

建設分野の宇宙事業参入加速に資する アナログサイトの試案

宇宙航空研究開発機構 施設部

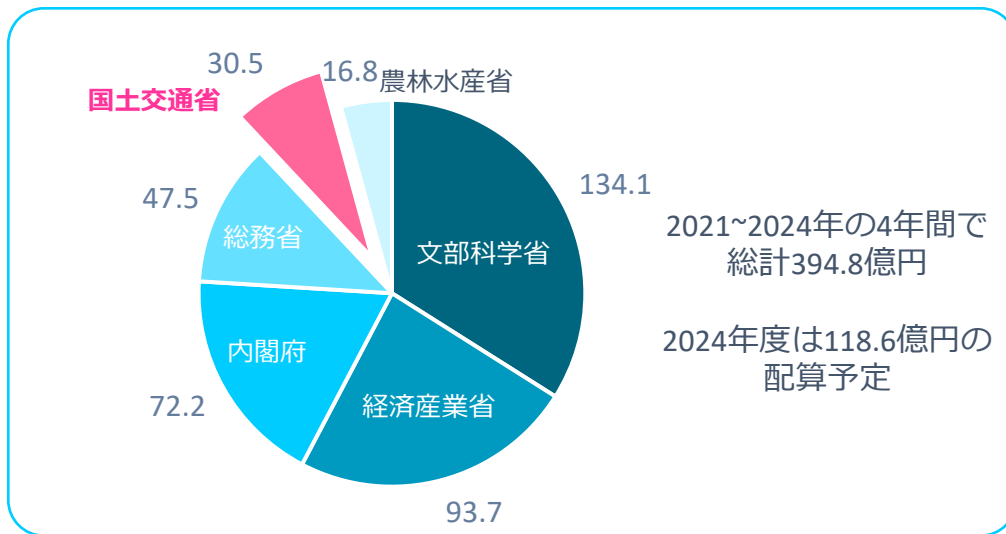
星之内 菜生
阿波田 康裕

建設分野の宇宙事業参入の取り組み

スターダストプログラム（国交省）宇宙無人建設革新技術開発

- スターダストプログラム 2021年～
- 月面開発・衛星基盤技術の強化など、各省の縦割りを排し連携して取り組むべき研究開発プロジェクトを推進するため、内閣府宇宙政策委員会が主導する枠組み

無人建設、建材製造、簡易施設建設の3部門で合計12案件の研究が進行中



配算額はスターダストプログラム全21案件中6位

順位	番号	案件名	担当省庁	合計
1	R3-04	小型SAR衛星コンステレーションの利用拡大に向けた実証	内閣府	72.2
2	R3-02	月面におけるエネルギー関連技術開発	経済産業省 総務省	68.1
3	R2-01	衛星用の通信フルデジタル化技術開発	文部科学省	44.0
4	R2-03	小型衛星コンステレーション関連要素技術開発	経済産業省	35.3
5	R2-07	月面活動に向けた測位・通信技術開発	文部科学省	21.5
6	R3-01	宇宙無人建設革新技術開発	国土交通省	17.1
7	R3-03	月面等における長期滞在を支える高度資源循環型食料供給システムの開発	農林水産省	16.8

今回は宇宙事業のうち
「**月拠点建設**」に注目する

JAXAの宇宙プロジェクトの進め方

宇宙機 (Spacecraft) :
無人の人工衛星及び宇宙探査機の総称

JAXAでのプロジェクトの流れ

プリフェーズA ミッション定義 (概念検討)	フェーズA		フェーズB	フェーズC	フェーズD		フェーズE			フェーズF
	概念設計	計画決定	基本設計	詳細設計	製作 試験	射場 整備	初期 運用	定常 運用	後期 利用	破棄

要素技術開発

BBM
ブレッドボード
モデル

EM
エンジニアリング
モデル

PFM/FM
フライト
モデル

段階的にモデルをつくりながら
設計・開発が進められ、
都度試験・審査が行われる！

BBM：一般用の部品及び材料等を用いて製作された簡易なモデル。質量、寸法及び宇宙環境への耐久性能は要求されない
EM：電氣的及び機械的な設計をするために質量・寸法・電力などについて評価するモデル
FM：実際に打上げ運用されるロケット・人工衛星及びこれらのサブシステム又はコンポーネント



宇宙環境への適用


微小/低重力


真空


高温/低温


放射線

など、...

100近い技術資料が存在



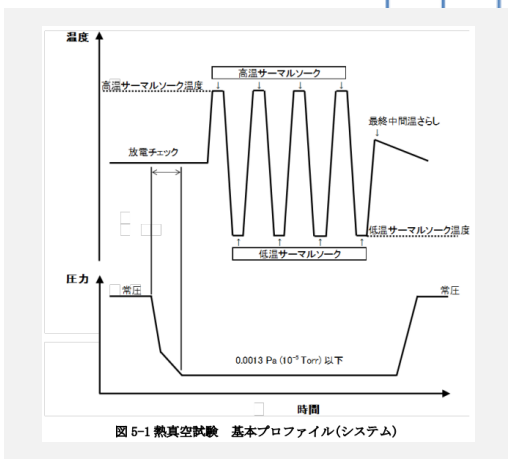
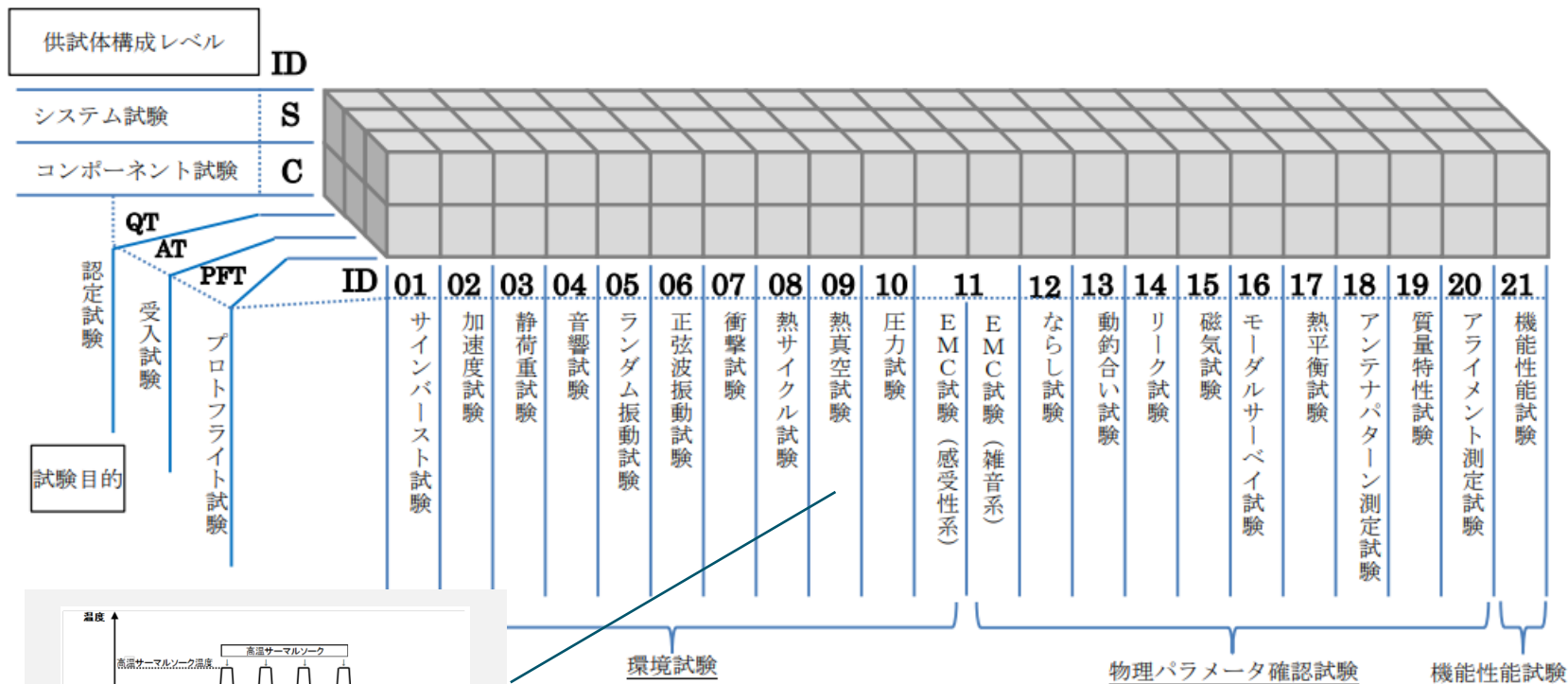
ネットからだれでも見れる！



JAXA安全・信頼性推進部では衛星・ロケット・探査機等様々な宇宙機を開発する際の多くの標準（共通技術文書）を整備

宇宙機が受ける試験

参考：JERG-2-130D 宇宙機一般試験標準

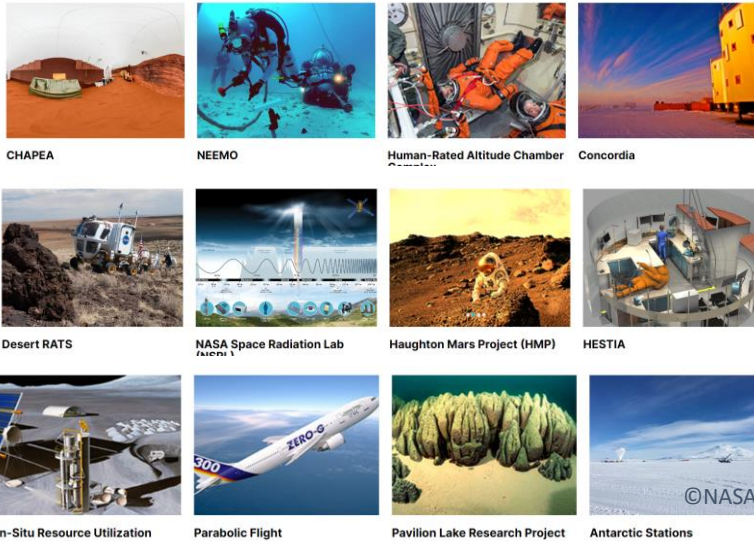


プロトタイプモデル/プロトフライトモデルは、例えば熱真空試験において、宇宙の環境を模擬した左図のような温度/圧力下での試験を行う必要がある

**フェーズが早い段階での
トライアンドエラーの機会が求められる**

アナログサイトとは

NASA Analogs mission



Analog

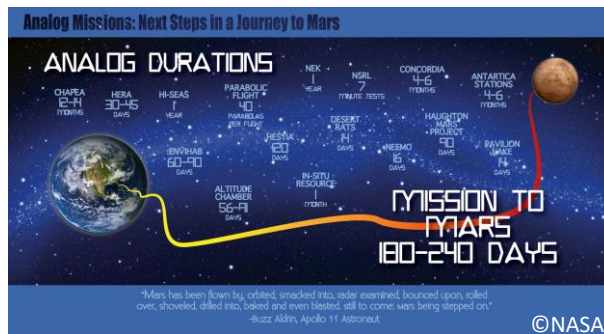
something that is similar to or can be used instead of something else:

Cambridge Dictionary より

「アナログサイト」という言葉ははっきりとした定義がまだない。

今回は、「Analog」単語自体の定義に近い認識、**環境試験設備も含む、宇宙環境を模擬した試験設備をアナログサイトとする。**

建設業界が関わる宇宙機に必要な実験ができる
敷居の低い
アナログサイトの建設



- NASAのサイトでは特に「有人」月・火星探査を想定しており、被験者が存在するものが多い
- 環境試験設備は掲載されていない

建設業界の
宇宙事業参入を
加速させる



地球上の建設業界
を盛り上げる
設計・工事を行うのは
建設業界

せかいのアナログサイト

BIOS-3 @シベリア

閉鎖系で植物を育成し、
空気・水・一部の栄養
素を循環。3人で6か月



<https://www.ibp.ru/science/bios3.php>

Lunar Palace 365 @北京

生命維持装置の実証
(昆虫食を含む)
4人で110日間滞在



©WWW.NEWS.CN

CEEF @青森

可能な限り閉鎖系で
物質循環を模擬
2人で2週間滞在

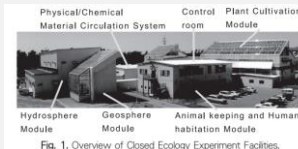


Fig. 1. Overview of Closed Ecology Experiment Facilities.

多胡ら

@マーシャルSFC

生命維持装置の統合
試験を行う



©NASA

NSRL @ニューヨーク

宇宙放射線の人体への
影響を調べる



©NASA

:envihab @ケルン

ベッドレストで微小重
力が身体に与える影響
を調べる (約30日)



©ESA

アンテナ試験設備 @インド

宇宙機の電波特性を確
認する



©ISRO

ルナテラス @鳥取

鳥取砂丘でロボットの
実証実験ができる



©鳥取県

13mφスペースチャンバ
@つくば
高真空や極低温、太陽光
による高熱などの環境を
再現



©JAXA

Antarctic Stations @南極

越冬中の心理的影響を調査
4人で6か月滞在



©NASA

CHAPEA @ジョンソンSC

3Dプリントで作成
閉鎖環境での心理的影響
を調査、4人で1年滞在



©NASA

Desert RATS @アリゾナ

船外探索ツールや
オペレーションを確認
全体で200人規模の滞在



©NASA

主に詳細設計以降に
使用すると考えるもの

主に概念検討に
使用すると考えるもの

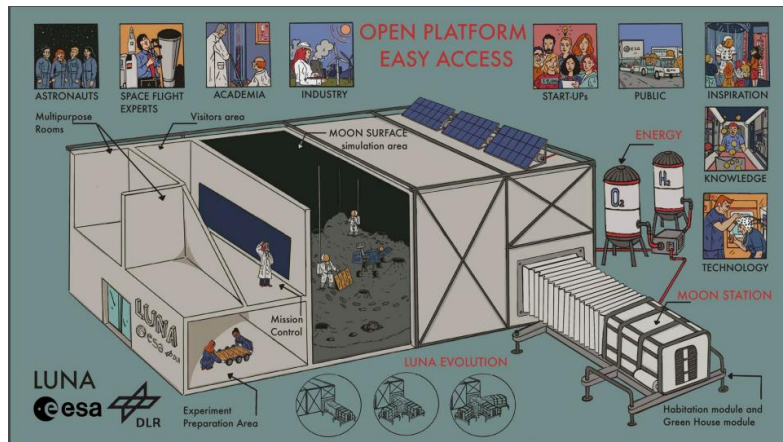
ESA 今後の月探査のためのアナログサイト検討

Analogue for Preparing Robotic and Human Exploration on the Moon – Needs and Concepts,
ESA GSP Study, Contract 4000111890

- **ESAの新しいアナログサイト建設に関するスタディ (2014~2016年)**

今後の月探査に向け、100名以上の専門家へのヒアリングを実施。アナログサイトの要求を下記6つに大別

- ① ISRU(その場資源利用)の実証(採掘・抽出など)
- ② 通信制約を伴う遠隔操作、ロボット協調の実証
- ③ レゴリスによる汚染の防止・軽減の実証
- ④ 新しい運用コンセプトの検証と妥当性確認
- ⑤ EVAの実証(部分重力模擬)
- ⑥ ECLSS(生命維持装置)の実証



現在ドイツケルンに、下記3つの設備を持つアナログサイトが建設中 (**2024年完成予定**)

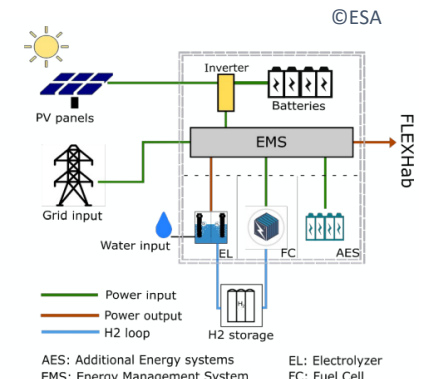
① **Gravity offload system**
宇宙飛行士のための月重力模擬設備



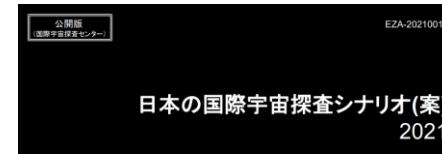
② **Regolith testbed area**
月面地形模擬設備



③ **LUNA energy**
太陽光と水素の発電システム
実証設備



探査ロードマップとの整合



引き続き建設技術はロードマップに記載されている

FY2032に居住モジュール、FY2033に資源プラントミッション実施

CN : Characteristics and Needs UC : Use Cases

CN-162-L	Deploy and operate autonomous construction demonstration utilization payload(s) to the lunar surface, including partial-scale demonstrations of regolith management and construction of structures, to demonstrate scalable capabilities and applications.
UC-142-L	Deploy and set up autonomous construction demonstration utilization payload(s) on the lunar surface with long-term remote operation
UC-143-L	Demonstrate autonomous construction techniques, e.g., collection of regolith, processing regolith into feedstock, and regolith construction

表 5.5-4 有人フェーズの詳細シナリオ

	ISECGでのミッションシナリオ	基地構築による長期ミッション(日本からの提案)	備考
FY2029	国際有人プリカーサ(与圧車2台など大型カーゴ)		
FY2030	国際有人科学探査1(4人・極域)	拠点構築ミッション1(電源、建機)	・国際有人科学探査5回のうち数回でSPA探査を実施することを提する。 ・極で有人拠点建設を開始することを提案する。無人カーゴ及び追加の有人ミッションがあれば活用する。
FY2031	国際有人科学探査2(同上)	拠点構築ミッション2(建機2)	
FY2032	国際有人科学探査3(同上)	拠点構築ミッション3(居住モジュール)	
FY2033	国際有人科学探査4(同上)	拠点構築ミッション4(資源プラント)	
FY2034	国際有人科学探査5(同上)	有人滞在ミッション1 有人長期滞在開始(6か月)。	
FY2035~	※以降は具体的な国際ミッションはない。	有人滞在ミッション2 有人長期滞在開始(500日)へ。	ISRU機能を持つ拠点の完成。拠点を起点とした科学探査等を開始。順次、拠点拡張や天文台建設を進める。

スケジュール(案)

2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
概念検討 予算確保	設計	工事	(アナログサイト)								
プリフェーズA	フェーズA		フェーズB	フェーズC	フェーズD						
概念検討	概念設計	計画決定	基本設計	詳細設計	製作試験	射場整備		(宇宙機)			
	要素技術開発						▼(建機1)	▼(建機2)	▼居住モジュール	▼資源プラント	▼有人探査ミッション1

土建分野の宇宙参入を加速させるために要素技術開発で使えるアナログサイトについて
今、動き出す必要がある

建設分野へのアンケート（概要）

○質問対象者

宇宙×土建 分野で活躍されている方々29名（匿名）

○質問内容

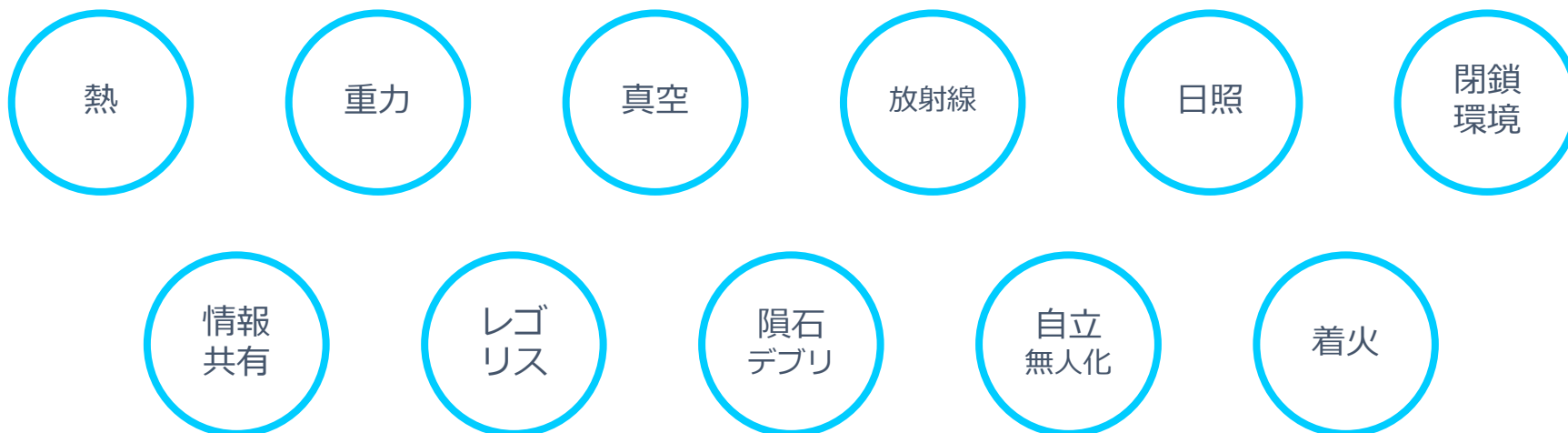
1. 月探査に向けて、何に興味がありますか

- 例 ①1/6G下での液体の挙動を知りたい
②真空（超低圧力状態）でのアクチュエータの挙動を知りたい
...

2. 1を実現するために、どのようなアナログサイトが必要ですか

- 例 ①10秒以上1/6Gを再現できる落下塔
②汚れても良い真空チャンバ
...

得られたキーワード



建設分野へのアンケート（回答例）

事前調査 性状把握

- 縦孔・地下空洞を含む月面の地形の形状（でこぼこや斜度）・性状（カたい柔らかい）
- 拠点構築場所の環境条件の詳細（熱、放射線、スペースデブリなど。年間を通じた時系列的变化情報も含む）
- 高真空、1/6G下におけるレゴリスの力学挙動（レゴリス-機械系/レゴリス-構造物系相互作用）
- 安価で大量に使えるシミュラント
- 広大なシミュラントの実験ヤード
- 月面の日照環境による標識の識別やカメラの性能
- 月面での放射線状況での開発した計器の動作

建設手法検討

- 建設に用いることの出来る工法リスト
- 精密測量や拠点構築の手段
- 1/6Gでの3Dプリンタの挙動
- 1/6G、真空、極域温度条件でのレゴリスの焼成性状
- 柔軟構造物の断熱性能
- 月面環境を模擬した（例えば）直径40m級の大型真空環境施設（内部床には、模擬砂や模擬岩石を配する）（原子力発電所の格納容器のノウハウを利用して建設可能）

拠点設計

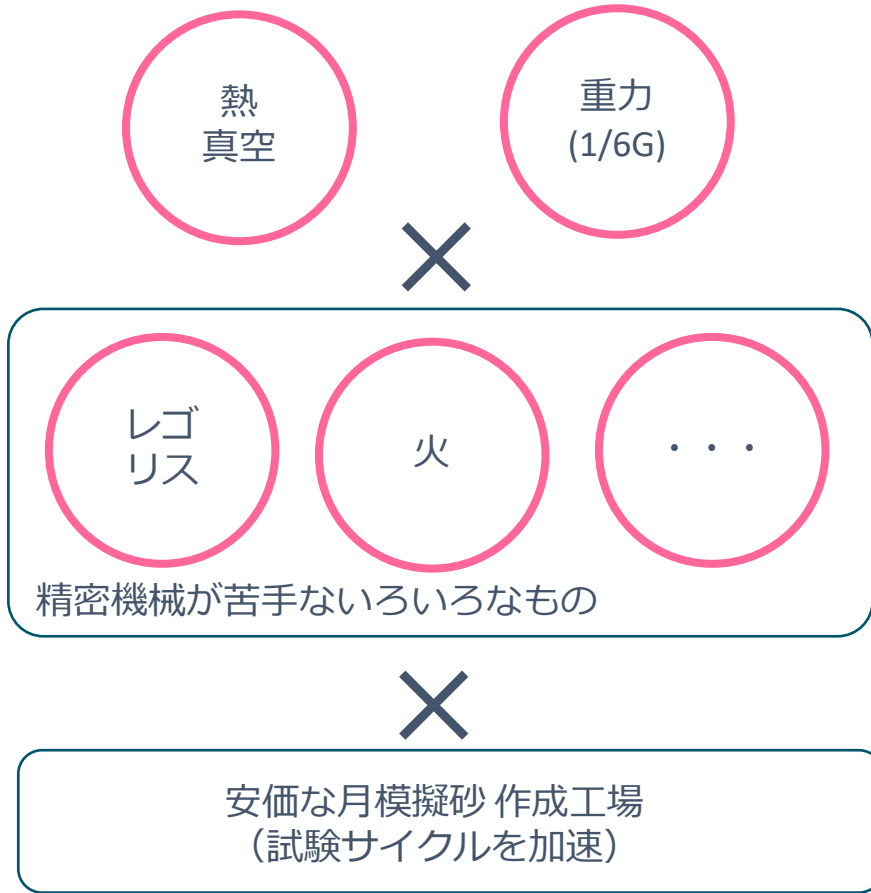
- 閉鎖系の生命維持技術実証施設
- 与圧空間内の空気の対流
- 液体（特に手洗いや洗顔といった行動をとった時の水の動き。極微小重力下との違い）
- 外部の真空状態におかれた与圧空間内部気温と筐体表面の温度（放熱）との経時的な関係
- 効率的な冗長性の持たせ方
- 外壁への結露の状況
- 展開構造物等へデブリの衝突実験を行うことができる施設

火に関するもの

- 月面の重力/温度/気圧でのものの動きを知りたい
- 火に対する要望も多い

- 月環境下における、火薬や高圧ガスの取り扱い方法
→1/6Gや放射線環境下における高圧ガスタンクの試験設備
- 1/6Gでの燃焼性状、発生ガスの流動性状
- 火災が起きたときの最適な消化方法
- 金属サンダーで切断する際の火の粉の飛び方

提案内容



- 概念検討段階（開発初期）で検証が求められる
- 実現のための技術は存在する（世界初の技術が求められるわけではない）
- 日本での実績が少ない

	緊急性	実現性	新規性
熱真空 × いろいろなもの	◎	◎	○
	概念検討 宇宙実証2030年	基本技術保有	国内での実績は少ない（限定的）
重力 × いろいろなもの	◎	◎	○
	概念検討 宇宙実証2030年	基本技術保有	1/6Gの事例は少ない（限定的）
閉鎖環境 (物質循環含む)	△	△	○
	概念検討 宇宙実証2032年	基本技術未保有 海外では実証済み	物質循環も含めた閉鎖系実験の実績は少ない
宇宙放射線	◎	○	△
	概念検討 宇宙実証2030年	基本技術保有	経産省主導で宇宙機の放射線試験環境開発が進行中
隕石 /デブリ	△	○	△
	概念検討 宇宙実証2032年	熱真空環境と組み合わせた実験例あり	相模原のガス銃・チャンバで実験可能
自立無人化	◎	◎	△
	概念検討 宇宙実証2030	フィールド作成 実績あり	ルナテラス等で実験可能
日照	◎	◎	△
	概念検討 宇宙実証2030年	キセノンランプで模擬可能	相模原宇宙探査実験棟で実験可能
月面情報共有	◎	◎	△
	概念検討 宇宙実証2030年	各国の公開情報の整理で実現可能	月環境標準・ハンドブック策定が進行中

熱真空・1/6G 試験の現状

熱真空試験の環境条件

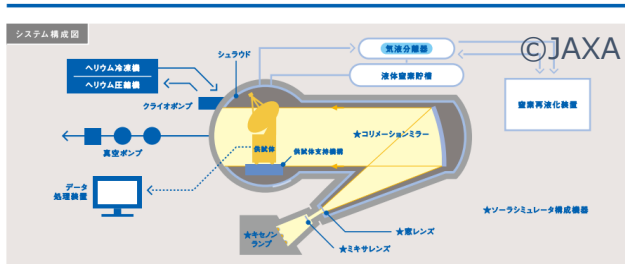
- 筑波宇宙センターには13mφ、8mφの熱真空チャンバーがあり、共に太陽光を模擬するためのソーラーシミュレータを持っている
- 液体窒素を用いた極低温環境 (-170°C) 以下を模擬できる。13mφでは 1.33×10^{-5} Pa以下（真空排気約15時間）を再現できる
- 各種センサを搭載した衛星等も同じ設備で試験するため、場を汚すことは厳禁

宇宙環境が詳細に再現されている
利用の敷居が低いものがほしい



X線分光撮像衛星(XRISM) スペースチャンバ搬入時の様子

13mφスペースチャンバ



ソーラーシミュレータ：均一に横方向から光を照射できる

探査機の1/6G模擬

- 供試体を吊り下げて実験を行っている
- MRIの報告資料では、月シミュラント上での走行実験結果では、1G場では問題なく走行可能だが、1/6Gでは空転して前進不可と記載あり
(令和3年度宇宙開発利用推進研究開発（月面におけるエネルギー関連技術開発（技術課題整理））報告書）

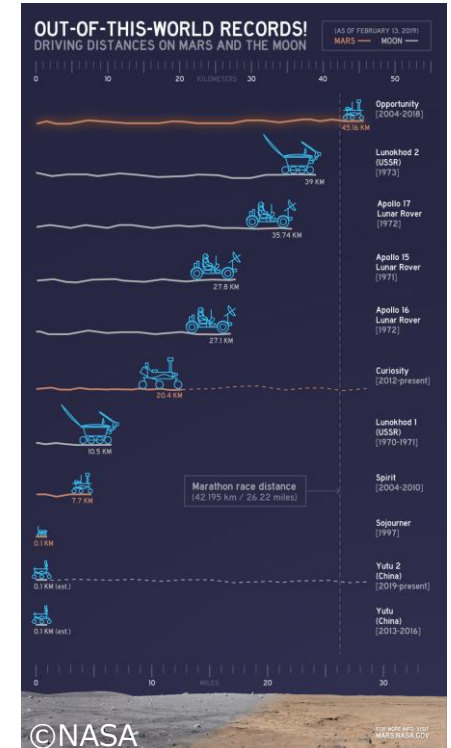
砂粒子も含めた低重力環境の模擬設備がほしい



LUPEXの走行試験



Chandrayaan-3の実験



2019年時点の探査車の走行距離 11

せかいの Dirty / Dusty チャンバ




レゴリスを入れられる、汚れても良い熱真空チャンバが各国で整備されている

研究期間	NASA	KICT 韓国建設技術研究院	ESRIC European Space Resources Innovation Centre
			
名前	GRC “Dirty” Vacuum Chamber (VF13)	Dirty Thermal Vacuum Chamber (DTVC)	Dusty Thermal Vacuum Chamber : DTVC
完成年	少なくとも2014年には存在	2020年	2025年予定
大きさ	D = 1.5m, H=2.52m, 6.35m ³	4m×4m×4m, 50m ³	-
温度	-193°C~	-190 ~ + 150 °C	-180~160°C
真空	10 ⁻⁴ Pa	10 ⁻² Pa	10 ⁻⁴ Pa
メモ	最大1tの月模擬砂を入れられる 2023年にはレーザーを用いてレゴリスから物質を取り出す実験を実施	ISRU（その場資源利用）技術の検証目的 25tの月模擬砂を入れられる	月模擬砂をチャンバに入れ、防塵性能等を検証する

インドでも月模擬砂を10~20cm敷き詰められる熱真空チャンバの研究が行われている
(K. Durga Prasad et.al “Development of a chamber to simulate lunar surface environment”, 2020)

1/6G の模擬

要素技術開発に気軽に使えるアナログサイトとしては
頻度高い実験が可能な落下塔が最適

	きぼう実験棟のCBEF	パラボリックフライト	落下塔
			
しくみ	ISSの無重力下でターンテーブルにより人工重力を発生させる	航空機が放物線運動することで機内を低重力環境にする	カウンターウェイトを持った滑車など抵抗発生機構を用いて自由落下させ、供試体内部を低重力(1/6G)環境にする
既往実験	尾崎ら, 月模擬砂を含む粉粒体の質量流量/かさ密度と重力の関係の解明, 2020	牧ら, 月模擬砂粒子の浮遊拡散挙動の解明, 2013 など	馬場ら, 下塔を用いた探査機が天体接触時に飛散する砂の飛散挙動評価手法の構築, 2020 など
継続時間	長時間	30秒程度	1.6秒 (高さ14m)
頻度	テーマ選考から宇宙実験まで 数年	1日1フライト	1日に20回程度 (高さ55m)
特徴	他の方法に比べ高価 試験品の制約が大きい (各審査会を通過する必要がある)	運営企業が限られている 4人貸切で 1フライト360万円 https://www.jsforum.or.jp/other/zerog/	試験機器が破壊される可能性がある 1回の落下 3万円 (高さ55m) http://dokei.net/conts.php?nid=287

提案するアナログサイト

① 汚れていい熱真空チャンバ

- 大きさ：1m³
- 圧力：10⁻³ Pa
真空排気時間4時間以内
(参考：筑波宇宙センター1mφチャンバ)
- 温度：-170~160°C
- 参考費用：筑波の1mφチャンバでは設備利用費1日約4万円

② 1/6G落下塔

- 高さ：30m、1/6G継続時間3秒
(参考：弘前大学の落下塔
14mで1/6G継続時間1.6秒)
- 参考費用：北海道55mの微小重力落下塔で1落下3万円

×

③ 安価な月模擬砂 作成場

高頻度の実験を可能にするため、安価な月模擬砂生成場を併設

化学組成が模擬された月面模擬砂は価格が高く、例えば相模原の宇宙探査実験棟は珪砂が敷き詰められている

→ 物性のみを模擬した安価な模擬砂を作成



地球に持ち帰られた月レゴリスの
拡大写真

<https://www.lpi.usra.edu/lunar/samples/atlas/compendium/10085.pdf>



高炉スラグ細骨材

<https://www.jfe-steel.co.jp/products/slag/b09.html>

粒子形状が類似する入手しやすい材料の使用を想定

**3設備を併設することで頻度の高い実験を可能にし
研究開発・プロジェクトを加速させる**

～Future Work～ (社内公募研究などを活用)

- 要求性能・費用の精査、体制の検討
- 1/6G模擬の落下塔機構の検討
- 物理組成をあわせた月模擬砂に適する材料の検討