

第6章 植物を中心とする閉鎖生態系生命維持システムの構築および関連実験

後藤英司(東京大学大学院農学生命科学研究科)

1. はじめに

国際宇宙ステーション(ISS)では日本を含む参加各国が無重力下でさまざまな植物実験を実施する予定である。ISSでは乗員は定期的に交代し、ステーション内でリサイクルできない物資は地上から定期的に補給され、廃棄物は地上に持ち帰ることになる。しかし今後計画される実験ステーションでは乗員の滞在期間が長くなり、将来は1年を越えることもありうる。そのような長期にわたる宇宙活動を支援するために、医学、心理学、精神衛生学などの分野の研究者によりさまざまな研究開発が行われている。NASAでも将来の有人飛行を想定して再生型の生命維持システムの基礎研究を行っている。

植物の利用は食糧自給の最も有効な手段として米国航空宇宙局(NASA)では重要テーマに位置づけている(Wheeler et al., 2002)。宇宙における植物利用は、新たな宇宙時代を迎えた今日、より現実的な課題になりつつある。その背景には米国が計画している火星への有人飛行がある。また米国以外の数カ国では宇宙開発シナリオとして、月面に長期滞在型の実験基地を造る計画を挙げている。これらの長期有人飛行活動において植物の役割は3つある。第1は食糧を自給すること。第2は宇宙空間内の限られた資源の有効利用、つまり物質循環を効率的に行うために植物を利用すること。そして第3は人間が植物に接することによる心理的効果と景観効果である。本稿では将来宇宙においてどのように植物を利用するのかを紹介したい。

2. 閉鎖生態系生命維持システム

2.1 閉鎖生態系生命維持システムとは何か

宇宙船、宇宙基地では、地上から物資の供給を得る頻度は少ない。廃棄物は宇宙空間に廃棄することはできないため地球に持ち帰る。したがって宇宙における人間を中心とする人工的な生態系は、エネルギーは解放系であるが、物質的にはほぼ閉鎖系に近いシステムを構築することが必要になる。このような生態系を"人工的な閉鎖生態系", いわゆる CELSS と呼ぶ(図1)。CELSSは Closed Ecological Life Support System または Controlled Ecological Life Support System の略語であり、閉鎖生態系生命維持システムと呼ばれる。米国の研究者は CELSS の C には Closed でなく Controlled を使うことが多い。閉じた生命維持システムを造ることの難しさを知っているためであろう。長期の有人飛行活動を可能にするためには CELSS を構築し、閉鎖度、循環度の高い物質循環システムを確立することが重要になる。

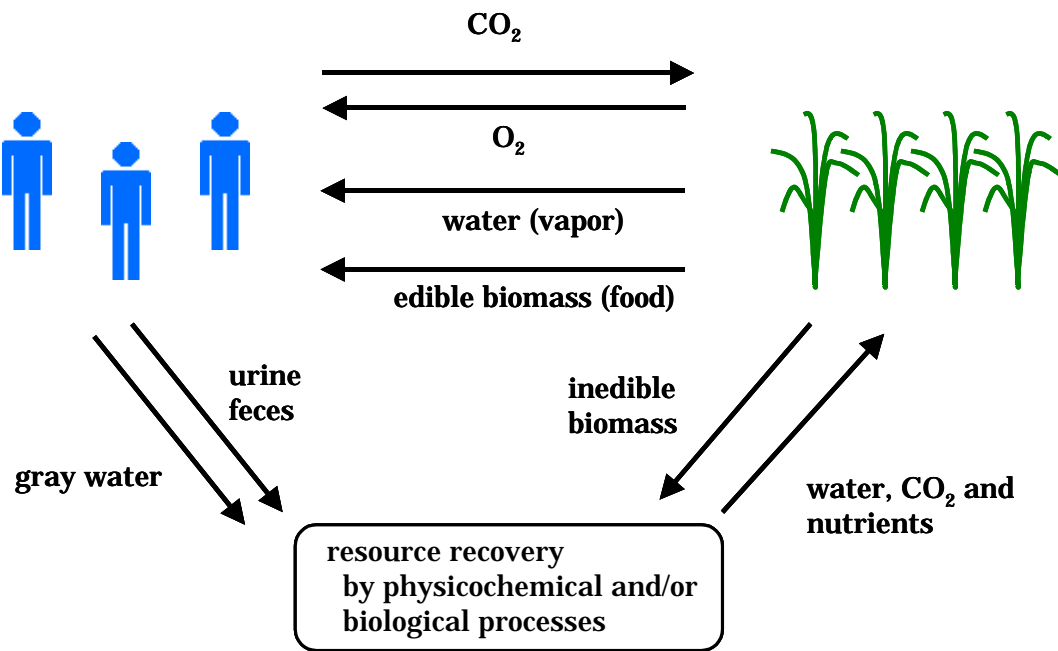


図1 閉鎖生態系における物質循環の考え方

2.2 系内の物質循環

人間の生命活動に必須な要素は酸素，水，食糧である．代謝研究によれば成人1人1日当たりの物質収支は， O_2 ガスを約 840g，水（飲料水，食品中水分を含む）を約 3080g，食糧を約 620g(乾物ベース)を獲得し， CO_2 ガスを約 1000g，水は呼気と発汗で約 1830g，尿で約 1510g，また固形排泄物を約 200g を排出する（新田・木部，1994）。

まず，人間が呼気で放出する CO_2 ガスから O_2 ガスを作り出す方法を考える。従来から検討され ISS で実用化される物理化学的な方法は，空気中の CO_2 ガスを分離，吸着し，サバチ工法を利用して酸素と炭素に分ける方法である。一方，植物は光合成活動により CO_2 を吸収して O_2 を放出する，いわゆるガス交換機能を有している。物理化学的反応は数 100 を必要とするが，光合成の適温は 20 ~ 30 で，人間の適温と一致する。酸素発生量は光合成速度に比例するため，発生量の予測と制御が容易である。しかし問題もある。植物は発芽から収穫までの間光合成量が変化し，また多くの植物には暗期が必要である。安定したガス交換のためには複数の植物を組み合わせさせて栽培し，生育ステージを細分化して混植する，栽培区画ごとに明期時間帯をずらすなどの工夫が必要になる。

水は宇宙では貴重な資源である。CELSS において人間1人当たり1日に必要な水量は約 30kg になると見積もられている。そのために生活水を効率的に再生する技術と，人間から排泄される糞尿中の水分を化学的に浄化する技術が開発されている。呼気や発汗によって空気中に放出された水分は純度が高いため除湿器で回収すればそのまま上水になるが，生活水や糞尿には有機物が混ざっているため，濾過，蒸留のシステムが必要になる。ロシ

アの宇宙船ミールでは物理化学的な方法による水再生システムが使用され、IIS にも搭載される予定である。一方、植物の蒸散作用も水を再生する手段の一つとして注目されている。植物根で吸水される水は、養分の吸収、分配、体温維持に使用され、99%以上が葉面の気孔を通して空気中に蒸発する。この水蒸気も上水または培養液水として再利用できる。しかし浄化のために積極的に植物を利用することには無理がある。なぜなら除去したい物質が植物体に蓄積して生育不良になるからである。CELSS における植物による水質浄化は、食糧生産とガス交換の2大機能に付随する機能と考えるべきであろう。

系内で植物を利用する食糧生産を行う場合、植物の不可食部および人間からの廃棄物は肥料に再合成することが望ましい。現在、有機廃棄物を酸化して無機物に変える方法として湿式酸化法などが検討されている。湿式酸化法は、高温高压下で有機物を酸化分解し、炭素はCO₂ガスとして空気中に、窒素はアンモニアとして残液中に抽出させる。この方法では、肥料成分として必要なリン酸、カリウムおよび他の金属元素もかなりの割合で分離抽出が可能である。最近は、このようにして再生した肥料成分を主成分とする養液栽培法の研究が行われている。

2.3 作物種と必要栽培面積

食糧自給に関しては、小さな人工生態系で家畜や魚を飼育するのは効率が悪いので、食糧は基本的には食用作物から摂取することになる。ガス交換だけが目的ならば、藻を栽培するほうが効率的である。たとえば、人間1人が排出するCO₂ガスをO₂ガスに変換するには60Lの水槽で藻を栽培すれば十分と言われている。もちろん藻は食糧にもなる。しかし、多くの人には、藻ばかりを食べる食生活を好まない。それでは食糧を食用作物でまかなうとして、必要な栽培面積はどのくらいになるのだろうか？ 以前筆者ら(Goto, 1997)が行った計算では、イネ、ムギ、ジャガイモ、ダイズ、ラッカセイ、レタス、ホウレンソウの7作物を選ぶと、エネルギー、タンパク、脂質、主要なビタミンをバランスよく含む組み合わせが得られる(表1)。作物の選定と料理法はベジタリアン食が参考になる。これらの作物を人工光型植物工場において最も好適な栽培環境で栽培するならば、人間1人あたり、年間を通して35~55m²の栽培面積が必要になる(表2)。この量の植物はCO₂とO₂のガス交換には十分である。養液栽培は多段式が可能なので、実際には、12畳の部屋で高さ4mの空間があれば人間1人分の食料を供給できる。

表1 人間の栄養所要量と閉鎖生態系における食用作物

	重量 ²⁾ (g)	熱量 (kcal)	タンパク (g)	脂質 (g)	カルシウム (mg)	ビタミン C (mg)
目標値 ¹⁾		2700	85	85	600	50.0
イネ	200	702	15	6	20	0.0
コムギ	200	666	21	6	48	0.0
ジャガイモ	150	483	3	0	8	34.5
ダイズ	100	417	35	19	240	0.0
ラッカセイ	80	449	20	38	40	0.0
レタス	40	5	1	0	20	5.2
ホウレンソウ	40	10	1	0	22	26.0
合計	810	2732	96	69	398	65.7

1) 乗員1名当たりの栄養所要量。食品分析表4版(1990)に基づく。

2) 食用部位の乾燥重。ただしレタスとホウレンソウは新鮮重。

表2 作物の生産性と栽培面積

作物	1作に必要な 栽培日数 ¹⁾ (days)	1作の生産量 ²⁾ (g m ⁻²)	1日当たりの 生産量 ²⁾ (g m ⁻² d ⁻¹)	1名当たりの必要量と 必要栽培面積	
				重量 ²⁾ (g d ⁻¹)	栽培面積 (m ²)
イネ	100	1500	15.0	200	13.3
コムギ	80	1500	18.8	200	10.7
ジャガイモ	110	1800	16.4	150	9.2
ダイズ	100	1000	10.0	100	10.0
ラッカセイ	100	800	8.0	80	10.0
レタス	20	4000	200.0	40	0.2
ホウレンソウ	20	4000	200.0	40	0.2
合計					53.6

1) 移植後から収穫までの日数

2) 食用部位の乾燥重。ただしレタスとホウレンソウは新鮮重。

3 . 海外の CELSS 植物生産の研究動向

米国では宇宙利用を目的とする CELSS 植物生産に関する研究が盛んである。その理由として長い宇宙開発・研究の歴史と、NASA が関連研究費を大学に分配していることが挙げられる。実際にスペースステーション実験を数多く行える環境と、自国が月面・火星基地構想を推進している理由から、CELSS 研究に携わる NASA および大学の農学系研究者は真剣であり、過去 20 年間着実に研究成果を出している。NASA では Kennedy Space Center (KSC と略)、Lyndon B. Johnson Space Center (JSC と略)、Ames Research Center (ARC と略) の 3 研究所で植物関連の研究を行っており、大学に対しても多額の研究費を与えている。

米国には人工光利用型の植物生産施設（いわゆる植物工場）で稼働している例はほとんどない。補光温室や水耕栽培（図 2）はかなり普及しているが、日本のような植物工場ブームはみられない。日本の植物工場は施設園芸の一形態であるため栽培作物が限られている。大部分は葉菜類と薬用植物で、果菜類、穀類、根菜類などは採算が合わないという理由で十分な基礎研究がなされていない。一方米国の CELSS 研究では、人間の栄養分すべてを植物から摂取したいとする発想から対象作物の種類が幅広い。穀物、イモ類、豆類、種実類に関する人工光下での栽培事例が豊富であり、植物工場にも応用できる植物生産研究が数多く存在する。今後、CELSS または植物工場関連で植物栽培に取り組む場合は、米国における研究成果を参考にし、研究動向を把握しておくのが望ましい。



図2 北米における大規模な補光栽培施設(水耕栽培でレタスを栽培)の例

米国では 15 年以上前に CELSS で栽培すべき作物としてコムギ、イネ、ジャガイモ、サツマイモ、ダイズ、ピーナッツ、レタス、テンサイが選ばれた (Salisbury, 1991)。一部ビタミンは外部から補給するという前提であるが、この 8 作物で必要栄養素を供給できる (もちろん他にも 30 種以上の作物が有力候補として挙げられている)。そして NASA と

大学が分担して栽培方法，成長量の測定，ガス交換等のデータを集める研究が開始された。KSCのほか，大学ではパデュー大，ユタ州立大，ウィスコンシン大，タスケギー大などが実験を担当してきた。現時点ではイネの生長データおよび栽培方法の報告はされておらず，実質的には7作物である。イネを重視しない理由は，環境調節，栽培管理の難しさもあるが，米国人で米を主食にする人の割合が少ないのが最大の理由であろう。この8作物は，しばしば必要栽培面積算定の根拠として引用されている。しかし1990年代中頃から，候補作物を見直す動きがでてきた。そして宇宙飛行士，ベジタリアン（菜食主義者）とそのメニューに精通している栄養士・調理士が参加して，ベジタリアンダイエットからメニューを学び，作物候補を再考することを行った。栄養価，多様なメニューに利用できること，加工の難易が重要とされた。ベジタリアンメニューを参考にする動きには，CELSSで家畜を育てるのは難しいという理由がある。アジア諸国の食事を参考にしようという意見も出た。しかし食品の選択は食文化の影響を受けるので，魚から動物性タンパクを摂取しようとする発想は少ないようである。

作物の選定では，栄養価を満足する条件のもとで栽培空間を最小にすることが重要視されてきたが，今後は，乗員が数ヵ月から数年間満足できるような料理を供給できる作物群が望まれる。実際，JSCのBio-Plex（後述）では，8作物に必要な栽培容積を越える容積を栽培に割り当てる計画であり，数種の作物を加えることができる。コーネル大では，約40種類の作物について栄養価，生産性，水耕栽培の容易さ，ベジタリアンメニューに利用できるかという観点から，パクチョイほか数種の作物の栽培試験をしている。またパデュー大とタスケギー大では，新たに数種の作物について調理，加工方法を研究している。品種の選抜も重視されており，わい性で高収量の品種，乾物重量当りの栄養素含有量の高い品種，可食部の割合が大きい品種，光飽和点が高い品種，炭酸ガス施肥が有効な品種を見いだす作業が行われている。

藻類はガス浄化作用と食糧のメリットを持つため，70-80年代にNASAで栽培方法や栄養成分の研究が行われた。その後も新品種の検討や栽培装置の研究がされているが（Gale et al., 1989; Javanmardian and Palsson, 1992），他国に比べてこの分野の報告は少なく，藻類を食糧に加えるという考え方は少ない。

最近では，火星までの有人飛行および火星滞在を想定して，食糧供給に必要なエネルギーおよび物資の算定が行われている（Drysdale and Bugbee, 2003）。幾つかのシナリオを想定して，例えば，植物種ごとに栽培に必要な空調や照明のエネルギーや，水や資材の重量を計算している。収穫物の貯蔵，加工，調理に要するエネルギーや資材の量も計算している。その結果から，栽培法の見直しも提案されている。例えば水耕栽培を行う場合，栽培方法によって培養液量が大きく異なることから，なるべく水深が浅くてすむ栽培法が求められている。

4．宇宙における植物生産
4．1 宇宙特有の環境要因
4．1．1 宇宙放射線

宇宙空間は地球と異なり，太陽からの放射線(宇宙放射線)を吸収する大気圏がない。そのため人間は宇宙服を着ても長時間は活動できない。長期間生活する建築物は放射線を防御する構造が必要である。しかし天井や壁だけで放射線を防ぐのは難しい。例えば月面では地下 2m 以下に建設するか，地上に建設するならば周囲を 2m 以上の岩石で覆うことになる(図 3；清水建設宇宙開発室，1999)。植物は人間よりも放射線に強く，その影響は 1/10 から 1/100 であるという説もあるが，栽培管理を人間が行うことを想定すると，植物生産にも宇宙船の居住空間の建築構造を適用することになる。



図3 レゴリス表層下に居住空間を造る月面基地のイメージ
(清水建設宇宙開発室作成)

4.1.2 真空

宇宙空間はほぼ真空(火星は6~9kPa)であるため,内部圧を地球の平地並みの101kPa(1気圧)に維持するためには,漏気のない気密性の優れた構造が要求される(図4)。

もちろん全圧を1気圧にできれば問題ないが,実は植物は大気の主成分である窒素ガスを直接利用してはいない。必要なのはCO₂ガスとO₂ガスであり,この合計分圧は約21kPaである。この2成分に水蒸気を加えた約23kPaの全圧の空気で栽培してもよいし,不活性ガス(HeやAr)で全圧を維持してもかまわない。ガス制御の面ではむしろ低圧の方が有利な点もある(図5)。

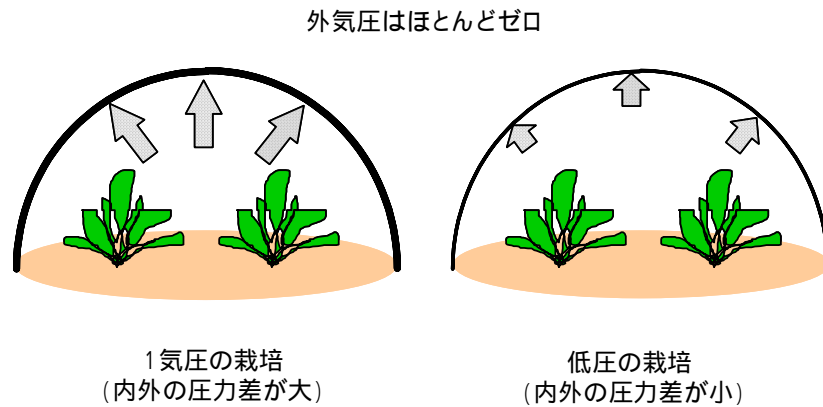


図4 宇宙空間で植物栽培を行うには

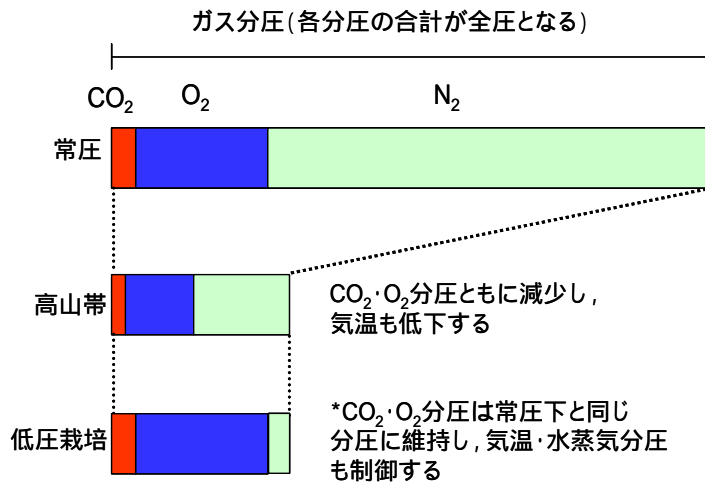


図5 低圧環境を利用する植物栽培の考え方

そこで筆者らは低圧下で植物を栽培する試みを行っている(Goto et al., 1995, 1996; Iwabuchi et al., 1996)。図6は植物を長期間, 低い全圧下で栽培する装置の一例である。

結論を言うと、0.5 ~ 0.2 気圧でも、CO₂ ガス、O₂ ガス、水蒸気を適値に維持すれば、植物生産は可能である（図 7）。また最近の筆者らの研究では、0.1 気圧でも、常圧と同等の、発芽、開花および種子生産が可能であることを明らかにしている（Goto et al., 2002; Arai et al., 2003）このことから、筆者は、おそらく平地で栽培される作物の多くは、0.2 気圧程度までの低圧下で問題なく世代交代を含めた生活環を行えると考えている。

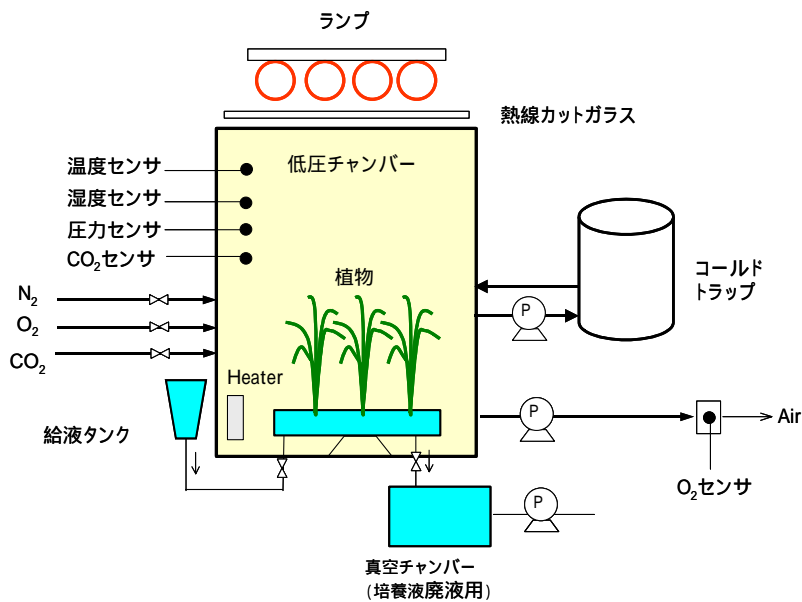


図6 低圧環境で植物栽培を行う実験システムの概要

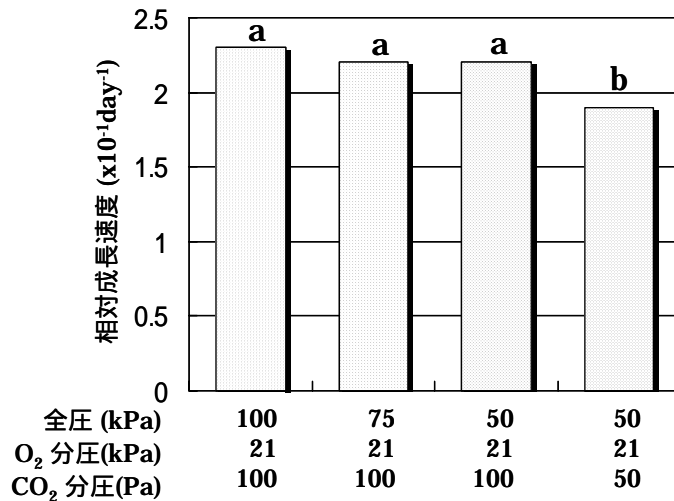


図7 低圧環境におけるホウレンソウの成長
(気温・水蒸気分圧は一定の条件で実験)

過去にはドイツ (Daunicht and Brinkjans, 1992) とフランス (Andre and Massimino, 1992) で同様な研究を行っていた。最近では、米国の KSC (図 8; Fowler et al., 2002),

カナダの Guelph 大学 (図 9 と 10; Chamberlain et al., 2002) でも低圧植物栽培の研究が活発である。両グループとも数年前から研究に着手しており、高額な資金を投入して低圧で植物を育成する装置の開発を行っている。これらの技術水準は高いものの実際の植物実験はあまり手がけておらず、植物実験のデータは日本が最も豊富である。これからは日本、米国、カナダの研究動向に注目したい。



図8 米国KSCにおける低圧植物育成装置
(右が低圧チャンパー本体, 左がこれを収納する人工気象器)



図9 カナダGuelph大学の低圧植物育成装置
(Walk-inチャンパー型, 1台)



図10 カナダGuelph大学の低圧植物育成装置
(小型チャンパー, 5台)

4.1.3 光

宇宙でどうやって光合成に必要な光を得るのだろうか。太陽光の明暗周期が火星では約24時間であるが、月面では約29日、地球軌道上では約90分である。いずれにしても放射線が強い、気温が生育適温でないという理由から、光合成の光エネルギーを太陽光から直接得ることは困難である。したがって太陽エネルギーを電気エネルギーに変換し、人工光源で照射する。従来から植物実験には波長組成が自然光に近いメタルハライドランプ、もしくは電気変換効率の高い高圧ナトリウムランプが使用されてきた。しかし宇宙では、限られた空間に効率良く照明するために、照明効率、均一性、安全性といった観点が重視されるため、高輝度発光ダイオード(LED)や小型高効率蛍光ランプが使われる。LEDの特長は波長域が狭いことで、赤、青、緑などの複数色のLEDチップを組み合わせると、植物に最適な波長組成の作出、および波長制御により微小重力下における光形態形成反応の調節が可能になるかもしれない。そこで筆者らはLEDを用いて穀類や野菜を栽培する研究に取り組んでいる(図11; Goto et al., 2000; 後藤・辻村, 2000)。

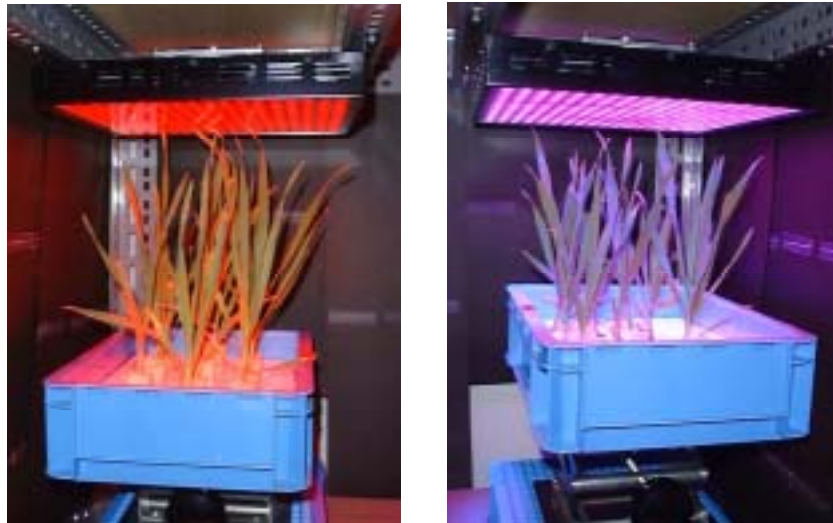


図11 最も生育に適する光質(赤,青,遠赤の光量割合)を調べる植物実験
(写真はオオムギの苗)

宇宙や閉鎖空間において人工光で植物を栽培する取り組みは、植物工場(後述)における光環境と植物に関する研究の応用として、日本と米国を中心に実施されている。今までの研究から、太陽光の波長組成が植物に最適であるとは言えないこと、すなわち太陽光に模擬した光源を開発する必要はないことが明らかになっている。そして、植物種および生育ステージに合わせて必要な波長域を効率よく組み合わせるのが望ましいという成果が多数報告されている。生育ステージには大きく分けて、葉を増やす(栄養成長)ステージと、花芽をつけて実を作る(生殖成長)ステージの2つがある。葉を食料とする葉菜類は、栄

養成長期だけで栽培が完了するものであり、発光効率の高い赤色光（600～700nm）を中心として5～20%程度の青色光（400～500nm）を加える光源が適値であることが多い。一方、花芽をつける時期を経て種実を食料とする果菜類、穀類、豆類などは、ある程度の割合で遠赤色光（700～800nm）を必要とし、青色光は生育ステージに応じての増減調節が必要である。いずれにしても、人工光だけであらゆる植物の栽培が可能である。

4.1.4 重力

重力は宇宙において植物を育成するための最大の環境要因である。火星（0.37G）や月面（1/6G）では低重力が存在するので、地上で開発された養液の供給・循環の基本技術は実現可能である。しかし1Gの地上とは重力の大きさが異なるため、さまざまな問題が生じると予想されるため、IISで実施される重力植物学研究の成果を最大限に取り入れることが不可欠である。またIIS等において、重力を0から1Gの間で可変できる人工重力装置を利用して火星や月面のシミュレーション実験も必要になる。

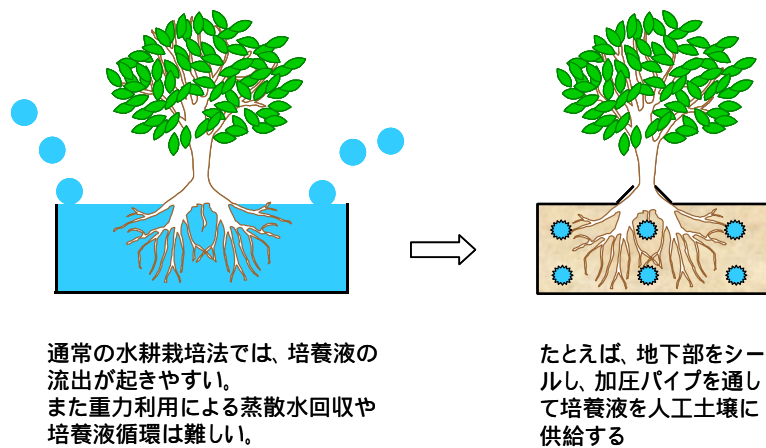


図12 微小重力下における培養液供給の問題

微小重力下での植物栽培の難点は水耕栽培における培養液の供給である（図12）。そこでコロラド州立大とウィスコンシン大が培養液の供給システムを開発した。これは多孔性膜と多孔性チューブを使用して培養液を空气中に飛び散らすことなく植物根に付着させる方法である。その後KSCでセラミック製多孔性チューブを用いる栽培システムが開発がされ、動作確認実験も行われている。副産物として、この方法は水ポテンシャルの制御が可能なので水分ストレス研究に応用されている。

微小重力下での植物栽培は、培養液供給の問題だけでなく、重力反応が異なるので地上と同じ生長を得るのは難しい、という意見がある。微小重力環境のIISでは、植物栽培は大きな空間を必要とする反面、乗員の滞在期間が短いので食糧を自給するメリットが少ないため、植物生産そのものは重視されていない。一方、月面および火星では、CELSSを構築するには植物生産は不可欠と考えられている。その場合、重力が存在するので培養液や除湿水などの液体は下方に流れるため、微小重力特有の制御上の問題は解消される。現在のCELSS植物生産研究の多くは重力の存在を前提に進められている。

4.2 宇宙型の植物工場

人工光型植物工場という工場をご存じだろうか。空調により温湿度，CO₂ ガス濃度を制御した室内で，太陽光の代わりに人工光を用い，土壌の代わりに養液法を用いて栽培するハイテク農業である（図 13）。日本はこの分野の研究では世界のトップクラスである。この生産法は自然条件の影響を受けないため計画生産しやすい，好適環境下で生育するため成長が早く栽培期間を短縮できる，土壌の汚染や肥沃度の低下を心配する必要がないというメリットがある。また，播種・移植・収穫の機械やロボットを導入しやすいと考えられている。



図13 植物の工場的栽培(写真は実験室に設けたミニ施設)

農業としてみると，投入エネルギーコストが高く売値が低い作物ではなかなか採算は取れない。しかし栽培技術は多くの作物，具体的には葉菜類，果菜類，穀類，イモ類，豆類などで確立されている。宇宙における作物生産施設はまさに人工光型植物工場の宇宙版になるであろう。

5．閉鎖生態系の実証実験

人間を含む CELSS の実証実験としては、1990 年代前半に行われたロシアの BIOS-3、米国アリゾナ州のバイオスフェア 2 が有名である。両者は、一定期間人間が系内に滞在し、植物を栽培し自給自足の生活を試みる点は一致しているが、他の点では大きな違いがある。前者は宇宙応用を想定した人工的な実験系であり、食糧として必要最小限の植物種と人間から構成される系であった。後者は地球の生態系に近づけるために、土壌を利用して気象条件の異なる区を設け、多数の植物種、家畜、微生物を生息させていた。このため、制御が複雑になりさまざまな問題が生じたと言われている。宇宙に作る人工生態系は人間活動の支援が目的であるため、初期段階は、必要最低限の生物種だけを入れて系の維持を図ることになるであろう。

米国の NASA では火星等への長期有人飛行を想定した Advanced Life Support Project (ALS) を展開している。JSC が核になり、ARS と KRC と共同で、さらには大学等と連携して植物栽培、物理化学的な物質循環システム、食品加工などの研究開発を行っている。そして JSC では BIO-Plex という CELSS 実証実験施設を建設中である (図 14, 15, 16; Villarreal and Tri, 2001; Barta and Castillo, 2001)。これは植物栽培、水処理、廃棄物処理、ガス再生、食品加工などの技術をまとめた CELSS 実証実験施設である。物理化学的再生処理をベースに生物的处理の機能を加えたシステムで、植物生産施設と 4 名 (最大 8 名) の人間が居住できる施設を持つ。具体的には 5 つないしは 6 つの円筒形チャンバー (直径 4.6m、長さ 11.3m、窓はない) をトンネルで接続する。2 つが植物生産用、あとは居住用、制御・実験室用、再生処理施設用である。現在幾つかのモジュールが完成している。植物生産チャンバーの栽培作物はすでに実績のある作物が中心だが、現在各大学等で行っている作物の選定で適当な作物が見つければ、それらを含める予定である。予算の関係上なかなか開発進度が遅いようであるが、現在は施設内部の詳細設計を行っている。完成後は 5 年間かけて、物質循環システムの性能試験、および植物と人間を含めた長期間の実証実験を行う予定である。

現在、日本でも (財) 環境科学技術研究所 (青森県六ヶ所村) が閉鎖系実験を計画中である (Tako et al., 2003)。ここでは、居住施設、植物栽培施設、家畜施設と物理化学的な物質循環システムが結ばれており、各施設の物質収支を測定しながら長期間の閉鎖実験を行うことができる。2005 年には人間 1 人、ヤギ数頭および植物を入れた実験が開始される予定である。詳しくは当研究所の研究報告やホームページを参照されたい。

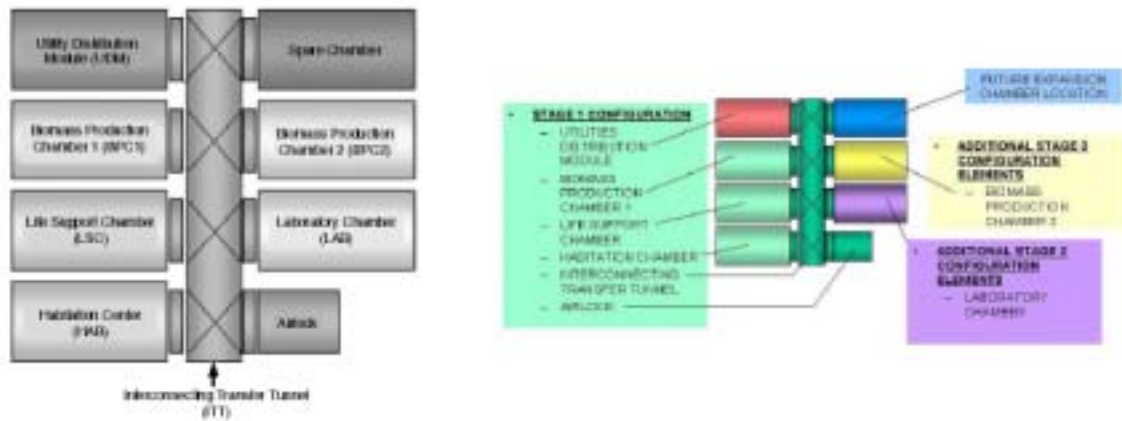


図14 JSCのBIO-Plexの全体図(8つの円筒型モジュールが中央の1本の連絡部で接続される。左図が概要、右図がモジュールの説明)



図15 BIO-Plexの写真(左図がモジュール外観、右図が1モジュールの内部)

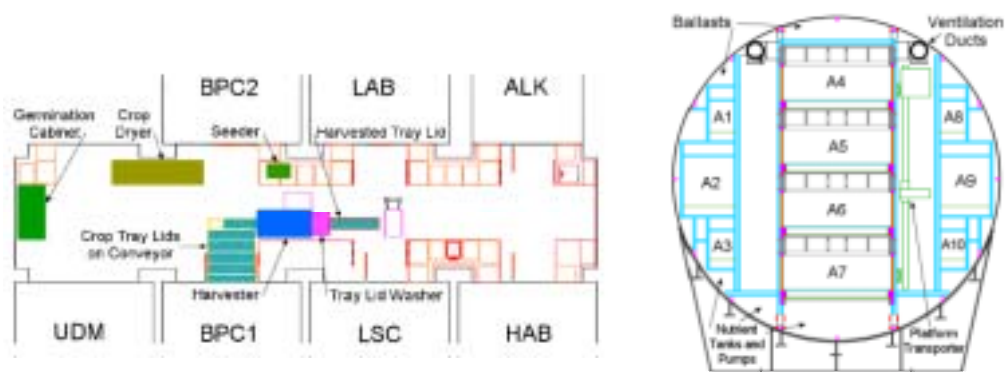


図16 BIO-Plexの図面

左図:各モジュールとの連結部(通路)に、播種機、収穫機、育苗装置などを設置する様子が描かれた平面図。

右図:植物を生産するモジュール「植物生産チャンバー」BPC1とBPC2の断面図。モジュール内中央は3段式、側面は2段式の栽培ユニットを搭載。

6 . おわりに

宇宙を利用する植物研究は、現在までのところ、重力植物学研究が中心である。特に日本はその性格が強い。しかし米国を中心とする諸外国では、植物を含めた人工生態系をどのように宇宙活動に応用するか、そして生態系をどのように造るか、という研究がかなり長い間行われている。各国とも現在はもちろん重力研究が主であるが、重力に関する基礎研究が完了したとして、その知見だけで微小重力空間で容易に植物栽培が可能になるかと問われれば、その答えはノーである。また植物反応は、微小重力環境と重力が存在する月面や火星などの低重力環境では大きくことなるため 栽培法や環境調節法も異なってくる。その意味で、今後の宇宙開発研究において、植物を長期間宇宙空間で生育させる研究はますます必要になるであろう。

宇宙において人間と植物を中心とする人工的な閉鎖生態系を作るためには、ここで紹介した植物研究だけでなく、物質循環とリサイクル、系内で発生・蓄積する微量有害ガスの除去、微生物の問題、閉鎖系システムの制御、収穫物の貯蔵、食品加工、農業用ロボットを導入など多岐にわたる基礎研究が必要である。そこは農学的、生物学的な研究と工学的な研究が結びつく研究領域である。また、これらの研究を通じて生まれる技術の一部は、地上の生態系研究や環境問題の解決にも応用できるであろう。宇宙で植物を育てる研究は、植物と環境の関係を環境工学的にとらえて、一見過酷と思われる宇宙環境を積極的に制御し、最適な生育環境を創造するという研究であり、今後の発展が期待されている。

7 . 参考文献

- Andre, M. and Massimino, D. (1992). Growth of plants at reduced pressures: experiments in wheat--technological advantages and constraints. *Adv. Space Res.*, 12(5), 97-106.
- Arai, Y., Goto, E., Omasa, K. (2003) Growth and development of *Arabidopsis thaliana* under hypobaric conditions. *Proc. of 33rd International Conference on Environmental Systems, SAE Technical Paper Series, 2003-01-2478.*
- Barta, D. J., Castillo, J. M. (2001) Preliminary Designs of the Biomass Production System for the Bioregenerative Planetary Life Support Systems Test Complex. *SAE Paper 2001-01-2319.*
- Chamberlain, C.P., Graham, G.T. and Dixon, M.A. (2002) Analysis of plant water relations under variable pressure: Technical challenges. *Proceedings of 32nd ICES, SAE Technical Paper Series, 2002-01-2382.*
- Daunicht, H.J. and Brinkjans, H.J. (1992). Gas exchange and growth of plants under reduced air pressure. *Adv. Space Res.*, 12(5), 107-114.
- Drysdale, A., Bugbee, B. (2003) Optimizing a Plant Habitat for Space: A Novel Approach to Plant Growth on the Moon. *SAE Technical Paper Series, 2003-01-2360.*
- Fowler, P.A., Yeralan, S., Mu, Y., Bucklin, R., Rygalov, V., Wheeler, R.M. and Dixon, M.A. (2002) Monitoring and control for artificial climate design. *Proceedings of 32nd ICES, SAE Technical*

Paper Series, 2002-01-2286.

- Gale, J., D.T. Smernoff, B.A. Macler, and R.D. MacElroy. (1989) Carbon balance and productivity of *Lemna gibba*, a candidate plant for CELSS. *Adv. Space Res.* 9(8):43-52.
- Goto, E. (1997) Environmental control for plant production in space CELSS. In *Plant Production in Closed Ecosystems* (eds. E. Goto et al.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 279-296.
- Goto, E., Iwabuchi, K., Takakura, T. (1995) Effect of reduced total air pressure on spinach growth. *J. Agric. Meteorol.* 51(2): 139-143.
- Goto, E., Ohta, H., Iwabuchi, K., Takakura, T. (1996) Measurement of net photosynthetic and transpiration rates of spinach and maize plants under hypobaric condition. *J. Agric. Meteorol.* 52(2): 117-123.
- Goto, E., Tsujimura, J., Takahashi, H., Kitaya, Y., Saito, T., Tani, A. (2000) Development of a LED lighting system for growing plants in space. *Proc. of The XIV CIGR World Congress 2000*, Nov.28 - Dec.1, 2000, Tsukuba, 1779-1802.
- 後藤英司, 辻村淳之助. 2000. 宇宙における植物育成実験用光源と光環境の制御, IGE シリーズ 28「宇宙植物科学の最前線」, 東北大学遺伝生態研究センター, 94-102
- Goto, E., Arai, Y., Omasa, K. (2002) Growth and development of higher plants under hypobaric conditions. *Proc. of 32nd International Conference on Environmental Systems*, SAE Technical Paper Series, 2002-01-2439.
- Iwabuchi, K., Goto, E., Takakura, T. (1996) Germination and growth of spinach under hypobaric conditions. *Environ. Control in Biol.* 34(3): 169-178.
- Javanmardian, M and B.O. Palsson. (1992) Design and operation of an algal photobioreactor system. *Adv. Space Res.* 12(5):231-235.
- 新田慶治・木部勢至朗. (1994) 宇宙で生きる, オーム社, pp146.
- Salisbury, F.B. (1991) Lunar farming: achieving maximum yield for the exploration of space. *HortScience* 26(7):827-829.
- 清水建設宇宙開発室. (1999) 月へ, ふたたび - 月に仕事場をつくる, オーム社, pp150.
- Tako, Y., Honda, G., Komatsubara, O., Shinohara, M., Arai, R., Nitta, K. (2003) Matching of Gas Metabolism among Crop Community, Human and Animal in the CEEF. *SAE Technical Paper Series*, 2003-01-2452.
- Villarreal, J. D. and Tri, T. O. (2001) Bioregenerative Planetary Life Support Systems Test Complex (BIO-Plex): Progress to Date. *SAE Paper* 2001-01-2317.
- Wheeler, R.M., Stutte, G.W., Subbarao, G.V. and Yorio, N.C. (2002). Plant growth and human life support for space. In *Handbook of plant and crop physiology* (ed. M. Pessaraki), Marcel Dekker, Inc., New York. 925-941.