

航空機放物飛行実験による微小重力下での植物栽培システム水循環

北宅 善昭 (大阪府大), 遠藤 良輔 (大阪府大), 高梁 昭久 (群馬大), 日出間 純 (東北大), 橋本 博文 (JAXA), 稲富 裕光 (JAXA)

Water cycle in a plant culture system under microgravity conditions in parabolic airplane flights

Yoshiaki, Kitaya*, Ryosuke, Endo, Akihisa Takahashi, Jun Hidema, Hirohumi, Hashimoto, Yuko Inatomi

*Graduate School of Life and Environmental Sciences, Osaka Prefecture University, Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai, Osaka 599-8531, Japan
E-Mail: kitaya@envi.osakafu-u.ac.jp

Abstract: As a basic study to develop a cultivation device that produces plants to be food and also enables purification of air and water and recycling of substances in space, the water circulation must be established in a medium-plants-atmosphere continuum under altered gravity conditions. We examined the effect of altered gravity on the movement of water in the medium, in stems, in leaves, and in a water condenser under gravity of 1.0, 2.0, 0.01, and 1.5 g (about 20 seconds each) during parabolic airplane flight.

Key words; CELSS, Space agriculture, Water recycle

1. はじめに

宇宙開発において、人間が長期にわたって宇宙船、宇宙ステーション、あるいは月や火星の基地などに滞在する場合、人間の生存に不可欠な食料生産、空気や水の浄化、物質リサイクルなどを閉鎖環境下で行う閉鎖生態系生命維持システム(Controlled Ecological Life Support System、以下 CELSS(セルス))を構築する必要がある。CELSS では基本的に、人間を含む動物の呼吸により排出される CO₂は植物の光合成で吸収・固定され、その時に発生する O₂が動物の呼吸に利用される。また、動物の排泄物や植物の食用にならない部分は、酸化されて水と CO₂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 O₂の供給および発生する CO₂の吸収も植物の光合成に依存することになる。さらにCO やエチレンなど微量有害ガスの吸収、除去も植物が担う。また飲用水には、植物からの蒸散水を凝縮して用いる。したがって CELSS では、食料生産機能に加えて、ガス処理機能や水処理機能をもつ植物栽培システムの構築が重要課題となる。

宇宙の閉鎖空間で、食料となる植物を生産し、さらに空気や水の浄化、物質リサイクルを可能とする栽培実験装置を開発する。この装置は宇宙植物工場の小型モデルであり、精密な環境制御の下で植物を育成でき、制御環境要素の逐次モニタリング、植物生育における地上部・地下部の形態形成、葉・根のガス交換、水収支、光合成産物の転流などの情報を個体あるいは組織レベルで自動モニタリングできる。この装置を ISS に搭載し、食料生産を実証するとともに、宇宙環境の植物影響を細胞・個体レベルで評価する予定である。ISS 実験の目的は、植物生理生態において、重力を中心とした宇宙環境影響を解明することであり、具体的には、1)これまでに宇宙実

験で解明されてきた植物芽生えの成長に対する重力影響等について、成熟個体での実証ならびに宇宙紫外線との複合影響の解明、および宇宙植物工場構築の基礎研究として、2)培地・植物・大気連続体での水の移動、3)植物体内での水・同化産物・成長調節物質の移動、4)植物体地上部と周辺大気、植物根部と根圏環境との間の物質移動、4)植物体各部位と周辺環境との間の熱移動を調べることである。

H29 年度の航空機実験(11/2~6実施)では、その基礎知見を得るため、培地・植物・大気連続体での水循環に及ぼす微小重力の影響について検討した。航空機を用いた放物飛行中の重力 1.0、2.0、0.01、および 1.5 g(それぞれ約 20 秒)下での、培地内、植物茎内、葉面、およびペルチェ冷却凝集器・不織布システム内の水の動きについて、主に熱的計測法を用いて調べた。

2. 方法

実験装置は、ロックウール培地で育成した植物体、乾燥および湿潤状態の模擬葉、植物固定台、植物用照明装置、熱式茎内水流計測装置、微細熱電対を用いた温度計測システム、熱画像取得装置、データロガーから構成した。気孔開度指数 RTR は、各葉温と周辺の温湿度から算定し、蒸散水流速は、ヒートパルス式茎内水流計測装置の茎アタッチメント内のヒータにより加熱された茎内水分が蒸散流として上方へ移動する速度を熱的にモニターし算定した。

周辺気温の上昇を防止して恒温にするために、ペルチェ冷却装置を設置する。環境計測装置として、植物体近傍に、気温、相対湿度、気流速度計等の測器を取り付けた。

3. 結果及び考察

3-1. 微小重量下での試作植物栽培実験装置(図1)における環境制御・植物情報モニタリングの確認のため、

以下の項目について、動作確認を行った結果、各項目とも微小重力下での問題は見られなかった。

- (1) 植物育成用チャンバー内の気温制御
- (2) 葉での光合成、蒸散機能の指標となる気孔開度指数のモニタリング(図2)
- (3) 植物育成チャンバー内外の CO₂濃度差計測による植物ガス交換のモニタリング(図3)

3-2. 茎内蒸散流に及ぼす低重力の影響

サツマイモ茎内の水の移動に及ぼす低重力の影響を調べるため、微小ヒータで加熱された茎の表面を熱画像カメラを用いて連続撮影した。茎内を通る水の動きについては、茎表面温度分布画像を用いて、微小ヒータで加熱された部位周辺の水の流れに伴う熱伝達の状況から検討した。放物線飛行中において茎の表面温度をモニターすることにより、茎の道管を通る水の流れて熱が移動する状況から、水の流れを定性的に解析した。仮説では、葉からの蒸散が活発に行われる強制気流条件では、植物の茎内や培地内の水の流れに伴い、微小ヒータにより加えられた熱の伝達が促進され、加熱部近傍の温度分布が変形する。実験の結果、攪拌ファンによる強制気流(植物近傍の気流速度 0.5 m s⁻¹)がある場合、微小重力下(0.01 g)と地上重力(1.0 g)下での茎における温度差の分布は、仮説と同様の変化を示し、微小重力下では茎内蒸散流が促進された(図4)。

これまでの航空機実験で明らかにしてきたように、強制気流がない場合(植物近傍の気流速度 0.1 m s⁻¹以下)、低重力は葉での蒸散を抑制し(Hirai and Kitaya, 2009)、茎内の蒸散流を抑制する。しかし今回、強制気流がある場合には低重力下での鉛直上向きの茎蒸散流が促進された。強制気流により蒸散が促進される条件では、低重力は、上向きの蒸散流に対して抑制的に働く重力の影響を除去されるため、茎内の水の流れを促進したと考えられる。なお、このメカニズムについては、今後の検討課題である。

3-3. 培地内(図5)およびペルチェ冷却凝集器・不織布システム内の水の動きを、主に熱画像カメラで簡易にモニタリングし、ISS内でのその手法の利用可能性を確認した(図6)。

4. 今後の課題・展望

宇宙の低重力下における植物栽培では、根での吸水、根から葉に向かう水移動を促進して健全な植物を育成するためには、強制気流が重要であることを確認した。ただし、気流速度の増加は、水利用効率の低下を引き起こし、水循環に負の影響を及ぼす可能性がある。試作植物栽培実験装置は、宇宙の低重力下でも動作することが期待できるが、今後さらにモニタリング・制御の高精度化、自動化を図るとともに、微小重力以外に、ISS内で報告されている数千 μmol mol⁻¹の高 CO₂濃度などの特殊な環境条件でも、栽培チャンバー内の最適環境を長期的に制御できる仕様にすることが必要である。



図2. 短時間の重力変動下での気孔開度のモニタリングの一例(気孔開度指数は、重力変動には物理的に影響されなかった。このことから、この気孔開度指数は、宇宙の微小重力環境でも、植物のガス交換(光合成・蒸散)活性をモニタリングできることが確認できた。

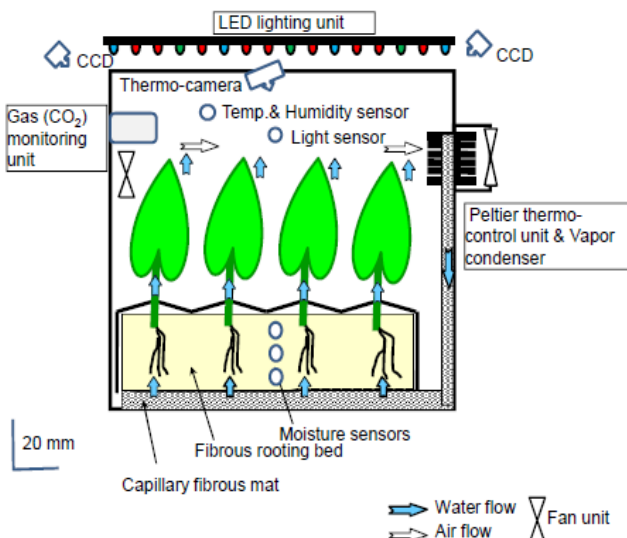


図1. 航空機実験に用いた植物栽培装置

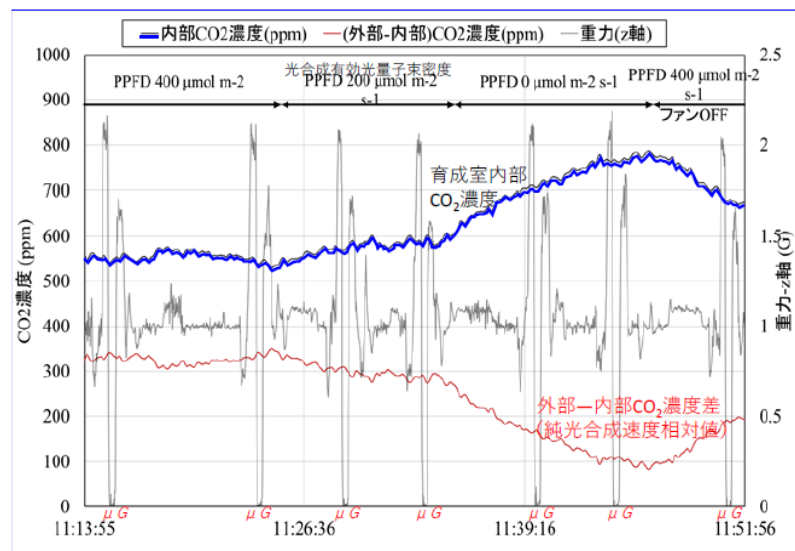


図3. ガス交換(光合成)モニタリングシステムの実証例(純光合成速度相対値の出力には短時間G変動の影響は見られず、モニタリング可能であった。)

強制送気あり、PPFD400 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$

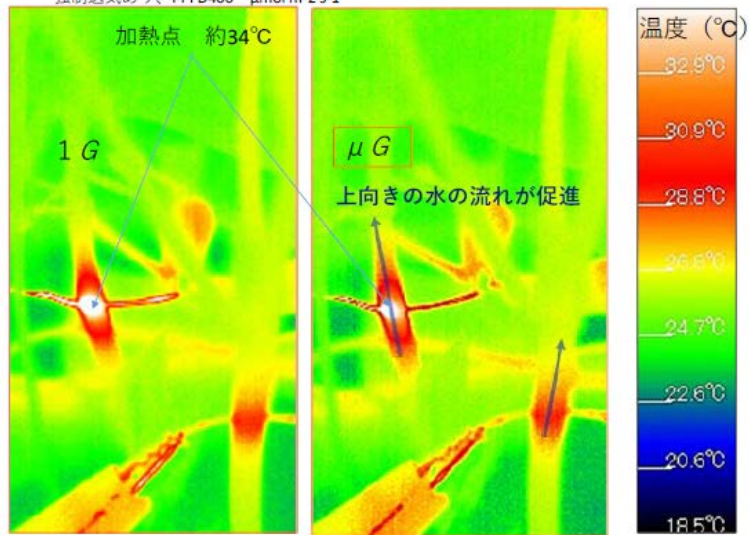


図4. 植物体内の水の流れに及ぼす微小重力の影響(微小ヒータで加熱された茎の表面を熱画像カメラを用いて連続撮影した。茎内を通る水の動きについては、茎表面温度分布画像を用いて、微小ヒータで加熱された部位周辺の水の流れに伴う熱伝達の状態から推定した。放物線飛行中の微小重力下では、鉛直上向き熱輸送が促進、すなわち鉛直上向きの水の流れが促進された。

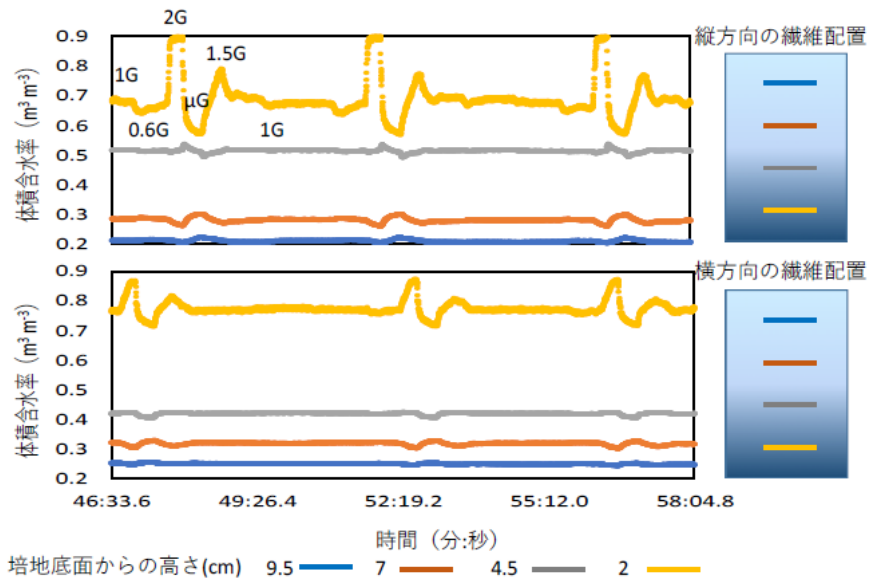


図5. ポリエステル不織布培地内水移動に及ぼす微小重力の影響 (微小重力下では、培地内含水率は低層部で増加し、上層部で低下した。繊維方向が鉛直の場合、その変化はより顕著であった。ロックウール培地でも同様であった。)

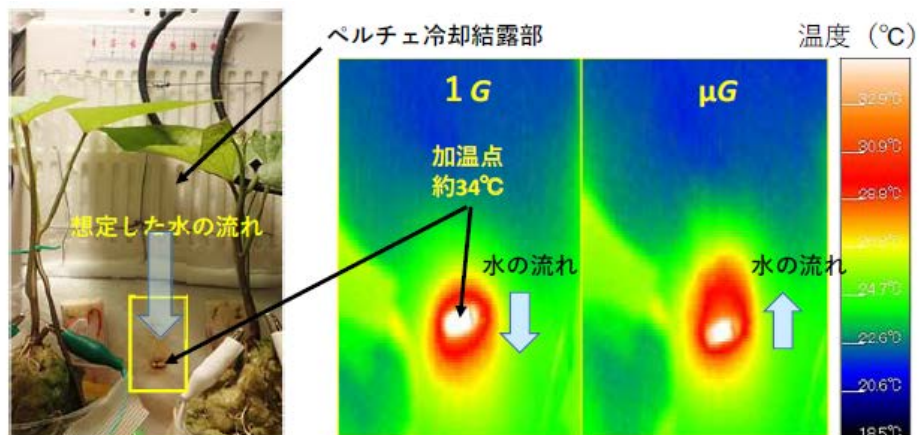


図6. 不織布を流れる水の流れの熱画像による可視化 (想定では、ペルチェ冷却部の結露水は不織布の毛管力で下部に移動して、植物栽培培地に供給される。1G下では、水は下方向に輸送されたが、20秒間の μG 下では、上向きに輸送された。今回の短時間実験では、水の輸送力としては、重力が優先していた。微小重力下で想定通りに水を循環させるには、ペルチェ冷却部結露水の水ポテンシャルを高く維持し、根圏培地内との間の水ポテンシャル勾配を大きくする必要がある。)