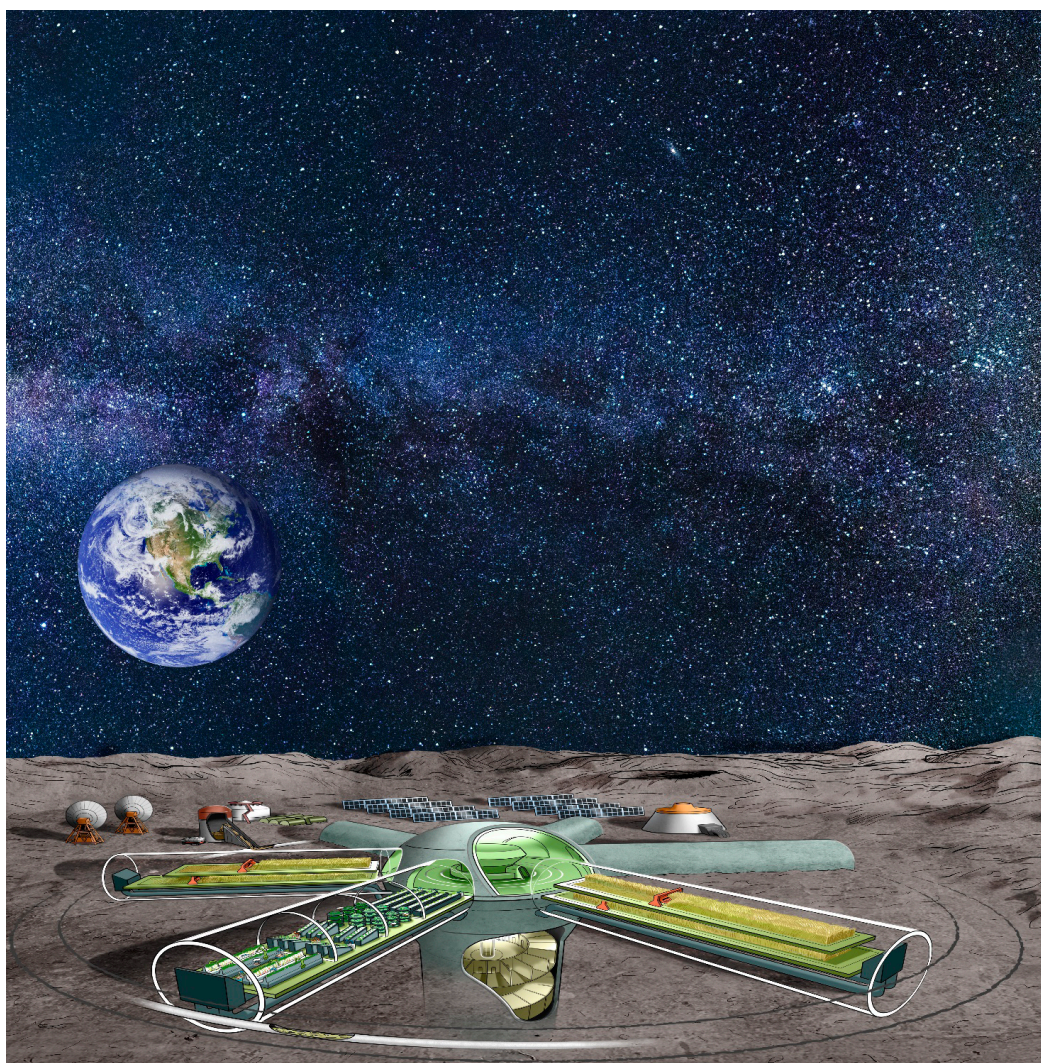


月面農場ワーキンググループ検討報告書 第1版

Report of Lunar Farming Concept Study Working Group 1st

月面農場ワーキンググループ

Lunar Farming Concept Study Working Group



2019年6月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

月面農場ワーキンググループ検討報告書 第1版

ABSTRACT.....	1
概要.....	1

1. はじめに	事務局
1.1. 月面農場ワーキンググループ設立趣意	3
1.2. 背景.....	3
1.3. 検討の進め方	4
1.4. 検討体制.....	4
1.5. 前提条件、仮定.....	6
1.6. 月面農場コンセプト	7
参考文献.....	7

2. 宇宙農業の過去、現在	篠原正典（帝京科学大学 生命環境学部自然環境学科 准教授） 矢野幸子（JAXA 有人宇宙技術部門 きぼう利用センター 主任研究開発員）
2.1. 宇宙農業の歴史	9
2.2. 藻類の利用	9
2.3. 各国の宇宙農場	10
2.3.1. ロシア(旧ソ連を含む).....	10
2.3.2. 米国.....	11
2.3.3. 欧州.....	15
2.3.4. 日本.....	16
2.3.5. 中国.....	19
2.3.6. その他.....	19
2.4. 低重力での植物生理.....	20
2.5. 国際宇宙ステーションでの植物栽培実績	20
引用文献.....	22

3. 作物種の選定	後藤英司（千葉大学大学院 園芸学研究科 教授） 宮松雅子（シダックス総合研究所 管理栄養士）
3.1. 月面で日本人に必要とされる栄養量	25
3.1.1. 月面で日本人に必要とされる栄養量の前提	25
3.1.2. エネルギー及び栄養素の指標	26
3.2. 栽培作物候補の選定	26
3.2.1. 植物工場における作物生産	26
3.2.2. 作物種間差.....	27
3.2.3. ウイルスフリー化.....	27
3.2.4. 形質.....	27
3.2.5. 機械化、ロボット化、ICT 利用.....	27
3.2.6. 選定した候補作物の特徴	28
3.3. 月面農場における1日の摂取量の決定	29
3.4. 必要な栽培面積.....	30
3.5. 過剰となる可能性のある栄養素	30
3.6. 不足の可能性のある栄養素	31
3.7. 作物種を用いた食事イメージ	32

3.8. 作物種のための食材による栄養摂取の限界	33
3.9. まとめ	33
引用文献	34

4. 栽培システム

北宅善昭（大阪府立大学大学院 生命環境科学研究科緑地環境科学専攻 教授）
渡邊博之（玉川大学 農学部生命化学科 教授）

4.1. 月面農場における作物栽培環境制御の基本的留意点	35
4.1.1. 光環境	35
4.1.2. 温度環境	35
4.1.3. 湿度環境	35
4.1.4. CO ₂ 環境	35
4.1.5. 気流環境	36
4.1.6. 根圏環境	36
4.2. 宇宙微小重力下での植物栽培	36
4.2.1. 宇宙微小重力下での植物栽培における環境制御の問題点	36
4.2.2. 微小重力が植物葉の熱・ガス交換におよぼす影響	37
4.3. 宇宙環境での植物栽培におけるその他の留意点	40
4.4. 栽培システム機能、構造	40
4.5. 栽培方法・栽培条件・管理	41
（別添）作物種ごとの成長の特徴・栽培カレンダー	42
参考文献	52

5. 高効率食料生産

近藤直（京都大学大学院 農学研究科地域環境科学専攻 教授）
大場隆之（東京工業大学 未来産業技術研究所 教授）
伊藤浩之（東京工業大学 未来産業技術研究所 准教授）
鹿島光司（株式会社 朝日工業社）
深水克郎（東京工業大学 未来産業技術研究所）

5.1. 共通技術	53
5.2. 各栽培品目の栽培方式	53
5.3. 各栽培品目の生育過程分割と適切なモニタリング項目	54
5.3.1. イネ（バッチ方式）	55
5.3.2. ダイズ（バッチ方式）	56
5.3.3. サツマイモ（連続方式）	56
5.3.4. ジャガイモ（連続方式）	58
5.3.5. レタス（連続方式）	59
5.3.6. トマト（多段棚）	60
5.3.7. キュウリ（多段棚）	61
5.3.8. イチゴ（個別）	61
参考文献	63

6. 持続的な物質循環システム

中井勇介（農業食品産業技術総合研究機構 九州沖縄農業研究センター 園芸研究領域）

遠藤良輔（大阪府立大学大学院 生命環境科学研究科）

小島昌治（株式会社 翔栄）

中野明正（農林水産省 農林水産学術会議事務局）

豊田剛己（東京農工大学大学院 農業研究院生物システム科学部門）

概要	65
6.1. はじめに	65
6.2. 月面入植当初における元素の供給	65
6.3. 栽培システムと居住区の循環	66
6.3.1. 想定される資源循環システム	66
6.3.2. 微生物の利用と増殖制御	67
6.3.3. 培養液の循環利用	67
6.4. 微生物を利用した物質変換	67
6.4.1. メタン発酵	68
6.4.2. 堆肥化、残渣の利用	70
6.4.3. 尿尿、糞便の再利用	70
6.5. 月面鉱物の資源としての利用	71
6.5.1. 模擬月レゴリスの保水力	72
6.5.2. 月レゴリスの物理性の改善が見込める資材	72
6.5.3. 模擬月レゴリスを用いた作物栽培試験	73
6.5.4. レゴリスの再利用	74
6.6. 熱化学的処理	74
6.7. 月面における長期的な資源循環に関する今後の展望	74
6.8. 今後の課題	76
参考文献	76

7. 月面農場システムの検討

宮嶋宏行（国際医療福祉大学 総合教育センター 教授）

7.1. はじめに	77
7.2. 月面農場設計の前提条件	77
7.3. 物質収支計算	78
7.4. 生命維持システムの設計	79
7.4.1. 計算手順	79
7.4.2. 生命維持システムの構成	80
7.4.3. 食料生産システム	81
7.4.4. 資源再生システム	81
7.5. システム設計案の比較	81
7.6. まとめ	87
付録 7A：生化学量論	87
付録 7B 等価システム質量	88
付録 7C 生命維持システム要素技術候補	89
引用文献	91

8. 今後の課題

事務局

8.1. 低重力での植物栽培について.....	93
8.2. 機器構成、装置	93
8.3. 照明・空調などの設備.....	93
8.4. 種苗	95
8.5. 食料・資源の拡張.....	95
引用文献	95

9. まとめ

事務局

9.1. 月面農場ワーキンググループ活動のまとめ	97
9.1.1. 検討の背景	97
9.1.2. 月面農場の全体像.....	97
9.1.3. 栽培システム.....	98
9.1.4. 高効率食料生産.....	99
9.1.5. 物質循環システム.....	100
9.1.6. その他検討事項.....	100
9.2. 宇宙探査イノベーションハブの研究課題としての成果	100
9.3. 最後に	101
謝辞	101

事務局

JAXA 宇宙探査イノベーションハブ 副ハブ長 川崎一義

JAXA 宇宙探査イノベーションハブ 主任研究開発員 布施哲人

シダックス総合研究所 高戸良之

シダックス総合研究所 管理栄養士 宮松雅子

月面農場ワーキンググループ検討報告書 第1版

月面農場ワーキンググループ

Report of Lunar Farming Concept Study Working Group 1st

Lunar Farming Concept Study Working Group

ABSTRACT

JAXA space exploration innovation hub center has been studying as working group activity about the concept of the realization of “Lunar Farming” assuming plant cultivation on the moon, aiming for future food production in the outer space.

The concept study members is organized by professionals in universities and private experts who are interested in lunar farms examined the lunar plant factory concept and the members are divided into four groups of cultivation technology, unmanned technology, recycling, and overall system.

In this report, we will report the results of study for each technical field about the concept of lunar plant factory which JAXA/Japan considers.

Keywords: JAXA Publication, Lunar Farming,

概要

JAXA 宇宙探査イノベーションハブは、将来の宇宙での食料生産を目指し、月面を想定した「月面農場」の実現に向けたコンセプトを検討するワーキンググループ活動を行ってきた。

検討委員は、月面農場に関心が高い大学・民間有識者を検討委員として協力を仰ぎ、栽培技術、無人化技術、リサイクル、全体システムの4つのグループに分け検討を行った。

本レポートでは、JAXA/日本が検討する月面農場のコンセプトからそれぞれ技術分野毎の検討結果について報告する。

1. はじめに

1.1. 月面農場ワーキンググループ設立趣意

国際宇宙ステーション(ISS)が完成し人類が常駐するようになって8年(ワーキンググループ設立時)が経過し、有人宇宙探査活動は次の段階、即ち、月を含む更に遠方の天体へ、人類の生存圏・活動領域を広げる段階にある。人類の活動領域は、地球上では、まず探検、次に開拓、最終的には定住というステップを取り拡大してきた。現在の宇宙探査活動は、このステップに例えるなら、ISSのある地球低軌道は定住段階にあり、次の目標である月は探検段階から開拓段階へ進みつつあると言えることができる。しかしながら、様々な理由によりこの段階で開発が世界的に停滞しているのも事実である。

この現状を打開するため、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構は、宇宙探査イノベーションハブを立ち上げ、地上技術とのさらなる連携による施策を開始した。具体的には、今までの低軌道、静止軌道を利用した宇宙開発と違い、「地面の存在」という地球上との共通点に着目し、「地上の優れた農業・バイオ技術の応用と更なる技術革新」「地産地消(可能な限り地球からの補給を最少にする自給自足型の宇宙システム)」をキーワードにかかげ、宇宙だけでなく、地上におけるイノベーションを起こすような新たな技術を獲得するとともに、将来の有人探査拠点の「開拓」を現実のものにしようとしている。

月などの他天体に人類の生存圏・活動領域を拡大することは、新たな宇宙利用産業の創出につながると期待されており、国際的にも月や小惑星の資源利用についての議論が高まっている。今後10~20年の宇宙探査は、従来の宇宙機関や関連企業だけでなく、月面での活動を行いたい国や企業を顧客とした新たなビジネスが構想されつつある。このように、民間企業を含む多様な研究者や技術者が参画し、国際共同・競争による月・火星への探査に向けた活動を中心に進むことが期待される。

本ワーキンググループは、将来、人類が月面で定住することを想定し、人類が安全かつ持続的に定住することを可能とする月面農場システムの概念検討を行うものである。過去にも同様の検討は行なわれたことはあったが、その後の植物工場やバイオ技術の目覚ましい進展により、これら地球上の最先端の農業・バイオ技術を適用した月面農場の概念検討は世界的にみても新しい試みである。本ワーキンググループは、これらの検討を適切かつ効果的に進めることを目的として、本設立趣旨に同意し、宇宙・月面に関する構想、または地上の植物工場等の設計について知見を有する有識者の意見を取りまとめるために設置するものである。

1.2. 背景

(1)探査ハブの活動全体、月面農場ワーキンググループの発端と目指すところ

平成27年4月、JAXAを含む独立行政法人は、「国民経済の発展その他の公益に資するため研究開発の最大限の成果を確保すること」を目的に「国立研究開発法人」へと移行した。同時に国立研究開発法人を中核としたイノベーション創出が、国家重点施策として位置づけられた。これらの政策の動きに対応して、JAXAでは、平成27年4月1日より「宇宙探査イノベーションハブ」と「次世代航空イノベーションハブ」を新たな組織として設置し、オープンイノベーション型の研究活動に取り組んでいる。

探査ハブでは、研究の初期の段階から「地上における企業の研究開発ニーズ」とJAXAが宇宙探査で必要とする技術ニーズをマッチングさせることで、JAXAでの研究成果を宇宙だけでなく、より速やかに地上におけるイノベーションに繋げるような研究システムの構築を目指している。特に、これまで宇宙とは関係のなかった地上の技術を宇宙にSpin-inさせて、宇宙探査に応用する過程で新たな技術を開発(Spin-up)し、その成果を宇宙だけでなく、地上においてもイノベーションを創出して速やかに社会に貢献(Spin-out)することを目指している。

これからの「宇宙探査」は、官・民間問わず、人類が月や火星に乗り出していこうという機運が高まっている。即ち、「重力」があり「地面」があり「物質」がある宇宙環境での探査活動技術が必要とされるが、これらの技術は「地球上」での技術開発が先行しており、特に日本には世界最先端の技術が存在している。探査ハブではここに着目して、民間のニーズとマッチした研究開発活動を進めている。

この研究課題の探索において、地上の植物工場関連の企業・大学から、宇宙農場や月面農場への応用を目指した提案が多く寄せられた。ところが、JAXA における月面農場の検討は約 30 年前に宇宙科学研究所で行われたもののその後具体的な検討はなされていないのが実情である。このため、この 30 年間に発展した地上の最先端の植物工場技術を導入して、今一度、月面農場システムを検討することを目的に、日本の植物工場研究の第一人者の協力を得て、我が国の月面農場ワーキンググループを立ちあげた(委員長 千葉大学 後藤教授)。この活動を通じ、月面農場のみならず、地上における植物工場にイノベーションを起こすような研究活動を展開していくつもりである。

(2)持続的な食料生産の要素技術

ISS は 2000 年の常時滞在開始以来、主に 3 人～6 人が滞在する有人施設として科学実験に利用されている。宇宙における食料生産について考えるにあたり、現状のところ、ISS への生活用品や食料の定期的な補給は欠かすことができないが、月等の他天体に人類の生存圏を拡大するためには地球からの補給量を減らすための技術開発が必要であり、食料生産についての検討が必須である¹⁾。これまで地球低軌道で実証されてきた乾燥食品やレトルト食品様の宇宙食のみに頼ることなく、持続的な食料生産を可能にする技術的課題を識別し、解決する必要がある。

持続的な食料生産のためには月・惑星の資源を利用して、空気、水、資材等を生産し再生する、いわば宇宙での地産地消型技術が必要である。食料となる作物を栽培するためには、光及び電気エネルギーの利用効率を増加させ、面積当たりの収穫量を上げること、物質循環を完結させるための廃棄物処理技術が重要となる。また宇宙飛行士の貴重な時間を節約するため、作業の自動化に関する検討も必要である。このように環境制御技術、無人化技術、リサイクル技術といった要素技術の革新的発展を目指す意味で、将来の社会課題の解決にもつながる取り組みである。

例えば、これまでの宇宙から地上へのイノベーションの例として LED と多段式養液栽培がある。LED は NASA が省電力に着目し、宇宙での利用を進めたことから地上での植物工場で有効な技術として広がった²⁾。多段式養液栽培についても限られた栽培面積でいかに収量を上げるかを宇宙用に追求した結果により、植物工場内での栽培様式として普及した。月面農場のようにリソースが限られた場面を想定した技術検討は、農業の社会的需要を先取りしているとも言える。宇宙という面積、電力、労働時間などリソースの制約がある場面で生かせる技術は、栽培設備、水、肥料などについても制約がある地上の環境での装置開発の要求を満足するものと重なる。このように制約のある状況における課題を解決する技術が、地上の社会課題の解決に及ぼす影響は大きい。本取り組みにより、現状の地球環境にとらわれず、極限環境での食料生産や資源・労働力制約の克服等に繋がることが期待される。

1.3. 検討の進め方

(1)ワーキンググループ、及びサブグループの設置

月面農場ワーキンググループ検討委員(以下、「委員」という。)は、月面農場に関心が高い大学・民間有識者を委員として協力を仰ぎ、委員をそれぞれの専門領域ごとに議論を深めてもらうため、栽培技術、無人化技術、リサイクル、全体システムの 4 つのサブグループに分けて検討を行った。

(2)議論経緯

平成 29 年 3 月にキックオフ会合を開催し、それ以降、6 月、9 月、12 月、平成 30 年 4 月、8 月にそれぞれワーキンググループ会合を行った。それぞれの会合に向けて各サブグループで議論を進め、ワーキンググループ会合にてそれぞれのサブグループの議論の進捗報告、及び各サブグループ間の意見のすり合わせを行った。

1.4. 検討体制

(1)月面農場ワーキンググループ検討委員を表 1.1 に示す。

表 1.1 月面農場ワーキンググループ検討委員

氏 名	所 属	専 門
伊藤浩之	東京工業大学 未来産業技術研究所 准教授	植物栽培システム、センサー、モニタリングシステム
遠藤良輔	大阪府立大学大学院 生命環境科学研究科緑地環境科学専攻 講師	植物系残渣(ごんさ)を対象としたメタン発酵によるエネルギー・肥料回収
大場隆之	東京工業大学 未来産業技術研究所 教授	植物栽培システム、センサー、モニタリングシステム
川井真	JA 共済総合研究所調査研究部 地域再生・基盤研究グループ主席研究員 多摩大学大学院 経営情報学研究科 客員教授	農業実務者とのインタフェース、政治哲学、地方行政論、社会保障論、医療政策論
北宅善昭	大阪府立大学大学院 生命環境科学研究科緑地環境科学専攻 教授	植物と環境のモニタリング及び制御、植物栽培を中核とした閉鎖生態系生命維持システム
小島昌治	株式会社 翔榮	農業コンサルタント
近藤直	京都大学大学院 農学研究科地域環境科学専攻 教授	動植物の生体計測、農産物や食品の生産、選別、加工、貯蔵等に関する生産技術
後藤英司 (委員長)	千葉大学大学院 園芸学研究科 教授	植物工場、植物環境工学、施設園芸
篠原正典	帝京科学大学 生命環境学部自然環境学科 准教授	動物行動学、環境科学技術研究所の閉鎖型生態系実験
中井勇介	国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 九州沖縄農業研究センター 園芸研究領域 施設野菜グループ 研究員	人工光型植物工場、植物生理学、植物生理化学
中野明正 (平成 29 年 9 月 まで)	国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構野菜花き研究部門野菜生産システム研究領域 生産環境ユニット長 (当時)	植物栽培、高度施設園芸
豊田剛己	東京農工大学大学院生物システム応用科学府 生態系型生産システム教育研究分野 教授	土壌学(土壌生物)、植物保護学
宮嶋宏行	国際医療福祉大学 総合教育センター 教授	閉鎖環境生態工学
矢野幸子	JAXA 有人宇宙技術部門 きぼう利用センター 主任研究開発員 文部科学省科学技術・学術政策研究所 (NISTEP) 科学技術予測センター 特別研究員	宇宙実験、植物栽培実験
渡邊博之	玉川大学 農学部生命化学科 教授	光植物生理学、植物環境制御学、植物工場

(2)検討委員のサブグループの構成

表 1.2 に示す。

表 1.2 月面農場ワーキンググループ サブグループ構成

サブグループ	論点	委員
①環境制御 (光、水、大気等の制御、それぞれ栽培植物に適した環境制御)	栽培の環境制御	北宅委員(取りまとめ) 渡邊委員
②無人化 栽培環境の維持、播種や収穫にいたるまでの植物モニタリング、無人化・ロボット制御技術等	播種・育苗 栽培・収穫	近藤委員(取りまとめ) 大場委員 伊藤委員
③リサイクル 土壌改良、限られた資源の再利用(リサイクル) 非可食部や排泄物などのリサイクル	リサイクル 土壌改良	豊田委員(取りまとめ) 中井委員 小島委員 遠藤委員 中野委員(29年9月まで)
④全体システム システム全体の検討	作物種検討 システム検討	後藤委員(取りまとめ) 篠原委員 矢野委員 川井委員 宮嶋委員

1.5. 前提条件、仮定

以下のような前提条件、仮定を置いて検討を進める。

- ①重力波地上の約 1/6(0.17G)
- ②月面拠点建設シナリオでは、無人、有人短期滞在、有人長期滞在、一般人の滞在と進むシナリオを意識し、月面農場検討は当面 6 名(4～8 名)滞在を想定する。
- ③作物種は、レタス等の葉物野菜のみならず、地球からの補給が遅れた場合でも基本的なエネルギー・栄養素は自給自足できる作物を対象とし、その種、必要量を試算する。
- ④月面で採取する物質(月の極地域から採掘した水、その他、酸素、リン、カリウム等)の使用、地上から持ち込む物資(月面で採取した物質の不足分、二酸化炭素、窒素等)の重量を必要最小限とし、全量リサイクル、必要量を試算する。
- ⑤必要な電力は太陽光発電で得られるとし、必要量を試算する。
- ⑥LED を利用する場合は、昼夜の長さは任意に調整できるとし、どのように調整すべきか検討する。太陽光を利用する場合は、放射線・隕石等に対する防御ができ、可視光、赤外線を透過する新素材でできた屋内での栽培を検討する。
- ⑦空気圧、分圧は、必要な圧力に調整することができるとする。
- ⑧必要な温度調整ができるものとする。
- ⑨廃棄物は、気体、液体、固体にかかわらず可能な限り放出せず、リサイクルする設定とする。

1.6. 月面農場コンセプト

- 本ワーキンググループは、将来の月、火星の探査、短期滞在、長期滞在を想定し、極力、地球からの補給に頼らず人類が生きていくために必要なエネルギー、栄養素の自給を目指した農作物の栽培システム(月面農場)構築を目指す検討を行うものである。
- 実現可能な構想であることを大前提とし、現在までに我が国が培ってきた最先端の農業技術、ロボット技術等を活用しつつ、更にそれらを一層発展・融合させ 2030 年代に実現しているだろう技術を外挿したものを積極的に活用することとする。
- 将来の農業従事者の減少により、素人でも篤農家と同じレベルで農業を営めるようになることが求められる時代が来る。そういった将来を見据え、機械やロボットを使った、農作業の負担軽減のための自動化、無人化を普及させるような技術を見出す。これはなるべく宇宙飛行士の労働を削減する必要がある月面農場と極めて親和性の高いものである。
- 検討にあたっては、地上の植物工場の更なる発展、課題解決に繋がるような技術について特に識別し、積極的に関与する。更には、必要に応じて、部分的な実証試験のコンセプトになることを目指すものとする。
- 検討にあたっては、過去の諸外国、青森県六ヶ所村(財)環境科学研究所における検討、実験を参考にしつつ、単なる踏襲ではなく、日本の独自性あるものを可能な限り盛り込むものとする。
- 想定する月面農場の規模は、より近い将来の初期段階を想定した少人数のケース(6 人)と、恒常的に人類が滞在することを想定した大人数のケース(100 人)の 2 つのパターンを仮定することとする。これらは少人数、大人数のそれぞれにおいて人数に変動があった際の比例計算の基礎となる人数とする。
- 月面農場実現に重要な要素のうち、省スペース、省エネルギー、省リソース(水、O₂、CO₂)を重視する。また、検討は月面拠点に植物栽培を担うモジュールで閉じたものとし、居住モジュール、実験モジュールなどその他月面拠点とのやり取りは検討の対象としない。エネルギー、リソースについては、当該モジュールで閉じた IN/OUT のインタフェースについて言及することとする。
- 本検討は、日本(JAXA)が月面農場のあり方を絞り込む性質のものとするのではなく、検討の中で出された様々なアイデアを、そのメリット、デメリット等を含めて記載するものとする。これにより、本検討報告書の読者による様々な発想や、新しいアイデアを触発し、更なる検討の深化につなげていくことを期待するものである。

参考文献

- 1) 矢野幸子, 月面農場から始まる未来の農業と産業の可能性—NISTEP 予測調査と JAXA 月面農場ワーキンググループ活動報告速報—, STI Horizon Vol.4 No.3 26-31, 2018.
- 2) Raymond Wheeler, “Agriculture for Space: People and Places Paving the Way,” Open Agriculture. 2017, 2, 14-32.

2. 宇宙農業の過去、現在

篠原正典(帝京科学大学 生命環境学部自然環境学科 准教授)
矢野幸子(JAXA 有人宇宙技術部門 きぼう利用センター 主任研究開発員)

2.1. 宇宙農業の歴史

1960年代に米国と旧ソビエト連邦が人工衛星や有人宇宙船を用いた宇宙開発を開始してから約60年が経過しようとしている。2018年の今、国際宇宙ステーション(International Space Station, ISS)は運用20周年を迎えた。そして人類は月近傍、月面、火星へと生存可能な領域を広げようとしている。有人宇宙活動を長期的・持続的にする技術の一つとして食料生産技術があり、環境制御・自動化・リサイクルがキーとなる。これらの技術を包含するのが閉鎖生態系生命維持システム Controlled Ecological Life Support System (CELSS)であり、生命維持システムに生物を利用するのが生物再生型生命維持システム Bioregenerative Life Support System(BLSS)である。

宇宙開発の初期段階から米国とロシア(旧ソ連を含む)は宇宙船内での植物栽培についても積極的に取り組んできた。宇宙環境を使った植物の研究は、重力感知メカニズムや光や重力への植物の反応を探る重力生理学的研究や植物と微生物の共生に着目する分野の他、農学的なアプローチで持続的な作物生産を目的とする宇宙農業的研究に分類され、これまで宇宙船内のスペースの制約から宇宙では比較的小さな栽培装置を用いて植物生理学的研究が主流であった。BLSSを目指した規模の大きな栽培研究は地上の実験施設で実施されてきた。地上での閉鎖生態系栽培施設研究は、ロシア、米国、欧州、日本、カナダがそれぞれ、もしくは協力しつつ研究を進められており、最近では中国も精力的に研究を進めている。BLSS研究の歴史をまとめたものを図に示す¹⁾。

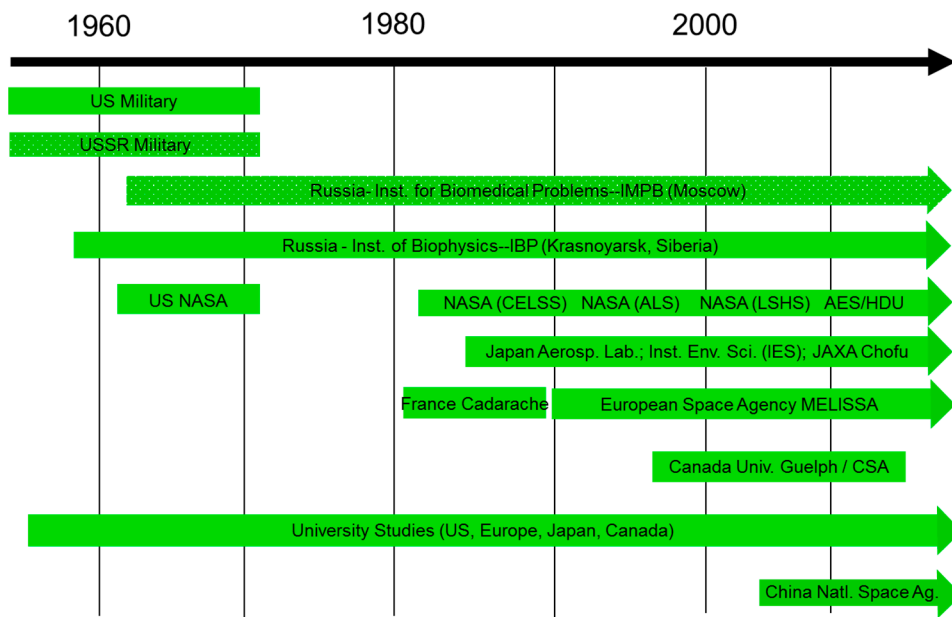


図 2.1 生物再生型生命維持システム (BLSS) 研究の歴史¹⁾

2.2. 藻類の利用

1950年から1960年代の宇宙開発の超初期のライフサポート技術研究として、クロレラなどの藻類を使って酸素発生と炭酸ガス除去の研究が盛んに行われた。しかしマーキュリー計画やジェミニ計画に際しては、短期の宇宙滞在に対して光合成による空気再生システムの重量や電力等が割に合わず、採用されなかった。藻類の利用に関して長期滞在においては有用性の検討の余地はあるが、可食性や揮発性ガスの発生等、課題の解決の必要があることが分かっている²⁾。

2.3. 各国の宇宙農場

2.3.1. ロシア(旧ソ連を含む)

閉鎖環境でのライフサポート研究に関しての地上実験として、ロシア(旧ソビエト連邦)は 1950 年代からシベリアのクラシノヤルツク(Krasnoyarsk)に設置した BIOS という地上設備を用いて、閉鎖環境での生命維持を目的とした植物栽培研究を実施してきた(図 2.2)²⁾。BIOS ではコムギなどを用いてガス、栄養、水のリサイクルに関する研究が行われていた。15 年以上にわたり約 20m² の栽培面積のファイトトロンで食料生産と酸素供給に植物を利用する研究が実施され、藻類についても研究対象であった。しかし藻類の培養槽と植物栽培区をつないでいたため、トマトやジャガイモの成長が止まり、キュウリの開花もせず、葉は黄化し、ビートの葉にはアントシアニンの蓄積が見られたことから、藻類から植物栽培を阻害する有毒な揮発性のガス成分の発生が疑われるなど問題も明らかになった。このため 1970 年代末から 1980 年代の BIOS-3 プロジェクトにおいては植物の光合成産物の研究にフォーカスされた。その後も 2 つの BIOS-3 ファイトトロンで計 41 m² の栽培面積で定量的な栽培データを得ていた。人の尿を再生した水でコムギを育てる実験では培養水へのナトリウムの蓄積が見られることなど、水リサイクルにおけるナトリウム除去の必要性が明らかになった。

BIOS-3 の研究チームは大規模な閉鎖系生命維持システムとしての生物再生型技術開発を前提に地上実験を展開していたが、ロシア生物医学問題研究所(Institute for Biomedical Problems, IMBP) は独自の有人宇宙ステーションや後に ISS において実際の宇宙セットでの栽培実験を開始した。ロシアは最初の有人宇宙ステーションサリュート(Salyut) を 1971 年に打ち上げ、Oasis 植物栽培システムによって植物実験を実施した³⁾。ロシアは宇宙ステーションの改良と共に栽培装置の改良を重ね、次の有人宇宙ステーションミール(Mir) 内に植物栽培装置 SVET を設置した(図 2.3)。また ISS のロシアモジュール内に植物栽培装置 Lada(図 2.4)を設置するなど、継続的に宇宙用の栽培装置を開発・利用している。これまでにコムギ、オオムギ、ダイズ、ミズナなど様々な植物栽培が試みられ、水とガス環境のデータが取得されている。サリュートやミールでの実験当初は植物に成長阻害や結実障害が見られたが、最終的にはエチレンの蓄積によると結論され、栽培装置内外でのガス交換およびエチレン除去フィルターの必要性が示唆された。IMBP は宇宙ステーションでの研究を進めることで、火星への移動期間における微小重力環境での食料生産を目指している²⁾。



図 2.2 ロシア(旧ソビエト連邦)による BIOS-3²⁾



図 2.3 ロシア宇宙ステーションミールでの植物栽培（提供 NASA）



図 2.4 ISS ロシアモジュールでの植物栽培（提供 NASA）

2.3.2. 米国

(1)全般

米国航空宇宙局(NASA)が発足して間もない 1958 年、Biologistics Symposium がオハイオ州で開催され、人間にとって宇宙滞在時に必要な食料となる作物リストが作られた²⁾。そこでは低光量でも育ち、コンパクトサイズで高収量、尿リサイクル水で問題となる塩(ナトリウム)への耐性といったクライテリアが整理され、サツマイモ、レタス、ハクサイ、キャベツ、カブ、カリフラワーなど 13 種類の作物が選定された。1960 年代から 70 年代は宇宙プログラムには米軍も大きく関与しており、ライフサポートのための植物研究が行われていた。その後、数十年間の技術進展により、人工光による高光量出力が技術的に可能になり、垂直農法といった栽培空間デザインや、水耕栽培、高 CO₂ 栽培による光合成効率の増加の試みへと研究が進展していった⁴⁾。

NASA は 1980 年代に CELSS 研究に改めて取り組み、ワークショップを開くなどして作物栽培についての議論を進めていた。NASA では Kennedy Space Center (KSC)、Lyndon B. Johnson Space Center (JSC)、Ames Research Center (ARC)の 3 研究所で植物関連の研究が行われ、NASA は大学に対しても研究費を与え研究を進めた⁵⁾。その結果、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、ピーナツ、レタス等が選ばれた。NASA と大学が分担して栽培方法、成長量の測定、ガス交換のデータを集める研究が行われた。KSC の他、パデュー大学、ユタ州立大学、ウィスコンシン大学、タスケギー大学などが実験を担当した(図 2.5)¹⁾。1997 年に行われた Advanced Life Support Plant/ Food Production Meeting では、生命維持に必要な栄養学的な面、作物の収穫指数、調理のしやすさと閉鎖環境での栽培実績が評価され、23 種の作物が提案された⁶⁾。宇宙での LED 光源の利用や垂直・多段式農法は技術的イノベーションといえ、宇宙利用を目指した研究が地上の農業にも役立つ例となった。



図 2.5 NASA の過去の閉鎖生態系試験設備¹⁾

- A) Ames Research Center Closed Chamber System B) Purdue University Minitrons
C) Johnson Space Center Variable Pressure Growth Chamber
D) Kennedy Space Center Biomass Production Chamber

(2) NASA 生物再生型地上実験施設

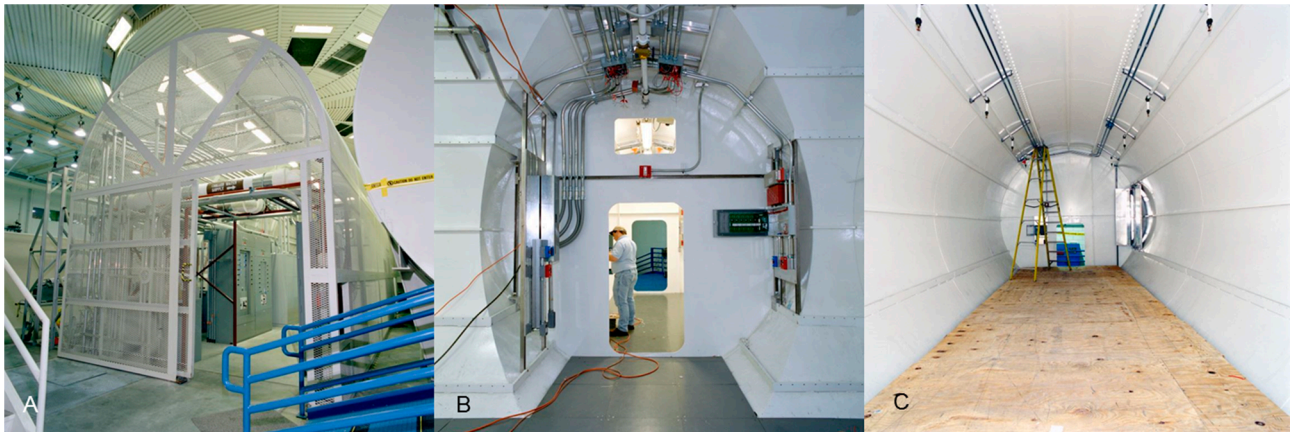
ロシアの BIOS プロジェクトと同様に、NASA においても惑星での宇宙基地への応用を考慮した研究がされており、重力があることを前提として給排水等の環境制御をする研究が行われた。閉鎖生態系生命維持システム、特に植物栽培を伴う生物再生型研究には、それなりの規模が必要になるため、地上をベースとした研究が多くされてきた。NASA が資金提供して行った地上実験としては、1~4m²の栽培面積を持つ小規模のグロースチャンバーでの研究が多い。一方大規模な実験設備としては1988年から2000年にKSCで運用されていたBiomass Production Chamber (BPC)がよく知られている(図2.5D)。BPCは20m²の栽培面積を持ち、閉鎖空間で宇宙でのライフサポートを想定した植物栽培研究が行われた。BPCではNFT水耕栽培法を利用し、7.5m高のチャンバー内に4段の棚を設置している。ここでは86日間のコムギ栽培、105日間でジャガイモ栽培、90日間でダイズ栽培、28日間でレタス栽培、85日間でトマトの栽培、その他イネ、ラディッシュの栽培も行われた。炭酸ガス濃度による収量の変化に関するデータや、エチレンの蓄積のデータがとられた²⁾。

特に食料生産と居住を地上実験施設で同時に実施した事例として NASA では Lunar Mars Life Support Project(LMLSTP)がある。LMLSTPは1995年から1998年にNASA JSCで実施されたプロジェクトである⁷⁾。4段階の閉鎖実験により実施された。フェーズⅠでは15日間の1人を対象とした実験であったが、フェーズⅢでは91日間にわたる4人を対象とする実験となった。特にフェーズⅢでは空気・水については完全閉鎖系、食料・廃棄物処理については部分閉鎖系として実施された(表2.1)⁸⁾。

表 2.1 Lunar Mars Life Support Project (LMLSTP)⁸⁾

Test	Phase I	Phase II	Phase IIA	Phase III
Duration	15 days	30 days	60 days	91 days
Crew	1	4	4	4
Types of Systems	Biological (Wheat)	Physicochemical (Advanced)	Physicochemical (ISS Regenerative ECLSS)	Integrated Physicochemical & Biological (Advanced)
Full Closure	Air	Air & Water	Air & Water	Air & Water
Partial Closure				Food & Waste
Open Loop	Water, Food & Waste	Food & Waste	Food & Waste	

また NASA は、JSC に BIO-Plex (Bioregenerative Planetary Life Support Systems Test Complex) を建設した。BIO-Plex は 1 式が 80m² の大きな農業モジュール (Biomass Production System) を 2 式備えるものだったが⁹⁾が、2000 年代に計画が取りやめになった。NASA のコンスタレーション計画に資金集中することが取りやめの理由とされ、生物再生を伴う閉鎖型生命維持システムとしての本格的な実験は、予定資金不足を含む方針変更により構造物(図 2.6)¹⁰⁾だけが完成した時点で打ち切りになった。コンスタレーション計画自体も 2010 年にオバマ政権により中止となった。

図 2.6 Bioregenerative Life Support Systems Test Complex (BIO-Plex)¹⁰⁾

NASA ジョンソン宇宙センターに建設の 4 人が 1 年間滞在できる大型有人設備として建設された。

A) View of exterior B) View of interior C) View of interior

(3)宇宙実験

NASA は重力が存在する惑星を前提とした CELSS 研究と同時に、微小重力環境でも機能可能な栽培要素技術開発も行ってきた。特に重力の影響を受けやすい給水システム、光環境による光合成効率に関する研究が多く行われており、給水システムとしては多孔質のチューブや膜を用いた給水方式に関して大学等に資金提供をしていた。それ等の成果が宇宙飛行士に新鮮野菜を提供するサラダマシンのシステムデザインとなった。実験規模では小サイズであるが、植物栽培装置アストロカルチャー(Astroculture, ASC) やアドバンストアストロカルチャー(Advanced Astroculture, ADVASC) が 1990 年代から 2000 年代に実際にスペースシャトルや ISS に搭載され栽培実験が行われた。その後、Plant Generic Bioprocessing Apparatus(PGBA)、Biomass Production System (BPS)、最近では Veggie (図 2.7) といった植物栽培装置が NASA や NASA が資金提供した企業により開発されたが、それらのほとんどは重力生物学的な研究に使われ、食料の供給としては小規模の実験であった。

宇宙装置による宇宙農業にフォーカスした実験の例として、ロシアと NASA が共同でコムギを宇宙ステーションミールの植物栽培装置 SVET 内で育てた実験¹¹⁾、ジャガイモを ASC¹²⁾、コムギを BPS¹³⁾で育て光合成効率を測定した実験などの実績がある。ISS に 2014 年から搭載された Veggie は LED 光源と空気を攪拌するファン、クルーの操作による給水システムというシンプルな設計で、植物生理学実験にも利用される一方、栽培植物としてレタス等が栽培された。宇宙での栽培においても HACCP を意識した細菌検査等が行われ、栽培したサンプルは凍結して地上での検査を経て、栽培 2 回目となる 2015 年 8 月に栽培されたレタスを初めて公式に宇宙飛行士が食べるというイベントが行われた(図 2.7C)。その後、2016 年にヒャクニチソウ、2017 年にはトウキョウベカナの収穫が行われた。2018 年にはトマトの栽培が予定されている¹⁴⁾。さらに米国は Advanced Plant Habitat(APH)を 2017 年に ISS に打ち上げ、日本実験棟「きぼう」内に設置して最初の栽培実験を実施した(図 2.8)。

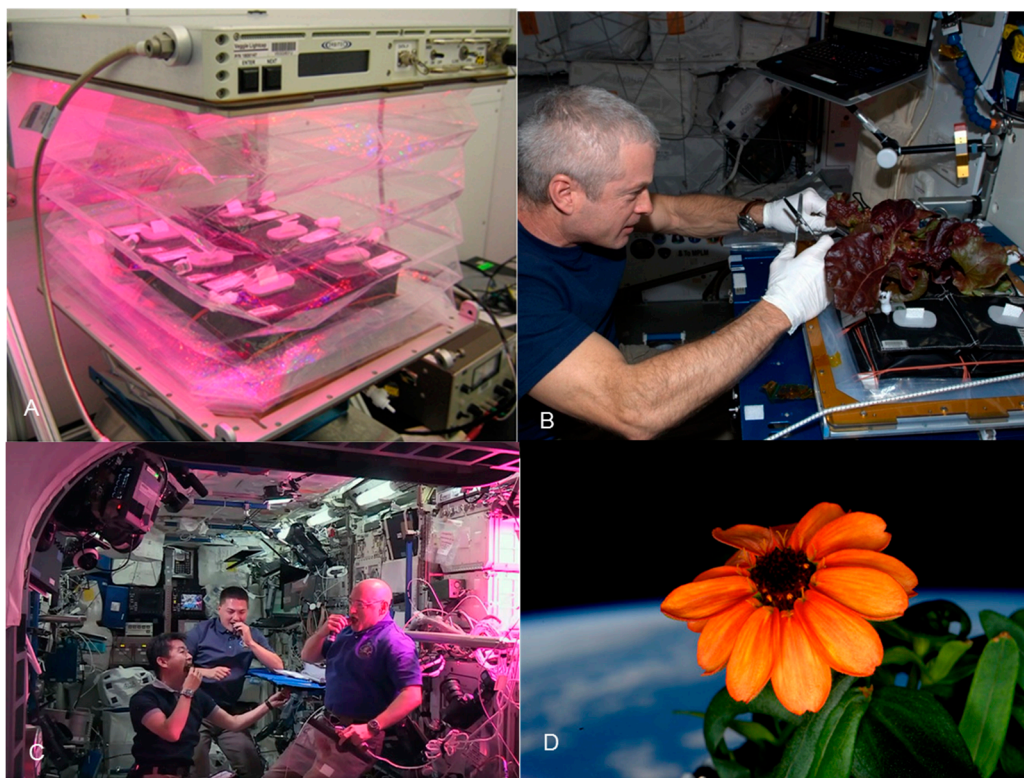


図 2.7 ISS NASA 栽培装置 Veggie (提供 NASA および Food Production for Space Exploration¹⁴⁾)

A) Veggie 外観(地上で撮影) B) ISS でレタスを収穫する Steve Swanson 飛行士(2014 年 6 月)

C) ISS で育てたレタスを口にする Kjell Lingren 飛行士と Scott Kelly 飛行士と油井亀美也飛行士(2015 年 8 月)

D) ISS で開花したヒャクニチソウ(2016 年 2 月)



図 2.8 NASA 植物栽培装置 Advanced Plant Habitat (APH)

A) APH 内で生育するコムギ B) APH から取り出した Science Carrier とコムギ C) APH からコムギが生育した Science Carrier を取り出す金井宣茂飛行士 提供 NASA

(3) NASA 以外の宇宙農場的地上実験設備 Biosphere2

Biosphere2 はアリゾナ州 Oracle に 1980 年から 1990 年代初期に建設されたプライベートスポンサーによる大型閉鎖環境施設である。2000m² の巨大な農業エリアには 2720m³ の土壌が運び込まれ、8 人が 2 年間生活するための食料の 80%を賄う計画であった。幅広い種類の植物と動物が含まれる複雑系で、目標は宇宙を視野に入れた閉鎖環境での生命維持と生物学的な再生技術への挑戦だった。閉鎖実験は 1991 年から 1993 年までの 2 年間と、その後の 6 か月間、2 回にわたって行われたが、1 回目の 2 年間の試験も完全閉鎖環境は維持できず、16 か月目で酸素濃度が 14%になり開放を余儀なくされた。また炭酸ガス濃度の変動により昆虫や鳥が死ぬ現象も見られた¹⁵⁾。また食料不足に見舞われた。ガス環境の変動は日照不足と想定を超える土壌細菌の呼吸量が原因であったとされている¹⁶⁾。これらの他にクルー間、またクルー・運用スタッフ間での心理問題があったことも指摘されている。

(4) 火星模擬実験施設 MDRS

Mars Desert Research Station(MDRS) はアメリカの非営利団体である火星協会がアメリカのユタ州に所有する火星模擬実験施設である。1 チーム約 6 名が 2~3 週間滞在し、火星での居住を模擬する実験を行っている。日本からは日本火星協会が 2014 年、2015 年に延べ 8 名を派遣した¹⁷⁾。GreenHab という食料生産および植物科学研究施設を設け、将来の火星有人ミッションに必要となる食料の種類や量についての研究を実施している。最近では日本火星協会の村上祐資氏がユタ州と北極圏の両方に計 160 日滞在する長期滞在ミッションに参加している¹⁸⁾。

2.3.3. 欧州

欧州宇宙機関(ESA)は Micro-Ecological Life Support System Alternative(MELiSSA)プロジェクトとして、物質循環も含めた生物学的環境維持研究プロジェクトを 1987 年から実施している。初期の MELiSSA プロジェクトは微生物を使った廃棄物処理や、シアノバクテリアをバイオマス生産に使うコンセプトであったが、現在は植物栽培を含むプロジェクトへと拡大している。MELiSSA ではリモートセンシングによる作物モニターも盛んで、コムギ、ビート、ダイズなどを閉鎖環境、水耕栽培での栽培状態に関するデータを取得している²⁾。

ESA は宇宙用の栽培装置 European Modular Cultivation System(EMCS)を開発し、2006 年から ISS に搭載し宇宙での植物研究に役立てている¹⁹⁾。また、有人探査時代の食料となる作物栽培研究を目指してドイツ宇宙機関(DLR)主導で EDEN ISS を開発・南極において運用中である(図 2.9)。EDEN ISS は宇宙利用のスピノフとしての意味もあり²⁰⁾、極地の生鮮野菜供給のため多段栽培モジュールで、唯一宇宙利用を視野に入れている。EDEN ISS のコンテナは 2018 年に南極大陸に運ばれ、ドイツの南極基地 Neumayer-Station III から 400m の場所で運用され、現在栽培実験中である²¹⁾。



図 2.9 ESA EDEN ISS 植物栽培コンテナ

A)EDEN ISS のコンテナ内の栽培棚 B)EDENISS で生育したトマト C)キュウリ D)バジル E)ハツカダイコン F)ブレーメンの運用管制室 G)南極に設置された EDEN ISS 外観と、収穫した野菜を Neumayer Staion III に運ぶためそりに乗せられた運搬箱

出典：Facebook @spaceedeniss

2.3.4. 日本

(1) 日本の CELSS 研究

日本における宇宙農業の検討は、有人活動の目的地として火星を目指すもので、約 30 年前に宇宙科学研究所(ISAS)の山下雅道氏を中心に開始された。ISAS での活動と、「宇宙農業サロン」活動において、耐塩性の高い植物の栽培、低重力でのミツバチの飛行、カイコ等昆虫食を使ったメニューの検討などが行われている。

一方 CELSS 研究としては 1980 年代後半から航空宇宙技術研究所(NAL)において閉鎖型生態系生命維持システムにおける生物再生技術開発が実施されてきた。閉鎖型生態系実験施設(CEEF: Closed Ecology Experimental Facilities)は、植物栽培を伴う完全な閉鎖環境下で 2 名が 120 日間生活する施設として建設された²²⁾。青森県六ヶ所村の環境科学技術研究所内に 1994～1999 年にかけて建設されたこの施設は、生態系内の放射性核種の動態をシミュレートする目的で作られたが、同研究所の新田慶治氏が NAL 時代よりあたためてきた実験施設であり、高温高压下で分解を行う湿式酸化装置やサバチエ反応を利用し水素を媒介に CO₂ から C と O₂ を取り出すと再生装置など、有人宇宙開発につながる要素技術が組み込まれた先進的な ECLSS(環境制御を伴った生命維持システム)であった²³⁾。廃棄物処理の一翼として小型のヤギ(シバヤギ)が導入されている(植物の非可食部を摂取し減量化や分解の促進に貢献)というユニークな点もあった。施設の完成と前後して、2000 年より居住候補者として 4 名の研究員が選抜を経て順次採用され、植物栽培、機器校正、安全衛生管理などのトレーニングを終え、2005 年に 1 週間の居住実験を 3 度、2006 年に 1 週間の居住実験を 6 度、そして、2007 年には 2 週間の居住実験を 3 度行ったのち 4 週間の居住実験を完遂し、閉鎖居住実験を成功裏に終えた。植物栽培は土壌を使わず全て水耕で行った。炭水化物としてイネを 60m²、タンパク質としてダイズ

を 30m²、脂質として落花生を 30m²、その他ビタミン・ミネラルを期待して野菜類 20 種類などに 30 m²といった耕作面積で栽培した²²⁾²⁴⁾。この実験は、自給率の高さ(居住者は最大 95%、ヤギは 100%)、実際に閉鎖系内でとれた作物の加工・摂食の実践に加え、菌叢の調査、居住者の心理状態のモニタリング、閉鎖居住ならではのトラブルシューティングの整理といった点で、ロシア(旧ソ連)や NASA が行ってきた実験と比較してもその成果が高く評価されるものであった²⁴⁾。



図 2.10 環境科学技術研究所(IES)内の閉鎖型生態系実験施設(CEEFF)の外観および内部

A)CEEFF、およびその支援設備は、一般的な建屋の内部に構築された。B)CEEFF はコンクリートを一切使用せずステンレスとガラスで気密の高い閉鎖環境を構築し、土壌を用いず全ての作物栽培を水耕栽培で行った²²⁾。



図 2.11 CEEFF 内で栽培された作物^{22) 24)}

A)シークエンシャルに栽培されているイネ B)ダイズ C)トマト D)キャベツ E)シークエンシャルに栽培されているシュンギク F)ニンジン G)野菜類栽培の様子

(2) 宇宙実験

宇宙における数日から 10 日程度の暗所での植物の生育実験がスペースシャトルや国際宇宙ステーションで実施されてきた。それらの結果からは微小重力環境では重力屈性が見られないことに加え、植物の細胞壁の構成成分が変化し、根の水分屈性が現れやすくなるなどの特徴も見られた。Seed-to-Seed 実験についても、ロシア、米国、欧州、日本等、世界各国の実験結果を総合すると、宇宙でも生育環境を整えることができれば、植物の生活環を完結させることは可能であることが分かっている。日本も ISS 日本実験棟「きぼう」において細胞培養装置内の植物実験ユニット(PEU)を用いてシロイヌナズナの Seed-to-Seed 実験(Space Seed 実験、図 2.12)を成功させている²⁵⁾。

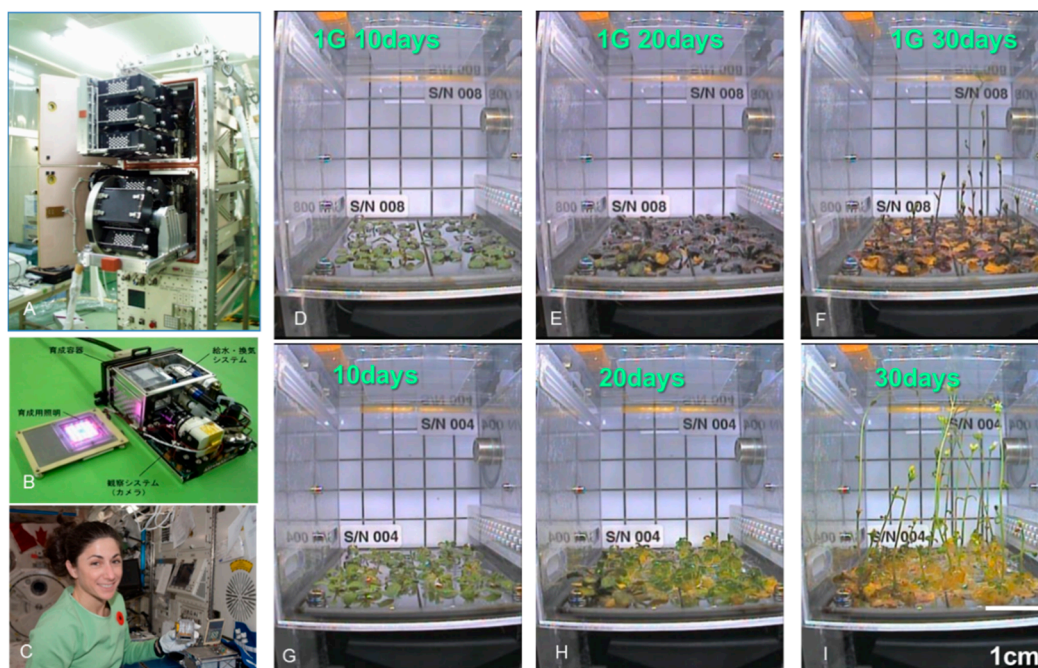


図 2.12 日本の ISS 植物栽培実験(Space Seed)

A)ISS 日本実験棟「きぼう」に設置されている細胞培養装置 B)細胞培養装置内で使用する植物実験ユニット C)シロイヌナズナ栽培実験を実施している NASA 宇宙飛行士 Nicole Stot D~F)細胞培養装置の人工重力部に設置した PEU 内のシロイヌナズナ G~I)細胞培養装置のマイクロ G 部に設置した PEU 内のシロイヌナズナ (JAXA 提供)

(3) 地上実験

惑星表面では一定の重力が存在するため、微小重力特有の問題は解消されと考えられる。しかし月近傍のステーション(深宇宙ゲートウェイ²⁶⁾)や火星を含む惑星までの移動中は微小重力環境となる。これまで日本で行われた宇宙植物栽培にフォーカスした地上研究では 1997 年から 3 年間で 5 大学(東北大学・東京大学・大阪府立大学・宇都宮大学・東海大学)の研究チームが「微小重力下における植物の生活環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」として植物栽培ボックスの設計、地上品製作、航空機実験を含む栽培実験を実施している。本研究により、宇宙での植物栽培を実現する要素技術の中でも重力の影響を受けにくい照明システム、空調システム、気流制御、養水分供給システムの供給システムの設計と検証が重要課題であることが整理された²⁷⁾。

これらの実績を踏まえて宇宙探査イノベーションハブでの月面農場ワーキンググループ活動での技術要素抽出作業へと研究を進展させていると整理することができる。

(4) 宇宙環境利用科学専門委員会

ISAS が主導している学術コミュニティ支援活動の一つに、宇宙環境利用科学専門委員会がある。本専門委員会では 2017 年度から、植物栽培研究をフロントローディング研究と位置づけ、支援を行っている。

(5) 有人惑星探査における安定的な食料確保を目指した作物栽培の要素技術に関する研究

2015 年、有人惑星探査における安定的な食料確保を目指した作物栽培の要素技術に関する研究を、有人惑星探査に必要な技術開発と位置づけ、JAXA 筑波宇宙センターでの研究を開始している。惑星基地での食料確保を目指した作物の栽培と、惑星への移動中の宇宙飛行士への生鮮野菜の提供、精神衛生面のサポートに資する植物の栽培を目標に研究を進めている。既存の植物工場技術を活かし、研究のノウハウを持つ大学等研究機関や産業界と連携する体制づくりを行っている。この活動は宇宙探査イノベーションハブの月面農場ワーキンググループ活動と同時進行で実施中であり、アドバイザリー委員会などの活動として月面農場ワーキンググループのメンバーが参画している。

2.3.5. 中国

月宮 1 号(Lunar palace-1)は、中国北京の北京航空航天大学内に建設された 160m²(500 m³)の 4 人用の閉鎖居住実験施設である。2013～2014 年の 105 日間に及んだ閉鎖居住実験では、植物栽培モジュールを半分稼働させた状態(100 m² (300 m³))で 3 名の閉鎖居住実験を行い 1.6 人分の生産性を確認した。この実験時には、小麦を 30 m²、タイガーナッツ(Chufa)を 10 m²、ダイズを 5.6 m²、その他に葉菜やイチゴなど 8 種に 12.7 m²の耕作面積がそれぞれ割かれ栽培された。栽培棚は赤と青の LED による多段式のものが採用されていた。動物飼育も実施していることがユニークな点として挙げられ、非可食部の処理のために、また食用のために、ミールワームを飼育し、実際に実験生活中の摂食も実施されている(図 2.13)²⁸⁾。2017～2018 年には、370 日にかけてシステムを連続稼働させ、4 人一組の代謝量の異なる二つのチームが交互に 110 日、200 日、60 日という居住を行い、成功裏に実験を終わらせたと報道されている²⁹⁾。学術報告の多くは北京大学の研究者によりなされ、2014 年の 105 日実験に関しては、宇宙開発系、生態工学系、農業・植物生理系、菌叢系など、多方面で学術報告がなされている。これまでの報告では閉鎖循環は完成されておらず、特に廃棄物処理に関しての詳細は明らかされていないが、微生物による処理が想定されており、今回の 370 日実験の成果報告が待たれる。

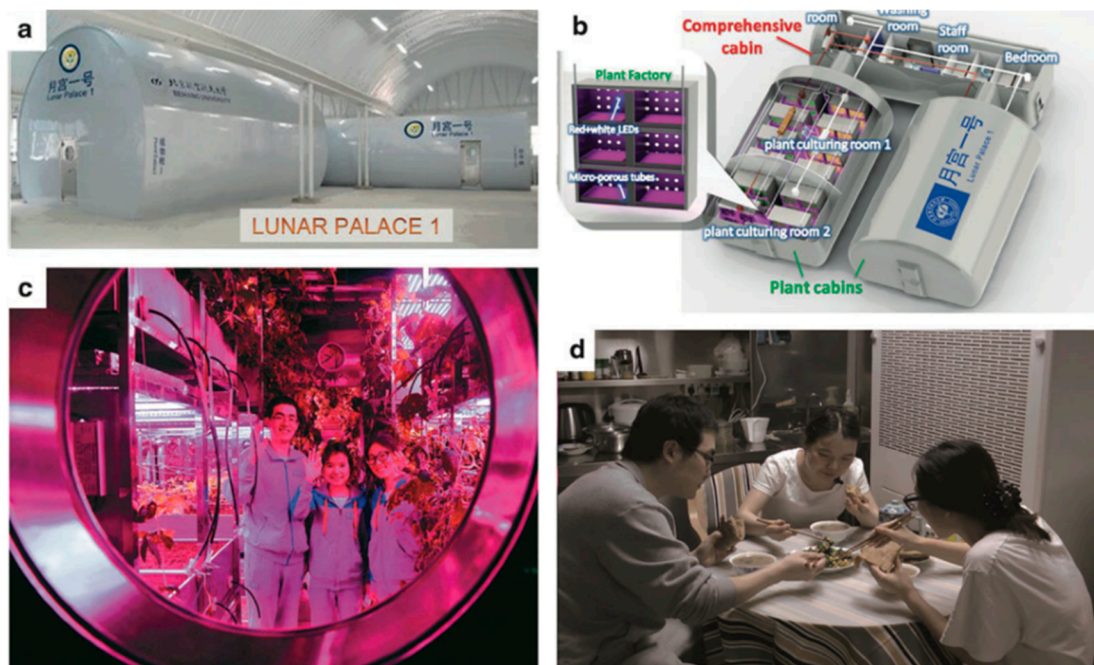


図 2.13 月宮 1 号²⁸⁾

月宮 1 号 a)月宮の外観 b)月宮の内観イラスト c)105 日実験時のクルー3 名 d)同実験時の食事の様子

2.3.6. その他

NASA はアリゾナ大学農学部と協力して、宇宙で農業を行うための膨張式グリーンハウスのプロトタイプを開発したことが 2017 年 5 月 5 日付けニュースになっている³⁰⁾。またロシアから宇宙利用を前提とした 6 面栽培装置という全く新しい発想の装置の提案が報道された³¹⁾。

2.4. 低重力での植物生理

植物は周囲の環境刺激を受容し反応するしくみを獲得し、特に重力を利用しながら生活環を営んでいる³³⁾。これまでの宇宙環境での植物の生育に関する研究からは、植物の細胞壁の構成成分が変化し、根の水分屈性が現れやすくなるなどの特徴が明らかになった。また生育環境を整えれば植物の生活環を完結させることは可能であることも分かっている²⁷⁾。しかし、これまで微小重力と重力環境下での植物生理や栽培状態の変化が注目されており、栽培装置や遠心機の制約などから低重力下での長期栽培の実績は見当たらない。

宇宙における植物の世代交代に関しては、宇宙開発の初期には宇宙ステーションでの稔性種子の形成の形成に問題を生じていた。しかし、微小重力に影響される環境要因を制御することによって、宇宙環境でも植物は種子を形成することが分かった。ただし、宇宙で植物体の老化や種子の稔性・形状に異常が見られ、それらは植物種によって異なる可能性も指摘されている。

植物には水分屈性、光屈性、頂芽優勢、回旋転頭運動など、重力応答に影響を受ける種々の植物の成長現象が見出されている。中でも研究が進んでいるのは、重力に抗して体を構築する反応である抗重力反応であり、この反応の直接的な担い手は細胞壁である。植物は固定したエネルギーの90%以上を頑丈な細胞壁構築に使用しており、惑星上の低重力で抗重力反応の必要が少なくなると植物はその分のエネルギーを他への分配に回すようになるといわれている³³⁾。月で作物を栽培する場合に、実際にどのような植物生理の現象が現れるか興味深い。

Kiss ら³⁴⁾によると、高等植物のモデルとして植物研究に広く使われているシロイヌナズナを用いた光屈性に関する実験(TOROPI-2)結果から、赤色光と青色光に対する光屈性の閾値は0.1Gから0.3G付近にある。また藻類を用いた低重力実験では、重力方向に従っておもりの役割を果たす細胞内の平衡石(アミロプラスト)が0.1Gから0.2G程度で沈降している様子が報告されている。これらのことから、植物にとって月や火星の低重力は、微小重力環境よりもむしろ地上と同じ1Gに近い状況であると仮定することができる。

一方、低重力は、栽培装置や栽培環境に影響を及ぼす可能性がある。航空機放物飛行による短時間微小重力実験の結果からは、重力がないことで対流が消失し、植物と周辺環境との熱交換が抑制されることにより植物体の温度上昇が結実低下を招く可能性が示唆されている³⁵⁾。また最近行われた、航空機放物飛行による短時間重力変動実験で重力条件を1G以下の部分重力的に変動させた実験によると、培地内の水分分布や栽培システムによる環境制御に低重力が少なからず影響している可能性が示唆された³⁶⁾。低重力が栽培システムに与える影響については、部分的にも検証しておくことが好ましい。

2.5. 国際宇宙ステーションでの植物栽培実績

(1)宇宙での栽培実験の目的

これまでに様々な植物がスペースシャトル・ISSで実験に供されている。植物は食料にもなるほか、光合成による炭酸固定と水分の吸収・蒸散により、閉鎖環境の環境制御面から、有人宇宙活動に有効であることから宇宙での生育を確認する目的、重力や光応答、根の屈性等に関しての多くの基礎実験、栽培実験がなされている³⁷⁾。

(2)ISS 実験での実績

シャトル時代に比べて、ISSでは長期間の連続栽培が可能になった。装置もNASA、ESA、JAXA、ロシアがそれぞれ開発しており、共同ミッションにも使われている。ISSではこれまでに約80テーマの植物実験が実施されているが、その約半数がモデル植物であるシロイヌナズナを使った実験である。このほか、コムギ、オオムギ、ダイズ、ミズナ、トマト、ハツカダイコン、エンドウマメがISSで栽培されている。パクチョイ、ケール、ワサビの栽培計画もある。トウモロコシ、キュウリ、イネ、レンズマメを使った実験例があるが、芽生えや根を解析するための実験で、暗所での発芽実験である。マメ科の植物ウマゴヤシ、イネ科のモデル植物ミナトカモジグサ、マツ科トウヒ属の樹木エゾマツアラカシ、イトヤナギ、ウルシ、アサガオを使った実験もされている。クロレラ、クラミドモナスといった藻類の培養実験も実施されている。根粒菌、枯草菌やブドウ球菌といった土壌や植物、衛生管理に関連の深い微生物を対象にした実験も行われている。

レタスについては2014年から2015年に複数回にわたりNASAの装置Veggieによって栽培された。1、2回目は凍結して地上回収され、分析と微生物検査ののち、2015年の栽培において軌道上での宇宙飛行士への提供、油井飛行士を含む3名の飛行士が試食した(図2.7)。

2017年に「きぼう」船内実験室のラック内にNASA開発のAPH(Advanced Plant Habitat)が搭載された。APHはこれまでの宇宙植物装置としては最大である0.2m²の栽培面積を持ち、2018年に初期検証としてシロイヌナズナとコムギが栽培された。コムギは結実の様子が公開されている(図2.8)。

i) ジャガイモの栽培

食料生産におけるジャガイモの有用性はNASAも認識しており、火星のレゴリスシュミラントでの栽培実験や、砂漠土を使った栽培実験が地上実験室で行われている。宇宙では、1995年のスペースシャトルミッションSTS-73においてジャガイモ(Seed Potato)の栽培実験が行われており、ミッドデッキロッカータイプの栽培装置Astrocultureで栽培した塊根を地上で分析している¹²⁾。塊根の成長やデンプンの粒子径などについて、地上対照群と違いはみられなかったと結論している³⁸⁾。この実験ではフライトが2週間程度のため、地上において7週間育てた植物体を搭載している。種イモから発芽、収穫をした例はない。

ii) イチゴの栽培

イチゴについても宇宙栽培を目指した地上検討はNASA、ESA(EDEN ISS)等で試みられているが、宇宙での栽培実績はない。苗の輸送、栽培期間の長さ、受粉などに課題があると考えられる。

iii) コムギ、オオムギ、ダイズの栽培

コムギ、オオムギ、ダイズについてはNASAの宇宙栽培装置やロシアの栽培装置での実績が多くある。

iv) トマトの栽培

トマトはロシアモジュール設置の栽培装置Ladaでの栽培実験サンプル名として記載があるが、論文等記録がない。またVeggieを使い光質と肥料をテストするためトマトを育てる予定¹⁴⁾。実験前の種子の長期保存が課題とされ、花粉の宇宙飛行士への影響が考慮される。

v) レタス、ミズナの栽培

レタス、ミズナについてはNASAの装置やロシアの栽培装置での多数実績がある。

vi) サツマイモの栽培

サツマイモの栽培については見当たらない。宇宙での食料生産の対象として有用性は認識されている⁶⁾³⁹⁾。

vii) 教育ミッションでの栽培

輸送量と実験スペースに制約のある宇宙実験の適用条件において、植物はサンプルである種子の保存が容易であり、多数のサンプルを輸送しやすいこと、給水による実験開始が可能なため、生物実験サンプルとして比較的コントロールしやすいこと、形態などから重力の影響が観察しやすいことなどの特徴から、栽培のデモンストレーション的な意味と児童・生徒・学生の教育効果を狙ったミッションにおいて数多く栽培されている。向井千秋飛行士は1994年、自身の初スペースシャトルフライトにカイワレダイコンを持ち込み、キャビン内で発芽させた。NASAのDonald Pettit飛行士は、特別な装置を使わず、ジップロックバックを用いてズッキーニを育て、開花・結実までの記録を写真と解説付きで公開している。また同様にヒマワリを育てた飛行士もいる。

JAXAが2013年に実施した「Space Seed for Asian Future2013」ではアズキの発芽実験がISSきぼうで実施された。またロシアの栽培装置Ladaを利用してエンドウマメやオオムギを使った教育ミッションが行われている。欧州宇宙機関(ESA)によっても教育用キットでルッコラを用いた実験が実施されている。

viii) その他

高麗ニンジン(Zhenshen, Ginseng)の培養細胞が2007年から2009年、ISSのロシアモジュールで培養されている。また2016年に中国の有人宇宙船の神舟-11とドッキングした宇宙実験室の天宮(Tiangong)-2での約30日間の有人実験期間中において、レタスが栽培された⁴⁰⁾。

引用文献

- 1) M. Porterfield, NASA Bioregenerative Life Support: Past, Present & Future, ISLSWG Bioregenerative Life Support Workshop, Italy: <http://www.asi.it/en/node/32451>, 2015.
- 2) R. Wheeler, “Agriculture for Space: People and Places Paving the Way,” *Open Agriculture* 2, 14-32, 2017.
- 3) P. Zabel, M. Bamsey, B. Schubert, M. Tajmar, “Review and analysis of over 40 years of space plant growth systems,” *Life Sciences in Space Research* 10, 1-16, 2016.
- 4) 後藤英司, “植物を中心とする閉鎖生態系生命維持システムの構築及び関連実験,” 宇宙環境利用推進センター, 2003.
- 5) 後藤英司, “米国の CELSS における植物生産の研究,” *生物環境調節* 33(2) 89-95, 1995.
- 6) R. Wheeler, “NASA TM 2009-214768 Roadmaps and Strategies for Crop Research for Bio regenerative Life Support System,” 2009.
- 7) N. J. Packham, “The Lunar-Mars Life Support Test Project: the Crew Perspective,” <https://lsda.jsc.nasa.gov/books/ground/1.3Crewmembers.pdf>.
- 8) D. J. Barta, The Lunar Mars Life Support Test Project, JSC-CN-36382, 2016.
- 9) D. J. Barta, J. M. Castillo, R. E. Fortson, “The Biomass Production System for the Bioregenerative Planetary Life Support Systems Test Complex: Preliminary Designs and Considerations,” SAE Technical Paper 1999-01-2188, 1999.
- 10) NASA, BIO-Plex Facility in Building 29, <https://archive.org/details/JSC2001-00794>, 2001.
- 11) F. B. Salisbury, W. Campbell, J. G. Carman, G. E. Bingham, “Plant growth during the greenhouse II experiment on the Mir orbital station,” *Adv. Space Res.* 31(1) 221-227, 2003.
- 12) M. E. Cook, J. G. Croxdale, “Ultrastructure of potato tubers formed in microgravity under controlled environmental conditions,” *J. Exp. Bot.*, 54(390) 2157-2164, <https://doi.org/10.1093/jxb/erg218>, 2003.
- 13) W. G. Stutte, O. Monje, D. G. Goins, C. B. Tripathy, “Microgravity effects on thylakoid, single leaf, and whole canopy photosynthesis of dwarf wheat,” *Planta* 223 46-56, <https://doi.org/10.1007/s00425-005-0066-2>, 2005.
- 14) G. Massa, Food Production for Space Exploration, KSC-E-DAA-TN38634, 2017.
- 15) Environment and Ecology, Biosphere 2, <http://environment-ecology.com/ecological-design/255-biosphere-2.html>, 2018.10.14 Access.
- 16) The University of Arizona, Biosphere 2 Where science lives, <http://biosphere2.org/>, 2018.10.18 Access.
- 17) 角地雅信, 宮嶋宏行, 安濃由紀, 村川恭介, “火星模擬実験の概観と有人火星探査の検討,” *Int. J. Microgravity Sci. Appl.* 33(3) 330311, <http://doi.org/10.15011/ijmsa.33.330311>, 2016.
- 18) 村上祐資, YUSUKE MURAKAMI Official Website, <http://www.fieldnote.net/about/>, 2018.10.12 Access.
- 19) E. Brinckmann, ESA hardware for plant research on the International Space Station, *Adv. Space Res.*, 36(7) 1162-1166, 2005.
- 20) D. Schubert, D. Quantius, J. Hauslage, L. Glasgow, F. Schroder, M. Dorn, Advanced Greenhouse Modules for use within Planetary Habitats, 41st International Conference on Environmental Systems, AIAA2011-5166, 2011.
- 21) ESA EDEN Ground Demonstration of Plant Cultivation Technologies for Safe Food Production in Space, <http://eden-iss.net/>, 2018.10.14 Access.
- 22) M. Shinohara, O. Komatsubara, Y. Aibe, S. Nozoe, T. Shimamiya, Y. Tako, K. Nitta, “Air Circulation Confinement Experiments in the CEEF: Physiological Status in Ecnauts through Repeated Seven-day Habitations,” *Soc. Automotive. Eng. Tech. Paper* 2006-01-2293, 2006.
- 23) K. Nitta, “The CEEF, closed ecosystem as a laboratory for determining the dynamics of radioactive isotopes,” *Adv. Space Res.*, 27(9) 1505-1512, [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(01\)00242-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00242-3), 2001.

- 24) 多胡靖弘, “閉鎖型生態系実験施設を用いた閉鎖居住実験—食料自給および物質 (空気・水・廃棄物) 循環、ならびにトラブルシューティング—,” 閉鎖生態系・生態工学ハンドブック 48-66, 2015.
- 25) S. Yano, H. Kasahara, D. Masuda, F. Tanigaki, T. Shimazu, H. Suzuki, I. Karahara, K. Soga, T. Hoson, I. Tayama, Y. Tsuchiya, S. Kamisaka, “Improvements in and actual performance of the Plant Experiment Unit onboard Kibo, the Japanese experiment module on the international space station,” *Adv. Space Res.*, 51(5) 780-788, 2013.
- 26) 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 宇宙開発利用部会 ISS・国際宇宙探査小委員会 (第20回) 資料 20-1-1 H29.6.28, http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/071/shiryo/1387901.htm, 2017.
- 27) 矢野幸子, 嶋津徹, “宇宙における植物栽培研究と求められる光技術,” *光学*, 46(1) 25-31, 2017.
- 28) C. Dong, Y. Fu, B. Xie, M. Wang, H. Liu, “Element Cycling and Energy and Responses in Ecosystem Simulations Conducted at the Chinese Lunar Palace-1,” *Astrobiology* 17(1) 78-86, 2017.
- 29) 「月宮」実験が終了 計 370 日間は世界最長 (China News Service 2018.5.19), <http://www.afpbb.com/articles/-/3175157>, 2018.10.17 Access.
- 30) NASA が火星での植物栽培に本気を出した。宇宙農業を念頭に置いた膨張式グリーンハウスを設計, <http://karapaia.com/archives/52238501.html>, 2017.5.5.
- 31) A. Sinitskaya, On the ISS will grow green in cylindrical beds, <https://iz.ru/737654/anastasiia-sinitckaia/na-mks-vyrastiat-zelen-v-tcilindricheskikh-griadkakh>, 2018.7.17.
- 32) 曾我康一, “重力による植物の生長調節—遠心過重力を用いた地上実験—,” *日本マイクログラビティ応用学会誌* 21(1) 74-78, 2004.
- 33) 高橋秀幸, 日出間純, 北宅善昭, 保尊隆享, 唐原一郎, 矢野幸子, “宇宙環境を利用した植物科学の研究シナリオ,” *Int. J. Microgravity Sci. Appl.* 34(2) 340200, 2017.
- 34) J. Kiss, “Plant Biology in reduced gravity on the Moon and Mars,” *Plant Biology* 16, suppl.1, 12-17, 2014.
- 35) 北宅善昭, “宇宙での植物栽培における植物体の熱・ガス交換,” 閉鎖生態系・生態工学ハンドブック 86-92, 2005.
- 36) 北宅善昭, “航空機放物飛行実験による微小重力下での植物栽培システム水循環,” 第 32 回宇宙環境利用シンポジウム, 2018.
- 37) International Space Station, Space Station Research Experiments, Biology and Biotechnology, Plant Biology, https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/experimentsHardware.html#Biology-and-Biotechnology, Access 2018.8.7.
- 38) J. Croxdale, M. Cook, T. W. Tibbitts, C. S. Brown, R. M. Wheeler, “Structure of potato tubers formed during spaceflight,” *J. Exp. Bot.*, 48(317) 2037-2043, 1997.
- 39) M. Perchonok, The Challenges of Developing a Food System for Mars Mission, JSC-CN-36608, 2016.
- 40) J. Haipeng, Space Journal: Entry 7 -- Chinese farmers in space, http://www.xinhuanet.com/english/2016-11/13/c_135825974.htm, 2016.11.13.

3. 作物種の選定

後藤英司(千葉大学大学院 園芸学研究科 教授)

宮松雅子(シダックス総合研究所)

3.1. 月面で日本人に必要とされる栄養量

3.1.1. 月面で日本人に必要とされる栄養量の前提

本ワーキンググループでの対象は、日本人である。宇宙での ISS 長期滞在時の栄養摂取基準は、NASA の惑星探査ミッション等があるが、これらは、欧米人を中心に考えられており、日本人に当てはめることはできない¹⁾。現時点での惑星ミッション用基準は、カルシウムやビタミン D 等、特に長期ミッションで栄養学的意義が強調されるもの以外は概ね米国の地上基準に準じ²⁾ており、本ワーキンググループにおける月面農場での作物種の栽培量を定める基準は、日本人を対象としてことから、厚生労働省が示す「日本人の食事摂取基準 2015 年版 (以下、「食事摂取基準」)²⁾」を活用することとした。「食事摂取基準」は、健康な個人並びに集団を対象として、国民の健康の保持・増進・生活習慣病の予防のために参照するエネルギー及び栄養素の摂取量の基準を性年齢別に示すものである。「食事摂取基準」の 30～49 歳男性(身体活動レベル 2)を基準に、検討を進めた(表 3.1)。

表 3.1 30～49 歳男性・女性(身体活動レベル 2)の食事摂取基準値

			男性	女性	耐用上限量	授乳婦・妊婦 (付加量)
エネルギー	kcal/日	推定平均必要量	2650	2000		
たんぱく質	g/日	推奨量	60	50		
目標量	%エネルギー	目標量	13-20	13-20		
脂質	%エネルギー	目標量	20-30	20-30		
炭水化物	%エネルギー	目標量	50-65	50-65		
食物繊維	g/日	目標量	20以上	18以上		
ビタミンA	μ RAE/日	推奨量	900	700	○	○
ビタミンD	μ g/日	目安量	5.5	5.5	○	○
ビタミンE	mg/日	目安量	6.5	6.0	○	○
ビタミンK	μ g/日	目安量	150	150		
ビタミンB1	mg/日	推定平均必要量-推奨量	1.2-1.4	0.9-1.1		○
ビタミンB2	mg/日	推定平均必要量-推奨量	1.3-1.6	1.0-1.1		○
ナイアシン	mgNE/日	推定平均必要量-推奨量	13-15	8-11	○	○
ビタミンB6	mg/日	推定平均必要量-推奨量	1.2-1.4	1.0-1.2	○	○
ビタミンB12	μ g/日	推定平均必要量-推奨量	2.0-2.4	2.0-2.4		○
葉酸	μ g/日	推定平均必要量-推奨量	200-240	200-240	○	○
パントテン酸	mg/日	目安量	5	4		○
ビオチン	μ g/日	目安量	50	50		○
ビタミンC	mg/日	推定平均必要量-推奨量	85-100	85-100		○
ナトリウム	mg/日	推定平均必要量	600	600		
(食塩相当量)	g/日	推定平均必要量	1.5	1.5		
カリウム	mg/日	目安量	2500	2000		○
カルシウム	mg/日	推定平均必要量-推奨量	550-650	550-650	○	
マグネシウム	mg/日	推定平均必要量-推奨量	310-370	240-290		
リン	mg/日	目安量	1000	800	○	○
鉄	mg/日	推定平均必要量-推奨量	6.0-7.0	9.0-10.5(月経有) 5.5-6.5(月経無)	○	○
亜鉛	mg/日	推定平均必要量-推奨量	8-10	6-8	○	○
銅	mg/日	推定平均必要量-推奨量	0.7-1.0	0.6-0.8	○	○
マンガン	mg/日	目安量	4.0	3.5	○	○
ヨウ素	μ g/日	推定平均必要量-推奨量	95-130	95-130	○	○
セレン	μ g/日	目安量	25-30	20-25	○	○
モリブデン	μ g/日	推定平均必要量-推奨量	25-30	20-25	○	○

3.1.2. エネルギー及び栄養素の指標²⁾

「食事摂取基準」では、エネルギーは、エネルギー摂取の過不足の回避を目的とする指標(推定エネルギー必要量)が設定されている。栄養素については、摂取不足の回避を目的とする3種類の指標(推定平均必要量、推奨量、目安量)、過剰摂取による健康障害の回避を目的とする指標(耐用上限量)、及び生活習慣病の予防を目的とする指標(目標量)の5つの指標で構成されている。エネルギー及び栄養素に関する6つの指標は下記の通りである。

表 3.2 「食事摂取基準」で示されているエネルギー及び栄養素に関する指標

指標	
推定エネルギー必要量	エネルギー必要量は、WHO の定義に従い、「ある身長・体重と体組成の個人が、長期間良好な健康状態を維持する身体活動レベルの時、エネルギー消費量との均衡がとれるエネルギー摂取量」と定義。 推定エネルギー必要量 (kcal/day) = 基礎代謝量 (kcal/day) × 身体活動レベル
推定平均必要量 (estimated average requirement; EAR)	ある対象集団において測定された必要量の分布に基づき、母集団における必要量の平均値を示すもの。当該集団に属する 50% の人が必要量を満たすと推定される摂取量として定義。
推奨量 (recommended dietary allowance; RDA)	ある対象集団において測定された必要量の分布に基づき、母集団に属するほとんどの人 (97～98%) が充足している量。
目安量 (adequate intake; AI)	特定の集団における、ある一定の栄養状態を維持するのに十分な量として「目安量」を定義する。十分な化学的根拠が得られず「推定平均必要量」が算定できない場合に算定するものとする。実際には、特定の集団において不足状態を示す人がほとんど観察されない量として与えられる。
耐用上限量 (tolerable upper intake level; UL)	健康障害をもたらすリスクがないとみなされる習慣的な摂取量の上限を与える量。これを超えて摂取すると、過剰摂取によって生じる潜在的な健康障害のリスクが高まると考える。十分な化学的根拠が得られない栄養素については設定しない。
目標量 (tentative dietary goal for preventing life-style related diseases; DG)	「生活習慣病の予防のために現在の日本人が当面の目標とすべき摂取量」として設定。

3.2. 栽培作物候補の選定

月面農場においては、太陽光を利用せずに人工光源で作物を栽培できる植物工場を用いる。我が国は植物工場を用いた商業栽培が世界で最も普及しており、関連研究蓄積および技術開発力は世界トップクラスである。我が国で開発された人工光型植物工場は、栽培室の閉鎖度を高く維持することができるため、エネルギー収支や物質収支の制御が容易である。月面で人工光型植物工場を用いて作物を生産するにあたり、候補作物の選定で考慮すべき点は以下の通りである。

3.2.1. 植物工場における作物生産

主要な食用作物として穀類、マメ類、イモ類、種実類、葉菜類、果菜類、根菜類、果樹がある。食用作物の大多数は、人工光型植物工場で生産できる。人工光型植物工場は、土壌の代わりに養液栽培法を用い、植物生育に必要な地上部環境要因である温湿度、光、CO₂ ガス、O₂ ガス、気流を制御する。

養液栽培は、土壌を使わないで必要元素を含む培養液を植物に与えて栽培する方法である³⁾。養液栽培には培地に砂、れき、おがくず、ロックウール、パーライトまたはバーミュキュライト等を使う固形培地耕と、固形培地を使わない水耕および噴霧耕に大別できる。葉菜類は水耕法で栽培できるが、多くの作物は固形培地耕で栽培する。月面は重力が存在する(1/6G)ため、養液栽培は地上の技術がほぼそのまま運用できると考えられる。

3.2.2. 作物種間差

植物工場における生産性(1作の収量)は、環境条件と栽培条件を最適化すれば、慣行法の同等～3倍程度である。イネ(水稻)の場合、水田の平均収量の2倍の収量を得ることができる。また年に3作程度の栽培ができるため、年間収量は水田の約6倍になる⁴⁾。

植物工場において栽培に必要な電力は主に照明と空調に使われる。植物体内の物質合成の第1ステップである光合成(糖の合成)の効率は、作物種間によらずほぼ同じとみなしてよい⁵⁾ため、投入電力量あたりの乾物重量成長の効率は植物種間差は小さいと考える。ただし、タンパク質、脂質、二次代謝物の合成効率は作物種間で異なる。

作物種間で異なる他の点として、可食部比率(収穫指数、harvest index)と栽培管理作業の労働量がある。可食部比率が大きいと残渣になる非可食部が少ないことを意味する。栽培管理作業や収穫作業などの労働量は、作物種間差が大きい。栽培管理が複雑だったり長時間必要であると月面居住者の負担が増える。しかし労働量については後述する機械化・ロボット化によって解決が可能であるため、候補作物の選定では、あまり重視しないでよい。

3.2.3. ウイルスフリー化

月面基地内で植物のウイルス病、カビ病を蔓延させないために、地球上から作物をウイルスフリー化して月面基地に持ち込むことが望ましい。現状では植物組織培養法によるウイルスフリー化・増殖が可能な作物と技術未確立の作物に大別できる。そのため、作物の選定において留意するのが望ましい。また地上から病害虫類を持ち込まないことも必要である。以上を考慮すれば、月面農場では病虫害の発生を抑えることができるため、無農薬栽培が可能になろう。

3.2.4. 形質

農業の品種改良において重視された病害虫耐性、環境ストレス耐性および高い水利用効率は、植物工場では必要ない。むしろ、植物工場の好適栽培条件下で高速成長を示す品種を探し出すことも有用である。植物工場において高速成長をする、栄養成分・機能性成分を高含有するなどの有益な形質を付与した遺伝子組換え作物を利用することも想定する。

3.2.5. 機械化、ロボット化、ICT利用

農業分野のAI、ICT、機械化、ロボット化は、月面基地の稼働時期までに大幅に進歩していることが予想される。そこで、現在すでに可能性が示唆されている機械化・ロボット技術は導入できると仮定する。人間の嫌う、単純、辛い、危険な農作業はロボットが行うと仮定する。受粉昆虫は導入しても良いが、しない場合は、ホルモン剤散布を含めてロボットが行うと仮定する。ただし、これらを実現するための要素技術開発が必要である。

以上の観点と3.1節の食事摂取基準を考慮して、下記の作物を候補作物として選定した。

穀類	イネ
マメ類	ダイズ
イモ類	ジャガイモ、サツマイモ
果菜類	トマト、イチゴ、キュウリ
葉菜類	レタス、その他(コマツナなど)

いずれも植物工場での栽培が可能であり、組織培養法によるウイルスフリー化が可能で、遺伝子組換えも可能である。

主要な穀類にイネ、コムギ、オオムギがあるが、和食を中心に料理のバラエティを考慮してイネを選んだ。植物工場での栽培は研究例が豊富である。ダイズはマメ類の中では主食、副食、植物油としても利用可能で、豆腐やハンバーグの食材にも使えるポピュラーな作物であり、植物工場での栽培は研究レベルでは豊富である。ジャガイモとサツマイモは露地農業では土壌中でイモが肥大する。ジャガイモや塊茎であり養液栽培の

研究例が多い。サツマイモは肥大根であり養液栽培はやや難しいが研究開発がなされている。どちらも栄養価が高く料理に欠かせない作物であり選定した。野菜では、生産量が多く食材としての利用価値が高い果菜類と葉菜類を選んだ。それぞれポピュラーな作物で植物工場の生産事例の多い作物種を選定した。

今回選定した作物群以外には種実類、根菜類、果樹、茶などがある。これらの作物は、選定した 8 作物の栽培方法を適用すれば、いずれかの方法で栽培が可能である。したがって本報告では、この 8 作物の組み合わせを用いて各種の検討を行う。

3.2.6. 選定した候補作物の特徴⁶⁾⁷⁾⁸⁾

選定された候補作物の栄養学的な特徴は下記の通りである。

(1)イネ <コメ (玄米)>

イネの可食部であるコメについて説明する。コメは、炭水化物を多く含み、主要なエネルギー源であり、主食となる。玄米は、もみからもみ殻を除いたもので、ぬかと胚芽が残っているため、精製したコメと比べ、たんぱく質、脂質、ミネラル、食物繊維が多いが、消化吸収率は低い。

(2)ジャガイモ

ジャガイモは、冷涼な気候での栽培に適する。安定して収穫でき、貯蔵性が高いため世界的にも重要な食物である。味が淡白なため、主食としても常用される。主成分はでんぷんであり、ビタミン C、ビタミン B₁、カリウムを多く含み、フランスでは「大地のりんご」とも呼ばれる。主食になる野菜として世界中で栽培される。

(3)サツマイモ

サツマイモは、気象の変化に強く、安定して収穫できることから、救荒作物として重視されていた。イモ類の中では糖分含有量が高く甘みが強い。主成分はでんぷんで、ビタミン C、ビタミン E、カリウム、カルシウム、銅などのミネラルと食物繊維を多く含む。葉や茎も食することができる。

(4)ダイズ

①ダイズ

ダイズは「畑の肉」と呼ばれるほど良質なたんぱく質に富み、カルシウム、ビタミン B₁、ビタミン B₂、ビタミン E を多く含む。ダイズは組織が固く、消化が悪いことから豆腐、油揚げ、豆乳、みそ、納豆、油脂、醤油など、様々な加工品に加工される。

②エダマメ

大豆を完熟前に収穫した未熟豆を指す。大豆と同様に、たんぱく質、糖質、ビタミン B₁、ビタミン B₂、カルシウムが豊富に含まれ、大豆にはないビタミン C を含む。

(5)トマト (ミニトマト)

鮮やかな色で料理を引き立てるナス科の西洋野菜。日本では生で食べることが多く使用頻度が高い。ミニトマトは、小粒で甘みが強く多汁質で、ほどよい酸味を持つ。赤い色素はリコピンと呼ばれ抗酸化作用を持つ。ビタミン C とビタミン A が比較的多く、カリウムを含む緑黄色野菜である。

(6)キュウリ

さわやかな香りと歯触りが特徴で生で食べられることから常備野菜の一つとされる。キュウリの約 95%は水分であり、残りの 4%にビタミンやミネラル、炭水化物などがわずかに含まれる。ビタミン C を壊すアスコルビナーゼという酵素が含まれる（酸により抑制される）。

(7)レタス (リーフレタス)

シャキッとしており、何にでも合わせやすい万能野菜である。全体の約 95%が水分で、ビタミン C、E、カロテン、カルシウム、カリウム、鉄、亜鉛などを含む。結球レタスに比べ、リーフレタスはカリウムを始めビタミン、ミネラル含量が多い。

(8)イチゴ

洗うだけで簡単に食べることができ、さわやかな甘みと香りで万人に好まれる。果物の中でもビタミン C を多く含み、果肉は多汁質でほどよい甘みと酸味が特徴の果物である。

表 3.3 8 作物種の栄養価（100g あたり）⁹⁾

	エネルギー kcal	たんぱく質 g	脂質 g	炭水化物 g	食物繊維 g	ナトリウム mg	カリウム mg	カルシウム mg	マグネシウム mg	リン mg	鉄 mg	亜鉛 mg	銅 mg	マンガン mg	ヨウ素 μg	セレン μg	クロム μg	モリブデン μg	レチノール 当量 μg
1) コメ 玄米	353	6.8	2.7	74.3	3.0	1	230	9	110	290	2.1	1.8	0.27	2.06	0	3	0	64	0
精白米	358	6.1	0.9	77.6	0.5	1	89	5	23	95	0.8	1.4	0.22	0.81	0	2	0	69	0
2) サツマイモ	134	1.2	0.2	31.9	2.2	11	480	36	24	47	0.6	0.2	0.17	0.41	1	0	1	4	2
3) ジャガイモ	76	1.6	0.1	17.6	1.3	1	410	3	20	40	0.4	0.2	0.10	0.11	0	0	5	4	0
4) ダイズ	422	33.8	19.7	29.5	17.9	1	1900	180	220	490	6.8	3.1	1.07	2.51	0	5	3	350	1
エダマメ	135	11.7	6.2	8.8	5.0	1	590	58	62	170	2.7	1.4	0.41	0.71	0	1	1	240	22
5) レタス	16	1.2	0.2	3.2	2.0	4	410	66	15	31	1.8	0.4	0.05	0.43	0	0	0	0	170
6) ミニトマト	29	1.1	0.1	7.2	1.4	4	290	12	13	29	0.4	0.2	0.06	0.10	4	0	0	4	80
7) キュウリ	14	1.0	0.1	3.0	1.1	1	200	26	15	36	0.3	0.2	0.11	0.07	1	1	1	4	28
8) イチゴ	17	0.5	0.1	4.3	0.7	0	85	9	7	16	0.2	0.1	0.03	0.10	1	0	0	5	1

	レチノール 当量 μg	ビタミンD μg	α-トコフェ ロール mg	ビタミンK μg	ビタミンB1 mg	ビタミンB2 mg	ナイアシン mg	ビタミンB6 mg	ビタミンB12 μg	葉酸 μg	パントテン 酸 mg	ビオチン μg	ビタミンC mg	食塩相当 量 g
1) コメ 玄米	0	0.0	1.2	0	0.41	0.04	6.3	0.45	0.0	27	1.37	6.0	0	0.0
精白米	0	0.0	0.1	0	0.08	0.02	1.2	0.12	0.0	12	0.66	1.4	0	0.0
2) サツマイモ	2	0.0	1.5	0	0.11	0.04	0.8	0.26	0.0	49	0.90	4.1	29	0.0
3) ジャガイモ	0	0.0	0.0	0	0.09	0.03	1.3	0.18	0.0	21	0.47	0.4	35	0.0
4) ダイズ	1	0.0	2.3	18	0.71	0.26	2.0	0.51	0.0	260	1.36	27.5	3	0.0
エダマメ	22	0.0	0.8	30	0.31	0.15	1.6	0.15	0.0	320	0.53	11.1	27	0.0
5) レタス	170	0.0	1.2	160	0.10	0.10	0.3	0.08	0.0	120	0.14	0.0	17	0.0
6) ミニトマト	80	0.0	0.9	7	0.07	0.05	0.8	0.11	0.0	35	0.17	3.6	32	0.0
7) キュウリ	28	0.0	0.3	34	0.03	0.03	0.2	0.05	0.0	25	0.33	1.4	14	0.0
8) イチゴ	1	0.0	0.2	0	0.02	0.01	0.2	0.02	0.0	45	0.17	0.4	31	0.0

3.3. 月面農場における1日の摂取量の決定²⁾

本ワーキンググループでは、地球からの補給に頼らず月面農場で栽培された植物で自給自足を行うことを前提条件として検討を進めた。それぞれの栽培作物の栄養素的な特徴を踏まえ、「食事摂取基準」の示す範囲を目指し、はじめに、エネルギーと3大栄養素のバランスを考慮し8作物種の1日量を決定した。

ビタミン・ミネラルは可能な限り推奨量(RDA)を目指し、推定平均必要量(EAR)から耐用上限量(UL)の範囲を目標値とし、内容を調整した。最終的に玄米 400g、サツマイモ 150g、ジャガイモ 75g、大豆(乾)120g、エダマメ 50g、リーフレタス 150g、トマト 200g、キュウリ 100g、イチゴ 50g を本ワーキンググループにおける1日量として決定した。8つの作物種の補給量と基準値(※推定平均必要量、推奨量、目安量のいずれか)との比較は表4に示す。

表 3.4 8 作物種から得られる栄養量と日本人の食事摂取基準(2015 年版)基準値との比較

食品名	重量 (g)	エネルギー kcal	たんぱく質 g	脂質 g	炭水化物 g	食物繊維 g	ナトリウム mg	カリウム mg	カルシウム mg	マグネシウム mg	リン mg	鉄 mg	亜鉛 mg	銅 mg	マンガン mg	ヨウ素 μg	セレン μg	クロム μg	モリブデン μg
玄米	400	1412	27.2	10.8	297.2	12	4	920	36	440	1160	8.4	7.2	1.08	8.24	0	12	0	256
サツマイモ	150	201	1.8	0.3	47.85	3.3	16.5	720	54	36	70.5	0.9	0.3	0.26	0.62	2	0	2	6
ジャガイモ	75	57	1.2	0.075	13.2	0.975	0.75	307.5	2.25	15	30	0.3	0.15	0.08	0.08	0	0	4	3
大豆(乾燥)	120	506	40.56	23.64	35.4	21.48	1.2	2280	216	264	588	8.16	3.72	1.28	3.01	0	6	4	420
エダマメ	50	68	5.85	3.1	4.4	2.5	0.5	295	29	31	85	1.35	0.7	0.21	0.36	0	1	1	120
大豆油	30	276	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0	0	0	0
リーフレタス	150	24	1.8	0.3	4.8	3	6	615	99	22.5	46.5	2.7	0.6	0.08	0.65	0	0	0	0
ミニトマト	200	58	2.2	0.2	14.4	2.8	8	580	24	26	58	0.8	0.4	0.12	0.20	8	0	0	8
キュウリ	100	14	1	0.1	3	1.1	1	200	26	15	36	0.3	0.2	0.11	0.07	1	1	1	4
イチゴ	50	17	0.45	0.05	4.25	0.7	0	85	8.5	6.5	15.5	0.15	0.1	0.03	0.10	1	0	0	5
合計	1325	2633	82.06	68.565	424.5	47.9	38	6003	495	856	2090	23.1	13.4	3.23	13.32	11	20	10	822
基準			P比(12%)	F比(23%)	C比(65%)			2500	650	370	1000	7.5	10	1	4	130	30	10	25
充足率								240%	76%	231%	209%	307%	134%	323%	333%	8%	65%	104%	3286%
評価			○	○	○	○	○	過剰	不足	過剰	○	○	○	○	過剰	不足	不足	○	過剰

食品名	レチノール μg	ビタミンD μg	α-トコフェ ロール mg	ビタミンK μg	ビタミンB1 mg	ビタミンB2 mg	ナイアシン mg	ビタミンB6 mg	ビタミンB12 μg	葉酸 μg	パントテン 酸 mg	ビオチン μg	ビタミンC mg	食塩相当 量 g
玄米	0	0.0	4.8	0	1.64	0.16	25.2	1.80	0.0	108	5.48	24.0	0	0.0
サツマイモ	3	0.0	2.3	0	0.17	0.06	1.2	0.39	0.0	74	1.35	6.2	44	0.0
ジャガイモ	0	0.0	0.0	0	0.07	0.02	1.0	0.14	0.0	16	0.35	0.3	26	0.0
大豆(乾燥)	1	0.0	2.8	22	0.85	0.31	2.4	0.61	0.0	312	1.63	33.0	4	0.0
エダマメ	11	0.0	0.4	15	0.16	0.08	0.8	0.08	0.0	160	0.27	5.6	14	0.0
大豆油	0	0.0	3.1	63	0.00	0.00	0.0	0.00	0.0	0	0.00	0.0	0	0.0
リーフレタス	255	0.0	1.8	240	0.15	0.15	0.5	0.12	0.0	180	0.21	0.0	26	0.0
ミニトマト	160	0.0	1.8	14	0.14	0.10	1.6	0.22	0.0	70	0.34	7.2	64	0.0
キュウリ	28	0.0	0.3	34	0.03	0.03	0.2	0.05	0.0	25	0.33	1.4	14	0.0
イチゴ	1	0.0	0.2	0	0.02	0.01	0.2	0.02	0.0	45	0.17	0.4	31	0.0
合計	459	0.0	17.4	388	3.21	0.92	33.0	3.42	0.0	989	10.12	78.0	221	0.0
基準	900	5.5	6.5	150	1.4	1.6	15	1.4	2.4	240	5	50	100	
充足率	51%	0%	268%	258%	230%	57%	220%	244%	0%	412%	202%	156%	221%	
評価	不足	不足	○	過剰	過剰	不足	○	○	不足	○	過剰	過剰	過剰	

3.4. 必要な栽培面積

植物工場で想定する成長・収量などの栽培データと可食部収穫指数(H.I.)などを考慮すると、必要面積は以下になる。

表 3.5 必要栽培面積の算出例

	1人あたりの 必要重量 (g/day)	植物工場における生産性			1人あたりの 必要面積 (m ²)	必要面積	
		1作の生産量 (g/m ²)	栽培日数 (day)	日生産量 (g/m ² /day)		6人 (m ²)	100人 (m ²)
イネ	400	900	90	10	40.0	240	4000
ジャガイモ	75	8000	360	22	3.4	20	338
サツマイモ ¹⁾	150	—	—	20	7.5	45	750
ダイズ	350	1400	100	14	25.0	150	2500
レタス	150	2500	30	83	1.8	11	180
トマト	200	83000	360	231	0.9	5	87
キュウリ	100	70000	360	194	0.5	3	51
イチゴ	50	17000	360	47	1.1	6	106

¹⁾ サツマイモの栽培例が少ないため、日生産量をジャガイモの約9割と仮定した。

3.5. 過剰となる可能性のある栄養素

摂取量が過剰となる可能性のある栄養素(推定平均必要量または推奨量の2倍以上)は、カリウム、マグネシウム、ビタミンK、ビタミンB₁、パントテン酸、ビタミンC、銅、α-トコフェロール、ナイアシン、ビタミンB₆、葉酸、鉄、マンガン、モリブデンの14の栄養素である。

表 3.6 推定平均必要量または推奨量の2倍以上となる栄養素
(上限量以下の栄養素は除く)

<耐用上限量なし>

食品名	カリウム mg	マグネシウム mg	ビタミンK μg	ビタミンB ₁ mg	パントテン酸 mg	ビタミンC mg
1日の合計栄養価	6003	856	388	3.21	10.12	221
基準	2500	370	150	1.4	5	100
充足率	240%	231%	258%	230%	202%	221%
耐用上限量	—	—	—	—	—	—
評価	過剰	過剰	過剰	過剰	過剰	過剰

<耐用上限量あり>

食品名	銅 mg	αトコフェロール mg	ナイアシン mg	ビタミンB ₆ mg	葉酸 μg	鉄 mg	マンガン mg	モリブデン μg
1日の合計栄養価	3.23	17.4	33.0	3.42	989	23.1	13.32	822
基準	1	6.5	15	1.4	240	7.5	4	25
充足率	323%	268%	220%	244%	412%	307%	333%	3286%
耐用上限量	10	900	350	60	1000	55	11	550
評価	過剰	過剰	過剰	過剰	過剰	過剰	過剰	過剰

8つの作物種の補給量による栄養素と「食事摂取基準」と比較すると、マンガン、モリブデンが耐用上限量以上となること課題としてあげられる。

マンガンは成人の体内に12~20mg存在し、マンガンスーパーオキシドジスムターゼなどの酵素の構成、アルギナーゼなどの酵素の活性化を行っており、骨代謝、糖脂質代謝、運動機能、皮膚代謝等に関与する。マンガンは穀類、野菜類、豆類に多く含まれ、厳密な菜食など特異な食事形態及びサプリメントの不適切な利用によって過剰摂取が生じる可能性があり、耐用上限量が設定されている。マンガンは、糠側に偏在するため、精米によって5.0mg減らすことが可能である(図3.1)。過剰症を防ぐ意味でも精米の工程は必要となる可能性がある。

一方、モリブデンは、キサンチンオキシダーゼ、アルデヒドオキシダーゼ、亜硫酸オキシダーゼの補酵素として機能している。モリブデンも穀類や豆類に多く含まれることから、極端な菜食の場合に摂取量が多くなる。モリブデンは玄米と白米で比較した場合、両者に明確な差を認めず、コメ全体にほぼ均一に分布している⁷⁾、との報告があり、モリブデンは、精米による減少は見込めない。しかし、植物性食品のモリブデンをはじめとする微量ミネラル濃度は、生育土壌や品種の影響を受けて変動することが明らかとなっていることから、養液の組成を含め検討を行うことが必要である。

	マンガン mg		マンガン mg
コメ(玄米) 400g	8.24	コメ(白米) 400g	3.24
7作物種の合計	5.08	7作物種の合計	5.08
合計	13.32	合計	8.32

精米
-5mg

図 3.1 コメの精米によるマンガン量の変化

8つの作物種の補給量が定平均必要量または推奨量の2倍以上となる栄養素は、12の栄養素である。これらは、耐用上限量の設定がない、または、耐用上限量以下のため健康障害リスクは少ないと考えられる。しかし、宇宙環境では宇宙放射線への暴露により、鉄が酸化剤として組織障害を引き起こす懸念があるため、鉄の過剰摂取には注意が必要である⁷⁾。また、葉酸をはじめ、過剰の可能性のある栄養素のうち、ビタミンK、ビタミンC以外の栄養素は精米を行うことで含有量が減少する(表 3.7)。ナイアシンのみ基準値をわずかに下回るが、過剰による健康リスクが懸念されるため、過剰摂取のリスク軽減を優先して考える必要がある。モリブデンやマンガンと同様に、精米の行程を行うことや、栽培液組成を含め検討を進める必要がある。

また、食物繊維やカリウムは耐用上限量が設定されていないが、現代では不足しやすい栄養素のため過剰に摂取した場合についての検討が少なく言及が難しい。耐用上限量がない栄養素においても、地上での生活と大きく異なることから、慎重な検討が必要である。

表 3.7 コメの精製による栄養価の変化

	重量 (g)	エネルギー kcal	カリウム mg	マグネシウム mg	鉄 mg	銅 mg	αトコフェロール mg	ビタミンK μg	ビタミンB1 mg	ナイアシン mg	ビタミンB6 mg	葉酸 μg	パントテン酸 mg	ビタミンC mg
玄米400g+7作物種	1325	2633	6003	856	23.1	3.23	17.4	388	3.21	33.0	3.42	989	10.12	221
充足率			240%	231%	307%	323%	268%	258%	230%	220%	244%	412%	202%	221%
白米400g+7作物種	1325	2653	5439	508	17.9	3.03	13.0	388	1.89	12.6	2.10	929	7.28	221
充足率			218%	137%	238%	303%	200%	258%	135%	84%	150%	387%	146%	221%
精米の影響			減少	減少	減少	減少	減少	なし	減少	減少	減少	減少	減少	なし

3.6. 不足の可能性のある栄養素

日本人の食事摂取基準と8作物種からの補給量を比較すると、カルシウム、ヨウ素、セレン、ビタミンA(レチノール)、ビタミンD、ビタミンB₂、ビタミンB₁₂の7つの栄養素(ナトリウムは、野菜だけで補給はされないが、調理の際に、調味料等々から摂取が見込めることから除外)が推定平均必要量または推奨量以下となる。

月面農場では、緑黄色野菜が少なく、動物性食品(魚類、肉類、乳製品)の供給がないため、食品に特異的に含まれる栄養素の不足が考えられる。中でも、宇宙環境では筋・骨量が減少するとされており、カルシウム、ビタミンDには注意する必要がある。8作物種からの補給で不足する栄養素に関しては、補助食品(サプリメント)から補う必要がある。基準と比べ不足する栄養素の量は158.9mgと計算である(表 3.9)。実際に、宇宙飛行士は不足するビタミンDサプリメントの持ち込みを行っており、不足する栄養素は欠乏症のリスクを回避する上でも補うことが必要である。

表 3.8 不足する栄養素

食品名	重量 (g)	カルシウム mg	ヨウ素 μg	セレン μg	レチノール μg	ビタミンD μg	ビタミンB2 mg	ビタミンB12 μg
玄米	400	36	0	12	0	0.0	0.16	0.0
サツイモ	150	54	2	0	3	0.0	0.06	0.0
ジャガイモ	75	2.25	0	0	0	0.0	0.02	0.0
大豆(乾燥)	120	216	0	6	1	0.0	0.31	0.0
エダマメ	50	29	0	1	11	0.0	0.08	0.0
大豆油	30	0	0	0	0	0.0	0.00	0.0
リーフレタス	150	99	0	0	255	0.0	0.15	0.0
ミニトマト	200	24	8	0	160	0.0	0.10	0.0
キュウリ	100	26	1	1	28	0.0	0.03	0.0
イチゴ	50	8.5	1	0	1	0.0	0.01	0.0
合計	1325	495	11	20	459	0.0	0.92	0.0
基準		650	130	30	900	5.5	1.6	2.4
充足率		76%	8%	65%	51%	0%	57%	0%
評価		不足	不足	不足	不足	不足	不足	不足

表 3.9 不足する栄養素量

	補給量	基準値	不足量	(mg)
カルシウム (mg)	495	650	155	155
ヨウ素 (μg)	11	130	119	0.119
セレン (μg)	20	30	10	0.01
レチノール (μg)	459	900	441	0.441
ビタミンD (μg)	0	5.5	5.5	0.0055
ビタミンB2 (mg)	0.92	1.6	0.68	0.92
ビタミンB12 (mg)	0	2.4	2.4	2.4
合計(mg)				158.9

3.7. 8 作物種を用いた食事イメージ





3.3 で決定された 8 作物種の補給量で、一般的な家庭料理を参考に 1 日の食事イメージを作成した。

表 3.10 1 日の食事イメージ

	料理名	料理写真	エネルギー kcal	たんぱく質 g	脂質 g	炭水化物 g	食物繊維 g	食塩相当 量 g
朝	ごはん		469	9.0	3.6	98.8	4.0	0.0
	煮豆		156	10.8	5.9	15.7	5.4	1.3
	呉汁		59	4.5	2.5	4.9	2.2	1.1
	中華和え		71	1.9	4.2	7.7	1.8	0.9
	いちご		17	0.5	0.1	4.3	0.7	0.0
	合計		773	26.8	16.2	131.4	14.1	3.3
昼	ダイズカレー		860	27.4	28.2	124.2	13.9	1.6
	レタスの甘酢和え		31	0.9	0.2	6.5	1.1	0.0
	合計		891	28.3	28.4	130.7	15.0	1.6
間食	さつまいも茶巾		117	0.7	0.4	27.8	2.1	0.1
	合計		117	0.7	0.4	27.8	2.1	0.1
夕	ごはん		469	9.0	3.6	98.8	4.0	0.0
	ダイズハンバーグ		433	15.9	23.1	41.3	9.2	2.0
	サツマイモの甘煮		128	0.7	0.4	30.8	2.1	0.1
	トマトスープ		14	0.6	0.1	3.3	0.8	1.0
	えだまめ		34	2.9	1.6	2.2	1.3	0.0
	合計		1078	29.2	28.7	176.4	17.3	3.1
一日の合計			2859	84.9	73.6	466.2	48.4	8.1

別途、サツマイモは茎や葉を喫食できることから、レシピを作成した。

表 3.11 サツマイモ茎葉料理

お浸し	きんぴら	チヂミ風	中華炒め
		 (ジャガイモのすりおろしをつなぎに利用)	

サツマイモの茎や葉は、日本では食用される機会が少ないが、クセがなく、短時間の加熱でおいしく食べることができる。日本食品標準成分表 2015 年版(七訂)では、サツマイモの茎や葉の栄養価の記載がなく、詳細な栄養価は不明のため、分析が必要である。

3.8. 8 作物種のための食材による栄養摂取の限界

8 作物種のための食環境は、地球上の食環境と大きく異なる。特に、地上では、多岐に渡る食品があり、豊かな食環境は栄養素の補給だけでなく、精神衛生の面でも大きく貢献している。肉・魚・卵・乳製品などの動物性食品、キノコや果樹、海藻といった食材が今回検討から外れたが、8つの植物性食品のみで構成された食事による生活は、これまでの実績がなくわからない部分が多い。

実際に宇宙食は、16 周期のサイクルで作成されているが、宇宙飛行士からは、メニューの多様化が求められている¹¹⁾こと、増田らは、7 種類の作物だけでヒトの精神的ストレスを低く維持しながら長期間の閉鎖居住実験を行うことは不可能¹²⁾、と言及している。長期的な滞在を目指すためにも、将来的には栽培品目の増加、更には牛、豚、鶏、魚といった家畜類の導入を行い、食事に対する多様性を増やしていくことが必須と考えられる。

3.9. まとめ

対象とした 8 作物種で、エネルギーを始め炭水化物、たんぱく質、脂質の 3 大栄養素を満たすことは可能であったが、ビタミン・ミネラルの過不足が課題である。マンガン、モリブデンをはじめ、過剰の可能性のある栄養素は 14 種類である。これらは過剰摂取による健康リスクが懸念されるため、不足する栄養素と比べ、健康リスク軽減を優先して考える必要がある。その対処方法として、精米によって、糠・胚芽を取り除くことや、栽培液組成を変えることが挙げられる。

不足する栄養素は、カルシウム、ヨウ素、セレン、ビタミン A(レチノール活性当量)、ビタミン D、ビタミン B₂、ビタミン B₁₂ である。その要因として月面農場には動物性食品、海藻、きのこ、緑黄色野菜がないためである。今回検討をした 8 作物種からの補給が難しいため、サプリメントからの補給が必須である。サプリメントの補給量は 158.9 mg/日程度と考えられる。

今回は、30～49 歳の男性(身体活動レベル 2)を基準に検討を行ったが、他の年齢または、女性については別途検討が必要である。

引用文献

- 1) 松本暁子, “宇宙での栄養”宇宙航空環境医学, Vol.45, No.3, 75-97, 2008
- 2) 日本人の食事摂取基準(2015 年版), 厚生労働省
- 3) 養液栽培の全て, 日本施設園芸協会・日本溶液栽培研究会共編, 誠文堂, 2012
- 4) Eiji Goto, Production of pharmaceutical materials using genetically modified plants grown under artificial lighting. *Acta Hort.* 907: 45-52. 2011.
- 5) 後藤英司, 人工環境下の植物の光合成と物質生産, *TechnoInnovation*, 16(4): 18-22, 2006
- 6) 食品解説つき 新ビジュアル食品成分表, 新しい食生活を考える会. 大修館書店, 2016
- 7) 野菜と果物の品目ガイド, 霜村春奈, 農経新聞, 2014
- 8) からだにおいしい 野菜の便利帳, 坂木利隆, 高橋書店, 2008
- 9) 日本食品標準成分表 2015 年版(七訂), 文部科学省
- 10) 齊悦, 崔懿, 下城千可, 吉田宗弘, “コメのマンガンとモリブデン含有量”, *Biomedical Research on Trace Elements* 26(1); 23-26, 2015
- 11) 立花正一, 中沢孝, 渋川喜和夫, “宇宙環境のストレスと宇宙食”, 日本食品科学工学会誌 第 55 巻 第 12 号, 2008 年 12 月
- 12) 増田毅, 多胡靖宏, “閉鎖居住実験の準備状況(1)閉鎖生態系実験施設(CEEF)における食糧供給” *Eco-Engineering*, 17(3), 183-189, 2005

4. 栽培システム

北宅善昭(大阪府立大学大学院 生命環境科学研究科緑地環境科学専攻 教授)
渡邊博之(玉川大学 農学部生命化学科 教授)

宇宙での植物栽培では空間容積、エネルギー使用量などが限られるので、植物密度を高め、同時に照明効率を高める必要がある。光源には、発光効率、耐久性、安全性に優れ、また広範囲で正確な波長制御が可能な発光ダイオード(LED)を用いる。気温、湿度などの環境は地上での一般的な最適値に制御し、また CO_2 濃度は $0.7\sim 1\text{ mmol mol}^{-1}$ に制御する。

宇宙植物栽培装置を用いて、効率的な植物生産を行なうための環境制御技術を確立するためには、植物のガス交換および成長に対する物理的環境要素(光強度、明暗周期、光の波長、気温、湿度、 CO_2 濃度、気流、培地水分、培地通気性など)の影響に加えて、微小重力や低圧環境など宇宙特有の環境条件の影響についても検討しなければならない。

植物生産では、光合成速度を最大とする環境制御が重要となる。ここではまず、地上での植物生産と共通する環境要素の制御について、主要な物理的環境要素が光合成に及ぼす影響について、さらに、宇宙の微小重力下での環境制御の課題について検討した。

4.1. 月面農場における作物栽培環境制御の基本的留意点

4.1.1. 光環境

宇宙での植物栽培では空間容積、エネルギー使用量などが限られるので、植物密度を高め、同時に照明効率を高める必要がある。光源には、発光効率、耐久性、安全性に優れ、また広範囲で正確な波長制御が可能な発光ダイオード(LED)を用い、光合成有効光量子束密度(PPFD)は、葉菜類、果菜類、穀類、イモ類でそれぞれ、100-300、200-500、400-800、200-400 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 程度とする。光質については、植物種・品種により、また栽培の目的により条件を変える必要がある。

4.1.2. 温度環境

植物体内での生化学反応や植物の生理機能活性に直接的に影響するのは、植物体温(あるいは葉温)である。例えば、光合成反応には最適温度があり、一般に純光合成速度は最大となる葉温は、 $20\sim 30^\circ\text{C}$ の範囲にある。葉温は、葉で吸収される放射エネルギーの増加により上昇し、葉から外気へ輸送される顕熱エネルギーおよび潜熱エネルギーの増加により低下する。従ってこれらのエネルギー収支に関与する環境要因(光強度、気温、湿度、気流速度など)は葉温に影響し、ひいては光合成・成長に影響するため、複合環境制御の考え方が重要となる。

4.1.3. 湿度環境

相対湿度と純光合成速度の関係は、他の環境条件(たとえば気流速度など)によって変化するが、一般に相対湿度 $75\sim 85\%$ で純光合成速度は最大となる。相対湿度が 90% になると純光合成速度は低下するが、これは高相対湿度(低水蒸気飽差)下では、蒸散による水損失が抑制されると同時に、根圧による吸水力は維持されたままであるため、葉内水分が過剰となり、その圧力で気孔開度が小さくなることが原因と考えられている。

4.1.4. CO_2 環境

一般に CO_2 濃度の上昇により純光合成速度は増加するが、 CO_2 飽和点を超えると純光合成速度は増加しなくなる。植物の光合成に対する CO_2 濃度の影響は、光強度や温度など、他の環境要素により大きく異なる。 CO_2 飽和点は、光強度の増加に伴い上昇する。 CO_2 補償点(純光合成速度がゼロとなる時の CO_2 濃度)は、光強度の増加に伴い低下する。 CO_2 濃度の上昇に伴い、純光合成速度に対する葉温の影響は著しくなり、純光合成速度を最大にする葉温は、高温側に移行する。低 CO_2 濃度下では、葉温を高めて光合成反応に関与する酵素の活性を高めても、光合成の材料である CO_2 の量が制限因子となるので、純光合成速度増加に対する葉温上昇の効果は小さい。

4.1.5. 気流環境

栽培空間の環境条件を均一にし、また純光合成速度や蒸散速度を高めて生育を促進するために、栽培空間の空気を攪拌する必要がある。気流速度が低下すると葉面境界層抵抗が増大し、光合成（図 4.1）や蒸散が抑制され、その結果生育が抑制される。とくに植物体周辺の気流速度が 0.5 m s^{-1} 以下では、気流速度の低下にともなう生育抑制が著しい。個体群内部の植物体周辺気流速度は、 0.1 m s^{-1} 以下になる場合が多い。また、環境要因の多くは葉面境界層を介して作物の光合成や蒸散に影響するので、気流環境の制御は重要である。

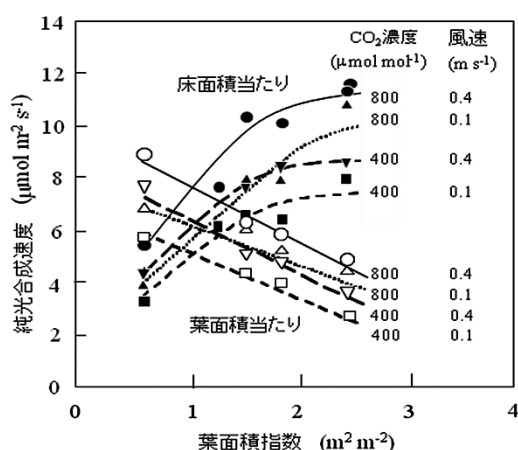


図 4.1. トマト苗個体群の純光合成速度に及ぼす葉面積指数 (LAI)、 CO_2 濃度、および風速の影響 (Kitaya et al., 2004 より) (黒塗潰し：床面積当たり、白抜き：葉面積当たり)

光合成有効光量子束密度: $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 気温: 23°C , 相対湿度: 55%, 植物高: 0.05-0.2 m

4.1.6. 根圏環境

一般に養分組成、pH および液温の制御は、養液タンク内で行う。しかしガス環境の調節は養液タンク内だけでは不十分である。とくに根が常に養液中にある水耕栽培の場合、液中に溶存している O_2 濃度が生育の制限要因になることが多い。たとえば、 20°C の水 1 リットル中に溶存できる O_2 は最大でも 9.3 mg に過ぎず、根の呼吸により短時間で消費される。したがって正常な根の機能を維持するためには、常に養液中に O_2 を補給する必要がある。とくに液温が高くなると、根の呼吸速度が増加し、 O_2 消費量が多くなることに加えて、液中の飽和 O_2 濃度は低下するので、 O_2 不足になりやすい。根への O_2 供給量を増すため、送液方法や栽培ベッドの構造などにいろいろな工夫がなされている。静水中での O_2 拡散係数は静気中の約 1 万分の 1 であるので、水耕栽培の根の近傍では O_2 が吸収されると濃度はすぐに低下する。根が常に培養液中にある水耕栽培では根周辺の O_2 濃度は低下し易いため、養液を強制流動させて、 O_2 を根の表面まで速やかに輸送することが重要である。噴霧耕の場合、根への O_2 供給が制限されることはない。

4.2. 宇宙微小重力下での植物栽培

4.2.1. 宇宙微小重力下での植物栽培における環境制御の問題点

微小重力については、地上で水平においた植物を回転させて重力の方向を攪乱させる装置(クリノスタット)を用いた擬似微小重力実験や、スペースシャトルを用いた重力屈性に関する植物生理学的研究が多く行なわれ、微小重力下でも植物は生育できることが示されている。また地上において、重力の方向が反対になるように植物を逆さに吊り下げて栽培した実験により、重力方向が逆の場合 (-1 G の重力)でも、光強度 $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上であれば、図 4.2 に示すように光屈性により植物の成長方向を制御でき、ほぼ正常に育成できることが示された³⁾。最近では、国際宇宙ステーションでの長期の栽培試験により、宇宙の微小重力下でも植物が栽培でき、開花、結実することが実証されている。

しかしこれまでの宇宙実験で解析されたコムギやシロイヌナズナの生殖過程では、開花、結実はそのものの、発芽能力を持つ稔性種子の形成率が著しく低下し、またカラシナではほぼ地上と等しい種子数を採取できたが、種子の形質や成熟過程に変異が生じたとの報告もある^{4),5),6)}。これらの異常の原因については、不明な点が多い。

宇宙での植物栽培では人間の食料となる穀類や豆類の生産が重要であり、これらを生産するためには、宇宙で開花、受精、稔実などの生殖成長を正常に行なわせなければならない。また長期の有人活動を支援するためには、種子からの発芽、栄養成長、生殖成長、種子形成の生活環を何世代にもわたって繰り返さなければならない。しかしこれまでの宇宙実験結果から、上述のように、植物の生殖成長や種子形成が正常には行なわれないことが問題となることが予想される。



図 4.2 植物の成長に対する重力影響を地上で検証するための逆さ吊り下げ栽培
(Kitaya et al., 1992)

4.2.2. 微小重力が植物葉の熱・ガス交換におよぼす影響

宇宙の微小重力場では温度差による熱対流が生じないため、熱およびガスの交換速度が著しく抑制され、植物器官での温度上昇や葉での光合成抑制が生じると考えられる。ここでは、葉の熱・ガス交換におよぼす微小重力の影響を検討するため、航空機の放物線飛行中の重力変化(0.01~2 G)に伴う葉温および葉の純光合成速度の変動について調べた結果を紹介する。

1 回の放物線飛行において、重力 1 G での水平飛行から約 20 秒間の上昇加速飛行(2 G)を経て、約 20 秒間の微小重力飛行(0.01 G)を行ない、その後水平飛行に戻るまでの約 30 秒間は 1.5 G の重力を受ける。水平飛行時(重力 1 G)、上昇加速飛行時(2 G)、微小重力飛行時(0.01 G)、および水平飛行復帰時(1.5 G)におけるオオムギ生葉の葉温分布を図 4. 3 に示す⁷⁾。葉温分布は、赤外線熱画像カメラで取得した。重力が 1 G から 2 G に増加すると、葉の中央部の高温域が減少し、0.01 G になると高温域は増加し、1.5 G になると再度減少した。葉の平均温度は、水平飛行時約 30℃であったが、上昇加速飛行時に約 0.3℃低下した。その後、微小重力飛行開始とともに、葉温は直線的に上昇し、20 秒後には 1 G での葉温より約 1℃上昇した。水平飛行に復帰する時に重力が上昇すると、葉温は再び低下した。また微小重力下では、葉の先端部の細い部位における葉温が 2~3℃ 上昇し、葉の広い部位に比べて葉温上昇が顕著であった⁸⁾。重力 1 G 下では対流が生じており、葉の先端部の細い部位における葉面境界層が、葉の広い部位のそれに比べて薄く、そのため熱(潜熱+顕熱)輸送に対する抵抗が小さいので、細い部位の葉温は広い部位より低い。しかし対流のない微小重力下では、葉の幅に関係なく葉面境界層の厚さがほぼ一定であるので、葉温も葉の幅に関係なくほぼ同じ値に近づく。そのため重力が 1 G から 0.01 G に低下すると、微小な部位の温度上昇が顕著になり、葉面での温度分布は均一化される。

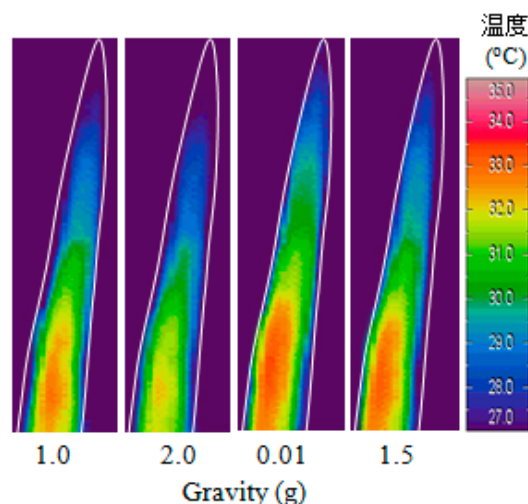


図 4.3 航空機放物線飛行中の重力変化にともなうオオムギ葉表面の温度分布の変動

また上記実験と同様の方法で、重力の変化にともなうオオムギ生葉、銅板製模擬葉、湿潤濾紙製模擬葉の表面平均温度の変動を比較した。各模擬葉の放射率(ある温度の物体から放射される電磁波のエネルギーと、同じ温度の黒体から放射される電磁波のエネルギーとの比であり、放射吸収率と同じ値である)、および熱容量は、生葉とほぼ同様であった。蒸発速度あるいは蒸散速度は、銅板製模擬葉<オオムギ生葉<湿潤濾紙製模擬葉の順に大きい。1 G から 0.01 G への重力減少にともなう各試料の温度上昇は、銅板模擬葉で 0.1℃、生葉で 0.8℃、濾紙模擬葉で 1.1℃となり、蒸発散速度が大きい試料ほど大きくなった。このことから、微小重力場での各試料の熱交換において、対流抑制に伴い、水の蒸発散速度が低下し潜熱輸送が抑制されたために、温度上昇が大きくなったと考えられる。

オオムギ葉の純光合成速度およびイチゴ葉の蒸散速度に及ぼす重力の影響を図 4.4 に示す^{7),8),9),10)}。水平飛行時、約 $4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であったオオムギ葉の純光合成速度は、微小重力飛行(重力 0.01G)開始とともに低下し、20 秒後には、水平飛行(重力 1G)時に比べて約 20%低下した。水平飛行に復帰するために、重力が上昇すると純光合成速度は急激に上昇した。また微小重力飛行時のイチゴ葉の蒸散速度は、水平飛行時に比べて約 40%低下した。

微小重力場では温度差による熱対流が生じないため、葉と周辺空気との熱・ガス交換が抑制され、蒸散速度の低下による葉温の上昇、純光合成速度の低下が生じたと考えられる。この実験では、微小重力の期間が 20 秒と短く、熱・ガス交換は定常状態になっていない。宇宙での植物実験のように、植物が長期間、微小重力下に置かれる場合、葉温の上昇は、20 秒間の本実験結果の約 2 倍になることが、植物の熱的特性から予測される。また純光合成速度や蒸散速度の低下も、宇宙の連続的な微小重力下ではさらに著しくなると考えられる。

微小重力下での植物体温の上昇および純光合成速度の低下は、宇宙で植物生産を行なう上で留意すべき重要な問題である。宇宙の微小重力下に長時間おかれる植物では、光合成、蒸散、葉温はどのように影響を受けるのであろうか。例えば植物体温の上昇に関して、イネ、コムギ、トマトなどの花粉形成は 32～34℃程度の高温によって障害を受ける。

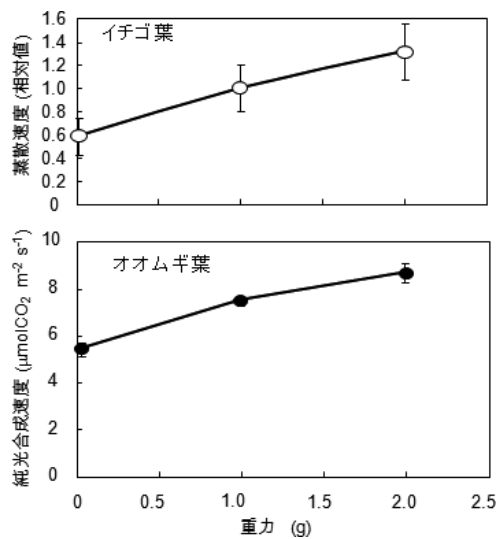


図 4.4 異なる重力レベルにおけるオオムギの純光合成速度

(Kitaya et al., 2001; Hirai & Kitaya, 2009 より)

各値は4回の放物線飛行についての平均値。縦棒は標準偏差を表す。

そこで、植物の生殖成長に対する宇宙環境の影響として、微小重力が植物の生殖器官の温度上昇を介して、花粉の形成、発育に及ぼす影響を予測するため、航空機放物線飛行実験により、微小重力下で熱対流が生じない場合の生殖器官微細組織の温度の動態について検討した。その結果、イネの穎花とオシベの葯、およびトマトの花弁とメシベ柱頭の温度は、重力が1 Gから2 Gに増加すると低下し、0.01 Gに低下すると上昇した(図 4.5)。1 Gから0.01 Gへの重力の低下に伴い、イネの穎花では2℃、オシベの葯では3.6℃温度が上昇し、またトマトの花弁では2.7℃、メシベ柱頭では2.4℃温度が上昇した。重力の低下に伴う植物体各部位の表面温度の上昇は、イネのオシベ葯のような微細な部位で、特に著しくなった。この実験結果は、微小重力下で熱対流が生じない場合、温度上昇により生殖器官の異常を引き起こされる可能性を示唆している。以上のことから、微小重力は、光合成、蒸散などのガス交換を抑制して、栄養成長の抑制を引き起こすとともに、光合成抑制に伴う物質生産の抑制および生殖器官の温度上昇により、不稔などの生殖成長の異常を引き起こすと考えられる(図 4.6)。これらの成長抑制や生殖異常を防ぐためには、適正な気流環境制御が不可欠である。

以上のように、微小重力下では、熱対流(密度対流)が生じにくいいため、強制空気流動が無い場合、放物線飛行中に生じる20秒間の微小重力(0.01G)でも、熱対流の抑制により植物葉と周辺空気との熱交換が抑制され、約2~3℃の葉温上昇が生じ得る。とくに微小重力下では、蒸散抑制による潜熱交換の抑制が、葉温上昇に大きく関与する。また微小重力下での対流の抑制により、葉でのCO₂吸収速度(純光合成速度)も低下する。従って熱およびガス交換の観点から、宇宙での植物栽培において、気流制御による対流促進は不可欠である。また宇宙で種子を稔らせて持続的な植物生産を行なおうとする場合、生殖異常を引き起こす生殖器官の過度の温度上昇を防止するためにも、植物周辺において強制的に空気を流動させ、生殖器官での熱・ガス交換を促進させる必要がある。また高密度植物群落内は気流速度が低くなるため、ガス拡散を促進して光合成や蒸散を促進するためにも、気流制御は不可欠である。

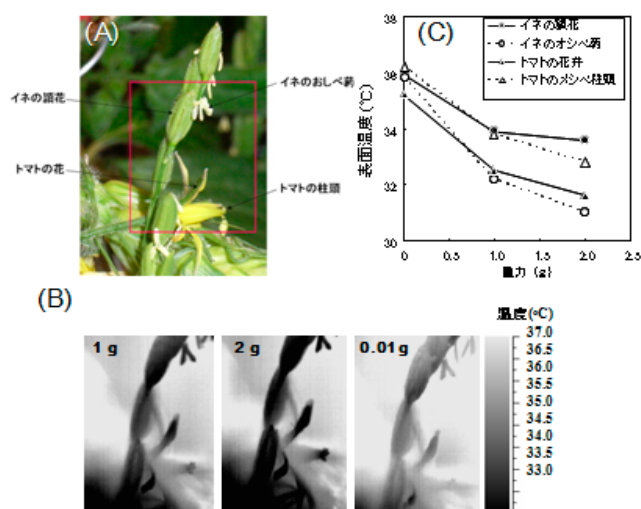


図 4.5 植物生殖器官の表面温度に及ぼす重力の影響
(Kitaya and Hirai, 2013 より)

(A) 測定部位の写真

(B) 航空機放物線飛行中の異なる重力 (1, 2, 0.01 g) 下での熱画像

(C) 植物生殖器官の表面温度に及ぼす重力の影響を示すグラフ

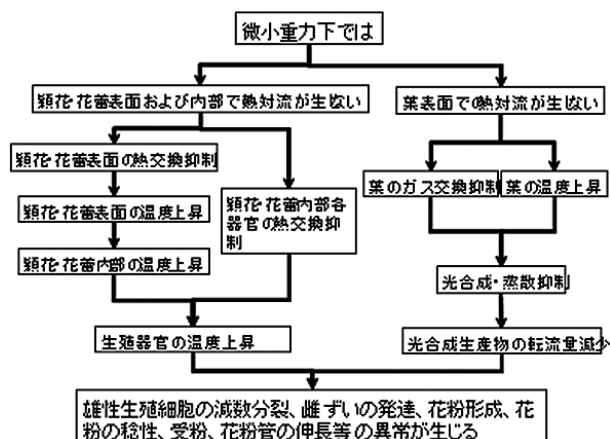


図 4.6 ガスおよび熱交換の観点から見た植物の生殖成長に及ぼす微小重力の影響

4.3. 宇宙環境での植物栽培におけるその他の留意点

月面はほぼ真空であるため 0 気圧であり、火星表面は 0.06～0.09 気圧である。宇宙ステーション内も、部分的に減圧することは容易である。このような低圧条件下では、施設内を低圧にすることで、施設の外壁構造などを簡易にできる。従って宇宙での植物栽培では、低圧環境下での植物栽培技術の確立も重要な課題となる。地上気圧の 1/4 の低圧下での栽培において、ハウレンソウなどが正常に育つことが報告されている¹¹⁾。また、低圧力に加えて、微小重力も施設の耐荷重構造の軽量化に有利である。

閉鎖環境では、さまざまな微量有害ガスが発生し、蓄積し得る。とくにエチレンは重要な植物成長調節物質であり、植物自らも発生源となる。一般に、空気中のエチレン濃度が $0.1 \mu\text{mol mol}^{-1}$ 以上に上昇すると、植物に障害が生じる。閉鎖環境では、さまざまな微量ガス成分の挙動をモニターする必要がある、過剰蓄積による不具合が生じる場合には、微量ガスの除去システムが不可欠となる。

微小重力下における植物根への給水も、重要な問題の一つである。地球上では、どのような植物栽培法でも、給水システムには重力による水の落下現象が利用されている。しかし、宇宙の微小重力、あるいは小重力環境では、水の落下が制限される。従って、根に水を供給するためには、圧力勾配あるいは毛管力を利用することが必要となろう。

4.4. 栽培システム機能、構造

月面での真空環境を想定すると、栽培装置を設置する建屋構造は内外気圧差に耐える円筒状もしくは円筒を半分に切った板かまぼこ状の形状をした耐圧容器が好ましい。そうした耐圧構造容器内に多層構造をもった水耕栽培システムを導入することが考えられる。LED を光源とした多層型水耕栽培装置については、すでに国内外で開発が進んでおり、栽培実績も蓄積されている。一例として、写真 4.7 に玉川大学で開発された LED 多段式水耕栽培システムの外観を紹介する。耐久性を高めた水冷式 LED パネル光源と薄膜水耕方式(NFT 水耕方式)の水耕システムを組み合わせ、多段式の栽培フレームに多数の栽培システムを積み重ねた構造をもつ。水耕養液を薄膜状に流し、そこに根を這わせることにより、湛液式水耕方式(DFT 水耕方式)よりも軽量、薄型の水耕装置に仕上げることができ、多層構造にした場合、限られたスペースに多数の栽培システムを作り込むことが可能となり、スペース効率の点で有利である。図 4.8 は、栽培システムを 12 段に積み重ねた野菜の生産装置を示した。



図 4.7 多段式 LED 水耕栽培システム
(玉川大学 FST ラボ)



図 4.8 12 段式リーフレタス生産施設
(玉川大学 LED 農園)

4.5. 栽培方法・栽培条件・管理

月面農場で栽培を想定している 8 作物について、栽培方法、栽培条件、栽培管理、栽培カレンダーなどをまとめた。要点を下記に抜粋する。

①栽培期間が短い葉菜類：リーフレタス

栽培期間が短く、約 5 週間で収穫可能。LED 水耕栽培については十分に実績がある。

②栽培期間が長い穀物類：イネ、ダイズ

イネ、ダイズともに、収穫まで約 16 週間が必要であり、長期間の栽培が必要。栽培装置を平面的に展開し、収穫ごとに全面的作物を植え替える方式を取ることが妥当。

③根菜類：サツマイモ、ジャガイモ

根菜類に対しては、ミスト水耕方式の利用が有効。サツマイモ、ジャガイモともに現状、25 週間ほどの栽培期間が必要であり、栽培期間の短縮が課題。水耕方式を採用することにより、収穫時期を迎えた塊茎、根茎から順次収穫することが可能。

④果菜類：イチゴ、トマト、キュウリ





イチゴについては、LED 多段栽培方式で研究例が報告されている。トマト、キュウリについては、LED 栽培の研究例が少ないが、収穫物を栽培パネル上に横置することにより、多段栽培システムを採用することが可能。トマトは播種 16 週後ころから、キュウリは播種 10 週間後ころから順次収穫。

これら特徴に留意し、更に詳細な成長過程、各成長段階における注目すべきモニタリング事項、それに応じた栽培作業を作物種ごとに、以下の図(別添)にまとめた。



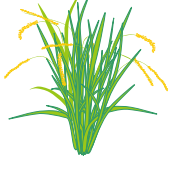
(別添) 作物種ごとの成長の特徴・栽培カレンダー

<作物種ごとの成長の特徴・栽培カレンダー>

(1) イネ①

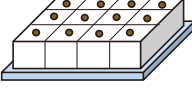



成長過程	種	発芽	苗	出穂
イメージ				
時期(通算)	0日	5日	3週	10週
モニタリング対象	①異常の検知 ②環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	①成長の確認(発芽) ②環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	①成長の確認(葉の枚数、色) ②環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	①成長の確認(穂数、花粉の充実度合い) ②環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)
センサー	①イメージセンサー	①イメージセンサー	①イメージセンサー	①イメージセンサー
栽培作業	①苗床を作らず、当初から35cmで種を植え付け(光照射の効率化を図る)	①生育部分のみへの光照射により効率化を図る	①照明の波長、明暗周期を変更	①穂肥、水管理を変更

(1) イネ②

成長過程	開花	登熟	収穫	
イメージ				
時期(通算)	10週	10～16週	16週(4ヶ月) (出穂から40日)	
モニタリング対象	①成長の確認(開花) ②環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	①成長の確認(登熟) ②環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	①時間管理 ②登熟度合い(色、手触り) ③環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	
センサー	①イメージセンサー	①イメージセンサー	①イメージセンサー ②近赤外分光センサー ③タンパク質、水分センサー	
栽培作業			①刈り取り	





(2) ダイズ①

参考)タキイ種苗HP
一部改編


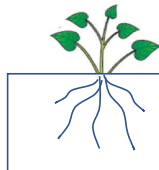
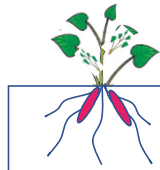
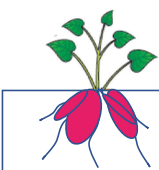
成長過程	播種	発芽	転倒防止、摘心	成長
イメージ		 噴霧水耕装置	 噴霧水耕装置	 噴霧水耕装置
時期(通算)	0日	3日前後		1カ月
モニタリング対象	①異常の検知 ②環境管理 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度) ・(光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度)	①成長の確認(芽) ②環境管理 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度) ・(光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度)	①成長の確認(葉の枚数) ②環境管理 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度) ・(光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度)	①成長の確認(葉の枚数) ②環境管理 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度) ・(光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度)
センサー				
栽培作業	①間隔が、20～25cm空くようにし、1ヶ所に2～3粒	①根粒菌と共存しており、肥料が多過ぎる際の生育不良に注意	①転倒防止(倒れやすいので本葉が1枚、3枚出たとき) ②摘心(本葉が4枚ほど出た頃、主茎の先端を切り取り)	

(2) ダイズ②

参考)タキイ種苗HP
一部改編

成長過程	成長	開花、着実	収穫(えだまめ)	収穫(大豆)
イメージ	 噴霧水耕装置	 噴霧水耕装置	 噴霧水耕装置	 噴霧水耕装置
時期(通算)		2ヶ月	2.5～3ヶ月	4ヶ月
モニタリング対象	①成長の確認(繁茂量) ②環境管理 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度) ・(光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度)	①花数 ②さやの長さ、直径、色 ③環境管理 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度) ・(光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度)	①時間管理	①葉ざやが黄色くなる、完全に葉が落ちて乾いたころ ②さやを振って中で豆がカサカサと音がする
センサー				①近赤外分光センサー ②水分・タンパク質センサー
栽培作業		①花数調整 ②収穫時期(通算)の確認、完熟時期(通算)の確認	①えだまめ(節毎にさやができてから、30日程度で収穫)	①②一斉収穫

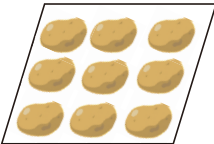


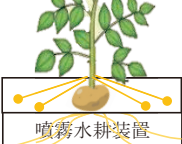
(3) サツマイモ

成長過程	植え付け	茎葉部・根部成長	肥大根発達・腋芽を野菜として収穫	大きくなった肥大根から順次収穫
イメージ	 噴霧耕			
時期(通算)	0日	2週間	1～2カ月	2～6カ月
モニタリング対象	①萎れの有無 ②環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	①葉数 ②生長点(一番高いもの) ③腋芽の観察 ④萎れの有無・葉色の監視 ⑤環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	①腋芽の成長+時間管理(1週間程度) ②肥大根の観察 ③萎れの有無・葉色の監視 ④環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	①腋芽の成長+時間管理(1週間程度) ②肥大根サイズ ③萎れの有無・葉色の監視 ④環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)
センサー	①イメージセンサー	①イメージセンサー ②自動クロロフィル蛍光測定	①イメージセンサー	①イメージセンサー ②ヘルムホルツ共鳴
栽培作業	①葉が5～6枚ついている枝を挿し木とする(一番最初の持ち込み時は要検討) ②1つの枝につき、直径20～30cm程度の面積を確保 ③養液成分濃度を管理	①葉は10～15枚程度に制限(高さは30cm程度)し、一番上(生長点)を切る。 ②その後、腋芽を確認 ③成長に応じて、養液成分濃度を管理	①一定サイズの腋芽を収穫(1週間程度)し食用に ②その後、芋を確認(1ヶ月程度で小さい芋ができる) ③成長に応じて、養液成分濃度を管理	①一定サイズの腋芽収穫を継続 ②肥大根の収穫(一括収穫ではなく、順次収穫) ③成長に応じて、養液成分濃度を管理

＜サツマイモ栽培に関するその他の注意点＞

- ・上部(茎、葉部)と下部(根部)の間に、境界板(セパレーター)を置き、そこに小さい穴をあけ、挿し木を差し込む
植物が大きくなると、その穴で固定され、植物全体が支えられることを見込む
- ・下部は、噴霧環境(芋は茎から数cm～5cm程度下、噴霧環境部分にできる)とし、深さについては要検討(30cm程度)。芋は底面に着いても問題ない
- ・芋ができなくなった(上部が枯れた)段階で、次世代の挿し木用の枝葉を確保し、最初の植え付けに使う
- ・残った葉は繊維質ではあるが食用とし、茎はリサイクルする

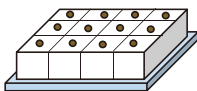
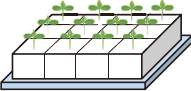
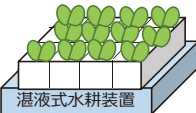
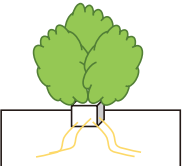
(4)ジャガイモ①

成長過程	浴光催芽	発根促進	育苗	地上部(葉)の展開およびストロン形成
イメージ	芋丸ごと、装置に集めて置く 	噴霧水耕の場合、本過程(発根促進)は必要ない可能性有り 		
時期(通算)	0～40日	40日前後	25日間(65日前後)	30～40日間(100日前後)
モニタリング対象	①芽の出芽状況 ②時間管理(40日程度) ③環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	①発根状況確認+時間管理(3、4日) ②環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	①発根状況 ②苗の成長状況+時間管理(25日:短縮の可能性あり) ③環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	①芽の勢い(茎径、出葉数) ②ストロン形成 ③環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)
センサー	①イメージセンサー	①イメージセンサー	①イメージセンサー ②自動クロロフィル蛍光測定	①イメージセンサー ②自動クロロフィル蛍光測定
栽培作業	①芋は丸ごと使用、浴光催芽(強い光(300 μ mol、24時間、蛍光灯)をあて芽を出させる ②萌芽期の生育適温15～20℃を保つ	①3～4日暗幕で光を遮り(幕で覆う)、発根を促進させる	①発根確認後暗幕から取り出し、噴霧水耕装置に移す。株間距離は5～8cm ②苗を育てる(長日条件) ③芽かき(茎の直径、葉の専有面積等で残す芽を3本に選定。芋を押さえ、芽を引き、取り外す)	①株間を25cm程度に広げる ②植え替え後、30～40日経過後、地上部繁茂を確認し、光条件を変える(長日から短日に)

(4) ジャガイモ②

成長過程	塊茎形成・肥大誘導 および収穫			
イメージ				
時期(通算)	70日間(170日前後)			
モニタリング 対象	①茎葉が半分以上枯れる、倒伏する ②地下部の重量 ③環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)			
センサー	①イメージセンサー ②ヘルムホルツ共鳴			
栽培作業	①逐次収穫も可能であるが、地上部が倒伏するまで待ち、倒伏後茎を抜きとって一斉収穫も可 ②芋を食用と次世代の種イモに分ける			

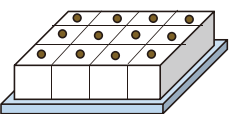
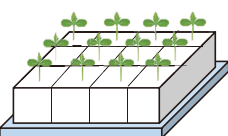
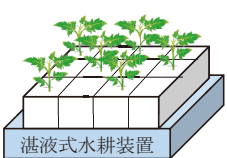
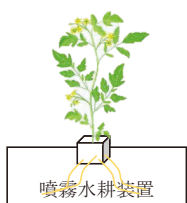
(5) リーフレタス

成長過程	播種	発芽	育苗	成長→収穫
イメージ				
時期	0日	播種から4～5日後まで	播種から18、19日後まで	播種から32～40日後まで
モニタリング 対象	①環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	①葉の色・サイズ ②光合成能力 ③環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度	①葉の数・色・サイズ ②光合成能力 ③環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	①葉の数・色・サイズ ②光合成能力 ③環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)
センサー	①イメージセンサー ②クロロフィル蛍光測定	①イメージセンサー ②クロロフィル蛍光測定	①イメージセンサー ②クロロフィル蛍光測定	①イメージセンサー ②クロロフィル蛍光測定
栽培作業	①ポリ乳酸スポンジに播種	①子葉が展開した状態まで水のみで栽培	①4、5枚の本葉が展開している状態まで湛液式水耕装置	①葉の数・色・サイズをカメラで確認して収穫

＜レタス栽培に関するその他の注意＞

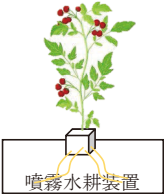


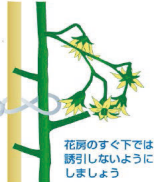
- ・収穫後は冷蔵すれば長持ちする。保存するのであれば、パックし、密封、冷暗所で保存がよい。きれいにつくれば雑菌が少ないので保存も可能
- ・廃棄物は、下葉と根が廃棄40～50g/株の廃棄
- ・ウレタンスポンジは廃棄が難しいため、生分解性のポリマー（ポリ乳酸など）の使用を検討

(6)トマト①

成長過程	播種	発芽	育苗	定植・本栽培
イメージ				
時期	0日	播種から4～5日迄	播種から3～4週間後迄 (20日間程度)	定植: 播種から3～4週間後 本栽培: 定植後4カ月後まで (90日間程度)
モニタリング対象	①葉の色・サイズ ②光合成能力 ③環境管理(光、温度、湿度、二酸化炭素濃度) ④水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	①葉の色・サイズ ②光合成能力 ③環境管理(光、温度、湿度、二酸化炭素濃度) ④水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	①葉の色・サイズ ②光合成能力 ③環境管理(光、温度、湿度、二酸化炭素濃度) ④水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	①葉の色・サイズ ②光合成能力 ③環境管理(光、温度、湿度、二酸化炭素濃度) ④水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)
センサー	①イメージセンサー ②クロロフィル蛍光測定	①イメージセンサー ②クロロフィル蛍光測定	①イメージセンサー ②クロロフィル蛍光測定	①イメージセンサー ②クロロフィル蛍光測定
栽培作業	①ポリ乳酸マット(白色)内で発芽させる(1粒ずつ2cm間隔)	①底面灌水により発芽させる	①15cm間隔で植え替える(発芽後の日にち管理でOK) ②光を変えて、水耕溶液を入れ替える ③湛液式水耕栽培装置を使用	①受粉は風媒 ②光を変えて、水耕溶液を入れ替える ③噴霧水耕栽培装置を使用

(6)トマト②

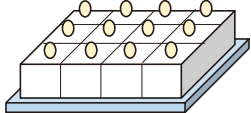
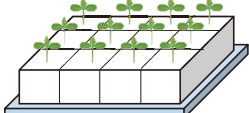
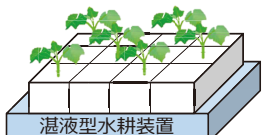
参考)タキイ種苗 HP

成長過程	収穫	摘心(*)	芽かき(*)	誘引(*)
イメージ				
時期	播種から4～7ヶ月後頃迄 (約100日間)			
モニタリング対象	①葉の色・サイズ ②光合成能力 ③環境管理(光、温度、湿度、二酸化炭素濃度) ④水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)			
センサー	①イメージセンサー ②クロロフィル蛍光測定			
栽培作業	適宜、摘心・芽かき・誘引を実施(*) 側枝が広がると栄養分を取られてしまうため、脇芽をとる。 ドローンによる収穫			



<トマト栽培に関して>

- ・中央部に噴霧水耕装置を備えた多段LED照射棚を用い、照明は棚から上方向に向けての照射も可能。
- ・必要に応じて、摘心、脇芽かき、摘果はドローン・ロボットによる自動作業で実施する。

(7)キュウリ(ミニキュウリ) ①

成長過程	播種	発芽	育苗
イメージ			 湿液型水耕装置
時期	0日	播種から8～10日	播種から8-10日～3、4週頃 (発芽以降14-18日間)
モニタリング対象	①時間管理(8-10日) ②環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	①葉の色・サイズ ②光合成能力 ④環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	①時間管理 ②葉の色・サイズ(本葉の確認) ③光合成能力(同上) ④環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)
センサー		①イメージセンサー ②クロロフィル蛍光測定	②イメージセンサー ③クロロフィル蛍光測定
栽培作業	①ウレタンマット上で発芽させる(上に置くだけで、埋め込まない。水に湿らせる) ②1粒ずつ2cm間隔	①発芽の確認(通常水を使って暗条件で発芽、適温は23℃前後)	①本葉の確認 ②栽培装置に定植(光を変えて、養液を入れ替える)

(7)キュウリ(ミニキュウリ) ②




成長過程	定植、本栽培	収穫	
イメージ	つるを誘引 噴霧栽培に移行 	花が咲く 実が大きく 	
時期	播種から3、4週～9、10週頃 (40日間程度)	播種から9、10週～24、25週 (100日間程度)	
モニタリング対象	①葉の色・サイズ ②光合成能力 ③つるの確認 ④環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	①実のサイズ、重さ ②葉の色・サイズ(本葉の確認) ③光合成能力(同上) ④環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	
センサー	①イメージセンサー ②クロロフィル蛍光測定	①②イメージセンサー ③クロロフィル蛍光測定	
栽培作業	①本葉3、4枚となった段階で噴霧栽培に移行(地上部30cm程度)、10cm間隔に植え替え ②成長の確認 ③つるを誘導 ④受粉は風媒 ⑤脇芽、雌花の摘芯(7節までは全て摘芯、以降は側枝2本を残し摘芯)	①10～15cm(50～60g)で収穫	

＜ミニキュウリ栽培のその他の注意＞

- 植え替えを省くため、種の状態から株間を広げてはどうか→効率的な光の照射ができるかどうか
- 間引きは必要ないか→苗を選んで植え付ければ必要ない
- 定植後に摘心は必要か
 - 研究室でも摘心をしている。側枝を取り除くようにしている(栄養素の供給の面から) トマトも同じ
 - 地上で成長モデリングを構築し、主節から出てくる側枝の量や摘花する花の数を推定できれば、その後、機械化も可能かもしれない(節数のカウント→その間の枝を除く)
- 枝の誘導が難しい



(8)イチゴ①

参考)タキイ種苗 HP
一部改編

成長過程	植え付け	育苗	生育
イメージ	 噴霧水耕装置	 噴霧水耕装置	 噴霧水耕装置
ランナー作りからの日数	3カ月	4カ月	5～7カ月
植え付けからの日数	0	1カ月	2～4カ月
モニタリング対象	①成長(葉の繁茂量) ②時間 ③環境管理(光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度) ④水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	①成長(葉の繁茂量) ②時間 ③環境管理(光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度) ④水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	①成長(葉の繁茂量) ②時間 ③環境管理(光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度) ④水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)
センサー	①イメージセンサー	①イメージセンサー	①イメージセンサー
栽培作業	①採苗は空中採苗をロボットが自動でおこなう ②植え付け		地上部の適温 20～25℃

(8)イチゴ②

参考)タキイ種苗 HP
一部改編

成長過程	開花	収穫	
イメージ			
ランナー作りからの日数	7～14カ月	7～14カ月	
植え付けからの日数	4～11カ月	4～11カ月	
モニタリング対象	①花のモニタリング ②成長(葉の繁茂量) ③時間 ④環境管理(光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度) ⑤水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	①花のモニタリング ②成長(葉の繁茂量) ③時間 ④環境管理(光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度) ⑤水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	
センサー	①イメージセンサー(花の認識) ②複数波長による花の選別	①ドローン、ロボットの協働のための音響測位システム ②イメージセンサー	
栽培作業	<div> 花数調節(摘花) ↓ 受粉 ↓ 4週間後収穫 </div> 約7カ月くり返す 受粉は3Dカメラビジョンと超音波により自動で実施	①果実の肥大適温 昼間:20～24℃、夜間6～10℃に保つ ②開花から成熟までの日数は温度による影響を受け、積算温度600～700℃で収穫期に達する。着色を良くするために日当たりを良くすることが重要	

参考文献

- 1) Kitaya, Y., Shibuya, T., Kozai, T. and Kubota, C. Effects of light intensity and air velocity on air temperature, water vapor pressure and CO₂ concentration inside a plants stand under an artificial lighting condition. *Life Support & Biosphere Science*, 5, 199-203, 1998.
- 2) Kitaya, Y., Shibuya, T., Yoshida, M. and Kiyota, M. Effects of air velocity on photosynthesis of plant canopies under elevated CO₂ levels in a plant culture system. *Adv Space Res.*, 34, 1466-1469, 2004.
- 3) Kitaya Y, Kiyota M, Imanaka T. and Aiga I., Growth of vegetables suspended upside down. *Acta Hort.*, 303, 79-84, 1992.
- 4) Merckies, A.I. and Laurinavichyus R.S. Complete cycle of individual development of *Arabidopsis Thaliana* Haynh plants at Salyut orbital station. *Doklady AN SSSR* 271, 509-512, 1983.
- 5) Mashinsky, A.L., Ivanova I., Derendyaeva T., Nechitailo G.S. & Salisbury F.B. From seed-to-seed experiment with wheat plants under space-flight conditions. *Adv. Space Res.* 14, 13-19, 1994.6) Salisbury, F.B., Bingham G.E., Campbell W.F., Carman J.G., Bubenheim D.L., Yendler B. and Jahns G. Growing super-dwarf wheat in Svet on Mir. *Life Support and Biosphere Science*, 2, 31-39, 1955.
- 7) Kitaya, Y., Kawai M., Tsuruyama, J., Takahashi, H., Tani, A., Goto, E., Saito, T. and M. Kiyota. The effects of gravity on surface temperatures of plant leaves. *Plant Cell Environ.* 26: 497-503, 2003.
- 8) Kitaya, Y., Kawai M., Takahashi, H., Tani, A., Goto, E., Saito, T., Shibuya, T. and Kiyota, M. Heat and gas exchanges between plants and atmosphere under microgravity conditions. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1077, 244-255, 2006.
- 9) Kitaya, Y., Kawai M., Tsuruyama, J., Takahashi, H., Tani, A., Goto, E., Saito, T. and M. Kiyota. The effect of gravity on surface temperature and net photosynthetic rate of plant leaves. *Adv. Space Res.* 28, 659-664, 2001.
- 10) Hirai, H. and Kitaya, Y. Effects of Gravity on Transpiration of Plant Leaves. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 1161, 166-172, 2009.
- 11) Goto, E., Iwabuchi, K. and Takakura, T. Effect of reduced total air pressure on spinach growth. *J. Agric. Meteorol.*, 51(2): 139-143, 1995.

5. 高効率食料生産

近藤直(京都大学大学院 農学研究科地域環境科学専攻 教授)

大場隆之(東京工業大学 未来産業技術研究所 教授)

伊藤浩之(東京工業大学 未来産業技術研究所 准教授)

鹿島光司(株式会社 朝日工業社)

深水克郎(東京工業大学未来産業技術研究所)

月面農場にて栽培する8品目(イネ、ダイズ、サツマイモ、ジャガイモ、トマト、レタス、キュウリ、イチゴ)を、居住人数6人および100人を想定し、特に100人の場合において効率的に生産可能と考えられる方法を提案する。

本提案では、まず栽培8品目すべてに共通して適用する技術を示す。次にそれぞれの生産品目ごとに栽培スタイル(栽培様式)を定める。そしてその様式を実現するために最適な栽培方式、例えばバッチ式の栽培か栽培部分が移動することによる連続式かに大まかに大別した。

作物の生産過程は、播種(定植)、生育、収穫などの工程に区分され、各工程において可能な限り自動作業を導入するために必要な生育・環境モニタリング項目、具体的なセンシング方法および機械化方法を提案する。それら要素技術の中には、既存の技術を応用することで達成可能と考えられるものもあるが、ドローン、ロボットの開発やセンシング方法の確立など、今後さらなる技術向上が必要と考えられる方法も含む。

5.1. 共通技術

栽培は土を使用しない水耕栽培を基本とする。ただし月面では水は非常に貴重な資源であり、培養液を循環させることによるロスや、培養液中の肥料成分の偏りを避けるためにも植物の生育に最低限の給水にとどめる必要がある。そこで、本報告での作物栽培にはドライミストによる噴霧水耕栽培を採用することを前提とした¹⁾。光合成のための光源として、月面にも太陽光は降り注ぐが、地磁気による宇宙線の遮蔽がなく暴露による影響が懸念され、また月面においては昼夜の周期が約28日間と地球上で進化した作物の生体リズムとは大きくかけ離れており、生育に支障をきたす可能性が高い。そのため、光源にはLED照明を採用することとした。後述するセンシングのための光源としても紫外・赤外域の波長をもつLEDは有効に使用できると考えられる。生育モニタリングする場合に、蛍光画像を利用する手法はすべての栽培品目にわたり有用な情報を得られる可能性がある。クロロフィル蛍光の取得および解析から分かる光合成の活性や、新しく発生した芽(生長点)の検出、葉と茎の区別など既存の技術としても用途は多岐にわたる²⁾。

また、すべての作物生産に対しコアテクノロジーとして最も重要と考えられる技術の一つが人工知能を用いた画像認識技術である。近年のDeep Learningによるブレイクスルーにより、適切な学習を経た後の画像認識精度はすでに現時点で人間を越えている³⁾。月面農場において農作物のうち可食部を的確に認識し収穫を確実にこなしたり、生育の状況や収穫タイミングなど栽培上必要な情報を得たりするために人工知能に裏付けされた画像解析・認識技術の導入は不可欠であろう。

以下各栽培品目についての提案でもここで挙げた共通技術を積極的に利用することが前提となる。

5.2. 各栽培品目の栽培方式

各作物の収穫効率を考慮し、平面一斉収穫型、多段式などの栽培様式を定め、その様式を満たす栽培方式を決定した。栽培方式は栽培装置の形状とも関連し、生産の効率、作業性、出来上がった作物の品質を左右する重要な項目である。下表5.1に、栽培8品目それぞれを居住想定人数ごとに生産する場合の栽培方式を示す。居住想定人数が6人の場合は、全員が作業に従事すると仮定しているが、100人の場合は高効率生産を達成できる栽培様式ならびにそれを実現する栽培方式を提案する。

100 人の居住者の、栄養バランスのとれた食料とするための各栽培品目に必要な栽培面積を別のグループが試算しているため、その情報も併せて表 5.1 に示した。なお、この栽培面積は面積効率を上げる多段を考慮せず、すべて平面で栽培した場合の数値としてある。

ここで、バッチ方式とは播種もしくは定植後に植物体を移動させず、収穫もしくは植物体の全数入れ替え時に、決められた区画中にある植物を一斉に移動または更新する栽培方式をいい、連続方式とは 1 株または少数の植物体（の支持材）が生育に伴い移動し、一定の時間間隔で播種または定植し、同様の間隔で収穫していく方式をいう。トマトとキュウリに関しては、平面的な広がりを持つ多段栽培棚の上で、水平方向に栽培する。

表 5.1 各作目の供給人数別の栽培方式

作物種	6 人	100 人	100 人分の 必要栽培面積 (m ²)
イネ	バッチ	バッチ	4000
ダイズ	バッチ	バッチ	2500
サツマイモ	バッチ	連続	2250
ジャガイモ	バッチ	連続	1000
レタス	バッチ	連続	900
トマト	バッチ	多段棚	90
キュウリ	バッチ	多段棚	50
イチゴ	バッチ	個別	550
< 共通項目> 溶液栽培（ドライミスト）使用、照明は LED を使用			

5.3. 各栽培品目の生育過程分割と適切なモニタリング項目

月面居住空間に暮らす居住者が増えると、人口を養うために生産量を増やす必要がある。居住者は必ずしも全員が食料生産作業(農業)に従事するわけではないため、分業を実現するために多人数分の食料を省力的に生み出す高効率な方法で行わなければならない。また、食料の安定供給のために、一定の品質で、かつ備蓄を考慮し余剰が出るよう収穫量が計画・確保されなければならないことから、バラツキやエラーの原因となる人の手による作業を極力減らし自動化・機械化を実現する必要がある。自動化・機械化を達成するために検討すべき項目として、生育環境を調節する機構はもちろんのこと、ロボット・ドローンのような作業機械に加えて植物の生育状態や変化、収穫物の位置などを的確にセンシングする手段・センサーも開発すべきである⁴⁾。

以下、生産を想定している 8 品目の作物について、播種もしくは定植から収穫までに必要と考えられた作業やセンシング項目を表にまとめ、それらの達成のために既存の技術を応用可能か、新たな技術開発を要するかの判断を加えた。

5.3.1. イネ（パッチ方式）

項目番号	工程	適用技術	既存／新規開発	備考
1.1	播種	ガントリを使った播種 2～3 粒ずつ一定ピッチで自動播種	既存	ガントリに統合する必要あり
1.2	発芽・生育確認	画像解析（可視光／複数波長）	既存	ソフトウェア開発の必要あり
		画像撮影（ガントリ固定／定点撮影／ドローン利用）	新規	
1.3	照明点灯変更方式	株の成長判断および同心円状の LED 照射	新規	画像解析が必要
1.4	収穫適期判断	近赤外分光画像解析（タンパク質・水分の推定）	既存	
1.5	収穫	ガントリ接続コンバインでパッチ収穫	既存	
1.6	ポストハーベスト	保存性を考慮し、玄米をフリーズドライ	既存技術	
		乾燥させずに粳摺りし、玄米とする	新規	通常は乾燥しないと粳摺り不可

イネの必要栽培面積は 4000m^2 と試算されている(表 5.1)。ほかの品目と比較して広い栽培面積が必要であり、機械化による恩恵を強く得られると考えられる。播種から収穫までイネはひとところで栽培されるため、図 1A)のように栽培エリア上を移動するガントリと呼ばれる機械を改良し、すべての作業を自動で行えるようにすることが効率的であると考えられる。ガントリのアームに装備された多機能ヘッドが、播種、生育確認、収穫適期判断および収穫作業を実施する。 4000m^2 の栽培面積の確保案としてここでは、1基のガントリが担う栽培部分をモジュール的にとらえ、それらを平面的に組み合わせることで栽培面積の柔軟な拡大にも対応できるシステムを提案する。人工照明を用いた栽培を前提にしているため、このモジュールを平面的ではなく多段に構成することで面積を有効活用することも可能である。

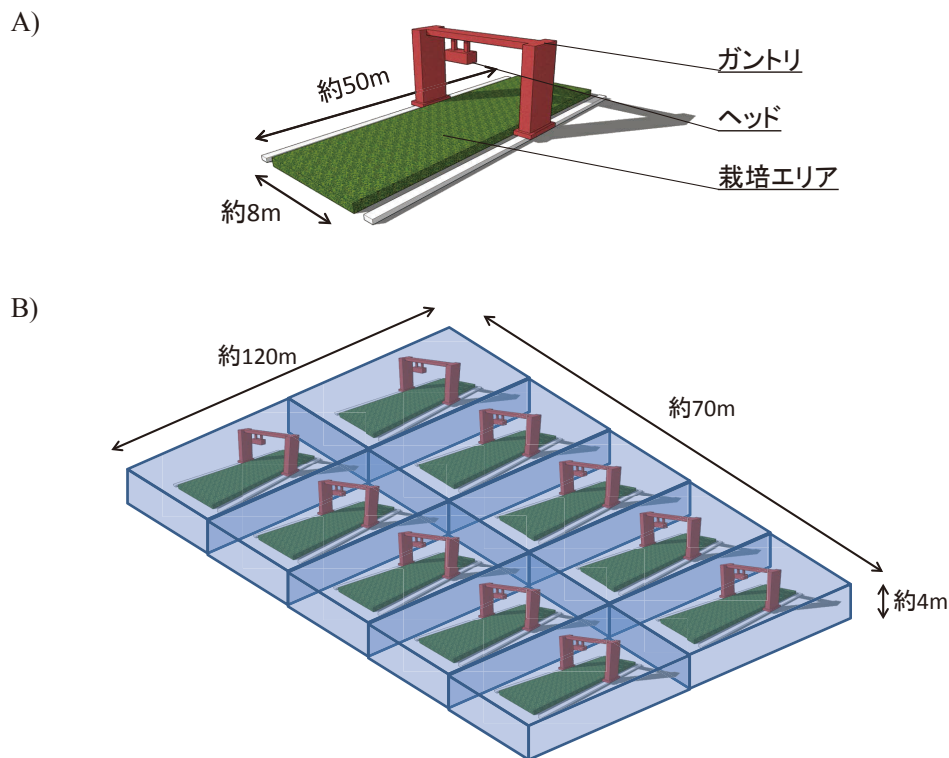


図 5.1 バッチ方式に用いられるガントリ式栽培装

A) ガントリ式栽培装置の基本単位イメージと大きさ

B) 空調・照明のための個別モジュールで囲み、100名の居住者分のために複数接続したイメージ図

イネは栽培のために多量の光を必要とするため、LED 照明は光合成有効光量子束密度(PPFD)として約 $1000\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 程度を放射できる強力なものを用いる必要がある⁵⁾。他方イネの播種・収穫の効率の面から採用されたこの栽培方式では、株の間隔が幼苗時も最大繁茂後も変わらず、植生が疎の時期に無駄な照明を当ててしまうことが懸念される。このため、画像判断により各株の水平方向の広がりを検知し、株の大きさに合わせて照射範囲を変えることが可能な照明システムの開発・導入が期待される。

穀物としての品質および収穫適期を判断するために、近赤外(NIR)分光画像を活用した非破壊検査が有用と考えられる⁶⁾。共通技術の項で挙げた蛍光画像から得られる情報と合わせ、イネの発芽から収穫までを効果的にモニタリングすることが可能である。

5.3.2. ダイズ (バッチ方式)

項目番号	工程	適用技術	既存／新規開発	備考
2.1	播種	ガントリを使った播種 2～3 粒ずつ一定ピッチで自動播種	既存	ガントリに統合する必要あり
2.2	発芽・生育確認	画像解析（可視光／複数波長）	既存	葉の数、繁茂量、花の数、さやの長さ、直径、色
2.3	収穫適期判断	画像判断	既存	さやの色、乾燥度合い
		音	新規	乾燥すると中でカサカサと音がすることを利用
2.4	収穫	ガントリ接続コンバインでバッチ収穫	既存	

ダイズの栽培はイネと同様、バッチ方式およびガントリを使った栽培装置モジュールが適用可能と考えられる。ただし、通常は収穫の時点で完全に乾燥した状態であるため、乾燥状態をモニターする必要がある。この目的のために画像解析もしくは指向性を持った音波によるセンシングが有用と考えられる。

5.3.3. サツマイモ (連続方式)

項目番号	工程	適用技術	既存／新規開発	備考
3.1	定植（挿し木）	一定程度（日数管理）大きくなったツルを刈り取る昆虫型ロボットにより苗を集める	新規	
		集めた苗を 1 本ずつ定植	既存技術で可能	
3.2	生育状況測定	画像解析（可視光／複数波長）	既存	ソフトウェアの開発が必要になる可能性あり。
		自動クロロフィル蛍光測定機の応用	既存	
3.3	収穫適期判断	ヘルムホルツ共鳴および画像判断	新規	空間を占める割合が求められるか。
3.4	収穫（葉）	ロボットによる採取	新規	昆虫型ロボット使用。 取りすぎるとイモが育たなくなる。
3.4	収穫（イモ）	適切な重量（体積）であれば可能	新規	非可食部の根の分別方法はあるか

100 人の居住者のためにサツマイモを適切な量だけ供給するためには、 2250m^2 の栽培面積が必要との試算がなされた(表 5.1)が、省スペースで高効率な栽培方式である連続栽培方式を採用することで、必要な栽培面積を削減できる可能性がある。連続栽培方式はベルトコンベアのような可動式の栽培面を持つ栽培装置により栽培する方法(図 5.2)で、環境を一定にコントロールできる場所では年間を通じて栽培・収穫が可能であるため毎日の作業の平準化や収穫などの作業場所の集約につながり得る。また、作物が幼苗の時期は密集して栽培できるため、株間を調節する方法との組み合わせで栽培面積の利用効率を向上させることができる。

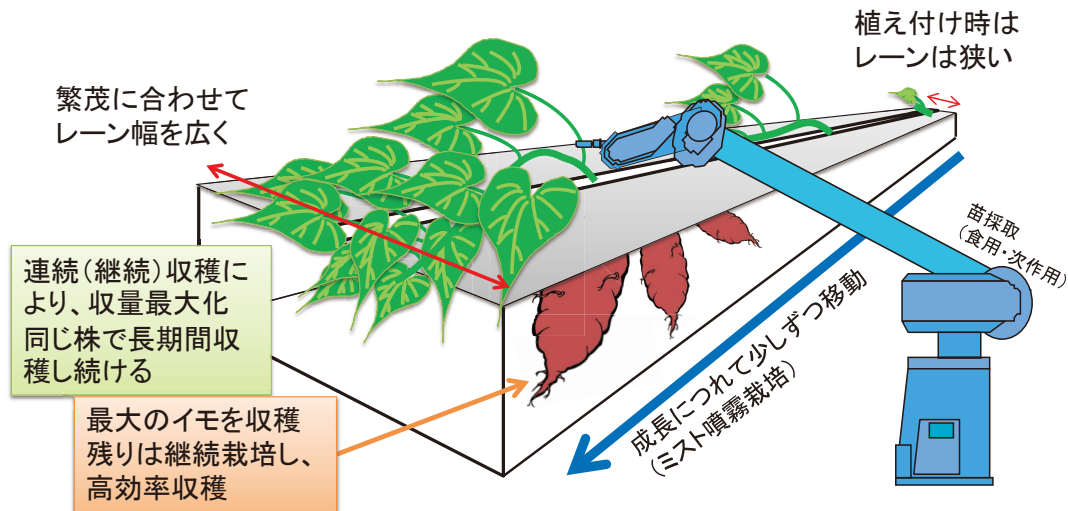


図 5.2 サツマイモの葉の繁茂とともに栽培幅を広げる連続栽培装置の模式図

例えば本 WG で仮定されたサツマイモの 1 人 1 日当たりの必要重量は 150g であるから、100 人の居住者が毎日 15kg のサツマイモを食すことになる。サツマイモは 1m^2 あたり少なくとも約 2kg は収穫を見込めるため、毎日収穫面積として 7.5m^2 が必要となる。サツマイモが 4 か月で栽培開始から収穫を迎えると仮定した場合、毎日 7.5m^2 を収穫し続けるためには単純計算では 900m^2 が必要栽培面積となるが、上述した幼苗時の密植を達成できると必要な面積は 2 分の 1 程度の削減が見込まれる(図 5.3)。

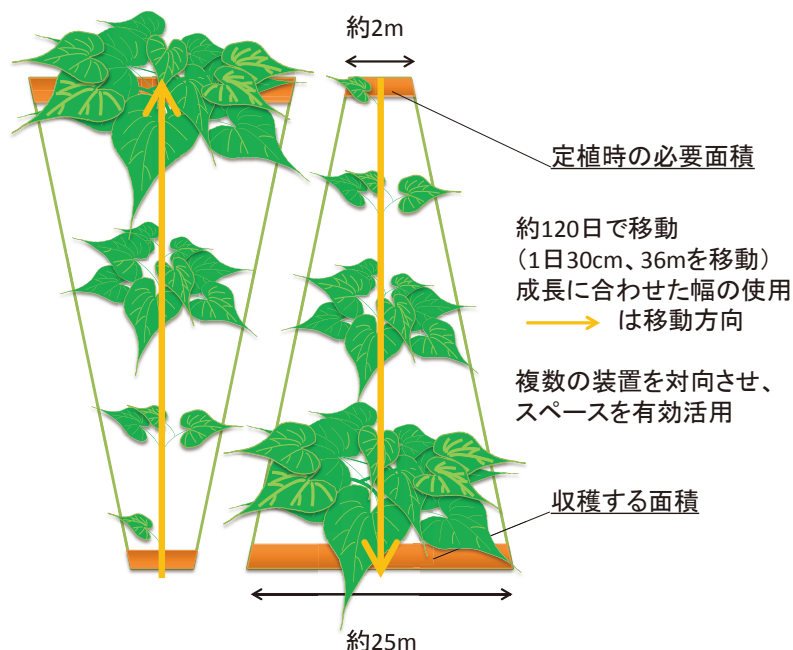


図 5.3 連続栽培における株間拡大による面積使用効率の上昇

株間を広げる技術は水耕栽培ではいくつか見受けられるが、月面農場での基本給水スタイルであるミスト栽培の場合、隙間があるとそこからミストが漏れ出る可能性があるため、高いシール性を維持したまま株間を調節する技術を開発する必要がある。

イモは地下部で肥大するため、生育を非接触で確認するための手段として、画像解析に加え、ヘルムホルツ共鳴を応用した技術を提案する。ヘルムホルツ共鳴はビンの口を吹くと音が鳴る現象(共鳴)に代表され、あらかじめ体積や開口部面積が分かっている共鳴器を用いた場合、内部に入った物体により変化する共鳴周波数によりその物体の体積を推定することが可能である(図 5.4)⁷⁾。月面農場においてはイモもミストにより栽培するため、イモ部分は地下部空間で生育する。その時の地下部空間での共鳴周波数の変化を測定することでイモの体積を推定できると考えられる。

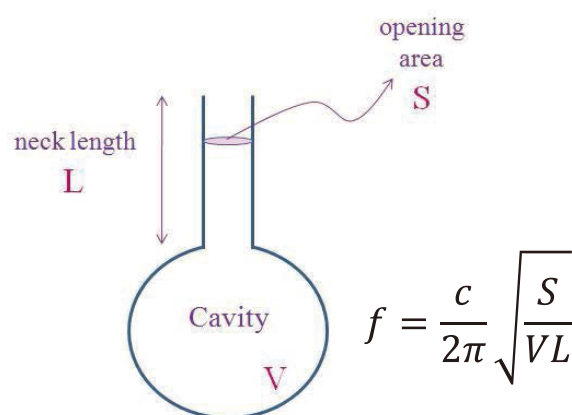


図 5.4 ヘルムホルツ共鳴の模式図及び共鳴周波数の理論式
図中の式内の c は音速を表す。

サツマイモは通常苗を用いて増殖させる。その場合上述のように連続栽培において毎日同数の苗を植えるための苗の供給源を確保する必要がある。一方イモの光合成のためにも葉は必要であり、栽培途中のイモのツルから出た葉をすべて苗として供給することはできない。また、サツマイモの苗は食べることができ、本 WG においても栄養豊富な食材として食用可能だと検討している。このような事情のため新苗は生長点培養により作出するか⁸⁾、苗および食用葉の供給のために数多くのイモを栽培する必要がある。別の対策案としては、一つの株を栽培し続け、長期間にわたり収穫し続ける方法も考えられる。月面農場においては環境を自由に調節することができるため、一度植えると 1 年、2 年とイモを生産し続けることが可能かもしれない。

栽培途中のイモからの苗の採取は、ロボットにより行われる。集められた苗の一部を定植する作業は既存の機械技術で実施可能と考えられる。

5.3.4. ジャガイモ（連続方式）

項目番号	工程	適用技術	既存／新規開発	備考
4.1	定植（タネイモ）	蛍光画像解析	新規	芽を判断することが可能
4.2	生育状況測定	画像解析（可視光／複数波長）	既存	ソフトウェアの開発が必要になる可能性あり。
		自動クロロフィル蛍光測定機の応用	既存	
4.3	収穫適期判断	ヘルムホルツ共鳴および画像判断	新規	空間を占める割合が求められるか。
4.4	収穫（イモ）	適切な重量（体積）であれば可能	新規	

ジャガイモはサツマイモと同じく連続方式が適用できるものと考えられる。

5.3.5. レタス（連続方式）

項目番号	工程	適用技術	既存／新規開発	備考
5.1	播種	自動で播種	既存	
5.2	生育状況測定	画像解析（可視光／複数波長）	既存	ソフトウェアの開発が必要になる可能性あり。
5.3	収穫適期判断	画像解析（葉の色、サイズ）	新規	
5.4	収穫	適切な重量（体積）であれば可能	新規	非可食部の根の分別方法はあるか

レタスは既存の植物工場で最も多く生産されている作物であり、多段式の栽培棚を用いた栽培方法が確立されている。月面農場においては省スペース性を追求するため、多段化に加え、サツマイモやジャガイモと同様、株間を少しずつ広げる方法を提案する(図 5.5)。

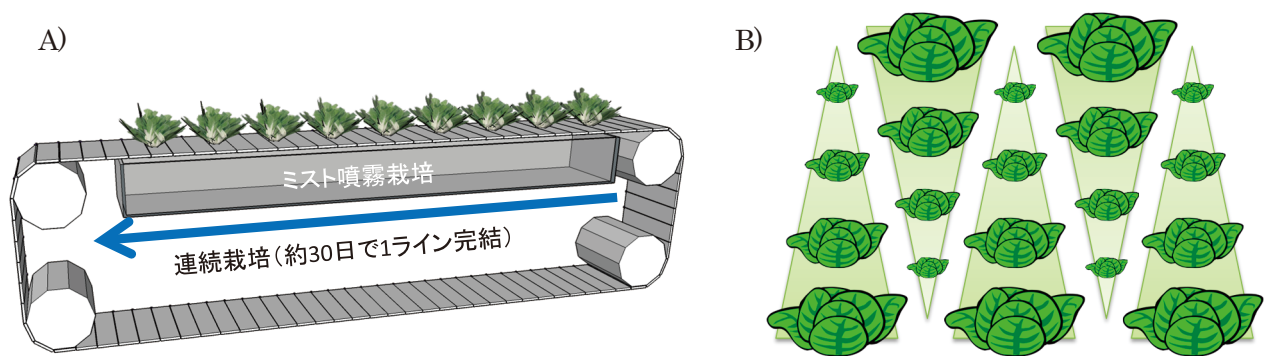


図 5.5 レタスの連続栽培方式のイメージ図

A)コンベアとその内部に備えたミスト噴霧栽培用の地下部の模式図

B)成長とともに株間を広げ、さらに複数の装置を対向させて配置した場合の模式図

一方スペース効率を上げる試みとしてレタス栽培で既に実証されている方法として、レタスが円形の水槽で中心から外周部へ向けて生育と共にらせん状に移動し、その過程で株間を広げていく方法がある（図 5.6）⁹⁾。非常に理にかなった栽培スペースの使い方をしており、ミストの封じ込め技術が確立できた場合、有望な栽培方法と考えられる。

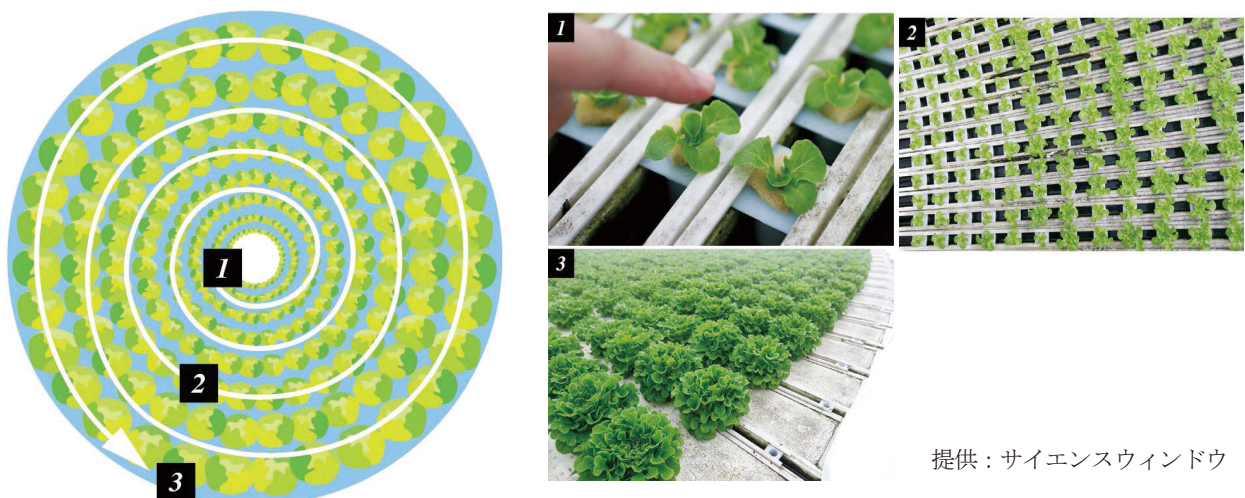


図 5.6 中心から外周部へらせん状に移動する栽培方法の模式図と実際の株間調整方法

左模式図中の 1～3 の番号は右写真の番号と対応している。

1 は出芽直後、2 は徐々に生育するレタスを示し、3 は収穫間際の株間調整を受けたレタスである。

5.3.6. トマト（多段棚）

項目番号	工程	適用技術	既存／新規開発	備考
6.1	播種	自動で播種	既存	
6.2	育苗	自動植替え装置	既存	
6.3	生育状況測定	画像解析（可視光／複数波長）	既存	ソフトウェアの開発が必要になる可能性あり。
6.4	誘引	光の方向等検討	新規	底面照射により棚に張り付くか
6.5	収穫適期判断	画像解析（果実の色、サイズ）	新規	
6.6	収穫	ロボット・ドローンによる収穫	新規	

トマトは種子を発芽させ、効率よく苗生産をしたのちに定植し、本栽培に移る。通常採用されている栽培方式は、一つの株を長期間栽培し続け、次々と実る果実を収穫していく「多段栽培」もしくは対照的に1株あたり2～4果房程度のみ制限し、栽植密度並びに株の回転を上げて収量を確保する「低段密植」あるいは季節ごとに多段と低段を組み合わせた栽培方式も採用されている¹⁰⁾。月面農場では、数株のトマト苗を平面的かつ放射状に生育させる棚を単位モジュールとし、それを垂直に積み重ねる多段棚方式を提案する(図5.7)。生育期間は低段密植に近いが、脇芽かきや摘芯を実施せずに収量を確保できるかが省力化の重要な検討項目である。栽培棚の各単位モジュールは図5.7Aに示すように円形であり、LED照明および中心部にミスト供給部を持つ。中心部に苗を定植したのち、LED照射が上方向であるため植物体は棚面に沿って平面的に伸長すると予想される。果実も棚上に結果すると考えられ、棚上で活動する収穫(果柄カット)ロボットと運搬用ドローンの協働により収穫される。図5.7Bは100名の居住者へ供給することを考えた場合の必要面積を今回提案する多段装置に換算し、レイアウトを仮定したものである。4段に積み重ねた単位モジュールをコンテナで覆い、環境管理の単位とした。

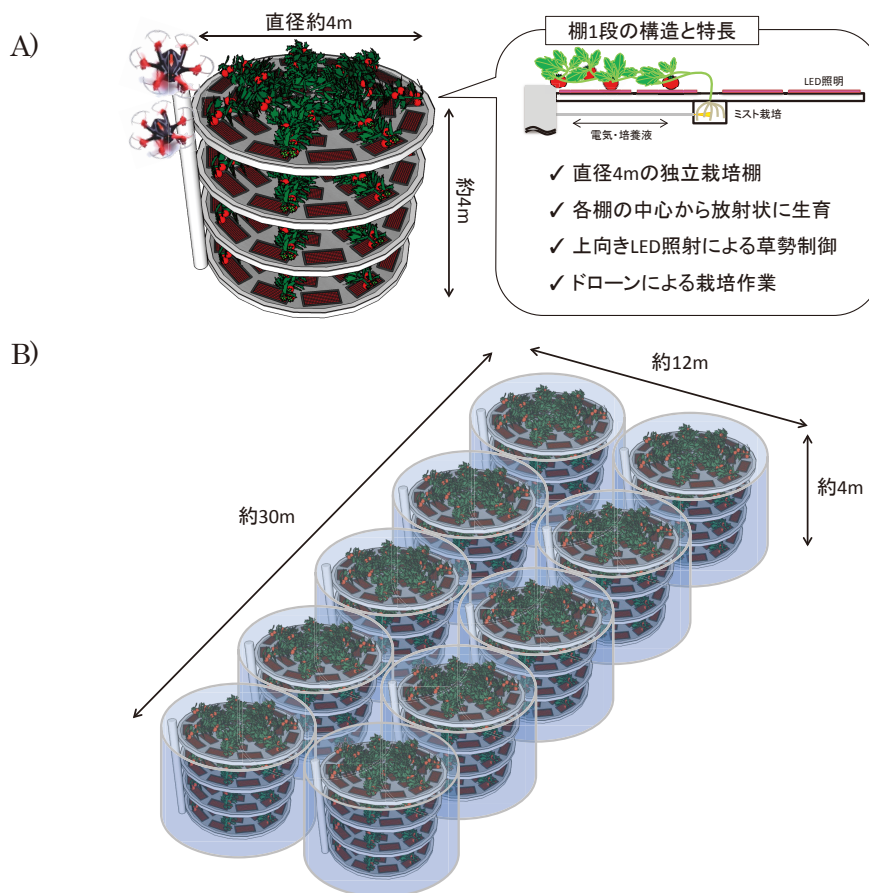


図5.7 トマト栽培のための多段棚イメージ

A)単位モジュールを4段1組とした際のイメージとサイズ

B)100名の居住者へ供給するためのシステム案

本栽培方式では各単位モジュールの間隔が約 50cm と狭いため、ロボットやドローンの活用による自動栽培・自動収穫が前提となる。収穫に適した熟度(糖度)、大きさのトマトを葉や茎が入り組む棚上での確に認識し、収穫する技術は未だ実現できてはいないが、近年発展が著しい人工知能(AI)による画像判断手法を利用し、自動収穫する方法は着実に現実味を増してきている。自動で果実を「認識する」技術と並行して開発が求められるものは、収穫ロボット(果柄カット用ロボット¹²⁾や運搬用ドローンを含む)の単独および協働制御方法が挙げられよう。

5.3.7. キュウリ (多段棚)

項目番号	工程	適用技術	既存／新規開発	備考
7.1	播種	自動で播種	既存	
7.2	育苗	自動植替え装置	既存	
7.3	生育状況測定	画像解析 (可視光／複数波長)	既存	ソフトウェアの開発が必要になる可能性あり。
7.4	誘引	光の方向等検討	新規	
7.5	収穫適期判断	画像解析 (葉の色、サイズ)	新規	
7.6	収穫	ロボット・ドローンによる	新規	

トマトと同様の栽培方式を適用できると考えられる。ただし、葉の色と果実の色がどちらも緑色と近く、果実の画像による判別はトマトに比較して難易度が高いことが予想される。

5.3.8. イチゴ (個別)

項目番号	工程	適用技術	既存／新規開発	備考
8.1	定植 (ランナー管理)	ドローンによる自動空中採苗	新規	
8.2	花数調節	画像解析	既存	
		花を切る (マニピュレータ／レーザー)	新規	
8.3	生育状況測定	画像解析 (可視光／複数波長)	既存	ソフトウェアの開発が必要になる可能性あり。
8.4	受粉	3D マシンビジョン	新規	
		超音波による受粉	新規	
8.5	収穫適期判断	画像解析 (実の色、サイズ)	新規	
8.6	収穫	ロボット・ドローンによる収穫	新規	

イチゴの栽培方式としては、下図 5.8 で示すように複数の畝のような栽培装置に苗を定植していき、畝の形状のため通路側に垂れてきたイチゴの果実を収穫するものを提案する。既存の技術である高設栽培をベースに考える。定植、更新は栽培装置単位で一斉に行われる。一般的には定植後約 2 か月後～8 か月後の 6 か月間収穫し続けることができることから、収穫量の平準化のために栽培装置は 10 台並列を想定した。

イチゴを月面農場で栽培する場合に想定される課題として主な物は、ランナーの管理と自動定植、受粉の自動化そして収穫のためのロボット・ドローンの導入が挙げられる。1 台当たり栽培面積として 55m²(0.5m×110m)を持つ栽培装置へは、約 1000 本の苗が必要になるため、ランナーの効率的な生産、そして管理は重要である。

ランナーの生産は、既存の技術で「空中採苗」と呼ばれる、高設栽培装置から垂れ下がってくるランナーを採苗する方法¹²⁾を採用できる。この方法はイチゴのランナーが土壌に接触しなくても自然に根の原基を発生させる性質を利用したもので、発根する部位を認識し、ドローンにより自動的に採苗・収集できれば無人化・高効率化が可能である。

イチゴの収穫は複数のドローン・ロボットを協調的に駆使して実施する。図 5.8 ではドローン・ロボットを制御するために音(スペクトル拡散音)を利用し測位するシステム¹³⁾を図示している。この例では、ロボットとドローンは分業しており、果実採取専用のロボットがイチゴの果実を株から切り取り、それをドローンが集荷して回る。個別の機械の測位のために、音を使った測位システムが確立できれば、栽培装置や植物の陰に隠れた場合でも、音の回折を利用した障害物の回避が可能になると考えられる。

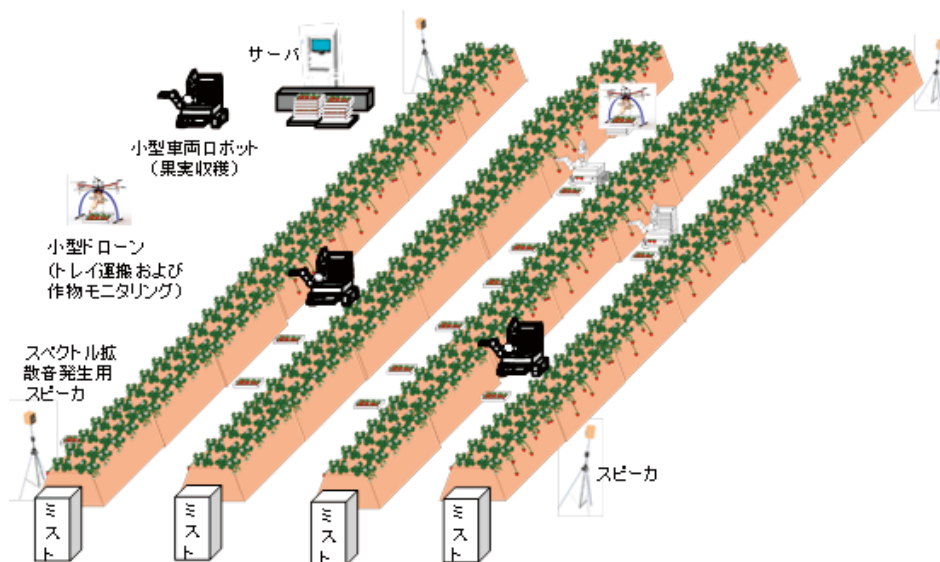


図 5.8 イチゴの栽培方式およびスペクトル拡散音信号により制御される複数のドローンと収穫ロボットの模式図

イチゴは結実させるために受粉が必要であり、農業の現場においてもハチを利用して受粉させたり、手作業により受粉させたりしている。月面農場においてはハチの利用は個体の確保や維持が問題となる可能性が高いことから、自動で機械的に受粉させる技術が望まれる。有望な技術として、フェーズドアレイを 3D 画像認識と組み合わせ、超音波のパルス圧を利用してイチゴの花を揺らし、受粉させる非接触のシステムが考えられる¹⁴⁾。図 5.9 にシステムの外観と動作模式図を示す。イチゴの群落に沿って 3D カメラで撮影しながら装置を走らせ、花が認識された場合、指向性のある超音波パルスを用いて花を揺らすことで受粉させる。

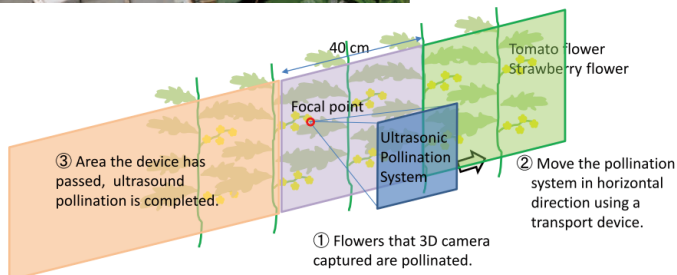
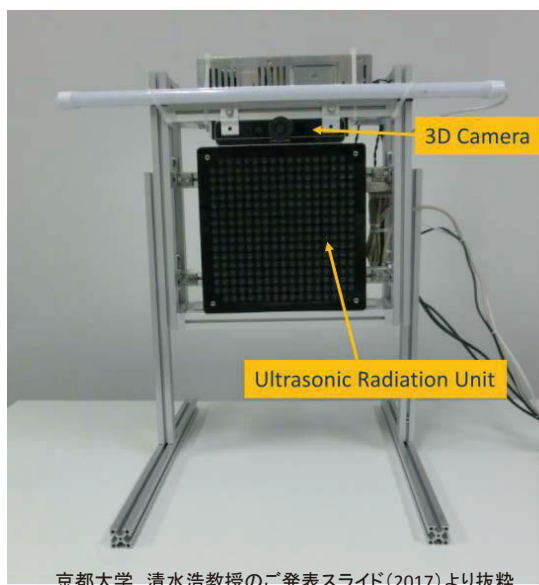


図 5.9 Phased Array と 3D Camera を利用したイチゴの非接触受粉システム

左：試作装置の外観 右上：イチゴ群落に装置を向けた状態 右下：動作フローの模式図

参考文献

- 1) 特許公報 特開 2009-055871 噴霧水耕栽培法
- 2) 高山ら, 植物工場におけるセンシング, 閉鎖生態系・生態工学ハンドブック(2015 年), 367-371
- 3) K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, “Deep residual learning for image recognition,” in IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016, pp. 770–778.
- 4) Duckett, T., Pearson, S., Blackmore, S., Grieve, B. and Smith, M. (2018) White paper - Agricultural Robotics: The Future of Robotic Agriculture.
- 5) 丸山ら, 人工光型植物工場における栽培環境制御とクリーン化技術, エアロゾル研究 2016, 31(2), p104-109
- 6) 河野ら, 近赤外分光法による農産物等の非破壊品質評価, 農業機械学会誌 2013, 75(2), p67-73
- 7) H. Xu, H. Chen, Y. Ying, N. Kondo, 2015, Fruit Density as an Indicator for Watermelon Hollow Detection Using Helmholtz Resonance, Transactions of the ASABE, 57 (4), 1163-1172.
- 8) 濱井ら, ベニイモ栽培における組織培養苗の重要性, 南方資源利用技術研究会誌; Journal of the society tropical resources technologists, 1993 9(1): 5-9
- 9) JST サイエンスウィンドウ 2016 秋号, p18-19
- 10) 低段・多段組合せ栽培によるトマトの周年多収生産技術マニュアル, SHP 関東地域農業研究・普及協議会, 平成 22 年 3 月
- 11) Naoshi KONDO et al., Development of an End-Effector for a Tomato Cluster Harvesting Robot, Engineering in Agriculture, Environment and Food 3(1) : 20-24, 2010
- 12) 大越ら, イチゴ空中採苗のための簡易高設ベンチ育苗システム, 東北農業研究; Tohoku Agric. Res. 54, 187-188 (2001)
- 13) Slamet Widodo et al., Moving Object Localization Using Sound-Based Positioning System with Doppler Shift Compensation, Robotics 2013, 2, 36-53
- 14) 清水 浩, Development of ultrasonic pollination system, 2018 CIGR

6. 持続的な物質循環システム

中井勇介(農業食品産業技術総合研究機構 九州沖縄農業研究センター 園芸研究領域)

遠藤良輔(大阪府立大学大学院 生命環境科学研究科)

小島昌治(株式会社 翔栄)

中野明正(農林水産省農林水産学術会議事務局)

豊田剛己(東京農工大学大学院 農業研究院生物システム科学部門)

概要

月面での長期間滞在または居住を可能にするためには、月面での生活で生じる有機性廃棄物の処理や植物生産のための元素資源の欠乏といった問題を解決する必要がある。月面農場ワーキンググループ第3グループでは、持続的な月面農場を確立させるために必要なシステムの一つを構築することを目的として、ISRU(In-Situ Resource Utilization; その場資源利用技術)などを念頭におきながら、月面における効率的な有機性廃棄物の資源循環のあり方について議論を行った。

月-地球間の輸送は莫大なコストがかかるため、作物を生産するために必要な炭素や窒素などの元素は、その都度の交換輸送ではなく、月面での生活において生じる作物残渣などの有機性廃棄物から、効率的に回収して循環利用する必要があると考えられる。月面において生じる有機性廃棄物は、非可食部などの作物残渣や養液栽培廃液、尿、糞便などが想定された。それらを効率的に循環させるためには、月面での現地試験が必要であるが、地球上で実用化されている嫌気的処理であるメタン発酵や好气的処理である活性汚泥法、堆肥化などの微生物を利用した処理が有効であり、資源循環の中核を成すと考えられた。本稿では、これまでの第3グループの検討結果を取りまとめ、持続的な月面農場を確立するための資源循環システムや月の鉱物(レゴリス)の資源としての利用について提案を行う。

6.1. はじめに

我々第3グループは、月面農場での資源循環システムについて議論を行ってきた。その結果、月面において有機性残渣を効率的に資源化して循環させるためには、嫌気的処理であるメタン発酵や好气的処理である活性汚泥法などの微生物を利用した処理が月面におけるリサイクルの中核を成すと想定された。さらに、月面における効率的な資源循環を考えると、残渣・廃棄物の性状や、月面農場で用いられる栽培用培地の種類に応じて、柔軟に微生物処理法を使い分ける、もしくは組み合わせることが重要となるという考えに至った。また、月面に存在する月面鉱物(月レゴリス)から、作物栽培に必要とされるカリウム(K)、リン(P)、カルシウム(Ca)、マグネシウム(Mg)などの元素を供給するのも資源利用効率の点で有用であると考えられた。

以上のように、月面における資源循環システムを構築する際には、嫌気的ならびに好气的微生物群による残渣の効率的な資源化やリサイクル可能資材や月レゴリスの積極的利用が、持続的な作物生産体系を確立する上で必要な視点になると考えられる。

6.2. 月面入植当初における元素の供給

月面に長期間滞在するためには、リサイクル、特に元素の循環システムの構築が不可欠になる。表6.1に示すように、ヒトが生命活動を維持するためには各種のミネラルやエネルギー源としての糖だけでなく、体内で合成できないアミノ酸、ビタミンなどを食物から摂取する必要がある¹⁾。そのため、食物残渣などに含まれる元素を効率よくリサイクルできるシステムを構築することが、長期間の月面における有人活動を支える鍵となる。ヒトが生存するために必要な多くのミネラル分は植物から供給が可能である。そこで、作物を栽培する際の月面での物質循環を考えると、月面入植初期は、作物の生産に必須であり、かつ月面で収集するには多大な労力とエネルギーが必要となる窒素(N)、硫黄(S)、カリウム(K)、リン(P)、炭素(C)、水素(H)、酸素(O)などの多量元素を地球から供給することが重要になると考えられる。

以上のことから、本グループでは、各区域を分けることで作物病害の発生などのリスクの分散し、さらに紫外線殺菌や膜ろ過による除菌技術を併用しながら、メタン発酵や堆肥化によって有機性廃棄物を資源に変換する技術を採用した。

6.3.2. 微生物の利用と増殖制御

月面に居住するにあたり、食料供給に必要な農地面積が第4グループにより計算された(表6.2)。第3グループでは、想定された農地の規模から、資源循環と生産システムの運営を実施する場合に考慮すべき問題点を解決するために想定される手法を示す。

効率的な資源循環を想定した場合、微生物による対応が必須である。植物に対しては地球上から病原菌が持ち込まれなければ、長期間、病原菌なしで生産できる可能性がある。一方で、滅菌処理を行った場合でも、植物体や資材、ヒトに付着した一般細菌をゼロにすることは不可能と考えられる。一般細菌は、水と無機成分、根から分泌される有機物により、容易に繁殖できるため、栽培環境を無菌条件でスタートしたとしても比較的速やかに微生物叢が形成されることが予測される。この際、積極的に特定の微生物を接種すれば想定した菌叢をある程度制御できる可能性がある。近い将来、病原菌が侵入してくることを想定して、病原菌に対して抵抗力を有する微生物叢を人工的に確立しておくことが、持続的な月面農場を確立する上で重要であると考えられる。このような考え方は地球上における有機栽培でも実践されている技術である。すなわち、太陽熱消毒などで病原菌を減少させ、一般細菌を含む堆肥を施用することにより生産を持続的に実施している。

表 6.2 必要栽培面積の算出例(3章 表 3.5 再掲)

	1人あたりの 必要重量 (g/day)	植物工場における生産性			1人あたりの 必要面積 (m ²)	必要面積	
		1作の生産量 (g/m ²)	栽培日数 (day)	日生産量 (g/m ² /day)		6人	100人
						(m ²)	(m ²)
イネ	400	900	90	10	40.0	240	4000
ジャガイモ	75	8000	360	22	3.4	20	338
サツマイモ ¹⁾	150	—	—	20	7.5	45	750
ダイズ	350	1400	100	14	25.0	150	2500
レタス	150	2500	30	83	1.8	11	180
トマト	200	83000	360	231	0.9	5	87
キュウリ	100	70000	360	194	0.5	3	51
イチゴ	50	17000	360	47	1.1	6	106

¹⁾ サツマイモの栽培例が少ないため、日生産量をジャガイモの約9割と仮定した。

6.3.3. 培養液の循環利用

月面では、水もまた貴重な資源となるため、循環利用が必須である。水を再利用する際、微生物混入のリスクが考えられる。一方で、微生物のうち大半は無害であり、特にヒトに対して害がある微生物はごく一部である。ヒト・農作物に被害を与えない微生物であれば殺菌処理の必要性は当面ないと考えられる。しかし、混入した微生物が増殖しすぎた場合や病原性微生物が発生した場合、その数を制御する必要があるため、滅菌技術は必須である。現在、地球上で行われている水の滅菌技術は、塩素や紫外線による殺菌、濾過による除菌が挙げられるが、塩素は濃度により植物の根やヒトの健康に害を与える可能性があるため、第3グループでは、月面農場に適した殺菌方法として、紫外線による殺菌や濾過による除菌を採用した。また、水を再利用する際の注意点として、病原性微生物などの混入以外に、植物が分泌する自家中毒(アレロパシー)物質の養液などへの蓄積が考えられるが、加熱分解、活性炭による濾過である程度の除去が可能であると考えられる。

6.4. 微生物を利用した物質変換

非可食部などの生産物の残渣が月面では貴重な炭素源、窒素源となるため効率的に循環させ再利用する必要がある。第3グループでは、月面農場において、それらを効率的に資源循環させるシステムの中核処理技術には、微生物を利用した生物化学的な物質変換を想定した(図6.2)。微生物を用いない資源循環方法としては、1994年に青森

県六ヶ所村で建設が開始された CEEF(閉鎖生態系実験施設)において、高温高压下の水中で有機性廃棄物を物理化学的に分解する湿式酸化処理が試みられてきた(6.6 参照)。非生物的な本手法は、分解に要する時間が短いという利点がある一方で、ガス化した窒素を植物養分にできないことや高压処理による火災などの危険性が短所とされる。他方、微生物により有機性廃棄物を生分解する生物化学的物質変換は、成熟した安定的な廃棄物処理技術として地球上で実用化されているが、宇宙のような閉鎖空間では微生物による環境汚染リスクが課題とされている。しかしながら、月面農場全体を考えるとヒトや植物には常在細菌が生息しているため、滅菌した場合でも細菌やウイルスを完全に除去することは難しい。また、植物病原菌の蔓延リスクに備えた持続的な作物生産体系を確立するうえでは、有用微生物群で構成される安定的な微生物菌叢をむしろ積極的に月面農場に導入することも重要であると考えられる。微生物処理は、対象とする廃棄物の種類や処理法によって得られる肥料成分の形状が異なることから、月面における効率的な資源循環を考えるときは、残渣・廃棄物の性状や、農場で用いられる植物用培地の種類に応じて、柔軟に微生物処理法を使い分ける、もしくは組み合わせることが有効となると考えられる。

以上のことから、月面入植当初は、紫外線殺菌や膜ろ過による除菌技術を併用しながら、メタン発酵や堆肥化によって有機性廃棄物を資源に変換する技術を採用した。ただし、有機性廃棄物中に、生分解できない有毒物質あるいは重金属が含まれる場合、これらは微生物・植物・ヒトのいずれかに経時的に蓄積して、なんらかの影響を及ぼす可能性がある。そのため、これらを選択的に排除する物理化学的技術について、今後検討する必要がある。

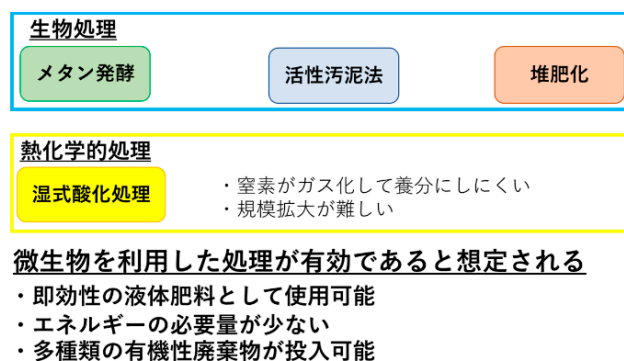


図 6.2 月面に適した物質循環法の提案

6.4.1. メタン発酵

メタン発酵は、嫌気性微生物により進行する廃棄物系バイオマスの生物化学的変換プロセスの一種である。メタン発酵は、堆肥化と比較して相対的に含水率の高い廃棄物が対象となり、また反応過程での発熱があまり生じない。このため、メタン発酵によって無機化された肥料成分は液状となる。これを酸化処理して液中の高濃度アンモニウムイオンを硝酸イオンに転換、もしくは、施肥方法を工夫すれば、養液栽培のための培養液のベースや速効性の液体肥料として利用できる(図 6.3)。他方、メタン発酵は酸化還元電位が -300 mV 以下の絶対嫌気性環境によってのみ成立するため、高効率処理のためには発酵槽の高い気密性が要求される。

メタン発酵は、酵母のみからなるエタノール発酵と異なり、多種多様な微生物群から構成される多段型反応系である。結果として、メタン発酵では非常に多くの種類の有機性廃棄物を投入することが可能である。また、酢酸などの有機酸や硫化物など多くの中間代謝物が生成する。これらはいずれメタン、アンモニア、二酸化炭素に分解されるものであるが、メタン発酵の進行を意図的に制御して、ヒトの生活に資する中間代謝物を取り出すことも可能である。候補作物であるイネならびにダイズを対象として、収穫時に発生する残渣量、収穫時残渣をメタン発酵して得られる資源の生成量およびメタン発酵槽容積について、それぞれ推定した(表 6.3～5)。これらはあくまで理論値であり、実際のメタン発酵では pH やアンモニア濃度など、種々の動的な環境要素が資源化量の変動要因となることに注意する必要がある。また、他の残渣について同様の試算を行うためには、その化学組成を明らかにする必要がある。

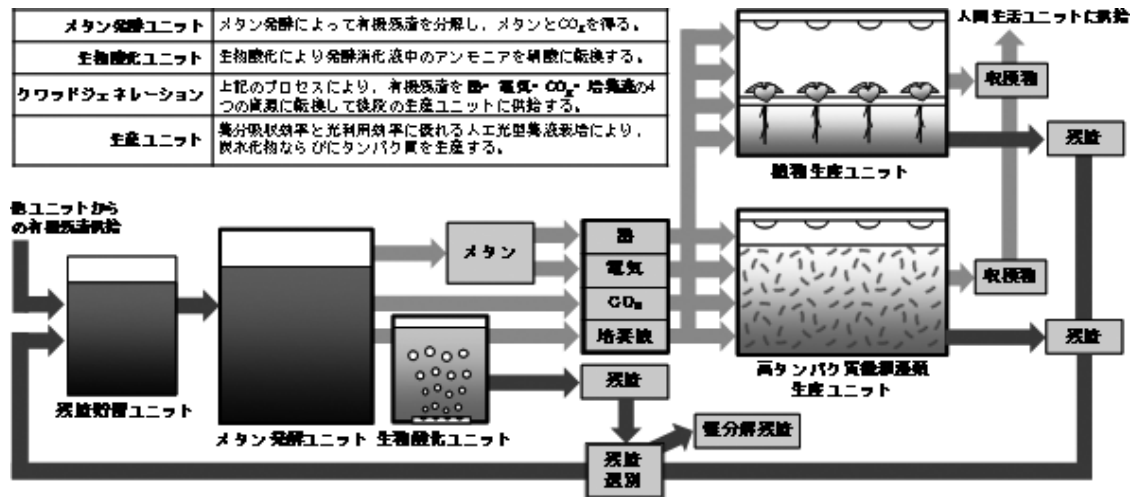


図 6.3 宇宙利用におけるクワッドジェネレーション型マルチ生産システムの例

表 6.3 イネおよびダイズの必要重量から求めた収穫時残渣の発生重量、有機物量、含水率

	必要重量 (gFW day ⁻¹ person ⁻¹)	収穫時残渣の 重量 (gFW day ⁻¹ person ⁻¹)	収穫時残渣の 有機物量 (gVS day ⁻¹ person ⁻¹)	収穫時残渣の 含水率 (gH ₂ O gFW ⁻¹)
イネ (精白米)	400	—	—	—
ダイズ	350	—	—	—
稲わら	—	560 ¹⁾	409 ¹⁾	0.13 ¹⁾
粃殻	—	89 ²⁾	63 ²⁾	0.09 ²⁾
ダイズ収穫残渣	—	735 ³⁾	632 ³⁾	0.14 ³⁾
計	750	1384	1103	—

¹⁾保井ら (1969)。²⁾平成 19 年度東北バイオマス発見活用促進事業におけるデータ (農水省、2007)。³⁾IPCC 報告書 (1996)。表 6.4 イネおよびダイズ収穫時残渣がメタン発酵で 60%分解¹⁾された場合の CH₄、CO₂、NH₄⁺生成量の推定値

	CH ₄ 生成量 (L day ⁻¹ person ⁻¹)	CO ₂ 生成量 (L day ⁻¹ person ⁻¹)	NH ₄ ⁺ 生成量 (g day ⁻¹ person ⁻¹)
稲わら	109 ²⁾	100	2.0
粃殻	16 ³⁾	16	0.0
ダイズ収穫残渣	176 ⁴⁾	146	12.9
計	301	262	14.9

¹⁾落ら (2005) における牧草のメタン発酵分解率の報告を適用した。²⁾保井ら (1969) の報告している稲わら成分組成に、稲わらの C/N 比を 60-80 とする犬伏・安西 (2001) の報告を加味して C/N 比を 70 とし、稲わらの組成を C₂₅H₄₂O₂₀N_{0.3} と推定して下のメタン発酵理論式*を用いて算出した。³⁾粃殻が炭水化物のみからなると仮定し、組成を C₆H₁₀O₅ と推定して算出した。⁴⁾IPCC 報告書 (1996) の報告から、組成を C₃₃H₅₄O₂₄N₂ と推定して算出した。

*メタン発酵理論式 (李, 2005) :

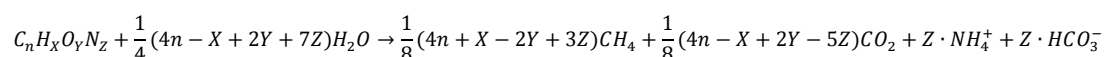


表 6.5 滞在人数ごとの残渣の総容積ならびにメタン発酵槽¹⁾有効容積の推定値

規模	1 人 (原単位)	6 人	100 人
メタン発酵槽に投入する 希釈残渣の総容積 ²⁾ (L day ⁻¹ person ⁻¹)	6.0 ²⁾	36.0	600
水理学的滞留時間 ³⁾ を 20 日とした場合の メタン発酵槽有効容積 (L)	120	720	12,000

¹⁾メタン発酵方式は連続運転・湿式中温方式とした。基質の含水率ならびに投入負荷は、生ごみを基質とした場合に概ね標準的とされる条件（含水率約 80%ならびに水理学的滞留時間 20 日）を仮定した。

²⁾加水前の残渣重量を Table 1 から 1384 gFW day⁻¹ person⁻¹、そのうち水分量を 165 gH₂O day⁻¹ person⁻¹と仮定して、4620 g の水を加水することで含水率 80%とした。加水後の残渣の密度は 1000 g L⁻¹とした。

³⁾水理的滞留時間は以下の式で求めた。

$$\text{水理学的滞留時間 (day)} = \frac{\text{メタン発酵槽有効容積 (L)}}{\text{投入する希釈残渣の容積 (L / day)}}$$

6.4.2. 堆肥化、残渣の利用

比較的簡易な廃棄物処理に堆肥化がある(図 6.4)。堆肥の原料は、主に稲わらやもみ殻、家畜糞尿など、大部分が植物由来の粗大有機物であり、最終的に二酸化炭素とアンモニアに分解することが可能である。堆肥化に関する詳細な研究はその歴史を含めて長く行われており^{2,3)}、堆肥中には、無機元素も多く残存する。月面農場を長期的に運営するには、エネルギーコストが低く、中長期にわたり炭素を保持する性質を活かし、これらを作物生産の肥料として活用することが合理的であると考えられる。また、堆肥化中、堆肥内の温度は 60℃～80℃程度まで上昇することから、その熱を利用した病原菌などの殺菌効果が期待できる。

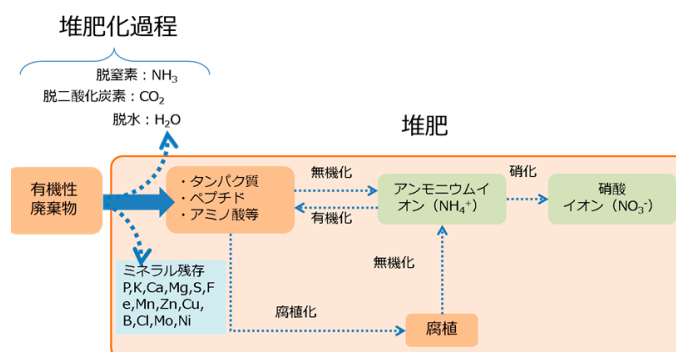


図 6.4 堆肥化家庭と窒素の形態変化

6.4.3. 尿尿、糞便の再利用

月面上での生活において排泄された尿や糞便を作物生産用の肥料資源として廃棄物処理地域にストックすることで、資源不足を効率的に回避できると考えられる。ヒトの尿尿には、尿素やリン酸、カリウムなどが含まれていることや、ヒトの尿尿を原料とした養液栽培方法が報告されていることから⁴⁾、月面農場においても、尿素を窒素肥料として利用できる可能性がある。尿や糞便を効率的に再利用するためには、尿と糞便を分別回収し、それぞれに適したリサイクルシステムで処理を行う必要があると考えられる。尿を肥料として再利用する場合は、必要に応じて殺菌後、濾過や透析膜などで、除塩処理を行い利用することや、作物に生理障害が観察されるほどではないが、液体肥料としてそのまま利用するには窒素含量が高濃度であるため、希釈して使用することが想定できる。また、尿はウレアーゼによりアンモニウムイオンと二酸化炭素まで分解可能であり、さらにアンモニウムイオンを酸化することで、硝酸イオンに変換できる。以上のような尿尿から得られた資源を月面農場における作物生産に最大限活用するには、そのまま作物に施与するのではなく、Fertigation のシステム(図 6.5)^{2,5)}などと組み合わせることで、その効果を最大限発揮できると想定される。一方、糞便はメタン発酵や堆肥化に組み込むことができる。この際、気相から CO₂、NH₃、H₂O が回収可能であり、堆肥化物中に含まれる S、Ca、Mg および微量元素を作物栽培用の資源として再利用が可能であると想定される。以上から、月面においては、糞便や尿も貴重な元素資源であるため、長期的に月面農場を運営するためには、いずれかのタイミングで資源循環することが望ましいと考えられる。

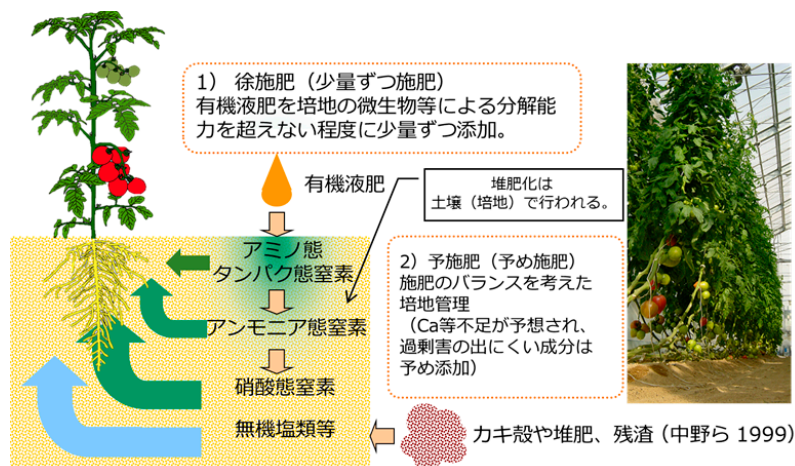


図 6.5 Fertilization システム

6.5. 月面鉱物の資源としての利用

月面鉱物(月レゴリス)を構成する元素は、地球上の土壌元素と類似性があり⁶⁾、Ca、Mg、K、Pや微量元素などが含まれているため(表 6.6、6.7)、作物への栄養素供給源の候補として利用・活用が期待できる。実際、火星および月の土壌を模して作成された人工土壌を用いてトマト、コムギ等を栽培した報告があり、土壌として問題はないとされている⁷⁾。一方で、月レゴリス中の Mn、Zn、Pb、Se などの重金属含量は地球上の土壌の中央値と同程度であるが、Ni は 6 倍、Cr においては 27 倍も高い。また、月レゴリスには As、Cd、Ag が濃度は低いながらも含まれる場合がある。今後、月レゴリスを用いて作物を栽培することを想定すると、これら重金属の作物への吸収量について常に留意していく必要がある。さらには、月レゴリスの物理性、特に、保水性や通気性などの特性解明も望まれる。

表 6.6 月の岩石の組織の例

		A11	A12	A14	A15	A16	A17	unit
Major and minor elements	SiO ₂	42.2	46.3	48.1	46.8	45.0	43.2	(wt%)
	TiO ₂	7.8	3.0	1.7	1.4	0.5	4.2	
	Al ₂ O ₃	13.6	12.9	17.4	14.6	27.3	17.1	
	Cr ₂ O ₃	0.3	0.3	0.2	0.4	0.3	0.3	
	FeO	15.3	15.1	10.4	14.3	5.1	12.2	
	MnO	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.2	
	MgO	7.8	9.3	9.4	11.5	5.7	10.7	
	CaO	11.9	10.7	10.7	10.8	15.7	11.8	
	Na ₂ O	0.5	0.5	0.7	0.4	0.5	0.4	
	K ₂ O	0.2	0.3	0.6	0.2	0.2	0.1	
	P ₂ O ₅	0.1	0.4	0.5	0.2	0.1	0.1	
	S	0.1	-	-	0.1	0.1	0.1	
Total		99.9	99.6	99.8	100.8	100.8	100.5	
soils & breccias								
miscellaneous minor elements	P	560	1616	2073	908	570	453	(μg/g)
	V	69.6	114.4	51.1	110.4	21.1	71	
	Cr	1986	2468	1496	2530	728	2220	
	Mn	1662	1600	1009	1445	511	1252	
	Sr	163	138	184	138	154	153	
Incompatible trace elements	K		540	912	409		440	(μg/g)
	Ba	232	70	146			74	
siderophile elements	Co	31	40.8	34.6	44.6	27	33.8	(μg/g)
	Ni	199	260	411	216	378	211	
vapor-mobilized elements	S	1240	820	870	624	543		(μg/g)
	F			138	69			
	Zn	24.7	6	26.7		19.1		
	As			85				(ng/g)
	Se	330	200	316	193	224		
	Ag					8.5		
	Cd					83		
	Pb	1.61	3.9	8.3	1.81	1.9	1.47	(μg/g)

表 6.7 月と地球の岩石組成の例

酸化物	月岩石 重量%	地球岩石 重量%
SiO ₂	44.40%	59.36%
Al ₂ O ₃	6.14%	15.30%
FeO	10.90%	6.43%
MgO	32.70%	3.48%
CaO	2.31%	5.04%
Na ₂ O	0.09%	3.77%
K ₂ O	0.01%	3.13%
TiO ₂	0.31%	0.33%

※地球岩石の値はクラーク係数から計算

6.5.1. 模擬月レゴリスの保水力

月レゴリスを作物への栄養素供給源や作物栽培用の培地として利用できるかどうか探るため、JAXA から提供された模擬月レゴリスの保水力や根圏に与える影響などを検討した。模擬月レゴリスは一般的な土壌と比較して保水力に乏しく、もっとも保水力の乏しい川砂よりも低いという結果が得られた(図 6.6A)。

JAXA から提供された月レゴリスの形状などに関する情報を併せて判断すると、月レゴリスを作物栽培用の培地として利用するには、保水力や物理性を改善する必要があることが示唆された。また、レゴリスの保水力を改善し得る資材としていくつか検討したところ、ポリ乳酸(PLA: 農業資材名 LACTIF)やパルプが高い保水力を示すことが判明した(図 6.6B)。

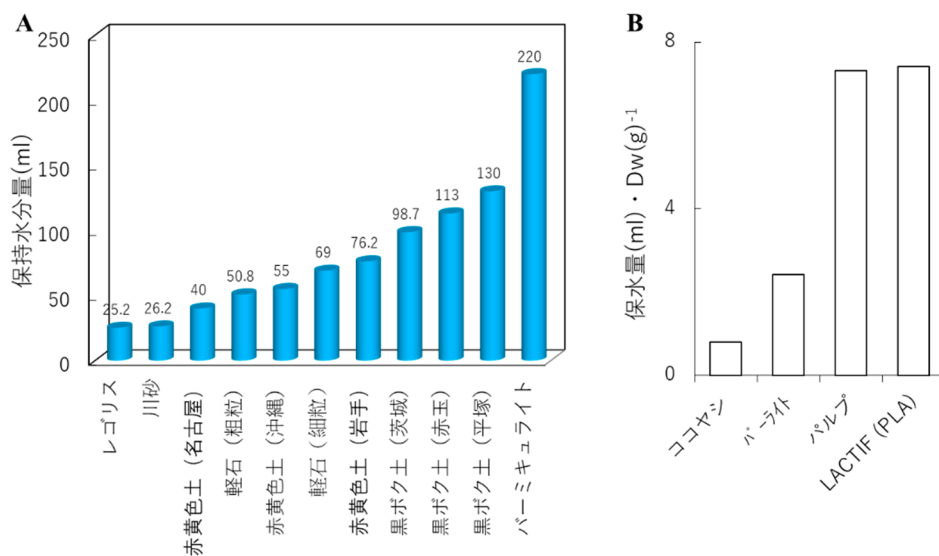


図 6.6 各培地の保水量

6.5.2. 月レゴリスの物理性の改善が見込める資材

月レゴリスを作物栽培用の培地として利用するには、保水力や物理性を改善する必要があることが示唆された。月レゴリスを利用して作物を栽培するためには、リサイクル可能で気相率が高く軽量であるなどの特徴を持つ資材と混和することで、保水力などの物理性を改善し利用できる可能性が考えられる。上記のような特徴を併せ持つ資材として、デンプンなどを原料に合成される生分解性のポリマーであるポリ乳酸 (PLA)が考えられた(図 6.7)。PLA は、デンプンの糖化、乳酸発酵、重合を経て PLA 樹脂が製造され、繊維やフィルムなどに加工される⁸⁾。一般的にポリ乳酸製品は、ABS 樹脂製品と比較して耐久性や耐熱性が劣るとされているが、製造方法によりポリプロピレンと同等の強度を与えることが可能とされている。また、加水分解や堆肥化などの生分解により、最終的に水と二酸化炭素に分解できるため、元素の循環利用の観点からも有用な資材であると考えられた。さらに、月面農場において作物を生産する際は人工光型植物工場のシステムが提案されているが、栽培過程で必要となる苗などの支持体としての利用も考えられる。また、堆肥中において、ポリ乳酸の分解は難しいとされているが、ポリ乳酸を効率よく分解する *Pseudozyma* 属の酵母菌や *Amycolatopsis* 属の放線菌などが報告されている^{9, 10)}。月面における資源循環システムを構築する際に、上記のような特定の微生物を積極的にリサイクルシステム中に接種し、微生物叢を人工的に確立することが、持続的な作物生産体系を確立する上で重要になると考えられる。PLA は、デンプンなどを原料に合成できることから、製造設備を月面農場に導入することで、月面でも製造できる可能性が高いと考えられるため、持続的に月面農場を運営するうえ、有望な素材の一つであると考えられた。

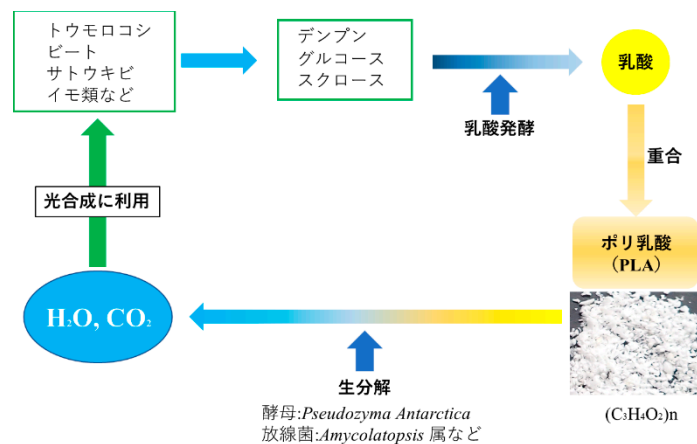


図 6.7 ポリ乳酸の物質循環

6.5.3. 模擬月レゴリスを用いた作物栽培試験

ポリ乳酸を原料に作成された軽量で気相率が高い LACTIF 培地(株式会社 JSP)が開発されている。LACTIF 培地のような物理性に優れる資材と月レゴリスを混和することで、月レゴリスの土壌としての物理性や保水力が改善され、根圏発達が良くなり肥料資源を効率的に利用できる可能性がある。そこで、月面入植後に月レゴリスが現地資源として活用可能か探るため、スプラウト(芽生え野菜)や月面農場での栽培候補作物の一部であるダイズ、リーフレタス、イチゴを用いて、模擬月レゴリスとポリ乳酸の混和による根圏の発達や生育への影響を検討した。なお、試験に用いられたポリ乳酸は、株式会社 JSP よりご提供いただいた LACTIF 培地を用いた。

試験の結果、模擬月レゴリスは、LACTIF 培地と混合して用いることで模擬月レゴリス単体での栽培よりもダイズ、リーフレタス、イチゴ、スプラウト類の根圏発達を促進させるという予備実験結果が得られた(図 6.8A, B)。以上の結果は、LACTIF 培地を混合することで、培地気相率などが改善され植物生育適性が向上したためと考えられる。さらに、模擬月レゴリスと LACTIF 培地の混合培地で栽培したダイズを完熟稲ワラ堆肥に定植し栽培を続けたところ、コントロール(培養土)と比較するとやや果実は小さいが、果実を得られることが確認できた(図 6.8C)。

本実験により、月レゴリスを活用し作物を栽培できる可能性が示唆された。月面での生活が安定し、将来的に月レゴリスを利用した作物栽培も視野に入れる場合、月面入植後から、人工光型植物工場での作物栽培と並列して、月レゴリスの物理的改良が作物の成長に与える生理生態的な影響の評価や可食部位への有害重金属蓄積などの調査が必要であると考えられる。このように、長期的な月面への居住を可能にするためには、残渣の効率的な資源化に加えて、循環資源の利用効率を向上しうる現地調達資材の開拓・導入も重要であると考えられる。

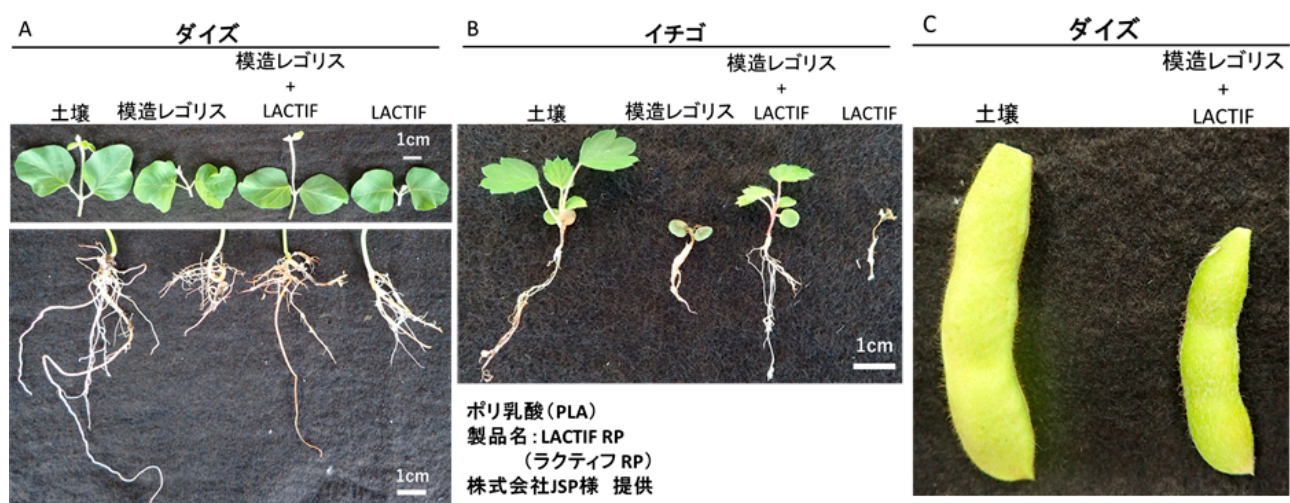


図 6.8 各培地上で栽培した作物

6.5.4. レゴリスの再利用

レゴリスの利用方法として、焼結し培地として利用できる可能性がある。一方、使用後の焼結レゴリスを再利用する場合、例えば、宇宙放射線などを利用し殺菌、滅菌ができるかを検討する必要がある。現在、月面における曝露環境での宇宙放射線(太陽粒子、銀河放射線等の主に陽子線)の実測データは十分にない。一度使用した焼結レゴリスを月面で曝露した場合、奥深い部分まで殺菌ができていないか、また、宇宙放射線環境が安定しているかどうか不明である中で、殺菌を確実に行うのは容易ではない。むしろ、照射対象のレゴリスを混合しながら、人工的に発生させた滅菌用の紫外線ランプ等を必要な照射波長や照射時間を調整しながら照射した方が殺菌には有効と考えられる。また、対象となる菌の種類により、殺菌に必要な放射線の強度や照射時間が異なると考えられる。このような環境下での微生物動態については、月面上で研究を実施する必要があると考えられる。

6.6. 熱化学的処理

1994 年から青森県六ヶ所村で建設が開始された CEEF(閉鎖生態系実験施設)では、微生物によらない熱化学的廃棄物処理として、ヒトの排泄物と植物の不可食部を高温高压下の水中で分解する湿式酸化処理が試みられている。湿式酸化は、水の臨界に達しない 374℃以下で、かつ水の気化を防ぐために密閉式の高圧容器の中で行われる。生物処理に比べて分解時間が短い点、分解物中に細菌やウイルスが含まれず環境汚染のリスクが少ない点がメリットとされる。一方、高压処理であることや規模を大きくしにくいこと、窒素がガス化して植物養分としにくいことがデメリットとされる。図 6.9 に、閉鎖系における資源循環ユニットとして検討されてきた湿式酸化処理・堆肥化・メタン発酵の概略図を示す。

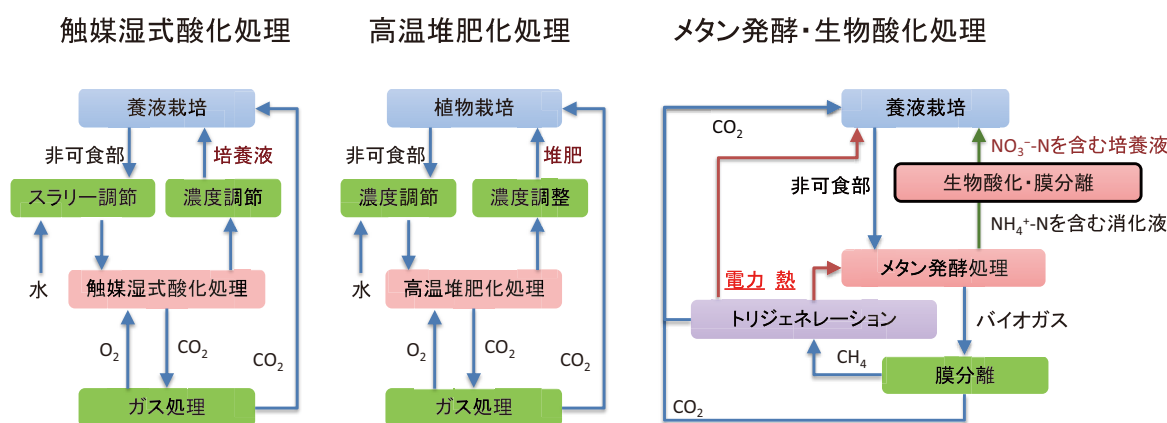


図 6.9 閉鎖系における熱化学的ならびに生物化学的有機物分解処理方法の概略

6.7. 月面における長期的な資源循環に関する今後の展望

地上での嫌気発酵槽の主な使用目的は、メタンガスの生産となることが多い。一方で、メタンガス生産までの段階でアンモニアや硫化物などの副生産物が発生する。月面では、元素資源が限られると予測できるため、これら副産生成物が、重要な資源となる。そのため、それぞれの化合物の生成の仕組みや条件などを研究・解明することは、月面農場での効率的な資源循環だけではなく、地上での効率的なメタン製造などにも反映可能と考えられる。作物残渣に最も多く含有される有機物として、植物セルロースが挙げられる。現在、植物セルロースの効率的な分解について、多くの視点から研究がなされている。その中で、真菌類や細菌類を用いた効率的な植物セルロースの分解に関する研究が活発に行われている。月面農場において発生する植物セルロースの分解も真菌類・細菌類を用いると効率的な資源循環が可能であると予測される。以上から、月面農場を持続的に運営するための資源循環の今後の予測として、図 6.10 のようなシステムをイメージした。生物という完全なコントロールのできないものをできる限り簡易的に扱うことを考慮し、元素をできるだけ扱いやすい状態で貯留することに留意している。例えば、収穫物からの残渣物は稲のように一回の排出量の多いものもあるため、貯留しながら堆肥化やキノコなどのセルロース分解菌などを用い、緩やかに分解させながら、メタン発酵槽への投入量を主に調整する役割を担うなどである。

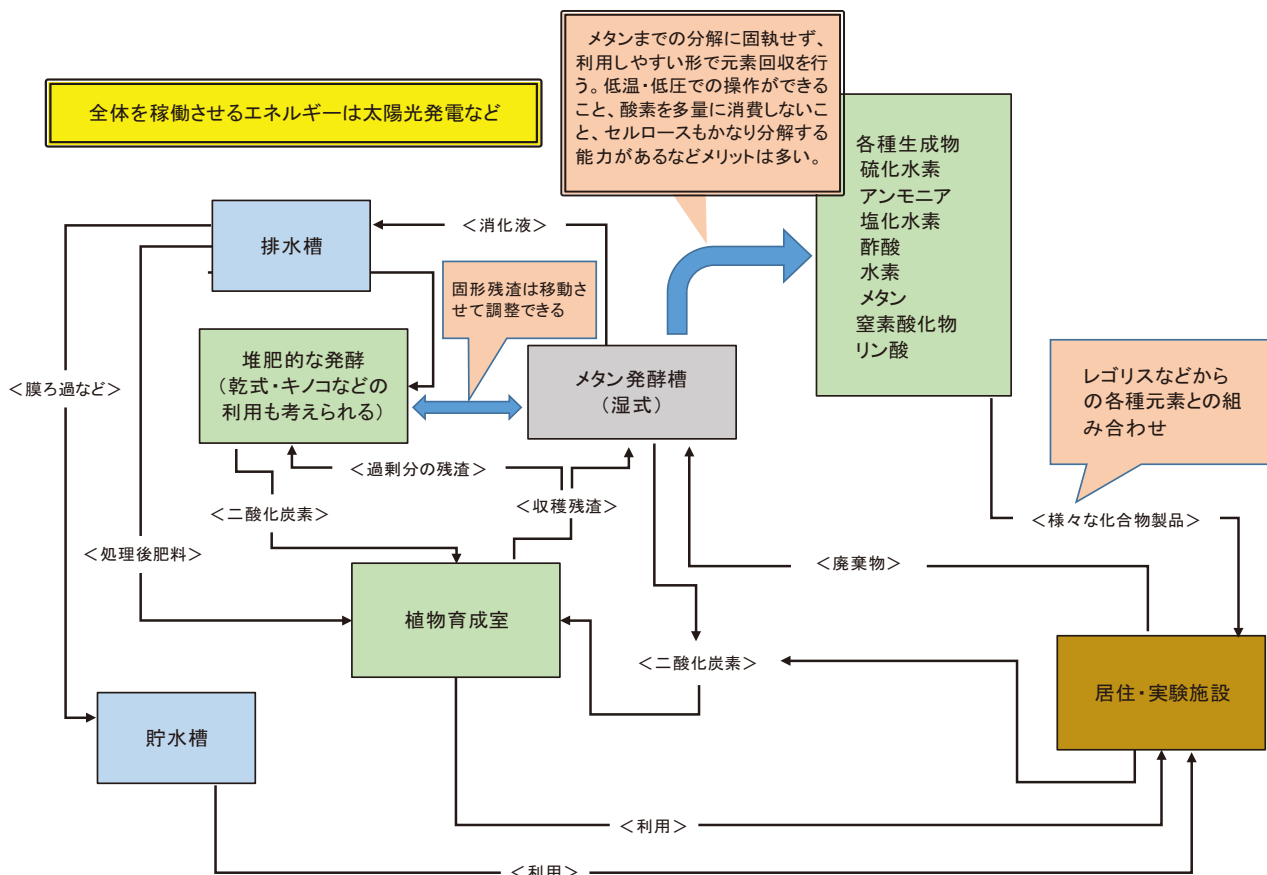


図 6.10 嫌気発酵槽を中心とした物質循環の概略の一例

月面農場が軌道に乗り、滞在人数や基地面積が増加すれば、炭素や酸素、水素を保持するためのバッファー機能の高い土、もしくは、それに準じたものを増やす必要があると考えられる。特に、土の基材の一つである堆肥は、炭素などの元素を蓄える能力が高いため、その必要性が高まってくることが予想される。また、培地耕なども、この段階で有効になっていくと考えられる。嫌気発酵でもセルロースは分解されるが、高効率とはいえないため、堆肥化によるセルロースの分解機能を導入することで、嫌気槽への投入量の調整や前処理など、循環速度のコントロールをおこなうことが有効であると考えられた。月面に堆肥の生産システムが組み込まれると、発酵の際の熱が得られるため、嫌気発酵の加温や植物育成室の加温に利用することが可能であると予測される。一方で、月面農場は完全閉鎖空間であるため、熱や二酸化炭素を上手く活用するための、装置やそれを駆動させるためのエネルギーが別途必要になることは、考慮すべきである。また、生合成・生分解が可能なポリ乳酸や、月レゴリスから製造可能と考えられるパーライトに準じたものは、月面入植時から早い段階で導入することを視野に入れることも必要になるかもしれない。一方で、月面農場を長期的に運営していると、居住空間や生活空間、生産空間から、無機性の廃棄物も生じてくると考えられるため、例えば、金属類やガラス類は電気炉などによる溶解、プラスチックなどは熔融など、無機性廃棄物のリサイクルシステムも構築しておくことが望ましいと考えられる。以上のように、月面における持続的な資源循環システムを構築する際は、発生する残渣の効率的な資源化を考慮することが重要であると考えられる。

図 6.10 は滞在人数が 5 人前後の人数を対象としており、バッファー機能は嫌気発酵槽と水が担うことを想定した。廃棄物は嫌気発酵槽にあえて集中させており有機物を中心にした循環システムを示した。

メタンの利用は、太陽電池による電気エネルギーを前提とした場合、エネルギーとしての価値は低く、N、C の循環においては二酸化炭素の利用が容易であることから、メタンまでの発酵を目的としていない。月面において各種化合物を製造することを視野にいれていくとアンモニア、硝酸、硫酸、塩化水素は重要な位置を占めてくると予想される。アンモニアのハーバー・ボッシュ法のような触媒を用いた合成法と併用し、閉鎖系での循環利用下での効率的な運用が必要と考えられる。

6.8. 今後の課題

物質循環に必要な微生物や作物をはじめとした物資を月面に持ち込む際、意図しない病原菌の混入やそれを原因とした病害の発生が危惧される。月面入植当初は、養液栽培を主とするため病気が発生すると、甚大な被害が出ると予測される。病害による作物の被害を抑制するためには、病原菌の侵入防止策や滅菌技術、農薬などによる病原菌の防除に関しても議論を深める必要があると考えられる。一方で、月面には地球上から導入した微生物しか存在しないと考えられるため、病害防除などに農薬を使用する場合は、微生物の多様性が形成されずに農薬分解が進まない可能性や共生菌不在による肥料の利用効率の低下なども考えられる。以上のことから、今後、月面における物質循環において、分解菌コミュニティなどの形成についても議論が必要になると考えられる。

参考文献

- 1) 文部科学省, 食品成分データベース, 2015, <https://fooddb.mext.go.jp/index.pl>
- 2) 中野明正, インテグレート有機農業論, 誠文堂新光社, 2012.
- 3) 中野明正ら, 植物工場・施設園芸ハンドブック, 2015.
- 4) Linyan Yang, Apostolos Giannis, Victor W.-C. Chang, Bianxia Liu, Jiefeng Zhang, Jing-Yuan Wang. Application of hydroponic systems for the treatment of source-separated human urine, *Ecological Engineering*, 81, 2015, 182-191.
- 5) Fernandez-Salvador, J, B.C. Strik, D.R. Bryla., Liquid corn and fish fertilizers are good options for fertigation in blackberry cultivars grown in an organic production system, *HortScience*, 50(2) 2015, 225-233.
- 6) SPACE.com, アポロ 15 号によって採集された岩石の組成, 2010.
- 7) Wamelink GWW, Frissel JY, Krijnen WHJ, Verwoert MR, Goedhart PW. Can Plants Grow on Mars and the Moon: A Growth Experiment on Mars and Moon Soil Simulants. *PLoS ONE* 9(8), 2014, e103138. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0103138>
- 8) 木村良晴, 石油に依存しない高分子、ポリ乳酸をつくる。高分子, 2015, 64(5), 278-282. <http://www.space.com/scienceastronomy/moon-mantle-exposed-craters-100705.html>
- 9) 北本宏子 et al, 特願 2008-023030 号(2008).
- 10) 常盤 豊, 生分解性プラスチックを分解する微生物と天然高分子, 生物工学会誌, 2007, 85(6), 264-266.

7. 月面農場システムの検討

～ 生命維持システム設計の観点から見た月面農場の検討 ～

宮嶋宏行(国際医療福祉大学 総合教育センター 教授)

7.1. はじめに

月では約 4 週間周期で約 2 週間ずつの昼夜があり、夜間の電力を貯蔵する必要があるため、従来、月面での食料生産は魅力的な選択肢ではなく、食料生産は約 24 時間 40 分周期の昼夜がある火星に焦点を当てるが多かった。宇宙での食料生産のための作物栽培は、1960 年代のロシアでの研究以降、多数の事例がある。食料生産と居住を地上実験施設で同時に実施した代表的な事例にはロシアの BIOS3^{3,4)}、米国の Lunar Mars Life Support Test Project (LMLSTP)⁵⁾、日本の Closed Ecology Experiment Facilities (CEEF)⁶⁾がある。最近の事例では中国の Lunar Palace 1⁷⁾がある。特に近年の作物栽培では、LED の利用が一般的になり、高圧ナトリウムランプを利用していた時代とは耐久性、軽量化、エネルギー利用効率の面で大きく異なる設計が可能になった。^{8,9,10)}

そこで本検討では、生物再生型生命維持システム分析ツール^{11,12)}を用いて、最新の植物工場の知見を取り入れた月面農場のシステム設計を行う。特に食料生産は、生命維持システムの設計に大きく関わるため、生命維持システム設計の観点から、月面農場全体の仕様を検討する。本報告では、分析ツールの設計法や計算手順について示した後、ワーキンググループで検討された設定値¹³⁾を用いて、月面農場を設計した一例について示す。

7.2. 月面農場設計の前提条件

まず、ワーキンググループの月面農場設計の前提条件について示す。月面拠点システムに必要な全体システムのうち他のグループで検討されている部分については次のような前提条件を設定した。

GR1：ISRU 利用により水、酸素、窒素を月面で製造できる。

GR2：月面でコンクリートを製造できる。

GR3：拠点位置を南極域の高地と想定し、9 割の日照率で太陽電池を利用できる。

GR4：原子力発電の利用も電力供給源の選択肢の 1 つである。

日本人の食事摂取基準 2015 年版¹⁴⁾に掲載された栄養価を参考に、エネルギー、たんぱく質、脂質のバランスを考慮し栽培作物候補が決められ、基準モデルは 30～49 歳男性身体活動レベルⅡ（2650kcal/日）である。農作物からの栄養は、植物性のみであることを考慮し、動物性たんぱく質を地球から供給する。その他の不足する栄養素についてはサプリメントとして地球から供給する。

作物種は、栽培面積、必要エネルギー、作業労働量、料理メニュー数を考慮して選定された。ワーキンググループで現在設定されている栽培作物と栽培量を表 7.1 に示す。地上の植物工場で得られた生産量や収穫指数から必要面積が決定された。イネ、ジャガイモ、サツマイモ、大豆、レタス、トマト、キュウリ、イチゴの 8 種類を内部で生産する。また、これら 8 種類では不足するエネルギーとたんぱく質については、動物性たんぱく 50g を地球から持ち込むという前提で計算する。このときのエネルギー、要求量、収穫までの日数、収穫指数、一日当たりの可食部の生産量、一人分の食料生産に必要な栽培面積、栽培棚の段数を考慮した実際の床面積を表 7.1 に示す。イネ、ダイズの栽培棚の段数、および床面積は、ここに示す 3 通りについて検討する。

表 7.1 月面農場の栽培作物候補

作物	エネルギー	要求量*1	収穫までの 日数	収穫指数*1	1 日の 生産量*1	一人当たり 栽培面積	栽培棚段数 *2	床面積 *2
	kcal/day	g/day	day	-	g/m ² /day	m ²	-	m ²
イネ	1421.1	335.2	90	0.5	8.5	40.0	1	40.0
							2	20.0
							3	13.3
ジャガイモ	58.6	15.6	100	0.82	4.6	3.4	3	1.13
サツマイモ	206.2	52.0	120	0.65	7.0	7.5	3	2.5
ダイズ	646.9	131.9	100	0.52	5.6	25.0	1	25.0
							2	12.5
							3	8.33
レタス	26.3	7.4	30	0.91	4.2	1.8	5	0.36
トマト	48.8	12.4	100	0.7	13.9	0.9	1	0.9
キュウリ	18.3	4.8	80	0.7	9.7	0.5	1	0.5
イチゴ	12.2	3.1	60	0.7	2.8	1.1	5	0.22
小計	2438.5	562.4				80.2		70.6 38.1 27.3
動物性たんぱく*3	211.0	50.00						
合計	2649.5	612.4						

*1 WG で設定された数字をドライマスに変換

*2 イネ、ダイズの栽培棚段数を 1 段, 2 段, 3 段の 3 通り検討する。これらのシステムを CLOSED 1、CLOSED 2、CLOSED 3 と呼ぶ。

*3 動物性たんぱくを追加で摂取したと仮定

NASA の先端生命維持システムの基準値^{15,16,17)}をもとに、人間の生活に関わる設定値を表 7.2 に示すように設定する。

表 7.2 人間の生活に関わる設定値（1 日一人当たりの kg）

要求項目	月面拠点, kg/CM-d
酸素	表 7.1 の設定による
食料（固形）	表 7.1 の設定による
食料（水分）	表 7.1 の設定による
代謝水	表 7.1 の設定による
調理用水	0.76
飲用水	2.10
手洗い用水	0.20
シャワー用水	2.72
トイレ洗浄水	0.30
洗濯用水	12.5
その他	0.78

7.3. 物質収支計算

表 7.1 の作物の栽培量をもとに生化学量論(付録 7A)^{18,19)}により物質収支を計算した結果を表 7.3 に示す。不足する物質が外部からの補給量になる。

表 7.3 物質収支モデル

	Input 1	Input 2	Input 3	Input 4	Output 1	Output 2	Output 3
植物	CO ₂	H ₂ O	NH ₃	HNO ₃	Edible	Inedible	O ₂
dry-g/CM	1741.2	621.7	19.1	42.4	562.4	497.8	1364.2

計算は付録 7A の式(A1)(A2)を利用

	Input 1-4	Input 5	Output 1	Output 2	Output 3	Output 4	Output 5
人間	Food	O ₂	Urine	Feces	Other	CO ₂	H ₂ O
dry-g/CM	612.4	599.0	51.7	105.2	0.00	778.7	275.9

計算は付録 7A の式(A3)を利用

	Input 1-4 or Input 1	Input 2 or Input 5	Output 1	Output 2	Output 3	Output 4
廃棄物処理	Waste	O ₂	CO ₂	H ₂ O	N ₂	Residues
尿, dry-g/CM	43.9	39.0	42.9	26.3	13.7	6.6
便, dry-g/CM	105.2	208.7	228.4	76.8	8.7	0.0
非可食部, dry-g/CM	497.8	602.1	789.6	301.5	8.9	0.0
Total, dry-g/CM	646.9	849.8	1060.9	404.6	31.2	6.6

計算は付録 7A の式(A4)(A5)(A7)を利用

	Input 1	Input 2	Output 1	Output 2
N ₂ 固定	N ₂	H ₂ O	NH ₃	HNO ₃
Total, dry-g/CM	25.1	36.4	19.1	42.4

計算は付録 7A の式(A8)を利用

7.4. 生命維持システムの設計

付録 7B に示した等価システム質量 Equivalent System Mass (ESM)²⁰⁾を利用して、月面農場を組み込んだ生命維持システムの比較を行う。ESM は質量、体積、電力、冷却、労働時間より構成される。付録 7C の表 7C1 の生命維持システム要素技術候補^{20,21)}をもとに人数に比例した値を用いる。補給質量はその利用技術により変化する。

7.4.1. 計算手順

設計ツールの計算手順を図 7.1 に示す。ミッション要求設定、栽培作物設定、物質収支計算、サブシステム要素技術設定、ESM 計算の手順で検討し、ミッション要求の変更、栽培作物の変更、要素技術の変更の 3 つのループがあり(B)、ESM を減らす方策を検討する。また、検討中に栽培作物データ、および技術データの更新があれば、そのデータを全体の計算に反映させることができる(A)。

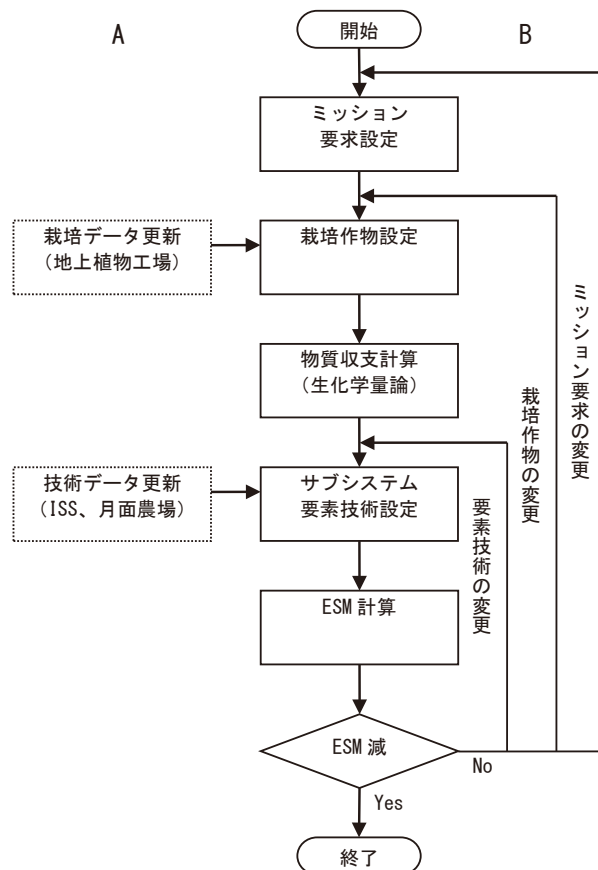


図 7.1 設計ツールの計算手順

7.4.2. 生命維持システムの構成

開放型、ISS 型、閉鎖型の要素技術を表 7.4 に示す。これら 3 つの型のサブシステムの質量、体積、電力、冷却、労働時間の組み合わせを付録 7C の表 7C2 に示す。開放型は、利用後の物質を再生しない。ISS 型は、二酸化炭素、水を再生し、廃棄物を再生せず乾燥させて貯蔵する。閉鎖型は、植物の光合成を利用して二酸化炭素と水を再生する。廃棄物を処理して再利用する。

表 7.4 月面拠点の要素技術

機能	サブ機能	開放型	ISS 型	閉鎖型
空気処理系	CO ₂ 除去	LiOH	4BMS	4BMS
	CO ₂ 還元	—	サバチエ	作物栽培
	微量有害物除去	活性炭、フィルタ	活性炭、フィルタ、酸化剤	活性炭、フィルタ、酸化剤
	空気貯蔵	N ₂ /低温 O ₂ タンク	N ₂ /O ₂ タンク	N ₂ /O ₂ タンク
	空気供給	N ₂ /低温 O ₂ タンク	CO ₂ 還元、水電気分解	作物栽培
	温湿度制御	CHX	CHX、排水へ凝縮	CHX、排水へ凝縮
水処理	飲料水貯蔵	タンク	タンク	タンク
	水供給	タンク	タンク、水再生	作物栽培
	水精製	ヨウ素、MCV	ヨウ素	ヨウ素
	排水処理	放出	多重ろ過	多重ろ過
	排水貯蔵	タンク	タンク	タンク
廃棄物処理系	尿処理	排水タンクへ	VCD	バイオリアクター
	便処理	便バッグ	便バッグ、乾燥圧縮	バイオリアクター、湿式酸化
食料系	食料生産	—	—	作物栽培
	食料供給	積載型食品	積載型食品	冷蔵/冷凍
居住系	洗濯	—	—	洗濯

4BMS: 4 ベッドモレキュラシープ, CHX: 凝縮熱交換, LiOH: 水酸化リチウム, MCV: 微生物チェックバルブ, VCD: 蒸気圧縮蒸留

7.4.3. 食料生産システム

月面農場の食料生産システムの ESM を表 7.5 に示す。この設計値は LED 照明、水耕栽培、インフレーターブル構造を前提とした。

表 7.5 の作物部分の初期質量 6.51kg/m^2 は、地球からの N_2 、 CO_2 、 NH_3 、 HNO_3 の質量の合計であり、 N_2 の質量は栽培空間の体積から計算され、 CO_2 、 NH_3 、 HNO_3 の質量は表 7.3 の物質収支をもとに計算された。

表 7.1 に示された作物栽培に必要な LED 電力を計算した。光量子束当たりの光合成量を 0.4g/mol とすると^{8,23)}、生産量 $1,090\text{g}$ (可食部 562g 、非可食部 498g)に必要な光合成光量子束は $2,651\text{mol}$ ($1,090\text{g}/0.4\text{g/mol}$)となる。LED の 1 ジュール当たりの光合成光量子を $1.66\mu\text{mol/J}$ とすると¹⁵⁾、光合成光量子束は $1,596,728\text{kJ}$ ($2,651\text{mol}/0.00166\text{mol/kJ}$)となる。仮に、このエネルギーを 8 時間で照射すると、必要電力は、 44.4kW/CM-day ($1,596,728\text{kJ}/36,000\text{s}$)となる。これを栽培面積 80.2m^2 で割ると 0.553kW/m^2 となる。また冷却(排熱)は、植物工場のデータより、LED 照明電力の 20%とした。労働時間 $1.3\text{h/m}^2\text{-year}$ は、ほとんどの農作業を機械化すると仮定した場合の数字である。

表 7.5 月面農場の食料生産システム

構成要素	初期質量	体積	電力	熱負荷	補給質量	労働時間
	kg/m^2	m^3/m^2	kW/m^2	kW/m^2	$\text{kg/m}^2\text{-year}$	$\text{h/m}^2\text{-year}$
作物部分	6.51	2.6	0.14	0.14	0	1.3
照明設備	7.54	0.4	0.691	0.138	0.19	0.0027
電力系	2.77	0	0.02	0.02	1.07	0.0032
機械系	4.1	0	0.1	0.1	0.5	0.1
2 次構造系(棚等)	5.7	0	0	0	0	0
合計	26.6	3.00	0.96	0.41	1.75	1.41
1 次構造系(インフレーターブル)	9.16	0	0	0	0	0

7.4.4. 資源再生システム

食料の生産に伴い、可食部の量に相当する非可食部が発生する。表 7.3 の物質収支をもとにバイオリアクターの ESM を計算する。一人当たりの非可食部のドライマスは 497.8g/day である。加水前の湿質量は、 736g/day (非可食部 497.8g/day 、水 238.2g/day)である。処理前に水の比率を 80%にするために $2,175\text{g}$ の水を加えると、合計量は 2987g (736g/day 、 2251g/day)となる。処理物の密度を $1,000\text{g/L}$ と仮定すると、その体積は 3.0L/day ($2987\text{g/day}/1000\text{g/L}$)となる。反応時間 20 日間と仮定すると反応容器の大きさは、 60L/day ($3.0\text{L/day}\times 20\text{day}$)、すなわち 0.06m^3 となる。

次に低炭素社会戦略センターの報告書²⁴⁾に示されたメタン発酵設備の仕様(処理能力 $17,500\text{kg}$ に対して、装置質量 $865,000\text{kg}$ 、装置体積 $33,600\text{m}^3$ 、電力 566kW 、冷却 361kW)をもとに、一人 1 日当たり 497.8g の処理ができるバイオリアクターの仕様を見積もると表 7.6 のようになる。この一人当たりの体積 1.17m^3 は 0.06m^3 に対して十分な大きさである。 1.17m^3 は反応容器だけではなく、その他の設備も含む体積である。

表 7.6 月面農場のバイオリアクター

質量	体積	電力	熱負荷	補給量	労働時間
kg/CM	m^3/CM	kW/CM	kW/CM	kg/CM-yr	h/CM-yr
30.0	1.17	0.02	0.01	TBD	TBD

7.5. システム設計案の比較

図 7.2 に月面農場のシステム構成を示す。このシステムは空気再生(Air)、食料生産(Biomass)、食料貯蔵(Food)、熱制御(Thermal)、廃棄物処理(Waste)、水再生(Water)、船外活動(EVA)(図 7.2 には示していない)、居住(Accommodations)の 8 つのサブシステムからなる。

ここでは開放型(OPEN)、ISS 型(空気と水の再生)(ISS(A+W))、3 つの閉鎖型(CLOSED 1, CLOSED 2, CLOSED 3)の 5 つの生命維持システム設計案を比較した。このうち閉鎖型が月面農場で食料生産する構成である。CLOSED 2 は CLOSED 1 に比べ、イネとダイズの栽培棚段数を 1 段から 2 段へ変更し、CLOSED 3 は 1 段から 3 段へ変更した。このとき食料生産システムを除く植物栽培モジュール(インフレータブル外殻)の設定は、表 7.7 のようになる。例えば、CLOSED 1 の床面積は 70.6m²、栽培空間の高さ 3m で、20%のマーヅンを含むその容積は 267m³である。これをシールドなしのインフレータブル構造で建設した場合の外殻質量は 2,444kg (267m³×9.16kg/m³)となる。単位体積当たりの質量 9.16kg/m³は、NASA 先端生命維持システムの基準値¹⁵⁾を利用した。

6 人の食料供給のためには、体積 1,601m³(267m³×6)、質量 14,661kg(2,444kg×6)の植物栽培空間が必要になり、これは 150m³のモジュール 11 棟に相当する。また CLOSED 2 を利用した場合は 6 棟、CLOSED 3 を利用した場合は 4 棟になる。この他に、居住モジュール 1 棟、実験モジュール 1 棟、ユーティリティモジュール 1 棟がある。これらのモジュールは図 7.3 に示すようにレゴリスで覆われ保護される。

表 7.8 に月面拠点の ESM 変換係数を示す。電力の変換係数は原子力発電を利用した場合の数値である。労働力の変換係数は、利用できる時間により変動するが、その計算方法²¹⁾については省略する。

表 7.7 植物栽培モジュール(インフレータブル外殻)の設定

	CLOSED 1	CLOSED 2	CLOSED 3
栽培面積, m ² /人	80.2	80.2	80.2
床面積, m ² /人	70.6	38.1	27.3
床面積/栽培面積	0.88	0.48	0.34
植物栽培空間の体積 (20%マーヅン含む) , m ³ /人	267	144	103
植物栽培空間の質量, kg/人	2,444	1,319	944
植物栽培モジュール体積 (6 人用) , m ³	1,601	864	618
植物栽培モジュール質量 (6 人用) , kg	14,661	7,913	5,664
植物栽培モジュール数 (6 人用)	11	6	4

表 7.8 月面拠点の ESM 変換係数²¹⁾

要素	変換係数
質量 kg/kg	1
体積 kg/m ³	9.16
電力 (原子力利用) kg/kW	76
冷却 kg/kW	102
労働時間 kg/h	(変数)

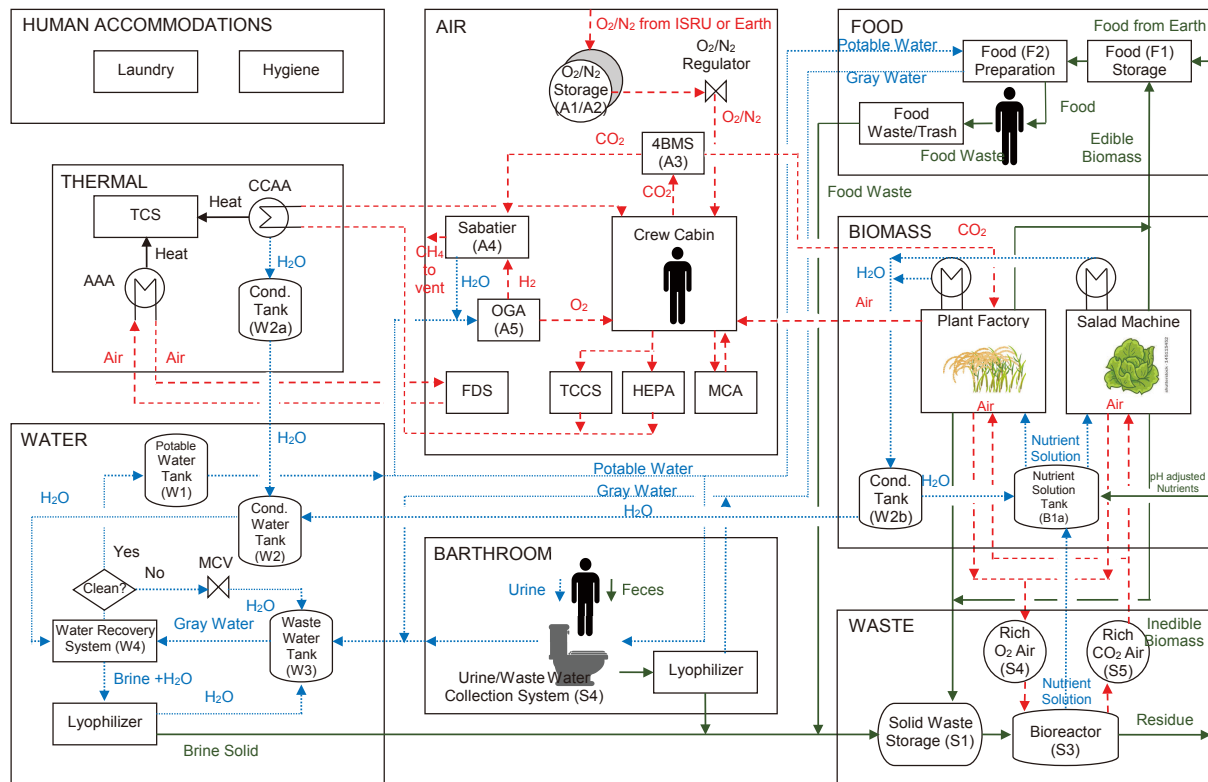


図 7.2 月面農場を含む月面拠点の生命維持システム構成

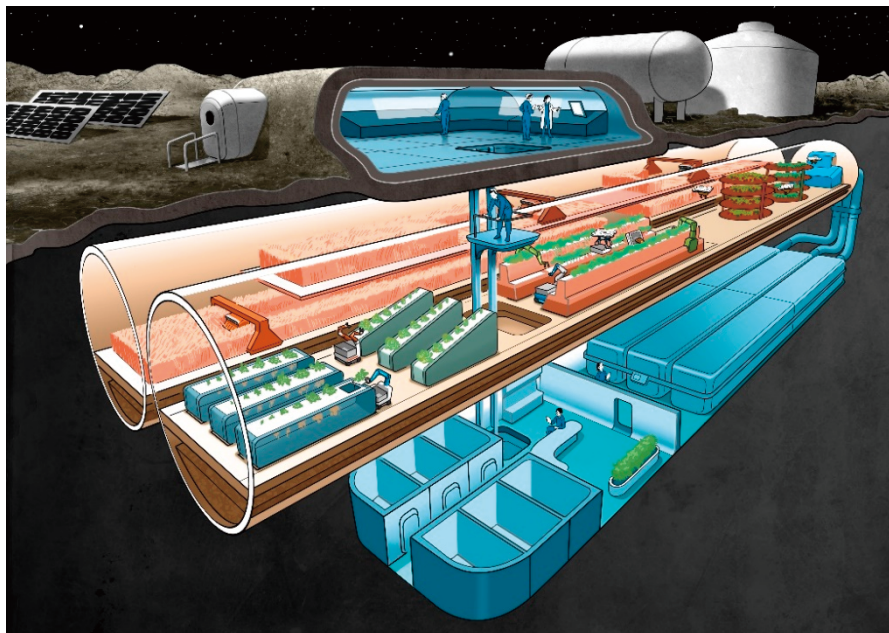


図 7.3 レゴリスで覆われた月面拠点

6 人が 1 年間、月面に居住した場合の質量と ESM の計算結果を表 7.9 に示す。表 7.9 に示した OPEN、ISS(A+W)、CLOSED 1、CLOSED 2、CLOSED 3 のグラフを図 7.4～7.9 に示す。図 7.4、7.5、7.7、7.8 は初期質量、1 年間の補給質量、初期 ESM、1 年間の ESM 増分をサブシステムごとに示し、図 7.6 は 5 つの生命維持システムの全体質量の時間変化、図 7.9 は 5 つの生命維持システムの ESM の時間変化を示す。カッコ内の

数字は質量換算での再生率である。最後に図 7.10 に、農作業自動化率を変化させた場合の ISS(A+W)と CLOSED 2、および ISS(A+W)と CLOSED 3 の ESM の大きさが逆転する日数を示した。

初期質量と補給質量の比較(表 7.9(a)(b)、図 7.4、図 7.5)

表 7.9(a)(b)に 5 つの生命維持システムの初期質量と 1 年間の補給質量を示す。CLOSED 1 の初期質量は OPEN の 19.3 倍である。CLOSED 1 では空気処理や水処理サブシステムの機能が食料生産により代用されるため、2 つのサブシステムの初期質量が ISS(A+W)より小さくなっているが、食料生産システムの質量が 26,534kg と大きく、CLOSED 1 の初期質量は OPEN よりかなり大きい。

次に、食料生産システムを CLOSED 1 より小型化するために、イネとダイズの栽培棚段数を 2 段にした場合(CLOSED 2)と、3 段にした場合(CLOSED 3)の初期質量は OPEN の 12.7 倍、10.4 倍である。CLOSED 2 と CLOSED 3 は CLOSED 1 より与圧体積が減少したことで、その初期質量は小さくなっているが、まだ OPEN や ISS(A+W)の初期質量よりかなり大きい。

CLOSED 1、CLOSED 2、CLOSED 3 の補給質量は OPEN の 0.24 倍、0.22 倍、0.21 倍である。食料生産により空気(酸素)、食料、水を再生し、それらの補給質量を OPEN や ISS(A+W)より大きく減らすことができていく。

初期質量と補給質量の時系列比較(図 7.6)

図 7.6 に 5 つの生命維持システムの全体質量(初期質量と補給質量)の 1800 日の時間変化を示す。CLOSED 2 の質量は 550 日以降に OPEN より、900 日以降に ISS(A+W)より小さくなっている。また、CLOSED 3 の質量は 450 日以降に OPEN より、750 日以降に ISS(A+W)より小さくなっている。

初期 ESM と 1 年間 ESM 増分の比較(表 7.9(c)(d)、図 7.7、図 7.8)

表 7.9(c)(d)に 5 つの生命維持システムの初期 ESM と 1 年間運用した場合の ESM 増分を示す。CLOSED 1 の初期 ESM は、OPEN の 44.4 倍である。CLOSED 2 は OPEN の 33.1 倍、CLOSED 3 は OPEN の 29.4 倍である。CLOSED 1、CLOSED 2、CLOSED 3 の 1 年間の ESM 増分は、OPEN の 0.4 倍、0.3 倍、0.3 倍である。

ESM の時系列比較(図 7.9)

図 7.9 に 5 つの生命維持システムの ESM の 4000 日間の変化を示す。CLOSED 1 が OPEN の ESM を 3600 日以降下回り、ISS(A+W)の ESM を 4000 日以内に下回ることではない。CLOSED 2 が OPEN の ESM を 2200 日以降下回り、ISS(A+W)の ESM を 4000 日以内に下回ることではない。CLOSED 3 が OPEN の ESM を 1850 日以降下回り、ISS(A+W)の ESM を 3650 日以降下回る。イネとダイズを 3 段栽培にした場合に 10 年程度で ISS(A+W)より有利なシステムとなる。

農作業自動化率と損益分岐点(図 7.10)

農作業自動化率を変化させた場合に CLOSED 2 と CLOSED 3 の ESM が ISS(A+W)の ESM を下回るミッション期間の変化を図 7.10 に示す。自動化率 0 は年間 13 時間/m²の農作業を示し²²⁾、1 は完全自動化を示す。図 7.1 から図 7.9 に示した結果は、自動化率 0.9 で計算された値である。自動化率が 0.8、0.7 と下がっていくと、CLOSED 2 の ESM が ISS(A+W)の ESM を下回るミッション期間が急激に長くなる。CLOSED 3 の損益分岐点(ESM が逆転する点)は、自動化率低下に対して CLOSED 2 の場合よりはその感度が小さい。月面農場での農作業の自動化が運用コスト削減には重要であると言える。

表 7.9 1 年間運用した場合の (a) 初期質量・(b) 補給質量・(c) 初期 ESM・(d) ESM 増分

初期質量, kg	OPEN (0%)	ISS(A+W) (37%)	CLOSED 1 (76%)	CLOSED 2 (78%)	CLOSED 3 (79%)
Air	585	846	653	653	653
Biomass	0	0	26,534	16,623	13,320
Food	0	0	321	321	321
Thermal	390	390	390	390	390
Waste	115	115	348	348	348
Water	164	1,062	141	141	141
EVA	196	196	196	196	196
Accommodations	35	35	115	115	115
Total	1,485	2,644	28,698	18,787	15,484
System/OPNE	1.0	1.8	19.3	12.7	10.4

補給質量, kg/年	OPEN (0%)	ISS(A+W) (37%)	CLOSED 1 (76%)	CLOSED 2 (78%)	CLOSED 3 (79%)
Air	1,705	28	28	28	28
Biomass	0	0	733	437	339
Food	4,073	4,073	149	149	149
Thermal	19	19	19	19	19
Waste	0	0	0	0	0
Water	6,462	2,206	3	3	3
EVA	757	757	757	757	757
Accommodations	3,024	3,024	2,131	2,131	2,131
Total	16,041	10,108	3,819	3,524	3,425
System/OPEN	1.00	0.63	0.24	0.22	0.21

初期 ESM, kg	OPEN (0%)	ISS(A+W) (37%)	CLOSED 1 (76%)	CLOSED 2 (78%)	CLOSED 3 (79%)
Air	730	1,110	900	900	900
Biomass	0	0	90,115	66,511	58,644
Food	0	0	339	339	339
Thermal	628	628	628	628	628
Waste	138	138	413	413	413
Water	179	1,338	145	145	145
EVA	382	382	204	204	204
Accommodations	35	35	231	231	231
Total	2,093	3,631	92,974	69,371	61,503
Total/OPEN	1.0	1.7	44.4	33.1	29.4

ESM 増分, kg/年	OPEN (0%)	ISS(A+W) (37%)	CLOSED 1 (76%)	CLOSED 2 (78%)	CLOSED 3 (79%)
Air	1,705	39	104	85	78
Biomass	0	0	3,446	1,528	1,032
Food	4,073	4,073	149	149	149
Thermal	36	32	111	87	79
Waste	0	0	6	4	4
Water	6,462	2,206	3	3	3
EVA	984	929	757	757	757
Accommodations	3,024	3,024	2,462	2,377	2,349
Total	16,284	10,303	7,037	4,990	4,452
Total/OPEN	1.0	0.6	0.4	0.3	0.3

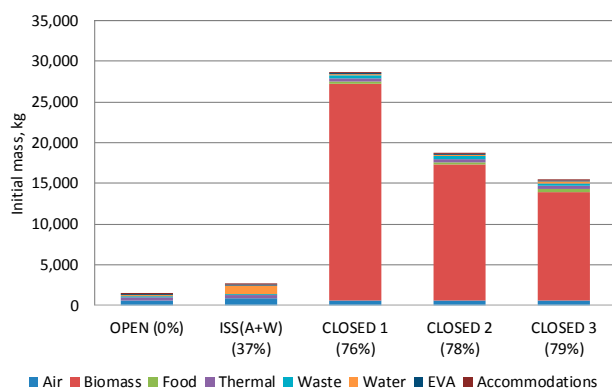


図 7.4 5つのシステム構成の初期質量の比較

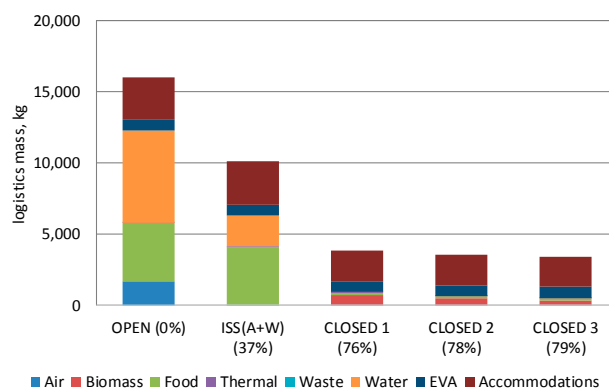


図 7.5 1年間運用した場合の5つのシステム構成の補給質量の比較

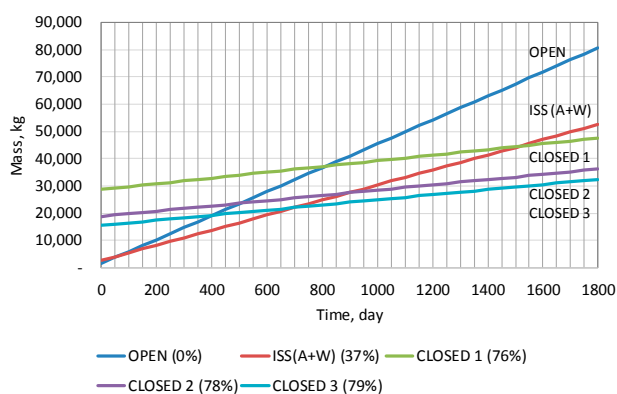


図 7.6 5つのシステム構成の質量（初期+補給）時間変化比較

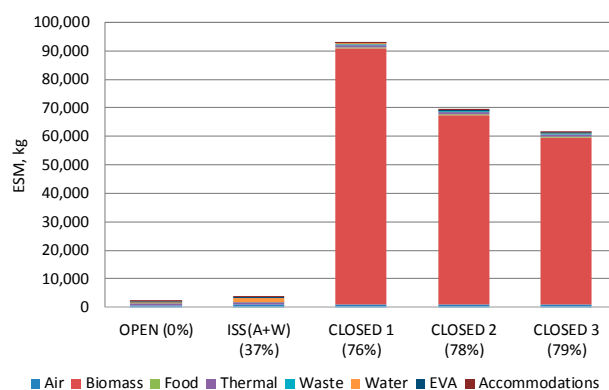


図 7.7 5つのシステムの0日 ESM 比較

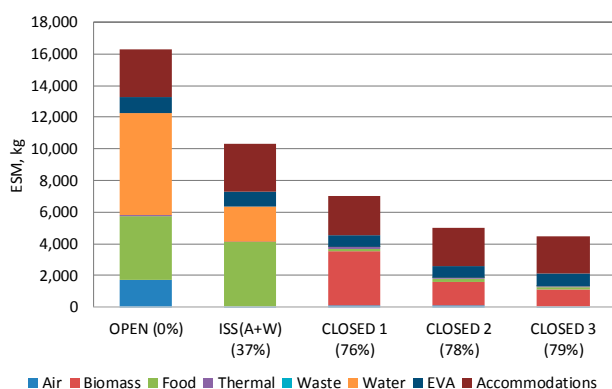


図 7.8 5つのシステムの1年間 ESM 増分比較

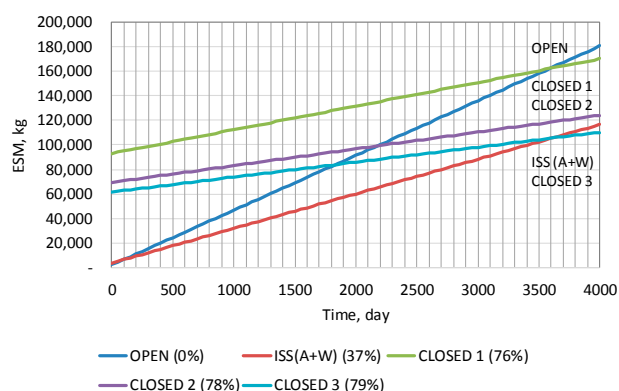


図 7.9 5つのシステム構成の ESM 時間変化比較

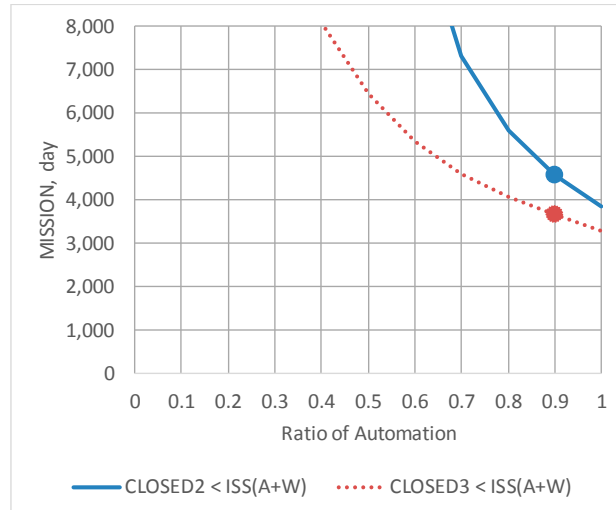


図 7.10 農作業自動化率と損益分岐点

7.6. まとめ

月面拠点への月面農場の導入に関して検討が可能な生物再生型生命維持システム分析ツールを開発した。食料生産システムを含む月面拠点生命維持システムの質量と ESM について、LED など最近の技術を導入した場合について比較した。栽培量の多い作物の栽培棚の段数を増やし、空間利用効率を上げた場合に大きく初期質量を抑えることができ、開放型の質量合計より 450 日以降、ISS 型の質量合計より 750 日以降に有利になることを確認した。しかしながら、労働力を含む ESM を用いた評価では、栽培棚段数を増やし、空間利用効率を上げた場合でも、開放型や ISS 型よりも有利な運用には、それぞれ 1850 日、3650 日以上が必要であることがわかった。

ここでは、月面で建築資材や水・酸素等の物質を調達し、原子力発電を利用した場合、10 年程度で地球から食料を補給するよりも ESM で表した運用コストで有利な月面農場の 1 つの姿を示した。今回想定した 8 種類の作物を利用する場合、栽培面積が大きいイネ、ダイズの多段栽培(3 段程度)と自動化技術が運用コスト削減には特に重要である。

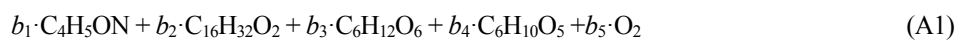
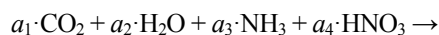
付録 7A：生化学量論

生命維持システムの物質収支解析では生化学量論(Biochemical Stoichiometry)¹⁰⁾が用いられる。生化学量論は、閉鎖生態系の物質収支を解析するために Volk T. と Rummel J. D.によって開発された。生化学量論は、生物の代謝物質を化学式で近似し、その代謝に関する物質平衡式を作成し、質量保存則に基づいて物質平衡式を解くことにより未知の代謝量を求める¹¹⁾。植物、人間、廃棄物処理、肥料生産の 4 つの物質平衡式を示す。

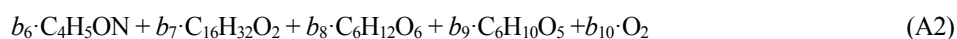
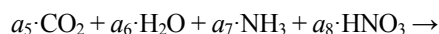
植物

植物の物質平衡式は、光合成により「二酸化炭素・水・アンモニア・硝酸」が「たんぱく質・脂質・糖質・繊維・酸素」に変化する式(A1)と式(A2)からなる。

可食部：

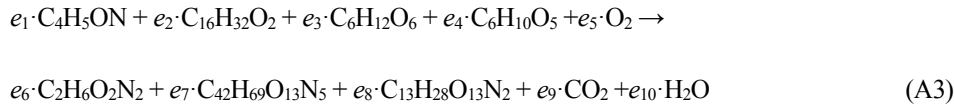


非可食部：



人間

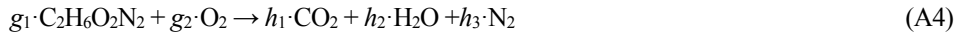
人間の物質平衡式は、「たんぱく質・脂質・糖質・繊維・酸素」が「尿・糞・その他の有機物・二酸化炭素・水」に変化する式(A3)からなる。



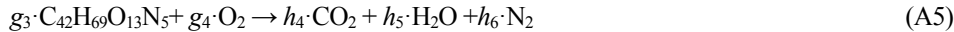
廃棄物処理

廃棄物処理の物質平衡式は、「尿・酸素」が「二酸化炭素・水・窒素」に変化する式(A4)、「糞・酸素」が「二酸化炭素・水・窒素」に変化する式(A5)、「その他の有機物・酸素」が「二酸化炭素・水・窒素」に変化する式(A6)、「非可食部のたんぱく質・脂質・糖質・繊維・酸素」が「二酸化炭素・水・窒素」に変化する式(A7)からなる。

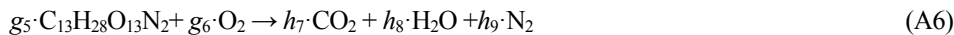
尿：



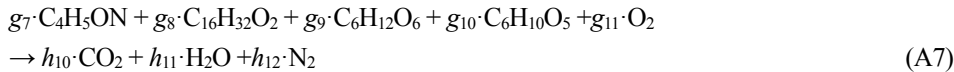
糞：



その他の有機物：

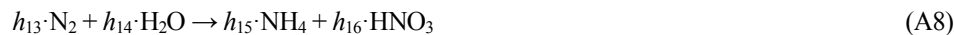


非可食部：



肥料生産

肥料生産の物質平衡式は、「窒素と水」が「アンモニアと硝酸」に変化する式(A8)からなる。



付録 7B 等価システム質量

全体システムの比較には NASA で利用されている等価システム質量(ESM : Equivalent System Mass)⁶⁾を用いる。ESM は生命維持システムのコストを式(B1)のように質量、体積、電力、冷却、労働時間で表し、サブシステム $i=1$ から n まで合計して ESM を計算する。

$$ESM = \sum_{i=1}^n \left[(M_{li} \cdot SF_{li}) + (V_{li} \cdot V_{eqi}) + (P_i \cdot P_{eqi}) + (C_i \cdot C_{eqi}) + (CT_i \cdot D \cdot CT_{eqi}) + (M_{TDi} \cdot D \cdot SF_{TDi}) \right] \quad (B1)$$

M_{li} : サブシステム i の初期質量[kg]

SF_{li} : サブシステム i の初期質量貯蔵係数[kg/kg]

V_{li} : サブシステム i の初期体積[m³]

V_{eqi} : サブシステム i の与圧体積質量等価係数[kg/m³]

P_i : サブシステム i の必要電力[kW_e]

P_{eqi} : サブシステム i の電力質量等価係数[kg/kW_e]

C_i : サブシステム i の冷却要求[kW_{th}]

C_{eqi} : サブシステム i の冷却質量等価係数[kg/kW_{th}]

CT_i : サブシステム i の労働時間要求[CM-h/yr]

D : ミッション期間[y]

CT_{eqi} : サブシステム i の労働時間質量等価係数[kg/CM-h]

M_{TDi} : サブシステム i の時間依存質量[kg/yr]

SF_{TDi} : サブシステム i の時間依存質量貯蔵係数[kg/kg]

質量変換係数 (V_{eq} , P_{eq} , C_{eq} , and CT_{eq}) は質量ではない要素(V , P , C and CT) を質量に変換する。

付録 7C 生命維持システム要素技術候補

月面拠点生命維持システムの要素技術候補を表 7C1 に示す。サブシステムの質量、体積、電力、冷却、労働力の数値は文献 MSAD-04-0306 (Hanford, 2004)²¹⁾、NASA CR-2006-213694 (Hanford, 2006)²²⁾、NASA JSC-47804 (Hanford, 2002)²⁵⁾を参考にした。OPEN、ISS(A+W)、CLOSED のサブシステムの構成を表 7C2 に示す。

表 7C1 6 人の月面拠点生命維持システム要素技術候補

No.	Subsystem	Tech.	Mass kg	Volume m ³	Power W _e	Cooling W _{th}	Resupply Mass kg/day	Resupply Parts Mass kg/yr	Resupply Volume m ³ /yr	Crew time CM-h/yr	Ref. No
100	Air Subsystem										
110	Atmospheric Control System										
111	Atmospheric Pressure Control	ISS	119.4	0.26	70.5	70.5	0	0.00	0	0	20
120	Atmosphere Revitalization System										
121	Carbon Dioxide Removal	LiOH	0	0	0	0	0.00	365.00	1.095	0	
122	Carbon Dioxide Removal	4BMS/ISS	185.1	0.44	556.21	556.21	0.00	0.00	0	2.76	20
123	Carbon Dioxide Reduction	Sabatier	75.91	0.14	82.94	82.94	-3.59	0.00	0	0	20
125	Oxygen Generation	SPE/ISS	388.97	1.02	3421.67	1868.34	4.04	50.32	0	10.1	20
126	Gaseous Trace Contaminant Control	ISS	68.41	0.14	194.35	194.35	0.00	21.29	0.322	0	20
127	Atmosphere Composition Monitoring Assembly	ISS	54.3	0.09	103.5	103.5	0.00	0.00	0	0	20
128	Sample Delivery System	ISS	35.11	0.04	0	0	0.00	0.00	0	0	20
129	Airlock Carbon Dioxide Removal	ISS	181.3	0.23	397	397	0.00	0.00	0	0	20
180	Gas Storage										
181	Nitrogen Storage	High Pressure	1	0.00	0	0	0.02			0	22
182	Nitrogen Storage	Cryogenic	22	0.02	0	0	0.02			0	22
183	Oxygen Storage	High Pressure	118	0.09	0	0	3.59			0	22
184	Oxygen Storage	Cryogenic	139	0.11	0	0	3.59			0	22
190	Fire Detection and Suppression										
191	Fire Detection System	ISS	1.5	0	1.48	1.48	0	0.00	0	0.01	20
192	Fire Suppression System	ISS	6.8	0.04	0	0	0	0.00	0	0	20
200	Biomass Subsystem										
220	Plant Growth Chamber / Salad Machine										
221	Plant Growth Chamber	Drysdale	43004	436	1107923	1107923		1614.22		922	16
222	Salad Machine	Takashima	120	0.602	500	500		2.40		91.25	
223	Plant Growth Machine I	CLOSED 1	11873	1303	442610	176489		732.83		92	WG
224	Plant Growth Chamber unshielded I	CLOSED 1	14661								15
225	Plant Growth Chamber shielded		213038								15
226	Plant Growth Machine II	CLOSED 2	8710	792	392001	125880		437.10		50	WG
227	Plant Growth Chamber unshielded II	CLOSED 2	7913								15
228	Plant Growth Machine III	CLOSED 3	7656	622	375132	109011		338.52		36	WG
229	Plant Growth Chamber unshielded III	CLOSED 3	5664								15
260	Food Subsystem										
262	Food Storage without food production	Shuttle	0	0	0	0	11.16	0.00	0	0	WG
263	Refrigerator/Freezer	ISS	321	2	0.204	0.228					22
264	Food Storage with biomass production	Lunar Farm	0	0	0	0	0.41	0.00	0	0	WG
300	Thermal Subsystem										
310	Temperature and Humidity Control										
311	Common Cabin Air Assembly	ISS	118.08	0.5	530.52	530.52	0		0	0	20
312	Avionics Air Assembly	ISS	12.4	0.03	175	175	0		0	0	20
313	Atmosphere Circulation	ISS	9.8	0.02	61	61	0		0	0	20
314	Atmosphere Microbial Control	ISS	100	0.27	0	0	0	19.06	0.13	3.33	20
320	Internal Thermal Control System										
321	Internal Thermal Control System	-	149.28	0.3	517.71	517.71	0		0	0	20
400	Waste Subsystem										
410	Solid Waste Collection										
411	Solid Waste Collection	ESDM	36.36	0.13	14	14	0	0.00	0	0	20
420	Solid Waste Processing System										
421	Solid Waste Treatment	Storage	78.33	2.18	0	0		0.00	0	0	20
422	Incinerator	ALS	200	1.4	0.3	1.3		10.00		0.2	22
423	Supercritical Water Oxidation	ALS	200	1.4	0.5	1.5				0.2	
424	Bioreactor	ALS	231	0.46	0	0.59		1.50		1059.00	22
425	Bioreactor	LCS	148	6	0.1	0.1					WG
500	Water Subsystem										
510	Urine/ Waste Water Collection System										

511	Urine/ Waste Water Collection System	ISS	4.55	0.02	4	4	0	1.62	0	0	20
512	Urine/ Waste Water Collection System	ALS	4.55	0.02	4	4	0	1.62	0	0	20
520	Water Recovery System										
521	Water Treatment Process	ISS WRS	541.63	1.93	788.76	788.76		1295.75	0	0	20
522	Water Treatment Process	VPCAR	557.56	1.69	4011.45	1808.87		100.96	0	0	20
523	Urine, Hygiene&Potable Water, and Brine Storage	ISS	133.34	0.35	13.68	13.68			0	0	20
524	Urine, Hygiene&Potable Water, and Brine Storage	ALS	205.12	0.53	19.81	19.81			0	0	20
525	Microbial Check Valve	ISS	3.56	0.01	0	0		1.41	0	0	20
526	Microbial Check Valve	ALS	6.67	0.02	0	0		2.65	0	0	20
527	Process Controller	ISS	36.11	0.08	156.18	156.18			0	0	20
528	Process Controller	ALS	63	0	180	180			0	0	20
529	Water Quality Monitoring	ISS	14.07	0.04	4.72	4.72			0	0	20
530	Water Quality Monitoring	ALS	14.07	0.04	4.72	4.72			0	0	20
531	Product Water Delivery System	ISS	37.99	0.09	2.65	2.65			0	0	20
532	Product Water Delivery System	ALS	58.37	0.14	3.83	3.83			0	0	20
540	Water Storage										
541	Hygiene Water Storage	-	132	1.32			14.70		0	0	
542	Potable Water Storage	-	27	0.27			3.00		0	0	
543	Urine Storage	-					9.02		0	0	
544	Waste Water Storage	-					4.80		0	0	
600	Human Accommodations										
610	Clothing										
611	Clothing	Supply					2.92		6.24	0	
612	Clothing	Laundry					0.12		0.26	0	
620	Laundry Equipment										
621	Water/Dryer	-	80	0.26	633.33	633.33	0.00		0	12.045	20
622	Detergent	-	0.01	0	0	0	0.35		0	0	20
630	Whips										
631	Hand/Face/Shower Wet Whips	-					0.31				
640	Miscellaneous Items										
641	Miscellaneous Items	-					5.06				
642	N ₂		35.42								
700	Extravehicular Activity										
711	Maximum Absorbency Garments	-	196	0.82			0.05		0.0001	44.8	20
712	Carbon Dioxide Removal (LiOH)	-					0.50		0.0015		
713	Airlock Recycle Pump for EVA	-			1000	1000	0.48		0.0014		
714	Oxygen Recharge Compressor Assembly for EVA	-					0.27		0.0008		
715	Food, O ₂ , and Water Add	-					0.77		0.0023		

表 7C2 OPEN、ISS(A+W)、CLOSED のサブシステムの構成

	サブシステム	OPEN 型	ISS (A+W)型	CLOSED 型
1	Air	111, 121, 126, 127, 128, 129, 181, 183, 191, 192	111, 122, 123, 124, 126, 127, 128, 129, 181, 183, 191, 192	111, 122, 126, 127, 128, 129, 181, 191, 192
2	Biomass			223, 224 (CLOSED 1) 226, 227 (CLOSED 2) 228, 229 (CLOSED 3)
2	Food	262	262	263, 264
3	Thermal	311, 312, 313, 314, 321	311, 312, 313, 314, 321	311, 312, 313, 314, 321
4	Waste	411, 421	411, 421	423, 425
5	Water	511, 541, 542	511, 521, 523, 525	511, 523, 525
6	Accommodations	611, 631, 641	611, 631, 641	612, 621, 622, 631, 641
7	EVA	711, 712, 713, 714, 715	711, 712, 713, 714, 715	711, 712, 713, 714, 715

サブシステムの数字は、表 7C1 の数字と対応している。

引用文献

- 1) Cabinet Office, Government of Japan, Comprehensive Strategy on Science, Technology and Innovation 2014 - Bridge of Innovation toward Creating the Future -, Cabinet Decision, 2014.
- 2) JAXA, Space Exploration Innovation Hub, <http://www.ihub-tansa.jaxa.jp/english/index.html> [cited 20 February 2018].
- 3) Wheeler, R. M., Agriculture for Space: People and Places Paving the Way, *Open Agriculture* 2017 2, 14-32, 2017.
- 4) Gitelson, J. I., Terskov, I. A., Kovrov, B. G., Lisovskii, G. M., Okladnikov, Yu. N., Sid'ko, F. Ya., Trubachev, I. N., Shilenko, M. P., Alekseev, S. S., Pan'kova, I. M., and Tirranen, L. S., Long-term experiments on man's stay in biological life-support system, *Adv Space Res.* 1989;9(8):65-71.
- 5) Packham, N. J., The Lunar-Mars Life Support Test Project: the Crew Perspective, <https://lsda.jsc.nasa.gov/books/ground/1.3Crewmembers.pdf> [cited 20 February 2018].
- 6) Tako, Y., Komatsubara, O., Tsuga, S., Arai, R. et al., Circulation of Water in Addition to CO₂, O₂ and Plant Biomass in an Artificial Ecosystem Comprised of Humans, Goats and Crops During Three 2-Weeks Closed Habitation Experiments Using CEEF, *SAE 2007-01-3091*, 2007.
- 7) Dong C., Fu Y., Xie B., Wang M., and Liu H., Element Cycling and Energy Flux Responses in Ecosystem Simulations Conducted at the Chinese Lunar Palace-1, *Astrobiology*. January 2017, 17(1), 78-86.
- 8) Goto, E., Plant Cultivation and Light Environment Control under Artificial Light, <http://www.academy.nougaku.jp/sympo/pdf/20131109sympo/20131109goto.pdf> [cited 20 February 2018].
- 9) Goto, E., Matsumoto, H., Ishigami, Y., Hikosaka, S., Fujiwara, K. and Yano, A. 2014. Measurements of the photosynthetic rates in vegetables under various qualities of light from light-emitting diodes. *Acta Hort.* 1037: 261-268.
- 10) Ono, E., Usami, H., Fuse, M., and Watanabe, H., Operation of a Semi-Commercial Scale Plant Factory, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2011.
- 11) Miyajima, H., Ishikawa, Y., Arai, R., Tako, Y., and Nitta, K., Considerations of Material Circulation in CEEF Based on the Recent Operation Strategy, *SAE Technical Paper 2003-01-2453*, 2003.
- 12) Miyajima, H., Logistics and Life Support Systems Analysis for High-Mobility Exploration on a Lunar Surface, *43rd International Conference on Environmental Systems*, *AIAA-2013-3377*, 2013.
- 13) Discussions in JAXA Innovation Hub Lunar Farm Working Group, 2017.
- 14) Ministry of Health, Labor and Welfare (MHLW), Dietary Reference Intakes for Japanese (2015), <http://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-10900000-Kenkoukyoku/Overview.pdf> [cited 20 February 2018].
- 15) Anderson, M. S., Ewert, M. K., Keener, J. F., and Wagner, S. A., Advanced Life Support Baseline Values and Assumptions Document, NASA, TP-2015-218570, 2015.
- 16) Hanford, A. J., Advanced Life Support Baseline Values and Assumptions Document, NASA, CR-2004-208941, 2004.
- 17) Tobias, B., Garr, J. and Erne, M., 2011: International Space Station water balance operations, *Proceeding of 41st International Conference on Environmental Systems*, *AIAA 2011-5150*.
- 18) Rummel, J. D., and Volk, T., 1987: A modular BLSS simulation model, *Advances in Space Research*, 7(4), 59-67.
- 19) Volk, T., and Rummel, J. D., 1987: Mass balances for a biological life support system simulation model, *Advances in Space Research*, 7(4), 141-148.
- 20) Hanford, A. J., Subsystem Details for the Fiscal Year 2004 Advanced Life Support Research and Technology Development Metric, *MSAD-04-0306*, 2004.

- 21) Hanford, A. J., Advanced Life Support Research and Technology Development Metric - Fiscal Year 2005, NASA/CR-2006-213694, 2006.
- 22) Drysdale, A. E. et al., Advanced Life Support Systems Modeling and Analysis Project Baseline Values and Assumptions Document, JSC 39317, 1999.
- 23) Patterson, R. L., Giacomelli, G. A., Hernandez, E., Yanes, M., and Jensen, T., Poly-Culture Food Production and Air Revitalization Mass and Energy Balances Measured in a Semi-Closed Lunar Greenhouse Prototype (LGH), ICES-2014-167, 2014.
- 24) The Center for Low Carbon Society Strategy (LCS), Methane Production from Biomass Wastes by Anaerobic Fermentation (First step), LCS-FY2013-PP-05, 2014.

8. 今後の課題

8.1. 低重力での植物栽培について

低重力は、栽培装置や栽培環境に影響を及ぼす可能性がある。航空機放物飛行による短時間微小重力実験の結果からは、重力がないことで対流が消失し、植物と周辺環境との熱交換が抑制されることにより植物体の温度上昇が結実低下を招く可能性が示唆されている。また最近行われた、航空機放物飛行による短時間重力変動実験で重力条件を 1G 以下の部分重力的に変動させた実験によると、根圏（培地内）の水分分布や栽培システムによる環境制御に低重力が少なからず影響している可能性が示唆された。このため、低重力が栽培システムに与える影響については、検証しておくことが好ましい。微小重力で検証すれば部分重力でも問題は少ないと考えられる。

これまでも部分重力での実験の必要性は議論されていたが、ISS に取り付けられる予定だったセントリフュージアコモデーションモジュール(CAM)の開発が中止されたことにより、各宇宙機関が開発する個別の装置により実験が進められている。JAXA は細胞培養装置と呼ばれる遠心機付きの実験装置を開発し、日本の実験棟きぼう内に備え科学研究に利用している。細胞培養装置の遠心機の直径は 25 cm ほどのため、遠心機に植物栽培ユニットを設置すると、ユニット内部の植物の生育スペースは高さ 5 cm ほどになる。今後、細胞培養装置の遠心機の大型化を行うとともに大型作物栽培装置を設置し、低重力実験を実施する実験環境を整備することが期待される。ISS の運用は事実上 2024 年までとなっているので、早急に調整を進め、特に、月重力条件 0.17G、火星重力条件 0.83G を想定した、重力環境の違いによる植物栽培システムの環境制御の要素技術の検証を実施することが望ましい。これまでは微小重力・1G の軌道上対照実験の設定であったが、低重力・1G の対照実験、低重力・微小重力、重力条件を可変にする実験パターンも考慮した装置環境整備が期待される。

現在の細胞培養装置内の遠心機に搭載する栽培装置は寸法の他、電力、通信などに制約がある。しかも遠心機のターンテーブル上に装着する栽培ユニットを製作するのはコスト・スケジュール的に大きな困難を伴うことが予想される。このため、今後月面や惑星表面等の低重力で起こる現象を ISS で検証するためには、少なくとも照明とファン、観察系、および制御通信系を備えた植物栽培エリアの設置が求められる。

8.2. 機器構成、装置

ワーキンググループで検討したシステムに関し、具体的に実現するための機器構成、装置設計の検討が必要である。ただし、すぐに実現出来る技術と、研究開発が必要なものとがあるため、キーとなる要素技術を識別し、地上での技術実証を行う必要がある。識別した要素技術は宇宙探査イノベーションハブの技術提案募集 (RFP) にて参画者の募集を行い、日本の最先端の研究開発を行う。

8.3. 照明・空調などの設備

植物工場の普及が進んだ背景に LED の導入がある。月面農場は人工光型植物工場を想定しているため、LED による栽培効率の向上、コストの削減は重要な要素である。地上の人工光型植物工場と求められる要件に大きな違いはないが、低重力、低気圧による影響で温度条件などを見直した最適な LED の検討が必要である。また、同様に温度、空気環境コントロールのための空調設備についても月面農場の条件にあったものを検討する必要がある。

国際宇宙ステーションでは生命維持装置の都合上、炭酸ガス(CO₂)濃度が地球上の大気より高くなる。通常 3000~5000ppm ほどの高濃度環境となっている。そこで、筑波宇宙センターの地上実験室において、ジャガイモを対象に、5000ppm での栽培試験を行ったところ、高 CO₂ 群でも塊根の生育は認められたが、地上部の茎に生理障害とみられる脱分化状態のカルス状塊が発生した。



図 8.1 CO₂ 条件 5000ppm(ドアを開けたため、表示は低下)

LED で生育したジャガイモ地上部

(2018 年 8 月、筑波宇宙センター宇宙実験棟にて栽培) 写真提供 JAXA

赤色(ピーク波長 655nm)・青色(ピーク波長 447.5nm) 赤青比 3:1、400 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (照射距離 200mm) 湿度 70-80%

これまでに、トマト苗において人工光型植物工場の栽培例で高 CO₂ (2000ppm)、単色（赤または青）LED の生育時に生理障害が発生するという報告がある¹²⁾。LED 栽培時に葉が膨らむように変形してしまう現象には、紫外線他、未解明の光刺激が関係している可能性が示唆されている³⁾。一般に高 CO₂ 環境下では収量の増加が期待できるが、いくつかのジャガイモ品種で 800ppm に CO₂ を高めた栽培実験では、高 CO₂ 環境下において明期 24 時間とした場合 1000 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ という強光下では収量への効果が低く、400ppm 程度の CO₂ 濃度の場合と変わらなかった品種もあることが報告されている⁴⁾。このように、物理化学処理の限界により、CO₂ 濃度が高くなりがちな閉鎖生態系において、収量は光環境の強度によってその影響が変わることが予想される。また低重力という要素も加わるため、効率的な栽培のためには生育状況に応じた最適条件設定が必要となる。空調の必要性はもちろんのこと、閉鎖環境内の大気成分の制御や、少なくとも環境モニタリングが必須である。

生理傷害を防ぎ、品質の良い作物を得るためには赤青 LED に紫外域、赤外域の追加が効果的である可能性がある。収量の増加には作物を健全に成長させることが大きく寄与し、そのための照明の仕様検討が重要となる。また植物種や品種により波長感受性に違いがあることがわかっている。適切な光量、光質を設定するには、成長速度、消費電力、作物の形態のいずれを重視するかによって、LED の波長等の選択方針が変わる。

LED による植物栽培については、レタスなど葉物野菜において研究と実用化が進んでいるが、トマトなどの生殖成長を前提とする結実作物については太陽光型が主流である。トマトについては良質で成長のそろった苗を短期間で供給するために人工光型植物工場を用い、結実段階は太陽光型植物工場で行っている。今後のコスト低下が進展すれば、全成長過程を人工光型植物工場での栽培へと移行することも考えられる。またジャガイモについては LED 下での栽培報告自体が少ないため、データが少ない中、宇宙を目指した実験実績が貴重なデータとなると考えられる。

また、植物の機能性成分の合成を促進するためには紫外線～青色光を照射することなど、光環境は重要である。LED によって紫外線をイチゴ果実に照射すると、アントシアニンとアスコルビン酸含量が高まるという報告がある⁵⁾。宇宙飛行士の健康管理の面では抗酸化成分は重要であるため、照明によって植物の機能性を高めることには大きな利点がある。

植物の育成には光合成に関係する 660nm 付近の赤色系の光と、植物の形態の形成に 460nm 付近の青色系の光が必要である。JAXA がこれまでに開発した宇宙用植物実験ユニットでは、電力上の制約から赤色と青色の LED を採用した。最近の研究では緑色系の光(550nm 付近)にも生理的意味があることが示唆されている。また、健全な生育や機能性成分の増加には紫外線や遠赤色光の必要性も指摘されている。よって月面農場での栽培モジュールにおける LED 選定や、月面活動に先立って国際宇宙ステーションで生育を実証するための実験装置を設計する場合には、これらの結果を考慮した照明装置とすることとすることが必要である。

8.4. 種苗

植物の種子は保存が可能であるが、種子の表皮についたカビなどの完全滅菌は種子の形状によっては困難である。また、作物によっては苗による輸送が必要なものもある。輸送用の保存形態・保存条件の検討が必要である。栽培モジュール内でも、食用にする群と、種子用、また維持用の培養区などを設けるなどの配慮も必要である。

8.5. 食料・資源の拡張

今回の報告書では 8 つの栽培作物を設定して検討を行ってきた。当然これは宇宙飛行士の食生活の向上のために今後さらなる拡張が必要である。栽培作物を増やすことで必要となる装置が増え、コスト増につながるため、開発運用の負荷の少ない効率的な作物種の拡張が求められる。キノコ類や果樹などが栽培出来るようになると格段にメニューの種類も広がっていく。

引用文献

- 1) 三須秀幸, 森正樹, 奥村総一郎, 金澤真一, 池口直樹, 中井龍資, “高品質トマト人工光育苗装置,” SEI テクニカルレビュー第 192 号 132-137, 2018.
- 2) 渡邊恭成, 安田剛規, 米田正, 中野明正, “トマト育苗のための LED 光照射条件の検討,” 野菜茶業研究所 研究報告 15 57-66, 2016.
- 3) G. Massa, H.-H. Kim, R. Wheeler, C. Mitchell, “Plant Productivity in Response to LED lighting,” Hort. Science 43(7) 1951-1956, 2008.
- 4) R. Wheeler, T. Tibbitts, A. Fitzpatrick, “Carbon Dioxide Effects on Potato Growth under Different Photoperiods and Irradiance,” Crop Sci. 31 1209-1213, 1991.
- 5) 福田弘和, 和田光生, 小倉東一, 植物工場栽培野菜の味と安全性および技術的課題, 植物工場の生産性向上、コスト削減技術とビジネス構築—今、注目されている植物工場とは、その全容— 40-45, 2015.

9. まとめ

9.1. 月面農場ワーキンググループ活動のまとめ

平成 29 年から実施してきた月面農場ワーキンググループの活動は、日本における月面農場を考える上で最も知見のある専門家の多くにお集まり頂き活発な議論で内容を深めることが出来た。当初以下のようなイメージを持ち、どのような専門家の意見を集めるべきか議論するところから本活動はスタートした。本項では、月面農場 WG 報告書の概要についてまとめる。

月面農場の検討のイメージ

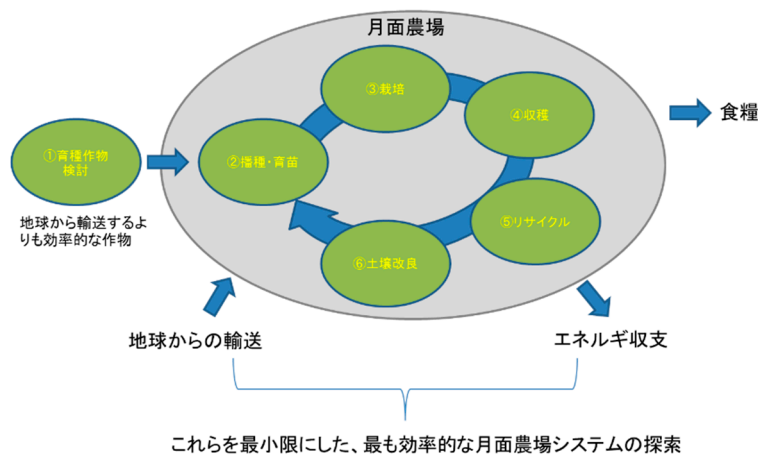


図 9.1 月面農場の検討イメージ（事務局作成）

9.1.1. 検討の背景

検討の開始においては、前提となる月面の条件、また議論の土台となる仮定を置いて議論を進めた。月面の物理的な条件は決まっていることも多いが、システムの規模感を統一するための、滞在人数の仮定は入植当初として6人規模、規模の効率を議論するためにある程度の未来を見据えた100人規模、の2つを仮定して議論を進めた。太陽光の活用についても議論があったが、放射線、隕石からの防御を考慮すると、太陽光を積極的に活用するメリットより、一度太陽電池パネルにて電力化してLEDを活用する方が優位であるという意見が多かった。

各システムの議論を進める中で、省リソース、省スペース、省ワークロード、といった共通の目指すべき課題が抽出され、月面農場コンセプトをまとめることになった。

9.1.2. 月面農場の全体像

図 9.2 に月面農場の全体像、6人規模、100人規模、のそれぞれを以下に示す。6人規模では、生活エリアは盛り土にて覆い、栽培エリアは地下部に埋め立て、更にその下に最も安全性の高い区画として居住エリアとした。栽培エリアでは、選定した8種類の作物種の栽培システムを6人規模の生活に必要なエネルギー、栄養素を摂取出来る量としてそれぞれ作物種ごとに栽培面積を算出し設計した。

100人規模のシステムでは、最も栽培面積の大きいイネをガントリで効率良く栽培出来るよう、長い距離をとった円筒形の栽培エリアとした。これを6区画展開することで、収穫物を中央に集めるルートや、リサイクル施設に搬入される残渣などを外周で運搬できるような構造とした。中央は生活エリアで、地下に居住エリアを設けたのは6人規模のケースと同じ考え方である。各栽培エリアでは、5章で紹介した高効率栽培システムの構造が見える。

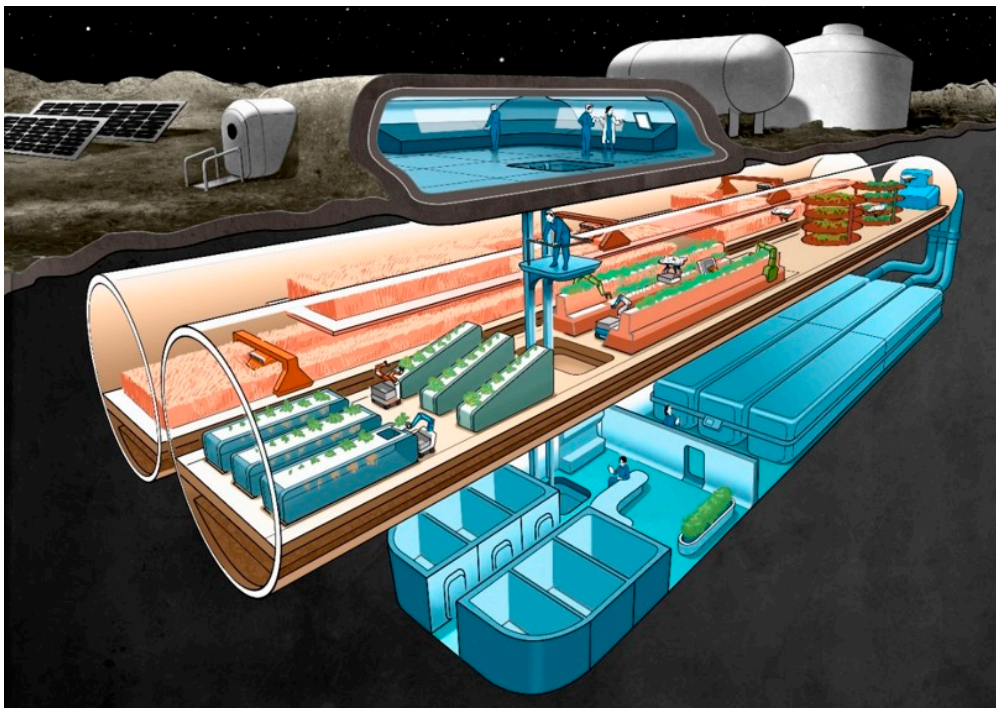


図 9.2 月面農場全体イメージ（6 人規模） 図 7.3 再掲

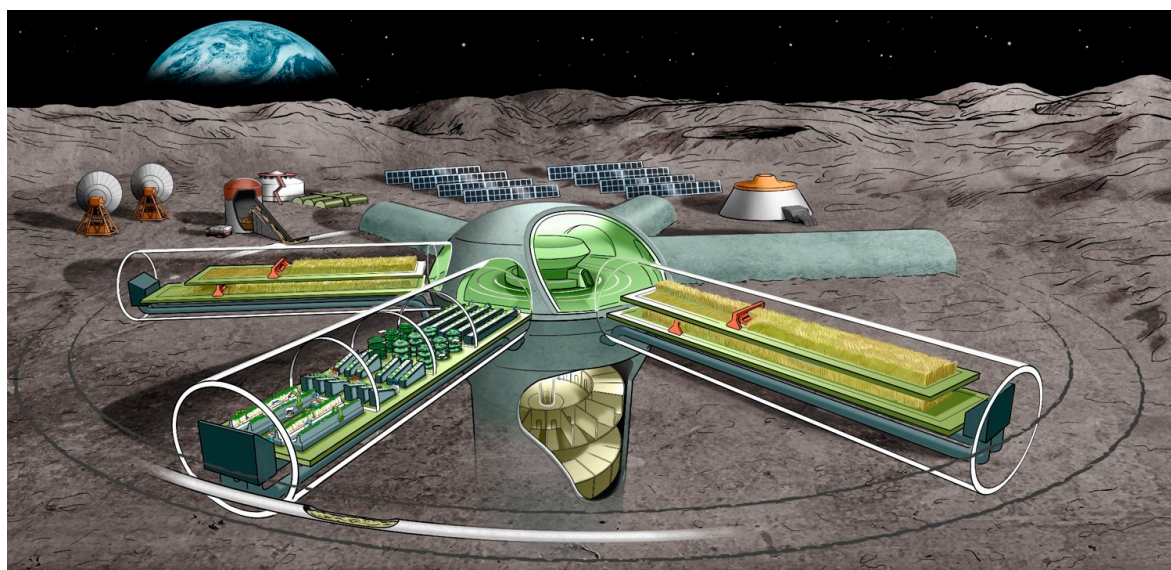


図 9.3 月面農場全体イメージ（100 人規模）

9.1.3. 栽培システム

第 1 グループでは、栽培システムの検討として、月面農場における作物栽培環境制御の基本的留意点について整理した。検討が必要な項目として、光環境、温度環境、湿度環境、CO₂ 環境、気流環境、根圏環境などがあり、それぞれについて留意点をまとめた。また、宇宙における植物栽培の研究として、微小重力における植物栽培の課題についても紹介した。

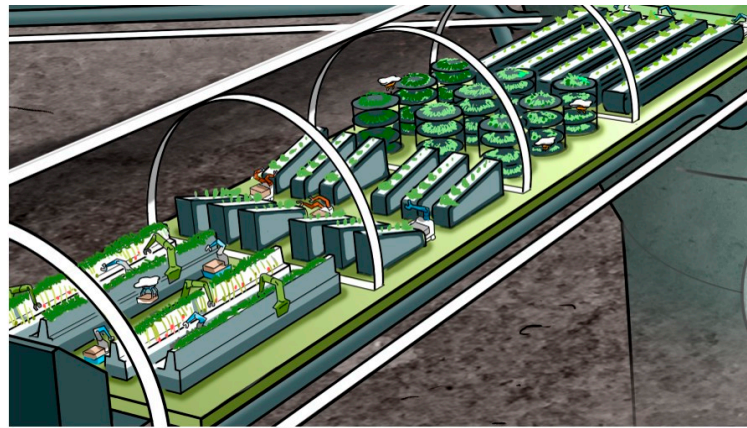
上記を踏まえ、地上の植物工場の知見を生かした、システムの機能、構造、栽培方法・栽培条件・管理などを網羅的に整理した。8 作物種のそれぞれについて、栽培ステージごとの管理について栽培カレンダーとして付録としてまとめた。



玉川大学LED農園



玉川大学FSTラボ



月面農場の栽培エリアイメージ

図 9.4 栽培エリアイメージ

9.1.4. 高効率食料生産

第2グループでは、高効率な植物生産が可能となるシステムとして、面積効率の高い栽培システムの構造を検討した。また、リソース、特に水、光を最小とするような仕組みとしてドライフォグ（ミスト水耕）を用いた栽培システム、宇宙飛行士の作業量を最小にするための自動収穫システムの検討を行った。また、栽培環境、生育状況の把握を行うためのモニタリングシステムも自動化には重要な要素である。

図 9.5 は、左上から時計回りに、ガントリー方式で栽培から収穫を行うシステム。その右が、ドライフォグを用いた自動収穫機能を備えたジャガイモ栽培システム。右下は、ドローンでの収穫が可能な積み上げ式トマト栽培システムで、この左奥の暗部では夜間のセンサーセンシング（青色光でモニタ）により、生育状況の把握を行っている。最後に左下の絵では、イチゴの自動収穫システムであり、5章にある通り、自動で受粉を行うシステムが描かれている。

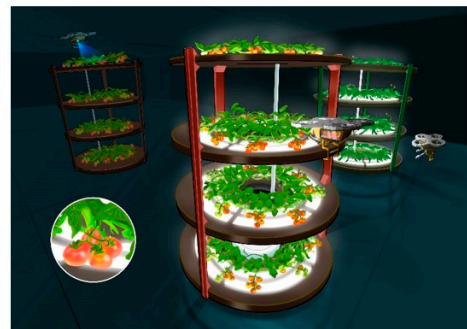


図 9.5 高効率栽培システムイメージ

9.1.5. 物質循環システム

第3グループでは、月面で生じる廃棄物の処理や、植物生産のために元素資源を再利用するための資源循環システムの検討を行った。議論のトピックとして、月面入植当初の元素の供給や、微生物、培養液の循環利用、メタン発酵による微生物処理、堆肥化のための残渣、尿尿、糞便の利用について検討した。また、月面にはレゴリスと呼ばれる火山灰に似た植物栽培に適さない水はけの悪い砂で覆われているが、月面鉱物の資源としての利用として、レゴリスシミュラントを用いた栽培実験も行った。

図9.6では、植物残渣などを集めてメタン発酵を進めるコンテナ、及び養液生成などの資源循環システムのイメージを示す。

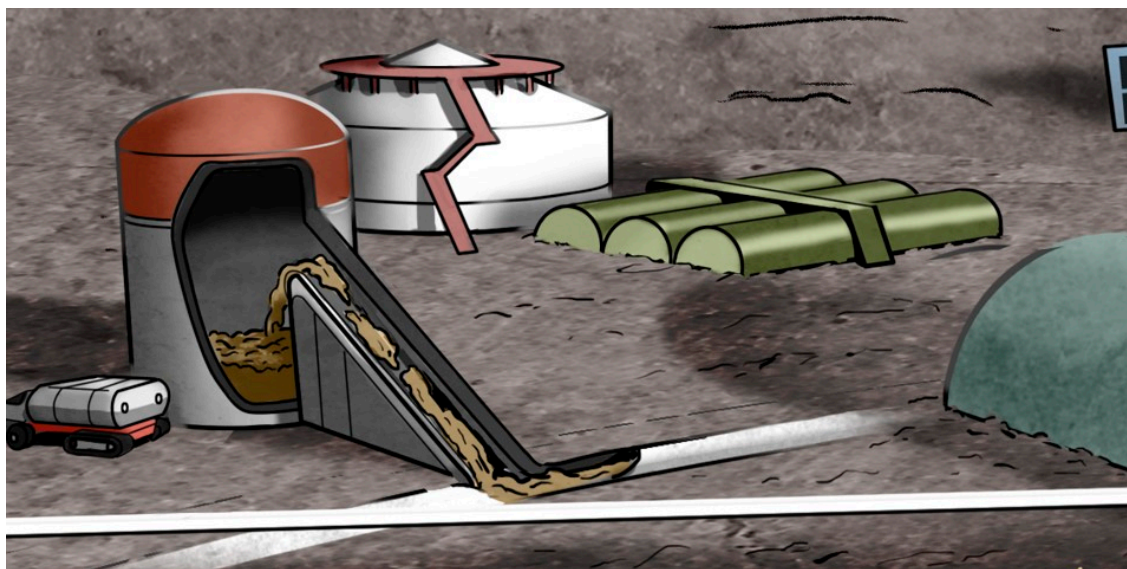


図 9.6 物質循環システムイメージ

9.1.6. その他検討事項

第4グループでは、全体システムの検討をリードしたことに加え、過去・現在の日本を含めた世界における宇宙農業関連の研究、経緯などを調査した。特に日本では六ヶ所村で行なわれた環境技術研究所の CEEF での実験が多く、先駆的な取り組みをしていたため参考にした。

また、8作物種の選定や、そこから導き出される必要なエネルギー、栄養素を満たすための栽培面積算出、8作物種で実現が可能な調理例の考案なども行った。

全体システムの検討・評価として、生命維持システム設計の観点から月面農場の構成、規模などを検討し、初期重量と、補給質量の関係を導き、地球から食料を供給するよりも現地生産の方が効率が良いという損益分岐点を検討した。

9.2. 宇宙探査イノベーションハブの研究課題としての成果

宇宙探査イノベーションハブでは、月面農場ワーキンググループでの議論を元に、平成29年度、30年度に2回の研究提案募集を行い、4つの研究課題を設定し、8つの共同研究を開始した（表9.1）。今後も、地上で求められる最新技術と、月面農場の実現に向けた必須技術の両方を満たす研究開発を行っていく。得られた技術は国際宇宙ステーション（ISS）での技術実証や、南極昭和基地への適用、地上ビジネスへの展開など様々な発展先が考えられるため、共同研究の成果の応用先を検討・推進し、将来の月面農場への適用に繋げていく。

表 9.1 宇宙探査イノベーションハブの研究課題としての成果

研究課題	テーマ名	実施機関
月面農場を想定した新しい農作物の栽培実証	袋培養技術を活用した病虫害フリーでかつ緊急時バックアップも可能な農場システムの研究	株式会社竹中工務店、キリン株式会社、国立大学法人千葉大学、学校法人東京理科大学
	穀物増産を実現する種子へのプラズマ大量処理技術開発	国立大学法人九州大学、ケニックス株式会社
	月面農場における高カロリー作物栽培システムの要素技術開発	千代田化工建設株式会社、メビオール株式会社
	摂食可能なジャガイモの完全閉鎖型・完全水耕型人工栽培システムの基礎検討	学校法人玉川学園 玉川大学、パナソニック株式会社
植物生産へ適用可能なタンパク質素材の開発	植物生産へ適用可能な高性能人工構造タンパク質素材の開発	Spiber 株式会社
月面農場を想定したドライフォグを用いた節水型植物栽培システム	水利用効率を高めた屋内型ドライフォグ栽培システムの開発	株式会社いけうち、大阪府立大学
穀物に頼らないコンパクトなタンパク質生産システム	食用藻類スピルリナを用いた省資源かつコンパクトなタンパク質生産システムの開発	株式会社ちとせ研究所、株式会社タベルモ、株式会社 IHI エアロスペース

9.3. 最後に

本報告書は、宇宙農場の実現に向けて、我が国で初めて本格的に取り組んだ貴重な成果である。我が国は現在まで、宇宙実験を通して微小重力下の植物研究に大きな成果を生み出している。その経験と知見をふまえて、今回、有重力の月面での食料生産基地の検討に着手した。国内の幅広い分野の有識者と専門家が一堂に会して議論を重ね、当初の目標を超える充実した報告をまとめることができた。この報告が起点となり、月面農場への関心がさらに高まり、関連分野を含めた様々な取り組みが加速化し、発展することを期待する。

謝辞

本稿を作成するに当たり、多大な御協力を賜りました月面農場ワーキンググループ委員関係者の皆様、内閣官房 木村賢二様、京都大学清水浩教授、株式会社 CSP ジャパン金山秀樹様、LACTIF 培地をご提供くださった株式会社 JSP 佐々木秀浩様、オフィス K 神野耕二様、新潟食料科学大学趙鉄軍講師ほか調査に御協力いただきました方々に厚く御礼申し上げます。

宇宙航空研究開発機構特別資料 JAXA-SP-19-001

JAXA Special Publication

月面農場ワーキンググループ検討報告書 第1版

Report of Lunar Farming Concept Study Working Group 1st

発 行 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1
URL: <http://www.jaxa.jp/>

発 行 日 2019年6月19日
電 子 出 版 制 作 松枝印刷株式会社

※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。
Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

