2 ~ 2倍 (●印のある方が1/2倍)



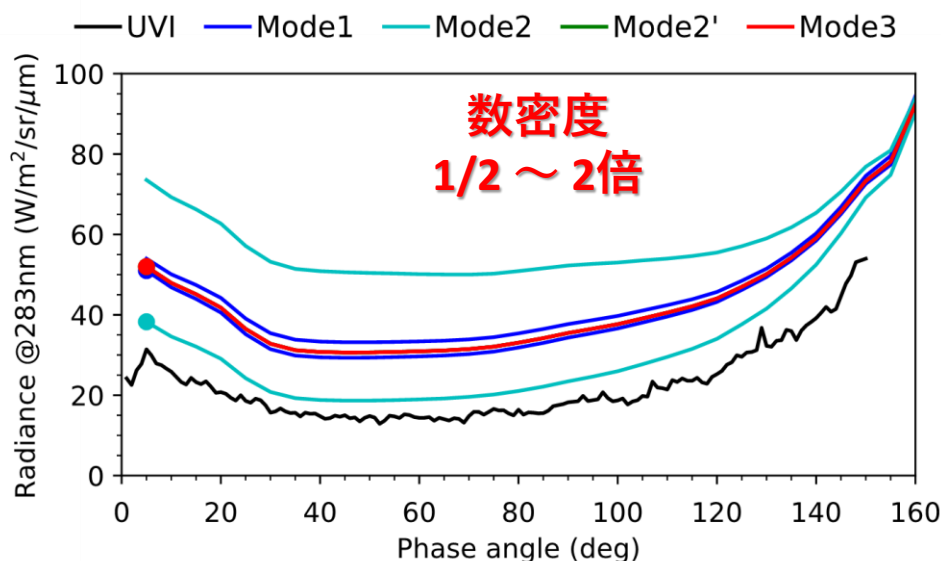
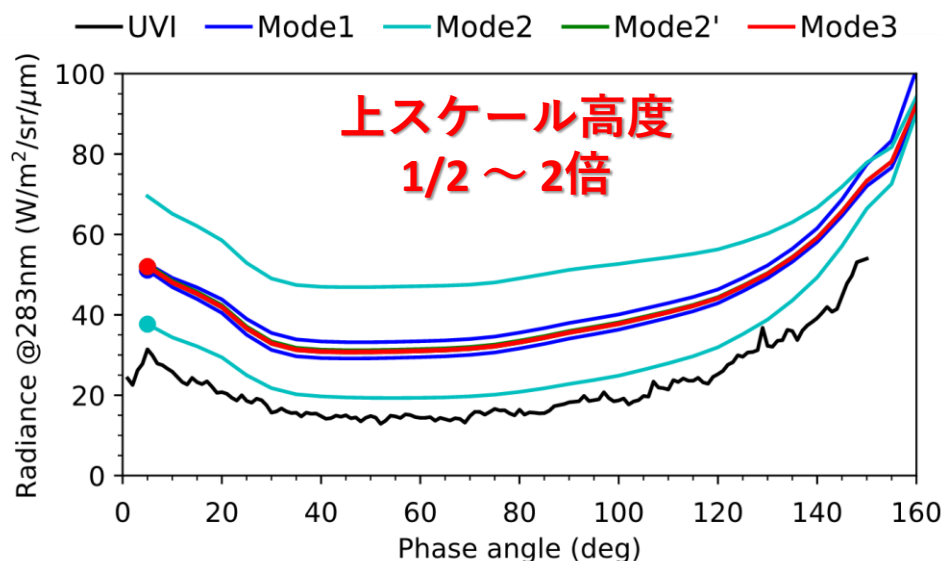
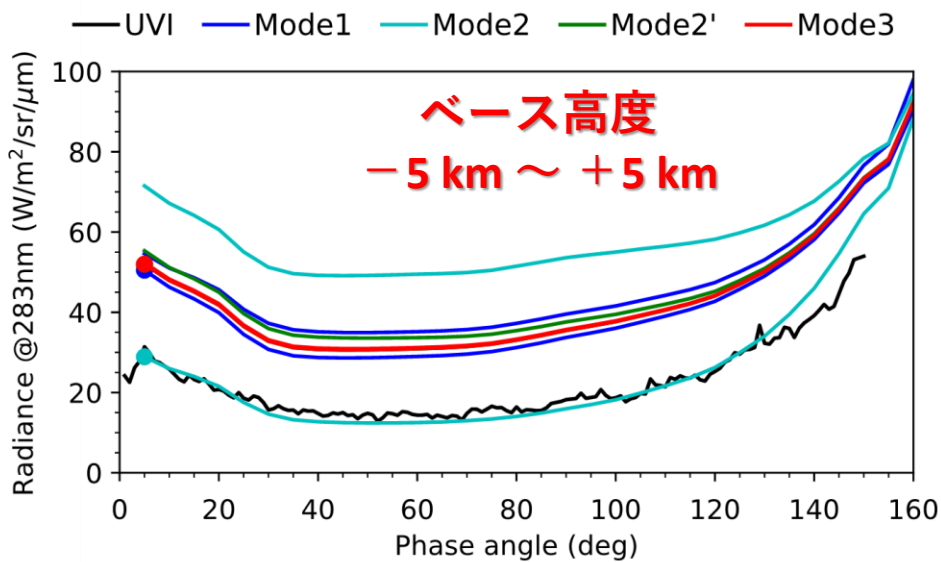
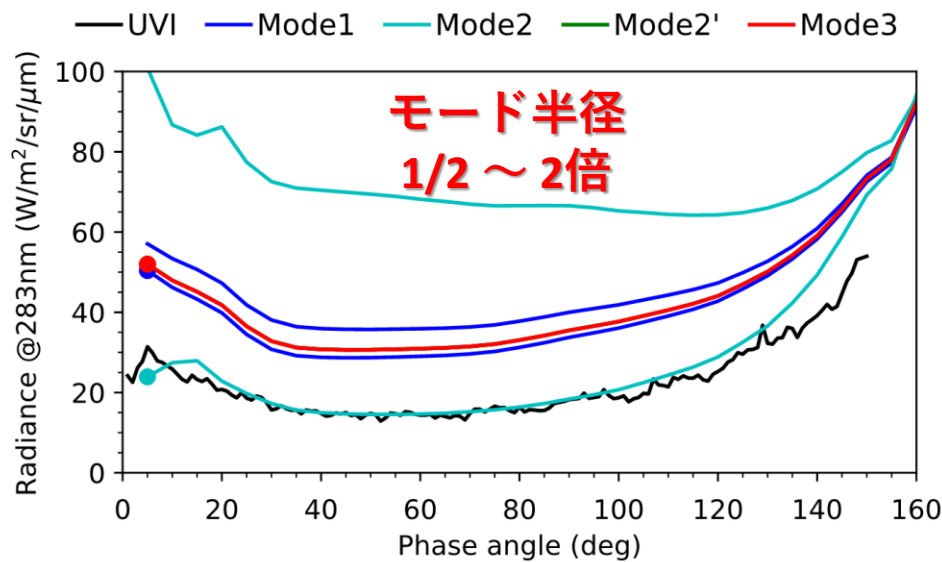
# 感度解析結果（ベース高度）

ベース高度  $-5\text{ km} \sim +5\text{ km}$  (●印のある方が $-5\text{ km}$ )

— UVI    — Mode1    — Mode2    — Mode2'    — Mode3



# 感度解析結果 (粒径分布、高度分布)



- どのパラメータも似たような傾向がある

# まとめと今後の展望

## まとめ

1. MODTRANを使って金星大気の放射伝達計算を行い、UVIで観測される輝度の位相角依存性をシミュレートすることが出来た
2. UVIの観測輝度は高位相角よりも低位相角の方が雲の特性パラメータに感度があるらしい
3. UVIの観測輝度はMode1 (upper haze) よりもMode2に対して感度があるらしい
  - Mode2のパラメータを精度良く決めておく必要がある

## 今後の展望

1. DISORT (またはRSTAR) が上手く動作しない原因を突きとめ、MODTRANではなくDISORTを使う
2. 最適化する雲の特性パラメータと固定するパラメータを決め、求まるパラメータの精度について検証する