

探査ハブにおける月面食料生産の取り組み ～月面農場の実現を目指して～

2023年11月17日

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構
宇宙探査イノベーションハブ
岩崎 亜矢子／大熊 隼人

宇宙探査における食料生産分野

- ◆ 人類が地球外天体に生活圏を築くためには、地球とつながる「**へその緒**」を少しずつ**切る**ことが必要
- ◆ 地球からの**全指令型・全補給型**から脱却した自立探査の実現を目指す
- ◆ 自動化による地上からの**指令の最小化**と現地調達による**補給量の低減**



NASA

アポロ

建設: なし
現地調達: なし
再利用: なし

宇宙飛行士は着陸船に滞在。滞在に必要な機材等は全て地球から運搬。



国際宇宙ステーション

建設: 宇宙飛行士
現地調達: 電力
再利用: 空気、水の一部

モジュールを順次打上げ地上の指示により結合して建設。電力は自給自足。



今後の探査

建設: 無人化・自動化
現地調達: $\approx 100\%$
再利用: $\approx 100\%$

初期段階から無人化(遠隔化)・自動化を導入。燃料、空気、水、食料の地産地消。

食料生産では多岐にわたる技術開発が必要

探る

- 着陸、移動する
- 自律(人工知能)で効率のよい探査をする
- 資源(水氷, 鉱物)を見つける、採取・分析する

建てる

- 地盤調査・掘削・整地する
- 無人／遠隔／自動で建設する

住む

- 生命維持・環境制御を実現する(ECLSS)
- 資源をリサイクルする

作る

- 水から燃料等を現地で生産する
- 現地で資源を抽出し資材を製造
- 食料を省資源で生産する

共通技術

- 通信
- エネルギー(発電、送電、蓄電等)
- 省電力、熱制御

地上のフードシステム



農業を中心としたフードシステム

宇宙のフードシステム



農業を中心としたフードシステム

探査ハブにおける 月面フードシステムに関する取り組み

月面食料生産に関する取り組みの歩み

開始

2017年

- ・ 月面農場ワーキンググループによる検討開始
- ・ 植物栽培に関する共同研究を開始(RFP3)

継続

- ・ 効率的な植物栽培、資源循環など研究テーマを展開(RFP4～)
- ・ 月面農場ワーキンググループの検討報告書を発行(2019年)

SPACE FOODSPHERE設立

スターダストプログラム開始

発展

- ・ 植物以外の食料(養殖)に関する研究テーマに着手(RFP9)
- ・ 月面フードシステムワーキンググループによる検討開始(2023年)

◆コンセプト

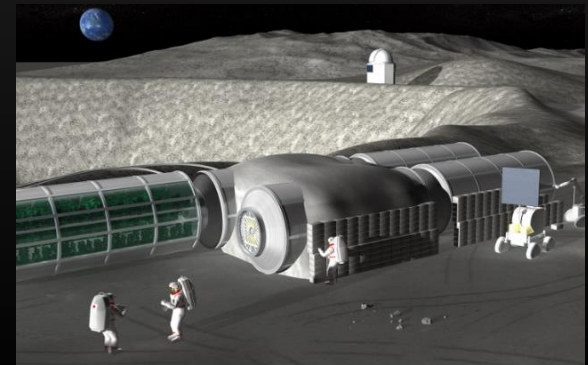
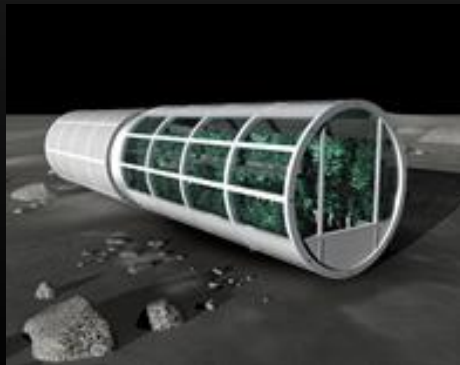
地産地消型技術のうち、地上の最先端の技術を活用した月面での食料生産を実現する植物栽培システムの構想立案を目指す。

◆月面農場に向けてチャレンジする課題とは

- 地球から供給する物資の最小化
- 宇宙飛行士(作業者)の作業の最小化
- 必要なリソース(水、エネルギー)の省力化



月面農場のコンセプトは、未来の地球上の社会課題解決を抽出するシステムとなり、宇宙と地上の共通の技術課題解決に繋がる。

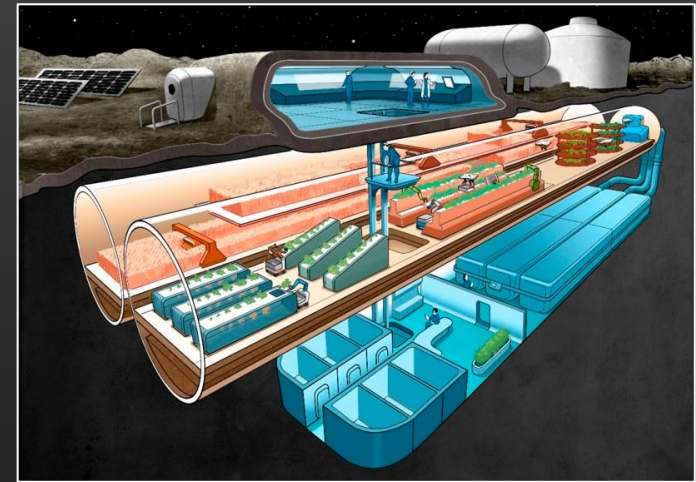


月面農場の全体イメージ

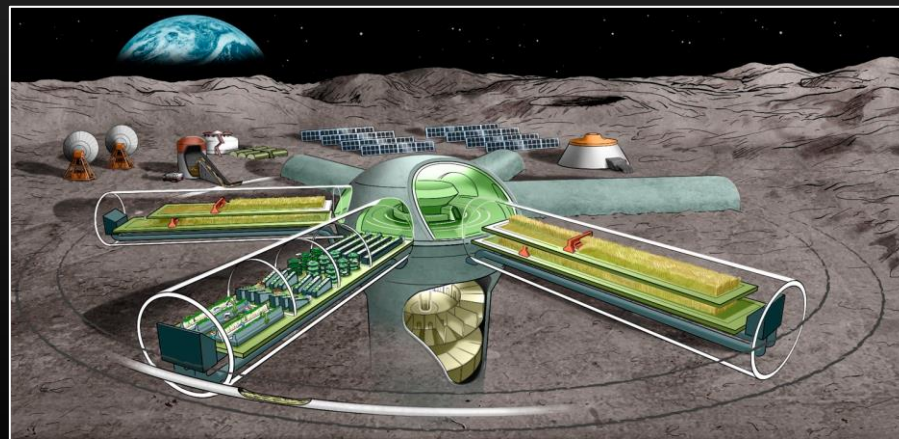
■ 月面農場の全体像

・月面滞在初期フェーズである6人規模においては、生活エリアは盛り土で覆い、栽培エリアは地下部に埋め立て、更にその下に最も安全性の高い区画として居住エリアとする

・100人規模では、長い距離をとった円筒形の栽培エリアとし、これを6区画展開することで、収穫物を中央に集めるルートや、リサイクル施設に搬入される残渣などを外周で運搬できるような構造とする



月面基地イメージ(6人規模)



月面基地イメージ(100人規模)

■ 植物栽培環境制御

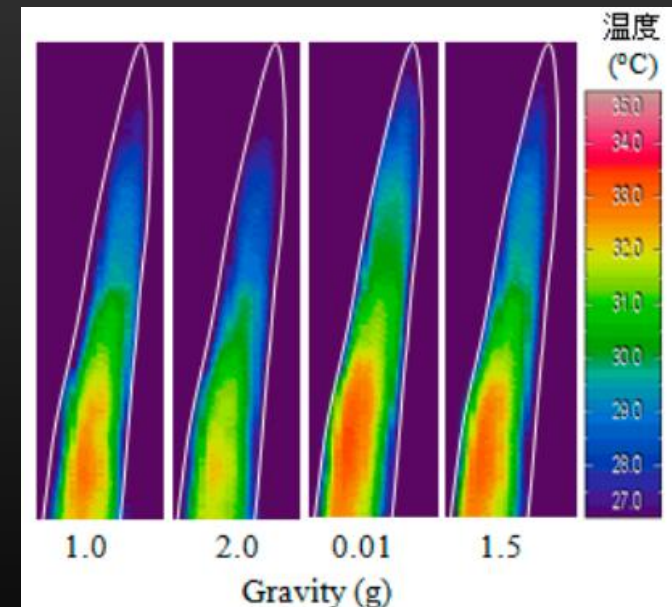
効率的な植物生産を行なうための環境制御技術を確認するためには、植物のガス交換および成長に対する物理的環境要素(光強度、明暗周期、光の波長、気温、湿度、CO₂濃度、気流、培地水分、培地通気性など)の影響に加えて、微小重力や低圧環境など宇宙特有の環境条件の影響についても検討しなければならない。

<温度環境>

光合成反応には最適温度があり、一般に純光合成速度が最大となる葉温は、20～30℃の範囲にある。葉温は、葉で吸収されるエネルギーの増加や葉から外気へ輸送されるエネルギーの低下に等によって変化する。従ってこれらのエネルギー収支に關与する環境要因は葉温に影響し、ひいては光合成・成長に影響するため、複合環境制御の考え方が重要となる。

<湿度環境>

相対湿度と純光合成速度の關係は、他の環境条件(たとえば気流速度など)によって変化するが、一般に相対湿度 75～85%で純光合成速度は最大となる。



重力変化にともなうオオムギ
葉表面の温度分布の変動

月面農場システム

<光環境>

宇宙での植物栽培では空間容積、エネルギー使用量などが限られるので、植物密度を高め、同時に照明効率を高める必要がある。光源には、発光効率、耐久性、安全性に優れ、また広範囲で正確な波長制御が可能な発光ダイオード(LED)を用いる。

<CO₂環境>

一般にCO₂濃度の上昇により純光合成速度は増加するが、CO₂飽和点を超えると純光合成速度は増加しなくなる。

植物の光合成に対するCO₂濃度の影響は、光強度や温度など、他の環境要素により大きく異なる。

<気流環境>

栽培空間の環境条件を均一にし、また純光合成速度や蒸散速度を高めて生育を促進するために、栽培空間の空気を攪拌する必要がある。気流速度が低下すると葉面境界層抵抗が増大し、光合成や蒸散が抑制され、その結果生育が抑制される。



LED水耕栽培システム

■ 高効率食料生産

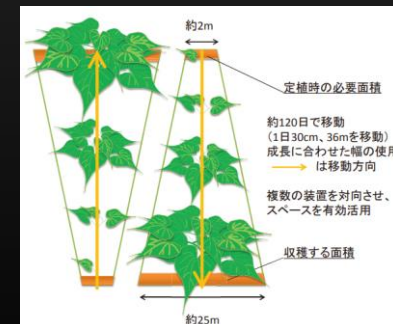
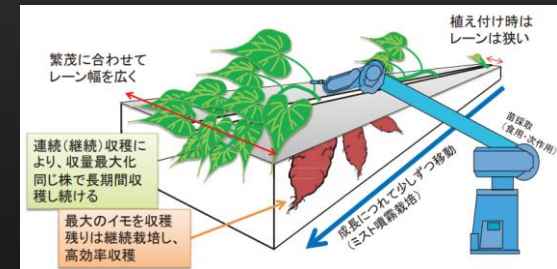
<省リソース栽培>

・栽培は土を使用しない水耕栽培がベースとなる。ただし月面では水は非常に貴重な資源であり、培養液を循環させることによるロスや、培養液中の肥料成分の偏りを避けるためにも植物の生育に最低限の給水にとどめる必要がある。そこで作物栽培にはドライミストによる噴霧水耕栽培システムは有効な栽培方法の一つであると言える。

・作物は成長するにつれて必要な栽培面積が増えていくが、最初からある程度の広さを確保することは空間利用効率の観点ではあまり合理的ではない。しかし作物の成長に合わせて広げていくのは人的リソースの問題から避けたい。そこで省スペースで高効率な栽培方式である連続栽培方式を採用することで、必要な栽培面積を削減できるとともに人作業の軽減も図ることが可能である。



ドライフォグ栽培システム



連続栽培における株間拡大による面積使用効率の上昇

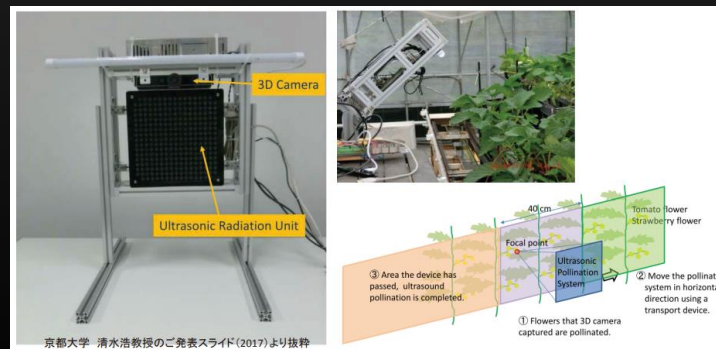
<人作業の削減>

・食料生産にかかる作業量を最小にするためにはできるだけロボット等に頼った自動化システムが必要となる。農作物のうち可食部を的確に認識し収穫を確実にこなしたり、生育の状況や収穫タイミングなど栽培上必要な情報を得たりするために人工知能に裏付けされた画像解析・認識技術の導入は不可欠である。



自動収穫システム

・またイチゴは結実させるために受粉が必要であり、農業の現場においてもハチを利用して受粉させたりしているが月面においてはハチの利用は個体の確保や維持が問題となる可能性が高いことから、自動で機械的に受粉させる技術が望まれる。有望な技術として、フェーズドアレイを3D画像認識と組み合わせ、超音波のパルス圧を利用してイチゴの花を揺らし、受粉させる非接触のシステムが考えられる。



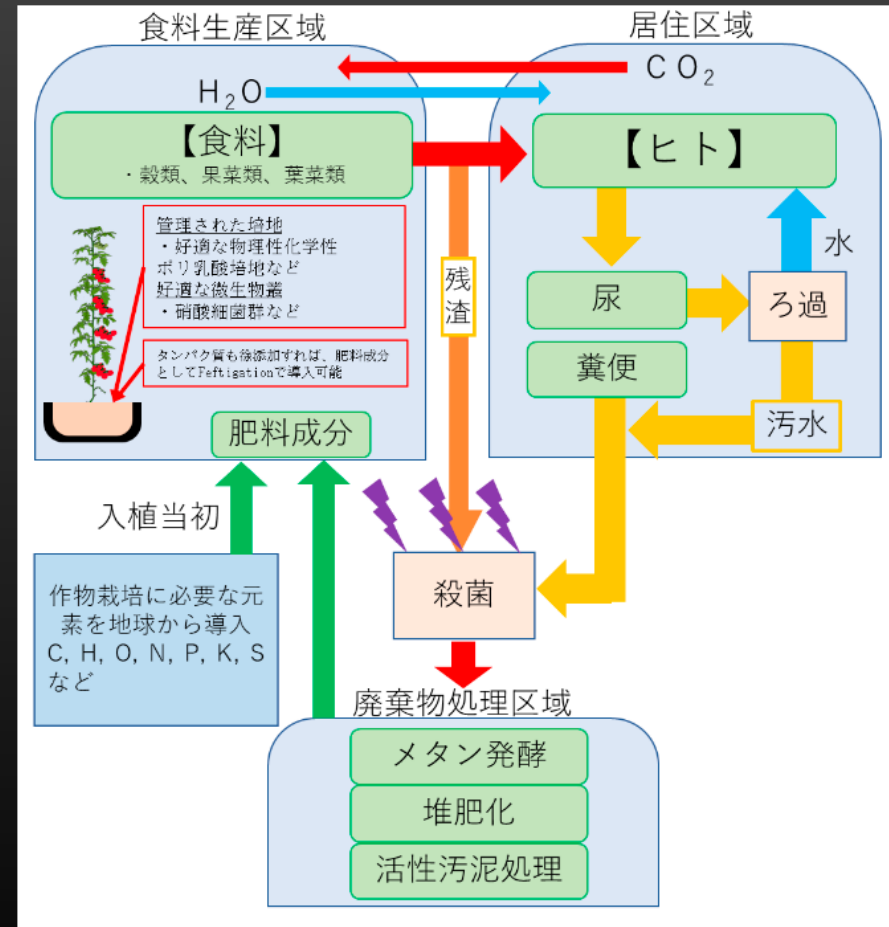
イチゴの非接触受粉システム

■ 物質循環システム

・月－地球間の輸送は莫大なコストがかかるため、作物を生産するために必要な炭素や窒素などの元素は、その都度の交換輸送ではなく、月面での生活において生じる作物残渣などの有機性廃棄物から、効率的に回収して循環利用する必要がある。

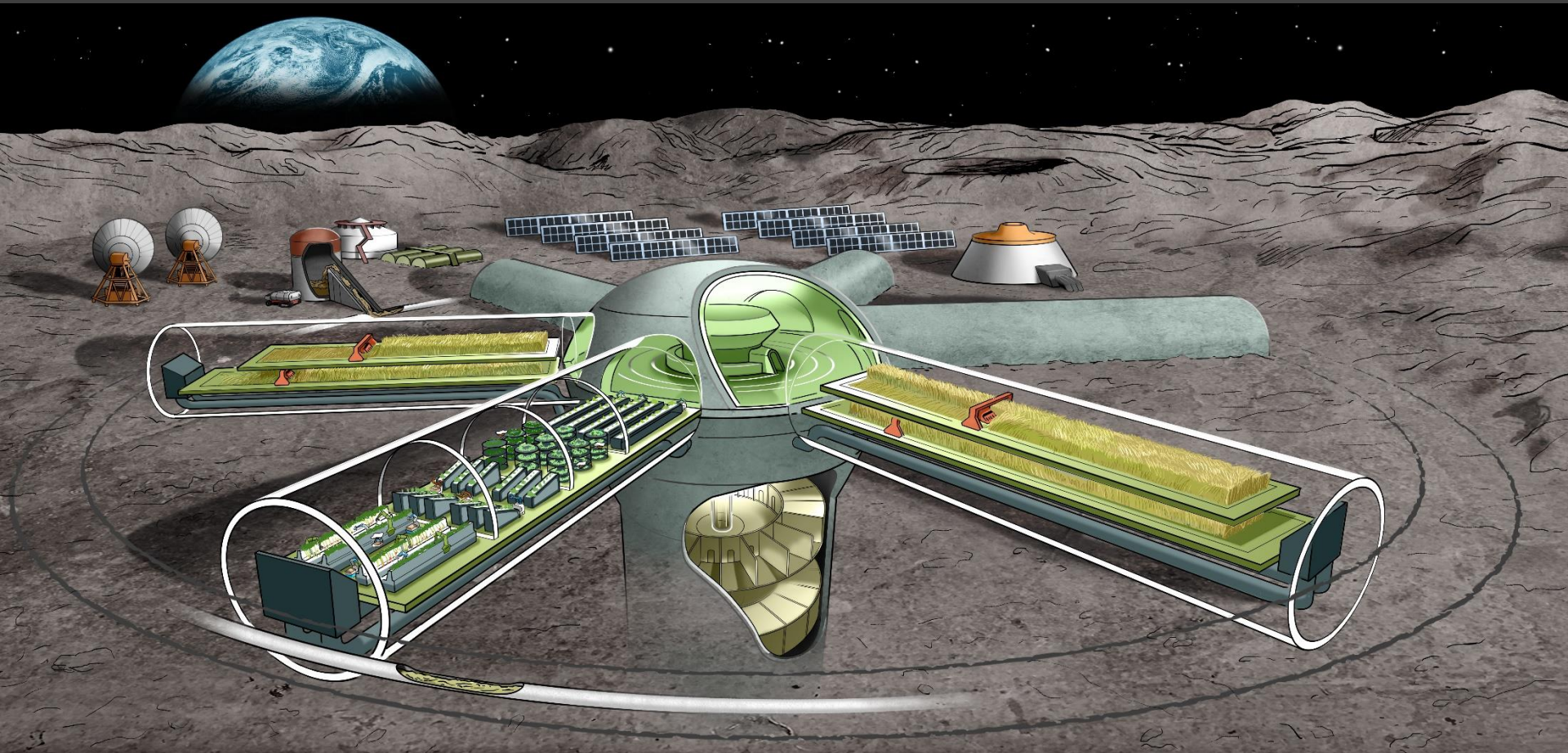
・資源循環システムの中核処理技術として、微生物を利用した生物化学的物質変換を想定する。月面においては、窒素、炭素、水が少なく、これらの元素は植物の必須元素でもあるため、資源として効率的に再利用する必要がある。

そこで、ヒトが居住する区域と植物群を生産する区域、廃棄物処理区域をある程度独立させることで、効率的な資源循環が行えると考えられる。



月面における食料生産と物質循環

月面農場WG検討報告書

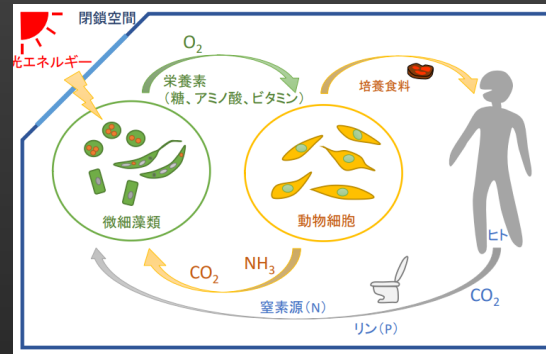
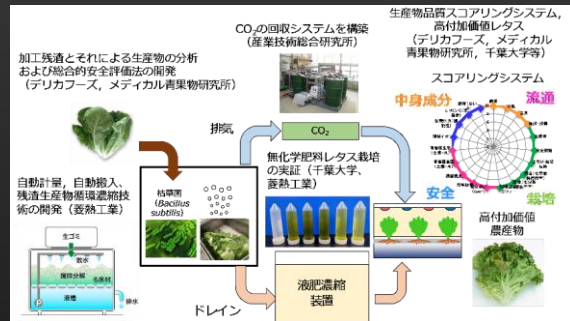


月面農場イメージ©JAXA月面農場ワーキンググループ
月面農場ワーキンググループ検討報告書第1版(2019年6月発行)
<http://www.ihub-tansa.jaxa.jp/Lunarfarming.html>

探査ハブにおける食料生産関連研究

循環

- ・残渣処理
- ・資源化



消費

加工

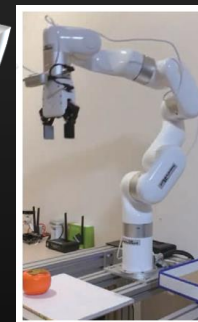
生産

- ・植物栽培



販売

流通



- ・貯蔵

販売・消費

加工・流通

農業を中心としたフードシステム

月面食料生産システム構築に向けた 現在の取り組み

<月面フードシステムワーキンググループ>

■ 背景

- ✓ 月面農場ワーキンググループ(2017)での検討、それをベースとしたSPACE FOODSPHERE(2020)における具体的な研究開発が進んでいる
- ✓ アルテミス計画が進められるなか、月面での食料生産の方向性をより具体化していく必要性が出てきた

■ 目的

- ✓ 宇宙での食料生産に関する国内外の研究開発状況やシナリオ、ロードマップをベースとして今後の月面食料生産の全体像を描き、ロードマップをアップデートする
- ✓ 省リソースにフォーカスした実現可能なシステムを検討する
- ✓ 食料生産後のプロセス(調理・加工・貯蔵)方法の検討や、植物以外の食料生産の有効性、実現性を検討する

宇宙のフードシステム



農業を中心としたフードシステム



ご清聴いただきありがとうございました