

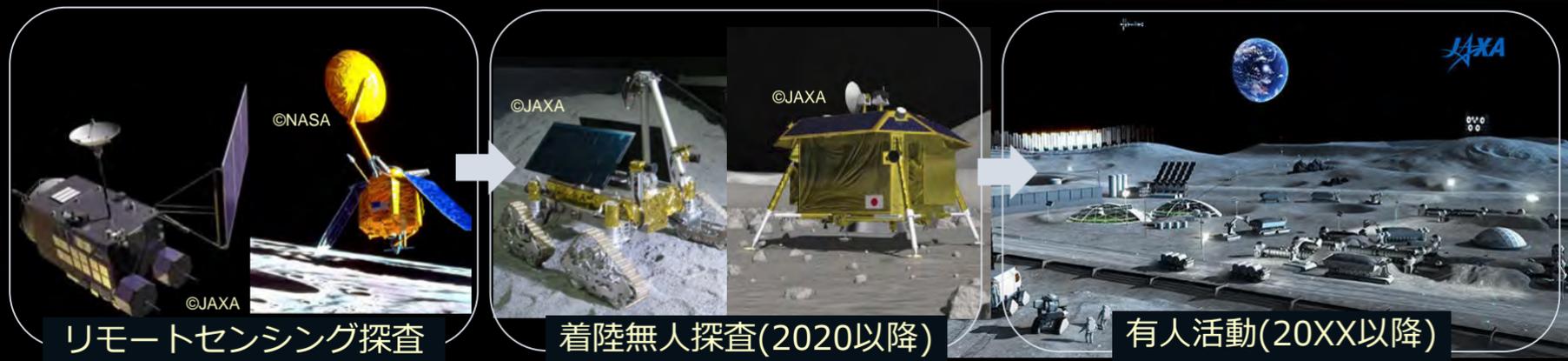
月面の地盤調査 月面土工構造物の設計に向けて

立命館大学 理工学部 環境都市工学科
小林 泰三

本研究は、科研費、（財）日本宇宙フォーラム（宇宙利用先駆研究）、JAXA、国土交通省・文部科学省（宇宙開発利用加速化戦略プログラム）等の支援に基づいて実施したものです。

“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。

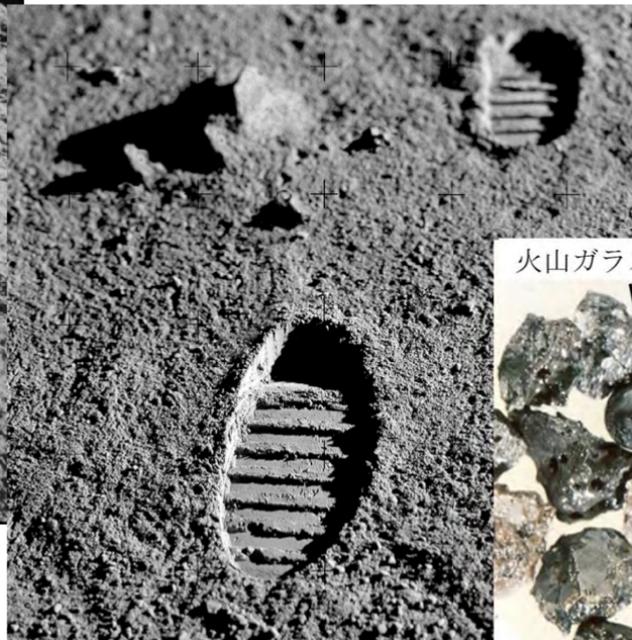


月レゴリス



アポロ12号宇宙飛行士が撮影した
サーバイヤー3号の着陸機パッド

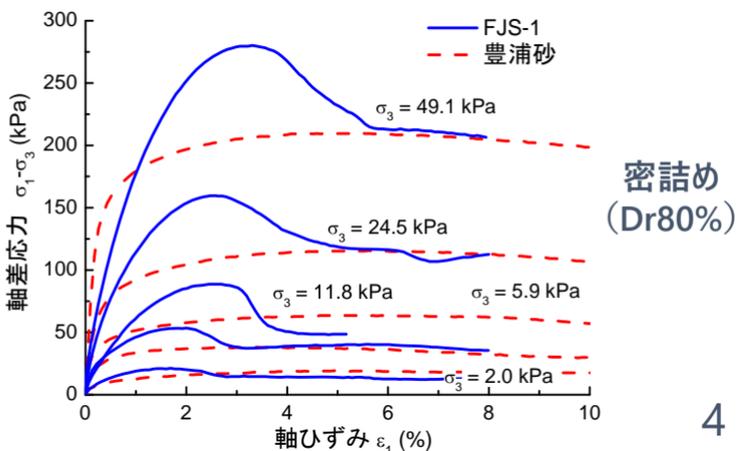
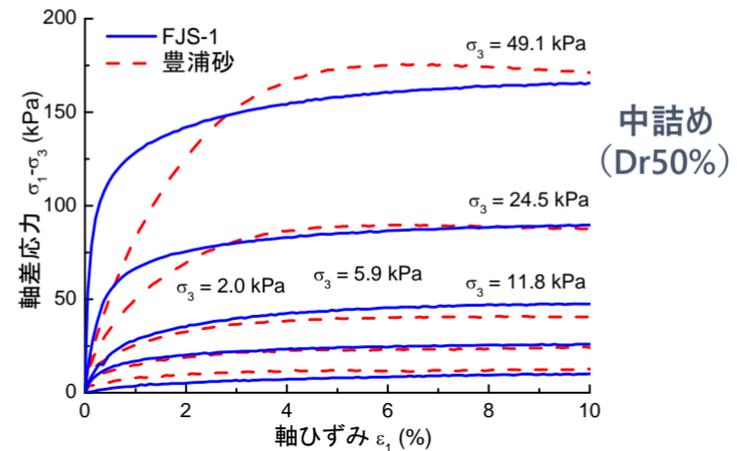
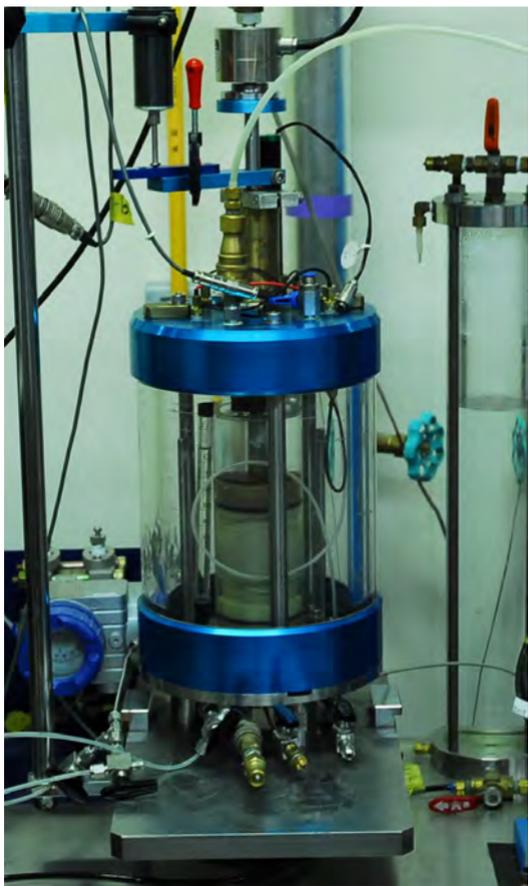
アポロ宇宙飛行士の足跡



リターンサンプルの拡大写真
(1mmふるい残留試料)

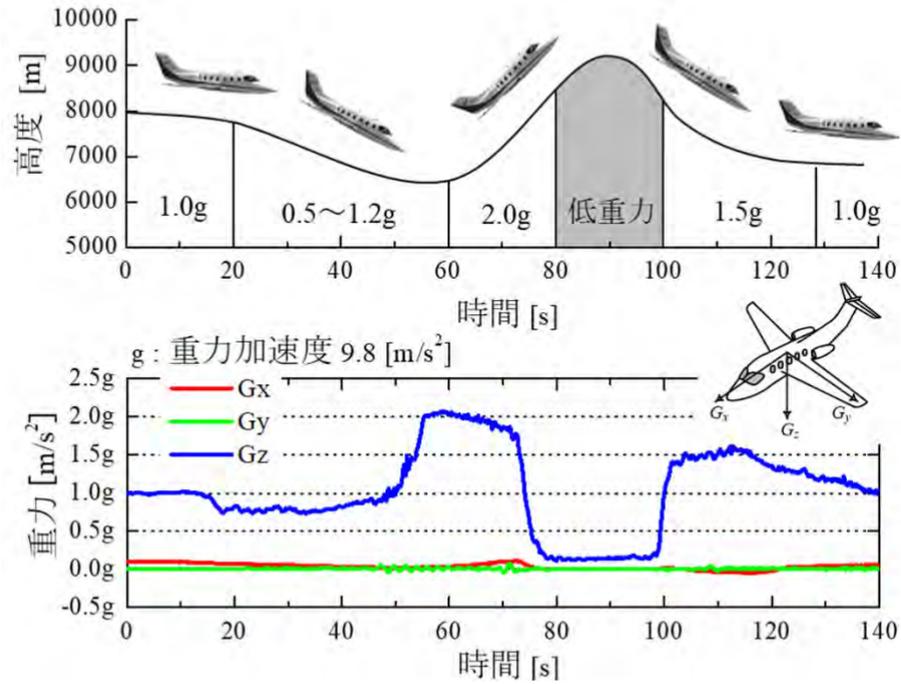


地上砂と月面土（シミュラント）、土要素レベルでの違い



低重力場におけるレゴリスの挙動

Parabolic Flight Experiment

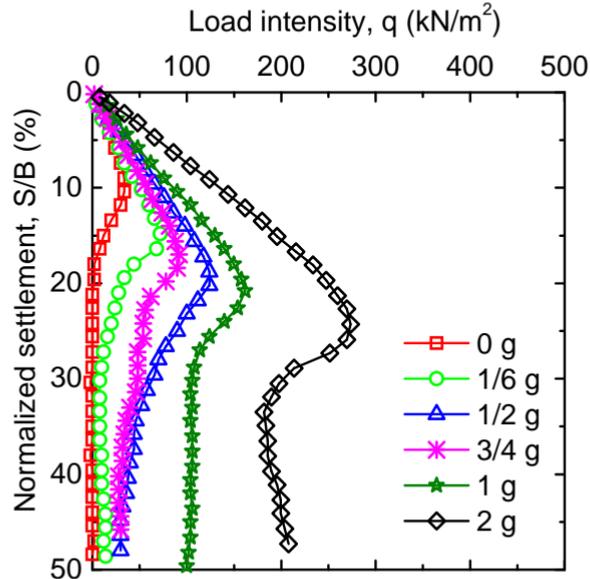
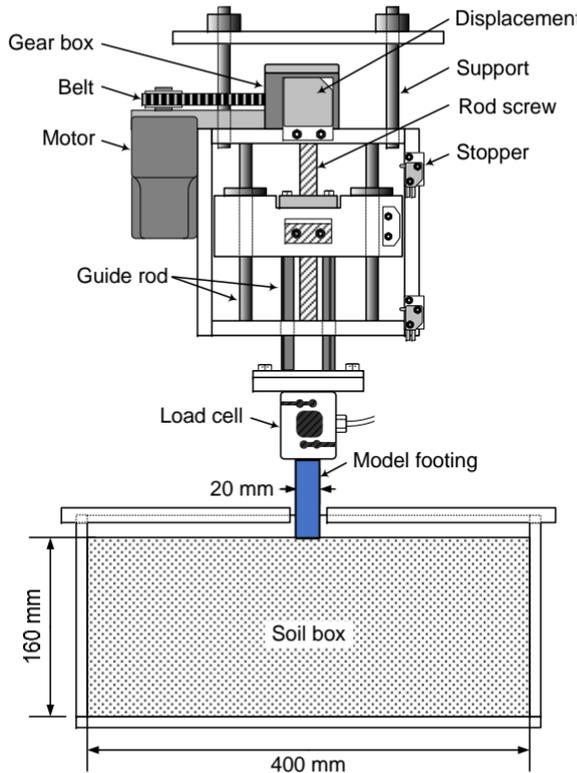


Mitsubishi MU-300

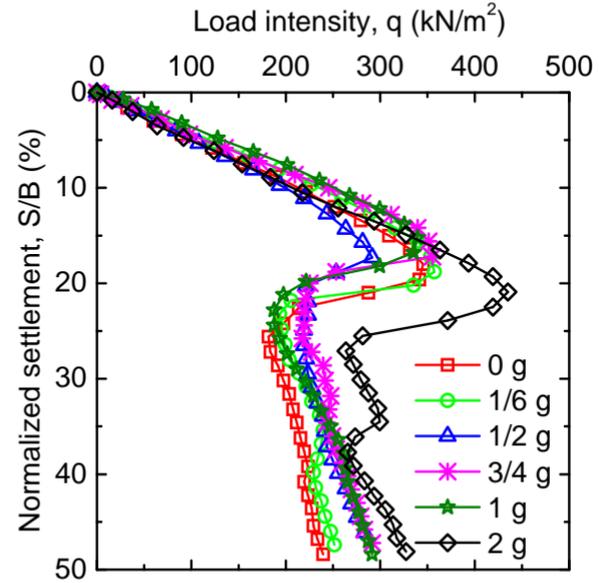
放物線飛行の間（高低差：約3,000m）、20-40 秒の低重力場が実現する

地盤の支持力は理論通り重力に比例するのか？

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



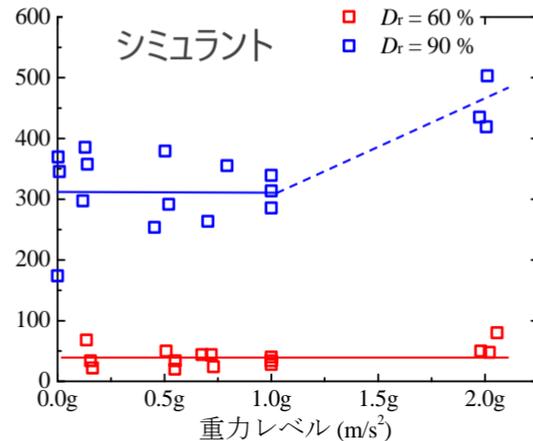
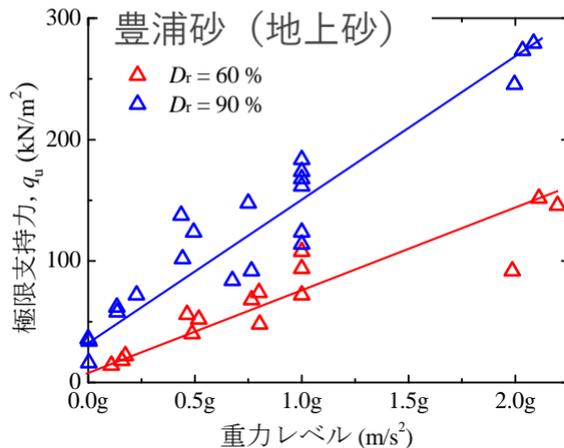
地上砂 (豊浦砂)



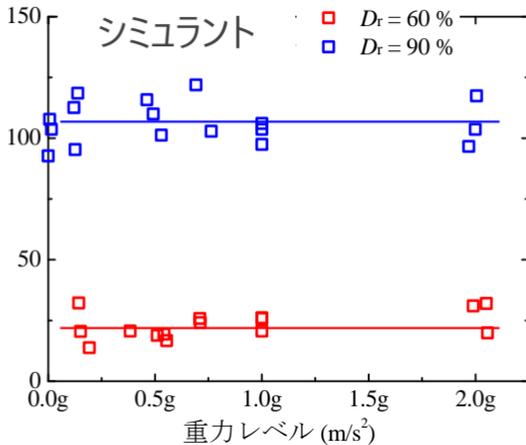
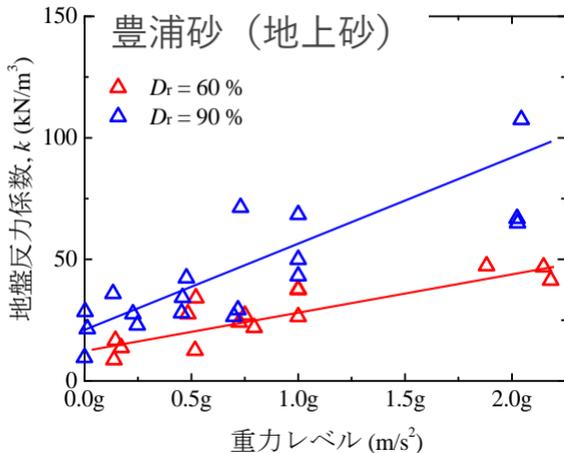
月面模擬土 (FJS-1)

支持力は理論通り重力に比例するのか？

極限支持力 →



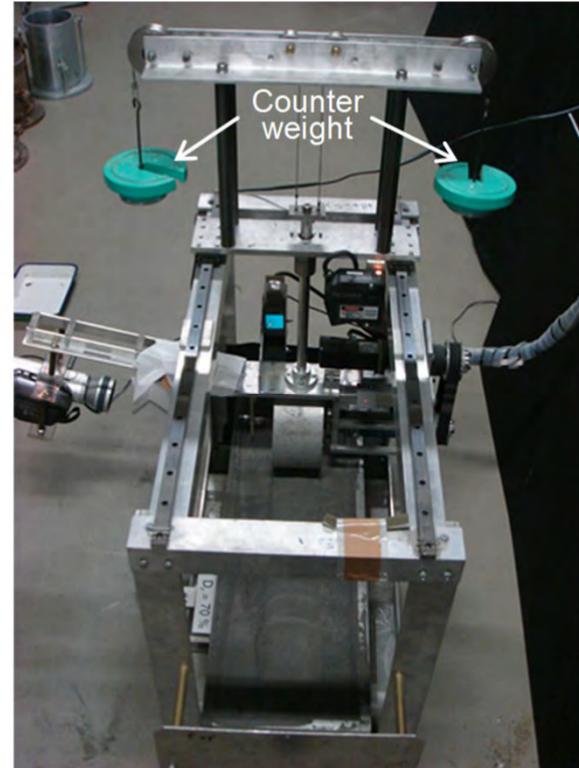
地盤反力係数 →



車輪走行：低重力は敵か味方か

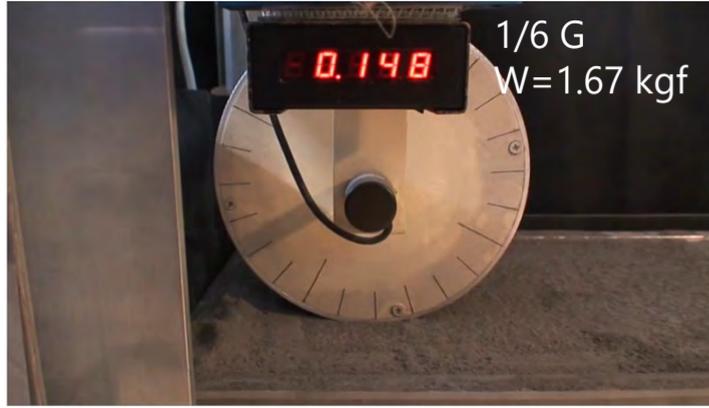
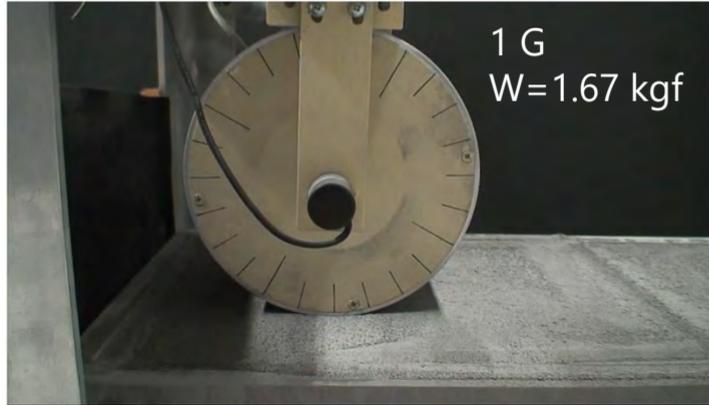


航空機実験
(車輪荷重と地盤内応力が変化)



地上実験
(車輪荷重のみが変化)

車輪走行：低重力は敵か味方か



月探査・基地建設に向けた測量・地盤調査法～施設設計法

立命館大/芝浦工大/東京大/港湾空港技研/アジア航測/基礎地盤コンサルタンツ/ソイル&ロックエンジ

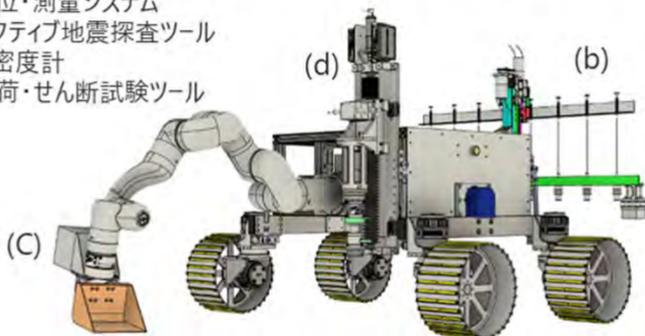
月面の3次元地質地盤図を描き、
探査機の設計、月面基地建設の設計に貢献する！



RGIS：月面無人地盤調査システム

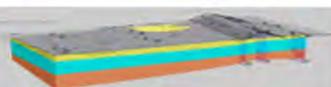
- ① 非GNSS環境における測位・地形測量
- ② 月面で使える地質・土質試験ツール
- ③ 無人調査ロボット
- ④ 月面施設の調査・設計法の確立

- (a) 測位・測量システム
(b) アクティブ地震探査ツール
(c) RI密度計
(d) 載荷・せん断試験ツール



3次元地質地盤図

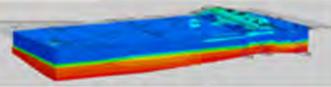
- 空間データ基盤
マッピング
モデリング
GIS



地層モデル



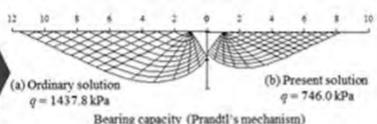
支持層サーフェスモデル



ボクセルモデル

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



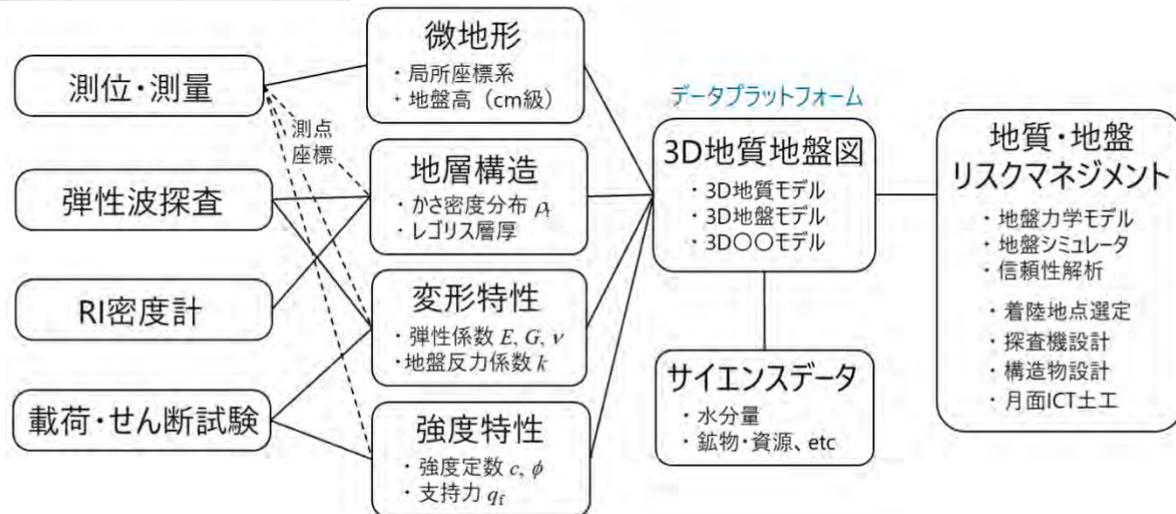
地震探査 (弾性波探査)



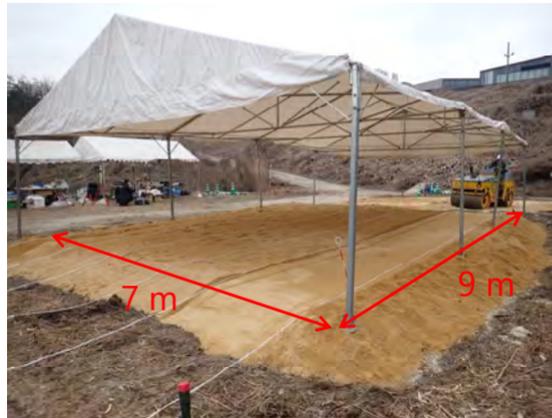
RI密度計



载荷・せん断試験



地上検証用モデルを用いたフィールド模擬実験



① 表土の排土



② 掘削

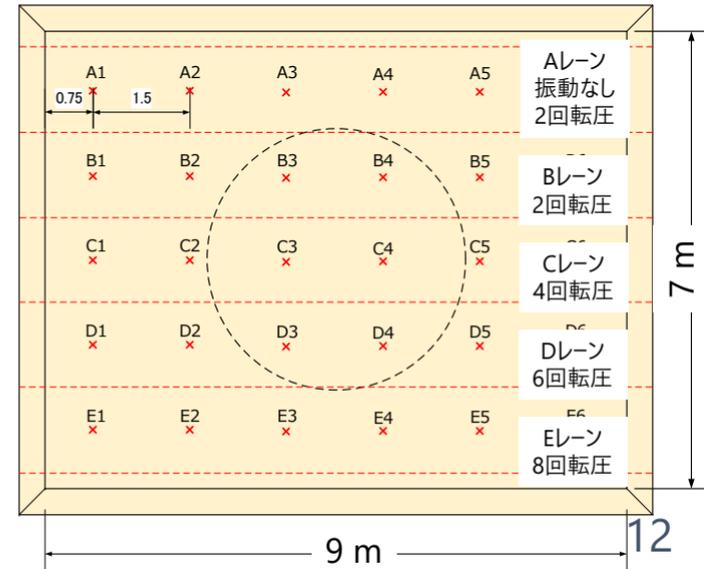
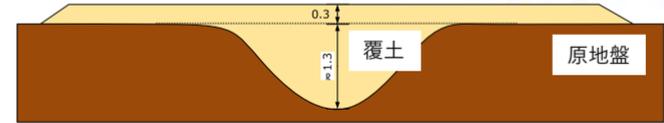


③ 覆土



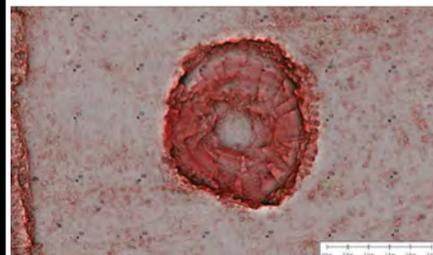
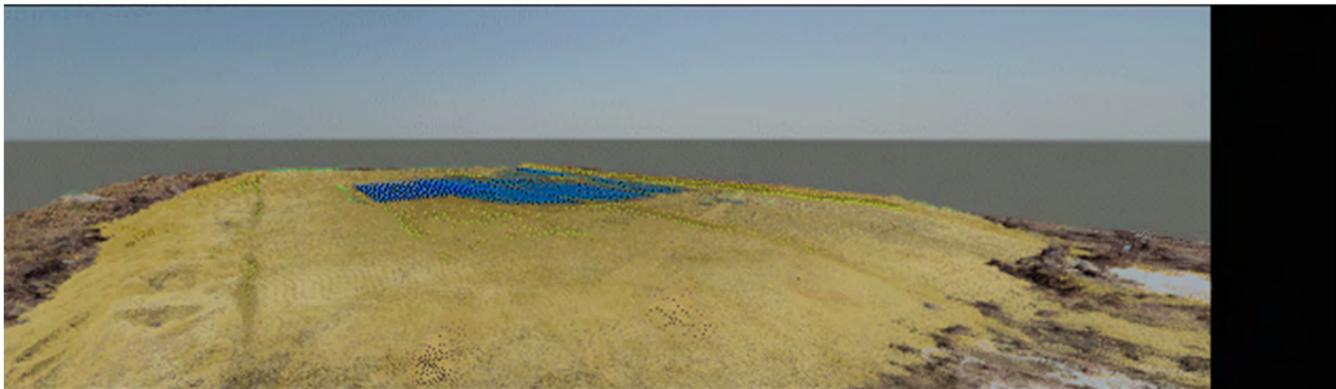
④ 転圧

4tローラ

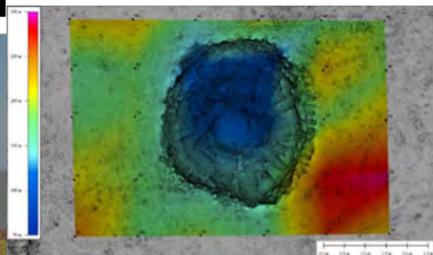
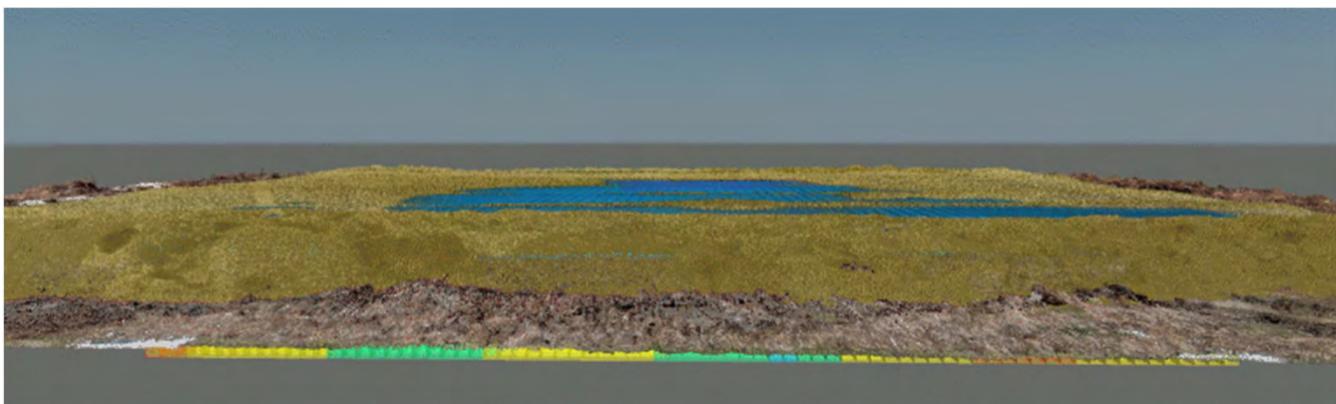


3次元地質地盤図の作成 (1/2)

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)



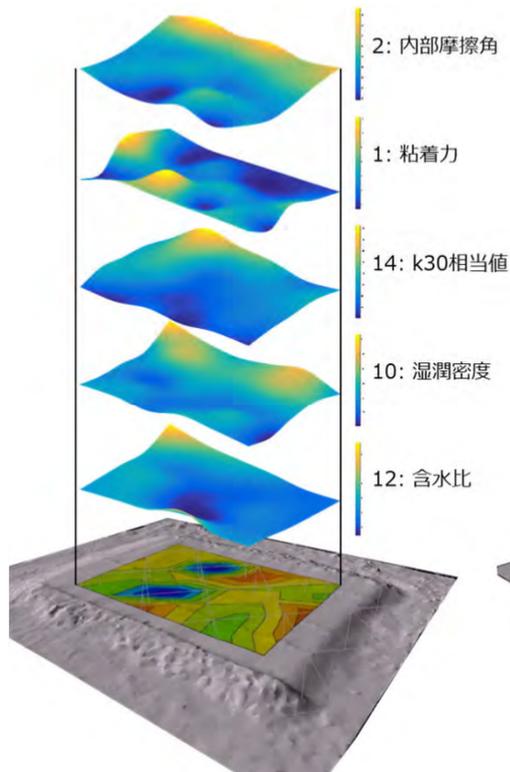
赤色立体地図(D=0.8m)



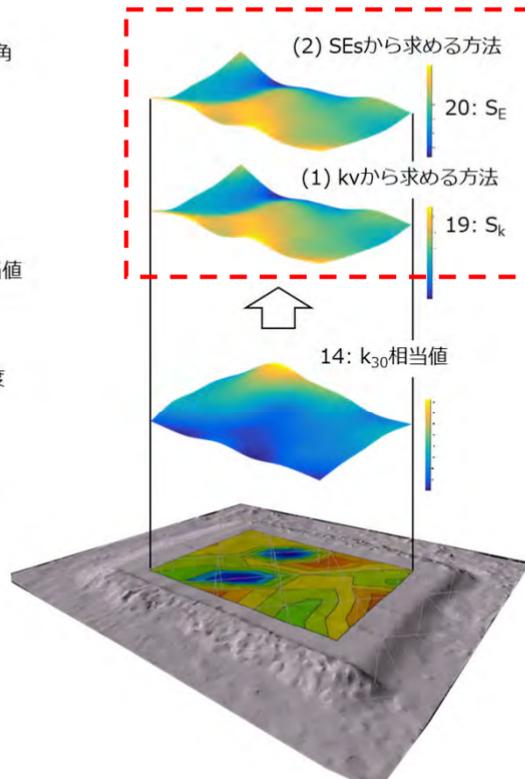
S波速度分布図と地形図の合成(D=0.8m)

3次元地質地盤図の作成 (2/2)

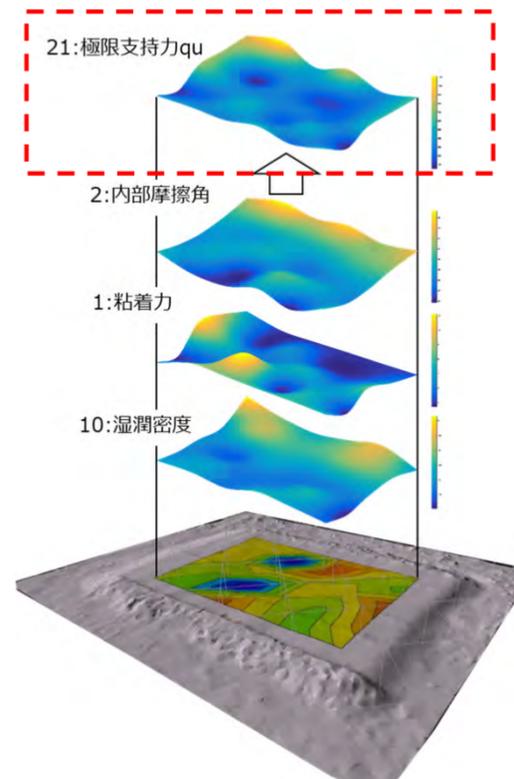
各種土質計測とその結果に基づくレゴリス挙動予測



計測データのオーバーレイ



即時沈下量の分布図

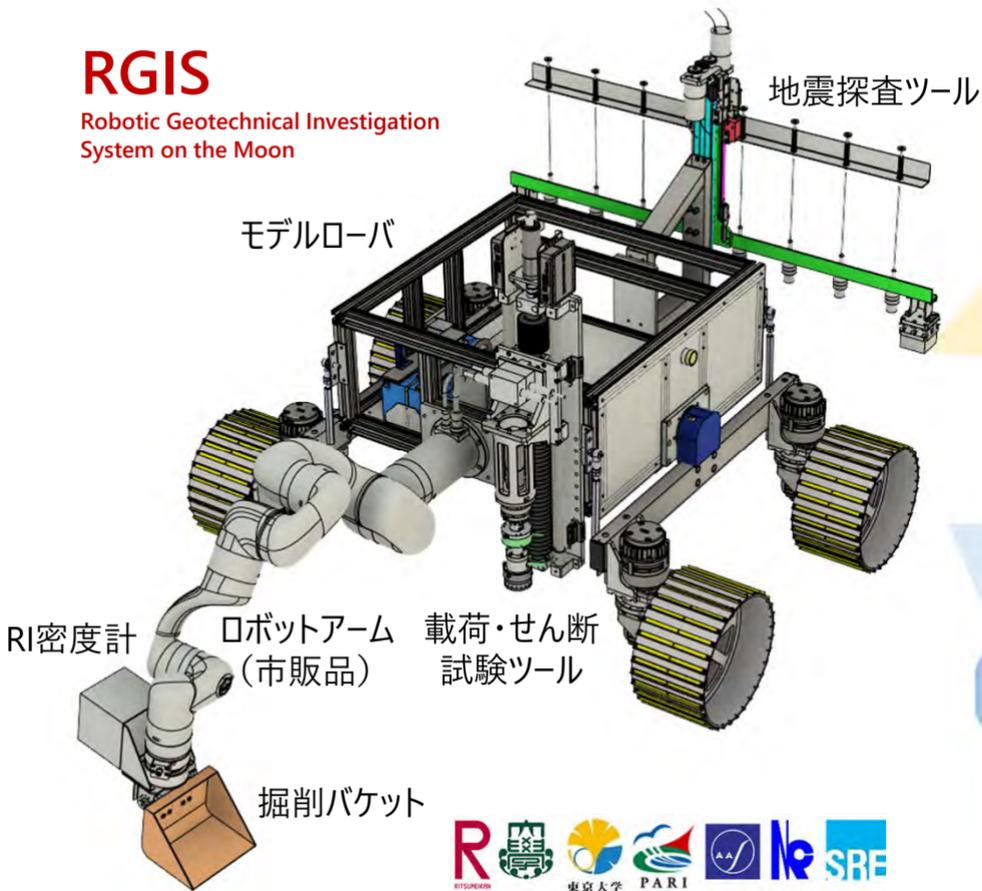


極限支持力の分布図

Robotic Geotechnical Investigation System : RGIS

RGIS

Robotic Geotechnical Investigation System on the Moon

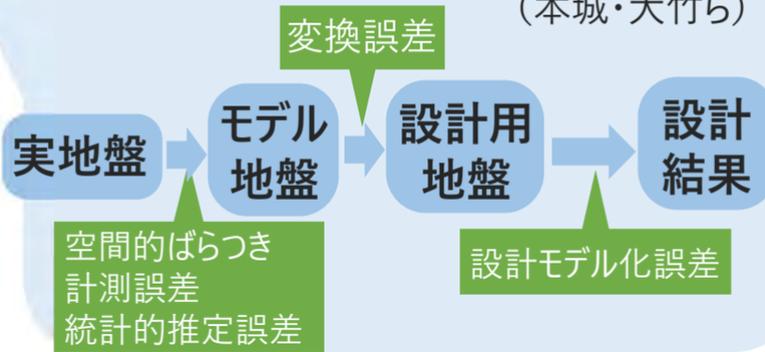


例えば、

ランダ着陸時の応答を予測するために：

- 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？

地盤解析における考慮すべき不確実性
(本城・大竹ら)



地上には試験・調査マニュアル、設計基準書があるが・・・

地盤材料試験の方法と解説

— 二分冊の2 —

社団法人 地盤工学会

地盤調査の方法と解説

— 二分冊の2 —

公益社団法人 地盤工学会

道路土工構造物技術基準

道路土工構造物技術基準・同解説

平成29年

公益社団法人 日本

道路土工 盛土工指針

(平成22年度版)

平成22年4月

社団法人 日本道路協会

道路土工 盛土工指針

道路土工 軟弱地盤対策工指針

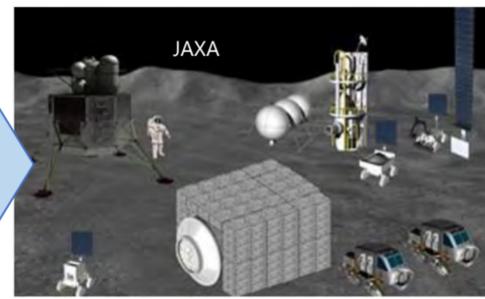
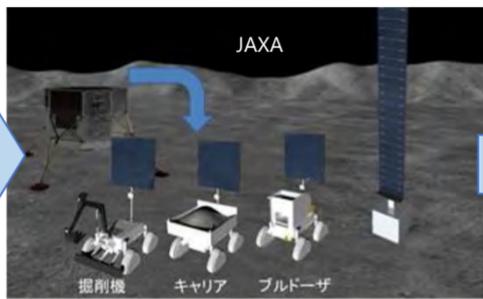
(平成24年度版)

平成24年8月

公益社団法人 日本道路協会

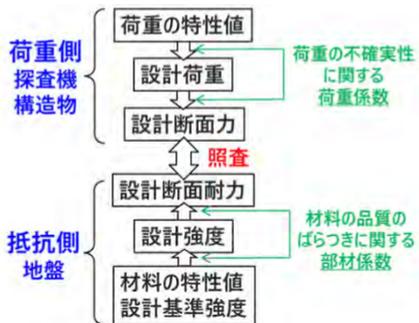
道路土工 軟弱地盤対策工指針

輸送機の発着ゾーンの調査・建設シナリオ



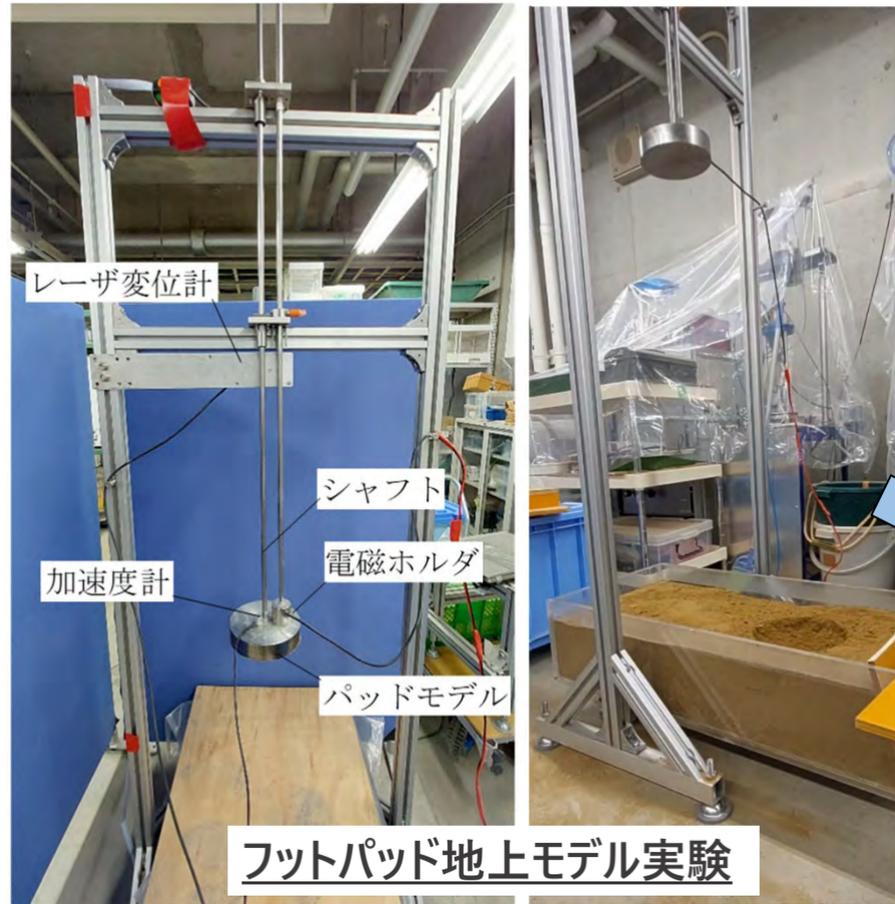
	フェーズ0 (2020年代後半)	フェーズ1 (2030年代前半)	フェーズ2 (2034年)
着陸条件	原地盤 ・航法支援なし ・地質・地盤情報なし	原地盤 ・航法支援あり ・地質・地盤情報あり	発着ゾーン (人工地盤) ・航法支援あり ・所定の性能を持つ人工地盤
調査目的	・次回着陸ポイントの選定 ・月面拠点の建設候補地の選定	・月面施設 (主要施設) の設計・施工のための調査	・月面施設拡張のための調査

月面における
性能照査型
信頼性設計

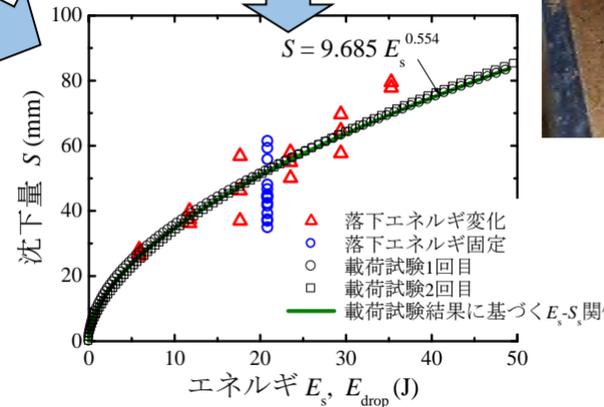
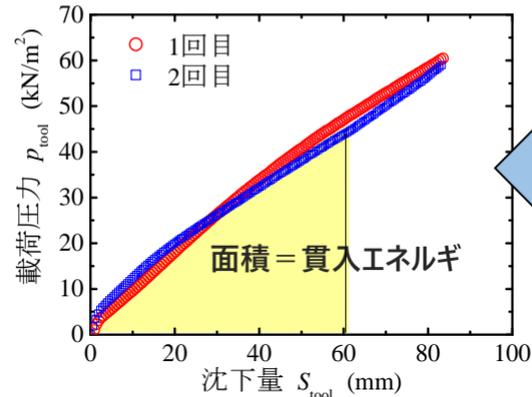


- ① ランダ着陸・離陸において、地盤 (舗装) に作用する荷重の定義
- ② 地盤 (舗装) に求められる性能の定義
- ③ 性能を規定する基準や指標 (設計の照査項目) の定義
- ④ 照査項目の計算手法の確立
- ⑤ 照査項目の計算に必要な地盤特性・土質パラメータの定義

例題) 着陸機フットパッドの沈下量予測



調査ツールによる载荷試験

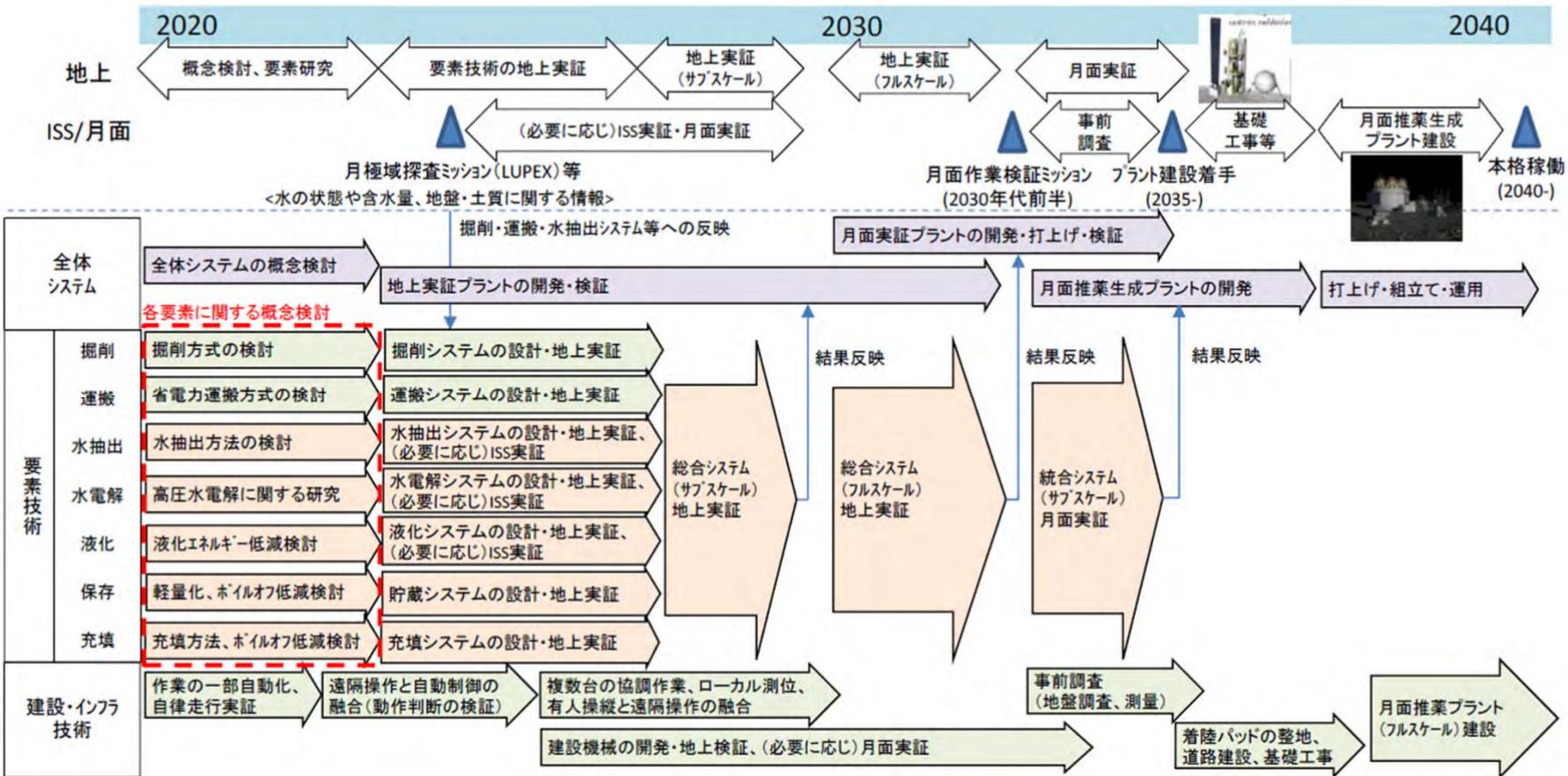


過酷な月面環境と基地建設のための課題

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

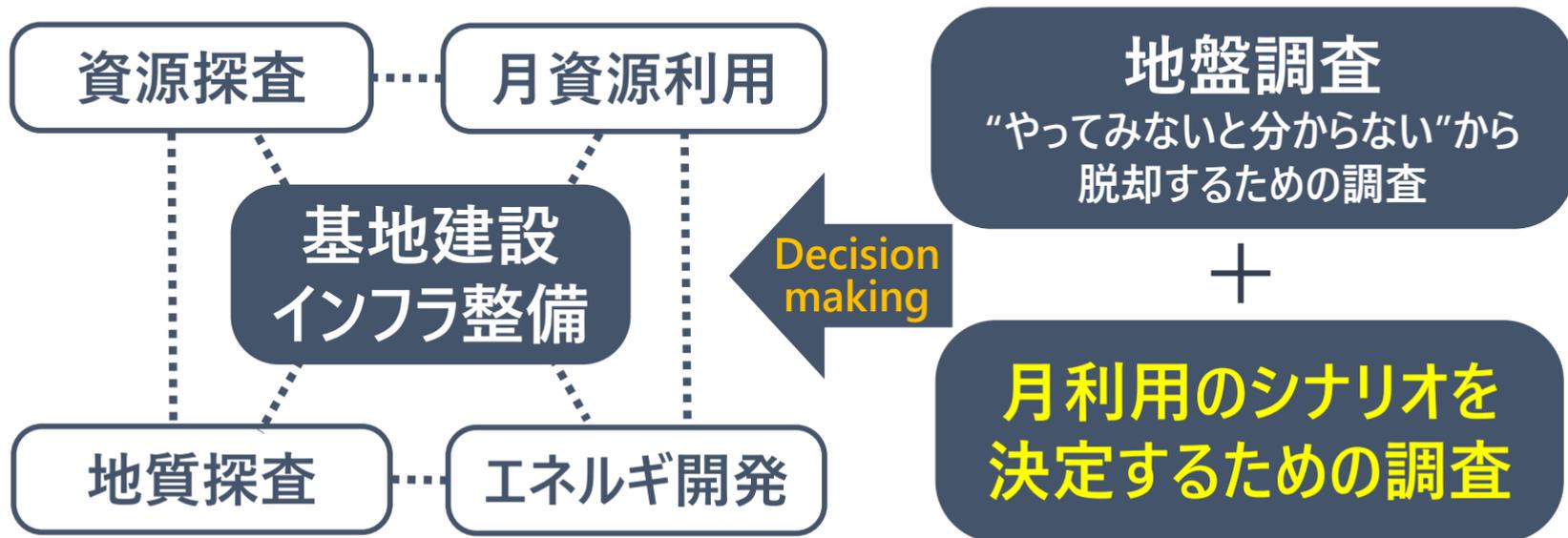
JAXA 月面推薬生成プラントの実現に向けた技術ロードマップ

JAXA日本の国際宇宙探査シナリオ（案）2021 P576から抜粋



月面開発における土木の役割

土木は、計画・技術をつないで社会活動を支える総合工学



どのフェーズで、何を、どのように、
調べないといけないのか？

ご清聴ありがとうございました。

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。