

5. 高効率食料生産

近藤直(京都大学大学院 農学研究科地域環境科学専攻 教授)

大場隆之(東京工業大学 未来産業技術研究所 教授)

伊藤浩之(東京工業大学 未来産業技術研究所 准教授)

鹿島光司(株式会社 朝日工業社)

深水克郎(東京工業大学未来産業技術研究所)

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

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

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

5.1. 共通技術

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

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

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

5.2. 各栽培品目の栽培方式

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

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

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

表 5.1 各作目の供給人数別の栽培方式

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

5.3. 各栽培品目の生育過程分割と適切なモニタリング項目

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

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

5.3.1. イネ (バッチ方式)

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

イネの必要栽培面積は 4000m² と試算されている(表 5.1)。ほかの品目と比較して広い栽培面積が必要であり、機械化による恩恵を強く得られると考えられる。播種から収穫までイネはひとところで栽培されるため、図 1A)のように栽培エリア上を移動するガントリと呼ばれる機械を改良し、すべての作業を自動で行えるようにすることが効率的であると考えられる。ガントリのアームに装備された多機能ヘッドが、播種、生育確認、収穫適期判断および収穫作業を実施する。4000m²の栽培面積の確保案としてここでは、1基のガントリが担う栽培部分をモジュール的にとらえ、それらを平面的に組み合わせることで栽培面積の柔軟な拡大にも対応できるシステムを提案する。人工照明を用いた栽培を前提にしているため、このモジュールを平面的ではなく多段に構成することで面積を有効活用することも可能である。

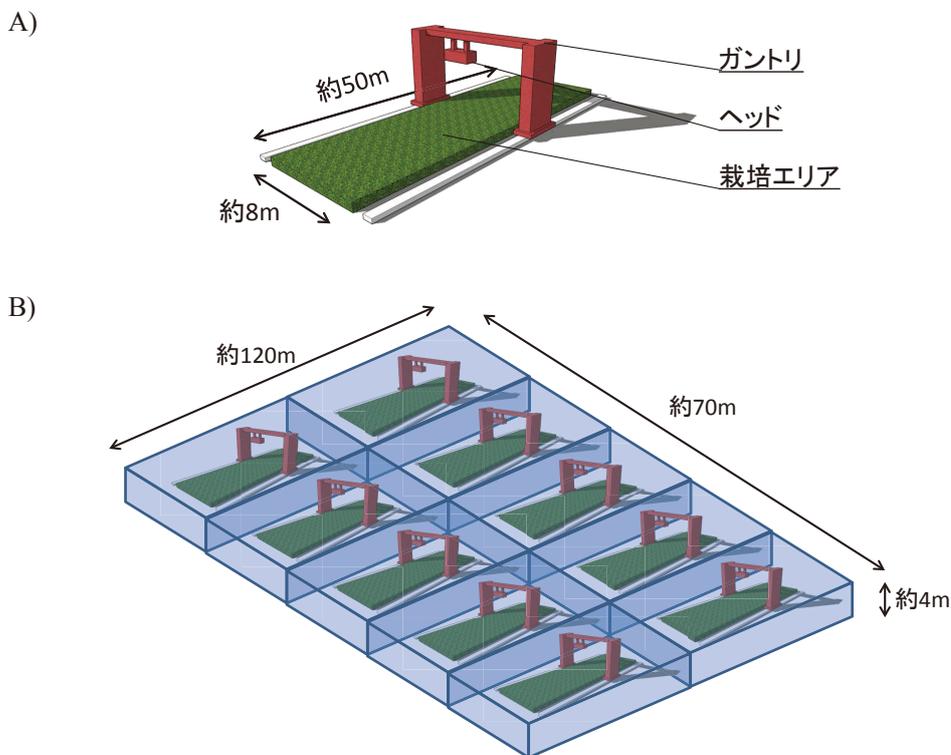


図 5.1 バッチ方式に用いられるガントリ式栽培装

- A) ガントリ式栽培装置の基本単位イメージと大きさ
- B) 空調・照明のための個別モジュールで囲み、100名の居住者分のために複数接続したイメージ図

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

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

5.3.2. ダイズ (バッチ方式)

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

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

5.3.3. サツマイモ (連続方式)

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

100 人の居住者のためにサツマイモを適切な量だけ供給するためには、2250m² の栽培面積が必要との試算がなされた(表 5.1)が、省スペースで高効率な栽培方式である連続栽培方式を採用することで、必要な栽培面積を削減できる可能性がある。連続栽培方式はベルトコンベアのような可動式の栽培面を持つ栽培装置により栽培する方法(図 5.2)で、環境を一定にコントロールできる場所では年間を通じて栽培・収穫が可能であるため毎日の作業の平準化や収穫などの作業場所の集約につながり得る。また、作物が幼苗の時期は密集して栽培できるため、株間を調節する方法との組み合わせで栽培面積の利用効率を向上させることができる。

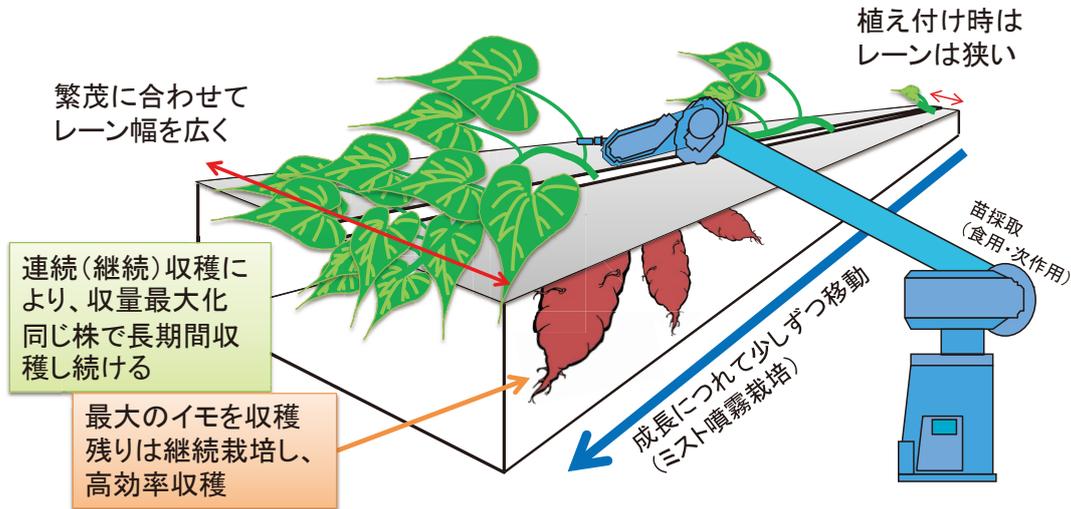


図 5.2 サツマイモの葉の繁茂とともに栽培幅を広げる連続栽培装置の模式図

例えば本 WG で仮定されたサツマイモの 1 人 1 日当たりの必要重量は 150g であるから、100 人の居住者が毎日 15kg のサツマイモを食すことになる。サツマイモは 1m² あたり少なくとも約 2kg は収穫を見込めるため、毎日収穫面積として 7.5m² が必要となる。サツマイモが 4 か月で栽培開始から収穫を迎えると仮定した場合、毎日 7.5m² を収穫し続けるためには単純計算では 900m² が必要栽培面積となるが、上述した幼苗時の密植を達成できると必要な面積は 2 分の 1 程度の削減が見込まれる(図 5.3)。

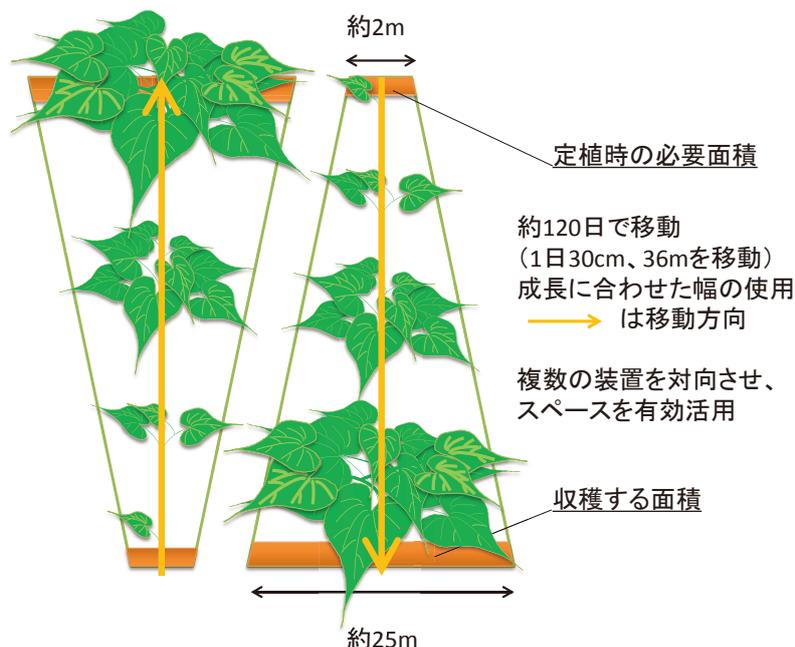


図 5.3 連続栽培における株間拡大による面積使用効率の上昇

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

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

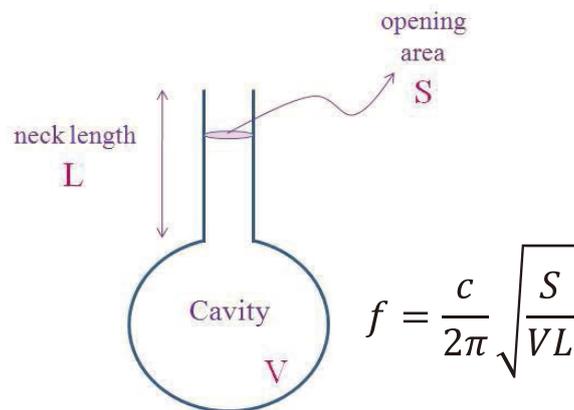


図 5.4 ヘルムホルツ共鳴の模式図及び共鳴周波数の理論式
図中の式内の c は音速を表す。

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

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

5.3.4. ジャガイモ (連続方式)

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

ジャガイモはサツマイモと同じく連続方式が適用できるものと考えられる。

5.3.5. レタス（連続方式）

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

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

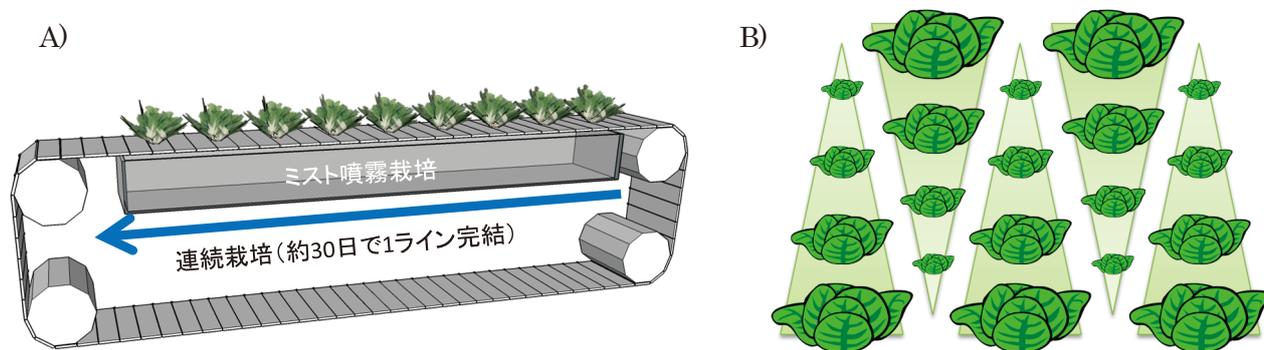
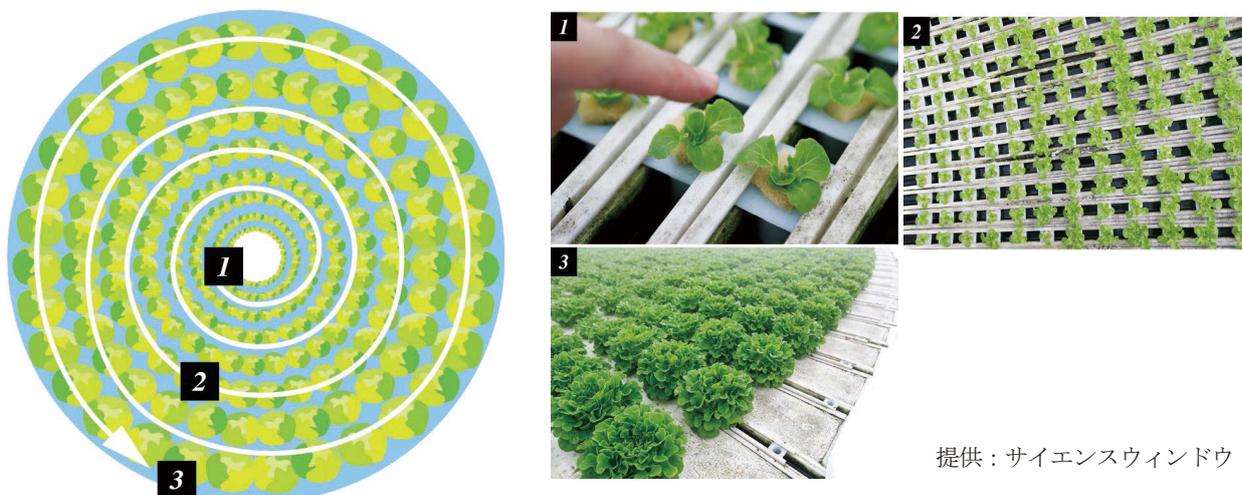


図 5.5 レタスの連続栽培方式のイメージ図

- A)コンベアとその内部に備えたミスト噴霧栽培用の地下部の模式図
- B)成長とともに株間を広げ、さらに複数の装置を対向させて配置した場合の模式図

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



提供：サイエンスウィンドウ

図 5.6 中心から外周部へらせん状に移動する栽培方法の模式図と実際の株間調整方法
 左模式図中の 1～3 の番号は右写真の番号と対応している。
 1 は出芽直後、2 は徐々に生育するレタスを示し、3 は収穫間際の株間調整を受けたレタスである。

5.3.6. トマト（多段棚）

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

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

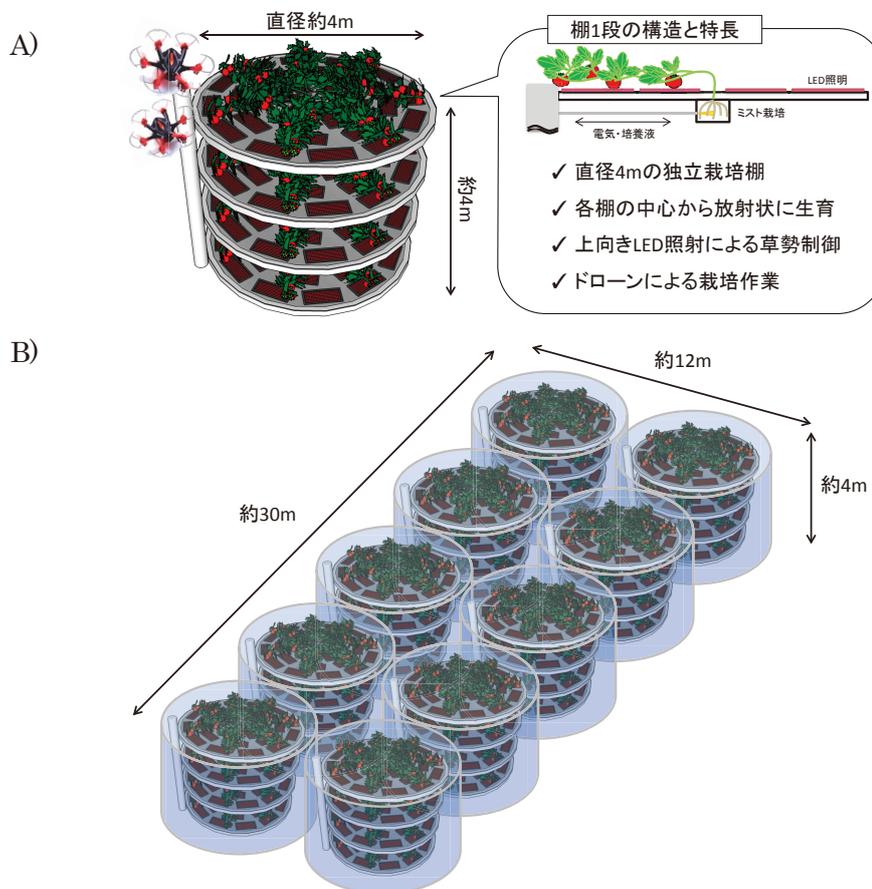


図5.7 トマト栽培のための多段棚イメージ

A)単位モジュールを4段1組とした際のイメージとサイズ B)100名の居住者へ供給するためのシステム案

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

5.3.7. キュウリ (多段棚)

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

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

5.3.8. イチゴ (個別)

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

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

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

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

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

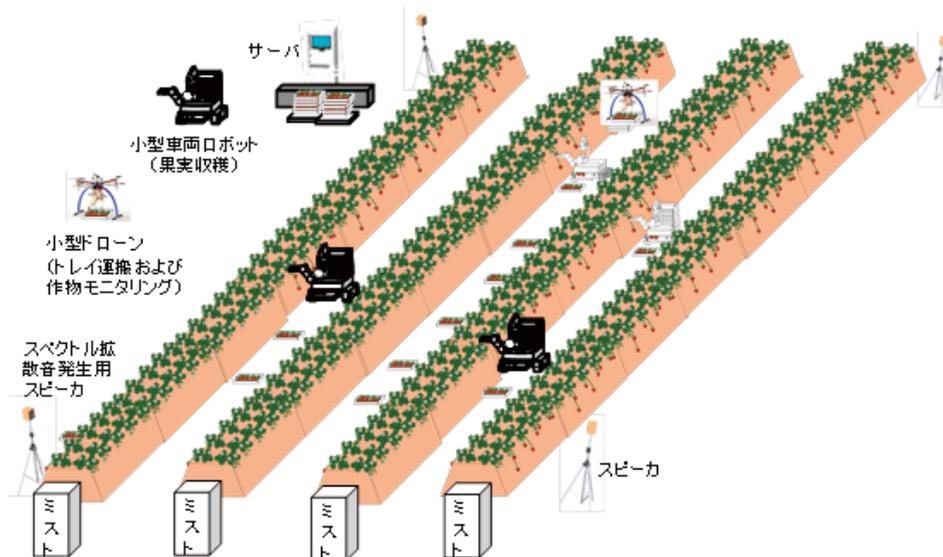
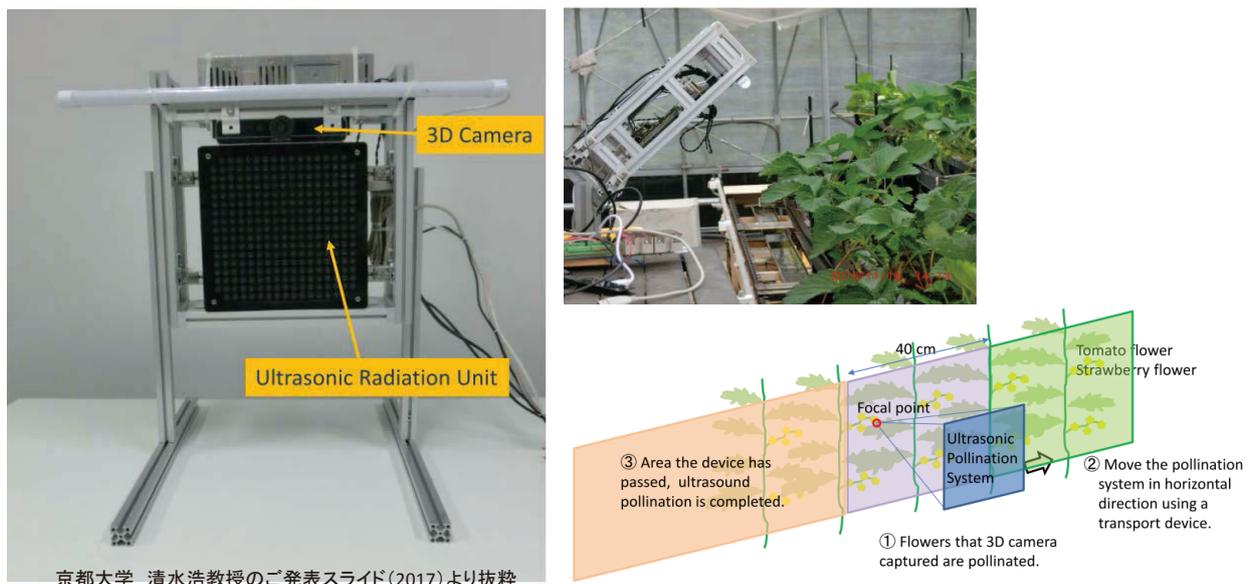


図 5.8 イチゴの栽培方式およびスペクトル拡散音信号により制御される複数のドローンと収穫ロボットの模式図

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



京都大学 清水浩教授のご発表スライド(2017)より抜粋

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

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

参考文献

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