21世紀の宇宙インフラストラクチャ*

栗木 恭一**

Space Infrastructure in 21st Century / Kyoichi KURIKI

Key words : space infrastructure, space business, space station, solar power satellite, lunar base, closed ecology, life support system, antimatter propulsion

1. はじめに

我が国における宇宙開発の活動は、科学及び実用衛星の開発を軸とした国内の動きと、これを通じて蓄積された技術力を基に国際的プロジェクトへの参加の両面において発展しつつある。折しも1987年の初めに宇宙開発委員会、長期政策懇談会は「宇宙開発の新時代を目指して」と題して、今世紀いっぱいの我が国の宇宙開発のあり方を提言し、予測をまとめている。図1はこの報告に載せられたもので、開発に登場する輸送手段、宇宙施設(Space Facility)が地球を中心に描かれている。自主開発が進められているH-IIロケットは、2トン級衛星の静止軌道への投入が可能とされており、同機を用いた地上回収機も今後の計画のなかに見える。更にその先では、オリエン特・エクスプレスと銘打った水平離着陸を果たす有人宇宙往還機(Space Plane)も登場しよう。画面中央に大きく描かれているNASA宇宙ステーションは1990年代後半に稼動が予定されているが、国際協力の一環として我が国もこれに参加している。その軌道は低軌道(LEO; Low Earth Orbit)と呼ばれ、高度500km近辺に設定されるが、そこでの活動の一部は宇宙工場へと発展してゆくであろう。

一方、米国においては1986年にNational Commission on Spaceが、今後50年の米国宇宙開発の方向を予測して、委員長名で呼ばれるペインズレポートを提出した。報告の要旨はカラーイラストを随所に配した成書として出版されている¹⁾。ここでは、先に記した宇

宙ステーションを踏み石として、人類は月面に基地を築き工業活動を開始し、火星にむけて有人探査計画を推し進める、と2035年までの見通しをたてている。

上記の2報告の作成には大勢の科学者、技術者、管理者の意見、予測を盛り込んだものであるが、恐らく宇宙開発に縁の薄い人々から見るとSFの感がいぬめないであろうし、たとえSFと思われていた宇宙活動が実現しつつある実績をみよ、といわれても直ちに得心がゆくものでもなかろう。そこで本論文では、こうした多様な宇宙活動の局面が

- (1) いかなる動機(driver)により正当化されるのか
- (2) いかなる筋書きのもとに脈絡を有しているのか

を述べてみたい。もとより著者固有の見方であるから別の見解もあろうが、理解の一助となれば幸いである。

2. 宇宙インフラストラクチャ

宇宙活動の今後の動向を示すに当たって、人類の生態系、すなわち地球がどのようなシステムであり、その生活に不可欠な基本構成要素(インフラストラクチャ)はどのようなものから成るかを心得ておこう。熱力学的な手法を用いると、生態系は図2のような3種に大別できる。孤立生態系はエネルギー、物質の出入りが全くない系と定義されるが、適当な例は見つけにくく、放射排熱を認めれば、深宇宙有人宇宙船などがこれになろう。閉鎖生態系はエネルギーの流入・流出はあるが、物質は閉じた系内で循環する系で、我が地球がまさにこれに当たる。開放生態系はエネルギー、物質ともに外部とやりとりのある系で、人体、家庭、

* 原稿受付 昭和63年1月13日

** 宇宙科学研究所(東京都目黒区駒場4-6-1)

図1 21世紀の宇宙活動の姿

図2 生態系の3形式

国家などがその例である。太陽を中心に火星までの内惑星空間は太陽エネルギーで満ち溢れており、人類がこれをとらえて小地球、すなわちスペースコロニーを建設するのを待ち受けている。またこの空間に存在する天体をも物質として利用するようになれば、人類は宇宙をも開放生態系としてとり込むことになる。

エネルギー、物質に情報を加えると生態系にとって基本となる大要素がそろい、特に宇宙活動にあてはめた場合の内容は表1のように表せる。第4項の環境保全はインフラストラクチャ構築の際の束縛条件であるが、近年このファクタがいかに大きな重みを持つかは技術者のみならず社会全体が痛切に感じているところである。宇宙開発も大空間という逃げがあるものの決して例外ではない。このことを強調しつつ、3大要素が今後いかに整備されてゆくかを予見してみよう。

宇宙における産業活動がこれまでどういう経過をたどり、これからいかなる局面が展開するかが図3の調

表1 宇宙インフラストラクチャ

1. 物質
・材料、構造
・食料、生命維持システム
2. エネルギー
・電力、動力
・推進システム、輸送網
3. 情報
・通信、観測
・人工知能、ロボティクス
4. 環境保全

査結果で大局的に示される。1980年代までは通信、観測活動をエレクトロニクス技術が支えてきたという情報主導型であった。スペースシャトル、宇宙ステーションという有人、回収型のシステムが定着する1990年代には材料(物質)生成の作業が定着する。同時にこうした作業を手助けするサービス業の台頭が示されているが、既に欧州、日本にそうした企業、団体が現れている。材料生成は宇宙工場の出現を促し、エネルギーの需要増から宇宙におけるエネルギー開発が始まることになる。

3. 宇宙ステーション

NASA 宇宙ステーションの建設は1994年に始ま

図3 宇宙ビジネス規模予測

り、今世紀中には図4に示すような外観になる予定である。漢字の「中」の字を90°回転させたような構造に見えるが、まず芯棒をつくり、それから「口」を加えるという順序でつくられる。初期には乗員5~6名、電力75kWでスタートし、最終的には3倍程度の規模に達する。ただ単に大きな衛星に過ぎない、従来の衛星の方が使いやすい、などといった批評も聞かれたが、

- (1) 有人で長期の実験が可能となること
- (2) システム全体が都市構造を形成すること
- (3) より高い軌道への中継点となること

において、従来の衛星と一線を画するものであり、スペースシャトルが初期には微小重力材料生成実験に用いられたが、本来の輸送機としての役割をとり戻しつ

図5 宇宙ステーションの都市構造

図6 内惑系重力ポテンシャル

つあるように、宇宙ステーションも初期には(1)の性格を打ち出しつつ、ゆくゆくは(2),(3)の役割へと移ってゆく。

図4を見ると、宇宙ステーション本体の近傍をプラットフォーム、フリーフライヤが飛んでいるが、これらもシステム構成要素であり、図5のような役割を果たすこととなる。実験、試験のなかには大電力を使って電波を出したり、周辺にガスを放出したりする騒々しいものと、観測のように静かにやりたいものがある。これらを1か所に同居させることは無理であるから、プラットフォームにより物理的に分散させ、宇宙ステーション本体は通信中継、補給・交換作業などに専念する。こうした姿は、騒がしい工場地帯、静かな住宅地、これらを整合させる市役所や中央駅などの構成に似ており、都市構造と呼ばれるゆえんである。

宇宙ステーションが地球の重力ポテンシャルのなかで占める位置は図6のように示される。地球重力場脱出を山の頂上

図4 NASA 宇宙ステーション

図7 太陽発電衛星

とすると、宇宙ステーションはまさにベースキャンプに位置しており、その高度も低すぎると抗力が増大する、高すぎるとバンアレン帯に入るなどの制約から高度 500 km 近辺の軌道に限定される。将来は上昇、下降する宇宙船で混雑する中継点となることが予想される。

4. 太陽発電衛星

電波によってエネルギーを送る構想は 19 世紀末にテスラが提唱しているが、軌道上で太陽エネルギーをマイクロ波エネルギーに変えて地上に送るという太陽発電衛星 (Solar Power Satellite; SPS) の概念は、1968 年に現アーサー・D・リトル社副社長のグレーザーにより特許として公表された。折から 1970 年代初頭の石油ショックもあって、NASA/DOE (National Aeronautics and Space Administration, 米国航空宇宙局/ Department of Energy, エネルギー省) は格好のテーマとして取りあげ、概念設計を行った。

NASA/DOE 基本システムは図 7 のような外観を有し、静止軌道で発電しマイクロ波に変換して地球に伝送する。このシステムを開発する根拠として、

- (1) 日照軌道で得られる太陽エネルギーは、地上の 6~15 倍となる。
- (2) 無重力を利用して軽量化がはかられ、天候障害がないので保守が容易である。
- (3) 地上レクテナは工業地域に隣接した沿岸洋上に設置できる。
- (4) 現存発電所の最大規模に匹敵する電力が 1 基で得られる。
- (5) 廃棄物を発生せず、排熱の大半も宇宙で行われ

図8 ロケット噴射による電離層へのインパクト

るから極めてクリーンなエネルギーである。

- (6) エネルギー変換技術は十分に整っており、開発上の障害は見当たらない。

などが挙げられている。構造は地上発生電力 5 GW を満たすため $10.4 \times 4.3 \times 0.2$ km, 30 000 t と巨大で、山手線環内を覆いつくす広さとなる。この大きさの故にこの計画が主張している年間 1 基の建設に至るアプローチは受けがよい。しかし、上記の特色は代替エネルギーとして魅力あるものであり、小型のものを分散して低高度軌道に設置するといった工夫も提案され²⁾、今後の展開が期待される。

コストについては、システムの大小にかかわらず、単位電力につき見積れる。太陽電池アレイは総重量の 50% 以上を占めるが、その生産コストは現在の 300 ドル/W から、1 ドル/W への減少を目指している。後の数字は年間生産量が数 GW になった段階で実現できる。また、地上から静止軌道への輸送費は重量を電力で換算し 0.5 ドル/W となる。他の費用も加え、SPS の寿命を 30 年とすると電力料金は 0.033 ドル/kWh となる。見積りの甘さを考慮しても 21 世紀の代替エネルギーとなり得ることが分かる。

このような大規模な宇宙開発に際し、環境保全は表 1 で力説したように十分な注意を払わねばならない。図 8 はサターン 5 を用いてスカイラブを打ち上げたときにたまたま観測を行っていたレーダがとらえた電離層プラズマの著しい減少の様相である³⁾。ロケットの出す水蒸気でプラズマが消え、その回復に数時間を要している。SPS の建築のため毎日 100 t の資材打上げを行えば、電離層に修復されない孔があいてしまうことになる。輸送費低減の観点から資材の大半を月で調達する案も出ているが⁴⁾、むしろ環境保全の観点から月から輸送した方がよい。

いずれにせよ世界的に見て、石油の供給は図 9 に示すように 2010 年には頭うち、もしくは下降を始めることになる。図 3 に示す宇宙エネルギー開発開始時期もこうした事態を踏まえての設定と思われる。

図9 石油の採取量の実績と予測

5. 月・惑星開発

アポロ計画で地球に持ち帰られた月の岩石や土を分析した結果、月には生物はおろかその痕跡も見当たらず、そのほかに特記すべき鉱物もなかったと報じられている。岩石の成分も地球の玄武岩のそれと類似とのことであるが、地球から分離して衛星となったという説を考えても納得のゆく事柄である。

このような不毛の地をなぜ開発する必要があるのか。前節の終わりに触れたように、その答は、

- (1) 月の位置エネルギー利用
- (2) 地球の環境保全

にあると考えられる。図6で分かるように、地球を谷底に置いた山頂をみると、静止軌道と月が存在している。宇宙ステーションは七合目付近にあって、上昇、下降する宇宙船の中継点、補給地としての役目を果たす。ここで宇宙ステーションへ補給用推進剤として液

体酸素を調達することを考えてみよう。液体水素も推進剤として必要だが、1:8の割で酸素の重量が大部分である。地上から宇宙ステーションに資材を輸送すると発射台での重量のわずか1.5%が届くのみである。残り98.5%の推進剤のうち約半分が重力に抗する仕事で、他の半分が空気抵抗に抗して失われる。月に土砂、岩石を分解する酸素工場ができ、図10のようなリニアモータ式発射台ができれば、発射時重量の50%を地球の宇宙ステーションに届けることができる。最近の電気推進には酸素だけを用いるものもあり⁵⁾、

輸送時間を数倍長くとれば水素を必要とする化学ロケットを用いずに輸送することも可能である。しかも、月からの輸送で消費される推進剤は地球の大気圏外に撒かれるので、大気汚染の心配がない。電気推進を用いれば比推力が大きいため推進剤の消費量が少なくて済み、大気圏外の環境保全にも寄与することができる。宇宙ステーションと静止軌道を往復するOTV(Orbit Transfer Vehicle, 軌道間輸送機)にとっては、静止軌道を補給地とすることができるので、月からの輸送が一層有利になってくる。

月面に基地を築くとき、月における水素、炭素、窒素の存在が絶望的であることから完全な閉鎖生態系を築く必要がある。表1のインフラストラクチャの中で最大の課題がこの生命維持装置である。人間一人当たりの食糧と排泄物は図11のようであり、摂取した炭水化物を成す炭素の大部分は呼吸排気として、水素の大部分は汗として、残りが尿、固形排泄物として棄て

図10 月面基地

図 11 食糧摂取と排泄

図 12 21 世紀の宇宙活動予測年譜

られる。従って、まず水と呼吸気の循環が第一課題であり、宇宙ステーションでも試みられようとしている。炭水化物、蛋白質の合成はその次の課題となろう。

生命維持の視点から火星を見ると、水、炭酸ガス、窒素も存在していることから、月よりはるかに魅力的に思われる。生命発見の希望をいまだ捨てきっていない理由もそこにある。しかし仮に十分な生命維持系を携行しても、火星への旅は片道8か月以上を要し、往復の期間宇宙船内で無重力と孤独感に人間が耐えられるかが大問題である。ソ連は宇宙ステーション・ミールでその実績を着々と築いている。

6. 太陽系から恒星へ

ベインズレポートは2035年までの宇宙活動の展開について述べ、その脈絡はおよそ前節までのようなシナリオかと思う。そこで、火星まで達した人類は次にどこに向かうのかと考えると、急に空しさを感じられてくるが、次の目標を設定するに違いないと信じさせる強い動機が人間には潜んでいる。それは、

- (1) 飽くことない科学的、探險的好奇心
- (2) 人類種属を保存するための努力

であり、哲学めいた感懐ではない。

人間の創った探査機は現在太陽系の最外惑星を目指して飛んでいる。その距離は太陽から約2000分の1光年のところにあって、更に1万倍の距離に恒星ケンタウルス座プロキシマをのぞんでいる。この間にオールトの雲と呼ばれる彗星群を見るが、我々の興味をひくものではなく、やはり地球外知的生物(ET)見たさの好奇心から隣の恒星に探査機を送りたい。この宇宙船を駆動する光子ロケットの燃料は反物質であり、3

tを要する。その生産は太陽発電衛星100基を30年間働かせて生産される。宇宙船の総重量は160t、30年かかって4~6光年域の恒星に到達する。これに要する経費は約2兆ドルとなるが、21世紀後半の先進国のGDPの1%の程度となる。

このような、いわば遊びにだれが金を出すものかという声も聞こえそうな気がするが、3tの反物質の持つ能力を見定めていただきたい。かつて恐竜が絶滅した説明の有力なものとして10km径の隕石の衝突が唱えられている。3tの反物質をもってすれば、この隕石も微塵に砕くことができ、1kmのものであれば気化してしまうことさえ可能である。有史以来1万年を経過したが、この時間は1km径の隕石が地球に衝突してもおかしくない確率周期と推定される。従って、地球や惑星に住む人間種属を保存しようという動機は、反物質のようなエネルギー源を利用して隕石衝突防災体制を築いてゆくものと思われる。

以上のような活動は、著者が知る限りの要素を集めて綴ったものであり、最後に図12にまとめてみた。不備の点は諸賢のご意見をいただき改めていきたい。

参 考 文 献

- 1) Pioneering the Space, Bantam Books, (1986).
- 2) J. E. Drummond and R. N. Drummond: Derivation of a Low Cost Satellite Power System, Proc. 11th IECEC, (1976) 64.
- 3) M. Mendillo, G. S. Hawkins and A. Klobuchar: Sudden Vanishing of Ionospheric F Region, J. Geo. Res., 80, (1975) 2217.
- 4) H. H. Koelle: A Logistics Model for Large Space Power System, Acta Astronautica, 13, 6/7, (1986) 411.
- 5) K. Kuriki, Y. Sasao and Y. Kondo: Orbital Transportation of SPS, IAF-85-157, (1985).