

令和5年度
修士学位論文

ショウガ乾物率推定のための
マルチスペクトル画像から得られる
植生指数の研究

A Study on the Estimation of Dry Matter Content of
Ginger Using Vegetation Indices Derived from
Multispectral Images

1265098 久保田 雄斗

指導教員 栗原 徹

2024年2月28日

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻
情報システム工学コース

要 旨

ショウガ乾物率推定のための マルチスペクトル画像から得られる植生指数の研究

久保田 雄斗

ショウガは高知県の基幹品目として重要な青果物の一種であるが、県内の露地ショウガの1-2割程度の塊茎が貯蔵中に腐敗してしまう貯蔵根茎腐敗病と呼ばれる病害が問題視されている。その原因の一つとして、乾物率が低く充実の悪い塊茎の収穫及び貯蔵が挙げられる。高知県農業技術センターの内部調査により、植生指数の一つである SPAD と乾物率に相関があることが明らかになった。しかし、SPAD の計測は通常ほ場全体を計測できないこと、計測にはほ場内に侵入する必要があるため、病原菌を持ち込んでしまう恐れがあることからほ場外からほ場全体の乾物率を予測する手法が求められている。そこで我々はドローンによる空撮で得られるマルチスペクトル画像に注目した。空撮を行うため、ほ場外からほ場全体を撮影でき、様々な植生指数が計算できる。

本研究では、様々な植生指数の日別積算値 (以降では x の日別積算値は Σx と記す) を説明変数として単回帰及び重回帰によって乾物率の推定を行い、推定精度向上に貢献した植生指数を主成分分析を用いて検討した。結果、 $\Sigma MTCI$ と $\Sigma (1 - RedEdgeNDVI)$ の2つを説明変数とした場合、最も決定係数が高くなった。また、積算値であることが決定係数の向上に大きく貢献していること、 Σ 植生指数を用いることで経過日数では得られない特徴を認識できた可能性があることが分かった。

キーワード 乾物率, マルチスペクトル画像, 植生指数

Abstract

A Study on the Estimation of Dry Matter Content of Ginger Using Vegetation Indices Derived from Multispectral Images

KUBOTA Yuto

A disease called storage rhizome rot, which causes 10-20% of ginger tubers to rot during storage, has become a problem. One of the causes of this disease is the storage of tubers with low dry matter percentage. An survey of the Agricultural Technology Center of Kochi Prefecture revealed a correlation between SPAD and dry matter percentages. However, it is not possible to measure SPAD across the entire field, and we must enter the field to measure SPAD. Therefore, we focused on multispectral images gotten from aerial photography by drones. Because of the aerial photography, the entire field can be photographed from outside the field, and vegetation indices can be calculated.

In this study, we estimated the dry matter percentages by regression using the daily integrated values of various vegetation indices (daily integrated values of x will be denoted as Σx) as explanatory variables, and examined which vegetation index contributed to the improvement of estimation accuracy using principal component analysis. The results showed that the coefficient of determination was highest when $\Sigma MTCI$ and $\Sigma (1 - RedEdgeNDVI)$ were used as explanatory variables. It was also found that the totalized value contributed significantly to the improvement of the coefficient of determination, and that the use of the Σ vegetation index may have allowed the recognition of characteristics that could not be gotten using the number of elapsed days.

key words Dry-matter-percentage, Multispectral-image, Vegetation-Index

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	背景	1
1.2	目的	4
1.3	本論文の構成	5
第 2 章	関連技術	6
2.1	OpenDroneMap	6
2.2	放射照度・放射輝度・反射率	6
2.2.1	放射照度	6
2.2.2	放射輝度	7
2.2.3	反射率	7
2.3	植生指数	7
2.4	平滑化 spline	8
2.5	ARMA モデル・ARIMA モデル	9
2.5.1	ARMA モデル	9
2.5.2	ARIMA モデル	9
第 3 章	実験機材・実験環境	10
3.1	計測機材	10
3.2	計測環境	11
3.3	実験環境	12
第 4 章	提案手法	13
4.1	乾物率推定の手順	13
4.1.1	反射率マップの作成	13

目次

4.1.2	植生指数の日別値算出	14
4.1.3	乾物率の推定	15
第 5 章	結果・考察	17
5.1	植生指数の日別値の予測精度	17
5.2	単回帰分析	18
5.3	重回帰分析	19
5.4	未知のほ場に対する推定精度	21
5.5	主成分分析	23
第 6 章	結論	26
	謝辞	27
	参考文献	28

目次

1.1	貯蔵根茎腐敗病被害根茎	2
1.2	SPAD 計測器を使用する様子	3
2.1	標準反射板が写った NIR 画像	8
3.1	Inspire2, 引用元： https://drone-girls.com/drone_pb/inspire2/	10
3.2	RedEdge-M, 引用元： https://www.aeromotus.com/product/rededge-m/	11
4.1	乾物率推定の手順	13
4.2	NIR 領域における反射率マップ	15
5.1	各植生指数の日別値	17
5.2	経過日数の単回帰における乾物率計測値と乾物率推定値の関係	19
5.3	重回帰の場合の乾物率推定値と乾物率計測値の yy-plot	21
5.4	各説明変数と乾物率計測値	22
5.5	主成分寄与率	24
5.6	第 2 主成分までの主成分負荷量	25

表目次

1.1	出穂期の植生指数, 植生指数と LAI 及び乾物中の積, 植生指数相互の積と窒素保有量との相関係数: 参考文献 [4] より引用	3
1.2	幼穂分化期の植生指数, 植生指数と LAI 及び乾物中の積, 植生指数相互の積と窒素保有量との相関係数: 参考文献 [4] より引用	4
3.1	RedEdge-M の仕様	11
3.2	データ取得期間及びその回数	12
5.1	各条件における植生指数日別値 RMSE	18
5.2	単回帰分析の結果	18
5.3	各説明変数間の vif	20
5.4	重回帰分析の結果	20
5.5	各条件における植生指数日別値 RMSE	22

第 1 章

はじめに

1.1 背景

ショウガは高知県の基幹品目として重要な青果物の一種であるが，県内の露地ショウガの 1-2 割程度の塊茎が貯蔵中に腐敗してしまう貯蔵根茎腐敗病と呼ばれる病害が問題視されている．図 1.1 に貯蔵根茎腐敗病被害根茎を示す．貯蔵根茎腐敗病に感染すると，貯蔵中に偽茎の傷口などから感染し，塊茎の陥没や内部の腐敗が生じることが知られている．図 1.1 は内部腐敗が起きている例であるが，ショウガ内部にまで腐敗が及んでいることが分かる．

貯蔵根茎腐敗病の発生原因についてはあまりよく知られておらず，現場では対策に苦慮しているが，その原因の一つとして，乾物率が低く充実の悪い塊茎を収穫及び貯蔵することが挙げられている．この乾物率の目安として経験的に 8%以上の乾物率であれば貯蔵根茎腐敗病の発症率が低下すると考えられている．加えて，近年は農業従事者人口の減少及び高齢化が進んでおり，農作業の省力化，自動化技術が注目されている．そのなかで，リモートセンシング技術を利用した農作物の生育状況の推定も多く行われている．

先行研究として，岡 美佐子らは発病したショウガ種根茎からだけでなく，ほ場周辺の植物の根圏で生息・増殖し，雨水や小動物などが貯蔵根茎腐敗病の病原菌をもたらす可能性を示唆した [1]．そのため，感染リスクを減らすためにできる限りほ場内に立ち入らないことが求められる．高知県農業技術センターの内部調査により，SPAD*¹ と乾物率に相関があることが明らかになった．しかし，SPAD の計測は図 1.2 に示す計測器のように通常葉を挟んで計測を行う都合上，ほ場内に立ち入る必要がある．加えて，この計測の仕方では葉 1 枚に対

*¹ SPAD:葉クロロフィル量と大きく関係する値

1.1 背景



図 1.1: 貯蔵根茎腐敗病被害根茎

する SPAD の計測しかできず，ほ場全体の生育状況を把握するためには複数地点で複数個所の計測を行う必要があり，計測が大変であるという問題もある。

また，村田 資治らはダイズの地上部乾物重推定のための新たな植生指数として CI^{*2} と日射量の積の日別積算値が有効であることを示した [2]。リモートセンシングの分野では，Yanbo Huang らが高解像度の衛星画像，ドローンによる航空画像，地上構造物に搭載されたセンサーを管理する FLTL(four-layer-twelve-level) リモートセンシングデータ管理構造を用いてビッグデータを扱う手法が紹介されているが，ビッグデータから特定した地球レベル，地域レベルでの傾向から個々の農場毎の問題を解決できるわけではない [3] としており，大規模なデータとローカルなデータを組み合わせており，農業分野においては農場毎に特徴が異

*2 CI:クロロフィル指数

1.1 背景



図 1.2: SPAD 計測器を使用する様子

なることが考えられる。他にも、柳 讚錫らはイネの窒素含有量を推定するために、ドローンによって撮影された航空画像から得られる複数の植生指数の積を用いた [4]。著者らが示した具体的な相関係数を表 1.1, 1.2 に示す。表 1.1, 1.2 に示すように著者らは、出穂期及

表 1.1: 出穂期の植生指数, 植生指数と LAI 及び乾物中の積, 植生指数相互の積と窒素保有量との相関係数: 参考文献 [4] より引用

(方法1 窒素保有量 (g/m ²) との相関係数)							
RN 0.8726		GN 0.8777		NDVI 0.8668		GNDVI 0.8619	
RN×DW*	RN×LAI	GN×DW	GN×LAI	NDVI×DW	NDVI×LAI	GNDVI×DW	GNDVI×LAI
0.9560	0.9773	0.9445	0.9792	0.9511	0.9714	0.9381	0.9709
RN×GN	RN×GNDVI	GN×GN	GN×GNDVI	NDVI×GN	NDVI×GNDVI	GNDVI×GN	GNDVI×GNDVI
0.8868	0.8789	0.8828	0.8781	0.8837	0.8756	0.8781	0.8653
(方法2 窒素保有量と (g/m ²) の相関係数)							
RN 0.9176		GN 0.9207		NDVI 0.8987		GNDVI 0.9070	
RN×DW	RN×LAI	GN×DW	GN×LAI	NDVI×DW	NDVI×LAI	GNDVI×DW	GNDVI×LAI
0.9583	0.9659	0.9601	0.9714	0.9500	0.9666	0.9510	0.9680
RN×GN	RN×GNDVI	GN×GN	GN×GNDVI	NDVI×GN	NDVI×GNDVI	GNDVI×GN	GNDVI×GNDVI
0.9252	0.9200	0.9255	0.9210	0.9202	0.9071	0.9210	0.9099

(方法 (1): サンプル地点の平均値, 方法 (2): 区画の全面積の平均, DW*: Dry Weight, 方法 1: データ数 n=20, 方法 2: n=10, 全ての相関係数が 1% 有意差水準)

び幼穂分化期において相関係数が向上したことを示しており、このことから、単一の植生指

1.2 目的

表 1.2: 幼穂分化期の植生指数, 植生指数と LAI 及び乾物中の積, 植生指数相互の積と窒素保有量との相関係数: 参考文献 [4] より引用

(方法 1 窒素保有量 (g/m ²) との相関係数)							
RN 0.3018		GN 0.4177		NDVI 0.2663		GNDVI 0.3969	
RN×DW 0.7363**	RN×LAI 0.8142**	GN×DW 0.7754**	GN×LAI 0.8330**	NDVI×DW 0.8263**	NDVI×LAI 0.8802**	GNDVI×DW 0.8288**	GNDVI×LAI 0.8786**
RN×GN 0.4063	RN×GNDVI 0.3418	GN×GN 0.4279*	GN×GNDVI 0.4181	NDVI×GN 0.4166	NDVI×GNDVI 0.3771	GNDVI×GN 0.4181	GNDVI×GNDVI 0.3997
(方法 2 窒素保有量と (g/m ²) の相関係数)							
RN 0.8142**		GN 0.8666**		NDVI 0.7896**		GNDVI 0.8579**	
RN×DW 0.8656**	RN×LAI 0.9056**	GN×DW 0.8864**	GN×LAI 0.9090**	NDVI×DW 0.8765**	NDVI×LAI 0.9134**	GNDVI×DW 0.8826**	GNDVI×LAI 0.9123**
RN×GN 0.8568**	RN×GNDVI 0.8293**	GN×GN 0.8709**	GN×GNDVI 0.8668**	NDVI×GN 0.8634**	NDVI×GNDVI 0.8391**	GNDVI×GN 0.8668**	GNDVI×GNDVI 0.8591**

(方法 (1): サンプル地点の平均値, 方法 (2): 区画の全面積の平均, DW*: Dry Weight, 方法 1: データ数 n=20, 方法 2: n=10, **: 1% 有意差水準, *: 5% 有意差水準)

数のみではなく複数の植生指数を組み合わせることが植物の生育状況の推定に有効であることが分かる。

1.2 目的

本研究ではほ場外からほ場全体の状態を計測できる手法としてドローンによる空撮で得られるマルチスペクトル画像から計算可能である複数の植生指数を用いた乾物率の推定を行う。

本研究では様々な植生指数の日別積算値を説明変数とした重回帰によって乾物率の推定を行う。また、各植生指数の日別積算値を求めるための日別値の算出には平滑化スプラインを用いる。最終撮影日以降の植生指数については ARMA モデル及び ARIMA モデルで比較し、植生指数の推定精度の検証を行う。その後、様々な説明変数を用いて回帰分析、主成分分析、未知のほ場に対する推定精度の検討などを行い、乾物率推定に最適な植生指数の組み合わせを提案し、その理由について考察する。

1.3 本論文の構成

1.3 本論文の構成

本論文の構成として第 2 章で乾物率推定に関連する技術について述べる。第 3 章では計測環境や実験機材について説明する。第 4 章では提案手法について述べる。第 5 章では結果と考察を述べる。第 6 章では結論を述べる。

第 2 章

関連技術

2.1 OpenDroneMap

OpenDroneMap(ODM)とは複数枚の航空写真を1枚の大きなオルソ画像にしたり, 3Dモデルに処理することが可能なオープンソースの写真測量ソフトウェアのことである. ODMは, WebブラウザからGUIによる操作ができるインターフェースとしてWebODMを提供しており [5], コンピュータに対する深い知識がない農業従事者であっても環境の構築さえ済ませてしまえば簡単にオルソ画像の生成が可能となっている.

ODM以外のGUIで操作ができる写真測量ソフトウェアとしてPIX4Dmapperなどが挙げられるが, どれも有料であり, PIX4Dmapperは購入に80万円以上の費用が掛かってしまうため, 初期費用が高額になってしまう [6]. それに対し, ODMはインストールおよび環境の構築に多少の予備知識が必要ではあるものの, 無償で利用できるという利点がある.

2.2 放射照度・放射輝度・反射率

2.2.1 放射照度

放射照度とは物体に当たる光の強さを示す指標で, 本研究では主に太陽光の強さを示す指標であり, 後述するマルチスペクトルカメラからメタデータとしての取得が可能である.

2.3 植生指数

2.2.2 放射輝度

放射輝度とは、物体に当たった光が跳ね返った時の光の強さを示す指標で、後述するマルチスペクトルカメラから得られるメタデータ及び画像を用いることで計算可能である。しかし、放射輝度は反射特性によって変動する一方で、入力となる光の強さによっても変動してしまうという性質を持つ。

2.2.3 反射率

反射率とは、物体の反射特性を表すものであり、反射率を用いることで撮影タイミングの違いなどによる日光の強さや、カメラの特性に左右されずに物体の反射特性を比較することができる。反射率は0から1の間で表され、反射率が大きいほどその波長の光を吸収せずに反射していることを示す。

反射率 ρ は以下の式によって表すことができる。

$$\rho = \frac{\pi * L * d^2}{E * \cos(\Theta)} \quad (d \text{ は地球太陽間の距離, } L \text{ は放射輝度, } E \text{ は分光太陽照度, } \Theta \text{ は太陽高度})$$

このうち、 $\frac{\pi * d^2}{E * \cos(\Theta)}$ については同時刻においては定数であると考えることができる。これを利用して、図 2.1 の中央に写っているような反射率が既知である標準反射板を用いることで $\frac{\pi * d^2}{E * \cos(\Theta)}$ を推定し、この係数で校正を行う形で反射率を計算する。

2.3 植生指数

植生指数とはクロロフィル量や LAI といった植物の生育状況に関連する指標を植物の反射率特性を利用して数値化することを目的として作られた指標のことである。代表的な植生指数としては NDVI[7], CI[2] などが挙げられ、農業や林業では生育状況の把握などの目的のために使用されている。本研究では、代表的な植生指数として NDVI を、葉クロロフィル含量に深く関係する値として LCI, RedEdgeNDVI, MTCI[8] の 3 つの植生指数を使用す

2.4 平滑化 spline



図 2.1: 標準反射板が写った NIR 画像

る。各植生指数は以下の式によって表すことができる。

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

$$RedEdgeNDVI = \frac{NIR - RedEdge}{NIR + RedEdge}$$

$$LCI = \frac{NIR - RedEdge}{NIR + Red}$$

$$MTCI = \frac{NIR - RedEdge}{RedEdge - Red}$$

2.4 平滑化 spline

平滑化 spline[9] とは、ノイズを含むデータに対してノイズの平均が 0 で独立となるモデルを仮定し、関数 $f(x)$ を推定する手法で、以下の式を最小化する形で求められる。

$$\sum_{i=1}^n \{Y_i - \hat{f}(x_i)\}^2 + \lambda \int \hat{f}''(x)^2 dx$$

平滑化 spline を使用する際のパラメータは λ であり、 $\lambda=0$ の場合、spline 補間を行った場合の結果と等しく、 λ が大きい程曲線の滑らかさが大きくなる、

2.5 ARMA モデル・ARIMA モデル

農業分野では平均気温とリンゴ果樹の発育データに平滑化 spline をあてはめることで長期的な傾向を求めたり [10], 先行研究でも紹介したダイズの乾物重推定のために用いる植生指数の日別値の算出に用いられている [2].

2.5 ARMA モデル・ARIMA モデル

2.5.1 ARMA モデル

ARMA モデル [11] とは, autoregressive moving average model の略称であり, 自己回帰モデル (AR モデル) と移動平均モデル (MA モデル) を組み合わせた主に時系列データの将来値予測に用いられるモデルであり. 以下の式で表される. ARMA モデルは定常性を持つ時系列データに対する強い説明力を持つ.

$$X_t = c + \sum_{i=1}^p \varphi_i X_{t-i} + \sum_{i=0}^q \theta_i \varepsilon_{t-i}$$

(c は定数, φ_k は自己回帰パラメータ, θ_k は移動平均パラメータ,
 ε_t は時刻 t におけるホワイトノイズである)

2.5.2 ARIMA モデル

ARIMA モデル [12] とは, autoregressive integrated moving average model の略称であり, ARMA モデルをデータの d 階差分に対して適用することで非定常な時系列データを説明できるようにしたモデルである.

第 3 章

実験機材・実験環境

本章ではマルチスペクトル画像の撮影及び乾物率の計測を行った際の計測環境及び実際に乾物率推定を行うプログラムを動作させた環境について述べている。

3.1 計測機材

本研究では、ほ場の空撮は全て図 3.1 に示す DJI 社のドローン Inspire2 と図 3.2 Micasense 社のマルチスペクトルカメラ RedEdge-M を用いて行った。



図 3.1: Inspire2, 引用元 : <https://drone-girls.com/drone-pb/inspire2/>

RedEdge-M は RGB に加え、NIR 領域及び植物の反射率が大きく変化する RedEdge 領域の 5Channel の撮影が可能である。RedEdge-M の仕様を表 3.1 に示す。また、反射率の算出には図 2.1 に示した標準反射板を各撮影日の撮影直前に撮影し、それらの画像を用いた校正を行う形で計算した。

3.2 計測環境



図 3.2: RedEdge-M, 引用元 : <https://www.aeromotus.com/product/rededge-m/>

表 3.1: RedEdge-M の仕様

Channel	Center Wavelength(nm)	Bandwidth FWHM(nm)
Blue	475	20
Green	560	20
Red	668	10
NIR	840	40
RedEdge	717	10

3.2 計測環境

本研究で乾物率の計測及びドローンによる空撮を行ったほ場は香南市のほ場 (以下現地ほ場と記す), 高知県農業育成担い手センター (以下担い手センターと記す), 高知県農業技術センター (以下農技センターと記す) の3ヶ所である. 各ほ場の計測環境を表 3.2 に示す. これら3つのほ場での撮影はできる限りマルチスペクトルデータに異常があらわれないように全て晴天条件の午前中に撮影された. 甘藷についての論文ではあるが, 施肥が塊茎乾物率に影響を与えている可能性が示唆されており [13], 担い手センター及び農技センターは施肥の種類ごとに複数区画存在するため, 乾物率の計測は全て各区画で区別して行った. 地上解像

3.3 実験環境

度は高度 120m で 8.2cm/pixel と記載されており [14], 撮影高度が 40m 程度であることから, およそ 2.73cm/pixel となる. また, オーバーサンプリング率は 80%である.

表 3.2: データ取得期間及びその回数

場所	撮影期間	撮影回数	収穫期間	収穫回数	撮影高度
担い手センター	2022/8/9-11	11	10/18-11/17	4*3area	40m
現地ほ場	2022/9/13-11/16	7	10/20-12/12	6	40m
農技センター	2023/8/1-11/20	14	10/20-12/11	6*7area	43m

3.3 実験環境

提案手法は WebODM(ver.2.3.0) 及び Python3 で実装を行った. 但し, 反射率マップ作成は Micasense 社が公開している Python 用のライブラリ「Image Processing」を使用する都合上動作が保証されている version3.6.15 で実装し, 乾物率の推定は version3.11.7 で実装した.

第 4 章

提案手法

4.1 乾物率推定の手順

提案手法では、図 4.1 及び以下に示す手順によって乾物率の推定を行う。

1. OpenDroneMap を用いた反射率マップの作成
2. 植生指数の日別値算出
3. 複数の植生指数及び経過日数を説明変数とした回帰分析による乾物率の推定

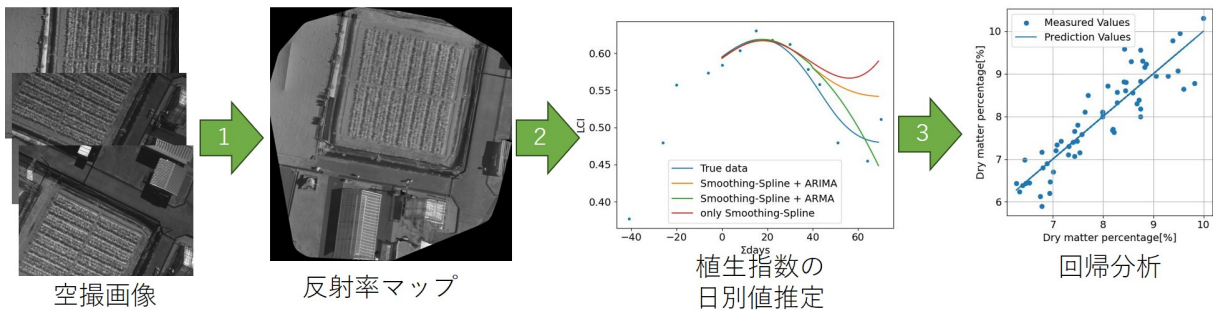


図 4.1: 乾物率推定の手順

また、主成分分析なども行い、乾物率の推定に大きく貢献している植生指数や、乾物率推定に最適な説明変数の組み合わせについても検討する。

4.1.1 反射率マップの作成

提案手法では、反射率マップを正しく推定するための前処理として、全ての画像に対し放射輝度を求め、得られた画像の分光太陽照度 E_k を標準反射板が映っている画像の分光太陽

4.1 乾物率推定の手順

照度 E_0 に近づけるために

$$\frac{I_0}{I_k} \text{ (} I_0 \text{ は標準反射板が映っている画像の放射照度, } I_k \text{ は対象画像の放射照度)}$$

を補正係数として各画像に対して乗算する。ここで式に用いた放射照度 I_0 , I_k はそれぞれ RedEdge-M による撮影時にメタデータとして取得されている。その後, WebODM を用いて 1 枚の反射率マップに変換し, 得られた反射率マップに対して標準反射板が映っている画像と同じ校正係数を乗算する形で画像全体に対して反射率を計算することで反射率マップを求める。実際に NIR 領域で求めた反射率マップを図 4.2 に示す。

4.1.2 植生指数の日別値算出

植生指数の日別値を利用していた先行研究 [2] では日別値の算出に平滑化 spline を使用していたため, 提案手法でも日別値の算出には平滑化 spline ($\lambda=1000$) を使用する。しかし, 平滑化 spline は最終撮影日以降の値を精度よく予測することを保証する手法ではないため, 3 つのほ場のうち最も撮影回数及び撮影期間の長い農技センターのデータに対して

- 撮影開始日から最終撮影日までの全データを使用した平滑化 spline 曲線 (真値)
- 撮影開始日から最終撮影日-30 日までのデータを使用した平滑化 spline 曲線
- 撮影開始日から最終撮影日-30 日までのデータを使用し, 最後 30 日までは平滑化 spline で最後 30 日のみ ARMA モデルで推定した曲線 ($p=5, q=3$)
- 撮影開始日から最終撮影日-30 日までのデータを使用し, 最後 30 日までは平滑化 spline で最後 30 日のみ ARIMA モデルで推定した曲線 ($p=20, d=1, q=20$)

を算出し, 全データを用いた平滑化 spline 曲線を真値とした場合の RMSE を比較することで最も精度良く将来の植生指数を推定できる手法を検討する。

4.1 乾物率推定の手順

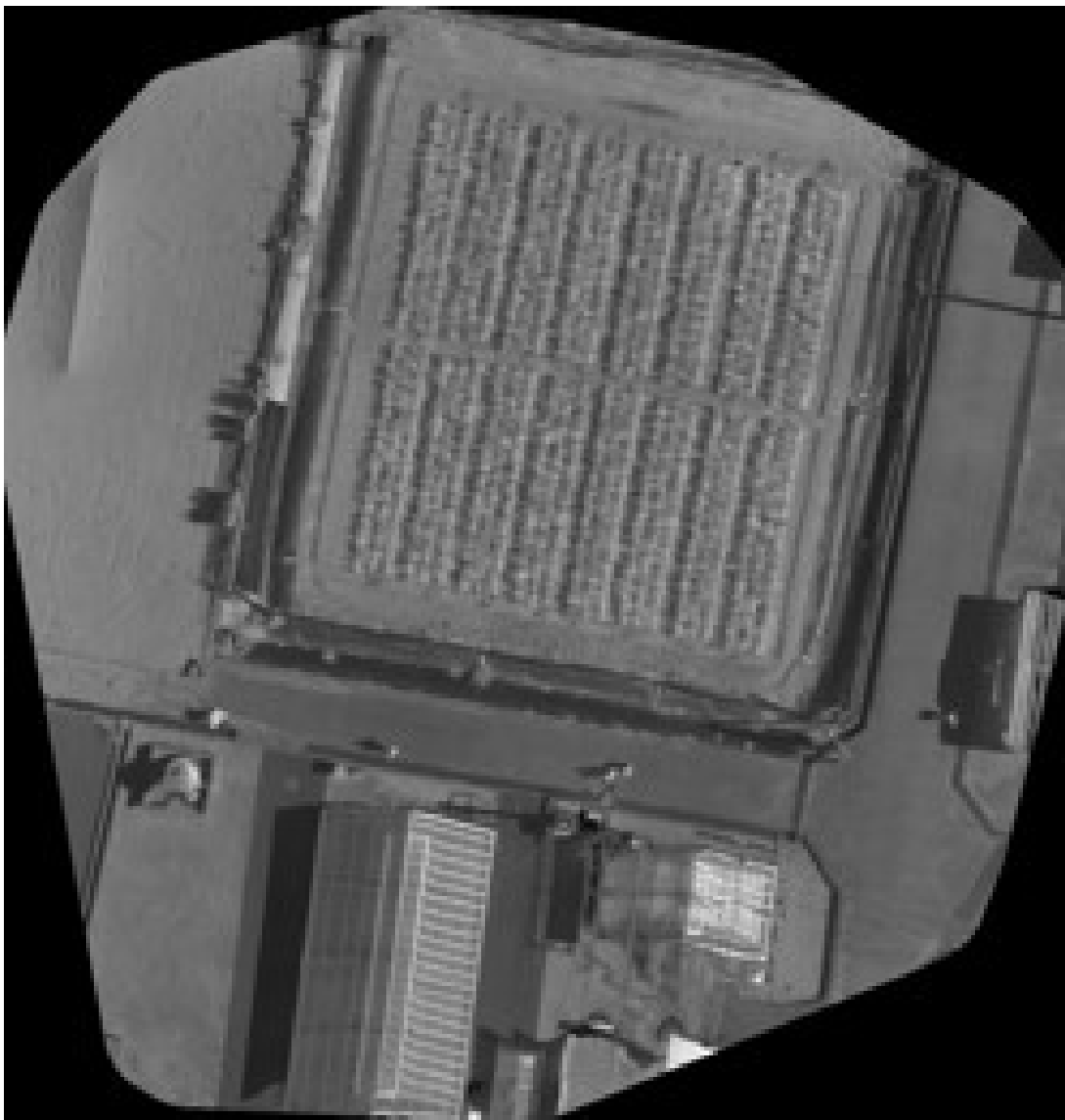


図 4.2: NIR 領域における反射率マップ

4.1.3 乾物率の推定

乾物率の推定には経過日数, ΣLCI , $\Sigma (1 - LCI)$, $\Sigma NDVI$, $\Sigma (1 - NDVI)$, $\Sigma RedEdgeNDVI$, $\Sigma (1 - RedEdgeNDVI)$, $\Sigma MTCI$ の 8 つの説明変数を用いた単回帰及び重回帰による分析を行う。重回帰分析の際には、多重共線性の問題を考慮して vif が 10 以下となる説明変数の組み合わせを用いる。この際、未知のほ場についての乾物率推定精度を評価するために、最も調整済み決定係数が高かった組み合わせに対し、2022 年のほ

4.1 乾物率推定の手順

場のみ，または 2023 年のほ場のみデータをそれぞれ用いて調整済み決定係数及び RMSE を比較する．

その後，説明変数に対して主成分分析を行うことで，最も決定係数が高い説明変数の組み合わせの理由について検討を行い，乾物率推定に有効となる植生指数が何か，どうして乾物率推定に有効となるのかを調べる．

第5章

結果・考察

5.1 植生指数の日別値の予測精度

各植生指数の日別値の推移を図 5.1 に RMSE を表 5.1 に示す。

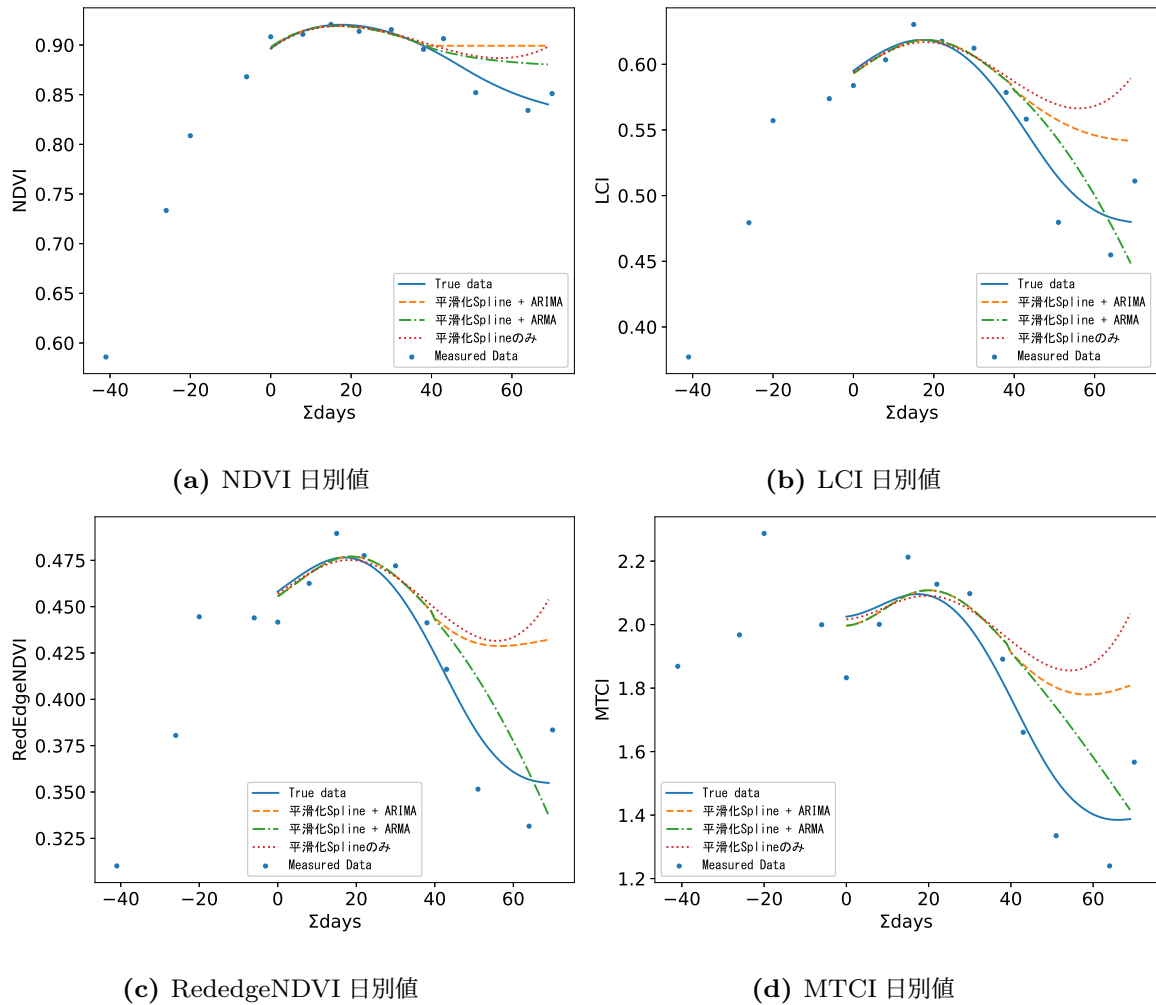


図 5.1: 各植生指数の日別値

5.2 単回帰分析

表 5.1: 各条件における植生指数日別値 RMSE

手法	RMSE
平滑化 spline のみ	0.0696
平滑化 spline+ARMA	0.0220
平滑化 spline+ARIMA	0.0481

図 5.1 から、全ての植生指数に対して平滑化 spline のみで予測した際の予測精度がかなり低いことが分かった。表 5.1 から、どの植生指数に対しても ARMA モデルの RMSE が最小であり、最も真値に近いと考えたため ARMA モデルを採用した。

5.2 単回帰分析

単回帰分析の結果を表 5.2 に示す。表 5.2 から、経過日数を説明変数とした場合が最も決

表 5.2: 単回帰分析の結果

説明変数	経過日数	Σ LCI	Σ (1-LCI)	Σ NDVI	Σ (1-NDVI)	Σ RENDVI	Σ (1-RENDVI)	Σ MTCI
調整済み決定係数	0.768	0.697	0.738	0.760	0.709	0.651	0.757	0.465
RMSE	0.51357	0.588	0.544	0.522	0.575	0.630	0.526	0.780
最大誤差	1.282	1.297	1.582	1.254	1.752	1.345	1.482	1.881

定係数が高く、経過日数であること、つまり積算値であること自体が決定係数の向上に大きく貢献していると考えられる。また図 5.2 は横軸に経過日数の単回帰を行った場合の横軸乾物率推定値縦軸実測値の yy-plot であるが、概ね $\pm 1\%$ 程度での推定が可能となっていることが分かる。

5.3 重回帰分析

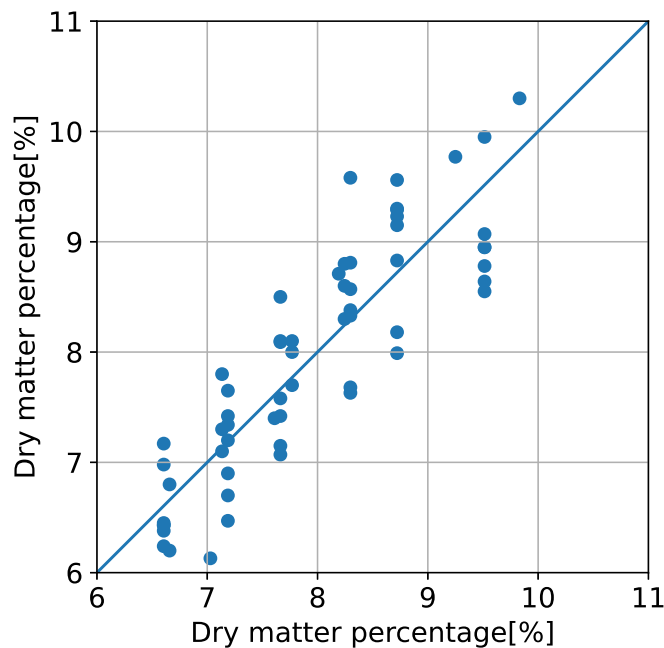


図 5.2: 経過日数の単回帰における乾物率計測値と乾物率推定値の関係

5.3 重回帰分析

提案手法に用いた説明変数は全て積算値であるため、非常に似た特徴を持ちやすく、多重共線性の問題を起こしやすい。表 5.3 に説明変数を 2 つとした場合の vif を示す。表 5.3 から、 vif が 10 以下になるような組み合わせで重回帰分析を行う場合、説明変数は 2 つまでが限界であると考えられるため、表 5.3 の vif が 10 以下になる組み合わせを説明変数とした場合の重回帰分析及び各説明変数の単回帰分析の結果を表 5.4 に示す。表 5.4 から、 $\Sigma MTCI$ と $\Sigma (1 - RedEdgeNDVI)$ の 2 つを説明変数とした重回帰が最も調整済み決定係数が高く、RMSE が小さくなった。この際の不偏標準偏差は 0.51 であり、現時点で信頼区間を 95%とした場合に誤差 $\pm 1\%$ 以内での推定は可能であると言える。経験的に乾物率 8%以上のショウガは貯蔵根茎腐敗病のリスクが低下するとされているため、この誤差 1%の差は非常に大きく影響することが考えられる。このことから、乾物率と貯蔵根茎腐敗病の関係性を詳しく調査する際には、1%単位での推定は必須であると考えているため、现阶段の誤差 $\pm 1\%$ 以内という値は信頼性にやや欠けると考えられる。加えて、この誤差 $\pm 1\%$ とい

5.3 重回帰分析

表 5.3: 各説明変数間の vif

vif	Σ LCI	Σ (1-LCI)	Σ NDVI	Σ (1-NDVI)	Σ RENDVI	Σ (1-RENDVI)	Σ MTCI
経過日数	43.46	36.85	760.4	24.36	27.23	52.64	9.462
Σ LCI		12.25	67.59	10.67	494.1	14.99	29.46
Σ (1-LCI)			28.67	70.93	9.670	834.1	5.161
Σ NDVI				19.04	37.56	40.05	11.11
Σ (1-NDVI)					8.914	56.94	5.273
Σ RENDVI						11.42	47.95
Σ (1-RENDVI)							5.743
Σ MTCI							

表 5.4: 重回帰分析の結果

説明変数 1	Σ MTCI	Σ MTCI	Σ MTCI	Σ MTCI	Σ RedEdgeNDVI	Σ RedEdgeNDVI
説明変数 2	経過日数	Σ (1-LCI)	Σ (1-NDVI)	Σ (1-RedEdgeNDVI)	Σ (1-LCI)	Σ (1-NDVI)
調整済み決定係数	0.7698	0.7659	0.7369	0.7708	0.7665	0.7518
RMSE	0.507	0.511	0.543	0.506	0.510	0.527
最大誤差	1.264	1.328	1.478	1.298	1.300	1.415

う数字は単回帰の時点での数字と大きく変わっておらず、実用面で考えると経過日数で考えた方がコストがかからない。しかし、調整済み決定係数が微量ながら植生指数 2 種類の重回帰の方が上回っていること、RMSE が小さくなっていることから、経過日数だけでは取得できない乾物率に関する特徴を植生指数を用いることで取得できた可能性がある。そのため、乾物率と貯蔵根茎腐敗病の関係の調査に用いるためにも更なる精度改善、具体的には半分の信頼区間 95%で誤差 $\pm 0.5\%$ 程度の精度が求められると考えている。

一方で、提案手法はほ場や区画全体の植生指数という代表値から全体の乾物率の代表値を推定している。そのため、乾物率の予測値が計測値の中央を通るような推定結果になっている場合は乾物率代表値を上手く示していると言える、そこで、重回帰分析で最も決定係数が

5.4 未知のほ場に対する推定精度

高かった $\Sigma MTCI$ と $\Sigma (1 - RedEdgeNDVI)$ の2つを説明変数とした重回帰を用いた場合の乾物率推定値を横軸に乾物率測定値を縦軸にとった yy-plot を図 5.3 に示す。図 5.3

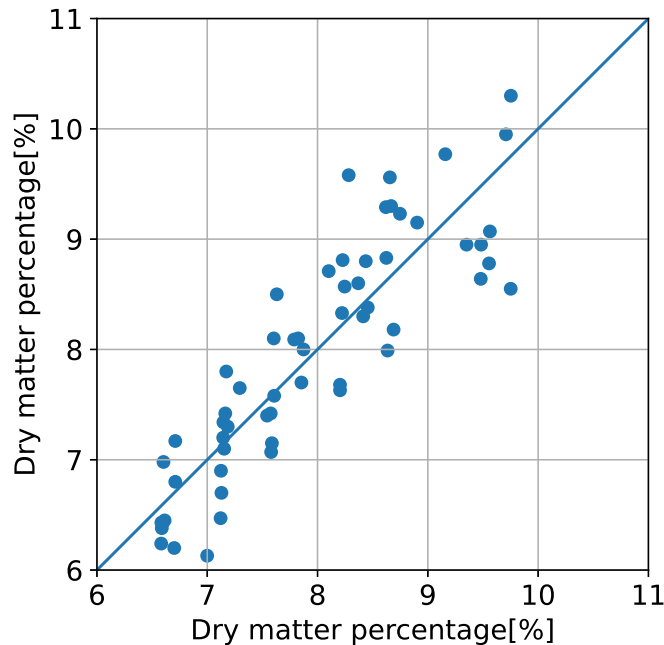


図 5.3: 重回帰の場合の乾物率推定値と乾物率計測値の yy-plot

から、乾物率の予測値が計測値の中央を通るような推定結果となっていると言えるため、提案手法が乾物率の代表値を上手く説明できていると考えている。しかしながら、図 5.3 の乾物率計測値 8%以上のショウガについてはやや誤差が大きくなっているように見受けられる。そのため、乾物率 10%以上の非常に高い乾物率に対しての推定精度は信頼性に欠ける可能性が高いと考えられる。但し、10%以上の高い乾物率の推定については乾物率を高くし過ぎてしまうと別の病害の危険性も考えられるため、10%までの乾物率推定でも十分であると考えている。

5.4 未知のほ場に対する推定精度

未知のデータに対する乾物率予測精度を知るために、2022 年のほ場のみ、2023 年のほ場のみに回帰を行い、それぞれの RMSE を求めた。2022 年のほ場は 2 か所存在しているが、

5.4 未知のほ場に対する推定精度

それぞれの乾物率計測回数が少ないことから両方のほ場のデータを用いた回帰を行った。重回帰で最も決定係数が高くなった $\Sigma MTCI$ と $\Sigma (1 - RedEdgeNDVI)$ の2つを説明変数とした重回帰での決定係数及び各年次における RMSE を表 5.5 に、 $\Sigma MTCI$ または $\Sigma (1 - RedEdgeNDVI)$ に対応する乾物率計測値を図 5.4 に示す。

表 5.5: 各条件における植生指数日別値 RMSE

使用データ (データ数 n)	決定係数	2022 年の RMSE	2023 年の RMSE
2022 年 (n=18)	0.907	0.337	0.690
2023 年 (n=42)	0.731	0.522	0.521
全ほ場 (n=60)	0.771	0.438	0.533

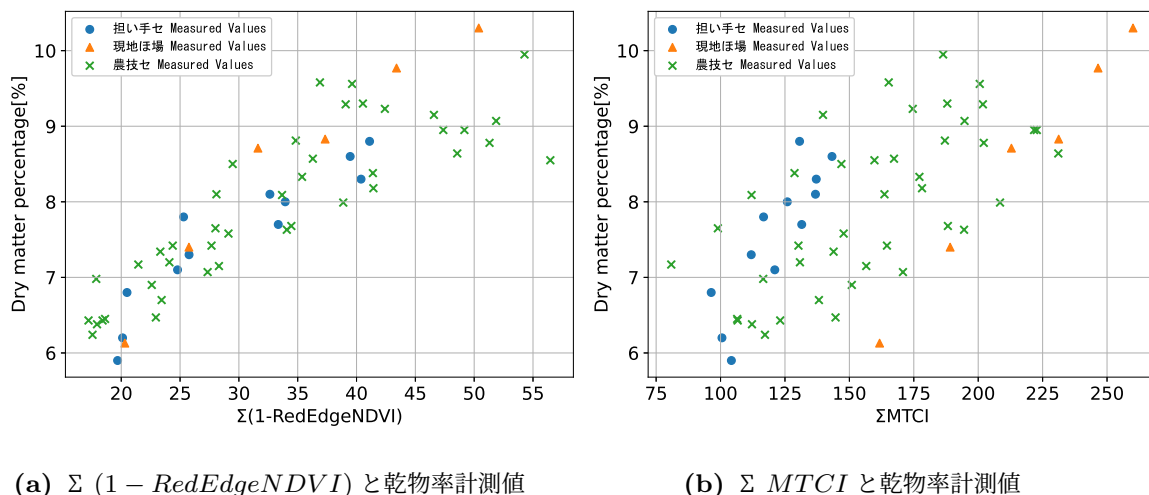


図 5.4: 各説明変数と乾物率計測値

表 5.5 から、2022 年のみで回帰を行った場合の決定係数が 0.9 以上と高い一方で 2022 年の RMSE と 2023 年の RMSE の差が 0.3 以上とかなり高くなっている。それに対し、2023 年のみで回帰を行った場合の決定係数は 0.73 と 2022 年の場合よりも低いながらも、2022 年の RMSE と 2023 年の RMSE の差が 0.01 と非常に低いことから 2023 年のほ場は 2022 年のほ場を説明できていると言える。この差がデータ数の違いによるものであれば 2023 年のほ場のデータ数が 42 であることから、50 回程度の計測を行えば未知のほ場に対しての乾

5.5 主成分分析

物率推定が行えるということになる。

一方で、2022年のほ場のデータ数を増やしても上手く未知のほ場の乾物率が推定できない可能性もある。図 5.4b から、現地ほ場と担い手センターのほ場間で $\Sigma MTCI$ と乾物率計測値の関係に差があり、 $\Sigma MTCI$ の部分では上手くこの2つのほ場間の差を考慮した推定が行えていないが、図 5.4a から、現地ほ場と担い手センターのほ場間で $\Sigma (1 - RedEdgeNDVI)$ と乾物率計測値の関係に差があまり見られない。このことから2つのほ場間の差を考慮した推定は行えていると言える。しかし、図 5.4a, 5.4b の両方で農技センターの方が他のほ場よりもばらつきが大きいこと、 $\Sigma MTCI$ と乾物率の関係から、現地ほ場と担い手センターの乾物率計測値が農技センターの乾物率計測値のばらつきの両端部分になっていることを考えると、2022年のほ場が特殊であるからではなく、4条件では条件数が足りなかったことが農技センターの乾物率を説明しきれなかった理由であると考えている。そのため、施肥等が異なる7条件以上で1-2週間おきに6回ずつの計42回以上の計測を行えば未知のほ場にも対応できる可能性があり、この検証のためには追加で施肥条件が同一または異なる条件下での乾物率計測を行い、交差検証などを用いて検証する必要があると考える。

5.5 主成分分析

$\Sigma (1 - RedEdgeNDVI)$ と $\Sigma MTCI$ の組み合わせで決定係数が上昇した要因を調べるために、提案手法で回帰分析に使用した説明変数全てに対して主成分分析を行った。各主成分の累積寄与率を図 5.5 に示す。図 5.5 から、第2主成分までの累積寄与率がほぼ1であり、説明変数のほとんど全てが第2主成分までで表現できると言える。そこで、第2主成分までの主成分負荷量を plot したグラフを図 5.6 に示す。

図 5.6 から、 $\Sigma MTCI$ と $\Sigma (1 - RedEdgeNDVI)$ の組み合わせを用いることで、第2主成分をうまく表現できたこと、 $\Sigma (1 - RedEdgeNDVI)$ が最も $\Sigma (1 - \text{植生指数})$ の形の中で第1主成分に対する寄与率が高いことで最も高い決定係数となったのではないかと考え

5.5 主成分分析

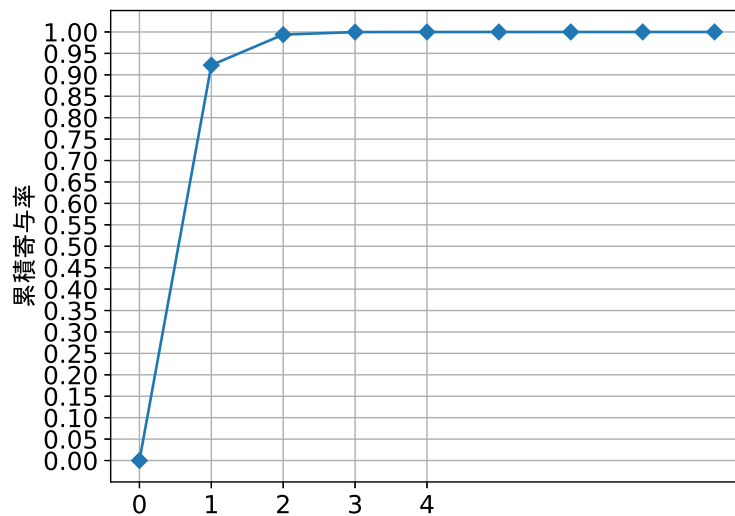


図 5.5: 主成分寄与率

る。経過日数と $\Sigma NDVI$ 以外の説明変数が全て第 2 主成分に対して小さくない主成分負荷量を持っていることから、第 2 主成分が経過時間に関わらない成分であり、乾物率の推定精度向上に関連する成分ではないかと考えている。

5.5 主成分分析

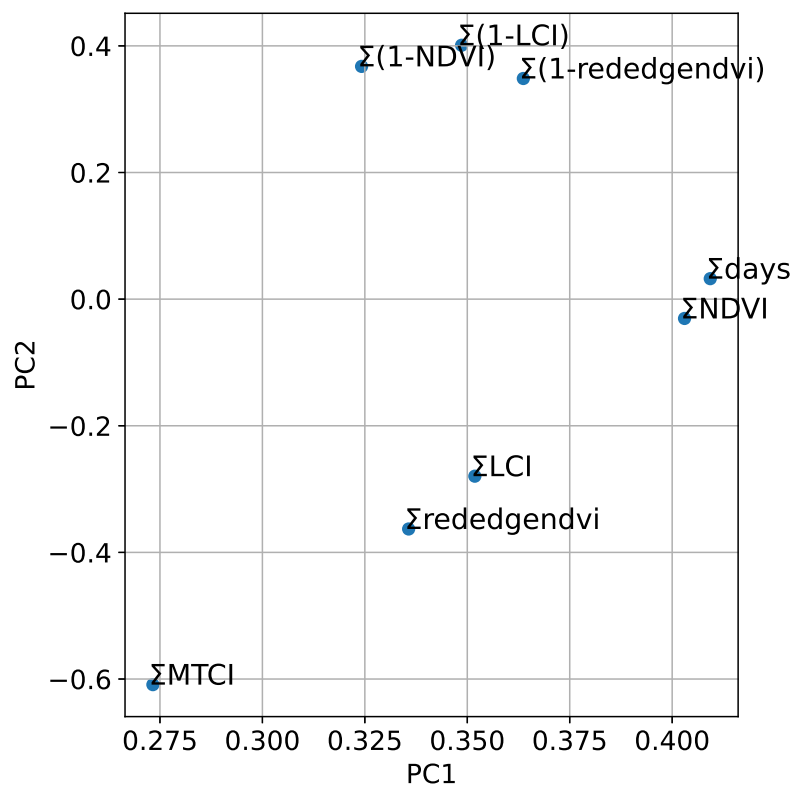


図 5.6: 第 2 主成分までの主成分負荷量

第 6 章

結論

本研究では、ドローンによる空撮によって得られるマルチスペクトル画像からほ場内に立ち入ることなく乾物率を推定する手法を提案した。

まず植生指数の日別値の推定精度を検討するために最終撮影日以降の植生指数の日別値を ARIMA モデル及び ARMA モデルにより推定した。その結果、ARMA モデルを適用することで平滑化 spline のみによる推定と比較して RMSE が 3 分の 1 程度に減少した。

その後、乾物率推定に最適な説明変数を調べるために重回帰分析及び主成分分析を行った。その結果、単回帰では経過日数が最も決定係数が高いが、重回帰を含めると $\Sigma (1 - RedEdgeNDVI)$ と $\Sigma MTCI$ の組み合わせが最も決定係数が高く、 Σ 植生指数の形でしか説明できない要素が乾物率の上昇に貢献している可能性がある。また、その際の調整済み決定係数は約 0.77、最大誤差は約 1.2% であり、最終撮影日から 1 か月後までの乾物率を誤差 $\pm 1.0\%$ で推定ができる。一方で、経過日数の単回帰でもほとんど同じ推定精度となっており、乾物率と貯蔵根茎腐敗病との関係を明らかにするためには更なる精度の向上が求められる。また、施肥等の条件が異なる 7 条件以上のデータがあれば未知のほ場に対する推定ができる可能性がある。この検証のためには既存のデータと同じ施肥条件や異なる施肥条件で追加の乾物率計測を行い、交差検証などを用いて詳しく検討することが効果的であると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり，御丁寧な御指導いただきました栗原徹教授に心から感謝を申し上げます。そしてお忙しい中，本研究の副査を引き受けていただきました吉田真一教授，福本昌弘教授に御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 岡ら：ショウガ貯蔵根茎腐敗病の発生生態，高知県農業技術センター研究報告，2021.
- [2] 村田ら：近接リモートセンシングを用いたダイズ地上部乾物重の推定法の高精度化，農業作業研究 53 巻 3 号，2018.
- [3] Huang ら：Agricultural remote sensing big data: Management and applications, Journal of Integrative Agriculture, 2018.
- [4] 柳ら：リモートセンシングによるイネの窒素保有量の推定，農業機械学会誌，2004.
- [5] OpenDroneMap：Drone Mapping Software - Open Drone Map,
<https://www.opendronemap.org/>，2024 年閲覧.
- [6] PIX4D：PIX4Dmapper 価格—Pix4D,
<https://www.pix4d.com/jp/pricing/pix4dmapper/>，2024 年閲覧.
- [7] 国土地理院：植生指標データについて—国土地理院，
<https://www.gsi.go.jp/kankyochiri/ndvi.html>，2024 年閲覧.
- [8] Paul J Curran ら：The MERIS terrestrial chlorophyll index, International Journal of Remote Sensing 25, 2003.
- [9] G. Wahba：“Estimating the smoothing parameter” in Spline models for observational data, Society for Industrial and Applied Mathematics, 1990.
- [10] 藤沢ら：日本におけるリンゴの発育早期化に見られる温暖化の影響，農業気象 63 巻 4 号，2007.
- [11] Box ら：Time Series Analysis: Forecasting and Control, Holden-Day, 1970.
- [12] Percival ら：Spectral Analysis for Physical Applications, Cambridge University Press, 1993.
- [13] 津野ら：甘藷の乾物性産に関する研究 第 10 報 肥料条件と乾物生産よりみた塊根乾物率の決まりかた，日本作物学会紀事 37 巻 1 号，1968.

参考文献

- [14] Micasense : MicaSense RedEdge-M™ Multispectral Camera User Manual,
https://support.micasense.com/hc/en-us/article_attachments/115004168274,
2024 年閱覽