

〈研究ノート〉

## ドローンによるマルチスペクトル観測と IoT センサで 取得した気象データによる小麦の収穫適期予測

佐藤隆雄\* 栗原純一† 湯村翼‡ 柿並義宏§

### Predicting Optimal Harvest Time for Wheat Based on Multispectral Drone Images and Meteorological Data Collected Using IoT Sensors

Takao M. SATO\* Junichi KURIHARA† Tsubasa YUMURA‡ Yoshihiro KAKINAMI§

#### 要旨

江別市にある2件の小麦圃場を対象にドローンを用いたマルチスペクトル観測とIoTセンサを用いた気象モニタリングを実施し、得られたデータから小麦の収穫適期予測に必要な解析手法の確立を目指した。ドローン画像から算出した正規化植生指数NDVIと収穫適期の判断に用いられる小麦の穂水分率には強い正の相関があり、成熟期から収穫期におけるNDVIの時間変化は傾きの異なる2つの一次関数で表現できることが分かった。

#### Abstract

We conducted multispectral observations using a drone and meteorological monitoring using IoT sensors at two wheat fields in Ebetsu City, Hokkaido. Our goal was to develop analysis methods necessary for predicting the optimal harvest time for wheat based on the collected data. We found a strong positive correlation between the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) at the fields calculated from the drone images and the moisture content of wheat spikes, which is commonly used to determine the optimal harvest time. Additionally, we found that the time variation of NDVI at the fields from the maturity stage to the harvest stage can be represented by two linear functions with different slopes.

#### キーワード

リモートセンシング (Remote sensing) 小麦収穫予測 (Prediction of wheat harvest)  
ドローン (Drone) IoT センサ (IoT sensor)

\* 北海道情報大学経営情報学部システム情報学科准教授, Associate Professor, Department of Business and Information Systems (Dept. of BIS.), HIU

† 北海道情報大学経営情報学部システム情報学科教授, Professor, Dept. of BIS., HIU

‡ 北海道情報大学情報メディア学部情報メディア学科准教授, Associate Professor, Department of Information Media (Dept. of IM.), HIU

§ 北海道情報大学情報メディア学部情報メディア学科教授, Professor, Dept. of IM., HIU

## 1. はじめに

小麦はトウモロコシに次いで世界で2番目に生産量の多い穀物である。2022年の国連食糧農業機関の統計によると、世界で最も生産量が多い国は中国で、インド、ロシア、米国と続き、日本は993,500トンで世界第52位である<sup>1</sup>。日本国内で生産量が最も多い都道府県は北海道で、全国の約62%を占める<sup>2</sup>。

世界の小麦生産地の多くは冷涼で乾燥した気候である。そのような気候では、成熟した小麦は十分に乾燥した状態で収穫されるため、出荷されるまで生産地の穀物倉庫にそのままの状態でも保管される。一方、日本や中国のように湿潤な気候では、成熟した小麦がまだ十分に乾燥していない状態でも収穫せざるを得ない。収穫が遅れると、降雨によって穂発芽が発生し、品質が著しく低下する恐れがある。また、収穫した小麦が十分に乾燥していないと、保管中や輸送中にカビが発生する可能性もある。そこで、収穫直後に温風乾燥機にかけて水分率が一定以下になるまで乾燥させることが行われている（関口 2024）。

日本では、小麦の収穫適期は子実の水分率によって決められる。北海道においては、収穫開始時における小麦の子実水分の上限は35%とされている（関口 2024）。これに対して、農林水産省の検査規格における小麦の水分の上限は12.5%である<sup>3</sup>。収穫時の水分率が低いほど機械乾燥の燃料費を抑えることができるため、小麦の子実水分

が35%を下回った後も可能な限り収穫を先延ばして圃場における自然乾燥による水分低下を待つ方が経済的となる。しかし、降雨による穂発芽というリスクを伴うこの収穫適期判断の方法は、生産者にとって精神的負担となっている。

小麦の水分率は水分計などを用いて計測でき、成熟期においては直線的に1日当たり1~2%、成熟期後は1日あたり3~5%減少することが知られている（関口 2024）。しかし、北海道のように一軒の生産者が多数の分散した圃場を所有する地域では、全ての圃場を巡回して小麦の水分率データを収集することは困難である。各圃場の水分率を遠隔で推定し、収穫適期を予測できれば、生産者の負担軽減につながる。収穫に用いるコンバイン等の農業機械を複数の生産者で共有している場合は、収穫する圃場の順番を決める基準としても有効である。また、機械乾燥の燃料を最小限に抑えられるため、経済的であるだけでなく、二酸化炭素排出量の削減にも貢献することができる。

従来、衛星画像を利用して小麦の生育状況を推定する研究がなされており、一部は実用化され、農業情報サービスとして提供されている<sup>4</sup>。具体的には、光学衛星からマルチスペクトル観測された小麦圃場における正規化植生指数（Normalized Difference Vegetation Index; NDVI）を用いて相対的な生育状況を予測した「早晚マップ」と呼ばれる地図を作成している。しかし、近年は気候変動の影響により、北海道では小麦の出穂期から成熟期にあたる6月から7月に

<sup>1</sup> FAOSTAT (<https://www.fao.org/faostat/en/#home>)

<sup>2</sup> 政府統計の総合窓口（e-Stat）、「令和4年産麦類（子実用）の収穫量（全国農業地域別・都道府県別）」（<https://www.e-stat.go.jp>）

<sup>3</sup> 農林水産省、「農産物規格規定（平成13年2月28日農林水産省告示第244号）」（<https://www.maff.go.jp/j/seisan/syoryu/kensa/attach/pdf/hourei-52.pdf>）

<sup>4</sup> 内閣府、「衛星データをビジネスに利用したグッドプラクティス事例集」（[https://www8.cao.go.jp/space/goodpractice/r02/r02\\_jirei\\_all.pdf](https://www8.cao.go.jp/space/goodpractice/r02/r02_jirei_all.pdf)）

かけて雨量が増加しており<sup>5</sup>、雲の影響で衛星画像が利用できないことが増えている。近年急速に利用が拡大している無人航空機（ドローン）は、1回の飛行で観測できる範囲は狭いものの、光学衛星よりも雲の影響を受けにくく高解像度画像を得られるという利点がある。

本研究では、石狩管内でも有数の小麦産地である江別市の小麦圃場に対して、ドローンを用いたマルチスペクトル観測とIoTセンサを用いた気象モニタリングを実施し、得られたデータから小麦の収穫適期予測に必要な解析手法の確立を目指した。

## 2. 小麦圃場における生育観測

### 2-1 小麦圃場

江別市役所と江別市内の生産者のご協力のもと美原（43.145°N，141.574°E）と篠津（43.143°N，141.519°E）にある2つの圃場を本研究の観測対象に選定した（図1）。



図1 観測対象とした圃場の位置。

美原は秋播き小麦の「ゆめちから」が、篠津は春播き小麦の「春よ恋」が栽培されており、品種や栽培方法の違いを調べることができる。

### 2-2 圃場における NDVI の時間変化

#### 2-2-1 ドローンによる圃場観測

使用したドローンは DJI 社製の P4 Multispectral<sup>6</sup>である。P4 Multispectral はスマート農業や環境モニタリングといった用途向けに開発されたマルチスペクトルイメージング機能を有する高性能ドローンである。P4 Multispectral には主に3つの特徴がある。まず、6台の1/2.9インチCMOSセンサを用いて、RGB画像と5波長（青、緑、赤、レッドエッジ、近赤外線）での狭帯域画像を同時に取得できる。また、機体上部にはスペクトル日照センサが搭載されており、太陽放射照度をリアルタイムで計測している。このデータは観測中の日照条件の変化を補正し、精度の高いNDVI画像を作成するために利用できる。さらに、ネットワーク型RTK（Real-time kinematic）を使用すると、センチメートルレベルの高精度測位画像を取得できる。P4 Multispectralの観測波長を表1に示す。

表1 P4 Multispectralの6台のセンサの観測波長

可視光イメージング	
RGB	—
マルチスペクトルイメージング	
青 (B)	450 ± 16 nm
緑 (G)	560 ± 16 nm
赤 (R)	650 ± 16 nm
レッドエッジ (RE)	730 ± 16 nm
近赤外線 (NIR)	840 ± 26 nm

観測は、専用アプリ DJI GS Pro で作成した飛行計画に基づいて実施した。飛行計画を実行すると、ドローンが自律的に観測を行うため、観測者はリアルタイムで送信さ

<sup>5</sup> 地方独立行政法人北海道立総合研究機構，「温暖化する地球—北海道の農林業は何ができるのか!？」（[https://www.hro.or.jp/upload/1091/ondanka\\_panf.pdf](https://www.hro.or.jp/upload/1091/ondanka_panf.pdf)）

<sup>6</sup> DJI，「P4 Multispectral」（<https://www.dji.com/jp/p4-multispectral>）

れる画像の確認とドローンの飛行を見守るだけである。飛行計画では、飛行高度を地上 50m (画像 1 ピクセルの分解能は約 2.6cm)、飛行経路上の画像オーバーラップ率を 70%、飛行経路間の画像オーバーラップ率を 60%に設定した。ドローンは各ポイントでホバリング撮影を実施し、美原では合計 918 枚 (6 枚/ポイント×153 ポイント)、篠津では 1014 枚 (6 枚/ポイント×169 ポイント) の画像を記録した。観測に要した時間は両圃場とも 1 回あたり約 15 分であった。本研究では異なる観測日の画像を比較するため、各波長の明るさを校正する必要がある。この目的のため、反射率が既知の 2 種類の反射板 (Group 8 Technology, Inc.の反射率 24%と 36%のパネル) を圃場周辺に配置し、圃場と同一条件となるように飛行するドローンで撮影した。図 2 は観測風景である。観測期間は、美原が 2023 年 5 月 18 日から 7 月 19 日まで、篠津が 2023 年 5 月 25 日から 7 月 30 日までで、観測時刻は太陽高度が可能な限り同一となるように 10 時から 12 時までとした。観測実施日を表 2 にまとめた。

### 2-2-2 NDVI

NDVI とは、植物による光の反射特性を利用して植生の状況を把握することを目的に考案された指標である。NDVI は-1 から 1 の間に正規化された数値となり、植物の量が多い、または活力が高いほど、数値が増加する。NDVI は(1) により算出される。
$$NDVI = (NIR - R)/(NIR + R) \quad (1)$$
但し、 $R$  は赤、 $NIR$  は近赤外線を表す。

類似した指標に正規化レッドエッジ指数 (NDRE) がある。これは、近赤外線の代わりにレッドエッジを使用して算出するものである。

$$NDRE = (RE - R)/(RE + R) \quad (2)$$
但し、 $R$  は赤、 $RE$  はレッドエッジを表す。



図 2 圃場観測風景 (篠津)。上の写真は離陸前、下の写真は離陸直後である。下の写真で橙色のランディングパッドの奥に見える 2 つのパネルが反射板である。

表 2 圃場観測実施日 (2023 年)

美原	
5 月	18, 24, 31 日
6 月	8, 14, 20, 23, 29 日
7 月	2, 4, 7, 8, 10, 14, 17, 19 日
計 16 回	
篠津	
5 月	25, 31 日
6 月	8, 14, 20, 23, 29 日
7 月	2, 4, 7, 8, 10, 14, 18, 19, 21, 26, 28, 30 日
計 19 回	

小麦は成熟に近づくと、水分が抜け落ち、穂が緑色から褐色に変化し収穫期を迎える。従って、圃場の NDVI を成熟期から収穫期にかけて計測すると、数値が減少する

ことが知られており、減少の程度を定式化することが目標となる。

### 2-2-3 NDVI のオルソモザイク画像の作成

圃場における NDVI のオルソモザイク画像を作成するため、写真測量ソフトウェアである Pix4Dmapper<sup>7</sup> (Version 4.8.4) を使用した。オルソモザイク画像とは、上空で取得した画像に対して幾何学的歪みの補正と色調整を施した上で、複数画像を接合し 1 枚に合成した画像のことである。Pix4Dmapper の Ag Multispectral という処理オプションテンプレートを選択し、RGB、各波長での反射率、NDVI、NDRE のオルソモザイク画像 (計 8 種類) を作成した。6 月 14 日以前はネットワーク型 RTK を使用しなかったため、画像に記録された位置情報をそのまま使用すると測位精度が低く、異なる観測日のオルソモザイク画像を比較するには不適であった。この問題を解決するため、ドローンが観測中に取得した GNSS (Global Navigation Satellite System) データと画像のタイムスタンプ、そして国土地理院が提供している江別の電子基準点データ<sup>8</sup>を使い、後処理キネマティック (Post-processing kinematic; PPK) 方式により測位情報を補正した。解析には RTKLIB<sup>9</sup> (Version 2.4.2) を使用した。ネットワーク型 RTK を使用していない画像に関しては、この補正した測位情報を Pix4Dmapper に入力した。各圃場での RGB と NDVI のオルソモザイク画像の代表例を図 3 と図 4 に示す。

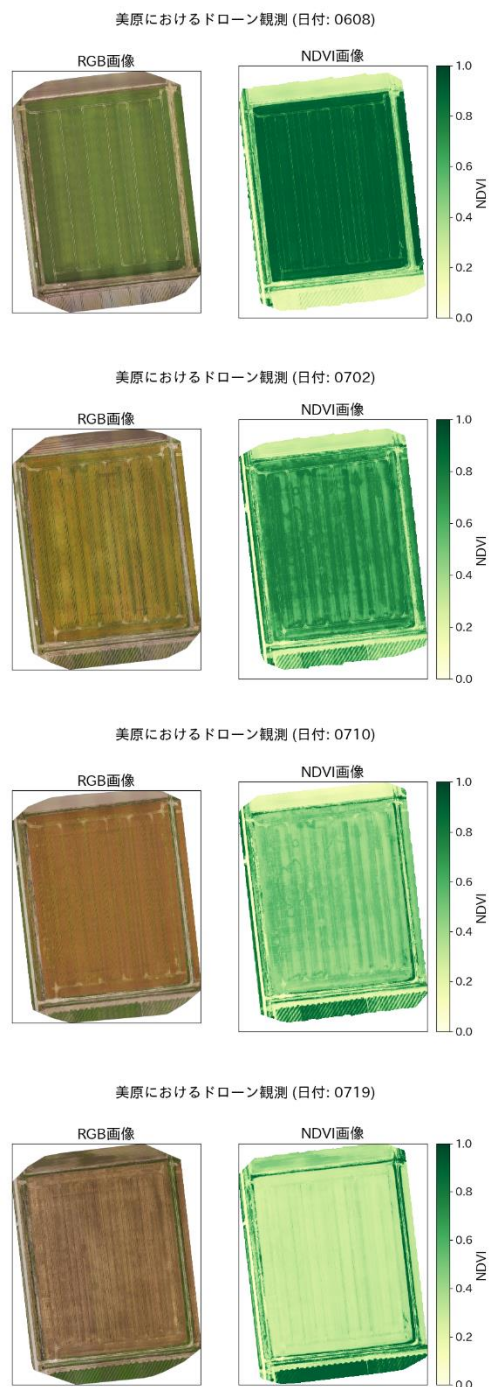


図 3 美原の RGB と NDVI のオルソモザイク画像 (上から順に 6 月 8 日, 7 月 2 日, 7 月 10 日, 7 月 19 日)。

<sup>7</sup> Pix4D, 「Pix4Dmapper」 (<https://www.pix4d.com/jp/product/pix4dmapper-photogrammetry-software>)

<sup>8</sup> 国土地理院, 「電子基準点データ提供サービス」 (<https://terras.gsi.go.jp>)

<sup>9</sup> 高須知二, 「RTKLIB」 (<https://www.rtklib.com>)

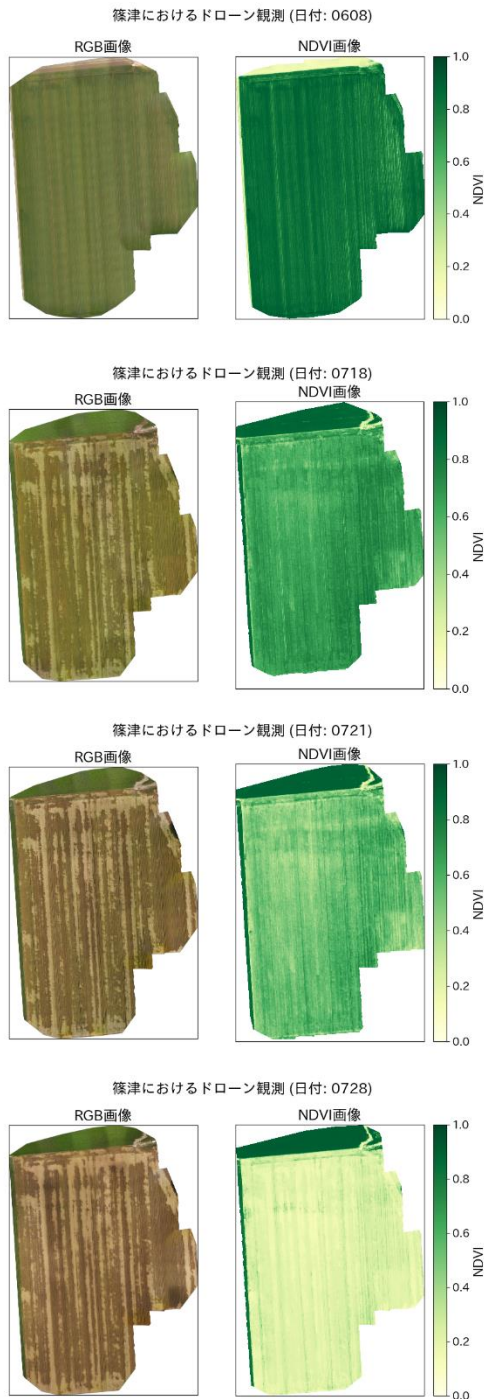


図 4 篠津の RGB と NDVI のオルソモザイク画像（上から順に 6 月 8 日，7 月 18 日，7 月 21 日，7 月 28 日）。道路が隣接しているため，安全上の観点から圃場全体の観測は行わなかった。7 月 14 日以降のデータには倒伏の影響が見られる（RGB 画像の薄茶色部分）。

## 2-2-4 圃場における NDVI の時系列

観測期間における圃場の NDVI の変化を調べるため，地理情報システムソフトウェアである QGIS<sup>10</sup>（Version 3.28.9）を用いて圃場範囲をポリゴンで定義したシェープファイルを作成した。このシェープファイルを基に圃場全体のピクセルを平均した NDVI の時系列を図 5 に示す。秋播き小麦を栽培している美原では，観測開始時から NDVI が頭打ちとなっており，6 月 23 日までは漸減し，これ以降は急減している。一方で，春播き小麦を栽培している篠津では，播種時期が秋播き小麦よりも遅いため，NDVI は 6 月 14 日まで上昇し，7 月 10 日までの約 1 か月間は漸減し，これ以降は急減している。同様の変化は NDRE でも確認できた。

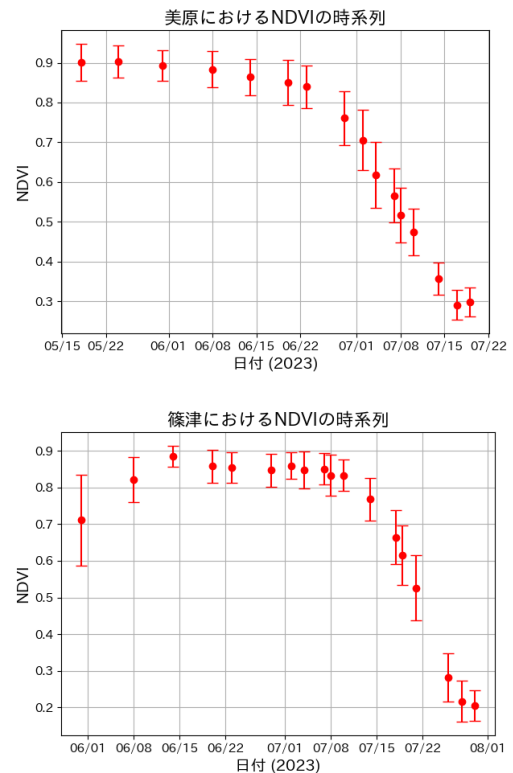


図 5 美原（上）と篠津（下）における NDVI の時系列。エラーバーは標準偏差（ $1\sigma$ ）を示している。

<sup>10</sup> QGIS, 「QGIS」 (<https://qgis.org>)

### 2-3 穂水分率の計測

2-2 で述べた圃場の NDVI と小麦の穂水分率の関係を調査するため、6月6日以降はドローンによる圃場観測終了後に小麦の穂を1地点あたり30本採集し(図6)、水分の蒸発を防ぐためビニール袋に入れて持ち帰った。大学に設置した送風定温乾燥機の中にトレイに載せた穂を入れて105°Cで24時間乾燥させた(図7)。乾燥前後の重量を電子天秤で計測し穂水分率(乾燥前の穂の重量に対する乾燥前後の重量差の割合)を求めた。各圃場あたり2つの採集地点を選定し、名称を美原A、美原B、篠津C、篠津Dとした(図8)。表3は各地点における採集実施日である。



図6 小麦の穂の採集風景(美原)。



図7 乾燥前の小麦の穂。1地点から採集した30本の穂が1つのトレイに載せられている。

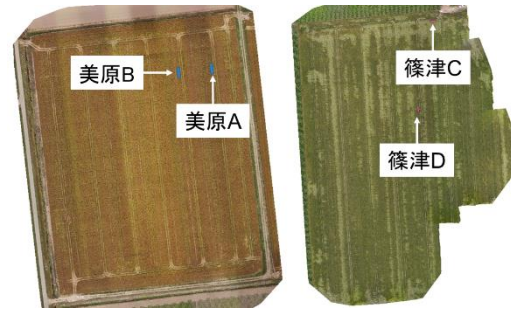


図8 穂の採集地点。左が美原、右が篠津である。各圃場あたり2つの採集地点を選定した。

表3 穂の採集実施日(2023年)

美原 A	
6月	8, 14, 20, 23, 29日
7月	2, 4, 7, 8, 10, 14, 17, 19, 21日
計14回	
美原 B	
6月	6, 14, 20, 23, 29日
7月	2, 4, 7, 8, 10, 14, 17, 19, 21日
計14回	
篠津 C	
6月	23, 29日
7月	2, 4, 7, 8, 10, 14, 18, 19, 21, 26, 28日
計13回	
篠津 D	
7月	4, 7, 8, 10, 14, 18, 19, 21, 26, 28日
計10回	

各地点における穂水分率の時系列を図9に示す。収穫適期は穂水分率が35%以下になった時期とされているため(関口2024)、美原では7月15日頃以降、篠津では7月24日頃以降が収穫適期となる。穂水分率の減少傾向は、同一圃場内では採集地点の違いによる有意な差は見られなかった。

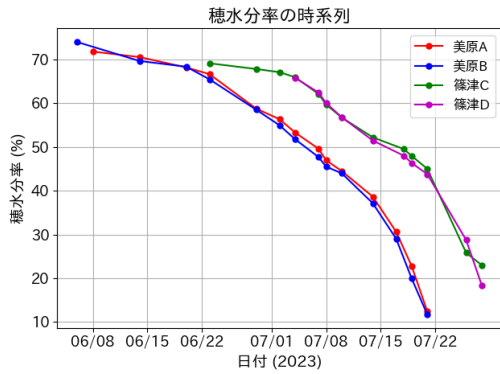


図9 美原 (AとB) と篠津 (CとD) における穂水分率の時系列

## 2-4 NDVI と穂水分率の関係

圃場全体のNDVIを求めた時と同様の方法で、穂の採集地点を7m×2mの矩形領域と仮定してNDVIの平均を算出した。採集地点におけるNDVIと穂水分率の関係を図10に示す。奥野(2005)で述べられている通り、NDVIと穂水分率には強い正の相関があり、両者は一次直線で表現可能であった。色付きの直線は採集地点毎に線形回帰した結果で、黒色の直線は圃場毎に線形回帰した結果である。興味深いことに異なる圃場でも一次直線の傾きはほぼ同じ値(約62 [穂水分率/NDVI])であり、品種や栽培方法に依存しない値であるのか新たなデータによる追加調査が必要である。美原で得られた一次直線( $y = 62.2x + 13.5$ )に $y = 35$ (収穫適期の穂水分率)を代入すると $x = 0.35$ が得られる。篠津で得られた一次直線( $y = 62.5x + 8.3$ )からは同様の計算により $x = 0.43$ が得られる。つまり、NDVIがこれらの値を示した時が収穫適期となる。美原と篠津で収穫適期のNDVIが異なる(一次直線のy切片が異なる)のは、品種や栽培方法の違いを反映しているのかもしれない。この点についても新たなデータによる追加調査が必要である。

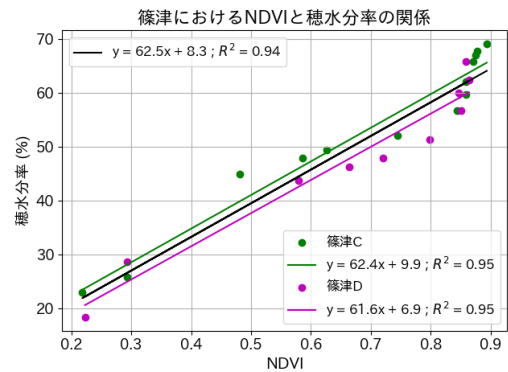
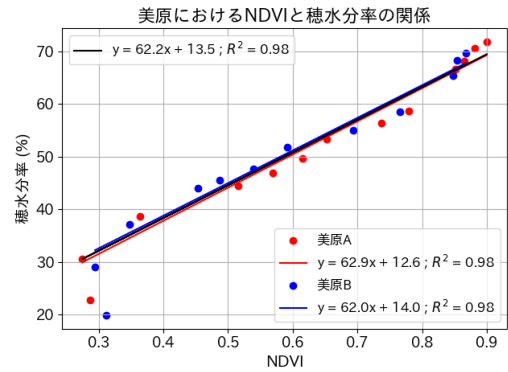


図10 美原(上)と篠津(下)におけるNDVIと穂水分率の関係。美原では穂水分率が約20%を示すデータ(2点)は線形回帰に使用していない。

## 2-5 NDVIの時間変化の定式化

図5に示したNDVIの時系列のうち出穂期前後以降のデータは、どちらの圃場も2つの異なる一次直線で表現できた(図11)。図11の横軸は実際の収穫日(美原:7月21日, 篠津:7月29日)を起点とした日数に変換している。出穂期から登熟期前半は傾きが緩やかで、ある時期から傾きが急になる特徴を有している。2つの一次直線の交点は、美原が(-24.9, 0.84), 篠津が(-15.9, 0.83)となった。品種や栽培方法が異なる両圃場で、NDVIが0.85程度まで減少すると傾きが変化するという特徴が得られたのは興味深い。どのような生物学的背景により傾きが急になるのかは調査中である。傾きが変化した後、秋播き小麦である美原よりも春播き小麦である篠津の方が収穫に達するまでの期間が短い(傾きがより



急になる) 特徴があった。今回得られた関係式は、品種と栽培方法が同じであれば、栽培年度や圃場が異なっても成立するのかが評価する必要がある。2024年度はドローンによる新たな観測データとこの関係式を用いて実際に収穫適期を予測し、今回得られた関係式のロバスト性を検証する。

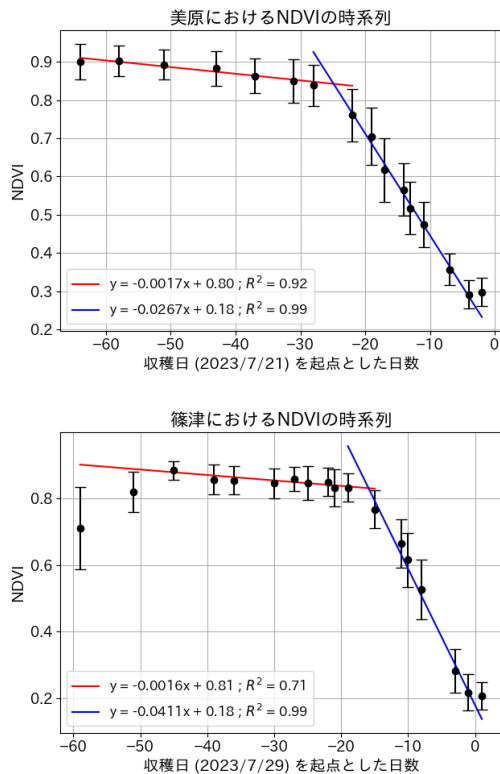


図 11 美原 (上) と篠津 (下) における NDVI の時系列。出穂期前後以降の NDVI の時系列は 2 つの異なる一次直線で近似可能である。美原では NDVI が 0.35, 篠津では NDVI が 0.43 に達した日以降が収穫適期である。

### 3. IoT センサによる小麦圃場の気象モニタリング

#### 3-1 IoT センサの概要

圃場における気象データを取得するため、前嶋 (2021) と前嶋 (2022) の手法を参考に IoT センサを実装し、両圃場に設置した (図 12)。設置期間は、美原が 2023 年

6 月 8 日から 8 月 4 日まで、篠津が 2023 年 6 月 19 日から 8 月 4 日までである。気象観測用に搭載したセンサは、照度センサ、湿度センサ、雨量計、温度センサである。IoT センサの筐体内部構成を図 13 に示す。全てのセンサは Arduino Uno R3 に接続されており、取得データは 10 分間隔でサーバに送信される。Arduino には通信用のシールド SORACOM LTE-M Shield for Arduino が搭載されており、サーバへのデータ送信には NTT ドコモの LTE 回線を利用した。機器の稼働に必要な電力は、太陽光発電パネルにより供給される。昼間に発電した余剰電力は鉛蓄電池に蓄電し、夜間は鉛蓄電池が電力を供給する。蓄電状況は電圧センサで監視する。



図 12 篠津に設置した IoT センサ。

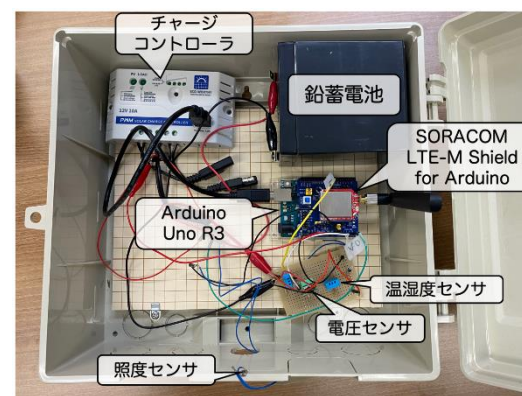


図 13 IoT センサの筐体内部構成。

管体外部に設置した雨量計を図 14 に示す。雨量計は鹿威しと同様の原理で計測を行う。スプーンの柄尻には銅板を装着しており、これが土台の金属製ネジと接触することで電気回路が構成され、通常は通電状態にある。スプーンのつぼ（丸い部分）に一定量の水が貯まるとつぼが下がり、柄尻の銅板が浮いて通電が遮断される。スプーンが傾くと貯まった水が放出され、再度つぼが上がり銅板は電気回路を構成する。通電が遮断された回数は即ちスプーンが傾いた回数であり、これを計測することで雨量が分かるという仕組みである。スプーンにつぼに雨を誘導するため、スプーンの上部に漏斗を装着した。



図 14 雨量計の外観。ピンク色のスプーンが鹿威しの竹筒の役割をしている。

データの受信サービスには SORACOM Harvest Data を用いた。SORACOM Harvest Data は、SORACOM の SIM カード毎にデータを管理しており、Web コンソール上で簡単にデータを表示できる。SORACOM Harvest Data で取得したデータは、より本格的な可視化やデータの共有、アラート設定が可能な SORACOM Lagoon というダッシュボードサービスにも接続できる。

### 3-2 IoT センサの性能評価

IoT センサで取得したデータの解析結果について述べる。図 15 は美原と篠津における設置期間全体の計測結果である。

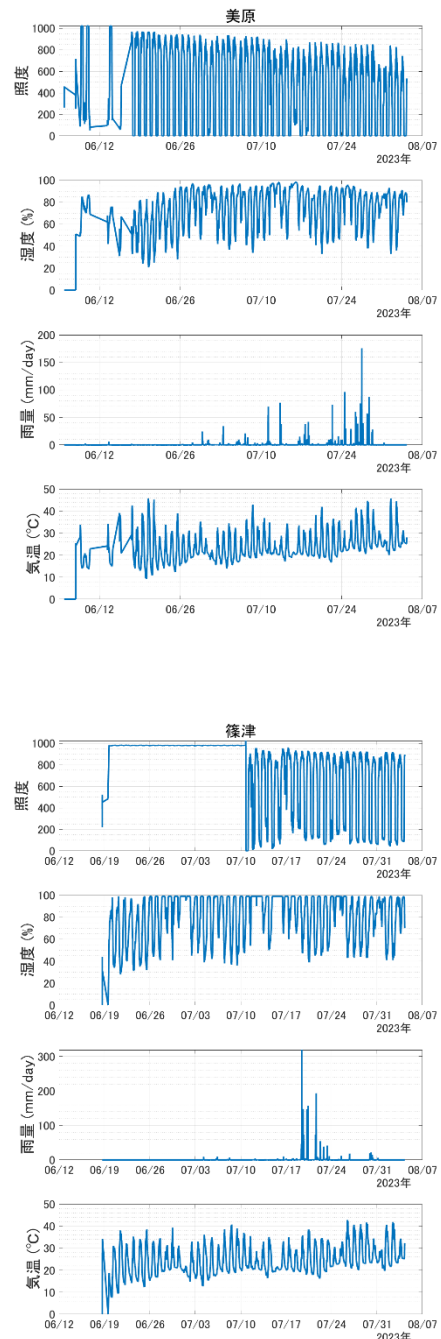


図 15 美原（上）と篠津（下）における IoT センサの計測結果。上から順に照度、湿度、雨量、気温である。

照度センサの値はアナログ出力電圧値を 10bit で表現しており、事前に校正を行わなかったため物理量には変換できなかった。美原では、数回のネットワーク及びセンサの調整後、6月18日以降は4項目（照度、湿度、雨量、気温）全てで連続計測に成功した。設置場所周辺に明かりがなく、夜間は照度の値がほぼ0となった。湿度は100%に達する日はほとんどなかった。雨量は計測できたものの、実際よりも多い雨量が計測される、または降雨がないと思われる日にも雨量が計測される等の問題があり精度の観点から改善が必要であった。気温は設置期間を通して概ね計測できた。篠津では、照度センサが不調であったため7月10日以前のデータは正しく計測できなかった。これ以降は明確な日変動を示しており、周囲の明るさの変動を正しく捉えたことが分かる。但し、夜間でも値が0にはならず、設置場所周辺の家の明かりを計測した可能性がある。湿度は設置当初から動作しているが、日中に100%を示す日が多く計測された。雨量に関しては美原と同様の問題が確認できた。

本研究で開発した4種類のセンサの性能を評価するため、十分に校正された農研機構メッシュ農業気象データ<sup>11</sup>（以下、農研機構データ）と美原および篠津の計測結果を比較した（図16）。農研機構データは1日毎の値であるため、センサの照度と雨量は1日の積算値を、センサの湿度と気温のデータは平均値を算出した。

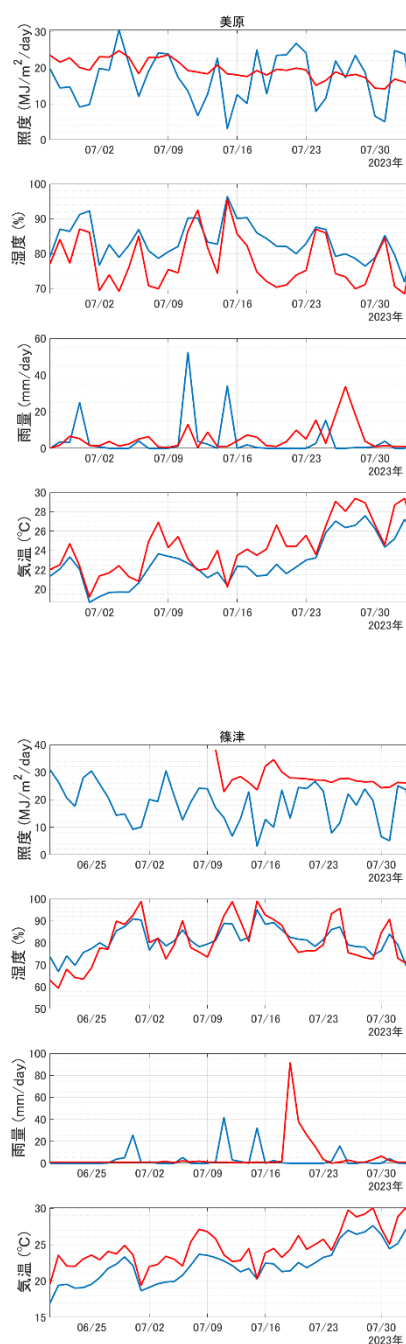


図 16 美原（上）と篠津（下）における IoT センサの計測データ（赤）と農研機構データ（青）の比較。上から順に照度、湿度、雨量、気温である。比較のため、IoT センサの照度データは 3000 で、雨量は 25 で除算した値を表示している。

<sup>11</sup> 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構, 「農研機構メッシュ農業気象データ」 ([https://amu.rd.naro.go.jp/wiki\\_open/doku.php?id=start](https://amu.rd.naro.go.jp/wiki_open/doku.php?id=start))

照度に関しては、センサの値が物理量ではないため直接比較できない。ここでは便宜的に、センサで計測した照度データを3000で割って表示している。美原、篠津ともにセンサの計測値の変動が小さく、天候が変わることによる日照量の変動を十分に計測できていない可能性がある。湿度に関しては、美原、篠津ともに日々変動を捉えていた。但し、農研機構データに比べ、美原では湿度が低く出る傾向（平均： $-5.7\%$ 、標準偏差： $3.8\%$ ）があり、篠津では同程度（平均： $-0.3\%$ 、標準偏差： $5.6\%$ ）であった。雨量に関しては、センサが1桁以上高い値を示したため、雨量データを25で割って表示している。雨量はどちらのセンサも農研機構データより1桁以上高い値を示し、かつ、降雨のタイミングも一致していない。誤動作が多かった可能性が高いため、設計の根本的な見直しが必要である。気温に関しては、農研機構データと同様の変動を美原、篠津ともに捉えているが、両地点ともセンサの方が高い値を示した。つまり、美原で平均 $1.5^{\circ}\text{C}$ （標準偏差： $1.1^{\circ}\text{C}$ ）、篠津で平均 $2.3^{\circ}\text{C}$ （標準偏差： $1.1^{\circ}\text{C}$ ）高かった。

美原と篠津は直線で約4.5 km離れている。この距離でも気象条件が多少異なることが農研機構データから分かった（図17）。篠津は美原に比べて年平均の値として、照度で $+1.1 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ （標準偏差： $0.4 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ ）、湿度で $-1.2\%$ （標準偏差： $1.3\%$ ）、雨量で $-1.2 \text{ mm/day}$ （標準偏差： $1.3 \text{ mm/day}$ ）、気温で $+0.19^{\circ}\text{C}$ （標準偏差： $0.20^{\circ}\text{C}$ ）の違いがあった。これに対して、開発したセンサで同様の調査を行った結果を図18に示す。篠津は美原に比べて日平均の値として、湿度で $5.7\%$ （標準偏差： $3.4\%$ ）、気温で $0.6^{\circ}\text{C}$ （標準偏差： $0.6^{\circ}\text{C}$ ）の違いがあった。センサの計測差は、設置場所の地域差では説明できないため、センサ間のバイアスが大きい（個体差が大きい）、もしくは、設置環境

が大きく異なることを示唆している。

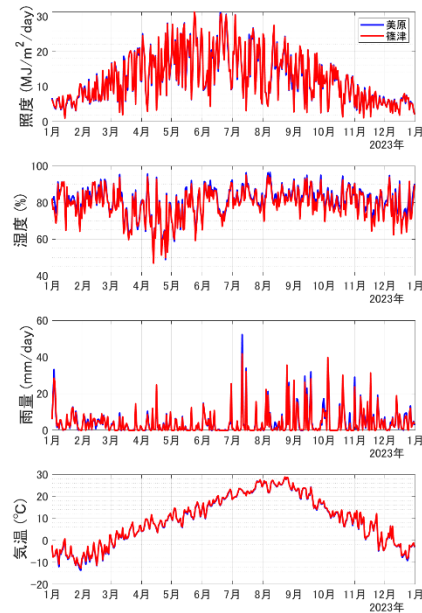


図17 農研機構データに基づく美原（青）と篠津（赤）の気象データ。上から順に照度、湿度、雨量、気温である。

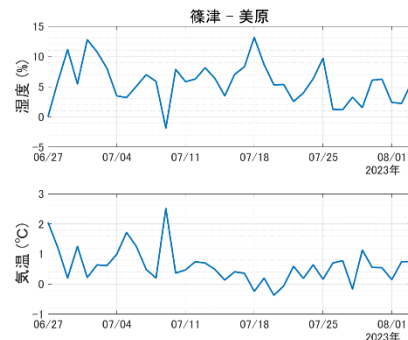


図18 IoTセンサの計測差（篠津-美原）。上は湿度差、下は気温差である。

センサの開発と運用を通じて、センサ毎に課題が明らかとなった。照度センサは設置場所によって家の明かりや街灯の影響を受けた。湿度センサと温度センサは筐体内に設置されていることに加えて、防水のために筐体をビニールで覆ったため、外気よりも湿度と温度の両方が高い値を示し

た。雨量計は、漏斗部分に枯れ草が詰まることや強風といった運用における耐久性が問題となった。今回はレンガブロックで設けた囲いの中に雨量計を設置したが、今後は囲いの隙間から入る風への対策も必要と考えている。本研究では、必要なセンサを設置するまでの準備期間が短く、十分な校正を行うことができなかった。今回の反省を基に 2024 年度はドローンによる圃場観測データの解析に資するデータを得るために、センサの改良と設置方法の工夫を行い計測している。

#### 4. 可視化ツールの製作

ドローンや IoT センサで計測したデータを実際の農作業で利活用するには、スマートフォン等で気軽に閲覧できることが望ましい。そこで、利用シーンを想定したビューワのプロトタイプを Web アプリケーションとして開発した。ビューワのトップ画面には、図 19 のようにドローンによる圃場画像のサムネイルが日付ごとに並ぶ。

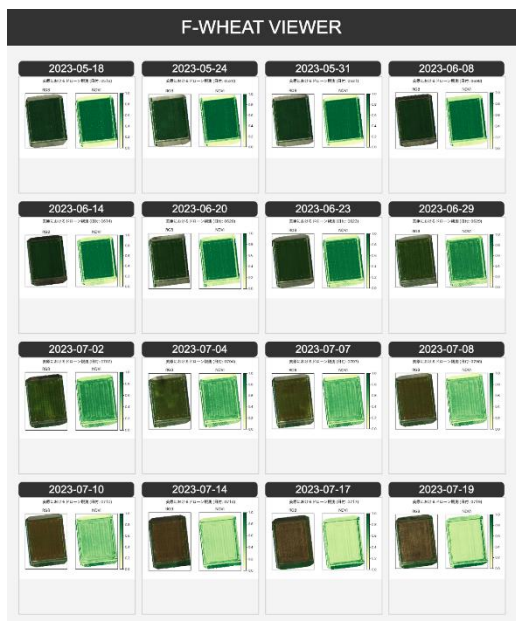


図 19 ビューワのトップ画面。

サムネイルをクリックすると詳細画面に遷移する (図 20)。詳細画面には、その日のセンサデータの時系列とドローンによる圃場画像が表示される。

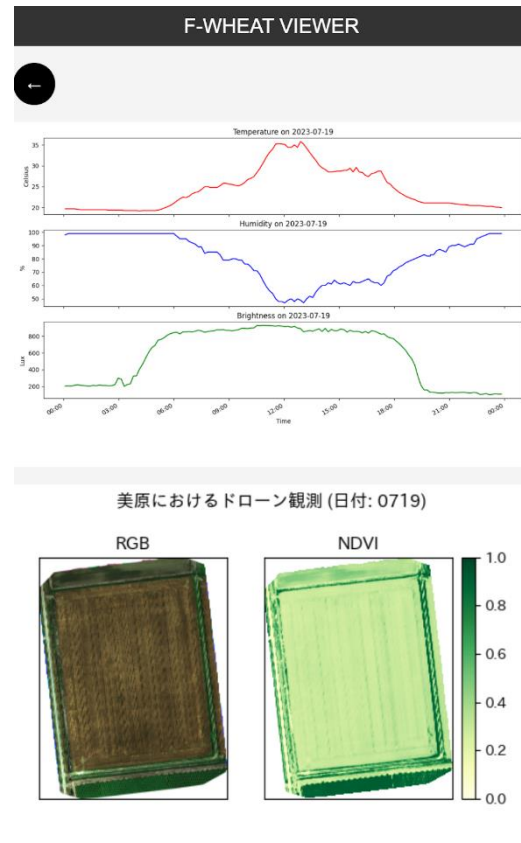


図 20 ビューワの詳細画面。

本研究で開発したビューワはプロトタイプであるため、詳細画面のデータはグラフを画像化したものである。ここでは、スクリプトによって予め画像にしたものを埋め込んでいる。実際のユースケースを考えると、データをリアルタイムに閲覧できることが望ましい。センサデータをオンラインデータストア等に保管し、そのデータを随時描画することが改善案として挙げられる。

## 5. まとめと今後

本研究では、ドローン・IoT のデータ融合による小麦の収穫適期予測に必要な手法の開発、データの取得、そして得られたデータの解析を中心に研究を進めた。ドローンによる圃場観測及び穂水分率の計測では、収穫適期予測に必要なデータを収集し予測式を得ることに成功した。今後は、農研機構データから抽出した日々の温度と NDVI の関係を調査することに加えて、衛星画像を利用することで江別市全域にわたる小麦の収穫適期予測の可能性について研究を深化させたい。IoT センサに関しては、数か月にわたる設置期間でデータを計測することに成功し、今後必要な改善点を洗い出すことができた。2024年2月27日には、江別市役所主導の下、北海道農業改良普及センター、そして江別市内の生産者の方々と「スマート農業に係る意見交換会」と題した会合を開催した。この会合では、本研究の目的と進捗を説明し、現場の方々と議論する機会を得た。江別市は令和6年度新規事業として「スマート農業推進検討事業」を開始しており、本学の活動は江別市にとっても時を得たものであり、十分アピールできるものと考えている。また、本研究を通して大学院学生1名、学部学生5名がドローンによる圃場観測、IoT センサの開発に携わった。

2024年度は4月23日より篠津（秋播き小麦2件、春播き小麦1件）と東野幌（秋播き小麦1件）の合計4件の圃場に対してドローンによる観測を開始した。IoT センサは5月29日に設置作業が完了し、データ収集を開始した。

### 謝辞

本研究は、2023年度北海道情報大学学内共同研究に採択され支援を受けました。江

別市役所農業振興課と北海道農業改良普及センター、そして圃場を快く貸してくださいました生産者の皆様には本研究を遂行する上で多大なご協力を頂きました。この場をお借りして感謝申し上げます。

### 参考文献

- 奥野林太郎（2005）「衛星リモートセンシングを用いた小麦適期収穫支援システム」『農業機械学会誌』第67巻第5号，pp.17-19。
- 関口建二（2024）「IV 小麦の収穫と乾燥」『北海道の小麦づくり』  
[https://hokkaido-nosan.or.jp/manager/wp-content/uploads/r06\\_wheat-4.pdf](https://hokkaido-nosan.or.jp/manager/wp-content/uploads/r06_wheat-4.pdf)（2024年5月25日アクセス）。
- 前嶋武（2021）「家庭菜園をDIYとセンサーで楽しみたい！スマート雨量計を自作してみる」[https://fabcross.jp/category/make/20210701\\_rain\\_gauge.html](https://fabcross.jp/category/make/20210701_rain_gauge.html)（2024年5月26日アクセス）。
- 前嶋武（2022）「電源不要！ソーラーIoTデバイスを3万円台で作ってみた」[https://fabcross.jp/category/make/20220630\\_solar\\_iot.html](https://fabcross.jp/category/make/20220630_solar_iot.html)（2024年5月26日アクセス）。