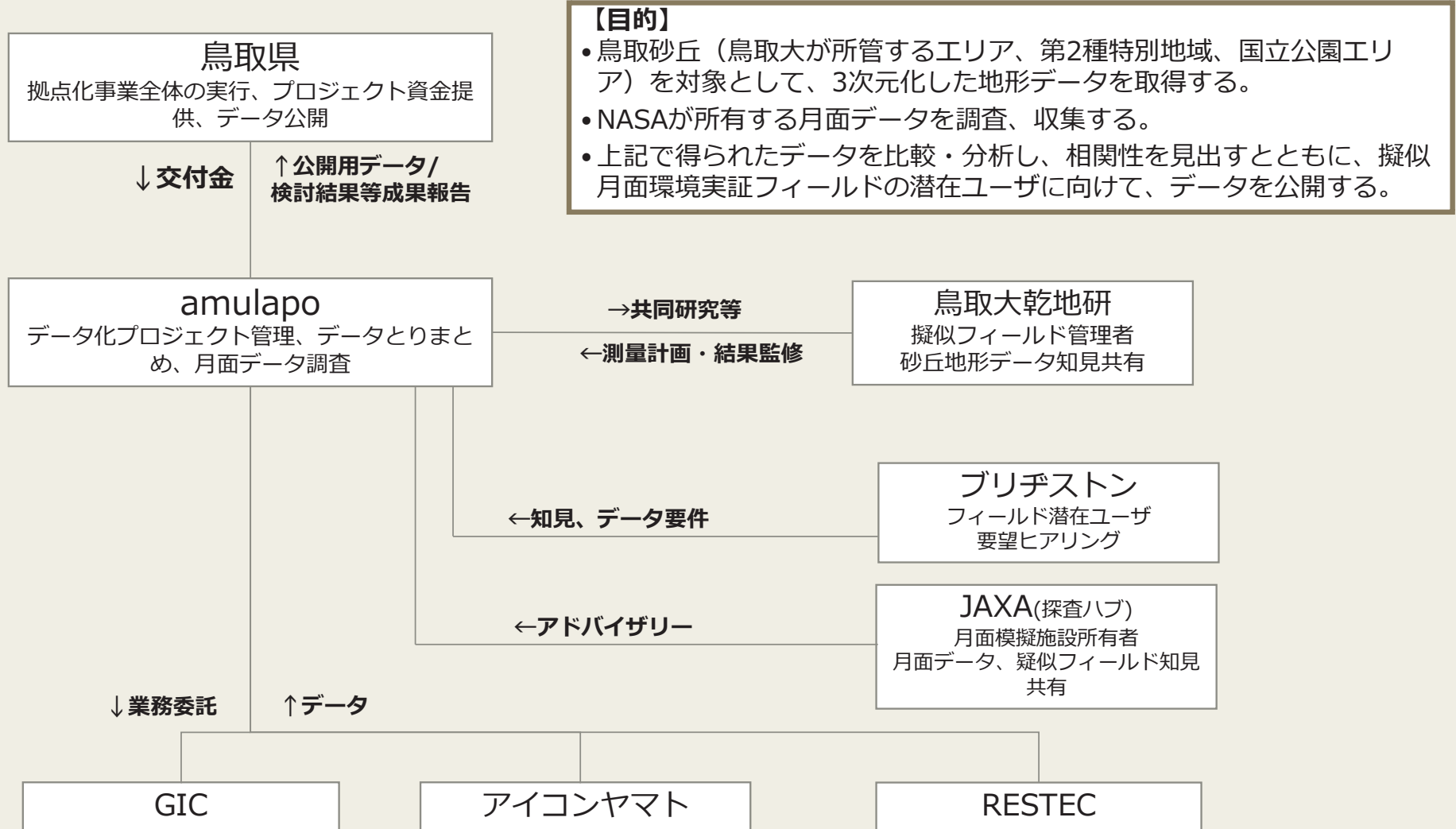


月面模擬実証フィールド構築に向けた
鳥取砂丘のデジタルデータ化プロジェクト
成果報告

2023.6.23



プロジェクトの目的及び体制図



プロジェクトの成果物一覧

No	成果物	備考
1	鳥取砂丘3次元マップ(3次元点群データより作成)	UAV等に搭載されたレーザスキャナを利用した測量により、3次元化した点群データを取得する。データ形式は点群データの標準であるLAS/PTS形式とし、一般的なデータ形式を踏襲する。 絶対位置精度はGPS程度とし相対精度をセンチオーダーに追い込む。
2	鳥取砂丘機械特性データ	テラメカニクスで使用される土壌の特性データを複数地点において測定し、整理する。(粒径分布、成分分析、粘着力、内部摩擦角等を対象とし、月面データと比較)
3	NASA月面データ調査報告	文献等で使用されているレゴリスの情報源については、概ねLunar Sourcebookに準拠しているものと想定されている。月面の地形データが、NASA(orJAXA)がどのようにデータを公開しているかを整理。 また、Lunar Sourcebookより、アポロ計画時月面から取得されたレゴリスのサンプルを使用した特性データ等を取得、整理する。
4	鳥取砂丘/月面の比較検討	上記で得られたデータ間の相関性や相似性を整理し、鳥取砂丘の月面模擬化に関する考察を行う。
5	データ公開	G情報空間センターというWebサイトを活用してデータの公開を行う。点群データは特に静岡県が多く取得して無償公開しており、本サイトを通じて配布されている。これにより、得られたデータを広く民間に浸透させていく。

鳥取砂丘3次元マップ

- 乾地研劉先生との共同研究契約、およびアイコンヤマトへの委託契約に基づき実施した。
- 8/22に乾地研におけるテストフライトを実施し、飛行パラメータ等の確認を実施した。
- 10/12-13にかけて鳥取砂丘全域の点群データを取得済み。また点群データからDEMの生成を行った。
- 同様に12/9、1/11、2/27に取得を行った。また、計4回のデータに基づき、冬季の季節風による地形変化についても調査を行った。
(今後、乾地研より論文にて公表予定)



乾地研点群データ(1)



乾地研点群データ(2)

鳥取砂丘3次元点群データ



砂丘全域

ファイルサイズ : 20,224,584KB
点群サイズ : 609,116,817点

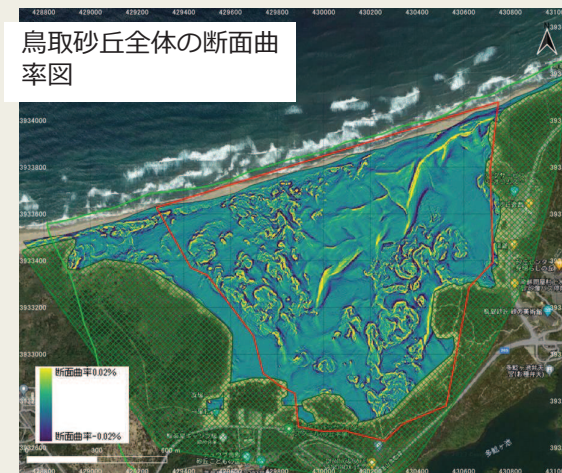
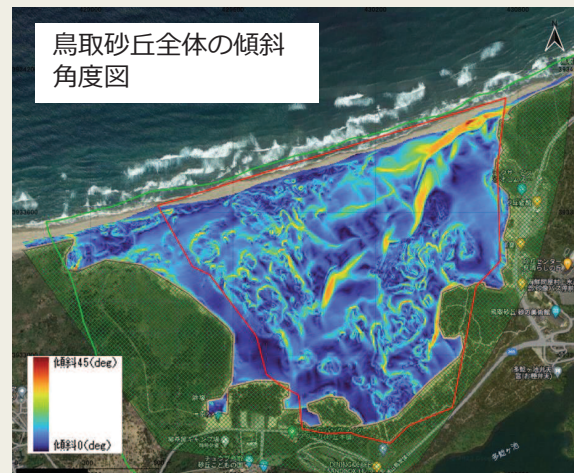
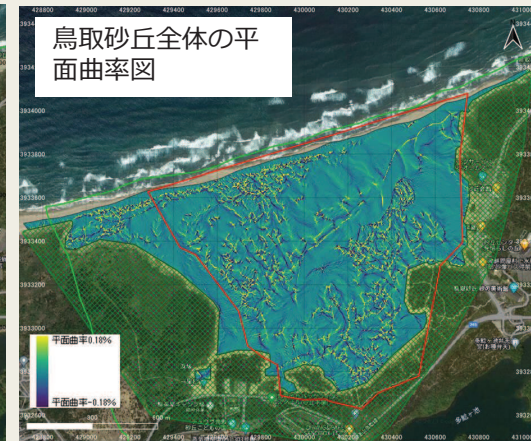
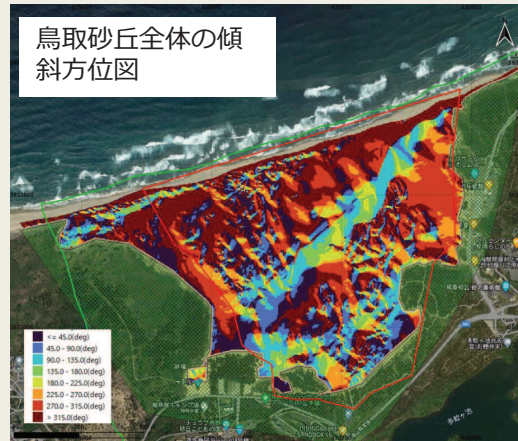
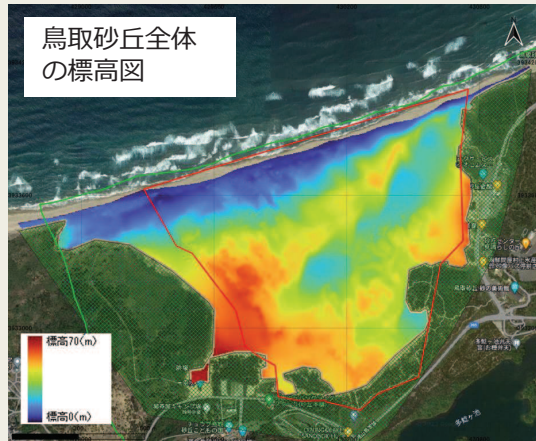


観光砂丘方面



観光エリア

数値地形モデルによる数値解析



機械特性データ取得

- ジーアイシーへの委託契約に基づき実施。ジーアイシーからの再委託により鳥大中村先生にご協力頂いた。
- 乾地研工エリア3点、第二種特別保護区域、JAXA相模原探査フィールド、東北硅砂5号(市販品)を対象に以下の試験を実施し、特性を得た。
- 乾地研側(T-1~T-3)は9/13に採取し、試験を実施。相模原(J-1)は11/14に現場密度試験を実施し、その他試験用の砂を貸与いただき、鳥取に郵送後、鳥大にて試験を実施した。
- 第二種工エリア(TS-1)の砂採取は文化庁及び環境省の承認の上で、23/1/6に現場密度試験を実施し、砂を採取した。

分析項目	単位	実施数量					合計
		T-1	T-2	T-3	TS-1	J-1	
試料の採取							
試料採取	箇所	1	1	1	1	※	4
物理的性質試験							
砂の最小密度・最大密度試験	試料	1	1	1	1	1	5
土粒子の密度試験	試料	1	1	1	1	1	5
土の粒度試験	試料	1	1	1	1	1	5
土の圧密定圧一面せん断試験	試料			1	1	1	3
現場密度試験	試料			1	1	1	3
成分分析試験							
鉱物組成分析	試料			1	1		2
全岩化学組成分析	試料			1	1		2



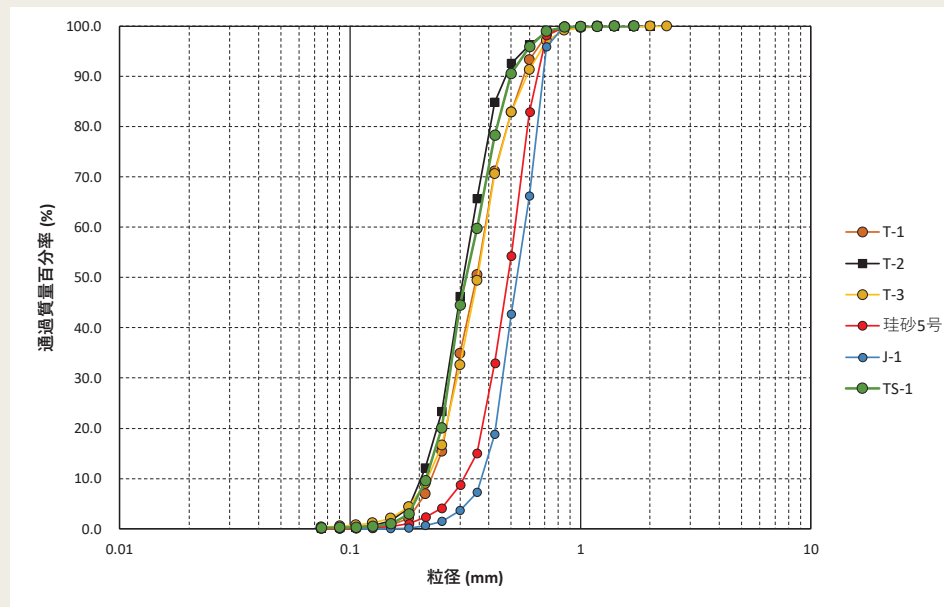
JAXA相模原探査フィールドでの作業



密度試験及び粒度試験結果

密度試験結果

密度 (g/cm ³)	T-1	T-2	T-3	TS-1	東北珪砂5号	J-1
土粒子密度	2.70	2.69	2.70	2.69	2.63	2.63
最小密度	1.36	1.35	1.42	1.37	1.45	1.46
最大密度	1.66	1.66	1.70	1.67	1.72	1.72



粒度試験結果

- 全ての試料は、粗砂はほとんど無く、中砂と細砂で構成される。
- 東北珪砂5号は中砂が約95%、鳥取砂丘砂よりも425 μ m以下が少ないことから、鳥取砂丘砂よりも粒径が揃っている。
- 東北珪砂5号は鳥取砂丘砂よりも粒径が揃っているため、最小密度・最大密度ともに鳥取砂丘砂より大きい。
- JAXAの珪砂は、購入した珪砂5号に対して粒径が大きい。購入時期の差異やふるいの数を増やしていることが要因と想定。

現場密度試験及びせん断試験結果

- 現場密度試験では相対密度(D_r)を求めた。(1に近いほど密)
 - TS-1 No.1=0.268, No.2=0.442
 - J-1 0.677~0.904
- 砂丘においては表層の取得のため緩く、相模原では実験等により踏み固めがあるためと考察。T-3は工事中の箇所を行ったため参考値扱い。
- せん断試験結果は以下の通り。
- 粒度分布の影響等により差が出ているものと考察。

	$D_r = 0.3$		$D_r = 0.8$	
	粘着力 c (kN/m ²)	せん断抵抗角 ϕ (deg)	粘着力 c (kN/m ²)	せん断抵抗角 ϕ (deg)
J-1	0.4	34.9	0.5	42.2
T-3	1.5	32.2	3.0	37.0
TS-1	1.0	32.7	2.6	38.4

NASA月面データの調査及び比較

- アポロ計画で取得された月面レゴリスのサンプルを調査した結果が Lunar Sourcebook という公開文書に整理されており、これを中心に調査。
- その他、豊浦砂及びFJS-1についても文献等を調査した。
- 以下に示す月面データはあくまでアポロ計画で着陸した近傍のポイントであることに注意。以下は粒度分布の例。

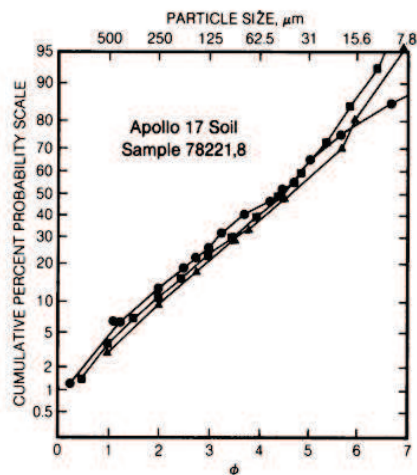
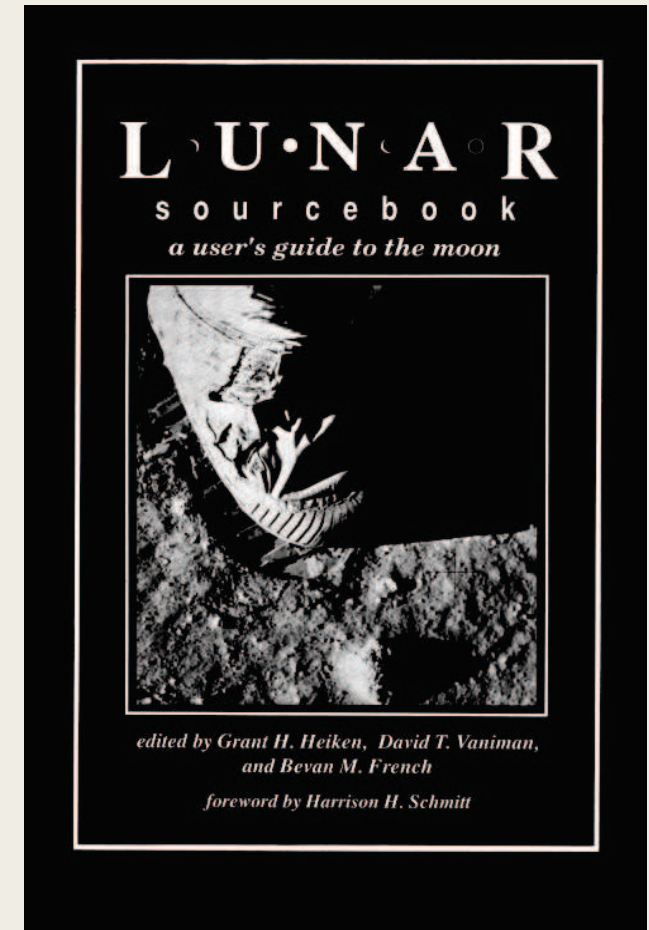
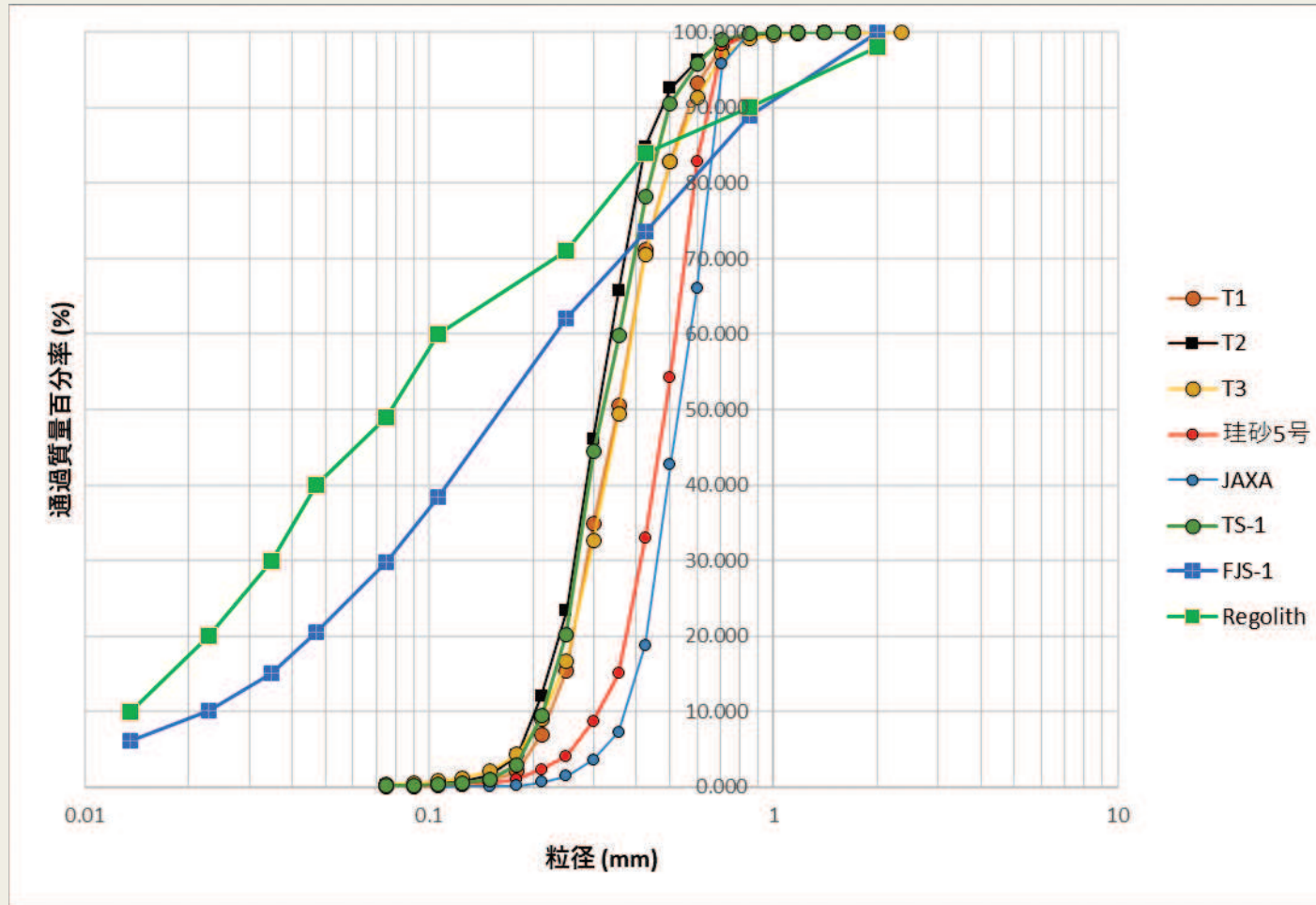


Fig. 9.1. Distribution of particle sizes in separate splits of Apollo 17 lunar soil 78221,8, analyzed by three different laboratories. Lower horizontal axis shows particle size as (ϕ) , where $(\phi) = -\log_2 d$ and d is the particle diameter in millimeters. Upper horizontal axis shows particle size in micrometers. Vertical axis plots cumulative percent on a probability scale. The three curves are close but not identical; the largest differences are present at the smallest particle sizes. All information from unpublished data (after Butler and King 1974).

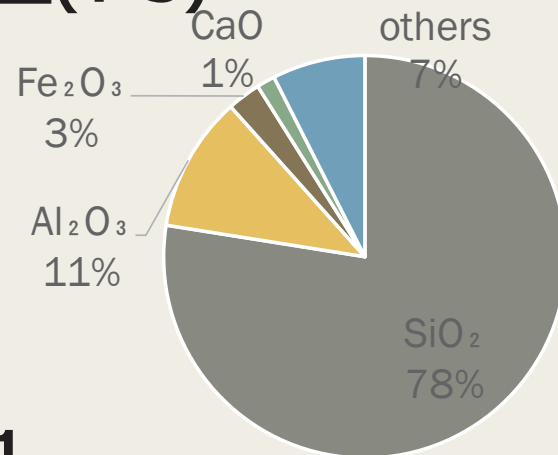


粒度分布比較結果

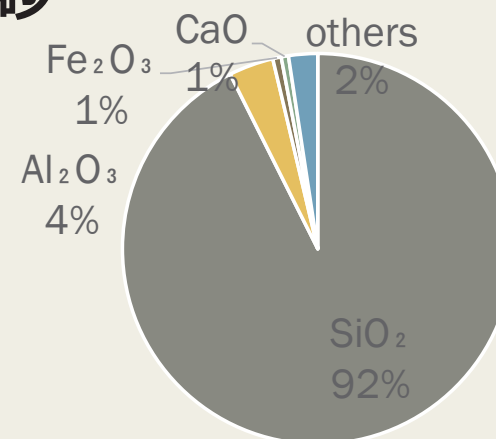


化学成分比較結果

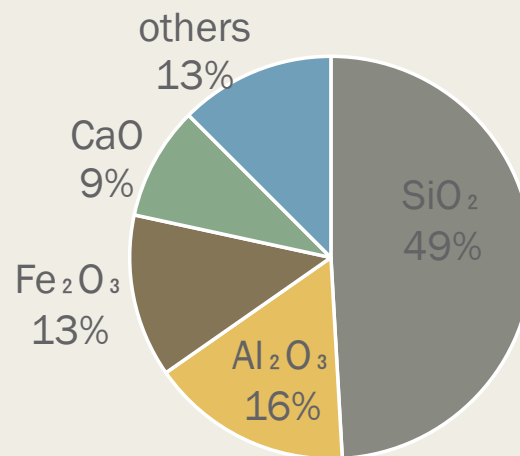
鳥取砂丘(T-3)



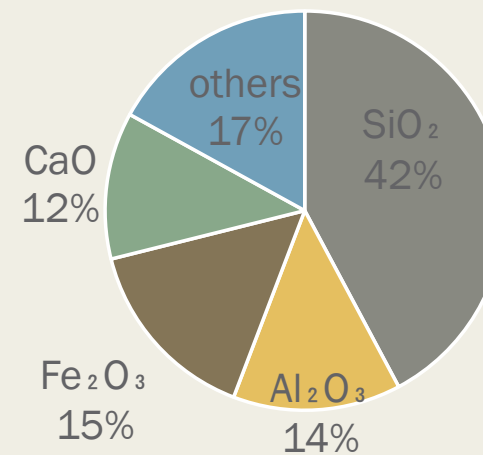
豊浦標準砂



FJS-1



月面



土壌の機械特性比較結果

粘着力・せん断抵抗角

	Dr = 0.3		Dr = 0.8	
	粘着力	せん断抵抗角	粘着力	せん断抵抗角
	c (kN/m ²)	ϕ (deg)	c (kN/m ²)	ϕ (deg)
J-1	0.4	34.9	0.5	42.2
T-3	1.5	32.2	3.0	37.0
Ts-1	1.0	32.7	2.6	38.4
FJS-1	0.7	39.0		

月面データ^{*[1]}

	Dr = 0.67	
	粘着力	せん断抵抗角
	c (kN/m ²)	ϕ (deg)
Regolith	0.75-2.1	37-45

* アポロ11号の結果

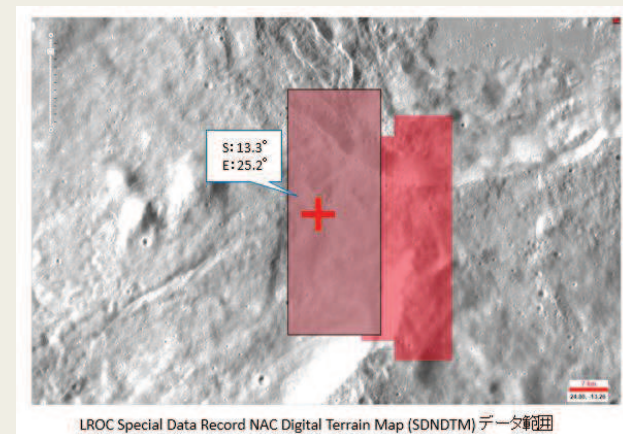
[1] Lunar Source Book Table 9.11

地形特性の比較結果

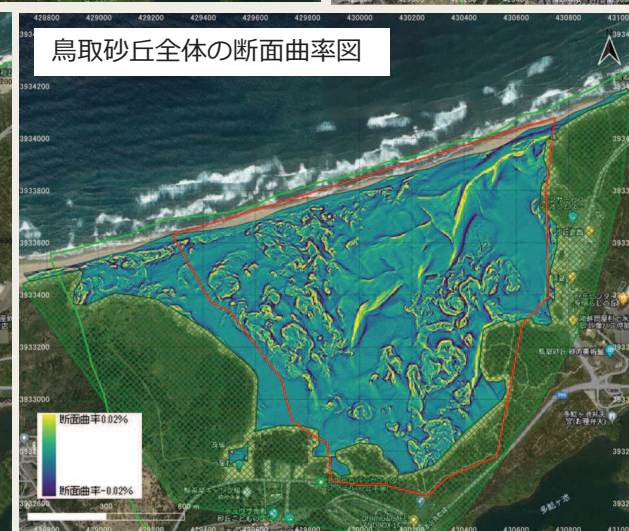
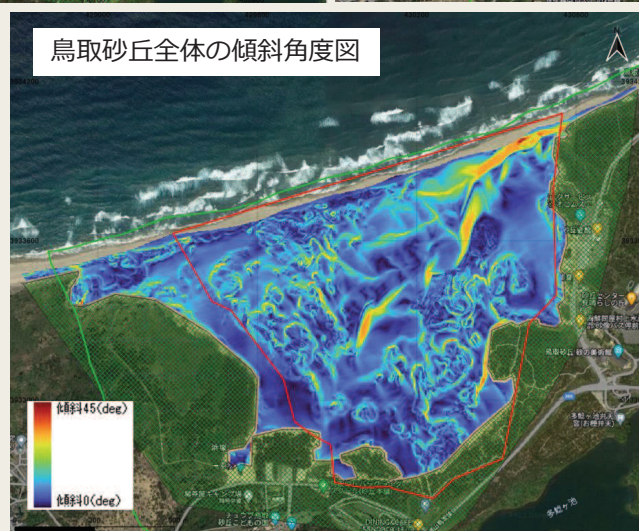
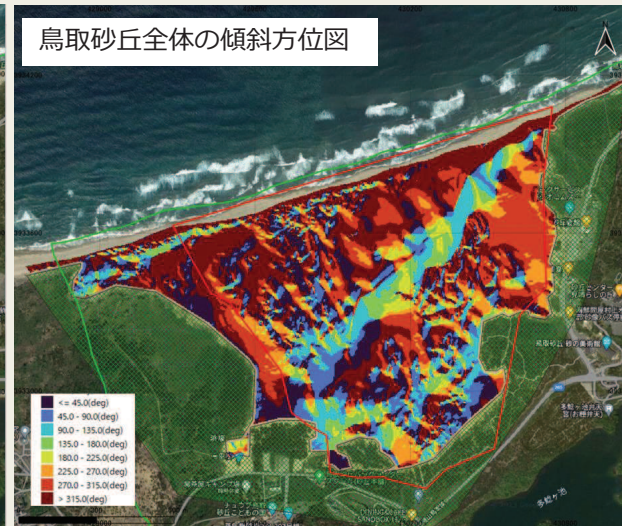
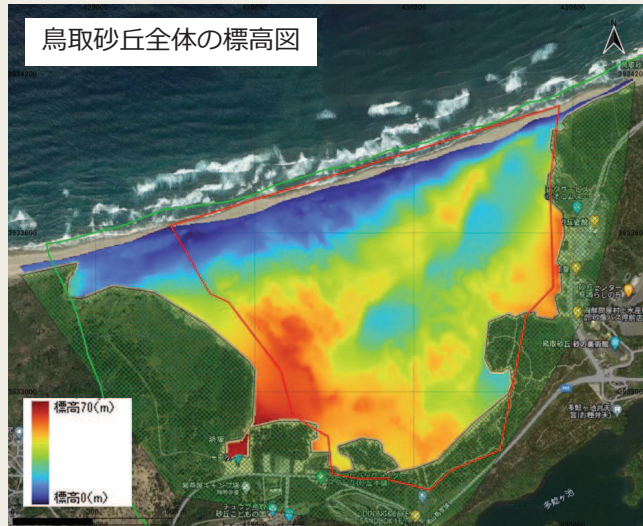
- RESTECに委託して実施した。
- 数値解析により月面と鳥取砂丘の地形を比較した。月面の標高データおよび鳥取砂丘の標高データ(DEM)を用いて、任意のグリッドにおける地形特性およびその分布の算出等を行った。
- 比較対象とする月面については、今後の情報公開のオープン性も鑑みてJAXA探査機であるSLIMが着陸予定のMare Nectarisとした。NASA LROのデータに基づき解析を実施。
- 以下のような地形特性をもとに比較検討を行った。
 - ① 標高値
 - ② 傾斜角度
 - ③ 傾斜方位
 - ④ 傾斜曲率



図. 解析対象エリアの概略地図

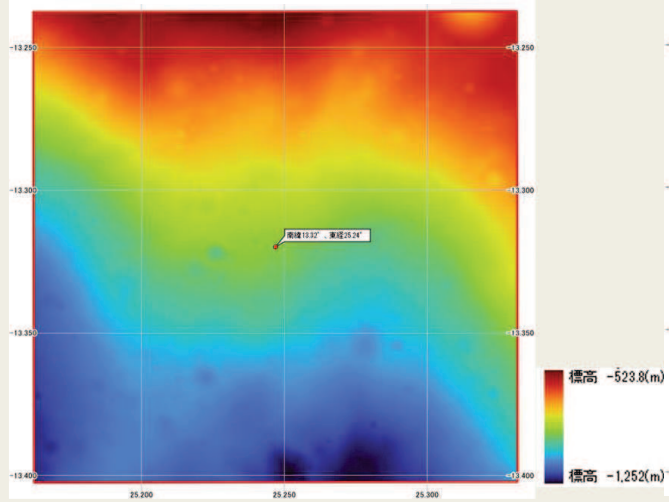


鳥取砂丘の数値解析結果

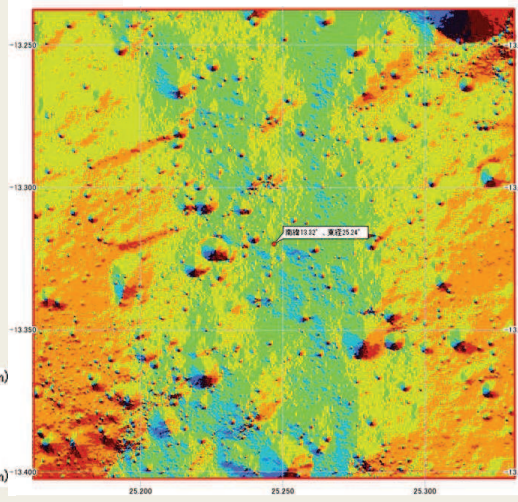


月面の数値解析結果

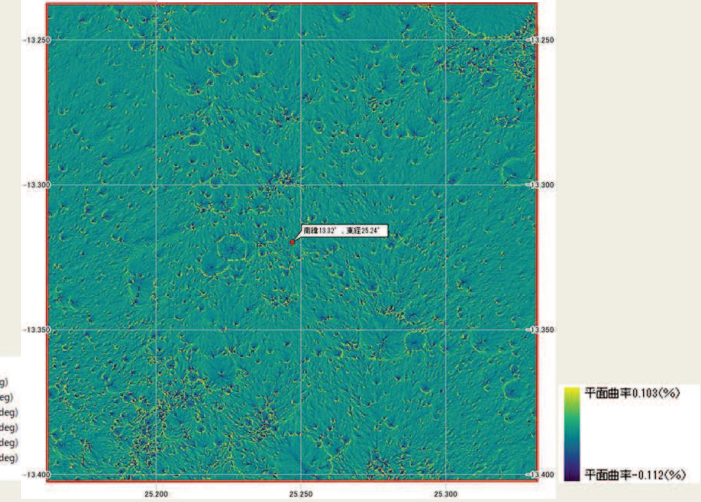
月面全体の標高図



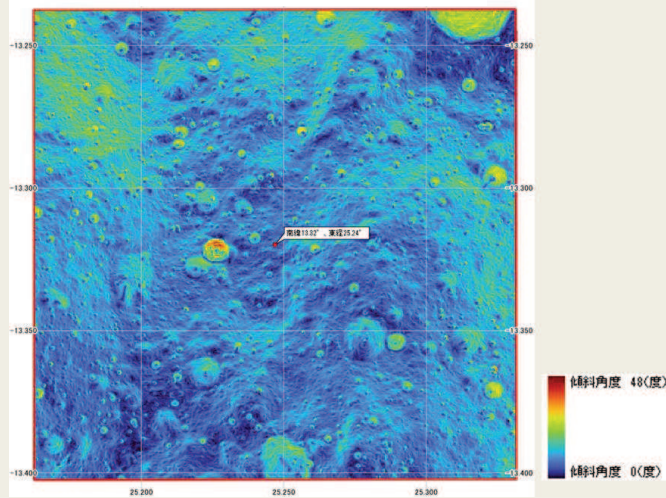
月面全体の傾斜方位図



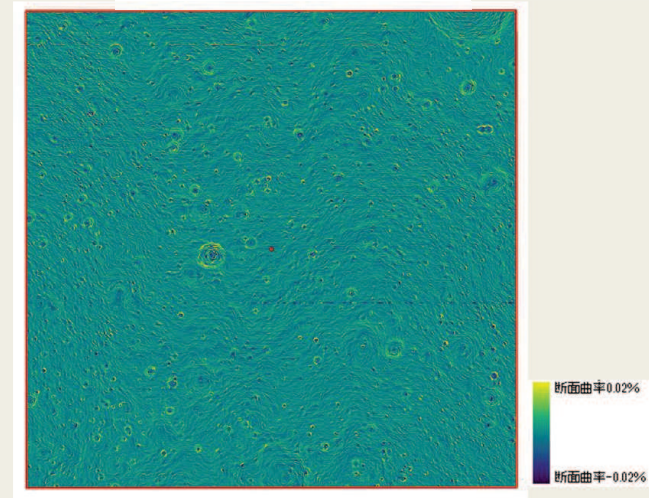
月面全体の平面曲率図



月面全体の傾斜角度図



月面全体の断面曲率図



地形的特徴量の類似度判定(1)

月面の各グリッドの地形および鳥取砂丘における地形の類似度を算出する。まず初めに類似度算出の手法についてまとめる。

■ 類似度算出の手法

本解析では鳥取砂丘および月面データから求められる地形的特徴量及びそれらの要素 [max, min, ave, stdv] をエリア毎にまとめ、多次元の特徴量ベクトルとして扱い、下記に記すユークリッド距離、コサイン類似度を用いて類似度計算を実施する。

1. ユークリッド距離

二点間の直線距離を算出する方法。値が小さい程、類似度が高いことを意味する。ベクトル間の距離が重要であり、ベクトルの向きには影響されない。

$$d(\vec{q}, \vec{d}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - d_i)^2}$$

2. コサイン類似度

二点間の角度を算出する方法。値は-1~+1を示し、+1に近いほど類似度が高いことを意味する。コサイン類似度はベクトルの向きが関係し、大きさに影響されない。

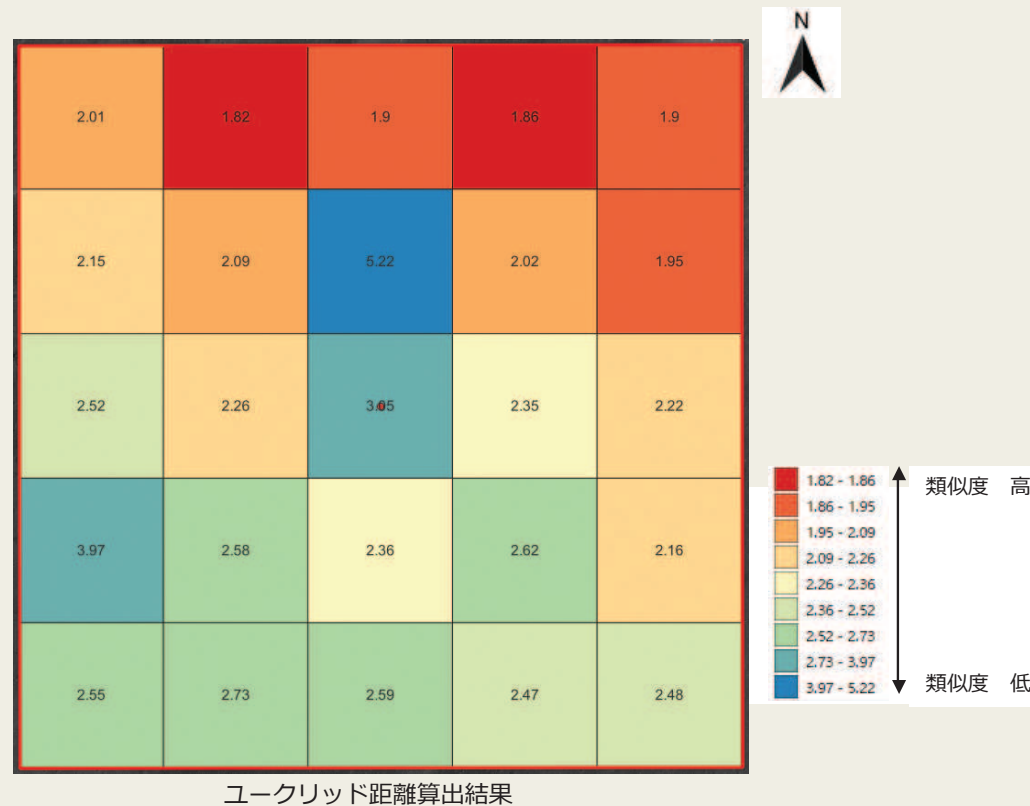
$$\cos(\vec{q}, \vec{d}) = \frac{\sum_{i=1}^n q_i d_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n q_i^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2}}$$

※本解析では各特徴量ベクトルに対し、正規化（ノルムの逆数をかけ）をして類似度解析を実施する。

地形的特徴量の類似度判定(2)

■ ユークリッド距離算出結果

鳥取砂丘の実験可能エリアと各月面グリッドにおけるユークリッド距離の算出結果を下図に示す。ユークリッド距離は数値が小さいほど特徴ベクトル間の距離が近い、つまり特徴が似た傾向にあると言える。本結果から赤いポリゴンにて示す北側エリアの方が、相対的に見て類似度が高く、エリアの南側については比較的低い傾向にあることが示された。



データ公開

- G情報空間センターにおいて、鳥取県側から点群等の数値データの公開を行っている。
- 6月前半に実施されたISTS2023において本プロジェクトの成果発表を行った。
- 機械特性等のデータはPlanetary Simulant Database等の国際的なデータベースに載るよう国内外へ発信を行っていく。
- 鳥大(乾地研)からも鳥取砂丘の変動に関する論文が投稿されている。



月面と鳥取砂丘の関係性のまとめ

調査・分析項目	実施内容	比較結果
月面と鳥取砂丘の地形的な特徴はどれくらい似ているか？	鳥取砂丘をドローンによる測量で3次元測定し、高精度な地形データを取得。 この地形データとNASAが所有する月面の高度データ(JAXA月探査機が着陸を予定している箇所を抽出)から得られる情報を比較して、標高や傾斜の特性などの分布度合を調査した。	月面上の限定的なエリアとの比較とはなるが、場所によっては同じような起伏や勾配といった地形的特徴を有することが確認できた。 ただし、月面上の大きなクレーターのような特殊な地形は検討の対象外としており今後の検討課題である。
月面と鳥取砂丘上で車両の走りやすさはどれくらい似ているか？	鳥取砂丘上の数地点で土木工学の地盤調査の知見を生かした手法により、砂の土壌強度を計測。これをアポロ計画時に調査された月面上の強度と比較した。 またJAXAが有する月面模擬フィールドも同等の方法で特性を取得し、比較に加えた。 土壌強度を知ることにより車両の走りやすさを推し量ることが可能。 また、砂丘と月面レゴリスの粒度分布や化学成分なども調査、比較した。	土壌強度の比較としては基本的に一般的な砂の性質を双方有しており乾燥状態であれば大きな乖離はないことは確認できた。 ただし砂丘の特性は天候によって大きく左右され、降雨降雪などにより砂地が固まり、より走りやすい状態となることは注意が必要である。 粒度分布は細砂、中砂成分が多いことや化学成分の比較としても概ね似たような性質を有していることが確認できた。

鳥取砂丘の特徴を最新の技術によりデジタルデータとして取得した。これにより様々な特徴を、過去に得られた月面データと定量的な比較が可能になった。比較の結果、月面上の限定されたエリアが対象とはなるものの、類似した地形的特徴や砂の強度を持っていることが確認できた。