

火星着陸機での気象観測

乙部直人

- ▶ 周辺の状況
 - ▶ 我が国の火星探査の計画はそもそも？
- ▶ 探査の計画
 - ▶ 次の探査の計画は？
- ▶ 測器の開発状況とか（本当はやりたいこと）
 - ▶ 気象測器の全体とか，諸々からチョイスして，
- ▶ 持って行ける測器
 - ▶ それで何が持って行けるの？
 - ▶ 何をどうやって観測するの？

発表の内容（地表観測の準備状況）

戦略的火星探査計画の狙い・科学意義・国際探査での位置づけ

2020s

2030s

20xx

重力天体離着陸技術（ピンポイント着陸、空力制御他）
 重力天体表面探査技術（サンプル技術、観測装置、小型バス機器他）
 深宇宙補給技術（周回機投入・軌道ランデブ技術他）、深宇宙光通信、惑星保護

小天体SR技術

通信技術

着陸技術

往還技術

火星衛星SR (MMX)

- 火星衛星の遠隔観測および回収試料の分析
- 衛星の起源
- 原始太陽系における有機物・水の移動、天体への供給過程

水の起源・輸送

周回・探査技術実証

- 周回軌道上からの全球の網羅的観測および将来着陸候補地点の詳細観測
- レーダー・サウンダ等による物質分布
- 水などの揮発性物質の貯蔵・循環・散逸観測
- 磁場・放射線・宇宙環境観測

水の分布・貯蔵

着陸探査

- 着陸探査により精査された地質体から回収された試料の精密分析
- 岩石学（鉱物同定・温度圧力条件推定など）
- 地球化学（年代測定、元素濃度測定など）
- 生命探査・無機・有機化学

水の化学進化

国際協働火星SR

- 代表的あるいは特異的な地質体の局所かつ精密探査
- 地質層序の解読から地質体の形成史を復元
- 地質体形成史より表層環境史の復元
- その場化学分析による揮発性元素や有機物の観測・同定

本格探査 (想定)

- 広範な着陸探査およびサンプル回収による科学データの取得
- 継続的な活動による利用可能性の調査

通信リレー・着陸地点選定

インフラ整備構築

戦略的火星探査 ～活動領域の拡大～

特色ある我が国独自の探査：高傾斜地や高緯度地域での浅部地下圏へ



JAXA's Strategic Mars Exploration Program (JSMEP)

Goals & Objectives

Ensuring Expansion of the Areas of Human Activities,
Exploring Hills, High-latitudes, and the Subsurface World

Key Technologies

Entry-descent-landing (accurate landing & aerodynamic control)
Explore the surface (sampling, sci. instrument, small bus system)
Deep space transportation (orbital rendezvous, planetary protection)

20xx

Multiple & Sustainable Mars Exploration
Objectives: ISRU & landing of global Mars

Infrastructure Construction on Mars

Evolution of Water

Lander/Rover Exploration

Objectives: In-situ Sample Analysis & Surface Science

- Petrology/Mineralogy (e.g., P-T condition)
- Geochemistry (e.g., dating, elemental abundances)
- Biochemistry (e.g., biomarker/signature, life detection)

2030s

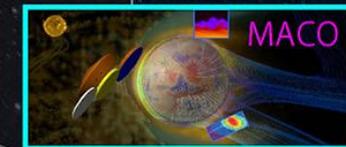
Distribution & Inventory of Water

Small Orbiter & EDL Demonstration

Objectives: Global Mapping & Landing Site Selection

- Radar sounder observation of subsurface world
- Distribution, transport & storage/loss of water and volatiles
- Space weather and climate investigation at Mars (e.g., radiation)

EDL



2020s

Origin & Delivery of Water

Martian Moons Exploration (MMX)

Objectives: Moon Science & SR

- Origin of Phobos and Deimos
- Transportation of water & organics in the early SS



Telecommunication

Deep Space Transportation
Sample Return

Participation of
International Mars Program (e.g., MSR)

(International Space Exploration Committee)

Exploration Ice Mapper: Objectives

EXPLORATION OBJECTIVES

- Ground Ice as a Resource**
Is there water ice contained within the first 10m of the surface?
What are the spatial extents of the deposits?
- Landing Site Geotechnical Properties**
How rough are the surface and shallow subsurface?
How compact are the potential landing sites?

SCIENCE OBJECTIVES (notional)

- Distribution & Origin of Ice Reservoirs**
Quantify extent and volume of water ice in non-polar regions
- Dynamic Surface Processes on Mars**
Establish role of liquid water in Recurring Slope Lineae
- Geological Evidence for Environmental Transitions**
Evaluate fine-scale morphology in ancient terrains ("dust removal")

1 HUMAN ESSENTIALS

Exceptional one-time cost-sharing chance: Flagship Mission at Pathfinder price!
NASA: \$100M to 160M + \$242M to 240

IDENTIFYING WATER-ICE RESOURCES

- ROCKET FUEL for the trip back home.
- LIFE SUPPORT on the Martian surface.

CHARACTERIZING UNKNOWN TERRAIN

- GOOD DRILLING conditions for accessing water.
- SOLID GROUND for the habitat & launch pad.

2 SCIENCE LEAPS

REVEALING SECRETS OF THE MARTIAN CRYOSPHERE
Surface & Subsurface Water-Ice:
Where, How Much, How Deep, How Pure?

Uncovering Hidden Records of GEOLOGY & CLIMATE
Seeking "Spec-1 Regions" for PAST or PRESENT LIFE

- ▶ ランダーをセカンダリーペイロードで
- ▶ 大きさ（重量）は限界まで小さい
 - ▶ そもそも0kgを下回っている？(一応ありそう)
 - ▶ ロケットや推進方法次第
 - ▶ MELOSの時の測器群が提案されたが可能性と関係性と重量を勘案して...
 - ▶ 気象測器，水蒸気，Ne計，カメラで組み立てることに（もちろんなにも決定事項では・・・）

EDL DEMO

- ▶ 何を求められているのか？
- ▶ サイエンスというより実用機器として
 - ▶ HKデータ
 - ▶ 有人探査のために
 - ▶ ダストストームの予測？
 - ▶ 有害物質の拡散予測
- ▶ 我々は？
 - ▶ ダストの観測
 - ▶ 風速が大事

気象測器のおしごと

- ▶ 天気予報が出来ること（有人探査のために）
 - ▶ モデルと観測態勢
地温などを入力として、ローカルの気象がほぼ再現できるモデルを用意すること
衛星観測があるといい。
 - ▶ 汚染物質の広がりの予想
- ▶ 地球と異なる物理過程を調べること
 - ▶ ダストの巻き上がり、ダストの分布、放射収支
 - ▶ 気象モデルは階層的。下の階層は仮定なしにしたい。
 - ▶ グローバルダストストームの成因や維持について何か分かりたい。

気象学的な興味・実用的な目標



半径: 3396km (0.4g)
質量: 地球の10%程度

公転半径: 1.4-1.6AU
公転周期: 689日

自転周期: 24.7日
赤道傾斜角: 25.19°

大気圧: 7-9hPa
温度: -53°C (有効温度-56°C)

火星の環境

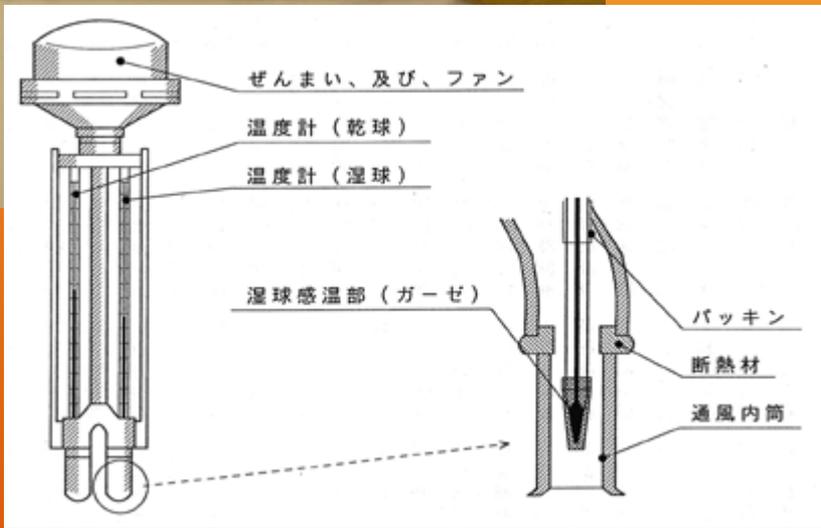
Sensor Efficiency

Sensors	Resolution
Temperature	0.1K
Wind Velocity	1m/s
Pressure	0.1Pa
Surface Temp.	0.1K
Wind Direction	-

sampling rate: 2s

- CO-I: 仲吉 (東京理科大)
- 周囲からの放射吸収率の違う3色の温度計で温度を測定する。
- それぞれの違いから長波・短波の放射を推定すると共に温度を補正して空気の温度を測定する

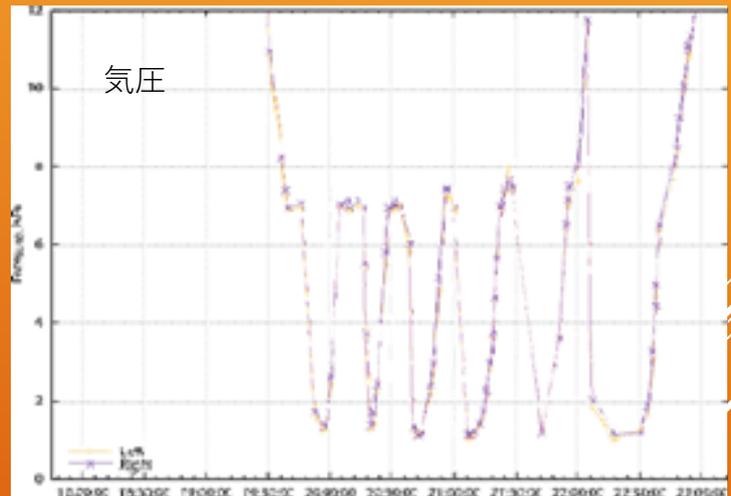
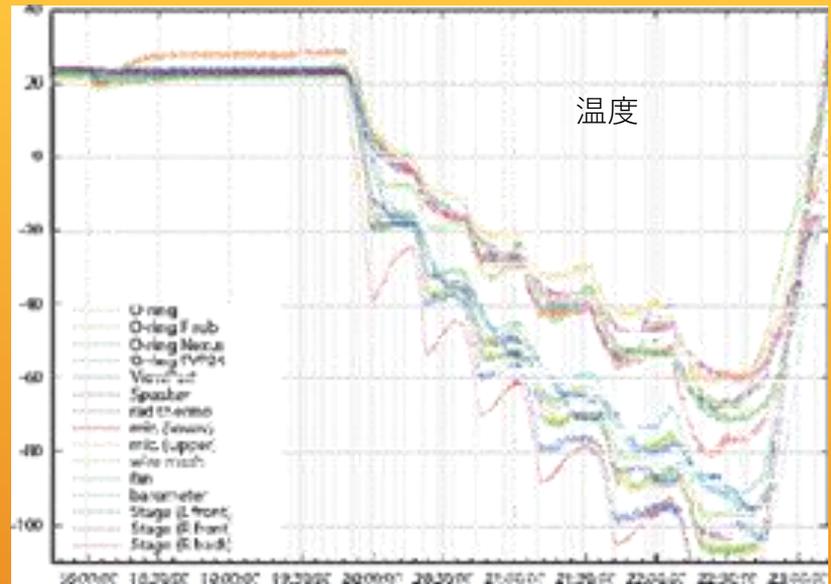
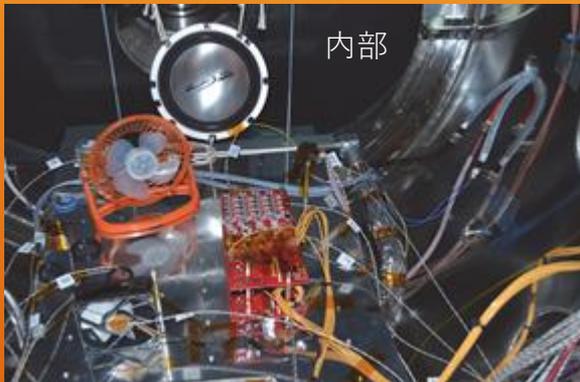
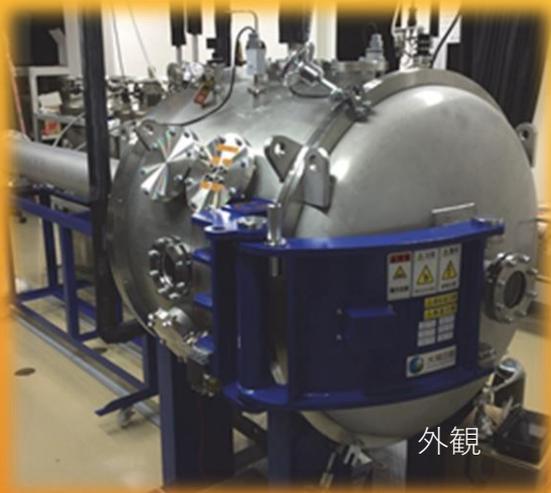
温度計



$$C_x \frac{dT_x}{dt} = -h_x A_x (T_x - T_a) - \varepsilon_x \sigma T_x^4 A_x + \varepsilon_x L A_x + \alpha_x S A_x + Q_x$$

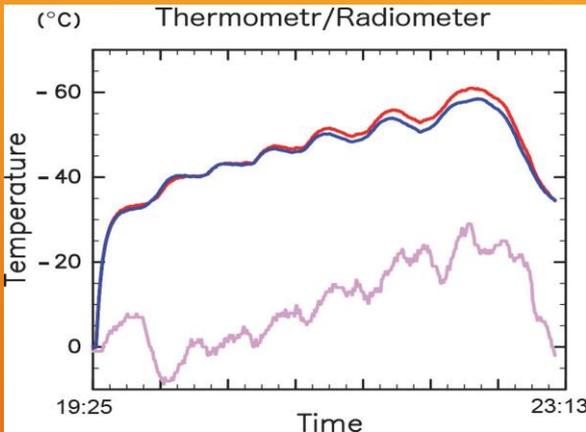


パラメータ	記号	単位	備考
温度計の出力	T_x	K	
熱容量	C_x	J/K	
温度計の表面積	A_x	m^2	
熱放射の射出率	ε_x		
日射の吸収率	α_x		
センサの発熱	Q_x	W	
時刻	t		
ステファン・ボルツマン定数	σ	$W m^{-2} K^{-4}$	$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$
気温	T_a	K	
センサに入射する日射量	S	$W m^{-2}$	
センサに入射する熱放射量	L	$W m^{-2}$	夜間は0
熱伝達係数	h_x		



火星環境模擬チャンバー

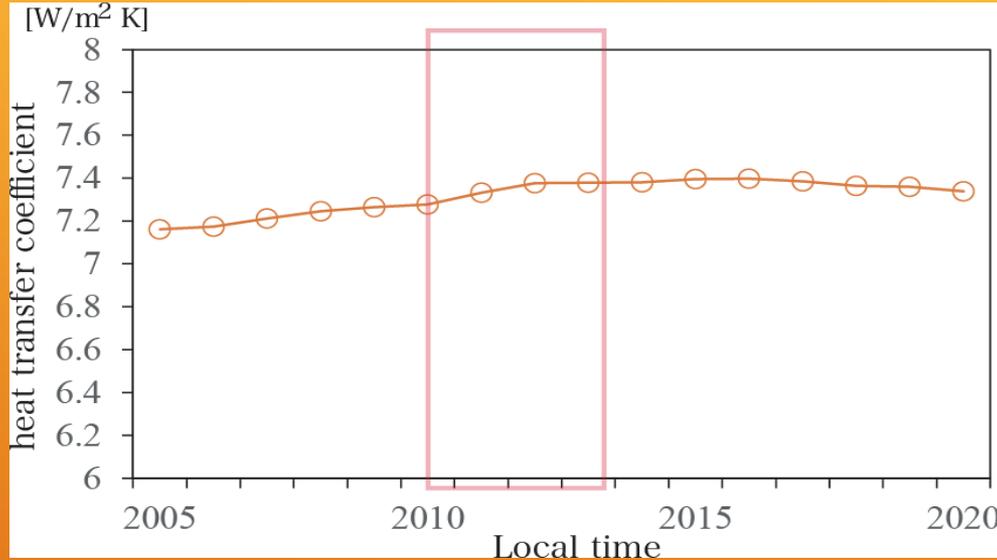
-80°C以下で5hPa以下に設定



赤と青は2つのグローブ球温度
マゼンダはその温度差から計算した長波放射

- 仲吉(東京理科大)
- 周囲からの放射吸収率の違い
3色の温度計で温度を測定する。
- それぞれの違いから長波・短波の放射を推定すると共に温度を補正して空気の温度を測定する
- 温度は正しく測定できてそう。精度のために低温用熱電対にするべき。
- 長波は測定できているが正解かは確認できていない。短波は測定していない。
- エレキ部が手つかずだが、熱電対ロガーで良い。
- センサー部は手作りなので振動や塗料の検討、振動テストなどが必要。
- 精度の見積もりもまだ 10W ,20W ぐらいか？

温度計1 (赤外, 太陽放射) (火星チャンバー)



赤い四角の時間帯にファンを動作させた。
熱伝導率の上昇が検出できている。

温度計2 (風速) (火星チャンバー)

- 4つめの温度計は定常な加熱を与えることで、熱式風速計として機能する。
- 他の温度計とは温度を変えている。風速に応じて周囲との熱の交換率に差が生じることを利用して風速を測定する。
- 温度計部に準ずるが過熱が強すぎるので(火星に合わせて)その検討とエレキ部が必要
- 熱伝導率などは周囲の気体状態に依存するので火星の場合気圧計が必要では？

Sensor Efficiency

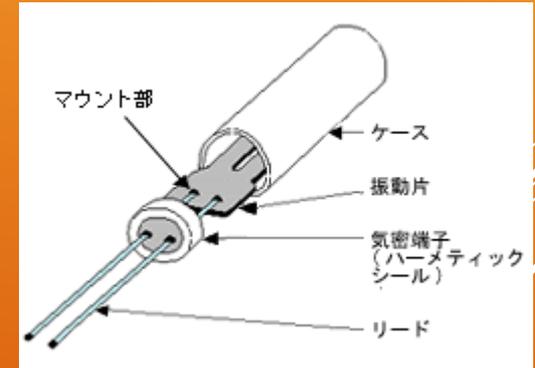
Sensors	Resolution
Temperature	0.1K
Wind Velocity	1m/s
Pressure	0.1Pa
Surface Temp.	0.1K
Wind Direction	-

sampling rate: 2s



図3 飛翔体搭載用水晶摩擦気圧計 (QFG)

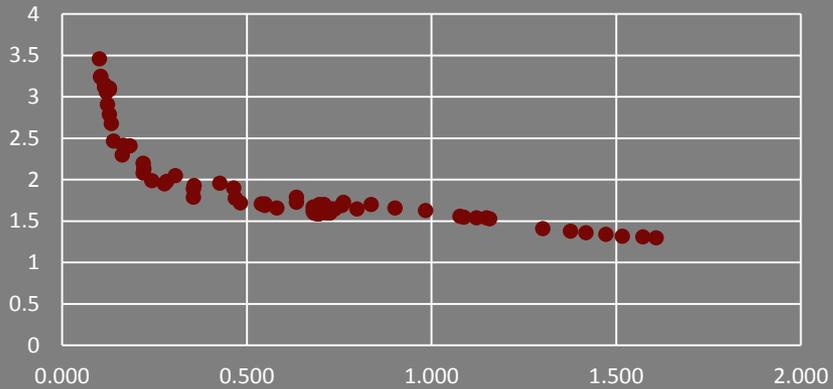
- 栗原(北大)
- 水晶振動子のインピーダンスが圧力に依存するのを利用。
- 温度にも依存するが周波数に影響を与えるので、温度も測定でき、補正も可能。
- ロケット観測にも使用されており、火星チャンバーでも問題無さそう。
- 残りの開発はサイズや耐候性、設置方法など。



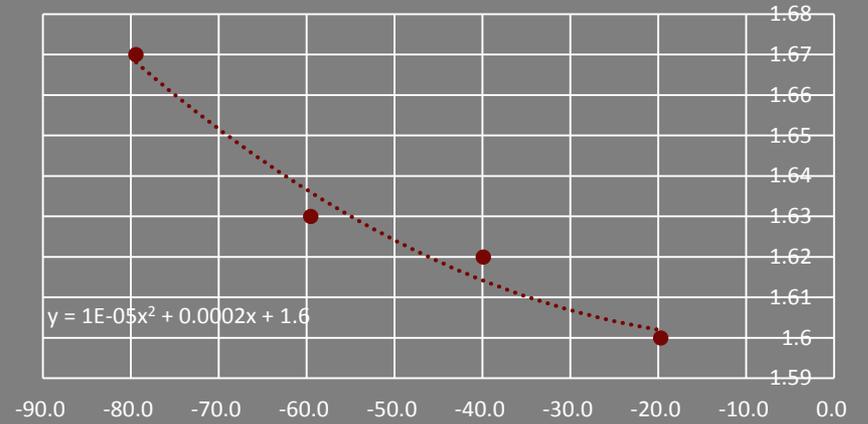
SEIKO EPSON の音叉型振動子

気圧計

Barometer (y : Barometer x : ControlPanel/pressure gauge)



Dependency on Temperature(6.8hPa)

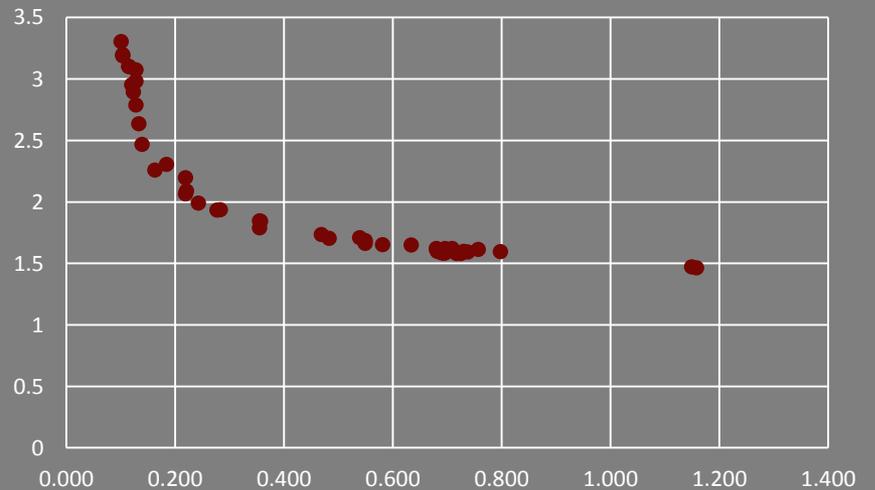


火星チャンバーでの実験

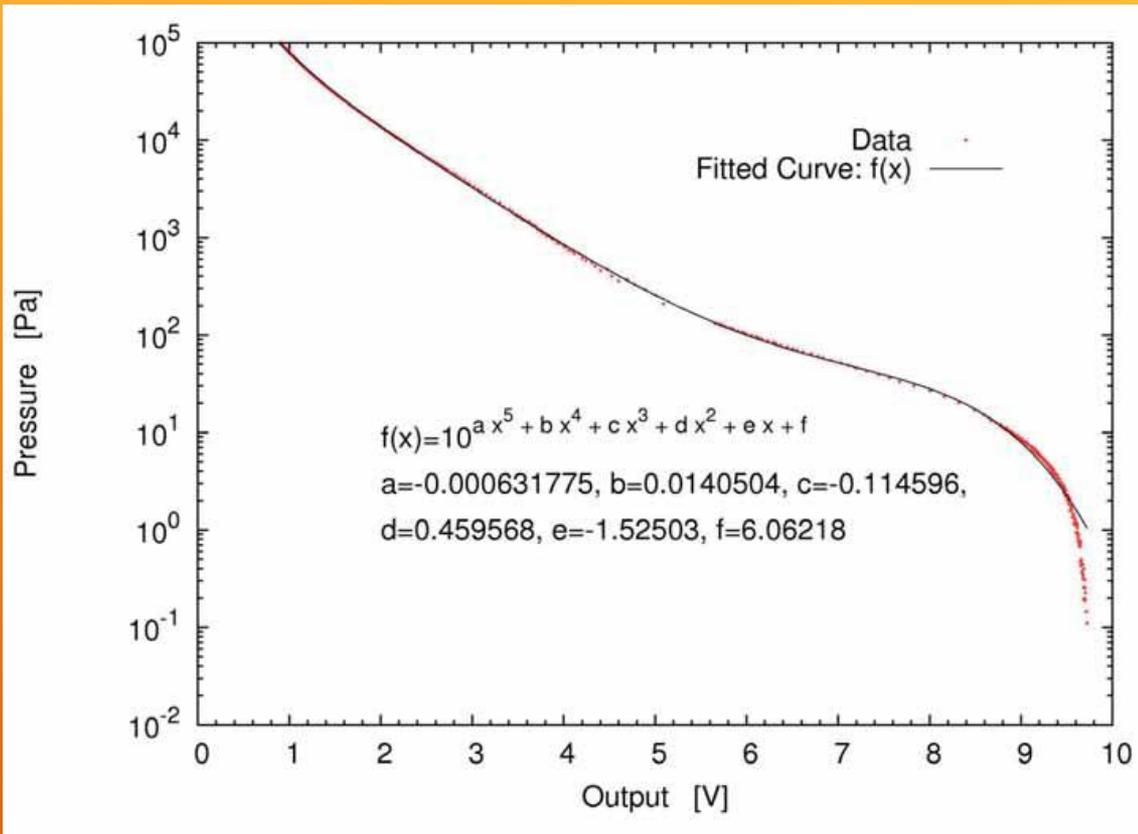
温度補正をするとかなり精度が良い

PRESSURE

Corrected with Temperature

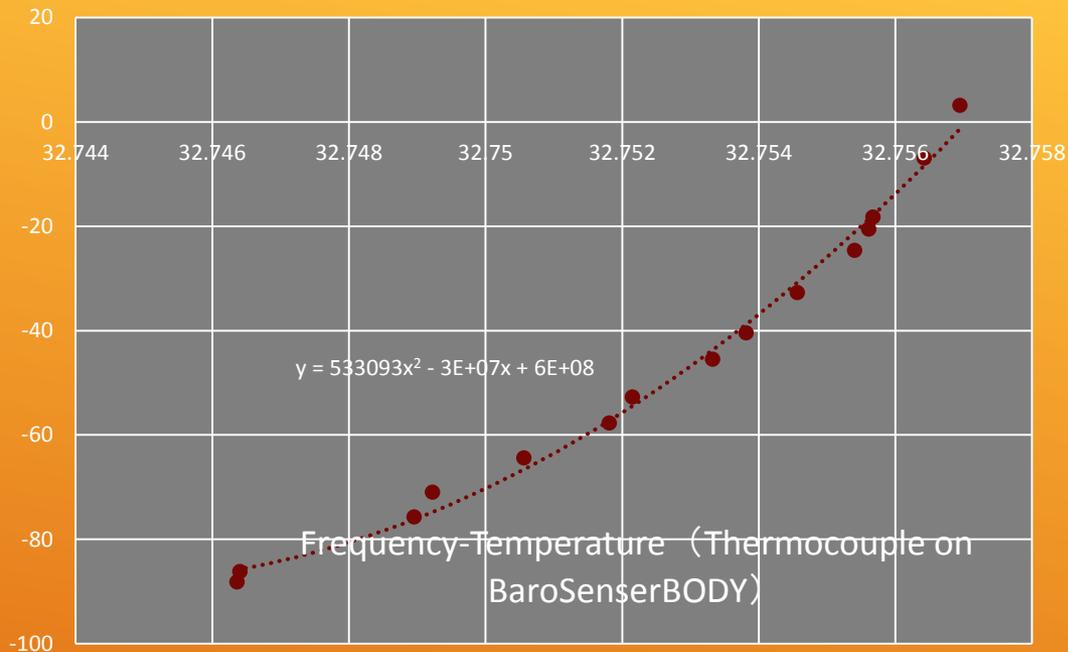


► 0.1Pa on Martian Surface (Tunable)



Calibration in air

ACCURACY OF BAROMETER



火星チャンバーの結果

温度計としても使用できる
 (MIMでは、あまり考えてない
 高精度の周波数カウンターが必要)

THERMOCOUPLE VS TEMPERATURE FROM

	Outside Thermocouple	Inner Thermocouple	Temperature Frequency
22:56:30	-71.94	-94.4	-83.2389
23:00:32	-54.13	-74.7	-68.7101
23:02:20	-46.35	-58.7	-60.2459
23:03:32	-39.58	-53.8	-54.0083
23:04:26	-37.44	-46.3	-49.5689
23:06:06	-29.47	-36.1	-41.0071
23:09:26	-12.48	-17.0	-24.3147

ダストデビル通過時

Ellehoj et al.(2010)

Phoenix Lander

Vaisala Barocap/Thermocap

観測期間 151sol

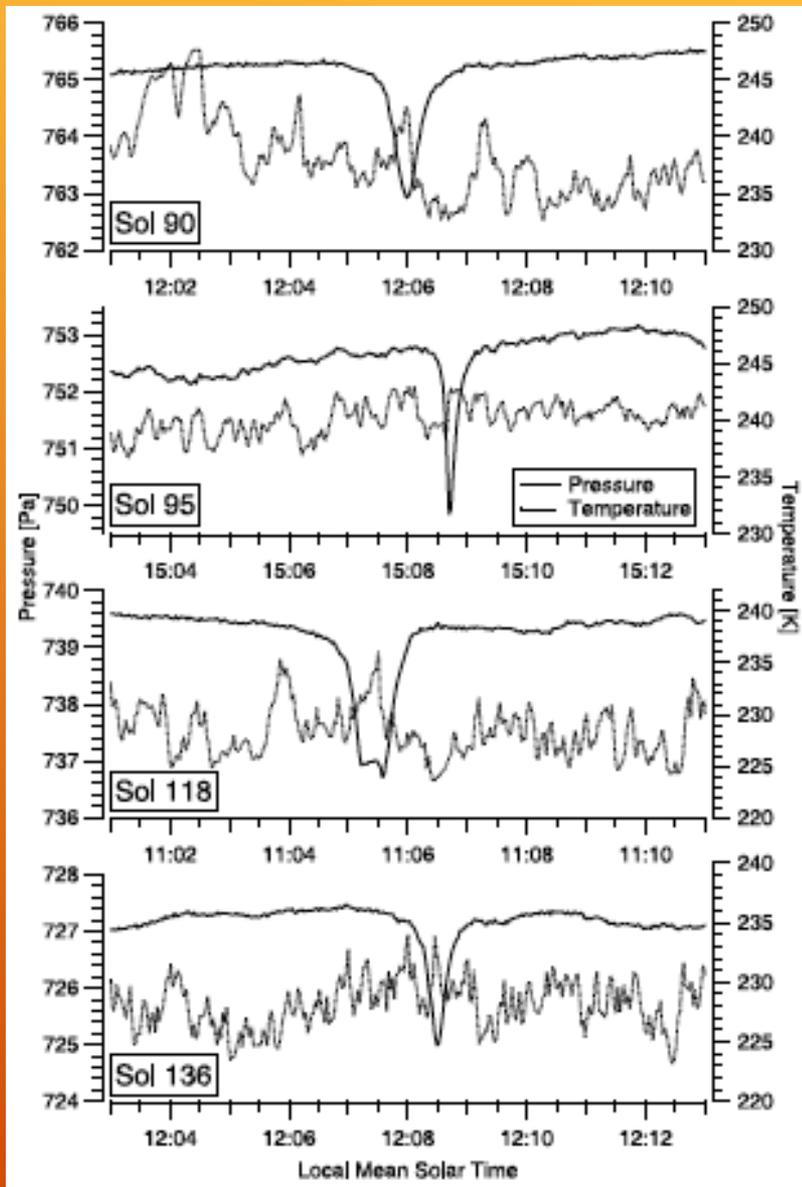
観測された渦 502

ダストデビルによる変動

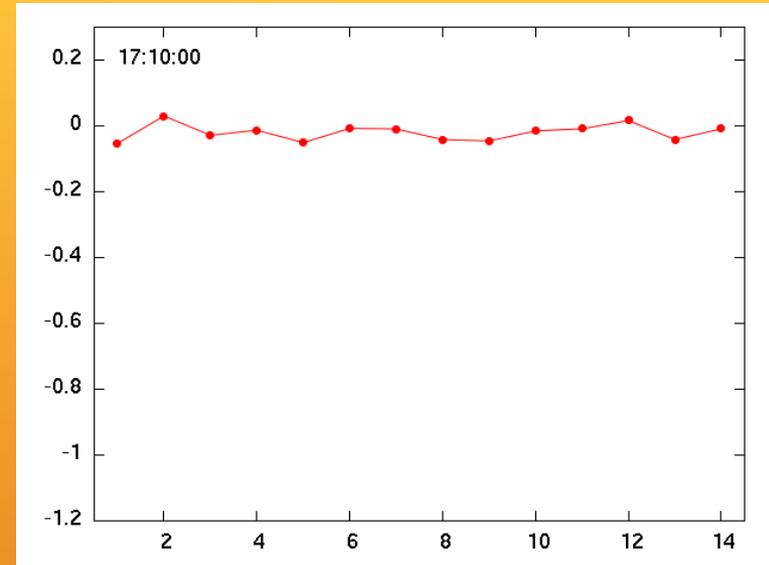
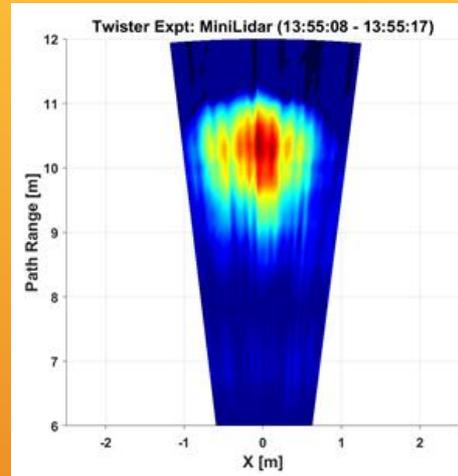
継続時間 10-20sec

ΔP 1-5Pa

ΔT 0.5-2K



気圧計による竜巻ラボの観測
(直線的に配置)



名古屋市科学館

竜巻ラボ

ライダーの首振り実験

ライダーの試験の時に気圧測定

図 2.4-4： 大気散乱光データを画像的に取得しその一部を格子状にダウンリンクし地上でカメラのポインティング情報を補正する。(左: ポインティング情報が誤っていた場合、右:ポインティングが正しい場合)



図 2.4-3： 構成の類似する Venus Express/Venus Monitoring Camera (VMC)の検出器ヘッド

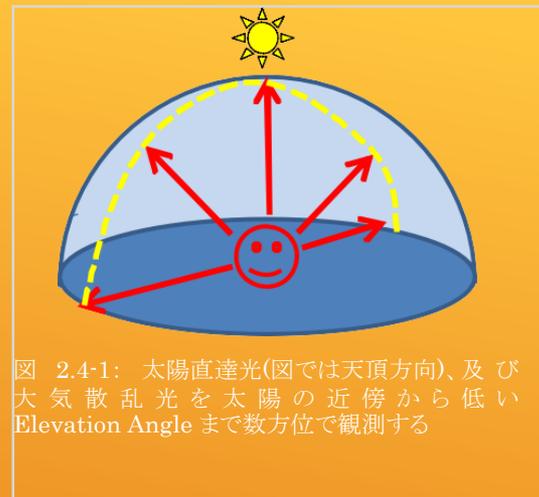
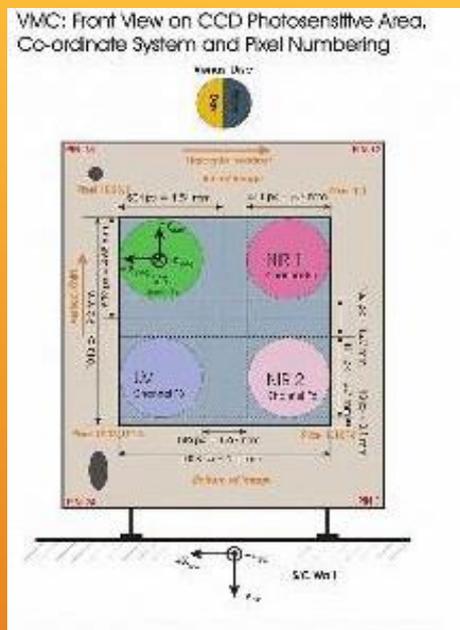


図 2.4-1: 太陽直達光(図では天頂方向)、及び大気散乱光を太陽の近傍から低い Elevation Angle まで数方位で観測する

これはMELOSの時の資料で
現在検討中(全天カメラ?)

環境監視カメラ

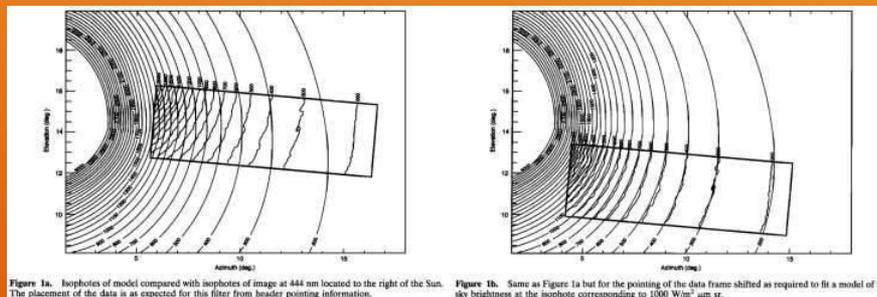


Figure 1a. Isophotes of model compared with isophotes of image at 444 nm located to the right of the Sun. The placement of the data is as expected for this filter from header pointing information.
Figure 1b. Same as Figure 1a but for the pointing of the data frame shifted as required to fit a model of the sky brightness at the isophote corresponding to 1000 W/m² μm sr.

- ▶ 作っている測器（から少しだけ）紹介した
 - ▶ マルチ温度計，気圧計，（粒子カウンター），（ライダー），（水蒸気計），（カメラ）
- ▶ 現計画中のMIMで（最大）持って行けそうなのは温度計と気圧計と水蒸気計と粒子カウンターとカメラ
- ▶ 風速計こそもっていきたいけど，MIMの次？
- ▶ 限られたリソースで出来ることは何でしょう？

まとめ1

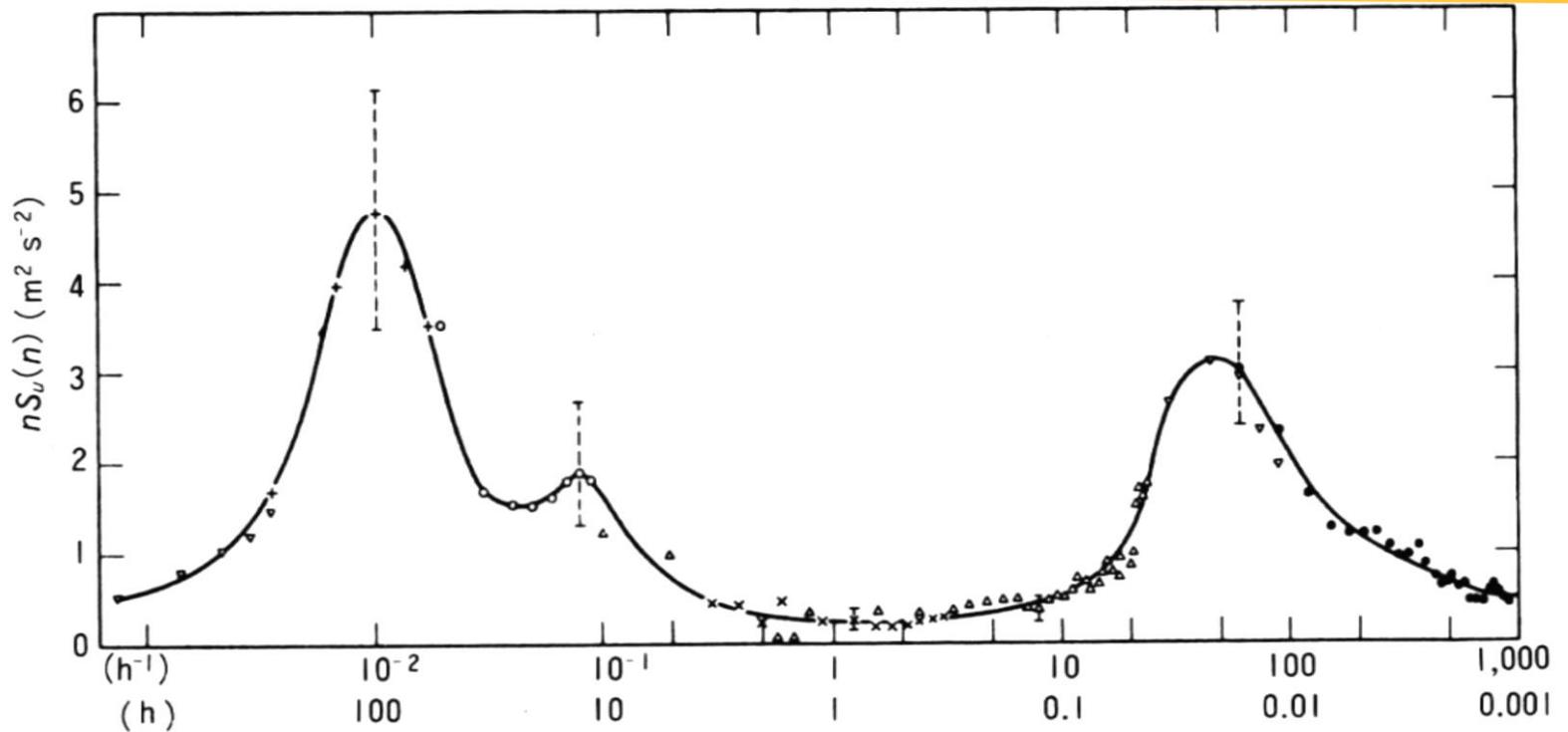
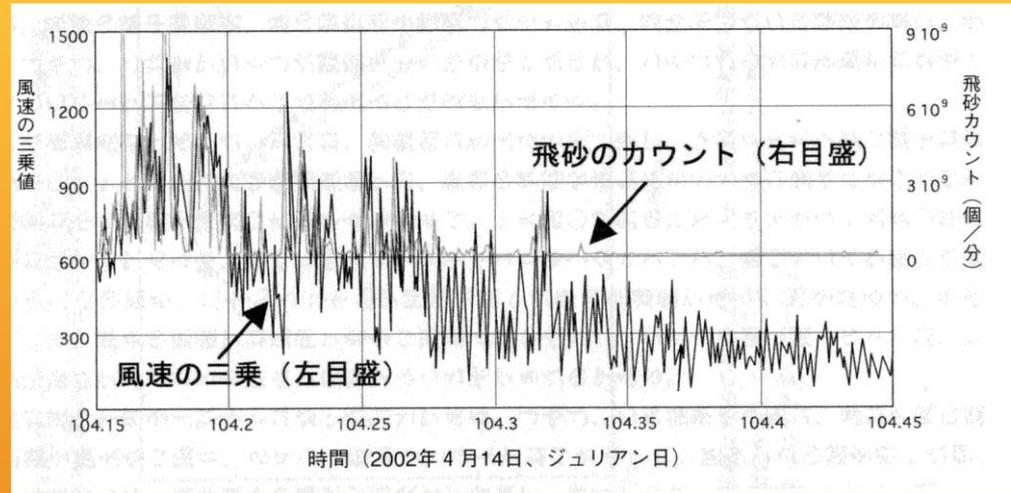


図1.19 地上風の分散スペクトル(Van der Hoven, 1957). 米国のブルックヘブン国立研究所にある地上125 mの塔で観測. 対数スペクトルであることに注意.

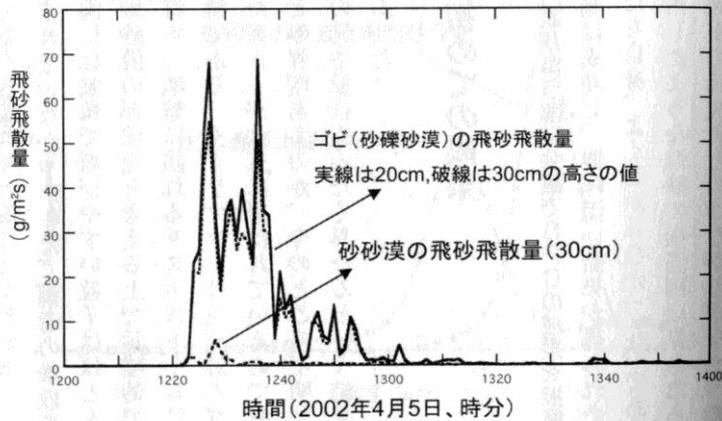
地上風のスペクトル

ADECの結果 サルテーション

まずは右上のような図が描けるといい。
できればダストで描きたい。



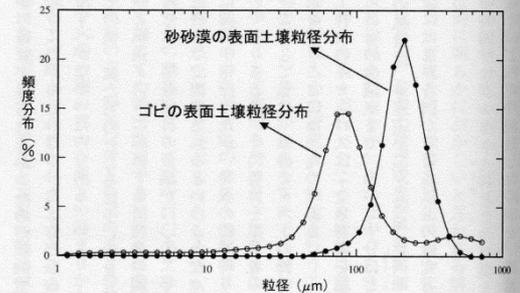
Thin line: Sand count
Thick line: u^3 (Mikami)



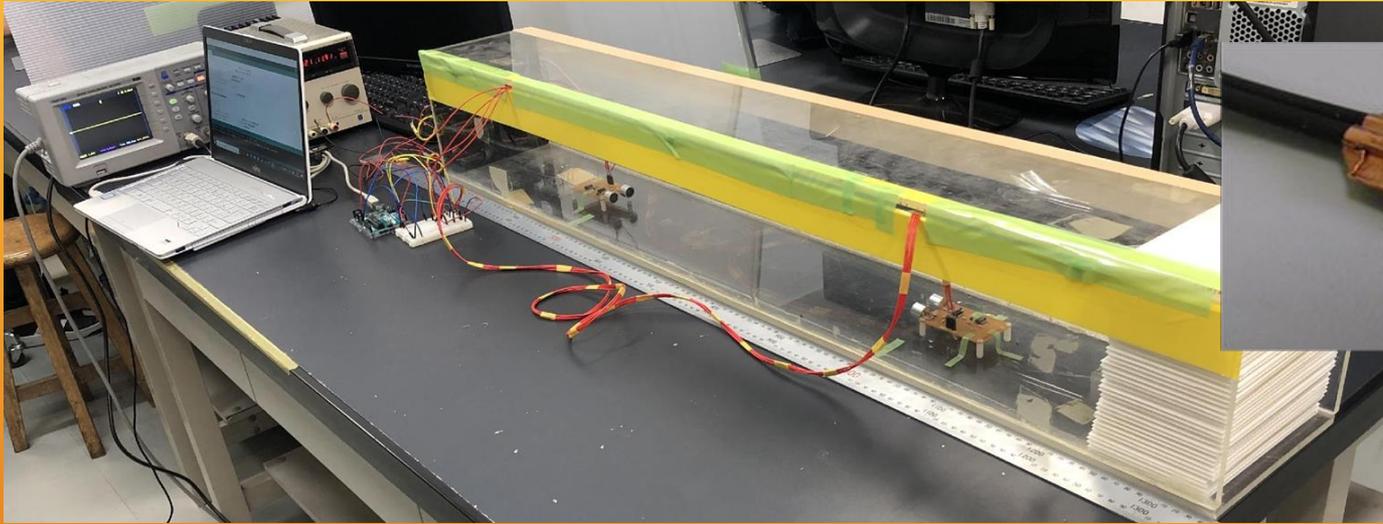
同じ気象条件下でも飛砂の発生量はゴビの方が圧倒的に多い (Mikami et al., 2005)。

砂だけ砂漠だと飛びやすいサイズの粒子がなくなっているためほとんど飛ばない。降りる場所が重要。

タクラマカン砂漠南部のゴビ観測サイトと砂砂漠観測サイトの表面土壌の粒径分布 (Mikami et al., 2005)



図の横軸は表面土壌の粒径 (単位 μm)、縦軸は各粒径毎の土壌の割合 (%) を示す。飛砂が飛散しやすいと言われる 80 から 100 ミクロン程度の大きさの粒子は、ゴビ観測サイトの方が多く、砂砂漠にはわずかしが含まれていない。



- 常圧下ではPICでも製作できる
- 火星環境での音響インピーダンスに適合する素子が必要
 - 有望な素子は見つけたが（エレクトレット）
試作に至っていない（予算的理由）
作れる人とは面識がない（手持ちので試してみたらいけそう
でしたと連絡いただいた）ので形状等の打ち合わせまでには
至っていない

超音波風速計（TRL3）

- ▶ 本当に測りたいのは風向風速
- ▶ 鉛直流も含めて十分な精度で測れそうなのは、音波を利用した風速計
- ▶ 大気の薄さが問題だけれども、エレクトレットセンサーは有望かも？
- ▶ ダスト（砂）カウンターも重要
 - ▶ ダスト（砂）のカウンターがあれば、風と飛砂もしくはダストの巻き上げとの関係を測定できてとても、よい。
 - ▶ 気圧計とでもダストデビルとの関係が言えるかも。
 - ▶ 降りる場所重要かも？砂っぽいところより礫っぽい方がいい？

まとめ2