

## 6. 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

コマツ      〇菊池 直彦  
コマツ      杉村 俊輔  
コマツ      宮井 慎一郎

### 1. 目的および背景

本プロジェクトは、「宇宙開発利用加速化戦略プログラム」(スターダストプログラム)の一環として、2021年7月に選定された「宇宙無人建設革新技術開発」(国交省主担当、文科省連携)の公募に応募し、選定を受けたことから始まった。

応募にあたり、地上の建設現場で喫緊の課題となっている人手不足と働き方改革への対応と生産性の向上や環境問題を解決するために実施している建設機械の電動化と自動化・自律化、建設現場のDX化の先に、月面での無人施工の実現があると考え、月面建設機械の研究開発を提案した(図1)。

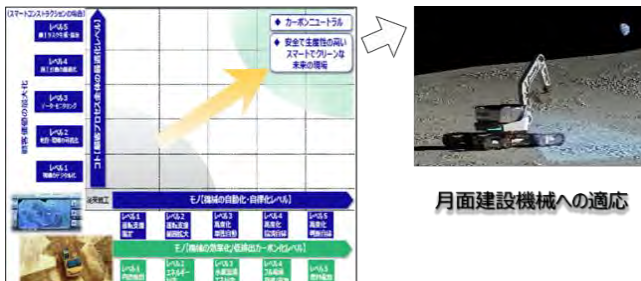


図1 未来の現場と月面建設機械

### 2. 掘削シミュレータ

月面建設機械の開発は地上の建機と異なり、現地での実機による試験や確認が困難なため、まずは高精度な「デジタルツイン技術」構築が必要と考えた。その可能性を検証するために、現場環境と建設機械をサイバー空間上に再現して掘削シミュレーションを実施した。本研究では、マルチボディダイナミクスと離散粒子シミュレーションの連成が可能であり、リアルタイムレベルでの高速計算が可能な市販の物理エンジンAGX Dynamics(以下、AGX)を用いて、建設機械と土のモデル化を行った。

#### 2.1. 月面建機モデル

本研究では、月面で稼働することを想定して地上建機の3トンクラスのショベルをベースにモデル化した。作業機はブーム、アーム、バケットの3つのリンクを回転ジョイントで結合し、回転アクチュエータで駆動するモデルとした。本シミュレータでは、バケットの刃先位置と姿勢が目標に沿うように、各アクチュエータの回転角度や角速度を入力して作業機を動かした。

#### 2.2. 月面の土モデル

本研究では、AGXの土モデルの中でもAGX Terrainモジュールを用いた。このモデルは、グリッド要素と粒子要素で構成される。グリッド要素は連続体として解くことで土の圧縮挙動を、粒子要素は個々の接触計算によって掘削時の土の不連続な挙動を表現する<sup>1)</sup>。グリッド要素と粒子要素の境界は、バケット位置と土質力学に基づいて決定される。

月面環境を想定した土質パラメータは月面模擬土(FJS-1)を用いて検討した。ここでは、土を掘削する装置であるバケットへ作用する掘削抵抗力 $F$ と、バケット周りの土挙動ならびに掘削土量について、シミュレータと実験を比較することで決定した。図2、3に土挙動、バケット掘削抵抗力について、シミュレータと掘削ベンチ試験の比較をそれぞれ示す。試験、シミュレータともに同条件で5回実施した結果の平均抵抗力として示す。掘削終了時(12秒)の $F_z$ の値が掘削土量であり、シミュレータと試験で精度良く一致することが確認できた。掘削終了時までの掘削抵抗の変化、バケット周りの土挙動についても概ね再現できた。

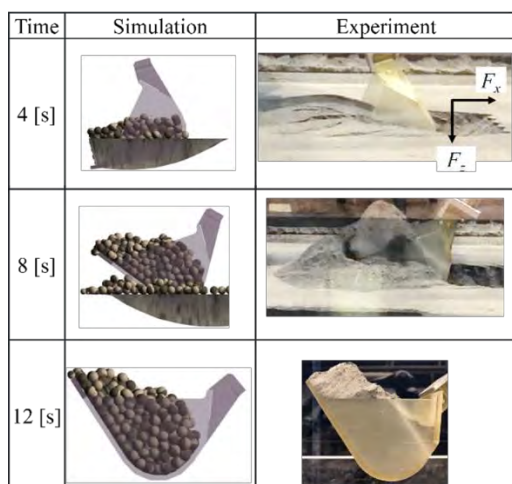


図 2 バケット周りの土挙動の比較

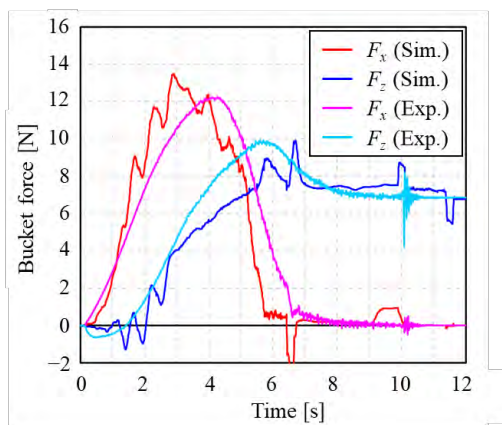


図 3 バケット掘削抵抗の比較

### 2.3. 月面建機モデルによる掘削シミュレーション

月面建機モデルと月面の土モデルで掘削シミュレーションを実施した(図 4)。車体と地面の接地面の長さを前方は+30%, 後方は+10%として, また作業機の動かし方の工夫を加えることで, 低重力下でも車体重量を大きくすることなく, 目標とする 1 杯 200kg 程度の掘削ができることを確認できた。また, 1 回の掘削に必要なエネルギー量は, 機械や電氣的なロスを考慮せずに, 約 8kJ であることが確認できた。

また, 月面建機を用いた施工を評価するための準備として施工シミュレータのフレームワークを作成した。施工シミュレータは, 目標土量や目標地形形状を施工指示として入力し, 複数の作業から構成される施工計画のもとで, 施工は順次実施され, 施工指示の履行を目指す。シミュレーション結果として, 各作業の作業

時間, 土量, エネルギー消費等を入力する。本フレームワークを活用し, 施工の評価を進め, 月面建機のより最適な形状や制御を探索する(図 5)。

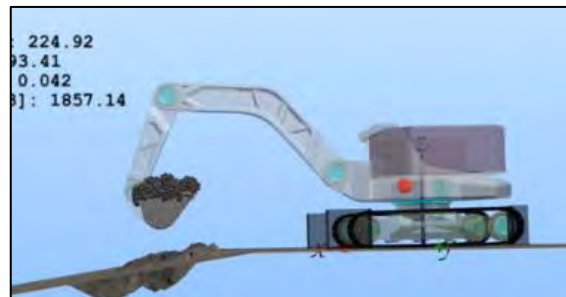


図 4 月面建機での掘削

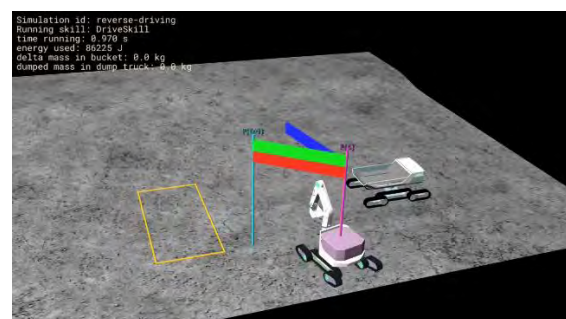


図 5 施工シミュレータの動作一例

### 3. 今後の計画

今後, 地上での施工の自動化の開発進捗を反映させることで月面建設機械の具体化を進め, 今後の月面建設計画に従い月面施工の実現性を検証していく。

### 謝辞

本研究開発は, 「宇宙開発利用加速化戦略プログラム・宇宙無人建設革新技术開発」の一環として, 国土交通省の委託を受けて実施したものである。ここに記し, 関係者に謝意を表する。

### 参考文献

- 1) M. Servin, T. Berglund and S. Nystedt: A multiscale model of terrain dynamics for real-time earthmoving simulation, Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences, Vol. 8, No. 11, pp. 1-35, 2021.