

# 月地下空間への有人拠点構想

庄司 研\*1・村瀬 宏典\*2・出口 亮\*3・渡辺 賢\*4・佐藤 大樹\*1  
 村田 裕志\*1・松土 智史\*5・鈴木 菜々子\*6・廣木 正行\*7・広崎 朋史\*8

Keywords : vertical hole, underground space, living environment, heating and cooling loads, material cycle

縦孔, 地下空間, 居住環境, 冷暖房負荷, 物質循環

## 1. 背景と目的

宇宙でより多くの方が暮らす月面社会を実現するには宇宙技術の蓄積に加え、自給自足・地産地消の新しい技術と物質循環の仕組みが必要となる。地球も閉じた空間であり、資源は有限である。宇宙における地産地消は、現在の地球でこそ実現に向けて取り組むべき要素を含んでおり、これらの技術は地球におけるレジリエントな社会づくりへのヒントになると考えられる。

2009年に日本の月周回衛星「かぐや」が撮影した画像により月面に直径50m以上の縦孔が発見された(図-1)。これは地下の溶岩チューブにつながっているとされる。月の縦孔を起点とした溶岩チューブの内部は、月面のような宇宙放射線や飛来物、大きな温度差などのリスクが少なく、基地建設には非常に有利な空間であると考えられている。

我々は月の縦孔を中心とした地下空間に豊かな生活空間を実現することを検討してきた。この地下空間に必要なとされるのは、月面上での短期ミッションでの滞在を補完する役割として、長期滞在のために、安心感・開放感を提供できる空間であると考えた。従来の月面活動での「閉鎖・集中型」の基地に対して、月地下空洞では「開放・交流型」の環境を作り、相互補完的な関係をつくるコンセプトとした(図-2)。また、「①物理的な生存環境」(有人宇宙技術の視点)と「②心理的な居住環境」(建築的視点)の両立が必要である。月地下の空間は月面活動に不足するものを補い、自然の変化やリズムが感じられる多様な場所をつ

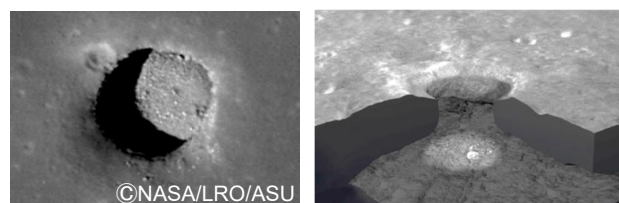


図-1 月の縦孔(左)と内部イメージ(右)  
 Fig.1 Vertical hole (left) and internal image (right)

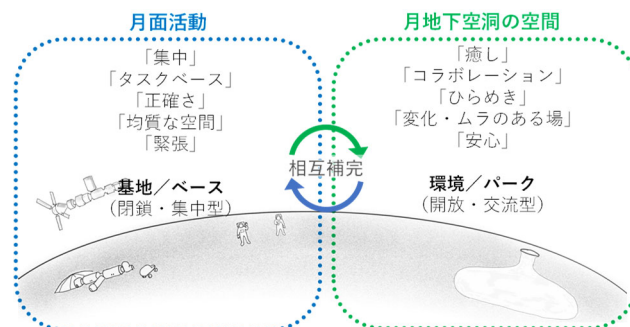


図-2 月地下空間のコンセプト  
 Fig.2 Concept of the moon underground space



図-3 月地下における居住空間  
 Fig.3 Living space in the underground of the moon

*1 技術センター イノベーション戦略部 技術開発戦略室	*5 設計本部 構造設計第二部
*2 設計本部 建築設計第一部	*6 クリーンエネルギー・環境事業推進本部 自然共生技術部
*3 設計本部 先端デザイン部	*7 エンジニアリング本部 エンジニアリングソリューション部
*4 ソリューション営業本部 プロポーザル・ソリューション部	*8 宇宙システム開発(株)

くり、「②心理的な居住環境」として、快適な環境で開放感のある、6分の1の重力に合わせてデザインされた場所となる。図-3、図-4 にこの月地下における居住空間のイメージを示す。本報では上記のコンセプトに基づいて構想した月の居住空間について、冷暖房負荷、閉鎖空間の物質循環、VR による空間の体感評価について示し、月地下居住の一案として提案する。



図-4 居住空間の昼間のイメージ  
Fig.4 Daytime image of living space

## 2. 月地下空間における居住空間と要素技術

### 2.1 月地下空間を利用した構造技術

溶岩チューブ内部は、宇宙放射線や飛来物の危険が少なく、軽量な材料で自由な居住空間の構築が可能になる。そこで多重膜構造による大空間構築を考えた。図-5 に居住空間のゾーニングを示す。縦孔を中心とし、同心円状に 3 つのゾーンに分かれた空間を膜の壁で区画する計画とした。図-6 に示すように、外部の 0 気圧と居住域の 1 気圧の間を 0.25 気圧ずつ段階的に圧力調整した空間を設け、膜材への圧力を低減する。与圧後、これらの各ゾーンを形成する膜の膨張力とスポークケーブルの引張力の釣り合いで形状を保持できる。

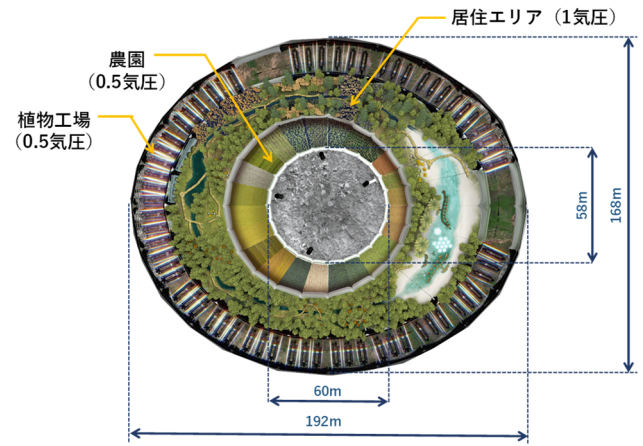


図-5 居住空間のゾーニング  
Fig.5 Living space zoning

### 2.2 植物栽培の 2 つのエリア

植物栽培には、効率よく食料生産できる植物工場と収穫を楽しむための農園の 2 つを計画した。農園は日照を得やすい縦孔の周囲に配置し、自然採光の可能な明るい空間となる。人が土とふれあい収穫を楽しめる空間は心理的なストレス軽減効果も期待される。また、農園は居住エリアに緑の開放的な景色をもたらす。

### 2.3 電力・熱の確保

図-7 に月地下居住の設備システムの例を示す。月では昼と夜が約 14 日間ずつで夜間の電力の確保が課題である。月の地下空間表面温度は約 $-20^{\circ}\text{C}$ と安定しており、月面 ( $110\sim-170^{\circ}\text{C}$ ) との温度差は大きく、これを利用

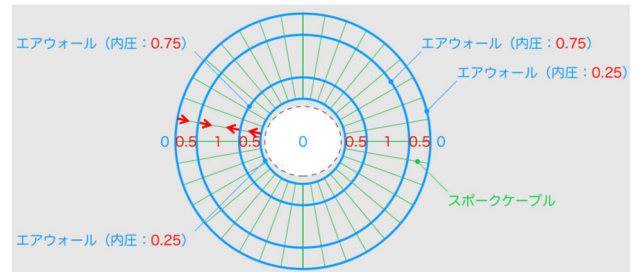


図-6 壁面構築概要  
Fig.6 Wall construction

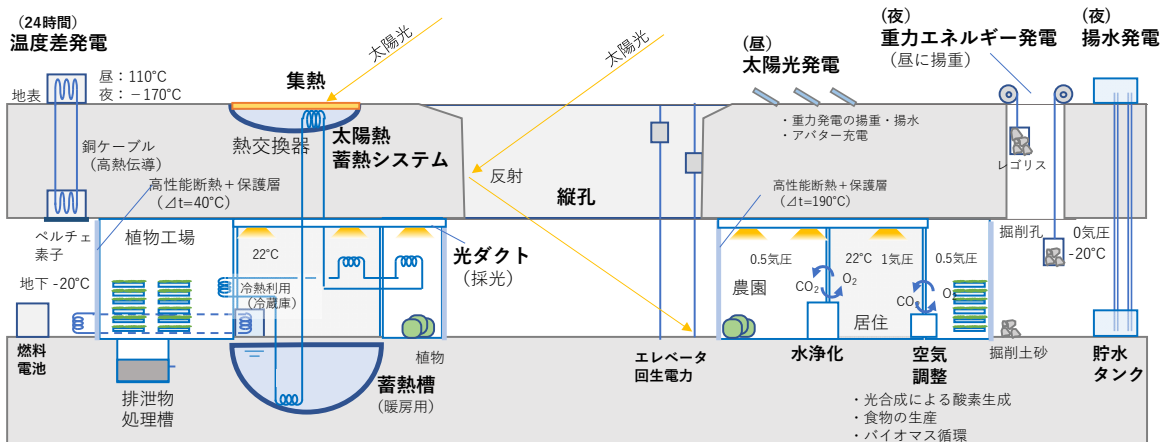


図-7 月地下居住の設備システムの例  
Fig.7 Example of equipment system of lunar underground habitat



した温度差発電が考えられる。夜間は昼間の太陽光発電で積み上げたレゴリス（月の砂）ブロックを降下させて発電する重力エネルギー発電が考えられる。

また、省エネルギーへの工夫も必要である。例えば太陽光を熱や光源として直接利用することによる消費電力削減や、太陽熱からの温水や放射冷却による冷水などの蓄熱の活用による安定した熱源の確保が温度調整には必要である。冷房には-20℃の溶岩チューブ表面や宇宙空間への放熱も利用できる。また、居住空間内の温度調整には熱搬送の仕組みも必要である。

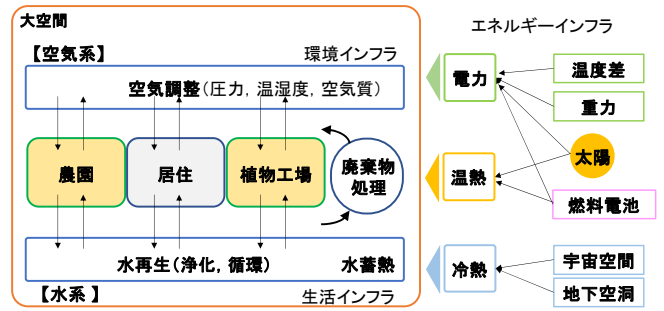


図-8 月地下居住の構成要素  
Fig.8 Components of the moon underground living

### 3. 3つの空間と物質循環の関係

#### 3.1 物質循環システムの概要

図-8 に月地下居住の構成要素を示す。安全で健康に生存できる環境を作る「環境インフラ」と、衛生的で快適な生活を実現する「生活インフラ」、それを支えるエネルギーインフラがある。長期滞在では健康や心理的な観点から生活の質も重要であり、その前提は空気や水、食料が確保されている安心感である。

物質循環の検討には各領域にわたって物質の循環を適切に制御できるシステムが必要となる。また、長期滞在のためには省エネルギーの追求も課題であり、装置利用を最小限とした物質循環システムの構築を目指すのが理想である。

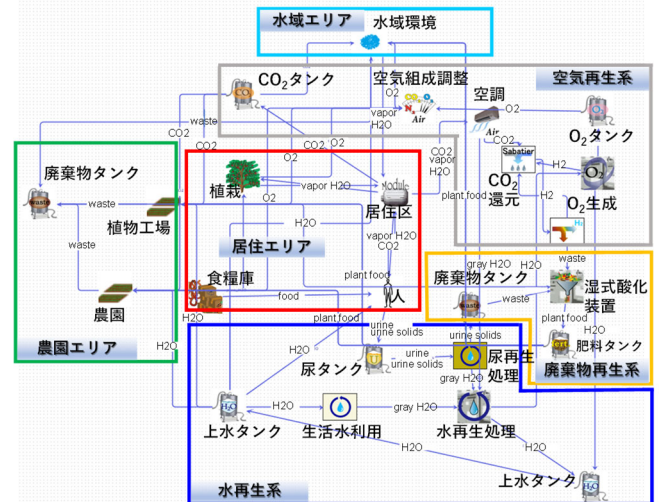


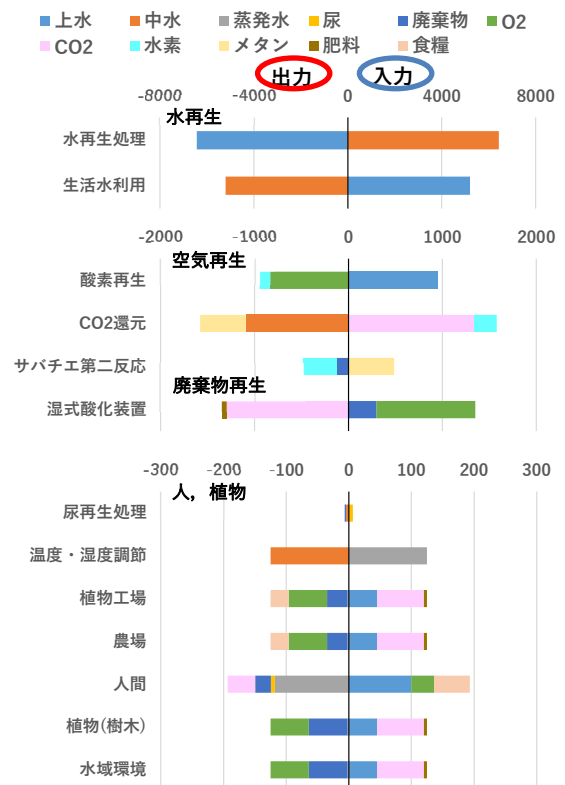
図9 物質循環シミュレーションモデル  
Fig.9 Material cycle simulation model

図-9 に月地下居住空間における物質循環シミュレーション<sup>1)</sup>のモデルを示す。3つの居住エリアと、空気再生系、水再生系、廃棄物再生系という3つの再生システムに分かれており、相互に関連しあい、全ての物質を再び利用できる状態に戻し循環させる。O<sub>2</sub>とCO<sub>2</sub>については植物の光合成の活用を前提と考えるが変化の速度は遅いため、空気の組成バランスの調整には空気組成調整の機器が必要となる。

#### 3.2 物質循環の設定条件

1人当たりの植物工場、農園のそれぞれの栽培面積は96.51m<sup>2</sup>、50人で4,825.5m<sup>2</sup>とした。計算上は植物工場と農園の栽培面積を同等としたが、植物工場での栽培は高密度化することができ、その分、農園では少量の高付加価値の作物も栽培できる。その他の設定条件については、文献<sup>1)2)3)4)</sup>を参考に設定した。

植物工場と農園から生産されるものは可食部（食糧）と不可食部（廃棄物）に分けて扱い、樹木、水域環境（植物を想定）からは不可食部を合計して廃棄物に分類した。居住区域の樹木の配置面積は4,825m<sup>2</sup>でこれは居住区域9,425m<sup>2</sup>の約50%である。



[+ : 入力 (流入, 摂取), - : 出力 (排出)]  
図10 物質循環の収支結果 [kg/day]  
Fig.10 Balance result of material cycle

表-1 物質循環の収支 [kg/day]\*\*

Table1 Balance of material cycle

	単位: kg/day	上水	中水	蒸発水	尿	廃棄物	O2	CO2	水素	メタン	肥料	食糧
水再生系	尿再生処理		-4.2		6.4	-2.3						
	水再生処理	-6,432.5	6,432.5									
	生活水利用	5,205.7	-5,205.7									
空気再生系	温度・湿度調節		-124.9	124.9								
	酸素再生	946.9					-840.8		-106.1			
	CO2還元		-1,093.3					1,336.2	243.0	-485.9		
	サバチエ第二反応					-121.5			-364.4	485.9		
農場・植物工場	植物工場	45.0		-1.8		-33.1	-61.3	75.1			4.8	-28.8
	農場	45.0		-1.8		-33.1	-61.3	75.1			4.8	-28.8
廃棄物再生系	湿式酸化装置					298.5	1,052.0	-1,298.1			-52.4	
居住エリア	人間	100.0		-117.8	-6.4	-25.0	36.0	-44.3				57.5
	植物(樹木)	45.0		-1.8		-61.8	-61.3	75.1			4.8	
水域エリア	水域環境	45.0		-1.8		-61.8	-61.3	75.1			4.8	

※[+: 入力 (流入, 摂取), -: 出力 (排出)]

3.3 物質循環の試算結果

図-10、表-1 に物質循環の結果として、各工程や人や植物の物質の収支を示す。+は「入る」、-は「出る」を表している。最も量が多いのは生活水利用と水再生処理となった。生活水の利用は最小限の設定であるが、全体の中では多くの量を占める。空気再生で O<sub>2</sub> と CO<sub>2</sub> の濃度のバランスをとる必要があり、廃棄物再生も併せて収支をとるものとしている。人、植物については人の呼吸による CO<sub>2</sub> は少なく、呼吸に必要な O<sub>2</sub> は植物から十分得られる結果となった。廃棄物の処理は湿式酸化装置を用いるが、O<sub>2</sub> の消費量、CO<sub>2</sub> の排出量が多く、廃棄物を減らす工夫が必要である。CO<sub>2</sub> 排出や酸素再生装置の稼働による調整が必要となった。それぞれの変動を吸収するバッファとして貯留タンクを用いた収支の調整が考えられる。

このようにシミュレーションにより物質収支が成立する条件や変動時の対処方法などについて検討することで閉鎖生態系を維持するシステムの要件や生じうるリスクについて重要な情報が得られる。

表-2 に物質循環用保存タンク容量を示す。搬送距離が短くなるように用途と容量を考慮した配置計画や、インフラを複数系統に分散配置して非常時のリスク低減に配慮するなど、空間デザインとも関連している。

4. 地下居住空間における空調エネルギー

地下居住空間に必要な空調熱量について検討する。月面での温熱源は日射と人体や機器からの発熱であり、外壁、地盤、天井からの熱損失を考慮した空調計画を行う。空調には蓄熱の活用が重要となり、昼の日射熱を夜の暖房用に、夜の放射・伝導冷却による冷水・氷を昼の冷房用に熱源として確保することが考えられる。

表-2 物質循環用保存タンク容量

Table 2 Tank capacity for material circulation

用途	出力 (kg/日)	タンク容量 (kg)	用途	出力 (kg/日)	タンク容量 (kg)
上水	6,432.5	9,648.8	O <sub>2</sub>	1,088.1	1,632.1
蒸散水	124.9	187.3	CO <sub>2</sub>	1,636.7	2,455.1
中水	6,432.5	9,648.8	水素	470.6	705.8
尿	6.4	9.7	メタン	485.9	728.9
廃棄物	338.5	507.7	体積換算		
食糧	57.5	86.3	O <sub>2</sub> :1142m <sup>3</sup> , CO <sub>2</sub> :1242m <sup>3</sup>		
肥料	52.4	78.7			

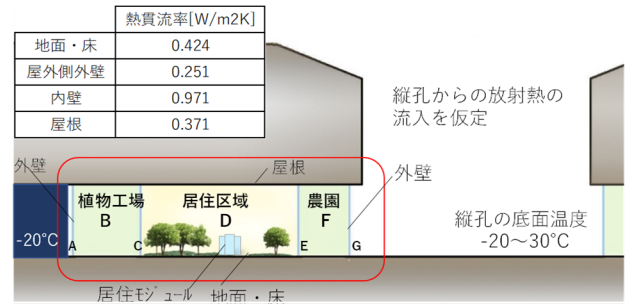


図-11 空調負荷の計算モデル (断面)

Fig.11 Simulation model of air conditioning load (cross section)

表-3 空調ゾーンの面積、容積

Table 3 Area and volume of air conditioning zone

	面積[m <sup>2</sup> ] (床・天井)	容積[m <sup>3</sup> ]	壁面積[m <sup>2</sup> ] (外側)	役割
B 植物工場	7,741	123,854	9,047.7	食糧生産、空調調整
D 居住エリア	9,425	150,796	7,538.2	生活空間
F 農園	5,435	86,959	5,117.5	農作業
居住モジュール(54個)	875	2,624		プライベート空間
合計	22,601	361,610	21,703	

表-4 内部発熱条件

Table 4 Internal heat generation

	B 植物工場	D 居住区域	F 農園	D内 居住モジュール
照明 (LED) [W/m <sup>2</sup> ]	10	10	10	5
植物栽培用LED[W/m <sup>2</sup> ]	26			
機器[W/m <sup>2</sup> ]	10	20	10	10
サーバラック[Wh]	3000			
人体: 顕熱負荷67[W/人]			8人	40人
人体: 呼吸湿気16.7[g/h人]	2人			
アパター:600[W/体]	10	30	10	

### 4.1 居住空間の空調熱負荷計算の概要

図-11 に計算モデルの代表的な断面を、表-3 に各ゾーンの規模を示す。大空間の空調に必要な熱量は、熱回路網解析により求めた。本解析はゾーン間の熱移動を質点の接続としてモデル化するもので、3つの大空間を空調ゾーンとし28日間の解析を行った。表-4 に内部発熱条件、図-12 に内部発熱スケジュールを示す。居住区域には滞在用の居住モジュール(16m<sup>2</sup>/人)を設け大空間とは別に空調できる想定とした。人体は夜間の代謝を30%と仮定し、照明負荷は、一般的なオフィス同等として、夜間は共用空間の照度確保を考慮して昼間の30%の照明利用とした。溶岩チューブの表面温度は20℃で一定とし、縦孔に面する壁面への放射熱は、日照の有無に対応した底面温度<sup>9)</sup>を参考に、陰になる面積比率を勘案して表面温度を図-13のように仮定し平均値を用いた。また、地盤面と天井面には熱伝導による放熱が生じると仮定した。

表-5 にシミュレーションの空調温度設定を示す。空調エネルギーの削減策として設定温度を低くした場合の効果把握するため、基準設定として全体を20℃としたCase1に対し、Case2では月の夜間に設定温度を冬季と想定した10℃とした。Case3では全体の温度を18℃に下げ、省エネ効果を確認した。個人の居住モジュール内は22℃一定とした。

### 4.2 空調負荷の試算結果

図-14 に各ケースで月の昼と夜の暖房負荷の比較を示す。Case1の昼間は植物工場と居住区域で約40MWあり、農園は日射熱で負荷が低減される。夜間は逆に農園の負荷が大きい結果となった。Case2は月の夜間に居住区域の暖房負荷がほぼなくなり、居住モジュールの負荷が若干高くなった。しかし隣接する植物工場、農園の暖房負荷は増加し、合計負荷はCase1の236MWに比べ約8%の削減(217MW)が見られた。Case3では、全体の負荷が低下し、Case1に対し約13%の削減(205MW)であった。

図-15 に28日間のCase1の空調負荷変動を示す。「-」は暖房、「+」は冷房を示す。面積の大きい居住エリアは30~230kWと変動が大きく、植物工場は70~170kW、農園は100~170kWだが、日射の影響で数日間は負荷が0~70kW程度まで低減する結果となった。外壁の断熱性の向上で暖房負荷低減の可能性が考えられる。

## 5. VRによる空間評価

縦孔を中心とした地下の大空間は回遊性を有し、奥

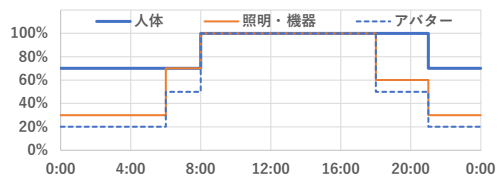


図-12 内部発熱スケジュール  
Fig.12 Internal load schedules

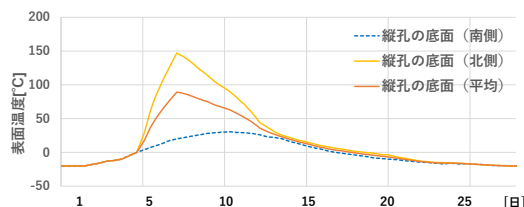


図-13 月の縦孔の温度 (28日間)  
Fig.13 Temperature of the moon vertical hole (28 days)

表-5 シミュレーションの空調温度設定  
Table 5 air conditioning temperature settings

		植物工場	居住区域	農園	居住モジュール
Case1	基準設定	20			22
Case2	居住区域の温度の低減 (月の夜は冬の想定)	20	月の昼: 20 月の夜: 10	20	
Case3	大空間全体を18℃設定	18	18	18	

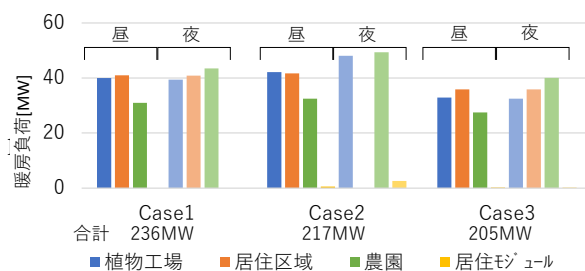


図-14 各ケースの暖房負荷の比較  
Fig.14 Heating loads of every case

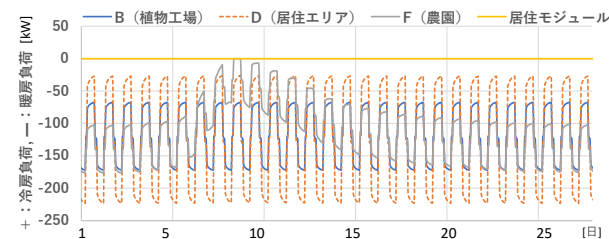


図-15 Case1の空調負荷変動  
Fig.15 Air conditioning load in case 1

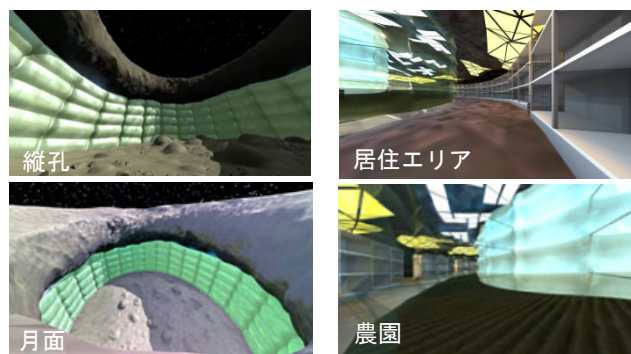


図-16 VRによる居住空間の確認  
Fig.16 Confirmation of living space by VR



行きを感じられる空間になると予想される。しかし、細長い空間で、居住者の感じる空間の印象や圧迫感が問題となる可能性がある。そこで、VR (Virtual Reality) の仮想空間の中に居住空間を再現し、空間評価を試みた。図-16 に VR で再現したエリアを示す。居住空間、農園、月面、縦孔の底を自由移動でき、1/6 重力により跳躍の浮遊感が感じられる。評価は主観的なものであるが、一部で大きな壁の圧迫感はあるものの大空間の開放感を体感できた。今後、空間デザインにより魅力的な場所にできると考えられる。

## 6. 自然の再現に関する検討

### 6.1 農園の構築

農園は人が作物の栽培を楽しめる明るい空間である。「月の高地」の斜長岩は地球では土壌改良剤として使われ、吸水性・保水性に優れ Ca, Al, Si に富む。一方、「月の海」の玄武岩は植物が好む無機栄養成分の大半を含有し、農地に最適な土質で吸水性・保水性には劣る。これらの土を混合し、作物栽培の必要元素 (C, H, O, N, P, K, S 等) を地球から持ち込み添加すれば農地の土となる。表-6 に植物が根を張るのに必要な土の層構成の例を示す。土の上部の有効土層には保水性のある斜長岩 (月の高地) が、下層基盤には透水性が高い玄武岩 (月の海) が向いている。土層の深さは 70~100cm 程度必要で、施設全体の地盤高さの目安となる。

### 6.2 水域環境

居住区内には海を模した水域環境を設けている。これは人が安心できる景観を作る要素であり、水の浄化ができる可能性もある。水深は、農園の土の高さ約 100cm を考慮すると、最大で約 80~90cm 程度となる。本研究の物質循環では、水域環境でも植物の光合成を想定している。

### 6.3 大空間の空気循環

図-17 に大空間の対流による空気の流れを示す。月の重力は地球の 1/6 であるが、空気の温度差があれば対流が生じて自然な風が感じられ、また、局所的な汚染質濃度の上昇を防ぐ効果も期待できる。ここでは水域環境も考慮し、空間内に温暖なエリアと冷涼なエリアを計画した。空間に変化をもたらすと同時に、自然に近い朝露などの自然現象は心理的に良い可能性もある。

### 6.4 照明計画

居住空間には、人の体内時計に合わせた 24 時間周期の照度、温度の変化が望ましい。太陽光は縦孔から安全な形で採光に利用し、人工照明と組み合わせて明る

表-6 農園の土の層構成<sup>6)</sup>

Table 6 Farm soil layer composition

層名	特性	低木 (3m以下)	高木 (3~7m)
「有効土層」 植物の根が伸びる層	上部：養分含み柔らかく 透水性・保水性も良好	30cm	40cm
	下部：透水性が良好	20cm	30cm
「下層基盤」	排水が良好	20cm	30cm
		合計 70cm	100cm

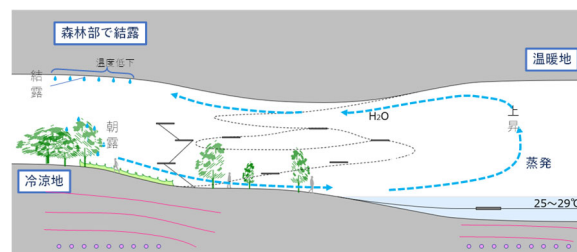


図-17 大空間における対流

Fig.17 Air convection in large space

い空間をつくる。また、例えば大空間の中の 1/3~1/2 を夜として運用するとピーク電力の抑制効果もあり、一考に値する。

## 7. おわりに

宇宙建築は地球の一部を地球から持っていくことも含めて、人が豊かに暮らすための場を提供するものである。その実現を検討することは、地球での生活を見直し循環型社会を作る一助になり得る。今後も月面を技術的なチャレンジの場にとらえ、月における建築・建設技術について検討を重ねていく予定である。

### 参考文献

- 1) Moriyama, E., et al., "New ECLSS Simulation Software and Its Demonstration by Manned Mars Missions", ICES-2015-157, 45<sup>th</sup> International Conference on Environmental Systems, Bellevue, WA, 2015.
- 2) Miyajima, H., et al., "Considerations of Material Circulation in CEEF Based on the Recent Operation Strategy", SAE Technical Paper 2003-01-2453, 2003, doi: <https://doi.org/10.4271/2003-01-2453>.
- 3) 宮嶋宏行：1-4 宇宙居住と物質循環 - 閉鎖生態系の実現 - , 閉鎖生態系・生態工学ハンドブック, アドスリー, pp.38-47, 2015.
- 4) Anderson, M.S., Ewert, M.K. and Keener, J.F., "Life Support Baseline Values and Assumptions Document", NASA TP-2015-218570/REV1, 2018.
- 5) 河野功, 春山純一他, 月の縦孔・地下空間利用基地による SDGs 社会実験プラットフォームの研究, 第 63 回宇宙科学技術連合講演会, 2C06, 2019.
- 6) 豊田幸夫：エコ&ヒーリング・ランドスケープ 環境配慮と癒しの環境づくり, p.72, 2005.