

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 18 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K08002

研究課題名(和文) 週間降雨予報を用いた根圏土壌中の水分・窒素成分・地温の中期的予測システムの開発

研究課題名(英文) Simulation system for short-term changes of soil water, temperature, and nitrogen transfer in a root zone using a meteorological forecasting

研究代表者

坂井 勝 (Sakai, Masaru)

三重大学・生物資源学研究所・講師

研究者番号：70608934

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：気象データに基づく畑地の土壌水分量・地温予測のために、土中水分・熱・溶質移動予測プログラムHYDRUS-1Dと、土壌面と植被面の熱収支を考慮した2層モデルを連結したシミュレーションモデルの構築を行った。土壌乾燥に伴う蒸発速度と蒸散速度の低下と地表面熱収支の相互作用を考慮することで、より厳密な畑地の水・熱循環の予測が可能となった。特に、必要なパラメータである放射群落透過率について、地表面被覆率を用いることで、作物生長過程の土壌環境予測が可能であることを示した。また、農研機構メッシュ農業気象データで提供される気象予報値を用いた数値実験を行い、1週間程度の短期的な土壌環境予測について検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

畑地の土壌水分量・地温等の土壌環境の把握は、灌水・施肥計画等の栽培管理に重要である。特に、集中豪雨や無降雨期間の増加が懸念される近年では、気象データに基づき、土壌環境の予測が必要になる。構築したモデルと、農研機構が提供するメッシュ農業気象データを用いることで、短期的な土壌環境の予報が可能である。また、構築したモデルは、土壌物理学と農業気象学や栽培学等を学際的に結びつけるツールとしても期待される。

研究成果の概要(英文)：In order to predict soil moisture and temperature in vegetated fields, it is important to give soil surface evaporation rate and soil surface heat flux as surface boundary conditions, and transpiration rate as a sink term. The double source model, accounting for two energy balance of soil surface - atmosphere and plant - atmosphere, is a promising method to determine soil surface boundary conditions using meteorological data from a bare condition to a fully vegetated condition. In this study, we implemented the double source model into HYDRUS-1D and simulated soil moisture and heat transport including root water uptake. Meteorological forecasting data from the Agro-Meteorological Grid Square, NARO were used to predict short-term changes of soil water and temperature.

研究分野：土壌物理学

キーワード：蒸発散 土壌水分移動 地温変化 窒素移動 数値シミュレーション 地表面熱収支 気象予報値

1. 研究開始当初の背景

畑地における環境問題の一つとして、硝酸態窒素の下方浸透による地下水汚染が挙げられる。高濃度の硝酸態窒素を含む地下水の摂取は、乳幼児のメトヘモグロビン血症を引き起こす恐れがある。このため、国は1990年に環境基本法に基づく水質環境基準項目に硝酸態窒素及び亜硝酸態窒素の基準値10 mg/Lを設定している。堆肥等として畑に施用された有機態窒素(Org-N)は、従属栄養細菌の働きでアンモニア態窒素(NH₄-N)となり(無機化)、その後、硝化菌の働きで亜硝酸態窒素(NO₂-N)及び硝酸態窒素(NO₃-N)に形態変化(硝化)しながら、土壤中を水とともに移動する。特にアジアモンスーン地帯に位置する日本では、年間降水量が年間蒸発量よりもはるかに多いため、土壌から地下水へ多くの窒素成分の溶脱が起こり得る。このような地下水汚染を起こさず、低環境負荷型で持続可能な農業を行うためには、土壌中の水分移動、およびそれにともなう窒素の挙動を予測した上での営農活動が必要である。降雨や灌漑によって畑地に浸潤した水は、根圏土壌の水分増加、蒸発散、および根圏土壌下への下方浸透として消費される。そのため窒素成分の挙動を把握するためには、土の保水性と透水性にもとづくこれらの水収支の要素の定量的な把握と予測、土のNH₄-N吸着特性、NH₄-NからへのNO₃-N硝化反応速度の把握が少なくとも必要である。

特に大気への放出である蒸発散は、地表面からの水分蒸発と、植物根の吸水をともなう葉面からの蒸散で表される。気象条件をもとに可能蒸発散を推定する方法が一般的であるが、蒸発は地表面付近の水分を消費するのに対し、蒸散は根が存在するより深い位置から水分を消費するため、これらを分けて評価する研究が進められている。蒸散による根の吸水により窒素成分も吸収されることから、栽培圃場からの蒸散量の把握は重要である。栽培圃場からの蒸散量は、放射量や温湿度などの気象条件、土壌水分量による乾燥ストレス、植物の生長にともなう葉面積や地表面被覆率の増加、といった主に3つの要因で変化するため、気象条件・土壌条件・生育状態から総合的に評価する必要がある。

近年、農業経営のICT化が進み、栽培環境を測定した数値としての「見える化」に基づいた栽培方法の調整が行われている。色・大きさなどの生育状況や気象データについての整備が進んでいる。一方、土壌環境については土壌水分量や電気伝導度の点的な計測にとどまっており、一般的にはこの測定値に基づいて灌水量が決定される。一方で、窒素成分の根圏より下層への浸透は、前述のように土中水分移動や窒素成分の吸着特性や硝化反応速度などの土壌特性に影響を受ける。そのため、窒素成分の下方浸透を制限する低環境負荷型スマート農業の実現には、例えば天気予報など簡易的に利用可能な気象予測を用いて土壌水分移動・窒素成分移動をシミュレーションし、この後1週間といった中期的な土壌環境の予測が必要だと考える。

2. 研究の目的

作物を栽培する畑地においては、作物の生長にともない、土壌面は裸地条件から植生に被覆された条件へと変化する。そのため、気象条件から畑地の土壌水分量・地温の変化、またそれにともなう窒素成分の挙動を予測するためには、土壌面蒸発や植物根の吸水にともなう蒸散を考慮した地表面熱収支式の検討が必要である。本研究では、まず、土壌面と植被面における熱収支式を考慮した「熱収支2層モデル」と、土中水分・熱・溶質移動予測プログラムである「HYDRUS-1D」を連結したシミュレーションプログラムの開発を行った。そして、ダイズ栽培圃場において土壌環境データ・気象データ・植物生育データの現場観測を行い、構築したシミュレーションプログラムの検証、およびシミュレーションに必要なパラメータ群の検討を行った。さらに、農研機構メッシュ農業気象データから提供される気象予報値を用いたシミュレーションを行い、1週間程度の短期的な土壌環境の予測について検討を行った(図1)。

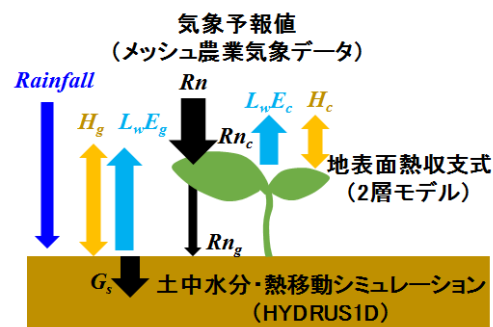


図1 畑地土中の水分・地温予測の概略図

3. 研究の方法

3.1 熱収支2層モデルと土中水分・熱・溶質移動予測プログラム HYDRUS-1D の連結

畑地の土中水分・地温変化を予測するためには、地表面境界条件である蒸発速度 E_g と地中熱フラックス G_s 、および蒸散速度 E_c の推定が重要である。2層モデルでは、植被層と土壌面における熱収支を計算する (Maruyama et al., 2017)。

$$Rn_c = H_c + L_w E_c, \quad Rn_g = H_g + L_w E_g + G_s$$

ここで、 Rn_g と Rn_c は土壌面と植被に対する純放射量、 H_g と H_c は土壌面 - 大気間と植被 - 大気間の顕熱フラックス、 E_g と E_c は土壌面蒸発速度と蒸散速度、 L_w は蒸発潜熱、 G_s は地中熱フラックスである。本研究では、HYDRUS-1D と連結することで、土壌乾燥にともなう E_g と E_c の低下を考慮したシミュレーションプログラムの開発を行った。

3.2 ダイズ栽培圃場における現場観測

三重大学附属農場のダイズ栽培圃場で2018年と2019年に現場観測を行った。土中データと

して土中水分量、土中水圧力、地温を各深さで自動計測した。また、重量ライシメータを設置し、蒸発散速度の測定を行った。さらに、各気象データおよび、ダイズの生育データ（草高、葉面積指数 LAI、地表面被覆率）の測定を行った。地表面被覆率は、地表面の空中写真を画像解析することで求めた。現場観測データに開発したシミュレーションプログラムを適用することで、プログラムの検証を行った。特に、土壌環境の計算結果に感度が高いパラメータである、日射を植被面と地表面に分配する放射の群落透過率 τ について検討した。植生下で降雨後比較的湿潤な 7/31 を対象に、放射の群落透過率 $\tau = 0.3, 0.5, 0.8$ を与えて地表面熱収支、蒸発散速度 E 、地温の感度解析を行った。また、植生の大きさが異なる無降雨期間 2018/7/10 ~ 16 (草高 40 cm, 被覆率 30%, LAI 1) と 7/31 ~ 8/6 (草高 50 cm, 被覆率 60%, LAI 3) を対象に、放射透過率 τ を被覆率から与えた数値計算を行った。

3.3 メッシュ農業気象データを用いた畑地の土壌水分量・地温の予測

農研機構メッシュ農業気象データから提供される気象観測値と予測値を用いて、土中水分・熱移動の数値実験を行い、数日 ~ 1 週間程度の土壌水分量と地温の予測精度について検討を行った。計算に必要な気象データとして、日平均・最高・最低気温、日平均相対湿度、日平均風速、全天日射量、下向き長波放射量、降水量の地点データをメッシュ農業気象データから取得した。気温、相対湿度、風速、日射量は正弦関数で計算した 1 時間毎の変動値を、長波放射量と降水量は 1 日を通して一定値を与えた。三重大学附属農場のダイズ栽培圃場を想定した 2019/7/29 ~ 8/14 の数値実験を行った。土壌の水分・熱特性は現場の層位に合わせて与え、植生条件は草高 40 cm, LAI 1.0, 被覆率 20% で一定とし、根の分布は 30 cm 深まで均一とした。まず、8/15 以降にメッシュ農業気象データから取得した 7/29 ~ 8/14 の気象観測値を用いて数値計算を行い、土壌水分量と地温変化の計算値を得た（以降、観測値）。次に、8/5 ~ 8/11 に取得した気象予測値を用い、7/29 ~ 8/14 の期間に対し数値計算を行い、観測値との比較を行った。また 8/11 ~ 13 の 5, 15, 25 cm 深の土壌水分量・地温に対して平均二乗誤差 (RMSE) の計算を行った。

4. 研究成果

4.1 放射の群落透過率 τ の検討

図 2 に、2018/7/31 において放射の群落透過率 τ を 0.3, 0.5, 0.8 としたときの蒸発散速度 E 、蒸散速度 E_c を示す。7/31 は土壌が湿潤であり、可能蒸発散速度で進行した。 τ の減少にともない日中の植被に対する純放射 R_{nc} が大きくなるため、 E_c は増加し、蒸発速度 E_g は減少した。一方、 R_n と E の違いはなく、日蒸発散量はいずれも 0.7 cm 程度となった。図 3 に、 τ と可能蒸発 E_p に占める可能蒸散 E_{gp} と可能蒸散 E_{cp} の割合の関係を示す。 τ と E_{gp}/E_p は、ほぼ一価関係を示し、 τ は可能蒸散と可能蒸散の割合を決めるパラメータであると言える。

図 4, 5 に、被覆率 30% で $\tau = 0.7$ とした 2018/7/10 ~ 16, 被覆率 60% で $\tau = 0.4$ とした 2018/7/31 ~ 8/6 の蒸発散速度 E と蒸散速度 E_c の計算値、土壌水分量の実測値と計算値を示す。7/10 ~ 16 では、土壌乾燥にともない蒸発速度 E_g は低下したが、 E_c の低下は見られず、可能蒸散速度を維持した（図 4 (a)）。可能蒸散で進行した 7/12 までの計算の水分量は実測を概ね再現したが、土壌乾燥が進行した 7/13 以降で実測値を過大評価した（図 4 (b)）。7/31 ~ 8/6 では、土壌乾燥にともない E_g , E_c は低下した（図 5 (a)）。図 4 と同様に、8/1 までの計算は水分量の実測を概ね再現したため、 τ を被覆率で与えることで生長に応じた可能蒸散・蒸散の割合を与えられる可能性が示された。また、計算の水分量は、土壌乾燥が進行した 8/3 以降、特に 15 cm 以深で実測を過大評価したため、 E_c を過小評価していると考えられる（図 5 (b)）。

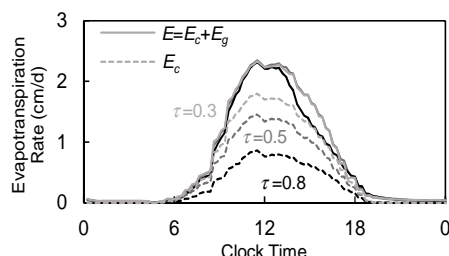


図 2 τ による蒸発散・蒸散速度の変化

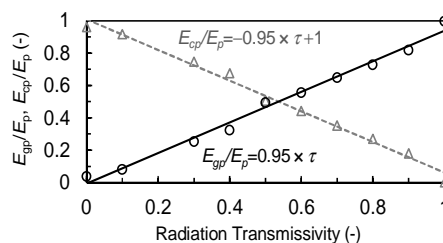


図 3 τ と可能蒸発・蒸散の割合の関係

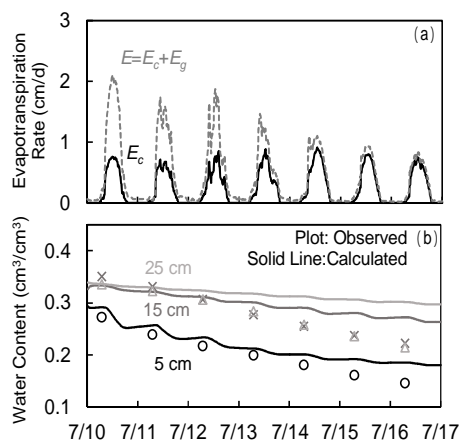


図 4 被覆率 30% 時の蒸発散速度 (a) と土中水分量 (b)

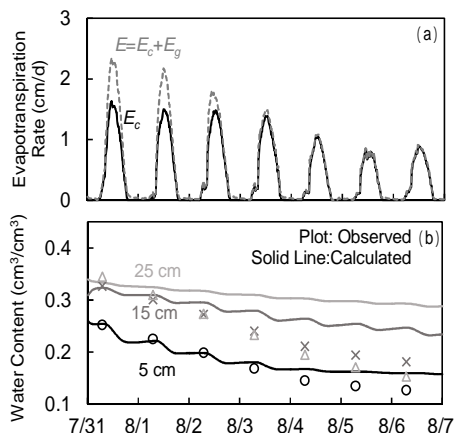


図 5 被覆率 60% 時の蒸発散速度 (a) と土中水分量 (b)

4.2 気象予報値を用いた土壌環境予測

図6にメッシュ農業気象データで得られた日降水量と全天日射量の観測値、及び2019/8/5と8/8に取得した予測値を示す。予測値は観測値に比べ、8/8~8/11で低い日射量を示した。また8/5取得データでは8/5~8/7に降水イベントが予測された。図7,8に8/5と8/8に取得した気象予測値を用いた計算結果を示す。8/5取得予測値では、8/5~8/7の降雨により土壌水分量の観測値を過大評価した。また、5cm深の地温について、低い日射と高い水分量の影響で、8/5~8/11で最大8°C程度過小評価したが、8/12以降は良く再現した。8/8取得予測値では8/8~8/11の土壌水分量変化をよく再現し、5cm深の地温についても8/14を除けば誤差は最大4°C程度であった。8/11~13に対するRMSE値を図9に示す。約1週間前(8/5)の予測値を用いると、作土層内の土壌水分量は $0.01\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 、地温は 2.3°C の誤差で予測可能であった。また、予測日と観測日の近さと誤差の大小に明確な相関は無く、日毎の気象予測値の影響が大きいと言える。今後は、多降雨期間や、土壌水分・地温の実測値に対する予測精度の検証が必要である。

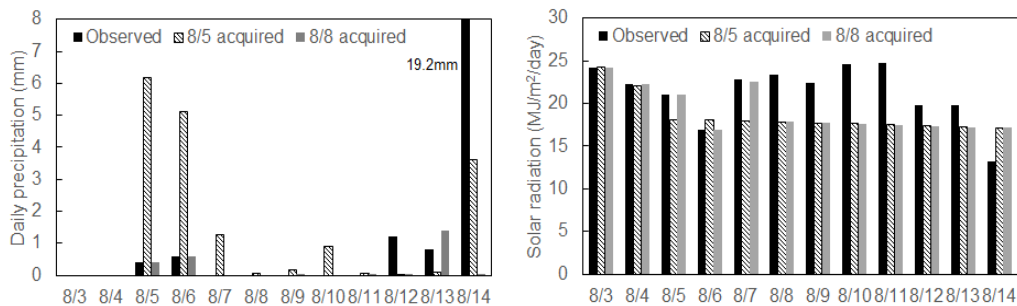


図6 日降水量と全天日射量の観測値と8/5及び8/8に取得した予測値

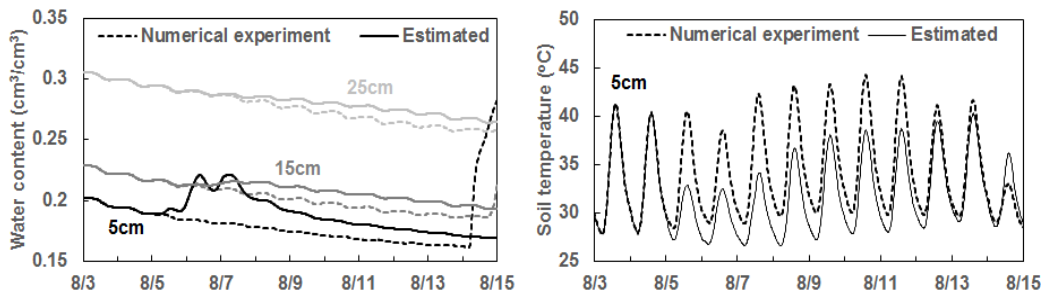


図7 8/5に取得した気象予測値を用いた土壌水分量と地温の計算値

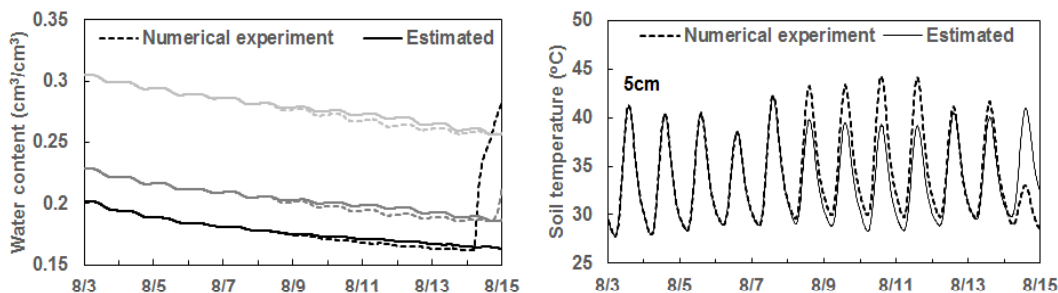


図8 8/8に取得した気象予測値を用いた土壌水分量と地温の計算値

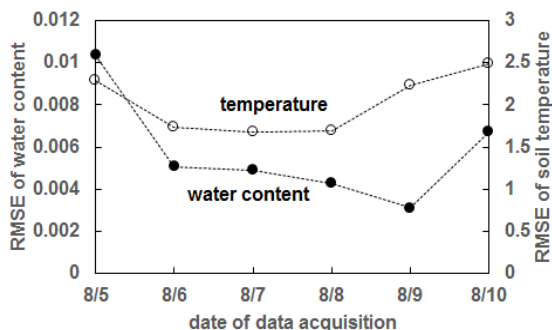


図9 8/11-13の土壌水分量・地温計算値の平均二乗誤差とデータ取得日の関係

5 まとめ

本研究では、気象データに基づく畑地の土壌水分量・地温予測のために、HYDRUS-1D と熱収支 2 層モデルを連結したシミュレーションモデルの構築を行った。土壌乾燥に伴う蒸発速度と蒸散速度の低下と地表面熱収支成分の相互作用を考慮することで、より厳密な土壌 - 植物 - 大気の水・熱移動予測が可能になると考える。また、農研機構メッシュ農業気象データから提供される気象予報値を用いることで、1 週間程度の短期的な土壌環境の予測を可能にした。今後は、様々な気象条件下において現場観測値と予測値を比較検討し、予測の有効性や問題点について整理する必要がある。また、当初目的であった窒素成分の移動予測については、本研究で構築した水分・熱移動モデルに溶質移動モデルを組み合わせることで可能となるが、今後の課題とした。

<引用文献>

Maruyama, A., Nemoto, M., Hamasaki, T., Ishida, S., & Kuwagata, T. (2017). A Water Temperature Simulation Model for Rice Paddies With Variable Water Depths. *Water Resources Research*, 53(12), 10065–10084. <https://doi.org/10.1002/2017WR021019>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kojima Yuki, Heitman Joshua L., Sakai Masaru, Kato Chihiro, Horton Robert	4. 巻 32
2. 論文標題 Bulk density effects on soil hydrologic and thermal characteristics: A numerical investigation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Hydrological Processes	6. 最初と最後の頁 2203 ~ 2216
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/hyp.13152	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 -

1. 著者名 坂井 勝	4. 巻 10
2. 論文標題 畑地の蒸発散の評価と予測	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 アグリバイオ	6. 最初と最後の頁 52-55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計21件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 高橋由奈・坂井勝
2. 発表標題 地表面熱収支に基づくダイズ栽培圃場の土中水分量・地温の予測
3. 学会等名 農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木萌香・坂井勝・取出伸夫
2. 発表標題 ライシメータで測定したダイズ栽培圃場の蒸発散速度を再現する水ストレス応答関数の推定
3. 学会等名 農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂井勝
2. 発表標題 畑地の蒸発散にともなう土壌水分・地温変化の予測
3. 学会等名 農業農村工学会大会土壌物理研究部会研究集会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂井勝・三口貴久代
2. 発表標題 メッシュ農業気象データを用いた畑地の土壌水分量・地温の予測
3. 学会等名 土壌物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋由奈・坂井勝・取出伸夫
2. 発表標題 土壌クラスト層の透水係数が畑地の蒸発に与える影響
3. 学会等名 土壌物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木萌香・坂井勝・取出伸夫
2. 発表標題 ライシメータを用いたダイズ栽培圃場における水ストレス応答関数の検証
3. 学会等名 土壌物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuna Takahashi & Masaru Sakai
2. 発表標題 Numerical Simulation of Soil Water and Heat Transport in a Soybean Field based on the Soil Surface Energy Balance using HYDRUS-1D
3. 学会等名 ASA-CSSA-SSSA International Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋由奈・坂井勝・取出伸夫
2. 発表標題 畑地の蒸発に地表面近傍の透水係数が与える影響
3. 学会等名 農業農村工学会京都支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木萌香・坂井勝・取出伸夫
2. 発表標題 ライシメータで測定した蒸発散速度に基づくダイズの水ストレス応答関数の推定
3. 学会等名 農業農村工学会京都支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂井勝・三口貴久代
2. 発表標題 メッシュ農業気象データを用いた畑地作土層内の土壌水分量・地温の予測
3. 学会等名 農業気象学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂井勝、大西一平、取出伸夫
2. 発表標題 ポット栽培実験における蒸散速度の日変化に基づく水ストレス応答関数の推定
3. 学会等名 農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋由奈、坂井勝、取出伸夫
2. 発表標題 デントコーン畑における蒸発散潜熱と地表面熱フラックスの変化
3. 学会等名 農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木萌香、坂井勝、取出伸夫
2. 発表標題 熱移動を考慮した蒸発法による乾燥領域の不飽和透水係数の推定
3. 学会等名 農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 坂井勝、高橋由奈、丸山篤志、取出伸夫
2. 発表標題 2層モデルを用いた畑地の土中水分・熱移動予測モデルの構築
3. 学会等名 土壤物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋由奈、坂井勝、丸山篤志、取出伸夫
2. 発表標題 2層モデルの放射透過率と気孔コンダクタンスが畑地の地表面熱収支に与える影響
3. 学会等名 土壤物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木萌香、坂井勝、取出伸夫、三石正一
2. 発表標題 スマートフィールドライシメータを用いたダイズ栽培圃場の蒸発散量の測定
3. 学会等名 土壤物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋由奈、坂井勝、取出伸夫
2. 発表標題 裸地土中の水分変化に基づく蒸発に対する地表面抵抗の推定
3. 学会等名 農業農村工学会京都支部会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木萌香、坂井勝、取出伸夫
2. 発表標題 蒸発法による砂質土の乾燥領域の不飽和透水係数の推定
3. 学会等名 農業農村工学会京都支部会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋由奈、坂井勝
2. 発表標題 HYDRUS-1Dと2層モデルを用いた畑地の土壌乾燥にともなう蒸発散速度変化の予測
3. 学会等名 農業気象学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大西一平、坂井 勝、取出伸夫、森 優奈
2. 発表標題 ポット栽培におけるダイズの蒸散速度から推定した水ストレス応答関数
3. 学会等名 農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大西一平、坂井 勝、取出伸夫、森 優奈
2. 発表標題 ポット栽培におけるダイズの蒸散速度を再現する水ストレス応答関数の推定
3. 学会等名 土壌物理学会
4. 発表年 2017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
---------	---------------------------	-----------------------	----