

月面開発における地盤工学の貢献

～宇宙建設工学の創成に向けて～

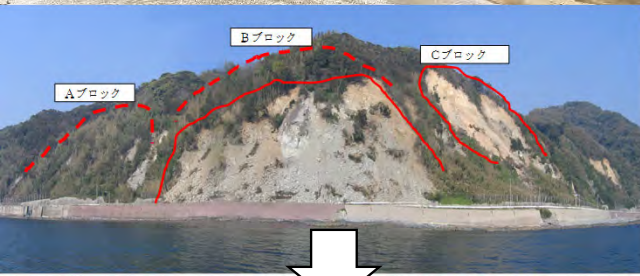
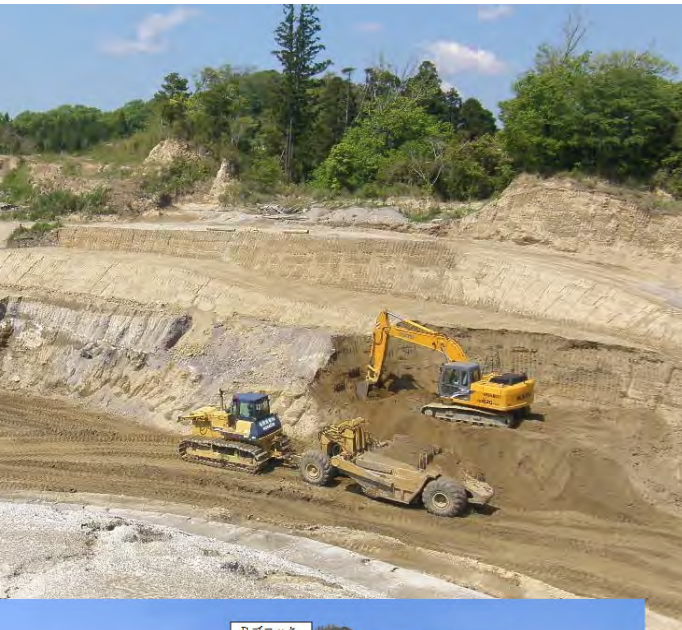
立命館大学 理工学部 環境都市工学科

小林 泰三 (kobat@fc.ritsumei.ac.jp)

ご質問等あればお気軽にご連絡ください。

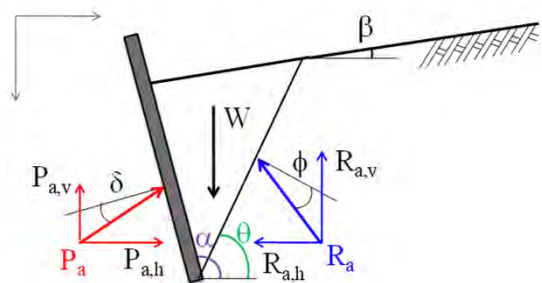
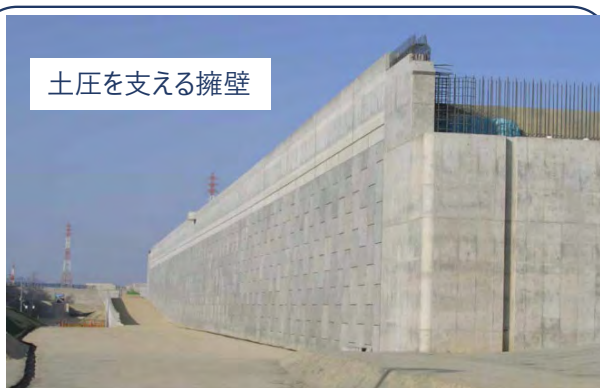
©JAXA/NHK

社会インフラ整備と地盤工学



土質力学 Soil Mechanics

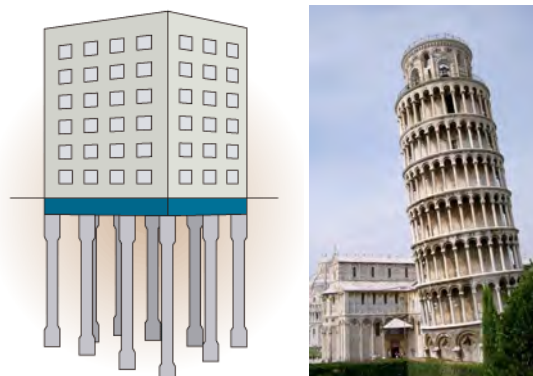
土圧問題 (Earth pressure)



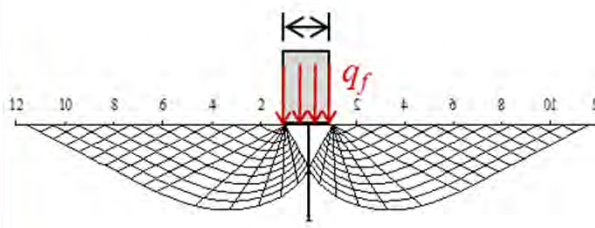
Coulomb/Rankineの土圧式

$$P = \frac{1}{2} \gamma H^2 K = \frac{1}{2} \gamma H^2 \tan\left(\frac{\pi}{4} \mp \frac{\phi'}{2}\right)$$

支持力問題 (Bearing capacity)



荷重を支える基礎地盤



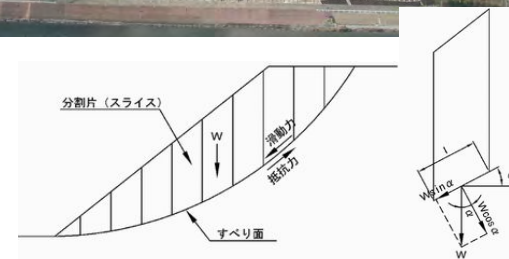
Terzaghiの支持力式

$$q_f = \frac{1}{2} \gamma B \cdot N_\gamma + c \cdot N_c + \sigma \cdot N_q$$

斜面安定問題 (Slope stability)



地震による斜面崩壊と復旧対策



Fellenius等の分割法

$$F_s = \frac{\sum_i \{c_i l_i + (W_i \cos \alpha_i - u_i l_i) \tan \phi_i\}}{\sum_i W_i \sin \alpha_i}$$

地質・地盤リスクマネジメント

地盤の不確実性をどこまで低減できるか？

表-1 リスクの要因とその要素の類型

区分	類型	要素
自然的要因	予測・把握が難しい地質	発生場の予測が困難な要因 (局所的な地盤脆弱部等)
		発生時期の予測が困難な要因 (地山劣化、落石、異常気象等)
		不均質性・不規則性が著しい地質
人為的要因	解釈・工学的判断の誤り	地形に関するリスクの見逃し
		地質構造・地質特性に関するリスクの見逃し
		地盤物性の調査不足や評価不足
		地形に関するリスクの見誤り
		地質構造に関するリスクの見誤り
	地質に対する知識不足	リスクの兆候(事象)の見誤り
		地盤条件に不適な設計 不適切な施工の実施
	情報共有・伝達の不備	リスクに関する情報共有・伝達の不備
	地質調査の質・量の不足	地質調査未実施
		調査計画の不適合
地形図の精度不足		
事業遂行上の問題	コスト優先(災害復旧)	
	事業スケジュールを優先(調査不十分)	

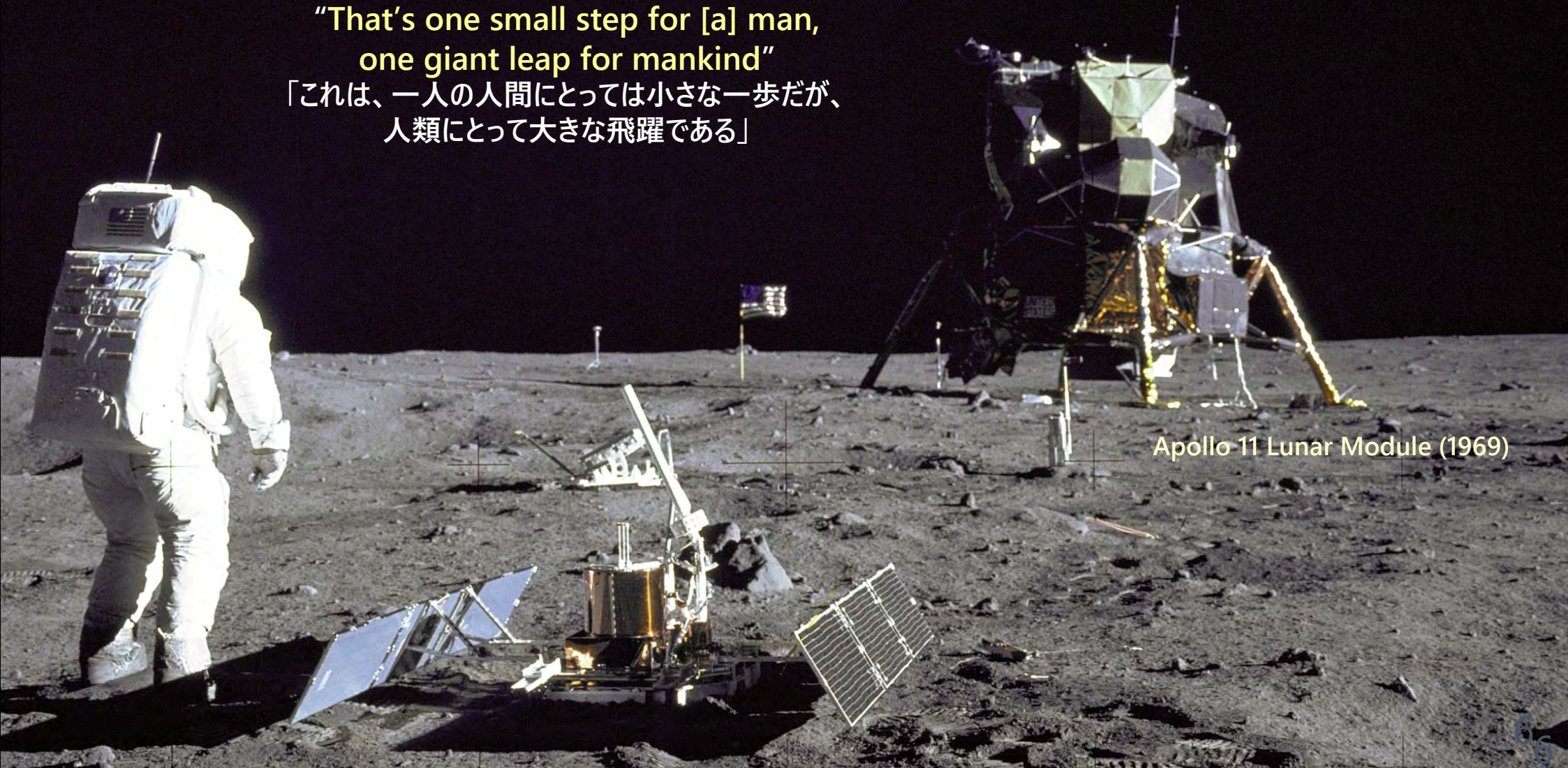
“実際に行ってやってみないと分からない”からの脱却

- これまで違って、重力天体下での活動では、レゴリスと接触する作業が多々見込まれる。
- 探査ロボット・観測機器の設計・運用、将来の基地建設に向けた土木設計には、レゴリスの挙動予測（土質力学・地盤工学的検討）が不可欠。
- 月面は未解明な点が多く、多くの不確実性（地質・地盤リスク）が残されている。
- 持続的な探査、月面開発を実施していくためには、月面の**地質・地盤リスクアセスメント（地盤調査）**、**地質・地盤リスクマネジメント**の地盤工学的スキームの構築が必要。



Apollo計画 (1961-1972)

"That's one small step for [a] man,
one giant leap for mankind"
「これは、一人の人間にとっては小さな一歩だが、
人類にとって大きな飛躍である」



Apollo 11 Lunar Module (1969)

アポロ計画におけるSoil Mechanics Studies (アポロ計画で分かったこと)

Lunar Sourcebook, Chapter 9: Physical Properties of the Lunar Surface
W. D. Carrier III, G. R. Olhoeft and W. Mendell

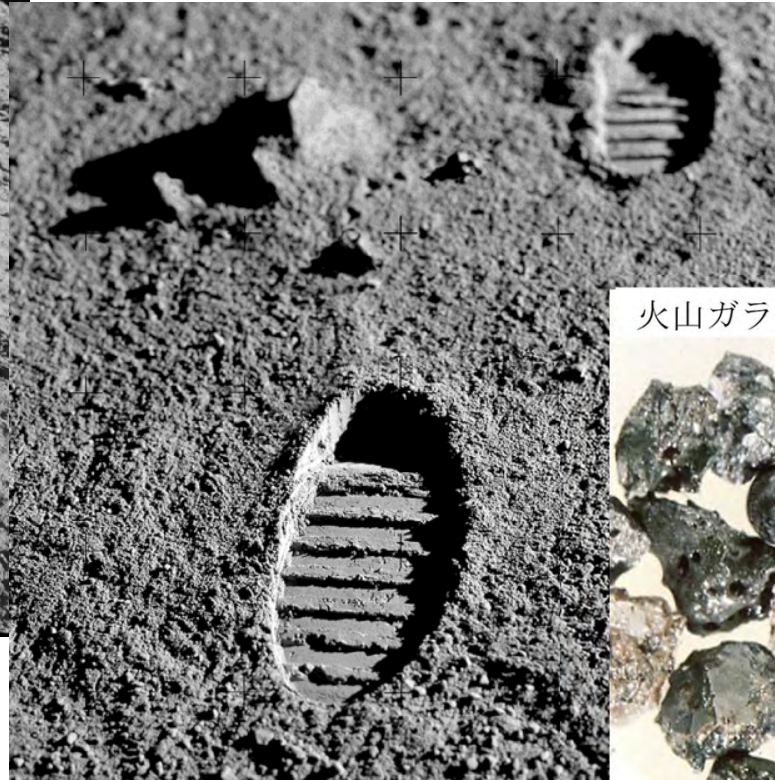
https://www.lpi.usra.edu/publications/books/lunar_sourcebook/

月レゴリス

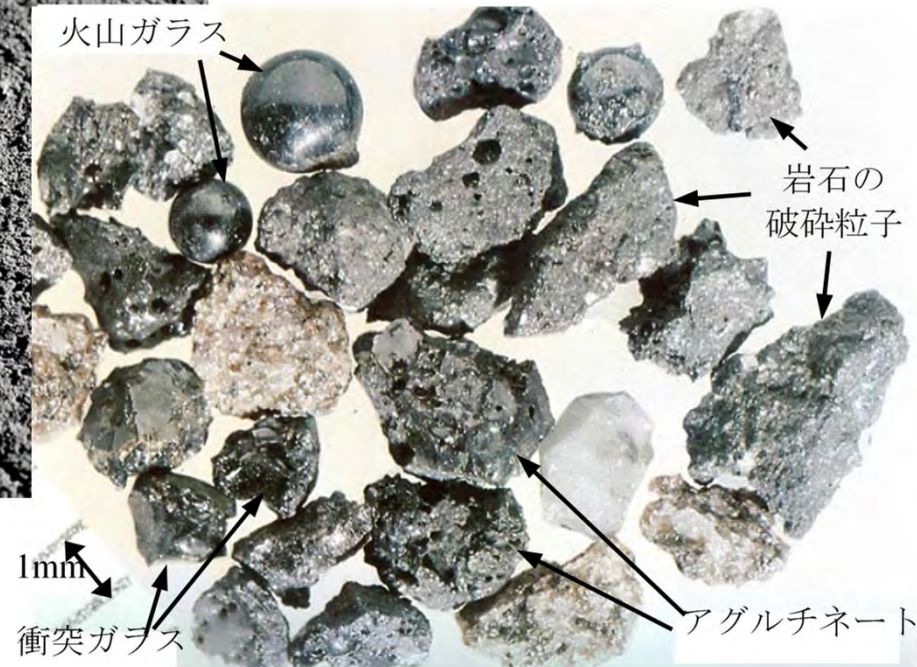


アポロ12号宇宙飛行士が撮影した
サーバイヤ-3号の着陸機パッド

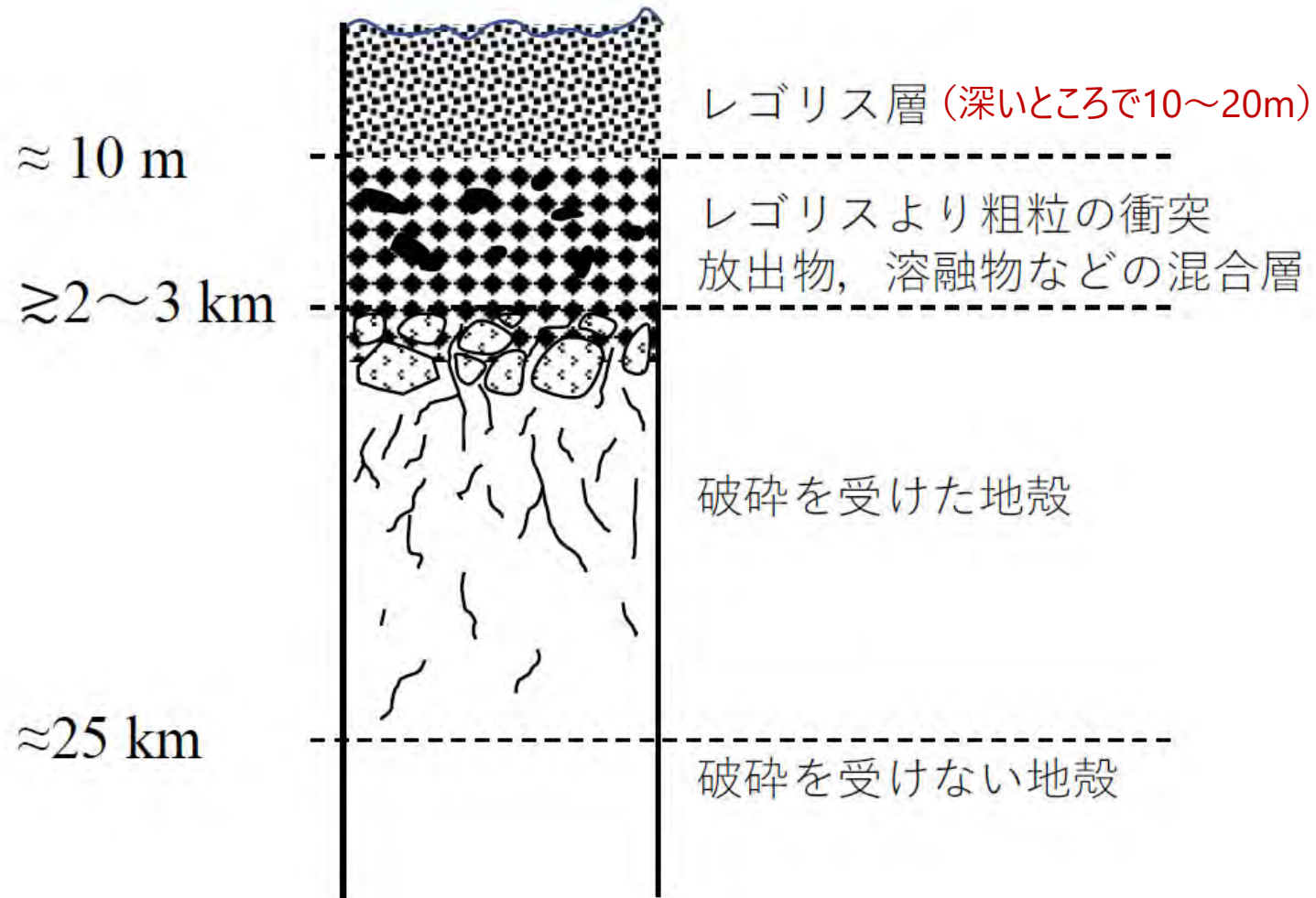
アポロ宇宙飛行士の足跡



リターンサンプルの拡大写真
(1mmふるい残留試料)



月の地殻の断面構造



アポロ計画の土質調査

∟



コーン貫入試験を実施する宇宙飛行士

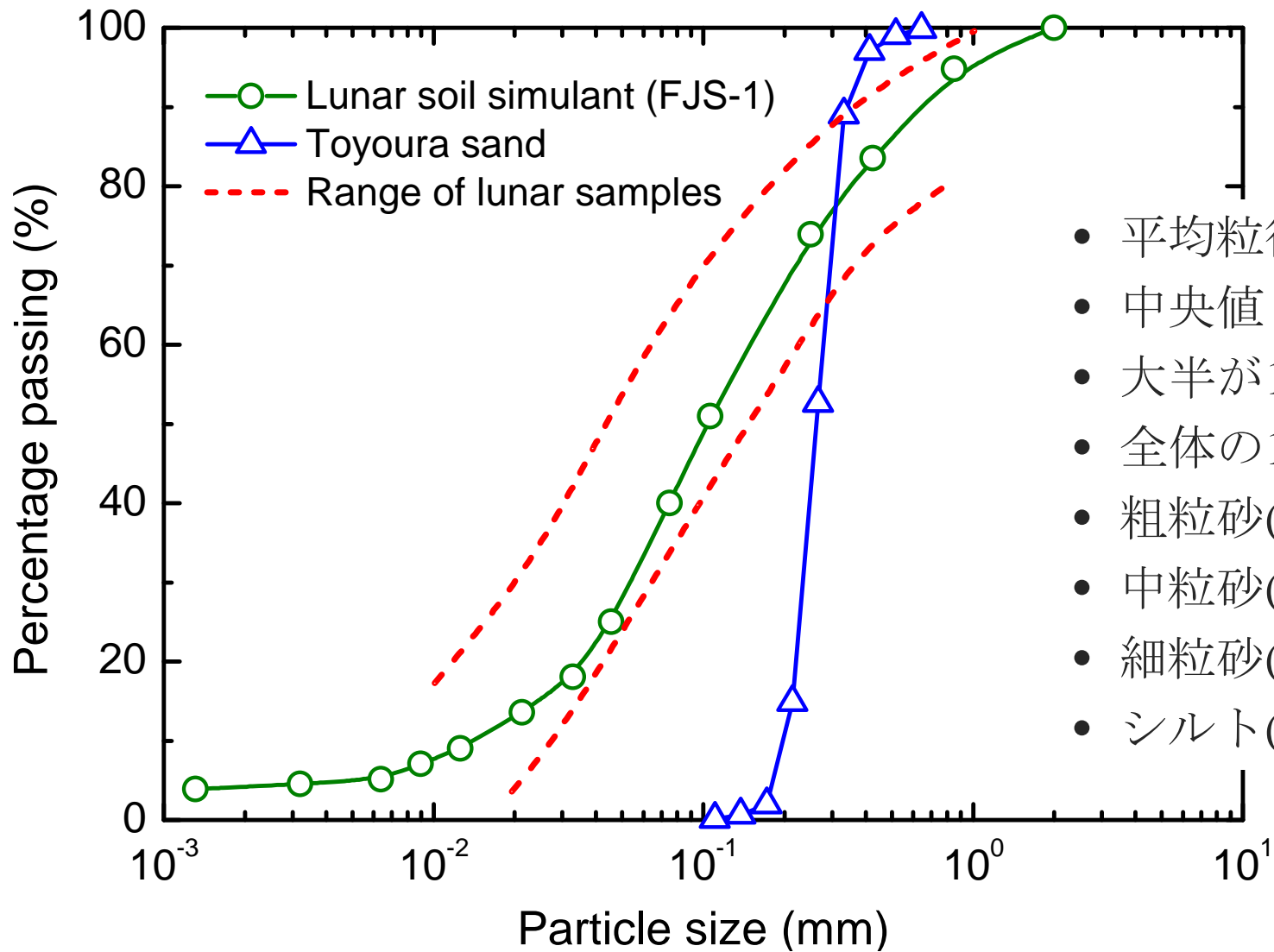
- Particle size, Particle shape
- Specific gravity
- Bulk density and Porosity
- Relative density
- Compressibility, C_c , C_r
- OCR, maximum past pressure
- Strength parameters, c , ϕ
- Permeability, diffusibility
- Ultimate bearing capacity
- Allowable bearing capacity
- Slope stability
- Trafficability

アポロ計画の観測項目

Mission	Launch data	Accomplishment	atmosphere and ion studies	surface chemistry	chemical mapping from orbit	dust analysis	surface-based geophysics	meteoroid studies	photography	radiation environment studies	sample returned to Earth	selenodesy measurements	soil mechanics studies	solar wind studies
Luna 1	01/02/59	first lunar flyby												
Luna 2	09/12/59	first lunar impact												
Luna 3	10/04/59	first photo of lunar farside							○					
Ranger 3	01/26/62	missed the Moon by 36,793 km												
Luna 4	04/02/63	missed the Moon by 8,500 km												
Ranger 4	04/23/62	crashed on the lunar farside												
Ranger 5	10/18/62	missed the Moon by 724 km												
Ranger 6	01/30/64	impact lander; television failed												
Ranger 7	07/28/64	impact lander							○					
Ranger 8	02/17/65	impact lander							○					
Ranger 9	03/21/65	impact lander							○					
Luna 5	05/09/65	crashed on the Moon												
Luna 6	06/08/65	missed the Moon by 161,000 km												
Zond 3	07/18/65	photographed lunar farside							○					
Luna 7	10/04/65	crashed on the Moon												
Luna 8	12/03/65	crashed on the lunar farside												
Luna 9	01/31/66	first lunar soft landing							○					
Luna 10	03/31/66	first lunar satellite										○		
Surveyor 1	05/30/66	first soft-landed robot laboratory			○				○				○	
Lunar Orbiter 1	08/10/66	lunar satellite						○	○	○				
Luna 11	08/24/66	lunar satellite						○	○					
Luna 12	10/22/66	lunar satellite						○	○					
Lunar Orbiter 2	11/06/66	lunar satellite						○	○	○				
Luna 13	12/21/66	soft landing on the Moon		○										
Lunar Orbiter 3	02/05/67	lunar satellite						○	○	○				
Surveyor 3	04/17/67	soft-landed robot laboratory							○				○	
Lunar Orbiter 4	05/04/67	lunar satellite						○	○	○				
Explorer 35	07/19/67	lunar satellite												
Lunar Orbiter 5	08/01/67	lunar satellite						○	○	○				
Surveyor 5	09/08/67	soft-landed robot laboratory		○										○
Surveyor 6	11/07/67	soft-landed robot laboratory		○										○
Surveyor 7	01/07/68	soft-landed robot laboratory		○										○
Luna 14	04/07/68	lunar satellite												
Zond 5	09/14/68	first lunar flyby and Earth return												
Zond 6	11/10/68	lunar flyby and Earth return							○					
Apollo 8 (G)	12/21/68	first humans to orbit the Moon							○					
Apollo 10 (G)	05/18/69	first docking maneuvers in lunar orbit							○					
Luna 15	07/13/69	crashed on the Moon												
Apollo 11 (H)	07/16/69	first humans on the Moon (07/20/69)				○	○		○		○		○	○
Zond 7	08/08/69	lunar flyby and Earth return							○					
Apollo 12 (H)	11/14/69	second human landing on the Moon	○			○		○			○		○	○
Luna 16	09/12/70	first robot sample return (100 g)							○		○			
Luna 17	11/10/70	first robot rover (322 days, 10.5 km)		○					○	○				○
Apollo 13 (H)	04/11/70	aborted human landing												
Zond 8	10/20/70	lunar flyby and Earth return							○					
Apollo 14 (H)	01/31/71	third human landing on the Moon		○		○	○		○		○		○	○
Apollo 15 (J)	07/26/71	fourth human landing on the Moon	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○
Luna 18	09/02/71	crashed on the Moon												
Luna 19	09/28/71	lunar satellite							○				○	
Luna 20	02/14/72	second robot sample return (30 g)							○		○			
Apollo 16 (J)	04/16/72	fifth human landing on the Moon	○	○	○		○		○	○	○	○	○	○
Apollo 17 (J)	12/07/72	sixth human landing on the Moon				○	○		○	○	○	○	○	○
Luna 21	01/08/73	robot lunar rover (139 days, 37 km)		○					○	○				○
Luna 22	05/29/74	lunar satellite							○					
Luna 23	10/28/74	failed robot sampler									○			
Luna 24	08/09/76	third robot sample return (170 g)												

Mission	Launch data	particle size, particle shapes	specific gravity	bulk density and porosity	relative density	compressibility, C _c , Cr	coefficient of earth pressure at rest	OCR, maximum past pressure	strength parameters, c, φ	permeability, diffusivity	ultimate static bearing capacity	ultimate dynamic bearing capacity	allowable static bearing capacity	allowable dynamic bearing capacity	slope stability	trafficability
Luna 1	01/02/59															
Luna 2	09/12/59															
Luna 3	10/04/59															
Ranger 3	01/26/62															
Luna 4	04/02/63															
Ranger 4	04/23/62															
Ranger 5	10/18/62															
Ranger 6	01/30/64															
Ranger 7	07/28/64															
Ranger 8	02/17/65															
Ranger 9	03/21/65															
Luna 5	05/09/65															
Luna 6	06/08/65															
Zond 3	07/18/65															
Luna 7	10/04/65															
Luna 8	12/03/65															
Luna 9	01/31/66															
Luna 10	03/31/66															
Surveyor 1	05/30/66			○												
Lunar Orbiter 1	08/10/66															
Luna 11	08/24/66															
Luna 12	10/22/66															
Lunar Orbiter 2	11/06/66															
Luna 13	12/21/66															
Lunar Orbiter 3	02/05/67									○						
Surveyor 3	04/17/67															
Lunar Orbiter 4	05/04/67															
Explorer 35	07/19/67															
Lunar Orbiter 5	08/01/67															
Surveyor 5	09/08/67															
Surveyor 6	11/07/67															
Surveyor 7	01/07/68															
Luna 14	04/07/68															
Zond 5	09/14/68															
Zond 6	11/10/68															
Apollo 8 (G)	12/21/68															
Apollo 10 (G)	05/18/69															
Luna 15	07/13/69															
Apollo 11 (H)	07/16/69	○	○	○	○					○	○		○			
Zond 7	08/08/69															
Apollo 12 (H)	11/14/69	○	○	○	○	○				○	○		○			
Luna 16	09/12/70															
Luna 17	11/10/70															
Apollo 13 (H)	04/11/70															
Zond 8	10/20/70															
Apollo 14 (H)	01/31/71	○	○	○	○											
Apollo 15 (J)	07/26/71	○	○	○	○					○			○			
Luna 18	09/02/71															
Luna 19	09/28/71															
Luna 20	02/14/72															
Apollo 16 (J)	04/16/72	○	○	○	○	○							○	○		
Apollo 17 (J)	12/07/72	○	○	○	○											
Luna 21	01/08/73															
Luna 22	05/29/74															
Luna 23	10/28/74															
Luna 24	08/09/76															

粒度



- 平均粒径 : $70 \mu\text{m}$
- 中央値 : $40 \sim 130 \mu\text{m}$
- 大半が 1mm 以下
- 全体の $10 \sim 20\%$: $20 \mu\text{m}$
- 粗粒砂 ($2.0 \sim 4.75 \text{ mm}$) : 2%
- 中粒砂 ($0.425 \sim 2.0 \text{ mm}$) : 14%
- 細粒砂 ($0.074 \sim 0.425 \text{ mm}$) : 33%
- シルト (0.074 mm 以下) : 51%

比重・かさ密度

https://www.lpi.usra.edu/publications/books/lunar_sourcebook/

比重

Agglutinate and glass particles 1.0 to >3.32
 Basalt particles >3.32
 Breccia particles 2.9 to 3.10

Recommended typical value: 3.1

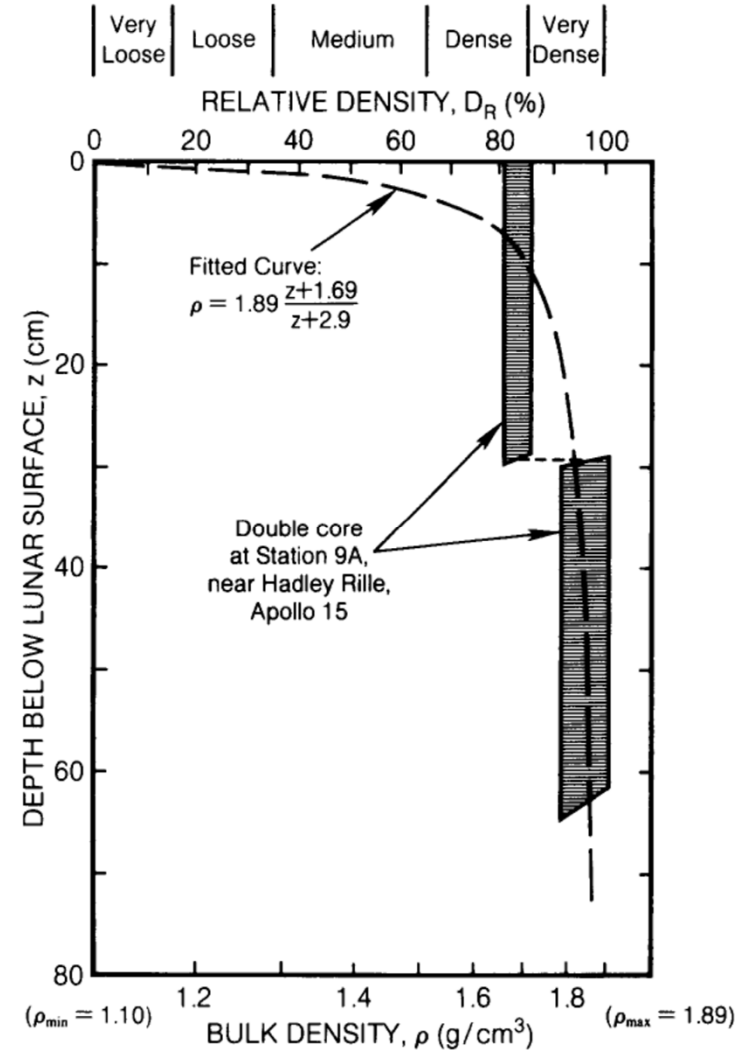
玄武岩の鉄

かさ密度

Average Bulk Density (g/cm ³)	Depth Range (cm)
1.50 ± 0.05	0 - 15
1.58 ± 0.05	0 - 30
1.74 ± 0.05	30 - 60
1.66 ± 0.05	0 - 60

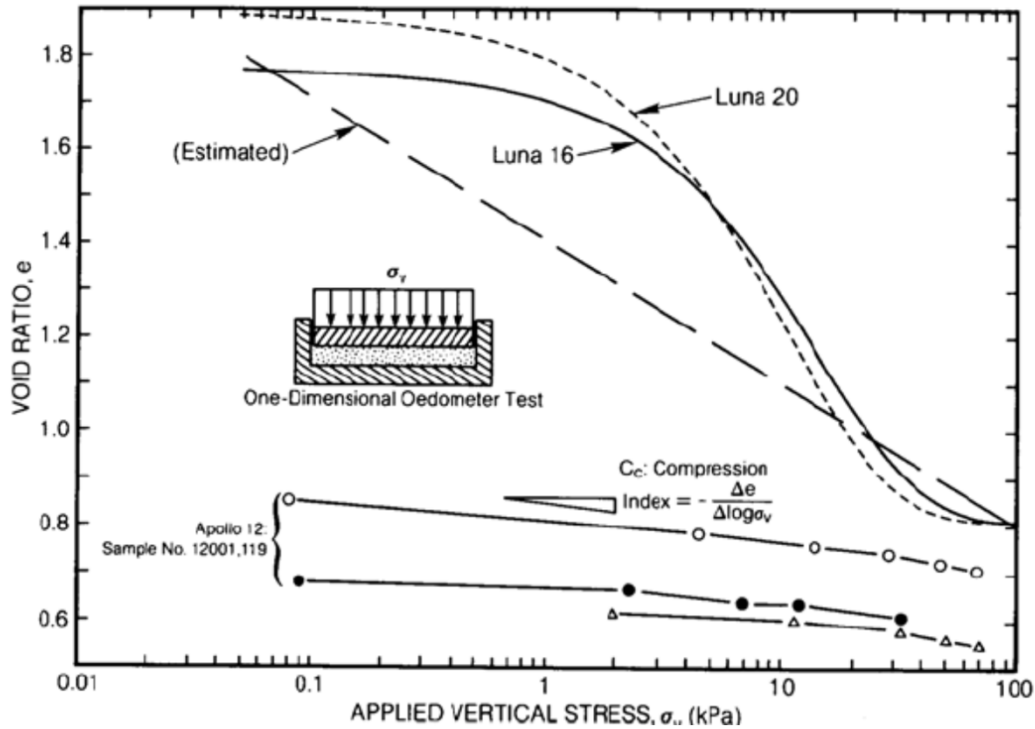
相対密度

Depth Range (cm)	Relative Density (%)	Description
0 - 15	65 ± 3	Medium to dense
0 - 30	74 ± 3	Dense
30 - 60	92 ± 3	Very dense
0 - 60	83 ± 3	Dense

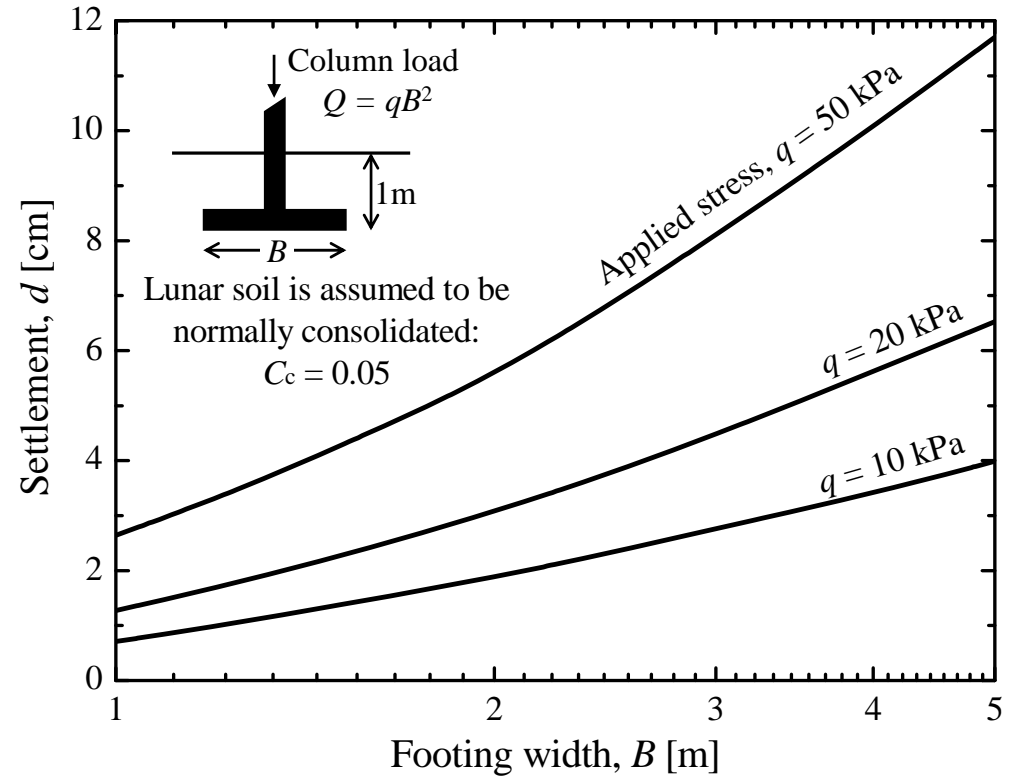


月サンプルの圧縮試験 ⇒ 構造物の沈下量予測

https://www.lpi.usra.edu/publications/books/lunar_sourcebook/



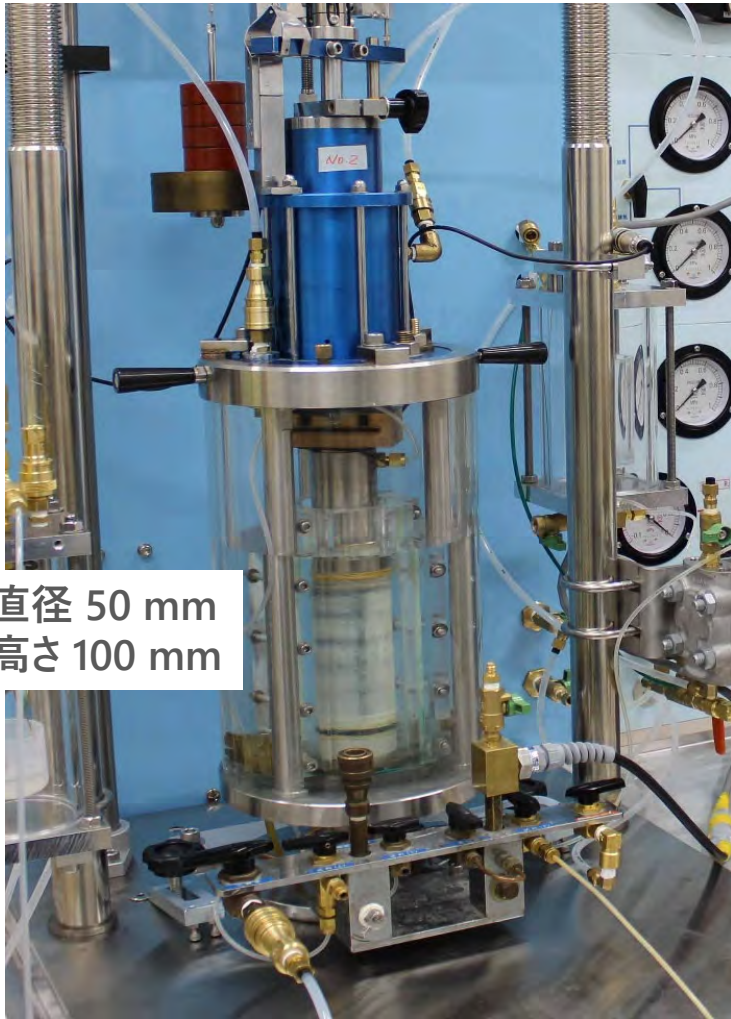
圧縮試験によって得られたe-logp曲線



月面構造物の沈下量予測

圧縮の最終沈下量予測式：
$$d = \sum_{j=1}^n \frac{C_j}{1 + e_j} \Delta H_j \log \left(\frac{\sigma_{ij} + \Delta \sigma_j}{\sigma_{ij}} \right)$$

月サンプルのせん断試験 ⇒ 強度定数 (c, ϕ)

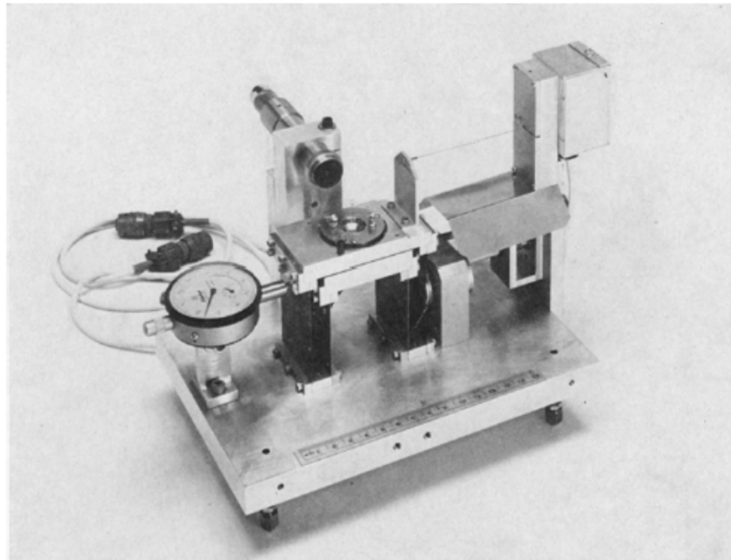


直径 50 mm
高さ 100 mm

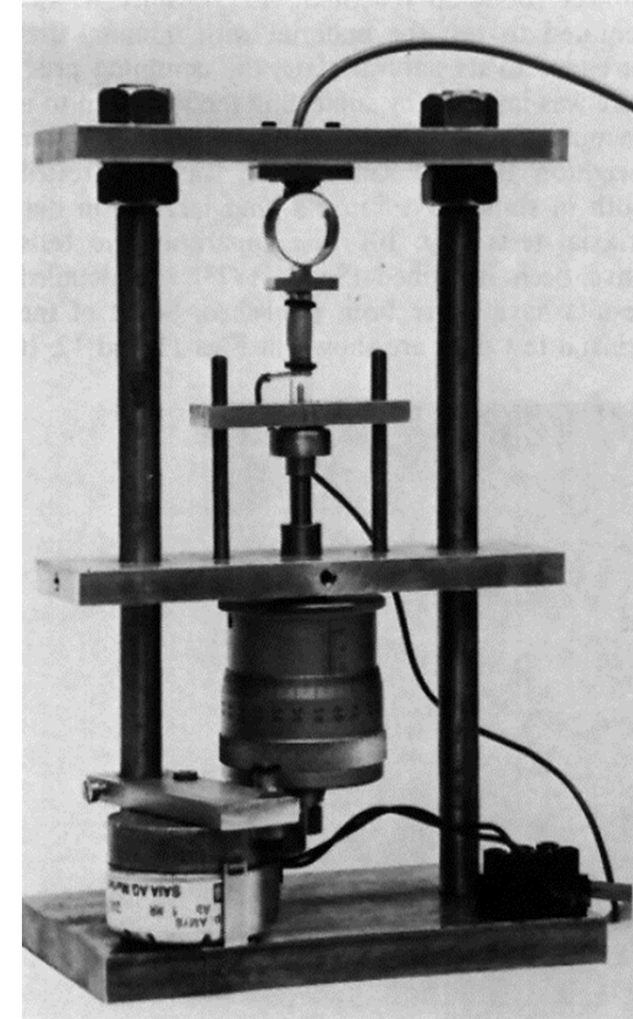
地上で用いる一般的な試験装置



直径 5 mm×深さ 5mm
質量 : 1.3 g !!



Carrier and Jaffe, et al.(1972)



Scott (1987)

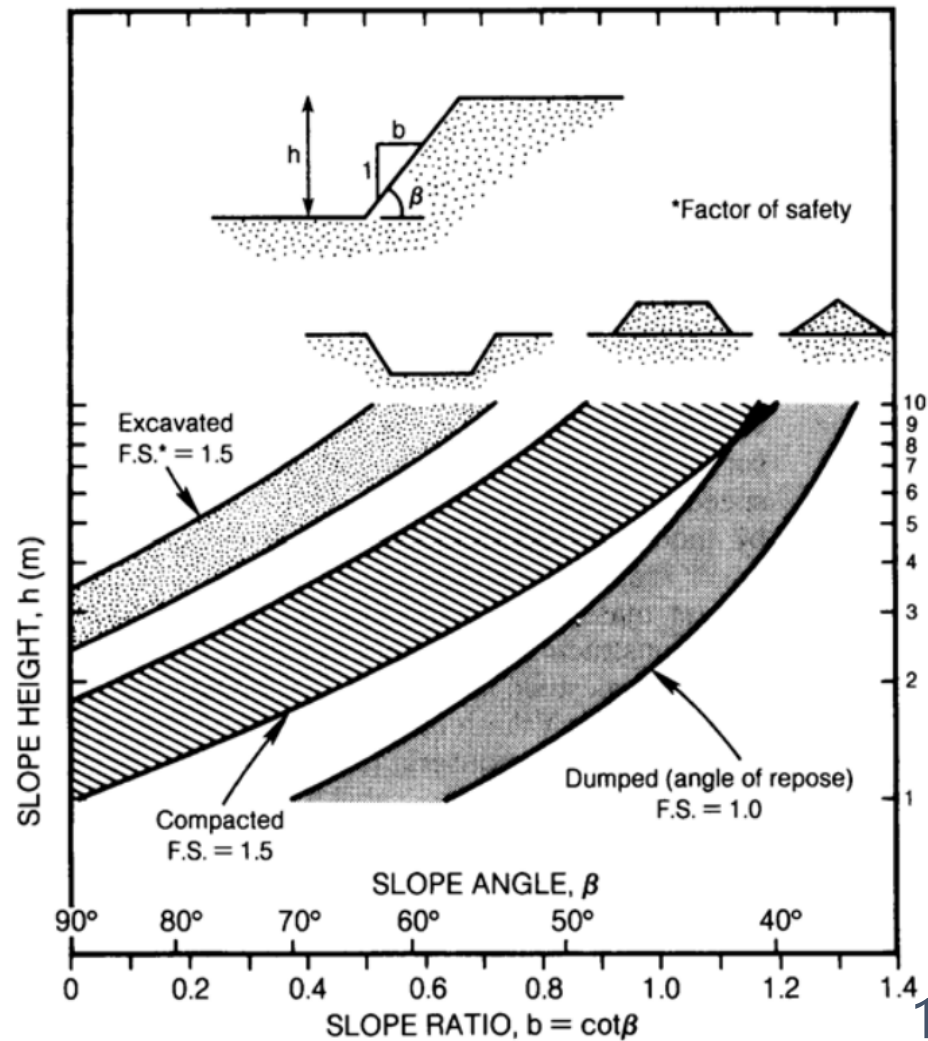
月レゴリスの強度定数 ⇒ 支持力、土圧、斜面安定

https://www.lpi.usra.edu/publications/books/lunar_sourcebook/

強度定数 (c, ϕ) のBest Estimate

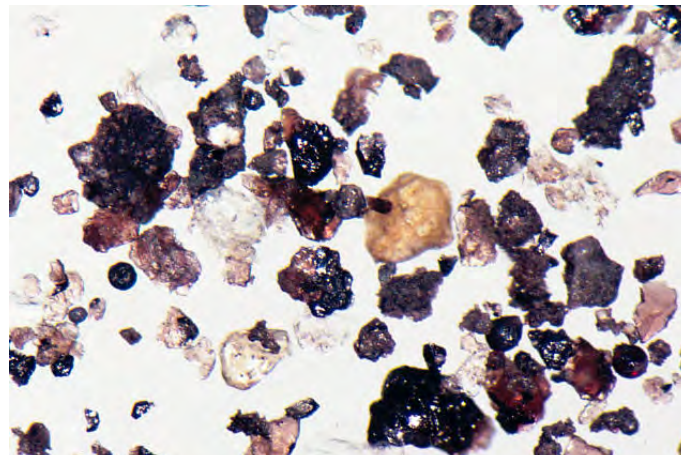
深さ (cm)	粘着力 c (kPa)		内部摩擦角 ϕ (deg)	
	平均	範囲	平均	範囲
0-15	0.52	0.44 ~ 0.62	42	41 ~ 43
0-30	0.90	0.74 ~ 1.1	46	44 ~ 47
30-60	3.0	2.4 ~ 3.8	54	52 ~ 55

月面人工斜面の限界高さ

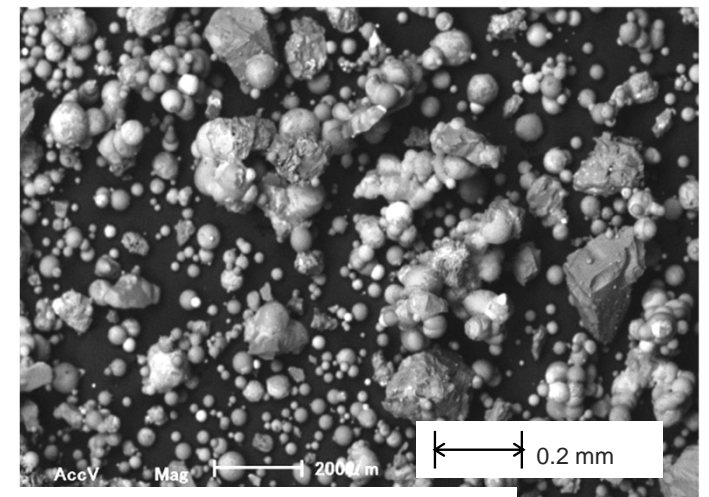
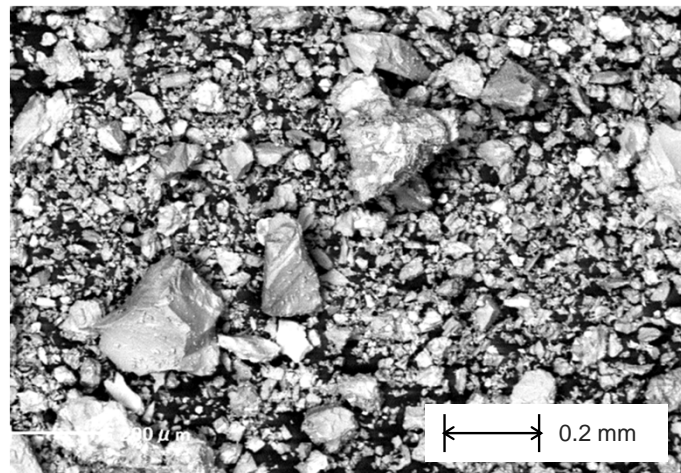
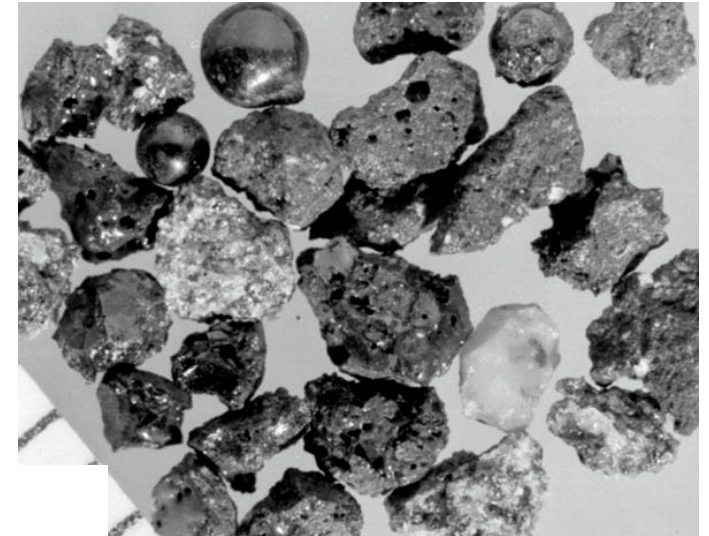


月模擬土（レゴリスシミュラント） を用いた地上研究

レゴリス／レゴリスシミュラント

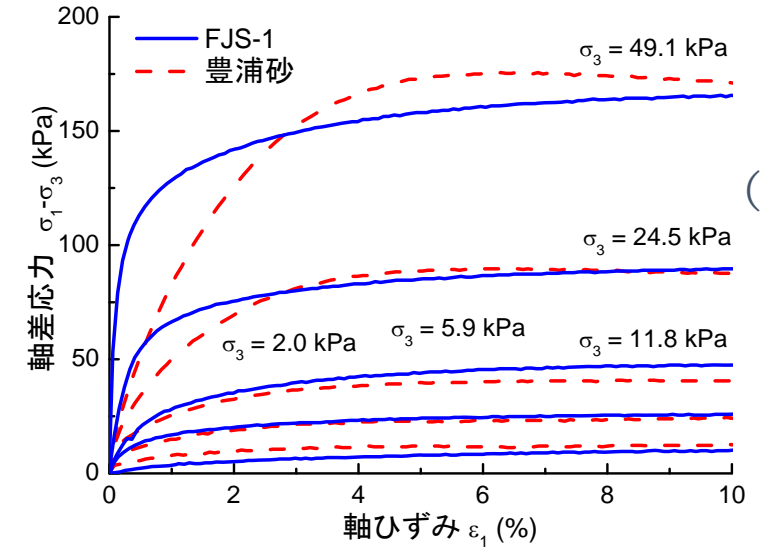
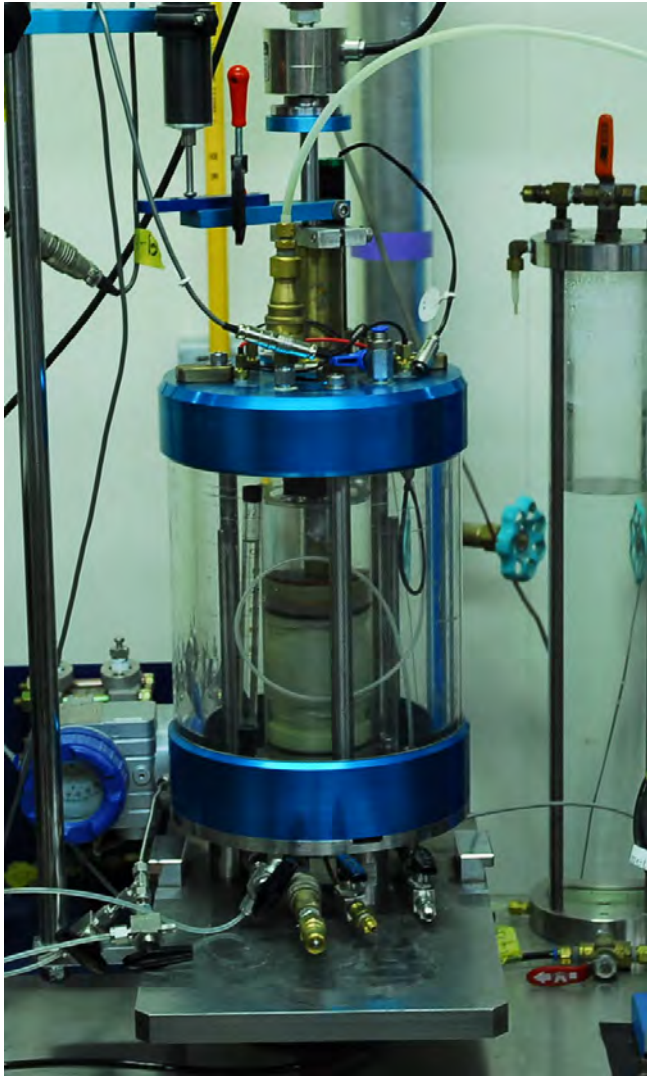


アポロが持ち帰った月レゴリス

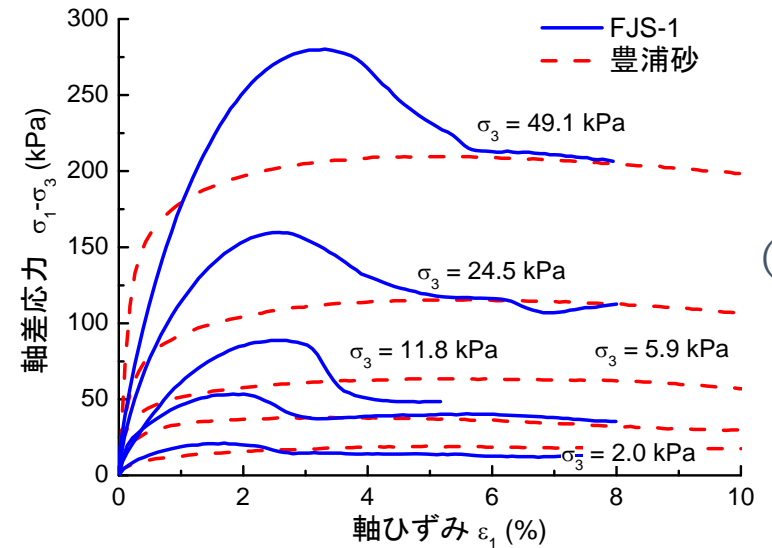


レゴリス シミュラント (人工月面模擬土) FJS-1 produced by 清水建設

地上砂と月面土、土要素レベルでの違い



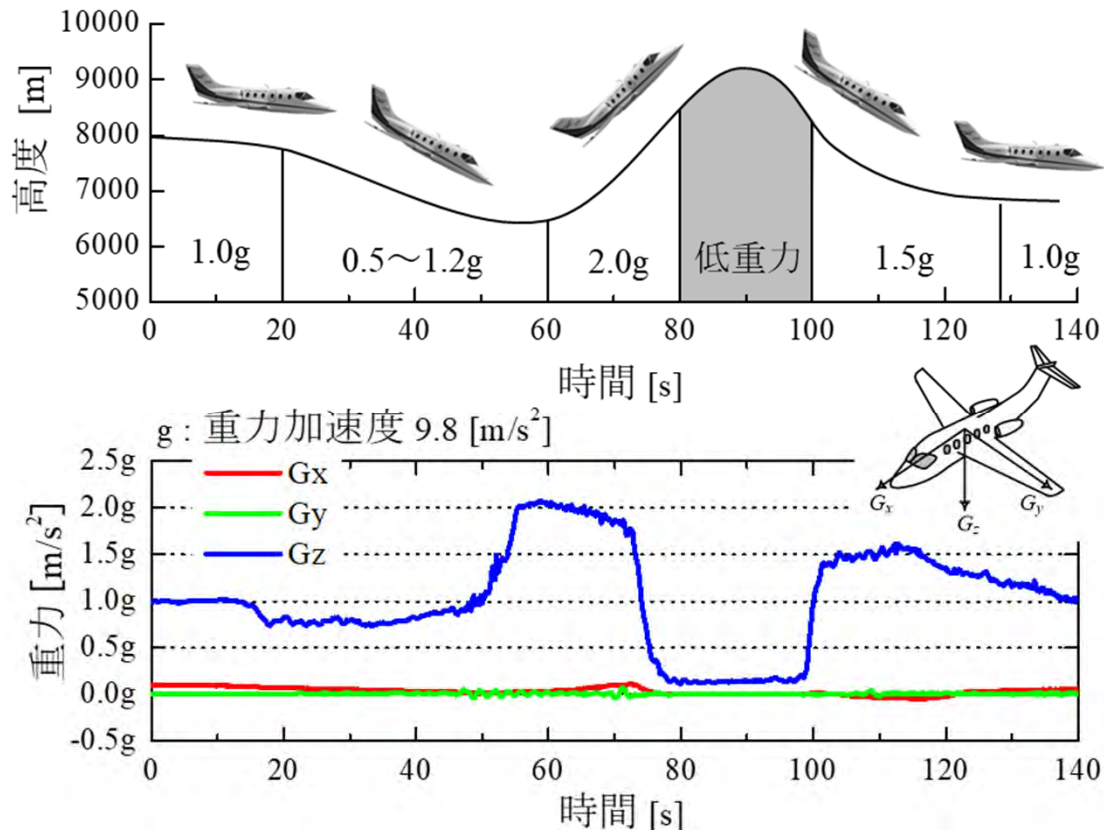
中詰め
(Dr50%)



密詰め
(Dr80%)

低重力場におけるレゴリスの挙動

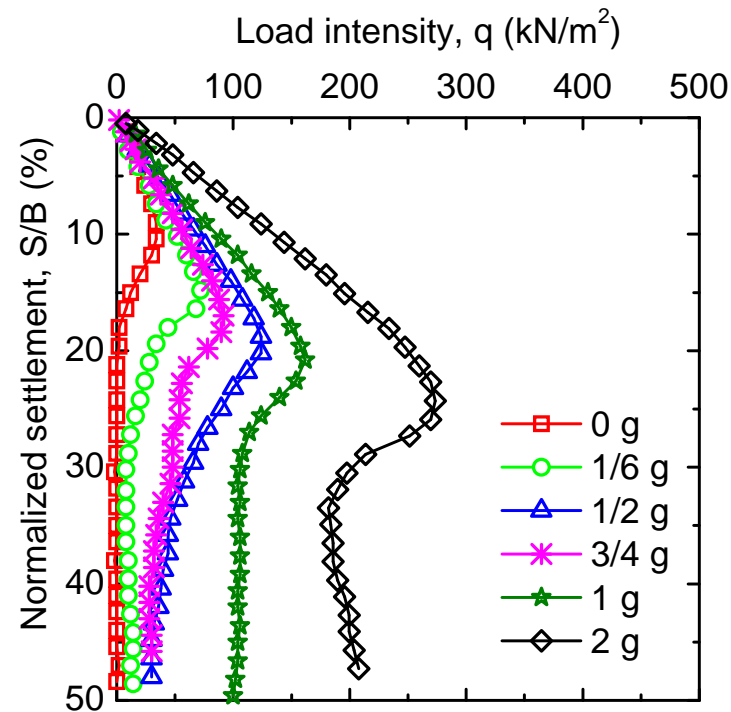
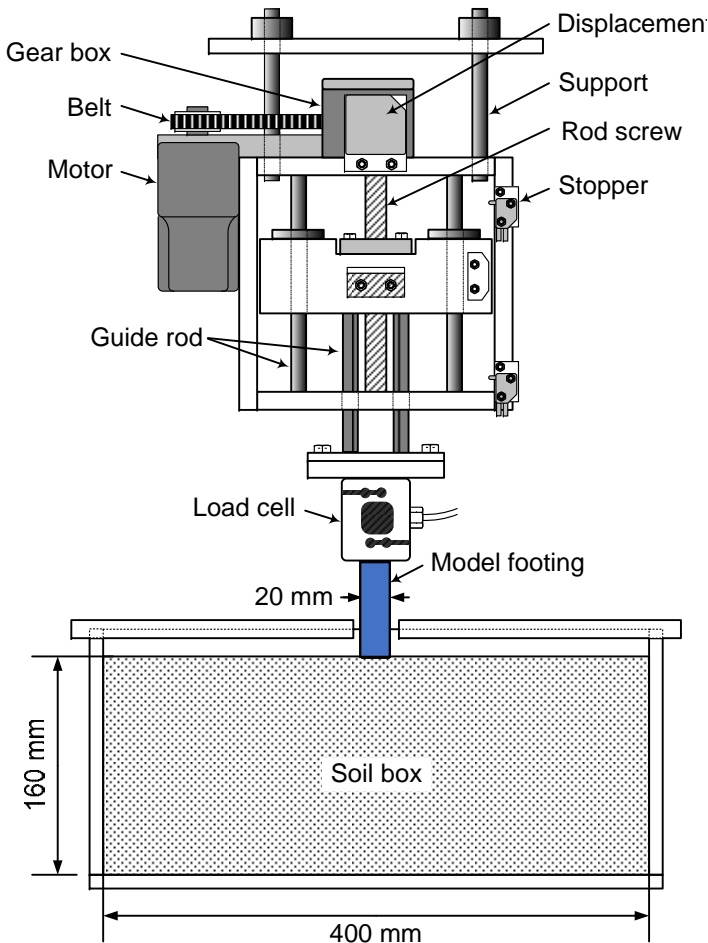
Parabolic Flight Experiment



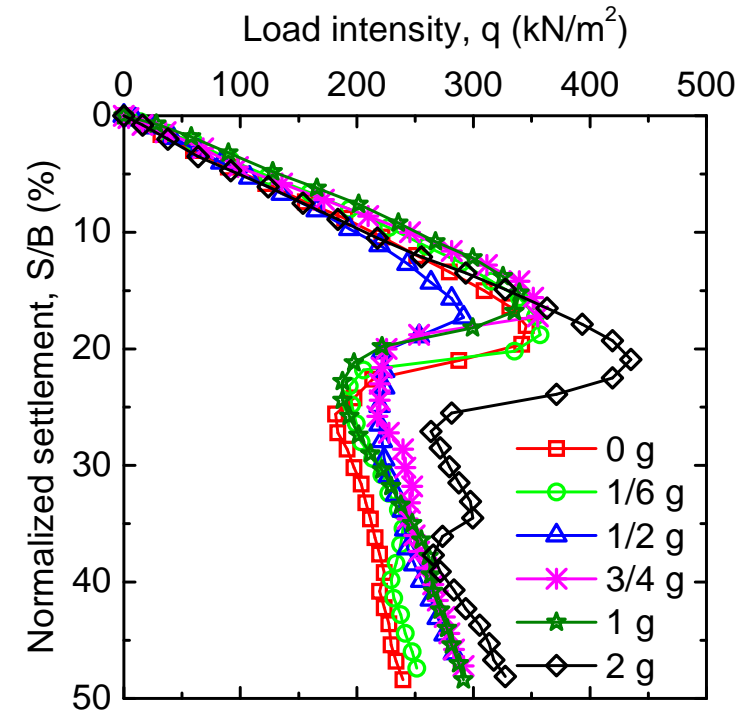
放物線飛行の間（高低差：約3,000m）、20-40 秒の低重力場が実現する

支持力は理論通り重力に比例するのか？

Terzaghiの支持力公式：
$$q_u = cN_c + p_0N_q + \frac{1}{2} \rho g B N_\gamma$$



地上砂 (豊浦砂)

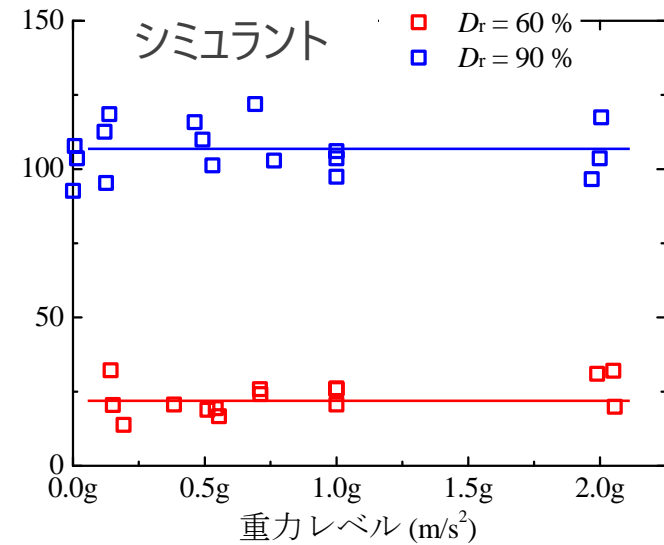
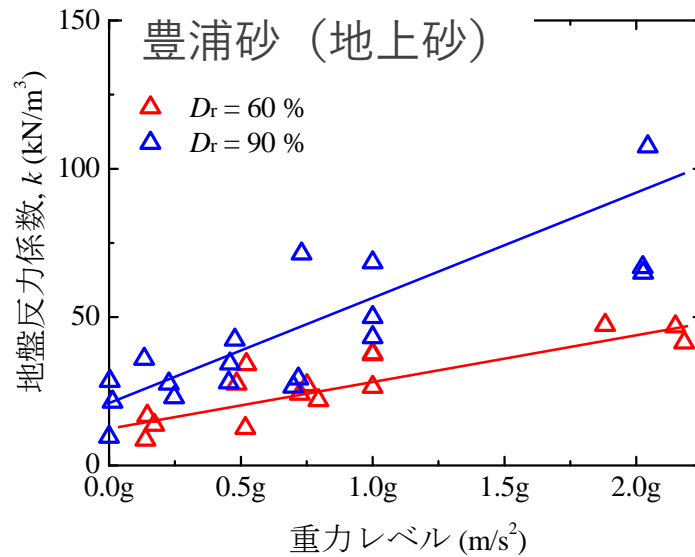


月面模擬土 (FJS-1)

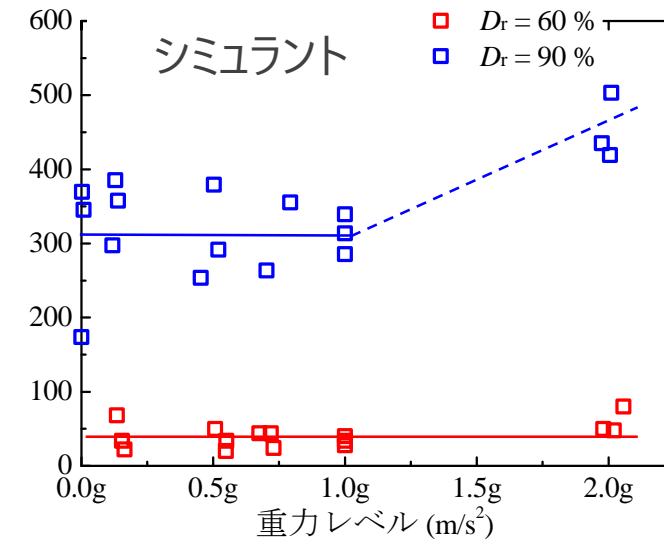
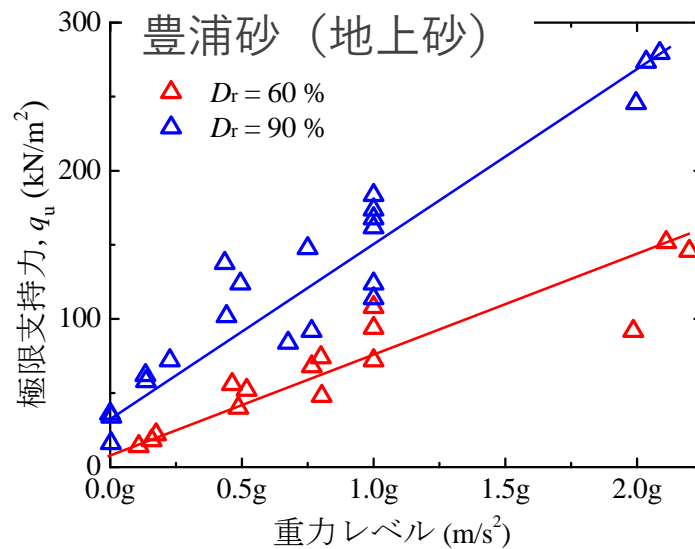
T. Kobayashi, et. al, Bearing capacity of shallow foundations in low gravity environments, Soils and Foundations, 49(1), 115-134, 2009

支持力は理論通り重力に比例するのか？

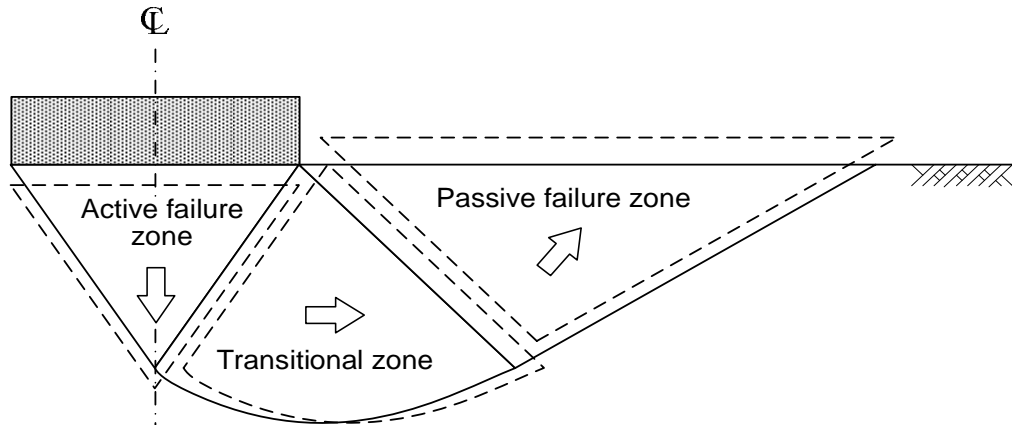
地盤反力係数 →



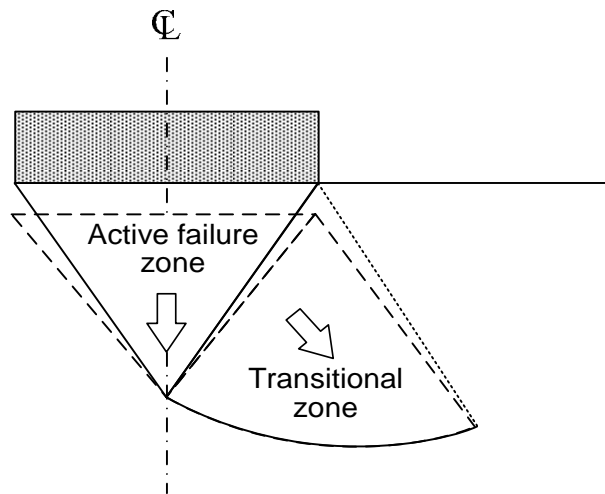
極限支持力 →



圧縮性 ⇒ 破壊モード ⇒ 重力依存性



全般せん断（豊浦砂：非圧縮性）



局所せん断（レゴリス：圧縮性）

粘着力項 上載圧項 **自重項**

$$q = cN_c + p_0N_q + \frac{1}{2}\rho gBN_\gamma$$

地盤の圧縮性の違い
(土の特殊性)



破壊領域（破壊モード）の違い



内部消散エネルギーの違い



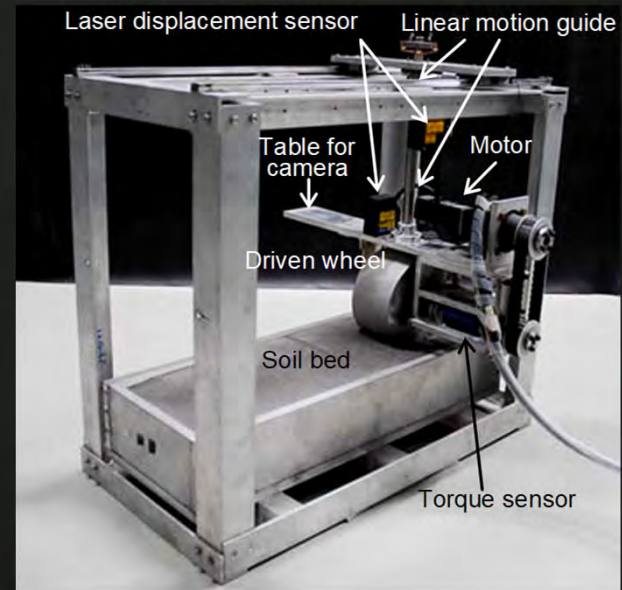
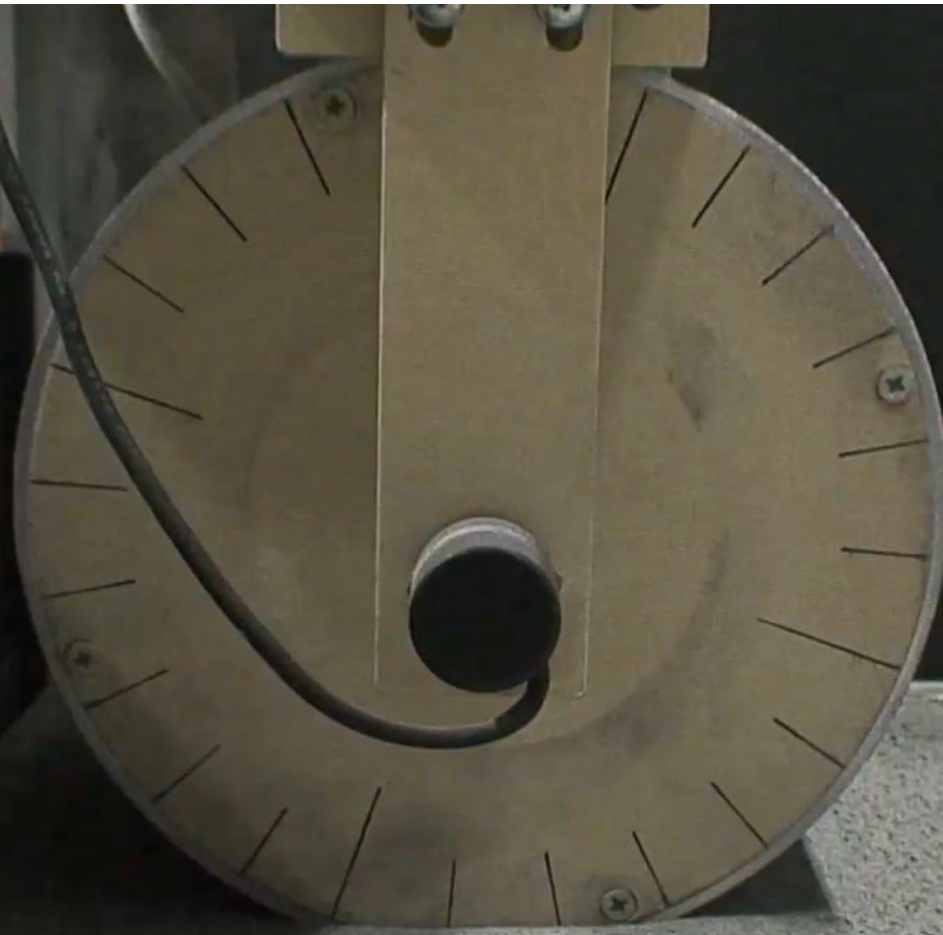
重力依存性の違い
(重力の影響)

Spirit on Mars got stuck in a sand trap in 2009



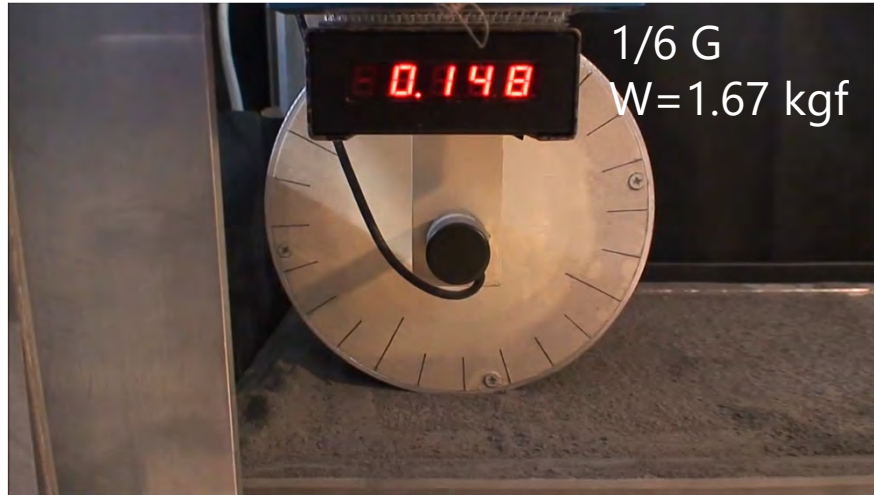
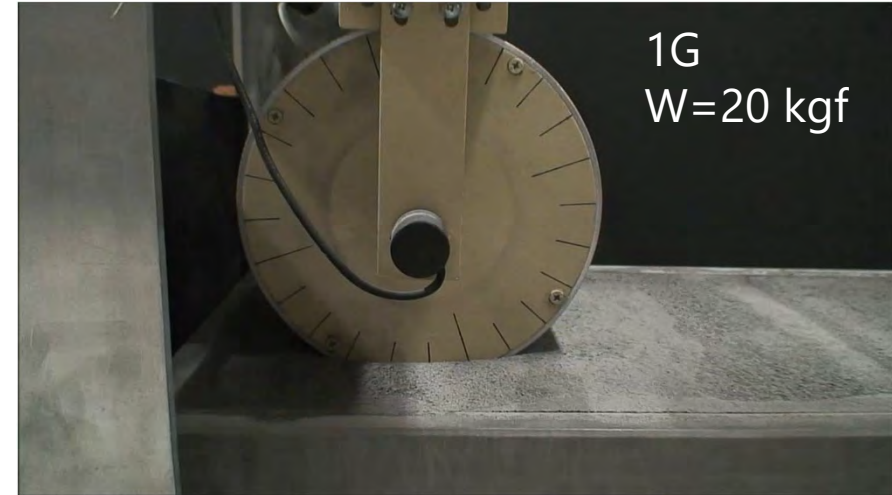
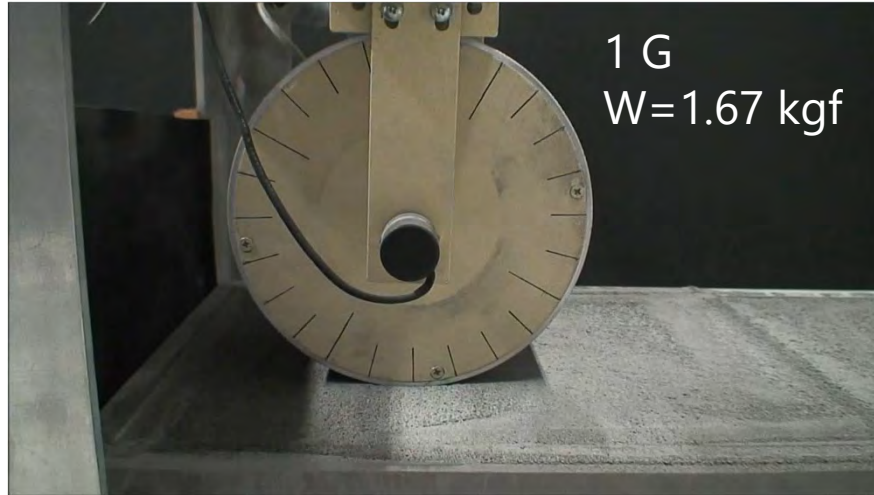
刚性車輪

質量 10 kg
車輪径 15 cm
車輪幅 8 cm



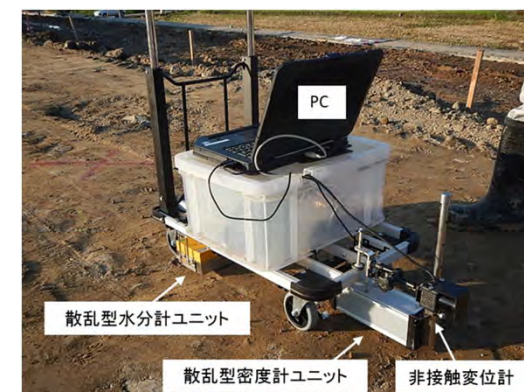
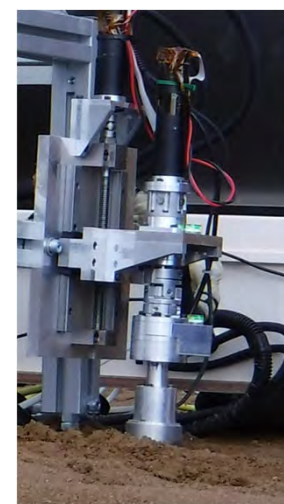
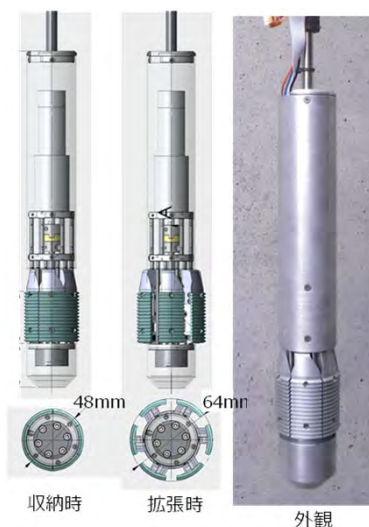
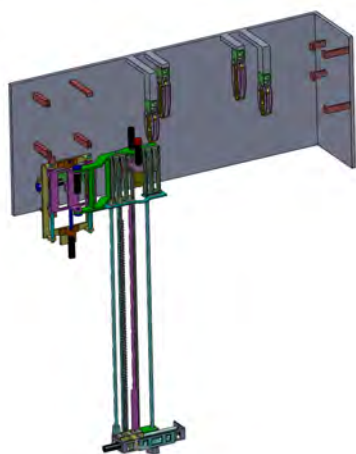
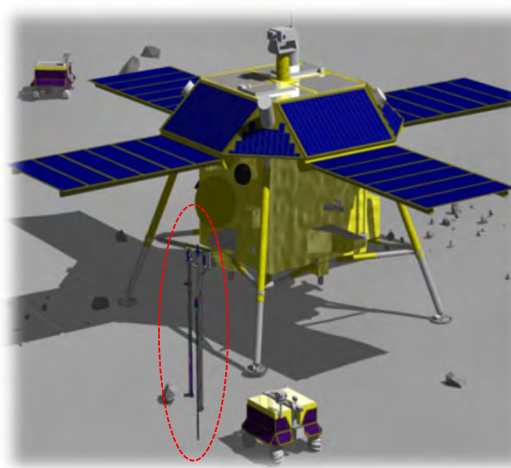
月面模擬土

車輪走行：低重力は敵か味方か



月面地盤調査装置の開発

- JAXA 月探査計画SELENE-2 月面地盤調査装置LSM
- JAXA 月極域探査計画LUPEX 非接触水分計MGRIS
- JAXA 月極域探査計画LUPEX 月アクティブ地震探査
- JAXA 火星衛星探査計画MMX 着陸装置検討検討チーム
- JAXA 惑星表面の柔軟地盤の重力依存性調査Hourglass



月で取得すべきデータ（国際宇宙探査シナリオ）

JAXA：日本の国際宇宙探査シナリオ（案）公開版2021、p.147

<https://www.exploration.jaxa.jp/assets/img/news/pdf/scenario/2021/Scenario2021.pdf>

表 6.1-2 環境・資源データ(月)の整理結果

取得すべきデータ	現状	今後実行すべき事項	優先度付け		
			安全性 (への影響)	緊急性	総合
水	これまでのリモートセンシング観測で、極域の地下(1m程度)に水素(水氷と考えるのが合理的)の存在を示す観測データが得られている。存在量は、0.08-20wt%と研究により開きがある。	着陸ミッションにてその場での直接的に存在分布を計測することが必要	緑	赤	赤
放射線	宇宙飛行士の被ばく線量を精度よく推定するには、エネルギースペクトラムデータが必要であるが、特に被ばく線量への影響の大きい太陽フレア時の磁気圏外の実測データはないため、その被ばく量を適切に予測することが困難で、深宇宙ミッションでの放射線被ばく対策の目的が立たない状況。	月・火星探査無人ミッションの機会をとらえつつ、太陽活動による変動も考慮して太陽フレア時のエネルギースペクトラムデータを蓄積していくことが必要。	赤	黄	黄
レゴリス安全性	化学組成による毒性は研究され NASA の毒性研究 G が 2010 年にまとめたデータ有。ただし実レゴリスによる実験データはほとんどない。	実レゴリスのサンプルリターンによる動物実験でのデータ取得。	黄	黄	黄
レゴリス土質特性(テラメカニクスデータ)	レゴリスの「基本的物理特性」については、地球に持ち帰られたサンプルデータによって計測されている。「力学特性」については、間接的な方法によって計測あるいは推定値・予測値が提案されている(一部は、リターンサンプルで変形や強度に関する土質試験も行われている)。近年は、シミュラントを使った実験も多く行われている。 > 基本的物理特性: 粒度分布、粒子形状、土粒子密度、かさ密度、間隙比など > 力学特性: 変形や強度に関する土質パラメータ(変形係数、強度定数など)、支持力や斜面の安定性、ローバの走行性などの予測値	変形や強度に関する力学パラメータ、密度分布の直接計測(原位置地盤調査)。 ・探査ローバや着陸脚等のレゴリス-機械系の相互作用データの取得。 ・月・惑星環境下で適用できる地盤力学モデル/テラメカニクスモデル/シミュレーション技術の構築。	赤	赤	赤
レゴリスによる汚染	着陸時スラスター噴射でのレゴリス巻き上げ、及び月面上活動時の帯電レゴリスの宇宙服への付着がアポロ計画で目撃・体験されている。月周回機 LADEE により昼夜境界でダストが多いことが観測されている。	月面活動、及び月面電位分布で浮遊するレゴリス量を定量的に測定する。	黄	黄	黄
地形	全球 10m 間隔(かぐや)、および極域 2m 間隔(LRO 高度計)の 3 次元地形データが取得されている。	掘削やモジュール設置、基地建設実現のため、精度の良い地形計測が必須。	黄	黄	黄
温度	全球(LRO の観測時刻のみ)、および Apollo 着陸地点(連続時間変化)でのデータが取得されている。	将来探査地点における温度の連続時間変化データ(日照条件、周辺地形からの熱輻射の影響が場所により異なるため)	黄	黄	黄
日照	3 次元地形データを用いて、任意の場所および時刻における太陽光照射シミュレーションが実施可能。	(必要無し)	黄	黄	黄
プラズマ	太陽風と月面物質との相互作用により形成されるプラズマ環境(粒子分布、月面帯電等)のデータが得られている。	将来探査地点における帯電、電界、粒子速度等の時間・日照条件変化の影響の測定	黄	黄	黄
隕石	月表面の隕石衝突孔のサイズ分布、地震観測、および地上からの衝突発光観測から、隕石のサイズ分布等が推定されている。	隕石のサイズ、速度、質量、飛来方向等を測定	赤	黄	黄
重力	全球の重力異常分布が測定されている(地下物質による重力集中であるマスコン等)	(必要無し)	黄	黄	黄

取得すべきデータ

現状

レゴリス土質特性(テラメカニクスデータ)

- レゴリスの「基本的物理特性」については、地球に持ち帰られたサンプルデータによって計測されている。「力学特性」については、間接的な方法によって計測あるいは推定値・予測値が提案されている(一部は、リターンサンプルで変形や強度に関する土質試験も行われている)。近年は、シミュラントを使った実験も多く行われている。
 - > 基本的物理特性: 粒度分布、粒子形状、土粒子密度、かさ密度、間隙比など
 - > 力学特性: 変形や強度に関する土質パラメータ(変形係数、強度定数など)、支持力や斜面の安定性、ローバの走行性などの予測値

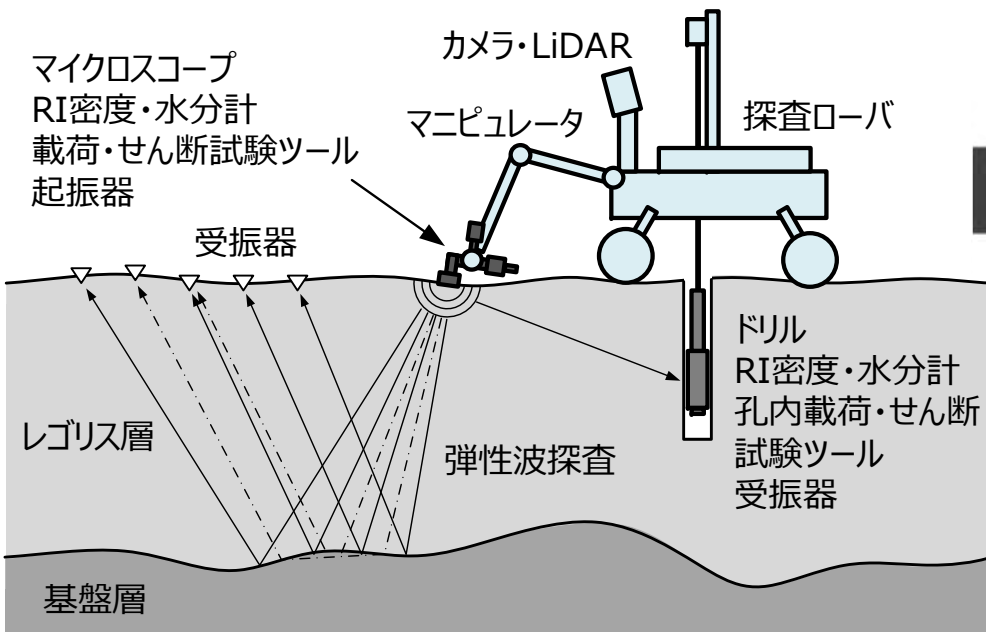
今後実行すべき事項

- 変形や強度に関する力学パラメータ、密度分布の直接計測(原位置地盤調査)。
- 探査ローバや着陸脚等のレゴリス-機械系の相互作用データの取得。
- 月・惑星環境下で適用できる地盤力学モデル/テラメカニクスモデル/シミュレーション技術の構築。

持続的な探査・基地建設に向けた地盤工学スキーム

月面の地形・地盤調査

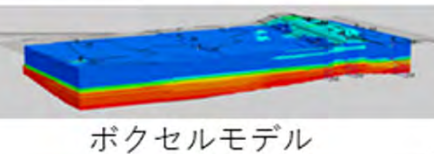
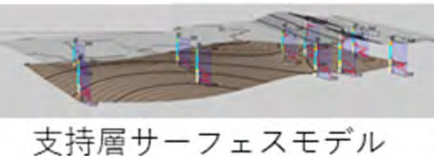
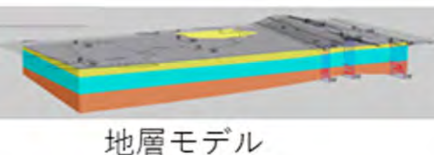
- ① 非GNSS環境における地形測量
- ② 月面で使える地質・土質試験ツール
- ③ 無人試験を実現するためのロボットアーム
- ④ 取得データの活用技術の構築



月面の地質・地盤リスクマネジメント

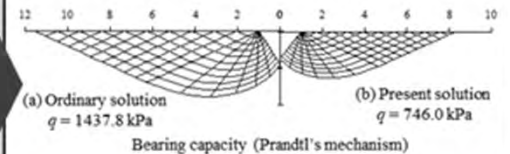
3次元地質地盤図

- 空間データ基盤
- マッピング
- モデリング
- GIS



データ活用

- 構成則・地盤解析
- 探査機シミュレーション
- 信頼性解析・性能設計
- 月面土工BIM/CIMモデル

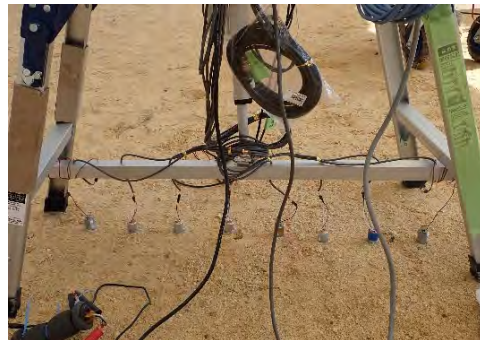


月面の地図を描き、地質・力学特性を知るための4つの調査ツール

測位・測量



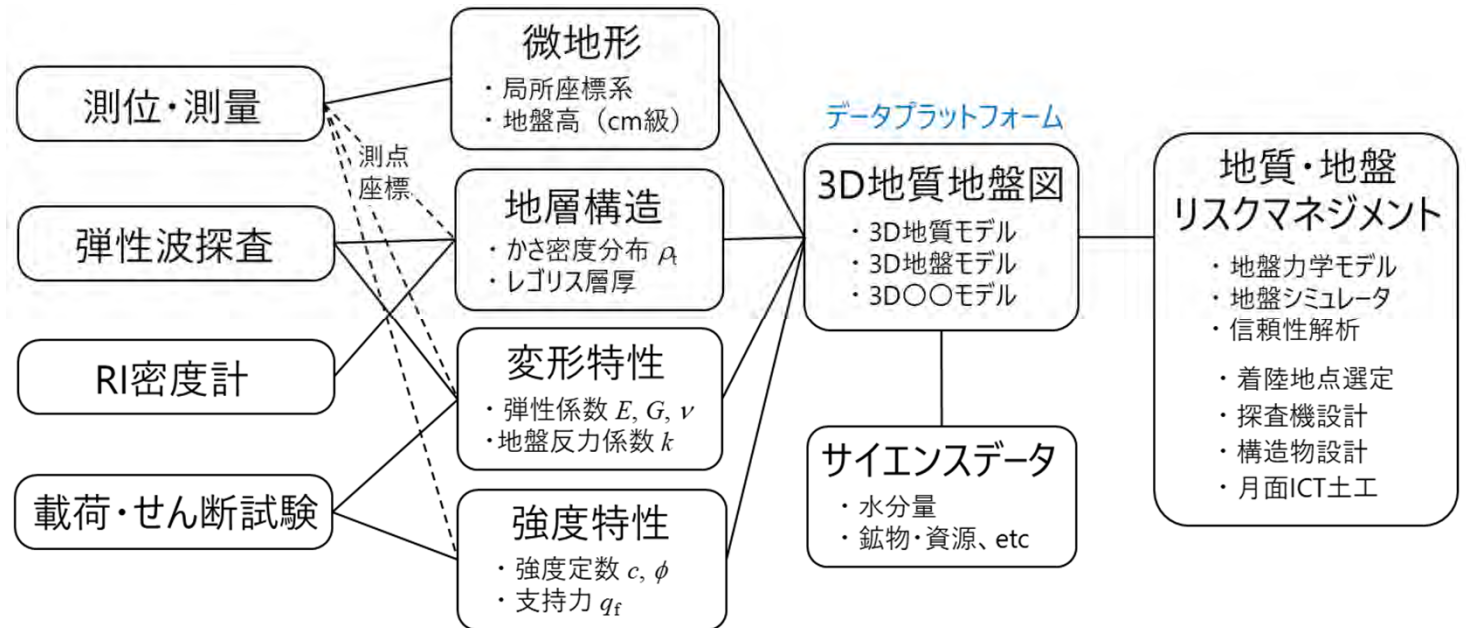
地震探査（弾性波探査）



RI密度計



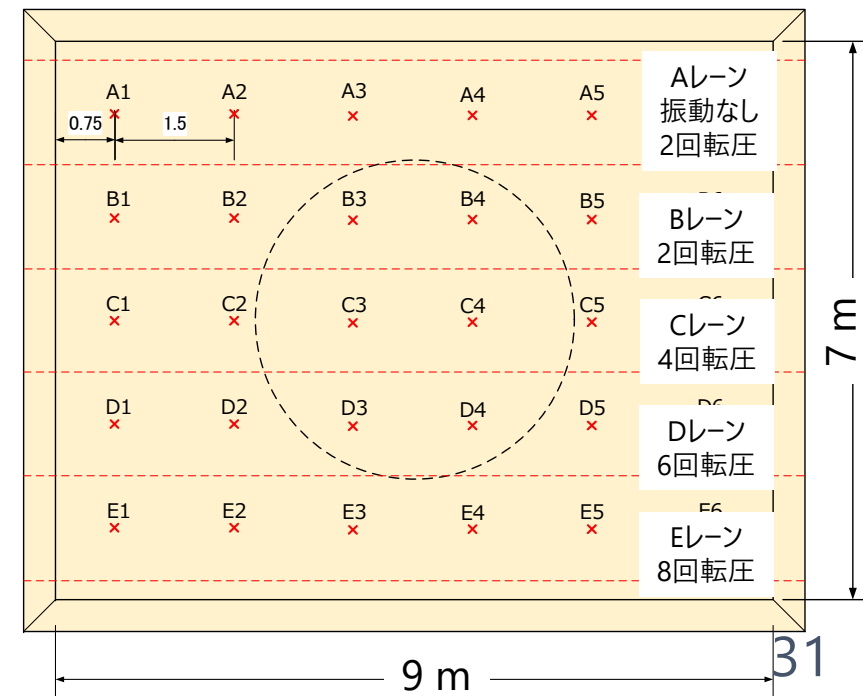
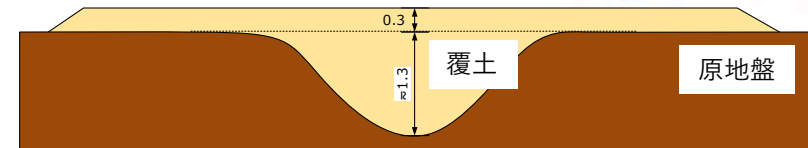
载荷・せん断試験



観測ツール → 観測項目 → 月面地盤BIM/CIM → データ利用 30

地上検証用モデルを用いたフィールド模擬実験

4tローラ



① 表土の排土



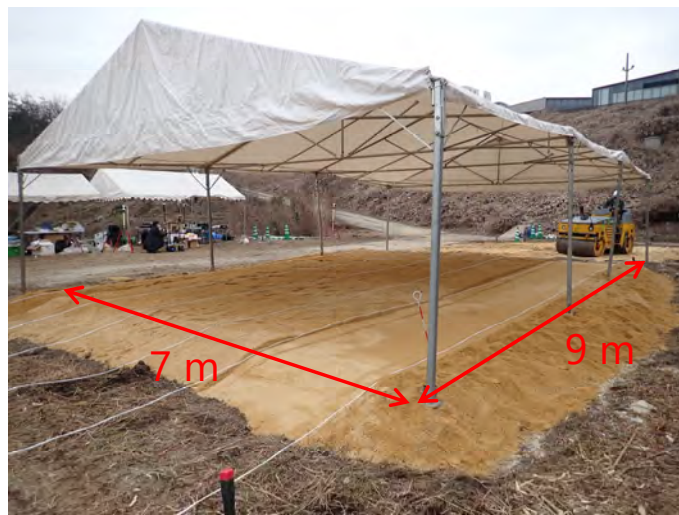
② 掘削



③ 覆土



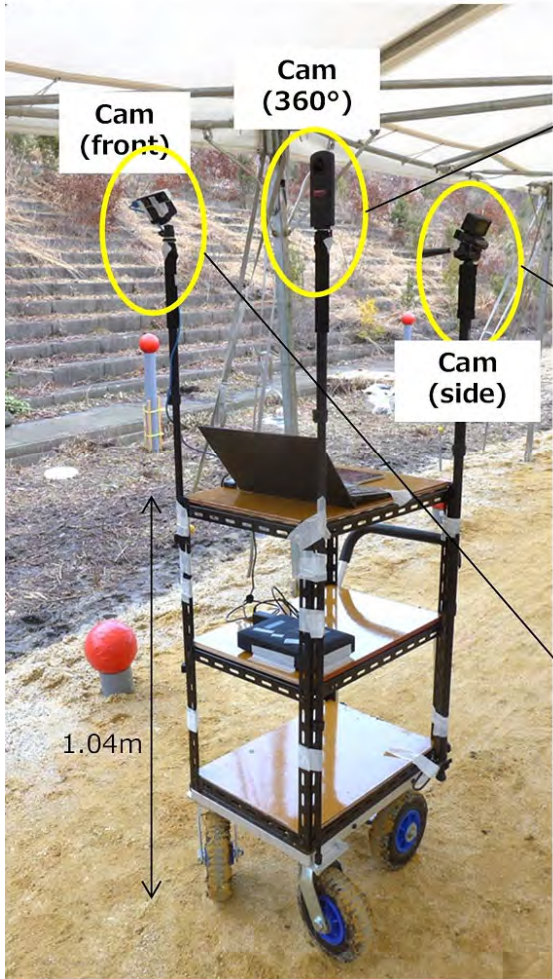
④ 転圧



月面の微地形を描くための測位・測量ツール

写真測量による地形測量（他、LiDAR等も実施）

Type 2



Panorama camera
Theta Z1 (Ricoh)



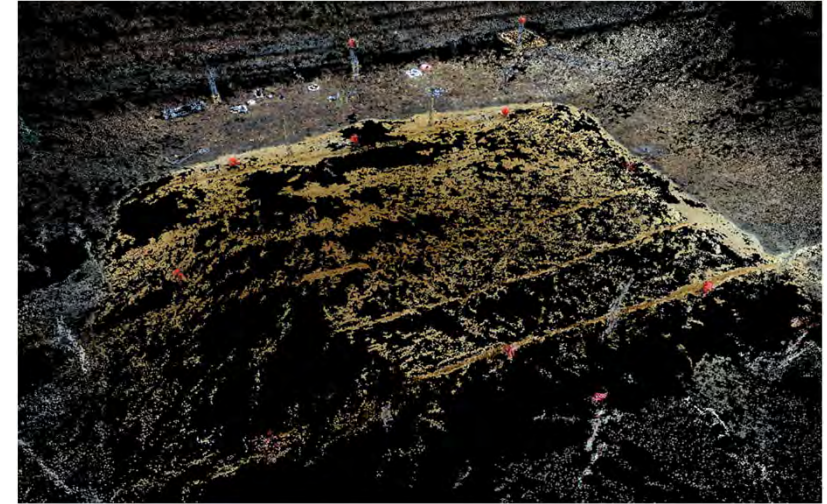
High resolution
camera
RX0M2 (SONY)



IMU stereo camera
RealSense T265 (Intel)



Triplet
camera
RX0M2 (SONY)
+
T265 (Intel)

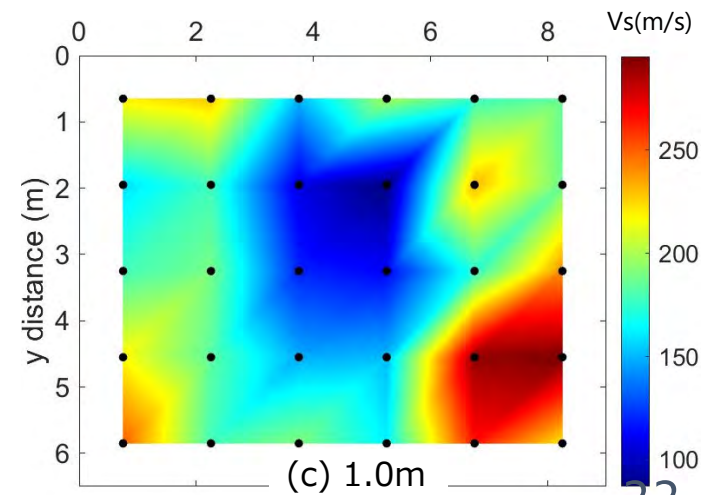
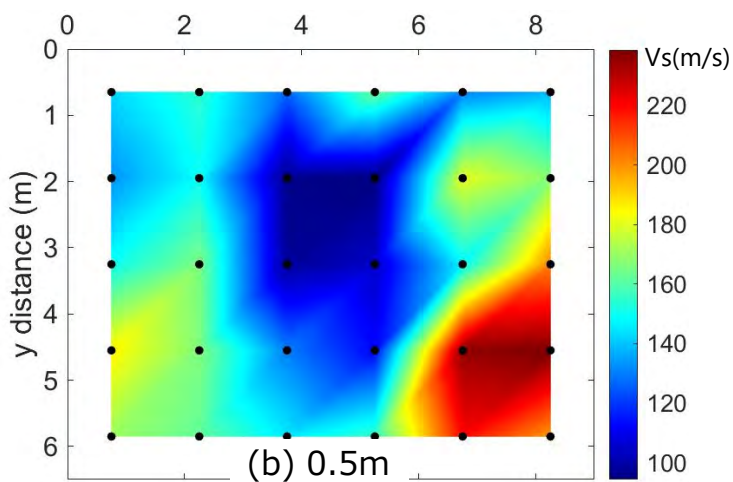
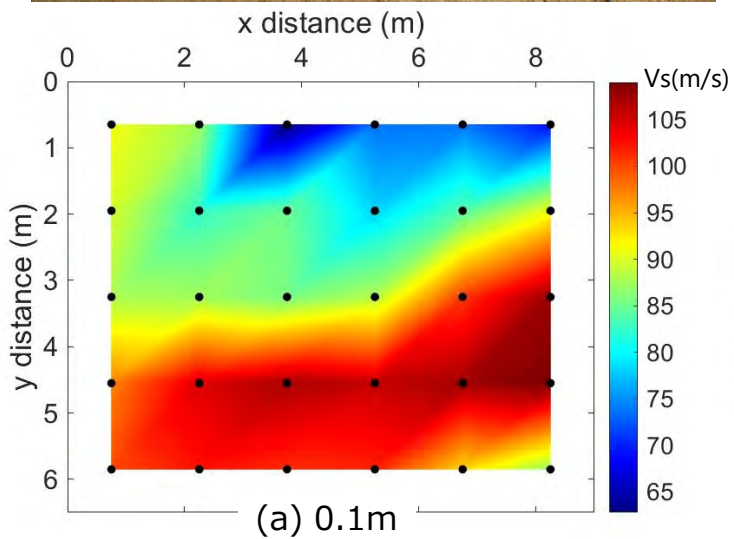
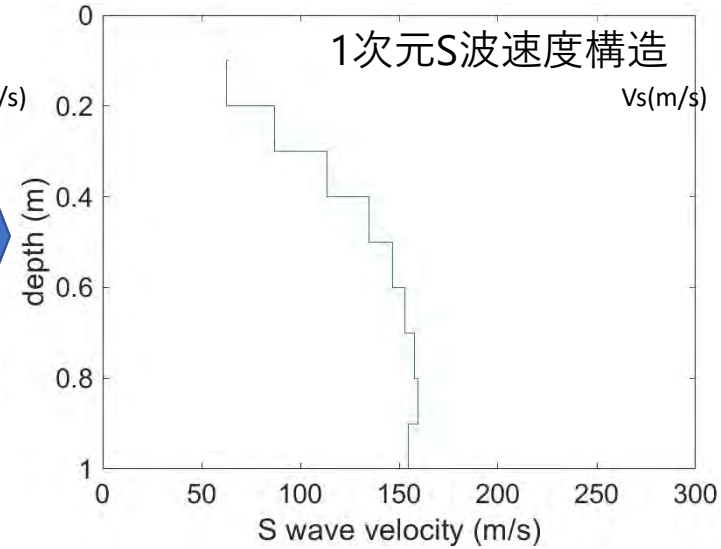
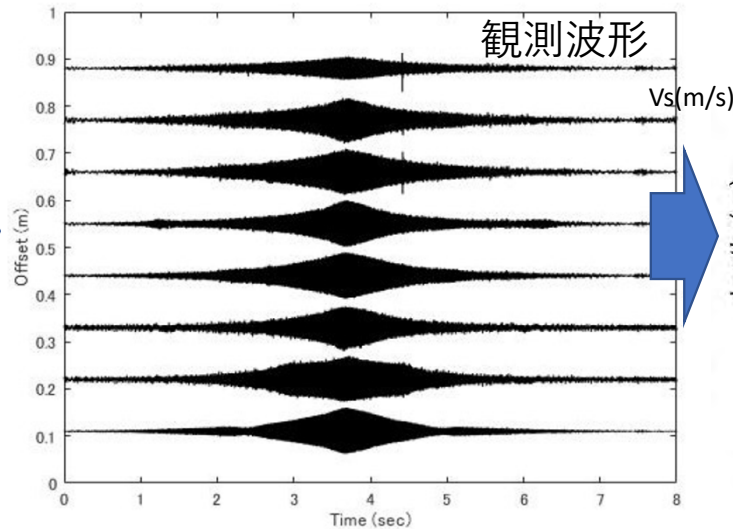
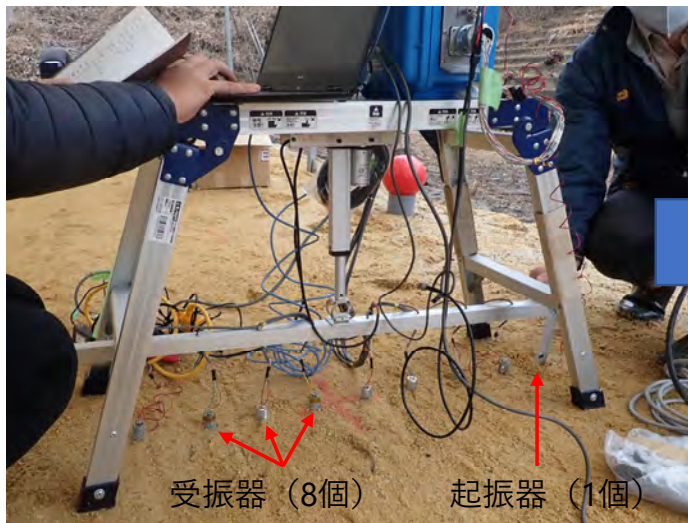


全方位カメラ画像から生成した点群



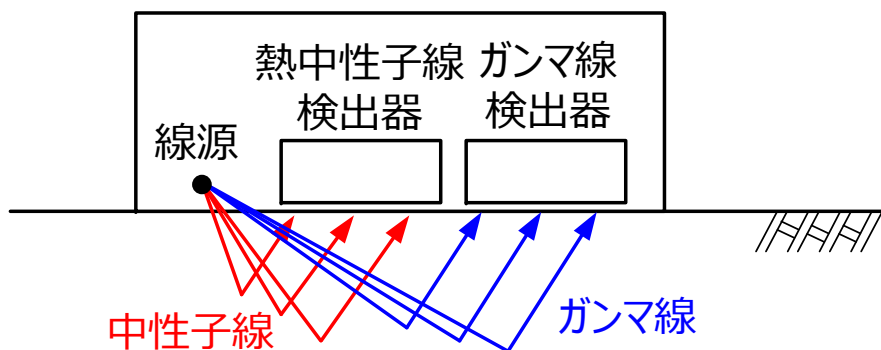
高解像度カメラ画像から生成した点群

地層構造を可視化するための地震探査ツール



試験ヤードの深度毎のS波速度分布図

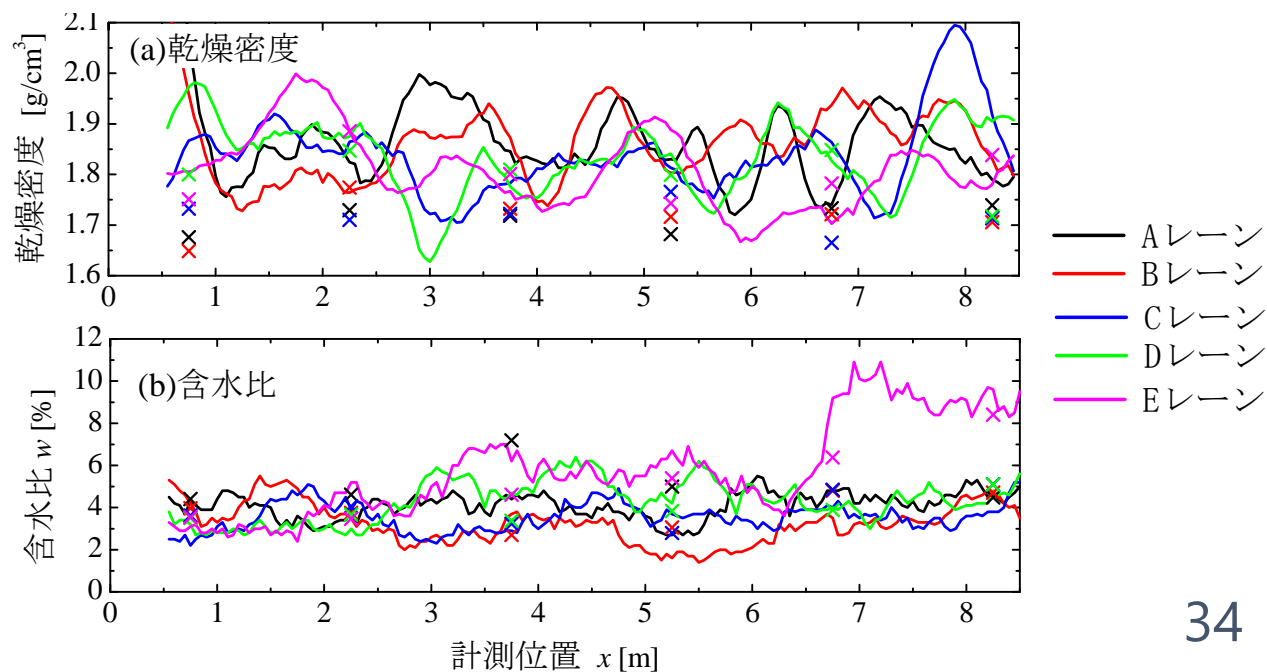
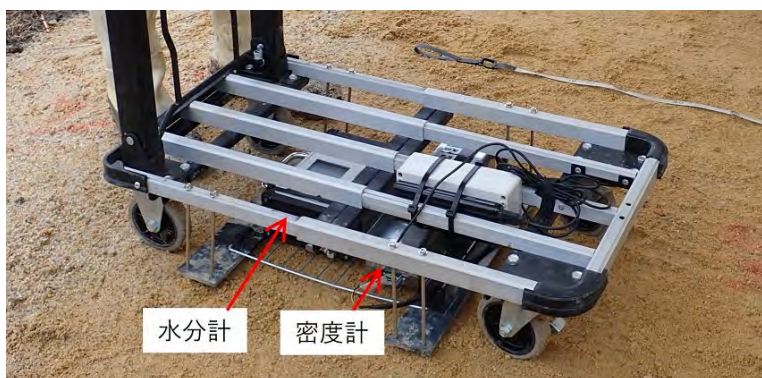
かさ密度（水分量）を調査するためのRI密度（水分）計



RI密度計（試作機）
（セシウム137、CsIシンチレータ）



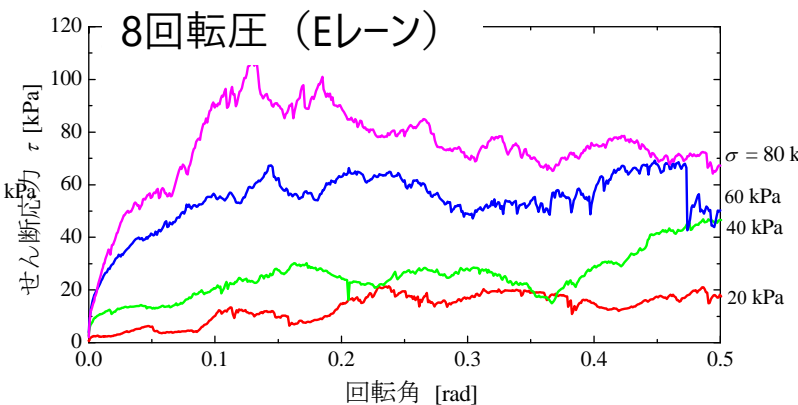
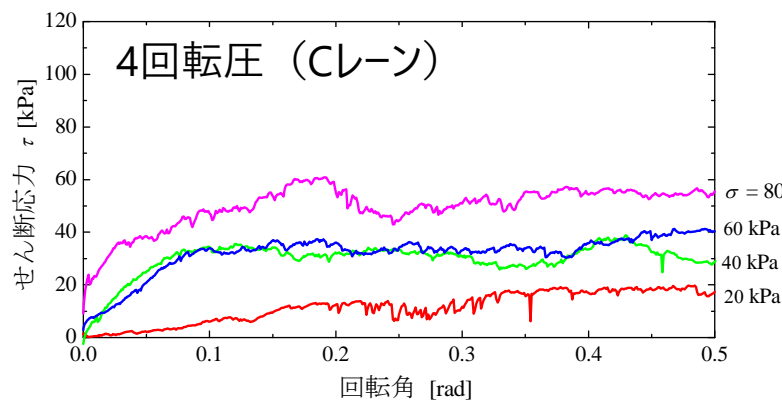
RI水分計（商品）
（カリホルニウム252、He3比例計数管）



変形・強度特性を調査するための載荷・せん断試験ツール



回転せん断試験の結果



	1	2	3	4	5	6
A	4.58	5.66	5.63	7.21	7.34	2.60
B	0.00	4.75	0.00	12.08	2.51	0.00
C	6.26	2.76	4.88	2.99	4.10	10.97
D	2.64	0.00	0.00	3.16	0.00	8.49
E	0.39	0.00	10.88	0.00	0.00	3.99

粘着力c (kPa)

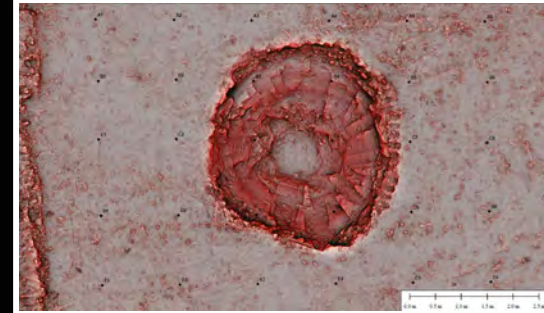
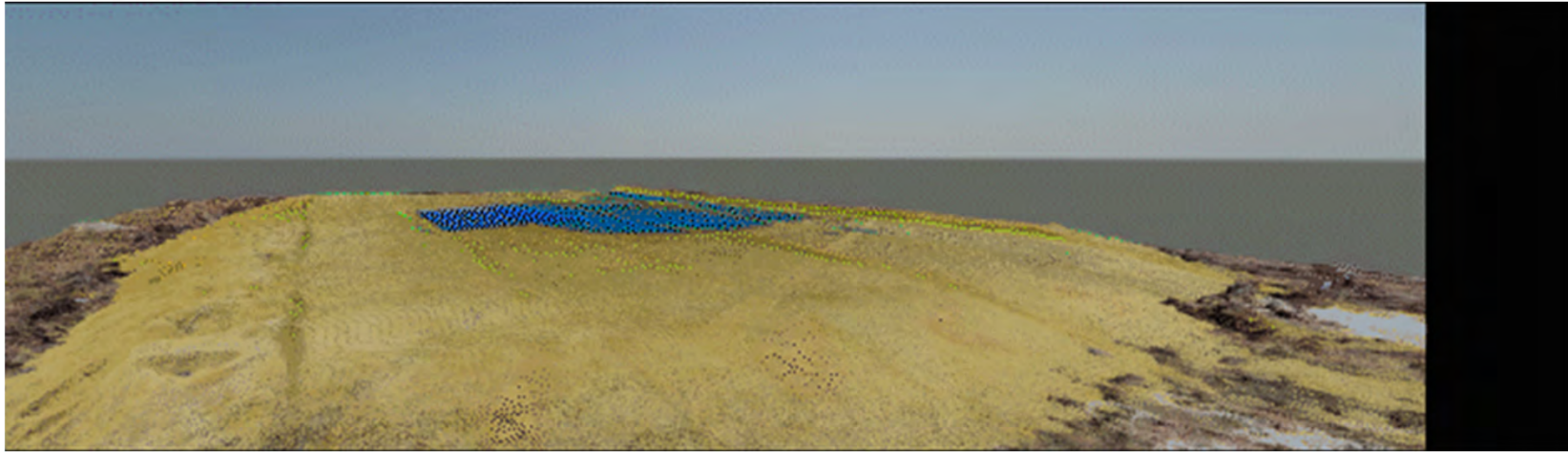
	1	2	3	4	5	6
A	37.5	30.2	36.4	30.7	31.8	37.7
B	34.1	36.8	38.9	30.3	36.1	35.1
C	35.7	34.6	33.5	36.8	36.0	34.8
D	40.6	39.4	37.3	36.8	35.8	37.0
E	43.7	41.2	42.7	42.8	46.5	42.0

内部摩擦角 ϕ (deg)

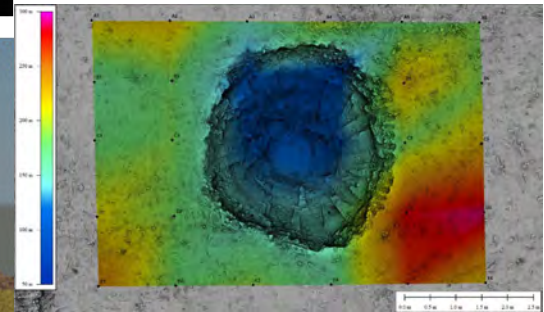
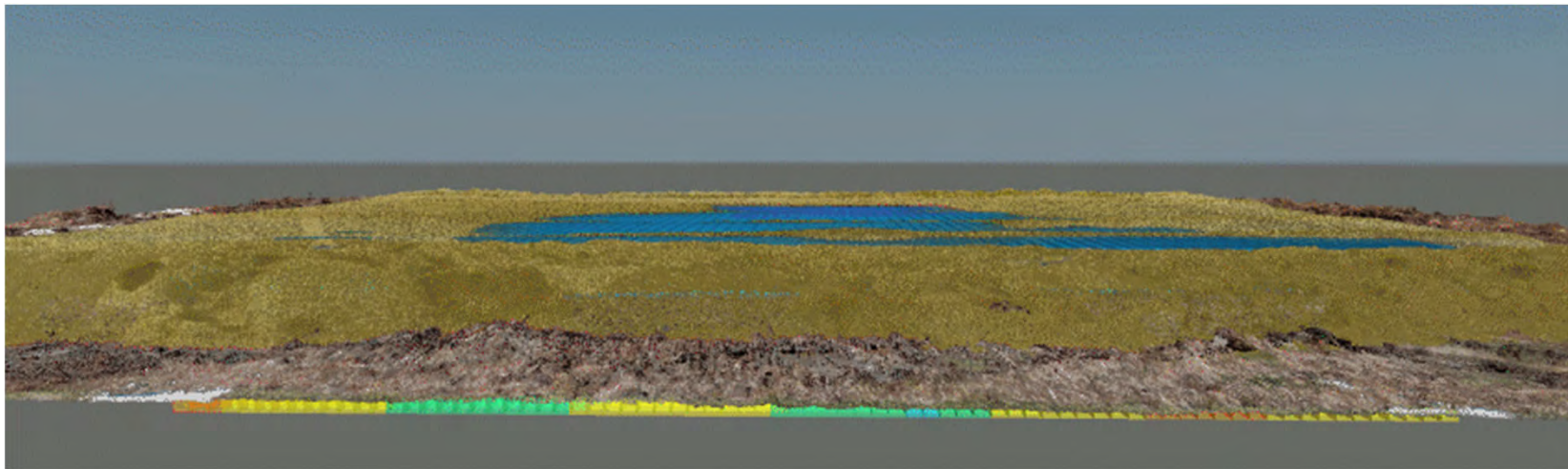
35

3次元地質地盤図の作成 (1/2)

地形測量と弾性波探査によって得られたS波速度 (3次元ボクセル表現)



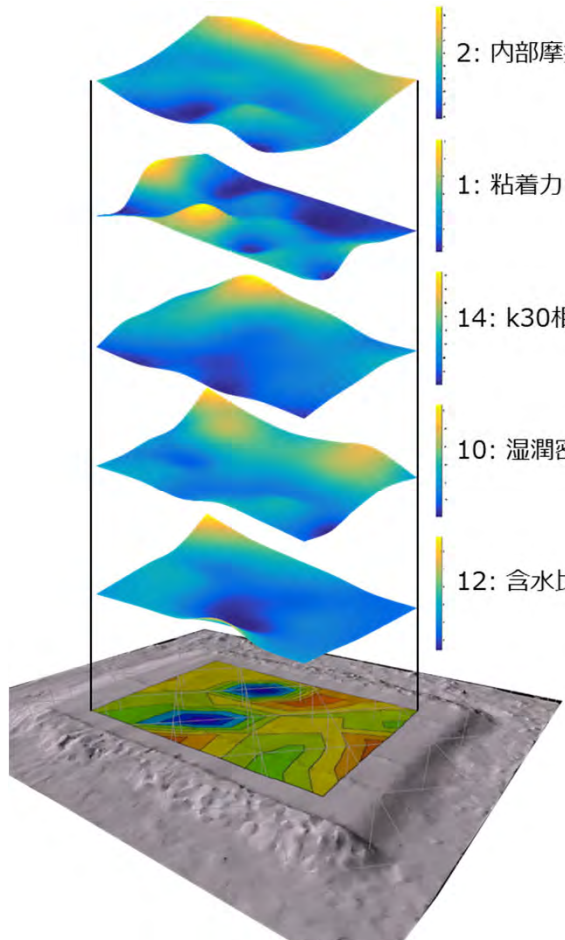
赤色立体地図(D=0.8m)



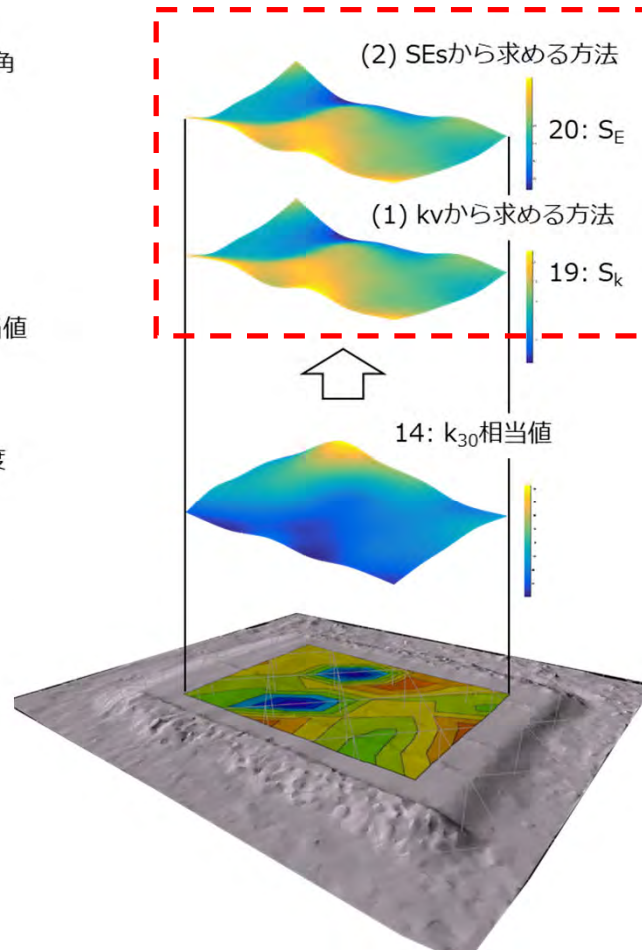
S波速度分布図と地形図の合成(D=0.8m)

3次元地質地盤図の作成 (2/2)

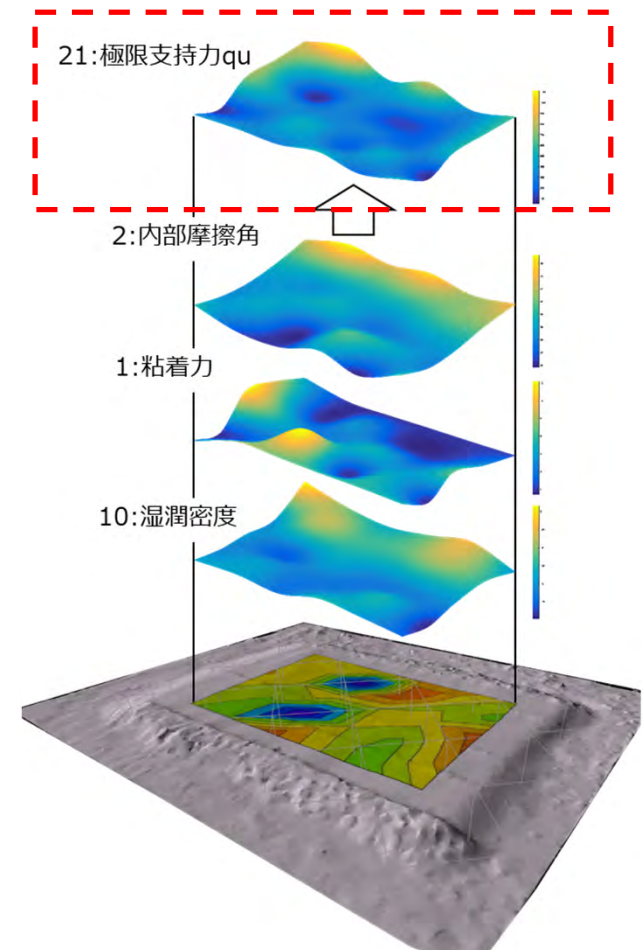
各種土質計測とその結果に基づくレゴリス挙動予測



計測データのオーバーレイ



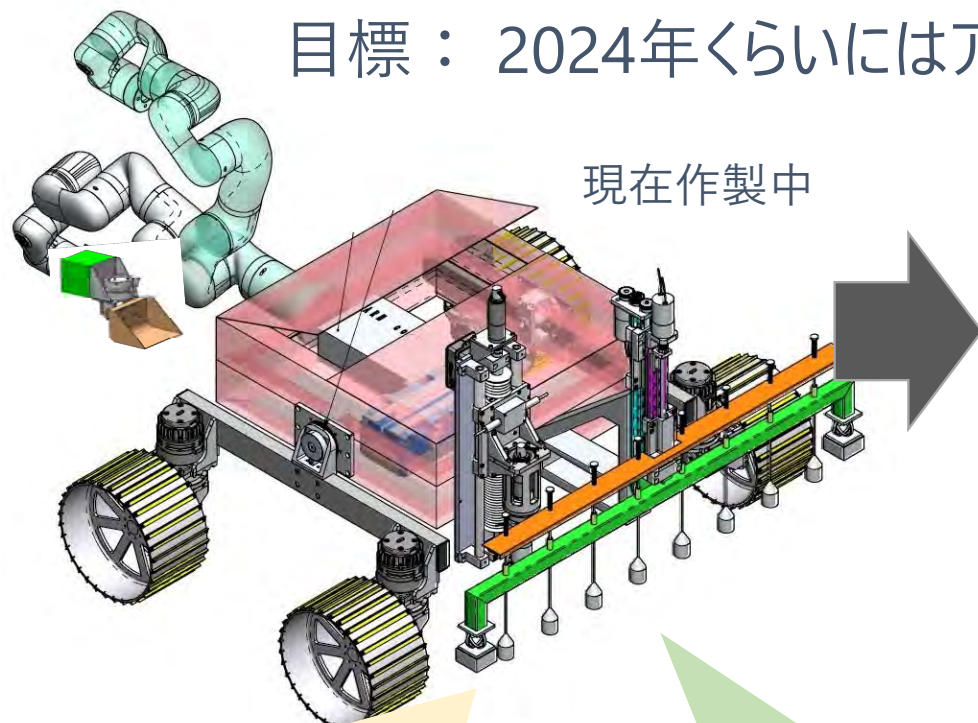
即時沈下量の分布図



極限支持力の分布図

Robotic Geotechnical Investigation System : RGIS

目標 : 2024年くらいにはアナログ試験を実施したい



例えば、

ランダ着陸時の沈下量を予測するために :

- どんな予測モデルを使うのか？
- 何をどうやって測るのか？
- どこをどれくらいの密度で計測すると、どれくらいの信頼性が確保できるのか？

- 計測誤差
- 空間的ばらつき
- 統計的推定誤差
- 変換誤差
- モデル化誤差

月面拠点建設の実現に向けて

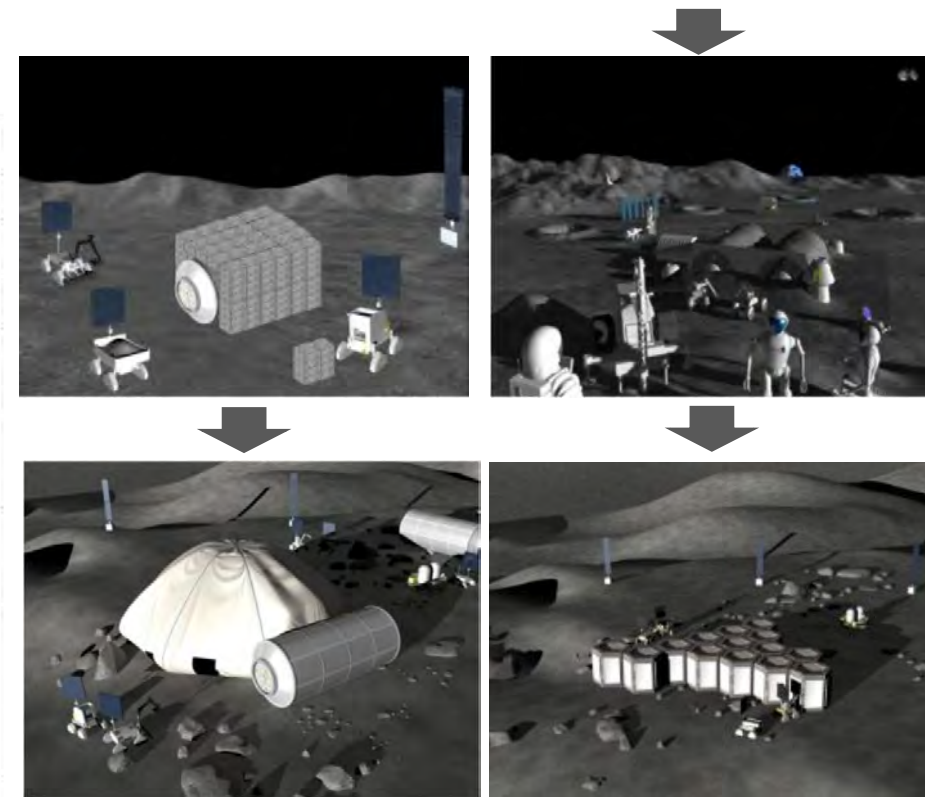
JAXA 有人月面基地構想

目的

- ① 1/6 重力下での 500 日滞在実証（有人滞在、技術実証）
- ② 資源利用による本格的な探査（燃料製造、現地物質の直接利用）
- ③ 科学（調査・分析、整備・保守）

表 5.5-1 拠点建設の前提条件

項目	内容
構築期間	2035 年頃に、月面に 4 人が長期間滞在可能な拠点が構築される。
中長期計画等	拠点の拡張性と合わせて検討。
拠点全体規模	約 4km ² (約 2km 四方)
拠点の構成	複数ゾーンから構成。具体的には、着陸ゾーン、居住ゾーン、サービスゾーン、観測ゾーン、ゾーン間道路の 5 種。
拠点の拡張性	増設可能な建設方式が不可欠。用途変更(スペース可変)を含めるかは要検討。
拠点建設方式	拡張性と効率を両立する方式を選定。モジュール方式、展開方式、組立方式、現地での建設方式、など。
現地調達可能な材料	物質: 岩石鉱物、レゴリス、噴出性揮発物質(火山性ガスなど)、非月物質(隕石など) エネルギー: 太陽光・熱、重力 人工物: 使用済みのランダ、タンクなど
月面環境	別途整理



2030年代前半：拠点建設の開始 40
（無人による有人拠点建設）

JAXA：日本の国際宇宙探査シナリオ（案）公開版2021、p.117～

<https://www.exploration.jaxa.jp/assets/img/news/pdf/scenario/2021/Scenario2021.pdf>

「宇宙開発利用加速化戦略プログラム」（国交省及び文科省）

宇宙無人建設革新技術開発推進プロジェクト（イメージ）



©KAJIMA



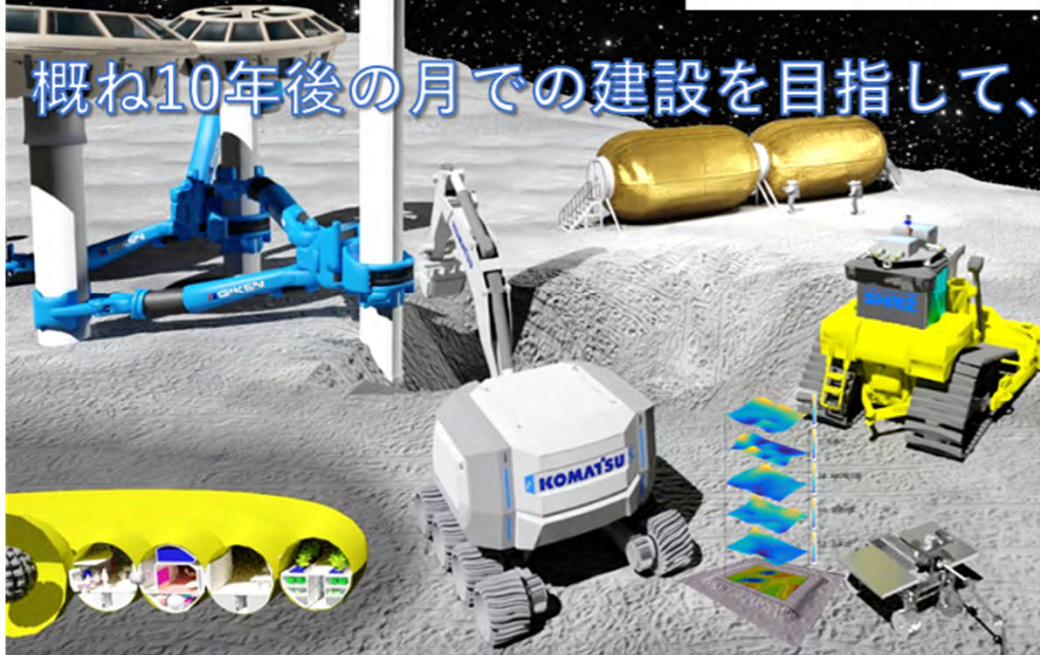
Construction on



MOON & EARTH

As of
2022.6.22

概ね10年後の月での建設を目指して、地球での建設技術の革新を進めます



©2021 KAJIMA CORPORATION

https://www.mlit.go.jp/report/press/sogo15_hh_000302.html

宇宙無人建設革新技術開発推進プロジェクト

令和4年度(2022年度) 研究開発一覧(継続、移行)

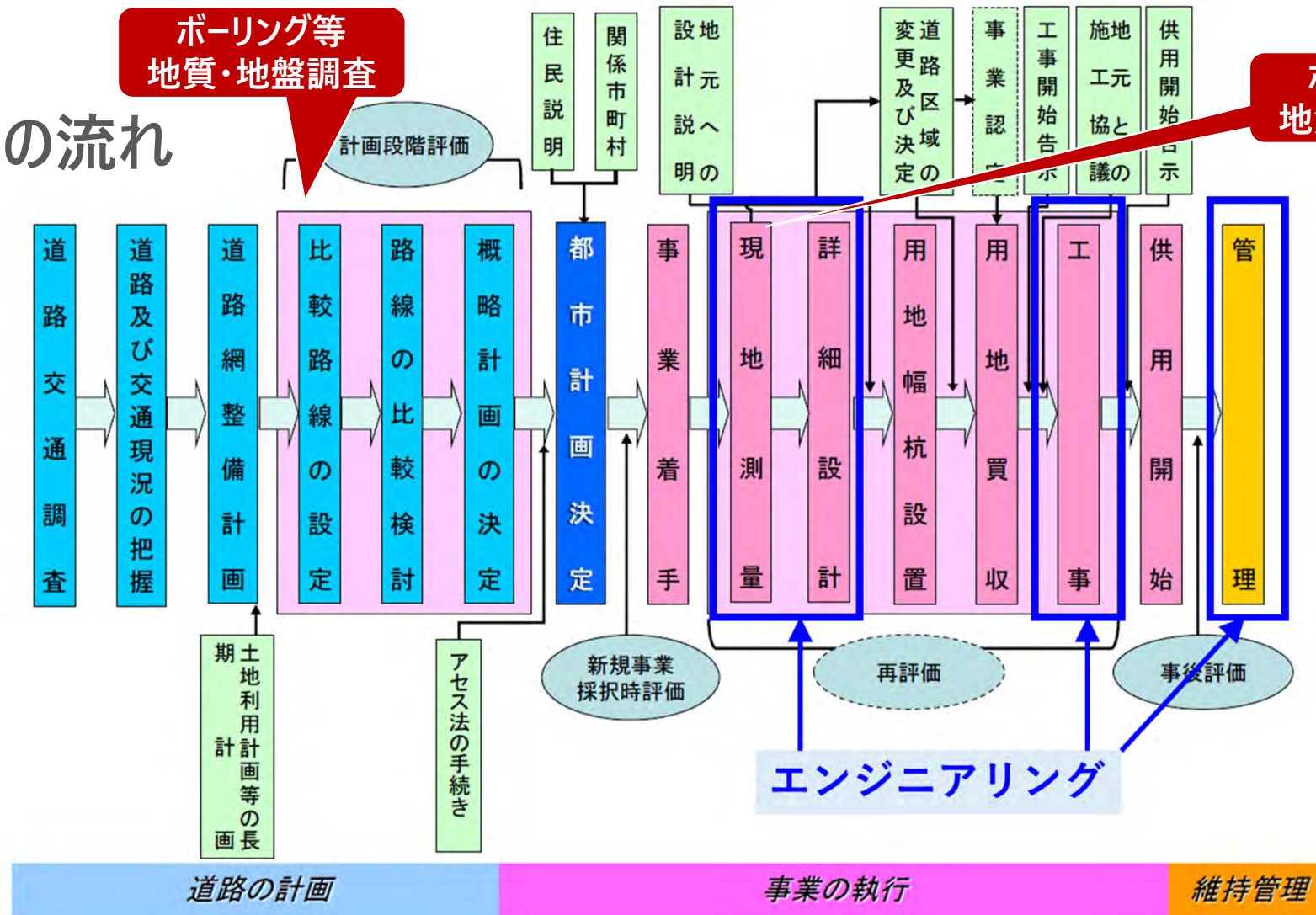
技術分類		技術研究開発名称	実施者 (○代表者、共同実施者)	実施 Stage
技術Ⅰ: 無人建設 (自動化・ 遠隔化)	施工 (掘削、積込等)	建設環境に適応する自律遠隔施工技術の開発 一次世代施工システムの宇宙適用	○鹿島建設 宇宙航空研究開発機構、芝浦工業大学	R&D (継続)
	施工 (敷均し等)	自律施工のための環境認識基盤システムの開発 及び自律施工の実証	○清水建設 ボッシュ	
	建設機械・施工	デジタルツイン技術を活用した、月面環境に適 応する建設機械実現のための研究開発	○小松製作所	R&D (F/Sからの 移行)
	測量・調査	月面の3次元地質地盤図を作成するための測 量・地盤調査法	○立命館大学 芝浦工業大学、東京大学、海上・港湾・航空技術研究所、 アジア航測、基礎地盤コンサルタンツ、ソイルロックアンドエン 지니어リング	
	輸送(調査)	索道技術を利用した災害対応運搬技術の開発	○熊谷組 住友林業、光洋機械産業、加藤製作所、工学院大学	
	基礎(調査)	回転切削圧入の施工データを利用した、月面 建設の合理的な設計施工プロセスの提案と評 価	○技研製作所	
技術Ⅲ: 簡易施設建設		月面インフラータブル居住モジュールの地上実 証モデル構築	○清水建設 太陽工業、東京理科大学	
		月面における展開構造物の要件定義および無 人設営検討の技術開発	○大林組 宇宙航空研究開発機構、室蘭工業大学、サカセ・アドテック	
技術Ⅱ: 建材製造		月資源を用いた拠点基地建設材料の製造と施 工方法の技術開発	○大林組 名古屋工業大学、レーザー技術総合研究所	
		コア用・シェル用の3Dプリント技術の開発と高 強度梁の作製技術開発	○早稲田大学 東京理科大学	

F/S・・・Feasibility Study 実現可能性の検証 【1年度間】

R&D・・・Research & Development 技術研究開発 【複数年度間】

地上の土木建設プロセス（道路事業を例に）

道路事業の流れ



仕様規定型設計から性能規定型設計へ

性能 1

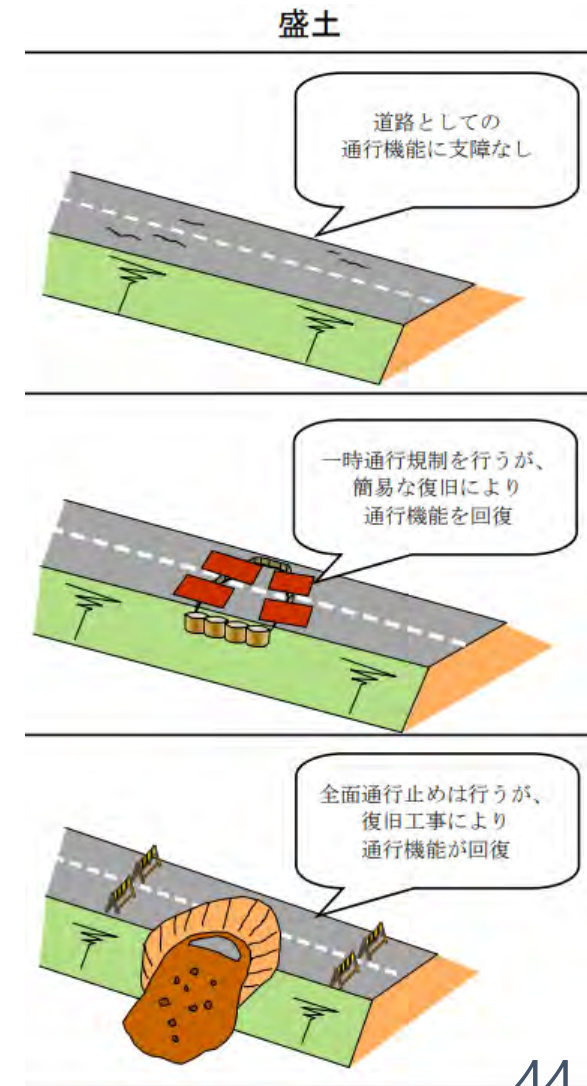
道路土工構造物が**健全である**、又は、道路土工構造物は損傷するが、当該道路土工構造物の存する区間の**道路としての機能に支障を及ぼさない**性能（使用性・修復性・安全性）

性能 2

道路土工構造物の**損傷が限定的なものにとどまり**、当該道路土工構造物の存する区間の**道路の機能の一部に支障を及ぼすが、速やかに回復**できる性能（修復性・安全性）

性能 3

道路土工構造物の損傷が、当該道路土工構造物の存する区間の道路の機能に支障を及ぼすが、**当該支障が致命的なものとならない**性能（安全性）



作用と要求性能のマトリクス

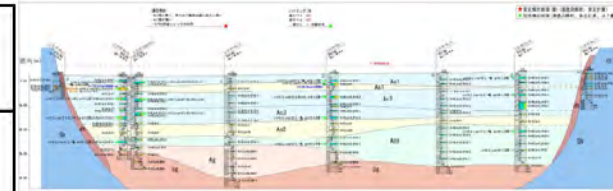
作用		重要度1	重要度2
常時の作用（死荷重、活荷重等、常に構造物に影響する作用）		性能1	性能1
降雨の作用 （通常想定される降雨、施設に応じて3、5～10年確率降雨）		性能1	性能1
地震動 の作用	レベル1 地震動（耐用年数中に1～2回発生するレベル）	性能1	性能2
	レベル2 地震動（想定される最大規模） タイプⅠ：プレート境界型（大きな振幅、長時間） タイプⅡ：内陸直下型（継続時間は短いが強い）	性能2	性能3

重要度 1 損傷すると道路機能への影響が著しいもの、あるいは近隣する施設に著しい影響を与えるもの

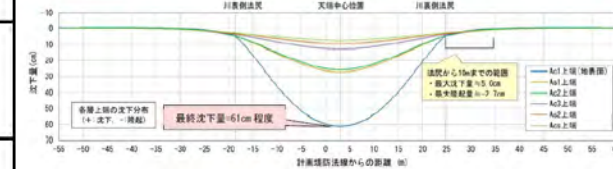
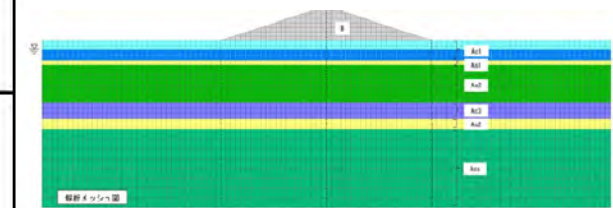
重要度 2 上記以外の道路土工構造物

盛土の性能照査

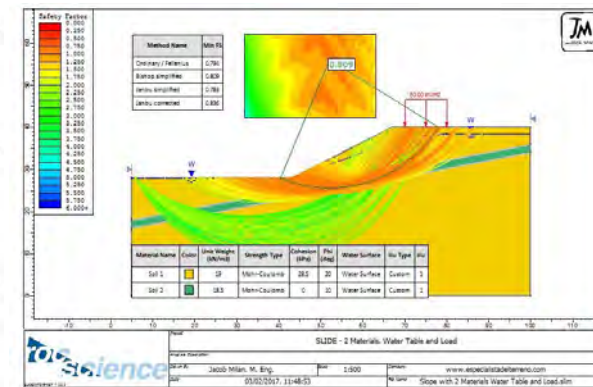
要求性能	盛土の限界状態	構成要素	構成要素の限界状態	照査項目	照査手法
性能 1	盛土が健全である、又は、盛土は損傷するが、当該盛土の存する区間の道路としての機能に支障を及ぼさない限界の状態	基礎地盤	基礎地盤の力学特性に大きな変化が生じず、盛土及び路面から要求される変位にとどまる限界の状態	変形	変形照査
		盛土	盛土の力学特性に大きな変化が生じず、かつ路面から要求される変位にとどまる限界の状態	安定	安定照査
性能 2	盛土の損傷が限定的なものにとどまり、当該盛土の存する区間の道路の機能の一部に支障を及ぼすが、すみやかに回復できる限界の状態	基礎地盤	復旧に支障となるような過大な変形や損傷が生じない限界の状態	安定	安定照査
		盛土	損傷の修復を容易に行い得る限界の状態	変形	変形照査
性能 3	盛土の損傷が、当該盛土の存する区間の道路の機能に支障を及ぼすが、当該支障が致命的なものとならない限界の状態	基礎地盤	隣接する施設等へ甚大な影響を与えるような過大な変形や損傷が生じない限界の状態	変形	変形照査
		盛土	カルバートの耐力が大きく低下し始める限界の状態	変形	変形照査



地盤モデル

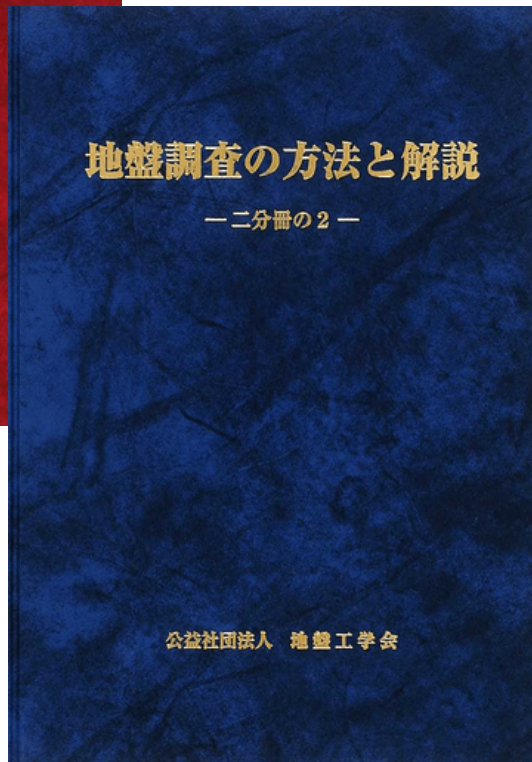
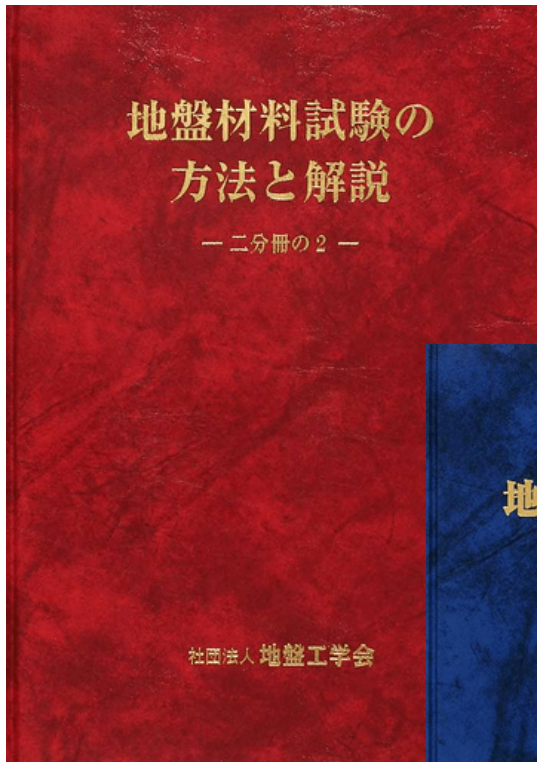


変形 (沈下) 計算



安定計算

地上には試験・調査マニュアル、設計基準書があるが・・・



道路土工構造物技術基準

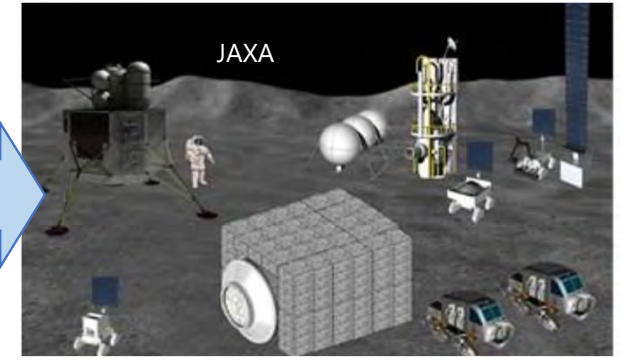
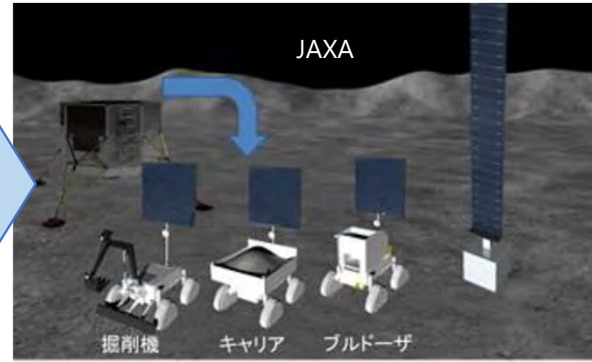


道路土工
盛土工指針



道路土工
軟弱地盤対策工指針

輸送機の発着ゾーンの調査・建設シナリオ



	フェーズ0 (2020年代後半)	フェーズ1 (2030年代前半)	フェーズ2 (2034年)
着陸条件	原地盤 ・航法支援なし ・地質・地盤情報なし	原地盤 ・航法支援あり ・地質・地盤情報あり	発着ゾーン (人工地盤) ・航法支援あり ・所定の性能を持つ人工地盤
調査目的	・次回着陸ポイントの選定 ・月面拠点の建設候補地の選定	・月面施設 (主要施設) の設計・施工のための調査	・月面施設拡張のための調査

不確実性を相手にする
土木工学的な設計法

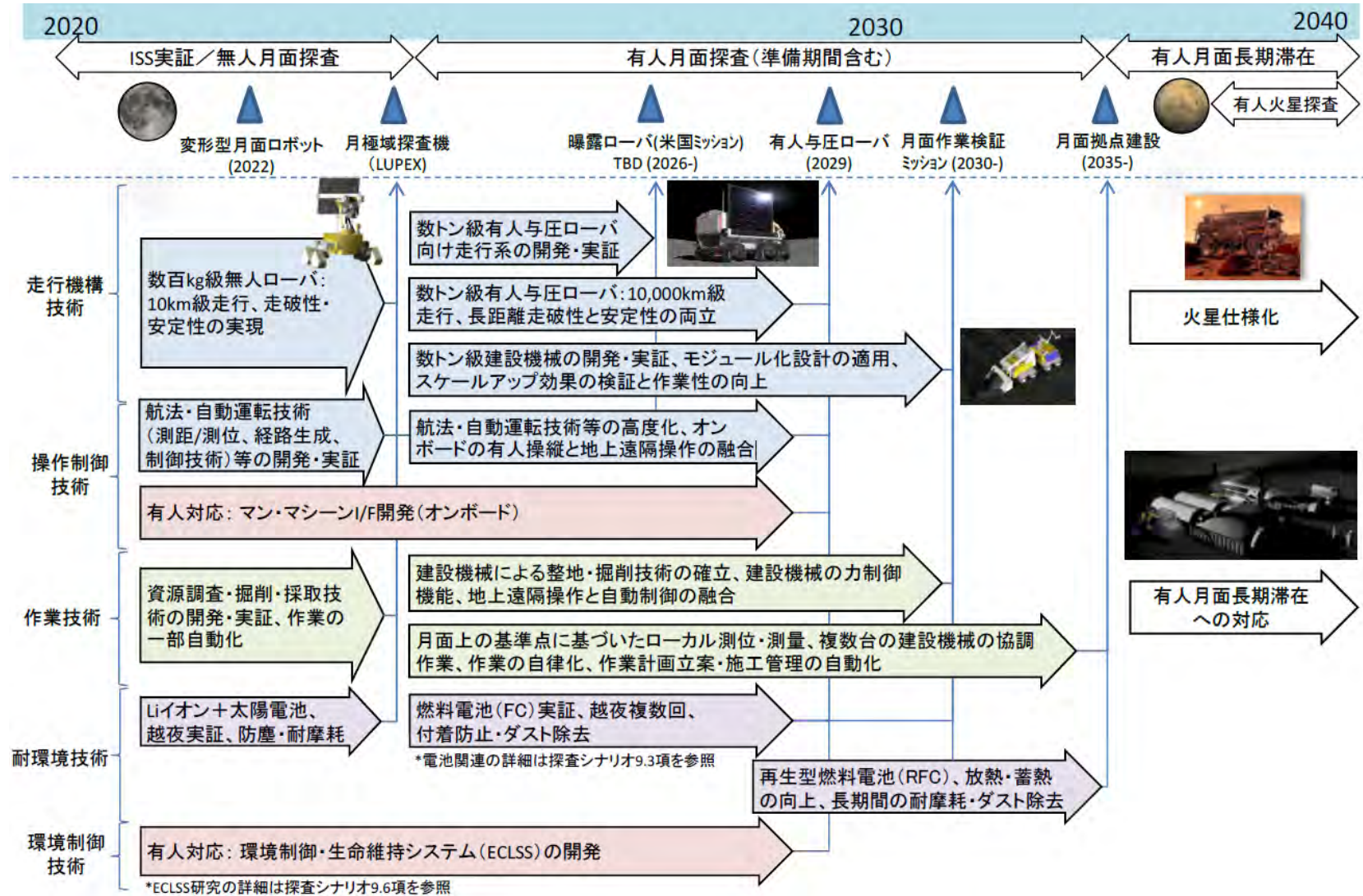


月面における信頼性設計
(地質・地盤リスクマネジメント)



- ① ランダ着陸・離陸において、地盤 (舗装) に作用する荷重の定義
- ② 地盤 (舗装) に求められる性能の定義
- ③ 性能を規定する基準や指標 (設計の照査項目) の定義
- ④ 照査項目の計算手法の確立
- ⑤ 照査項目の計算に必要な地盤特性・土質パラメータの定義

JAXA技術ロードマップ（表面移動技術・作業技術）



JAXA：日本の国際宇宙探査シナリオ（案）公開版2021、p.471

月面における建設技術

フェーズ	必要な技術
調査・計画	<ul style="list-style-type: none"> マスタートプラン（目的の設定） 拠点拡張性を考慮したインフラ整備計画（シナリオ検討） 非GNSS環境下における測位・測量、地質・地盤調査
設計	<ul style="list-style-type: none"> レゴリスの地盤解析・挙動シミュレーション 土工（盛土・切土・整地・締固め）の設計法 耐環境性モジュール／構造物／観測機器の基礎設計法・設置法
施工	<ul style="list-style-type: none"> 軽量で多目的な建設機械 自律・遠隔施工技術 電源・建設資材の輸送・製造技術 施工・品質管理の方法論
維持管理	<ul style="list-style-type: none"> 地盤・構造物の変状観測 劣化の想定とメンテナンス 機能診断評価

赤字：JAXA宇宙探査シナリオ等では記載されていない事項（しかし、月面拠点建設には必須と思われるの技術）

過酷な月面環境と基地建設のための課題

項目	月面環境	基地建設のための課題
重力	地球の1/6	支持力・土圧・斜面安定性 構造物・建設機械の設計
高真空	$10^{-10} \sim 10^{-7}$ Pa	与圧機構の実現 気密性・耐圧性の確保 放熱対策, 潤滑機構対策
隕石	隕石等の直撃	遮蔽・防護対策
放射線	宇宙放射線・太陽風	遮蔽・防護対策
温度	-170~120 °C	耐熱・断熱対策
周期	自転・公転周期 27.3日	安定した電力確保, 越夜 裏面では通信手段の考慮
地震	頻度は高いが 規模は小さい	構造物の設置場所や要求性能 によっては耐震性の確保
地形・土質	海と高地で異なる 地形・地質・土質	建設場所における詳しい調査

南極昭和基地

規模



調査・設計⇒建築施工⇒運用・維持管理



調査・設計⇒土木施工⇒建築施工⇒運用・維持管理

フェーズ

月面開発における地盤工学の貢献

探査フェーズ	レゴリスに関連する オペレーション	具体的な貢献内容 (地盤工学的検討が必要となる技術項目)
無人ロボット 探査	着陸船の着陸	着陸時の沈下予測, 着陸脚の設計支援など
	探査ロボットの移動	走行性 (トラフィカビリティ, モビリティ) 予測, 走破性の高い走行系や走行制御法の提案, ロボット運動シミュレーション, 走行経路プランニング, 走行応答観測による地盤評価など
	レゴリスの掘削・ ハンドリング	作業ロボットへの作業負荷予測, 作業の実現性評価、作業シミュレーション 効率的なレゴリスの掘削・ハンドリング方法の提案, 施工プランニング支援
サンプルリターン	レゴリスのサンプリング	採取技術の提案, 作業の実現性評価など
無人長期観測	観測機器の 設置・運用	科学観測機器 (天文台, 熱流量計, 地震計など) の 設置・埋設方法の提案など
基地建設	インフラ整備のための 設計・施工・運用	地盤調査, 設置構造物の挙動予測・安定性評価, 基礎設計, 隕石・放射線からの遮蔽・防護対策 (レゴリスによる被覆・地下設計等) の 提案, 基地地盤の整地, 構造物・実験・居住棟の基礎工事, アクセス道路の整備など

月面建設技術シンポジウム「宇宙開発における土木の役割」

主催：土木学会 建設用ロボット委員会（月面建設技術WG） <https://robot-jsce.jp/>

JAXAをはじめ、様々なコミュニティで月面開発・月面基地構想が活発に議論されるようになった。それぞれのコミュニティでどのような構想が議論されているのかの情報交換を行い、構想を実現するための「建設／土木」の役割について議論する。

- 開催日：2023年3月16日（木）13:00～17:30
- 会場：土木学会講堂（新宿区四谷） + オンライン（ハイブリッド形式）
- 基調講演（予定）：永井直樹様（JAXA）、中谷絵里様（内閣府）、TBD（ispace）
- WGメンバー話題提供：小林泰三（立命大）、石上玄也（慶応大）、川上好弘（大林組）
三浦 悟（鹿島建設）、鵜山尚大（清水建設）
- パネルディスカッション：永井様、中谷様、増様、荒木様、WGメンバー代表
パネリスト話題提供：増 竜郎様（国交省）、荒木慶一様（名古屋大学・日本建築学会）

申し込み方法を含む「開催案内（ポスター）」が完成し次第、上記の委員会HPにアップします（年始を予定）。どなたでも参加できます。奮ってご参加ください。

ご清聴ありがとうございました。