

クラウド制御による自動養液土耕栽培システムが導入されたピーマン栽培ビニールハウス内における灌水量とペンマン・モンティース法の適用性の検討

メタデータ	言語: jpn 出版者: 明治大学農学部 公開日: 2020-07-30 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 伊東, 雄樹, 八重樫, 聡太, 青木, 伸輔, 菅野, 宗夫, 小沢, 聖, 竹迫, 紘, 喜多, 英司, 登尾, 浩助 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10291/20948

〔研究論文〕

クラウド制御による自動養液土耕栽培システムが導入された ピーマン栽培ビニールハウス内における灌水量と ペンマン・モンテース法の適用性の検討

伊東 雄樹¹・八重樫聡太²・青木 伸輔¹・菅野 宗夫³
小沢 聖⁴・竹迫 紘⁵・喜多 英司⁶・登尾 浩助^{7*}

(2018年9月28日受理)

Evaluation of irrigation rate and applicability of Penman-Monteith method to bell pepper grown soil regulated by cloud-based automatic fertigation system in greenhouse

Yuki ITO¹, Sota YAEGASHI², Shinsuke AOKI¹, Muneo KANNO³,
Kiyoshi OZAWA⁴, Hiroshi TAKESAKO⁵, Eiji KITA⁶, and Kosuke NOBORIO^{7*}

Abstract

In this study, we evaluated the (1) amount of irrigated water by an automatic fertigation system; (2) correlation between atmospheric environment and stemflow; and (3) applicability of Penman-Monteith method to the cultivation soil of three varieties of pepper, *viz.*, Pitaro, Yellow-horn, and Red-horn, in a side-opened greenhouse. The water content in the soil, potential evapotranspiration in the greenhouse, and stemflow in Pi-taro were measured using time-domain reflectometry (TDR), Penman-Monteith method, and stem heat balance method, respectively. Soil water distribution well represented irrigated water by the automatic fertigation system and root distribution. The amount of irrigated water by the automatic fertigation system agreed well with the stemflow rate. There was a significant negative correlation between soil heat flux and stemflow, and significant positive correlation between stemflow and the net radiation, vapor pressure deficit, air temperature, soil temperature, or solar radiation. Potential evapotranspiration in the greenhouse, determined using Penman-Monteith method, increased with increases in the wind speed, temperature, relative humidity, and net radiation, which was consistent with the findings of previous studies. Penman-Monteith method is applicable in a greenhouse setting; however, it is important to consider the size of the greenhouse.

Key words: automatic fertigation system, potential evapotranspiration, Penman-Monteith, stem flow rate, bell pepper

¹ 明治大学大学院農学研究科 〒214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1

² 明治大学農学部 (現: 日本工営株式会社) 〒214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1

³ 認定NPO法人ふくしま再生の会 〒960-1815 福島県相馬郡飯館村佐須滑87-1

⁴ 明治大学黒川農場 〒215-0035 神奈川県川崎市麻生区黒川2060-1

⁵ 明治大学研究・知財戦略機構 〒214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1

⁶ 株式会社ルートレック・ネットワークス 〒215-0004 神奈川県川崎市麻生区万福寺111 新百合ヶ丘シティビルディング 6F

⁷ 明治大学農学部 〒214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1

* Corresponding Author: Higashi-mita 1-1-1, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa, Japan 214-8571

Phone: +81-44-934-7156; Fax: +81-44-934-7156

E-mail address: noboriok@meiji.ac.jp

要約 自動養液土耕栽培システムを導入した側面開放型ビニールハウス内の3品種のピーマン（ピー太郎・イエローホルン・レッドホルン）栽培の土壌において、自動養液土耕栽培システムによる灌水量の評価、大気環境および土壌水分と茎内流量の相関関係およびペンマン・モンティース法の適用性の検討を行った。土壌水分量の測定には時間領域反射（Time Domain Reflectometry: TDR）法を、ビニールハウス内の可能蒸発散量の推定にはペンマン・モンティース法を、ピー太郎の茎内流量の測定には茎熱収支法を用いた。土壌水分量は自動養液土耕栽培システムによる灌水と根の分布を良く示した。自動養液土耕栽培システムによる灌水量と茎内流量は良く一致した。茎内流量と純放射量、飽差、気温、地温および日射量は有意な正の相関が、地中熱流量は有意な負の相関があった。ペンマン・モンティース法を用いて推定された可能蒸発散量は純放射量、相対湿度、気温および風速の順に感度が高く、既往の研究結果と一致した。ビニールハウスにおいて、ペンマン・モンティース法は適用可能であるが、ビニールハウスの規模を考慮する必要があると考えられる。

キーワード：自動養液土耕栽培システム、可能蒸発散量、ペンマン・モンティース法、茎内流量、ピーマン

1. 背景

2011年3月11日に発生した東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故の影響により、福島県のいくつかの地域で避難指示が出され、約16万人の住民が避難生活を余儀なくされた。2017年3月までに帰宅困難地域を除いた地域で避難指示が解除され、福島県飯舘村も避難指示が解除された。震災以前、飯舘村では就業人口の約25%が農家であり、帰村後の営農再開が強く望まれている。営農再開に向けて飯舘村の農地では表土剥ぎ取り工法により除染が行われ（農林水産省 2013）、表土剥ぎ取りが行われた農地は表土に客土が行われた。表土剥ぎ取りが行われた農地において、表土の全炭素・窒素含量は剥ぎ取られなかった下層土に比べて有意に低いという報告がある（好野ら 2015）。除染作業により地力が低下した農地において営農を再開するに当たり、肥沃度が低下した土壌における作物の栽培体系を提案する必要がある。そこで、培養液を点滴で土壌に灌水する養液土耕栽培に着目した。養液土耕栽培はトマトの生育について施肥窒素利用率が慣行施肥法よりも高いことが報告されており（林ら 2003）、地力の低下した土壌でも効率的に養分を植物体に供給可能である。また、Pandeyら（2013）やTanaskovikら（2011）は養液土耕栽培が砂質土壌におけるピーマン栽培に対して有効であることを示した。

近年、ZeRo. agri（株式会社ルートレック・ネットワークス）という自動養液土耕栽培システムが開発さ

れた。ZeRo. agriはハウス外の日射量とハウス内土壌の体積含水率などの環境条件より培養液供給量をクラウド上で決定し、自動的に灌水を行うシステムである。これまでにZeRo. agriにより決定された灌水量を評価した研究例は見当たらない。作物の茎内流量は茎熱収支法（Sakuratani 1981）とヒートパルス法（Huber 1932）により測定される。茎熱収支法による茎内流量は秤量法による蒸散量と±10%以内で一致することを明らかにされている（Sakuratani 1981）。したがって、茎熱収支法を用いてZeRo. agriによって決定した灌水量を評価することが可能である。

自動養液土耕栽培システムは施設栽培で用いられることが多く、施設内外における環境条件の実測値を用いて推定された作物の蒸散量をもとに決定するものが多い（例えば竹内ら 1998）。作物の蒸散量は土壌水分や大気環境の影響を受けることが報告されている（長岡ら 1984; Yaoら 2001）。蒸散を抑制する因子は土壌や大気環境が複雑に関与しており、例えば植物は土壌が乾燥して根による吸水が制限されると蒸散が抑制される。GavandeとTaylor（1967）は、蒸散量は土壌水分および気温や湿度などの大気環境によって影響されるが、土壌水分および大気環境は相互に関連しながら単独条件より大きく蒸散量に影響することを報告した。須藤と安藤（1975）はピーマンとトマトの蒸散量について大気湿度と土壌水分量に相互作用はなく、それぞれ単独で作用していることを明らかにした。一方で、小田ら（1993）はキュウリについて大気温度、土壌水分量および大気湿度のそれぞれが相互

的に蒸散量の増減に關与していることを明らかにした。これらの先行研究は、大気環境および土壤水分量が蒸散量に及ぼす影響についてさらなる研究が必要であることを示している。

点滴灌漑による灌水量を決定するためには、点滴灌漑が行われている土壤における水分動態を明らかにすることが重要である。点滴灌漑が適用された土壤における土壤水分の二次元分布はこれまで多くの研究が行われてきた。Skaggsら(2004)は点滴灌漑が行われた無植生の砂質ローム土壤における土壤水分の二次元分布の実測値と数値計算による推定値が良く一致することを報告した。CoelhoとOr(1999)はトウモロコシを栽培したシルト質ローム土壤において根と土壤水分の二次元分布が良く一致することを報告した。したがって、自動養液土耕栽培システムを導入した土壤における水分分布を明らかにすることは、灌水管理にとって重要である。

従来、ビニールハウスやガラス温室などの狭い農業用施設において微気象学的手法の適用は難しいとされてきた(HeilmanとBrittin 1989)。しかし、Villareal-Guerreroら(2012)は側面開放型農業用施設内において改良ペンマン・モンティース法を利用して推定した可能蒸発散量は実蒸散量と線形関係があると報告した。また、Kirnalら(2003)やPrengerら(2002)も改良ペンマン・モンティース法は農業用施設内の可能蒸発散量の推定に可能であると報告した。一方で、栽培管理を簡素化するためには少ない測定項目と一般的な理論を用いることが望ましいが、改良ペンマン・モンティース法は必要なパラメーターが多く、理論式も複雑である。一般的なペンマン・モンティース法(例えばAllenら1998; Campbell 1985)は、農業用施設に対して適用可能であると報告されており(例えばZhangら2010)、その議論は現在も続いている。したがって、農業用施設内の可能蒸発散量に対する適用性についてさらなる検討が必要である。以上のことから、本研究では自動養液土耕栽培システムを導入した側面開放型ビニールハウス内土壤において以下の4点を明らかにすることを目的とした。

1. 自動養液土耕栽培システムで管理された土壤に

おける水分分布

2. 自動養液土耕栽培システムによる灌水量
3. 大気環境および土壤水分と茎内流量の相関関係
4. ビニールハウスに対するペンマン・モンティース法の適用可能性と推定した可能蒸発散量の環境条件に対する感度

2. 方法

2.1. 実験地および栽培管理

実験は2017年6月7日から10月27日まで福島県飯館村の東西方向に設置した側面開放型ビニールハウス(幅:長さ=5.5 m:30 m)内圃場において行った。ハウス内土壤において体積含水率、地温、可能蒸発散量および茎内流量を測定および推定した。土性は砂質粘土ローム(砂:シルト:粘土=60%:25%:15%)であった。2017年6月7日から11月19日まで3品種のピーマン(ピー太郎・イエローホルン・レッドホルン、タキイ種苗株式会社)を混栽した。本研究では、比較的栽培管理が容易で収穫期間が長いピー太郎およびピクルスなどの加工用にイエローホルンとレッドホルンを栽培した。移植後日数(Day after transplant: DAT)は2017年6月7日をDAT=1とした。自動養液土耕栽培システムはZeRo. agriを用いた。幅0.8 m、長さ30 mの平畝を畝間0.75 mで東西方向に4本立て、畝と平行になるように2本の灌水チューブを地表面に畝中央からそれぞれ南北に0.15 m間隔で設置し、穴あき黒色マルチで地表面を被覆した。灌水チューブ(UniRam CNL, Netafim, Israel)のドリッパーは0.2 m間隔、灌水量は全てのドリッパーにおいて一定である。3品種のピーマンの苗は6月7日に灌水チューブに沿って、条間は0.4 m間隔の千鳥植えて定植した。ただし、茎内流量を測定したピー太郎は畝の北端から0.4 mの畝中央に定植し、2本の灌水チューブは既定の設置位置より畝の中央に0.15 mずつ寄せた。栽培前に土壤に十分な灌水を施し、その48時間後の土壤における体積含水率を目標体積含水率とし、目標体積含水率は $0.33 \text{ (m}^3 \text{ m}^{-3}\text{)}$ であった。気象データ、土壤の体積含水率および日射量の測定値をもとに目標体積含水率に対して不足する量をクラウド上で予

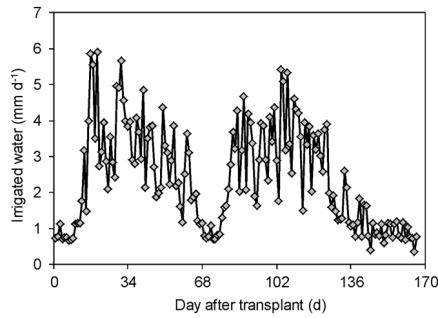


Fig. 1 The amount of irrigated water during measurement period.

測し、土壌体積含水率が目標体積含水率を下回ることが予想された直後の正時に灌水を行った。培養液は水に液肥を混入して調整した。栽培期間中、常に水系統および液肥系統の電磁弁の開放時間の比は0.2であった。液肥はそれぞれ10倍希釈した OAT ハウス 1号と2号が液肥混入器を用いて液肥混入率が2%となるように調整した。測定期間中に施肥された窒素量は $33.48 \text{ kg } 10 \text{ a}^{-1}$ であり、日灌水量を Fig. 1 に示した。

2.2. 体積含水率と地温の測定

土壌全体の比誘電率は TDR 法 (TDR100, Campbell Sci., Noborio 2001) を、地温は T 型熱電対を用いてデータロガー (CR3000, Campbell Scientific Inc., USA) で10分間隔に測定および記録した。TDR センサーは 3 線式で、ステンレスロッドの太さ、間隔および長さは、それぞれ3.2, 20および100 mm であった。TDR センサーおよび熱電対は、畝に垂直な土壌断面に対して茎内流量を測定したピー太郎の株直下および左右0.1 m の土壌深さ0.05, 0.1, 0.2および0.3 m に設置した。体積含水率 θ_w ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) は(1)式を用いて推定した。

$$\theta_w = 4.53 \times 10^{-2} + 2.31 \times 10^{-2} \varepsilon_b - 4.0 \times 10^{-2} \varepsilon_b^2 \quad (1)$$

ここで、 ε_b は測定した土壌全体の比誘電率である。

2.3. 茎熱収支法を用いた茎内流量の測定

茎熱収支法 (櫻谷 1982) を用いて茎内流量を測定した。茎熱収支法は植物体の茎部の一部を一定の熱量で加熱した時、蒸散流の増減によるその部位の温度分

布変化を利用して、茎内流量を求める測定方法である。本研究では、茎内流量と蒸散量が等しいと仮定した。茎の一部に熱量 Q (W) を与えた際に発生する熱収支式は下記の(2)式で求められる。

$$Q = Q_f + q_u + q_d + q_r \quad (2)$$

ここで、 Q_f は蒸散流によって熱源の下流、つまり植物体において上向きに輸送される熱量 (W)、 q_u と q_d はそれぞれ伝導によって熱源の上流側、下流側に失われる熱量 (W)、 q_r は熱源表面から周囲の空气中へ失われる熱量 (W) である。(2)式の右辺の Q_f 、 q_u 、 q_d および q_r はそれぞれ(3)、(4)、(5)および(6)式で表すことができる。

$$Q_f = cF_{sm}(T_d - T_u) \quad (3)$$

$$q_u = \lambda A \frac{T_u - T'_u}{\Delta x} \quad (4)$$

$$q_d = \lambda A \frac{T_d - T'_d}{\Delta x} \quad (5)$$

$$q_r = kE \quad (6)$$

ここで、 c は水の比熱 ($= 4.18 \text{ J g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)、 F_{sm} は質量単位の茎内流量 (g s^{-1})、 T_d と T_u はそれぞれ加熱部位直上と直下の茎温 ($^\circ\text{C}$)、 λ は茎の熱伝導率 ($\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)、 A は茎の横断面積 (m^2)、 T'_u は T_u の測定点から Δx (m) 上流の点での茎温 ($^\circ\text{C}$)、 T'_d は T_d の測定点から Δx 下流の点での茎温 ($^\circ\text{C}$)、 E は起電力 (V)、 k は係数 (W V^{-1}) である。 k は Sakuratani ら (1999) にならい、1日毎にその日の最小値をそれぞれ用いた。(2)式に(3)、(4)、(5)および(6)式を代入すると F_{sm} は

$$F_{sm} = \frac{Q - \lambda A \left[\frac{(T_u - T'_d) - (T_d - T'_u)}{\Delta x} \right] - kE}{c(T_d - T_u)} \quad (7)$$

と表される。Steinberg ら (1989) は熱電対の結線方法を変えることによって3系統で済む3線式を提案した。すなわち、(7)式は以下のように変形できる。

$$F_{sm} \approx \frac{Q - \lambda A \frac{(T_u - T'_u) - (T_d - T'_d) - kE}{\Delta x}}{c_w \left\{ \frac{(T_u + T'_u)}{2} - \frac{(T_d + T'_d)}{2} \right\}} = \frac{Q - \lambda A \frac{(T_u - T'_d) - (T'_u - T_d) - kE}{\Delta x}}{\frac{c_w}{2} \{(T'_u - T_d) + (T_u - T'_d)\}} \quad (8)$$

F_{sm} は深さ単位の茎内流量 F_{st} (m s^{-1}) に(9)式により計算した。

$$F_{st} = \frac{F_{sm}}{\rho_w A_p} \quad (9)$$

ここで、 ρ_w は水の密度 (10^6 g m^{-3})、 A_p はピー太郎1個体に対する地表面積 (m^2) である。 A_p は畝1本の面積と畝の長さおよび条間より算出された3品種のピーマンの株数より決定した。

茎内流量の測定のために用いたステムフローセンサーは、ピー太郎の主茎（直径16 mm）の地上部において土壌熱伝導による影響が小さくなるように地表面から20 cm程度の1箇所に設置した。ステムフローセンサーは熱電対と茎部を密着させるために食品包装用フィルム、ヒーターから空気中への熱の分散を防ぐための断熱材、その上から日射によるセンサーへの影響を軽減するためにアルミホイルで被覆した。ヒーターの熱により植物体が傷つくことを避けるために、ステムフローセンサーのヒーターは10分おきに2分間断続的に加熱した。茎内流があるときヒーターの熱が与えられると、茎内の温度は変化する。室内実験により加熱を終了してから1分程度で温度変化がなくなったため、測定はヒーターの加熱中2分間と加熱後1分間の計3分間行った。

2.4. ペンマン・モンテイス法を用いた可能蒸発散量の推定

可能蒸発散量をペンマン・モンテイス法により推定した。ペンマン式は(10)式で表すことができる(Campbell 1985)。

$$L \cdot ET_p = - \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n + G) + \frac{\gamma L}{\Delta + \gamma} \left(\frac{\rho_a^o - \rho_a}{r_{va}} \right) \right] \quad (10)$$

ここで L は蒸発潜熱 (J kg^{-1})、 ET_p は可能蒸発散量 ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)、 Δ は温度飽和水蒸気濃度曲線の勾配 ($\text{kg m}^{-3} \text{ K}^{-1}$)、 γ は乾湿計定数 ($= 0.5 \times 10^{-3} \text{ kg m}^{-3} \text{ K}^{-1}$)、 R_n は純放射量 (W m^{-2})、 G は地中熱流量 (W m^{-2})、 ρ_a^o は気温 T_a (K) に対する大気の水蒸気濃度 (kg m^{-3})、 ρ_s は地表面における水蒸気濃度 (kg m^{-3})、 r_{va} は植生上の水蒸気輸送に対する空気力学的抵抗 (s m^{-1}) である。 Δ と r_{va} はそれぞれ以下の式で求めた (Campbell 1985)。

$$\Delta = \frac{\rho_a^o - \rho_s}{T_a - T_s} \quad (11)$$

$$r_{va} = \frac{\ln [(z-d+z_H)/z_H] \ln [(z-d+z_M)/z_M]}{k^2 \bar{u}} \quad (12)$$

ここで、 T_s は地表面温度 (K)、 k はカルマン定数 (≈ 0.4)、 \bar{u} は平均風速 (m s^{-1})、 z は風速を測定した地表面からの高度 (m)、 d はゼロ面変位で $z-d$ を見かけの高度とみなす。 z_H と z_M はそれぞれ熱と運動量に対する粗度長である。Campbell (1985) は草丈 h (m) に対して、代表的な値として $d = 0.077h$ 、 $z_M = 0.13h$ 、 $z_H = 0.2z_M$ を提案しており、本研究ではこれらの値を用いた。水蒸気濃度 ρ は温度 T (K) における飽和水蒸気濃度 ρ^o に相対湿度 RH (0-1) を乗じて計算した (Campbell 1985)。

$$\rho = RH \left\{ \frac{\exp (31.3716 - 6014.79/T - 0.00792495T)}{1000T} \right\} \quad (13)$$

大気の水蒸気濃度 ρ_a (kg m^{-3}) は、(13)式において RH は大気の相対湿度、 T は気温 T_a (K) を使って計算した。植生の水蒸気濃度 ρ_s は、(13)式において $RH = 1.0$ 、 T は地表面(植生)温度 T_s (K) を使って計算した。

R_n は純放射計、 G は地中熱流板を用いてハウス内において、データロガー (CR1000, Campbell Scientific Inc., USA) を用いて10分毎に記録した。純放射計は黒体スプレーを塗布したペルチェ素子を用いた。地中熱流板は黒体スプレーが塗布されたペルチェ素子を用いた。風速は超音波風向風速計 (ATMOS-22, METER Group Inc., USA) を、相対湿度、気温およ

び大気圧は放射シールド付き湿度センサー (ATMOS-14, METEER Group Inc., USA)を用いて測定し、データロガー (Em50, METEER Group Inc., USA) を用いて10分毎に記録した。 G , R_n , 風速, 相対湿度, 気温および大気圧は, TDR センサーおよび熱電対が埋設されたハウス内の西端から東へ約10 m, 北側側面から約2 mの畝において測定した。 G は土壌深さ0.05 m, R_n , 風速, 相対湿度, 気温および大気圧は地表面から高さ2 mにおいて測定した。風速は, DAT=0から31まで超音波風速計を設置しなかったため, ビニールハウス内で測定された竹内ら (1998) の平均風速 (0.6 m s^{-1}) を用いた。

2.5. 土壌および環境条件と茎内流量の相関および環境条件に対する可能蒸発散量の感度解析

本研究における環境条件は R_n , G , 飽差 (VPD: Vapor pressure deficit) ($=\rho_a^o - \rho_a$) および r_{va} である。 F_{st} は環境条件に加えて植生上の気温 T_a , 畝中央の深さ5 cmにおける地温 T_s , 全12測定点の θ_w および全12測定点の θ_w の平均値について表計算ソフトエクセル (Microsoft Corporation, USA) を用いて相関分析を行った。また, F_{st} と ET_p について表計算ソフトエクセルを用いて単純回帰分析を行った。有意差検定は Fisher と Yates (1963) にしたがって行った。

ET_p の感度解析は, (10)式中的変数である R_n , G ,

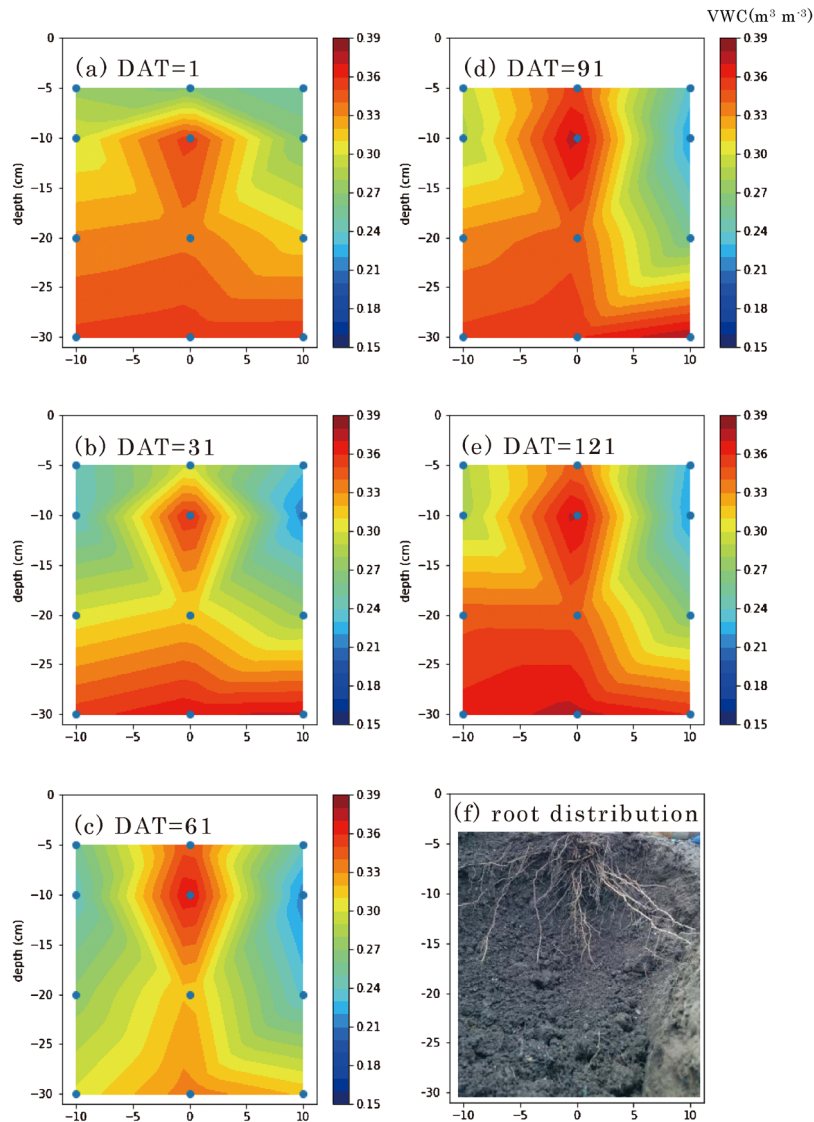


Fig. 2 Volumetric water content (VWC) distribution in cross-sectional ridge soil at 5 pm on day after transplant (DAT) = (a) 1, (b) 31, (c) 61, (d) 91, (e) 121, and (f) root distribution on the last day of measurement period. Blue dots in the figures show the location of TDR probes.

VPD および r_{va} に対して行った。それぞれの変数を 1 つだけ 10% 減少した $ET_{p,90\%}$ を推定し、1 つの変数も変化させなかった場合の ET_p に対する相対値 $ET_{p,90\%}/ET_p$ を計算した。

3. 結果

Fig. 2(a), (b), (c), (d) および (e) にそれぞれ DAT が 1, 31, 61, 91 および 121 の 17 時の畝断面における θ_w の分布を示した。DAT=1, 31, 91 および 121 の土壌深さ 30 cm における θ_w は $0.36 \text{ (m}^3 \text{ m}^{-3}\text{)}$ 程度であった。DAT=61 の土壌深さ 30 cm における θ_w は $0.33 \text{ (m}^3 \text{ m}^{-3}\text{)}$ 程度であった。測定期間を通して土壌深さ 30 cm における θ_w に大きな差はなかった。土壌断面中央の深さ 5 から 20 cm に深さ 0.1 m を中心として円

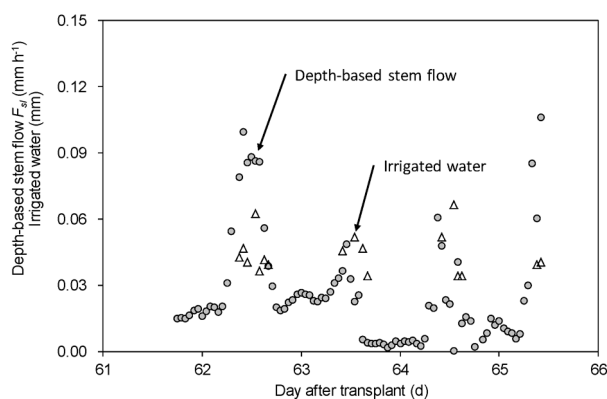


Fig. 3 Diurnal changes in depth-based stem flow (F_{sl}) and the amount of irrigated water by ZeRo. agri from day after transplant (DAT) = 61 to 65.

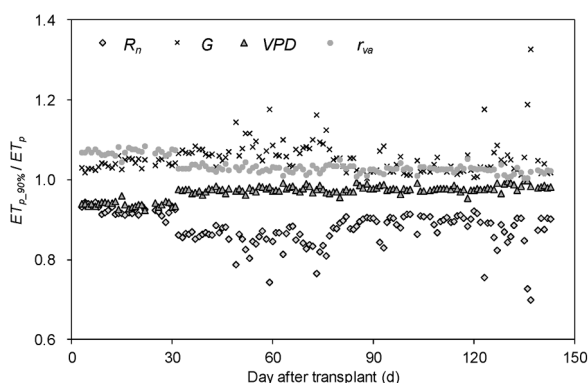


Fig. 4 Relative sensitivity coefficient of potential evapotranspiration (ET_p) and $ET_{p,90\%}$ calculated with 10% decreased net radiation (R_n), soil heat flux (G), vapor pressure deficit (VPD), and resistance to atmospheric boundary layer (r_{va}) in the greenhouse.

形状に分布し、中心ほど θ_w は高かった。 θ_w は測定期間を通して畝の左端より右端において低く、DAT の経過とともに θ_w が低い領域が土壌深くに広がった。

Fig. 3 に DAT=61 から DAT=65 における F_{sl} と灌水量の比較を示した。 F_{sl} は日中に大きくなり、夜間は小さいが一定の値であった。ZeRo. agri による灌水量は日中における F_{sl} の変化と非常に良く一致した。

測定期間中の土壌断面の各測定点における θ_w および全ての測点における θ_w の平均と F_{sl} の相関係数を Table 1 に示した。 F_{sl} は土壌断面における θ_w の変化と土壌深さ 10 cm の南側を除いて有意な相関がなかった。 θ_w の平均値も F_{sl} とは有意な相関がなかった。 F_{sl} と環境条件、気温、地温および日射量の相関係数を Table 2 に示した。茎内流量と r_{va} は有意な相関がなかった。茎内流量と R_n , VPD , 気温、地温および日射量と有意な正の相関が、 G は有意な負の相関があった。

ハウス内の環境条件に対する ET_p の感度解析の経時変化を Fig. 4 に示した。風速を一定と仮定した期間中 (DAT=0 から 31) は、 VPD および r_{va} を 10% 減少させると ET_p に比べて $ET_{p,90\%}$ がそれぞれ 6% 程度増加および減少した。実測された風速を用いた場

Table 1 Correlation of depth-based stem flow (F_{sl}) and volumetric water content (θ_w) at each soil depth in cross-sectional ridge soil.

Ridge side	Soil depth (cm)			
	5	10	20	30
South	-0.173	-0.199*	-0.146	0.056
Center	-0.036	-0.184	-0.038	0.145
North	-0.118	-0.005	0.065	0.142
Average		-0.154		

*: $P < 0.05$ (n = 548)

Table 2 Correlation (r) of depth-based stem flow (F_{sl}) and environmental condition¹ in the greenhouse.

	R_n	G	VPD	r_{va}	T_a	T_s	Solar radiation
r	0.457*	-0.515*	0.385*	0.235	0.410*	0.385*	0.429*

*: $P < 0.05$ (n = 548)

¹ R_n , G , VPD , r_{va} , T_a , and T_s are net radiation, soil heat flux, vapor pressure deficit, internal crop resistance to vapor transfer, air temperature above the plant canopy, and soil temperature, respectively.

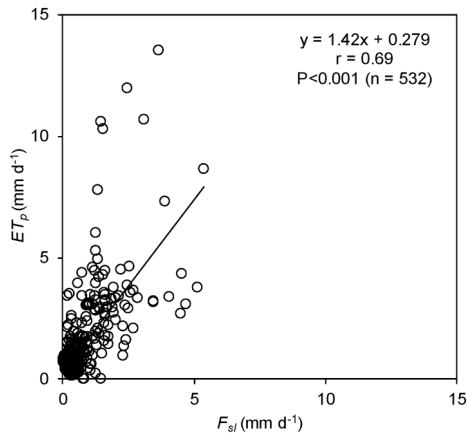


Fig. 5 Relationships between depth-based stem flow (F_{sl}) and potential evapotranspiration (ET_p).

合, $ET_{p_{90\%}}$ の増加と減少は 3%程度にとどまった。 R_n を 10%減少させた場合, $ET_{p_{90\%}}$ は 1 から 20%程度減少し, 特に 8 月に大きく減少した。 G を 10%減少させた場合, $ET_{p_{90\%}}$ は 1 から 20%程度増加し, 特に 8 月に大きく増加した。

Fig. 5 に F_{sl} と ET_p の関係を示した。本研究では F_{sl} を実蒸散量として評価した。 F_{sl} に対する ET_p の近似直線の傾きは 1.42 であった。

4. 考察

4.1. 自動養液土耕栽培システムで管理されたピー太郎の栽培土壌における水分分布の推定

土壌深さ 30 cm における θ_w は DAT=61 に他の測定日に比べて低い値であったが, それほど大きな差ではなく, 測定期間を通してほぼ一定の値であったと考えられる。土壌断面中央部における円形状の高含水域は灌水された培養液の分布を精度良く測定できたことが考えられる。Mojid と Cho (2004) は TDR 法を用いて砂質土壌における根密度を推定可能であることを報告しており, 低水分域は移植後日数の経過とともに土壌深くに拡大し, 根の伸長に伴った変化であると考えられる。

4.2. 自動養液土耕栽培システムによる灌水量の評価

土壌の各深さにおける θ_w と F_{sl} の日変化は畝南側の土壌深さ 10 cm を除いて相関がなかった。一方で, ZeRo. agri による灌水量は F_{sl} と非常に良く一致し

た。これらのことから, 土壌における θ_w と F_{sl} に相関がなかった原因は, ピー太郎による吸水量と ZeRo. agri による灌水量が良く一致しており, 土壌水が移動してもそれぞれの点における土壌水分量は変化しなかったため, 土壌水分分布が定常状態にみえたためであると考えられる。畝南側の土壌深さ 10 cm のみ相関があった原因は, 畝北側に植物根が集中しており, 灌水した培養液が畝北側に移動したことにより体積含水率が変化したためである。 r_{va} 以外のパラメーターと F_{sl} には有意な相関がなかった。 R_n , G , VPD , T_a および T_s と F_{sl} に相関があることは先行研究 (Gavande と Taylor 1967; 長岡ら 1984; 須藤と安藤 1975) と一致する。 r_{va} と F_{sl} に相関がなかった原因は, ビニールハウス内の風速が非常に小さくほとんど一定であったため, F_{sl} に対する他のパラメーターの影響が強かったためである。ZeRo. agri による灌水量は F_{sl} と非常に良く一致した。このことから, 除染により地表面を剥ぎ取られた農地においても作物の吸水量を適切に推定した上で灌水量を決定し, 作物生産を行うことが可能である。

4.3. 大気環境および土壌水分と可能蒸発散量の相関関係

Aydin ら (2015) はペンマン・モンテース法を用いて推定された ET_p は R_n , 相対湿度, 気温および風速の順に感度が高いことを報告した。本研究では ET_p の感度は R_n と G に対して高く, 次いで VPD と r_{va} が高かった。Aydin ら (2015) が感度解析に用いた相対湿度と気温は VPD として評価することが可能であるため, 本研究の感度解析の結果と同じ結果であると考えられる。 ET_p の r_{va} に対する感度解析は, 風速の固定値 (竹内ら 1998) を用いた場合 10%程度, 風速の実測値を用いた場合 6%程度過大評価された。このことは, ペンマン・モンテース法を用いて ET_p を推定するとき, 農業用施設内の風速が微風であったとしても実測値を用いることが望ましいことを示している。

4.4. 3品種のピーマンを栽培したビニールハウスに対するペンマン・モンテース法の適用可能性の検討と推定された可能蒸発散量の環境条件に対する感度解析

Morille ら (2013) は施設栽培下の作物について、様々な微気象学的手法で推定された ET_p と実蒸散量の線形関係についてまとめた。Morille ら (2013) によるとピーマン栽培土壌に対する傾きは1.25から1.28であり、本研究の傾きより小さかった。これは、本研究に用いたビニールハウスが Morille ら (2013) が用いたビニールハウスより小さかったため、ビニールハウス外から移流熱の影響を受けたことで ET_p 可能蒸発散量が過大評価されたことが原因であると考えられる。したがって、農業用施設内における ET_p 可能蒸発散量の推定にペンマン・モンテース法を用いる場合、農業用施設の規模を考慮することが重要であるが、その具体的な規模は今後のさらなる研究を行う必要がある。

5. まとめ

自動養液土耕栽培システムを導入した側面開放型ビニールハウス内土壌において、自動養液土耕栽培システムを用いて管理された土壌における水分分布の推定、自動養液土耕栽培システムによる灌水量の評価、大気環境および土壌水分と茎内流量の相関関係およびペンマン・モンテース法の適用性の検討、可能蒸発散量の環境条件に対する感度解析を行った。TDR法は、自動養液土耕栽培システムを導入したピー太郎栽培の土壌における根の分布を推定可能である。自動養液土耕栽培システムによる灌水量は茎内流量と非常に良く一致した。自動養液土耕栽培システムは蒸散量を非常に良く推定して灌水量を決定可能である。茎内流量と土壌水分の変化に相関はなかった。これは、自動養液土耕システムによる灌水量とピー太郎の吸水量が良く一致したことで、土壌水分の移動がそれぞれの点における土壌水分量が変化として現れず、定常状態にみえたことが原因であると考えられる。農業用施設内における可能蒸発散量の推定にペンマン・モンテース法を用いる場合、ハウスの規模を考慮することが重

要である。今後は、ペンマン・モンテース法以外の微気象学的手法についても同様の考慮を行う必要がある。

謝辞

本研究の一部は2017年度明治大学教育研究振興基金事業（研究事業）および農業農村工学会戦略的研究申請支援の助成により行った。

引用文献

- Allen RG, Pereira LS, Raes D and Smith M. Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements—FAO Irrigation and drainage paper 56. pp. 17–28. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998.
- Aydin M, Jung YS, Yang JE, Kim SJ and Kim KD. (2015): Sensitivity of soil evaporation and reference evapotranspiration to climatic variables in South Korea. *Turkish Journal of Agriculture and Forest*, 39: 652–662.
- Campbell GS. *Soil physics with basic*. pp. 140–144. Elsevier, Amsterdam. 1985.
- Coelho EF and Or D. (1999): Root distribution and water uptake patterns of corn under surface and subsurface drip irrigation. *Plant and Soil*, 206: 123–136.
- Fisher RA and Yates F. *Statistical tables for biological, agricultural and medical research*. 6th ed. p. 72. Oliver and Boyd, Edinbrugh. 1963.
- Gavande SA and Taylor SA. (1967): Influence of soil water potential and atmospheric evaporative demand on transpiration and the energy status of water in plants. *Agronomy Journal*, 59: 4–7.
- 林康人・新妻成一・久保省三 (2003) : 灌水施肥（養液土耕）栽培の肥効は高いのか 施肥量を段階的に変えた場合のトマトの施肥窒素利用率. *日本土壤肥科学会雑誌*, 74: 175–182.
- Heilman JL and Brittin CL. (1989): Fetch requirement for Bowen ratio measurements of latent and sensible heat fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 44: 261–273.
- Huber B. (1932): Beobachtung und messung pflanzlicher saftstromme. *Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft*, 50: 89–109.
- Kirnal H, Kaya C, Higgs D and Tas I. (2003): Responses of drip irrigated bell pepper to water stress and different nitrogen levels with or without mulch cover. *Journal of Plant Nutrition*, 26: 263–277.
- Mojid MA and Cho H. (2004): Evaluation of the time-domain reflectometry (TDR)-measured composite dielectric constant of root-mixed soil for estimating soil-water content and root density. *Journal of Hydrology*, 295: 263–275.
- Morille B, Migeon C and Bournet PE. (2013): Is the Penman-Monteith model adapted to predict crop transpiration under greenhouse conditions? Application to a New Guinea Impatiens crop. *Scientia Horticulturae*, 152: 80–91.
- 長岡正昭・高橋和彦・新井和夫 (1984) : トマト・キュウリの光合成・蒸散に及ぼす環境条件の影響. *野菜試験場報告 A*,

- 12: 97-117.
- Noborio K. (2001): Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. *Computer Electronics in Agriculture*, 31: 213-237.
- 農林水産省 (2013): 農地除染対策の技術書 (第2編 施工編). <http://www.maff.go.jp/j/nousin/seko/josen/pdf/sekou> (2017年12月19日付).
- 小田雅行・李智軍・辻顕光・市村一雄・佐々木英知 (1993): 高温時の空気湿度と土壌水分がキュウリの葉緑素蛍光発生に及ぼす影響. *園芸学会雑誌*, 62: 399-405.
- Pandey AK, Singh AK, Kumar A and Singh SK. (2013): Effect of drip irrigation, spacing and nitrogen fertigation on productivity of chilli (*Capsicum annuum L.*). *Environmental and Ecology*, 31: 139-142.
- Prenger JJ, Fynn RP and Hansen RC. (2002): A comparison of four evapotranspiration models in a greenhouse environment. *American Society of Agricultural Engineers*, 45: 1779-1788.
- Sakuratani T. (1981): A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. *Journal of Agricultural Meteorology*, 37: 9-17.
- 櫻谷哲夫 (1982): 作物体内の蒸散流量測定方法の開発とその応用. *農業技術研究報告 A, 物理統計*, 29: 47-121.
- Sakuratani T, Aoe T and Higuchi H. (1999): Reverse flow in roots of *Sesbania rostrata* measured using the constant power heat balance method. *Plant Cell and Environment*, 22: 1153-1160.
- Skaggs TH, Trout TJ, Šimůnek J and Shouse PJ. (2004): Comparison of HYDRUS-2D simulation of drip irrigation of drip irrigation with experimental observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130: 466-472.
- Steinberg S, Van Bavel CHM and McFarland MJ. (1989): A gauge to measure mass flow rate of sap in stems and trunks of woody plants. *Journal of American Society for Horticulture Science*, 114: 466-472.
- 須藤憲一・安藤隆夫 (1975): ピーマン・トマトの蒸散および体内水分状態に及ぼす空気湿度. *野菜試験場報告*, 2: 49-63.
- 竹内真一・安田繁・河原田禮次郎・矢野友久 (1998): 作物の蒸散量を指標としたハウス内ピーマンの灌漑管理 茎内流測定法の灌漑管理への適用 (I). *農業土木学会論文集*, 194: 41-49.
- Tanaskovik V, Cukaliev O, Romić D and Ondrasek G. (2011): The influence of drip fertigation on water use efficiency in tomato crop production. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 76: 57-63.
- Villarreal-Guerrero F, Kacira M, Fitz-Rodríguez E, Kubota C, Giacomelli GA, Linker R and Arbel A. (2012): Comparison of three evapotranspiration models for a greenhouse cooling strategy with natural ventilation and variable high pressure fogging. *Scientia Horticulturae*, 134: 210-221.
- Yao C, Moreshet S and Aloni B. (2001): Water relations and hydraulic control of stomatal behavior in bell pepper plant in partial soil drying. *Plant, Cell and Environment*, 24: 227-235.
- 好野美奈子・小林浩幸・高橋義彦・齋藤邦人 (2015): 剥ぎ取り除染を行った農地において表土剥ぎ取りおよび客土が地力に与える影響. *環境放射能除染学会誌*, 3: 145-152.
- Zhang Z, Liu S, Liu S and Huang Z. (2010): Estimation of cucumber evapotranspiration in solar greenhouse in northeast China. *Agricultural Sciences in China*, 9: 512-518.