

### 3. 高度資源循環型食料供給システム構築のための基礎調査・実証

#### 3.1 概要

宇宙開発初期より米国やロシア等を中心とした宇宙での植物栽培に関する研究が実施されている他、欧州や中国、日本においても宇宙における食料生産や資源再生に関する研究が長期に渡って進められている。これらの取り組みについて、SPACE FOODSPHEREやJAXAを中心に関係企業等の協力を得て2018～2020年度にかけて調査を進めてきた。

これまでは、1. 国内外における研究や閉鎖実験等の動向調査と技術的課題に関する全般的な調査、2. 国際宇宙ステーション（ISS）軌道上における植物栽培装置（NASAのVeggieやAdvanced Plant Habitat等）やリサイクル技術等に関する実験等の動向調査、3. 欧州（MELiSSAプログラム等）や中国等における資源再生を含めた関連プログラムや閉鎖隔離環境施設に関する調査について、それぞれ研究報告書、論文・書籍、各宇宙機関や組織等のウェブサイト、ニュース記事等の公開情報をベースに情報収集を行い基礎情報としてまとめている。また、2019年6月にJAXAより発行された月面農場ワーキンググループ検討報告書（文献1）においては、国内外の動向に加えて、将来の月面での食料生産を想定し、栽培システム、高効率食料生産技術、物質循環システム、全体システムに関する検討内容がまとめられている。

**本調査においては、過去の調査等のコアメンバーの協力を得ながら、過去の調査結果や知見を最大限活用し、今後の国内における研究開発に対する有用性の高いテーマに注力した調査及び基礎実証を実施する。**

#### 3.2 実施背景と手法

##### 3.2.1 国内外の研究開発動向に関する調査

調査にあたっては、宇宙利用を想定し得る食料生産や資源再生等に関する要素技術に関する先行研究や、宇宙利用を想定した食料生産や資源再生を伴う閉鎖実験に関連した文献調査を行う。食料生産分野では、高等植物、微細藻類、培肉等のキーワードについて注目し、研究や技術に関して調査を行う。一方で資源再生分野では、糞尿や残渣などの処理・資源再生技術に関連して、生物処理、物理化学処理、養液調整システムといったキーワードについて注目し、研究開発に関して調査を行う。

閉鎖実験に関連した調査としては、米国の閉鎖隔離環境施設BIO-Plexや中国の閉鎖隔離環境施設Lunar Palace-1、日本の閉鎖隔離環境施設CEEf等に関する論文等について詳細な文献調査を行うこととする。

##### 3.2.2 米国・欧州（ESA MELiSSA等）の最新状況調査

国外の閉鎖隔離環境施設での調査は、文献調査に加えて、これら技術について研究を推進している機関が集うイベントICES2021（2021年7月12-15日、オンライン）にLeave a Nest America Inc.が参加し、MELiSSA Conference 2021\*に、Leave a Nest United Kingdom Ltd.が参加し、それぞれ高度資源循環型食料供給システムに関わる研究・技術プレゼンテーションを聴講、レポートとして纏める。なお、当初MELiSSAのパイロットプラント（スペイン）を訪問する予定であったが、コロナ渦の影響により渡航困難となったため前述のオンライン対応に切り替えることとした。

\*MELiSSA Conference 2021は未開催だったため、前年度開催されたMELiSSA Conference 2020の発表レポート資料を調査し、レポート化を進めた。

##### 3.2.3 上記調査に基づく研究/技術の定性/定量比較

3.2.1 「国内外の研究開発動向に関する調査」、3.2.2 「ESA MELiSSAの拠点等の調査」の結果として得られた国内外の高度資源循環型食料供給システムにおける要素技術の開発状況の定性/定量比較し、分析する。

### 3.2.4 調査により判明した研究/技術に関する基礎実証

以下4点については将来的に宇宙での食料生産を行う際に検証や研究開発が必要となるが、前述の調査において、国際的にも十分に研究が実施されていない又は情報開示が不十分であることが判明したため、本事業においてこれらに関する基礎実証を実施することとした。

- ① 高等植物の低圧環境における生殖成長に関する検証
- ② 高等植物の品種育成に際したLED光源の利用に関する検証
- ③ 藻類培養の手法について閉鎖環境下の培養効率の検証
- ④ 有機性廃棄物の手法について前提条件を揃えた比較検証

#### 3.2.4.1 高等植物の低圧栽培に関する基礎実証

##### 【背景】

宇宙空間は微小重力環境であると同時に高真空環境である。地上と異なる宇宙の特殊環境として、微小重力、宇宙放射線、真空の3要素が重要であるが、植物については微小重力と放射線についての研究が主であり、真空（圧力）については注目度は高くない。しかし、月面・火星の地表面の気圧はほぼゼロであり、閉鎖環境下で制御が必要な圧力等の因子が植物生育に及ぼす影響を調査することは重要である。

1980年代後半から、フランス、ドイツ、日本（文献1-7）などの研究機関・研究者が低圧植物実験を行っている。2000年以降は、米国、韓国、韓国他の先進国の研究者も取り組んでいる

（文献8-15）。現在までに、0.2～0.3気圧まで全圧を低下しても、CO<sub>2</sub>分圧、O<sub>2</sub>分圧、水蒸気分圧を適値に制御していれば、植物は常圧と同等な光合成を行い、栄養成長を行うことが報告されている（文献16）。しかし生殖成長（花成誘導、花芽形成、花粉形成、開花、受精、結実、種子の成長と完熟まで）については、あまり報告されていない。

そこで今回は、JAXAのが提案する「月面農場ワーキンググループ検討報告書」で候補作物に選ばれているイネを対象植物として、花粉形成、開花受精、種子成長の3ステージについて、既所有の低圧栽培システムを用いて、全圧を下げた条件下での栽培試験を行う。

##### 【手法】

低圧処理は、全圧を30～101 kPa（101 kPa＝1気圧）の範囲に制御しつつCO<sub>2</sub>分圧、O<sub>2</sub>分圧、H<sub>2</sub>O分圧も制御が可能なグローブチャンバーを用いた（図3.2.4.1-1、図3.2.4.1-2）。このチャンパーにはバッファータンク、真空ポンプ、除湿部が接続されている。チャンパー内では養液栽培を行うことができ、培養液はチャンパー外から供給できる。そのため、一度も蓋を開けることなく長期間の低圧栽培が可能である。本装置は環境を一定に保つため、温湿度を制御できる室内に設置した。イネの品種には、矮性品種の矮稻C（農業生物資源ジーンバンクより分譲）を用いた。

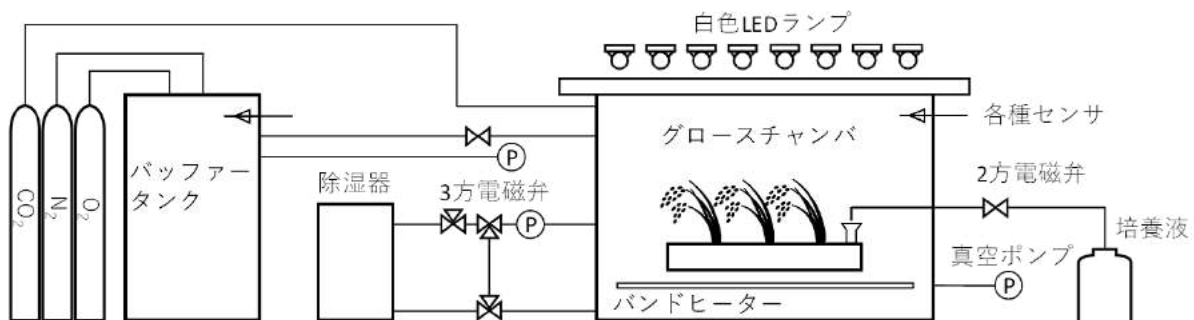


図3.2.4.1-1 低圧栽培システムの全体図

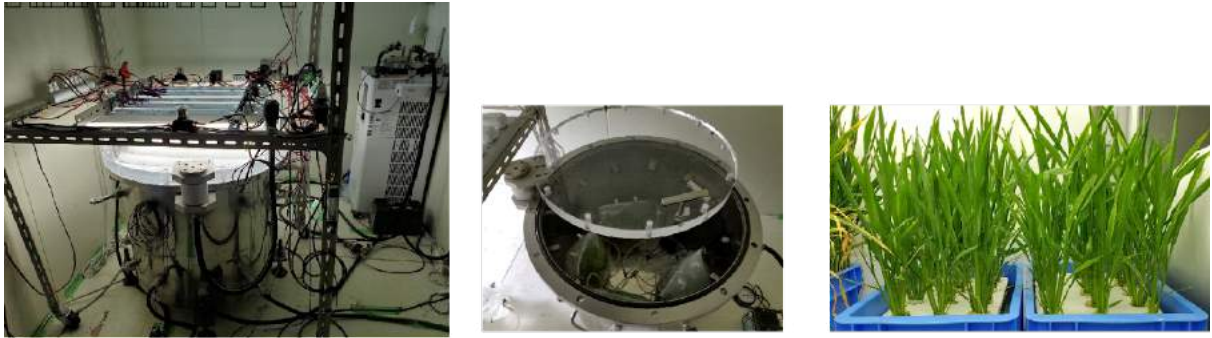


図3.2.4.1-2 低圧栽培システムの外観（左）、チャンバー部（中央）および育成中のイネ

### 3.2.4.2 高等植物の変異体の栽培に関する基礎実証

#### 【背景】

植物の成長に重要な光域は主に400-500nm（青い光）と、600-700nm（赤い光）である。植物の生長を最大にする青色光に対する赤色光の光量子の比（B/R比）は植物種によって異なる。また植物の光応答には、光の強さや光量も大きく影響する。

宇宙空間の閉鎖隔離環境ではLED光源の使用が想定されるが、イネやダイズといった種子作物に関しては、植物体が大きく種子の収穫まで時間がかかるゆえに、LED光源での種子生産に関する研究は少なく（例としてFang et al., 2021）、品種育成への適用例もほとんどない。また、野外環境で稔実する突然変異体が人工環境では不稔や生育不良となる事例が多く見られ、宇宙栽培品種の開発の障害となる可能性がある。

本課題では、イネおよびダイズのLED光源への適応性を事前検証することで、今後の宇宙栽培品種の栽培や選抜に資する。試験内容は、イネ、ダイズそれぞれの品種開発戦略に基づき設定する。

#### 【イネの実験方法】

アルトレーダー製の吊り下げ型LEDパネル（(a)赤青型VEFA300Wおよび(b)太陽光型VEFA46WFJ）、日本医化製LED人工気象器（(c)電球型LPH411-PFDT-SPおよび(d)桃色LED混合型LPH410-PT-SP）、比較対象の(e)東京理化製蛍光灯型人工気象器（FLI2000A）を用いて、明期12時間または15時間、通常の培土栽培または水耕栽培（Kuroda M, 2015）による栽培試験を行った。なお、最大光量に設定した場合の光量子量（ $\mu\text{mol} / \text{s} / \text{m}^2$ ）をパネル直下50cmまたは栽培床中心部で測定すると、おおむね(a)250、(b)150、(c)300、(d)260、(e)240となる。また、おおまかな波長分布としては、(a)は赤青2色のみ、その他は400nm-700nmの間で連続した分布を示す。LED照明は蛍光灯より600nm-700nmの赤色光が多く、(d)が最も赤色光が多い。

イネ系統としては、基準品種としての日本晴とコシヒカリ、北海道品種（きらら397、おぼろづき）、コシヒカリ矮性変異体（北陸100号）、良食味矮性品種（キヌヒカリ）を選定した。

#### 【ダイズの実験方法】

##### 1) LED光のB/R比と光の強さによるダイズの反応

人工照明栽培室の調光機能付きのLED（Vegefarm製）を用いて、異なるB/R比と光の強さの照射条件5つを設定し（表3.2.4.2-1）、37mm×37mm×35mmの連結ポット（滅菌したJA ニッピ園芸培土1号を入れた）にダイズ品種「エンレイ」の種子を播種した。室温25°C、12時間照明で粒肥大盛期（R6期）まで育てた。開花までの日数とR6期の主茎長を調査した。

表3.2.4.2-1 LED条件の設定（測定場所：ポットを置く棚板の表面）

LED条件	PPFD( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	PFD-B	PFD-R	B/R比
1	864.5	122.3	733.2	0.1
2	431.1	126.0	287.0	0.4
3	769.6	312.0	446.1	0.6
4	542.7	226.2	305.8	0.7
5	1105.3	469.2	621.3	0.7

## 2) LED照明でダイズ矮性変異体の栽培特性

電球色LED（日本医化製、スペクトルは図3.2.4.2-1）照明を用いた栽培環境シミュレーターの中で、ダイズ品種「エンレイ」と、化学物質エタンスルホン酸メチル(EMS)で変異誘発した「エンレイ」由来矮性変異体DWの発芽した苗を、10cm×10cm×20mmのポット（滅菌したJA ニッピ園芸培土1号を充填）に移植した。昼25℃/夜20℃、14時間照明でR6期まで育てた。開花まで日数と登熟期の主茎長、分枝数、莢数/個体、粒数/個体を調査した。

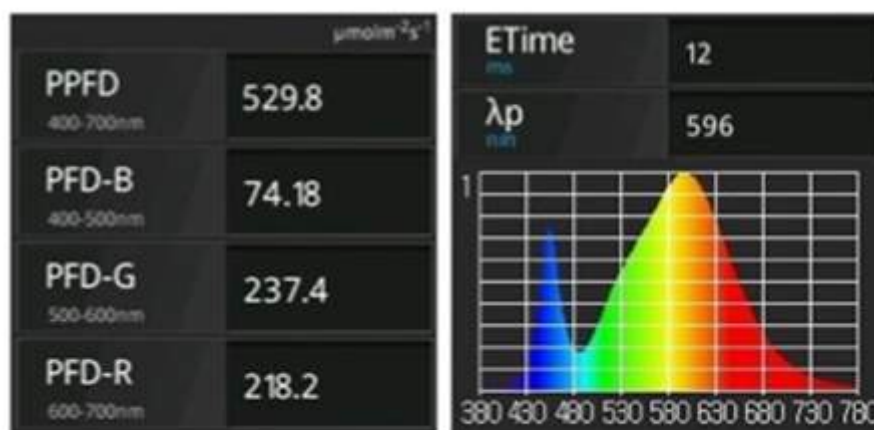


図3.2.4.2-1 電球色LED（日本医化製）のスペクトル（測定場所：ポットを置く棚板の表面）

### 3.2.4.3 微細藻類の培養に関する基礎実証

#### 【背景】

前述の通り、宇宙空間での光合成を利用した酸素の再生を含めた資源循環、及び食料確保のための選択肢として、植物栽培と併せて微細藻類の培養を利用することが検討され、既にISSにおける低軌道でのスピルリナなどの試験的培養の実施例もある(文献1)。しかしながら、宇宙での培養に最適な種・株、もしくは培養方法などについては十分に検証されているとは言えない状況である。また、微細藻類培養は基本的には液体中で実施するために、完全な無重力環境での培養と、火星もしくは月面を想定した低重力環境での培養では適切な方法は異なることが想定される。これまで、特に月面などの低重力環境を想定した微細藻類培養方法は検討され始めたばかりである(文献2)。

高いバイオマス生産性を得つつ、柔軟に培養の規模を調整するための藻類培養装置として、図3.2.4.3-1にあるような平板型培養槽(Flat plate reactor)が候補の一つとして挙げられる。培養槽に照射された光の強度は、ランバート-ベールの法則に従い、深さに対して指数関数的に減衰していく。このため、高濃度の微細藻類培養液においては、光合成に利用可能な量の光が到達できる深度が数cmである場合も多く、微細藻類が照射した光を効率的に利用するためには培養槽を薄く作製することが最も簡単な解決法の一つとなる。極限まで培養槽を薄くした場合には、引用文献3にあるように、培養液を6 mmの厚みで広げることによってCO<sub>2</sub>交換と光の利用効率が高い、培養液当たりの高いバイオマス生産性が得られる。一方で、その場合には十分な培養容積を確保することが難しくなり、培養槽以外に空気割合と水蒸気量を一定に保つための余分な空間も

必要となる。さらに培養液の対流形成や、培養槽の洗浄操作も困難となる。このため、培養空間当たりのバイオマス生産性を考慮した場合の最適な培養槽厚みは検討が必要な課題となる。引用文献2においても、低重力環境での利用が可能な形態として平板型培養槽を採用しており、これに対して複雑な加工を施すことで、曝気による無駄のない水流を生じさせる工夫がある。

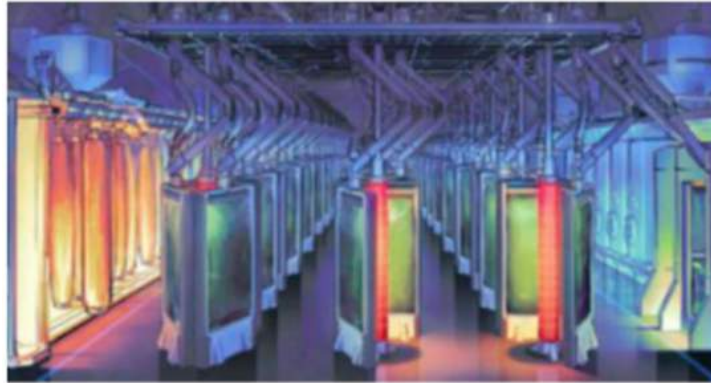


図3.2.4.3-1 平板型フォトバイオリアクターの利用イメージ  
(出所：SPACE FOODSPHERE)

平板型培養槽での藻類培養は、多数の検討例が存在するが（文献4, 5）、得られる生産性は、より実績の多い池型培養槽での試験結果からも予測可能である。池型培養槽では、光を上面から受容し、藻類の光合成に利用するが、平板型フォトバイオリアクターはこれを縦に配置し、側面から人工光を照射する点で条件が類似する。平板型フォトバイオリアクターでは、両側面から人工光を照射することができるため、2基の池型培養槽を裏表に張り付けた形態と同じと理解可能である。

地球重力下でデータ取得できる種類の平板型培養装置を作製することで、生産性の検証や運用方法のシミュレートを地上で実施することが可能となる。そのためには、地上での培養試験に適した培養槽の素材や大きさ、形態などを専用に検討する必要がある。本試験においては、その培養装置の仕様を決定・試作し、装置を用いた藻類培養を実際に行うことで、池型培養槽などから想定されるバイオマス生産性を示すことを実証する。特に、手法②において言及するように、地球外での実践的な利用の際の輸送も考慮し、なるべくシンプルな形態での培養槽設計を目指す。

#### 【手法①：LED機器選定と試用】

光合成を利用した閉鎖空間での微細藻類培養においては、光源としてLEDを利用する。培養システム全体において、LEDの消費電力が8～9割を占めることになる想定され、適切な機器の選定が以後の試験の進捗に重要となる。植物工場などでもLEDは利用されるに至り、性能は日進月歩で改善しているが、微細藻類培養試験に適切な機器を選定する必要がある。特にLED照明の厚さ、発熱、照射光波長分布、エネルギー消費、価格などを検討する必要がある。このため、本項目では下記2点を実施した。

- ・市販の植物栽培用のLED機器の調達と性能比較
- ・平板型アクリル培養槽での利用に最適なLED機器の選定

植物工場用LED機器取り扱いのある企業、もしくは通販サイトから少量のLED機器を購入した。それぞれのLED機器の照射波長パターンをスペクトロメーター（あげ波長AGH-815V、MRT）を用いて測定した。さらに、照度計（HD2302.0、デルタオーム）を用いてPPFD（photosynthetic photon flux density）を測定した。得られたデータから、投入電力当たりの出力光量、及び最大照射光量を算出した。

また、購入したLED機器を利用し、観賞魚用水槽（レグラスフラットF-600SH/B、コトブキ）を用いて微細藻類ユーグレナ（*Euglena gracilis* Z株）を試験培養し、光独立栄養培養の人工光源として利用できることを確認した。前培養、及び本培養の条件は表3.2.4.3-1、及び表3.2.4.3-2の通り。KH3.5培地（文献6）を用いて前培養した培養液を1,295 gで5分間遠心回収（遠心機HP30I, ローター JLA-9.1000）し、CM3.5培地（文献7）に懸濁し使用した。

表3.2.4.3-1 前培養条件

前培養	条件
容器	100 mL フラスコ
培養液	KH3.5培地 50mL
温度	～26℃
曝気	なし（旋回攪拌 100 rpm）
光条件	LED（白色）PPFD ～100 μmol/m <sup>2</sup> s
期間	7日間
測定	なし

表3.2.4.3-2 本培養条件（調達したLED機器試用）

本培養	条件
容器	水槽（35L培養）
培養液	CM3.5培地
温度	前半33℃ ⇒ 後半27℃
曝気	5% CO <sub>2</sub> (v/v) 2L/min
光条件	LED（赤色・青色）、LED（赤色・青色＋UV）、LED（白色）
期間	7日間
測定	OD 860

本培養では水槽の4側面よりLED機器で光照射した。底面には6連マグネティックスターラー（SSHE-16GDAX6、小池精密機器製作所）を設置し攪拌した。水温は、途中までは成り行きで調整せず、後半は冷却水循環装置（CCA-1112A、東京理化機器）からの冷却水を通水する水道用フレキ管をチラーとして利用し温度調整した。また、エアストーン（GX-74、ケニス）を介して5%CO<sub>2</sub>を2 L/minで曝気した。細胞の増殖は吸光光度計（UV-mini1240、島津）を用いてλ=860 nmとしての吸光度を測定し評価した。

#### 【手法②：地上での実証試験のための培養槽試作】

低重力環境を想定した場合と比較し、地上では培養液に対してかかる重力を支持する必要があるため、培養槽に用いる素材と検討可能な大きさに制限があるが、その中で類似形態の培養装置を確立することが求められる。低重力環境では、深さ数mの培養槽が検討でき、素材としてもプラスチックバッグなどが利用できる可能性があるが、地上での検討ではアクリル素材を利用した、深さ1 m程度の培養槽が現実的と考えた。過去に20 cm水深の池型培養槽をアクリル素材で作製した際に、アクリル板の厚み1.5 cmで作製した実績があったため、厚みは1.5 cmを中心に検討し、本項目では下記2点を実施した。

- ・アクリル培養槽の形態検討
- ・試験培養用平板型アクリル培養槽の設計と試作

緑藻類全般は、静置した際に沈降する状態をとるものが多い。このため、培養槽内の液流により、細胞が沈みにくい縦長の形態を検討した。また、手法1において選定したLED機器のサイズ、及び実験の操作性を鑑み、下記2サイズでアクリル素材の培養槽を試作した。

- ・50 cm x 100 cm x 15 cm (アクリル厚 1 cm)
- ・50 cm x 100 cm x 10 cm (アクリル厚1.5 cm)

それぞれのアクリル板は、アクリル業者において切断加工し、工作を外注することで溶接・組み上げ完成させた。試作した培養槽においては、エアポンプ（APN-057R、レイシー）を用いて、シリコンチューブ経由でエアストーン(GX-61、ケニス)から曝気し液流を目視確認した。

### 【手法③：試作した培養槽での生産性の予測】

手法②で作製した平板型培養槽（内側奥行10 cm）は、培養している藻類細胞により中心部分に光が到達しない状態を仮定した場合、奥行が5 cmの池型培養槽に対して片側からLED機器で照射した独立な2台と等しい生産性となる。このことを根拠として、池型培養槽での光量に対するバイオマス生産性をもとに試作した培養槽で得られるべきバイオマス生産性を試算した。さらに、消費電力とLED機器から発せられる光子数を元に、光合成によるバイオマス生産性の理論的限界も併せて試算した。

### 【手法④：試作培養槽を用いた生産性の実証】

手法①において、観賞魚用の水槽で試験培養した*E. gracilis* Z株藻体を利用し、CM3.5培地で希釈した上で、試作した水槽での培養試験を実施した。本培養の条件は表3.2.4.3-3の通り。

表3.2.4.3-3 本培養条件

本培養	条件
容器	試作培養槽（45L培養）
培養液	CM3.5培地
温度	前半28℃
曝気	5% CO <sub>2</sub> (v/v) 2L/min
光条件	片側～3,000 μmol/m <sup>2</sup> s ⇒途中から片側～800 μmol/m <sup>2</sup> s
期間	5日間
測定	OD 860、終盤だけ乾燥重量も測定

培養は手法2で設定したように各種機器を組み上げて使用した。CO<sub>2</sub>供給は、エアストーン（GX-61、ケニス）を介して5% CO<sub>2</sub>を2 L/minで曝気した。細胞の増殖は吸光度計（UV-mini1240、島津）を用いてλ= 860 nmとして吸光を測定し評価した。また、終盤にはガラス紙（GS-25、アドバンテック）を用いて10 mLの培養液を濾過し、フィルター上の細胞を洗浄、乾燥した後に元フィルターとの乾燥重量の差を測定し、培養液中の細胞の乾燥重量を決定した。

### 3.2.4.4 資源再生手法に関する基礎実証

#### 【実施背景】

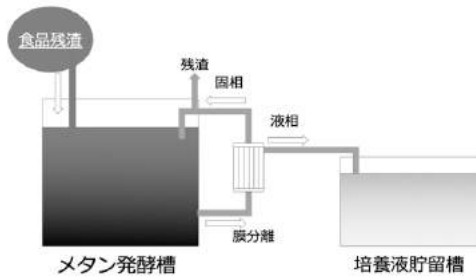
地球から遠く離れた宇宙での長期滞在にあたっては、食料や廃棄物を地球と交換することが難しいため、有機性廃棄物を資源化して食料生産を行うことが求められる。しかしながら、有機性廃棄物から資源を完全に再生して食料を生産する手法はいまだ確立していない。この手法確立のためには、有機性廃棄物を処理して無機物に分解して、さらに、食料となる植物や微細藻類が吸収可能な形態で回収することが重要である。有機物には多くの種類や性状があり、それゆえ地上でこれまで開発されてきた処理技術も多岐にわたるが、宇宙で利用可能な有用技術を最終的に確定するためには、できるだけ多くの候補処理手法を公正に比較することが求められる。

これまでの研究調査から、微生物処理と熱化学処理が資源再生の候補手法として絞り込まれている。微生物処理はメタン発酵と生物酸化が、熱化学処理は湿式酸化が代表的である。前者は主に生ごみや下水処理の、また、後者は主に有機廃液処理の、それぞれ異なる分野で発達してきた経緯もあり、これらが同一の有機性廃棄物や同一の条件で、宇宙における資源再生を目的として比較調査された例はない。以上の観点から、今回は要素技術を洗い出して選定するための基礎的な実験を実施し、候補技術による有機物分解ならびに植物栄養塩回収が可能か試験を行った。

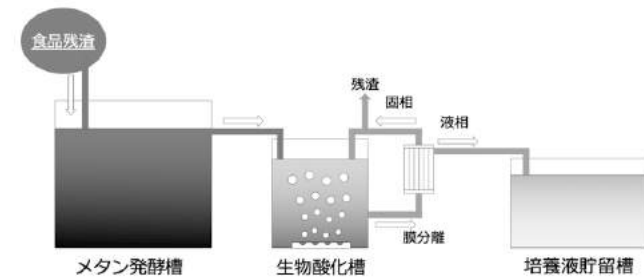
### 【手法】

微生物処理手法として、メタン発酵、生物酸化、メタン発酵・生物酸化の回分培養、連続培養の双方が可能な小型実験系を試作した（図3.2.4.4-1）。熱化学処理手法として、湿式酸化の回分処理が可能な小型実験系を試作した。これらそれぞれの実験系に必要な基礎的知見として、処理時間、運転条件、また、有機物分解および植物栄養塩回収のそれぞれについてこれら技術が利用可能か検証した。有機物分解はCODcrを、また、植物栄養塩の回収は窒素の形態別濃度を測定することで解析した。なお、試験のための有機物には、処理手法の比較という観点から、組成や性状が既知のモデル生ごみ（生ごみの組成を模擬して人工的に作製したもの）を利用した。

#### 1. メタン発酵



#### 3. メタン発酵・生物酸化



#### 2. 生物酸化

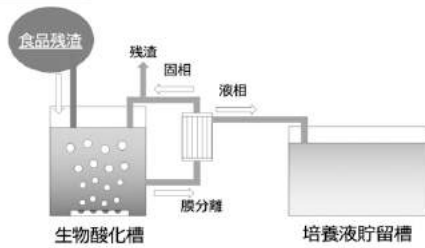


図3.2.4.4-1 試作した小型実験系の模式図



### 3.3 実施結果・考察

#### 3.3.1 国内外の研究開発動向に関する調査

調査にあたっては、宇宙利用を想定し得る食料生産や資源再生等に関する要素技術に関する先行研究や、宇宙利用を想定した食料生産や資源再生を伴う閉鎖実験に関連した文献調査を行った。文献調査の方法として、各国、地域の食料生産システムを有する閉鎖隔離環境施設（表3.3.1-1）やキーワードから公開されている論文やレビューを収集した。検索ワードとして、膨大な候補がある場合には最新の情報を得るために公開期間を2018年以降ものに設定し、定量、定性評価に使えるものを収集した。なお、上記の検索で有望な論文が見つからない場合は公開期間を2018年以前にして収集した。

具体的には、食料生産分野では高等植物、微細藻類、培養肉等のキーワードについて注目し、研究や技術に関して調査を行った。高等植物では、閉鎖隔離環境施設での食料生産の候補として挙げられているイネ、コムギ、ジャガイモ、サツマイモ、ダイズ、レタス、トマト、キュウリ、イチゴ、他作物の収量と栽培条件を整理した。微細藻類は、シアノバクテリア（スピルリナ）、ユーグレナ等についての活用について情報を収集し、培養肉では、ウシ、ブタ、トリについての活用について情報を収集した。

資源再生分野では、糞尿や残渣（植物、排液）の処理・資源再生技術に関連して、生物処理、物理化学処理といった処理方法と再生される資源と効率について整理を行った。またISRU（現地資源利用）として挙げられるレゴリスについても調査を行った。

また、国外の研究開発動向の調査としてDeep Space Food Challengeの入賞チームの情報も精査した（表3.3.2-8, 9, 10）。本チャレンジは、米国とカナダが連携して実施している国際的なコンペティションである。長期宇宙ミッションにおいて、最小限のインプットで、安全で栄養価が高く、おいしく食べられる食品を最大限に生産し、地上の人々にも恩恵をもたらす可能性のある新しい食品生産技術・システムを構築することを目的としている。

これらの先行研究調査結果を基に、定性/定量評価の項目にて詳細を記載した。

表3.3.1-1. 食料生産システムを有する主な閉鎖隔離環境施設（略称）

地域	施設	運用期間（西暦）
日本	Closed Ecological Experiment Facilities (CEEF)	2005-2007
中国	月宮一号 (Lunar Palace-1)	2013-2014 (*1) 2017-2018 (*2)
	深圳市绿航星际太空科技研究院 (Space Science and Technology Institute (Shenzhen))	2016
ロシア	BIOS-3	1972-1984
米国	Bioregenerative Life Support Systems Test Complex (BIO-Plex)	計画中止
	Lunar-Mars Life Support Test Project (LMLSTP)	1995-1998 (*3)
	Biomass Production Chamber (BPC)	1988-2000
	Biosphere2	1991-1993 (*4) 1994 (*5)
欧州	Micro Ecological Life Support System Alternative (MELiSSA) Pilot Plant	2009-
	EDEN-ISS	2015-

\*1 : Lunar Palace 105

\*2 : Lunar Palace 365

\*3 : Phase I~III

\*4 : MISSION 1

\*5 : MISSION 2

### 3.3.2 米国・欧州（ESA MELISSA等）の最新状況調査

国外の調査は、文献調査に加えて、これら技術について研究を推進している機関が集う主要イベントから動向を探った。

#### 3.3.2.1 米国ICES（International Conference on Environmental Systems）

ICES 2021（2021年7月12-15日）はLeave a Nest America Inc.がオンラインで参加し、高度資源循環型食料供給システムに関わる研究・技術プレゼンテーションを聴講、配布資料を参照し、レポートとして纏めた。

具体的には、ICES2021中の約250の演題を含む45セッションから、高度資源循環型食料供給システムに関連する3セッション・44演題を抽出した。次に、特に食料生産に関わるトピックと汚水・汚物処理や資源循環に関わるトピックの合計10演題を注力演題（表3.3.2-1）として抽出した。注力演題については、調査メンバーが該当発表をオンラインで視聴の上、発表者、発表サマリの情報をまとめた。

表3.3.2-1. ICES2021 食料生産および資源循環に関わるトピックの注力演題抽出

#	演題 / 所属・発表者 / 概要
1	PFPU – Microgravity Precursor Food Production Unit nutrient
	Thales Alenia Space Italia・Giorgio Boscheri
2	PFPU（Precursor Food Production Unit）は、微小重力下で食用の根菜を統計的に生産することを目的とした、モジュール式の食品生産ユニット実証機について発表している。MELISSAでの実証が行われており、今回は栄養供給システムの研究成果について取り上げている。
	Development of a harvesting-unit for an automated photobioreactor system Institut of Space Systems, University of Stuttgart・Johannes Martin 微細藻類をベースとした、自動光を用いたバイオリクターシステムの開発について発表している。微細藻類は、光合成によりCO <sub>2</sub> 、水、光、栄養分を利用して酸素とバイオマスを提供することから、宇宙飛行士の補助食料源として利用、硝酸塩・リン酸塩を吸収することで、排水処理を行うこともできる。今回は、培養プロセスを自動化するために開発されたコンポーネントの概要について紹介している。
3	Circular Food Production System Using Algae/Animal Cell Recycling Culture
	Tokyo Women's Medical University・Tatsuya Shimizu 将来の宇宙空間や月面基地にて、持続可能でコンパクトな食料生産を実現するため、藻類・動物細胞をリサイクル培養し、かつその細胞を用いて三次元組織を培養することについて発表している。藻類と動物の間で酸素、二酸化炭素、アンモニアの循環、酸加水分解した藻類エキスからは、グルコース、アミノ酸、ビタミンなどの栄養分が動物細胞に供給されたことを報告している。牛の筋肉細胞シートを積層して、筋肉のような3次元組織（培養ミニハム）を作製することにも成功したことも報告している。
4	Bioregenerative Food Production System: Using integrated food production systems to feed the future
	University of Arizona・Antonio Gutierrez-Jaramillo 地球上での食料生産をBLSSに最適化し、Bioregenerative Food Production System (BFPS)として数値的に評価し、最適解を導き出すことについて発表している。このプロジェクト

	では、植物、キノコ、昆虫、魚等の生産要素を持つBFPSの生産性を予測するモデルを作成したことについて報告している。
5	Optimizing Crop Selection Using Genetic Algorithms Interstellar Lab · Graham Gordon
	Interstellar Labでは、作物の栽培を中心とした再生可能な環境や農業システムの開発について発表している。今回は、水の消費量、照明の必要性などの微細な変化量を計算することができる、革新的な作物選択アルゴリズム (CSA) の開発について報告している。
6	ISS Waste Water Pretreatment Via DNA Pattern Picofilter Using Inorganic Brine Simulant AMENTUM · Franco, Carolina
	DNAをパターンとして用いたゾルゲル法によるセラミック管状の膜エレメントを用いたより高い純度の水濾過システムについて発表している。今回は、宇宙船や同様の排水の前処理プロセスの実現可能性を判断するために、無機塩水の模擬物質を用いた試験結果について報告している。
7	Sodium Chloride Removal from International Space Station Wastewater Brine to Generate Plant Fertilizer NASA Kennedy Space Center · Irwin Tesia
	排水中のNaClを除去した植物養液の作成について発表している。排水中のNaClと他の塩類を分離し、植物の肥料として利用する熱スイングプロセスが提案されている。今回は、熱スイングプロセスが排水中のNaCl削減のための有望なアプローチであることを示した初期の概念実証試験の結果と、今後の開発計画について報告する。
8	Next Generation Water Recovery for a Sustainable Closed Loop Living Faraday Technology Inc (FTI) · Santosh H. Vijapur
	持続可能な循環型生活を実現する次世代型水回収装置について発表している。尿を効率的に処理するバイオ電気化学システムを開発し、尿素を約95%含有させて水回収システムの効率と耐久性を向上させることを報告している。
9	Managing Space Food Waste with Fermentation: Novel System Design Update Space Exploration Initiative at Massachusetts Institute of Technology · Coblenz Maggie
	宇宙での食品廃棄物管理システムとしての発酵について発表している。閉鎖空間環境での発酵の最適化に焦点を当てており、現在、廃棄物管理を目的とした発酵食品の制御とデータ取得のために、開発中の発酵チャンバーのプロトタイプについて報告している。
10	A Fecal Processing Technology Trade Study for Water Recovery in Various Mission Duration Scenarios ERC Inc., JSC Engineering Technology and Science (JETS) · Camilah D. Powell
	人間の固形廃棄物に含まれる水分回収について発表している。排泄物に含まれる水分の80%以上を回収できるかどうかを評価するためのトレードスタディについて報告している。

抽出した演題の中でも研究開発要素が強く、食料生産、資源循環に関わるトピックのなかで水処理、排水利用、糞便処理、食品保存・管理、バイオリアクター、食品生産システムなど特定の処理技術やシステムに特化した合計10演題を注力演題として抽出した。そこから4名の米国のアカデミア在籍研究者を発掘し、他には当該分野のプエルトリコ、ドイツ、日本の研究者も認識できた。

### 3.3.2.2 MELiSSA Conference

予定していた欧州宇宙機関ESAが主催するMELiSSA Conference 2021は、今期末開催につき2020年の開催資料を基に、Leave a Nest United Kingdom Ltd.が高度資源循環型食料供給システムに関わる研究・技術プレゼンテーションの配布資料を参照し、レポートとして纏めた。MELiSSA Conference 2020の97の演題から、高度資源循環型食料供給システム構築に関連する61演題を抽出した。次に、特に食料生産に関わるトピック、汚水・汚物処理や資源循環に関わるトピック、全体システムの効率化に関わるトピックやMELiSSA Pilot Plantと関わりの深い研究トピックを合計10演題を注力演題として抽出した（表3.3.2-2）。

表3.3.2-2. MELiSSA Conference 2020食料生産および資源循環に関わるトピックの注力演題抽出

#	演題 / 所属・発表者 / 概要
1	PRIAM - A compact intensified artificial light photobioreactor adapted to life support for human space exploration
	Algolight・Charlene Thobie フォトバイオリアクターPRIAMについて発表している。PRIAMでは、光ファイバを織り込んだBrochier社のLightex技術を採用しており、内部に体積照明を備えた平面型多層膜光バイオリアクターとなっている。この技術は、単位ごとの光照射面あたりの培養体積を大幅に減少させることにより、高い生産性（乾物重3.5-3.9 kg/m <sup>3</sup> /日）を実現することができる。本技術は制御性と堅牢性を持つことで、安定した生産性が実現でき、コンパクトさも有人宇宙探査の生命維持に適していると報告している。
2	Effectiveness of Bacterial Amendments on Lettuce Performance Inside a Plant Factory with Artificial Lighting
	Ghent University・Thijs Van Gerrewey 泥炭（ピート）の代替培地による植物と微生物の相互作用の検証について発表している。植物と微生物の相互作用を検証することで品質向上や生産性の向上が図れると考えられているが、このコンセプトは水耕栽培ではあまり導入されていない。今回の研究では、培地組成、根圏微生物群集、農作物の収量と品質の関係をより深く理解するための実験を行い、その結果、混合培地と根圏微生物との間に相互作用が認められたと報告している。
3	Design of a module for cultivation of tuberous plants in space - The PROJECT "PRECURSOR OF FOOD PRODUCTION UNIT" (PFPU)
	University of Naples Federico II・Roberta Paradiso PFPU (Precursor Food Production Unit) 微小重力下での塊茎植物（ジャガイモ）を栽培するモジュール式システムについて発表している。実証機は、Root Module、Nutrient Module、Microbial Contamination Control Moduleの3つの主要モジュールで構成されている。今回の研究では、Root Moduleにおける培地の検証、センサー計測、塊茎の発芽および植物の成長試験について報告している。
4	Microbes in Hydroponic Crop Cultivation in Space
	Ghent University・Danny Geelen 宇宙での水耕栽培における微生物について発表している。今回の研究では、植物の健康や病気への抵抗力向上に貢献する微生物を割り出し、有機肥料への効率的な活用に貢献するために行った。結果として、水耕栽培によるレタスの生産と品質は、し尿由来肥料の種類に大きく影響されることがわかり、肥料の違いにより、異なる根圏の微生物群集の組成が促進されること、植物の病原体に対する防御にも利用できると報告している。

5	Seed orientation affects seedling development in hardware for experiments in space
	University of Naples Federico II · Aronne Giovanna
6	種子の位置と根の初期成長に与える影響について発表している。Vigna radiata（緑豆）種子の向きが初期の根の成長と方向性に影響することがわかった。この現象は、重力に対する種子の向きとは無関係であり、後の段階で重力屈性に応じて、根の先端の向きが変化した。この実験を元にWAPS（Water Across the Plant Systems）の根の区画へ根の成長を促すのに最適な2つの種子の位置を特定することができたと報告している。
	Continuous operation of C3, C4a and C5 Compartments in the MELiSSA Pilot Plant interconnected in gas and liquid phases
7	Universitat Autònoma de Barcelona · Enrique PEIRO
	硝化型充填床式バイオリアクター（C3：硝化）、エアリフト式フォトバイオリアクター（C4：食料・酸素生産）、ラットアイソレーター（C5：模擬クルー）の液相と気相の統合システムの検証について発表している。機能テストでは、設置したハードウェアが正しく機能していることが確認され、各システムの制御変数に影響を与えることなく、3つのコンパートメントが正常に接続することができた。光バイオリアクターに硝化バイオリアクターの廃液を異なる滞留時間で供給した場合でも、統合システムの動作が正確に調整され、動物区画の酸素レベルを選択した設定値に維持することができたと報告している。
8	Dynamics of Limnospira indica continuous culture in and air-lift photobioreactor - David Garcia-Gragera, MELiSSA Pilot Plant
	Universitat Autònoma de Barcelona · David Garcia-Gragera
9	LEDを用いたフォトバイオリアクターの酸素生成における最適な動作条件について発表している。このコンパートメントは、ループ内から二酸化炭素を回収し、光合成を元に酸素を供給、食用の材料を供給する。今回の研究では、ハロゲンからLEDへ照明システムを変えた後の光合成バイオリアクターの酸素生成における最適な動作条件について報告している。
	Microbial analysis of the MELiSSA waste degradation compartment 1 (C1) and isolation and identification of C1 dominant bacteria
9	KU Leuven · Tinh Van Nguyen
	廃棄物分解（C1）コンパートメントの微生物解析とC1優占菌の分離・同定について発表している。植菌後1454日目までのC1コンパートメントの生物群集は非常に安定していることが分かった。この中からは、2,500種類以上のOTU（Operational Taxonomic Unit）が同定された。3つのバイオリアクターの間で共通で確認されたOTUは500種で構成されており、細菌群集全体の93%を占めていた。これらの共通したOTUのうち、 <i>Caprocioproducens</i> 、 <i>Thermoanaerobacterium</i> 、 <i>Unclassified Ruminococcaceae</i> 、 <i>Lactobacillus</i> 、 <i>Fonticella</i> 、 <i>Leuconostoc</i> 、 <i>Moorella</i> の7種が全体の75%を占め、特に <i>Caprocioproducens</i> と <i>Thermoanaerobacterium</i> が最も優勢であった。また、最も優勢であった3種が分離された。今後は、微生物群の代謝相互作用について明らかにしていくと報告された。
9	Terrestrial valorization of a MELiSSA compartment - Photoheterotrophic production of purple microbial protein on brewery water
	University of Antwerp · Abbas Alloul
9	C2コンパートメントで紅色非硫黄細菌（PNSB）の活用による、排水からタンパク質生産の可能性について発表された。本研究では、酸素、COD、暗闇の3つの条件を同時に満たすことで、高い選択性とコスト効率を実現し、PNSBを用いたレースウェイ・リアクターでの微生物タンパク質生産のパイオニアになることができたと報告された。

10	How to gradually acclimate MELiSSA's nitrification compartment to urine mixed with VFA-rich anaerobic digestion (C1) effluent
	KU Leuven · Koen Rummens
	Black Water Treatment Breadboard (BWTB) プロジェクトにおける、C1とC3コンパートメントを直接結合し、人が排出する廃棄物の1/4を処理することについて発表された。研究の結果、C3コンパートメントに供給するされた、尿中の尿素の完全な硝化（および有機物の除去）は、25°Cの温度で達成できることがわかった。また、C3コンパートメントへの流入を徐々に増加させていくことが有効であり、遊離アンモニウムと遊離亜硝酸の濃度を細かくモニタリングする必要がある。さらに、pHの変化もモニタリングする必要がある。硝化細菌への影響を考えるとpH 7以上、遊離アンモニアの揮発を防ぐためにはpH 8以下に保つ必要がある。塩分による影響に関しては、尿を蒸留水で1：5以上の割合で希釈した場合影響がないことがわかったと報告している。

MELiSSA Conference 2020の注力演題の調査を通して、現行の研究の多くは宇宙環境での食料生産や高度資源循環型食料供給をより効率的に実現するための関連研究が多いことがわかった。MELiSSA Pilot Plantは、1995年に初期構想が完成し、現在のPilot Plantが落成したのが2009年であり歴史は古く、基礎的なシステムはすでに完成しているため、長期宇宙ミッションに耐えるために必要なシステムの効率化に研究のフォーカスをおいていると推察された。例えば、より効率的に微細藻類を生産するための光学システムの開発や資源循環における、重要な微生物の同定に関する研究などが挙げられる。

### 3.3.3 上記調査に基づく研究/技術の定性/定量比較

宇宙利用を想定し得る食料生産や資源再生等に関する要素技術に関する先行研究や、宇宙利用を想定した食料生産や資源再生を伴う閉鎖隔離実験に関連した文献調査を基に主要な閉鎖隔離環境施設の食料生産や資源再生、これらシステムについて定性/定量評価を行った。

#### 3.3.3.1 閉鎖実験施設に関する取り組み

##### 3.3.3.1.1. 国・地域別での主たる閉鎖隔離環境施設での概要及び変遷について

主要な閉鎖隔離環境施設の食料生産や資源再生システムに関する項目について定量、定性評価の整理を行った（表3.3.3-1）

日本の閉鎖隔離環境施設としては、青森県六ヶ所村に建設された閉鎖生態系実験施設（CEEF）があり、閉鎖居住実験は2005～2007年に行われた。食料生産としては、施設内で植物20種類を水耕で栽培し、自給率は居住者が最大95%、シバヤギ100%を達成した。資源循環としては、O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>の循環を作物栽培区画、人と動物区画に加え、有機廃棄物処理によるCO<sub>2</sub>回収も含めてC源の循環を試みた（文献1）。

中国では、2013年に完成した閉鎖隔離環境施設である有人BLSS地上統合実験システム Lunar Palace-1にて、2014年に実験が行われた。105日の実験期間の中で、21種類の食用作物の栽培、イエローミールワームの培養、人の排泄物のシステム内処理が行われた（文献2）。2017年にはシステムのアップグレードにより、食用、野菜作物、ベリー類など35種類の植物を栽培、し尿と固形廃棄物のリサイクルが行われた結果、酸素と水の100%リサイクル、食料の83%再生（新鮮重量）、システム全体の閉鎖性98.2%を達成した（文献3）。また、2016年、深圳市绿航星际太空科技研究院（Space Science and Technology Institute (Shenzhen)）で行われた実験では、酸素循環100%、水循環99%、食物循環70%を達成している（文献4）。

米国では、NASAで、1995～1998年に実施されたLunar Mars Life Support Project (LMLSTP)（文献19）に続き、BIO-Plex（Bioregenerative Planetary Life Support Systems Test Complex）を建設したもののプロジェクトとしては、実験が実施されぬまま2000年代に打ち切りになっている（文献6）。その後は2010年にアリゾナの砂漠にてHDU-DSH（Habitat Demonstration Unit - Deep Space Habitat）を宇宙での安全な居住空間を設計、開発、テストするテストベッドとして活用する取り組みも行われた（文献7）。また、NASA以外では、1986年に建設され、1991年か

ら1994年の間に実験が行われたBiosphere 2があるが、食料が不足し、大気中の酸素濃度が低下など、閉鎖実験自体は成功に終わることができていない。火星模擬実験施設Mars Desert Research Station (MDRS) では2014に2週間の居住実験を行う中で、GreenHab 施設内で野菜栽培食料生産に取り組んだ(文献8)。また、アリゾナ大学が活用しているBiosphere2内に新たな閉鎖隔離環境施設 A Space Analog for the Moon and Mars (SAM) が建設されており、2022年以降研究チームの受け入れが予定されている(文献9)。

欧州では、欧州宇宙機関(ESA)が中心となって1987年より実施しているMicro-Ecological Life Support System Alternative (MELiSSA) プロジェクト(文献10)が現在も進められている。バルセロナ自治大学内に設置されたMELiSSA Pilot Plantでは、廃棄物の分解、硝化反応による資源循環、微細藻類の光合成による空気の再生、植物栽培の光合成による食料の生産、模擬クルーとしてラットを用いた実験(文献11)が各コンパートメントで実施されている。また、宇宙での植物生産を想定した研究を行うEDEN ISSプロジェクトは2015年に開始し(文献12)、2018年より作物栽培実験が行われている(文献13)。

表3.3.3-1. 食料生産システムを有する主な閉鎖隔離環境施設全体の定量評価

	日本		中国			ロシア	米国				EU	
	LFWG	CEEF	Lunar Palace 365	Lunar Palace 105	Space Science and Technology Institute (Shenzhen)	BIOS-3	BIO-Plex (*2)	LMLSTP	BPC (*4)	Biosphere2	MELiSSA Pilot Plant	EDEN-ISS
場所	月面(想定)	日本、六ヶ所村	中国、北京	中国、北京	中国、深圳	ロシア、クラスノヤルスク	米国、テキサス州ヒューストン	米国、テキサス州ヒューストン	米国、フロリダ州	米国、アリゾナ州	EU、バルセロナ	EU、南極
面積(施設全体: m <sup>2</sup> )	533<(*1)	486	160	100	370	126	160	350<	<20	12500	214	25(*6)
容積(施設全体: m <sup>3</sup> )	618-1601<(*1)	1365	500	308	1340	315	-	927<	113	185750	-	63(*6)
実験時期(年)	-	2005-2007	2017-2018	2013-2014	2016	1972-1984	-	1995-1998	1988-1998	1991-1993、1994	2009-	2015-2019(*7)
実験のクルーの人数(人)	6	2	4	3	4	3	4	4(*3)	-	8	-	-
実験期間(日)	365	28	370	105	180	180	365	91(*3)	-	910(*5)	-	-

\*1: 栽培室のみ。面積は記述の体積と高さより算出

\*2: 計画上の数値、栽培室のみ、2000年代に建設途中で中止

\*3: Phase III

\*4：Controlled Ecological Life Support System (CELSS) program、閉鎖隔離環境施設での栽培のみ

\*5：MISSION1：1991-1993年の2年間、MISSION2：1994年の6ヶ月の合計

\*6：コンテナ2つで構成されている施設のうち1つのコンテナの値を2倍して算出

\*7：現在も運用されている

(文献1-5, 13-20, 22, 23, 26)

### 3.3.3.2 植物栽培技術

#### 3.3.3.2.1 閉鎖隔離環境施設での栽培品目について

主要な閉鎖隔離環境施設の評価にあたり、食料生産のなかでも栽培条件に関する項目と、品目ごとの生産効率について整理を行った(表3.3.3-2, 3, 4)。なお、我が国での月面を想定した「月面農場」の実現に向けたコンセプトを検討する月面農場ワーキンググループ検討報告書(LFWG)の数値も参考に記載した。

イネは閉鎖隔離環境施設での栽培実績が少なく、コムギを主食としての利用として想定しているケースが多かった。Lunar Palace-1では、イネの栽培において湛水期に、メタンガスの発生が閉鎖系によくないと考え採用しなかったとのコメントがみられた(文献24)。ジャガイモは主食としての利用を見据えて閉鎖隔離環境施設での栽培実績が多かった。一方でサツマイモは栽培実績が少なかった。

ダイズは、タンパク質源としての利用を見据えて各閉鎖隔離環境施設での試験が実施されていた。それぞれの生産効率についてはCEEfが $7.5 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$ と最も高い値となった。BPCは $6.9 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$ 、Lunar Palace 365が $6.1 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$ 、Lunar Palace 105が $5.3 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$ となった。イチゴは、クルーのストレス緩和という目的で栽培品種として取り入れられている事例が多かった。

BPCは、居住環境施設は一体ではないが、閉鎖型の栽培施設でコムギ、ジャガイモ、ダイズ、トマト、レタスを単一に栽培した。CO<sub>2</sub>は、明期には1000または1200 ppmとした。薄膜水耕を用いていた。コムギ試験では、出穂直前にエチレン濃度が100 ppbを超え、これは種子結実に悪影響を与えるほど高くなった。これに対して、過マンガン酸カリウムまたは触媒酸化システムを用いてエチレンおよびその他のVOCを除去すれば収量向上させることができると言及している。またBPCの数値は最良の単一収量ではなく、全体の平均値に基づいているため、さらなる改善が可能であるとしている。例えば、ウィスコンシン大学で行われたジャガイモ栽培では、同様の光強度で異なる栽培技術を用いた試験で $30 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$ を超えている(文献23)。薄膜水耕の使用は、ジャガイモでも大規模に実証されサツマイモやラッカセイなど他の地中性作物に有効なことを示した。本システムは月や火星のような重力環境でも機能すると報告している(文献25)。

LMLSTPのPhase IIIでは、91日間でコムギの栽培を行っている。品種はApogeeを使い、 $11.2 \text{ m}^2$ のグロースチャンバーをA面、B面の2つに分け、PPFD  $1,500 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ と24時間の光周期で水耕で栽培した。完全に植え付けた後、約20日おきに植え付けた面積の1/4ずつ、段階的かつ連続的に収穫・再植を行った。A面は、標準的な水耕栽培用養液の配合、B面は非食用バイオマス由来の養分で栽培した。平均子実収量はA面が $1.87 \text{ kg/m}^2$ で、B面が $2.03 \text{ kg/m}^2$ であった。A面およびB面の生産効率は平均で $25.1 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$ と高い値となった。しかしながら20日おきに植え付ける方法によって、同じ養液で異なる生育ステージの作物を水耕栽培する際の課題が明らかになった。生育後期の植物はKとPを素早く吸収する傾向があり、生育初期の植物に栄養不足をもたらすと報告した(文献26)。

閉鎖隔離環境施設の生産効率を比較すると、試験時の光量、CO<sub>2</sub>、養液など栽培条件が異なることから、一概には評価が難しい。しかしながらBPCはジャガイモ $20.8 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$ 、レタス $12.4 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$ で他の施設に比べて高い数値を出していた。LMLSTPのコムギ栽培も後述の矮性品種のApogeeを用いて $25.1 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$ と他の施設よりも高い値となった。

これら作物については、将来的に遺伝子組換え技術の活用について言及があるものの、実際の栽培で用いられている例はなかった。しかしながら、これら品種について文献からの特徴や宇宙



での栽培を見据えた品種改良について情報は得られなかった。地上での低圧、微小重力の条件検討については、閉鎖隔離環境施設内での研究はあまり進んでいなかった。

### 3.3.3.2.2.閉鎖隔離環境施設での栽培方法について

#### 光源について

完全に太陽光利用のみの施設は、Biosphere2であった。施設の利用エネルギーはその分少なくなったが、冬期の光量が低下し植物の生育が遅くなったと報告している。CEEFは、一部太陽光併用していた栽培を行っていた。その他の施設は、人工光を利用していた。エネルギーコストはかかるが、人工光を利用することで植物が計画的に栽培できること、居住者のCO<sub>2</sub>を吸収し、O<sub>2</sub>を生産できる。1990年代からは、宇宙での植物栽培にLEDの利用が始まり、最適な光源が研究され、過去の蛍光灯や高圧ナトリウムランプ、メタルハライドランプを利用していた閉鎖隔離環境施設に比べて生産効率は向上している（文献27）

#### 養液について

Biosphere2を除き、各施設では養液栽培が中心であった。水耕方式も水資源の節約や、宇宙を見据えた際の効率的な水利用の方式が検討されていた。BPCやMELISSA Pilot Plantでは、薄膜水耕（NFT）方式が用いられていた。BPCでは本方式を用いたジャガイモ栽培で高い生産効率が見られている。MELISSA Pilot PlantにおいてもPFPUで基材を用いたジャガイモの栽培研究が進んでいることが発表されていた（文献28）。これら以外に、EDEN-ISSでは、噴霧水耕を用いて栽培を行っていた。噴霧水耕のメリットは、薄膜水耕よりも節水が可能で、根が水に浸からないため、ガス交換がしやすい。LFWGでも一部の栽培に利用が検討されている方式である。

Lunar Palace-1、Space Science and Technology Institute (Shenzhen)は、人の尿や糞、植物残渣を培地や有機肥料として活用することも試みられた。Lunar Palace-1では固形廃棄物を処理し培地として利用したとの報告があった。尿からの窒素成分を利用し、ワラ、糞の発酵から固形肥料を回収していた。一方、Space Science and Technology Institute (Shenzhen)は、基材を用いて点滴灌水を利用しコムギ、レタス、果菜類の栽培を行っており、焼却灰からミネラル（K）を用いることと、糞と非可食部を発酵処理し有機肥料として利用していた。BIOS-3では、尿を直接に養液に入れてコムギ栽培を試験的に行った。その結果、根や養液のナトリウム濃度は高くなったが、可食部に影響はみられなかったと報告している。

なお、閉鎖隔離環境施設の栽培において中国のLunar Palace-1、Space Science and Technology Institute (Shenzhen)は、有機肥料を用いていたとの記述はあったが、微生物の活用については判然としなかった。MELISSAカンファレンスでは水耕栽培、培地それぞれで微生物の植物の相互作用について研究が進められている報告があった（文献29）。

#### CO<sub>2</sub>について

各閉鎖隔離環境施設で、発生するCO<sub>2</sub>を回収し、植物生産に利用していた。LMLSTPは、人からの呼気からCO<sub>2</sub>を回収していた。CEEFでは、人に加えて、ヤギの廃棄物の燃焼によるCO<sub>2</sub>を得ていた。Lunar Palace-1は、人に加えて、ワラ、糞を発酵させてCO<sub>2</sub>回収をしていた。Space Science and Technology Institute (Shenzhen)は人や動物の呼気、廃棄物を発酵、燃焼したのからCO<sub>2</sub>を回収していた。

表3.3.3-2. 主要閉鎖環境施設及びプロジェクト内の栽培条件

日本		中国			ロシア	米国			欧州	
LFWG (*1)	CEEF	Lunar Palace 365	Lunar Palace 105	Space Science and Technology Institute (Shenzh	BIOS-3	LMLSTP (*4)	BPC	Biospher e2 (*5)	MELiSS A Pilot Plant	EDEN-I SS

								en)														
栽培容積	103-267	677	406	203	888.5	236.3	27	113	<35220	6.9	31.5											
栽培面積	80.2	150 (うち育苗10.3)	120	69	219.5	60	11.2	20	1259	5.0	12.5											
詳細	段数	段あたり栽培面積	段数	段あたり栽培面積	段数 (*2)	段あたり栽培面積	段数 (*2)	段あたり栽培面積	段数	段あたり栽培面積	段数	段あたり栽培面積	段数	段あたり栽培面積	段数	段あたり栽培面積	段数	段あたり栽培面積	段あたり栽培面積 (*5)			
イネ	1 2 3	40.0 20.0 13.3	1	60.0	-	-	-	-	-	-	-	-	4	5.0	1	<319	-	-	-	-		
ジャガイモ	3	1.1 3	-	-	不明	6.0	-	-	2	<25.0	1	4.8	-	-	4	5.0	1	<141	1	5.0	-	-
サツマイモ	3	2.5	-	-	-	-	-	-	3	<16.7	-	-	-	-	4	5.0	1	106	-	-	-	-
ダイズ	1 2 3	25.0 12.5 8.3 3	1	30.0	20	0.7	8	0.7	3	<16.7	-	-	-	-	4	5.0	1	183	1	5.0	-	-
レタス	5	0.3 6	1	0.5	22	0.4 4-0.50	11	0.4 4-0.50	3	<16.7	-	-	2	不明	4	5.0	1	<141	1	5.0	3	0.6
トマト	1	0.9	1	1.5	不明	6.0	-	-	1	<19.6	1	1.2	-	-	4	5.0	1	<141	-	-	2	1.8

キュウリ	1	0.5	1	0.5	不明	3.0	3	0.0 2	1	<19 .6	1	0.4	-	-	-	-	1	<14 1	-	-	1	0.6 0
イチゴ	5	0.2 2	-	-	3	1.0	1	1.0	1	<19 .6	-	-	-	-	4	5.0	-	-	-	-	1	0.6 0
コムギ	-	-	-	-	不明	60. 0-6 6.0	10	4.0	6 ( *3 )	18. 9	1	39. 6	2	不明	4	5.0	1	150	1	5.0	-	-
ニンジン	-	-	1	1.3	5	0.5	5	0.5	3	<16 .7	1	1.2	-	-	4	5.0	1	<14 1	-	-	-	-

栽培容積 単位：m<sup>3</sup>

栽培面積 単位：m<sup>2</sup>

\*1：一人当たりの必要量、多段にした場合は容積が削減される。

\*2：同じ作物を異なる段数で育てていることもありバッチ数を記載した。段数およびバッチ数が不明なものについては段あたりの栽培面積でその作物の総栽培面積を記載した。

\*3：1段、2段、3段それぞれで合計113.2 m<sup>2</sup>の栽培面積で行ったとの記載あり、計6段とした。

\*4：栽培室の床面積、コムギ栽培の場合

\*5：栽培面積は、40-102 m<sup>2</sup>の18面の栽培プロットを合算した。容積については、論文の農業区分の数値とした。

\*6：12.5 m<sup>2</sup>の栽培面積とパネルの数から各栽培面積を算出した。

(文献1-4,13-19, 30-32)

表3.3.3-3. 主要閉鎖隔離環境施設及びプロジェクト内で実施された食料生産効率

	日本		中国			ロシア	米国			欧州	
作物	LFWG	CEEF	Lunar Palace 365	Lunar Palace 105	Space Science and Technol ogy Institute (Shenzh en) (*1)	BIOS-3 (*2)	LMLST P (*3)	BPC	Biosphe re2 (*4)	MELISS A Pilot Plant	EDEN-I SS (*5 )
イネ	8.5	7.9	-	-	-	-	-	-	2.0	-	-
ジャガイモ	4.6	-	6.1±2.5	-	栽培実 績あり	0.9	-	20.8	2.1	11.4	-
サツマイモ	7.0	-	-	-	栽培実 績あり	-	-	-	5.7	-	-

ダイズ	5.6	7.5	6.1±1.3	5.3±1.8	栽培実績あり	-	-	6.9	2.2	4.1	-
レタス	4.2	5.4	6.0±1.5	6.0±0.6	5.0	-	栽培実績あり	12.4	3.3	8.0	2.2-4.0
トマト	13.9	4.0	18.9	-	栽培実績あり	3.7	-	11.4	栽培実績あり	-	2.8-3.1
キュウリ	9.7	9.2	7.0±1.6	10.0±1.5	5.0	34.5	-	-	8.0	-	16.1
イチゴ	2.8	-	1.4	1.2	栽培実績あり	-	-	-	-	-	栽培実績あり
コムギ	-	-	13.6±3.2	12.8±2.3	12.8	12.5	25.1	15.8	1.5	4.78-8.97	-
ニンジン	-	7.1	17.9±6.4	3.6±0.2	栽培実績あり	23.6	-	-	4.0	-	-

乾物重 単位：DW g/m<sup>2</sup>・day（小数点第2以下、四捨五入）

\*1：Space Science and Technology Institute (Shenzhen)のレタス、キュウリは生鮮重の値を乾物量に換算。栽培実績ありは、詳細な栽培面積と生産量の記載がなかった。

\*2：BIOS-3のジャガイモ、トマト、キュウリ、ニンジン生鮮重の値を乾物量に換算。

\*3：平均子実収量1.95 kg/m<sup>2</sup>を7回の栽培日数平均77.7日から算出した。

\*4：収量は1991-1993年の期間でのデータから算出、ジャガイモ、サツマイモ、ダイズレタス、トマトキュウリ、ニンジンは生鮮重の値を乾物量に換算。。イネ、コムギを除き生育期間の日数の情報がなかったため、一般的な生育日数を基に算出した。

\*5：EDEN-ISSのレタス、トマト、キュウリは生鮮重の値を乾物量に換算。

水分量は、ジャガイモ80%、サツマイモ65%、ダイズ12%、レタス95%、トマト94%、キュウリ95%、ニンジン88%とした。

栽培実績ありの表記については、論文上で栽培履歴があるものの、収量については詳細数値がなかった。

（文献2-4, 13-19, 21, 23, 31-34）

表3.3.3-4. 主要閉鎖隔離環境施設及びプロジェクト内の食料生産に関する技術（定性評価）

		光源	栽培方式	水	肥料	CO <sub>2</sub>	特徴
日本	LFWG	人工光	湛水水耕 / 噴霧水耕	全量リサイクルを目指す、現地調達も一部検討	メタン発酵などを用いて全量リサイクルを目指す、現地調達も一部検討	人からの呼気からCO <sub>2</sub> 回収	微小重力、低圧の環境も加味して栽培検討
	CEEF	人工光 / 自然光・人工光併設	養液・固形培地（ハイドロボール）	凝縮水を回収し、再び供給	肥料排水をろ過し再利用、人、ヤギの廃棄物からの回収はなし	施設内循環、呼気および人、ヤギの廃棄物の燃焼によるCO <sub>2</sub> 回収	自然光も栽培に利用
中国	Lunar Palace 365	人工光	水耕 / 固形培地固形培地（固形廃棄物から変換され	排水、尿を処理し水回収、養液も処理し循環	尿からの窒素成分を利用、ワラ、糞の発酵から固形肥	ワラ、糞を発酵させてCO <sub>2</sub> 回収	糞や食品残渣などの廃棄物を処理し培地に活用

			たバーミキュライトまたは土壌様基質)		料を回収		
	Lunar Palace 105	人工光	水耕 / 固形培地				栽培面積は Lunar Palace 365の半分
	Space institute of southern china shenzhen	人工光	水耕 / 培地	尿、生活排水の処理水を養液として利用	焼却灰からミネラル (K) を栽培に利用、糞と非可食部を発酵処理し有機肥料として利用	人や動物の呼気、廃棄物を発酵、燃焼したもから CO <sub>2</sub> 回収	固形廃棄物を処理し培地に活用
ロシア	BIOS-3	人工光	水耕・人工培地	糞、尿を処理し循環	一部の尿をコムギ栽培で利用	施設内で循環	微生物叢について検証
米国	LMLSTP	人工光	水耕	凝縮水を回収し、再び供給	施設内での資源循環なし	人からの呼気からCO <sub>2</sub> 回収、CO <sub>2</sub> ボトルからも供給	水と空気は施設内で完全に循環、食料と廃棄物は部分的に循環
	BPC	人工光	薄膜水耕	凝縮水を回収し、再び供給	施設内での資源循環なし	CO <sub>2</sub> 利用	多数の品種で試験
	Biosphere2	太陽光	土耕 (水田含む)	人、動物の排水を処理し、TDS1000 ppm以下にして灌漑用水として利用	バイオマスの乾燥保存し、堆肥の分解を促す	施設内で循環、日照時間によりCO <sub>2</sub> 濃度に差あり、最小6月1060 ppm、最大12月2466 ppm	動物、果樹も利用
欧州	MELiSSA Pilot Plant	人工光	薄膜水耕・ロックウールキューブ	チャンバー内の凝縮水を回収	2週間で養液完全交換	チャンバー内で維持	レタス栽培での風速について検証
	EDEN-ISS	人工光	噴霧水耕	凝縮水を回収し、再び供給	施設内での資源循環なし	栽培室のCO <sub>2</sub> 除去装置なし	画像処理による生育中の植物ストレス検出

(文献1-4, 13-17, 32, 35-36)

### 3.3.3.2.3. 国際的な要素技術の動向について

#### 宇宙での要素技術の検証について

現在、ISSには、植物チャンバーとしてVeggieとAdvanced Plant Habitat (APH) がある。宇宙環境でさまざまな作物を試験するためのプラットフォームを生物再生研究コミュニティに提供し、将来のミッションのためのより大きな生物再生システムを構築するための足がかりとなっている。Veggieは簡易型であり、受粉などの簡単な操作を行うことに適している。APHは、内部で空気をリサイクルし、電熱式クーラーで内部を冷却している。蒸散した水分を回収して根に戻す他、CO<sub>2</sub>、光合成のモニタリングやエチレン除去などの制御も可能である。これらの装置を使い、植物への水と栄養の供給管理の重要性、植物への高濃度および超高濃度 CO<sub>2</sub>の影響、作物の成長と発達に対する光の深い影響などを明らかにしている。次のステップは、早ければ2024年のISSを目標としたOhalo IIIである。この作物生産システムは、蒸散した水を再利用するために大気圧で閉じられ、様々な自動化およびセンシング機能が搭載される予定である。Ohalo IIIは

進化と拡張が可能ないように設計されており、当初は微小重力下での植物栽培のためのさまざまな水の供給と量の最適化を行う（文献27）。今後も重力が植物に与える影響や、水分の供給、宇宙放射線の影響など、いまだ明らかになっていない事象について研究が進められる予定である。

### 地上での要素技術の検証について

栽培環境に関する研究は、地上でも進められている。CO<sub>2</sub>濃度は、生育に関連することから最適な濃度について検討が進められてきた。とある試験では、340から1,200 ppmまで上昇させると、コムギやイネの収量は30～40%増加するが、2,500 ppm（0.25%）までさらに上昇させると、1,200 ppmで栽培した植物と比べて、収量が常に25%減少した。さらにCO<sub>2</sub>濃度を2%（20,000 ppm）まで上げて、さらに10%減少する。イネとコムギの収量増加は、主に1 m<sup>2</sup>あたりの穂数の増加によるものであり、穂や種子の大きさへの影響はわずかであった。これらの研究では、種子の結実の減少は、最終的な収量を測定するまで見た目にはわからないという部分が課題でもあったと報告している（文献37）。またCO<sub>2</sub>濃度が高くなると、いくつかの植物でエチレン合成が増加し、エチレンはコムギの種子の結実を強力に阻害することが知られている。ロシアでも、ミールにてコムギの栽培試験が行われ、栄養生長まで栽培ができたが閉鎖環境内のエチレンにより不稔が引き起こされたことを報告している（文献38）。

タスキギ大学でもNASAと連携し、Center for Food and Environmental Systems for Human Exploration of Space（CFESH）にてサツマイモ、ラッカセイの宇宙を見据えた栽培試験が行われていた。2003年からの試験においては、CO<sub>2</sub>が最適でない場合、サツマイモの貯蔵根の収量は増加したが、葉の生産量はCO<sub>2</sub>の増加とともに減少した。ラッカセイでは、葉面乾物量、成熟さや・種子量、全種子収量は5,000 ppmで増加したが、10,000 ppmの薄膜水耕で栽培した植物ではさや・種子がより多く生産されたと報告している（文献39）。

また、宇宙における植物栽培では、月面や火星表面および宇宙ステーション内も低圧で、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することができ、地球の気圧まで高めるためには空気を入れるコストがかかるため、低圧環境下での植物栽培技術の確立も必要となる。これまでに本事業で実証を担当されている千葉大学大学院の後藤英司氏らの研究において、地上気圧の1/4の低圧下でハウレンソウなどが正常に生育することが報告されている（文献40）。しかしながら花成誘導、花芽形成、花粉形成、開花、受精、結実、種子の成長と完熟といった生殖成長については、ほとんど報告されていないことが明らかになった。

低い光量でも栽培可能かどうかの試験も行われており、白色蛍光灯の下、PPFD 90 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>、光周期16時間または24時間の環境下で栽培された場合、イネやダイズでは過度に伸長してしまい、この光量では実用的な栽培ができなかった。一方でトマト、ピーマン、エンドウは栽培に成功した。エンドウとピーマンのライフサイクルは、高照度の場合よりも2～3倍長くなり、連続光条件下で栽培したピーマンは、16時間の光周期で栽培したものよりわずかに背が高くなったとの報告もある（文献41）。

今後も、地上で検証できる要素技術については研究が進んでいくだろう。現在、ISSでは毛細管力を利用して根を窒息させることなく水を根に導く基質ベースの給水システムが使用されているが、将来的には質量と廃棄物を減らすために、基質がない、もしくは基質を減らした水と栄養の供給システムが検討されている。また栄養供給の領域では、プラズマの利用による生育促進も検討されている。これらの植物やヒトの病原体による汚染を避けるため、飛行前に種子表面の除菌を行うプラズマ処理なども検討されている（文献27）。

### 3.3.3.3 品種開発について

米国では、NASAがユタ州立大学のBruce Bugbeeらのチームと連携し、宇宙での生育に特化した作物の開発を進めてきている。これまでに矮性コムギ品種のApogeeを10年以上の交配と選別を行い作出した（文献42）。本品種は、発芽後23日に出穂し、成熟時でも草丈が45 cm程度にしかならない。葉が発生せず、通常の品種はカルシウム不足で枯れるような状況でも育つ。ISSのAPHでの栽培の実績もある（文献43）。さらにApogeeよりも矮性なPerigeeも作出している（文献44）。このほかに宇宙向けの作物品種として、トマト（Micro-Tina tomatoes）、イネ（Super

Dwarf rice)、ダイズ (Hoyt soybeans)、ピーマン (Triton peppers)、エンドウマメ (Earlgreen peas) を育種技術により作出している (文献45)。

中国では、華南農業大学の宇宙繁殖研究センターを中心に宇宙育種の取り組みを推進している。宇宙育種とは、宇宙空間の強い宇宙線、微小重力、弱い地磁気、清潔な超真空という特殊な環境に種子をさらすことで、植物の成長や発達に影響を与え、作物種子の遺伝的变化を引き起こすことが目的である。宇宙へ運ばれた種子が地上で発芽すると、染色体異常の頻度が非常に高くなる。これは宇宙放射線と微小重力の複合的な影響、およびその他の宇宙飛行の要因が、種子の遺伝的变化の主な原因であると考えられている。このような変異を作り栽培、スクリーニングして高収量、高品質、耐病性のある品種を作り出すことを進めている (文献46)。これまでにイネ、コムギ、トマトなど、66種類の新品種をリリースしている。将来的に宇宙への展開を見据えているが、現状は開発された種子の地上での活用に重きが置かれている。品種の作出以外に、これまでに宇宙環境の条件が植物の種子の発芽や成長に影響を与えることについても研究が行われている (文献47)。植物や同じ植物でも品種によって宇宙飛行に対する感受性が異なると報告している。例えば、コムギ、オオムギ、トウモロコシ、ワタ、ヒマワリ、ダイズ、キュウリ、トマトの種子は発芽率が向上した。イネ、キビ、エンドウ、ピーマン、タバコの種子は、地上との差はなかった。しかし、ソルガム、スイカ、ナス、ダイコン、タオルゴーヤの種子は、発芽率が低下したとの報告がある (文献48)。

#### 3.3.3.4 模擬レゴリスを用いた人工土壌について

ISRU (現地資源利用) のなかで、月、火星から掘削し、酸素や水、メタンなどの資源の調達について検討されており、レゴリスについても現地での居住施設の材料として利用することについてNASA進めている (文献49)。食料生産の文脈では、レゴリスそのものを植物栽培の培地として用いることが可能か検証が各国でも進められている。

これらを培地として使う場合には、有機物やN、P、Sなどの主要な多量栄養素を欠いており、さらにこれらの模擬物質は一般に、アルカリ性、鉱物成分の低い凝集力、保水力が低いなど、植物の健康に有害な特徴を数多く示している (文献50)。レゴリスの化学的・生物的肥沃度や物理的・水理的特性を向上させる持続可能で効果的なアプローチとして、Kozyrovskaらは、パイオニア植物としてマリーゴールド (*Tagetes patula* L.) の栽培を提案している。この植物は、病気に強く、光や低重力に強く、美しいイメージと繊細な香りは、宇宙基地の過酷な環境を美しく彩り、ストレス要因を軽減する。さらに、抗炎症・抗酸化、空気清浄、害虫駆除などに利用できる。それだけではなく、特定の菌根菌がおり、月の珪酸塩岩を分解して、植物の成長に必要な陽イオンを放出することができることから導入が期待されている。実験では、マリーゴールドの種子を植え付ける前に、植物生育細菌 (*Paenibacillus* sp. と *Glomus* sp.) を形成させた場合、種子発芽と植物生長を促し、無菌の珪酸塩岩基材では生長が遅い対照と比べて早期に開花したと報告している。この方法は、栄養分の少ない環境で植物の生育を支えるために、実用上必要なものであることが証明された。パイオニア植物とそれに付随する微生物の主な役割により、十分な肥沃度を持つ土壌を形成し、第二世代の植物 (コムギ、イネ、ダイズ) を栽培し、ビタミン、栄養分、生体分子の新鮮な供給源を月探査員に提供することができるのではないかと言及している (文献51)。

オランダのワーゲニンゲン大学のG.W.W. Wamelinkらは、火星と月のレゴリスの模擬物質で作物を栽培し、人間の糞尿の添加を模した栄養液も加えて収穫が可能か検証している。主な目的は、次世代に向けた食用作物とその種子の生産であった。結果は10種類の作物 (ガーデンクレス、ロケット、トマト、ラディッシュ、ライ麦、キヌア、ハウレンソウ、チャイブ、エンドウ、ネギ) のうち、ハウレンソウを除く9種類がよく育ち、可食部を収穫できたという実績がある。またバイオマス生産量は、地球対照土壌と火星模擬土壌が最も多く、月模擬土壌とは有意な差がみられた。3種の種子 (ダイコン、ライ麦、クレス) について発芽試験においては、月模擬土壌でのダイコンの発芽が、地球対照土壌に比べて有意に低かったと報告している (文献52)。

フェデリコ2世・ナポリ大学のLuigi G. Duriらは、レタス品種を用いて火星レゴリス模擬物質と有機残渣を加えることで収量や成分を改善させると報告している。最適な条件としては、模擬

物質：堆肥=30：70の混合物が最も便利であることが証明されたが、限られた資源である堆肥の持続的利用を考えた場合、70：30の混合は、収量と品質の多少の大幅な低下を受け入れつつ、より現実的なシナリオであると言及している（文献53）。

ジョージア大学のPaul A. Schroederらは、月の土壤模擬物質における栄養吸収と植物応答の改善において、微生物接種が有効であると報告している。チームでは火星の土壤模擬物質でも研究を進めており、レタス、ハウレンソウ、ダイコン、レッドクローバー、モスビーン、ソルトグラスのなかでレッドクローバー、モスビーンが最も初期生育が良好であった。また火星レベルの硫酸マグネシウム水和物（エプソマイト）を用いた栽培では、モスビーンが最も塩分ストレスに耐える能力を示したと報告している（文献54）。

このほかに、ハイドロゲルを火星模擬土壤に添加することにより、植物による水利用を改善し、より少ない水量で作物の収穫量を増やす試みも行われている。ハイドロゲル添加の効果は灌漑制限下で顕著であり、粘土と砂を含む土壤では、スペアミントの高さがそれぞれ3および6%増加した。同様に、ハイドロゲル添加により、スペアミントの質量は粘土含有土壤で110%、砂含有土壤で78%増加した。さらに、ダイコンの種子は土壤の類似品では発芽しなかったが、ハイドロゲルの補給により27%の種子が発芽したと報告している（文献55）。

### 3.3.3.5 微細藻類の生産について

微細藻類は、高等植物に比べてバイオマス生産に必要な表面積や体積が少なく、連続的に収穫でき、複雑な調理をしなくても十分に食用になり、廃棄物の発生が少ないことから、多くの場合、食用バイオマス生産にも効率的である。また物質循環、CO<sub>2</sub>吸収し、O<sub>2</sub>を生産することからも期待されている（文献56）。

実際にいくつかの閉鎖隔離環境施設でも微細藻類が利用されており、BIOS-3ではクロレラ（文献22）が3名の居住者にO<sub>2</sub>を供給源の一つとなった。Space Science and Technology Institute (Shenzhen)、でもスピルリナを居住者の食料として利用した（文献4）。MELISSA Pilot Plantにおいて、*Limnospira indica*を用いた83 LのフォトバイオリアクターにてO<sub>2</sub>生産とCO<sub>2</sub>消費が光強度によって適応可能であり、ラット3匹の区画（人間1人のO<sub>2</sub>要求量の約5-10%）を満たすことが実証された。この実験では、ラットはフォトバイオリアクターとのガス交換により数ヶ月間生存できた（文献57）。この他にMELISSA conference2020にてフォトバイオリアクターの酸素生成における最適な動作条件を定義することに目標をおいているなかで、新規のLED照明システムでは従来のハロゲンライトに比べて2倍の出力を得ることができたと発表している（文献59）。なお、各閉鎖隔離環境施設でのユーグレナの活用事例はなかった。

宇宙での微細藻類の実験は、液体培養の微小重力や宇宙放射線にどのように反応するかといった非常に基本的な問題を目的としていた。その歴史は古く1960年頃から始まっており、Korabl-Sputnik 2で藻類は暗所で寒天上に培養され、定期的に人工照明を当てながら液体培養ができたので、藻類は軌道上で基本的な生理機能や光合成機能を果たすことができると結論づけられた。その後もミールやISSの宇宙ステーションや帰還カプセルの中で、さまざまな光合成細菌を使ったより精巧な実験が行われた。その後も宇宙での様々な微細藻類の試験が進んでおり、2017年にISSに打ち上げられたArthrospira-B実験は、宇宙空間でのシアノバクテリア*Limnospira indica* PCC8005の増殖速度だけでなくO<sub>2</sub>生成速度もオンラインで測定できる初めての試みであり、1ヶ月以上の全期間にわたって培養状態を保った（文献60）。現在までのところ、この実験は、宇宙ステーションに搭載された計装化されたフォトバイオリアクターを稼働させるための最も洗練された成功アプローチとされている。その後も宇宙でフォトバイオリアクターを用いた実験はいくつか行われたが、装置の不具合、技術的な失敗により使用可能なデータは残っていない。

将来的には、フォトバイオリアクターが宇宙での食用バイオマス生産、物質循環の一つとして期待されているが、生命維持装置の安全性と信頼性が最も重要となる。致命的な事故を回避するためには、いくつかのバックアップ設備や制御機構を設置し、システムを一貫して監視しなければならない。実験室レベルの小規模のバイオリアクターが成功したとしても、BLSSに必要な生産率を達成するためにはスケールアップ手順を踏む必要がある。信頼性の高いシステムを開発するためには、フォトバイオリアクターは、比較的小さいが十分な容積と、高細胞密度培養におけ



る適切な照明の使用による高い生産性のバランスの取れた組み合わせを示す必要がある（文献56）。

### 3.3.3.6 タンパク源の生産

#### 培養肉について

これまでに各閉鎖隔離環境施設においては、MELiSSA Pilot Plantにて紅色非硫黄細菌の利用で排水からのタンパク源の生産が研究として行われていた。実験では、夜間に攪拌を行わず酸素供給を減らすことで、紅色非硫黄細菌の数を上昇させることができた。光の利用については、24時間の照明が、12時間の明暗体制に比べ、紅色非硫黄細菌を増加させたと報告している（文献61）。

閉鎖隔離環境施設以外でも将来的な宇宙でのタンパク源の生産方法の研究が進められている。日本でもICES2021で発表されている東京女子医科大学の清水達也氏が牛の筋肉細胞シートを積層して、筋肉のような3次元組織（培養ミニハム）を作製することや、藻類・動物細胞の共培養の研究等を進めている（文献62）。

国外でも培養肉の宇宙への活用が進められている。培養ステーキ肉を開発するイスラエルのAleph Farmsは、2019年9月にISSにおいてロシアの3D Bioprinting Solutionsと提携し、3Dバイオプリンティング技術を使用して肉組織を組み立てることに成功している。さらに同社は、気候や資源の有無に左右されず、高品質でおいしい肉を生産することをミッションとして宇宙開発プログラム「Aleph Zero」を進めており、2022年3月31日にラモン財団とイスラエル宇宙庁が主導する史上初のオール民間クルーによるISSへの訪問「ラキアミッション」と並行して、SpacePharmaが開発した特殊なマイクロ流体装置を用いて、微小重力条件下で細胞から筋肉細胞に成長、成熟させることを試みている（文献63）。

#### 昆虫食について

閉鎖隔離環境施設での長期的な滞在においてタンパク源としての昆虫の利用も検討されている。Lunar Palace-1では、植物残渣からミールワームを育て、タンパク源とした。ミールワームは必須アミノ酸、多価不飽和脂肪酸が多く含まれていると報告されている（文献3）。Space Science and Technology Institute (Shenzhen)でもタンパク源としてオオムギの害虫を植物残渣を餌にして生産していたという報告があった（文献4）。

### 3.3.3.7 資源再生技術

宇宙空間で人間が生存するためには、地球からの補給を減らして酸素、水、食料をその場で生産し廃棄物を効率的に再利用するためのシステムの構築が重要である（文献81）。本章では、主要閉鎖隔離環境施設及びプロジェクト内で実施された植物生産時の非可食部と養液及び、人や動物が生活時に排出する固形廃棄物（糞便）及び液体廃棄物（生活排水、尿）を対象にした資源再生の定量、定性評価の結果から以下のことが明らかとなった（表3.3.3-5, 6, 7）。

#### 植物非可食部からの資源再生について

植物非可食部の再生率については、Biosphere2が100%となったが、閉鎖環境の循環ができておらず上手くいっているとは言い難い状況であった。その他の閉鎖隔離環境施設をみると、Space Science and Technology Institute (Shenzhen)で87.7%、CEEF79%、Lunar Palace 365が67%、Lunar Palace 105が41%となっている（表3.3.3-5）。

Space Science and Technology Institute (Shenzhen)は、オオムギの害虫を育てて植物非可食部を処理してタンパク源とし、発生する糞や呼気からのCO<sub>2</sub>の回収をしていたほか、燃焼処理も行っており高い値となった（文献4）。CEEFも、ヤギの飼料としていたこと、飼料にもならないものについては、燃焼処理をしており高い値となっていた（文献30）。

Lunar Palace-1において、ワラでキノコを育て、食品残渣とともにミールワームを育てる取り組みを行っていた（文献3）。

LMLSTPでは、非食用食品の生物学的分解が行われていた。コムギの非食用バイオマスの1/2を攪拌槽型好気性バイオリクターで無機化し、栄養塩の回収していた（文献15）

MELiSSAでは、植物非可食部は資源リサイクルを達成する5つの区画のうち、コンパートメント1で処理される。セルロース分解菌による繊維の加水分解、高温高圧下での難分解性有機物の分解、そして、嫌気条件での好熱菌による加水分解及び酸発酵による揮発性脂肪酸、アンモニウム、二酸化炭素への変換が行われる（文献64-66）。

日本では、本事業の基礎実証も実施した大阪府立大学の遠藤良輔氏らが微生物処理を組み合わせ、消化液を培養液として利用できるようにする研究を進めている。

### **糞からの資源再生について**

クルーが排出する固形廃棄物としての糞便の再生率は、Space Science and Technology Institute (Shenzhen)で87.7%、Lunar Palace 365が67%、Lunar Palace 105が41%となっている（表3.3.3-5）。

Lunar PalaceおよびSpace Science and Technology Institute (Shenzhen)において糞の処理は植物非可食部とともに発酵させ処理したと報告があった。またこの発酵処理で発生したものを有機肥料として利用していた（文献3, 4）。

CEEFでは、炭化・燃焼処理により炭素の循環を行っていた（文献1）。一方で窒素、ミネラルについては循環を想定していたが、湿式酸化システムが導入できず、行っていなかった。

MELiSSA Pilot Plantでは、植物非可食部や紙ゴミと同様、C1コンパートメントのバイオリアクター内で糞の処理が行われる。反応中の温度は55°Cまで上がるため、ほとんどの病原菌を不活性化できる（文献66）。

ICES2021では、人間の固形廃棄物に含まれる水分回収について発表があった。排泄物に含まれる水分をいくつかの糞便処理技術を等価システム質量（ESM）を用いて分析し、質量、電力、体積に相当する糞便水回収の推定コストと各技術の水回収質量の節約量を評価・比較していた（文献67）。

### **尿からの資源再生について**

各閉鎖隔離環境施設で尿からの水分と窒素の回収についての試みがされていた。生活排水等を含めた水の再生率を数値で見ると、CEEFで90.7%、Lunar Palace 365が99.7%、Lunar Palace 105が100%となっている（表3.3.3-5）。一方、Lunar Palace 105での尿からの窒素分の回収は20.5%に留まる（文献2）。人は、一日約14 gの窒素分、すなわち90~100 gのタンパク質の摂取が必要であり、体内での代謝として窒素分の85%が尿中の尿素として排出される（文献68）。つまり窒素分のリサイクルには、尿の効果的な処理が重要となる。以下に、各施設の水の再利用及び尿からの窒素の回収方法についてまとめた。

### **CEEF**

植物栽培モジュール側では、作物から蒸散した水を凝縮水として回収し、清水貯留槽に蓄積されたのち、UV照射処理をして、植物栽培ベッドの養液に供給された。また、一部の清浄水は、濾過され、浄水貯槽に蓄えられたのち、飲料水やシャワー水として利用された。全居住期間の平均での作物への水の供給は、2090 L/day、作物からの水の排出の総量は2080 L/dayで、両者の差は、収穫された作物に含まれる水量に相当する。居住モジュールでは全期間平均でヒトとヤギへの水の供給量は75.2 L/day、排出量は68.2 L/dayで、全期間平均でそれぞれ75.2 L/dayと68.2 L/dayで、両者の差は、人の尿量とヤギの排泄物の熱分解処理時の蒸発による損失に相当する。尿は、乾燥トイレで水分を分離後、凝縮水として、生活排水貯槽に移され、生活排水と統合された。RO膜システムで処理し、中水を再生した。中水は、居住モジュールでのトイレフラッシング水、動物飼育檻洗浄水、または肥料用水槽に移され、植物栽培モジュールの養液として供給された。

乾燥させた尿は、動物糞尿とともに炭化処理を行ったため、窒素源の回収は行われなかった。乾燥トイレから予期せずNO<sub>x</sub>ガスが発生したが、リサイクルはせず微量有害ガス処理ユニットを附設して対応を試みた（文献1）。

### **Lunarpalace105**

温湿度調整システムからの凝縮水は、植物の蒸散、植物栽培ユニットの養液の蒸発、乗組員の代謝による汗等に由来する。凝縮水は、限外ろ過と紫外線殺菌を組み合わせた活性炭吸着により復水浄化された。システムは、PPコットン前濾過塔、活性炭吸着塔、限外濾過膜を順次通過することで浄化をする設計で、処理能力は2 L/minだった。復水は植物栽培ユニットの灌漑用水に利用された。浄化された凝縮水は270.4 kg/dayとなった。

尿は、減圧蒸留法によって、窒素の一部は水蒸気とともに蒸留され、塩類は濃縮された後、乾燥、保存された。アンモニアを含む凝縮水は、衛生・厨房排水と混合して、膜生物活性炭反応装置で処理した。浄化された尿と衛生厨房排水はそれぞれ3.01 kg/dayと43.34 kg/dayとなった。全体として、施設内の水の再生率は100%を達成した。尿は浄化時に脱塩され、処理水は厨房排水の処理水と同様に植物栽培用の灌漑用水として利用された。尿中の窒素の回収率は約20.5%であったが、それ以外は、尿素やクレアチン、尿酸など有機物の形で尿の残渣側に残っており、より高い回収率を達成できる前処理方法が検討されている（文献2）。

### **Lunarpalace365**

灌漑用水は植物の蒸散あるいは蒸発するが、その空気中の水分を凝縮して液化した後、膜型生物活性炭バイオリアクター（MBACR）による浄化と紫外線消毒を経て、飲料水、衛生水、生活用水など、乗組員が直接使用できる状態にした。植物小屋の総蒸散量は724.26 L/day（平均蒸散量は6.13 L/m<sup>2</sup>・day）である。クルーから排出される尿は、ロータリーエバポレーターで窒素と水を回収し、回収水をMBACRに移して浄化された。生活排水は直接MBACRに移された。MBACR内の水は植物栽培用の養液調製タンクに移され、紫外線消毒後に利用された。システムとしての尿処理能力7,130 g/dayであった。尿と洗濯用水の浄化水は灌漑用水の基準に達し、復水を浄化した水は、復水用水の基準を満たし、また、尿から回収できた窒素は99.7%に至った（文献3）。

### **Space Science and Technology Institute (Shenzhen)**

居住側の排水処理として、人の尿は、バイオトイレ中の尿タンクで蓄積、その他生活排水と共に、生物処理と膜分離処理を組み合わせた嫌気性/好気性膜分離生物反応器(MBR)のシステムを用いて浄化して、植物栽培ユニット用養液として供給された。植物栽培側で蒸散した水分は凝集水として回収後、濾過と殺菌後に洗濯、シャワー、調理用途への利用、またはトイレの洗浄水として利用された。

180日の実験期間中、凝縮水の回収量は917 L/dayで、そのうち 866 L/dayは養液として再利用され、そのサイクル期間は26日であった。4人の乗組員の1日の飲料水供給量は50.62 Lで、生活用水としての処理量は51.37 L、サイクル期間は441日であり、サンプリング時の水の損失を除いて、180日の実験期間中に水の放出はなかった。水の閉鎖度は100%であった。すべての水は10日ごとにプラットホームで採取、分析され、pH、EC、濁度、N、P、TOC、COD、無機塩、有機物、微生物などの数値を出して評価した（文献4）。

尿及び生活排水に含まれる有機態窒素は生物処理により変換され、植物栽培用養液で再利用された。養液は連続的に自己循環し、特にアンモニア態窒素は1.0 mg/L以下で比較的安定に保たれていた（文献69）。

### **MELISSA**

MELISSAプロジェクトは、有機廃棄物、尿、糞、CO<sub>2</sub>などクルーから排出される廃棄物をリサイクルして、酸素、水、食料を作ることができる人工生態系の再現を基本としており、独立して動作する5つの相互接続されたコンパートメントでできている。

C1コンパートメントでは、システム内のすべての廃棄物（糞便、尿、紙、非食用バイオマス、植物の非食用部分）が収集され、嫌気性好熱菌によってアンモニウム、揮発性脂肪酸、ミネラルに変換される。C2コンパートメントでは、1で生成された揮発性脂肪酸及びミネラルは、光をエネルギー源とする光従属栄養細菌の増殖により、嫌気性条件下で無機炭素源やアンモニウムイオンに変換される。C3コンパートメントでは、C1、C2で生成されたアンモニウムを *Nitrosomonas europaea* バクテリアによって酸化、硝酸塩の酸化を *Nitrobacter winogradskyi* で行

う。C4コンパートメントでは、二酸化炭素を酸素に変換し、乗組員の食料となる食用のバイオマスを作り、水を回収する役割を担う。C4aでは、CO<sub>2</sub>を炭素源とする光独立栄養細菌 *Arthrospira platensis*が酸素と水を生産し、C4bは、高等植物が生育し、C5コンパートメントではクルーの居住セクションとして構成されている（文献58, 70）。

アンモニウムイオンから硝酸塩への硝化反応には、多様な微生物群集ではなく、*Nitrosomonas europaea* ATCC 19718と*Nitrobacter winogradskyi* ATCC 25391の共培養で実現している。特に、*N. winogradskyi*はアンモニウムや亜硝酸塩濃度が高くても反応効率が落ちず、高塩分濃度環境下でも両者の共培養では生物活性が落ちないことが分かっており、合成尿マトリックス中で45 mS/cmの塩分濃度であっても連続攪拌槽反応器（CSTR）において90-94%ほどの硝化効率を保つ。好気性環境下で行われる、これら亜硝酸化および硝酸化プロセスは、MELISSAのC3コンパートメントに設置されたバイオリアクターにて、4.8年もの長期に渡り、アンモニウム負荷率 1.35 kgN/m<sup>3</sup>・day で、95-100%の窒素変換効率が報告されている。現在は、C3コンパートメントで実施される硝化共培養に、C1コンパートメントで作用していた尿素分解菌を追加して尿分解と硝化で同時並行的に反応が進むプロセスの実現である（文献70）。

### EDEN-ISS

施設内で稼働するクルーの尿や生活排水のリサイクルシステムは現状実装されている報告はないが、ドイツ航空宇宙センターでは、C.R.O.P.という土の機能を模倣したバイオフィルターシステムで尿を硝酸態窒素含有養液に変換することを目的として、人工尿を用いた窒素の無機化実験が行われており、このコンセプトと組み合わせた宇宙空間での植物栽培ユニットのコンセプトが議論されている。温室内では、空気をろ過して回収した凝縮水を水タンクに溜めて、再利用する設計になっていると思われる（文献74）。

### LMLSTP

Phase IIIの実験では、洗濯、シャワーなどの生活排水、尿、凝縮水、固形廃棄物処理の焼却炉由来の凝縮水の処理を行った。処理方法は、生物学的手法（バイオリアクター内での反応）後に逆浸透膜や蒸留装置を用いた物理化学的手法を組み合わせた形で実施し、Milli-Q®による処理を行った。処理水には、殺菌目的で加熱処理、ヨウ素添加が行われたのち、再利用された（文献15, 20）。

### BIOS-3

尿を食用部分が養液に触れないコムギ栽培用の養液に混ぜて利用を試みた。また、糞を乾燥させた際の水蒸気もシステム内でリサイクルを行った。また、蒸散した水分は凝縮水として回収して、植物栽培用養液や洗濯・掃除などの生活用水として利用された。飲料水として使う際は、イオン交換膜でろ過して、ヨウ化カリウム、フッ化物、塩類を添加した（文献16）。

その他、施設に限定しない取り組みでいうと、ICES2021では、NASAのIrwin Tesiaらが排水に含まれるNaClを熱スイングプロセスで取り除き、他の塩類を含む水を培養液に利用するための研究についての報告があった（文献72）。またFaraday Technology Inc.の Santosh H. Vijapurらは、尿を効率的に処理するバイオ電気化学システムを開発し、尿素を約95%含有させて水回収システムの効率と耐久性を向上させたと報告している（文献73）。

表3.3.3-5. 主要閉鎖隔離環境施設及びプロジェクト内で実施された廃棄物処理のインプット

		日本		中国			ロシア	米国		欧州	
対象	詳細	LFWG	CEEF	Lunar Palace 365	Lunar Palace 105	Space Science and Technology Institute	BIOS-3	LMLSTP	Biosphere2	MELISSA (*5)	EDEN-ISS

						(Shenzhen) (*3)					
廃棄物 (人)	糞	105.2	56	33.0	55.3	134 (180日試験)	実績あり	32.0	実績あり	13.3	-
	尿	51.7or 43.9	2.5	1776 (*1)	1098 (*1)	188 (10日間試験)	実績あり	59.0	375 (*4)	49.7 (尿素)	-
廃棄物 (植物)	植物非可食部	497.8	479	273.0	152.3	8483	実績あり	6660 (*2)	実績あり	-	52.3
	養液	検討あり	実績あり	実績あり	26988 (*2)	実績あり	-	-	-	-	-

廃棄物（人）の単位：DW g/day・人

廃棄物（植物）の単位：DW g/day・人

\*1：廃棄物（人）尿の単位は、FW g/day・人で記載した。

\*2：廃棄物（植物）植物非可食または培養廃液の単位は、FWg/dayで記載した。

\*3：廃棄物（人）の単位は、FWg/day・人、廃棄物（植物）の単位は、FWg/dayで記載した。

\*4：尿だけでなく、複合排水も含めた処理量、単位はm<sup>3</sup>/year

\*5：実績ではなく、要求量を記載、尿には、尿素の乾燥重量を記載した。

(文献2, 3, 4, 14, 16, 31, 35, 74-77)

表3.3.3-6. 主要閉鎖隔離環境施設及びプロジェクト内で実施された資源の再生率（分解率またはリサイクル率）

		日本		中国			ロシア	米国		欧州	
対象	詳細	LFWG	CEEF	Lunar Palace 365	Lunar Palace 105	Space Science and Technology Institute (Shenzhen)	BIOS-3	LMLST P	Biosphere 2	MELISS A Pilot Plant (*10)	EDEN-I SS (*12)
廃棄物 (人)	糞	-	実績あり (*1)	67.0 (*4)	41.0 (*4)	87.7 (*5)	-	実績あり (*8)	100.0	-	-
	尿 (水再生)	-	90.7 (*2)	99.7	100.0	記載なし	実績あり (*6)	100.0 (*9)	100.0	実績あり (*11) -	-
廃棄物 (植物)	植物非可食部	-	79.0 (*3)	67.0 (*4)	41.0 (*4)	87.7 (*6)	-	実績あり (*8)	100.0	-	-
	養液	-	94.4	記載なし	記載なし	記載なし	記載なし (*7)	記載なし	-	記載なし	記載なし

分解率/リサイクル率：単位 %

\*1：炭化・燃焼処理のため、C源および水の循環はできていることから実績ありとした。

- \*2：AHMから供給された上水・中水の和と排出された生活排水、濃縮水、凝縮水の和から算出した。
  - \*3：植物非可食部をシバヤギの飼料として供給した割合を記載した。
  - \*4：わら、ミルワーム飼料混ぜた状態での分解率
  - \*5：栽培に、し尿の活用を試みた記述あり。
  - \*6：植物非可食部をオオムギ害虫の飼料として与えた記述あり。
  - \*7：凝縮水の利用については言及あり。
  - \*8：燃焼処理の実績あり。
  - \*9：水再生率
  - \*10：目標値あり、廃棄物ごとに処理方法の検討がされている。
  - \*11：合成尿での実績あり
  - \*12：将来的に循環系の利用について言及あり。
- (文献1-4, 14-16, 31, 36, 70, 71, 75)

表3.3.3-7. 主要閉鎖隔離環境施設及びプロジェクト内の資源循環に関する技術（定性評価）

		糞	尿	植物非可食部	養液	特徴
日本	LFWG	発酵処理を検討	水分は回収し、窒素分も再利用を検討	発酵処理を検討	再利用を検討	微小重力下での処理を見据えてを検討
	CEEF	燃焼処理、水分と炭素を回収	水分は回収し再利用、窒素	燃焼処理、家畜飼料としても利用	施設内で循環	ヤギを利用し植物残渣処理、詳細なトラブルシューティング
中国	Lunar Palace 365	非可食部とあわせて発酵処理、CO <sub>2</sub> を回収	水分は回収し、養液として再利用	糞とあわせて発酵処理しCO <sub>2</sub> 回収、昆虫飼料としても利用	施設内で循環	昆虫を利用し植物残渣処理、上記の処理過程でキノコも利用
	Lunar Palace 105					
	Space Science and Technology Institute (Shenzhen)	微生物処理、燃焼処理	水分は回収し、養液として再利用	微生物処理、燃焼処理、昆虫飼料として利用	施設内で循環	昆虫を利用し植物残渣処理
ロシア	BIOS-3	乾燥、保管	乾燥、保管 一部は試験的にそのままコムギ栽培に利用	-	糞、尿を処理し循環	し尿を養液として利用する試み
米国	LMLSTP	燃焼処理	水分は回収再利用	燃焼処理、微生物処理	凝縮水を回収し、再利用	焼却炉由来の凝縮水の回収
	Biosphere2	動物飼育室からの固形廃棄物や動物に与えられない植物は、すべて細断、乾燥し植え付けの間に土に埋め戻す。ごく一部は堆肥化、ミミズ床に与えた	トイレ、衛生設備、厨房の排水は、し尿嫌気性保持槽で分解し、湿地排水処理へ	動物の飼料として利用	-	湿地排水処理システムにより重金属類も処理
欧州	MELiSSA Pilot Plant	C1コンパートメントで、バクテリアのコンソーシアムが糞便や固形廃棄物、尿を主にCO <sub>2</sub> 、揮発性脂肪酸（VFAs）、遊離NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> を含むミネラルに消化/液化			凝縮水を回収し、再利用	廃棄物ごとに処理方法の検討

		する				
	EDEN-ISS	-	-	-	施設内の凝縮水を再利用	将来的に循環系の利用について言及

(文献1-5, 13-16, 20, 58, 71, 75)

### 3.3.3.8 その他着目すべき動向 (Deep Space Food Challenge)

Deep Space Food Challengeは、米国とカナダが連携して実施している国際的なコンペティションであり、将来宇宙での利用を見据えていることから、入賞チームの情報も精査した(表3.3.3-8, 9, 10)。以下に、特徴のあるチームの情報を抜粋する。

モジュール型で装置一つで植物、藻類、菌類を育てるCANGrowやCosmic EatsやFar Out Foods、Canada - Growth、PeaPodのように精密な環境制御、低メンテナンスに重きをおいた開発を進めているチームもみられた。

SIRONA NOMsが最小限の投入物と廃棄物で様々な果物、野菜、ハーブ、魚を栽培する小規模な生物再生システムを、Interstellar Labが、新鮮なマイクログリーン、野菜、キノコ、昆虫を生産し、長期宇宙ミッションのための微量栄養素を供給するモジュール型の生物再生システム(NUCLEUS)の開発を進めており、排液の活用に留まらずモジュールのなかでの循環することを目指していることが伺える。

藻類を活用する研究も複数選出されていた。SEuPS – Space Euglena Production Systemというテーマでは、人間の排泄物からユグレナを培養するという取り組みを進めている。

AlgaBloom International Ltd.は、微細藻類を高密度かつ低水量で培養し、スムージー、ペースト、パスタ、フレークなど、異なる栄養プロファイル、風味、食感を持つ食品の開発を目指している。Astra Gastronomyは栄養価が高く、成長の早い微細藻類からスナックを作ることを進めている。

細胞培養についても、いくつかの取り組みが入選している。Mission: Space Foodは、細胞の凍結保存とバイオリクターを使用して、多能性幹細胞から肉を培養することを計画しており、牛肉だけでなく豚肉や羊肉など他の肉類の培養にも応用することを想定している。Deep Space Entomocultureは乾燥保存された昆虫細胞を宇宙へ輸送し、簡単な材料を用いて懸濁型バイオリクターで再活性化させ、従来の肉製品に似た筋肉と脂肪のバイオマスを生産することを目指している。Hefvinは栄養豊富な培地で果実の細胞を培養し、球形化によってさまざまな種類の細胞を皮と果肉を持つ食用の果実構造にカプセル化することを検討している。

タンパク源を微生物のから作り出す取り組みについても、いくつか研究が進められている。µBitesは、プラスチックやバイオマスの廃棄物を食料生成のための炭素源として利用する、微生物を利用した次世代食料生産システムを検討している。Electric Cowは、食品用微生物と3Dプリンターにより、CO<sub>2</sub>や廃棄物を直接食品に変換することを目指している。Solar Foodsもガス発酵によるタンパク質生産に取り組んでいる。

昆虫食についても、Lunar Palace-1で利用されたミールワームのように、Canacompost Systemsではミズアブ、MARTLETではコオロギをタンパク源として利用する研究が進められている。

表3.3.3-8. Deep Space Food Challenge フェーズ1 米国入賞チーム

チーム/機関	テーマ	概要
1 Astra Gastronomy	食品製造	栄養価が高く、成長の早い微細藻類を育て、脱水し、ナッツなどと混ぜてカリカリの一口サイズのスナックに成形する。
2 Beehex	食品製造	植物や培養肉などを脱水して粉末状の食品にし、密封したカートリッジに保存して保存期間(5年以上)とし、必要な時にカートリッジ内の保存食品を使って食品を製造することができる汎用食品製造装置をつくる。

3	BigRedBites	食品製造	シアノバクテリア、酵母、キノコ、植物の共生システムで、1日の必要カロリーの15%を満たす新鮮で栄養価の高い農産物を得るための加工装置。3Dプリントされた人工土壌や共生型の共存などの革新的な技術により、各サブシステムの廃棄物を最大限に活用し、外部からの投入を最小限に抑えることができる。
4	Bistromatic	食品製造	Bistromaticは、宇宙飛行士が長期宇宙滞在中に地球と同じような食事体験をするための自動食品製造機である。豊かな食感と適度な水分を持った食品を、さまざまな形状で生産する。
5	Cosmic Eats	食品製造	COSMIC EATSは、植物、菌類、藻類の食品生産モジュールを1つのマルチモジュールシステムに統合して構成されている。
6	Deep Space Entomoculture	生物培養	この生産方法は、昆虫の細胞から食品を生成するための自己完結型の装置である。乾燥保存された昆虫細胞を宇宙へ輸送し、簡単な材料を用いて懸濁型バイオリアクターで再活性化させ、従来の肉製品に似た筋肉と脂肪のバイオマスを生産するために使用される。
7	Far Out Foods	植物等育成	Exo-Gardenは、ほぼ閉ループの自己完結型食品生産システムで、さまざまな新鮮なキノコや水耕栽培の野菜を生産することができる。
8	Hefvin	生物培養	Hefvinは、栄養豊富な培地で果実の細胞を培養し、球形化によってさまざまな種類の細胞を皮と果肉を持つ食用の果実構造にカプセル化する技術を採用している。この技術により、味、色、香りの豊かなベリーを生産する。
9	Interstellar Lab	植物等育成	NUCLEUSは、新鮮なマイクログリーン、野菜、キノコ、昆虫を生産し、長期宇宙ミッションのための微量栄養素を供給するモジュール型の生物再生システムである。複数の自律型ファイトトロンを組み合わせ、水、空気、栄養分の投入を最小限に抑えた自立型の食料生産システムを構築する。
10	Kernel Deltech	植物等育成	Kernel Food Production Systemは、明確に定義された出発原料から不活性化された菌類バイオマスを生産する自律型装置である。低重力環境下での連続培養技術により、バイオマス生産量と製品の安全性を確保するため、培養条件を厳密に制御してバイオマス生産を実現する。
11	Mission: Space Food	生物培養	このプロジェクトは、実績があり信頼性の高い包装された食品システムを基盤としているが、宇宙での食品生産というエキサイティングな新しい展望も活用している。細胞の凍結保存とバイオリアクターを使用して、多能性幹細胞から肉を培養する予定である。この方法により、乗組員は放牧による牛の飼育と比較して、ほぼ1,000倍少ない投入量で肉を生産できるようになる。このシステムは、豚肉や羊肉など他の肉類の培養にも応用でき、食の選択肢をさらに広げることができる。
12	Nolux	植物育成	生物の光合成に依存しない植物・菌類由来の食品生産が可能な人工光合成システム
13	Project MIDGE	植物育成	モジュール式インフレータブル動的成長環境は、厳しい環境下で食料を成長させるための新しいアプローチで、どこにでも設置でき、あらゆるものを成長させることができるように設計されている。
14	RADICLE-X	植物育成	RADICLE-Xは、パッシブでスマートなモジュール式栽培システムを採用し、深宇宙ミッションのための栄養価の高い可変の生鮮食料を生産している。この軽量のシステムは、複数の居住区や温室構成に展開可能で、特許取得済みのハイブリッド水技術に基づいて構築されており、最小限の水、エネルギー、宇宙飛行士の時間から最大の収穫を実現する。



15	SIRONA NOMs	食品製造	再生可能な宇宙空間と農業の持続的統合 新規有機食 (SIRONA NOMs) は、最小限の投入物と廃棄物で様々な果物、野菜、ハーブ、魚を栽培する小規模な生物再生システムである。
16	Space Bread	食品製造	宇宙パンは、宇宙飛行士が宇宙でパンを作ることができるフードシステムである。多機能プラスチックバッグにより、クルーはバッグの中にすべての材料を保存し、組み合わせ、焼くことで、すぐに食べられるイーストライズドロールを作ることができる。
17	Space Lab Cafe	植物育成	Space Lab®カフェは、最小限の水、電力、廃棄物、処理時間で、栄養価の高いさまざまな野菜を連続的に生産するコンパクトな垂直農園である。月、火星、宇宙船の居住空間で重力の有無にかかわらず動作し、地球の都心部や遠隔地の過酷な環境でもファーム・トゥ・テーブルのソリューションを提供することができる。
18	µBites	食品製造	µBites (ミューバイツ) はプラスチックやバイオマスの廃棄物を食料生成のための炭素源として利用する、微生物を利用した次世代食料生産システムである。

表3.3.3-9. Deep Space Food Challenge セミファイナリスト カナダ入賞チーム

チーム/機関	テーマ	概要	
1	Canacompost Systems	アウトポスト ミズアブを用いたスペースコンポスト	ミズアブ (BSF) の幼虫と微生物相を用いて、自動化されたシステム内で有機物を堆肥化し、栄養豊富な堆肥、動物性タンパク質、肥沃な昆虫排泄物、熱、二酸化炭素を生成する。これらは、他の食料生産システムで利用することができる。堆肥と糞は肥料として、熱と二酸化炭素は植物の成長プロセスで、昆虫は家畜 (または人間) の消費に利用する。
2	McGill University / McGill Advanced bio-Regenerative Toolkit for Long Excursion Trips (MARTLET)	コオロギ飼育・採集・変態システム	コオロギ飼育・収集・変換システム (CRCTS) は、タンパク質が豊富なコオロギを世界で初めて制御された環境で育て、収穫することにより、地球上の遠隔地にいる宇宙飛行士や人間のためのタンパク源になるように設計する。
3	McGill University / McGill Advanced bio-Regenerative Toolkit for Long Excursion Trips (MARTLET)	インスピラフォトバイオリアクター	光源を内蔵した6容器型のフォトバイオリアクターで、カートリッジ容器内で微細藻類を培養する新規のモジュール型バイオリアクター。そのまま消費することができたり、他の食品に追加したときに香料や栄養補助食品として使用される食用ゲルに培養出力を変換するために収穫と処理ユニットと結合している。
4	AlgaBloom International Ltd.	宇宙での持続可能な食料生産のためのプログラムブル微細藻類培養プラットフォーム	AlgaSpace培養システムは、微細藻類を高密度かつ低水量で培養し、スムージー、ペースト、パスタ、フレークなど、異なる栄養プロファイル、風味、食感を持つ食品を生産するために、バイオフィルムベースの成長を活用する。このプラットフォームは、栄養価の高い食品を生産するだけでなく、排尿、消化、呼吸から出る廃棄物を生物生産のための原料として利用することができる。
5	University of Waterloo	食品・生命維持のための培養用ハイドロゲル光バイオリアクター	アルゲラックシステムは、食用として栄養価の高い微細藻類を培養するためのシステムである。革新的な設計により、水とエネルギーの使用量を最小限に抑えることができる。

6	Ecoation Innovative Solutions Inc.	CANGrow モジュール式屋内食品生産システム	CANGrowは、新しいモジュール式ポリカルチャー室内食品生産システム。イチゴ、チェリートマト、2種類の根菜、マイクログリーン、4種類のユニークなハーブ、ミニヘッドレタス、藻類スーパーフード、菌類による肉の代替品「スペースベーコン」など、生物学的に効率の良い多様な食品を栽培することができる。この技術は、年間500kg以上の栄養価の高い食品を提供できる可能性がある。
7	University of Guelph	Canada - Growth - 宇宙環境用成長オプション	カナダグースは、新鮮な果物や野菜、キノコなどを高密度に生産するための環境制御型植物栽培室で、電源と給水を完備している。カナダ独自の制御環境技術と専門知識を活用し、高密度生産システム内で均質な条件を達成する方法を考案している。
8	PeaPod Technologies Inc.	PeaPod	PeaPodは、低メンテナンスのモジュール式食料生産と分散型研究のための精密自動植物生育環境。PeaPodは、あらゆる作物を栽培するために必要な環境を生成することができ、同時に植物の成長に関するデータを収集し、機械学習によって時間をかけて食品を最適化することができる。PeaPodは、空気温度調節、加湿、除湿、照明、エアロポニックスなど、一連の自動制御システム。
9	NobleGen Inc.	SEuPS - 宇宙ユグレナ生産システム	人間の排泄物をプラットフォーム生物であるユグレナ・グラシリスの原料にアップサイクルする。ミドリムシの光合成能力を活用し、自律的なAIシステムによって監視・制御されるエネルギー効率の高いバイオリクターで微生物を育てることで、効率を最大化する予定。
10	Concordia University	アストロヤストマイクロファーム 宇宙適応型栄養・フレーバーファクトリー	宇宙環境に特別に適応した酵母菌（アストロイスト）が中心となっています。この酵母は、宇宙への長い航海に必要な栄養素と、食体験を豊かにする風味の分子を作り出す。これらの栄養素とフレーバー分子の生産は、自動化・最適化されたバイオリクターシステムで行われる。最終製品は、美味しくて栄養価の高い酵母スプレッドで、安全に消費することができる。

表3.3.3-10. Deep Space Food Challenge フェーズ1 インターナショナル入賞チーム

チーム/機関		テーマ	概要
1	ALSEC Alimentos Secos SAS	食品製造	ALSECは、マイクロカプセル化、ナノテクノロジー、人工知能、3Dプリントという4つのテクノロジーを取り入れた食品生産システムを提案し、ナチュラル・オーガニック・高栄養な粉末食品の処方開発を進めている。
2	AMBAR	植物育成	Agro-Migra は、水生植物と陸生植物が共存する生態系として機能する、異なる区画を持つ多目的栽培キャビネットで、消費に適した食料を生産する。消費者の幸福と満足を達成することを主な目的とし、高品質の食品を生産することに重点を置いている。
3	Electric Cow	食品製造	食品用微生物と3Dプリンターにより、CO <sub>2</sub> や廃棄物を直接食品に変換することができる。
4	Enigma of the Cosmos	植物育成	リーフィー&マイクログリーン食品生産システム。伸縮自在の栽培チャンネルシステムで植物の自然な成長サイクルをサポートし、植物のニーズに応じて栽培面積を調整することで栽培スペースの効率を高め、その結果、最低40%の効率アップを実現する。
5	JPWORKS SRL	植物育成	ChloeNanoClima® は、ナノプラントやマイクログリーンを、汚染されない単一の自律的な生態系で栽培する革新的な技術であ

			る。資源と作業時間を最適化し、最も安全で迅速かつ栄養価の高い野菜のスーパーフードを提供する。
6	KEETA	生物培養	相互依存のミクロ生態系からの出力を利用し、栄養豊富な様々な食品を作り出す3Dプリント食品システムである。この生態系は、生産者、昆虫、分解者で構成されている。昆虫は、タンパク質、ビタミン、ミネラルを多く含み、また、様々な味を提供することができる。
7	LTCOP	植物育成	火星の条件下や輸送中に生鮮食品（野菜、果物-イチゴ、タイバ）を生産する。縦型パネルを使用し、人工光や運用上の制約の中で生鮮食品を生産することが可能である。このシステムでは、肥料の投与による植物の栄養管理や、テルペンを加えた果物のカロテノイドレベルの制御が可能である。組織培養研究所は、生殖質バンクを供給し維持するためのシステムに含まれている。
8	Natufia x Edama	植物育成	水耕栽培システム、堆肥化ソリューション、大型藻類養殖からなる閉ループの室内農業技術で、すべてが大規模な自動化システムにシームレスに統合されている。
9	Solar Foods	食品製造	ガス発酵による単細胞タンパク質生産。
10	Team π	植物育成	地球と宇宙のために設計された可倒式生命維持装置である。植物栽培のユニークなアプローチと高度な植物処理装置、そしてエコロジカルフットプリントの削減とポジティブインパクトを目指して自給自足の環境を備えている。

## 考察

宇宙利用を想定し得る食料生産や資源再生等に関する要素技術に関する先行研究や、宇宙利用を想定した食料生産や資源再生を伴う閉鎖隔離環境施設の実験に関連した文献調査および、国内外の高度資源循環型食料供給システムにおける要素技術の開発状況を定性/定量比較し、分析することで以下のようなことが明らかとなった。

食料生産、資源循環に関して、定量比較を試みたが、施設ごとに栽培環境や処理条件が異なることから、詳細な比較が難しかった。

Lunar Palace 365（4名、370日）は、Space Science and Technology Institute (Shenzhen)（4名、180日）に比べておよそ半分の面積、容積で生産を行っていた。食料供給も項目が異なるが、Lunar Palace 365では食料の83%再生（新鮮重量）、Space Science and Technology Institute (Shenzhen)では食物循環70%であり効率化が図られていると考えられた。

BPCやMELiSSA Pilot Plantでは、ジャガイモ栽培が薄膜水耕で実施されており高い生産効率で低重力下でも利用できるという言及もあったことから、サツマイモ栽培でも活用が期待できる。また薄膜水耕は少ない水量で栽培できるメリットもあるが、湛液水耕に比べて水が少ないため、停電などにより灌水システムが停止してしまうと作物が枯れてしまうデメリットも存在するため、宇宙での安定的な電力供給が必要になると考えられる。

宇宙向けの品種改良や宇宙での栽培においては、通常の栽培とは異なる環境であることを念頭に置いて取り組むことが求められる。例えば、低重力下での水の挙動、根域での適切な灌水、閉鎖環境でのエチレンやメタンガス蓄積などによる植物生育への影響とこれらガスの除去方法、低圧環境での品種ごとの最適栽培方法、レゴリスを利用した場合には含まれる有害成分の除去もしくは吸収しない方法や微生物叢の導入による生育促進など考慮すべき点が多くある。特にイネは通常の栽培方法の場合では、土壌微生物からのガス発生の懸念もあり、閉鎖隔離環境施設での実験や宇宙での栽培において検証が必要だと考えられる。

また初期は、地球から水耕栽培の栄養塩成分を持ってくるが、都度、資源を運搬していくことは現実的ではないことから将来的には現地の廃棄物から得ることが求められるだろう。閉鎖隔離環境施設でも施設内の循環を考え、微生物発酵により有機肥料を作成し作物生産に利用していた。この場合、微生物の挙動の把握も必要となると考えられる。例えば、人や植物残渣由

来のものから有機肥料を作る場合には、残存するものが悪影響を与えないか検証が求められる。さらに微生物が存在しない場所で行う場合には、普段は影響のない微生物のでも、対象に悪影響を与える可能性もありうる。閉鎖系のなかで残存しない、人や植物にとって影響の少ない殺菌方法などを検討する必要があるだろう。

微細藻類培養は、各国の閉鎖隔離環境施設でもシアノバクテリア（スピルリナ）、クロレラなどの利用が検討されており、LED光源の利用や培養槽の改良により効率の向上が進められている。一部、ISSでも微細藻類の培養が進んでいるが、最適な培養システムの完成には至っていない。今後も月面などの低重力環境を想定した培養方法が検討されると考えられる。

タンパク源の生産については、昆虫食の利用も閉鎖隔離環境施設では検討されていた。植物残渣を餌として利用できる場合は、限られた資源の中からのタンパク源となりうるだろう。培養細胞は、これまでに各閉鎖隔離環境施設での活用事例はなかったが、Aleph Farmsが宇宙での牛の細胞での培養試験を進めており、今後も各国で取り組みは進んでいくと考えられる。Deep Space Food Challengeの入選チーム一覧からも、微生物からタンパク源を生産する試みも始まっていることから、宇宙での食料生産方法の一つになると考えられる。

尿処理では、水分の再生と同様に窒素成分を回収、リサイクルして、養液に活かす技術検討が行われている。有機態窒素を無機化する際の生物処理手法及び微生物種の検討、またその反応を効率化するための脱塩など前処理としての物理化学的手法の組み合わせ及び開発が求められる。尿処理水を使った植物栽培の調整や最適化は十分な検討がなされているとは言えないため今後の研究開発要素となりうる。

植物非可食部の処理方法は、Space Science and Technology Institute (Shenzhen)とCEEFは燃焼処理を利用しており分解率が他の施設に比べて高かった。しかしながら、宇宙での燃焼処理が利用可能かどうか考慮する必要があるだろう。

現状は、各施設にて微生物処理と熱化学処理の組み合わせでの処理が資源再生の候補手法として絞り込まれている。微生物処理はメタン発酵と生物酸化が、熱化学処理は湿式酸化が代表的である。前者は主に生ごみや下水処理の、また、後者は主に有機廃液処理の、それぞれ異なる分野で発達してきた経緯もあり、廃棄物などからの無機化肥料を得る方が、もともと存在しない環境では、リスクの少ないと考えられる。前述の有機肥料の利用についてのリスクを考えた場合には、資源再生による無機肥料を得るアプローチが良いのではないだろうか。閉鎖隔離環境施設によっては、植物非可食部を昆虫の餌とし、タンパク源としていた。通常の微生物処理を進める前に昆虫でのタンパク源の生産を行い、資源を有効に利用していく方法も今後、検討に入れる必要があると考えられる。

### 3.3.4 調査により判明した研究/技術に関する基礎実証

#### 3.3.4.1 高等植物の低圧栽培に関する基礎実証

品種は、矮性品種の矮稻C（農業生物資源ジーンバンクより分譲）を用い、人工気象室で育成した。育苗期（播種～21日目）の栽培環境条件は、光合成有効光量子束密度（PPFD）350  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、明期 16 h、気温 27°C、相対湿度 80 %、CO<sub>2</sub>濃度 500 ppm とした。21日目以降の栽培環境条件は、PPFD 350  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、明期 12 h、気温 27°C、相対湿度 70 %、CO<sub>2</sub>濃度 500 ppm とした。

低圧の試験区は全圧 30 kPaとし、O<sub>2</sub>分圧を6 kPa、9 kPa、12 kPaとする、30/6区、30/9区、30/12区の3試験区とした。対照区は全圧101 kPa、O<sub>2</sub>分圧21 kPaとする101/21区を設定した。また、CO<sub>2</sub>分圧、H<sub>2</sub>O分圧はそれぞれ50 Pa、2.9 kPaで一定に制御した。

30/6区のO<sub>2</sub>分圧は6 kPaであり、これは常圧の空気をそのまま0.3気圧に低下させた状態に等しい。30/9区と30/12区は、30/6区のO<sub>2</sub>分圧が6 kPaであると酸素欠乏や低酸素障害が発生する可能性があるため、それと比較するために設けた。

#### 【結果と考察①：花粉形成試験】

播種後約65日目の株を用いて下記の試験を行った。

低圧処理は、穂の葉耳間長が0の状態を確認した日に処理を開始し、出穂を確認するまで行った。試験株数は4株とした。その後、即座に、穂の花粉粒数を調査した。ワセリンを塗ったプレパラートを用意し、その上で葯を破壊し、花粉を付着させた。花粉にはでんぷんが含まれるため、エオシンを用いて染色したのち、生物顕微鏡を用いて計測を行った。また、低圧下でのイネの環境応答と花成誘導時期に関する遺伝子発現を予備的に調べた。

各試験区の花粉粒数はおよそ700-800粒であった（図3.3.4.1-1）。本品種は常圧下で栽培する場合、花粉粒数が700粒前後で、稔実率が90%近くを示す品種である。低圧区の花粉粒数は、対照区と有意な差はなく、全圧30 kPa下において、6～12 kPaのO<sub>2</sub>分圧はイネの花粉形成に大きな影響を及ぼさない可能性が考えられた。実施者らは既往研究で、全圧30 kPa下において、光合成速度に試験区間で差が無いことを明らかにしている。そのため、低圧下でも花粉形成に必要な光合成産物は十分であったことが花粉粒数に有意差がない理由として考えられた。しかし、出穂後に常圧に戻して育成したところ、低圧処理を行った全区で開花後の葯の裂開が不十分なものが対照区よりも多く確認されたため、開花が低圧の影響を受ける可能性が示唆された。遺伝子発現については特徴的な結果は得られなかった。

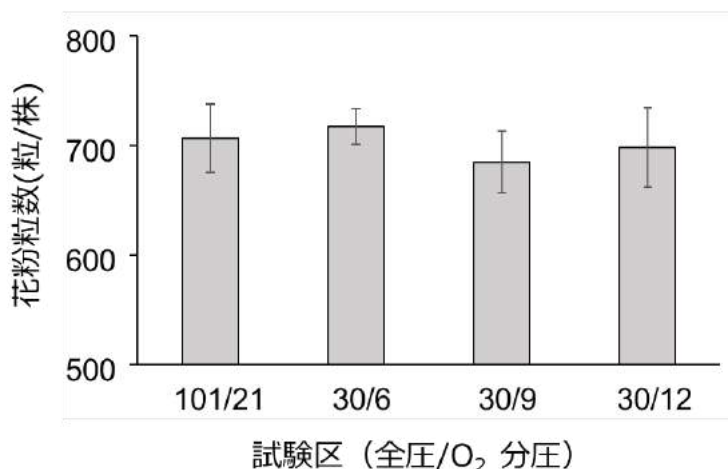


図3.3.4.1-1 低圧下における株あたりの花粉粒数 (n=12)

#### 【結果と考察②：花種子の稔実試験】

低圧および低酸素分圧がイネの受精に及ぼす影響を調査した。試験株数は4株とした。低圧処理は出穂を確認した日に開始し、20日間行った。20日目に、草丈、茎数、穂数、穂の生体重、葉と茎の生体重および乾物重、葉面積、籾数、稔実籾数、不稔籾数を測定した。

出穂後、20日間、全圧を30 kPa 下で育成したイネの成長は、対照区と大きな違いは無かった(表3.3.4.1-1)。葉(葉身)と茎(葉鞘)の重量および両者比は、試験区間で有意差は見られなかった。籾数と稔実率に有意差はなかったが、全圧30 kPa/O<sub>2</sub>分圧6 kPaの区の稔実率は対照区に比べて小さい傾向を示した。秋田(1980)は水稻‘短銀坊主’において、常圧下で2% (2 kPa)以上のO<sub>2</sub>濃度があれば、柱頭上において花粉は発芽するとしている。しかし、受粉花粉発芽の段階以降の花柱中における花粉管の伸長、受精過程あるいは受精後の胚乳の発育段階において、3 kPaの低O<sub>2</sub>濃度は稔実を阻害することを示した。また、日中開花する水稻の穂を日中のみ低酸素下に置いた場合、不稔が確認されたのに対し、夜間のみ低酸素下においても、不稔は見られなかったとしている。他方、本試験ではO<sub>2</sub>分圧は6 kPa以上に維持したため、低酸素の影響は受けなかったと考えられた。

表3.3.4.1-1 低圧下における出穂後20日間の生育 (n=4)

		試験区 (全圧/O <sub>2</sub> 分圧, kPa)		
		Cont	30/6	30/9
草丈	[cm]	45.6	43.7	43.7
穂数	[本]	13.3	12.3	12.0
葉生体重	[g]	19.3	18.0	18.3
茎生体重	[g]	43.6	42.6	42.9
地上部乾物率	[%]	23.2	24.2	23.2
葉面積	[cm <sup>2</sup> ]	1,150	1,089	1,113
籾数	[粒]	355	323	324
稔実率	[%]	83.4	76.1	-

以上の結果、低圧下における出穂後20日間の生育 (n=4) 以上の結果から、全圧30 kPa下において、O<sub>2</sub>分圧が6 kPa以上あれば、イネの花粉形成および種子の稔実は十分に行われると考えられた。今後はさらに種子成長の後半である種子の登熟について調べる必要がある。

### 3.3.4.2 高等植物の変異体の栽培に関する基礎実証

【結果と考察①：イネ】

- (1) 赤青型LEDパネルを用いると、イネは相当に矮化して着籾数や稔実率も低くなり、正常な生育形態を示さなかった。太陽光型LEDパネル下では、蛍光灯型人工気象器と類似した形態を示し、種子も問題なく収穫できた。以上より、イネの育成に関しては太陽光型の波長分布を示すLEDが適していると判断された。
- (2) 最大光量に設定した人工気象器で日本晴を栽培したところ、培土栽培 (Midorikawa K et al., 2014)、水耕栽培 (Kuroda M et al., 2015) いずれの場合も、LED型人工気象器では草丈の伸長抑制、葉の退色と枯れ上がり、植物体の枯死が多発して正常な生育形態を示さなかった(図3.3.4.2-1)。光量を50%に低減させることで、多くの個体で種子の収穫まで到達できたが、依然として葉の退色と枯れ上がりが発生した。これらの結果から、LED型人工気象器で系統育成を行うためには、さらなる栽培条件検討が必要と考えられた。
- (3) 明期12時間の短日条件に設定した蛍光灯型人工気象器で栽培すると、北陸100号とキヌヒカリの草丈はコシヒカリより20%以上低くなった。また北海道の2品種も、コシヒカリより20%以上低い草丈となった。
- (4) 明期15時間の長日条件に設定した人工気象器で栽培すると、LED型・蛍光灯型いずれの場合も、北海道の2品種は移植後7週間以内に出穂したが、他の品種の出穂はそこからさらに5週間

以上を要した。これらの結果から、北海道品種は長時間光照射への適応性に優れることが確認された。

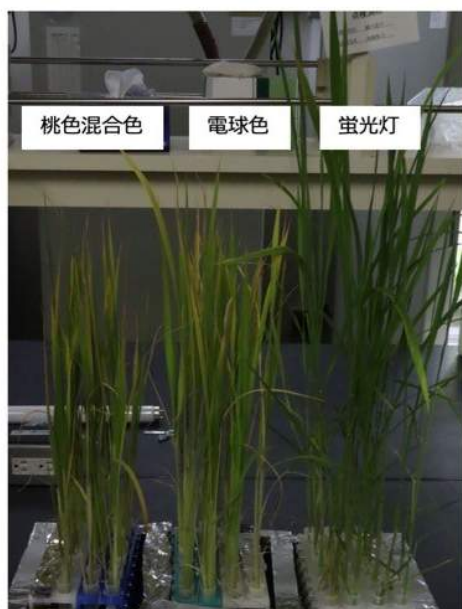


図3.3.4.2-1 LED型および蛍光灯型の人工気象器における水耕栽培イネの生育比較

【結果と考察②：ダイズ】

1) LED光のB/R比と光の強さによるダイズの反応

LED光のB/R比増加に伴い、ダイズの主茎長が低下する傾向が見られ、B/R比が0.6以上（LED条件3-5）で、0.4以下（LED条件1と2）より主茎長が有意に低かった（図3.3.4.2-2）。同じB/R比で光の強さが異なるLED条件4と5の間では、有意差が見られなかった。この結果から、光の強さより、B/R比の方が主茎長への影響が大きいと考えられた。また、B/Rが0.6以上の場合、葉縮の症状が現れた（図3.3.4.2-3）。いずれの条件下でも開花までの日数は同じ（29日間）であり、5～6粒/個体の種子が採種できた。これらのことから、LED条件1と2、37mm×37mm×35mmの連結ポットの栽培で、多数の系統・品種から矮性の変異体の効率的なスクリーニングが可能だと考えられる。

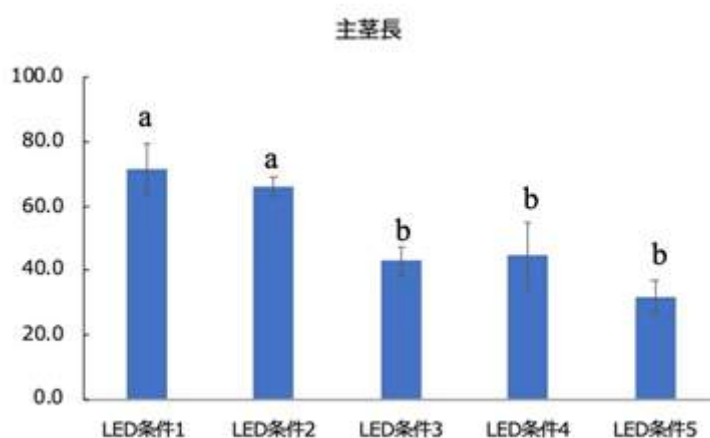


図3.3.4.2-2 異なるLED条件下でダイズ品種「エンレイ」粒肥大盛期の主茎長(cm)。条件1～5において、PPFDはそれぞれ865、431、770、542と1,105であり、B/R比では、0.1、0.4、0.6、0.7と0.7である。



図3.3.4.2-3 LED条件5下での明瞭な縮葉の症状

## 2) LED照明下でのダイズ矮性変異体の栽培特性

汎用的な人工気象器におけるLED照明のタイプのうち、上記1)の結果から正常な生育が期待される範囲のスペクトルを持つ電球色LED (B/R比: 0.3、PPFD:  $529.8\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) の照明下で、ダイズ品種「エンレイ」とその矮性変異体DWの栽培特性を調査した結果、「エンレイ」は徒長し収穫期に119cmに達したが、矮性変異体DWでは徒長せず、収穫期にわずか42cmであった(図3.3.4.2-4)。その他の形質については、分枝数はほぼ変わらず、莢数/個体と粒数/個体はある程度減少したが、有意差は認められなかった。これらのことから、矮性変異体DWは宇宙空間で想定される限られた空間での栽培に適した形質を持つと考えられた。

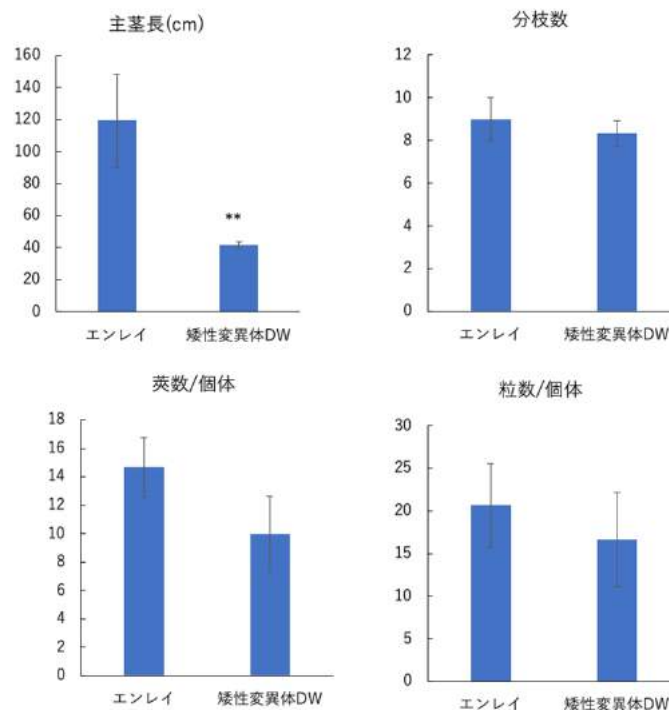


図3.3.4.2-4 電球色LED照明下でのダイズ品種「エンレイ」とその矮性変異体DWの栽培特性

\*\* : スチューデントのt検定で、0.01水準で有意差があることを示す。

## 3.3.4.3 微細藻類の培養に関する基礎実証

### 【結果と考察①：LED機器選定と試用】

植物工場等で利用される6種のLED機器を調達した(表3.3.4.3-1)。



表3.3.4.3-1 調達したLED機器

	メーカー	調達場所		調達価格 (円/個)
①	Smarup	Amazon	1200W LED植物育成ライト	9,000
②	Tledtech	Amazon	LED植物育成灯 室内栽培ランプ 1000W 8000LM	7,000
③	Greensindoor	Amazon	植物育成ライト led 育成用ライト	3,300
④	Nilipal	Amazon	Aokyong 植物育成ライト LED 光合成ライト 1000W	12,000
⑤	Neewer	Amazon	調光可能2色LEDプロビデオライト	4,700
⑥	大日本印刷	貸与	フレキシブルLEDシート	-

調達したLED機器の仕様と特徴は表3.3.4.3-2の通り。

表3.3.4.3-2 各LED機器の仕様と特徴

	メーカー	寸法	最大電力 (W)	10cm位置光量 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ )	電力当たりの光量	調光
①	Smarup	40 cm × 21 cm × 6cm	135	1,600	11.9	不可
②	Tledtech	31 cm × 21 cm × 5cm	111	2,200	19.8	可
③	Greensindoor	30 cm × 30 cm × 0.5cm	33	400	12.1	不可
④	Nilipal	30 cm × 24 cm × 1cm	112	2,500	22.3 (※)	可
⑤	Neewer	20 cm × 20 cm × 2cm	31	800	25.8	可
⑥	大日本印刷	39 cm × 56 cm × 0.3cm	37	330	8.9	不可

※ 4\_NilipalのLEDは背面の調光用のユニットを外した場合の寸法 (最小ユニットの場合)

※ 4\_NilipalのLEDは光量を絞った際の電力当たりの光量は26.3となる

⑥のフレキシブルLEDシートのみ形状が柔軟・軽量であったが、他は板にLED素子を張り付けた形態であった。①、②はさらに冷却用のファンが内蔵されていた。それぞれのLED機器の発するスペクトルは、青・赤を中心としたもの (①~③) と、緑色を含む白色光のもの (④~⑥) 2種類が存在した (図3.3.4.3-1)。緑色光は、基本的には光合成に使われにくいとされてきたが、高等植物においても光の当たりにくい奥の葉緑体にも供給しやすく光合成にも一定の寄与があるとされる (文献1)。また、白色光の方がLEDとしての発光の効率が高く、工場で勤務する人の目にも優しいということもあり、近年は植物工場での採用例も多い様子であった。藻類培養においても、緑色光は培養槽表面の細胞に吸収されず、培養槽深い部分に届きやすい可能性があり、バイオマス生産性の上でも好適効果をもたらすことが期待できる。

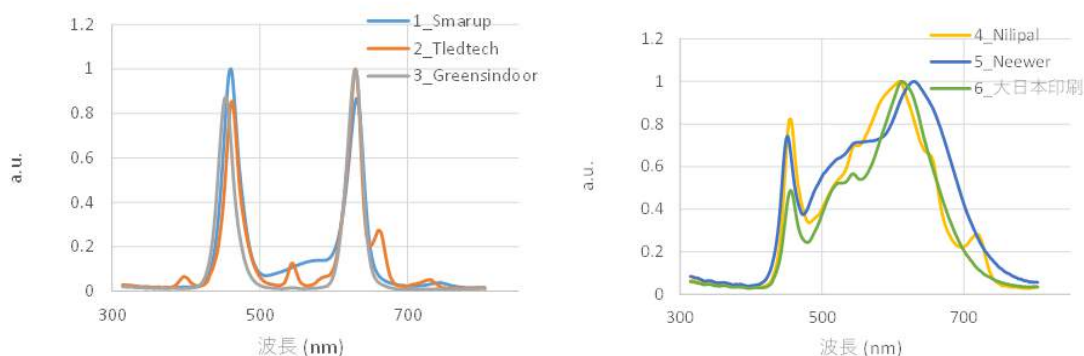


図3.3.4.3-1 各種LED装置の照射スペクトル

調達したLED機器を用いて微細藻類が増殖可能であることを確認するために、①、及び③を用いて*Euglena gracilis* Z株の培養を試みた（図3.3.4.3-2）。

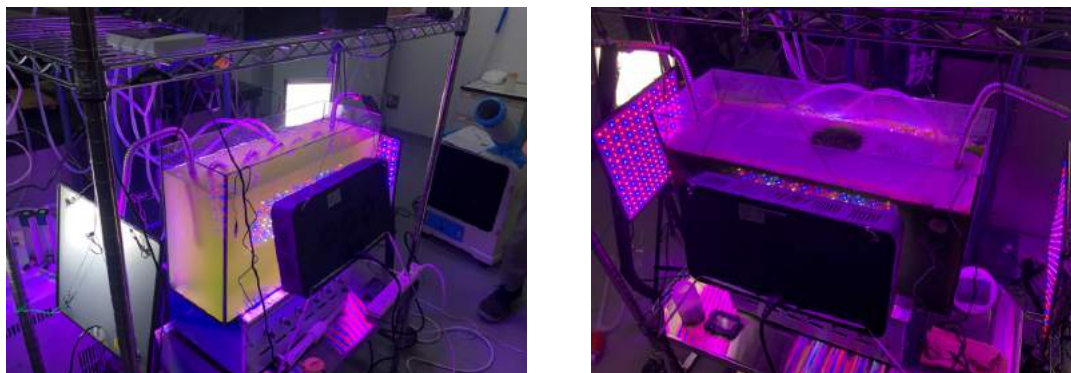


図3.3.4.3-2 調達したLED機器を用いた試験的培養の様子（左：培養開始時、右：培養終了時）

培養液を冷やさずに、室温（～26℃）にて培養を継続した結果、光源から発生した熱により33℃まで水温が上昇した。スポットクーラー、及び冷却水を循環させるチラーで冷やすことで水温を27℃に安定させてから増殖が速くなり、最大で1日当たりの $\lambda=860$  nmでの吸光度（OD860）としての値の増加が0.46となった（図3.3.4.3-3）。

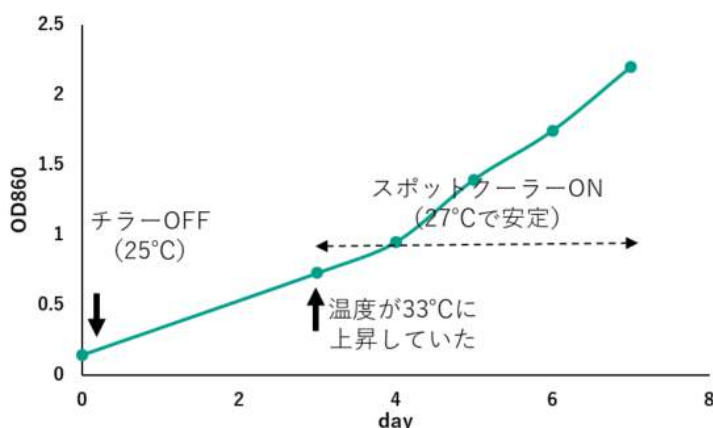


図3.3.4.3-3 LED機器を用いた試験培養での細胞の増殖曲線

最大出力光量は④が一番高く、より近い位置から測定するとPPFDで4,000  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 程度の値が計測された。これは、太陽光から得られる地上での自然環境下での光量の2倍程度にあたり、性能としては過剰であるが、下記の4点が追加で優れていると判断した。

- 調光機能を利用し随時必要な光量に合わせられる
- 多様なサイズが用意されており、平面状に連結可能
- 背面に固定された電流調節器を取り外して集中管理可能
- 背面に固定された電流調節器を外すと、他の薄型LEDと同様に薄く軽い
- 消費電力当たりの光量が優れている

フレキシブルLEDシート（⑥）は、軽量で柔軟である点が優れているが、そもそも吊り下げるために何らかの板に張り付ける必要があり、平板型アクリル培養槽に対しては十分に利点が発揮できない。円筒形の培養槽などの場合には有効となる可能性がある。

以上の結果から、④のLED機器が平板型アクリル培養槽での実証試験をする上で最適であると結論した。同じ製品を3枚利用することで、LED機器で側面50 cm×1 mの平板型アクリル培養槽全体に照射するLEDを組み上げることが可能であり（図3.3.4.3-4）、当該セッティングでの消費電力は800と1,200  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ （50 cm x 30 cm LED板3枚）の調光時でそれぞれ108 W

と160 Wであった。



図3.3.4.3-4 ④のLEDを利用した平板型アクリル培養槽用の光源

#### 【結果と考察②：地上での実証試験のための培養槽試作】

微細藻類培養において沈殿を防ぐ際には、水流によって舞い上げることが必要となる。底浅の培養槽の場合には、底面からのマグネティックスターラーによる攪拌などが可能であり、また円筒形の培養槽であれば攪拌翼での効率的な攪拌も可能である。一方で、平板型の培養槽においては、縦長の形状を設定し、底面からの曝気により、沈みにくい水流を形成させることが効果的と考えた。微細藻類培養においては、光合成のための二酸化炭素供給が必須であり、このための曝気により生じる水流を利用することが可能である。中央からの曝気による水流が角で阻害されないように、底面に斜面を設けた形態を考案し試作した(図3.3.4.3-5, 6)。なお、下部に試験的に培養液を抜くための穴をあけ、ねじ込み配管を接続した。

検討した前面板サイズ(幅50 cm、高さ1 m)で、内側の奥行が15 cmと10 cmの2種類の容量(75 Lと45 L容量)のアクリル培養槽の形状を検討した。それぞれの培養槽を試作し、中心下部からエアーストーンにて2 L/minで曝気したところ、想定通りの水流の生成が確認された。一方で、内側の奥行が15 cmのものは10 cmのものとは比べ、水流の制御がやや難しく、手前側と奥側で均一に水流が形成されにくい可能性が示唆され、高密度の微細藻類培養での光量減衰を考慮して、内側奥行は10 cmの形態の方が適すると結論した。

アクリル厚 1 cmで作製した培養槽は、水を満たした際に中央部分が水圧で膨れ、1 cmほど突出した(図3.3.4.3-7)。一方で1.5 cmで作製した培養槽は、水を満たしても大きく膨れることはなかった(図3.3.4.3-8)。このため、1×g重力下での平板型アクリル培養槽を用いた培養試験においては、1.5 cm厚のアクリル板を用いて培養槽を作製するのが適切とわかった。

照明は、手法1で作製した④Nilipal社のLED機器を3枚連結したものを利用し、エレクターシェルフを用いて培養槽から1 cm程度離れた前後につるした。温度調整は、水道用フレキ管を水槽内に通し、冷却水循環装置を用いて任意の温度の冷却水を流すことでLED機器からの発熱を相殺するのに十分であることを確認した。最終的なセッティングは図3.3.4.3-9の通り。

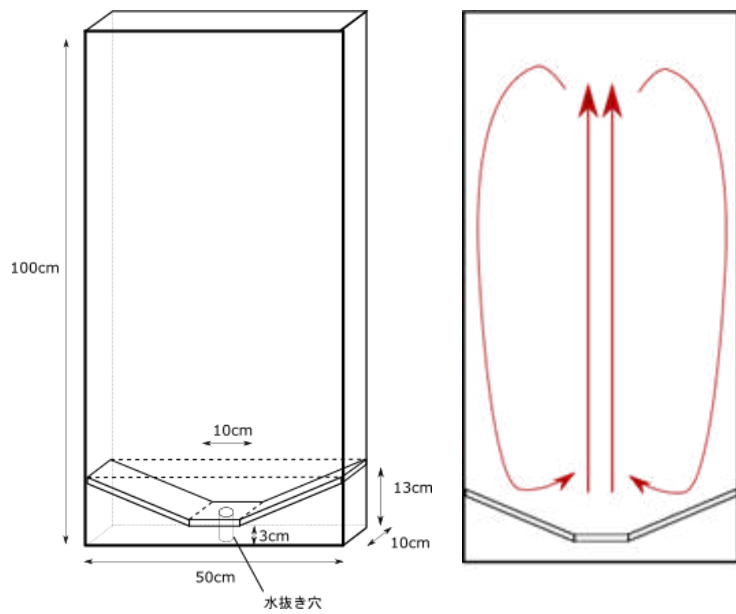


図3.3.4.3-5 アクリル培養槽の設計



図3.3.4.3-6 試作品外観



図3.3.4.3-7 注水した培養槽（1 cm厚）



図3.3.4.3-8 注水した培養槽（1.5 cm厚）

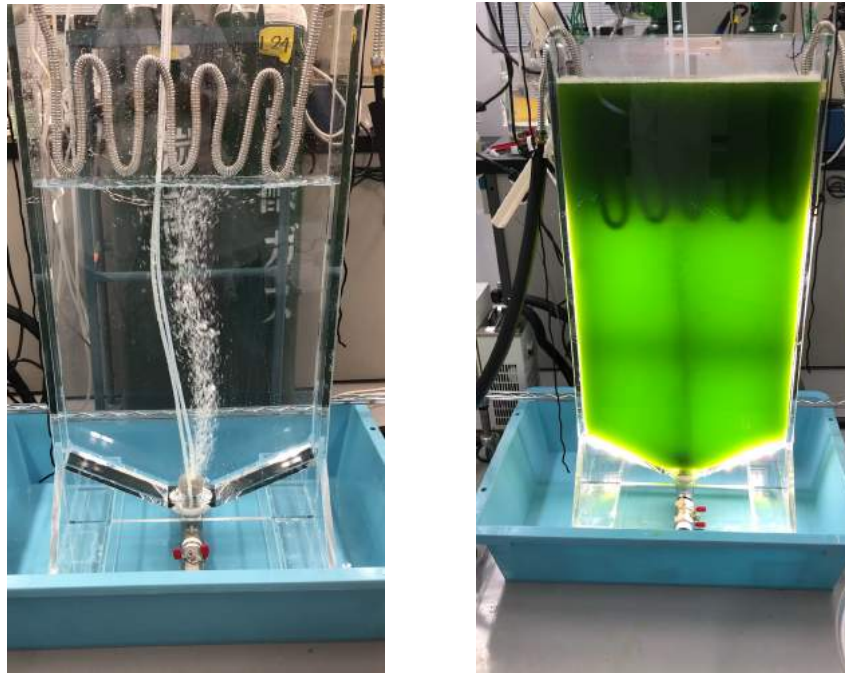


図3.3.4.3-9 培養装置の最終的な外観

**【結果と考察③：試作した培養槽での生産性の予測】**

US Department of Energyが過去にアメリカでの屋外培養の年間目標として設定した値が25 dry-g/m<sup>2</sup>/dayあることから理解できるように、PPFDでの光量 1,000~3,000 μmol/m<sup>2</sup>s程度の日中の光照射が期待される条件での屋外の池型培養槽での微細藻類のバイオマス生産性は一般的に20~30 dry-g/m<sup>2</sup>/dayが実践的な上限となる。実際に、アメリカでの夏場の屋外培養（日中最大PPFD 1,600 μmol/m<sup>2</sup>sの照射）において*Chlorella sorokiniana*の培養で19.9 g/m<sup>2</sup>/dayでの増殖が示されている（文献2）。

本実証で用いている*E. gracilis*も屋外での培養試験で同等の増殖性能を示す。メタルハライドランプを光源として用い、側面を遮光した底面10 cm×10 cm、高さ25 cmの角形ビーカーを用いて20 cm水深にて培養試験を実施した際（図3.3.4.3-10）には、PPFD 2,400 μmol/m<sup>2</sup>sにて24時間人工光を照射した場合に、およそ50 dry-g/m<sup>2</sup>/dayの増加率を達成した実績がある。仮に、照射光が全て有効に光合成に利用され、5 cm、もしくは10 cm水深で同様に照射光量に依存した増殖をすると仮定すると、それぞれ表3.3.4.3-3の増殖率を示すこととなる。

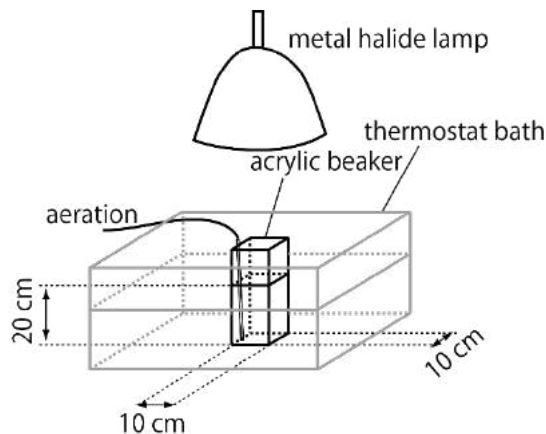


図3.3.4.3-10 角形ビーカーを用いた培養装置

表3.3.4.3-3 池型培養槽における24時間光照射での生産性予測

水深 (cm)	単位体積当たりの増殖 (dry-g/L/day)	単位面積当たりの増殖 (dry-g/m <sup>2</sup> /day)
20	0.25	50
10	0.5	50
5	1.0	50

実際には、過剰な光を照射することにより、培養している微細藻類の増殖が阻害されることが知られ（文献3）、作製した培養槽に対して照射できる光量は、これにより制限される可能性がある。仮に内側の奥行きが10 cmで、光量800 $\mu$ mol/m<sup>2</sup>sで両側から照射したと仮定した際の生産性は、表3.3.4.3-3の5 cm水深の場合の増殖性（1.0 dry-g/L/day）及び、光量を考慮した下記計算式より0.33 dry-g/L/day程度と予想される。

$$1.0 \times 800/2400 = 0.33 \text{ dry-g/L/day}$$

【結果と考察①】の表3.3.4.3-2にあったLED機器④の電力当たりの発生光量は22.3であった。このことから、800 $\mu$ mol/m<sup>2</sup>sの光量を出力する際の消費電力は、試作培養槽両面で6枚を使用した場合、下記計算式より215W程度となることが予想される。

$$800 / 22.3 = 215 \text{ W}$$

このとき、1日照射時に消費される電力合計は下記計算式により18.6 MJとなる。

$$215 \times 60 \times 60 \times 24 / 10^6 = 18.6 \text{ MJ/day}$$

培養槽容積が約45Lであるため、生産されるバイオマス量は14.9 dry-gと試算され、バイオマス生産に対するエネルギー利用効率は下記計算より0.73 g/MJとなる。

$$0.33 \text{ dry-g/L} \times 45 \text{ L} = 14.9 \text{ dry-g}$$

$$14.9 \text{ dry-g} / 18.6 \text{ MJ} = 0.80 \text{ g/MJ}$$

さらに、培養槽に照射した光を無駄なく光合成に利用できたと仮定した場合の理論的バイオマス生産性の上限と、その際のエネルギー利用効率を試算する。

上記条件で1日に照射している光量子数は下記計算式により69 mol程度である。

$$800 \mu\text{mol/m}^2\text{s} \times 0.5 \text{ m}^2 \times 2 \times 60 \times 60 \times 24 / 10^6 = 69 \text{ mol}$$

上記光量子の緑色光も含めて光合成利用できるとし、CO<sub>2</sub>分子1つを還元するために8個の光量子が必要であることと、可視光の吸収率と、吸収後の熱放散によるエネルギー散逸を考慮した最大量子収率を合わせて0.8程度と仮定すると、下記計算式から還元されるCO<sub>2</sub>分子の個数は1日当たり6.9 mol程度となる。

$$69 \text{ mol} / 8 \times 0.8 = 6.9 \text{ mol}$$

生成したバイオマス乾燥重量の60%が炭素で構成されると仮定した場合、このとき増加するバイオマス量は下記計算より49.7 dry-gである。

$$6.9 \times 12 \times 0.6 = 49.7 \text{ dry-g}$$

培養槽の容積が45Lであるため、増殖の理論上限は（両面から800 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ で光照射した場合）下記計算式により、1.1 dry-g/L/dayとなる。

$$49.7 \text{ dry-g} / 45 \text{ L} = 1.1 \text{ dry-g/L/day}$$

またその際の、バイオマス生産に対するエネルギー利用効率は下記計算より2.7 g/MJ（理論上限）となる。

$$49.7 \text{ dry-g} / 18.6 \text{ MJ} = 2.7 \text{ g/MJ}$$

以上の試作培養槽に対する800  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 照射時のバイオマス生産性の試算を表3.3.4.3-4にまとめる。

表3.3.4.3-4 試作培養槽でのバイオマス生産性試算(800  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 照射時)

	池型培養槽のデータによる推定	理論上限
バイオマス生産性 (dry-g/L/day)	0.33	1.1
エネルギー利用効率 (dry-g/MJ)	0.80	2.7

#### 【結果と考察④：試作培養槽を用いた生産性の実証】

試作機での培養の様子と、測定した増殖結果は図3.3.4.3-11の通りである。本培養試験においては、光が増殖上限を律速しないよう、LED光の出力強め（片面 $\sim 3000 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ ）で照射して培養を試みた。途中まで順調に増殖したが、3日目で細胞が白化し死に始め、増殖が停滞することが確認された。*E. gracilis*は図3.3.4.3-10にあるような培養装置では、試験した細胞濃度において、これまで強光による増殖阻害は確認できていなかったが、自然環境ではあり得ない光量での照射により、強光阻害に類する影響が生じることが確認された。

さらに培養3日目において、培地中の窒素源となるアンモニウムイオン濃度を測定したところ、1.64 mg/Lであり、CM3.5培地中に含まれるアンモニア269 mg/Lのほとんどが消費されていたことがわかった。このため、培養3日目に、硫酸アンモニウムを24.2 g追加した上で、光量を片面800  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ 程度に下げたところ、翌日以降、細胞が再び緑化し増加を開始し、4日目から5日目の間では0.22 dry-g/L/dayの乾燥重量の増加が観測された。3日目時点での培養液中の細胞の乾燥重量は測定できていなかったが、5日目の吸光度（OD860）と藻体乾燥重量を指標に3日目の乾燥重量は2.20 g/Lと試算でき、これを基に3～5日目の藻体の乾燥重量の増加分を計算すると0.38 dry-g/L/dayと試算された。この結果は【結果と考察③】において予想されたバイオマス生産性に近い値であり、製作した培養槽が期待通りの生産性を達成できる可能性を示す。また、片面800 $\sim 3,000 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ の間に、この濃度域で*E. gracilis*を培養する際の最適な光量があることが示唆され、最適な細胞濃度と光量の関係を決定することにより、さらに高いバイオマス生産性を達成できると期待できる。

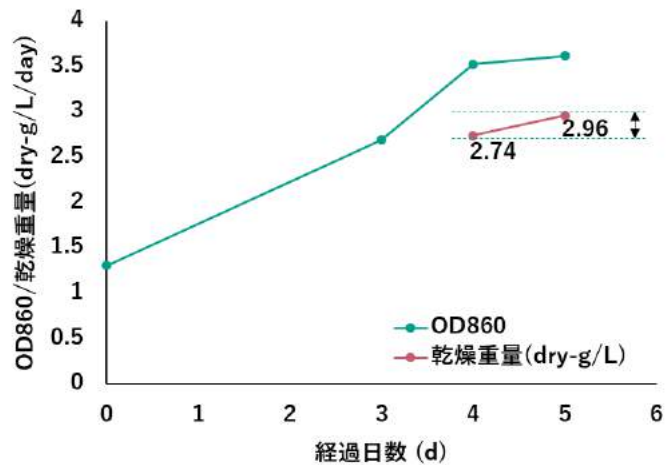
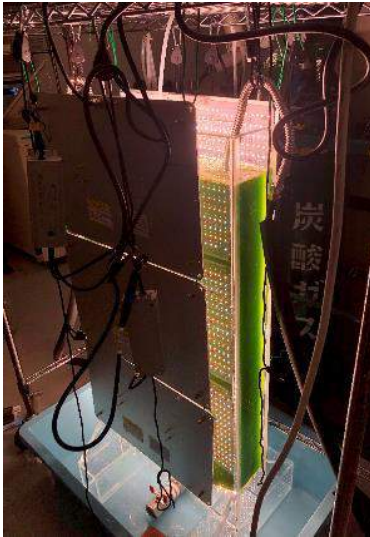


図3.3.4.3-11 培養の様子（左）と測定値（右）

### 【全体の結果・考察】

一連の試験を通して、平板型培養槽の生産性を地上において実証するための装置を仕様決定・試作した。実際に代表的な微細藻類の一種である*E. gracilis*を培養することで、池型培養槽での過去の培養試験から予想された値と同等の増殖を示すことを実証し、今回試作した平板型培養槽が理論通りの生産性を確保できる形態であることを実証した。低重力環境では、さらに高さがある培養槽を実践的に利用することができる可能性があるが、その場合も、奥行（培養槽の厚み）が同等であれば、本試験において製作した培養槽と同様の増殖を示すことが期待できる。

試作した平板型培養槽の形状は、底面に斜度を付加することにより攪拌を促進する工夫を施した。文献3.2.3.3-2のような複雑な内部構造を設けることで、底面への細胞の沈殿を最小限に押さえることも可能と考えられるが、バイオマス生産性は、基本的には利用する藻類株、及び光量で規定されるため、大きくは変化しないと考えられる。内部に整流板を設置することで、細胞の沈殿をさらに減少させることができる可能性があるが、最適化のためには曝気量や培養槽の高さ、重力などの影響も考慮する必要があり、流体シミュレーションで完結させることが効率がよい。また、実践的には、型枠にプラスチックバックをはめた形態での培養を目指すことにより、整流版の設置が困難な可能性もあるため、現状の形態での地上試験を優先し、内部構造の改良検討は先の課題とすることが妥当と考えられる。

今回の試験では食品利用される代表的微細藻類として、*E. gracilis*の培養を実施するに留まったが、他の微細藻類種でも同様に培養実施可能と考えられ、それぞれの生産性を本試作機で検討比較可能となる。文献3.2.3.3-2において、培養の自動化が月面等での藻類培養の実践的な利用のための課題の一つとして挙げられているが、本試作機は内部に空間的余裕が残るため、自動化のための改良が容易となる。センサー類や自動洗浄装置、自動収穫装置などを増設し、培養の自動化率を上げていくことが可能であり、これらも次の課題となる。

### 3.3.4.4 資源再生手法に関する基礎実証

メタン発酵や生物酸化では働く微生物群集の構造が異なっており、有機物負荷（生物処理液あたりの有機物投入量）はメタン発酵で生物酸化よりも高いことが知られている。本基礎実証では、予備実験を行うことで、それぞれの微生物処理に適した有機物負荷をあらかじめ求めた。その結果、メタン発酵の検証では処理液:モデル生ごみの投入容積比が24:1の割合になるように調節した。メタン発酵・生物酸化では、上記の投入比でメタン発酵した液を水で3倍に希釈し、生物酸化液:希釈処理液の容積比が4.5:1の割合を用いた。生物酸化の容積比は予備実験で試行錯誤的に探索し、最終的に生物酸化液:希釈処理液の容積比が4:0.2の割合を用いた。

### 【結果と考察①：メタン発酵】



有機物の分解程度をメタン発酵で生成するバイオガス生成量から求めたところ、モデル生ごみを利用した有機物分解に要する時間は30日程度を要することが確認できた（図3.3.4.4-1A）。また、有機物分解は実験開始後10日までに終わる比較的早い分解過程と、10日以降に行われる遅い分解過程に分かれることもわかった（図3.3.4.4-1B）。これは、モデル生ごみ中に含まれる有機物に、易分解性のものと難分解性のものが含まれるためと考えられる。過去の知見により、メタン発酵では、繊維質の成分が分解されにくいことがわかっており（文献1）、植物の木部を構成するリグニン、セルロース、ヘミセルロースの結合物は難分解構造の代表例である。セルロースやヘミセルロースは個別には生分解可能であることから、有機性廃棄物を微生物で処理する前に、細断などの物理処理や、酸などの化学処理で、繊維の構造を破壊する前処理を行うことが有効であることが示唆された。

CODを指標とした有機物分解率の測定を行い、他国の論文等で報告されている文献値（90%程度、例えば文献2）が達成しうることを確認した。また、窒素、リン、カリウムの資源回収率の測定を行い、リンの多くが沈殿態として存在する傾向があることを確認した。

メタン発酵の発酵液（消化液）は固相の沈殿性が低く、色は全体に黒かった（図3.3.4.4-2）。中空糸膜による固液分離では、他の処理液より早く膜が詰まる傾向がみられた。

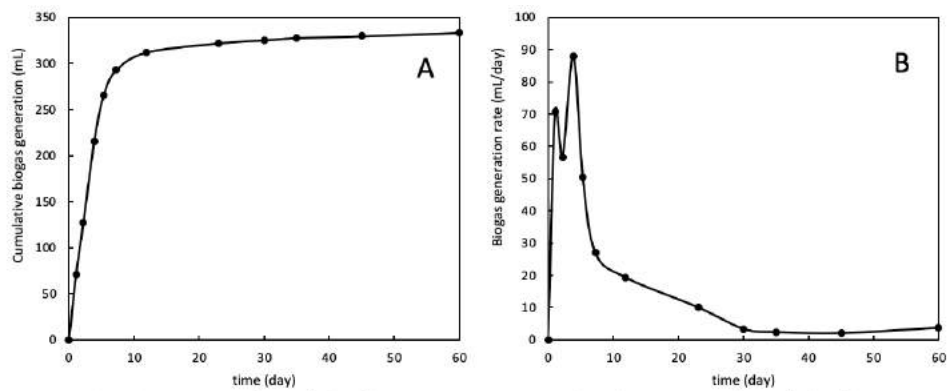


図3.3.4.4-1 メタン発酵におけるバイオガス生成蓄積量（A）および生成速度（B）の推移

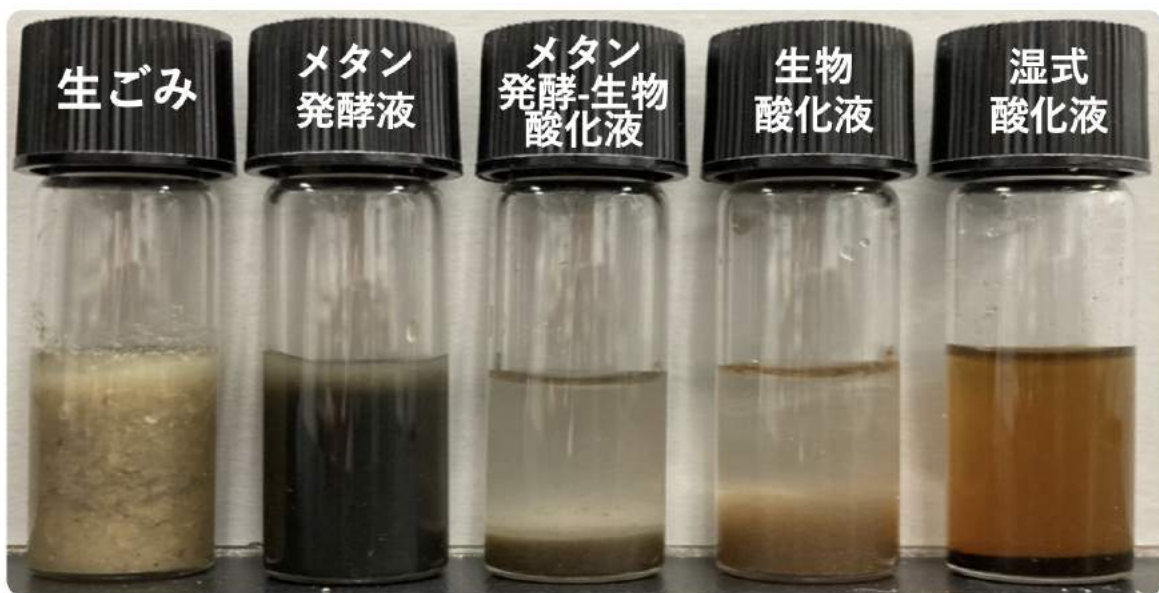


図3.3.4.4-2 モデル生ごみ、メタン発酵液、メタン発酵-生物酸化液、生物酸化液、湿式酸化液の性状

#### 【結果と考察②：生物酸化】

生物酸化による食品残渣処理のための基礎実験を実施した。好氣的処理の生物酸化では投入有機物負荷が小さいため（文献3）、一度に少量のモデル生ごみしか処理できなかった。また、食品残渣の成分が培養液よりも好氣的微生物に奪われる割合が多くなることを確認した。これについては、運転条件をいくつか変えても同様であった。

CODを指標とした有機物の分解率は、メタン発酵同様90%程度であった。窒素、リン、カリウムの資源回収率の測定を行ったところ、pHが高くリンの回収が低くなることがわかった。生物酸化槽では硝化反応が植物栄養塩転換反応として重要であるが、これを行う硝化細菌群は高い有機物負荷あるいはC/N比の大きい有機物に対する耐性が低いことが知られている（文献4）。高濃度の有機性廃棄物を生物酸化で直接処理する場合は、希釈処理を行ったり、前処理を行って有機物中の炭素をある程度放出してから処理することが有用である可能性が確認できた。もっとも、操作可能な環境条件は他にも多くあり、他の運転条件を用いた今後の検証も必要であると判断した。

生物酸化した後の液（生物酸化液）は、メタン発酵消化液よりも固液の分離性が高かった（図3.3.4.4-2）。一方で、沈降汚泥の量が後述のメタン発酵・生物酸化よりも多く、このことから有機性廃棄物を直接好氣的に微生物処理することの難易度の高さが裏付けられた。

#### 【結果と考察③：メタン発酵・生物酸化】

モデル生ごみをメタン発酵したものを、さらに生物酸化で処理したところ、有機物がさらに分解され生ごみに含まれる有機物の90%以上が分解できることがわかった。分解には回分で3日程度を要したことが、pHの推移から示唆された。pHは6強であり、養液栽培培養液として求められる弱酸性を満たしていた。なお、メタン発酵消化液のpHは7程度、生物酸化のみの処理ではpHは8程度であった。窒素・カリウム・リンの溶存化程度は3つの微生物処理で最も大きかった。これは、異なる2種類の微生物処理を行っていること、pHが低いことなどが理由として考えられるが、確定的な要因を得るためには、環境条件を様々に変化させながら測定を行う必要がある。

メタン発酵・生物酸化した後の液（メタン発酵・生物酸化液）は、もっとも固液の分離性が高かった（図3.3.4.4-2）。沈降汚泥の量も小さく、有機性廃棄物を他の試験区に比べて効果的に溶存化できていることが示唆された。

#### 【結果と考察④：湿式酸化】

200°C2時間の湿式酸化による有機物の分解程度は75%程度であった。pHは最も低く、4~5となった。窒素形態は、メタン発酵と同じくアンモニウム態窒素が多くなり、硝酸態窒素はほとんど含まなかった。モデル生ごみを湿式酸化した後の生成物には佃煮を思わせる独特の香気があり、モデル生ごみの分解過程で生成した糖とアミノ酸がメイラード反応を起こして何らかの物質が生成していることが示唆された（文献5）。未分解の有機物は液相に溶存しているものが多く、溶存性のアミノ酸・有機酸などである可能性がある。

固液分離は良好であり、また、固体沈降度が高かった（図3.3.4.4-2）。湿式酸化では、液相の着色が顕著であった。メイラード反応を起こすと低分子のメイラード色素が生成することから、これが着色の原因である可能性がある。本試験で用いた湿式酸化装置は数mLと小型であるため栽培試験は行っていないが、今後メイラード反応で生じる物質が資源回収ひいては植物栽培に及ぼす影響を明らかにする必要があると考えられる。

#### 【全体の結果・考察】

それぞれの手法について、資源再生（有機物分解ならびに植物栄養塩の回収）・反応時間ならびに装置の規模等を指標として全体的な比較を行った（表3.3.4.4-1）。有機物分解については、微生物を用いたどの手法も90%程度に達していた。さらなる数値の向上に対しては、基質に合

わせた環境条件の調節や前処理を行うことが有効であると考えられる。一点、メタン発酵での有機物分解ではメタンが生じることから、これを燃焼させてCO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oに分解させてから植物に吸収させる必要がある。この分解反応で生じるエネルギーは熱や電気に転換できるので、システム全体で有効に利活用する方法を検討するとさらなる資源再生に繋がる可能性がある。最も有機物分解率が高いのは、微生物反応を組み合わせた手法であるメタン発酵・生物酸化であった。湿式酸化では有機物分解は75%にとどまった。未分解の有機物の多くは溶存態であり、酸化温度あるいは酸化時間を調節することにより、分解率を高められる可能性がある。また、湿式酸化を有機物の前処理として用い、その後に微生物処理して栄養塩の回収性を高めることも今後検討する価値があると考えられる。

表3.3.4.4-1 それぞれの有機性廃棄物処理手法における資源再生、反応時間および装置の規模

手法	有機物分解 (分解率が高いと 高評価)	窒素の回収 (溶存度が高いと 高評価)	リンの回収 (溶存度が高いと 高評価)	反応時間 (短いと高評価)	装置容積規模 (小さいと高評 価)
メタン発酵	○	○	△	△	△
生物酸化	○	△	△	○	○
メタン発酵・生物酸化	◎	◎	○	△	△
湿式酸化	△	○	◎	◎	◎

適用可能性について高い順に◎、○、△、また、適用が不可能な場合は×で評価した（なお、適用が不可能と考えられる手法はなかったため×は未記載）。

回収した植物栄養塩については、窒素とリンいずれも処理後に液相に溶存化しており、植物に利用可能であることが確認できた。ただし、その溶存度や溶存形態は処理により異なった。メタン発酵ならびに湿式酸化では窒素形態がアンモニウム態窒素のみであり、生物酸化ならびにメタン発酵・生物酸化ではアンモニウム態窒素よりも硝酸態窒素が多くなるという特徴が見られた。生物酸化では、環境条件の制御によりアンモニウム態窒素と硝酸態窒素割合をある程度調節できる可能性があることから、栽培植物の適性に応じたデザインが行えると期待される。また、リンの回収率は処理液のpHに大きく依存しており、pHを低下させることで回収率を高められることが示唆された。

反応時間は、湿式酸化の2時間が最も短く、ついで生物酸化の3日程度、メタン発酵の30日程度、メタン発酵・生物酸化の33日程度、の順となった。好氣的微生物は有機物負荷を高められない代わりに反応速度は高く、嫌氣的微生物は有機物負荷を高められる代わりに反応速度は低いというトレードオフがあり、それをそのまま反映する結果となった。装置の容積規模は有機性廃棄物の投入速度が等しい場合、反応時間に比例する。そのため、反応時間と容積規模は微生物で同評価となった。ただし、湿式酸化は装置の容積規模は最小となるが、高温高圧に対処する設計となるため、装置の重厚度は大きくなることに注意する必要がある。

以上のように、資源再生手法にはそれぞれメリット・デメリットがあり、適用するシステムの条件に応じて柔軟に運転条件や装置をデザインする必要があると考えられる。宇宙における資源循環的な養液栽培にあたっては、現状では資源再生の好適度からメタン発酵（嫌氣的処理）・生物酸化（好氣的処理）装置が第一候補となり、宇宙での活動に対応した植物残渣や人糞尿を対象とした調査を行いつつ、これの容積規模をコンパクトにしていくことが求められる。他方、他の手法についても調査を継続して最適運用条件を明らかにしたうえで、必要に応じて手法の更新や新しい処理方法を検討していくことが今後重要になると考えられる。

## 4. まとめ

### 4.1 閉鎖隔離環境における食とQOLのマネジメントシステム構築に向けた基礎調査・実証

#### 4.1.1 調査概要

閉鎖隔離環境における食とQOLのマネジメントシステムに関連した国内外の動向を調査した結果、設備の規模や計測・モニタリング項目、チーム構成、提供する食等の多種多様な組合せの閉鎖実験が、各国や運営主体の工夫により実施されてきた。以下にその概要を記述する。

##### 4.1.1.1 閉鎖隔離施設・滞在環境

国内外には様々な閉鎖隔離環境が存在しており、その中で多様な閉鎖隔離模擬実験が実施されているが、ミッションにおける滞在期間が長くなるほど閉鎖空間の大きさ（床面積）が増大する傾向にあった。また、空間内の環境は、基本的に全ての施設において温度・湿度がクルーにとって過ごしやすいようコントロールされている。HI-SEASに関しては、視覚的にも心理的にも外部から遮断する工夫がなされているほか、クオリティの高い機材等も導入されていた。

##### 4.1.1.2 計測/モニタリング機器

個人またはチームのストレスやパフォーマンスに関しては、様々な計測手法や分析方法が開発・試行されており、閉鎖空間におけるQOL分析手法を確立するにあたっては、より考え方の近い手法を参考に独自の計測・分析手法を構築するのが適切である。一方、データの蓄積方法など課題は多くあり、今後国際的に共通した実験の枠組みや手法の構築を進める動きなど、将来的な動向も注視しつつ進めていく必要があると考えられる。

##### 4.1.1.3 チーム構成・パフォーマンス

閉鎖隔離模擬ミッションは、6名前後の滞在人数で、男女比等のバランスも考慮し実施されているケースが多い。クルーのストレス度合いや作業精度等のパフォーマンス測定に加え、チームとしてのグループダイナミクスの検証も様々な手法を用いて実施されている。一方、重大な事故やミッション中止にまで発展するケースは少ないものの、多くのミッションで対人トラブルが発生している。また意図的に事故を発生させてクルーの反応を確認するミッションもあり、いずれのミッションも将来的な宇宙探査を見据えた様々な検証方法を工夫して作り上げている。

##### 4.1.1.4 閉鎖実験における食

食に関しては、いずれのミッションにおいても重要視しており、とりわけ食に対する個々人の関わり方が非常に重要であることが強調されている。また、味・見た目・食感・栄養・栽培・食卓（を囲む人）など多様な視点での影響に関する報告があり、様々な要素がクルーへの心理面やパフォーマンスへの影響に繋がっていることが認識されている。植物栽培への関与が心理的な安定に繋がるという報告もあり、食が今後の閉鎖隔離環境におけるキーファクターであることは、ヒアリングをした研究者を含めて一致した見解であった。

#### 4.1.1.1 調査概要

#### 4.1.2 基礎実証概要

##### 4.1.2.1 仮想閉鎖空間での基礎実証

閉鎖隔離環境における将来的な観察システムの構築を想定し、その予備的な実証として仮想的な閉鎖空間において、主に市販品を用いて各種カメラ、センサーの配置や、観察・分析のための基礎データとなる画像や映像、音声データなどの情報収集と、空間内における人間の動作や状況把握に対する有効性を検証した。空間全体と食卓をスコープとする前提で、各機器の特徴、メリット/デメリットの把握と機器同士の組合せによる相性、課題等が抽出された。

##### 4.1.2.2 被災経験自治体での基礎実証

被災経験自治体である熊本県益城町にて、閉鎖隔離環境を想定したグループワークを行い、共同作業を通じたグループダイナミクスの観察手法に関して、撮影・録音機材を使用したグループワークの記録、及び空間内における人間の動作や状況把握を検証（量的検証）すると共に、アン

ケートによって被災経験に基づくフィードバック（質的検証）を得た。機材による記録データとアンケートによって抽出した参加者毎の見解を比較した結果、参加者から多様な意見を幅広く広い出すことができ、またその中に被災経験に基づくフィードバックも複数含まれていたことから、極地に類する経験者を対象とした質的検証手法について一定の有効性が確認できた。

## 4.2 高度資源循環型食料供給システム構築のための基礎調査・実証

### 4.2.1 調査概要

高度資源循環型食料供給システムに関連した国際的な技術動向を調査した結果、米国、欧州、中国、日本等で、宇宙における食料生産や資源再生を目指した研究開発や、それらに関する閉鎖実験施設を用いた実証実験等がこれまで多数実施されてきた。以下にその概要を記述する。

#### 4.2.1.1 高等植物の栽培

宇宙を想定した高等植物の栽培技術については、各国で多数の研究開発が実施されてきており、米国はISSにおける簡易栽培装置Veggieや精密栽培装置Advanced Plant Habitatの運用実績を有し、火星等における食料生産に向けたISS検証のための栽培装置Ohalo IIIの開発が進められている。今後宇宙での食料生産を見据えて、宇宙環境特有の課題解決、消費リソースの最小化、栽培作物の選定、選定された作物の収量や自動化率の最大化等について、宇宙での長期連続運転を想定した各種トレードオフを意識しながら高度化・最適化する必要があるものと考えられる。

また、宇宙の限られた栽培面積で栽培可能かつ短期間で生育する品種開発が米国等で進められてきた。米国においては交配/選抜による矮性小麦の品種開発が代表的だが、それ以外にも複数の作物で矮性品種作出の事例が見られたが、遺伝子組換えやゲノム編集等の技術活用事例は見当たらなかった。また、本調査の中では味を重要視する記述が見られず、良食味の品種が選抜されていない可能性がある。

さらに、地球からの補給量削減の観点から、月や火星のレゴリスを用いた植物栽培に関する研究開発として、月や火星の模擬レゴリスを用いた地上での栽培実験が各国で実施されており、肥料の供給等によって植物の栽培が一定程度可能であることは複数研究で検証されている。一方、火星レゴリスに含まれる有毒な過塩素酸塩への対処、長期栽培に関する検証、低重力環境下における水の挙動、各種作物の収量増等のための最適化など課題は残されている。

#### 4.2.1.2 微細藻類の培養

微細藻類はその高いバイオマス生産性から宇宙における食料生産と資源循環の役割を期待されてきた。各国において複数の微細藻類の利用が検討され、LED光源の利用や培養槽の改良により培養効率の向上が進められており、一部、ISSにおける微細藻類の培養実験も実施されている。ただし、長期運用を見据えた連続的、安定的、高収量の培養には課題があり、今後それらの課題への対処が求められる。

#### 4.2.1.3 タンパク源生産

宇宙におけるタンパク源の生産のため、培養肉や昆虫に関する取り組みが進められている。イスラエルのベンチャー企業Aleph FarmsはISSにおいて培養肉に関する基礎的な実験を実施した他、日本でも東京女子医科大学の清水達也教授が宇宙利用を見据えて藻類・動物細胞の共培養等の研究を進めている。中国Lunar Palace-1では植物残渣からミールワームを育て食料としていた。その他、ミズアブやコオロギをタンパク源として宇宙で利用するための研究が国内外で進められている。培養肉の開発については初期フェーズであり今後のさらなる開発が求められ、また昆虫利用については心理的ハードルや衛生面の課題の克服が不可欠と考えられる。

#### 4.2.1.4 資源再生

宇宙での持続的な食料生産のため、地球からの物資補給量の削減に向けて、植物残渣・糞・尿から窒素や炭素等を回収し植物栽培等に活用する取り組みが各国で実施されてきた。欧州や日本では微生物を用いて窒素を無機態で回収する技術開発が各種進められており、中国の閉鎖実験に

においては微生物処理にて有機態で回収する取り組みが中心のようであり、米国においては植物栽培への活用を目的とした資源再生に関する取り組みはごく限定的であった。

#### 4.2.1.5 閉鎖隔離環境施設関連

宇宙における長期滞在を想定し、密閉された空間において食料生産、資源循環、居住などに関する統合的な実験を行うことのできる閉鎖隔離環境施設が国内外で構築/運用されてきた。近年では主に中国がLunar Palace-1など2つの施設を用いた閉鎖実験を実施している。米国では2000年までに実施されたBPC（ただし居住実験は含まない）における植物栽培の成果が顕著であった。それ以降、NASAでは密閉型の閉鎖実験は実施されていないが、近年アリゾナ大学が閉鎖隔離環境施設を建設している。欧州ではスペインにて再生型生命維持システムの統合実証用のパイロットプラントを運用している。

#### 4.2.1.6 その他

2021年に米国NASAとカナダの宇宙機関CSAの名を冠する宇宙食料分野のコンペティションであるDeep Space Food Challengeが開始した。米国やカナダ等から多数の企業や大学が挑戦し、高等植物や微細藻類、昆虫食など幅広い提案がされている。現時点においては技術水準など未知数ではあるが、注視すべき取り組みであると考えられる。

### 4.2.2 基礎実証概要

#### 4.2.2.1 高等植物の低圧栽培に関する基礎実証

月や火星の地表面上はほぼ真空環境であり、栽培空間を低圧とした方が栽培環境の構築・維持コストの観点で有利と考えられる。過去に国内外で低圧環境下の高等植物の栄養成長にかかる栽培実験は実施されているが、生殖成長にかかる研究はほとんど報告されていない。そこで本事業においてはイネを対象として低圧環境（全圧30 kPa、O<sub>2</sub>分圧6～12kPa）下における生殖成長にかかる栽培実験を実施した。その結果、開花については低圧環境で多少の影響を受ける可能性が示唆されたが、稔実においては低圧環境の影響は見られなかった。本結果より、低圧環境下においてもイネの花粉形成および種子の稔実は十分に行われることが示唆された。

#### 4.2.2.2 高等植物の変異体の栽培に関する基礎実証

栽培空間やリソースが限られる宇宙での食用作物の栽培には、極矮性や長時間日照下での開花性といった、地上とは異なる指標での品種開発が必要となる。しかし、LED光源下での栽培を前提とした品種育成の事例や研究報告はほとんどない。LED光源による宇宙栽培向け品種育成の可能性を検証するため、イネとダイズの複数の品種・変異体等について、複数パターンLED光源を用いた栽培実験を実施した。その結果、まずLED光源の種類がイネ・ダイズの栽培特性に及ぼす影響を調査し、正常な生育を示すLED光源の種類・特性を明らかにした。さらに、矮性等の有用形質を示す変異体等のLED照明下での特性を明らかにし、LED光源の種類を適切に選ぶことで選抜が可能であることを示した。

#### 4.2.2.3 微細藻類の培養に関する基礎実証

宇宙において、高いバイオマス生産性を有する微細藻類は有用と考えられ、空気再生や食料を効率的に確保するための選択肢として期待されている。一方、特に月面などの低重力環境における連続的かつ相応規模の食料供給に適した培養手法や培養効率・自動化率の向上の手法、種・株の選定等の検討は不十分である。そこで、候補形状の平板型培養槽を地上実証用に簡易試作し、バイオマス生産性検証のための基礎実証を実施した。その結果、*E. gracilis*の培養にかかる検証を実施することができ、他微細藻類種の培養検証も可能であることが示唆された。

#### 4.2.2.4 資源再生手法に関する基礎実証

地球から月や火星への物資補給を低減するためには、有機性廃棄物を現地にて処理し、食料生産に活用可能な資源を回収する技術が必要となる。当該技術候補としては、微生物処理と熱化学処理が選択肢として挙げられるが、これらは同一条件下での比較実験の研究の報告が見られな

い。そこで、代表的な手法として、メタン発酵、生物酸化、メタン発酵・生物酸化、湿式酸化を選定し、モデル生ごみを用いた実験を実施し、有機物分解、窒素とリンの回収、反応時間等の比較を実施した。その結果、各手法のメリットとデメリットは存在するも、メタン発酵（嫌氣的処理）・生物酸化（好氣的処理）装置が第一候補であることが示唆された。但し、当該処理により生成されたメタンの活用方法については今後の検討課題である。

#### 4.3 今後の展望

閉鎖隔離環境におけるQOLマネジメントシステムについて、これまで米国をはじめロシア、中国を中心に様々な閉鎖設備での滞在実験が進められてきたが、ここ数年でも新たな閉鎖施設の構築や月・火星探査を見据えた閉鎖模擬ミッションの計画が複数発表されている。一方で、それぞれの閉鎖模擬実験は実施目的や実施スキーム、資金規模、周辺環境等によって実現できる範囲や内容は大きく異なっており、個別にカスタマイズが必要であることが本事業を通じて確認された。また、閉鎖ミッションにおける食の重要性についても調査において再認識し、今後の長期宇宙滞在に向けた食に関連したソリューション開発においても高いポテンシャルがあることが示唆された。

このような状況を踏まえ、日本においてQOLマネジメントシステムを備えた閉鎖隔離実証施設の構築・運用を進めていくためには、施設だけでなく、立地条件や様々なステークホルダーの存在、閉鎖隔離環境をシミュレーションすることの社会における価値などを踏まえ、運用性にも最大限配慮した持続的な閉鎖実験プラットフォームの構築が期待される。

食に関するソリューションについては、日本の食品関連企業が保有する技術やノウハウ等の強みや、昨今世界的な潮流になっているフードテック等の活用なども視野に入れつつも、宇宙や極地、極地に類する環境の経験者が保有するリアリティのある声に耳を傾け、そこから導き出される真の課題に対して一つ一つアプローチする姿勢が重要と考えられる。

また、高度資源循環型食料供給システムについては、これまで各国で様々な取り組みが実施されており、近年ではNASA等によるDeep Space Food Challengeが開始するなど、その動きは活発化していると言える。但し、宇宙における長期安定運用と経済合理性を成立させるシステムは未だ確立しておらず、発展余地の大きい領域であることが本事業を通して確認された。

そのような中、日本として今後プレゼンスを発揮するためには、国内で発展している植物栽培技術等の強みを最大限活用しつつ、国際的に優位性の高いシステム構築を目指すべきと考えられる。海外のこれまでの取り組みでは食料生産の収量のみ追求されるケースが多いが、QOLを重視した取り組みとして、日本のブランド品種など、良食味の品種を最大限活用した宇宙向けの品種開発も有効だと考える。さらには、現状の技術成熟度は低いものの、微細藻類と培養肉を組み合わせた循環型の培養肉生産技術の開発はユニークであり、また地上への波及効果も見込まれ、今後の進捗が期待される。また、食料生産を主眼に置いた資源再生については欧州が先行しているが、米国の取り組みが限定的である中、日本として優位性を発揮でき得ると考えられる。

また、高度資源循環型食料供給システム単体ではなく、食料生産から収穫、加工、廃棄物処理に至るまで、その工程にいかに関わりQOLを確保するかという観点も重要であり、人と食の相互作用も含めた課題抽出とソリューション構築が不可欠である。その観点から、今後日本がプレゼンスを発揮するためには、高度資源循環型食料供給システムとQOLマネジメントシステムの統合システムとしての技術成熟度を向上させる必要があり、またそれらシステムに関して持続的に統合実証が可能な閉鎖隔離実証施設の構築が不可欠になると考えられる。

## 5. 引用文献情報

### 1. 背景

引用文献無し

### 2. 閉鎖隔離環境における食とQOLのマネジメントシステム構築に向けた基礎調査・実証

#### 2.1 概要

引用文献無し

#### 2.2 実施背景と手法

##### 2.2.1 既存技術や最新技術に関する調査

引用文献無し

##### 2.2.2 閉鎖隔離環境施設、及び極地滞在オペレーション等に関する現地調査

引用文献無し

##### 2.2.3 上記調査に基づく技術やノウハウ等の定性/定量比較

引用文献無し

##### 2.2.4 調査で抽出された要素技術に関する閉鎖施設での基礎実証

引用文献無し

#### 2.3 実施結果・考察

##### 2.3.1 既存技術や最新技術に関する調査

###### 文献1

Momose, K. et al. "Feasibility Study of Using Applicable Space Assets for Disaster Management and Mitigation in Japan." 71st International Astronautical Congress. Online, (2020).

###### 文献2

百瀬和彦 他. "3G01 地球上及び宇宙における極限閉鎖環境の比較検討." 第65回宇宙科学技術連合講演会, (2020).

###### 文献3

Lauren Blackwell Landon et al. Psychology and Human Performance in Space Programs - Research at the Frontier. CRC Press, (2021).

###### 文献4

Lauren Blackwell Landon et al. Psychology and Human Performance in Space Programs - Extreme Application. CRC Press, (2021).

###### 文献5

宇宙システム開発株式会社, 閉鎖隔離実験の研究成果に関する調査 (JX-PSPC-534264) 成果報告書, 宇宙航空研究開発機構, (2021).

###### 文献6

Mohanty et al. "Survey of Past, Present and Planned Human Space Mission Simulators." *SAE Technical Paper*, 2008-01-2020, (2008).

###### 文献7

Pierpaolo Zivi et al. "Sleep in Isolated, Confined, and Extreme (ICE): A Review on the Different Factors Affecting Human Sleep in ICE." *frontiers in Neuroscience*, 11 August 2020, (2020).

###### 文献8

Jad Nasrini et al. "Cognitive Performance During Confinement and Sleep Restriction in NASA's Human Exploration Research Analog (HERA)." *frontiers in Physiology*, 28 April 2020, (2020).



**文献9**

R. Woodruff et al., "3D Interactive Model of HERA to support ECLSS anomaly resolution using a Virtual Assistant," 2021 IEEE Aerospace Conference (50100), (2021): 1-10.

**文献10**

NASA. "Human Research Program Human Exploration Research Analog (HERA) Facility and Capabilities Information."

[https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/2019\\_hera\\_facility\\_capabilities\\_information.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/2019_hera_facility_capabilities_information.pdf), (2016).

**文献11**

Poonampreet Kaur Josan et al. "Experimental Design & Pilot Testing for ECLSS Anomaly Resolution using Daphne-AT Virtual Assistant." 2021 IEEE Aerospace Conference (50100), (2021).

**文献12**

Erin E. Flynn Evans et al. "Changes in performance and bio-mathematical model performance predictions during 45 days of sleep restriction in a simulated space mission." *scientific reports*, 24 September 2020, (2020).

**文献13**

Mathias Basner et al. "Psychological and Behavioral Changes during Confinement in a 520-Day Simulated Interplanetary Mission to Mars." *Pros One*, March 27, 2014, (2014).

**文献14**

Lauren Blackwell Landon et al. "Risk of Performance and Behavioral Health Decrements Due to Inadequate Cooperation, Coordination, Communication, and Psychosocial Adaptation within a Team." *Human Research Program Behavioral Health and Performance*, (2016).

**文献15**

Igor' Borisovich Ushakov et al. "Main findings of psychophysiological studies in the Mars 500 experiment." *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2014, Vol. 84, No. 2, (2014):106–114.

**文献16**

Šolcová, Iva. "Anticipated and perceived personal growth and values in two spaceflight simulation studies." *Acta Astronautica*, Volume 179, (2021): 561-568.

**文献17**

Carole Tafforin. "Time Effects, Cultural Influences, and Individual Differences in Crew Behavior During the Mars-500 Experiment." *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, Volume 84, Number 10, (2013):1082-1086.

**文献18**

Mathias Basner et al. "Mars 520-d mission simulation reveals protracted crew hypokinesia and alterations of sleep duration and timing." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Volume 110, No.7, (2013).

**文献19**

Raymond M. Wheeler. "Agriculture for Space: People and Places Paving the Way." *Open Agriculture*, 2017, 2, (2017): 14-32.

**文献20**

Yuming Fu et al. "Establishment of a closed artificial ecosystem to ensure human long-term survival on the moon." *bioRxiv*, January 14, 2021, (2021).

**文献21**

Dong, Chen et al. "Influence of nitrogen source and concentrations on wheat growth and production inside "Lunar Palace-1"." *Acta Astronautica*, Volume 144, (2018): 371-379.

**文献22**

Leonard David. "China's Lunar Palace 1: First Test of Closed Life Support System." Leonard David's INSIDE OUTER SPACE, June 4, 2014,

<https://www.leonarddavid.com/chinas-lunar-palace-1-first-test-of-closed-life-support-system/>, (September 1, 2021).

**文献23**

Leonard David. "China's 'Lunar Palace' for Space Research Tested on Earth." June 17, 2014, <https://www.space.com/26267-china-lunar-palace-space-research-mission.html>, (September 1, 2021).

**文献24**

Ruilin Wu et al. "Ethological Analysis of Crew Interactions in Lunch Time and Correlation with Questionnaires Data from a Lunar Analog Mission." *Hang tian yi xue yu yi xue gong cheng = Space medicine & medical engineering*, (2018).

**文献25**

China Plus. "Lunar Palace 1 opens to public to mark China Space Day." April 24, 2018, <http://chinaplus.cri.cn/news/china/9/20180424/122084.html>, (September 1, 2021).

**文献26**

Ruilin Wu et al. "Psychosocial interaction during a 105-day isolated mission in LUNAR PALACE 1." *Acta Astronautica*, Volume 113, (2015): 1–7.

**文献27**

Sandra Häuplik-Meusburger. "Habitability Studies and Full Scale Simulation Research: Preliminary themes following HI-SEAS mission IV." 47th International Conference on Environmental Systems, (2017).

**文献28**

Goemaere, Sophie. "Life on mars from a Self-Determination Theory perspective: How astronauts' needs for autonomy, competence and relatedness go hand in hand with crew health and mission success - Results from HI-SEAS IV." *Acta Astronautica*, Volume 159, (2019): 273-285.

**文献29**

Andrew P. Koutnik et al. "Human Adaptations to Multiday Saturation on NASA NEEMO." *frontiers in Physiology*, 12 January 2021, (2021).

**文献30**

Elizabeth Howell. "Astronauts Simulate Deep-Space Mission in Underwater Lab." *Space.com*, July 25, 2014, (2014).

**文献31**

Steven Chappell et al. "Final Report of NEEMO 14: Evaluation of a Space Exploration Vehicle, Cargo Lander, and Crew Lander during Simulated Partial-gravity Exploration and Construction Tasks." NASA/TP-2011-216152, (2011).

**文献32**

Tristan C. Endsley et al. "Mapping CO2 Concentrations Within A Spaceflight Analog Environment." 50th International Conference on Environmental Systems, ICES-2020, (2020).

**文献33**

M. M. Mader. "Geological exploration of other planets: Insights from terrestrial desert, sea, and polar field campaigns." 65th International Astronautical Congress, (2014).

**文献34**

Michael Schirber. "NEEMO's Undersea Operations: Making Telemedicine a Long Distance Reality." *Space.com*, October 19, 2004, (2004).

**文献35**

S.T. Engler. et al. "HI-SEAS habitat energy requirements and forecasting." *Acta Astronautica*, Volume 162, (2019): 50–55.

**文献36**

Anne Joan Meier. "Human factor investigation of waste processing system during the Hi-seas 4-Month mars analog mission in support of NASA's logistic reduction and repurposing project: Trash to gas." 65th International Astronautical Congress, (2014).

**文献37**

Sandro Contenta. "Getting to Mars 'without killing each other'." *Toronto Star*, Oct. 25, 2015, (2015).

**文献38**

Balwant Rai et al. "Human Factor Studies on a Mars Analogue During Crew 100b International Lunar Exploration Working Group EuroMoonMars Crew: Proposed New Approaches for Future Human Space and Interplanetary Missions." *North American Journal of Medical Sciences*. 2012 Nov; Volume 4, Issue 11, (2012): 548-57.

**文献39**

Matthew Allner et al. "Crew performance analysis of a simulated Mars mission at the Mars Desert Research Station (MDRS) in Utah, USA." 59th International Astronautical Congress 2008, (2008): 11-23.

**文献40**

Lucie Poulet et al. "Greenhouse automation, Illumination and Expansion study for mars desert research station." 65th International Astronautical Congress, (2014).

**文献41**

Cora S. Thiel et al. "PCR-based analysis of microbial communities during the EuroGeoMars campaign at Mars Desert Research Station, Utah." *International Journal of Astrobiology*, (2011): 1-14.

**文献42**

William Clancey et al. "The Mobile Agents Integrated Field Test: Mars Desert Research Station April 2003." 17th FLAIRS Conference 2004, (2004): 732-737.

**文献43**

Gernot Groemer et al. "Human performance data in a high workload environment during the simulated Mars expedition "AustroMars"." *Acta Astronautica*, Volume 66, (2010): 780-787.

**文献44**

Sheryl L. Bishop et al. "FMARS 2007: Stress and coping in an arctic Mars simulation." *Acta Astronautica*, Volume 66, (2010): 1353-1367.

**文献45**

M. Bamsey et al. "Four-month Moon and Mars crew water utilization study conducted at the Flashline Mars Arctic Research Station, Devon Island, Nunavut." *Advances in Space Research*, 43, (2009): 1256–1274.

**文献46**

Kristine Ferrone et al. "Flashline Mars Arctic Research Station (FMARS) 2009 Crew Perspectives." SpaceOps 2010 Conference, (2010).

**文献47**

M. Nelson et al. "Atmospheric Dynamics and Bioregenerative Technologies in a Soil-Based Ecological Life Support System : Initial Results from Biosphere 2." *Advances in Space Research*. Vol. 14, No. 11, (1994): 417-426.

**文献48**

M. Nelson et al. "Living in space: Results from biosphere 2's initial closure, an early testbed for closed ecological systems on Mars." *Life Support & Biosphere Science: International Journal of Earth Space*, 2(2), (1995): 81-102.

**文献49**

Meredith Sattler. "Boundaries and Frontiers at Biosphere 2: 1991-1994." ARCC 2017 Conference – Architecture of Complexity, (2017).

**文献50**

M. Nelson et al. "Bioregenerative recycling of wastewater in Biosphere 2 using a constructed wetland: 2-year results." *Ecological Engineering* 13, (1999): 189–197.

**文献51**

Francesco N. Tubiello et al. "Dynamics of the global water cycle of Biosphere 2." *Ecological Engineering* 13, (1999): 287–300.

**文献52**

M. Nelson et al. "Using a Closed Ecological System to Study Earth's Biosphere." *BioScience*, Vol. 43, No. 4, (1993): 225-236.

**文献53**

Bruno D.V. Marino et al. "The agricultural biome of Biosphere 2: Structure, composition and function." *Ecological Engineering* 13, (1999): 199–234.

**文献54**

M. Nelson et al. "Group dynamics challenges: Insights from Biosphere2 experiments." *Life Sciences in Space Research* 6, (2015): 79–86.

**文献55**

Donna Oliver. "Psychological Effects of Isolation and Confinement of a Winter-Over Group at McMurdo Station, Antarctica." *From Antarctica to Outer Space*, (1991): 217-227.

**文献56**

Jeff S. Bowman et al. "Microbial Community Dynamics in Two Polar Extremes: The Lakes of the McMurdo Dry Valleys and the West Antarctic Peninsula Marine Ecosystem." *BioScience*, Volume 66, Issue 10, (2016): 829–847.

**文献57**

Joan Myers. "Antarctica Journal." Joan Myers Photography, October 13, 2002, [http://www.joanmyers.com/wondrous\\_cold/ant-journal.pdf](http://www.joanmyers.com/wondrous_cold/ant-journal.pdf), (September 1, 2021).

**文献58**

"McMurdo AIMS high!" [mcmurdostation.com](https://www.mcmurdostation.com/1819/aims.html), August 4, 2020, <https://www.mcmurdostation.com/1819/aims.html>, (September 1, 2021).

**文献59**

"MCMURDO STATION MODERNIZATION DESIGN Programming Report," FUTURE USAP, May 11, 2016, [https://future.usap.gov/core\\_rfp/McMurdo%20Station%20Pre-Design%20Programming%20report.pdf](https://future.usap.gov/core_rfp/McMurdo%20Station%20Pre-Design%20Programming%20report.pdf), (September 1, 2021).

**文献60**

Kelli Mars. "Experience HERA." NASA, Jun 23, 2021. <https://www.nasa.gov/analogs/hera/experience-hera>, (March 10, 2022).

**文献61**

Daniel Oberhaus. "Six Men Spent 520 Days Locked in a Room to See If We Could Live on Mars." VICE. May 20, 2015. <https://www.vice.com/en/article/ae35y8/six-men-spent-520-days-locked-in-a-room-to-see-if-we-could-live-on-mars>, (March 10, 2022).

**文献62**

鈴木康朗. "宇宙隔離ツアー「過酷な」生活 プライバシーなし、耐えたら38万円." [withnews](https://withnews.jp/article/f0160217001qq0000000000000000W0390901qq000013007A). 2016/02/17. <https://withnews.jp/article/f0160217001qq0000000000000000W0390901qq000013007A>, (March 10, 2022).

**文献63**

Space.com Staff. "Lunar Palace 1: China's One-Year Mock Moon Mission in Pictures, Space.com." May 17, 2018. <https://www.space.com/40610-china-mock-moon-mission-lunar-palace-1-photos.html>, (March 10, 2022).

**文献64**

Jonny Baxter. "NASA selects UCD alumnus for undersea mission, University College Dublin." July 07, 2016.  
<https://www.ucd.ie/newsandopinion/news/2016/july/07/nasaselectsucdalumnusforunderseamission/>, (March 10, 2022).

#### 文献65

Matt Williams. "This is the Habitat in Hawaii Helping Astronauts Preparing to Explore Mars." UNIVERSE TODAY. August 31, 2018.  
<https://www.universetoday.com/139862/this-is-the-habitat-in-hawaii-helping-astronauts-preparing-to-explore-mars/>, (March 10, 2022).

#### 文献66

Na.P.. "Mars Desert Research Station." THEPANERKROOM. July 22, 2012.  
<https://thepanekroom.com/2012/07/22/mars-desert-research-station/>, (March 10, 2022).

#### 文献67

Alchetron. "Flashline Mars Arctic Research Station." March 14, 2018.  
<https://alchetron.com/Flashline-Mars-Arctic-Research-Station/>, (March 10, 2022).

#### 文献68

Shimada, K. "Biosphere2." Wikipedia, Sept. 20, 2010.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ShimadaK2010Sept20\\_Biosphere2-Rainforest-Habitat-WestLung\\_DSC07210.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ShimadaK2010Sept20_Biosphere2-Rainforest-Habitat-WestLung_DSC07210.JPG), (March 10, 2022).

#### 文献69

United States Antarctic Program. "McMurdo Station Webcams."  
<https://www.usap.gov/videoclipsandmaps/mcmwebcam.cfm>, (March 10, 2022).

### 2.3.2 閉鎖隔離環境施設、及び極地滞在オペレーション等に関する現地調査

引用文献無し

### 2.3.3 上記調査に基づく技術やノウハウ等の定性/定量比較

引用文献無し

### 2.3.4 調査で抽出された要素技術に関する閉鎖施設での基礎実証

引用文献無し

## 3. 高度資源循環型食料供給システム構築のための基礎調査・実証

### 3.1 概要

#### 文献1

月面農場ワーキンググループ. "月面農場ワーキンググループ検討報告書 第1版". 宇宙航空研究開発機構特別資料. JAXA-SP-19-001, (2019): 1-101.

### 3.2 実施背景と手法

#### 3.2.1 国内外の研究開発動向に関する調査

引用文献無し

#### 3.2.2 米国・欧州（ESA MELISSA等）の最新状況調査

引用文献無し

#### 3.2.3 上記調査に基づく研究/技術の定性/定量比較

引用文献無し

### 3.2.4 調査により判明した研究/技術に関する基礎実証

#### 3.2.4.1 高等植物の低圧栽培に関する基礎実証

##### 文献1

Andre and Massimino. Growth of plants at reduced pressures: experiments in wheat--technological advantages and constraints. *Adv. Space. Res.* 12(5): 97-106. 1992.

##### 文献2

Daunicht and Brinkjans. Gas exchange and growth of plants under reduced air pressure. *Adv. Space Res.* 12(5): 107-114. 1992.

##### 文献3

Iwabuchi, Goto, Takakura. Effect of O<sub>2</sub> pressure under low air pressure on net photosynthetic rate of spinach. *Acta Hort.*, 399: 101-106. 1995.

##### 文献4

Goto, Iwabuchi, Takakura. Effect of reduced total air pressure on spinach growth. *J. Agric. Meteorol.* 51(2): 139-143. 1995.

##### 文献5

Goto et al. Measurement of net photosynthetic and transpiration rates of spinach and maize plants under hypobaric condition *J. Agric. Meteorol.* 52(2): 117-123. 1996.

##### 文献6

Iwabuchi, Goto, Takakura. Germination and growth of spinach under hypobaric conditions. *Environ. Control in Biol.* 34(3): 169-178. 1996.

##### 文献7

Iwabuchi et al. Effect of vapor pressure deficit on spinach growth under hypobaric conditions. *Acta Hort.*, 440: 60-64. 1996.

##### 文献8

Goto, Arai, Omasa. Growth and Development of Higher Plants Under Hypobaric Conditions. SAE Technical Paper 2002-01-2439. 2002.

##### 文献9

Corey et al. Toward Martian agriculture: responses of plants to hypobaria. *Life Support Biosph. Sci.* 8: 103-114. 2002.

##### 文献10

Iwabuchi et al. Short-term and long-term effects of low total pressure on gas exchange rates of spinach. *Adv. Space Res.* 31: 241-244. 2003.

##### 文献11

He et al. Effect of hypobaric conditions on ethylene evolution and growth of lettuce and wheat. *Journal of Plant Physiology* 160(11): 1341-1350. 2003.

##### 文献12

Paul et al. Hypobaric Biology: Arabidopsis Gene Expression at Low Atmospheric Pressure. *Plant Physiol.* 134: 215-223. 2004.

##### 文献13

He et al. Separating the effects of hypobaria and hypoxia on lettuce: growth and gas exchange. *Physiologia Plantarum* 131(2): 226-240. 2007.

##### 文献14

Nihal et al. Hypobaria and hypoxia affects growth and phytochemical contents of lettuce. *Scientia Horticulturae.* 122: 171-178. 2009.

##### 文献15

Paul et al. Patterns of Arabidopsis gene expression in the face of hypobaric stress. *AoB Plants.* 9(4):1-19. 2017.

##### 文献16

石神・後藤. 低圧環境における植物の生育. *植物環境工学.* 20 (4): 228-235. 2008.

#### 3.2.4.2 高等植物の変異体の栽培に関する基礎実証

##### 文献1

Fang L. et al. "Plant growth and photosynthetic characteristics of soybean seedlings under different LED lighting quality conditions." *Journal of plant growth regulation* (2021) 40(2): 668-678.

##### 文献2

Midorikawa K. et al. "Additional nitrogen fertilization at heading time of rice down-regulates cellulose synthesis in seed endosperm." *PLoS ONE* (2014) 9, e98738.

##### 文献3

Kuroda M. and Ikenaga S. "Single-tube hydroponics as a novel idea for small-scale production of crop seed in a plant incubator." *Biosci. Biotechnol. Biochem.* (2015) 79, 63-67.

#### 3.2.4.3 微細藻類の培養に関する基礎実証

##### 文献1

Fahrion et al. "Use of photobioreactors in regenerative life support systems for human space exploration." *Frontiers in Microbiology* 12 (2021): 1748.

##### 文献2

Detrell "Chlorella Vulgaris Photobioreactor for Oxygen and Food Production on a Moon Base—Potential and Challenges." *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* (2021): 124.

##### 文献3

Doucha and Karel "Outdoor open thin-layer microalgal photobioreactor: potential productivity." *Journal of applied phycology* 21.1 (2009): 111-117.

##### 文献4

Qiang, et al. "Ultrahigh-cell-density culture of a marine green alga *Chlorococcum littorale* in a flat-plate photobioreactor." *Applied Microbiology and Biotechnology* 49.6 (1998): 655-662.

##### 文献5

Koren and Hutner. "High yield media for photosynthesizing *Euglena gracilis*." *Journal of Protozoology* 14 (1967)(Suppl.): 17

##### 文献6

Qiang and Richmond. "Productivity and photosynthetic efficiency of *Spirulina platensis* as affected by light intensity, algal density and rate of mixing in a flat plate photobioreactor." *Journal of Applied Phycology* 8.2 (1996): 139-145.

##### 文献7

Cramer, Marian, and Jack Myers. "Growth and photosynthetic characteristics of *Euglena gracilis*." *Archiv für Mikrobiologie* 17.1 (1952): 384-402.

#### 3.2.4.4 資源再生手法に関する基礎実証

引用文献無し

### 3.3 実施結果・考察

#### 3.3.1 国内外の研究開発動向に関する調査

引用文献無し

#### 3.3.2 米国・欧州（ESA MELISSA等）の最新状況調査

引用文献無し

#### 3.3.3 上記調査に基づく研究/技術の定性/定量比較

#### 文献1

多胡靖宏. 第1章第5節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, (2015): 448p.

#### 文献2

Fu Yuming et al. "How to establish a Bioregenerative Life Support System for long-term crewed missions to the Moon or Mars." *Astrobiology* 16.12 (2016): 925-936.

#### 文献3

Fu Yuming et al. "Establishment of a closed artificial ecosystem to ensure human long-term survival on the moon." *BioRxiv* (2021) doi:<https://doi.org/10.1101/2021.01.12.426282>.

#### 文献4

Tang Yongkang et al. "Design and establishment of a large-scale controlled ecological life-support system integrated experimental platform." *Life sciences in space research* 31 (2021): 121-130.

#### 文献5

Albiol Joan et al. "MELiSSA Pilot Plant: Animal Compartment design Preliminary Requirements for the animal selection." *MELiSSA TECHNICAL NOTE*, 75.5, (2007).

#### 文献6

Romeyn Matthew et al. "Crop readiness level (crl): a scale to track progression of crop testing for space." *49th International Conference on Environmental Systems*, Boston, Massachusetts, (2019).

#### 文献7

Barbeau Zach. "Habitat Demonstration Unit-Deep Space Habitat (HDU-DSH) Integration and Preparation for Desert RATS 2011." *NASA Technical Reports*, JSC-CN-24431, (2011)

#### 文献8

Poulet Lucie et al. "Greenhouse automation, illumination and expansion study for Mars Desert Research Station." *65th International Astronautical Congress*, Toronto, Canada, (2014).

#### 文献9

Staats Kai et al. "A Hi-Fidelity Space Analog for the Moon and Mars at Biosphere 2." *Terrestrial Analogs 2021* (LPI Contrib. No. 2595).

#### 文献10

MELiSSA Foundation. "The European project of circular life support systems". <https://www.melissafoundation.org/>, (March 13, 2022).

#### 文献11

MELiSSA Foundation. "MELISSA PILOT PLANT". <https://www.melissafoundation.org/page/melissa-pilot-plant>", (March 13, 2022).

#### 文献12

The EDEN ISS consortium. "Ground Demonstration of Plant Cultivation Technologies for Safe Food Production in Space". <https://eden-iss.net/>, (March 13, 2022).

#### 文献13

Zabel, Paul et al. "Biomass production of the EDEN ISS space greenhouse in Antarctica during the 2018 experiment phase." *Frontiers in plant science* 11 (2020): 656.

#### 文献14

月面農場ワーキンググループ. "月面農場ワーキンググループ検討報告書 第1版". 宇宙航空研究開発機構特別資料. JAXA-SP-19-001, (2019): 1-101.

#### 文献15

Salisbury Frank B. et al. "Bios-3: Siberian experiments in bioregenerative life support." *BioScience* 47.9 (1997): 575-585

#### 文献16



R.M. Wheeler et al. "Crop Production for Advanced Life Support System" NASA Technical Reports, NASA/TM-2003-211184, (2003)

**文献17**

R.M. Wheeler et al. "Crop Production for Advanced Life Support System" *NASA Technical Reports*, NASA/TM-2003-211184, (2003)

**文献18**

Silverstone S. E. et al.. "Food production and nutrition in Biosphere 2: results from the first mission September 1991 to September 1993." *Advances in Space Research* 18.4-5 (1996): 49-61.

**文献19**

Ewert Mike "Life Support System Technologies for NASA Exploration Missions." Army Research Office Workshop on Base Camp Sustainability, (2007).

**文献20**

Holmer, Curt. "Bio-Regenerative Life Support Systems Functional Stability and Limitations, a Theoretical Modeling Approach". *The University of North Dakota, Ph.D. thesis*, (2020).

**文献21**

Barta, Daniel J. "The Lunar Mars Life Support Test Project" NASA Technical Reports, JSC-CN-36382, (2016).

**文献22**

Zabel Paul et al. "Future exploration greenhouse design of the EDEN ISS project." 47th International Conference on Environmental Systems, Charleston, South Carolina, (2017).

**文献23**

R.M. Wheeler et al. "Crop productivities and radiation use efficiencies for bioregenerative life support." *Advances in Space Research* 41 (2008):706–713

**文献24**

中国载人航天工程网. “月宫一号”——太空种植的绿色梦想在这里启航 专访“月宫一号”总设计师刘红教授及志愿者” (2014/6/5)<http://www.cmse.gov.cn/zhuanti/news/show.php@itemid=4102>

**文献25**

R.M. Wheeler "Agriculture for Space: People and Places Paving the Way." *Open Agriculture* 2 (2017) : 14–32

**文献26**

Daniel J. Barta "The Lunar Mars Life Support Test Project." (May 26, 2016)  
<https://ntrs.nasa.gov/citations/20160006345>

**文献27**

Christina M. Johnson et al. "Supplemental Food Production With Plants: A Review of NASA Research." *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* (November 10, 2021)  
<https://doi.org/10.3389/fspas.2021.734343>.

**文献28**

Roberta Paradiso et al. "Design of a module for cultivation of tuberous plants in Space: the project Precursor of Food Production Unit (PFPU)." *MELiSSA Conference 2020*.  
<https://www.melissafoundation.org/download/656>.

**文献29**

Thijs Van Gerrewey et al. "Effectiveness of Bacterial Amendments on Lettuce Performance Inside a Plant Factory with Artificial Lighting." *MELiSSA Conference 2020*. <https://www.melissafoundation.org/download/655>.

**文献30**

Tako Yasuhiro et al. "Analysis of circulation of carbon, oxygen and water in the Closed Ecology Experiment Facilities.", *Proceedings of the International Symposium on Application of a Closed Experimental System to Modeling of <sup>14</sup>C Transfer in the Environment* (2007): 92-101.

**文献31**

Tako Yasuhiro et al. "CEEF: closed ecology experiment facilities." *Gravitational and Space Research* 23.2 (2010).

**文献32**

Tako Yasuhiro et al. "CEEF: closed ecology experiment facilities." *Gravitational and Space Research* 23.2 (2010).

**文献33**

Hanford Anthony J. "Advanced life support baseline values and assumptions document." *Technical Reports* (2006): 3.

**文献34**

Peiro Enrique et al. "Air distribution in a fully-closed higher plant growth chamber impacts crop performance of hydroponically-grown lettuce." *Frontiers in Plant Science* (2020): 537.

**文献35**

Molders Katrien et al. "Selection and hydroponic growth of potato cultivars for bioregenerative life support systems." *Advances in space research* 50.1 (2012): 156-165.

**文献36**

Paradiso Roberta et al. "Soybean cultivation for Bioregenerative Life Support Systems (BLSSs): the effect of hydroponic system and nitrogen source." *Advances in Space Research* 53.3 (2014): 574-584.

**文献37**

Stasiak M. et al. "Crop selection for advanced life support systems in the ESA MELiSSA program: Durum wheat (*Triticum turgidum* var *durum*)." *Advances in space research* 49.12 (2012): 1684-1690.

**文献38**

Xie Beizhen et al. "The water treatment and recycling in 105-day bioregenerative life support experiment in the Lunar Palace 1." *Acta Astronautica* 140 (2017): 420-426.

**文献39**

Nelson M. et al. "Atmospheric dynamics and bioregenerative technologies in a soil-based ecological life support system: initial results from Biosphere 2." *Advances in Space Research* 14.11 (1994): 417-426.

**文献40**

石神靖弘ら. "低圧環境における植物の栽培" *植物環境工学* 20. 4 (2008): 228-235

**文献41**

Joseph F. Romagnano et al. "Dwarf Crop Response to a 16 or 24 hr Photoperiod Under LowLight Conditions." Utah State University DigitalCommons@USU (2002)

**文献42**

Bruce Bugbee. "Yield Comparisons and Unique Characteristics of the Dwarf Wheat Cultivar 'USU-Apogee'." Utah State University DigitalCommons@USU (1999)  
[https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1009&context=cpl\\_dwarfcrops](https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1009&context=cpl_dwarfcrops)

**文献43**

"Advanced Plant Habitat. National Aeronautics and Space Administration."  
<https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/advanced-plant-habitat.pdf>

**文献44**

"Historical Summary of the Selection of USU-Perigee." Utah State University DigitalCommons@USU (2002)

[https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1002&context=cpl\\_dwarfcrops](https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1002&context=cpl_dwarfcrops)

**文献45**

"Dwarf Crops For Space Flight. Utah State University Crop Physiology Lab College of Agriculture & Applied Sciences." <https://caas.usu.edu/labs/cpl/research/dwarf-crops>

[https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1007&context=cpl\\_dwarfcrops](https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1007&context=cpl_dwarfcrops)

**文献46**

L X Liu et al. "Achievements and Perspectives of Crop Space Breeding in China." *Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome* (2009): 213-215

**文献47**

Tapan Kumar Mohanta et al. "Space Breeding: The Next-Generation Crops." *Frontiers in Plant Science*. (2021) <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2021.771985>

**文献48**

Liling Jiang et al. "Space breeding in modern agriculture." *American Journal of Agricultural Research* (2020) 5:81

**文献49**

L X Liu et al. "Achievements and Perspectives of Crop Space Breeding in China." *Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome* (2009): 213-215

**文献50**

Luigi Giuseppe Duri et al. "The Potential for Lunar and Martian Regolith Simulants to Sustain Plant Growth: A Multidisciplinary Overview." *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* (January 4, 2022) <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.747821>

**文献51**

Natalia Kozyrovska et al. "Growing pioneer plants for a lunar base." *Advances in Space Research* 37.1.(2006) :93-99. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.03.005>

**文献52**

G.W.W. Wamelink et al. "Crop growth and viability of seeds on Mars and Moon soil simulants." *Open Agriculture* 4 (2019): 509-516

**文献53**

L. G. Duri et al. "Mars Regolith Simulant Ameliorated by Compost as In Situ Cultivation Substrate Improves Lettuce Growth and Nutritional Aspects." *Plants* 9 (628): 1-17

**文献54**

Natalia Kozyrovska et al. "Growing pioneer plants for a lunar base." *Advances in Space Research* 37.1.(2006) :93-99. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.03.005>

**文献55**

Frédéric Peyrusson "Hydrogels Improve Plant Growth in Mars Analog Conditions." *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* (November 18, 2021) <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.729278>

**文献56**

Jana Fahrion et al. "Use of Photobioreactors in Regenerative Life Support Systems for Human Space Exploration." *Front. Microbiol.* (June 29, 2021) <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.699525>

**文献57**

Nils Jonathan Helmuth Aversch "Choice of Microbial System for In-Situ Resource Utilization on Mars." *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* (June 30, 2021) <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.700370>

**文献58**

Frédéric Peyrusson "Hydrogels Improve Plant Growth in Mars Analog Conditions." *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* (November 18, 2021) <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.729278>

**文献59**

Jana Fahrion et al. "Use of Photobioreactors in Regenerative Life Support Systems for Human Space Exploration." *Front. Microbiol.* (June 29, 2021) <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.699525>

**文献60**

Nils Jonathan Helmuth Aversch "Choice of Microbial System for In-Situ Resource Utilization on Mars." *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* (June 30, 2021) <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.700370>

**文献61**

Tom Verbeelen et al. "Development of Nitrogen Recycling Strategies for Bioregenerative Life Support Systems in Space." *Front. Microbiol.* (October 13, 2021)  
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.700810>

**文献62**

Shimizu Tatsuya. "Circular Food Production System Using Algae/Animal Cell Recycling Culture." 50th International Conference on Environmental Systems, (2021)  
<https://ttu-ir.tdl.org/handle/2346/87127>

**文献63**

Laurent Poughon et al. "Limnospira indica PCC8005 growth in photobioreactor: model and simulation of the ISS and ground experiments." *Life Sciences in Space Research* 25 (2020): 53-65

**文献64**

Lasseur, Christophe, et al. "MELiSSA: the European project of closed life support system." *Gravitational and Space Research* 23.2 (2010).

**文献65**

Walker, Jeremy, and Céline Granjou. "MELiSSA the minimal biosphere: Human life, waste and refuge in deep space." *Futures* 92 (2017): 59-69.

**文献66**

MELiSSA Foundation. "WASTE TREATMENT".  
<https://www.melissafoundation.org/page/waste-treatment>", (March 14, 2022).

**文献67**

Lasseur Christophe et al. "MELiSSA: the European project of closed life support system." *Gravitational and Space Research* 23.2 (2010).

**文献68**

Walker Jeremy et al. "MELiSSA the minimal biosphere: Human life, waste and refuge in deep space." *Futures* 92 (2017): 59-69.

**文献69**

MELiSSA Foundation. "WASTE TREATMENT".  
<https://www.melissafoundation.org/page/waste-treatment>", (March 14, 2022).

**文献70**

Thiron, Benjamin. "Global Control of a Life Support System: Flow control and optimisation." Kungliga Tekniska Högskolan (KTH), Master's thesis, (2020).

**文献71**

Noah J. Langenfeld et al. "Optimizing Nitrogen Fixation and Recycling for Food Production in Regenerative Life Support Systems." *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* (June 18, 2021) <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.699688>

**文献72**

Zhang, Liangchang, et al. "Water management in a controlled ecological life support system during a 4-person-180-day integrated experiment: Configuration and performance." *Science of The Total Environment* 651 (2019): 2080-2086.

**文献73**

Thiron Benjamin. "Global Control of a Life Support System: Flow control and optimisation." Kungliga Tekniska Högskolan (KTH), Master's thesis, (2020).

**文献74**

Doug Messier "EDEN ISS Project Presents Results of New Greenhouse Concept for Future Space Missions". *Advertise on Parabolic Arc Polls Archive*. September 1, 2019.  
<http://www.parabolicarc.com/2019/09/01/eden-iss-project-presents-results-of-new-greenhouse-concept-for-future-space-missions/>. March 10, 2022.

#### 文献75

Nelson Mark et al. "The water cycle in closed ecological systems: Perspectives from the Biosphere 2 and Laboratory Biosphere systems." *Advances in Space Research* 44 (2009): 1404-1412.

#### 文献76

Zeidler Conrad et al. "Resource Consumption and Waste Production of the EDEN ISS Space Greenhouse Analogue during the 2018 Experiment Phase in Antarctica." (2020).

#### 文献77

Liu Hong et al. "Review of research into bioregenerative life support system (s) which can support humans living in space." *Life sciences in space research* 31 (2021): 113-120.

#### 文献78

Nelson Mark et al. "The water cycle in closed ecological systems: Perspectives from the Biosphere 2 and Laboratory Biosphere systems." *Advances in Space Research* 44 (2009): 1404-12.

#### 文献79

G.H. Just et al. "Parametric review of existing regolith excavation techniques for lunar In Situ Resource Utilisation (ISRU) and recommendations for future excavation experiments." *Planetary and Space Science* 180 (2020): 104746

#### 文献80

Zeidler Conrad et al. "Resource Consumption and Waste Production of the EDEN ISS Space Greenhouse Analogue during the 2018 Experiment Phase in Antarctica." (2020).

#### 文献81

Liu, Hong, et al. "Review of research into bioregenerative life support system (s) which can support humans living in space." *Life sciences in space research* 31 (2021): 113-120.

### 3.3.4 調査により判明した研究/技術に関する基礎実証

#### 3.3.4.1 高等植物の低圧栽培に関する基礎実証

引用文献無し

#### 3.3.4.2 高等植物の変異体の栽培に関する基礎実証

引用文献無し

#### 3.3.4.3 微細藻類の培養に関する基礎実証

##### 文献1

Terashima et al. "Green light drives leaf photosynthesis more efficiently than red light in strong white light: revisiting the enigmatic question of why leaves are green." *Plant and cell physiology* 50.4 (2009): 684-697.

##### 文献2

Huesemann et al. "Climate-simulated raceway pond culturing: quantifying the maximum achievable annual biomass productivity of *Chlorella sorokiniana* in the contiguous USA." *Journal of Applied Phycology* 30.1 (2018): 287-298.

##### 文献3

Raven. "The cost of photoinhibition." *Physiologia Plantarum* 142.1 (2011): 87-104.

#### 3.3.4.4 資源再生手法に関する基礎実証

##### 文献1

Hendriks, A. T. W. M., & Zeeman, G. "Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass." *Bioresource Technology*, 100(1), (2009): 10-18.

##### 文献2

Tan et al. "Design and establishment of a large-scale controlled ecological life-support system integrated experimental platform." *Life Sciences in Space Research*, 31, (2021): 121-130.

**文献3**

Jouanneau et al. "Methods for assessing biochemical oxygen demand (BOD): A review." *Water Research*, 49(1), (2014): 62-82.

**文献4**

Sun et al. "Effective biological nitrogen removal treatment processes for domestic wastewaters with low C/N ratios: A review." *Environmental Engineering Science*, 27(2), (2010): 111-126.

**文献5**

Körner, P. "Hydrothermal degradation of amino acids." *ChemSusChem*, 14(22), (2021): 4947-4957.