

令和 6 年 9 月 19 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K05834

研究課題名（和文）作物水ストレス制御に関する熟練農業者の経験知の解明とオンデマンド型灌漑手法の確立

研究課題名（英文）Development of on-demand irrigation method based on empirical knowledge of expert farmers on water stress control

研究代表者

弓削 こずえ（Yuge, Kozue）

佐賀大学・農学部・教授

研究者番号：70341287

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：高品質の作物の安定生産には水ストレス制御が非常に重要である。本研究は、作物の水ストレス制御に関する熟練農業者の経験知を解明し、作物の水分需要に適切に対応するオンデマンド型の灌漑手法を確立することを目的とする。まず、熟練農業者が灌漑のタイミングと量を決定する際に指標としている土壌水分状態などの水消費環境を解明する数値モデルを構築し、作物の水ストレス状態を評価した。数値モデルの妥当性を複数の作物圃場で確認するとともに、作物ごとに農家の水管理実態や灌水スケジューリングを解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高品質の作物の安定生産には水ストレスを適切に制御することが非常に重要であるが、作物圃場の水消費環境は極めて複雑であり、水管理のルーティン化が困難である。本研究では、土壌水分状態などの水消費環境を指標として、熟練農業者が長年の経験と勘に基づいて行っている灌漑のスケジューリングを明らかにしたことが学術的にユニークである。また、近年、農業従事者が高齢化・減少する中で新規就農の促進に向けた各種支援が行われている。本研究の成果を現場に提案することで、経験の乏しい耕作者でも安定的に作物を生産するための水管理技術を習得することが可能となり、社会的にも意義深いと言える。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study is to develop irrigation method based on empirical knowledge of expert farmers on water stress control. Numerical models to clarify the water consumption environment which were used by expert farmers as determining indicator for irrigation scheduling were developed. Model accuracies were verified by field experiment at crop fields, and the relationship between water consumption environment and water stress was evaluated. Using these factors as indicator, irrigation scheme of expert farmers was clarified.

研究分野：灌漑工学

キーワード：土壌水分 蒸発散 消費水量 畑地灌漑 灌漑スケジューリング

1. 研究開始当初の背景

2018年にTPP協定発行が大筋合意に至るなど、我が国では国産農産物の競争力強化を早急に図ることが求められている。一方で、世界人口の増加に伴って飢餓のパンデミックが懸念される中、人類共通の課題である。こうした国際情勢を踏まえ、2020年に新たな食料・農業・農村基本計画が閣議決定され、国産農産物の国際競争力の強化と食料自給率の向上が最重要課題に位置づけられた。同計画には、新型コロナウイルス感染症などの新たな感染症への対応も盛り込まれており、国産農産物の消費拡大や地産地消の促進の必要性が掲げられている。これらの課題解決には国内外の消費者ニーズを満たす多品目かつ高品質の作物の安定的な生産が不可欠であり、栽培環境の調節が可能である施設栽培の重要性は今後ますます高まると考えられる。

施設栽培は収益性が高いため、新規就農者の80%以上が選択する実態がある。高品質の作物の安定生産には水ストレス制御が非常に重要であるが、施設畑では降雨による水分補給がないため、作物の生産性と品質は農業者の灌漑スキルに特に大きく依存している。その一方で、施設畑では水消費に深く関与する温湿度、気流および土壌水分などの環境が露地と比較すると極めて複雑であり、水分供給のルーティン化が困難である。

2. 研究の目的

本研究は、品質の高い作物生産の安定化を目指して、熟練農業者の水ストレス制御に関する経験知を解明し、作物の水分需要を過不足なく補うオンデマンド型の灌漑手法を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 現地調査

本研究では、九州内のキュウリ、イチゴ、白ネギならびにトマト栽培圃場を対象とした。本報告では、キュウリおよびイチゴ圃場における結果を紹介する。各圃場の状況を Fig.1 に示す。キュウリ圃場では、10~1月(秋期)および3~7月(春期)の2期作が行われた。畝部に部分的にマルチングされており、マルチの下に設置した灌水チューブにより水分供給が行われている。イチゴ圃場では、10月に苗の移植が行われ、11月ごろに圃場をプラスチックフィルムで被覆して5月まで栽培が行われていた。キュウリ圃場に比較すると高畝で栽培されており、圃場の全面をマルチで被覆し、まる知シートの下に敷設したチューブによって灌漑が行われていた。

各圃場において、深さ5cm、15cm、25cm、35cmおよび50cmに土壌水分計を埋設し、水分状態を連続測定した。同深度で採取した土壌サンプルを用いて、水分特性曲線、透水係数および粒度分布を求めた。また、ウェザーステーション、放射収支計を設置して、気温、相対湿度、風速および放射成分を実測した。さらに、給水栓に設置した電磁流量計によって灌水量の測定を行った。

(2) 蒸発散量の算定方法

土壌水分管理実態と水ストレス状態の関係を評価

するため、次式のPenman法によってポテンシャル蒸発散速度 ET_p (mm d⁻¹) を求め、これに作物係数を乗じて蒸発散量を求めた

$$ET_p = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_{net}}{l} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u_2)(e_{sa} - e_a) \quad (1)$$

ここで、 R_{net} : 純放射量 (MJ m⁻² d⁻¹), l : 水の蒸発潜熱 (MJ kg⁻¹), Δ : 飽和蒸気圧曲線の勾配 (hPa °C⁻¹), γ : 乾湿計定数 (0.66 hPa °C⁻¹), e_a : 蒸気圧 (hPa), e_{sa} : 飽和蒸気圧 (hPa), $f(u_2)$: 高度2mにおける風速 u_2 (m s⁻¹) の関数 (mm d⁻¹ hPa⁻¹) である。

(3) 土壌水分動態予測モデルの構築

本研究では、HYDRUS 2D/3D (Šimůnek et al., 2008) を用いて土壌水分動態予測モデルを構築した。本モデルでは、土壌中の水分動態は次式で表現される。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S_a(h) \quad (2)$$

ここで、 θ : 体積含水率 (cm³ cm⁻³), t : 時間 (d), $K(h)$: 不飽和透水係数 (cm d⁻¹), h : 圧力水頭 (cm), x : 水平方向の座標 (cm), z : 鉛直方向の座標 (cm, 深さ方向を正とする), $S_a(h)$: 作物根の吸水速度 (cm³ cm⁻³ d⁻¹) である。

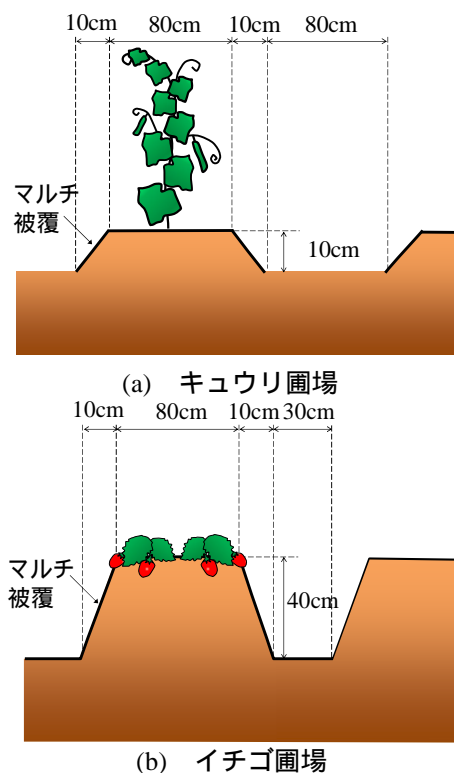


Fig.1 対象圃場の状況

作物根の吸水速度は Feddes モデルを用い、水ストレスおよび根群深さを考慮して次の式で求めた。

$$S_a(h) = abT_p L_t \quad (3)$$

ここで、 a ：水分ストレスによる吸水減少係数 (-)、 b ：根密度分布 (cm^{-2})、 T_p ：ポテンシャル蒸散速度 (cm d^{-1})、 L_t ：蒸散に関わる土壌面長 (cm) である。 a は作物の種類によって定められている定数であり、既往の研究 (弓削ら, 2018) において例示された通り、圧力水頭の値や蒸散速度の大きさに応じて設定した。

式 (2) に用いる土壌水分特性パラメータについては様々なモデルが提案されている。本研究では、次式で表現される van Genuchten モデル (van Genuchten, 1980) によってフィッティングすることとした。

$$\theta = \theta_{res} + (\theta_{sat} - \theta_{res}) \left(1 + |\alpha h|^n \right)^{-m} \quad (4)$$

ここで、 θ_{res} ：残留体積含水率 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)、 θ_{sat} ：飽和体積含水率 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)、 α ：定数 (cm^{-1})、 n 、 m ：定数 (-) である。パラメータ m は次式により求めた。

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (5)$$

不飽和透水係数については、式 (4) のパラメータと飽和透水係数を用いて van Genuchten (1980) が提案した次式によって推定した。

$$K(h) = K_{sat} S_e^\lambda \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (6)$$

ここで、 K_{sat} ：飽和透水係数 (cm d^{-1})、 λ ：定数 (-)、 S_e ：有効飽和度 (-) である。 S_e は次式によって表現される。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \quad (7)$$

λ は不飽和透水係数の測定値を用いた推定が必要であるが、本研究は便宜的に全ての層で 0.5 と設定した。

本モデルの構造を Fig.2 に示す。モデルの境界条件には、圃場内の気象要素や放射収支などを用いて式 (1) によって蒸発散速度を求め、これを蒸散速度と土壌面蒸発速度に分離して設定した。ただし、マルチング部については、水分移動なしと設定した。

4. 研究成果

Fig.3 はキュウリおよびイチゴ圃場において測定した土壌水分状態 (pF) および灌水量の経時変化であるキュウリ圃場においては春期の結果を示している。また、Fig.4 に各圃場で得られた水分特性曲線を示す。これらの図より、キュウリ圃場においては、深さ 5~15cm の比較的浅い層では、土壌水分が圃場容量量と生長阻害水分点の間の容易有効水分の範囲に収まるような水分管理が行われていた。比較的深い層においては、湿潤な状態に保たれていた。以上より、キュウリ圃場においては乾燥側の水ストレスが発生しないように水管理が行われていたことが明らかとなった。一方、イチゴ圃場においては、いずれの層でも土壌水分状態は容易有効水分の範囲内に維持するよう灌漑が行われていた。ただし、栽培期の後半では、灌漑の中断期間が長くなり、表層部の水分状態は生長阻害水分点 (pF3.0) 付近の乾燥した状態に到達しており、水ストレスのかかった状態であったことが窺われる。

Fig.5 は、キュウリ圃場において、ある灌漑イベントから次の灌漑イベントまでの中断期間における蒸発散量を式 (1) によって算定し、次の灌漑イベント時点で補われた水量 (補給水量) を比較したものである。この図によると、定植期である 3 月は蒸発散量を大きく上回る水分が補給されていたことが明らかである。これは、定植直後の活着を促すなどの栽培管理目的で灌漑が行われたと考えられる。我が国の畑地用水計画の技術書 (農林水産省農村振興局, 2016) によると、定植期の栽培管理目的の用水は 3~5mm/d 程度と見積もられているが、本研究で対象としたキュウリ圃場ではこれを大きく

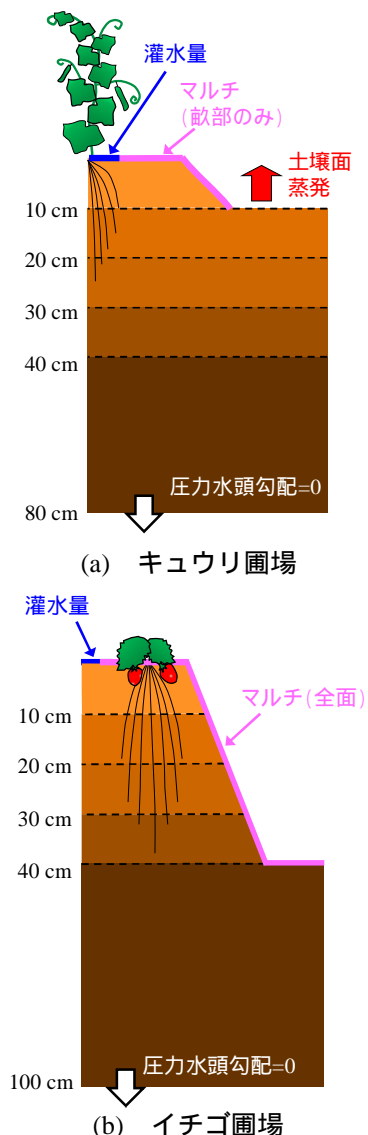


Fig.2 土壌水分動態予測モデルの概要

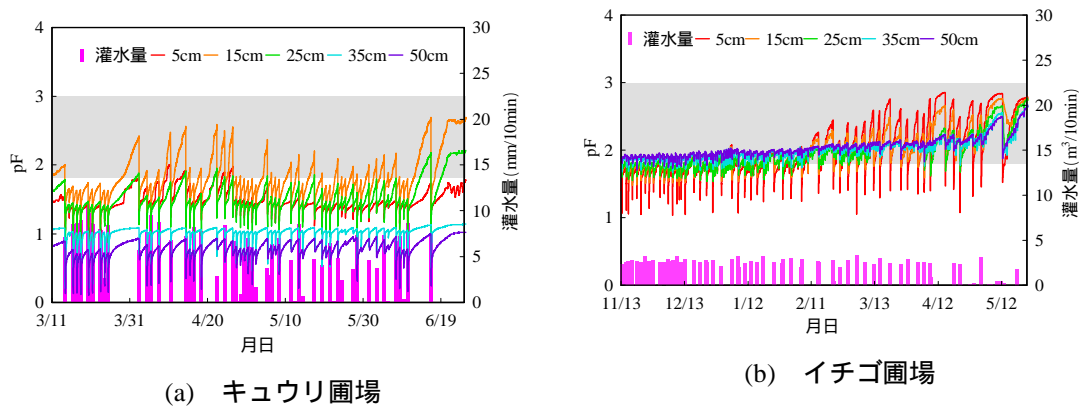


Fig.3 土壤水分状態および灌水量の経時変化

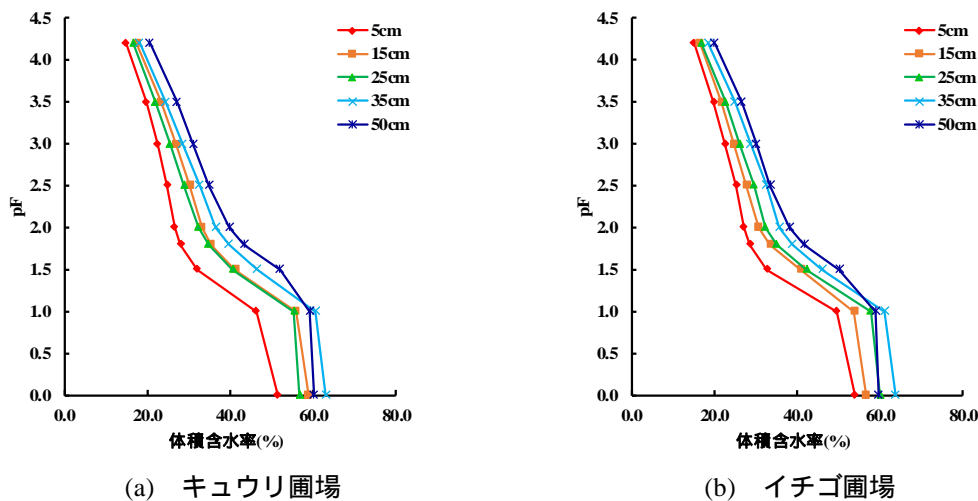


Fig.4 対象圃場における水分特性曲線

上回る用水が供給されていたことが明らかである。定植後約1か月を経過すると、補給水量は減少し、蒸発散によって消費した水量と同等の水分が灌漑されていた。また、栽培終期では、補給水量が蒸発散量よりも少なくなっていた。一方で、Fig.3によれば、深さ15~25cmではpFが高くなっており、土壤水分状態は乾燥傾向にあるが、深部の土壤水分は容易有効水分の範囲もしくはそれよりも湿潤な状態に保たれていた。このことより、耕作者の経験と勘に基づいて水ストレスの懸念のない水分状態に管理されていたと推察される。

Fig.2のモデルを用いて、対象圃場の土壤水分動態の評価を行った結果をFig.6およびFig.7に示す。まず、Fig.6は比較的湿潤な状態に管理されていたキュウリ圃場において、生育期ごとに灌漑直後の水分フラックスを計算した結果である。この図より、いずれの期間においても灌漑直後は畝間への水分移動が生じていた。本圃場では部分的にマルチングされており、裸地状態の畝間の土壌面蒸発の影響であると考えられる。このことから、農家は乾燥状態にあった畝間や湿潤な状態である深部の土壤水分環境を踏まえて灌水をコントロールしていたことが窺われる。

Fig.7は栽培後期に水ストレスが発生していたイチゴ圃場における生育期別の灌水日の体積含水率の空間分布を示している。定植後1か月の灌水日は作物体付近の土壤水分状態はやや低くなっているが、全体的に湿潤な状態にある。定植後約2か月では、作物体付近の土壤水分状態が生長障害水分点であるpF3.0付近になったタイミングで灌水が行われていた。定植後約3か月ならびに4か月後の結果によると、作物体付近の土壤水分状態はかなり乾燥しており、水ストレスがかかったタイミングで灌水が行われていた。以上より、本研究で構築したモデルによって、農家の灌水のタイミングを明らかにすることができた。

引用文献

農林水産省農村振興局(2016):土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 計画「農業用水(畑)」, 農業農村工学会。

Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th. and Šejna, M. (2008): Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes, *Vadose Zone Journal*, **7**(2), 587-600.

van Genuchten, M.Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, **44**(5), 892-898.

弓削こずえ, 濱田耕佑, 阿南光政, 濱上邦彦, Van Dam, J.C., Kroes, J.G. (2018): 干拓農地における水分ストレスの評価と灌漑スケジューリングの最適化, *農業農村工学会論文集*, **306**, I_55-I_62.

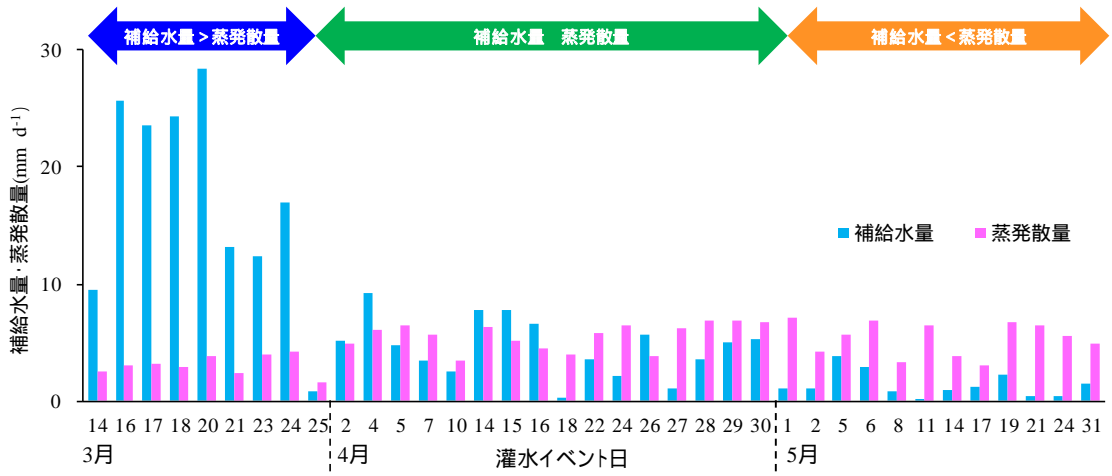


Fig.5 キュウリ圃場における補給水量と蒸発散量の比較

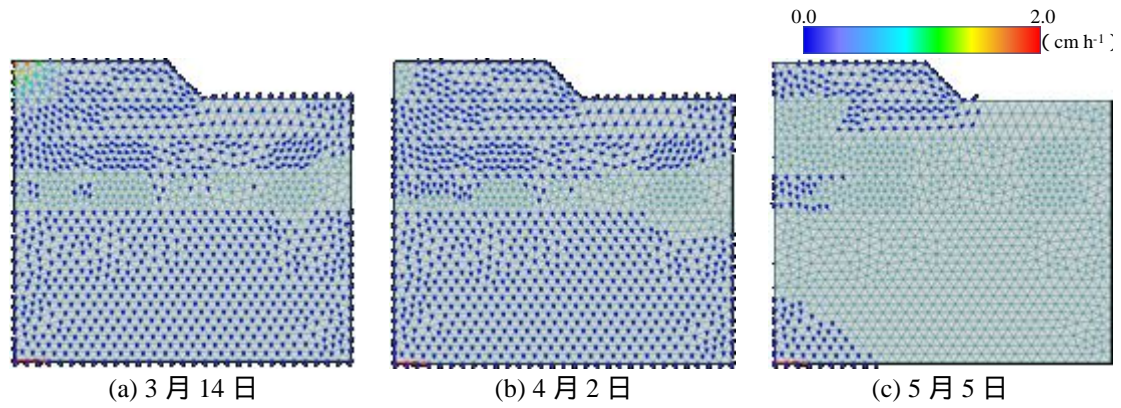


Fig.6 キュウリ圃場における灌漑後の水フラックスの空間分布

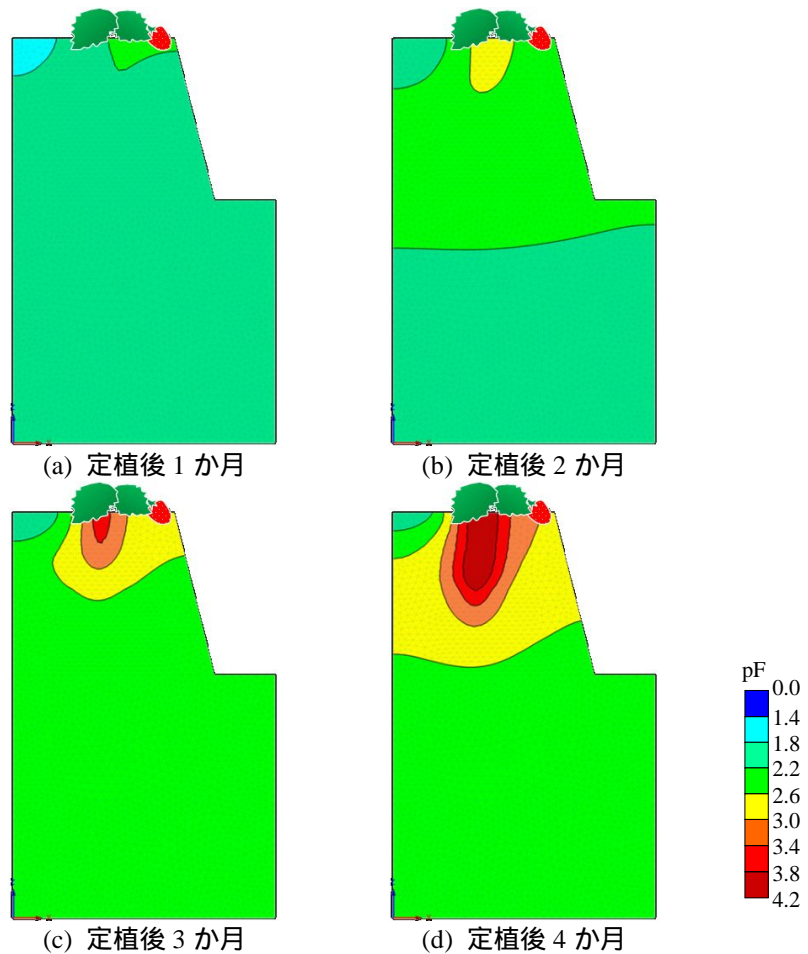


Fig.7 イチゴ圃場における灌水日の土壌水分状態

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 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 弓削 こずえ, 阿南 光政, 藤木 豊, 平川 晃	4. 巻 90 (1)
2. 論文標題 畝の断面形状が変化するネギ培土栽培圃場の土壌水分動態と消費水量の推定	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 農業農村工学会論文集	6. 最初と最後の頁 I_101-I_110
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 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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 弓削こずえ, 阿南光政
2. 発表標題 キュウリ栽培施設畑の水管理実態と土壌水分分布の評価
3. 学会等名 第70回 農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 弓削こずえ, 阿南光政
2. 発表標題 畑地土壌面における水分状態の時間変化と風食量の関係
3. 学会等名 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 弓削こずえ, 阿南光政
2. 発表標題 施設畑における気象データに基づいた消費水量算定手法の検証
3. 学会等名 第72回 農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 弓削こずえ, 阿南光政, 藤木豊
2. 発表標題 施設畑における水分管理実態と蒸発散環境の評価
3. 学会等名 令和5年度農業農村工学会九州沖縄支部講演会
4. 発表年 2023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	阿南 光政 (Anan Mitumasa) (80782359)	佐賀大学・農学部・准教授 (17201)	

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
---------	---------