

# 宇宙環境利用の生命科学

石岡憲昭、東端 晃

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部宇宙環境利用科学研究系

ISS科学プロジェクト室兼務

## 1. はじめに

昨年、米国ブッシュ大統領の新宇宙政策の発表後、NASAは「Exploration」に組織を改変して、人類の火星に向けた体制とした。これまでの宇宙における基礎生物学研究は医学的課題の基礎研究を除き縮小されている。実際、第5回ライフサイエンス国際公募の募集時にはモデル生物として「シロイヌナズナ」「C.elegans」を中心とした基礎生物学研究に主体があったが選定時には「Exploration」に寄与しない動植物の研究は選定しない方針が明確にされ、さらに過去に選定したテーマですら除外する方針を打ち出した。NASAは医学的リスクのクリティカルロードパスを設定し今後10年間で宇宙飛行士200人を対象に医学課題を克服するとの提言もしている。昨年、NASAエイムスリサーチセンターを訪れたが、ビジターセンターは見事に国際宇宙ステーションの影も形もなく火星一色であった。国際宇宙ライフサイエンスワーキンググループの会合においても担当者レベルでNASAは各国に「Exploration」への参加と協力を求めている。スペースシャトルが本年5月再飛行を目指し準備中であるが、例え順調に飛行が再開されたとしても国際宇宙ステーションの建造が最優先であり、基礎生物学宇宙実験が実施できるとしても早くても2007年後半以後である。そして、2010年にはシャトルの引退が決まっている。一方、中国が独自に有人技術を開発し、昨年に続き本年中にも有人ロケット「神船」による2回目の有人宇宙飛行が計画されている。それに合わせるようにフリーフライヤーを用いる宇宙実験の共同実施を各国に打診してきている。ESAやCSA、CNESも注視しているようである。その中で日本はいったいどこへ行こうとしているのか、それは取りも直さず日本の宇宙生命科学の独自性、方向性にも関わってくる。宇宙生命科学を推進する者の一人として、日本は、宇宙環境を利用した基礎生物学研究を主体に重点化領域の推進を継続すると強調している。人の宇宙における生存に係わる問題を基礎生物学から解決し人類の地球外活動の拡大を目指す。

## 2. 地球の創生と火星へ

宇宙が始まってから多くの星々が誕生し、死んでいる。星の死はまた新たな星の誕生を促す。約46億年前、ある超新星が銀河系のある場所で大爆発とともに死を迎えた。爆発の衝撃波は星間雲の塵やガスの密度にゆらぎを生じ、密度の高いところと低いところができ、密度の高いところでは塵やガスが激しくぶつかり合い回転しながら成長し大きくなっていった。大きくなるにつれ自分の重力に負けて今度は逆に中心に向かって収縮を始め、それ

につれて中心部はどんどん温度が上昇し、ついには非常に高温で光り輝く原始太陽が誕生したのである。原始太陽を中心にガスや塵が円盤状に回転し高温の原始惑星系円盤を形成していった。原始太陽の収縮が終了すると温度が下がり原始惑星系円盤内の鉱物粒子が凝集してお互いがくっつきやすくなりどんどん大きな塊ができる。やがて数キロメートルから数十キロメートルの大きさの小天体「微惑星」となり、その後、互いに衝突を繰り返しながら大きくなり同じ軌道にある小型の微惑星や塵を引力で取り込みながら原始惑星へと成長していったのである。こうして第三惑星の地球を含む9つの惑星からなる太陽系ができた。そして地球に生命が誕生したのは、今から約40億年前と考えられているが、いったいどのようにして誕生したかは未だに謎がいっぱいである。

1996年、生物の痕跡が火星由来の隕石から発見されたとのNASAからのニュースは、ことの真意はともかく地球外生命の存在に対する期待を高めた。火星は地球によく似た惑星であり、その太古の環境も似ていたことを示すデータが増えている。さらに2001年にNASAは、同じ隕石から走磁性細菌によって作り出されたような数珠状の磁鉄鉱の結晶を発見したと報告した。地球に存在する走磁性細菌は酸素を必要とするが、もし、結晶をつくった細菌が地球型と似ているとしたら36億年以上前の火星には空気が存在したということになる。主成分は二酸化炭素であるが、確かに非常に薄いながらも大気が今でも存在しているのだが。また、今年(2002年)になってから、火星の地表面からほんのわずかの下に火星の全土を覆うくらいの大量の水が氷として貯えられていると発表された。もし、氷の下に液体の水が存在すれば、その生命が地球型と似ているかどうかは別にして、過去に生命が存在しただけでなく今現在も生命が存在している可能性を否定できない。ひょっとしたら火星を起源とする生命体が原始地球に飛来し、地球型生物の共通祖先になったのかもしれない。火星から来た生命が、地球環境の中で重力に対応しながら生殖という個体複製の手段を獲得しながら進化を続け、今現在、進化の頂点にいると思われる我々人類が生命の故郷火星を目指し、テラフォーミングによる火星再生と宇宙環境への適応そして居住を成し遂げようとしているのであろうか。

### 3. 地球生命誕生と放射線、重力

地球に生命が誕生したのは、今から約40億年前と考えられているが、いったいどのようにして誕生したかは未だに謎である。宇宙空間に存在する星間分子からいろいろな有機化合物が見つかったり、隕石からも核酸分子やアミノ酸が見つかったりしている。一方、原始地球大気の組成には一酸化炭素や二酸化炭素、窒素ガス、水が存在し宇宙放射線をエネルギーにアミノ酸などの有機物ができたとも考えられている。既に存在していた、あるいは新たに合成された生命の基となる物質が、原始地球の海で高分子化し、タンパク質、RNAあるいはDNAとなり相互作用をしていく過程で生命が誕生したのであろうか。最初の生物は単細胞の嫌気性バクテリアと考えられているが、どうやって誕生したのかその過程が未だに解っていない。ただ嫌気性生物の誕生に伴い二酸化炭素が増加し、やがて二酸化炭素

を利用する光合成によって自ら有機物と酸素を作り出す生物の誕生により大気中の酸素が増加していったと考えられている。

大量の酸素は紫外線のエネルギーによりオゾン化が起こり大気上層にオゾン層が形成され、それがまた生物にとって有害な宇宙放射線や紫外線から地球を守る役割を果たすようになった。そして生物は陸上へと進出していくわけであるが、一方で地上の生物は、大気を構成する酸素や窒素などの原子核に宇宙放射線が衝突して生じる二次放射線を常に受けている。それはある意味で突然変異を引き起こす進化の原動力でもあり、また同時に DNA に損傷をもたらし、生物を死に至らしめる脅威でもある。そこで生物は初期の段階から損傷を最小限にとどめ、さらにはそれを修復する能力を獲得したと考えられている。その過程の中で、環境に適応し、淘汰を免れ多様な生物相へと進化していったのである。バクテリアからヒトまで DNA の修復機構が似ていることがそれを物語っていると思われる。

浮力のある水中から陸上に進出した生物にとっての大きな環境の変化は、1G という重力に直接さらされることである。重力下での生物は、発生や生理機能、神経機能、体形など、巧みに重力に抗する、あるいは利用するすべを獲得しながら進化してきた。言い換えれば重力に適応できた生物が生き残り、適応できなかった生物は死滅していったということである。それはまた、放射線と重力という環境が、地球生命にとって無くてはならない進化要因であったこと意味している。



Fig. 1. 生命の起源と進化： A Product of Cosmic, Planetary, and Biological Processes ( by NASA:<http://cmex-www.arc.nasa.gov/VikingCD/Puzzle/EvoLife.htm> )

#### 4 . 地球生物の重力感知器

重力下で進化してきた生物は、単純直線運動のカニヤクラゲから角加速度運動にも対応する器官が加わり回転運動が可能になった魚類以降脊椎動物まで、平衡感覚を担う器官(平

衡器)があり重力変化に応答している。平衡器は、発生学的に古く聴器を持たない動物でも平衡胞としてその機能を担う器官を持っている。平衡胞は、内側に感覚毛を持つ感覚細胞からなっており、平衡石が移動して接する感覚細胞からの信号により重力方向に対する体の傾きを知る。ヒトを含め脊椎動物では内耳にある耳石器官を通して中枢に重力方向や運動の直線加速度の情報を伝える。耳石器官は卵形囊、球形囊という二つの平衡胞からなり、平衡胞には有毛細胞という受容細胞が並んでいる。有毛細胞は耳石膜で覆われていて、その耳石膜上に炭酸カルシウムの結晶である耳石が層をなして存在している。耳石の動きに連動して有毛細胞の感覚毛が傾斜することにより重力方向の情報が中枢に伝えられるのである。さらに三半規管の各膨大部にも同様の機構があり、回転運動にも対応している。

植物では動物における平衡石と同様な役割を果たしているのがアミロプラストである。アミロプラストは茎では内皮細胞に、根では先端の根冠にあるコルメラ細胞内に存在し、重力方向に沈降し、情報を伝達する。ただし動物のような感覚毛を持つ細胞は無く、アミロプラストの沈降後いかにして情報が伝達されるのか未だ明らかになってはいない。

## 5 . 宇宙放射線の生物影響

初期の段階から放射線による損傷を最小限にとどめ、それを修復する能力を獲得し、環境に適応し、進化していった生物が宇宙に進出する時に再び遭遇するのが宇宙放射線の脅威である。国際宇宙ステーション、月から火星へと宇宙放射線環境に長期間滞在することは地球型生命としてはこれまでにない経験をすることになる。宇宙放射線の生物影響に関する宇宙実験はこれまでに多く成されているが、低線量長期被曝の影響、微小重力との相互作用の可能性など未だ多くの課題がある。宇宙放射線は銀河宇宙線、太陽粒子線、補足粒子線からなる。宇宙放射線はライトフラッシュと呼ばれる白い火花として宇宙飛行士の目を通して直接感じるができる。この反応は核反応であるとの報告もある。高エネルギーの重粒子線や陽子線は宇宙ステーションの中に飛び込んできて宇宙飛行士の体に達する。重粒子線が当たった場合、細胞内のDNAの2重鎖切断やバースタンダー効果による細胞死などが起こる。生物影響の研究から実験的に宇宙放射線に対する安全値を示し、防護策を求めていくことは、今後ヒトが宇宙に進出していくことにとって最も重要な課題の一つであり、NASAでも「Radiation Health」はトッププライオリティに設定されている。

## 6 . 微小重力環境における生体変化

地球環境に適応し進化してきた地球型生命である人類が宇宙へその活動の場を拡げようとする時、様々な生理的变化が起きることは知られている。

### 6 . 1 . 宇宙酔い

宇宙酔いは、吐き気や頭痛、めまいなどの症状をさすが、数日間で慣れて症状はなくなる。微小重力下では内耳からの情報が入らず、目のなどからの情報と一致せず平衡感覚が

崩れて起こるとされるが、全体的メカニズムは未だに不明である。有毛細胞の機械的刺激が電氣的信号に変換され神経を介して情報を伝達するだけでなく、重力変化に対して遺伝子発現も変化することから、前庭系を構成する細胞の微小重力下での遺伝子変化を分析し、神経の関係を総合的に解析して宇宙酔いメカニズムを解明する研究もなされている。

## 6.2. 筋の萎縮

生物は進化の過程で、重力に抗して姿勢を保持し制御するべく、特に脊椎動物は、筋肉や骨格を発達させてきた。筋肉も骨も重力という刺激があって初めてその機能を発揮しているのである。宇宙では重力に抗した筋活動の必要がないため、抗重力筋の形態や機能が著しい影響を受ける。その結果、宇宙滞在が長期間に及ぶと筋萎縮、筋力減少が問題となってくる。筋力維持には、神経からの刺激が必要であるが、宇宙環境では刺激が極端に少なくなり筋萎縮を起こすのである。微小重力環境では、筋肉や骨の役割が地上に比べ著しく減じる訳で、ある意味においてこの筋萎縮、骨量減少という現象は宇宙への適応であり、退化と言えるのかもしれない。しかしながら宇宙環境では適応でも、地球に帰還したときは大変である筋萎縮と骨粗鬆症によく似た症状に長期間悩まされ続けなくてはならないからである。

## 6.3. 骨量の減少

カルシウム不足で骨粗鬆症が発症するが、もう一つ重要な因子が筋肉同様に骨に対する刺激である。骨の場合は神経刺激ではなく、骨の長軸方向への物理的圧力刺激が無いと強度が不要となり弱くなっていく。圧力が加わると骨芽細胞が活発に活動し、カルシウム分泌を促進し強い骨を形成する。これは骨形成には極性あるいは方向性があることを意味する。骨の細胞には破骨細胞と骨芽細胞の2種類があり、破骨細胞が、骨のカルシウムを溶かし、その後、骨芽細胞がカルシウムを分泌し骨形成を行う。吸収される骨量と形成される骨量が等しく平衡状態（リモデリング状態）にあるとき、骨は常に生まれ変わり、ヒトの体全体の骨は約2年半ですべて入れ替わる。通常、骨吸収と骨形成のバランスで骨が維持されているが、このバランスは骨に働く刺激で変化する。微小重力という刺激により宇宙環境ではこのバランスが崩れ、骨吸収にシフトした結果、破骨細胞により溶かされたカルシウムの血中への流出が続く。血液中のカルシウム濃度は神経機能や生理機能維持に必要な濃度で一定にしている必要があり、骨のカルシウム成分はほとんど尿とともに体外に排出される。宇宙飛行士では、閉経後の女性が1年間に1～2%程度骨密度が減少するに対して、およそ1ヶ月で同程度の減少がみられる。宇宙における骨量減少は、地上における骨粗鬆症との類似性から多くの研究がなされ、多くの知見が得られているが、微小重力によるこのリモデリング状態からのバランスシフトの分子メカニズムは未だ不明の点が多く研究が続いている。

## 7. 宇宙環境利用の生命科学

### 7.1. 宇宙生命科学分野の重点化領域

これまで宇宙生命科学分野は以下の研究活動を行ってきた。

- ・ 生命が宇宙環境に適応・応答する基本的なメカニズムを理解すること
- ・ 宇宙における生命の起源、進化、及びその分布を理解すること。
- ・ 人が参加する宇宙ミッションへの臨床医学的サポート体制を準備し、宇宙探査の危険に対する対処法、治療法の開発を行うこと。
- ・ 人の活動領域を地球から宇宙へ拡大するための科学的、技術的基盤を開発すること

実際このような研究活動が、(1)宇宙における生命と生態学の発展的理解、(2)安全で生産的な人の宇宙活動を可能にする科学的基盤及び技術的支援システムの準備、(3)得られる知識の地球上の生活水準向上や改善への寄与という宇宙生命科学の初期目的の支えであり、過去20年、重要な科学的成果が日本を含め国際協力の下で獲得されてきた。

過去の成果を踏まえ、現在建設中の国際宇宙ステーション(ISS)を利用して、さらに人の宇宙活動を前進するために、特に、宇宙生命科学分野の目標を(1)人類の活動領域の拡大に向けた健康、安全、環境、生活向上の課題発見、(2)地球表面の環境条件に限定されない普遍的な生命の法則探求に焦点を絞り成果獲得を目指すべき時期が来ている。ISS建設の遅れもあり、科学利用の見直し議論の中で、これらの目標達成と科学成果創出のための重点領域科学として、時系列的に「宇宙ゲノム科学」、「宇宙行動科学」、及び「宇宙環境科学」の三つを横軸に、一方、微小重力環境、放射線環境、宇宙空間と閉鎖環境の三つの宇宙環境での特質を縦軸として、重力感受に関する生命現象の解析、宇宙放射線の生物影響の解析、宇宙環境への適応と利用の三つの研究領域が設定された。「宇宙ゲノム科学」を推進し、さらに将来的に「生命の行動(宇宙行動科学)」および「生命と環境(宇宙環境科学)」といったよりマクロレベルに向けた段階的なアプローチを総合的にまとめて人類の活動範囲を宇宙に広げていく足がかりとして整理していくということである。

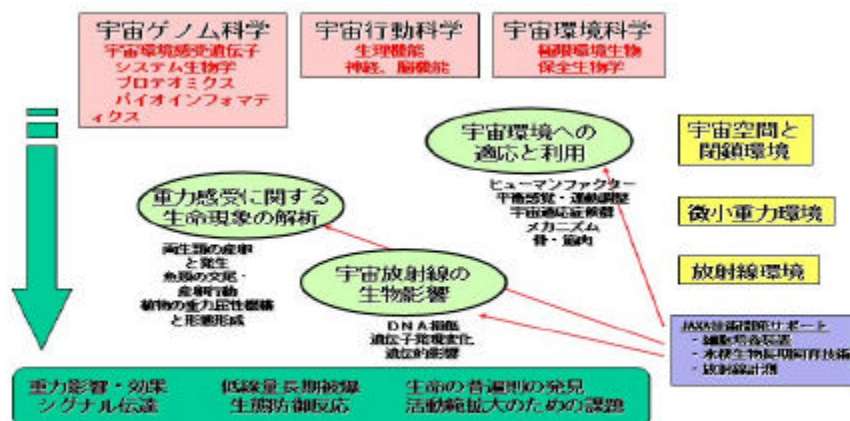


Fig. 2. 宇宙生命科学の重点領域と方向性

### 7.1.1. 宇宙ゲノム科学

ヒトゲノムプロジェクトによってヒトの遺伝子が明らかとなり、研究の中心が遺伝子発現解析、遺伝子多型解析、タンパク質の機能解析等、プロテオミックスと連動した機能解析が中心になっている。このような状況下で、「人類が地球外に活動範囲を広げていく」という目標で宇宙に目を向けると、現に進行している地上でのゲノム科学（地球ゲノム科学）に取り残されているのが、まさに宇宙環境下における生物影響の知見である。そこで、プロテオミックスやバイオインフォマティックスの最新技術を活用し、宇宙環境感受性遺伝子やタンパク質の役割を解明することにより、宇宙環境の生命への影響を体系的に解明する。かつ地球ゲノム科学の知見と連携し、生物が持つ適応性、多様性の解明や生命機能の新たな知見を獲得することである。つまり宇宙ゲノム科学は、宇宙環境下で発動される生物ゲノムの遺伝子情報から地球ゲノム科学と連動して、生命や生体、あるいはヒト及び生物界を構成する法則を発見していくことにつながる新しい科学として位置づけられる。

生命が約40億年前に原始地球に誕生し、長い進化を経て、1Gという地球環境の中を生き延びる術を獲得し、その情報をゲノムに記録してきた。そこには生物に普遍的法則があり、多種類、多様な生物の共通情報として発動、保持されてきた重力感受の遺伝子情報があるはずである。統合的に生命を理解するには、生命のプログラムである生物ゲノムの全構造の解明と、遺伝子の全ネットワーク解明が必要である。一方ゲノム情報の多様性の研究は、異なる生物種間の比較から、進化の法則を明らかにする可能性もあり、宇宙環境下で発現する遺伝子の機能の研究はそういう意味でも重要である。宇宙ゲノム科学では、普遍性の高い法則をヒトのモデルとなる動物を対象とした実験を通して検証することである。その成果は、生物の生理的機能、形態形成、個体や群落、生態系、生物圏の全容など、宇宙行動科学や宇宙環境科学の基礎にもつながり、さらに、少子化や高齢化社会の問題、医療問題、地球的規模での食料問題や環境問題の解決に向けた新たな視点を与えるものと考えられる。また、人類の生存や活動範囲の基盤を拡充し、新産業の基盤形成の促進に貢献し、活力ある豊かな社会を築くことを可能にするという意味で、宇宙ゲノム科学の推進は非常に大きな意義を持つものと考えられる。

### 7.1.2. 宇宙行動科学

生物個体が重力環境に適応する相違を神経機能、生理、代謝、生体機能の応答変化から比較生物学的に解析する。極限環境におけるヒトや生物の生理・行動・心理特性を解析し、生命機能の新たな知見を得ると同時にヒトの長期宇宙滞在に向けた基礎的研究とする。また、ヒトに限らず生物個体が重力環境に適応する相違を比較生物学的に解析し、急性的、慢性的重力環境変化に対して、多様な生物個体の生理、代謝、生体機能の応答変化を解析し、適応性、多様性の解明を目指す。生物の適応性、多様性は解明されなければならない生物学の重要な課題の一つであり、また心理的特性は特別課題のヒューマンファクターの

基礎的研究になる。宇宙環境を利用した多様な生命機能の新たな知見は、新しい知的領域の創出が期待でき、宇宙環境利用の発展にとって重要である。

### 7.1.3. 宇宙環境科学

微小重力や低線量率高エネルギー放射線の極限環境を側面に、閉鎖生態系と見なせる ISS 環境を利用した長期的生物影響を解析する。宇宙環境下での長期間にわたる生態系の変化と生物適応をシステム生物学的に解析する。閉鎖生態系を利用して宇宙ゲノム科学、宇宙行動科学両科学分野への貢献が期待できるだけでなく、宇宙的視点から環境問題と連動した地球生命の多様性と種の保存（保全生物学）に貢献する。将来的に地球を含め宇宙環境の中で生命が発展していくための新しい科学的知的学問領域の創出が期待でき、長期有人飛行における生命維持の基盤的技術開発に貢献できる。

90年代に入ってから NASA から提唱されたアストロバイオロジーは宇宙的視点から生命の起源を追求する新しい学問分野である。一方、保全生物学は地球上の生命の多様性と種の保存を科学的に扱うために環境問題と連動して80年代に成立したやはり新しい学問分野である。ISS環境を緩く閉じた生態系と見なすことにより保全生物学のモデルとなり、微小重力、低線量率高エネルギー放射線の極限環境と言う側面でもとらえることにより、アストロバイオロジーのモデルともなる。このことを利用して宇宙ゲノム科学、宇宙行動科学両科学分野への貢献を目指す。

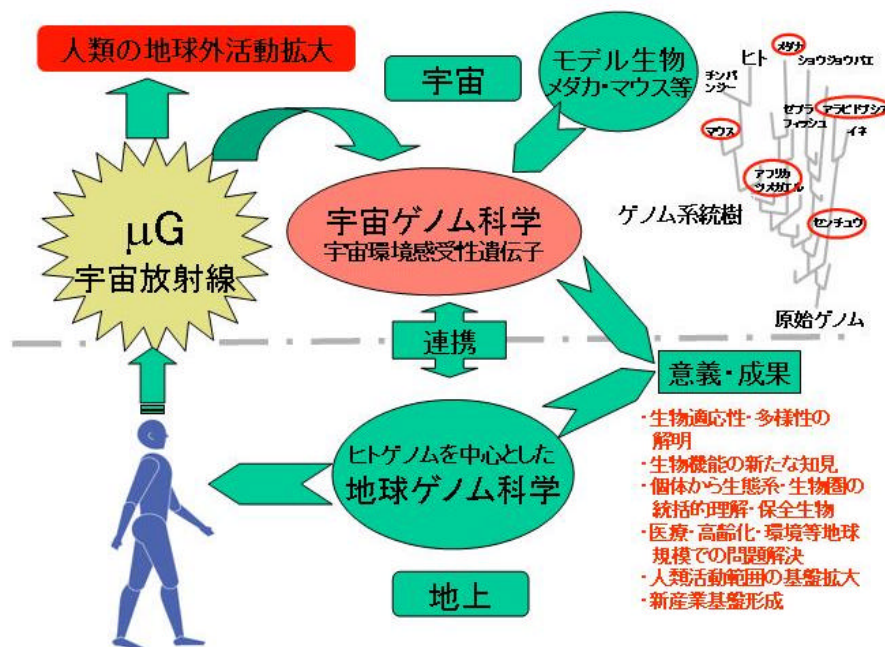


Fig. 3. 人類の地球外活動拡大に向けたモデル生物を利用した宇宙ゲノム科学の推進



## 7.2. 宇宙環境利用科学委員会の研究班ワーキンググループ(WG)

宇宙航空研究開発機構の宇宙科学研究本部では科学の一層の推進のため、宇宙環境利用科学委員会の下、将来の宇宙環境を利用した科学諸分野の研究コミュニティの核となる活動に発展することを期待して、物質科学、生命科学及び基礎科学の各分野の研究班を設置、宇宙環境利用科学の意欲的かつ有効な議論と微小重力利用研究計画提案を目指した研究班WGを公募した。国際宇宙ステーションや各種の宇宙実験システムでの微小重力実験を目指した地上研究の実施、落下塔、航空機等の短時間微小重力実験手段、更には、小型ロケット実験、回収衛星、宇宙ステーションなど広範な宇宙環境利用機会を活用した科学研究計画の立案と準備を目的とした提案から、現在、生命科学分野として23のWGが採択され活動をおこなっている。我々が推進しているWGの2つの例を以下に示す。

### 7.2.1. 宇宙環境ストレス応答の細胞生物学研究班WG

細胞はいかにして増殖過程と生存において遺伝子を複製し保持するか？

細胞はいかにして複雑な細胞を構築しているのか？

細胞はいかにして細胞内器官を合成し保持しているのか？

細胞はいかにして遺伝的に定義されたプログラムに従い分化し特殊化された組織や多細胞生物へと発達するのか？

生物はいかにして細胞外の環境変化に対して細胞レベルで応答するのか？

生物はいかにして適応性、多様性を発動するのか？

等々といった基礎生物学の課題を念頭に、宇宙環境下、特に微小重力と宇宙放射線という生物、細胞に対する一種のストレス刺激への応答を分子レベルから解析することを目的とする。

細胞生物学は生物学的過程をその基本的単位である細胞のレベルで研究するである。基本的に細胞生物学は、分子レベルの視点から組織レベルにまでを視野にいれ、個々の細胞の内因性イベントや環境要因への細胞の反応に集約される。従って、この分野の研究は発生、筋、骨、物質代謝、心循環系やその他のホメオスタティックな系、免疫系、運動感覚系を含む宇宙生物学をその根幹から支えるものである。組織、生体レベルの問題は最終的には細胞個々の細胞とそれらの統合された生理学的ネットワークの正常な機能に依存している。この分野ではこれまで、分子遺伝学や分子生物学の急速な進歩に支えられ多くの成果を上げてきた。また、ヒト遺伝子を始め多くのモデル生物の遺伝子が明らかにされ、ゲノミクス、プロテオミクスからバイオインフォマティクスという機能と情報を一体とした新しい学問分野に発展している。性格や行動、精神活動までもが遺伝子支配を受けているとすれば、その発現の最小単位である細胞を中心に宇宙環境が細胞にどのような影響を及ぼすかを系統的、網羅的に解析することは、今後ヒトが宇宙環境下に長期滞在する上での生物学的課題克服に寄与するだけでなく、ヒトの活動領域を地球から宇宙へ拡大するための科学的、技術的基盤となる。さらに地球上の1G下で進化してきた地球生命が宇宙

環境に応答し適応するメカニズムを理解することで、生物の多様性、適応性の基本的なメカニズムの解明につながるはずである。これまで多くの宇宙環境下での細胞実験が実施され、発表されている。さらにIML - 1、SL - J、IML - 2からのデータは利用できるようになっており、ヒトリンパ球、胎児の肺細胞やその他いろいろなタイプの細胞で、宇宙飛行による細胞生理学的影響が、広範囲に観察されている。しかしながら矛盾した結果がでたり、明確な結果がでなかったりという問題点もある。宇宙という制約の中では、装置を含めた実験条件に起因することも多く、地上での実験とは異なることを十分認識しながら、これまでの結果を新しい視点、解析方法で見直すことも重要である。

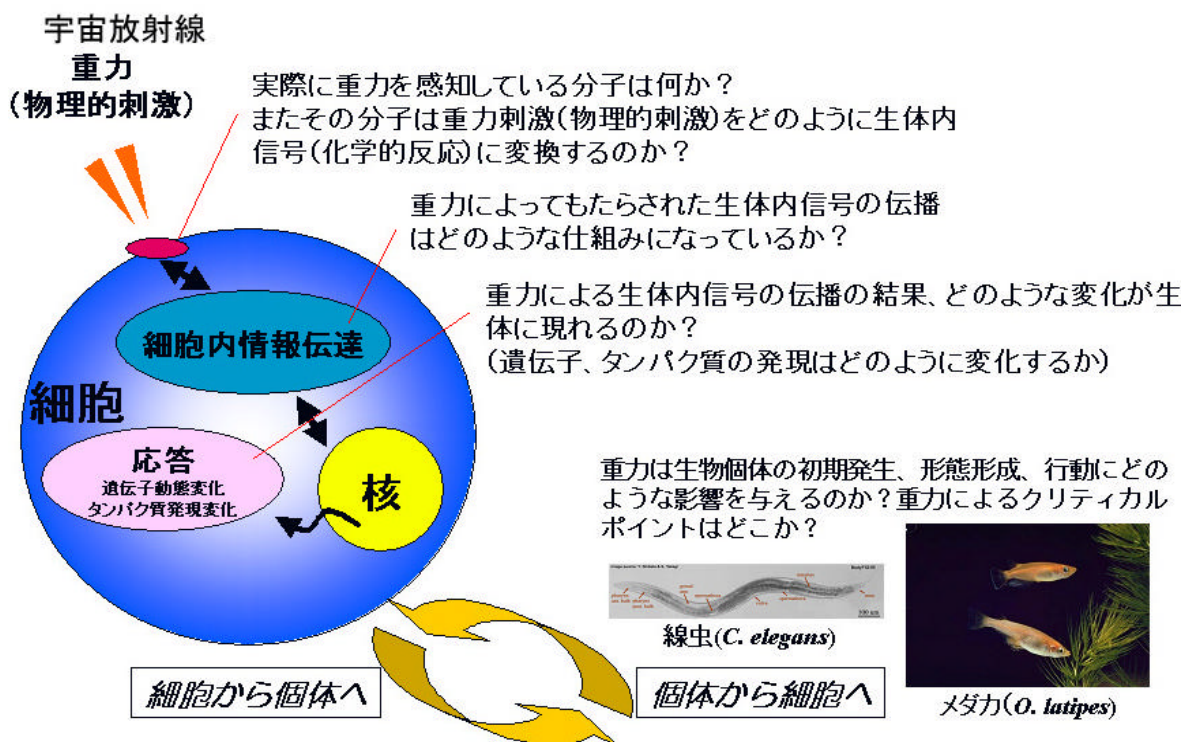


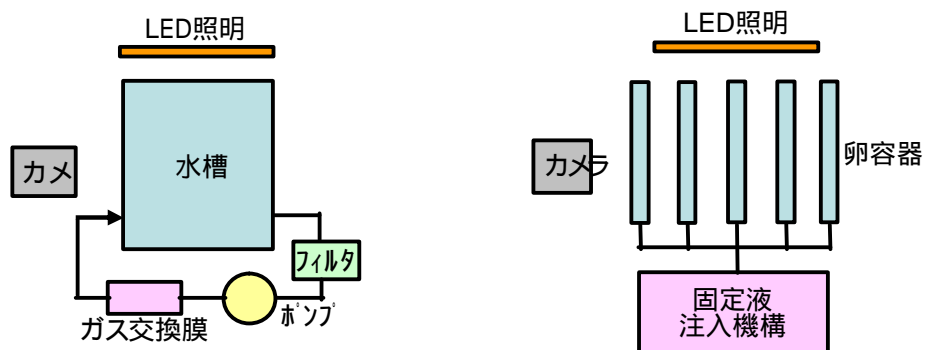
Fig. 4 . 重力、宇宙放射線が与える影響の解明にむけて

7.2.2. フリーフライヤー等の早期飛行手段を利用した重力生物学(水棲生物を利用した実験等を主体として)

遺伝学研究や発生学研究、近年は医学分野でも優れた実験モデル生物として注目され、研究基盤整備や実験手法の開発が進んでいるメダカやゼブラフィッシュなどの小型魚類を用いて、宇宙滞在が脊椎動物に与える影響を胚の発生観察、行動解析、組織観察、分子レベルの解析など、さまざまな手法で明らかにすることをめざす。小型の搭載用実験装置(図参照)により小型魚類を軌道上で2週間程度飼育し、装置内カメラにより生物の状況を記録する。生存した状態で、または化学固定を行って地上に回収する。地上で生物試料の解析をおこなう。

小型魚類では、宇宙放射線や微小重力などの環境変化が生物へ与える影響を様々な手法

で解析可能である。これまでに経験しなかった特殊な環境に適応しようとする生物の応答解析を通じて生物への理解を深め、基礎生物学の発展に寄与することができる。また小型魚類で得られた成果はヒトへ応用できるため、有人宇宙探査など人類の宇宙進出にむけた基礎データとするとともに、医学の発展を通じて一般社会に役立てる。



(1) 鎖循環系生物飼育装置

(2) 小型容器化学固定生物飼育装置

Fig. 5. フリーフライヤー実験に向けた水棲生物実験装置構想

### 7.3. 宇宙医学分野の重点領域

宇宙医学研究分野では以下の課題に関連する研究を重点的に推進してきている。

- (1) 基礎宇宙医学：宇宙環境におけるストレス応答メカニズムの解明
- (2) 臨床宇宙医学：長期宇宙滞在における人体の適応と対策
- (3) 新たな重点課題：長期宇宙飛行におけるヒューマンファクターの検討

宇宙環境におけるストレス応答メカニズムの解明については、宇宙環境が人体に及ぼす影響について、より包括的・体系的に取り組むことを課題とする。骨、筋肉、神経等、個別の課題について、横断的かつ体系的な研究課題を対象として考えるものである。その背景として、近年のゲノム科学・細胞生物学の進展により、異なる器官・組織であっても、細胞レベルでは生体のメカニズムとして共通する部分が多いことが明らかになりつつあること、また生体の反応は個々の器官のみに還元し得るものではなく、例えば筋骨格系、免疫系、神経系、循環器系等においても、その相互作用を考慮し、個体システムの反応として、とらえなければならないことが挙げられる。この課題は、基礎医学研究として宇宙生命科学分野とも共通するものであるが、ここでは個体レベルでのストレス応答メカニズムを中心課題と考える。基礎的な知見に基づいたストレス応答のメカニズムを基礎とし、ヒトの長期宇宙滞在に伴う医学的課題、特にリスクとなる要因に対し、定量的な評価を行うことが期待される。

臨床宇宙医学としての「長期宇宙滞在における人体の適応と対策」は宇宙飛行士の健康管理技術への貢献や、地上の医療活動への研究成果の還元することが求められている。具体的には、宇宙環境における生体の適応と対策、宇宙環境における生体情報モニター

と軌道上（遠隔）医療等、有人宇宙開発の基盤技術に役立つ研究が必要とされる。上記の知見はまた同時に、誰もが行ける宇宙飛行を目的とした、医学的課題の解決につながるものと思われる。

以上の活動を踏まえ、現在、宇宙基幹システム本部有人宇宙技術部の宇宙医学グループでは、宇宙飛行士の長期宇宙滞在に必要な宇宙医学研究を体系的に取り組むと同時に国際宇宙ステーション計画で実施する地上、及び軌道上の宇宙医学研究を通じて、有人宇宙技術の蓄積を目指すべく、「宇宙医学戦略」制定の検討をおこなっている。

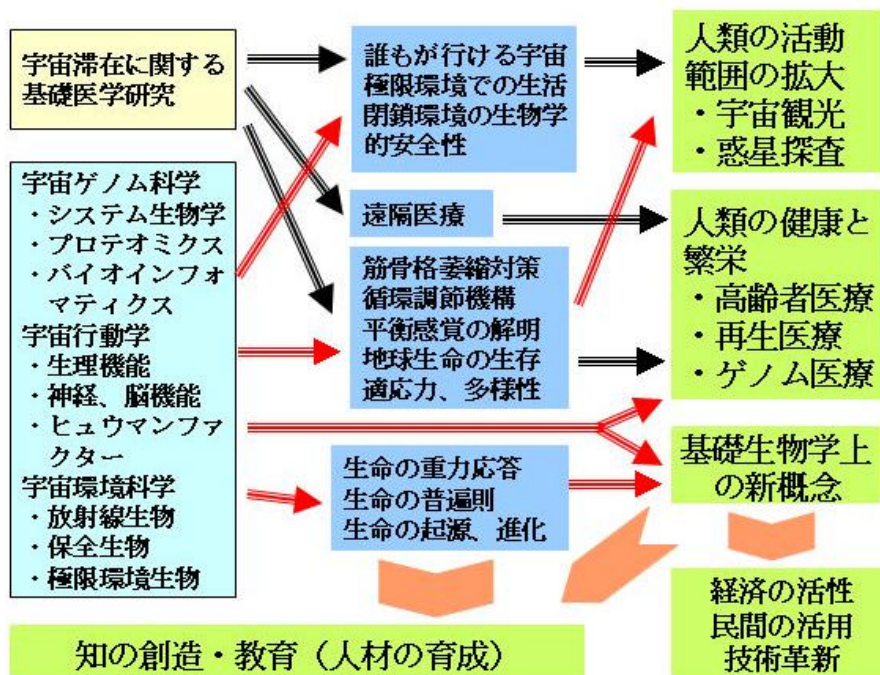


Fig. 6. 宇宙環境を利用する生命科学推進と今後の展望

## 8. あとがきにかえて

「国際宇宙ステーション計画」の先行きや火星にむけた「Exploration」の行末、スペースシャトルの再開、日本のH2Aロケットや宇宙政策等々いろいろあるが、それでも「ヒトが宇宙にその活動領域を拡大して行く」ことを確信し、その生物学的課題を克服していかなければならない宇宙環境を利用する生命科学にとって、宇宙実験は重要な手段である。ここで改めて宇宙での生物実験の難しさを考えてみる。宇宙で実験をやろうとするとき、まず頭に入れておかないといけない、地上と全く違う条件がある。それが微小重力である。地上では、うっかりグラスを床に落とせば割れてしまうという常識が通用しないのである。

まず落ちるという感覚や地上で逆立ちしたときのあの上下感覚が無い。地上では液体中に発生した気泡は、ある大きさになると上方に浮かび上がってしまうが、微小重力下ではそうした現象は起きない。生命科学実験では液体を使うことが多いが、この気泡の問題は実験内容を十分に把握した上で実験装置や器具等の製作に反映されなければならない。宇宙でお湯を沸かすかどうかはともかく、液体を加熱しても熱対流が起きないので攪拌をしなければなかなか沸かない。二種類以上の液体を混ぜたいときも同様である。攪拌するのは良いとしてその前にどうやって溶液を計量し、どういった容器に入れれば良いのであろう。地上では簡単にメスシリンダーやメスフラスコ、ピペット等を使って計量し、ビーカーに入れ攪拌して混合するが、すでにその時点で我々は重力の恩恵を被っているのである。もし重力が無ければメスシリンダーやピペットに気泡が入ってしまうと正確に計量できないし、濡れ性により液体は、実は、容器にじっと入っておらず容器の壁面に広がるとうとするし、表面張力により丸くなってメスシリンダーやビーカーの外に出てしまうであろう。一方、重さのことなる液体や物を一度混ぜてしまうと二度と分離しなくなる。地上で水と油を混ぜようと激しく攪拌すると懸濁液になるが、時間がたつと油は水の上に浮いてきてしまう。しかしながら微小重力下では懸濁液のままである。とにかく重力が在ることを前提にした地上の実験装置、器具類では、操作使用方法も含めて微小重力下での実験にそのまま使えると言うわけにはいかないのである。それが実験や装置開発の難しさにもつながっているのである。

更なる問題は実際に生命科学実験をするのは誰かということだ。新しい研究テーマの実験を実施するまでにかかる時間は、地上ではほんの数日或いは数ヶ月と言ったところであろうか。それもこれも研究費に依存する場合がほとんどだが。では宇宙で実施するにはどのくらいの期間が必要なのであろう。実験計画の開始から装置の開発と飛行機会の確保を考えると現在でも3～5年は覚悟しなければならない。さらに、地上の科学の発展はめざましく、その間に宇宙実験の必要性が無くなってしまう場合も考えなくてはならない。装置開発を加えた広い意味での実験の搭載性にもいくつか課題がある。一つは実験装置や器具、試薬等の宇宙飛行士に対する安全性である。もう一つは電力、排熱、重量、容積そして宇宙飛行士の時間などの使用可能なリソースの割り当てである。生命科学実験では冷凍冷蔵庫は必需品だし、細胞実験では細胞培養器に実験期間を通して継続的な電力供給が必要になる。実験実施のために越えなければならない極めて重要な課題は、実は、誰が微小重力下で実験をするのかということである。つまり宇宙飛行士を実験に拘束する時間である。宇宙実験の提案者が直接宇宙で実験するにはまだまだ時間が掛かりそうである。実験の複雑さや内容にもよるが、やはり人間の観察と判断に基づいた柔軟な実験操作が本来的には生物の実験には必要である。しかし時間的にも技術的にも実施に困難さが伴う場合は自動化した実験装置での自動実験が必要になってくるが、その反面装置が複雑化することになり実験の効率や科学的要求の縮小にもつながってしまうことになる。とはいえ国際宇宙ステーションの建設が始まり、既に宇宙飛行士が常駐し作業をおこなっている。今はま

だ建設途中とはいっても微小重力下での長時間実験やライフサイクルに関する実験が可能になりつつある。研究者が計画する実験は多種多様であり、共通実験装置や機器だけで宇宙実験を実施していくのはなかなか難しい。今後も宇宙実験を推進していくとなれば、ミクロ化やナノテクノロジーなどの先端の技術が要求される。

#### 参考文献

- 1) フランソワ・ロラン、フランス・ロラン＝セルソー、ジャン・シュネデル：宇宙生物学への招待、唐牛幸子（訳）、白水社（文庫クセジュ）（2000）。
- 2) 宇宙実験最前線、日本マイクログラビティ応用学会（編）、講談社（ブルーバックス）（1996）。
- 3) 宇宙環境利用の展望、宇宙開発事業団宇宙環境利用研究システム/宇宙環境利用研究センター（編）、宇宙開発事業団、（2001）。
- 4) Space Life Science Experiments from Japan 1987-2000, Biol. Sci. Space, 15, (2001).
- 5) Plant in Space Biology, Suge, H. (ed.), Tohoku University, (1996).
- 6) F. Baluska, K.H. Hasenstein: Planta, 203 (1997) S69.
- 7) 宇宙環境利用のサイエンス、井口洋夫（監）、岡田益吉、朽津耕三、小林俊一（編）、裳華房、（2000）。
- 8) 平成12年度 JSUP 宇宙環境利用の展望、宇宙環境利用推進センター、（2000）。
- 9) 平成13年度 JSUP 宇宙環境利用の展望、宇宙環境利用推進センター、（2001）。
- 10) 井尻憲一：宇宙の生物学、朝倉書店、（2001）。
- 11) 宇宙環境利用研究システム・宇宙環境利用研究センター成果報告書 NASA-SPP-030001、宇宙開発事業団、（2003）。
- 12) 国際宇宙ステーション利用計画及び運用・利用体制に関する宇宙開発委員会及びNASA 委員会での検討結果（中間報告）宇宙開発事業団、（2003）。
- 13) 宇宙環境利用に関する公募地上研究 平成14年度終了テーマ研究成果報告書、財団法人日本宇宙フォーラム/宇宙開発事業団、（2003）。
- 14) 大西武雄 監修：低線量・低線量率 放射線による生物影響発現、(株)アブリコム、（2003）。
- 15) 石岡憲昭、東端 晃、浅島 誠：宇宙生命科学の現状と今後、日本マイクログラビティ応用学会誌、21(1), 68-73, (2004)。
- 16) M. Ikenaga, I. Yoshikawa, M. Kojo, T. Ayaki, H. Ryo, K. Ishizaki, T. Kato, H. Yamamoto, R. Hara: Biol. Sci. Space, 11, 346-350, (1997)。