

第2回月面建設技術シンポジウム

Session 1 構想・計画

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

2024年3月22日



MAKE BEYOND

つくるを拓く

目次

1. 検討背景
2. 開発目的
3. 実現可能性のある展開構造物の選出
4. 非与圧型構造の検討
5. 与圧型構造の検討
6. まとめ

1. 検討背景

宇宙建設革新プロジェクト (イメージ)

Construction on MOON & EARTH

As of 2023.4.20

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

100年をつくる会社 鹿島 SHMZ BOSCH Invented for life KOMATSU R KYC KATO 住友林業 工学院大学 GIKEN

SHMZ MakMax 太陽工業株式会社 OBARASHI XAXA OBARASHI ILT JAMSS 大成建設 Panasonic

【本プロジェクト研究開発実施者：代表者及び共同実施者、全36者(重複込み)】

YOND

3

令和5年度(2023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 ボッシュエンジニアリング	
	施工 (測位)	月面適応のためのSLAM自動運転技術の開発	○大成建設 パナソニックアドバンステクノロジー	R&D (F/Sからの 移行)
	施工 (全体システム)	トータル月面建設システムのモデル構築	○有人宇宙システム	
	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 (継続)
	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、東京大学大学院、横浜国立大学、港湾空港技術 研究所、アジア航測㈱、基礎地盤コンサルタンツ㈱、ソイルアンド ロックエンジニアリング㈱	
	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	R&D (継続)	
	月面インフレ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		
技術Ⅲ: 簡易施設建設	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	R&D (F/Sからの 移行)	
	月の縦孔での滞在開始用ベースキャンプの最小形 態と展開着床機構の開発	○東京大学 九州大学、宇宙航空研究開発機構		

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

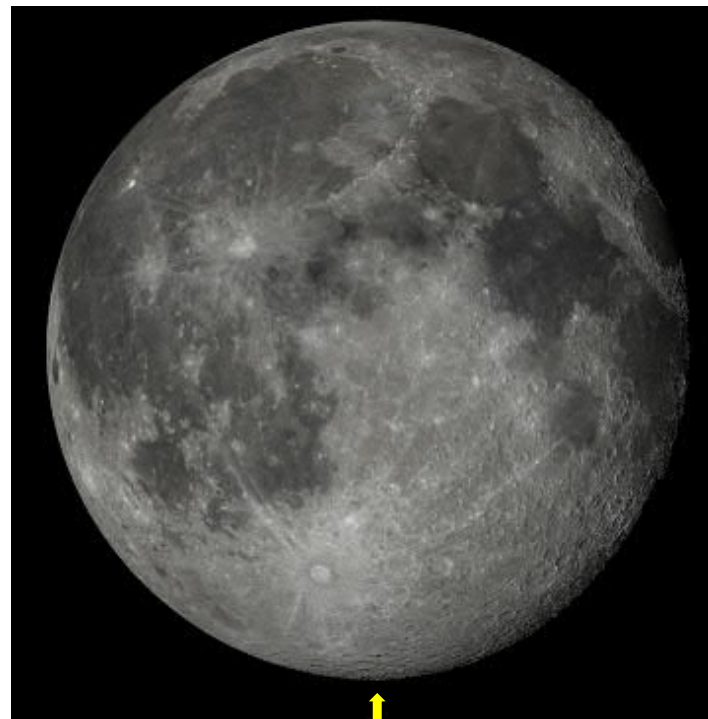
R&D・・・Research & Development 技術研究開発 【複数年度間】

2. 開発目的

月面開発の初期段階は、人数や資材が限定的になる。

資材輸送量の削減と建設作業の無人化（**自動建設**）との親和性を目指し、各探査フェーズにおける需要をもとに、要求性能や設置方法を明確にしつつ、最も効果的な対象構造を選択して自動展開・無人設営の研究を実施している。

現在の開発事例として自動展開型の多目的タワー（発電、通信等）ならびに与圧空間向けの展開構造を紹介する。



想定地域：月南極付近

3. 実現可能性のある展開構造物の選出

開発対象の展開性型構造物を具体的に選出

【対象】 月面開発初期の施設として必要なもの



【材料/構造】 月面環境条件/性能要求に応じた材料と構造

【機能】 **自動展開・無人設営**に適した展開機能

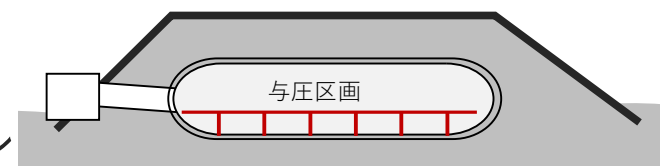
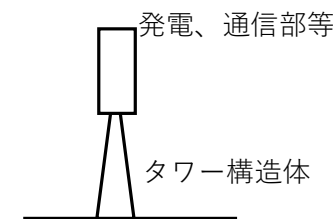
【対象】 は以下の2タイプを選出した

◆ 非与圧型構造

発電、通信等の多目的に使用するタワー状の展開構造物

◆ 与圧型構造

月面開発初期に少人数が滞在する展開型居住モジュール



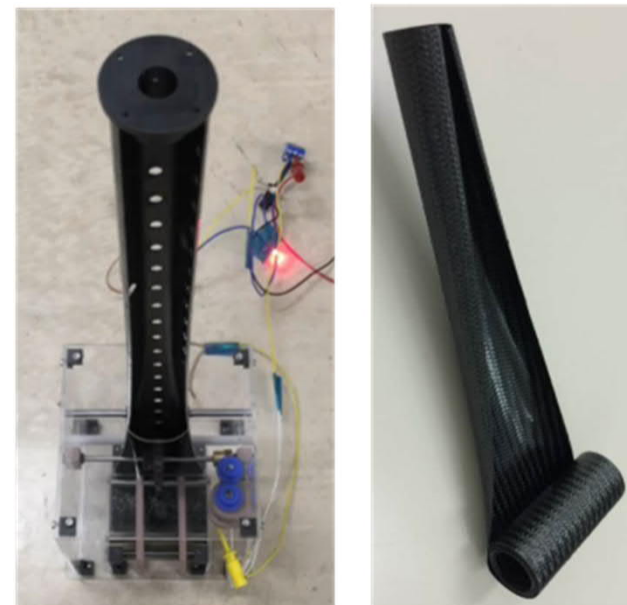
4. 非与圧型構造の検討

4.1. 構造タイプの選択

月面は低重力とはいえ常に重力加速度が作用している。支持荷重に対する十分な強度と高い展開性の観点から多角的な評価を行い、炭素繊維強化プラスチック製双安定性伸展ブームをタワー構造に採用することとした。この方式は柱となる構造体を巻き取ることができるため極めてコンパクトに収納できる。

また、比較的細いブームで構造強度を確保するためこのブームを3体、三角柱状に配置する方式とした。

多目的タワーの中でも重要な機能となる太陽光発電部はSAP（Solar Array Panels）をタワー上部に設置する。本報告ではSAP部は固定型であるが、現在この部分は太陽光追尾型に改良する検討を進めている。

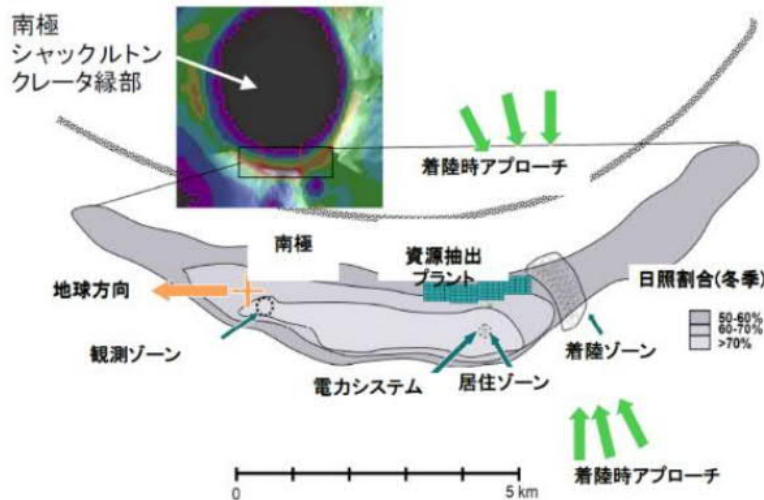


炭素繊維強化プラスチック製
双安定性伸展ブーム

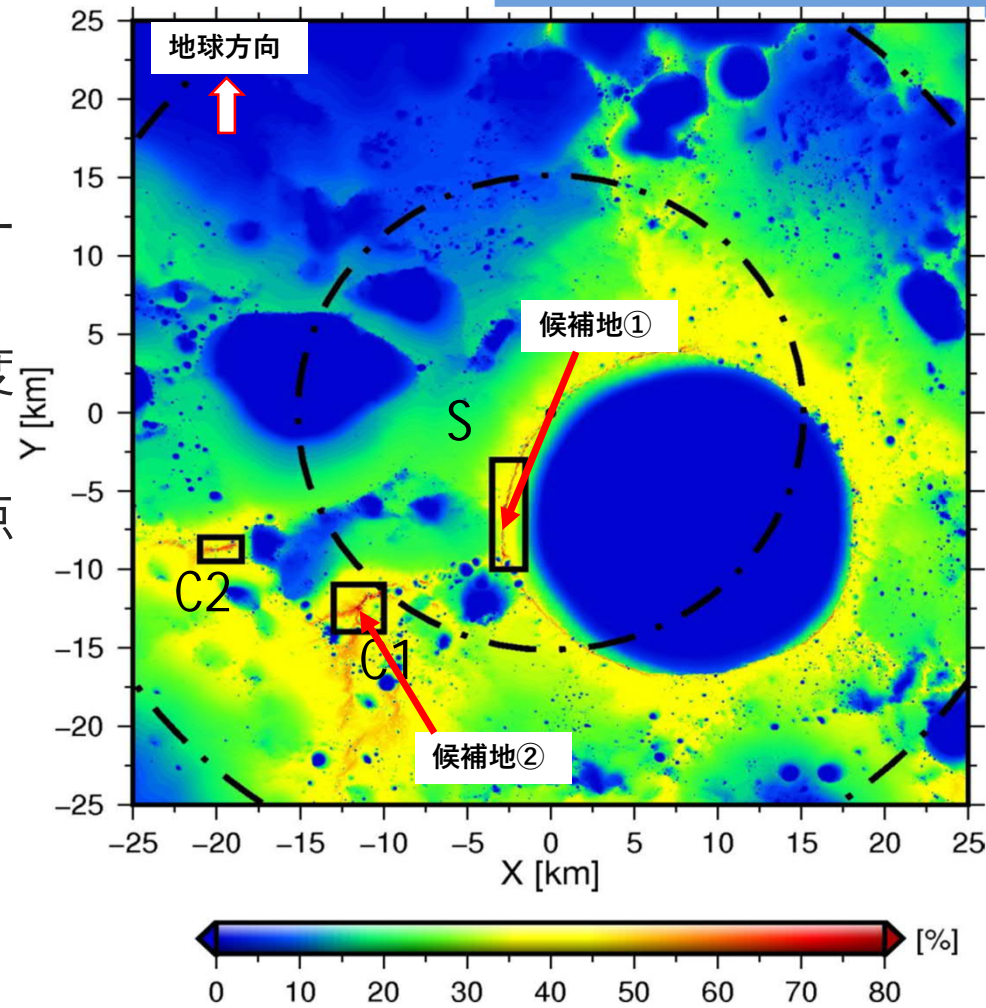
4.2. 太陽光発電に必要なタワー高さの検討

タワーの設置に際しては月南極域で日照時間が長くとれる高標高地点として以下の2点でタワー高さが日照条件に与える影響を検討した。

- ① 日本の国際宇宙探査シナリオ（案）2021年度版に示された月面基地内の高標高地点
- ② 既往論文（右図）のC1エリア内の高標高地点



日本の国際宇宙探査シナリオ(案) 2021 公開版 EZA-2021001、
宇宙航空研究開発機構 国際宇宙探査センター



P. Gläser et al., Illumination conditions at the lunar poles: Implications for future exploration, Planetary and Space Science Volume 162, 1 November 2018, Pages 170-178

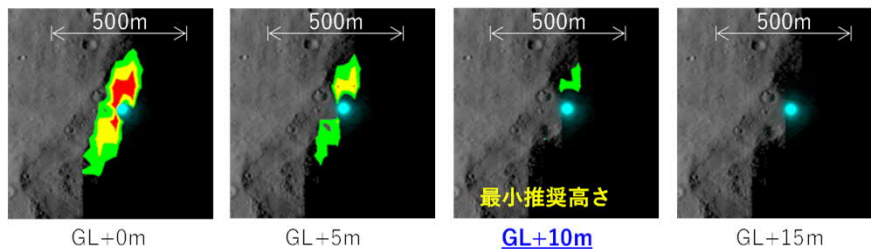
4.2. 必要なタワー高さの検討

JAXA殿のかぐや観測データより月南極域（南緯90°～85°）の地形データを作成し、日照計算を基に想定設置場所で効率的な太陽光発電を行うためのタワー高さの検討を行った（ここでは候補地1の例）。

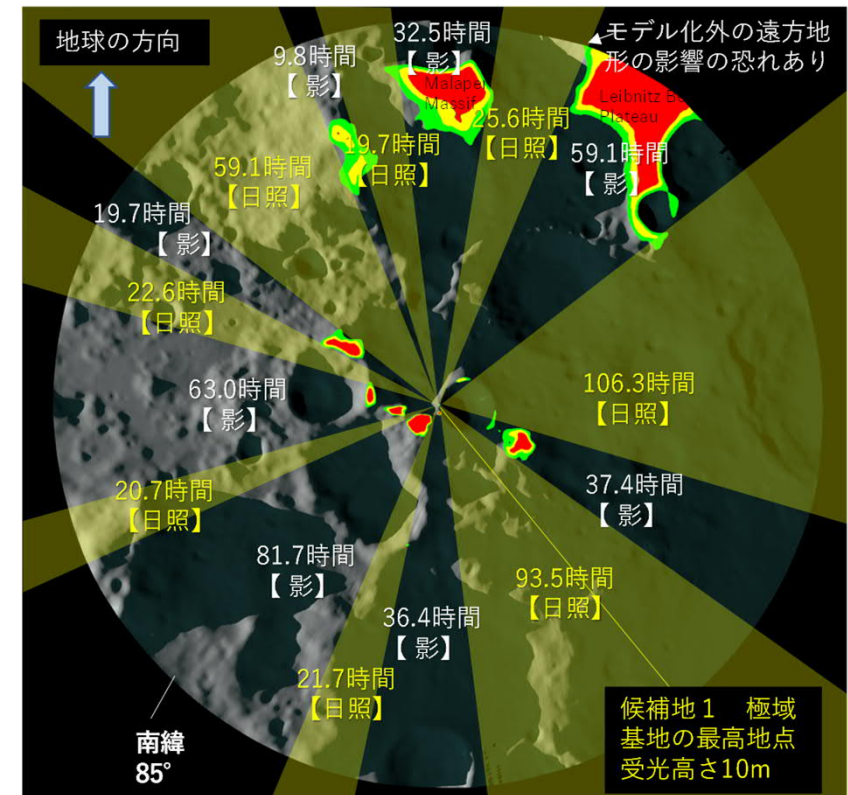
その結果、SAP高さを10m以上にするると近傍地形の影響をあまり受けず費用対効果が高い発電施設を構築できることが判った。

本検討ではSAP部の上下寸法も考慮してタワー高さは12mに設定した。

シミュレーションの結果太陽が最も低い冬至期でも50%以上、総合では80%以上の時間、太陽光発電を行えることが判った。



冬至期のタワー高さ と 周辺地形影響



冬至期に日照が得られる方位 (h=10m)

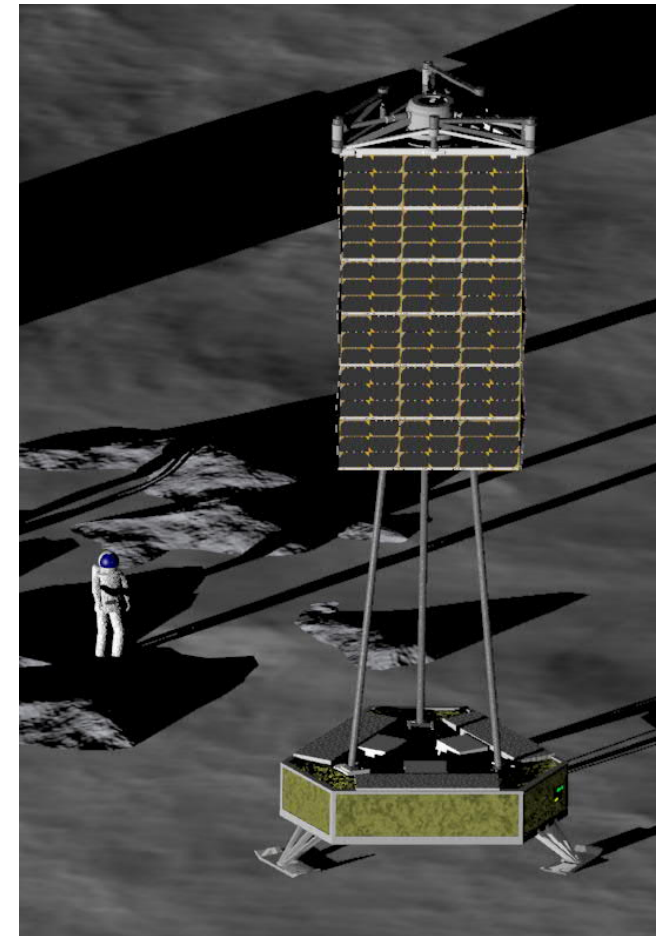
4.3. 多目的タワーの基本設計

タワーの主構造体はCFRP製双安定性伸展ブームを用いた三角錐骨組みを基本とした形状可変型電動式伸展構造物で製作する。

支柱支持構造と兼用したモータ型アクチュエータを使った巻き取り機構を各支柱の脚部に配置する。各アクチュエータの動きを制御することで傾斜地でもタワーを垂直に立てられる。

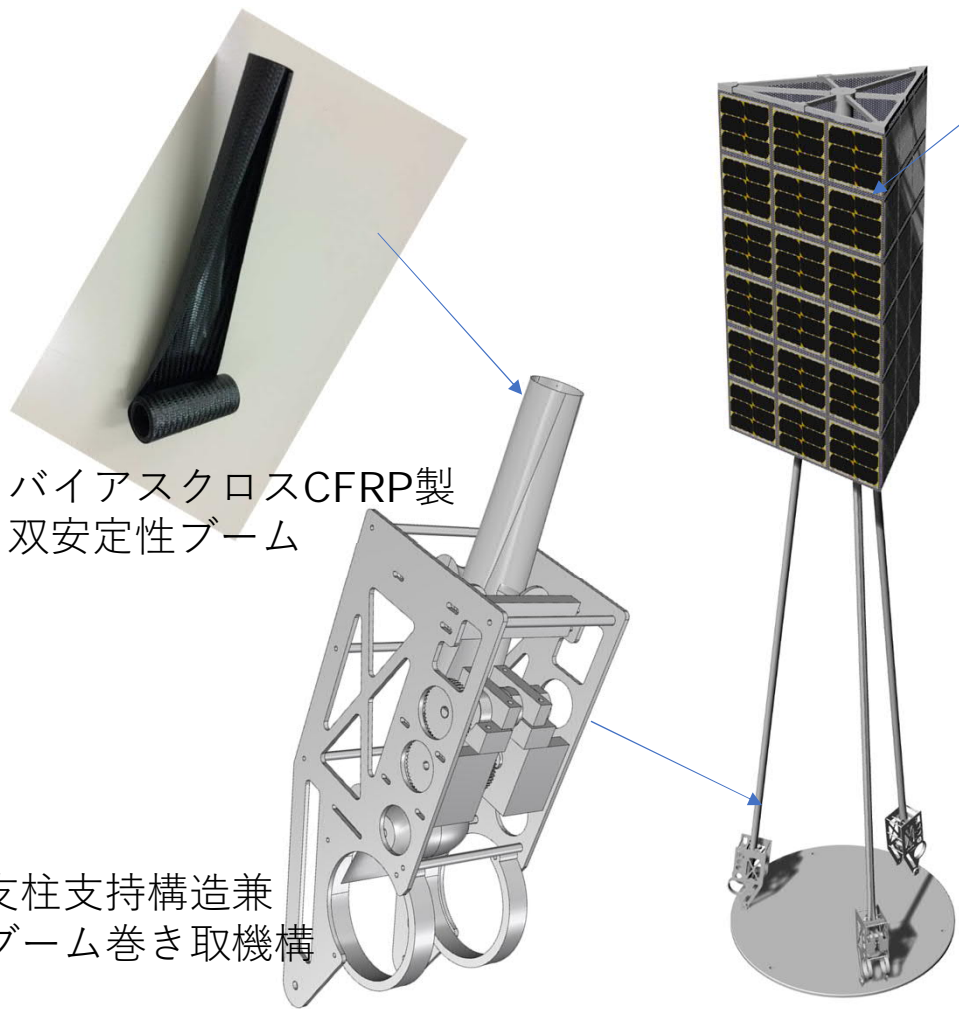
極域での太陽高度はほぼ水平面に近いことから、太陽電池パネル（SAP）は展開時にほぼ垂直方向に展開することとする。SAPもコンパクトに収納できる様、折り畳み機構を採用する。

輸送時（展開前）のサイズは月輸送船のフェアリングに収まるサイズとする。



多目的タワー（h=12m）

4.4. 多目的タワーのBBM試験（実機の1/6）



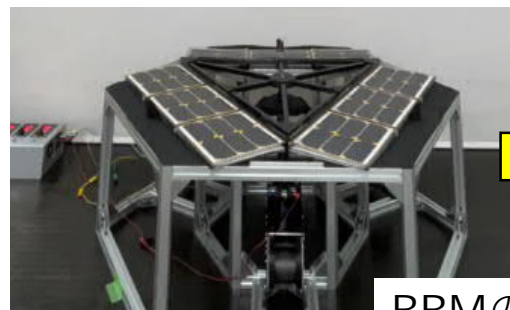
バイアスクロスCFRP製
双安定性ブーム

支柱支持構造兼
ブーム巻き取機構

薄膜太陽電池セル

地球では月面との重力比
が約6倍であることから、
このBBM構造体に作用す
る応力と発生ひずみは月
面実機と同等になる

BBM全体図（高さ2.0m）
実機の高さは12.0m



展開前

BBMの動作試験



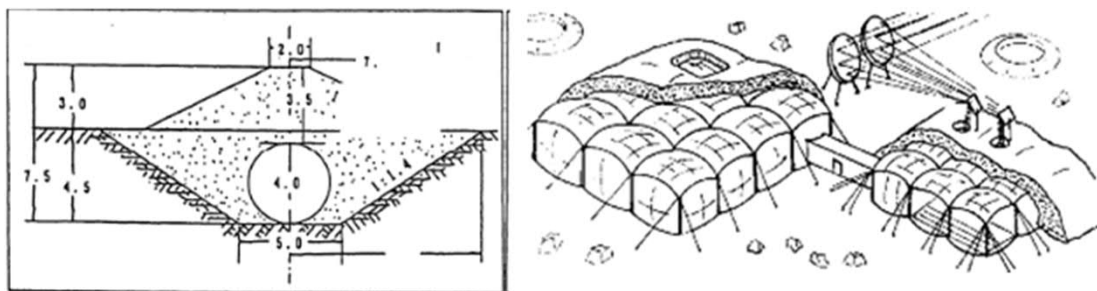
展開後

5. 与圧型構造の検討

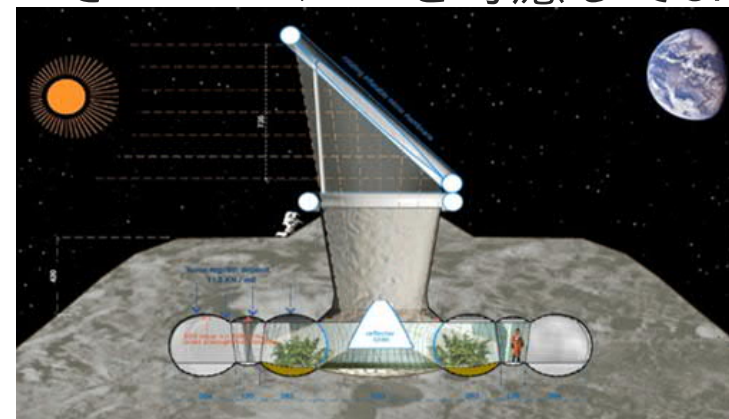
5.1 検討対象の選択

展開型の居住モジュールとして、膜構造を使ったインフレータブル構造を想定
本検討においては、断熱や放射線遮蔽、対デブリ防護といった保護機能を月面のレゴリスに持たせる方針としている。

既往検討等より断熱と放射線遮蔽のためにレゴリス層の厚さは3m以上とされる
(下記の例では3.5m) が、工事の精度や性能ばらつきのマージンを考慮して5m
とした。



Benaroya, H., Bernold, L., and Chua, K. M., 2002, "Engineering, Design and Construction of Lunar Bases", Journal of Aerospace Engineering Volume 15, Issue 2



ESA/Herzig et al. Bouncy Castles on the Moon. Inflated Habitats Might be the Best Way to Get Started on a Lunar Base, Space and astronomy news - Universe Today

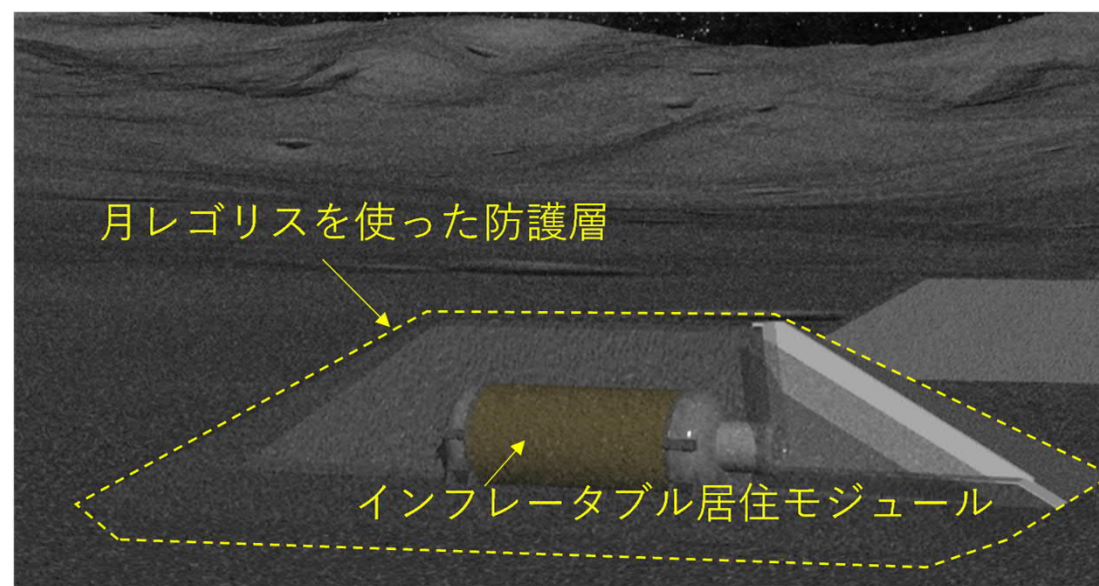
5.2 防護層としての月地盤

防護層には月レゴリス層を用い、断熱・放射線遮蔽・小型デブリからの防護機能を持たせる（MMOD層を月の自然材料で代用）。

膜構造部（インフレーターブル構造）は耐圧強度と気密性を確保し、内圧とのバランスで形状維持を行う。

具体的な土圧分布やレゴリスの安定性、インフレーターブル構造に生じる応力状態を求めるための構造解析を現在実施中（3次元の粒子法解析）

これにより、レゴリス層らびに空気膜構造の安定形状とその時の膜体の応力ひずみ状態を求める。

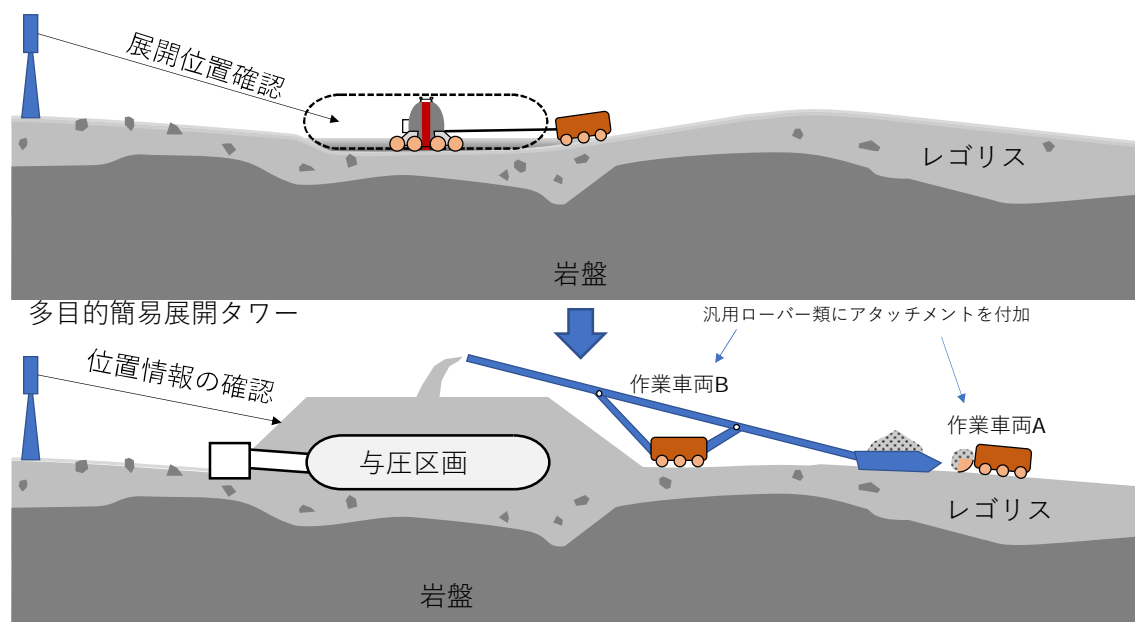


5.3. 埋設型インフレーターブル構造の施工性検討

埋設型構造を地下に設置する場合、月面の掘削工事が必要になるが、従来のバックホー方式の掘削シミュレーションを行ったところ、低重力の月面では掘削効率が悪く、掘削工事の工期と費用がいずれも全体工事の1/2以上を占めることが判明した。月面掘削機械の開発も期待されるが、ここではインフレーターブル構造を地上設置し、その上から土壘状にレゴリスを設置する方式とした。

レゴリスの堆積状態は地表面から数十cmの範囲で緩い状態から密な状態に急変するため、地表近くの緩い層を広い面積で採取して必要なボリュームを確保する。

各施工機械は概念段階であり、本施設に限らず基地建設に使われる機械にアタッチメントを付けることを想定している。



6. まとめ

本研究では国土交通省宇宙建設革新プロジェクトの一環として、滞在可能な人数や投入できる資材の物量がいずれも限定的な月面開発の初期段階を対象とし、資材輸送量の削減と現地建設作業の省力化に効果的な自動展開・無人設営の研究を継続的に実施している。

今回の報告では現在の開発事例として自動展開型の多目的タワー（発電、通信等）ならびに与圧空間向けの展開構造を紹介した。今後も研究を継続し、実機の月面設置を念頭に置いたより具体的な設計仕様や構造形式を検討するとともに実証試験等を通してその実現性を確認する。