

サトウキビ栽培土壌の迅速評価方法の開発

国立研究開発法人国際農林水産業研究センター熱帯・島嶼研究拠点
神田 隆志（研究代表者）、寺島 義文、安西 俊彦
生産環境・畜産領域 西垣 智弘

【要約】

サトウキビ栽培圃場^{ほじょう}における土壌の赤外分光法の利用可能性について、沖縄県内から収集した782点の土壌試料のスペクトルデータを用いて土壌特性値予測モデルを作成した結果、pH (H₂O)、全窒素および交換性カルシウムの分析項目について比較的予測精度の高いモデルが作成できた。解析手法については今後さらに検証を行う必要があるが、迅速かつ簡易な本モデルを用いた正確な土壌診断の広域への適用が期待される。

1 調査の背景と目的

(1) サトウキビ生産現場における土壌診断の重要性

サトウキビの収量には、サトウキビ品種の違いの他、土壌環境、立地環境、圃場管理、気象条件などのさまざまな環境因子が関係している。土壌環境に関しては、沖縄県全体の約半分の土壌がケイ酸欠乏であること¹⁾、リン酸およびカリウムの減肥が可能であること²⁾がサトウキビ圃場の広域調査の結果から示されている。また、可給態窒素含量が少ない圃場や作土層厚の薄い圃場でのサトウキビ収量の低下³⁾、粗砕石灰岩施用の酸性矯正によるサトウキビの増収効果⁴⁾など、適切な土壌環境管理はサトウキビ収量の増加につながる。さらに、土壌中のカリウム含量⁵⁾、交換性マグネシウム、pH (H₂O)³⁾ (注1) とサトウキビ糖度との関係が認められており、土壌中の成分状況は、サトウキビの収量だけでなく、品質にも関係している。

また、肥沃度の低い土壌が分布する南西諸島における持続的なサトウキビ生産のためには、在来有機資源の効果的な土壌還元が必要であり、島嶼域内

の資源循環や環境保全に重要である。昨年度、国立研究開発法人国際農林水産業研究センター（以下「国際農研」という）が実施した砂糖関係研究委託調査では、フィルターケーキやバガス灰などを施用している農家圃場は、化学肥料のみを施用している農家圃場と比べて土壌の理化学性が改善されている可能性が明らかとなった⁶⁾。一方で、これら有機資源の量には限りがあることから、高い投入効果が見込める圃場を選定し、計画的・効果的な施用を実現していくことが必要となる。

(注1) 土壌中の水素イオン濃度H⁺の指標。5.0以下は強酸性、5.0～5.5は酸性、5.5～6.0は弱酸性、7.0は中性、7.0以上はアルカリ性。サトウキビは、pH6.5～7.5の微酸性～微アルカリ性の土壌が生育に適しているとされる。土壌pHは、乾土1に対して水2.5の割合の懸濁液pHと規定されており、pH (H₂O) と表す。

(2) 赤外分光法による土壌診断

サトウキビの持続的な安定生産には、土壌中の養分の過不足を把握するための土壌診断により、科学的データに基づく施肥設計や地域有機資源の施用による土づくりを効果的に実施することが必要であ

る。しかし、土壌情報の取得には時間・労力が必要なため、これまで迅速かつ広域な評価は困難であった。

近年、これらの課題を解決するための方法として、赤外分光法を利用した迅速かつ低コストの土壌分析の可能性が示されてきた。赤外分光法は、物質に赤外光を照射し、透過または反射した光を測定することで、試料の構造解析や定量を行う分析手法である^(注2)。これらの技術は、迅速かつ非破壊な分析であり、試料準備に乾燥と粉碎のみを必要とするのみであることから化学分析によって得られた実測値と比較検証することが進められている⁷⁾。

(注2) VisNIR(可視～近赤外: 2万5000cm⁻¹～4000cm⁻¹) およびMIR(中赤外: 4000cm⁻¹～400cm⁻¹) は土壌分析で最も使用されるスペクトル領域である。

(3) 本課題の目的

近年土壌診断への利用が進められている赤外分光法に注目し、土壌の中近赤外領域のスペクトルデータを用いて、土壌特性値の推定モデルを作成し、沖縄県内土壌の簡易土壌診断技術の開発を行うことを目的とする。

なお、本研究は独立行政法人農畜産業振興機構の令和4年度砂糖関係研究委託調査により実施したものである。

2 試料および方法

(1) 土壌試料および分析項目

本研究では、沖縄県農業研究センターおよび沖縄農業技術開発株式会社において沖縄県内各所から採取、保管されており、基本的な土壌特性値が明らかである土壌試料782点を用いた。これらの土壌試料には、サトウキビ圃場以外から採取した土壌試料も含まれており、その内訳は、サトウキビ圃場380点、バレイショ圃場22点、カボチャ圃場16点、花き類圃場364点である。本研究で使用した分析値は、pH(H₂O)、電気伝導度(EC)、有機炭素量(OC)、全窒素量(TN)、陽イオン交換容量(CEC)、交換性カリウム量(Ex-K)、交換性マグネシウム量(Ex-Mg)、交換性カルシウム量(Ex-Ca)、有効態リン酸量(Ava-P)、可給態窒素量(Ava-N)の合計10項目である(表1)。

(2) 土壌試料の調整および測定、解析方法

はじめに、現地圃場から採取した土壌試料を風通しが良く、直接日に当たらない場所で約2週間から1カ月程度風乾した後、2ミリメートルのステンレスふるいを用いて粗大植物片や小さい石を取り除くとともに、土壌試料の均質化を行った。その後、土

表1 予測モデルの作成に用いた土壌特性値と各特性値の内訳

分析項目		単位	最大値	最小値	平均値	サンプル数
水素イオン濃度	pH(H ₂ O)		9.0	3.5	6.5	782
電気伝導度	EC	mS cm ⁻¹	2.09	0.03	0.17	782
有機炭素量	OC	%	5.17	0.09	1.62	751
全窒素量	TN	%	0.38	0.01	0.14	782
陽イオン交換容量	CEC	cmol _c kg ⁻¹	27.21	0.79	12.9	780
交換性カリウム量	Ex-K	cmol _c kg ⁻¹	4.74	0.08	1.00	782
交換性マグネシウム量	Ex-Mg	cmol _c kg ⁻¹	12.36	0.05	2.55	782
交換性カルシウム量	Ex-Ca	cmol _c kg ⁻¹	54.50	0.14	15.42	782
有効態リン酸量	Ava-P	mg P ₂ O ₅ 100g ⁻¹	357.43	0.74	65.60	782
可給態窒素量	Ava-N	mg N 100g ⁻¹	8.98	0.23	2.22	417

資料：筆者作成

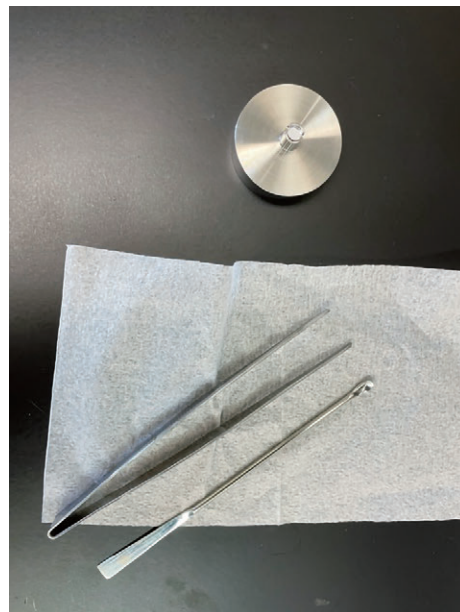
壤試料をさらに均質化するために、高速振動試料粉碎機（図1左）を用いて1分間試料を破碎し、微粉碎の土壤試料を作成した。この微粉碎した土壤試料を拡散反射測定用の専用カップに擦り切り一杯分しゅうてん充填し（必要な土壤の量は1グラム以下）、測定に供試した（図1右）。

中近赤外領域の測定には、フーリエ変換赤外分光光度計（FT-IR）（図2左）および拡散反射測定装置（図2右）を使用して、拡散反射フーリエ変換赤外分光法（DRIFT法）により中赤外領域の 4000cm^{-1} ～ 400cm^{-1} の範囲で解像度 4cm^{-1} のスペクトルデータを取得した。各土壤試料の測定は積算回数20回で測定した後、平均値を各土壤試料のスペクトルデータとした。測定に要する時間は1試料1分程度で

ある。このスペクトルデータをテキストファイルで保存した後、各波長の吸光度の値をCSVファイルにまとめ、スペクトルライブラリーとした。

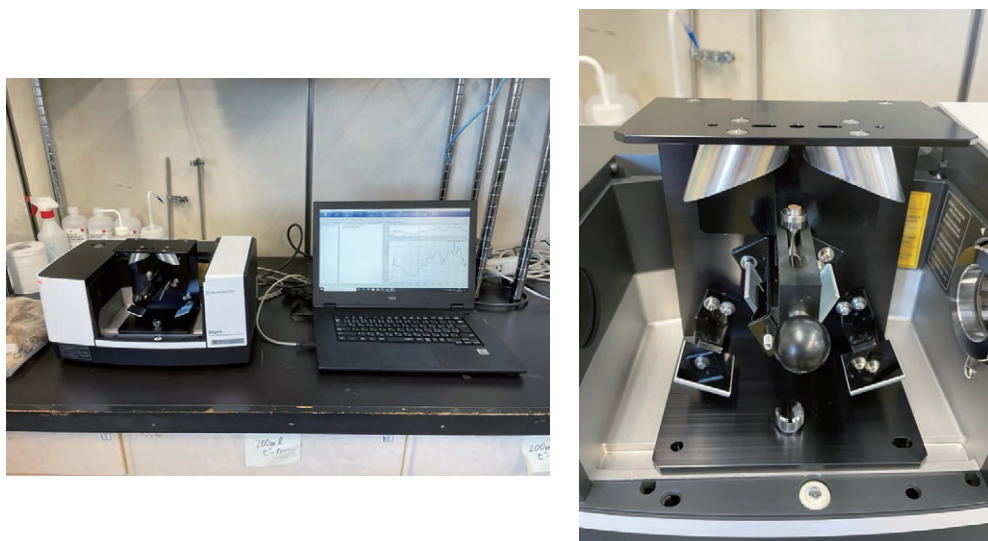
土壤特性値予測モデルの作成に用いるスペクトルデータは、スムージングなどの前処理を行ったデータを使用し、図3に示した手順により土壤特性値予測モデルの作成および精度評価を行った。精度評価は化学分析値と予測値の比較により行い、評価指標として決定係数（ R^2 ）、二乗平均平方根誤差（RMSE）および変数の標準偏差とモデルによるその変数の予測の標準誤差との間の比（RPD）を用いた。スペクトルデータの調整および予測モデルの作成はWadoux et al. (2021)⁸⁾の方法に従った。

図1 土壤試料の作成に使用した機器と道具



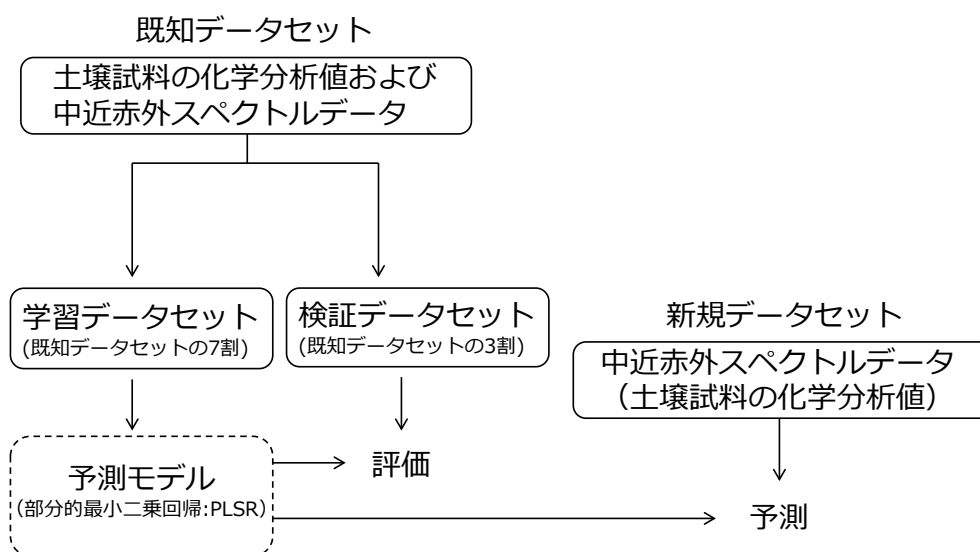
左：高速振動試料粉碎機（TI-100, CMT社製）、
右：拡散反射測定用の土壤試料充填道具

図2 中近赤外領域のスペクトルデータ測定に使用した機器



左：フーリエ変換赤外分光光度計（IR Spirit, 島津製作所）、
右：拡散反射測定装置（DRS-8000A, 島津製作所）

図3 土壌特性値予測モデルの作成および検証のフローチャート



(3) 石垣島サトウキビ圃場における簡易 土壌診断技術の検証

作成した土壌特性値予測モデルの適用可能性を探るため、化学分析値が未知の土壌試料を仮定した新規データセットとして、フィルターケーキやバガス灰、堆肥を圃場に還元（長期連用）しているサトウキビ農家圃場16点、それら圃場および近隣の化学肥料のみを施用しているサトウキビ圃場16点について、

中近赤外分光分析を実施し、各土壌特性値予測モデルの精度評価を行った。この土壌試料は昨年度寺島らにより実施された「サトウキビの持続的生産技術の開発に向けた製糖副産物・堆肥連用農家圃場における製糖副産物および堆肥施用が土壌に与える影響の評価」⁶⁾で使用した土壌試料と同一であり、本研究で使用している土壌分析項目の分析値がすでに得られている。土壌試料の分析値の内訳を表2に示した。

表2 検証に使用した石垣島島内のサトウキビ圃場の土壌特性値

分析項目		単位	最大値	最小値	平均値	サンプル数
水素イオン濃度	pH (H ₂ O)		8.2	3.7	5.9	32
電気伝導度	EC	mS cm ⁻¹	1.13	0.03	0.25	32
有機炭素量	OC	%	7.29	0.74	2.50	32
全窒素量	TN	%	0.39	0.05	0.14	32
陽イオン交換容量	CEC	cmol _c kg ⁻¹	25.44	3.42	11.45	32
交換性カリウム量	Ex-K	cmol _c kg ⁻¹	2.21	0.10	0.73	32
交換性マグネシウム量	Ex-Mg	cmol _c kg ⁻¹	4.67	0.19	1.25	32
交換性カルシウム量	Ex-Ca	cmol _c kg ⁻¹	45.58	0.41	10.29	32
有効態リン酸量	Ava-P	mg P ₂ O ₅ 100g ⁻¹	312.55	5.04	54.03	32
可給態窒素量	Ava-N	mg N 100g ⁻¹	26.67	2.60	6.80	32

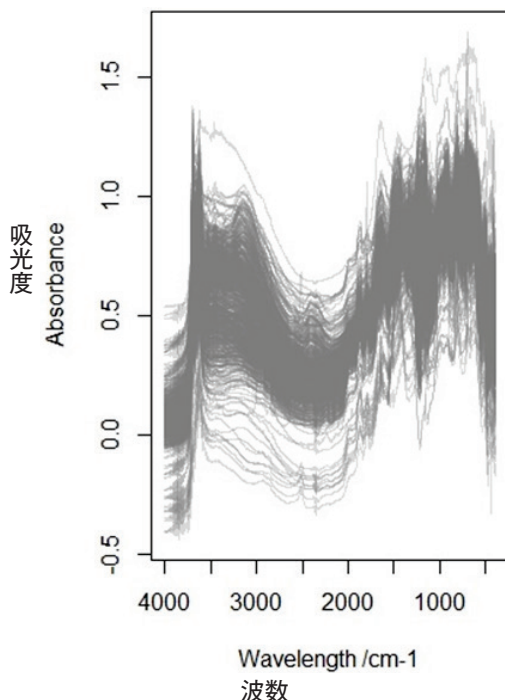
資料：筆者作成

3 結果

(1) 沖縄県内土壌の土壌特性値予測モデルの作成

土壌特性値予測モデルの作成に使用した土壌試料すべてのスペクトルデータを図4に示す。

図4 沖縄県内土壌の中近赤外領域のスペクトルデータ



資料：筆者作成

学習データセットを用いて線形の回帰分析手法の一つである部分的最小二乗回帰 (PLSR) より土壌特性値予測モデルを作成した際の交差検証による結果を表3に示した。

土壌特性値予測モデルの評価について、Sila et al. (2017)⁹⁾ は、 $R^2 < 0.7$ 、 $0.7 < R^2 < 0.9$ 、 $R^2 > 0.9$ の3段階で評価を行っており、この基準によると、本研究で作成した土壌特性値予測モデルは、pH (H₂O) ($R^2 = 0.81$ 、RPD = 2.30)、全窒素 ($R^2 = 0.86$ 、RPD = 2.65)、CEC ($R^2 = 0.79$ 、RPD = 2.16)、交換性カルシウム ($R^2 = 0.89$ 、RPD = 3.06) および有効態リン酸 ($R^2 = 0.74$ 、RPD = 1.97) で比較的高い予測精度が得られた。一方、EC ($R^2 = 0.42$ 、RPD = 1.31)、有機炭素 ($R^2 = 0.68$ 、RPD = 1.78)、交換性カリウム ($R^2 = 0.60$ 、RPD = 1.57)、交換性マグネシウム ($R^2 = 0.68$ 、RPD = 1.78)、可給態窒素 ($R^2 = 0.61$ 、RPD = 1.61) では予測精度が低くなった。

続いて、作成した土壌特性値予測モデルの検証データセットによる結果を表3および図5に示した。学習データによる交差検証の結果と同様に、pH (H₂O) ($R^2 = 0.79$ 、RPD = 2.15)、全窒素 ($R^2 = 0.74$ 、RPD = 1.95) および交換性カルシウム

表3 各土壌特性値の学習データおよび検証データによる評価

土壌特性値	学習データセット			検証データセット		
	RMSEcv	R ²	RPD	RMSEv	R ²	RPD
pH (H ₂ O)	0.53	0.81	2.30	0.60	0.79	2.15
EC	0.13	0.42	1.31	0.17	0.12	1.00
有機炭素	0.46	0.68	1.78	0.55	0.56	1.50
全窒素	0.02	0.86	2.65	0.02	0.74	1.95
CEC	2.15	0.79	2.16	2.67	0.64	1.65
交換性カリウム	0.38	0.60	1.57	0.50	0.27	1.05
交換性マグネシウム	0.97	0.68	1.78	1.09	0.55	1.47
交換性カルシウム	4.22	0.89	3.06	5.93	0.78	2.12
有効態リン酸	27.81	0.74	1.97	37.17	0.62	1.61
可給態窒素	0.73	0.61	1.61	1.66	0.16	0.69

資料：筆者作成

(R² = 0.78、RPD = 2.12) では、比較的高い予測精度が得られた一方、有機炭素 (R² = 0.56、RPD = 1.50)、CEC (R² = 0.64、RPD = 1.65)、交換性マグネシウム (R² = 0.55、RPD = 1.47)、有効態リン酸 (R² = 0.62、RPD = 1.61) では予測精度が低く、特に、EC (R² = 0.12、RPD = 1.00)、交換性カリウム (R² = 0.27、RPD = 1.05) および可給態窒素 (R² = 0.16、RPD = 0.69) では低い予測精度であった。

Wijewardane et al. (2018)¹⁰⁾ は、米国内の約2万点の土壌試料を用いて中近赤外領域のスペクトルデータからPLSRにより土壌特性値予測モデルを作成した結果、有機炭素、無機炭素、全炭素、全窒素、粒径(粘土含量、シルト含量、砂含量)、CEC、全硫黄およびpHではR² > 0.7と、高い予測精度が得られた一方、交換性カリウム (R² = 0.29) および交換性リン (R² = 0.14) については予測精度が低いことを示した。一方、ケニア西部の約160点の土壌試料を用いてPLSRにより土壌特性値予測モデルを作成した結果では、pH、全炭素、全窒素、交換性カルシウムの他、交換性マグネシウムや交換性カリウムについても高い予測精度が得られている⁹⁾。土壌特性値予測モデルは地域によって異なることが

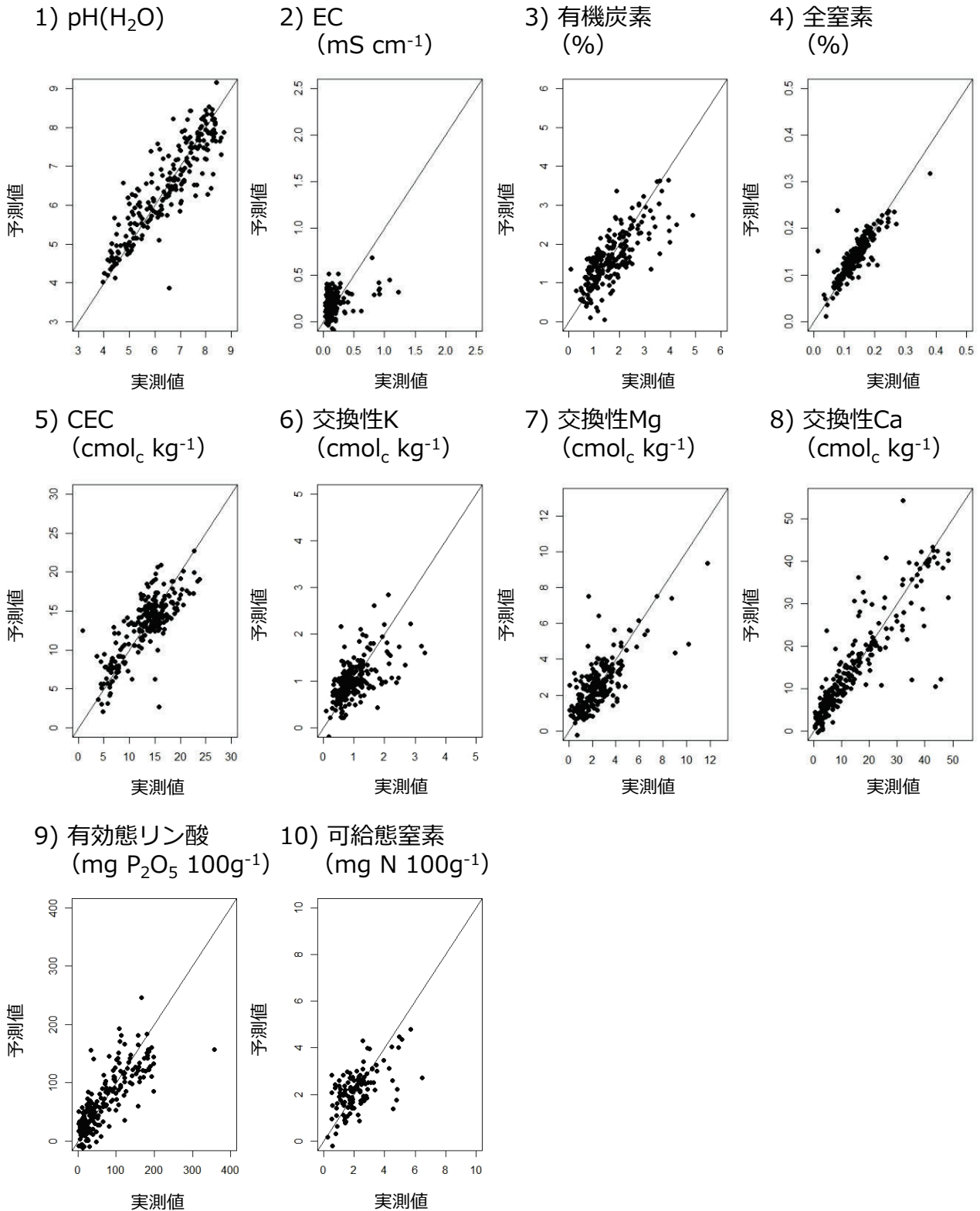
知られている。

沖縄県では、県内に分布している土壌が主に国頭マージ、島尻マージ、ジャーガルの3種と土壌の種類は少ないが、性質が大きく異なる土壌が混在している特徴がある¹¹⁾。このように性質の大きく異なる土壌が分布している地域では、分析値の幅も広くなることから、より多くの土壌試料を用いる必要がある。同時に、Wijewardane et al. (2018)¹⁰⁾ では約2万点、サブサハラアフリカの水田土壌で実施したJohnson et al. (2019)¹²⁾ では2845点と、より精度の高い土壌特性値予測モデルを作成するためにも多くの土壌試料を用いる必要がある。土壌特性値予測モデルの作成に用いる土壌試料の点数は予測精度に影響を及ぼす一つの要因であることから、より多くの土壌試料を用いて土壌特性値予測モデルを作成することで、予測精度の向上につながれると考えられる。

(2) 石垣島内の圃場管理の異なる土壌の評価

上記で作成した土壌特性値予測モデルを用いて、石垣島内のサトウキビ圃場から採取した土壌試料の各土壌特性値の予測を行った結果を図6に示した。

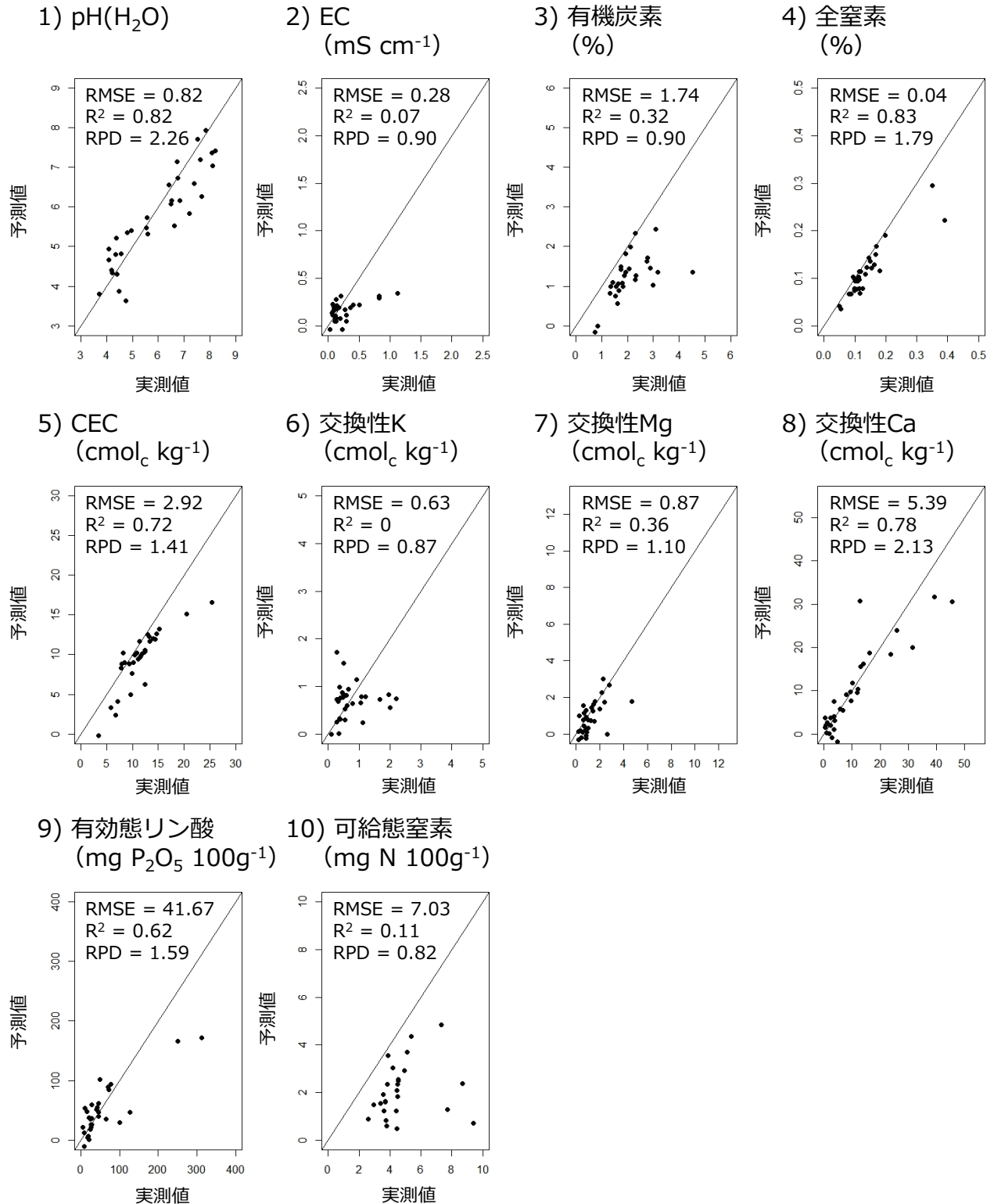
図5 各土壌特性値の化学分析結果と検証データによる予測値の関係



資料：筆者作成

注：実測値は化学分析の結果、予測値はモデルからの結果であり、図中の斜め線上に黒丸がある場合、実測値と予測値が一致していることを示し、斜め線から離れるほど両方の値が一致していないことを示す。

図6 新規データセットによる各土壌特性値の予測値と実測値の関係



資料：筆者作成

注：実測値は化学分析の結果、予測値はモデルからの結果であり、図中の斜め線上に黒丸がある場合、実測値と予測値が一致していることを示し、斜め線から離れるほど両方の値が一致していないことを示す。

土壌特性値予測モデルによる予測値と比較すると、pH (H₂O)、全窒素、CEC、交換性カルシウムについては、予測値と実測値で高い相関を示した。一方、有効態リン酸についても中程度の予測精度が示されたが、EC、有機炭素、交換性カリウムおよびマグネシウム、可給態窒素では予測精度が低くなった。この結果から明らかであるように、土壌特性値予測モデルの作成の際に予測精度の低かった分析項目に関して、新規データセットにおいても予測精度が低くなったことから、今後土壌特性値予測モデルの予測精度を上げる必要がある。

予測精度を上げる試みとして、Wijewardane et al. (2018)¹⁰⁾では、PLSRとANN (Artificial neural network: 人工ニューラルネットワーク) を用いて解析手法の比較を行った結果、ANNでより精度の高い予測精度が得られることを示した。また、解析に使用するスペクトルデータの波長領域についても検証されており、Johnson et al. (2019)¹²⁾は、解析に用いるスペクトルデータを近赤外領域 (7498cm⁻¹-4000cm⁻¹)、中近赤外領域 (4000cm⁻¹-600cm⁻¹)、近赤外～中近赤外領域 (7498cm⁻¹-600cm⁻¹) と異なる領域のスペクトルデータを用いて比較した結果、近赤外～中近赤外領域すべてを用いた場合で最も予測精度が高いことを示した。その他、Sila et al. (2017)⁹⁾は、PLSRを用いたスペクトルデータからの解析に加え、土壌採取地点の空間情報を加味することで、PLSRのみでの結果よりも予測精度が向上することを示した。本研究においても、今後、解析手法やスペクトルデータの領域について検証することで予測精度を上げることが可能であると考えられる。

4 まとめ

本研究では、サトウキビ栽培圃場の持続的な生産基盤の構築のため必要不可欠な土壌診断に関して、

これまで多くの時間と労力が必要であった土壌の化学分析に代わる迅速かつ簡易な土壌の赤外分光法への代替可能性について検証を行った。沖縄県内各所から収集した土壌の中近赤外領域のスペクトルデータと化学分析値を用いて、各土壌特性値予測モデルを作成した結果、pH (H₂O)、全窒素および交換性カルシウムについて、比較的予測精度の高いモデルが作成できた。一方、EC、交換性カリウムおよび可給態窒素については予測精度が低い結果であり、新たな土壌試料を用いて推定した際も予測精度が低い結果であった。

本研究で用いた赤外分光法と機械学習による土壌特性値予測モデルの作成は、近年、FAO (国際連合食糧農業機関) 主導で進められている食料安全保障と気候変動緩和・適応のためのグローバル・ソイル・パートナーシップ (Global Soil Partnership) において、地球の土壌資源を保障するための新たな国際協力の枠組みとして積極的に導入が図られている技術となっていることから、解析技術などについては今後ますます進展していくことが想定される¹³⁾。現場に適用するためには、解析手法などについて今後も検証を行う必要があるが、フーリエ変換赤外分光光度計 (FT-IR) による測定は広い場所を必要とせず、また、土壌試料の前処理も微粉碎のみで分光スペクトルを測定でき、それをもとに多項目について同時に推定が可能であることから、従来の化学分析よりも労力や時間を大幅に短縮することが可能である。同時に、この技術を用いることで土壌診断を同時期に広域展開することが可能であるとともに、時期ごとに土壌診断をするなど土壌試料の採取頻度を増やすことも可能である。そのため、土壌の状態をモニタリングすることが期待できるとともに、収量予測モデルなどと組み合わせることで、持続可能な土壌管理によるサトウキビの安定生産だけでなく、サトウキビの生育ステージに応じた適正な土壌特性値を設定し、農地管理の省力化へとつなげるこ

とができると考えられる。

謝辞

本課題で使用した土壌試料および化学分析値は沖縄県農業研究センターの比嘉基晶氏および宮丸直子氏、沖縄農業技術開発株式会社の吉田晃一氏のご協力により提供していただいた。また、石垣島内の土

壌試料の採取は石垣製糖株式会社の入嵩西敦氏にご協力いただいた。多量の土壌試料の採取・調整、化学分析には多くの時間と労力が必要であり、これら貴重な土壌試料と化学分析値を提供していただいたことで本研究課題が実施できました。ご協力していただいた皆さまに感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 矢内純太他 (2019) 「沖縄県のサトウキビ畑土壌における可給態ケイ酸の定量評価とその規定要因の解析」『日本土壌肥科学雑誌』90巻1号pp.13-21.
- 2) 大田守也他 (2000) 「沖縄県におけるサトウキビの栄養診断と土壌診断」『日本作物学会九州支部会報』66巻pp.56-59.
- 3) Yoshida et al. (2016) Low nitrogen availability and shallow plow layer decrease sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) productivity in Kitadaito Island, Japan. *Soil Science and Plant Nutrition*, 62: 504-510.
- 4) 宮丸直子他 (2013) 「粗砕石灰岩による低コストで持続性が高い酸性矯正技術」『日本土壌肥科学雑誌』84巻4号pp.302-306.
- 5) 平良英三 (2020) 「サトウキビ製糖業における近赤外分光法の応用」一般財団法人食品分析開発センター HP <<http://www.mac.or.jp/mail/200801/02.shtml>>
- 6) 寺島義文他 (2023) 「サトウキビの持続的生産技術の開発に向けた製糖副産物・堆肥連用農家圃場の土壌調査およびバガス炭化物の利用可能性の評価」『砂糖類・でん粉情報』2023年2月号pp.7-17.
- 7) Nocita et al. (2015) Soil spectroscopy: An alternative to wet chemistry for soil monitoring. *Advances in Agronomy*, 132: 139-159.
- 8) Wadoux et al. (2021) Soil spectral inference with R. Analysing digital soil spectra using the R programming environment. Switzerland, Springer.
- 9) Sila et al. (2017) Evaluating regression-kriging for mid-infrared spectroscopy prediction of soil properties in western Kenya. *Geoderma Regional*, 10: 39-47.
- 10) Wijewardane et al. (2018) Predicting physical and chemical properties of US soils with a mid-infrared reflectance spectral library. *Soil Science Society of American Journal*, 82: 722-731.
- 11) 儀間靖 (2016) 「沖縄県の農耕地土壌について」『ペドロジスト』60巻1号pp.71-75.
- 12) Johnson et al. (2019) Near-infrared, mid-infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for assessing soil fertility in rice fields in sub-Saharan Africa. *Geoderma*, 354: 113840.
- 13) Benedetti and van Egmond (2021) Global Soil Spectroscopy Assessment. Spectral soil data – Needs and capacities. Rome, FAO.