

火星表層でのダスト観測

お断り

- MMX の話ではなくて将来の着陸機の話です
- 私は火星の表層環境の専門家ではありません。
 - ぜひ専門家の方(自薦他薦問わず)を紹介して下さい。
 - これから専門家になろうとする方, 特に一緒に装置開発・検討して下さい方からのご連絡もお待ちしております
- 研究「グループ」があるわけではありません
- この発表(の前半)は1週間程度の付け焼刃的勉強を元にしており, 話題(議論のきっかけ)の提供を主目的としています
 - 議論させて下さい. 入れ知恵歓迎

考えていること

火星は砂の惑星である

火星有人探査が計画
されている

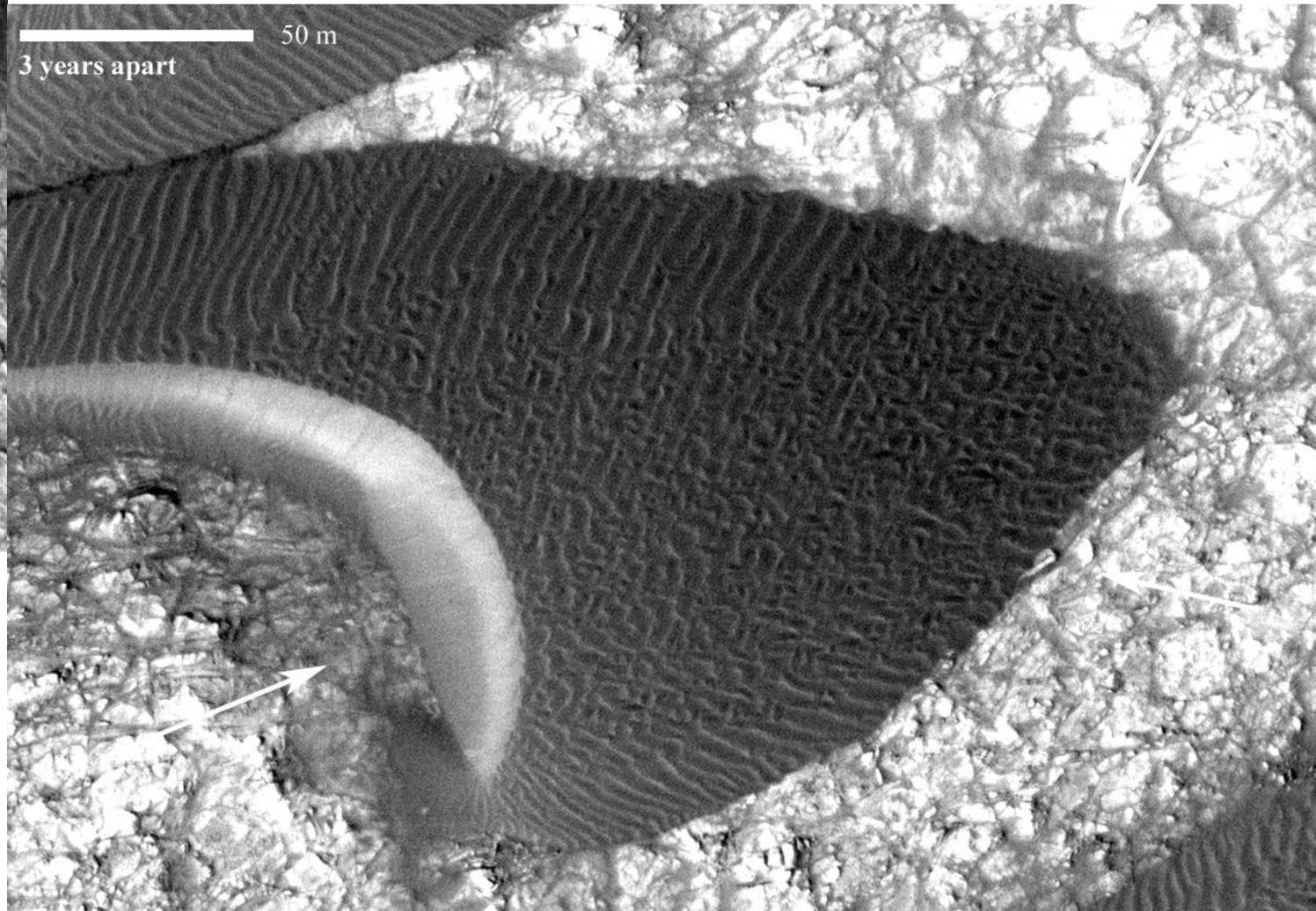
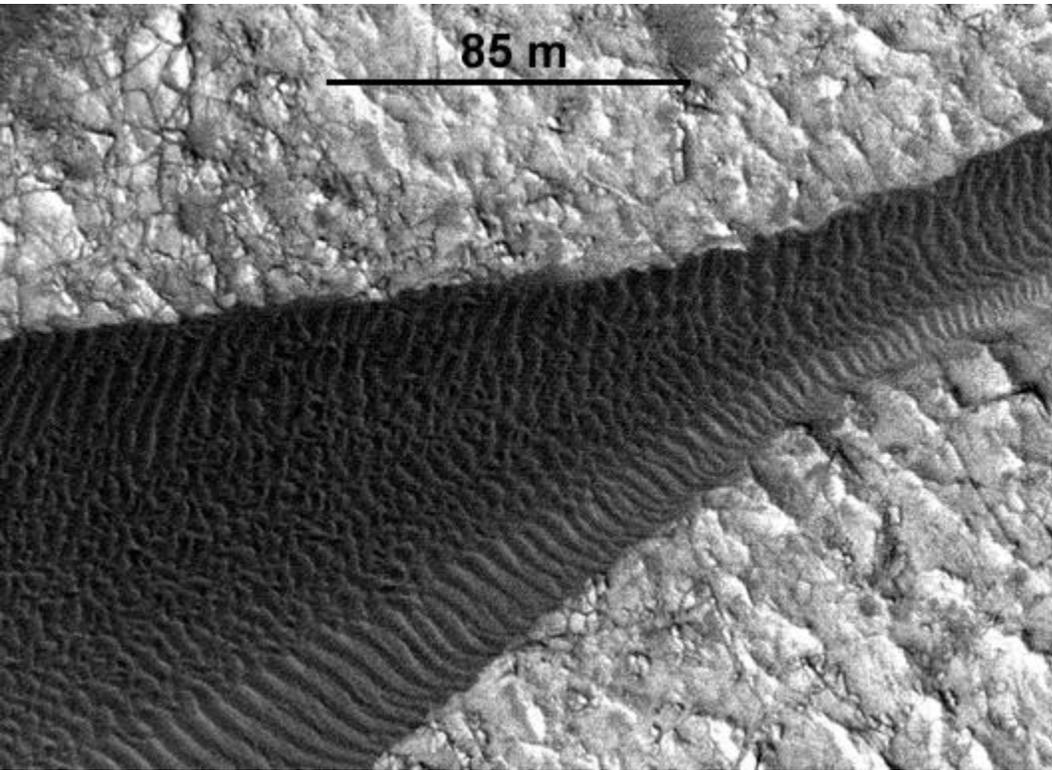
火星の表層からの
ダスト観測を行いたい

火星は砂の惑星である

地形が変化することが直接 確認できた最初の例

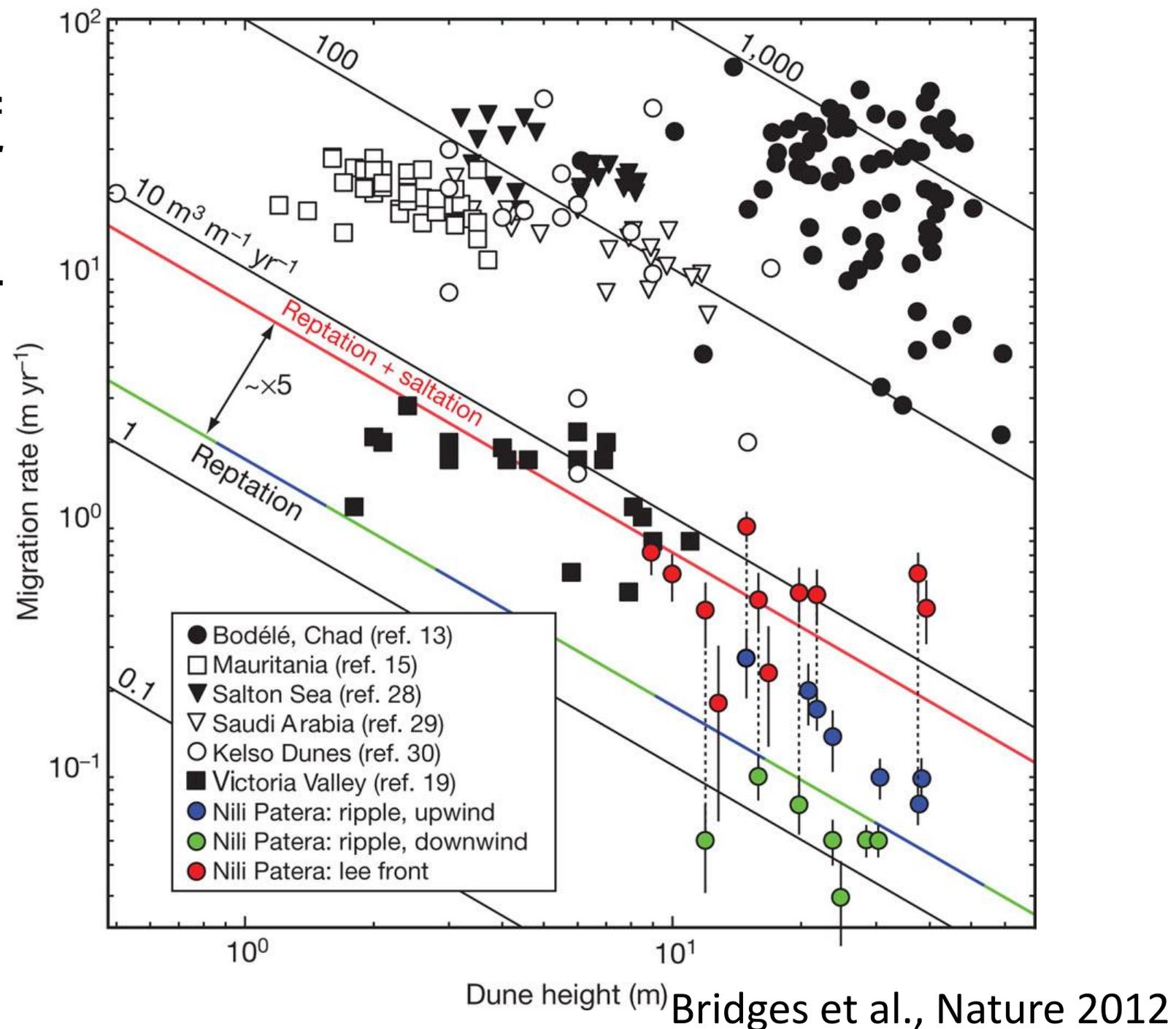
HiRISE によって撮影されたリップルの変化
(左)と砂丘の移動(右)

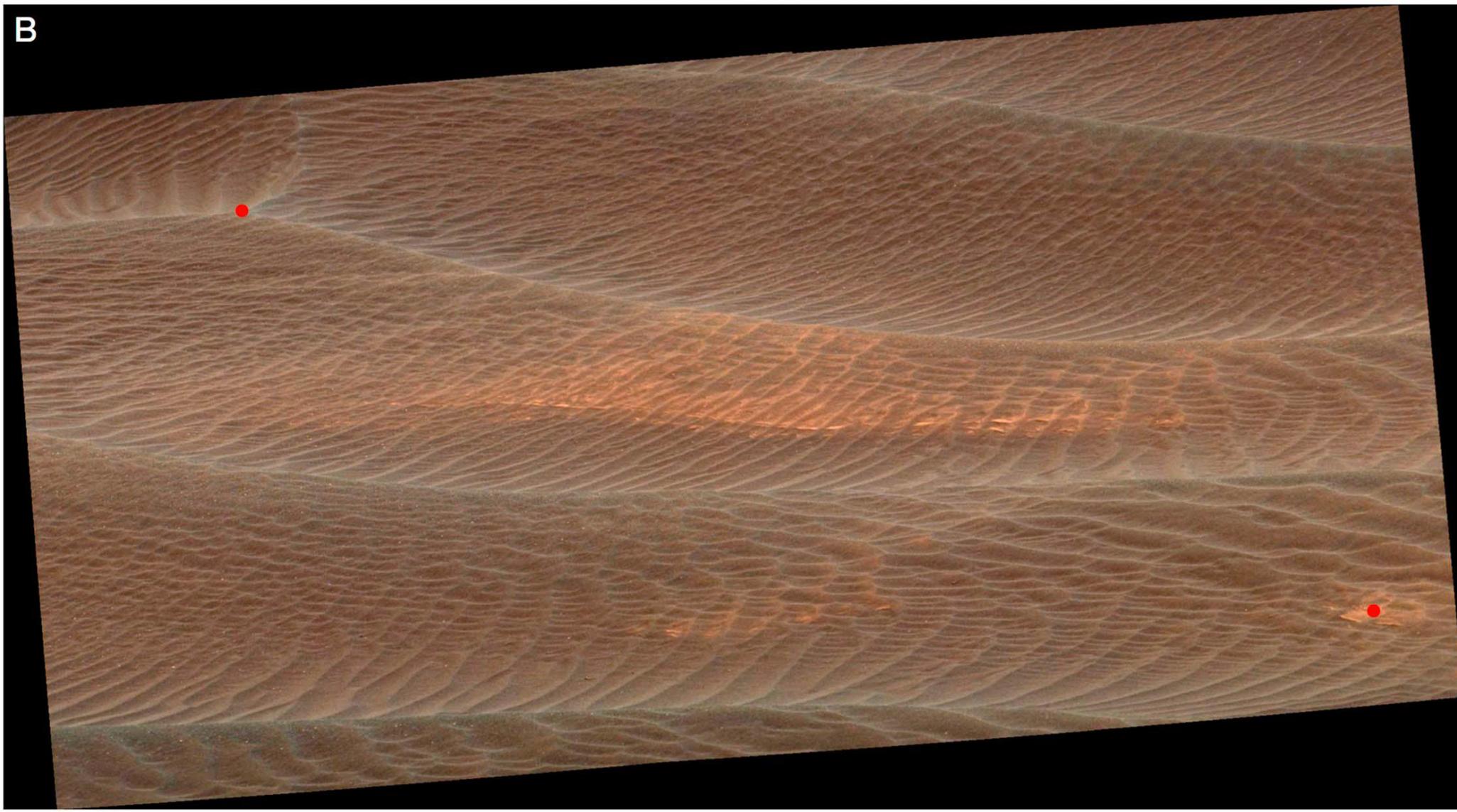
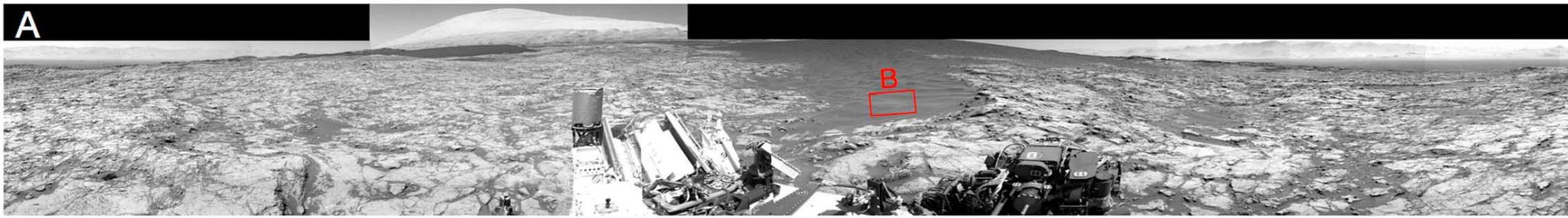
どちらも Bridges et al., Nature 2012



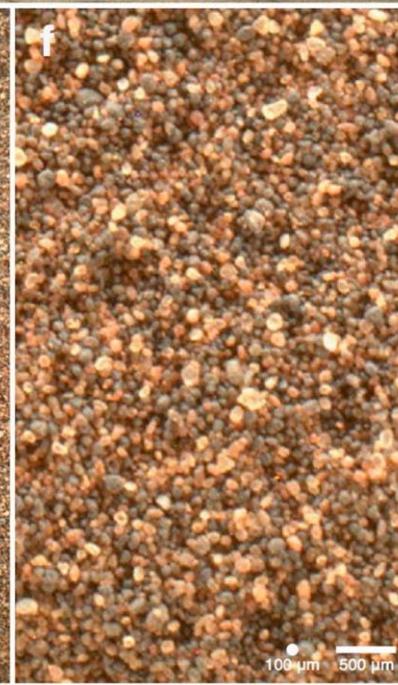
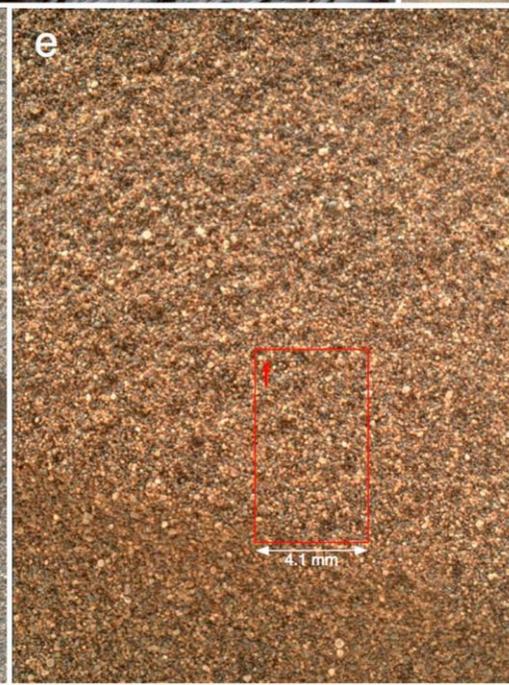
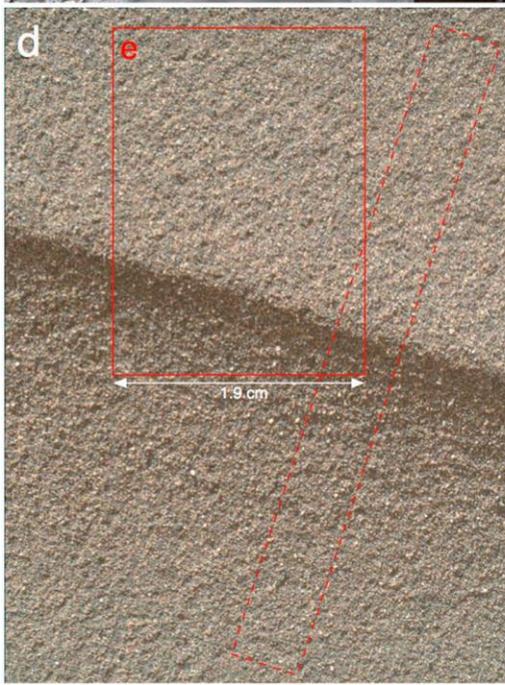
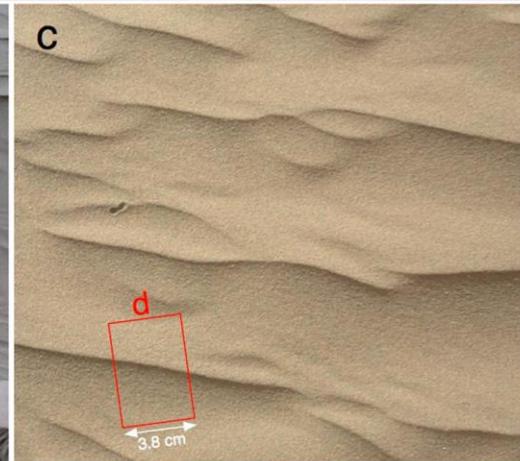
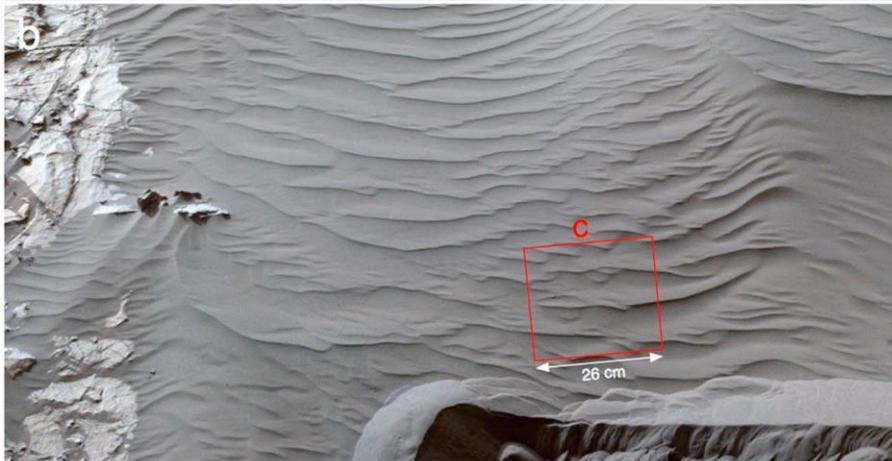
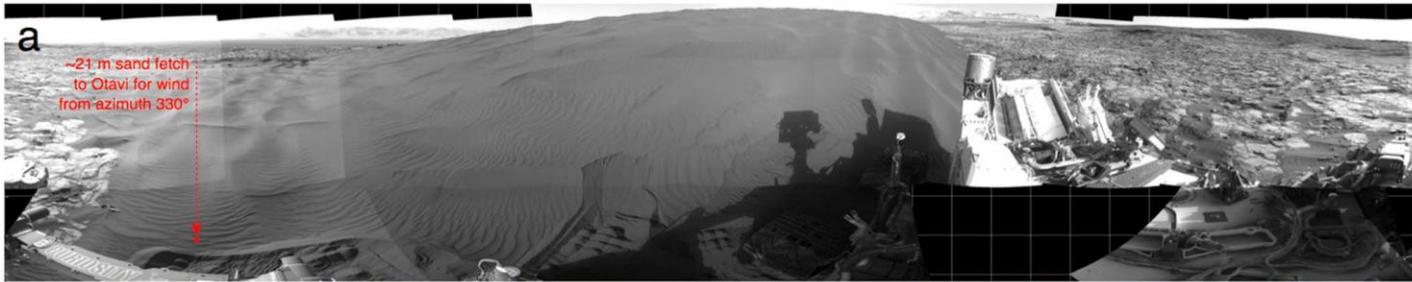
砂丘の高さと移動速度

- 右下の色のついた点が HiRISE 観測から求めたもの。それ以外は地球の値
- 火星の砂丘の移動速度は地球に比べて 1-2桁遅い
 - 大気が薄いため
 - 風速場の違い
 - 水蒸気の有無
 - 形状の違い などなど



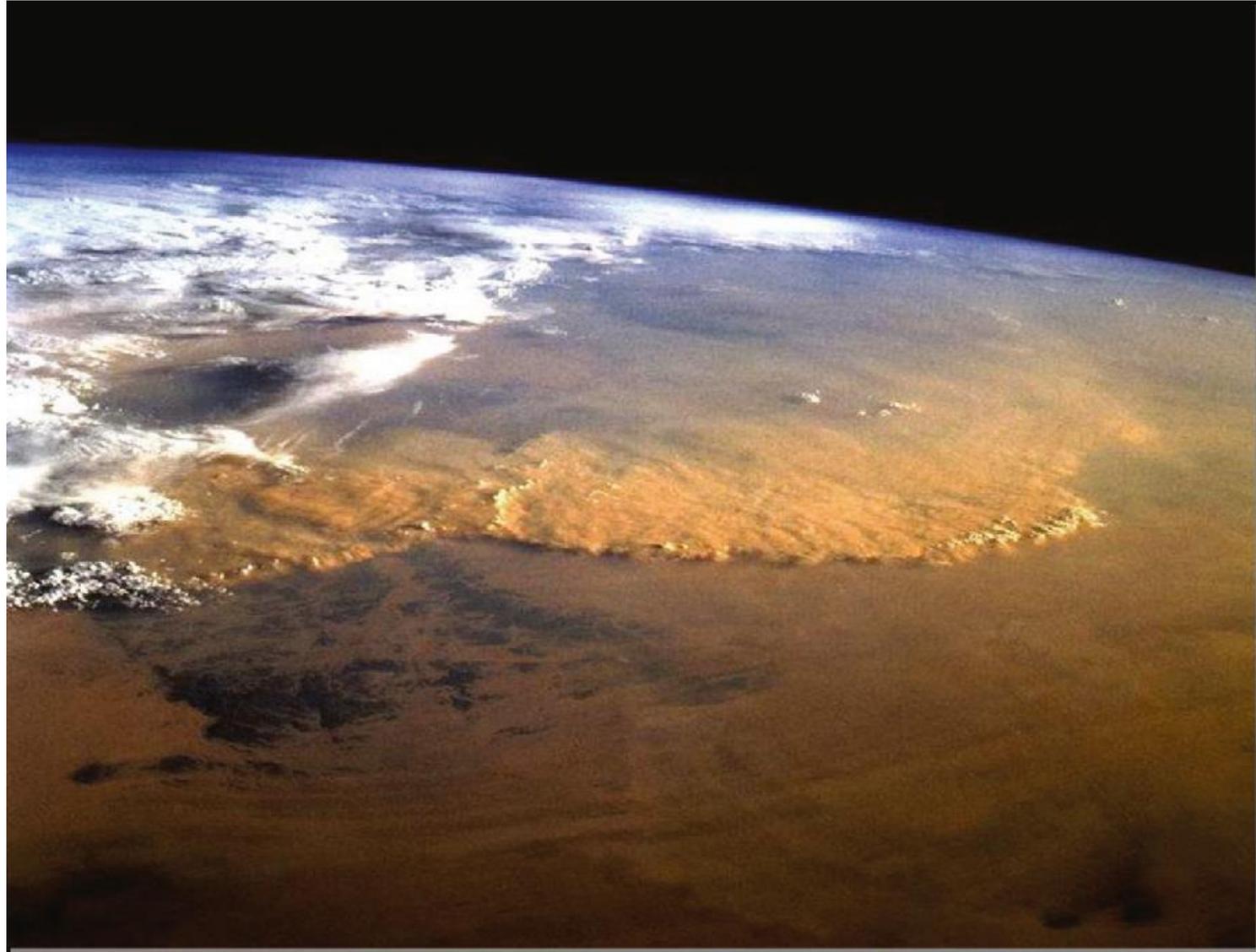


MSLによるパノラマ
(A)と、一部拡大(B)
Sullivan and Kok,
JGR2017

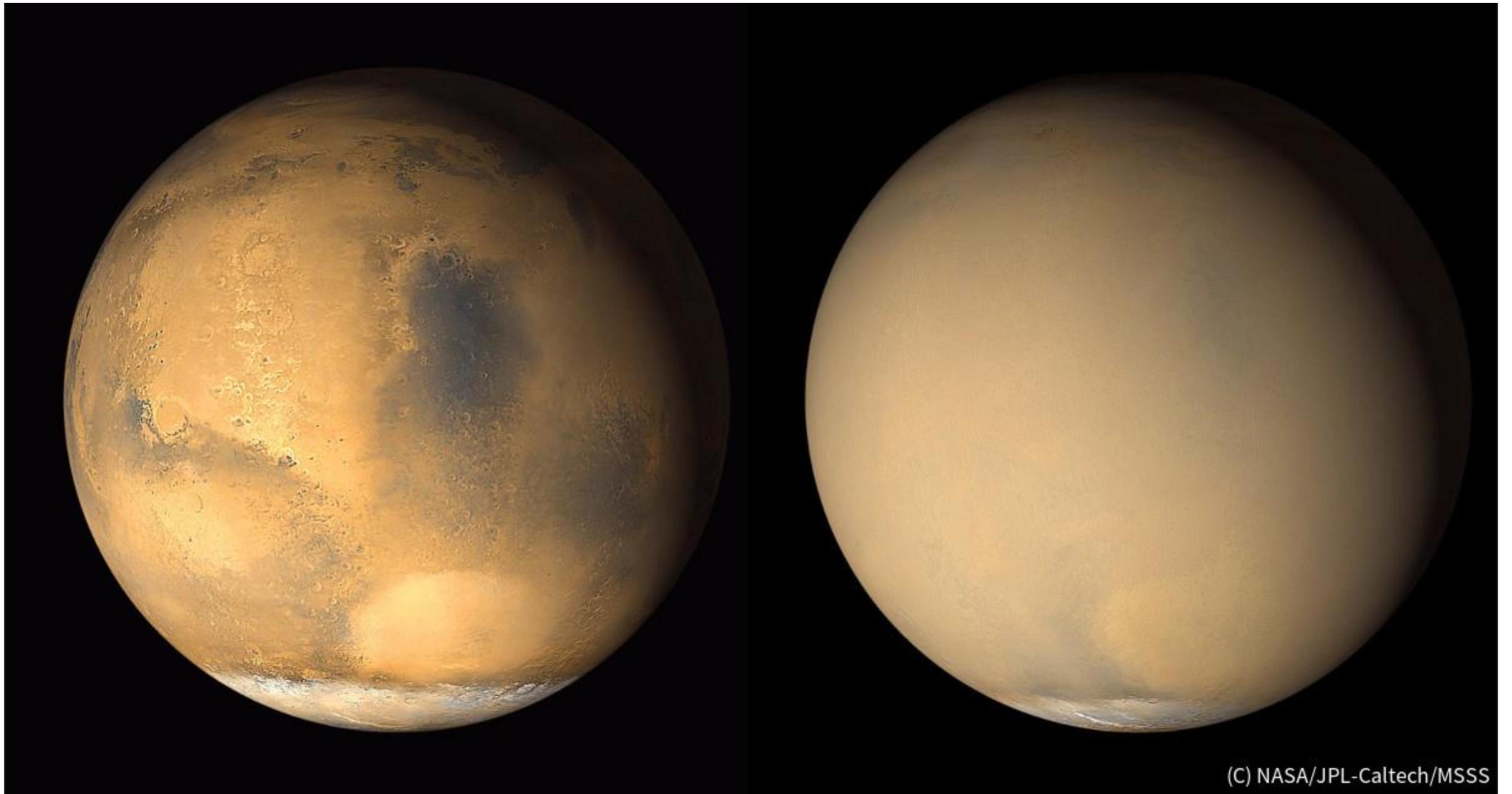


MSLによる観測
Sullivan and Kok, JGR2017

グローバルダストストーム
(全球砂嵐)

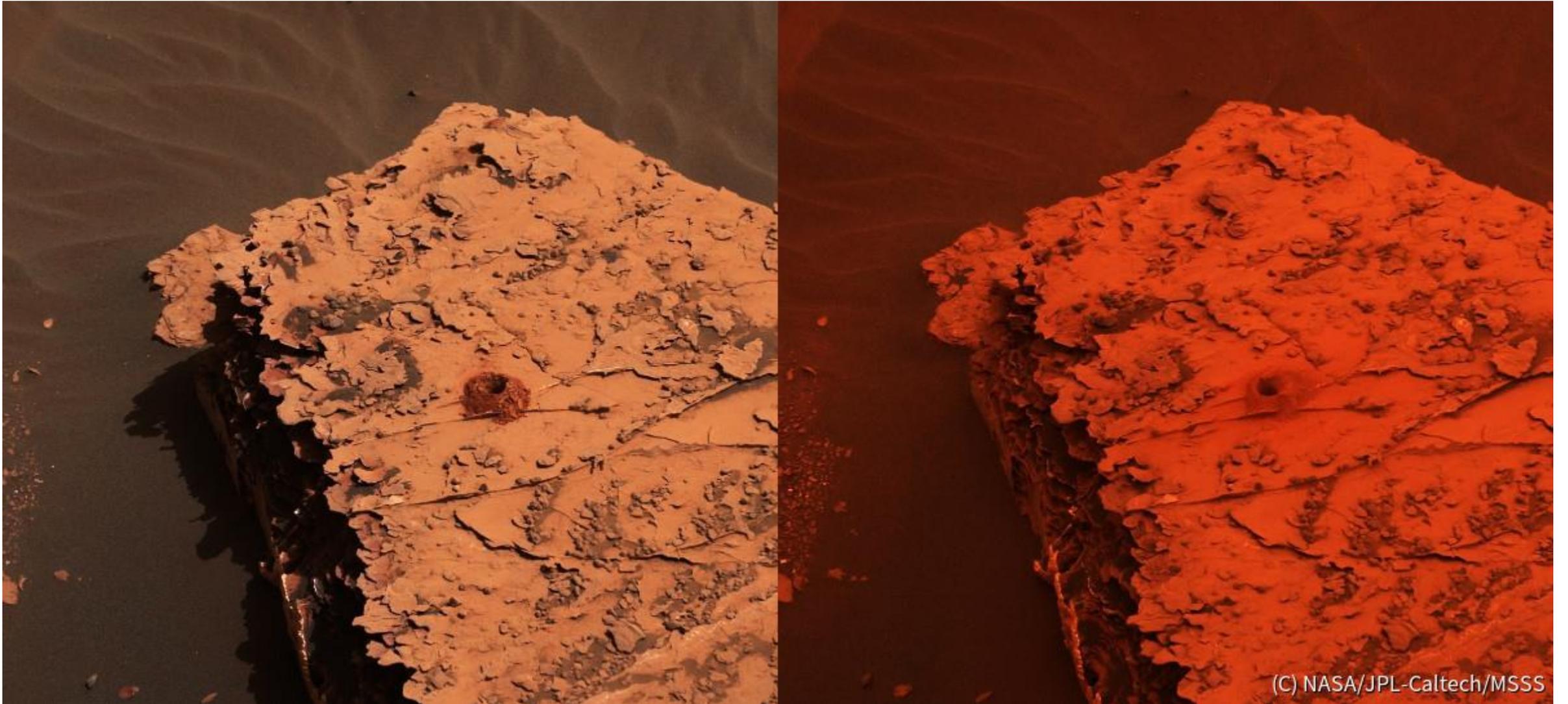


スペースシャトルから観測した地球のサハラ砂漠の砂嵐
“Physics and Modelling of Wind Erosion” (Y. Shao, Springer 2008)



(C) NASA/JPL-Caltech/MSSS

2001年の全球砂嵐. 左から右に至るまでおよそ1ヶ月



2018年5月21日（砂嵐前）と6月17日（砂嵐中）にキュリオシティが撮影した岩石色の違いは加工によるものではなく、当たっている太陽光の違いによる

砂嵐の中の気象条件

- 地球の砂嵐(せいぜい数日)では, 強い風が吹き, 目も開けていられない／精密機器は砂が入り込んで壊れるなどの報告がある
- 火星の砂嵐(長いときは1-2ヶ月)では, 上空大気が40K 以上高温になり, 一方地表面温度は 20K 近く下がるという報告がある
 - 砂嵐の中では風が吹く?
しずしずとダストが降り積もる? プルーム状になる?
 - 有人活動への影響は? じん肺, 中皮腫
(月レゴリスは呼吸系に入ると「火薬のような臭いがする」と報告されてる)
- 太陽電池パネルによる発電が主なエネルギー源の探査機では砂嵐の中での観測は難しい

考えていること

火星は**砂の惑星**である

- 風食地形がある
- 移動する砂丘
- 実際に砂で覆われている

• 全球砂嵐

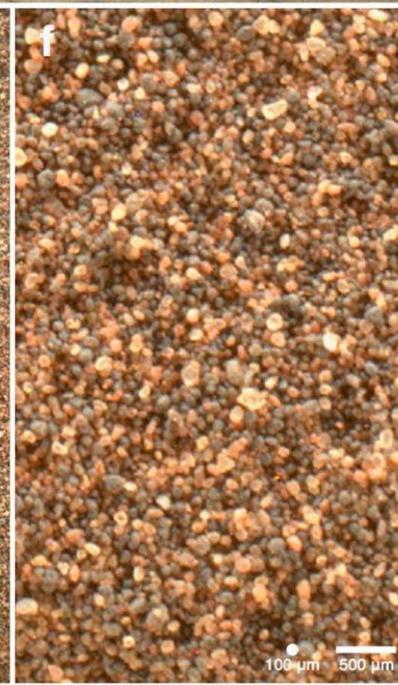
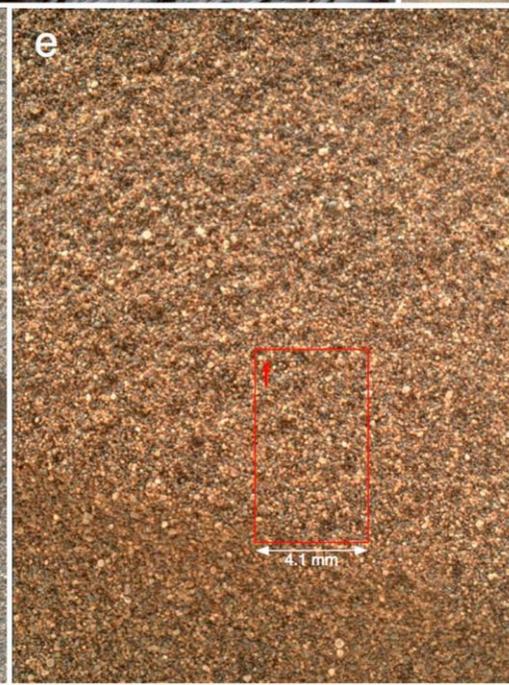
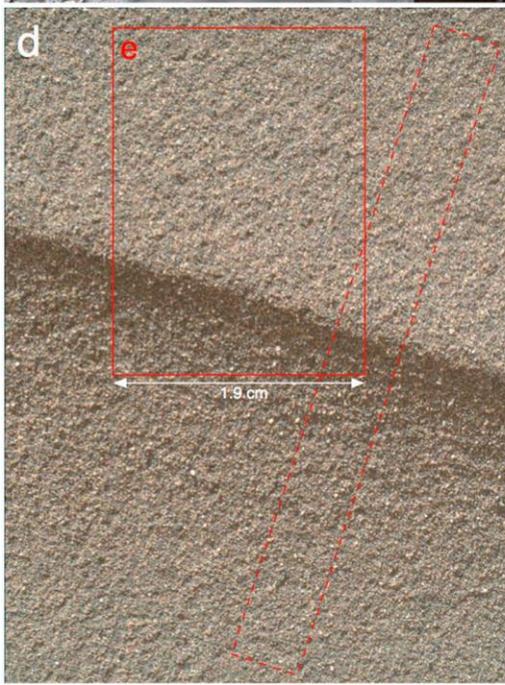
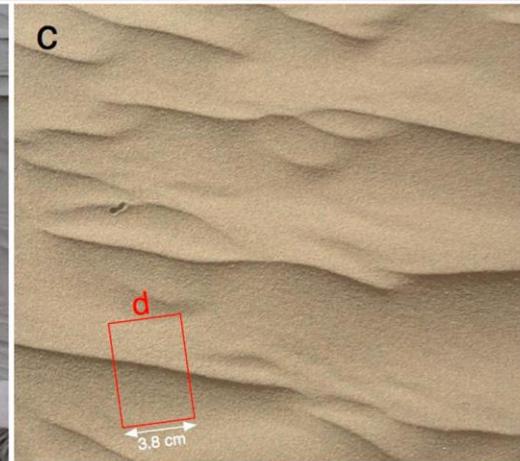
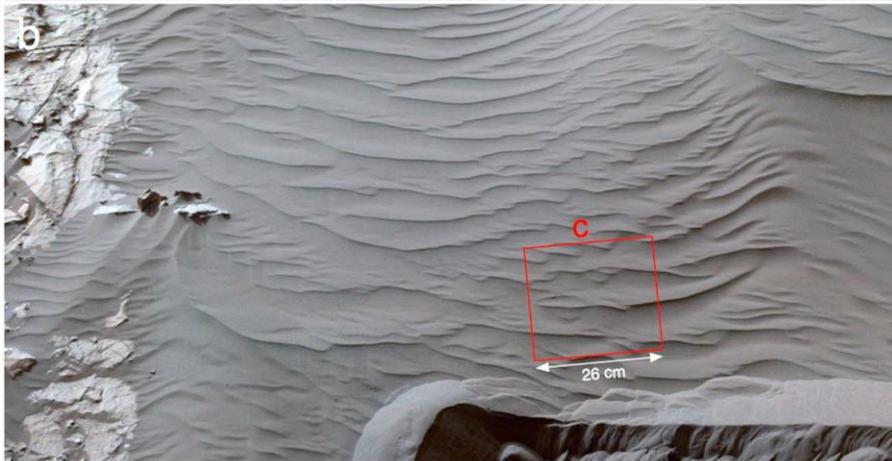
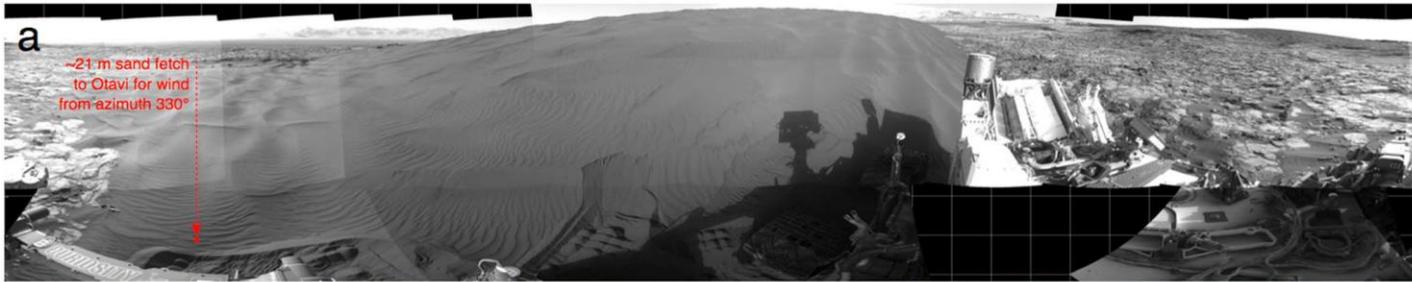
火星**有人探査**が計画されている

- ダストの人体への影響？
 - じん肺, 中皮腫
- 砂嵐中の気象条件？

火星の**表層からのダスト観測**を行いたい

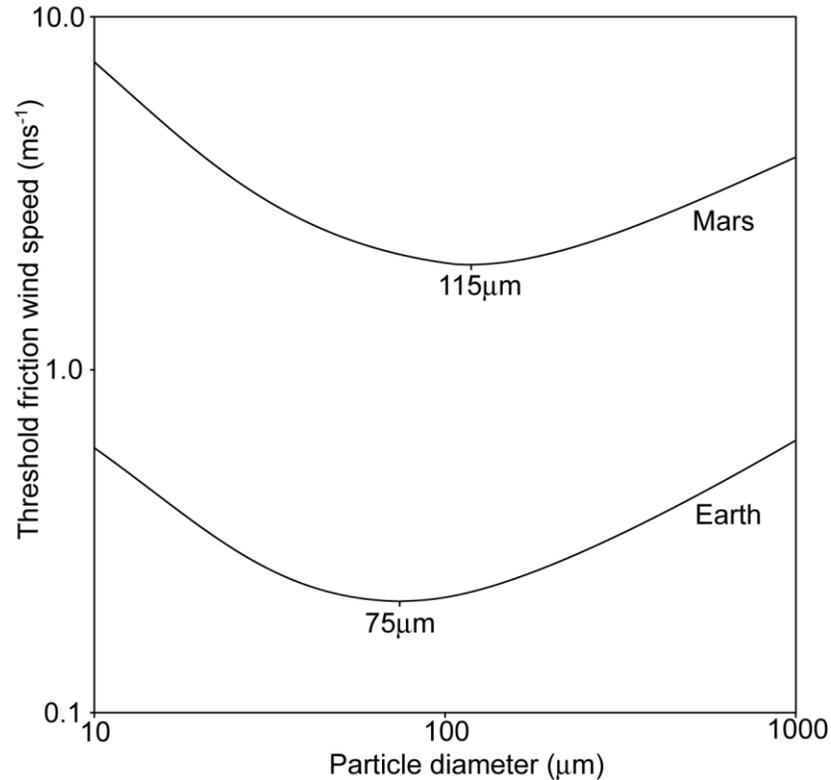
- 周回軌道からの観測vsその場観測

ダストストーム(砂嵐)は
砂なのか？ダストなのか？



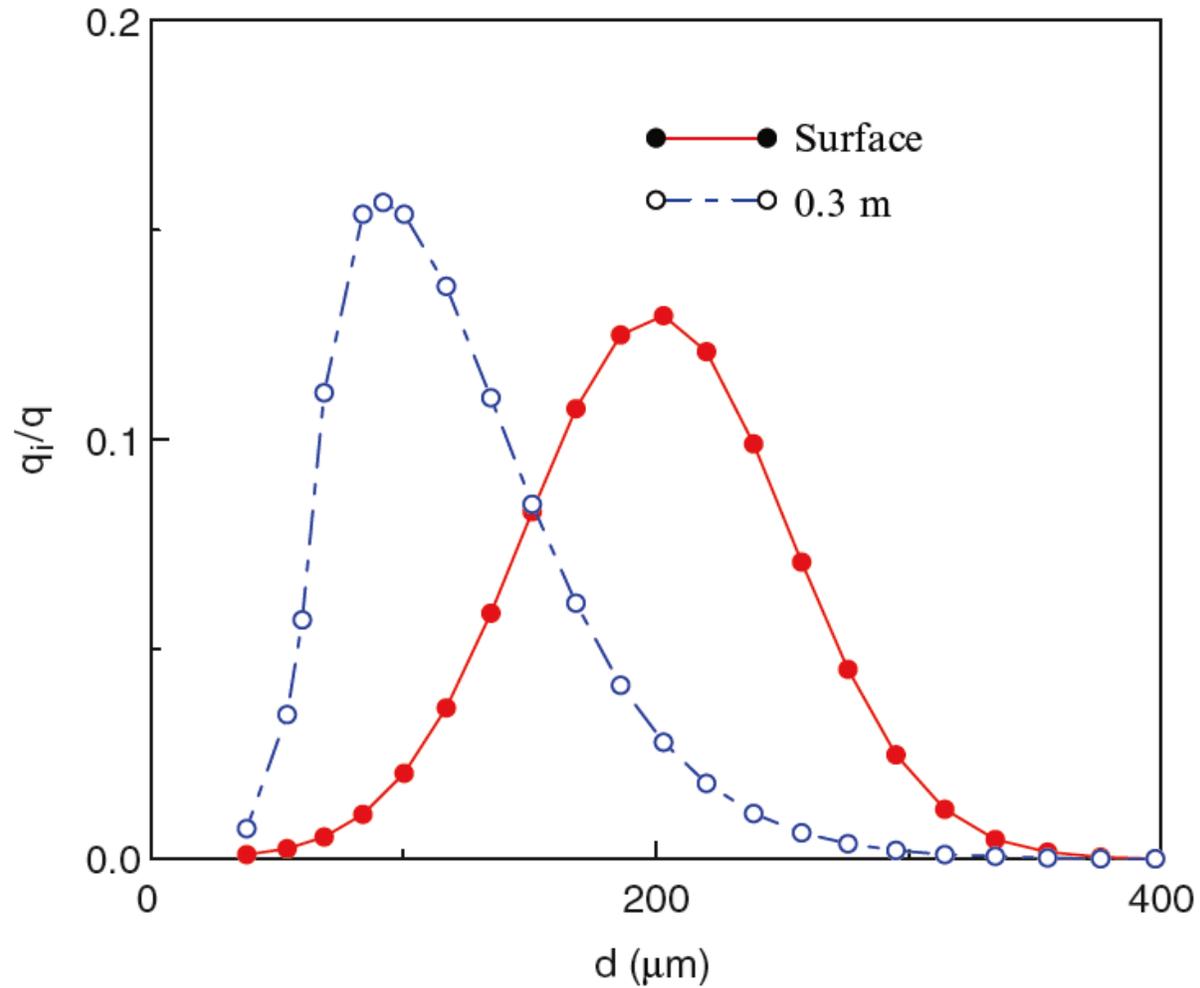
MSLによる観測
Sullivan and Kok, JGR2017

Saltation threshold velocity



Balme and Greeley, Rev. Geophys. 2005

- 均一な粒子からなる地面から粒子が動き出すのに必要な風速
 - 大きい粒子は重いため飛びにくい。
 - 小さい粒子は粒子間相互作用が効くため飛びにくい
- 火星は重力が小さいが、大気が薄いため、地球より1桁以上風速が必要
- 火星では $100 \mu\text{m}$ くらいがもっとも動きやすい
- 火星での閾値はもっと小さいのではないかと、いう話題は決着していない印象。論文は近年でも出ている (Kok, Phys. Rev. Lett. 2010; Ayoub et al., Nat. Comm. 2014; Sullivan and Kok, JGR 2017; Andreotti et al., PNAS 2021)



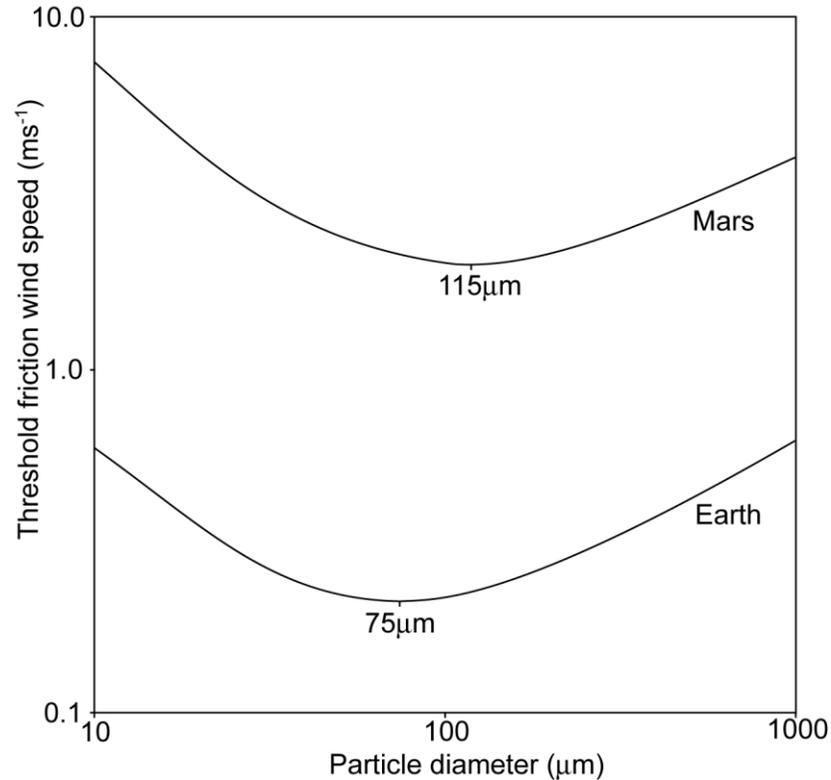
地球での、地上30cmの粒子サイズ分布と
地表面粒子のサイズ分布

Taken from "Physics and Modelling of Wind Erosion" by Shao, Springer

定常的なダスト

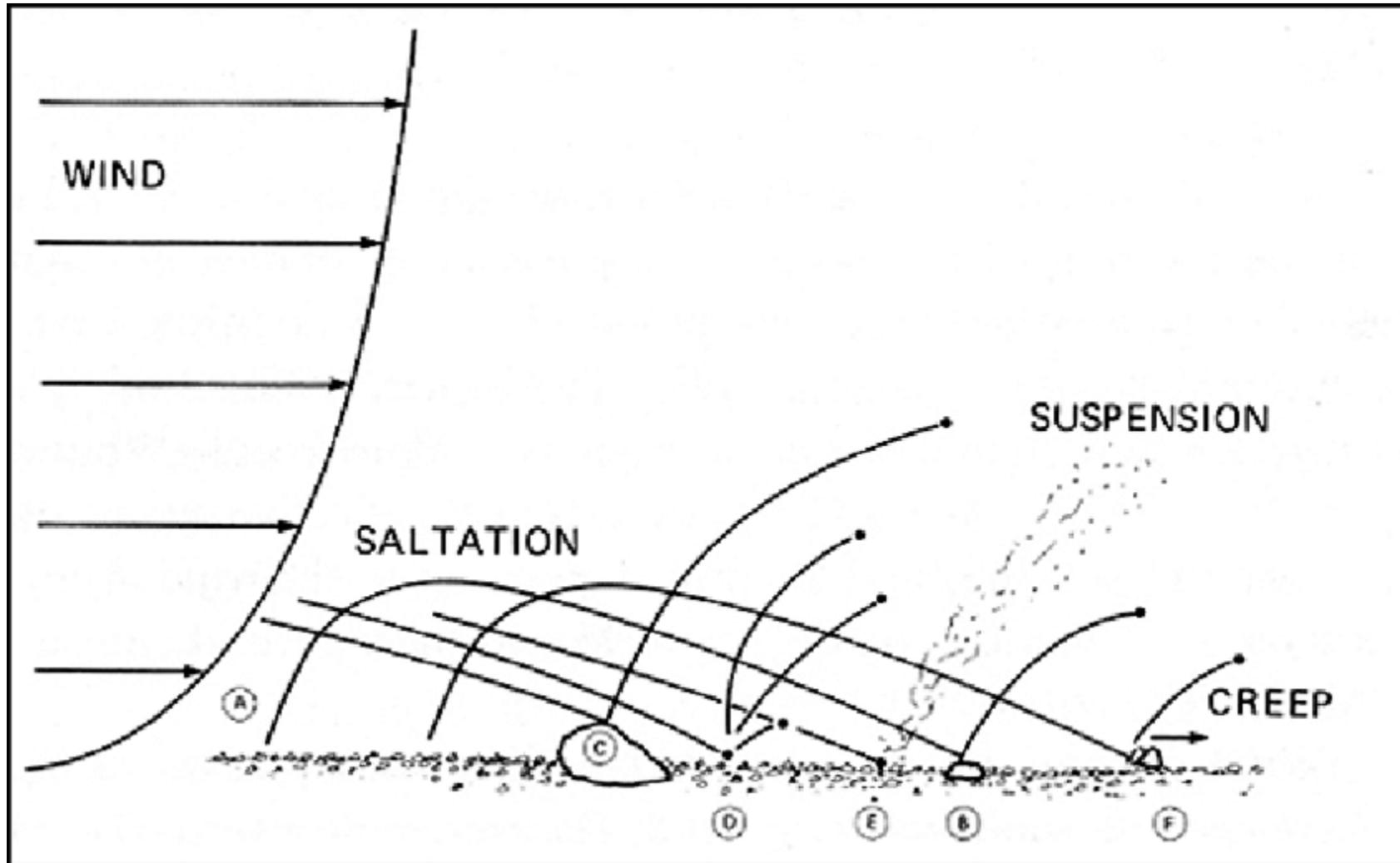
- 火星の空は赤い. 夕焼けは青い
レイリー散乱ではなくミー散乱が優勢
ダストサイズは $1.2-1.4\mu\text{m}$ 程度と見積もられる
- 発電量の継続的な低下と風による回復
 - ダストの沈降・堆積を示唆
- 大気中の沈降速度は 1mm/s 程度.
 - 1火星日の間におよそ 100m 沈降
 - 定常的な供給が無いと, 10日程度で境界層内のダストは枯渇
 - $100\mu\text{m}$ のダストでは, 大気全体からあっという間に失われるはず

Saltation threshold velocity



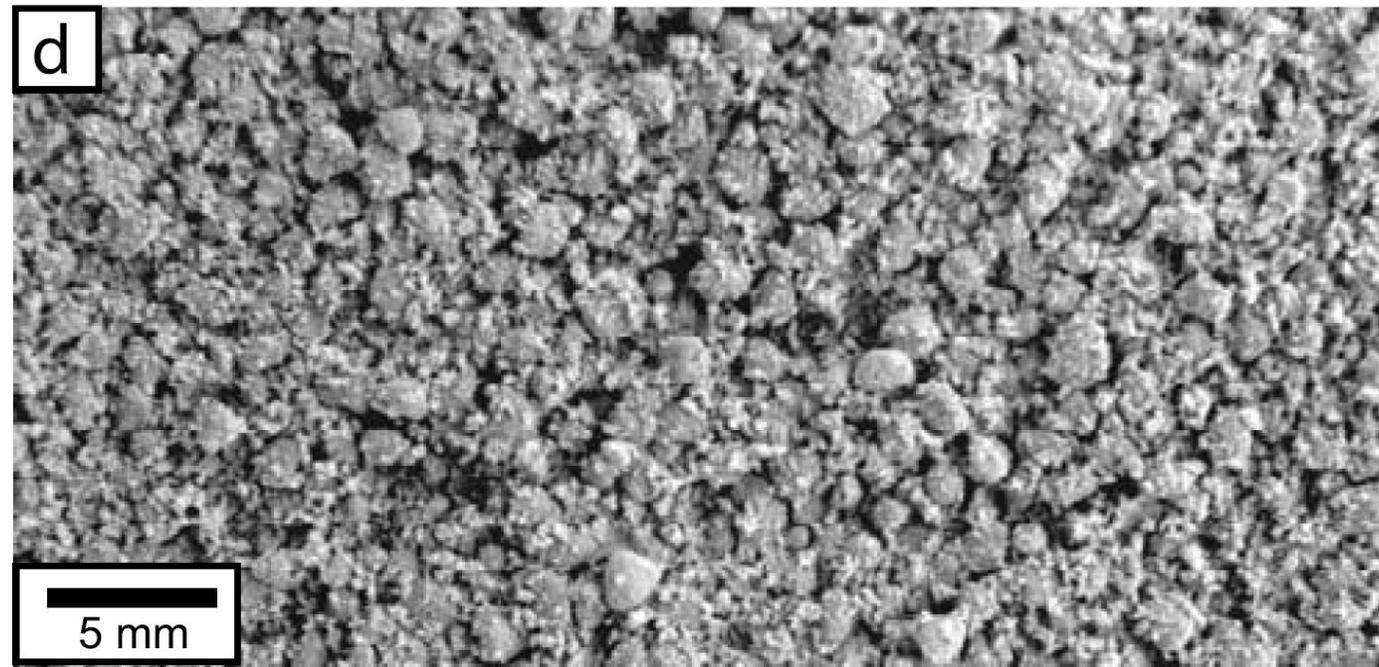
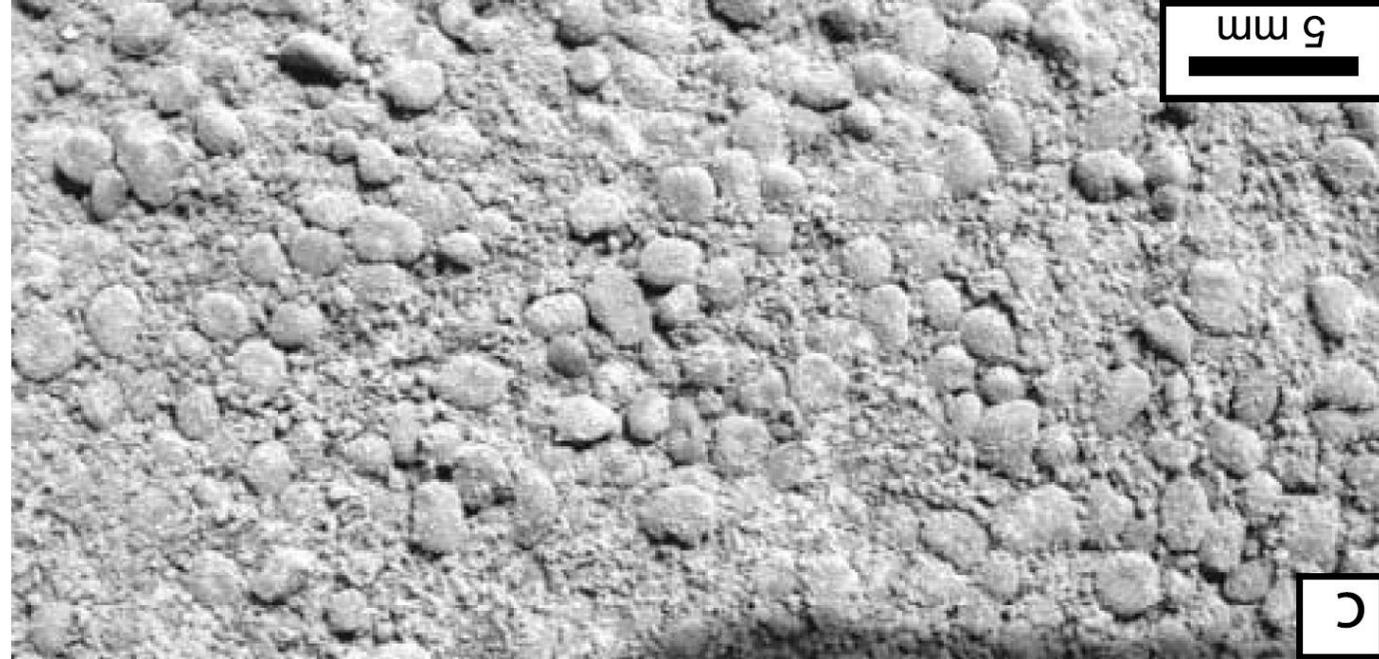
Balme and Greeley, Rev. Geophys. 2005

- 均一な粒子からなる地面から粒子が動き出すのに必要な風速
 - 大きい粒子は重いため飛びにくい。
 - 小さい粒子は粒子間相互作用が効くため飛びにくい
- 火星は重力が小さいが、大気が薄いため、地球より1桁以上風速が必要
- 火星では $100 \mu\text{m}$ くらいがもっとも動きやすい
- 火星での閾値はもっと小さいのではないかと、いう話題は決着していない印象。論文は近年でも出ている (Kok, Phys. Rev. Lett. 2010; Ayoub et al., Nat. Comm. 2014; Sullivan and Kok, JGR 2017; Andreotti et al., PNAS 2021)



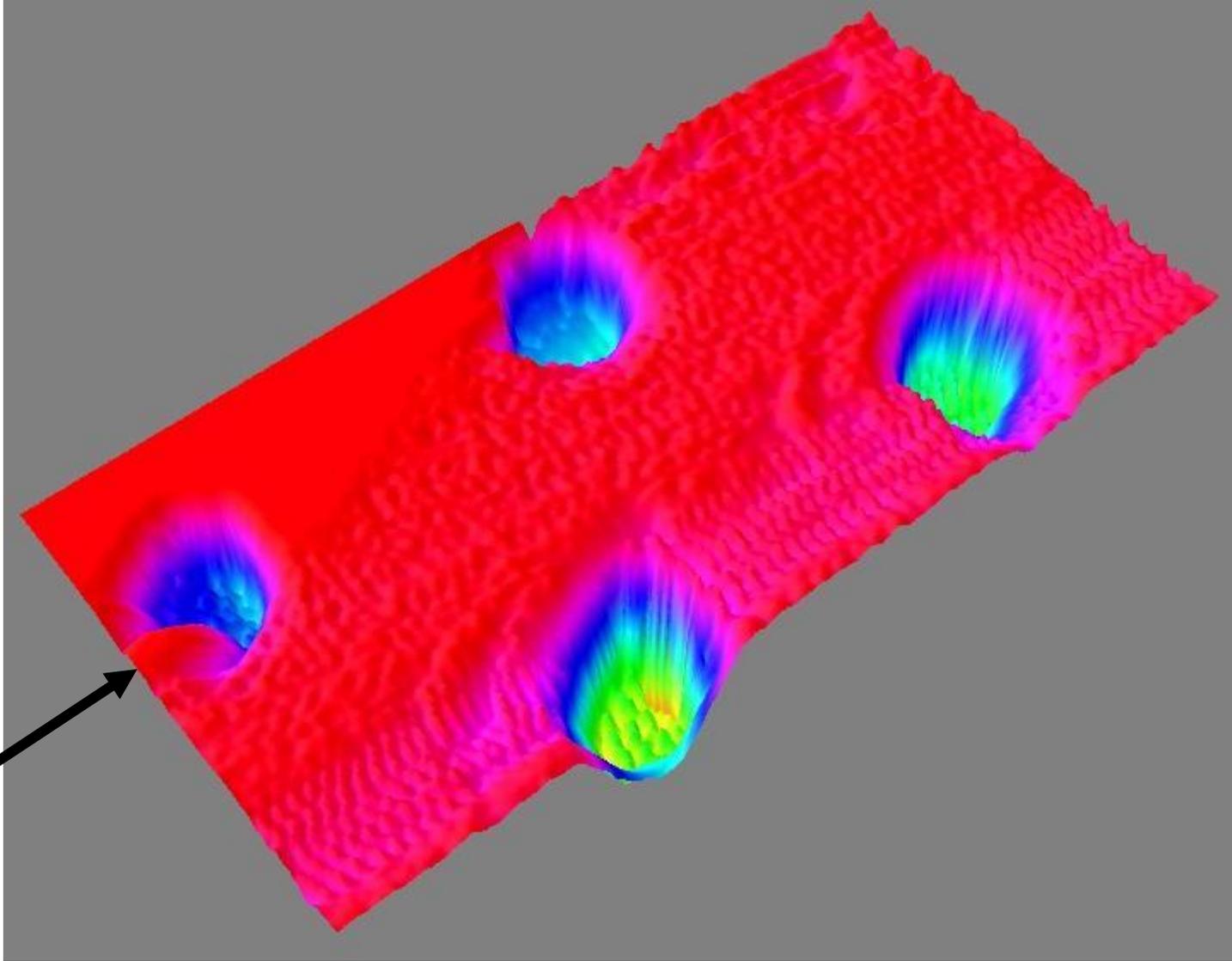
地表面からダストが飛び出すメカニズム

“Wind as a Geological Process” by Greeley and Iversen,
Cambridge Univ. Press 1985



火星探査ローバスピリットの
Microscopic Imager (MI) で
観測した地表面粒子。
(c) はダストデビル通過跡、
(d) は通過跡の外側で撮影
Greeley et al., JGR 2005

ダスト
～1 μm



フェニックスの原子間力顕微鏡で見つかったダスト(いちばん左の穴)

Image credit: NASA/JPL-Caltech/University of Arizona/University of Neuchatel/Imperial College London

大気中のダストの量

- ダストサイズは 1-2 μm 程度. 沈降速度は 1mm/s 程度.
 - 1火星日の間におよそ 100m 沈降
 - 定常的な供給が無いと, 10日程度で境界層内のダストは枯渇
- 太陽電池パネルの発電量の変化 (0.28%/day, Landis and Jenkins 2000) から求まる大気中のダスト密度は 10^{10} 個/ m^3 程度
- PhoenixによるLIDAR 観測の消散係数 (0.06km^{-1} , Komguem et al., 2013) から求まる大気上空のダスト密度は 10^7 個/ m^3 程度
- MRO搭載 MCS (Mars Climate Sounder) による観測では大気最下層 (と言っても境界層より少し上?) の消散係数は 10^{-2} - $10^{-2.5}\text{km}^{-1}$ 程度
- 総じて, 大気中のダスト量は 10^7 個/ m^3 程度か
 - クリーンルームのクラスで言うとクラス9 (通常の事務所の空気) 程度

ダストの起源

- ダストサイズは 1-2 μm 程度. 沈降速度は 1mm/s 程度.
 - 1火星日の間におよそ 100m 沈降
 - 定常的な供給が無いと, 10日程度で境界層内のダストは枯渇
- ダストデビルが主な供給源? (Stanzal et al., Icarus 2008)
- ダストデビルの発生率は場所によって異なる
オポチュニティーはあまり遭遇しなかった
- もしダストデビルがダストの主な供給源なら, 大気中のダスト濃度にムラができるはず
- ムラとダストデビル発生頻度, またはムラと気塊(気団)の相関が見えればダストデビル起源説を支持することになるか?

考えていること

火星は砂の惑星である

- 風食地形がある
- 移動する砂丘
- 実際に砂で覆われている

火星はダストの惑星である

- 遠くがかすんで見える
- 火星の空は赤く、夕焼けは青い
- SAP発電量は低下するが風で回復

- 全球砂嵐
- ダストデビル

火星有人探査が計画されている

- ダストの人体への影響？
 - じん肺, 中皮腫
- 砂嵐中の気象条件？

火星の表層からのダスト観測を行いたい

- 周回軌道からの観測vsその場観測
- 表面境界層内部で何が起きているのか
- ダストのソースとシンク

火星表面からダストを
計測するには

ダスト観測の条件

- 「現場」を知りたいので表面から観測したい(ランダ or ローバ)
- 1-2 μm のダストを見たいので, 赤外線レーザは適切ではない
- 風との関係が重要.
 - 風とダストを同時に測る or 風速計と協調する
- 終日, 通年の観測
 - 沈降が卓越する時間(季節)と巻き上げが卓越する時間(季節)
- 地面の砂の表面も観測できると良いのだろう
- 多地点で測れるとなお良い
 - 気象条件による違い, 分布のムラ

LIDARによる視線方向のダスト分布の観測

● LIDAR (Light Detection And Ranging) の原理

送光部からの光がダストによって散乱されて戻ってきたプロフィールから、視線方向のダストの分布を求める。

散乱光の到達時間 ⇒ ダストまでの距離

散乱光の強度 ⇒ ダストの量(総断面積)

散乱光の光子数を数える光子カウンティングモードと、エネルギープロフィールを求めるアナログモードとがある。

● 提案する小型近距離用LIDARの特徴

・光源にLEDを採用

小型で扱いやすい(耐振動, 耐温度)

集光が悪い。しかしその分、光軸調整は余裕が生まれる
(受光視野よりも送光視野の方を大きくとる)

・測定範囲は0-100m

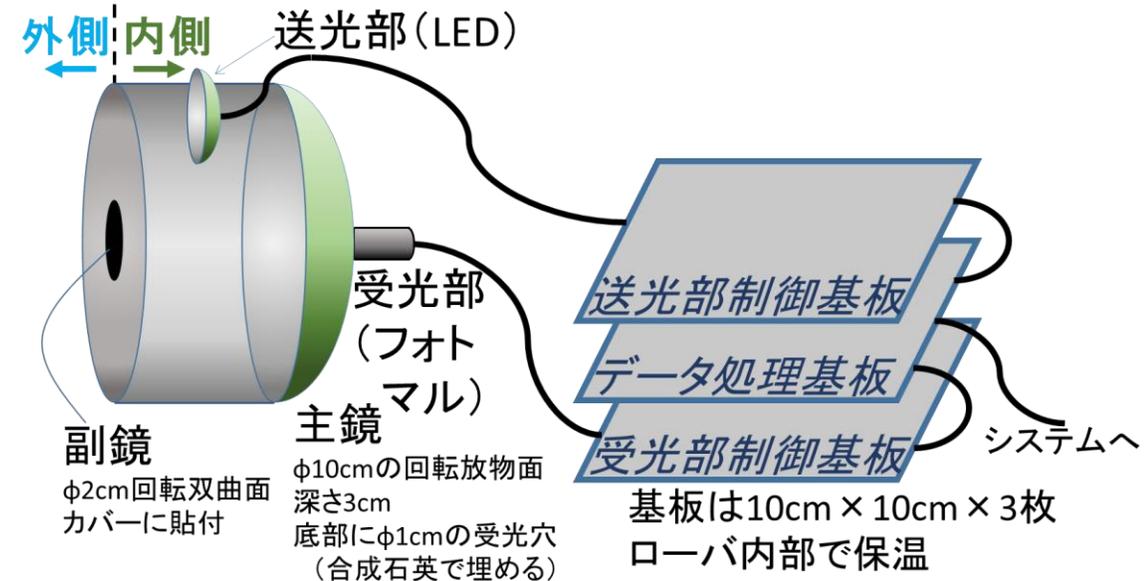
鉛直分布ではなく、水平方向を観測することで、地表付近のダスト量(と、風や渦の関係)を明らかにする

・搭載場所

ローバの側面。ローバの向きを変えることで測線の方向を変える

・サイズ, 消費電力, 質量

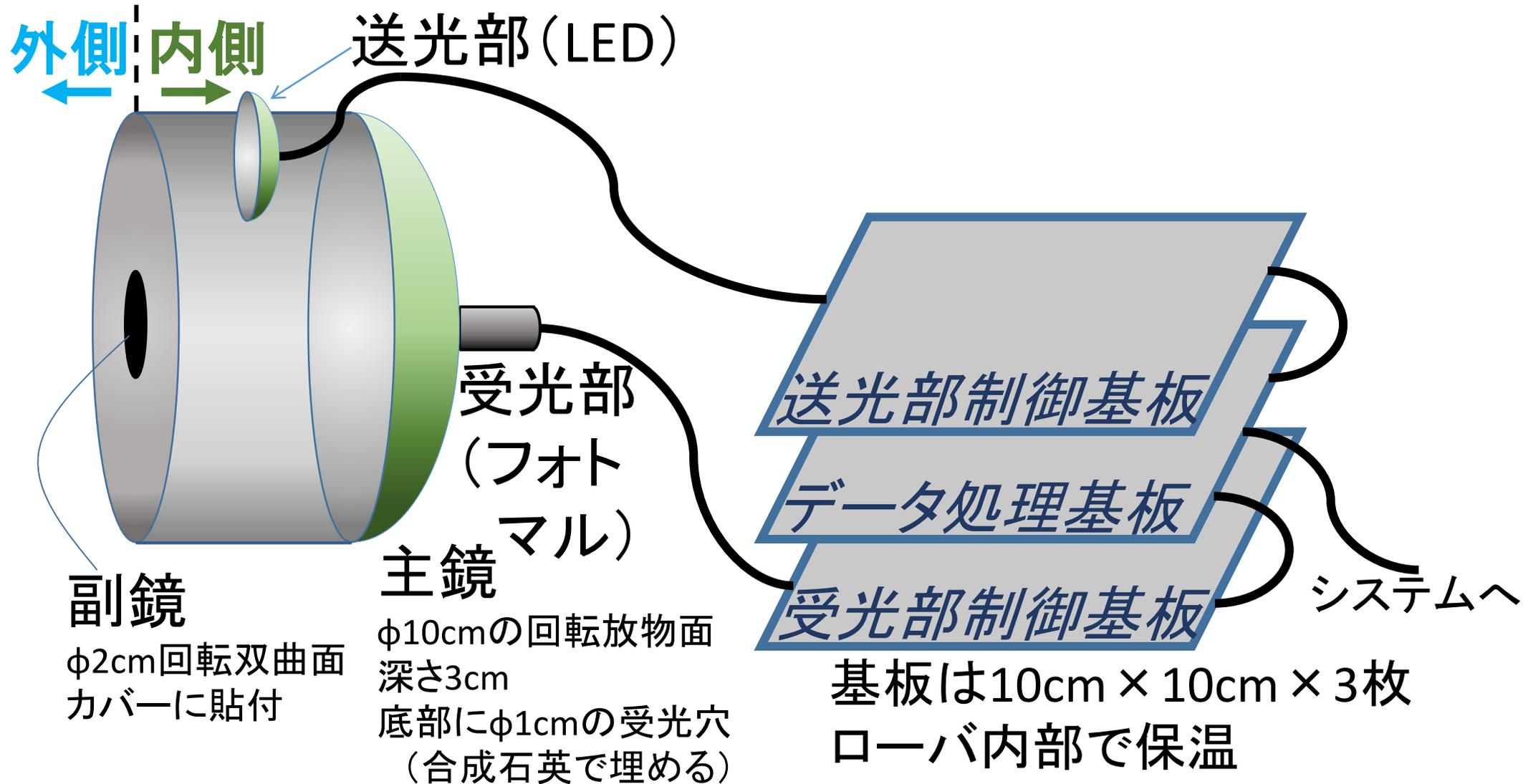
集光部はφ100mm, 1W, 700g 基板はローバ内部に格納

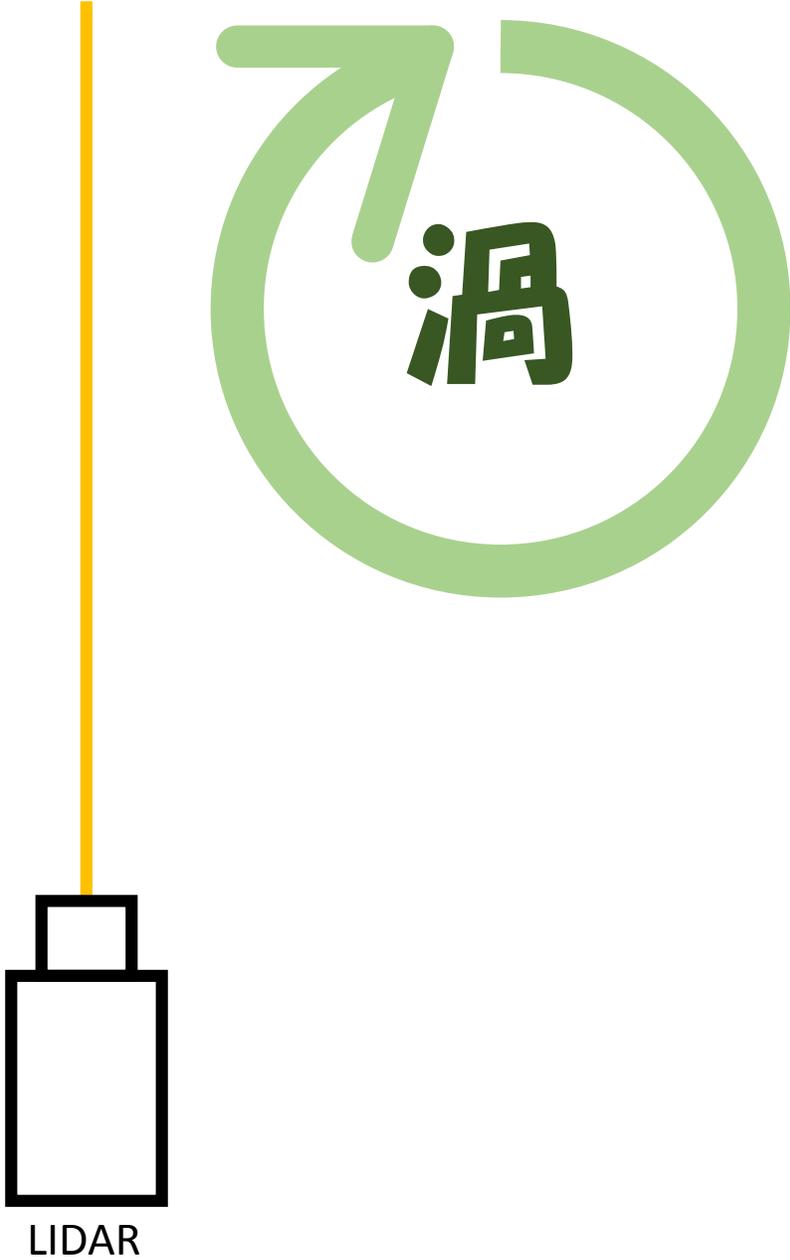


● (目標) 精度

空間解像度1m, 時間分解能1s

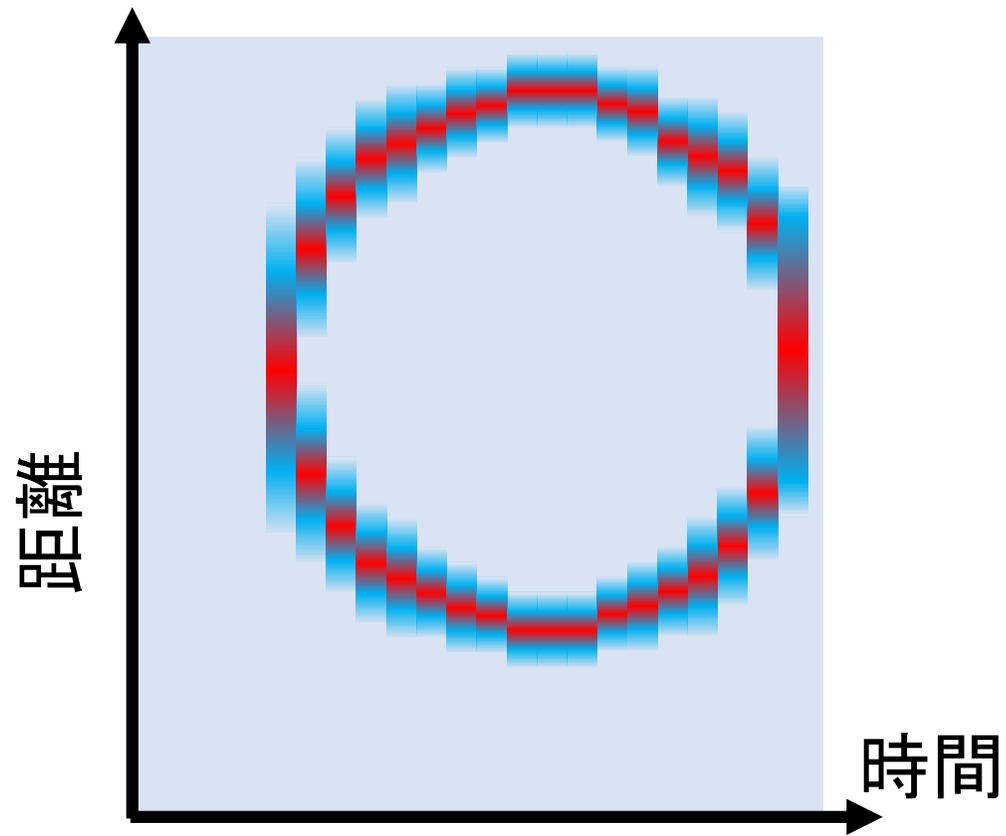
⇐ 10mサイズの渦が捉えられる程度







LIDAR



このような円環状のデータが
得られれば、渦のサイズと
移動速度が求まる

ダストセンサーによるダスト密度のその場観測

●ダストセンサーの観測原理

レーザー光(連続光)にダストを含んだ大気を導入。

散乱光のプロファイルを計測する

散乱光の幅 ⇒ ダストの通過時間

散乱光の強度 ⇒ ダストのサイズ

散乱光強度の変化 ⇒ 粒子の形

●提案する装置の特徴

空気清浄器の部品として量産されている

センサ部は30g, 5VDC, 200mA以下

気球に搭載され成層圏で稼働した実績がある

●搭載場所

風通しの良い場所(能動的な吸気は行わない)

地上からの高さが異なる複数地点に搭載できると、

高度毎のダストのサイズ分布がわかる

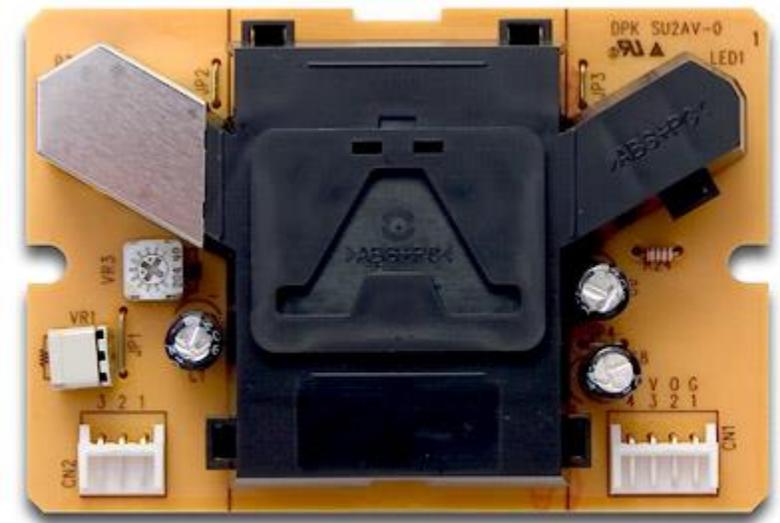
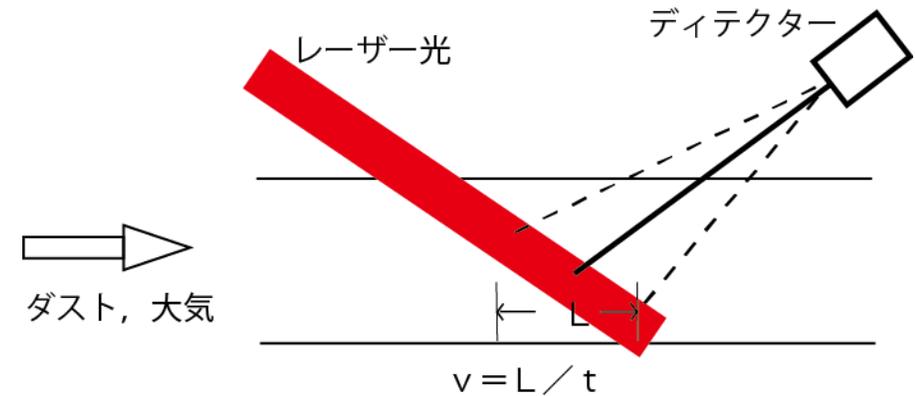
●精度

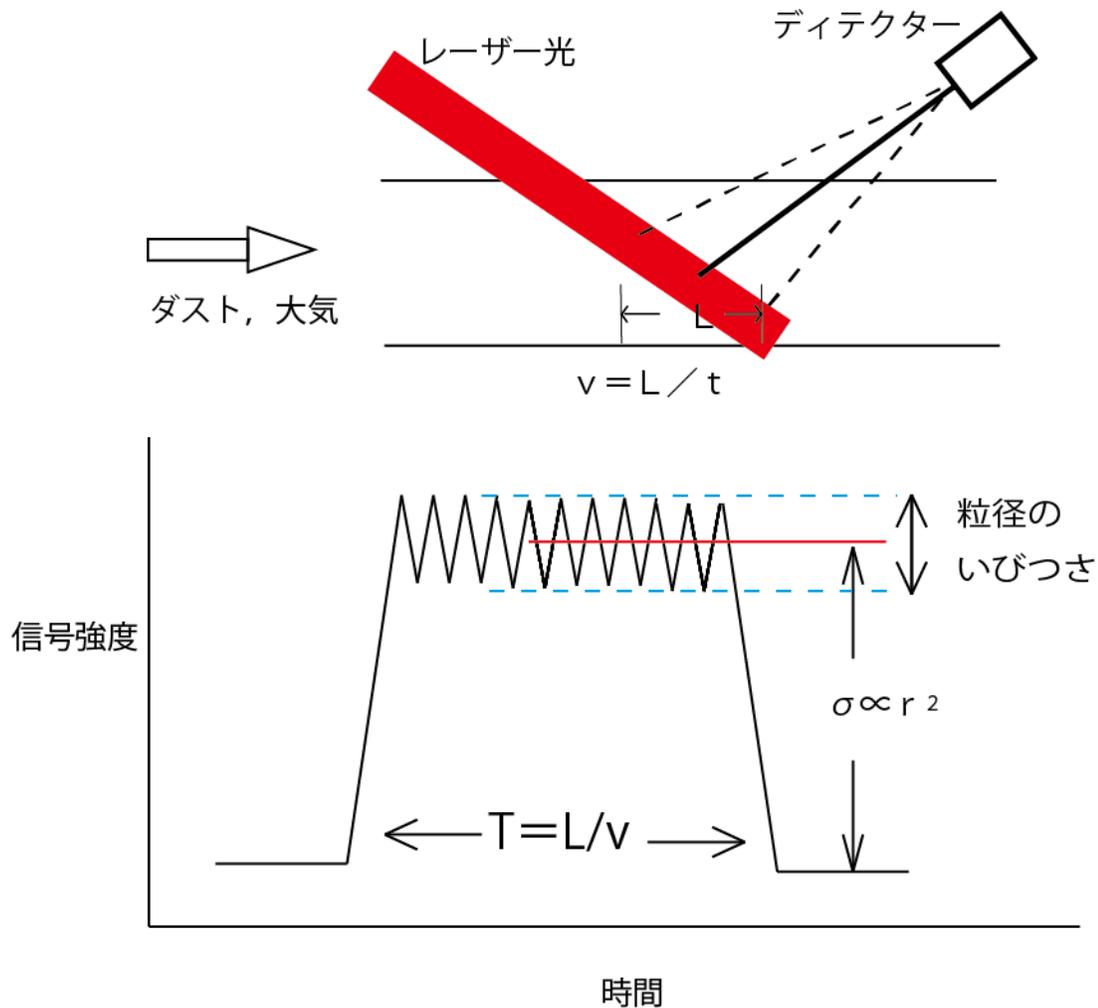
0.5 μ m から30 μ mまでの粒子を、5個以上のサイズ

区分で測定する。

観測領域をあらかじめ制限することで、測定できるダスト

の最大密度を制約する(TBD)





- 観測領域が $(1\text{mm})^3$ 程度だとすると, ダスト密度が 10^9 個/ m^3 以下であれば, 個別のシグナルを得られる
 - ダストストーム中は難しそう?
- シグナルの強度, 継続時間, 分散などから情報を抽出する
 - 継続時間から通過速度が求まるため, 風速の大まかな指標は得られるかもしれない.
設置条件による

考えていること

火星は砂の惑星である

- 風食地形がある
- 移動する砂丘
- 実際に砂で覆われている

火星はダストの惑星である

- 遠くがかすんで見える
- 火星の空は赤く、夕焼けは青い
- SAP発電量は低下するが風で回復

- 全球砂嵐
- ダストデビル

火星有人探査が計画されている

- ダストの人体への影響？
 - じん肺, 中皮腫
- 砂嵐中の気象条件？

火星の表層からのダスト観測を行いたい

- 周回軌道からの観測vsその場観測
- 表面境界層内部で何が起きているのか
- ダストのソースとシンク