

微小重力化の材料科学

Material Science under Microgravity

石川正道*

Masamichi Ishikawa

1. はじめに

微小重力を利用した新技術の創製、バイオテクノロジー、ライフサイエンス実験が注目されるようになってきた。アポロ計画の一環として米国において1960年代より開始されて以来、近年のスペースシャトルによる各種宇宙実験および現在計画が進められている宇宙ステーションを用いた産業利用へと大きく発展してきた。わが国においても宇宙ステーション（JEM）による本格的な軌道上実験に備えて、落下塔、航空機、小型ロケットなど予備実験手段と呼ばれる簡易な実験手段の開発が進められており、表1に示すように日本企業による実施例も増大している。

表1 予備実験手段を用いた日本企業の取り組み

企業名	内容	実施時期と実験手段
日本電気	ダイヤモンド粒を均一分散したガラスの製造	1984年、スペースシャトル
日本板硝子	フッ化物光ファイバーの製造	1985年、スペースシャトル
宇宙環境利用研究所	GaAs結晶成長 半導体融液の熱伝導度測定 PbSnTe半導体系での元素拡散	1988年、小型ロケット 1989年、小型ロケット 1990年、小型ロケット
富士通	タンパク質の結晶成長	1989年、回収型カプセル
日立	酸化物超伝導材料の製造	1990年、小型ロケット
石川島播磨重工業 三菱総合研究所	液晶相変化のその場観察実験	1990年、小型ロケット

注：ロケット実験以上の本格的な微小重力実験に限定した。航空機実験まで含めれば、さらに増加する。

資料：MRI作成

宇宙で各種実験を行う最も大きな理由は、その微小重力環境にある。地上では、重力が温度差、密度差によって物質を分離し、自重によって変形を引き起こす。しかし、微小重力を利用した材料プロセッシングでは、地上で行うよりもはるかに均質で、完全な半導体結晶の成長や無容器処理にする、地上では達成できないレベルの純度および形態の金属、セラミックスを混合、凝固することができる。

このような宇宙空間のメリットを利用して科学的に

* (株)三菱総合研究所 先端科学研究所主任研究員

〒100 東京都千代田区大手町2-3-6

も商業的にも価値の高い材料を製造しようとする研究開発の取り組みが活発化してきた。これまでの研究の動向を類型化すると次のようになる。

ステップ1：宇宙実験によって地上の研究開発を促進する。

ステップ2：地上では製造することのできない新材料を創製する。

ステップ3：高付加価値材料の宇宙での商業的生産。

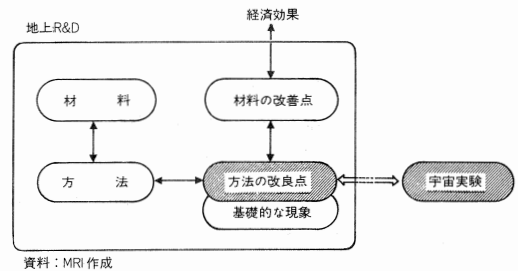


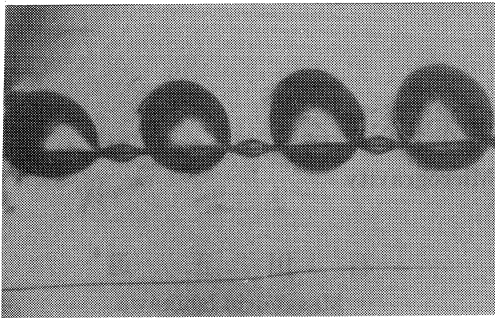
図-1 宇宙実験の産業利用

微小重力の産業利用は、第1のステップから開始されると考えられ、図-1のように当面は、重力が地上の処理に対して及ぼす理解を深めつつ、地上製造の基準（ベンチマーク）として使用する新種の材料を限量だけ製造することが狙われることになる。

2. 宇宙を利用した研究開発

① 微小重力工学としての流体研究

材料の製造・加工にあたっては、原料をいったん溶液に溶かしたり、融解させたり、あるいは原料そのものが気体であったり、そのプロセスにおいて流体が関与することはよく知られている。一方、これまでの微小重力実験の結果から、微小重力の効果は、流体に最も顕著に現れる。たとえば、写1に示すように微小重力下では大小の気泡が浮力によって気壁に接することなく流体中に止まり、何らかの力によって大小の気泡



資料：ミュンヘン工科大学

写1 微小重力下でのふっとう気泡の規則配列

が周期的に配列する。さらに、温度差のある流体中で重力対流が消滅する一方で、より微弱な力に起因するマランゴニ対流が発生するなど、地上では見られない現象が顕著となる。このように宇宙における材料製造の興味は、『地上では、重力の存在により隠されて流体に作用している2次的な弱い力による物理化学的諸現象を明らかにし、これを最大限利用したプロセス技術を開発する』ことにあると言える。

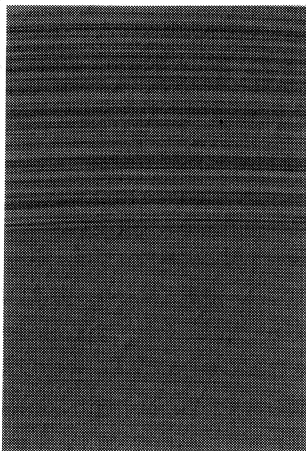
② 微小重力の応用

・極限を目指す高品質電子材料

半導体材料は、結晶欠陥、不純物分布など原子レベルでの構造の制御が必要とされている。微小重力場では、ストレーションなどによる結晶欠陥の低減、化学組成の均一化、多元系半導体など密度差をもつ物質の処理に有利となっている(写2)。

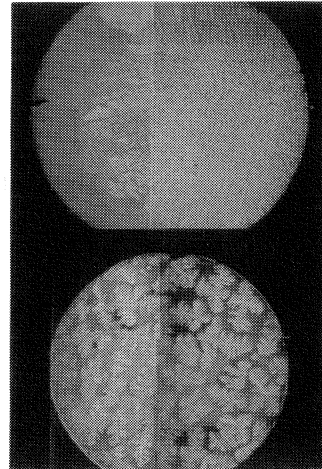
・特異な微細構造をもつ新材料の創製

微小重力下では、結晶が晶出しても沈降せず、異なった密度をもつ成分も均一に分散することから地上



資料：ノバ・スペース社

写2 宇宙での半導体製造



資料：ノバ・スペース社

写3 宇宙での合金製造 (Al-Cu)

では決して得ることができない組織をもった材料が容易に得られる(写3)。

- ・ニューセラミックスを生み出す無容器処理
 ファインセラミックスの需要の増大に伴って、融点が高く反応性の高い成分をもつ無機材料の研究が増えてきた。微小重力で有利な浮遊処理を用いれば、容器を用いることなく、高純度のセラミックスの調整が可能となる。
- ・バイオテクノロジーの基礎となる大型タンパク質結晶の成長
 タンパク質は、分子量が大きくX線による構造解析が可能な大きさの結晶が得にくい。微小重力はこのような生体高分子の結晶化にも有効である。

3. 微小重力を生み出す手段

① 身近な微小重力実験手段

宇宙での恒久的な微小重力状態への期待が高まるにつれ、地上でも何らかの手段で、“無重力”を実現しようとする試みがなされている。①落下塔、②航空機、③小型ロケットなどが代表的な実験手段である(表2参照)。これら実験手段は、本格的な微小重力実験のための予備実験手段として位置付けられており、簡易であるがための問題としていくつかの制約をもつが、種類が豊富であることから、これらを選択、組み合わせることによって実験の目的に適合させることができる。実験手段を評価するパラメータとして最も重要なものは、無重力の質と、その持続時間である。評価の基準としては、1) 無重力の質：無対流、拡散など無重力下固有の現象を評価するのに十分なほど小さいこ

表2 予備実験手段の特性比較

実験手段	微小重力継続時間 (微小重量レベル) [g]	実験操作	運用性	実験装置に対する制約等
落下塔	数秒 ($10^{-2} \sim 10^{-6}$)	無操作	・簡便	・地上実験装置の流用が可能 ・一般的に小型 ・停止時g環境(20~30g)に対する配慮が必要 ・再使用可(衝撃吸収材の使用)
航空機	数+秒 ($10^{-1} \sim 10^{-2}$)	有人操作	・やや簡便 (ただし機能向上により複雑化) ・航空管制システムが必要	・地上実験用装置の流用が可能 ・(機種により異なるが)大型サイズの装置搭載が可能 ・再使用可
小型ロケット (弾道飛行)	数分 (10^{-6} 以下)	全自動	・中程度 ・テレメトリモニタ, 記録設備が必要 ・回収システムが必要	・専用装置の開発が必要 ・ロケット径によりサイズに制限 ・打上/回収時のg環境(10~25g)に対する配慮が必要 ・電力消費小 ・場合により再使用可
フリー フライヤー (周回飛行)	数日以上 (10^{-6} 以上)	全自動	・やや複雑 ・再突入技術(逆噴射ブースタ姿勢制御等)が必要 ・回収システムが必要	・専用装置の開発が必要 ・サイズは多種類利用可能 ・打上/回収時のg環境(10~25g)に対する配慮が必要 ・電力消費小 ・場合により再使用可
スペース シャトル	数日 (10^{-4} 以下)	有人操作	・複雑 ・詳細な実験モニタを行うためには独自の運用システムが必要 ・NASAの安全基準を満たすことが必要	・専用装置の開発が必要 ・再使用可

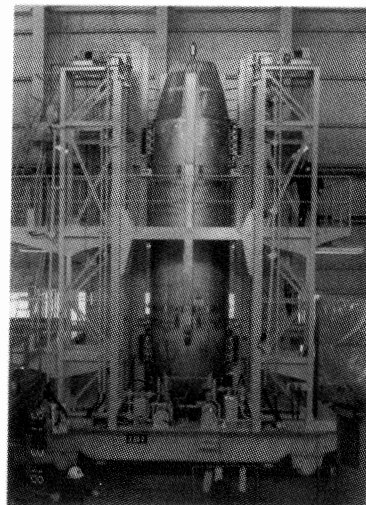
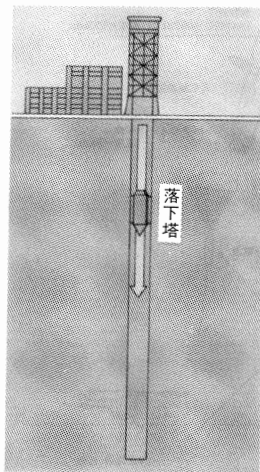
資料：宇宙環境利用国際シンポジウム「IN SPACE '87」(1987)

と、2) 持続時間：現象が定常状態に達するまで微小重力の状態が維持されること、が目安となる。

航空機(MU-300)の本格的な運用は昨年からはじまり、大規模落下塔および小型ロケット(TR-IA)は本年から稼働する。また、無人の宇宙実験システムとして関心の高い回収型カプセル衛星利用の検討もはじまり、新技術開発にとっても微小重力環境はより身近なものになりつつある。

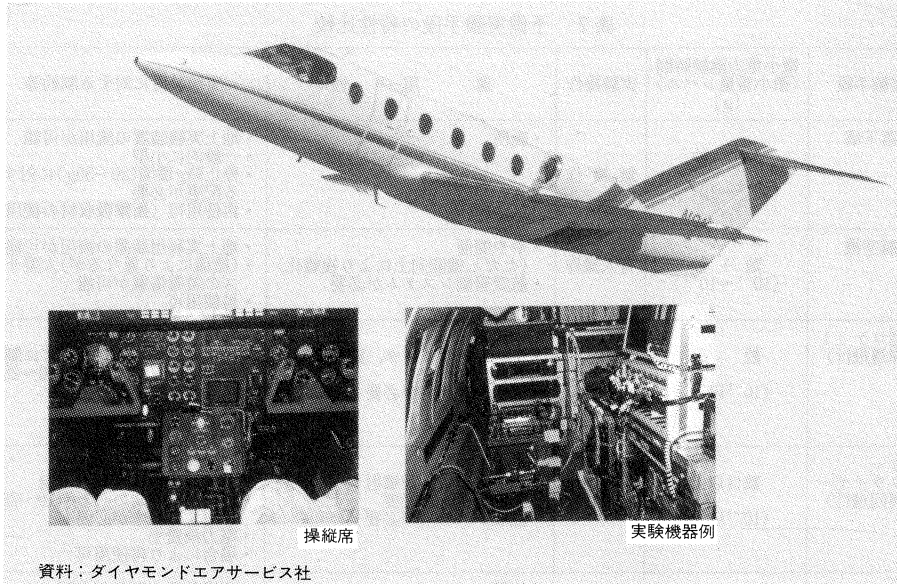
② 落下塔実験 —自由落下させればもう無重力—

微小重力実験手段として最も簡便な方法は、落下塔を用いるものである。この方法は、中空の管中で物体を自由落下させるものである。装置は、一般に落下カプセル中に配置し、回収・再使用が可能である。わが国では、現在、世界最大級規模の施設が北海道土砂川町に、さらに真空落下方式で微小重力環境のよい施設が岐阜県土岐市に建設中である。いずれの施設も第3セクター方式で運営されており、民間研究機関の参入も意図されている。



資料：地下無重力実験センター

写4 落下塔および実験カプセル(右写真)



写5 航空機実験システム (MU-300)

落下塔は、微小重力の保持時間が数秒程度と短いことから、これまでは燃焼、液滴、流体挙動の観察などの速い現象の観察が中心であった。しかしながら、今後、わが国に作られる施設では、より規模の大きい実験が可能のため、産業面からのアプローチとして、超電導材料の基礎研究や新材料の開発研究が有望視されている。

③ 航空機実験 ー誰でも無重力体験が可能ー

航空機が放物飛行する時に得られる約20秒間の微小重力環境を利用して、各種の実験が行われている。欧米では、NASA（米国航空宇宙局）のKC-135やCNES（フランス）のカラベル航空機などが有名である。わが国ではMU-300という小型ジェット機を用いた微小重力実験システムが昨年から本格的に稼働している（写5）。これまでに、MU-300では、マランゴニ対流（表面張力に起因する対流）の計測実験、気液

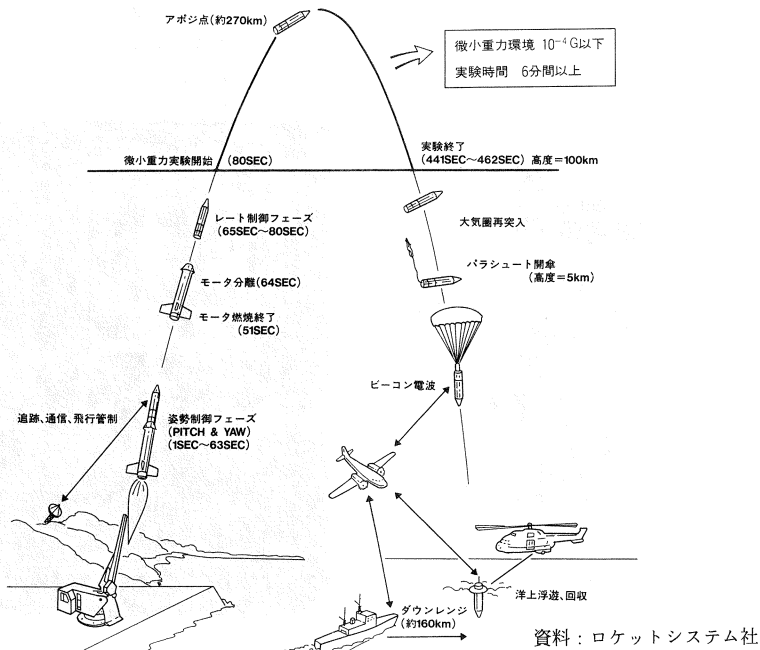


図-2 小型ロケットによる微小重力実験

の分離過程に関する実験、無重力下での凝固現象に関する実験、液滴等の音波浮遊実験、魚（鯉、金魚）の姿勢制御と脳活動に関する実験、濡れ性の精密計測実験、などの実験がとり行われている。

④ 小型ロケット実験 一宇宙実験の第一歩一

小型ロケットを打ち上げ、弾道飛行中に得られる微小重力を利用して、実験を行うものである。軌道高度は約300kmに達する。落下塔や航空機に比べ、得られる微小重力時間が長く、さらに重力レベルが良好なことが特徴である。わが国では、本年から宇宙開発事業団によりTR-1A小型ロケットを用いた実験が行われる（図-2）。ここでは、溶液から結晶成長における界面や環境相のマイクロ観察実験、気泡の発生、成長等に関する実験、粒子分散合金の溶融凝固実験などのテーマが予定されている。これまでも欧米の実験手段であるMASERやTEXUSロケットを用いて、液晶相変化の観察実験や酸化物超電導材料の形成実験、半導体溶液の熱伝導度測定実験が行われた。これらの実験は、民間企業が主体的に参加しており、産業面での関心の高さを示している。

⑤ 回収型カプセル衛星 一本格的な産業利用が可能一

わが国においても本格的な宇宙実験を日差した研究プロジェクトが計画されている。しかし、前述の微小重力実験手段は、微小重力の保持時間の短さなどから、対象となる実験テーマなどに大きな制約がある。一方、スペースシャトルなどの有人ミッションは、安全性などの点で制限をうけることになる。本格的な産業ミッションを推進するためには、これら2つのハードルを越える必要がある。回収型カプセル衛星は、ロケットを地球低軌道に打ち上げ、周回中の微小重力環境を利用した実験システムであり、上記の点を克服するものとして期待が高い。

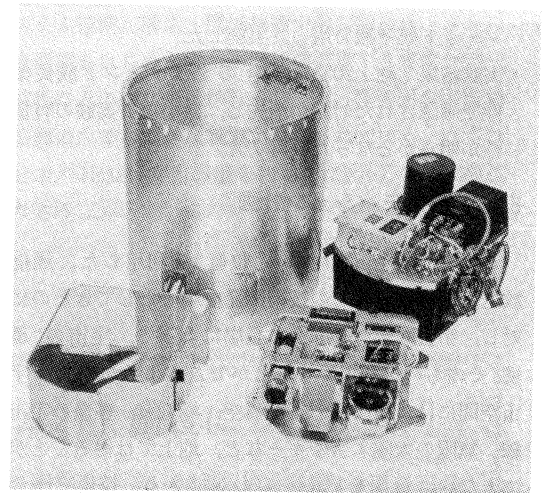
4. 三菱総合研究所が実施した微小重力実験

① 液晶を用いた材料生成のその場観察

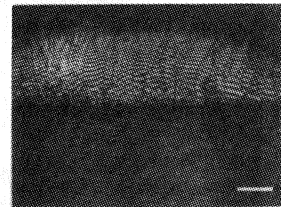
・目的：材料の凝固過程や結晶成長は、生成環境となる流体内部での熱輸送および物質輸送により大きな影響を受ける。微小重力環境では、このような密度差を伴う系での対流輸送が消失するために、地上での製造に比べより完全で、均質な物質を得ることが可能と考えられている。本実験では、微小重力場を利用した材料処理が地上処理と比べてどのような理由で有効となるかを画像記録することによって

明らかにし、有望な微小重力材料プロセスの設計を行うための基礎的知見を得ることを目的として行われた。

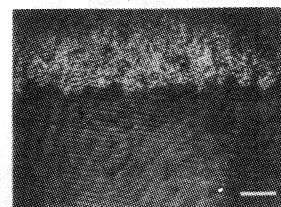
- ・実験装置および手段：スウェーデン宇宙公社が打ち上げるメーザーロケットを利用し、新たに開発したレーザー光マッハツェンダー干渉計を備えた結晶凝固その場観察装置を用いた（光学干渉計を搭載したロケット実験はわが国として最初の事例である）。
- ・結果：凝固界面直上の対流が消失することにより、過冷却温度分布が長時間にわたって維持され、関連した現象を観察できた。過冷却を制御した材料プロセスの有望性が明らかにされた（写6）。



(重力下)



(微小重力下)

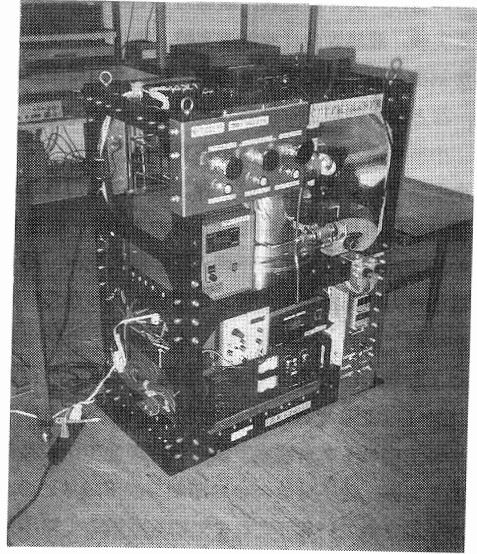


資料：(財)機械システム振興協会

写6 液晶を用いた材料のその場観察装置と実験結果

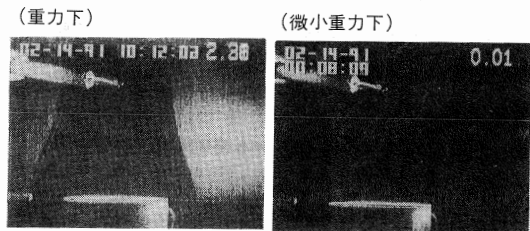
② 宇宙用CVDプロセス基礎実験

- 目的：微小重力下では、反応ガス中の温度分布に伴う熱対流を抑制することが可能となり、近年注目されている薄膜ダイヤモンドの品質制御が容易になる、という想定のもとに、宇宙開発事業団は、宇宙でのダイヤモンド気相成長実験を計画している。本実験は、このような微小重力環境の優れた特性を利用して、気体中での物質輸送、反応メカニズム等、気相からの薄膜製造技術に関する基礎技術データを取得することを目的に行われた。
- 実験装置および手段：DCプラズマ方式CVDチャンバーを航空機実験用に改造した気相成長基礎実験装置により、ダイヤモンドエアサービス社MU-300ジェット航空機を用いて実施した。
- 実験結果：地上20Torr以上のダイヤモンド成長条件で確認された対流が消失し、微小重力実験の有望性が明らかとなった（写7）。



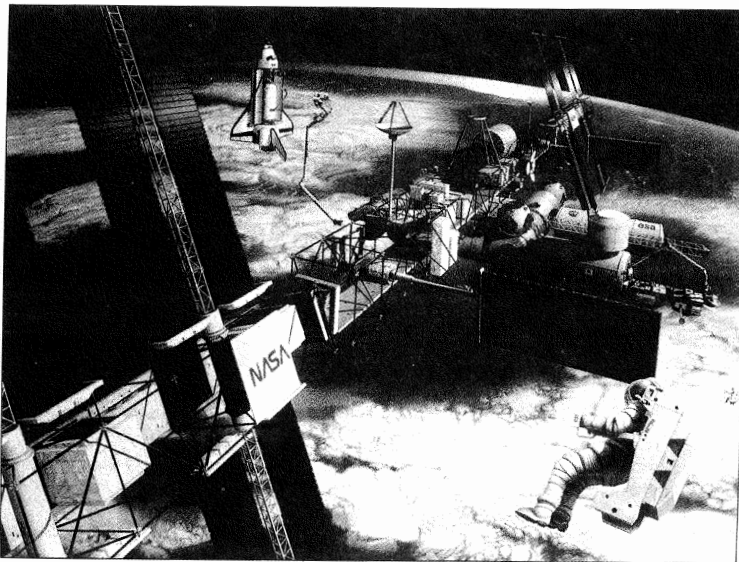
5. 宇宙ステーション計画

これまでの宇宙利用が、“位置”を利用した、通信放送、地球観測などの技術開発を中心としてきたのに対し、宇宙ステーションの登場によって、宇宙の“環境”そのものを利用することができるようになる。宇宙空間には、微小重力、高真空、極低温、多量の宇宙線、無限の太陽エネルギーなど、地上では得ることができない、資源を見出すことができる。技術立国の



資料：宇宙開発事業団

写7 宇宙用CVDプロセス基礎実験装置と実験結果



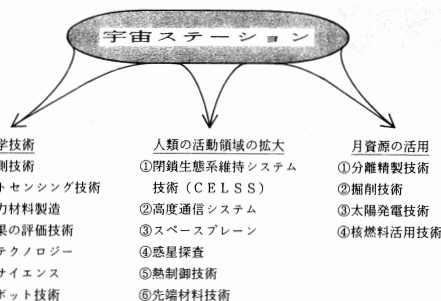
資料：宇宙開発事業団

写8 宇宙ステーション

わが国としては、このような宇宙環境を利用した新技術開発は、21世紀に向けた産業基盤と位置付けられよう。

宇宙ステーションは、1984年のレーガン大統領の年頭一般教書による発表を契機として、日本、米国、欧州、カナダの国際協力の下に進められている恒久的な有人宇宙実験施設である。現在、各国で開発が進められており、わが国は独自の実験モジュール（JEM）を取り付ける予定である。JEMは、無重力下における材料実験、ライフサイエンス実験等を行う与圧部と天体観測、宇宙関連技術開発および理工学実験を行う曝露部などから構成される。運用開始は1990年代末の予定であり、宇宙空間にハイテク実験室が生まれることになる。

宇宙ステーションは、わが国が参加するはじめての恒久的な大規模宇宙実験プロジェクトである。したがって、そのインパクトは、単に科学的な面のみならず、技術的な面や社会的、文化的な面にまで及ぶ。



資料：MRI作成

図-3 宇宙ステーションがもたらす新技術の芽

技術的な面では、安全確保、自動化、自律化などのシステム技術、構造・機械技術や熱制御技術、さらには光通信をはじめとする高度通信技術やライフサポート技術などの確立がはかれる。一方、教育面や宇宙科学振興の点でも大きな成果が期待されている。いずれにせよ、JEMは宇宙環境を利用したR&Dの一大拠点となろう。

話の泉

「グリーンフォーラム21」創設について

日刊工業新聞社は、「地球にやさしい経済システム」の実現に向けて、産・学両界の有識者により、環境と経済の共生の方策や企業活動のあり方の提言を目的に「グリーンフォーラム21」を創設した。

活動としては、定期的な勉強会やシンポジウム、日刊工業紙上で問題提起の連載、新聞・雑誌・出版物はもとより、各種イベント等あらゆるメディアを使いキャンペーンを展開することとしている。

メンバーは、次の各氏である。

〔座長〕 東京大学教授 茅 陽一

〔委員〕

・学識経験者メンバー

京都大学教授 佐和 隆光

早稲田大学教授 中村 桂子

西東京科学大学教授 早川 豊彦

国際基督教大学教授 横田 洋三

・産業界有識者メンバー

丸紅(株)副社長 石井 康裕

東京海上火災保険(株)専務 大橋 浩

日本電気(株)取締役支配人 小野 敏夫

東レ(株)取締役 小野澤信義

NKK総合企画部長 木崎 肇

鹿島建設(株)環境開発部長 小林 勲

(株)クボタ 環境管理部長 笹 徹

(株)東芝 副社長 佐藤 文夫

キャノン(株)取締役 白波瀬零兒

トヨタ自動車(株)取締役 花岡 正紀

デュボンジャパンリミテッド常務 槇 英男

日刊工業新聞社 取締役編集局長 大蔭 勝威

(50音順)