

# LAGRANGE POINT

ラグランジュ・ポイントの宇宙都市

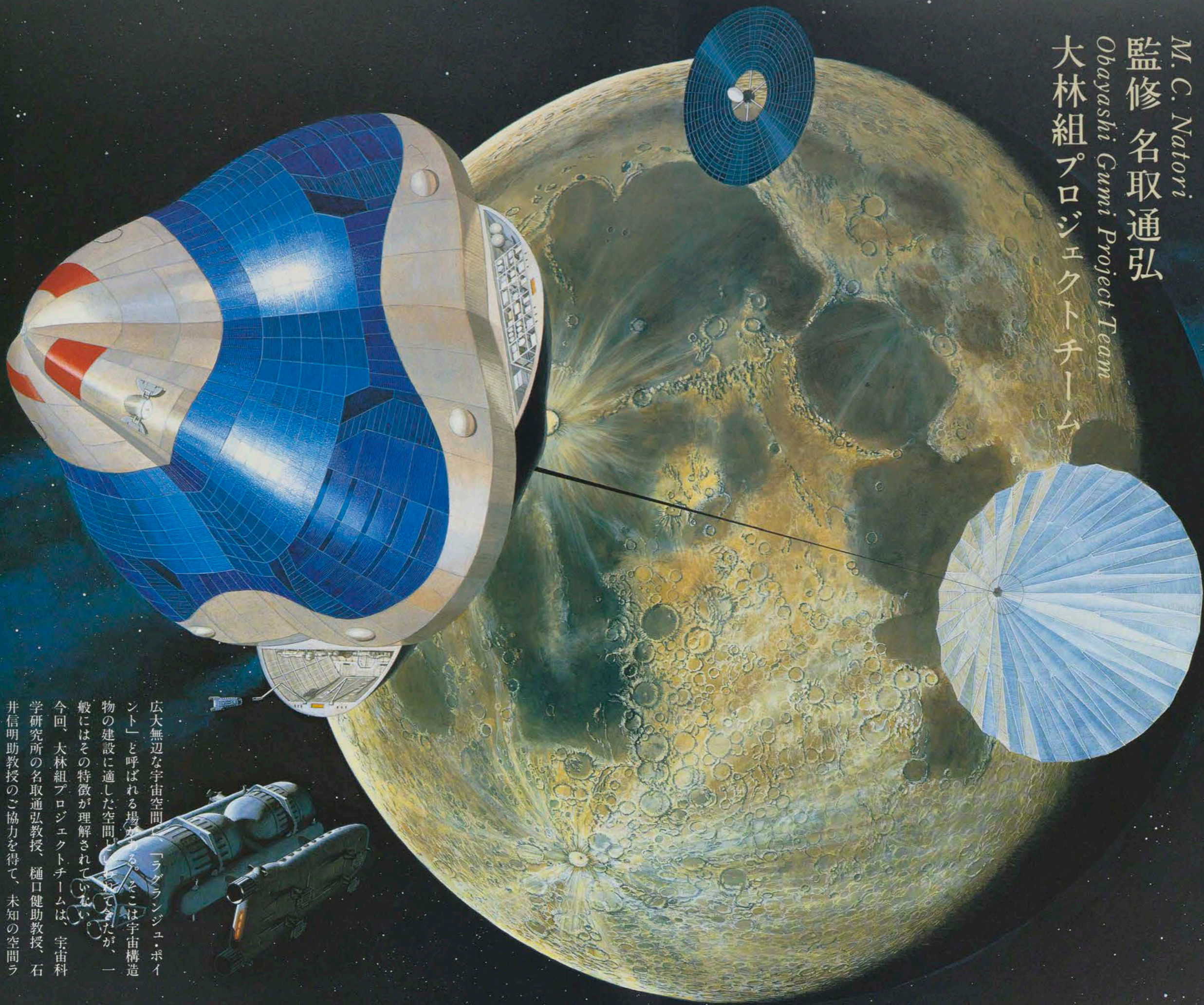
## 『スペース・ナッツⅡ』建設構想

M. C. Natori

監修 名取通弘

Obayashi Gumi Project Team

大林組プロジェクトチーム

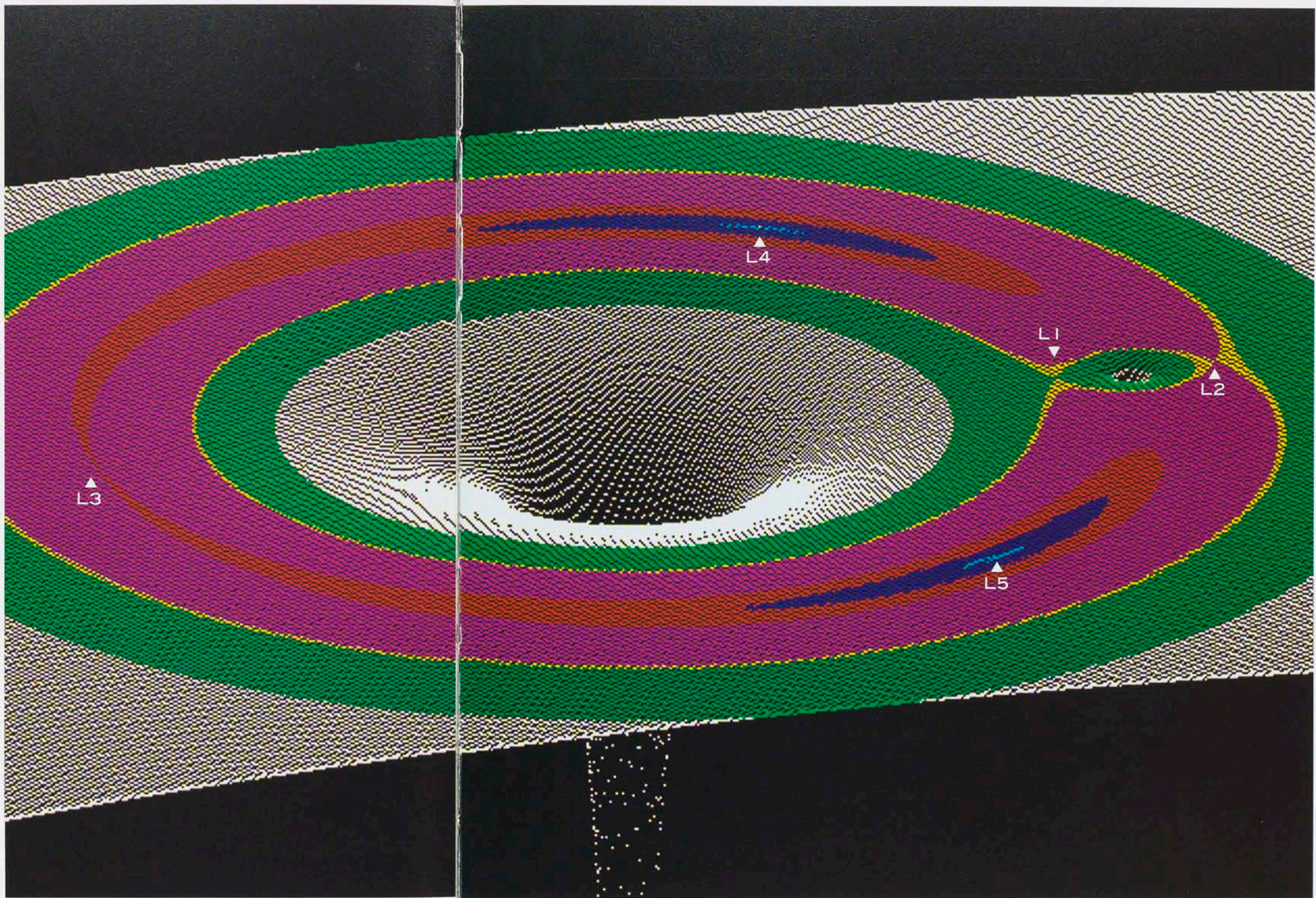


広大無辺な宇宙空間「ラグランジュ・ポイント」と呼ばれる場所がある。そこは宇宙構造物の建設に適した空間として知られてきたが、一般にはその特徴が理解されていない。

今回、大林組プロジェクトチームは、宇宙科学研究所の名取通弘教授、樋口健助教授、石井信明助教授のご協力を得て、未知の空間ラグランジュ・ポイントの物理的特性をコンピュータ・グラフィックによって明らかにし、さらに人類の長い間の夢でもある『宇宙都市』の建設に挑戦した。



# 一、ラグランジュ・ポイントへの旅 二〇八〇年



地球（中央凹部）、月（右凹部）とラグランジュ・ポイントの重力ポテンシャル面C.G.図  
※この図の解説は、P12・13をご参照ください。

## ●人類と宇宙空間

地球上空四〇〇キロメートルの低軌道上にある宇宙ステーションを離れ、私たちを乗せたL1行き連絡船・スペースシップは、長楕円軌道を描きながら「宇宙都市」をめざし旅立った。遙か三三万キロメートルの彼方にある、ラグランジュ・ポイントへの旅の始まりである。

動力船を中心に二機の客船を連結したスペースシップは、回転をして客室内に人工重力を発生させながら進む。回転半径が小さいので、地球上と同じGというわけにはいかない。それでも人工重力のおかげで、私のような一般のツーリストが宇宙酔いを感じずに快適なフライトを楽しむことができるのはありがたい。

思えば二〇世紀の後半、選り抜かれた宇宙飛行士たちによるフライトだけが行われていた時代があった。最初の有人宇宙飛行に成功したガガーリンも、

アポロ一号に乗って月への着陸を果たしたアームストロングも、長期にわたり特別な訓練を受けたスペシャリストであった。それから一世紀を超える時がたち、西暦二〇八〇年の私たちは宇宙飛行士の肩書がなくとも、簡単な健康診断と注意書きを渡されるだけで宇宙を楽しむ時代となったのである。寝転んでのぞく窓には、ちょうど月が見えていた。同じその方向に、人類が初めて築いた宇宙都市があるのだ。

かつて人類は、宇宙進出のために二つの場所を想像した。

一つは衛星や惑星といった、地球に似た天体である。一九六九年のアポロ一号の月面着陸をきっかけに、それは現実のものとなり、一世紀のあいだに急速に人類の居住が進められた。

現在、月にはすでに「ルナ・シティ」と呼ばれる都市が完成している。私もルナ・シティへは一度行ったことがある。地球環境を再現したドームやシン

ボル・タワー、研究施設、住宅棟などがつくられ、あらゆる分野の研究者のほか都市運営のスタッフ、観光客まで含め、二万人を超える人々がそこで暮らしている。月の資源を利用した宇宙開発も盛んに行われ、ルナ・シティはいまや人類の宇宙進出の中心地といってもいいほどである。

月を足場に、人類は火星にも進出した。最長時には四億キロメートルの距離にある火星にも、地球環境に似たドームがつくられ、そこには研究者を中心に一五〇〇人以上の人々が生活している。いずれ人類の大規模な移住があるかもしれない。

ところで人類が夢見たもう一つの場所、それは宇宙空間そのものであった。

何もない宇宙空間に構造物をつくり、そこを人間の居住領域とする……この途方もない考えを早くから提案したのは、旧ソ連の科学者コンスタンチン・ツイオルコフスキーであった。彼は、飛行機もまだなかった十九世紀後半に、液体燃料による近代ロケ



ツトの概念を打ち出し宇宙への進出を夢想した。「真空の中で支えもなしに生活する」ことの素晴らしさを指摘し、人工重力を生み出しながら太陽を回る宇宙建造物を建設することの意味を説いたのである。宇宙空間への人類の進出は、その後も多くの科学者たちによって考えられた。私の曾祖父がまだ子供だった時代、SF作品の中で多くの子供たちを魅了した宇宙ステーションは、その代表といえるであろう。

一九七四年にアメリカの物理学者ジェラルド・K・オニールの提案したスペースコロニー計画は、宇宙空間での居住の具体的なイメージを創った点で画期的であった。彼は、長さ一キロメートルの円筒状の建造物を建設し、内部に地球環境を再現することにより一万人規模の宇宙集落(スペースコロニー)を描いてみせた。建造物の規模を拡張すれば、最終的には数百万人もの人間が宇宙空間に暮らすことが可能であると示唆したのである。

こうした先人たちの宇宙居住計画は、現在では小学校で習う宇宙史の教科書にも書き留められているほどポピュラーなものだ。しかし、それは単に終わった歴史として語られるのではない。彼らが宇宙居住の必要性の背景として指摘した、「地球における人口過剰の解消」や「化石燃料に代わる新たなエネルギー資源の活用」といったテーマは、いまや現実のものとなっている。二〇五〇年に、地球の総人口は一〇〇億人を超え、その影響はエネルギー不足や気候変動をはじめ、あらゆる分野で顕著となっている(注)。

宇宙空間は、人類の夢と好奇心を満たす場であると同時に、地球の現実をバックアップする場として、大いなる期待が寄せられているのである。

今日、スペースシップに乗って私がめぐす宇宙都市は、まさにその宇宙空間に浮かんでいる。宇宙都市計画においてL5を選択した理由も、そこに設置すれば軌道を維持するための工夫がほとんど必要ないと判断したからであろう。

ただし実際にラグランジュ・ポイントに建造物を建設する場合、地球と月の重力のほかに、太陽の重力の影響を受ける。また、太陽光の圧力といった微小な力の影響もあり、いっそう複雑な動きが生じる。

### ●L1における宇宙都市

ラグランジュ・ポイントの五点のうち、安定度の高さではL4・L5が優れている。しかし、私のめぐす宇宙都市は、実はL1にある。それは月との関係が考慮されたからだ。

L1は、月とともに地球を回る系で考えると、地球と月との重力が均衡する位置にある。距離になると、地球からは約三三万七〇〇キロ、月からはわずか四万八〇〇〇キロの場所にある。地球から月へ向かうさい、CGからも分かるように、L1を通るルートがもっとも重力場レベルの低い、効率的な軌道である。

L1はまた、地球と月をむすぶ接点であり、互いの窓口ともいえることができる。地球の地理でいえば、かつてアジアと西洋をむすぶ東西文明の懸け橋として世界の富が集まった、イスタンブールのボスポラス海峡のような位置にある。人類が地球に築いた文明と、月に誕生しつつある新しい文明との接点にふさわしい場所だといえるだろう。

では、L1に宇宙都市を建設することには、実際にどのようなメリットがあるのだろうか。

#### ①月資源利用の生産拠点

L1は、月資源を利用するのに、宇宙でもっとも便利な場所である。

宇宙都市の建設資材のほとんどは、月から調達できる。資材の運搬にも、重力が地球の六分の一しか

市、それはツイオルコフスキーから二世紀近くのち、オニールから約一世紀後に、人類が宇宙空間に初めて築いた居住のための本格的な建造物である。

そして宇宙都市の浮かぶ「宇宙空間」こそ、宇宙建築にもっともふさわしいとされる、ラグランジュ・ポイントなのである。

### ●ラグランジュ・ポイントとは何か

オニールがスペースコロニー計画を発表したとき、彼はその建設予定地として、L5という宇宙空間に注目した。そこは地球と月を結ぶ線を一辺とした正三角形の頂点に位置しており、地球と月の重力と遠心力とのバランスがとれた、安定した点(場)だといわれていたからである。

このL5をふくむL点、つまりラグランジュ・ポイントを発見したのは、一八世紀後半、マリー・アントワネットに重用され、フランス革命の時代を生きた天才的数学者ジョセフ・ルイ・ラグランジュであった。彼は、三つの天体が互いに万有引力(重力)を及ぼし合いながら行う運動を一般的に解明する問題(三体問題)に取り組み、太陽と木星、そして第三の天体の運動を、特別な条件のもとに数式によって示し、正三角形解と直線解を得たのである(P23/石井信明氏「ラグランジュの重力平衡点」参照)。

その結果、太陽と木星をつなぐ直線上及び延長線上に三点(L1・L3)、太陽と木星の間を二辺とする正三角形の頂点の位置に二点(L4、L5)、安定したポイントがあることを指摘した。それらがラグランジュ・ポイントである。そのうちの正三角形解の位置には、のちになって天体観測によりトロヤ群小惑星の存在が確認されている。

ラグランジュが太陽と木星の運動によって明らかにした五つのポイントは、地球と月との関係にも同様に存在する。オニールが提案したL5は、その一に捕獲することができるのである。

二〇八〇年の宇宙都市では、地球への物資補給(エネルギー、各種製品)と、できるだけ自給自足的な運営が期待され、月資源の利用が時代の重要なテーマとなっている。利用可能な月の資源には、酸素(人間の生命維持・ロケットの推進剤)、シリコン、金属(鉄・アルミニウム・マグネシウム・チタンなど)、ヘリウム3(核融合用)、レゴリス(月の表土(放射線遮蔽、マストドライバ)などがある)。

宇宙都市の研究所と工場では、これらの資源をもとに、無重力環境を利用して地球ではつくることのできない新材料の開発を行っている。また完成した製品を地球周回軌道に送り出すにも、L1は経済的で便利な場所だ。現在までに宇宙都市が生み出した最大の製品、それは地球上空に配置されている太陽発電衛星である。

#### ②月への交通の中継点

月面には人口二万人を超えるルナ・シティという都市があり、人間や物資の交流を考えると、L1の宇宙都市は地球と月をむすぶ交通のターミナルといえる。

宇宙都市と月との往復は、小さなエネルギーで済むので、日常的なミニシャトル便が行き交っている。私のような地球からの訪問者は、まずL1の宇宙都市に降り立ち、ミニシャトルに乗り換えて気軽に月へ行くことができる。

#### ③宇宙観光の拠点

L1は、地球と月を同時に眺めることのできる位置にあり、壮大な宇宙のパノラマを楽しむには最適である。実際、私もその魅力に抗しがたく、L1行きのスペースシップに乗ったのだ。

つてであった。では本当にラグランジュ・ポイントは、宇宙建築に適した場所のだろうか。

私の乗るスペースシップの壁には、ラグランジュ・ポイントの特性をコンピュータによってグラフィック化した図(P8・12・13図)が数枚飾られている。それを見ると、地球と月のまわりの何もないはずの宇宙空間には、実際には複雑な重力場があり、互いに影響しあっていることが理解できる。その中でL1・L5の位置だけが、重力の均衡した特殊な場なのである。

しかし、L1・L3と、L4・L5とは、空間の性格が少し異なっている。同じように重力の均衡する場であっても、L1・L3は重力ポテンシャルを地面にみたとすると山の峰、あるいは馬の鞍(鞍点)に相当する。対してL4・L5は山の頂上といえる。

L点に置かれた物体(たとえば宇宙都市)が、ある速度の範囲で地球の側へ自然に動き始めたとき、その物体は地球側の斜面を大きく転がり落ちながら、地球の周辺を回り、L1付近に安定することはない。

ところがL4、あるいはL5では、地球側の斜面を転がり落ちるようにはみえながら、複雑な動きを繰り返しつつ、出発点であるL4・L5をまわる軌道を描くようになり、遠くへは離れない。たとえば自身が、L4から転がり出ようとする物体の中にいたとする。動きに応じて目の前の坂道が次々に盛り上がり、その影響で迷走のごとき動きをしながらL4の近くへ押し戻され、結局はL4から大きく離れることのない軌道上を転がることになる。そういう非常に不思議な空間なのである。

そのぶんL4・L5のほうが、L1・L3よりも安定しているといえる。オニールがスペースコロニー宇宙都市の内部は、空間自体が宇宙を知り、楽しむ場でもある。それについては、私が到着してから案内することにしてしよう。

④宇宙定住への実験的空間  
将来、人類はなんらかの理由で宇宙に大量移住することがあるだろうか。そのさい惑星や衛星に住むか、それとも宇宙空間に住むかが一つの課題となるだろう。

ツイオルコフスキーは惑星の特殊な環境下では人間の空間が限定されるとし、またオニールは惑星をできるだけ汚染せず宇宙に暮らす方法として、それぞれ宇宙空間を採用した。惑星・衛星と宇宙空間での、それぞれの人類の定住の可能性とその影響を知るには、月と比較しやすいL1は貴重な体験の場となっている。

#### ⑤宇宙観測の拠点

無重力空間は、観測機器への重力の影響(たわみ)がないので、精度の高い天体観測の場に適している。L1の宇宙都市は太陽に対して一定の向きを常に維持しているため、太陽に向けた側には太陽観測所、その反対側には星の天体観測所が置かれている。

#### ⑥他の惑星や宇宙空間への前進基地

火星をはじめ、さらなる遠い宇宙へと飛行する者たちにとって、L1の宇宙都市は物資面・健康面など、最後の準備を整える支援基地の役割を果たしている。また逆に、遠い宇宙から帰還する者たちには、最終目的地である地球の環境に慣れるための準備空間ともなっている。

(注)世界銀行と国連環境計画による一九九六年の報告書による。



# L点CG作成に当って

Fumihiko Inoue  
井上文宏

## パソコンによるLagrange Pointsの可視化

今回、『季刊大林』Lagrange Pointsのプロジェクトチームに参加し、私に課されたテーマは、地球と月の重力場に存在する重力均衡点(L点: Libration point)をなるべく解りやすく表現することであった。L点とはどこにあるのか? どのような形状をしているのか? そして、なぜ安定であるのか? を、ここではいわゆる制限3体問題をパソコンを用いて数値解析し、その結果を3次元グラフィックすることによって解説した。

### (1)L点を表す制限3体問題の関係式

この問題では万有引力のもと、重心まわりに円運動をする2つの質点 $P_1$ 、 $P_2$ (ここではもちろん地球と月を考える)に対し、質量が非常に小さい第3の質点 $P_3$ の運動を扱う。式の誘導を簡単にするため、2つの質点 $P_1$ 、 $P_2$ の距離、質量の和および重力定数 $G$ で無次元化した量を用いると、回転座標系で固定した第3の質点 $P_3(x, y)$ の運動方程式は、式(1)および(2)で表される。ただし、ここでは平面上での問題を考える。

$$\ddot{x} - 2\dot{y} - x = \partial V / \partial x \quad (1)$$

$$\ddot{y} + 2\dot{x} - y = \partial V / \partial y \quad (2)$$

ここで、 $V$ は重力ポテンシャルを表す。ただし、 $\mu$ は2つの質点 $P_1$ 、 $P_2$ の質量比を、 $r_1$ 、 $r_2$ は質点 $P_3$ と、 $P_1$ 、 $P_2$ との距離を表す。

$$V = (1-\mu)/r_1 + \mu/r_2 \quad (3)$$

$$r_1 = \sqrt{(x-\mu)^2 + y^2} \quad (4)$$

$$r_2 = \sqrt{(x+(1-\mu))^2 + y^2} \quad (5)$$

式(3)が時間に関する項を陽に含まないことから、式(1)および(2)を時間積分することにより、ヤコビ積分と呼ばれる運動の積分式(6)が誘導される。

$$\frac{x^2+y^2}{2} - \frac{\dot{x}^2+\dot{y}^2}{2} + V = C \quad (6)$$

ある瞬間に第3の質点 $P_3$ の速度を0( $\dot{x}=\dot{y}=0$ )とすると、いわゆるゼロ速度曲面を表す方程式(7)が誘導される。ここで、ヤコビ定数 $C$ は質点 $P_1$ 、 $P_2$ の重力と回転に伴う遠心力の和で表される重力場ポテンシャルの値を示している。

$$(x^2+y^2)/2 + V = C \quad (7)$$

式(7)で表せる平面の中に求めているLagrange Pointsを見いだすことができる。

### (2)Lagrange Pointsのグラフィック化

式(7)を用いて、地球と月のまわりの重力場ポテンシャルを計算した。ただし、地球と月の質量比には $\mu=0.0121505$ を用いた。 $xy$ 平面の質点 $P(x, y)$ におけるヤコビ定数 $C$ の値を $z$ 座標に置き、質点 $P(x, y, C)$ を3次元座標にグラフィック化した。ここでは通常見ることのできない宇宙空間の複雑な重力場が観察できる。

本誌の表紙では、13単色で表した重力場ポテンシャル面の状態を示す。中央に広がる巨大な吸い込みの中心が地球の位置に、隣接する

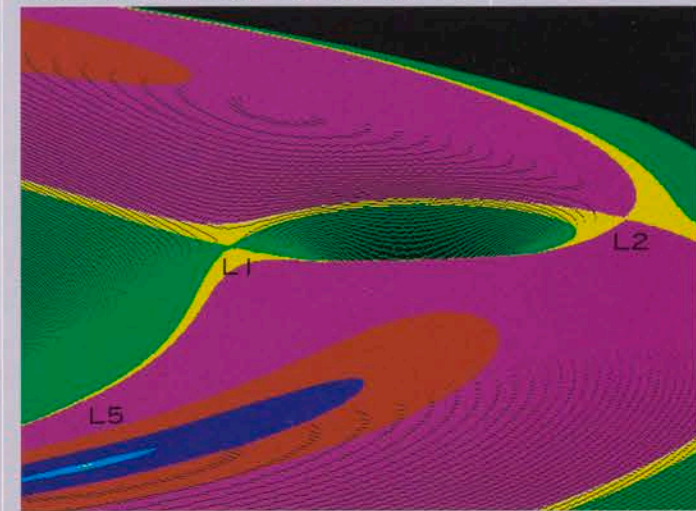


図1 L点付近の重力ポテンシャル面

表1 重力ポテンシャルの範囲と配色

Cの範囲	配色
$-1.49401 \leq C$	淡黄
$-1.49409 \leq C \leq -1.49401$ (L4 or L5)	水
$-1.49680 \leq C \leq -1.49409$	青
$-1.50607 \leq C \leq -1.49680$	赤
$-1.58610 \leq C \leq -1.50607$ (L3)	紫
$-1.59419 \leq C \leq -1.58610$ (L2)	黄
$-1.80000 \leq C \leq -1.59419$ (L1)	緑
$C \leq -1.80000$	白

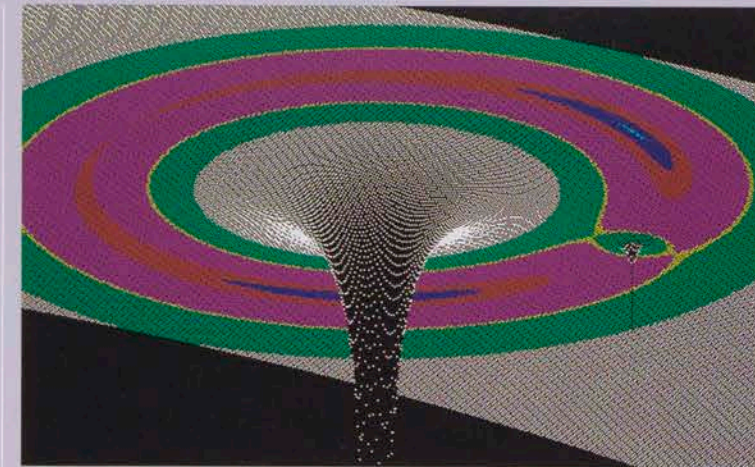
表2 L点の座標と重力ポテンシャル

	x座標	y座標	C
$L_1$	0.863893	0.0	-1.59419
$L_2$	1.155699	0.0	-1.58610
$L_3$	-1.005064	0.0	-1.506076
$L_4$	0.4878495	0.8660254	-1.493996
$L_5$	0.4878495	-0.8660254	-1.493996

小さな吸い込みの中心が月の位置に対応する。地球や月の中心に近いほど、重力場の曲面の落ち込みは大きくなり重力の影響を強く受け、逆に遠ざかるほど小さく平坦になっている。L点はこの平面上の鞍点(峠のような形をした点)あるいは山の頂点に対応する。この図から地球と月とを結ぶ間には鞍点(L1)の存在があることは確認できそうであるが、他のL点の位置を推定することは難しい。

そこで、ヤコビ定数 $C$ の値によって重力場をレベル分けし、各レベルの配色を試みた。配色はL1~L3によって領域が分割される点およびL4、L5付近の盛り上がり強調した。表1にヤコビ定数 $C$ の範囲と配色の関係を、表2に数値計算で得られたL点の座標を示す。P. 8の図では表紙で見られなかった重力場の凹凸が浮かび上がっ

図2 L点付近の重力ポテンシャル面下部図



てくる。地球と月を結ぶ直線上には領域を2分割(緑の領域、黄の領域、赤の領域)する点が3カ所あり、これらの点が $L1$ 、 $L2$ 、 $L3$ に対応する。ここは重力ポテンシャルの峠であるが、その周囲から見ると谷である特異な曲面を呈している。峠の高さはそれぞれ異なり $L1 < L2 < L3$ の関係がある。

一方、地球と月の周囲には、非常に滑らかなそして細長い山脈(むしろ丘と言ってもよいであろう)が対称に連なり(赤から青の領域)、山の頂上(淡黄)は地球と月の距離を一边とする正三角形の頂点に正確に一致する。この点が $L4$ 、 $L5$ に対応する。 $L4$ および $L5$ の重力場ポテンシャルは等しく、この点は場面全体で最も高い。

P. 8図の重力場平面を拡大してみた図1では $L1$ 付近における鞍状の起伏や $L5$ 付近における山の盛り上がりより鮮明となる。 $L1$ 点はまさに地球と月を結ぶゲートと言えよう。すなわち、地球の周囲には重力の小高い山脈が連なるが、唯一 $L1$ 点を結ぶ軌道だけは開かれている。 $L1$ 点を経由する航行が最も重力場レベルの低い、効率の良い軌道であることがわかる。 $L1$ 点の利用価値は非常に大きいことが想像できる。一方、 $L4$ 、 $L5$ を経由する軌道は重力場レベルが最も高い位置への航行であ

り、地球からの距離が月までの距離に等しい点を考慮すると必ずしも効率は良くない。しかし、この点は重力が均衡し、宇宙構造物を安定的に静止し続けることができる点では興味深い。

図2は図1を下面から観察した結果である。重力場の全体構造がより鮮明になり、同時にL点は地球や月の重力をあまり受けない比較的平坦な位置に存在することがわかる。

### (3)L点近傍の軌道と安定性

図1は質点 $P_3$ が静止した状態における重力場(すなわち式(7)で表される重力場)を表しているが、外乱によって運動が加わると、重力場は式(6)を満たす場へと変化する。しかし、この場合でもヤコビ定数 $C$ は変化しないため、質点 $P_3$ の運動は定数 $C$ を満たす範囲に限られる。このとき、重力場の領域が閉じていれば運動はその内部のみとなり、質点の運動は見かけ上安定した軌道をとる。ここでは式(1)および(2)の微分方程式を数値計算し、L点近傍における軌道の安定性を確認した。

図3は初期条件として $L1$ および $L4$ 、 $L5$ 近傍に質点を静止させ、自然外乱によって移動した軌道の例を示す。 $L1$ 点の例では、質点は地球側の斜面を転がり落ち、地球を2周

半まわって、その後月をまわる軌道に落ち着く。初期条件を変えても、質点は最終的に地球あるいは月をまわる軌道に落ち着き、 $L1$ 点近傍に滞る軌道とはならない。重力場が鞍状となる $L1$ 点に置かれた物体の軌道は確定できず、すなわち不安定な重力均衡点と考えられる。ここに宇宙構造物を静止させるには工夫が必要である。 $L4$ 、 $L5$ の例では、質点の運動は非常に不規則ではあるが、結果的にL点をまわる軌道を取り、L点を大きく離れることはない。ただし、このような軌道は質点がL点のごく近傍に置かれた場合のみであり、L点からある程度離れるとL点をまわる軌道とはならない。この運動を質点に固定した目で見ると、静止した状態では山の頂上であっても、山を下り始めて速度が増すと前面に再び山が出現する。そして速度が減少するとまた山の頂上に達するという現象が連続して起こり、結果としてL点の周りを離れられないということになる。山の頂上である $L4$ 、 $L5$ に置かれた物体はその近傍を離れられず、すなわち安定な重力均衡点と考えられる。

【榎大林組技術研究所/建築第一研究室】

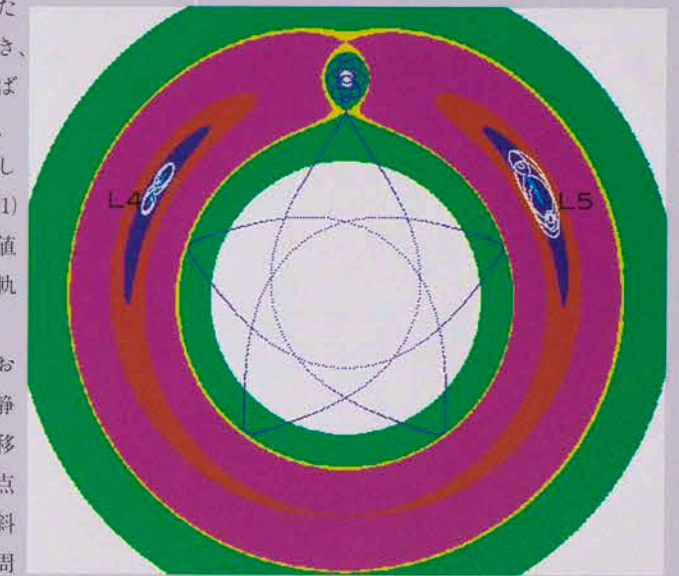


図3 L点からの軌道図



# 二、「宇宙都市」建設構想

## ●新しい宇宙デザインを求めて

地球低軌道の宇宙ステーションを旅立ってから二日後、機内のアナウンスが宇宙都市への接近を告げた。スペースシップの前方には眩しいばかりの大き

な月があり、その手前に淡い光を放つ小さな物体が、パラシュートのような帆を曳いて浮かぶ姿が見えた。それが宇宙都市だった。

小さな物体といったが、宇宙都市は実際には長軸一・九キロメートル、短軸一・八キロメートルもの巨大な構造物である。スペースシップは減速しながらも、宇宙都市にぐんぐん近づいていく。

全体の姿がはっきりと見えたとき、窓から眺めていた私は小さな声をあげた。いままで見たどのような宇宙構造物とも、それは違っていた。なめらかな布を広げたかのように、表面はゆるやかにうねり、軽やかな印象を与えながら輝いていた。金属の構造物というよりは、どこか自然が創り上げた造形を思わせた。

かつて、宇宙空間が人類にとってはまだ制約の多い、克服すべき場所として考えられていた時代、人間の乗る宇宙構造物は機能性や安全性をストレートにデザイン化したものがほとんどであった。それは二〇世紀の人類が、宇宙に憧れつつも、そこに広がる空間にいかに対処すべきか、いかに身を守るかを優先的に考えていたことをよく物語っている。

その一方で二〇世紀末にはすでに、来るべき宇宙構造物のデザインが工学的見地から模索されてもいた。宇宙科学研究所では、宇宙空間における大型構造物の建設と運用を踏まえて、それまでの固定的な構造から、必要に応じて自在に形状を変える展開型構造のシステムが研究されていた。さらに宇宙空間のさまざまな環境変化に応じて、形状だけではなく物理的特性までを構造物自身が変化させる、柔軟な適応性と自律性とを併せ持った「知的適応構造」の

研究も進められていたのである。

そうした工学的進歩に加え、二一世紀には宇宙そのものに対する人類の意識にも大きな変化がみられた。

二〇八〇年のいまでも、宇宙空間が人類にとってけつて安全といえる場所でないことは同様である。しかし、月や火星への進出が決まると、人類は次第に宇宙を親しい自然としてもとらえるようになった。そして現在では、宇宙とともにいかに生きていくか、それが人類の大きなテーマとなっている。宇宙空間は、人類にとって生命を紡ぎ、未来を育てる場なのである。

その中であって、ラグランジュ・ポイントの存在は、とりわけ興味深い。地球や月を安定した場、宇宙空間を不安定な場とすると、ラグランジュ・ポイントは半安定とも呼ぶべき第三の空間である。そうした未知の空間こそ、新しい生命、新しい概念の生まれる場にふさわしいといえるだろう。

宇宙都市の姿は、それをよく象徴している。ある人は胡桃のようだといい、「スペース・ナッツII」という愛称を付けた。宇宙空間に蒔かれた一粒の胡桃である。

別の者は、分裂する細胞の胚を思わせると語った。それは生命が誕生し、成長する原イメージである。またほかのある人は、貝殻にも似ているといった。堅い外殻の内に生命を宿した構造だからである。

そのときラグランジュ・ポイントの宇宙空間は、種を蒔く大地となり、細胞に秘められた生命を慈しむ母なる羊水となり、貝を育む海ともなる。生命のための空間である。

考えてみると、胡桃も細胞の胚も貝殻も、すべてが離着するさいには、六〇度回転して空港部分が宇宙空間に姿を現す。そして乗客の乗降時には、回転して人工重力を発生する。

表面のサンサイドは、常に太陽の側を向いているので、その利点を生かした装置がある。宇宙都市の内部に光を導く太陽光ハイライト（集光器）や、エネルギー自給のための太陽電池（エネルギーは独立して宇宙空間に浮かぶ太陽発電衛星からも供給される）、さらには太陽観測所にデータを送る観測装置もある。

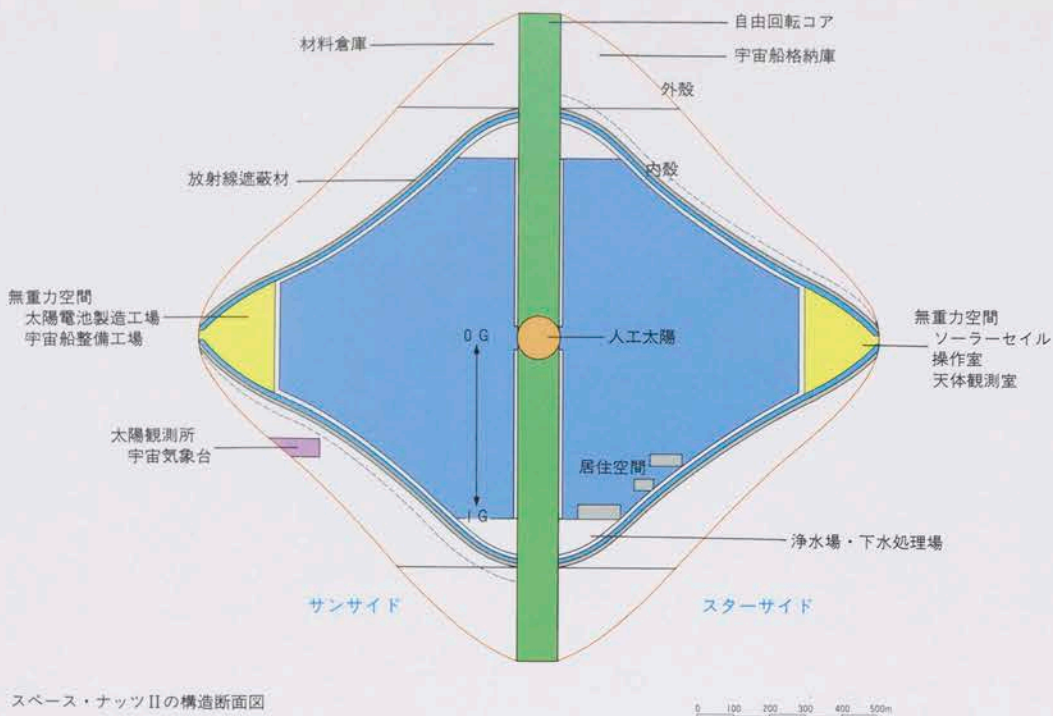
太陽観測の目的の一つは、宇宙活動の障害となる放射線の予測である。放射線が増えるときには避難警報も必要となるので、そのための宇宙気象台が併設されている。

一方のスターサイドには天文観測装置や、セイルのコントロール装置などが配備されている。

セイルは、宇宙都市をL1に留めるための装置である。円錐形の帆は、太陽光の圧力を受けて力を発生する。なんらかの理由で宇宙都市がL1から離れようとしたさい、帆の張り方をコントロールすることで元の位置に戻すことができる。そのためには、セイルは常に太陽と逆の方向になびく必要がある。このことよって宇宙都市の位置と姿勢は一定となり、サンサイドとスターサイドができるのである。

内殻は、最大直径一キロメートルの変形の円筒状空間であり、内部は居住空間となっている。宇宙都市の総人口二〇〇〇人のうち、空港スタッフや太陽観測所要員などを除く大半が、ここで暮らしている。そのため外側は月のレゴリスを利用した放射線遮蔽層で覆われ、内部環境が保護されている。

内殻はまた、自由回転コアを境壁として、サンサイドとスターサイドに分かれ、それぞれが逆方向に回転している。外殻は必要に応じて回転するが、内



スペース・ナッツIIの構造断面図

宇宙のシンボルであった。大宇宙のなかの、小宇宙を象徴している。その小宇宙こそ、人類の夢の住みかなのである。

宇宙都市の姿を眺めていると、私はふと、はるかに遠い過去の時代の、こんな言葉を思い起こした……「たとえ胡桃の殻のなかにあろうとも、無限の天地を領する王者のつもりになれる」（ハムレット）。宇宙で生命を紡いでいく人類の、未来へ向けた意志のデザインでもあるように、私には感じられたのだ。

そのとき、宇宙都市が波打つように輝きながら動いた。

こちら側と月に向けた反対側とが、互いに逆に回転し始め、六〇度ほどずれると、そこで止まった。貝殻が、ほんの少し口を開いたのだ。スペースシップの窓から、宇宙都市の殻の一部見えた。そこが空港だった。

中からテザーがゆっくりと延びてくる。私を乗せた客船は、動力船から離れるとフックを出し、そのテザーに掛けた。軽い連結ショックのあと、客船は空港の中へと静かに引き込まれる。両側からロボットアームが延びてきて客船をとらえると、格納庫に固定した。到着したのだ。

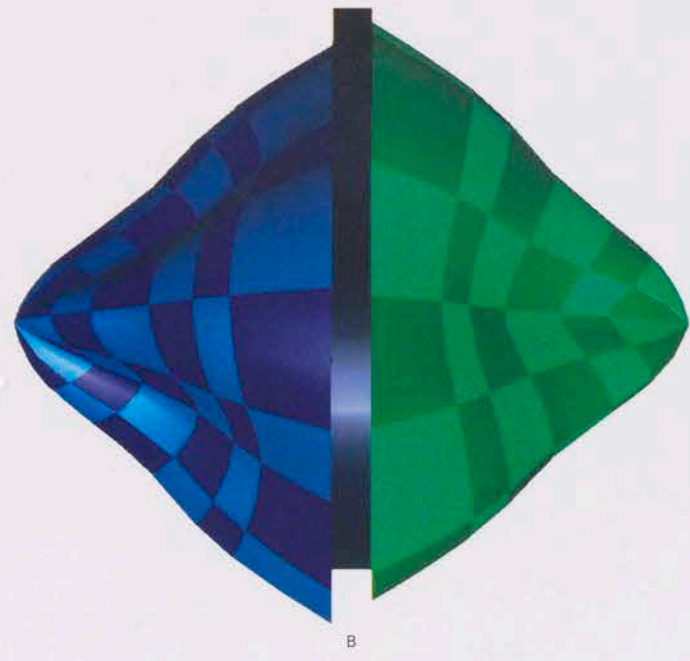
宇宙都市の殻が閉じ、再び回転を始めた。今度の回転は、しばらく続いた。空港の中に、人工重力をつくり出しているのだ。やがて客船のドアが開き、私は宇宙都市への第一歩を踏み出した。人工重力のおかげで、違和感はなかった。

## ●ハロー！ スペース・ナッツII

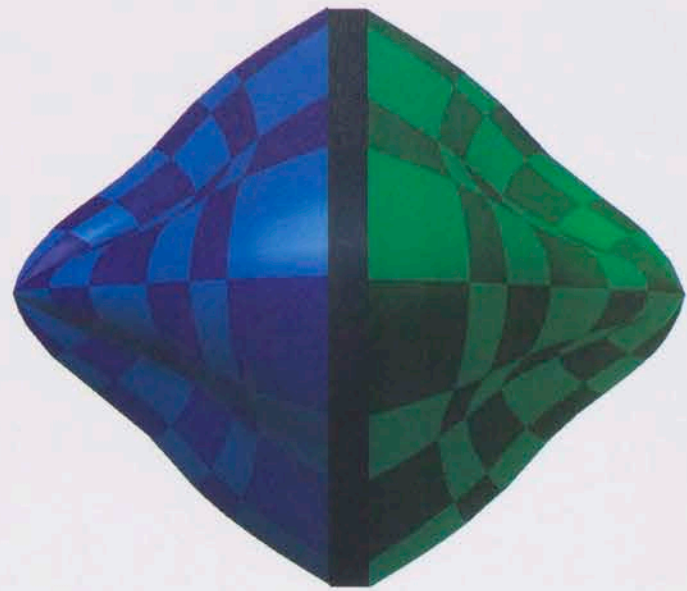
カプセル型のエレベーターに乗り込むと、壁面の立体映像のスイッチが入り、宇宙都市の案内を流し始めた。

宇宙都市は、外殻と内殻との二重構造になっている。

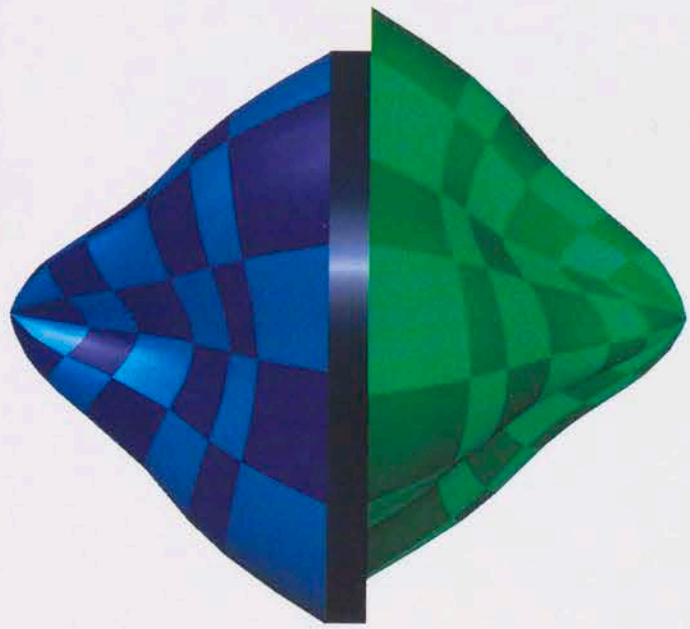




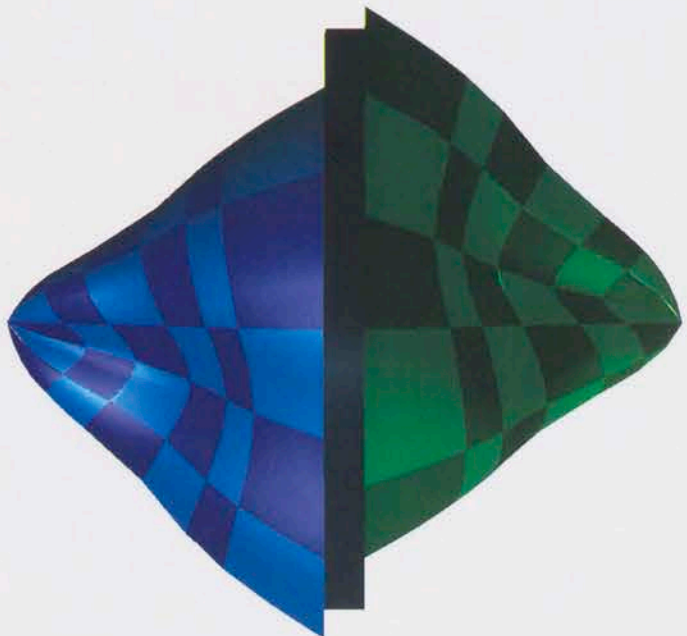
B



A (基本形)

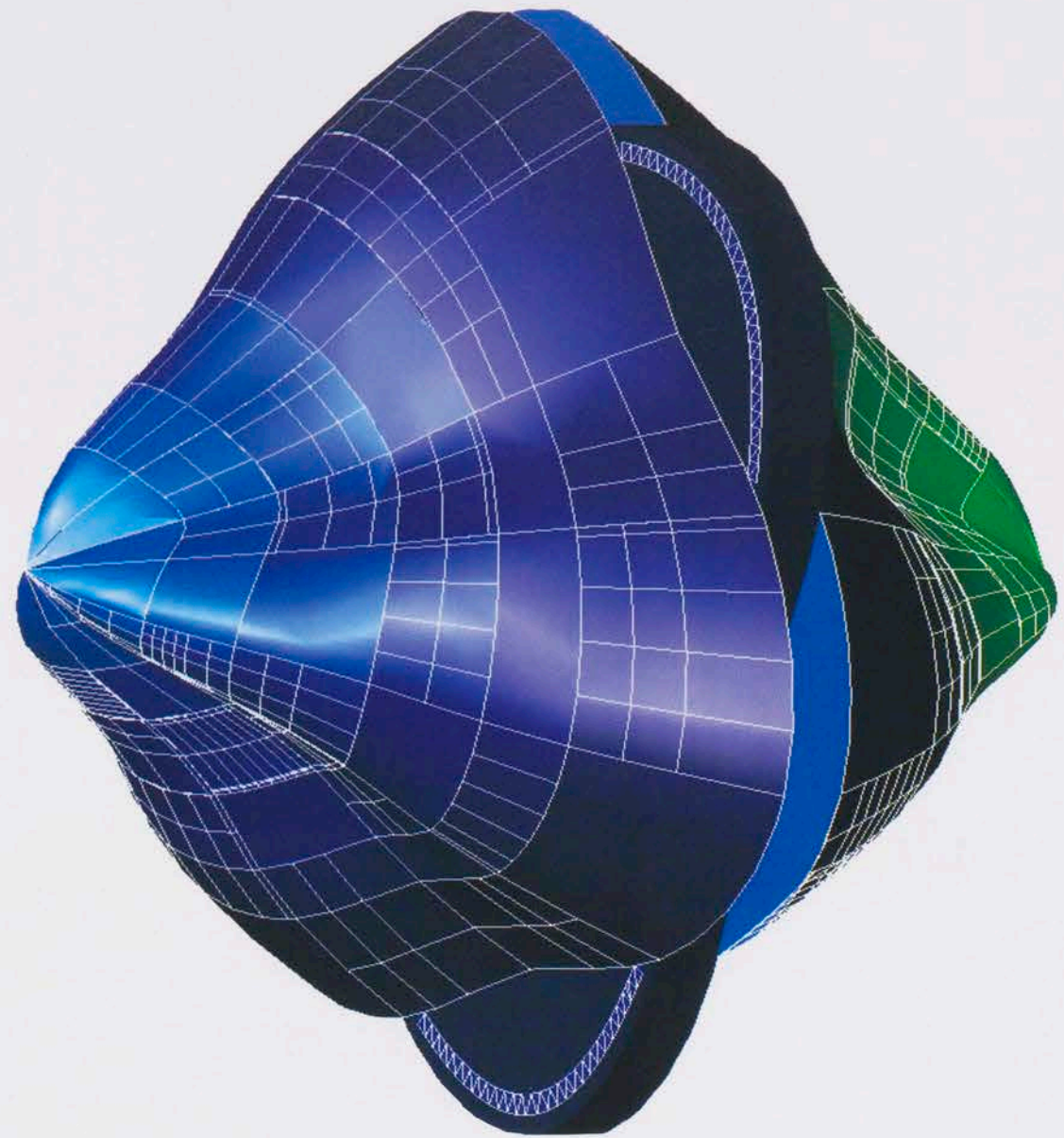


D



C

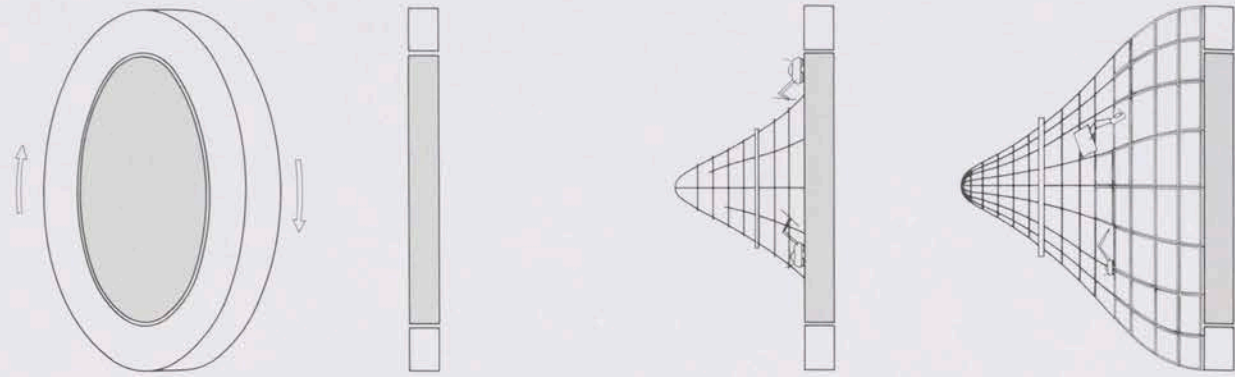
自由回転コアと左右サイドの回転によって  
さまざまな形態となる



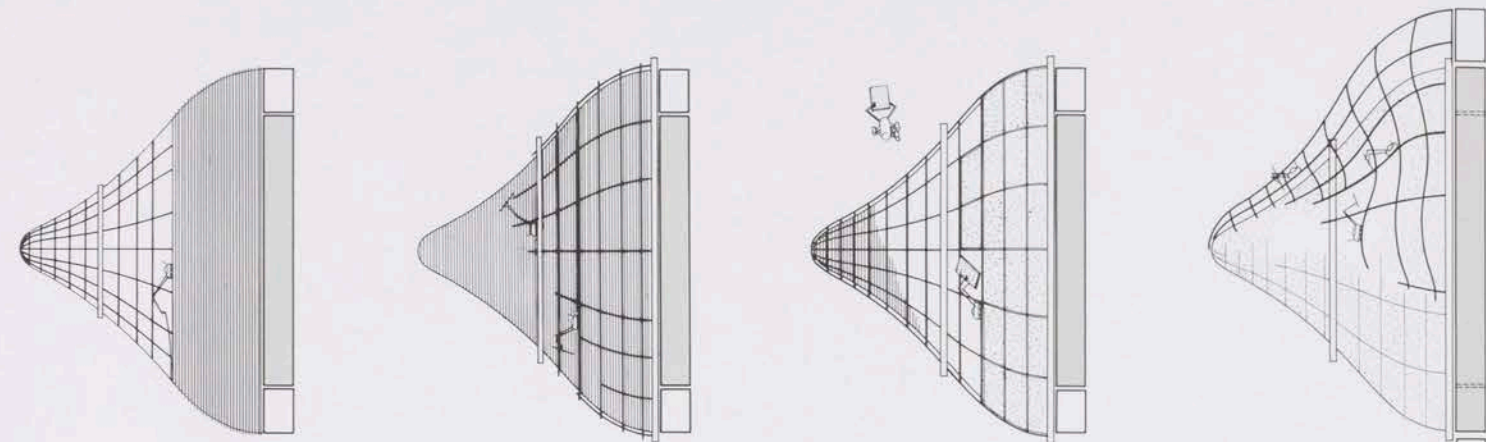
左右サイドは、自由回転コアを基盤に逆方向に回転する



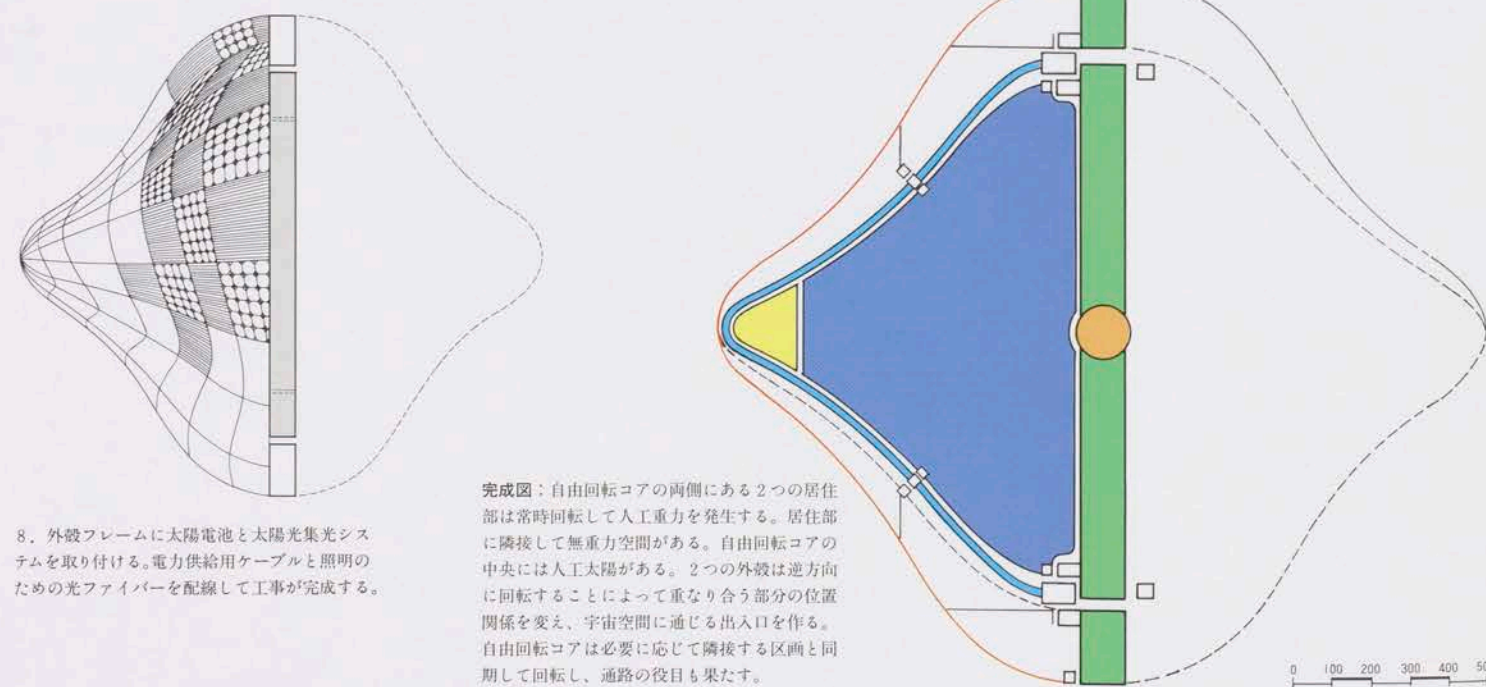
スペースナッツII建設方法：建設資材のほとんどは月から供給される。鉄・アルミニウム等の金属は構造材料となる。月の表土(レゴリス)には、多くのガラス質が含まれているので、加熱するとガラスが溶けて周りの鉱物を結びつけ、ブロック状のものができる。これは放射線遮蔽材として使用する。またガラスはグラスファイバーに加工すると高い引張強度を持った繊維となるので、これを中空の容器に巻き付けて内部の圧力に耐える構造体を作ることができる。



1. ラグランジュ点にスペースナッツ建設の基礎を組み立てる。基礎は静止した円盤で、その周囲にはリング状の居住区がある。居住区は回転し、その遠心力で人工重力を発生させる。工事完成後、両者は一体化して、内側自由回転コアとなる。  
2. 基盤上にアルミ合金製の内殻フレームを組み立てる。組み立てはすべてロボットが行う。  
3. フレームにアルミ合金のパネルを取り付ける。パネルを溶接によって結合し、気密空間を作る。



4. パネルの上からグラスファイバーを巻き付け、樹脂で固定化すると、居住空間となる内殻が完成する。  
5. 内殻の周囲に、回転運動を発生させるためのモーターを取り付ける。内殻表面を足場として放射線遮蔽部のフレームを組み立てる。  
6. フレームに月の表土を固めて作ったレゴリスブロックを取り付け、大きな質量をもつ強固な放射線遮蔽部をつくる。これによって居住部は宇宙の放射線から守られる。  
7. 放射線遮蔽部周囲に設けられた外殻を回転させるためのリングと足場を支えとして、外殻のフレームを構築する。同時に中央部周囲にリング状の外側自由回転コアを組み立てる。



8. 外殻フレームに太陽電池と太陽光集光システムを取り付ける。電力供給用ケーブルと照明のための光ファイバーを配線して工事が完成する。  
完成図：自由回転コアの両側にある2つの居住部は常時回転して人工重力を発生する。居住部に隣接して無重力空間がある。自由回転コアの中央には人工太陽がある。2つの外殻は逆方向に回転することによって重なり合う部分の位置関係を変え、宇宙空間に通じる出入口を作る。自由回転コアは必要に応じて隣接する区画と同期して回転し、通路の役目も果たす。

殻はおよそ毎分一回転のペースで常時回転することで、地球と同じ1Gの人工重力を生み出している。

ただし、1Gの重力が発生するのは中心軸から50メートル地点なので、住宅をはじめとした一般の生活関連施設のほとんどは、その付近の人工地盤上にある。ちょうど円筒空間の内側の壁に張り付くような形で、三六〇度全面に造られている。私がつとも驚いたのは、その光景、つまり「地上」の風景が三六〇度つなげた姿を初めて見たときである。

エレベーターが止まり、自由回転コアから内殻の居住空間に足を踏み入れると、私の立っている場所はおもろいこと、左右、そして上に至るまですべてに建物や道路があった。真上を見上げて、そこは空でなく、約一キロメートル先に住宅や公園があり、双眼鏡を覗くと人々が頭を私のほうに向け逆さまに歩いているのが小さく見えた。私の泊まる予定のナッツ・ホテルは右手の上方にあり、重力を生かすために低層で建てられた建物の屋上がすっきり見えていた。私のすぐ横では滝の水が、回転の影響であらう、少し斜めに落下しているのが分かった。体験したことのない不思議な感覚が、しばらくのあいだ身内を走り、私はその場に立ちつくした。その光景は、私のいる場所が地球でもほかの惑星でもなく、まぎれもなく宇宙空間であることを教えてくれたのである。

もう一つの驚きは、私の背後にあった。振り仰ぐと、自由回転コアの部分の広々とした壁面はブルーの拡散光に満ち、中央にはまばゆい光を放つ大きな球体があった。それが宇宙都市の空と太陽(人工太陽)だったのである。

民たちは、この人工太陽によって、地球に近い環境で暮らしているのである。

人工太陽に近い中空を、何か飛翔するものがある。鳥かと思っただけ、よく見るとそれは人間だった。回転する内殻では、中心軸から遠ざかるほど重力が1Gに近づくと、反対に人工太陽のある中心軸付近は無重力となる。その環境を利用して、小さな羽根を付けただけで人間が鳥のように空中を舞うことができる。「鳥人」とか「バード・フライイング」と呼ばれている、宇宙都市ならではの人気スポーツを楽しむ人たちがいた。

無重力といえば、内殻の両端には、その環境を利用した研究・生産施設がある。無重力空間は対流が生じないので、純度の高い金属や薬品の製造に適している。あるいは大型の重量物でも、浮遊させて、わずかな力で移動でき、あらゆる方向から加工しやすい。この工場で生産された太陽電池は、地球の静止軌道に送られ、太陽発電衛星として活躍している。また無重力空間は、観測機器が重さでたわむこともないので、天体観測にも適している。内殻では、スターサイドの空間に天体観測所が設置されている。人工重力が、周辺部から中心部へと段階的に小さくなっていくことにも、さまざまな利点がある。遠い惑星への長期宇宙旅行者のための重力への適応訓練、さらに心臓病や骨折した人、あるいは足腰の弱い老人の療養などには、重力の小さな空間が向いている。

その一方で、人工重力を積極的に利用した施設もある。都市に不可欠の浄水場・下水処理場などは、沈殿・気泡分離といった重力を前提とした現象を応用するため、もつとも重力のかかる人工地盤の下に配置されている。そこは居住域の外側にも当たるので、月のレゴリスとともに放射線遮蔽にも効果を発揮しているのである。

### ●宇宙都市の構造と建設

ふたたび自由回転コアに戻った私は、エレベーターで外周部へと向かった。宇宙都市のもつとも外側の部分で、そこには展望台があった。

椅子に腰掛けて窓から覗くと、すぐ近くに円盤状の物体が宙に浮かんでいるのが見えた。宇宙都市にエネルギーを供給している太陽発電衛星である。自ら回転する遠心力により、表面に並べられた薄い太陽電池の平面を保ち、同時に太陽に対する面角度を変えて、もつとも効率よい向きを常に維持している。宇宙空間の構造物にとって、最大のメリットは無重力といえる太陽エネルギーを利用できることである。その意味では太陽発電衛星こそ、もつとも宇宙空間を意識した構造物だといえる。

少し下方には、円錐形のセイルの広がりがあった。現在は宇宙都市の位置が安定しているのだから、それほど大きく帆を張っていないが、最大時には直径が八〇キロメートルにもなるのだという。

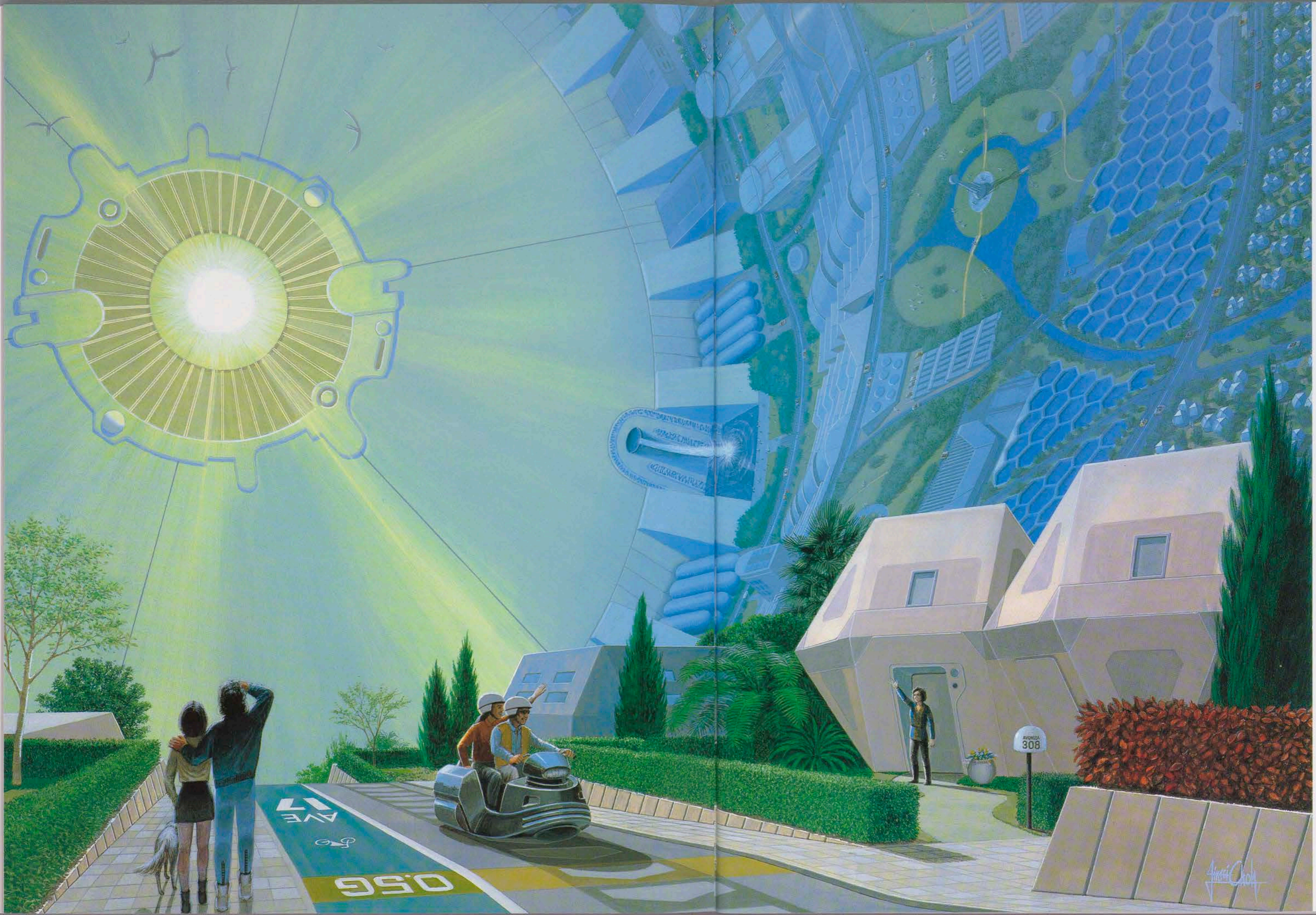
その向こうには、地球から見たときの七・八倍はある巨大な月が輝いている。ここからは、月の地形すら手に取るように分かる。よく見ると、月面上には宇宙都市の小さな影が映っていた。ルナ・シティはどのあたりだろうか。

椅子を一八〇度回転させて反対側の窓を覗くと、そこには地球の青い姿があった。月よりも小さな地球である。

地球と月とを交互に眺めているうち、私は不思議な思いにとらわれ始めた。ここ11の宇宙都市では、なぜか地球よりも月のほうが身近に感じられるのである。それは距離が近いというだけの理由ではなかった。もしかすると、宇宙都市の建設資材のほとんどが、月の物質からつくられていることと関係あるのかもしれない。



居住部より人工太陽を見る。この近辺は重力0.5Gに相当する。右側面に見えるのは、クロレラ培養プールや公園、居住区である。遠心力により重力を得ているため、滝の落下が右へ振れているのがわかる。



スペース・ナッツII内部想像図 画・張仁誠 (CHO JINSEI)



## 宇宙都市の構造概要

### ① 居住部

内殻の居住部分は、基本的には航空機と同様の構造である。月の物質を加工したアルミ合金をフレームにし、その上からやはりアルミ合金のパネルを貼りながら組み立てが行われた。

内部は一気圧に保たれているので、その圧力に耐える構造体が必要となる。そこで月のレゴリスに多く含まれているガラス質を加工し、引っ張り強度の高いグラスファイバーの繊維をつくり、全体に巻き付けてある。

### ② 放射線遮蔽部（シールド部）

月のレゴリスを加熱し、ガラス質と他の鉱物とを結合させてブロック形に固めたものを、内殻の外に並べ、放射線遮蔽を行っている。ブロックは月面のルナ・シティの工場で生産し、カタパルトでL1付近へと打ち上げ、回収しながら連結していき、遮蔽層をつくっていく。ただし総重量の関係から、居住部分と同様に回転させると膨大な遠心力が生まれ、これを支える構造物が別途に必要なため、遮蔽層は回転させていない。

### ③ 外殻部

月面工場で加工した軽量のアルミ合金をフレームに、表面には太陽電池と太陽光の集光器が取り付けられている。

### 宇宙都市の建設概要

宇宙空間での建設作業には、放射線をはじめとした危険が伴うためできるだけロボット化することが望ましい。しかし、宇宙都市ほど大規模な構造物になると、それだけでは効率が悪く、地上における建設と同様の考えも必要となる（P19/建設方法図参照）。

① 何もない宇宙空間で建設作業を行うには、大地に代わる人工地盤が必要となる。宇宙都市では、中央

の自由回転コア部分をできるだけ月面で組み立て、L1に運んで工事用基盤とした。

② コアの建設基盤上で、内殻のフレームをロボットによって組み立てていく。組み立て作業は先端部分から始め、順次押し出す形で中央部の半径の大きな部分へと進める。

③ 内殻の表面に、内部気圧を受けるグラスファイバーをロボットで巻き付け、居住部周囲には回転用のモーター駆動部を取り付ける。さらに放射線遮蔽層用のフレームを取り付け、月面から打ち上げたブロックを回収し、接合しながら強固な構造体をつくる。

④ 外殻用フレームを取り付け、パネルを貼っていく。同時に電力供給ケーブル、照明用の光ファイバーケーブルなどの設備工事を行う。

宇宙都市の構造部材は、月から得た鉄やアルミニウムである。内殻には、内部気圧に耐えるため、月のレゴリスを加工したグラスファイバーが使われ、放射線遮蔽にもやはり月のレゴリスを加工したブロック材を利用している。それだけではなく、宇宙都市で人間が生きていくための酸素も、月資源から生み出されている。

いってみれば宇宙都市は、その多くを、月を母として誕生した。換言すれば、地球以外の資源を使つてつくった、宇宙空間で初めての本格的構造物でもある。それは人類が、将来にわたって宇宙で生き延びていくための実験的方法の一つであるだろう。

私がこのL1の宇宙都市に来て、地球よりもむしろ月に親しみをおぼえたのも、やがて人類が地球だけに頼らずに宇宙空間で暮らしていく時代への序曲なのかもしれない。私の意識や感情にも、宇宙に住むことを前提とした大きな変化が起こりつつあるのだ。それはラグランジュ・ポイントという不思議な空間の影響だろうか。地球と月との引き合う力の境界

に在って、地球と月を同時に眺めることのできる空間。「そんなL1行き切符は、人類の未来の中にこそある」

## ● 作業を終えて

ラグランジュ・ポイントとは、どのような宇宙空間なのか。今回のプロジェクトチームの作業は、その理解から始まった。数式と理論の上ではすでに解明されているが、一般の人にも分かりやすい資料はきわめて少ない。まして、そこに構造物を建設するとなると何が必要なのか、どのような事態が考えられるのか。その手掛かりとなる資料は皆無に等しく、正確に理解するまでに相当の時間を費やした。そうした中で挑戦したのが、ラグランジュ・ポイントのコンピュータ・グラフィック化であった。これによって専門分野以外の読者にも、ラグランジュ・ポイントの特質が理解されれば幸いである。

もう一つの挑戦は、未来における宇宙都市のデザインであった。二〇八〇年という未来を想定すれば、宇宙構造物の意匠や内容、工法などに変化があるのは当然である。宇宙科学研究所の名取教授のもとでは、工学的な新しい構造に加え、海におけるクラゲの動きや蚕の繭の張り方といった自然界の研究まで教えて戴き、大いに刺激を受けた。未来の宇宙都市を想像することは、ある意味で人類の未来そのものを想像することもである。今回は、人類と宇宙との共生をテーマに作業を行った。将来、宇宙都市が実現する日が来たとして、私たちの孫や曾孫たちが、今回の宇宙都市と比較してどのような印象をもつか、それもひそかな楽しみである。

最後に、全般にわたりご協力戴いた宇宙科学研究所の名取通弘教授と樋口健助教授、そしてラグランジュ・ポイントに関するアドバイスを戴いた石井信明助教授に、改めて御礼申し上げます。