

温室内における土壌および灌漑管理のための水および熱収支

| | |
|-------|---|
| メタデータ | 言語: ja 出版者: 公開日: 2019-07-30 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 伊東, 雄樹 メールアドレス: 所属: |
| URL | http://hdl.handle.net/10291/20278 |

明治大学大学院農学研究科

2018 年度

博士学位請求論文

温室内における土壌および灌漑管理のための水および熱収支

(Water and Energy Balance for Soil and
Irrigation Management in Greenhouse)

学位請求者 農学専攻
伊東 雄樹

目次

| | |
|--|----|
| 1. 序章 | 1 |
| 1.1. 点滴灌漑 | 1 |
| 1.2. 土壌消毒 | 2 |
| 1.3. 時間領域反射(Time domain reflectometry: TDR)法 | 3 |
| 1.4. 本研究の目的 | 4 |
| 1.5. 引用文献 | 4 |
| 2. 農業施設における水および熱収支 | 9 |
| 2.1. 背景 | 9 |
| 2.2. 方法 | 11 |
| 2.2.1. 実験地および栽培管理 | 11 |
| 2.2.2. 体積含水率と地温の測定 | 12 |
| 2.2.3. ペンマン・モンティース法を用いた可能蒸発散量の推定 | 13 |
| 2.2.4. 茎熱収支法を用いた茎内流量の測定 | 15 |
| 2.2.5. 環境条件に対する茎内流量と可能蒸発散量の影響 | 16 |
| 2.3. 結果と考察 | 17 |
| 2.3.1. 土壌における含水率分布 | 17 |
| 2.3.2. 自動養液土耕栽培システムによる灌水量の評価 | 17 |
| 2.3.3. 蒸散量と環境要因の関係 | 18 |
| 2.3.4. ビニールハウスにおけるペンマン・モンティース法の適用可能性 | 19 |
| 2.4. まとめ | 19 |
| 2.5. 引用文献 | 20 |
| 3. 熱水土壌消毒の適切な熱水散布量の提案 | 37 |
| 3.1. 背景 | 37 |
| 3.2. 実験方法 | 40 |
| 3.2.1. TDR 法を用いて測定した比誘電率の温度依存性 | 40 |
| 3.2.2. 熱水土壌消毒の圃場実験 | 41 |
| 3.2.3. HYDRUS-1D を用いた熱水土壌消毒の水分および熱移動の推定 | 41 |
| 3.2.4. 水分移動 | 41 |
| 3.2.5. 水分移動特性 | 42 |
| 3.2.6. 熱移動 | 44 |
| 3.2.7. 熱水土壌消毒時の土壌における地温と体積含水率の実測値と推定値の比較 | 45 |
| 3.2.8. 逆解析によるパラメーターの推定と黒ボク土における適切な熱水散布量の提案 | 45 |
| 3.2.9. 黒ボク土土壌における追加給水法の適用性 | 47 |
| 3.3. 結果と考察 | 47 |
| 3.3.1. TDR 法を用いて測定した比誘電率の温度依存性 | 47 |
| 3.3.2. 熱水土壌消毒時の土壌における地温と体積含水率の実測値と推定値の比較 | 48 |
| 3.3.3. 逆解析によるパラメーターの推定と黒ボク土における適切な熱水散布量の提案 | 50 |
| 3.3.4. 黒ボク土土壌における追加給水法の適用性 | 52 |
| 3.4. まとめ | 53 |
| 3.5. 引用文献 | 55 |
| 5. 結論 | 72 |
| 記号一覧 | 74 |
| 謝辞 | 78 |

図表リスト

Table 2-1 Correlation of depth-based stem flow (F_{st}) and volumetric water content (θ_w) at each soil depth in cross-sectional ridge soil.

Table 2-2 Pearson's correlation (r) of depth-based stem flow (F_{st}) and environmental condition in the greenhouse. 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 on the vegetation, and soil temperature, respectively.

Table 3-1 Physical parameters and soil texture.

Table 4-1 Saturated volumetric water content θ_s , residual volumetric water content θ_r , saturated hydraulic conductivity K_s , and α , n , and l of van Genuchten's fitting parameters.

Table 4-2 Bulk density, solid phase, and particle density of the experimental field.

Table 4-3 Calibrated soil hydraulic physical parameters by inversed analysis.

Table 4-4 Calibrated soil thermal physical parameters by inversed analysis.

Fig. 1-1 Examples TDR waveforms in distilled water, water-saturated sand, and air-dried sand with three-rods probe (=0.145 m). La shows an apparent probe length from the beginning to the end of the probe. $V_p = 0.66$. (referred from; Noborio, 2001)

Fig. 1-2 Examples TDR waveforms in distilled water and NaCl solution with a three-rods probe (=0.045 m) (referred from; Noborio, 2001).

Fig. 2-1 The amount of irrigated water during measurement period in (a) 2015 and (b) 2017.

Fig. 2-2 Simplified representation of stomatal and aerodynamic resistance for water vapor flow in Penman-Monteith method.

Fig. 2-3 Correlation of measured voltage with peltier device and net radiation.

Fig. 2-4 Wire connections of thermocouples (Left: Sakuratani, 1981; Right: Steinberg et al., 1990)

Fig. 2-5 (a) The amount of irrigated water and changes in (b) soil temperature and (c) volumetric water content at each measurement point from DAT=64 to 71 in 2017. Numbers in legends of each figure shows soil depth and location in the ridge; 1, 2, and 3: 5 cm soil depth, 4, 5, and 6: 10 cm soil depth, 7, 8, and 9: 20 cm soil depth, 10, 11, and 12: 30 cm soil depth, 1, 4, 7, and 10: south side of ridge, 2, 5, 8, and 11: center of the ridge, 3, 6, 9, and 12: north side of ridge. Dashed lines are values measured with ZeRo. agri.

Fig. 2-6 Volumetric water content distribution in cross-sectional ridge soil at 5 pm on day after transplanted (DAT)=(a) 1, (b) 31, (c) 61, (d) 91, (e) 121, and (f) root distribution on the last day of measurement period. Black dots show where TDR probes were inserted in (a) to (e). yellow lines are roots in (f).

Fig. 2-7 Comparison of amount of daily irrigated water, I , and apparent root water uptake, U .

Fig. 2-8 Comparison of amount of daily irrigated water, I , and potential evapotranspiration, ET_p .

Fig. 2-9 Diurnal changes in mass-based stem flow (F_{sm}) during DAT = 60 to 65.

Fig. 2-10 Diurnal changes in depth-based stem flow (F_{sl}) and the amount of irrigated water by ZeRo. agri from day after transplanted (DAT)=60 to 65.

Fig. 2-11 Relative sensitivity coefficient of potential evapotranspiration (ET_p) and $ET_{p_{90\%}}$ calculated with 10% decreased net radiation (R_n): $90\%_{R_n}$, soil heat flux (G): $90\%_G$, vapor pressure deficit (VPD): $90\%_{VPD}$, and internal crop resistance to vapor transfer (r_{va}): $90\%_{r_{va}}$ in the greenhouse.

Fig. 2-12 Relationship between depth-based stem flow (F_{sl}) and potential evapotranspiration (ET_p).

Fig. 3-1 Comparison of soil temperature and bulk dielectric permittivity of Andisol of each actual volumetric water content.

Fig. 3-2 Comparison of soil temperature and bulk electrical conductivity of Andisol at each actual volumetric water content.

Fig. 3-3 Comparison of actual volumetric water content and calibrated volumetric water content. Error bar indicates ± 1 SD (n=94~547).

Fig. 4-1 Changes in measured and calculated volumetric water content with non-calibrated hydraulic and thermal parameters of at each observation point. Solid lines and plots show measured values and calculated values, respectively.

Fig. 4-2 Changes in measured and calculated soil temperature with non-calibrated hydraulic and thermal parameters of at each observation point. Solid lines and plots show measured values and calculated values, respectively.

Fig. 4-3 Changes in measured and calculated volumetric water content with calibrated hydraulic and thermal parameters of at each observation point. Upper heat boundary condition was applied (a) soil temperature at 5 cm depth and (b) 95 °C of hot water from 0 to 150 min as dirichlet condition, respectively. Solid lines and plots show measured values and calculated values, respectively.

Fig. 4-4 Changes in measured and calculated soil temperature with calibrated hydraulic and thermal parameters of at each observation point. Upper heat boundary condition was applied (a) soil temperature at 5 cm depth and (b) 95 °C of hot water from 0 to 150 min as dirichlet condition, respectively. Solid lines and plots show measured values and calculated values, respectively.

Fig. 4-5 Duration time which soil temperature at each observation point was kept over 55 °C after hot water application was started. Hot water application was carried out for (a) 90min, (b) 120 min, (c) 150 min, and (d) 180 min. Legend shows the amount of applied hot water.

Fig. 4-6 Duration time which soil temperature at each observation point was kept over 55 °C after hot water application was started. Hot water application was carried out for (a) 90min, (b) 120 min, (c) 150 min, and (d) 180 min before additional tap water application. The amount of applied hot water was 125 L m⁻². Legend shows the amount of applied tap water (L m⁻²).

Fig. 4-7 Changes in calculated soil temperature at (a) 5, (b) 10, (c) 20, (d) 40, and (e) 60 cm soil depth applied several amount of tap water after hot water application for 120 min. Legends show the amount of applied tap water (L m⁻²). Red arrows in each figure show hot water application. Dashed lines show 55 °C.

1. 序章

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, 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植物体に養分を供給可能である。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。

日本における耕地面積は4,444,000haであり(農林水産省, 2017)、その内施設栽培は43,232 haである。野菜・果樹・花卉などの園芸作物は日本における農業産出額の約4割を占める。さらに、多様な品目が施設で栽培されており、トマトやいちごなどの多くは施設で栽培される。また、施設野菜の10a当たり所得は露地作の約3倍であり、労働生産性の高さと小面積で収益を上げることが可能である(農林水産省, 2015)。このように、施設栽培は耕地面積が小さいにも関わらず、高収益を上げることが可能な栽培環境である。作物を栽培する上で水管理は非常に重要であるため、土壌の水および熱収支を明らかにする必要がある。また、作物を安定的に生産するためには土壌病害が少ない土壌を維持することが必要であるが、施設栽培の土壌は畑の状態にあり、畑特有の短所の一つに連作障害が挙げられる。

1.1. 点滴灌漑

点滴灌漑は、1860年代からドイツで始まり、ドイツやアメリカを中心に改良が進んだ。近代的な点滴灌漑の技術はイスラエルで発明された。点滴灌漑は作物体近傍に直接灌水を行うことで水の利用率を向上することが可能であるため、乾燥地で用いられて

きた。点滴灌漑は鳥取砂丘に代表される砂質土壌のように保水性が低い土壌でも効率的に灌水を行うことが可能であると考えられる。点滴灌漑に関する研究は Goldberg (1970)をはじめとして数多くの研究が行われてきた。灌水のスケジュールや量の管理(Bresler, 1977; Nakayama and Bucks, 1991)、作物の収量や品質に関する研究はトウモロコシ(Payero et al., 2008)、トマト(Hanson and May, 2004)、キャベツ(Tiwari et al., 2003)、ピーマン(Sezen et al., 2006)、ワタ(Dagdelen et al., 2009)など多くの作物目に関して行われている。

1.2. 土壌消毒

連作障害をもたらす土壌病害虫の多くは、一般的に好気性細菌で生命活動には酸素を必要とする。水田は湛水によって還元状態になるため、土壌病害虫は死滅し、増殖が抑制される。また、水田はイネの収穫後に落水されるため、休閑期には土壌が酸化状態になる。このように土壌の空気の条件が大きく変化するため水田では土壌病害虫が安定して生息できないため連作障害が発生しにくい。一方、畑地はほぼ常に酸化条件であるため、連作障害が生じやすい。畑地では、連作障害を防ぐために土壌消毒が数作期毎に行われる。

1989年にモントリオール議定書が採択され、それまで主な土壌消毒剤として用いられてきた臭化メチルが日本を含む先進国は2005年、発展途上国は2010年までに特別な用途を除いた使用が禁止された(UNPN, 1989)。そこで、臭化メチル剤に代わる土壌消毒法の開発が急務となった。土壌消毒には化学的消毒法、生物的消毒法、物理的消毒法などがある。化学的消毒法にはクロルピクリン、ダゾメットやD-D剤などが用いられる。化学的消毒は臭気の問題や身体に直接影響を及ぼす。物理的消毒法は太陽熱を利用する太陽熱消毒、蒸気の熱を利用する蒸気消毒および熱水の熱を利用する熱水土壌消毒がある(西, 2002)。物理的消毒は特に薬品は用いないため、注意する点は熱水や蒸気による火傷のみである(西 and 北, 2002)。物理的消毒法にはそれぞれ長所と短所がある。太陽熱消毒は太陽熱を利用するため、消毒の効果が天候に左右されやすいという短所があるが、消毒に必要な資材等が少ないためコストは低く抑えられる。太陽熱消毒は中東などの十分な日射量があり、気温が高い地域で多く利用されている(Stapleton and De Vay, 1986)。蒸気消毒は蒸気を土壌に散布し地温を非常に高温にすることが可能であるという利点がある。一方で、蒸気を処理するためには土壌にパイプを埋設する必要があり手間がかかる上、消毒可能な深さが限られているという短所もある。蒸気消毒はネギ、ホウレンソウ、大葉等の軟弱野菜類、ユリ、キク等の切

花などの付加価値が高い施設園芸作物栽培で全国的に広く利用されている(北, 2006)。熱水土壌消毒は熱水の調整に大量の水を用いるため水源の確保が必須であることが短所の一つに挙げられるが、熱水の処理は地表面から可能であり、消毒可能な深さ蒸気消毒に比べて深い。熱水土壌消毒は日本独自の技術であり、1982年に研究が開始された比較的新しい土壌消毒法である。熱水土壌消毒の土壌病害虫に対する効果について多くの研究が行われ、様々な土壌病害虫に有効であると報告されている(西, 2002)。土壌病害中の多くは熱水処理によって死滅するが、硝化菌などの有用微生物は残存すると報告された(橋本, 2002)。熱水は傾斜地(高木, 2002)や透水性が低い土壌(山口, 2002)などの特殊な圃場においても熱水の処理が可能である。しかし、熱水は土壌の溶質を多く溶脱するが、溶脱される溶質には硝酸態窒素も含まれるため、地下水汚染の可能性が指摘された(落合ら, 2009)。熱水の散布量により、溶脱され土壌深部へ流出する溶質の量は変わると考えられる。熱水の散布量は農家の経験で決定されており、適切な散布量を理論的に決定された例はない。

1.3. 時間領域反射(Time domain reflectometry: TDR)法

土壌における水分および養分の動態を把握することは農地を管理する上で非常に重要である。水分および養分は土壌サンプルを実験室に持ち帰り測定する方法と、センサーを用いて農地の原位置で測定することが可能である。実験室に持ち帰り測定する方法は、時間と手間がかかり、連続測定ができないことが問題点として挙げられる。一方で、原位置における測定は瞬時に数値を得ることができ、経時的測定も可能であるため、土壌の水分状態に則して灌水管理を行う上で必要不可欠である。土壌水分量の原位置における測定は、Topp (1980)が TDR 法を用いた測定法を確立してから飛躍的に進歩した。土壌水分量は TDR 法を利用して測定した比誘電率から推定する。TDR 法は土壌水分量と同時に養分濃度の指標となる電気伝導度も同時に測定可能である。

TDR 法については Noborio(2001)に詳しいが、比誘電率と電気伝導度の測定原理について簡単にまとめる。比誘電率は電磁波の伝播速度を利用して測定する。電磁波の反射波形は Fig. 1-1 のように TDR プローブ周辺の水分が減少するとみかけのプローブ長 L_a が短くなる。また、電気伝導度は電磁波の減衰を利用して測定する。電磁波の反射波形は Fig. 1-2 のように TDR プローブ周辺の溶質濃度が高くなるとプローブ終端で反射された電磁波の強度(電圧) V_a が低くなる。比誘電率は温度(Davis and Chudobiak, 1975)や溶質濃度(Dalton et al., 1990; Noborio et al., 1994)など様々な土壌環境の影響を受ける。熱水土壌消毒は 70 から 95°C に調

整された熱水を土壤に散布して土壤消毒を行う。熱水土壤消毒法の適切な熱水散布量は農家の経験により決定されており、落合(2009)や加藤(2010)は熱水の適切な散布量の決定に数値計算を用いることを提案した。彼らの実験では、熱水土壤消毒時の土壤においてTDR法で測定された比誘電率を利用した体積含水率と地温の実測値と数値計算による推定値との比較を行った。しかし、TDR法で測定した比誘電率を利用して推定した体積含水率について90℃近い地温に対する適用性は検討されていない。

1.4. 本研究の目的

除染され、地力が低下した福島県の農地において養液土耕栽培が適用可能であると明らかにすることができれば、福島県の被災地における農業面の復興を実現する一つの方法として提案することが可能である。また、土壤管理を適切に行うことは作物を安定的に生産するために重要である。本研究では、2章で自動養液土耕栽培を用いたビニールハウス内における水および熱収支を、3章でTDR法の温度依存性を明らかにした。4章で熱水土壤消毒の適切な投入量を提案した。

1.5. 引用文献

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).

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.

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. 日本土壤肥料学会雑誌. 74: 175-182.

Pandey A.K., A. K. Singh, A. Kumar and S. K. Singh. 2013. Effect of drip irrigation, spacing and nitrogen fertigation on productivity of chili (*Capsicum annuum* L.). *Environ. Ecol.* 31: 139-142.

Tanaskovik V., O. Cukaliev, D. Romic, and G. Ondrasek. 2011. The influence of drip fertigation on water use efficiency in tomato crop production. *Agri. Conspect. Sci.* 76: 57-63.

Bresler E. 1977. Trickle-drip irrigation: principles and application to soil-water management. *Advan. Agro.* 29.

Dagdelen N., H. Basal, E. Yilmaz, T. Gurbuz, and S. Akcay. 2009. Different drip irrigation regimes affect cotton yield, water use efficiency and fiber quality in western Turkey. *Agri. Water Manage.* 96: 111-120.

- Dalton F.N., S. Dasberg, J.D. Rhoades, and A. Nadler. 1990. Time domain reflectometry: simultaneous in-situ measurement of soil water content and salinity BARD final report. Project no. US-868084. Bet Dagan, Israel.
- Davis J.L., W.J. Chudobiak. 1975. In situ meter for measuring relative permittivity of soils. Geol. Surv. Can. Part A Paper 75-1: 75-79.
- Goldberg 1970
- Hanson B. and D. May. 2004. Effect of subsurface drip irrigation on processing tomato yield, water table depth, soil salinity, and profitability. Agri. Water Manage. 68: 1-17.
- 橋本知義. 2002. 熱水土壤消毒 その原理と実践の記録. 日本園芸施設協会. pp101-104
- 加藤高寛. 2010. 熱水土壤消毒における土壤中の水分と熱移動. 明治大学修士論文.
- 北宣裕. 2006. 物理的消毒法の効果と普及. 野菜茶業研究集報. 3 : 7-15.
- Nakayama F. S. and D. A. Bucks. 1991. Water quality in drip/trickle irrigation: A review. Irrig. Sci. 12: 187-192.
- 西和文. 2002. 熱水土壤消毒 その原理と実践の記録. 日本園芸施設協会. p1.
- 西和文. 2002. 熱水土壤消毒 その原理と実践の記録. 日本園芸施設協会. pp7-16.
- 西和文, 北宣裕. 2002. 熱水土壤消毒 その原理と実践の記録. 日本園芸施設協会. Pp161-164.
- Noborio K., K. J. McInnes, J. L. Heilman. 1994. Field measurements of soil electrical conductivity and water content by time-domain reflectometry. Comput. Electron. Agri. 11: 131-142.
- 農林水産省. 2016. 施設園芸をめぐる情勢
http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/sisetsu/pdf/jyousei_1.pdf. (2018年10月1日確認)
- 農林水産省. 2015. 園芸施設の設置等の状況.
<http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/sisetsu/haipura/setti.html>. (2018年10月1日確認)
- 落合博之. 2009. 熱水消毒時における土壤中の水分、溶質、熱の移動. 明治大学博士学位請求論文
- Payero J. O., D. D. Tarkalson, S. Irmak, D. Davison, and J. L. Petersen. 2008. Effect of irrigation amounts applied with subsurface drip irrigation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency, and dry matter production in a semiarid climate. Agri. Water Manage. 95: 895-908.

- Sezen S. M., A. Yazar, and S. Eker. 2006. Effect of drip irrigation regimes on yield and quality of field grown bell pepper. *Agri. Water Manage.* 81: 115-131.
- Stapleton J. J. and J. E. De Vay. 1986. Soil solarization: a non-chemical approach for management of plant pathogens and pests. *Crop Protec.* 5(3): 190-198.
- 高木廣. 2002. 熱水土壤消毒 その原理と実践の記録. 日本園芸施設協会. pp117-124
- Tiwari K. N., A. Singh, and P. K. Mal. 2003. Effect of drip irrigation on yield of cabbage (*Brassica oleracea* L. var. *capitata*) under mulch and non-mulch conditions. *Agri. Water Manage.* 58: 19-28.
- Topp, G.C., J.L. Davis, A. P. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.* 16: 574-582.
- UNEP. 1989. The Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer eighth edition. UNEP. P 11.
- 山口純一郎. 2002. 熱水土壤消毒 その原理と実践の記録. 日本園芸施設協会. pp124-127

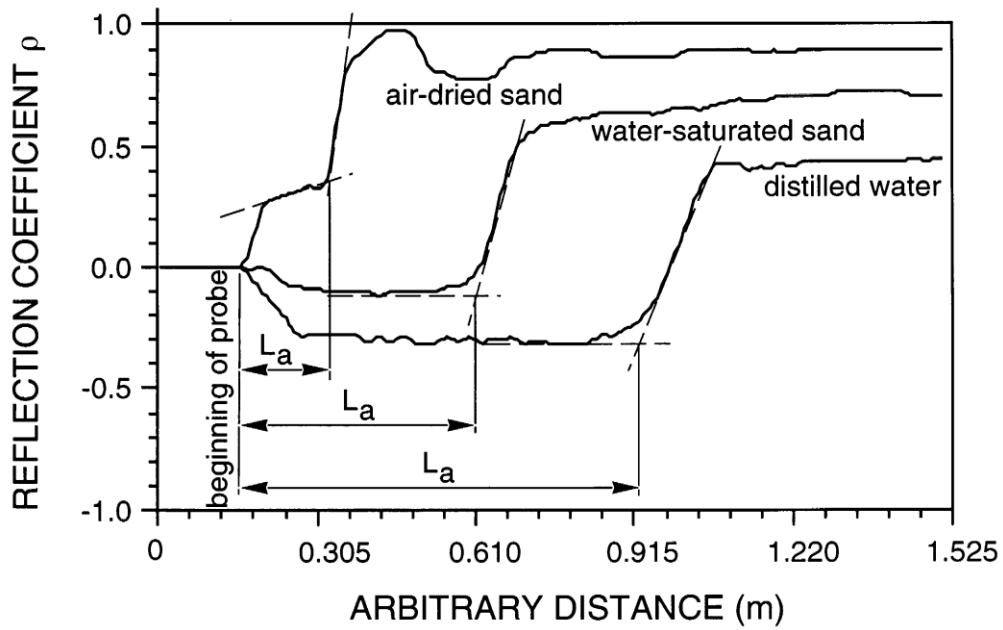


Fig. 1-1 Examples TDR waveforms in distilled water, water-saturated sand, and air-dried sand with three-rods probe ($=0.145$ m). L_a shows an apparent probe length from the beginning to the end of the probe. $V_p = 0.66$. (referred from; Noborio, 2001)

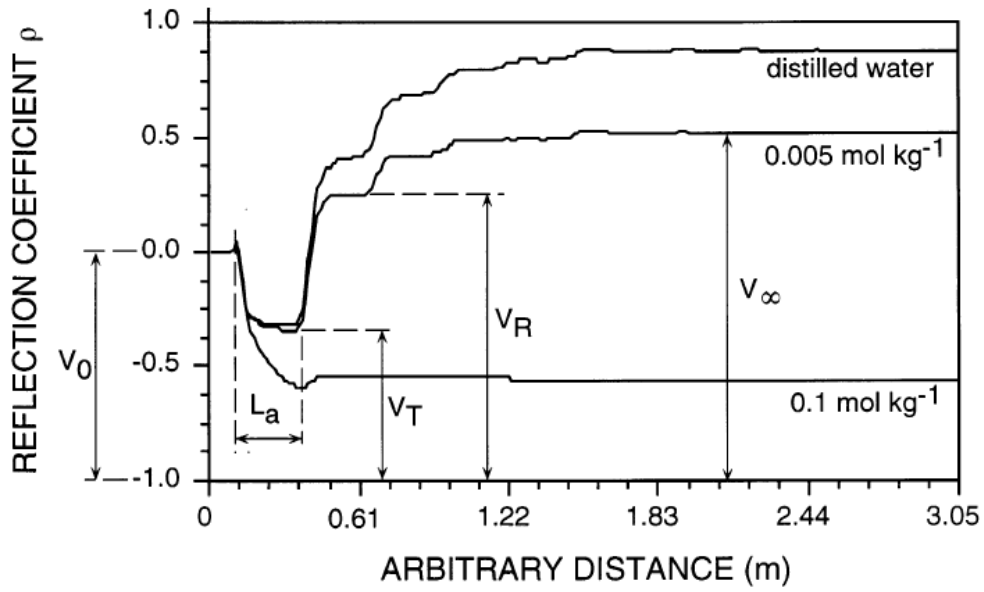


Fig. 1-2 Examples TDR waveforms in distilled water and NaCl solution with a three-rod probe (=0.045 m) (referred from; Noborio, 2001).

2. 農業施設における水および熱収支

2.1. 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, 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植物体に養分を供給可能である。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。

Skaggs et al. (2004) は点滴灌漑が行われた無植生の砂質ローム土壌における土壌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 and Or (1999)はトウモロコシを栽培したシルト質ローム土壌において根と土壌水分の二次元分布について、体積含水率が低い領域と植物根が分布した領域が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壌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。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。ヒートパルス法は植物の茎や樹木の幹に電極を直接挿入して、与えた熱量と茎内流における温度変化を用いて茎内流量を測定する方法である(森川, 1972)。ヒートパルス法は外部からの影響が小さいため、蒸発散量の評価に用いられる。一方で、茎に直接電力を挿入

するため茎を痛める原因となる。茎熱収支法は、植物体の茎部に一定の熱量を与え、茎内流によって輸送される熱量から茎内流量を求める方法であり、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)。茎熱収支法は茎の周囲にヒーターを巻きつけるため、直接茎を痛めることはないが、ヒーターの熱を長時間与え続けると茎の組織が痛む原因となる。草本植物の茎内流量を測定する場合、茎熱収支法が取り扱いやすい方法と考えられる。

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(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(例えば Yao et al., 2001; 長岡ら, 1984 など)。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 and 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関与していることを明らかにした。これらの先行研究は、大気環境および土壌水分量が蒸散量に及ぼす影響について更なる研究が必要であることを示している。

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。しかし、Villareal-Guerrero et al. (2012) は側面開放型農業用施設内において改良ペンマン・モンテース法により推定され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、Kernal et al. (2003) や Prenger et al. (2002)も改良ペンマン・モンテ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・モンテース法(例えば Campbell, 1985; Allen et al., 1998)は、十分なフェッチが得られないため農業用施設には適用できないとされてきた(Heilman and Brittin, 1989)。しかし、一般的なペンマン・モンテース法も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 et al., 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一般的なペンマン・モンテース法適用性について更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壌において以下の4点を明らかにすることを目的とした。

- i. 自動養液土耕栽培システムで管理された土壌における水分分布
- ii. 自動養液土耕栽培システムによる灌水量の評価
- iii. 大気環境および土壌水分と茎内流量の相関関係
- iv. ピーマンを栽培したビニールハウスに対するペンマン・モンティ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

2.2. 方法

2.2.1. 実験地および栽培管理

実験は2015年6月5日から11月14日、2017年6月7日から10月27日まで福島県飯舘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=5.5m:30m)内圃場において行った。ハウス内土壌において体積含水率、地温、可能蒸発散量およびピーマンの茎内流量を測定および推定した。圃場内の土壌は除染後、客土が行われ、土性はSandy Loam(砂:シルト:粘土=60%:25%:15%)であった。2015年6月5日から11月14日まではピーマン(ピー太郎:タキイ種苗株式会社)を栽培した。2017年6月7日から11月19日までは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を測定対象として選出した。また、イエローホルンとレッドホルンはピクルスなどの加工用に栽培した。移植後日数(Day after transplanted: DAT)は、2015年は6月5日、2017年は6月7日をDAT=1とした。自動養液土耕栽培システムにZeRo. agriを用いて灌水管管理を行った。2015年および2017年は幅0.8m、長さ30mの平畝を畝間1.15mで4本立てた。それぞれの畝にハウスと平行になるように2015年は畝中央に1本、2017年は畝中央からそれぞれ南北に0.15m間隔で2本の灌水チューブを地表面に設置し、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0.2m間隔、灌水量は全てのドリッパーにおいて一定である。ピーマンの苗は2015年6月5日および2017年6月7日に、畝中央を中心として条間を0.4m間隔の千鳥植えで定植した。ただし、2017年はこの後で記述する灌水茎内流量を測定したピーマン(ピー太郎)は畝中央に定植し、灌水チューブも畝の中央に寄せた。栽培前に土壌に十分な灌水を施し、その48時間後の体積含水率を目標体積含水率とした。灌水量は気象デー

タ、土壌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予想して与えた。2015年の目標体積含水率($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)は2015年6月5日から6月9日は0.250、6月10日から7月6日は0.255、7月7日から8月3日は0.270、8月4日から11月14日は0.320であった。2017年の目標体積含水率($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)は栽培期間を通して0.330であった。培養液は水に液肥を混入して調整し、栽培期間中、水系統および液肥系統の電磁弁の開放時間の比が2015年は6月5日から6月9日まで0.50、6月10日は0.35、6月11日から11月14日まで0.300、2017年は栽培期間を通して0.200であった。例えば、水系統および液肥系統の電磁弁の開放時間の比が0.200とすると、水系統の電磁弁を10分開放した場合、液肥系統の電磁弁は2分間開放した。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2015年が $73.67 \text{ kg } 10 \text{ a}^{-1}$ 、2017年が $33.48 \text{ kg } 10 \text{ a}^{-1}$ であり、それぞれの年の灌水量をFig. 2-1に示した。時間当たりの灌水量は2015年と2017年に大きな差はなかったが、測定期間を通した総灌水量は2015年が $58020 \text{ mm period}^{-1}$ 、2017年が $39850 \text{ mm period}^{-1}$ であり、2015年と2017年で約 $20000 \text{ mm period}^{-1}$ の差が生じた。これは2015年の灌水頻度が2017年より高く、灌水時間が結果的に長くなったためである。

2.2.2. 体積含水率と地温の測定

土壌全体の比誘電率はTDR法(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分間隔で測定および記録した。TDR法にはTDR100(Campbell Scientific Inc., USA)、マルチプレクサー(SDMX50, Campbell Scientific Inc., USA)および自作のTDRプローブを用いた。TDRプローブは3線式で、ロッドの太さ、間隔および長さは、それぞれ3.2、20および100mmであった。TDRプローブおよび熱電対は、畝に対して垂直な土壌断面に対して茎内流量を測定したピーマン灌水の直下および左右0.1mの土壌深さ0.05、0.1、0.2および0.3mに計12本設置した。実験地の土壌についてTDR法で測定した比誘電率と体積含水率の関係式を作成した。実験地の土壌を実験室内に持ち帰り、風乾後2mmふるいを通した土壌を供試土として用いた。供試土をある体積含水率に調整し、内径15cm、高さ20cmのアルミ缶に土壌深さが15cm、乾燥密度が実験地と同様になるように充填した。それぞれの体積含水率に対する比誘電率を測定した。比誘電率 ϵ_b と体積含水率 θ_w の関係を式(1-1)に示す。

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

ここで、 ε_b は測定された土壌全体の比誘電率である。

ピーマン(ピー太郎)のみかけの根の吸水量を推定した。本来は土壌深層への浸潤量と地表面における蒸発量を加えることが一般的である。本研究では作土層の下層が礫分を多く含む土層であったため、マトリックポテンシャル勾配は常に作土層が低かったと仮定し、土壌深層への浸潤量は無視した。また、地表面はマルチで被覆したため、蒸発量も無視した。したがって、根の吸水量 $U(\text{mm d}^{-1})$ は以下の式で表すことができる。

$$U = I - \Delta\theta_{mean} \quad (1-2)$$

ここで、 I は灌水量(mm d^{-1})、 $\Delta\theta_{mean}(\text{mm d}^{-1})$ は体積含水率の日変化量である。 $\Delta\theta_{mean}$ は次式で表される。

$$\Delta\theta_{mean} = \frac{V_a(\theta_{mean} - \theta'_{mean})}{\Delta t A_e} \quad (1-3)$$

ここで、 V_a は有効土壌体積($0.3 \text{ m long} \times 0.2 \text{ m wide} \times 0.35 \text{ m deep} = 0.021 \text{ m}^3$)、 θ_{mean} と θ'_{mean} はそれぞれ $\text{DAT} = i$ と $i+1$ の午前5時における平均体積含水率 ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)、 Δt は i 日と $i+1$ 日の間隔(d)、 A_e は有効地表面積($0.3 \text{ m long} \times 0.2 \text{ m wide} = 0.06 \text{ m}^2$)である。

2.2.3. ペンマン・モンティー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・モンティース法により推定した。ペンマン式は(1-4)式で表すことができる (Campbell, 1985)。

$$L_E \cdot ET_p = - \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n + G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \left(\frac{\rho_a^o - \rho_a}{r_{va}} \right) \right] \quad (1-4)$$

ここで L_E は蒸発潜熱(MJ kg^{-1})、 ET_p は可能蒸発散量 (mm)、 Δ は温度飽和水蒸気濃度曲線の勾配($\text{kg m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)、 γ は乾湿計定数($=0.66 \text{ hPa }^\circ\text{C}^{-1}$)、 R_n は純放射量 (W m^{-2})、 G は地中熱伝導量 (W m^{-2})、 ρ_a^o は気温 T_a ($^\circ\text{C}$)に対する大気の飽和水蒸気濃度(kg m^{-3})、 ρ_a 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。本研究では純放射量および地中熱流量の熱フラックスについて、地表面に向かう方向を正、地表面から離れる方向を負とした。また、植生上の水蒸気拡散に対する抵抗 r_{va} は植物に水分ストレスがかかるにしたがって大きくなるが、ペンマン・モンティ

一ス法は、植生が十分に灌水された条件に適用可能であり、植生面を大きな一枚の葉として考えるため、 r_{va} はゼロと仮定した(Fig. 2-1)。 Δ と r_{va} はそれぞれ以下の式で求めた (Campbell, 1985)。

$$\Delta = \frac{\rho_a^0 - \rho_s}{T_a - T_s} \quad (1-5)$$

$$r_{va} = \frac{\ln[(z_a - d + z_H)/z_H] \ln[(z - d + z_h)/z_M]}{k^2 \bar{u}} \quad (1-6)$$

ここで、 T_s は地表面温度(°C)、 k はカルマン定数(≈0.4)、 \bar{u} は平均風速 (m s^{-1})、 z_a 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_v (m)に対して、代表的な値として $d=0.077h_v$ 、 $z_M=0.13h$ 、 $z_H=0.2z_M$ が提案しており、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^0 に相対湿度 RH (0-1)を乗じて計算した (Campbell, 1985)。

$$\rho = RH \left\{ \frac{\exp(31.3716 - 6014.79/T - 0.00792495T)}{1000T} \right\} \quad (1-7)$$

大気の水蒸気濃度 ρ_a は、(1-7)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。植生面の水蒸気濃度 ρ_s は、(1-7)式において $RH=1.0$ 、 T は植生面(本研究では地表面)の温度 T_s (K)を使って計算した。

純放射量は自作の純放射計、地中熱流量は自作の地中熱流板および地表面温度は T 型熱電対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 分毎に測定および記録した。純放射計と地中熱流板は黒体スプレーが塗布されたサーモモジュール(ペルチェ素子)を用いた。正味純放射計()を用いて測定した熱量とペルチェ素子を用いて測定した電圧の関係を Fig. 2-2 に示す。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, METER Group, Inc., USA)を用いて測定し、データロガー(Em50, Meter Group Inc., USA)を用いて 10 分毎に記録した。地中熱流量、純放射量、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入り口から約 10m、北側側面から約 2m の畝において測定した。地表面温度は土壌において感知部が空気中に露出しない程度の地表面近傍、地中熱流量は土壌深さ 0.05m、純放射量、風速、相対湿度、気温および大気圧は地表面から高さ 2m にお

いて測定した。風速は、DAT=1 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(0.6m s⁻¹)を用いた。

2.2.4. 茎熱収支法を用いた茎内流量の測定

本研究では、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、蒸散量を求める測定方法である。茎部の加熱と蒸散流の増減によるその部位の温度分布変化はステムフローセンサーを用いて測定した。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式(1-8)で求められる (Sakuratani, 1981)。

$$Q = Q_f + q_u + q_d + q_r \quad (1-8)$$

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。式(1-8)の右辺の Q_f 、 q_u 、 q_d および q_r はそれぞれ式(1-9)、(1-10)、(1-11)および(1-12)で表すことができる (Sakuratani, 1981)。

$$Q_f = c_w F_{sm} (T_d - T_u) \quad (1-9)$$

$$q_u = \lambda A \frac{T_u - T'_u}{\Delta x} \quad (1-10)$$

$$q_d = \lambda A \frac{T_d - T'_d}{\Delta x} \quad (1-11)$$

$$q_r = k_s E \quad (1-12)$$

ここで c_w は水の比熱(= 4.18 J g⁻¹ °C⁻¹)、 F_{sm} は質量単位(g s⁻¹)の茎内流量、 T_d と T_u はそれぞれ加温部位直上と直下の茎温(°C)、 λ は茎の熱伝導率(W m⁻¹ °C⁻¹)、 A は茎の横断面積(m²)、 T'_u は T_u の測定点から Δx (m)上流の点での茎温(°C)、 T'_d は T_d の測定点から Δx 下流の点での茎温(°C)、 E は起電力(V)、 k_s は実験係数(W V⁻¹)である。式(1-8)に式(1-9)、(1-10)、(1-11)および(1-12)を代入すると F_{sm} (g s⁻¹) は

$$F_{sm} = \frac{Q - \lambda A \left[\frac{(T_u - T'_u) - (T_d - T'_d)}{\Delta x} \right] - k_s E}{c_w (T_d - T_u)} \quad (1-13)$$

と表される。Steinberg ら(1990)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 (Fig. 2-3)。すなわち、(1-13)式は以下のように変形できる。

$$F_{sm} \approx \frac{Q - \lambda A \frac{(T_u - T'_u) - (T_d - T'_d)}{\Delta x} - kE}{c_w \left\{ \frac{(T_u + T'_u)}{2} - \frac{(T_d + T'_d)}{2} \right\}} = \frac{Q - \lambda A \frac{(T_u - T'_d) - (T'_u - T_d)}{\Delta x} - kE}{\frac{c_w}{2} \{ (T'_u - T_d) + (T_u - T'_d) \}} \quad (1-14)$$

(1-14)式を Steinberg et al. (1990)の配線に従って図中の記号を用いると、

$$F_{sm} = \frac{Q - \lambda A \frac{BH - AH}{\Delta x} - k(CH)}{c_w \frac{AH + BH}{2}} \quad (1-15)$$

となる。 k は Sakuratanie(1999)にならい、1日毎にその日の最小値をそれぞれ用いた。

F_{sm} は深さ単位の茎内流量 F_{sl} (mm s⁻¹)に(1-16)式により計算した。

$$F_{sl} = \frac{F_{sm}}{\rho_w A_p} \quad (1-16)$$

ここで、 ρ_w は水の密度(10⁶ g m⁻³)、 A_p はピーマン1個体に対する地表面積である。 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ピーマンの本数より決定した。

ステムフローセンサーは、ピーマンの主茎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20cm程度の1箇所に設置した。茎の直径は16mmであった。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(ポリ塩化ビニリデン)、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箔で被覆した。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。

2.2.5. 環境条件に対する茎内流量と可能蒸発散量の影響

本研究における環境条件は純放射量、地中熱流量、飽差および植生上の水蒸気輸送に対する空気力学的抵抗である。 F_{sl} は環境条件に加えて植生上の気温、畝中央の深さ5cmにおける地温、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)を用いて相関帰分析を行った。また、 F_{sl} と ET_p について表計算ソフトエクセル(Microsoft Corporation, USA)を用いて単回帰分析を行った。有意差検定は Fisher and Yates (1963)にしたがって行った。

ET_p の感度解析は、(1-4)式中の変数である R_n 、 G 、飽差(VPD: Vapor pressure deficit)($=\rho_a^o-\rho_a$)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 に対する相対値を計算した。

2.3. 結果と考察

2.3.1. 土壌における含水率分布

Fig. 2-5 に2017年の灌水量が最も多かった8月9日(DAT=64)から13日(DAT=68)における灌水量、地温および体積含水率の変化を示す。地温は日中に高くなった。灌水は日中に行われたが、それぞれの深さにおける体積含水率はほとんど変化しなかった。灌水は地温や体積含水率の変化に影響を与えないことが明らかになった。

Fig. 2-6 (a), (b), (c), (d)および (e) にそれぞれ2017年の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 $0.3 \text{ (m}^3 \text{ m}^{-3}\text{)}$ 程度であった。測定期間を通して土壌深さ30cm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0.1mを中心として円形状に分布し、中心ほど θ_w は高かった。 θ_w は測定期間を通して畝の南側より北側において低く、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。

土壌深さ30cmにおける θ_w はDAT=61において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 and 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。

2.3.2. 自動養液土耕栽培システムによる灌水量の評価

Fig. 2-7 に2015年の栽培期間における I と U の比較を示した。 I と U は栽培の初期を除いて非常に良く一致した。栽培初期は植物体の根の活着する過程にあり、根の吸水が安定しな

かったことが原因であると考えられる。Fig. 2-8 に 2015 年の栽培期間における I と ET_p の比較を示した。 ET_p は測定期間を通して I より小さい値であった。ピーマンの植生面上の温度の鉛直分布が一定ではなかったことで気温 T_a における水蒸気濃度 ρ_a が、 ET_p を過小評価した原因であると考えられる。また、Fernandez et al., (2010) は式(1-6)中の平均風速 u が小さくなることによる r_{va} の過小評価が ET_p を過小評価する原因となることを報告した。本実験地の土壌深さ 30cm より深い土層には礫を多く含む層が分布しているため、キャピラリーバリア(宮崎, 2000)によって灌水された培養液が土壌深さ 30cm より深い土層へ移動することはほとんどないと考えられる。このことは測定期間中の土壌深さ 30cm における体積含水率がほとんど一定であったことから説明可能である。したがって、灌水された培養液のほとんどはピーマンによって吸収されたことが考えられる。

DAT=60 から 65 までの茎内流量の経時を Fig. 2-9 に示す。茎内流量の変化の傾向と値は先行研究の値(例えば Moreshet et al., 1999; Sliber et al., 2005)と良く一致した。ピー太郎の茎内流量は他のピーマン品種と大きな差がないことが明らかになった。Fig. 2-10 に DAT=61 から DAT=65 における F_{sl} と自動養液土耕栽培システムによる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} の変化と良く一致した。

2.3.3. 蒸散量と環境要因の関係

2017 年の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 2-1 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 10cm 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 2-2 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。

土壌の各深さにおける θ_w と F_{sl} の日変化はほとんど相関関係がなかった。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、作物体による吸水量と 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い、土壌水分分布が定常状態に見えたためであると考えられる。 r_{va} 以外のパラメーターと F_{sl} には有意な相関があった。 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、肥沃度が低下し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。

2.3.4. ビニールハウスにおけるペンマン・モンティース法の適用可能性

2017年の測定期間中のハウス内における環境条件に対する ET_p の感度解析の経時変化を Fig. 2-11 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。Aydin ら (2015) はペンマン・モンティ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、風速に DAT=1 から 31 までは固定値 ($=0.6 \text{ m s}^{-1}$)、DAT=32 以降に実測値を用いた場合、それぞれ $ET_{p_90\%}$ は ET_p に比べて 10% 程度および 6% 程度大きく計算された。このことは、ペンマン・モンティース法を用いて 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。

Fig. 2-12 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。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、ビニールハウス外への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可能性がある。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・モンティ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、その具体的な規模などは今後さらに検討を行う必要がある。

2.4. 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マン栽培の土壌における根の分布を良く表した。水分減少法を用いたみかけの根の吸水量は自動養液土耕栽培システムによる灌水量と良く一致した。また、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無かった。これは、自動養液土耕システムによる灌水量とピーマン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。

2.5. 引用文献

- Allen R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. 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.
- Aydin M., Y. S. Jung, J. E. Yang, S. J. Kim and K. D. Kim. 2015. Sensitivity of soil evaporation and reference evapotranspiration to climatic variables in South Korea. Turk. J. Agri. Forest. 39: 652-662.
- Campbell G. S. Soil physics with basic. pp. 140-144. Elsevier, Amsterdam. 1985.
- Coelho E. F. and D. Or. 1999. Root distribution and water uptake patterns of corn under surface and subsurface drip irrigation. Plant and Soil. 206: 123-136.
- Fisher R. A. and F. Yates. Statistical tables for biological, agricultural and medical research edited by R.A. Fisher and F. Yates. 6th ed. 1963. p. 72. Oliver and Boyd, Edinburgh.
- Gavande S. A. and S. A. Taylor. 1967. Influence of soil water potential and atmospheric evaporative demand on transpiration and the energy status of water in plants. Agro. J. 59: 4-7.
- Heilman J. L. and C. L. Brittin. 1989. Fetch requirement for Bowen ratio measurements of latent and sensible heat fluxes. Agri. and Forest Meteorol. 44: 261-273. 1989.
- Huber B. 1932. Beobachtung und messung pflanzlicher saftstromme. Ber. der Deutsch. Bot. Ges. 50: 89-109.

- Kirnal H., C. Kaya, D. Higgs, I. Tas. 2003. Responses of drip irrigated bell pepper to water stress and different nitrogen levels with or without mulch cover. *J. Plant Nutr.* 26(2): 263-277.
- 宮崎毅. 環境地水学. p. 126. 東京大学出版会, 東京. 2000.
- Mojid M. A. and H. Cho. 2004. Evaluation of the time-domain reflectometry (TDR)- measured composite dielectric constant of root-mixed soil for estimating soil-water content and root density. *J. Hydro.* 295: 263-275.
- 森川靖. 1972. 樹液流測定装置と測定方法. *日本林学会誌.* 54 (5): 166-171.
- Morille B., C. Migeon, and P. E. Bournet. 2013. Is the Penman-Monteith model adapted to predict crop transpiration under greenhouse conditions? Application to a New Guinea Impatiens crop. *Sci. Hortic.* 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. *Comput. Electron. Agri.* 31: 213-237.
- 小田雅行, 李智軍, 辻頭光, 市村一雄, 佐々木英知. 1993. 高温時の空気湿度と土壤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.
- Prenger J. J., R. P. Fynn, and R. C. Hansen. 2002. A comparison of four evapotranspiration models in a greenhouse environment. *Am. Soc. Agri. Engi.* 45-6: 1779-1788.
- Sakuratani T. 1981. A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. *J. Agri Meteorol.* 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., T. Aoe, and H. Higuchi. 1999. Reverse flow in roots of *Sesbania rostrata* measured using the constant power heat balance method. *Plant Cell Environ.* 22: 1153-1160.
- Skaggs T. H., T. J. Trout, J. Šimůnek, and P. J. Shouse. 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulation of drip irrigation of drip irrigation with experimental observations. *J. Irri. Drain. Engi.* 130: 466-472.
- Steinberg S., C. H. M. Van Bavel, and M. J. McFarland. 1989. A gauge to measure mass flow rate of sap in stems and trunks of woody plants. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 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.
- Villarreal-Guerrero F., M. Kacira, E. Fitz-Rodríguez, C. Kubota, G. A. Giacomelli, R. Linker, and A. Arbel. 2012. Comparison of three evapotranspiration models for a greenhouse cooling strategy with natural ventilation and variable high pressure fogging. *Sci. Hortic.* 134: 210-221.
- Yao C., S. Moreshet, and B. Aloni. 2001. Water relations and hydraulic control of stomatal behavior in bell pepper plant in partial soil drying. *Plant Cell Environ.* 24: 227–235.
- Zhang Z., S. Liu, S. Liu, and Z. Huang. 2010. Estimation of cucumber evapotranspiration in solar greenhouse in Northeast China. *Agri. Sci. China.* 9: 512-518.

Table 2-1 Correlation of depth-based stem flow (F_{st}) and volumetric water content (θ_w) at each soil depth in cross-sectional ridge soil.

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

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

Table 2-2 Pearson's correlation (r) of depth-based stem flow (F_{st}) and environmental condition in the greenhouse. 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 on the vegetation, and soil temperature, respectively.

| | 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)

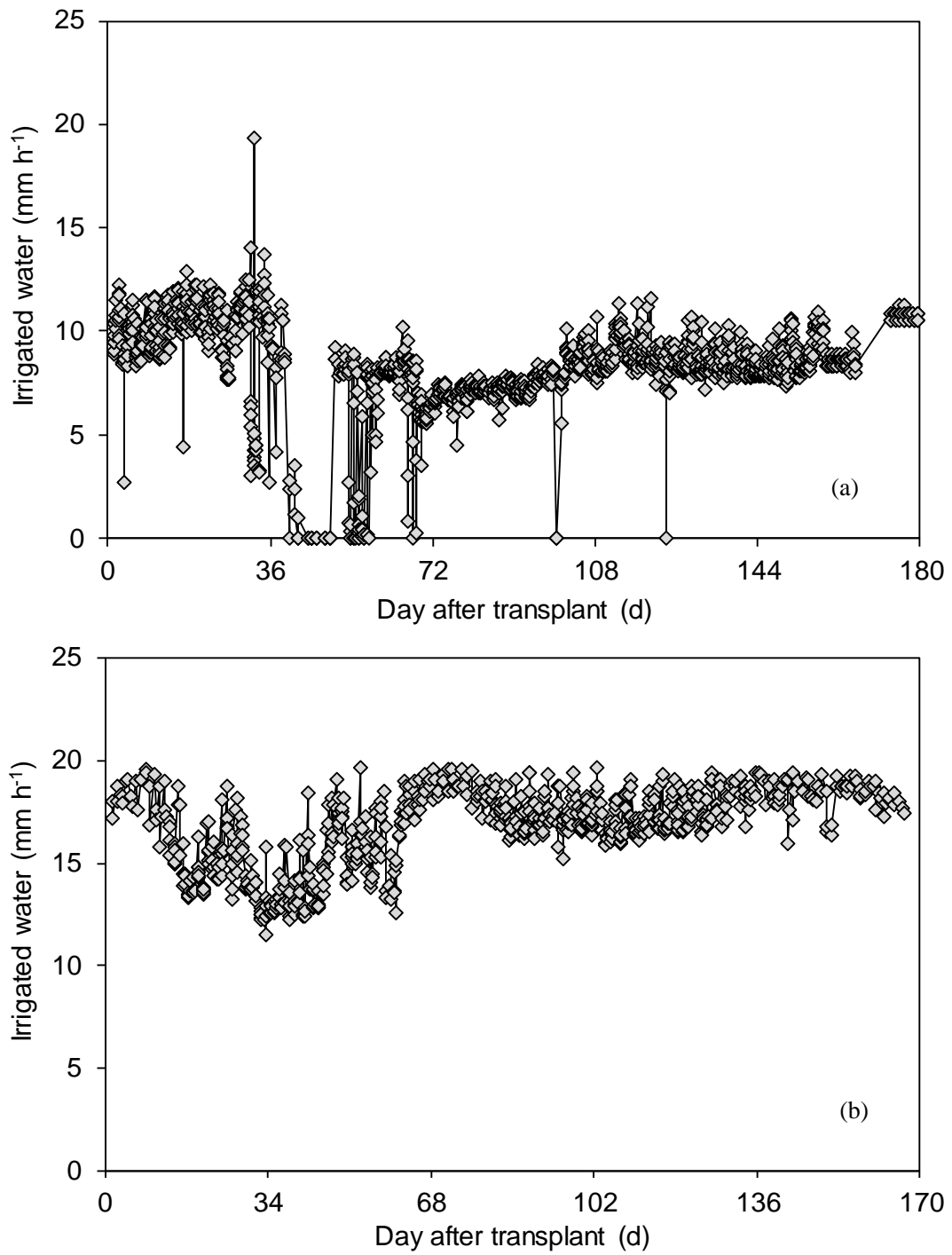


Fig. 2-1 The amount of irrigated water during measurement period in (a) 2015 and (b) 2017.

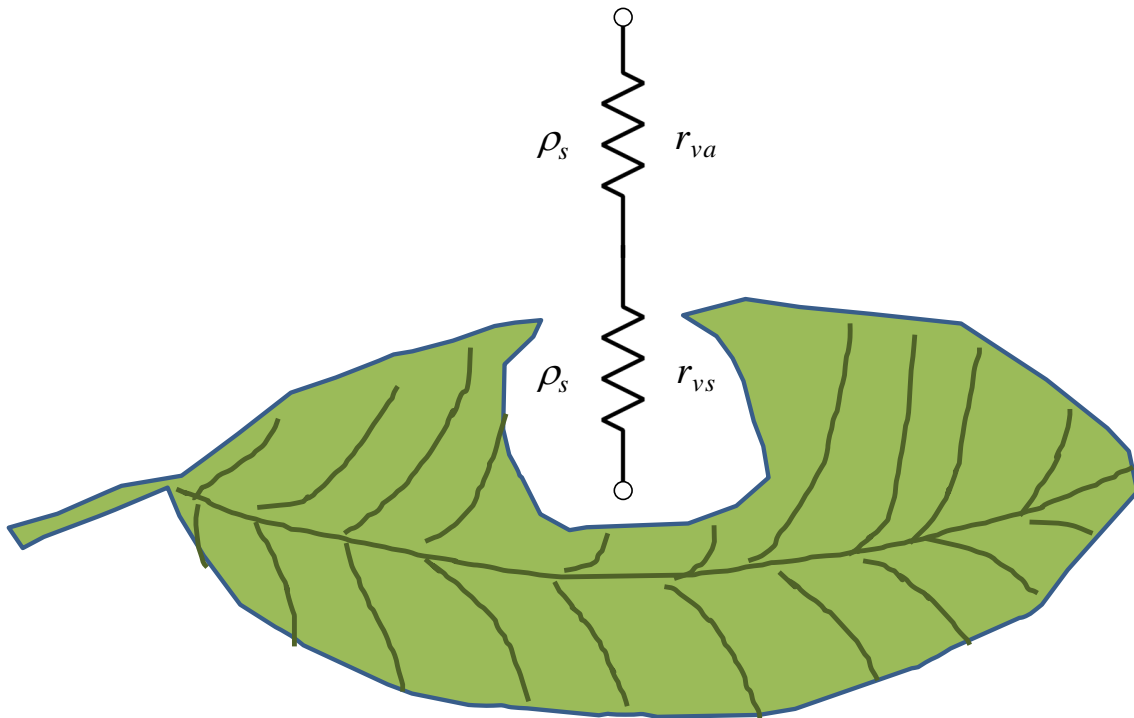


Fig. 2-2 Simplified representation of stomatal and aerodynamic resistance for water vapor flow in Penman-Monteith method.

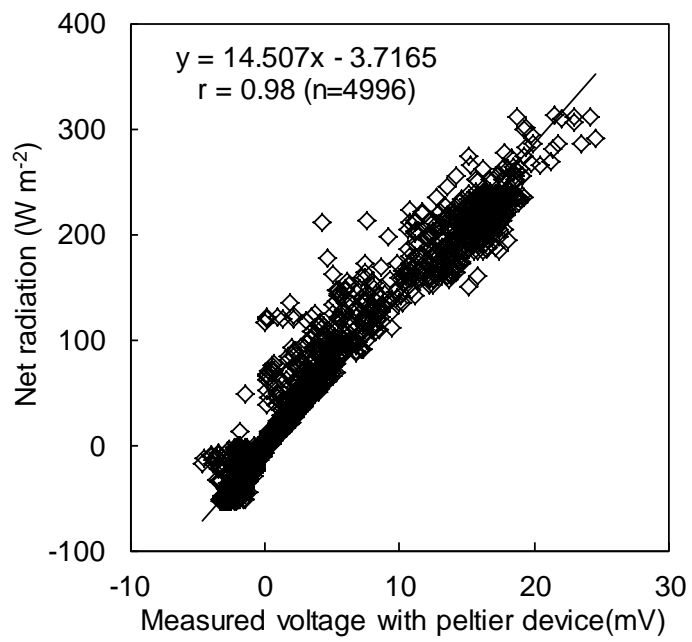


Fig. 2-3 Correlation of measured voltage with peltier device and net radiation.

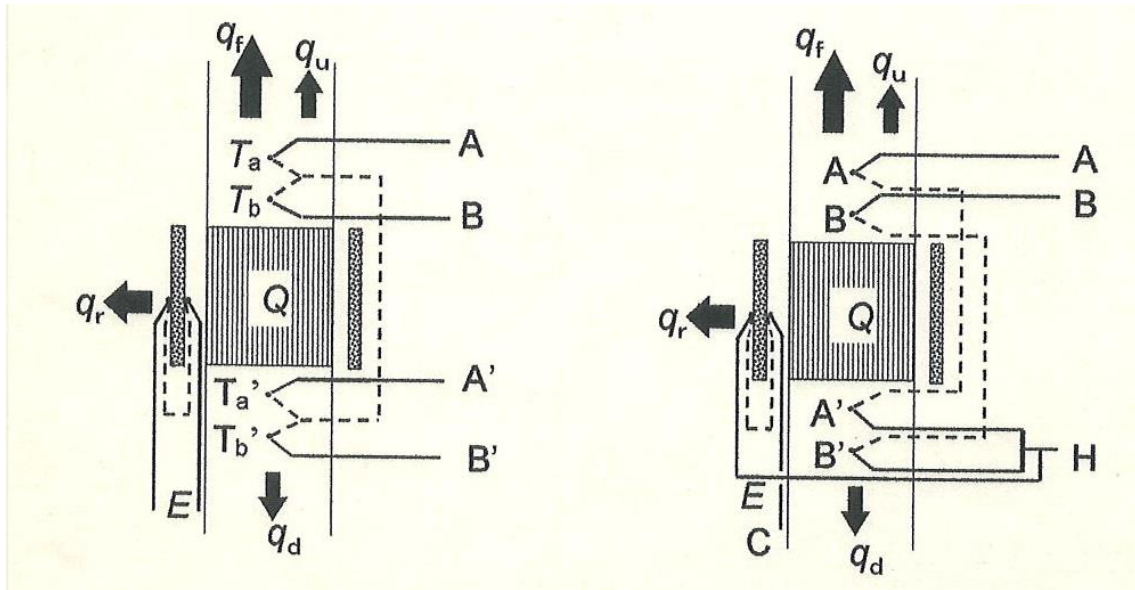


Fig. 2-4 Wire connections of thermocouples (Left: Sakuratani, 1981; Right: Steinberg et al., 1990)

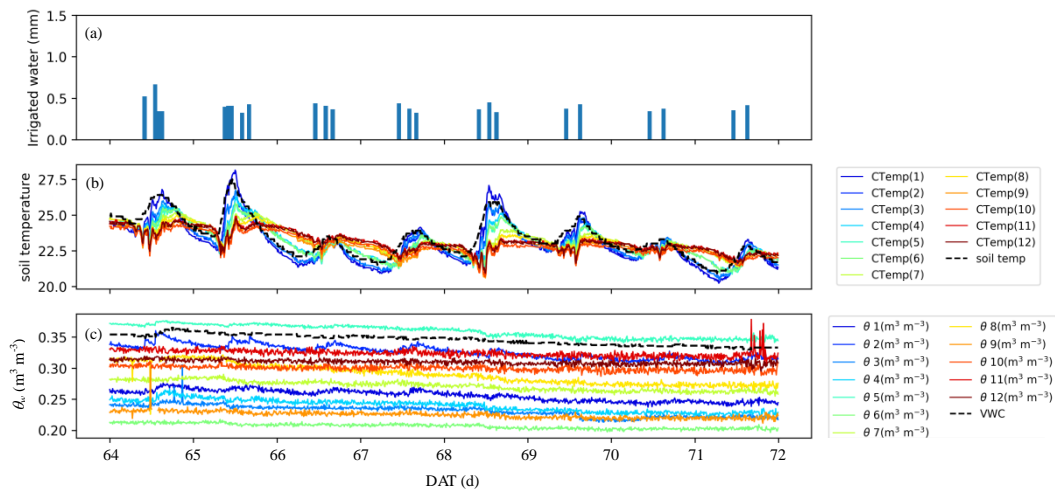


Fig. 2-5 (a) The amount of irrigated water and changes in (b) soil temperature and (c) volumetric water content at each measurement point from DAT=64 to 71 in 2017. Numbers in legends of each figure shows soil depth and location in the ridge; 1, 2, and 3: 5 cm soil depth, 4, 5, and 6: 10 cm soil depth, 7, 8, and 9: 20 cm soil depth, 10, 11, and 12: 30 cm soil depth, 1, 4, 7, and 10: south side of ridge, 2, 5, 8, and 11: center of the ridge, 3, 6, 9, and 12: north side of ridge. Dashed lines are values measured with ZeRo. agri.

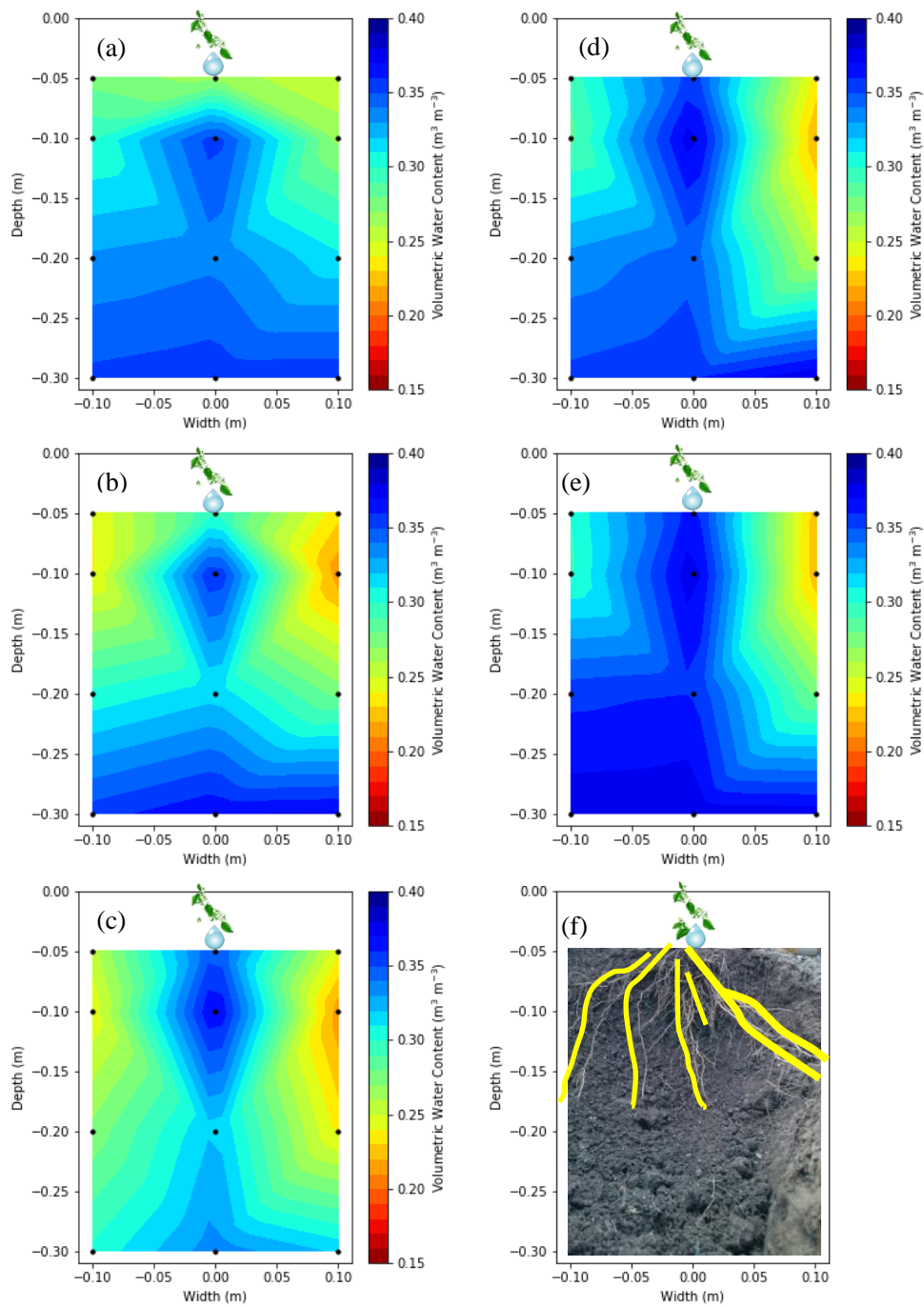


Fig. 2-6 Volumetric water content distribution in cross-sectional ridge soil at 5 pm on day after transplanted (DAT)=(a) 1, (b) 31, (c) 61, (d) 91, (e) 121, and (f) root distribution on the last day of measurement period. Black dots show where TDR probes were inserted in (a) to (e). yellow lines are roots in (f).

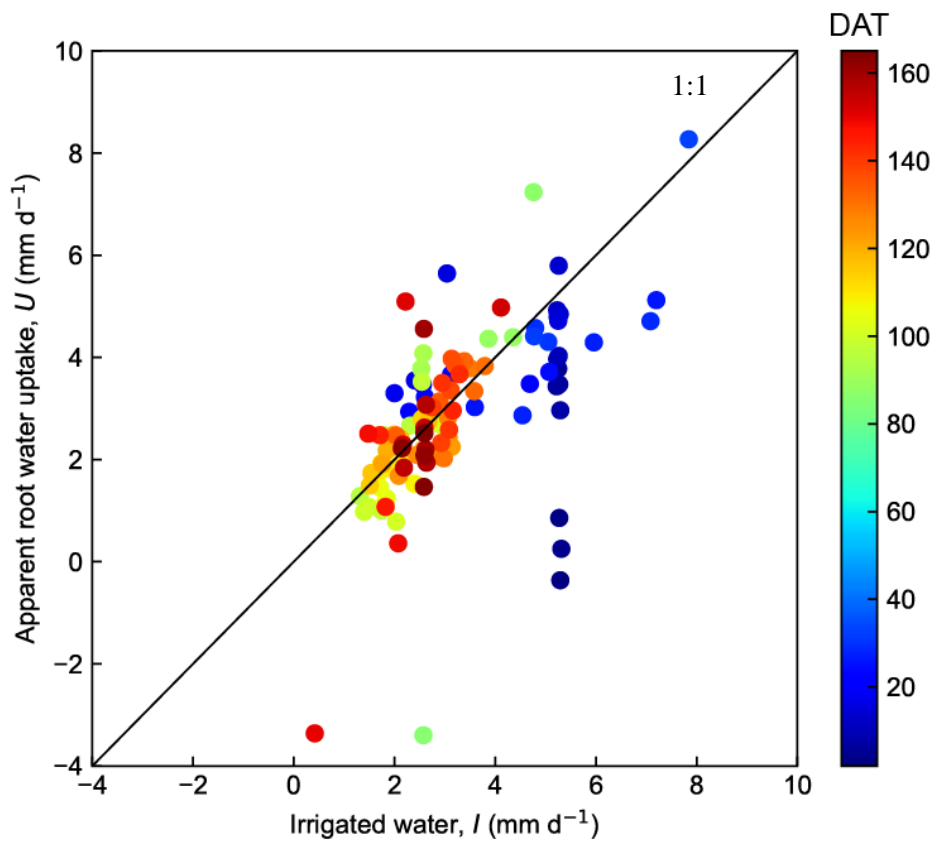


Fig. 2-7 Comparison of amount of daily irrigated water, I , and apparent root water uptake, U .

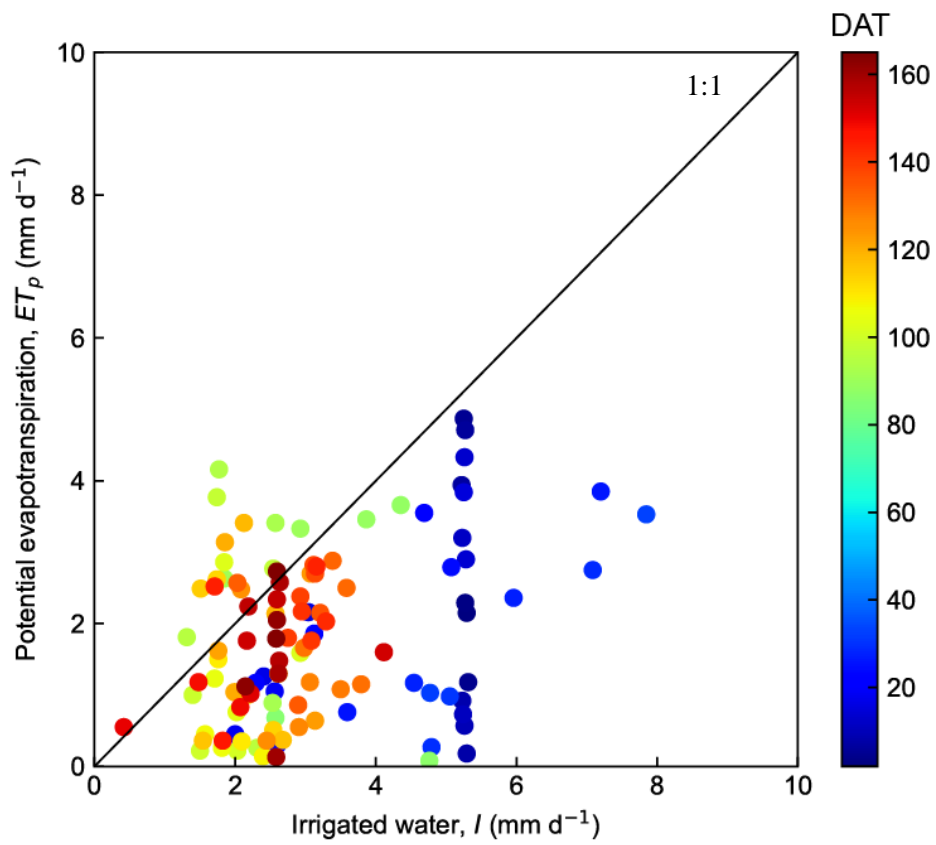


Fig. 2-8 Comparison of amount of daily irrigated water, I , and potential evapotranspiration, ET_p .

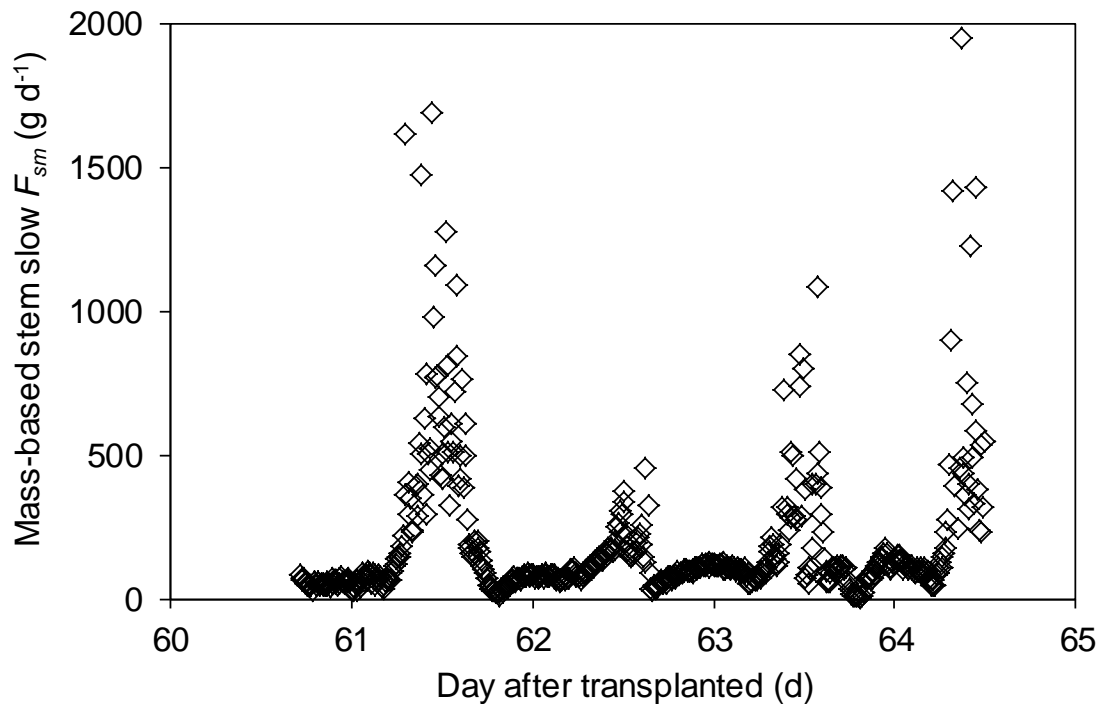


Fig. 2-9 Diurnal changes in mass-based stem flow (F_{sm}) during DAT = 60 to 65.

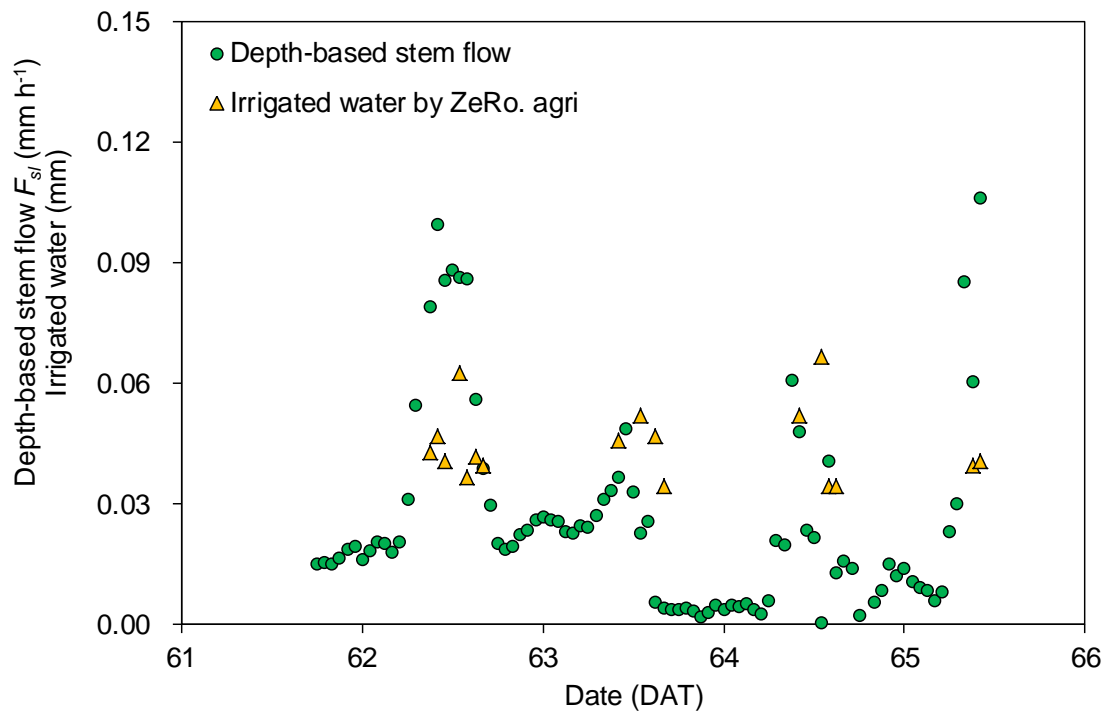


Fig. 2-10 Diurnal changes in depth-based stem flow (F_{st}) and the amount of irrigated water by ZeRo. agri from day after transplanted (DAT)=60 to 65.

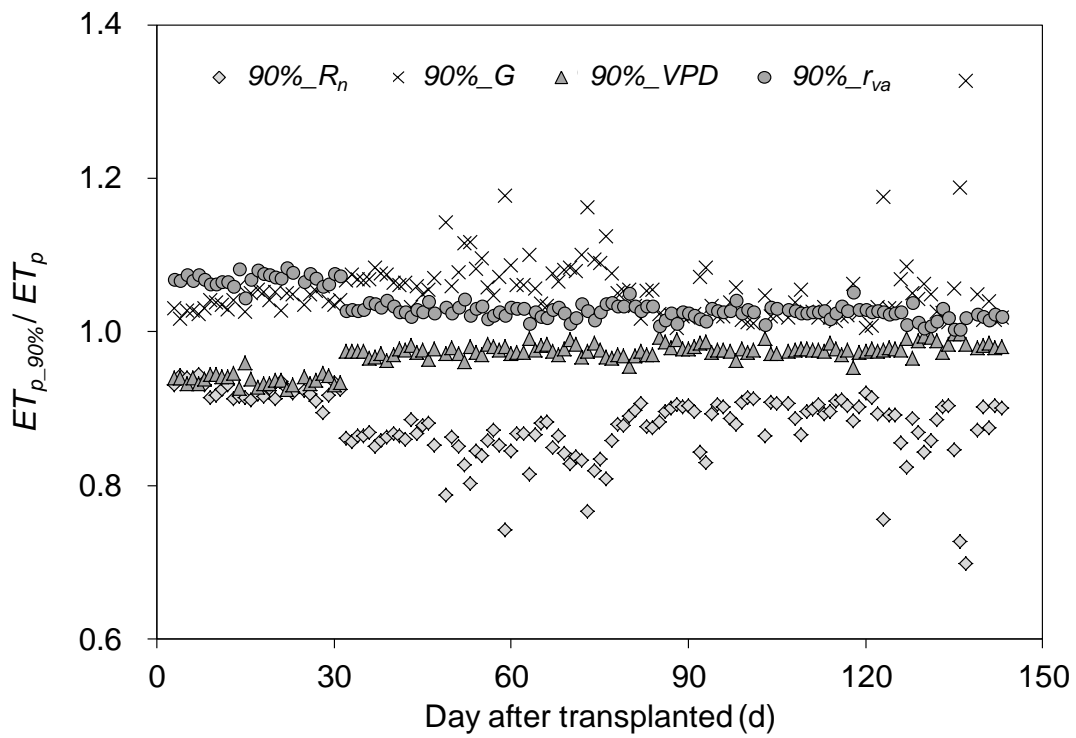


Fig. 2-11 Relative sensitivity coefficient of potential evapotranspiration (ET_p) and $ET_{p_{90\%}}$ calculated with 10% decreased net radiation (R_n): $90\%_{R_n}$, soil heat flux (G): $90\%_G$, vapor pressure deficit (VPD): $90\%_{VPD}$, and internal crop resistance to vapor transfer (r_{va}): $90\%_{r_{va}}$ in the greenhouse.

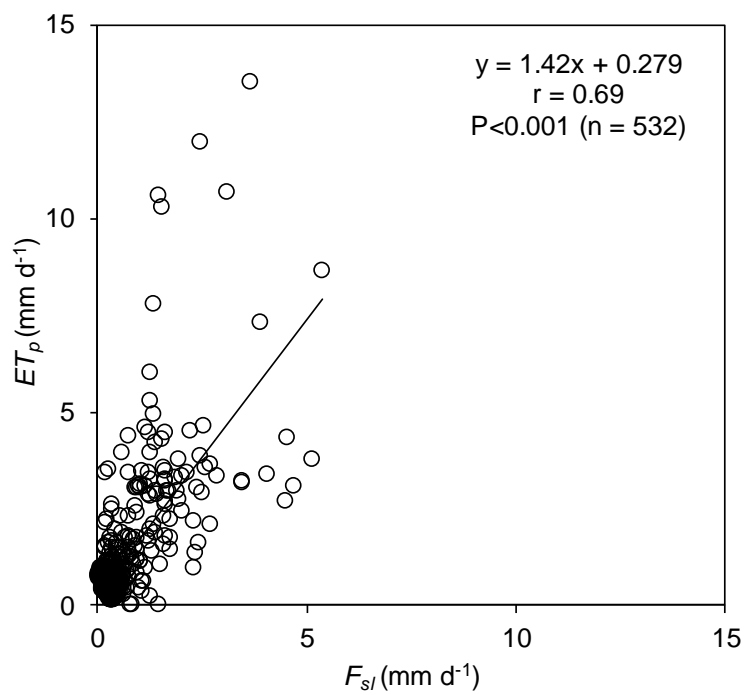


Fig. 2-12 Relationship between depth-based stem flow (F_{sl}) and potential evapotranspiration (ET_p).

3. 熱水土壤消毒の適切な熱水散布量の提案

3.1. 背景

日本における耕地面積は 4,444,000ha であり(農林水産省, 2017)、その内施設栽培は 43,232 ha である。野菜・果樹・花卉などの園芸作物は日本における農業産出額の約 4 割を占める。さらに、多様な品目が施設で栽培されており、トマトやいちごなどの多くは施設で栽培される。また、施設野菜の 10a 当たり所得は露地作の約 3 倍であり、労働生産性の高さと小面積で収益を上げることが可能である(農林水産省, 2015)。このように、施設栽培は耕地面積が小さいにも関わらず、高収益を上げることが可能な栽培環境である。作物を安定的に生産するためには土壤病害が少ない土壤を維持することが必要であるが、施設栽培の土壤は畑の状態にあり、畑特有の短所の一つに連作障害が挙げられる。

連作障害をもたらす土壤病害虫の多くは、一般的に好気性細菌で生命活動には酸素を必要とする。水田は湛水によって還元状態になるため、土壤病害虫は死滅し、増殖が抑制される。また、水田はイネの収穫後に落水されるため、休閑期には土壤が酸化状態になる。このように土壤の空気の条件が大きく変化するため水田では土壤病害虫が安定して生息できないため連作障害が発生しにくい。一方、畑地はほぼ常に酸化条件であるため、連作障害が生じやすい。畑地では、連作障害を防ぐために土壤消毒が数作期毎に行われる。

1989 年にモントリオール議定書が採択され、それまで主な土壤消毒剤として用いられてきた臭化メチルが日本を含む先進国は 2005 年、発展途上国は 2010 年までに特別な用途を除いた使用が禁止された(UNPN, 1989)。そこで、臭化メチル剤に代わる土壤消毒法の開発が急務となった。土壤消毒には化学的消毒法、生物的消毒法、物理的消毒法などがある。化学的消毒法にはクロルピクリン、ダゾメットや D-D 剤などが用いられる。化学的消毒は臭気の問題や身体に直接影響を及ぼす。物理的消毒法は太陽熱を利用する太陽熱消毒、蒸気の熱を利用する蒸気消毒および熱水の熱を利用する熱水土壤消毒がある(西, 2002)。物理的消毒は特に薬品は用いないため、注意する点は熱水や蒸気による火傷のみである(西 and 北, 2002)。物理的消毒法にはそれぞれ長所と短所がある。太陽熱消毒は太陽熱を利用するため、消毒の効果が天候に左右されやすいという短所があるが、消毒に必要な資材等が少ないためコストは低く抑えられる。太陽熱消毒は中東など

の十分な日射量があり、気温が高い地域で多く利用されている(Stapleton and De Vay, 1986)。蒸気消毒は蒸気を土壤に散布し地温を非常に高温にすることが可能であるという利点がある。一方で、蒸気を処理するためには土壤にパイプを埋設する必要がある上、手間がかかる上、消毒可能な深さが限られているという短所もある。蒸気消毒はネギ、ホウレンソウ、大葉等の軟弱野菜類、ユリ、キク等の切花などの付加価値が高い施設園芸作物栽培で全国的に広く利用されている(北, 2006)。熱水土壤消毒は熱水の調整に大量の水を用いるため水源の確保が必須であることが短所の一つに挙げられるが、熱水の処理は地表面から可能であり、消毒可能な深さ蒸気消毒に比べて深い。熱水土壤消毒は日本独自の技術であり、1982年に研究が開始された比較的新しい土壤消毒法である。熱水土壤消毒の土壤病害虫に対する効果について多くの研究が行われ、様々な土壤病害虫に有効であると報告されている(西, 2002)。土壤病害中の多くは熱水処理によって死滅するが、硝化菌などの有用微生物は残存すると報告された(橋本, 2002)。熱水は傾斜地(高木, 2002)や透水性が低い土壤(山口, 2002)などの特殊な圃場においても熱水の処理が可能である。しかし、熱水は土壤の溶質を多く溶脱するが、溶脱される溶質には硝酸態窒素も含まれるため、地下水汚染の可能性が指摘された(落合ら, 2009)。熱水の散布量により、溶脱され土壤深部へ流出する溶質の量は変わると考えられる。熱水の散布量は農家の経験で決定されており、適切な散布量を理論的に決定された例はない。

熱水土壤消毒は70から95℃に調整された100から200L m²程度の熱水を土壤に散布して、熱水の熱により土壤消毒を行う。熱水土壤消毒法の適切な熱水散布量は農家の経験により決定されている。落合(2009)や加藤(2010)は熱水の適切な散布量の決定に数値計算を用いることを提案した。彼らの実験では、熱水土壤消毒時の土壤においてTDR法で測定された比誘電率を利用した体積含水率と地温の実測値と数値計算による推定値と比較を行った。しかし、体積含水率の推定に用いられた比誘電率について90℃近い地温に対する適用性は検討されていない。黒ボク土の分布面積は世界の3%に過ぎないが、日本の30%以上、日本の畑地においてはほぼ半数の47%を占める。熱水土壤消毒は日本独自の土壤消毒法であるため、日本に広く分布する黒ボク土における適切な熱水散布量を決定することは重要である。また、TDR法の温度依存性はさまざまな測定条件について研究が行われてきた(Roth et al., 1990; Pepin et al., 1995; Skierucha (2009))。Or and Wraith (1999)はTDR法を用いて測定された様々な土壤における地温が上昇すると比誘電率が上昇する土壤と減少する土壤があり、その変化は土壤の体積含水率でも異なることを報告した。

Wraith and Or (1999)は Or and Wraith (1999)の結果が比誘電率の推定に用いる電磁波の波形が土壌の種類、温度および体積含水率で異なることが原因であると報告した。これまでに提案された理論式(例えば Or and Wraith, 1999; Skierucha, 2009)は測定に必要なパラメーターが多く、適用可能な温度の上限は55°Cである。黒ボク土土壌におけるTDR法で測定された比誘電率と体積含水率の関係は、Miyamoto et al. (2001)や Miyamoto and Chikushi(2006)によって明らかにされているが、温度依存性については明らかにされていない。

熱水は土壌の溶質を多く溶脱するが、溶脱される溶質には硝酸態窒素も含まれるため、地下水汚染の可能性が指摘された(落合ら, 2009)。熱水の散布量により、溶脱され土壌深部へ流出する溶質の量は変わると考えられる。熱水の散布量は農家の経験で決定されており、適切な散布量を理論的に決定された例はない。熱水土壌消毒の効果は地温とその継続時間により判断されたため、適切な散布量は地温の変化をもとに決定されることが適当であると考えられる。土壌において熱は伝導による移動が大きな部分を占めるが、熱水土壌消毒時の土壌における熱移動は高温の水分が大量に散布されるため、移流による熱移動も考慮する必要があると考えられる。落合(2009)や加藤(2010)が提案したように、熱水の適切な投入量は数値計算を用いて提案することが望ましい。熱水土壌消毒時の土壌は非常に高温になるため、水蒸気移動と水分や熱移動の物理パラメーターの温度依存性を考慮する必要があると考えた。また、熱水の適切な投入量を決定する上で汎用的な数値計算ソフトを用いることが望ましい。本研究では、土壌における一次元水分、熱および溶質移動の汎用的な数値計算ソフトである HYDRUS-1D(Šimůnek et al., 2016)を用いることにした。HYDRUS は土壌における水分、熱および溶質移動について、一次元の数値計算が可能な HYDRUS-1D と二次元および三次元の数値計算が可能な HYDRUS-2D/3D がある。HYDRUS-2D/3D は水蒸気移動を考慮することができないが、HYDRUS-1D は水蒸気移動を考慮することが可能である。また、HYDRUS-1D は透水係数の温度依存性を考慮することが可能である。

これまで、熱水土壌消毒は熱水のみを土壌に散布されてきた。近年、地球規模の気候変動の一因に温室効果ガスの過剰な放出が挙げられる。農地における温室効果ガスの放出に関する研究が多く行われており、熱水に用いるボイラーも重油などの化石燃料を用いるため、温室効果ガスの放出源ともなり得る。温室効果ガス放出量を削減するためには、ボイラーによる熱水の調整量を少なくすることが考えられる。熱水の調整量を削減可能な熱水の散布方法の1つに追加給水法が挙げられる。追加給水法は、土壌に熱水を散布した後に常温水(ボイラーで加熱されていない水)を追加で散布する方法である。追

加給水法が適用された土壌における地温の変化を報告した例は非常に少ない。中山(2002)と加藤(2010)は室内実験を行い、熱水を散布した後に常温水を散布することで、熱水の熱が熱水のみを散布した時に比べてより土壌深くに運ばれることを報告した。伊東(2013)は追加給水法を適用した畑圃場において地温と体積含水率の変化を測定し、熱水と常温水(ボイラーで加熱されていない水)の合計散布量と等量の熱水のみを散布した時より土壌深くの地温が上昇することを報告した。

そこで、本研究では以下の2点を目的とした。

1. 55°C以上の黒ボク土土壌についてTDR法で測定された比誘電率から推定された体積含水率を可能な限り少ないパラメーターで温度補正可能な理論式を提案すること
2. 熱水土壌消毒時の土壌における体積含水率と地温の実測値をもとに、シミュレーションモデルHYDRUS-1Dの逆解析を利用して適切な水分特性および熱特性の物理パラメーターを推定して、熱水土壌消毒の適切な熱水の散布量および追加給水法の適切な散布量を提案すること

3.2. 実験方法

3.2.1. TDR法を用いて測定した比誘電率の温度依存性

供試土は黒ボク土を用い、物理性をTable 3-1にまとめた。体積含水率($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)は0から0.65まで蒸留水を用いて密閉容器内で混合して調整した。調整後、土壌と蒸留水を馴染ませるために24時間以上20°Cの恒温槽内に静置した。ステンレス製の円筒(内径:高さ=67.25mm:198.4mm)に土壌深さは15cm、乾燥密度は 0.8Mg m^{-3} になるように水分を調整した供試土を充填した。供試土の温度は95°Cに維持した恒温水槽内で管理した。TDR法を用いて土壌の比誘電率 ϵ_b と電気伝導度 EC_b とそれぞれの値の推定に用いられた波形を、T型熱電対を用いて供試土の地温および恒温水槽内の水温を測定した。 ϵ_b と EC_b はパルス発生器TDR100、データロガーCR1000およびマルチプレクサーSDMX50(それぞれCampbell Scientific Inc., USA)を用いて測定した。TDRプローブはロッドの太さ、長さおよび間隔がそれぞれ3.2mm、100mmおよび15mmのものを使用した。TDRプローブは地表面に対して垂直に、熱電対はステンレス供試土の中央に挿入した。供試土の体積含水率は実験中に供試土内の水分が蒸発するため実験前後で供試土の体積含水率に誤差が生じる。本研究では実験開始前と実験終了時の体積含水率の平均値を供試土の体積含水率 θ_0 とした。

3.2.2. 熱水土壤消毒の圃場実験

実験は2010年に神奈川県農業技術センターのビニールハウス内畑圃場で行った。ビニールハウスは南北方向に設置され、長さ18m幅5.4mであった。土性はClay Loam(砂:粘土:シルト=45%:31%:24%)であった。実験地の土壤の物理性をTable 3-2に示す。透水係数は実験開始前に土壤を深さ40cmまで深耕したため、乾燥密度は小さく透水性が高かった。

熱水は重油式ボイラーを用いて95℃に調整した。熱水と常温水は灌水用チューブ(キリコ, 三菱樹脂アグリドリーム社)をハウスと平行に30cm間隔で地表面に敷設し散布した。熱水による熱を維持するために地表面をビニールハウス用のビニールシートで被覆した。ビニールシートは地表面に敷設された灌水チューブの上から被覆し、熱水散布終了後にチューブのみ引き抜き、ビニールシートは実験終了まで地表面を被覆したままにした。熱水は8月10日の14時から150分間で185 L m²散布した。熱水散布7日前に急激な土壤の圧密沈降の影響を防ぐために常温水を185 L m²散布した。ビニールハウスの入口は熱水の散布開始から測定終了までデータ回収および作業時以外は閉めたままにした。

比誘電率と地温をそれぞれTDR(Time Domain Reflectometry)法とT型熱電対を用いて、データロガー(CR3000, Campbell Scientific Ltd., USA)で2分毎に測定・記録した。比誘電率と地温は土壤深さ5cm、10cm、20cm、30cm、40cm、60cmおよび80cmにおいて測定した。TDRプローブは土壤断面に対して垂直に挿入した。TDR法はロッド長が10cm、ロッド間隔が1.2cm、ロッド径が3.6mmの3線式プローブを用いた。測定は北側の入口から4.5m、東側面から1.35mの位置において行った。測定した比誘電率と『3.3.1 TDR法を用いて測定した比誘電率の温度依存性』で提案する(2-17)および(2-18)式を用いて正しい体積含水率を推定した。

3.2.3. HYDRUS-1Dを用いた熱水土壤消毒の水分および熱移動の推定

HYDRUS-1Dを用いて熱水土壤消毒時の水分および熱移動の実測値について逆解析を行った。逆解析を用いて校正した水分特性および熱的特性パラメーターを用いて適切な熱水の散布量を決定した。HYDRUS-1Dにおいて用いられている水分および熱移動の理論を以下に説明する。

3.2.4. 水分移動

温度勾配が存在する条件下では、液状水フラックスと水蒸気フラックスは土中水圧力勾配のみではなく、温度勾配についても考慮する必要があり、不飽和土壌における水フラックス q_{total} は液状水フラックス q_L と水蒸気フラックス q_v の和で表される。

$$\begin{aligned} q_{Total} &= q_L + q_v = q_{Lh} + q_{LT} + q_{vh} + q_{vT} \\ &= -K_{Lh}(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) - K_{LT} \frac{\partial T}{\partial z} - K_{vh} \frac{\partial h}{\partial z} - K_{vT} \frac{\partial T}{\partial z} \end{aligned} \quad (2-1)$$

ここで、 q_{Lh} は土中水圧力勾配による液状水フラックス (cm min^{-1})、 q_{LT} は温度勾配による液状水フラックス (cm min^{-1})、 q_{vh} は土中水圧力勾配による水蒸気フラックス (cm min^{-1})、 q_{vT} は温度勾配による水蒸気フラックス (cm min^{-1})、 K_{Lh} (cm min^{-1}) と K_{LT} (cm min^{-1}) はそれぞれ土中水圧力勾配と温度勾配による液状水移動における不飽和透水係数、 K_{vh} (cm min^{-1}) と K_{vT} (cm min^{-1}) はそれぞれ土中水圧力勾配と温度勾配による水蒸気移動における不飽和透水係数、 h は土中水圧力 (cm)、 T は温度 (K)、 z は上向きを正とする空間座標 (cm) である。式(2-1)を水の保存則に代入すると水分移動の支配方程式が以下の様に与えられる (Saito et al., 2006)。

$$\frac{\partial \theta_T(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[(K_{Lh} + K_{vh}) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) + (K_{LT} + K_{vT}) \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (2-2)$$

ここで、 θ_T は $\theta_T = \theta + \theta_v$ で表される全体積含水率 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) であり、 θ は液状水の体積含水率 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) と θ_v は水蒸気の体積含水率 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) である。

3.2.5. 水分移動特性

体積含水率 θ と土中水圧力 h は van Genuchten の式で表される (van Genuchten, 1980)。

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^{(1-1/n)}} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (2-3)$$

ここで、 θ_r は残留体積含水率 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)、 θ_s は飽和体積含水率 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)、 α (cm^{-1})、 n (無次元) は水分特性曲線の形状を与える実験定数である。

土中水圧力勾配による液状水移動における不飽和透水係数 K_{Lh} は Mualem (1976) の間隙径分布モデルを用いた。

$$K_{Lh} = K_S S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (2-4)$$

ここで、 K_S は飽和透水係数 (cm min^{-1}), S_e は有効飽和度、 l と m は実験定数であり l には Mualem (1976)により 0.5 が提案されている。温度勾配による液状水移動における不飽和透水係数 K_{LT} は以下の式で決定される (Noborio et al., 1996)。

$$K_{LT} = K_{Lh} \left(h G_{wT} \frac{1}{\gamma_0} \frac{d\gamma}{T} \right) \quad (2-5)$$

ここで、 G_{wT} は表面張力の温度依存を補正する促進係数(無次元) (Nimmo and Miller, 1986)、 γ は土中水の表面張力 (J min^{-2})、 γ_0 は 25°C における表面張力 (kg min^{-2}) である。

土中水圧力勾配および温度勾配による水蒸気フラックスの透過係数 K_{vh} および K_{vT} はそれぞれ次の式で定義される。

$$K_{vh} = \frac{D}{\rho_w} \rho_{vs} \frac{M_w g}{RT} H_r \quad (2-6)$$

$$K_{vT} = \frac{D}{\rho_w} \eta H_r \frac{d\rho_{vs}}{dT} \quad (2-7)$$

ここで、 D は土中の水蒸気拡散係数 ($\text{cm}^2 \text{min}^{-1}$) である。 ρ_w は液状水の密度 (kg m^{-3}) で $\rho_w = 1 - 7.37 \times 10^{-6} (T-4)^2 + 3.79 \times 10^{-8} (T-4)^3$ 、 ρ_{vs} は飽和水蒸気密度 (kg m^{-3}) で $\rho_{vs} = T^1 \times 10^{-3} \exp(31.37 - 6014.79T^{-1} - 7.92 \times 10^{-3} T)$ と定義される。 M_w は水の分子量 ($=0.018015 \text{ kg mol}^{-1}$)、 g は重力加速度 ($=9.81 \text{ m s}^{-1}$)、 R は気体定数 ($\text{kg cm}^2 \text{min}^{-2} \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$)、 H_r は相対湿度である。土中の水蒸気拡散係数 D は次式で表される。

$$D = \tau_a a_v D_a \quad (2-8)$$

ここで、 τ_a は気相の屈曲度 (Millington and Quirk, 1961)、 a_v は気相率である。 D_a は温度 T における大気中の水蒸気拡散係数 ($\text{cm}^2 \text{min}^{-1}$) であり次の式で表される。

$$D_a = 2.12 \cdot 10^{-5} \left(\frac{T}{273.15} \right)^2 \quad (2-9)$$

η は水蒸気促進係数であり、Cass et al. (1984) は以下の式で定義した。

$$\eta = 9.5 + 3 \frac{\theta_L}{\theta_s} - 8.5 \exp \left\{ - \left[\left(1 + \frac{2.6}{\sqrt{f_c}} \right) \frac{\theta_L}{\theta_s} \right]^4 \right\} \quad (2-10)$$

ここで、 f_c は粘土分率(無次元)である。また、相対湿度 H_r は以下のように表される(Philip and de Vries, 1957)。

$$H_r = \exp \left[\frac{hMg}{RT} \right] \quad (2-11)$$

透水係数の温度依存は以下の式で表される(Constantz, 1982)。

$$K_T(\theta) = \frac{\mu_{ref}}{\mu_T} \frac{\rho_T}{\rho_{ref}} K_{ref}(\theta) = \alpha_K^* K_{ref}(\theta) \quad (2-12)$$

$$\mu_T = \frac{1.787 - 0.007T}{1 + 0.03225T}$$

$$\rho_T = 1 - 7.37 \cdot 10^{-6}(T - 4)^2 + 3.79 \cdot 10^{-8}(T - 4)^3$$

ここで、 K_{ref} および K_T はそれぞれ基準温度 T_{ref} および地温 $T(^{\circ}\text{C})$ における透水係数、 μ_{ref} および μ_T はそれぞれ基準温度 T_{ref} および地温 $T(^{\circ}\text{C})$ における粘性係数($\text{Pa cm}^{-1} \text{ min}^{-1}$)、 α_K^* は透水係数の温度補正值である。

3.2.6. 熱移動

熱移動の支配方程式は次式で与えられる(de Vries, 1958)。

$$\frac{\partial C_p T}{\partial t} + L_0 \frac{\partial \theta_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(\theta_L) \frac{\partial T}{\partial z} \right] - C_w \frac{\partial q_L T}{\partial z} - C_v \frac{\partial q_v T}{\partial z} - L_0 \frac{\partial q_v}{\partial z} \quad (2-13)$$

ここで、 C_p は土の体積熱容量($\text{J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$)、 L_0 は単位体積当たりの水の蒸発潜熱 (J m^{-3})である。 L_0 は次式で与えられる。

$$L_0 = L_w \rho_w \quad (2-14)$$

ここで、 L_w は単位重量当たりの蒸発潜熱($=2.501 \times 10^6 - 2369.2T$)である。 $\lambda(\theta_L)$ は土の熱伝導率($\text{ML T}^{-3} \text{ K}^{-1}$)であり、次式で表される(Campbell, 1985)。

$$\lambda_0(\theta_L) = A + B\theta_L - (A - D) \exp[-(C\theta_L)^E] \quad (2-15)$$

$$A = \frac{0.57 + 1.73\theta_q + 0.93\theta_{ma}}{1 - 0.74\theta_q - 0.49\theta_{ma}} - 2.8\theta_n(1 - \theta_n)$$

$$\begin{aligned}
B &= 2.8\theta_n \\
C &= 1 + 2.6\theta_c^{-1/2} \\
D &= 0.03 + 0.7\theta_n^2 \\
E &= 4
\end{aligned}$$

ここで、 n 、 q 、 c 、および ma はそれぞれ固相、石英、粘土およびこれら以外の鉱物を表す。 C_p ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$) は固相の体積熱容量 C_s ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$)、液相の体積熱容量 C_w ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$)、気相の体積熱容量 C_v ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$) にそれぞれの体積分率を乗じた和で表される。

$$C_p = C_s\theta_n + C_w\theta_L + C_v\theta_v \quad (2-16)$$

3.2.7. 熱水土壤消毒時の土壤における地温と体積含水率の実測値と推定値の比較

水分特性値は van Genuchten (1980) のモデルを用い決定した。ヒステリシスは考慮しなかった。熱移動の熱伝導率は Campbell (1985) の理論を用いて決定した。計算時間は熱水が浸透して、それぞれの深さが最高地温に達し、地温が減少を開始するまでの十分な時間を考慮して 360 分とした。熱水土壤消毒の効果は根圏全体にあることが望ましいため土壤の厚さは 80 cm とし、地表面から土壤深さ 80 cm までに 1 cm 間隔の節点を設けた。観測点は、土壤深さ 5、10、20、40 および 60 cm に設けた。各節点における体積含水率と地温の初期値は、0-5 cm、6-10 cm、11-20 cm、21-40 cm、41-60 cm および 61-80 cm の土層に対して、それぞれ土壤深さ 5 と 10 cm、土壤深さ 10 と 20 cm、土壤深さ 20 と 40 cm、土壤深さ 40 と 60 cm および土壤深さ 60 と 80 cm における実測値と土壤深さの線形近似式を用いて推定した。それぞれの土層に用いた θ_r 、 θ_s 、 K_s 、 n 、 α および l は、各土層の土壤サンプルを実験地から持ち帰り実験室で実測した値を用いた (Table 3-3)。水分および熱移動の上端境界条件は地表面に熱水を散布するため時間変動として与えた。水分移動の上端境界条件はノイマン型大気境界条件として 0 から 150 分まで $0.123 \text{ cm min}^{-1}$ 、151 から 360 分まで 0 cm min^{-1} の降雨量として与えた。熱移動の上端境界条件はディリクレ型境界条件として 0 から 150 分まで $95 \text{ }^\circ\text{C}$ の気温を与えた。

3.2.8. 逆解析によるパラメーターの推定と黒ボク土における適切な熱水散布量の提案

初期条件と境界条件は『4.2.6 熱水土壤消毒時の土壤における地温と体積含水率の実測値と推定値の比較』と同様である。本研究では地表面の地温を測定しなかったため、熱移動の上端境界条件について二つの場合を想定した。一つ目はディリクレ型境界条件

として 0 から 150 分まで 95 °C の気温、151 から 360 分までハウス内の大気温度を、二つ目は 0 から 360 分までディリクレ型の土壌深さ 5cm における地温を与える場合について検討した。ただし、二つ目の熱移動の上端境界条件を適用した場合は、土壌深さ 5 cm を地表面と仮定したため、土壌厚さは 75 cm になるが、0-5 cm の土層が深さ 5 cm だけの層、6 から 80 cm までの土層は一つ目の境界条件の場合と同様とした。下部境界条件は水分移動に自由排水、熱移動にゼロフラックスを与えた。

熱水土壌消毒時の土壌深さ 0 から 60 cm までの 5 つの土層における体積含水率と地温の実測値に対して α 、 n 、 K_s 、粘土含率 clay、固相の体積熱容量 C_n および液相の体積熱容量 C_w の 6 個のパラメーターを逆解析により推定した。熱水土壌消毒時の土壌のように地温が高くなる時の水分および熱移動に関する物理パラメーターに関する研究例は非常に少ない。加藤(2010)は飽和透水係数について、温度が高くなると実測値は理論値より小さくなることを報告した。本研究では、熱水土壌消毒時の土壌における水分移動の物理パラメーターを推定するために、測定が簡単な θ_r と θ_s ではなく、van Genuchten モデルのフィッティングパラメーターである α 、 n 、および温度依存性がある K_s を選択した。有機物は数%含まれると考えられたが、本研究では有機物含量は 0、固相率の実測値にはほとんど誤差がないと仮定して逆解析の対象にはしなかった。また、有機物含量が 0 であるため有機物の体積熱容量 C_o も逆解析の対象にしなかった。石英含量も大きく変わらないと仮定して逆解析の対象には含まなかった。土壌の熱的性質の温度依存性について、体積熱容量は無視できるほど小さく、熱拡散係数と熱伝導率は大きいとされている。HYDRUS-1D では土壌の熱的性質について温度依存性を考慮できないが、実測値を良く再現可能な熱特性の物理パラメーターを推定するために clay、 C_n および C_w を推定した。本研究では、まず水分移動特性値の初期値、熱移動特性値は HYDRUS-1D に与えられている値を初期値として、水分特性パラメーターについて逆解析を行い、得られた水分移動特性値の推定値を用いて熱移動特性値について逆解析を行った。熱水散布中の土壌における地温と体積含水率は大きく変化するため、熱水散布中の水分および熱移動の物理パラメーターを推定する逆解析の計算時間は 360 分とした。

熱水土壌消毒の土壌病害虫に対する効果は、ある基準以上の地温が維持された長さによって判断される。本研究では神奈川肥料株式会社 (<http://www.kanagawa-nessui.co.jp/sakumotu-byogaityu-simetuondo.pdf>) をもとに、地温が 55°C 以上で 4 時間以上維持されたときに熱水土壌消毒の効果が発揮されたと判断した。本研究では、逆解析により推定された水分および熱移動に関する物理パラメーターを利

用して、さまざまな散布量と散布時間についてある地温以上が維持された時間をまとめた。熱水の散布量および散布時間は、それぞれ 50 から 300 L m² および 90 から 180 分とした。水分と熱移動の上端境界条件はそれぞれの散布量と散布時間に対応した降水量として与えた。熱水の処理開始から十分な時間を確保するために、適切な熱水の投入量の提案のための計算時間は 1440 分とした。地温の観測点は土壌深さ 5、10、20、40 および 60cm とした。その結果から、適切な熱水の散布量と散布時間を提案した。

3.2.9. 黒ボク土土壌における追加給水法の適用性

『4.3.3 黒ボク土土壌における適切な熱水散布量の提案』で推定した水分および熱移動の物理パラメーターを用いて追加給水法の熱水と常温水の散布時間および量を提案する。境界条件や初期条件は全て『4.3.3 黒ボク土土壌における適切な熱水散布量の提案』で用いたパラメーターを用いた。追加給水法は熱水の投入量を削減することを目的としているため、熱水の供給量は熱水のみを散布する場合散布時間に関係なく最も安定して地温を高く維持できる最低の量である 125L m² とした。熱水と常温水の散布量は、熱水の散布量の半分より少ない 10 から 50L m² とした。常温水の散布時間は直前に散布する熱水と同じ散布速度になるようにした。常温水の温度は 30℃ とした。

3.3. 結果と考察

3.3.1. TDR 法を用いて測定した比誘電率の温度依存性

Fig. 3-1 にそれぞれの体積含水率に調整した供試土の比誘電率と地温の関係を示した。体積含水率が風乾から 0.4 程度までは地温が高くなっても比誘電率は変化しなかった。体積含水率が 0.4 以上になると地温が高くなるにつれて比誘電率が小さくなり、体積含水率が高いほど比誘電率は小さくなった。地温が 70℃ を超えると体積含水率が違っても比誘電率がほとんど変わらない値であった。体積含水率と地温が高いときに体積含水率に違いがあっても比誘電率がほとんど同じ値になるため、比誘電率のみでは正しい体積含水率を推定できないことが明らかになった。これは、温度が高くなると比誘電率の測定に利用されるみかけのプロープ長が短くなり、さらに体積含水率が高いとその影響が大きくなることが原因であった。

Fig. 3-2 にそれぞれの体積含水率に調整した供試土の電気伝導度と地温の関係を示した。体積含水率が風乾から 0.4 程度のとき地温が高くなると電気伝導度は大きくなり、体積含水率が高いほど地温に対する電気伝導度の傾きは大きくなった。体積含水率が 0.4 以上のとき地温が高くなると電気伝導度は大きくなったが、体積含水率が高いほど電気伝導度は小さかつ

た。これらの結果から、体積含水率と地温がともに高いときの比誘電率は電気伝導度を同時に測定することで、正しい体積含水率 θ_c を推定可能であると考えた。

本研究では 25°C の土壌における体積含水率を正しい体積含水率 θ_c とした。体積含水率と地温が高いときみかけの体積含水率は過小評価され、電気伝導度は体積含水率が 0.42 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)より高いとき、温度の上昇に伴う電気伝導度の上昇率は体積含水率が高いほど小さくなり、電気伝導度の最大値は 60 (mS m^{-1})以下であった。そこで、体積含水率と地温が高いときにみかけの体積含水率を増幅する必要がある。増幅には地温のみが変数の項および地温と電気伝導度を変数とする項を持つ温度補正式を用いることとした。正しい体積含水率 θ_c に対して測定した比誘電率から推定したみかけの体積含水率 θ_p 、地温 T_{sk} および電気伝導度 EC_b をエクセルのソルバーを用いて最小二乗法でフィッティングした。以下に体積含水率の温度補正式を示す。

$$\begin{aligned} \theta_p > 0.42: \theta_c &= \theta_p + 0.0001(T_{sk} - 25) + 0.000035(60 - EC_b)(T_{sk} - 25) \\ \theta_p \leq 0.42: \theta_c &= \theta_w \end{aligned} \quad (2-17)$$

ここで、 θ_p はみかけの体積含水率($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)、 T_{sk} は地温($^{\circ}\text{C}$)、 EC_b は電気伝導度(mS m^{-1})である。 θ_p は次の式で推定した。地温が 25°C の体積含水率 θ_c と TDR 法で測定した比誘電率 ε_{b25} の関係式は以下の様になる。

$$\theta_c = 0.000023 \varepsilon_{b25}^3 - 0.0017 \varepsilon_{b25}^2 + 0.0444 \varepsilon_{b25} + 0.0188 \quad (2-18)$$

式(2-18)中の 25°C の比誘電率 ε_{b25} を各温度におけるみかけの比誘電率 ε_b に置き換えると、みかけの体積含水率 θ_p は式(2-19)のように表すことができる。

$$\theta_p = 0.000023 \varepsilon_b^3 - 0.0017 \varepsilon_b^2 + 0.0444 \varepsilon_b + 0.0188 \quad (2-19)$$

ここで、 ε_b は比誘電率である。正しい体積含水率 θ_c は供試土の体積含水率 θ_a を Fig. 3-3 に示す。提案した黒ボク土の θ_p に対する温度補正式は θ_c を精度よく推定可能である。

3.3.2. 熱水土壌消毒時の土壌における地温と体積含水率の実測値と推定値の比較

熱水土壌消毒時の土壌において、熱水の散布開始から 360 分後までの各深さにおける体積含水率の実測値と実験室で得た水分および熱移動の物理パラメーターを用いた推定値を比較した(Fig. 3-4)。体積含水率の実測値と推定値は全体的に変化の傾向は似ていたが差がかなり大きく、土壌深さ 5、10 および 20cm において特に大きかった。実測の初期値は土壌深さ 5 および 20cm において $0.19 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ 、それ以外の深さでは $0.4 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$

程度であり、体積含水率は比較的高かった。実測値は熱水の散布を開始すると浅い観測点から順に上昇し、最大値は土壌深さ 5cm において $0.40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 、土壌深さ 10 および 20cm において $0.50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 、土壌深さ 40 および 60cm において $0.45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 程度であった。土壌深さ 20、40 および 60cm における推定値の最大値は、それぞれ $0.35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 、 $0.48 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ および $0.50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ であった。推定値は、土壌深さ 5 および 10cm において熱水の散布を開始してから 60 分程度で $0.70 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ を超えて熱水の散布が終了した 150 分まで一定の値を維持した。土壌深さ 20、40 および 60cm における推定値は熱水の散布を開始してから、それぞれ 90、150 および 220 分後から上昇した。土壌深さ 20cm における推定値は最大値になった後すぐに減少を開始した。土壌深さ 40cm における推定値は熱水の散布を開始してから 360 分後まで最大値を維持した。土壌深さ 60cm における推定値は熱水の散布を開始してから 360 分後が最大値であった。土壌深さ 5 および 10cm において、熱水散布開始から体積含水率が上昇を開始するまでの時間に大きな差はなかった。土壌深さ 20、40 および 60cm において、熱水散布開始から体積含水率が上昇を開始するまでの時間は推定値と実測値に大きな差があり、深いほど差は大きかった。

熱水土壌消毒時の土壌において、熱水の散布開始から 360 分後までの各深さにおける地温の実測値と HYDRUS-1D の推定値を比較した(Fig. 3-5)。地温の実測値と推定値は体積含水率と比べるとよく一致したが、誤差は大きかった。実測値の最大値は土壌深さ 5、10、20、40 および 60cm において、それぞれ 85、85、80、60 および 40°C であった。推定値の最大値は土壌深さ 5、10、20、40 および 60cm において、それぞれ 85、72、53、30 および 29°C であり、土壌深さ 60cm は初期値から変化がなかった。土壌深さ 5cm における推定値と実測値の最大値は良く一致したが、それ以外の観測点における推定値は実測値に比べて 15 から 25°C 程度過小評価であった。土壌深さ 5cm において推定値は実測値に比べて早く上昇し、推定値の上昇は深くなるにつれて実測値に比べて徐々に遅くなった。

温度勾配が存在する不飽和土壌において地温と体積含水率の分布の実測値と推定値は、どちらか一方が一致するともう一方は一致しないことが報告されており、原因は水蒸気移動による水分移動と潜熱輸送による熱移動の理論にあるとされた(Heitman et al., 2008)。熱水土壌消毒時の土壌は Heitman et al. (2008)の実験に比べて大きな温度勾配が生じ、地表面は 90°C 近くになるため、水蒸気濃度は大きくなる。したがって、地温と体積含水率の実測値と推定値が一致しなかった原因は、Heitman et al. (2008)と同様に水分および熱移動の理論について水蒸気の影響を考慮できなかったためだと考えられる。

3.3.3. 逆解析によるパラメーターの推定と黒ボク土における適切な熱水散布量の提案

はじめに熱移動の上端境界条件を検討した。ディリクレ型の大気境界条件として0から150分まで95°Cの気温、151から360分まではハウス内の大気温度を与える場合(Fig. 3-6(a))とディリクレ型の大気境界条件として0から360分まで土壌深さ5cmにおける地温を与える場合(Fig. 3-6 (b))をそれぞれ上端境界条件として用いた逆解析で得た水分および熱移動の物理パラメーターを用いて推定した各測定点における体積含水率の変化を示す。土壌深さ5cmを地表面と仮定して計算を行ったため、土壌深さ5cmにおける体積含水率の推定値は実測値に比べて大きな値になった(Fig. 3-6 (b))。それぞれの上端境界条件について土壌深さ5cm以外の測定点における体積含水率の実測値と推定値の差は小さく、それぞれの上端境界条件で大きな違いはなかった(Fig. 3-6)。ディリクレ型の大気境界条件として0から150分まで95°Cの気温、151から360分まではハウス内の大気温度を与える場合(Fig. 3-7(a))とディリクレ型の大気境界条件として0から360分まで土壌深さ5cmにおける地温を与える場合(Fig. 3-7 (b))をそれぞれ上端境界条件として用いた逆解析で得た水分および熱移動の物理パラメーターを用いて推定した各測定点における地温の変化を示す。地温の変化も体積含水率の変化と同様に実測値と推定値の誤差は小さく、それぞれの上端境界条件で大きな違いはなかった。これらの結果から本研究では土壌深さ5cmも水分および熱移動について推定可能とするために、ディリクレ型の大気境界条件として0から150分まで95°Cの気温、151から360分まではハウス内の大気温度を与えた。

Table 3-4 にそれぞれの土層に対する逆解析による水分特性パラメーターの校正値を示す。水分特性パラメーターは、 α と n の実測値と校正値に大きな差はなかった。飽和透水係数は校正値が実測値の約0.3から7.0倍であり、土壌深さ5-10cm、20-40cmおよび40-60cmの土層における推定値はそれぞれ0.11、5.5および3.7 cm h⁻¹と大きな値、土壌深さ0-5cmおよび10-20cmの土層における推定値はそれぞれ0.051および0.54 cm h⁻¹と小さな値であった。

HYDURS-1Dでは透水係数について温度が上昇すると透水係数は大きくなる温度補正式が用いられている(Constanz, 1982)。しかし、地温が高くなった浅い土層の透水係数は実測値より小さくなった。矢野ら(1983)は土壌の吸水や脱水過程に温度変化が生じることで土壌中に気泡が発生し、温度が高いほど同じ体積含水率におけるマトリックポテ

ンシャルが大きくなることを報告した。これは、熱水土壤消毒時の土壤のように温度変化が大きいつき、一時的に透水係数が理論値より小さくなる可能性があることを示唆した。また、土壤に水分が浸潤する過程で浸潤前線に沿ってマトリックポテンシャルが不連続に上昇する場合、下の土層に水みちの役割を果たす新しい経路が発生する。この狭い経路はフィンガー流と呼ばれ(宮崎, 1995)、水の流速は非常に早くなる。土壤深さ 10cm より深い土層における飽和透水係数の推定値が実測値に比べて大きくなった原因は、熱水散布中に生じたフィンガー流による体積含水率の急上昇を TDR センサーが測定したためだと考えられる。

熱水散布開始後の地温はそれぞれの深さにおいて精度よく評価されたが、10 から 20°C 程度の差が生じた。温度勾配がある土壤における水分移動は、液状水と水蒸気で移動することが報告されている(Philip and de Vries, 1957)。水分および熱移動は水蒸気移動について式(2-10)中の水蒸気促進係数で増幅することで、実測値と理論値を一致させた。Goh and Noborio (2016)は、この促進係数の本質は水が液体から気体に形態変化するときの圧力勾配であると理論的に証明した。本研究における地温の推定値と実測値の誤差はこの圧力勾配による水蒸気移動が原因であると考えられる。

本研究では、熱水土壤消毒の適切な熱対散布量を提案するために、逆解析を行った。逆解析により校正された水分特性および熱特性のパラメーターを用いた推定値と実測値多少の差はあったものの、実測値に対して推定値は過小評価された。したがって、ある量の熱水を散布した時に推定値以上に地温を上昇させることが可能であると考えられるため、熱水土壤消毒の適切な熱対散布量を提案するために利用可能であると判断した。

Table 3-5 に熱特性パラメーターの実測値と逆解析による校正值を示す。それぞれのパラメーターについて全ての深さにおいて実測値と校正值に差はなかった。

Fig. 3-8 に 95°C の熱水を様々な時間および量で散布した土壤の各観測点において地温が 55°C 以上を維持した時間を示す。土壤深さ 5 および 10 cm における地温は熱水の散布量と時間に関係なく 55°C を 4 時間以上維持した。土壤深さ 20 cm における地温は熱水の散布量が 50 L m⁻² のとき、散布時間を 90 および 120 分にすると 55°C を 4 時間以上維持できなかった。熱水を散布した時間が同じ時、散布量が 50 L m⁻² であると顕著に地温を 55°C 以上で維持する時間が短くなる。散布時間を 90 から 120 分で行うと、土壤深さ 40cm を地温 55°C 以上で 4 時間以上維持することはできない。散布時間を 150 分から 180 分で行うと、散布量を 175 L m⁻² 以上にするすることで、土壤深さ 40cm を地温 55°C 以上

で4時間以上維持することが可能である。散布量を 125 L m^{-2} 以上、散布時間が180分のとき、土壌深さ10、20および40cmにおける地温は15時間以上も 55°C 以上で維持される。散布する時間および量を変えると土壌深さ5cmにおいて地温が 55°C 以上を維持する時間は、4.4から11.2時間であった。土壌深さ20cmにおいて地温が 55°C 以上を維持した時間は、散布時間が90、120、150および180分のとき、それぞれ7.1から9.8時間、12.5から16.2時間、14.1から22.3時間および5.7から22.3時間であり、熱水の散布量と散布時間による変動がもっとも大きかった。

地温を 55°C 以上で4時間以上維持するためには、消毒対象の土壌深さが20cmまでの場合は散布時間に関係なく 75 L m^{-2} 以上、消毒対象の土壌深さが40cmまでの場合は散布時間を150分のとき 175 L m^{-2} 以上、散布時間が180分のとき 100 L m^{-2} の熱水を散布する必要がある。ただし、土壌病害虫は 40°C 程度でも数時間で殺菌される場合が多く(西, 2002)、熱水は上記より少ない量を短い時間で散布しても土壌消毒効果を期待できる可能性がある。

3.3.4. 黒ボク土土壌における追加給水法の適用性

Fig. 3-9 に追加給水法を行った土壌において地温が 55°C 以上を維持した時間を示す。熱水のみを 125 L m^{-2} 散布した結果を常温水の散布量を 0 L m^{-2} とした。熱水の散布時間を90分とした場合の地温が 55°C 以上で維持された時間は、土壌深さ5cmにおいて4.3から5.2時間、土壌深さ10cmにおいて6.1から8.8時間、土壌深さ20cmにおいて8.8から10.5時間、土壌深さ40および60cmにおいて0時間であった(Fig. 3-9(a))。熱水の散布時間を120分とした場合の地温が 55°C 以上で維持された時間は、土壌深さ5cmにおいて4.8から6.3時間、土壌深さ10cmにおいて6.3から10.3時間、土壌深さ20cmにおいて10.5から15.6時間、土壌深さ40および60cmにおいて0時間であった(Fig. 3-9(b))。熱水のみを150分間散布したときの土壌深さ40cmにおける地温は 55°C を越えなかったが、常温水を追加で散布すると12.8から20.4時間地温が 55°C 以上維持し、追加した常温水の量が多いほど 55°C 以上を維持する時間は長くなった(Fig. 3-9(c))。熱水を180分散布した後に常温水を追加で散布したときに地温が 55°C 以上になった時間は熱水のみを180分散布したときと大きな差はなかった。ただし、追加する常温水の量が増えると、土壌深さ5および10cmにおいて 55°C を維持する時間が短くなる。(Fig. 3-9(d))。熱水の散布時間を180分とした場合、常温水の散布量を増やすと土壌深さ5および10cmにおいて地温が 55°C を以上維持した時間が短くなった。

Fig. 3-10 にそれぞれの深さにおける異なる量の常温水を熱水処理の後に散布した時の土壌における地温の推定値の変化を示す。土壌深さ 5 および 10cm における地温は常温水の散布が開始されると急激に低下し、常温水の量が多いほど地温は低くなった。土壌深さ 20、40 および 60cm における地温は常温水の散布が開始されても上昇し、常温水の散布量が多いほど地温は高くなった。

熱水の散布時間を 150 分にした時、熱水のみを散布した時に地温が 55°C 以上ならなかった深さを 55°C 以上にすることが可能である。本研究の結果は追加給水法が熱水のみを散布する処理方法に比べて、深い土層の地温を 55°C 以上で維持するために有効であることを示した。熱水を 125L m² 散布した後に常温水を追加給水する場合、熱水の散布時間は 150 分とし、常温水を追加散布することで熱水のみを散布するより深い土層まで土壌消毒の効果を期待できる。この時、土壌深さ 5cm の地温は 55°C 以上で維持される時間が 4 時間を下回る可能性があるが、地温が非常に高い場合は殺菌に要する時間も短くなるため土壌消毒の効果は地表面でも期待できると考えられる。

3.4. まとめ

熱水土壌消毒の適切な熱水の散布量を提案するために HYDRUS-1D を用いて逆解析を行い、実測値をもとに適切な水分および熱移動の物理パラメーターを推定した。水分および熱移動の物理パラメーターの実測値を用いた HYDRUS-1D による推定値と実測値は、水分移動について大きく誤差が生じ、熱移動は水分移動に比べて小さいが誤差が生じた。熱水土壌消毒時の土壌における体積含水率と地温の実測値を用いて HYDRUS-1D を利用して逆解析を行い α 、 n 、 K_s 、 clay 、 C_n および C_w の 6 個のパラメーターを推定した。推定した K_s は浅い土層で推定値が実測値より小さくなり、深い層で推定値が実測値より大きくなった。これは、浅い層では熱水散布により地温が急激に上昇した影響で土壌中に気泡が発生し、透水係数が一時的に小さくなったためだと考えた。深い土層ではフィンガー流が発生し、それによる体積含水率の上昇を TDR センサーが測定したことで透水係数が大きくなったことが考えられる。校正した水分特性および熱特性パラメーターを利用した水分移動と熱移動の推定値と実測値は概ね良く一致した。ただし、熱移動にはそれぞれの深さにおいて 10 から 20°C の誤差が生じた。これは、熱水散布にともない土壌に大きな温度勾配が生じ、水蒸気が土壌中を圧力勾配で移動した結果、熱が水蒸気により運ばれたためだと考えられる。

推定した物理パラメーターを利用して熱水をさまざまな量と時間で散布したときの地温が 55°C 以上になった時間についてまとめた。地温を 55°C 以上で 4 時間以上維持するためには、消毒対象の土壌深さが 20 cm までの場合は散布時間に関係なく 75 L m⁻² 以上、消毒対象の土壌深さが 40 cm までの場合は散布時間を 150 分のとき 175 L m⁻² 以上、散布時間が 180 分のとき 100 L m⁻² の熱水を散布する必要がある。ただし、熱移動の推定値は実測値に比べて土壌深さ 20 cm において 10°C、土壌深さ 40 cm において 10 から 20°C 程度過小評価されるため、ある量の熱水を散布した場合、地温は推定値より高くなることが考えられるため、本研究で提案した熱水の散布量はさらに削減できる可能性がある。

追加給水法が熱水のみを散布する処理方法に比べて、深い土層の地温を 55°C 以上で維持するために有効であることを示した。熱水を 125 L m⁻² で 150 分間散布した後に常温水を追加散布することで熱水のみを散布するより深い土層まで土壌消毒の効果を期待できる。

本研究では T_{sk} が 55°C 以上になる黒ボク土について TDR 法で測定した ϵ_b の温度依存性と ϵ_b を利用して推定した θ_p の温度補正式を提案した。 ϵ_b は θ_p が 0.4 より低いときは T_{sk} が高くなっても 25°C の ϵ_b と大きな差はなく温度依存性は非常に小さくなるが、 θ_p が 0.4 以上のときに T_{sk} が高くなると 25°C の値より小さくなり、 θ_p が高いほどより小さくなる。 EC_b は全ての体積含水率について T_{sk} が上がると大きくなる正の傾きを示した。 θ_p が 0.4 より低いとき傾きは θ_p が高くなるにつれ大きくなり、 θ_p が 0.4 以上のときに徐々に傾きが小さくなる。 ϵ_b 、 EC_b および T_{sk} を利用することで、 θ_c を精度よく推定可能であることが明らかになった。

3.5. 引用文献

- Campbell, G. S. 1985. *Soil Physics with Basic; Transport Models for Soil-Plant Systems*, Elsevier, New York, de Vries,
- Goh E. G. and K. Noborio. 2016. An improved heat flux theory and mathematical equation to estimate water vapor advection as an alternative to mechanistic enhancement factor, *Transp. Porous Med.* 11(2): 331-346.
- Heitman, J. L., R. Horton, T. Ren, I. N. Nassar, and D. D. Davis. 2008. A test of coupled soil heat and water transfer prediction under transient boundary temperature. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 72, 1197-1207.
- 伊東雄樹. 2013. 熱水土壤消毒時の土壤における様々な物理性の変化. 明治大学修士論文.
- 加藤高寛. 2010. 熱水土壤消毒における土壤中の水分と熱移動. 明治大学修士論文.
- Millington, R. J., and J. M. Quirk. 1961. Permeability of porous solids, *Trans. Faraday Soc.*, 57, 1200-1207
- Miyamoto T. and J. Chikushi. 2006. Time domain reflectometry calibration for typical upland soils in Kyushu, Japan. *Jpn. Agri. Res. Quart.*40(3): 225-231.
- Miyamoto T., R. Kobayashi, T. Annaka, and J. Chikushi. 2001. Applicability of multiple length TDR probes to measure water distribution in an Andisol under different tillage system in Japan. *Soil Till. Res.* 60: 91-99.
- 宮崎毅. 1995. 傾斜キャピラリーバリアーの限界長に関する研究. 農業土木学会論文集. 179:49-56.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resour. Res.*, 12(3), 513-522.
- 中山尊登. 2002. 熱水土壤消毒 その原理と実践の記録. 日本園芸施設協会. pp137-139.
- Nimmo, J. R., and E. E. Miller. 1986. The temperature dependence of isothermal moisture vs. potential characteristics of soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50, 1105-1113.
- 西和文. 2002. 熱水土壤消毒 その原理と実践の記録. 日本園芸施設協会. pp7-16.
- Noborio K. 2001. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. *Comput. Electron. Agri.* 31: 213-237.
- Noborio, K., K. J. McInnes, and J. L. Heilman. 1996b. Two-dimensional model for water, heat, and solute transport in furrow-irrigated soil: II. Field evaluation, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60, 1010-1021.

- 落合博之. 2009. 熱水消毒時における土壌中の水分、溶質、熱の移動. 明治大学博士学位請求論文
- Or D. and J. M. Wraith. 1999. Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: A physical model. *Water Resour. Res.* 35, 371-383.
- Pepin S., N. J. Livingston, and W. R. Hook. 1995. Temperature-dependent measurement errors in time domain reflectometry determinations of soil water. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 38-43.
- Philip, J. R., and D. A. de Vries. 1957. Moisture movement in porous media under temperature gradients, *Eos Trans. AGU*, 38(2), 222-232.
- Roth K., R. Schulin, H. Fluhler, and W. Attinger. 1990. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resour. Res.* 26(10): 2267-2273.
- Saito, H., J., Šimůnek, and B. Mohanty. 2006. Numerical analyses of coupled water, vapor and heat transport in the vadose zone, *Vadose Zone J.*, 5, 784–800.
- Šimůnek, J., M. Th. Van Genuchten, and M Šejna. 2016. Recent Developments and Applications of the HYDRUS Computer Software Packages, *Vadose Zone J.*, 15 (7), doi:10.2136/vzj2016.04.0033
- Skierucha W. 2009. Temperature dependence of time domain reflectometry-measurement soil dielectric permittivity. *J. Plant. Nutr. Soil Sci.* 172: 186-193.
- van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898.
- 矢野友久, 井上光弘, 小谷佳人. 1983. 砂質土壌の水分特性曲線とその温度依存性について. 鳥取大砂丘研報. 22:1-8.
- Wraith J. M. and D. Or. 1999. Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: Experimental evidence and hypothesis development. *Water Resour. Res.* 35, 361-369.

Table 3-1 Physical parameters and soil texture.

| Particle density (Mg m ⁻³) | sand (%) | silt (%) | clay (%) | Soil texture |
|---|----------|----------|----------|--------------|
| 2.716 | 45 | 24 | 31 | clay Loam |

Table 3-2 Bulk density, solid phase, and particle density of the experimental field.

| Soil depth (cm) | Bulk density (Mg m ⁻³) | Solid phase (m ³ m ⁻³) | Particle density (Mg m ⁻³) |
|--------------------|---------------------------------------|--|---|
| 0-5 | 0.64 | 0.24 | |
| 5-10 | 0.62 | 0.23 | |
| 10-20 | 0.74 | 0.27 | 2.72 |
| 20-40 | 0.66 | 0.24 | |
| 40-60 | 0.63 | 0.23 | |

Table 3-3 Saturated volumetric water content θ_s , residual volumetric water content θ_r , saturated hydraulic conductivity K_s , and α , n , and l of van Genuchten's fitting parameters.

| Soil depth (cm) | θ_r ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) | θ_s ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) | α (cm^{-1}) | n | K_s (cm min^{-1}) | l |
|--------------------|---|---|----------------------------------|-------|-----------------------------------|-------|
| 0-5 | 0.057 | 0.757 | 0.020 | 1.300 | 0.131 | 0.500 |
| 5-10 | 0.061 | 0.754 | 0.008 | 1.310 | 0.033 | 0.500 |
| 10-20 | 0.053 | 0.702 | 0.050 | 1.380 | 0.735 | 0.500 |
| 20-40 | 0.055 | 0.744 | 0.011 | 1.387 | 0.851 | 0.500 |
| 40-60 | 0.047 | 0.749 | 0.010 | 1.350 | 0.526 | 0.500 |

Table 3-4 Calibrated soil hydraulic physical parameters by inversed analysis.

| Soil depth (cm) | α | | n | | K_s | |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | measured | inversed | measured | inversed | measured | inversed |
| 0-5 | 0.020 | 0.055 | 1.30 | 1.38 | 0.13 | 0.051 |
| 5-10 | 0.0080 | 0.0090 | 1.31 | 1.92 | 0.033 | 0.11 |
| 10-20 | 0.050 | 0.0090 | 1.38 | 1.54 | 0.73 | 0.54 |
| 20-40 | 0.011 | 0.011 | 1.39 | 1.81 | 0.85 | 5.5 |
| 40-60 | 0.010 | 0.015 | 1.35 | 1.46 | 0.53 | 3.7 |

Table 3-5 Calibrated soil thermal physical parameters by inversed analysis.

| Soil depth (cm) | clay | | C_n | | C_w | |
|--------------------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Initial | inversed | Initial | inversed | Initial | inversed |
| 0-5 | | 0.050 | | 8.87E+07 | | 1.62E+08 |
| 5-10 | | 0.10 | | 8.44E+07 | | 1.67E+08 |
| 10-20 | 0.10 | 0.10 | 6.91E+07 | 5.78E+06 | 1.50E+08 | 1.34E+08 |
| 20-40 | | 0.10 | | 2.64E+07 | | 9.64E+07 |
| 40-60 | | 0.10 | | 3.77E+06 | | 5.92E+07 |

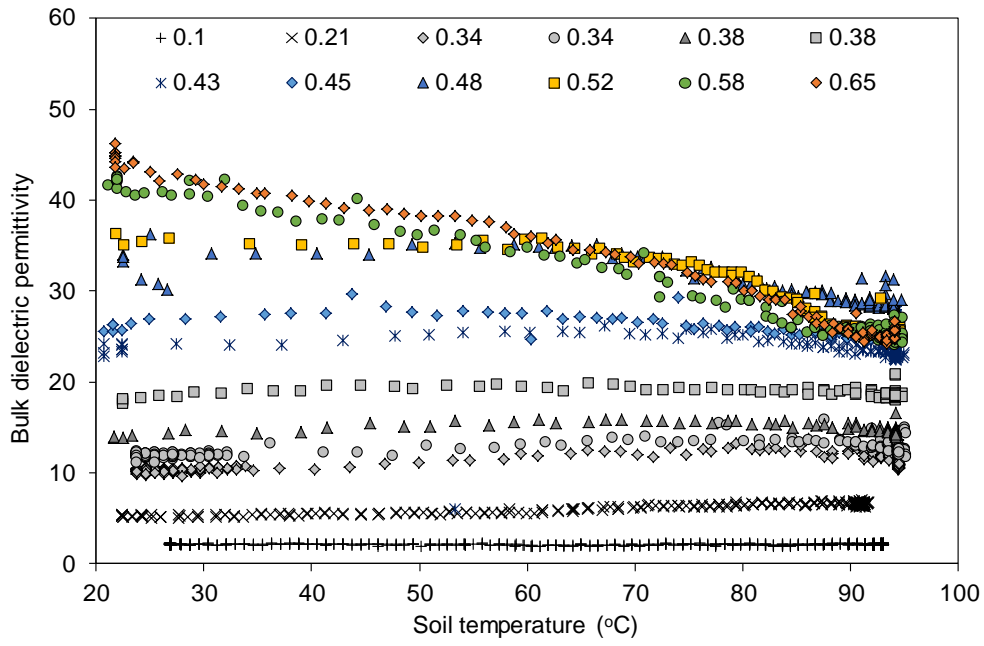


Fig. 3-1 Comparison of soil temperature and bulk dielectric permittivity of Andisol of each actual volumetric water content.

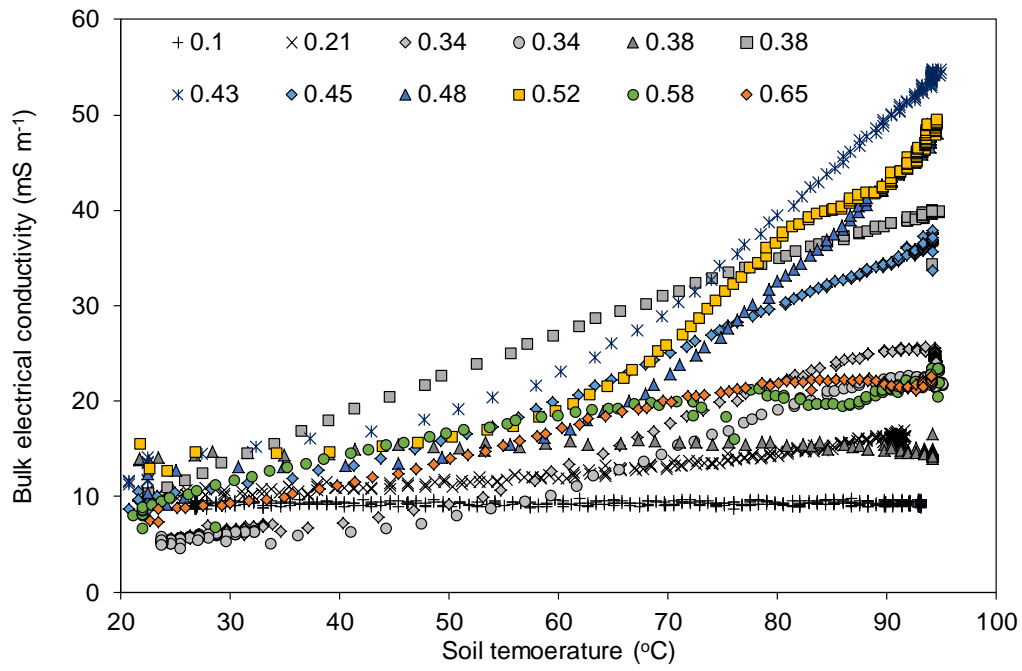


Fig. 3-2 Comparison of soil temperature and bulk electrical conductivity of Andisol at each actual volumetric water content.

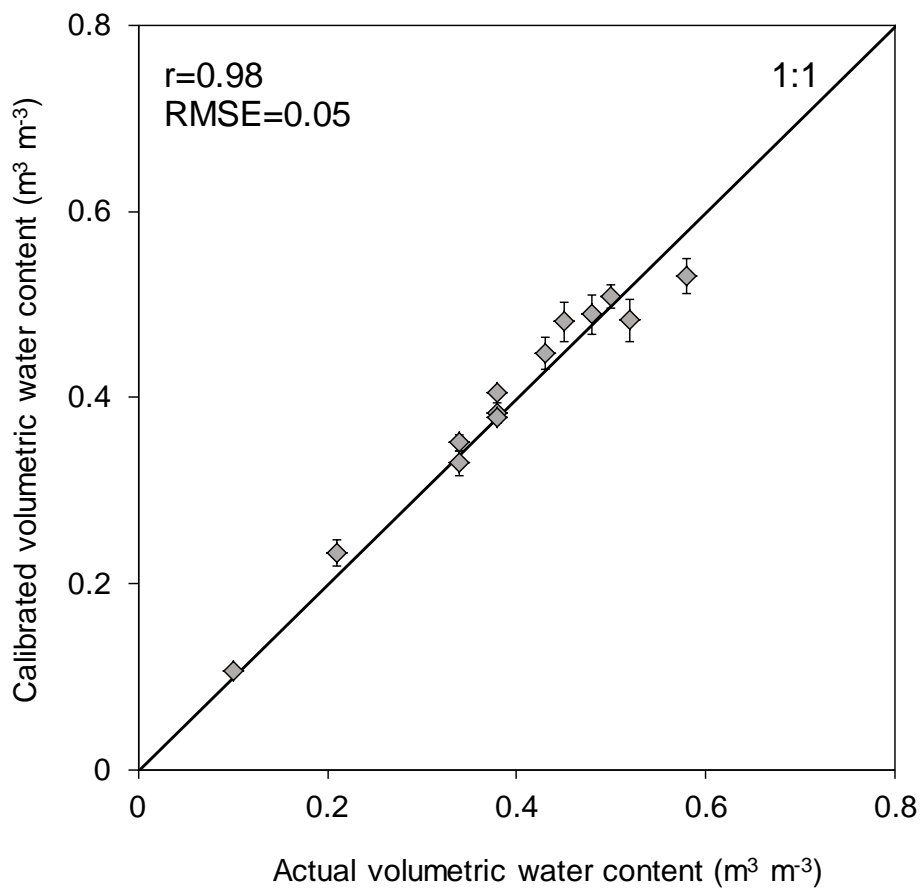


Fig. 3-3 Comparison of actual volumetric water content and calibrated volumetric water content.
Error bar indicates ± 1 SD (n=94~547).

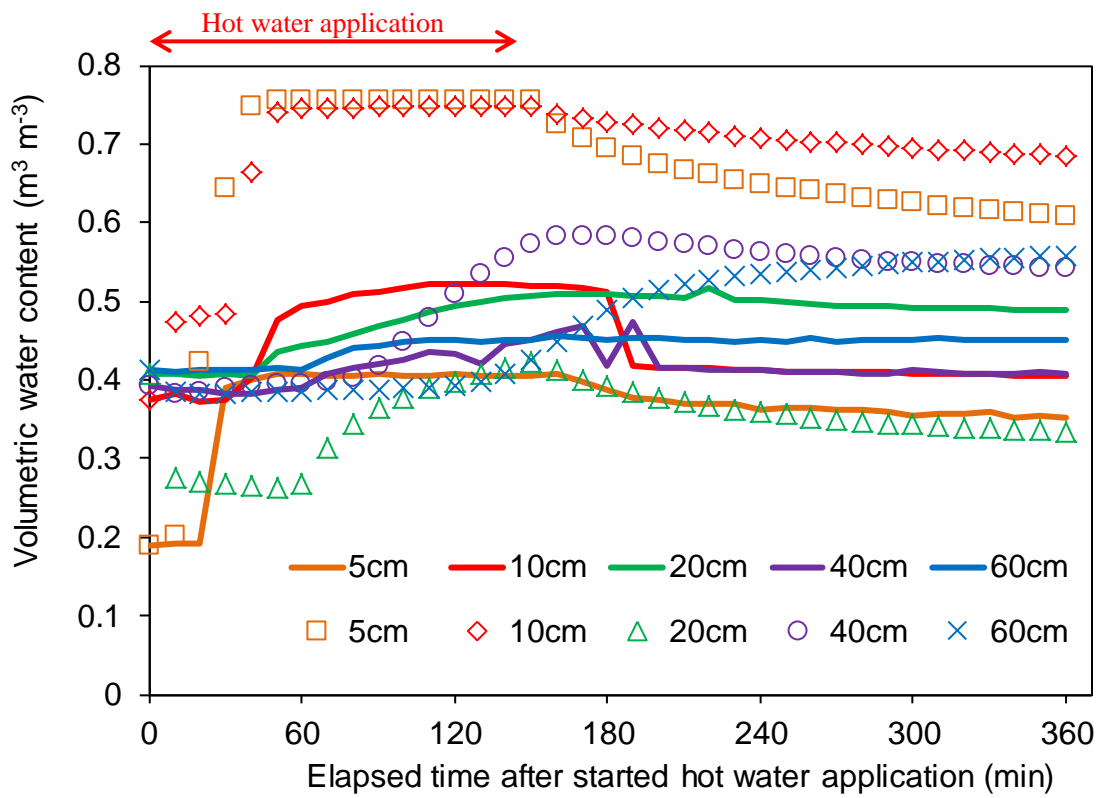


Fig. 3-4 Changes in measured and calculated volumetric water content with non-calibrated hydraulic and thermal parameters of at each observation point. Solid lines and plots show measured values and calculated values, respectively.

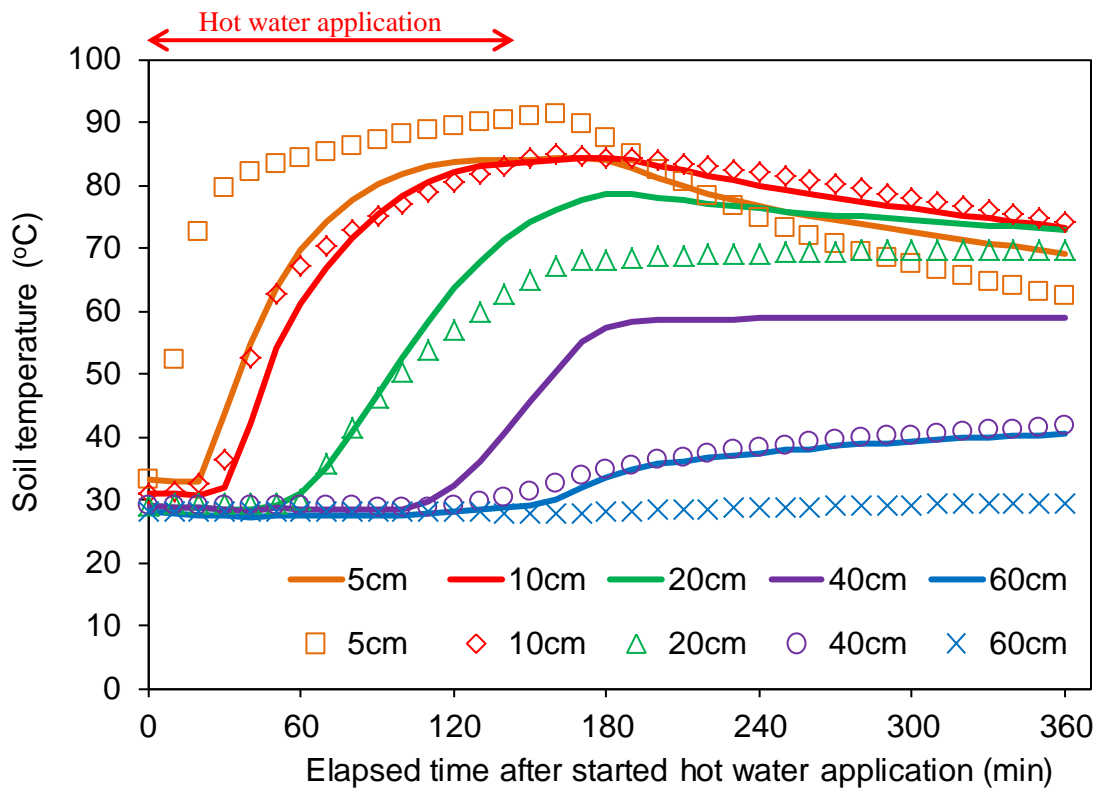


Fig. 3-5 Changes in measured and calculated soil temperature with non-calibrated hydraulic and thermal parameters of at each observation point. Solid lines and plots show measured values and calculated values, respectively.

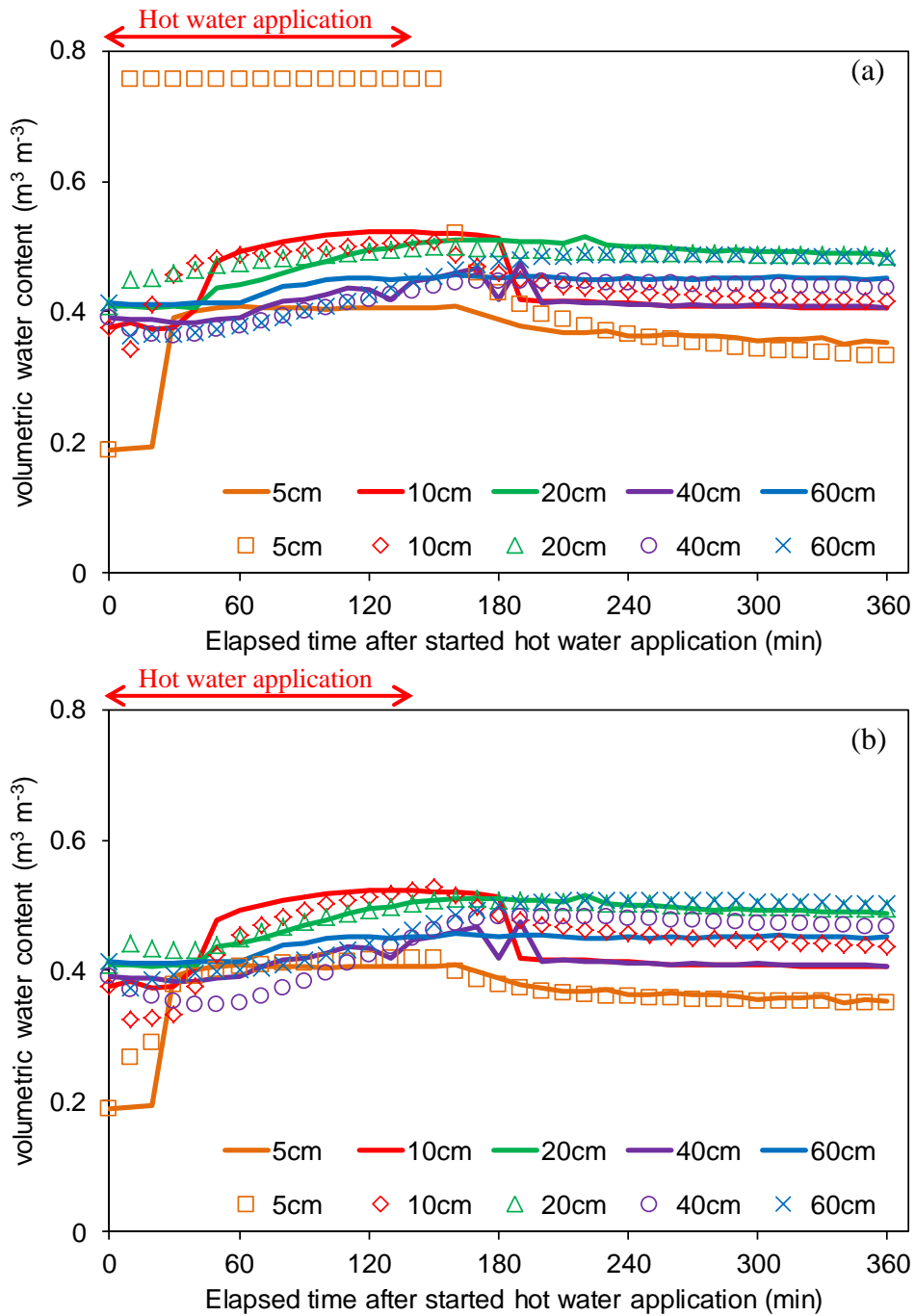


Fig. 3-6 Changes in measured and calculated volumetric water content with calibrated hydraulic and thermal parameters of at each observation point. Upper heat boundary condition was applied (a) soil temperature at 5 cm depth and (b) 95 °C of hot water from 0 to 150 min as dirichlet condition, respectively. Solid lines and plots show measured values and calculated values, respectively.

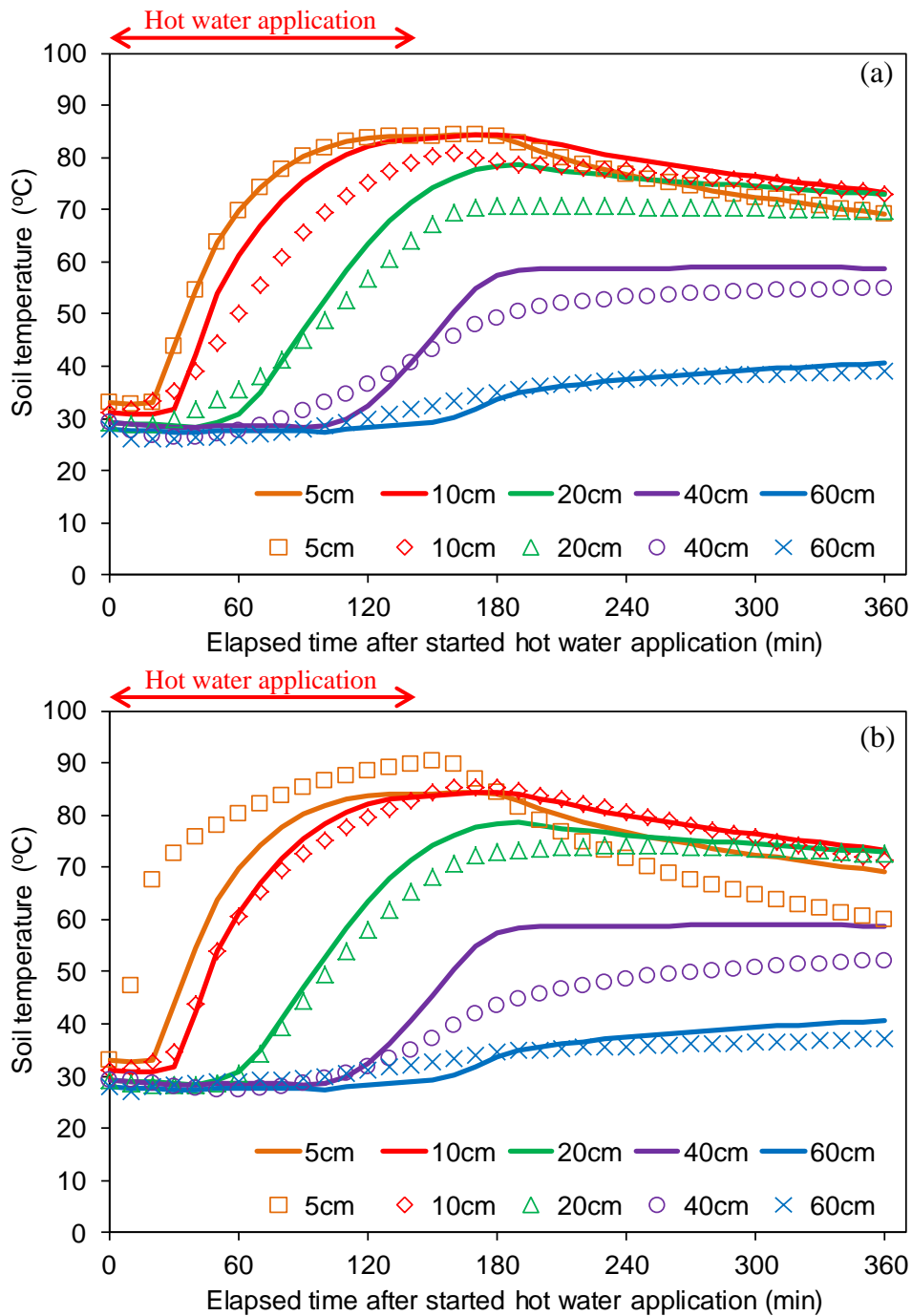


Fig. 3-7 Changes in measured and calculated soil temperature with calibrated hydraulic and thermal parameters of at each observation point. Upper heat boundary condition was applied (a) soil temperature at 5 cm depth and (b) 95 °C of hot water from 0 to 150 min as dirichlet condition, respectively. Solid lines and plots show measured values and calculated values, respectively.

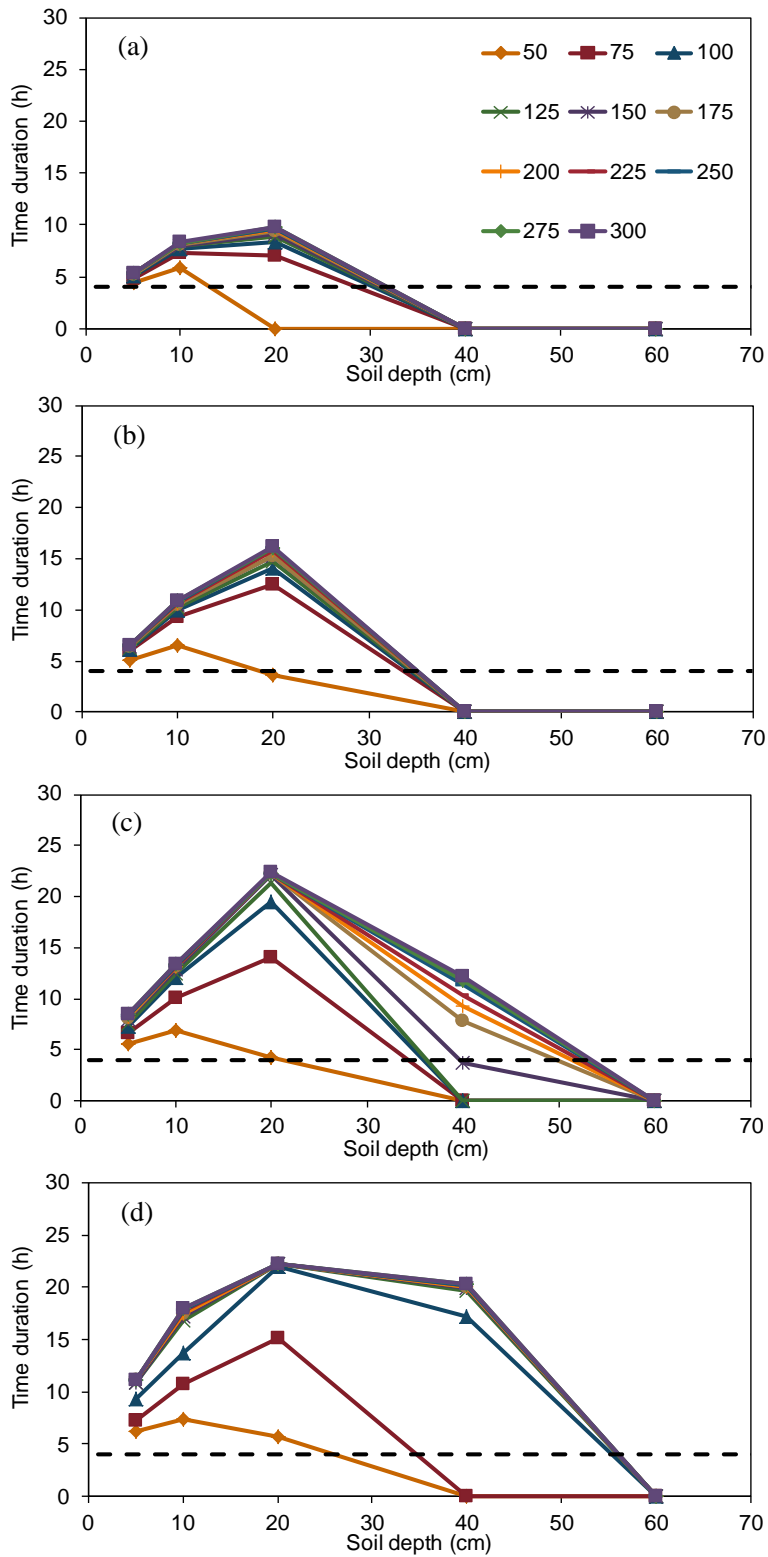


Fig. 3-8 Duration time which soil temperature at each observation point was kept over 55 °C after hot water application was started. Hot water application was carried out for (a) 90min, (b) 120 min, (c) 150 min, and (d) 180 min. Legend shows the amount of applied hot water.

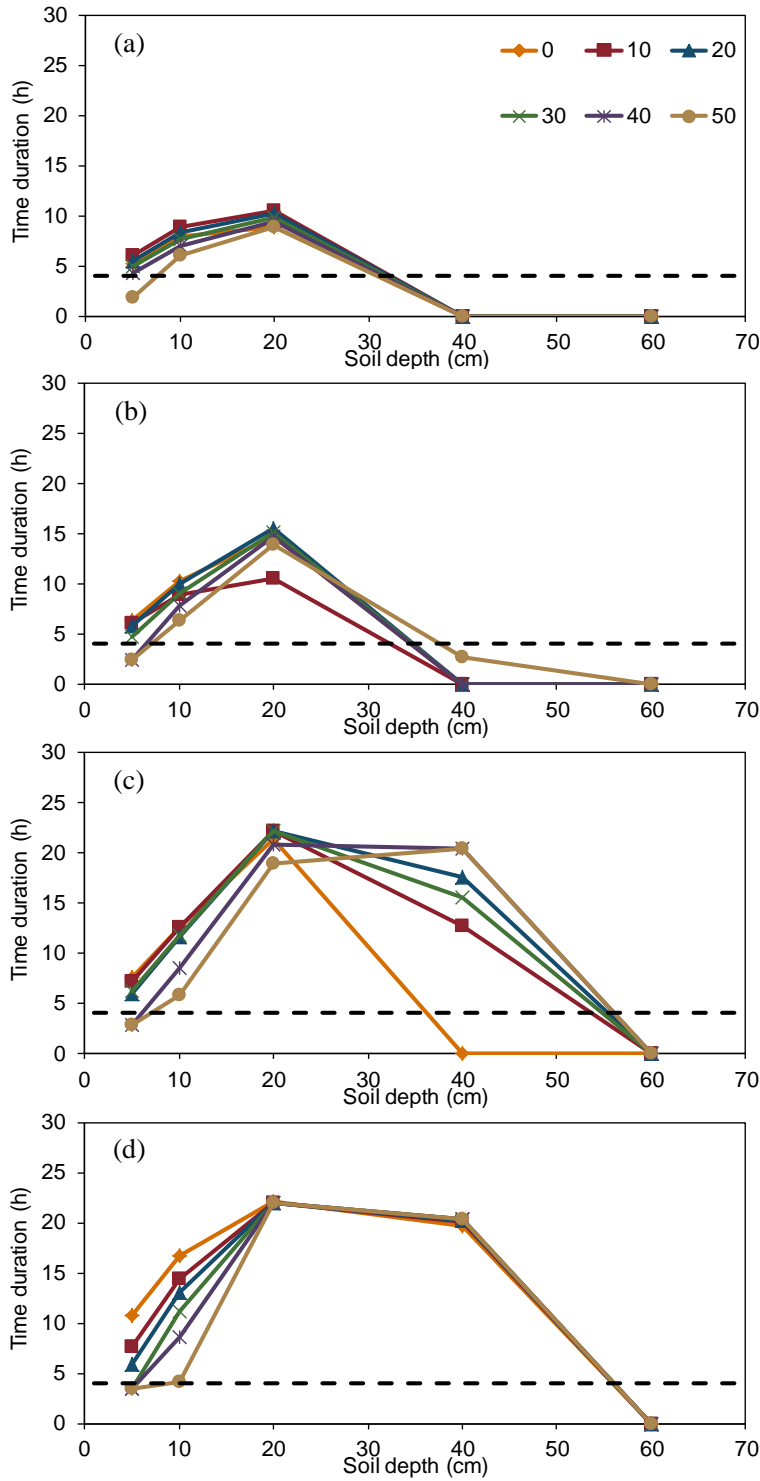


Fig. 3-9 Duration time which soil temperature at each observation point was kept over 55 °C after hot water application was started. Hot water application was carried out for (a) 90min, (b) 120 min, (c) 150 min, and (d) 180 min before additional tap water application. The amount of applied hot water was 125 L m⁻². Legend shows the amount of applied tap water (L m⁻²).

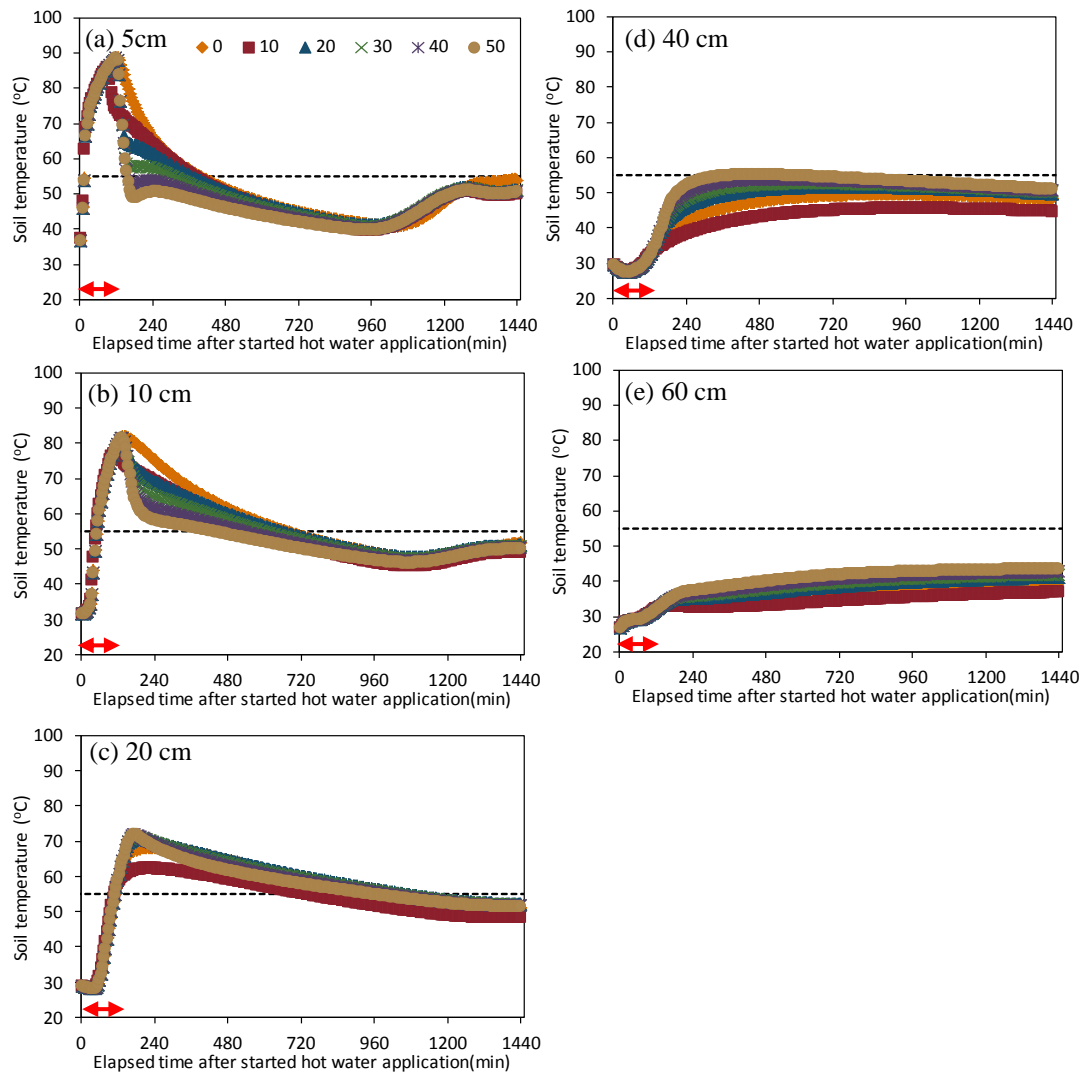


Fig. 3-10 Changes in calculated soil temperature at (a) 5, (b) 10, (c) 20, (d) 40, and (e) 60 cm soil depth applied several amount of tap water after hot water application for 120 min. Legends show the amount of applied tap water ($L m^{-2}$). Red arrows in each figure show hot water application. Dashed lines show 55 °C.

5. 結論

本研究では農業用施設、特にビニールハウスにおける土壌および灌水管理を行うための水分および熱収支を明らかにした。

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・モンティ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マン栽培の土壌における根の分布を良く表した。水分減少法を用いたみかけの根の吸水量は自動養液土耕栽培システムによる灌水量と良く一致した。また、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無かった。これは、自動養液土耕システムによる灌水量とピーマン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・モンティ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。

本研究では T_{sk} が 55°C 以上になる黒ボク土について TDR 法で測定した ε_b の温度依存性と ε_b を利用して推定した θ_p の温度補正式を提案した。 ε_b は θ_p が 0.4 より低いときは T_{sk} が高くなっても 25°C の ε_b と大きな差はなく温度依存性は非常に小さくなるが、 θ_p が 0.4 以上のときに T_{sk} が高くなると 25°C の値より小さくなり、 θ_p が高いほどより小さくなる。 EC_b は全ての体積含水率について T_{sk} が上がると大きくなる正の傾きを示した。 θ_p が 0.4 より低いとき傾きは θ_p が高くなるにつれ大きくなり、 θ_p が 0.4 以上のときに徐々に傾きが小さくなる。 ε_b 、 EC_b および T_{sk} を利用することで、 θ_c を精度よく推定可能であることが明らかになった。

熱水土壌消毒の適切な熱水の散布量を提案するために HYDRUS-1D を用いて逆解析を行い、実測値をもとに適切な水分および熱移動の物理パラメーターを推定した。水分および熱移動の物理パラメーターの実測値を用いた HYDRUS-1D による推定値と実測値は、水分移動について大きく誤差が生じ、熱移動は水分移動に比べて小さいが誤差が生じた。熱水土壌消毒時の土壌における体積含水率と地温の実測値を用いて HYDRUS-1D を利用して逆解析を行い α 、 n 、 K_s 、 clay 、 C_n および C_w の 6 個のパラメーターを推定した。推定した K_s は浅い土層で推定値が実測値より小さくなり、深い層で推定値が実測値より大きくなった。これは、浅い層では熱水散布により地温が急激に上

昇した影響で土壌中に気泡が発生し、透水係数が一時的に小さくなったためだと考えた。深い土層ではフィンガー流が発生し、それを TDR センサーが測定したことで透水係数が大きくなったことが考えられる。推定した物理パラメーターを利用した水分移動と熱移動の推定値と実測値は良く一致した。ただし、熱移動にはそれぞれの深さにおいて 10 から 20°C の誤差が生じた。これは、熱水散布にともない土壌に大きな温度勾配が生じ、水蒸気が土壌中を圧力勾配で移動した結果、熱が水蒸気により運ばれたためだと考えられる。

推定した物理パラメーターを利用して熱水をさまざまな量と時間で散布したときの地温が 55°C 以上になった時間についてまとめた。地温を 55°C 以上で 4 時間以上維持するためには、土壌消毒の対象深さが 20cm のとき散布時間に関係なく 75L m⁻² 以下、深さが 40cm のとき散布時間を必ず 180 分以上で 125L m⁻² 以上の熱水を散布する必要がある。ただし、熱移動の推定値は実測値に比べて土壌深さ 20cm において 10°C、土壌深さ 40cm において 10 から 20°C 程度過小評価されるため、熱水の投入量はさらに少なくできる可能性がある。

追加給水法が熱水のみを散布する処理方法に比べて、深い土層の地温を 55°C 以上で維持するために有効であることを示した。熱水を 125L m⁻² 散布した後に常温水を追加給水する場合、常温水を 30 から 50L m⁻² 追加散布することで熱水のみを散布するより深い土層まで土壌消毒の効果を期待できる。

本研究では、福島県の被災地における農業復興のために、除染で肥沃度が低下した農地における新たな栽培体系として自動養液土耕栽培を導入することを提案した。本研究で用いた自動点滴養液土耕栽培は作物の蒸散量を精度よく推定した上で灌水を行えることが明らかになった。さらに、熱水土壌消毒の適切な散布量を提案し、農家の土壌管理にかかるコストを削減することに寄与できる結果を得た。

記号一覧

- A_e : 有効地表面積(300mm long × 200mm wide = $6.0 \times 10^4 \text{ mm}^2$)
- A : 茎の横断面積(m^2)
- A_p : ピーマン 1 個体に対する地表面積(m^2)
- a_v : 気相率 ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)
- c : 粘土
- c_w : 水の比熱(= $4.18 \text{ J g}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)
- C_p : 土の体積熱容量($\text{ML}^{-1} \text{ T}^{-2} \text{ K}^{-1}$)
- C_s : 固相の体積熱容量($\text{ML}^{-1} \text{ T}^{-2} \text{ K}^{-1}$)
- C_w : 液相の体積熱容量($\text{ML}^{-1} \text{ T}^{-2} \text{ K}^{-1}$)
- C_v : 気相の体積熱容量($\text{ML}^{-1} \text{ T}^{-2} \text{ K}^{-1}$)
- D_a : 温度 T における大気中の水蒸気拡散係数 ($\text{L}^2 \text{ T}^{-1}$)
- D : 土中の水蒸気拡散係数($\text{L}^2 \text{ T}^{-1}$)
- d : ゼロ面変位
- E : 起電力(V)
- EC_b : 電気伝導度(mS m^{-1})
- ET_p : 可能蒸発散量 (mm)
- F_{st} : 深さ単位の茎内流量 (mm s^{-1})
- F_{sm} : 質量単位の茎内流量(g s^{-1})
- f_c : 粘土分率(無次元)
- G : 地中熱伝導量 (W m^{-2})
- G_{wT} : 表面張力の温度依存を補正する促進係数(無次元)
- g : 重力加速度(L T^{-1})(= 9.81 m s^{-1})
- H_r : 相対湿度 (0-1)
- h_v : 草丈 (m)
- h : 土中水圧力(L)
- I : 灌水量(mm d^{-1})
- k : カルマン定数(≈ 0.4)
- K : 単位温度
- K_s : 飽和透水係数 (L T^{-1})

K_{Lh} : 土中水圧力勾配による液状水移動における不飽和透水係数(LT⁻¹)
 K_{LT} : 温度勾配による液状水移動における不飽和透水係数(LT⁻¹)
 K_{vh} : 土中水圧力勾配による水蒸気移動における不飽和透水係数(LT⁻¹)
 K_{vT} : 温度勾配による水蒸気移動における不飽和透水係数(LT⁻¹)
 K_{ref} : 基準温度 T_{ref} における透水係数(L T⁻¹)
 K_T : 地温 $T(^{\circ}\text{C})$ における透水係数(L T⁻¹)
 k_s : 実験係数(W V⁻¹)
 L : 単位長さ
 L_E : 蒸発潜熱(MJ kg⁻¹)
 L_a : みかけのプローブ長(m)
 L_w : 単位重量当たりの蒸発潜熱(=2.501×10⁶-2369.2T)
 L_0 : 単位体積当たりの水の蒸発潜熱(J m⁻³)
 M : 単位長さ
 M_w : 水の分子量(Mmol⁻¹)(=0.018015 kg mol⁻¹)
 m : 実験定数
 ma : 固相、石英および粘土以外の鉱物
 N : 実験定数(無次元)
 n : 固相
 Q : 熱量(W)
 Q_f : 植物体において上向きに輸送される熱量 (W)
 q : 石英
 q_d : 伝導によって熱源の下流側に失われる熱量 (W)
 q_{Lh} : 土中水圧力勾配による液状水フラックス(L T⁻¹)
 q_{LT} : 温度勾配による液状水フラックス(L T⁻¹)
 q_r : 熱源表面から周囲の空気中へ失われる熱量 (W)
 q_u : 伝導によって熱源の上流側に失われる熱量 (W)
 q_{vh} : 土中水圧力勾配による水蒸気フラックス(L T⁻¹)
 q_{vT} : 温度勾配による水蒸気フラックス(L T⁻¹)
 R : 気体定数(M L² T⁻² mol⁻¹ K⁻¹)
 RH : 相対湿度 (0-1)
 R_n : 純放射量 (W m⁻²)

r_{va} : 植生上の水蒸気輸送に対する空気力学的抵抗($s\ m^{-1}$)
 r_{va} : 植生上の水蒸気拡散に対する抵抗($s\ m^{-1}$)
 S_e : 有効飽和度
 T : 温度(K)
 T_a : 気温(K)
 T_d : それぞれ加温部位直上の茎温($^{\circ}C$)
 T_s : 地表面温度($^{\circ}C$)
 T_{sk} : 地温($^{\circ}C$)
 T_u : それぞれ加温部位直下の茎温($^{\circ}C$)
 T'_u : T_u の測定点から $\Delta x(m)$ 上流の点での茎温($^{\circ}C$)
 T'_d : T_d の測定点から $\Delta x(m)$ 下流の点での茎温($^{\circ}C$)
 Δt : i 日と $i+1$ 日の間隔(d)
 U : みかけの根の吸水量 ($mm\ d^{-1}$)
 \bar{u} : 平均風速 ($m\ s^{-1}$)
 V_a : 有効土壌体積 (mm^3)
 V_{∞} : TDR プローブ終端で反射された電磁波の強度(電圧)
 z : 上向きを正とする空間座標(L)
 z_H : 熱に対する粗度長
 z_M : 運動量に対する粗度長
 z_a : 風速を測定した地表面からの高度 (m)

θ : 液状水の体積含水率($L^3\ L^{-3}$)
 θ_a : 実験開始前と実験終了時の体積含水率の平均値($m^3\ m^{-3}$)
 θ_c : 正しい体積含水率($m^3\ m^{-3}$)
 $\Delta\theta_{mean}$: 体積含水率の日変化量($mm\ d^{-1}$)
 θ_{mean} : DAT= i の午前5時における平均体積含水率 ($mm^3\ mm^{-3}$)
 θ'_{mean} : DAT= $i+1$ 日の午前5時における平均体積含水率 ($mm^3\ mm^{-3}$)
 θ_p : みかけの体積含水率($m^3\ m^{-3}$)
 θ_v : 水蒸気の体積含水率($L^3\ L^{-3}$)
 θ_r : 残留体積含水率($L^3\ L^{-3}$)
 θ_s : 飽和体積含水率($L^3\ L^{-3}$)

θ_w : 体積含水率($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
 α : 実験定数(L^{-1})
 α_k^* : 透水係数の温度補正值
 ε_b : 測定された土壌全体の比誘電率
 γ : 乾湿計定数($=0.66 \text{ hPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)
 γ : 土中水の表面張力(M T^{-2})
 γ_0 : 25°C における表面張力(M T^{-2})
 ρ : 水蒸気濃度(kg m^{-3})
 ρ^0 : 飽和水蒸気濃度(kg m^{-3})
 ρ_a : 大気の水蒸気濃度(kg m^{-3})
 ρ_a^0 : 気温 T_a ($^\circ\text{C}$)に対する大気の飽和水蒸気濃度(kg m^{-3})
 ρ_s : 地表面における水蒸気濃度(kg m^{-3})
 ρ_s : 植生の水蒸気濃度(0-1)
 ρ_{vs} : 飽和水蒸気密度(M L^{-1})
 ρ_w : 水の密度(10^6 g m^{-3})
 ρ_w : 液状水の密度(M L^{-1})
 η : 水蒸気促進係数
 λ : 茎の熱伝導率($\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
 $\lambda(\theta_L)$: 土の熱伝導率($\text{M L T}^{-3} \text{ K}^{-1}$)
 τ_a : 気相の屈曲度
 μ_{ref} : 基準温度 T_{ref} における粘性係数($\text{M L}^{-1} \text{ T}^{-1}$)
 μT : 地温 T ($^\circ\text{C}$)における粘性係数($\text{M L}^{-1} \text{ T}^{-1}$)
 Δ : 温度飽和水蒸気濃度曲線の勾配($\text{kg m}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)

謝辞

本論文は著者が2013年4月から2018年3月までに行った研究成果をまとめたものである。研究を行う過程で、多くの方々のご指導やご支援を頂いたので、ここに感謝を表したい。

登尾浩助教授には研究だけではなく様々な面で辛抱強くご指導とご鞭撻を頂いた心より感謝申し上げます。小島信彦准教授、服部俊宏准教授、矢崎友嗣専任講師および岐阜大学工学部小島悠揮助教にはお忙しい中審査員として適切なご意見、ご指導を頂いた。NGO 福島再生の会副理事長の菅野宗夫氏には実験圃場の管理を行って頂き、東日本大震災後の福島県の農家が抱える問題など貴重な意見を伺うことができた。株式会社ルートレック・ネットワークスの喜多英司氏には圃場の灌水管理を行って頂いた。明治大学黒川農場の小沢聖特任教授には栽培管理などをご教授頂いた。明治大学研究知財戦略機構の竹迫紘博士には作物の栽培管理を行って頂いた。北里大学獣医学部の落合博之講師には実験の手順などをご指導いただいた。神奈川県農業技術センターの太田和宏氏をはじめ職員の方々には圃場実験を行うに当たり、実験手順をご指導頂き、圃場を提供して頂いた。

本研究は笹川科学研究助成および明治大学教育研究振興基金事業(研究事業)の助成を受けて行った。

青木伸輔君とUniversiti Malaysia TerengganuのSunny Goh Eng Giap講師は博士後期課程の同期としてお互いに励まし合いながら研究を進めることができた。研究室の同期や後輩とは時にはぶつかり合いながらも楽しく実験を行い、充実した時間を過ごすことができた。

最後に、ここまで支えてくれた両親、弟、妹に深く感謝します。ありがとうございました。