

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H03085

研究課題名（和文）小型衛星データとフラックスサイトデータを利用したディープラーニングによる作物予測

研究課題名（英文）Prediction of crop development using PLANET, flux site data and deep learning

研究代表者

櫻井 玄（Sakurai, Gen）

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農業環境研究部門・上級研究員

研究者番号：70452737

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,000,000円

研究成果の概要（和文）：作物収量を、衛星を主としたデータから予測する技術において、加法モデルと勾配ブースティング手法を組み合わせる手法を開発した。また、衛星データの解析において重要な要素となる作物の葉について、より詳細な数理モデルを構築し、作物生育モデルとカップリングする基盤を形成した。さらに、Planetのような高時間解像度衛星のために、青色波長のデータと粒子フィルタと呼ばれるデータ同化手法を利用して、雲のノイズを取り除いてフィルタリングする新たな手法を開発した。また、新潟県や茨城県において、衛星データと地上葉面積指数や生育状況に関するグラントゥールデータを膨大に集め、技術の発展のためのデータベースを作った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の目的は、衛星データ情報を利用して作物のバイオマスや収量を推定するために必要な様々な基盤技術を開発することにある。特に、近年進化が著しい小型高解像度衛星データは空間解像度が数メートルであり、また時間解像度も1日以下であるため、作物における光反射に強く関わる葉の部分の数理モデルの詳細化や高時間解像度にとまらぬ雲などのノイズの効率的な除去技術の確立が重要であった。また、衛星の空間解像度に合わせたグラントゥールデータの大規模収集も重要な要素である。本研究では、これからの高時間解像度・高空間解像度衛星の農業における利用における技術的な基盤技術を開発した。

研究成果の概要（英文）：For predicting rice yield from satellite data, we have developed a prediction method in which the additive linear model and the gradient boosting method are combined. In addition, we constructed a more detailed mathematical model of crop leaves, which is an important element in satellite data analysis. Furthermore, for high-time-resolution satellites like Planet, we developed a new method to filter out cloud noise using blue wavelength data and one of the data assimilation techniques called particle filtering. In addition, in Niigata and Ibaraki prefectures, we have collected a large amount of satellite data and ground-truth data on leaf area index and growth conditions and created a database for the development of technology.

研究分野：統計学

キーワード：衛星データ 数理モデル 統計モデル 機械学習 フィルタリング 葉面積指数

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

精密農業の文脈においても、地球温暖化の文脈においても、作物バイオマスと収量を各成長段階で推定することの重要性は高い。作物の生育を予測する手段としては、気象データとともに衛星データを使って生育状況を予測する手段があり膨大な研究がなされているが、衛星データに関しては、その空間解像度が数 km のものは日本のような狭小圃場では使いにくいという問題があった。例えば、高時間解像度の撮影で安価に利用できる衛星データは NASA の MODIS データ (解像度 250~1000 m) など、低解像度に限られており、従って、特に日本などの狭小地圃場では、その利用の限界が指摘されていた。一方で、空間解像度が数 m の衛星データは、逆に時間解像度が数週間になるというトレードオフがあった。しかしながら、近年、衛星データ Planet が登場し、空間解像度が数 m でありながら、時間解像度も 1 日以下でデータが得られる環境が構築されつつある。

一方で、日本において高い空間解像度と時間解像度の衛星データを利用することを意識した技術開発はこれまであまり行われてこなかった。また、衛星データを用いて作物の生育を予測するためには、葉面積指数などのグランドトゥールズデータが高空間解像度・高時間解像度で観測される必要があるが、そのようなデータセットは今まで収集されてこなかった。日本の狭小圃場において、高空間解像度・高時間解像度の衛星データを意識した技術開発とデータセットの蓄積が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、衛星及び地上についての高頻度時系列データから、プロセスベースモデルとデータ同化、機械学習手法を融合した新たな手法によって、作物バイオマス予測手法を一新するための技術基盤を作成する。そのためには、以下の四つのアプローチが必要である。一つ目は、衛星データに対して、ディープラーニングや勾配ブースティングなどの機械学習手法を適用し、作物のバイオマスまたは収量などを予測する手法を検証することである。二つ目は、高時間解像度衛星データの利用を考慮して、雲などのノイズを自動で効率的に除去して作物の葉面積指数などを推定する手法を開発することである。三つ目は、作物の数理モデルの内、衛星データが参照する対象である葉の部分の詳細化を行うことで、作物の数理モデルと衛星データの接続性を高めるための基盤を作成することである。四つ目は、Planet 衛星データの空間・時間解像度にあった形で葉面積指数や作物の生育状況などのデータを膨大に蓄積し、Planet 衛星の利用のためのデータの基盤を作成することである。本研究では、上記四つのアプローチそれぞれについて検証を行うことを目的とする。

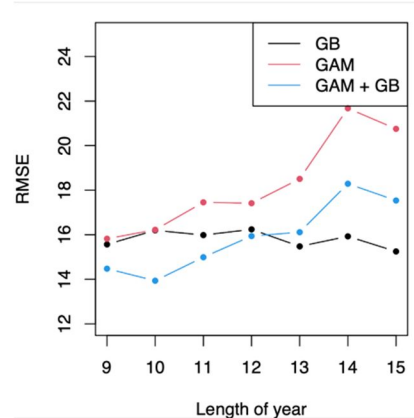
3. 研究の方法

- 1) 衛星データに対して、勾配ブースティングなどの機械学習手法を適用し、作物の収量を予測する手法を検証した。具体的には、日本の全域に対する作物収量の予測に、機械学習手法の一つである勾配ブースティング法を当てはめ、統計的手法の重回帰分析や一般化加法モデルの結果と比較した。また、勾配ブースティングと加法モデルを融合した新たな手法の有効性を検証した。
- 2) 高時間解像度の衛星データとして Planet 衛星データを取得し、新潟県の 20 の圃場の NDVI データを取得した。それぞれについて、雲のノイズを除去する新たな手法を適用し、その有効性を検討した。
- 3) 葉の構造を詳細に再現した数理モデルを作成した。葉の構造を数ミリの単位の空間解像度でモデル化し、そのそれぞれの空間で光合成や蒸散、スクロース輸送など、葉の基本的な生理学的な現象を再現するモデルを作成した。
- 4) 茨城県龍ヶ崎市と新潟県の複数箇所の圃場について葉面積指数のデータを取得した。特に、龍ヶ崎市のデータに関しては、週に 1~2 回の頻度で葉面積指数を 6~12 の圃場で測定した。

4. 研究成果

- 1) 勾配ブースティング法は日本全国の収量予測に対して高い精度を実現し、従来統計的手法よりも高い精度を実現した。勾配ブースティング手法は、モデルの誤差を繰り返し精緻化する手法であり、データ数が少ない収量データについては従来の予定にあったディープラーニングの手法よりも、勾配ブースティングを今後適用する方が、有効性が高い可能性がある。さらに、勾配ブースティング手法と加法モデルを融合する手法の有効性を検証した。この手法では、加法モデルという統計的手法を用いることによって、モデルの中身の解釈性を高めつつ、勾配ブースティング手法を併用することで、モデルの精度を高めることができている。この手法は推定方法の頑健性も勾配ブースティングに比べて向上させることができる可能性があり、特にデータが少ない場合のモデルの精度を増加させることができる。

図1 勾配ブースティング (GB) と加法モデル (GAM) とその融合 (GAM + GB) の精度の比較。縦軸はイネの収量 (kg / 10a) の観測値からの残差の平均を示す。融合手法は GB と同等の精度を示すことがわかる。データが少ないとき (年数が短いとき) は融合手法の方が頑健な傾向がある。



- 2) 高時間解像度衛星データの利用を考慮して、雲などのノイズを自動で効率的に除去して作物の葉面積指数などを推定する手法を開発した。具体的には、青色波長のデータとデータ同化手法の一種を利用して、雲のノイズを取り除いてフィルタリングする手法を開発した。この手法では、毎日の時間解像度で得られる衛星データに対して、自動的に雲の影響を除去し、葉面積指数の一つの指標である NDVI を推定する。

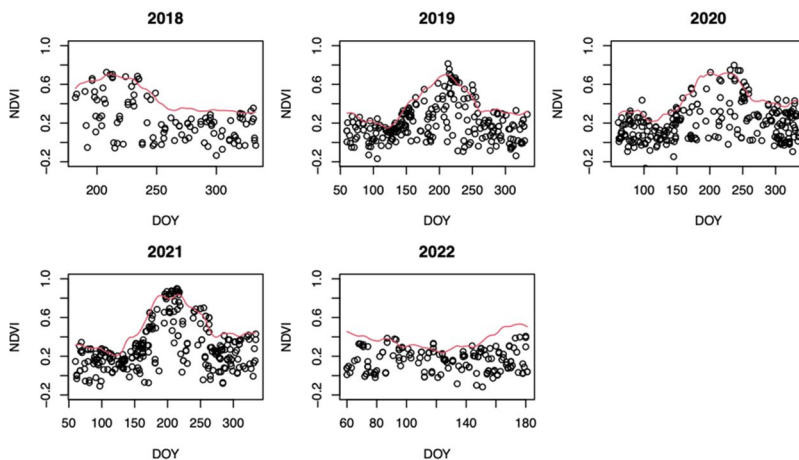


図2 新潟県新津の圃場の NDVI。黒い点が衛星データを示し、赤いラインが NDVI の推定値を示す。

- 3) 葉を数ミリの詳細な空間解像度で再現し、その中で、光合成と気孔開口、蒸散、師管輸送、導管輸送などの生理学的な動態を再現するモデルを開発した。本モデルのシミュレーション実験により、植物の葉は 1 枚の中でも光合成の速度に大きなばらつきがあることが明らかになった。これらの研究により、植物の葉を詳細な 1 枚の単位で観測し、モデル化することの重要性が示唆された。

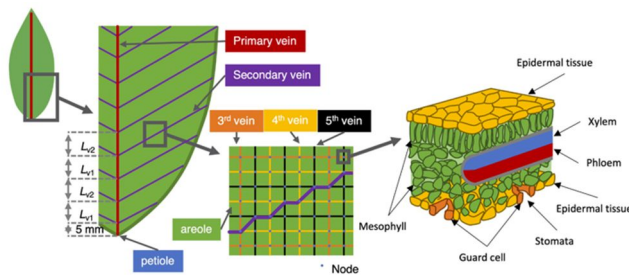


図3 開発された葉の詳細な数理モデルの模式図。

- 4) 茨城県龍ケ崎市と新潟県の複数箇所の圃場について LAI2200 を用いて、葉面積指数のデータを取得した。特に、龍ケ崎市のデータに関しては、移植から出穂の時期まで、週に 1~2 回の頻度で葉面積指数を 6~12 の圃場で測定することができた。このように、Planet 衛星の空間・時間解像度に合わせた葉面積指数に関する詳細なグラントゥールースデータはこれまで日本ではなく、今後の研究の基盤となるデータベースである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Sakurai Gen, Miklavcic Stanley J.	4. 巻 13
2. 論文標題 A Whole Leaf Comparative Study of Stomatal Conductance Models	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Plant Science	6. 最初と最後の頁 1-21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fpls.2022.766975	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Hasegawa Tomoko, Sakurai Gen, Fujimori Shinichiro, Takahashi Kiyoshi, Hijioka Yasuaki, Masui Toshihiko	4. 巻 2
2. 論文標題 Extreme climate events increase risk of global food insecurity and adaptation needs	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Food	6. 最初と最後の頁 587 ~ 595
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s43016-021-00335-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Doi Takeshi, Sakurai Gen, Iizumi Toshichika	4. 巻 4
2. 論文標題 Seasonal Predictability of Four Major Crop Yields Worldwide by a Hybrid System of Dynamical Climate Prediction and Eco-Physiological Crop-Growth Simulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Sustainable Food Systems	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fsufs.2020.00084	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Sakurai Gen, Miklavcic Stanley J.	4. 巻 12
2. 論文標題 On the Efficacy of Water Transport in Leaves. A Coupled Xylem-Phloem Model of Water and Solute Transport	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Plant Science	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fpls.2021.615457	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Kunimitsu Yoji, Sakurai Gen, Iizumi Toshichika	4. 巻 12
2. 論文標題 Systemic Risk in Global Agricultural Markets and Trade Liberalization under Climate Change: Synchronized Crop-Yield Change and Agricultural Price Volatility	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sustainability	6. 最初と最後の頁 10680 ~ 10680
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/su122410680	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ruane Alex C. et al. (18番目 Gen Sakurai)	4. 巻 300
2. 論文標題 Strong regional influence of climatic forcing datasets on global crop model ensembles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Agricultural and Forest Meteorology	6. 最初と最後の頁 108313 ~ 108313
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.agrformet.2020.108313	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yokohata Tokuta, Kinoshita Tsuguki, Sakurai Gen, Pokhrel Yadu, Ito Akihiko, Okada Masashi, Satoh Yusuke, Kato Etsushi, Nitta Tomoko, Fujimori Shinichiro, Felfelani Farshid, Masaki Yoshimitsu, Iizumi Toshichika, Nishimori Motoki, Hanasaki Naota, Takahashi Kiyoshi, Yamagata Yoshiki, Emori Seita	4. 巻 13
2. 論文標題 MIRCO-INTEG-LAND version 1: a global biogeochemical land surface model with human water management, crop growth, and land-use change	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geoscientific Model Development	6. 最初と最後の頁 4713 ~ 4747
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/gmd-13-4713-2020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 櫻井 玄
2. 発表標題 農学データの解析
3. 学会等名 計量生物セミナー (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tokuta Yokohata, Tsuguki Kinoshita, Gen Sakurai, Akihiko Ito, Yusuke Satoh, Yadu Pokhrel, Masashi Okada, Etsushi Kato, KIYOSHI TAKAHASHI, Naota Hanasaki, Shinichiro Fujimori, Seita Emori
2. 発表標題 Impacts of climate and socio-economic changes on water, food, bio-energy and land use investigated with an integrated land surface model (MIROC-INTEG)
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小野圭介、伊川浩樹、宮田明
2. 発表標題 渦相関法の平均化時間短縮に関する検討
3. 学会等名 日本農業気象学会2020年全国大会（日本、大阪）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ikawa, H., Ono, K.
2. 発表標題 Field-scale productivity and water use of a high-yielding rice cultivar
3. 学会等名 AsiaFlux Workshop 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Buareal, K., Kato, T., Morozumi, T., Ono, K.
2. 発表標題 Ground based measurement of solar-induced chlorophyll fluorescence dynamics in rice paddy field ecosystem
3. 学会等名 AsiaFlux Workshop 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 櫻井玄、深見一磨
2. 発表標題 気候変動と作物生産性: 14作物についての解析
3. 学会等名 日本地域学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 岸野 洋久	4. 発行年 2022年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 240
3. 書名 生産環境統計学	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	坂本 利弘 (Sakamoto Toshihiro) (20354053)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農業環境研究部門・上級研究員 (82111)	
研究分担者	石塚 直樹 (Ishituka Naoki) (20414500)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農業環境研究部門・上級研究員 (82111)	
研究分担者	小野 圭介 (Ono Keisuke) (20549555)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農業環境研究部門・上級研究員 (82111)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	Sprague David (Sprague David) (90282285)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農業環境研究部門・再雇用職員 (82111)	
研究分担者	宮田 明 (Miyata Akira) (60354114)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農業環境変動研究センター・研究領域長 (82111)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
オーストラリア	University of South Australia			
オーストラリア	University of South Australia			
米国	NASA Goddard Institute for Space Studies	Center for Climate Systems Research	University of Chicago	他2機関
ドイツ	Potsdam Institute	Karlsruhe Institute of Technology	Humboldt University of Berlin	
スロバキア	Comenius University in Bratislava			
オーストリア	IIASA	BOKU		