

令和元年6月18日現在

機関番号：11101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K18756

研究課題名(和文) 作物根の吸水特性を考慮した水田転換畑における土壌水分移動予測

研究課題名(英文) Predicting soil water movement at a converted upland field by considering characteristic of root water uptake

研究代表者

加藤 千尋 (Kato, Chihiro)

弘前大学・農学生命科学部・助教

研究者番号：60728616

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：圃場における土壌水分状態の把握と制御は、安定的な収量・品質の担保に重要である。一方、日本の転換畑に見られるような多湿な土壌環境における、圃場スケールの土中水移動予測モデルは十分には検討されてこなかった。本研究では、水田転換ダイズ畑を模して栽培試験を行い、土壌水分の時空間変動をモニタリングしたうえで、数値モデルの構築を試みた。実験に基づき、ダイズ栽培期間中の根量分布、蒸発散速度、LAIの変動を考慮することによって、土中水移動予測の精度が向上した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

農地における土中水移動現象の解明と作物生産現場への適用は、安定的な収量や品質の確保に重要である。本研究は、これまであまり検討されてこなかった、日本の水田転換畑に見られるような多湿な土壌環境下における、作物根の吸水速度の時空間分布を考慮した土中水移動モデルの構築に取り組んだものである。近年の気候変動や田畑輪換のような土地利用変化に伴い、その重要性・必要性は増すものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Though predicting and controlling field soil moisture are required to assure a stable yield and the high quality of products, proper numerical model for predicting soil moisture in croplands especially under high soil moisture conditions is still under discussion. Here we evaluated a numerical model for predicting soil moisture in converted soybean fields. A soybean-growing experiment with a converted field model was conducted and spatial and temporal variation of soil moisture was monitored. Then a numerical simulation of soil water movement for this growing experiment was conducted with the HYDRUS-1D model. The simulation results improved with the consideration of root distribution variation, changes in evapotranspiration rate and LAI values.

研究分野：地域環境工学

キーワード：水田転換畑 土壌水分 数値計算 ダイズ 根の吸水

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

土壌は作物生産の基盤である。土壌水分は作物の発芽・生育に影響を及ぼし、また、土中水移動は土壌中の養分の輸送を伴うため、農地における土中水移動予測は、効率的かつ持続的な作物栽培に有用である。また、土中水移動は土壌汚染問題とも密接に関わる。たとえば土中の Cd などの重金属は、酸化条件では主に水に溶けて土中を移動し植物根周辺に達すると考えられる。したがってコストや効果の観点から効率的な重金属汚染対策を実現するためには、圃場スケールで作物根の吸水現象を踏まえた土中の水および物質の動きを予測することが有用である。

他方、近年、田畑輪換によって毎年千 ha 程度の水田が新たに畑地として利用されている。転換畑は重粘性土壌、高地下水位などの条件によって排水不良である土地が多く、作物の収量や品質の確保には土壌水分状態の把握が重要である。特に水田転換畑の主要作物であるダイズは過湿害を生じやすく、例えば生育初期の過湿条件が生育収量を低減させることが知られている (Bajgain et al., 2015)。

作物畑の圃場における土中水移動予測は、作物根の吸水量 (蒸散量) を土壌水分に関する収支式に組み込むマクロスケールアプローチ (Simunek and Hopmans, 2009) が一般的である。このアプローチでは、可能蒸散量を基に土壌水分状態、塩ストレスなどによって吸水量を増減させる。また、鉛直方向の根の吸水量分布を関数を用いて再現する。しかし現状では、この関数をどのように決定するか確立しておらず、また、検証も十分ではない。さらに、根の形態は、地下水位の違いや圃場の排水性など土壌の乾燥、過湿の条件によって大きく異なる (Haque et al., 2014) が、日本の水田転換畑に見られるような、粘性土で湿潤環境下における検証は殆ど行われていない。

2. 研究の目的

以上を踏まえ本研究では、水田転換畑を対象に「土壌水分条件に応じて、生育ステージのいつ、どの土壌深さから吸水するか」を考慮した土中水移動予測モデルを構築することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、水田転換ダイズ畑を模した模型実験による、ダイズ栽培期間中の各深さの土壌水分モニタリングとダイズ根重分布の把握を行った上で、ダイズ栽培期間中の土中水移動を再現する数値モデルの構築を行った。

ダイズ畑模型実験

弘前大学 (青森県弘前市) 内のガラス室に幅 52.5cm×奥行 34cm×高さ 56.4cm のプラスチックコンテナを設置し、ダイズ「リュウホウ」を栽培した。まずコンテナ底面から深さ 10cm 分の礫を敷き、その上に深さ 40cm 分の土壌試料を充填した。供試土は、弘前大学農学生命科学部附属金木農場の水田土 (土性 Clay Loam; 以下「粘質土」とよぶ) において採取した土壌を用いた。粘質土の畑地が乾燥したときに生じる亀裂や土塊を再現するため、試料の採土後に直径 3cm 程度の土塊を作製し、これを用いて乾燥密度 0.89g cm^{-3} となるように充填した。表層 20cm 分に施肥し、十分量の散水を行った後にダイズ「リュウホウ」を播種した。栽培期間中は、AMeDAS 弘前地点の降水量データを基に、6 月は 5 日おきに 7.2mm、7 月は 4 日おきに 13.1mm、8 月は 3 日おきに 13.4mm、9 月は 3 日おきに 13.9mm の散水を行った。

栽培用コンテナに、給水用マリOTTタンク、越流制御装置、排水タンクおよびマンメーターを取り付け、地下水位を制御した。地下水位の条件は、(i) G10; 高地下水位・排水不良条件 (栽培期間を通して地表面から深さ 10cm)、(ii) G40; ダイズ栽培に適切とされる地下水位 (栽培期間を通して地表面から深さ 40cm)、(iii) G10-40; 梅雨に当たる生育初期の多湿条件 (出芽後約 1 か月半は深さ 10cm、その後深さ 40cm) の 3 条件とし、1 日 2 回以上、マンメーターによって地下水位を確認した。また、給水タンクから土壌への流入水量と排水量も 1 日 2 回計量した。水収支式を考慮すると、給水量 (散水量と流入水量) と排水量の差は、土壌水分増加量と蒸発散量の和であり、土壌水分消費量に相当すると考えられる。さらに、深さ 3, 5, 7, 15, 25, 35cm に土壌水分センサ (METER 社 EC5) を、また深さ 5, 15, 25cm に K 型熱電対を埋設し、栽培期間中、20 分ごとにデータを記録した。ダイズ子実が成熟し収穫期となったら、地上部を刈り取り、10cm 深さごとに株周囲の土壌を取り出し、根の周りの土を洗い流した。炉乾燥後、各深さの根重を計量した。

なお、栽培試験は 2016 年 6 月から 9 月に G10 と G40、2017 年 6 月から 9 月に G40 と G10-40 の条件で栽培を行った。また土性による違いを把握するため 2017 年に地下水位 G10 および G40 の 2 条件について供試試料を砂質土 (土性 Sand (遠藤ら 2018); 青森県つがる市屏風山地区の畑地上層から採土) とする栽培試験も行った。

数値計算

本研究では、数値計算に土中水移動汎用プログラム HYDRUS-1D を用いた。土中水移動の支配方程式は、植物の吸水を考慮した拡張型リチャーズ式である。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S(h)$$

$$S(h) = \gamma(h) S_p \quad (1)$$

$$S_p = b(z)T_0$$

ここで、 θ は体積含水率、 $K(h)$ は透水係数、 t は時間、 h は土中水圧力、 $S(h)$ は植物根の吸水速度、 $\gamma(h)$ はストレス応答関数、 S_p はポテンシャル吸水速度である。本研究では、ストレス応答関数に Feddes モデル (Feddes et al., 1974) を適用した。HYDRUS 内の Feddes モデルは Šimůnek and Hopmans (2009) に詳しい。Feddes パラメータは、HYDRUS のデータベースによって決定した。すなわち、作物の有効水分の最大値 $h_0 = -10\text{cmH}_2\text{O}$ 、吸水速度が最大になる土中水圧力の最大値 $h_{opt} = -25\text{cmH}_2\text{O}$ 、最小値 $h_{2H} = -750\text{cmH}_2\text{O}$ (可能蒸散速度 $T_p > T_{2H} = 0.5\text{cm d}^{-1}$ の条件下) 及び $h_{2L} = -2,000\text{cmH}_2\text{O}$ ($T_p < T_{2L} = 0.1\text{cm d}^{-1}$ の条件下)、永久しおれ点 $h_3 = -16,000\text{cmH}_2\text{O}$ とした。また、式 (1) 中の $b(z)$ は、正規化したポテンシャル吸水速度分布である。本研究では、 $b(z)$ を栽培試験の根重調査を基に決定した。

計算領域を鉛直方向に 60cm とし、下層 20cm をレキ、上層 40cm を土壌とした。さらに上層 40cm を 2 層に分け、地表面から深さ 10cm までを 1 層目、深さ 10cm から 40cm までを 2 層目とする 3 層構成とした。土壌の水移動特性関数について、レキ層は van Genuchten - Mualem モデルを仮定し、ニューラルネットワーク Rosetta Lite (Schaap et al., 1998) の "Sand" のパラメータセットを適用した。また、粘質土は土塊の多い構造を考慮して Durner-Mualem モデルを仮定した。Durner-Mualem モデルは次の式(2)、(3)で表される。また、 $w_2=0$ のとき、式(2)、(3)は van Genuchten-Mualem モデルとなる。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = w_1 (1 + |\alpha_1 h|^{n_1})^{-m_1} + w_2 (1 + |\alpha_2 h|^{n_2})^{-m_2} \quad (2)$$

$$K(S_e) = \frac{K_s (w_1 S_{e1} + w_2 S_{e2})^l \left(w_1 \alpha_1 \left[1 - \left(1 - S_{e1}^{m_1} \right) \right] + w_2 \alpha_2 \left[1 - \left(1 - S_{e2}^{m_2} \right) \right] \right)^2}{w_1 \alpha_1 + w_2 \alpha_2} \quad (3)$$

ここで、 θ_r は残留体積含水率 [$\text{L}^3 \text{L}^{-3}$]、 θ_s は飽和体積含水率 [$\text{L}^3 \text{L}^{-3}$]、 K_s は飽和透水係数 [L T^{-1}]、 S_e は有効飽和度 [-]、 α_i 、 l 、 $m_i (= 1 - 1/n_i)$ 、 $n_i [-]$ は経験的なパラメータ、 w_i は重みづけのパラメータである。各パラメータは、Kato and Nishimura (2017) と同様に、農業環境変動研究センターが公開する日本土壌インベントリーデジタル土壌図と土壌物理性データベース SolphyJ (江口ら, 2011) を用い、式(2)、(3)中の θ_s 、 θ_r 、 l 、 K_s 、 α_2 、 n_2 を決定した。土塊間の間隙 (マクロポア) の保水性を表わす α_1 と n_1 は Akay et al. (2008) を参考に、またマクロポアの寄与の重み係数 $w_2 (= 1 - w_1)$ は試行錯誤のうえ決定した。

計算の初期条件は、設定地下水位および地表面を $-100\text{cmH}_2\text{O}$ として線形補間した。境界条件は、地表面は散水量と可能蒸発散量、下端は地下水位一定条件とした。ここで可能蒸発散量 ET_p は FAO 基準蒸発散量に作物係数 K_{crop} を乗じて算出した。ダイズの各生育ステージにおける作物係数は農林水産省 (1997) を参考に播種・移植期、生長期、収穫期と 3 期間に分けて定め、各期間の時期は前述の「土壌水分消費速度」の実測結果に基づいて決定した。さらに、可能蒸発散量 ET_p を葉面積指数 LAI に基づき可能蒸発量 E_p と可能蒸散量 T_p に分離した (Simunek et al, 2013)。各生育ステージの LAI は Bajgain et al. (2015) および古畑ら (2011) を参考に決定した。

4. 研究成果

栽培試験

図 1 に、2016 年、2017 年の粘質土を用いた栽培試験における根重割合の分布を示す。2016 年の G10、G40 を比較すると、G10 においては全体の 97% が深さ 10 cm 以浅に分布していたのに対し、G40 では深さ 10cm までに分布していたのは 85% であった (図 1(a))。他方、2017 年の G40、G10-40 を比較すると、地表面から深さ 10cm までに分布していた根重割合はそれぞれ 60%、75% であった (図 1(b))。根重分布は生育初期の土壌水分状態の影響を受け、生育初期に多湿な土壌水分条件下で生育した場合、地表面近傍の根重割合が増加することが示唆された。

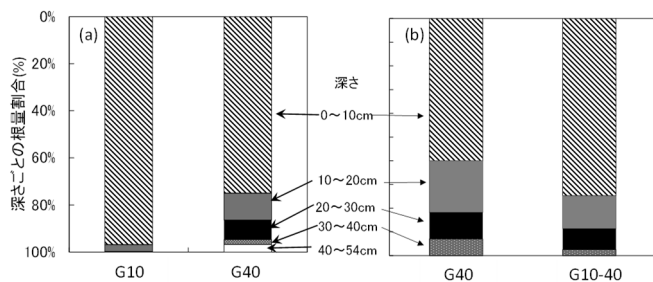


図 1 2016 年(a)、2017 年(b)の粘質土を用いた栽培試験における根重割合

栽培期間中の土壌水分変動について、図 2 に 2016 年の G10 および G40 の 3 深度の土壌水分変動の比較を示す。G40 では、開花日 (播種から約 50 日) を境に、どの深さにおいても土壌水分量の減少が確認された。他方 G10 においては、根が集中する深さ 5cm も開花日以降の大きな土壌水分減少はなかった。また、G10、G40 とともに収穫期に近づくにつれ深さ 5cm において土壌水分量の増加傾向が見られた。

図 3 に、粘質土および砂質土の G10-40 の条件下における深さ 3cm の土壌水分変動の比較を示す。粘質土では収穫期に明確な土壌水分増加が確認された。収穫期に根の吸水速度が低下し、低

透水性・高保水性の粘質土において土壌水分が増加したと考えられる。他方，高透水性の砂質土では，下方浸透や土壌面蒸発速度が比較的大きく，土壌水分量の増加はあまり生じなかったと考えられる。

以上の根重鉛直分布と栽培期間を通した土壌水分変動を参考に，粘質土の G40 および G10-40 の条件下における数値計算のため，それぞれの条件における式 (1) 中の吸水速度分布 $b(z)$ を決定した。まず，播種後 0~90 日は根重分布割合に基づき，図 4 (a) のように決定した。播種後 91~120 日の収穫期においては，土壌水分量が増加傾向を示しており (図 2, 3)，根重分布に関わらず上層の吸水速度が相対的に低かったと考えられる。そのため，上層から下層にかけて直線的に吸水速度が高くなる図 4 (b) の分布とした。

図 5 に，2017 年の粘質土の実験における給排水量差の経時変化 (5 日平均) について，G40 と G10-40 の比較を示す。これらの値は，ダイズの水分消費速度に相当する。栽培期間を通して，G40 は G10-40 と比較して値が高くなった。また，G40 では播種後 30 - 90 日目に他の期間と比べて一時的に値が大きくなった一方で，G10-40 では，値の増加のタイミングが遅く，60-90 日目に大きくなった。そしてこれを踏まえ，数値計算における作物係数 K_{crop} および LAI をそれぞれ表 1，図 6 のように決定した。

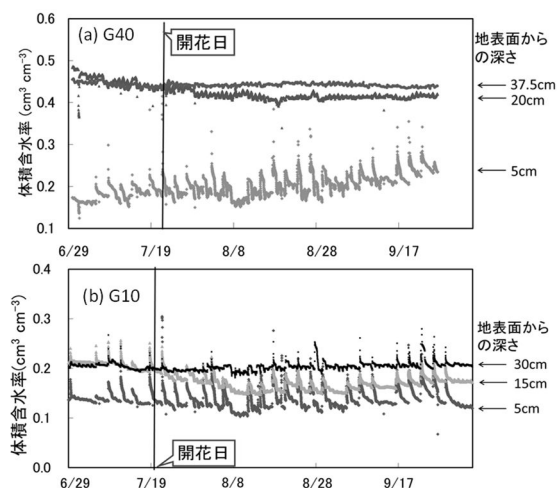


図 2 G10 および G40 の 3 深度の土壌水分変動の比較 (2016 年)

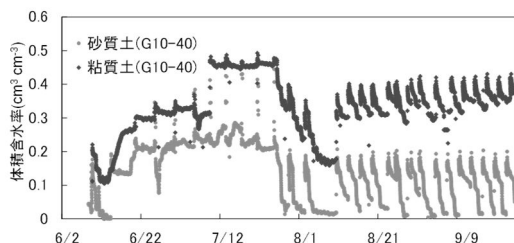


図 3 粘質土および砂質土の G10-40 の条件下における深さ 3cm の土壌水分変動 (2017 年)

数値計算

決定した粘質土の水分移動特性関数について，図 7 (a)，(b) にそれぞれ保水性 $\theta(h)$ ，透水性 $K(\theta)$ を示す。図 8 に 2017 年の G40，G10-40 における深さ 3cm および 25cm の土壌水分変動の実測値と計算値の比較を示す。なお，G10-40 の深さ 3cm の実測値は，図 3 のそれと同じである。なお，G10-40 の深さ 25cm の土壌水分量はセンサの不具合のため，播種から約 1 か月欠測となった。特に G40 では，数値モデルは散水に伴う土壌水分の増加とその後の乾燥の土壌水分変化を良く再現した。

図 9 は G40 の深さ 3cm の土壌水分量について，作物係数と LAI の変動を考慮しなかった場合 (Kato and Nishimura, 2017) の計算結果である。図 8 と比較すると，本研究で作物係数と LAI の変動を考慮することによって特に生育初期の 6 月と，土壌の乾燥が顕著な 8 月初旬の土壌水分変動を良く再現できた。他方，本シミュレーション

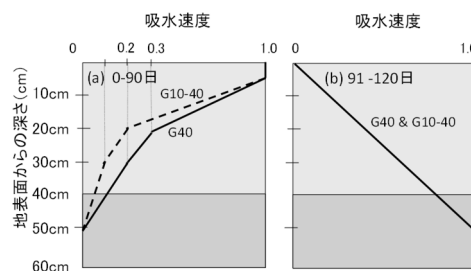


図 4 数値計算のための吸水速度分布 $b(z)$ の決定

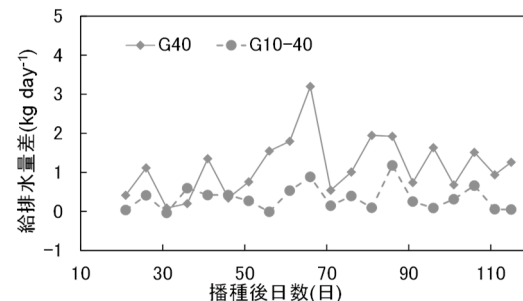


図 5 粘質土を用いた栽培試験の給排水量差の経時変化(2017 年)

表 1 作物係数 K_{crop} の決定

	作物係数 (農林水産省, 1997)	播種後日数	
		G40	G10
播種・移植期	0.7	0 - 30 th	0 - 60 th
生育期	1.1	31 st - 90 th	61 st - 90 th
成熟・収穫期	0.5	91 st - 120 th	91 st - 120 th

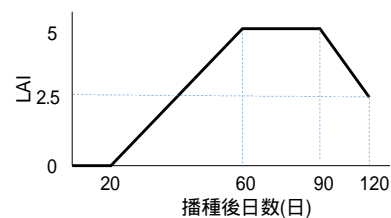


図 6 LAI の決定

では、播種後 91 ~ 120 日に上層の吸水速度分布と作物係数 K_{crop} が他の時期と比較して小さくなるように設定したが、G40, G10-40 どちらの場合もモデルはこの時期の土壤水分量の増加を再現しなかった。さらに G10-40 の条件下において、地下水位が深さ 10cm に保たれている間、モデルは深さ 25cm の土壤水分量を過大に見積もる傾向にあった。また、深さ 3cm では、計算値は、観測値と比較すると散水後の排水が急激に生じていた。これらの計算値と実測値の不一致は、飽和近傍から高土壤水分領域における水分移動特性の再現精度に起因すると考えられる。本研究では水分移動特性関数に Durner-Mualem モデルの適用し、土塊や土壤構造を考慮した、ダイズ栽培期間中の土中水移動を再現することができた。ただし、特に高土壤水分条件において数値計算の精度を高めるには、高水分領域における水移動特性関数パラメータのさらなる検討が必要である。

参考文献

- Akay et al. (2008), Vadose Zone J, 7 (3), 909-918.
 Bajgain et al. (2015), Field Crop Res, 180, 221-227.
 江口ら (2011), 平成 23 年度農業農村工学会大会講演要旨集, 302-303.
 Feddes et al. (1974), Water Resour Res, 10, 1199-1206.
 古畑ら (2011), 日作記, 80(1), 65-72.
 Haque et al. (2014), Am J Plant Sci, 5, 3022-3031.
 Kato and Nishimura (2017), Paddy Water Environ, 15, 159-169.
 農林水産省, 1997, 土地改良事業計画設計基準 計画「農業用水(畑)」
 Schaap et al. (1998), Soil Sci Soc Am J, 62, 847-855.
 Simunek and Hopmans, 2009, Ecolog Model, 4(24), 505-521

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- Kato, C., C. Sasaki, A. Endo, N. Matsuyama, T. Nishimura, Predicting soil water movement in converted soybean fields under high moisture condition, Paddy and Water Environment, 17(2), 55-61, DOI: 10.1007/s10333-019-00696-4, 査読有
 Li, S., C. Sasaki, C. Kato, N. Matsuyama, T. Annaka, A. Endo, K. Sasaki: Reducing cadmium and copper uptake of soybeans by controlling groundwater level and its impacts on growth and yield. International Journal of Environmental and Rural Development, 8(1),77-84, 2017, 査読有

〔学会発表〕(計 5 件)

- Kato, C., C. Sasaki, A. Endo, N. Matsuyama, T. Nishimura, Predicting soil water movement in converted soybean fields under high moisture condition, PAWEES-INWEPF International Conference Nara 2018, 2018
加藤千尋・佐々木長市・遠藤明・松山信彦: 排水性の異なる水田転換ダイズ畑における土壤水分変動予測, 2017 年度土壤物理学大会(札幌), 2017
Kato, C., S. Nakano, A. Endo, C. Sasaki, T. Shiraiwa : Modeling the effects of excess water on soybean growth in converted paddy field in Japan 1. Predicting groundwater level and soil moisture condition - The case of Biwa lake reclamation area, 9th Asian Crop Science Association Conference (Jeju, Korea),

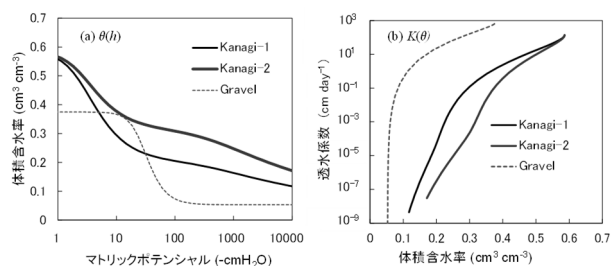


図 7 水分移動特性関数の決定 保水性(a), 透水性(b)

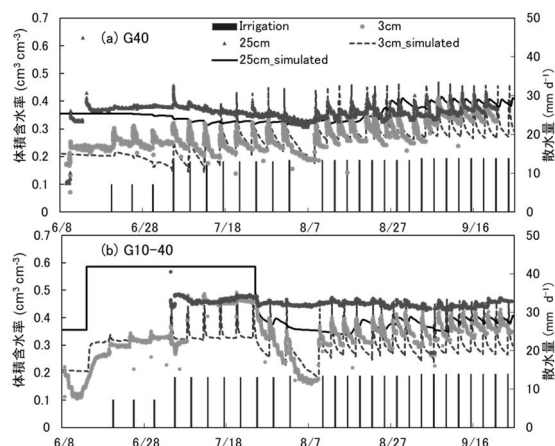


図 8 G40 (a), G10-40 (b)における深さ 3cm および 25cm の土壤水分量変動の実測値と計算値の比較

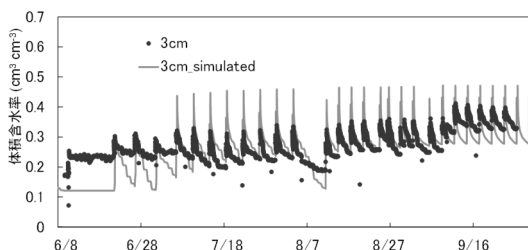


図 9 作物係数と LAI の変動を考慮しなかった場合の計算結果

2017

加藤千尋、白岩立彦、西村拓、遠藤明、佐々木長市、琵琶湖干拓地の水田転換畑における地下水位・土壌水分予測、2016年度土壤物理学大会、2016

李松涛、加藤千尋、佐々木長市、佐々木喜市、松山信彦、カドミウム汚染畑における地下水位がダイズの生育・収量およびカドミウム吸収に及ぼす影響、平成27年度農業農村工学会大会講演会、2015

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。