

4. 栽培システム

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

宇宙での植物栽培では空間容積、エネルギー使用量などが限られるので、植物密度を高め、同時に照明効率を高める必要がある。光源には、発光効率、耐久性、安全性に優れ、また広範囲で正確な波長制御が可能な発光ダイオード(LED)を用いる。気温、湿度などの環境は地上での一般的な最適値に制御し、また CO₂ 濃度は 0.7~1 mmol mol⁻¹ に制御する。

宇宙植物栽培装置を用いて、効率的な植物生産を行なうための環境制御技術を確立するためには、植物のガス交換および成長に対する物理的環境要素(光強度、明暗周期、光の波長、気温、湿度、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。

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

4.1. 月面農場における作物栽培環境制御の基本的留意点

4.1.1. 光環境

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

4.1.2. 温度環境

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

4.1.3. 湿度環境

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

4.1.4. 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。CO₂ 飽和点は、光強度の増加に伴い上昇する。CO₂ 補償点(純光合成速度がゼロとなる時の CO₂ 濃度)は、光強度の増加に伴い低下する。CO₂ 濃度の上昇に伴い、純光合成速度に対する葉温の影響は著しくなり、純光合成速度を最大にする葉温は、高温側に移行する。低 CO₂ 濃度下では、葉温を高めて光合成反応に関与する酵素の活性を高めても、光合成の材料である CO₂ の量が制限因子となるので、純光合成速度増加に対する葉温上昇の効果は小さい。

4.1.5. 気流環境

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

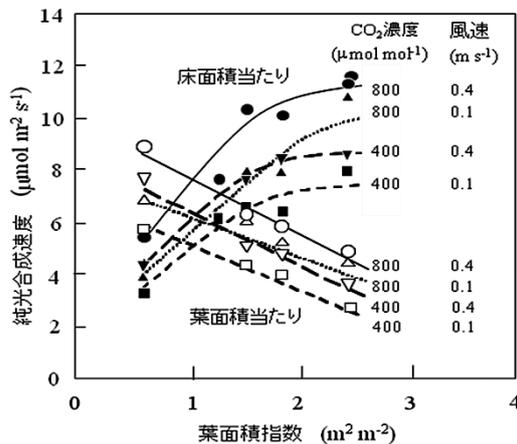


図 4.1. トマト苗個体群の純光合成速度に及ぼす葉面積指数 (LAI)、CO₂濃度、および風速の影響 (Kitaya et al., 2004 より) (黒塗潰し：床面積当たり、白抜き：葉面積当たり)

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

4.1.6. 根圏環境

一般に養分組成、pH および液温の制御は、養液タンク内で行う。しかしガス環境の調節は養液タンク内だけでは不十分である。とくに根が常に養液中にある水耕栽培の場合、液中に溶存している O₂ 濃度が生育の制限要因になることが多い。たとえば、 20°C の水 1 リットル中に溶存できる O₂ は最大でも 9.3 mg に過ぎず、根の呼吸により短時間で消費される。したがって正常な根の機能を維持するためには、常に養液中に O₂ を補給する必要がある。とくに液温が高くなると、根の呼吸速度が増加し、O₂ 消費量が多くなることに加えて、液中の飽和 O₂ 濃度は低下するので、O₂ 不足になりやすい。根への O₂ 供給量を増すため、送液方法や栽培ベッドの構造などにいろいろな工夫がなされている。静水中での O₂ 拡散係数は静気中の約 1 万分の 1 であるので、水耕栽培の根の近傍では O₂ が吸収されると濃度はすぐに低下する。根が常に培養液中にある水耕栽培では根周辺の O₂ 濃度は低下し易いため、養液を強制流動させて、O₂ を根の表面まで速やかに輸送することが重要である。噴霧耕の場合、根への O₂ 供給が制限されることはない。

4.2. 宇宙微小重力下での植物栽培

4.2.1. 宇宙微小重力下での植物栽培における環境制御の問題点

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

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

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



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

4.2.2. 微小重力が植物葉の熱・ガス交換におよぼす影響

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

1回の放物線飛行において、重力1 Gでの水平飛行から約20秒間の上昇加速飛行(2 G)を経て、約20秒間の微小重力飛行(0.01 G)を行ない、その後水平飛行に戻るまでの約30秒間は1.5 Gの重力を受ける。水平飛行時(重力1 G)、上昇加速飛行時(2 G)、微小重力飛行時(0.01 G)、および水平飛行復帰時(1.5 G)におけるオオムギ生葉の葉温分布を図4.3に示す⁷⁾。葉温分布は、赤外線熱画像カメラで取得した。重力が1 Gから2 Gに増加すると、葉の中央部の高温域が減少し、0.01 Gになると高温域は増加し、1.5 Gになると再度減少した。葉の平均温度は、水平飛行時約30℃であったが、上昇加速飛行時に約0.3℃低下した。その後、微小重力飛行開始とともに、葉温は直線的に上昇し、20秒後には1 Gでの葉温より約1℃上昇した。水平飛行に復帰する時に重力が上昇すると、葉温は再び低下した。また微小重力下では、葉の先端部の細い部位における葉温が2~3℃上昇し、葉の広い部位に比べて葉温上昇が顕著であった⁸⁾。重力1 G下では対流が生じており、葉の先端部の細い部位における葉面境界層が、葉の広い部位のそれに比べて薄く、そのため熱(潜熱+顕熱)輸送に対する抵抗が小さいので、細い部位の葉温は広い部位より低い。しかし対流のない微小重力下では、葉の幅に関係なく葉面境界層の厚さがほぼ一定であるので、葉温も葉の幅に関係なくほぼ同じ値に近づく。そのため重力が1 Gから0.01 Gに低下すると、微小な部位の温度上昇が顕著になり、葉面での温度分布は均一化される。

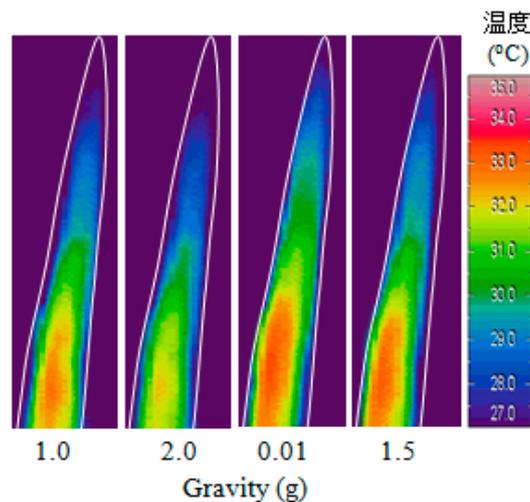


図 4.3 航空機放物線飛行中の重力変化にともなうオオムギ葉表面の温度分布の変動

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

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

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

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

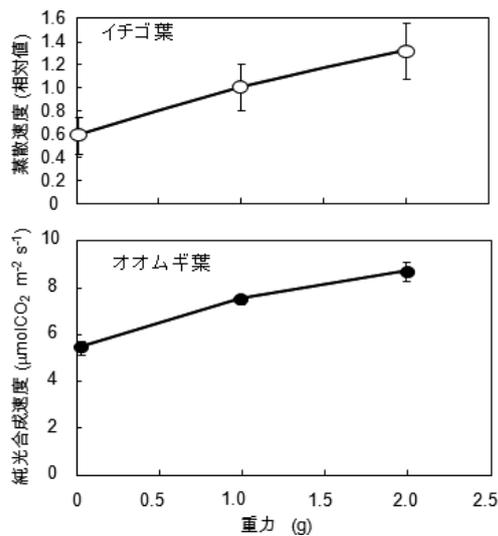


図 4.4 異なる重力レベルにおけるオオムギの純光合成速度

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

各値は4回の放物線飛行についての平均値。縦棒は標準偏差を表す。

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

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

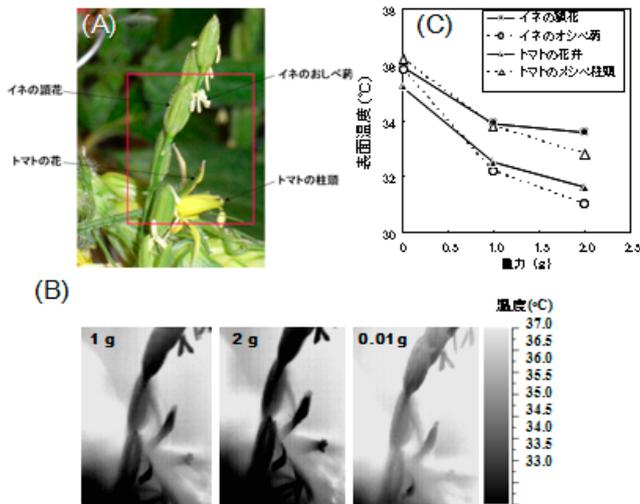


図 4.5 植物生殖器官の表面温度に及ぼす重力の影響 (Kitaya and Hirai, 2013 より)

- (A) 測定部位の写真
- (B) 航空機放物線飛行中の異なる重力 (1, 2, 0.01 g) 下での熱画像
- (C) 植物生殖器官の表面温度に及ぼす重力の影響を示すグラフ

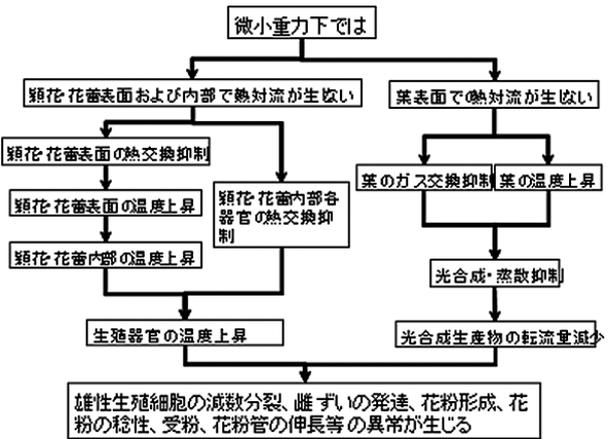


図 4.6 ガスおよび熱交換の観点から見た植物の生殖成長に及ぼす微小重力の影響

4.3. 宇宙環境での植物栽培におけるその他の留意点

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

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

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

4.4. 栽培システム機能、構造

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



図 4.7 多段式 LED 水耕栽培システム
(玉川大学 FST ラボ)



図 4.8 12 段式リーフレタス生産施設
(玉川大学 LED 農園)

4.5. 栽培方法・栽培条件・管理

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

①栽培期間が短い葉菜類：リーフレタス

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

②栽培期間が長い穀物類：イネ、ダイズ

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

③根菜類：サツマイモ、ジャガイモ

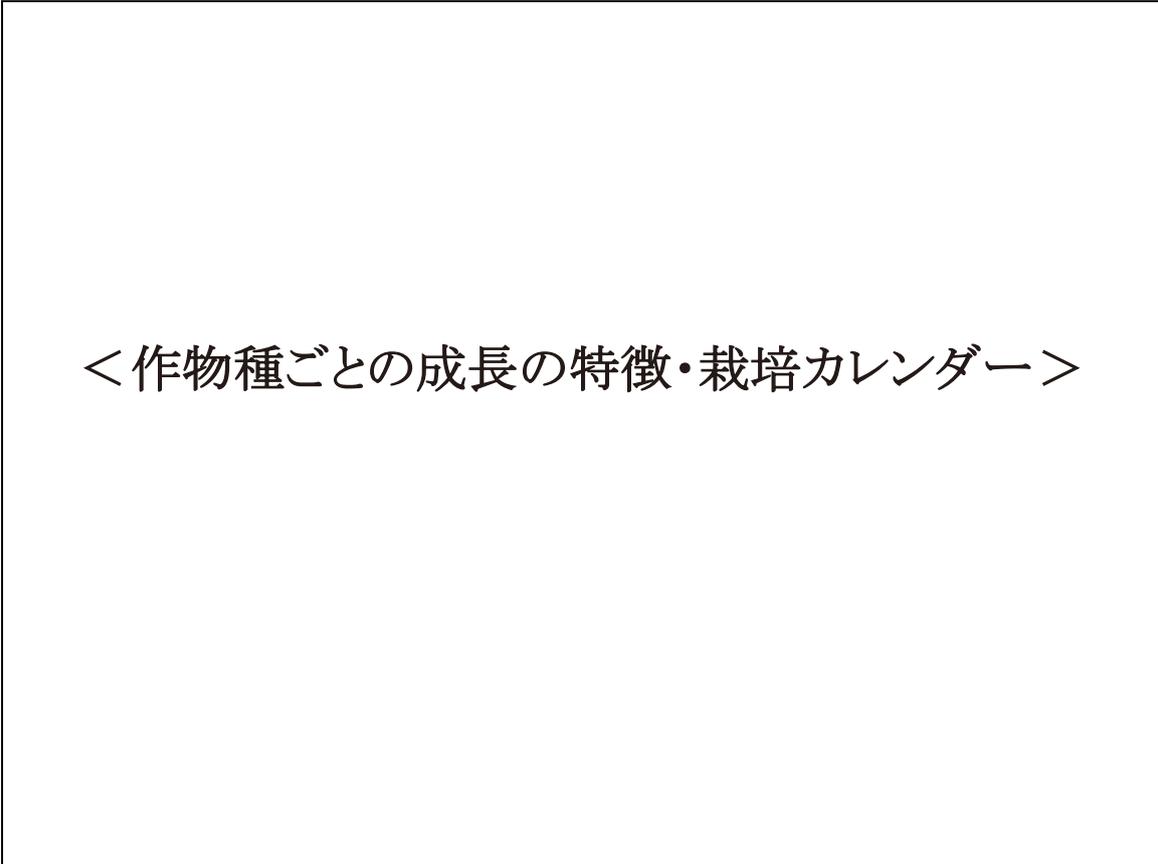
根菜類に対しては、ミスト水耕方式の利用が有効。サツマイモ、ジャガイモともに現状、25 週間ほどの栽培期間が必要であり、栽培期間の短縮が課題。水耕方式を採用することにより、収穫時期を迎えた塊茎、根茎から順次収穫することが可能。

④果菜類：イチゴ、トマト、キュウリ

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

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

(別添) 作物種ごとの成長の特徴・栽培カレンダー



(1) イネ①

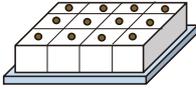
成長過程	種	発芽	苗	出穂
イメージ				
時期(通算)	0日	5日	3週	10週
モニタリング対象	①異常の検知 ②環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	①成長の確認(発芽) ②環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	①成長の確認(葉の枚数、色) ②環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	①成長の確認(穂数、花粉の充実度合い) ②環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)
センサー	①イメージ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

(1)イネ②

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

(2)ダイズ①

参考)タキイ種苗HP
一部改編

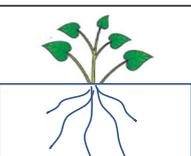
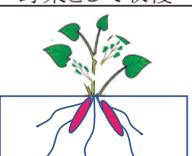
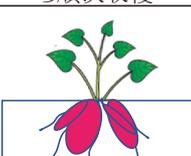
成長過程	播種	発芽	転倒防止、摘心	成長
イメージ		 噴霧水耕装置	 噴霧水耕装置	 噴霧水耕装置
時期(通算)	0日	3日前後		1カ月
モニタリング対象	①異常の検知 ②環境管理 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度) ・(光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度)	①成長の確認(芽) ②環境管理 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度) ・(光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度)	①成長の確認(葉の枚数) ②環境管理 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度) ・(光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度)	①成長の確認(葉の枚数) ②環境管理 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度) ・(光の強さ、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

(2)ダイズ②

参考)タキイ種苗HP
一部改編

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

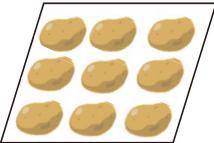
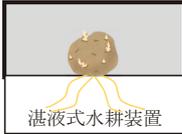
(3)サツマイモ

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

＜サツマイモ栽培に関するその他の注意点＞

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

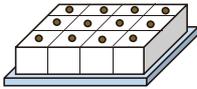
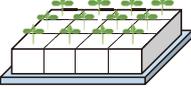
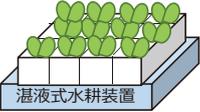
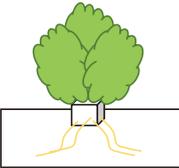
(4) ジャガイモ①

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

(4) ジャガイモ②

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

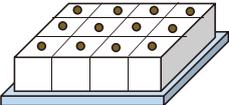
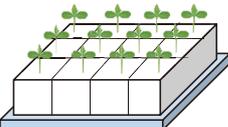
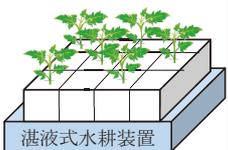
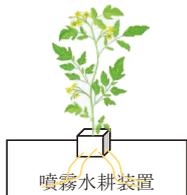
(5) リーフレタス

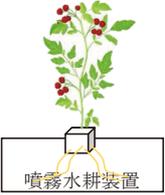
成長過程	播種	発芽	育苗	成長→収穫
イメージ				
時期	0日	播種から4～5日後まで	播種から18、19日後まで	播種から32～40日後まで
モニタリング対象	①環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	①葉の色・サイズ ②光合成能力 ③環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度	①葉の数・色・サイズ ②光合成能力 ③環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)	①葉の数・色・サイズ ②光合成能力 ③環境管理 ・光の強さ、温度、湿度、二酸化炭素濃度 ・水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)
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

<レタス栽培に関するその他の注意>

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

(6)トマト①

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

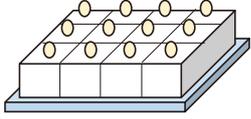
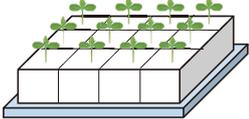
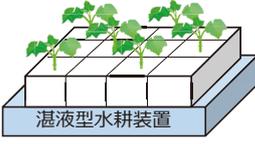
(6)トマト②				
成長過程	収穫	摘心(*)	芽かき(*)	誘引(*)
イメージ				
時期	播種から4~7ヶ月後頃迄 (約100日間)			
モニタリング対象	①葉の色・サイズ ②光合成能力 ③環境管理(光、温度、湿度、二酸化炭素濃度) ④水耕溶液モニタリング(pH、塩濃度)			
センサー	①イメージセンサー ②クロロフィル蛍光測定			
栽培作業	適宜、摘心・芽かき・誘引を実施(*) 側枝が広がると栄養分を取られてしまうため、脇芽をとる。 ドローンによる収穫			

参考)タキイ種苗 HP

<トマト栽培に関して>

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

(7)キュウリ(ミニキュウリ) ①

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

(7)キュウリ(ミニキュウリ) ②

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

<ミニキュウリ栽培のその他の注意>

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

(8)イチゴ①

参考)タキイ種苗 HP
一部改編

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

(8)イチゴ②

参考)タキイ種苗 HP
一部改編

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

参考文献

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