

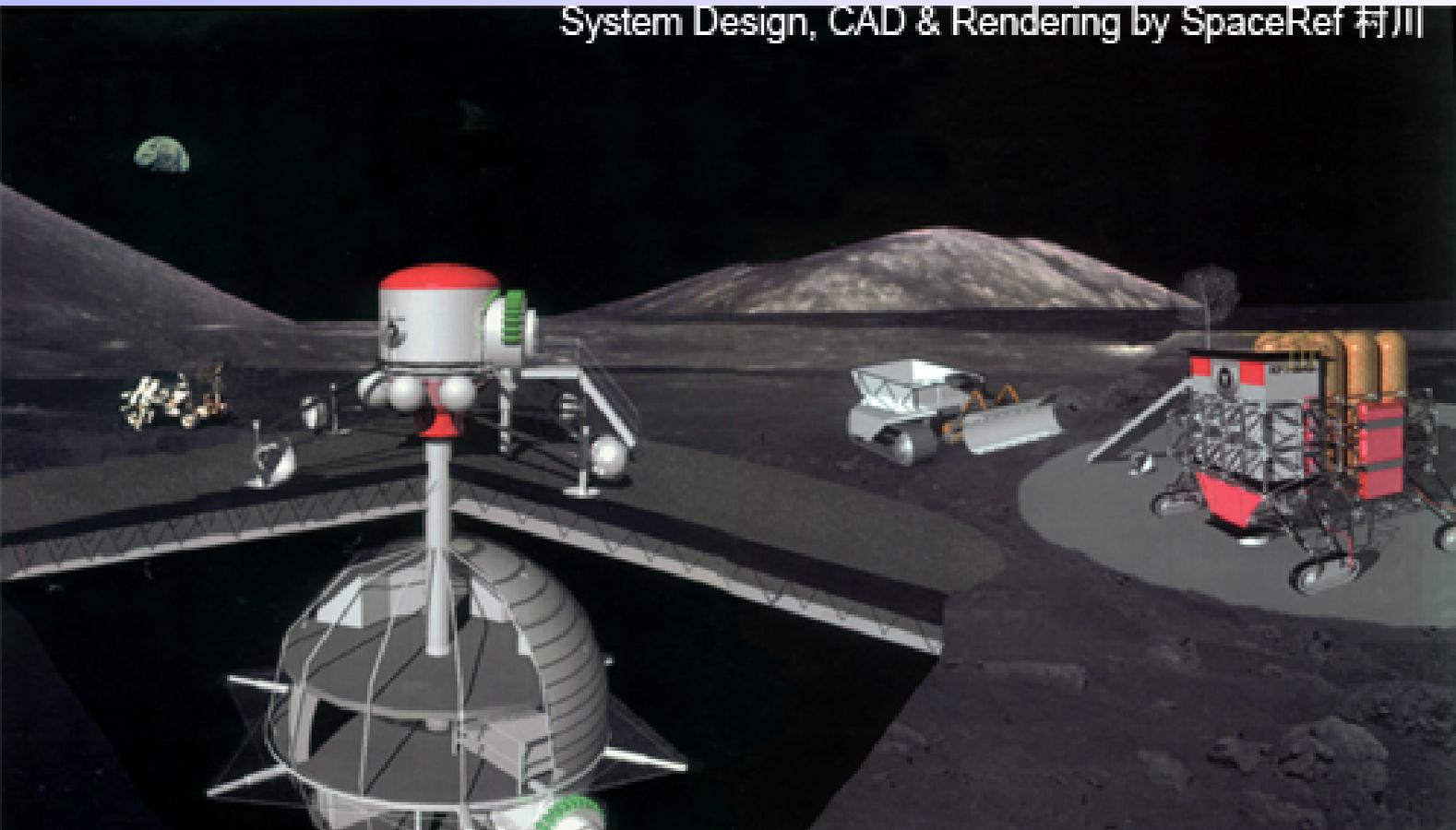
宇宙建築物と地球建築物の 関連性に関する考察

—月面基地の設計に向けて—

スペースレフ

村川恭介

System Design, CAD & Rendering by SpaceRef 村川



Copyright All Reserved Murakawa 2007

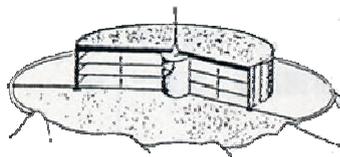
Lunar Base Design

宇宙建築物と地球建築物の関連性に関する考察

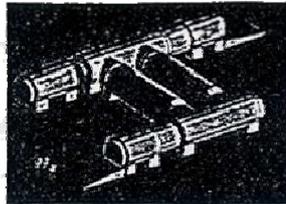
村川恭介

要旨：米国、ヨーロッパ、ロシアを中心に進められている有人宇宙計画の中で、地球上での建築技術が宇宙計画実現に貢献できることが明らかになりつつある。これを踏まえて、本務では宇宙建築物と地球上建築物の設計、施工方法を比較し、類似性を検討することにより、技術の相互移転の可能性を考察し、建築学が宇宙計画に貢献できる可能性を示唆する。

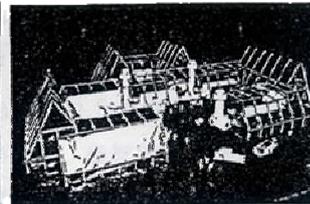
宇宙建築の定義：宇宙建築 (Space Architecture) という言葉は明確には定義されていないが、「地球以外の場所 (Extraterrestrial) 空間に建造される構築物で、惑星表面上に建築されることのみならず、地球も含めた惑星軌道上に定常的、又は長期的に位置するもので、有人施設あるいは人間の長期に渡る営みに深く関わりのあるもの (例：スペースステーション及びそれに類するもの、月面基地、火星基地、火星探査船、地球・月間の恒常的施設、宇宙工場等)」と言える。このことから、科学探査、リモートセンシング、コミュニケーション等の目的で使用される無人施設、運搬を目的とした輸送施設 (例：スペースシャトル、月面探査車等) は対象外である。ただし、地球上の建築物と同様、建設資材運搬には輸送手段が不可欠であり、設計・施工上大きな制約条件の一つになり、相関関係にあるので無視は出来ない。 [図-1] は、宇宙建築の概念設計の例を示す。



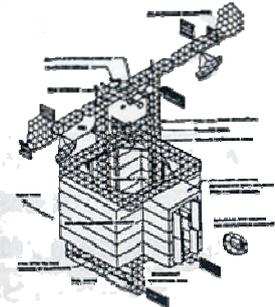
(Lin, 1988)



(Toups, 1989)



(Murakawa, 1990)



(Kennedy, 1990)

類似点：宇宙建築の建設には、地上建築とは、設計及び施工上、多くの類似点がみられる。ただし、スペースステーションのような無重力空間の場合と、多少でも重力のある地球以外の惑星表面ヒでは幾つかの異なつた留意点がある。 [表-1] は、計画、材料、構造、施工と言った地球上建築と宇宙建築で一般的な検討項目と、宇宙建築の場合について特に異なる項目、研究課題の要点のみをまとめたものである。

[表-1] 地球上建築と宙建築の設計・施工上の検討項目

地球上・宇宙の両建築での共通検討項目		特に宇宙建築で必要な検討項目ー研究課題
計 画	音	● 1気圧以下の室内環境では音の伝波力低下。 ● 無重力空間では構築物は互いに緊結された一体構造が多く、振動、騒音の吸収が必要、● 居住空間は完全密閉空間であるため残響が激しく吸音、吸振動が必要。
	室内気候	● 地球以外では、真空かそれに近い大気のため、外部への放熱方法重要。また、太陽光を受ける面と影面との極端な温度差への配慮。● エネルギーの再利用、人間の作る二酸化炭素の再利用等エネルギーの100%利用。● 無重力空間での空気の対流の研究。● 太陽からの距離、惑星の大気の内容、公転・自転周期などによる日照の変化。● 宇宙線、太陽放射線への配慮、人体への影響、放射線遮蔽構造等の研究。
	自然光・人口照明	● 太陽光の利用、窓の位置 (地球が見えるように) ・窓の大きさ

計 画	<ul style="list-style-type: none"> ◆マスタ・プランニング ◆動線計画 ◆人間工学 ◆モジュール ◆プロファブ化率 ◆防火 ◆避難 	<p>●資源利用のための採鉱エリア・材料生産工場・宇宙船発着場・居住施設・太陽光発電、原子力などのエネルギー・生産施設・実験施設・宇宙観測施設・自給自足生産施設等の主要施設を結ぶネットワーク・クづくり及びそれらを結ぶ効率的で安全な交通網、輸送施設・手段の研究。●将来の施設拡張性を確保するためのデザインされた全体システム。●室内空間は単調になりやすいため、空間認識の容易性・方向性の明確化といった心理的工夫が必要。●微重力環境での人間工学分野の研究閉鎖空間、限定された人数、荒涼とした屋外環境、単調な生活と言った中での生活に対応した心理学の研究。●生産、輸送、アSEMBル、メンテナンスなどの高効率化のための部品のモジュール化・単純化は最重要検討項目の一つ。●火災・空気の漏れは居住施設にとって致命的なため、防火区画・防煙区画・防圧区画が必要。また、避難は屋外への避難のみならず、他の部分から完全に独立した安全施設への避難も考慮。防圧区画の研究が必要</p>
	<ul style="list-style-type: none"> ◆構造フレーム、シェル、膜、応力・変形、地盤、基礎構造 ◆材料 	<p>●テザ- (TETHER) 構造の検討。●軌道上及び低重力惑星 (月 = 1/6G、火星 = 1/3G) における構造体の重力、重心、遠心力、振動、応力、変形等の検討、及び新しい構造形態の研究。●真空またはそれに近い環境での与圧構造体の応力、変形などの検討、及び新しい構造形態の研究。●月、火星における構造体基礎、擁壁、地下構造体等のための地質・地盤調査。●月、火星での現場資源の利用・加工処理方法、建築資材の製作方法、各資材の物理的性の解明、運搬方法。</p>
	◆給排水、電気、冷暖房・空気調和	<p>●太陽光利用のエネルギー・供給源の研究、新しい冷暖房システムの研究。● CELSS (Controlled Ecological Life Support System) の建築設備としての研究。●宇宙施設でのごみ・廃棄物処理の研究。●無重力環境での効率的で快適な空気調和システム</p>
	◆施工計画、基礎・土工事、駆休・仕上・設備工事等	<p>●宇宙環境でな施エロボットの研究、施工管理のコンピュータソフトの開発。●軌道上・惑屋上での合理的な施工方法、建設機械、建設関連道具のデザイン開発。●安全で効率的な建設小屋の開発。●新しい輸送システムの開発</p>
<ul style="list-style-type: none"> ●有史以来行われている地球上での原始的な建設方法、原始的な資源の利用・使用方法の研究 ●地球以外でのコロニー構築のため、人間にとっての居住空間のユートピア的目標設定、社会学考察 		

要約：今までの宇宙計画は輸送手段開発の歴史でもあった。しかしながら、欧州、ロシア、米国で進められている次の宇宙開発目標は人間の地球外での長期滞在または定住である。人間を快適かつ安全に地球外に存在させるためには地球上と同様に建築施設が必要であるが、環境は違うものの地球外空間での建築設計・施工には地球上の建築設計・施工と同様の手続きを踏まなければならない。

事実、諸外国では、多くの建築設計・建設経験者が宇宙計画に関わっているが、地球上での有史以来の膨大な量の建築技術の蓄積が、今日の高性能の建築を建設可能にしている事を見ると、これらの技術が宇宙計画、特に多くの部品を宇宙という現場でアSEMBルしなければならない宇宙建築の建設に貢献できる可能性があることは間違いあるまい。また、上記の表から見ても建築的研究テーマも多く見受けられ、宇宙というより条件の厳しい環境条件に対応した技術が開発されれば、地球上での技術発展に大きく貢献することも可能であろう。

建設材料の視点での考察：ガラス

宇宙建築と地上建築との類似性の具体例として、月面上での有力な建築材料として期待されているガラスについて検証をした。月面の表土の大部分を占めるケイ酸塩 (Silicates) を比較的単純な加工処理によって生産可能なガラスについて、地球上のガラスと比較しながら類似性、特質性について述べる

ガラスの定義：本稿で言うガラスとは溶融物を結晶化することなく冷却して得られる無機物質のことをいい、金属や高分子のガラスは含めない。

ガラス生産に適した月面資源：月面には自然にできたガラスが存在するが、月面ガラスの大部分は、隕石の衝突エネルギーによって液状化した溶解物質の分裂からできた液状の小滴の急激な冷却によって形成されたといわれている。

このことから、月面の資源を溶融して自然の状態では材質の優れたガラスを形成する可能性を示唆し

ており、工業生産に必要な施設・設備が貧しいであろう初期の月面基地の段階でも、表土の単純な加工処理によってガラスという応用範囲の広い工業製品を生産できることを意味している。

現在までの調査によれば、月面の表面にある物質の99パーセントは、鉄、マグネシウム、そして時にはチタニウムが豊富な玄武岩（ケイ酸塩鉱物の一つである輝石群-Proxene [Hg, Fe, Ca, Zn, Kn Si A] を多く含む）と、アルミニウムとカルシウムが多く含まれる灰長石（ケイ酸塩鉱物の一つである斜長石群-Anorthosite 又は Ca rich - Plagioclase [Na/CaAl₂Si₂O₅] のひとつ）に近い岩石である。基本的には、一般的なケイ酸塩を熔融し、結晶化しない程度に十分に遠く冷却すれば、いろいろと異なった特性をもつ様々なガラスを作ることが可能である。

次の理由から、高地（月面の明るいところ）にありCaを多く含む灰長石（Ca-Plagioclase）が月面ガラス生産のための最有力な鉱物である。

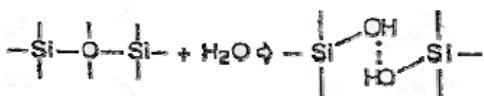
- 不純物がほとんど含まれないので熔融して透明なガラス又はガラスファイバーを製造することができる。
- 月面表土に含まれる成分の中で最も低い磁化率であるため、強い磁場の使用によって非磁性体として分留されて、ほとんど99%の純度まで精製することが可能である。
- 1550°C程で熔融し、高い粘性をもっているため、板状、ブロック状、繊維状のガラスを作るための加工性が良い。
- Plagioclaseと同じ組成をもつアルミノケイ酸塩ガラスは膨脹係数が低く、粘度は熔融ガラスの温度が下がるにつれて急激に高くなる。つまり徐冷温度が極めて高く徐冷は困難であるから、ガラス繊維や焼入れ強化ガラスのように急激な冷却によって成型する必要のあるもの、または徐冷が不要な用途に適する。

このことから、複雑で繊細な徐冷工程が不要なアルミノケイ酸塩ガラスの生産は、生産設備に限度がある月面では大変有利と推測できる。

地球上で生産されているケイ酸塩系ガラスの代表的なソーダ石灰ガラス(Na₂O-CaO/MgO-SiO₂)とアルミノケイ酸塩系ガラスの代表的なEガラスの化学組成と月面の代表的な鉱物の化学組成を次表に示す。組成の類似性からみて、理論的には地球上で生産されているようなガラスは、環境の違いによる技

月面で生産されたガラスの特製

ガラスに含まれる水分は水酸基OHとして存在し、これがSi-O結合を加水分解し、結果的にSi-Oの強い結合を弱めて結果的にガラスの強度を弱めることになる。それを化学式に表すと、



となる。

ガラスは本質的には人間が知る最も強い物質の一つであるが、真空環境で生成されテストされた傷のないガラスは、140kg/mm²という一般市場にでていた合金よりも約10倍の強度を達成できる。そのことから月面では真空・無水環境なので、この環境下で生成したガラスは、加水分解による強度の低減は起こらず、地球上では考えられないほど大きな強度を生じると予想されている。

ガラス繊維：地球上で生産されている長繊維のほとんどがEガラスと呼ばれる電気絶縁性に優れた繊維であるが、このEガラス（アルミノケイ酸塩ガラスの一つ）とCa-Plagioclaseとは前述のように組成が同じで化学組成割合が大変酷似している上に、ガラス繊維の生産は、板状などのガラスの製造に必要な徐冷過程という大変難しくエネルギーの必要な工程を要しないため比較的単純であり、月面基地の初期の段階から生産可能と思われる。さらに、コーティングのように、生産されたガラス繊維の加傷防止技術が強化されれば、優れた引張り強さを示す材料として金属に取って変わって補強筋やワイヤー等として利用可能である。なお、不透明なガラス繊維ならば、月面の土を直接溶かしてつくること

ができる。ただし、不純物などによる性能の不確実性の増加は否めない。

前述したように、月面の無水環境下でつくられるガラス繊維は、ガラス素材の純粋度が高く、製造過程で温度、接触等が注意深く管理されれば理論値に近いとてつもない強度を持つものになる可能性がある。

月面でのガラスの利用：ガラスは、他の月面資源利用による生産可能資材より、相対的に高い圧縮強度、引張強度、弾性係数、高硬度、低い熱膨張率、割れやすさなどを特徴とし、資源を有効に使うことが可能なため、地球上でのガラスの生産と同様に鉱物資源を熔融するための集中した高エネルギーの供給が可能ならば、建設用として、その他多方面に渡る応用と利用が可能である。応用可能なものとしては次のようなものが考えられる。

- ・ボルト、ナット、ローラー、歯車、滑車といった機械部品
- ・ドライバー、ハンマー、レンチといった工具類
- ・椅子、テーブルといった家具類
- ・板状パネル
- ・スペースフレームの部材などといった棒状の部品
- ・補強筋、ひも、ロープ、ケーブル、ベルトといった長尺、帯状の部材
- ・車両のレールの類
- ・液体、気体の輸送管といったパイプ状の部材
- ・太陽光の地下室への伝送、通信用等に必要光ファイバー
- ・窓ガラス
- ・レンズ
- ・内装・装飾部材（ガラス中の含有物によって色の調整が可能）、食器
- ・その他多数・・・

月面基地の建設方法：

現在最も現実的に計画されている月面基地の建築工法について考察する。月面上で提案されている建築技術のアイデアの多くは地球上の **Earth Sheltered Architecture**（覆土建築）技術と大きく類似している。その意味を考察し、地球上と、月面という地球外空間での建築技術の相互技術移転の可能性を示唆した。

月面上での人間の居住施設空間を作り出す工法がいろいろ提案されている。これらの工法に共通に要求される条件として、以下のように列挙する。

①人体または、精密機器に多大なる悪影響を及ぼす太陽からの放射線、放射熱、宇宙からの危険な放射線、隕石等かの保護。

* 11年周期で起こる太陽の大爆発によって作り出される太陽からの放射線は短時間で人間を死にいたらしめるほど強烈である。また、太陽光を浴びた物質の表面温度は130～150℃にも達する。逆に、日陰はマイナス100℃以下にもなり、その温度差は極端である。これらの過酷な環境に対処するために月面の土で施設に覆うことによって解決するのが一般的な提案となっている。

②人間による作業量の減少。

* 人間の作業量を増加させることは人間への危険度を増加させ、生命維持に必要な食糧、酸素、エネルギー等の管理が増大する。

③短時間での建設

本全体的にエネルギーの節約が要求される、

④建設資材の軽量化及び資材現地調達率の増加

* 建設資材、特に容量のかさばる構造材を地球から運搬するには大きなエネルギーを要するため、軽量化、減容化または現地での資材の生産化が必要。

⑤拡張性

* 施設はそれぞれ独立しているより施設同士が連結している方が設備面で経済的であるし人間の動線もスムーズになる。特に外部は真空なので居住空間は加圧される必要がある。この意味からも施設全体が一体化される必要がある。

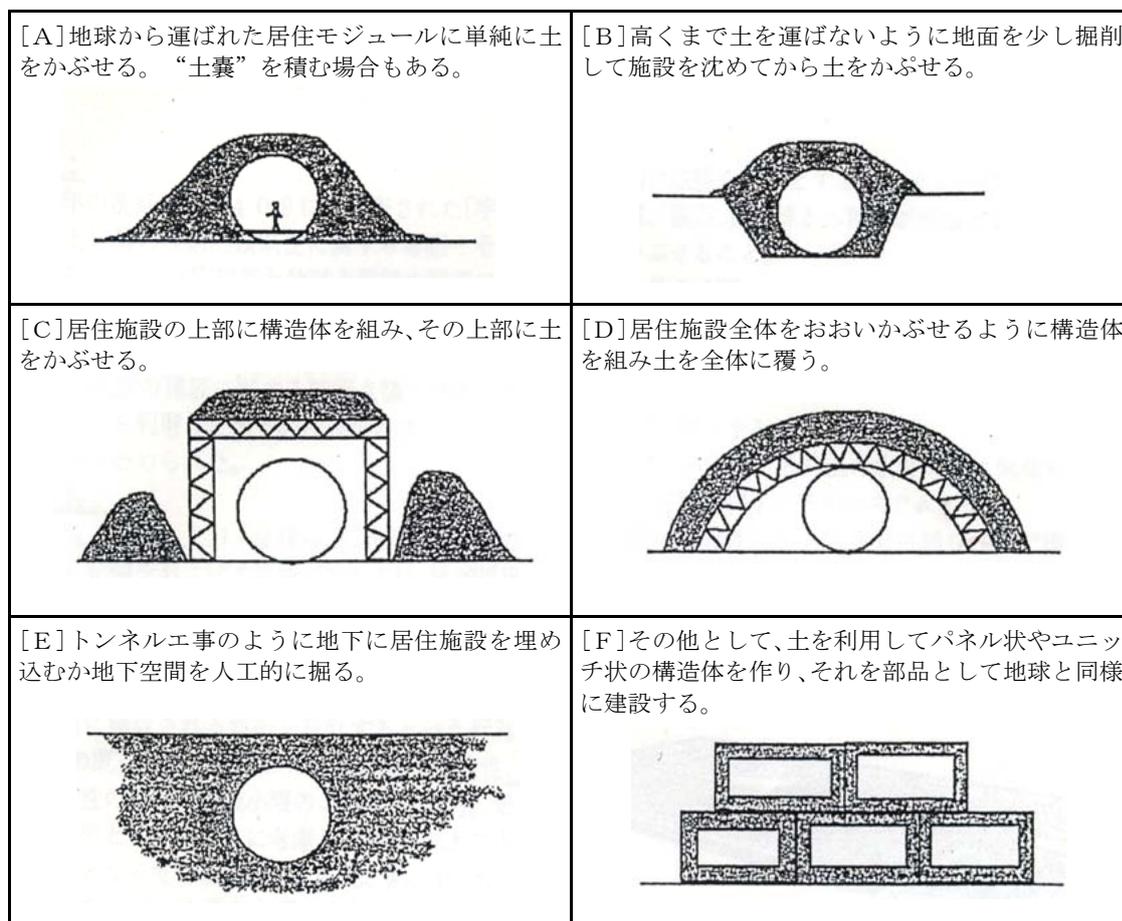
⑥施工法の単純化

* 最も単純化された施設とはいわゆるプレファブ化率100パーセントの施設を指

す。30年以上前に人間を初めて月に送り込んだアポロ計画で使用されたアポロ宇宙船月面着陸機はこれに該当する。

すなわち現地へ搬入されたその時点から施設の機能が100パーセント保証される。月面施設は可能な限りプレファブ化されたものが搬入された方がよいが、地球からの運搬とのからみで経済性を加味すると100パーセントのプレファブ化率が良いかどうかは状況による。南極基地施設建設と共通するところが多い。

以上の様な条件を配慮して提案された月面居住施設の工法をパターン化すると以下のように分類できる。



尚、各居住施設は、現在建設されている宇宙ステーションに使用される居住施設のような金属製の完全完成品や、風船の様に膨らませて空間を作るもの等が考えられる。

ところで、これらの工法と非常に酷似し、多くの点で共通したものが **Earth Sheltered Architecture** (覆土建築) である。実例を図に示すが、月面居住施設と同様に土をかぶせることによってエネルギー対策、遮音等に大変有効とされている。覆土建築は、地球上の生態系を司る地表面の減少を防ぐのに有効であるが、これらの建築物を建設するに際しての技術開発の視点から見ると、月面居住施設の様々な発想は地球上建築に大いに参考になるし注目に値する。



基礎スラブを利用した地下居住施設の建設：

以下は、宇宙建築と地球上建築の技術の相互移転の可能性の具体例として、初期の月面基地開発に必要な居住施設の建設方法に関するものであり、米国土木学会主催の宇宙施設の建設に関する国際会議で発表された「基礎スラブを利用した地下居住施設の建設」を説明する。

1. 研究目的：

現在、環境・資源・人口・食糧等、地球上での人間の存続に大きく影響をおよぼす事柄に対しては、地球規模のみでなく地球周辺の宇宙をも取り込んで対応せざるを得なくなっているが、あらゆるデザイン行為の過程においても同様の対応、考慮が必要となってきた。地球外空間に建設される建築を設計するという行為では、地球上の既存技術を利用しつつ、最大限の安全性、最大限の快適性の確保や、最小限のエネルギー消費、最大限の空間利用といったことに考慮し、通常地球上で当たり前の存在となっている空気、太陽光、熱、音、水についてはかなり違った見方が要求される中で行われる。

本文では、人間が月面に居住するために最初に必要とされる初期居住施設の設計過程を示すことにより、地球上の技術の宇宙建築への応用のされ方、そして逆に設計された施設から地政上建築への技術の再応用の可能性について検証した。

2. 対象施設

本施設は、前提条件として、月面での人間の一時的な滞在を可能とする最も初期の居住施設の次に建設され、恒常的な滞在を可能にするためのものである。月面居住施設の設計に最低限必要とされる主な設計条件を以下に示す。

- ・出来る限り短時間で建設可能とするシステム。
- ・建設作業中、作業員が月面上で浴びるであろう太陽からの放射線量を最小限にする。
- ・ロボットなどにより建設可能な単純なシステム
- ・将来的に拡張を可能とするシステムの採用。
- ・放射線、隕石、真空等から施設が保護されるように土をかぶせること、
- ・作業全体の必要エネルギーや必要資材の重量を最小限にすること

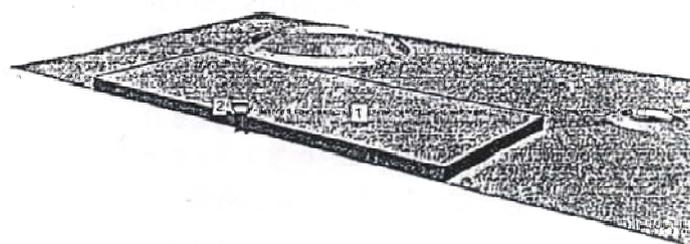
以上のことから、

- ①居住施設として”ゴム風船”式の膨張式構造システムの採用。
- ②地下構築物とする。
- ③真空環境の中でも地球上の水と同様に気体を媒体として建設に利用出来るシステムの採用。
- ④基本的な構造基盤として最も単純な作業で構築可能な地表面上のスラブの建設を最初に行う。

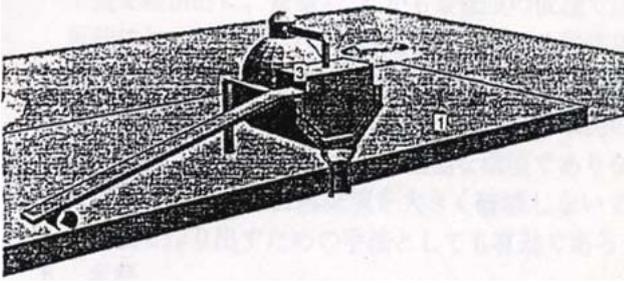
図1に建設システムを示した。

【図1】

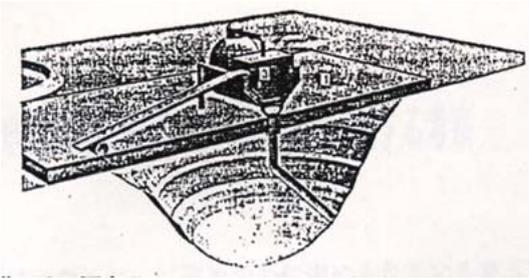
(1) まず地面に単純な床(基礎)を構築する。



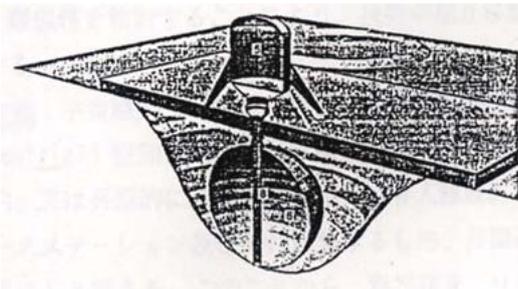
(2) 地下を掘削するためのエアージェット掘削機を接続する。



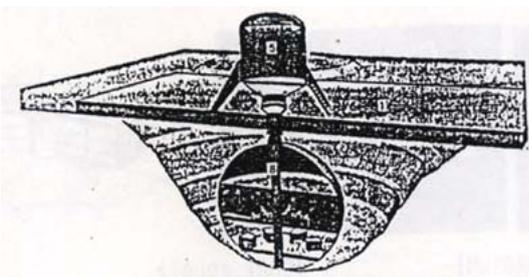
(3) ガスを媒体として地下の土を吸い上げ、地下空間を造る、使用したガスは貴重なため再利用される。



(4) ”ゴム風船”ユニットを積んだモジュールをスラブに接続し、地下空間の中に膨張させる。



(5) 膨張した風船の中に居住に必要な設備、備品を設置する。スラブの上には放射線遮蔽のための土をかぶせ、施設の完成とする。空になったモジュールは出入り口（エアロック）に利用される。



(6) 断面を示す

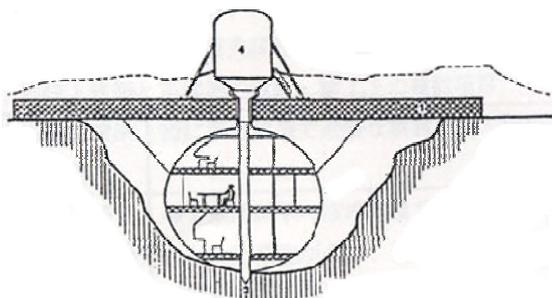
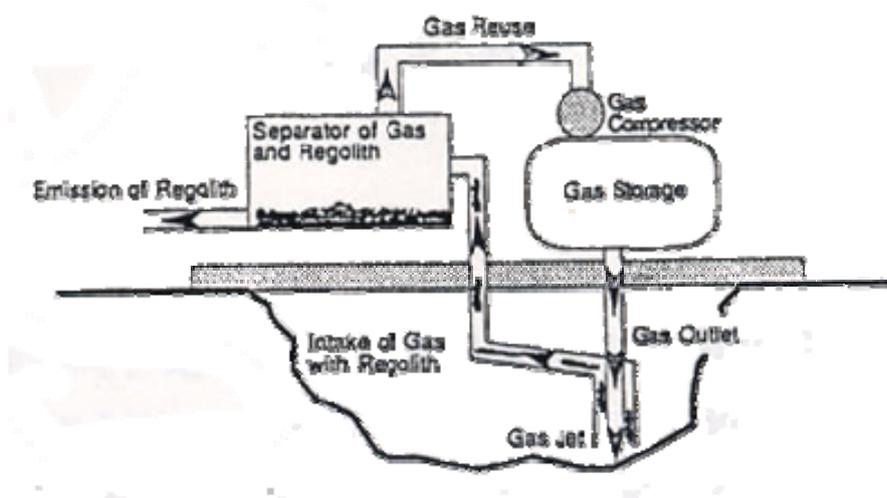


図2にエアージェット掘削機のシステムを示す。



利用された地球上の建設技術

利用又は参考にされた既存技術を以下に示す。

①エアードームに使用される膜式膨張構造。膜繊維の候補として炭素繊維(ケブラー)が有力。真空環境で、膜内部が1気圧に加圧された場合、膜自体にかなりの張力を生じ、膜そのものが強固な構造体になり得る。

②掘削技術として、水面下の掘削等に採用されるニューマチックケーソン工法を参考にした。この工法はまず、板状の構造体をつくり、圧縮空気を構造体の下に圧送しながら外部からの水漏れを空気圧で防ぎ、内部での人間による作業の安全性を高めながら地下構造体全体を完成させていく。(大架橋の柱脚工事などで利用)この工法の有利点は、外部が水面下とか深い 地下などの危険な環境下でも、比較的安全に人間が作業出来る環境を造り出せる点にある。月面という超真空環境下での作業は、重い宇宙服の着用を余儀なくされるが、この工法を利用することにより、完全とはいかなくとも真空の危険性からは逃れることが出来る。また板構造体の上部に放射線遮蔽に有効な土をかぶせることによって安全性はさらに高まる。

5. 開発された工法から、地球上での建設への応用：この地下空間建設工法は、①小規模で狭い敷地での地下塗を経済的に、安全に、しかも最低限の仮設で建設可能にし、コストダウンが課題となっている居住用の地下室建設に利用できるであろう。また、②軟弱地盤での地下室建設にも有効であろう。また、③未開の森林や砂漠、極地、沼地といった過酷な環境でありながら保存されるべき自然環境を大きく破壊しないで居住施設を作り出すための手法としても有効であろう。

6. 考察

地球上の建設技術、設計手法の宇宙建築への応用は、多くの提案において既に行われている。今回は、比較的小規模の宇宙建築に応用されたが、有効に機能したし、そのアイデアは現実的である、今後、さらに様々な地球上の技術を元に宇宙施設の設計に応用されることになると思う。