

宇宙シェルターの位置づけとその拡張性に関する基礎的研究

66952 前島彩子

1. はじめに

背景と目的

1529~69年、コンラッド・ハースがはじめて多段式ロケットの構想を論文にまとめたとき、そのペイロードには円筒状の家がのせられていた。宇宙に住むことは大航海時代のころから示されていたわけだ。しかし実現にむけた取組は、宇宙船の延長として航空機や機械の分野で進められてきていて建築として扱われることはこれまで一般的ではなかった。ところが最近の宇宙利用は国家的プロジェクトだけでなく民間企業も宇宙旅行の企画や宇宙ホテルの準備をはじめると対象がひろがりつつある。国際情勢の変化や環境への意識の高まりもあり、要求される空間には莫大な資金を投じる宇宙開発からコストに見合う持続的視点が求められるようになっている。そうした現状をふまえたこれまでと違う建築的な取組み方がないだろうか。本研究では大空間の追加に対応できる形態を示すことで低軌道の宇宙シェルターの今後について検討した。



図1 ハース提案のロケット

2. 地上の延長にみた宇宙のシェルター

2.1 宇宙の環境と距離による概念図提案

距離と環境の2軸によりシェルターの評価を行い宇宙シェルターの相対的位置を確認した。まず環境の指標を定めるために有人活動が行われているあるいは行われる予定の地球、低軌道、月、火星の環境条件を整理した(表1)。

表1. 地球、低軌道、月、火星の環境

	地球	低軌道 (宇宙ステーション)	月 (兩極)	火星
地球からの距離	-	400km (1)	384,400km(960)	7.8×10^7 km(20000、最接近時)
温度	平均15°C、-90~60°C	-150°C~120°C	-170°C~120°C	平均-63°C、-140~20°C
磁場環境	24,000 - 66,000 nT	-	なし	なし
放射線	地球磁場、大気で防御	地球磁場で防御	太陽放射線、宇宙銀河線が直撃	太陽放射線、宇宙銀河線が直撃 (ISSの2.5倍)
大気圧	1.01×10^5 Pa (1気圧)	1.0×10^{-5} Pa (高真空)	1.0×10^{-7} Pa (高真空)	0.8×10^{-3} Pa (0.007気圧)
隕石	大気によって防御される	大気が極薄いので直撃	大気がないので直撃	大気が薄いので直撃
重力	9.8 m/s^2 (1G)	微小重力	1.6 m/s^2 (1/6G)	3.7 m/s^2 (1/3G)
地震	頻繁、広く震源地が分布	-	地球に比べて小規模、特定場所では起こら	-

これをもとに一方の軸として「シェルター要求度」を①日差し ②雨風 ③温度・湿度 ④放射線 ⑤隕石・内圧(高真空)と定めた。もう一方の距離の軸は「供給地から敷地までの距離」とする。

この指標を仮定し、距離と環境に特徴的なシェルターの比較を通じて軸の調整を行い概念図にまとめた。

2.2 概念図で対象としたシェルター

環境と距離に特徴的なシェルターが要求される宇宙、災害地、遠隔地、極地、軍事を対象に定め文献から「シェルター要求度」と「距離」を判断して概念図に加えた。またこれらの例のほとんどの場合でプレファブ¹化が行われていたので先に対象とした分野以外からプレファブ建築も対象に追加し計40例を扱った。一部を表2に示す。

表2 対象としたシェルター

No.	名称	図	シェルター要求度	距離	分節分類	類似例	備考
06	オックスファム社震災シェルター		2 雨風	地上遠隔地	分割		インフラ断絶地吹きつけ
08	ニッセンハット		2 雨風	地上遠隔地	分割	クオンセットハット、ジェームズズウェイハット	移築
11	核シェルター		4 放射線	近く	-		
18	ビグロー社の宇宙ホテル		5 高真空	低軌道上	展開		
33	押し出しコンクリート		5 高真空	月面	-		ロボット現場施工
38	アビタ67		3 温度湿度	近く	一体	中銀マンション YSUN	交換

2.3 概念図と考察

対象には地球から離れた低軌道、月面、火星面を含めるので、現地材料を利用した建設も扱えるよう「地球からの距離」軸を放物線状に加え、図3にまとめ、運搬方法とプレファブについて考察した。

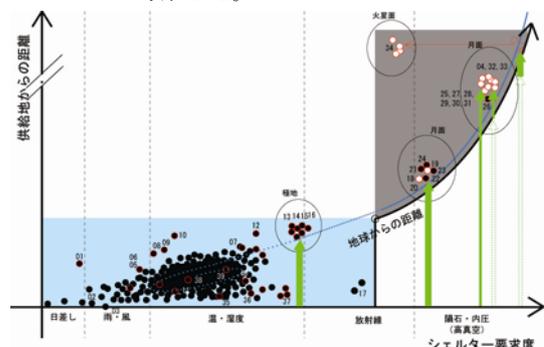


図2. シェルター要求度と距離概念図

¹構造躯体の主要部分が敷地以外で加工されているもの

居住段階による運搬方法比較

供給地である地球から離れるほどコスト効果が大きいため、月、火星では現地材料を利用した建設提案もある。特に火星では現地材料利用の知見を月面で得て、早い段階で現地材料による建設に切替えることが目指されている。一方低軌道には材料は存在しないので居住段階に関わらず、地球からの輸送のみによって建設が行われる。

プレファブ化の要因と空間分節の比較

地上ではプレファブ化の要因は「大量生産」「一様な性能」「工期短縮」「精度向上」「未熟施工者による施工簡略化」「遠隔地」「交換」「複雑な形態」などがある。宇宙では1)供給地からの距離と、現地材料を利用した場合でも2)環境の厳しさによる施工簡略化、の2つの面からプレファブ化が行われる。これを空間単位の分節により「一体型」「分割型」「展開型」に分け、運搬性と施工性について整理した(表3)。高真空環境ではジョイント部分のシーリング機能を維持させることや多くの船外活動を伴うことから「分割型」は難しいと考えられ既往例はない。「一体型」は大きさが制限されるが、「展開型」は大空間が可能となる。

表3 空間分節による分類

分類	空間分節による分類		
	一体型 モジュール式	分割型 パネル式	展開型 空気膨張式、折畳み式
地上の例	 M1	 フランスの極地基地	 コンクリートキャンパス
低軌道の例	 国際宇宙ステーション		 トランスハブ
月面の例	 LUNOX	 清水建設宇宙ホテル	 STEM シェルター
運搬	地上 運搬容積大	運搬小	運搬小
	宇宙 運搬容積大 打上加速度	運搬小	運搬小
施工	地上 現場施工小	現場施工簡略	現場施工小
	宇宙 現場施工なし	船外活動あり	負圧下で容易に膨張
備考		気密性難 現地材料利用に有用	電力必要

3. 低軌道上の宇宙ステーションの拡張性

2. では低軌道上では一体型か展開型の空間単位を組み合わせることによって建設が行われることと、その建設方法は居住段階によって変化しないことを確認した。ここでは実際に低軌道に建設された宇宙ステーションを例にとりあげ、一体型のモジュールをどう拡張させてきたか整理を行う。

3.1 宇宙ステーションの概要

計画の変遷

実在の宇宙ステーションはロシアが1971年に打ち上げた

サリュート1号に始まり、これまで4つの計画^{注)}がある。

表4 実現している宇宙シェルター

	建設・利用期間	完成質量	開発
サリュート前期	1971年-1977年	19t	旧ソ連
サリュート後期	1977年-1991年	19t	旧ソ連
スカイラブ	1973年-1979年	90t	アメリカ
ミール	1985年-2001年	109t	旧ソ連
国際宇宙ステーション	1998年-2010年予定	420t	15カ国

注)サリュートは機体の接合部の数によって1号から5号までを前期、6号と7号を後期にわけている。

また国際宇宙ステーション(ISS)は多国間協力による初めての事業であり、計画は発案当初からその大きさ、打上スケジュール、運用期間が毎年のように変化し、1998年に最初のモジュール(与圧空間単位)が打ち上げられた後も開発費の増大、スペースシャトルの事故などによって予定を変更しながらすすめてきた。この間に、機器・技術・実験内容の陳腐化、社会情勢の変化によって計画時の意味が薄れるといった懸念が高まりつつあり、柔軟に対応できるようなシステムの検討の必要が唱えられるようになってきている。

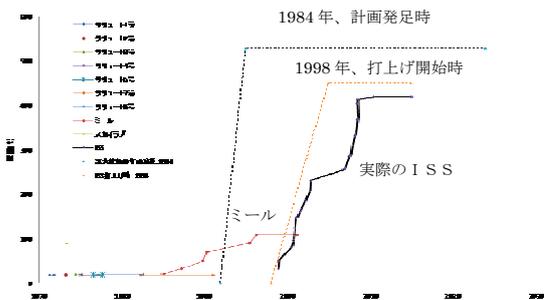


図3. 計画ごとの質量変遷

機能拡張に対するとらえ方

ミールとISSではモジュールを複数つなげモジュールで拡張をはかっているが両者は機能のとらえ方に相違点をもつ。ひとつは電力について。必要電力と質量には比例関係があることが知られているがミールでは各モジュールに発電能力をもたせているのでモジュールの増加に比例して発電能力を増加できる分散方式を採用している。一方ISSではモジュールと別にトラス架構をかけ、ここで生産した電力を各モジュールに配送する集中方式をとる。閉鎖生活空間において人工の循環系をつかさどる生命維持装置についても同様なシステムの違いがみられる。

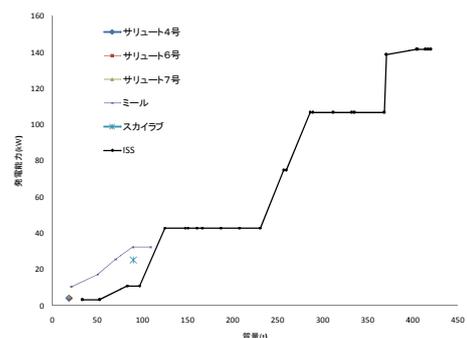


図4 質量と発電能力の推移

3.2 モジュール配置の表現と地上との相違

表5 宇宙ステーションのモジュール配置

名称	ヴォーストック	サリュート前期、スカイラブ	サリュート後期	ミール	国際宇宙ステーション
模式図					
「グラフ」					
頂点数 v	1	2	3	10	23
枝数 e	0	1	2	9	24
次数 d(v)	0	1	1,2	1,2,6	1,2,3,4,6
配置	点	木	木	中心をもつ木	双中心をもつ木

宇宙ステーションの完成形態を比較するため、モジュールを球、ドッキング部分を線で表現した。サリュート、スカイラブでは直線配列だったものがミールで枝分かれが生じ、ISSでは枝分かれしたモジュールがさらに枝分かれする様子が見えてくる（表3、模式図）。ここでより定式的な評価のため「グラフ」表現を加えた。ここで取り上げた「グラフ」理論とは点と線によって物事の関係性を表現し、アルゴリズムの基礎になっているものだが、工学だけでなく社会学、経済学、心理学など幅広い分野の実用面に応用されている。建築ではネットワーク行程表としての利用がある。本研究では、モジュールと接合の関係性に絞って検証を定量的かつ図的に行うために「グラフ」を利用した。表3下段の「グラフ」表現では、与圧単位を点（丸形）で示し、黒色は低軌道に固定される単位、灰色は移動する単位を示す。与圧単位の連結部分は線で示し非与圧単位（トラス架構）は黒丸に塗潰した。また点内の番号は組立順序を示し、点線は計画が中止されたモジュールを示す。サリュートでは「木」、ミールは「中心をもつ木」ISSは「双中心をもつ木」となり頂点数や中心の有無によって複雑さに違いがあるもののすべての宇宙ステーションは「木」と呼ばれる軸的な連結をとり、「サイクル」という閉じた関係をもたない連結に分類された。

3.3 地上のモジュール構造を通じた考察

地上でも単一の空間単位の集合による建築構法があり、ユニット構造、箱型住宅などと呼ばれる。規格化された同一形態で多様性を作り出すにはどういった方向性検討されるべきなのか。次に地上の例を参照した。

コンクリートキャンパスシェルター(CCS)

平面的な単位の連続が提示されている。ただ直接ジョイントされていない単位同士も地面を介して関係性が生まれるのでグラフではこれを点線で示した。

アビタ67

単位が立体的に積層され、空中庭園やテラスといったユニットの外表面によって構成されたヴォイドが建築的魅力を高めて

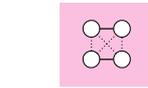


図6 CCS拡張案とグラフ表現

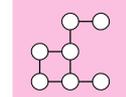


図7 アビタ67の構成とグラフ

外部環境で生存できる地上ではユニット外表面を介した関係性が生まれるので「グラフ」は空間の実情を表現するには不十分であった。一方外部、外表面を考慮できない閉鎖空間の宇宙においては単なる位置を表現にとどまらず空間性の違いを定量的に把握することができる。

またユニット構造は現場施工を少なくするため機能を工場に取り付けるが同時に重量増加に結びつく要因となっていてユニット構造の特性のひとつである、交換は地上では困難になる。低軌道は無重力状態なので運んでしまえば取り付け、交換はたやすく、モジュールの移設はミールでもISSでも繰り返しおこなわれている。

4. 低軌道上の拡張パターンの提案

2. では低軌道の建築構法、3. では配置の特性を確認した。また居住人数が年間30人以上になると個人のプライベート空間の充実と同時に公共の大空間の必要性も高まる[1]。ところが表3に示したようにこれまでの宇宙ステーションは初期モジュールを中心として分岐していくだけの「木」構造をとって拡張していくので、大空間の増設は全体の端部に配置されることとなり、利用が不便であるうえ、質量中心の把握必要の点からも望ましくなかった。ここでは宇宙ホテル計画が現実的になりつつある低軌道において大空間を追加できる形態獲得を目的とした構法提案をおこなった。

4.1 立体閉ループ構成

同じ空間単位を、閉ループをつくるように連結させると内側に空間が生じる。この操作を立体的に行うことで内包空間を生み出すことができ展開構造の挿入によって大空間の獲得につながる。こうした形態は地上では施工難などから意味を持たない。しかし低軌道上では剛体性の高い、質量中心の明確な構成をもつことは重要な形態決定要素になりえる。

4.2 球殻モジュールとその配置

本提案では単位として同半径の球殻をもちいる。球形は①高真空環境下で外壁面にかかる応力を一定にできる点、②無重力状態空間でどの方向においても同じ内部空間をもつこと、③表面積が小さく熱効率が高いこと、④結合部は点で接するため接合方向に万能性があることから一般性をもって比較できるものとして採用した。

球殻モジュールを、内包空間をもつように外縁に配置させていくことは同じ長さの辺で構成された、凸型多面体の頂点に配置することに等しい。



図7 凸型多面体と球モジュールの配置

こうした凸型多面体は18個存在することが知られているがこのうち、斜方20・12面体のように「頂点からのびる辺にねじれが生じているもの」と「内包される空間のほうが外縁を構成する元のモジュール以下のもの」は拡張の観点からは適当でないので、7つが得られた(表6)。

表6 球殻モジュールの配置

頂点配置	切頂4面体	正12面体	切頂8面体
姿図			
単位半径	1	1	1
単位数	12	20	24
ポート数	18	30	36
内殻半径	1.35	1.80	2.16
充填率	0.29	0.41	0.39
隙間率	0.35	0.25	0.32
切頂6面体	20・12面体	切頂20面体	切頂12面体
1	1	1	1
24	30	60	60
36	60	90	90
2.56	2.24	3.96	4.94
0.31	0.46	0.40	0.28
0.47	0.25	0.37	0.55

4.3 ジョイント方向の検証

同一単位を組合せ、7つの形を適宜創出するには異なるジョイント方向をもつ外縁モジュールの交点角度を検証する必要がある。

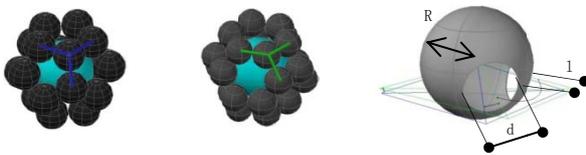


図8 B:正12面体とC:切頂8面体の角度のふれ

外殻の半径とジョイント部分の大きさはISSを参照して以下に仮定した。外殻モジュールは運搬能力の向上によって大きくなっていくことを考慮して幅をもたせた。

外殻の半径 R : 2,000mm-5000mm

ジョイント部分の直径 d:500mm

ジョイント同士の間隔 l : 1,000mm

検証結果を表5に示す。A→Bのように1段階の拡張は13パターン、B→C→Fの2段階は12パターン、3段階は6パターン、4段階は2パターンあった。

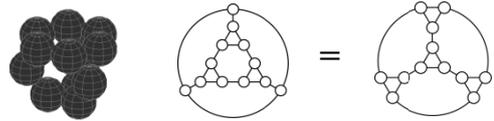
表7 モジュールの組み換え可能なパターン

可能な組合せを白抜きでしめす。()内数値は、外殻半径の選択可能範囲

モジュール数	A	B	C	D	E	F	G
A 切頂4面体	12	AB (4700-)	AC	AD (2000-3100)	AE (3800)	AF (-2800)	AG
B 正12面体	20		BC (-2500)	BD (4200-)	BE (4300-)	BF (-2800)	BG
C 切頂8面体	24			CD	CE	CF (-2800)	CG
D 切頂6面体	24				DE (3800-)	DF (4800-)	DG (-4200)
E 20・12面体	30					EF (4800-)	EG
F 切頂20面体	60						FG (4700-)
G 切頂12面体	60						

4.4 提案形態と「グラフ」による評価

外縁単位は、球に外接する凸型多面体上に配置が決まるので線が交差しない「平面グラフ」に表すことができ全体が「サイクル」の集合によって構成されていることが確認できる。これにより奥に位置する単位の把握が容易になり生命維持装置の配線、管理に有用性が期待できる。また凸型多面体を構成する多角形の種類分描ける「グラフ」が存在する。内包される大空間も、中央に置くことで全ての頂点と直接つないだグラフで表現することができた。ここで内包大空間と外縁単位空間の接合を適宜選択することによって公的な大空間と私的な単位空間にヒエラルキーを設けることができ「グラフ」により数値的把握も可能となる。



2種の多角形から成るので2つの「グラフ」をもつ

図9 切頂4面体、外縁単位のみ「グラフ」

		内殻を考慮した切頂4面体			
公私ヒエラルキー度					
0	1	1	1	1	
1	3	3	6	3	
2	9	9	3	3	
3	0	0	3	6	
モジュール数		12+1			

図10 公私ヒエラルキーの「グラフ」評価とスケッチ

5 まとめ

シェルターを距離と環境によって概念図にまとめ、運搬、プレファブの分節に着目して低軌道の建設方法を整理した。つぎに閉鎖空間の低軌道上では「グラフ」によって空間構成の表現が可能なこと、これまでの宇宙ステーションは単位を連結させても「木」の構成しかとっていないことから大空間の追加に問題点を指摘した。その上で立体的に閉ループ構成をもたせることで地上からの同一単位の組合せによっても大空間が追加可能な多様な形態を示した。

参考文献:

- [1] 狼嘉彰ほか、「宇宙ステーション入門」東京大学出版、2002
- [2] 岸本直子、「階層性をもつ構造物システムに関する研究」2006
- [3] 那花謙二、「Leg Polygon法(その3)」日本建築学会大会学術講演梗概集、1991
- [4] J.A.Bondy、「グラフ理論への入門」共立出版、1991