

## 長期有人宇宙活動を支える植物

北宅 善昭

大阪府立大学生命環境科学研究科  
〒599-8531 堺市中区学園町 1-1

### Plants to support long-term manned space activities

Yoshiaki Kitaya

Graduate School of Life and Environmental Sciences, Osaka Prefecture University  
Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai, Osaka 599-8531, Japan

Key words: Controlled ecological life support system,  
Gravity, Plant factory, Space farming

DOI: 10.24480/bsj-review.11a9.00181

#### 1. はじめに

地球から約 400 km の距離にある国際宇宙ステーション (ISS) では、2000 年 11 月から宇宙飛行士の常時滞在が開始され、多くの観測や科学実験が行われてきた。今後、地球から約 38 万 km 離れた月へ、さらには約 7,800 万 km 離れた火星への有人ミッションが十数年内に予定されており、人類の火星移住という壮大な構想もある。将来、月や火星にヒトが長期滞在する場合、地球上 (以下、地上) に似た生存環境を作る必要がある。またそれ以前に予定されている長期有人宇宙探査で、ヒトが輸送機に乗り宇宙に出ていく場合にも、生命維持の環境が不可欠である。

現在の飛行技術では火星への往還飛行のみで約 15 ヶ月を要する。NASA の試算によると、成人男性 1 人が通常の活動を行う場合の 1 日分のエネルギー (2,800 kcal) や栄養素を摂取するために必要な食料は乾重で 0.62 kg、水は 3.08 kg、呼吸に必要な O<sub>2</sub> は 0.84 kg であり、排出される固形物は 0.11 kg、水は 3.42 kg、CO<sub>2</sub> は 1.0 kg である (図 1 の中央部) (新田 1989)。1 人 1 日に約 4.5 kg の物質を取り込み、排出する。現在の技術では、無人機を用いて 1 kg の物資を ISS まで運ぶだけでも数百万円の経費が必要である。火星滞在期間を含めて、複数乗員の生命維持のための物資は膨大な量となり、全てを地球から運ぶことは技術的にも経済的にも困難である。このように長期間宇宙に滞在する場合、ヒトの生存に不可欠な食料の生産、空気や水の浄化、物質リサイクルなどを閉鎖環境下で行なう閉鎖生態系生命維持システム (Controlled Ecological Life Support System, 略して CELSS (セルス)) が必要となる。CELSS では基本的に、ヒトを含む動物の呼吸により排出される CO<sub>2</sub> は植物の光合成で吸収・固定され、その時に発生する O<sub>2</sub> が動物の呼吸に利用される。また、動物の排泄物や植物の非可食部分は、酸化されて水と CO<sub>2</sub> およびその他の無機物に変換されるので、その酸化に必要な O<sub>2</sub> の供給

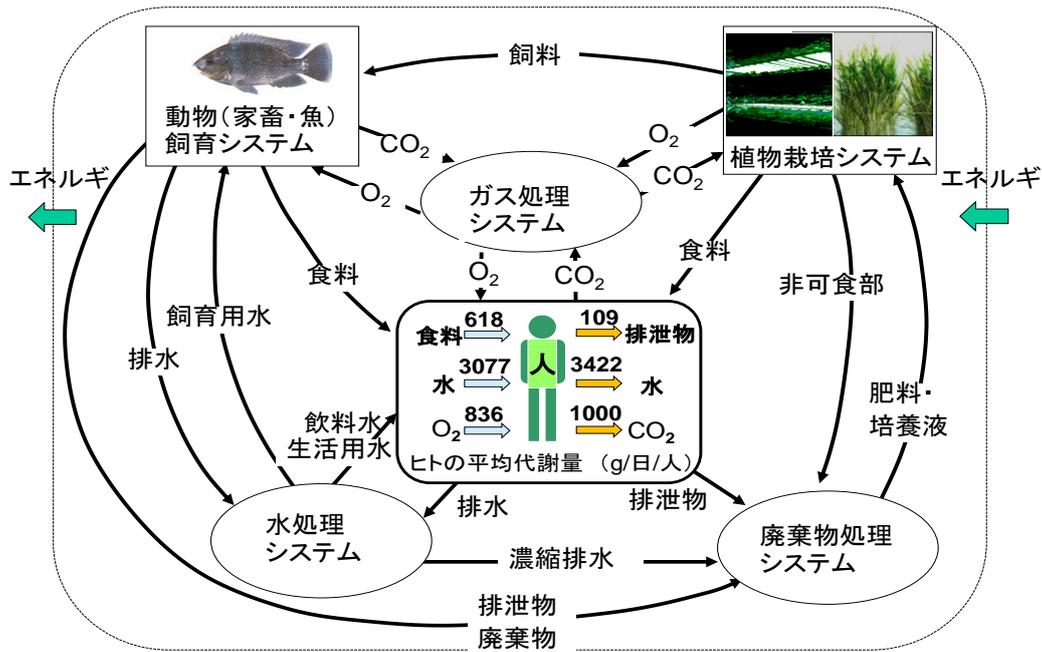


図 1. 長期の有人宇宙活動を支えるための完全物質循環システム

および発生する CO<sub>2</sub> の吸収も植物の光合成が担える。さらにヒトに有害な微量ガスや不快臭気の吸収、除去も植物に依存できる。また飲用水には、植物栽培システムからの蒸発散水を凝縮して用いる。さらに、強度の肉体的・精神的ストレスに曝される宇宙飛行士が、生きた植物と接触し、生鮮野菜を食べることは、精神的ストレス緩和に有効である。したがって CELSS では、食料生産機能に加えて、ガス処理、水処理、精神的ストレス緩和機能などをもつ多機能植物栽培システムの構築が重要となる。

宇宙開発における輸送機開発、惑星探査、深宇宙観測などは物理学、数理学、工学の領域である。そこに有人活動が加わると、CELSS など生存のための技術が重要課題となり、農学や植物学との接点が生じる。ヒトの生存の基本は食料であり、その生産性を高めるためには、農学・植物学領域の知見や技術が必要となる。地上とは異なる環境下、限られた空間・資源・エネルギーの中で安全かつ計画的に食料をヒトに供給するためには、健全に成長する植物の挙動を正確に把握し、生産速度を最大にする環境制御が必要となる。そのためには、発芽から栄養・生殖成長を含む植物生育全段階における形態形成、ガス交換、水収支などの情報を、個体あるいは組織レベルで正確に自動計測し、即時の解析結果に基づくフィードバック・フィードフォワード制御を駆使した環境制御が必要となる。すなわち、植物学・物理学・数理学・工学の観点からの環境制御を中心とした高効率植物生産技術が重要となる。

CELSS での栽培候補植物として、可食部に含まれる栄養素、栽培の容易さなどを考慮して、カロリー源となるコムギ、イネ、サツマイモ、ジャガイモ、脂質源となるダイズ、ラッカセイ、ビタミンなど機能性成分を含むレタス、ニンジン、トマト、イチゴなどが挙げられている。また高速度で増殖するクロレラ、スピルリナ、ユーグレナなどの微細藻類も候補になっている。

表 1. 地球, 月および火星の諸特性

	地球	月	火星
質量( $10^{26}$ kg)	59.8	0.74	6.43
自転周期(日)	0.9973	27.32	1.026
公転周期(日)	365.26	27.32	687
太陽からの平均距離( $10^6$ km)	149.6		227.9
赤道直径(km)	12760	3476	6780
表面気圧(hPa)	約1000	0	約10
表面温度(°C)	7	110(赤道付近の昼) -170(赤道付近の夜)	-93
大気組成(%)	N <sub>2</sub> (78.1) O <sub>2</sub> (20.9) Ar (0.93) CO <sub>2</sub> (0.04)		N <sub>2</sub> (2.7) O <sub>2</sub> (0.13) Ar (1.6) CO <sub>2</sub> (95.32)

空気が無く、あるいはその組成が地球とは大きく異なる宇宙環境(表 1 参照)において、限られた空間で大量の植物を高速で栽培するためには、閉鎖型の植物工場(宇宙植物工場)が不可欠である。CELSS において効率的な植物生産を行なうための環境制御技術を確立するためには、植物のガス交換および成長に対する物理的環境要素(光強度, 明暗周期, 光の波長, 気温, 湿度, CO<sub>2</sub>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。

## 2. これまでの宇宙農業関連研究の概要

地上での宇宙農業研究は、1950 年代に開始された米国空軍および米国航空宇宙局(NASA)による CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>変換のための藻類培養から始まる(Wheeler 2017)。ロシアでも、1960 年代に宇宙を目指した藻類生産と環境制御農業の研究が開始された。NASA は 1980 年から CELSS 研究を開始し、完全閉鎖栽培室(20 m<sup>2</sup>)室内で農作物の環境制御生産実証を行い、1990 年代にはヒトと作物との物資循環に関する研究へと展開している(Wheeler 2017)。欧州宇宙機関(ESA)では、1980 年代後半から Micro-Ecological Life Support System Alternative (MELiSSA)プロジェクトを開始し、微生物も取り入れた CELSS 研究を継続している(Lasseur *et al.* 2010)。またドイツ航空宇宙センター(DLR)を中心に、月や火星での植物工場を目指した EDEN ISS プロジェクト(Zeidler *et al.* 2017)を 2015~2019 年に行い、南極での実証栽培試験も行っている。

CELSS の大規模実験例として、1990 年にアメリカ、アリゾナ州に作られた閉鎖施設がある(図 2)(Allen 1991)。この施設は、地球上の生物圏(Biosphere, バイオスフェア)を模擬した第 2 の生物圏と言う意味で、バイオスフェア II と名付けられた。12,700 m<sup>2</sup>の敷地に、地上部はガラスドームで覆われ、地下部も含めて密閉空間を作り、その内部に地球の生態系をまねて、様々な自然植生や農業生態系、海などを配置した(Allen 1991)。この閉鎖環境下で 1991 年から 1993 年までの約 2 年間、男女 4 人ずつ計 8 人がコムギなどの食料作物、トマトなどの

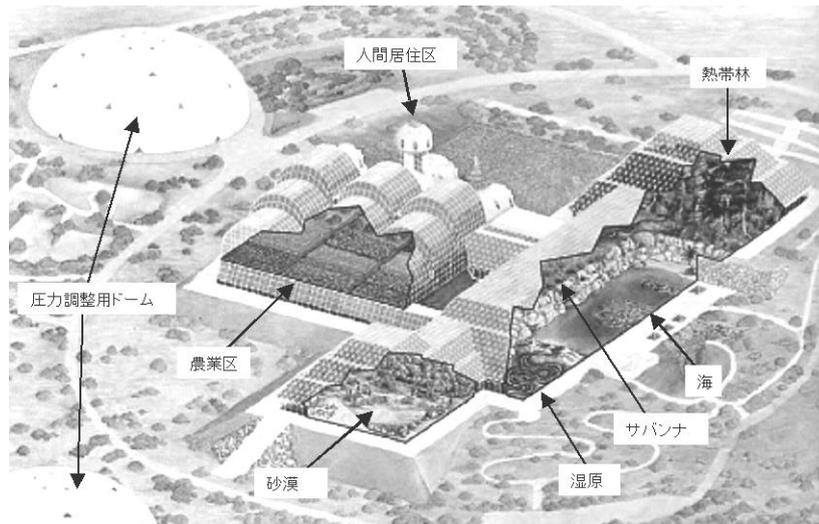


図2. バイオスフェア2の概要

野菜、バナナなどの果樹などを栽培、ヤギを飼育し、自給自足の生活を行った。最初、実験は順調であったが、1年後、内部の  $O_2$  濃度が初期の 21% から低下して 14% の危険値になったため、実験は終了せざるを得なくなった。計画では、土壤微生物や他の生物の呼吸が植物の光合成と釣り合って、 $O_2$  濃度および  $CO_2$  濃度は、初期値を維持できる予定であった。しかし、植物の成長を制御できなかったこと、閉鎖系内に持ち込んだ土壌の中で微生物が急激に増加したこと、構造材のコンクリートによる  $CO_2$  吸収 ( $Ca(OH)_2 + H_2O + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O$ ) が生じたことなどが原因となって、ガス収支が崩れてしまった。この例のように、閉鎖系内では予想できない物質の動きが生じ得ることに留意しなければならない。

1990年代に、日本の環境科学研究所(青森県)では、閉鎖生態実験施設を構築し(Tako *et al.* 1997)、植物栽培を中心に、ヒト、動物、廃棄物の物質循環に関する研究を開始した。ヒト居住施設 (123 m<sup>2</sup>)、植物栽培施設 (150 m<sup>2</sup>)、家畜飼育施設 (54 m<sup>2</sup>)、陸水圏生態実験施設、物質循環処理施設から構成される(図3)。ヒトの食料や家畜の飼料は、植物から得て、植物栽培に必要な肥料はヒトと家畜の排泄物から作るなど、必要な物質は全て内部でリサイクルされ、利用される。植物栽培施設では、成人男性2人が自分たちの生存に必要な栄養を供給する植物(イネ、ダイズ、ジャガイモ、トマト、コマツナ、ピーナッツなど)を栽培する。ヒトの食用にならない部分の一部は家畜の飼料とし、その他は廃棄物として、酸化処理される。この植物栽培施設は、温度、湿度、 $CO_2$  濃度、光などの栽培環境を最適に維持して、限られた空間でより多くの食料を短時間に生産できる植物工場である。家畜飼育施設では、植物を飼料としてヤギを飼育する。糞尿は物理的、化学的に処理されて、植物栽培の肥料となる。物質循環処理施設は、ヒト居住施設、植物栽培施設、家畜飼育施設、陸水圏生態実験施設の間であって、物理化学的処理により物質を目的に応じて変換し、循環させる。たとえば、食料や飼料にならない植物の根やヒト・家畜の排泄物を湿式酸化処理を経て肥料に合成する。また廃水や結露水を浄化して、飲用水、生活用水、植物栽培用水などにする。居住施設内の  $O_2$  が不足する場合には  $CO_2$  を分解して発生させた  $O_2$  を補給し、またエチレンなどの有害ガスを分解処理するなど、システム全体のガス環境を最適に維持している。

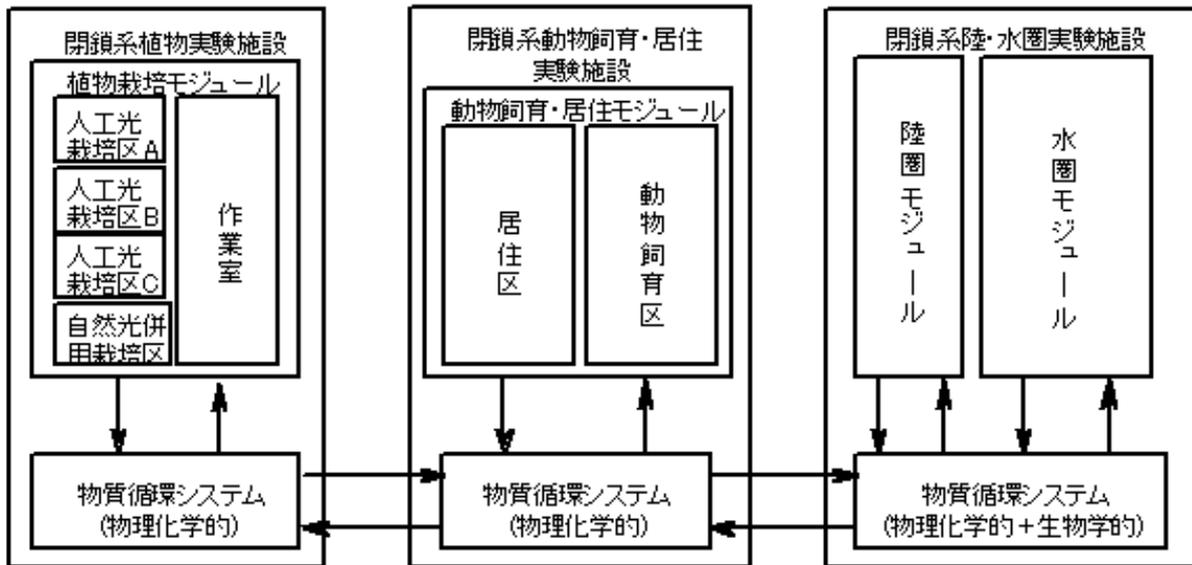


図3. 環境科学研究所閉鎖生態系実験施設の構成  
矢印は物質の流れを示す。

また実験室規模ではあるが、植物と食用菌(キノコ)の複合栽培が実証されている。植物は、明期には光合成により  $\text{CO}_2$  を吸収し、 $\text{O}_2$  を放出する。他方、食用菌は常時  $\text{O}_2$  を吸収し、 $\text{CO}_2$  を放出する。したがって、植物とキノコの栽培室を連結し、両室の空気を循環させることにより、明期に植物栽培室に  $\text{CO}_2$  を供給して植物の成長を促進し、同時にキノコ栽培室の  $\text{CO}_2$  濃度を低下させ、 $\text{O}_2$  を供給して、キノコの成長を促進できた(谷ら 1993, Kitaya *et al.* 1993)。キノコ菌糸の培養培地に植物生産システムから排出される植物残渣を用いることも可能である。このシステムは、高効率な植物・キノコ生産システムとして、物質循環型植物工場の一例と成り得る。

2000年には、カナダ Guelph 大学の研究チームが低圧下での作物群落生産性を調べるための減圧植物生産室を開発した(Dixon *et al.* 2017)。また同時期、火星を目指した宇宙農業の研究会が発足し(Yamashita *et al.* 2005)、宇宙での動物性蛋白質生産や、火星居住のため宇宙農場を中心としたモデルシステムにおける熱や物質の収支、循環(Yamashita *et al.* 2006)などが検討された。最近では、中国の北京航空航天大学が、3人の生存のための空気、水、食料を生産できる農業モジュール(69 m<sup>2</sup>)を含む閉鎖型生命維持施設(Lunar Palace 1)を構築し、試験を行っている(Dong *et al.* 2015)。

### 3. 宇宙植物工場における環境制御

#### 3-1. 宇宙微小重力下での植物生産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応答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。



図4. 地上でのレタスの逆さ吊り下げ栽培  
上下栽培棚の中央に蛍光灯光源を配置し、上下方向に光を照射。

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 (Kitaya *et al.* 1992)。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、結実が可能であ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、結実はするものの、発芽能力を持つ稔性種子の形成率が著しく低下した(例えば、Merkies & Laurinavichyus 1983; Mashinsky *et al.* 1994, Salisbury *et al.* 1995)。

### 3-2. 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が抑制され、葉温の上昇および光合成・蒸散の抑制が起こると考えられる。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による重力変化(0.01~2g)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1gでの水平飛行から約20秒間の上昇加速飛行(2g)を経て、約20秒間の微小重力飛行(0.01g)を行ない、その後水平飛行に戻るまでの約30秒間は1.5gの重力を受ける。水平飛行時(重力1g)、上昇加速飛行時(2g)、微小重力飛行時(0.01g)、および水平飛行復帰時(1.5g)におけるオオムギ生葉の葉温分布を図5に示す(Kitaya *et al.* 2003)。重力が1gから2gに増加すると、葉の中央部の高温域が減少し、0.01gになると増加し、1.5gになると再度減少した。葉の平均温度は、水平飛行時約30°Cであったが、上昇加速飛行時に約0.3°C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1gでの葉温より約1°C上昇した。水平飛行に復帰するため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°C上昇し、葉

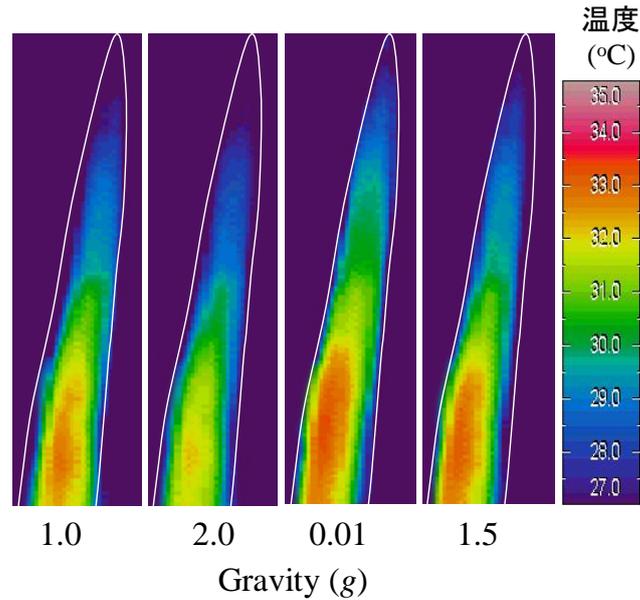


図5. 航空機放物線飛行中の重力変化にともなうオオムギ葉表面の温度分布変動

の広い部位に比べて葉温上昇が顕著であった(図6)(Kitaya *et al.* 2006)。重力 1g 下では、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。しかし強制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。そのため微小重力下では、微小な部位の温度上昇が顕著になる。これらのことから、重力の低下に伴い、葉温が上昇することが確認でき、さらに微小な部位での温度上昇が著しいことが判明した。

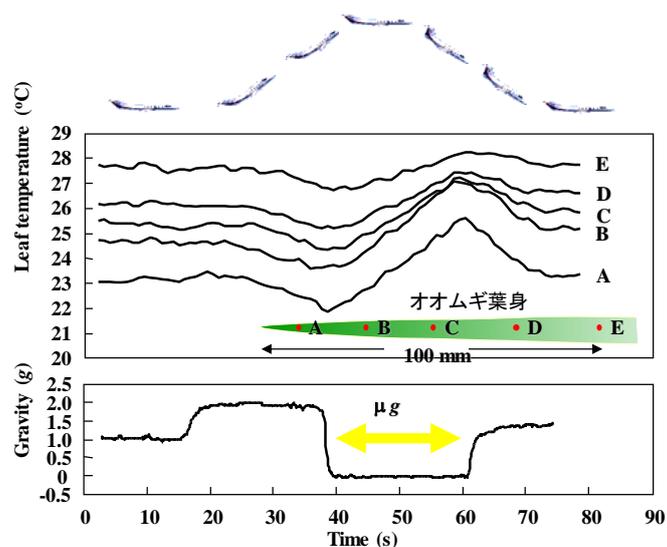


図6. 航空機放物線飛行中の重力変化にともなうオオムギ葉身各部位の表面温度の推移

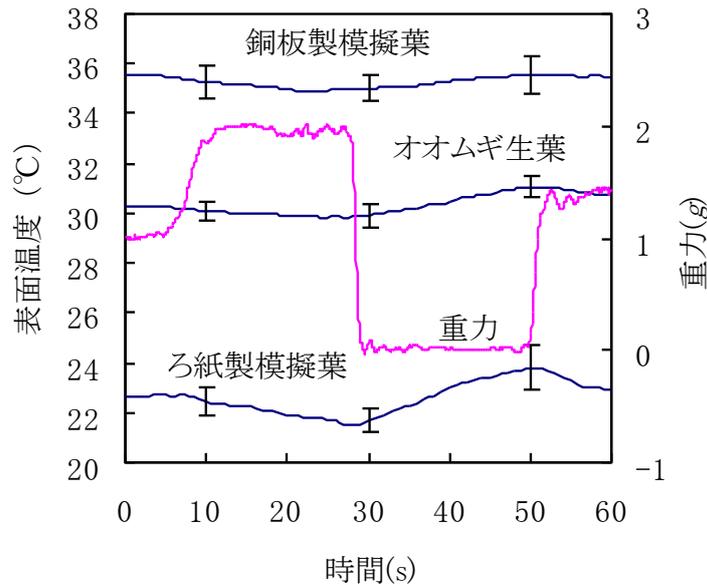


図7. 航空機放物線飛行中の重力変化にともなうオオムギ生葉および2種の模擬葉(銅板性乾燥模擬葉, ろ紙製湿潤模擬葉)の表面温度の経時変動

表面温度の値は、各供試葉表面の平均温度の9回の放物線飛行の平均値。誤差線は標準偏差。

また、重力の変化にともなうオオムギ生葉、銅板製乾燥模擬葉、ろ紙製湿潤模擬葉の表面平均温度の経時変動を比較した(図7)。各模擬葉の射出率、熱容量は、生葉とほぼ同様とした。蒸発速度あるいは蒸散速度は、乾燥模擬葉<オオムギ生葉<湿潤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平均温度上昇は、銅板模擬葉で0.1°C、生葉で0.8°C、湿潤模擬葉で1.1°Cとなり、乾燥模擬葉で最小、湿潤模擬葉で最大となった。このことから、微小重力場での各試料の熱交換において、水の蒸発散抑制に伴う潜熱輸送の抑制が温度変動に大きく影響したと考えられる。

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8に示す(Kitaya et al. 2001, Hirai & Kitaya 2009)。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。これらのことから、微小重力場では純光合成速度は低下することが確認された。

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、葉温の上昇、純光合成速度の低下が生じたと考えられる。これら一連の航空機実験では、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。宇宙での長期植物栽培のように、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秒間の微小重力環境下での実験結果の約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。

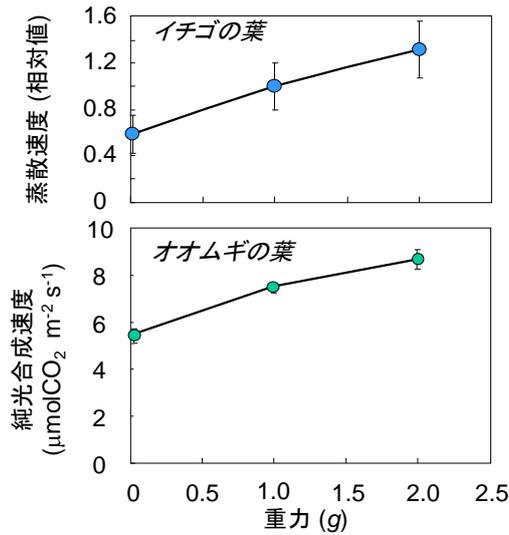


図8. オオムギ葉の純光合成速度およびイチゴ葉の蒸散速度に及ぼす重力の影響

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問題である。例えば植物体温の上昇に関して、イネ、コムギ、トマト、ピーマン、オオムギ、シロイヌナズナなどの花粉形成は30~33°C程度の高温によって障害を受ける(例えば, Erickson & Markhart 2002, Abiko *et al.* 2005, Sakata *et al.* 2010)。上述の結果は、宇宙の微小重力下では穎花表面上および穎花内での熱対流が抑制されて、熱交換、特に蒸散速度低下に伴う気化潜熱交換の抑制によって、花粉形成の障害を誘発するだけの組織温度の上昇が生じる可能性を示唆している。

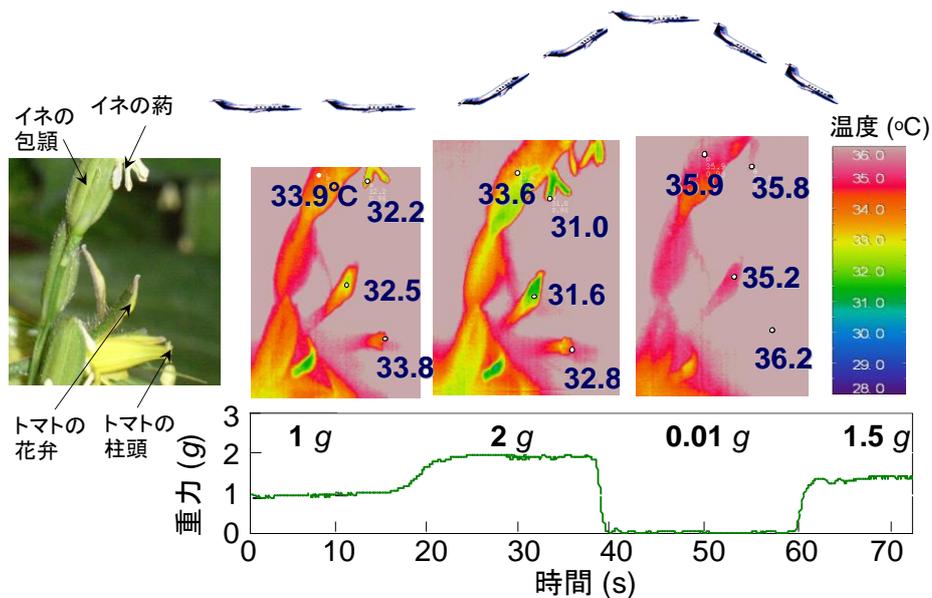


図9. 航空機放物線飛行中の重力変化にともなう植物生殖器官温度の変動

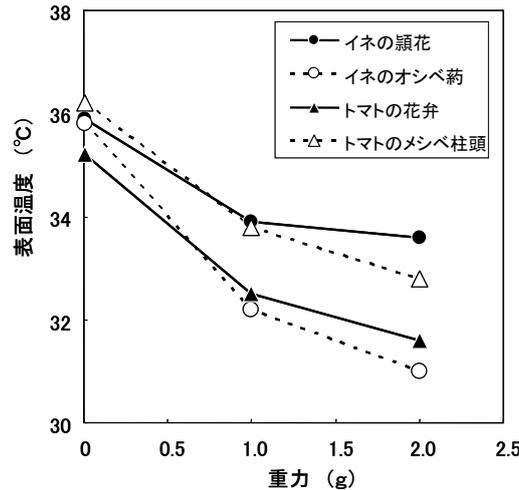


図 10. 生殖器官各部位の温度に及ぼす重力の影響

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 1g から 2g に増加すると低下し、0.01g に低下すると上昇した(図 9)。1g から 0.01g 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(図 10)。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。この実験結果から、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表面温度は、2-4°C 上昇し得ることが確認できた。このことは、微小重力下では生殖器官の温度上昇により、不稔などの生殖異常を引き起こす可能性を示唆している。

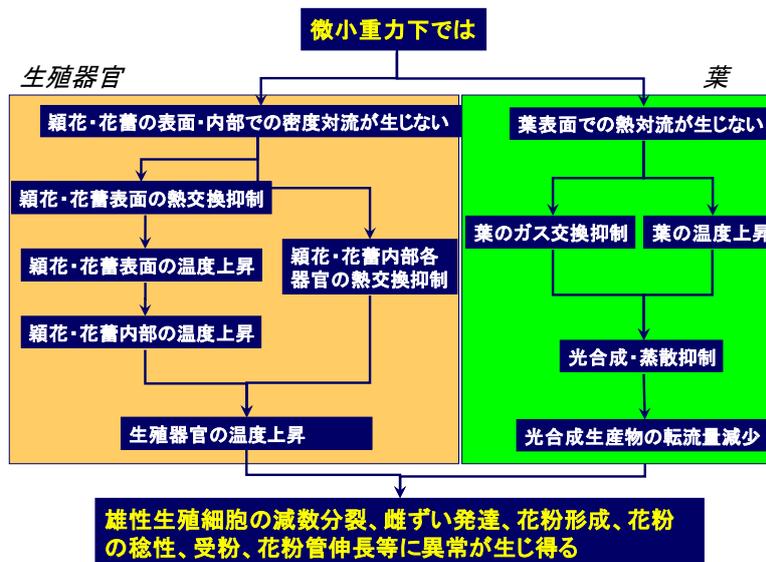


図 11. ガスおよび熱交換の観点から見た植物の生殖成長に及ぼす微小重力の影響

以上のことから、微小重力下で気流環境制御が不十分な場合、光合成などのガス交換が抑制されるとともに、生殖器官の温度上昇により、不稔などの生殖異常を引き起こすと考えられる(図1 1)。将来の宇宙での植物栽培では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ろう。

サツマイモ、ジャガイモのようなイモ類は、食料となる部分が塊根や塊茎であるので生殖成長は不要であり、また栄養繁殖できるので、繁殖のための種子形成も不要である。特にサツマイモは遺伝的多様性に富み、栽培が比較的容易である。また塊根と同時に茎葉部も野菜として食用となり、その可食部比率は90%以上となり得る。さらにビタミンA、CおよびE、食物繊維、タンパク質、カルシウム、カリウムなどを豊富に含有し、特に茎葉部には、抗酸化物質を豊富に含み(表2)、機能性野菜としての利用性も高いことから、宇宙でのパイオニア食料作物の候補となる。

これまでの筆者らの研究結果に基づく試算では、1人当たり必要なサツマイモの栽培面積は54 m<sup>2</sup>である。なお日本の農地での作物生産では、この約6倍の耕地面積が必要である。例えば3×3×3 m<sup>3</sup>の栽培空間に6段の栽培棚を設置すると、1人分の食料生産と同時に、蒸発散により1日約180 Lの清浄水を回収できる(図1 2)。この栽培装置は、1) 宇宙での食料生産、2) 閉鎖系内での物質循環、3) ヒトに対する有害ガス、不快臭気の除去、4) 生鮮野菜の供給や植物と接することによる精神衛生の向上などの観点から、宇宙における人類の自立した長期的居住を可能にするための重要な第一歩となることが期待される。宇宙では、栽培空間容積、エネルギー使用量などが限られるので、蔓性の茎を整枝して葉面積密度を高め、同時に照明効率を高めることで、今後、上述の1人当たりの必要栽培空間容積を1/2に縮小することを目指している。

表2. 各種作物可食部の成分とその含有量(湿重100g当たり)

Crop plant	Energy (kcal)	Protein (g)	Lipid (g)	Carbo-Hydrate (g)	Dietary Fiber (g)	Ca (mg)	K (mg)	Fe (mg)	P (mg)	Ascorbic Acid (Vitamin C) (mg)	β-Carotene (Vitamin A) (mg)	α-Tocopherol (Vitamin E) (mg)	Vitamin K (mg)
Tuberous root of sweet potato	132	1.2	0.2	31.5	2.3	40	470	0.7	46	29	23	1.6	(0)
Leaf and petiole of sweet potato 'Suion'*	-	4.0	-	-	5.7	142	-	2.0	-	31	9400	4.3	1016
Rice	350	6.8	2.7	73.8	3.0	9	230	2.1	290	(0)	1	1.2	(0)
Wheat	337	10.6	3.1	72.2	10.8	26	470	3.2	350	(0)	-	1.2	(0)
Soybean	417	35.3	19.0	28.2	17.1	240	1900	9.4	580	Tr	6	1.8	18
Potato	76	1.6	0.1	17.6	1.3	3	410	0.4	40	35	-	Tr	Tr
Peanut	562	25.4	47.5	18.8	7.4	50	740	1.6	380	(0)	-	10.1	Tr
Leaf Lettuce	16	1.4	0.1	3.3	1.9	58	490	1.0	41	21	2300	1.3	160
Strawberry	34	0.9	0.1	8.5	1.4	17	170	0.3	31	62	17	0.4	(0)
Tomato	19	0.7	0.1	4.7	1.0	7	210	0.2	26	15	540	0.9	4

日本食品標準成分表 2010 および\*: <https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/karc/2002/konarc02-10.html> より。

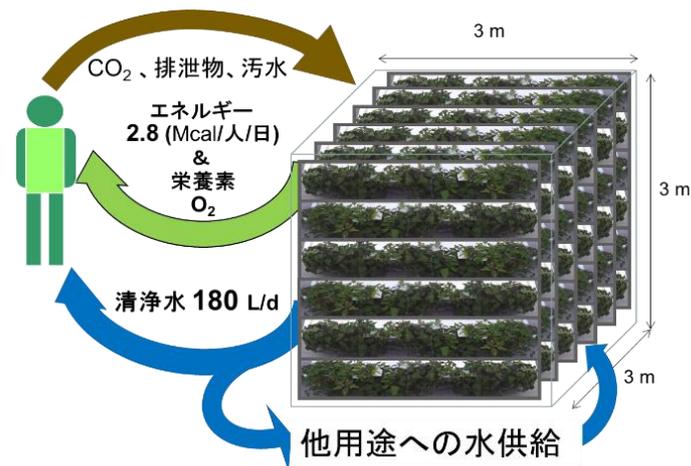


図 1 2.1 人の成人男性の生存を可能にする宇宙植物工場 (9 m<sup>2</sup> の栽培ベッドを 6 段重ねた多段式) とその多益的機能

### 3-3. 宇宙閉鎖環境での植物生産におけるその他の留意点

CELSS の閉鎖植物工場では、限られた空間およびエネルギーを有効利用するために、植物は高密度群落状態で栽培される。高密度群落内の気温、相対湿度、光強度および CO<sub>2</sub> 濃度などの環境要素は、群落外のそれらと大きく異なる (Kitaya *et al.* 1998)。一般に光強度が高くなると、葉温の上昇や蒸散促進により、高密度群落内の気温および水蒸気張力は群落外より高くなり、また純光合成速度の増加に伴い CO<sub>2</sub> 濃度は低くなり、その結果、予期した蒸散速度や光合成速度が得られなくなる。例えば草丈 0.1 m、葉面積指数 5 のナス苗の個体群を用いた地上実験において、群落上の気温 28°C、相対湿度 65% (水蒸気張力 24 hPa)、CO<sub>2</sub> 濃度 380 μmol mol<sup>-1</sup>、光合成有効光量子束密度 500 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (放射フラックス 170 W m<sup>-2</sup>)、風速 0.1 m s<sup>-1</sup> とした場合、群落外に比べて、群落内上層の気温は 2-3°C、水蒸気張力は 6 hPa 上昇し、また CO<sub>2</sub> 濃度は 25-35 μmol mol<sup>-1</sup> 低下した。しかし群落上の風速が 0.3 m s<sup>-1</sup> に増加すると、風速 0.1 m s<sup>-1</sup> に比べて、気温は 1.2°C 低下し、CO<sub>2</sub> 濃度は 12 μmol mol<sup>-1</sup> 増加した。これらのことから、植物群落内環境をより厳密に制御するためには、気流環境の制御が不可欠である。

トマト苗群落の純光合成速度は CO<sub>2</sub> 濃度の上昇により増加する (図 1 3) (Kitaya *et al.* 2004)。CO<sub>2</sub> 濃度の上昇による純光合成速度の増加は、葉面積指数の高い高密度群落で顕著であり、また低風速で顕著である。この現象は、高 CO<sub>2</sub> 濃度環境下でも、純光合成速度を高めて生育を促進するためには、低 CO<sub>2</sub> 濃度環境と同様、風速を高めて群落内外のガス交換を促進すると同時に、葉面境界層を薄くして、植物葉と周辺大気とのガス交換を促進することが重要であることを示唆している。

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<sup>-1</sup> 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しながら、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。

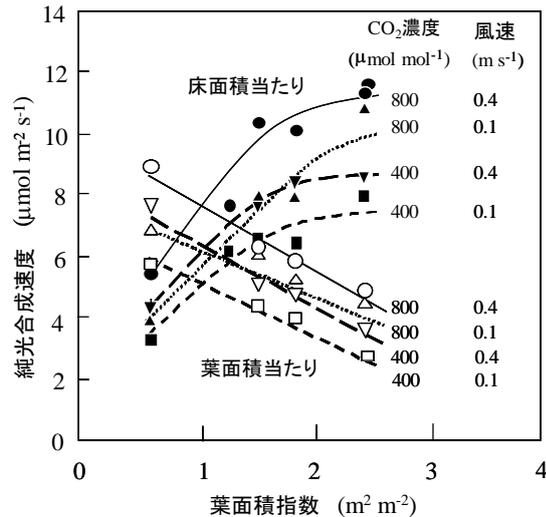


図 13. トマト苗個体群の純光合成速度(黒塗潰し：床面積当たり，白抜き：葉面積当たり)に及ぼす葉面積指数(LAI)，CO<sub>2</sub>濃度，および風速の影響(Kitaya *et al.* 2004 より転載)  
光合成有効光量子束密度：250 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>，気温：23°C，相対湿度：55%，植物高：0.05-0.20 m。

微小重力下では，植物根への給水に関しても問題がある。地球上では，どのような植物栽培でも，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，あるいは低重力環境では，水の落下が制限される。したがって，根に水を供給するためには，ポンプなどによる圧力勾配，あるいは親水性繊維材料などによる毛管力を利用することになる。

重力以外の宇宙環境として，気圧環境がある。表 1 に示すように月面はほぼ真空であるため 0 気圧であり，火星表面は 0.01 気圧である。ほぼ真空の空間にある宇宙ステーション内も，減圧することは容易である。このような低圧下では，植物栽培施設内を低圧に維持することは，閉鎖施設の被膜構造などを簡易化でき，有利である。そこで宇宙農業では，低圧環境下での植物栽培技術の確立が重要な課題となる。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(Goto *et al.* 1995)。また，低圧力に加えて，低重力も施設の耐荷重構造の簡易化に有利である。

その他，宇宙放射線や宇宙紫外線，さらにはそれらと低重力が植物生育や遺伝子変異に及ぼす複合影響についても，特に月や火星表面での長期植物栽培では考慮しなければならない。

#### 4. おわりに

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，光合成も抑制される。したが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。

CELSS における効率の高い植物栽培システムを構築するための今後の課題として、照明システム、水分供給システム、水蒸気回収システムおよびガス制御システムのさらなる高効率化、小型化および軽量化を図ることが重要である。また、最適環境制御の指標となる植物活性を評価するため、高度な植物成長モニタリング技術を開発する必要がある。

地球は、ほぼ完全な閉鎖環境であり、その中で植物、ヒト、およびその他の従属栄養生物が共存している。したがって、CELSS は地球における物質循環システムのミニチュアと考えることができる。CELSS が構築できれば、長期有人宇宙活動の支援に貢献するのみならず、地球上の生態系における物質循環の中で起こっている様々な現象を実験的に再現することができ、不適切なヒト活動により生じている CO<sub>2</sub> 濃度上昇や地球温暖化など、地球環境の将来予測や地球環境問題の解決方法を見いだすための実験装置となることが期待される。

## 謝辞

本稿で紹介した研究成果の一部については、Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)、ダイヤモンドエアーサービスおよび日本宇宙フォーラムのご支援に謝意を表す。また一部は、Japan Society for Promotion of Science (JSPS) Grants-in-Aid for Scientific Research, 16H01646 および 18H04984 で行ったものである。

## 引用文献

- Abiko, M., Akibayashi, K., Sakata, T., Kimura, M., Kihara, M., Itoh, K., Asamizu, E., Sato, S., Takahashi, H., & Higashitani, A. 2005. High-temperature induction of male sterility during barley (*Hordeum vulgare* L.) anther development is mediated by transcriptional inhibition. *Sex. Plant Repro.* 18: 91–100.
- Allen, J., 1991, Biosphere 2, The human experiment. Penguin Books Ltd, Middlesex, UK, pp 156.
- Dixon, M., Stasiak, M., Rondeau, T., & Graham, T. 2017. Advanced Life Support Research and Technology Transfer at the University of Guelph. *Open Agric.* 2: 139–147.
- Dong, C., Shao, L., Fu, Y., Wang, M., Xie, B., Yu, J., & Liu, H. 2015. Evaluation of wheat growth, morphological characteristics, biomass yield and quality in Lunar Palace-1, plant factory, green house and field systems. *Acta Astro.* 111: 102-109.
- Erickson, A. & Markhart, A.H. 2002, Flower developmental stage and organ sensitivity of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) to elevated temperature. *Plant Cell & Environ.* 25: 123-130.
- Goto, E., Iwabuchi, K. & Takakura, T. 1995. Effect of reduced total air pressure on spinach growth. *J. Agric. Meteorol.* 51: 139-143.
- 新田慶治 1989. CELSS のシステム構築上の諸問題. *CELSS 研究会誌* 1: 5-12.
- Hirai, H. & Kitaya, Y. 2009. Effects of gravity on transpiration of plant leaves. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1161: 166-172.

- Kitaya, Y., Kawai, M., Tsuruyama, J., Takahashi, H., Tani, A., Goto, E., Saito, T. & Kiyota, M. 2001. The effect of gravity on surface temperature and net photosynthetic rate of plant leaves. *Adv. Space Res.* 28: 659-664.
- Kitaya, Y., Kawai M., Tsuruyama, J., Takahashi, H., Tani, A., Goto, E., Saito, T. & Kiyota, M. 2003. The effects of gravity on surface temperatures of plant leaves. *Plant Cell Environ.* 26: 497-503.
- Kitaya, Y., Kawai M., Takahashi, H., Tani, A., Goto, E., Saito, T., Shibuya, T. & Kiyota, M. 2006. Heat and gas exchanges between plants and atmosphere under microgravity conditions. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1077: 244-255.
- Kitaya, Y., Kiyota, M., Imanaka, T., & Aiga, I. 1992. Growth of vegetables suspended upside down. *Acta Hort.* 303: 79-84.
- Kitaya, Y., Shibuya, T., Kozai, T., & Kubota, C. 1998. Effects of light intensity & air velocity on air temperature, water vapor pressure and CO<sub>2</sub> concentration inside a plant stand under an artificial lighting condition. *Life Support & Biosphere Sci.* 5: 199-203.
- Kitaya, Y., Shibuya, T., Yoshida, M., & Kiyota, M. 2004. Effects of air velocity on photosynthesis of plant canopies under elevated CO<sub>2</sub> levels in a plant culture system. *Adv Space Res.* 34: 1466-1469.
- Kitaya, Y., Tani, A., Kiyota, M. & Aiga, I. 1993. Plant growth and gas balance in a plant and mushroom culture system. *Adv. Space Res.* 14: 282-284.
- Lasseur, C., Brunet, J., Weever, H.D., Dixon, M., Dussap, G., Godia, F., Leys, N., Mergeay, M. & Straeten V.D. 2010. MELiSSA: The European project of closed life support system. *Gravi. Space Biol.* 23: 3-12.
- Mashinsky, A.L., Ivanova, I., Derendyaeva, T., Nechitailo, G.S., & Salisbury F.B. 1994. From seed-to-seed experiment with wheat plants under space-flight conditions. *Adv. Space Res.* 14: 13-19.
- Merkies, A.I. & Laurinavichyus, R.S. 1983. Complete cycle of individual development of *Arabidopsis thaliana* Haynh plants at Salyut orbital station. *Doklady AN SSSR* 271: 509-512.
- Salisbury, F.B., Bingham G.E., Campbell W.F., Carman J.G., Bubenheim D.L., Yendler B. & Jahns G. 1995. Growing super-dwarf wheat in Svet on Mir. *Life Support & Biosphere Science* 2: 31-39.
- Tako, Y. 1997. Closed plant experiment facility (CPEF) in closed ecology experimental facilities (CEEF) and preliminary studies on CPEF operation. (in *Plant Production in Closed Ecosystems*, Edts, Goto, E. et al.), Kluwer Academic Publishers, Netherland, pp 321-338.
- 谷晃・山南明久・北宅善昭・清田信・相賀一郎 1993. *CELSS 研究会誌* 5: 11-16.
- Sakata, T., Oshino, T., Miura, S., Tomabeche, M., Tsunaga, Y., Higashitani, N., Miyazawa, Y., Takahashi, H., Watanabe, M., & Higashitani, A. 2010. Auxins reverse plant male sterility caused by high temperatures. *PNAS* 107: 8569-8574.
- Wheeler, R.M. 2017. Agriculture for space: People and places paving the way. *Open Agriculture* 2: 14-32.

- Yamashita, M., Arai, M., Ishii, C., Ishikawa, Y., Izumi, R., Oshima, T., Oshima, H., Omori, K., Katayama, N., Katayama, A., Kanazawa, S., Kariya, T., Kawasaki, T., Kitaya, Y., Goto, E., Saito, T., Shimizu, T., Shiraishi, A., Takaoki, M., Takahashi, H., Tani, A., Toki, K., Tomita-Yokotani, K., Nakajima, A., Nagatomo, M., Nitta, K., Hashimoto, H., Hirafuji, M., Fujii, Y., Mizutani, H., Mihara, K., Miyagawa, T., Mukai, C., Mori, S., Yano, S., Yamazaki, N., & Yokota, H. 2005. Conceptual study of space agriculture. *Space Utiliz. Res.* 21: 323-326.
- Yamashita, M., Ishikawa, Y., Kitaya, Y., Goto, E., Arai, M., Hashimoto, H., Tomita-Yokotani, K., Hirafuji, M., Omori, K., Shiraishi, A., Tani, A., Toki, K., Yokota, H. & Fujita, O. 2006. An Overview of challenges in modeling heat and mass transfer for living on Mars. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1077: 232-243.
- Zeidler, C., Vrakking, V., Bamsey, M., Poulet, L., Zabel, P., Schubert, D., Paille, C., Mazzoleni, E., & Domurath, N. 2017. Greenhouse Module for Space System: A Lunar Greenhouse Design. *Open Agriculture* 2: 116–132.