

令和 5 年 5 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H03099

研究課題名(和文) 葉と土壌の空間的不均質性を導入した水分動態解析による精密灌水情報の提供

研究課題名(英文) Proposal of precision irrigation information by water dynamics analysis with spatial heterogeneity of leaf and soil

研究代表者

中村 公人(Nakamura, Kimihito)

京都大学・農学研究科・教授

研究者番号：30293921

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：ウンシュウミカンの灌水指標となる葉の水ポテンシャルは、レッドエッジ波長やRGB情報、葉の変位情報から推定可能であることがわかった。また、葉面温度と気温の差は、任意の日射量条件下では、土壌水分減少量と負の相関があることが明らかになった。すなわち、これらの遠隔情報から、葉と土壌の水分状態を推定でき、灌水のタイミングと必要灌水量の予測が可能であることが示唆された。さらに、植生・土壌の水分動態を扱うことができる陸面過程モデル(SiB4)に観測データを適用した結果、土壌水分量の再現性には課題が残ったが、葉面温度と気温の差の再現性は高かった。また、直接的な土壌水分多点計測システムを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ウンシュウミカンの高品質化のために、樹による必要な灌水の違いを考慮することを目的とした場合、それぞれの樹の必要灌水量を推定できる遠隔情報が葉面温度であること、灌水のタイミングの指標となる葉の水ポテンシャルを推定できる情報がレッドエッジ波長、RGB情報、葉の変位情報であることを示したことは、ミカンの品質向上のための精密水管理手法を実用化していく上で意義あることと考えられる。また、廉価な土壌水分センサーを用いた土壌水分量の直接的な多点観測システムの基本を構築したことは、水管理によって品質向上を目指す園地管理者に有用な選択肢を与えることができたと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Leaf water potential, which is an indicator of irrigation for mandarin oranges, can be estimated from red-edge wavelength, RGB information, and leaf displacement information. The difference between leaf surface temperature and air temperature was found to be negatively correlated with the amount of soil water depletion under given solar radiation conditions. These results suggest that it is possible to estimate the leaf and soil water conditions from these remote information, and to estimate the timing and required amount of irrigation water. Furthermore, when the observed data were applied to Simple Biosphere Model (SiB4) that calculates vegetation and soil moisture dynamics, the reproducibility of soil moisture content remained a problem, but the reproducibility of the difference between leaf surface temperature and air temperature was high. In addition, a direct multi-point soil moisture measurement system was constructed.

研究分野：灌漑排水学

キーワード：畑地灌漑 土壌水分動態解析 リモートセンシング 精密農業 ミカン

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

わが国の果樹の代表であるウンシュウミカンは適切な水管理によって高品質化を図ることができる作物である。ミカン農家が要望している「土壌特性の空間的不均質性を考慮した樹ごとのリアルタイムの灌水情報」を提供するための新しい解析手法を確立することを大きな目的とした。そのためのアイデアは、空間的不均質性を反映している「ある因子」を用いて土壌水分状態を逐次予測すること、かつ、マルチスペクトルカメラなどによる広域遠隔情報から得ることができるような因子を見出すことである。また、ミカンの灌水の指標になっている葉の生理情報で乾湿状態を表す葉の水ポテンシャル (leaf water potential: LWP) を同様の観測から得て、これらを総合した水分動態解析により、逐次的灌水情報の提供が可能ではないかと考えた。

2. 研究の目的

以下を研究の目的とした

葉の観測情報から LWP を推定する方法を見出す

灌水情報の基本となる土壌水分減少量を得るための葉の観測情報を特定する

土壌水分量の多点計測システムを構築する

土壌水分特性の空間分布を把握する

土壌・植物・大気系の水分移動解析によって灌水情報を導く

3. 研究の方法

(1) UAV から取得した葉の遠隔情報と葉の水ポテンシャルの関係

和歌山県有田市のウンシュウミカン圃場 (北緯 34 度 07 分, 東経 135 度 18 分) において, マルチスペクトルカメラ搭載の Phantom 4 multispectral (DJI 社製, 以下 P4M) とサーマルカメラ搭載の Mavic 2 enterprise dual (DJI 社製, 以下 M2ED) の 2 つのドローン (UAV) を用いて, 遠隔情報を得た。搭載されたカメラを UAV の鉛直下側に向けて撮影した。

月に 1~2 回の頻度で撮影を行ったが, 撮影日 2 日前から無降雨であった 2021 年 7 月~2022 年 12 月までの計 14 回の撮影を対象に解析を行った。撮影時刻は, およそ 10 時, 12 時, 14 時, 16 時と日没直後とした。

撮影対象範囲は, 定点観測を行っている樹 (No.00) を中心とした。複数の高度 (10~100 m) からの撮影を行ったが, 解析にあたっては LWP 測定を行った複数の樹が全て視野に収まる高度の写真 (P4M: 100 m, M2ED: 80 m) を用いた。撮影範囲は, P4M でおおよそ 75 m × 95 m, M2ED でおおよそ 60 m × 80 m である。なお, No.00 の樹では, LWP の定期計測に加えて, 5 分おきに葉面温度と気象要素 (気温, 相対湿度, 日射量, 風速) の観測を行っている。

P4M に搭載されたマルチスペクトルカメラは 6 台の CMOS センサーから構成される。すなわち, 1 台の可視光イメージング用 RGB センサーとマルチスペクトルイメージング用モノクロセンサー 5 台から成り, ブルー (B): 450 nm ± 16 nm, グリーン (G): 560 nm ± 16 nm, レッド (R): 650 nm ± 16 nm, レッドエッジ (RE): 730 nm ± 16 nm, 近赤外線 (NIR): 840 nm ± 26 nm の 5 つの波長について測定できる。これらの波長の画素値および各波長画像から正規化植生指標 (NDVI) などの複数の指標を得た。M2ED に搭載されたサーマルカメラは非冷却 VOx マイクロボロメータを用いたセンサーである。

また, 画像情報と照応させる LWP をプレッシャーチャンバー法 (PMS Model 600, Instrument 社製) により計測した。高品質化のための水管理を行う際の指標として日没前後の夕方の LWP が有効であるとの知見から, 日没直後の葉を採取して計測した。採取対象の樹は合計 11 本であるが, 調査期間中の枯死や作業時間の都合のため一部欠測がある。

(2) 樹体に近いカメラから取得した葉の色彩・形状情報と葉の水ポテンシャルの関係

大阪公立大学中百舌鳥キャンパス (堺市) 内圃場にて栽培されているウンシュウミカン樹 1 本を対象とした。2021 年 9 月と 12 月の計 7 日の 8, 10, 12, 14, 16, 17 時に, 対象樹の日陰部分から成熟葉を 3~4 枚を無作為に採取し, LWP を測定した。

RGB 撮影用 (RGB の 3 波長域) および近赤外マルチスペクトル (以下, NIR) 撮影用 (RGB, 740 nm, 850 nm, 940 nm の 6 波長域) のカメラモジュールをそれぞれ Raspberry Pi に装着させた機器を, 前者は樹冠の一部が, 後者は対象樹全体が画面に収まる距離で, 逆光を避けるためレンズが北向きになる位置に固定設置し, 所定時刻に撮影収録した。また, 基準用にアルミ板 (30 cm × 30 cm) を設置した。上記の全日時に撮影された画像から, 6 波長域それぞれの輝度値 (R, G, B, NIR740, NIR850, NIR940) を抽出し, それぞれの平均値を色彩情報として解析に用いた。

形状情報としては, 画像に写る葉の中から, 枝先にある成熟葉の 1 枚を観察ターゲットとして定め, 12 月に水ポテンシャルを測定した各日時における RGB 撮影画像からターゲット葉の葉先のピクセル位置を取得し, 日別に午前 8 時におけるピクセル位置からの縦 (鉛直) 方向のピクセル変位を求めて解析に用いた。

(3)葉面温度と土壌水分減少量の関係

和歌山県有田市のウンシュウミカン圃場において、定点観測樹を1本設定した。調査樹の樹冠下には、非透水性・透湿性の白色マルチ(タイベック,デュボン製)が地表面に敷設されている。この樹は、3.1節のNo.00と同一である。調査樹の樹冠下に2種類の誘電率型の体積含水率センサーTEROS-11(Meter社製,深さ5cm),GS-1(Meter社製,深さ25,35,50cm),CS616(Campbell社製,深さ5,15,25,35,50cm)を埋設した。また、土壌水ポテンシャルセンサーTEROS-21(Meter社製)をTDRと同じ深さに埋設した。調査樹に近接した高さ2.6mの位置にATMOS-41(Meter社製)を設置し、日射量,降水量,気温,相対湿度,風速を測定し、樹冠上2mの高さに葉面温度計(赤外線表面温度センサー)SI-431(Apogee社製)を設置した。葉面温度計は測定対象領域に対象樹の樹冠のみが入るように設置した。いずれのデータも測定間隔は5分とした。実蒸発散量を土壌水分減少量から、蒸発散位はペンマン式から推定した。

2021年7月~2022年12月にかけて、およそ月1~2回、調査樹の気孔コンダクタンスをSC-1 Leaf Porometer(Meter社製)を用いたポロメーター法により測定し、LWPをプレッシャーチャンパー法により計測した。測定は10時から日没直後まで約2時間ごとに行った。樹冠の赤道付近から採取した生育の良い成熟した葉5枚の平均値を測定値とした。

(4)多点土壌水分モニタリングシステムの構築

廉価な土壌水分センサーとして、キャパシタンス式のSEN0193(DF-ROBOT製,約1,000円)を用いた。また、比較するセンサーとして、誘電率型のTEROS-12(METER製,約43,000円)とWD5-WET-SDI(A.R.P製,約50,000円)を選択した。性能評価のために、対象圃場で採取した土壌を1Lビーカーに入れ、蒸留水で複数の所定の体積含水率に調整し、各センサーで3回の反復計測した平均値を出力値として、それぞれ較正式を作成した。別途、体積含水率を3.8%~48.5%の間で計14段階で調整した土壌の計測を行い、較正式を用いて土壌水分を推定し、3センサーによる精度比較を行った。

和歌山県有田市のウンシュウミカン圃場の6地点において、各地点ともマルチの敷設箇所と無敷設箇所において3深度(地表~10cm,20~30cm,40~50cm)にセンサーSEN0193を埋設し、土壌水分計測を行った。データの読み取り・記録はRaspberry Pi4を用いて10分間隔で行い、100V電源が確保できない地点においては、ソーラーパネル(45W)とバッテリー(50Ah)で電源を確保した。

(5)土壌水分特性の空間分布

和歌山県有田市のウンシュウミカン圃場の土壌水分特性の空間分布を把握するために、ミニディスクインフィルトロメータ(METER製)を用いた測定を行った。測定は2022年6~12月にかけて、計35地点で行った。測定地点は、各樹の樹冠下である。デフォルトの測定では、土性の情報を与えることによって、飽和透水係数が求められるが、浸入量の経時変化が再現されるように、HYRUS-2D/3Dを用いた円筒座標系の2次元水分移動解析によって、土壌水分特性パラメータ(飽和透水係数 K_s と以下のvan Genuchten式のパラメータ $\theta_r, \theta_s, \alpha, n$)を同定した。

また、ミカンの品質と土壌水分特性の関係性を検討するために、浸入試験を行った地点を含む計108本から、2022年11月12日にミカン1個ずつ採取し、糖酸度計PAL-BX|ACID1(アタゴ製)を用いて糖度と酸度を測定した。

(6)陸面過程モデルを用いた水分動態解析

SiB4(Simple Biosphere Model Version 4)(Haynes et al., 2020)を用いて、植生を考慮した熱収支・土壌水分動態解析を行った。本モデルには、根による吸収,気孔による蒸散の制御,蒸発,土壌中の水分移動などが組み込まれている。必要な入力情報は砂と粘土の体積割合,気象条件(気温,比湿,風速,気圧,日射量,降水量)であり,体積含水率,気孔コンダクタンス(気孔抵抗),葉面温度の経時変化を計算した。

4. 研究成果

(1)UAV から取得した葉の遠隔情報と葉の水ポテンシャルの関係

葉面温度

葉面温度は気温の影響を受けるため、葉面温度と気温の差(LT-AT)を指標として検討した。日没直後のLWPと関係があるLT-ATの時間帯として、14時と日没直後を検討したが、全ての樹と撮影日のデータから、LT-ATとLWPとの間に明確な相関は確認できなかった。

LT-ATとLWPの関係性をさらに検討するために、樹No.00において経時観測したLT-ATの5分間隔データの10日間移動平均

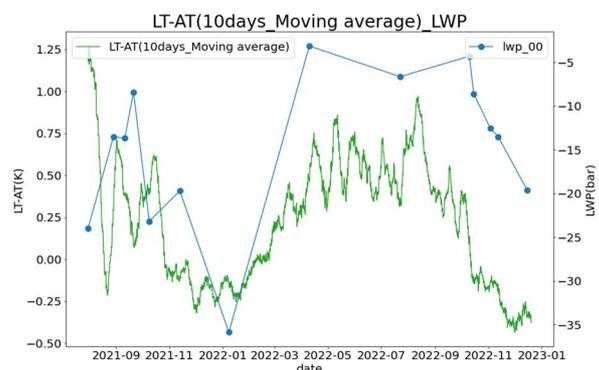


図1 樹No.00の10日移動平均のLT-ATとLWPの変化

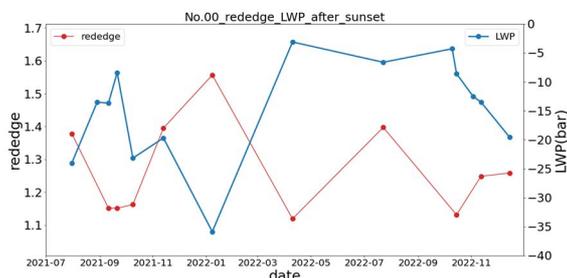
均と LWP の経時変化を図 1 に示す。10 日移動平均の LT-AT と LWP の変化は連動しており、LT-AT は LWP の季節的な変化を反映する可能性があることが示唆される。同様に、14 時あるいは日没直後の LT-AT は日ごとの変動が大きく、撮影時の値と LWP との関係の決定係数は 14 時で 0.00375、日没直後で 0.00491 と低かった。

以上より、遠隔情報により得られた LT-AT から LWP を直接的に推定することは困難であることが明らかになった。

マルチスペクトル情報

P4M の撮影画像から、様々な指標値と LWP との関係性を調べたが、どの指標値も高い決定係数を示すような関係性は得られなかった。

そこで、樹別および撮影日別に指標値と LWP の経時変化を詳細に検討した。図 2 に示すように、樹 No.00 での日没直後のレッドエッジ波長域において LWP に応答する傾向が見られた。レッドエッジの推移が LWP の推移と類似していることを示した既往例があることから、レッドエッジ波長域に着目した。日没直後のレッドエッジの値を樹別、撮影日別に分類して LWP との関係性を調べたところ、樹別のレッドエッジ波長域と LWP との関係性においては、決定係数が 0.665 と高い値になる樹が見られた。しかし、樹によっては決定係数が 0.001 となるなど、樹ごとのばらつきは大きい。また、特に 10~12 月にかけての収穫期を含む期間で決定係数が高いことがわかった。以上より、10~12 月において、同一日時による撮影であれば、画像内の異なる樹についてレッドエッジから LWP の差異を推定できる可能性がある。



(2) 樹体に近いカメラから取得した葉の色彩・形状情報と葉の水ポテンシャルの関係

各平均輝度値を説明変数、LWP を目的変数として単回帰分析を行った。月ごとの決定係数を図 3 に示す。両月で決定係数の値に大きな差が生じ、樹体の生理活性がより高いとされる夏季期間中の 9 月において、全体的に決定係数の値が大きく、R、G、B で 0.79 以上と高い関係性が得られた。ミカン果実品質への影響度の高い時期である 9 月において高い関係性が得られたことから、これらが客観的灌水指標としての利用可能性が示唆された。

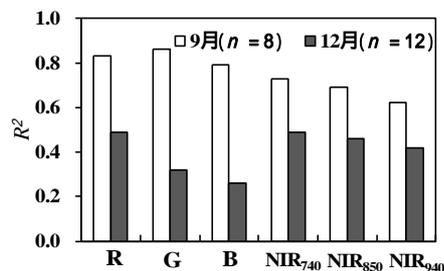


図 3 月別での各色彩指標と LWP の関係の決定係数 R^2

形状情報とした葉の変位と LWP の関係について、日付別および時刻別に分析を行った(表 1)。日付別では全データを用いたときと同程度であったが、時刻別では、とくに 17 時においては決定係数が 0.98 という非常に高い値が得られた。通常、樹体の水ストレス状態を診断する際、夜明け前あるいは日没後における LWP の測定値を代表値にしていることを踏まえると、こうした時間帯を対象にすれば、形状情報からも実用的な精度で、樹体の水ストレス評価を行える可能性がある。

表 1 日付別・時刻別での形状情報と LWP の決定係数 R^2

date	$R^2(n=6)$	time	$R^2(n=4)$
12月3日	0.26	10時	0.39
12月9日	0.56	12時	0.50
		14時	0.33
12月10日	0.69	16時	0.66
		17時	0.98

(3) 葉面温度と土壌水分減少量の関係

土壌水分ストレスがある場合、蒸散が抑制されることによって、葉面温度が上昇し、気温との差が大きくなることが予想される。葉面温度と気温の差(LT-AT)の特性を検討したところ、任意の日射量の際の日平均の LT-AT と土壌水分減少量に図 4 に示すような負の関係性が得られる場合があった。他の日射量においても、ばらつきはみられるものの、弱い関係性が確認できた。土壌水分減少量が葉面温度から推定できることが示唆される。

(4) 多点土壌水分モニタリングシステムの構築

センサー SEN0193 の RMSE は 3.3% と 3 種の中で最も誤差が小さく、特に高品質ミカンの栽培管理上、重要となる体積含水率 10~20% の範囲に限定すると、RMSE は 1.1% となった。よって現地の土壌を用いて較正を行えば、本センサーは実用可能と判断された。

本センサーを用いて多点計測を行ったところ、マルチの有無で比較すると、土壌水分量はマルチ有の方が少なくなっており、マルチによる効果が認められた。また、マルチ無では、降雨に対する土壌水分量の増加

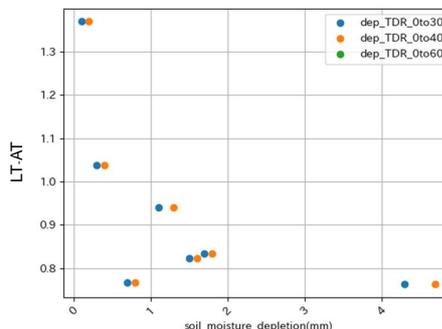


図 4 LT-AT と土壌水分減少量の関係 (日射量日平均 270~280 W/m^2)

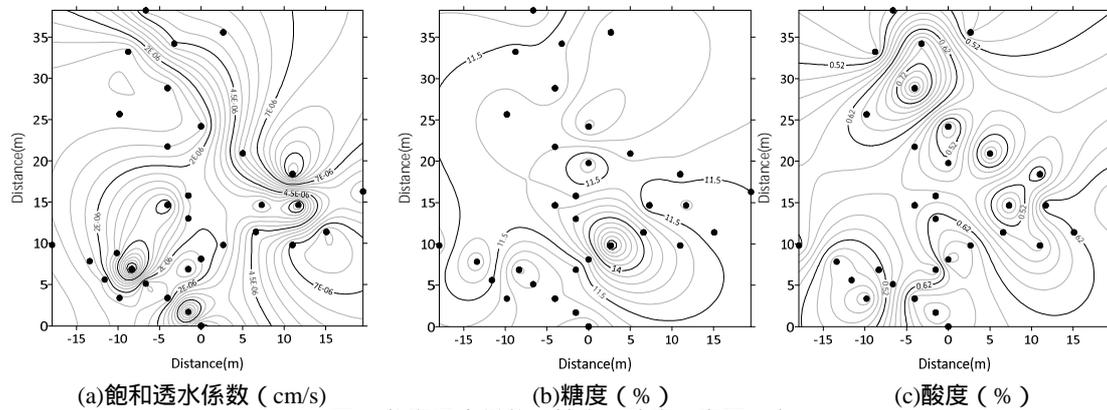


図5 飽和透水係数と糖度・酸度の空間分布

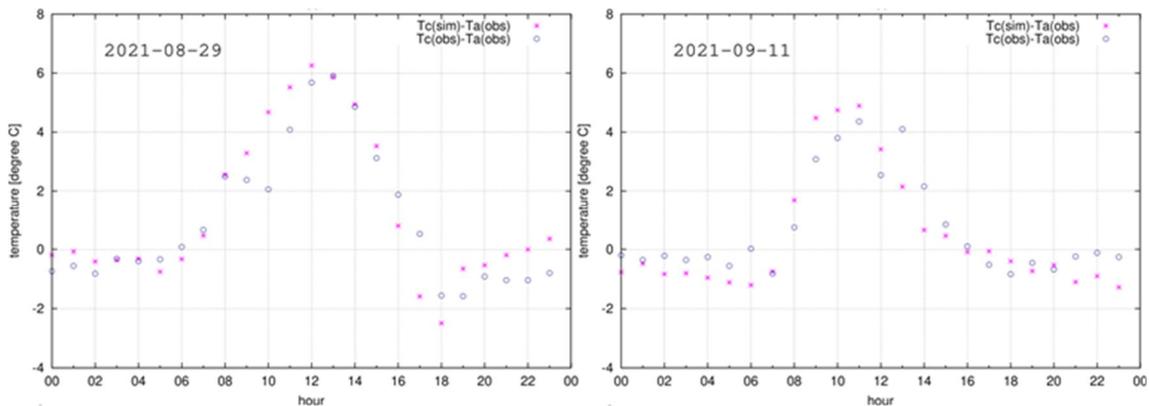


図6 葉面温度と気温の差の日変化の実測値と計算値の比較

が検出されたが、マルチ有では総雨量が比較的多かった場合（36.5 mm, 11.5mm）を除き、表層でもほとんど応答しなかった。各降雨に対し、マルチによってどの程度土壌浸透が抑えられるかの把握は困難であるため、こういった観点からも、より多点での直接的な土壌水分計測は灌水管理上望ましいといえる。

(5) 土壌水分特性の空間分布

同定された飽和透水係数と糖度・酸度の空間分布を図5に示す。浸入計による測定は、地表面での負圧を-0.5 cm、浸入時間を20分としており、得られる土壌水分特性は、ごく表層のものである。HYDRUSによって同定された飽和透水係数は、 $10^{-7} \sim 10^{-5}$ cm/sのオーダの範囲内が得られたが、デフォルトで求められる値はこれよりおよそ2オーダ程度大きく、違いがみられた。ただし、強い相関が確認できたため、相対的な透水性は表現できている。また、圃場は階段状になっているが（図の上側の標高が高い）、地形が透水性に影響していないことが確認できた。

糖度はおよそ10~14%、酸度は0.4~0.7%の範囲であった。糖度と酸度の空間分布と飽和透水係数の分布を比較すると、明確な関係性は得られなかった。糖酸度比も同様であった。全体的に均質な品質であることが、その要因であると考えられるが、土壌水分特性が直接的に品質に影響を与えるわけではないことが示され、灌水による管理が影響しているものと考えられる。

(6) 陸面過程モデルを用いた水分動態解析

土壌中の各深さでの体積含水率の経時変化の再現性は低かった。SiB4では、土層を10層に分割し、単純な水収支を基本に計算しており、高い空間解像度での詳細な水分移動解析が必要と考えられる。2021年8月29日、9月11日の葉面温度と気温の差の実測値と計算値の比較を図6に示す。ここに示した日に限らず、葉面温度の再現性は高かった。気孔コンダクタンスは、日変化の傾向は捉えられたが、絶対値については、実測値に比べて過小評価された。

植生・土壌の水分動態を解析するためのモデルの構築のためには課題が残ったが、蒸発散を考慮したモデルによって葉面温度が再現されることが示され、今後、本モデルで用いられている植生を考慮した熱・水分動態解析手法を援用し、精度が高い必要灌水量を提示する予定である。

(7) まとめ

葉面温度の空間的把握が土壌水分推定に繋ることが示された。直接的な土壌水分多点計測システム構築と並行して、水分動態解析の改善により高度な灌水情報提供にまで進展させたい。

< 引用文献 >

Haynes K, Baker I, Denning S (2020): The Simple Biosphere Model Version 4.2: SiB4 Technical Description, Colorado State University, Fort Collins, Colorado

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kader Mohammad Abdul, Nakamura Kimihito, Senge Masateru, Mojid Mohammad Abdul	4. 巻 ws2021095
2. 論文標題 Two-dimensional numerical simulations of soil-water and heat flow in a rainfed soybean field under plastic mulching	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Water Supply	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2166/ws.2021.095	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中桐貴生, 名嘉大助, 堀野治彦, 中村公人, 櫻井伸治
2. 発表標題 デジタル画像を用いたウンシュウミカンの水分ストレス評価に関する基礎的検討
3. 学会等名 2021年度（第70回）農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 畑田 舞, 中村公人, 濱 武英
2. 発表標題 ウンシュウミカン樹における葉面温度を用いた気孔コンダクタンスの推定
3. 学会等名 2022年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森宗照明, 堀野治彦, 中桐貴生, 櫻井伸治, 中村公人
2. 発表標題 ミカン葉画像の色彩および形状情報を用いた水ストレス評価手法の検討
3. 学会等名 第79回農業農村工学会京都支部研究発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中桐 貴生 (Nakagiri Takao) (80301430)	大阪公立大学・大学院農学研究科 ・准教授 (24405)	
研究分担者	辻本 久美子 (Tsujimoto Kumiko) (80557702)	岡山大学・環境生命科学学域・助教 (15301)	
研究分担者	濱 武英 (Hama Takehide) (30512008)	京都大学・農学研究科・准教授 (14301)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	カデル モハマド アブドゥル (Kader Mohammad Abdul)		
研究協力者	繁澤 良介 (Hanzawa Ryosuke)		
研究協力者	畑田 舞 (Hatada Mai)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	名嘉 大助 (Naka Daisuke)		
研究協力者	森宗 照明 (Morimune Teruaki)		
研究協力者	丸尾 直也 (Maruo Naoya)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関