

2020/02/12 火星勉強会

Mars Science Laboratory Observations of the 2018/Mars Year 34 Global Dust Storm

Guzewich, S. D., Lemmon, M., Smith, C. L., Martínez, G., de Vicente-Retortillo, Á.,
Newman, C. E., et al. (2019)
Geophysical Research Letters, 46, 71–79.
<https://doi.org/10.1029/2018GL080839>

東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻
修士1年 森 悠貴

1. Introduction

Global dust stormについて

- 全球的なdust storm(=global dust storm)は、数MYごとに起こり数週間～数か月の間持続する。
- Global dust stormによって、「大気循環」「火星表面のアルベド」「dust storm後の水・CO₂の輸送やdeposition」が変わる。

2018年のglobal dust stormについて

- 北半球で、前線のような弓状のdust stormとして始まった。
2018年5月中旬(Ls~181°)
Acidalia Planitia (30-60° N, 300-360° E)とUtopia Planitia (30-60° N, 80-140° E)を横切る形
- 6月初旬(Ls~188°)、南半球でdust liftingが起こり、赤道付近にあったstormと合併した。
- 6月中旬(Ls~193°)、stormがグローバルになった。
- 7月初旬(Ls~205°)、stormが減衰し始めた。
- 9月中旬(Ls~250°)、元のレベルに戻り、stormが終わった。

2. Methodology

Curiosity: Gale Craterの気候や気象を研究するための機器を搭載している。

- **Rover Environmental Monitoring Station (REMS)**
- **Mast Camera (Mastcam)**
- **Navigation Camera (Navcam)**
- Radiation Assessment Detector
- Chemistry and Camera instrument

“Global dust storm campaign”

Sol 2075 (7 June 2018, $L_s=188.7^\circ$) ~ Sol 2169 (11 September 2018, $L_s=248.2^\circ$)

- REMS: 3時間ごとに、大気・地表温度、相対湿度(RH)、紫外線放射、大気圧を測る。
- Mastcam: Sol 2072~2119の間は少なくとも1solに1回、それ以降は大体1週間に3回、大気のopacity (“tau”と“line-of-sight extinction”)を測る。
- Navcam: ほぼ毎日line-of-sight extinctionを、1週間に2~3回程度dust devilを観測する。
- Chemistry and Camera: 通常より高い頻度でダストの特性や大気ガスの量を観測する。

1. Dust storm前後でGale Craterの気象がどのように変わるか？気圧や温度、湿度によるローカルな環境における、グローバルな大気の動きへのサインは何か？
2. ダストの量、鉛直分布、物理的特性がdust stormの間にどのように発達するか？
3. Dust stormの間に風のプロセスは変わるのか？
4. 局所的な水の循環はdust stormによって変わるのか？

3. Results: 3.1 Column-Integrated Atmospheric Dust Opacity

Dust loadingは火星大気の循環の主要な動力源である。また、dust loadingが大きいほど循環が強められる。
→Dust storm中のDust opacityを理解することがどの気象的観測においても重要。

Fig1: Mastcamによる観測

- $L_s=180\sim 190^\circ$: Sol 2073では0.57程度で全体的に0.6~0.7の間。(MY33と同程度、MY32より0.1小さい)
- Sol 2076~2077($L_s=190.1-190.5^\circ$): 0.78(Sol 2075)から、1.77(Sol 2077)に上昇。
- Sol 2080~2085($L_s=192.5-195.5^\circ$): 1.56から8.5(peak)に上昇。

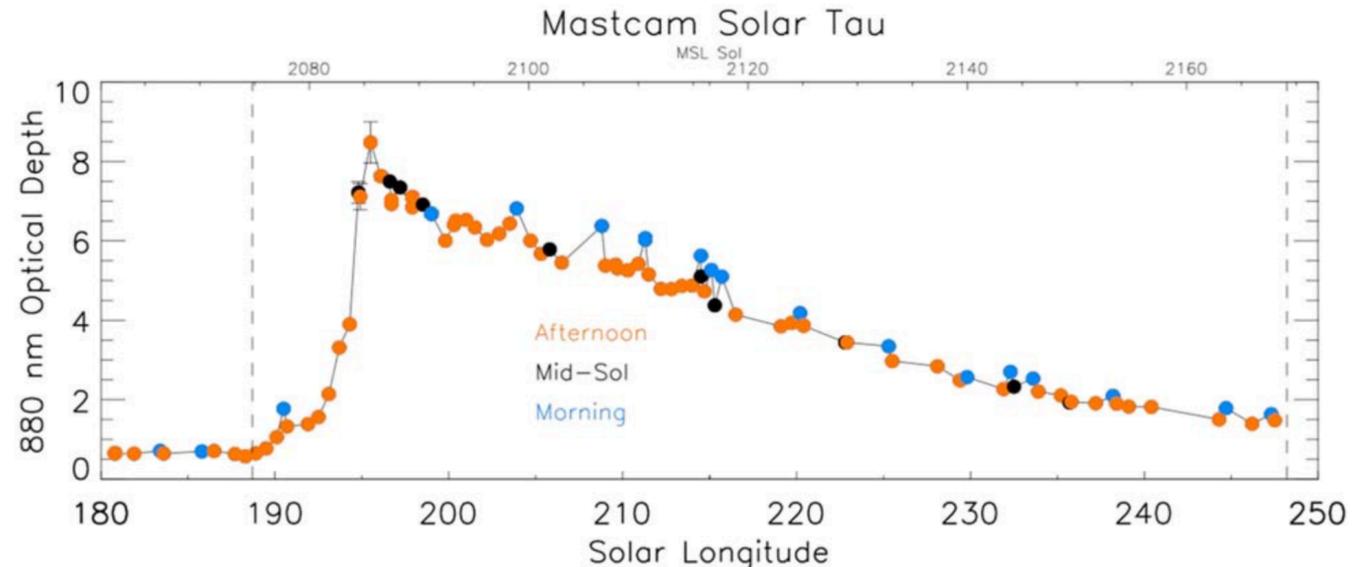
Mars Color Imagerによる観測

- Sol 2076~2077: ダストがグローバルに輸送されるのに加えて、Gale Craterの南西側の局所的なダストが散逸している (Malin et al., 2018)。
- Sol 2080~2085: Dust liftingが広がり、Gale Craterを包み込んでいる (Malin et al., 2018)。

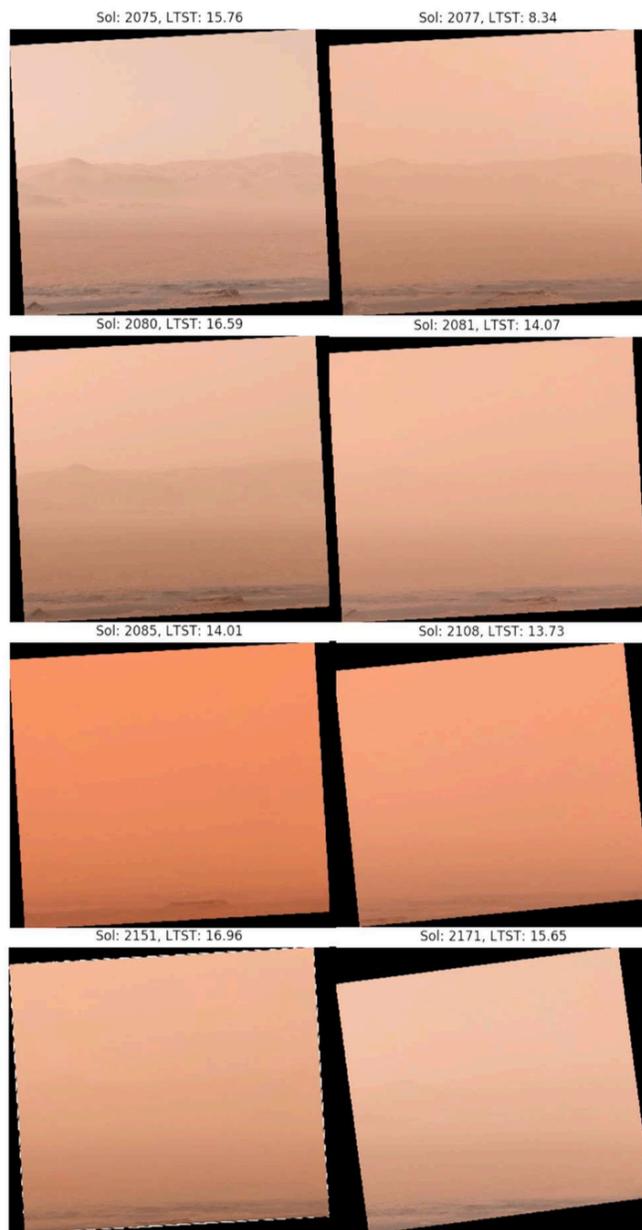
→これらの観測から、Gale Craterで観測されたダストはどこか別のところからdust liftingにより流されてきたと考えられる。

Fig1

- Sol 2107~2171: opacityの減衰のタイムスケールは 43 ± 2 sols。
→MY28のglobal dust stormでの43 sols (Lemmon et al., 2015)と一致、MY12での51 sols (Pollack et al., 1979)とは近い値となっている。



3. Results: 3.2 Line-of-Sight Atmospheric Dust Opacity



Column densityに加えて、クレーター内での視線方向のopacityも計測している。

MastcamとNavcamによって北側の縁の画像が撮られている。

1段目の写真では、北側のクレーターの縁がはっきりと見え、約30km先まで見える。

3段目の写真では北側のクレーターの縁が見えなくなっていて、Sol 2094では2.7km先までしか見えない。

4段目の写真ではクレーターの縁が再び見えている。

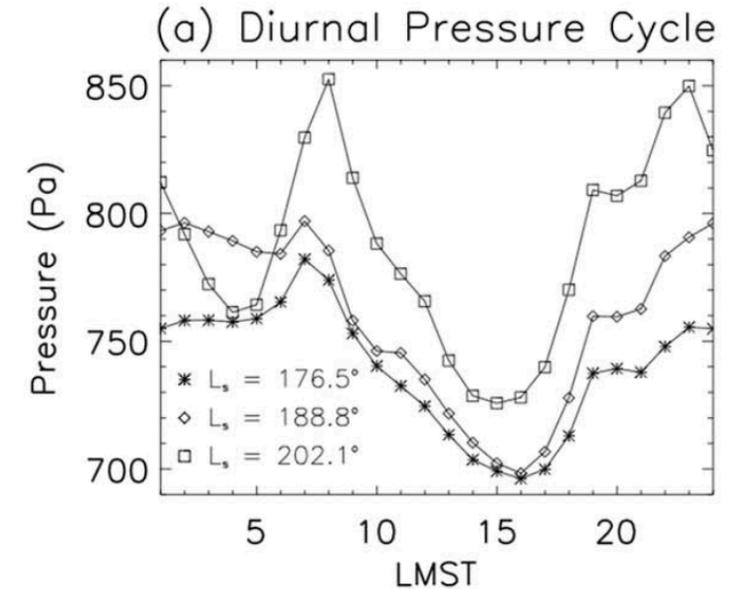
Sol 2094は、column densityがピークであったSol 2085より9 sols後である。このことから、ダストは低高度に落ち着く前にどこかからGale Craterに輸送されてきたことが示唆されている。

3. Results: 3.3 Meteorological Measurements

Fig3: REMSで観測された気象学的な変数

(a) 気圧の日変化

- 日変化の振幅は熱潮汐と mesoscale の循環による。
- Storm 形成前(*)では32Pa程度の振幅が見られ、通常はこのような振幅が見られる。
- Storm が形成されると、その振幅が大きくなる。
- 潮汐やグローバルな大気 dust forcing による半日周期の振幅も見られる(◇では12-14Pa、□では40Pa程度)。



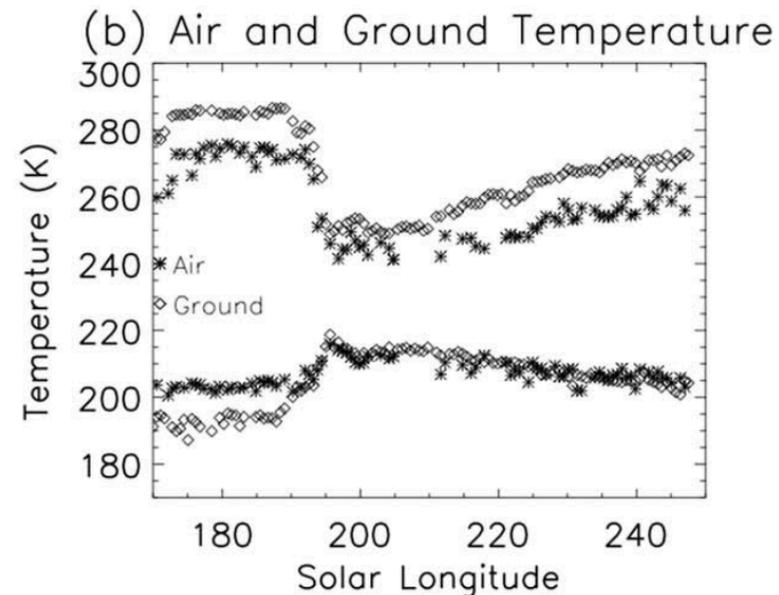
- * : ストーム形成前
- ◇ : ストームが急激に成長している時
- : ストームがグローバルに成長し終わりゲールに高い dust opacity がある時

3. Results: 3.3 Meteorological Measurements

Fig3: REMSで観測された気象学的な変数

(b) 大気と地面の温度

- 右図の最大値と最小値から、温度の日変化が分かる。
- Dust storm前($L_s < 185^\circ$)
大気温度差 $\sim 70\text{K}$ 、地面温度差 $\sim 90\text{K}$ である。
地面の方が大気より夜に $5\text{-}10\text{K}$ 低く、昼に $10\text{-}15\text{K}$ 高い。
- Dust opacityが大きいと、
夜：ダストから降り注ぐ赤外線が強くなり、温度が高くなる。
昼：入ってくる太陽放射が減り、温度が低くなる。
- Dust storm中の大気と地面の比較
夜：ほぼ一致 $\rightarrow 1.5\text{m}$ 程度の高度まで大気が等温である。
昼：dust opacityが減少するにつれて差が開いていくが、 $L_s = 240^\circ$ 以降また揃い始める。
- 日平均気温はdust storm前より約 10K 下がっている。
- 大気温度変化が50%減ると、nontidal pressureの振幅は 8Pa 程度になる。よって、stormによって 48Pa の振幅が見られると、そのうち 40Pa が潮汐によるものであり、stormによって 15Pa から 40Pa まで上昇したと分かる。

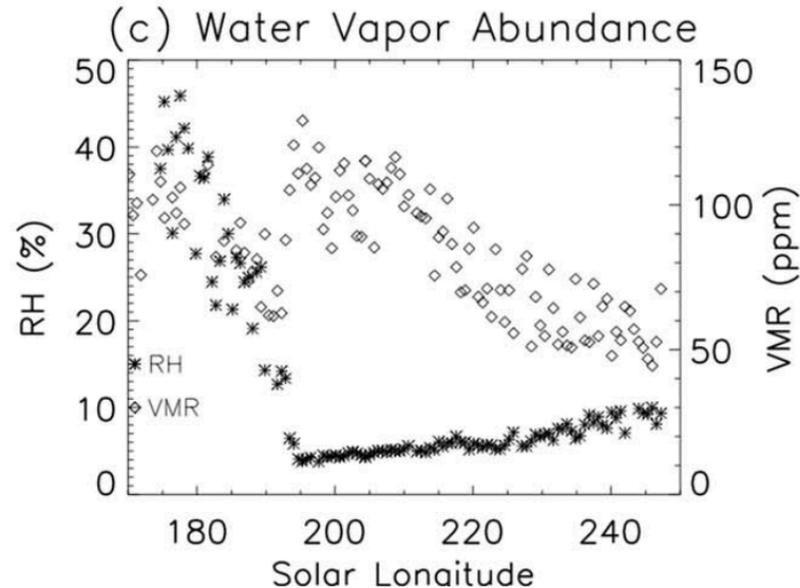


3. Results: 3.3 Meteorological Measurements

Fig3: REMSで観測された気象学的な変数

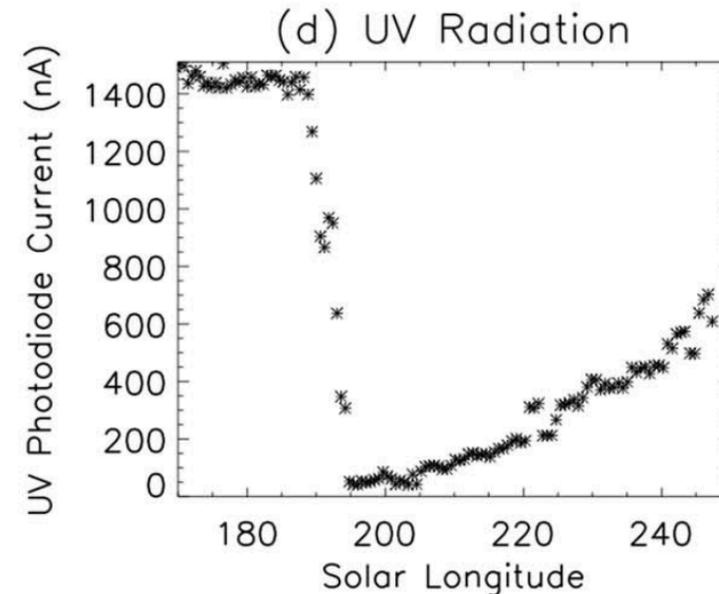
(c) 水蒸気量

- RH: Gale Craterをdust stormが覆うと、夜の最低気温が上がるため、RHは5%まで下がる。Stormが弱まるにつれて典型的な値(~10%)に戻る。
- VMR: RH, 温度, 大気圧を用いて水蒸気混合比が得られる。Ls=170~190° の減少は前年も見られたが、Ls=190~195° の上昇とその後の減少のトレンドは前年は見られなかった。



(d) UV Photodiode Current (UV solar fluxに対応)

- 1400-1500nAから40nAに落ちている。
- センサー上のダスト沈殿によるblockingを無視すれば、入射してくるUV solar radiationのうち97%が減少している。

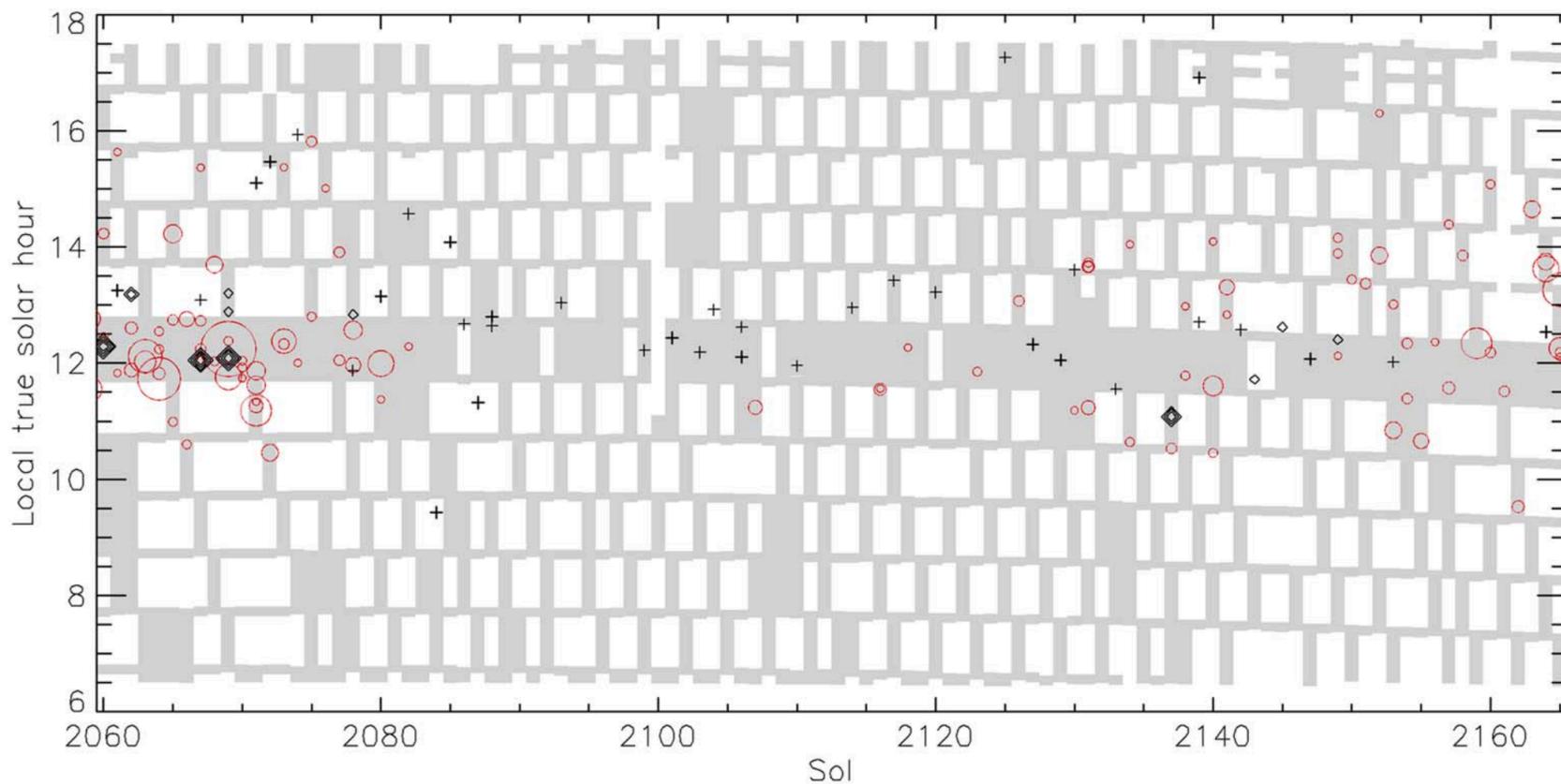


3. Results: 3.4 Vortex and Dust Devil Activity

熱力学を用いたモデルから、dust loadingが増すと、表面付近の大気の温度勾配による熱フラックスの減少によってdust devilが減ることが示されている(Newman et al., 2002)。

南半球の春夏には毎年dust devilは増えるもので、Fig4のSol 2070より前まではそれが見られるが、dust opacityが上昇するとdust devilや対流の渦がなくなっている。

- : REMS pressure vortex
- +: no dust devil
- ◇: dust devil



3. Results: 3.5 Other results

ダストの半径

- Storm前はダストの半径は $1.4\ \mu\text{m}$ であったが、optical depth >6 の時、ダストの半径は $4\ \mu\text{m}$ 以上となった。
- これは、過去のglobal dust stormの研究で示唆されていた、stormはより大きな粒子を運ぶという結果を裏付けている。

アルベド

- 地表の温度から求められたアルベドは0.2から0.28に上がった。

Change detection imaging

- Sol 2083~2084で大きなsediment motionが見られたが、これはMY33と同じものであった。

4. Conclusions

約100solsの期間、MSL science teamは2018/MY34 global dust stormについてのscience campaignを行なった。

- ✓ Mastcamで測った大気のoptical depthは、storm前の0.6という値から12solsの間に8.5(peak)まで上がった。その後は 43 ± 2 solsの減衰率で減衰し始めた。これは過去のglobal dust stormの際の観測とよく似ている。
- ✓ MastcamとNavcamで観測された、Column optical depthとクレーター内の視線方向のoptical depthを比較することで、ダストのほとんどはGale Craterの外から来たことが分かる。
- ✓ ダストによってUV solar radiationは97%減少している。これにより、昼と夜の気温・地面温度の差がそれぞれ~40K, ~55K減っている。また、夜の地面と低高度の大気はほぼ等温になっている。このような状況では熱フラックスが減少し、dust devilやconvective pressure vorticesが無くなる。
- ✓ REMSは40Pa振幅の半日周期の潮汐を観測した。これは通常の4倍ほどである。Mesoscaleの寄与が約50%減ったのに対して、潮汐の寄与は約3倍に増えた。