

# ハイパースペクトルカメラによる火星大気観測

まなご

眞子 直弘

千葉大学環境リモートセンシング研究センター

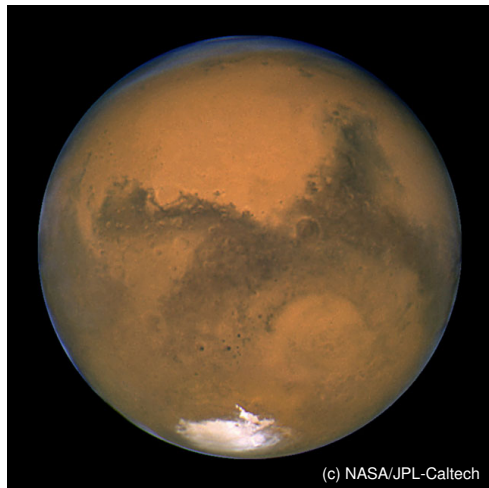
2013年07月11日

惑星大気研究会 オンラインセミナー 第57回  
@ 神戸大学 惑星科学研究センター

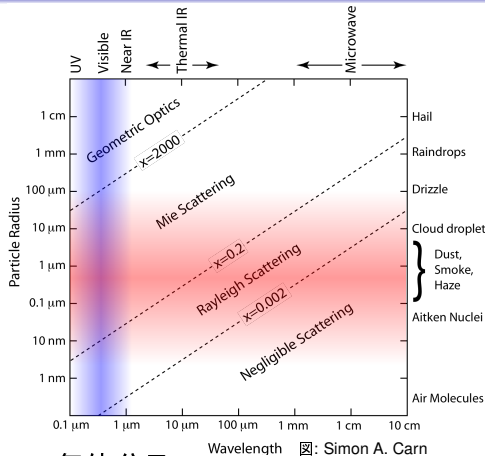


# 火星大気とエアロゾル

- 火星… 太陽からの距離1.5 AU, 半径は地球の約半分
- 地表面気温 $-50^{\circ}\text{C}$ , 気圧8hPa程度
- 火星の大気組成:  $\text{CO}_2$  95%,  $\text{N}_2$  2.7%, Ar 1.6%,  $\text{O}_2$  0.13%
- エアロゾル… 大気中に浮遊する固体または液体の微粒子の総称
  - 浮遊可能なサイズには上限がある(地球だと $\sim 100\ \mu\text{m}$ 程度)
  - 火星の主なエアロゾルはダスト
  - 水氷雲やドライアイス雲も広い意味でエアロゾルに含まれる
  - ダストが火星の放射収支に影響
  - エアロゾルの計測が非常に重要



# 気体分子とエアロゾル



エアロゾル  
気体分子

## ● 気体分子

- 粒径  $\sim 10^{-4} \mu\text{m}$
- **Rayleigh散乱**
  - $\propto \lambda^{-4}$
  - 前方散乱と後方散乱の割合が同じ
- **吸収の波長依存性は大きい**

## Scattering geometry

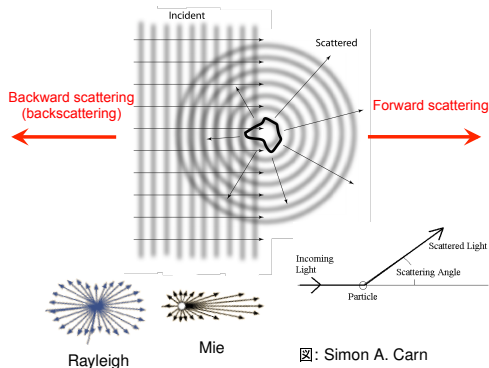


図: Simon A. Carn

## ● エアロゾル (固体または液体)

- 粒径  $10^{-2} \sim 10^2 \mu\text{m}$
- **Mie散乱**
  - $\propto \lambda^{-2} \sim \lambda^{-0.5}$
  - **前方散乱が強い**
- 吸収の波長依存性は小さい



# 直達太陽光の放射伝達計算

放射照度 大気上端

$$E(\lambda) = E_0(\lambda) \times T(\lambda, \theta_{01}, \infty, z_1)$$

透過率

$$T(\lambda, \theta, z_i, z_f) = \exp \left[ - \int_{z_i}^{z_f} \alpha_{\text{ext}}(\lambda, z) \frac{|dz|}{\cos \theta} \right] = \exp[-m(\lambda) \tau(\lambda)]$$

光路に沿った積分

消散係数

$$\alpha_{\text{ext}}(\lambda, z) = \alpha_{\text{sca}}^{\text{R}}(\lambda, z) + \sum_g \alpha_{\text{abs}}^{\text{g}}(\lambda, z) + \alpha_{\text{sca}}^{\text{M}}(\lambda, z) + \alpha_{\text{abs}}^{\text{M}}(\lambda, z)$$

Rayleigh散乱      気体吸収      Mie散乱      Mie吸収

- 透過率から **光学的厚さが簡単に求まる**

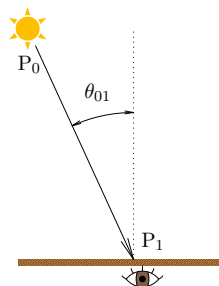
光学的厚さ

$$\tau(\lambda) = \int \alpha_{\text{ext}}(\lambda, z) dz$$

エアマス

$$m(\lambda) = \frac{1}{\cos \theta} \quad (\text{平面的な大気の場合})$$

- **エアロゾルの散乱と吸収が区別できない**



# 散乱太陽光の放射伝達計算

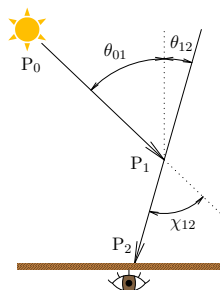
放射輝度

$$L(\lambda) = E_0(\lambda) \int_{z_2}^{\infty} \beta(\lambda, \chi_{12}, z_1) T(\lambda, \theta_{01}, \infty, z_1) T(\lambda, \theta_{12}, z_1, z_2) \frac{dz_1}{\cos \theta_{12}}$$

側方散乱係数                      Rayleigh位相関数                      Mie位相関数

$$\beta(\lambda, \chi_{12}, z_1) = \alpha_{\text{sca}}^{\text{R}}(\lambda, z_1) f^{\text{R}}(\lambda, \chi_{12}) + \alpha_{\text{sca}}^{\text{M}}(\lambda, z_1) f^{\text{M}}(\lambda, \chi_{12})$$

- 位相関数の情報を含む
- エアロゾルの散乱と吸収を分離できる
- 多重散乱を含めるともう少し計算が複雑になる



## エアロゾルの測定方法

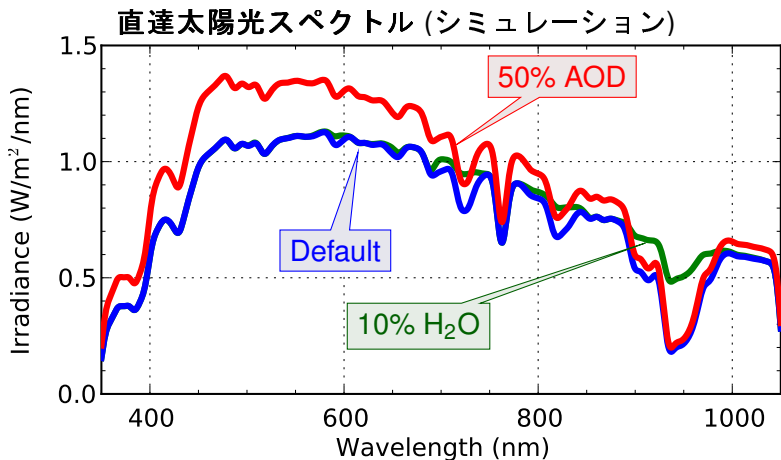
- サンプリング法
  - 光学式粒子数計測器（粒径分布）
  - ネフェロメータ（散乱係数）
  - エーサロメータ（吸収係数）
  - 吸収率測定器（吸収係数）
  - 粉塵捕集器（粒径分布, 組成）
- 局所的な測定しかできない
- 捕集により性質が変化する可能性
- リモートセンシング法
  - サンフォトメータ（光学的厚さ）
  - スカイラジオメータ（光学的厚さ, 粒径分布, 複素屈折率, 単一散乱アルベド）
  - ライダー（消散係数, 偏光解消度）
  - 衛星観測（光学的厚さ）
- 広域の測定が可能
- これから説明する太陽光スペクトルを使ったエアロゾル特性導出方法はスカイラジオメータ同様, 様々なエアロゾル特性を導出できる



# 地球大気の放射伝達シミュレーション

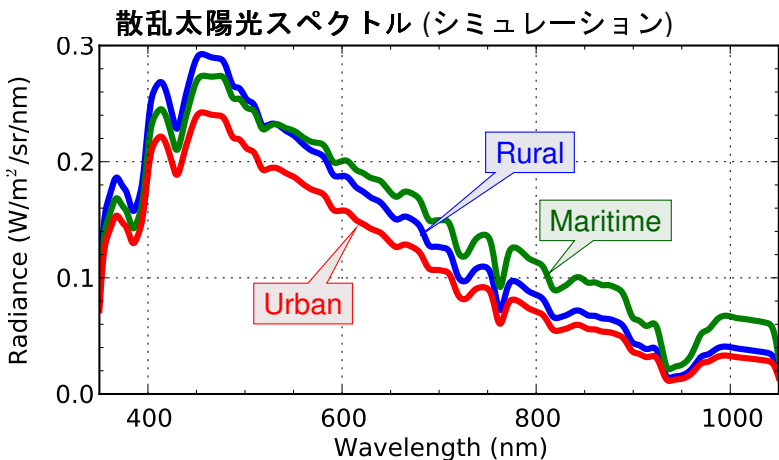
- 放射伝達コード… MODTRAN4
- 大気モデル (Tropical, Mid-Latitude/Sub-Arctic Summer/Winter, **カスタム**)
  - **気圧**の高度プロファイル
  - **気温**の高度プロファイル
  - **気体混合比**の高度プロファイル  
( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HNO}_3$ , etc.)
- エアロゾルモデル (Rural, Maritime, Urban, **カスタム**)
  - 波長550 nmにおける地上視程 (**光学的厚さ**)
  - 波長ごとの**消散係数**の高度プロファイル (波長550 nmで規格化)
  - 波長ごとの**吸収係数**の高度プロファイル (波長550 nmの消散係数で規格化)
  - 波長ごとの**位相関数**
- その他
  - 大気上端太陽放射照度
  - 地表面反射率
  - 地球半径

# 気体分子・エアロゾルが直達太陽光スペクトルに与える影響



- 絶対温度5800Kの黒体放射スペクトルに近い
- 水蒸気量を減らすと水の吸収が減る
- エアロゾル光学的厚さ(AOD)を減らすと透過率が増える

# エアロゾルが散乱太陽光に与える影響



- 直達太陽光スペクトルと似ている（ピーク波長が異なる）
- Maritimeエアロゾルは粒径が大きく，散乱の波長依存性が平坦
- Urbanエアロゾルは吸収性が大きく，散乱強度が小さい

# どうやってエアロゾル光学特性を導出するか？

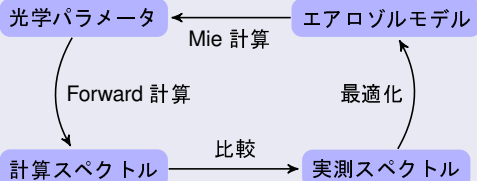
## 直達太陽光 放射照度

- 放射伝達シミュレーションにより計算スペクトルを求める
- 計算スペクトルが実測スペクトルに合うように入力パラメータを調整する**スペクトルマッチング**を行う



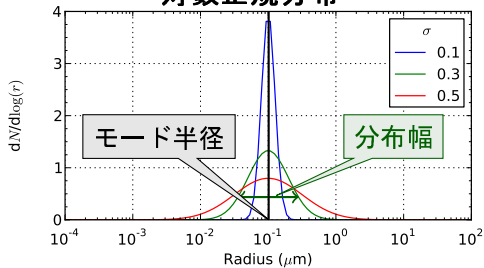
## エアロゾルモデルを利用したエアロゾル光学特性の導出

## スペクトルマッチング



- 光学パラメータは数が多い
- エアロゾルモデル
  - 物質（複素屈折率）
  - 形状（球形, 対数正規分布）
  - 少ないパラメータで記述可
  - 3成分（TCAM）
    - 混合比2, モード半径3
  - 2成分（物質は1種類）
    - 混合比1, 複素屈折率2, モード半径2
  - 1成分
    - 複素屈折率2, モード半径1

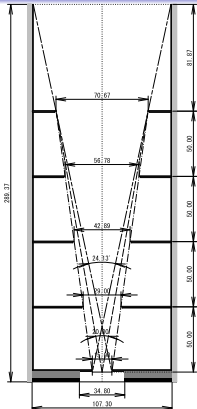
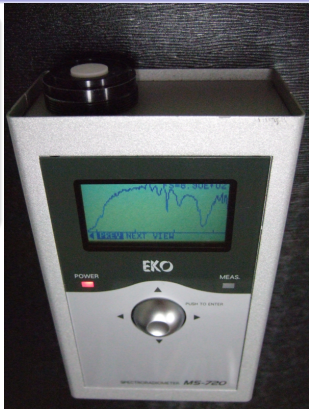
## 対数正規分布



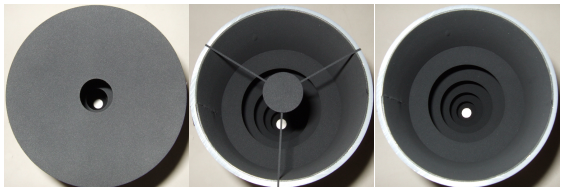
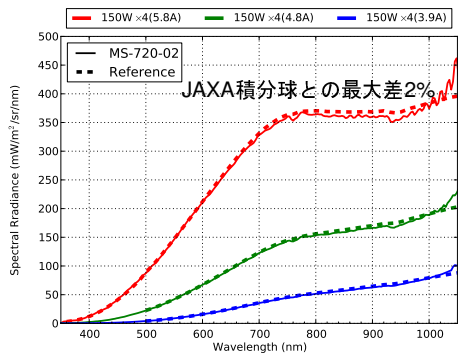
# 分光放射計を使ったエアロゾル測定

## 英弘精機 MS-720の主な仕様

実用波長範囲 (nm)	350 ~ 1050
波長間隔 (nm)	3
波長分解能 (nm)	10
全角視野 (deg)	180
本体サイズ (mm)	100×165×60
バッテリー持続時間	18 時間 (1000データ)

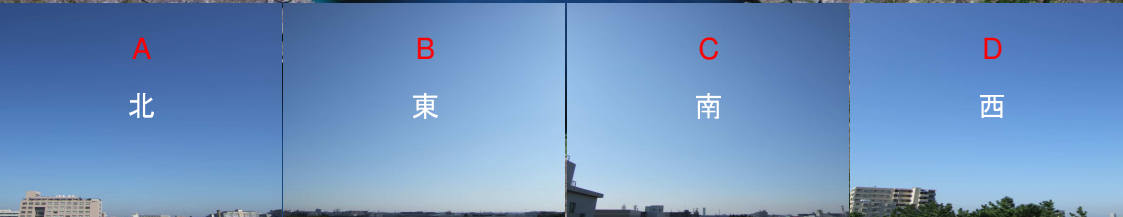
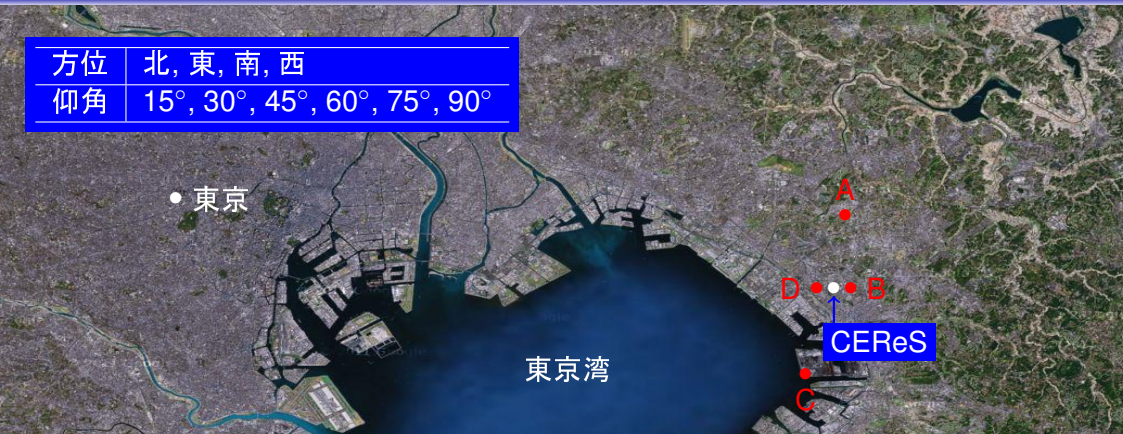


Langley法で絶対値校正 (@Mauna Kea)  
MODTRANと整合的

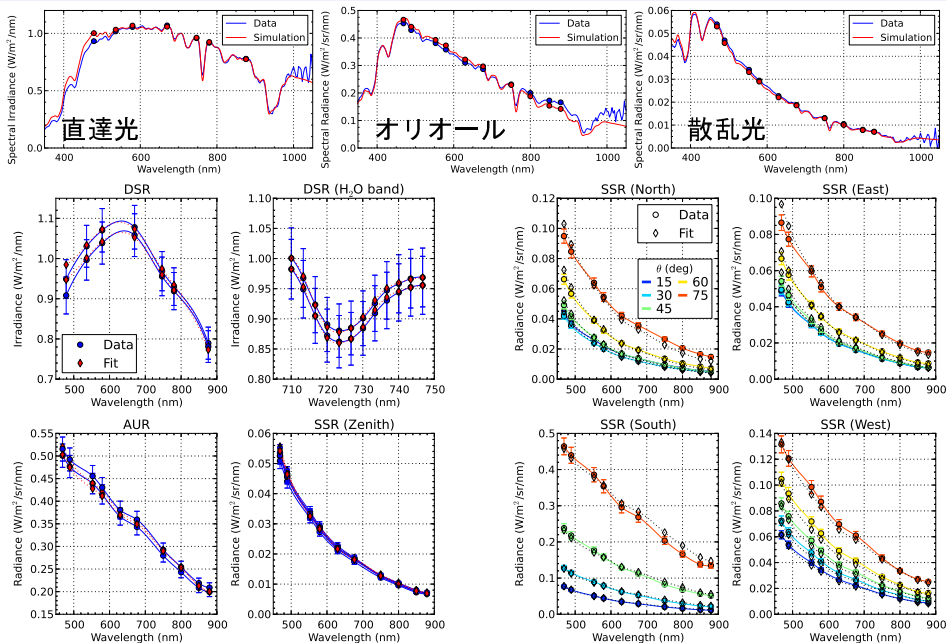


# 観測サイト（千葉大周辺）

方位	北, 東, 南, 西
仰角	15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°

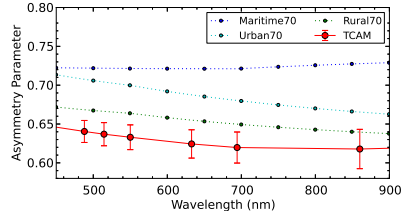
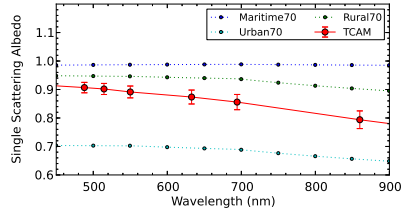
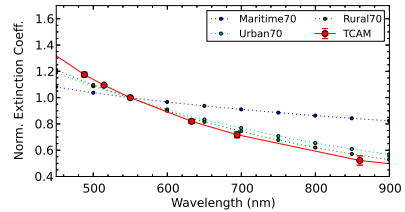


# 分光放射計を使ったエアロゾル測定結果 (スペクトル)



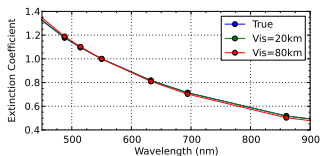
# 分光放射計を使ったエアロゾル測定結果（パラメータ）

パラメータ	最適値	誤差
光学的厚さ	0.190	0.001
水蒸気量(g/cm <sup>2</sup> )	0.80	0.04
Angstrom 指数	1.3	0.1
$m_1$	0.84	0.05
$m_2$	$2.6 \times 10^{-3}$	$0.7 \times 10^{-3}$
$m_3$	0.16	0.05
$n_1$	0.9	0.1
$n_2$	0.1	0.1
$n_3$	$7 \times 10^{-5}$	$7 \times 10^{-5}$
$r_1^{\text{eff}}$ (μm)	0.087	0.007
$r_2^{\text{eff}}$ (μm)	0.06	0.01
$r_3^{\text{eff}}$ (μm)	1.7	0.5
$r_1$ (μm)	0.030	0.003
$r_2$ (μm)	0.016	0.005
$r_3$ (μm)	0.9	0.3
$w_1$	0.31	Fixed
$w_2$	0.33	Fixed
$w_3$	0.34	Fixed

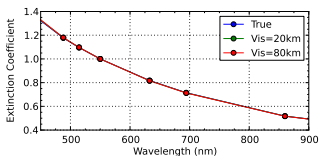


# 分光放射計を使ったエアロゾル測定結果（感度解析）

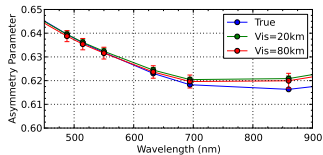
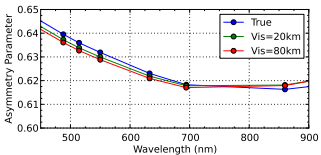
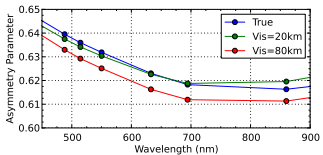
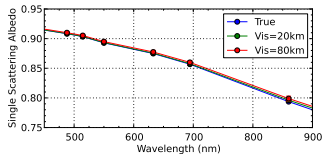
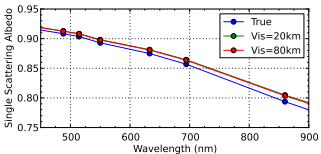
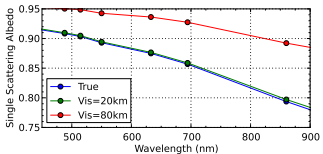
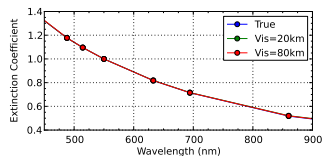
1% 系統誤差（直達光）



1% 系統誤差（散乱光）



1% 統計誤差(直達・散乱)



視程20 km → AOD 0.37, 視程80 km → AOD 0.10

# ハイパースペクトルカメラを使ったエアロゾル測定

## エバ・ジャパン NH-2 (7) の主な仕様

センサー	CMOS
分光方式	透過型回折格子
測定波長 (nm)	350 ~ 1100
波長間隔 (nm)	5
最大画像サイズ	752×480 (1280×1024)
色深度 (bit)	10
画像取得時間 (s)	4 (7)
本体サイズ (mm)	76×62×193
重量 (g)	850

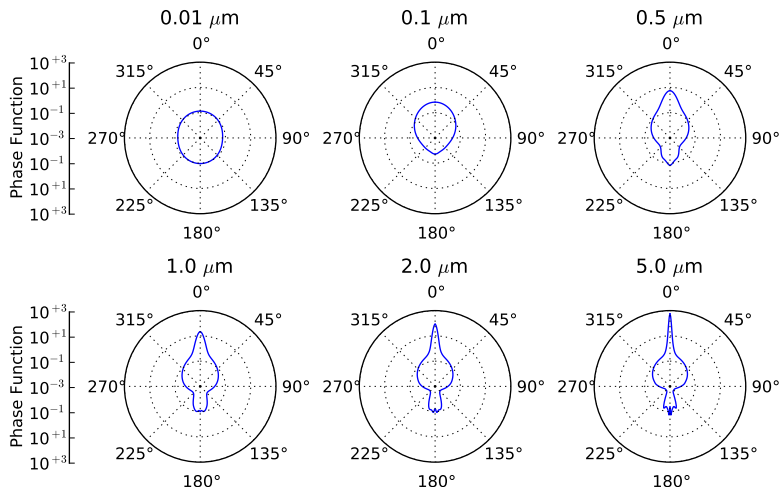
- 各種校正済み
  - 波長校正
  - 画角校正
  - 絶対値校正
  - フラット校正



# ハイパースペクトルカメラを使う利点（1）

- エアロゾルの光学特性は**粒径に大きく依存する**
- 粒径の違いは**前方散乱で顕著に現れる**

⇒ **太陽のごく近傍の観測が重要！** カメラなら容易



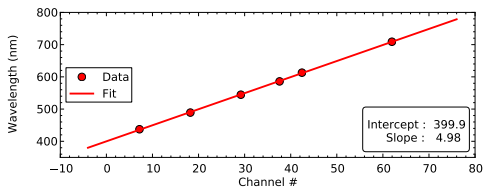
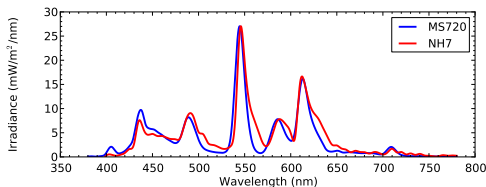


## ハイパースペクトルカメラを使う利点（2）

- **雲**があると太陽光スペクトルが大きく変化するために問題が生じる
- カメラで取得した画像を見れば容易に**雲を認識**できる！

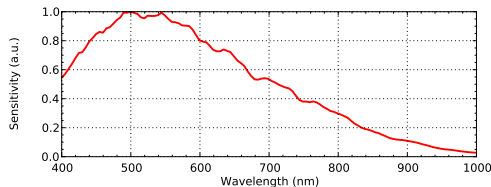
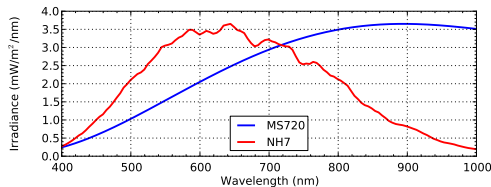
# ハイパースペクトルカメラの波長・絶対値校正(NH-7)

## ● 波長校正



- MS720: 誤差 < 0.2 nm
- 光源: 蛍光灯
- 回帰直線の誤差 (RMS): **1.3 nm**

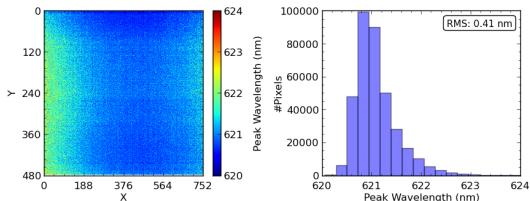
## ● 絶対値校正



- MS720: 誤差 < 2 %
- 光源: ハロゲンランプ+積分球
- 感度ピーク波長: **500 nm**
- 感度領域: **350 ~ 1100 nm**

# ハイパースペクトルカメラのフラット校正(NH-2)

## 波長一様性



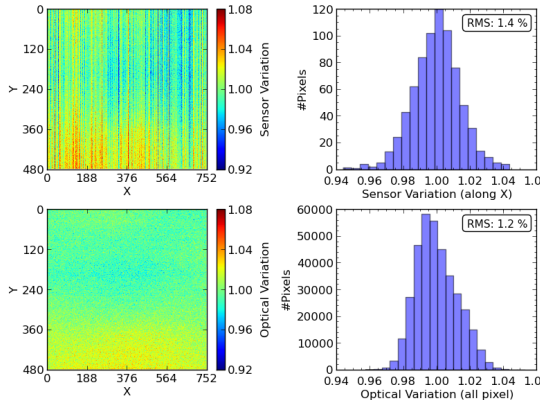
- 波長一様性

- 光源: 蛍光灯+ 拡散板
- 非一様性(RMS): **0.41 nm**

- 絶対値一様性

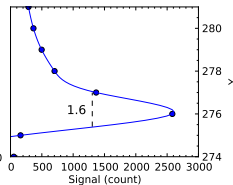
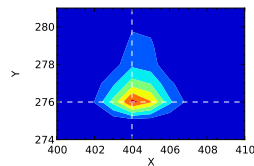
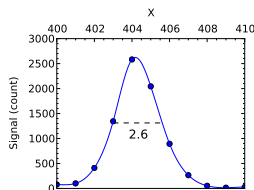
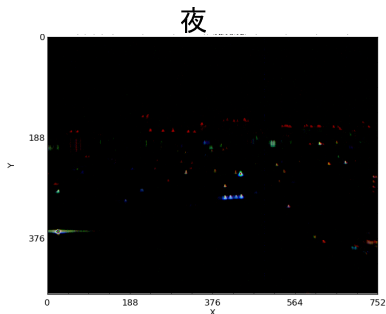
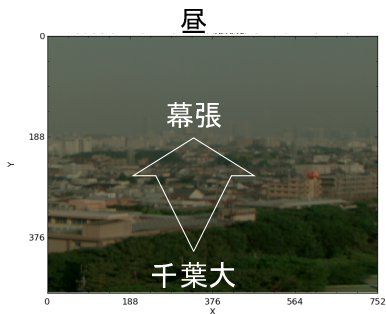
- 光源: トワイライトフラット  
(視野回転: 0, 90, 180, 270 deg)
- センサー非一様性(RMS): **1.4 %**
- 光学系非一様性(RMS): **1.2 %**

## 絶対値一様性



- 光学系非一様性には光源も含む

# ハイパースペクトルカメラの空間分解能(NH-2)



- 点像広がり関数(FWHM):

- X ... 2.6 pixel

- Y ... 1.6 pixel

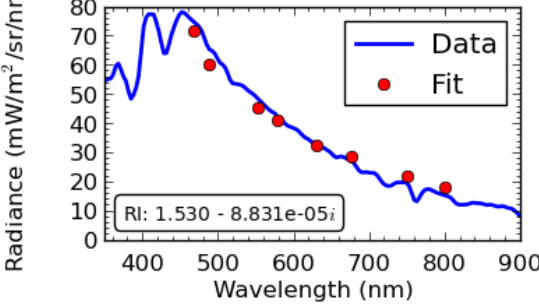
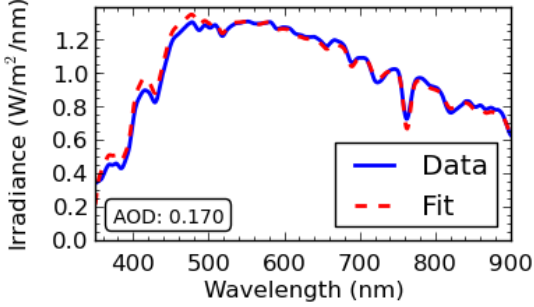
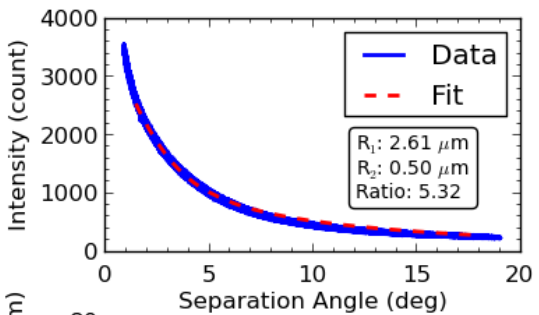
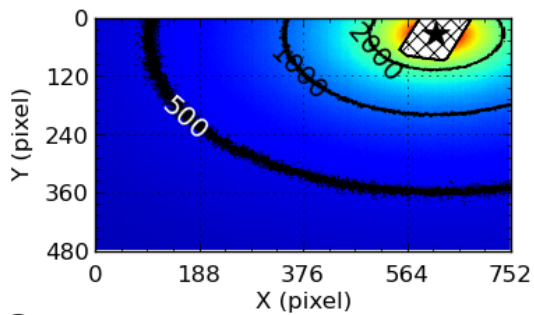
- 画素サイズ:

- X ... 0.0203 deg/pixel

- Y ... 0.0325 deg/pixel

⇒ 空間分解能 ~ **0.07 deg**

# ハイパースペクトルカメラを使ったエアロゾル測定結果 (1)



## ハイパースペクトルカメラを使ったエアロゾル測定結果 (2)

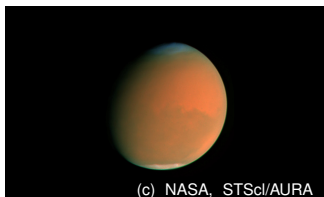
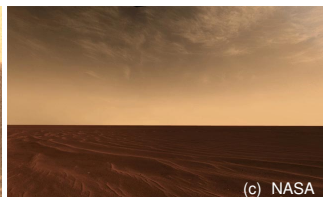
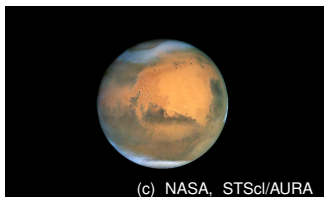
光学的厚さ	0.17	
H <sub>2</sub> O倍率 <sup>*a</sup>	0.25	
	成分1	成分2
複素屈折率実数部	(1.53)	(1.53)
複素屈折率虚数部	8.8E-05	
モード半径(μm)	2.61	0.5
分布幅	(0.26)	(0.26)
混合比 <sup>*b</sup>	(1)	5.32

\*a MODTRANのデフォルト値に対する倍率

\*b 波長550 nmの消散断面積の重み付き混合比

- 散乱光は天頂方向のみ測定
- オリオールは波長550 nmの散乱角依存性のみ使用
- 1成分モデルではオリオールがフィットできず、2成分モデルを使用

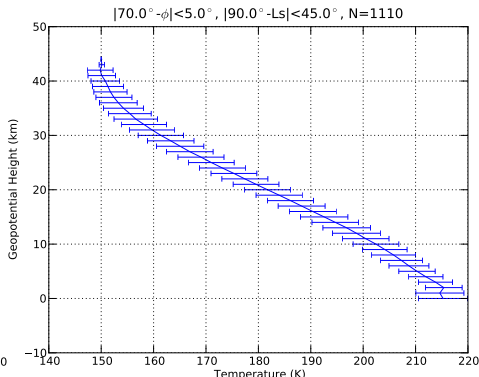
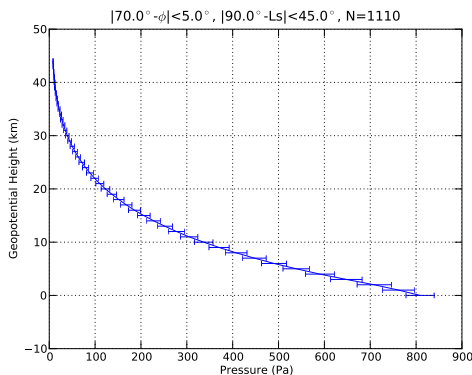
# 火星大気のエアロゾル



- 主なエアロゾルは地表面からのダスト
- 水氷雲, ドライアイス雲
- 火星の夕日は青く見える

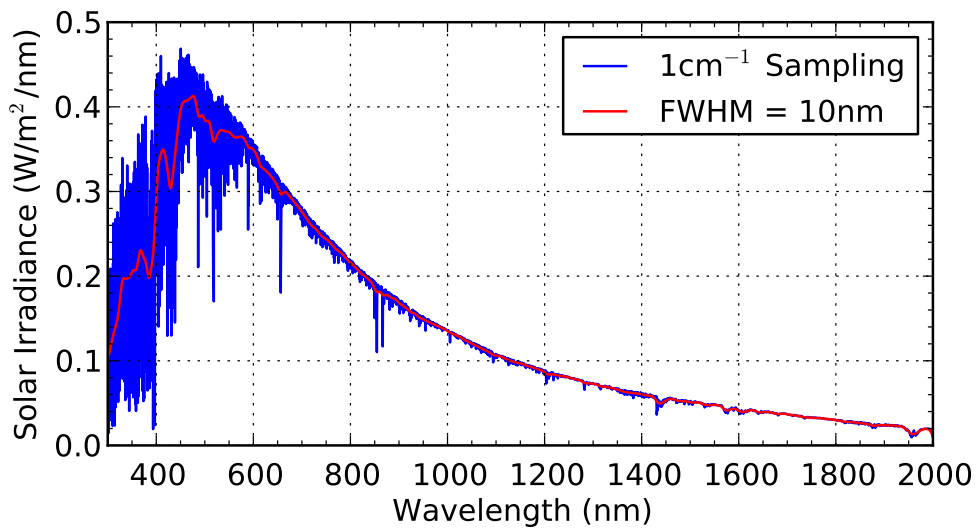
# 火星大気の放射伝達シミュレーション

- 太陽からの距離 (1.5 AU, 大気上端太陽放射照度は地球の0.4倍)
- 赤道半径 (3396 km)
- 気圧 (地表面で7 ~ 9 hPa), 気温 (地表面で $-143 \sim 0$  °C)
- 気体分子の混合比 ( $\text{CO}_2$  95%,  $\text{N}_2$  2.7%, Ar 1.6%,  $\text{O}_2$  0.13%, CO 0.07%)
- エアロゾル光学的厚さ (0.3 ~ 0.7)
- 地表面反射率 (0.2)



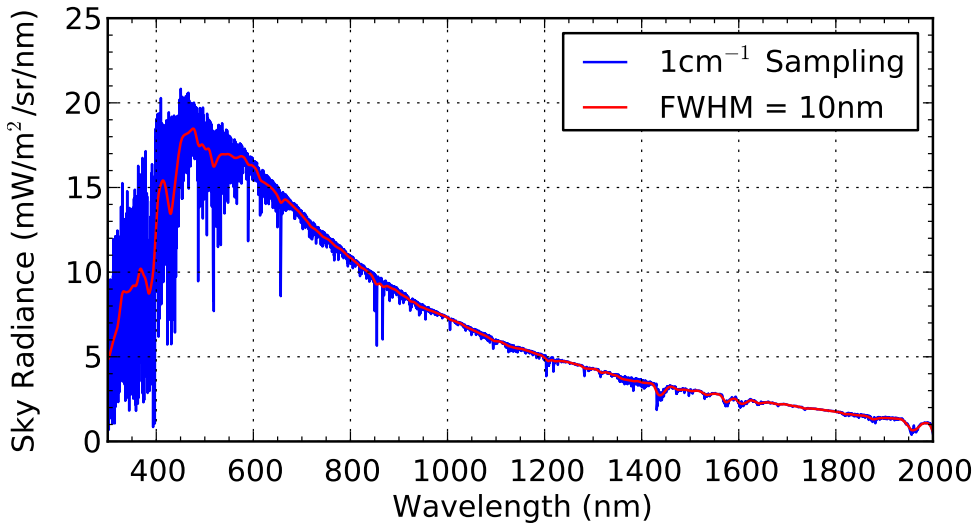


# 火星大気の放射伝達シミュレーション結果 (1)



● 太陽天頂角: 60°

# 火星大気の放射伝達シミュレーション結果 (2)



- 太陽天頂角: 60°, 視線天頂角: 30°

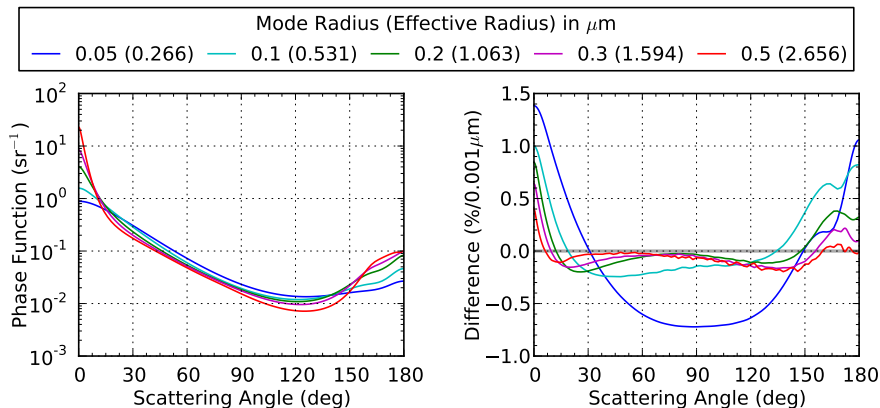
# 太陽光スペクトルを利用した火星エアロゾル特性の導出

To be done ...

- 1成分, または2成分で適当な複素屈折率, 粒径分布を仮定してエアロゾルモデルを構築する
- 選択した波長帯, 散乱角の散乱光スペクトルを計算する
- 適当なノイズを加えた擬似観測スペクトルを作成する
- エアロゾルモデルのパラメータを逆解析により求める.  
必要ならばいくつかのパラメータは固定値とする
- 最適化しないパラメータを真値からずらした場合, 得られる解の誤差がどうなるか調べる
- 選択する波長帯, 散乱角を変えた場合に得られる解の誤差がどうなるか調べる
- ダストの代わりに水氷雲, ドライアイス雲を仮定した場合にどうなるか調べる

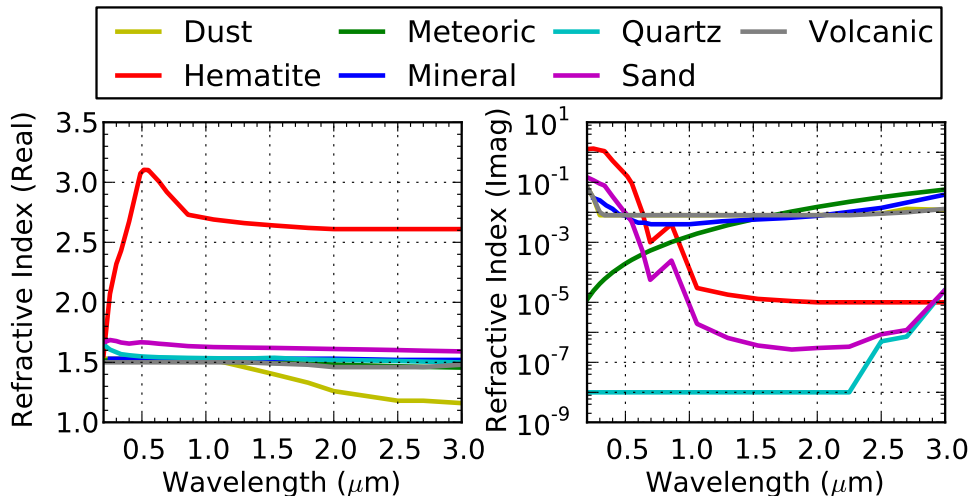


# 散乱角のとり方



- 散乱角 $\sim 20^\circ$ に変曲点
- 散乱角 $\leq 20^\circ$ の前方散乱で3点（例えば $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ）
- $20^\circ < \text{散乱角} < 120^\circ$ で3点（例えば $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ）
- モード半径が $0.5 \mu\text{m}$ より大きいエアロゾルを検出する場合は散乱角 $< 5^\circ$ を見る必要あり

# ダストの複素屈折率



出典：GEISA-2003 Aerosols Sub-Database

- 実数部は赤鉄鉱（Hematite）を除き  $1 \mu\text{m}$  以下でほぼ1.53
- 虚数部は  $1 \mu\text{m}$  以下で流星塵（Meteoric）だけ特異な振る舞いをしている

## まとめと今後の課題




### まとめ

- 直達・散乱太陽光スペクトルからエアロゾル特性を導出する方法について説明した
- 火星エアロゾル測定のための波長帯, 散乱角の選び方について考察を行った

### 今後の課題

- シミュレーションデータを用いて火星エアロゾル特性導出を行い, どの程度の精度で求まるか調べる
- 液晶チューナブルフィルタがエアロゾル観測に使えるかどうか調べる
- 補助的データ (エアロゾル高度プロファイル, 地表面アルベド等) の誤差が導出結果に与える影響を調べる

# References

-  [N. Manago, H. Kuze](#)  
Determination of tropospheric aerosol characteristics by spectral measurements of solar radiation using a compact, stand-alone spectroradiometer  
[Appl. Opt., 49\(8\):1446–1458, 2010.](#)
-  [N. Manago, S. Miyazawa, Bannu, H. Kuze](#)  
Seasonal variation of tropospheric aerosol properties by direct and scattered solar radiation spectroscopy  
[J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 112:285–291, 2011](#)
-  [N. Manago, S. Miyazawa, K. Kuriyama, H. Kuze](#)  
Aerosol optical properties derived from solar spectrum measurements and their application to atmospheric correction of satellite data  
[Proc. of SPIE Vol. 7857 785709](#)