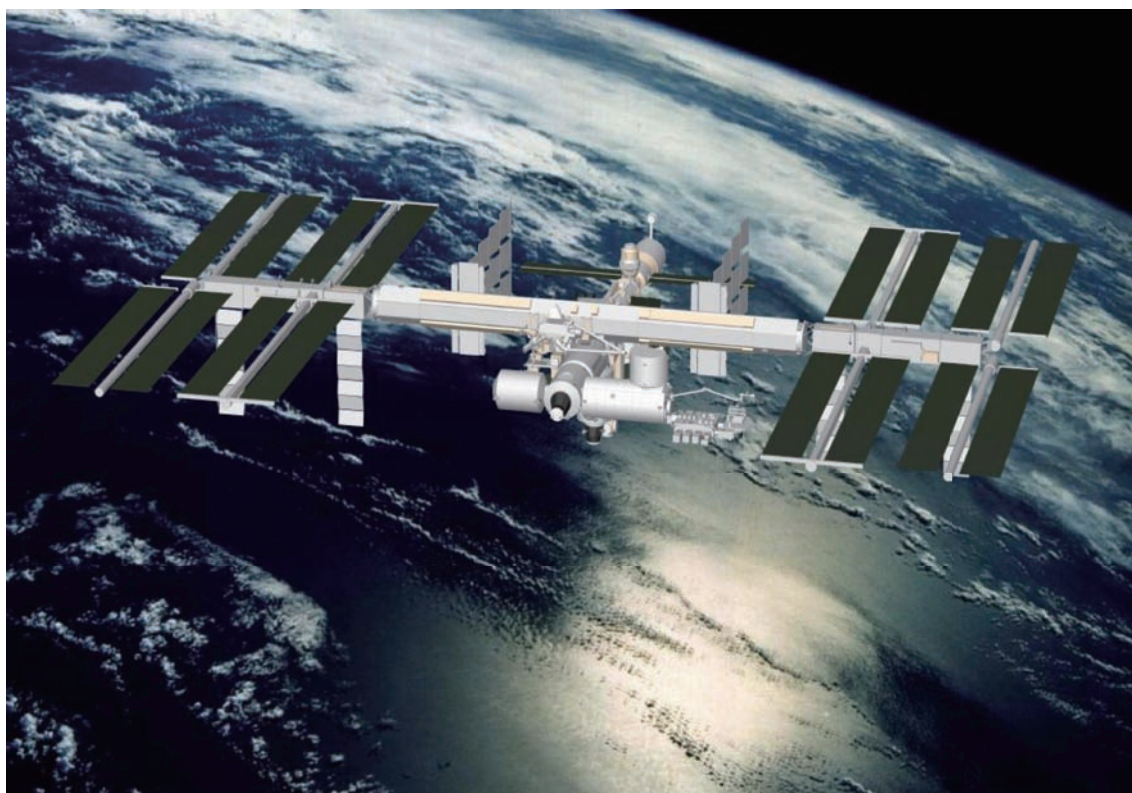


# 宇宙環境利用と人類の将来（Ⅰ）

— いきものの星・地球 —



宇宙航空研究開発機構

井口洋夫 監修

**表紙の写真の説明**

**タイトル:** 国際宇宙ステーション完成イメージ図 背景あり

**日付:** 2006/3

**場所:**

**カテゴリー:** 国際宇宙ステーション (ISS)

**ミッション:**

**内容:**

**Photo No.:** P-023-11899

**コメント:**

宇宙航空研究開発機構特別資料  
JAXA Special Publication

# 宇宙環境利用と人類の将来（Ⅰ）

## — いきものの星・地球 —

宇宙航空研究開発機構  
Japan Aerospace Exploration Agency



## 本書を読んで下さる方へ

1957 年、人工衛星が地球を周回して 50 年、現在われわれ人類が宇宙開発にかけて来た努力が、その中間基地であり、また宇宙環境利用の拠点となる国際宇宙ステーション(ISS)として、結実完成する最終作業が進められている。その作業の中に、日本の実験棟(きぼう)の構築が含まれており、更に 2008~9 年にかけてその稼動が期待される。

そして、次の 10 年、この分野に携わる者は今迄蓄積した「宇宙環境利用の科学実験」の手法を遺憾なく発揮して、その成果を世に問うことが求められている。

ここに至るまでの段階で、宇宙環境利用研究の舞台づくりや推進役を荷った宇宙開発事業団(NASDA)は、1996 年以降宇宙環境利用研究システム並びにセンターを設置、そこに広い学術分野—理工系、生命系そして医学系といった—の人材が集い、更に目的を同じくする大学・研究機関の研究者・技術者との全面的協力を行い、日本全国で 200 余課題の宇宙実験を実施して来た。

そして、そこには様々の新しい発想の誕生が集約され、新規課題も累積されている。

これから、いよいよ本格的宇宙実験を実施しようとしている今、これらの実験を通して、「この奇跡と言うべき美しき星—地球—に生を受けた人類の将来を考える」ことは、「未知なるものへの挑戦」という立場からも意義深いものとする。

このような思いで、執筆者各人が自分の思索を率直に文章に込めて書き上げた作品で、教科書を目指すものでないことを理解いただきたい。

読者の方々も、是非執筆者と共に、宇宙環境の中に飛び込んで下さって、その独特な環境を楽しみながら空想を逞しくして戴ければ、本書の出版の意義を満たすことが出来ると考えている。

是非頁をめくって戴き、従来の本との相違点を読み取って戴きたい。

井口 洋夫



# 宇宙環境利用と人類の将来(Ⅰ)

## — いきものの星・地球 —

### 目 次

本書を読んで下さる方へ

1. 序論	1
1. 1 地球の創生と生物の発生、進化(執筆:石岡憲昭)	1
1. 1. 1 地球の創生と生命誕生	1
1. 1. 2 火星は生命誕生の母なる星か	1
1. 1. 3 宇宙環境を利用した実験の目的・方法・実験の難しさ	2
2. 宇宙・地球と生物	6
2. 1 はじめに(執筆:佐藤温重)	6
2. 2 生命の起源と進化(執筆:東端 晃)	8
2. 2. 1 太陽系の誕生	8
2. 2. 2 生命の起源と定義	8
2. 2. 3 原始生命の誕生	9
2. 2. 4 原核生物の誕生	10
2. 2. 5 酸素の発生	11
2. 2. 6 原核生物から真核生物へ	12
2. 2. 7 単細胞生物から多細胞生物へ	14
2. 2. 8 生物の急発展—先カンブリア期からカンブリア期へ(顕生代)	16
2. 2. 9 水中から陸上へ—オゾン層の形成(オルドビス紀～シルル紀)	17
2. 2. 10 植物の進化(シダ植物から裸子植物へ)	19
2. 2. 11 動物の上陸と骨格の形成	20
2. 2. 12 生物の進化と重力環境	22
2. 2. 13 地球から宇宙へ	23
2. 3 地球外生物、地球外文明は存在するか(執筆:谷垣文章)	26
2. 3. 1 宇宙人という概念	26
2. 3. 2 火星からの隕石	29
2. 3. 3 地球外知的生物の存在する確率	30
2. 3. 4 宇宙人探しという挑戦の始まり	31
2. 3. 5 本格的に始まったSETI計画	35

2. 4 生物の重力感受の仕組み(執筆:永松愛子) .....	37
2. 4. 1 生物の重力感受機構 .....	37
2. 4. 2 植物の重力屈性機構 .....	50
2. 4. 3 宇宙実験での重力感受機構の解明 .....	54
参考文献、論文	
2. 5 宇宙環境での生物の生殖、発生(執筆:矢野幸子) .....	56
2. 5. 1 アフリカツメガエルの受精と発生 .....	57
2. 5. 2 イモリの産卵・発生実験 .....	59
2. 5. 3 卵がヒヨコになるには重力が必要 .....	59
2. 5. 4 宇宙でのメダカ .....	60
2. 5. 5 微小重力下における植物の生活環境に関する研究 .....	63
2. 5. 6 宇宙滞在のための継世代培養を実現するための装置や技術について .....	67
2. 5節の付録:用語の説明 .....	72
参考文献	
2. 6 生物は宇宙に適応できるか(執筆:泉龍太郎) .....	74
2. 6. 1 生物の適応とは何ぞや .....	74
2. 6. 2 ヒトは宇宙でどうなるか .....	75
2. 6. 3 宇宙への適応に向けて .....	82

**[宇宙環境利用と人類の将来 編集者紹介]**

井口洋夫:宇宙航空研究開発機構 顧問

佐藤温重:元宇宙航空研究開発機構 アドバイザー

中嶋英彰:国立環境研究所 総括研究官

三原建弘:理化学研究所 研究員

山本昌孝:宇宙航空研究開発機構 主幹研究員(編集まとめ)

**[宇宙環境利用と人類の将来(Ⅰ)ーいきものの星・地球ー 執筆者紹介]**

石岡憲昭:宇宙航空研究開発機構 教授

佐藤温重:元宇宙航空研究開発機構 アドバイザー

東端 晃:宇宙航空研究開発機構 助教

谷垣文章:宇宙航空研究開発機構 主任開発員

永松愛子:宇宙航空研究開発機構 主任研究員

矢野幸子:宇宙航空研究開発機構 主任研究員

泉龍太郎:宇宙航空研究開発機構 主任研究員



## 1. 序論

### 1. 1 地球の創生と生物の発生、進化

#### 1. 1. 1 地球の創生と生命誕生

宇宙が始まってから今も多くの星々が誕生し、死んでいます。星の死はまた新たな星の誕生を促すのです。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ました。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きました。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す。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きました。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ます。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上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す。こうして第三惑星の地球を含む8つの惑星からなる太陽系ができたのです。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ますが、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す。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ていますし、隕石からも核酸分子やアミノ酸が見つかっています。既に存在してい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しょうか。最初の生物は単細胞のバクテリアと考えられていますが、どうやって生物として誕生したのかその過程も未だに解っていません。

#### 1. 1. 2 火星は生命誕生の母なる星か

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ました。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ます。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ました。地球に存在する走磁性細菌は酸素を必要としますが、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ります。主成分は二酸化炭素ですが、確かに非常に薄いながらも大気が今でも存在しています。また、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ました。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ません。ひょっとしたら火星を起源とする生命体が隕石や氷塊に乗って原始地球に飛来し、地球型生物の共通祖先になったのかもしれませんが。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、進化の頂点にいらっしゃる我々人類が生命の故郷火星を目指し、火星に眠っている水を利用して火星を地球のように緑豊かな星にしようというテラフォーミング計画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しょうか。

さて、第2編—いきものの星・地球—では地球における生命の起源と進化についての最近の知見を紹介し(2. 2節)、さらに地球外生物や地球外文明の可能性を論じた上で(2. 3節)、地球の生物を語る上で忘れてはならない重力に対する感受のしくみについて、これまでに明らかになっている実験結果を中心に概説します(2. 4節)。また、進化にとって重要な生殖や発生については既に行われた宇宙実験を中心に紹介し、生物が宇宙環境において系世代的に繁殖していけるのかどうか(2. 5節)、また生物の多様性により獲得する能力とその宇宙環境への適応、そして人類の恒常的宇宙進出について考え(2. 6節)、生物としての人類の限りなき未来へ思いを馳せましょう。

### 1. 1. 3 宇宙環境を利用した実験の目的・方法・実験の難しさ

#### (1) ライフサイエンス

##### 宇宙ライフサイエンスとは

宇宙がビックバンにより始まって、はや？150億年が過ぎ、太陽系ができてようやく46億年、その第三惑星地球に生命が誕生し進化を続けて40億年。未だ進化の途上にあるとはいえ、そのトップランナー？である私たち人類は、今、知的好奇心と思索の中で生命を科学という道具で解き明かそうとしています。脳が脳をどこまで解明できるのだろうかというパラドックス的問いに明確な解答を出し得ないまま、生命が生命をどこまで解明できるかに挑戦しているのです。

生命とは何か？生命の多様性とは？普遍性とは？これら大きな課題へのチャレンジは既に始まって久しいのですが、多くの知見が得られたと同時にまた多くの謎が新

たに生まれ、未だ明確な答えを出すには至ってはいません。宇宙ライフサイエンスは重力をパラメーターとする新しい視点からこの課題に挑戦しようというものです。そして宇宙での生物実験の目的の一つがそこにあるのです。もちろん、生物が重力を感知する分子メカニズムやそれに対応する分子メカニズムを明らかにすることも重要な基礎生物学の研究課題ですし、宇宙飛行士が宇宙で起こす宇宙酔いや骨量の減少、筋肉の萎縮などもそれ自体が地上の医学に貢献できる重要な研究対象であることには間違いありません。が、やはりここでは、生命の本質に関わる新しい概念の創造を目指すことを宇宙ライフサイエンス研究の目的の第一として位置付けたいと思います。今まで地球上の生命の存在と進化に影響を与えてきた重力という環境から逃れるすべもなく、それ故に重力なしには地球上の生命とその進化を語ることができなかった私たち人類が、今、地球上で創り出せない唯一の環境であった長期間微小重力という環境の場と重力をパラメーターとして生命現象を解析することのできる技術と方法をまさに手にしつつあるのですから。

## （2）微小重力環境でのライフサイエンス実験の難しさ

宇宙で実験をやろうとすると、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ります。それが微小重力です。地上で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宇宙では通用しないのです。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のです。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いましたが、微小重力下ではそうした現象は起きません。ライフサイエンス実験では液体を使うことが多いのですが、この気泡の発生が宇宙実験では問題になることがあります。地上では殆ど問題にはなりませんが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りません。また、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ませんので攪拌をしてやらなければなかなか沸きません。二種類以上の液体を混ぜたいときも同様です。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しょうか。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ぜますが、すでにその時点で私たちは重力の恩恵を被っているのです。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でしょうし、微小重力下では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ろうとしようし、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しょう。一方、重さの異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ってしまう。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りますが、時間がたつと油は水の上に浮いてきて水相と油相に分離します。けれども、微小重力下では懸濁液のままです。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、操

作使用方法は、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す。実験器具や装置類の開発には工夫が必要になってきます。それが実験の制約や難しさにもつながっているのです。

### (3) 動物を用いた実験の難しさ

動物の微小重力下における行動観察は地上における重力の影響を貝間見せてくれます。カエルは反り返ったり、また空中に飛び出したカエルは頭とお尻を結んだ体軸を中心にくるくると後ろ足を伸ばして交差させながら回転したりします。魚は種類によって後ろにあるいは前にくるくる回転し、鳥はばたばたと羽ばたきしながらやはり後ろ回りをしました。トカゲやヤモリは何かにつかまろうともがきます。実際、しっかりつかまるとじっとして動きません。動物が微小重力に急性的に曝された結果は、それぞれの地上での生活様式や行動に依存した結果の反映と思われるのですが、このような行動を起こす動物たちをどのようにして飼育すれば良いのでしょうか。給餌方法や糞尿、ゴミの処理など大変です。ラットなどは授乳も難しいでしょうから。もし動物たちが微小重力に適応できなければ悲惨です。餌も食べられず、水も飲めずに死んでしまうでしょう。単に行動観察をして、こうなりました、ああなりました。その結果、多分こう推察されますではなく、行動のメカニズムを感覚や骨、筋肉、臓器などの神経系、力学系を通した生理的情報として分析し解析して初めて地上の生物行動と重力の関係や生物の適応、多様性について明らかにしていくことができるのですが、これでは実験どころではありません。特に、宇宙ステーションでは、微小重力下での生殖行動、受精、そして2世誕生、さらに3世誕生と多世代に渡って慢性的に微小重力にさらされた生物の生理作用、代謝および生物相による相違などを解析することができるようになりますから、微小重力に適応するのかどうかは、大変重要なのです。適応できなければ、あるいは適応できたとしても生殖行動ができなければこれまた意味がありません。微小重力に反応しないメダカが見事に2世を宇宙で誕生させた様に、宇宙実験に適したモデル生物を探したり、創ったりしなければなりません。そういった意味では、既に経験のあるメダカやゼブラフィッシュなどの小型魚類を用いる実験が得策かもしれません。科学要求を十分満たす水棲生物用の実験装置の開発が待たれます。

### (4) 宇宙では誰が実験をするのか

新しい研究テーマの実験をスタート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しょうか。それもこれも研究費に依存する場合がほとんどですが。じゃあ宇宙で実施するにはどのくらいの期間が必要なのでしょう。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りません。さらに、地上のサイエンス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りません。装置の開発を加

えた広い意味での実験の搭載性にも考えなくてはならない課題があります。実験装置や器具等の消費電力や排熱、重量、容積などの制約です。ライフサイエンス実験では冷凍冷蔵庫は必需品ですし、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からです。でも実験を実施する上で一番重要な問題は、実は、誰が微小重力下で実験をするのかということです。実験の複雑さや内容にもよりますが、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す。宇宙実験の提案者が直接宇宙で実験するのが一番ですが、それにはまだまだ時間が掛かりそうです。そこで宇宙飛行士にやってもらうことになる訳ですが、その為には訓練と時間が必要になってきます。つまり地上での訓練、練習や宇宙での実験操作にどれくらい宇宙飛行士の作業時間を割り当てられるのかということは実験実施上実に大きなファクターになるのです。結局、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を用いた自動実験が必要になってきますが、開発が難しく時間が掛かり、装置が複雑化することになりますし、その反面、実験の効率や科学的要求の縮小にも当然つながってしまいます。

#### （５）今後の宇宙ライフサイエンス実験

国際宇宙ステーションの建設が始まり、既に３人の宇宙飛行士が常駐し作業をおこなっています。今はまだ建設途中とはいえ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ります。いままで述べてきたことは宇宙ライフサイエンス実験の難しさのほんの一部にしかすぎません。さらに、研究者が計画する実験は多種多様ですので、共通実験装置や機器だけで宇宙実験に対応していくのはこれからなかなか難しいと思われます。地上での先端の技術、ナノテクノロジー等を応用した実験系やミニチュア化された装置、器具類が要求されてくるでしょう。時代の要求に合わせながらいろいろな難しさは克服していかなければなりません、一番重要なことは、ただ宇宙に持っていけばなんとかなる的な、宇宙に持っていくこと自体が目的のような実験の時代は完全に終わったと認識することでしょう。ちょっと言い過ぎかもしれませんが、個人の興味や趣味的実験ではなく、科学にのっとった、地上実験の日々の積み重ねに裏付けられた、標的を絞った、綿密な実験計画の基に実施されることが、今後もますます求められるでしょう。

## 2. 宇宙・地球と生物

### 2.1 はじめに

人類は活動の場を地球から宇宙へと広げています。1961年に旧ソ連のガガーリンがウオストーク宇宙船で史上初の宇宙飛行を行って以来、日本人宇宙飛行士5名を含む410名(2001年10月現在)の宇宙飛行士が宇宙滞在を経験しています。このような人類の宇宙進出に先立ってイヌなどいろいろな生物が人類の宇宙飛行の安全性を確認する目的で宇宙飛行をしました。その後もネズミ、メダカ、コイ、イモリ、アフリカツメガエル、ニワトリ、ショウジョウバエ、カイコなどの動物、トウモロコシ、コメ、シロナズナ、キュウリなどの植物、アカパンカビ、大腸菌などの微生物の約90種が科学実験の目的で宇宙船に搭載されました。宇宙に滞在した時間はガガーリンの場合わずか1時間48分であったが、スペースシャトルに搭乗した宇宙飛行士は1~2週間、国際宇宙ステーションでは3ヶ月間と次第に長期間宇宙滞在しております。ロシアの宇宙飛行士ポリヤコフはミール宇宙基地で437日17時間(延べ宇宙滞在678日16時間)滞在し人類の宇宙滞在の最長記録をうち立てています。宇宙滞在は宇宙飛行士だけでなく一般人もロシアのソユーズTMA-1タクシーを利用し宇宙旅行が出来る時代となりました。三人目の宇宙旅行者となる米国のアイドル歌手ベースさんは、2002年7月初めにモスクワ郊外の宇宙飛行士訓練センターで国際宇宙ステーションに旅行するために必要な医学検査を受け基礎的訓練を受けました。

スペースシャトルや国際宇宙ステーションが飛行しているのは、宇宙といっても地上約280km~480kmの地球近傍の低層宇宙空間ですが、アメリカは1969年7月に3人の宇宙飛行士を月面に着陸させましたし、ロシアはNASA、ESAと協力して2015年までに5名の宇宙飛行士を火星に送り込む構想を発表しています。無人の探査衛星は、惑星の探査、さらに太陽系外深宇宙まで飛行し探査を現在でも続けています。このように人類の生活圏は宇宙に向けて拡大を続けており、宇宙における生物を知ることが重要になっております。

一方、星間物質の中から生命の基本となる核酸、アミノ酸が発見されたことにより、生命が出現し、進化し、現存する惑星として地球だけでなく火星、エウロペーが注目されるようになりました。生物学は、これまで地球上に生活する生物のみを取り上げて来ましたが、地球外にも生命の存在が推定されるようになり圏外生物学(エクソバイオロジー)あるいは宇宙生物学(コスモバイオロジー)という分野が誕生しました。またスペースシャトルや宇宙ステーションの中につくられた宇宙実験室で宇宙環境を利用して研究を行う宇宙環境利用科学が成立しました。そして生物学は、地球を含む宇宙全体として生命現象をとらえる見方に変わりつつあります。

地球上の生物は、重力を駆動力の1つとして進化してきたと見る事が出来ます。進化圧としての重力の役割は地上でも研究することが出来ますが、宇宙船内環境を利用すると一層はつきりさせることが出来ます。宇宙実験室は、生物の生存に必要な環境要因である空気、水、温度、照明などは人為的に制御されておりますが、微小重力は、人為的に制御することが困難な環境要因であるため宇宙船内は微小重力環境です。この微小重力環境を利用することによって、重力の存在する地上の環境では解明することが困難な生物の重力感受のしくみを調べる事が出来ます。

人類は宇宙船にのり宇宙に進出しましたが、宇宙船内では微小重力や低線量の宇宙放射線にさらされることになります。人類が宇宙に進出するためには生物システムに対する宇宙船内環境の影響を調べ、生体影響に対する対策を確立することが不可欠でし、宇宙旅行から帰還したとき地球環境に再び適応出来るかを調べ、その対策を考えることも必要です。

人類の生活圏は宇宙にまで拡大し宇宙と生物の関係は密接になり、宇宙環境における生物の機能を知ることが重要となっています。宇宙船内環境における生物の機能の研究は、人類の宇宙進出に必要な知識として役立つことは当然ですが、地上の生命過程の基本的理解、人類の健康、quality of life の向上にも役立っております。

## 2. 2 生命の起源と進化

### 2. 2. 1 太陽系の誕生

宇宙の誕生は、今から100億年とも170億年前とも言われてきており、様々な研究者により議論されてきた。最近の調査や研究において宇宙の誕生はおそらく約150億年前頃ではないかという結論に達しつつある。我々が住む地球が属する太陽系は、今からおよそ50億年前に寿命を迎えた星が爆発し、その衝撃によってガスの渦ができ誕生したと考えられている。太陽系の寿命は約100億年と考えられており、現在はちょうど寿命の半ばにさしかかっている。

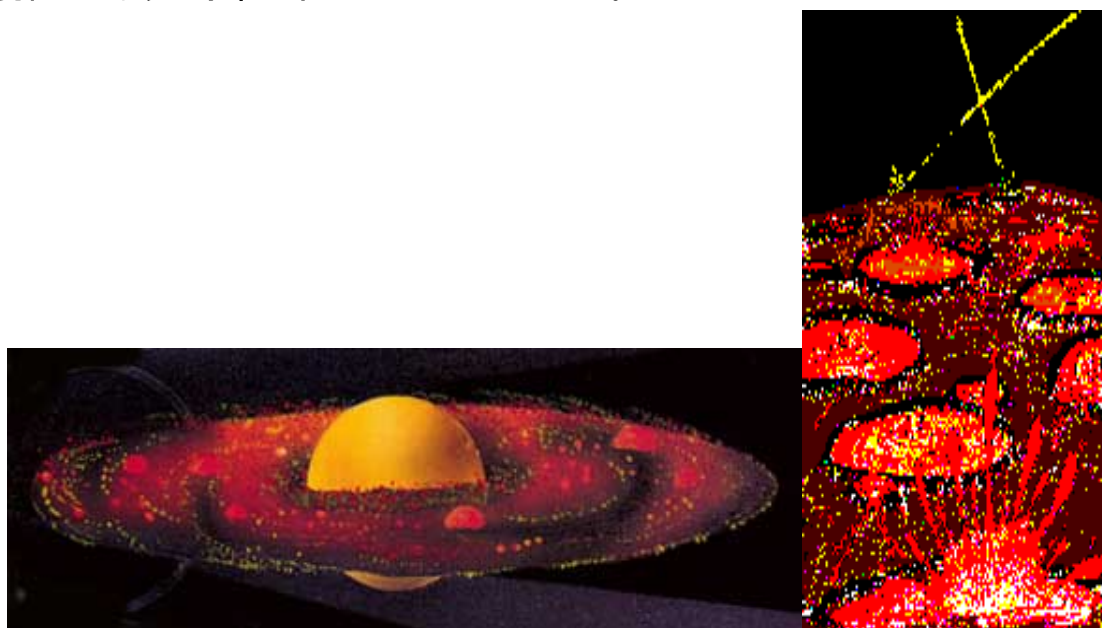


図2. 2-1 太陽系の誕生

### 2. 2. 2 生命の起源と定義

生物の起源については、多くの科学者、哲学者、宗教者によって古くから語られており、自然を超越した神によって創造されたと考えられた時代や、自然発生的に生まれたと考えられていた時代もあったが、今から250年程前にフランスのパスツールの実験によって自然発生説は否定された。つまり、生物は生物からのみ作られるものであるということである。それでは、今の生物の基となる生命体がどのように誕生したのであろうか。またその後、我々生物がどのように進化し、今に至ったのかという問題は、興味が尽きない問題である。

そもそも生命の定義とは何だろうか。現在認識されている生命の定義は、1) 自己複製能力を持つこと、2) 物質やエネルギー代謝能力を持つこと、3) 外界との仕切りを持っていることの3点である。現存するほとんどすべての生物は、その遺伝情報を



伝える媒体として DNA を利用し、次の代へと情報を伝えていく。これほど多種の生物が存在していながら、遺伝情報を伝えるシステムが DNA という特定の物質を介して行われているということは、生物がもともとある一つの原始生命からそれぞれの環境等に応じて進化を果たし、多数の種に分化していったと考えてよい。

### 2. 2. 3 原始生命の誕生

原始生命は今からおよそ40億年前に誕生したといわれており、当時の化石の調査などから、生物による物質の産生があったことを物語る調査結果が報告されている。しかし、それら原始生命がどのような過程で誕生したのかは未だに謎のままである。この問題に対して様々な説が提唱されている。

原始生命が誕生したと考えられている約40億年前の地球の環境は、今の地球の環境とは全く違っていた。この頃の地球は、地表のマグマが冷えて固まり、海が形成された。しかし現在のように大気中に酸素は無く、むしろ硫化水素やメタンなどの有害ガスが充満していた環境だった。このような環境の中、海中では生物を構成するのに必要な要素、例えばアミノ酸、脂質、核酸(DNA や RNA)などが無機的に合成されたい。いわば海は生命に必要な要素が詰まったスープ(原始スープ)の状態であった。有機物が豊富に含まれた原始スープの中では、触媒反応や重合反応など化学反応が数限りなく繰り返されたであろうが、それだけでは先に述べた生物の定義を満たす“生命体”が誕生するまでには至らなかっただろう。

一つの説では、核酸が資質の膜に包まれ、その核酸の情報からタンパク質を産生したと考えられている。また一方では、アミノ酸が結合した結果タンパク質が作られ、核酸と一緒に脂質の膜にくるまれたという説も提唱されている。現在のように生物の遺伝情報が DNA を媒体として伝わっていく以前は、RNA が遺伝情報の媒体であったという説もある。また、それよりも以前の原始状態ではタンパク質が遺伝情報の媒体であったという説もある。オパーリンはタンパク質の周辺に水の層ができ、それらが集合することによって細胞の原型になるようなコアセルベートと呼ばれるものが、生命の誕生の一過程に関与しているということを提唱した。その他色々な説が提唱されているが、いずれにしてもはっきりとした決め手が無いまま現在に至っている。しかし、タンパク質や核酸など遺伝情報をもつ要素が脂質(リン脂質)により包み込まれることにより外界と隔てられ、その内部では物質やエネルギーの代謝機構さらには自己複製能力を持つようになり、原始生物が誕生したと考えられる。

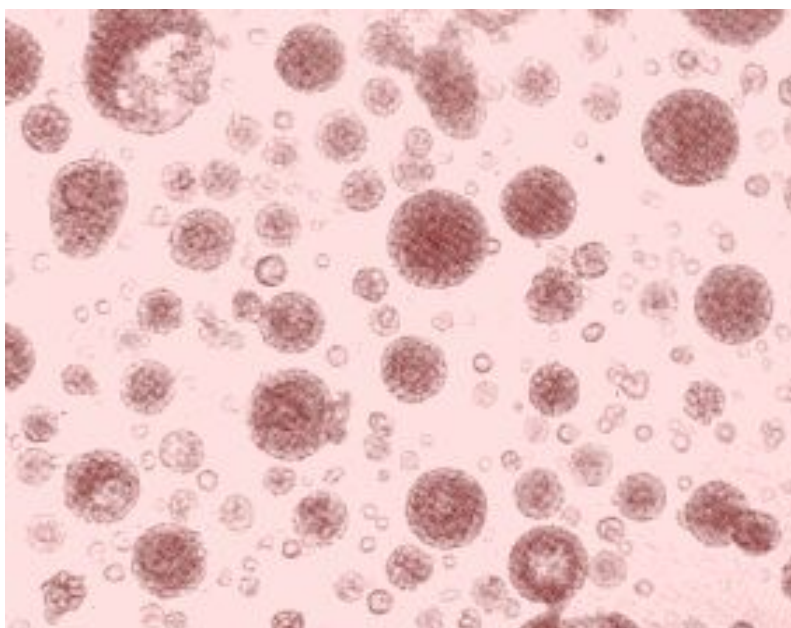


図2. 2-2  
コアセルベート

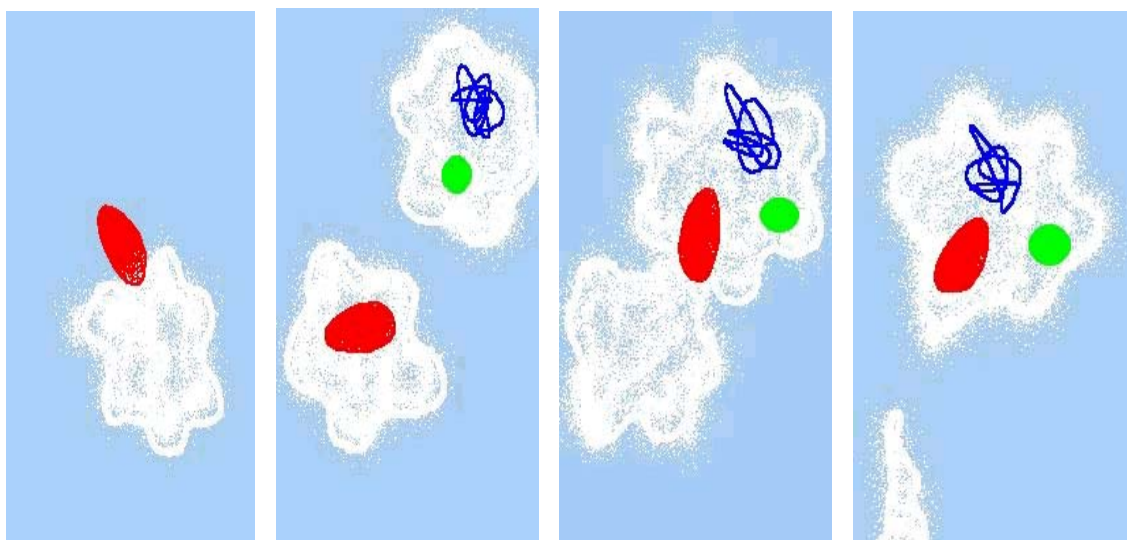


図2. 2-3 アミノ酸や核酸がリン脂質に覆われる

#### 2. 2. 4 原核生物の誕生

原始スープの中で誕生した原始生命は次第に高度化していき、およそ35億年前になるとバクテリアなどに代表される原核生物が登場する。この当時の地球の大気あるいは海中には酸素がほとんど存在していない。この時代はまだ光合成生物が登場する前の段階であり光合成による酸素の供給は無く、もちろんオゾン層も無かった。従って、地表は宇宙からの放射線が降り注ぎ、遺伝子の切断など生物が生命を維持するためには非常に過酷な環境であり、また酸素が無いことからかなり還元的な環境であったと考えられる。今でこそ我々哺乳類を筆頭に酸素呼吸をして生活をする生

物が多く存在しているが、その当時では何をエネルギー源としていたのだろうか。還元的な環境だった当時は、還元型の鉄や硫黄、硫化水素など酸素存在下ではすぐに酸化してしまう物質がエネルギー源として使われていた。先に述べたように、地表や海水表面が宇宙からの紫外線などによって、生命が生活するには危険な環境であったことや、硫化水素のような生命活動をする上でエネルギー源となる物質の多くが海底噴火口に多く存在していたため、噴火口がある海中のかなり深いところで原始生命が過ごしていたと考えられている。このような環境の中で原始生命は、物質やエネルギー代謝の機構、自己複製能力の機構を確立させていき、原核生物へと進化していった。現在でも、噴火口近くの高熱で酸素のない環境で生活するバクテリア類は多く存在しており、古細菌として分類されている。

## 2. 2. 5 酸素の発生

やがて30億年程前になると、地球の環境を変える一大変化がおとずれる。酸素の発生である。それまで硫化水素などをエネルギー源として生活していた原核生物の中から太陽の光をエネルギーとして生活する生物が誕生した。これらの生物は太陽の光と豊富にある二酸化炭素をエネルギー源とし、酸素を発生する機構を完成させた。この機構を光合成といい、シアノバクテリアやラン藻などがこの役割を担った。特にラン藻のストロマトライトの発展は目覚しく捕食者も少なかったので当時の地球全般にわたって生育して光合成を行っていた。この光合成により還元的だった地球の環境は次第に変化していく。

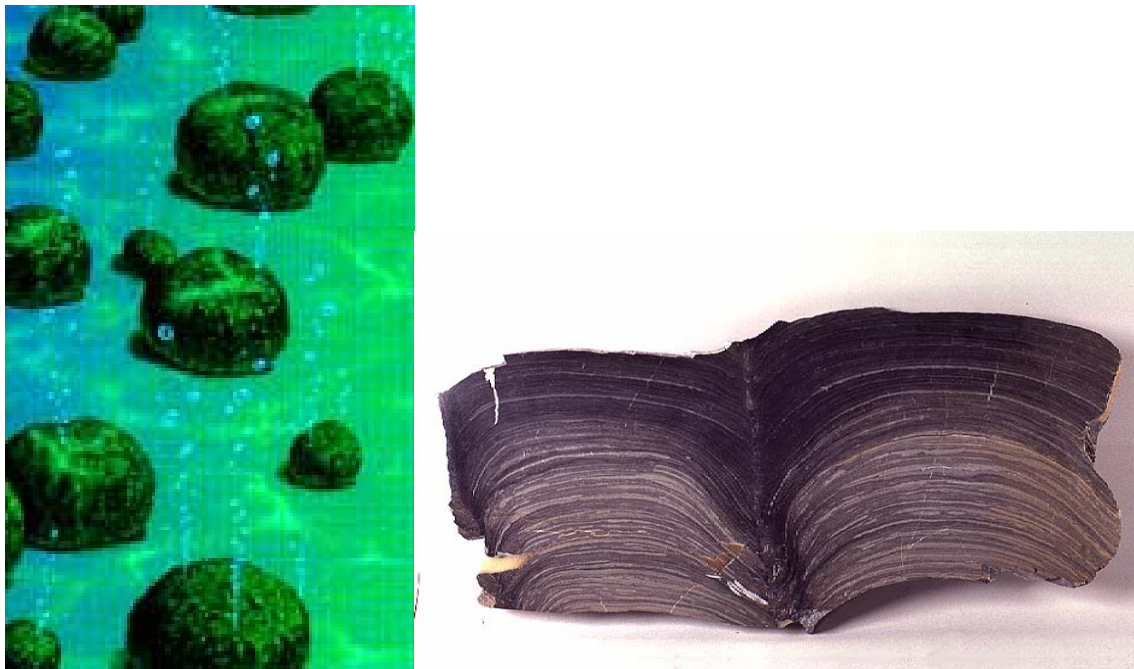


図2. 2-4 ストロマトライト(約19億年前:カナダ北部)

海水には、光合成が始まる前までは還元型の鉄が多く存在し大量に溶け込んでいたが、光合成により海中の酸素濃度が高くなると、水に溶けにくい酸化鉄を生じて海底に堆積していった。現在、このようにして堆積していった酸化鉄を多く含む地層（縞状鉄鉱層）が発見されており、当時の地球の環境について予測する貴重なデータとなっている。



図2. 2-5 縞状鉄鉄鉱層（約25億年前：オーストラリア西部）

豊富にあった還元型の鉄が酸素によって酸化鉄になった後、発生し続ける酸素は海水中あるいは大気中に充満していった。酸素は反応性が強いので生体にとって有害であり、それまで酸素の無い環境で生育してきた生物は、一部を除いて死滅するか生育環境を変えざるを得なかった。このようにして、地球上の生態系は一旦大きな変換期を迎える。ほとんどの生物が酸素の発生によって死滅した後、ある一部の生物は、有害であったはずの酸素を利用する能力を身に付けて生活する生物（好気性生物）が現れ、次第に発展して地球上に増えていった。

## 2. 2. 6 原核生物から真核生物へ

このように酸素をエネルギー源として発展した生物は、さらに発展するため長い時間をかけてより複雑な構造をとるようになっていく。特に生物の遺伝情報の媒体である DNA を膜で覆って核を形成することにより、大切な遺伝情報を保護するようになった。このように DNA が膜に包まれて核を形成した生物（細胞）を真核生物（細胞）という。

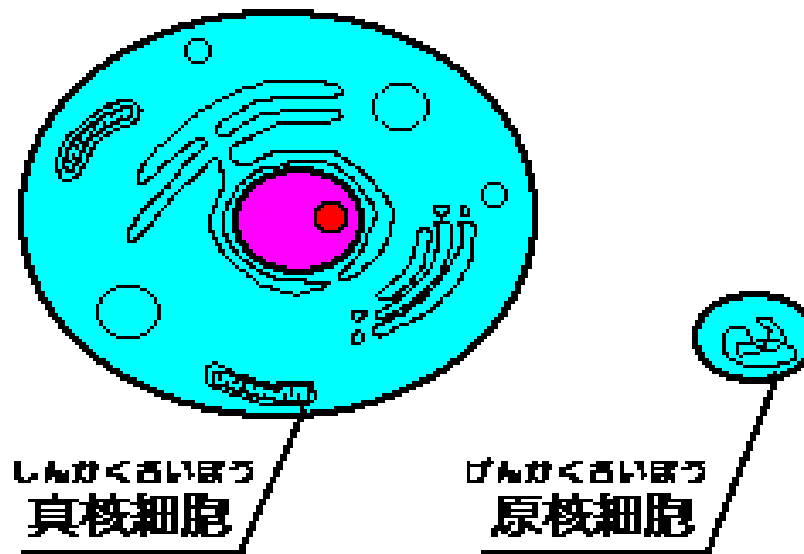


図2. 2-6 真核細胞と原核細胞

真核生物は、1 つの生物(細胞)内をいろいろな作業分担をする部分(細胞内小器官)にわけて、エネルギー生産や物質代謝の効率化が図られた。これまでの原核生物では、生物内において生命に必要な物質の移動を拡散に頼らざるを得ず、必要な物質の濃度が下がってしまつて効率よく反応を進めることが出来ない。しかし、真核生物のように生物内にある機能を専門に行う器官を形成し、必要な物質を一箇所に集めることで必要な反応をすばやく進め、エネルギーや物質の取り込みが効率化される。この結果、真核生物は原核生物に比べて大型化、長寿命化が進んでいった。

真核生物において、細胞内小器官が形成されていった過程については、いくつか説がある。ある原核生物が、光合成や呼吸などもともと別な能力を持った他の原核生物を自分の中に取り込み、共生させることによってさらに高度な生命機能を獲得していったという説がある。この説を“細胞内共生説”という。一方、あるひとつの細胞が、内部に膜の仕切りを作り、その部分ごとに物質の輸送や代謝などの機能を持たせたという“膜進化説”がある。現在では、分子生物学の発展によりミトコンドリアや葉緑体などの細胞内小器官の RNA を調べることによって、細胞内共生説が一般に受け入れられるようになった。

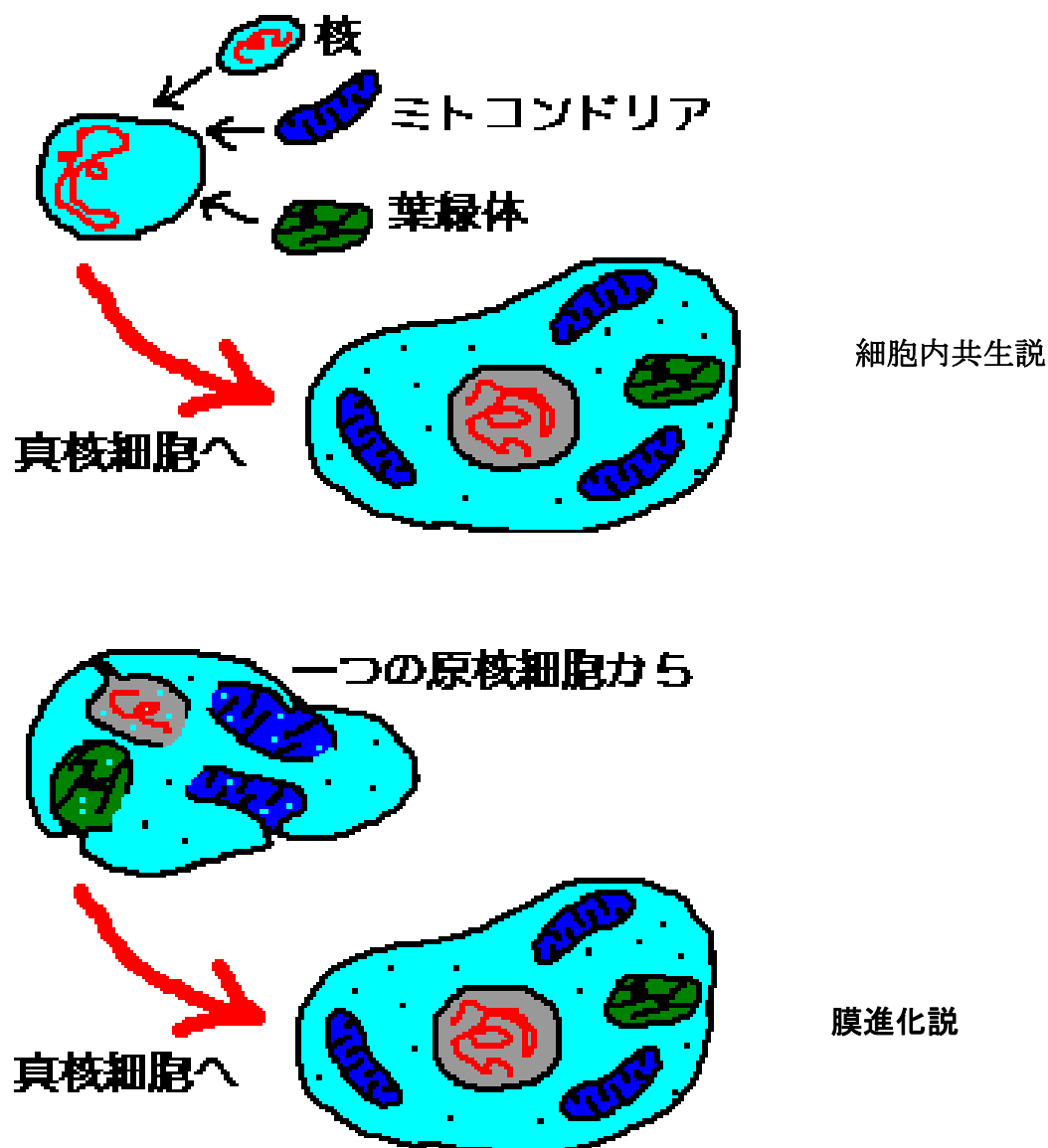


図2. 2-7 細胞内共生説と膜進化説

## 2. 2. 7 単細胞生物から多細胞生物へ

これまでの生物は膜で外界を仕切り、生命を維持するひとつの細胞(単細胞生物)として存在していたが、真核生物が誕生し、生命活動がより高度化されることにより、さらに大型化が進んでいった。原核生物どうしが共生することにより、生命活動の効率化を図ったように、真核生物のあいだでも、他の真核生物の機能をうまく利用したり、あるいは相手に利用されたりすることで、さらに効率よく物質の代謝や環境への適応を果たし、また、生命維持の恒常性を高める生物が登場した。真核生物は、他の真核生物を取り込んだり、取り込まれたりせず、真核生物どうしがお互いにくっつくことでひとつの固まりとなり、生活するようになった。



多細胞生物の登場は、今から10億年程前と考えられており、当時の地層から藻類の化石が発見されている。多細胞生物が登場した当初は、単純に同じ種の細胞どうしが結合した細胞集合体であったが、徐々に細胞集合体のある部分がそれぞれ独特な機能を持つようになり、生命を維持するための役割を果たすようになった。例えば、細胞集合体が形成されると、ある細胞は集合体の表面に露出し、ある細胞は内側に存在するものがある。集合体の表面に位置する細胞は生命維持に必要な物質を外界から吸収したり、体内で生じた老廃物を内部からはき出したりする役割を担い、内側にある細胞は、生命を維持するのに必要な様々な物質を作ったり、表面に位置する細胞から送られてくる物質を消化する役割を担うことで作業が分担された。機能が異なる細胞どうしが集まることによってお互いに協力し合い、一つの生命体を形成することで、効率的に生命活動が行えるようになった。

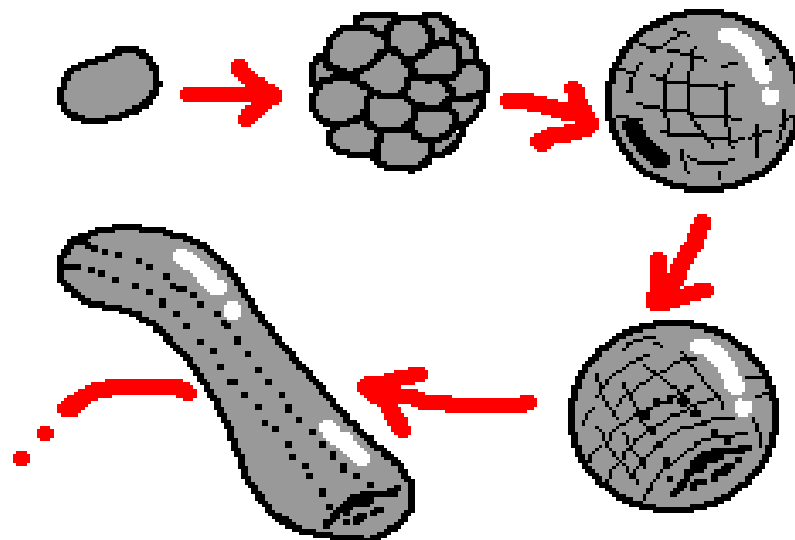


図2. 2-8 真核生物が集合し、多細胞生物へ進化

こうして、細胞が集まって形成された多細胞生物は、次第に大きく、強力になり、さらに長生きするようになった。多細胞生物は、海の底でゆっくりと進化を続けた。その中には菌類や植物、動物などがいるが、そうした生き物たちの種類はそれほど多かったわけではなかった。現在発見されている化石によると、6億年くらい前にいくつかの多細胞生物が存在していたことが明らかになっている。それらはエディアカラ生物群とよばれる化石である。

## 2. 2. 8 生物の急発展—先カンブリア期からカンブリア期へ(顕生代)

現在、我々が見ることができる化石の多くは、カンブリア期と呼ばれる時代から以降のものであり、この頃から地球上の生物の種類が急激に増え始めた。この現象は“カンブリア期の爆発”といわれているが、なぜこのような現象が起こったのだろうか。その理由はいくつか考えられているが、本当のところはまだはっきりとわかってはいない。

しかし、この時代の化石が現在でも多く残っており、この爆発的な進化の謎を解く鍵として、チェンジャン動物群やバージェス動物群などの化石が注目されている。

チェンジャン動物群の化石は、中国雲南省昆明の南東約50キロに分布するカンブリア紀初期の海洋動物の化石である。バージェス動物群の化石が出土する地層よりも若干古い地層である。今でも未解明の化石が多く存在している。

バージェス動物群の化石は、カナダ西部ロッキー山脈中のヨーホー国立公園に分布する、カンブリア紀中期の海洋動物の化石である。1907年に、アメリカのチャールズ・ウォルコットによって発見されたが、長い間注目を集めることはなかった。ところが最近になってふたたび調査がおこなわれ、カンブリア紀における動物の爆発的進化の謎をとく鍵として、注目されるようになった。この“カンブリア紀の爆発”では、これまで数億年という長い年月をかけて行われた進化の早さと比較すると、数千万年という非常に短い時間で、それまでまったく存在しなかった種の動物が一斉に地球上に登場した。そうした動物たちが一体どのような関係にあるのかは、まったく分からなかった。



図2. 2－9 バージェス動物群の化石 ナラオイア(1～4cm)





図2. 2-10 バージェス動物群の化石 オレノデス(5～8.5cm)

しかし、これらの化石の解析から、現存する動物につながる動物群が登場したことや、生物が他の生物を捕らえて餌とする捕食、現在の脊椎動物のルーツと考えられる脊索動物の存在など、生物の進化における重要な証拠が多く得られた。また、普通では残りにくい、ミミズのような軟らかい体をもった動物の化石が残っており、当時の生態系や進化の過程を知る上でも貴重な手がかりとなっている。

## 2. 2. 9 水中から陸上へ—オゾン層の形成(オルドビス紀～シルル紀)

原始生命が海洋中で発生してから各ステップを経て進化していった生物は、長い間その生活場所を海洋中で過ごし、陸に上がることがなかった。生物中にある遺伝子は放射線によって壊されてしまう恐れがあり、強い紫外線が当たるところでは、生物は生きていくことができない。その当時の地球では太陽から降り注ぐ紫外線やその他の放射線を防ぐ覆いがなく、直接地上に到達していた。今の地球では、上空にあるオゾン層とよばれる部分が、太陽からの強い紫外線を防いでいる。そのため、人間を初めとする陸上で生活する生物は安全に生活することができる。

オゾンは酸素の原子3つがくっついたものである。我々が呼吸に利用している酸素は酸素の原子が2つくっついたものだが、大気中に酸素があると、紫外線の働きによって、ひとりでにオゾンが形成される。形成されたオゾンは紫外線が照射されるとまた酸素にもどり大気中に漂う。このようにして太陽から降り注ぐ紫外線は、オゾンを酸素に変えたり、酸素をオゾンに変換したりするのに消費され、あまり地上に届かなくなる。

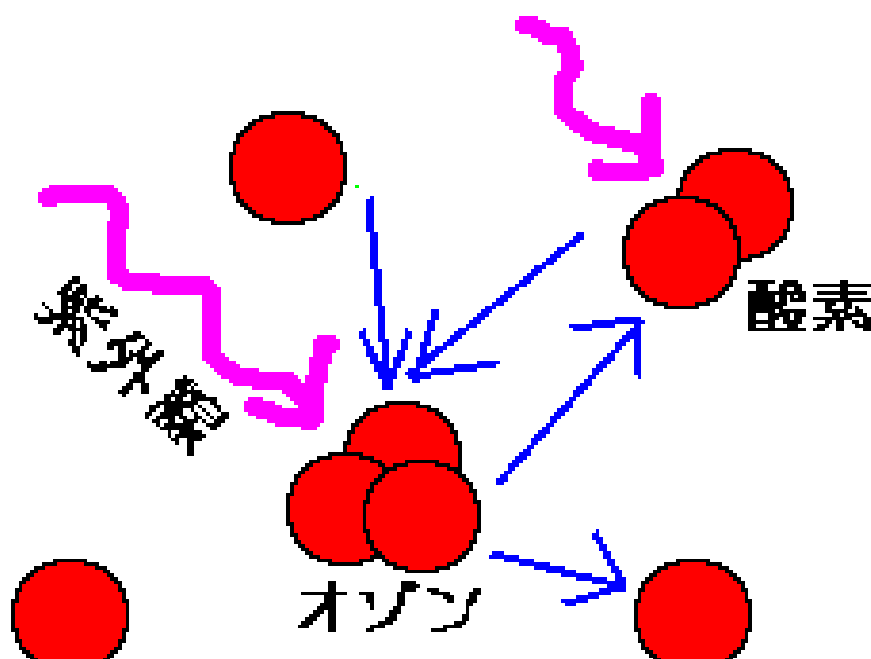


図2. 2-11 オゾンの発生

2. 2. 5項でも述べたが、地球上の酸素は光合成を行う生物によってもたらされた。シアノバクテリアやラン藻など、酸素を放出する生物が誕生してすぐに大気中に酸素が発生したわけではない。海中で生活をする光合成生物によって発生された酸素は、海中に大量に存在していた還元型の鉄と反応し、酸化鉄となって海底へ沈んでいった。海中の鉄がほとんど酸化され海底に沈むと、ようやく大気中に酸素が発生した。しかし、大気中の酸素は岩の中に含まれていた鉄やその他の金属を酸化するのに消費されていった。このため、酸素が大気中に大量に含まれるようになったのは、初めて酸素を放出する光合成生物が現れてから25億年以上も経過した、10億年ほど前のことだと考えられている。大気中に酸素が含まれるようになると、オゾン層が地球を取り囲み、生物が陸へ進出できる準備が整った。

オゾン層が形成され、太陽からの強い紫外線やその他の宇宙放射線が遮られるようになると、まず植物が陸へと上がりはじめた。その当時の様子を物語る苔類の化石がアフリカから発見されている。また、生物が陸へ上陸をはじめた頃は、植物が主体で、動物類はまだ陸へは上がっていない。動物は他の生物(植物やほかの動物)を捕食する必要があるので、餌となる生物が先に上陸しなければならなかった。その点、植物は水と二酸化炭素、太陽からの光があれば、生育することができたので先に陸に上がることができた。しかし、それらの植物が陸に上がり始めた頃は、乾いた砂漠のような場所だったと考えられている。上陸をはじめた植物は、初めは水辺から上陸し、ゆっくりと時間をかけて内陸へと入りこんでいった。



図2. 2-12 植物の一部が水中から陸へ上陸を始めた

一部の動物もこの頃上陸をはじめており、節足動物が陸上を這いまわった跡の化石がみついている。しかし、本格的な上陸が始まり、さまざまな動植物が陸上に姿をあらわすのは、この後のシルル紀以降である。生物が陸上で生活するためには、それまでの岩石や砂だけではなく、植物が根付くための土壌が必要となるが、それらは徐々に水辺から上陸した植物が枯れて積み重なり、土を作っていた。枯れた植物からできた土は、それまで岩石や砂だけでできた地表面よりも、多くの水を蓄えることができる。これによって植物は土の中に根を張り、水で土が流出しないように土壌をしっかりと支えるようになった。このようにして、乾いていた陸が少しずつ水で潤い、次第に緑で覆われ、ついには森を形成するようになった。湿った森の中では、植物の他に昆虫類なども生活し、現在の地球と同じような環境に進化していった。このように陸上は緑と水で豊かになると、その他多くの動物も水中から陸上へと進出を始めた。

## 2. 2. 10 植物の進化(シダ植物から裸子植物へ)

生物が水中から陸上へ上がるときに、生物には重力が大きな負荷となってかかる。水中で生活する限りでは、生物の体に浮力が働くので、自分の重さにとらわれることなく、漂いながら大きく成長することができる。しかし、陸上ではもちろん浮力が無くなり、生物は自分の体の重さを重力に逆らって支えなければならない。また、体の周りを取り巻いていた水がないため、生きるために必要な水分や養分を体内に行き渡ら

せるための機構、さらに乾燥から防ぐため機構などが必要であった。植物では、水分やそれに溶けた養分を体のすみずみまで行き渡らせるために維管束を形成し、これらの困難に対応した。このようにして陸に上がった植物は、重力に逆らってその高さを伸ばし、森林などが形成されていった。この当時の植物はシダ類がほとんどであり、雄と雌の区別されていた。したがってシダ植物が増えるためには雄からの精子が雌まで届かなくてはならず、乾燥した地域では生育することが難しい。このためにシダ植物は、水辺から近い土地で生育するにとどまった。

このように水辺の限られた地域でしか繁殖できないシダ植物が進出できない乾燥した土地、水辺から離れた地域に進出していったのが裸子植物である。裸子植物の雄は精子を花粉の中に入れ、水がなくても風で花粉を飛ばすことで、精子を雌へ届けることができた。さらに、精子と卵が結合して成長し種子をつくることで、乾燥した地域でも耐えることができるようになった。こうして裸子植物は、水辺から離れ、乾燥した土地へ進出していき、巨大な森を形成していった。裸子植物はデボン紀にシダ植物から派生し、石炭紀に大いに繁栄した。

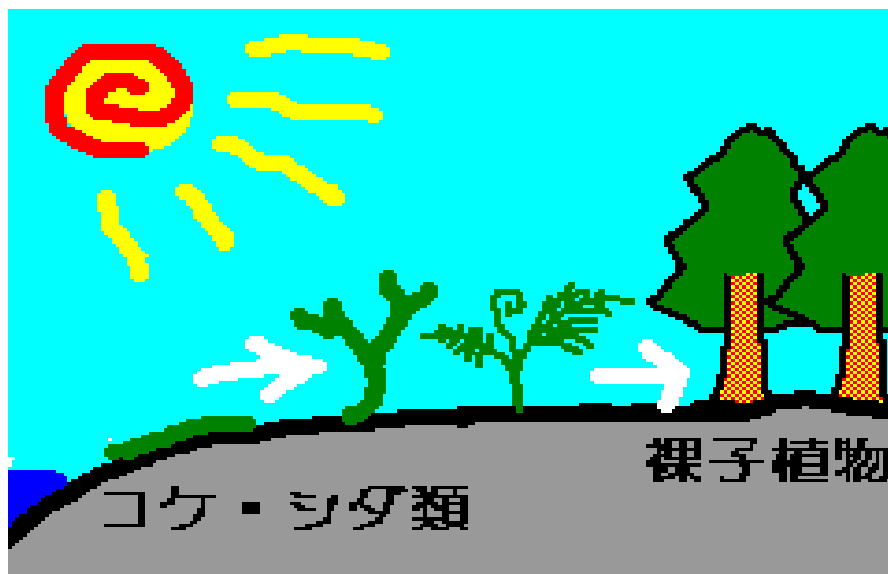


図2. 2-13 植物の一部が水中から陸へ上陸を始めた

## 2. 2. 11 動物の上陸と骨格の形成

先にも述べたように、生物が水中から陸上へ進出するには、自分の体を重力に逆らって支える機構が必要である。植物は維管束の形成により体を支え、水分や養分を体中に行き渡らせる機構を形成した。動物の場合はどのような進化があったのだろうか。

多細胞生物の登場後、ある一部の種はさらに進化をとげた生物は、ミミズのような

体の軟らかい動物や、ムカデなどの節足動物へとさらにその種を増やしていった。このような中において、今から4億8,000万年前ほど前に背骨を持つ生物が登場した。魚類の登場である。魚類をはじめとして、この後に登場する両生類、爬虫類、哺乳類はすべて背骨を持っている生物種で、このような動物を脊椎動物という。つまり、魚類の登場は、脊椎動物の登場ともいえる。魚類は海で大いに繁栄してその種を増やしていったが、やがて海では激しい生存競争の場となっていく。

やがて激しさを増す生存競争から生き残るために、一部の動物が陸へと進出していった。それまで生活していた水中とはまったく異なる陸上に進出するためには、動物の体自体も陸の環境に合わせて進化させなければならない。



図2. 2-14 植物に続いて動物も陸上へ進出していった

その一点は骨の形成にある。魚類にも骨はあるが、水中で生活をしているためにそれほど強度な骨は必要としなかった。しかし、陸上で生活するためには自分の体を重力に逆らって支えられるほどの強度な骨が必要となる。

ここで骨の構成成分であるカルシウムについて述べる。陸上に上がった動物の骨は、リン酸カルシウムという物質からできており、硬く丈夫で、体を支えるのに重要な働きをしている。しかし、骨の役割は体を支えるだけではなく、もう一つ重要な役割を担っている。骨の成分の一つであるカルシウムは、動物が生きていくにあたって非常に大切な欠かせない物質である。そのカルシウムを骨は貯蔵し、必要に応じてそこか



ら取り出して利用するのである。

カルシウムは、生態を維持するのに必要な様々なイベント、特に生体内を駆け巡る信号の伝達物質として欠かせないものである。例えば、体のある部分を動かそうとしたとき、神経組織の中を伝わる信号を最終的に筋肉に伝えるときや、筋肉細胞が筋繊維を収縮させるための信号物質としても使われるので欠かすことができない。これによって動物は自在に体を動かし、行動することができるのである。また、我々哺乳類をはじめとした多細胞生物は、その体を構成するために細胞と細胞がくっついて組織を形成し、それらが集まって一つの個体が形成されている。この細胞同士をくっつける役割をするタンパク質が機能するときにカルシウムが必要となる。

このように陸上へ進出した動物は、やがてデボン紀になると両生類、石炭紀には爬虫類、三畳紀には我々人間が属する哺乳類へと進化していった。この進化の中で、動物は自分の子孫を残すシステムについても、ある種では卵細胞を硬いからで包んだ卵殻を作り、また哺乳類では雌の体内である時期まで子供を育てる胎生など、確実に世代交代が行える形に進化していった。

## 2. 2. 12 生物の進化と重力環境

動物は陸上へと進出していった後、その環境に適応して数や種類を増やしていった。しかし、常に一方的に数や種類が増えていったわけではない。地球の環境の大きな変化がたびたびおとずれ、変化に適応できなかった生物は大絶滅が繰り返された。古代に繁栄を極めた恐竜や海中の生物(アンモナイト、三葉虫など)も、環境変化に対応できずに絶滅し、今では現存しない。氷河期や大隕石などの墜落によりほとんどの生物が生きられないような環境変化を繰り返す中、現存する生物のもととなる種類が生き延び、さらに進化をつづけた。やがて、猿の中から猿人が登場し、やがて人類が登場し、地球上で活躍するようになった。今の人類は、化石などの解析によって、今から400～500万年まえほどに、類人猿から分岐したと考えられている。やがて、人類は道具を作り、使うことを覚えた。また、火を使うことを身に付け、食物の栽培を行うなど、これまでの生物と比較にならないほど高度な生活を送るようになった。この間、人類の数は急激に伸びていき、文明、社会を形成し、より知的な活動をするようになった。人類の誕生から現在の高度な社会を形成するまでにかかった時間(約500万年)は、生命の誕生から現在までの時間(約40億年)と比べると、驚くほど短い。

命の誕生から40億年、常に生物は環境に合わせて進化、多様化し、現在のような生態系が作り上げられ、いまでも非常に多くの種類の生物が地球上で生活している。しかし、これまでおきた様々な環境変化をぐりぬけ、進化を遂げた生物も、環境という点においてある共通点が一つある。それは“重力”という環境である。地球上で生活する限り、生物は常に地球による重力がある環境下でその生命を育む必要があっ

た。生命の誕生から現在まで、地球上から重力がなくなった瞬間というのはなかったのである。ということは、生物の進化も地球における重力の環境下に適応した形で進んだといえる。

## 2. 2. 13 地球から宇宙へ

まもなく、国際宇宙ステーションが完成し、人類の本格的な宇宙活動が始まろうとしている。やがて人類はこの地球から飛び出し、未知の宇宙空間で生活を始めるかもしれない。そのような中で、我々人類に限らず生物は宇宙環境に適応していけるのだろうか。

これまで長い時間をかけて進化してきた生物がすぐに宇宙空間というこれまでとはまったく異なった環境にすぐに適応できると考えるのは難しい。現在地球上に存在する生物の体の構造や機能は、すべて重力のある環境下で作り上げられたからである。

しかし、宇宙空間あるいは火星などの他の惑星環境に適した体の構造や必要な機能については、何一つわかっていないといってよい。また、宇宙飛行士がスペースシャトルなどで宇宙空間に飛び出したときに様々な人体への影響が観察されているが、どのようなメカニズムで影響が現れるかということについては、明らかにされていない点が多い。

このように地球から宇宙へ飛び出すには、解明しなければ課題がまだまだ多く残っている。この困難を乗り越えるために、国際宇宙ステーションが宇宙空間での研究所としての役割を果たし、これからますます宇宙空間での実験・研究は進められることだろう。

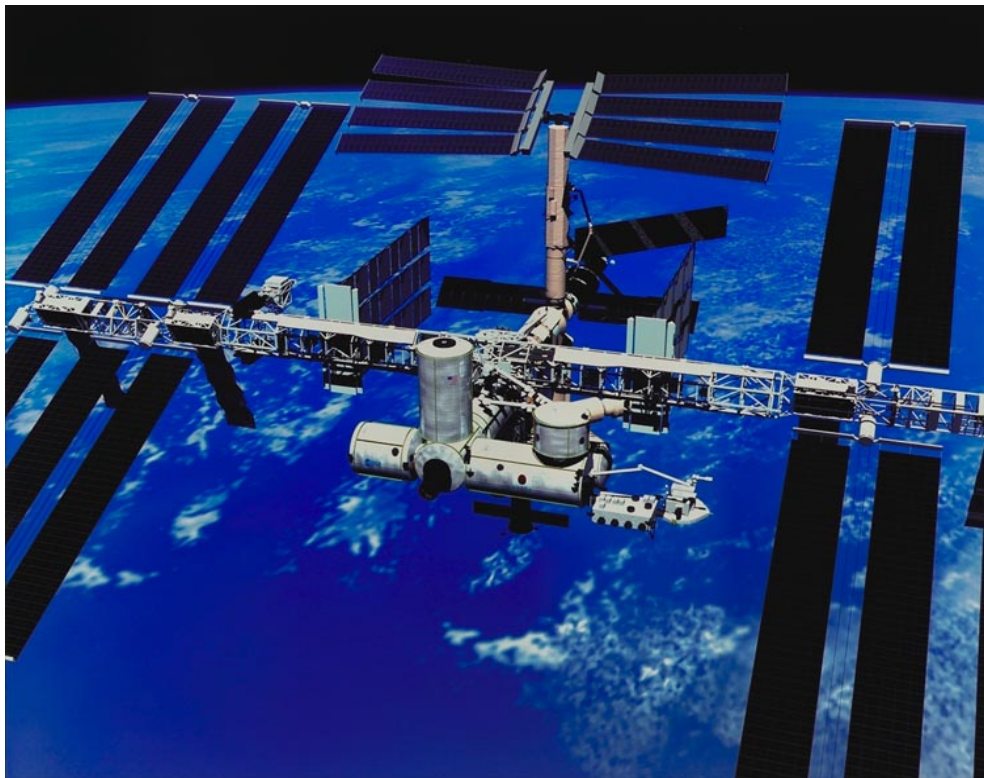


図2. 2-15 国際宇宙ステーション



図2. 2-16 火星への進出



表2. 2-1 生物の進化

代	紀	世	年代（始）	年代（終）	氷河時代
始生代		地球誕生	4 6 億年	2 5 億年	
原生代			2 5 億年	5 億 7 0 0 0 万	氷河時代 約 6 億年前
古生代	カンブリア紀	海中に生物が 生れた	5 億 7 0 0 0 万	5 億年	
	オルドビス紀		5 億年	4 億 3 0 0 0 万	
	シルル紀	陸上に植物が 進出	4 億 3 0 0 0 万	3 億 9 5 0 0 万	
	デボン紀		3 億 9 5 0 0 万	3 億 4 5 0 0 万	
	石炭紀（ミ シシッピー 紀）		3 億 4 5 0 0 万	3 億 2 0 0 0 万	
	石炭紀（ペ ンシルベニ ア紀）		3 億 2 0 0 0 万	2 億 8 0 0 0 万	氷河時代（石 炭紀末から二 畳紀初期）
	二畳紀（ペ ルム紀）		2 億 8 0 0 0 万	2 億 2 5 0 0 万	
中生代	三畳紀		2 億 2 5 0 0 万	1 億 9 0 0 0 万	
	ジュラ紀		1 億 9 0 0 0 万	1 億 3 6 0 0 万	
	白亜紀		1 億 3 6 0 0 万	6 5 0 0 万	
新生代	第三紀	暁新世	6 5 0 0 万	5 3 0 0 万	アルプス造山 運動
		始新世	5 3 0 0 万	3 7 0 0 万	
		漸新生	3 7 0 0 万	2 6 0 0 万	
		中新世	2 6 0 0 万	7 0 0 万	
		鮮新世	7 0 0 万	2 0 0 万	
	第四紀	更新世（洪 積世）	2 0 0 万	1 万	氷河時代
		完新世（沖 積世）	1 万	現代	後氷期
第四紀更新 世（洪積 世）	考古学で言う旧石器時代にほぼ相当する。				
第四紀完新 世（沖積 世）	新石器時代、人類は農耕を発明した（約 1 万年前）、日本では縄 文時代に当たる				
ウルム氷期	第四紀氷河時代の最後の氷期（第 4 氷期） 5 万 3 千年から 1 万年前、旧石器時代の最後期 海面は現在より 1 0 0 メートルも下がっていた				
後氷期への 移行期	1 万 3 0 0 0 年前 旧石器時代の終末から縄文草創期の時代				
氷期	氷河時代のうちでも特に寒冷で氷河が著しく発達した時期				
間氷期	氷河時代のうち、氷期に挟まれた気候がかなり温暖な時期 気温は現在とほぼ同様ないし若干高めで、海面は現在よりも 2 0 ～ 3 0 メー トル程高めであった				

## 2. 3 地球外生物、地球外文明は存在するか

地球以外の場所に生命体は存在するのでしょうか。いるとすれば文明を持つ人類のように高度な(あるいは人類より高度かもしれませんが)知的生物なのでしょうか。この問いは、生命の起源を探る試みと同じく、長い間人々を悩ませ、好奇心と冒険心をかき立て、また小説や映画などの愉快的空想世界の一領域をも生み出してきました。結論を最初に申しますと、この根源的な疑問に対して、まだ誰も明確な回答を得ていません。

それでは、この問いは恋愛や神などのように、掴み所のない謎めいたものなのでしょうか。確かにかつてはそうでした。しかし、現代では、人類は、地球以外の場所へも進出する技術を得て、活動領域を飛躍的に拡大させました。探査衛星だけでなく、ヒトまでも宇宙に送り出せるようになったのです。生命科学・宇宙探査・宇宙技術など複数の学問領域の進歩の結果として、これまで謎とされてきた「地球外生物は存在するか」という問いを、遂に人類史上初めて解くことができるかも知れない時代に、私たちは今生きていると言えます。

ここでは、この問いに対する人類の挑戦の歴史と、現在と未来の挑戦を簡単に述べたいと思います。

### 2. 3. 1 宇宙人という概念

宇宙人という生命体が存在するかも知れないと言うアイデアは、一体誰が最初に考え出したものなのでしょうか。日本では平安時代初期くらいまで遡るかも知れません。つまり「竹取物語」を書いた作者(詳細不明)です。物語では最後にかぐや姫は月に帰っていきますので、かぐや姫は月に住む宇宙人というわけです。

ヨーロッパでは、古代ギリシャ人や 17 世紀の科学者ケプラーも月に人間がいると空想したようです。観測技術も進み、月の次に火星も身近になると、1898 年には H.G.ウェルズ(Herbert George Wells)が火星人が地球に攻めてきて大パニックになるという SF 小説「宇宙戦争(The War of the Worlds)」を書き、火星にはタコに似た宇宙人がいると想像しました。なぜタコ型火星人かというと、高い知能は頭脳が大きいことにあられ、小さな火星の重力のもとでは手足が細くても体を支えるには十分であろうという理由からです。こういった考え方は、自然淘汰により環境に適した形質を持つ個体・種が存続するという、地球上の生命進化を考える際の考え方と基本的に同じものです。生命とは何か? から始まって、もし宇宙人がいるとしたら、どんな形でどんな生命の仕組みを持っているのかを研究している科学者もいます。

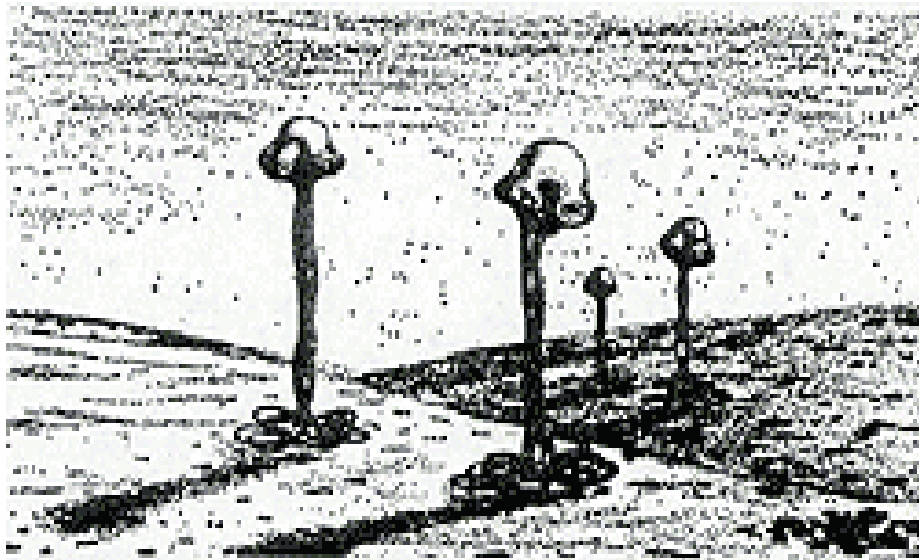


図2. 3-1 H.G.ウェルズの想像した火星入

火星入がいるかどうかはずいぶん長い間議論がかわされました。19世紀末には火星表面に人工的な運河の痕跡のような模様が観測されたので、それを作れるほどの知的生物がいるだろうと言われたりしましたが、多くの学者は火星では大気が薄く酸素もほとんどなく気温も低いことなどから高等生物は存在しないと考えていました。その後の探査衛星等の火星調査で、火星表面の模様は偶然の産物であり、火星入もいないだろうという結果が得られています。1976年には火星に着陸したバイキング探査機により、現在の火星にはバクテリア等の微生物も存在しないことが判明しています。バイキング探査機には、火星表面の土壌をすくい取って水と養分を与える装置が搭載されており、火星の土の中にバクテリアのような生物がいたとしたら、なんらかの生化学反応がおきるはずで、それを捉えることのできる装置が使用されました。



図2. 3-2 火星のマリナーの谷(アガトダエモン運河と言われていました)

それでもなお、1976 年にバイキング探査機が火星表面を撮影した写真の中に人の顔に似ている山が写っていると言うことで、UFO(未確認飛行物体:Unidentified Flying Objects)やアトランティスなどの超古代文明を信じる人々によって、それは古代火星人が伝えようとしたメッセージだと信じられています。1998 年のマーズグローバルサーベイヤーによる詳細な写真によって、この模様は単なる光と影のいたずらだと断定された後も、古代火星人を信じる人達はNASAの隠蔽工作だとして反論しています。宇宙人の存在を期待する人々にとっては、地球外生物が発見されるまでは、永遠にあきらめ切れない夢なのかもしれません。それゆえに今後も楽しい映画や小説が生み出されることでしょう。地球人というのは、本当におもしろい「宇宙人」だと思いませんか。



図2. 3-3 人の顔に見えますか？ 上:バイキング撮影、下:マーズグローバルサーベイヤー撮影

### 2. 3. 2 火星からの隕石

火星に生物が存在する可能性は極めて小さいとされていますが、1996 年に NASA ジョンソン宇宙センターとスタンフォード大学の研究グループから衝撃的なニュースが発表されました。火星からの隕石に生命の痕跡らしきものを発見したというもので、再び火星の生命の発見に興味が高まりました。化学的分析により火星から飛来したと考えられる隕石は、地球上で現在 30 個程度発見されていますが、その中の1つで 1984 年に南極で発見された ALH84001 とよばれる隕石に、古代火星のバクテリアの化石のような物質が内包されていたと報告されたのです。この隕石は、36 億年前の火星で作られ、1500 万年前に何らかの物体が火星に衝突した衝撃で飛び出し、13000 年前に地球の南極に落下したものであると推定されました。発見された化石のような物質は、長さが 1 万分の 1 ミリほどで、地球上の一般的な細菌の 10 分の 1 程度の大きさでした。しかし地球上で最古の生物化石(約 35 億年前)とされるラン藻と形が似ていて、これが火星生物の化石の写真ですと言われると妙に説得力のあるものでした。

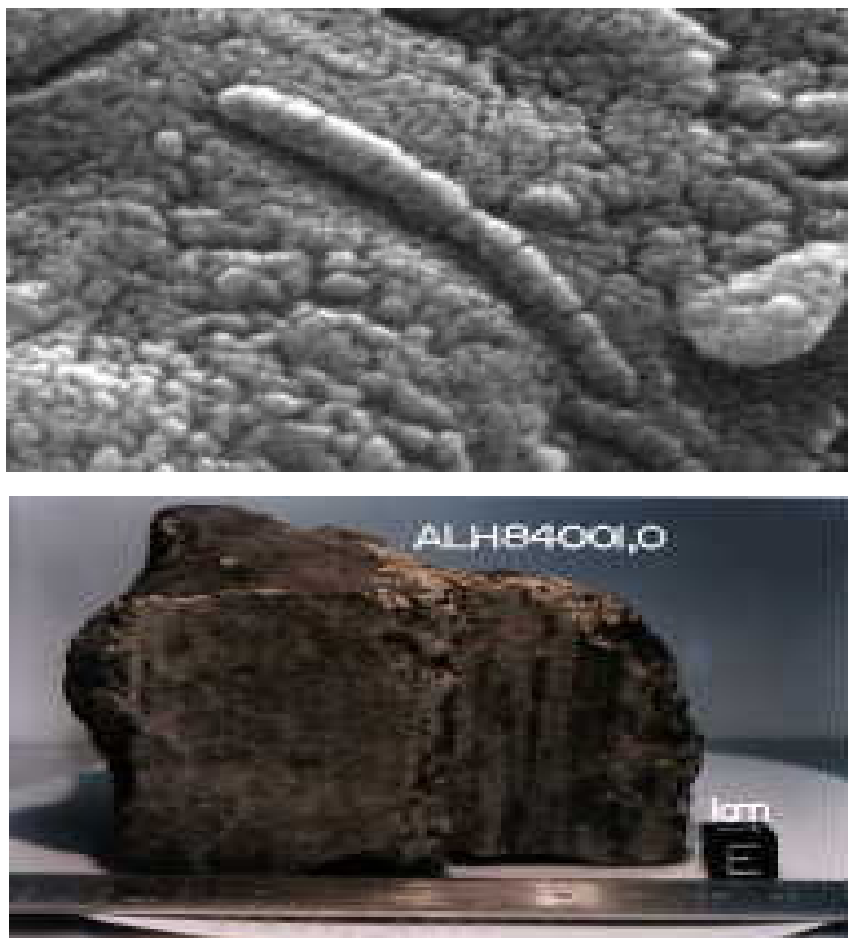


図2. 3-4 上:公開された写真 下:隕石 ALH84001

その後、この説に多くの反論が寄せられ、化石のような物体は本物の化石ではなく自然の産物である可能性も出てきました。現在では火星の生命に関しては、肯定的な証拠は少なく、どちらかというとな否定的な意見が多いようです。しかし、2002 年に NASA は、火星探査機「2001 マーズ・オデッセイ」による水素の検出結果から、火星の表層部(深さ1m 以内)に大量の水(氷)が存在すると発表しました。かつて火星は温暖な気候であったと推測されているので、まだまだ火星の生命とその痕跡探しの挑戦は続きそうです。

ところで、太陽系には火星以外にも生命存在に関係していそうな天体があります。海がありそうだという木星の衛星エウロパと土星最大の衛星タイタンです。エウロパは月より少し小さい岩石型衛星です。1995 年頃人工衛星ガリレオによりエウロパが調査され、地表の氷の下には海があり海底火山も存在する可能性があることが分かりました。火山があるとすれば地球型生命(微生物)が生存できる環境条件にかなり近いのです。また、タイタンの大気は約 40 億年前の生命が誕生する以前の原始地球の大気に似ていると考えられています。2004 年土星に到達した土星探査機カッシーニには、タイタンに突入する探査機ホイヘンスが搭載されており、2005年1月タイタンに着陸しました。ホイヘンスによりタイタンの大気と地表の分析が行われています。

### 2. 3. 3 地球外知的生物の存在する確率

地球外生物が存在しないことを証明することは困難なので、存在の例が1つでも発見されれば、この長年の議論にも決着がつきます。一体どれくらいの確率で生命の存在しそうな星はあるのでしょうか。太陽系には地球以外に生物がいなかったとしても、宇宙には多くの星があり、太陽系が所属する銀河系だけでも、恒星は 2000 億個もあると言われています。それだけでもあれば、地球のような環境の惑星もありそうです。もしその星の環境が地球に似ていなくても、地球型生命とは異なる何らかの方法でエネルギーを獲得し外界の特殊環境中で生存できる生物が存在しているかも知れません。1961 年アメリカの宇宙物理学者フランク・ドレイク博士(Frank Drake)は、「現在、銀河系内に高度知的文明を持つ生物が住む星のある確率」を算出する次のような方程式を提唱しました。

$$N = R_* \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times L$$

N : 銀河系内の文明の数

$R_*$  : 銀河系内で1年間に誕生する恒星の数

$f_p$  : その恒星が惑星系を有する確率

$n_e$  : その惑星系で生物が存在できるような環境をもつ惑星の数

$f_l$  : その環境の惑星に生物が発生する確率

$f_i$  : その生物が知的生物に進化する確率

$f_c$  : その知的生物が他の星に存在を示す信号を発信する技術を有する確率

L : その知的生物がその信号を発信できる時間(文明の寿命)(年)

ドレイクの式を見ておわかりのように、この方程式の各項に代入する数値は人により考え方により変わってきます。計算結果は、やはり地球だけの1個だとする人や、1万～100万個とする人もいます。

#### 2. 3. 4 宇宙人探しという挑戦の始まり

もし高度な文明を持つ生物が存在したら何か意味のある電波を発信しているかも知れません。それを受信して、地球外知的生物の探索または交信を試みる活動が行われていて、それらの活動は総称してSETIまたはCETI(The Search(Communication) for Extraterrestrial Intelligence)計画と呼ばれています。

SETI計画は、1959年にジュセッペ・コッコーニ(Giuseppi Cocconi)とフィリップ・モリソン(Philip Morrison)が英国の科学誌ネイチャーに発表した論文「星間通信の探索(Searching for Interstellar Communication)」が発端となりました。彼らはその論文で、もし宇宙人が電波を発信しているとすれば、その波長は中性水素原子が発する21cmである可能性が高いと主張しました。

初めての電波による地球外生命探査は、1960年に前述のドレイク博士によって行われ、オズマ(OZMA)計画と名付けられました。オズマとは物語「オズの魔法使い」に登場する魔法の国の王女の名前です。オズマ計画では、米国ウェストバージニア州グリーンバンクにある26m電波望遠鏡を用いて、宇宙人からの通信を受信しようと試みました。この時、電波望遠鏡のアンテナは、太陽によく似た地球から11光年程度の比較的近い2つの恒星(エリダヌス座イプシロン( $\epsilon$ )星、くじら座タウ( $\tau$ )星)に向けられました。探査波長は論文を参考にして21cmとされました。合計400時間観測されましたが、残念ながら宇宙人からと思われる電波は受信できませんでした。

宇宙人からの電波を受けるだけでなく、逆に地球から宇宙人へメッセージを送る試みも実施されました。それにはどんな方法が考えられるでしょうか。手紙をビンに詰めて川や海に流し名も知らぬ人が拾ってくれることを期待するように、人工衛星に宇宙人への手紙を載せるのはロマンチックですね。また急ぐのであれば(といっても宇宙は広いので気が遠くなりますが)電波で発信する方法が良いでしょう。

さて、最初の試みは、1972年に打上げたパイオニア10号に(1973年打上げの11号にも)「宇宙人への手紙」が取り付けられたことでした。この手紙は、縦18cm、横27cmの金メッキされたアルミ板で、太陽系の位置やその惑星、友好的に手をあげている人間の男女の全身像が描かれていました。その後、パイオニア10号は1983年6月に太陽系外に出た初めての人工物になるという記録を打ち立て、現在も11号と共に宇宙人へのメッセージを載せ、最終目標地点である地球から68億光年離れた牛座のアルデバラン星に向けて、果てしない宇宙の旅を続けています。

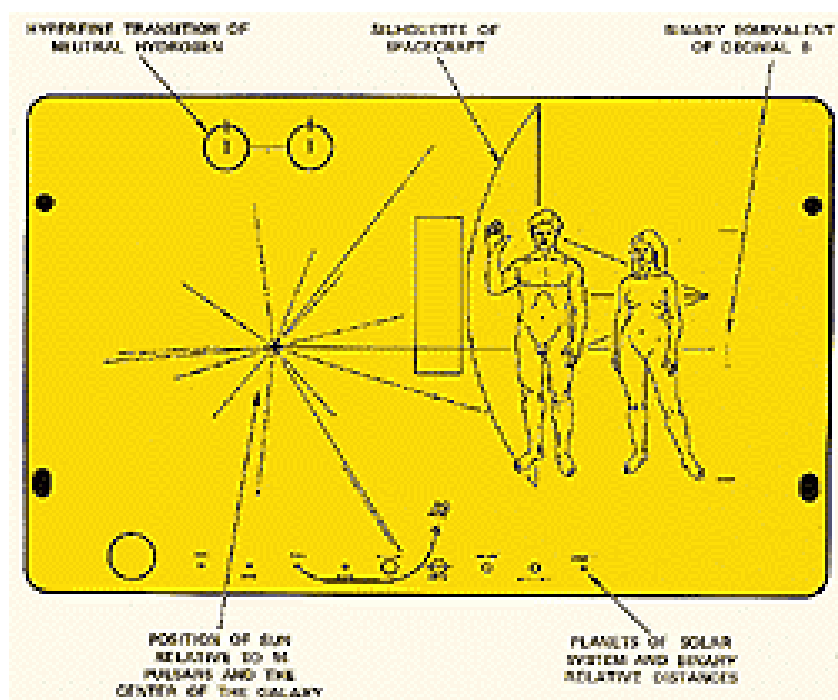
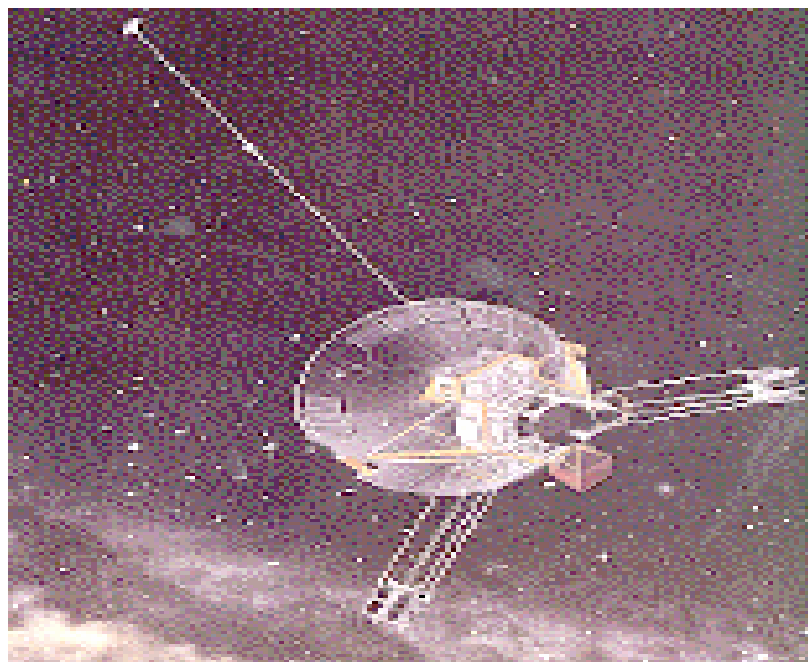
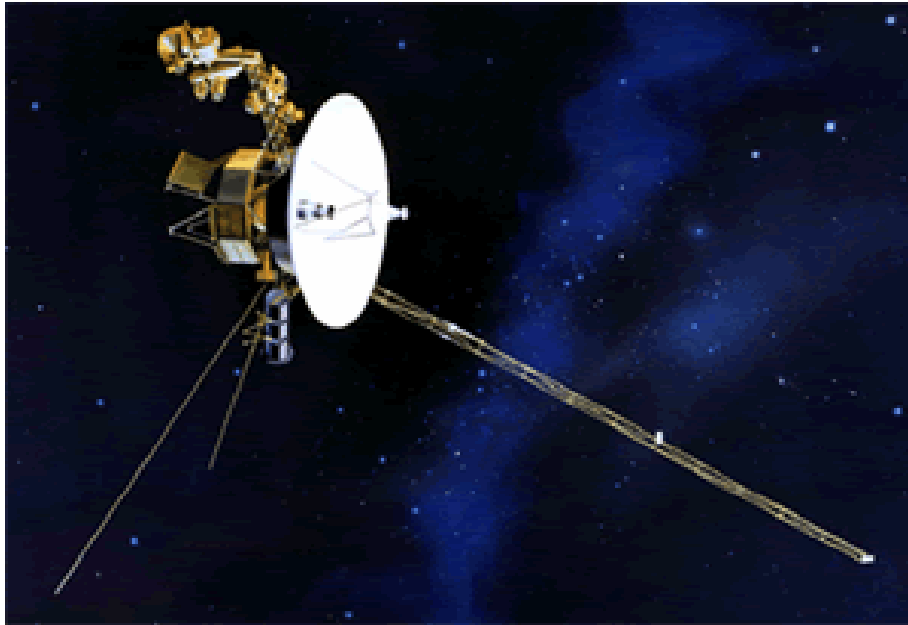


図2. 3-5 上:パイオニア 10 号、11 号

下:初めての宇宙人への手紙



また、1977年に打上げられた惑星探査機ボイジャー1号と2号には、金のケースに収められた直径約30cmの金メッキされた銅製のレコードが搭載されました。このディスクの中には、122枚の絵や写真で、数と単位の定義、太陽系のデータ、地球上の生物の説明、文化と文明などが記録されているほか、自然の音、音楽、世界中の60の言語などが90分間録音されました。ケース表面には、銀河系での太陽系の位置などが図示されていました。

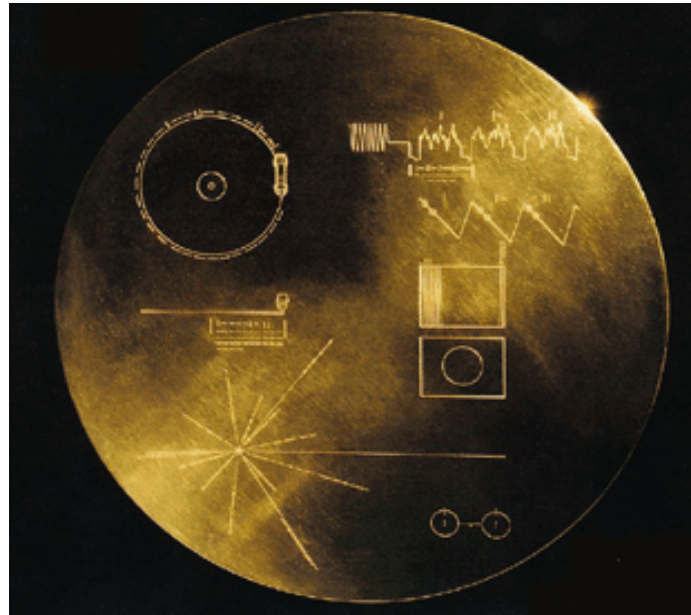


ボイジャー1号、2号



ボイジャー・レコード

図2. 3-6(1/2)



ポイジャー・レコードのケース

図2. 3-6(2/2)

次の試みとして、地球からメッセージが電波の形で発信されました。1974年11月16日にプエルトリコのアレシボ天文台の305m巨大電波望遠鏡から、30万個の星が集まった24000光年離れたヘラクレス座球状星団M13へ向けて、1679個のオンオフ(2進数)信号が送信されたものです。波長は2380MHz近傍です。アメリカの惑星科学・天文学者であった故カール・セーガン(Carl Sagan)博士らが中心となって作成した、このアレシボ・メッセージ(Arecibo Message)には、数・遺伝子の基本構造・人間・太陽系・アレシボ望遠鏡などを表す内容が、2進数の信号に変換されて入っていました。信号を横23、縦73のマス目にならべると意味のあるパターンになるように工夫されています。組み合わせとしては、1679は $23 \times 73$ 以外には、 $1 \times 1679$ しかないのです。高度な知能があれば解読できるだろうというわけです。

1974年に送られたこのメッセージが、M13星団に届くのは24000年後です。ということは、M13に住む宇宙人がこの信号をキャッチして解読しすぐ返事を返してくれたとしても、それを地球人が受け取ることができるのは西暦49974年です。はたして人類はそれまで存続しているのでしょうか。

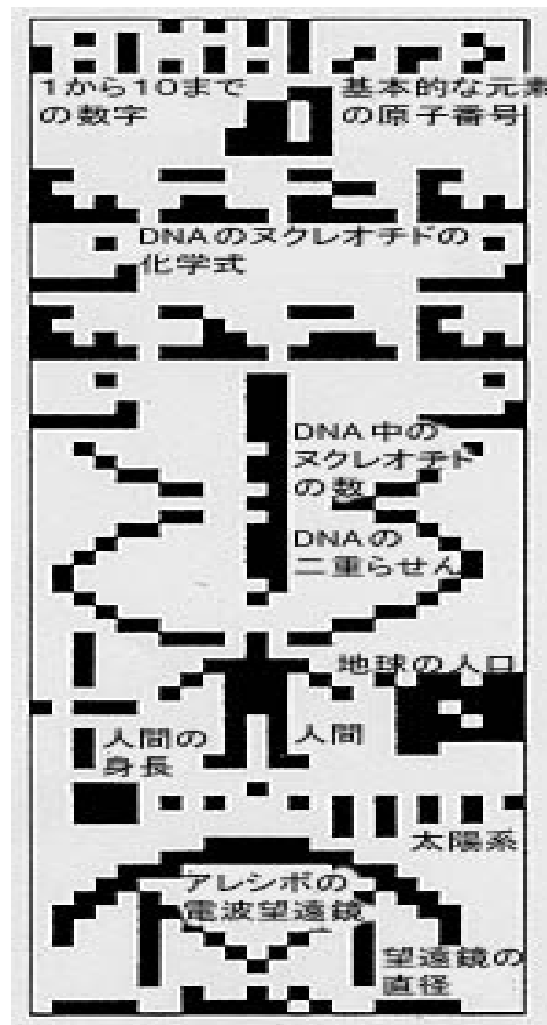


図2. 3-7 アレシボ・メッセージ

### 2. 3. 5 本格的に始まった SETI 計画

SETI 計画とは、地球に届く電波信号を電波望遠鏡で捉え、超高感度のスペクトルアナライザーと呼ばれる特殊コンピュータで莫大な数のチャンネルに選り分け、高度の文明を持つ地球外生物が発していると思定される電波信号をキャッチしようとする壮大なプロジェクトの総称です。代表的なものに、BETA、META、SERENDIP および Phoenix プロジェクトがあり、これらのマイクロ波による電波望遠鏡の探査以外に、光学望遠鏡(レーザー波を使う)による Optical SETI があります。

また、1999 年 5 月から開始された SETI@home プロジェクトは、250 万人を超える一般人が参加する世界最大のコンピュータ・ネットワーキングによる草の根の SETI プロジェクトとしてますます人気と重要性が高まっています。SETI@home は、個人所有のコンピュータの空き時間を利用して、宇宙から届く電波信号の中から宇宙人の発した信号を探そうというアイデアです。米国カリフォルニア大学バークレー校のダン・ワー

シマー(Dan Werthimer)博士により考案されました。コンピュータが使われていない時に画面に現われるスクリーン・セーバーにプログラムを組み込み、プエルトリコのアレシボ天文台からインターネット経由で送られてくる電波信号データを自動的に解析して地球外知的生物からのサインを捕捉しようとする試みであり、誰でも参加できます。パソコン 5 万台でスーパーコンピューター1台分の解析能力に相当すると仮定すると、参加しているパソコンは約 250 万台なので全体でスーパーコンピューター50 台分の解析能力を有することになります。

SETI 計画では、巨大な電波望遠鏡を使って、宇宙で最も存在量の多い水素(中性水素ガス)の放射周波数(1420MHz)から、水素と共に水を構成する水酸基(OH)の1640MHz 付近までの帯域を中心に探索作業が続けられています。これらの帯域周辺は、ノイズが少なく、また生命が存在するには水が不可欠などの理由で選定されています。

現在のところ、地球外生物が発信したと言える決定的なデータはまだ発見されていません。地球外の知的生命からのシグナルであると判定する基準は、同じ電波信号が複数回観測されることが必要であるとされています。

## 2. 4 生物の重力感受の仕組み

キーワード: 重力感受、分子機構(メカニズム)、突然変異体

地球上の生物は地球の重力のもとで進化し、生存のための環境適応をしてきた。この重力環境に適応するための戦略として、さまざまな生物は重力刺激の感受と、その情報伝達を行なう器官や仕組みを持っている。細胞、器官、個体の増殖、機能、運動に及ぼす重力の影響は大きく、地球上での姿勢の安定や生理的な機能の変化をつかさどっている。スペースシャトルや国際宇宙ステーションによる微小重力環境下での実験は、生物に対して重力という外的因子をなくすことができ、生物がいかに重力を検知しその仕組みを遺伝的に伝えるか、生物の進化の過程を明らかにする上でも貴重な知見となる。本稿では、様々な生物の重力感受に着目し、重力応答反応の中でもっとも知られている高等植物の重力屈性機構についての研究の現状を紹介する。

### 2. 4. 1 生物の重力感受機構

#### (1) 動物の重力感受機構

##### (a) 原生動物

単細胞ミドリムシ(*Euglena viridis*)やコナミドリムシ(*Chlamydomonas Pulvisculus*)、ゾウリムシ(*Paramecium*)には、重力の存在下では重力と反対方向に泳ぐ性質がある(負の重力走性、負の走地性ともいう)(図2. 4-1)。ゾウリムシの重力受容のメカニズムについて詳細はわかってないが、多くの遊泳性の単細胞生物は重力を受容するような特別な機構を持たないのに関わらず、重力によって沈下する方向に逆らって水面に向かって泳ぎ続ける性質を持っている。重力感受のセンサーとして、機械的刺激のセンサーでもある繊毛が働いてると考えられている。回りの水抵抗により繊毛は受動的で機械的な歪みを生じ、細胞膜電位を変化させて上方へ移動する繊毛運動を引き起こす。最上らはこの細胞膜電位の変化が繊毛打の頻度だけでなく、角度も調節している仮説を提唱している。力学的変化を受容する運動性繊毛の力学-電気変換反応は他の生物種でも知られており、重力感受は機械的刺激の受容反応のひとつとして捉えることができる。

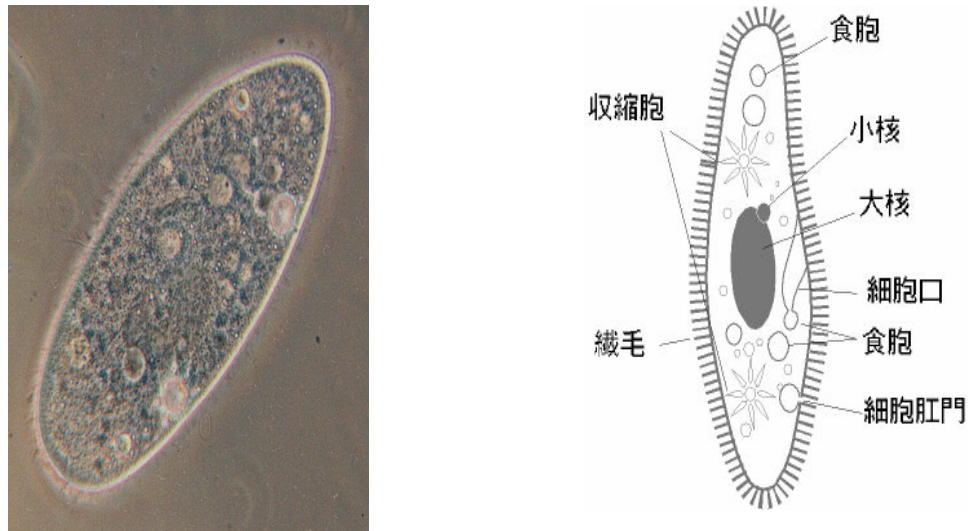


図 2. 4 - 1 ゾウリムシ

## (b)脊椎動物

魚類については、メダカ、コイ、ガマアンコウなどの個体の行動様式について、両生類についてはアフリカツメガエル、イモリ、ゼブラフィッシュなどの個体の行動様式についての重力の影響がよく知られている。両生類は、はじめて水中から陸上に進出した脊椎動物であり、重力生物学にとって重要な位置を占めている。胚発生から変態して上陸する過程に、脊椎動物の進化の歴史をくりかえし示すため、宇宙生物学にとってたいへん興味深い実験材料である。軌道上での魚類・両生類の行動様式については、1973 年のスカイラブや 1975 年のソユーズテストプロジェクトなど、1970 年代から盛んに軌上実験が行われてきた。軌道上において、魚類ではコイの背光反応の異常、金魚の前回りやばく転、メダカのルーピング行動、両生類ではイモリやアフリカツメガエルのオタマジャクシの前まわり行動が観察され、地上との行動様式に違いがあることが確認された(図2. 4-2)。1990 年9月、スペースシャトル エンデバー号に2匹の鯉が搭載され、背光反応を観察する実験が行われた。背光反応とはもともとほとんどの生物の持つ特性であるが、光の方向に背を向けて逃げようとする性質である。魚類においては、この光の方向に背ヒレを向ける背光反応と重力に対して姿勢を安定させようとする二つの反応によって、水中での姿勢を保っている。エンデバー号には内耳にある重力センサーである耳石器官を摘出したコイと正常なコイが搭載された。脊椎動物の重力受容器は内耳にある耳石器官であり、視覚と耳石器官による情報が小脳の前庭神経核へ伝えられ、自分の姿勢を認識して姿勢の制御を行なう。

耳石器官は、静止時には重力方向を、運動時には水平方向と垂直方向の直線加速度を受容する。耳石(otolith)は平衡石(statolith)とよばれる重りを受容細胞が取り囲んだ平衡胞(otocyte) (図2. 4-3)の一種であり、体が傾くと平衡石が傾き、耳石の変化(機械的刺激)を受け取った有毛細胞膜電位を変化させ、電気的な情報に変換されて中枢(小脳の前庭神経核)に伝えられる。機械的刺激の膜電位の変化は(a)項のゾウリムシの繊毛のメカニズムに共通する重力感受機構といえる。平衡胞は無脊椎動物にも見られる重力受容器官である。ミズクラゲの傘、ホタテガイの底部、ザリガニの第一触覚基部に存在する。

軌道上において、耳石を摘出したコイは光の方向だけで姿勢を決定するようになるが、時間とともに重力を感知する機能が回復する。これは耳石以外にも重力を検出する機能があり、摘出された耳石のかわりに機能しはじめた可能性があげられるが、それがなんであるかまだ同定されていない。軌道上においてメダカ科のフンジュラスや金魚が前回りをする事が確認されており、そのメカニズムに浮き袋のしくみが関連していることが示唆されている。耳石のかわりの重力件検出をしている器官として、浮き袋が候補としてあげられている。

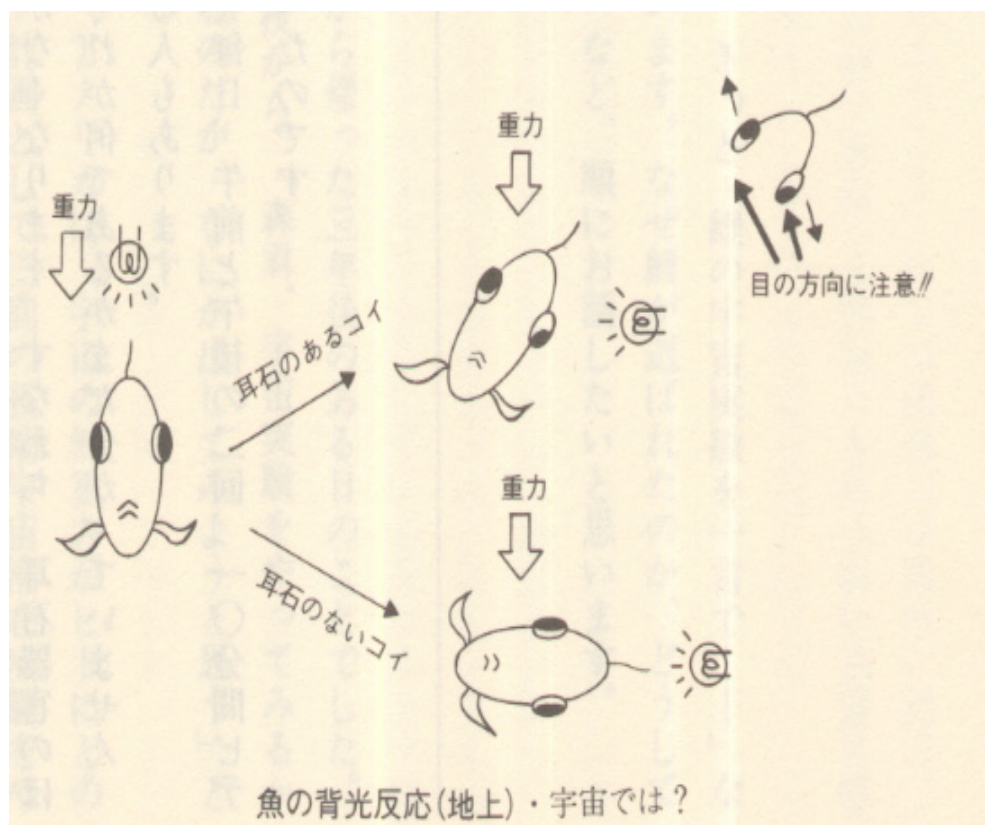


図2. 4-2 コイの背光反



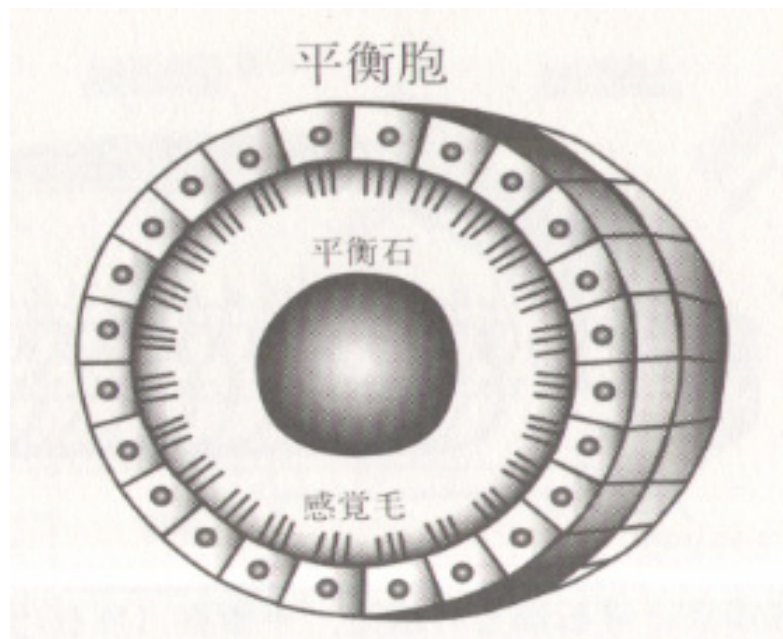


図2. 4-3 平衡胞の基本図形

## (2) 植物の重力感受

植物特有の重力に対する応答現象として重力屈性(gravitropism)がある。重力屈性は、植物が重力のベクターに対して生長方向をかえる現象であり、根は重力方向(正の重力屈性)に、茎・胚軸などの茎葉部は重力と反対方向(負の重力屈性)に伸長する。重力屈性機構を獲得することで、植物は地上部ではより多くの光を受容し、地下部ではより多くの水分や養分を得るために伸長方向を変化させることができる。移動する能力を持たない植物が重力屈性を持たなければいけない理由は明らかであり、動物の一過的な刺激への適応現象とは異なる機構があげられる。重力屈性反応には以下の4つのステップがあると考えられている(図2. 4-4)。重力屈性におけるメカニズム全体については 2.4.2 項で紹介する。

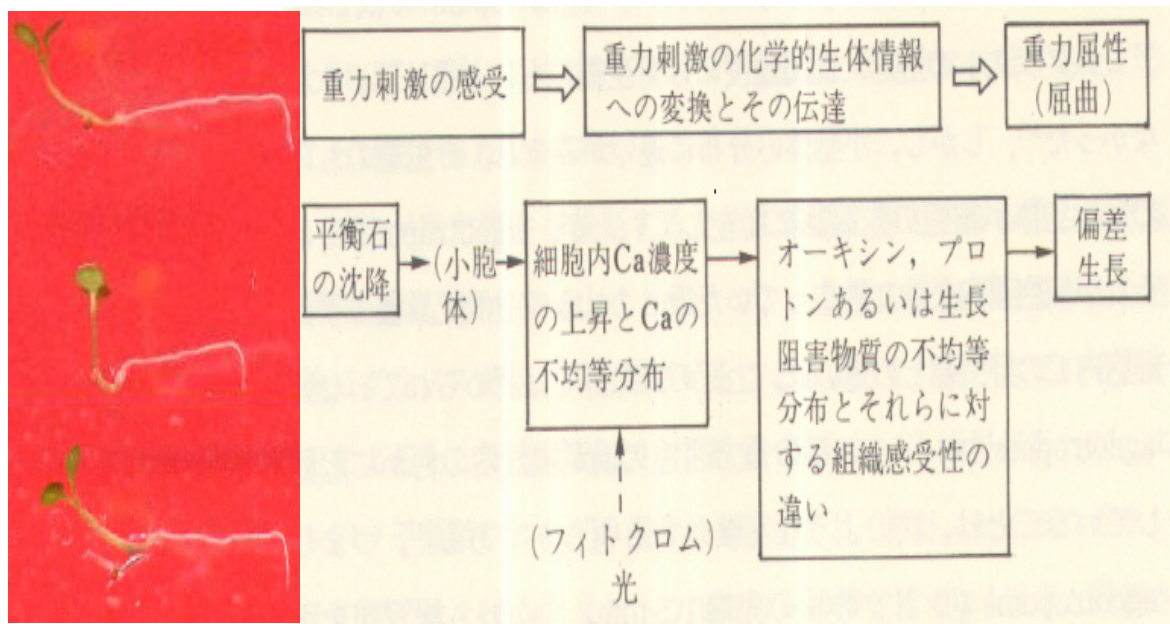


図2. 4-4 重力屈性発現機構のモデル

## (a) 下等植物

下等植物の重力の方向に対する応答について、藻類、蘚苔類、シダ類でくわし調べられている。特に重力感受については、藻類のフラスモ、シャジクモ(図2. 4-5)などの輪藻類の頂部に近い節間細胞が負の重力屈性(図2. 4-6)を、単核細胞である仮根は正の重力屈性を示すことが知られており、重力の感受には、高等動物の三半規管にあたる平衡器官に相当する仕組みがあることが分かっている。シャジクモの仮根の先端において、硫酸バリウムの結晶からなる小体が存在し、それが平衡石として重力により沈降することが確認されている。シャジクモにおいては、平衡石の位置変化が重力屈性において最初に見られる反応である。仮根を横たえると平衡石が下になった側に沈み、その部位から重力屈性が起こる。コケ、シダ類またはそれ以上の高等植物でも、この平衡石が茎、葉軸、根の先端に存在しており、重力に従って沈降、あるいは浮上するが、その成分はデンプン粒を含む沈降性アミロプラストである。植物種において平衡石の成分が異なる可能性があるが、何らかの平衡器官の機能を持っていることは、動物だけではなく植物においても明らかである。

蘚苔類においては、ゼニゴケ、ミズゼニゴケの仮根の正重力屈性、葉状体(配偶体)の先端部の負の重力屈性、造胞体の負の重力屈性がよく知られている。しかし、蘚苔類については重力よりも光の屈性刺激のほうがはるかに優勢であり、重力感受

や屈性における定量的な解析は少ない。

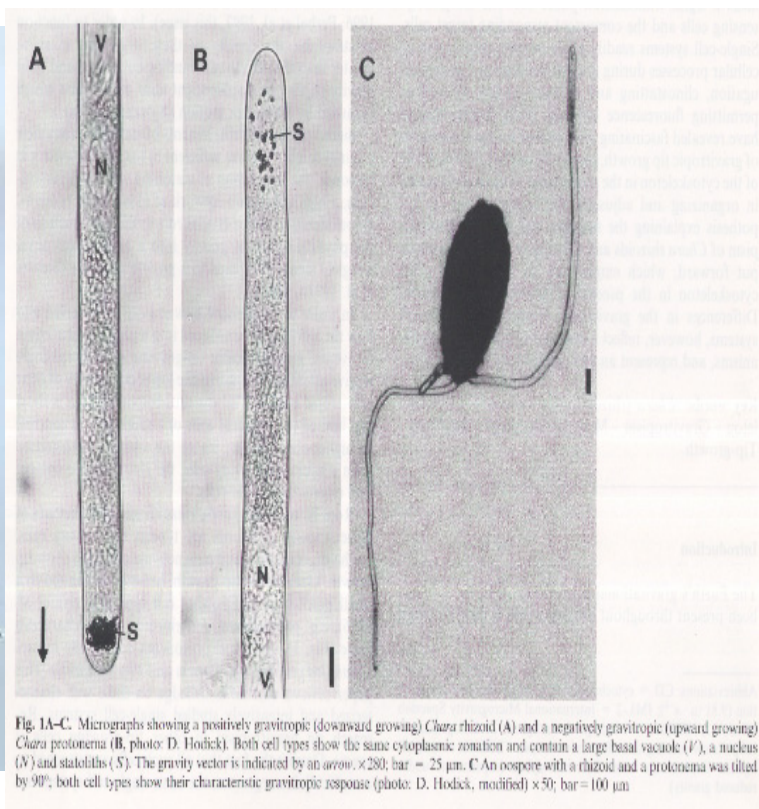


図2. 4-5 シャジクモ

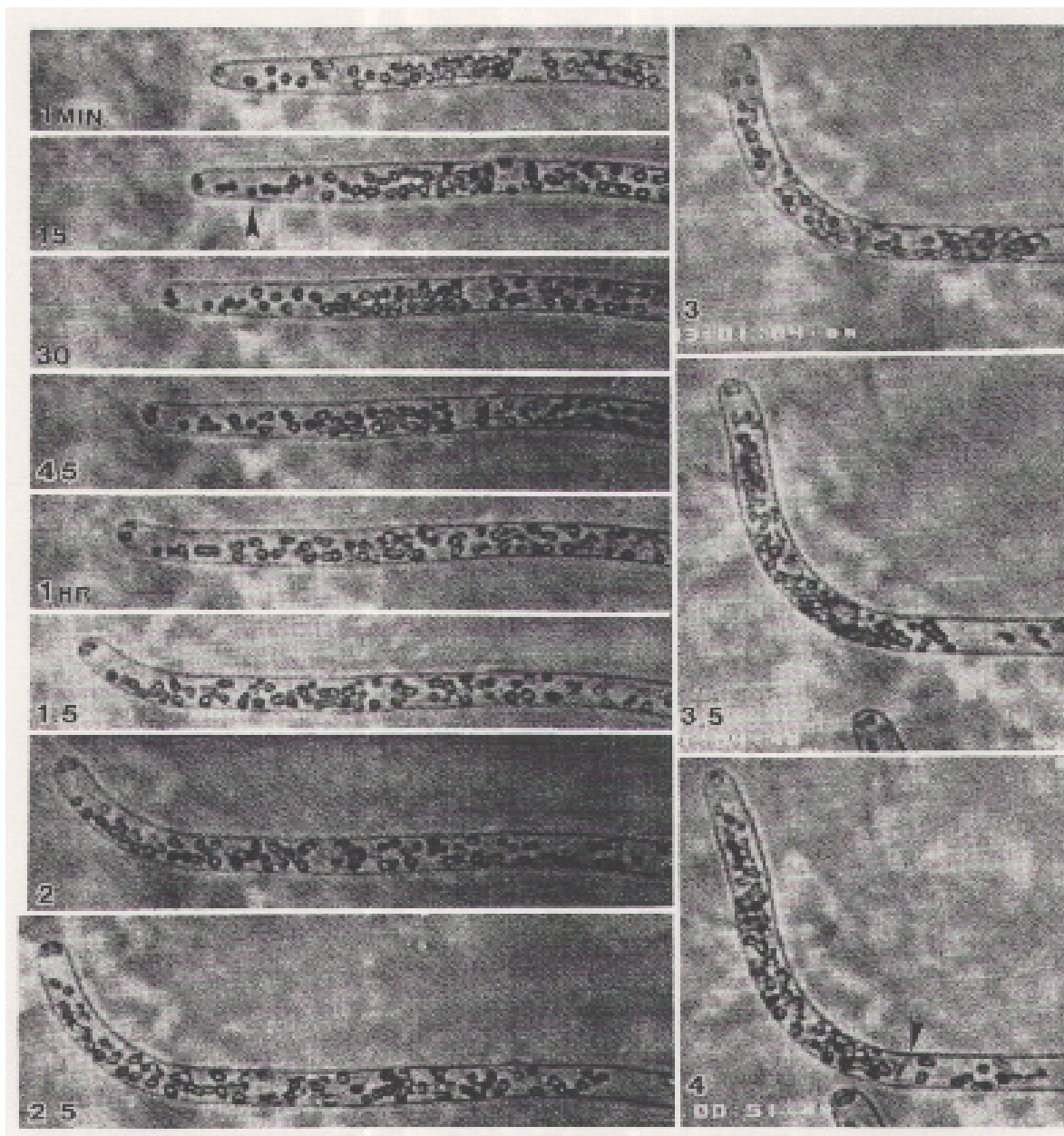


図2. 4-6 コケ類(single protonema of the moss ceratodon)の負の重力屈性

(b) 高等植物

藻類、蘚苔類、シダ類と同様に、高等植物においても重力を感受する器官のひとつとして平衡石として沈降性アミロプラスト(amyloplast)がある。アミロプラストはデンプン粒を蓄積するように分化した白色色素体(plastid)のひとつである。十分に発達したアミロプラストは通常特定細胞に存在しており、細胞内で重力ベクター方向に沈降しているのが観察されている。



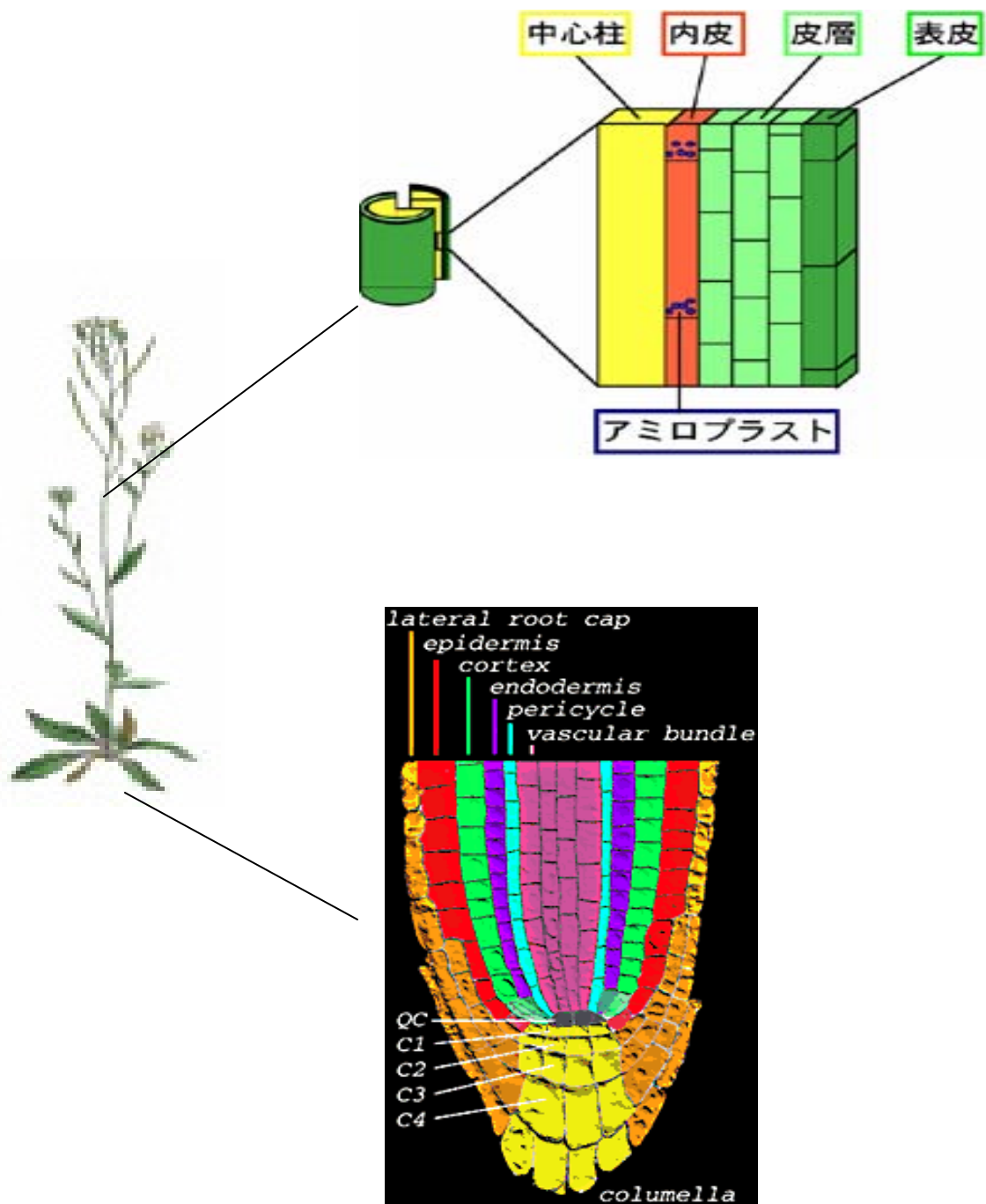


図2. 4－7 根と花茎、胚軸の構造

このアミロプラストを含む細胞は、根においては根冠組織の中央部を占めるコルメラ細胞 (columella cell) であり、地上部においては胚軸や茎の内皮細胞 (endodermis

cell)であり、維管束細胞をふくむ中心柱組織を取り囲むように存在する(図2. 4-7)。高等植物のコルメラ細胞や内皮細胞に蓄積するアミロプラスト(図2. 4-8)が重力を感受するといえるか? 高等植物のアミロプラストや、(a)項で述べたシャジクモの硫酸バリウムの結晶からなる小体が平衡石になりえるかどうかは、平衡石が何であっても細胞内で原形質中を重力に従って沈降、浮上する物体でなければならない。液体中を固体粒子が沈降する場合、物体の落下速度はストークスの式から、アミロプラストは理論的に沈降する物質であると裏付けられているが、細胞の底面に沈むのに必要な時間よりも早い高等植物の秒オーダーでの閾値が得られている。アミロプラストの沈降速度と刺激の感受について、どこまで重要な相関を示すのかははっきりと結論が出せない。アミロプラストが沈降した際に小胞体(Endoplasmic Reticulum:ER)と接触している電子顕微鏡画像(図2. 4-9)が取られていることから、アミロプラストの沈降だけでなく、小胞体などの細胞小器官との接触が重力感受の引き金であるともいわれている。シロイヌナズナ(*Arabidopsis thaliana*)の重力屈性異常変異体 *pgm* では、デンプン合成経路で働くホスホグルコムターゼの酵素活性が失われているため、プラステド内にデンプン粒が存在しない。しかし、重力屈性能が完全に失われておらず、非常に弱いながらも重力屈性を示すことから、必ずしもアミロプラストが細胞内で沈降しなくても重力感受はできる、またはアミロプラストの沈降以外にも重力感受を引き起こすものがあり得ることも示唆される(図2. 4-10)。

ハーゼンシュタインらはアミロプラスト以外の重力を感受する細胞構造として、胞骨格の特にアクチンフィラメントを指摘している。

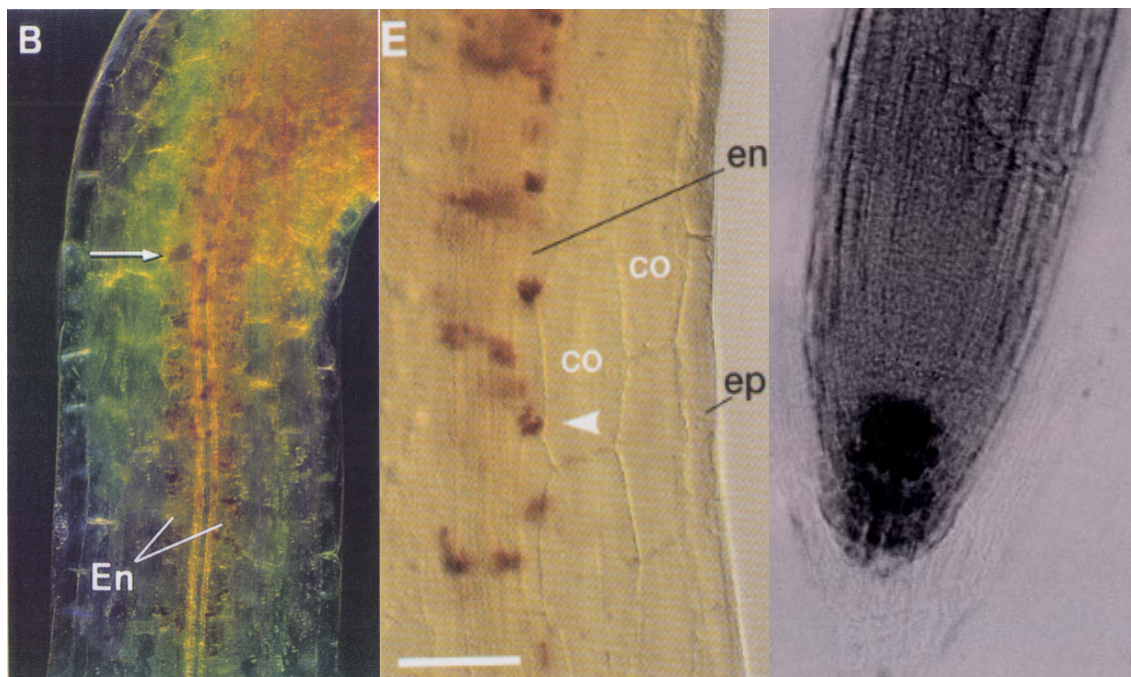


図2. 4-8 シロイヌナズナ(*Arabidopsis thaliana*)の根、胚軸、花茎のアミロプラスト



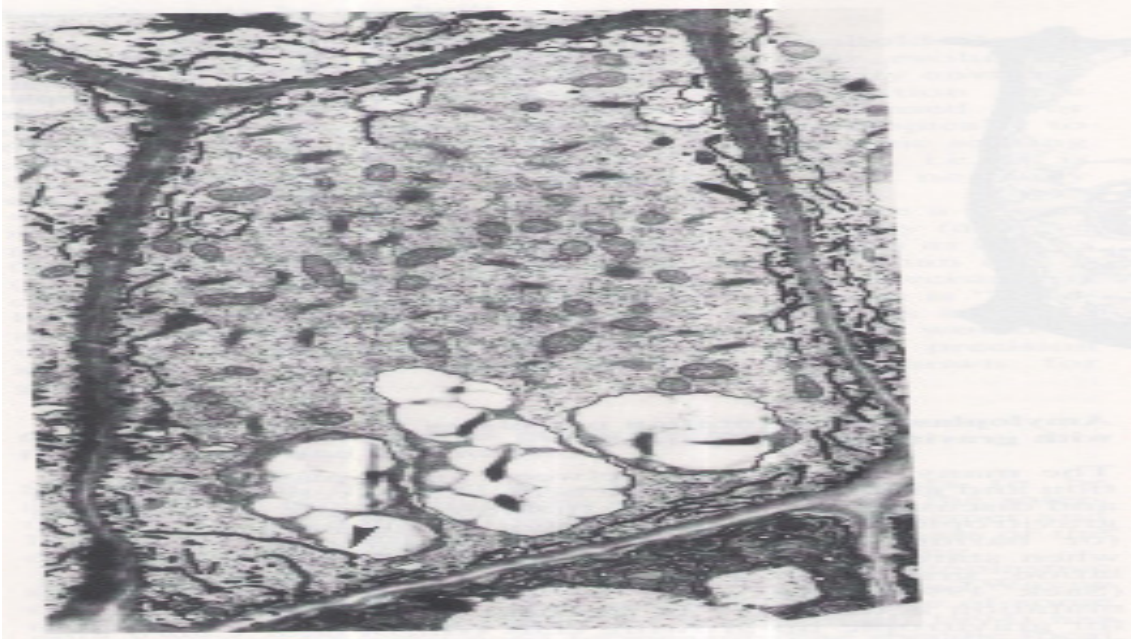


図2. 4-9 シロイヌナズナの内皮細胞 コルメラ細胞の電子顕微鏡画像  
アミロプラストと Endoplasmic Reticulum:ER との接触が見られる

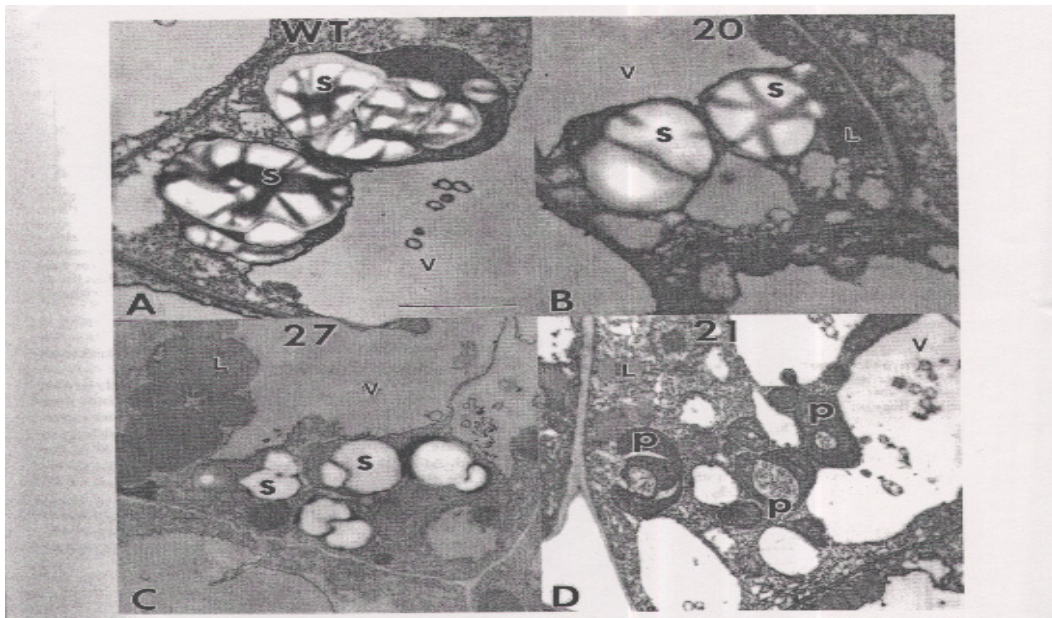


図2. 4-10 シロイヌナズナの内皮細胞 野生株と突然変異体の電子顕微鏡画像

細胞骨格は、植物種や細胞種(植物のどの部位の細胞か)によって異なる動態を示しているのが確認されている。根のコルメラ細胞では、細胞骨格によるネットワークで重力を感受する2つの説が提唱されている。ひとつめは、核などの細胞小器官とアミロプラストが相互に F-actin でつながっており、アミロプラストが沈降すると相互のつながりによりアミロプラストが下方に吊り下げられることで重力刺激を感受する説である。もうひとつは、細胞内に張り巡らされた細胞骨格が、アミロプラストの沈降や移動により、細胞膜あるいは細胞膜状のレセプター等に刺激を張力変化として伝える説である(図2. 4-11)。

両者の説とも、細胞骨格とアミロプラストの相関が重力感受のスタートに必須であるが、どちらが先に重力を感受するためのトリガーになるかはまだわかっていない。

根のコルメラ細胞や茎の内皮細胞のアミロプラストの動きがどのようなシグナルを生じるのか、そのシグナルをどのように他の細胞に伝えるのか、オーキシンの分布・偏差成長を制御するシグナルにどのように変換されるのか、未知の問題が数多く残されている。

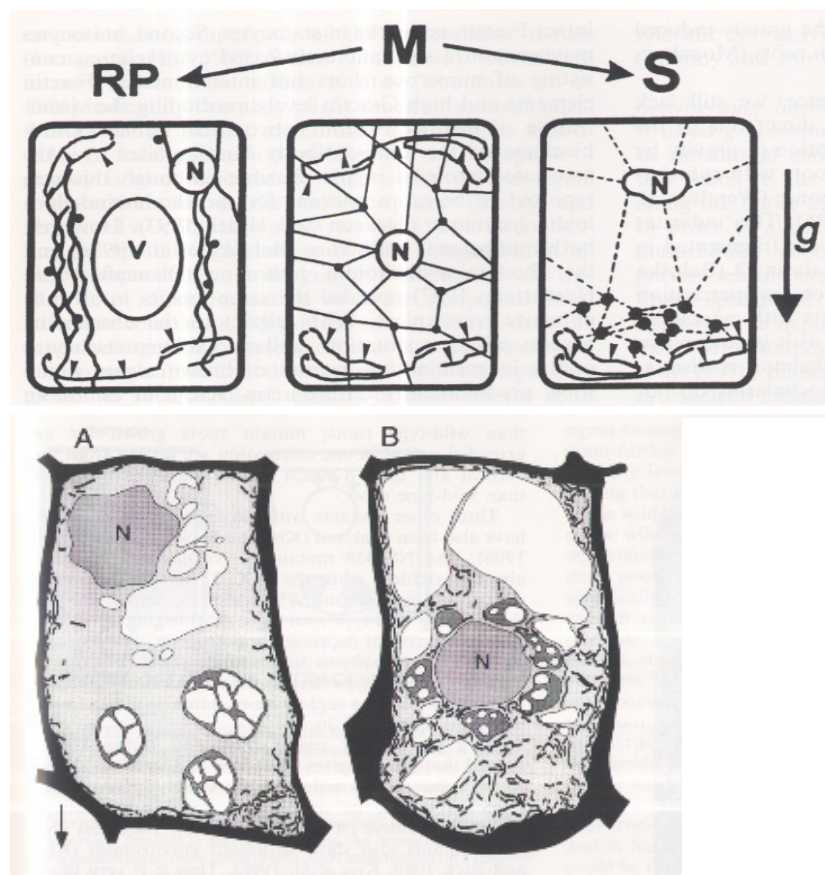


図2. 4-11 植物細胞の違いによる細胞小器官の分布と骨格の違い



### （3）細胞の重力感受

多細胞動物を構成する体細胞の重力感受機構を研究するために、遊泳細胞、付着細胞、浮遊細胞を用いた細胞への微小重力の影響を調べる軌道上実験が行なわれてきた。遊泳細胞について（1）（a）項の原生動物のゾウリムシについて説明した。付着細胞では c-fuss などの遺伝子発現について、浮遊細胞ではリンパ球の活性化に伴うシグナル伝達について微小重力に対する応答がよく研究されている。これらの細胞における重力感受のしくみを統一的に説明する学説はないが、細胞質基質の成分や細胞内小器官の沈降速度から物理的に重力感受の仕組みを試みた研究がある。細胞質基質の成分（生体高分子）にはファン・デル・ワールス力やイオン化した分子間に働く電気的な引力や反発力、化学結合が大きく作用し、重力の影響はたいへん小さい。動物細胞においては直接的に重力を感知する仕組みについては不明であるが、接触変化→膜電位の変化→細胞機能、形状の変化という間接的な重力の応答を示すことがいえる。この間接的な重力応答は、重力を機械刺激のひとつとして感受した応答であるが、機械刺激には細胞内骨格が密接に関連している。付着細胞において、微小重力で F アクチンの含量が増加した実験結果が得られており、マイクロフィラメントが重力感受性構造のひとつである可能性がある（図2. 4－12）。植物においても平衡石だけの存在では重力感受機構は説明しきれず、細胞内に張り巡らされた細胞骨格の張力変化が膜電位の変化を引き起こし、伸張域へ情報が伝達されることが示唆されている。重力を感知する細胞内の機構について、動物、植物においても共通の、またはそれぞれ特有の感受メカニズムが明らかになりつつある。

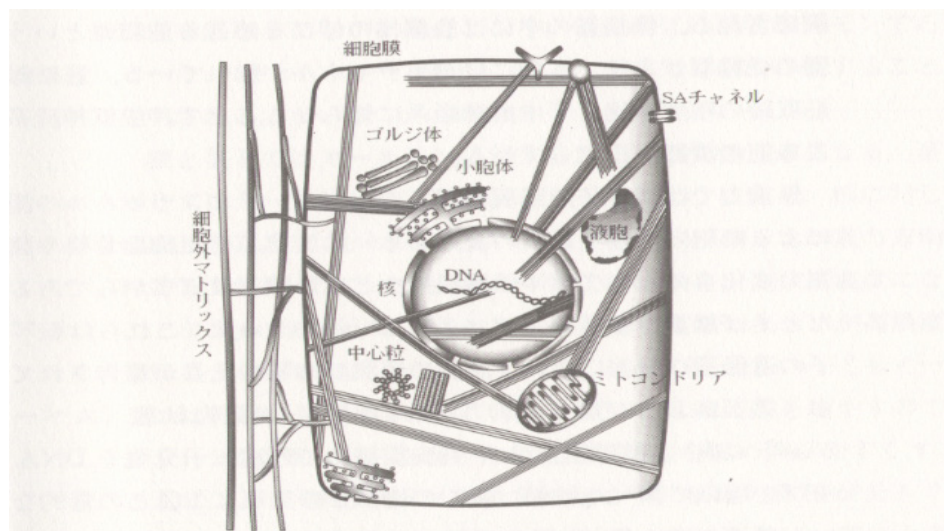


図2. 4－12 細胞内のオルガネットと細胞骨格

## 2. 4. 2 植物の重力屈性機構

### (a) 重力刺激感受後の応答

重力屈性質反応は 2.4.1(2)で述べたように、①重力刺激の感受、②重力感受細胞内でのシグナルの発生と伝達、③細胞間のシグナル伝達、④偏差成長の反応過程により、重力屈性反応を示す。地上部では、シロイヌナズナでは胚軸、花茎の内皮細胞が重力を感受して負の重力屈性を示す。地上部と地下部(根)の重力屈性反応は多少仕組みが異なっている。地上部では重力を感受した内皮細胞層から、平行して層をなす外側の表層に向かって刺激が伝わることで、縦に連なる内皮層全体の信号が地上部全体に伝わり、感受部位の刺激が地上部の両側にオーキシンの不当分布を引き起こし、偏差成長を引き起こす(図2. 4-13)。

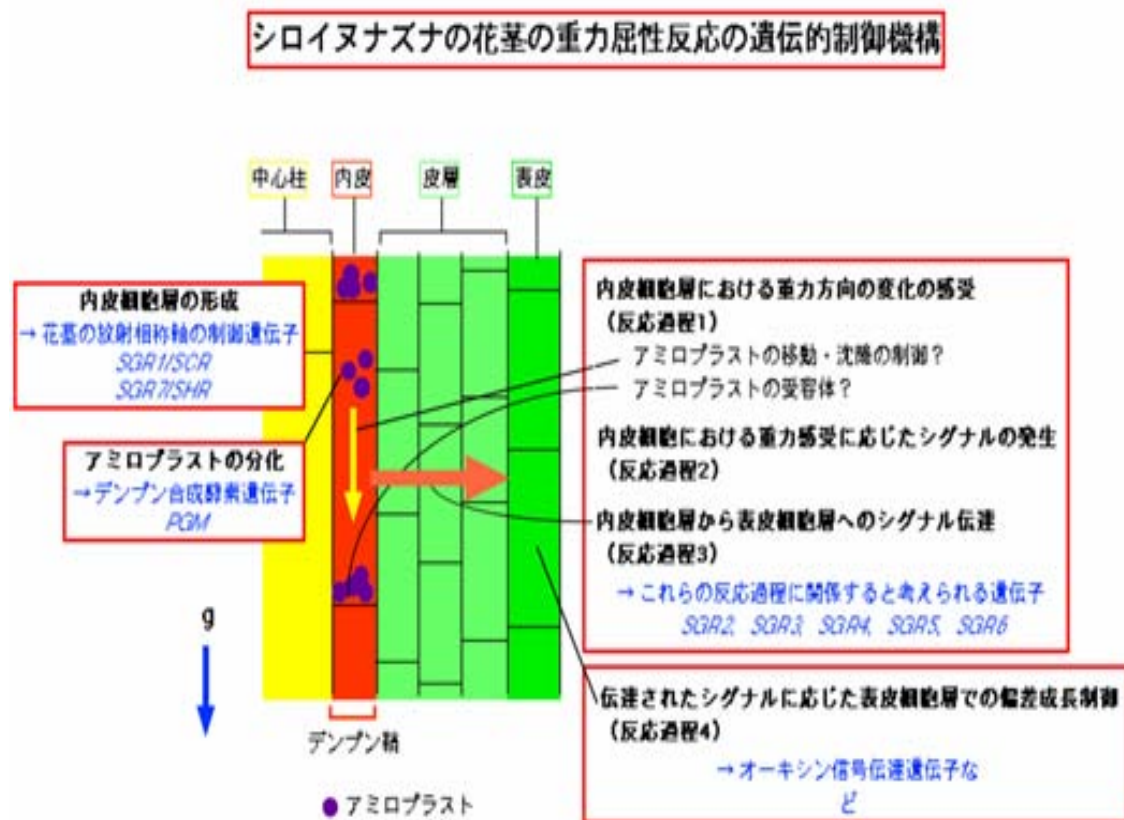


図2. 4-13 シロイヌナズナの花茎の重力屈性反応の遺伝的制御機構

地下部では、重力刺激の感受は、先端から 0.5mm 程度にある根冠のコルメラ細胞で行われるが、屈曲反応が起こるのは根冠部より 2~3mm 上部にある伸長領域である(図2. 4-14)。根冠と伸長帯ではある種のコミュニケーションが行われており、重力刺激の情報伝達が行われている。地下部では、重力感受部位と偏差成長部位が完全に異なっているため、重力屈性反応の現象の分離して解析を行える。

根の重力屈性反応は、花茎と同様に伸長帯の両側の不均等な生長の結果である。

この偏差生長の違いについても、コロドニー・ヴェント(Cholodny-Went)説であるオーキシンの再分布が根の下向きの屈曲メカニズムに密接に関連している。しかし、根冠のコルメラでのアミロプラストの沈降によって重力感受が行われ、伸長帯の下側部位でのオーキシン濃度の上昇によって最終的な根の屈曲が行われているのであれば、この2つのステップはどのような伝達のメカニズムが働いているのであろうか？ ここで、カルシウムイオン( $\text{Ca}^{2+}$ )が鍵となる。1960年～1980年代にかけて、EDTAなどのカルシウムのキレート剤を用いた細胞間移動の確認を行う実験が数多くされている。この結果、重力屈性反応には、遊離状態で存在している移動可能なカルシウムが細胞間の情報伝達の役割を担っていることが確認された(図2. 4-14)。現在では、アミロプラストまたは細胞骨格の張力の強さの偏りから、アミロプラストが小胞体に接し、この膜構造からカルシウムイオンが放出される。細胞下部でカルシウム濃度が増加すると、カルシウムはカルモジュリンと結合し、細胞膜上のオーキシンポンプやカルシウムポンプを活性化させる。隣接細胞にカルシウムが輸送され、重力刺激が細胞間に伝達されるとの仮説がたてられている。カルシウムイオン( $\text{Ca}^{2+}$ )だけではなく、プロトンイオン( $\text{H}^+$ )も重力刺激(ベクトル方向)に沿って偏った分布を示し、膜電位の変化として根では上側にプロトンイオン( $\text{H}^+$ )が、下側(重力方向側)により多く蓄積しているのが確認されている。カルシウムイオン( $\text{Ca}^{2+}$ )、プロトンイオン( $\text{H}^+$ )の偏った分布が引き金となり、伸長帯へ移動するオーキシンの不均等な分布が引き起こされ、根の下側の伸長生長が大きく抑制され、下側に屈曲することになる。

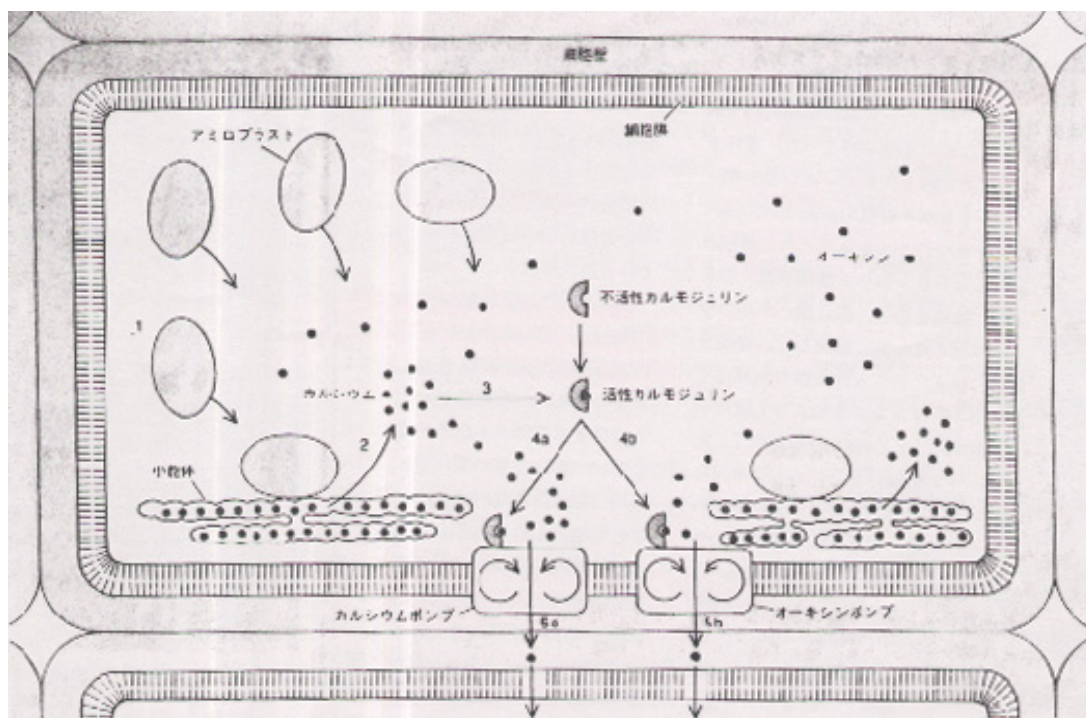


図2. 4-14 細胞内での重力刺激伝達のメカニズム



## (b) 突然変異体の利用

各重力応答の反応過程の分子機構の解明を行うために、重力屈性が異常になった突然変異体を用いた研究が行われてきた。各器官の重力屈性反応が遺伝的にそれぞれ異なる制御を受けており、重力屈性のシステムを支える遺伝子群の解明が行われている。図2. 4-15にモデル植物であるシロイヌナズナ(*Arabidopsis thaliana*)の重力屈性異常変異体を示す。これらの重力屈性異常変異体には

- ① デンプン合成系欠損変異(図2. 4-10参照)
- ② 花茎、胚軸、根のいずれか、または複数の組み合わせによる重力屈性異常
- ③ 花茎、胚軸、根の放射パターン形成異常
- ④ オーキシン輸送または感受性に異常のある変異株

に大別できる。これらの突然変異体は重力屈性発現機構において、下流域である細胞間のシグナル伝達、④偏差成長の反応過程にかかわるものが多い。

Mutant	Phenotype	Gene product	References
<i>hy2</i>	Abnormal gravitropism in hypocotyl and root. Auxin resistant. Suppressor of <i>hy2</i> and <i>phyB</i> .	Semidominant IAA3	Kim <i>et al.</i> , 1998; Reed <i>et al.</i> , 1998; Tian and Reed, 1999
<i>axr2</i>	Abnormal gravitropism in inflorescence stem, hypocotyl and root. Auxin resistant.	Dominant IAA7	Wilson <i>et al.</i> , 1990; Timpte <i>et al.</i> , 1992; Nagpal <i>et al.</i> , 2000
<i>msg2</i>	Abnormal gravitropism in hypocotyl. Insensitive to auxin in hypocotyl.	Dominant IAA19	Tatematsu <i>et al.</i> , 1999

図2. 4-15 シロイヌナズナ(*Arabidopsis thaliana*)重力屈性異常変異体(1/2)

Mutant	Phenotype	Gene product	References
<i>pgm</i>	Reduced gravitropism in inflorescence stem, hypocotyl and root. Loss of phosphoglucomutase activity. No starch synthesis.	Recessive Plastidic phosphoglucomutase	Caspar <i>et al.</i> , 1985; Caspar and Pickard, 1989; Kiss <i>et al.</i> , 1989; Periapuram <i>et al.</i> , 2000
<i>sgr1/tacr</i>	No gravitropism in inflorescence stem and hypocotyl. Loss of endodermis/starch sheath.	Recessive Transcriptional factor (GRAS protein)	Fukaki <i>et al.</i> , 1996b; Di Laurentio <i>et al.</i> , 1996; Fukaki <i>et al.</i> , 1998; Wysocka-Diller <i>et al.</i> , 2000
<i>sgr7/tshr</i>	No gravitropism in inflorescence stem and hypocotyl. Loss of endodermis/starch sheath.	Recessive	Scheres <i>et al.</i> , 1995; Fukaki <i>et al.</i> , 1998
<i>sgr2</i>	Reduced gravitropism in inflorescence stem and hypocotyl. Abnormal embryogenesis.	Recessive	Fukaki <i>et al.</i> , 1996b; Kato and Tasaka, unpublished
<i>sgr4</i>	Reduced gravitropism in inflorescence stem and hypocotyl. Zigzag-shaped stem.	Recessive	Yamauchi <i>et al.</i> , 1997
<i>sgr3</i>	Reduced gravitropism in inflorescence stem.	Recessive	Fukaki <i>et al.</i> , 1996b
<i>sgr5</i>	Reduced gravitropism in inflorescence stem.	Recessive	Yamauchi <i>et al.</i> , 1997
<i>sgr6</i>	Reduced gravitropism in inflorescence stem.	Recessive	Yamauchi <i>et al.</i> , 1997
<i>nhg/larg1</i>	Reduced gravitropism in hypocotyl and root.	Recessive DnaJ-like	Fukaki <i>et al.</i> , 1997; Sedbrook <i>et al.</i> , 1998
<i>aux1</i>	Abnormal gravitropism in root. Auxin resistant.	Recessive Permease-like (auxin influx carrier)	Mirza <i>et al.</i> , 1984; Pickett <i>et al.</i> , 1990; Bennett <i>et al.</i> , 1996; Marchant <i>et al.</i> , 1999; Yamamoto and Yamamoto, 1998

Mutant	Phenotype	Gene product	References
<i>agr1/tir1/pin2</i>	Abnormal gravitropism in root.	Recessive Auxin-efflux carrier	Bell and Maher, 1990; Maher and Bell, 1990; Okada and Shimura, 1992; Chen <i>et al.</i> , 1998; Luschig <i>et al.</i> , 1998; Müller <i>et al.</i> , 1999; Utsuno <i>et al.</i> , 1998
<i>aux1</i>	Abnormal gravitropism in root. Auxin resistant.	Recessive Ubiquitin-activating enzyme E1-like	Lincoln <i>et al.</i> , 1990; Leyser <i>et al.</i> , 1993
<i>dug1</i>	Abnormal gravitropism in hypocotyl and root. Auxin resistant.	Dominant	Mirza <i>et al.</i> , 1984; Mirza and Maher, 1985
<i>aux1/sgr1</i>	Abnormal gravitropism in root. Auxin resistant.	Recessive	Hobbie and Estelle, 1995; Simmons <i>et al.</i> , 1995
<i>nhg1/nph4</i>	Abnormal gravitropism in hypocotyl. Insensitive to auxin in hypocotyl.	Recessive ARF7	Liscum and Briggs, 1996; Watahiki and Yamamoto, 1997; Stewe Evans <i>et al.</i> , 1998; Harper <i>et al.</i> , 2000
<i>slr</i>	Abnormal gravitropism in hypocotyl and root. Auxin resistant. Reduced lateral root formation and root hair formation.	Dominant IAA14	Fukaki and Tasaka, 1998; Fukaki and Tasaka, unpublished
<i>aux2</i>	Abnormal gravitropism in hypocotyl and root. Auxin resistant.	Semidominant IAA17	Leyser <i>et al.</i> , 1996; Rouse <i>et al.</i> , 1998

図2. 4-15 シロイヌナズナ (*Arabidopsis thaliana*) 重力屈性異常変異体 (2/2)



### 2. 4. 3 宇宙実験での重力感受機構の解明

1960年代から現在までの宇宙実験において、様々な植物種、生育ステージを使った重力感受・応答に関する研究が数多くされてきた。地上の1g環境下ではアミロプラストが沈降してるが、微小重力環境下では原形質中に散乱しているのが観察され、重力屈性反応が地上に比べて非常に小さいか、応答できないことが確認されている。根冠のコルメラ細胞を軌道上で重力刺激(1~3g)を与えて固定し、地上で電子顕微鏡観察を行うと、アミロプラストが小胞体へ接触していないが重力屈性の回復が見られる結果が得られている(図2. 4-16)。

重力感受機構で各細胞小器官が持つ役割は、微小重力実験において地上の1g環境とは異なる挙動を示し、重力感受メカニズムの解明に興味深い結果を得ている。単子葉・双子葉間、植物の部位別の細胞種間、感受細胞内の細胞小器官の役割の同定など、重力環境下での生物の進化過程を解明する上で、基礎科学的な課題が数多く残されている。

地上での宇宙実験環境下を模擬する方法として、重力方向を分散させるクリノスタットを用いた実験が行われている。アミロプラストだけではなく、細胞骨格の動態と重力ベクトルの相関を見る実験も行われており、細胞骨格の重力感受に対する役割の重要性が示されたデータが得られつつある。

植物の重力屈性の研究は1881年のC.Darwin以来、120年近くの歳月が流れるが、もっとも最初のステップである重力刺激の感受におけるメカニズムは未だ解明されていない

スペースシャトルから国際宇宙ステーションに実験の中心の場が移り、長期にわたる生物実験機会の変化が基礎科学の解明に劇的な進化をもたらす機会であることを期待したい。

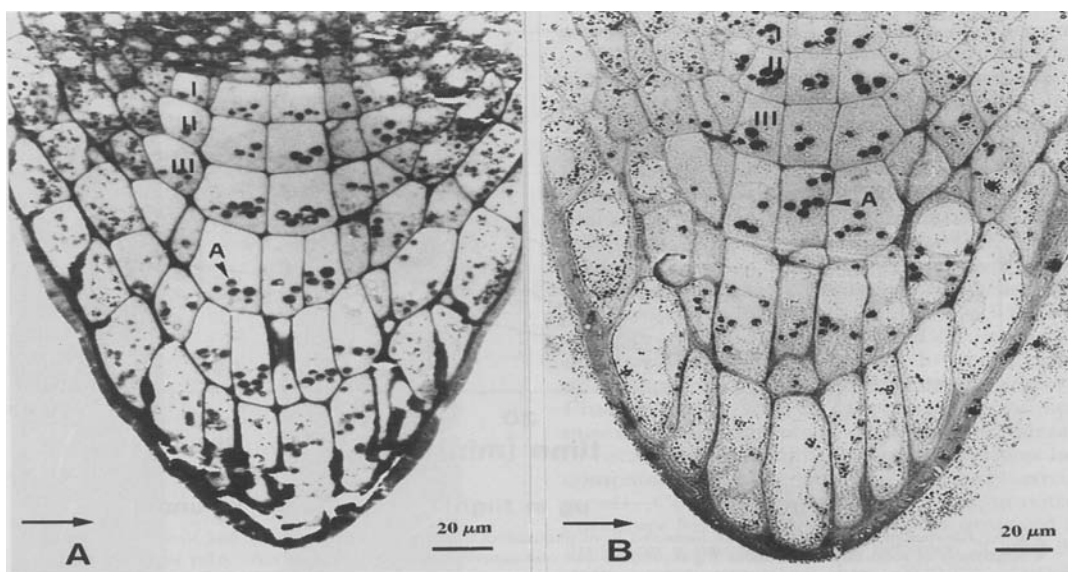


図2. 4-16 微小重力下と1g環境下での根のコルメラ細胞の分布

参考文献:

1. 高橋 秀幸／菅 洋(1987)『宇宙線の植物学』、学会出版センター
2. 菅 洋(1990)『宇宙植物学の課題～植物の重力反応～』、学会出版センター
3. 森 滋夫(1990)『宇宙へ飛んだ鯉～エンデバーの宇宙実験～』、リバティ書房
4. 日本マクロクログラビティー応用学会 編(1996)『宇宙実験最前線』、講談社
5. A.Sievers et.al (1997)『Planta ~Plant Biology in Space~』supplement to volume 203, Springer
6. 井口洋夫 監修／宇宙開発事業団(2000)『宇宙環境利用のサイエンス』、裳華堂
7. 桑野 龍士(2000)『宇宙環境利用への挑戦』、NEC ライブラリー
8. 横田 明穂 編(2000)『植物分子生理学入門』、学会出版センター
9. 東北大学遺伝生態研究センター(2000)『宇宙植物科学の最前線』／IGE シリーズ 28
10. 井尻 憲一(2001)『宇宙の生物学』応用動物学／バイオサイエンス5、朝倉書店
11. 「細胞工学」別冊 植物細胞工学シリーズ12『新版 植物の形を決める分子機構』、  
秀潤社
12. 別冊サイエンス 87.02.98 号、田沢訳「根はなぜ下に伸びるのか」M.L.エバンス／  
R.ムーア／K.H.ハーゼンスタイン、日本経済新聞社

論文:

1. Fred D.Sack(1991). 'Plant Gravity Seneing 'International Review Of Cytology, Vol.127
2. A.Sievers et.al (1997)『Planta ~Plant Biology in Space~』supplement to volume 203, Springer
3. J.Z.Kiss et.al. (1997) 'Reduced Gravitropism in Hypocotyls of Starch-Deficient Mutant of Arabidpsis' ,Plant Cell Physiol, 38(5):518-525
4. M.Tasaka(2001), ' Genetic Regulation of Gravitropism in Higher Plants' ,International Review of Cytology, Vol206,p135-154
5. P.H.Massonn et al. (2002), 'Arabidpsis taliana:A Model for the Study of Root and Shoot Gravitropism'

## 2. 5 宇宙環境での生物の生殖、発生

生殖とは、生物が次の世代を作っていくことです。発生とは、受精卵が分裂を繰り返し、体が作られていくことをいいます。地球上の生命はこれまで、重力のあるところで生殖・発生の過程をうまく機能させるように進化していました。それでは、重力のないところでは、生物はきちんと生殖し、発生できるのでしょうか。

これまで、ロケットや人工衛星、サリュート、スカイラブ、ミールなどの宇宙ステーション、さらにはスペースシャトルなどで数々の生物実験が行なわれてきました。地球上で重力の存在する環境で生活してきた生物を宇宙に連れて行き、重力のない環境で生物が生殖行動をおこなうことが出来るのかどうか。次の世代を残すことが出来るのかどうか。生物は宇宙でも子孫を残しつつ生活を持続することが出来るのかどうかは、私たち生物の進化の方向を考える上でも大変興味深い研究分野といえます。

生物の一生がスタートするのは卵と精子が一緒になる受精の瞬間といえるでしょう。受精すると、受精卵はすぐに細胞分裂を開始します。その細胞分裂に重力は影響しているのでしょうか。これまで、宇宙で行われた細胞分裂に関する生物実験では、カエルの受精卵やメダカの卵の実験などが行なわれています。これまでの実験結果からは、卵が受精することや細胞分裂が始まることと、細胞分裂が進んで受精卵の部分が体の各組織に分化していくことは微小重力下でも問題なく進んでいくようです。植物でも同じで、発芽・分化に問題は起こらないことが確かめられています。もちろん、地上にいたときと完全に同じではありませんが、不都合な部分を補うなにか別の反応が出てきて、宇宙での発生を問題なく進められるようにコントロールされているらしい、ということが実験によってわかってきました。

たとえば、アフリカツメガエルの卵では、宇宙で人工授精させても問題なく発生が進んで、地上と変わらない外形のオタマジャクシになりました。

メダカでは、オスとメスのメダカがスペースシャトルの中で交尾して、卵が生まれ、その卵が孵化して赤ちゃんメダカが孵りました。その赤ちゃんメダカはしっかり泳ぎだしました。ニワトリの卵の実験では、宇宙に持って行く時期によって地上と変わらないヒナが誕生する場合も、ヒナとならずに卵のままで死んでしまう場合もありました。殻の中で成長中のヒナは、酸素を取り入れ二酸化炭素を排出するために卵の殻の内側に血管を張り巡らせるのですが、宇宙では重力がなくて浮力が働かないために、血管が殻の内側まで届かずに酸欠になり、途中で死んでしまうことが分かったのです。しかし、宇宙で卵に一定の期間重力をかけてやれば、地上と変わらないヒヨコが誕生すると考えられます。

宇宙での植物の栽培はどうでしょうか。植物は根を重力方向に、茎を重力とは反対の方向に伸ばします。たとえ日の光がない暗黒の条件でも、植物は重力の方向を感

じ取り、方向性は維持されます。宇宙のような重力のない場所で、植物は成長し、花を咲かせ、種を実らすことができるのでしょうか。これまでの実験で、植物の栽培環境を整えてやれば、植物は地上と同じように花を咲かせ、種子を実らすことができることがわかりました。宇宙でできた種子を地上で発芽させてみる実験や、宇宙で採った種をまた宇宙で発芽させてみる実験も行なわれました。結果は、宇宙で取った種のほうが少し小さく、大きさにばらつきがあったこと以外は、一見、異なることはなかったのです。地上で栽培をすると、一回は宇宙でとれたことを忘れてしまうかのように、地上でとれた普通の植物と同じ背丈・さやの数が得られるようです。植物の種子の発生についても、宇宙でも環境制御をきちんとしてやれば植物は正常に育つ、と考えられるようになりました。しかし、宇宙で育った種子の中を切って観察してみると、地上でできた種子とは少し成分が異なることもあることがわかりました。根の呼吸の様子も、地上とは少し異なっていました。これは無重力で育ったために起こったことでしょうか、それとも宇宙ステーションやスペースシャトルに搭載された植物の栽培装置のせいで、植物にうまく酸素や二酸化炭素が行き渡らなかったことが原因でしょうか。さまざまな原因が考えられますが、確かなことを言うためには栽培装置の開発・改良と、それらを使った宇宙実験がこれからも必要になりそうです。この章では生物の生殖・発生についてこれまでの宇宙実験の例を挙げながら説明していきます。

## 2. 5. 1 アフリカツメガエルの受精と発生

宇宙で生殖活動をするにはまず自分の体を支えなければなりません。魚類は水中を遊泳するので、重力がなくても体を支えることに大きな支障はないでしょう。それに対して、陸上の生物はどうでしょうか。陸上の生物は、海での生存競争から生き残るために陸に進出したと考えられています。陸に活動範囲を広げたことで、重力に逆らって自分の体を支えるため強い骨格を持つ必要がありました。また、支えるだけでなくえさをとったりするために自分の体を移動させなければなりません。つまり、陸上生物は水中生物よりも重力の影響を受けて進化してきたと考えられますが、重力のないところでは正常に発生できるのでしょうか。

両生類は水中からまず陸上に上がった生物に近い動物だと考えられます。両生類の実験材料によく使われるアフリカツメガエルの卵を例に挙げてみましょう。春先になると池などにはカエルの卵が数珠のようにつながっているのを見ることが出来ます。カエルの卵はよく見ると黒い部分と白い部分に分かれています。受精していない卵はこの黒と白がさまざまな方向を向いているのですが、いったん受精すると一定の方向を向くようになります。重い卵黄を含む部分を植物極、そうでない部分を動物極といいます。植物極は白い側で一般的に卵黄が少なく、発生が進むと神経系や感覚器官、運動器官が形成される部分です。このとき落ち着いた卵の上側(反重力方向)は黒い側ですが、この動物極に胚の背部の構造が作られます(参考文献1)。

両生類の卵が微小重力下でも正常に発生することが、1992 年 1 月の IML-1 の実験により確認されていました。しかしこのときは、胞胚(卵割期)における形態異常が報告されました(参考文献2)。その後、1992 年 9 月の FMPT(通称ふわっと 92)で、Souza(参考文献5)らは、微小重力下での両生類(アフリカツメガエル)の受精と発生に関する実験を行い、宇宙で育ったオタマジャクシの遊泳行動を観察することで、両生類の発生、分化に及ぼす微小重力の影響について確認しようとした。

Souza の研究は「宇宙実験成果の現状(参考文献4)」に詳しく述べられていますが、概要を紹介しますと、以下のとおりです。アフリカツメガエルを、打ち上げの 36 時間前に容器に入れ、シャトル内部のインキュベータで 18℃に保温して打ち上げました。打ち上げてから 18 時間後にカエルの皮下に生殖腺刺激ホルモン(Human chorionic gonadotropin)を注射し、産卵を誘発しました。産卵した卵を 15 個から 30 個のグループにわけ、グループごとに人工授精し、1/5 に薄めたリンガー液(カエルの神経・筋肉・心臓などを長く正常に近い状態に保持するための溶液、生理的食塩水)に入れて微小重力実験群と、軌道上 1G 群に分けて飼育しました。飼育温度は 18℃でしたが、途中で発生を早めるため、フライト 50 時間後に 21℃に温度を上昇させて実験を継続しました。インキュベータの温度は安定していて(0.25℃以内の変化)良好でした。卵の一部はフライト中に化学固定されて、観察のために持ち帰りました。生きて帰還したオタマジャクシは、行動の観察のほか、動態視力検査が行なわれました。

カエルは 4 匹すべてがホルモン投与後 16 時間で産卵し、宇宙で得られた卵は、次のように特徴付けることができました。

宇宙で産卵・受精した卵は胚胞期の微妙な異常を除いて、ほぼ正常に発生、生育をしました。

微小重力群とフライト遠心実験群とは、発生の速さに差異は認められませんでした。

微小重力実験群では、胞胚期形態として、原体腔蓋細胞数が多くなり、原体腔の位置が植物極側に偏る傾向が見られました。これは地上でクリノスタットを用いて行なわれた模擬微小重力実験結果と類似しています。なお、2細胞期(卵割が 1 回終了したときの胚)の時期に化学固定された微小重力実験卵では、分裂装置が植物極よりに形成されていることがわかり、これにより原体腔の位置がずれたものと考えられました。

しかし、これらの差異は、発生が進むにつれてほぼ完全に修復されてしまうこともわかりました。

また、飛行中に撮影されたビデオ画像から、微小重力下でのオタマジャクシの遊泳行動には回転行動(ルーピング)がほとんど見られないことがわかりました。これは過去行なわれた短時間微小重力実験と一致しますが、微小重力の滞在時間と発生段階が違うことによるものと考えられます。

さらに、シャトル帰還後、3.5 時間では微小重力実験群のオタマジャクシのほうが水槽の底部に位置しやすい傾向が観察されました。微小重力で発生したオタマジャクシのほうが肺が小さめであることと関連があると考えられますが、この遊泳行動の違いは、帰還後 1 日で解消しました。

この他、微小重力実験群の方が、動態視力が良好であること（ただし帰還後 9 日で差異がなくなった）、フライトしたオタマジャクシはその世代、次の世代を問わず正常であることが確認されました。

この実験の結果、アフリカツメガエルの発生には、重力は必ずしも必要ないことがわかったのです。

## 2. 5. 2 イモリの産卵・発生実験

イモリの宇宙実験は、宇宙航空研究開発機構の山下雅道らによって計画され、1994 年に実施されました。この実験については「宇宙実験最前線」(参考文献3)や「第 2 次国際微小重力実験室(IML-2)宇宙実験結果成果報告書予稿集」(参考文献6)などに詳しく記載されています。この実験ではメスのイモリを宇宙へ持っていき、産卵させました。この実験に使用したアカハライモリという日本産のイモリの場合、冬眠を始める前にオスとメスは交尾をしますが、すぐに受精はせず、メスはオスから受け取った精子を自分の体の中にしまっておきます。春になると、メスは体のなかにしまっておいた精子と同時に卵を産むので、産卵のときに受精が行われるのです。宇宙実験では交尾後冬眠させたメスのイモリを実験装置に入れて打ち上げ、温度を上げて冬眠から目覚めさせ、ホルモン注射をしました。その結果、宇宙で受精をした卵を実験に使うことができました。

このときイモリは宇宙でちゃんと産卵し、受精卵が得られました。受精卵は細胞分裂を繰り返し、無重力で胚の形態も地球上で発生した胚と異なる点はありませんでした。

## 2. 5. 3 卵がヒヨコになるには重力が必要

ニワトリの卵を用いた発生・成長の実験は、二つの例が知られています。詳しくは「人類は宇宙へむかう」(参考文献7)にも述べられています。1 例は 1989 年に STS-29 というシャトル番号のついたフライトで、Vellinger らによって計画されました。この実験では 2 日齢と 9 日齢の 2 種の受精卵つまり有精卵が宇宙に送られました。これらを 5 日間軌道上で培養し、地上に回収しましたが、2 日齢の卵はまったく孵化しませんでした。

2 例目のニワトリの卵実験は、昭和大学の須田立雄らによって計画され、1992 年に実施されました(参考文献3)、(参考文献8)。この実験でも、地上で産卵された卵(有精卵)を宇宙に持って行きました。結論はニワトリのヒナはイモリと違って無重力

では地上と同じにはならなかったのです。

産卵当日(0日目)の有精卵を8個、産卵7日目の卵を10個、10日目の卵を10個、宇宙へ持っていきましたが、産卵当日のタマゴは1個を除いてすべて宇宙時滞中に死亡してしまいました。それらは器官形成を開始しながらも、途中で死亡していました。生きて帰還した1個はその後も発生を続け、ヒヨコのからだはできていましたが、孵化する前に死亡してしまいました。

これに対し、産卵7日目と10日目の卵は宇宙で正常に発育し、地上に降りてから元気なヒヨコが孵化しました。すなわち、産卵当日のタマゴはほとんどが発生途中で死亡し、産卵7日目以降の卵は正常に孵化するという結果が得られたのです。

孵化までのある時期だけ、人工的に重力をかけてやれば、宇宙でのヒヨコの誕生も期待できることになります。

#### 2.5.4 宇宙でのメダカ

脊椎動物として唯一、宇宙でオス・メスによる生殖行動つまり交尾による産卵行動が確認されたのがメダカです。子孫を増やすつまり生殖を行うことは生物の大きな特徴のひとつです。宇宙でも子孫を増やせるかどうかは、人類が将来宇宙で暮らすことを考えた場合に特に興味深い研究テーマであるといえます。

生殖の実験をしようとした場合、どんな動物を実験材料にするかを決めるのがまず大事なことです。例えば生理学実験に多く用いられているマウスやラットを宇宙に連れて行くためにはマウスやラットが自分の体を支えるための飼育箱や餌やりシステム、糞尿の処理システムが必要になります。魚類の場合も、宇宙用の水槽や餌やりシステム、水質維持システムは必要になりますが、魚類は地球でも水中に生きる生物ですから、重力のない宇宙でも比較的飼いやすいと考えられる動物です。その上、重力がある環境でも水の中を泳いでいるわけですから、宇宙でもちゃんと生殖行動ができるのではないかと考えられました。

日本のメダカが宇宙へ行く前に1973年、スカイラブ計画の中で、メダカの一種であるフンジュラスという魚が宇宙に連れていかれました(参考文献3)、(参考文献9)。しかし、この魚は宇宙に行くとすぐに回転(ルーピング)をはじめてしまったのです。回転をしたのでは生殖行動どころか、えさも食べられません。

このときから20年後、宇宙での最初の生殖行動を日本のメダカが実現しました。このメダカの生殖実験は、東京大学の井尻憲一らによって計画され、1994年に実施されました。井尻先生のホームページや、「宇宙実験最前線」にも詳しく述べられています(参考文献3、6、9)。

地上では動物は耳の器官(耳石)で上下左右など体の方向を感じ取っています。重力の方向によって耳石の感覚器の方向が変わるためです。また、視覚情報も方向を感じるのに重要です。宇宙に行くと、耳石からの情報が使えなくなるため、どちらが上



か、下か、分からなくなります。このため、目から入る情報と耳から入る情報が一致しなく、混乱が生じて気分が悪くなる「宇宙酔い」という状態が見られます。先に述べた魚の回転も魚の感覚器の混乱から生じるものと考えられます。

宇宙酔いにも個人差があります。井尻らは、無重力でも平気で泳げるルーピングしないメダカを発見しました。ジェット機での短時間の無重力実験（パラボリックフライト）で、無重力に強い系統のメダカを探し、無重力でも普通に泳ぐメダカの系統を見つけ出したのです。

無重力に強いメダカから、オス 2 匹、メス 2 匹の合計 4 匹を選び、宇宙用のメダカ水槽に入れ、スペースシャトル内の実験室に搭載しました。この実験は 1994 年の日本の宇宙飛行士向井千秋が初フライトしたときの実験でした。フライトには通称がつきますが、このときは IML-2（第 2 次国際微小重力実験室）という通称で呼ばれています。

宇宙での産卵行動で、オスがメスをひれで抱いているシーン（図 2. 5-1）が見られました。産卵も確認できました。メダカの卵は順調に発生を続け、宇宙実験を始めてから 12 日目、メダカの赤ちゃんの誕生が確認されました（図 2. 5-2, 図 2. 5-3）。

宇宙では、43 個の卵が産卵され、うち 38 個が正常に発生しました。38 個のうちで、8 個は宇宙で孵化し、残りの 30 個は地球へ戻ってから孵化しました。5 個は死亡してしまいましたが、地上での実験室でも同程度の死は起こります。つまり、地上の実験室での孵化率と差はなく、無重力でもメダカの発生は正常に進行することがわかりました。

宇宙で誕生した赤ちゃんメダカは地上に戻ってから成長を続け、3 ヶ月後には産卵を始めるまでに成長しました。そのメダカの子供たちも正常に発育しました。宇宙メダカの子孫は研究に使われるとともに、希望のあった小中学校などに譲られて、現在は日本全国いろいろなところで子孫を残しています。

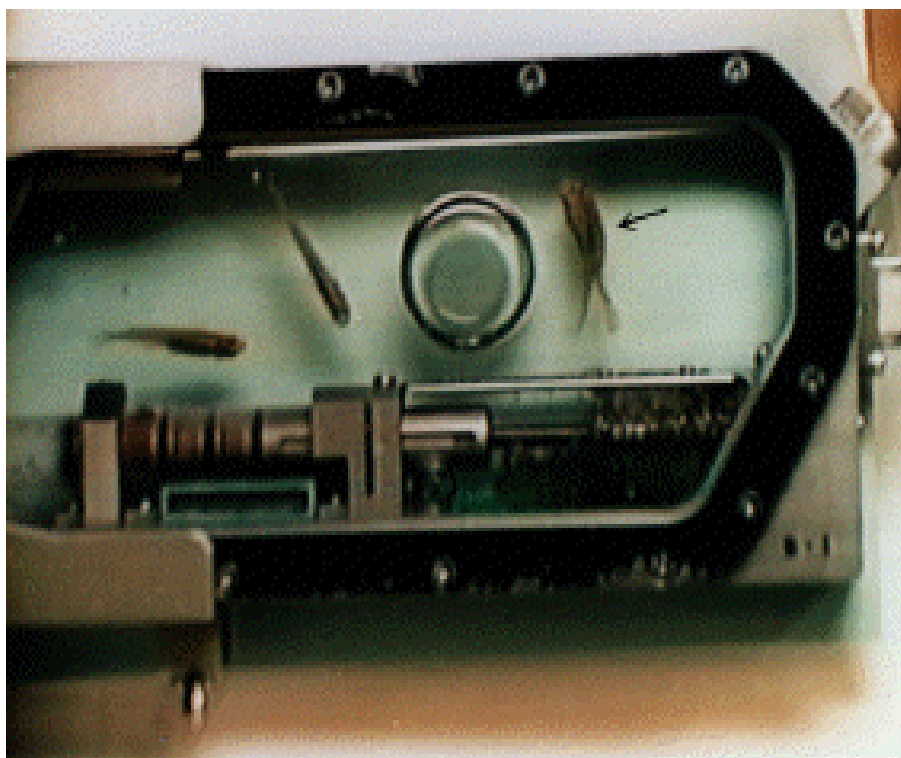


図 2. 5-1 宇宙におけるメダカの産卵行動(オスとメス)



図 2. 5-2 母親と泳ぐ宇宙で生まれた赤ちゃんメダカ

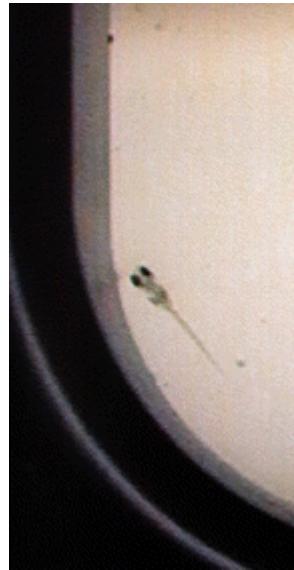


図 2. 5-3 宇宙で生まれた赤ちゃんメダカ  
(図2. 5-1～図2. 5-3はすべて  
[http://130.69.100.13/SPACEMEDAKA/IML2/j/table/P31\\_J.html](http://130.69.100.13/SPACEMEDAKA/IML2/j/table/P31_J.html) より)

#### 2. 5. 5 微小重力下における植物の生活環境に関する研究

これまでに、シロイヌナズナ(アラビドプシス)やコムギを用いて宇宙環境化における植物のライフサイクル(生活環、種子の発芽から次の世代の種子収穫まで)の完結を目指していくつかの研究がなされてきました。植物を宇宙で育てる実験は今から40年も前から行なわれています。特に、1970年代から80年代にかけて、数多くの実験が行なわれましたが、1983年ロシアのSalyut7で初めてシロイヌナズナの種子を宇宙で採ることに成功しました。しかし、このとき採られた種子は発芽する能力を持たないものでした。Musgraveらは、スペースシャトルや宇宙ステーションミールを利用して、植物の生殖フェーズに宇宙で何が起こるかを確認することを目的に、何回にも渡って宇宙での実験を行なっています(参考文献10, 11)。Musgraveらの最初の実験は1993年、STS-54と呼ばれるシャトルでの6日間の実験でした。6日間では種子から花を咲かすには短すぎるので、地上であらかじめ育てておいて、ちょうど宇宙で開花するようにした植物をスペースシャトルに載せて宇宙に持っていきました。このときは、アラビドプシスを持っていきましたが、生殖の初期段階でおしべとめしべの成長が止まってしまいました。また、葉の炭水化物量も地上の40%しかないことがわかりました。このとき、植物を栽培するのに使用した装置は空気の入りのない閉鎖型のチャンバー(温室)だったので、植物の成長に必要な二酸化炭素の量が制限され、炭酸固定ができなかったために成長も止まってしまったのではないかと結論されました。

次に試されたのが同じ1993年、STS-51というシャトルの10日間実験でした。この

ときは前回の失敗を生かして、チャンバーの中を 8000ppm の二酸化炭素で満たして栽培を行ないました。このときは、おしべの花粉もめしべも正常に発育しました。

さらに 1994 年、STS-68 という 11 日間の宇宙実験が行なわれました。このときは空気交換ができるタイプのチャンバーを用いました。採れたのは未熟な種子でしたが、地上と同様に種子ができることがわかりました。これらの実験から、生殖成長の初期や、花粉の生成、胚発生や種子の中にできている子葉の形成は重力がないところでうまくいくことがわかったのです。これらは発生の初期という段階です。では発生の後期についてはどうでしょうか。

生殖成長の後期と成熟段階について重力影響が調べられました。これには長期の宇宙実験が必要になりました。Musgrave らはこの実験にも参加しました。1997 年の 5 月 15 日に打ち上げられた STS-84 というシャトルで打ち上げられたブラシカ・ラパ (*Brassica rapa*) という植物の乾燥種子は、Svet という栽培装置で、給水後 15 日目に花を咲かせました。受粉は宇宙飛行士の手作業でした。採れた種子はバッグに入れてシリカゲルで乾燥させました。宇宙での一代目の世代を得る実験は 52 日間行なわれました。

このようにして宇宙で取った種子を宇宙ステーションミールの中でもう一度発芽させたのです。2 代目の世代は同じようにして受粉し、給水後 54 日で種子を収穫しました。さらにまたまた同じように 3 代目の実験が行なわれました。3 代目の実験の途中スペースシャトルで植物を地上に持って帰ってきました(図2. 5-4)。

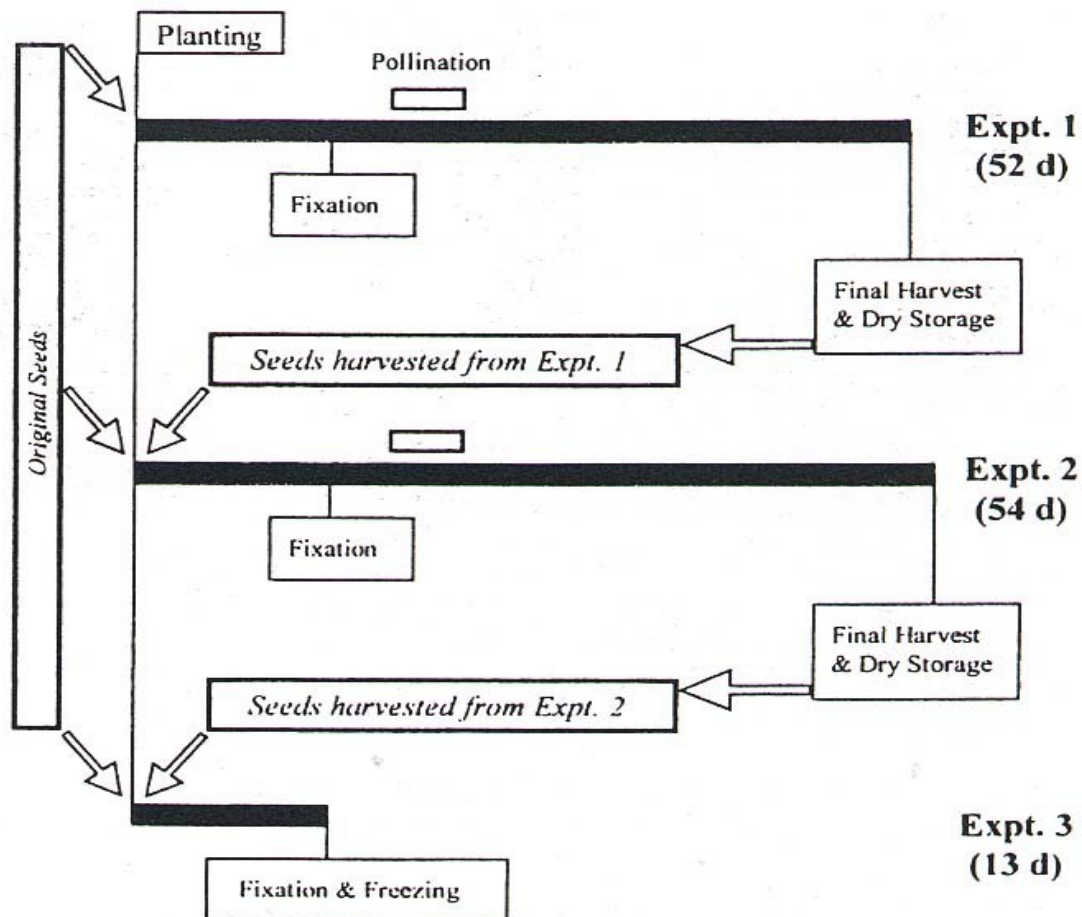
このように、植物は宇宙で種子をつけて 3 世代目の途中まで成長させての実験がなされました。1 世代目と 2 世代目で植物の高さとつぼみの数を比べると、高さは 2 世代目で宇宙で育てたものが低かったという結果がでました。また、つぼみの数も、地上実験に比べて少なかったことがわかりました。ただし、宇宙で取れた種子を地上に持ち帰って発芽させた場合には地上で取れた種子とほとんど同じという結果が得られました(図2. 5-5)。これは何が原因なのでしょう。原因は次のように予想されています。

宇宙では根が酸素不足になったことが考えられます。また、植物から出るホルモンの 1 種であるエチレンが、花粉の発育に影響したのではないかと推定されます。宇宙で採れた種子は、地上に比べて小さめなものがありました。宇宙では対流が起こらないため、種子が入っているさやの中や周りでは酸素と二酸化炭素の交換が地上に比べてうまくできていなく、揃ったつぼの種子ができなかったのではないかと考えられています。これらのことが本当かどうか確かめるためにも、さらに細かい計画を立てての宇宙実験が必要になります。

これまで宇宙で植物を栽培しようとした実験の大部分では、試したいずれの植物体においても生殖成長過程に異常をきたし、結実率が低下することが報告されてきました(参考文献12)。宇宙でも地上と変わらずに種子が取れると報告されるようになった

のは最近のことです。

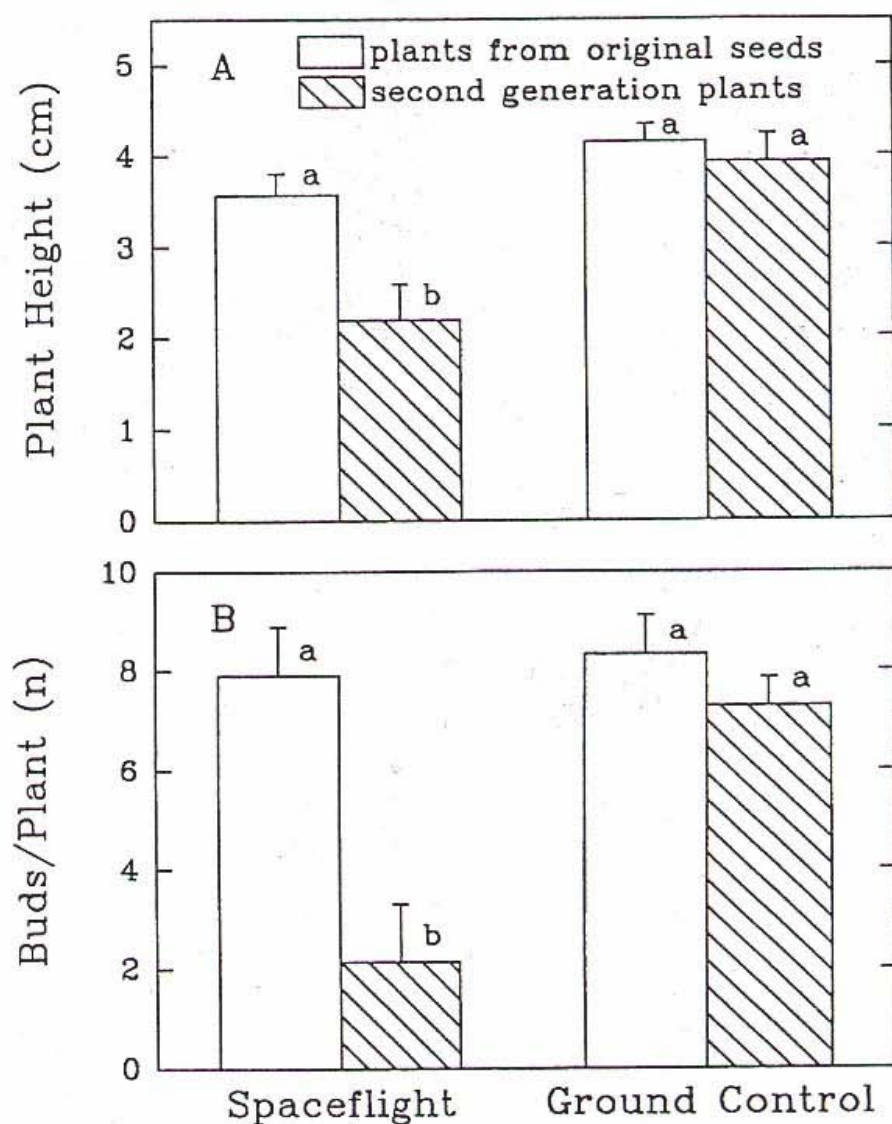
光合成のためのガス交換や水吸収は植物の成長に影響する主要因です。これらの主要因は対照実験として厳密に制御されなくてはなりません。成長に対する微小重力の影響を評価するにはこれらの対照実験をきちんと設定することが必要になるでしょう。



**Fig. 1.** Timeline showing the schedule of planting, pollination, fixation, and harvest dates for the three experiments. Final harvests consisted of placing mature plants into dry storage except during Expt. 3, when pre-flowering material was preserved by freezing and fixation. This same timeline was followed for the high-fidelity ground control conducted post-flight

図 2. 5-4 宇宙における植物実験の手順(Musgrave らの論文から)





**Fig. 3. A** Comparison of first- and second-generation plant heights determined from material fixed at the pre-flowering stage on orbit (Williams 1980) or during the ground control. Results from two experiments; total  $n = 96$ . **B** Comparison of first- and second-generation bud number determined from material fixed at the pre-flowering stage (13 d after planting) on orbit or during the ground control. Results from Experiment 3; total  $n = 41$ . Different lower-case letters indicate that values were statistically different ( $P \leq 0.05$ ) following Analysis of Variance (ANOVA)

図2. 5-5 宇宙で採れた種子(1代目・2代目)と地上対照実験との比較  
(Musgraveらの論文から)

## 2. 5. 6 宇宙滞在のための継世代培養を実現するための装置や技術について

宇宙ステーションは人類が地球外で生活するための準備であると考えてみてはどうでしょうか。すでに宇宙ステーションには 3 人の宇宙飛行士が住んで、毎日の生活を送っています。今の宇宙ステーションは地球に比べればずっと狭く、空気も、水も、食料も地球から持っていかななくてはなりません。しかももっとも長い期間の宇宙での生活を可能にするためには、食料を作り出すことも必要になるでしょう。まずその準備として、基礎的な研究が必要になります。宇宙ステーションの中で小型植物・細胞、魚類を用いた基礎研究をするための装置の紹介をします。

### （1）生物実験ユニット

生物実験ユニットとは、キャニスタと呼ばれるケースに収納される培養容器と制御部を装備したユニットで、国際宇宙ステーションの日本実験棟きぼうの中に搭載される装置である細胞培養装置（図2. 5－9）と組み合わせて実験を行います。また、必要に応じてクリーンベンチに持ち込んで操作します。生物実験ユニットは、中型キャニスタの内部に試料容器と制御部を収納するために小型に作られています。また電力、通信系は細胞培養装置あるいはクリーンベンチから供給されます。現在、JAXA では、植物実験ユニットと細胞実験ユニット、計測ユニットなど数種類の実験ユニットを開発中です。

植物実験ユニット（図2. 5－6a）は、宇宙で種子に給水して発芽させ、成長の各段階を小型 CCD カメラ（図2. 5－6b）によって観察することができる小型機器です。透明プラスチック製の容器（図2. 5－6c）のなかで、赤、青の発光ダイオード（LED）（図2. 5－6d）の生育用照明によって植物を育てます（図2. 5－6e、図2. 5－6f）。水分センサーと給水ポンプにより、播種支持体（土の代わりに種を植えるフォーム）の水分含量を自動制御します。また、湿度センサーと換気ポンプにより自動換気を行います。

細胞実験ユニット（図2. 5－7a）は、付着性細胞を培養するための付着板と酸素透過膜（気体を通過させることができる膜）を持った培養容器（図2. 5－7b）と制御部により構成されます。プログラムによる自動培地（栄養分が入った液体）交換並びにクリーンベンチ内に装備されている位相差／蛍光顕微鏡による細胞の観察が可能です。

生物実験ユニットは、コンピューター制御による完全自動運転および地上からのコマンドによる運転の両方ができます。また、実験要求により交換可能な部分と共通的に使用する部分とに分かれているので様々な実験に対応できます。

計測ユニット（図2. 5－8）は、キャニスタの中に実験用のフラスコや、培養バッグ、栽培容器など、実験に使用する容器や機器を収納することが出来ます。培養温度のデータを取得することが出来ますし、オプションで CCD カメラやヒータなども組み込むことが出来ます。細胞培養装置の実験ラックを図2. 5－9に示す。



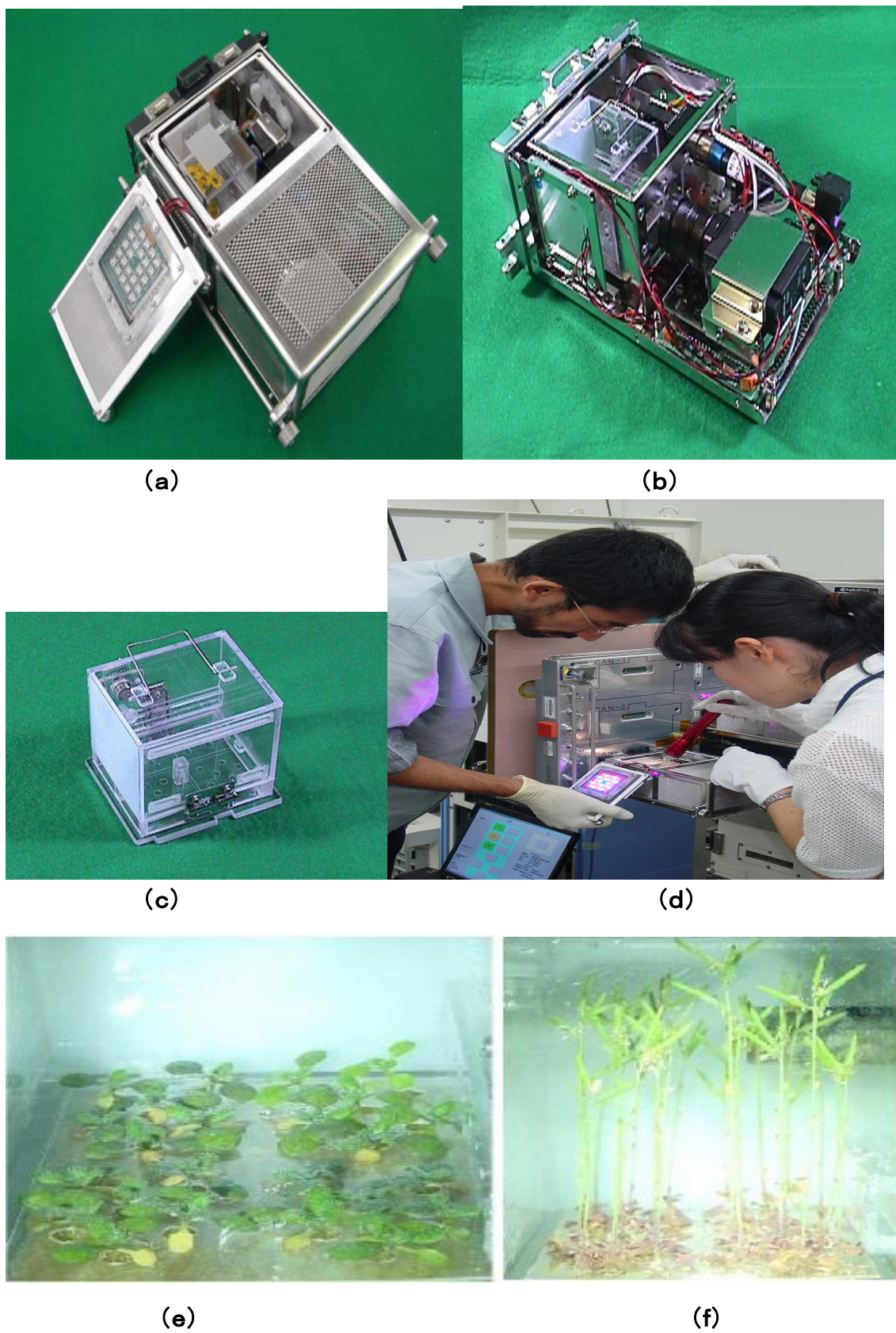


図 2.5-6 植物実験ユニット

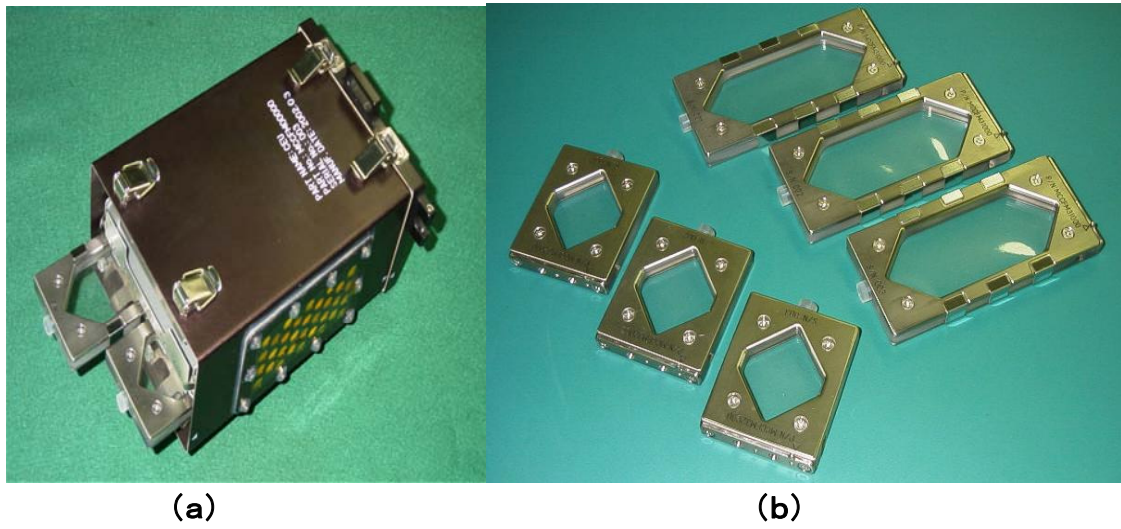


図 2.5-7 細胞実験ユニット



図 2.5-8 計測ユニット



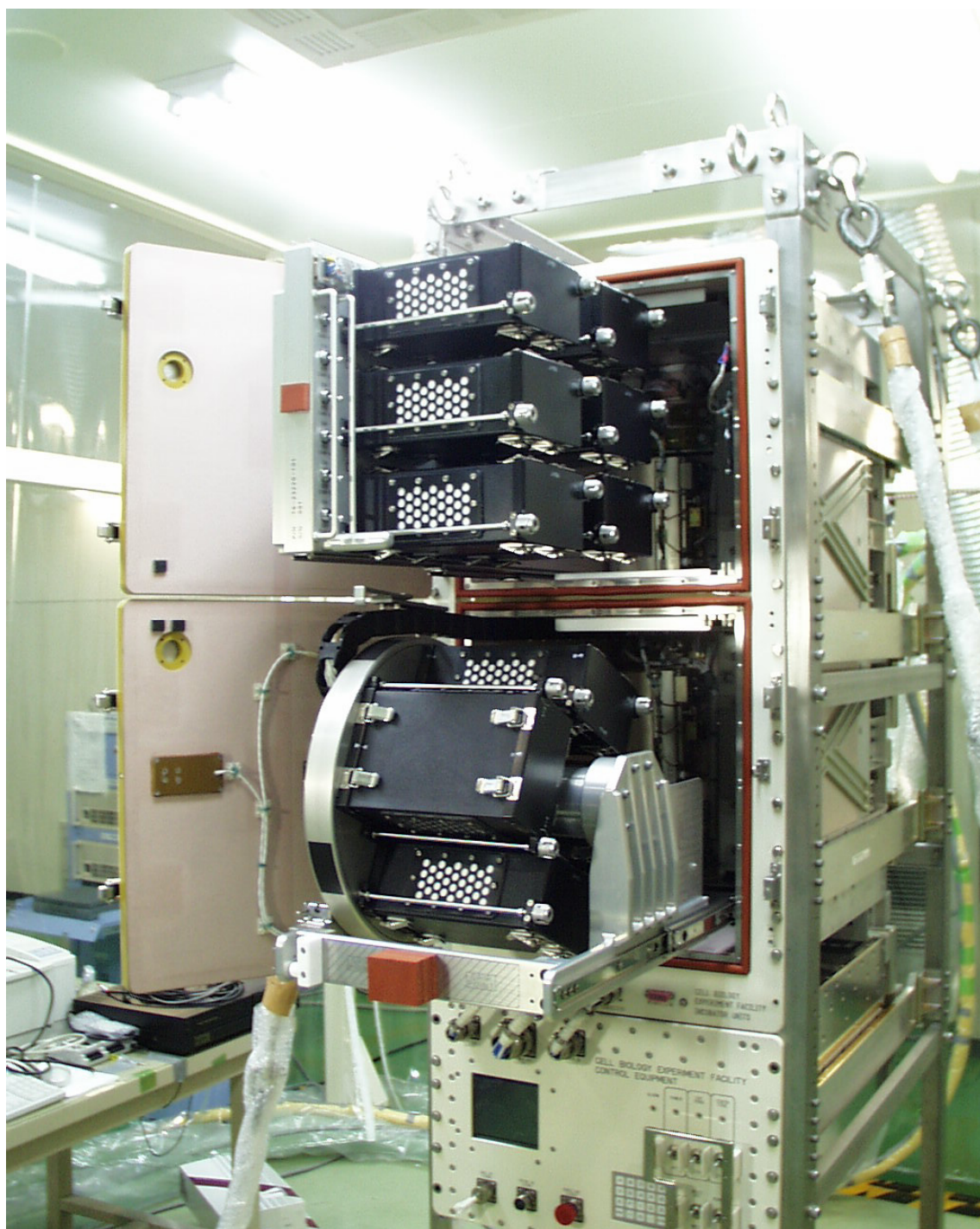


図 2.5-9 細胞培養装置

## （２）水棲生物搭載技術の開発

JAXA は、これまでスペースシャトルで水棲生物の実験をするための装置の開発に携わってきました。現在は、次世代型の水生生物実験装置を開発するための基礎実験を行なっています。この装置は、国際宇宙ステーションやスペースシャトルで、3 ヶ月の連続した魚類の飼育を可能にすることを目指しています。メダカやゼブラフィッシュ、アフリカツメガエルなどをモデル生物として、卵から複数世代に渡っての生殖・生育を目標とした仕様としています。水槽(図2. 5-10)には給餌システム、照明、カメラも装備し、宇宙での飼育実験と観察に対応できます。

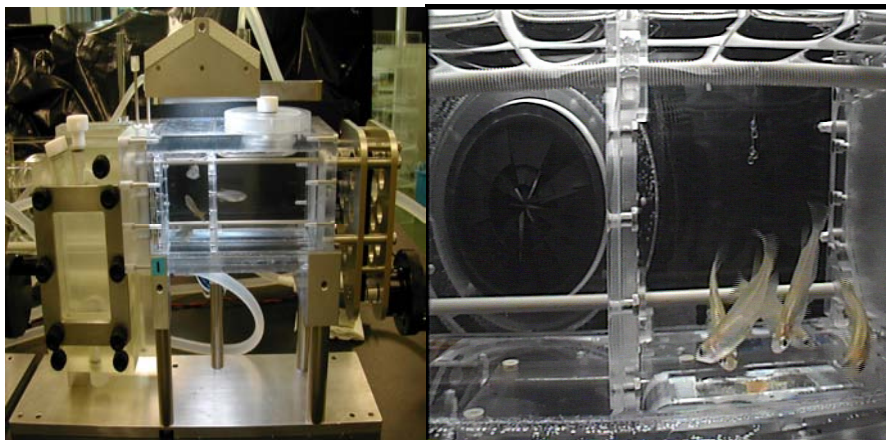
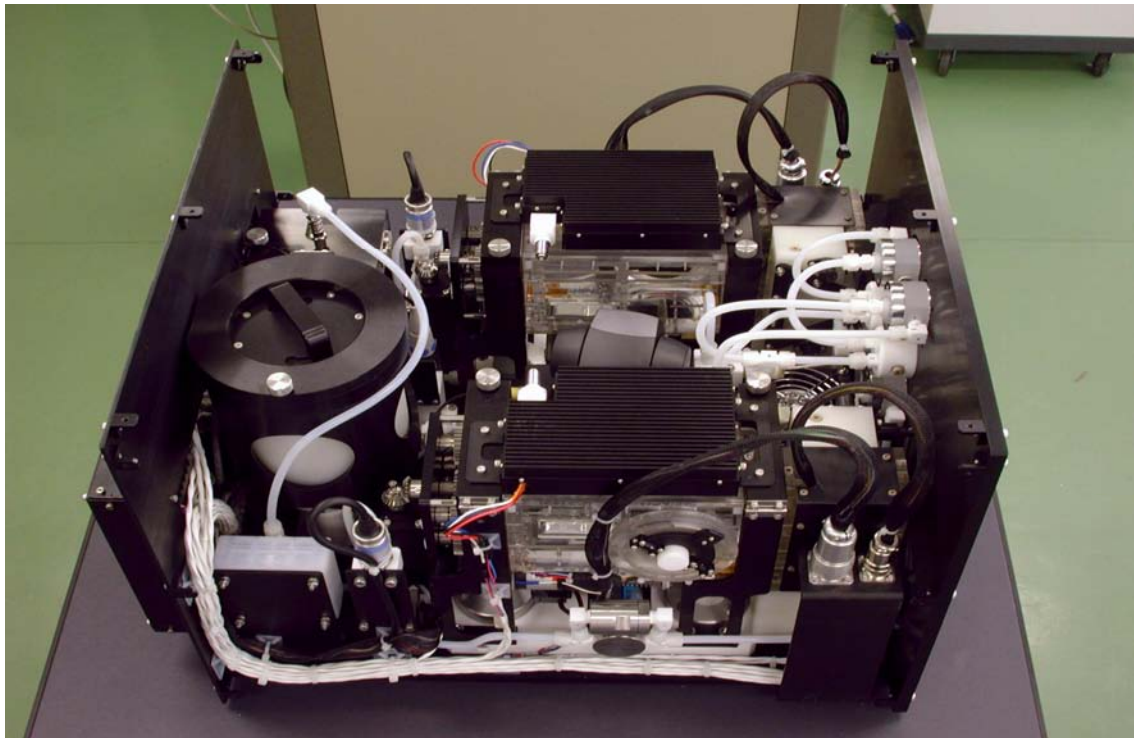


図2. 5-10 水棲生物実験装置要素試作モデル

## 2. 5節の付録：用語の説明

### □宇宙実験プロジェクトの名称と実施時期、特徴

IML-1(第一次国際微小重力実験室):スペースラブによる材料、ライフサイエンス関係ミッション、このとき日本は宇宙放射線モニタリング装置と有機結晶成長装置を提供し、2テーマの実験で参加しました。1992年1月22日～1月30日までの約8日間のフライトでした。

FMPT は、1992年9月12日～9月20日までの約8日間のフライトです。このときは日本の宇宙飛行士毛利衛飛行士がペイロードスペシャリストとして搭乗、ふわっと92の愛称で呼ばれた宇宙実験で、スペースシャトルに搭載された実験室「スペースラブ」により材料・ライフサイエンス関係の43テーマの実験を実施しました。そのうち34テーマが日本の実験テーマでした。

IML-2 は1994年7月8日～7月23日までの約15日間のフライトです。初の日本人女性宇宙飛行士、向井千秋飛行士が搭乗しました。

### 〔参考文献〕

- (1) 動物発生学 片桐千明 著 岩波書店 1987年 第3章「卵割から胚へ」  
第4章「胚における細胞質の領域性」
- (2) 宇宙環境利用のサイエンス 井口洋夫 監修 裳華房 第5-2章「両生類の発生と重力」P127-130
- (3) 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 I-2章「重力と発生」P36-42、I-7章「宇宙での子づくり」P85-91
- (4) 宇宙実験成果の現状 Volume2 ライフサイエンス編 1999年3月「アフリカツメガエルの受精発生」P12-13
- (5) Souza et. Al., Proc. National Acad. Sci. U.S.A. Vol. 92, pp2975-1978, March 1995  
<http://www.pnas.org/cgi/reprint/92/6/1975.pdf>
- (6) 第2次国際微小重力実験室(IML-2)宇宙実験成果報告書予稿集平成7年11月

(7)人類は宇宙へむかう 藤森義典 著 オーム社 4 章「宇宙と人間・生命」(発生・成長)P70-72

(8)ふわっと92宇宙実験成果報告書予稿集平成 5 年 12 月

(9)「宇宙メダカ実験のすべて」2 章、3 章

<http://130.69.100.13/SPACEMEDAKA/J.html>

(10)Gravity independence of seed-to-seed cycling in Brassica rapa、Mary E. musgrave et.al. Planta.(2000) 210:400-406

(11)Influence of microgravity on ultrastructure and storage reserved in seeds of Brassica rapa L. Anxiu Kuang et al. Annals of Botany (2000) 85: 851-859

(12)微小重力下における植物の生活観に関する研究とそのための微小重力場植物実験装置の開発 高橋秀幸、後藤英司、谷晃、北宅義昭、斎藤高弘、東谷篤志



## 2. 6 生物は宇宙に適応できるか

### 2. 6. 1 生物の適応とは何ぞや

生物は宇宙に適応できるのでしょうか？それは、「生物」と「適応」をどのように考えるかによります。例えば、私たちヒトは、空気が無いところでは生きていくことができず、また温度を一定の範囲に保ったり、強烈な太陽光線から身を守るためにも、宇宙船が必要となります。つまり、部分的には地球環境を保持しなければ生存できません。しかし、宇宙船で空気や温度を保った状態であれば、既に1年以上宇宙に滞在した飛行士も何名かおり、人類が生きていくことが可能なことは証明されています。これが微生物となると、事情は多少違ってきます。微生物の中には、高温、紫外線のような厳しい環境の下でも生存可能なものがあることが知られており、そのような種類の微生物は、宇宙のような厳しい環境でも、繁殖は難しいにしても、休眠状態で過ごすことは十分可能と考えられます。微生物ではなくても、クマムシ(図2. 6-1)は、ほとんど脱水し、極端に代謝活動を低下させた状態(tun 状態)で何十年も過ごすことができ、水をかけるとまた元にもどって動き出すことが知られています。tun 状態であれば、 $-250\sim+150^{\circ}\text{C}$ の範囲の温度や真空中にも耐えることが報告されています。ちなみにクマムシは正確に言えば昆虫ではなく、緩歩動物門に属する動物です。このような種類の生物も、宇宙環境で生きていくことができるかも知れません。宇宙船のような「部分的地球環境」の下であれば、ヒトも1年程度は滞在可能であり、またメダカでは卵から生まれて成長することが知られています。でも単に「生存」することと「適応」することは違います。ここでは特に、我々人類を中心として、宇宙に適応できるのかどうかを考えたいと思います。

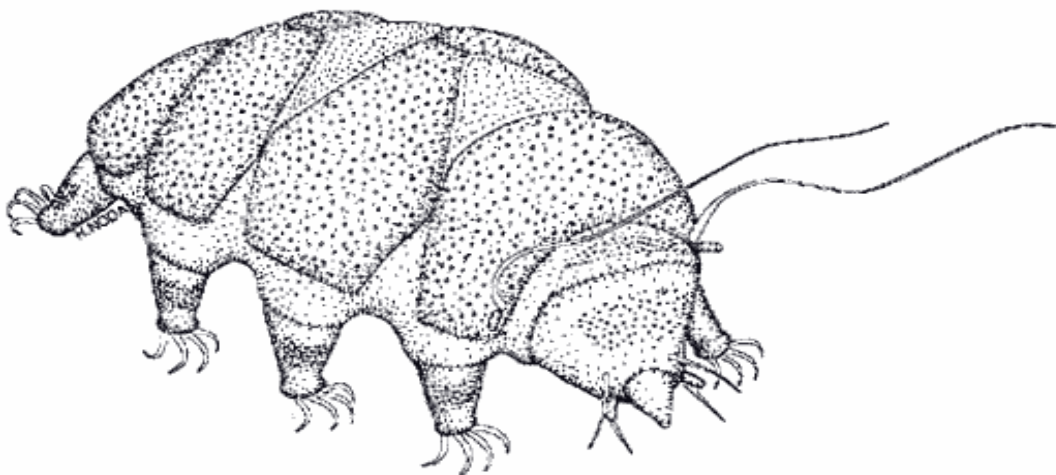


図2. 6-1 クマムシ



## 2. 6. 2 ヒトは宇宙でどうなるか

ヒトは宇宙でどのような影響を受けるのでしょうか。宇宙が地球とどのように違うかについて、ここで簡単に図2. 6-2にまとめてみました。空気や温度は一定に保たれているとして、最も大きな違いは重力です。またそれ以外に宇宙放射線、電磁場環境が違います。もう一つ大きな違いは、宇宙では、狭くて閉鎖された環境で、限られた人数で長期間滞在しなければならない、ということです。これは人間の精神や心理に大きな影響があると考えられます。このような心の問題も考えてみたいと思います。

ヒトが宇宙環境で受ける影響については、図2. 6-3を参照して下さい。これは人体をいくつかの観点に分けて、宇宙環境の影響をまとめたものです。重力が無くなることにより、方向感覚(上下左右の感覚)が乱れて混乱したり、血液・体液が下半身から上半身に移動して顔が丸くなったりします。でも、このような影響はだいたい1週間もすれば、新しい環境に慣れてしまいます。つまり、適応した訳です。ところがこの中で新しい環境に慣れることなく、影響が蓄積するものが2つあります。一つは、筋骨格系の萎縮、もう一つは宇宙放射線の影響です。

「適応」と言った場合、もう一つ考えておかなければならないのは、宇宙に適応した生物が、地球に戻った時、「再適応」できるかどうか、ということです。今のところ人体の影響については、図2. 6-3がだいたい同じ時間で逆の現象として起こると考えられています。でも、これはせいぜい数ヶ月単位の宇宙滞在を下に研究された結果であり、数年、数十年の適応については、まだ未知の世界です。ではここで、人体の影響についてももう少し詳しく考えてみたいと思います。

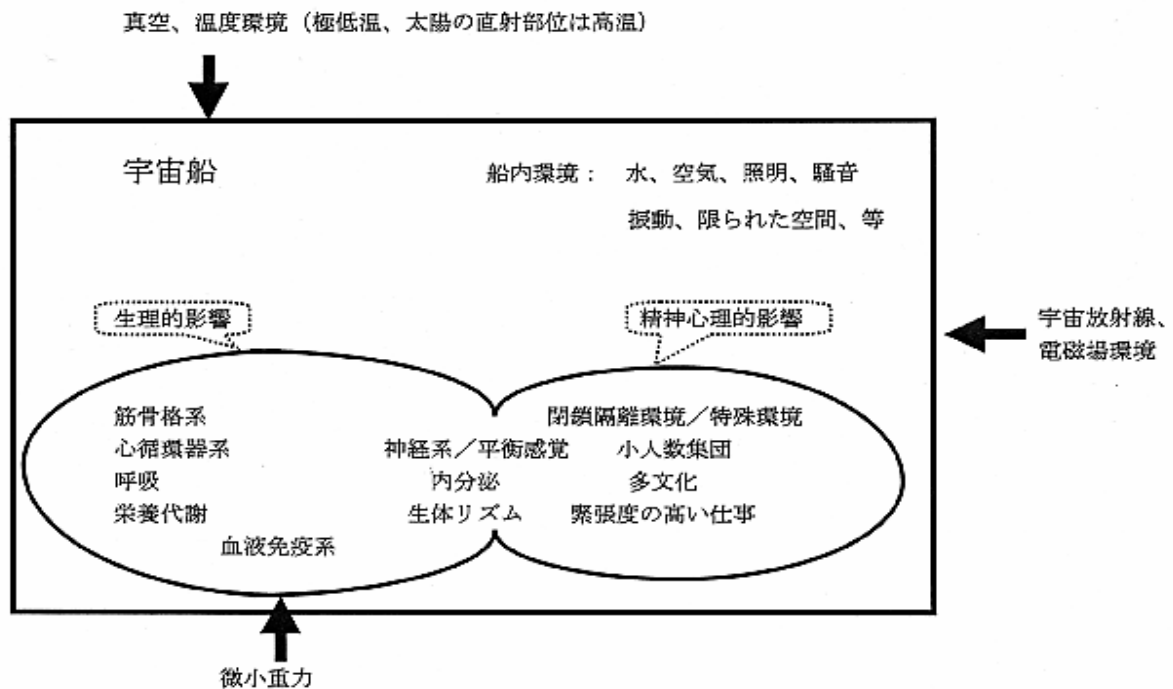


図2. 6-2 宇宙環境の特徴と人体への影響

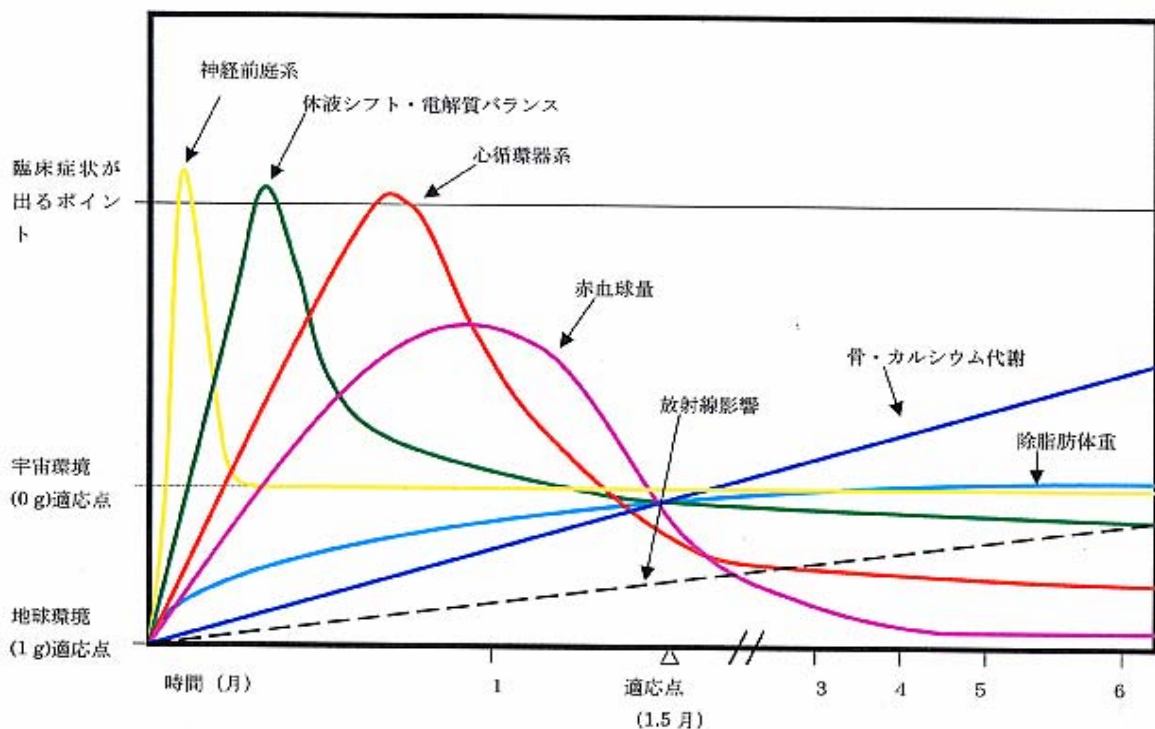


図2. 6-3 宇宙環境への人体の適応

### （1）血液・体液の移動（循環器系への影響）

宇宙へ行って重力が無くなると、血液や体液が下半身から上半身へ移動します。大人で約 1.5～2 リットルの体液が移動すると言われています（図2. 6-4）。日本人宇宙飛行士の毛利さんや向井さんが宇宙へ行った時に、顔が丸くなったことはテレビなどでも報道されたので、覚えておられる方も多いと思います（図2. 6-5）。頭の方に血液が多く溜まるので、最初のうちは頭がぼーっとしたり、頭痛が出る人もいます。宇宙酔いと関係しているとも言われています。でも、このような症状はだいたい4～5日もあれば落ち着きます。つまり新たな宇宙環境に適応した訳です。

さて、逆に宇宙から地球にもどった時、問題となるのが2つあります。一つは、地球に戻ると、体液は上半身から下半身に移動しますが、この時、脳を流れる血液が少なくなるため、ヒトによってはめまいがしたり、ひどい場合は意識を失ったりします。これを予防するために、宇宙から地球に戻る時は、水分を補給して血液全体の量を増やすようにしています。もう一つは重力が無い場合は、血液を全身に送り出す力も少なくてすむため、心臓の筋肉の力が衰えてしまうことです。こういったことを防ぐため、宇宙では運動することが欠かせません。

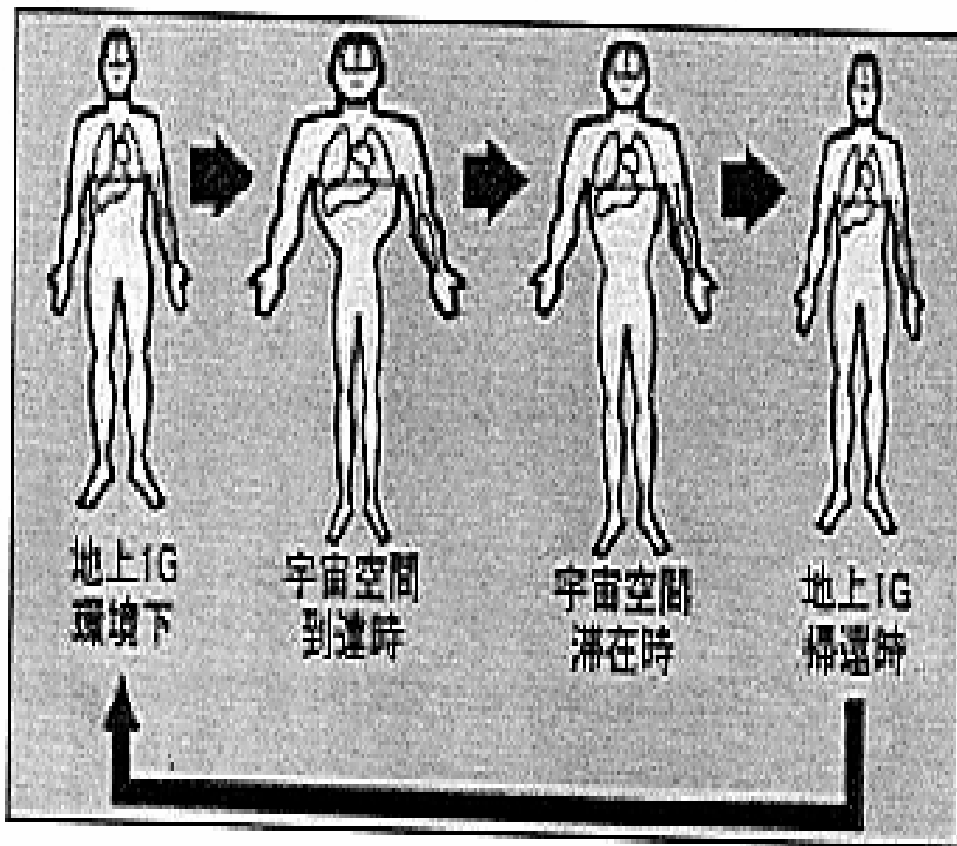
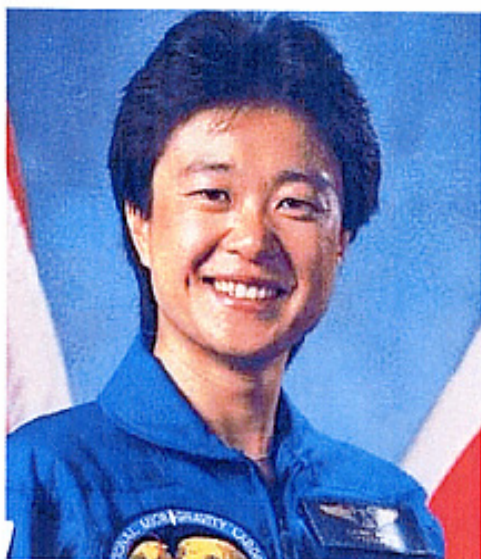


図2. 6-4 宇宙における体液の移動



地上



微小重力

図2. 6-5 宇宙では顔が丸くなる(向井宇宙飛行士)

## (2) 方向感覚

私たちは、重力や加速度を、耳の奥にある、三半器官(図2. 6-6)という感覚器で知覚しています。重力が無くなるとここからの感覚入力が失われ、視覚と体制感覚(手や足など、自分自身の体の位置を知る感覚)だけで位置を知ることになります。そのため、時に方向感覚が混乱してしまうことがあり、宇宙酔いの原因になると考えられています。

宇宙では重力が無いので、上下といった方向はありません。しかし、宇宙ステーションでは上下の方向が決められており、装置などはそれに従って配置されています。どのような方向に配置してもよさそうなものですが、上下が決まっていなくて非常に活動しにくいそうです。我々人類は、重力の無い世界には適応できても、上下感覚の無い世界には適応できないのかも知れません。でも、もしかすると、最初から重力の無い世界で生まれ育った人類がいるとしたら、上下感覚は無くても適応できるのかも知れません。面白い課題ですね。

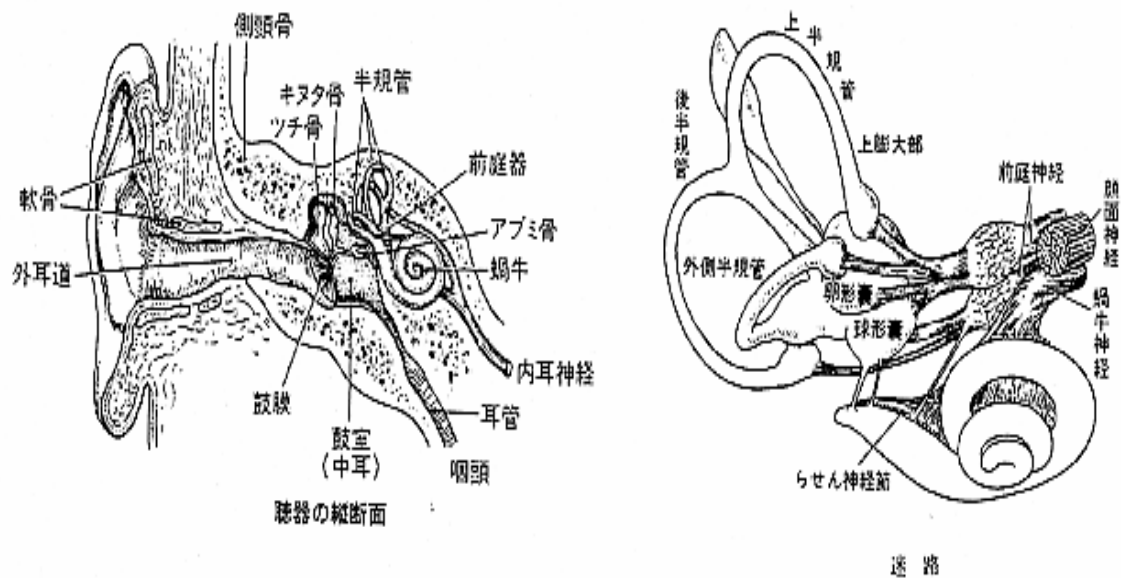


図2. 6-6 平衡感覚器(三半規管)

## (3) 骨と筋肉

重力の無い環境で生活すると、骨と筋肉はどんどん萎縮していきます。地球でも例えば骨折などで寝た切りになってしまうと、その人の骨・筋肉はどんどん萎縮することが知られています。生物の体は、基本的に使われない機能はどんどん低下します。ある意味では新しい環境に適応しつつある、とも考えることが出来ます。しかし、地球に戻ることを考えるとそれでは困るため、宇宙飛行士は運動することが義務付けられています。だいたい1日に2時間を目安として、トレッドミル(走る運動)と抵抗運動が主体です(図2. 6-7)。また骨・筋肉が萎縮と言っても、全身が一様に萎縮するわけではありません。主として体重がかかっている下半身が中心となります。では頭の骨はどうなるのでしょうか？はつきりと証明されてはいませんが、頭の骨は増えるという報告もあります。





図2. 6-7 宇宙での運動(NASA提供)

#### (4)その他の影響

宇宙滞在が数ヶ月の長期になると、体のいろいろなところに影響があることが知られています。例えば、これまでの研究で、血液を作るメカニズムがペースダウンして、貧血の傾向になったり、免疫機能が弱くなったりすることが報告されています。免疫機能については、宇宙船という非常に限られた環境では、他の生物からの免疫的な刺激を受ける機会が少なくなるため、抵抗力が弱くなることも懸念されています。でもこれらの影響はどちらかと言えば、細胞を使った研究が主であり、本当に病原体への抵抗力が落ちるのかどうかは、良く分かっていません。長期になれば、消化管からの食物の吸収や、体のエネルギー代謝も変わってくる可能性が考えられますが、これらの分野も、まだまだ研究が必要です。

#### (5)心の問題

宇宙環境がヒトの心、つまり精神・心理に及ぼす影響はいくつかあります(図2. 6-2)。一言で言えば、宇宙環境は非常に厳しい極限環境です。閉鎖された空間で、少ない人数で長期間生活しなければなりません。宇宙ステーションでは、1日という時間も人工的に作り出すため、生体リズムの問題も考えなければなりません。また、宇宙というのは一歩外に出れば、生存できない環境であり、常に危険と隣り合わせで



もあります。このような環境は、南極越冬などとよく比較されます。では、これに対して現在のところどのように取り組んでいるのでしょうか。大きく分けて2つあります。一つは、長期宇宙滞在の飛行士を選ぶときに、そのような厳しい環境でも耐えられるヒトであることを考慮します。2つ目は、地上からいろいろ支援することです。実際に宇宙滞在中に地上から支援することはもちろん、宇宙飛行前の訓練や、長期飛行が終わった後のフォローも含みます。宇宙飛行士にとって最も心の支えになるのは家族との交信と言われていますが、この交信はテレビ電話で行われています。

宇宙は確かに厳しい環境です。でも、このような厳しさを乗り越え、宇宙に滞在することは、我々の限りない財産ではないでしょうか。地球の姿は、宇宙からでないと見ることはできません。また、宇宙の暗黒さは、地球では絶対に経験することのできないものだ、と言った宇宙飛行士もいます。その暗黒さは、生命の無い、絶対無の空間であり、それに対比して、地球の存在の重要性を感じたそうです(図2. 6-8)。宇宙に行くことで、地上でそれを間接的に知る我々も含め、人類の意識は着実に変わりつつあるように思います。

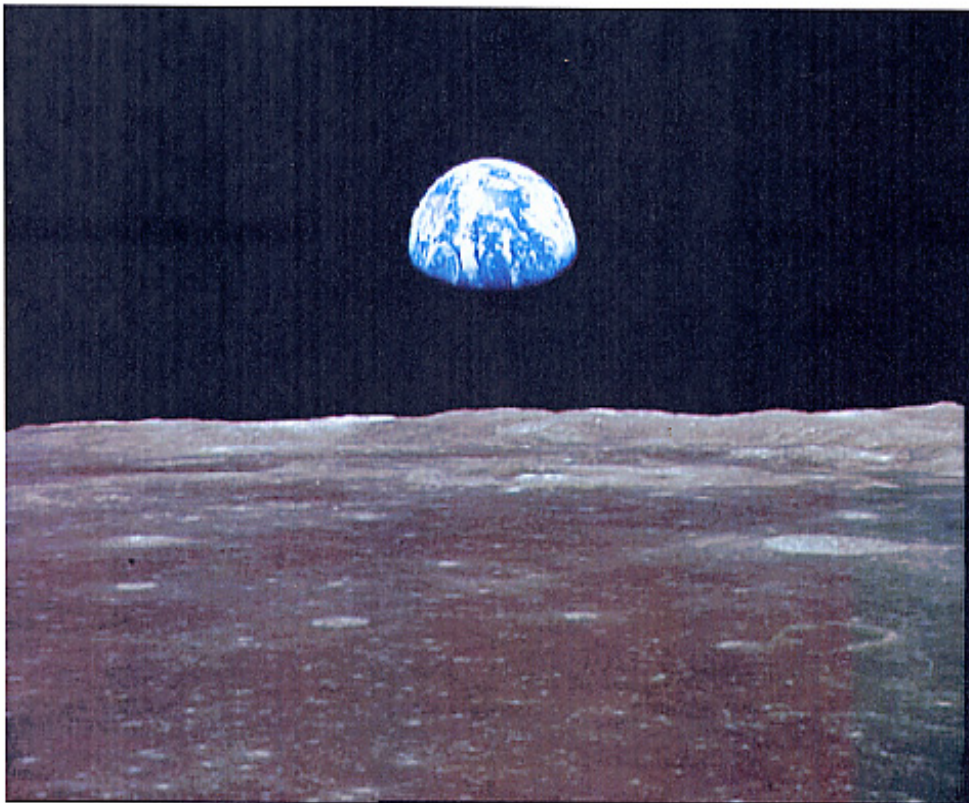


図2. 6-8 宇宙から見た地球(NASA提供)

## (6) 地球圏外への進出

これまでの宇宙ステーションは、ソ連／ロシアのミールも含めて、地球の周りを回っているもので、通信の時間差はそれほど無く、また何かトラブルがあった場合は地球に帰還することも可能です。これが火星探査、あるいはさらに遠方の宇宙探査となった場合はどうでしょうか。地球との交信も非常に時間がかかるようになり、また何かあったとしても簡単に地球にもどることはできません。その一方で、現在の科学技術の進歩は非常に早く、特に通信技術やコンピューター、バーチャルリアリティなどの発達により、宇宙にいても、あたかも地球に居るように感じるようになって来ましたが、宇宙で病気になっても、遠隔医療を利用して地球から治療の手助けをすることが考えられています。また、自動で診断／治療するような医療機器の研究開発も、素晴らしい勢いで進んでいます。そのように考えると、火星探査もだいぶ現実味を帯びてきます。

### 2. 6. 3 宇宙への適応に向けて

ガガーリンが最初に宇宙飛行を行ってから50年ちかく経ちました。人類の宇宙開発の歴史は、以下のステージで考えられています。

1. 生存可能性の検証: 宇宙環境でヒトが生きて帰ってくることができるかどうかの問題でした。
2. 健康維持: 宇宙でヒトが健康を維持できるかどうかの問題とされました。
3. パフォーマンス: 健康を維持した上で、宇宙でも良いコンディションで仕事ができるかどうかの問題となります。これが現在の状況と考えられます。

これから先は、4. 宇宙での生活、そして5. 子孫の繁栄を視野に入れた研究開発の時代が来ようと思います。

最初に述べたように、ヒトが宇宙で生きていくためには、空気や温度を一定に保つために、部分的な地球環境を維持しなければなりません(図2. 6-9)。現在の宇宙ステーションは、太陽電池などで、電力、水や空気はある程度を自前で調達していますが、食料を始めとする様々な物資はほとんど全面的に地球に依存しています。食料再生産を含めた、完全型の閉鎖環境についての研究も進められています。

人類は宇宙に適応できるのでしょうか？地球ができて 40 億年、生命が誕生して 30 億年、生物が海から陸上に上がったのは、4 億年前と言われています(図2. 6-10)。有人宇宙活動が始まったのはおよそ50年前で、生物が陸に上がってから、千万分の一ほどの時間しか経っていません。まだまだ結論が出るには時間がかかりそうですが、でも人類が本当に賢ければ、数万年の単位で考えれば、きっと宇宙に適応

した人類が現れることも十分に期待できるのではないのでしょうか。それはこの本をよんでいる皆さん、あるいはその子孫かも知れません。

宇宙空間は、そこで生きるには本当に厳しい環境です。そのために何が必要かを一つ一つ明らかにしていく必要があります。逆に言えば、宇宙に適応する過程において、我々人類は、地球環境の何が私たちの生存に必要であるかを知ることになります。本当に宇宙環境に適応できた時に初めて、私たちは地球環境が我々にもたらしてくれたものを知り得たと言えるのかも知れません。

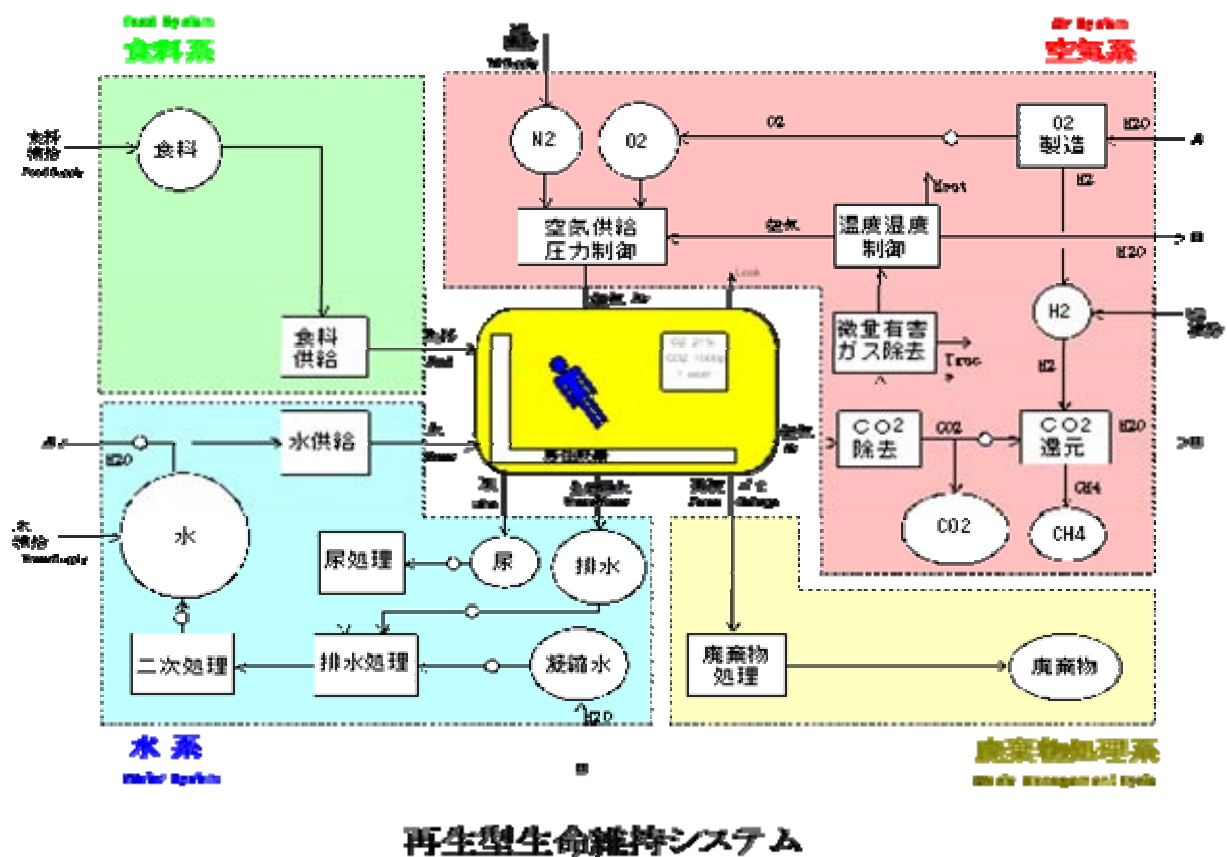


図2. 6－9 閉鎖環境における生命維持システム（「宇宙医学・生理学」宇宙開発事業団編 社会保険出版社より）

代	紀	世	年代（始）	年代（終）	氷河時代
始生代		地球誕生	4 6 億年	2 5 億年	
原生代			2 5 億年	5 億 7 0 0 0 万	氷河時代 約 6 億年前
古生代	カンブリア紀	海中に生物が 生れた	5 億 7 0 0 0 万	5 億年	
	オルドビス紀		5 億年	4 億 3 0 0 0 万	
	シルル紀	陸上に植物が 進出	4 億 3 0 0 0 万	3 億 9 5 0 0 万	
	デボン紀		3 億 9 5 0 0 万	3 億 4 5 0 0 万	
	石炭紀（ミ シシッピー 紀）		3 億 4 5 0 0 万	3 億 2 0 0 0 万	
	石炭紀（ペ ンシルベニ ア紀）		3 億 2 0 0 0 万	2 億 8 0 0 0 万	氷河時代（石 炭紀末から二 畳紀初期）
	二畳紀（ペ ルム紀）		2 億 8 0 0 0 万	2 億 2 5 0 0 万	
中生代	三畳紀		2 億 2 5 0 0 万	1 億 9 0 0 0 万	
	ジュラ紀		1 億 9 0 0 0 万	1 億 3 6 0 0 万	
	白亜紀		1 億 3 6 0 0 万	6 5 0 0 万	
新生代	第三紀	暁新世	6 5 0 0 万	5 3 0 0 万	アルプス造山 運動
		始新世	5 3 0 0 万	3 7 0 0 万	
		漸新生	3 7 0 0 万	2 6 0 0 万	
		中新世	2 6 0 0 万	7 0 0 万	
		鮮新世	7 0 0 万	2 0 0 万	
	第四紀	更新世（洪 積世）	2 0 0 万	1 万	氷河時代
		完新世（沖 積世）	1 万	現代	後氷期
第四紀更新 世（洪積 世）	考古学で言う旧石器時代にほぼ相当する。				
第四紀完新 世（沖積 世）	新石器時代、人類は農耕を発明した（約 1 万年前）、日本では縄 文時代に当たる				
ウルム氷期	第四紀氷河時代の最後の氷期（第 4 氷期） 5 万 3 千年から 1 万年前、旧石器時代の最後期 海面は現在より 1 0 0 メートルも下がっていた				
後氷期への 移行期	1 万 3 0 0 0 年前 旧石器時代の終末から縄文草創期の時代				
氷期	氷河時代のうちでも特に寒冷で氷河が著しく発達した時期				
間氷期	氷河時代のうち、氷期に挟まれた気候がかなり温暖な時期 気温は現在とほぼ同様ないし若干高めで、海面は現在よりも 2 0 ～ 3 0 メー トル程高めであった				

図2. 6－10 生物の進化

宇宙航空研究開発機構特別資料 JAXA—SP—05—026

---

発行日 平成18年3月31日  
編集・発行 宇宙航空研究開発機構  
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1  
URL: <http://www.jaxa.jp/>  
印刷・製本 ケーティエス情報(株)

---

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1

TEL:029-868-2079 FAX:029-868-2956

---

© 2006 宇宙航空研究開発機構

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等加工することを禁じます。

この用紙は地球環境・森林資源のため再生紙を使用しています。

