

— 研究展望
Review

研究展望

宇宙開発への勧誘

INVITATION TO SPACE DEVELOPMENT

長嶋眞矢*

By Shinya NAGASHIMA

1. ま え が き

太古より人類の歴史は未知の世界への挑戦, すなわち, フロンティア開拓の歴史であった。大航海時代, 西部開拓, 南極探検等を通じて, 人類は地球上のフロンティアを次々と開拓し, 豊かな社会を築き上げてきた。その結果, もはや地上には人類にとってのフロンティアはなくなった。これからは, 宇宙空間, 海底, 大深度地下 (Geofront) 等の, 地表から離れた立体的な新しいフロンティアの開発が, 人類にとって大きな目標となる。

土木工学については, 著者は全くの門外漢であるが, 英語で Civil Engineering (Military Engineering の対語か?) というからには, 「人類に安全で快適かつ豊かな社会生活を提供するための技術」と考えて大きな違いはないと思う。

そう考えると, 土木技術の歴史は人類の歴史——進化の過程での「猿人」や「原人」は除くとしても, 少なくとも「ホモ・サピエンス」といわれる種属が誕生した後期旧石器時代, 約 35 000 年前——とともに始まったであろう。

人類は厳しい自然環境の中で安全で快適かつ豊かな生活を営む場として, 住居を作り, 飲料水を確保する必要があった。また, 集落と集落との交流に, さらには国家の統一を維持するために交通路を整備してきた。土木技術はこれらの目的を達成するために使われ, 発展してきた。

そして, エジプトやギリシャ・ローマの時代には相当高度なレベルまで達していたと考えられる。

これに対して, 宇宙開発の歴史は極端に浅く, ロケット開発の父といわれるゴダート博士が, 1926 年に世界最初の液体燃料ロケットを打ち上げた時点からとしても, 3/4 世紀, 人類初の人工衛星「スプートニク 1 号」が実現した 1957 年とすれば 30 年余に過ぎない。

ここでは, 将来の宇宙開発の展望につき, 極力土木工学に結びつけて述べてみたい。浅学非才のため, 独断と偏見が混じることについてはご容赦いただきたい。

2. 宇宙技術発達の歴史

(1) ロケット開発の始まり

近代ロケット開発の歴史は, 1919 年ゴダートが「超高空に達する方法」(A Method of Reaching Extreme Altitude) を発表し, 「ロケットを使えば物体を月まで送ることができる」として液体ロケットの使用を提唱し, 1926 年, 世界最初の液体燃料ロケットの飛翔に成功したのが始まりである。一方, ドイツのオーベルトは, 1923 年「宇宙ロケット」を書き, 理論および設計に大きく寄与した。オーベルトの影響によりドイツでは, 急速にロケット熱が高まり, 1927 年には宇宙旅行協会が設立された。

1935 年ゴダートは, ジャイロを含む自動操縦装置を搭載し, ロケット噴流中の翼を制御して高度 2 300 m までの飛翔に成功した。これはロケットの安定から制御に進んだものとして特筆に値する。

(2) 「V-2 号」から「スプートニク」へ

第 2 次世界大戦後の, 米ソ両大国の宇宙開発技術の飛躍的発展の基礎となった「V-2 号」ロケットは, ナチス・

* (株) 西菱エンジニアリング社長付兼三菱重工業 (株) 神戸造船所宇宙プロジェクト部顧問

(〒652 神戸市兵庫区和田崎町 1-1-1)

Keywords: artificial satellite, space environment, space station, lunar base, planet exploration, CELSS

ドイツにより1940年1月から本格的開発が開始された。これは発射時重量13トンの大型ロケットで、1942年7月に試作を完了し、100機以上の打ち上げ実験が行われた結果、ようやく実用の目途を得て、1943年8月から量産に入り、3000機以上が製作された。「V-2号」は射程290 km、最大速度1.52 km/s、最高高度81.5 kmまで750 kgのペイロードを運ぶことができる。

アメリカは、第2次世界大戦の終了とともに、ドイツより押収した「V-2号」ロケットを組み立て、発射試験を行った。アメリカ海軍は、この結果から1946年夏、バイキングの開発を始めた。このロケットは1954年5月には高度254.5 kmに達した。そこで1956年にバイキングを第1段とした3段式ロケットで人工衛星を打ち上げる「バンガード計画」を発表した。フォン・ブラウンは1950年、アメリカ陸軍のレッドストーン造兵廠に移り、1952年、中距離弾道弾を完成し、さらにこれを改良したジュピターを1957年の初めに完成した。

一方、ソ連はドイツを占領するとただちに、ロケット関係の技術者、製品、資料等を押収し、熱心にロケット開発に乗り出した。1949年にT1を、1953年には中距離弾道弾T2を完成し、さらに1957年には大陸間弾道弾T3（重量120トン、推力150トン、射程8000 km）を完成した。ほぼ同じクラスのアメリカのアトラスの完成が1958年である。

かくして、人工衛星打ち上げの気運は熟し、1957年10月4日、ソ連はついに人類初の人工衛星「スプートニク1号」の打ち上げに成功した。アメリカは、バンガード計画が思わしくないため、急遽ジュピターに変更、アメリカ初の人工衛星「エクスプローラ1号」の打ち上げに成功したのが1958年2月1日（約4か月遅れ）であった。

（3）米ソ競争の時代

「スプートニク1号」の打ち上げ以降、米ソ両大国の熾烈な宇宙開発競争の時代に入った。1957年から30年間の米ソおよびその他の国の暦年ごとの人工衛星の打ち上げ個数を図-1に示す。

当時の宇宙開発の最大の目標は月探査に向けられた。人類の月旅行を達成するには、多くの技術的問題を解決しなければならないが、その主要なものは、無人の月探査、回収技術、有人宇宙飛行、軟着陸、ランデブー・ドッキング等であった。月探査に関する主要成果を表-1に、また、その基礎技術となった有人飛行の主要業績を表-2に示す。

無人の月探査は1959年1月の「ルナ1号」によって開始され、これは月から6000 kmの所を通過して初の人工惑星となった。ついで1959年9月「ルナ2号」は月に命中し、速度性能、航法・誘導の面で問題が解決し

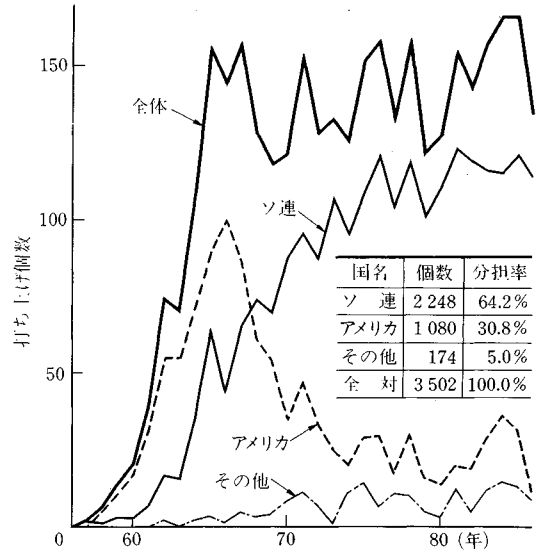


図-1 人工衛星の打ち上げ個数（1957～1986年）

たことを示した。同年10月「ルナ3号」による月の裏側の写真は世界中に深い感銘を与えた。軟着陸達成までには相当の時間がかかったが、1966年1月「ルナ9号」で初めて成功してからは、表面の状況もしだいに明らかになっていった。

人類の宇宙飛行は1961年4月の「ウォストーク1号」によるガガーリン少佐の飛行で初めて成功し、以降宇宙船もウォスホート、ソユーズと3人乗りまで大型化された。アメリカにおいても1962年2月の「フレンドシップ7号」などのマーキュリー計画から、2人乗りのジェミニ計画、3人乗りのアポロ計画へと大型化され、長期間の飛行も可能となり、人体への影響等も明らかになってきた。最初のランデブーは1965年12月「ジェミニ6号」と「7号」により行われた。1966年3月には「ジェミニ8号」と先に打ち上げられた目標（アジーナ・ロケット）とのドッキングに成功している。これら各種の技術的問題を解決して「アポロ8号」では人類の月周回飛行に、それに続いて「アポロ11号」では人類初の月面着陸に成功した。しかし、この月面着陸成功によって熱狂的な宇宙開発の時代は終わり、以降は実用面と採算とに重点の移った宇宙利用の時代に入っていった。

惑星飛行では惑星に最小のエネルギーで到達しようとする、打ち上げ時期（地球を出発する時期）は地球との相対位置が最適の時期を選ぶ必要がある。金星の場合には、約584日ごとに、火星の場合には、約780日ごとにその機会が来る。したがって、金星、火星への探査には、ほとんどこの機会のあるたびに探査機が打ち上げられてきた。打ち上げ最適時期と、そのときに打ち上げら

表-1 米ソの月探査の主要成果

打ち上げ年月日	探査機名	国名	成 果
1959年1月2日	ルナ1号	ソ連	月から6000kmを通過(初の人工惑星) (アメリカは同年3月3日、バイオニア4号で達成)
1959年9月12日	ルナ2号	"	37時間後、月面「晴の海」に命中 (アメリカは1962年4月23日、レインジャ3号で達成)
1959年10月4日	ルナ3号	"	初めて月の裏側撮影に成功
1966年1月31日	ルナ9号	"	79時間後「あらしの海」軟着陸に成功 (アメリカは同年5月30日、サーベヤー1号で達成)
1966年3月31日	ルナ10号	"	初の月周回軌道実現 (アメリカは同年8月10日、ルナオービター1号で達成)
1966年4月17日	サーベヤー3号	アメリカ	軟着陸後写真および土壌データを送信 (ソ連は同年12月21日、ルナ13号で達成)
1967年11月7日	サーベヤー6号	"	「中央の入江」に軟着陸後、月面を移動
1968年9月15日	ゾンド5号	ソ連	月周回後、地球に帰還
1968年12月21日	アポロ8号	アメリカ	有人初の月周回後帰還(飛行時間147時間1分)
1969年7月16日	アポロ11号	"	人類初の月面着陸成功(飛行時間195時間19分) (アームストロング、コリンズ、オールドリン)
1970年9月12日	ルナ16号	ソ連	「肥沃の海」に軟着陸後、月の岩石等を収集し帰還
1970年11月10日	ルナ17号	"	「雨の海」に軟着陸後、月面探査自走車(ルノホート)による探査
1971年7月26日	アポロ15号	アメリカ	月面活動に「月面車」を使用

表-2 米ソの有人飛行の主要業績

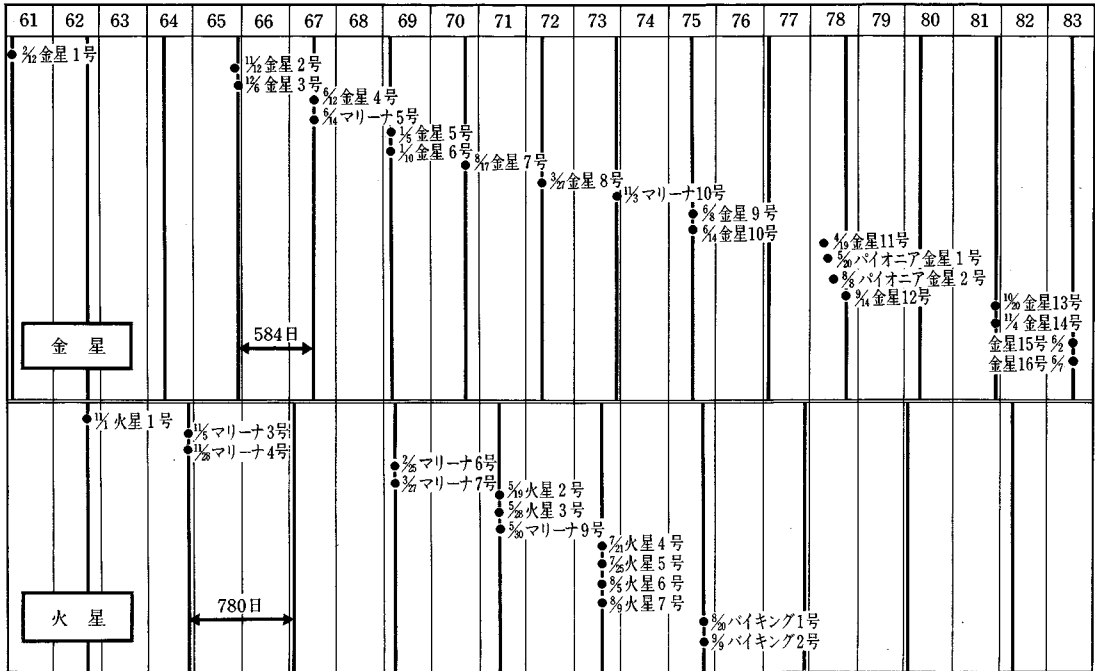
打ち上げ年月日	衛星名	国名	成 果
1961年4月12日	ウォストーク1号	ソ連	人類初の有人衛星、ガガーリン少佐搭乗、1周(1時間48分) (アメリカは同年5月5日、マーキュリー3号(フリーダム7号)により、シェパード中佐が弾道飛行(15分)を達成、1962年2月20日、マーキュリー6号(フレンドシップ7号)により、グレン中佐が初の周回飛行を達成)
1963年6月16日	ウォストーク6号	"	初の女性飛行士テレシコワが搭乗、48周(26時間2分) (アメリカは1983年6月18日チャレンジャー号で初の女性飛行士、サリー・ライド誕生)
1965年3月18日	ウォスホート2号	"	初の船外活動(10分)に成功 (アメリカは1966年6月3日、ジェミニ9号で達成)
1965年12月5日	ジェミニ7号	アメリカ	12月15日打ち上げたジェミニ6号とランデブーに成功 (ソ連は1968年10月26日、ソユーズ3号で達成)
1966年3月16日	ジェミニ8号	"	アジーナ・ロケットとのドッキングに成功 (ソ連は1969年1月14日/15日、ソユーズ4号/5号で達成)
1969年1月15日	ソユーズ5号	ソ連	ソユーズ4号に2名の搭乗員が移乗に成功 (アメリカは1973年5月25日、スカイラブ2号/1号で達成)
1970年6月1日	ソユーズ9号	"	初の軌道変更成功

れた探査機の実績を図-2に示す。また米ソの惑星探査の主要成果を表-3に示す。

金星への最初の飛行は「金星1号」で1961年5月に金星の近傍を通過したが電波不良で失敗に終わった。その後1966年3月に「金星3号」が金星に命中、1967年10月には「金星4号」による軟着陸に成功した。火星の資料を送ってきたのは1965年7月の「マリナー4号」

が最初である。

宇宙探査のもう1つの面として、上層大気、大気圏外空間の観測、大気圏外での天体観測等がある。この分野での最大の成果は、アメリカ初の人工衛星「エクスプローラ1号」によるバンアレン帯の発見であろう。



- 注) 1. ——— 線は最適打ち上げ時期を示す。
 2. 金星1号～16号, 火星1号～7号はソ連の探査機, マリナー3号～9号, バイオニア金星1, 2号およびバイキング1, 2号はアメリカの探査機。
 3. 金星11号およびバイオニア金星1号のみが少しずれている。

図—2 金星, 火星探査機の最適打ち上げ時期と実績

表—3 米ソの惑星探査の主要成果

	打ち上げ年月日	探査機名	国名	成 果
水 星	1973年11月3日	マリナー10号	アメリカ	金星の重力を利用して水星に接近 (ソ連は水星探査は行わず)
	1965年11月16日	金星3号	ソ連	金星表面に到達, ベナント打ち込み
金 星	1967年6月12日	金星4号	ソ連	金星に軟着陸, 大気, 気象等を測定 (金星16号まで続け大量のデータを集めた)
	1978年5月20日	バイオニア金星1号	アメリカ	金星周回軌道で上層大気, 磁気圏, 電離層, 重力等を観測 (同年, バイオニア金星2号も打ち上げ)
火 星	1964年11月28日	マリナー4号	アメリカ	火星から9790kmに接近, 写真撮影
	1969年2月25日	マリナー6号	ソ連	火星から3200kmを通過, 写真, 地上温度, 大気成分調査
	1969年2月27日	マリナー7号	ソ連	火星から3500kmを通過, 火星表面状態を生中継
	1971年5月19日	火星2号	ソ連	火星周回人工衛星となり, ベナントを火星に送った。
	1971年5月28日	火星3号	ソ連	12月2日初の軟着陸成功 (アメリカは1975年8月20日のバイキング1号で達成)
木 星 型 惑 星	1971年5月30日	マリナー9号	アメリカ	火星周回人工衛星となり火星表面の70%を写真撮影 (ソ連は1973年7月25日の火星5号で写真撮影達成)
	1972年3月3日	バイオニア10号	アメリカ	1973年12月3日本星から131500kmまで接近, その後1983年6月13日海王星軌道を通る
	1972年4月6日	バイオニア11号	ソ連	1974年12月2日本星に, 1979年9月2日土星に最接近
	1977年8月20日	ボイジャー2号	アメリカ	1979年7月9日本星に, 1981年8月25日土星に, 1986年1月24日天王星に, 1989年8月25日海王星に接近観測
	1977年9月5日	ボイジャー1号	ソ連	1979年3月5日本星に, 1980年11月12日土星に接近観測

3. 宇宙開発の意義

人類にとって宇宙は太古の時代から、夢とロマンの対象であった。宇宙は真理探求の対象として無限の広がりを持っており、その科学的探求は宇宙および生命の起源を解明し、人類文化の新しい時代を先導するものといえよう。1957年10月の「スプートニク1号」以来今日まで、三十有余年、世界の先進各国が競って宇宙開発に取り組んできたのは、宇宙開発に対して大きな意義を認めているからである。宇宙開発の意義は国により千差万別である。ここではわが国の一般認識としての意義を考える。

まず第1に、宇宙開発は経済、社会の発展に大きく寄与する。すでに、宇宙空間は通信衛星・放送衛星による電話中継やテレビ放送、また「ひまわり」等の気象衛星による天気予報の精度向上、あるいは観測衛星・探査衛星による各種観測および資源探査などによって、われわれの生活や文化の向上、経済の発展に貢献している。これらはすべて宇宙空間の中継地としての利用、もしくは宇宙での情報の利用、すなわち、宇宙空間の位置の利用である。しかし現在でも純商業ベースでの利用は通信衛星の分野に限られている。表—4に宇宙利用の形態別分類を示す。

第2は、人類の新しいフロンティアの開発である。すなわち、宇宙開発は、宇宙という人類の新しい活動領域の拡大を可能にし、微小重力、高真空というような宇宙の特殊な環境を利用して、地上では製造困難な新しい材料や医薬品等の製造、あるいは各種理工学実験の実施等、

宇宙空間の豊富なエネルギー、資源を人類が利用する道を開き、新しい「大航海時代」が始まるとさえいわれ、まさに無限の可能性を秘めている。宇宙環境利用の分類を表—5に示す。来るべき21世紀には人類は地球周辺の宇宙基地、有人宇宙プラットフォームから、月、惑星へとその活動領域を拡大していくことであろう。これが人類の宇宙開発に対する情熱の原動力の1つである。

第3は、国際協調への貢献である。宇宙開発は大規模プロジェクトとして進められることが多く、また人類共通の財産ともいべき国境のない広大な宇宙を対象としている点で、本質的に国際協力に適した性格をもち、今後ますます国際協力プロジェクトは増加するであろう。わが国が世界の経済大国の一員として認められるためには、自主技術を基盤として積極的に国際協力プロジェクトに参画し、応分の責任と貢献を果たさなければならない。

第4に、先端技術の典型ともいえる宇宙開発は、他分野の科学技術の発展に大きく寄与する。高信頼性、高性能の人工衛星や、これを打ち上げるロケットの開発・生産には高度な技術が必要であり、このような技術は他の技術開発や生産分野の発展の牽引力になるとともに、新しい先端技術産業を生み出すものとして、経済、社会の発展のための大きな原動力となるものと期待される。

世界各国はこのような宇宙開発、利用の意義に着目して、宇宙開発に積極的に取り組んでおり、世界の宇宙開発は国際間の相互依存関係を深めながら、開発途上国を含め地球的規模で大きく飛躍しつつある。

表—4 利用形態別の宇宙利用の分類

利用形態	利用の例	産業分野	
位置の利用	放送	教育	教育分野
		流通情報の提供	全産業分野
	通信	固定通信	
		移動体通信	
	宇宙での情報の利用	漁業情報の提供	水産業分野
		遭難防止	
		漁業資源	農林業分野
		土地利用	
		収穫予想	
		リモートセンシング(気象観測を含む)	森林の経営管理
地下資源探査			
宇宙観測	測地・地質調査	土木分野	
	宇宙科学	科学分野	
	材料実験	工業分野	
	薬品製造実験	医療分野	
宇宙環境の利用	太陽発電	エネルギー分野	

表一5 宇宙環境利用の分類

利用分野	内 容	意 義
天体観測	地球大気の影響のない宇宙空間の特性を利用し、電波、赤外線、可視光、X線、γ線等による天体観測および太陽活動モニタ、宇宙線観測等を実施。	観測波長域が広いこと等多種多様な天体観測を行えるので天文学、天体物理学および地球物理学の飛躍的發展が期待できる。
材料実験	宇宙環境（微小重力、高真空、豊富な太陽エネルギー等）を利用して、材料基礎科学実験、新材料製造実験、宇宙製造実用化実験等を実施。	宇宙環境下で各種の材料実験を系統的に行うことにより、材料基礎科学の振興、新材料製造技術の開発、宇宙製造実用化の促進に資する。
生命科学実験	宇宙環境（微小重力、宇宙放射線等）を利用して、生物学実験、宇宙医学実験、閉鎖生態系実験およびバイオテクノロジー実験を実施。	宇宙環境下で各種の生命科学実験を系統的に行うことにより、長期の有人宇宙滞在、地上では得られない生体試料の分離、精製、培養、生物学の振興等に資する。
宇宙エネルギー実験	宇宙空間で大電力を発生させ、それを利用した宇宙プラズマ実験、電気推進系実験、エネルギー伝送実験等を実施。	宇宙におけるエネルギー発生利用等に関する理工学的見通しを得ることができる。

(出所)：宇宙開発委員会宇宙基地特別部会「米国宇宙基地計画への参加に関する検討」(中間報告)

4. 宇宙開発の将来

(1) 宇宙基地の時代

宇宙基地の時代といわれる、1990年代末期から21世紀初頭にかけての、近未来の宇宙インフラストラクチャを図一3に示す。

この時期の宇宙インフラストラクチャは、基本的には、軌道上の人工衛星、宇宙基地、各種プラットフォーム等の宇宙活動システムと、これを支援する輸送システムおよび地上設備から構成される。

宇宙活動の主体は地球周回軌道で行われ、実用面から大きくは、①低傾角低軌道、②極軌道、③静止軌道、に分類することができる。

低傾角低軌道は、高度300~500kmで、有人、無人を含めて主に宇宙環境利用に供される。最も重点を置かれているのが、米、欧、日、加、が参画して国際協力のもとに開発が進められている、恒久的有人宇宙基地「フリーダム」の本体で、1999年に約460kmの軌道高度での運用開始が予定されている。

極軌道は、地球全表面の上空をカバーできる特徴を生かして、地球資源探査および地球環境の観測に使われる。高度は目的により変化するが、700~1000kmが多い。

地球環境の観測には、局地気象観測による高精度の気象予報、オゾンホール、地球温暖化等の原因といわれているフロン、メタン、炭酸ガス等の大気中の微量成分を観測する大気観測、海洋観測、植生観測、水圏観測等広範囲の応用が可能である。

静止軌道は、高度約36000kmで、地球の自転と同期して赤道を周回するので、地上との相対位置関係が不変のためこのようによばれ、通信衛星、放送衛星、気象観測衛星およびデータ中継衛星等宇宙での位置の利用として、広い用途をもっている。

地球周回軌道の衛星の軌道高度に対する速度および公転周期を図一4に示す。たとえば、今年2月7日に種子島宇宙センターから打ち上げられたわが国の海洋観測衛星(MOS-1b)の場合、高度約900kmの極軌道であるから軌道速度は7.5km/秒で、新幹線の百倍以上、ジャンボジェット機の巡航速度の約30倍の超高速で飛んでいることになる。したがって、宇宙活動システムは、輸送システムと同様に、有人/無人を問わず、構造を極度に軽量小型化した乗物の範疇に入るとみるべきであろう。

宇宙活動システムには地球周回軌道のほかに惑星間ミッションがあり、将来の人類の進出を目標に、各種の宇宙探査機が太陽系内の惑星に向かい、リモートセンシング、着陸探査のほかに、一部の惑星については、試料の持ち帰りも行われるであろう。

宇宙インフラストラクチャを支える地上設備には、射場設備、通信設備(ダウンレンジ局を含む地上局)、管制センター、利用者センター等があり、スペースシャトルのような再使用型有人宇宙輸送システム、有人宇宙基地等の場合には、着陸設備、宇宙飛行士訓練センター等が必要となる。この時期までは、土木技術が活躍できる範囲は、この地上施設、設備の分野に限られることとなる。

(2) 月面基地/火星開拓の時代

1964年、ソ連の天文学者カルダシェフ(Kardashev)は、惑星文明には3段階があると予測した。文明の第1段階ではエネルギー源をその惑星のみに求める。第2段階では、その惑星が属している恒星(太陽)系全体を利用するようになり、巨大な惑星を粉砕して資源にする。そして、第3段階では銀河系の隅々まで徹底的に利用し尽くすという説である。

1986年5月、アメリカ宇宙委員会報告「宇宙フロンティアの開拓」(ペインレポートとして有名)は21世紀のアメリカの宇宙活動の目標として、①われわれの惑星(地球)、太陽系、宇宙に関する理解の進展、②太陽系の探査、探鉱および定住、活動、③地球の人々に直接恩恵をもたらす宇宙産業の振興、の3つを勧告した。特に、

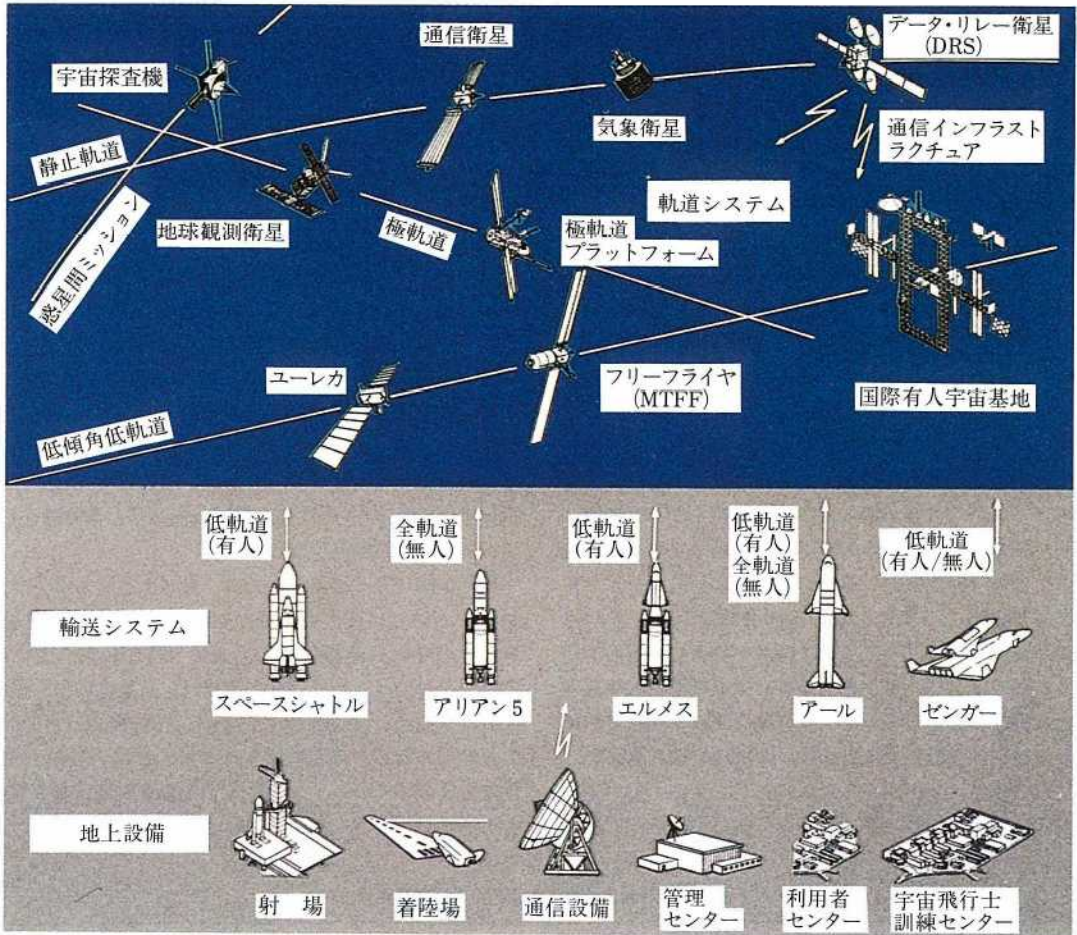


図-3 近未来の宇宙インフラストラクチャ

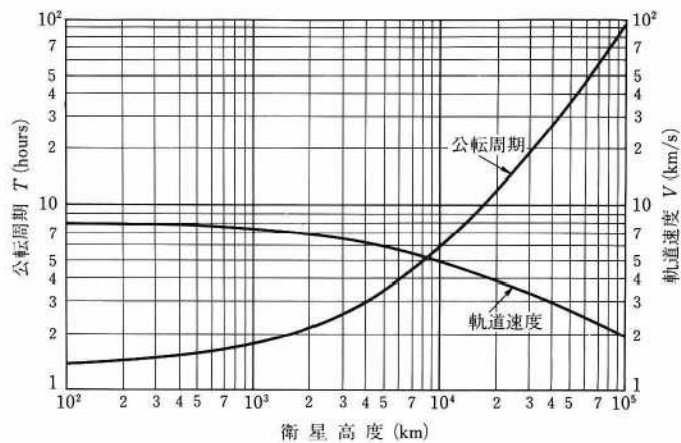


図-4 衛星高度と周期、速度の関係

宇宙フロンティアへの挑戦のため、探査、基礎研究と応用研究、資源開発および有人活動を内太陽系（小惑星帯までの、火星、地球、金星）で持続的、段階的な計画を進めることを強調した。この背景には、アポロ計画の反省がある。アポロ計画は持続的、段階的な計画ではなく、月に行く決断は政治的なものであり、主目的は、ソ連に追い越されたアメリカ科学技術の優位性を取り返し、世界の目を改めてアメリカに向けさせるための衝動に過ぎなかった。そのため有人月面探査は1972年12月の「アポロ17号」による6回目の月面着陸をもって打ち止めとなった。そこで、将来の計画はこの反省の上に立って、月面基地もそれ自身で完結するものではなく、内太陽系開発の1ステップと位置付けた。これを受けて、1988年春のアメリカ議会の聴聞会でも、国際協力による恒久的有人宇宙基地計画に続く、宇宙開発の次の目標に火星探査/月面基地計画が取り上げられ、レーガン大統領により承認されたアメリカの新国家宇宙政策では、基本目標の1つに「地球軌道以遠への人類の存在、活動」が新しく追加された。また、この具体的施策としてNASAに対し、いわゆる「パスファインダー計画」の着手が指示された。これは、月、火星の有人探査技術の開発計画を含む将来の宇宙ミッションを可能にする大規模で系統的な新技術開発計画で、目標は、①地球の徹底的研究、②月への帰還、③火星への先導的ミッション、④太陽系の無人ロボット探査の継続、等を可能にする革新的基礎

技術の開発である。

これは、人類のカルダシェフのいう惑星文明の第2段階への突入を意味し、具体化時には、わが国も国際協力の立場から、先進国の一員として応分の責任と分担とを呼びかけられることとなろう。

ではなぜ、当面の人類進出の目標が月および火星なのであろうか。表-6に月および太陽系惑星の主要な特性、環境を示す。

月については、最も近距離にある地球の衛星であり、他の惑星へ進出するための中継基地として容易にうなずけよう。月面に存在する主要元素を表-7に示す。

月面基地建設にあたっては、初期段階は別として、月にあるものは徹底的に利用（現地調達）して、月に存在しない、水素（H）、窒素（N）、炭素（C）等のみを地球から補給する方法が取られよう。このようにして、21世紀中頃には30人程度の人間が月面基地に常時滞在し、月での食糧の自給も可能となろう。

地球の隣にある惑星としては、金星と火星があるが、金星については表面大気圧が90バール、表面温度935Kと、いずれも非常に高く、人類の移住に適しているとはいえない。これに対して火星は、月面と同様、表面大気は少なく、表面温度（250K）、自転周期（1.026）とも地球に近く、月面基地の延長としての、人間の大量移住には適している。したがって人類が火星表面で生活する足がかりを築くため、前哨基地の建設が始まること

表-6 月および太陽系惑星の主要環境条件

	軌道長半径 a (天文単位)	離心率 e	対恒星 平均周期 P (太陽年)	太陽より受 ける輻射量 (地球=1)	赤道 重力 (地球=1)	脱出 速度 (km/s)	自転 周期 (日)	表面大 気圧 (bar)	有効温度 (K)	大気主要成分 (体積% また はモル比)	
月	—	—	—	1.00	0.17	2.38	27.322	—	400(昼) 100~80(夜)	—	
地球 型 惑 星	水 星	0.3871	0.2056	0.2409	6.67	0.38	4.25	58.65	—	不明	
	金 星	0.7233	0.0068	0.6152	1.91	0.91	10.36	243.01	90	240(雲上) 735(表面)	CO ₂ :96% N ₂ :3.4%
	地 球	1.0000	0.0167	1.0000	1.00	1.00	11.18	0.9973	1	295(太陽 直下)	N ₂ :78% O ₂ :21%
	火 星	1.5237	0.0934	1.8809	0.43	0.38	5.02	1.0260	0.006	250	CO ₂ :95% N ₂ :2.7% Ar:1.6%
木 星 型 惑 星	木 星	5.2026	0.0485	11.862	0.037	2.37	59.57	0.414	75±15*	124	H ₂ :0.89 He:0.11
	土 星	9.5549	0.0555	29.485	0.011	0.95	35.56	0.444	75±20*	94	H ₂ :0.96 He:0.04
	天王星	19.2184	0.0463	84.022	0.0027	0.89	21.33	0.649	225±75*	<59	H ₂ :0.85 He:0.15
	海王星	30.1104	0.0090	164.774	0.0011	1.19	23.77	0.768	225±75*	55	H ₂ :1.00
	冥王星	39.5399	0.2490	248.534	0.0006	0.06?	1.15?	6.387	**	**	**

注) 1. 理科年表63年度版および航空宇宙工学便覧による。

2. * 大気量 (kg·atm): 水素量, 1気圧, 0°Cにおける厚さ(km)。

3. ** 冥王星には大気があるとみられているが確認されていない。

表一 月面に存在する元素

元素名	原子数存在比率	備考
O	61.0%	
Si	16.3%	
Al	9.5%	AlはTerrae*の方がMaria**より多い
Ca+K	6.0%	
Mg	4.3%	
Fe	2.3%	FeはMariaにはTerraeの3倍存在する
Na	0.4%	
Ti	0.3%	Terraeにはほとんどない

注) 1. NASA Technical Memorandum 82478 による。
 2. *クレータの多い凸凹した高地。
 3. **比較的平坦な暗い地域(ガリレオがMariaとよんだ)。

となろう。

このほかに、火星と木星との軌道の間には多数の小惑星がある。1987年までに軌道が確認でき、登録番号が与えられたものは3630個、このほか軌道未確定のものは数千個といわれる。ごく少数の大型のもの(ケレス：直径1000km、パラス：直径608km、ベスタ：直径538km等)もあるが、一般には、はるかに小さく、人類の移住先としてではなく、粉碎して必要資源として利用されるであろう。

また、人類の移住先は月、惑星の表面のみでなく、宇宙空間に大型宇宙コロニーを建設する構想もある。

図一5は地球と月との間で重力が均衡する点(これをラグランジュ点といい、 $L_1 \sim L_5$ の5か所ある)を示す。このうち L_4, L_5 は安定で第3の天体が存在する可能性が高い。実際に L_4 点には「第2の月」(ゴーストムーン)とよばれるもやもやしたチリの集団が発見されている。

宇宙空間のコロニーの建設場所としては地球との相対運動の安定性からラグランジュ点 L_4, L_5 が有望と考えられ、建設資材は月資源の利用が、輸送の面からも経済的である。

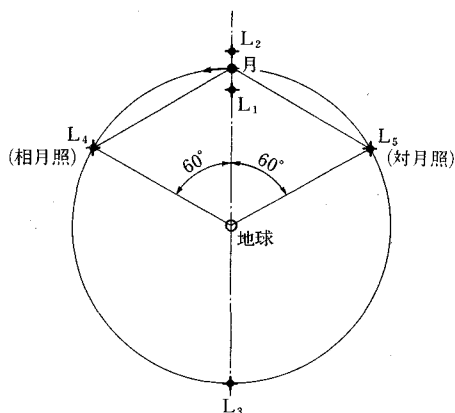
地球からの各種雑音を避けるため、月の向こう側にいるラグランジュ点 L_2 に電波天文台を建設する構想もある。

この時代になると、月面、火星等で人類が生活する場を提供する手段として土木技術、土木工学が大いに活躍することとなろう。

(3) 太陽系外への進出

天文観測を別とすれば、人類が太陽系外の探査に関して、最初の成果を上げるのは、早くても22世紀以降であろう。今後10000年頃までの人類の宇宙への進出を、少々大胆かもしれないが、図一6に推定してみた。また、太陽系からの距離が近い恒星のうち、絶対等級が8等より大きいものを表一8にまとめて示した。

太陽系外への進出に際しては、まず、他の天体の生物、



図一5 地球一月重力均衡点(ラグランジュ点)

文明との協調、友好を念頭に置く必要がある。

太陽系内では、地球以外に生命は存在しないと断定するにはデータが不足だが、人類程度の文明をもった生物がいないことは確かである。それでは地球は文明をもった生物が存在する唯一の星であろうか。1960年、コーネル大学のドレークは、銀河系の中に進歩した文明をもつ星が何個あるかを推定する計算式を提案した。この式に基づき多くの人が推定を行ったが、その幅は極端に広く、0~百億個とばらついた。最も楽観的な解では、10%の星に生命が存在する可能性がある。

実際に、地球外文明を探索する実験が行われている。高度に発達した地球外文明は、観測されやすい方法で、観測されやすい信号を意図的に送ってくる、という仮説を立てれば、地球外生命そのものを検出するよりは、その文明の技術的活動を探索する方が、はるかに容易と考えられる。1960年にドレークはアメリカ、グリーンバンク国立電波天文台の口径25mのパラボラアンテナを使って、地球から10.8光年の距離にある「エリダヌス座ε星」と11.8光年の「くじら座α星」に向けて3か月間受信を試みた。これらの星が選ばれたのは、どちらも太陽に良く似た星だから、地球に似た惑星を伴っているのではないかと期待したためであった。いわゆる「オズマ計画」であるが失敗に終わった。その後、現在まで、主として電波望遠鏡により500以上の星について調査が行われたが、残念ながらいまだ地球外知性の検出に至っていない。地球軌道上、月の裏側等条件の良い、大型天文台での今後の研究に期待したい。

次に、画期的な推進システムの開発が必要となる。光速の1/10の速度30000km/秒(現在の低軌道衛星の4000倍)が得られたとしても、太陽系に最も近い恒星、ケンタウルス座α星に到達するのに40年以上を必要とする。有人探査となれば、冷凍-解凍、による確実な長

発電所（電力供給システム）としては、夜が15日間も続くため、太陽エネルギーの利用は、エネルギー貯蔵システムが莫大な規模となり、当面はあまり実現性がない。このため原子力発電により月面基地に必要な電力の大部分を供給することとなる。初期は核分裂を利用した形式で進まざるを得ないが、有難いことに、月表面には、太陽風成分であるヘリウム3 (^3He) という核融合燃料が地球を1000年以上養うほど埋蔵されている。したがって、ある時期からはこれを利用し、放射性物質を使わず、しかも発電効率の高い、重水素-ヘリウム3反応炉が実現しよう。将来的には、月の長い夜の電力需要を満たす手段の1つとして、燃料電池や超電導コイルを利用したエネルギー貯蔵基地の建設も考えられる。昼間、太陽電池や太陽熱発電で発生した電力を燃料電池に蓄え、夜間、これを利用するシステムがまずできよう。また、高緯度の月面クレーター内部は、太陽光線が届かないため、低温になっており、超電導コイルを設置すれば、電力の効率的貯蔵が可能であろう。

月面工場での生産は、①月面での人間の快適な生活を支える物質の製造、すなわち、食糧としての動、植物の養殖・栽培、ガス処理、水処理、固形物処理を含んだ、閉鎖生態系の構築、拡張、②宇宙輸送システムに対する補給用推進薬（燃料、酸化剤）の製造、③地球へ回収する物質の月面での製造、の3つに分類できよう。月面工場においては、ロボットを使用して月面の掘削、運土等

を安全かつ効率的に行うとともに、酸素、ヘリウム3 (^3He)、鉄、アルミニウム、マグネシウム、チタン等の精錬が行われよう。月面工場は高真空、高温度差、地球の1/6の重力等の環境に対応したものにする必要がある。地球周辺の軌道に建設される宇宙工場が微小重力、高真空、宇宙放射線等の宇宙の特殊環境を利用して、経済的に採算の取れる特殊高性能（価値）物質を製造するのに対し、月面工場は、月から採掘される資源を利用して生産可能な物質を供給する。

宇宙港システムは、地球⇄月間の定期便や、火星を始めとする惑星や深宇宙へ飛び立つ宇宙探査機／宇宙輸送機に対して、推進薬補給サービス等を行うために月面に建設される。推進薬の効率的な使用のため、月周回軌道の上に建設されることもあろう。

宇宙観測システムとしては、地球からの、電波雑音を避けるため月の裏側に月面電波天文台が建設されよう。

また、この頃には、月周回低軌道に、人工重力を備えた宇宙ホテルが建設され、観光の目的に利用され、月面の各地を月面移動車を利用して旅行する月面観光が実現するであろう。

2050年に元気で生きていると自信のある若い人が、どの程度、職業としての月面基地の建設への参画、または、余暇を利用した月観光旅行に熱意を燃やすであろうか。想像するだけでも楽しくなる。

(1990.2.15・受付)