

# 火星のダストと雲に関するレビュー ～着陸機によるカメラ観測～

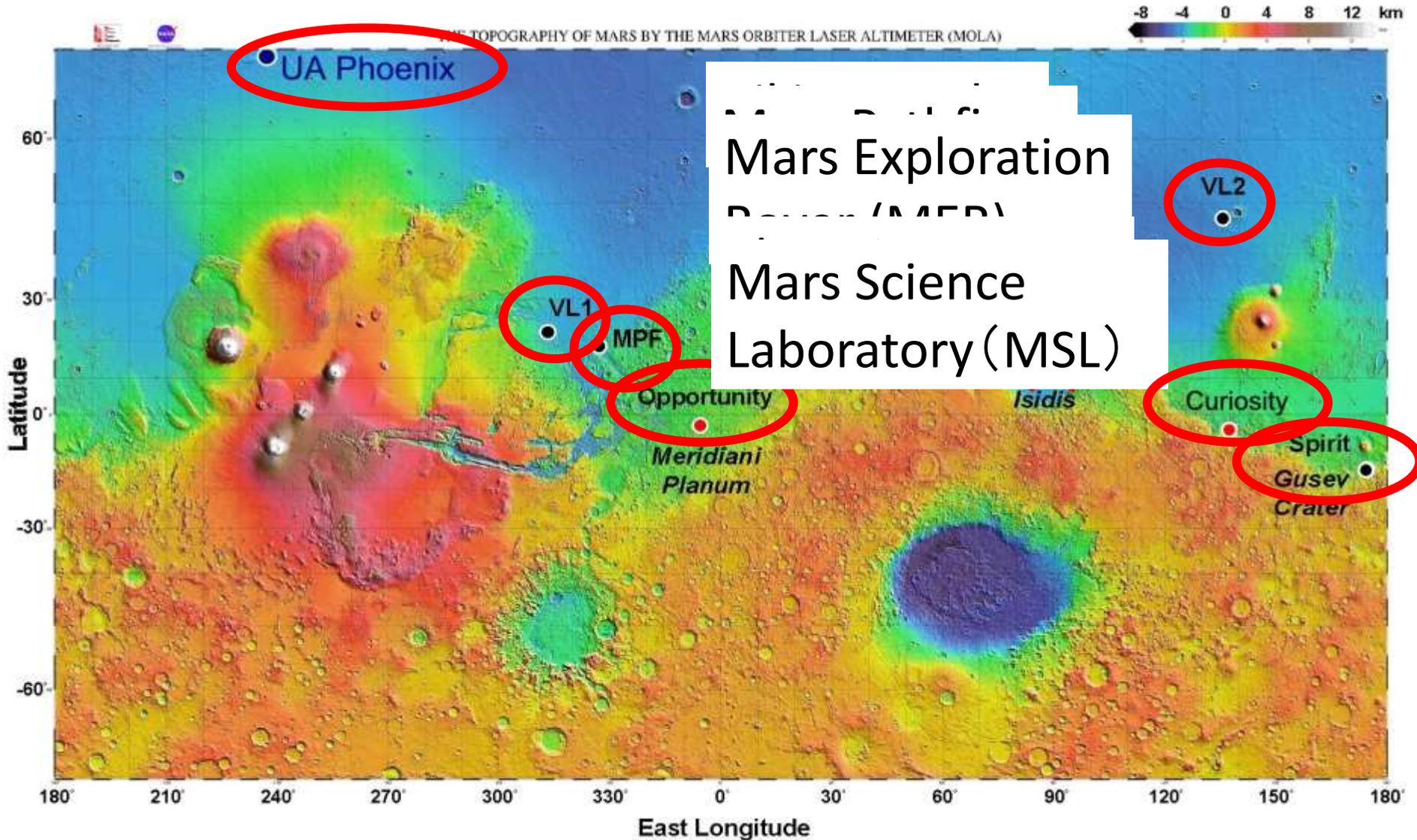
野口 克行

(奈良女子大学 研究院自然科学系)

# 本発表の目的

- 日本で検討が進められている火星着陸機計画 MELOSにおいて、工学用ナビカメラによる気象観測（特にダスト観測）の可能性が議論されている。
- 本講演では、過去の火星着陸機搭載カメラによる気象観測例を紹介し、今後どのような観測をするべきかの議論に資することを目的とする。

# 過去の火星着陸機と着陸地点



# 過去の火星着陸機と搭載カメラ

- Viking (1976): **Imaging Camera**
- Mars Pathfinder (1997): **IMP**
- Mars Exploration Rover (MER), Spirit and Opportunity (2004): **Pancam**
- Phoenix (2008): **SSI**
- Mars Science Laboratory (MSL), Curiosity (2012): **Mastcam**

# 各カメラ スペック比較

着陸機 カメラ名	観測開始 年	検出器 素子数	波長	FOV EL × AZ	SN比
Viking 1,2 Imaging Camera	1976	フォトダイオード, 12	6バンド 400-1100nm	100 × 342.5度	200-320
Pathfinder IMP	1997	CCD、 248 × 256	8バンド 450-990nm	14 × 14度	< 350
MER Pancam	2004	CCD、 1024 × 1024	16バンド 400-1100nm	16 × 16度	>200
(参考)MER Navcam	2004	CCD、 1024 × 1024	1バンド 600-800nm	45 × 45度	>200
Phoenix SSI	2008	CCD、 1024 × 1024	21バンド 450-1000nm	14 × 14度	>100
MSL Mastcam-34	2012	CCD 1200 × 1600	7バンド 440-1034nm	15 × 20度	
MSL Mastcam-100	2012	CCD 1200 × 1600	8バンド 440-1035nm	5.1 × 6.8度	

# 何が観測されてきたか？

- ダスト
  - 光学的厚さ
  - 平均粒径、粒径分布関数の幅など
  - 散乱位相関数
  - 複素屈折率
  - 鉛直分布
  - 時間変化(季節変化・日内変化)
- 水蒸気量・雲

# Mars Pathfinder (MPF)

1996年12月4日打ち上げ、1997年7月4日着陸(19.33N, 33.55W)

- IMP (Imager For Mars Pathfinder)
- APXS (Alpha Proton X-Ray Spectrometer)
- ASI/MET (Atmospheric Structure Instrument/Meteorology Package)

# Mars Pathfinder (MPF)

## IMPカメラによる観測

- ダスト
  - 太陽直達光・天空光観測によるダスト特性導出
- 水蒸気
  - 太陽直達光観測による水蒸気量導出

Pathfinderの着陸地点の緯度・経度は、Viking 1に近い

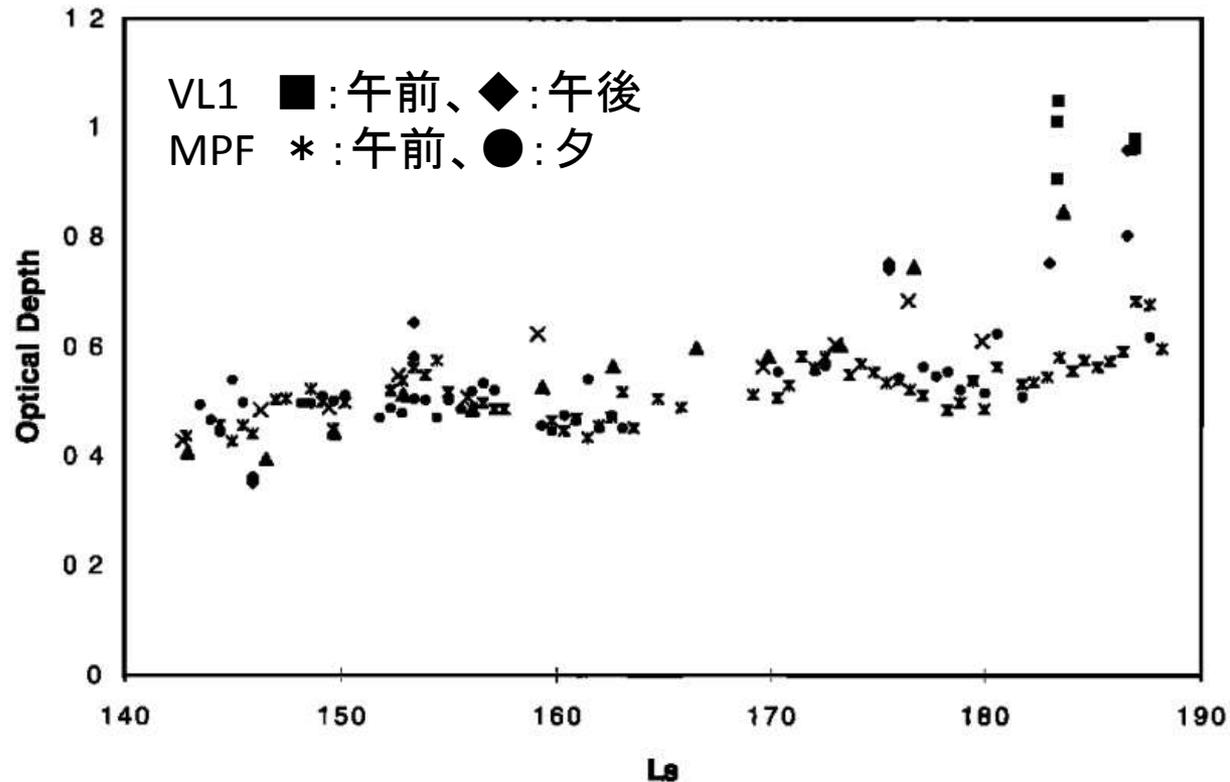
# MPF 直達光によるダスト観測

- 太陽の直接観測（直達光観測）による光学的厚さ $\tau$ の導出 [Smith and Lemmon, 1999]
- Beers' lawによる導出
$$I = I_0 \exp(-\tau \eta)$$

$I$ : 観測された太陽光強度、 $I_0$ : 大気圏外太陽光強度、 $\eta$ : エアマスファクター（平行平面大気なら $1/\cos(\text{SZA})$ ）
- 使用波長[nm]:  
450(青), 670(赤), 883・989(近赤)

# 直達光観測によるダスト光学的厚さ導出 例

- MPFと着陸地点の近いVL1と結果を比較
- VL1とMPFの結果が驚くほどよく一致 (Ls=183以降では差)
- それぞれの着陸機のデータも複数の火星年のデータを含むので、年ごとの変化が小さいと言える
- 典型的な光学的厚さ: 0.4-0.5 (Ls=145) から 0.6 (Ls=185)



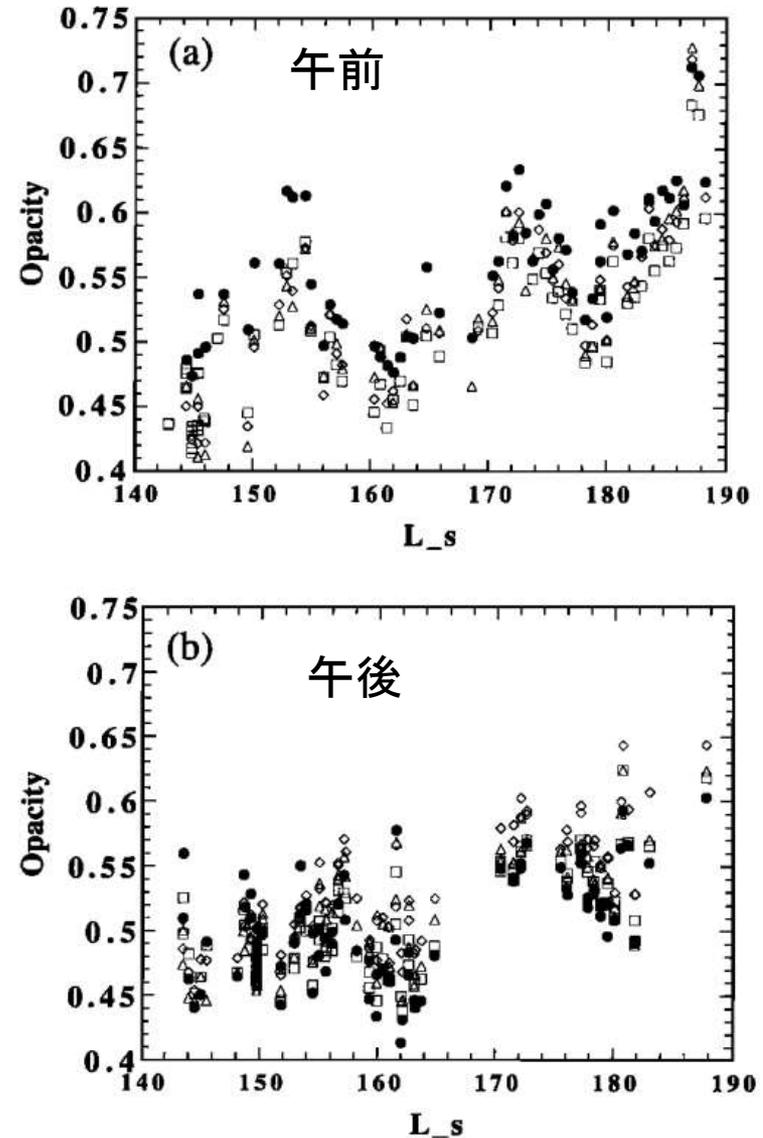
**Figure 1.** Viking Lander 1 data for two Martian years for both morning (squares, year 1; crosses, year 2) and afternoon (diamonds, year 1; triangles, year 2) observations [Colburn *et al.*, 1989]. These data taken in the Viking 670 nm solar filter are compared with similar data taken 20 years later by IMP in the same wavelength (asterisks, morning; circles, evening).

# 直達光観測による光学的厚さ導出 例(続き)

## 午前と午後の比較

- 光学的厚さは、午前中は波長間の差が大きい。特に青の $\tau$ が一番大きいことが多い。
- 午後や、青より長波長フィルタではあまり変化が無かった

→青の波長域では、小粒径(サブミクロンスケール)の水氷雲による影響( $\tau=0.14$ 程度)があったと思われる。

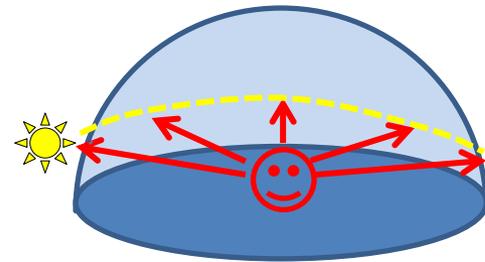


**Figure 5.** Opacity at (a) 0900–1000 LST and (b) 1300–1600 LST versus  $L_s$  for 450 nm (circles), 670 nm (squares), 883 nm (diamonds), and 989 nm (triangles).

# MPF 天空光によるダスト観測

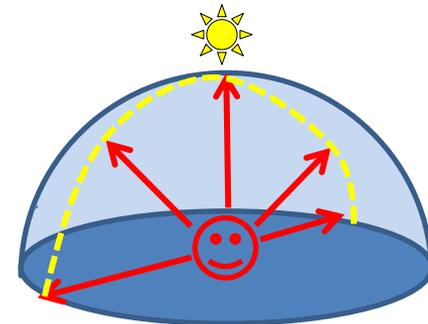
1. 朝夕の太陽高度が低い時に、同じ高度で全方位角を観測[Tomasko et al., 1999]

– 1997/07/15(MY23,  $L_s=148.1$ 、火星の5月に相当、Sol314)



2. 正午付近の太陽高度が高い時に、北から南に掛けて大円上を観測[Markiewicz et al., 1999]

– Sol56



# 解析概要

- 放射伝達モデルを用いて、天空光画像の光の強度を再現するように、ダスト特性の各パラメータ(平均粒径、粒径分布関数幅etc.)を合わせこむ
- ダスト粒径分布は、ガンマ分布[Hansen and Travis, 1974]を仮定
- 不規則形のエアロゾルによる単一散乱の解析
  - Pollack and Cuzzi [1980]の手法に従う。
  - 粒径分布、位相関数に関するパラメータの導出
- 2次元画像を利用して、画像が空のどこを見ているのか、正確な位置決め用いている(モデル計算と合うように)

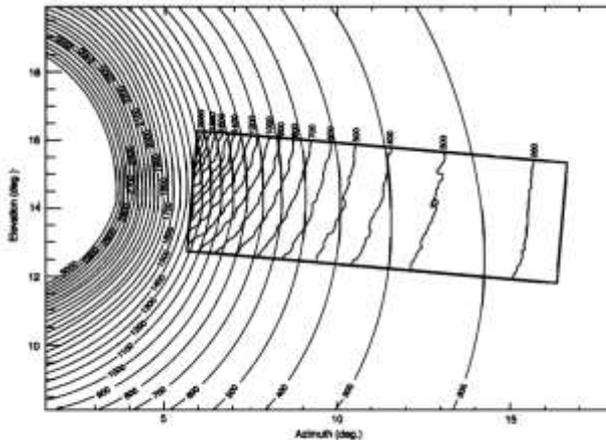


Figure 1a. Isophotes of model compared with isophotes of image at 444 nm located to the right of the Sun. The placement of the data is as expected for this filter from header pointing information.

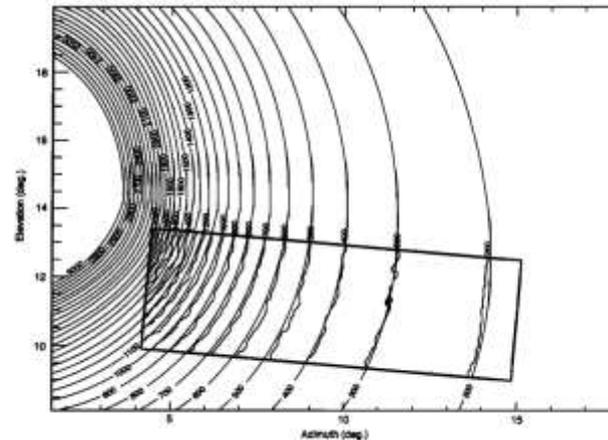


Figure 1b. Same as Figure 1a but for the pointing of the data frame shifted as required to fit a model of the sky brightness at the isophote corresponding to  $1000 \text{ W/m}^2 \mu\text{m sr}$ .

# 天空光観測による各パラメータ導出結果

## 1. 水平方向のスキャン観測による結果

Table 8. Parameters for Best Fitting Models at  $a = 1.6 \mu\text{m}$ ,  $b = 0.2$ ,  $n_r = 1.5$

Wavelength, nm	Imaginary Index	Single Scattering Albedo	Column Number Density, $\times 10^6 \text{ cm}^{-2}$	Tau Extinction	$G$	Theta <sub>min</sub> , deg	Asymmetry Parameter $g$
443.6	0.0122	0.755	4.6	0.485	115	138	0.777
670.8	0.0023	0.949	4.6	0.528	70	145	0.677
896.1	0.0036	0.940	4.4	0.528	120	150	0.706
965.3	0.0042	0.937	4.5	0.539	75	164	0.699

## 2. 鉛直方向のスキャン観測による結果

Table 2. The Optical Depth and Single Scattering Properties Derived from Sol 56 Data

$\lambda \mu\text{m}$	$\tau$	$r_{eff}$	$\nu_{eff}$	$b$	$\theta_{min}$	$n_i$	$Q_{ext}$	$Q_{sca}$	$\langle \cos \theta \rangle$
443.6	0.56	1.45	0.28	0.042	170	0.015	2.80	2.09	0.77
481.0	0.60	1.66	0.30	0.051	140	0.009	2.84	2.30	0.75
670.8	0.59	1.60	0.15	0.052	160	0.0032	3.00	2.80	0.73
896.1	0.61	1.85	0.25	0.046	220	0.0038	3.10	2.89	0.74
965.3	0.60	2.00	0.26	0.044	230	0.0024	3.20	3.07	0.72

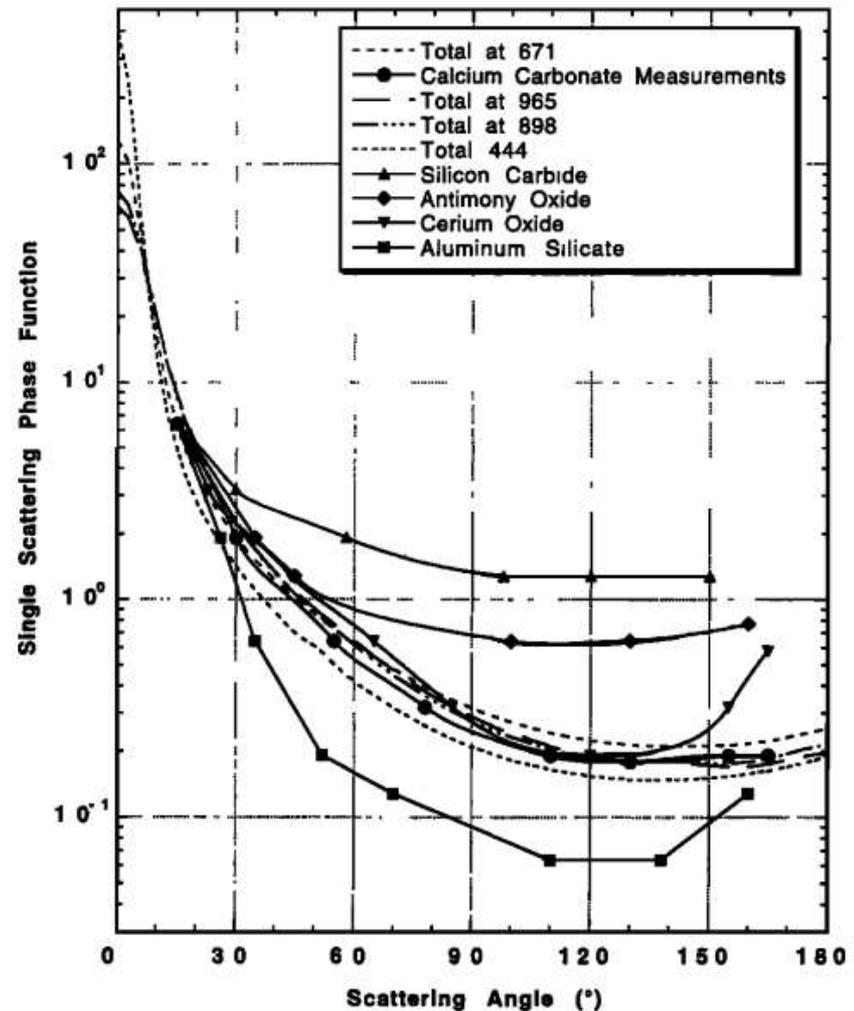
# 散乱位相関数と組成推定

火星の天空光観測で推定された散乱位相関数を、他の物質のものと比較

- Silicon Carbide
- antimony oxide
- cerium oxide
- calcium carbonate
- aluminum silicate



炭酸カルシウムが一番よく一致



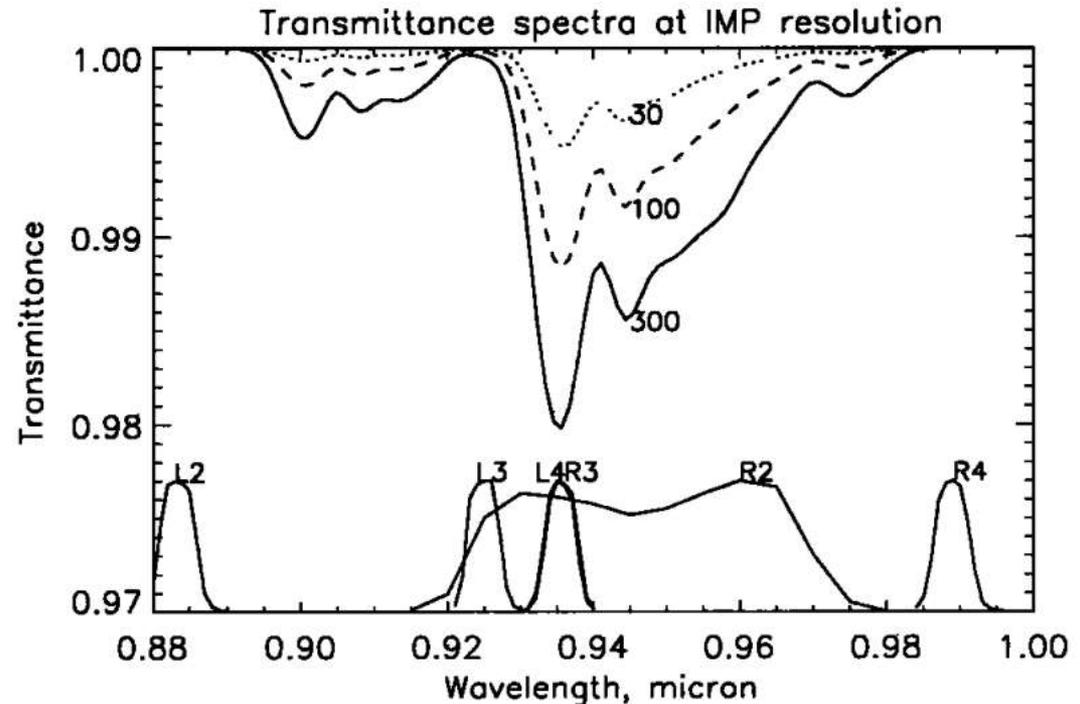
**Figure 21.** The total single scattering phase functions derived for four wavelengths for  $r_{\text{eff}} = 1.6 \mu\text{m}$  and  $b = 0.2$ . The phase functions at 444 nm (short dashes), 671 nm (medium dashes), 898 nm (dots and dashes), and 965 nm (long dashes) are shown. Also shown for comparison are the phase functions determined from laboratory measurements by *West et al.* [1997] for mineral powders of silicon carbide (triangles), antimony oxide (diamonds), cerium oxide (inverted triangles), calcium carbonate (dots), and aluminum silicate (squares).

# MPF 水蒸気量の観測

火星地表面における水蒸気量観測は、MPFが初めて

## 観測手法

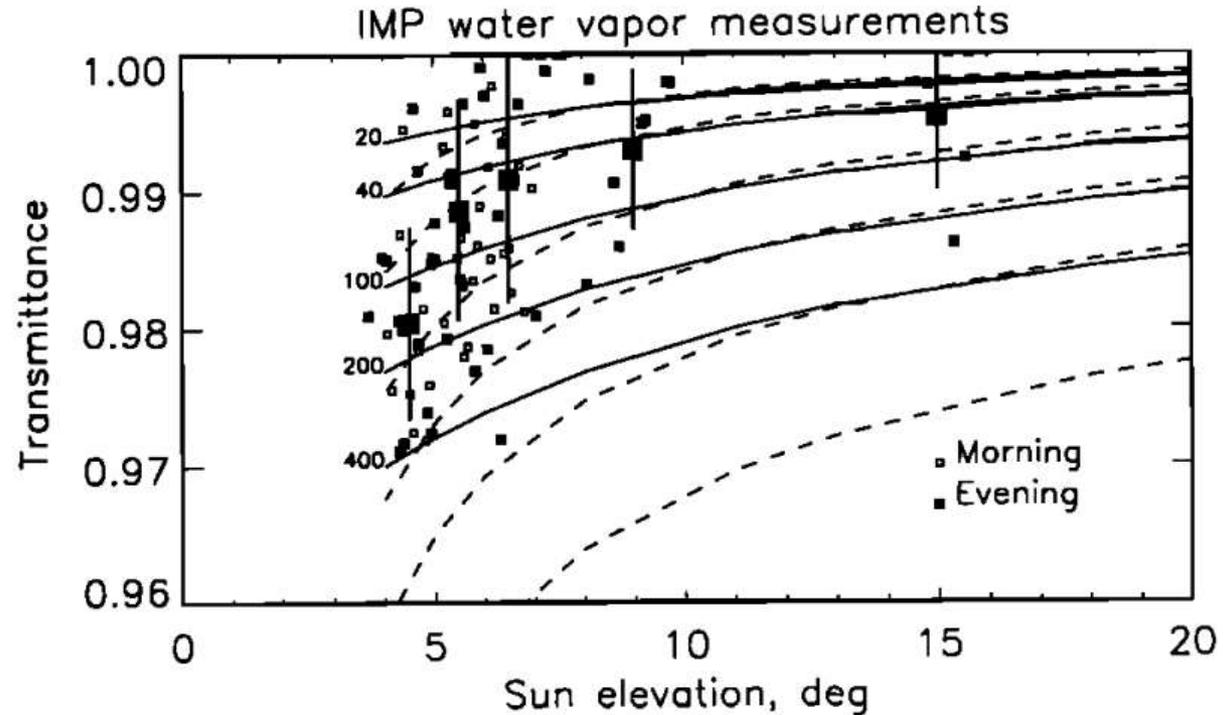
- 低仰角における太陽直達光の観測
- 水蒸気の吸収のある波長と連続吸収帯との差(比)から、水蒸気の透過率を計算



**Figure 1.** Bandpasses of the IMP water vapor filters (curves labeled L2,..., R4). Solid, dashed, and dotted lines at the top show the transmittance spectra of the dust-free Martian atmosphere calculated for air mass 10. Numbers at the curves denote H<sub>2</sub>O mixing ratio in units of parts per million (ppm). Corresponding H<sub>2</sub>O column densities are 2.5, 8, and 25 pr  $\mu\text{m}$ .

# 直達光観測による水蒸気透過率 導出

- 鉛直分布の仮定
  - 実線→鉛直一様分布
  - 破線→鉛直不均質分布  
高度0-1kmにのみ水蒸気が存在すると仮定
- 太陽仰角が小さくなるにつれ、観測では水蒸気の透過率が急激に減少
- 観測により近いのは、不均質分布を仮定した場合
- この水蒸気が集中している層の厚さは、ほぼ境界層の厚さ(1-3km)と等しい



**Figure 5.** Water vapor transmittance measured by IMP. Small open and solid rectangles show the individual determinations of transmittance in the morning and evening, respectively. Large rectangles and error bars are the mean values of transmittance and its standard deviation within the bins of  $1^\circ$  in elevation. Solid lines are the same as in Figure 4 and show the transmittance calculated for the uniform vertical distribution of water vapor. Dashed lines show the transmittance calculated for the nonuniform model with water vapor confined to a near-surface layer 1 km thick.

# Mars Exploration Rover (MER、Spirit and Opportunity)

Spirit: 2003年6月10日打上、2004年1月4日着陸(14.57S, 175.48E)

Opportunity: 2003年7月7日打上、2004年1月25日着陸(1.95S, 354.47E)

- **Pancam (Panoramic Camera)**
- MI (Microscopic Imager)
- Mini-TES (Miniature Thermal Emission Spectrometer)
- MB (Mo<sup>ss</sup>bauer Spectrometer)
- APX (Alpha Particle X-Ray Spectrometer)
- RAT (Rock Abrasion Tool)
- Magnet Array

# MER (Spirit and Opportunity)

## Pancamカメラ

- 直達光観測：ダスト光学的厚さ導出
- 天空光観測：
  - ダストパラメータ(粒径、複素屈折率等)
  - スケールハイト(鉛直分布)に関する情報

# 直達光観測による光学的厚さ導出

- 440nmと880nmで観測
- 基本的には、日内変化は観測されず
  - Opportunityにて、午後に $\tau$ が増大することがあり→局所的なダスト巻き上げかも
- 波長依存性: 440nmチャンネルに赤の「洩れ」があり、今回のデータでは議論が難しい

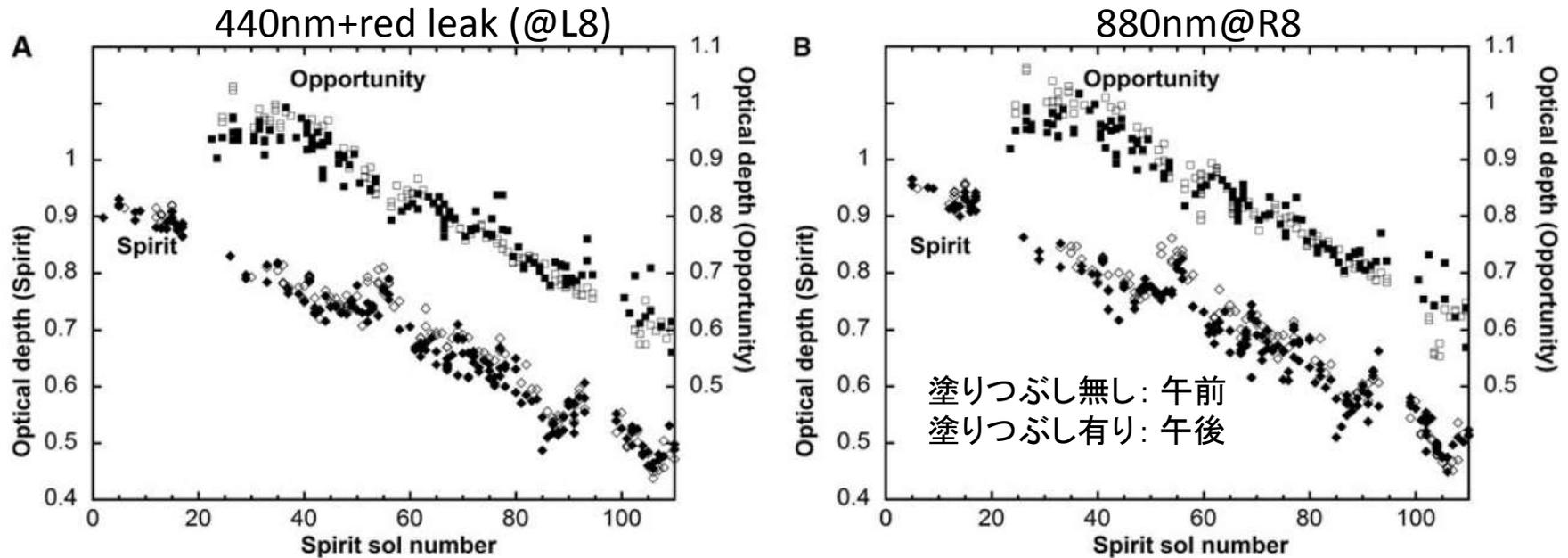


Fig. 1. Visible optical depth. Atmospheric optical depth observed with Pancam's (A) L8 filter (440 nm + red leak) and (B) R8 filter (880 nm) is shown for Spirit (diamonds) and Opportunity (squares). The closed symbols represent afternoon measurements for each sol, and the open symbols represent morning measurements for each sol. The Opportunity scale is displaced upward by 0.1 for clarity. The observations are shown

as a function of Spirit sol number, defined as 1 at Spirit's landing and 20.5 at Opportunity's landing. Sol 1 corresponds to  $L_s = 328^\circ$ , sol 61 to  $L_s = 0^\circ$ , and sol 110 to  $L_s = 24^\circ$ . The gap in data for Spirit beginning at sol 18 was due to a rover anomaly; the gap in data for both rovers beginning at about sol 95 was due to a pause in operations to allow a software upload.

# 天空光観測による粒径・粒径分布幅導出

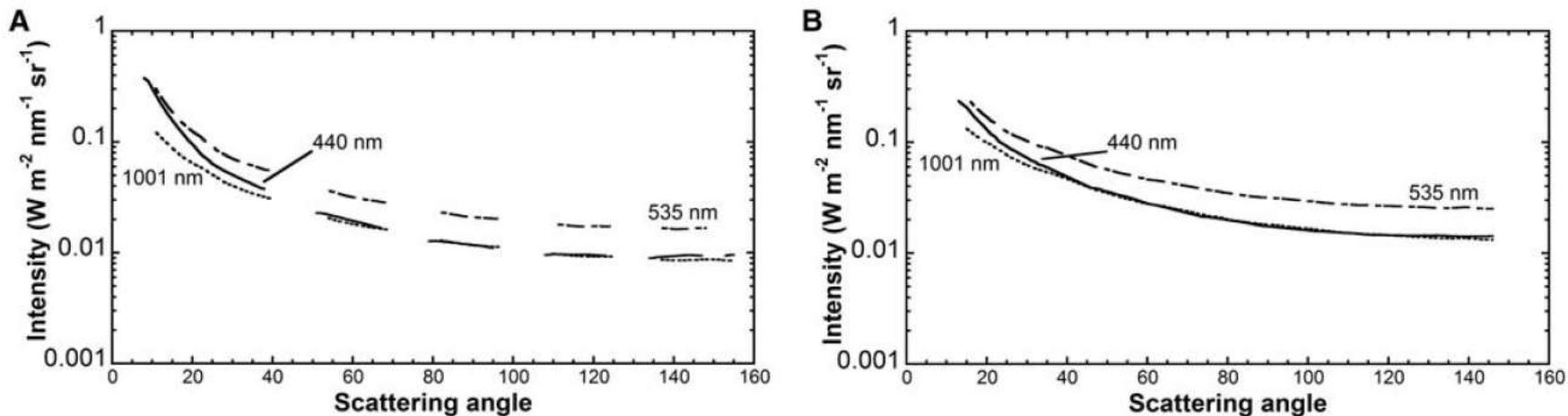


Fig. 2. Sky radiance. The sky intensity as a function of scattering angle for low-Sun sky surveys by Spirit on sol 49 (A) and Opportunity on sol 33 (B) is shown for three of the six colors observed: 440 nm (solid line), 535 nm (long-dashed line), and 1001 nm (short-dashed line). All observations

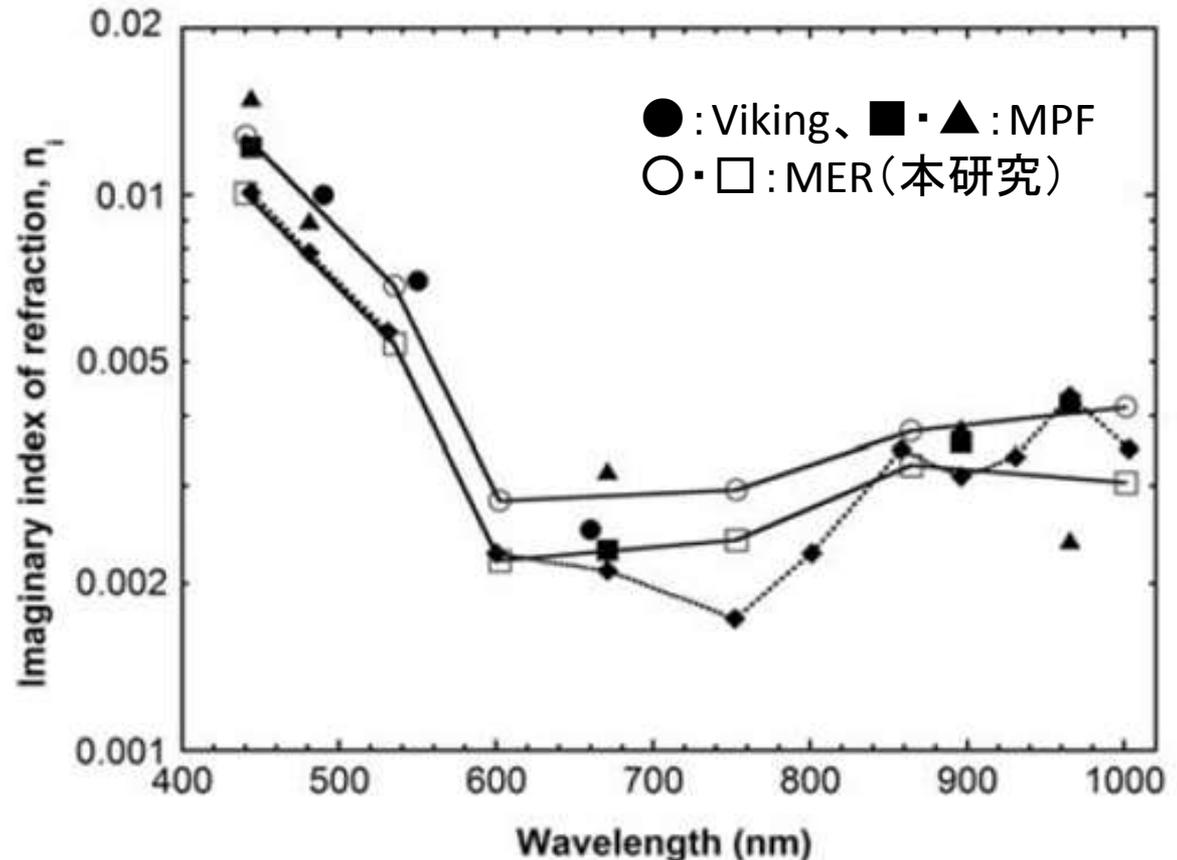
between 11.5° and 12.5° elevation were averaged over 1° scattering angle intervals to obtain the intensity shown. Each discrete group represents a subset of one 128- by 128-pixel image, except that three separate images contributed the group with the lowest scattering angles.

- ガンマ分布を仮定。分布幅は0.2で固定
- 粒径のみを変化させ、観測された天空光分布にフィッティング
- 各粒径・波長において、さらに下記のパラメータを変化させた。
  - 地表面反射率
  - 複素屈折率の虚部(吸収)
  - Gと $\Theta_{\min}$ (位相関数を表すパラメータ)
- 粒径のベストフィットは、  
Spirit:  $1.47 \pm 0.21 \mu\text{m}$ 、Opportunity:  $1.52 \pm 0.18 \mu\text{m}$

# 天空光観測で得られた複素屈折率(虚部)

過去の観測 (Viking、MPF) と整合的  
ダストの吸収は、400-600nmで強く、600-750nmに極小がある

Fig. 3. Imaginary index,  $n_i$ . The value of  $n_i$  derived from the Spirit (open circles, solid line) and Opportunity (open squares, solid line) sky surveys is shown as a function of wavelength. For comparison, previously determined values of  $n_i$  of martian atmospheric dust are shown, based on Viking sky surveys (22) (filled circles), Pathfinder low-Sun sky surveys (23) (filled squares) and high-Sun sky surveys (24) (filled triangles), and an analysis of a single 12-filter image set (27) (filled triangles, dotted line).



# ダストの鉛直分布に関する知見

- 低仰角 (<10度) の太陽直達光を観測
  - 下層2, 3スケールハイト分の高さの大気に感度有
- ダストの鉛直分布が高度に対してスケールハイト依存性を持つ(つまり、指数関数的?)と仮定して、放射伝達モデル計算と比較

## スケールハイトの比較

- 見積もられたダストのスケールハイト:  
11.56 ± 0.62 km
  - 大気圧のスケールハイト: 11.1 km
- ほぼ一致、ダストが良く混ざっているという予想と  
コンシステント

# MER Pancam 校正について

- 絶対値校正：放射輝度値で10%以下
  - フライト前の絶対値校正の正確度は、7%以下
  - フライト中（火星着陸後の観測中）  
天空光の観測結果を用いる  
特定の観測ジオメトリやダスト混濁度（光学的厚さ）の際の観測結果と、モデル計算結果との比較
    - モデルと観測の差
      - Spirit:  $0.98 \pm 0.06$ 、Opportunity:  $1.11 \pm 0.08$
- 相対値校正：校正ターゲットを用いた場合
  - フィルタ間：3%以下
  - ピクセル間：1%以下

## 2.9. Accuracy and Precision of the Calibration

[90] Uncertainties in the RAD calibration pipeline are difficult to quantify for the Pancam data, because they represent a complex combination of errors accumulated by the bias, dark current, and flatfield modeling/correction processes as well as the uncertainties in the preflight integrating sphere radiance scaling procedure. Based on preflight calibration data analysis, we estimated that our typical absolute radiance uncertainty would be  $\leq 7\%$ , an assumption that was validated by independent calibrated diode measurements from an engineering model Pancam [Bell *et al.*, 2003]. In flight, Lemmon *et al.* [2004] attempted to estimate the level of uncertainty of calibrated Pancam data by comparing calibrated radiances from sky images to their model of expected sky radiance for the specific observing geometries and dust opacities encountered. For the Pancam filters at 432, 535, 601, 753, 864, and 1009 nm, they found an average difference between modeled and measured radiances of  $0.98 \pm 0.06$  for Spirit and  $1.11 \pm 0.08$  for Opportunity. Given the uncertainties and assumptions inherent in their sky model, these results appear to indicate that the absolute radiance calibration of Pancam flight data from Mars, calibrated using the methods and data files described above, is probably at least accurate to within the  $\sim 10\%$  level, and is probably actually slightly more accurate, especially for the longer wavelength, higher SNR filter observations.

**Bell III et al. [2006, JGR]  
In-flight calibration and  
performance of the Mars  
Exploration Rover  
Panoramic Camera  
(Pancam) instruments**

# Phoenix

2007年8月4日打ち上げ、2008年5月25日着陸(68.22N, 234.25E)

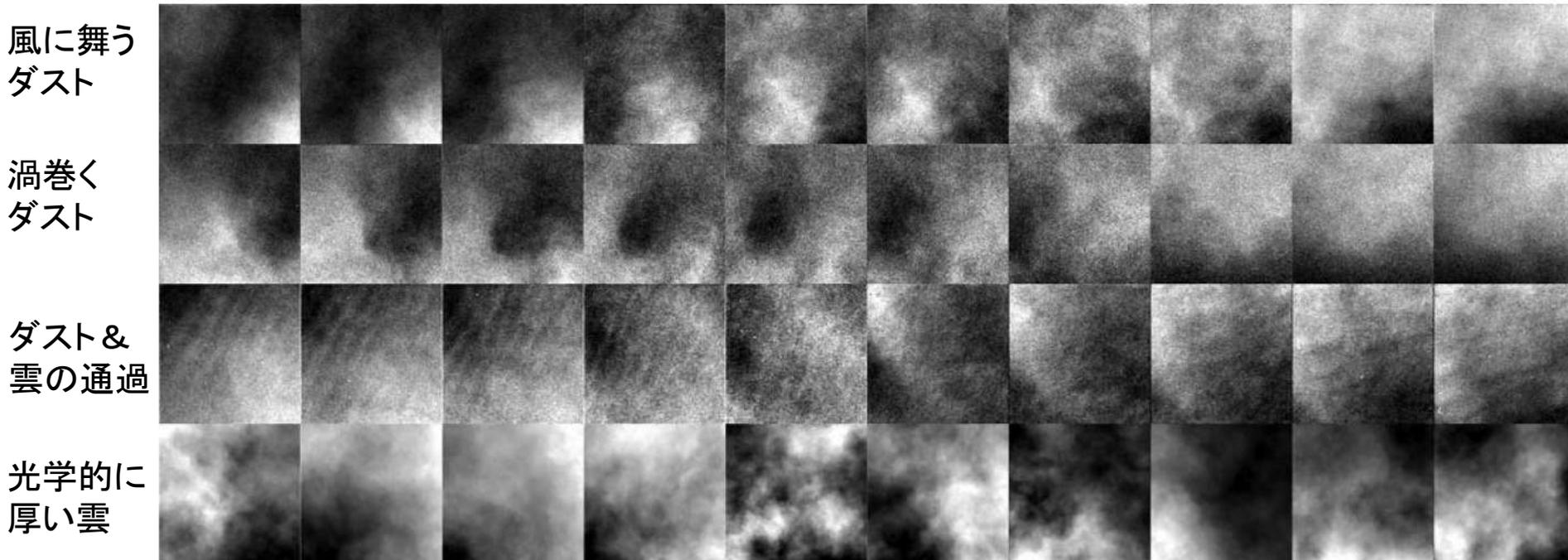
- SSI (Surface Stereo Imager)
- MECA (Microscopy, Electrochemistry, and Conductivity Analyzer)
- TECP (Thermal and Electrical Conductivity Probe)
- RAC (Robotic Arm Camera)
- TEGA (Thermal and Evolved Gas Analyzer)
- MARDI (Mars Descent Imager)
- MET (Meteorological Station)
- Lidar
- Telltale(風見)

# Phoenix: SSIカメラによる観測

- 連続撮影(アニメーション)が可能
- 天頂と地平線付近(低仰角)を撮影
  - 風向・風速導出(天頂観測)
    - 風に流されている構造がどの高度にあるのか、ライダーによる高度計測が前提
  - 光学的厚さの観測(天頂・地平線付近の観測)
- 雲形状分類
- Phoenixでは、SSIカメラ観測以外にもライダーによる鉛直分布観測を実施(後述)

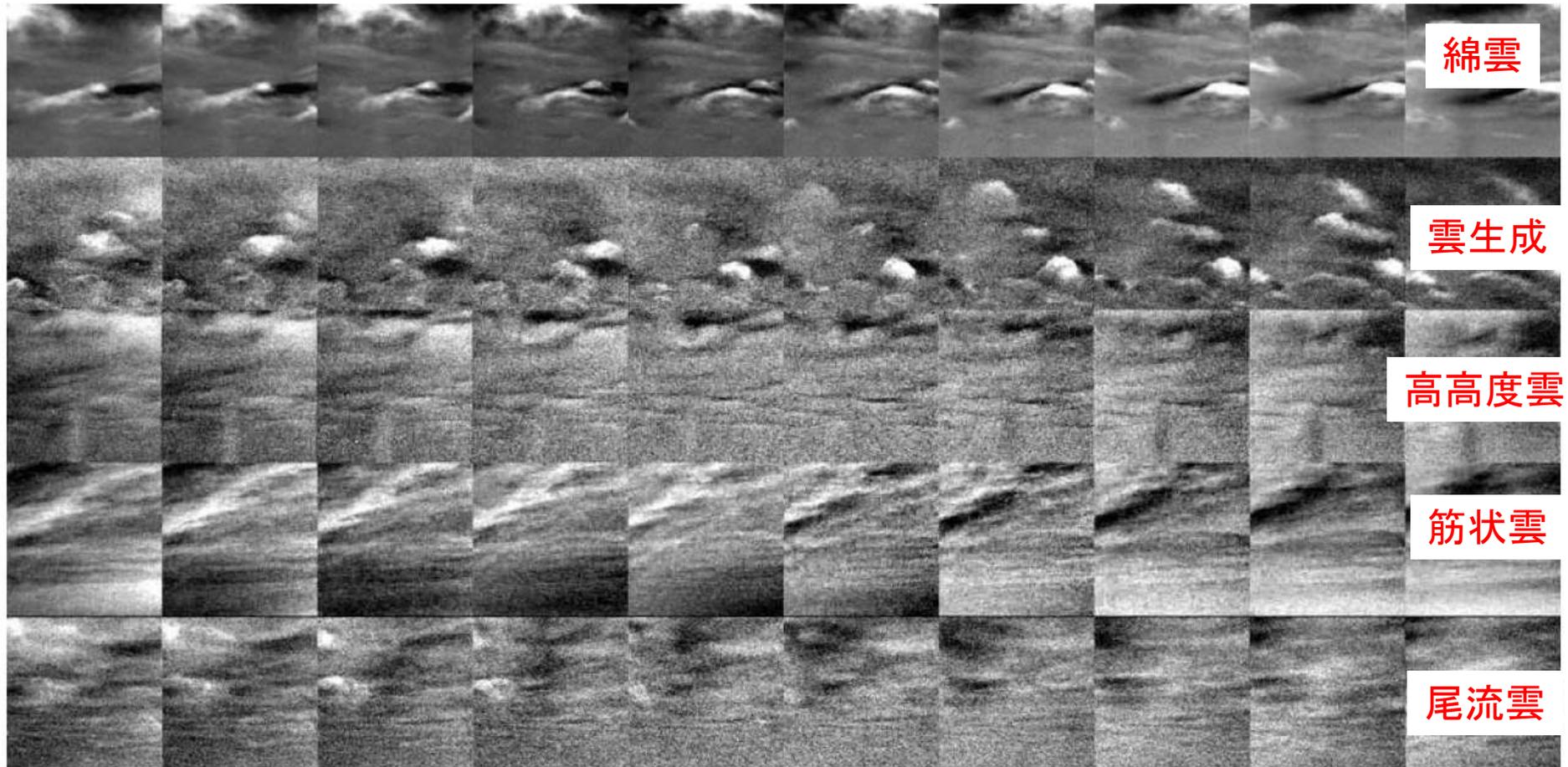
# 連続撮影(アニメーション)例

時間経過



**Figure 4.** Ten-frame zenith sequences displaying several different observed behaviors. Each row is a single sequence proceeding from the (left) earliest captured image to the (right) last. (top to bottom) Blowing dust on sol 008, swirling dust on sol 009, narrow and optically thin cloud streets with blowing dust on sol 101, and optically thick cloud from sol 141. All image sequences are SSI right eye blue filter images.

# 雲の連続画像例



**Figure 5.** Ten-frame suprahorizon sequences displaying several types of clouds observed. Each row is a single sequence proceeding from the (left) earliest captured image to the (right) last. (top to bottom) Fluffy clouds taken on sol 094, forming clouds from sol 112, thin high-altitude cloud from sol 078, streaky cloud from sol 084, and virga-like features from sol 080 are displayed. All image sequences are SSI right eye blue filter images.

# 雲の形状分類

地球の雲の分類方法を参考に行なわれた

**Table 2.** First Look Suprahorizon Data Set

Sclock	Sol	LTST	Filter(s)	Classification <sup>a</sup>
900575810	49	1638	LC	NA <sup>b</sup>
901182062	56	1233	L2	Cirrus/Cirrocumulus
901182119	56	1234	R8	Cirrus/Cirrocumulus
901449939	59	1259	LC/RC	Cirrus
901714257	62	1227	LC/RC	NA <sup>b</sup>
903035936	77	0947	LC/RC	Cirrus
903124956	78	0951	LC/RC	Cirrocumulus
903143142	78	1446	LC/RC	Stratocumulus/Cirrostratus
903163947	78	2024	LC/RC	Cirrocumulus
903310376	80	1159	LC/RC	Stratocumulus/Cirrostratus
903323485	80	1532	LB/RB	Stratocumulus/Cirrostratus
903327504	80	1637	LC/RC	Stratocumulus/Cirrostratus

# 過去の火星ダスト観測による 粒径・粒径分布幅まとめ

Tomasko et al. [1999, JGR]

**Table 1.** Summary of Measurements of Mean Cross-Section-Weighted Size and Variance of Martian Aerosols

Author	Parameter	$\langle r_{\text{eff}} \rangle, \mu\text{m}$	$v_{\text{eff}}$	Comment
<i>Pollack et al.</i> [1977]	$a = 0.4, b = 0.15$	<del>0.4</del>	<del>0.15</del>	superseded by <i>Pollack et al.</i> [1995] due to lack of vignetting correction
<i>Toon et al.</i> [1977]	$\alpha = 2, \gamma = 0.5,$ $r_m = 0.4$	( 2.75 )	0.42 )	observations at 5–40 $\mu\text{m}$ wavelength from Viking orbiter
<i>Pollack et al.</i> [1979]	same as <i>Toon</i> [1977]	<del>2.5</del>	<del>0.4</del>	superseded by <i>Pollack et al.</i> [1995] due to lack of vignetting correction
<i>Drossart et al.</i> [1991]	$\alpha = 1, \gamma = 1,$ $r_m = 0.31$	1.24 (somewhat uncertain)	0.25	spectra from $\sim 1$ to 3 $\mu\text{m}$ wavelength from outside the atmosphere from the Phobos mission
<i>Korablev et al.</i> [1993]	$\alpha = 2, \gamma = 1$	0.8 at 25 km, 1.6 at 15 km	$0.2 \pm 0.1$	solar occultations at 1.9 and 3.7 $\mu\text{m}$ wavelength from Phobos mission
<i>Pollack et al.</i> [1995]	lognormal	$1.85 \pm 0.3, 1.52 \pm 0.3$	$0.5 \pm 0.3$	Viking lander result replaces <i>Pollack et al.</i> [1977, 1979] papers
<i>Clancy et al.</i> [1995]	$\alpha = 1, \gamma = 0.3,$ $r_m = 0.014$	1.8	0.997 (given as 0.8)	includes observations from the ultraviolet to the thermal IR to constrain width of size distribution
This work	$a = 1.6, b = 0.2\text{--}0.5$	$1.6 \pm 0.15$	0.2–0.5 or more	preliminary result from IMP observations; no data from ultraviolet or thermal IR included

Lemmon et al. [2004]

$1.47 \pm 0.21 \mu\text{m}$

0.2(固定)

Spirit

Lemmon et al. [2004]

$1.52 \pm 0.18 \mu\text{m}$

0.2(固定)

Opportunity

Komguem et al. [2013]

1.2–1.4  $\mu\text{m}$

Phoenix, lidar

# 議論：ダスト光学的厚さ 日内変化

- 日内変化ありと結論
  - Viking:
  - Pathfinder: 朝は水氷雲の影響で短波長で増加  
←ダスト自体の日内変化は無い、とも言える
- 日内変化は無いと結論
  - MER: 日内変化は、測器の温度依存性で説明可  
(ただし、午後にダスト巻き上げと思われる局所的現象はあるかも)

# 今後のMELOSカメラ観測に向けて

- 過去の観測の時空間パラメータは、断片的
    - 限られた緯度・経度・Ls・LTST
    - 南半球中・高緯度は、過去に着陸無し
  - 工学ナビカメラで何ができるか？
    - 天空光観測メインか？（直達光は減光しないと無理）
    - 波長は1波長でも何とか可、できれば2波長欲しい
    - 散乱角は90度程度までは取れそう？
- 過去の観測に基づき、変化の少ないパラメータ(粒径等)は仮定して、変動の大きなものを求めるとよい？