

宇宙への取組み

吉田 哲二

清水建設が1980年代から取組んできた宇宙開発について、その流れを中心に報告する。バブル経済の真っ盛りの時期に始まり、現在もその活動を続け、海外との連携も進めている。ゼネコン的なアプローチで、「宇宙ホテル」や「コンクリート製月面基地」などの大型宇宙構想を開発提案してきた。一方、技術の研究開発基盤の構築を併せて行い、時代の激しい変遷の中で先を見据えた地道な活動も進めた。その代表はロボットである。建設ロボットから始め、極限環境、宇宙環境まで、技術に直接触れ、肌で感じ取る活動を今も続けている。宇宙旅行が現実のものとなる現代であるが、技術者のワクワク、ドキドキがなくては研究開発は続けられない。

キーワード：宇宙開発、月面基地、宇宙ホテル、ロボット

1. はじめに

初めてお会いする方々から必ず聞かれる一言がある。「宇宙とか、ロボットとか夢があっていいですね。ところで何をなさっているのですか」

最初の一言は宇宙という言葉から想像される遠い将来とか、遠い天体とか、なんとなく毎日アクセク働かず、しかもSF的なイメージに染まって、そのうち何とかなるような余韻があって嫌いではない。ところが、次に続く第二の一言が問題である。

「何も役に立つことをしないで、遊んでいるのではないのですか」と言った風に聞こえるし、好意的に理解すれば「宇宙といってもロケットですか。それとも、国際宇宙ステーション（ISS=International Space Station）の建設ですか」という現在進行形のテーマをさしているようにも聞こえる。

筆者は常に後者よりさらに超楽観的に受けて「現在存在する人工衛星やロケットではなく、ゼネコンですから地球人が宇宙で生活する空間を作ろうとしています」と答えることにしている。この後に続く長い説明を紹介する機会を本誌からいただいた。

21世紀を見通す視点で楽観的に読んでいただけると幸いである。

2. 宇宙開発特別プロジェクト

清水建設株式会社（以下、当社）の宇宙開発の正式

な発足は1987年の「宇宙開発特別プロジェクト」の設置から始まる。その前の年、1986年にはソ連のチェルノブイリで原子力発電所の炉心が溶融するという大惨事が起こり、翌1987年のわが国では、国鉄がJRに衣替えした年でもある。バブル経済の真っ盛りの頃である。

当時、「宇宙開発を始める」と言ってもすぐに手をつけられるテーマがあったわけではない。社内では、「なぜそんなことをやる必要があるのか」という声は小さくなかった。宇宙開発はサイエンスの分野であり、土木建築とはかけ離れている、という感覚である。これは、今でも根強く健在である。

「始める」ための理屈をいろいろと考えた。21世紀には必ず人類による宇宙へ進出が進み、地上のロケット射場や衛星の製造工場などハイテクインフラストラクチャ建設の波が怒涛のごとくやってくると説明したこともある。もっとも的を射た説明は、将来の宇宙開発では土木建築的な要素は決して無視できない存在であり、その時になってすぐ用意しろと言われても簡単にできるものではない。今から始めておくべきだ、というものである。

我々は、21世紀の初頭（現在）を目指して出発したのである。

当時の世界の宇宙開発は多くの失敗や事故を起こしていたが全体的に上り調子であり、多くの難関は将来への貴重な経験だと理解されていた。1986年1月の米国スペースシャトル「チャレンジャー号」の打上げ直後の爆発事故はその典型である（図—1）。

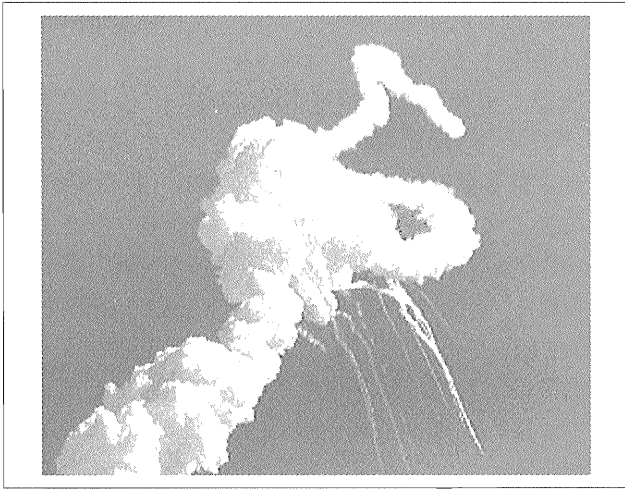


図-1 チャレンジャー爆発事故 (NASA)

フロリダのケネディー宇宙センターですべての準備が整った姿を打上げ2週間前にフロリダで見てきた筆者にとって、このニュースは人類の宇宙への挑戦はまだ始まったばかり、という事実を思い知らされるものであった。ロシアの宇宙ステーション「ミール」はチャレンジャー事故の翌月に打上げられ見事に成功し、その後も順調に拡張が進められた。米ソの宇宙競争の激しさは増すばかりであった。

3. 宇宙ホテル構想

当社の宇宙開発を代表する構想「宇宙ホテル」を1989年に発表した。宇宙を知らないエンジニアの勉強のためのモデルであった。人工衛星では小さくてゼネコンらしくない。スペースコロニーでは夢物語になってしまう。当時、検討が始められていた宇宙ステーションに関連付けてこの構想を研究材料とした(図-2)。

その3年前(1986年)から、国内の宇宙ロボット研究者を広く集めて行われた「宇宙ロボットフォーラム(略称)」(財団法人宇宙環境利用推進センター)が進められていた。宇宙工場(地球低軌道)に向けて有人宇宙技術を持たないわが国が将来の宇宙利用のために、ロボット技術を盛込んだ宇宙工場を研究しようとするものである。

宇宙ホテルはこの研究の経験を生かし、ゼネコンとして提案できる軌道上施設は何かと考え、地上でも多くの経験があるホテルとなった。資金の面では神社仏閣の方が近道かもしれないとも考えたが、より多くの人に提供したいということからホテルになった。

宇宙ホテルの来訪者を普通の一般人と想定し飛行機で海外旅行する感覚で宇宙へ訪れるものとし、宇宙飛行士のような訓練は考えなかった。したがって軌道上

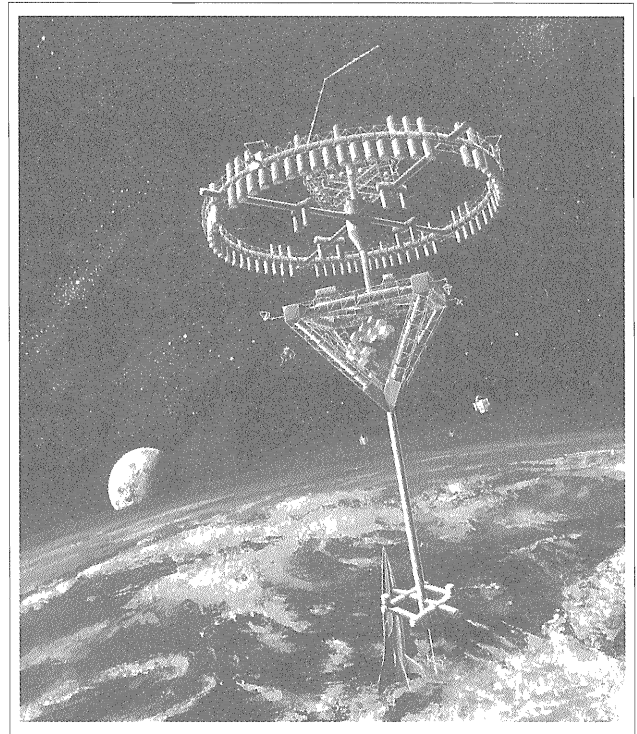


図-2 宇宙ホテル構想

でも重力が不可欠と考え、大きなリング構造に客室モジュールを取付け、それを回転させて人工重力を得るようにした。これは我々が最初に考えたものではないが、宇宙ホテルの発表後、欧米の宇宙関係機関からの提案が類似したリング構造になっているのは我々の構想が波及した痕跡が認められるようだ。

宇宙ホテルをわかりやすく説明するためにアニメーションまで制作し、その詳細を宇宙旅行ストーリーに沿って説明するようにした。その中には現在研究が進んでいる二足歩行ロボットやRFID(Radio Frequency Identification)も予見している。また、大型の平坦なスクリーンモニタで船外画像中継をするなど、フラットテレビも実現されると考えた。しかし、宇宙への往復に使う飛行機型の往還機や、数人で船外活動するための宇宙スクーター(小型宇宙飛行船)はまだ実現されていない。宇宙ホテルの実現時期が2020年頃としたので、まだ希望は捨てていない¹⁾。

現在、国際宇宙ステーション(ISS)への旅行には22億円程度はかかるが、一般人が旅行することが可能となった。2001年に60歳の米実業家デニス・チト氏が初めてISSに訪れ、その後2002年に南アメリカのITベンチャーのマーク・シャトルワース氏と続いている。最近、日本人のIT関係者が旅行することを計画していると報道されている。この宇宙旅行を企画している米国企業は、高価であるが月の周回旅行も提供する意気込みである。また、ラスベガスの億万長者

であるビゲロー氏はNASAから膨張式の宇宙船モジュール技術を譲り受け、独自に宇宙ホテルを建設する準備を進めている。すでにエンジニアリングモデル(EM)という軌道上に運ぶものと技術的に同一のものまで開発が進んでいるようだ。

また、地球には近いが、高度100kmを超す高さまで安全に往復する機器を使って、短い時間ではあるが、宇宙から地球を眺めることができる事業も走り出そうとしている。米国の賞金をかけた宇宙コンテストであるエクスペライズで見事賞金を獲得したスペースシップワン(SpaceShipOne)は飛行機のように滑走路から飛び立ち、高度100kmの上空まで小型ロケットで飛行するものである(図-3)。

降下では、飛行機と同じ要領で地上に戻り滑走路に着陸する。これを2週間の間に2回繰返すことに成功し、賞金1,000万ドル(約12億円)を獲得した。スペースシップワンのロケットエンジンはハイブリッドエンジンと呼ばれ、大型ロケットとは異なり燃料はプラスチックである。それに酸素を吹付けて推進力を得るもので、圧力容器がないことから日本でも大学など

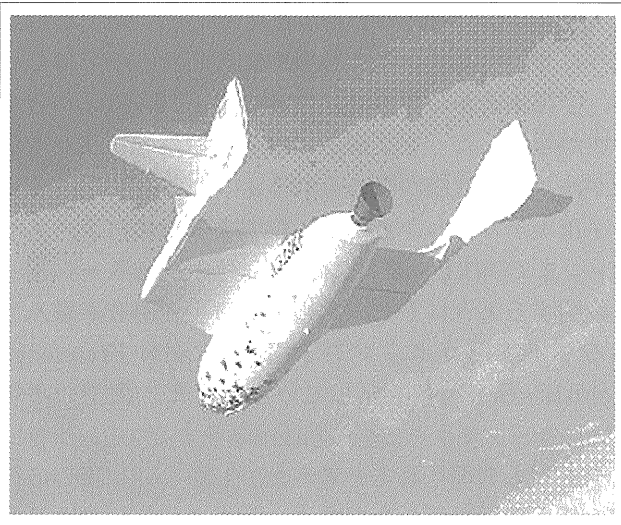


図-3 SpaceShipOne (Scaled Composites Inc.)

で研究が進んでおり、誰でも宇宙まで物を送り出すことが可能な時代になりつつある。

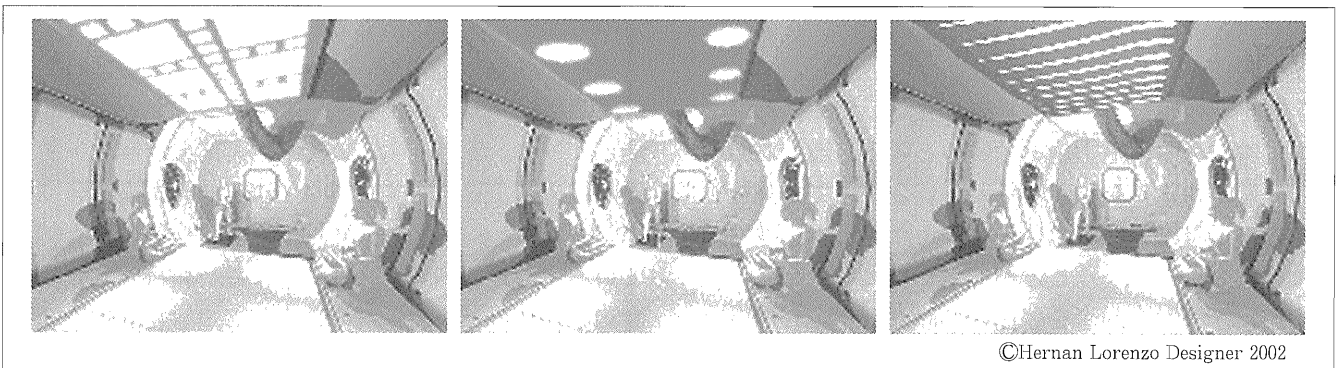
当社の宇宙ホテル構想はISS以上の大規模計画であり、実現の時期がわからない。そこで、ISSに民間ホテル事業を取付け、宇宙施設の有効利用の計画を提案した。イタリア人工業デザイナーのエルナン・ロレンツォ氏と協力して開発したものであるが、ISSに取付けられる予定のロシアのモジュールをひとつ借受け、6人程度のグループ旅行ができるように企画した。経費を低く抑えるためロシアの機器を多用している。モジュールの内部をホテル仕様に改造し、多様な軌道上経験を実現するアイデアを盛り込んだ(図-4)。

今後、ISSと地上を繋いだイベント(コンサート)や科学・理科の授業は日常化し、朝のテレビ番組にISSからの地球画像が映る日も近い。

4. 月面基地構想

当社の月面基地の構想発表は宇宙ホテルより1年早い。1/6とはいえ地球と同様に重力のある環境は、地球人には取組みやすい。当時、米国のアポロ計画の後、月に注目する国はなく、まさに「祭りの後」の様相を呈していた。アポロ計画に使われた遺品の多くは博物館で次世代の教育や歴史の証人として生き延びていたが、天文学や宇宙科学の分野で月を研究するとすれば月の誕生にからむ議論くらいが関の山であった。

月面基地に着目した理由は、宇宙コロニーが必要となる時が必ず来ると確信したからである。1980年代末は地球環境問題(当時は公害問題)が顕著に現れ、人口の爆発的増加が確実に、地球に住みにくくなる結果、宇宙へ進出することがひとつの選択肢だという仮説に基づいている。内外の宇宙機関が作った月面基地構想は、ほとんどが筒型金属製で地球から運んだモジュールを連結し、砂をかぶせたものであった。宇宙に携わる技術者はほとんどがサイエンスを専門とし、



©Hernan Lorenzo Designer 2002

図-4 ISS利用のホテル構想(Different ways to create Lightning Effects with the screens)

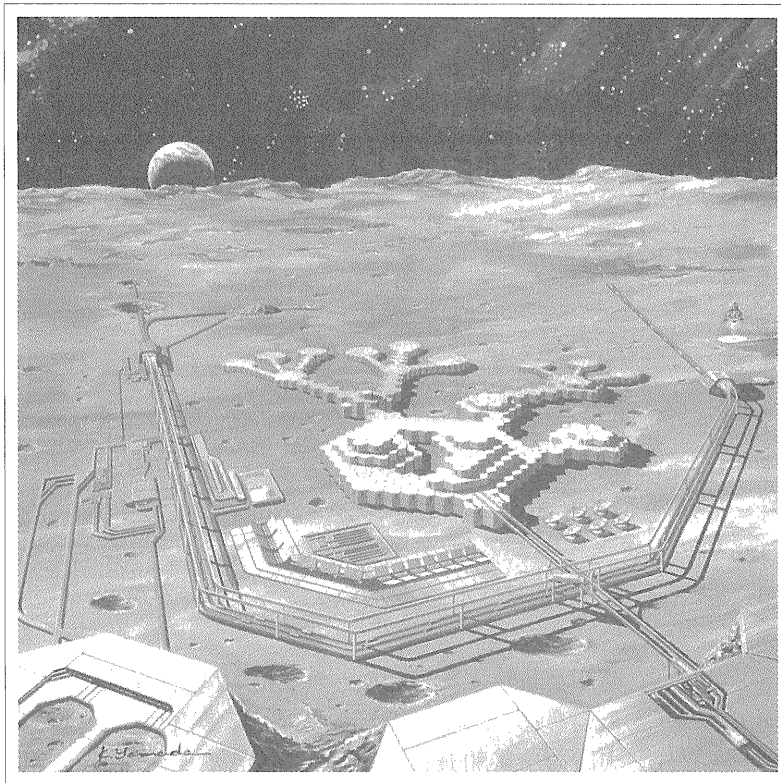


図-5 コンクリート製月面基地構想

土木建築からシナリオを作ることがないことが当社の月面基地構想が生まれる素地であった。

月面基地の研究には、地上の技術研究開発にも価値があると考えた。地上の土木建築技術の開発のために、月面と言う極限環境をモデルにすることで新しい発想の芽が出る可能性がある。

従来、企業の研究は2つの側面があるとされてきた。他社との差別化や宣伝のために目立つことが重要なものと、効率向上・コスト低減につながるものである。最近の地球環境対応のテーマはどちらでもないところにある。社会貢献と社会貢献を通じた新事業開発にあると思われる。実は月面基地もこの環境対応のテーマと似ている。宣伝効果のように目立つこともあるが、月面基地の建設に絡むテーマは、閉鎖生態系と呼ばれる外部とのやり取りが制限されている系で考える。

月面基地は非常に小さい系であるが、大きく考えれば地球もひとつの閉鎖生態系である。月面基地の研究で最も多く使った言葉は Recycle, Reuse であり、そのサイクルを回すために使う太陽エネルギーの確保と利用が最重要テーマであった。

非金属製の月面基地は主に米国の研究者が行っていたが、当社の構想も基地建設材料を月面の砂から製造することを基本とし、月資源利用 (In-Situ Resource Utilization) と呼ばれる考え方に基づいている。

月面基地には人間が中に入るため気圧を維持する必

要があるが、金属であれば LPG タンクのように円筒形が有利である。コンクリートで同じ構造を作ること可能だが、より大きな空間で多くの人員 (200 名以上) の収容を想定したため、小さいモジュールの連結だけでは不十分であった。そこで、蜂の巣のようにコンクリート製六角柱モジュールを繋いで、3 次的に拡張できる構造を考え出した。内圧は鉄筋に相当する張力に耐えられる材料を月面で製造し、プレストレストコンクリートとする方策を想定した (図-5)。

モジュール間の連結機密性維持や、真空中に暴露するコンクリートからの水分の水蒸発など検討課題はまだ解決されていないが、コンクリート養生条件については地上でも実験が可能なることから、米国から月土壌シミュラント (模擬砂) を輸入し暴露時期と強度発生との関係を研究した。結果は、適切な養生期間を確保できれば月面の真空環境で地上と同等の強度がえられるというものであった。

セメントの確保が、次の課題である。その他の研究として、

- ・太陽炉を使い月の砂からファイバー状の細い張力材素線を製造
 - ・溶かした砂を型に入れて煉瓦ブロックを製造する研究
 - ・植物の育成のために減圧した環境での成長実験
 - ・食料の長期保存方法の研究
- などこれからもテーマとなりそうな技術の芽が見えた。

5. 米国との連携

月面基地の研究は宇宙ホテルと異なり、将来の当社の本業となる可能性を秘めていると考えた。月面施工も夢ではないと思ったのである。

わが国は月探査をした経験もなく研究者も非常に少なかったため、米国に目を向け当時の宇宙建築の研究者と直接に交流を進めた。ヒューストン大学のベル教授やトロッチェ教授はまさに月面基地そのものを人間が住む空間として位置づけていた。また、月面コンクリートではリン教授がミネソタ大学のワイブレン教授が作った月シミュラントを使って材料的な方向から研究を進めていた。

宇宙で太陽光を集め地上で使えるようにエネルギー伝送するという宇宙太陽発電衛星を発明したピーター・

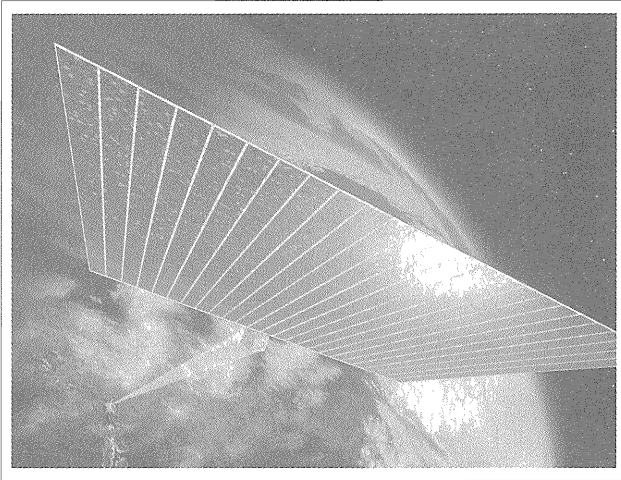


図-6 宇宙太陽発電システムの構想

グレイザー氏と懇談し、是非超大型衛星（図-6）を実現しようと氣勢をあげたのは同氏のことをまったく知らなかった素人の強さである。

その後米国中心に連携研究を展開し、特に米国大手の宇宙企業（マクドネルダグラス（MD）社、マーチンリエッタ社、ジェネラルダイナミクス社等）とは共同研究という形で月面基地の研究を進めた。大学関係では、ロボットでカーネギーメロン大学、構造技術ではコロラド大学に技術者を派遣した。

もっとも長く、かつ広い範囲でつきあったのは現在ボーイング社となったMD社である。月面基地の構造材料、閉鎖生態系、ロボット、など重要分野をほぼカバーした。ロスアンゼルス南にあるハンティングトンビーチの宇宙機器製造工場には、宇宙飛行士の訓練用プールや多くの宇宙関連施設があり、米国の宇宙の将来を支えるひとつの重要な基地であった。当時は、ISSの主要トラス構造を同施設で製造することが決まっていた。また、垂直離着陸機という将来の宇宙輸送技術の開発もここで行われていた。

規模は小さいが最も深くつきあったのはヒューストンにあるカーボテック社である。テーマは月の砂からの酸素製造である。クヌードセン社長と数人が働いている小さな石油化学系のベンチャーであったが、当時NASA ジョンソン宇宙センターにいたジョン・マンキンズ氏の助言で月での酸素製造の研究を始めていた。

月との往復の燃料として大量の酸素が必要となることは明らかであったが、地上からの供給ではたいへん高価なものになってしまう。そこで、地球の低軌道（高度300～500km）までは地上の酸素で運び上げるが、それ以後は月の酸素で月面まで物資を運ぶ、という計画である。本物の月の砂を使った実験や、月面重力で飛行するNASAの飛行機（KC135）を使った実

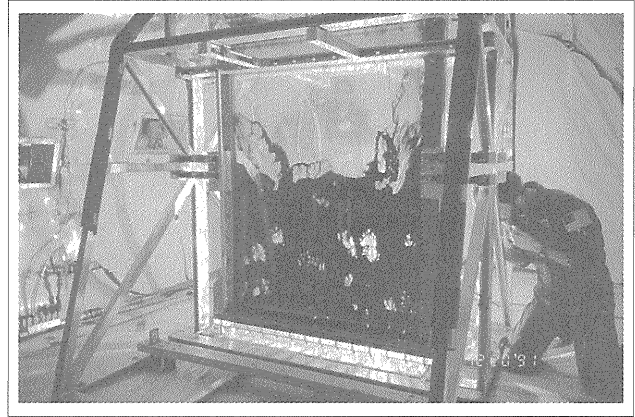


図-7 月面重力実験（NASA）

験など、際限を知らない勢いで活動していた（図-7）。

6. 宇宙ロボット実験

構想から始まるアプローチとは別に、宇宙技術の本当の姿を追い求めた研究も並行して進めた。

当時の宇宙開発事業団（NASDA；現在の宇宙航空研究開発機構、JAXA）が打上げる技術試験衛星7型（ETS-7）において、当時の航空宇宙技術研究所がトラス構造物を搭載し、軌道上で行うロボットによる展開と組立て作業を地上から遠隔操作するというプロジェクトである。1992年、まず衛星に搭載するトラスの実験装置を設計・製造することから始めた。しかし、実験の目的はロボットアームの地上からの操縦による作業であり、どのような装置を作ればよいのかたいへんな議論になった。

当社がこのプロジェクトに参加できたのは、米国カーネギーメロン大学において宇宙トラスの上を歩行移動する軽量で柔軟なロボット技術の研究を金出武雄教授の下で実施していたことと、組立て型の宇宙トラス結合機構の開発（スターベイ）を米国スターネット社と長期にわたって進めていたことによる。また、ロボット技術の建設への適用研究を1970年代から始めていたことも手伝っている。

幸運にもETS-7を搭載したH-2ロケットの打上げは成功し、当初いくつかの難関はあったがその後は絶好調で、予定の実験プログラムをほぼ100%実行したうえに追加の実験まで実施できた。これはわが国の宇宙技術の確かな面を示したもので、現在のJAXA（宇宙航空研究開発機構）はもっと誇りに思っていると思う。とはいえ、実験を担当する者にはたいへんつらいことがあった。衛星との通信が米国ハワイ州上空のデータリレー衛星を経由していたため、作業はハワイ時間で進められた。多くの実験は午前1時ころか

ら4時ころまで行われ、深夜に筑波に集合し詳細な手順の確認の後、夜明けまで緊張が続いた。これを2年半の間、断続的に実施した。宇宙と付合う鍵は体力である、とも言えそうである。

宇宙機器の開発は真空環境ばかりでなく、振動・衝撃環境が厳しいことと、宇宙空間での熱の管理を確実にすることが求められた。これらの解析作業は計算機を使いこなせる若い力に委ねたが、ふり返ってみると全てを4~5人で実施できたことは奇跡に近い。

7. 月へふたたび

日本機械学会の100周年出版事業のなかで100冊の本のひとつとして当社の実施してきた月面基地関連の内容をまとめるように依頼されて出版した。日本には少ない貴重な本だと思っている²⁾。

バブルの崩壊や社会変動の激しいなかで、宇宙開発を細々ではあるが繋いでこられたのは、関係者の多くの努力の賜物である。「継続こそ力なり」で2005年度には、小さな規模ではあるが米国の宇宙ベンチャーと組んでNASA提案公募研究に合格できた。これは将来の宇宙商業事業の可能性を、軌道上と月面のそれぞれで検討するものである。技術的な要素は少ないが、今後の宇宙開発に重要な官民の分担・協力のシナリオを策定するとともに、国際的な連携を初期から実施することで将来の国際協力の形をよりよいものにできる可能性がある。

我々は月に行ったこともないのに「ふたたび」というのはおかしいが、意外と近い将来、日本製のなにかが、もしくは日本人の誰かが月面で活躍することを真剣に考えている。

8. おわりに

詳細な研究内容や技術より、全力先進してきた雰囲気を書いたつもりである。古い内容もまぜて宇宙への取組みとさせていただいたが、その姿勢はほとんど変わらない。研究する本人がワクワク・ドキドキする研究こそ最も望ましい「取組み」であろう。

本報文の内容で間違いがあれば筆者の記憶の不確かさにその原因がある。文責は筆者にあることを最後に付け加えておく。

JCM A

《参考文献》

- 1) 黒田泰弘監修, 清水建設宇宙開発室著:「宇宙建築—居住を可能にする技術—」, 彰国社, 1991
- 2) 松本信二監修, 清水建設宇宙開発室編:「宇宙に暮らす—宇宙旅行から長期滞在へ—」, 裳華房, 2002

【筆者紹介】

吉田 哲二 (よしだ てつじ)
清水建設株式会社
技術研究所
宇宙・ロボット技術研究グループ



建設機械図鑑

本書は、日本建設機械要覧のダイジェスト版として、写真・図版を主体に最近の建設機械をわかりやすく解説したものです。建設事業に携わる方々、建設施工法を学ばれる方々、そして建設事業に関心のある一般の方々のための参考書です。

A4判 102頁 オールカラー 本体価格2,500円 送料600円

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8 (機械振興会館) Tel. 03(3433)1501 Fax. 03(3432)0289