

研究論文

Sentinel-2画像と筆ポリゴンを用いた 精密な水田NDVI抽出による広域収量予測の検証

Verification of Large-Scale Yield Prediction Using Precise Rice Paddy NDVI Extraction via
Sentinel-2 Images and Plot-Based Polygons

青木 和人*

- I. はじめに
- II. 既往研究と研究対象地域
- III. NDVIを用いた水稲収量の回帰分析
- IV. おわりに

本研究では、Sentinel-2の10m解像度データと農林水産省が公開を開始した筆ポリゴンを用いて、福井県全域の水田部分のNDVIを正確に抽出した。そして、生育期間中に取得した6時点のNDVIを用いて、NDVIを説明変数、2024年の10a当たり収量を被説明変数とした単回帰分析を行い、どの時期のNDVIが収量を最もよく説明するかを統計的に検証した。その結果、7月18日時点のNDVIで最も高い相関係数 ($R=0.55$) が得られ、品種が混在する広域条件下でも、1時点のNDVIが収量を一定程度推定しうることを示した。本研究では、第一に、公開衛星データと筆ポリゴンを組み合わせるだけで、市町レベルの収量推定が可能であることを実証し、リモートセンシングの実務での利用可能性を大きく前進させた。第二に、複数品種が混在し出穂期が異なる福井県で、単純なモデルで広域の水稲の生育状態を監視できることを示し、高温障害や害虫被害などを早期に検知する広域生育監視インフラとしてNDVIが有効であることを示した。第三に、誰もが利用可能な衛星画像や筆ポリゴン、GISを用いて、低コストで再現可能な広域収量予測モデルを構築できることを示し、地域人材にも活用可能な手法を示した。

キーワード : Sentinel-2, 筆ポリゴン, NDVI, 福井県, 収量予測

* 福井県立大学地域経済研究所

I. はじめに

近年、日本の農業は構造的転換期を迎えている。農業就業人口の減少と高齢化が進行し、農業経営体の規模拡大や法人化が進む一方で、地域の小規模農家や中山間地域では担い手不足が深刻化している（農林水産省 2025a）。従来の農業経営では、農家自身の経験や観察に基づく判断により、施肥・防除・収穫の時期が決定されてきた。しかし、地球温暖化の進行による気象変動の増大や極端な高温・多雨の発生頻度の増加は、作物の生育や収量に大きな影響を与えており、経験に依存した判断だけでは対応が難しくなっている。客観的なデータに基づく生育評価や予測が求められている（青木ほか 2023）。

こうした状況の中で、限られた労働力で持続的な生産を維持するための新しい技術基盤として、スマート農業が注目されている（白谷 2019）。スマート農業は、ICT・IoT・AI・リモートセンシングなどの先端技術を活用し、農作業の自動化・効率化・可視化を目指すものである。その中でも、衛星データを用いたリモートセンシングは、広域のかつ時系列的に農地の状態を把握できる手段として、近年その有効性が期待されている（石塚 2019）。

農業への衛星リモートセンシングによる活用方法として、植生指数（NDVI: Normalized Difference Vegetation Index）の活用がある。NDVIは、植物の葉面における光の反射特性を利用して植生活性を定量的に評価する指標である。作物の状況、健康度、被覆度、さらには収量推定の指標として広く利用されている（農林水産省 2021）。

従来、作物生育の評価や収量予測は、農家による現地観察、圃場調査などに依存しており、広域・高頻度の把握には限界があった。しかし、Sentinel-2に代表される高解像度衛星が定期的に農地を観測できるようになり、10mレベルの高解像度で農地の状態を定期的に捉えられるようになった。本来、リモートセンシングの長所は広域調査を可能にする点にある。都道府県単位のような広域を対象に、県下市町の水稲収量予測を行うことは、農林水産省・都道府県・市町村・農業試験場といった広域的な作況を把握する行政機関に寄与するとともに、農業協同組合・農事組合法人が担う生産者支援にも資するものであり、結果として地域経済の発展にもつながる。

しかし、既往研究の多くは特定圃場を対象とした小規模な地域分析にとどまっている。NDVIを正確に抽出するためには、農地境界を精密に特定する必要があり、その作業に多大な労力と時間がかかっていたためである。そのため、都道府県規模での広域な収量予測分析例は限定的であった。

こうした状況の中、2025年4月1日に農林水産省（2025b）は、全国の精密な農地区画にかかる地理空間情報を筆ポリゴンとして、誰でも利用できるオープンデータとして公開を開始した。このため、10mレベルの高解像度衛星画像と位置精度の高い筆ポリゴンを利用すれば、高精度に農地境界内のNDVIを抽出して、かつ、都道府県規模で広域に生育状態を観測できる。

そこで本研究では、水稲生産量の高い福井県を対象として、Sentinel-2の高解像度データと位置精度の高い筆ポリゴンデータを組み合わせたNDVI観測を行い、市町別統計を組

み合わせた回帰分析による収量予測モデルの検証をしたい。

以下、第2章では、既往研究を整理し、研究対象地域である福井県の自然環境、主要品種、2024年の生育状況を示す。第3章では、使用データと分析手順を示し、回帰分析を行う。最後に本研究の成果と今後の課題を整理する。

II. 既往研究と研究対象地域

1. 既往研究の整理

衛星データを用いたNDVI解析は、1970年代後半から農業・環境分野で幅広く応用されてきた。近赤外域と可視赤域の反射率差に基づくNDVIはTucker(1979)により提案され、当時、主力であったAVHRR¹やMODIS²などの衛星データを用いた地球規模の植生変動監視が進められてきた。

水稻を対象とした衛星リモートセンシングによる作物収量予測の研究は、日本では1990年代以降進められてきた。これらの研究では、衛星画像から算出したバンド反射値やNDVIを説明変数とし、収量を被説明変数として回帰モデルを構築するという枠組みがとられることが多い。北海道立中央農業試験場(1994)は、石狩・空知地方を対象に、1984・1986・1992年のLandsat-5 TM³、1993年のMOS-1⁴データと市町収量との関係を解析し、9月観測の緑・近赤外反射値、およびNDVIを用いた重回帰分析により、水稻収量を推定している。また、志賀・安積(1995)は北海道・石狩川下流域を対象として、30m解像度のLandsat-5TMおよび50m解像度の

MOS-1/MESSRデータを用いて水田画素を抽出し、各バンドの反射値とNDVIを市町別に平均した上で、市町統計収量との重回帰分析を行っている。

さらに、加藤・高橋(2019)は、Landsat⁸の可視・近赤外バンドから算出したNDVIを基礎データとし、農林水産省が公表する地域別農業統計(作況指数)との対応関係を分析することで、水稻作況の広域推定モデルを構築している。本研究では、2013~2017年の複数年データを対象とし、出穂期前後のNDVIが作況指数と最も強く関連することを示している。さらに、地域別の気温・降水量・日射量の差異がNDVI値に与える影響を詳細に検討し、気象条件の変動がNDVIと収量指標の関係をどの程度変動させるかを定量的に評価している。また、脇山・井上・中園(2003)は、気象衛星NOAA/AVHRR⁶のデータを用いた簡便な収量予測を行っている。当該研究では、出穂期前後40日間の収量内容決定期における日射量と出穂期のNDVIの積、および気温を説明変数とした重回帰モデルによる市町単位での水稻収量予測式を構築している。

日本における農業リモートセンシング研究の発展を1970年代から体系的に整理した総説として、齋藤(2010)は、水稻・小麦など主要作物を対象としたNDVI活用研究の系譜をまとめている。本稿では、当時、主力であったAVHRR、Landsat、MOS-1衛星などを用いた植生指数解析や冷害評価、作況指数推定など、多様な適用研究を俯瞰している。また、従来衛星の空間分解能の限界や課題にも触れ、今後の高解像度衛星の活用による高度化の可能性を示唆している。

その後、衛星リモートセンシング技術の発展はめざましく、特に2015年・2017年打ち上げの欧州宇宙機関 (ESA:European Space Agency)⁷による Sentinel-2A/B衛星の登場は、空間分解能⁸と観測頻度の両面で、リモートセンシングに大きな転機をもたらした。従来の代表的衛星である Landsat 系列では、マルチスペクトル画像⁹の空間分解能は30mにとどまっていた。そのため、1画素が900㎡を表すため、水田や畑など小さな圃場が混在する日本の農地では、1筆ごとの生育状況を正確に把握するには限界があった。それに対し Sentinel-2は、赤・近赤外バンドを含む主要バンドが10m分解能で提供され、1画素が100㎡という高精細な観測が可能である (ESA 2021)。この解像度向上により、従来は農地とそれ以外の土地利用が混在してしまっていた画素を、農地単位で識別できるようになり、NDVIを用いた生育モニタリングの精度が飛躍的に向上した。また、観測頻度も2機体制で5日周期と高く、夏季に雲に遮られやすい日本でも、生育期の重要なタイミングを逃さずにデータ取得できる。こうした理由から、Sentinel-2は現在、広域農業モニタリングから筆レベルの分析まで対応できる基盤衛星として位置づけられている。

Zhangら (2018) は、Sentinel-2の高解像度データと機械学習アルゴリズムを用いて水田域を高精度に分類している。そして、時系列情報を活用し、多様な特徴量を組み合わせることで、広域水田マッピングの有効性を示している。また、Fernández-Beltrán(2021)は、Sentinel-2の時系列データと3D-CNNを組み合わせ、ネパールの水稲収量を推定している。そして、NDVIを含む多時期のスペクトル情

報が収量形成の把握に有効である点を示している。さらに Sakamotoら (2021) は NDVI 時系列から水稲が生育の過程で示す一連の発育段階の時間的変化であるフェノロジーを推定し、出穂期および登熟期の特定が可能であることを示している。

このような高精度衛星画像データ入手が可能となった中、日本において農林水産省は2025年4月1日に、全国の筆単位の精密な農地区画にかかるとの地理空間情報である農地の区画情報 (筆ポリゴン) をオープンデータとして公開を開始した (農林水産省2025b)。筆ポリゴンとは、農地の地番ごとに区画されたポリゴンデータである。解像度は筆界レベルであり、衛星画像よりも空間精度が高い。しかし、Sentinel-2の高解像度データと位置精度の高い筆ポリゴンデータを組み合わせた水稲のNDVI観測による収量予測研究は未だない。

2. 福井県の自然環境

研究対象地域は福井県である。福井県は日本列島のほぼ中央、北陸地方の南端に位置し、北は日本海に面し、南東は岐阜県、西は滋賀県および京都府に接している。県土面積は約4,190km²であり、県北部には越前平野、県南部には若狭盆地が広がる。地形的には、県土の約75%が山地・丘陵地で占められており、可耕地は主要河川沿いの平野部、および沿岸部に集中している。主要な河川としては九頭竜川、日野川、北川などがあり、これらが形成する沖積平野が福井県の農業生産の中核をなしている (福井県統計調査課2023)。

気候は典型的な日本海側気候であり、冬季

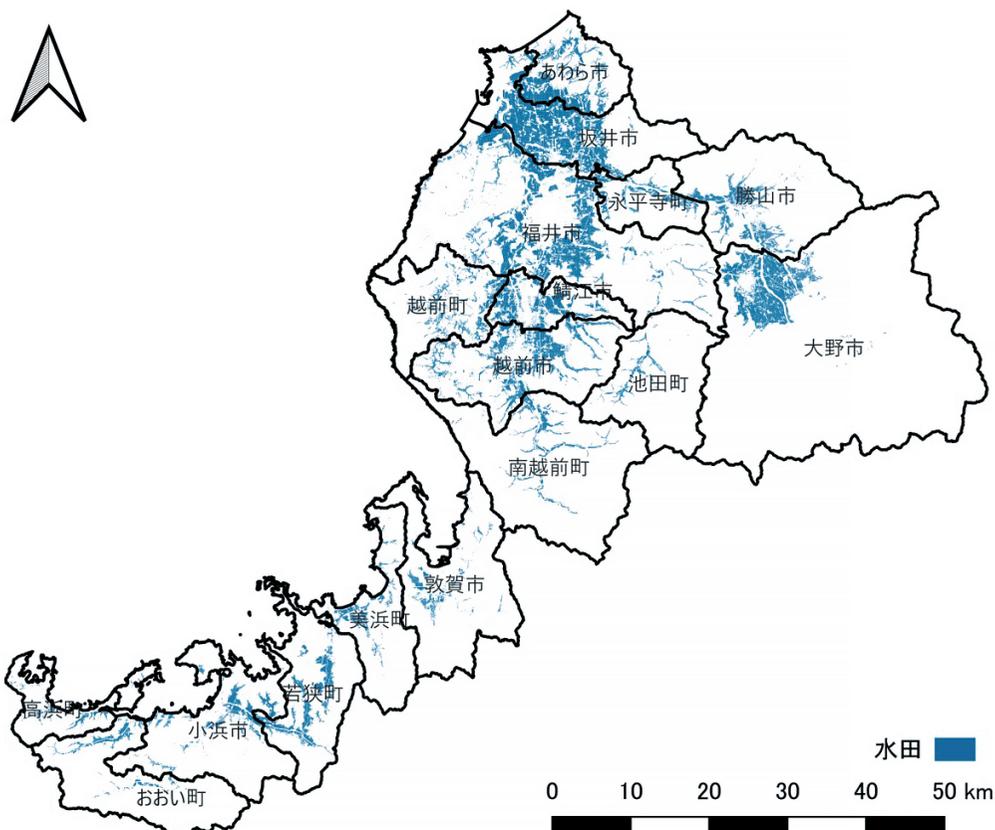


図1 福井県内の水田分布

出所：筆ポリゴン(農林水産省2025b)より著者作成。

は寒気の影響を強く受けて降雪量が多い。北部の福井市や坂井市では、平均年間降水量が2,500mm前後に達し、特に12月から2月にかけての積雪深は平野部でも50~100cmに及ぶ年がある。一方、夏季はフェーン現象の影響を受けて高温多湿となり、7~8月には最高気温が35℃を超える猛暑日が観測されることも少なくない。

福井県における気象条件は、北部の越前地域と南部の若狭地域で大きく異なる。越前地域では日本海の影響を受けて冬季の降雪が多く、春先の雪解け時期が作付け開始時期を左右する。一方、若狭地域は比較的温暖で、春

の訪れが早く、播種・移植の時期も早い傾向にある。福井県の年間日照時間は約1,800~1,900時間と全国平均よりやや少なく、冬季は曇天日が多い。

農林水産省(2025b)の筆ポリゴンを用いて、福井県内の水田分布を示したものが図1である。福井県の土地利用構造は、平野部・丘陵部・山間部の三つに大別できる。嶺北北部の坂井平野から福井平野にかけては、広大な沖積低地が広がり、水田が連続的に分布している。これらの地域では圃場整備が進んでいる。対照的に、越前市南部から池田町・南越前町にかけては丘陵地が多く、狭小な棚田

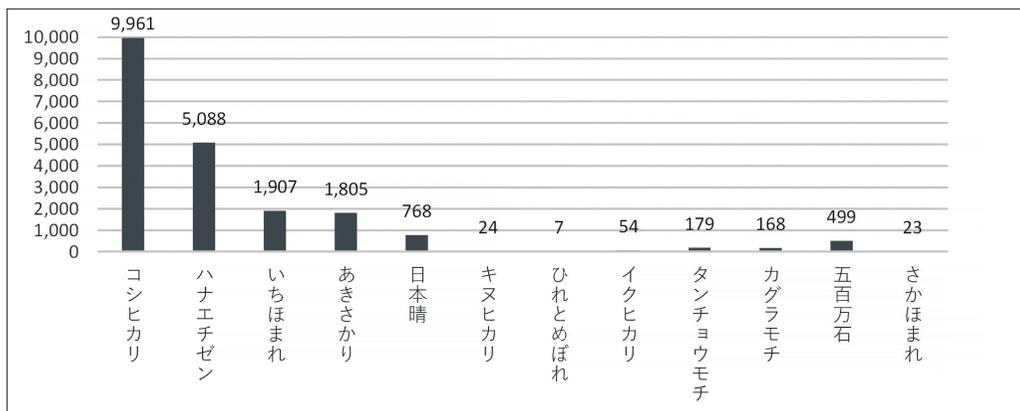


図2 2024年度品種別水稲作付状況

出所：福井県農林部2025bにより著作作成

が点在する。また、敦賀市より南の嶺南の若狭地域では海岸線沿いに平地に限られる一方、盆地部では水田と果樹園が混在する複合的な土地利用が見られる。

3. 水稲の主要品種

福井県の農業は、水稲を中心とする複合経営が基本である。県全体の耕地面積約39,500haのうち、35,800ha(90.63%)が田で占められている。2024年の福井県の水稲生産額は124,800tであり全国21位である(福井県農林部2025a)。2024年度の水稲作付面積は約23,400ha、平均収量は約527kg/10aである(福井県農林部2025b)。

図2の2024年度における福井県の品種別の水稲作付状況(福井県農林部2025b)を見ると、品種間の作付面積には大きな差がみられ、県内の稲作の中心が特定の品種に集中していることがわかる。2024年における福井県の水稲作付状況は、うるち米品種のコシヒカリが9,961haで全体の約49%に達し、県内の主力品種である。コシヒカリは出穂・成熟とも

に中生群の中では、やや早い特性をもつ。良食味・高品質が特徴で、全国的に広く作付される代表的主力品種である。

次いでハナエチゼン5,088haで全体の約25%を占める。ハナエチゼンは食味と耐倒伏性のバランスに優れ、早生品種として県内での需要がある。これら二大品種で県全体の約75%を構成している。第3位は、いちほまれ1,907ha(9%)である。いちほまれは、福井県が約6年かけて開発した高品質ブランド米であり、食味試験ではコシヒカリを上回る評価が出ることも多い中生品種である。続いて、あきさかりで1,805ha(約9%)である。あきさかりはコシヒカリの系譜を受け継ぎながら、食味・収量性の安定化を目的に近年導入が進んだ中生品種である。

他にも、もち米品種のカグラモチ、タンチョウモチ、酒米品種のさかほまれ、五百万石が生産されているが、総じて、2024年度の福井県の作付構成は、早生～中生のコシヒカリ、ハナエチゼン・あきさかり・いちほまれ、キヌヒカリのうるち米生産が中心である。特にハナエチゼンに代表される早生品種は、7

月中旬には幼穂形成期から出穂期に達し、葉量が最大となる時期が早い。

この点は後述する複数時点のNDVIと市町別収量との関係を比較の際に、大きな影響を及ぼしたと考えられる。すなわち、県内の多くの水田において、7月中旬が生育量（葉量）の最大化する時期に相当し、この時期のNDVIが収量形成に関わる生育状況を最もよく反映した可能性が高い。

このように、本研究で対象とした水稻の主要品種構成は、NDVIが最大値を示す時期の特定や、収量との対応関係を解釈する上で重要な前提条件であり、本節の品種構成の整理は、分析結果を理解するために必要な位置づけを持つ。

4. 2024年の生育状況

2024年の福井県における主要水稻品種の出穂期および登熟期は、6月の気象条件の影響を受け、概ね前年並みで推移した。中生品種のコシヒカリの出穂期は8月1日で前年並みであった。幼穂形成期は前年より1日早い7月12日に確認され、成熟期は9月2日頃と推定されている。早生品種であるハナエチゼンの出穂期は7月16日であり、前年より1日遅かった。幼穂形成期は前年より2日遅い6月27日と確認され、成熟期は8月13日頃と推定されている。早生であることから、他品種に比べて約2週間早く成熟する特徴を有している。中生品種のいちほまれは、8月4日に出穂し、前年より1日早く、幼穂形成期は前年より2日早い7月18日に確認された。中生品種のあきさかりはコシヒカリに比べ、平均して出穂期で5日遅い特性を持っており、

2024年の出穂日は8月4日と前年に比べ1日早かった（JA福井県2025）。

2024年は生育初期の4月および6月に気温が高く推移したため、幼穂形成期は前年並みか、やや早まる傾向であった。一方、出穂直前の7月は天候不順や日照不足がみられ、生育への影響が懸念されたが、出穂後の登熟期間は前年並みか、やや高温で推移したため、登熟の進行は比較的良好であった。最終的な生育結果として、コシヒカリでは登熟歩合が90.2%と向上し、ハナエチゼンおよびコシヒカリはいずれも玄米重が前年を上回るなど、全体として良好な生産状況を示した。

このように福井県では、複数の品種が作付けされており、品種間には出穂期が15~20日程度ずれるという生育差が存在する。本研究では、農地の精密なNDVI抽出による収量予測研究の第1段階として、あえて品種ごとに圃場に分けずに、県内全体を一括して、単回帰分析というシンプルな方法で、一定の説明力を持つ収量予測が成立するかどうかを確認したい。

Ⅲ. NDVIを用いた水稻収量の回帰分析

本章ではSentinel-2衛星画像から算出したNDVIを用いて、福井県内の市町ごとの水稻収量を予測したい。手法として、福井県全域を対象とし、2024年7月から8月に取得された複数時点のNDVIを用いて、実際の収量結果との相関係数から最適な時期のNDVIを選定し、回帰分析による収量予測モデルの構築を試みた。

研究の手順は、①筆ポリゴンに基づく正確な水田部分のNDVI抽出、②各日時のNDVI

との相関分析, ③回帰分析による収量予測モデルの構築と検証である. 稲作では, 活着期・分けつ期・幼穂形成期・出穂期・登熟期といった生育段階の進行に伴い植生の反射特性が大きく変化し, NDVIの推移にも明確な季節パターンが現れる. 特に, 出穂期から登熟初期にかけてNDVIが年間で最も高い値を示すことが多く, この時期の植生指数は籾数・稔実度など収量構成要素を最も反映しやすい. そのため, ②各日時のNDVIとの相関分析では, 複数の観測日のNDVIと収量の相関係数を比較し, 収量予測に最も適した観測日のNDVIを選定した.

1. 使用するデータ

(1) 衛星データ

本研究で利用した衛星データは, ESAが運用するSentinel-2衛星である. Sentinel-2は2015年と2017年に打ち上げられた2機体制の光学衛星であり, 搭載センサMSI (Multispectral Instrument) は13バンド(可視～短波赤外)を持つ. 空間解像度は10m, 20m, 60mの3種であり, 本研究ではNDVI算出に必要な10m解像度のバンド4 (Red, 665nm), およびバンド8 (NIR, 842nm)を使用した. 観測周期は5日で, 雲量の少ないシーンを選定すれば, 農地の生育変化を十分な時系列精度で追跡可能である. また, NDVIを正確に算出するには, 大気補正が施されたレベル2A (L2A) プロダクトを用いることが望ましい. 本研究ではESAが提供するSen2Corによる大気補正済みL2Aデータを使用した. L2Aプロダクトを使用することにより, 大気中のエアロゾル・水蒸気に

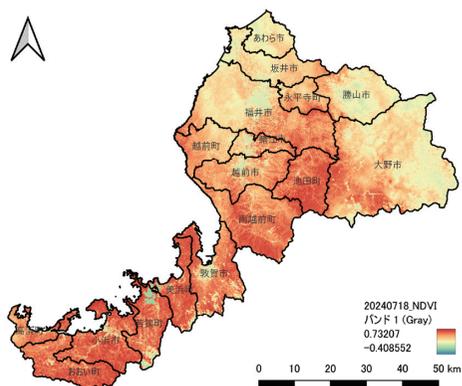


図3 2024年7月18日のNDVI値

出所: Sentinel-2画像(ESA2025)により著者作成

よる散乱の影響を軽減したデータや雲判別 (Scene Classification Layer : SCL) データの利用が可能である (ESA 2021). データは Copernicus Open Access Hub から無償で取得した.

NDVIは田植え後の5月中旬は活着直後に相当し, 葉量の増加が反映され始める. その後, 6月の分けつ期, 7月の幼穂形成期～出穂前後を経て, 8月の登熟初期に向けてNDVIは変動する. これらの生育ステージは, 年や市町によって進行が異なるため, 特定の時期だけを取得すると生育ズレの影響を受けやすい. 一方, 広い期間を連続観測することで, どの時期のNDVIが収量に最も寄与するかを客観的に抽出でき, 相関分析の信頼性が高まる. そのため, 本研究では, 7月3日から8月10日までの約1か月にわたり, 計6時点のNDVIを取得した (図3).

また, 高解像度光学衛星を用いた地表観測には, 雲の存在による根本的な制約がある. 光学センサーは, 可視光・近赤外域を利用して地表の反射特性を取得するため, 雲が発生していると地表からの反射が遮断され, 地表

表 1 福井県市町の水稲収穫量と農地区画情報

市町村 コード	都道府県	市町	2024水稲収穫量調査結果			田の区画情報 (筆ポリゴン)		
			子実用作付面積 (ha)	10a当たり 収量(kg)	子実用収穫量 (t)	筆数	面積 (m ²)	1筆あたり 面積 (m ²)
18201	福井県	福井市	23,500	542	124,800	36,138	71,021,612	1,965
18202	福井県	敦賀市	5,020	495	27,200	7,028	6,531,979	929
18204	福井県	小浜市	403	500	2,000	9,620	12,654,289	1,315
18205	福井県	大野市	821	540	4,110	20,675	38,218,238	1,849
18206	福井県	勝山市	2,540	519	13,700	13,176	17,196,924	1,305
18207	福井県	鯖江市	1,070	542	5,530	7,465	19,442,692	2,605
18208	福井県	あわら市	1,410	551	7,650	10,133	25,223,326	2,489
18209	福井県	越前市	1,720	529	9,470	20,553	32,952,161	1,603
18210	福井県	坂井市	2,420	549	12,800	21,727	58,591,340	2,697
18322	福井県	永平寺町	3,820	505	21,000	6,763	9,244,439	1,367
18382	福井県	池田町	608	444	3,070	3,353	3,942,256	1,176
18404	福井県	南越前町	249	495	1,110	5,744	9,110,883	1,586
18423	福井県	越前町	596	516	2,950	11,032	11,818,580	1,071
18442	福井県	美浜町	737	497	3,800	5,488	7,002,488	1,276
18481	福井県	高浜町	447	490	2,220	3,614	3,243,153	897
18483	福井県	おおい町	177	488	867	4,030	5,997,101	1,488
18501	福井県	若狭町	390	502	1,900	9,318	16,503,688	1,771
平均			2,702	512	14,363	11,521	20,511,479	1,611

出所：福井県農林部（2025b）、農林水産省（2025b）より著者作成

情報が取得できなくなる。特に日本では7～9月に雲の発生率が高い。NDVIは雲や影が存在すると極端に低い値を示し、誤った低生育と判定されるため、雲による影響の排除が必要である。本研究ではSentinel-2のSCLバンドを利用し、雲・影・異常値を除外した¹⁰

なお、本研究におけるGIS解析は、オープンソースソフトウェアであるQGIS3.34を使用した。QGISは、可視化と解析を同一環境で実行できる利点があり、NDVI算出、筆ポリゴンでのNDVI抽出、地図化に用いた。データ処理は、QGISのPython実行環境により、連続処理により多時点のNDVI算出・分析を可能とした。

（2）水稲収穫量と筆ポリゴン

次に必要となるのが、①筆ポリゴンに基づく正確な水田部分のNDVI抽出である。筆ポリゴンの各筆には田・畑・樹園地などの土地利用区分が属性として与えられている。本研究では属性情報から田ポリゴンのみを抽出し、これをマスクとして該当するNDVIのみを抽出した。また、回帰分析で非説明変数となる2024年の水稲収量データは、福井県農林部（2025b）の「農林漁業の動き（米（水稲）・麦）第3表 市町別水稲作付面積と単収・収穫量」に基づく、2024年の福井県内市町単位の10 a 当たり収量 (kg) (表1) を使用した。

これらの2024年の水稲収量と福井県市町の筆ポリゴンの状況を示したものが表1である。また、2024年の市町別の10 a 当たり

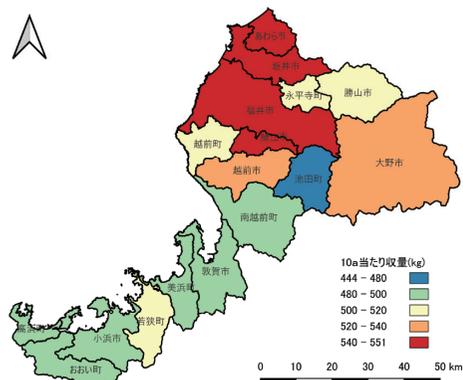


図4 2024年7月18日のNDVI値

出所：福井県農林部（2025b）より著者作成

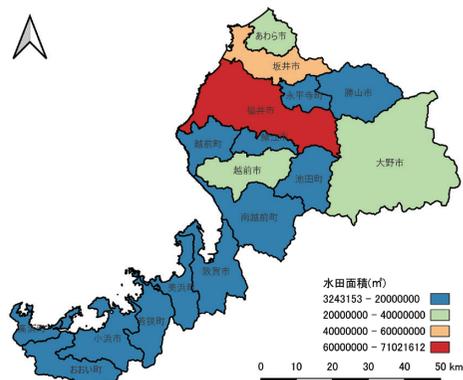


図5 市町別の水田合計面積

出所：農林水産省（2025b）より著者作成

収量を示したものが図4，筆ポリゴンによる市町別の水田合計面積を示したものが図5である。

福井県は稲作が主要農業であるが，各市町の規模や気象条件，地形，農業構造の違いにより，生産規模および単収には一定の差異が見られる。嶺北の福井市は，作付面積が23,500haと県内最大であり，総収穫量も124,800tと突出している。これは，福井市の平野部に広大な水田地帯が存在すること，また，人口が多く，生産農家数・耕地面積とも県内最大規模であることに起因する。単収は542kg/10aと県全体の平均に近く，広域かつ安定した生産基盤を有することが特徴である。

それ以外の市町においても，図4,5および表1に示すように，福井県内の水稲生産は市町ごとに作付面積および単収の両面で一定の地域差を有している。平野部を中心とする市町では作付規模が大きい一方，山間部を含む市町では作付面積が小さく，単収にもばらつきがみられる。

概観すると，福井県の水稲生産は，作付面

積の大きい福井市・越前市が量を支え，単収の高いあわら市・大野市・勝山市などが収量性を牽引するという構造となっている。これらの地域差は，地形条件，品種構成，栽培管理，気象条件など複数の要因が重なって生じていると考えられる。本研究では，こうした市町間の異質性を内包した上で，市町単位に集約したNDVIと収量との対応関係を検証しており，後述する回帰分析および残差の解釈において，これらの地域差は重要な前提条件となる。

2. 分析手順

分析に用いたNDVIは赤色域と近赤外域データの反射率を用いて以下の式で算出される。

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

NIR = Sentinel-2 Band 8（近赤外データ）

RED = Sentinel-2 Band 4（赤色データ）

NDVIの値域は-1～1であり，稲作期の水田では通常0.4～0.9程度をとる。

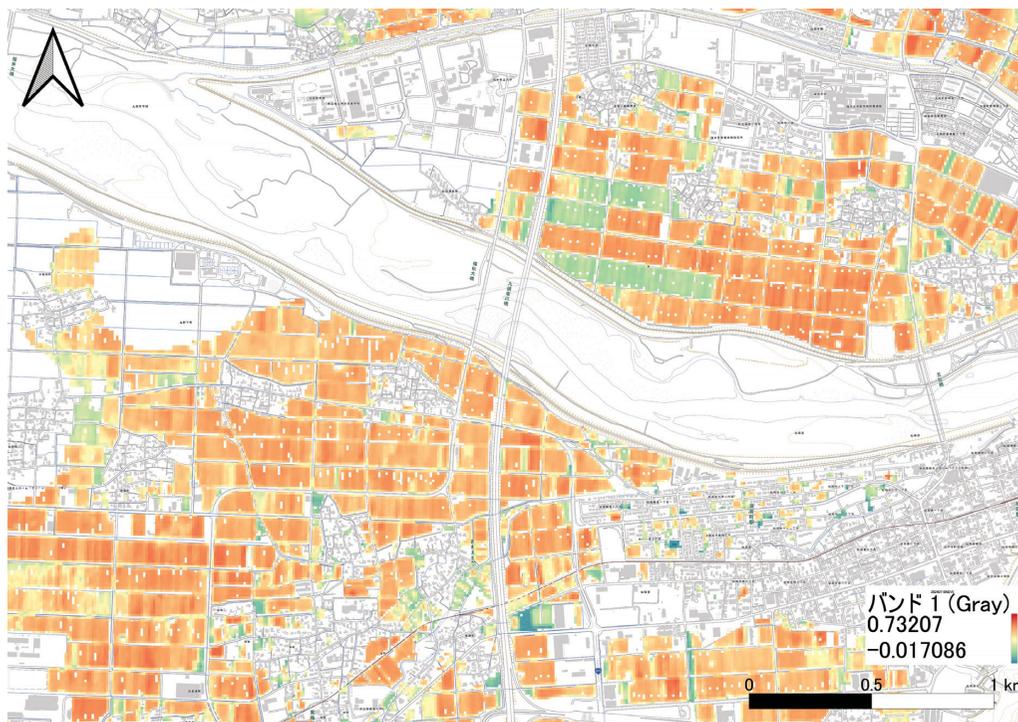


図6 筆ポリゴンにて抽出した水田NDVI値(福井県立大学付近)

出所：Sentinel-2画像(ESA2025)，筆ポリゴン農林水産省(2025b)により著作作成，背景地図は地理院地図を使用

まず、①筆ポリゴンに基づく正確な水田部分のNDVI抽出として、福井県全域のNDVI値を農地区画情報の筆ポリゴンにて抜き出すクリップ処理を行って、筆ポリゴンにて水田境界内のNDVIを抽出した。例として、図6は福井県立大学付近の筆ポリゴンにて抽出した水田NDVI値を示したものである。そして、行政統計として提供される非説明変数の市町別水稲収量と比較するために福井県内の市町単位でNDVIの平均値を算出した。具体的には、水田NDVIラスタを福井県の市町界ポリゴンと重ね合わせ、市町単位でのゾーン統計を行った。ゾーン統計では、各市町ポリゴン内部に存在するNDVI画素を対象に、総画素数、平均値を計算した。

この分析手順を複数観測日に対して繰り返して、観測日ごとの市町NDVIを計算・整理した。本研究ではSCLバンドにて雲・影・異常値を除外しているため、日時により取得できた画素数に違いが出ている。この画素数を当日の雲による除外度合いの指標として利用した。また、平均NDVI値は説明変数として利用した。

3. 回帰分析

次に②各日時のNDVIとの相関分析を行った。具体的には、取得した各市町別のNDVI値を説明変数、令和6年産福井県市町別水稲収量統計による各市町別の10a当たり収量を

表2 取得したNDVIと相関

No	日付	取得NDVI数	平均NDVI	相関関係
1	20240703	3,485,117	0.12	0.13
2	20240718	3,485,069	0.25	0.55
3	20240723	3,484,535	0.42	0.22
4	20240728	116,719	0.21	0.54
5	20240807	1,033,457	0.42	0.11
6	20240810	92,601	0.32	0.26

出所：Sentinel-2画像(ESA2025)、筆ポリゴン農林水産省(2025b)により著者作成

被説明変数として、7月から8月中旬までに取得された6時点の衛星画像を対象にそれぞれ、単回帰分析を実施した(表2)。

本研究では、Sentinel-2画像と筆ポリゴンを用いて、筆単位で水田内のNDVIを精密に抽出しているが、回帰分析では、行政統計として利用可能な市町別水稲収量と対応させるため、筆単位のNDVIを市町単位に集約した平均値を説明変数として用いた。その結果、本研究の回帰分析は、17市町を対象とした $n=17$ の単回帰分析となっている。

本研究は、筆ポリゴンという高精度な農地境界情報を用いてNDVIを抽出することで、従来よりも空間的に精緻な植生情報を取得した場合に、広域・行政単位での収量推定に一定の説明力を持ちうるかを、第1段階の検証として確認する点にある。そのため、この点は、本研究の分析上の制約である。また、市町単位への集約方法では、単純平均を採用した。これは、行政統計として公表されている水稲収量が市町単位の平均値であることとの対応関係を重視したためである。一方で、農業集落単位の収穫量との相関をとるなど、異なる集約方法を用いた場合に、収量との関係性がどのように変化するかについては、今後の課題となる。

その結果、7月18日のNDVIが最も高い相関係数($R=0.55$)を示した。同日のNDVI取得数は3,485,069ピクセルと十分な量が確保できている。雲域の影響も小さいことから、統計的には最も説明力の高いデータであると判断した。他にも、NDVI取得状況の観点から、7月23日も3,484,535ピクセルと十分に、平均NDVIも0.42と安定しており、良好であった。しかし、相関係数は0.127と低く、収量との関連性は限定的であった。その理由として、7月16日の出穂から約1週間が経過していたことが考えられる。

また、8月7日・8月12日など8月以降のNDVIは、全体的に値が低下しており、取得時の画素数も大きく減少している。観測範囲が雲で覆われ、近赤外の反射が正しく取得できなかった可能性が高い。8月以降は雲量が増える時期であり、衛星の撮影タイミングと天候条件が一致せず、データ品質が大きく低下したと考えられる。加えて8月以降は水稲が登熟期に入り、NDVIが自然に減少する時期でもあり、観測ノイズに強く左右された値となり、相関係数も低くなったと考えられる。

最も高い相関係数を示した2024年7月18日の単回帰分析結果が表3である。回帰統計結果は、相関係数 $R=0.55$ 、決定係数 $R^2=0.30$ 、補正 $R^2=0.26$ であった。これは、市町単位の収量の約25~30%程度が、単一時点のNDVIによって説明可能であることを示す。水稲収量は品種差・施肥量・水管理・気象条件・土壌特性など多数の要因の影響を受けることや既往研究の重回帰分析結果などを踏まえれば、NDVIのみの単回帰分析の説明力としては比較的妥当な水準にあるといえる。

p値は0.02であり、本モデルは5%水準に

表3 20240718NDVIによる回帰統計結果

相関R	決定係数R ²	補正 R2	標準誤差	観測数				
0.55	0.30	0.26	24.21	17				
	係数	標準誤差	t	P-値	下限95%	上限95%	下限95.0%	上限95.0%
切片	527.60	8.48	62.23	0.00	509.53	545.67	509.53	545.67
NDVI	-61.31	24.04	-2.55	0.02	-112.54	-10.08	-112.54	-10.08

出所：Sentinel-2画像(ESA2025)、筆ポリゴン農林水産省(2025b)により著者作成

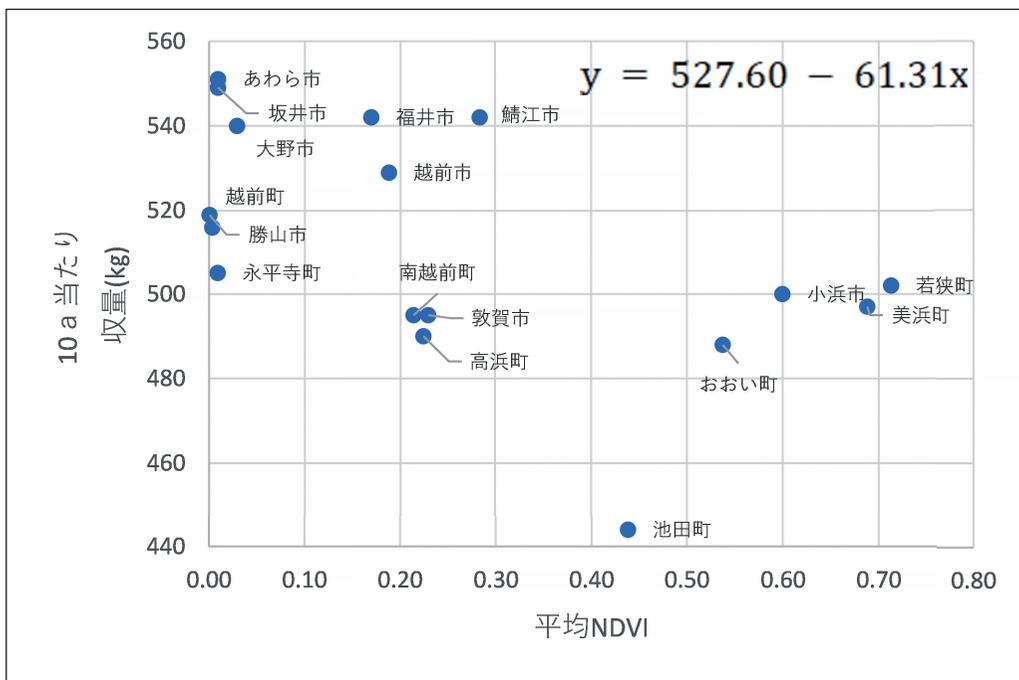


図7 市町別平均NDVIと10a当たり水稻収量との関係

出所：著者作成

において統計的に有意と判断される。一方で、1%水準には達していないことから、説明力としては中程度にとどまる。このことは、やはり収量変動にはNDVI以外の気象条件、土壌特性、栽培管理といった複数の要因が関与しており、NDVI単独ではその全体を十分に捉えきれない可能性を示唆している。

係数の推定値を見ると、切片は527.60、NDVIの回帰係数は-61.31で、NDVIが高い

ほど収量が低くなる逆相関となった。これは7月18日のNDVIが県内各品種の生育ステージの差を反映しているためと考えられる。すなわち、本時期は品種間および地域間で出穂の進度に差が生じる時期である。出穂が早い地域では葉色がやや褪色しはじめNDVIが低下する一方、出穂が遅い地域ではNDVIが高くなる時期である。結果として、NDVIの高さが、そのまま収量の高さを示さず、むしろ

生育のタイミング差を反映して逆相関が表れたと考えられる。この点は、品種ごとに分析対象を分割していない本研究の限界を示している。

回帰式として整理すると以下ようになる。

$$y=527.60-61.31x$$

yは10a当たり収量, xは平均NDVIを表す。切片527.60は、病害や雲影などでNDVIが0付近となる状態においても、基礎的に維持される収量水準を示しており、福井県の平均収量である480~520kg/10aと整合的な値である。傾き-61.31はNDVIが0.1低下すると収量が約6kg/10a減少することを意味する。

図7は、2024年7月18日時点の市町別平均NDVIと10a当たり水稲収量との関係を示したものである。両者の間には一定の相関が認められ、NDVIが市町単位の収量水準をある程度反映していることが確認できる。一方で、NDVIが高いにもかかわらず収量が相対的に低い市町や、その逆の傾向を示す市町も存在しており、品種構成や生育段階の違い、地形条件、栽培管理などが影響している可能性が示唆される。このことから、単一時点のNDVIによる収量推定は一定の有効性を持つ一方、地域特性を考慮した解釈が必要である。

4. 収量予測の検証

得られた回帰式を用いて17市町の予測収量を算出した結果が表4である。また、市町別の残差を示したものが図8である。

平均予測収量は494.04kg/10aであり、実測平均509kg/10aと比較して約-15kgの差にとどまった。このことから、単回帰式による水稲収量の収量予測が広域的な空間分布を捉

表4 20240718NDVIによる残差

No	自治体	実測値 (kg/10a)	予測値 (kg/10a)	残差	標準 残差
1	あわら市	551	527.60	23.40	1.00
2	坂井市	549	527.60	21.40	0.91
3	永平寺町	505	527.05	-22.05	-0.94
4	福井市	542	517.22	24.78	1.06
5	勝山市	519	527.56	-8.56	-0.37
6	大野市	540	525.81	14.19	0.61
7	池田町	444	500.74	-56.74	-2.42
8	鯖江市	542	510.20	31.80	1.36
9	越前市	529	516.08	12.92	0.55
10	越前町	516	527.38	-11.38	-0.49
11	南越前町	495	514.52	-19.52	-0.83
12	敦賀市	495	513.57	-18.57	-0.79
13	美浜町	497	485.41	11.59	0.49
14	若狭市	502	483.89	18.11	0.77
15	小浜市	500	490.84	9.16	0.39
16	おおい町	488	494.66	-6.66	-0.28
17	高浜町	490	513.88	-23.88	-1.02
	平均	509	494.04	14.96	

出所：Sentinel-2画像(ESA2025)、筆ポリゴン農林水産省(2025b)により著者作成。

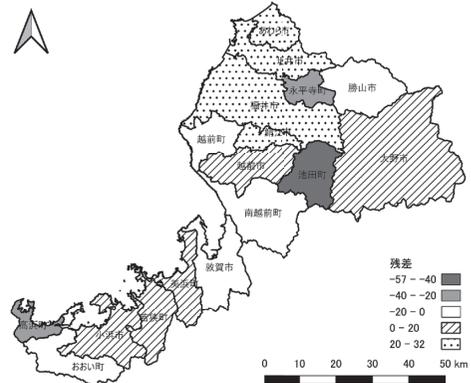


図8 市町別の実測値との残差

出所：著者作成

える上で、一定の妥当性を持つと考えられる。一方で、市町別に実測値と予測値の残差を検討すると、予測値が実測値を上回る市町と下回る市町が混在しており、NDVIと収量の関係が地域特性に応じて変動している。特に残差が小さい市町では、NDVIが実際の生育状況、および最終的な収量を反映しており、本研究で用いた筆ポリゴンによる精密な農地境

界内のNDVI抽出が寄与している可能性が高い。

しかし、一部の市町では、予測値が実測値を明らかに上回る過大推定、あるいは逆に大きく下回る過小推定がみられた。過大推定が生じている市町では、出穂前後のNDVIが高値を示しているにもかかわらず、登熟期の高温・多雨・風害、病害虫の発生など、NDVIでは捉えにくい要因により収量が抑制された可能性がある。また、地形的に冷涼あるいは日射条件が不利な地域では、葉量が十分に確保され高いNDVIが計測されても、穂数や登熟歩合が伸びず、最終収量には結び付かない場合がある。このような条件下では、葉の量を主に反映するNDVIの情報だけでは収量を過大に評価しやすいと考えられる。

一方で、過小推定がみられる市町では、雲や撮影時刻の条件、農地水面の反射、地形陰影などの影響により、実際よりもNDVIが低く算出された可能性がある。加えて、出穂後の早い段階から葉色がやや退色する品種構成や施肥・水管理の違いにより、NDVIが他地域と異なるパターンを示し、その結果、回帰式が収量を十分に説明できなかったことも考えられる。特に生育が旺盛な地域では、出穂期前後にNDVIが上限近くまで達し、その後の変化が小さい飽和状態となるため、生育の差がNDVIだけでは表れにくく、実際には高収量であってもモデル上は過小評価される場合がある。

残差と標準残差に注目すると、標準残差の多くは-1~+1の範囲に収まっており、モデルの外れ値の多くは存在しない。-2.42と最も標準残差が大きかった池田町は、山間部に位置する当地域特有の気象・栽培条件である

点や、山間部特有の時間的な日射量の増減の影響があった可能性が考えられる。

IV. おわりに

(1) 本研究ではSentinel-2の10m解像度データと、農林水産省が公開した精密な筆ポリゴンデータを活用し、福井県全域の水田部分のNDVIを高精度に抽出し、福井県全域を対象として、単回帰分析で、市町単位での水稲収量推定を行った。高解像度の衛星データと筆ポリゴンを組み合わせることの可能性を検証するために、あえて単回帰分析によって評価した。その結果、精度の高い農地境界内のNDVI抽出で、基礎的な単回帰分析ながら、市町単位で一定精度のある水稲収量予測が可能である点を示したことは、リモートセンシングによる収量予測を広く普及させるために大きな価値を持つであろう。

(2) 本研究が対象とした福井県ではコシヒカリ、ハナエチゼン、あきさかり、いちほまれなど複数の品種が作付けされており、品種間には出穂期が15~20日程度ずれるという生育差が存在する。本研究では、あえて品種ごとの圃場に分けずに、県内全体を一括して分析し、一定の説明力を持つ収量予測が成立することを示した。この結果は、個別の圃場単位の正確な収量予測ではなく、品種が混在する広域を単純なモデルで、高頻度に精度の高いNDVI抽出で、生育状態のモニタリングをすることで、突発的な気候変動、害虫などによる生育不良を早期に発見する生育監視モニタリングの実現可能性を示している。

(3) 本研究のもう一つの意義は、分析に用いたすべての基盤が誰でも入手・利用可能な

公開資源で構成されている点にある。衛星データには、無料で高頻度・高解像度の観測データが利用可能なSentinel-2画像を用い、農地境界には農林水産省がオープンデータとして提供する筆ポリゴンを使用した。また、解析環境として無償のオープンソースGISソフトウェアであるQGISを利用した。その結果、高価な衛星データやソフトウェアに依存せずに、広域レベルの収量予測モデルを構築できることを実証した。これにより、研究者だけでなく、地方自治体、農業協同組合、さらには地方でITによる起業を目指す地域人材まで、誰もが低コストで再現可能な生育監視・収量推定手法を実践できる道を示した点は、地方創生のために大きな意義を持つ。

今後の課題として、第一に、筆ポリゴンと品種区分情報を統合し、品種別に最適な観測日のNDVIを抽出する枠組みを構築する必要がある。これにより、品種固有の生育特性を反映したより精密な収量推定モデルが可能となる。第二に、本研究ではNDVIのみを説明変数とした単回帰モデルを用いたが、収量形成には多様な気象・栽培管理要因が関与することから、気象データや管理情報、時系列NDVI指標を統合した多変量モデルや機械学習手法へ発展させることが求められる。

このような研究を進めることで、水稲生産にて日本の食を支える地方において、衛星リモートセンシング技術は、収量予測や突発的な生育不良、ひいては農政立案を支える公共的インフラとしての役割を果たし、地域経済の安定化と農業の持続的発展に寄与していくことが可能となるであろう。

【参考文献】

青木優作・望月篤・鶴岡康夫 (2023) 「千葉

県における気象データとクラウドサービスを利用した水稲生育予測システム『でるた』の構築」『農業情報研究』32巻2号, pp.38-45.

石塚直樹 (2019) 「スマート農業の目としてのリモートセンシング技術」農研機構研究報告2019(1), pp.61-66.

加藤貴之・高橋正明 (2019) 「衛星データを用いた水稲作況指数推定モデルの構築」『農業情報学会誌』Vol.28, No.3, pp.155-163.

齋藤元也・石塚直樹・坂本利弘 (2017) 「日本における農業リモートセンシング研究の軌跡」『日本リモートセンシング学会誌』37巻3号, pp.193-203.

JA福井県 (2025) 「令和6年度 愛される福井県米を作ろう！ - 第3回 (最終回)」
<https://www.ja-fukuiken.or.jp/topics/detail.php?id=1512> (2025年11月28日 閲覧).

志賀弘行・安積大治 (1995) 「ランドサットTMデータおよびMOS-1/MESSRデータを用いた水稲収量地図の作成」『日本土壤肥科学雑誌』66(6), pp.625-631.

白谷栄作 (2019) 「農業のSociety5.0に向けた技術開発」水土の知 87(9), pp.741-744.

農林水産省 (2021) 「令和2年度スマート農業における水稲収量予測の高度化のための実証調査委託事業業務実施報告書」
https://www.maff.go.jp/j/budget/yosan_kansi/sikkou/tokutei_keihi/seika_R2/ippan/attach/pdf/210615-35.pdf (2025年11月28日閲覧).

農林水産省 (2025a) 『令和6年版 農業白書』
https://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/r6/zenbun.html (2025年11月28日閲覧).

- 覧).
- 農林水産省 (2025b) 「農地の区画情報 (筆ポリゴン) のデータ提供・利用」 <https://www.maff.go.jp/j/tokei/porigon/> (2025年11月28日閲覧).
- 福井県農林部 (2025a) 「福井県の農林水産業の概要」 https://www.maff.go.jp/j/kanbo/tiho/15sonota/todouhuku_gaiyou2025-18.pdf (2025年11月28日閲覧).
- 福井県農林部 (2025b) 「農林漁業の動き (米 (水稲)・麦)」 <https://www.pref.fukui.lg.jp/doc/nourinbu/nouringyogyoudata/nouringyogyoudata.html> (2025年11月28日閲覧).
- 福井県統計調査課 (2023) 「令和5年 (第71回) 福井県統計年鑑」 https://www.pref.fukui.lg.jp/doc/toukei-jouhou/nenkan_r5.html#01 (2025年11月28日閲覧).
- 北海道立中央農業試験場 (1994) 「衛星リモートセンシングによる水稲・てん菜収量の推定法」.
- 脇山恭行・井上君夫・中園江 (2003) 「水稲の登熟期における衛星データおよびアメダスデータを用いた収量予測法」『農業気象』59(4), pp.277-286.
- ESA (2021) 「Sentinel-2 User Handbook」 <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/Sentinel-2-msi> (2025年11月28日閲覧).
- Fernández-Beltrán, R., Meyer, H., Beltrán, D., et al. (2021) 「Rice-yield prediction with multi-temporal Sentinel-2 data and 3D CNNs」『Remote Sensing』13(7), 1391. <https://doi.org/10.3390/rs13071391>.
- Sakamoto, T., Yokozawa, M., Toritani, H., et al. (2021) “Rice phenology detection using Sentinel-2 time-series data in Japan” Remote Sensing of Environment, 252, 112121. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112121>.
- Tucker, C. J. (1979) “Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation” Remote Sensing of Environment 8(2), pp.127-150.
- Zhang, X., Liu, L., Yan, B., et al. (2018) “Mapping paddy rice fields using Sentinel-2 and machine learning algorithms” Remote Sensing, 10(3), 297. <https://doi.org/10.3390/rs10030297>.
- 注)
- 1 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) は, 1981年にNOAA-7へ初搭載されて以降, NOAA系列の極軌道衛星に継続的に搭載されてきた長寿命の地球観測センサーである. 空間分解能は約1kmと粗いものの, 広域の植生変動や海面温度, 雲量のモニタリングに適しており, 1980年代から世界規模の作物生育監視や環境変動研究の基盤として利用されてきた. 現在もNOAA-19やMetOp衛星などで運用が継続されており, 長期時系列データを活用した研究において重要な役割を果たしている.
 - 2 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) は, NASAのTerra (1999年打ち上げ) およびAqua (2002年打ち上げ) に搭載された中分解能センサーで, 250m・500m・1kmの複数解像度と36バンドを持つ高い観測能力を特徴とする.

- これにより、全球の植生分布、NDVI、地表温度、大気エアロゾルなど、多様な地球環境データの取得が可能となり、作物の生育モニタリングや作況把握に広く活用されてきた。TerraおよびAquaは長期運用の末、2024年に科学ミッションを終了し、姿勢制御制約に伴う観測品質の低下から、現在は事実上主要科学観測が停止している。
- 3 Landsat-5に搭載されたTM (Thematic Mapper) は、1984年に打ち上げられ、実に2013年まで29年間という長期にわたり運用された地球観測センサーである。空間分解能は30m (熱赤外バンドは120m) で、可視・近赤外・短波赤外の7バンドを搭載し、農地・森林・都市域など地表の土地被覆を安定して観測できた。特に30mという中分解能は、圃場レベルには粗いものの、農地の分布や植生状況、作物生育の広域変動を把握するには十分な精度を有し、1980～2000年代のリモートセンシング研究の基盤となった。NDVIを中心とした植生指数算出に多く利用され、作況指数推定や干ばつ評価などでも重要な役割を果たした。
 - 4 MOS-1 (Marine Observation Satellite-1) は日本が初めて打ち上げた本格的リモートセンシング衛星で、運用期間は1987～1995年である。搭載されたMESSR (Multispectral Electronic Self-Scanning Radiometer) は50mの空間解像度を持ち、4バンドで可視～近赤外の観測を行った。Landsatより解像度はやや粗いが、日本の広域農地を安定的に観測でき、特に水稻の作付状況や生育変動のモニタリングに活用された。国内では、MESSRデータを用いてNDVIによる水稻収量推定や生育ステージ判別を試みた研究が複数存在し、日本における農業リモートセンシング研究の原点と位置づけられる。
 - 5 Landsat8は、2013年に運用を開始した米国地質調査所 (USGS) とNASAによる地球観測衛星で、30m解像度のマルチスペクトル画像と15mの全色画像を取得する。赤色・近赤外域バンドを備え、NDVIなどの植生解析に適している。16日間隔で同一地点を観測でき、広域の土地被覆変化、環境監視、農業モニタリングなど多様な用途で利用されている。
 - 6 NOAA (米国海洋大気庁) の極軌道衛星シリーズは、気象・海洋・陸域を包括的に観測する多目的衛星として1980年代以降広く利用されてきた。特に、NOAA-7 (1981年運用開始) 以降に搭載されたAVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) は、空間解像度約1.1kmの可視・近赤外バンドを備え、植生指標 (NDVI) を世界規模で連続的に取得できる最初期の衛星センサーであった。AVHRRデータはGIMMS NDVIに代表される長期時系列プロダクトとして整備され、2000年代半ばまで継続利用されている。これにより、地球規模の植生変動や農業生産の把握に大きく貢献した。
 - 7 欧州宇宙機関 (European Space Agency: ESA) は、1975年に設立された欧州各国による国際的な宇宙開発機関であり、地球観測・宇宙科学・惑星探査など広範な分野を推進している。特に地球観測計画であるCopernicusでは、欧州委員会と連携してSentinel衛星シリーズを運用し、環境監

- 視, 気候変動評価, 災害対応のための高頻度・高解像度データを無償で提供している.
- 8 空間分解能とは, 衛星画像や航空写真が地表のどれだけ細かな対象を識別できるかを示す指標で, 1ピクセルが表す地上の最小面積を意味する. 例えば10mの空間分解能では, 1ピクセルが地上10m×10m(100㎡)を示し, 物体の形状や境界をより詳細に判読できる. 空間分解能が高いほど地物の識別能力が向上し, 農地, 市街地, 植生などの空間構造分析に有効である.
- 9 マルチスペクトル画像とは, 可視光から近赤外域など複数の波長帯(バンド)で同時に取得される衛星画像を指す. 各バンドは対象物の反射特性を異なる角度から捉えるため, 植生の生育状況, 水域, 土壌, 都市域などの判別が可能となる. 特に赤色域と近赤外域を用いた植生指数(NDVI)の算出など, 農業・環境監視に広く利用されている.
- 10 具体的には, SCLバンドの以下のコードを除外した.
- 1: センサ異常
 - 2: 暗ピクセル
 - 3: Cloud Shadow (雲影)
 - 8: Cloud Medium Probability (中確率雲)
 - 9: Cloud High Probability (高確率雲)
 - 10: Thin Cirrus (薄い巻雲)
 - 11: Snow/Ice (雪氷)

