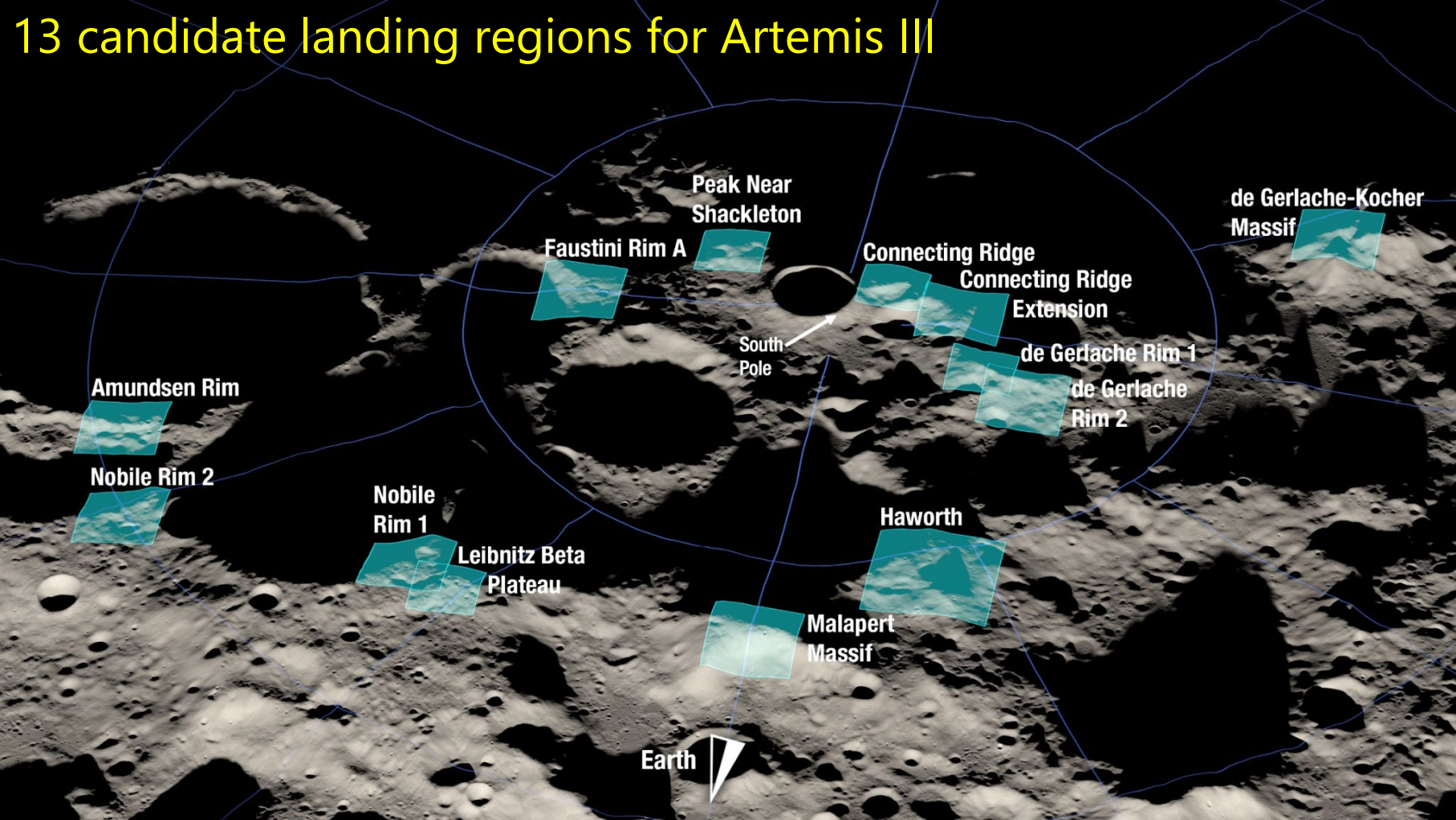


月面の地盤調査とデータ活用

小林泰三（立命館大学） kobat@fc.ritsumei.ac.jp

共同研究者 立命館大学（伊藤真一／加古川 篤）
芝浦工業大学（中川雅史）
東京大学（辻 健）
横浜国立大学（尾崎慎吾）
港湾空港技術研究所（松村 聡／近藤明彦）
アジア航測(株)（滝川正則／北村啓太郎／佐野寿聡）
基礎地盤コンサルタンツ(株)（米岡 威／尾高潤一郎／細堀健司）
ソイルアンドロックエンジニアリング(株)（池永太一／谷口 龍）

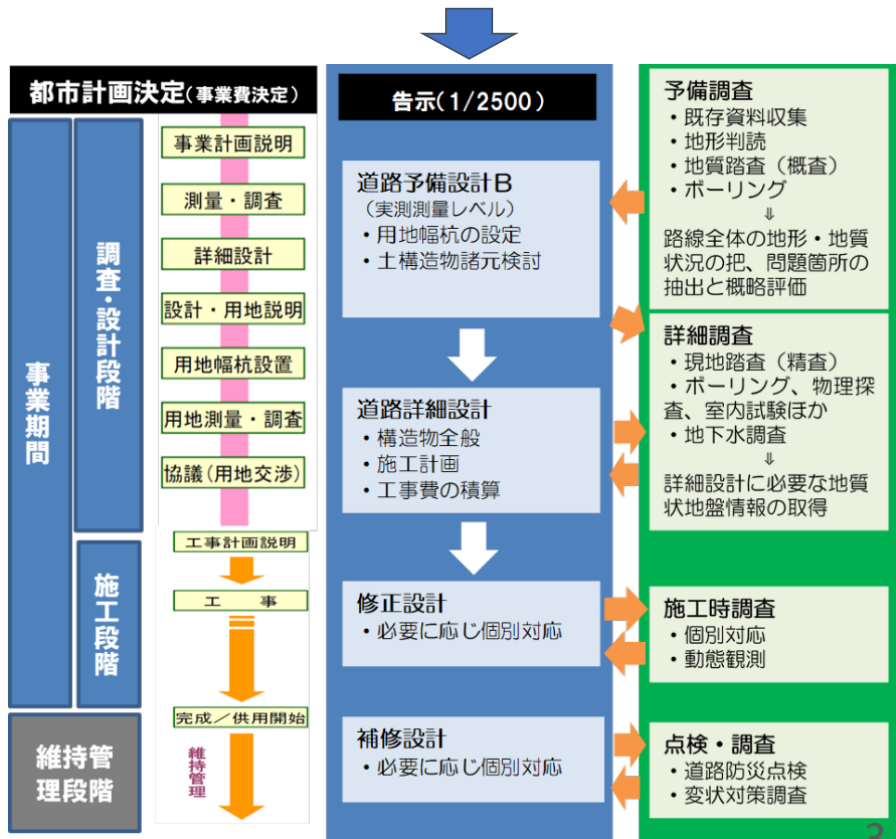
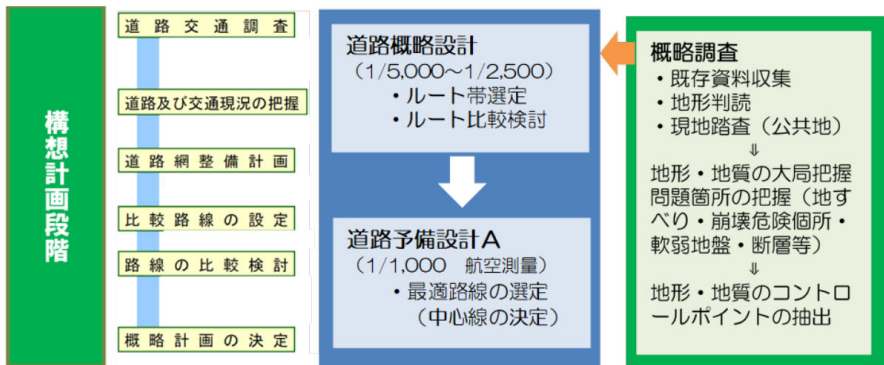
13 candidate landing regions for Artemis III



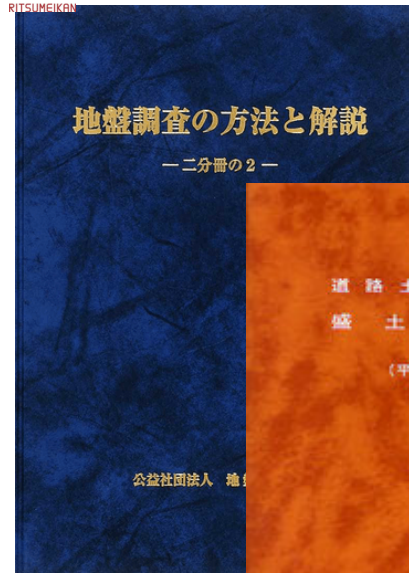
道路事業（地上）における設計と調査の流れ

【土木研究所】事業における地質・地盤リスクマネジメント
検討委員会：第1回委員会資料からの抜粋

https://www.pwri.go.jp/jpn/research/saientan/tishitsu-jiban/pdf/shiryuu_005.pdf



R 地上には試験・調査・設計マニュアルがあるが...



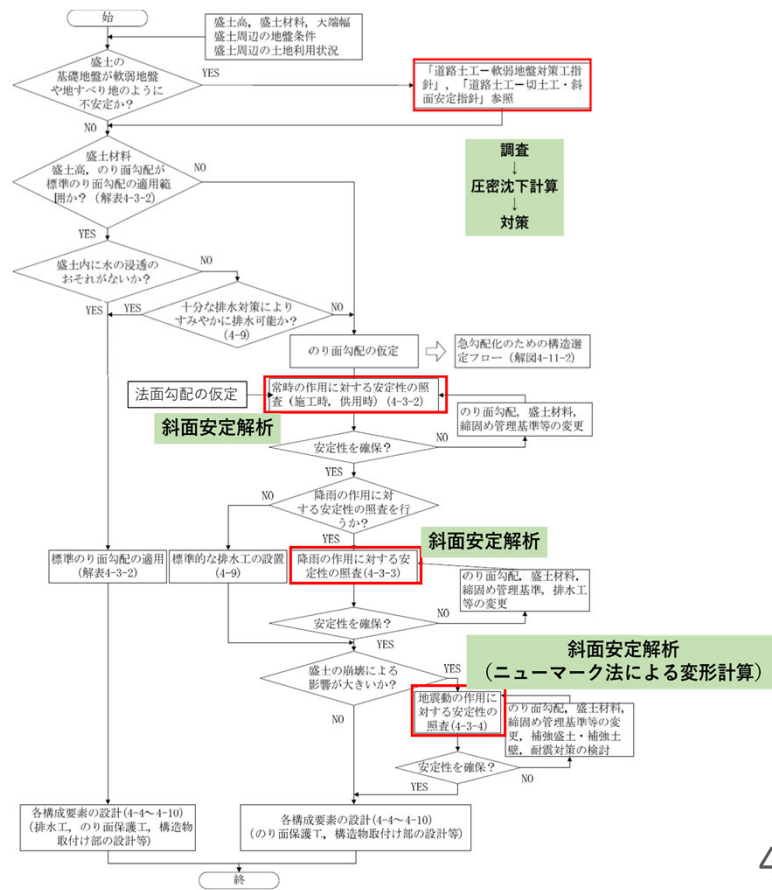
地盤調査の方法と解説



道路土工 盛土工指針



道路土工 軟弱地盤対策工指針

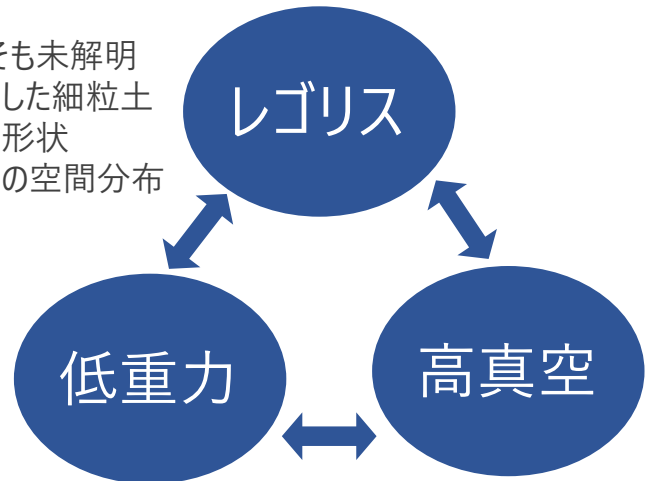


R 地球の調査・設計はそのまま使えない！

RITSUMEIKAN

月環境を考慮した 調査・設計法の必要性

- そもそも未解明
- 乾燥した細粒土
- 粒子形状
- 特性の空間分布



- レゴリス挙動
- 地盤内応力
- 反力不足

- 静電気力、ファンデルワールス力
- 摩擦特性

アポロ12号宇宙飛行士が撮影した
サーベイヤー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)



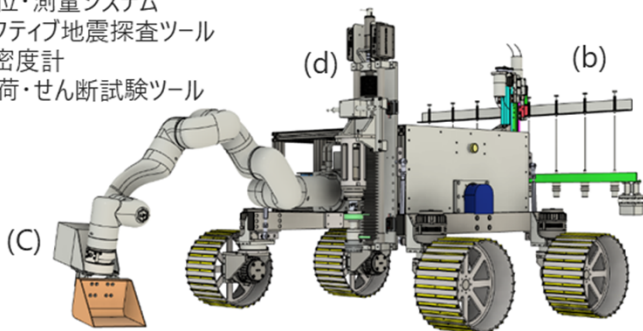
月探査・基地建設のための調査法～施設設計法の構築

宇宙シナリオ（構想）を計画・設計（技術論）に落とし込むためには「調査・設計法」が必須。
探査・基地建設には月面の地質・地盤リスクアセスメント／マネジメントが必須。

RGIS：月面無人地盤調査システム

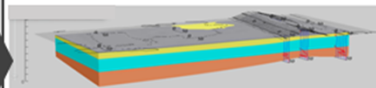
- ① 非GNSS環境における測位・地形測量
- ② 月面で使える地質・土質試験ツール
- ③ 無人調査ロボット
- ④ 月面施設の調査・設計法の確立

- (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

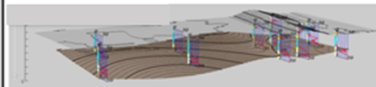


3次元地質地盤図

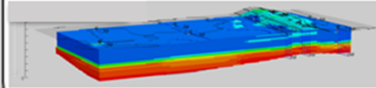
- 空間データ基盤
- マッピング
- モデリング
- GIS



地層モデル



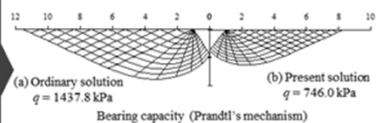
支持層サーフェスモデル



ボクセルモデル

データ活用

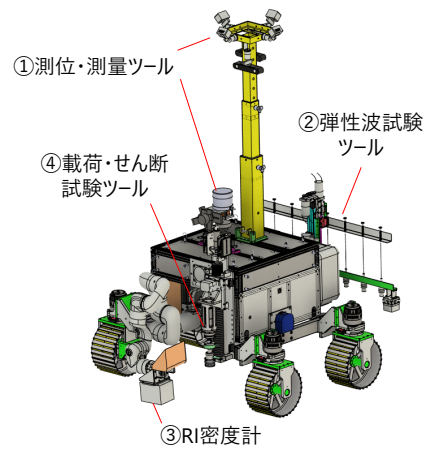
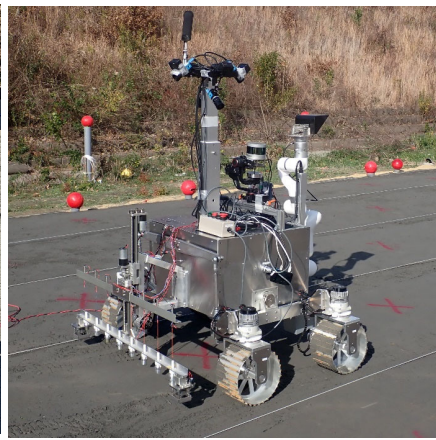
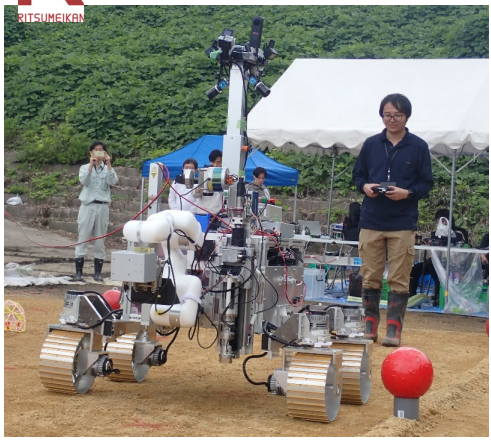
- 構成則・地盤解析
- 探査機シミュレーション
- 信頼性解析・性能設計
- 月面土工BIM/CIMモデル



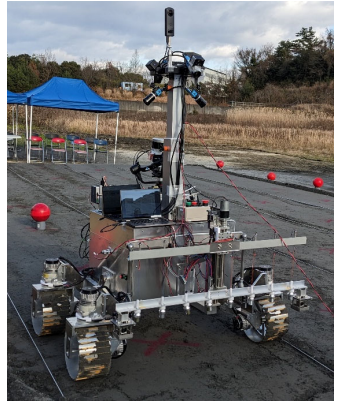
探査ローバシミュレータ (CMLab)

R RGIS : Robotic Geotechnical Investigation System

RITSUMEIKAN



① 測位・測量



② 弾性波試験

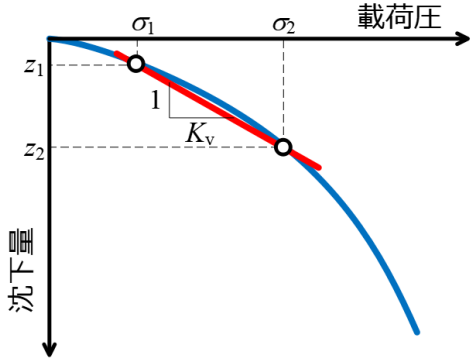
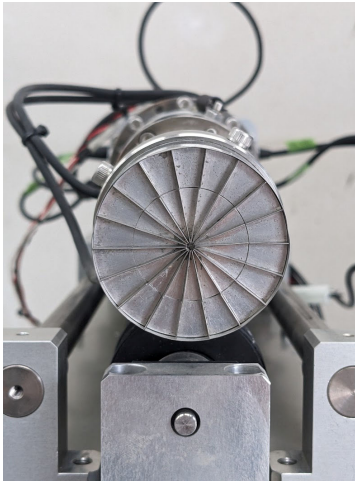
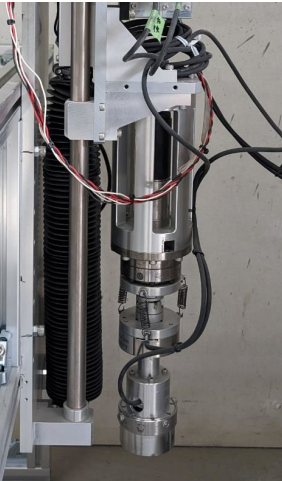
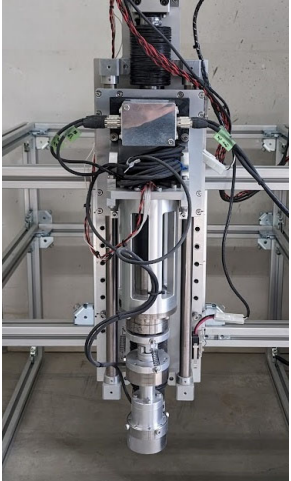
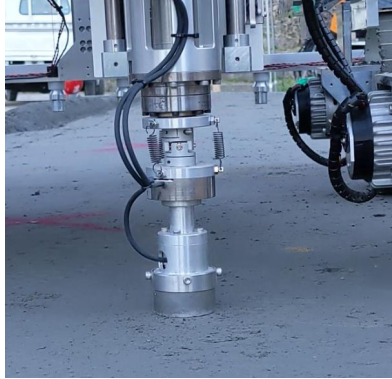
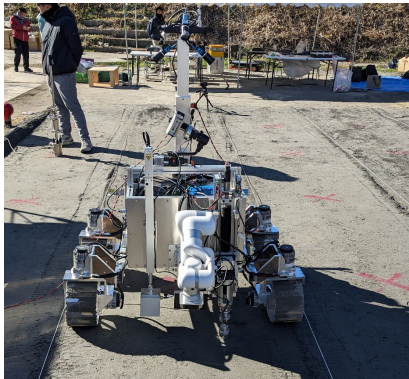


③ RI密度計



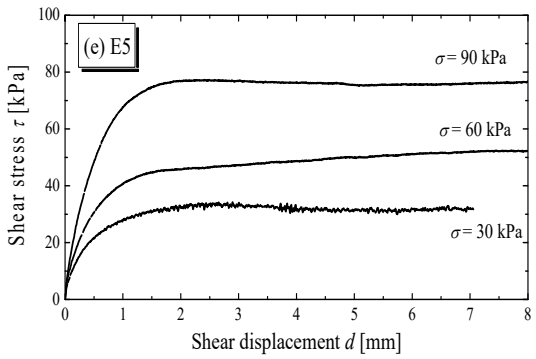
④ 載荷・せん断試験

R 载荷・せん断試験ツール



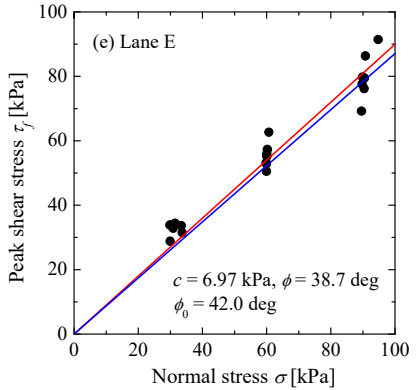
■ 载荷試験 (貫入試験)

→ 地盤反力係数, ヤング率等の「レゴリスの硬さ」



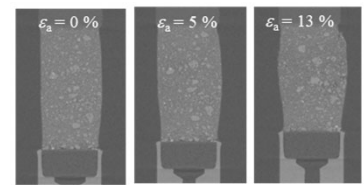
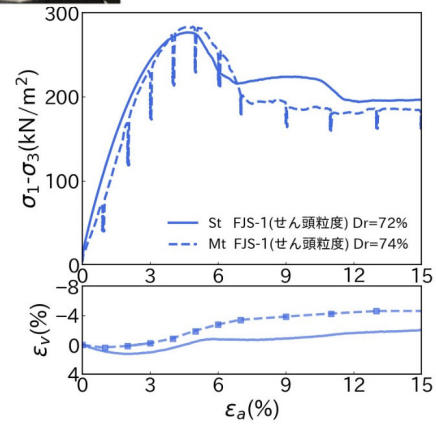
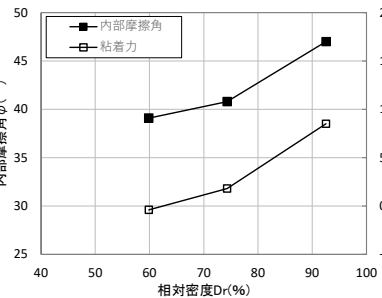
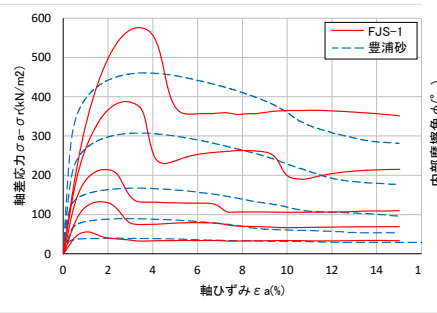
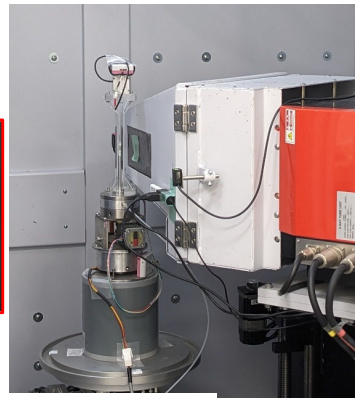
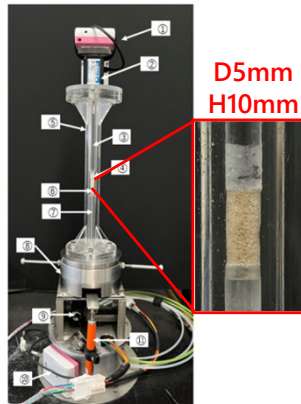
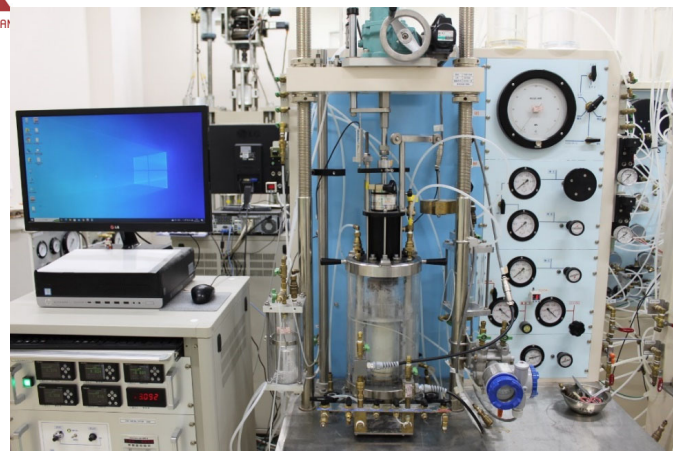
■ 回転せん断試験

→ 粘着力, 内部摩擦角の「レゴリスの強さ・強度」

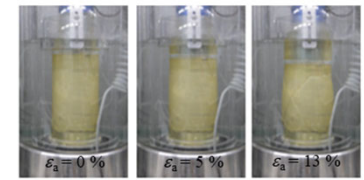


レゴリス (シミュラント) の土質特性把握

アポロ17号リターンサンプル
5g !!



超小型三軸圧縮試験

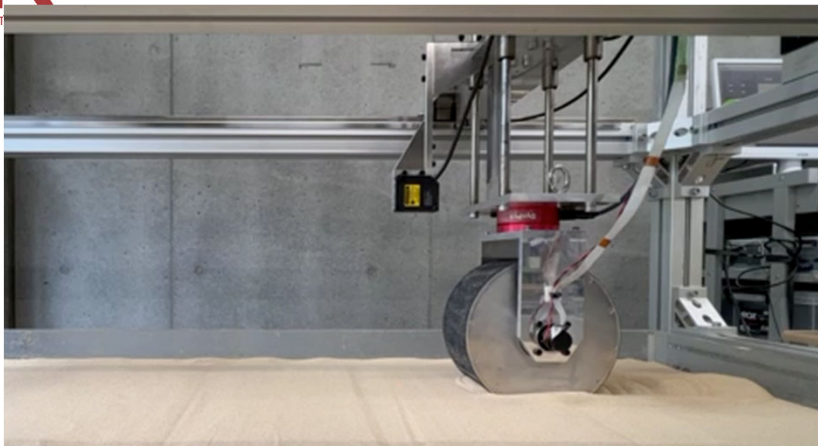


標準三軸圧縮試験

標準三軸圧縮試験 (Φ50, H100) による
土質試験 (地上砂、シミュラントの比較)

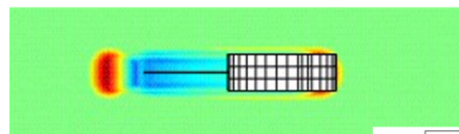
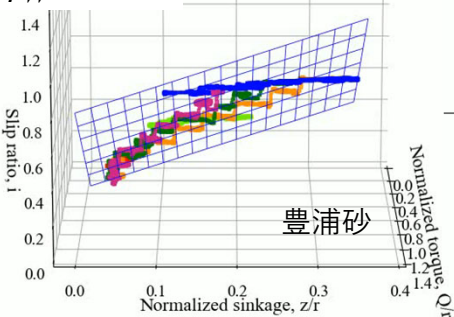
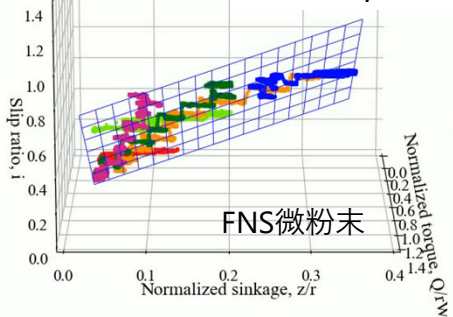
X線マイクロCTを利用した超小型三軸圧縮試験 (実レゴリス)

R テラメカニクスへの応用 (シミュレータ開発に向けて)

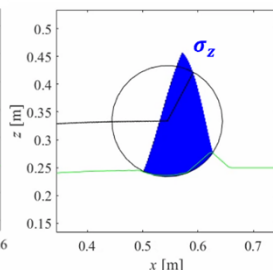
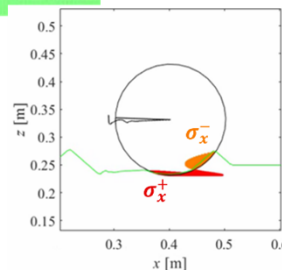
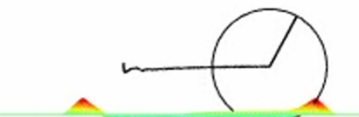


スリップ率 i - 沈下量 z - トルク Q が平面に乗る

$$a \cdot i + b \cdot \frac{z}{r} + c \cdot \frac{Q}{rW} + d = 0$$



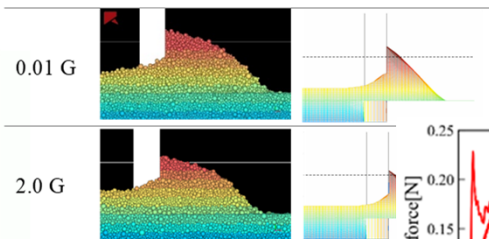
3D車輪走行
シミュレーション



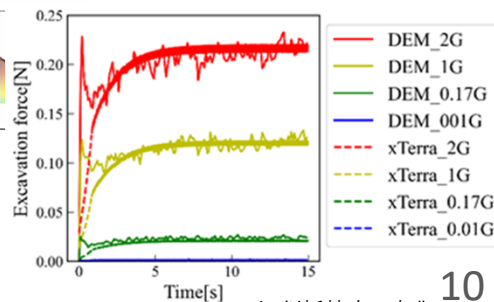
車輪に作用する接地圧分布

DEM

xTerramechanics



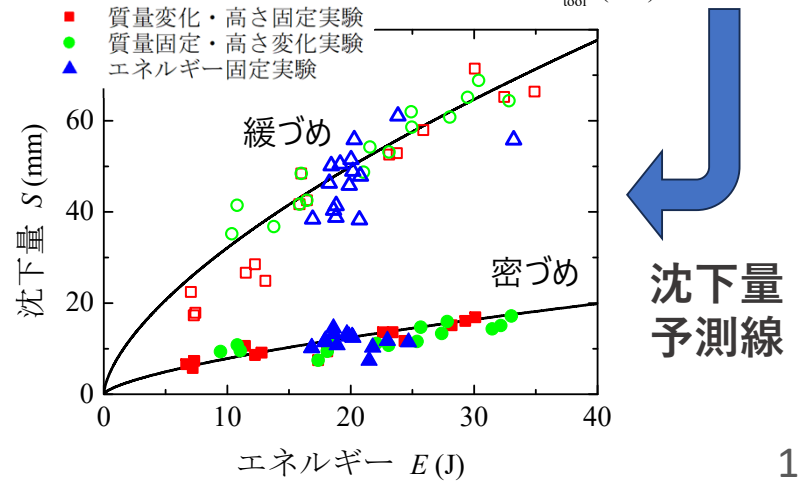
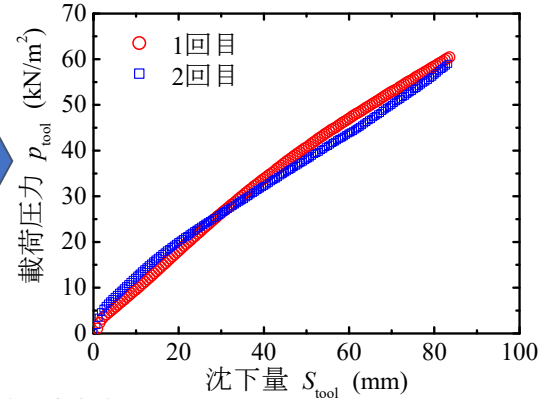
3D平刃切削
シミュレーション



切削抵抗力の変化

R 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



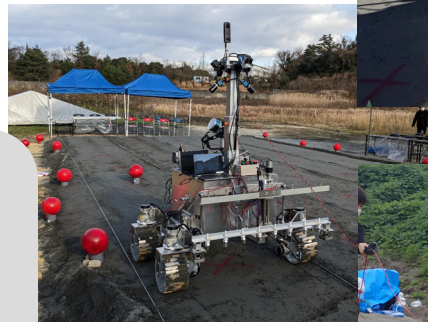
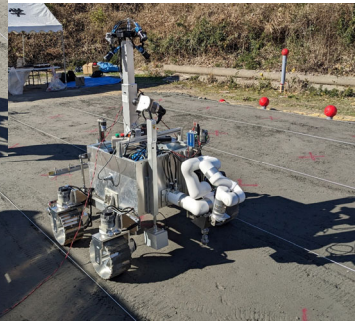
R まとめ（に代えて）

RITSUMEIKAN

- 「構想（シナリオ）」を「計画（プラン）」に落とし込んでいくためには、「調査」が必要。
- 「調査」は、「設計（探査機・構造物）」と一体で考えることが重要。
- レゴリス、1/6G、高真空等の月面環境における設計（探査機シミュレータ、構造物設計法）の構築は大きな課題。

土木工学・地盤工学が貢献できること

- ・ ランダやローバ、サンプリングツール等の設計・運用計画支援
- ・ 着陸ポイントの選定 → 離発着場の整備
- ・ ローバの安全な走行経路の選定 → 道路の整備
- ・ 整地（土工計画：掘削性、積み込み性、走行性、締固め特性）
- ・ 天文台、構造物の基礎工事



謝辞

本研究は、国土交通省・文部科学省「月面等での建設活動に資する無人建設革新技術開発推進プロジェクト」の委託を受けて行ったものです。

