

Cassini探査機データで探る木星対流圏 エアロゾルの特徴



学振研究員(PD), ISAS/JAXA
佐藤 隆雄

Contents of today's talk

1. Introduction

- 1.1. Jupiter overview
- 1.2. The current status of our knowledge of Jovian atmosphere
- 1.3. Outstanding problems in Jovian aerosol studies
- 1.4. The objectives of this thesis

2. Cassini ISS observation and data analysis

- 2.1. Cassini spacecraft
- 2.2. Instrument characteristics of ISS
- 2.3. Data reductions
- 2.4. Data selection
- 2.5. Characteristics of CB2 and BL1 limb-darkening curves

3. Radiative transfer modeling

- 3.1. Solution of radiative transfer in a scattering atmosphere
- 3.2. Accuracy validation of a radiative transfer code
- 3.3. Model description
- 3.4. Fitting strategy

4. Results

- 4.1. The CB2/STrZ data set
- 4.2. The CB2/SEBn data set
- 4.3. The BL1/STrZ data set
- 4.4. The BL1/SEBn data set
- 4.5. Summary of optical and physical properties of cloud and haze deduced from four data sets

5. Discussion

- 5.1. Cloud and haze properties deduced from the Cassini ISS limb-darkening analyses
- 5.2. Sensitivity of our results for the assumed parameters
- 5.3. Application of the best-fit Mie scattering phase functions to the Pioneer 10 IPP data
- 5.4. Limitation of the Pioneer HG function

6. Summary and conclusion

7. Future directions

1. Introduction

- Contents -

1.1. Jupiter overview

1.2. The current status of our knowledge of Jovian atmosphere

1.3. Outstanding problems in Jovian aerosol studies

1.4. The objectives of this thesis

1.1. Jupiter overview

- ガス惑星: H_2 (83.8%), He (15.6%), CH_4 (0.21%),...
- 駆動源: 太陽光 + 内部熱源 (太陽光 \times 1.6倍の放射量)
- 「底なし」の流体大気, 高速自転

■ 地球型惑星とは異なる魅力的な大気現象

- 帯状構造 (Zone & Belt)
- 斑構造 (e.g., Great Red Spot)
- 経度全体に広がる突発的な擾乱現象

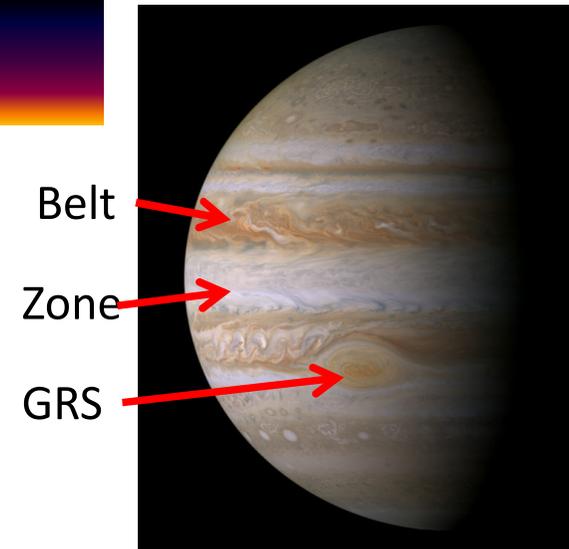


Fig.1. 木星 [Cassini/ISS].

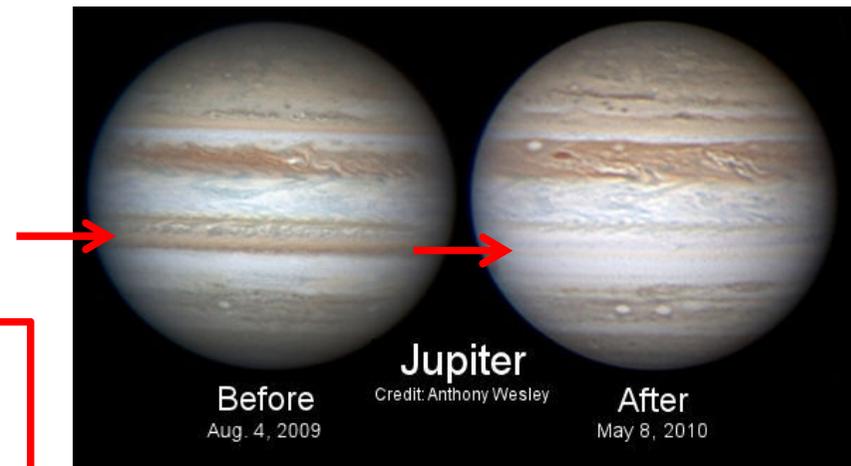


Fig.2. SEB擾乱 [左: 平穩時, 右: 擾乱時] (credit: Anthony Wesley).

時空間変化する大気現象の理解



雲層の鉛直構造 & 雲粒子の光学的特性
の理解が必須

1.2. The current status of our knowledge of Jovian atmosphere

■ 熱化学平衡モデル

太陽組成比 (H, N, S, O) を仮定 [Lewis, 1969; Weidenschilling and Lewis, 1973].

3種類の異なる凝結雲: NH_3 -ice ($\sim 0.7\text{bar}$), NH_4SH ($\sim 2\text{bar}$), H_2O -ice ($\sim 6\text{bar}$)

■ リモートセンシングによる観測的制約

一例:
 CH_4 吸収帯
反射光観測
(可視・近赤外領域)
○上層雲情報

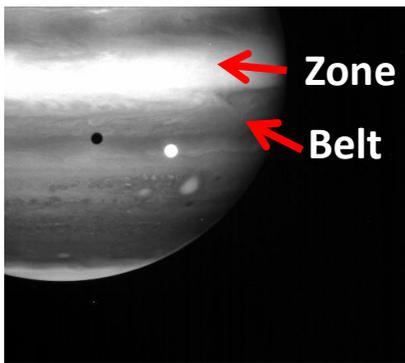


Fig. 4. メタン吸収帯 (890 nm) での木星 [Cassini/ISS].

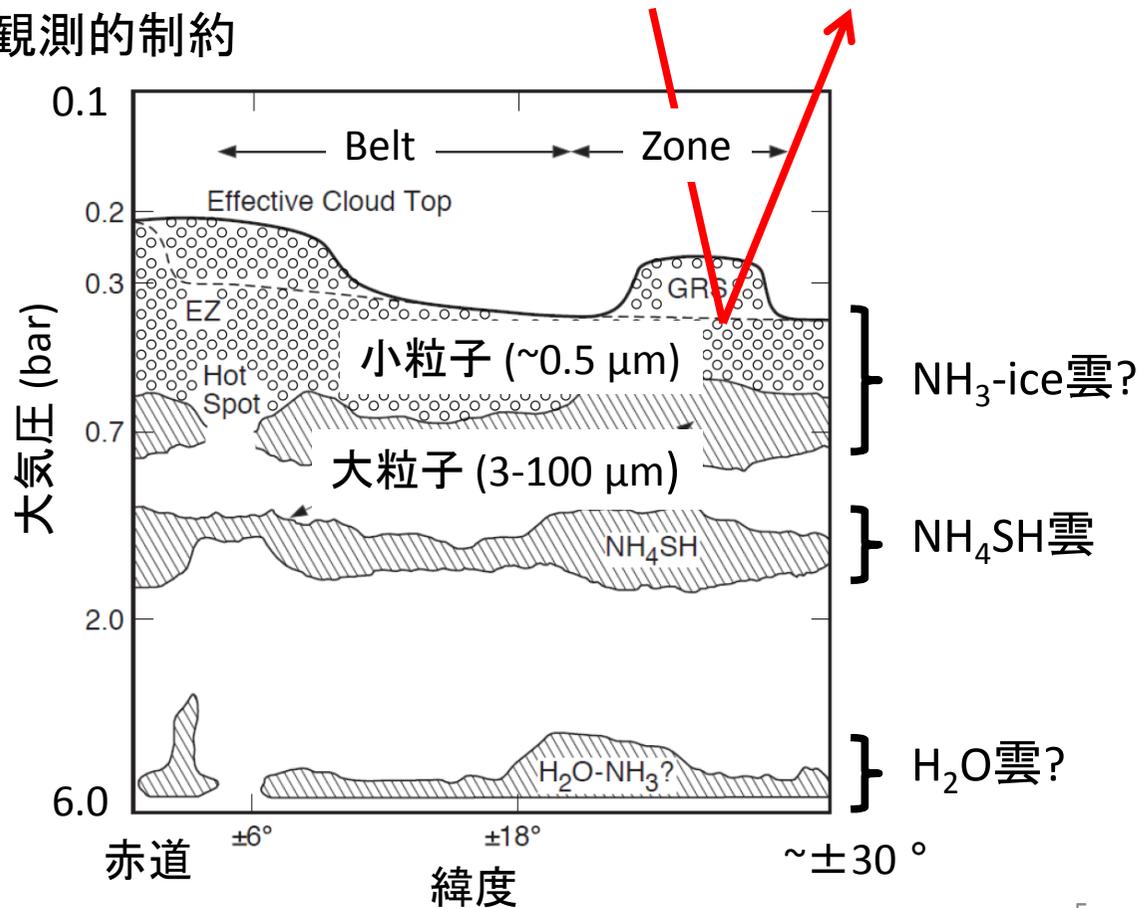


Fig. 3. 木星雲層構造の想像図 [West, 2004].

1.2. CH₄ band photometry

■メタン (CH₄)

- 凝結× → 高度分布: どこでも一様
- 吸収強度の異なる3つの吸収帯
= 感度のある高度が異なる

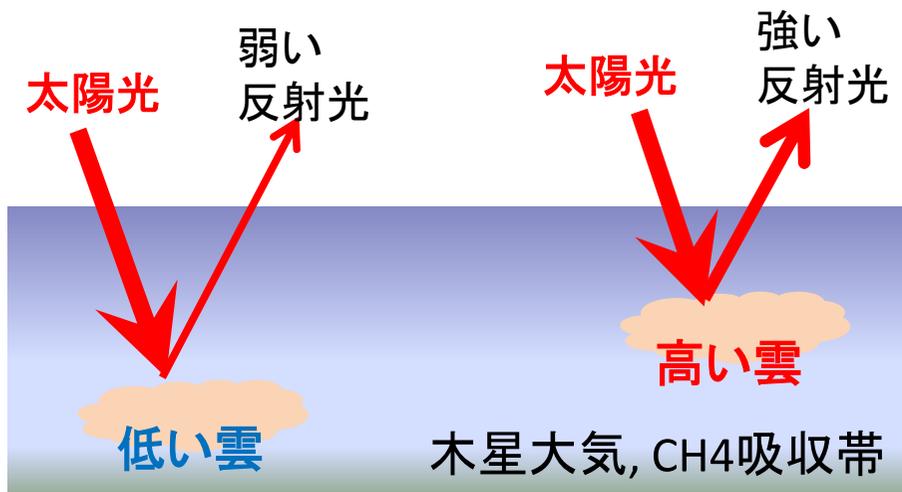


Fig. 6. 観測原理の概念図.

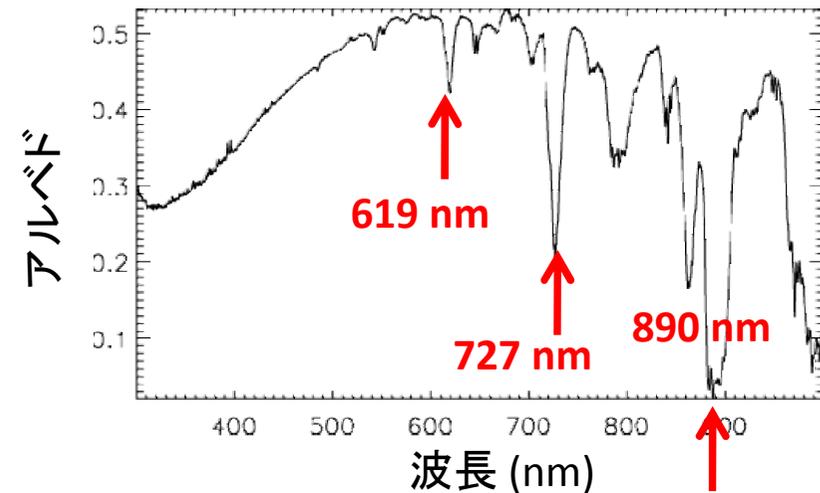


Fig. 5. 木星のアルベド [Karkoschka, 1994].

観測反射率(I/F)を再現する
雲層構造モデル
(i.e., 雲の高度分布, 光学的厚さ,
一次散乱アルベド)
を放射伝達計算をもとに決定可能

地上観測 (太陽位相角: 0–12°) では, 散乱大気の放射伝達計算に
不可欠な雲粒子の散乱特性 (散乱位相関数) の導出は不可能!
→ “a priori” の精度に結果が依存している可能性あり.

1.2. Scattering phase function

■ 先行研究 (主に2例)

1. Pioneer 10 Imaging Photopolarimeter (IPP) (1973)

(Tomasko et al., 1978)

- 青 (eff. 440 nm) / 赤 (eff. 640 nm)
- 広い太陽位相角データ (12 °-150 °)
- Henyey-Greenstein関数

初めて散乱位相関数を導出

- 地上観測・探査機データの解釈に広く利用

2. NH₃-iceの室内実験データ

(Martonchik et al., 1984)

- 屈折率 $n_r = 1.42$ @ 670 nm
- Mie散乱位相関数近似

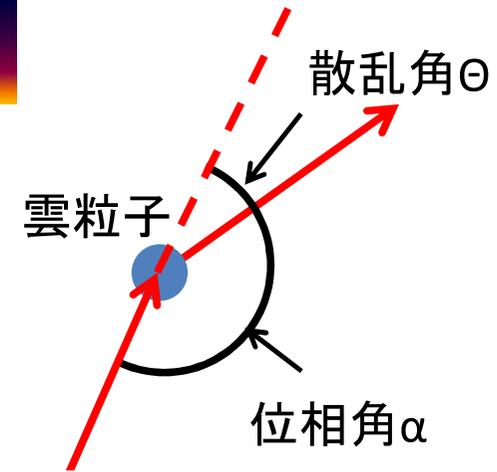


Fig. 7. 散乱角 Θ と位相角 $\alpha (= 180^\circ - \Theta)$ の関係

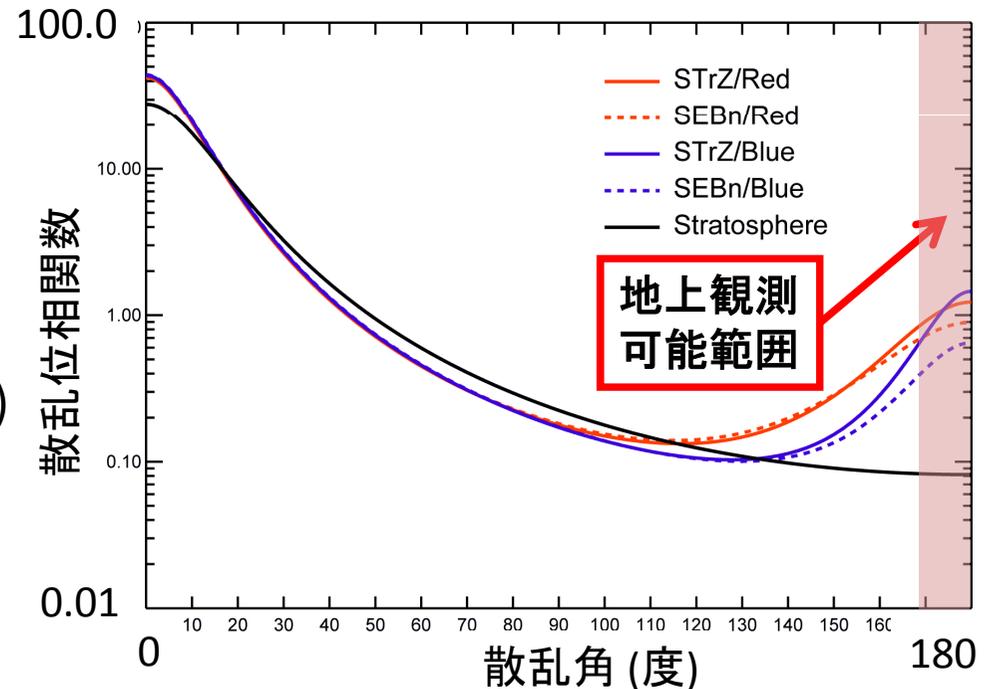


Fig. 8. Pioneer位相関数 [Tomasko et al., 1978]

1.3. Outstanding problems to be revealed in this thesis

■ Henyey-Greenstein 関数

$$P(g, \Theta) = \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \Theta)^{3/2}}$$

Θ : 散乱角 ($0^\circ \leq \Theta \leq 180^\circ$)
 g : アシンメトリパラメータ
($0 \leq g \leq 1$: 前方散乱
 $-1 \leq g \leq 0$: 後方散乱)
 f : 前方散乱の割合 ($0 \leq f \leq 1$)

■ 二項 Henyey-Greenstein 関数 (雲粒子に適用されてきた式)

$$P(f, g_1, g_2, \Theta) = f \cdot P(g_1, \Theta) + (1 - f) \cdot P(g_2, \Theta)$$

➤ 物理的に意味のない解析関数

長所

• 放射伝達計算: 簡単 (便利)

短所

• 粒子の光学的・物理的特性 (複素屈折率や粒径サイズ)

× 分からない → **雲の物性には一切言及できない**

• 散乱特性の波長依存性

× 考慮できず → **誤差要因**となりうる

1.3. Outstanding problems to be revealed in this thesis

■ 雲の正体は？

3- μm absorption anomaly

エアロゾルによる吸収でのみ説明可能

- Sromovsky and Fry (2010): Cassini/VIMS
NH₄SH ($r \sim 15 \mu\text{m}$)
➤ より深い雲の情報に感度あり
- Baines et al. (2002): Galileo/NIMS
“**純粋なNH₃-ice**”雲: 表面積の**<1%**

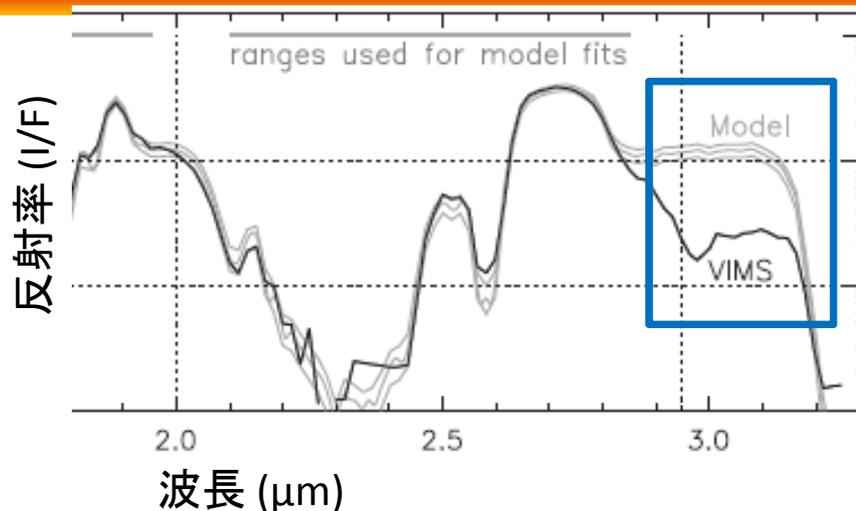


Fig. 9. Cassini VIMSスペクトルとモデル計算 [Sromovsky and Fry, 2010]

可視・近赤外光 (<1 μm) の散乱体



粒径の小さい雲 ($r \sim 0.5 \mu\text{m}$)

散乱位相関数導出に波長依存考慮可能な
Mie散乱理論を利用

(入力情報: 雲の屈折率 n_r , 粒径 r_{eff})

雲の物性に制約可能

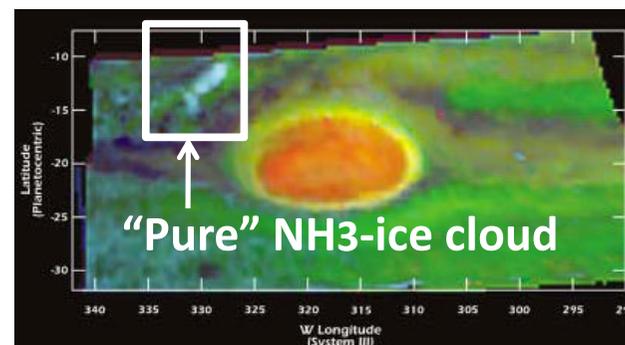


Fig. 10. GRS北西部で発見された
純粋なNH₃-ice雲
[Baines et al., 2002]

1.4. Objective of the study

雲の光学的・物理的特性

Keyword:

- 散乱位相関数
- 雲の物質

現状:

1. Pioneer 10解析による散乱位相関数
Henyey-Greenstein関数
 - 波長依存 ×, 雲物性?
2. NH₃-iceを仮定したMie散乱位相関数
 - 本当にNH₃-iceか?

本研究の目的

- 波長依存考慮可能なMie散乱理論を利用
新たな散乱位相関数の導出と妥当性検証
- **雲の物性に制約**
- **ZoneとBeltの模様 (構造) の違い**に言及

How?

- ✓ Cassini ISSによる木星フライバイ観測
- ✓ 放射伝達計算

利用 (貢献) 先

- ✓ 地上 (探査機) 観測データの解釈
新たな“a priori”として
- ✓ 熱収支の推定
- ✓ モデリング
エアロゾルによる
放射加熱&冷却の計算

2. Cassini ISS observation and data analysis

-Contents-

2.1. Cassini spacecraft

2.2. Instrument of characteristics of ISS

2.3. Data reductions

2.4. Data selection

2.5. Characteristics of CB2 and BL1 limb-darkening curves

2.1. Cassini spacecraft

Cassini Spacecraft

2000.10–2001.3 木星フライバイ観測

Imaging Science Subsystem (ISS)

Narrow Angle Camera (NAC)

➤ UV-NIR波長帯のフィルター撮像観測

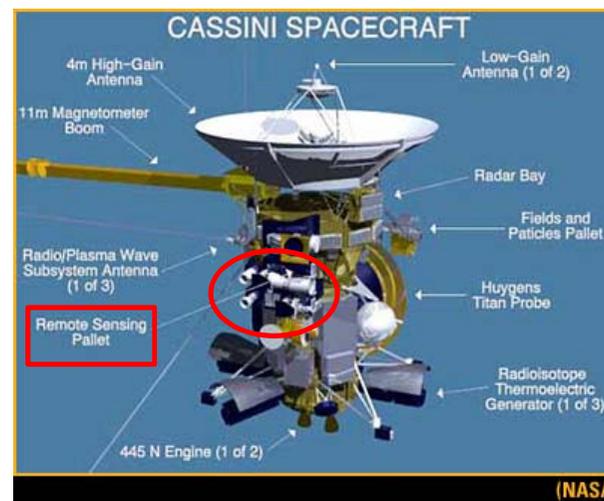


Fig. 11. Cassini探査機概観 (NASA).

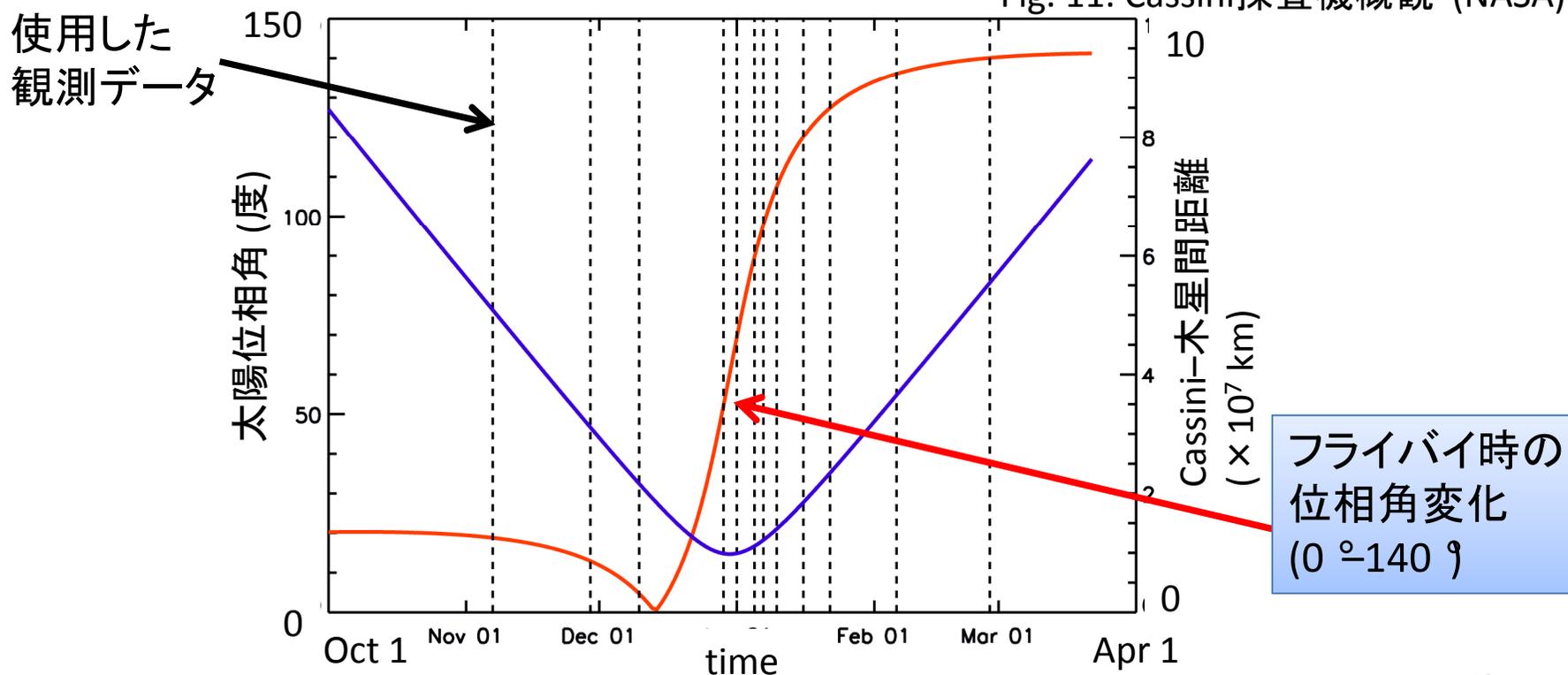


Fig. 12. 木星フライバイ中の位相角とCassini-木星間距離.

2.2. Instrument characteristics of the ISS

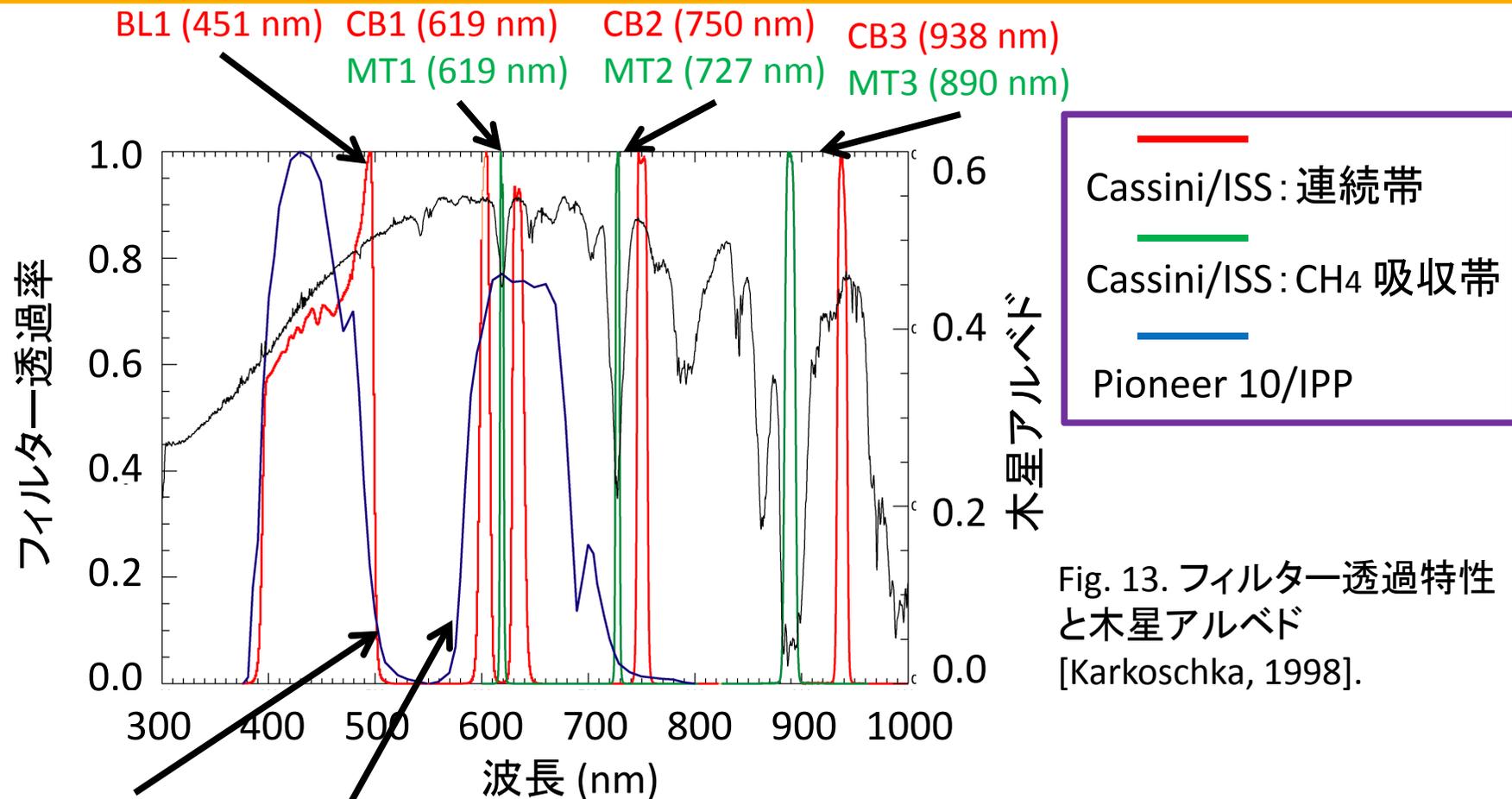


Fig. 13. フィルター透過特性と木星アルベド [Karkoschka, 1998].

Pioneer
 /blue (440 nm)
 Pioneer
 /red (640 nm)

Cassini ISSデータの特徴 (利点)

- **多波長**観測: UV-NIR (+ 単色性@CH₄吸収帯 & 連続帯)
- **様々な位相角**における観測: 0°-140°
- **世界初の多波長・広位相角データセット**

2.3. Data reductions

生データ

- CISSCAL 3.6
(calibration software by ISS team)
- additional correction
(R. West and B. Knowles, private communication)

絶対反射率の導出 (I/F)

- 木星画像の縁に対して楕円フィット
中心位置の決定

散乱ジオメトリの導出 ($\mu_0, \mu, \Delta\phi$)

特定の緯度帯に対して周辺減光曲線
(反射率の経度変化)の抽出

Fig. 14. データ校正例
(緯度経度マッピング後).

The STrZ

$$\alpha = 3.7^\circ$$

$$\alpha = 71.2^\circ$$

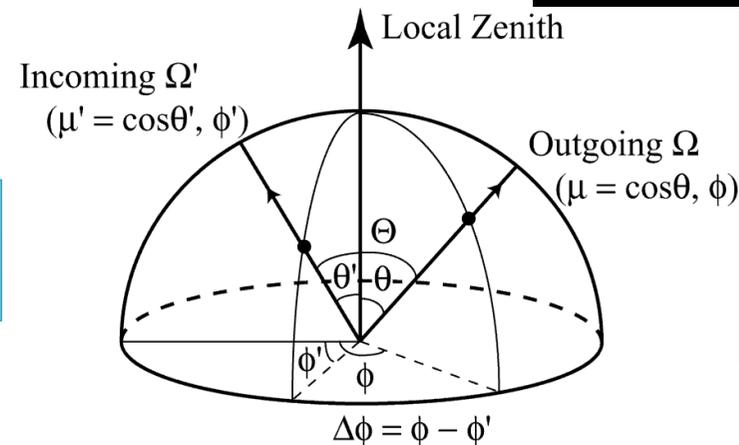
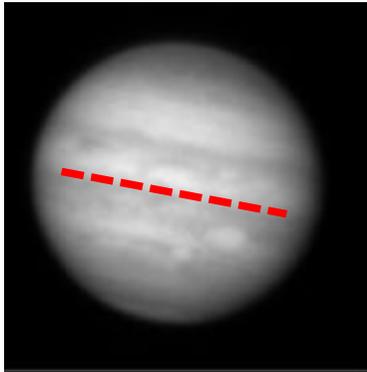


Fig. 15. 散乱ジオメトリ.

2.4. Principle of Limb-darkening analysis

■ 周辺減光曲線解析 (反射率の経度変化)

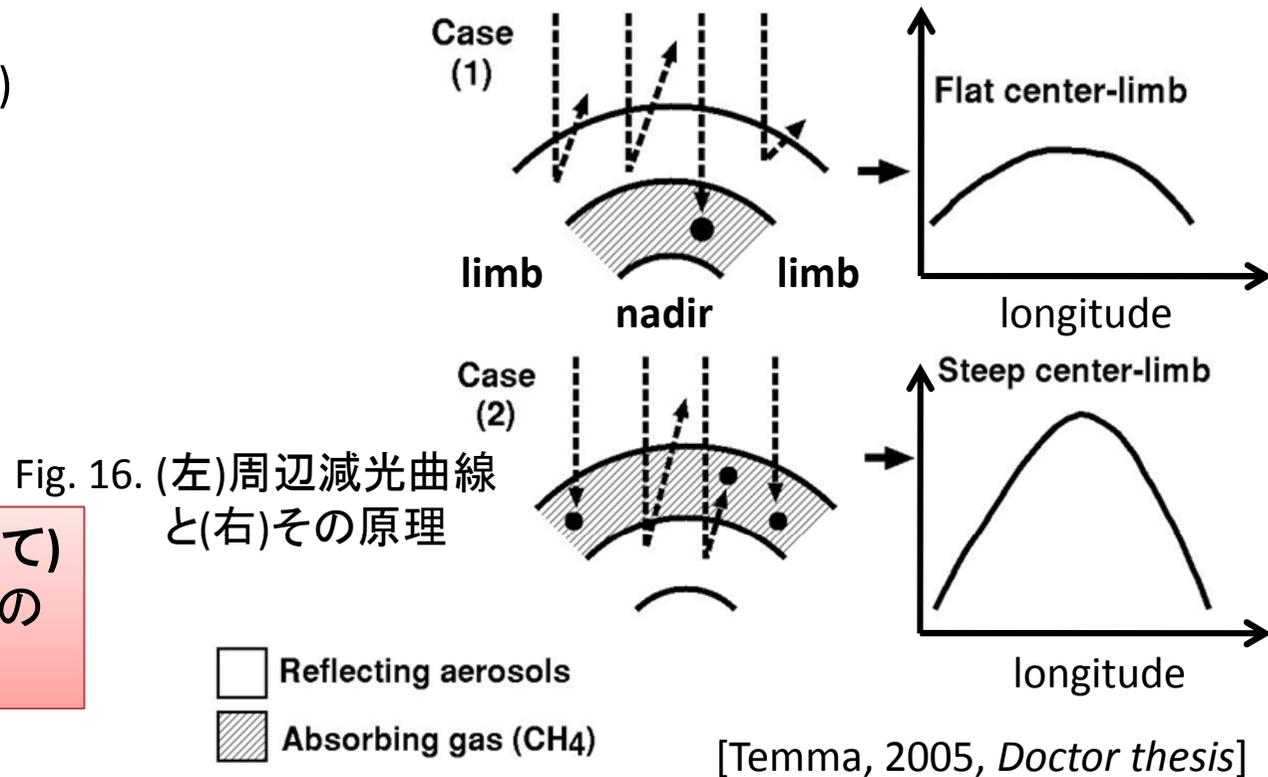


仮定: (第一近似として)
雲は経度方向に同一の
鉛直構造

周辺減光曲線は同一鉛直構造を異なる散乱ジオメトリ ($\mu_0, \mu, \Delta\phi$) で
観測したものと理解.

★ポイント★

周辺減光曲線のピーク強度 & 形 (波長、位相角の関数):
散乱・吸収物質の分布や散乱物質の光学的特性によって決定.



2.4. Data selection

✓ 解析領域:

1. the South Tropical Zone (STrZ) (latitude: -25°)
 2. the north component of the South Equatorial Belt (SEBn) (latitude: -10°)
- Tomasko et al. (1978) の解析領域と同等 & 「最も」経度一様に見える緯度領域

SEBn
(Belt)

STrZ
(Zone)

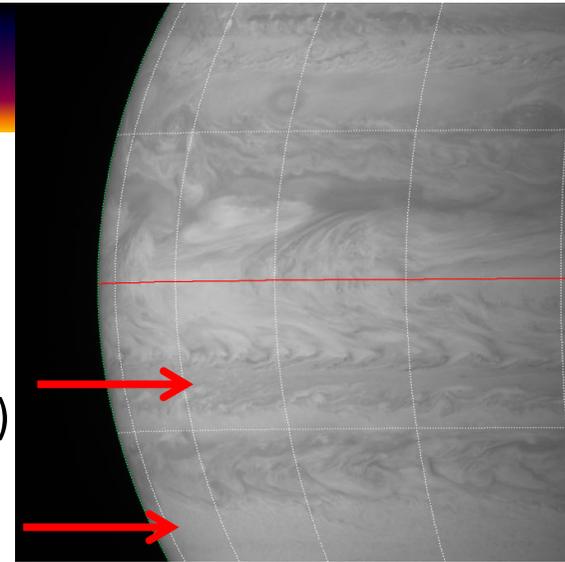


Fig. 17. 解析領域 ($\alpha = 71^\circ$).

✓ 解析波長: CB2 (有効波長750 nm) & BL1 (455 nm)

1. 豊富な位相角データ (4° – 140° ; 計12位相角)
2. 感度: 雲 & ヘイズの光学的 (散乱) 特性 \gg 雲 & ヘイズの高度分布
3. Tomasko et al. (1978) の2波長 (440 nm & 640 nm) と直接比較可能

2波長 (CB2 & BL1) \times 2緯度領域 (STrZ & SEBn) = 4データセットを作成

2.5. Characteristics of lime-darkening curves

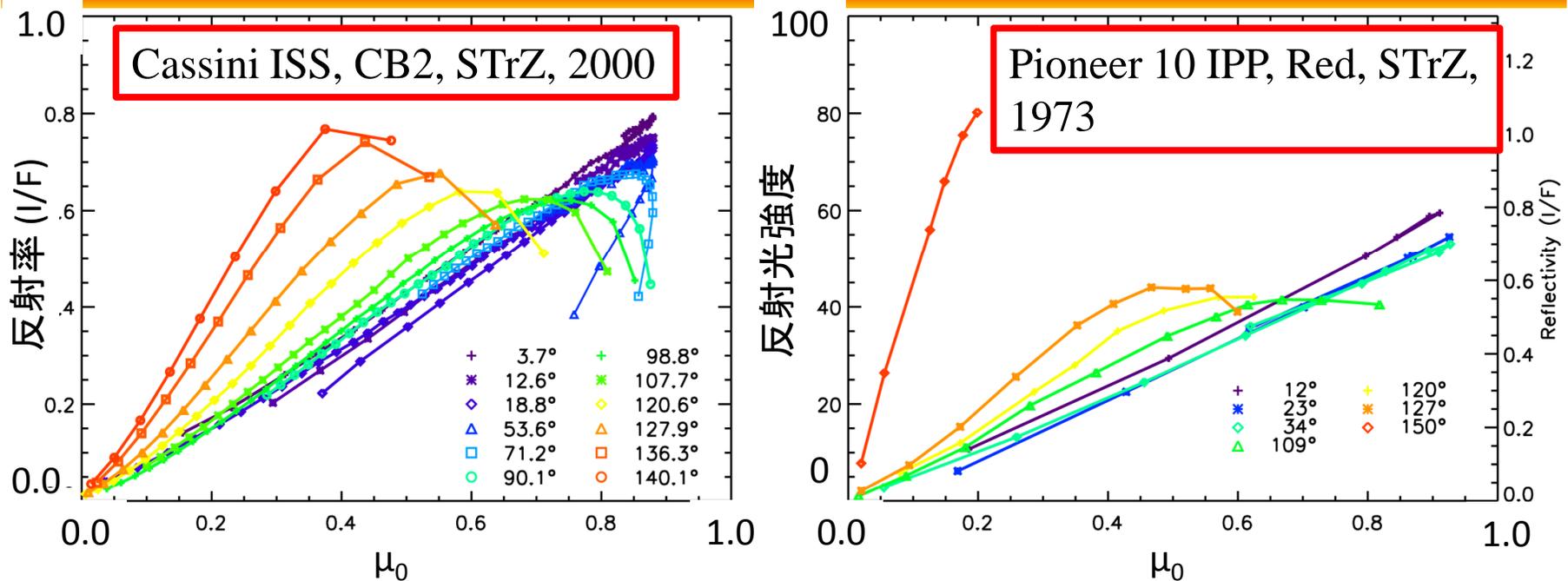


Fig. 18. STrZにおける反射率の μ_0 , 太陽位相角依存性: (左) Cassini (右) Pioneer 10.

Cassini ISSデータ

- $\alpha > 98.8^\circ \rightarrow$ ピーク値: 急激に大きくなる, 傾き: 急激に急になる
 - $\alpha < 98.8^\circ \rightarrow$ ピーク値: 大きくなる, 傾き: 緩やかに増加
- 同様のことがPioneer 10データからも読み取れる.

Pioneer 10 データに比べて,

✓位相角情報の欠落が少ない

2.5. Characteristics of scattering geometry

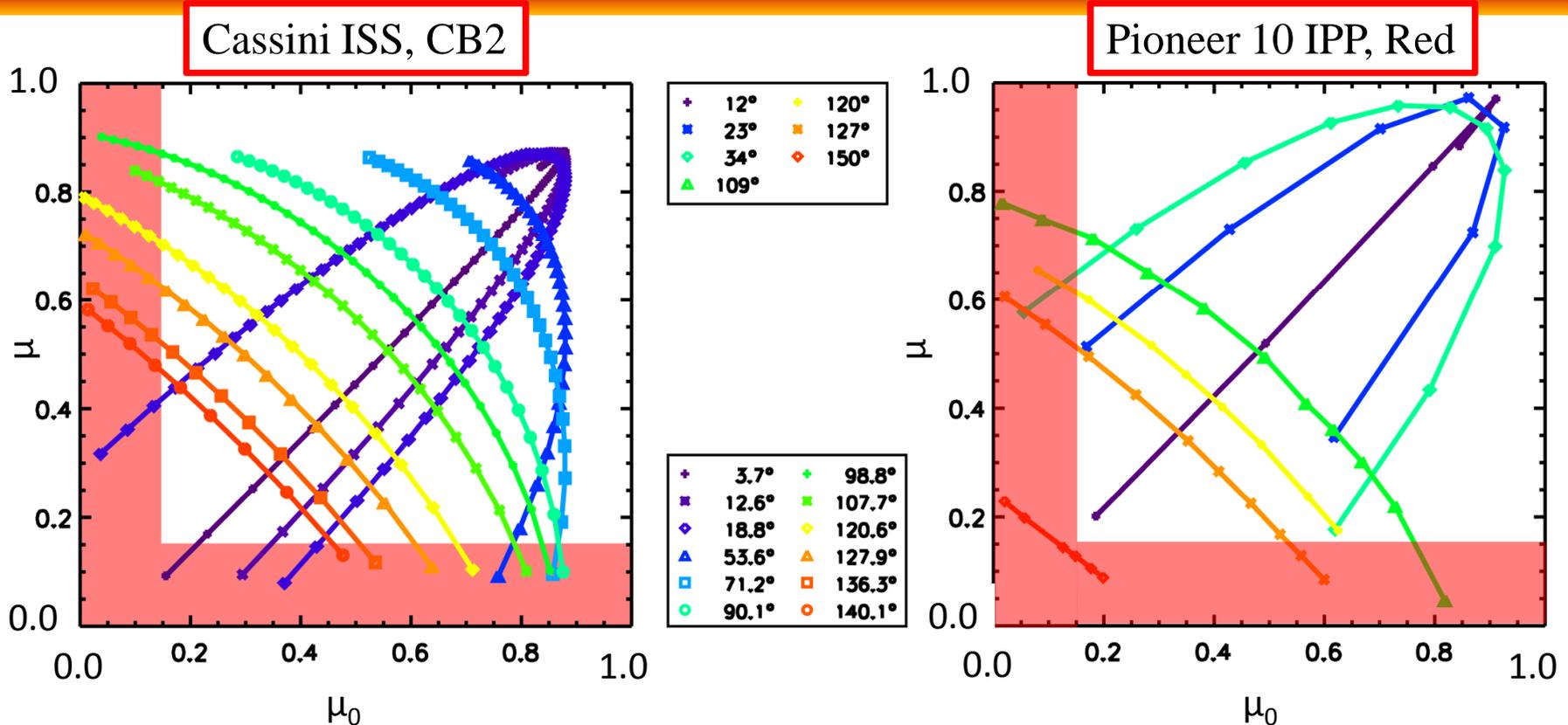


Fig. 19. STrZにおける散乱ジオメトリ (μ_0, μ) の関係: (左) Cassini, (右) Pioneer 10.

Cassini ISSデータ

- 平行平板大気仮定できる範囲内 (shaded area以外) で, μ_0 vs μ 面を広く網羅. 地上観測では...
- $\alpha < 12^\circ$ までしか調べることができない.

3. Radiative transfer modeling

- Contents -

3.1. Solution of radiative transfer in a scattering atmosphere

3.2. Accuracy validation of a radiative transfer code

3.3. Model description

3.4. Fitting strategy

本研究では、
惑星大気データ解析用に
放射伝達コードを作成した
(本発表では割愛)

3.3. Mie scattering phase function

★ 粒径サイズ分布で平均したMie 散乱位相関数

$$P(\lambda, \Theta) = \frac{\int_0^\infty Q_s(\lambda, r, n_r, n_i) \cdot \pi r^2 \cdot P(\lambda, r, n_r, n_i, \Theta) \cdot dN/dr(r_{\text{eff}}, v_{\text{eff}}) \cdot dr}{\int_0^\infty Q_s(\lambda, r, n_r, n_i) \cdot \pi r^2 \cdot dN/dr(r_{\text{eff}}, v_{\text{eff}}) \cdot dr}$$

λ: 波長 [μm], r: 粒径 [μm], Θ: 散乱角 [degree], n_r: 屈折率, n_i: 吸収率, Q_s: 散乱効率, P: 散乱位相関数, dN/dr: 粒径サイズ分布, r_{eff}: 有効半径 [μm], v_{eff}: 有効分散

○ : 求めたい
パラメータ

n_r = 1.4, n_i = 0.0,
v_{eff} = 0.1の場合

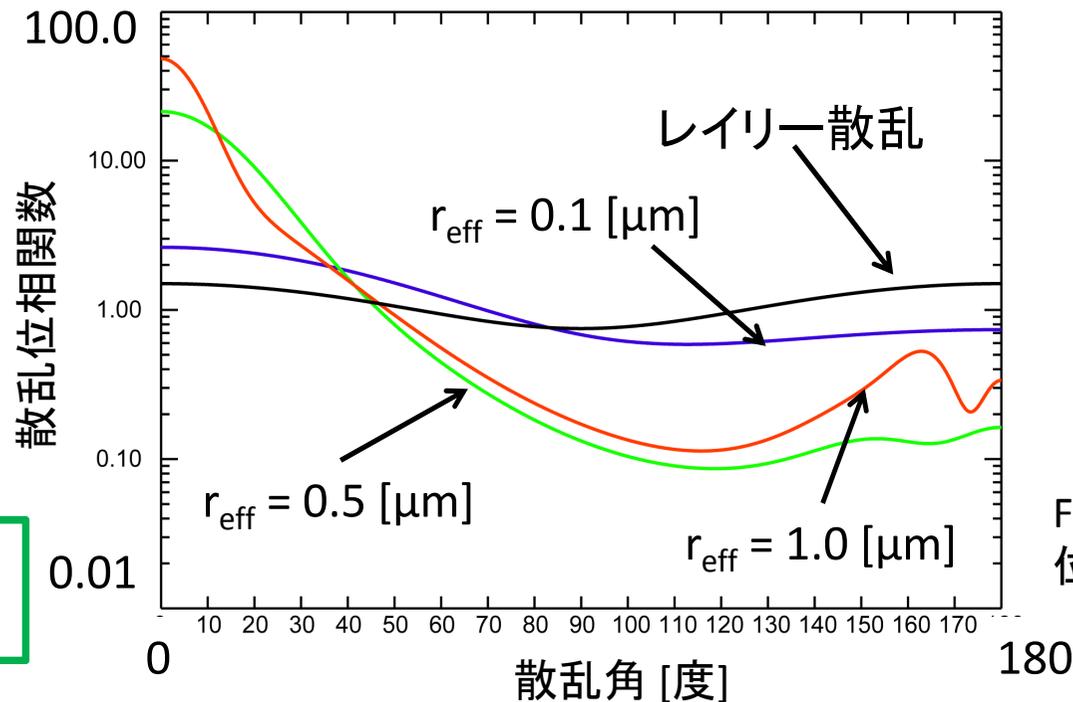
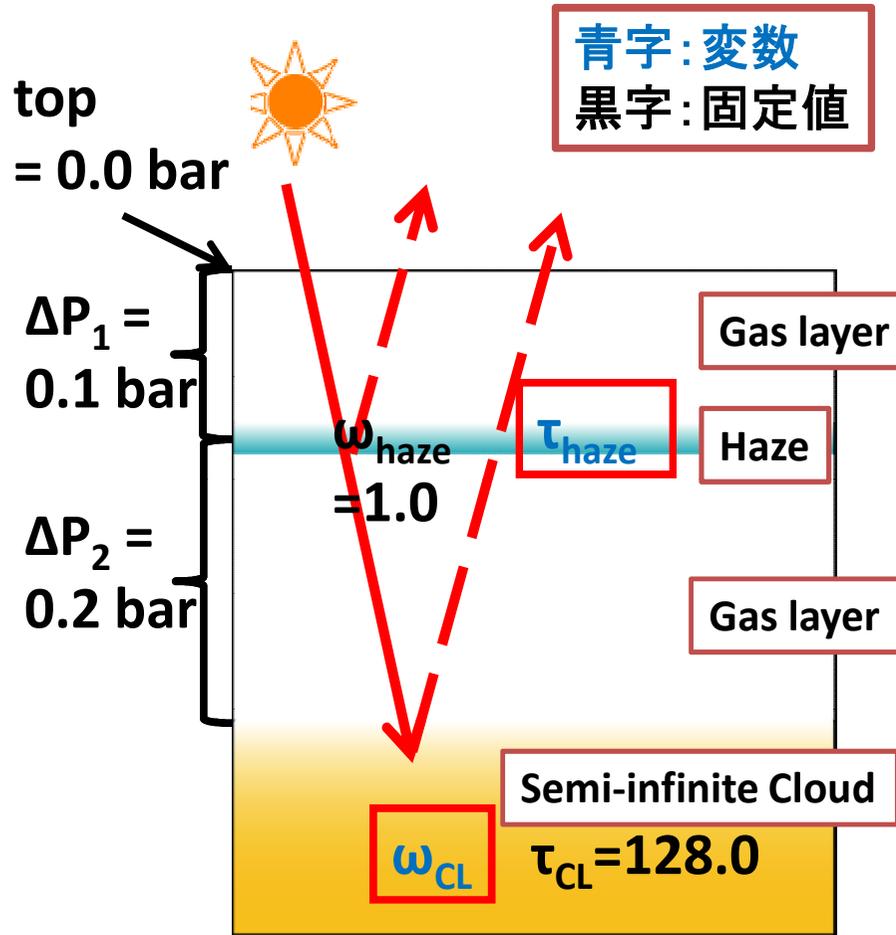


Fig. 20. Mie散乱位相関数の例.

3.3. Radiative transfer model (Type II-Mie)



青字: 変数
黒字: 固定値

Gas layer:

- レイリー散乱
- CH₄ 吸収 (Karkoschka, 1998)

Haze:

- Mie散乱位相関数
- Hansen's gamma size distribution
- $(r_{\text{eff, haze}}, v_{\text{eff, haze}}) = (0.05-0.5 \mu\text{m}, 0.1)$
- $(n_{r, haze}, n_{i, haze}) = (1.3-1.7, 0.0)$

Cloud:

- Mie散乱位相関数
- Hansen's gamma size distribution
- $(r_{\text{eff, cloud}}, v_{\text{eff, cloud}}) = (0.1-1.0 \mu\text{m}, 0.1)$
- $(n_{r, cloud}, n_{i, cloud}) = (1.3-2.0, 0.0)$

Fig. 21. 仮定した雲構造モデル [Tomasko et al., (1978) で用いられたモデルと同等].

3.4. Fitting strategy

■ 求めるパラメータ: 6種類

$n_{r, haze}$, $r_{eff, haze}$, $n_{r, cloud}$, $r_{eff, cloud}$, ω_{cloud} , τ_{haze}

1. $(n_{r, haze}, r_{eff, haze}, n_{r, cloud}, r_{eff, cloud})$ を離散的に (格子点上に) 配置
2. 各格子点において、残りのパラメータ ($\omega_{cloud}, \tau_{haze}$) を最適化

$(\omega_{CL}, \tau_{haze})$ を最適化!
(χ^2 を同様に計算)

$r_{eff, cloud}$
(0.1 [μm] 間隔)

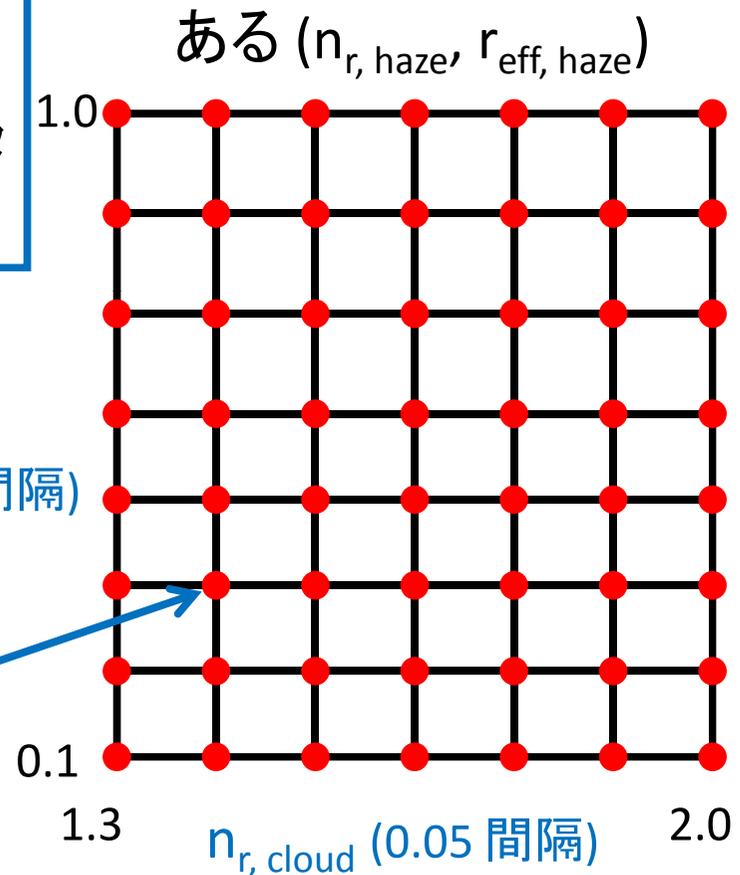


Fig. 22. 最適化の概念図. 22

4. Results

-Contents-

4.1. The CB2/STrZ data set

4.2. The CB2/SEBn data set

4.3. The BL1/STrZ data set

4.4. The BL1/SEBn data set

4.5. Summary of optical and physical properties of cloud and haze deduced from four data sets

残り3セットの結果は
最適値のみ紹介
(本発表では詳細は割愛)

4.1. χ^2 variations for the CB2/STrZ data set

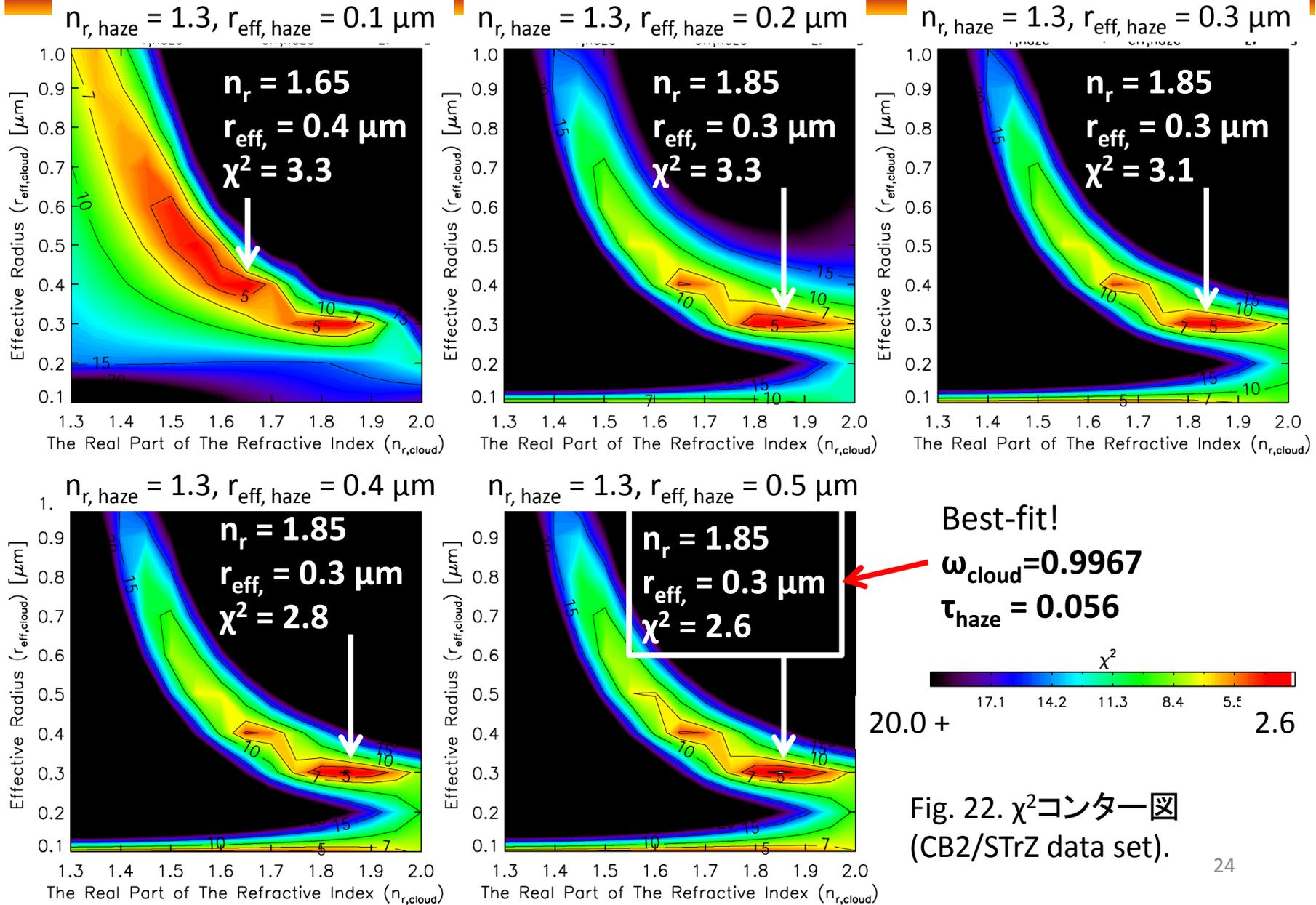


Fig. 22. χ^2 コンター図 (CB2/STrZ data set).

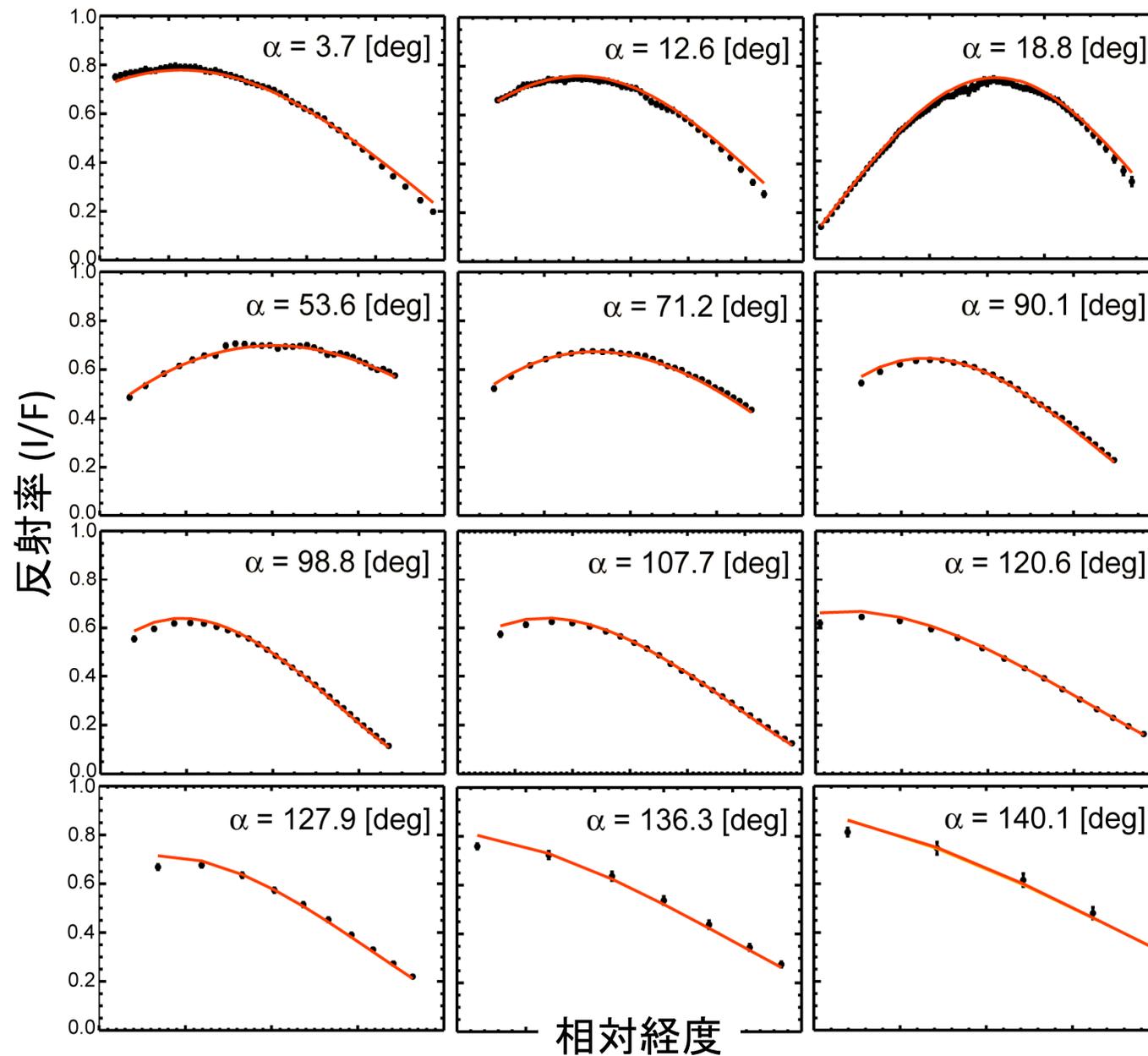


Fig. 23. 観測と
ベストフィットモデル
結果.

すべての位相角データを再現できるMie散乱位相関数を導出.

4.5. The best-fit models in CB2

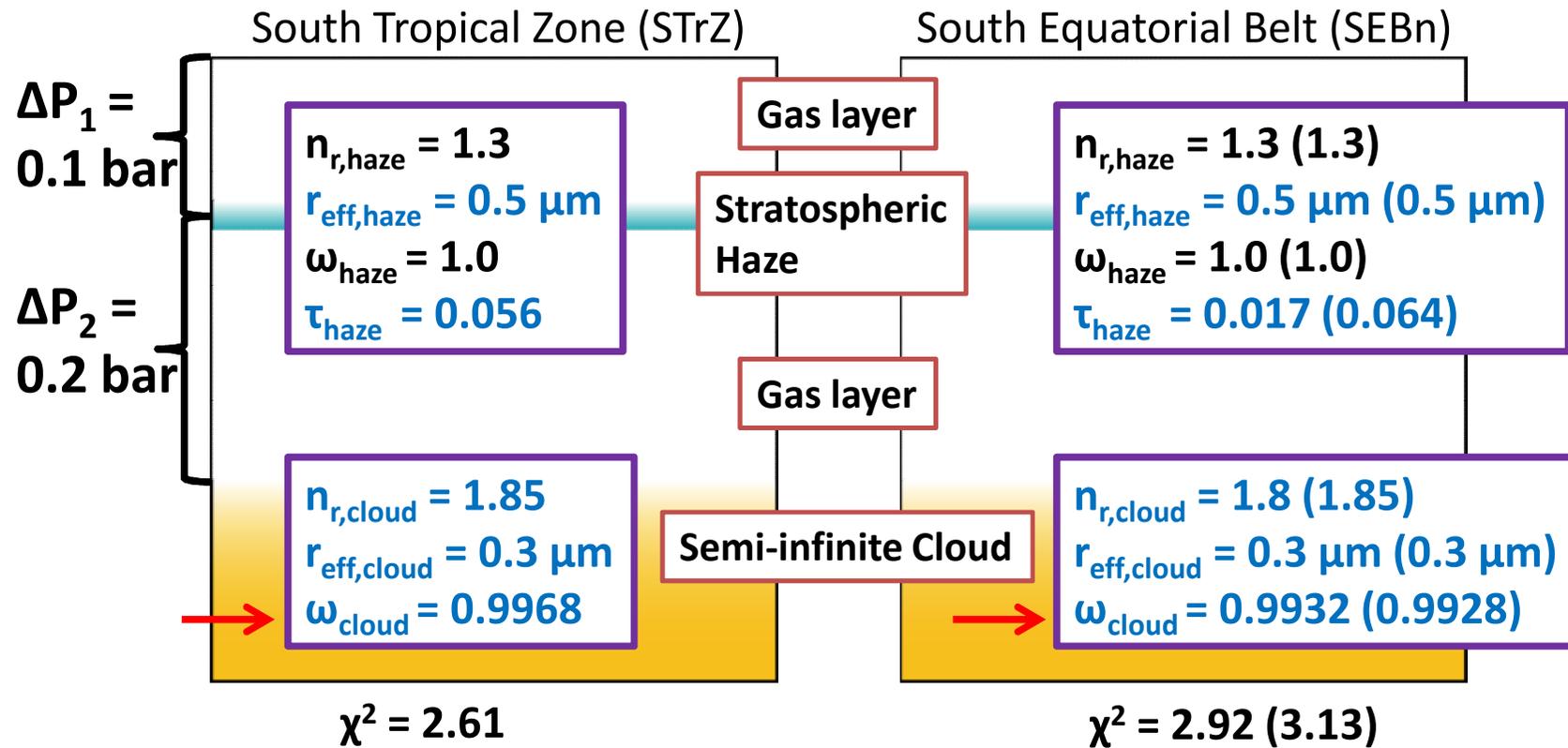


Fig. 24. ベストフィット雲モデル (CB2フィルター).

- 散乱位相関数
散乱特性に有意な差はない.
- 1回の散乱における吸収の確率 (1- ω)
雲層において, SEBn (1- ω = 0.0068) は STrZ (1- ω = 0.0032) の約2倍光を吸収.

4.5. The best-fit models in BL1

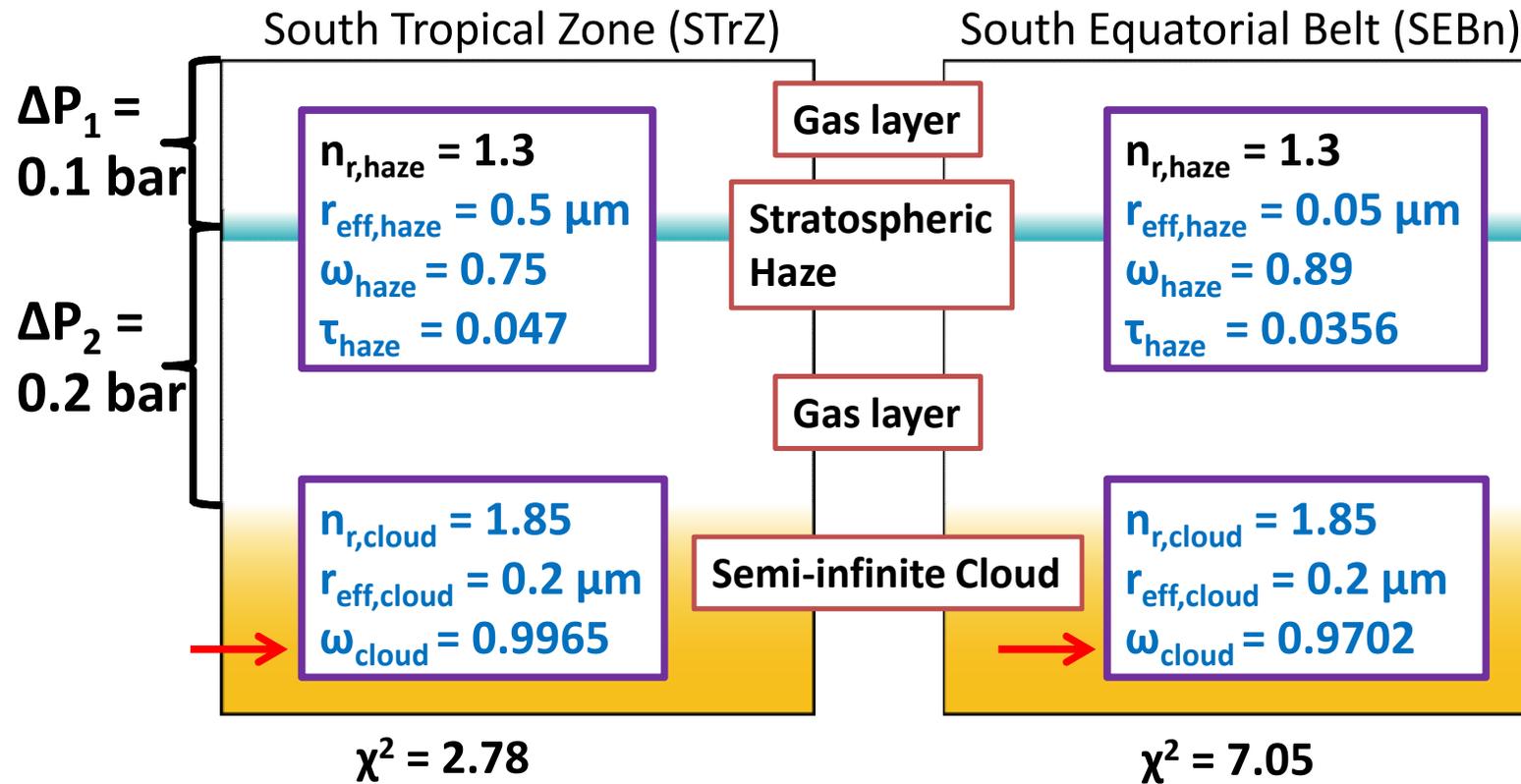


Fig. 25. ベストフィット雲モデル (BL1フィルター).

- 散乱位相関数
散乱特性に有意な差はない。
- 1回の散乱における吸収の確率 (1- ω)
雲層において, SEBn (1- ω = 0.0298) は STrZ (1- ω = 0.0035) の約8倍光を吸収 (近赤外よりも青色で吸収が顕著)。

5. Discussion

-Contents-

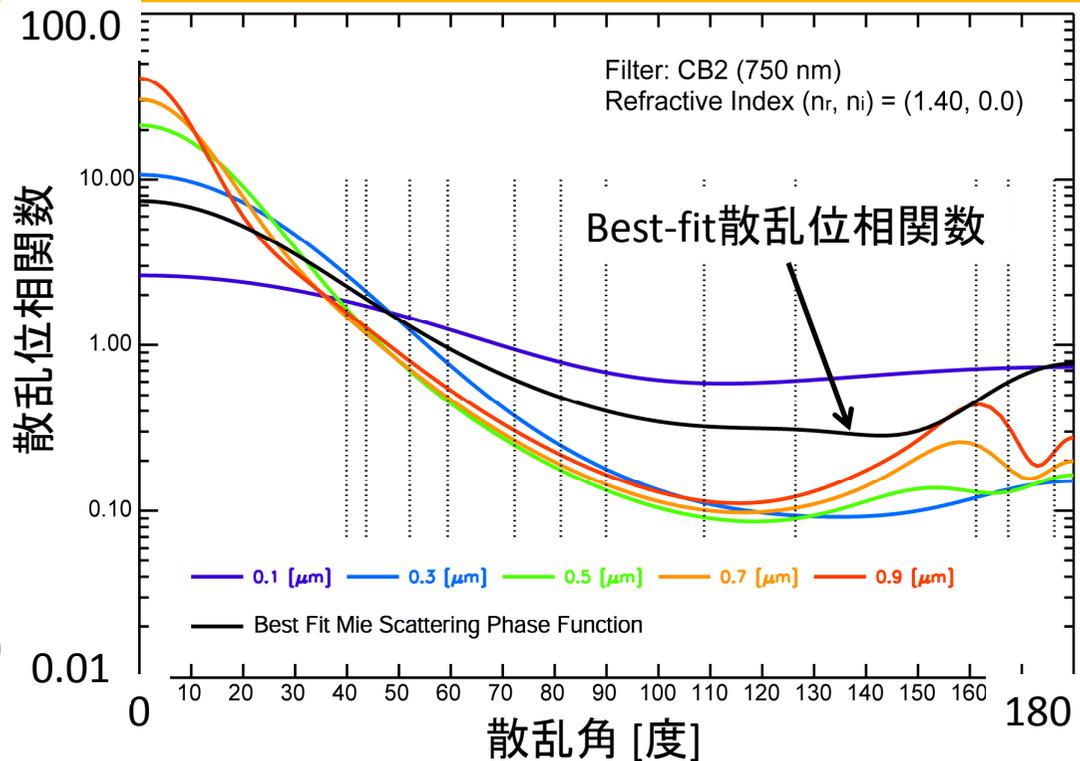
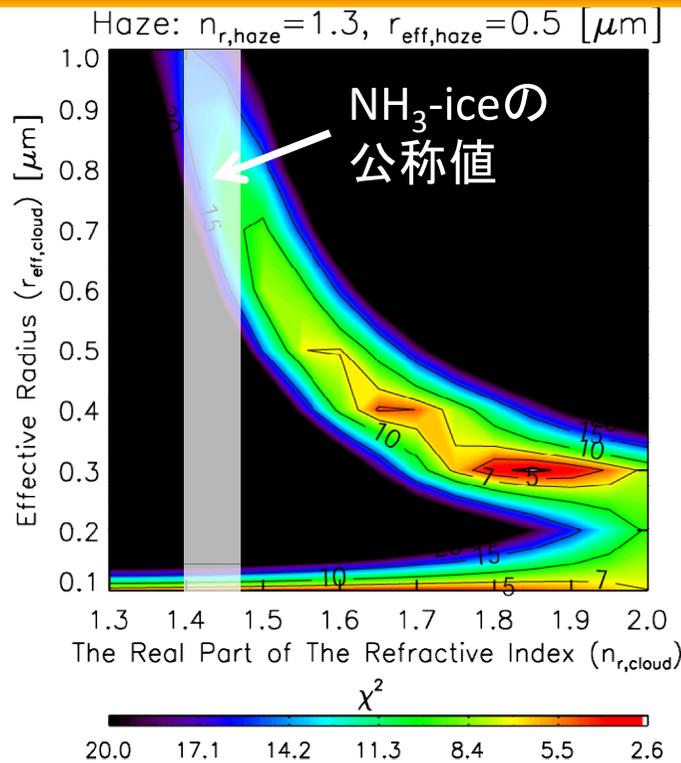
5.1. Cloud and haze properties deduced from the Cassini ISS limb-darkening analyses

5.2. Sensitivity of our results for the assumed parameters

5.3. Application of the best-fit Mie scattering phase functions to the Pioneer 10 IPP data

5.4. Limitation of the Pioneer HG function

5.1. Cloud particles (e.g., the CB2/STrZ data set)



NH₃-iceの室内実験データ

$n_r = 1.45$ @ 430 nm, $n_r = 1.42$ @ 670 nm
 →ヘイズの仮定 ($n_{r,haze}, r_{eff,haze}$) に関係なく
 再現できない ($\chi^2 > 10$)

- 後方散乱の持ち上がり不足
- 散乱の強さが散乱角によって大きく変化

Fig. 26. NH₃-iceを仮定した Mie散乱位相関数.

$n_{r,cloud} = 1.85$ という結果は,
 "純粋なNH₃-ice" の存在を
 否定!

5.1. Cloud particles

□ Lack of spectroscopic signature of NH₃-ice

- 純粋なNH₃-ice [Baines et al., 2002] → 限定的
- 3-μm 吸収 [Brooke et al., 1998, Sromovsky and Fry, 2010a, 2010b]
- (少なくとも) 小粒子のNH₃-iceでは説明不可.

本研究 (可視光) はこれらの研究を支持

Conflict !

□ Strong depletion of gaseous NH₃ abundance

- 凝結しているはず! (i.e., NH₃-ice)

この領域に注目

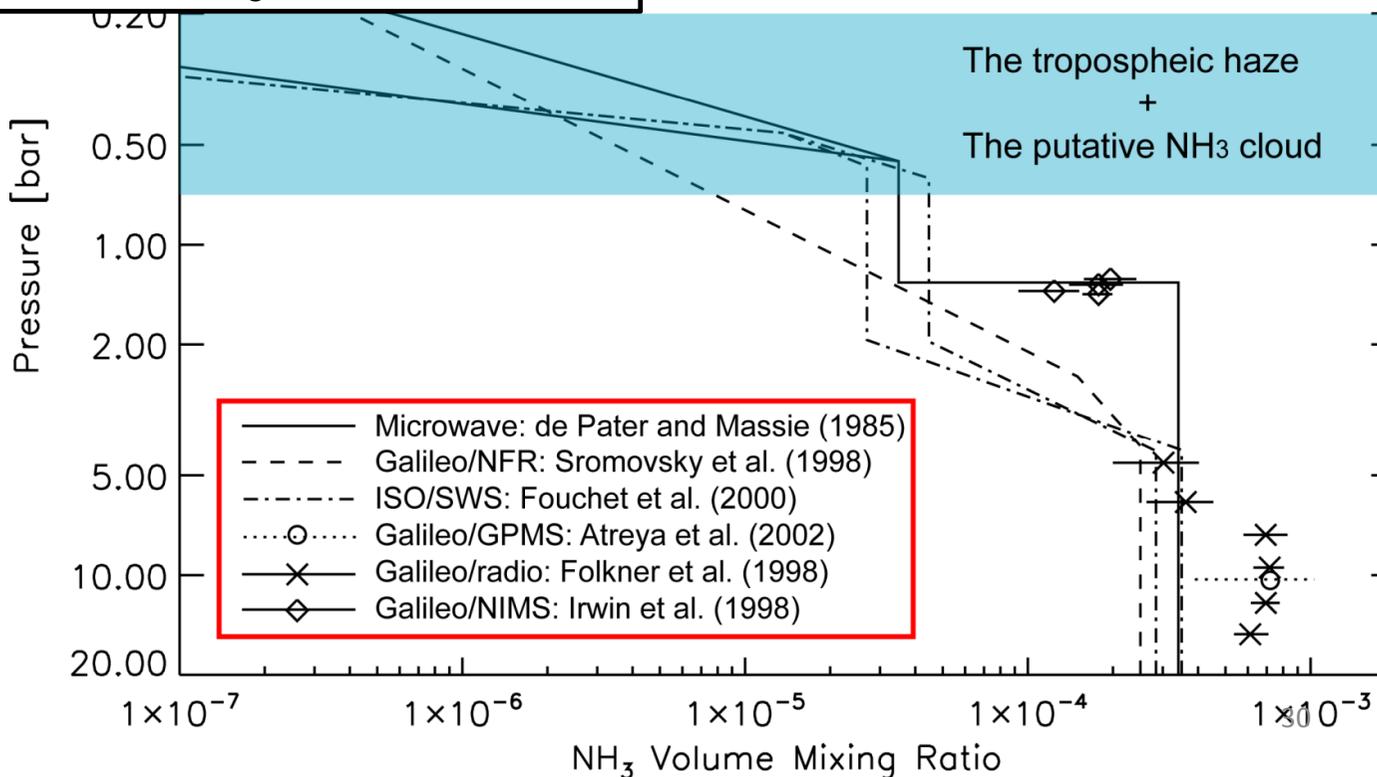


Fig. 27. NH₃ガス, 及び雲・ヘイズの高度分布.

5.1. Cloud particles

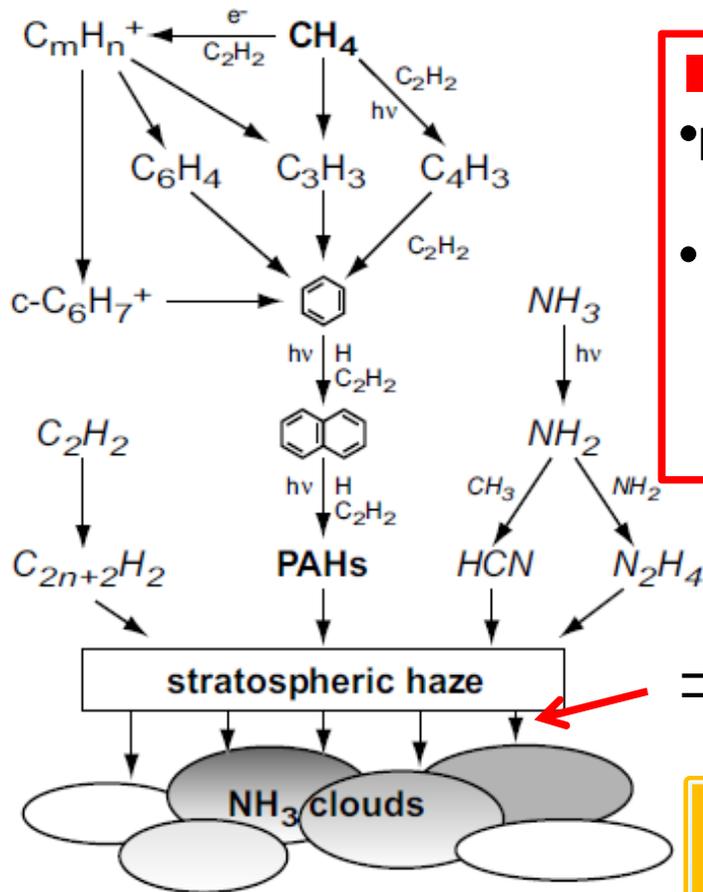


Fig. 28. 木星NH₃-ice雲のコーティング説 [Atreya et al., 2004].

■ 矛盾を解消するアイディア (の1例)

- photochemical materialsによるNH₃-iceのコーティング説 [Atreya et al., 2005]
- 室内実験 [Kalogerakis et al., 2008]
hydrocarbon-coated NH₃ iceの場合NH₃-iceの spectral signatureを弱める (消す) ことができることを実証.

コーティング

結論

上部対流圏に浮かぶ小粒子 (0.3 μm in CB2, 0.2 μm in BL1) からなる雲を捉えた. $n_r = 1.85$ という非常に高い屈折率はNH₃-iceをコーティングする物質の物性を表していると考えられる.

5.1. stratospheric haze (e.g., the CB2/STrZ data set)

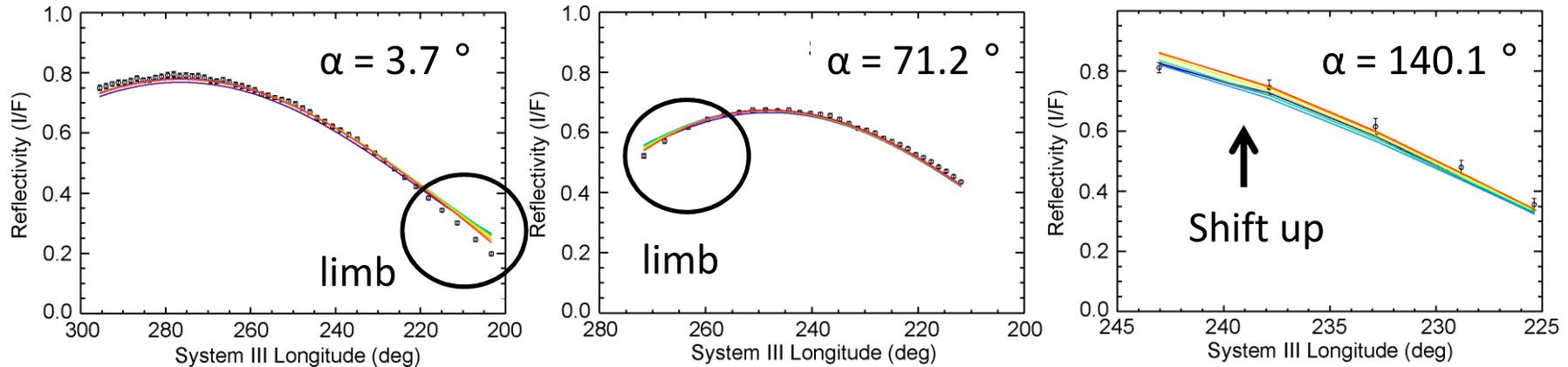


Fig. 29. ヘイズ粒径に対するモデルの感度

■ 本研究

- $n_{r, haze} = 1.3$ ← 制約できず
- $r_{eff, haze} = 0.5$ [μm] ($g \sim 0.84$)
- $\tau_{haze} = 0.056$

Consistent!

Consistent!

Tomasko et al. (1978): Pioneer 10 IPP

- $\alpha = 150$ データの再現
- ヘイズの散乱位相関数... $g \geq 0.75$

Rages et al. (1999): Galileo SSI / 756nm

- 大位相角 ($\alpha = 146$ & 157) データ
- $r_{eff, haze} = 0.45$ [μm] @ 96 mbar

**Kuehn and Beebe (1993),
Sato and Kawabata (1994):**

- CH₄ 吸収帯地上測光観測
- Pioneer位相関数利用
- $\tau_{haze} = 0.3-0.6$

波長 & 領域に関係なく、
光学的 (< 0.1) に非常に薄い
(先行研究結果の0.1-0.2 倍程度)
→ 散乱位相関数の違いを反映

5.1. Visual differences between STrZ and SEBn

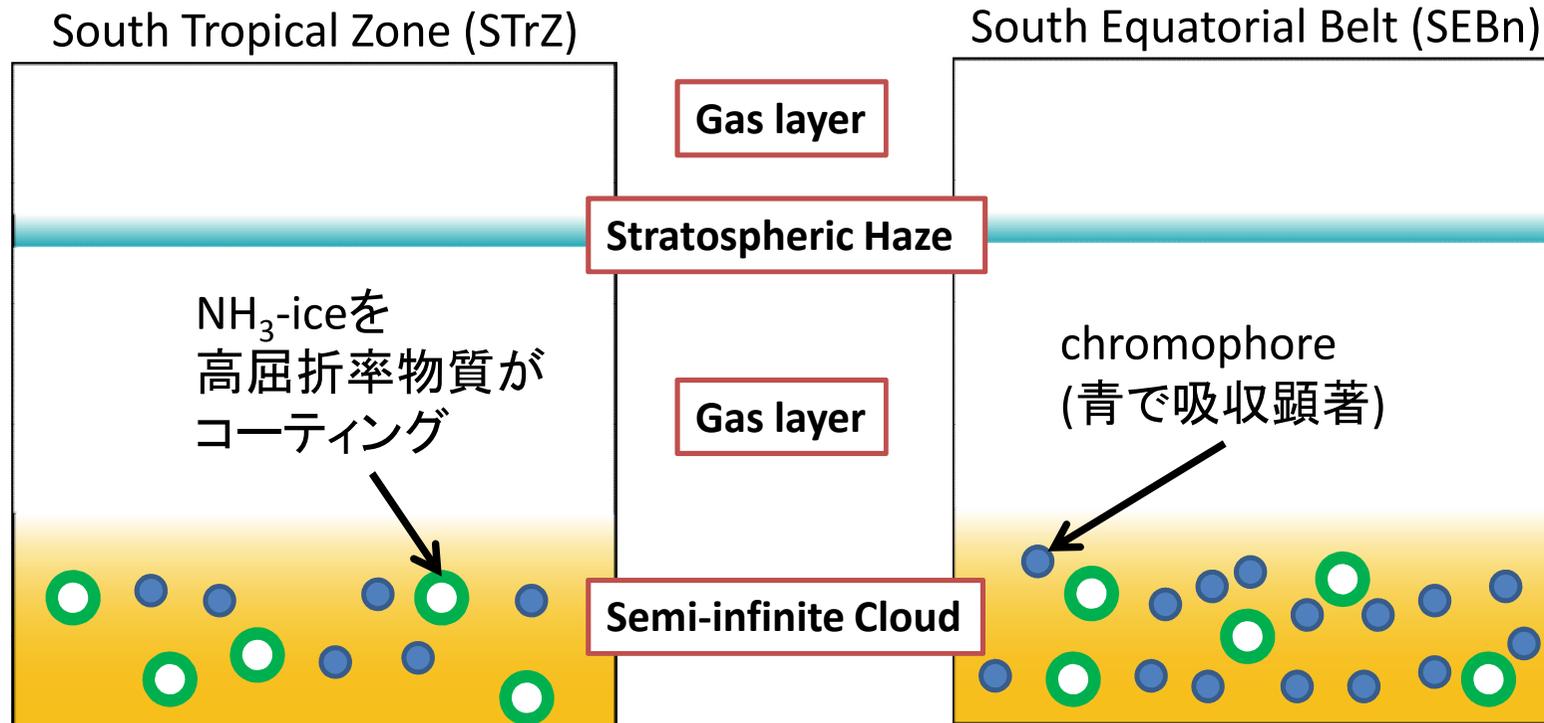


Fig. 30. ZoneとBeltの様相 (構造) の違いに関するアイデア.

ZoneとBeltの様相 (構造) の違いを説明できるパラメータ→ ω_{cloud} のみ

•雲粒子による吸収→×

∴散乱特性に有意な差異なし & 雲やヘイズ候補は可視-近赤外で”白”

•chromophore (吸収物質) による吸収

➤chromophoreの量: SEBn > STrZ & 波長が短いほどBeltで吸収顕著

定性的にはWest et al. (1986) のアイデアを支持

5.1. Comparison of scattering phase functions

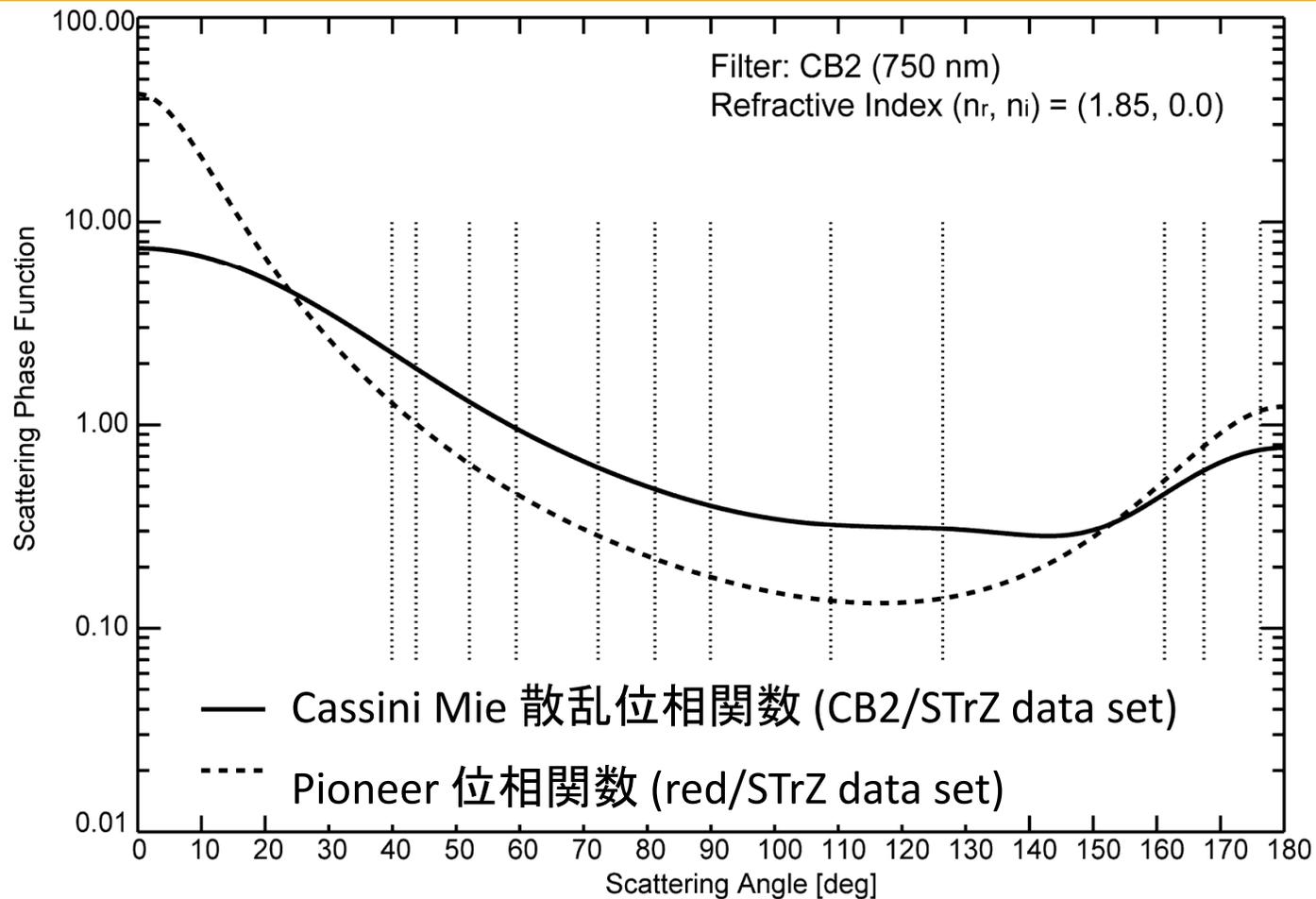


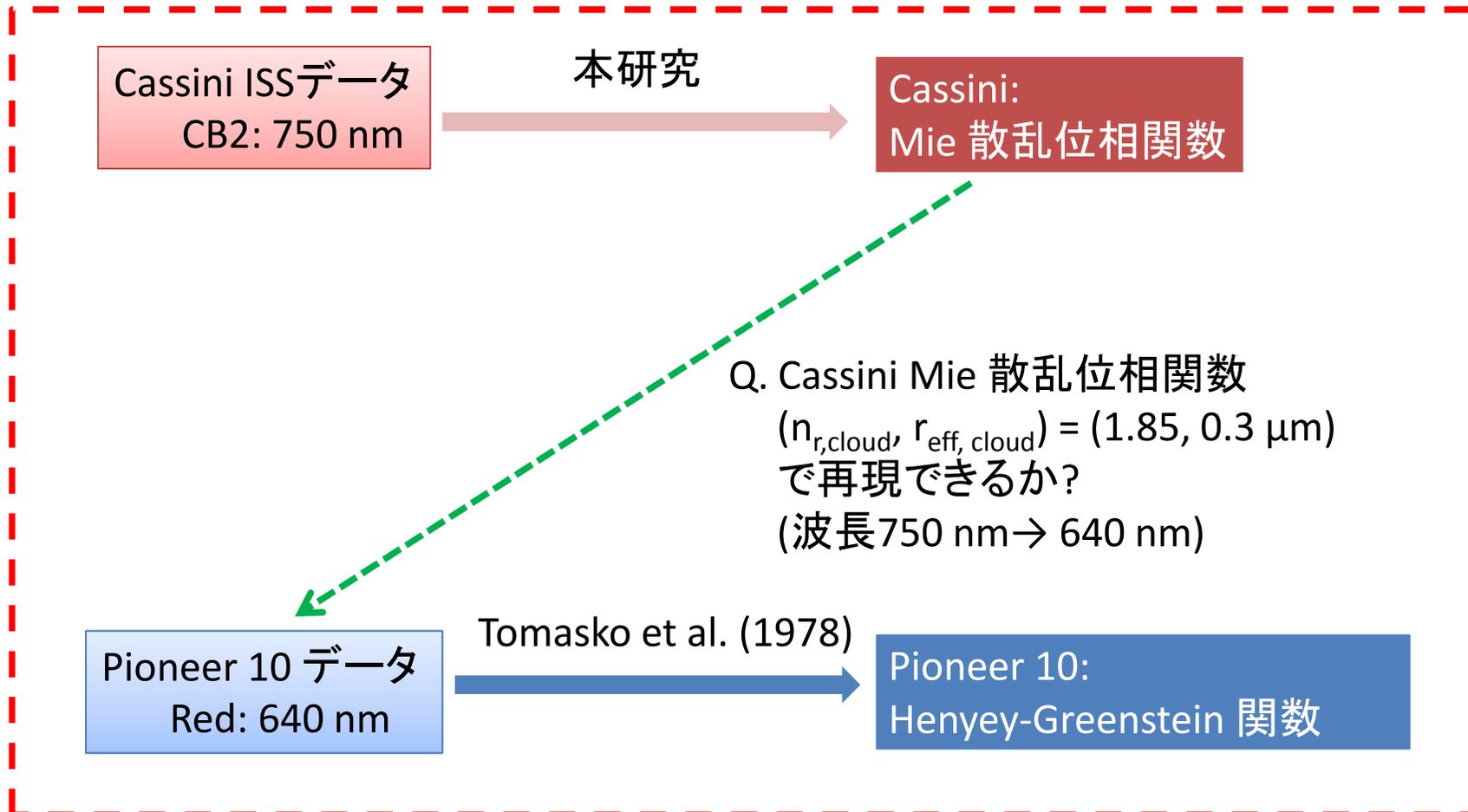
Fig. 31. Cassini Mie散乱位相関数とPioneer位相関数.

散乱位相関数

1. Pioneer 位相関数
2. ~~NH₃ iceを仮定したMie 散乱位相関数~~
3. Cassini Mie 散乱位相関数

5.3. Application of new Mie scattering phase functions

■ Cassini Mie 散乱位相関数の有効性の評価 (本発表では1例のみ紹介)



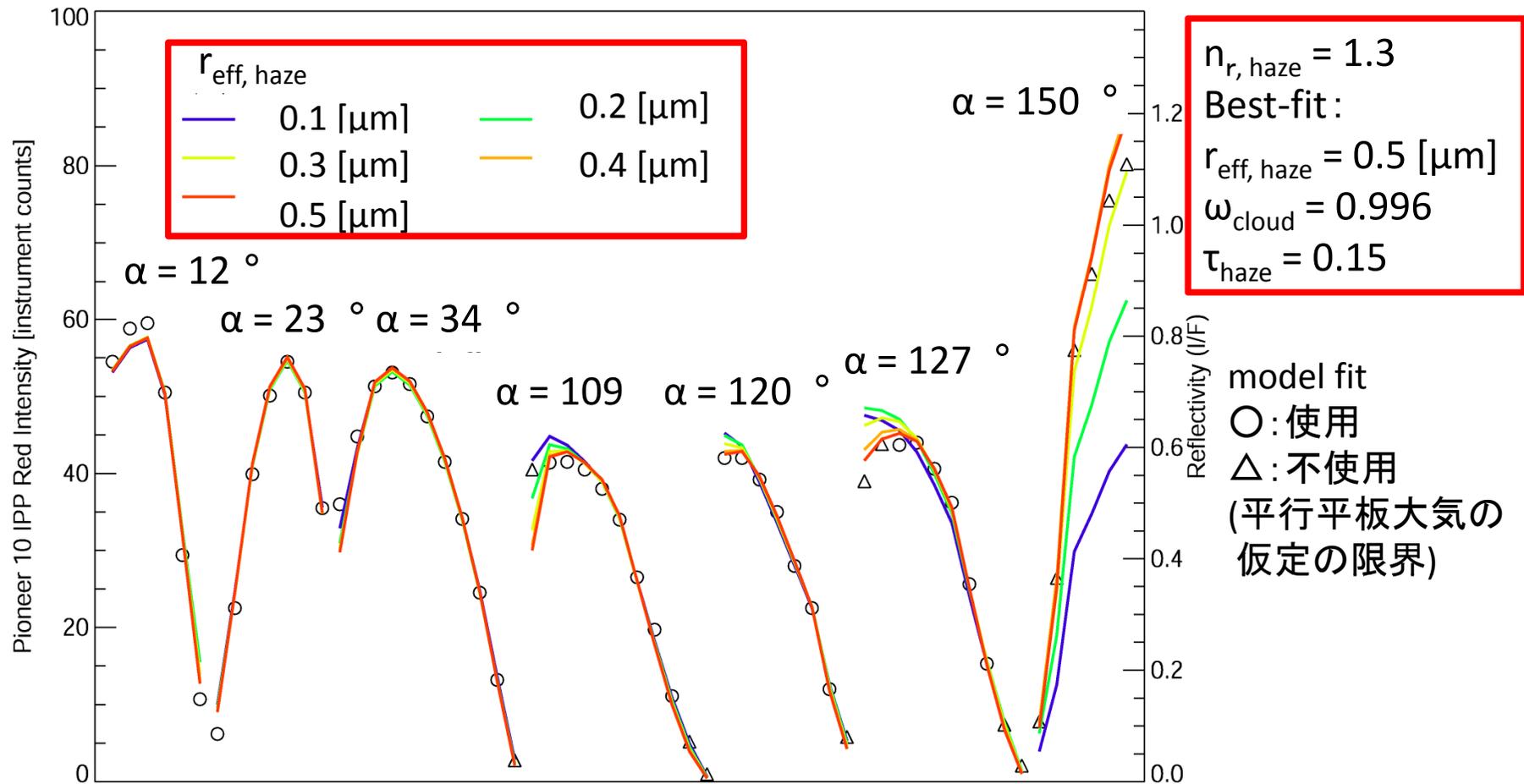


Fig. 32. Pioneer 10データフィット結果.

Pioneer 10データを再現!

➤ 雲粒子の散乱特性 (散乱位相関数) に時間変化は見られない.

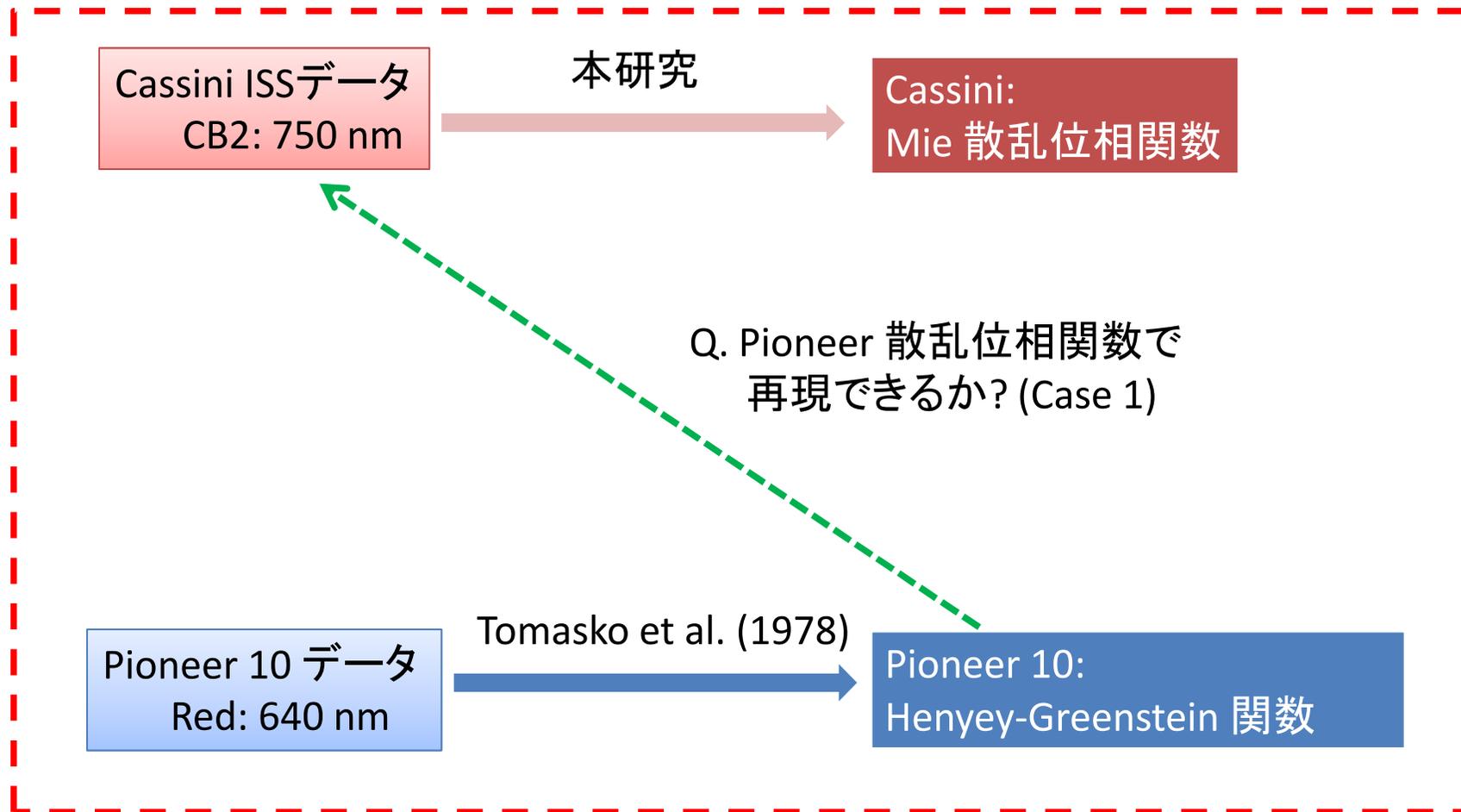
$\alpha = 150^\circ$ では, $r_{\text{eff, haze}}$ への感度が急激に大きくなる.

(平行平板大気と球形を考慮した場合の違い: $\sim 20\text{--}30\%$ [Herman et al., 1994])

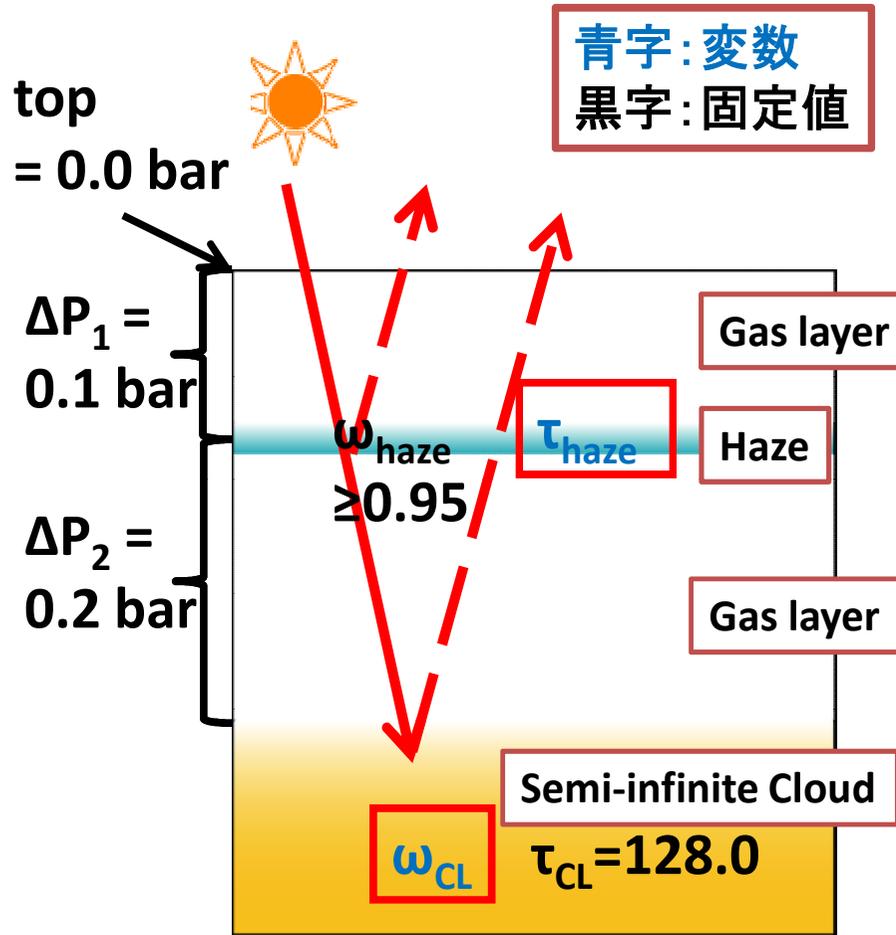
➤ $r_{\text{eff, haze}} = 0.1 [\mu\text{m}]$ は現時点でも棄却可能

5.4. Limitation of the Pioneer HG function

■ Pioneer 位相関数の有効性の評価 (CB2/STrZ データセットで検証)



5.4. Radiative transfer model (Type II-HG)



青字: 変数
黒字: 固定値

Gas layer:

- レイリー散乱
- CH_4 吸収 (Karkoschka, 1998)

Haze:

- Henyey-Greenstein 関数 ($g = 0.75$)

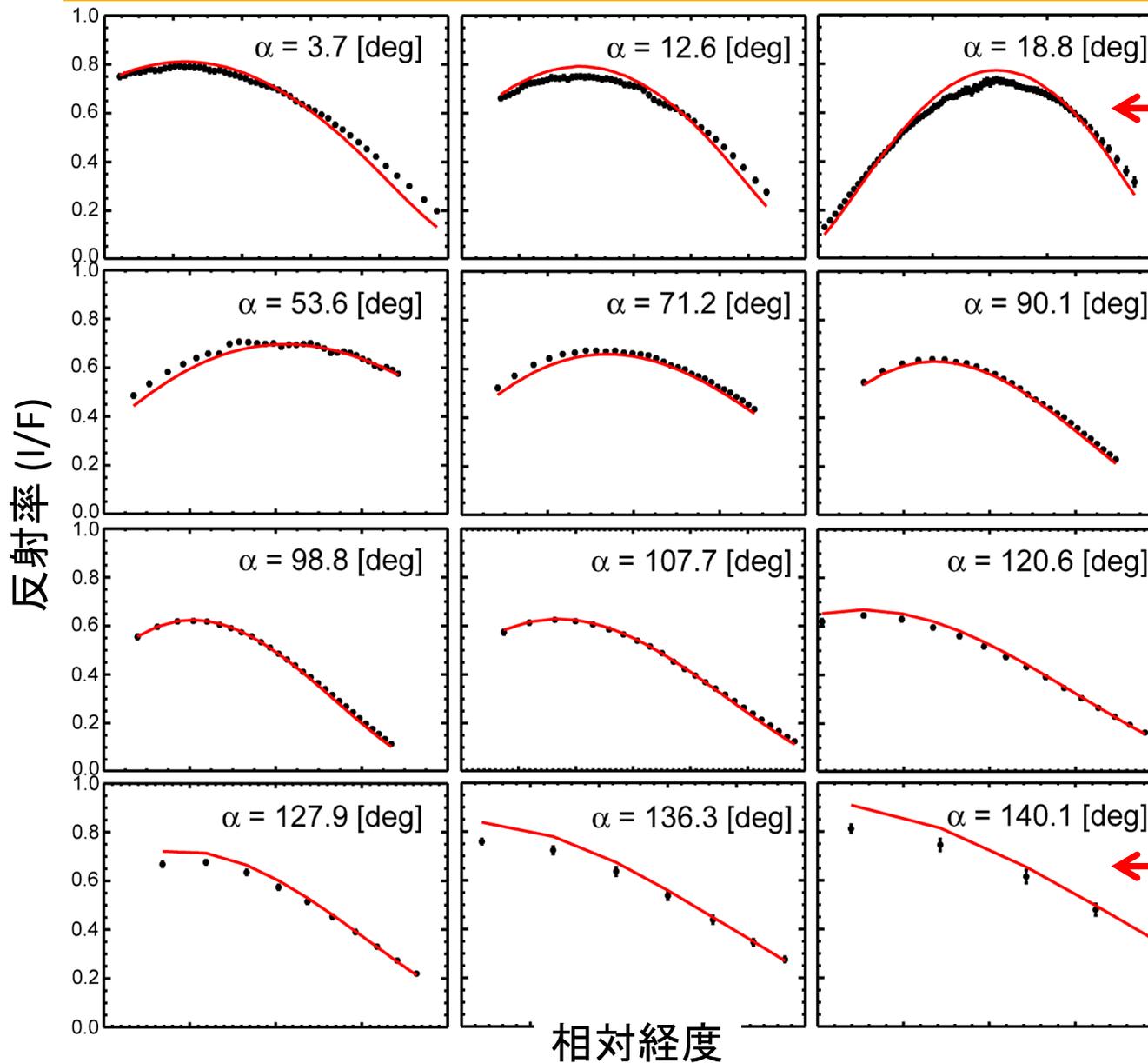
Cloud:

- 二項 Henyey-Greenstein 関数 $(f, g_1, g_2) = (0.938, 0.80, -0.70)$ in red (640 nm) for the STrZ

Tomasko et al. (1978)
と同じモデル (Type II)

Fig. 33. 仮定した雲構造モデル [Tomasko et al., (1978) で用いられたモデルと同等]

5.4. Results: Case 1



低位相角データ
でフィットできない。

ω_{haze} :
0.95–1.00

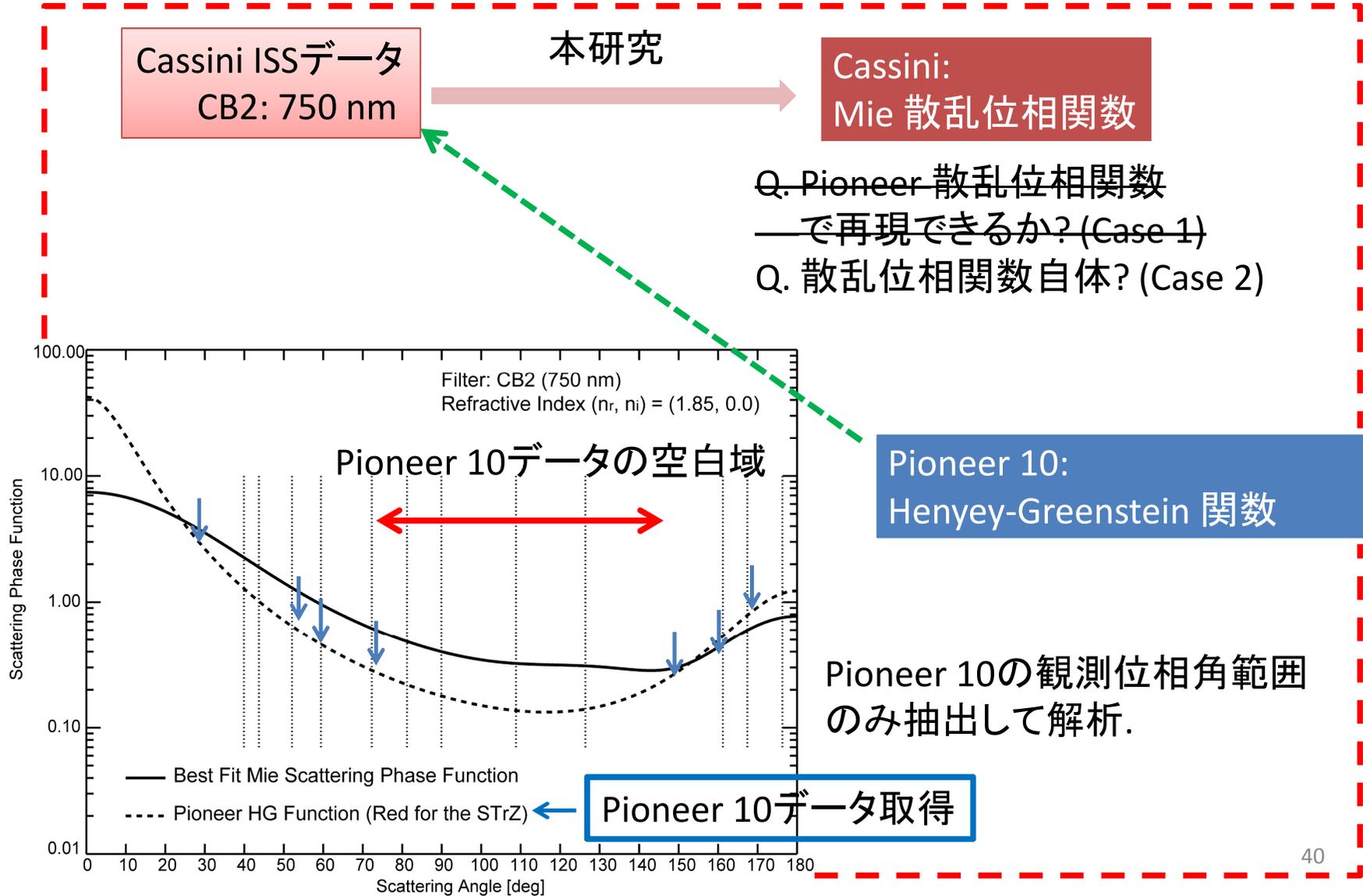
$\chi^2 = 9.41$
(@ $\omega_{\text{haze}} = 0.97$)
(本研究では,
 $\chi^2 = 2.6$)

高位相角データ
でフィットできない。

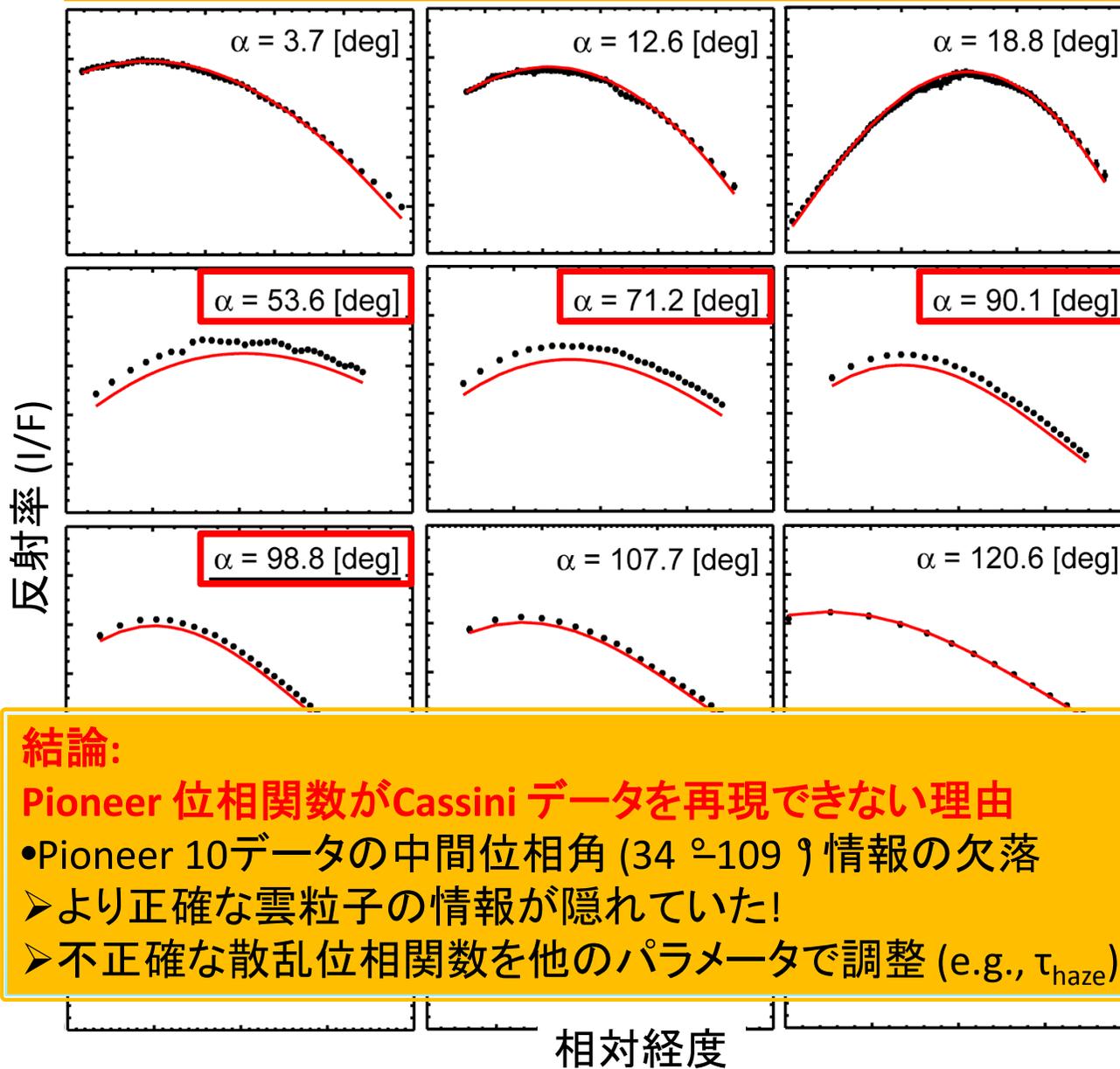
Fig. 34. Case1の結果

5.4. Limitation of the Pioneer HG function

■ Pioneer 散乱位相関数の妥当性の評価



5.4. Results: Case 2



ω_{haze} :
0.95–1.00

$\chi^2 = 5.64$
(@ $\omega_{\text{haze}} = 0.97$)

範囲外のデータ:
系統的にモデル計算
が暗い (5–10%).



Cassiniデータのもつ
相対誤差 (~ 1%) では
説明できない。

結論:
Pioneer 位相関数がCassini データを再現できない理由
 • Pioneer 10データの間位相角 (34 °–109 °) 情報の欠落
 ➤ より正確な雲粒子の情報が隠れていた!
 ➤ 不正確な散乱位相関数を他のパラメータで調整 (e.g., τ_{haze}).

Fig. 35. Case2の結果.

6. Summary and conclusions

- Cassini ISS 木星フライバイデータを利用し, Pioneer 10データ解析以来となる **雲粒子・ヘイズの散乱位相関数を観測的に導出した**.
- Mie散乱理論を雲粒子・ヘイズに適用し, 4種類(2波長×2緯度領域)のデータセットに対して放射伝達計算を行った.
- 上部対流圏に浮かぶ **粒径サイズの小さい (0.2, 0.3 μm) 雲**を捉えた. $n_r = 1.85$ という非常に高い屈折率は, **NH₃-iceをコーティングする物質の物性を表現している**と考えられる. **散乱特性は緯度領域に関わらず, ほぼ同じ特性を示している**.
- ZoneとBeltの模様 (構造) の違いは, **散乱特性ではなく雲層における吸収の違い**によってのみ説明できることが分かった. 吸収はchromophoreと呼ばれる未知の吸収物質によると考えられる.
- ヘイズの光学的特性の制約は十分ではないが, **前方散乱の強い (粒径の大きい) 物質**であり, かつ**光学的に非常に薄い (< 0.1)**ことが分かった.
- 本研究で得られた散乱位相関数はPioneer 10データをよく再現した. 一方でPioneer位相関数はCassiniデータを再現できなかった. これは**中間位相角 (34 °-109 °) における雲粒子の振舞をPioneer 10データが観測できなかったことに起因している**.
- 本研究により得られた散乱位相関数は, **"a priori"として将来の地上観測・探査機データの解析に広く利用**されることが期待される.

7. Future directions

- Cassini ISSの他波長 (UV & CH₄吸収帯フィルター)を用いたデータ解析
 - UVやCH₄吸収帯における周辺減光曲線の位相角依存性は世界的に手つかず.
 - 本研究では達成できなかった**詳細な雲層構造の導出・成層圏ヘイズの特性**.
- 本研究で得られた散乱位相関数とHSTデータを用いた木星雲層構造の時空間変動の詳細解析
 - 観測条件やデータ校正方法の違いがほぼないHSTデータと本研究で得られた散乱位相関数を用いることで, **初めて有意な時空間変動の議論が可能に**.
- 非平行平板大気のための放射伝達コード拡張
 - 高位相角データは成層圏ヘイズの情報を含んでいるが, 平行平板大気の限界のため情報を引き出せない.
 - こうしたコードは他惑星研究にも需要あり. e.g., 金星
 - unknown UV absorber の高度分布, 緯度経度依存性 (with VEX/VMC limb data)
- 本研究手法の土星・タイタンへの展開
 - Cassiniは土星・タイタンで詳細観測を継続中.
 - エアロゾルの散乱特性の解明はどの惑星でも必要不可欠.**
 - 土星の雲の散乱特性はNH₃で説明可能?
 - 木星と土星の顕著な色の違いは, 雲の一次散乱アルベドにどう表れるのか?
 - 同一観測装置によってのみ比較可能.



End