

称号及び氏名	博士（緑地環境科学）	徳田 綾也子
学位授与の日付	令和元年8月31日	
論文名	Development of a simple measurement of sap flow and influence of gravity on water transport in plants (簡易茎内流測定法の開発および植物体水輸送に及ぼす重力の影響評価)	
論文審査委員	主査	北宅 善昭
	副査	堀野 治彦
	副査	山田 宏之

## 論文要旨

### 第一章. 序論

近年、火星探査のための長期有人宇宙飛行や月面居住が現実味を帯びつつある。NASAの試算によると、成人男性一人が通常の活動に必要な1日分のエネルギー (2,800 kcal)を得るために摂取する食料は乾重で0.6 kg、水は3.1 kg、呼吸に必要なO<sub>2</sub>は0.8 kgであり、排出される固形物は0.1 kg、水は3.4 kg、CO<sub>2</sub>は1.0 kgである。一人の人間は1日に約4.5 kgの物質を取り込み、そして排出する。現在の技術では、無人機を用いて1 kgの物資を国際宇宙ステーション (ISS)に運ぶだけで数百万円の費用がかかる。火星はその20万倍の距離にあり、往還のみで約15ヶ月、滞在期間を含めると複数の乗員の生命維持に必要な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。長期間宇宙に人が滞在する場合、閉鎖環境下でそ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行う閉鎖生態系生命維持システム (Controlled Ecological Life Support System; CELSS)が必要となる。CELSSでは、人を含む動物の呼吸により排出されたCO<sub>2</sub>は植物の光合成で吸収され、同時に植物が排出する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は酸化されて、水とCO<sub>2</sub>およびその他無機物に変換される。その酸化に必要なO<sub>2</sub>の供給および発生するCO<sub>2</sub>の吸収も、植物の光合成が担う。人に有害な微量ガスや不快臭気の吸収および除去も植物に依存できる。飲用水には、栽培植物からの蒸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、生鮮野菜を摂取し、生きた植物と接することは、精神的ストレスの緩和に有効である。食料生産機能に加えて、ガス処理、水処理、ストレス緩和機能などを持つ多機能植物栽培システムが、CELSSにおいて重要となる。短期的には宇宙での植物栽培は可能であることがISSの実験で確認されているが、生殖過程の不具合などが報告されており、長期または数世代に渡る植物の生育における宇宙環境影響については、さらなる検討が必要である。本研究では、将来のCELSS構築を目標として、安定的な植物栽培システムを確立するための基礎知見を得るため、重力が植物体内の水輸送に及ぼす影響に着目した。植物は葉と大気間の水ポテンシャル勾配を駆動力として、根から茎・葉柄を經由して葉へ、水および栄養素を輸送する。茎や葉柄内の維管束を流れる水の流れである茎内流は、蒸散速度と高い相関を持ち、植物の成長の指標となる。

重力が植物の水輸送に及ぼす影響の一要因として、重力の影響が考えられる。地上では重力は上向きの水輸送を抑制する。草丈数10 cm程度の植物において、水輸送への重力の影響は、無視されることが多い。しかし、CELSSの植物栽培システムにおける植物の水ポテンシャルでは、根圏の水ポテンシャルが高く維持され、高密度栽培により高相対湿度となり易いことなどから、根から葉に至る水ポテンシャル勾配における重力ポテンシャルの比率が大きくなる場合が多いと想定される。そのような条件では、重力の低下によって水輸送が促進される可能性がある。本研究では、温度計測にサーモグラフィを用いて、ISS日本実験棟「きぼう」における植物栽培実験での利用を目的とした簡易な茎内流測定手法を開発し(第2章)、地上において重力ポテンシャルの影響を評価するため、植物を逆にした後の茎内流の変動を調べ(第3章)、そして航空機の放物線飛行によって得られる重力変化に伴う茎内流の変動を調べた(第4章)。さらに葉温のモニタリングを加えて、植物の水輸送の評価システムを提案した(第5章)。

## 第二章. サーマグラフィを用いた茎内流簡易測定法の開発

茎内流の測定法としてヒートパルス法、Granier法、熱収支法などがある。これらの方法では、熱輸送を利用して茎内流を測定する。茎をヒータで加熱すると、熱は伝導により茎の上下部へ、茎内流により上部へ、それぞれの合成流で運ばれる。茎内流による水の輸送量が多くなるほど、ヒータ上下の温度差が大きくなる。この上下の温度変化から茎内流を算出する。本研究ではこの原理を応用して、微細ヒータを葉柄内部に設置して加熱し、サーモグラフィで記録した茎や葉柄表面温度の変化から、茎内流の評価を試みた。実験では模擬植物およびCELSSにおける栽培候補植物の1つあるサツマイモを用いた。加熱点上下の葉柄表面の熱画像から茎内流の指標(ISF)を算定し、秤量法で測定した茎内流との相関を求めた。ISFの算出は2段階に分けて行った。測定対象となる葉柄表面温度と基準(茎内流なし)の表面温度との差( $\Delta T$ )のヒータ周辺の分布を求め、ヒータ上下の定位置2点間の $\Delta T$ の差をISFとした。その結果、模擬植物およびサツマイモのそれぞれにおいて、ISFと同時に秤量法で求めた蒸散速度との間に正の相関( $r = 0.90$ ,  $P < 0.01$ )が確認され、サーモグラフィを用いた茎内流の簡易測定法が確立できた。

### 第三章. 重力方向の変化が茎内流に及ぼす影響の解明

通常の植物 (基準位置: 茎は地面に対し直下で葉が上, 根が下) において重力ポテンシャルは水輸送を抑制し, 逆さ (茎は地面に対し直角で葉が下, 根が上) にした植物では水輸送を促進すると予測される. そこで秤量法を用いて, 基準位置の植物と逆さにした植物の蒸散速度の時間変化を求めて比較した. また, 基準位置にあるサツマイモを逆さ位置にして, 茎内流の時間変化を観察した. 茎内流はヒータの葉側と根側の茎表面温度の差 ( $T_l - T_r$ ) および基準位置を算定基準とした逆さ位置での ISF を用いて評価した.

秤量法を用いた蒸散速度測定では, 逆さにした植物の蒸散速度が基準位置の植物のそれより高くなった. ( $T_l - T_r$ ) は植物を逆さにした後, 緩やかに増加し, 30 分を経過すると基準位置より  $0.3^\circ\text{C}$  上昇し, 茎内流の促進が確認できた. ISF も同様の傾向となった. 逆さにした植物における重力の方向の変化は, 茎内流および蒸散の促進に寄与することを明らかにした.

### 第四章. 低重力が茎内流に及ぼす影響の解明

航空機の放物線飛行によって, 地球の重力加速度(以下, 重力)を  $1g$  とした場合の重力が  $0.38g$  (地球の約  $1/3$ ; 火星表面を模擬),  $0.16g$  (地球の約  $1/6$ ; 月表面を模擬) および  $0.01g$  (ほぼ無重力; ISS 内を模擬) の重力環境を創った (各 10–20 秒間). 重力は  $1g, 1.3g, 低 g, 1.3g, 1g$  の順に連続的に推移し, 低重力直前の  $1.0g$  を基準として低重力時の ISF を算出した. 重力の低下にともない ISF が増加したことから, 重力の低下により重力ポテンシャルが低下し, 茎内流が促進されることを明らかにした. 微小重力下では自然対流が抑制されるため蒸散が抑制される. 低重力と風速の複合影響について検討したところ, 強制対流を抑制した風速  $0.02 \text{ m s}^{-1}$  では重力の低下にともなう ISF の増加は風速  $0.25 \text{ m s}^{-1}$  に比べて小さくなった. 高風速で強制対流が十分に大きく蒸散が促進される場合に, 低重力下で茎内流の促進が顕著になることを明らかにした.

### 第五章. 宇宙実験で用いるためのサーモグラフィを用いた植物体水輸送評価システムの提案

植物生葉およびその近傍に設置した湿潤模擬葉, 乾燥模擬葉の表面温度をサーモグラフィで計測し, 各葉の熱収支を比較することにより植物生葉の水蒸気コンダクタンスを相対的に求める方法を低重力下で検証した. 航空機の放物線飛行による低重力下での実験の結果, この方法で葉の水蒸気コンダクタンスを評価できた. この葉の水蒸気コンダクタンス評価方法と第 2–4 章で検証した茎内流評価方法によって, ISS のように空間および実験リソースが限られている植物栽培実験において, また, 将来の CELSS において, 栽培植物の健全性をモニタリングするためのサーモグラフィを用いた温度計測による植物体水輸送の評価システムを提案した.

### 第六章. 結論

本研究では, まずサーモグラフィを用いた茎内流の簡易測定法を開発した. 次に, それ

を用いて植物体内の水輸送に及ぼす重力の影響を調べた。その結果、草丈数 10 cm 程度の植物において、一般的に無視されてきた水輸送への重力の影響は無視できないことが確認でき、宇宙での低重力下における水輸送促進の可能性を明らかにした。このことは、CELSS における植物の蒸散・光合成機能の促進するための技術開発に繋がる知見である。また本研究で提案した茎内流評価法および水蒸気コンダクタンス評価法は、宇宙における植物の実験や CELSS における栽培植物の水輸送モニタリングへの適用が期待される。

## 審査結果の要旨

近年、火星探査のための長期有人宇宙飛行や月面居住が現実味を帯びつつある。NASA の試算では、成人男性一人が通常の活動に必要な 1 日分の代謝・活動エネルギー (2800 kcal) を得るために摂取する食料は乾重で 0.6 kg、水は 3.1 kg、O<sub>2</sub> は 0.8 kg であり、排出される固形物は 0.1 kg、水は 3.4 kg、CO<sub>2</sub> は 1.0 kg である。したがって、長期宇宙活動での生命維持に必要な物資全てを地球から運ぶことは技術的・経済的に困難である。そこで、植物栽培を中心として、閉鎖環境下で食料生産、空気・水浄化、物質リサイクルなどを行う閉鎖生態系生命維持システム (CELSS) が必要となる。本研究では、CELSS における安定的な植物栽培技術確立の基礎知見を得るため、重力が植物体内の水輸送に及ぼす影響に着目した。水および栄養素は、植物の根から茎・葉柄を経由して葉へ輸送されるので、茎や葉柄内の維管束を流れる水の流れである茎内流は、植物成長の指標となる。

第二章では、近い将来に行う予定の国際宇宙ステーション (ISS) における植物栽培実験での利用を目的として、簡易な茎内流評価手法を開発した。CELSS での栽培候補植物であるサツマイモを用い、微細ヒータを葉柄内部に設置して加熱し、熱画像で記録した茎や葉柄表面温度の変化から、茎内流の評価を試みた。加热点上下の葉柄表面の熱画像から茎内流の指標 (ISF) を算定し、秤量法で測定した茎内流との相関を求めた。測定対象となる葉柄表面温度と基準(茎内流なし)の表面温度との差( $\Delta T$ )のヒータ周辺の分布を求め、ヒータ上下の定位置 2 点間の  $\Delta T$  の差を ISF とした。その結果、ISF と同時に秤量法で求めた茎内流との間に正の相関( $r = 0.90$ 、 $P < 0.01$ ) が確認され、熱画像を用いた茎内流の簡易測定法が確立できた。

第三章では、前章の測定法を用いて、地上において重力方向の変化が茎内流に及ぼす影響を調べた。基準位置の植物 (茎は地面に対し直角で葉が上、根が下) において重力は水輸送を抑制し、逆さにした植物 (茎は地面に対し直角で葉が下、根が上) では水輸送を促進すると予測される。そこで秤量法を用いて、基準位置の植物と逆さにした植物の蒸散速度の時間変化を求めて比較した。また、基準位置にあるサツマイモを逆さ位置にして、基準位置を算定基準とした逆さ位置での ISF を用いて茎内流を評価した。その結果、逆さにした植物の蒸散速度が基準位置の植物に比べて高くなった。植物を逆さにした後、ISF は緩やかに増加して 30 分経過するとほぼ一定値となり、茎内流の促進が確認できた。

第四章では、航空機の放物線飛行によって得られる重力変化に伴う茎内流の変動を調べた。地上 1g、火星表面 0.38g、月表面 0.16g および ISS 内 0.01g の重力環境を創り（各 10–20 秒間）、1g を算定基準とした各重力下での ISF を用いて茎内流を評価した。その結果、重力の低下により ISF は増加し、茎内流が促進された。低重力下では葉面隣接空間での自然対流が生じにくく蒸散が抑制されることから、低重力と風速の複合影響について検討したところ、高風速で強制対流が十分に大きく蒸散が促進される場合に、低重力下で茎内流の促進が顕著になることを明らかにした。

第五章では、植物生葉およびその近傍に設置した湿潤模擬葉、乾燥模擬葉の表面温度を熱画像で計測し、各葉の熱収支を比較することにより葉面水蒸気コンダクタンスを相対的に求める方法を航空機放物線飛行による低重力下で検証した。前章で検証した茎内流評価方法と合わせて、宇宙での栽培植物の健全性を担保するための水輸送評価システムを提案した。

以上、本研究では、新規開発の茎内流簡易測定法を用いて、宇宙での低重力下における植物体中の水輸送促進の可能性を明らかにした。このことは、CELSS における植物の蒸散・光合成機能を促進するための技術開発に繋がる新知見である。また熱画像を用いた茎内流評価法および葉面水蒸気コンダクタンス評価法は、宇宙における植物実験や CELSS における栽培植物の水輸送モニタリングへの適用が期待される。

これら一連の成果は、今後の有人宇宙開発や宇宙居住に不可欠な植物栽培システム構築のための基礎となる知見であり、さらには植物生理生態学、生物環境調節学などを基盤とする緑地環境科学の発展に大きく貢献すると考えられることから、本論文の審査結果と併せて、博士（緑地環境科学）の学位を授与することを適当と認める。