

リモートセンシング技術を用いた広域塩害土壌マッピング手法の開発

東京大学 生産技術研究所 沖一雄

1. はじめに

FAO (国際連合食糧農業機関) 2009 年世界食糧安全保障サミットの報告書によると、近い将来、爆発的な人口増加に伴い世界規模で食糧不足が発生すると警告されている。世界の食糧生産は 2005-2007 年の平均水準に比べ、2030 年には 40%以上、2050 年には 70%以上の増産が求められている。しかしながら、現在の農耕地はおよそ開発しつくされており、2050 年までにわずか 4%の増加しか見込めない。その一方で、FAO 「FAOSAT」(2004 年まで)によれば、穀物の収穫面積は 1980 年代以降減少傾向を示し、単位収穫量(単収)の伸び率も減少していることが報告されている。L.R.Brown, (2006)によると、世界の農耕地のおよそ 40%は深刻な土壌劣化の状態にあると言われ、現在の農耕地においても土壌劣化に伴う土地生産性の低下が報告されている。また、2007 年のアメリカ合衆国農務省の報告では、世界中で毎年 1000 万 ha の農耕地が灌漑による塩害が原因の土壌劣化で失われているとされている。

世界の農耕地での食糧生産性向上は食糧確保の面から緊急の問題である。特に海外の大規模穀倉地帯で生産されている食糧の輸入に依存している我が国にとっても、海外の大規模穀倉地帯における土壌劣化は、食糧確保と価格の安定のいずれの面からも看過できない問題である。

穀物の生産量は気象条件、土壌条件、作付・管理状況等によって支配される。気象は人間の手で管理することはできないが、土壌条件および作付や管理手法はコントロール可能である。本件は、リモートセンシング技術を用いた土壌特性の正確な把握を目指すものである。その成果として、劣化した土壌に適した品種を導入するといった作付や管理手法の導入が可能となり、土壌劣化が進む農耕地において収量の向上が期待される。

本件の対象地域は、乾燥地域である大規模農場地帯とする。現在多くの乾燥地域の農場において、土壌の劣化による耕作放棄地が年々増加している。その要因も複数存在し、主なものに塩害、乾燥、灌漑水害がある。特に塩害は不可逆的な現象であり、一度地表に塩類が集積してしまうと、除去は非常に困難である。近年、塩害化による土壌劣化をいかに未然に防ぐかが重要な課題となっている。軽度な塩害の場合でも、作物の単収が大きく低下すると言われている。耕作者の中には、このような塩害化の初期段階を把握できていないケースが多い。何故なら、管理する圃場が広すぎる事も一因だが、塩害はゆっくり進行するため変化に気付きにくく、土壌を一瞥しただけでは健全な土壌と初期段階の塩害化土壌の区別がつかないからである。土地所有者が土地の回復を図る際、あるいは土地の生産性を上げるため耐性作物の導入を行う際、これ

らの土壌劣化の抽出と、そのタイプ分け、及び初期段階での塩害化の検知が求められている。

現在のマルチスペクトルによるリモートセンシング技術を利用して行われている塩害化の検知は地表に塩類が晶出して塩分により白く変色し始めた土地に限られる。これは電気伝導度（EC）では 2500mS/m 以上に相当し、土地所有者が求める初期段階（軽度）の塩害化の検知は難しいのが現状である。また、目視判読に頼るため、誤判読も多い。本研究では、研究代表者が既に拠点置き研究を進めている米国アリゾナ州のピーカンツリー農場を対象地として、高空間分解能（数 c m）で観測ができる UAV（無人飛行体）を利用したより軽度の土壌塩害化地域の検出を目指し、ユーザーニーズに応えられる技術の開発を行う。

2. 手法および取得データ

本研究では、アメリカ合衆国アリゾナ州ブーイおよびサンシモンにあるピーカンナッツ圃場(図 1)にて、UAV を用いて可視近赤外画像(以降、近赤外画像)と熱赤外画像の撮影を行った。その後、近赤外画像を用いて活性モニタリングと樹高モデリング、熱赤外画像を用いて地表面温度解析を行った。以下で、画像取得と各種解析手法および取得データについて述べる。

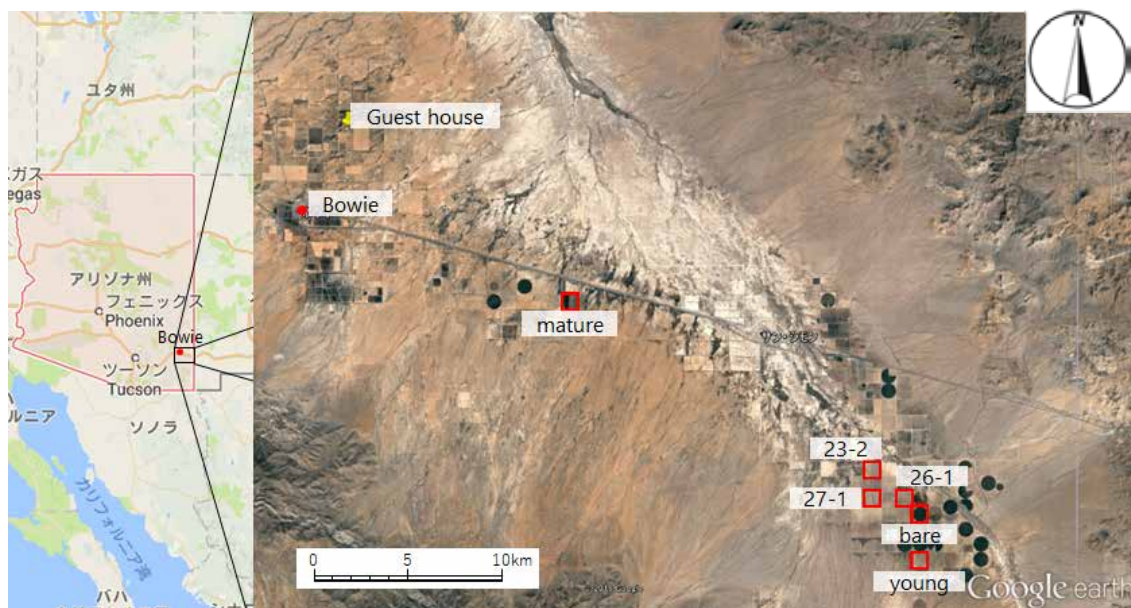


図 1 対象地点の位置関係

2-1. UAV による画像取得

観測は、ヘキサコプター型 UAV (MATRICE600, DJI 社製)に 2 台のデジタルカメラ(可視近赤外 : Yubaflex, BIZWORKS 社製、熱赤外 : Thermoshot, 日本アビオニクス社製)を搭載し、自動操縦で撮影を行った。それぞれのカメラの取得画像情報は表

1 のとおりである。

表 1 使用カメラ及び取得画像情報

	可視近赤外	熱赤外
使用機材	Yubaflex	Thermoshot
測定バンド	赤, 緑, 近赤外(0.85 μ m)	熱赤外(8~13 μ m)
画素数	4000pix×3000pix	160pix×120pix
視野角	水平 72.32°× 垂直 57.45°	水平 28°× 垂直 21°
保存形式	RAW 形式	温度情報付き JPEG 形式
解像度	約 4cm	約 40cm
ファイルサイズ	12.5~14MB/枚	60~80KB/枚

本研究では、飛行高度 120m で撮影を行ったため、近赤外・熱赤外それぞれ約 4cm、約 40cm の空間解像度で画像が得られた。撮影時の位置情報を取得するため、UAV には GPS ロガー(GPS Logger, Aaronia 社製)を搭載した。対象圃場の面積は 1 面あたりおよそ 64ha であり、UAV のバッテリーの制約から圃場 1 面を 3 回に分けて撮影した。圃場には、画像同士のマッチング精度を高めるため、対空標識を設置した(図 2)。

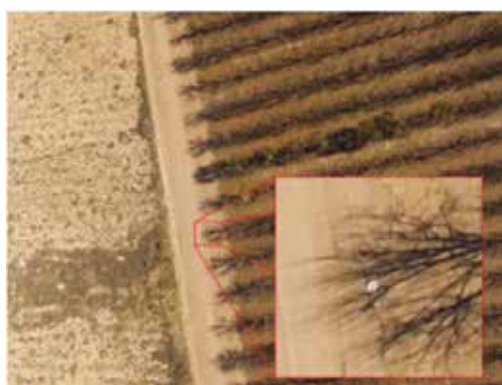


図 2 地上に設置した対空標識

また、初期の観測において UAV の離着陸の際に巻き上げられる砂埃が、撮影に使用しているカメラに不具合を生じさせた。その対策として、以降の観測は離着陸地点にビニルシートを敷いて行った(図 3)。



図3 UAV 飛行時の様子

2-2. 近赤外面像の解析

UAV で撮影した可視・近赤外面像から樹高と活性度の評価を行った。以下では、はじめに共通の手順を示した後、それぞれについて述べる。

① UAV で撮影した画像を波長帯ごとに標準白色板の値で標準化する。

近赤外面像は、専用のソフトウェアによりフォールスカラー画像(R, G, B にそれぞれ近赤外, 可視赤, 緑の波長帯が対応)として 32bit(浮動小数点)で表される輝度値を持って出力される。日ごとに異なる日射量を標準化するため、標準白色板の値を利用した。

② 時間情報を基に、GPS ロガーの位置情報を標準化した画像と関連付ける。

近赤外・熱赤外面像のどちらも位置情報を持っていないため、UAV に搭載した GPS ロガーから撮影時の位置情報(図4)を付加した。

③ 画像処理ソフトによる解析を行う。

画像処理ソフト Photoscan (Agisoft 社製)で画像と位置情報ファイルを読み込み、ポイントクラウド、メッシュ、3D モデル、DSM(Digital Surface Model)、オルソモザイク画像を作成した。



図4 UAV に搭載した GPS ロガーの情報

2-2-1. 樹高計測

上記手順③で作成した DSM を利用して樹高計測を行った。DSM は、解像度約 16cm/pix で、標高の値をもって出力される。観測回ごとに不規則な歪みが生じている

ため、GIS ソフト(ArcMap, ESRI 社製)を用いて歪みを除去し、地表面がおおよそ 0m となるよう補正した。

樹高計測の妥当性の検証および誤差補正を行うため、2017 年 6 月 19 日(幼木エリアのみ)、7 月 4 日、8 月 7 日、9 月 3 日に幼木エリア 23 本と成木エリア 16 本の樹高計測を行った。

2-2-2. 活性度評価

上記手順③で作成したオルソモザイク画像から各ピクセルの NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)を算出した。NDVI とは、植物が可視赤色光を吸収し近赤外光を反射する特性を利用した植生指標である。算出方法を以下に示す。

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

ここで、NIR、R はそれぞれ近赤外光、可視赤色光の反射率である。値は-1~1 をとり、土壌ではおおよそ 0、植物が密生すると 1 に近い値をとる。

果樹の間に生えるカバークロープも果樹同様の高い NDVI 値を示すことから、樹高モデリングの項で歪みを除去した DSM を利用し、カバークロープと果樹を分離するマスクを作成した。また、果樹を品種ごとに分けて評価を行うためのマスク作成も行った。

2-3. 熱赤外面像の解析

熱赤外面像を用いて、活性度評価および地表温度解析を行った。GPS ロガーの位置情報を画像に組み込み、出力する。現在、位置情報のずれにより、画像の重なっている部分が完全に一致しておらず、画像結合処理の自動化が済んでいない。そのため、GIS ソフト上でそれぞれの画像について位置を修正し、モザイク画像を作成した。

3. 解析結果および考察

上記の解析手法により得られた結果とその考察について、解析項目ごとに述べる。

3-1. 樹高計測

図 5 は、2017 年 8 月 5 日に幼木エリア、8 月 6 日に成木エリアで撮影した近赤外面像を基に作成した DSM と、8 月 7 日に行った樹高計測データとの関係を示している。

推定値は総じてグラウンドレベルからの値よりも低い値となった。この原因として、次第に細くなる果樹の最高点は 3D モデルとして検出されにくいことが考えられる。この関係から得られた回帰式を基に、樹高推定値の補正を行った。図 6、7、8 に幼木、成木、26-1 エリアにおける補正後の推定された樹高を示す。

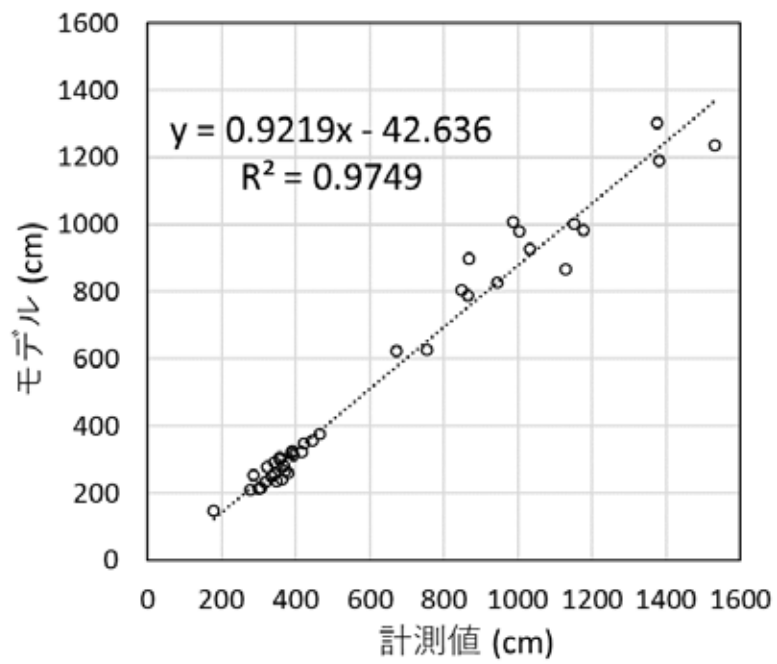


図5 樹高モデルと計測値の関係
(2017年8月上旬取得データ)

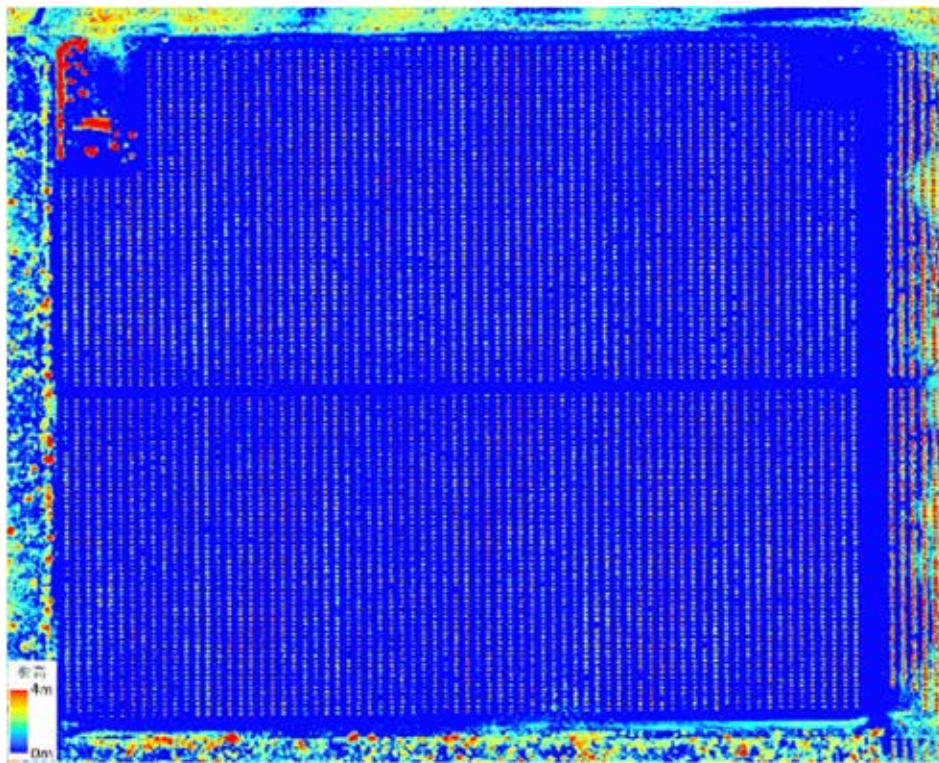


図6 推定された樹高 (幼木, 2017年8月5日)

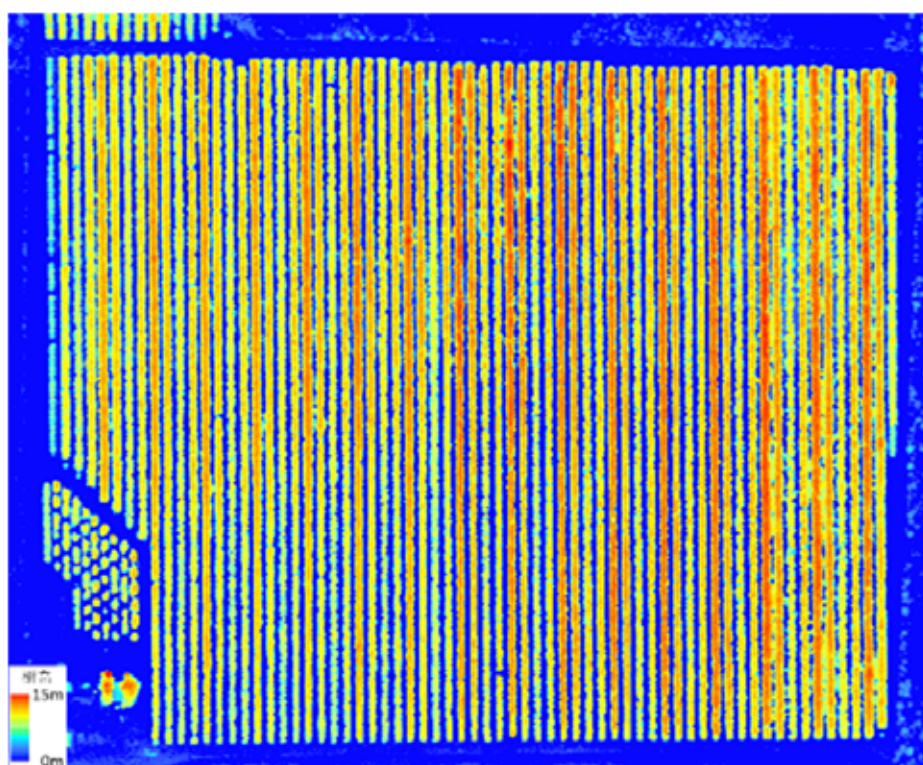


図7 推定された樹高 (成木, 2017年8月6日)

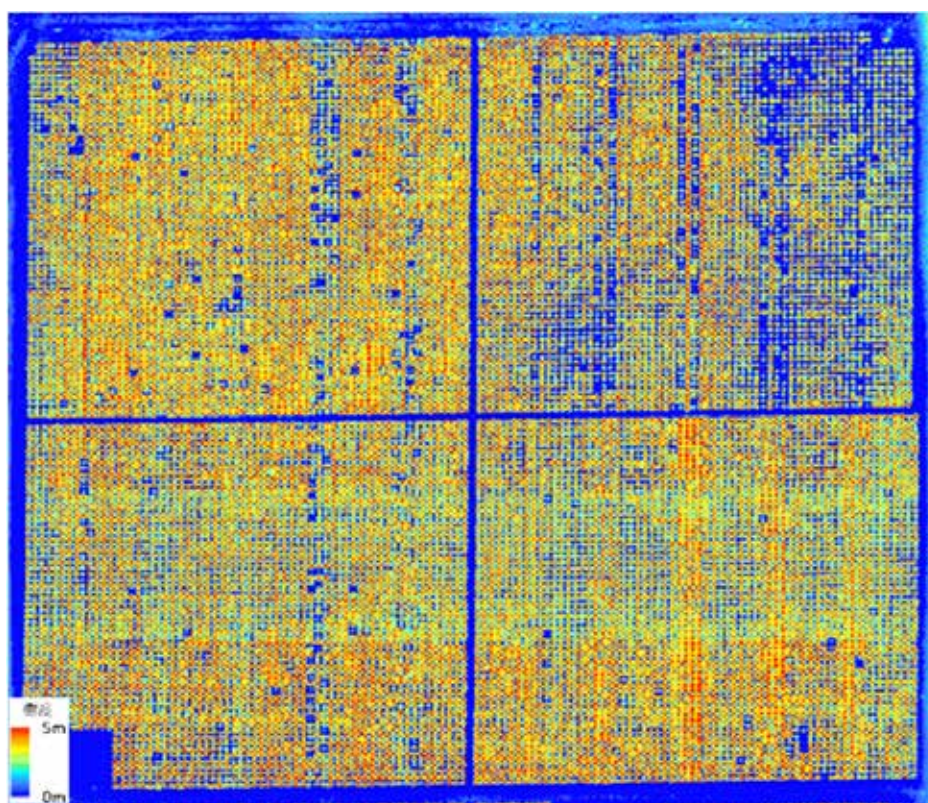


図8 推定された樹高 (26-1, 2017年7月25日)

UAVにより推定された樹高は、長期の継続的な観測で果樹の成長をモニタリングできることに加えて、活性度モニタリングの際に果樹と土壌およびカバークロップを分離して評価するためのマスク作成に利用することができる。図9に、26-1エリアの樹高モデルを利用して地上3m以上の高さに絞ったNDVIマップを示す。

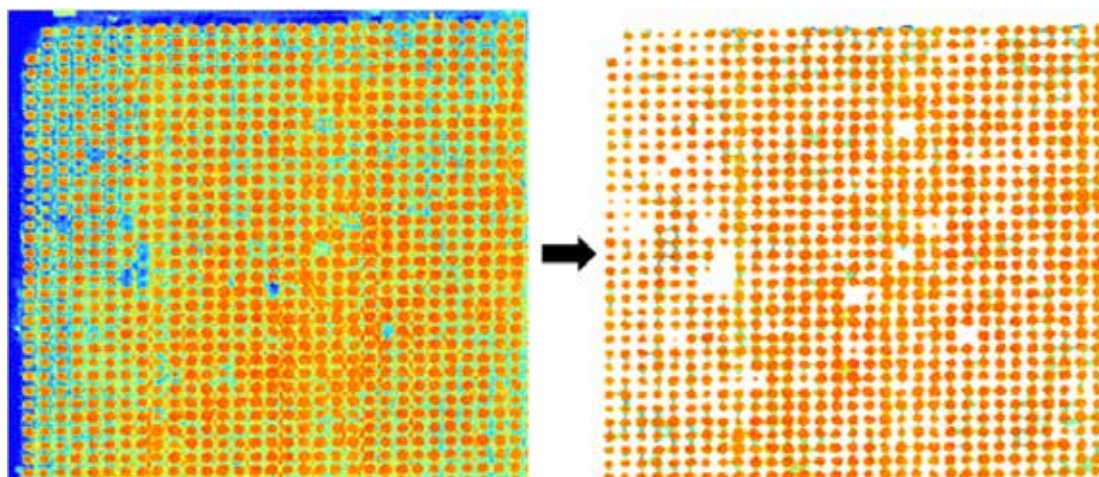


図9 樹高マスクにより果樹と地面を分離したNDVIマップ

3-2. 活性度評価

図10および図11は、2017年6月3日の幼木エリアにおけるNDVIマップと、その北西部を拡大したものである。-0.1から0.5の値が青から赤に配色されている。果樹は比較的高いNDVI値をとるため赤く表示されている。南北・東西方向に規則的に並んでいる赤い点が果樹を表し、それらに注目すると、東西方向に対し一定間隔で際立った列が存在することがわかる(図11)。このマップにおいて標準的な点が並ぶ列にはWichita、Waco、際立った点が並ぶ列にはWesternという異なる品種のピーカンが植えられていることがわかった。この結果から、同時期においても品種によってNDVIの値が異なることがわかる。したがって、活性度評価を行う際には品種ごとに分類して評価する必要がある。

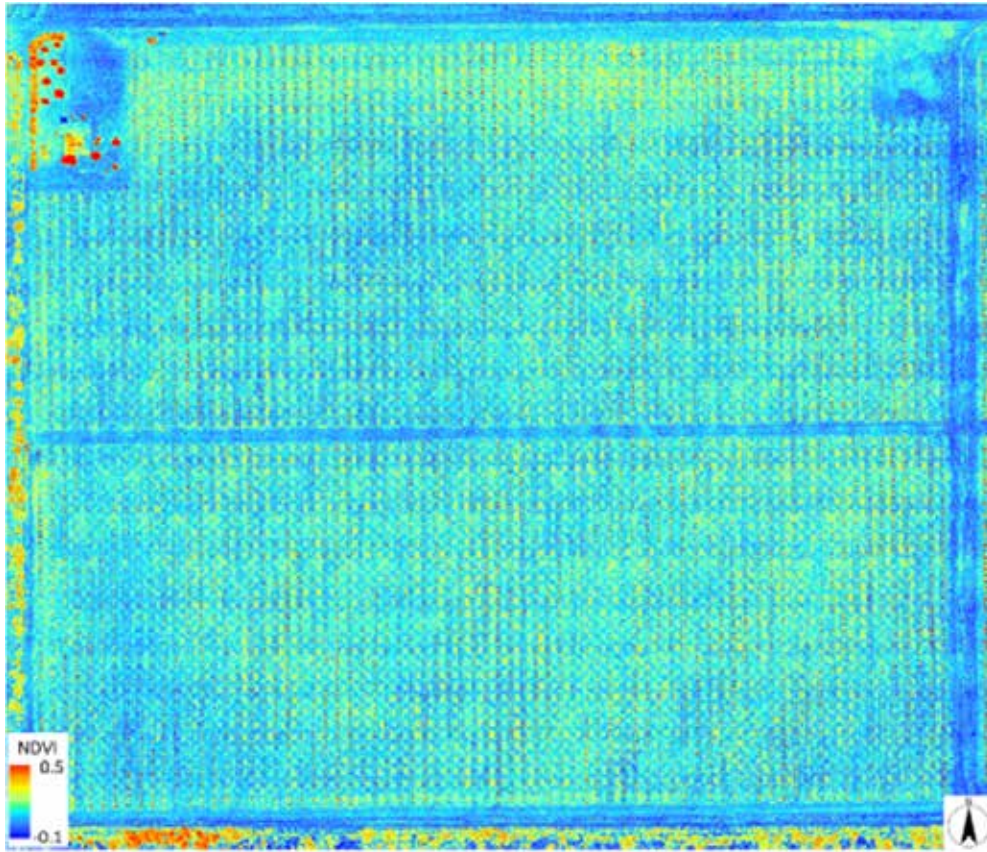


図 10 幼木エリア NDVI マップ (2017 月 6 月 3 日)

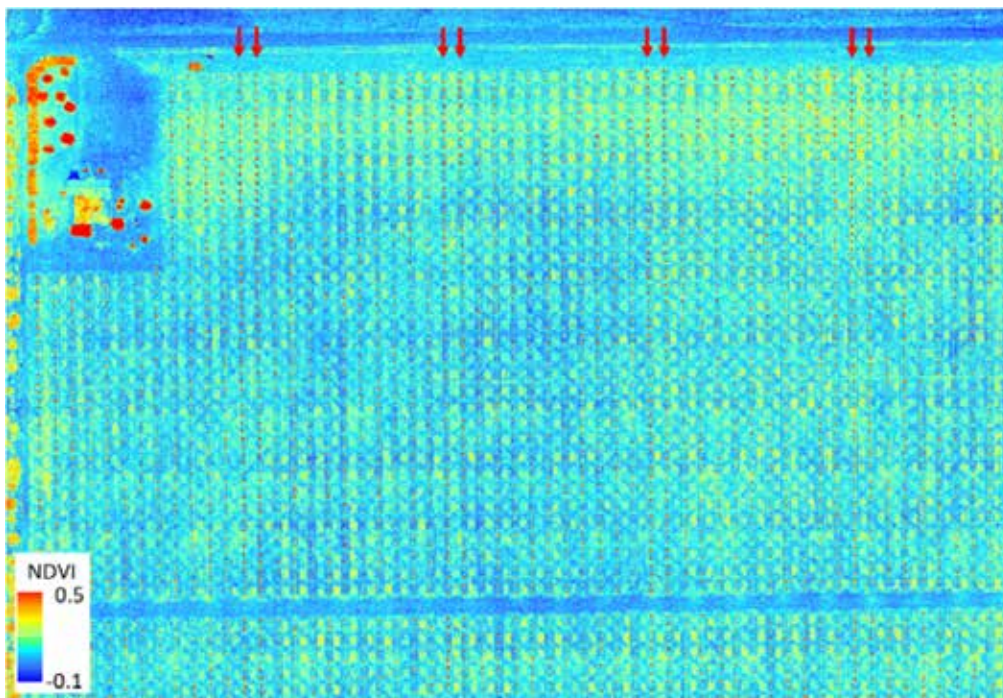


図 11 幼木エリア NDVI マップ 北西部拡大図 (2017 月 6 月 3 日)

3-3. 樹高計測と活性度モニタリングによる土壌塩害の影響抽出の可能性

図 12 は、2017 年 6 月 3 日の幼木エリアの NDVI マップ(左)と温度マップ(右)である。図から、圃場内に大きな円形が浮かび上がっていることがわかる。かつてこの圃場では、図 13 のようにアルファルファの栽培が行われていた。NDVI マップおよび温度マップに現れた円形と、かつてのアルファルファの位置が一致していることから、過去の栽培の影響が現在の圃場に及んでいることが推察される。表 2 より円形の内部は温度が高く、外部は温度が低い傾向が確認できる。この温度の違いは果樹の間の土壌を覆っているカバークロップの被覆状況によってもたらされていると考えられる。また、表 3 より円形の内部の樹高の成長は外部と比較して良くないことが分かる。

以上から、かつてアルファルファ栽培に使用されていた地点は、使用されていなかった地点と比べて植物が成長しにくい状況となっているといえる。農場の生産者はピーカンの樹木を植える前のアルファルファを育てることにより窒素固定ができ、ピーカンの成長が良くなると考えていたので、意外な結果となった。この原因として、アルファルファを育てるために塩分の濃度が含まれる水を地下からくみ上げ使用しているためだと考えている。残念ながら、まだ土壌の成分解析が終わっていないため結論付けることはできないが早急に解析し、本研究手法が土壌の塩害の影響に対して有効であるかどうか確認する必要がある。

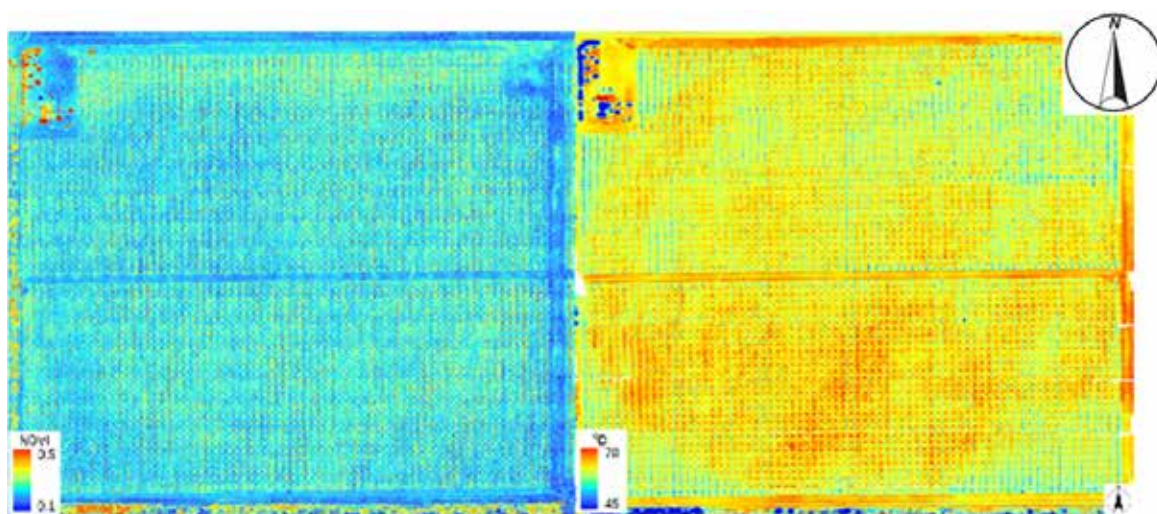


図 12 NDVI マップ(左)と地表面温度マップ(右) (幼木, 2017 年 6 月 3 日)



図 13 過去の幼木エリアの様子 (Google earth より引用, 2011 年 5 月 20 日撮影)

表 2 円形内外の NDVI 値と表面温度 (°C) (6 月 3 日観測)

	WACO		WESTERN		WICHITA	
	NDVI	Temp	NDVI	Temp	NDVI	Temp
ALL	0.453	53.5	0.456	51.9	0.441	53.1
IN_CIRCLE	0.453	53.8	0.456	52.2	0.441	53.5
OUT_CIRCLE	0.456	51.7	0.456	50.7	0.445	51.2

表 3 円形内外の 6 月 3 日と 8 月 1 8 日観測の樹高差 (m)

	WACO	WESTERN	WICHITA
ALL	0.529	0.233	0.369
IN_CIRCLE	0.522	0.230	0.364
OUT_CIRCLE	0.573	0.242	0.395

4. まとめ

本研究の成果を以下にまとめる。

- ① 大規模農場において UAV を使用した近赤外、熱赤外面像リモートセンシングの観測および処理手法のフレームワークの基礎を構築した。
- ② 3D モデルを利用した樹高計測の評価を実施した。
 - ・樹高計測データを用いてモデル推定値の補正を行った。
 - ・樹高モデルを基に果樹と地面とを分離するマスクを作成した。
- ③ NDVI 画像と熱赤外面像を利用した活性度評価を行った。
 - ・品種によって NDVI や温度の値が異なることを示した。
- ④ 樹高計測と活性度評価により土壌塩害の影響を抽出できる可能性を示した。
 - ・過去の栽培が現在の圃場に影響を及ぼしていることが示された。

- ・ 土壌の成分解析を至急実施する必要がある。

5. 謝辞

本研究は、公益財団法人 JFE21 世紀財団の研究助成により行われたものである。関係各位に深く感謝の意を表します。