

# 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>

明治大学大学院農学研究科

2018 年度

博士学位請求論文

(要約)

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

序論の一部、第 3 章および 4 章の結果は学术论文として出版する計画があるため公表できない。出版は 5 年以内を予定している。

# 1. 序論

## 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、トマト、キャベツ、ピーマン、ワタなど多くの作物目に関して行われている。

# 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。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。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、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、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。

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。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。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とヒートパルス法により測定される。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。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。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。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。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。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。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する。一方で、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。これらのことは、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、側面開放型農業用施設内において改良ペンマン・モンテイ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。また、改良ペンマン・モンテイ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・モンテイ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。しかし、一般的なペンマン・モンティ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、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・モンティ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

DAT(Day after transplant)=1、31、91 および 121(d)の土壌深さ 30 cm における体積含水率 $\theta_w$ は 0.36 ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )程度であった。DAT=61 の土壌深さ 30 cm における $\theta_w$ は 0.3 ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )程度であった。測定期間を通して土壌深さ 30cm における $\theta_w$ 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 $\theta_w$ は高かった。 $\theta_w$ 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 $\theta_w$ が低い領域が土壌深くに広がった。

土壌深さ 30cm における $\theta_w$ 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。TDR(Time domain reflectometry)法は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。

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。可能蒸散量 $ET_p$ 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 $\rho_a$ が、 $ET_p$ を過小評価した原因であると考えられる。また、平均風速 $u$ が小さくなることによる植生上の水蒸気移動に対する空気力学的抵抗 $r_{va}$ 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。

茎内流量の変化の傾向と値は先行研究の値と良く一致した。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。深さ単位の茎内流量  $F_{sl}$  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。

$F_{sl}$  は土壌断面における  $\theta_w$  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。 $F_{sl}$  と  $\theta_w$  の平均値および  $r_{va}$  は有意な相関がなかった。茎内流量と純放射量  $R_n$ 、飽差  $VPD$ 、気温、地温および日射量と有意な正の相関が、地中熱流量  $G$  は有意な負の相関があった。

土壌の各深さにおける  $\theta_w$  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  $\theta_w$  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。

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  $R_n$ 、 $G$ 、 $VPD$  および  $r_{va}$  の内 1 つだけを 10%減少した可能蒸発散量  $ET_{p,90\%}$  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。ペンマン・モンテイス法を用いて推定した  $ET_p$  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。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・モンテュース法を用いて  $ET_p$  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。

本研究では  $F_{sI}$  を実蒸散量として評価した。 $F_{sI}$  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。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先行研究で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・モンテュ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。

## 1.1. 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・モンテュ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・モンテュ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。