

植物の近接リモートセンシング技術の宇宙利用

久米 篤 (九大・農院), 松田 修 (九大・理院), 藤田 知道 (北大・院理)

Practical application of proximal remote sensing for plant growth monitoring in space

Atsushi Kume*, Osamu Matsuda, Tomomichi Fujita

*Kyushu Univ., 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, 812-8581

E-Mail: akume@agr.kyushu-u.ac.jp

Abstract: For plant cultivation management in space, an automatic or semi-automatic plant cultivation monitoring system is required. In the plant cultivation system in ISS, it is only possible to acquire a visible image by a normal digital camera, and not possible to obtain data beyond visual observation. However, even with a simple proximity remote sensing device, it is possible to obtain Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Photochemical Reflectance Index (PRI). Techniques for obtaining various information of plants in real time with a small amount of digital information, such as automatic screening devices for mutant individuals in space experiments, will be valuable. Such technology is expected to contribute to the future plant development project for Mars and the necessary technology development under the artificial cultivation environment such as plant factories on the ground. In this presentation, we propose the expected cultivation platform based on several examples.

Key words; International space station, Phenotyping, Space Agriculture, Space experiment

1. はじめに

宇宙における植物栽培管理においては、実験的もしくは環境維持的な状況にかかわらず、自動的もしくは半自動的な植物栽培モニタリングシステムが必要である。すなわち、植物栽培の非専門家あるいは自動栽培装置が植物の詳細な生育状況を簡便に把握するための技術が必要とされている。宇宙における植物栽培環境では、周辺空気、光源、水供給は人工的に管理されるが、通常の地球上における植物栽培とは条件が大きく異なる可能性が高い。栽培環境管理には宇宙船全体の生命システム維持という制約があるため、光源波長や照射サイクル、CO₂濃度において、地上における通常の栽培では想定されないような特殊環境下で植物を栽培することになる。このような環境下で、栽培している植物から効果的に生理生態学的情報を収集し、環境調節にフィードバックできるような栽培管理システムが必要とされている。そのための必須技術の1つとして、植物からの波長別反射率、赤外線放射あるいは蛍光強度変化を利用した近接リモートセンシングがあげられる。

精密(近接)リモートセンシング技術の多くは、農業あるいは工業分野で広く利用されており、近年は遺伝子型同定への応用も進んでいる。精密に調節された環境においては、200以上の非常に波長幅の狭い連続的なバンドデータが取得できるハイパースペクトルセンサの利用によって、葉における色素組成や葉緑体光定位運動が定量的に評価可能であることが紹介されている(Matsuda et al. 2012, 松田ら 2014)。また、個葉のリモートセンシング技術について、葉面積あたりの葉重や窒素、炭素、セルロース、フェノール類の推定を行う技術も、

実用化段階にある(中路ら 2014)。これらの技術は、植物栽培の自動化において不可欠であろう。

一方、宇宙環境の植物栽培においては利用できる人工光源のスペクトル分布や強度が日射波長とは異なるため、通常の近接リモートセンシングとは異なる最適化を行う必要がある。たとえば、栽培用のLED波長の分布域を考慮して遠赤色域(>700nm)も含まれるようにすることで、葉量やクロロフィル量のセンシングが可能になる。すなわち、照射放射のスペクトルとセンシングの利用波長の適切なマッチング、あるいはセンシング用追加光源の利用の検討などが必要となる。また、栽培容器内の温度分布や、成長のバラツキの把握など、栽培容器と対応したセンシング方法の開発も必要となるであろう。さらに、長期間の装置利用を考えると、センサの寿命や校正方法なども重要な検討課題となる(Jones & Vaughan 2010)。

現在のISSにおける植物栽培システムでは、通常のデジタルカメラによる可視画像が利用されており、目視以上のデータを得ることは困難である。栽培中の植物のさまざまな情報を少ないデジタル情報によりリアルタイムに得る技術は今後の宇宙植物栽培において重要である。宇宙実験における変異個体の自動スクリーニング装置などは、近い将来に実施される宇宙植物実験にともなうクルーの負担を低減し、将来的な火星へ向けた植物栽培プロジェクトや、地上における植物工場などの人工栽培環境下に必要な技術開発にも貢献することが期待される。本発表では、期待される栽培プラットフォームについて、いくつかの解析事例を元に提案する。

2. ヒメツリガネゴケにおけるモニタリング例

実際の宇宙実験において、成長量や光合成機能の現場における評価は重要であるが、これまではほとんど実施することが出来なかった。対象表面の放射特性画像を取得することによって、表面温度や様々な植生指数の分布図が得られる。植生指数の多くは700 nm付近で生じるクロロフィルの急激な吸収率の変化に基づいて、葉量や植生量を示すために使われているが、PRIのように葉緑体の光化学系におけるキサントフィルサイクルのエポキシ化(531 nm)を捉えることで、光ストレス状態を検出しようとするものもある。ここでは、シャーレ上で培養されたヒメツリガネゴケのコロニー(野生型、キナーゼ変異型)について、正規化差植生指数(NDVI)と化学的分光反射指数(PRI)の適用を試みた(Fig. 1)。その結果、NDVIによって遺伝型による成長量(バイオマス量)や、光ストレス状態の違いが容易に検出できることが示された。この結果は高精度ハイパースペクトルセンシングによるものであるが、半値幅10nmのマルチスペクトルセンサーを用いることをシミュレーションして画像作成して比較した場合でも、十分に実用的な検出精度が得られた。

このような光学的リモートセンシングでは、可視域では様々な色素含量、赤外域では主要な代謝物が分光特性に影響する。したがって、コロニー内での反射スペクトルの平均やばらつきを数値化することにより、生育条件や系統ごとの表現型の類似度が求められるであろう。また、類似度をもとに、既知の変異株とエピスタティックな関係にある、新規変異株のスクリーニングに応用することも可能であろう。

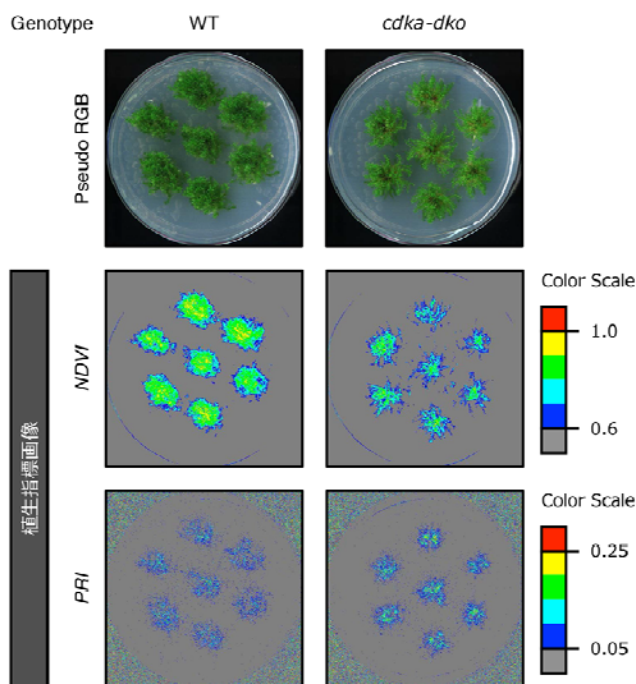


Fig.1 コケ培養コロニーにおける、近接リモートセンシング画像の例

実際の利用例としては、遺伝子破壊株等のライブラリを宇宙で生育させ、それを計測することでスクリーニングを行い地上のサンプルと対比し、重力応答に関わる未知遺伝子やバイオプロセスを地上にサンプルを持ち帰ることなく、見出すことが期待される。

3. ハードウェアの検討

リモートセンシングには、対象物に電磁波などを照射し、その反射や蛍光を捉える能動型と、単純に対象物からの反射や射出を捉える受動型がある。地上においては、太陽放射の均一な放射スペクトルや表面温度に応じて射出される放射強度を前提とした受動型が多く利用されるが、宇宙環境下では人工光利用が前提となるため、両者の併用が可能であり、また、光源のスペクトル特性の考慮が重要となる。

人工光環境下での植物からの情報取得を考えた場合、通常の高スペクトルセンシング情報は冗長性が高くなってしまうため、光源に応じたマルチスペクトルセンシングが適切であることが予想される。そこで、これまでの近接ハイパースペクトルセンシングの成果を再検討し、シンプルなマルチスペクトルシステムを将来的な宇宙船内の近接リモートセンシングのプロトタイプとして検討している。

具体的には、モノクロカメラの1眼として、電動フィルターホイールを取り付けるシステムや、4チャンネル程度の複眼式マルチスペクトルカメラの利用を想定している。特に現在、検討を行っている1台のカメラでフィルターを切り替えるシステムでは、マルチカメラシステムにおいて狭波長帯画像同士で演算する場合に生じる位置合わせ問題を回避できる。また、機構的にもコンパクトでシンプルにでき、較正も簡単になるため、宇宙における植物栽培モニタリングには適していることが予想される。赤外域のモニタリングも有望であるが、現段階では機器のコストや運用方法などで未解決な問題が多い。

参考文献

- Jones & Vaughan (2010) 植生のリモートセンシング (久米・大政監訳) 森北出版
- 松田 修, 末次 憲之, 内田 誠一, 和田 正三, 射場 厚 (2014) 近接ハイパースペクトルイメージングに基づく植物遺伝学研究の新展開. 日本生態学会誌, 64: 205-213
- Matsuda O, Tanaka A, Fujita T, Iba K (2012) Hyperspectral imaging techniques for rapid identification of Arabidopsis mutants with altered leaf pigment status. *Plant and Cell Physiology*, 53:1154-1170
- 中路 達郎, 小熊 宏之, 日浦 勉 (2014) 森林における葉形質のリモートセンシング. 日本生態学会誌, 64:215-221