

報 告

宇宙環境利用の新たな時代を目指して

—物質科学および生命科学における宇宙環境利用の視点から—



平成20年（2008年）9月4日

日本学術会議

基礎生物学委員会・臨床医学委員会・物理学委員会・
総合工学委員会・機械工学委員会・
電気電子工学委員会合同
重力加速度依存現象の科学・生命科学検討分科会

この報告は、日本学術会議基礎生物学委員会・臨床医学委員会・物理学委員会・総合工学委員会・機械工学委員会・電気電子工学委員会合同重力加速度依存現象の科学・生命科学検討分科会の審議結果を取りまとめ公表するものである。

日本学術会議基礎生物学委員会・臨床医学委員会・物理学委員会・
総合工学委員会・機械工学委員会・電気電子工学委員会合同
重力加速度依存現象の科学・生命科学検討分科会

委員長	日比谷孟俊（連携会員）	慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科教授
副委員長	遠山 嘉一（連携会員）	日本女子大客員教授
幹事	河野 通方（連携会員）	学位授与機構教授、東京大学名誉教授
	浅島 誠（第二部会員）	東京大学副学長
	井上 一（連携会員）	宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部長
	岡田 清孝（第二部会員）	京都大学教授
	北原 和夫（連携会員）	国際基督教大学教授
	小貫 明（連携会員）	京都大学教授
	西永 頌（連携会員）	豊橋技術科学大学前学長、東京大学名誉教授
	福林 徹（連携会員）	早稲田大学教授
	毛利 衛（第三部会員）	日本科学未来館館長

要 旨

1 作成の背景

人間活動による地球環境の急速な変化と地球資源の限界が認識され、人類の持続的な発展の可能性が模索されている。この問題の解決は、人間社会のみならず地球生命および地球自然環境すべてを含む複雑な状態変化を、同時に理解し対策を講じてはじめて可能となる。すなわち、大気、重力、磁場を有する地球環境の特性と人類を含めた地球生命圏を、科学的に理解し技術的に解決策を実行することに他ならない。これは、地球を宇宙から観測するとともに、宇宙環境を利用した研究活動を通じて得られる。同時に、宇宙環境を利用した研究は、今後人類活動が宇宙環境に展開する場合の放射線被曝および微小重力の問題に対して解答を与えると共に、新産業科学技術活動発展への基盤となる。

2 現状及び問題点

宇宙環境を利用した本格的な研究は、わが国においては、平成4(1992)年スペースシャトルに搭載された宇宙実験室における第一次材料実験(FMPT)が最初である。その後、様々な機会を利用して世界トップクラスの研究成果を挙げてきている。

宇宙環境における生命科学研究は、地球上で発展してきた生命体の重力感知メカニズムの解明や、放射線損傷を受けたDNAの復元研究へと進みつつある。地上における骨粗鬆症、生活習慣病、寝たきり老人における筋力の衰えなどの研究には、宇宙飛行士を被験者にした宇宙での研究が役立っている。

物質科学系の研究では、スペースシャトルや国際宇宙ステーション以外にも、ロケットや航空機利用、落下坑などの、短時間微小重力状態を利用した実験的研究も有効である。ヨーロッパにおいては、大学と産業界とが協力して、産業技術の向上のために宇宙環境を利用した科学技術研究を実施している。

人間の精神活動、空間認識、芸術などを扱う宇宙環境の人文的利用は、わが国が他国に先駆けて試みているものであり、宇宙環境文化という概念の発信において世界をリードできる可能性がある。

宇宙環境利用を推進してゆくためには、プラットフォームと輸送手段が必要である。一方、宇宙環境シミュレーション研究や物質科学系の研究のための、短時間微小重力状態を提供する手段は必ずしも需要を満たさず、最先端科学分野としての研究活動が停滞することが懸念される。

3 分科会での議論の骨子

地球および地球環境の理解と、持続可能な社会を維持するための手段と

して、生命科学分野と物質科学分野における宇宙環境利用に対する市民の理解を深める必要性がある。また、国際協力、宇宙環境の芸術利用、人材育成についても市民の理解を深める必要性がある。

宇宙環境を利用した研究は、最先端科学であり、地球環境を理解するための手段であり、わが国の将来を付託された分野横断のフロンティア領域である。したがって、学術の専門領域、官庁の所掌事項の領域の間に存在する障壁を超えて推進すべき課題であることを認識しなければならない。研究者にあっては、異なった文化を有する専門家や、納税者である国民に対し、機会を捉えて親しみやすく説明することが求められる。産業界においては、必要とする技術課題の解決の場として、宇宙環境利用があり得ることを認識し、大学等と連携してこれを活用することが望まれる。

このためには、以下のことが実現されるよう、今後、議論を継続していくべきであるとの結論を得た。

(1) アクセス機会の確保

国際宇宙ステーションが建設され運用が開始されている。生命系の研究において「時間」から「日」、「月」、あるいは「年」の長さの宇宙環境利用が必要となる。国際宇宙ステーション日本実験モジュールへのアクセスが、今後、長期にわたって可能となるようにすること。

(2) 短時間微小重力環境利用機会の確保

宇宙環境シミュレーション研究や物質系の科学研究においては、必ずしも長時間の微小重力環境を必要とせず、「秒」や「分」の長さで十分な場合も多い。これが可能となる小型ロケット、航空機の放物線飛行、落下坑などの利用の機会を充実させること。

(3) 宇宙環境芸術の振興

宇宙の人文利用を促進し、心の問題も研究の対象と捉え、絵画、舞踊などの宇宙環境芸術活動を促進すること。

(4) 海外研究者への手段の開放

宇宙環境（微小重力環境）利用が可能な国は限られている。アジア地域の諸国に、実験機会を提供し、科学者レベルでの連携を深めること。

(5) 人材の育成

宇宙環境利用の意義を、科学、技術、芸術、外交などの視点から理解し、かつ、全体をシステムとして運用できる人材を育成すること。

目 次

1	背景 - “宇宙からの視点”の時代を迎えて	1
2	宇宙環境と生命系	2
3	重力加速度依存現象の物理	3
4	宇宙環境利用と社会との関わり	4
5	宇宙環境と文化の創生	5
6	発展のための課題	6
7	発展のために求められること	6
8	おわりに	8
	<参考文献>	9
	<用語の説明>	11
	<参考資料>	13

1 背景 - 宇宙からの視点の時代を迎えて -

宇宙からの情報や宇宙についての研究は、私たちに様々な恩恵を与えてきた。平成 19 年 11 月、「かぐや」から地上に送られてきた、青い地球のハイビジョン映像を、多くの国民が家庭のテレビで見ることができた。地球は空気と水に囲まれた天体という、宇宙における地球環境の特殊性を認識させた。また、平成 20 年 6 月、国際宇宙ステーション日本実験モジュール「きぼう」の建設に従事中の星出宇宙飛行士は、「地球は、はかない存在」と表現し、人々の環境問題への意識を一層高めることとなった。「きぼう」においては、宇宙という特殊な環境を利用しつつ、長期に滞在する日本人宇宙飛行士が科学実験を行う準備ができあがった。

人類は天体を詳細に観測することにより、地球が球状であることを知り、その大きさを計算しえた。その後も、太陽が地球の回り巡るのではなく地球が太陽の回りを巡ることを知り、「コペルニクスの転回」という言葉に代表されるように、人類は宇宙と地球に関する認識を書き換えることを続けてきた。惑星の運動を記述し、人工衛星の運動をも記述可能とするケプラーの第 3 法則も、このような観測の繰返しの中から見出された。1960 年代に始まったアポロ計画において、月に向かう宇宙船から、暗黒の宇宙に浮かぶ地球の写真が送られてきた。この 1 枚の写真は、人類が住める場所は地球上にしかないことを悟らせ、only one earth という概念を生み、人々は環境問題の重要性に気がつくようになった。

大気が存在しない宇宙空間において撮影が可能な、エックス線カメラによるおどろおどろしいまでの太陽活動の画像と、スペースシャトルから撮影された地球を白く包む薄い大気の層の写真とを見比べることにより、生命が海から陸に進出するには、太陽や宇宙からの電離放射線を遮蔽する大気が形成されていることが前提であったと理解できる。今世紀初頭ヒトゲノム研究を通して、約 40 億年にもわたる多様な生命の進化の系譜に人類の位置を認識することができるようになり、地球上の生命体は運命共同体であるとの一体感が、今、生まれつつある。

現在、人類は地球資源の限界と人間活動による環境の変動を認識し、将来の持続的発展の可能性を模索している。地球環境における問題点について、多くの科学者がこれまでに多様な取り組みをしてきた。人間社会のみならず地球生命および地球自然環境すべてを含む複雑な状況変化を、同時にしかも客観的に把握する科学的視点によって理解することが求められる。そのためには、人工衛星により極地やアルプス、ヒマラヤなどにおける氷の減少、特定水域における海水温の上昇、乾燥地域における砂漠化の進展などの情報を入手して分析することが必要である。同時に、宇宙環境を含めてそこに人間が滞在し五感で得られるゼロ次の体感的情報を活用することが、地球環境を把握するための視点の拡大につながる。この結果に基づき、技術を作りながら解決策を模索してゆくことになる。

宇宙開発は国の総合力の発露の場である。宇宙における科学的な研究は

膨大な予算、高度な科学技術、および国民の賛同を伴って初めて可能である。このため、参加できる国の数は限られるのが実情であるが、その活動の成果は一国のみに帰すべきではない。地球の環境の理解に必要という人類共通の目的のために、宇宙利用を実施していかねばならない。

国際宇宙ステーション上の国際協力プロジェクトでは、宇宙からの視点で地球環境の問題を扱うことになる。したがって、生命科学、材料科学、流体物理、医学、理工学のほか心理学や法学も大きな役割を果たすようになってきている。地球観測では自然科学的な側面ばかりではなく、外交政治や経済学も視野に入れて考える必要がある。天文観測においては、物理的な研究ばかりではなく、他の惑星系における生命進化まで、学際的に取り扱う必要もできている。さらに、人間の活動の一環として、芸術の視点も取り入れられるようになってきている。宇宙環境という新たな場を提供されることにより、宇宙と地球との関わりを認識するために、あらゆる研究分野がその役割を増している。

また、宇宙に浮かぶ閉空間である宇宙ステーションでは、生命を安全に維持しいかねばならない。その意味で、宇宙ステーションは究極の危機管理の実践の場であり、地上において応用すべきところが多い。

本報告では、様々な宇宙での活動の一つとして、新しい分野である宇宙環境利用を取り上げ、宇宙環境と生命系、重力加速度依存現象の物理、宇宙環境利用と社会との関わり、さらに宇宙環境における文化の創生に焦点をあて、この分野における活動の例を紹介し、将来を見据えた施策について提案する。

2 宇宙環境と生命系

宇宙環境に人類が進出し、そして、地球上で生まれた生命体が宇宙環境に置かれる機会が、今後、増えてゆくことになる。重力加速度、大気および磁場が存在する地球において発達した生命体が、これまでとは異質な環境に置かれたとき、どのような反応を示し、適応していくのであろうか、このことを知ることは、今後の人類の宇宙活動を支える上で必須のことである。

この問いに対する答えを得るためには、実験的研究を通じ、生命体がどのように重力加速度に反応して、これに適応していくかを解明していくことが必要となる。生命体においては、その影響が遺伝子、細胞、臓器、および個体のレベルで生ずることになる。重力加速度と宇宙放射線の影響を調べ、普遍的な回答を得るためには、膨大な実験と時間を要するであろう。わが国における宇宙環境を利用した生命科学の実験は、平成4年のスペースシャトル実験「ふわっと'92」(FMPT)が、そのはじめである。

重力加速度や宇宙放射線の影響は、生命系においては情報として処理され、環境に適応させていくことになる。これらを扱う科学の体系としては、重力感受・応答性を扱う重力生物学、宇宙放射線の影響を調べる放射線生物学、宇宙に進出する人を対象とする宇宙医学、宇宙ステーションのよう

な閉鎖された狭い環境におかれたヒトの行動を科学する生態工学である。

例えば、植物の根の重力応答性のメカニズムが重力生物学によって解明されつつある。スペースシャトル上でのキュウリの芽生え実験において、地上では突起を1個形成するが微小重力下では2個の突起を形成するという、ネガティブコントロールが発見された。これは、ペグ形成に関与するオーキシンという物質の細胞膜間の輸送に関わるタンパク質が、重力加速度によって偏在するからであるとされ、宇宙での食料生産に関して基本的情報となる[1,2]。動物細胞の例としては、ラットの筋（芽）細胞が重力加速度の有無によって形態を変化させるメカニズムの解明が進みつつある。細胞膜が静水圧の有無に反応し、静水圧が作用しないことは細胞にとっては負荷を与えられたことになり、細胞膜を湾曲させることにより細胞の形状を支配するタンパク質の細胞への出入りの状況が変わるためと説明されている[3,4]。

重力加速度が発生に及ぼす影響も重要である。宇宙でメダカやカエルの卵は孵化し、世代交代することが可能であった。ニワトリの場合については、受精卵を用いた実験がスペースシャトル上で行われた。卵から雛にかえるためには、卵が呼吸を行うことが必須である。地上の場合には、白身（比重1.040）と黄身（比重1.029）との僅かな比重差により、黄身が殻に近づく。これにより、尿嚢が殻の内側に貼り付いて殻の内側に血管が伸び、殻を通じたガス交換が可能となる。しかしながら、微小重力下では比重差のメカニズムが機能しないために、卵が発生途中で死亡することが報告されている[5]。

微小重力状態で得られた科学的知見は、地上の人間の生活の向上に寄与し始めている。骨の新陳代謝には重力加速度とホルモンのバランスが関与する。骨からカルシウムが溶解する骨粗鬆症の理解と治療には、微小重力状態での骨からの脱カルシウム現象の解明が、また、地上における生活習慣病の理解と治療には、筋肉を使う機会が減少する宇宙飛行士を被験者とした代謝の研究が貢献している[6]。地上における寝たきり状態の病人や老人の筋肉の衰えの対策に、宇宙飛行士における抗重力筋の衰えと対策に関する知見が有効である[7]。

さらに、放射線生物学の遺伝子研究への寄与も注目されている。生物はDNAを複製することによって遺伝情報を伝えてゆく。複製に誤りがある場合には、DNAポリメラーゼという酵素が関与することにより修正される。すなわち、DNA修復能力である。人間が宇宙に長期滞在する場合、宇宙放射線によりDNAが損傷することになる。人間が本来持っているDNA修復能力が、微小重力環境によって変化を受けるのか否かを明らかにする研究が進みつつある。さらに、宇宙放射線の被曝限度を知り、宇宙での人体の健康管理に役立たせるための研究提案がなされている[8]。

3 重力加速度依存現象の物理

重力加速度は、これまでの流体力学や伝熱工学などの教科書では定数として扱われ、可変とされることはなかった。重力加速度が可変なプロセスパラメータであることに着目し、燃焼現象において世界で初めてその効果についての研究がわが国で行われた。ペンシルロケットの成功の2年後、人類が宇宙を体験する2年前の昭和32年のことであり、自由落下による短時間微小重力を用い実験がなされた[10]。燃焼が通常重力下とは異なった状態を呈することを初めて観察し、重力加速度依存現象の科学（微小重力科学）という最先端の科学の領域にメスが入れられた。

米国では昭和48年のスカイラブ計画や、昭和50年のアポロソユーズ計画以来、地球周回軌道や月への飛行の過程において、微小重力状態を利用した科学研究を実施してきた。昭和56年のスペースシャトルの飛行開始以来、ヨーロッパ各国や日本においても微小重力状態に注目する研究が実施されるようになり、生命科学や医学における重力加速度依存現象は最先端科学として認識され、宇宙における実験的研究がなされるようになってきた。

わが国における本格的な宇宙環境利用の研究は、平成4年に宇宙開発事業団（当時）によるスペースシャトル上での第一次材料実験（FMPT）「ふわっと'92」の実施と、平成5年の通商産業省（当時）の指導によるドイツのスペースシャトル計画D2への参加により本格化し、国際宇宙ステーション日本実験モジュール「きぼう」の建設と運用へつながっていく。同時に、これらの実験計画の準備の手段として、また、短時間で成果が得られる研究手段として、小型ロケットや、航空機による放物線飛行、落下実験施設による、微小重力実験が実施されてきた。

化合物半導体の結晶成長[11]、対流が抑制された場での結晶成長メカニズムのその場観察[12]、熔融金属の拡散定数測定[13]、熔融半導体のマランゴニ対流の酸素分圧依存性の場観察[14]、マランゴニ対流における粒子凝集構造のその場観察[15]、液滴列燃焼メカニズムの解明[16]などのように、わが国の研究者の手による優れた科学的成果は多い。

4 宇宙環境利用と社会との関わり

重力加速度依存現象の科学・生命科学のもう一つの特徴は、この分野の研究成果が単にトップサイエンスを目指すだけに留まらずに、社会との関わりを有することである。成果の例として挙げた、結晶成長、熱物性測定、燃焼、マランゴニ対流などは、いずれもが産業界におけるモノ作りのプロセスと深く関わっている。高温融体の拡散定数や熱伝導率などの熱物性定数の測定は、半導体結晶成長やジェットエンジン・タービンブレードの高品質化、溶接プロセスの最適化のために行われる数値シミュレーションに不可欠の値である。マランゴニ対流の研究は、この現象が実際のプロセスでは生じているものの地上の重力加速度の存在下では、よく理解されていなかった。しかし、重力加速度の無い状態で純粋な形で顕在化させること

に成功し、この結果として、シリコンの結晶成長のシミュレーションでは、マランゴニ対流を取り入れることが行われるようになってきている。微小重力下の液滴列燃焼においては、ディーゼルエンジンの燃焼室内で生じている素過程に、マランゴニ対流が関与していることを、わが国の研究者が世界に先駆けて解明することに成功している。これらの産業技術における科学現象を解明することは、熱機関設計においてその熱効率を論ずる場合にカルノー・サイクルの概念が、また、電磁波を利用する通信や観測においてマクスウェルの電磁方程式が基礎科学の知識として不可欠であるのと同様に、微小重力状態で得られた科学的知見が、地上の産業技術の改良のために寄与していることを意味している。

ヨーロッパでは、産業界、大学、宇宙機関が共同して MAP (Microgravity Application Program) や IMPRESS (Intermetallic Materials Processing in Relation to Earth and Space Solidification) 計画を推進し、次世代ジェットエンジンのタービン・ブレードなどの精密鑄造に必要な、熔融ニッケル基超合金の熱物性値測定プログラムを推進し、ヨーロッパにおける先端産業技術力の向上に寄与している。

5 宇宙環境と文化の創生

人は非日常的体験をすることにより、大きな精神的インパクトを受ける。そのインパクトが大きければ大きいほど、時間の経過とともにその意義が反芻され、意識は大きく変わってゆく。飛行後の宇宙飛行士における心の変化については、わが国において初めて着目されインタビューが行われた [18, 19]。

宇宙環境を科学や技術のためだけではなく、文化的視点から利用しようとする試みがある [20]。宇宙ステーションの中は、上下、前後、左右の全く無い 3 次元等方空間である。壁に貼りつけた写真や文字の向きで、上下を約束しているに過ぎない。どの方向に移動する宇宙飛行士の姿勢も同じである。もし、宇宙ステーションの壁に階段を設けたら、いくら昇っても頂上にたどりつくことなく、元に戻ってくる階段というエッシャーの騙し絵の世界である。このような空間を経験することにより、人の心には大きなインパクトが与えられる。経験した人でないと、簡単には理解できない世界である。

芸術家は、非日常的な経験をする、それが作品のモチーフになる。ワーグナーは、冬の北海で遭難しそうになった自らの経験を楽劇「さまよえるオランダ人」に仕上げ、ピカソはスペイン内戦の心証を「ゲルニカ」に仕上げ、丸木夫妻は広島での原爆の惨状を絵に残した。もし、感受性の強い芸術家が宇宙環境を体験したら、大きな芸術的モチーフを獲得することは間違いない。

無重力 3 次元空間そのものを、舞踊に利用するという提案がなされている [21]。無重力 3 次元等方空間において、ダンサーが床や壁を利用せずに

姿勢を変化させようとする、多体拘束系の力学（マルチボディダイナミクス）による解析と制御が必要になる。地上の通常重力場では実現が不可能な流体を利用したオブジェも可能となる。服飾においては、重力加速度を利用して着用する衣服の概念は変化を求められる。宇宙空間は人間の精神活動の新らたなフロンティアであり、新たな絵画、音楽、小説などが作られるであろう。いずれの場合にも、芸術あるいは感性と理工学とのコラボレーションが求められる。

6 発展のための課題

最先端の科学である宇宙環境利用を推進させるために、特に長時間の微小重力状態が必須となる生命科学系の実験的研究には、長期に亘ってこれを実現するためのプラットフォームが必要である。フロンティア人工物としての、国際宇宙ステーションの日本実験モジュールが完成し、実験が開始されるようになった。宇宙環境に恒久的な実験設備を有する国は限られており、わが国はこの設備を優先的に利用できるポジションにあるが、今後、この最先端の設備を継続的に、かつ有効に利用してゆくためには、宇宙ステーションへのアクセスが保証されていなければならない。米国のスペースシャトルの運航中止が日程に昇っており、懸念材料となっている。一方、物質系の微小重力科学においては、必ずしも、長時間の微小重力状態を必要とせず、数十秒から分の長さがあれば十分な場合もある。20秒の微小重力状態は、ジェット機の放物線飛行によって得られる。欧州宇宙機関 ESA ではエアバス A-300 機を用いて実施している。また、6-12 分の微小重力状態は小型ロケットによって得られ、欧州においては TEXUS および MAXUS ロケットが年に 1-2 回の頻度で打ち上げている。わが国においては、小型ビジネスジェット機が航空機に放物線飛行に供されているが機体が小型であるために、多くの研究者の要望に応ずることが困難である。また、微小重力実験用の小型ロケットの打ち上げは、現在、中止されており、微小重力科学の発展の阻害要因となっている。

欧州においては、欧州宇宙機関 ESA および欧州連合 EU が、産業界と共同して微小重力科学研究を大規模に推進しており、「産業界が必要とする基礎科学データ」が得られつつあり [22]、わが国の取り組みの遅れが懸念される。

7 発展のために求められること

地球環境の変化による種としての人類絶滅の危機を回避するには、地球環境を理解した上で技術的な解決を図ることになる。地球とその環境を理解するには、地球以外の月や惑星などの天体の探査、宇宙を利用した天文学の研究、地球の科学観測データ、国境の無い地球の画像解析、さらに、微小重力科学および、放射線を含む宇宙環境における生物学の研究が求められる。

宇宙環境は、科学、技術、人文、芸術、さらに経済や法律、国際政治など、あらゆる人間の営みが関わる場所である。我々が住む地球の特殊性をより深く理解し、地球環境とは何かを知るための視野の拡大の手段だからである。宇宙の芸術利用、例えば、無重力3次元等方空間を利用したような舞踊は、一般市民には科学研究の成果よりも直感的に宇宙環境を理解しやすく、結果として地球環境の特殊性を容易に認識することとなる。

宇宙環境利用には国家を越えた協力も求められる。この結果、地球環境に対する人類の意識は、これまでよりも一層研ぎすまされたものになり、人類は問題解決のための連帯感を深めてゆくことが期待される。生命系、非生命系を問わず、国際宇宙ステーション上にそれぞれの宇宙機関が保有する実験装置を、相互に活用することも実験の機会を増やしてゆく上で必須であり、各宇宙機関との間での調整が求められる。宇宙での恒久的な実験施設や小型ロケット、航空機の放物線飛行などの手段を持たない国々に、その手段を提供し、新しい科学の成果を共有してゆくことは、宇宙実験を経験したわが国には望まれる。

わが国の宇宙環境利用の状況は欧州に比べて遅れており、地球および地球環境を理解することと環境問題の解決に貢献できないばかりか、宇宙環境利用がもたらす産業科学技術の恩恵にも預かれないことが懸念される。宇宙環境利用は大型プラットフォームを利用した研究であるので、国に依存するところが大きい。一方、宇宙環境利用の成果が見えにくいことも挙げられている。宇宙環境を利用した生命科学や物質科学の成果は、重力によって応答する細胞内部での物質の移動の問題であったり、数式によって普遍的に記述される物理現象であったりする。これは、ロケットの打上げや、「かぐや」からの地球の画像などのように、必ずしも誰もが目で見て分かり易いものとはなっていない。このために費用対効果の問題がしばしば議論の対象となる。また、研究の成果は、それぞれの学術雑誌などに掲載されることになるので、異なった分野の科学者や専門家には見えにくくなっている。宇宙開発という巨大システムの中で、宇宙環境利用の意義を、科学、技術、芸術、外交などの視点から理解し、かつ、全体をシステムとして把握できる人材の育成も必要となる。

宇宙環境を利用した研究は、最先端科学であり、地球環境を理解するための手段であり、わが国の将来を付託された分野横断のフロンティア領域である。したがって、学術の専門領域、官庁の所掌事項の領域の間に存在する障壁を超えて推進すべき課題であることを認識しなければならない。研究者にあっては、異なった文化を有する専門家や、納税者である国民に対し、機会を捉えて親しみやすく説明することが求められる。産業界においては、必要とする技術課題の解決の場として、宇宙環境利用があり得ることを認識し、大学等と連携してこれを活用することが望まれる。

このためには、以下のことが実現されるよう、今後、一層議論を継続していくべきであるとの結論を得た。

(1) アクセス機会の確保

国際宇宙ステーションが建設され運用が開始されている。生命系の研究においては「時間」から「日」、「月」、あるいは「年」の長さの宇宙環境利用が必要となる。国際宇宙ステーション日本実験モジュールへのアクセスが、今後、長期にわたって可能となるようにすること。

(2) 短時間微小重力環境利用機会の確保

宇宙環境シミュレーション研究や物質系の科学研究においては、必ずしも長時間の微小重力環境を必要とせず、「秒」や「分」の長さで十分な場合も多い。これが可能となる小型ロケット、航空機の放物線飛行、落下坑などの利用の機会を充実させること。

(3) 宇宙環境芸術の振興

宇宙の人文利用を促進し、心の問題も研究の対象と捉え、絵画、舞踊などの宇宙環境芸術活動を促進すること。

(4) 海外研究者への手段の開放

宇宙環境（微小重力環境）利用が可能な国は限られている。アジア地域の諸国に、実験機会を提供し、科学者レベルでの連携を深めること。

(5) 人材の育成

宇宙環境利用の意義を、科学、技術、芸術、外交などの視点から理解し、かつ、全体をシステムとして運用できる人材を育成すること。

8 おわりに

人間の活動により地球環境が深刻化し、地球資源の限界が認識され、将来の持続可能な社会の可能性が模索されている。この問題の解決のためには、人間社会のみならず地球生命および地球自然環境すべてを含む複雑な状態変化を、同時に、しかも客観的に把握する科学的視点によって理解することが求められる。

地球環境を客観的に捉えられる視点は、物理的にも認識の上での地球から一度離れた視点に立って得られる。地球における重力加速度と大気と磁場の存在を取り払う視点に立った研究を通じて、地球の環境を客観的に捉えることが可能となる。

<参考文献>

- [1] M. Kamada, N. Fujii, S. Aizawa, S. Kamigaichi, C. Mukai, T. Shimazu, H. Takahashi, "Control of gravimorphogenesis by auxin: accumulation pattern of CS-IAA1 mRNA in cucumber seedlings grown in space and on the ground", *Planta* 211, (2000) 493-501.
- [2] H. Takahashi, M. Kamada, Y. Yamazaki, N. Fujii, A. Higashitani, S. Aizawa, I. Yoshizaki, S. Kamigaichi, C. Mukai, T. Shimazu, K. Fukui, "Morphogenesis in cucumber seedlings is negatively controlled by gravity", *Planta* 210, (2000) 515-518.
- [3] K. Hirasaka, T. Nikawa, L. Yuge, I. Ishihara, A. Higashibata, N. Ishioka, A. Okubo, T. Miyashita, N. Suzue, T. Ogawa, M. Oarada, K. Kishi, "Clinorotation prevents differentiation of rat myoblastic L6 cells in association with reduced NF- κ B signaling" *Biochimica et Biophysica Acta*, 1743 (2005) 130-140.
- [4] H. Furochi, S. Tamura, M. Mamemoka, C. Yamada, T. Ogawa, K. Hirasaka, Y. Okumura, T. Imagawa, S. Oguri, K. Ishidoh, K. Kishi, S. Higashiyama, T. Nikawa, "Osteoactivin fragments produced by ectodomain shedding induce MMP-3 expression via ERK pathway in mouse NIH-3T3 fibroblasts" *FEBS Letters*, 581 (2007) 5743-5750.
- [5] 須田立雄, ふわっと'92 宇宙実験成果報告書 (1/2 分冊) . 宇宙開発事業団技術報告 NASDA-TMR-940002, vol. 1, 宇宙開発事業団, 1994.
- [6] 篠山雄一, "微小重力下におかれた脊椎動物の生理: 特に Ca 代謝に注目して", *宇宙生物科学*, 15 (2001) 3-14.
- [7] 川島紫乃, 水野康, 大島博, "長期ベッドレストにおける下肢筋力低下の個人差の検討", *体力科学*, 153 (2004) 659.
- [8] K. Ohnishi, T. Ohnishi, "The biological of space radiation during long stay in space", *Biological Sciences in Space*, 18 (2004) 201-205.
- [9] 井尻憲一, 「宇宙の生物学」, 朝倉書店 (2001).
- [10] 熊谷一郎, 「燃焼」, 岩波全書 (1976).
- [11] 中谷功, 高橋聰, 西田勲夫, "微小重力下での浮遊帯域法", *日本結晶成長学会誌*, 20 (1994) 48-55.
- [12] W. Shimada, Y. Furukawa, "Pattern Formation of Ice Crystals during Free Growth in Supercooled Water", *Journal of Physical Chemistry B*, 101 (1997), 6171-6173, 1997.
- [13] T. Itami, T. Masaki, H. Aoki, S. Munejiri, M. Uchida, S. Matsumoto, K. Kamiyama, K. Hoshino, "Self-diffusion under microgravity and structure of group IVB liquids", *Journal of Non-Crystalline Solids*, 312-314 (2002) 177-181.
- [14] T. Azami, S. Nakamura and T. Hibiya, "Effect of Oxygen on

Thermocapillary Convection in a Molten Silicon Column under Microgravity”, Journal of Electrochemical Society, 148, (2001) G185-G189.

- [15] D. Schwabe, S. Tanaka, A. Mizev, H. Kawamura, “Particle accumulation structures in time-dependent thermocapillary flow in a liquid bridge under microgravity”, Microgravity Science and Technology, 18, (2006) 117-127.
- [16] H. Kobayashi, J. Park, T. Iwahashi, T. Niioka, “Microgravity Experiments on Flame Spread of an n-Decane Droplet Array in a High-Pressure Environment”, Proceedings of the Combustion Institute, 29, (2002) 2603-2610.
- [17] 新岡嵩, 河野通方, 佐藤順一, 「燃焼現象の基礎」, オーム社 (2001).
- [18] 立花隆, 「宇宙からの帰還」, 中央公論社, (1983) .
- [19] 立花隆, 「宇宙飛行士との対話：宇宙を語る I」, 中公文庫, (2007) .
- [20] 京都市立芸術大学・宇宙航空研究開発機構, 「共同研究最終成果報告書：宇宙への芸術的アプローチ」, 2005年3月.
- [21] イシグロダンスシアター, “天へのシルクロード 国際宇宙ステーションパイロットミッション実施に向けて” 東京表参道, 2007年11月3,4日.
- [22] “Microgravity Application Program” ESA SP-1290, 2005.

<用語の説明>

ペンシルロケット :

昭和30年4月12日に糸川博士らにより、日本で最初のロケット発射実験が行われた。直径1.8センチ、全長23センチの小さなロケットであった。その形状から、この名前がつけられた。

マランゴニ対流 :

液体の表面に温度や不純物の濃度に差があると、表面張力の勾配が生ずる。これによって生ずる対流をマランゴニ対流と呼ぶ。宇宙環境において浮力に起因する対流が抑制された状態では、この対流が非常に顕著になる。

カルノー・サイクル :

熱機関効率の限界を探り出すためにカルノー(Nicolas Leonard Sadi Carnot:1796-1832)によって、ガスの圧力と温度を示すグラフ上に仮想的に設けられた熱機関である。上記機関や内燃機関など、熱機関を考えるときの原点となっている。

マクスウェルの電磁方程式 :

空間を伝播する電磁波における磁場と電場との関係を記述した式。

熱物性測定 :

物質の比熱、放射率、密度、熱伝導率、表面張力などの、物質に固有な物理的性質のうち、特に熱に関わるものを熱物性と呼んでいる。特に、熔融金属や熔融半導体の熱物性測定は通常の重力加速度下では困難であるが、微小重力状態の利用により精密測定が可能となる。

MAP :

欧州宇宙機関 ESA が、大学と産業界との連携により推進する宇宙環境利用研究プロジェクトである。2000年からの7年間で8千万ユーロ(約110億円)が研究資金として投入された。30のチームが参加し、高温融体の熱物性測定や、蛋白質結晶成長の研究がなされている。 Microgravity Application Program の略。

IMPRESS :

ヨーロッパ連合 EU、欧州宇宙機関 ESA および産業界が関与する次世代宇宙航空機用の金属間化合物に関する研究開発プロジェクト。

Intermetallic Materials Processing in Relation to Earth and Space Solidification の略。

ペグ形成 :

キュウリやヘチマなどのウリ科植物では、発芽直後に特殊な突起状組織を形成し、それを梃子にして茎(下胚軸)が伸長することによって、芽ばえが種皮から抜け出す。この突起状組織はペグと呼び、その発達に重力が関係している。

多体拘束系力学 :

マルチボディダイナミクスとも言う。車両やロボットなど質点ではなく、

剛体要素が複数集まり、ピンジョイントやバネなどの結合要素によって結ばれた系を取り扱う、近年進歩が著しい力学の一分野である。

<参考資料>

基礎生物学委員会・臨床医学委員会・物理学委員会・総合工学委員会・機械工学委員会・電子電気工学委員会合同重力加速度依存現象の科学・生命科学検討分科会 審議経過

2006年

10月26日 日本学術会議幹事会（第27回）

- ・委員会設置、委員決定

12月11日 第1回分科会

- ・委員紹介
- ・JAXAの動向に関して議論。

2007年

1月11日 第2回分科会

- ・意志表出の基本的考え片について議論。
- ・生命の分野では宇宙放射線などとの関連、医療面とのつながり、応用も考えるべきと、議論。
- ・意志表出の原稿を準備。
- ・意思表出先についての議論。

2月6日 第3回分科会

- ・学術会議に相応しい高い視野からの理念を持たせるべきとの議論。打ち出すべきである。
- ・多数の委員会からの参加者があることの特徴として、宇宙、地球と人間との関連を主体にして、地球や人類の将来を踏まえたものを目指すことを議論。
- ・進化論等や、人間や心理等についても触れるべき。

2008年

9月4日 日本学術会議幹事会（第63回）

基礎生物学委員会・臨床医学委員会・物理学委員会・総合工学委員会・機械工学委員会・電気電子工学委員会合同重力加速度依存現象の科学・生命科学検討分科会報告「宇宙環境利用の新たな時代を目指してー物質科学および生命科学における宇宙環境利用の視点からー」について承認