

平成 30 年 5 月 21 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24248043

研究課題名(和文)植物群落の時空間機能情報の遠隔モニタリングと解析評価手法に関する研究

研究課題名(英文)Studies on methods of remote monitoring, analysis and evaluation of spatiotemporal functional information on plant communities

研究代表者

大政 謙次(Omasa, Kenji)

東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・特任研究員

研究者番号：70109908

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,000,000円

研究成果の概要(和文)：植物群落の時空間機能情報のモニタリングと解析評価手法の開発に関する研究を行った。例えば、関東地方や摩周湖周辺の衛星(LANDSAT)データから、蒸発散指標(iTVDI)を計算し、森林衰退の早期診断に有効であることを示した。また、大気酸素の吸収帯のO2Aバンドを利用して、太陽光下でクロロフィル蛍光パラメータを求める新しい方法(FLD-LISP法)やクロロフィル蛍光画像計測システムを開発し、光合成機能診断に適用した。さらに、地上やドローンなどから作物や樹木の3次元形状や植生指数、温度などを計測し、高精度で植物の形質評価を行う方法を開発した。

研究成果の概要(英文)：We have studied on the development of methods of remote monitoring, analysis and evaluation of spatiotemporal functional information on plant communities. For example, we have calculated evapotranspiration index (iTVDI) from satellite (LANDSAT) data in the Kanto region and around Lake Mashu and showed that it is effective for early detection of forest decline. In addition, a new method (FLD-LISP method) and a chlorophyll fluorescence imaging system for obtaining chlorophyll fluorescence parameters under sunlight were developed using O2A band in the absorption band of atmospheric oxygen and applied for diagnosis of photosynthetic function. Furthermore, we have developed methods for phenotyping with high accuracy by measuring the three-dimensional shape, vegetation index and temperature of crops and trees from the ground and drone.

研究分野：生物環境情報工学

キーワード：リモートセンシング 画像計測 蒸発散 光合成 クロロフィル蛍光 環境影響 情報工学

1. 研究開始当初の背景

温暖化や砂漠化、越境大気汚染などの地球環境問題に対応するため、生物圏機能のモニタリングが重要とされる。このため、地球観測の一環として、植物群落の構造や蒸散、光合成、成長、バイオマスなどの機能変化のモニタリングが盛んに行われるようになってきた。しかし、従来の方の多くは多大な労力を必要とするため、時空間機能情報を得るための遠隔モニタリング手法の開発が求められている。一方、植物生産の分野でも、精密農業や植物工場、育種などにおいて、農作物群落の時空間機能情報のモニタリングについての研究開発が必要とされている。また、都市緑化における気候緩和や大気環境改善機能の評価、水資源の有効的管理などの分野でも同様の期待がある。このため、植物個体や群落の時空間機能情報の新しいモニタリングと解析評価手法の開発が必要とされる。

2. 研究の目的

本研究は、地球観測や先端農業に欠かせない、植物群落の時空間機能情報のモニタリングと解析評価手法の開発に関する研究である。施設内実験や地上計測、マルチコプター(別名:ドローン、UAV)、衛星観測などにより、高波長分解能分光反射画像や熱赤外画像、3次元レンジ画像などを取得し、蒸発散、クロロフィル(Chl)蛍光、光合成、植物色素、群落構造、総生産力などの植物群落機能情報を解析評価するための手法を開発することを目的とする。特に、蒸散・植生指標やフラウンホーファー線を利用した太陽光 Chl 蛍光の解析評価法を新しく開発し、その適用範囲や精度を検証する。また、地上あるいはマルチコプターなどから植物の3次元計測を行い、その精度を検証するとともに、実際に作物や樹木群落の診断や観測に適用する。

3. 研究の方法

(1) LANDSAT データと標高、気象データなどを用いて、蒸発散指標 (iTVDI) について検討した。iTVDI は、正規化植生指標 (NDVI) と地表温度 T_s から気温 T_a を引いた指標 ($T_s - T_a$) の特徴空間上の値として定義した。関東地域や摩周湖周辺では、NDVI と T_s はランドサットデータから求め、また、 T_a はアメダスデータを標高補正した値を用いた。

(2) 太陽光 Chl 蛍光計測では、FLD (Fraunhofer Line Depth) 法により、GOSAT 衛星データの解析と、大気酸素の吸収帯の O_2A と O_2B バンドの高波長分解能分光システムの計測データの解析を行った。また、この分光システムとレーザを併用して、Chl 蛍光パラメータを求める FLD-LISP (Laser-Induced Saturation Pulse) 法を開発し、従来法である PAM 法との比較を行った。また、高感度カメラに O_2A の肩と谷に対応する狭帯域フィルタを装着した O_2A デュアルカメラシステムを

開発し、その特性の検討と植物葉の Chl 蛍光画像計測を行った。



図1 開発した O_2A デュアルカメラシステム

(3) 3次元形状計測に関しては、マルチコプターに搭載したカメラで計測した画像セットを用いて、SfM (Structure from Motion) 法による作物や樹木の3次元モデルの構築を行い、その精度検証を行った。また、マルチコプターに、マルチスペクトルカメラとサーマルカメラ、カラーカメラを同時搭載し、マルチコプターの飛行の安定度を調べるとともに、3台のカメラを用いた同時観測を行った。さらに、10台の一眼レフカメラをセットした植物苗の3次元計測システムを開発し、SfM 法による成長計測を行った。また、可搬型分光光度計で計測した分光反射率から Chl 含有量を推定する種々の植生指標を算出し、比較検討した。加えて、光合成反応の指標といわれている光化学反射率指標 (PRI) を PAM 法で計測した蛍光パラメータと比較した。

4. 研究成果

(1) 摩周湖周辺において、LANDSAT の可視・近赤外と熱赤外バンドの画像データを用いて、蒸発散指標 iTVDI について検討した。14種類の植生タイプ毎に、NDVI と iTVDI を比較したところ、低木や草地では、NDVI が小さく、iTVDI が大きかった。また、高木ではその逆の結果になったが、ダケカンバだけは、NDVI、iTVDI 共に、大きい値を示した。一般に、iTVDI は、土壌含水量と相関が高く、植生では蒸発散速度が大きいほど小さい値を示す傾向がある。また、大きい NDVI を示す植生は葉面積密度が大きく、最大蒸散速度も大きくなる傾向がある。しかし、ダケカンバは NDVI が他の高木と同じように大きかったにもかかわらず、iTVDI が相対的に大きな値を示した。このことは、ダケカンバの蒸散速度が少なくなっていることを示唆している。

関東地域の土地被覆タイプの間の iTVDI と NDVI の関係では、土地被覆タイプに加えて、植生被覆率や水の存在により、iTVDI や NDVI の値が変わることが明らかになった。例えば、水田では NDVI が同程度の値であっても水があると iTVDI が小さい値を示した。一方、草地や作物畑、果樹園では、植生被覆率の違いによる iTVDI の変化は小さかったが、NDVI は

被覆率の違いにより大きく変化した。また、赤城山の森林衰退では、iTVDI と森林衰退との関係を調べたところ、森林衰退が著しい場所で iTVDI が大きくなる傾向があった。以上の結果から、iTVDI が森林衰退の初期の指標として有効であることが示唆された。

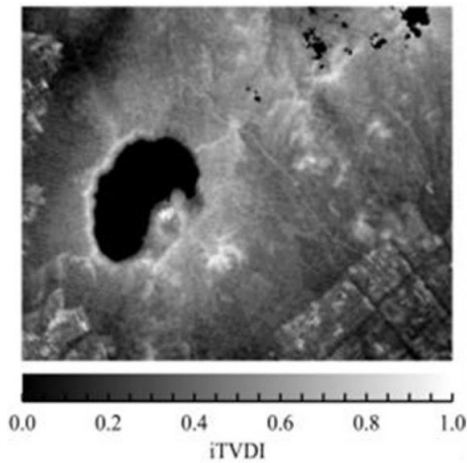


図2 摩周湖周辺の iTVDI 画像の例 (発表論文 より)

(2) フラウンホーファー線による太陽光 ChI 蛍光の解析評価法の開発と検証に関して、 O_2A バンド(760.4nm)と O_2B バンド(686.7nm)を用いて、太陽光 ChI 蛍光と人工光 ChI 蛍光を、高精度波長分解能をもつ分光器で計測し、定常 ChI 蛍光においては、ChI 含有量との関係が大きいことを明らかにした。また、 O_2A バンドでは ChI 含有量が多いほど蛍光強度が大きくなり、逆に、 O_2B バンドでは蛍光強度が小さくなる傾向があった。これは、ChI による蛍光の再吸収と関係していた。

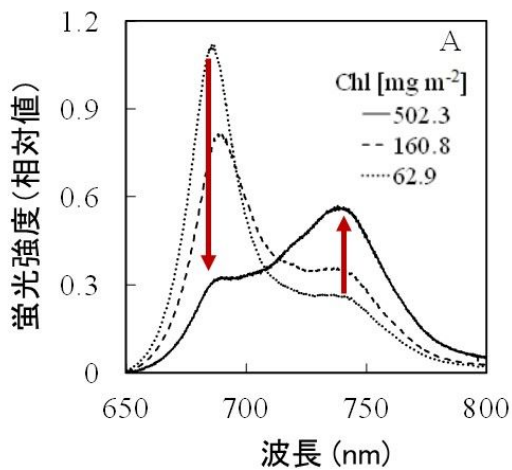


図3 ChI 含有量の違いによる分光 ChI 蛍光強度の違い (発表論文 より)

新しく開発した O_2A バンドでの FLD 法とレーザー照射による飽和パルス法の併用により、太陽光下での ChI 蛍光パラメータの解析

を可能にした。この太陽光 ChI 蛍光パラメータ計測法を FLD-LISP 法と命名した。そして、この方法を用いて、 C_3 のパプリカに加えて、 C_4 のトウモロコシ、観葉植物のパキラの葉の PPFD が異なる光環境下での応答特性と、PAM 法との比較による ChI 蛍光パラメータの精度検証を行ったところ、 Φ_{PSII} 、NPQ、ETR とともに PAM 法と同様の PPFD 特性を示し、FLD-LISP 法と PAM 法との決定係数が 0.86-0.89 と非常に高く、FLD-LISP 法の精度が検証された。

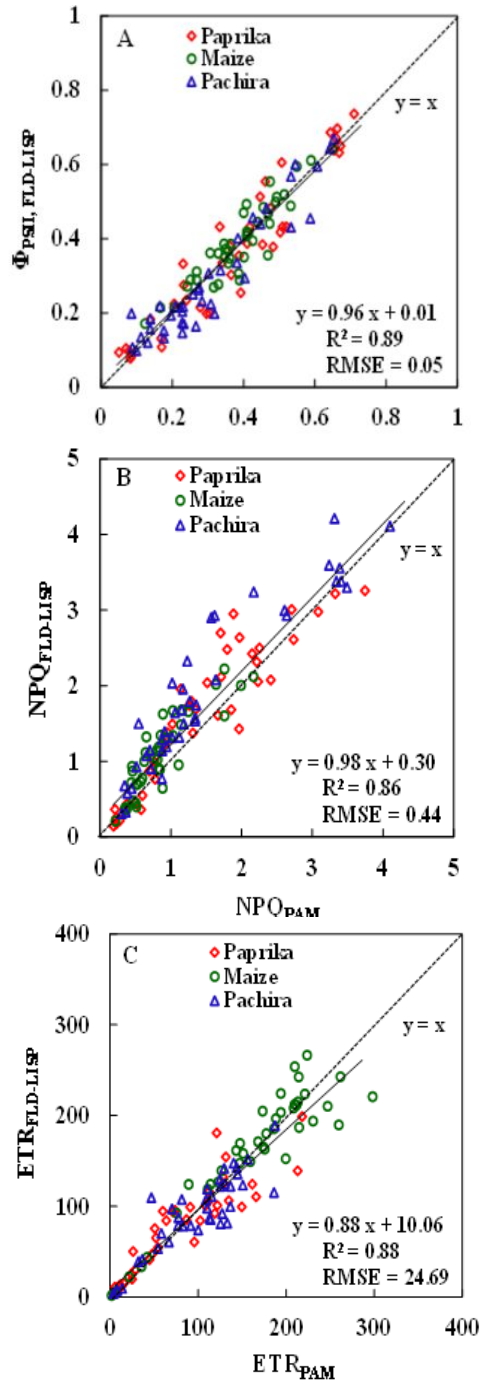


図4 パプリカ、トウモロコシ、パキラ葉の PPFD が異なる光環境下での FLD-LISP 法と PAM 法により計測された Φ_{PSII} 、NPQ、ETR の比較 (発表論文)

また、新しく開発したデュアルカメラによる太陽光 Chl 画像計測装置の光漏れなどの対策を行い、従来法の画像計測法との比較による精度検証を行ったところ、蛍光画像の結果がほぼ一致した。

一方、GOSAT 衛星データの解析を行い、 O_2A の近傍の太陽光起源の幾つかのフラウンホーファー線が Chl 蛍光解析に使用できることを明らかにした。そして、フラウンホーファー線の深さが深いほど、蛍光計測の精度が向上することを明らかにした。

(3)マルチコプターに、マルチスペクトルカメラとサーマルカメラ、カラーカメラを同時搭載し観測するシステムを構築した。そして、マルチコプターの飛行の安定度を調べるとともに、3台のカメラを用いた同時観測を行った。その結果、多方向から、これらの画像を安定して得られることが確かめられた。また、マルチコプターからの観測画像をもとに、SfM 法により、建物や農地、植物などの3次元モデルの構築を行った。その結果、イネ群落の3次元モデルで7.3cm、カラマツ群落で47cmの高さ精度で計測できることを示した。また、実験室での3次元形状計測のためのマルチカメラシステムを製作し、実際に植物の3次元計測を行った。その結果、0.57-1.65mmの精度でパプリカ苗の形状計測ができることを示した。

また、葉の表裏の分光反射率が異なる場合においても適用できる新しい Chl 含有量指標の開発を7種類の樹木葉を用いて行い、従来指標と比較検討を行った。その結果、他の14種類の植生指標と比べて、 $MDATT=(R_3-R_1)/(R_3-R_2)$ (但し、 R_i は、波長 i の分光反射率)の相関が最もよく、決定係数で0.856、RMSEでも6.82 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ であった。また、口バスタな波長域は、 $\lambda_1=732-885\text{nm}$ 、 $\lambda_2=697-771\text{nm}$ であった。また、光合成反応の指標といわれている光化学反射指標(PRI)について、メロン葉の生育ステージの違いによるPRIとChl蛍光パラメータ、植物色素含有量との関係を調べたところ、光合成反応に関係する光化学的及び非光化学的クエンチングのPRIへの影響は最大見積もっても20%以下で、植物色素、特に、Chl含有量の影響が大きかった。



図5 マルチコプターを用いたイネ群落の3次元計測例 (発表論文)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計25件)

S. Lu, F. Lu, W. You, Z. Wang, T. Liu and K. Omasa. A robust vegetation index for remotely assessing chlorophyll content of dorsiventral leaves across several species in different seasons. *Plant Methods*. 14:1-15. 2018
<https://doi.org/10.1186/s13007-018-0281-z> (査読付)

鄧 博慶・福丸裕樹・張 煜・青野光子・清水 庸・細井文樹・大政謙次. 小型 UAV を用いたカラマツ林の3次元リモートセンシングとその精度評価. *生態工学*. 30: 1- 6. 2018.
<https://doi.org/10.11450/seitaikogaku.30.1> (査読付)

P. Rahimzadeh-Baigiran, B. Tubuxin and K. Omasa. Estimating chlorophyll fluorescence parameters using the joint Fraunhofer line depth and laser-induced saturation pulse (FLD-LISP) method in different plant species. *Remote Sensing*. 9(6), 599: 1-17. 2017.
doi:10.3390/rs9060599 (査読付)

鄧 博慶・張 煜・清水 庸・細井文樹・大政謙次. 小型 UAV を用いた水田におけるイネ群落の3次元リモートセンシングの精度評価. *生態工学*. 28:107-112. 2016
<https://doi.org/10.11450/seitaikogaku.28.107> (査読付)

大政謙次. 植物機能リモートセンシングとフェノミクス研究への展開. *学術の動向*. 21(2): 72-76. 2016.
https://doi.org/10.5363/tits.21.2_72

Y. Zhang, P. Teng, Y. Shimizu, F. Hosoi and K. Omasa. Estimating 3D leaf and stem shape of nursery paprika plants by a novel multi-camera photography system. *Sensors*.16(874):1-18. 2016.
doi:10.3390/s16060874
(査読付)

T. Tonglaga, Y. Shimizu, K. Omasa. Differences in NDVI and iTVDI among various land cover types in Kanto region, Japan. *Eco-Eng*. 27: 111-116. 2015.
<https://doi.org/10.11450/seitaikogaku.27.111> (査読付)

S. Lu, X. Lu, W. Zhao, Y. Liu, Z. Wang and K. Omasa. Comparing vegetation indices for remote chlorophyll measurement of white poplar and Chinese elm leaves with different adaxial and abaxial surfaces. *J. Exp. Bot.* 66: 5625-5637 2015.
doi:10.1093/jxb/erv270 (査読付)

B. Tubuxin, P. Rahimzadeh-Bajgiran, Y. Ginnan, F. Hosoi and K. Omasa. Estimating chlorophyll content and photochemical yield of photosystem II (PSII) using solar-induced chlorophyll fluorescence measurements at different growing stages of attached leaves. *J. Exp. Bot.* 66: 5595-5603. 2015.
doi:10.1093/jxb/erv272 (査読付)

F. Hosoi and K. Omasa. Estimating leaf inclination angle distribution of broad-leaved trees in each part of the canopies by a high-resolution portable scanning lidar. *J. Agr. Meteorol.* 71(2):136-141. 2015.
Doi: 10.2480/agrmet.D-14-00049
(査読付)

大政謙次. 植物機能リモートセンシング 植物診断、フェノミクス研究への応用 . *生態工学*. 26:51-61. 2014.
<https://doi.org/10.11450/seitaikogaku.26.51>

P. Rahimzadeh-Bajgiran, A.A. Berg, C. Champagne, K. Omasa. Estimation of soil moisture using optical/thermal infrared remote sensing in the Canadian Prairies. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 83:94-103. 2013.
DOI:10.1016/j.isprsjprs.2013.06.004
(査読付)

P. Rahimzadeh-Bajgiran, M. Munehiro and K. Omasa. Relationships between the Photochemical Reflectance Index (PRI) and chlorophyll fluorescence parameters and plant pigment indices at different leaf growth stages. *Photosynth. Res.* 113: 261-271. 2012).
DOI 10.1007/s11120-012-9747-4
(査読付)

H. Naito, P. Rahimzadeh-Bajgiran, Y. Shimizu, F. Hosoi and K. Omasa. Summer-season differences in NDVI and iTVDI among vegetation cover types in Lake Mashu, Hokkaido, Japan using

Landsat TM data. *Environ. Control Biol.* 50:163-171. 2012.
<https://doi.org/10.2525/ecb.50.163>
(査読付)

F. Hosoi, H. Matsugami, K. Watanuki, Y. Shimizu and K. Omasa. Accurate detection of tree apices in coniferous canopies from airborne scanning lidar images based on crown-extraction filtering. *J. Appl. Remote Sens.* 6: 063502-1-063502-13. 2012. DOI: 10.1117/1.JRS.6.063502 (査読付)

[学会発表](計30件)

大政謙次. 陸域生態系機能のイメージング細胞～地球環境 日本学術会議公開シンポジウム「次世代統合バイオイメージング研究の展望」2017

大政謙次. 植物機能リモートセンシングとICT 基礎～フェノタイピング、スマート農業 . (公財)光科学技術研究振興財団「平成 29 年度 農業・工業原材料生産と光技術研究会」2017.

大政謙次. クロロフィル蛍光の画像化の歴史 細胞から衛星観測までー 特別セッション「太陽光誘起植物蛍光観測の現状理解」日本リモートセンシング学会平成 28 年秋期大会. 2016

大政謙次. 植物機能のリモートセンシングと時空間情報解析 細胞～地球環境- 第 57 回大気環境学会年会 2016

大政謙次. 植物の反応の可視化と IoTー基礎研究からスマート農業や地球観測への応用ー第 2 回農業電化シンポジウム 2016.

大政謙次. 植物環境応答のセンシングと空間情報解析. 日本学術会議公開シンポジウム「越境大気汚染と酸性雨 現場から将来予測までー」2016.

大政謙次. 生物環境情報工学分野からみたフューチャーグリーン. JST ワークショップ「フューチャーグリーン」2016.

大政謙次. 生態系リモートセンシング細胞から植生へ、2次元から3次元へー日本学術会議公開シンポジウム「生態系計測・モニタリングの最前線」2015

K. Omasa. Imaging techniques applied in studying plant structure and functioning. Seminar in Shandong University. 2015.

大政謙次. 植物機能リモートセンシングとフェノミクス研究への展開. 学会の公開シンポジウム「分野横断型農学の展開に向けて - 物理学・数理学の視点とその重要性 - 」2015.

K. Omasa. Remote sensing of plant phenotyping and vegetation functioning -from cell to canopy and 2D to 3D-. CIGR 18th World Congress. 2014.

K. Omasa. Imaging techniques from the cell to the canopy level -from 2D to 3D composite imaging. eminar of College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences. 2014.

K. Omasa. Modern agriculture and imaging techniques. Seminar of School of Geographical Sciences, Northeast Normal University. 2014.

大政謙次. 植物機能リモートセンシングとフェノミクス研究への展開. 農業情報学会 2012 年度秋期シンポジウム. 2012

大政謙次. 植物機能のリモートセンシング 細胞から植生へ、2次元から3次元へ. 日本生態学会第60回大会. 2013

大政謙次. 画像情報等の作物生産における温暖化対応技術への応用. 日本学術会議公開シンポジウム「気候変動に対応した作物栽培技術の現状と展望」2013

大政謙次. 植物機能イメージングとフェノミクス研究への展開—細胞から群落へ、2次元から3次元へ—. 日本生物環境工学会年次大会. 2013.

K. Omasa. 3D imaging from the cell to the canopy. ACPFG seminar in University of Adelaide. 2012

K. Omasa. Imaging techniques from the cell to the canopy level -from 2D to 3D composite imaging. CzechGlobe seminar. 2012

K. Omasa. 3D imaging of plant structure and functioning. Eberburg-Workshop "Leaf Optics" 2012.

[図書](計10件)

大政謙次. 植物機能の画像計測技術の発展とその応用. 「太陽光植物工場の新展開」(野口伸他編著) 327-340 (分担執筆) 養賢堂. 2012

大政謙次. リモートセンシング. 「スマート農業」(農業情報学会編) 農林統計出版. 46-49 (分担執筆). 2014

大政謙次. 植物機能リモートセンシングと植物診断、フェノミクス研究への応用「閉鎖生態系・生態工学ハンドブック」(大政謙次他監修). 354-366. (分担執筆) アドスリー. 2016.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大政 謙次 (OMASA Kenji)
東京大学・大学院農学生命科学研究科・特任研究員
研究者番号: 70109908

(2) 研究分担者

細井 文樹 (HOSOI Fumiki)
東京大学・大学院農学生命科学研究科・准教授
研究者番号: 80526468

清水 庸 (SHIMIZU Yo)
東京大学・大学院農学生命科学研究科・助教
研究者番号: 80526468

羽藤 堅治 (HATOU Kenji)
愛媛大学・大学院農学研究科・教授
研究者番号: 50274345

(3) 連携研究者

遠藤 良輔 (ENDO Rousuke)
大阪府立大学・大学院生命環境科学研究科・講師
研究者番号: 10409146

中林 和重 (NAKABAYASHI Kazushige)
明治大学・農学部・准教授
研究者番号: 40237368