

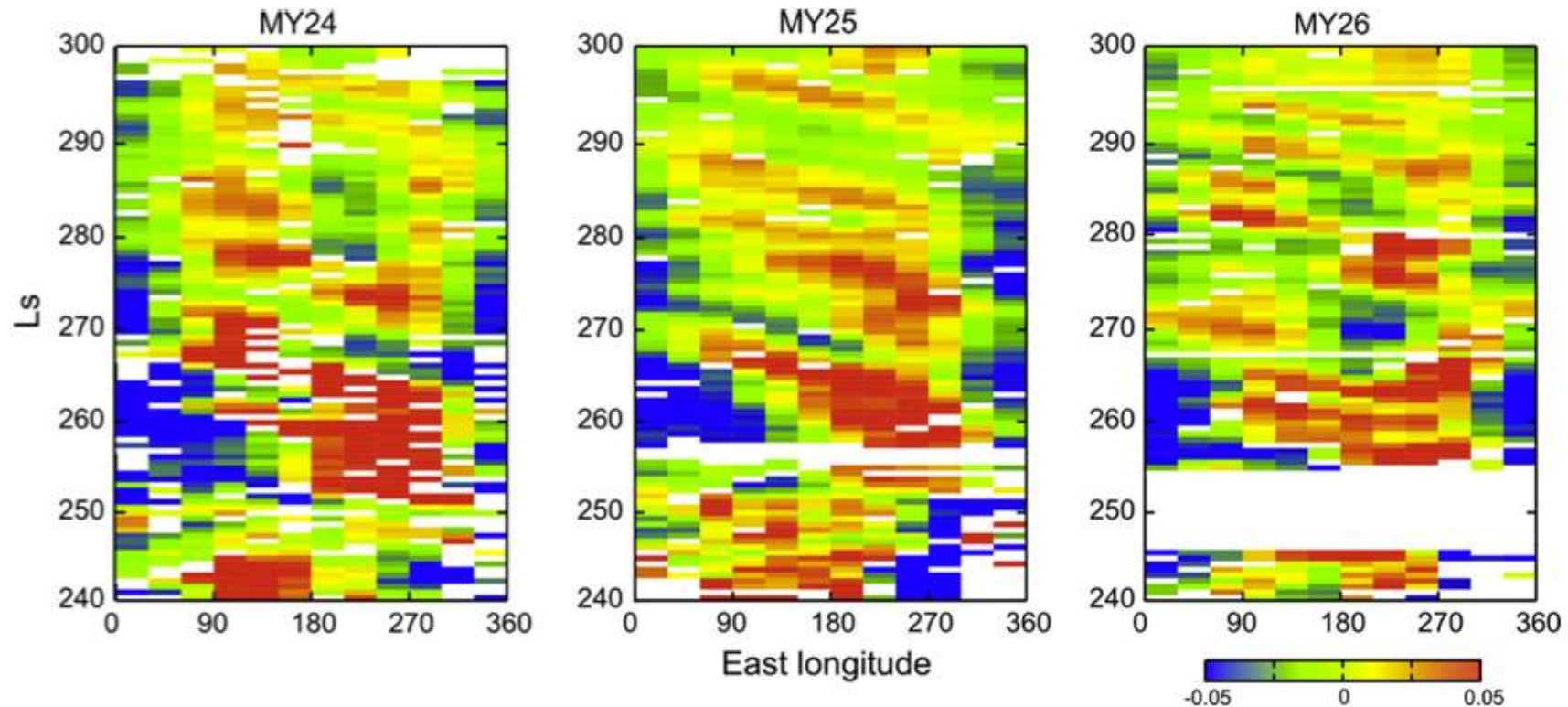
後半の内容

- ダスト気象学解明のための観測戦略
- 気候変動問題とMELOS大気サブテーマ「水循環」
 - * サブテーマ「大気化学」は今回省略
- まとめ「凍結岩石惑星の気候の理解に向けて」

従来のダスト観測の問題点

- 可視カメラ(MOC、MARCIなど)では原理的に浮遊ダストと地表ダストの区別がつかない。それでも視認できる縁のはっきりしたダスト雲だけがこれまでの研究対象。
- 短時間のうちに局所的に巻き上げられるのでないと明瞭なダスト雲にならない。→「ダストストーム以外」のダスト変動までとらえたい
- 赤外分光(TESなど)は浮遊ダストと地面を区別できるが、経度方向に疎らなので惑星規模の現象しか見えず、ほとんどのダスト現象が対象外。

低軌道衛星からの分光による空間分解



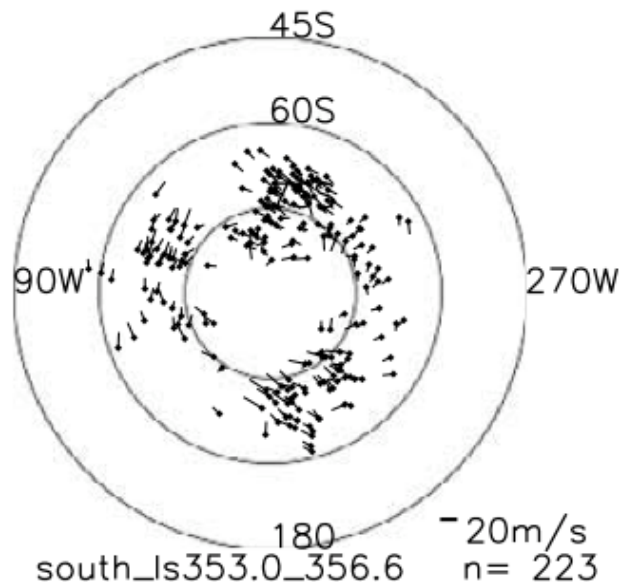
lovmöller diagrams of the dust optical depth for the latitude band 70–80°S during $L_S = 240\text{--}300^\circ$ of Mars years 24, 25 and 26. The zonal-mean component has been removed.

MGs/TESダストのホフメラー図 (Imamura and Ito, 2011)

低軌道だとダストに限らずせいぜいここまで

時間分解能の問題

- 多くのダスト現象の時間スケールは数日以下。1日1枚のダストマップからはスナップショットの形態研究ができるのみで、個々の現象の力学に踏み込むことは難しい。
- 時間分解できれば、**擾乱が成長しつつあるのか衰退しているのか、どのような風に流されているのか**といった、物理を特定するための決定的な情報となる。



MGs/MOCによる南極域のダスト
追跡風
(Wang and Ingersoll, 2003)

極軌道衛星では極域のみ可能

ではどうするか

- 両立すべき3つの要求
 - 大気ダストと地表ダストの分離
 - 高解像度
 - 高時間分解能
- これらを一挙解決する**偏光撮像**

可視偏光カメラ

左: 単一角度測定
右: 複数角度測定

- 浮遊粒子(粒径、量)に感度の高い「偏光」撮像を高精度に行うカメラ

- 過去のミッションでは、Mars-5/VPM(単一検出素子)がダストや氷雲を偏光観測

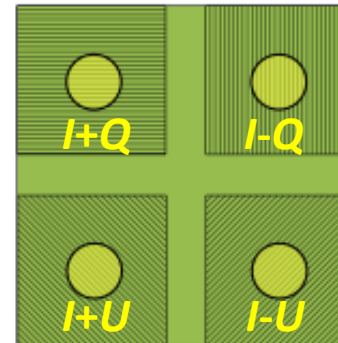
- 四眼構造とし、ストークスパラメータ $I \pm Q$, $I \pm U$ を同時取得

- HST観測(右例)では偏光板回転の所要時間における惑星自転が精度低下につながっていた。

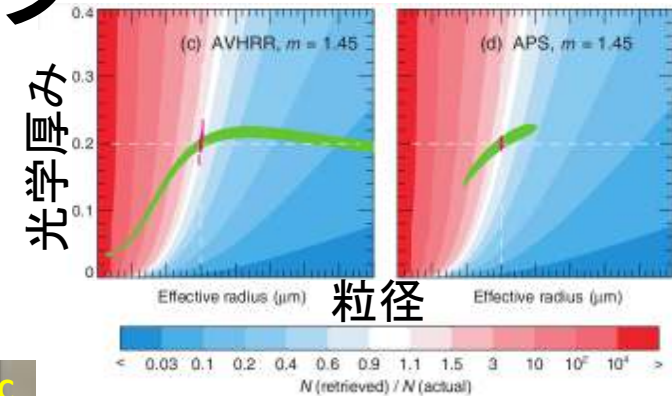
- 波長400 nm(青), 600 nm(赤)

- 15km × 15km解像度全球撮像

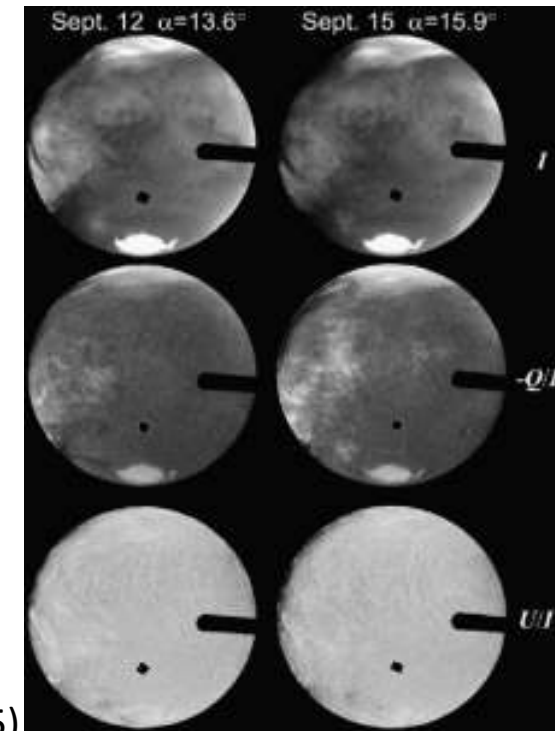
- 連続撮像により「偏光度位相曲線」を得て物理量決定精度を高める



4枚の平均は通常光画像



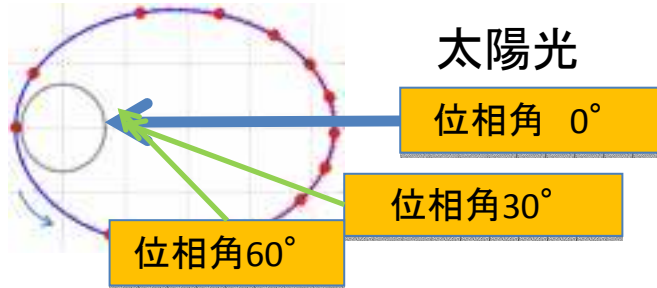
上) 偏光解析によるリトリバルの優位性 (Mishchenko et al., 2010)



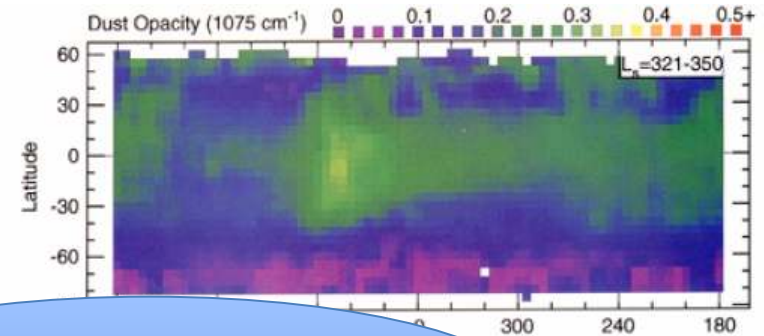
- 「あかつき」IR1カメラのヘリテージを活かして開発(エレキは同じ)。

右) HSTによる火星偏光度マップ (Shkuratov et al., 2005)

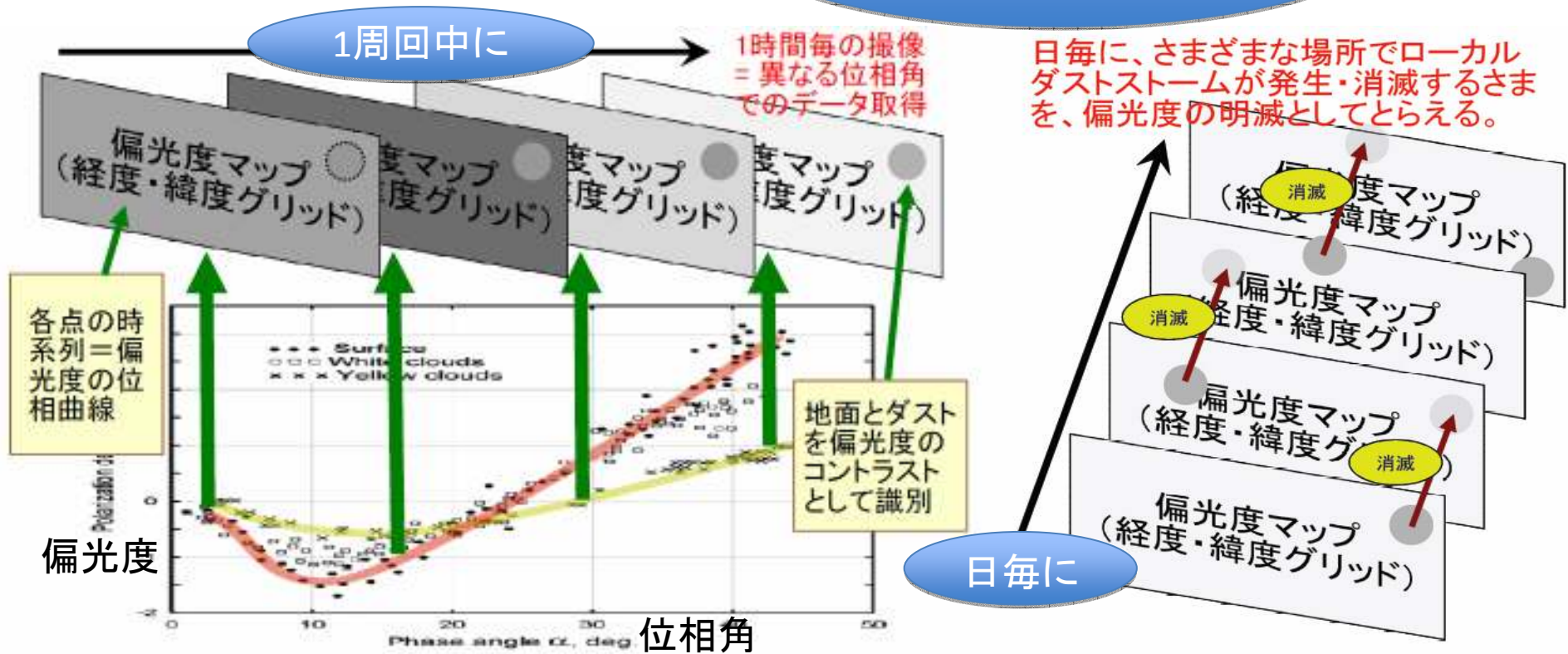
偏光観測のストラテジ



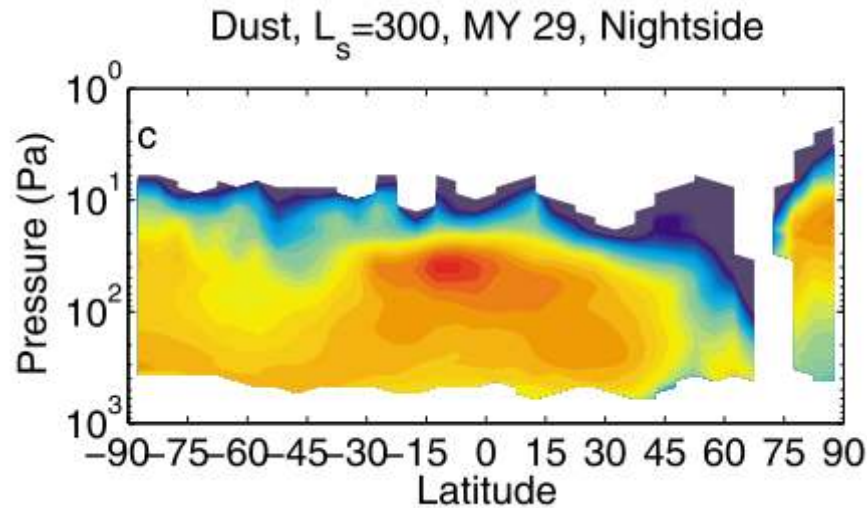
- 地表・雲・ダストは異なる位相曲線を示す
- 周回連続撮像により位相曲線を描き分離
- ダスト粒径情報、数密度情報を抽出
- 毎日の変化を広範囲にモニター



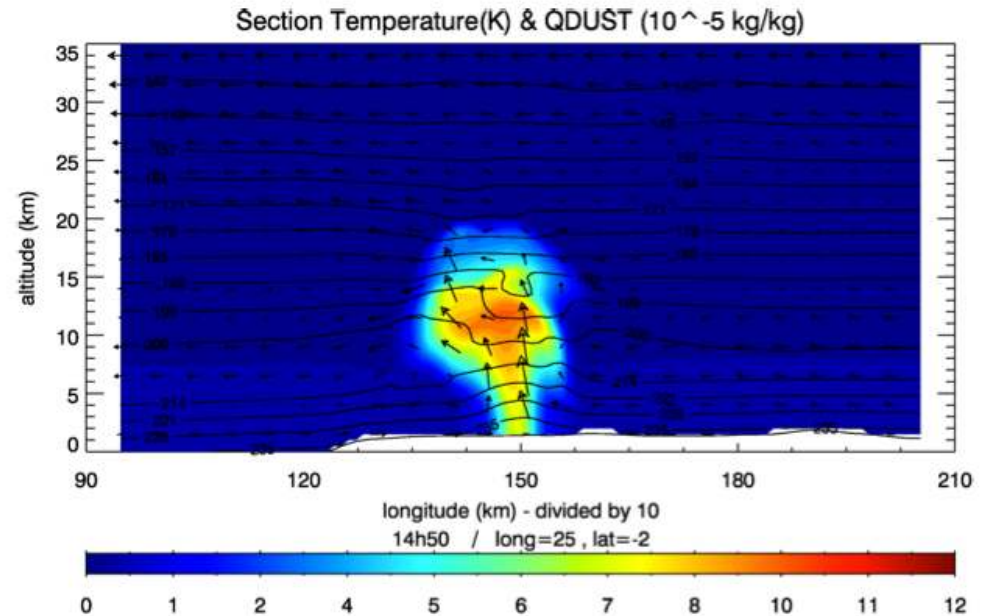
位相曲線解析から毎日
の変化を全球で可視化



高度分布をどうする



帯状平均ダストopacity
(Heavens et al. 2011)



火星ダストプリューム数値実験
(Spiga et al., 2011)

- 偏光は高度情報なし
- MRO/MCSにより、地表から離れたところにダスト混合比極大がよく見られることが明らかに
→ 高度分布を適当に仮定するわけにもいかない
- この高度分布を作り出すプロセスは今後の重要テーマ

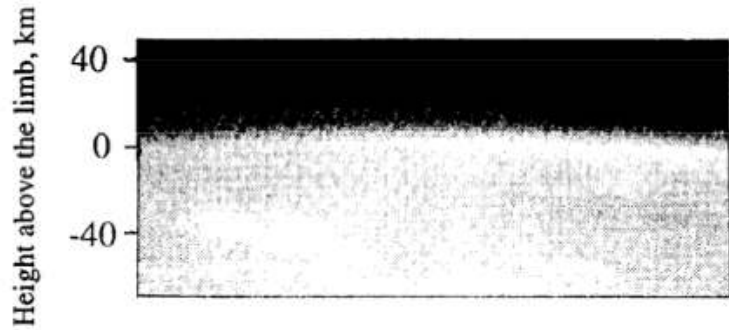


Fig. 1. Thermal infrared image of the morning limb of Mars taken by Termoscan/Phobos-2 instrument on March 26, 1989. Position of the limb and altitude scale are approximate

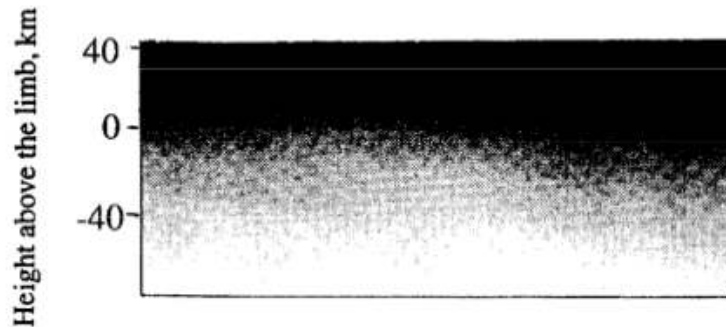


Fig. 2. The same as in Fig. 1 for the evening limb

Phobos-2 赤外 $11\ \mu\text{m}$ 撮像
(Titov et al., 1997)

角度分解能 1分
距離6000 kmから2 kmを分解



あかつきLIR改でリム撮像

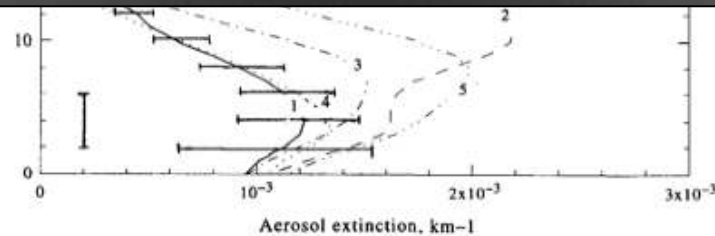
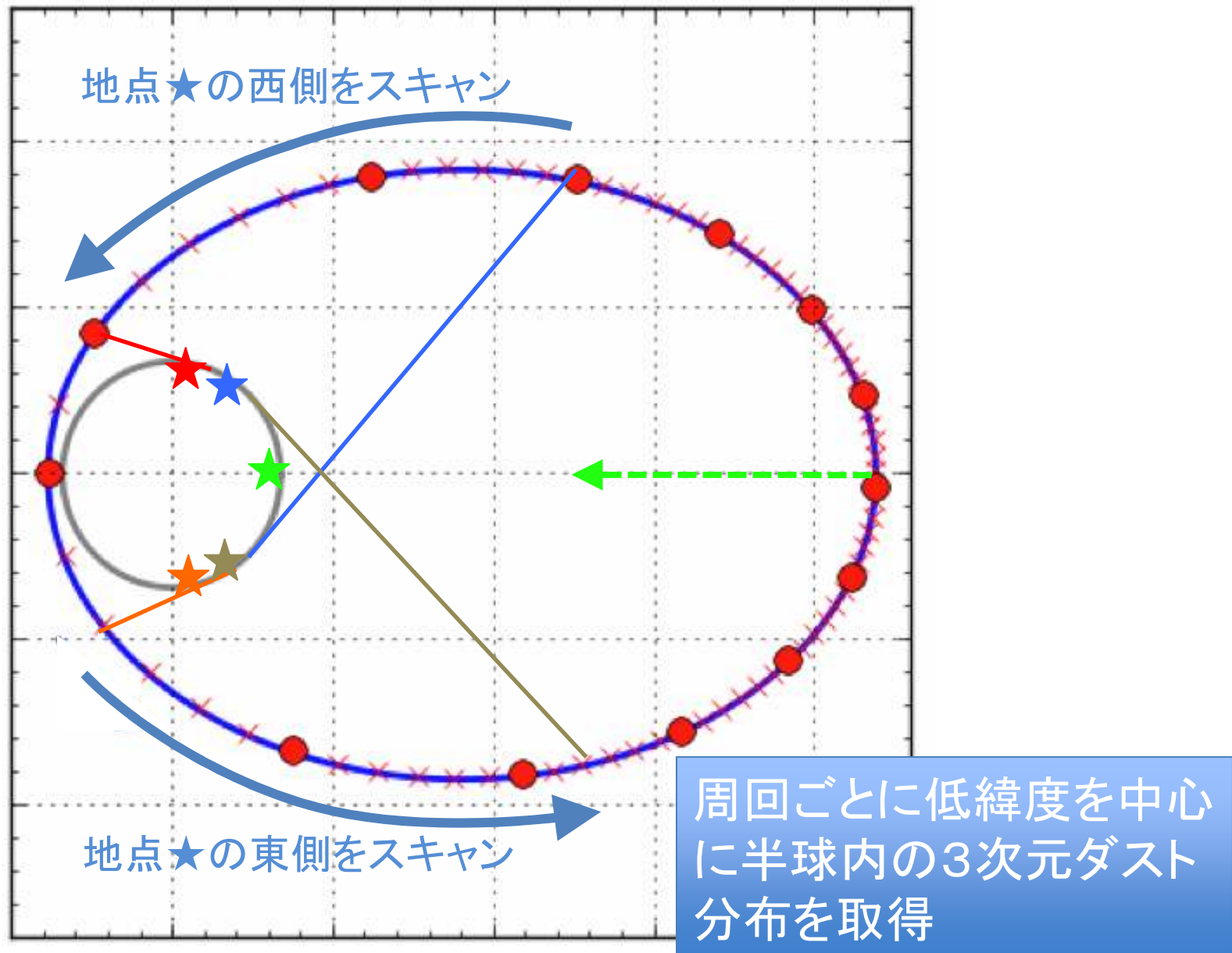


Fig. 11. Aerosol extinction profiles retrieved from the group-mean brightness profiles (a) at the morning limb, and (b) at the evening limb. The confidence intervals are shown for the aerosol profiles retrieved from the group 1 brightness profiles. These error bars are based on the analysis of all uncertainties of the retrieval procedure. The vertical bar shows the uncertainty in the limb positioning. Numerals by the curves correspond to the group numbers in Tables 1 and 2.

リムを見る光線(直線)と、そのときの特定地点の位置(★)



物理的理解のために

- 物質循環研究は3次元力学場情報があつてこそ。
従来はMGS/TESなどによる惑星スケール(数千km)の温度場のみ。

- Rossby変形半径 $NH/f = 600-1000$ km

$$\text{浮力振動数 } N = 0.006-0.01 \text{ s}^{-1}$$

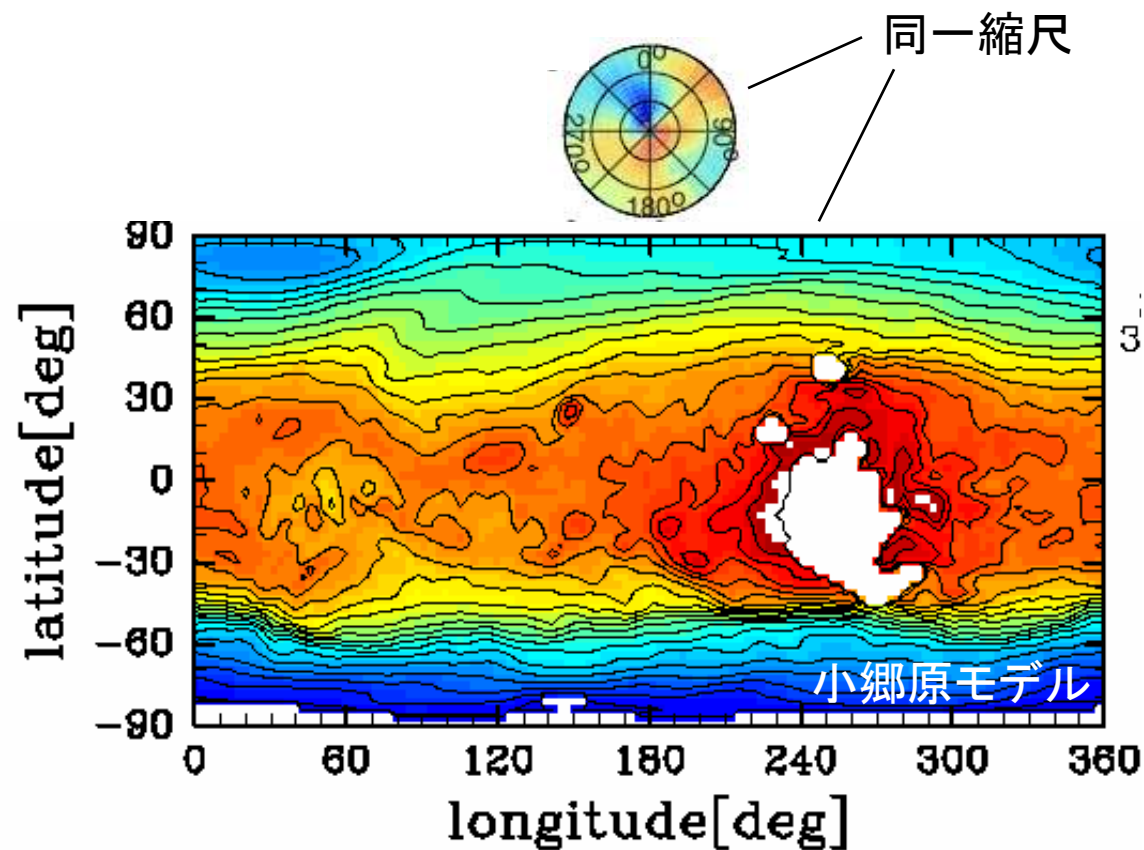
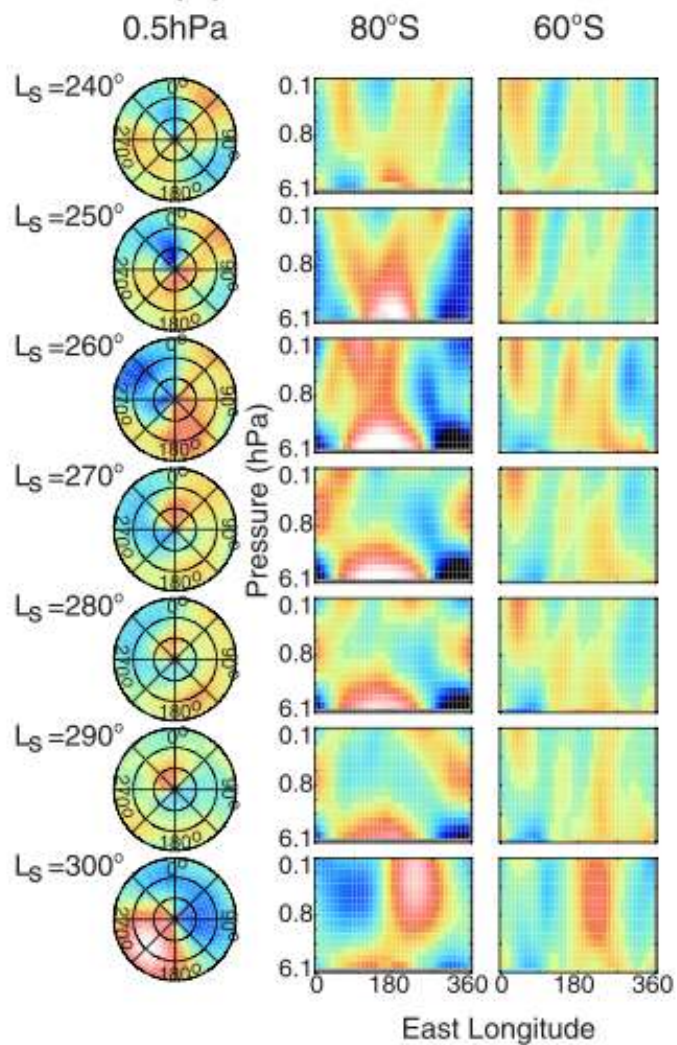
$$\text{Coriolis parameter } f = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

$$\text{Scale height } H = 10 \text{ km}$$

このへんまでは温度場から風速場をある程度推定可

- このスケールの3次元温度場を誰も見たことがない。(一例を除く) 何が見えるのか？

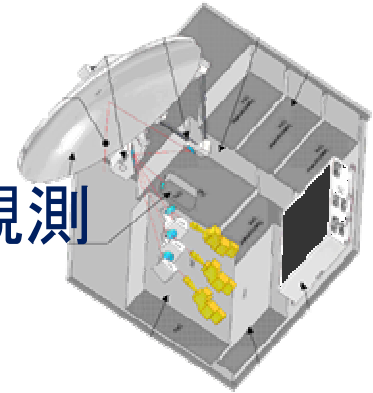
数百kmスケールの温度場



MGS/TESによる極域の温度擾乱
(Fukuhara and Imamura, 2008)

解像度300 kmあればダスト輸送に関
わる様々な力学過程を可視化できる
→サブミリ波サウンダ

サブミリ波サウンダ

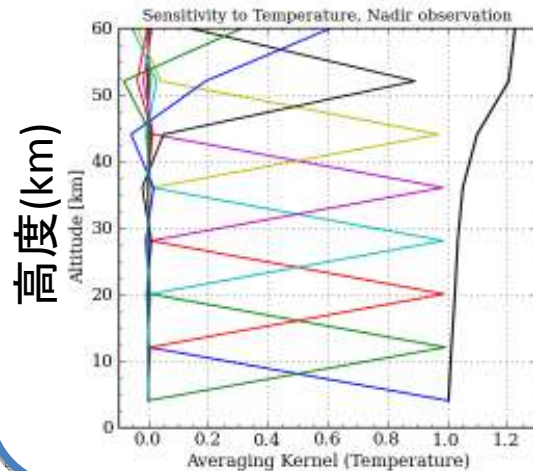


- サブミリ波帯 (550-620 GHz 帯) での微量気体観測
- ダストを透かした「場」の観測
 - 温度場の3次元分布
 - 水蒸気、同位体 (H_2O , CO)、および微量気体の3次元分布
 - 地表面温度と物性
 - ドップラーシフトによる風速の導出(リム観測の場合)

測定精度, 鉛直分解能(荷重関数)

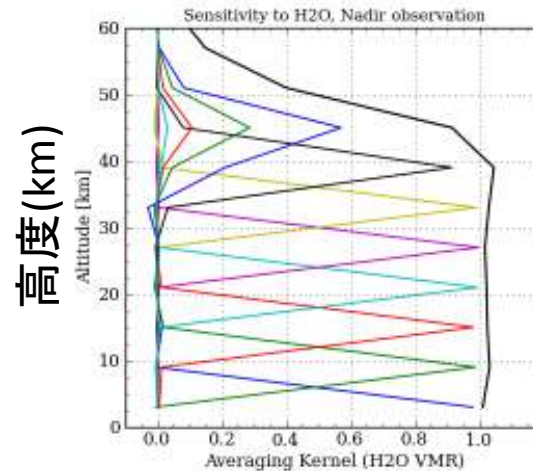
気温 (直下視)

精度 0.5 K @4 km, 2 K @12 km
鉛直分解能 8 km



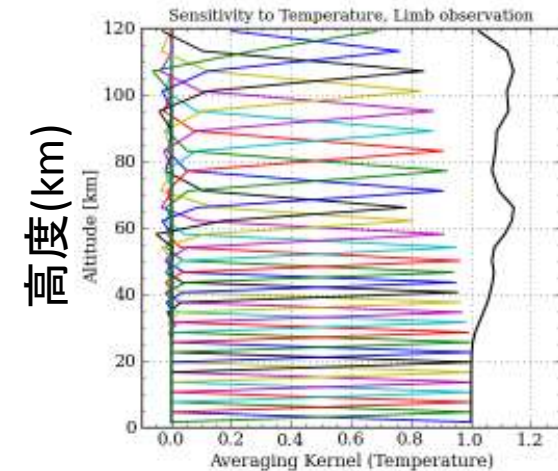
水蒸気 (直下視)

精度 5 - 15 % @0 - 30 km
鉛直分解能 6 km

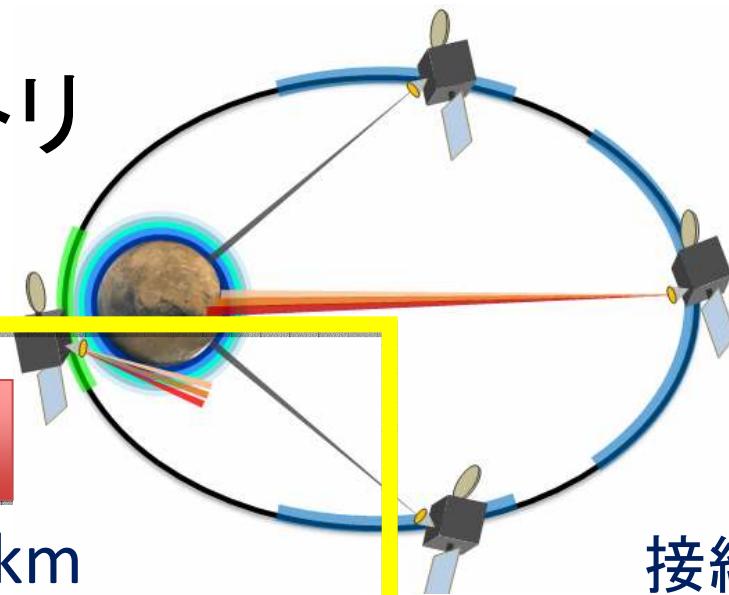


気温 (リム観測)

高高度まで高い感度.
精度 0.2 - 1 K (高度 40 km 以下)
鉛直分解能 3 km

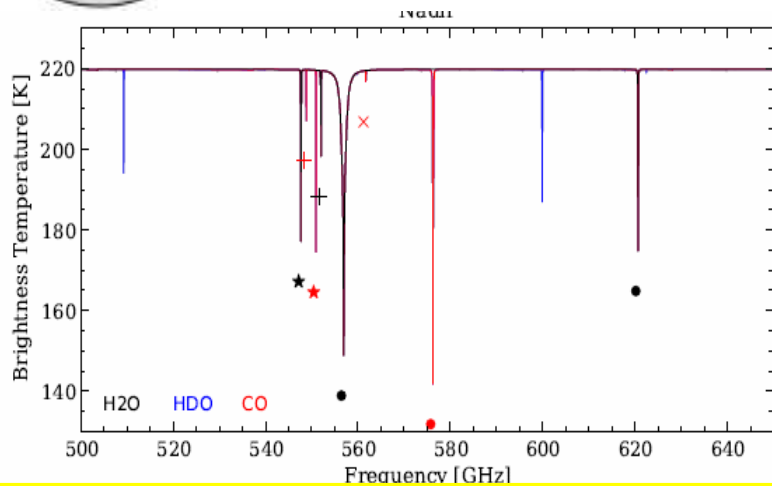


観測ジオメトリ



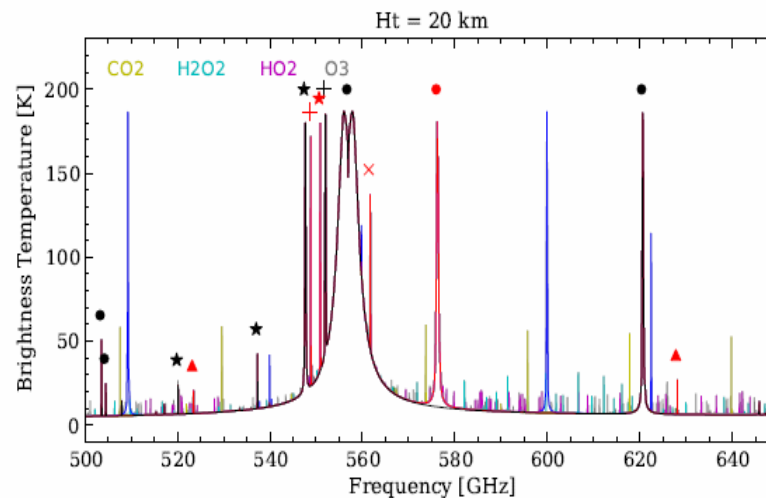
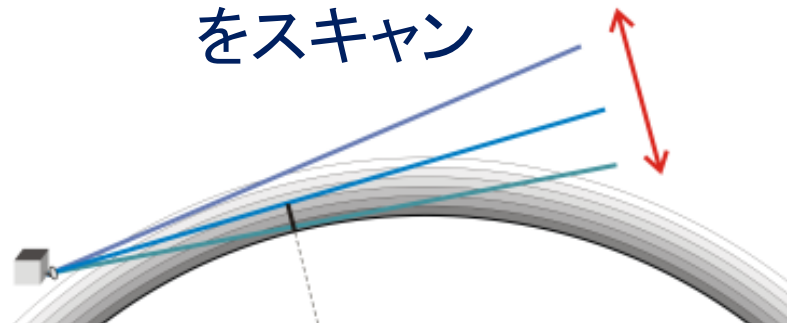
高高度から直下視

水平方向 ~300 km
ステップでマッピング



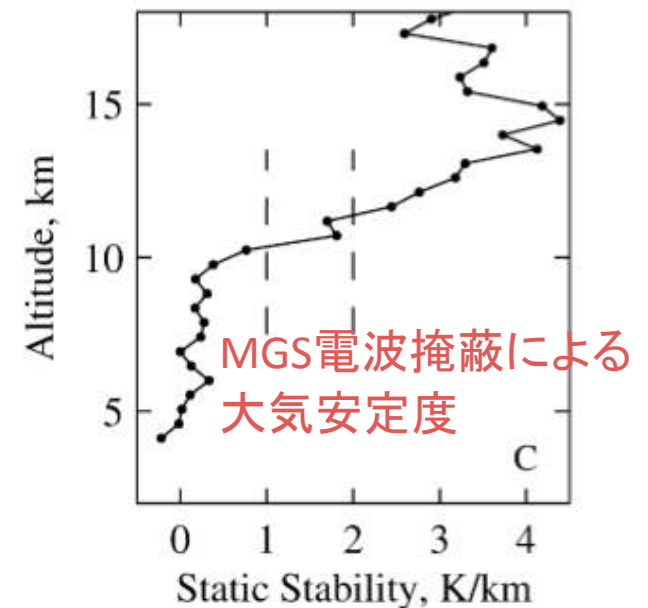
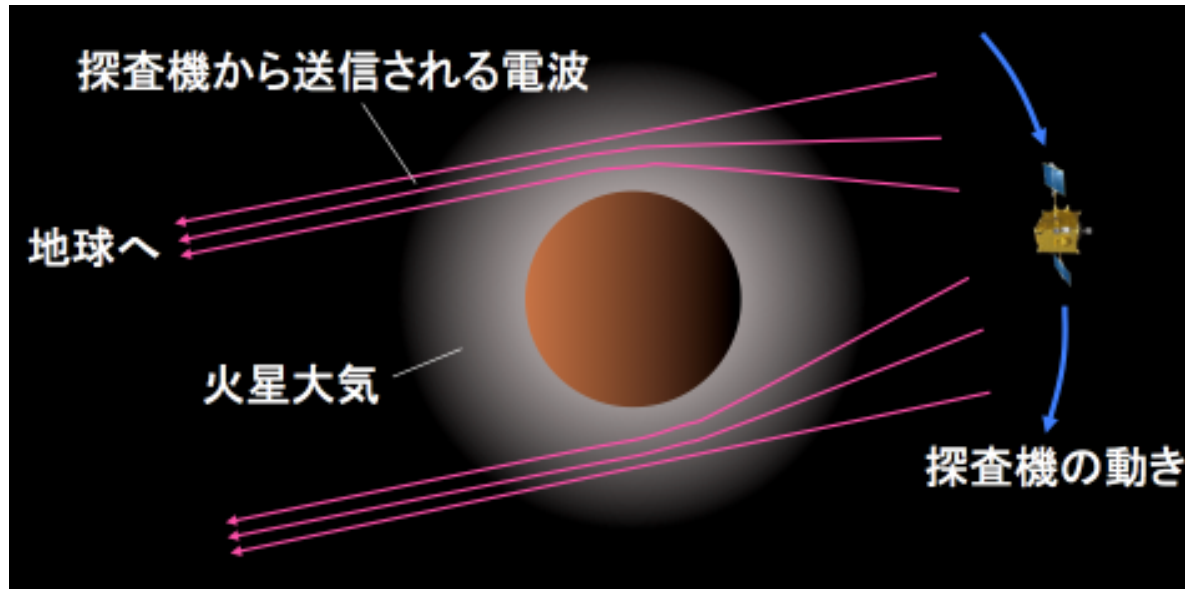
近火点近傍で
リム観測

接線高度 0 - 120 km
をスキャン



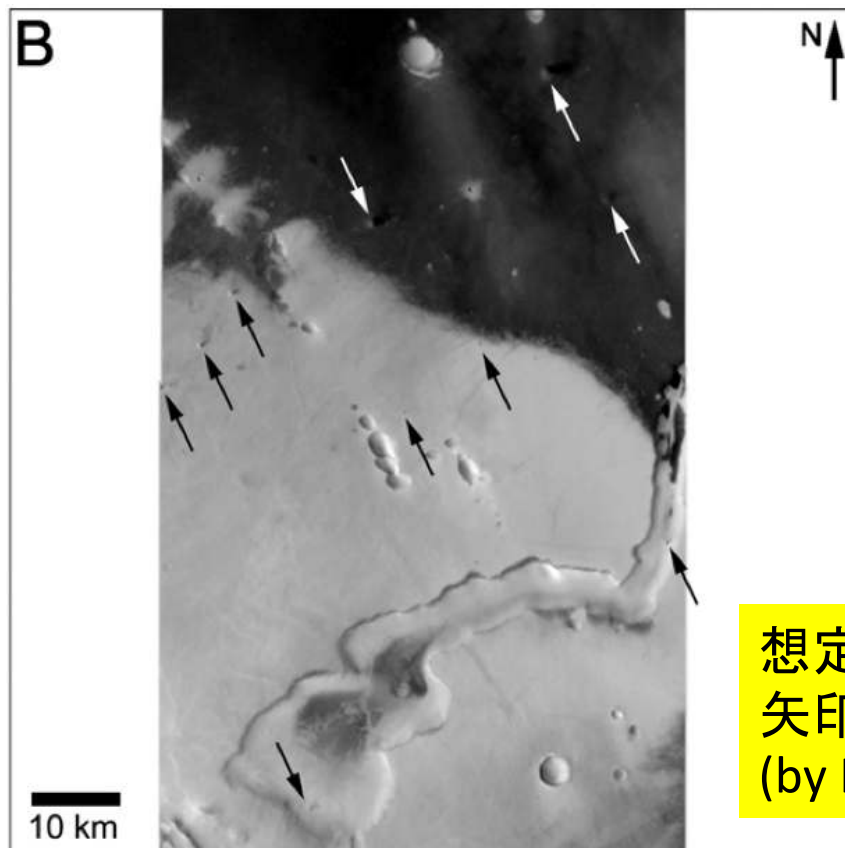
電波掩蔽

- 地球から見た火星の縁付近(朝方と夕方)の鉛直気温分布を精度0.1K、高度分解能1kmで取得
- 境界層の成層度を精密測定
- サブミリ波サウンダの気温計測の答え合わせ
- 超高安定発振器を搭載(あかつきで実績)



望遠カメラ(オプション)

- Cassini/Narrow-Angle Camera (カセグレン式)をベースに検討
- たとえば1.66"/pixel、1024x1024画素:遠火点から 150 m/pixel
- ローカルストームやダストデビルを広域の気象場・ダスト輸送と結びつける



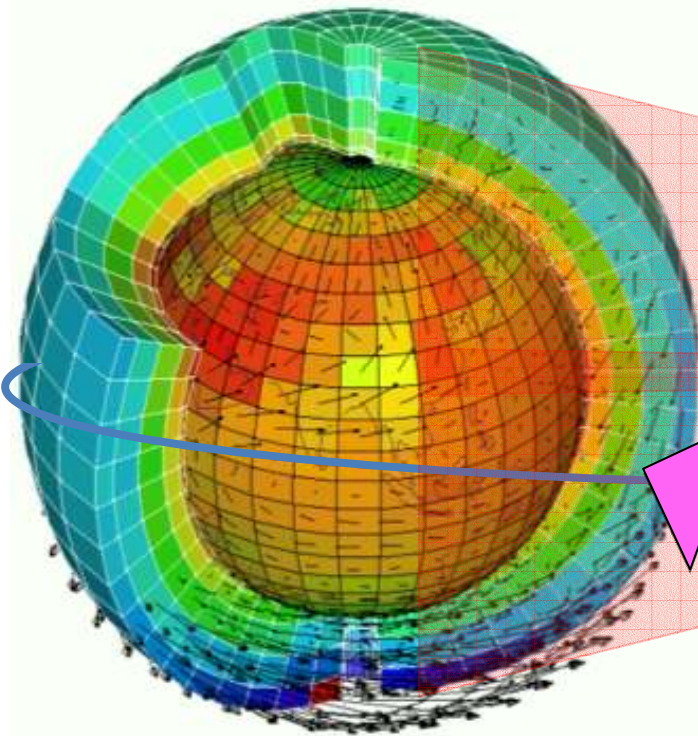
ダストデビルのうち軌道上から見える数百m規模のものはごく一部。しかしこれらは寿命が長く背が高いため、ダスト巻き上げ量では全体の半分を占めるかもしれない。
(Stanzel et al. 2008; Reiss et al. 2011)

想定仕様と同じ解像度の画像。
矢印がダストデビル。
(by HRSC, Reiss et al. 2011)

4つの観測装置

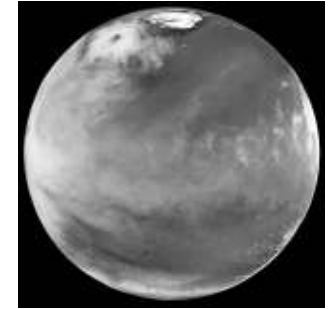
電波掩蔽

- 鉛直気温分布



可視偏光カメラ

- ダスト
- 粒径分布
- 雲

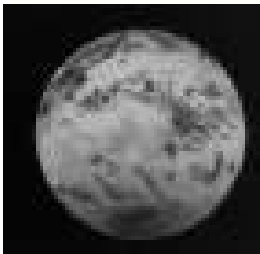


(望遠カメラ?)

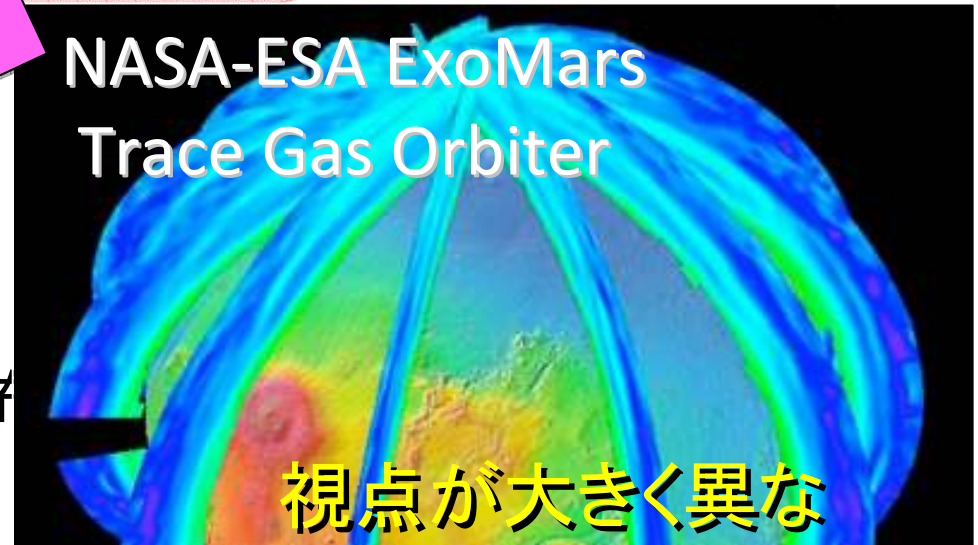
NASA-ESA ExoMars
Trace Gas Orbiter

中間赤外カメラ

- ダスト(含高度分布)
- 地表温度

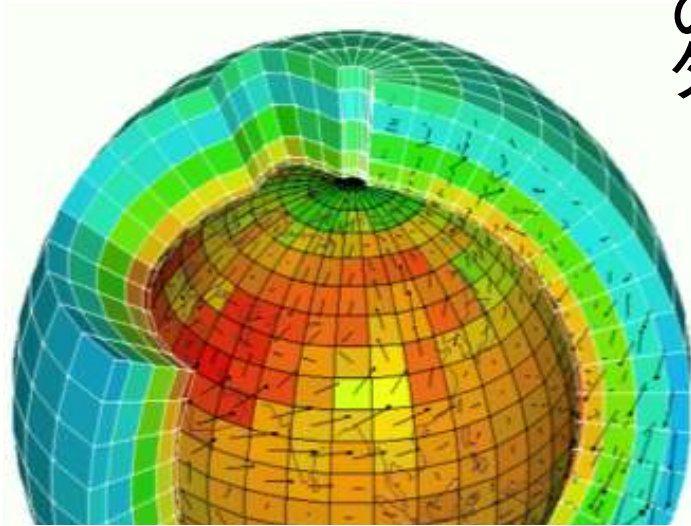


視点が大きく異なる

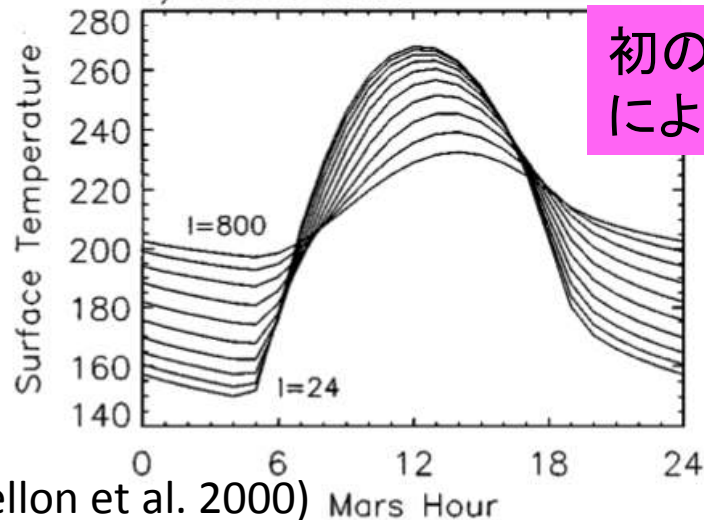


ダストサイクル解明のために

地表温度・輝度からアルベドや熱慣性
の変化をモニターし、ダストの観測デー
タや4次元同化モデルと合わせて解釈

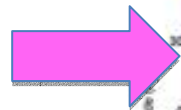


a) Thermal Inertia

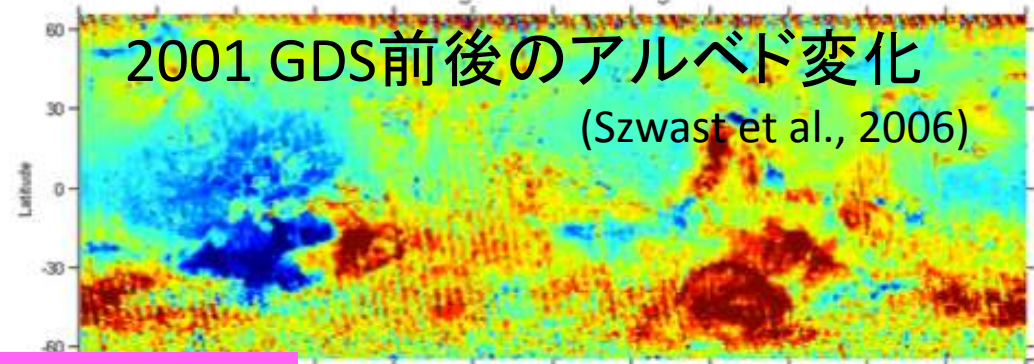


(Mellon et al. 2000)

初の日変化データ
による精密決定



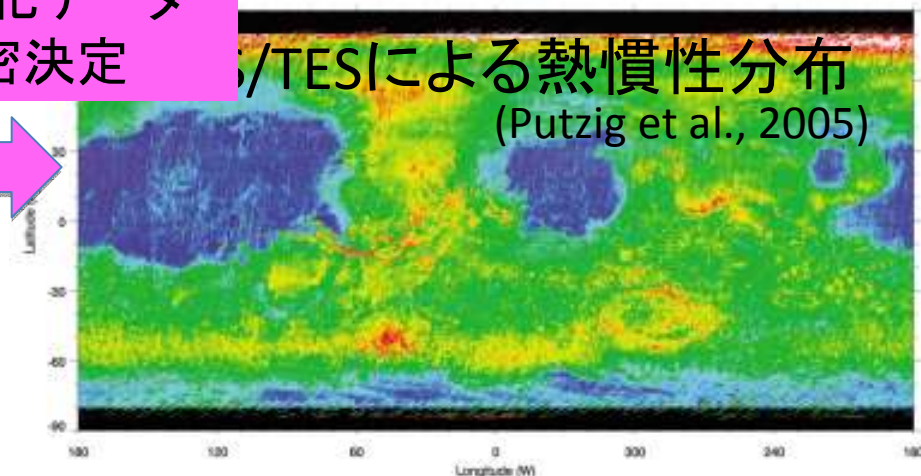
Albedo Difference - Bin Size = 1°
Year 2, L_s 0-90 to Year 3, L_s 0-90



2001 GDS前後のアルベド変化

(Szwast et al., 2006)

TESによる熱慣性分布
(Putzig et al., 2005)

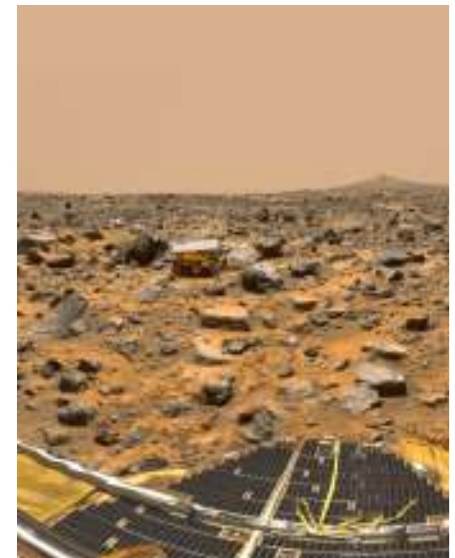


着陸機での気象観測

- オービターからの観測と同時にランダーで地表付近の気象を直接観測することにより、大規模な場がマイクロなダスト巻き上げ過程とどう関連しているかを調べる。
- 観測装置
 - 気温・気圧・・・基本的な気象情報
 - 音波風速計・・・地上1.5mでの3次元風速と温度をサンプリングレート10Hzで計測するとともに、ダストを巻き上げている対流や乱流をとらえる。低圧CO₂大気での動作確認試験済み。
 - ダスト顕微鏡・・・粒径、形
 - ダスト濃度モニタ・・・風速変動と合わせてダストの渦フラックス見積もり



音波風速計



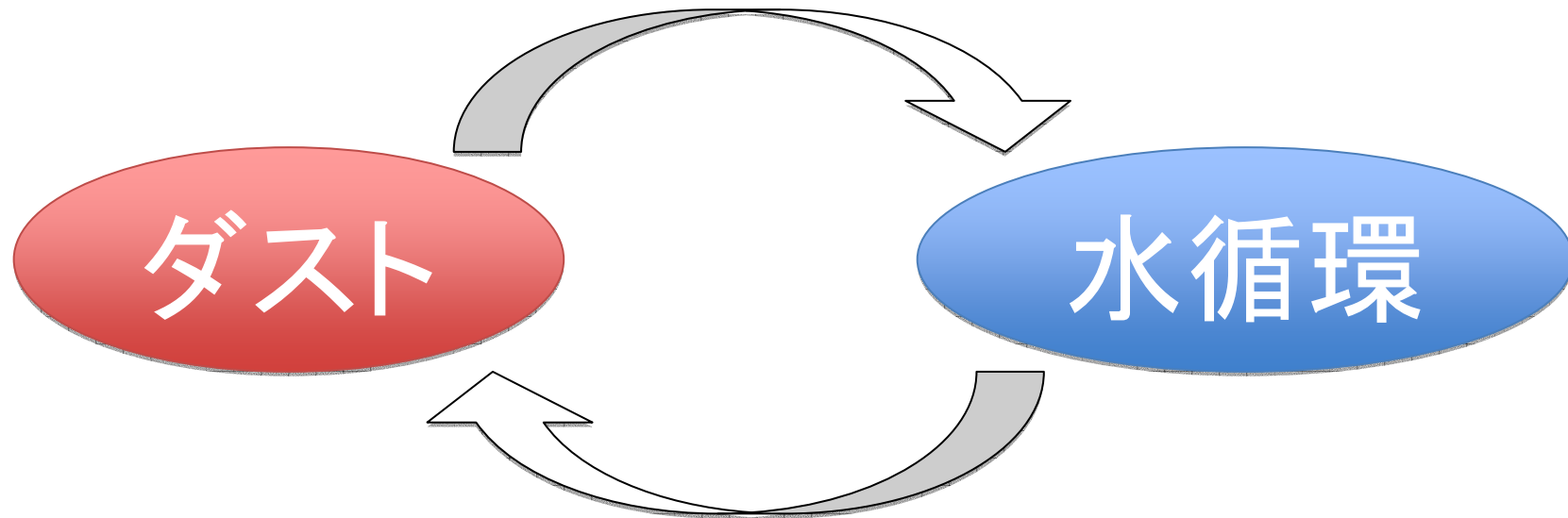
着陸機での大気電気観測

- ランダーにおいて電磁気学的手法によりローカルな鉛直電場やダストデビルの広域の分布をモニターし、ダスト巻き上げ過程の知見を得るとともに、オービターからのダスト分布観測の解釈に役立てる。
- 観測装置
 - ダイポールアンテナによる電場計測
 - ループアンテナ、フラックスゲート磁力計による3次元磁場計測
 - 電磁ノイズからダストデビルの位置同定、鉛直電場によるダスト持ち上げ効果の評価

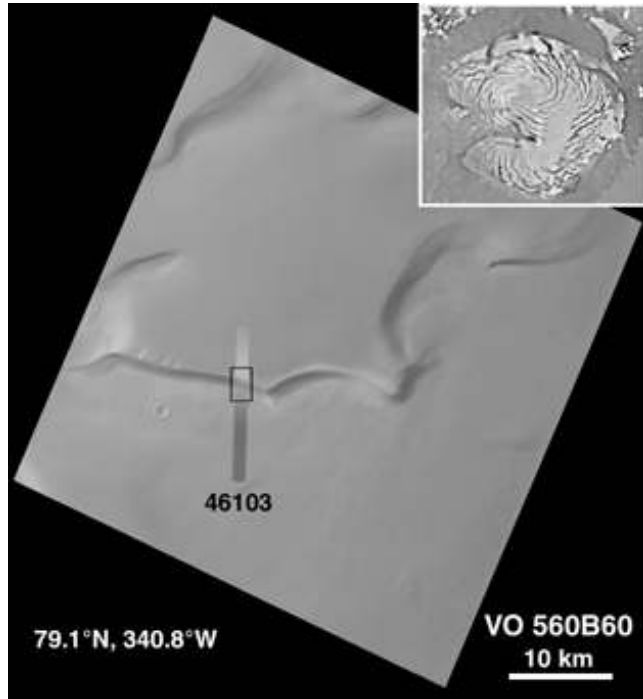


気候変動問題：ダストと水

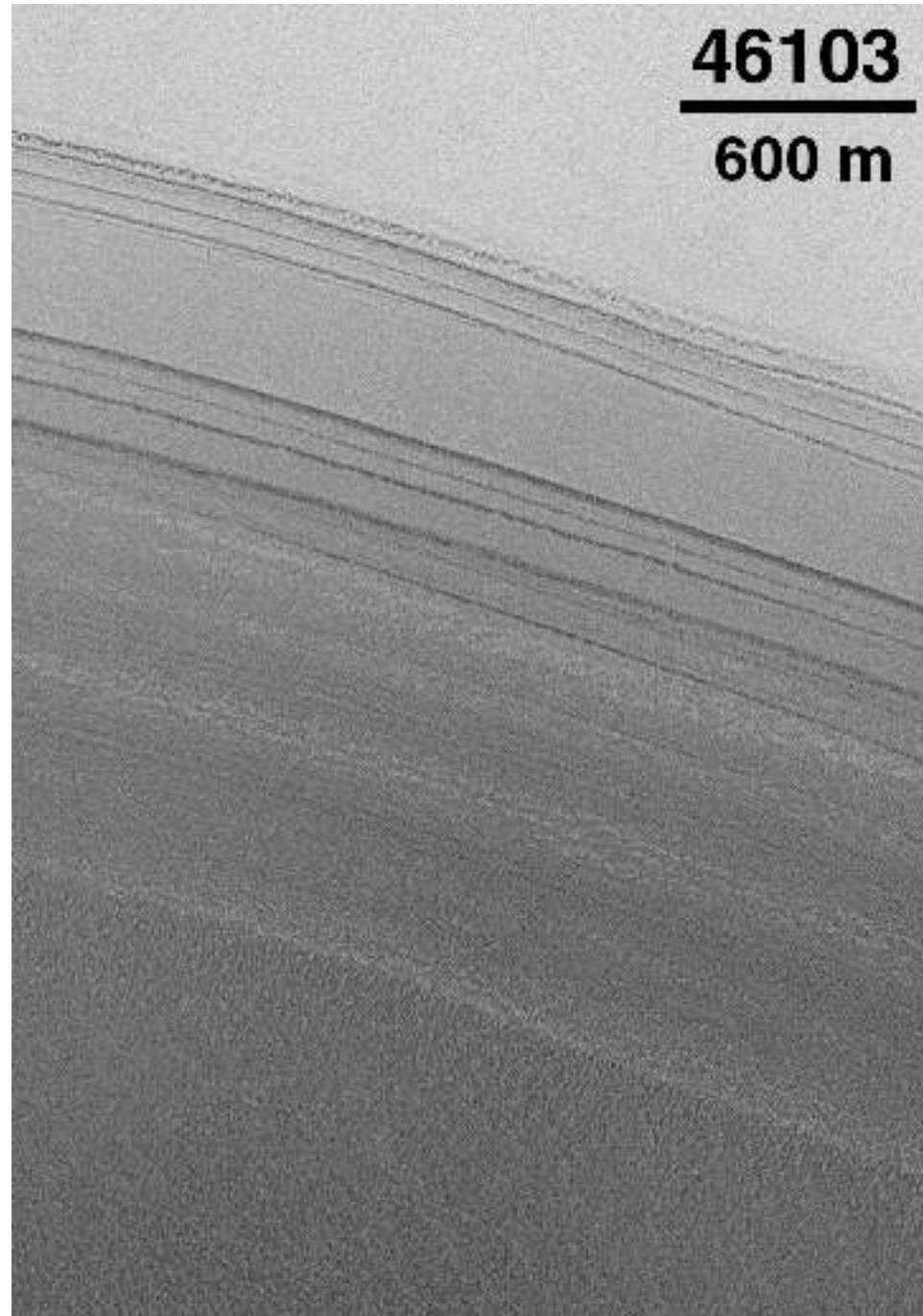
大気温度・地表温度の変化
地表アルベド・熱慣性の変化



ダストを核とする雲形成と沈降
霜によるダスト固定

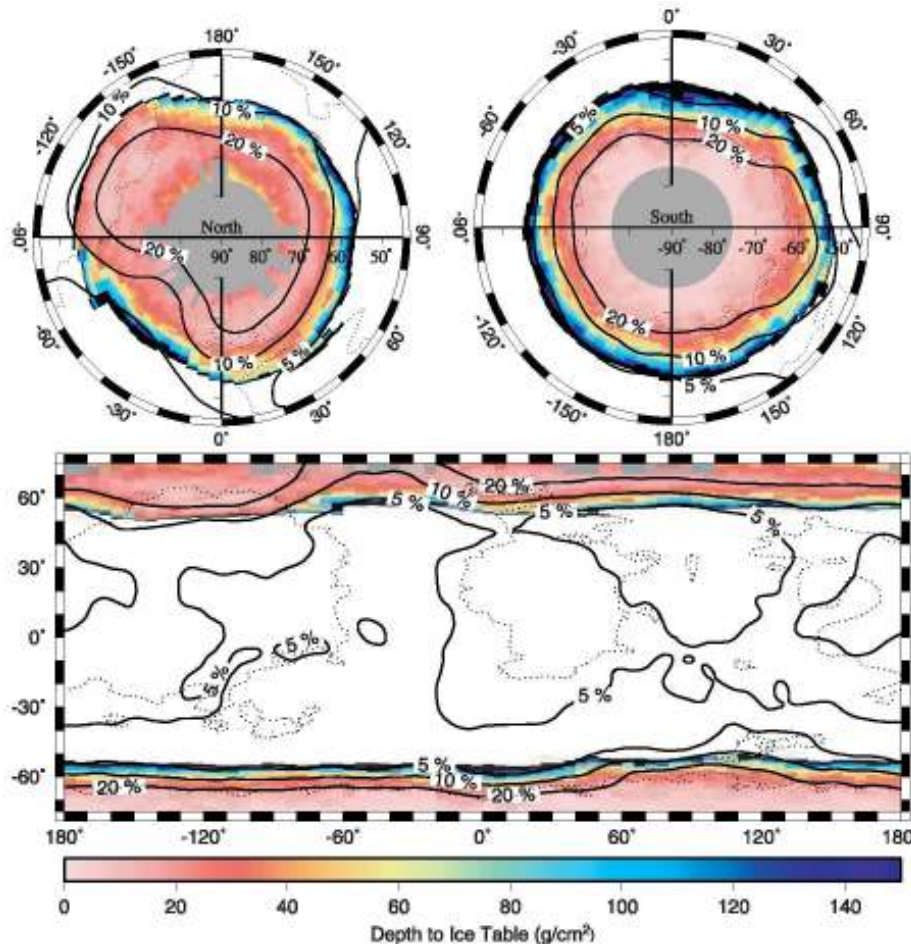


極冠堆積物



氷層までの深さ

地表での水蒸気濃度の時間平均
＝ある深さでの飽和水蒸気濃度の時間平均
でおおざっぱに決まるとされる

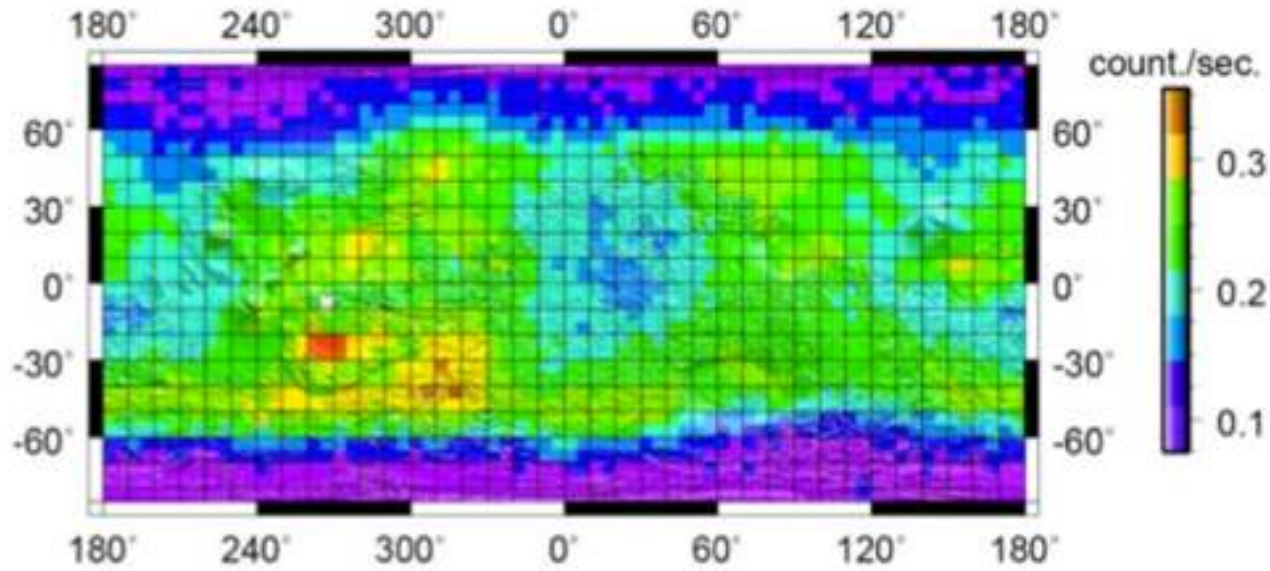


Schorghofer and Aharonson (2005)

色： 大気中の水蒸気との平衡状態を仮定して計算される氷床までの深さ

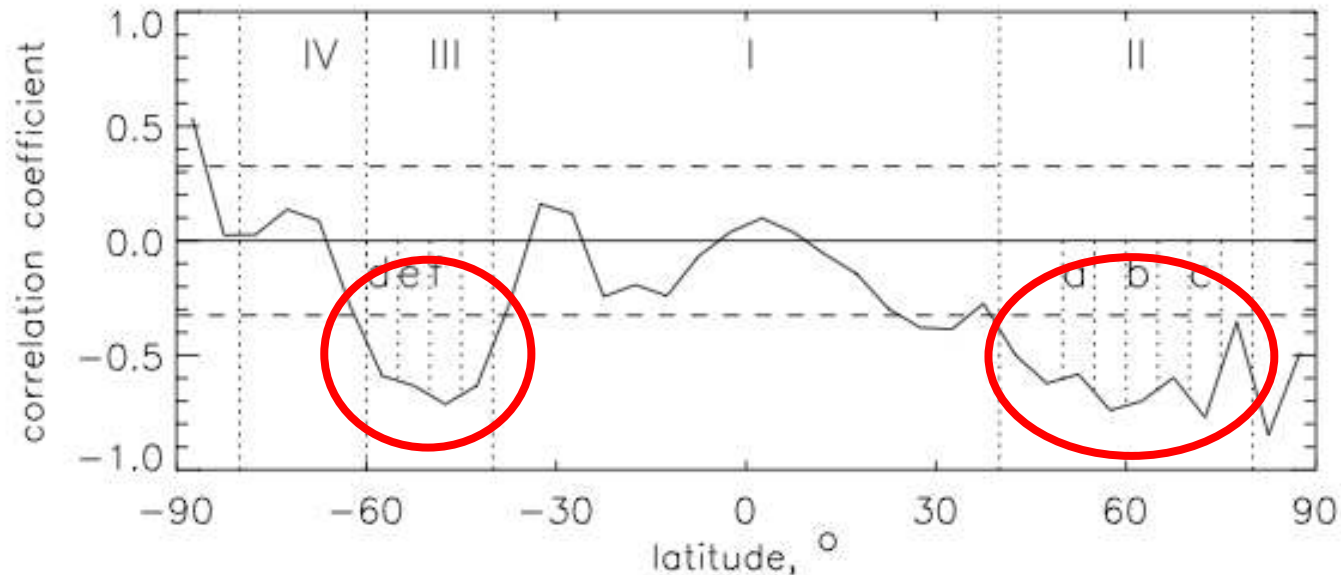
実線： 中性子分光から見積もられた水含有量

→現在の気候とだいたい平衡状態か



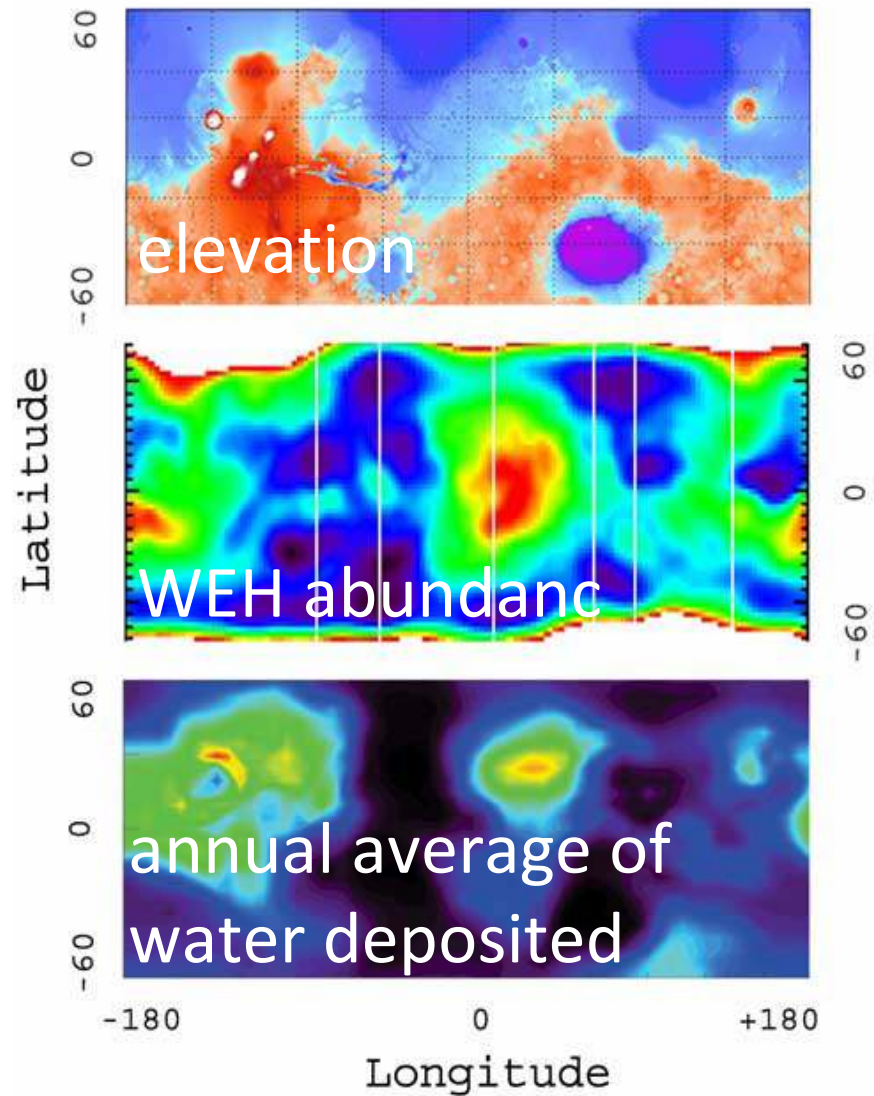
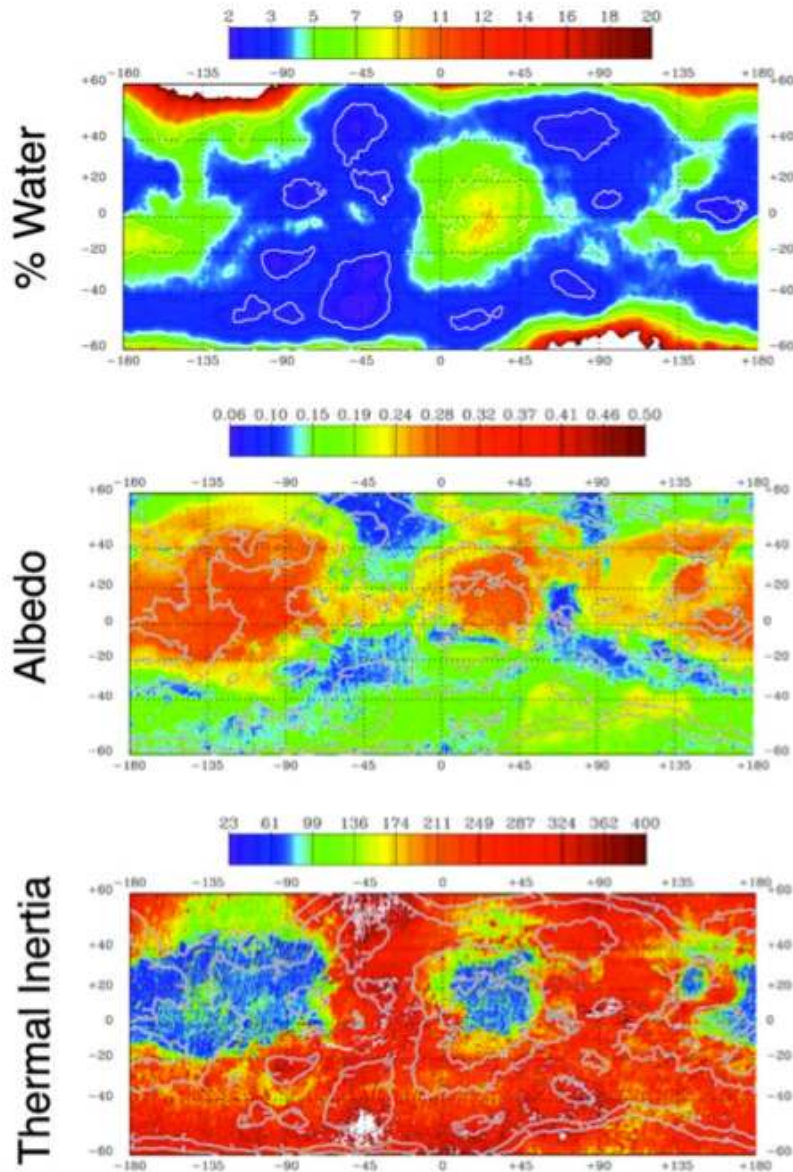
地表のアルベドと
地下氷の深さに
相関
(Mitrofanov et al.
2007)

Albedo of epithermal neutrons by Mars Odyssey/HEND



中性子アルベド(地下氷までの深さで決まる)と近赤外(1064nm)アルベドの緯度ごとの相関係数

低緯度地下氷(?)への現在の地域気候の影響 (Feldman et al., 2005)



水循環の問題

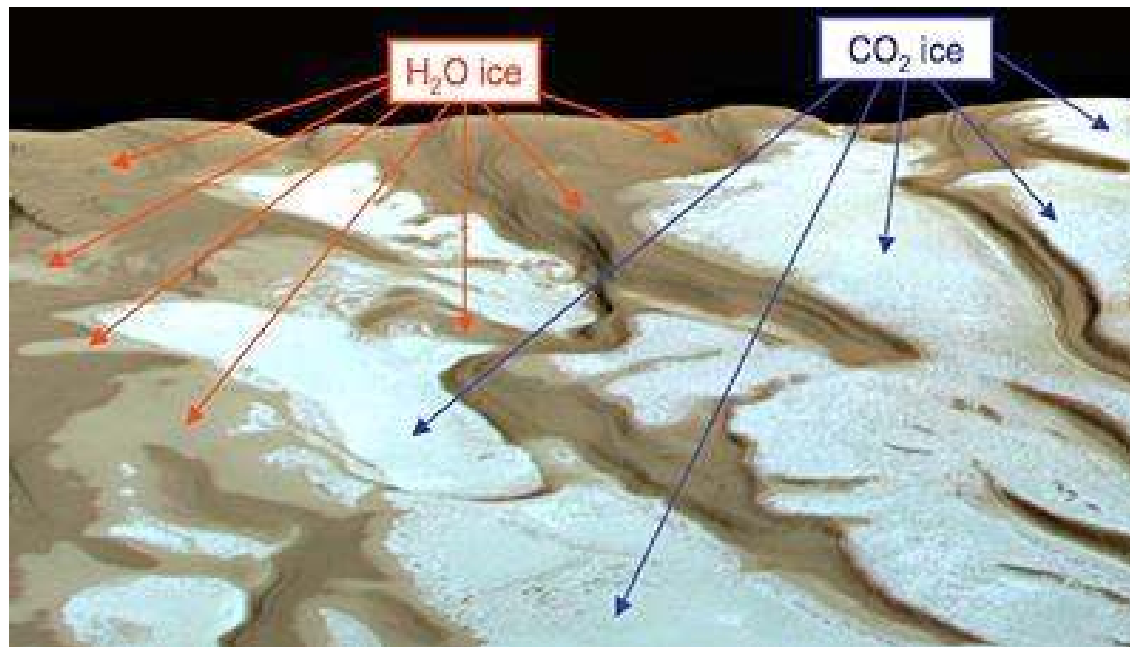
- 極冠・地下氷床・霜・地下水湧出・・・発見が相次ぐ火星の水の多様で不可解な姿
- そもそも各圏の水の存在量はどうか
 - 全て地表にあっても良い気がする
 - 全て地下にあっても良い気がする
 - 全て南北半球のどちらかにあっても良い気がする
 - 水蒸気はもっと多くても少なくても良い気がする
- ここでは水蒸気による輸送を考える

極冠

- 季節とともに拡大縮小
- 夏期も残る残存極冠
 - 北極ではH₂O氷のみ
 - 南極ではH₂O氷 + CO₂氷

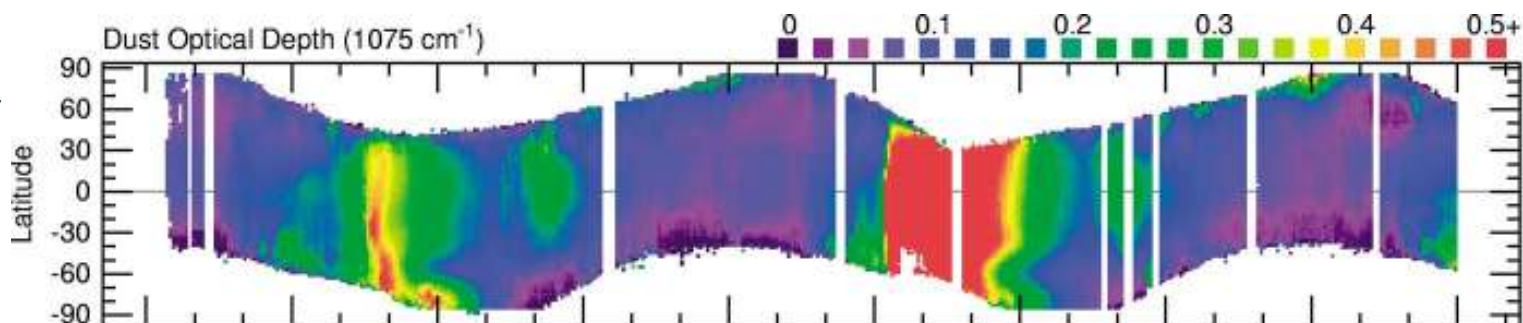


北極冠

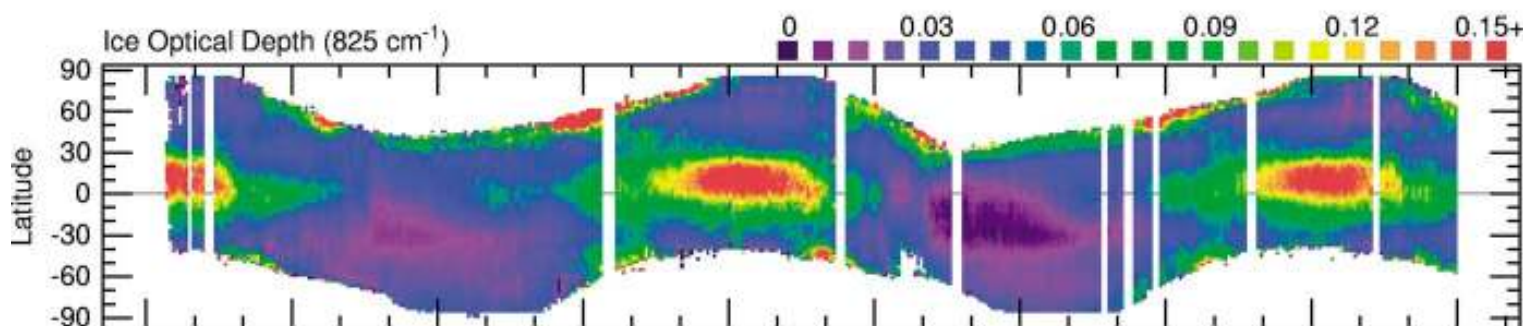


ダスト・雲・水蒸気の緯度分布の変動 (MGS/TES)

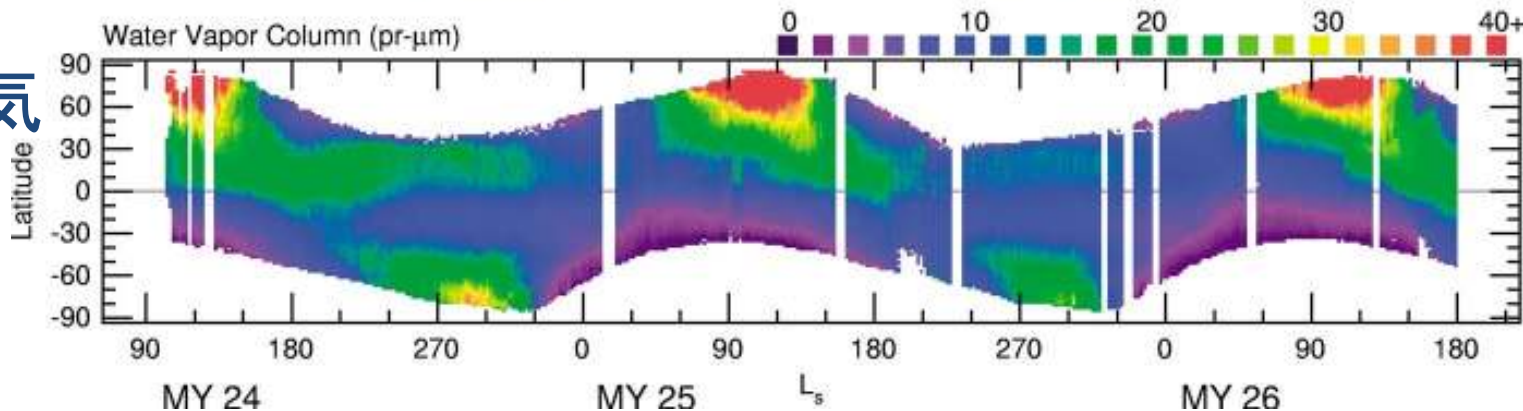
ダスト



氷雲



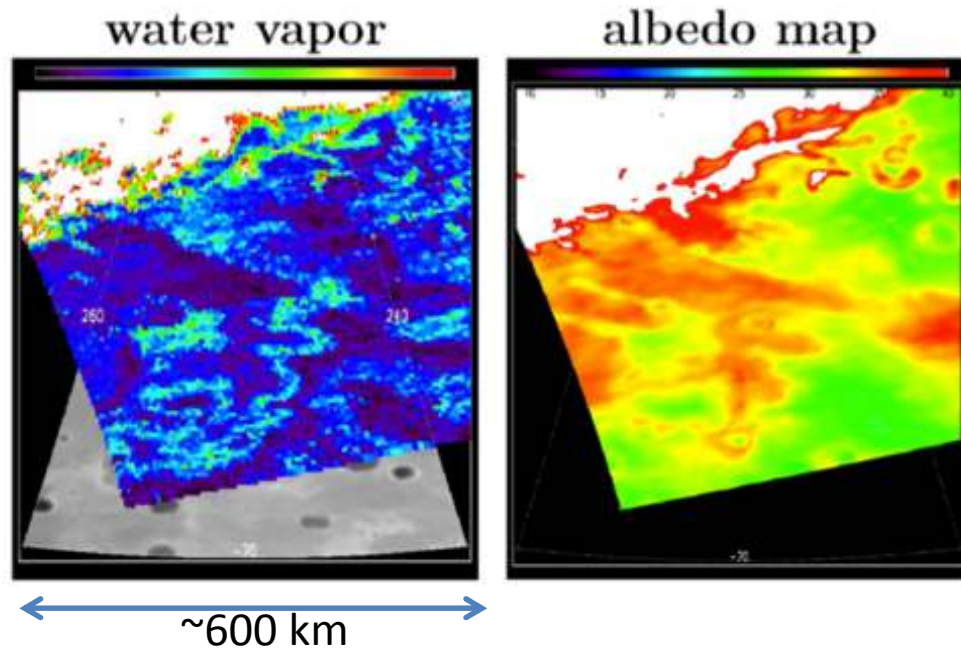
水蒸気



Smith (2004)

地下氷・レゴリス吸着水の効果

- これを考慮すると水蒸気量が20%増加 (Richardson & Wilson, 2002: GCM+2層レゴリスモデル)
- これを考慮すると水蒸気量が1/2~1/4に減少 (Böttger et al., 2005: GCM+10層レゴリスモデル)
- 水蒸気の入出りを直接的にとらえた観測はない



Mars Express/OMEGA

- 高緯度の水蒸気微細構造が数十kmスケールのアルベドと対応関係
- 午後より午前で顕著
- 地下・地表からの昇華を反映？

(Melchiorri et al., 2009)

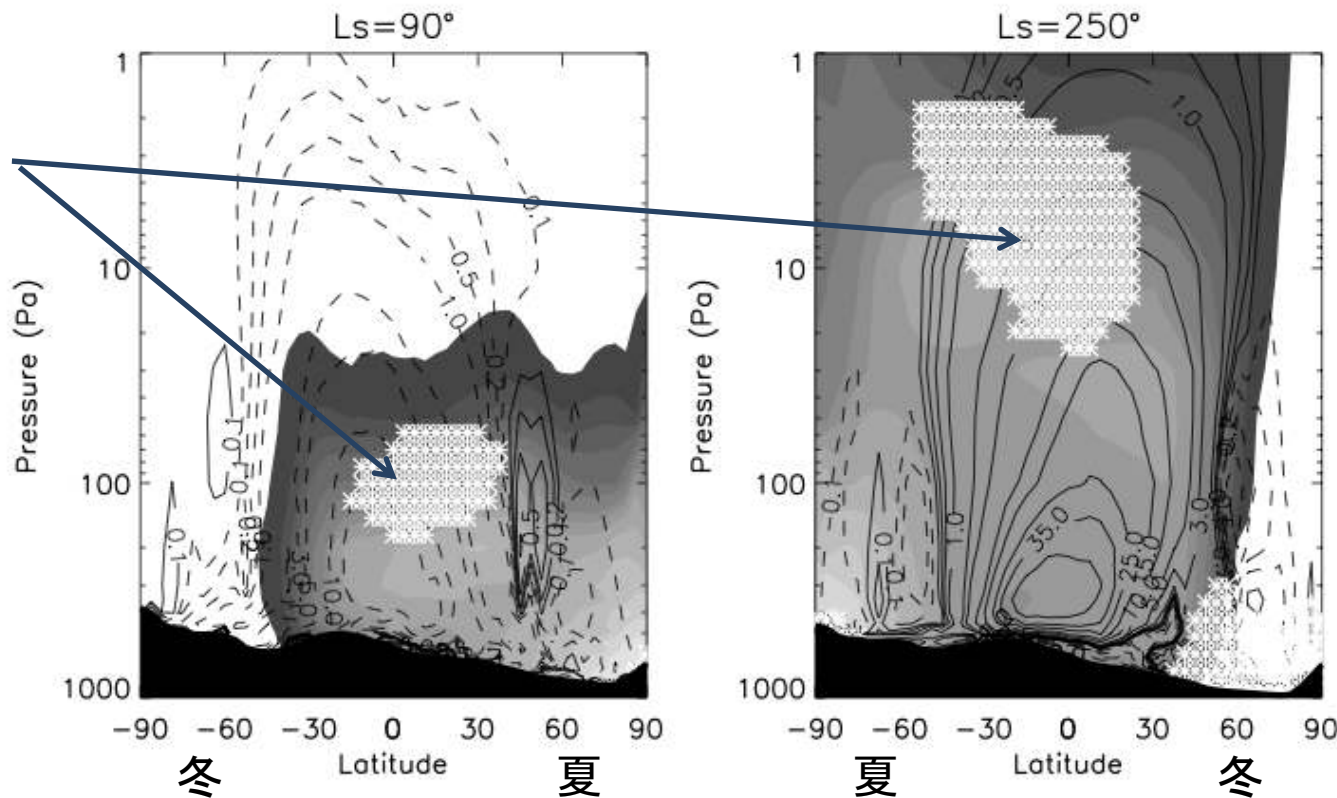
ハドレー循環による雲形成



- 地形の非対称と近日点効果で凝結高度に違い
- 1年間の積算では北極域に水を集める傾向

H₂O雲

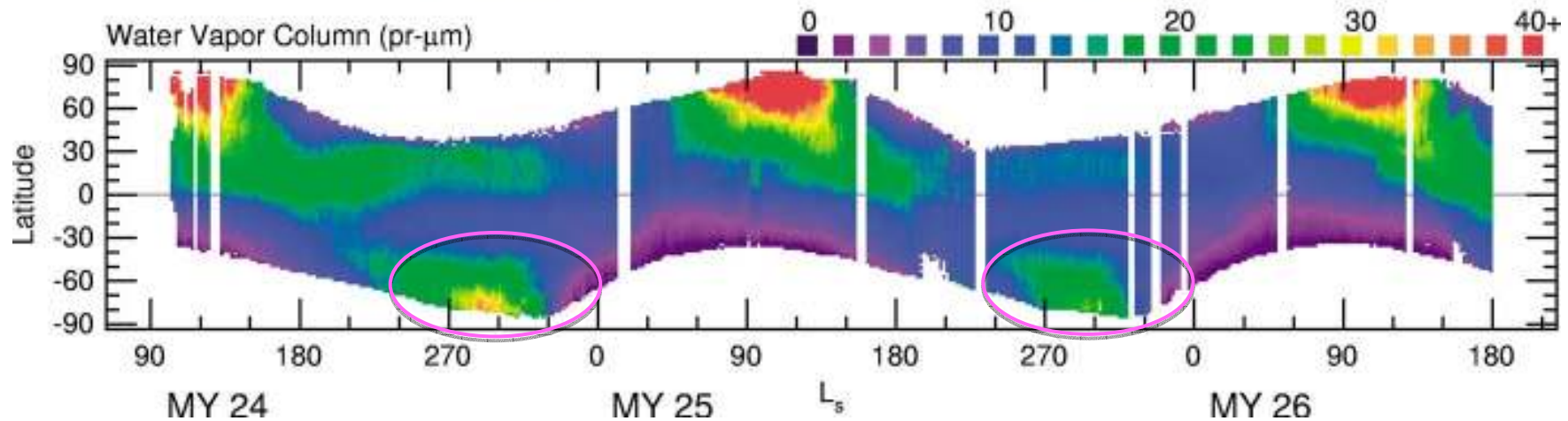
濃淡は
水蒸気
混合比



Montmessin et al. (2004)

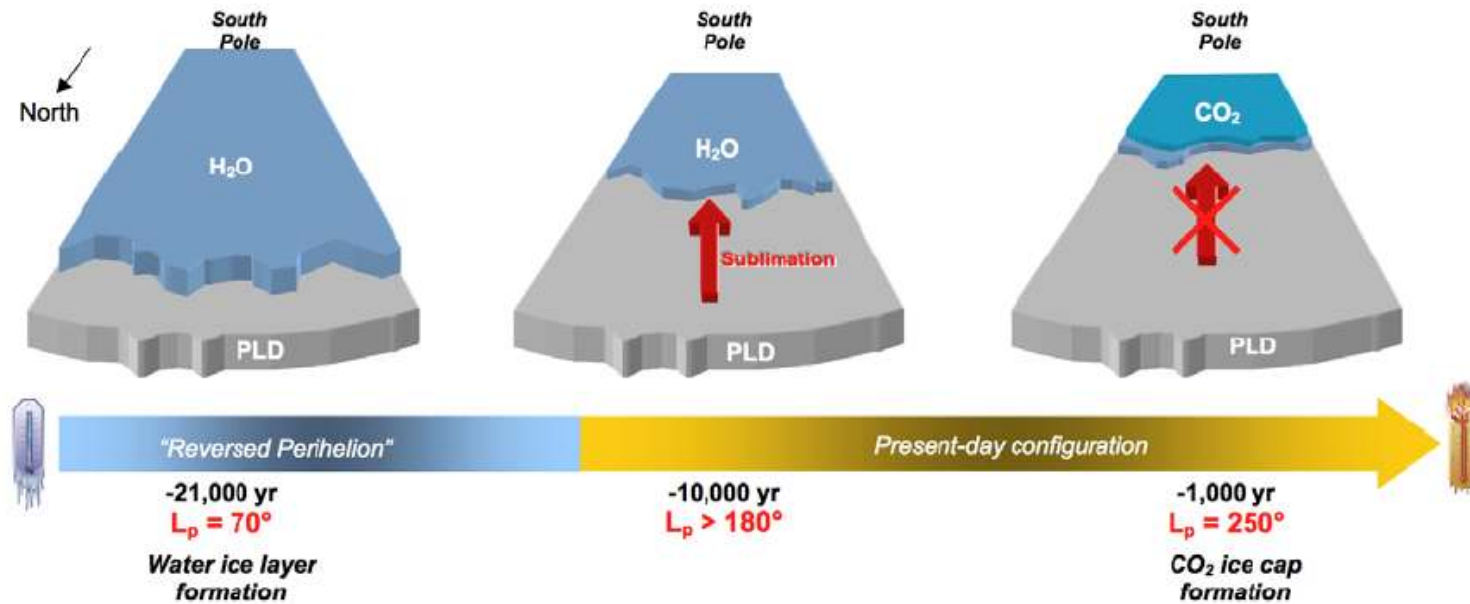


南半球の水の問題

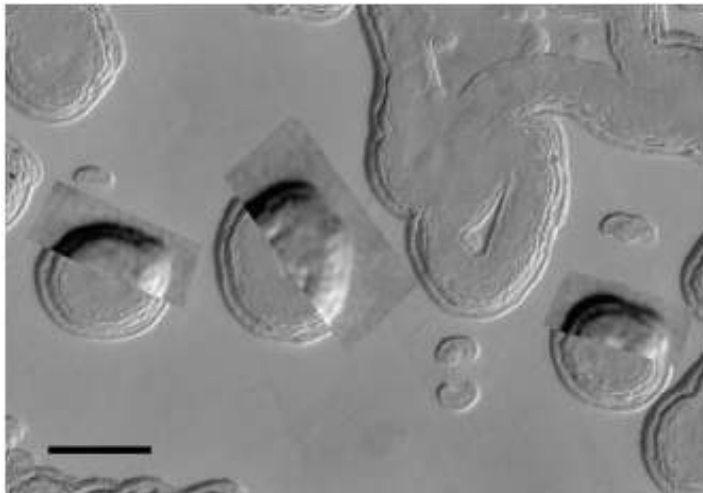


- 数値モデルは火星の水が全て北極域に集まることを予想
- モデル内で南極に CO_2 残存極冠を模した低温部 (cold trap) を置くと、水が安定化されて水蒸気の季節サイクルを再現
- なぜ、いつから南極に $\text{H}_2\text{O}+\text{CO}_2$ 永久極冠があるのか？

- 今の南極域の水は、近日点が北半球の夏にあった時代に南極域でH₂O氷が安定だったために蓄積したのかもしれない
- H₂O氷を安定化するCO₂残存極冠が現れたのは最近か

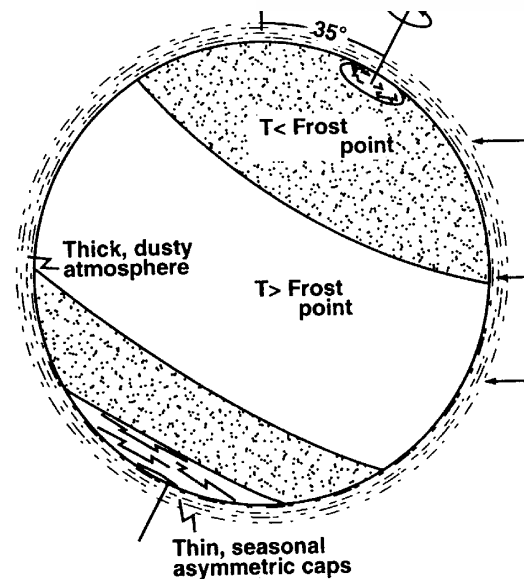
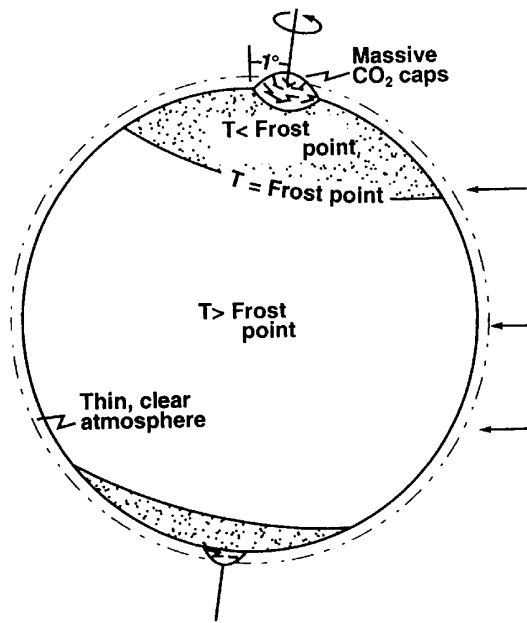
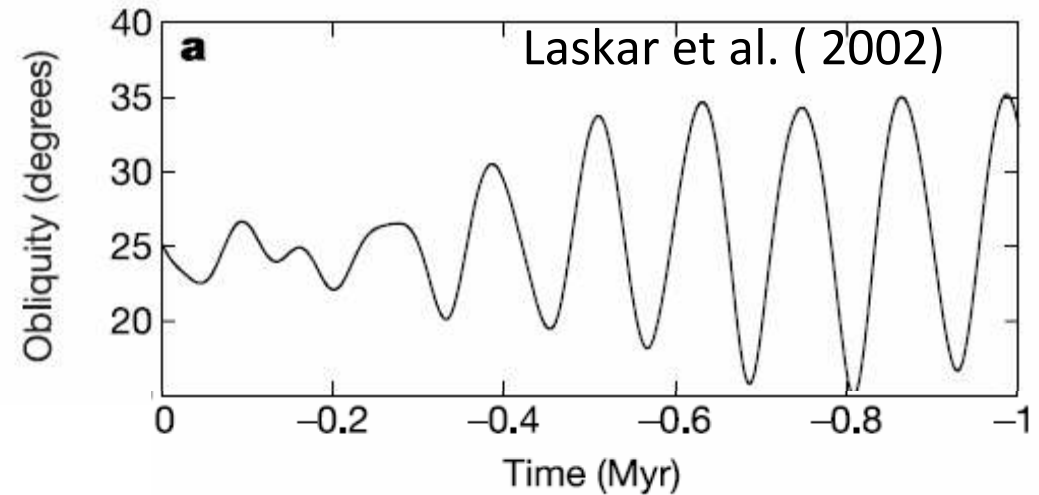


Montmessin et al. (2007)



MOCとHiRISE画像の比較
(Thomas et al. 2009)

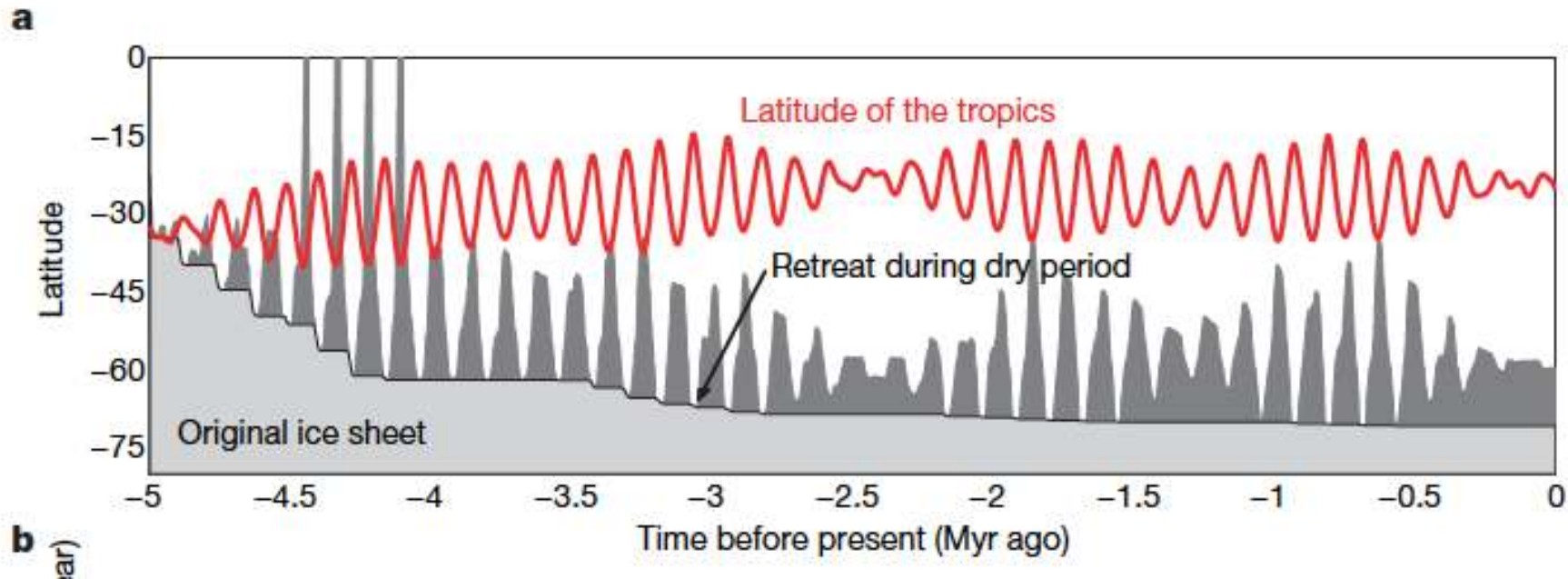
自転軸傾斜角 の変動の効果



- 自転傾斜角が小→極域が寒冷化→水蒸気が極域に凝結 (夏にもCO₂氷に覆われて蒸発しない)→水蒸気濃度低下
- 自転傾斜角が大→極域が温暖化→水蒸気が極域から蒸発 →水蒸気濃度上昇

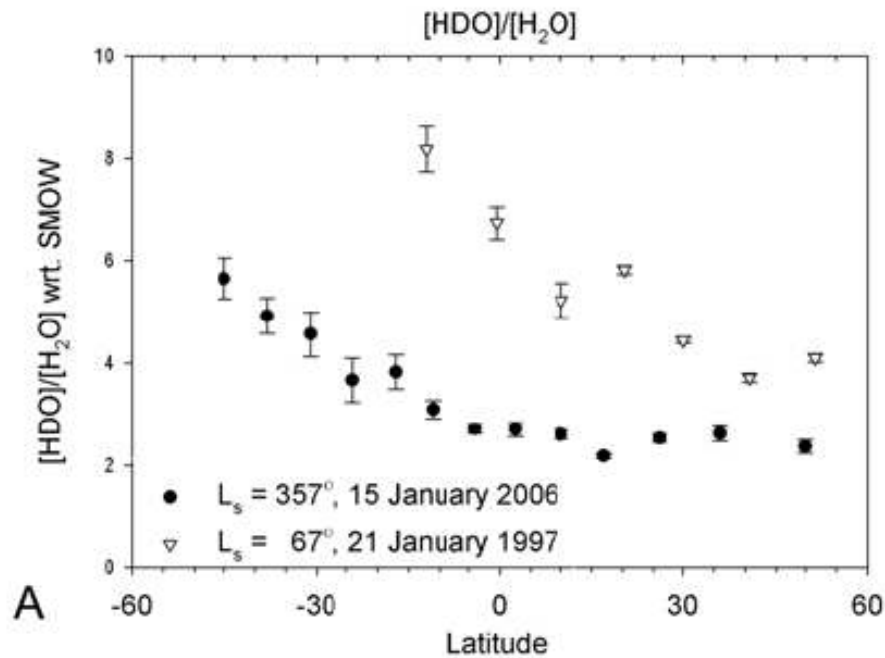
地下氷床の履歴？ (Schorghofer, 2007)

- ある時期に低緯度まで雪が降り積もって氷床が形成されたとして、そこからスタート
- 大気中の水蒸気量と地表温度の変化を強制として与える
- 最初の氷床がそのまま残っている成分(ice sheet)と、いったん蒸発して大気中の水蒸気となったあと再び地下に拡散で戻ってきた成分(pore ice)を区別



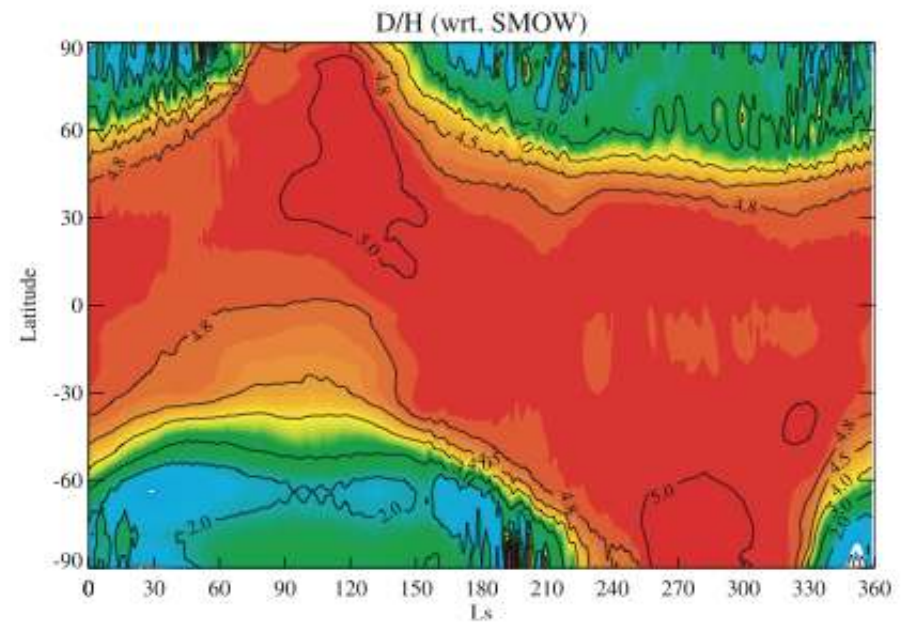
D/H比：相変化とリザーバーの手掛かり

赤外地上観測 (Novak et al. 2007)



北半球の春～夏に南でD/H大、
北でD/H比小

火星GCM (Montmessin et al. 2005)



気象学の観点からは左の時期
は北でD/H比が高いはず

北極冠に古い時代のD/H比の小さな水があり、これが北半球の夏に大気へ供給されるため？ (Fisher, 2007; 2008)

(将来的には氷床コアをサンプリングできると良い)

水輸送の問題意識

水蒸気の湧出や滞留は地表の物理特性や地下氷分布とどう対応するのか

極冠への水の出入りはどう起こるのか

南北半球間でどれほど移動するのか

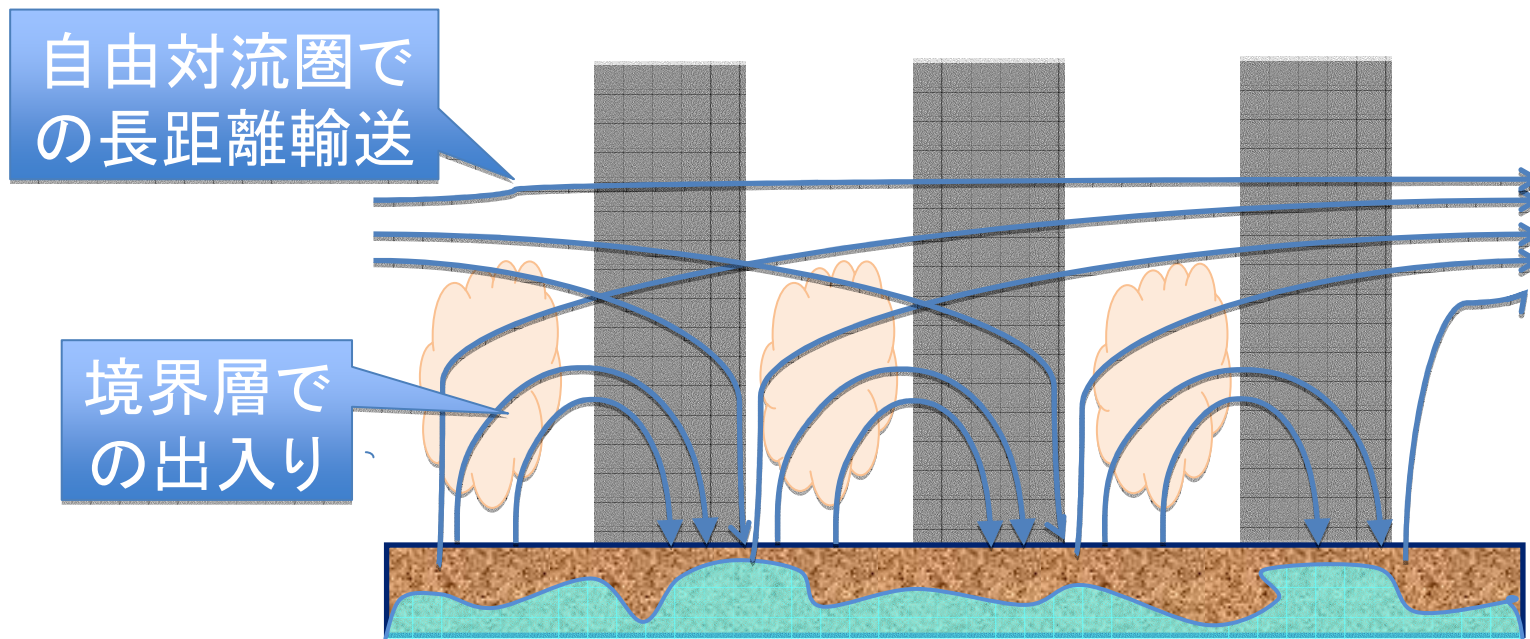
水蒸気ソースごとにD/H比はどう違うのか

水蒸気量はどうか決まるのか(輸送、雲形成、レゴリスとの出入りによるローカルな調節)

鍵となる数百km解像度の水蒸気分布とその変動を誰も見たことがない。morphologyを明らかにすることが最初のステップ。
→サブミリ波サウンダによる水蒸気3次元分布とD/H比

MELOSの視点：日変化とダスト

- 水蒸気の長距離輸送は日変化サイクルの残差であり、日変化サイクルの理解が最初のステップ。今回初めてそのような観測に挑む。
- ダスト加熱を伴う境界層の日変化サイクルとの関連も初めて観測



Gullies

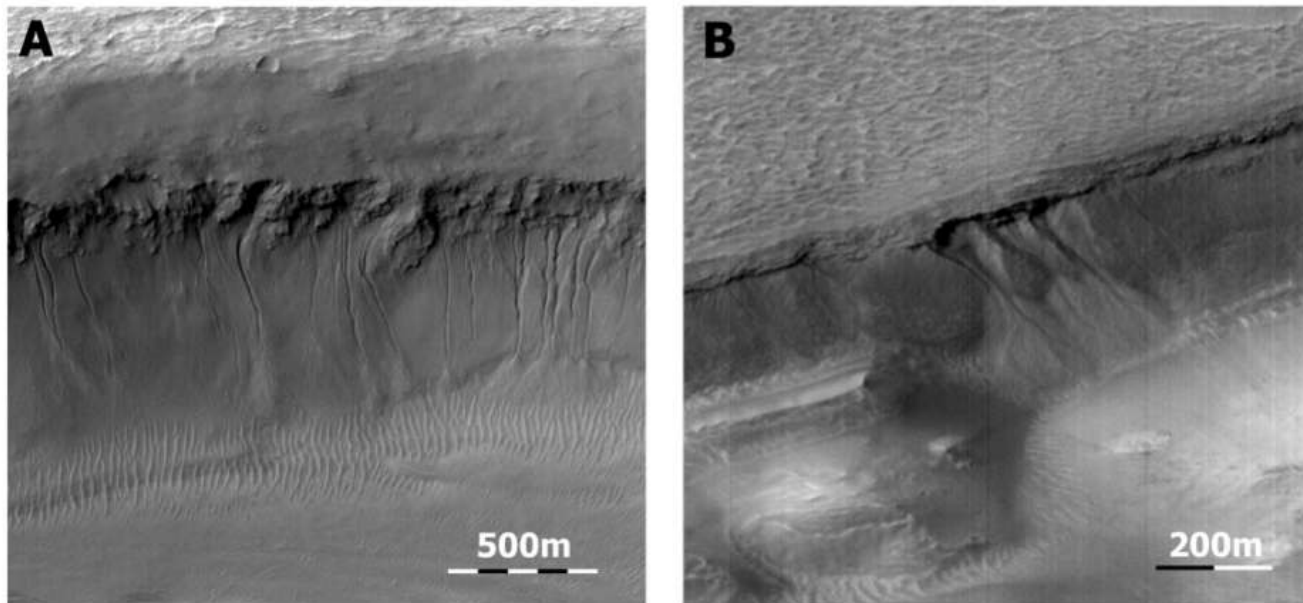
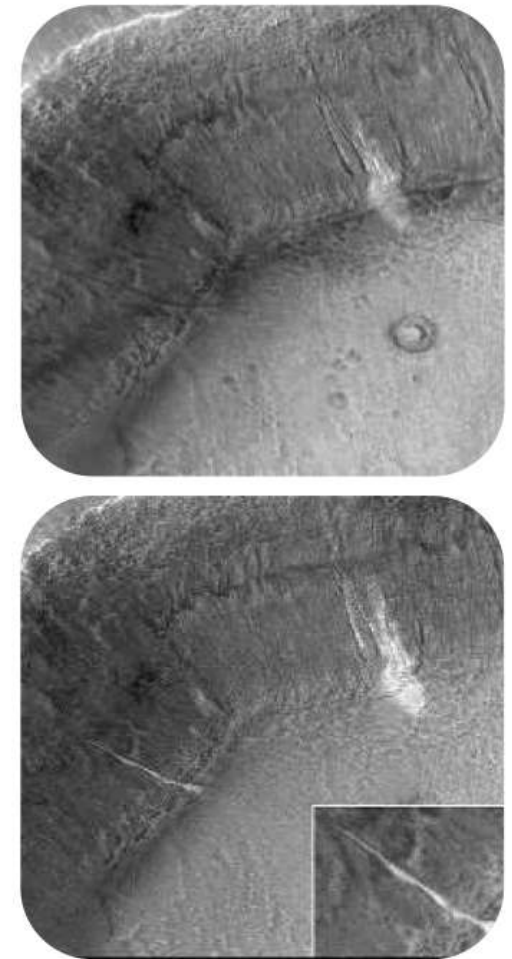


Figure 1. Images of gullies on Mars: (a) on the wall of Nirgal Vallis near $29.7^{\circ}\text{S} \times 39^{\circ}\text{W}$, subframe of Mars Orbiter Camera (MOC) image M03-02290, and (b) in a valley in Gorgonum Chaos near $38.5^{\circ}\text{S} \times 171.5^{\circ}\text{W}$, subframe of MOC image M07-02909. Gully features frequently appear to stem from or below cohesive strata exposed along the slope.



Martian weeping. New deposit (*bottom, left*) formed since top image was taken may be water-borne debris.

- 低緯度でも大気と接するところに水が存在
- 水蒸気観測で'wet spot'検出の可能性？

まとめ(に代えて)

凍結岩石惑星の気候はどう決まるのか

MELOSの目標

- 火星のダストや水が現在見られるように分布するのはなぜか
← 物質輸送を担う気象力学の素過程に新たなアプローチ
- 火星気候はどのような変動を内在し、今はどのような遷移過程にあるのか
← 観測をもとに火星気候モデルをより広い条件に適応させる
- 浮遊ダストが気候を支配するのは陸惑星・凍結惑星に共通する特徴か
← ダスト巻き上げの気象場への感度を明らかにする
- 鉱物エアロソルの粒径分布や高度分布はどう決まるのか
← 気象場と粒径の関係、地球のエアロゾルとの比較