



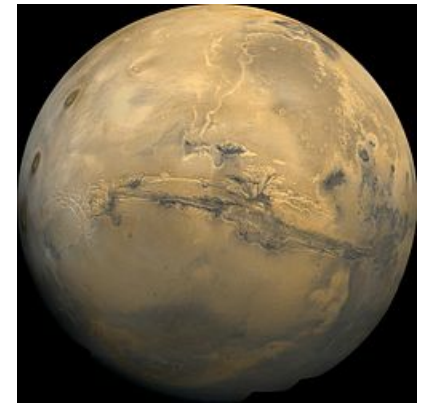
DCPAM/CReSS-Mars/ deepconv による 火星環境計算の現状

杉山耕一郎

2015/03/06
惑星大気研究会

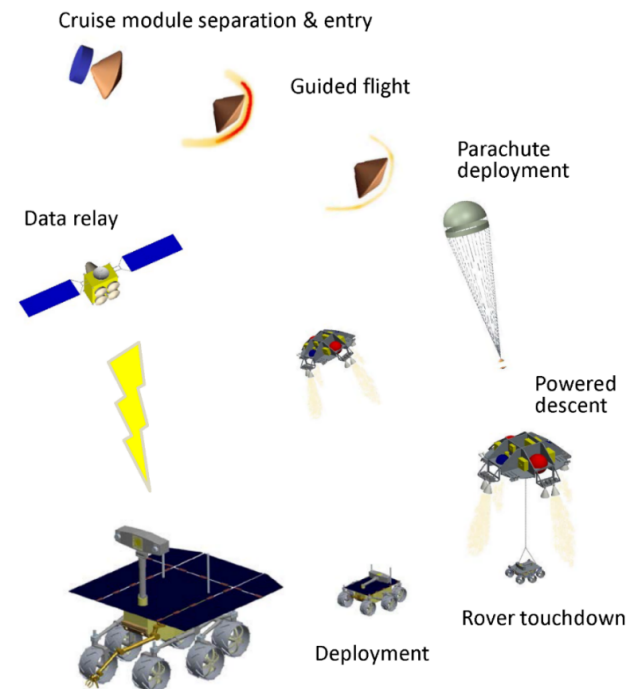
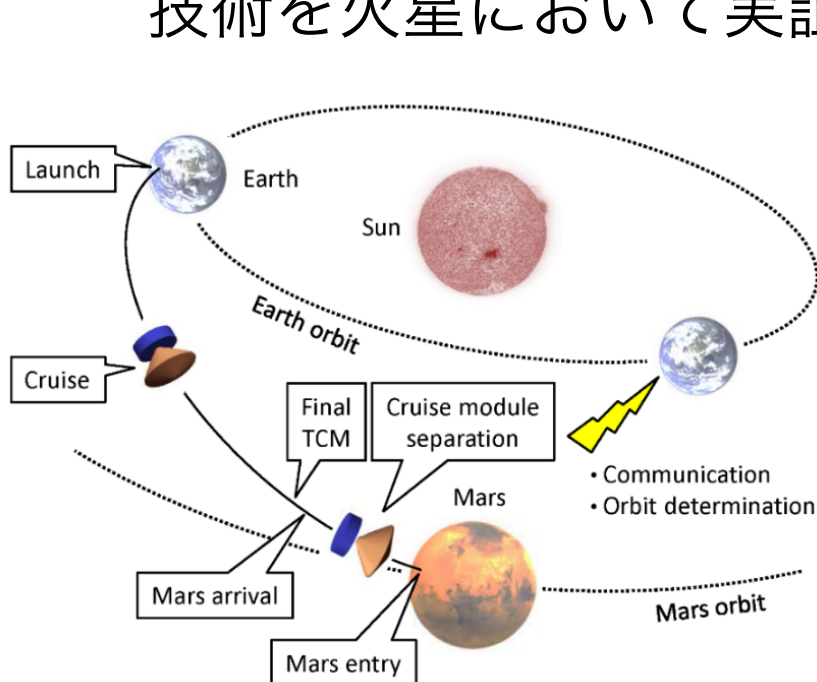
はじめに

- JAXA を中心に, 着陸船 (ローバー) による火星探査計画が議論
 - 将来的には国際協力の火星有人の話しも
- 火星探査計画において, ローバーの着陸候補地点の表層環境評価は必須.
 - 観測機器の設計
 - ローバーの安全な着地.
- 表層環境評価のために, 数値モデル群の整備を進めている
 - 大循環モデル: DCPAM (Takahashi et al. 2012)
 - 領域モデル: CReSS-Mars, deepconv (Sugiyama et al., 2013)
 - LES: SCALE-LES (Nishizawa et al. 2013)



火星着陸探査技術実証プロジェクト

- ・ 将来にわたる持続的な我が国独自の重力天体探査を実現するために、大気を有する重力天体へ着陸し探査目標点へ到達する技術を獲得する
- ・ 火星の探査目標地点近傍（半径 5 km 円内）へ着陸し、ROVER によって目標点へ到達し、土壌サンプリングを行うことによって、重力天体の表面探査を行う技術を火星において実証する



科学目標

- 生命探査

- 現在の知見で火星表面付近において最も存在確率の高い観測地点において、 10^4 細胞/グラム土壌の感度（地球で最も細胞密度の小さい地域で生命検出ができる感度）で生命観測実験を行い、検出可能な生命の存否を明らかにする

- 地質調査

- 生命探査実験を実施する土壌に含まれる鉱物の識別を行い、またRSLが流水現象であることについて根拠を得る。

- 地中レーダ探査

- 探査目標点として、現在の知見で火星表面付近において最も生命の検出確率が高い地域を選定し、探査目標点周辺の地質コンテキストを明らかにする

- ダストデビル観測 (カメラでのモニタリング)

- ガス測定 (主としてメタンガス)

- 気象観測 (温度・気圧・地表面温度と日射・地面放射・風向風速)

- ダスト計測 (微粒子が測定部を通過する頻度, 微粒子のサイズ, 通過速度を計測)

- 電磁波・音波計測

DCPAM を用いた表層環境評価

小高正嗣, 杉山耕一郎, 高橋芳幸, 西澤誠也,
林祥介, はしもとじょーじ

DCPAM を用いた表層環境評価

- DCPAM のシミュレーション結果と過去の探査機 (バイキング, マーズパスファインダー) による観測結果との比較を行い, モデルを用いた適切な環境評価方法の検討を行った.
- 上記の評価方法に基づいた, 探査機の着陸候補地点における環境評価の結果を示す.
 - 地表面温度と地表気温 ($z = 1\text{m}$ の換算値) [K]
 - 地表風速の絶対値 ($z = 1\text{m}$ の換算値) [m sec^{-1}]
 - 地表気圧 (高度補正值) [Pa]
 - 太陽放射直達光 [W m^{-2}]
 - 太陽放射散乱光 [W m^{-2}]
 - 空温度 [K]

DCPAM

- プリミティブ方程式を用いたスペクトルモデル
- 物理過程:
 - 乱流混合 (Mellor & Yamada, 1982)
 - 地表面過程 (Beljaars and Holtslag, 1991)
 - CO₂ の凝結と昇華
 - 大気とダストの放射過程
- 地表面のアルベド, 熱慣性, 地形は MGS の観測結果に基づく

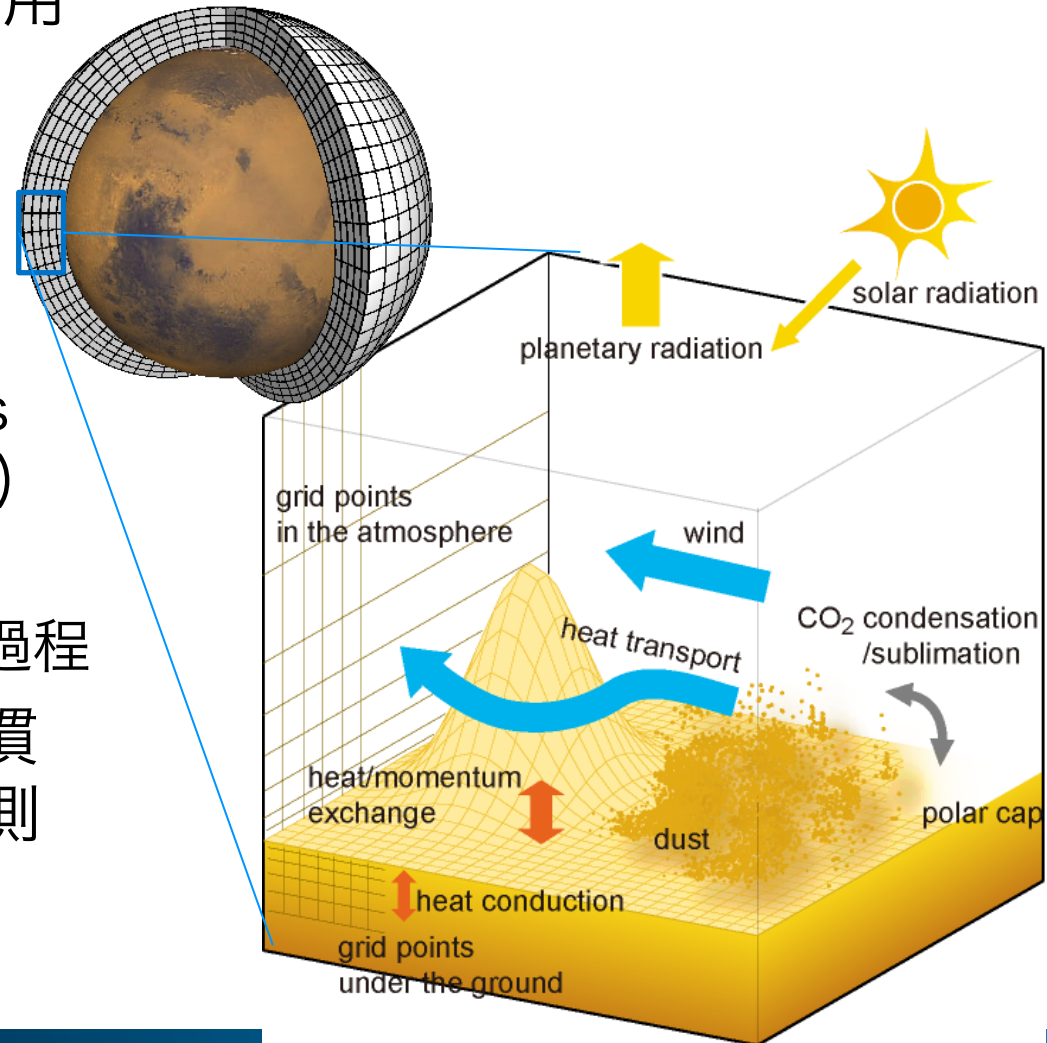
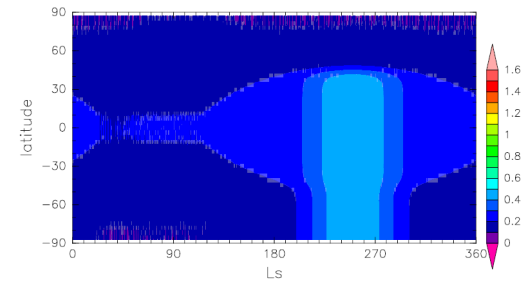


Figure 1: Schematic figure of DCPAM

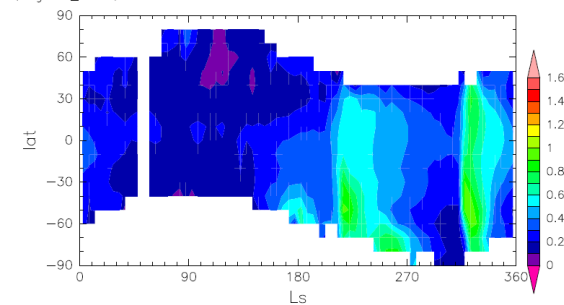
計算設定

- 水平切断波数 31
 - 対応する水平格子間隔は約 200 km
- 鉛直層数 36
 - モデル最下層高度は約 3 m
- ダストの空間分布とその季節変化は、観測結果 (MGS シナリオ)
or 光学的厚さ一定 ($\tau = 0, 1, 5$)
- 初期条件は等温度静止, 積分時間は 7 火星年.
 - 最後の 2 火星年のデータを解析に用いる

dust optical depth at 0.67 micron meter at the surface
(degree_north)



dust_optical_depth_at_14_LST
(degrees_north)

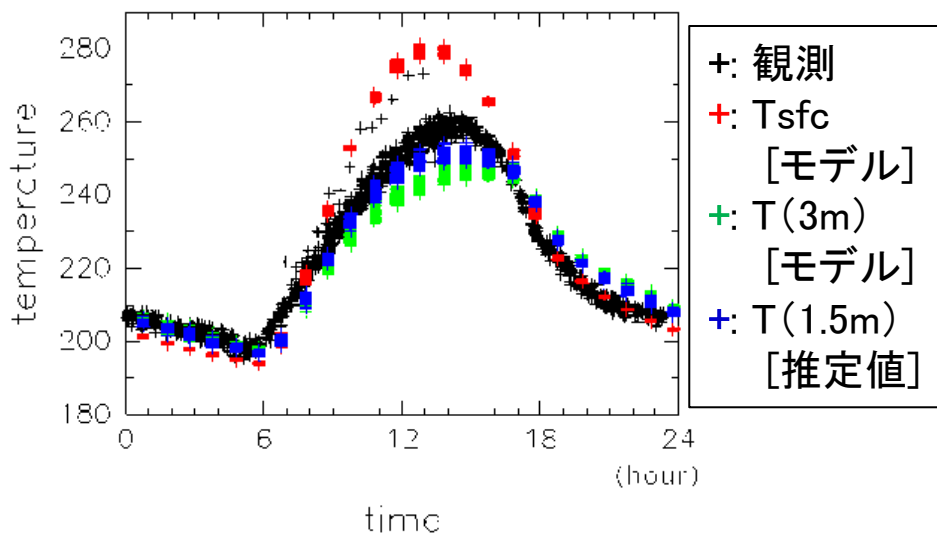


東西平均した可視光(波長 $0.67 \mu\text{m}$)に対するダストの光学的厚さの季節変化. (左図)モデルに与えた分布 (右図)マーズグローバルサーベイヤーによる観測結果.

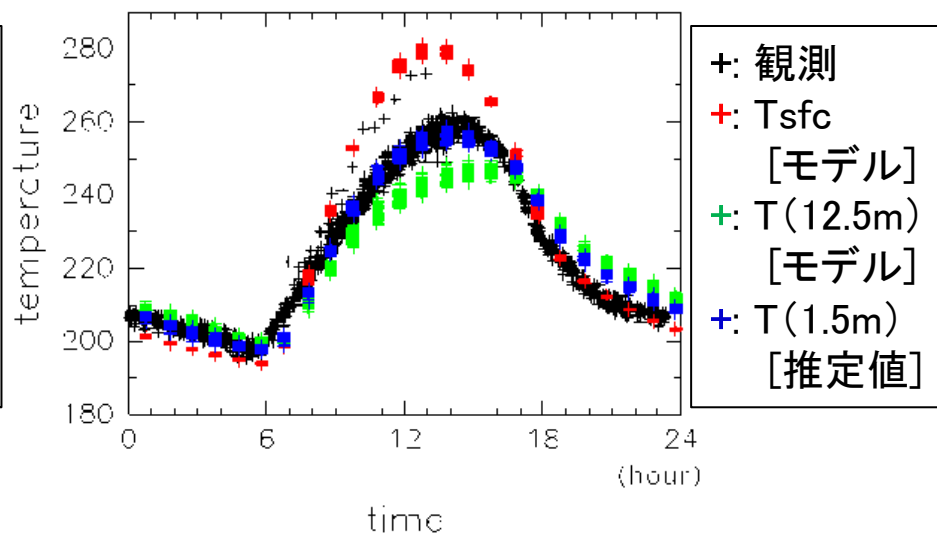
観測結果との比較：地表気温

- ・ マーズパスファイnderにより観測された高度 1.5 m の気温の日変化は, モデル第2層 (高度約 12.5 m) の気温と風速を用いた推定値によって良く再現された.
 - 中立成層の場合の対数型の風速と気温の鉛直分布を仮定.

(K) T(3m) を用いた T(1.5m) の推定



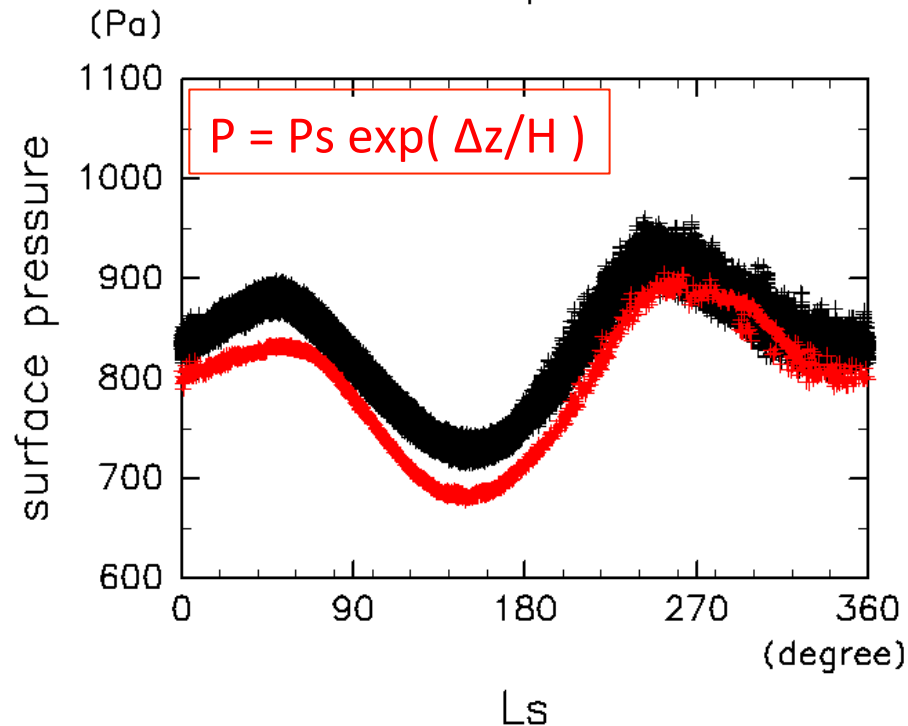
(K) T(12.5m) を用いた T(1.5m) の推定



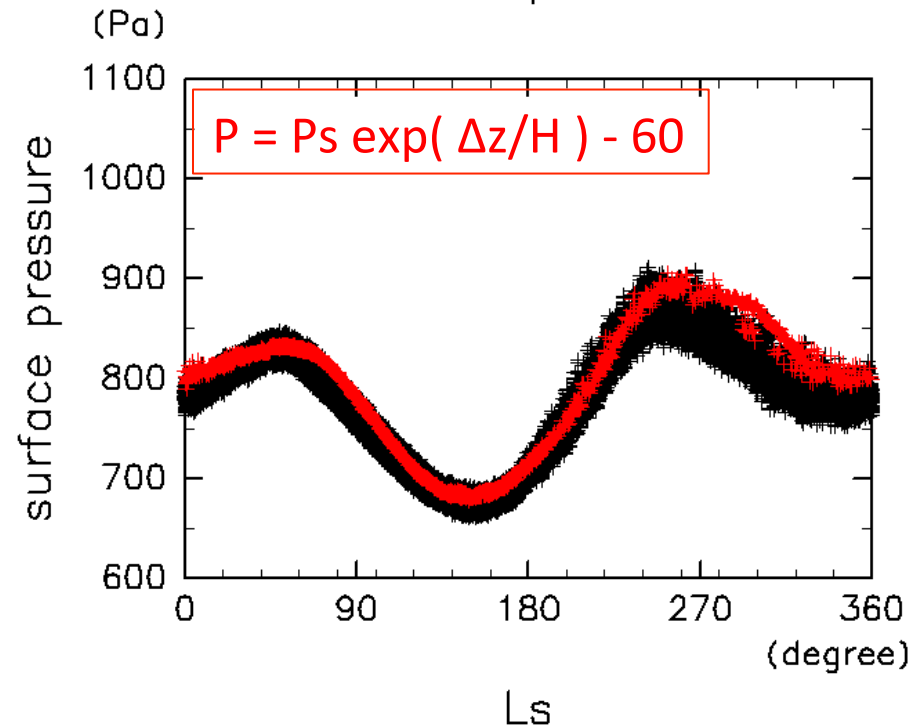
観測との比較：地表気圧

- ・ バイキング1号により観測された地表気圧の季節変化は、モデルの地表気圧に高度補正と大気量補正を行った推定値によって良く再現された。
 - 静水圧平衡を仮定, モデル第10層の気温に対応するスケールハイト使用

surface pressure



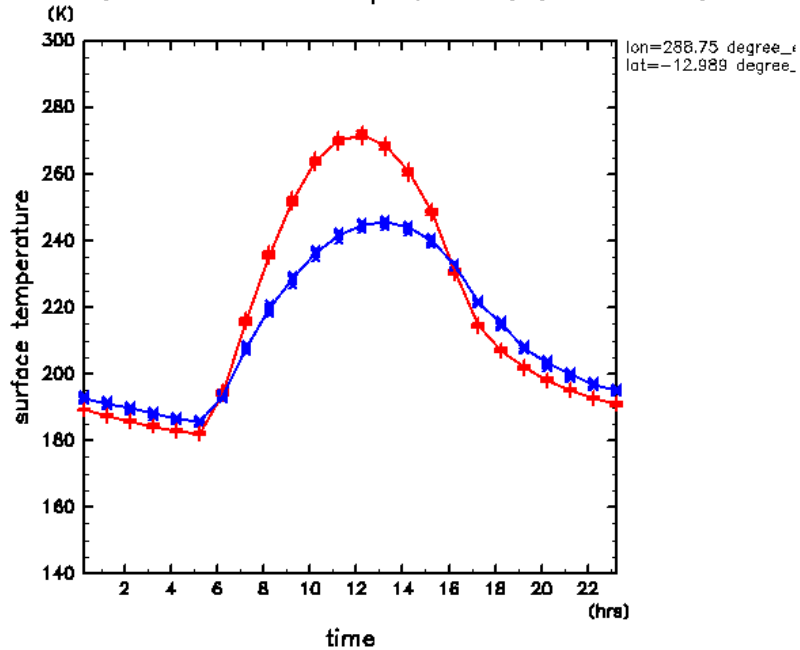
surface pressure



表層環境評価の例

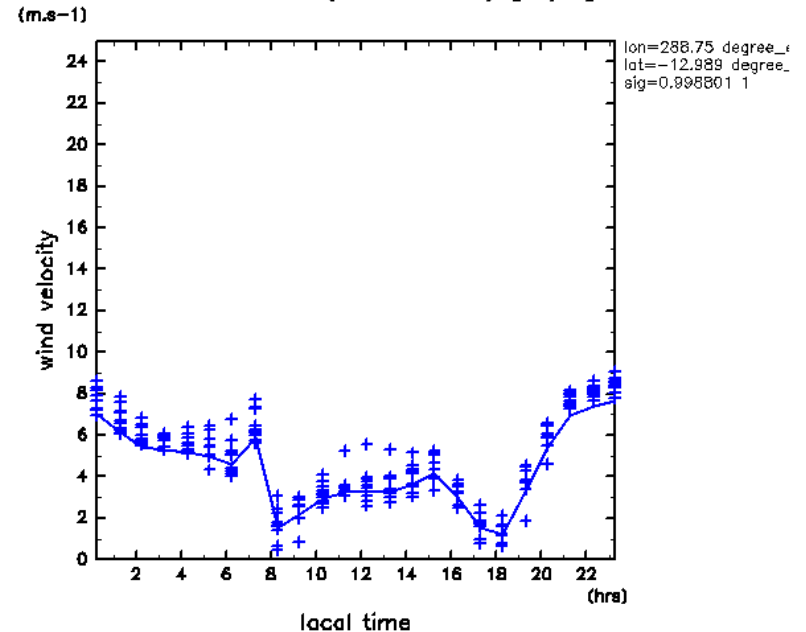
- ・ 地表面温度・気温の日変化

Ground / Surface Air Temp. (z=1m) (Ls=14-19)



- ・ 風速の日変化

Surface Wind (Ls=14-19) [m/s]

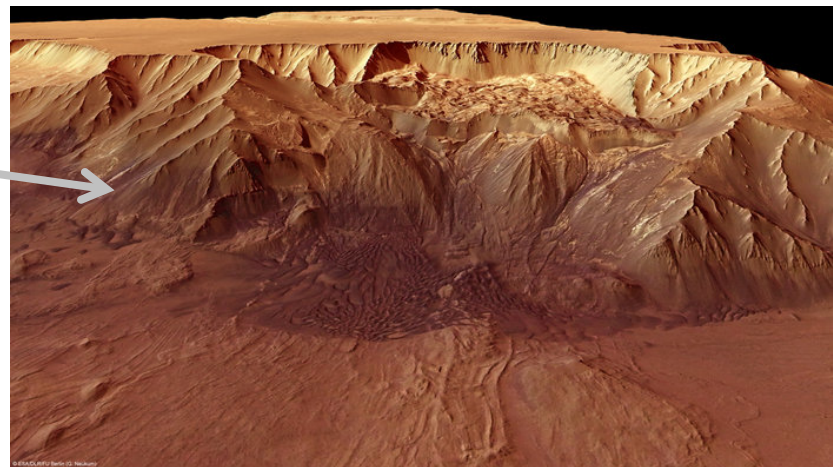
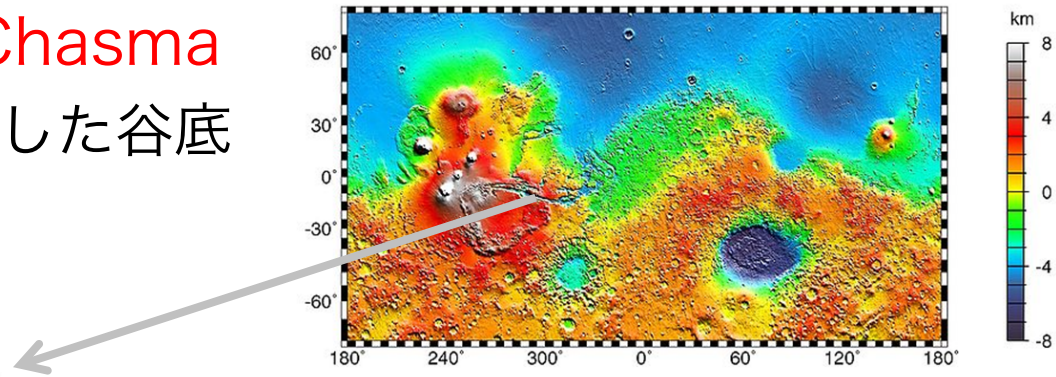
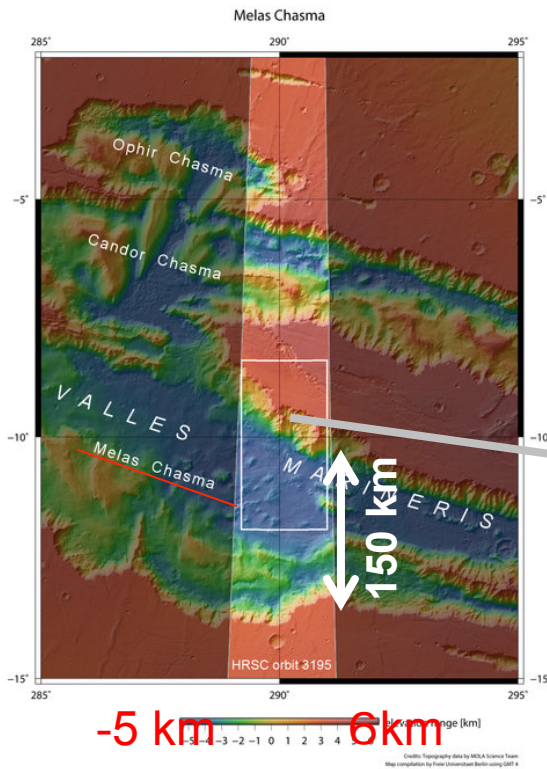


CReSS の火星大気への適用

杉山耕一郎, 小高正嗣, 中島健介, 高橋芳幸,
乙部直人, 西澤誠也, はしもとじょーじ, 林祥介,
長谷川晃一, 榊原篤志, 坪木和久

CRess-Mars を用いた表層環境評価

- 地形の影響を考慮。
 - 気温や地表面温度の日変化・風速の平均値や偏差などの統計量を得ることを目指す。
- 着陸候補点：Melas Chasma
 - 周囲から 9 km 陥没した谷底



CReSS-Mars の概要

- CReSS ver.3.4.3 ベース.
- 準圧縮方程式系
- 物理過程
 - 放射過程：Takahashi et al. (2003, 2006)
 - CO₂ とダストによる吸収・散乱を考慮
 - 乱流過程：1.5 次のクロージャー (Klemp and Wilhelmson, 1978)
 - 雲微物理過程：なし
 - 地表面フラックス：Louis et al. (1981)
 - 地中温度：鉛直一次元熱伝導方程式

本発表では

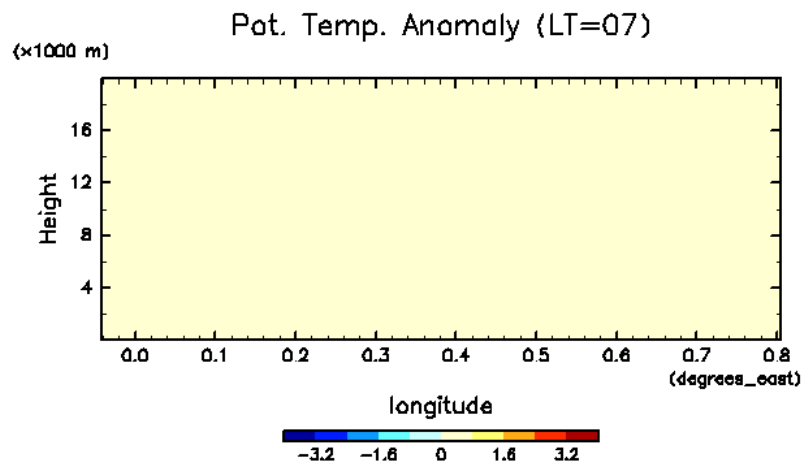
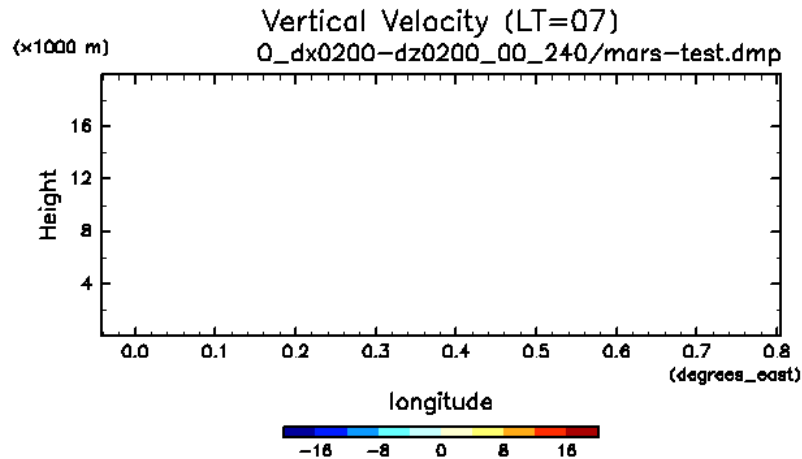
- ・ 昨年度より, CReSS を火星大気に適用
- ・ 計算結果の妥当性を検討するための理想化実験
 - 地形と大規模循環の効果を考慮せず
 - 他の数値モデルの計算結果との比較
 - NASA のローバーの観測結果と比較
- ・ ローター着陸予定地における数値実験
 - 地形と大規模循環の影響を考慮

理想化実験 (1)

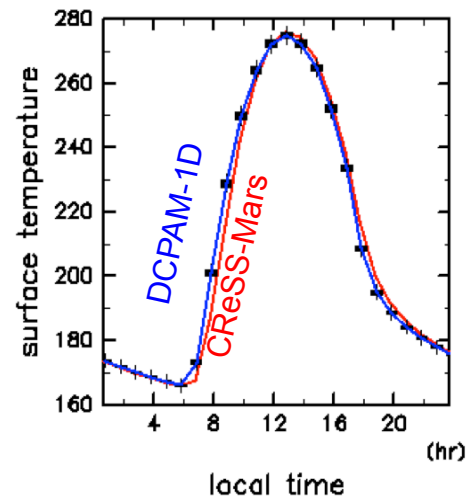
- 水平鉛直 2 次元の理想化実験
 - 地形と大規模循環の効果を考慮しない
 - 鉛直一次元放射対流モデル (DCPAM-1D) の計算結果と比較
 - 同じ放射計算コードを利用
- 計算設定
 - 地点: ローバー着陸 (Spirit)
 - ダストの光学的厚さ: $\tau = 0.3$
 - 地形なし
 - 格子点数: 252×200 (水平鉛直 2 次元)
 - 解像度: $\Delta x = 200$, Δz (mean) = 200, Δz (min) = 3 m
 - 周期境界条件 (水平)
 - 積分時間: 6 days.
 - 初期温度分布: DCPAM-1D の結果

理想化実験 (1)

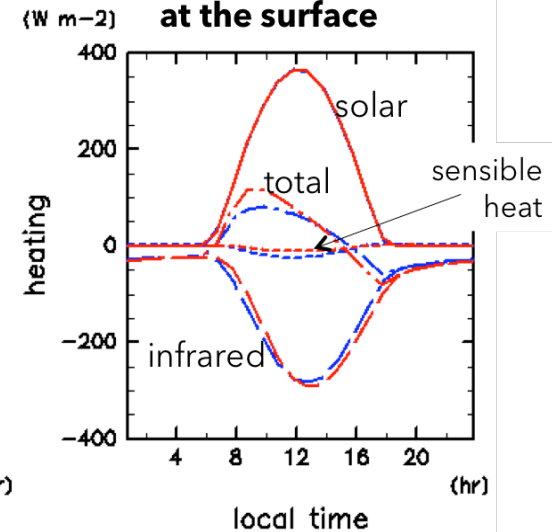
- 地表面温度や地表面熱収支の日変化は、鉛直一次元放射対流計算 (DCPAM-1D) と概ね一致



Surface temperature

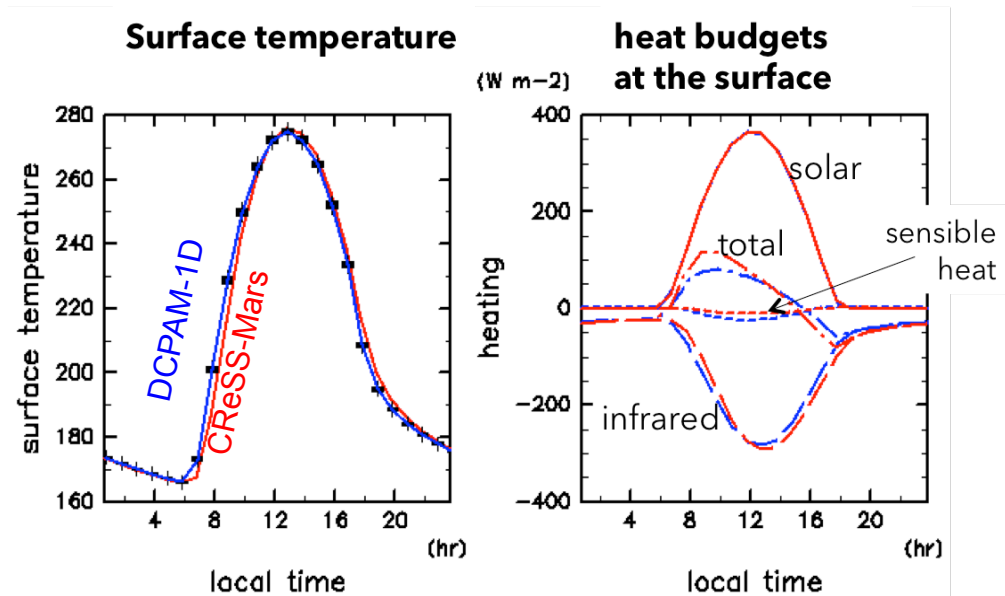
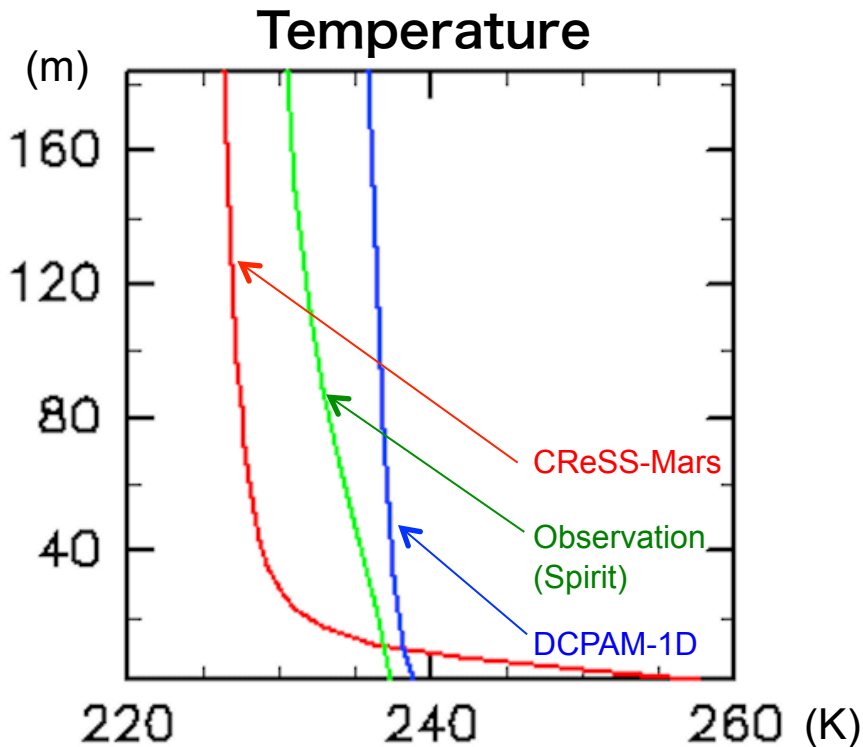


heat budgets at the surface



理想化実験 (1)

- 地表面温度や地表面熱収支の日変化は、鉛直一次元放射対流計算 (DCPAM-1D) と概ね一致
- 問題点: 地表面付近の温度勾配が非常に大きい



理想化実験（1）まとめ

- 火星大気用放射計算コードの移植は完了
 - 地表面温度や地表面熱収支の日変化は, 同じ放射計算コードを利用する数値モデル (DCPAM-1D) の結果と概ね一致
 - 火星は大気が薄いので ($P_s = \sim 6$ hPa), 地表面の温度や熱収支は放射でほぼ決まる.
- 接地境界層の温度構造の違いは, 地表面と大気との熱のやり取りの部分に原因があるのだろう.

ソースの確認 & 文献調査

- CReSS の混合長の定式化は、気象庁 MSM 由来。
 - Deardorff (1980) を修正
 - 乱流拡散係数が小さいため、下層に湿りが溜まったり、冬季の日本海の混合層が十分発達しないという問題があったらしい (気象庁数値予報課報告・別冊 54 「気象庁非静力学モデル II」)

(1) 非局所効果の導入

第 4.3.2 項 (2) で述べたように、1-方程式では混合長を何らかの方法で与える必要がある。Deardorff (1980) では、混合長 ℓ を z を地表からの高さとして

$$\frac{1}{\ell} = \frac{1}{kz} + \frac{1}{\ell_\infty} \quad (4.4.10)$$

$$\ell_\infty = \begin{cases} \Delta s & N_1^2 \leq 0 \\ \min \left(\Delta s, 0.76 \frac{E^{\frac{1}{2}}}{N_1} \right) & N_1^2 > 0 \end{cases} \quad (4.4.11)$$

で与えており、JMA-NHM での実装においてもこれに沿ったオプションがある。ここで、 N_1 は水蒸気を考慮したブランチ・バイサラ振動数

$$N_1^2 = \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta_1}{\partial z} \quad (4.4.12)$$

で θ_1 は液水温位 (定義は (4.2.13) 式) である。

地表面近傍で Prandtl の混合距離理論に従うように Deardorff (1980) を修正したもの。

ソースの確認 & 文献調査

- 火星 LES モデル研究では, Deardorff (1980) を使うのが良いと一行さらっと書いてある (Spiga et al., 2010).

In the new LMD Martian LES model, subgrid-scale (SGS) turbulent mixing is not computed by the SF09 Mellor–Yamada 2.5-order (MY2.5) scheme; instead, strategy adopted by Moeng *et al.* (2007) for terrestrial LES with WRF is chosen. Firstly, mixing terms are evaluated in physical space (x,y,z) rather than along coordinate surfaces. Secondly, the three-dimensional SGS turbulent kinetic energy e (prognostic) is advected by the resolved motions in the LES and used to compute the horizontal and vertical mixing coefficients through a 1.5-order closure (Deardorff, 1980; Skamarock and Klemp, 2008). This SGS scheme is thought to yield better performance in describing afternoon mixed layers than the SF09 MY2.5 scheme (Stull, 1988).

理想化実験 (2)

- 地表面付近の温度プロファイルは、**混合長**に大きく依存する可能性がある。
- **混合長**をパラメタとした水平鉛直 2 次元の**感度実験**
 - 背景風や地形を考慮しない理想化実験.
 - NASA ローバーの観測結果や、鉛直一次元放射対流モデル (DCPAM-1D) の計算結果と比較

理想化実験: 計算設定

地表面近傍でPrandtl の混合距離理論に従うように Deardorff (1980) を修正したもの。

- 変えるパラメタ:
不安定成層の混合長

- ケース 1:

CReSS オリジナル

$$l = \kappa z l_0 / (\kappa z + l_0)$$

(CReSS ver. 3.4)

- ケース 2: Deardorff

$$l = l_0$$

(Deardorff, 1980)

- $l_0 = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$,
 - $\kappa = 0.4$

- 地点: ローバー着陸点
(Spirit, Opportunity)
- ダストの光学的厚さ:
 $\tau = 0.3, 0.5$

- 地形なし

- 格子点数: 252 x 200
(水平鉛直 2 次元)

- 解像度:

$$\Delta x = 200 \text{ m,}$$

$$\Delta z (\text{mean}) = 200 \text{ m,}$$

$$\Delta z (\text{min}) = 2 \text{ m}$$

- 周期境界条件 (水平)

- 積分時間: 6 days.

- 初期温度分布:

DCPAM-1D の結果

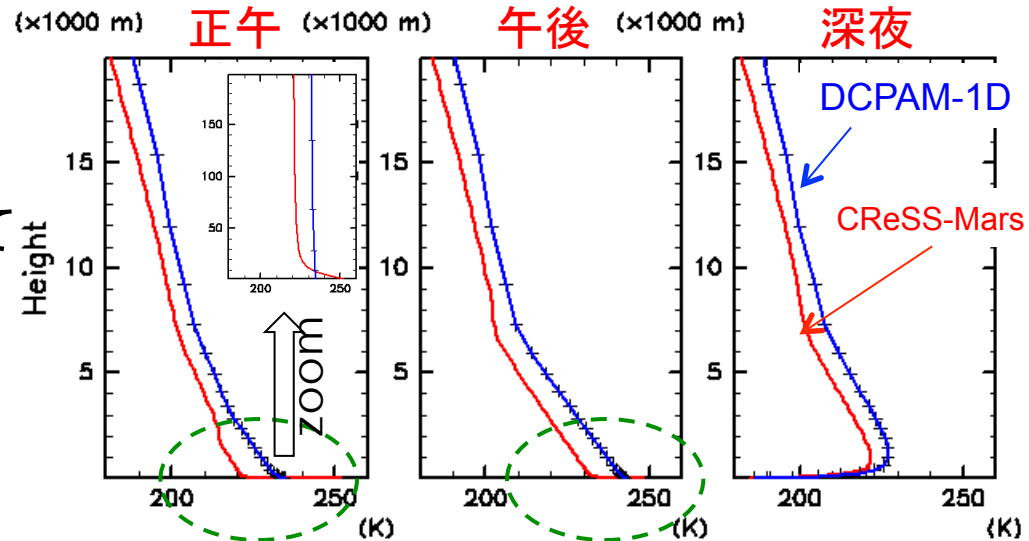
温度プロファイル (Spirit 観測点)

混合長に強く依存

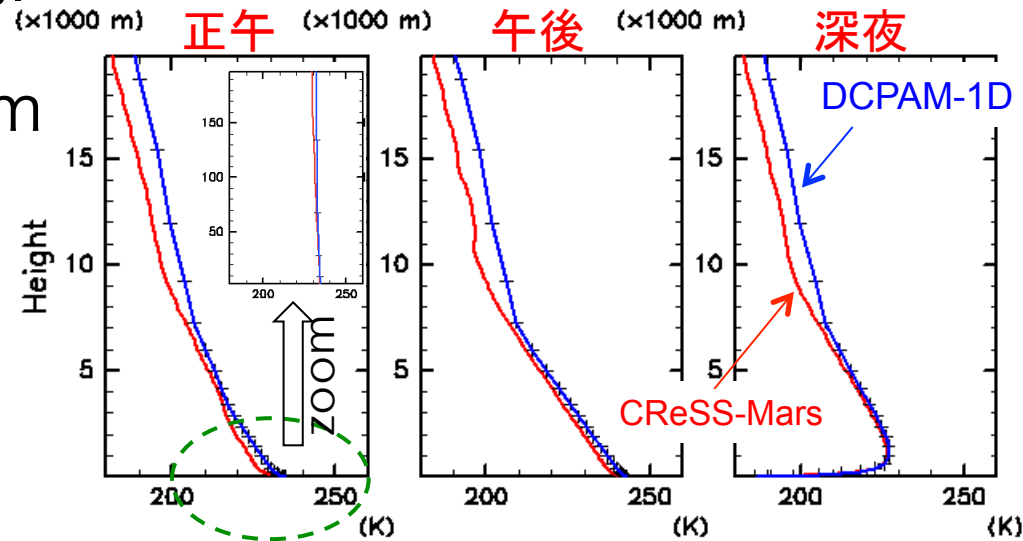
- CReSS オリジナル:
 - DCPAM-1D に比べて日中の地表面付近の温度勾配が大きい。
- Deardorff:
 - 8 km 以下では DCPAM-1D と整合的。

両ケースとも、高度 10 km より上空で温度が低い

温度 (CReSS オリジナル)



温度 (Deardorff)

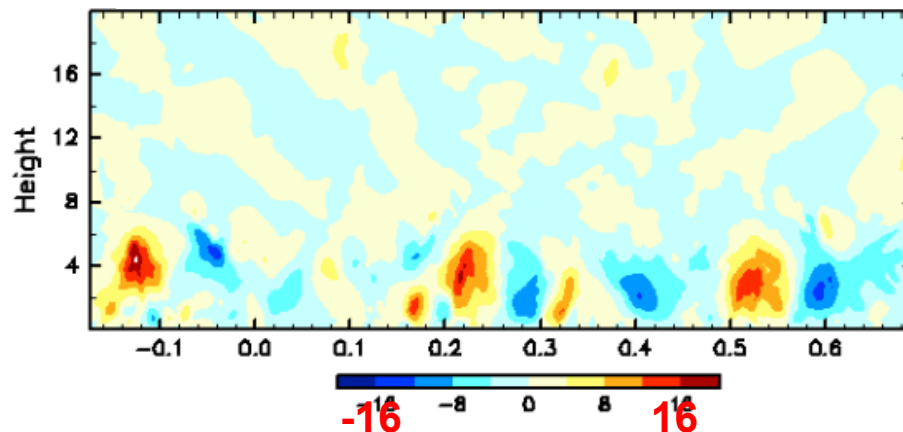


鉛直速度分布 (Spirit 観測点)

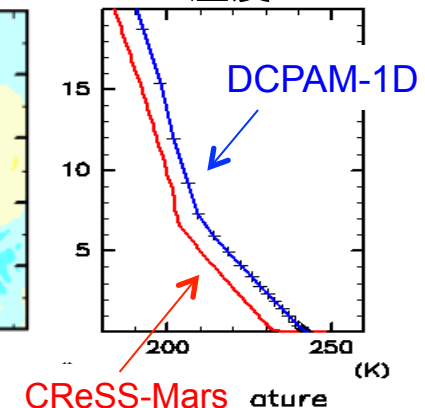
鉛直速度の大きさ, 対流層の厚さは混合長に強く依存

- Deardorff: 対流が 10 km 付近まで発達
=> 高度 10 km 付近での気温低下の原因

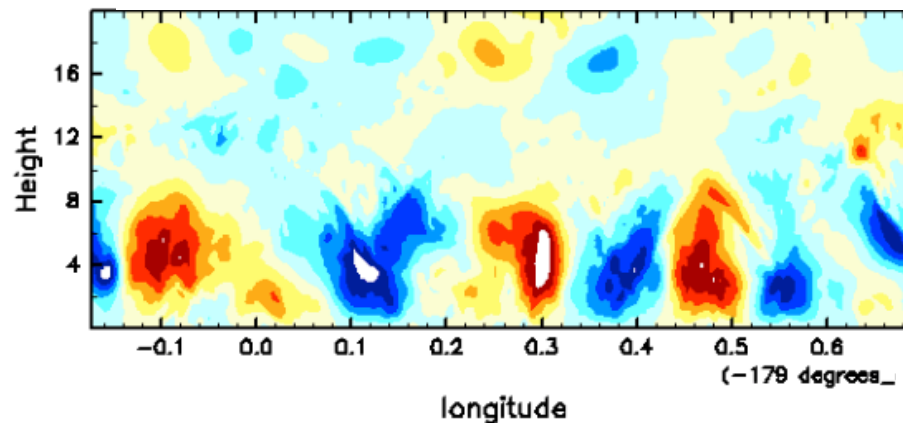
(x1000 m) 鉛直速度 (CReSS オリジナル, LT=15.7)



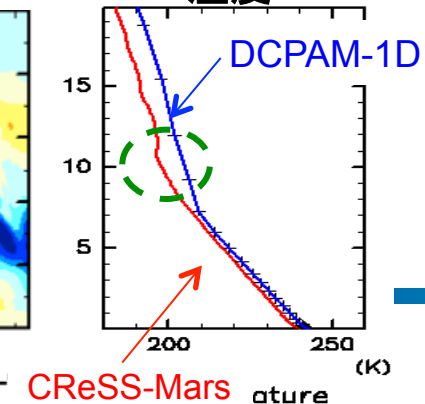
温度



(x1000 m) 鉛直速度 (Deardorff, LT=15.7)

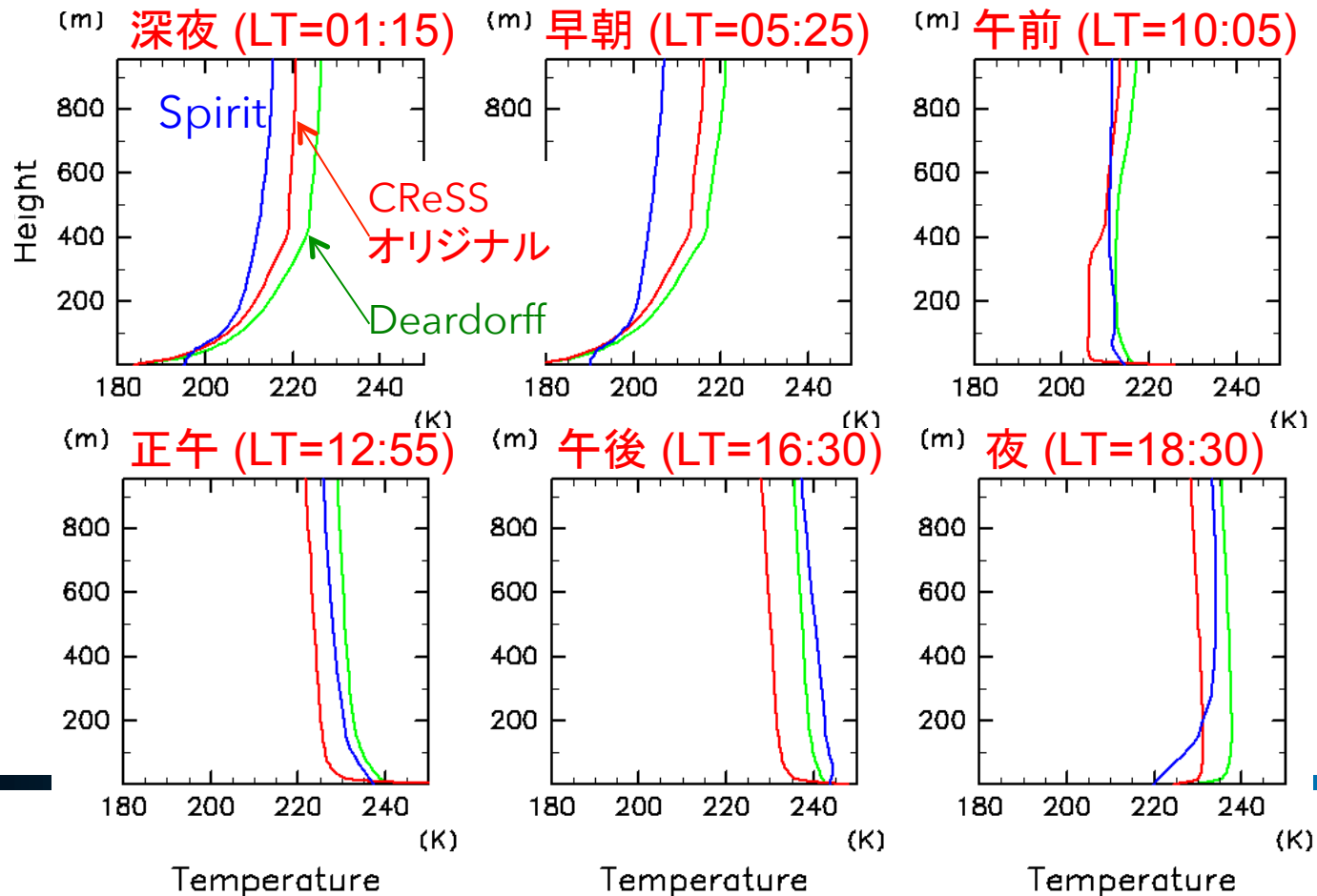


温度

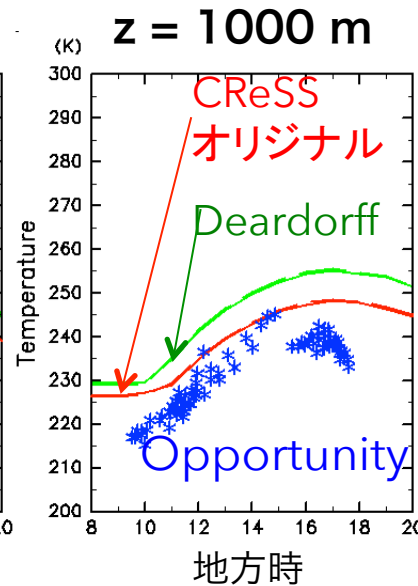
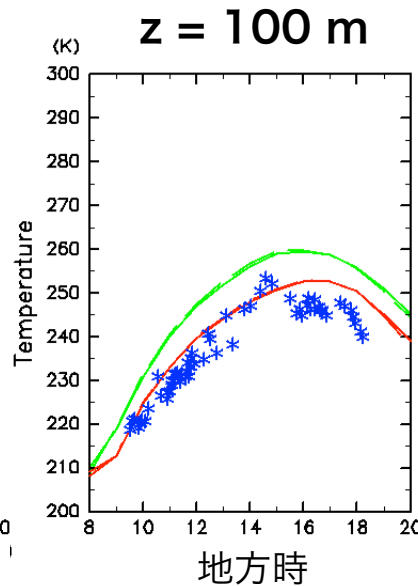
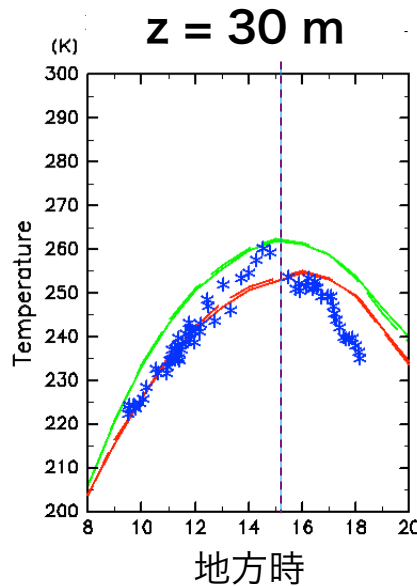
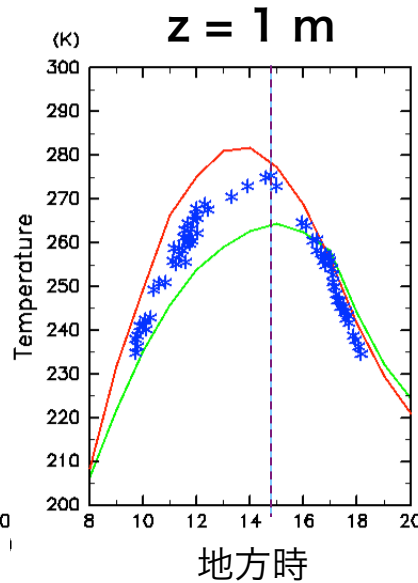
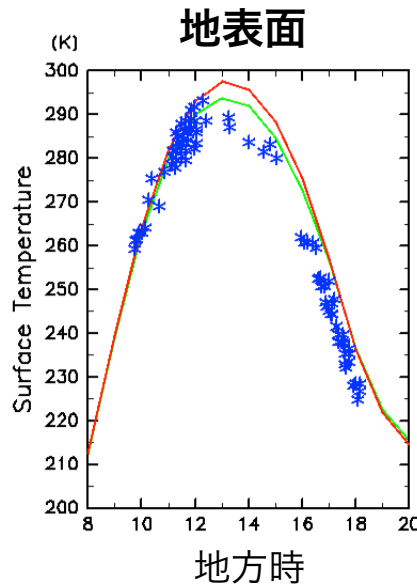


Spirit の観測との比較

- 日中, Deardorff の方が観測された温度勾配とより一致
 - 夜間・早朝の温度プロファイルはあまり合っていない



Opportunity の観測との比較



- 両ケースとも、温度の日変化の傾向は大きく外れてはいない
 - $z = 1 \text{ m}, 30 \text{ m}$ でピークを取る時刻は deardorff ケースの方がより一致

理想化実験（2）まとめ

- 混合長をパラメタとした感度実験を実施
 - 背景風や地形を考慮しない理想化実験
 - 地表面付近の温度プロファイルは、混合長の与え方に強く依存
 - 混合長として Deardorff (1980) を採用することで、NASA の火星探査ローバー Spirit と Opportunity の観測した日中の鉛直温度プロファイルと整合的な計算結果が得られた。
- 今後の数値実験においては
Deardorff (1980) の混合長を利用

より現実的な設定の数値実験

- **地形と大規模循環の効果**を考慮した数値実験
 - 大規模循環の効果を導入するために, 初期値および境界値として, 大循環モデル DCPAM によって作成された火星全球気象データを利用する.
- 比較的地形がなだらかな **Opportunity** の着陸地点 (1.9S, 2.5W) 付近での数値実験
 - 計算設定
 - 計算領域: 水平 350 km, 鉛直 60 km
 - 解像度: $dx = dy = 700$, $dz = 500$, $dz_{min} = 20$ m
 - ダストの光学的厚さ: 0.3
 - 季節: 春分 ($L_s = 0^\circ$)
 - 数値積分は 3 日分
 - 時間ステップ; $dt_{big} = 0.2$, $dt_{small} = 0.1$
 - 前述の理想化実験の 1/5 程度.

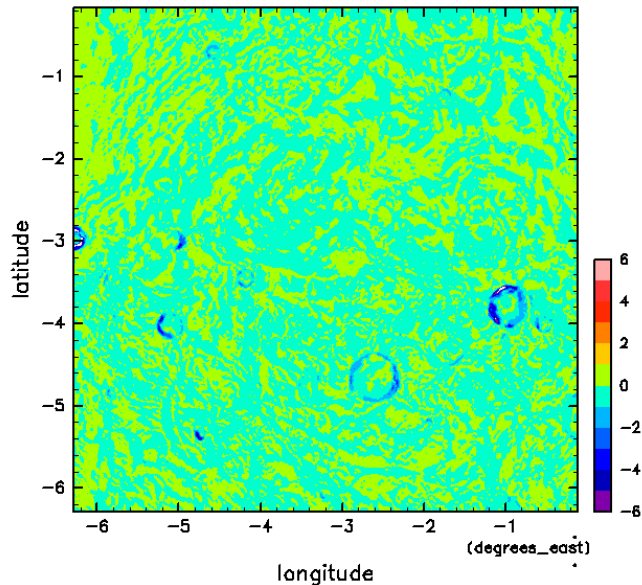
Opportunity の着陸地点での数値実験

- 日中、地表面付近において活発な対流が生じる。
 - 鉛直流はクレーターの縁に対応する場所で強まる
 - 鉛直流の細胞状の形状は、解像度や地形の有無という違いがあるにもかかわらず、火星 LES の結果と類似。

鉛直速度 (地上 ~10m)

z components of velocity [m/s]

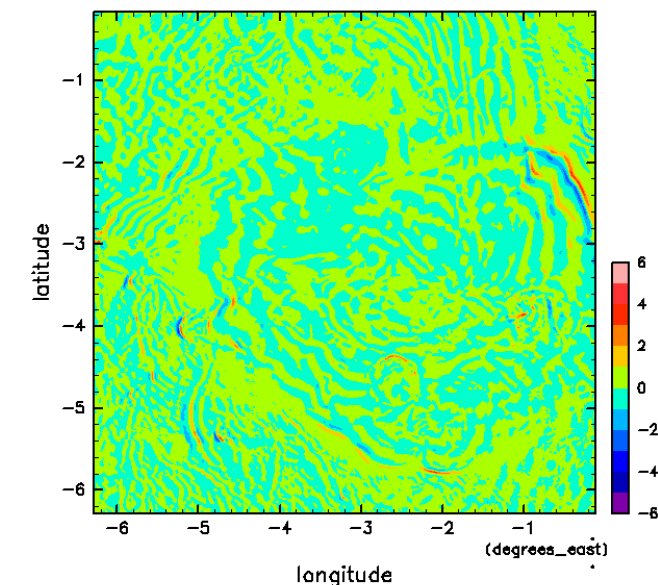
t=1.0 z=-1420.0



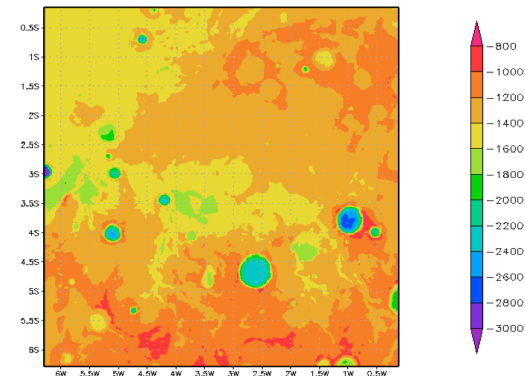
鉛直速度 (地上 ~430m)

z components of velocity [m/s]

t=1.0 z=-1000.0



(b) 地形



より現実的な設定の数値実験 進捗状況

- 火星地形の中でも起伏が比較的緩やかな地点では、対流運動の日変化を計算可能であることを確認した。
- しかし、地形の急峻な地点での数値実験は現時点では成功していない。
 - 長い時間ステップを 0.1 秒まで小さくしたり、最下層の格子点間隔を ~100 m に拡大しても、計算は破綻
- 数値積分に関するパラメタの調整方法の検討が必要。
 - ネスティングの問題？
 - GCM 格子間隔 $dx = dy = \sim 200$ km
 - CReSS 計算領域 ~ 300 km ($dx=dy=700$ m)
 - 地形無しで、大規模循環の効果だけ入れると？
 - 文献調査

deepconv 火星計算 (進捗)

村橋究理基, 小高正嗣

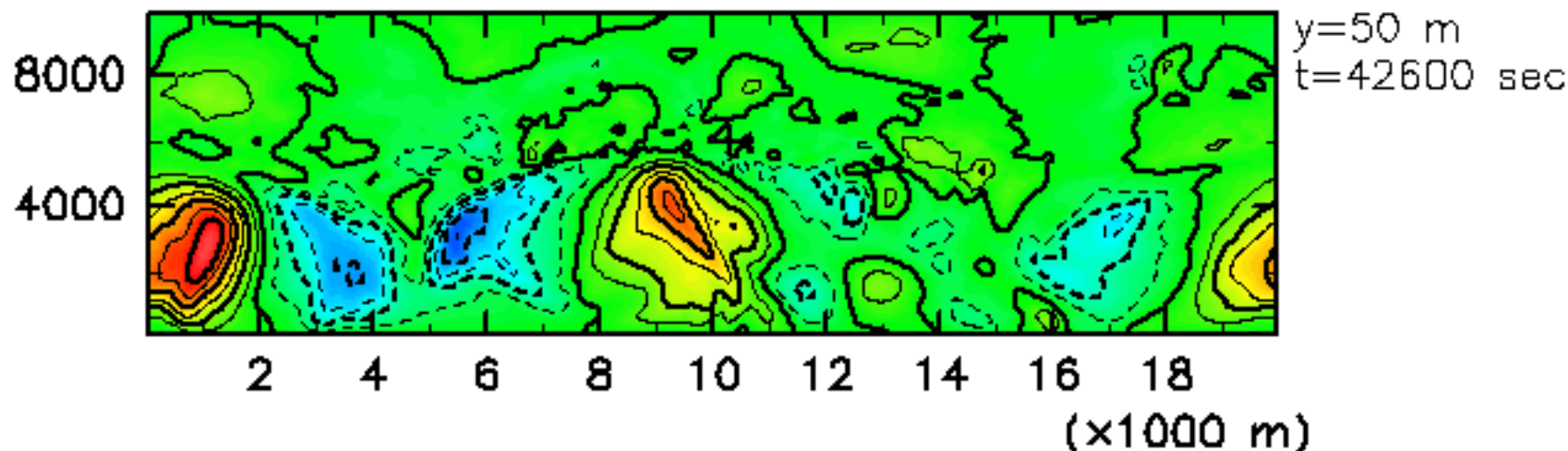
deepconv

- CReSS-Mars との比較検討を行いたい
 - Odaka et al. (2001) の再計算
 - CReSS-Mars の加熱率や地表面温度をオフラインで与えた実験
 - 火星版放射計算コードの移植
 - (地形を考慮)
- Odaka et al. (2001) の再計算に向けて
 - 計算領域 : $x = 20 \text{ km}$, $y = 100 \text{ m}$, $z = 10 \text{ km}$
 - 格子間隔 : 全て 100 m
 - 積分時間 : 12 h
 - 重力 : 3.72 m/s^2
 - 地表面温度 : 245 K
 - 地表面気圧 : 700 Pa
 - CO_2 のみ 乾燥大気

計算例

vertical velocity

(m)



CONTOUR INTERVAL = 2.500E+00

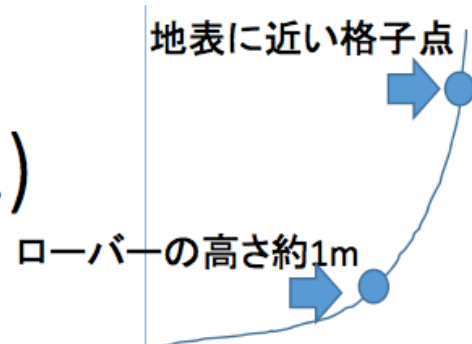


終わりに

- 現在, **大循環モデル**の計算結果を, 観測データを用いて校正した上で, 工学チームに提供.
- **CReSS-Mars** を用いた表層環境評価を行うための準備を進めている.
 - **理想化実験の結果は妥当**
 - 鉛直一次元の放射対流モデル (DCPAM-1D) と整合的
 - NASA の火星探査ローバー Spirit と Opportunity の観測した日中の鉛直温度プロファイルと整合的
 - 但し, 混合長として Deardorff (1980) を採用
 - 現在の問題点: **地形が急峻**な場合に数値計算が**破綻**
 - 数値積分に関するパラメタの調整方法の検討が必要.
 - 現在, 理研で開発された SCALE と CReSS-Mars との連携した計算を取り組みつつある.
- **deepconv** を用いた数値実験も遅々と進めている.



データ処理の詳細(2)



- 流速に関する仮定
 - 地表に最も近い格子点(3m)からローバ高さ(1m)の情報を算出(対数則)
 - 流束は高度の差に対して鈍感であるため高度補正なし
- 温度に関する仮定
 - 地表に最も近い格子点(3m)からローバ高さ(1m)の情報を算出(対数則)
 - 温度も高度の差に対して鈍感であるため高度補正なし
- 圧力に関する仮定
 - Viking/Pathfinderの観測結果との比較から-60Paの補正
 - 高度に違いによる静水圧分の補正

データ処理の詳細(3)

- 太陽直達光量に関する仮定
 - 直達太陽光 + 指向性をもつ太陽散乱光
- 太陽散乱光量に関する仮定
 - 指向性をもたない太陽散乱光
- 等価空温度
 - 火星大気熱輻射量から、大気が黒体と仮定して出した温度。熱輻射のスペクトルはCO₂スペクトルに影響を受けるが、熱解析には大きな影響が無いとして、そのまま利用

