

Development of LIDAR system for Mars rover

(火星着陸探査機搭載用 LIDAR 装置の開発)

Hiroki Senshu¹, Masanori Kobayashi¹, Tatsuo Shiina², Naohiro Manago^{3*},
George Hashimoto⁴

¹Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology
2-17-1 Tsudanuma, Narashino-shi, Chiba 275-0016, Japan

²Graduate School and Faculty of Engineering, Chiba University

³Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University
1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8522, Japan

⁴Department of Earth Sciences, Okayama University
3-1-1, Tsushima-Naka, Kita-ku, Okayama-shi, Okayama 700-8530, Japan

ABSTRACT

LIDAR (Light Detection And Ranging) is a method that send light to a target and measure the arrival time and intensity of the reflected light to investigate the location and density of the target, and it is widely used for measuring aerosol distribution in the Earth's atmosphere. In this research, we consider a LIDAR system to measure the dust distribution in the Martian atmosphere near the ground. To be used under the Martian environment, it needs to be compact, lightweight, low-power consuming, and durable against mechanical/ thermal shock. By using a LED as the light source, it is possible to reduce weight to less than 700 g, and power consumption during observation to less than 1 W. No LIDAR observation near the Martian ground has been made so far, since it is difficult to observe dust precisely at close range due to the problems caused by the optical design and spatial resolution of normal LIDAR system. Here, we propose a LIDAR system capable of observing dust in the range between 1~100 m at spatial/temporal resolution of 1 m/1 s. We expect that our LIDAR system will give us the world's first direct data of dust distribution near the Martian ground for understanding the dust-lifting mechanism.

火星着陸探査機搭載用LIDAR 装置の開発

千秋博紀¹， 小林正規¹， 椎名達雄²，
眞子直弘³， はしもとじょーじ⁴

¹千葉工大・PERC，²千葉大・融合，³千葉大・CEReS，⁴岡山大・自然

2014年8月4日

第47回 月・惑星シンポジウム
@宇宙科学研究所

火星LIDARの開発体制

- 千秋博紀（千葉工業大学・惑星探査研究センター）
 - 小林正規（千葉工業大学・惑星探査研究センター）
 - 椎名達雄（千葉大学・工学部）
 - 眞子直弘（千葉大学・環境リモートセンシング研究センター）
 - はしもとじょーじ（岡山大学・理学部）
 - MELOS 気象グループ
- + 地上用LIDAR開発メーカー
- + 宇宙用機器開発メーカー

講演内容

1 序論

- 火星のダスト
- 火星地表面のダスト

2 LIDARについて

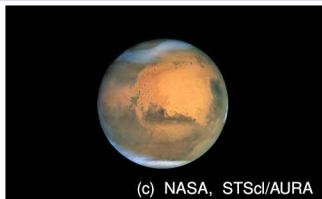
- LIDARとは
- LIDAR方程式とその解法
- 火星で活躍したLIDAR
- 2波長LIDARによる粒径推定
- ダスト供給フラックスの測定
- 火星LIDARに期待される観測成果
- 火星LIDARの成果から人類は何を新たに得られるのか？

3 開発状況

- 火星LIDARへの要求事項
- 火星LIDARの設計
- 観測計画
- ヒータ電力概算
- 火星LIDARの性能確認
- PFM開発のコスト, リスク
- 開発済み小型LED LIDAR
- 小型LED LIDARによるダスト測定
- 小型LED LIDARによる波浪観測
- 小型LED LIDARによる大気観測

4 結論

火星は「砂の惑星」



火星のダスト

- 火星大気には**大量のダスト**が存在する。
 - － 地球より大規模な砂塵嵐（ダストストーム）、塵旋風（ダストデビル）
- ダストは**火星気象に大きな影響**を与えている。
 - － 太陽光を散乱・吸収することによる直接効果
 - － 雲の凝結核になることによる間接効果

ダストが舞うダイナミックな火星地表面

- 火星ローバー Spiritが撮影した火星の塵旋風（ダストデビル）
 - 約9分半(21フレーム)に渡って撮影された画像
 - 塵旋風の直径は最大34m, 移動速度17km/h

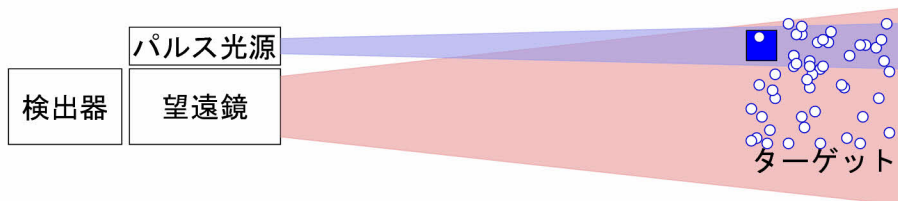


Image credit: NASA/JPL

火星地表面のダスト

- 火星地表面は大気にダストを供給している現場である
- **ダスト巻き上げ機構解明のため、火星表面のダストを観測したい!**
- 着陸機でなければ観測は困難（衛星観測では難しい）
- 広範囲を観測するならLIDARが最適!

LIDAR (Light Detection And Ranging) とは



- 素性の分かった光を **能動的** にターゲットに照射し、反射・散乱された光を観測することでターゲットまたはターゲットと観測者の間にある物質の性質を調べる **リモートセンシング手法** の一つ。
- 観測方法の違いにより様々な種類がある。
 - **Mie散乱LIDAR**, Raman散乱LIDAR, 偏光LIDAR, 差分吸収LIDAR, ドップラーLIDAR, イメージングLIDAR, etc.
- LIDARで測れるもの
 - **散乱体の位置, 濃度**, 形状, 移動速度, etc.
- 技術はすでに確立されており, 様々な分野で活用されている。
 - 黄砂ライダー, etc.

LIDAR方程式とその解法

LIDAR方程式

$$P(R) \propto \frac{\beta(R)}{R^2} \exp \left[-2 \int_0^R \alpha(r) dr \right]$$

P : LIDAR信号, R : 距離

α : 消散係数 (透過率を決める)

β : 後方散乱係数 (散乱量を決める)

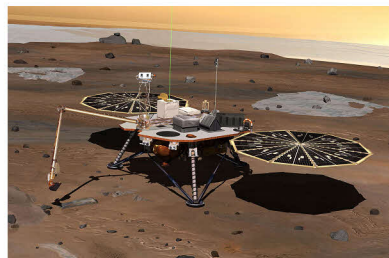
LIDAR方程式の解法 (LIDAR信号から α, β を求める方法)

- Fernald法
 - エアロゾル(ダスト)と大気分子の2成分モデル
 - ライダー比 $S_1 = \alpha_1/\beta_1$ が一定と仮定
 - 校正点における α_1 の値を仮定し、周辺の値を逐次積分により求める。
 - 消散係数の積分値(光学的厚さ)から S_1, α_1 の推定も可能
- Klett法
 - 1成分モデル(大気分子は無視)
- Slope法
 - 一様大気(α, β が距離に依らない)を仮定
- 差分法
 - 信号源が有る場所(ON)と無い場所(OFF)のLIDAR信号の比を使う
- **いずれの解法もLIDAR信号の絶対値は必要ない**

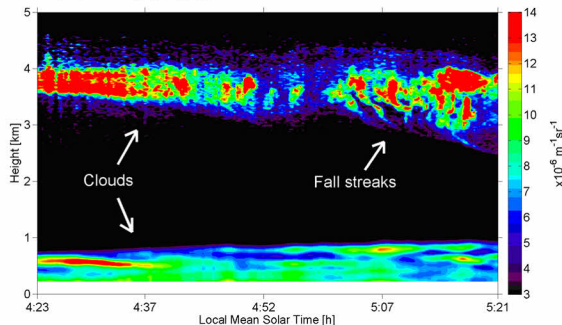
火星で活躍したLIDAR

● Phoenix LIDAR

- 惑星大気の観測用に用いられた初めてのLIDAR
- 532nmと1064nmの2波長
- 空間分解能はアナログモードで**20m**, 光子計数モードで**50m**
- 時間分解能は**20秒**
- **高度50m以下は装置の「死角」**に入って見えない



NASA/JPL/UA/Lockheed Martin, Corby Waste



Daerden et al. GRL 2010

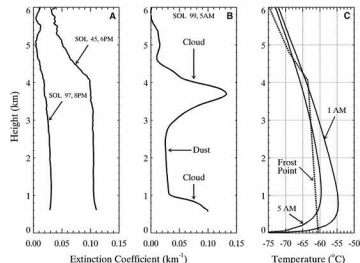
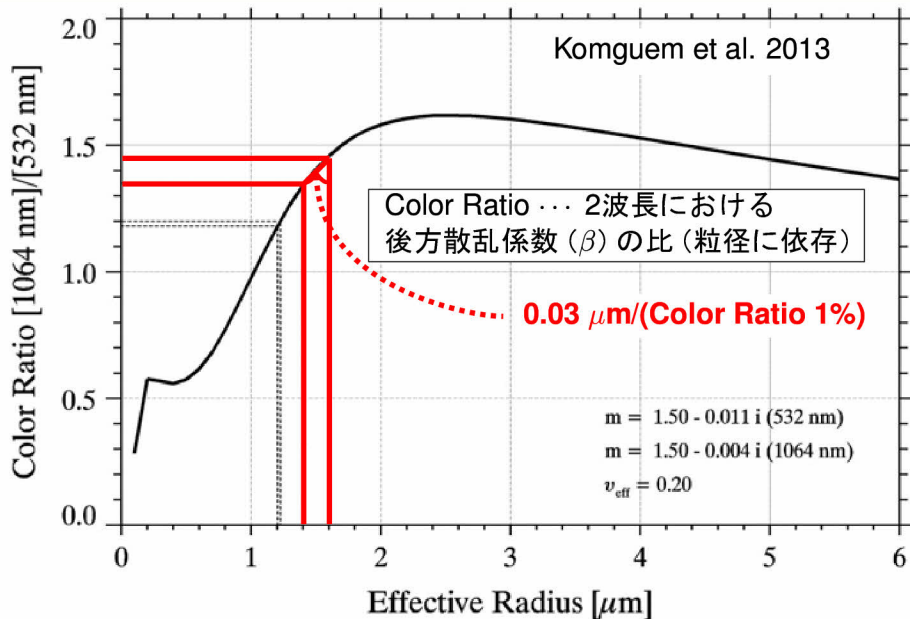


Fig. 1. (A and B) Profiles of the optical extinction coefficient (η) derived from the LIDAR backscatter signal at wavelength 532 nm for sols 45 ($U_s = 97^\circ$), 97 ($U_s = 121^\circ$), and 99 ($U_s = 122^\circ$). Each profile is averaged over 1 hour and smoothed for a vertical resolution of 40 m. (C) Height profiles of atmospheric temperature estimated with a numerical simulation model of the martian PBL (19, 20), and an estimate of the profile of frost point temperature.

2波長LIDARによる粒径推定

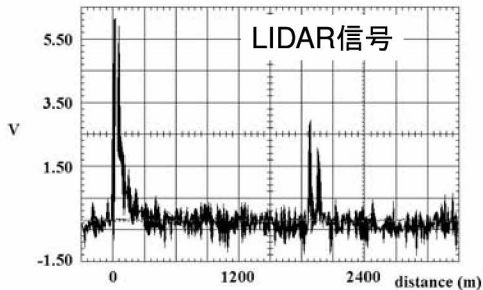


LIDARを使ったダスト供給フラックスの測定

- 米国アリゾナ州, サンタ・クルス平原におけるダストデビル観測



Renno et al. 2004



- LIDARでダスト密度を測定
 - 超音波風速計で3次元の風速を測定
 - ダストデビルの密度 0.1 g/m^3
 - ダストの鉛直風速 $1 \sim 10 \text{ m/s}$
- ⇒ ダストフラックス $0.1 \sim 1 \text{ g/m}^2/\text{s}$

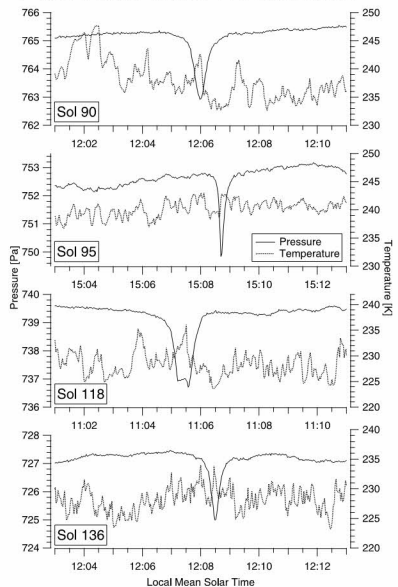
This document is provided by JAXA.

火星LIDARに期待される観測成果

LIDARでダストを測って何がしたいのか？

- ダストを巻き上げる機構を解明する
- メソスケールくらいで吹く風ではダストは巻き上がらない
- 数メートルスケールの渦がダストを巻き上げている
 - ダストデビルは確かにダストを巻き上げている
 - ダストデビルだけでは巻き上がるダストが足りない
 - カメラに写らない渦が巻き上げるダストがあるはず
- LIDARでカメラに写らない渦が巻き上げるダストを見る
 - Phoenixが観測した対流渦
 - 時間スケール **10 ~ 20 秒**
 - 発生頻度 **502個/151 sol** (1点での観測結果)

● Phoenixが観測した対流渦



火星LIDARの成果から人類は何を新たに得られるか？

● 火星での有人活動をサポートするための基礎データ

ー グローバルダストストームの予報

- 火星で有人活動をおこなうとしたらダストストーム予報技術は必須
- どれくらいの風が吹いてどれくらいのダストが巻き上がるのか、という関係が確立していないのが火星気象学の現状。それを明らかにするべく観測する。大きなスケールで吹く風が巻き上げるダストと、小さなスケールの渦が巻き上げるダストを定量的に調べる。
- 大きなスケールの風はGCMで見積もり、小さなスケールの渦はLESで見積もり、それらを接続することで、どういうスケールの擾乱がダストをそれぞれどれだけ巻き上げているのかを明らかにする。

● 汎惑星表層環境論の進展

ー 乾燥した惑星は世の中にたくさんあるかもしれない

- 金星・地球・火星だと、金星と火星は乾燥した惑星
- ー 乾燥した惑星の表層環境はダストがコントロールしている可能性が高い
- ー ダスト巻き上げの理解は乾燥した惑星の表層環境の理解に必須
- ー ダストが放射におよぼす影響→ダストが惑星の放射収支に及ぼす影響
- ー 乾燥惑星の居住可能性(ハビタビリティ)を議論する根拠

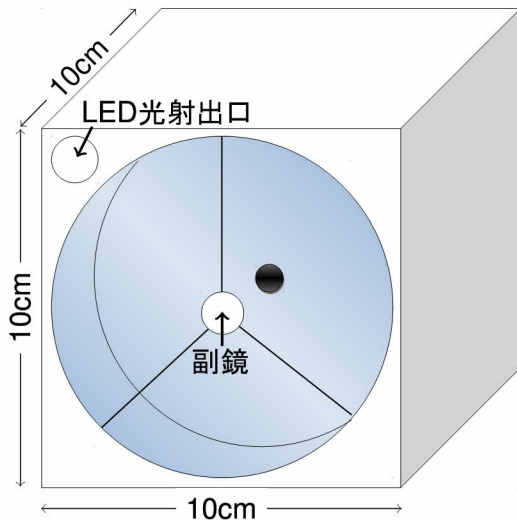
火星LIDARへの要求事項

- サイズ, 重量, 消費電力
 - 受光面のサイズは10cm × 10cm以下, 奥行きは15cm以下
 - 重量700g以下
 - 消費電力1W以下
- 観測の時間, 空間精度
 - **空間分解能1m, 時間分解能1s**以下
(← 空間スケール数m, 時間スケール10~20 sの渦)
- 観測可能距離
 - **距離100mまで測定可能**
- 観測精度
 - 散乱光強度の1%の変動が捉えられること
 - ダスト濃度(消散係数)の精度5~10% (TBC)
 - 粒子サイズについての情報が得られることが望ましい
- 送信エネルギーを測定できること
- 熱条件
 - 保存温度 -55°C以上,
 - 動作温度 -30°C以上

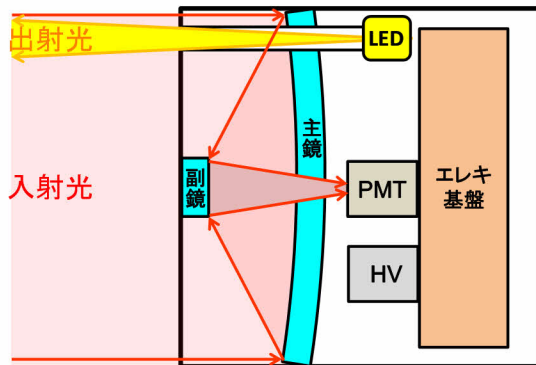
火星LIDARの設計

- 受光部
 - カセグレン式望遠鏡
 - 主鏡の穴($\phi \sim 3\text{mm}$)は合成石英で埋める
 - 受光素子は宇宙仕様の光電子増倍管
- 送光部
 - 光源にはLEDを用いる(軽量化, 耐放射線)
 - 送光窓は, 受光望遠鏡の一部に穴をあけて確保する
 - 送光窓は合成石英で埋める
 - 波長の異なる2種類の光(400nm & 800nm)を出せるようにする
 - LEDの光量, 石英窓透過率の変動を測定する
- クロック
 - 装置内部で生成する. 75MHzから300MHzを作り出す
- サイズ, 重量, 消費電力
 - 10cm × 10cm × 10cm, 700g, 1W を目標とする
- 熱環境体制
 - 保存温度 -55°C 以上 (エレキ基板),
 - 動作温度 -30°C 以上 (光電子増倍管)

火星LIDARの設計



- ・ 大きさは10cm × 10cm × 10cm
- ・ 光学系はカセグレン式望遠鏡
(視野角3 mrad)
- ・ 受光素子は光電子増倍管
- ・ 光源にはLED
(広がり角5 mrad)



火星LIDARの観測計画

- 通常時は、1Hz、3分間の連続観測を1時間おきに行う。
 - データ量は 約32 kByte × 時間数/日
- 他の観測から、ダストデビルが付近を通過することが予想される場合には、もっとも可能性が高い時間帯の1時間、連続観測を行う。
 - データ量は 約600 kByte/時間
- ダストデビルは、コアの部分を観測できなかったとしても、その周囲のダスト環境がわかれば大変意義のある測定となる。

サクセスレベル

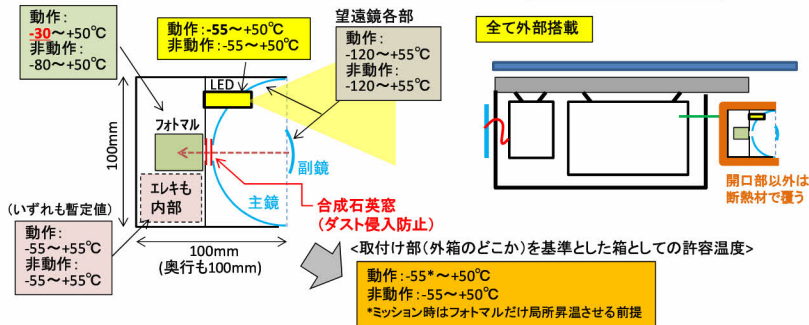
- **ミニマム**
 - ダストからの反射光をとらえ、視線方向の分布を得る。
- **ノミナル**
 - ローバー周囲の大気中のダスト分布を、条件の異なる複数地点（クレータなどの地形や、岩塊等の条件、ローカルタイムの違い）で計測する。
- **エクストラ**
 - ダストの観測を通じて、ダストデビルや、より小規模の大気中の渦を計測する。

火星LIDARのヒータ電力概算 (by JAXA 畠中先生)

06: LIDARによる観測

千葉工大
千秋先生

総重量: 0.7kg
総消費電力: 1W
運用: 1時間連続 × 1日1回



機器名	消費電力/個[W]	数量	寸法/形状情報	必要ヒータ電力[W]				昇温ヒータ電力量 [W・h]		
				下限温度[°C]		動作時				
					非動作時	動作時				
				非動作	動作	昼間	夜間	昼間	夜間	
LIDAR PKG	1.0	1	100x100x100mm, 0.7kg. 計測面(1面)以外は全て断熱材20mm厚を構築する前提で、(断熱材無し時ヒータ電力) × 1/6 + (断熱材有り時ヒータ電力) × 5/6として試算。	-55	-40	0.78	3.13	1.87	4.21	2.6
(ハーネス熱損)			太さ/本数を要調査							
自己消費電力合計	0					0.78	3.13	1.87	4.21	
				必要ヒータ電力合計[W]						

注) 内部部品レベルでヒータ制御する案もあるが、ここでは箱全体をヒータ制御する前提で計算。

ただし、フォトマルだけ下限がやや狭い(-30°C)なので、フォトマルだけ個別昇温する前提!

断熱有	0.69	2.78	1.65	3.73
断熱有	1.23	4.89	2.96	6.62

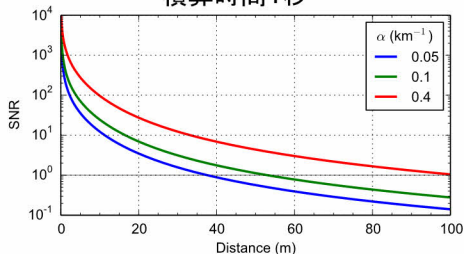
火星LIDARの性能確認

- シミュレーションを用いてS/N比(SNR)を計算

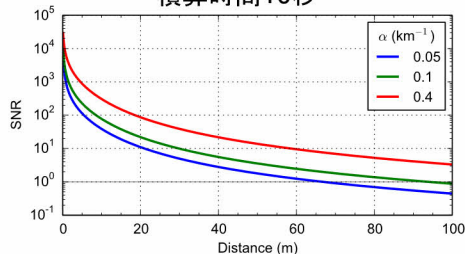
SNR計算条件

波長	400 nm	ミラー直径	10 cm	太陽天頂角	45 度
LEDパワー	10 mW	視野角	3 mrad	視線天頂角	80 度
LED周波数	1.5 MHz	フィルター幅	10 nm	ダスト実効半径	1.6 μm
LEDパルス幅	6.67 ns	光学的効率	0.36	ヘマタイト含有率	3 %
LED広がり角	5 mrad	量子効率	0.2	背景消散係数	0.05 km^{-1}

積算時間1秒



積算時間10秒

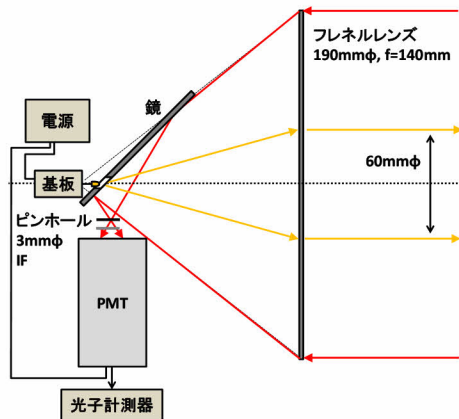


- 積算時間1秒では、消散係数 0.4 km^{-1} で検出限界100 m程度

PFM開発のコスト, リスク

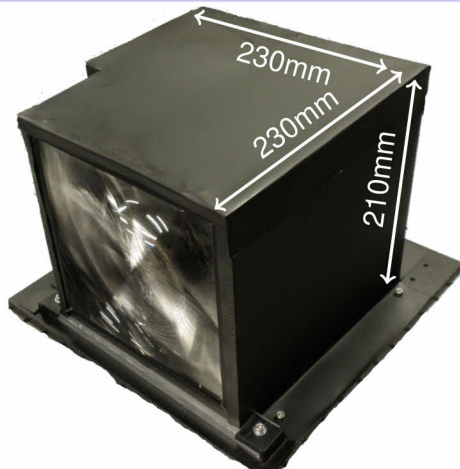
- メーカー（明星電機）に検討依頼中です。
 - － 8月7日に回答をいただけることになっています。

開発済み小型LED LIDAR



● 送信系

- 120 kHz, 100 mWのパルス光
- 60mmφ, 拡がり角10 mrad



● 受信系

- 190mmφのフレネルレンズ
- 視野角10 mrad

小型LED LIDARによるダスト測定実験

JAEA 粉塵測定試験装置

小型LED
LIDAR



約15m先の
ダストを測定

ダスト発生器



カスケード
インパクト



ダスト
測定部

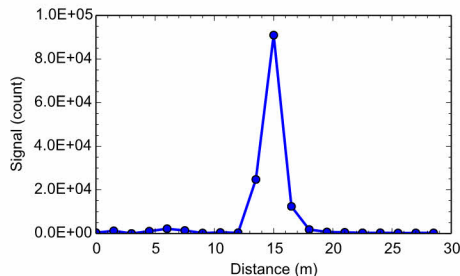
W 40cm
D 30cm
H 50cm

ダスト
発生器

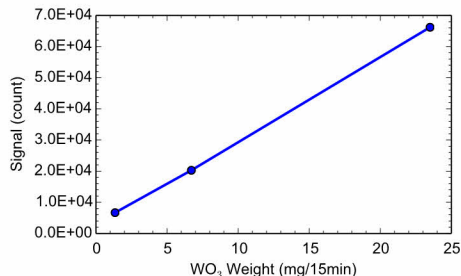
ダスト濃度
調整装置

小型LED LIDARによるダスト測定結果

LIDAR信号の例 (背景光除去済)



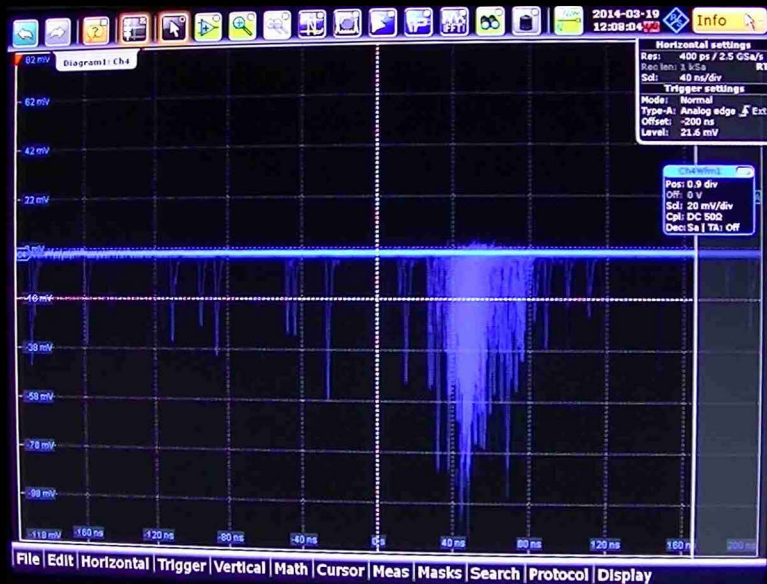
ダスト濃度 vs. 信号強度



- 120kHz, 100mWのパルス光
- 積算回数 = 2×10^6 (約17秒)
- 空間分解能1.5m (10ns相当)
 - 検出器の内部ジッター5ns
- 流量11.5L/min

- 流量3L/min, 6L/min, 11.5L/min
- 15分間に補集されたダストの重さを電子天秤で測定
 - ダスト濃度に時間変化有り

小型LED LIDARによる波浪観測



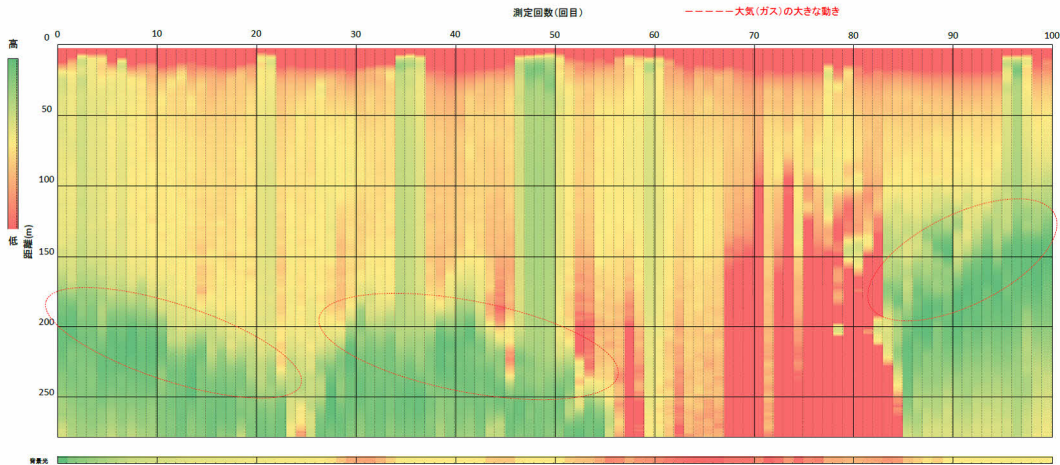
小型LED LIDARによる大気観測

測定日: 2014.03.05 測定場所: 社内(空に向けて)

測定時間: 18:07~18:57 (30秒毎、計100回測定)

積算時間: 約10秒




移動平均+距離2乗 対数表示 ※移動平均は、前後5ポイント



まとめ

- ダストは火星気象に大きな影響を与えている
- 火星表面におけるダスト巻き上げ機構を解明することはダストストーム予報技術や汎惑星表層環境論の発展に必須
- LIDARではカメラに写らない渦が巻き上げるダストも観測可能
- LEDを光源に用いる火星着陸探査機搭載用の小型LIDARを設計
- 小型LED LIDARはすでにいくつか開発済みであり、ダスト濃度等の測定実績もある

References

-  N. O. Renno, et al.
MATADOR 2002: A pilot field experiment on convective plumes and dust devils
J. Geophys. Res., 109:E07001, 2004.
-  J. Whiteway, M. Daly, A. Carswell, T. Duck, C. Dickinson, L. Komguem, and C. Cook
Lidar on the Phoenix mission to Mars
J. Geophys. Res., 113:E00A08, 2008.
-  L. Komguem, J. A. Whiteway, C. Dickinson, M. Daly, and M. T. Lemmon
Phoenix LIDAR measurements of Mars atmospheric dust
Icarus, 273:649–653, 2013.
-  M. D. Ellehoj, et al.
Convective vortices and dust devils at the Phoenix Mars mission landing site
J. Geophys. Res., 115:E00E16, 2010.