

# 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	<a href="http://hdl.handle.net/10291/20278">http://hdl.handle.net/10291/20278</a>

# 2018年度 農学研究科

## 博士学位請求論文 (要旨)

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

農学専攻  
伊東 雄樹

### 1 問題意識と目的

#### 1.1. 点滴灌漑について

点滴灌漑は、1860年代からドイツで始まり、ドイツやアメリカで改良が進んだ。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効率を向上することが可能であるため、主に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地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。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灌水量の管理(Bresler, 1977; Nakayama and Bucks, 1991)に関する研究のほか、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)など多くの作目に関して行われている。

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放射性降下物の影響により、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、我々が研究を行なっている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、避難指示解除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放射能除染が行われた後(農林水産, 2013)、表土として山砂による客土が行われた。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(好野ら, 2015)ので、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ためには、肥沃度が低い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

有効であることを報告している。従って、福島県飯舘村の除染が行われた農地においても養液土耕栽培を有効に利用できるのではないかと考え、養液土耕栽培を実施したハウス内における水および熱収支を明らかにして総合的に評価することを目的とした。

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

土壌水分量の原位置における測定は、Toppら(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。土壌の比誘電率は温度(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。後に記述する熱水を使った土壌消毒法では、70 から 95°Cに調整した熱水を土壌表面に散布して土壌消毒を行う。従来、熱水土壌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が、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。彼らは、熱水土壌消毒時の土壌においてTDR法で測定した比誘電率を利用した体積含水率を推定したが、90°C近い地温に対する土壌比誘電率の温度依存性については言及されていない。

## 1.3. 土壌消毒について

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。化学的消毒法は臭気の問題や健康に直接影響を及ぼす恐れがある。物理的消毒法には、主に太陽熱を利用する太陽熱消毒法、蒸気の熱を利用する蒸気消毒法、および熱水の熱を利用する熱水土壌消毒法がある。物理的消毒法は特に薬品は用いないため、注意する点は火傷のみである。物理的消毒法にはそれぞれ次のような長所と短所がある。太陽熱消毒法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。蒸気消毒法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がある。熱水土壌消毒法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、消毒可能な深さが蒸気消毒法に比べて深い。物理的消毒法のうち、太陽熱消毒法は中東などの気温が高い地域で多く利用されている(Stapleton and De Vay, 1986)。蒸気消毒法はネギ、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)。熱水土壌消毒法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。熱水土壌消毒法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ている(橋本, 2002)。熱水土壌消毒法は傾斜地(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適用が可能である。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ている(落合ら, 2009)。溶脱されて土壌深部へ流出する溶質の量は熱水の散布量に依存すると考えられる。従来、熱水散布量は農家の経験で決定されているため、溶脱を最小限に留め十分な消毒効果をあげるための適切な散布量を理論的に決定する必要がある。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章では熱水土壌消毒法における適切な熱水投入量を提案した。

## 2 構成及び各章の要約

2章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、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に変化として現れず、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。

3章では地温が 55°C以上になる黒ボク土について TDR 法で測定した比誘電率の温度依存性とその比誘電率を利用した体積含水率の温度補正式を提案した。 $\epsilon_b$ は $\theta_p$ が 0.4 より低いときは  $T_{sk}$ が高くなっても 25°Cの $\epsilon_b$ と大きな差はなく温度依存性は非常に小さくなるが、 $\theta_p$ 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、 $\theta_p$ 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。 $\theta_p$ が 0.4 より低いとき傾きは $\theta_p$ が高くなるにつれ大きくなり、 $\theta_p$ が 0.4 以上のときに徐々に傾きが小さくなる。 $\epsilon_b$ 、 $EC_b$ および  $T_{sk}$ を利用することで、 $\theta_e$ を精度よく推定可能であることが明らかになった。

4章では熱水土壤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。熱水土壤消毒時の土壤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 $\alpha$ 、 $n$ 、 $K_s$ 、 $clay$ 、 $C_n$ 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壤中に気泡が発生し、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壤に大きな温度勾配が生じ、水蒸気が土壤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、消毒対象の土壤深さが 20 cm までの場合は散布時間に関係なく 75 L m<sup>-2</sup> 以上、消毒対象の土壤深さが 40 cm までの場合は散布時間を 150 分のとき 175 L m<sup>-2</sup>以上、散布時間が 180 分のとき 100 L m<sup>-2</sup>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壤深さ 20 cm において 10°C、土壤深さ 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  $125 \text{ L m}^{-2}$  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。