## 特集「ALMAで迫る惑星科学」 全球ダストストーム中の火星地表面放射の観測

# 佐川 英夫<sup>1</sup>, 青木 翔平<sup>2</sup>, 前澤 裕之<sup>3</sup>, 中川 広務<sup>4</sup>, 笠羽 康正<sup>4</sup>

(要旨) 2018年の6月から9月にかけて、火星全球が濃いダスト(砂塵)で覆われる全球ダストストーム(global dust storm:GDS)が発生した.これは2007年以来のことであり、地表から撒き上げられた大量のダストによる太陽光吸収や日傘効果によって火星大気および地表面の環境が大きく変化したと考えられる.我々は、ミリ波・サブミリ波帯ではダストの光学的厚みが無視できる程度に小さくなること、つまり、ダストで覆われた火星大気の内部を見通せることに着目し、GDS期間中の火星をアルマ望遠鏡のアタカマコンパクトアレイで観測した.干渉計のビジビリティから地表面放射のディスク平均輝度温度を求めたところ、絶対値に不確定性があるものの、GDS最盛期の輝度温度がGDS収束時と比較して18%も低下していたことが示された.

## 1. 火星全球ダストストーム

火星は薄いCO<sub>2</sub>大気(地表面気圧が6 hPa程度.時間や場所によって大きく変動する)を持つが、その一番の特徴は、大気中に常に浮遊するダスト(砂塵)の存在であろう.粒径が数 $\mu$ mサイズのダストが地表から撒き上げられ、可視光での光学的厚み $\tau = 0.1 - 0.5$ といった濃度で火星大気中に分布している[1].このダストは太陽光を吸収し火星大気を暖める役割を果たしており、火星気象において重要である.

火星ダストの特筆すべき点として、大気中のダスト 濃度が大きく上昇(τ>~1-2)するダストストーム(砂 嵐)という現象がしばしば発生することが知られてい る.ダストが濃い領域の空間的な広がりは個々の事例 によって様々であるが、それらの中には惑星全体を覆 う規模の「全球ダストストーム(global dust storm,以 下GDS)」も存在する.GDSの発生メカニズムは未だ 謎が多く、過去の発生時期を見ても、1956、1971、 1973, 1977, 2001, 2007年と, 散発的である. GDS が発生すると宇宙から見た火星の姿も様変わりし(図 1), 分厚いダストの太陽光吸収による加熱量増大およ び日傘効果による反射率増大によって, 大気や地表面 の温度分布が著しく変化することが知られている. 実 際, 2001年のGDSでは, 高度25 km付近の気温が40 K以上も昇温したことが探査機からの赤外線観測で示 された[2]. そして, 温度場の変化は大気の循環も変 化させる. 例えば, 火星大気大循環モデルを用いた数



図1:2018年のダストストームが火星全体を覆っている様子. Mars Reconnaissance Orbiter探査機搭載の可視光カメラ MARCIを用いて取得された、ダストストーム発生前と後 の画像.NASAウェブサイト[13]に公開されたものを引用 (NASA/JPL-Caltech/MSSS).

京都産業大学
ベルギー王立宇宙科学研究所
大阪府立大学
東北大学
sagawa@cc. kyoto-su, ac. jp

値シミュレーションでは、GDS中は子午面循環の強 度が強まり、循環構造が高高度まで達するとともに、 高度50 km付近の上層大気における東西風速度が~ 100 m s<sup>-1</sup>も強まるという結果が示されている[3]. 最 近の研究[4]では、GDSによる大気循環の強化は、高 高度における気温の増加ともあいまって、普段は低高 度にしか存在しない水蒸気をより上空(高度80 km付 近まで)へ輸送し、熱圏からの水素散逸の増大にもつ ながりうることが示唆されている.

こうしたGDSに伴う火星大気の変化を観測的に調 べていくことは重要であるが,可視光や赤外波長での 観測はダストの光学的厚みに阻まれ,火星を覆うダス ト層の下を見ることが出来ない.一方,ミリ波・サブ ミリ波帯(波長が0.1 - 10 mm付近の電磁波)では,観 測波長がダストの粒径に比べて十分に大きくなり,ダ ストの光学的厚みが無視できるようになる.従って, アルマ望遠鏡(アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計, Atacama Large Millimeter/submillimeter Array: ALMA)をはじめとするミリ波・サブミリ波の観測を 用いることで,ダストで覆われた火星大気の内部の観 測が可能となる.[5]では,2001年に発生したGDSを 当時運用されていたサブミリ波天文衛星 (Submillimeter Wave Astronomy Satellite:SWAS) を用いて観測しており、GDSの発達に伴って地表~ 高度45 kmにかけての気温が40 Kも上昇したのが観 測され(これは前述の[2]とも整合する)、また、火星 地表面の輝度温度は逆に20 Kほど低下したことも示 されている、ミリ波・サブミリ波帯でGDSが発生し ている火星を観測した事例はこのSWASの例だけで あり、その実態を理解するためにも、観測例を増やす ことが望まれていた。

2007年以降,GDSが発生しない時期が久しく続い ていたが、2018年5月にアキダリア平原やユートピア 平原(いずれも北半球中緯度帯に位置する)に地域的な 砂嵐が発生し、その後、南半球で独立的に発生してい た砂嵐と合体する形で、6月中旬には全球的なダスト ストームへと発展していった、およそ10年ぶりに発 生したこの大規模なGDSは、7月上旬に最盛期へと発 達し、9月下旬に収束した、この間、火星の大気環境 はどのように変化したのであろうか? この問いに観 測から制約を与えるため、我々は、海外の研究グルー プとも協力しつつ、アルマ望遠鏡を用いてGDSが起 きている最中の火星観測を行った、その観測研究の中 から、本稿では火星地表面輝度温度のGDS中の変化

観測日 [月/日]	観測時刻 [UT]	火星季節 Ls [ ° ]	視直径 ["]	火星ディスク中心 (観測者直下点)		ダスト光学 的厚み*	較正天体
				緯度 [°]	西経 [°]		
6 / 21	10:18	197	19.0	- 15.0	183.4	7.1	[1] · [5]
6 / 30	03:43	202	20.7	-14.4	4.9	6.0	[2] · [6]
7 / 11	03:51	209	22.6	-13.2	267.7	5.4	[2] · [6]
8 / 12	05:28	228	23.7	- 9.8	7.0	2.7	[3] · [2]
8 / 17	00:43	232	23.2	-9.6	252.8	2.3	$[4] \cdot [2]$
8 / 24	05:02	236	22.2	-9.6	252.8	2.0	$[4] \cdot [2]$
8 / 28	05:02	239	21.5	-9.8	216.6	1.9	$[3] \cdot [2]$
9 / 03	04:04	243	20.5	-10.2	147.6	1.7	$[3] \cdot [2]$
9 / 05	03:45	244	20.1	-10.4	124.6	1.6	$[3] \cdot [7]$
9 / 10	23:12	248	19.1	-11.1	2.6	1.5	$[4] \cdot [2]$
9 / 15	02:37	250	18.4	-11.6	15.4	-	$[2] \cdot [8]$
9 / 19	03:28	253	17.7	-12.2	350.4	-	$[3] \cdot [2]$
9 / 23	21:46	256	16.9	-13.0	220.2	_	$[4] \cdot [2]$
9 / 28	01:18	258	16.3	-13.8	234.1	_	$[2] \cdot [7]$

表1:本研究で用いたACAデータの観測日時

較正天体(フラックス強度較正用・位相較正用の順に記載): [1] J2253+1608, [2] J1924-2914, [3] J2258-2758, [4] J1751+0939, [5] J2131-1207, [6] J2000-1748, [7] J2056-3208, [8] J1957-3845.

※ 波長 880 nm での値. 詳細は本文を参照のこと. 9/15 以降は公開データが無いため, 空白にしている.

について述べる.なお,2018年のGDSの詳細は[6]な どを参照されたい.

## 2. ACAによる観測

本論文で用いる観測データは、2018年6月21日か ら9月28日にかけて、アルマ望遠鏡のアタカマコンパ クトアレイ(モリタアレイ, Atacama Compact Array: ACA)を用いて取得された火星観測データ 2016.1.01272.Tおよび2017.A.00043.Tである。前者の データは我々が観測提案して取得したものであるが. 後者のデータに関してはアルマ望遠鏡データアーカイ ブの公開データから入手した. 観測日時およびその時 の火星の情報を表1にまとめた、観測期間において、 火星の季節を示すLs(solar longitude,火星から見た 太陽の黄経)は197°から258°にかけて変化している(北 半球の秋に相当)。また、この間、火星視直径は16秒 角から24秒角の間で推移した.なお、GDSの発達か ら収束までの経過を知るための参考情報として、火星 着陸探査機キュリオシティの搭載カメラで測定した波 長880 nmでの火星大気の光学的厚み[6]も併せて表1 に記載した. この光学的厚みのデータはキュリオシテ ィが調査をしているゲールクレータ(緯度-5°. 西経 223°)上空での値であり、火星全球での平均的な描像 とは厳密には一致しないが、Ls = 190°-200°の期間 (2018年6月10日から6月27日)に火星大気の光学的 厚みが1以下から~8まで急激に増加しており、この 時期にGDSが急速に発達したことが分かる。

我々が観測に用いたACAは、口径7 mの電波望遠 鏡12台から構成される干渉計であり、口径12 mアン テナによる干渉計配列よりもコンパクト(アンテナ基 線長は7 - 48 m)な配列が組まれている.そのため、 広がった構造を持つ電波源の観測に強いという特徴を 持つ. ACAによる火星観測の空間分解能(合成ビー ムの大きさ)は4 - 10秒角前後であったが、本研究で は火星ディスク平均での輝度を議論するため、この空 間分解能でも差し支えない.各観測日のデータ積分時 間は、6月30日の観測が46分間であり、それ以外は 26分間である.

火星のサブミリ波スペクトルにはCOやH2Oなどの 大気微量成分スペクトルが観測されるが、今回はそれ らの分子スペクトルが含まれていない220 GHz帯の連

続波を解析した.この連続波は火星地表面からのサブ ミリ波放射を見ていることになる. 観測した火星デー タは表1に記載されたクエーサーを用いてフラックス 強度および位相の較正が行なわれている。本研究のよ うに複数日の観測データの輝度温度を比較する場合に はフラックス強度較正の確度を評価することが重要と なる. 較正用の天体はそれぞれフラックス強度の文献 値に不確かさを持っており、その値を参照して較正さ れる火星輝度温度にも系統的な不確かさが伝播する. この不確かさが観測日によって異なることを防ぐには、 全データに対して単独の較正天体を使用する、あるい は、同一日に複数の較正天体を用いてフラックス強度 の相互較正を行なうなどの注意が必要である.本研究 で用いたデータセットでは、6月21日および9月5日 を除いた全データが J1924-2914(表1の較正天体[2])を フラックス強度較正用あるいは位相較正用の天体とし て観測していた. そこで、J1924-2914が利用できる データに関しては、このクエーサーでフラックス強度 の較正を行なうことにした.

## 3. ディスク平均輝度温度の導出

#### 3.1 missing fluxの問題

火星(や他の太陽系内の惑星)を干渉計で観測する際 にしばしば問題になるのが、その見かけの大きさであ る、干渉計は、その観測原理ゆえに、ある空間スケー ルよりも広がった輝度分布構造には感度を持たない (resolve-outやmissing fluxと呼ばれる). 本研究で用 いた ACA の波長 λ = 1.36 mm での観測では、最小基 線長  $L_{\min}$ がおよそ7 mであり、この場合  $0.6 \times \lambda/L_{\min}$ = 24秒角よりも広がった構造に対しての感度が欠損 してしまう(観測できる全フラックスが本来の値より も10%以上小さくなる). 今回の火星観測でも、特に 7月と8月の観測データは、このフラックス欠損の問 題が含まれていると懸念される.これは、本研究の目 的である火星輝度温度の時間変化を議論するうえで大 きな誤差要因となる.また、干渉計データから画像合 成を行なう際に必須となる合成ビームのサイドローブ パターンのデコンボリューションも、火星のような明 るい面光源天体の場合には一筋縄では行かない. そこ で、本研究では、画像合成されたデータを解析するの

ではなく,以下に述べる方法により,干渉計で取得されるビジビリティから直接的に火星のディスク平均輝 度温度を求めた.

#### 3.2 ビジビリティを用いた解析

干渉計は観測天体の輝度分布が二次元フーリエ変換 された情報(振幅と位相)を観測する.これをビジビリ ティと呼ぶ.ビジビリティは干渉計を構成するアンテ ナが設置されている距離(基線長)に対応する空間周波 数(*u*, *v*)の関数として取得されるが,観測天体上の微 細な輝度分布ほど,そのビジビリティを得るためには 大きな空間周波数,つまり長い基線長での観測を必要 とする.

火星の連続波輝度分布はディスク状の構造を持つと 近似できる.ディスク内部の輝度温度分布は現実的に は非一様(太陽直下点付近が比較的高温になっており, また,高緯度帯や極域は低温になっているはず)であ るが,ここでは一様な輝度温度Lを仮定する.そうし た一様な輝度分布を持つディスク構造の天体を干渉計 で観測した際に得られるビジビリティ V(u,v)は,理 論的にベッセル関数を用いて下記のように記述される (式導出については[7]が詳しい):

$$V(\beta) = I_0 \pi R^2 \frac{J_1(2\pi\beta)}{\pi\beta}$$
$$\beta = R \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{2}.$$

ここで、 $\beta$ は実空間座標をディスク(惑星)の視半径Rおよび観測波長 $\lambda$ で規格化した際の空間周波数であり、  $J_1$ は1次のベッセル関数である。火星のディスクの縁 の方に行くに従って輝度が徐々に暗くなる効果(周縁 減光効果)も考慮すると、1次のベッセル関数から少 し変形したビジビリティ分布となり、式として

$$V(\beta) = I_0 \pi R^2 \Lambda_q(2\pi\beta) \qquad \cdots 式(1)$$
但し,  $\Lambda_q(2\pi\beta) = \Gamma(q) \frac{J_q(2\pi\beta)}{(\pi\beta)^q}$ 

と表される[7].  $\Gamma(q)$ はガンマ関数, qは周縁減光効 果の度合いを示すパラメータである. 一見すると複雑 な数式に見えるが, これに $\beta = 0$ を代入することで u=v=0での全フラックス(単一鏡で観測した場合の フラックス)が求められ,

$$V(0) = I_0 \pi R^2 \frac{\Gamma(q)}{\Gamma(q+1)} = \frac{I_0 \pi R^2}{q}$$

となる. Rの値は既知なので、実際のACAで観測されたビジビリティに、*I*<sub>0</sub>と*q*をパラメータとして式(1)をフィッティングすることで、画像合成のプロセスを経ることなくディスク一様を仮定した際の輝度温度を推定することが出来る.

式(1)では $\beta$  < ~0.5においてビジビリティの振幅が 急激に増加するため、なるべく小さな $\beta$  を含む観測デ ータに理論ビジビリティ曲線をフィッティングするこ とが望ましい.また、 $\beta$ が大きくなると観測データの サンプル数は一般的に減少し、且つ、ディスク内で一 様輝度という仮定と現実との差が大きくなるため、フ ィッティング解析における誤差の寄与が相対的に大き くなる.本研究では、 $\beta$  <0.86のデータのみを利用し てフィッティング解析を行なった。例として、6月30 日の観測データに対するフィッティング結果を図2に 示した.赤線が求めたベストフィットのビジビリティ 曲線である.これを見ると、ベストフィットとして求 めたパラメータは $\beta$  >0.86の観測データの振る舞いも 大きく外れることなく再現していることが分かる.



図2:ACAで観測された火星のビジビリティ (黒丸)に,ディス クー様+周縁減光の理論モデルビジビリティ曲線をフィッ ティングしたもの(赤線).縦軸は放射束密度をジャンス キー単位<sup>1</sup>で示している.

このフィッティング解析の妥当性を検証するため, 疑似火星画像を用いた解析シミュレーションを行った.

1. 1 Jy =  $10^{-26}$ W/(m<sup>2</sup> Hz)



図3: (a) 疑似火星画像の例. この輝度温度分布にアンテナの視野感度特性が掛かったものが干渉計で観測される. (b) 疑似 火星画像を元にシミュレーションしたビジビリティ(黒丸)にフィッティング解析を適用した例. ×印は(a)の画像から 求めた全フラックスの真値を示す.

具体的には、先ず疑似火星画像を作成し(疑似火星画 像の作成方法は4.2章に後述する)、その画像を実際の ACA 観測と同じ空間周波数(u, v)座標でのビジビリテ ィデータに変換した.この変換にはアルマ望遠鏡デー タの解析に用いられるCASA ソフトウェアを利用し た。このビジビリティに適当な観測雑音をランダムノ イズとして与え、その後、実際の火星データの解析に 適用した手法と同様のフィッティング解析を行い.当 初の疑似火星画像でのディスク平均輝度温度(真値)と 整合する結果が得られるかを検証した(図3a, b)、検 証結果が真値として入力する疑似火星画像に依存しな いよう、14枚の異なる疑似火星画像を用意し、それ ぞれ真値とフィッティング推定値の差を求めた.これ を各観測日の(*u*, *v*)座標でのサンプリング条件で調査 したところ、いずれもフィッティング推定値が真値よ りも4-10 Kほど大きな値となった.これは、真値 の輝度温度を計算する時と、CASA ソフトウェアを用 いたビジビリティの計算時とで、アンテナの視野の感 度分布(220 GHzの場合、半値全幅が45秒角)の取り 扱いに微妙な差があることが原因と考えた. そこで, 次節以降で述べる実観測データの解析では、アンテナ の感度が掛け合わされた後の全フラックスV(0)では 無く、火星ディスクで一様と仮定した輝度温度Loの方 を議論に用いることにする、また、この検証では、真 値と推定値との差が特に大きくなるようなmissing flux を伴う観測日((u, v)空間でのサンプリングがフィ

ッティング解析に不適切だった日)は見られなかった.

#### 3.3 GDS期間中の輝度温度変化

表1に記載した観測データに関して、上述の方法で 求めた地表面放射のディスク平均輝度温度を時系列で 示したのが図4の■である.誤差はフラックス較正天 体のフラックス参照値の不確かさを元に付けた.GDS の状態を考えるための参考情報として、ゲールクレー タ上空での波長880 nmでの大気の光学的厚み[6]もプ ロットしている.得られた輝度温度は最小値が165 K,



図4: ACAデータから求めた火星地表面のディスク平均輝度温度(■)の時間変化. 下軸は火星の季節を示し, 上軸には月日を示した. 実線はキュリオシティによって測られた波長880 nmでの火星大気光学的厚み[6](目盛は右軸).

最大値が200 Kとなっており、中低緯度における一般 的な火星の地表面温度(~200 - 280 K)と比較してか なり低めの値となっている.この値の妥当性に関して アルマ望遠鏡のデータ較正の専門家らとも議論した結 果、今回の火星データはフラックス強度が系統的に過 小評価されている可能性が指摘された[8].実際、165 - 200 Kという輝度温度は、過去(2001年)のGDS発 生時の観測結果や火星大気大循環モデルのモデル計算 値(詳細は4章に後述)と比較しても有意に低い輝度温 度となっており、今回我々が求めた輝度温度の絶対値 は参考値として取り扱うのが適当だと考えられる.

次に、時間方向への変化を追うと、6月21日の観測 開始から7月11日の観測にかけてディスク平均輝度温 度が185 Kから165 Kまで低下している.その後、8 月12日以降は、全体的なトレンドとして輝度温度が 上昇している様子が見られ、170-180 K付近から 200 Kに達した.GDSの発達直後に地表面輝度温度が 低下するというのは、先の2001年のGDSの際の観測 [5]と整合的である.但し、7月11日以降の観測がしば らく無いため、輝度温度低下の極小がいつであったの かは判断できない.8月12日以降の全体的に輝度温度 が上昇するトレンドは、[6]の光学的厚みが平常時の 値に戻っていく様子とも整合しているように考えられ る.9月下旬にはGDSが鎮静したと考えられるが、こ の時期のACAデータから求めた輝度温度は200 K前 後でほぼ一定となっている。

### 4.考察

#### 4.1 2001年GDSの際の地表面温度変化との 比較

2001年のGDSも火星の季節がLs = 200°-210°付近 においてダストの光学的厚みが極大となっており、今 回のGDSと共通する部分が多い.2001年のGDS中に 火星地表面の輝度温度を観測した[5]の結果と我々の 2018年の結果を比較すると、絶対値に大きな差が有る. [5]ではGDS中の輝度温度の低下が190-200 K程度ま でであったのに対し、本研究の結果では165 Kまで低 下している.しかも、これが輝度温度の極小値であっ たかどうかは判断できず、7月中旬から8月中旬の間 に更に減少していたかも知れない.GDS収束時の輝 度温度も、[5]では210-220 Kとなっているが、本研 究では200 K程度である.このことは、3.3章で述べ たフラックス強度較正の過小評価の問題が主要な原因 の一つと考えられる.そこで、以下では、GDSが収 束したと考えられる時期の輝度温度を基準とした相対 的な輝度温度変化による議論を行う.2018年のACA 観測結果では9月下旬(9月23,28日)の平均値である 197.2 Kを基準値とした.

[5]で示されたGDS期間中の輝度温度の低下は10% 弱(210-220 Kに対して~20 K)であったのに対し、 本研究では18%という、2001年の結果のおよそ2倍 の輝度温度の低下が見られた. 輝度温度が著しく低下 していたのは7月11日の観測であるが、その日を除い たとしても、9-14%の低下が見られ、2001年の観測 結果よりも低温の結果が得られている。仮に、GDS 中のダスト濃度に差があれば、日傘効果による地表面 冷却の程度も異なってくる。2001年のGDSでは、火 星探査機からの赤外観測によって波長9 µmのダスト の光学的厚みが平常時の0.2以下から2以上まで上昇 したことが示されている[2]. 波長880 nmでのダスト の消散断面積は、波長9µmのそれと比べて、およそ 1.9 - 2.2倍になると考えられる[9]. この比を適用する と、2001年のGDSは大気の光学的厚み(波長880 nm)のピークが5程度だったと推測され。[6]で示され た2018年のGDS中の光学的厚みのピーク~8には若 干及ばない. 2018年の方がより濃いダスト層の中を 観測したと考えると、ACAデータの方が地表面輝度 温度の減少幅が大きいという結果に説明が付く. もっ とも、ゲールクレータでの定点観測である[6]と周回 衛星からの全球マッピング観測[2]をもとにした数字 を比較するのは些か乱暴な議論であり、今後、現在の 周回探査機の赤外線観測データなどから2018年の GDSにおける全球平均的なダストの光学的厚みが報 告されるのを待って改めて考察する必要がある.

#### 4.2 火星大気大循環モデルとの比較

ACAの観測データから求めた火星ディスク平均の 連続波輝度温度を、火星大気大循環モデル(general circulation model:GCM)から予想される火星地表面 放射の輝度温度と比較した.使用したGCMは、フラ ンス気象力学研究所で開発されているMars Climate Database [10](以下,MCD)であり、これまでに多く の火星研究に利用されてきた実績を持つ.



図5:火星大気大循環モデルから計算した火星地表面放射のディ スク平均輝度温度との比較.輝度温度はGDSが収束した9 月末の輝度温度で規格化している.○はダストストームが 無いモデル、△はダストストーム有りのモデルによる計算 値を示している.■が今回のACAによる観測結果.実線は 図4を参照のこと.

今回は、オンライン[11]でオープンアクセスが可能 なMCDバージョン 5.3を利用した. 用いた火星大気 状態のシナリオは、ダストストームが発生していない (浮遊ダストは存在)平常的な気候値シナリオと、ダス トストームを想定(可視光でのダストの光学的厚みを 全球で5.0に設定)したシナリオの二つである. これら 二つの大気シナリオに関して、時間・空間方向の非一 様性を考慮するため、ACAで観測したタイミングに 地球から見える火星ディスク内部の各格子点における 緯度経度を求め、その位置情報、現地時刻および季節 に対応した火星地表面温度をMCDから抽出した。地 表を灰色体と仮定すると、地表面の物理的な温度 T<sub>surf</sub> と地表面からの放射輝度 $I_{surf}$ の間には、射出率を  $\epsilon$  と して、 $I_{surf} = \epsilon B(T_{surf})$ の関係が有る。Bはプランク関 数である.各地点での射出率は、複素誘電率2.5を仮 定してフレネルの反射係数を求め、それを1から引く ことで求めた[12]. 地表面放射輝度を輝度温度に変換 する際は、レイリージーンズ近似では無く、プランク 関数を逆計算することで求めている。こうして得られ た疑似火星画像を,火星ディスク全域で平均し,観測 日方向に並べたものが図5の○(ダストストームが無 い条件)と△(ダストストーム有りの条件)である.こ れらのMCDのデータは、ACAデータと同様に、9月 23. 28日のダストストームが無い条件の輝度温度の

平均値(220.5 K)で規格化している.

時間方向の変化を見ると、6月下旬から9月末の観 測期間において、MCDの火星地表面輝度温度はせい ぜい7%程度の変化(季節変化)となっており、ACA で観測された輝度温度変動はそれよりもやはり有意に 大きい、前章で述べたようなフラックス強度較正の系 統誤差の問題は残されてはいるものの、観測された輝 度温度変動は(季節変化だけでは無く)GDSによる火 星地表環境の変化が表れていると考えて良いだろう.

また,MCDの数値実験結果では、ダストストーム 有りの場合は無しの場合と比較して、輝度温度が9-12%程度低下していることが分かる.これは7月11日 に観測された18%の輝度温度低下を説明するには至 らず、今回のGDSがMCDに組み入れられた光学的厚 み5.0のダストストームよりも激しいものであった可 能性を示唆する.

## 5. まとめ

本研究では、アルマ望遠鏡のACAを用いることで、 2018年に発生した火星全球ダストストーム(GDS)に 伴う火星地表面輝度温度の推移を議論した。得られた 輝度温度は絶対値が従来考えられていたものよりも小 さく、火星データのフラックス強度を系統的に過小評 価している可能性が強い.とはいえ、得られた結果を 時間方向に並べると、6月から7月に掛けて地表面放 射の輝度温度が減少し、8月から9月に掛けて徐々に 輝度温度が上昇していく傾向が示された.これは、 GDSが7月上旬に最大規模となり9月下旬に収束した 事実と整合的である. GDSの最盛期~鎮静期の間に 見られた輝度温度の変動は18%であり、これは2001 年のGDSの際の研究結果よりも大きな変動幅であっ た. この18%もの変動が事実であれば、2001年の事 例との差はGDS中のダスト濃度の違いによるもので はないかと示唆される.

本研究では地表面輝度温度の時間変化に注目したが, アルマ望遠鏡で取得された一連の火星観測データを用 いたその他の研究課題として,GDS中の気温の三次 元構造,風速場や水蒸気分布などの解析が現在進めら れている.これらの観測データは,分厚いダストスト ームに覆われた火星大気の変化を知る貴重な手がかり となると期待される.

## 謝 辞

本研究で使用したデータはアルマ望遠鏡で取得され た.アルマ望遠鏡はヨーロッパ南天天文台,米国国立 科学財団,日本自然科学研究機構などによって建設さ れた国際共同天文施設であり,合同アルマ観測所(日 本からは国立天文台が参加)によって運用されている. アルマ望遠鏡データの解析には,西合一矢氏(国立天 文台),Kazi Rygl氏(イタリア国立天体物理学研究 所)をはじめとする日・欧のアルマ地域センター関係 者およびEric Villard氏(合同アルマ観測所)から多く のサポートを頂いた.東北大学の黒田剛史氏には査読 を通して本稿の議論を深めて頂いた.ここに感謝を述 べる.

## 参考文献

- Kahre, M. A. et al., 2017, in The Atmosphere and Climate of Mars (Cambridge University Press).
- [2] Smith, M. D. et al., 2002, Icarus 157, 259.
- [3] Medvedev, A. S. et al., 2011, Aeolian Research 3, 145.
- [4] Heavens, N. G. et al., 2018, Nature Astronomy 2, 126.
- [5] Gurwell, M. A. et al., 2005, Icarus 175, 23.
- [6] Guzewich, S. D. et al., 2019, Geophys. Res. Letters 46, 71.
- [7] Butler and Bastian, 1999, in Synthesis Imaging in Radio Astronomy II, ASP Conf. series 180, 625.
- [8] Private communications with Eric Villard.
- [9] Mandeleine, J.-B. et al., 2011, J. Geophys. Res. 116, E11010.
- [10] Forget, F. et al., 1999, J. Geophys. Res. 104, 24155.
- [11] http://www-mars.lmd.jussieu.fr/mars/access.html
- [12] Rudy, D. J. et al., 1987, Icarus 71, 159.
- [13] https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA22487