

1. 概要

ローバーのバス機器であるナビゲーション用カメラを用いて、ダストデビル（の発生数、規模、持続時間、光学的厚さ、移動方向）をモニタリングする。

2. 科学目標

1. 着陸地点における、視程とダストデビルの日周期変動を把握する(Minimum Success)
2. 1に加えて、着陸地点における、ダストデビルによるダスト供給量の日変化から数十日周期までの変動を把握する (Full Success)
3. 1火星年に渡って、2と3を行う (Extra Success)

3. 意義

1. 科学的意義

火星に常時浮遊している一定量のダスト（以下、背景ダスト）を供給しているのは、主にダストデビルであると言われている。そのメカニズムゆえ、ダストデビルの発生数や規模、持続時間が大きく日変化することが予想される。火星の中低緯度でもっとも振幅の大きい支配的な変動成分は日周期変動であることから、日変化の重要性は明らかである。したがって、ダストデビルの活動の日変化を観測しなければそれによるダスト供給量を把握することはできない。しかし、過去の周回機（太陽同期軌道）からの高解像度撮像では地方時が固定されてしまい、大きな日変化を捉えることができない。

着陸機によってダストデビルの系統的な観測がおこなわれているものの、Spirit のみの1例であり、それも正午から午後2時に観測が集中していて、観測された日変化が有意かどうかは疑念が残る（Greeley et al., 2006）。したがって、今一度ダストデビルの日変化をモニタリングし、ダストデビルによるダスト供給量を正確に見積もる必要がある。一方で、背景ダストは大きく季節変化することが知られていて、その供給元であるダストデビルの活動と関係していると考えられている（Newman et al., 2002ab; Kahre et al., 2005）。火星の気象気候の季節変化や年々変動、より長周期の変動の理解へと進んでいくためには、各季節ごとのダスト供給量を見積もることが必要になってくる。日周期から数十日周期のダストデビルの活動を継続的に観測することで、ダストデビルによる季節ごとのダスト供給量を正確に把握することができる。

ダストデビルの発生や持続期間、移動方向などは、周辺大気の流れや安定度に大きく影響を受ける。したがって、ダストデビルの発生数や持続時間と、他国の周回機によって得られるその時の大規模温度場とを比べることにより、着陸地点においてどのような大気場のときにどれくらいのダストデビルが発生し、それによってどれくらいの背景ダストが供給されているかを対応付けることができる。この結果から、着陸地点以外の場所におけるダスト供給量を推測することも可能となる。

2. MELOS1 で実施する意義

着陸機によってダストデビルの日変化を系統的長期的に観測した例は Spirit の 1 例のみである。1 点で観測したから火星全土のダストデビルの日変化がわかった、とは到底言えず、2 点目の観測の意義はまったく減じられない。むしろ、Spirit の観測地方時の不均一を解消し、より信頼できる観測結果を得るという意味では、1 点目よりも科学的意義はあると言える。

世界的にみても火星に着陸する機会が多いとは言えず、数少ないチャンスを使って少しでも観測点を増やす必要がある。ナビゲーションカメラによって撮影された画像をもとに、生命探査を行う地点が選定される。その意味では、主サイエンスたる生命探査との大きなシナジーを有する機器ではあるが、ダストデビルのモニタリング自体が生命探査と大きなシナジーを有する科学であるとはなかなか言えない。むしろ、生命探査がうまくいかなかった場合やローバーが動けなくなった場合に、確実に何らかの科学的成果をもたらすことができる相補的な観測であると言える。さらに、生命探査機器のシャールをすべて使い切った後、ローバーが生きている限り活動を続ける科学的動機を与える観測であるとも言える。

3. 他のミッションと比較して

ナビゲーションカメラはどのローバー（ランダー）にも搭載されているものであるから、観測装置自体に新規性はさほどない。むしろ、（波長や感度の点で）似たような観測装置であるからこそ、他のミッションの観測結果と比べる際、測器ギャップをあまり気にせずに「継続観測」として解析できる。一方で、運用を工夫して観測可能な地方時を均一にカバーすることで、他のミッションの観測よりも信頼できる結果を得ることが可能となる。

4. 着陸時期、着陸地点について

現段階における着陸時期候補は、a) $L_s=331.4^\circ$, b) $L_s=324.2^\circ$, c) $L_s=14.8^\circ$, d) $L_s=135.0^\circ$, となっている。着陸候補地点は、A) Newton Crater (202.3°E , 41.7°S), B) Nili Fossae (74.7°E , 21.7°N), C) Isidis Planitia (85.5°E , 10.5°N), となっている。図 1 は NASA/Ames Research Center の GCM で計算された、ダストデビルのダストフラックス ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{sol}$) の経度平均の季節変化である。着陸地点が B) および C) の場合は a)~d) のどの季節に着陸してもダストデビルの発生を相当数とらえられると期待できる。着陸地点が A) ならば、a)~d) のどの季節になっても、観測期間のごくごく一部にしかダストデビルが活発な時期を含まないか、ダストデビルの活動度が低い季節となる (Kahre et al., 2006, Greeley et al., 2010)。Spirit ($\sim 175^\circ\text{E}$, $\sim 15^\circ\text{S}$) が $L_s=0^\circ \sim L_s=180^\circ$ の期間にダストデビルをほとんど検出で

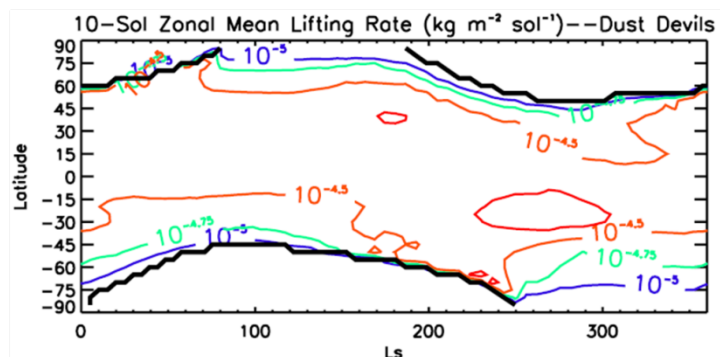


図 1. NASA/Ames Research Center の GCM で計算された、ダストデビルのダストフラックス ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{sol}$) の経度平均の季節変化。(Kahre et al., 2006)

¹ Solar Longitude. 火星の季節を現し、 $L_s=0^\circ$ は北半球春分、 90° は北半球夏至、 180° は北半球秋分、 270° は北半球冬至を表す。

きなかったことを考えれば、着陸地点がA)になった場合は、必要なダストデビル検出数（5-3）を達成することができないと考えられる。だが、Gusev Craterにおいて $L_s=0^\circ \sim L_s=180^\circ$ にはダストデビルはほとんど見つからなかったが、Spiritの運用上観測欠損が多く、本当に発生していないかはわからない（Greeley et al., 2010）。たとえ実際のダストデビル数が少なくても、継続的な観測によってダストデビルの活動度を正確に把握することは正確なダスト供給量の見積もりや、モデルの妥当性検証のために必須であると考えられる。したがって、どの地域、どの季節に着陸しても、ダストデビルモニタリングの意義は失われない。

4. 必要なデータ

1. ダストデビルが写った画像

●対応する科学目標: 2-1

- a. 地平線は 2km 先と仮定し、2km 先の直径 2m のダストデビルを解像できる
- b. 最長寿命 1900s（Greeley et al., 2006）のダストデビルの一生をモニタできる観測継続時間
 - ◇ Spirit の観測によって求められた最長寿命のダストデビルは、その一生をとらえきれていない。最長寿命を正しく決めるため、より長時間の「集中観測モード」を必要とする。
- c. 最短寿命 20s（Greeley et al., 2006）のダストデビルを検出できる時間分解能
 - ◇ Spirit の観測によって求められたダストデビルの最短寿命は、観測間隔 20s で既定されている可能性がある。最短寿命を正しく決めるためより高時間分解能の「高速モード」を必要とする
- d. 統計的に十分な個数のダストデビルを検出できるだけの視野
 - ◇ 運用シーケンスとトレードオフ。観測時間が現実的な長さになるくらい十分広い視野
- e. カメラ前方 ~ 15 m 以遠、水平線よりやや上（仰角 $<$ 数 deg）までの領域がはいる垂直視野
- f. 見通しのよい 1 方向だけでよいが、常にその方向であること

●対応する科学目標: 2-2, 2-3

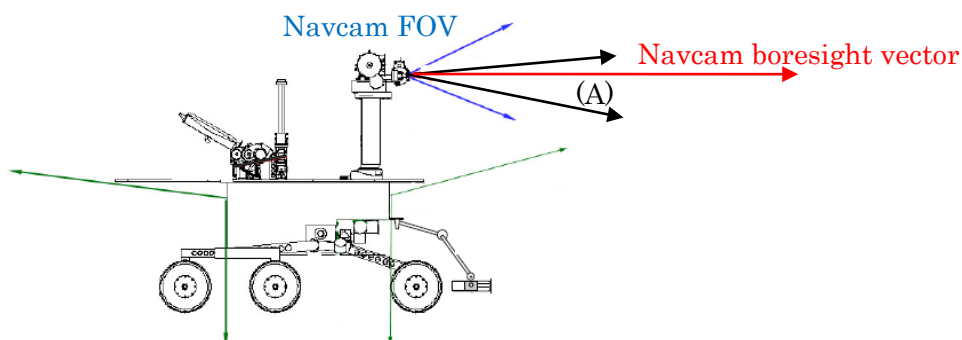


図 2. Navcam FOV, 視線, ダストデビルモニタリングで使用する垂直方向視野(A)の模式図。撮影された画像の中で、(A)に対応する領域だけを用いてダストデビル検出に用いる（他の領域はトリミング）。Navcam FOV の中に(A)が入っていれば、boresight vector の仰角は 0 deg でなくてもよい。

表 1. ダストデビル観測に必要なナビゲーションカメラのスペック

	通常モード	高速モード	集中観測モード	4 章との対応
水平方向視野	>45 deg	>45 deg	>45 deg	4-1-d
垂直方向視野	>15deg	>15 deg	>15 deg	4-1-e
角度分解能@FOV center	<1 mrad	<1 mrad	<1 mrad	4-1-a
観測時間間隔	<20 s	~5s	<20s	4-1-c
観測継続時間	>30 min	>7 min	>2 h	4-1-b
観測（視線）方向	固定	固定	固定	4-1-f, 4-2, 4-3 着陸後決定
ADC(FIXME)	>12 bits	>12 bits	>12 bits	

- g. 観測期間が L_s で 30° 以上で、その期間内で観測地方時、観測日が偏っていないこと（5-2 参照）
2. 特定のランドマークが写った画像（4-1.と兼ねてもよい）
- 対応する科学目標: 2-1
- a. 着陸地点からの距離の異なる複数の地形。着陸後に決定する
- b. 朝，昼，夕の 1 日 3 枚を毎日
3. 観測方向の地面の形状や模様が写った画像（4-1., 4-2.と兼ねてもよい）
- 対応する科学目標: 2-1, 2-2, 2-3
- ダストデビルの位置決めに必要（Greeley et al., 2006）

5. 測器提案

1. 必要スペック

4 章で示されたデータを取得するため、ナビゲーションカメラが満たしておくべき条件は表 1 に示されている。また、ナビゲーションカメラの視線と視野、そのうちダストデビルのモニタリングで用いる領域は図 2 において模式的に示されている。水平方向視野は統計的に十分な数のダストデビルを検出するため、観測頻度（5.3 で提案する運用シーケンス）とのトレードオフになる。水平方向視野、垂直方向視野と角度分解能@FOV center の値から、素子は水平方向には~800 ピクセル、垂直方向には~270 ピクセルあればよいということになる。

2. MELOS1/ナビゲーションカメラとしての親和性

現在のところ、MELOS1 のナビカメラとして MER/Navcam のそれ程度が想定されている。表 2.は Maki et al. (2003)の Table 3.から抜粋した MER/Navcam の仕様の一部を示しており、表 1 と比べて多くの部分が似通っている。現在想定されているナビカメラの仕様は、本提案にとっても必要十分であると言える。さらに、5-3 節でも述べるが、ダストデビルを画像中から検出し、データ転送できるように成形、変換する手続き（画像差分、ビンニング、圧縮など）は、ナビゲーション自体およびナビゲーションカメラによる周辺環境の調査でも行

表 2. MER/Navcam 諸元抜粋（Maki et al., 2003）.

水平方向視野	45 deg
垂直方向視野	45 deg
角度分解能@FOV center	0.82 mrad
画素数	1024x1024
Frame transfer time	5.12 ms
CCD readout (full frame)	5.4 s
CCD readout (4x1 binned)	1.4 s
ADC	12 bits

われる手続きである。つまり、ハードウェアやその仕様の追加、アップグレードのみならず、搭載ソフトウェアの追加すらもほとんど必要ない。あるとすれば、画像中のダストデビルだけをトリミングする処理を必要とするくらいで、5-3 節以降に述べる運用シーケンスを工夫するだけで十分目的を達成できる。

3. ダストデビルモニタリング運用提案 (TBD)

火星大気分野では L_s で 30° ごとに時間平均して季節変化を示すことが多い (例えば Banfield 2003, 2004)。南半球の夏が最も進行が早く (L_s で 30° あたりの日数が少ない)、約 50~60 sols で十分個数のダストデビルを観測しなくては、季節が変わってしまう (4-1-g)。したがって、50~60 sols 程度をひと塊りとし、その中で十分な回数の観測を、時間的に均一に行う必要がある。

大気中には様々な周期の変動が存在しており、ダストデビルの発生数や持続時間、規模などの日変化を正しく把握するためには、さまざまな地方時において可能な限り多くのダストデビルを観測しなくてはならない。さらに、より長周期の変化を捉えるには可能な限り切れ目なく継続的に観測する必要がある。統計的に検討した結果、地方時ごとにおよそ 400 個のダストデビルを検出できれば、期間を通してのダスト巻き上げ量を従来よりも高い信頼度で推定することが可能である。Greeley et al. (2006)を参考にすれば、MER/Navcam と同じ 20 秒間隔で撮影した場合、このためには 32 時間の観測を必要とする。しかし、50~60 sols の間に地方時ごとに 32 時間のダストデビル観測を確保することは容易ではない。特に、11:00-13:00 あたりの電力に余裕がある時刻に、それをすべて占有するような運用は可能であっても回数が限られ、長期間の観測欠損を招きかねない。そこで、1 回あたりの観測シーケンスを 30 分と短くし、それを毎日異なる地方時 (同じでもよい) に行っていく方法をとる (図 2 の通常モード)。こうすることで、他の活動の合間に入れ込むことができ、長期間の観測欠損を避けられる。

高速モードと集中観測モードを毎日毎週行う必要はなく、1, 2 か月に 1 度行えばよいと考えられる。

以上をもとに、たたき台となる観測シーケンスの一例を図 3 に示している。縦軸は日数で、横軸は各日における地方時である。1 マスは 30 分の観測シーケンスを示しており、赤色は通常モード、黄色は集中観測モード、緑色は高速モードをあらわしている。高速モードは 1 マスになっているが、実際は 7~8 分である。なお、図 3 中に示されていないが、毎日朝、昼、夕の 3 回、各回 1, 2 枚、特定のランドマークを撮影する。また、図 2 に示された時だけダストデビルモニタリングを行うことができればよいというわけではなく、隙間があるなら 2 枚でも 3 枚でも撮影し、ダストデビルを検出したい。

4. 記憶容量、転送量、CPU 性能について

5-3. の観測シーケンスに対応する記憶容量、転送量、CPU 性能は以下のとおり。

1. 記憶容量 (TBD)

まず、ダストデビル検出手続きを行うには、異なる時刻に撮影された 2 画像を必要とする。垂直方向視野、水平方向視野ともに 1024 ピクセルとした場合、 1024×1024 [pix] $\times$ 12 [bits] $\times$ 2 画像 = 3.1 MB の空き領域が必要である。た

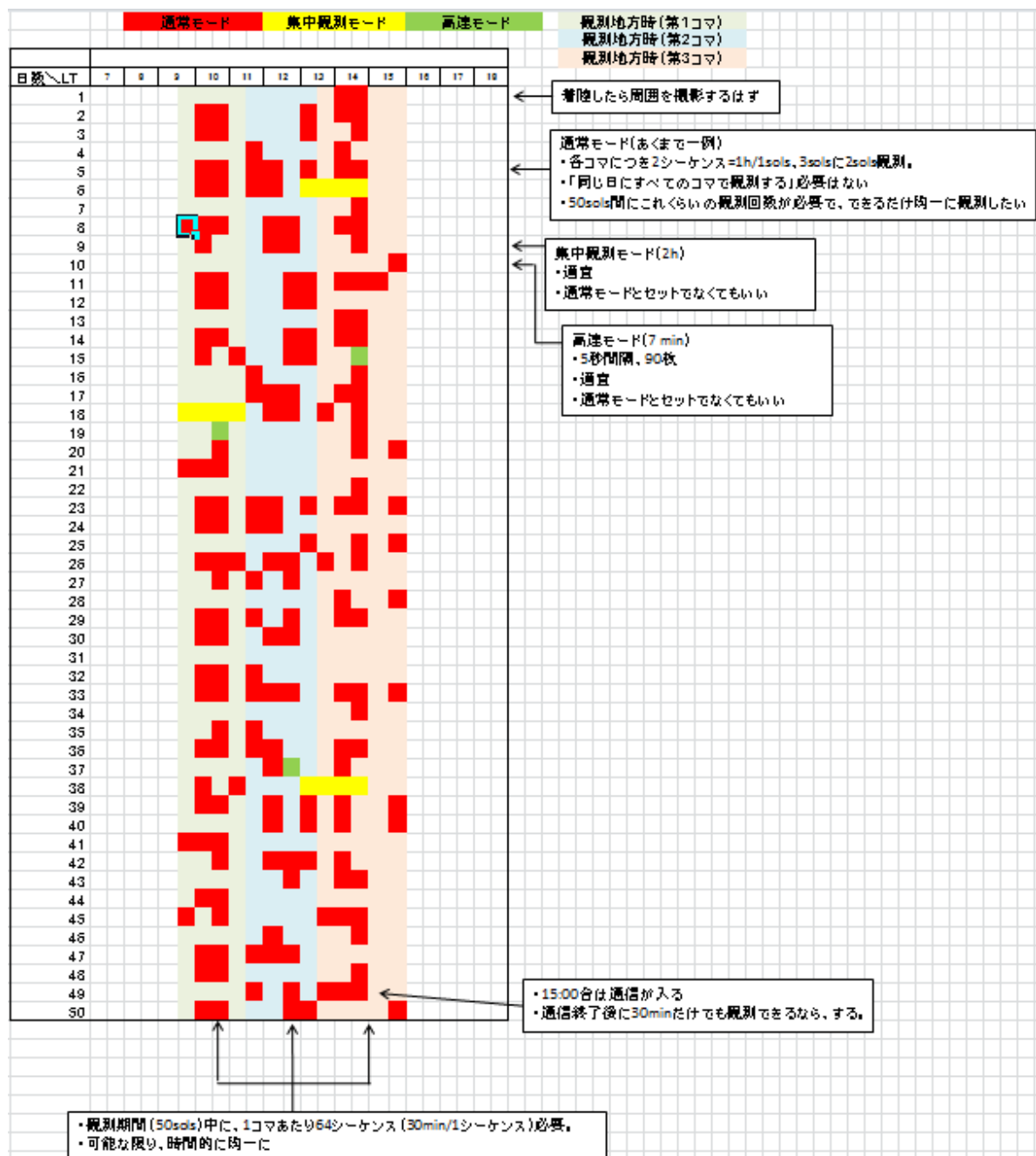


図 3. ダストデビルの観測シーケンスの 1 例. あくまでイメージ.

だし、ダストデビルが見つからなければこの領域は上書きされる。加えて、次の 3-2.に示されている転送されるデータを記憶する領域も必要となる。

2. 転送量 (TBD)

膨大な画像をすべて転送することは不可能であろうから、異なる時刻に撮影された 2 画像の差分 (機上処理) からダストデビルを検出し、ダストデビルの周囲のみ転送対象とすることで、転送データ量を削減する。ダストデビルの位置決めで必要な周囲の画像は、ローバーが移動しない限り 1 枚でよい。表 2 に各観測モードで生成される転送すべきデータ量が示されている。通常

表 2. 日ごと、週ごと、季節ごとのデータ転送量 (B=Bytes) **

	通常モード (4-1.)	高速モード (4-1.)	集中観測モード (4-1.)	ランドマーク画像 (4-2.)	位置決め用画像 (4-3)
/sequence	~3 KB	~3 KB	~11 KB		35 KB/image
/season(50sols)	~680 KB	~3 KB × ?*	~11 KB × ?*	4.5 KB	280 KB
/sol(mean)	~14 KB			90B(~10x10pix)	
/week(mean)	~95 KB			630 B	

* 適宜. 1 季節に 1 回以上

**1/10 に圧縮できることを仮定

モードは 20 秒間隔で 90 枚の画像を撮影するモードで, 1 シーケンス 30 分である. Spiritの実績 (Greeley et al., 2006) から, 通常モード 1 シーケンスで検出できるダストデビルの個数は平均的に 6 個程度かそれ以下で, 1/10 にデータ圧縮できると仮定すれば 2~4 KB/1 シーケンスの転送データ量となる. 1 seasonでは, $680 + 3 + 11 + 4.5 + 280 (+\alpha) \sim 980 \text{ KB}/50\text{sols}$ のデータが生成される. 位置決め用画像が変化する長距離移動は, 生命探査のため少なくとも 8 回 (シャーレの数) 行われると仮定した ($35 \times 8 = 280 \text{ KB}$). 表 2 の数値はすべて 1/10 に画像圧縮できることを仮定している.

3. CPU 性能 (TBD)

撮影された 1024×1024 [pixels]の 2 画像を用いて,

1024×340 [pixels]の領域を切り出し,

それらの差分を計算し,

そこからダストデビルを切り出す

ことを 5s 程度以内に行えること (高速モード) が必要である. 記憶容量, down link rate に余裕がある場合は, この限りではない.

6. 実現に向けて

1. ヘリテージ

- ・金星探査機「あかつき」用の画像処理

- 特徴検出, PIV

- 画像圧縮

2. 新規開発

- ・ナビゲーションプロセスへの挟み込み

- ・ダストデビル検出, 必要な部分の画像の切り出しアルゴリズム

→ 模擬データ or 地上観測データ or MER データによる試行を行う

7. H26 年度中の開発計画・経費要求

ナビゲーションカメラの仕様の詳細検討は, メーカーとはもとより工学チーム内においてもなされていない (personal communication with 石上さん). すでに, 今後工学チームで設けられるであろう仕様検討の場に参加することができるよう申し入れており, ダストデビル観測の観

点からコメントを行うつもりである。ナビゲーションカメラはバス機器であり、バス機器として開発が行われる。H26 年中に、科学測器としての開発項目はない。