

熱水土壌消毒時における熱・水・溶質移動の測定

誌名	明治大学農学部研究報告 = Bulletin of the Faculty of Agriculture, Meiji University
ISSN	04656083
著者名	加藤,高寛 登尾,浩助 北,宜裕
発行元	明治大学農学部
巻/号	58巻3号
掲載ページ	p. 75-84
発行年月	2009年2月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



〔研究論文〕

熱水土壤消毒時における熱・水・溶質移動の測定

加藤 高寛*・登尾 浩助*†・北 宜裕**

(2008年8月8日受理)

Measurement of Heat, Water, and Solute Movement During Soil Sterilization with Hot Water

Takahiro KATO*, Kosuke NOBORIO*†, and Nobuhiro KITA**

Summary

Although using hot water for soil sterilization is one of the promising alternatives to methyl bromide, there is a lack of knowledge about the appropriate amount of hot water to apply. Computer simulation is one of the methods that can easily determine the appropriate amount of hot water to be applied, but to develop a computer simulation model, it is necessary to know how heat, water, and solute behave in soil during and after hot water application. Thus, the authors measured heat, water, and solute movement in soil during and after hot water application. Experiments were conducted in the Kanagawa Agricultural Technology Center in Hiratsuka, Kanagawa. Horizontally installed time domain reflectometry (TDR) probes (from 5 to 40 cm deep from the soil surface in 5 cm intervals) and thermocouples (from the surface to 50 cm deep in 5 cm intervals) were used. Hot water (95°C) was continuously applied to the soil surface for three hours on August 24, 2007. The amount of hot water applied was 200 L/m². Soil temperature (ST), volumetric water content (VWC), and electrical conductivity were measured with a one minute interval. Values of ST and VWC consistently increased from the surface to the deeper layers. Values of ST and VWC at 5 and 10 cm increased simultaneously, so that heat was mostly transported by the convective water flow. On the other hand, at 20 cm and 30 cm, VWC first increased and was followed by ST. Therefore, the heat of the first 60 min after the start was used to raise the temperature of the soil between the surface and 20 cm, and the heat between 60 and 180 min might be used to raise the temperature of a soil layer below 20 cm. Solute in the soil was leached away to soil layers deeper than 30 cm.

Keywords: Hot Water Application, TDR, soil water, soil temperature, solute transfer

要 約 熱水土壤消毒法は臭化メチルの有望な代替土壤消毒技術の一つであるが、最適な熱水処理量の決定法が確立されていない。最適熱水処理量の決定にはシミュレーションモデルの利用が有効である。本研究では、その開発に必要な基礎的データが不足しているため、熱水土壤消毒時における地温・土壤水分量・電気伝導度を経時的に測定した。神奈川県農業技術センターのガラス室内圃場において、長さ10 cmの3線式TDRプローブを深さ5 cmから40 cmまで5 cm間隔で、また、熱電対は深さ0 cmから45 cmまで5 cm間隔で埋設

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

School of Agriculture, Meiji University, 1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa, 214-8571, Japan

** 神奈川県農業技術センター 〒259-1204 神奈川県平塚市上吉沢1617

Kanagawa Agricultural Technology Center

† Corresponding author E-mail: noboriok@isc.meiji.ac.jp, phone/fax: +81-44-934-7156

した。2007年8月24日10時10分に散水チューブから95°Cの熱水の処理を開始し、3時間で総量200 L/m²を連続的に処理した。体積含水率、電気伝導度、地温の鉛直分布を1分間隔で1週間計測したところ、熱水の浸透に伴って地温と土壌水分量は地表面から深部に向かって順に上昇した。深さ10 cm までは地温と体積含水率の上昇時間はほぼ等しかったため、熱は主に移流によって運ばれたことが明らかになった。深さ20及び30 cm では、体積含水率の上昇開始時間より温度上昇開始時間の方が遅く、そのため熱水処理開始から60分後までに処理された熱水は深さ20 cm までの地温を上昇させ、熱水処理60分後から180分後までに処理した熱水は深さ20~30 cm の地温を上昇させたと考えられた。土壌溶液の電気伝導度は、測定した全ての深さにおいて熱水処理前に比べ処理後の方が低く、処理した熱水によって溶質が30 cm 以深に運ばれたことが示唆された。

キーワード：熱水土壌消毒，TDR，熱移動，水移動，溶質移動

1. 緒言

従来土壌病害虫の防除には、簡易で扱いやすく、効果も安定している臭化メチル剤が使用されてきた。しかし、臭化メチルがオゾン層破壊物質であるため1997年に開催された「オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書」第9回締約国会議において、日本などの先進国では2005年、発展途上国でも2010年までに生産及び使用を全廃するという国際的取り決めがなされた。これを契機に土壌くん蒸剤として広く使用されていた臭化メチルに代わる新しい土壌消毒技術への切り替えが課題となっている。代替技術としてクロロピクリンやD-D油剤などの薬剤を利用した土壌消毒と熱を利用した物理的な消毒法がある。

薬剤による消毒では、薬剤を土壌に注入するので環境負荷が大きく、さらに農薬中毒による死亡事故も頻繁に報告されている（農林水産省生産資材課，2002）。即ち、作業には肉体的負荷だけでなく精神的負荷も与えていると考えられる。

熱を利用した物理的な消毒法として主なものに、太陽熱を利用した土壌消毒、蒸気消毒および熱水土壌消毒の3種類がある。太陽熱を利用した土壌消毒法は消毒の時期や地理的制約があり、土壌深層まで分布する土壌病害虫や45°Cでも死滅しない病害虫には効果は低い。さらにタバコモザイクウイルスにはまったく効果が認められない（北，2006）。また、蒸気消毒法は、処理方法の観点から1回に処理できる面積が限られており、大規模的な施設には適用しにくい等の問題点がある（北，2006）。物理的な消毒法の中でも、

最も新しい技術である熱水土壌消毒法は1985年に初めて土壌病害やセンチュウ害の防除試験が行われた。熱を利用した物理的な消毒法は薬剤を利用した消毒法に比べ環境負荷が小さく、さらに作業への肉体的・精神的負荷も小さいことから今後普及が進む事が期待される。特に熱水土壌消毒法は他の物理的な消毒法に比べ処理方法が簡易であり、効果も安定しているためさらに普及が進むと思われる。また、農林水産省は日本施設園芸協会の協力で熱水土壌消毒機の開発を進めている（宗，2003）。

熱水土壌消毒では、作付け前の圃場に熱水（70~95°C）を注入することで地温を上げ、土壌病害虫の防除を行う。ポリフィルムなどで土壌表面を被覆して熱の損失を抑制する。土壌浅部では高温による短時間での殺菌により、また土壌深部では比較的低温を長時間持続させる緩効的殺菌によって土壌病害虫の防除を行う。

熱水土壌消毒による土壌病害抑止効果については、トマト萎凋病（國安・竹内，1986）やダイズ黒根腐病（西ら，1999）をはじめとする数多くの作物の土壌病害虫を対象に研究されている。これまでに25作物50病害虫に対して極めて高い効果が認められている（西，2005）。

また、土壌中に残存している施肥由来の硝酸態窒素や肥料副成分の塩素等が除去され、灌水除塩と同様の効果が期待できる。さらに熱水土壌消毒後では理由はまだ解明されていないが、作物の窒素吸収量が増加し施肥量を抑えても収量が維持されることも知られている（植草・岡本，2004）。

このように様々な研究が行われているが、熱水土壤消毒は新しい技術であるため、現状ではまだ多くの課題を抱えている。その課題の一つに、熱水処理量の決定法が確立されてない問題がある。熱水処理量は、一般的には消毒すべき最下層の地温が55℃以上になるよう経験的に決定されている（國安ら，1991）。従来の研究から、熱水の処理量は栽培期間が長いトマトやバラなどでは200～300 L/m²、栽培期間が短いハウレンソウなどの軟弱野菜類では100～150 L/m²程度が適当であるとされている（北・植草，2007）。しかし、必要な熱水処理量は、気温、地温、日射量、対象病害虫、消毒すべき土壌の深度、初期土壌含水率などによって大きく変動するため、経験によって決められた熱水処理量では必ずしも最適な熱水処理量とはいえない。

現在、効果を安定させるため注入する熱水量は必要量より多くなっており、不要な経費となっている（植草・岡本，2004）。最適熱水処理量を決定するにはシミュレーションモデルの利用が有効であるが、シミュレーションモデル開発の基礎となる熱水処理時における熱・水・溶質がどのように移動するのかは今まで測定されていない。そこで本研究では、最適な熱水処理量を決定するためのシミュレーションモデルを開発するために必要な基礎データを収集するとともに、熱水処理時における土壌水分量・地温・電気伝導度等の変化を解析した。

2. 理 論

本研究では時間領域反射（time domain reflectometry, TDR）法を用いて土壌水分量及び電気伝導度の測定を行った。TDR法では、電磁波の伝播速度から土壌水分量と有意な関係を持つ土壌の比誘電率を測定することによって土壌水分量を推定することができる（Toppら，1980）。また、電磁波の減衰から溶液濃度と有意な関係をもつ土壌の電気伝導度を測定し、土壌の電気伝導度から土壌溶液の電気伝導度を推定することができる（Daltonら，1984；Hilhorst，2000；Noborio，2001）。

2.1 土壌水分量の測定

TDR法による土壌水分量の測定は、水の比誘電率 $\epsilon_w = 80$ が他の土壌構成物質（土粒子の比誘電率 $\epsilon_s = 3 \sim 10$ 、空気の比誘電率 $\epsilon_a = 1$ ）に比較して非常に大きい性質を利用している。土壌の比誘電率 ϵ_b と土壌体積含水率 θ_w (m³/m³) には、実験的に式(1)のような関係が見出されている（Toppら，1980）。

$$\theta_w = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon_b - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon_b^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon_b^3 \quad (1)$$

この関係は、土壌とプローブとの接触具合、温度、溶質の存在、乾燥密度、土壌構造、土性、ヒステリシスの影響をほとんど受けない。しかし、粘性土や有機質に富んだ土壌では比誘電率 ϵ_b を過小評価する傾向がある。そこで、本研究では、測定の精度を上げるために比誘電率 ϵ_b と体積含水率 θ_w の関係式を個別に求めた。

熱水処理時には地温が20℃から85℃まで大きく変化するため、水の比誘電率の温度依存性は無視できない。従って、水の比誘電率の温度依存性を考慮できる式(2)を用いて土壌の体積含水率と比誘電率の関係を求めた（Yuら，1997）。

$$\epsilon_b = (\theta_a \epsilon_a^\alpha + \theta_w \epsilon_w^\alpha + \theta_s \epsilon_s^\alpha)^{1/\alpha} \quad (2)$$

ここで、 ϵ_b ：土壌の比誘電率、 θ_a ：気相率(m³/m³)、 ϵ_a ：空気の比誘電率 (=1)、 α ：実験定数、 θ_w ：体積含水率 (m³/m³)、 ϵ_w ：水の比誘電率、 θ_s ：固相率(m³/m³)、 ϵ_s ：土粒子の比誘電率である。この式を体積含水率 θ_w について整理すると、

$$\theta_w = \frac{\epsilon_b^\alpha - \epsilon_a^\alpha - (\epsilon_s^\alpha - \epsilon_a^\alpha) \theta_s}{\epsilon_w^\alpha - \epsilon_a^\alpha} \quad (3)$$

となる。 α は測定した θ_w と ϵ_b の関係からエクセルのソルバー機能を用いて最小二乗法により求めた。 θ_s は土粒子密度と乾燥密度から計算し求めた。 ϵ_s は実測により、10.087とした。 ϵ_w は水の温度 T (°C) の関数として式(4)で表されるため、式(4)を式(3)の ϵ_w に代入した（Weast，1986）。

$$\epsilon_w = 87.74 - 0.40008T + 9.398 \times 10^{-4}T^2 - 1.410 \times 10^{-4}T^2 \quad (4)$$

2.2 土壌溶液の電気伝導度の測定

TDR で測定される電気伝導度は、土粒子と土壌間隙に存在する空気の電気伝導度、および土壌溶液の電気伝導度 EC_w (mS/m) を合わせた複合的な電気伝導度であり、見かけの電気伝導度 EC_b (mS/m) と呼ばれる。そのため、 EC_w を推定するために(5)式を用いた (Hilhorst, 2000)。

$$EC_w = \frac{\epsilon_w EC_b}{\epsilon_b - \epsilon_{ECb=0}} \quad (5)$$

ここに、 ϵ_w : 水の比誘電率、 ϵ_b : TDR で測定される土壌の比誘電率、 $\epsilon_{ECb=0}$: $EC_b = 0$ になるときの土壌の比誘電率 ϵ_b である。土壌水分の測定と同様に、水の比誘電率が温度依存するので式(5)の ϵ_w に式(4)を代入した。イオン交換水で種々の体積含水率に調整した供試土の ϵ_b と EC_b を測定して $EC_b - \epsilon_b$ に対する回帰直線の切片を $\epsilon_{ECb=0}$ とした。このキャリブレーション実験によって得られた値である3.931を $\epsilon_{ECb=0}$ とした。

さらに EC_w は温度の影響を受けるので、温度補正を行う必要がある。通常 EC_w は 25°C における値 EC_{w25} (mS/m) として報告される。したがって式(6)によって温度補正を行った (Heimovaara ら, 1995)。

$$EC_{w25} = EC_w \frac{1}{[1 + \delta(T - 25)]} \quad (6)$$

ここに、係数 $\delta = 0.0191$, T : 溶液温度 (°C) である。

3. 実験方法

神奈川県農業技術センター(神奈川県平塚市上吉沢)のガラス室内圃場に T 型熱電対温度計と TDR 土壌水分・電気伝導度計 (CAMPBELL SCIENTIFIC 社製 TDR100) を設置した後、散水チューブ式熱水土壌消毒装置を用いて熱水処理を行った。散水前に散水チューブを含む土壌表面全体をポリエチレンシート (0.05 mm 厚) で覆い、測定終了の9月1日までそのままの状態を維持した。

センサーを設置する前に圃場の土壌をトレンチャーを用いて深さ 1 m まで耕起し、土壌状態を均一化した。また、熱水処理によって土壌が圧密し、センサーの設置位置が沈下するのを防ぐため、熱水処理3日前に 200 L/m² の水を散布した。熱電対は地表面から深さ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 cm に水平に挿入し、30 cm 間隔で地点 1, 2, 3 の3箇所に設置した (Fig. 1)。また、ロッド長 10 cm の3線式 TDR プ

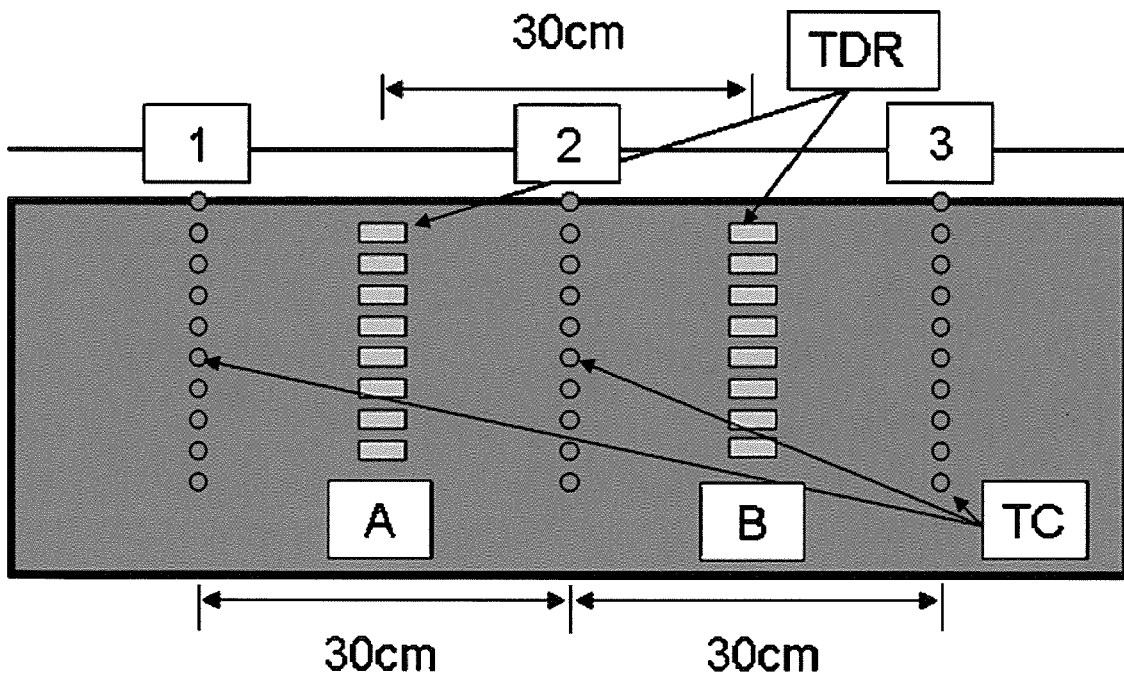


Fig. 1 Sensors installation profile, TDR and TC indicate TDR probes and thermocouples, respectively. Numbers, 1, 2, and 3 indicate the triplicates of thermocouples, and A and B indicate the duplicates of TDR probes.

ローブ（ロッド直径3.2 mm，ロッド間隔 2 cm）は地表面から深さ 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 cm に水平に挿入し，30 cm 間隔で地点 A, B の 2 箇所に設置した（Fig. 1）。2007年 8 月 24 日 10 時 10 分に熱水処理を開始し，13 時 10 分まで，3 時間にわたり連続処理した。散水チューブからの出湯温度は 95°C，処理量は 200 L/m² であった。データロガー（CAMPBELL SCIENTIFIC 社製 CR1000, CR3000）を用い 2007 年 8 月 24 日 10 時から 9 月 1 日 10 時までの 1 週間，各深さの比誘電率（ ϵ_b ），電気伝導度（ EC_b ），土壤温度（ T ）を 1 分ごとに計測した。熱水土壤消毒後には土壤が圧密されたため，熱水処理終了の 1 週間後にセンサーの埋設深さを再測定した。

4. 結果

実験を行った圃場では，熱水処理により土壤が圧密した。このため地表面が全体的に沈下し，センサーを設置した位置が熱水土壤消毒前後で異なった。したがって，以下のセンサーの設置深度は，全てセンサーを回収するときに測定した値で示した。また，土壤温度，体積含水率及び電気伝導度の測定結果は各地点とも類似した傾向を示したため，土壤温度測定結果は地

点 3 の測定結果のみ，また，体積含水率，電気伝導度の測定結果は地点 B の結果のみを示した。また，土壤温度測定結果は深さ 0, 10, 20, 30, 35, 40 及び 50 cm のみを示し，体積含水率，電気伝導度の測定結果は 10, 20, 29 及び 40 cm を示した。

4.1 熱水土壤消毒時における熱移動

測定開始から 12 時間後までの地点 3 における土壤温度を Fig. 2 に示した。地点 3 においては土壤表面（0 cm）に設置した熱電対が，散水チューブの穴に近かったため，その温度が 85°C 近くまで上昇した。熱水処理開始（ $t=10$ ）から 15 分後（ $t=25$ ）に深さ約 5 cm の温度が上昇し始め，180 分後には深さ約 40 cm の温度が上昇した。

地点 3 における測定開始から 1 週間後までの土壤温度の変化を Fig. 3 に示した。作土層である 0~20 cm までは，日較差を反映して 24 時間周期で地温が上下した。また，それより深い部分では地温の下降がゆるやかであった。

一般的に熱水土壤消毒では 55°C が 2 時間以上維持されることで十分な殺菌作用が得られる（國安ら，1991）。地点 3 では 35 cm 付近まではこの条件が満た

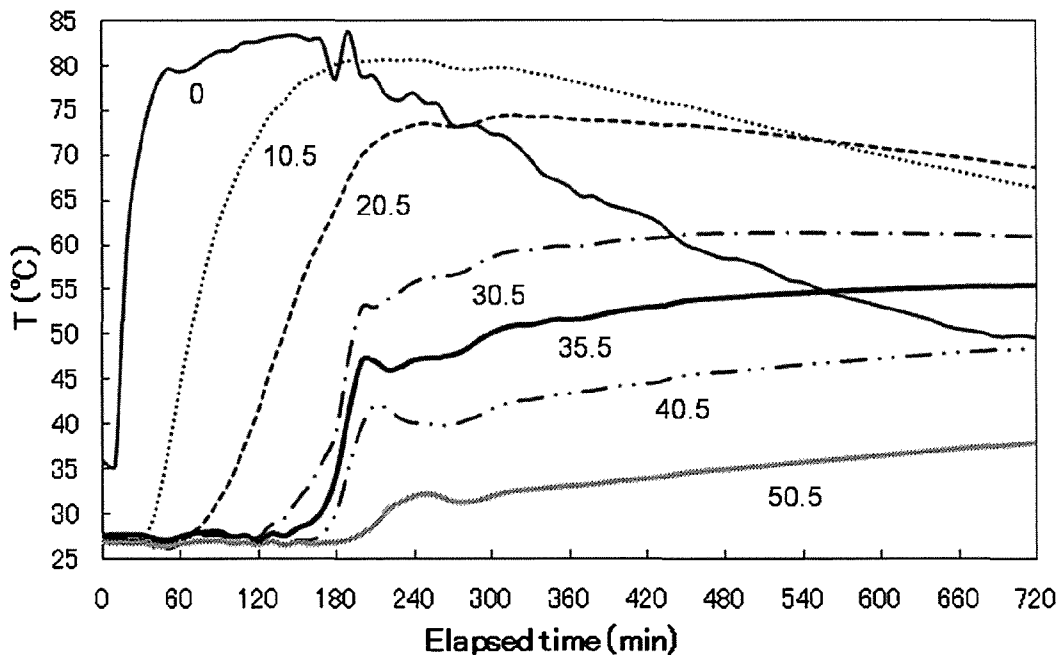


Fig. 2 Temporal changes in soil temperature, T (°C), at various depths during and after hot water application. Hot water was applied between 10 and 190 min. The numbers in the figure indicate depths in cm where thermocouples were installed.

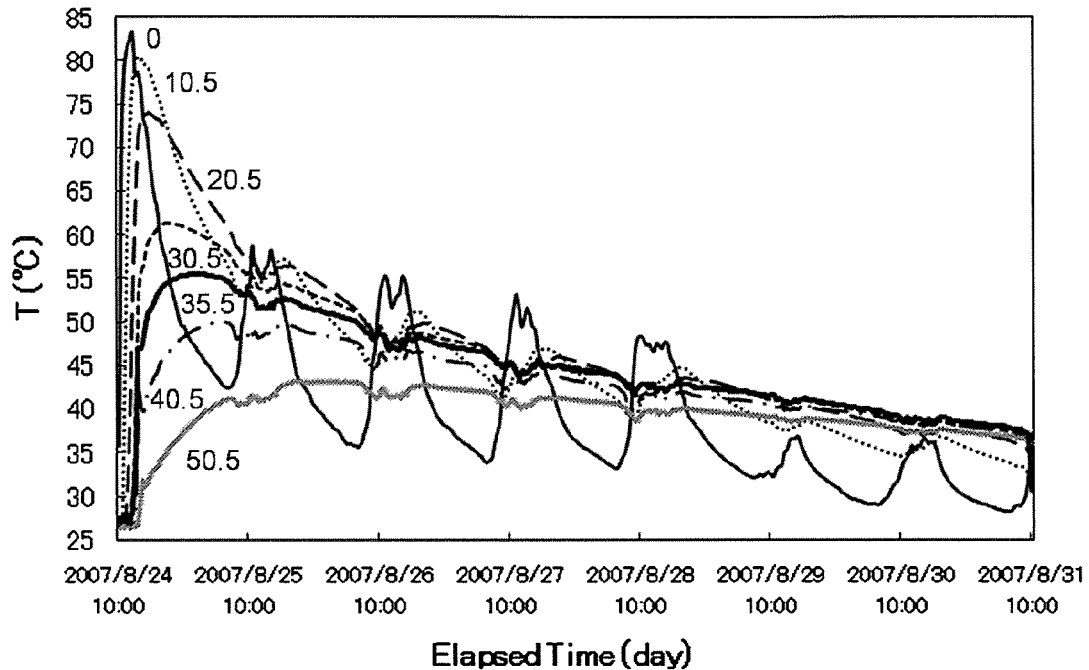


Fig. 3 Temporal changes in temperature, T ($^{\circ}\text{C}$), at several depths during and after hot water application. Hot water was applied between 10 : 10 and 13 : 10 on Aug., 24, 2007. Numbers indicate depths in cm where thermocouples were installed.

されたが、40.5 cm 以深は55 $^{\circ}\text{C}$ に達しなかったため、作土層より深い部分でも十分な土壤消毒効果を得るには、より多くの熱水を処理する必要があると考えられる。

4.2 熱水土壤消毒時における水移動

地点Bにおける測定開始から12時間後までの体積含水率の変化をFig. 4に示した。浅い部分から時間の経過とともに順々に体積含水率が上昇していることがわかる。地点Bでは、体積含水率が熱水処理開始から8分後に、深さ10 cmで上昇し始め、50分後には深さ40 cmでも上昇し始めた。また、熱水処理開始から110分後になると、深さ40 cmでは飽和に達し、以後、熱水処理終了時まで処理された熱水は深さ40 cmよりも浅い部分に貯留していったと推定された。これは熱水処理3日前に散布した水により、深さ40 cmよりも深い層に透水性の低い層が形成され、熱処理量による浸透速度より処理区域外への排出速度の方がより小さくなったためと考えられる。このことは、熱水処理を終了した190分後から、土壤浅部から徐々に熱水が40 cm以深に排水されていくことから確認できる。

4.3 水と溶質の同時移動

深さ10, 20, 30 cmにおける体積含水率と土壤溶液の電気伝導度の変化を比較したグラフをFig. 5に示した。深さ20 cm付近までは、熱水の流入と同時に電気伝導度が低下している。これは土壤溶液中にあった溶質が流入してきた熱水によってより深部に押し流されたためと考えられる。また、深さ20~30 cmでは、電気伝導度がいったん上昇し、その後減少した。これは、土壤浅部で処理した熱水により溶出された溶質が到達したためと考えられ、実際、深さ30 cmでは熱水処理終了時から電気伝導度が上昇している。これは細間隙内の溶液が、熱水散布中は粗間隙を水が流れている間は余り動かず、熱水散布終了後に徐々に移動したためと考えられる。

熱水処理終了後に、徐々に熱水が30 cm以深に排水されていくのにもなって溶質も30 cm以深へと移動したと考えられる。

熱水土壤消毒後に測定したすべての深さにおいて土壤溶液の電気伝導度は熱水土壤消毒前に比べ小さくなった。従って、熱水中に溶解出した表層の溶質が30 cmより深部に運ばれたと考えられる。

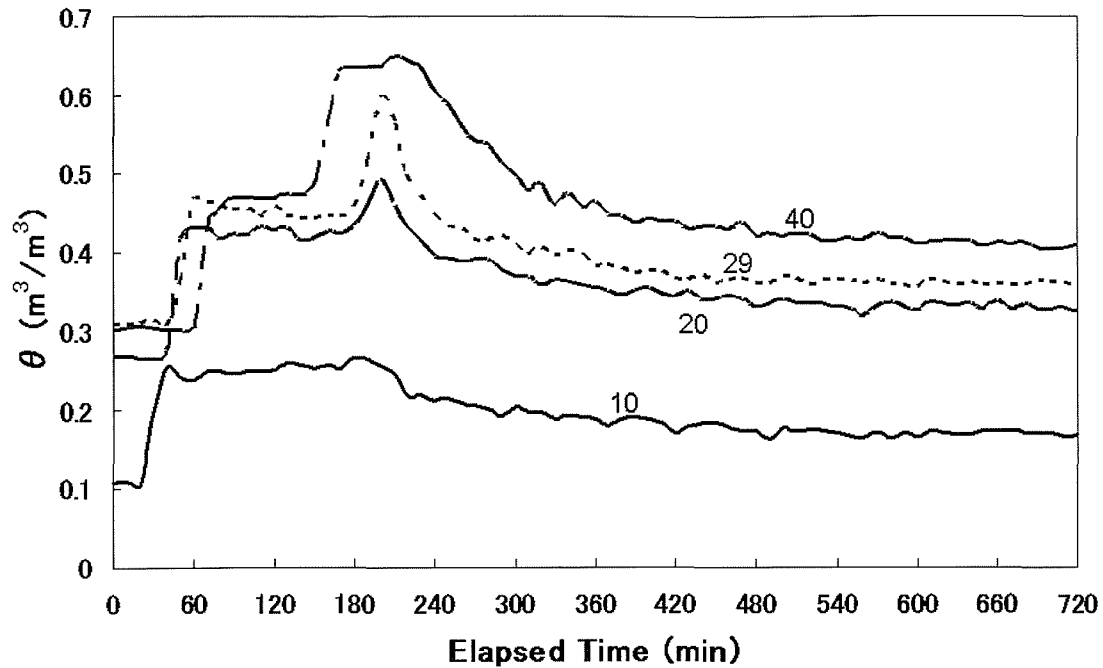


Fig. 4 Temporal changes in volumetric water content, θ (m^3/m^3), at various depths during hot water application. Hot water was applied between 10 and 190 min. Numbers indicate depths in cm where TDR probes were horizontally installed.

4.4 水と熱の同時移動

深さ10, 20, 30 cmにおける体積含水率と温度の変化を比較したグラフをFig. 6に示した。深さ10 cmでは温度・体積含水率の上昇開始時刻がほぼ同じことから、熱は主に水の移動に伴う移流によって運ばれたことがわかる。深さ20, 30 cmでは体積含水率の上昇開始時間よりも温度開始時間のほうが遅かった。このことから、熱水処理開始から約60分後までの熱水は深さ20 cmまでの土壌の温度を上昇させ、熱水処理60分後から約120分後までの熱水は20 cm以深の土壌の温度を上昇させたことが示唆された。

5. ま と め

土壌水分量と有意な関係を持つ土壌の比誘電率と、土壌溶液濃度と有意な関係を持つ土壌の電気伝導度を同時に測定することができるTDR法を用いて熱水処理時における土壌中の体積含水率と電気伝導度を測定した。また、熱電対を用いて土壌温度を測定した。体積含水率と温度測定から、熱水土壌消毒時においては、深さ10 cmでは熱は主に水の移動に伴う移流によって運ばれ、それ以深では熱伝導や水蒸気移動に伴い移動していると推定された。また、電気伝導度の測定

から、熱水処理により土壌中の溶質が著しく洗脱されることがわかった。しかし、本実験では熱水処理後から1週間後までしか測定しておらず、一度洗脱された溶質が分子拡散や土中の水分移動に伴って地表面付近に上昇してくる可能性も考えられた。また、本実験では深さ40 cmまでしか測定しなかったため、どの深さまで洗脱された溶質が到達したのかを知ることができず、熱水処理に伴う土壌溶液の洗脱が地下水面まで到達していたかどうかは解明できなかった。今後は、深度1 m付近までセンサーを挿入し、熱水処理によってどのくらいの深度まで溶質が移動したかを明らかにする必要がある。また、いったん流された溶質が熱水土壌消毒後の水分移動に伴って地表面付近に上昇することも考えられるため、今後は、熱水処理開始から作物の収穫までの長期にわたる溶質動態解析も必要である。本実験では、土壌深度35 cmまでは55°C以上の温度が確保されたため、200 L/m²という熱水処理量はトマトなどの栽培期間が長く、深い根圏を有する作物には適当な処理量であったが、ハウレンソウなどの栽培期間が短く、根圏が浅い作物には過多であったと考えられる。モデル構築のためにはより詳細に熱水土壌消毒時における水分・熱の移動を知る必要があるた

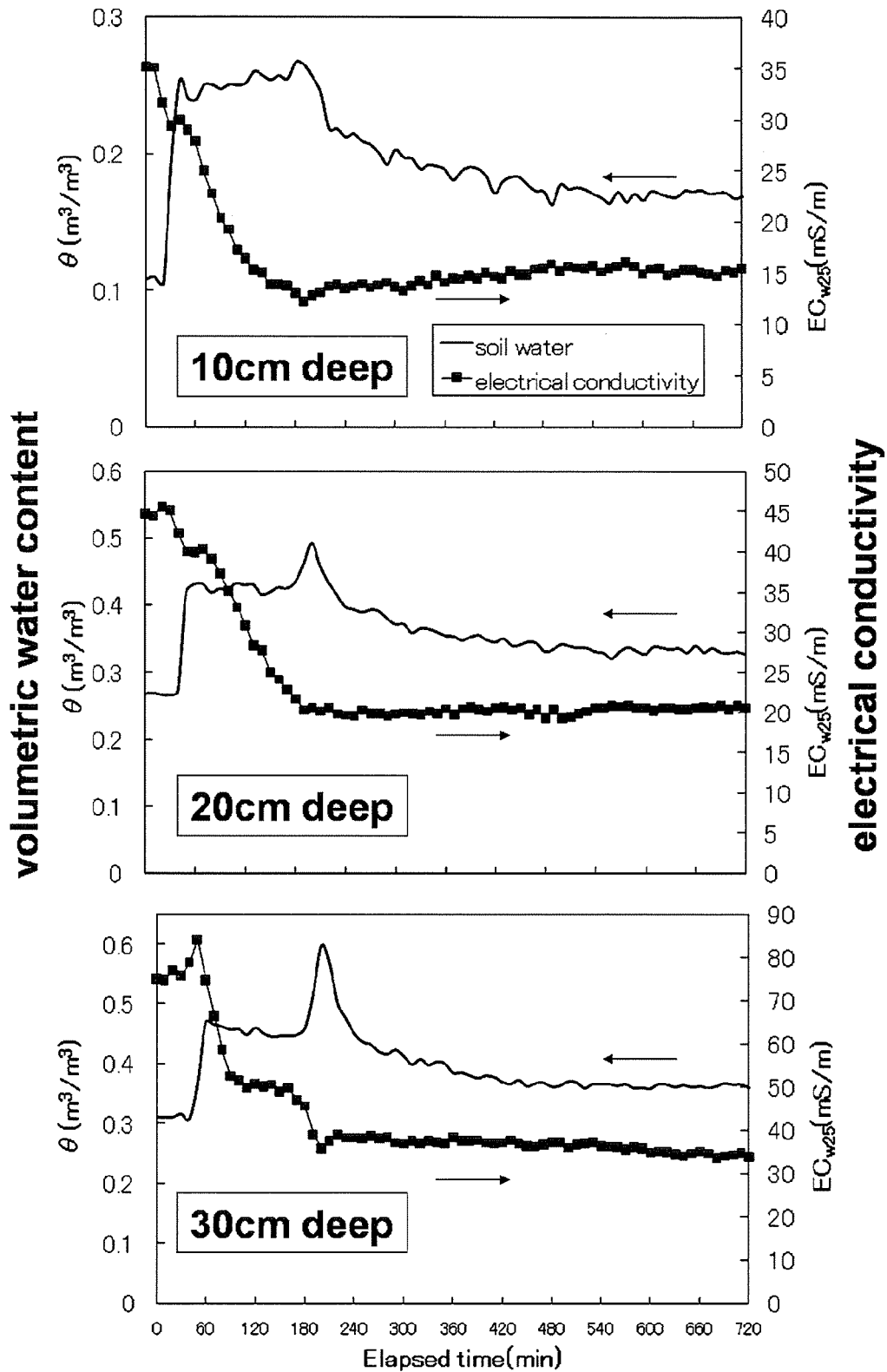


Fig. 5 Comparison between water and electrical conductivity of soil water at 10, 20, and 30 cm deep. Hot water was applied at between 10 and 190 min.

め、室内実験によって熱水土壤消毒を再現し測定する必要がある。

引用文献

1) Dalton F. N., M. T. h. van Genuchten. 1986. The time

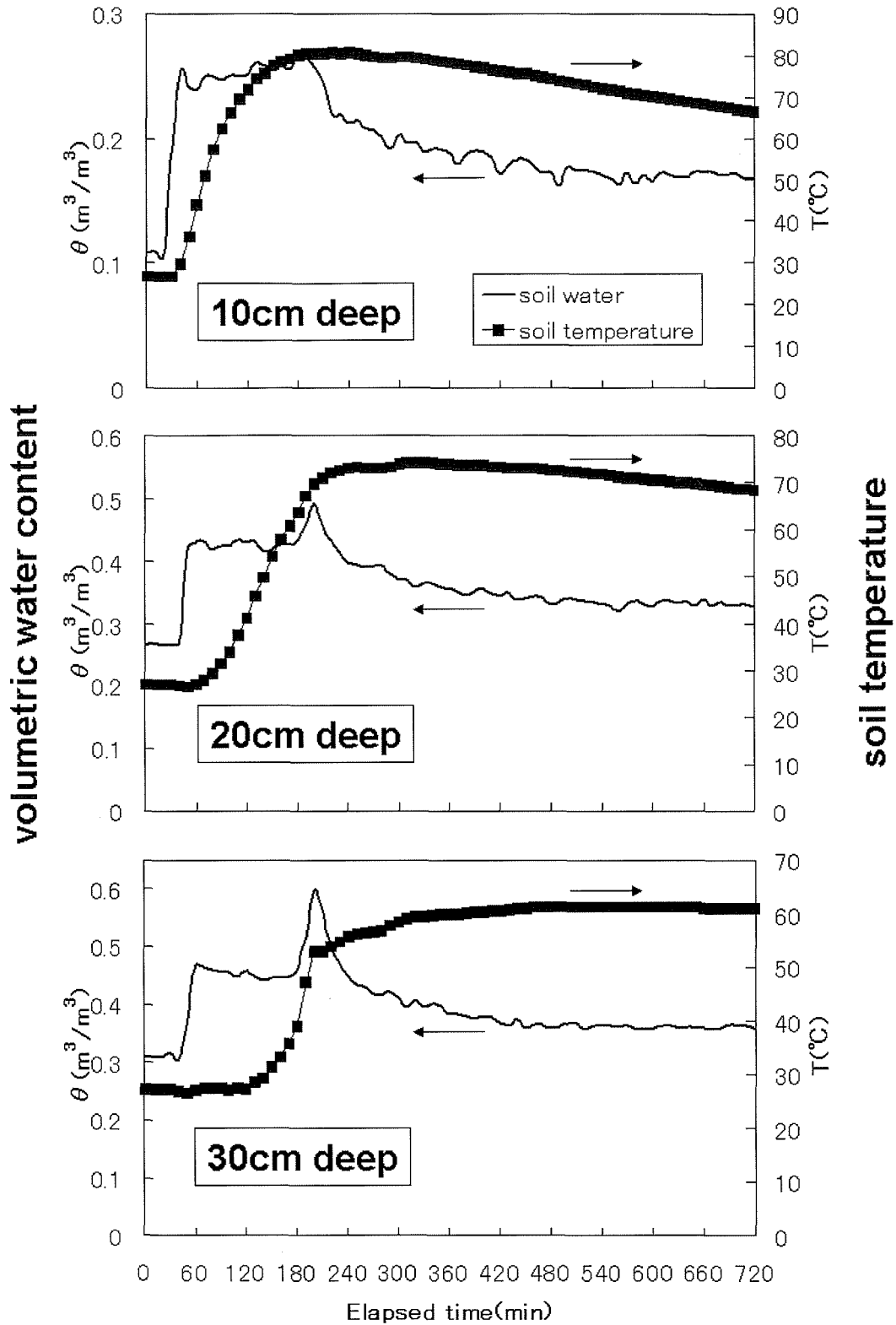


Fig. 6 Comparison between water and heat transfer at 10, 20, and 30 cm deep. Hot water was applied at between 10 and 190 min.

domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity. *Geoderma* 38: 237-250.

2) Heimovaara, T. J. 1992. Time domain reflectometry measurements of water-content and electrical-conductivity of layered soil columns: comment. *Soil Science Society of*

America Journal 56: 1657-1658.

3) Hilhorst, M. A. 2000. A pore water conductivity sensor. *Soil Science Society of America Journal* 64: 1922-1925.

4) 北宜裕. 2006 新段階を迎えた臭化メチル規制とその対策技術 物理的消毒法の効果と普及. *野菜茶業研究集報* 3:

- 7-15.
- 5) 北宜裕, 植草秀敏. 2007 熱水土壤消毒の効果と普及植物防疫 61: 73-78.
 - 6) 國安克人, 竹内昭士郎. 1986 野菜試験場報告. A14: 141-148.
 - 7) 國安克人, 西和文, 百田洋二, 竹下定男. 1991 熱水注入による土壤消毒. 植物防疫 45: 247-251.
 - 8) 西和文, 佐藤文子, 唐澤哲三, 佐藤剛, 福田徳治, 高橋廣治. 1999 農研センター研報. 30: 11-109.
 - 9) 西和文. 2005 野菜茶業研究集報. 2: 9-17.
 - 10) Noborio, K. 2001. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. Computers and Electronics in Agriculture 31: 213-237.
 - 11) 農林水産省生産資材課. 2002 平成12年度農作業事故調査報告書. 農林水産省生産資材 51.
 - 12) 宗和弘. 2003 臭化メチルを巡る最近の情勢. 農耕と園芸 58: 67-70.
 - 13) Topp, G. C., J. L. Davis, and A. P. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil-water content-measurements in coaxial transmission-lines. Water Resources Research 16: 574-582.
 - 14) 植草敏秀, 岡本昌広. 2004. 熱水土壤消毒-臭化メチル代替技術としての期待. 季刊肥料 97: 49-57.
 - 15) Yu, C., A. W. Warrick, M. H. Conklin, M. H. Young, and M. Zreda. 1997. Two- and three-parameter calibrations of time domain reflectometry for soil moisture measurement. Water Resources Research 33: 2417-2421.
 - 16) Weast, R.C., CRC Handbook of Chemistry and Physics, 67th ed., CRC Press, Boca Raton, Fla., 1986