



宇宙構造物の建設

松本 信二

現在、国際宇宙ステーションが建設中であるが、今後もこのような大型宇宙構造物の建設が期待されている。大型宇宙構造物を建設する方法としては、組立て方式、展開方式（折畳み構造）、インフレーター方式（膨脹方式）の3つがあり、各々、研究が進められている。いずれにしても、宇宙における建設では、作業環境が悪いので、宇宙ロボットがおおいに活躍する。月面基地の建設に関しても、各種の構法が提案されているが、いかにして建設コストを小さくできるかが大きな課題である。

キーワード：大型宇宙構造物、国際宇宙ステーション、宇宙発電衛星、宇宙ホテル、宇宙ロボット、月面基地

1. はじめに

現在、国際宇宙ステーション（ISS：International Space Station）が建設中であり、2006年には完成の予定である。この宇宙構造物は、全長110mの巨大なものであり、多くの部材で構成されている。このような大規模な宇宙構造物になると、これまでの人工衛星のように単にロケットで打上げればよいというわけではなく、宇宙における「建設」が必要となる。

今後、このような大型宇宙構造物の建設が本格的に展開する可能性があり、宇宙における建設技術についても、着実に研究を進めておく必要がある。そのような観点から、本報文では、今後建設が期待されている大型宇宙構造物を紹介し、その建設方法について述べる。

2. 大型宇宙構造物

（1）国際宇宙ステーション（ISS）

現在建設中の国際宇宙ステーション（ISS）は、

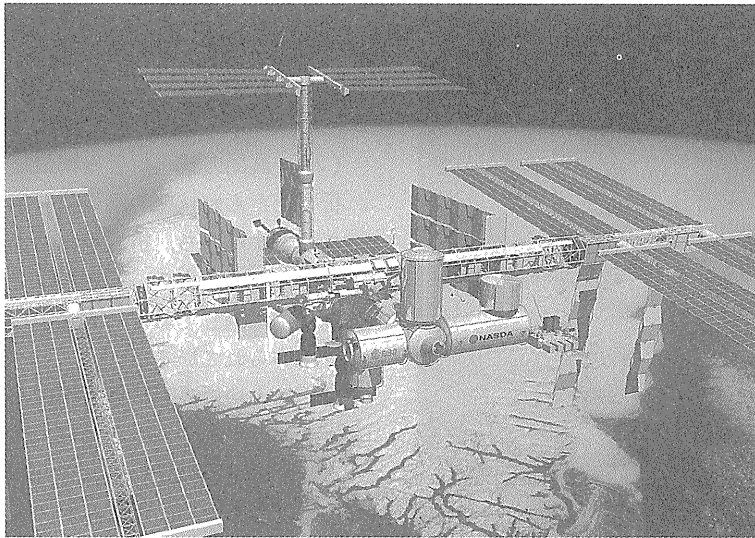
図-1に示すような形状をしている。全長110m、重量415tであり、中心部に円筒形のモジュールが9個つけられている。これらのモジュールは居住や実験のための施設であり、そのうちの一つを日本が設計・製作を担当している。

この宇宙ステーションが完成すると、いろいろな実験を、長時間系統的に実施することができる。5~6人の宇宙飛行士が居住することができ、日本人宇宙飛行士も常時宇宙に滞在することになるであろう。

この宇宙ステーションの建設方法は、地上で製作した約50個のユニットをスペース・シャトルで宇宙に運び、宇宙で順次接合していくという方法である。

（2）宇宙発電衛星

地球温暖化防止、酸性雨削減等に寄与するために、二酸化炭素（CO₂）の排出量の少ない発電方法として宇宙太陽発電が期待されている。この方式は、宇宙の巨大人工衛星上で発電し、マイクロウェーブやレーザーで地上に送電するというものである。



図一 国際宇宙ステーション (ISS) (NASA)

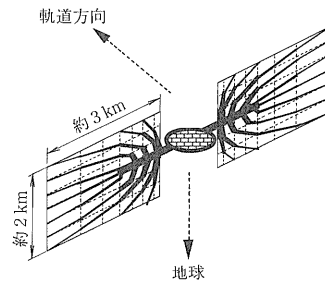
太陽エネルギーの活用は地上でも行われているが、宇宙は真空であり天候の影響がないので、非常に発電効率が低い。しかも、昼夜に関係なく発電できるという利点もある。このようなことから、宇宙で得られるエネルギー量は地上の約10倍にもなる。

この宇宙発電システムは、30年以上前にアメリカのピーター・グレイザー博士が提唱したものであるが、当時の技術レベルでは、発電コストがかかり過ぎるということで、実用化を断念していた。

しかし、近年、地球環境問題が大きく取上げられようになり、この宇宙発電が見直されるようになった。コストの問題はあるにしても、二酸化炭素の排出量は非常に少なく、原子力発電における放射能のような問題もない。しかも、宇宙輸送技術、太陽発電技術、無線電送技術が急速に進歩しつつあるので、コストの低下も大いに期待することができる。

数年前に通商産業省の検討委員会で提案した1GW級の宇宙発電衛星は、図一2に示すような形状をしている。これでも、宇宙構造物としては非常に大きなものであるが、約35年前にNASAで提案していたものは、5km×10kmというさらに大きなものであった。

上記の宇宙発電衛星は太陽光を利用して発電するものであるが、太陽熱を利用するシステムも提



図一2 宇宙発電衛星 (通商産業省 1995年)

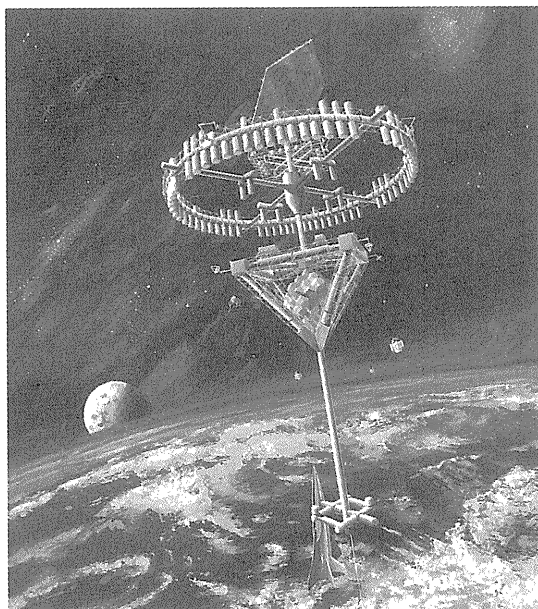
案されている。

(3) 宇宙ホテル

多くの人々にとって、宇宙に行きたいという根強い夢があり、宇宙観光が実現するのもそれほど遠い未来の話ではない。初めは、宇宙船に乗って地球を何回か回ってくるという単純な宇宙観光であろうが、そのうちに、どうしても宇宙にもう少し長く滞在したいということになり、宇宙に観光用の施設が必要となる。

1日か2日寝泊まりするだけならば比較的簡単な施設でいいが、それもだんだん飽き足らなくなることは確実であり、いずれ、宇宙ホテルが建設されることになる。そのような宇宙ホテルの例を図一3に示す。

このホテルの客室は円形上に配列されており、全体が1分間に3回回転することによって人工重



図一三 宇宙ホテル（清水建設）

力を発生させている。宇宙に行くと宇宙酔いになる人が多いので、少なくとも客室内では地上と同じように歩行や睡眠ができるように配慮されている。

構造物の大きさは全長 240 m であり、円形に配列されている客室部分は直径 140 m である。客室の他に無重力の空間も必要であり、発電施設や熱を放射するためのラジエータも設けなければならない。

3. 宇宙構造物の建設方法

上に紹介したような大型宇宙構造物を建設する主要な方法として、以下の 3 つがある。

(1) 組立て方式

地上からばらばらの部材を宇宙へ運搬し、宇宙で組立てていく方式である。前述の国際宇宙ステーションはこの方式によって建設されている。この場合、小さい部材で構成すれば、輸送時の容積を小さくすることができるが、宇宙における接合の手間がかかることになる。

現在建設中の国際宇宙ステーションの場合、宇宙における接合作業はほとんど自動化されておらず、宇宙飛行士の手作業が中心になっている。そ

のために、ユニットの大きさをスペース・シャトルで運べる範囲でできるだけ大きくし、接合作業を少なくしている。

(2) 展開方式（折畳み構造）

折りたたんだ状態の構造物を宇宙で広げる方式である。すなわち、折畳み傘のようなシステムだということができる。大規模なアンテナや反射版の構造物に適しており、太陽電池パネルなどにはよく用いられている。

宇宙輸送機の断面は通常円形になっており、大きさも限定される。たとえば、スペース・シャトルを用いるとすると、荷姿の直径を 4~5m にしなければならない。ところが、宇宙で用いるアンテナや太陽電池パネルは薄くていいが、大きさは数十 m にもなる。したがって、このような折畳み構造が適しているのである。

(3) インフレータブル方式（膨脹方式）

やわらかい布状の材料でできた袋で構成する構造物である。しばめた状態で宇宙に運び、宇宙でその中に気体を注入し、膨らませる方式である。膨らませた状態で硬化させて構造体にするのが一般的である。

この方式はまだ実際に使われたことはないが、研究は進められており、直径 14 m のアンテナを宇宙で実験的に建設したことはある。月面基地の構造には有効であると考えられており、NASA でも月面構造物の一つの案として以前に提案している。

いずれにしても、上記のような大型宇宙構造物を建設するためには、宇宙建設ロボットがどうしても必要になりそうである。宇宙ロボットの例としては、スペース・シャトルに取付けられているマニピュレータがよく知られている。

清水建設のグループでは、宇宙構造トラス上を歩行するロボットを提案している。このロボットに関しては、アメリカのカーネギー・メロン大学との共同研究によって各種の実験を行った。実験の様態を図一四に示す。

また、宇宙でトラス構造物を建設するための基礎実験としては、1998 年から 1999 年にかけて実施された技術試験衛星 7 型における構造物組立て

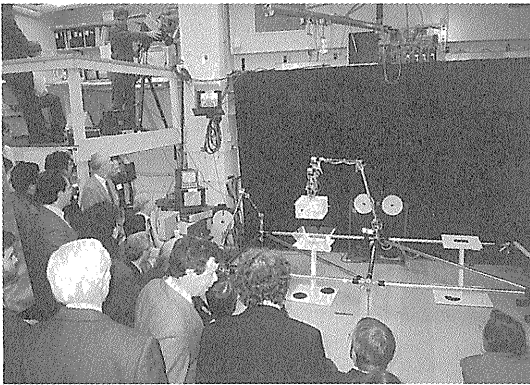


図-4 トラス歩行ロボット (清水建設)

実験がある。この実験では、図-5に示すような人工衛星上の実験装置を地上から操作して、トラスの組立てに関する基礎技術を習得した。

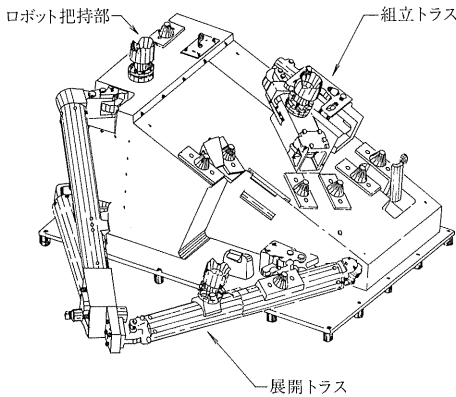


図-5 技術試験衛星7型による構造物組立て実験装置 (航空宇宙技術研究所/清水建設)

4. 月面基地の建設

(1) 月面基地の建設目的と建設シナリオ

月を探索する目的としては以下のようなことが

考えられている。

- ① 月の科学 (月の構造, 地質, 環境等)
- ② 月面天文台の建設
- ③ 月の資源の利用
- ④ 有人宇宙活動を拡張するためのテストベッド

1990年代前半に、アメリカでは月探査について真剣に検討されたが、科学観測のみの目的では、大規模な資金を投入するための合意が得られそうもないということから、③と④の目的を中心にするという考え方が一般的であった。すなわち、資源利用を中心に考えながら、将来の宇宙活動に備えるという考え方である。

清水建設とマグドネル・ダグラス社 (現在はボーイング社) で行った月面基地に関する共同研究でも、このような考え方に基づいて段階的に拡張する月面基地建設シナリオを作成した (表-1参照)。ただし、このシナリオで対象としている資源は、酸素、水素、ヘリウム3のみである。

このシナリオでは、6つの段階を設定し、順次拡張していくように計画されている。ここに記述されている年次はあくまで参考年次であるが、このような形で拡張させるのがもっとも現実的であろう。フェーズ1は無人数であり、フェーズ1からフェーズ6に進むにつれて、月に滞在するクルーの数が増加している。

フェーズ1の目的は、フェーズ2以降の有人月面活動を可能にするための基本施設を準備することであるが、特にエネルギー施設が重要である。

フェーズ2では最小限の居住を可能にし、まず4人のクルーが45日間月面上に滞在する。そして、酸素やヘリウム3のパイロットプラントも建設する。

表-1 月面基地の建設シナリオ (清水建設, マクドネル・ダグラス)

	フェーズおよび第一次打上げ年					
	1 (2005)	2 (2010)	3 (2015)	4 (2020)	5 (2050)	6 (2050)
クルー数	0	4	5	8	10	15
滞在日数	—	45日	90日	180日	1年	恒久化
電力	<1kW	10kW-昼 9kW-夜	20kW-昼 15kW-夜	60kW-昼 45kW-夜	100kW-昼 60kW-夜	140kW-昼 90kW-夜
居住モジュール数	—	1	1	1	2	2
実験モジュール数	—	0	0	2	4	4
酸素製造	小型無人実験	パイロットプラント (1kg/14日)	実験炉プラント (10kg/14日)	1t/年	10t/年	1E5t/年
ヘリウム3製造	—	パイロットプラント (数mg/14日)	実験炉プラント (10mg/14日)	1g/年	10g/年	100g/年

フェーズ3になると、居住クルーの人数も少し増やし、酸素やヘリウム3の実用プラントを建設する。

更に、フェーズが進むと、クルーの人数や滞在期間も徐々に増え、各種の実験や観測も活発に行われるようになる。

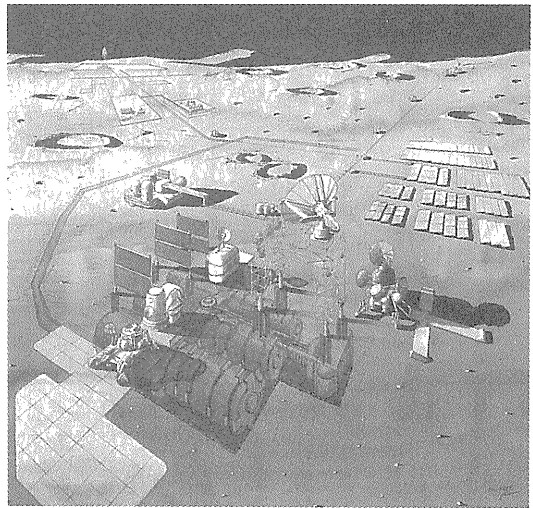
活動が活発化するにしたがってエネルギーの消費量も増加するので、発電量も増やさなければならない。このシナリオでは、発電はすべて太陽電池となっているが、コストを考えると原子力発電の方が有利である。太陽電池の場合、昼間での発電のみとなり、蓄電施設が大きくなるという問題がある。

(2) 月面基地の建築構法

月面基地には多くの施設が必要となるが、居住部分の建築構法としてどのようなものが考えられているかを紹介する。

① アルミ合金製モジュール構法

技術的に最も簡単なのは、宇宙ステーションで使用するのと同様の円筒形モジュール（直径約4m、長さ8～12m）を地球から運び、月面上に設置し連結する方法であろう。しかし、基礎をどのようにするかという問題があり、連結作業も宇宙ステーションの場合よりも難しいかもしれない。隕石の衝突や放射線を防御するために、構造物の上にレゴリスを被覆させる必要があるが、その作業も意外に困難である。アルミ合金製モジュール構法の例を図—6に示す。



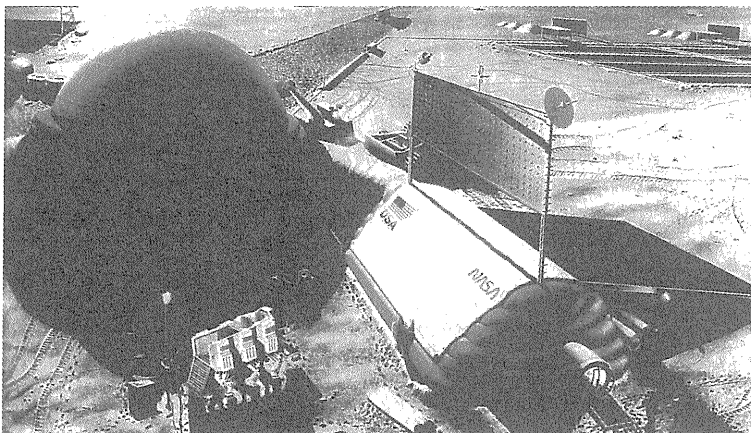
図—6 アルミ合金製モジュール構法の例（清水建設）

② インフレータブル構法

NASAでは、建設コストを下げる目的で、インフレータブル構法を提案している。

柔軟性のある膜材料でできた袋状の構造材を月面上に持っていき、気体を封入して膨らませる。その後、その構造体を硬化させたり、内部から補強したりして、使用する。形状としては、球状または円筒形となる。インフレータブル構法の例を図—7に示す。

インフレータブル構法を採用した場合、膜材だけで内圧に対抗するのは困難であり、どのようにして補強するかが問題となる。単に補強するだけでなく、膜材を膨らませた後で室内に床、壁、家具等を設置しなければならず、単純には施工で



図—7 インフレータブル構法の例（NASA）

きない。

③ コンクリート製モジュール構法

月面上でセメントや水を製造し、プレキャストコンクリート製のモジュールをつかって、現地に運搬し、設置・接続を行う。月面上の岩石や砂には、セメントの主成分である酸化アルミニウム (Al_2O_3)、二酸化珪素 (SiO_2)、石灰 (CaO) 等が豊富に含まれているので、これらを抽出することによってセメントを作ることができる。コンクリートの骨材としては、月面上の岩石を若干加工すればよい。水は月にはないので、地球から運搬した水素を用いて、月で生産する。

筆者等が提案しているコンクリート製モジュール構法は、六角柱のモジュールを用いている。一辺の長さが約 3.6 m、高さは 5.6 m である。モジュール同士を連結させることによって各種の居住施設をつくることができる。この構法を用いた大型の月面基地のイメージを図-8 に示す。

月面基地の建築構法選択に当たっては、建設コストが特に重要であるが、建設コストは建設規模に大きく左右される。したがって、建設シナリオが大きな意味をもつということになる。

5. おわりに

大型宇宙構造物の建設方法に関して、現在進められている研究の概要を紹介したが、さらに多く

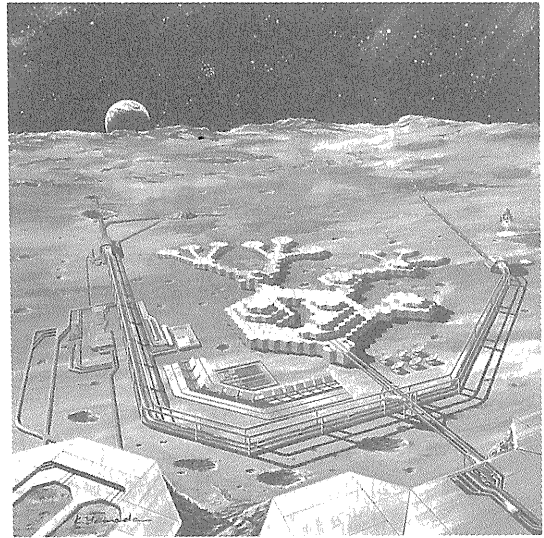


図-8 コンクリート製モジュール構法の例 (清水建設)

の新しい発想が必要だと考えている。いろいろな分野の研究者、技術者から独創的な提案が出てくることを期待したい。

J C M A

【筆者紹介】

松本 信二 (まつもと しんじ)
シー・エス・ビー・ジャパン株式会社
社長
元清水建設株式会社
宇宙開発室長

