宇宙実験と微小振動*

藤森義典**

Space Experiment and Micro Vibration / Yoshinori FUJIMORI

Key words: space experiment, microgravity phenomenon, micro g level, material and fluid science, life science

1. 宇宙開発と宇宙実験

「宇宙」という言葉は日本語の感覚からはすべてを包含する空間の意味に受け取られているが、英語では“Space”となっており地球周辺の空間を指すことが多い。この“Space”は数学上の抽象的空間を意味する言葉でもある。地球周回軌道より離れる惑星空間は“Deep Space”と表現している。“Cosmos”とか“Universe”が日本語の「宇宙」の意味に近いと言える。今日までに有人飛行で一番遠くへ行ったのは月までであり、深宇宙探査に関しては無人の観測機を飛行させている状況であるので、人間の宇宙活動も現在は地球周辺に限られていると言ってよい。それ故に宇宙開発も当面は地球近傍を舞台とし、英語でも“Space Development”となっている。

宇宙開発は約30年ぐらいの歴史があるだけで、まだ成長過程にあり、今後とも科学や技術の推進役として期待されている分野であろう。従って宇宙開発という言葉も今日、多岐多様な広範囲の活動を意味していて、即物的に分類すると主として

- (1) 地球近傍の軌道へ上昇させるか、又は物資を輸送する等の手段
- (2) 地球周回か、これ以上の高さとなる宇宙におけるミッション機器とに大別されよう。

(1)はいわゆるロケット、スペースシャトル、まだ実現していないスペースプレーンのことであり、(2)は人工衛星、軌道上サービス機、軌道上作業機、惑星

探査機等である。これら二者は技術的にかなり相違していて同一に論じられないことが多い。さらに(1)や(2)については人間が乗り込んで飛行するのか、無人か否かにより大きなシステム上の違いが生ずる。宇宙開発の初めのころは(1)の輸送手段そのものが宇宙開発の目的であった。今日でも輸送手段の改良、効率化は技術的に大きな課題ではあるけれども、何らかの方法で可能なため、第一義的目標ではなくなっている。(2)のミッションについても、初期のころは気象衛星、通信/放送衛星、少し遅れて地球観測衛星等によるミッションが目標であった。これらの意義は現在でも減少しておらず、需要としては増大している。従って純粋に研究開発なり技術開発という面は薄れつつあり、経済的効率向上が課題として残っている。

今日においては宇宙ミッションが従来の位置利用型から宇宙環境を利用して宇宙開発を推進しようという方向に向かっており、より中味が問われる時代となって来た。宇宙環境は地上と多々異なる特徴があって、その主なものを列举すると、(1)高真空、(2)無重力(微小重力)、(3)高強度太陽エネルギー、(3)高強度宇宙線、(4)広大空間、等である。これらの中で微小重力環境が最も注目されており、流体、材料、生命科学等の研究の場としても適しているという認識が広がりつつあり、宇宙開発の性格が変化するものと思われる。

現在研究的なレベルでの宇宙実験はスペースシャトルのキャビン内か、シャトルの荷物室に搭載されるスペースラブと呼ばれる円筒型の実験室内で実施されている。ソ連のミール宇宙船においても実施されているが、結果は発表されていないので内容は定かでない。

* 原稿受付 平成元年9月29日

** 宇宙開発事業団(東京都港区浜松町2-4-1)

図1 宇宙ステーション概念図 (NASA)

図2 日本モジュール (NASDA)

我が国でもスペースラブによる宇宙実験を1991年6月に計画している。

将来の宇宙実験の主役は現在計画中の宇宙ステーションである。これは図1に示すような、従来にない最大の有人人工衛星となる。米国NASA主導の下で計画が進められており、ESA (European Space Agency)、日本、カナダも参加する国際プロジェクトとなっている。

我が国は図2に示すようなJEM (Japanese Experiment Module) をもって参加する予定となっている。このJEMは円筒型の与圧室、曝露部、小型マニピュレータ、補給用モジュール等から構成されている。与

圧室はライフサイエンスや材料科学の実験室であり、曝露部は天体観測、地球観測、理工学、通信のミッションを行う場所である。マニピュレータは曝露部上で実験ペイロードの取付け、取外しを行う。操作は与圧室内から行う。又、補給用モジュールは予備の実験機器、補給品の保存室ないし、地上と軌道間の輸送コンテナとして使用される。

2. 無重力(微小重力)の物理

宇宙機の微小振動としては古くは剛体運動としての姿勢制御の問題がある。これは宇宙機(特に人工衛星)の指向精度として取り上げられて来た。多くの場合衛星はアンテナ、観測センサを特定の方向に向けておく必要があって、種々の外乱による姿勢変動は制御により補正している。この小論では宇宙機(衛星)の姿勢変動として生ずる微小振動ではなく、宇宙で行う実験に影響のある加速度レベルとしての微小振動、すなわちマイクロ- g (μg) を取り上げることとする。

無重力、厳密には微小重力であるが、は見掛け上物体が

重力の下で加速されるすべての非慣性基準座標系の中で生じる。この場合、D'Alembert 加速度として知られる座標系の加速度は、その座標系内部の重力の効果を相殺する。このことはEinsteinの等価原理(Equivalence Theory)の結果でもあり、重力は座標基準の加速度と区別がつかないことを意味している。従って軌道上での“重さの欠如”(Weightlessness)は重力が無いからではなく、重力が宇宙機の運動により相殺されているだけである。当然異なる座標系に置かれている観測者から見れば、宇宙機の運動による重力の効果を観測できる。

この微小重力環境はいくつかの方法で作り出すこと

が出来る。たとえば、落下塔、航空機やロケットの弾道飛行、人工衛星その他の軌道周回実験室等である。

現在我々の知識は、スカイラブやスペースシャトルの実験から得られているが、それ以前には軌道上における連続した自由落下はまるで重力が存在しないかのような環境を単純に提供すると考えられていた。しかしながら軌道上を周回している物体の基準座標系内においても、重力場が D'Alembert 加速度により完全に相殺されるのは物体の重心位置においてのみである。さらに、実際に軌道上で運用される実験室においては、機械類や乗組員が必要であり、それらがじょう乱の元となる。そしてそれらによる加速度レベルは地上で経験されるレベルよりけた違いに低いけれども、実験の障害となるには十分なレベルなのである。従ってこのような軌道上の環境を正確に記述すると、無重力 (Zero Gravity) とは言えず、微小重力 (Micro Gravity; $\mu\text{-g}$) となるわけである。

軌道上のじょう乱には多種の源があって、飛行物体の形状、寸法、軌道条件により変わってくる。ここでは、高度 460 km で、地球を周回する宇宙ステーションを想定する。この場合、じょう乱として準静的加速度 (Quasi-Steady)、振動加速度 (Oscillatory)、遷移加速度 (Transient) と大別することが出来る。これらの源 (原因) を以下に略記する。

1) 準静的加速度

これは大きさ、方向ともに大体一定である。源として重力傾斜 (Gravity Gradient)、空力的抵抗 (Aerodynamic Drag)、回転 (Rotational) によるものである。

重力傾斜による加速度は、先に述べた物体を軌道上に保持する求心力 (Centripetal Force) が厳密には物体の重心位置でのみ重力加速度を相殺するだけなので、重心以外の点では生ずることとなる。すなわち重心位置からの距離の違いにより求心力は変わるので、重力と求心力のわずかな差は宇宙機基準座標系内で見掛け上の力を惹起することとなる。

空力的抵抗は希薄な空気によるものであるが、重力傾斜による加速度に比較してけた違いに低いレベルであり外乱としては下限を与えるものである。

回転による加速度は宇宙ステーションのある面を常に地球方向へ向けて (局所垂直/局所水平方向制御: Local Vertical/Local Horizontal Orientation) おこなう場合に生じる。この時ステーションは重心回りに一定のピッチ回転率 (Pitch Rate) を持つこととなり、回転が内部に求心力を生じさせることとなる。もしステーションの回転が LV/LH 制御を完全に満

たしているのなら、回転による求心力は飛行方向に垂直な重力傾斜の影響を相殺する。しかし実際には制御系に誤差があるのと、飛行方向に並行な回転加速度は残留している。

2) 周期的振動による加速度

これは時間とともに定常的に変動するもので、振幅や周波数でその特徴が記述できる。構造物は共振周波数 (振動数) を持っているので、周期的外乱や衝撃の入力があるとその共振点で応答する。外部へ熱や音として発散すると応答は減衰する。また連続した周期的外乱があると、構造物も入力の前周波数で応答する。大体外乱にも多くの周波数成分があるし、構造にも共振点が多数あるので、外乱の性質に応じて適宜共振点で独立に応答していると考えてよい。この周期的じょう乱のよい例はファン、ポンプ、ライフサイエンス遠心加速機、健康維持用のトレッドミル等がある。

3) 遷移的 (過渡的) 加速度

これは先の 1) や 2) に入らない範疇のものを総称する。不連続な力、すなわち突然振動が開始したり、終了したりするもの、又は衝撃的なもので惹起される。遷移的外乱は一般的にある最大振幅となって減衰するものが多い。乗組員の動き、機器の作動開始/停止等がよい例である。この種の加速度は不規則であることと予測し難いこともあり、制御が難しく実験にとってより危険だと考えられる。

3. 宇宙環境の利用と $\mu\text{-g}$ レベル

宇宙の微小重力環境は一般に地上の 1g 以下では重力の影響ではよく分からない現象や過程を研究したり、新しい現象を発見するのによい機会を与えてくれる。これまでのスペースラブの実験から 10^{-3}g 程度の加速度でも十分大きな外乱となることが分かっているのでより低いレベルの $\mu\text{-g}$ 環境が望まれている。落下塔や航空機、ロケットによる実験では $\mu\text{-g}$ 継続時間に限界があり、実験装置のチェックや、短時間の現象の観察にしか使えない。スペースラブでは実験時間が 1 週間程度まで延びたが、たんばく質の結晶成長やライフサイエンス実験ではこの程度の期間でも十分なのである。そのようなわけで宇宙ステーションに至って初めて地上研究と本当の意味で対応をつけられることとなる。ここでは主として材料・流体、生命科学関係の宇宙実験と $\mu\text{-g}$ レベル要求を紹介する。

材料や流体の研究において微小重力環境は浮力・沈降・対流・静圧等重力による現象を無くしてしまうか、かなり減少させると予測される。この分野の主な活動は、① 気相処理 (Vapour Process)、② 熔融域処理

表1 マイクロ加速度の推定

	準静的加速度	振動加速度		遷移(過渡)加速度
試料保持 (試料移動 5 cm を仮定) $\mu\text{-}g = 10^{-6} g$	$1 \mu\text{-}g$	Hz	$\mu\text{-}g$	500 $\mu\text{-}g\text{-}s$ (パルス)
		0.001	0.007	
		0.01	0.7	
		0.1	70	
		1	7 000	
流体攪拌 (Bridgeman 結晶成長過程) $\mu\text{-}g = 10^{-6} g$	$1 \mu\text{-}g$	Hz	$\mu\text{-}g$	8 $\mu\text{-}g\text{-}s$
		0	1	
		0.016	1.3	
		0.16	8	
		1.6	80	
		16	800	

(Melt Zone Process), ③ 無容器処理 (Containerless Processing), ④ たんぱく質結晶成長 (Protein Crystal Growth), ⑤ 浮遊域処理 (Float Zone Process), ⑥ 流体物理 (Fluid Physics), ⑦ 燃焼 (Combustion), ⑧ 生物学 (Biotechnology), ⑨ 生物学/医学 (Biology and Medicine) となろう。この中で無容器処理と言われるのは、微小重力のため浮遊状態を利用できる大きな長所の活用である。但し実際に容器を全く無くすわけではなく、ある空間内に物質を浮遊させ物理的接触等の無いハンドリング技術のことであり、これからの開発課題である。

以上の①から⑨までの活動はいずれも特別な内容となり、必要な方法も独立になると予想される。しいて共通的要素を掲げるとすると、(A) 試料保持 (Sample Suspension), (B) 流体の攪拌 (Fluid Mixing) となる。浮遊している試料又は流体の攪拌時に生ずる $\mu\text{-}g$ を推算した一例は表1のようになっている。但し各種のパラメータを仮定しているので、大体の目安である。これらの予測値や実験内容を勘案して、利用者側は $\mu\text{-}g$ レベルの要求を出すこととなる。

生命科学・医学関係においても微小重力環境は種々の影響が報告されている。まず人体に対する影響は以下の事項が代表的である。すなわち、(1) 体液の移動と変化：現象として頭部充血感、鼻の閉塞感、顔の膨張、下肢容積減、心臓機能減退があり、一時的なものとして、初期の血液濃度増、帰還時の脳貧血、(2) 宇宙酔い：嘔吐、めまい、多唾液、冷汗、蒼白、倦怠、食欲不振、(3) カルシウム減少：骨への刺激減のためカルシウム密度減、(4) 筋肉と体容積の変化：下肢の抗重力筋萎縮、身体長伸長、体容積(体重)減少、等である。

今日ある程度の対症療法はあるが、研究目的のため

搭乗員を自由に使うわけにはいかないもので、たとえば(3)の問題等については小型動物や鳥類の卵を用いて脱カルシウム実験を行うことが多い。

現在では細胞レベルを宇宙空間で観察し、その分裂、増殖、分化、機能発現とそれらの異常および生存率の地上対照群との比較により研究することが注目されている。そのため細胞培養は研究上の重要な技術となっており、その良否が将来の遺伝子、分子レベルの研究に大きな影響があるものと予想される。

さらに研究の一分野として植物も大きなテーマである。植物には重力感受性、重力屈性があることはよく知られており、地上と宇宙において生長、分化、生殖等の比較対照研究を行うことは、宇宙における食糧生産の道を開くものである。

ライフサイエンス分野では $\mu\text{-}g$ のレベルや値について材料、流体分野程厳密な要求は少なく、 10^{-3} 程度あればよいとされる実験が多い。主たる関心事は $\mu\text{-}g$ レベルの持続性であるので、航空機やロケットでは本来の目的は達せられない。技術的な面で注目されているのは、(1) 乗組員の長期宇宙滞在、(2) 宇宙の汚染、毒物対策、(3) 軌道上での解析/処理、自動化、エキスパートシステムやAIの応用、試料の緊急回収、(4) 補給、(5) 実験支援機器、(6) 搭乗員実験時間とスキルのトレードオフ、(7) 予備実験、(8) 利用運用センタ、(9) 簡易型ペイロード、等についてである。これらの中には特にライフサイエンス分野のみならず、どの分野にも共通的に関心があるものも多い。

4. 我が国の宇宙実験プログラム

我が国の本格的宇宙実験は1991年6月にスペースシャトルで実施予定となっている第1次材料実験である。通称“FMPT”(First Material Processing Test)

表2 FMPT 研究テーマと実験装置

新超電導合金の溶製	連続加熱型電気炉	シリコン球結晶の成長と表面酸化	球結晶成長実験装置
二種の熔融金属の相互拡散および凝固生成する合金、化合物の組織と構造	〃	無重力下における気相金属凝結機構の研究	金属微粒子生成実験装置
高剛性・超低密度炭素繊維/アルミニウム合金複合材料の製造研究	〃	音波浮遊装置内での液滴の挙動と音波干渉履歴の研究	液滴マニピュレーション実験装置
無重力下におけるSi-As-Teアモルファス半導体の製造	〃	温度勾配及び超音波定常波のある場における泡の挙動の解明	流体物理実験装置：泡挙動実験ユニット
無重力条件下における共晶系合金の凝固に関する研究	〃	無重力下での材料製造過程におけるマランゴニ対流の研究	流体物理実験装置：マランゴニ対流実験ユニット
複合脱酸した鋼塊中の脱酸生成物の生成機構	高温加圧型電気炉	無重力環境下における有機金属結晶の成長	有機結晶成長実験装置
粒子分散合金の作製	〃	搭乗者の内分泌系の反応及び代謝変化	採尿装置
液相焼結機構の研究	〃	無重力順応過程における視-前庭性姿勢・運動制御の研究	前庭機能実験装置
狭バンドギャップ三元混晶半導体鉛すずテルル単結晶の無重力下における結晶成長	温度勾配型電気炉	宇宙空間における視覚安定性の研究	刺激信号制御装置 身体機能測定装置
非混合合金系の凝固・成長に関する研究	〃	骨と軟骨の発生と成長に及ぼす無重力の影響	卵ラック 保温カバー
無重力環境下における化合物半導体結晶の作製 (InGaAs の研究)	〃	無重力環境での知覚・動作機能の研究(手動制御特性の研究)	刺激信号制御装置 身体機能測定装置
無重力における帯溶融法によるPbSnTe大形単結晶の試作	イメージ炉	生体成分の無重力下での電気泳動法による分離条件の確認	電気泳動装置
浮遊帯域溶融法による化合物半導体結晶の作製	〃	無重力を利用した酵素の結晶成長	酵素実験キット
ガラスの高温挙動	〃	哺乳類細胞の超微構造と機能に及ぼす無重力の影響に関する研究	細胞実験キット
無重力下におけるサマルスカイトの合成	〃	フリーフロー電気泳動による細胞の分離	電気泳動装置
非可視域用光学材料の研究	音波浮遊炉	HZE および宇宙放射線の遺伝的影響	放射線照射コンテナ 放射線量計
		宇宙放射線の生物への影響の検討と宇宙飛行士の放射線防御対策の開発	放射線照射コンテナ 放射線量計
		アカパンカビを用いた概日性リズムの研究	カビ成長箱

と呼ばれていて、この目的のため日本人搭乗科学技術者3名が選抜され、現在国内外で訓練中であることはご承知の方も多いかと思う。

このFMPTで実施される研究テーマと使用される実験装置名を表2に示す。現在飛行に向けて準備中である。

5. 結 び

宇宙実験ないし宇宙における研究は内容的に特別な

ものでなく、本質的に地上研究の延長と考えるべきである。宇宙環境の特殊性や、宇宙で利用できる電力、水、ガス等のリソースも地上の実験室程余裕がないことを考えると、宇宙実験の内容が事前に十分検討、評価されていて、計画自体が綿密に練られていなければならない。そういう意味で、地上における研究の進め方を再考するよい機会でもあり、個々の技術開発も含めて、あらゆる分野の学術水準も向上するものと期待してよい。