

## 国際宇宙ステーションと植物宇宙実験 (その 1)

## - STS-95 植物宇宙実験を中心として -

宮本 健助 (大阪府立大学高等教育推進機構教授)

山本 良一 (帝塚山大学名誉教授)

上田 純一 (大阪府立大学名誉教授)

## 1. はじめに

宇宙と聞いて私達が今一番気になることはやはり「はやぶさ2」のことではないだろうか。「はやぶさ2」は、「はやぶさ」の後継機として小惑星にタッチダウン (着陸) し、サンプルを採取して地球に帰還するミッションである。先行機の「はやぶさ」は、途中で多くのトラブルにみまわれたものの、世界で初めて小惑星 (イトカワ) の表面物質を持ち帰ることに成功した。「はやぶさ2」が目指す小惑星はイトカワとは異なる型のリュウグウで、そこには太陽系が生まれた今から約 46 億年前の水や有機物が残っていると考えられている。従ってこのミッションでは、太陽系の誕生と生命誕生の秘密を明らかにすることを目的としている。

「はやぶさ2」は 2014 年 12 月 3 日に打ち上げられ、2018 年 6 月 27 日にリュウグウに到着した。タッチダウンは 2019 年 2 月 22 日午前 7 時 29 分 (日本時間) に成功し、所定のサンプルを採取した。また上空からの観測データを解析したところ、リュウグウの地表には水を含む岩石が存在することも明らかにされた。さらにこのミッションでは、後日、弾丸をリュウグウに打ち込んで人工クレーターを作り、リュウグウ内部からサンプルを採取することも計画されていた。実際「はやぶさ2」は 2019 年 4 月 5 日にリュウグウ表面に人工クレーターを作る「SCI」と呼ばれる衝突装置を分離した。しばらくしてクレーター生成の様子を撮影するために「DCAM3」と呼ばれるカメラも分離した。「SCI」はその後予定通り衝突体を打ち出して、これをリュウグウ表面に衝突させて人工クレーターを作ることに成功した。「DCAM3」カメラは、その時にできる「イジェクタ・カーテン」と呼ばれるリュウグウの物質が円錐状に飛び散る様子を撮影することに成功した。この様な極めて複雑かつ精巧な一連の作業が終了した後、「はやぶさ2」は 2020 年末に地球に帰還する予定となっている。この原稿が印刷出版される頃にはさらに詳細な情報がもたらされているかも知れない。実に夢多き宇宙のお話である。

本稿では、この様な夢多い宇宙環境において、筆者達が実施した植物宇宙実験を中心に、宇宙環境と生物との関係を解説することにしたい。

## 2. 宇宙環境と生命活動 - 人類の宇宙進出と宇宙実験の役割 (意義・目的) -

## 2.1. 宇宙環境の特徴

さて、この様な夢多かりし宇宙とはどのような世界であろうか。「宇宙」とは地球の大気圏外の空間で、地球表面 (海面) からの高度が 100 km 以上の空間と規定されている。この中で、現在有人宇宙飛行に利用されている空間はわずかである。例えば以下に述べる「国際宇宙ステー

ション」(International Space Station)は、地上約400kmの高度を秒速約8km(時速約27,600km)の速度で地球を周回している。わずか90分程度で地球を一周しているのである。

国際宇宙ステーションが飛行している宇宙環境は、微小重力環境〔正確には太陽(28.1G)や地球(1G)、火星(0.38G)、月(0.17G)などの重力が存在するため完全な無重力環境ではなく、 $10^{-4}$ ~ $10^{-6}$ Gの微小重力環境〕である。さらに、宇宙放射線(陽子、 $\gamma$ 線、 $\alpha$ 線、重粒子線などの複合放射線)、高真空、極端な温度変化などの特徴をもつ。宇宙では、太陽が照ると温度は摂氏121度に、また、日かげでは摂氏マイナス121度となり、日なたと日かげの温度差は240度以上である。これは、宇宙では対流による熱の移動がないためである。大気が存在すると、光は大気中のチリによって乱反射するため、日かげでも物を見ることができる。しかしながら、宇宙では乱反射する物質が無いので、太陽光が存在するところは極端に明るく、光が当たっていないところは極端に暗くなる。つまり宇宙では明暗が極めて明確である。宇宙環境は地球で誕生した生物にとっては非常に過酷な環境で、ほとんどの生物は生存することは不可能である。従って生物が生存し、活動できる宇宙での環境は、人類が宇宙空間に打ち上げた、あるいはそこで建設した人工の地球環境に類似した環境ということになる。

重力それ自身の概念は1687年、イギリスの自然哲学者・ニュートン(Sir Isaac Newton)によって提唱されたものである。ニュートンが発見した重力、すなわち万有引力と地球の自転に伴う遠心力との合力は、地球上全ての生物に影響を及ぼしている。この遠心力は北極と南極ではみられないと考えられるので重力は地球の緯度によってわずかに異なっていることになる。ヒトを含むすべての生物はこの地球上において誕生し、その後の地球環境の変化に呼応して様々な進化、発達し、今日に至っている。

スペースシャトルや国際宇宙ステーションの中では宇宙飛行士がふわふわと浮かんでいるのをよく目にするが、誤解を招かないように宇宙が微小重力環境であるということを示し簡潔に述べておく。先に述べたように重力とは地球上の物体に作用する地球の万有引力であり、物体に働く重力の強さがその物体の重さ(質量)である。重力のみが作用する場合、物体を落下させたときにその物体の速度が単位時間当たりどれだけ速くなるかという値(運動の加速度)は物体の質量に関係しないので、重力を加速度で表すことができる。重力加速度は同一地点ではすべての物体に対し同じでほぼ $9.80\text{ m/s}^2$ であるが、高地になるほど地球の中心からの距離が増大して万有引力が小さくなるため、重力加速度は小さくなる。しかし、地球の赤道における半径は約6378.1kmであるので、計算上海面から高度10kmまで上がっても重量の減少は1%にも満たない。スペースシャトルや国際宇宙ステーションの典型的な高度である海拔400kmでも地表の90%程度が残っていることになる。従って、地球から離れたことにより無重量になるのではなく、スペースシャトルや国際宇宙ステーションが地球に落下し続けるのでそれを避けるため飛行を続けており、この時生じる遠心力と地球の重力が釣り合っているためにスペースシャトルや国際宇宙ステーションの中では重力から解放されることになり無重量状態となる。

重力によって地球表面に気体が引きつけられる結果、大気が形成されている。そのおおよその組成は、窒素78%、酸素21%、アルゴン0.9%、そして二酸化炭素が0.03%とされている。

その他にも多くの微量成分が存在するが、この様な大気成分とその割合は、地球の気候変動や人為的活動によって変化している。特に近年では人為的活動に起因する二酸化炭素やフロン類（炭素と水素の他、フッ素や塩素などハロゲンを多く含む化合物の総称）をはじめとする温室効果ガスの濃度が上昇し、地球規模の大きな環境問題・社会問題を引き起こしていることは周知の事実である。

## 2.2. 特異な宇宙環境を利用した科学

宇宙環境は微小重力、宇宙放射線、高真空など地上では決して得ることのできない特徴を有している。その特異な環境を利用することで極めて広範な分野にわたる実験・観察や研究が可能となる。物理化学や材料科学に関する領域では、熱や物質の移動に関する重力に依存した現象を解明したり、重さの異なる物質を均質に混合して新しい素材を生み出したりすることが可能となる。簡単な実験であるが宇宙で蠟燭（ロウソク）に灯をともし実験では、液体から気体になったロウが放射状に拡散するために炎が丸く球状になり、熱対流による酸素供給が間に合わず周囲の酸素を使いきってやがて消えてしまうことが示されている（図1）。

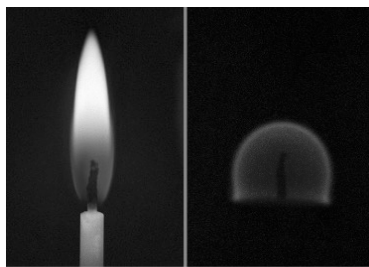


図1. 蠟燭の炎

左図：地上 1G 環境下、右図：微小重力環境下

(<https://kodomonono-mori.com/blog/?p=2014> より)

宇宙環境を利用したライフサイエンスや医学分野の領域では、生物の構造や機能に対する重力の影響の解明、宇宙・地球環境での生物の応答・適応に関する研究、宇宙放射線の生物への影響に関する研究、宇宙環境が人体や精神に与える影響とその対策に関する研究などが可能である。エアロビクスは本来「有酸素運動」という意味であるが、元々はアメリカ航空宇宙局（NASA）においてケネス・クーパー医師によって宇宙飛行士の心肺機能のトレーニング方法として開発されたものである。宇宙環境を利用するということは、色々な意味で我々の健康に恩恵を与えている。これらに加えて、宇宙観測、地球観測、ロボテクスや通信技術などの理工学分野も宇宙環境を利用すれば益々発展する可能性がある分野である。

1992年9月12日に打ち上げられた米国のスペースシャトル・エンデバー（Endeavour）において、毛利衛博士が我が国最初の有人宇宙実験を行った。以後この日を記念して我が国は9月12日を「宇宙の日」に制定している。宇宙環境下での人類の活動を目指す上で、宇宙実験の果たす役割は大きい。人類の長期にわたる宇宙進出をかなえるためには、光合成によって酸素や炭水化物を生み出す生産者として役割を担っている植物がいかに宇宙環境で育っていくのかを知ることが重要となる。次にまず植物と重力との関りについて述べることにしたい。

### 3. 植物と重力

#### 3.1. 植物の陸上進出

酸素発生型の光合成を行う生物の内、陸上で生活するもの以外を総称して藻類と呼ぶ。藻類は極めてあいまいな分類群で、真正細菌（原核生物）である藍藻（シアノバクテリア）、藍藻の一次共生に由来する葉緑体をもつ単細胞性真核生物の緑藻や紅藻、紅藻の二次共生に由来する黄色の葉緑体をもつ珪藻や褐藻、そして多細胞性の緑藻や紅藻などが含まれている。進化的には多系統で、系統の様々な段階で細胞共生によって葉緑体を獲得した生物の集団である。近年、栄養補助食品としての有用性が注目されているユーグレナ（ミドリムシ）も、緑藻の二次共生に由来する葉緑体をもつ藻類である。いずれにしても藻類は重力の影響をほとんど受けない水中で生活し、多様な系統を成してきた。

今から約4億7000万年前から約4億5000万年前の間（地質年代では古生代オルドビス紀中期）に、藻類の内の緑色植物門に属する淡水生シヤジクモ類から原始陸上植物は出現したとされている。水中で生活してきた藻類の体は通常柔らかくしなやかであるが、陸上に進出して地上の重力に直接さらされることによって陸上植物は強固な体をもつようになったと考えられている。約4億2000万年前（地質年代では古生代シルル期）の陸上の最古の植物化石として知られるクックソニア（コケ植物・シダ植物でもないリニア状植物として分類される）には根・葉の分化はみられない。しかしながら、シダ植物のヒカゲノカズラのように二又分枝し、その先端には孢子嚢を形成しており、生殖は水中で生活していた時と同じように孢子に頼っているものの空中での散布を可能とする繁殖方法を獲得していることがうかがえる。クックソニアには維管束（維管束は水を運ぶ導管を含む木部、養分の通り道である篩管を含む篩部、木部と篩部の間の形成層、および繊維組織からなり、根、茎、葉を貫いている複合組織）は無いが、無維管束植物であるコケ植物に似た通導組織がすでに存在し、水を体の隅々に運搬する仕組みも作られていることが示されている。水中に比べ環境が激変する陸上において、シダ植物、種子植物である裸子植物、そして被子植物の出現へと植物は多様な進化と繁栄を遂げていったのである。

#### 3.2. 植物の陸上進出と重力応答：抗重力反応と姿勢制御

種子植物では、受精した胚珠から発生した種子中の胚の両端に、それぞれ茎頂分裂組織と根端分裂組織と呼ばれる活発に細胞分裂をする領域がある。ここで細胞が分裂を繰り返すことで細胞齢の勾配を伴う茎一根という発達した主軸（軸性）が形成される。この発達した軸性をもつ自らの体を支えるためには、重力に抵抗する構造をもつことが必要である。植物の細胞は動物の細胞とは違って、細胞膜の外側に細胞壁と呼ばれる力学的に強固な構造を有している。この細胞壁を構築している細胞壁多糖類（セルロースや非セルロース性多糖類）の厚みや分子量に影響することによって、重力に抗する体制を作り上げていったと考えられている。この形態形成反応は地球上で成長する植物ではあたりまえのように行われているものであるが、宇宙微小重力環境と地上における植物の茎の成長速度の比較と細胞壁の硬さの比較から明らかにされたもので、大阪市立大学・保尊隆享教授らによって重力に抵抗するための体作りという意味で

「抗重力反応」(Gravity resistance)と名付けられている。

一方、地上の重力は地球の中心の方向を向いており、植物はこの方向が安定している重力シグナルを基準として巧みに自らの姿勢を制御する仕組みも併せもっている。地上では、植物の根は重力の方向へ、逆に茎は重力とは反対の方向に伸びるので、根をしっかりと地中に伸ばし水や無機栄養分を吸収し、茎を上へ伸ばして枝葉を空間に配置し効率的に光合成を行うことができる。この姿勢の制御は、植物体を横たえると茎は反重力方向に根は重力方向に屈曲して成長する(これを植物の屈性反応と言う)ことから容易に見てとれる。重力屈性(gravitropism)に代表される重力形態形成・姿勢制御の過程である。当初、この反応は屈地性(geotropism)と呼ばれていたが、1806年にイギリスの植物学者・ナイト(Knight T)は植物に遠心力を作用させる実験によって茎や根が人工的に作り出した重力加速度に対する反応であることを明らかにした。その後、1871年、ポーランドの植物学者・シーゼルスキー(Cielsielski T)によって根における重力屈性におけるシグナル伝達が初めて組織レベルで明らかにされ、「感受細胞での重力刺激の感受」、「シグナルの発生と伝達」、「細胞間のシグナル伝達」、「伸長域での偏差成長」という4つの段階によって構成されていることが示された。

さらに、光や重力刺激に対する屈性を担う化学物質の探索が行われた。その結果、1928年、オランダのウェント(Went FW)によって屈性現象を担う物質として最初の植物ホルモンであるオーキシンが単離され、その後、この化学物質の本体がインドール-3-酢酸(indole-3-acetic acid: IAA)であることが明らかにされた(図2A)。

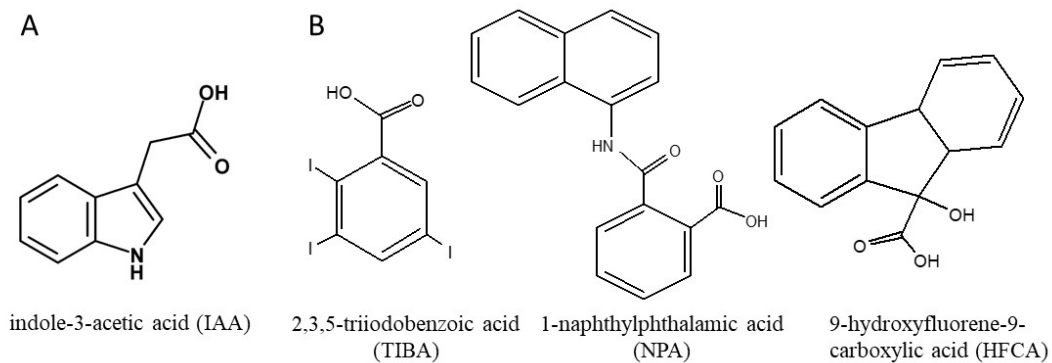


図2. 天然型オーキシン・インドール-3-酢酸(A)と代表的な非天然型オーキシン極性移動阻害剤(B)の化学構造

光や重力に応答したこのような偏差成長を説明する仮説として、現在オーキシンの横移動に基づくオーキシンの偏差分布によるという「コロドニー・ウェント説」が提唱されている。植物を横たえるとオーキシンが重力側(下側)に移動し、結果、重力側のオーキシン濃度が高まる。オーキシンに対する器官の反応性は異なっており、茎ではオーキシンは細胞伸長促進効果を示すのに対して、根は茎に比べてオーキシンに対する感受性が高く、高濃度のオーキシンで成長が抑制される。そのため、茎では重力側での成長が促進されるため上方向(負)に、根では抑制されるために下方向(正)に屈曲するとされている(図3)。

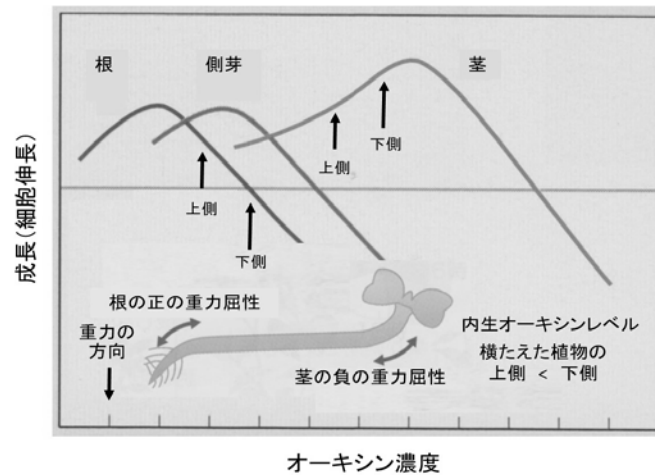


図3.「コロドニー・ウェント説」の概略。植物を横たえるとオーキシンの重力側に移動する。その結果、重力側にオーキシンが蓄積する。それにより、茎では重力側の成長が促進されるため上方向（重力とは反対方向）に、他方、根では抑制されるために下方向（重力の方向）に屈曲する。

### 3.3. オーキシン極性移動

#### 3.3.1. オーキシンの生理作用とオーキシン極性移動

植物ホルモン・オーキシンは、屈性反応以外にも、細胞の伸長、水を運ぶ木部と養分を運ぶ篩部からなる主に水や養分の運搬と機械的強度を保つ役割を担う内部組織である維管束のパターンニング、頂芽が主に成長している際には側芽の成長が抑制されるという頂芽優勢現象、根の発生といった多くの生理的プロセスで重要な役割を果たしている。この制御にはオーキシンの特異な移動に基づくオーキシンの濃度勾配が関わりとされる。

オーキシンは主に茎の頂端や若い葉で作られて、地上部では茎の内部の維管束を含む領域である中心柱を経て、根の先端へと輸送される。根の先端に輸送されたオーキシンは、根の先端の根冠にあるコルメラ細胞で左右対称に振り分けられ、皮層細胞を通過して根の基部側、伸長域の方向に輸送される。この様に細胞の極性に従ってオーキシンが移動することから、この移動は「オーキシン極性移動」(polar auxin transport) と呼ばれる。茎切片を切り出してその頂端側からオーキシンを与えた場合には、オーキシンは基部側に移動するものの、基部側から与えた場合にはほとんど頂端側へと移動しない（図4）。

コルメラ細胞は重力方向に沈降する大きなデンプン顆粒を含む色素体であるアミロプラストを含む細胞であり、根における重力感受の役割を担っている細胞である。一方、茎では維管束を包んでいる内皮組織のデンプン鞘細胞にアミロプラストが分布している。植物ではアミロプラストがあたかも平衡感覚を担うヒトの内耳にある炭酸カルシウムの結晶からなる耳石（平衡石）と同じような機能を果たしているのである。

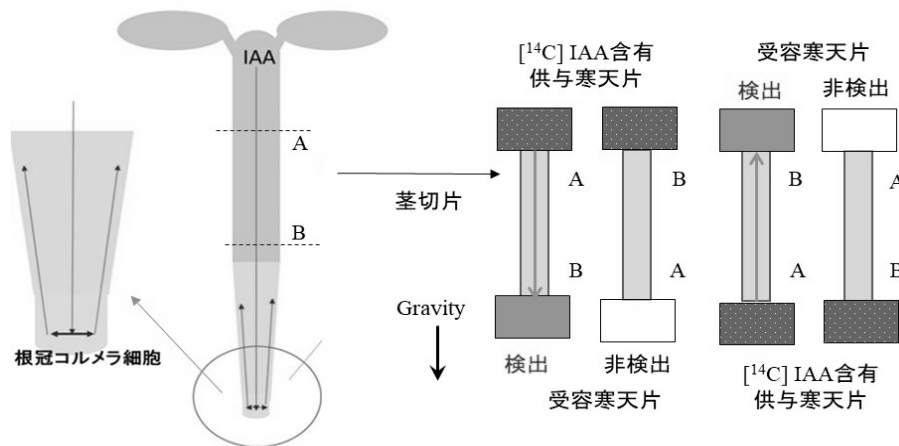


図4. オーキシンの極性移動を示す概念図。主に茎頂分裂組織や若い葉で作られたオーキシンは茎の中心柱を通して根の先端へと運ばれる。到達したオーキシンは根のコルメラ細胞で振り分けられ、その後、根の皮層組織を根の細胞極性に従って移動する。茎切片にオーキシンを頂端側から投与すると基部側に移動するが、基部側から投与しても頂端側へは移動しない。通常、オーキシンの移動能の測定には、放射能をもつ $^{14}\text{C}$ （炭素Cには質量数が12、13のものもあるが、これらには放射能は無い）で標識したオーキシン（IAA）を用いる。

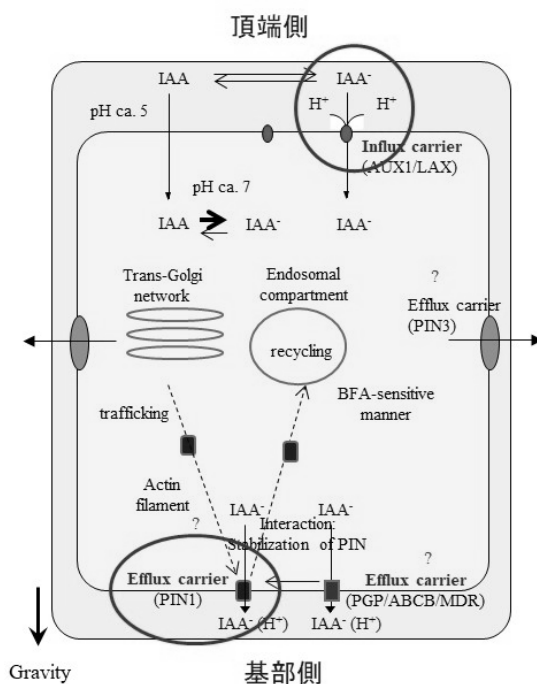


図5. オーキシン極性移動の仕組み（化学浸透説：chemiosmotic theory）。図中、AUX1 と PIN1 はそれぞれオーキシン（IAA）の細胞内への取込みと細胞外への排出を担う細胞膜に存在するキャリアータンパク質を示す。

### 3.3.2. オーキシン極性移動と PIN キャリアータンパク質

このオーキシンの極性移動の仕組みは、化学浸透説（chemiosmotic theory）によって説明されている（図5）。植物体内において細胞膜より内側の部分を除いた、水溶液で満たされた空間、

すなわち細胞壁とその間隙からなる空間をアポプラストと呼ぶ。オーキシンの化学的本体であるインドール-3-酢酸 (IAA) の酸解離定数  $pK_a$  (酸の強度を表す定量的指標で、酸から水素イオンが放出される解離反応の平衡定数  $K_a$  の負の常用対数。この値が小さいほど強酸を意味する) は 4.75 で細胞壁アポプラストの pH が 5 付近であることから、細胞壁アポプラストでは IAA は解離状態と非解離状態で存在する。非解離状態の IAA は細胞膜 (原形質膜) を濃度勾配に従った拡散作用によって通過することができるが、解離状態のものは細胞膜を通過できない。解離状態の IAA はオーキシン取込みキャリアータンパク質である AUX1 (AUXIN RESISTANT 1) タンパク質を介して細胞内に取り込まれる。細胞内 pH は約 7 であるため、取り込まれた IAA はすべて解離状態となり、その細胞外への排出には細胞膜に存在するオーキシン排出キャリアータンパク質が必要とされる。オーキシン輸送タンパク質の内、特に PIN (PIN-FORMED) タンパク質が、重要な構成要素と考えられている。

PIN タンパク質は、シロイヌナズナ (*Arabidopsis thaliana*) の花器官形成突然変異体の一つで花茎の先端がピン状を呈する *pin* 突然変異体 (図 6) (斜体表記は遺伝子を意味し、小文字斜体表記はその遺伝子が欠損していることを意味している。ちなみに大文字正体での表記は、その遺伝子の産物であるタンパク質を意味する) に関するに研究において、この遺伝子欠損変異体では花茎 (inflorescence axis) のオーキシン輸送の減少が認められること、さらに、PIN タンパク質が細胞の極性側 (下端) の細胞膜に局在することなどから、オーキシン極性移動を制御する重要な排出キャリアータンパク質であることが明らかにされている。オーキシン極性移動が重力の影響を受けている現象であるか否かは、以下に述べる筆者らの植物宇宙実験 (STS-95 実験) が行われるまでは明らかにされていなかった。

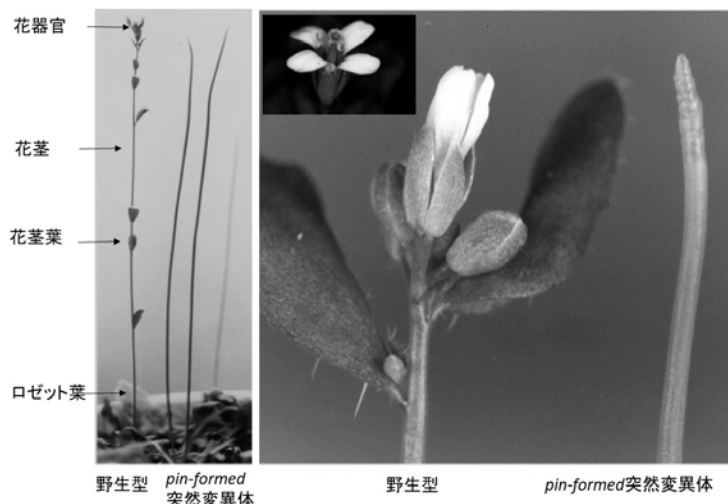


図 6. シロイヌナズナ (*Arabidopsis thaliana*) の野生型 (ecotype Columbia) と *pin-formed* (*pin*) 突然変異体

#### 4. 重力植物科学へのアプローチ

植物の成長・発達に対する重力の影響を明らかにするために、もっぱら植物体を横たえて重



カベクトル方向を変える方法がとられてきた。19世紀の後半、植物生理学の父と称せられるドイツの植物生理学者・ザックス（Sachs J）は、水平に横たえた植物体をその軸を中心に緩やかに回転させることで重力の方向性を除外する装置であるクリノスタット（植物回転器、clinostat）を開発し、クリノスタット上では茎も根も水平方向にまっすぐに伸長することを示し、クリノスタットの重力植物科学研究における有用性を示唆した。最近では2つの直交する回転軸をもつ3次的に回転可能な3次元クリノスタット（図7）も開発・利用されているが、重力そのものの存在は地上では容易に取り除くことはできない。地上において自由落下塔（drop tower）による自由落下や航空機による放物飛行（パラボリックフライト：水平飛行中に機首を上げて上昇した後エンジンを停止して放物軌道を描く飛行で、機体が自由落下運動をするため機内は見かけ上、短時間  $10^{-3}G$ （mG）程度の低重力状態になる）により数秒から数十秒の短い時間の微小重力環境を作り出すことは可能であるが、植物の成長・発達に対する重力の影響を解析するにはあまりにも短い。従って重力植物科学の研究にとって宇宙微小重力環境の利用は不可欠なものである。

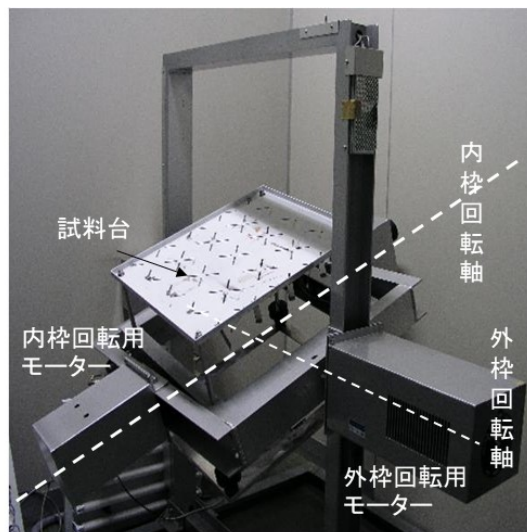


図7. 筆者らが使用している3次元クリノスタット。

2つの直交した回転軸を有しており、試料台に搭載した試料を3次的に回転させることができる。回転制御プログラムにより、回転方向および回転速度をランダムに制御可能で、一定期間内の垂直、水平ベクトル成分の積算がゼロになるように制御されている。

## 5. STS-95 宇宙植物実験

スペースシャトルは、アメリカ航空宇宙局（NASA）により開発された外部燃料タンクと宇宙と地球の往還する再使用可能な有人宇宙船本体からなる宇宙輸送システム（Space Transportation System : STS）で、1981年から2011年にかけて135回の打ち上げがなされた。宇宙でのミッションが終了すると、宇宙船は軌道上を外れ地球の大気圏に再突入しグライダーのように飛行して帰還する。

1998年10月にスペースシャトル“ディスカバリー（Discovery）”を利用したSTS-95と呼ばれるシャトルミッションにおいて、日本の研究者によって提案された4件の本格的な植物成長実験が実施された。このミッションは、アメリカで初めて地球の周回軌道を回った宇宙飛行士〔NASAのマーキュリー計画に従事し、1962年のマーキュリー6号（フレンドシップ7）によ

り達成]として有名なジョン・グレン (John Herschel Glenn Jr.) 宇宙飛行士 (1921 年生、2016 年没、1974 年～1999 年までオハイオ州選出のアメリカ議会上院議員) が 36 年ぶりの、そして日本人の向井千秋宇宙飛行士が二度目の宇宙飛行を行ったことで非常に注目されたミッションでもあった。

スペースシャトルの荷物室 (カーゴベイ) に搭載されたスペースハブモジュールと呼ばれる宇宙飛行士が入って活動可能な与圧空間である宇宙実験室は、7 名の宇宙飛行士が通常生活するミッドデッキと呼ばれる空間とトンネルでつながっている。STS-95 では、この実験室の壁に沿ってガマアンコウ実験用 NASDA 海水型前庭機能実験装置をはじめとする様々な実験装置がぎっしりと搭載されており、床面積はわずか 2 畳程度であったが軌道上では重力が無いため宇宙飛行士達はこの狭い空間の中で色々な姿勢をとることで 9 日間のフライトで 80 を超える実験がなされた。

STS-95 ミッションでの植物成長実験は、NASA が開発し、フライト実績を有する BRIC-60 (Biological Research in Canister 60) の使用を前提としていたために BRIC 実験と呼ばれた。「高等植物の根の電場及び重力の応答 (BRIC-ROOT)」、「ウリ科植物の重力形態形成：キュウリ芽生えのペグ細胞の発達と重力感受機構 (BRIC-PEGT)」、「微小重力環境における高等植物の成長調節 (BRIC-RICE)」、そして、筆者らのエンドウとトウモロコシ芽生えを対象にした「宇宙環境下における植物の形態形成とオーキシンの極性移動に関する研究 (BRIC-AUXIN)」〔研究代表者 (Principal Investigator: PI) : 上田純一、共同研究者 (Co-Investigator: CI) : 宮本健助・他) が実施された。BRIC-AUXIN での実際の植物の育成には、BRIC ではなく、NASA が開発した植物栽培容器 (Plant Growth Chamber, PGC) が使われた (図 8)。残念なことに、植物実験用培養装置 (インキュベーター) は搭載されておらず、成長実験はミッドデッキのキャビン温度で実施された。なお、宇宙実験を経験した研究者は同じ軌道上で 1G 対照実験を行う必要を痛感し、これが国際宇宙ステーションでの遠心力を利用して人工的に 1G 環境を作出する遠心機 (セントリフュージ) の設置へと活かされている。

図 8. STS-95 植物宇宙実験で使用された培養容器 (Plant Growth Chamber) と BRIC 容器 (Biological Research in Canister) (右下写真の筒状の容器)。



STS-95 植物成長実験は今から 20 年前に行われたものであるが、2016～2017 年にかけて行われた国際宇宙ステーション実験「宇宙環境を利用した植物の重力応答反応機構および姿勢制御機構の解析 “Auxin Transport”」の前段のものとして、ここではその成果に加え、地上実験を含め、成長およびオーキシン極性移動能に対する重力の影響を紹介したい。

## 6. 宇宙環境下での植物の成長・発達とオーキシン極性移動

### 6.1. 自発的形態形成

初期の植物宇宙実験の結果は、アメリカ航空宇宙局 (NASA) のハルステッド (Halstead TW) とダッチャー (Dutcher FR) により総説としてまとめられているが、植物の伸長成長に対する微小重力の影響はまちまちである。STS-95 植物宇宙実験においても、トウモロコシ (*Zea mays* L.) の幼葉鞘 (本質的に子葉の一部でイネ科植物の芽生えにおいて第一葉を包み込んでいる鞘状の器官) や中胚軸 (地中の種子と幼芽との間の胚軸)、エンドウ (*Pisum sativum* L.) の上胚軸などではわずかな抑制、イネ (*Oryza sativa* L.) の幼葉鞘やシロイヌズナの胚軸やモヤシマメ (*Vigna mungo* L.) の根では促進、また、キュウリ (*Cucumis sativus* L.) の胚軸や根では差が無いことが報告されている。植物宇宙実験では装置や実験条件に制限があり、その対照は地上 1 G のものであるため、伸長成長に対する影響が植物種や器官によって様々であるのか、重力以外の要因の違いの影響を受けた結果であるのかは明確でない。この点については、国際宇宙ステーション内の宇宙微小重力環境下において 1 G 環境を作出することができる遠心機を備えた植物培養装置を利用した対照実験を積み重ねていかないとならない。

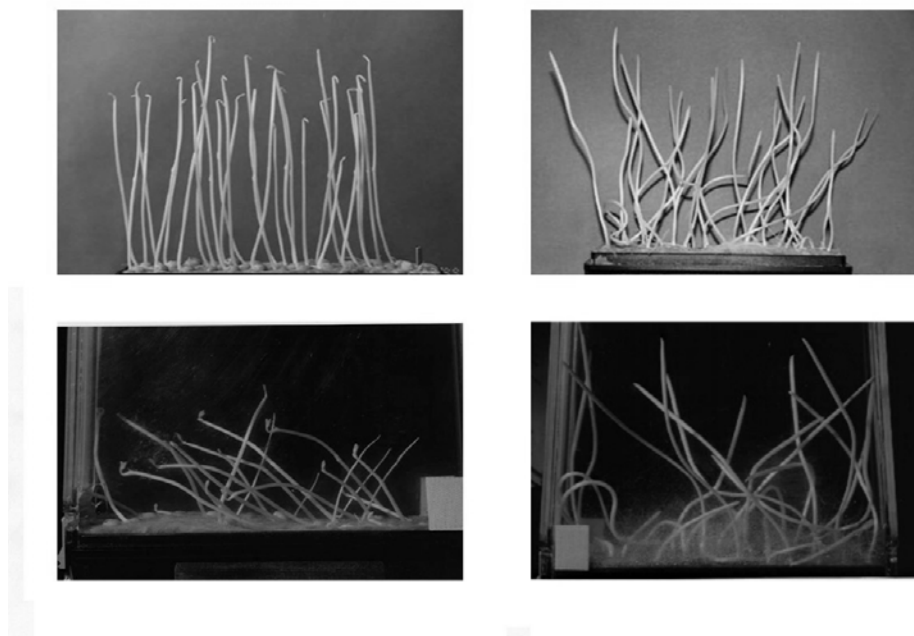


図 9. 宇宙微小重力環境下 (写真下) と地上 1 G 環境下 (写真上) で発芽・生育した 6 日齢黄化エンドウ芽生え (写真左) および黄化トウモロコシ芽生え (写真右)。

一方、植物の成長方向は、宇宙微小重力の影響を顕著に受ける。エンドウ（品種 Alaska）種子の胚の向きが種子支持体のロックウール上面に対して垂直になるように播種し、宇宙微小重力下で給水し、暗所で発芽・生育させると、黄化芽生えの上胚軸は子葉節基部で子葉から離れる方向に約 45 度傾いて伸長すること、根は茎と反対方向に気中に向かって伸長すること、そして、上胚軸鉤状部はその開度を増加させることが観察された。また、黄化トウモロコシ芽生えでは、幼葉鞘はほぼまっすぐに伸長したが、中胚軸はランダムな方向へ屈曲して伸長することが明らかとなった。この様な重力や光といった環境刺激が無い場合に認められる形態形成は、「自発的形態形成」(automorphogenesis あるいは automorphosis) と呼ばれる。自発的形態形成における成長方向は、植物の種類や器官によって異なっているが、微小重力環境下では植物は決してランダムな方向に成長するのではない (図 9)。

ちなみに黄化芽生えとは暗所で育てた、いわゆるもやしの形態をとる芽生えである。葉緑体をもたず、茎はひょろ長く、その先端はフック状をとる。このフック状の形態部を頂端鉤状部と言う。それに対して明所で育てた芽生えを緑化芽生えと呼び、クロロフィルをもつ葉緑体が発達するので植物体は緑色を呈し、またその茎は黄化芽生えに比べたく短く、葉が発達する。

## 6.2. オーキシン極性移動と宇宙微小重力

先に述べたように植物の姿勢制御にはオーキシンが重要な役割を果たしている。従来、オーキシンの極性移動は植物細胞の極性によってのみ制御されており重力の影響を受けないと考えられてきたが、オーキシン極性移動が重力の制御を受けているのか否かは明らかにされていなかった。しかしながら、宇宙微小重力環境下、暗所で発芽・生育させた黄化エンドウ芽生えの上胚軸のオーキシン極性移動は地上対照と比較して著しく低下していた。一方、黄化トウモロコシ幼葉鞘のオーキシン極性移動は、宇宙微小重力下で育てたもので地上対照に比べ、逆に高いという結果が得られた。植物の茎細胞におけるオーキシン極性移動は重力の支配下にあり、重力は黄化エンドウ上胚軸では正に、黄化トウモロコシ幼葉鞘では負にオーキシン極性移動を制御していることを示している。

植物体を 3 次元的に回転させることが可能な 3 次元クリノスタットを用いた実験によっても、宇宙微小重力環境下での実験結果とほぼ同じ結果が得られた。このことは、3 次元クリノスタットが擬似微小重力環境模擬装置として有用であることを示している。また、エンドウの Weibull's Weitor 品種に X 線照射することによって得られた重力応答突然変異体 *ageotropum* エンドウを暗所で発芽・生育させると、黄化芽生えの上胚軸や根は自発的形態形成に類似の形態をとる。この芽生えの上胚軸のオーキシン極性移動は、アラスカエンドウのそれに比べ低く、さらに、重力ベクトルの変化およびクリノスタット上の擬似微小重力の影響を受けない。*ageotropum* の原因遺伝子は特定されていないが、この突然変異体を用いた解析結果も自発的形態形成とオーキシン極性移動の密接な関係を支持するものである。

重力によって制御されているオーキシン極性移動と自発的形態形成との因果関係の解明には、オーキシン極性移動制御物質が有用なケミカルツールとなる。これまでにオーキシン極性

移動を高める化学物質の存在は知られていないが、非天然型オーキシンの極性移動阻害剤は多く知られている。2,3,5-トリヨード安息香酸 (2,3,5-triiodobenzoic acid: TIBA)、9-ヒドロキシフルオレン-9-カルボン酸 (9-hydroxyfluorene-9-carboxylic acid: HFCA)、そしてナフチルフタラミン酸 (1-naphthylphthalamic acid: NPA) といったオーキシン極性移動阻害剤 (図 2B) の存在下でエンドウ種子を発芽・生育させると、自発的形態形成が表現模写された。宇宙微小重力環境下で黄化エンドウ上胚軸のオーキシン極性移動能が低下していたことから、エンドウ上胚軸の自発的形態形成はオーキシン極性移動の低下 (攪乱) によってもたらされたと推察される。いいかえると、正常なオーキシン極性移動能が重力応答に必要であると考えられる。

オーキシン極性移動能が著しく低いシロイヌナズナの *pin* 突然変異体の研究から飛躍的に発展したオーキシン極性移動に関する分子レベルの研究から、シロイヌナズナ花茎のオーキシン極性移動には通導組織を形成する柔組織細胞の基部側の細胞膜に特異的に存在する AtPIN1 (At はシロイヌナズナ *Arabidopsis thaliana* を意味する) が、その排出キャリアータンパク質として重要であるとされる (図 5)。また、オーキシンの細胞内への取り込みには AtAUX1 取り込みキャリアータンパク質が関わっている。

筆者らは、黄化エンドウを対象として、重力によるオーキシン極性移動の制御機構を分子レベルで解明することを目指し、オーキシン極性移動に重要な役割を果たしていると考えられる *PsPIN2*、*PsPIN3*、*PsAUX1* 遺伝子の分離に成功した (Ps はエンドウ *Pisum sativum* を意味する)。*PsPIN2* と *PsAUX1* 遺伝子の発現 (転写) を 3 次元クリノスタット上の擬似微小重力環境下と 1G 環境下で育てた黄化芽生えの上胚軸において比較したところ、両遺伝子の発現にほとんど差は認められなかった。一方、Chawla と DeMason (2003) によって分離され、その情報が公開されていた *PsPIN1* 遺伝子 (accession No AY222857) の発現を同様の芽生えで解析したところ、特に子葉側の上胚軸においてその遺伝子発現が重力刺激に応答し変化する知見を得ている。

また、近年、極性移動するためには *PIN* 遺伝子の産物が、例えば茎細胞であれば細胞の基部側 (図 5)、すなわち極性側の細胞膜にきちんと配置されることの重要性が指摘されている。そのためには、アクチン繊維 (アクチンと呼ばれるタンパク質から構成されている細胞内部での繊維状構造) などの細胞骨格の形成、アクチン繊維に沿った *PIN1* タンパク質の小胞輸送 (膜の分裂や融合により、細胞膜と細胞内小器官、あるいは細胞内小器官の間で小胞を介して行われるタンパク質や脂質などを輸送する仕組み) が必要である。この解明には、*PIN* 遺伝子産物に対する抗体を用いた免疫組織化学的解析や、電子顕微鏡を用いた細胞骨格の解析などが必要とされる。“Auxin Transport” 国際宇宙ステーション実験では、オーキシン極性移動の重力による制御を分子レベルで解析することを目的に、免疫組織化学的解析による *PIN* タンパク質の細胞内局在、*PIN* 遺伝子ならびに *AUX1* 遺伝子の発現に対する解析を計画し、遂行した。その結果については、次号で報告する予定である。

## 7. アメリカ航空宇宙局 (NASA) での実験作業

宇宙実験の機会は限られている。STS-95 植物宇宙実験ではそれを成功させるために、綿密な

実験計画、準備作業の上で行われた。宇宙実験操作は宇宙飛行士が行うため、重力の無い環境での作業の手順の確定に、また、実験に使用する容器・器具の適合性や安全性の検討などに多くの時間を要した。特に宇宙で茎切片をいかに安全に調整するかという問題では、切れ味鋭い刃が直接にむき出しにならないように葉巻カッターを細工したもの (NASDA ステムカッター) も開発した。この様な様々な工夫は、以後の実験にも役立てられている (図 10a)。

オーキシン極性移動測定実験では一般に放射性同位体 (アイソトープ) 標識したインドール酢酸を利用する。日本では放射性アイソトープの使用は厳しく制限され、本実験に使用したレベルの放射能は極めて低いが、それでも管理区域内での厳格な使用が義務付けられている。その点、アメリカの法律では本実験に使用する放射性物質の濃度は問題視されないものであった。宇宙実験では溶液状態では使用できないため、放射性インドール酢酸 ( $^{14}\text{C}$ -labelled indole-3-acetic acid) を寒天に保持させる形でエッペンドルフチューブに入れて使用した。また、チューブの色を変えて色で処理の違いが識別できるように工夫を施した (図 10b)。寒天の硬さ (濃度) やチューブ底の形状の検討も必要であった。向井千秋宇宙飛行士を始め、7人のクルー (宇宙船搭乗者) が興味深そうに葉巻カッターを使ってエンドウやトウモロコシの芽生えから切片を切り出し、オーキシンを含む寒天を入れてあるチューブにそれを差し込む様子を間近にした感動は今なお残っている。

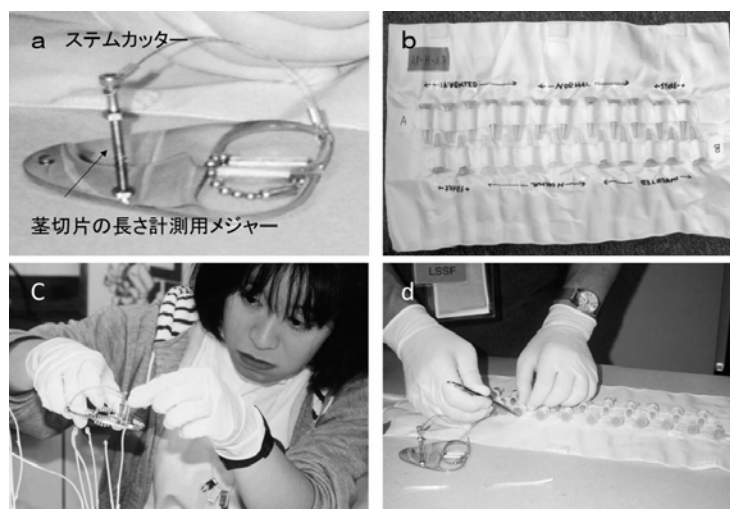


図 10. オーキシン極性移動実験に使用した実験器具および実験手順。

a: ステムカッター; b: 放射性オーキシンを含むチューブと消防士が着用する服に使われている燃えにくい布で作ったホルダー; c: ステムカッターを用いて茎切片を切り出すところ; d: 茎切片を放射性オーキシンを含むチューブに挿し込むところ。

スペースシャトル STS-95 “ディスカバリー” は 1998 年 10 月 29 日 14 時 00 分 (米国東部時間) の打ち上げ予定から、19 分遅れて NASA のケネディスペースセンター (Kennedy Space Center) の第 39B 射点から、快晴の空に向けて打ち上げられた (図 11)。STS-95 宇宙実験では、

スペースシャトルの飛行期間は9日間であったが、私達はおよそ一月前から、アメリカ東海岸のフロリダのケネディスペースセンターにおいて射場作業に従事した(写真12)。ハンガーLと呼ばれる元々は飛行機の格納庫の中に作られた実験棟内で射場作業を行うのであるが、設備等は極めて充実していた。



図 11. スペースシャトル STS-95 “ディスカバリー”の打ち上げ(左)と、それが順調に行われたことを示す掲示板(右)。右下は宮本 CI。



図 12. 射場作業の風景

左：左から上田純一 PI、勇田友和(大阪府立大学4回生)、星野友紀(大阪府立大学4回生、現山形大学農学部准教授)、藤井修平帝塚山大学教授(CI)；右：勇田友和君(左)と星野友紀君(右)が Plant Growth Chamber 中の支持体であるロックウールに胚の向きが一定になるように種子を播種しているところ。

飛行期間中は、筆者の一人上田 PI (Principal Investigator の略) はヒューストンの NASA ジョンソン宇宙センター内のミッションコントロールセンターで管制作業と軌道上実験における手順変更に対する対応に当たり、その指示をうけて宮本 CI (Co-Investigator の略) らがケネディスペースセンターにおいて地上対照実験における対応をとった。インキュベーターが備わっていなかったことで植物の成長に大きな影響を与える温度条件を頻繁に調節する必要があり大変な苦勞をしたことが思い出される。また、図 13 に示すように、7名の宇宙飛行士は分刻みで宇宙実験作業に従事していたことがうかがえる。

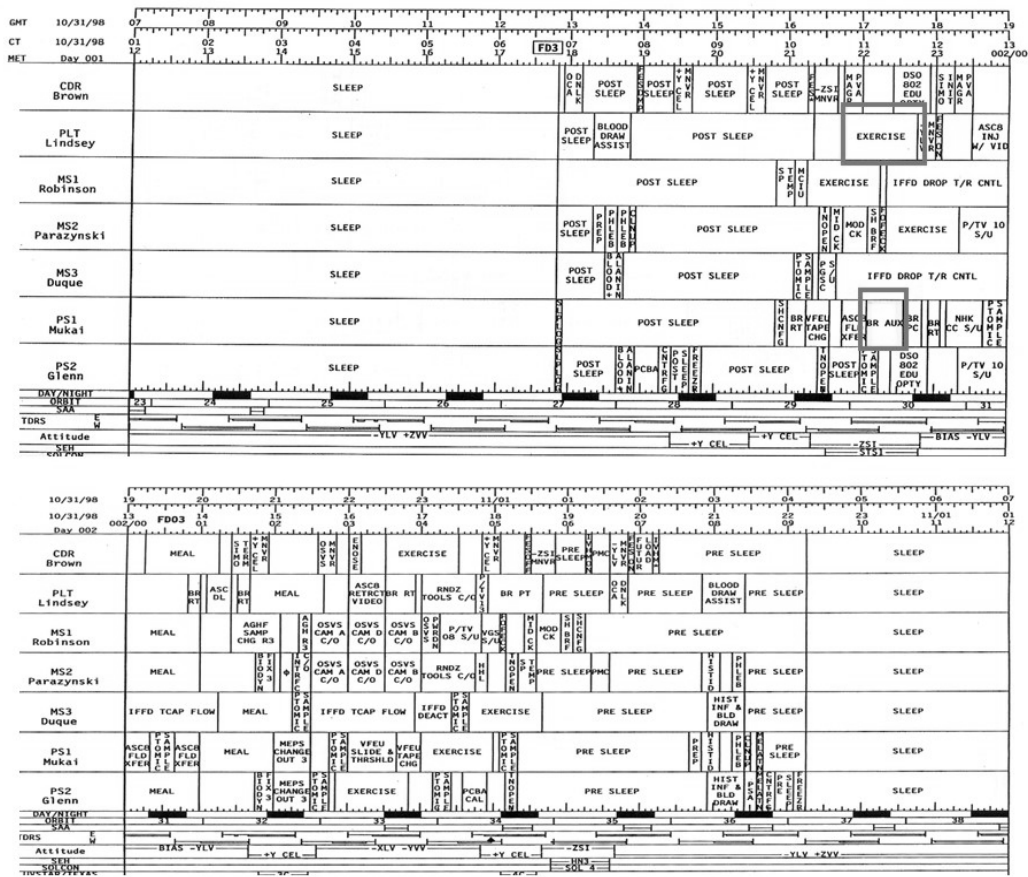


図 13. STS-95 実験のある一日の宇宙飛行士のスケジュール表。7名の宇宙飛行士は様々な実験作業に従事していることがうかがえる。下太枠は我々の実験 (BRIC-AUX) 作業。また Exercise と記された筋力を保つために運動が課せられている (上太枠)。上から、Brown 艦長 (Commandor: CDR)、Lindsey パイロット (Pilot : PLT)、Robinson 宇宙飛行士、Paraazyński 宇宙飛行士、Duque 宇宙飛行士 (いずれも Mission Specialist: MS 宇宙船搭乗技術者)、向井千秋宇宙飛行士 (Payload Specialist: PS 宇宙船搭乗科学技術者)、Glenn 宇宙飛行士 (PS) のスケジュール。

スペースシャトルの帰還は、通常ケネディスペースセンターであるが、天候次第で帰還の延期や第二基幹地であるカリフォルニア州エドワーズ空軍基地内にあるドライデン飛行研究センターに着陸する。ドライデン飛行研究センターに帰還した場合、スペースシャトルは自力飛行ができないため、ジャンボジェット機の上に載せられてケネディスペースセンターまで運ばれることになる。帰還後すぐに実験試料を回収し実験に供する必要があったため、上田 PI は、万一に備えドライデン飛行研究センターでの実験室立ち上げに当たるためヒューストンからドライデン飛行研究センターへ移動し待機することとなった。帰還予定日はケネディスペースセンター付近は晴天であったにもかかわらず、打ち上げ時に耐熱パネルの損傷で着陸の際のパラシ



ュートが使用できないことや上空の強風などの理由でケネディスペースセンターへの帰還が危ぶまれ直前まで帰還地が決まらなかったが、幸運にもスペースシャトルは無事に11月7日12時04分（米国東部時間）ケネディスペースセンターに帰還した。ケネディスペースセンターのチームは帰還後、直ちに回収した試料の処理に取り掛かり、翌日上田PIがカリフォルニアからアメリカ大陸を横断しケネディスペースセンターへと戻った時には、帰還後の実験作業を終えて祝杯をあげていたことが思い出される。

## 8. 国際宇宙ステーションとこれを利用した最近の宇宙実験

### 8.1. 国際宇宙ステーション

国際宇宙ステーションは、1998年に我が国をはじめ、アメリカ、カナダ、ヨーロッパの国々（イギリス、フランス、ドイツ、イタリア、スイス、スペイン、オランダ、ベルギー、デンマーク、ノルウェー、スウェーデン）およびロシアの計15ヶ国が協力して建設が開始され、2011年に完成を迎えた各種の宇宙実験や観測を行うための国境なき巨大な宇宙空間に存在する実験施設である。

国際宇宙ステーションはスペースシャトルを利用して、その様々な構成要素を40数回に分けて地上から宇宙に打ち上げ、これらを宇宙空間で組み立てて完成した。大まかな構成要素は与圧モジュールに属する4棟の実験モジュール、すなわちアメリカ実験棟「デスティニー」、ヨーロッパ実験棟「コロンバス」、ロシアの多目的実験モジュールおよび日本実験棟「きぼう」、3棟の結合モジュールなどと「きぼう」および「コロンバス」に取り付けられている曝露部（国際宇宙ステーションの外部に取り付けられている宇宙環境に直接さらされる部分）である。

国際宇宙ステーションでは2000年から3名の宇宙飛行士の長期間滞在が可能となり、2009年からはこれが6人に増員され、様々な実験や観測に従事している。国際宇宙ステーションの運用もまた国際協力のもとに行われている。アメリカが運用全体の調整を行い、アメリカ、カナダ、ロシア、ヨーロッパ11カ国からなる機関および我が国がそれぞれ開発したシステムや装置の運用の責任を担っている。

### 8.2. 日本実験棟「きぼう」を利用した国際宇宙ステーション植物宇宙実験

国際宇宙ステーションでは、宇宙飛行士が長期にわたって滞在しながら、様々な実験を行っている。日本実験棟「きぼう」を利用して、これまでに11テーマの植物生理学実験が行われている。その詳細については宇宙航空研究開発機構（JAXA）からの小冊子「宇宙を感じるしくみ」や個々の報告を参照されたい。以下、それらの概要を記すこととする。

#### 8.2.1. 植物の生活環

富山大学・神阪盛一郎教授らにより実施された「微小重力環境下における高等植物の生活環（Space Seed）」実験（2009）では、遠心機を備えた細胞培養装置（Cell Biology Experimental Facility: CBEF）を利用することによって、重力の無い軌道上で重力のある環境を作り出し、植物に対する重力の影響を宇宙で精緻に比較可能となった。そこでは、シロイヌナズナの生活環を構成す

る諸過程、特に老化や種子形成における異常も認められている一方で、種子形成が完了し宇宙微小重力環境下でも次世代を残すことが可能であることが明らかとなった。長期宇宙滞在を可能にするためには植物生産の効率化・持続性を考えることが必要であり、植物の生活環に対する微小重力の影響の解析結果は極めて重要な知見となる。

#### 8.2.2. 植物の抗重力反応と細胞壁

植物の成長方向を規定しているものは細胞壁を構成しているセルロース繊維の配向で、これが細胞の伸長方向に垂直に配置することで細胞は伸長方向に伸び、これが伸長方向に対して垂直に配向すると横に肥大する。このセルロース繊維は、微小管（細胞骨格の一種で、チューブリンと呼ばれるタンパク質からなる直径約 25 nm の管状の構造物）によってその配向が制御される。大阪市立大学・保尊隆享教授らによる「植物の抗重力反応における微小管－原形質膜－細胞壁連絡の役割 (Resist Wall)」実験 (2008) では、微小管に関する突然変異体シロイヌナズナを対象に、植物が重力に抗して成長する際に植物の細胞壁を強くするために細胞壁の内側に配置している微小管が細胞壁物性制御に関わっていることが示された。また、東北大学・西谷和彦教授による「微小重力環境下におけるシロイヌナズナの支持組織形成に関わる遺伝子群の逆遺伝的解析 (Cell Wall)」実験 (2008) では、細胞壁の構造をなすセルロース（グルコースが  $\beta$ -1,4 結合した多糖類）やヘミセルロースの一種キシログルカン（グルコースからなる主鎖に側鎖としてキシロースが結合した双子葉植物の細胞壁に普遍的に含まれるヘミセルロース性多糖類の一種）の生合成に関わる遺伝子の発現に対する宇宙微小重力の影響が明らかにされた。ちなみに、逆遺伝学的手法とは、着目した遺伝子の発現を抑制あるいは亢進することによって起こる表現型の変化を調べ、その遺伝子の機能を解析する研究手法である。

また、大阪市立大学・若林和幸准教授による「重力によるイネ芽生え細胞壁のフェルラ酸形成の制御機構 (Ferulate)」実験 (2010) では、イネ科植物の細胞壁中では、細胞壁多糖類のアラビノキシラン（キシロースの主鎖にアラビノースとメチルグルクロン酸が結合したヘミセルロース性多糖類の一種）に結合したフェルラ酸同士が架橋結合してジフェルラ酸を形成することによって細胞壁に力学的強度を与えているが、宇宙微小重力環境下ではその形成に関わる酵素活性が低下し、架橋形成が抑制されて細胞壁の緩みをもたらされることが示されている。これらは、抗重力反応の制御に密接に関わる細胞壁の構築に関する新しい知見である。

さらに、大阪市立大学・保尊隆享教授らによる「植物の抗重力反応機構－シグナル変換・伝達から応答まで (Resist Tubule)」実験 (2012～2014)、そして大阪市立大学・曾我康一准教授らによる「重力による茎形態変化における表層微小管と微小管結合タンパク質 MAP65 の役割 (Aniso Tubule)」実験 (2013～2015) によって、細胞膜上に存在する伸展活性化（機械的）刺激受容体（メカノレセプター）による重力刺激の感受、微小管の配向変化、セルロース繊維の合成方向の変化、細胞成長方向の変化、という抗重力反応の素過程が明らかにされつつある。

#### 8.2.3. ペグ形成

ウリ科植物（キュウリ）は、扁平で硬い種皮をもつ種子が発芽・成長する際に、胚軸と根の境界領域の下側（重力側）にペグという突起を形成し、これで種皮の下側を押さえた状態で胚軸を伸長させ、簡単に種皮から子葉が抜け出せるようになっている。行儀は悪いが片方の靴のかかとをもう一方の足でおさえて靴を脱ぐようなものである。東北大学・高橋秀幸教授らは STS-95 実験において境界領域の両側に 2 個のペグが形成されることを見出し、ペグは重力によって形成誘導されるのではなく、本来ペグを 2 つ形成させる能力があるが反重力側のペグの形成が重力によって制御されるオーキシンの減少によって抑制されるという重力によるペグ形成の負の制御を提唱した。「植物の重力依存的成長制御を担うオーキシン排出キャリア動態の解析 (CsPINs)」実験 (2011~2014) によって、オーキシン排出キャリアタンパク質である CsPIN1 タンパク質が重力感受細胞である内皮で重力に応答して細胞の下側の細胞膜に局在し、それによって上側から下側にオーキシンが運ばれる結果、重力下では上側のペグ形成が抑えられるという分子レベルでの制御モデルを導いている。

#### 8.2.4. 水分屈性

植物の自発的形態形成が地上 1 G 環境下では重力形態形成によって隠された現象で微小重力環境下でしか見ることができないものであるように、植物の様々な環境要因に応答した運動の多くも重力が干渉した状態である。微小重力下ではそれを分離して解析することが可能である。東北大学・高橋秀幸教授らは根の水分屈性に着目し、「微小重力下における根の水分屈性とオーキシン制御遺伝子の発現 (Hydro Tropi)」実験 (2010) において、微小重力環境下では根の水分勾配に対する応答性が上昇すること、さらに根の伸長帯の高水分側のオーキシン量が低水分側に比べて多いために高水分側に向かって屈曲することを明らかにしている。

#### 8.2.5. 回旋転頭運動

また、アサガオの蔓が支柱に巻きついて伸びているように、植物の茎や根はその先端部をらせん状に回転させながら伸長している。この運動は回旋転頭運動とよばれ、ダーウィンがその著書「植物の運動力」や「よじ登り植物」において植物の回旋転頭運動と重力屈性の関係について記述して以来、重力応答が回旋転頭運動に必要なかに興味を持たれてきた。東北大学・高橋秀幸教授らはアサガオとイネを対象に、「植物における回旋転頭運動の重力応答依存性の検証 (Plant Rotation)」実験 (2015) を行い、回旋転頭運動が微小重力環境下では抑制され、宇宙人工 1 G 環境下で増幅されることを見出し、回旋転頭運動における重力応答反応の関与を示唆している。

#### 8.2.6. 植物の重力装置

植物が重力を感受する仕組みとして、東京学芸大学・飯田秀利教授らによってシロイヌナズナの細胞の膜にある機械的刺激受容カルシウム ( $\text{Ca}^{2+}$ ) チャネルが同定されて以来、Ca イオンの重力応答の細胞内シグナル伝達過程における重要性が示されている。名古屋大学・辰巳仁史

准教授（現金沢工業大学・教授）らにより「植物細胞の重力受容装置の形成分化とその分子機構の研究（Plant Gravity Sensing）」実験（2014-2016）も実施されている。その成果の発表はまだなされていないが、重力感受機構の解明に繋がるものと期待される。

日本で実施されてきた国際宇宙ステーションにおける植物宇宙実験の多くは、STS-95 植物宇宙実験の成果を発展させたものであり、日本における宇宙植物科学のパイオニアとしての STS-95 植物宇宙実験の意義は大きい。筆者らも STS-95 植物宇宙実験とその後の地上基礎実験の成果を、「宇宙環境を利用した植物の重力応答反応機構および姿勢制御機構の解析“Auxin Transport”」をテーマとした国際宇宙ステーション実験に繋げることができた。幸い宇宙実験は計画通りに終わることができ、現在その解析を行っている。植物の重力応答に関わるこれらの宇宙実験成果は、重力生物学上、重要なものであると共に、将来の長期間にわたる宇宙環境利用を考える上で植物ホルモン動態を介した植物の成長・発達の化学物質による制御（ケミカルレギュレーション）や生物環境工学への適用などに寄与するものと考えている。

#### 9. 宇宙環境を利用する生命科学の展望（将来）

宇宙環境を利用する生命科学の方向性は、地球上で誕生し、進化・発展してきた生物の地球環境刺激に対する反応性のメカニズム（本質）を解明する視点、あるいは近い将来人類が宇宙で生存するために必須な食糧としての生物生産のための理論と技術を確立する視点、そして地球外生命の存在の可能性を探索によって明らかにする視点に大別することができる。狭義の生命科学の学問領域で考えると、重力生物学や放射線生物学分野の研究がなお一層発展し、新しい理論やそこから生まれる様々な技術を確立させることが必要となるであろう。この様な学問を発展させるためには、やはり子供のころから宇宙ひいては生物に対する興味を抱くことが必要であり、そこには教育が大きな原動力となる。現在の学校教育、社会教育において、宇宙や生物を意識した教育プログラムを構築することが是非とも必要である。

#### 謝辞

1998年に実施した STS-95 植物宇宙実験では、帝塚山大学の故藤井修平教授に、BRIC-AUXIN チームの一員として加わっていただき、筆者らと共に約1か月間米国フロリダで宇宙実験を御担当いただいた。藤井先生と実施した宇宙実験の思い出は、筆者らにとって宝物である。藤井先生の本実験における多大な貢献に心から感謝している。

#### 参考文献

「IGE シリーズ 28 宇宙植物科学の最前線—Perspective of Plant Research in Space—」、東北大学 遺伝生態研究センター（2000）

- 「宇宙環境と生命ー宇宙生物学への招待ー」、佐藤温重著、裳華房（2009）
- 「新しい植物科学 環境と食と農業の基礎」、神阪盛一郎・谷本英一共編、培風館（2010）
- 「宇宙植物科学、30年の歩みと将来」、一般社団法人日本宇宙生物科学創立30周年記念シンポジウム～未来への飛翔～、高橋秀幸（2016）
- 「最新植物生理化学」長谷川宏司・広瀬克利編、大学教育出版（2017）

嶋津 徹・相澤幸子（1999）「STS-95における宇宙実験（植物・細胞）」、宇宙生物科学 13：25-31.

Ueda, J., Miyamoto, K., Yuda, T., Hoshino, T., Fujii, S., Mukai, C., Kamigaichi, S., Aizawa, S., Yoshizaki, I., Shimazu, T., Fukui, K., Growth and development, and auxin polar transport in higher plants under microgravity conditions in space: BRIC-AUX on STS-95 space experiment. J. Plant Res. 112: 487-492 (1999)

Ueda, J., Miyamoto, K., Yuda, T., Hoshino, T., Sato, K., Fujii, S., Kamigaichi, S., Izumi, R., Ishioka, N., Aizawa, S., Yoshizaki, I., Shimazu, T., Fukui, K., STS-95 space experiment for growth and development, and auxin polar transport. Biol. Sci. Space 14: 47-57 (2000)

宇宙を感じる植物のしくみ：<http://iss.jaxa.jp/kiboresults/plant/>

はやぶさ2：<http://www.hayabusa2.jaxa.jp/>

国際宇宙ステーション：<http://iss.jaxa.jp/iss/>

スペースシャトル：<http://iss.jaxa.jp/shuttle/>

蝋燭（ロウソク）の炎：<https://kodomono-mori.com/blog/?p=2014>