

令和 5 年 5 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2022

課題番号：19K23693

研究課題名（和文）高時間分解能・高空間分解能衛星データ融合による圃場単位の水稲生育段階モニタリング

研究課題名（英文）Monitoring of paddy rice growth stage at field level by fusion of satellite data with high temporal and spatial resolution

研究代表者

祖父江 侑紀（Sofue, Yuki）

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：50844966

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,700,000円

研究成果の概要（和文）：地球規模の気候変動が問題視されている現在、気候条件の変化による熱帯地域の作物収量への影響が懸念されており、継続的なモニタリングを行うことが重要である。インドネシアでは各圃場の大きさが小さく、作付時期が異なる水田が混在している場合が多い。したがって、生育ステージの把握には高分解能を持つ衛星データが望ましい。本研究では、時間分解能と空間分解能のそれぞれに利点を持つ衛星データに着目し、融合データを作成して、その有効性について検討した。また、融合データと単一衛星データを使用して解析手法を比較検討し、インドネシアで有効なモニタリングおよび収量推定手法を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究ではリモートセンシングデータを用いた水稲の生育ステージモニタリングおよび収量推定の精度向上を目指し、手法を検討した。東南アジアの国では水稲作付時期が異なる圃場が混在しており、広域における生育ステージの把握は多くの時間と労力がかかる場合が多い。本研究ではインドネシアを事例として、中分解能高頻度観測の衛星と高分解能低頻度観測の衛星の組み合わせることで、現在の衛星観測技術による圃場単位での高頻度の水稲生育ステージモニタリングが実現可能かという点に着目し、検討を行った。また作成されたデータを含めて圃場単位でより高精度の収量推定手法を検討し、クラスタリングを用いた手法を構築した。

研究成果の概要（英文）：At a time when global climate change is becoming an issue, the impact of changing climatic conditions on crop yields in the tropics is of concern, and continuous monitoring is important. In Indonesia, the size of each field is small, and paddy fields are often mixed at different cropping seasons. Therefore, satellite data with high resolution is desirable for grasping the growth stage. In this study, we focused on satellite data, which has advantages in both temporal and spatial resolution, and created fusion data to examine its effectiveness. In addition, analysis methods were compared using fusion data and single-satellite data to establish monitoring and yield estimation methods that are effective in Indonesia.

研究分野：植生リモートセンシング

キーワード：収量推定 時系列クラスタリング 衛星データ融合 水稲生育ステージ推定

## 1. 研究開始当初の背景

食料安全保障は、世界規模で注目されている課題の一つであり、米は世界で最も多くの人々が主食としている食料の一つである。インドネシアは世界第3位の米生産国であるが、雨季と乾季にそれぞれ発生する水害と干ばつ害により多大な損害が発生し、さらには病虫害による損害が多く見られる。近年では気候変動の影響により、従来の雨季と乾季の時期にずれが生じており、それが水稲の管理をより困難なものとしている。

災害発生時の水稲の生育ステージとその被害程度の間には密接な関係があることから、稲の作付時期から生育ステージ、収量の推移を把握することは被害評価を行ううえで重要である。広範囲のモニタリングを可能にする手法の一つとして、衛星画像を用いたリモートセンシング手法の活用が注目されている。先行研究において、特に準リアルタイムでデータ提供が可能となってきた衛星データから得られる植生や湛水状態を示す指標の時系列変化を用いることで、水稲作付域を抽出し、作付時期および生育段階を判定することが有効であることが示されてきた。たとえば、これまでに、10日間合成データである SPOT/VEGETATION から算出された指数値変化を基にした水稲移植期の湛水状態の判別(Xiao et al., 2002)や8日間合成反射率データである MODIS を用いた広域水稲作付域のマッピング(Xiao et al., 2005; Xiao et al., 2006)が可能であることが示された。また、正規化植生指数 NDVI は水稲の生育過程をよく表していることが示されており、出穂時期がその最大値として表されることが示されている(Hongo et al., 2015)。一方でこれらの高頻度観測衛星は、圃場単位におけるモニタリングのためには空間分解能が低い点が問題となる。インドネシアは各圃場の大きさが小さく、形も均一ではないのに加え、作付時期が異なる水稲が混在している場合がほとんどである。したがって、生育ステージの把握には高分解能を持つ衛星データが望ましい。

時系列高分解能衛星データを得るため、高空間分解能衛星データと高時間分解能衛星データを組み合わせて使用するための手法が提案されている。地球規模の気候変動が問題視されている現在、気候条件の変化による熱帯地域の作物収量への影響が懸念されており、継続的なモニタリングを行うことが重要である。高空間分解能衛星データの使用に併せて、高頻度観測衛星データを活用することで、生育ステージをより高精度かつ準リアルタイムにモニタリングすることが可能となると考えられる。本研究では、時間分解能と空間分解能のそれぞれに利点を持つ衛星データに着目し、融合データを作成して、その有用性について検討した。また、融合データと単一衛星データを使用した手法を比較し、どのデータを使用し、どの手法を用いることでより高い精度でのモニタリング、収量推定を可能とするかについて検討した。

## 2. 研究の目的

本研究では、衛星データと現地観測による水稲の作付時期・生育データを使用して、インドネシアにおける水稲生育ステージおよび収量モニタリングの精度向上を目的とする。インドネシアでは、食料生産と環境を監視するための研究基盤の確立、食料生産システムの改善、および長期的な観点から食料安全保障を確保するための様々な研究が進められている。水稲の損害評価手法の確立は、現在実施されている研究テーマの一つであり、水害や干ばつ害発生時の稲の生育ステージは、その被害程度に大きく影響を及ぼすため、生育ステージの正確かつ迅速な分布把握は、損害評価において大きな意味を持つ。地球観測衛星データによるリモートセンシング手法を用いることで植生状態や時間変動を捉えることが可能となつてから、植物の季節変化(フェノロジー)を衛星データから推定されるようになった。この手法は農業的土地利用や主要作物の作付時期推定、生産量の推定に関する研究に対して使用されるようになった。このような研究には SPOT/VEGETATION や MODIS などの高頻度観測データを使用されることが一般的であり、対象地としては国や省あるいは州レベルの観測に限定されている。また、高空間分解能センサを持つ衛星データやマイクロ波センサによる衛星データはよりローカルレベルの農業リモートセンシング手法として用いられているが、そのデータ量等により、長期的かつ時系列データを得ることが困難であるという問題がある。そこで、新たに使用可能となった Sentinel-2 を高頻度観測衛星である MODIS のデータセットと組み合わせることにより、さらにローカルレベルで見た場合の水稲の生育ステージを、より高精度で把握し、収量推定の精度向上を目指すことが可能なのではないかと考えた。この衛星データ融合によって作成されたデータを含め、インドネシアにおけるより効果的な圃場単位のモニタリング手法および収量推定手法の比較検討を行った。

## 3. 研究の方法

本研究は、インドネシア共和国西ジャワ州を試験地として現地観測による稲の生育ステージのデータ収集を行った。また衛星データ解析として、高時間分解能データである MODIS の日データと、Sentinel-2 から算出し得られた NDVI データを ISTDFA(Improved spatial and temporal data fusion approach)(Wu et al., 2018)を用いて融合し、時系列高空間分解能 NDVI データを作成した。また、比較のため、Sentinel-2 データ単独の NDVI データを作成した。これらの処理から得られた NDVI データを用いて稲の生育ステージ分類図の作成を行った。ISTDFA

の各手順の詳細を以下に記載する。

(1) : WorldView-2 衛星データと Google Earth データを使用し、対象地域における水田の圃場ポリゴンを作成した。

(2) : Sentinel-2 のマルチスペクトルデータと MODIS の日データセットのマルチスペクトルデータを使用して正規化処理を行い、センサ間の差によるノイズの軽減を行った。

(2) : (2)で得られた Sentinel-2 データと MODIS の日データセットについて ISTDFA を用いて融合し、時系列高空間分解能データを作成した。この時系列データから、NDVI のほか、イネの生育制限要因となる水分を表す NDWI(正規化水指数)を算出した。

(3) : 以上の処理によって得られた時系列 NDVI 曲線を圃場単位で抽出し、時系列モニタリングに使用する。まずノイズを除去するために Savitzky-Golay フィルタを適用して時系列 NDVI の平滑化を行った。この時のフェノロジー曲線の形状に着目し、形状が類似するもの毎に K-means クラスタリングを行った。この処理により、対象地の圃場では、4 つのタイプの生育曲線を持つグループに分類された。次に、水稻の各生育ステージを NDVI 時系列のフェノロジーパラメータとして時系列データの重心を算出し、その期間に相当する時期として出穂時期を定義した。このパラメータ算出の際には現地観測データとの比較を行い、出穂期検出精度を検証した。

(4) : 上記の処理から得られたデータを使用して、重回帰分析による圃場単位の収量推定を行い、結果を 5 群交差検証によって検証した。

(5) : 同様の処理を Sentinel-2 衛星データ単独から得られた時系列 NDVI データについても行い、検証した。

## 4. 研究成果

### (1) 異なる衛星データの融合

既存の ESTARFM による融合手法を用いて、MODIS と SENTINEL-2 のデータ融合(Fusion)を行った。使用した融合手法の提唱論文では、LANDSAT と MODIS のデータ融合であったが、LANDSAT よりも時空間分解能が共に高い SENTINEL-2 データでも実施可能であることが示された。SENTINEL-2 データと MODIS データとの合成を行って作成した合成 SENTINEL-2 データの相関係数は各バンドで 0.68 から 0.93、これらのバンドから算出された植生指数および水指数はそれぞれ 0.92、0.8 であった。これらのことから、合成データは収量推定に使用可能であると考えられた。

### (2) 融合データを使用した水稻収量推定

合成データを基の SENTINEL-2 データと組み合わせ、水稻生育期間の時系列データを作成し、そのデータを基に収量推定式を作成した。推定式作成には重回帰分析を使用した。先行研究の結果を踏まえ、収量との高い関係性が報告されている出穂から登熟期に相当する期間を含む出穂 40 日後までの期間において、5 日毎に推定式を作成し、決定係数及び AIC を基に、最も適切であると思われるパラメータを選択した。出穂期は最大 NDVI 値を取る期間を出穂期と定義したまたそれらの結果は 5 群交差検証によって検証された。その結果、R 0.60、RMSE 1.30t/ha であった。この結果から、2 つの衛星データを組み合わせることで、Sentinel-2 衛星データなどの高空間分解能を持つデータがない期間においても、取得されるデータ頻度を向上させ、イネの圃場単位における収量推定を行うことが可能であると示唆された。しかし、これらの結果は使用可能ではあるものの、大幅な精度向上は認められなかった。この原因としては、圃場ごとに生育速度が異なり、同様に最大 NDVI 値を取る場合でも、右上がりの生育曲線や左上がりの生育曲線など、生育曲線の形状が異なるためであると考えられた。

### (3) 生育曲線の違いに基づいたクラスタリングによる水稻収量推定手法の構築

(2)の結果を踏まえ、更なる精度向上を目指して、生育曲線の違いにより対象地の水田を成長曲線の形状によって分類し、それらに対してクラスごとの収量推定モデル式を作成する手法を構築した。データは融合データと Sentinel-2 データ単独の 2 パターンを用いて解析を行った。手法の詳細を以下に示す。

クラスタリング：対象地の水田を K-means アルゴリズムに基づいた時系列クラスタリング手法を使用して、分類した。具体的には、圃場毎の NDVI 値を時系列データで算出し、そのデータを用いた。クラスタリングで得られた各クラスの重心を算出し、重心のピークを出穂期として定義した。その結果、決定係数は 0.7 以上を示し、推定に用いるのに適当であると判断した(図 1)。得られた結果を用いて、クラスごとに収量推定式を作成し、対象地の収量推定の精度向上を目指した。

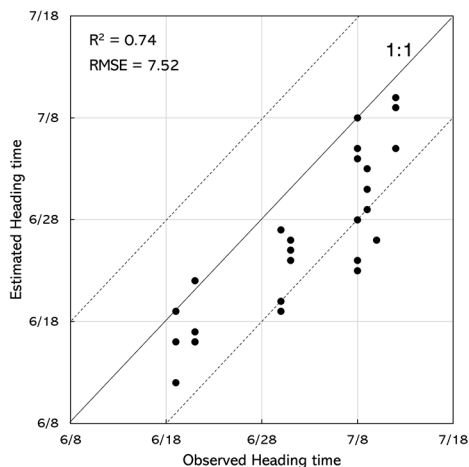


図 1 出穂期の推定結果.

収量推定：収量推定式作成には、可視域および近赤外、中間赤外域のバンドを用いた多重回帰分析を使用した。先行研究の結果を踏まえ、収量との高い関係性が報告されている出穂から登熟期に相当する期間を含む出穂 40 日後までの期間において、5 日毎に推定式を作成し、決定係数及び AIC を基に、最も適切であると思われるパラメータを選択した。

Sentinel-2 データ単独のデータを用いてクラスタリングを行った結果、対象地域全域の水田は、6 クラスに分類された。このうち、傾向が類似したクラスを統合し、最終的に計 4 クラスとして各クラスにおいて収量推定式を作成した。選択されたパラメータは、主にレッドエッジに相当するバンド 5、6 や中間赤外域に相当する Band12、指数では NDVI、NDWI であった。各クラスで選択されたパラメータ及び出穂からの日数は異なり、精度は  $R^2$  が 0.42 から 0.77、RMSE が 0.64t/ha から 1.1t/ha となり、ほとんどの圃場が分類されるクラスにおいて、もっとも精度が高かった。これら全クラスを統合して収量推定を行った結果、 $R^2 = 0.55$ 、 $RMSE = 1.14t/ha$  となり、これまでで最も高い精度を示した(図 2)。各クラスの式は以下の通りである。

- Class1;  $65.18 \times \text{Red-Edge} + 28.48 \times \text{NDVI} - 19.91$  (1)
- Class2;  $24.03 \times \text{NDWI} - 1.32$  (2)
- Class3;  $96.37 \times \text{Red-Edge} + 14.65 \times \text{NDWI} - 6.97$  (3)
- Class4;  $-71.85 \times \text{Red-Edge} + 50.95 \times \text{NDWI} - 3.39$  (4)

レッドエッジはクロロフィルとの関係から収量との関係性が指摘されており、先行研究の結果と一致する。また、SWIR や NDWI は対象地の水稻の制限要因が水分量であることを示していると考えられる。これらの結果から、対象地域における生育速度を揃えた収量推定手法は、推定精度向上に有効であることが示された(図 3)。

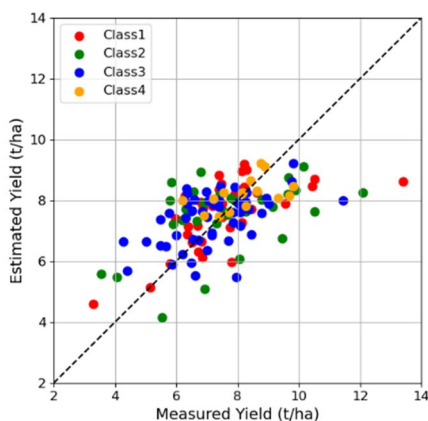


図 2 全クラスの収量推定結果(色はクラス別) .

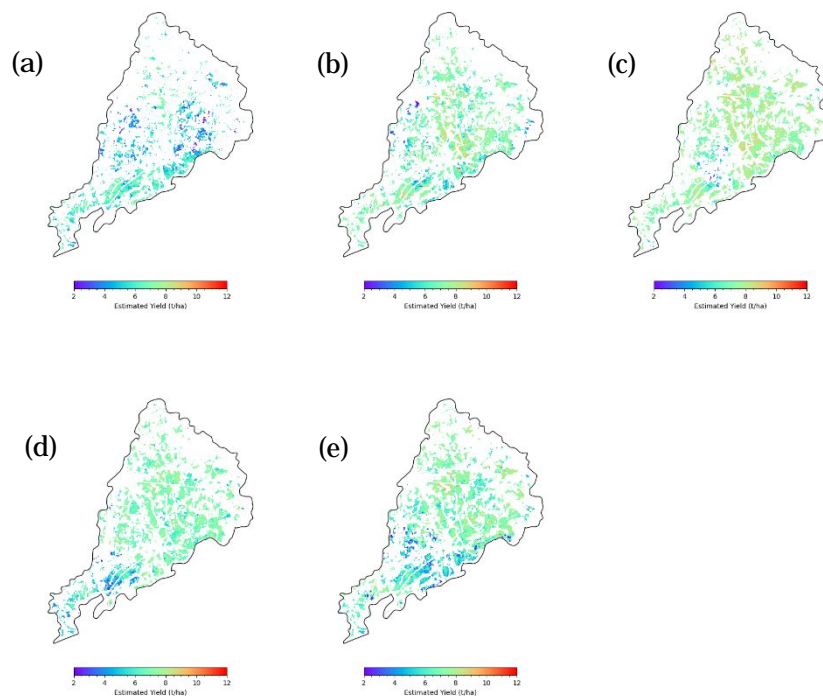


図 3 2017~2020 年における収量推定結果 . (a)2017 年、(b)2018 年、(c)2019 年、  
(d)2020 年、(e)2021 年 .

一方、融合データを用いた解析を行った結果、もっとも多くの水田が分類されたクラスでの決定係数は 0.28、RMSE は 1.26t/ha となり、精度の向上は見られなかった。これらの結果から雲量などにより、SENTINEL-2 データが使用できない時期にはデータ融合手法は使用可能であるが、SENTINEL-2 データに融合データを補助する形でその場合には単純な重回帰分析による収量推定法の方が高い精度を示すことが示された。生育曲線の形により重心が置かれる今回の手法では、2つの衛星のセンサの差異から生じるずれや解像度の違いから生じる差を補正しきれていなかったことがより大きく影響する可能性が考えられる。これらの際に生じるノイズの低減が今後の課題である。

以上の解析を通して、観測日に雲量が多いなどの理由から Sentinel-2 衛星データの使用が困難な場合、MODIS データを使用した融合データを使用することが可能であることが示された。ただし融合データを使用する場合には、最大 NDVI 値を取る時期を出穂期と定義し、その前後から 5 日ごとに推定式を作成し、各式の精度を決定係数と RMSE によって判断する手法の方が精度が高く推定された。また Sentinel-2 衛星データを単独で使用する場合、圃場単位の生育曲線の形状に基づいたクラスタリングを行い、そのグループごとに収量推定を行うことで、精度向上が見込めることを示すことができた。

#### < 引用文献 >

- X.Xiao, S.Boles, S.Frolking, W.Salas, B.Moore III, C.Li (2002) Observation of flooding and rice transplanting of paddy rice fields at the site to landscape scales in China using VEGETATION sensor data, *International journal of Remote Sensing*, 23(15), 3009-3022.
- X.Xiao, S.Boles, J.Liu, D.Zhuang, S. Frolking, C.Li, W.Salas, B.Moore III (2005) Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images. *Remote Sensing Environment*, 95(4), 480-492.
- X.Xiao, S.Boles, S.Frolking, C.Li, J.Y.Babu, W.Salas, B. Moore III (2006) Mapping paddy rice agriculture in South and Southeast Asia using multi-temporal MODIS images, 100(1), 95-113.
- C.Hongo, T.Tsuzawa, K.Tokui, E.Tamura (2015) Development of damage assessment method of rice crop for agricultural insurance using satellite data, *Journal of Agricultural Science*, 7(12), 1916-9752.
- M.Wu, C.Yang, X. Song, W.C.Hoffmann, W.Huang, Z.Niu, C.Wang, W. Li, B.Yu (2018) Monitoring cotton root rot by synthetic Sentinel-2 NDVI time series using improved spatial and temporal data fusion, *Scientific Reports*, 8 (2016),1-12.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Yuki Sofue, Chiharu Hongo, Naohiro Manago, Gunardi Sigit
2. 発表標題 YIELD ESTIMATION OF PADDY RICE BASED ON DIFFERENCES IN RICE GROWTH CURVES
3. 学会等名 日本リモートセンシング学会 第72回(令和4年度春季)学術講演会（オンライン）ISRS2022との同時開催（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Sofue, Chiharu Hongo, Naohiro Manago, Koki Homma, Gunardi Sigit, Budi Utoyo
2. 発表標題 Yield Estimation of Paddy Rice using High Spatial and Temporal Satellite Data in Indonesia
3. 学会等名 Japan Geoscience Union（日本地球惑星科学連合）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Sofue, Chiharu Hongo, Naohiro Manago, Gunardi Sigit, Koki Homma, Baba Barus
2. 発表標題 Estimation of Normal Rice Yield Considering Heading Stage based on Observation Data and Satellite Imagery
3. 学会等名 International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2021 (41th)（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 祖父江侑紀・本郷千春・眞子直弘・Gunardi Sigit
2. 発表標題 インドネシアにおける水稲フェノロジーの空間分布と変動パターンの推定
3. 学会等名 日本リモートセンシング学会 第71回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Sofue
2. 発表標題 Yield Estimation of Paddy Rice using High Spatial and Temporal Satellite Data in Indonesia
3. 学会等名 Japan Geoscience Union (JpGU) Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔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

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