

熱水土壤消毒時におけるサーモグラフィーを用いた 地表面温度分布の評価

落合博之¹・登尾浩助¹・太田和宏²・北浦健生²・北 宜裕²・加藤高寛¹

Evaluating the distribution of soil surface temperature using thermography during soil sterilization with hot water

Hiroyuki OCHIAI¹, Kosuke NOBORIO¹, Kazuhiro OHTA², Takeo KITAURA², Nobuhiro KITA² and Takahiro KATO¹

Abstract: The use of methyl bromide, which had been widely used all over the world, was banned in 2005 in Japan, so that it is very important to develop new techniques for soil sterilization. Using hot water for soil sterilization has become popular in Japan as an alternative for methyl bromide. Many studies have been done on bacterial survival in soil when hot water was applied. Few studies focused on measurement temperature at multiple locations in the field. Even it is necessary to keep soil temperature between the surface and 30 cm deep with 45 °C for 5 h although hydraulic conductivity for hot water varied place to place at a field. Therefore, we investigated temperature distribution before and after using hot water for soil sterilization in a greenhouse by measuring soil surface temperature using thermography. We also focused on effect of water movement by repacked soil at field with hot water application. We found that a temperature measurement was expressed the representative temperature at the field by the sterilization with hot water applied. However, a place, where we dug a hole for putting the sensors, was showed higher temperature than other places because of large amount of hot water application due to higher hydraulic conductivity and to destroyed hard pan layer. Therefore, we have to take care of refilling a hole after putting the sensors. Otherwise, over estimates of temperature occur due to applying large amount of hot water at such a place.

Key Words : hot water sterilization, thermography, temperature, soil surface

1. はじめに

近年、土壤消毒の中心となって使われていた臭化メチルの使用が、日本では 2005 年に、世界的にはモントリオール議定書によって 2010 年に全面禁止された。そのため、臭化メチルによる土壤消毒の代替技術の一つとし

て、1979 年から開発が始まった熱水を用いた土壤消毒方法が、環境にできるだけ負荷を与えない技術として注目されている。この方法は、水のみを用いているので、環境に比較的低負荷な土壤消毒法と考えられる。熱水を土壤に散布し、根群域である地表面から深さ 30 cm 以内の土壤を、45 °C 以上で 5 時間保つことによって線虫やバクテリアを死滅させる(北, 2006)。しかし、歴史が浅く、多方面にわたった研究はされてきていないのが現状である。これまでの研究は、國安・竹内(1986)や西ら(1990)などが行ってきた熱水消毒の有無による病原菌や線虫の数を調べることによる作物の品種に対する熱水土壤消毒効果の評価が主である。環境に低負荷な熱水消毒法であっても使用法を間違えると、臭化メチルを用いた土壤消毒法と同様に、環境に負荷をかける可能性がある(永井ら, 2006)。必要以上の熱水の散布は、使用水量とエネルギー経費が増加するばかりでなく、熱水による溶脱の促進によって必要以上の溶質を土壤から奪い、深層土壤へ移動させるため(落合ら, 2009)、地力の低下や地下水汚染も起こす危険性がある。そのため、最適な熱水の散布量を決定する必要がある。加藤ら(2009)は、PVC パイプに 5 cm 間隔で熱電対を付けることで鉛直に挿入可能な温度センサーを用いて熱水処理時にハウス内土壤の 3 地点で深さごとの温度測定を行って、地表面の温度が 65 °C 以上のとき深さ 30 cm で 45 °C 以上であることを報告した。圃場では多点での測定が困難であることに加えて、場所ごとに透水係数や乾燥密度が大きく異なる可能性があり、このことが土壤の温度上昇に影響を与えると考えられる。その上で、熱水土壤消毒では、圃場内すべての場所で根群域である深さ約 30 cm まで線虫やバクテリアが死滅する温度(45 °C で 5 時間以上)に地温を上昇させる必要がある(北, 2006)。しかし、これまでの研究では、熱水土壤消毒時の土壤温度を多点で測定した例はほとんどない。そこで本研究では、サーモグラフィーを用いて熱水土壤消毒を行ったハウス内の地表面温度分布を評価することで、熱水土壤消毒の効果を評価した。また同時に、94 °C の熱水処理を利用して、土壤断面の温度を比較することで、センサー設置時の土壤の攪乱が土壤水分量や地温に与える影響を評価した。

¹Meiji University, School of Agriculture, 1-1-1 Higashimita, Tama, Kawasaki, Kanagawa 214-8571, Japan. Corresponding author: 落合博之, 明治大学農学部

²Kanagawa Agricultural Technology Center, 1617 Kamiyoshizawa, Hiratsuka, Kanagawa 259-1204, Japan.

2010 年 9 月 3 日受稿 2011 年 4 月 19 日受理
土壤の物理性 118 号, 13-17 (2011)

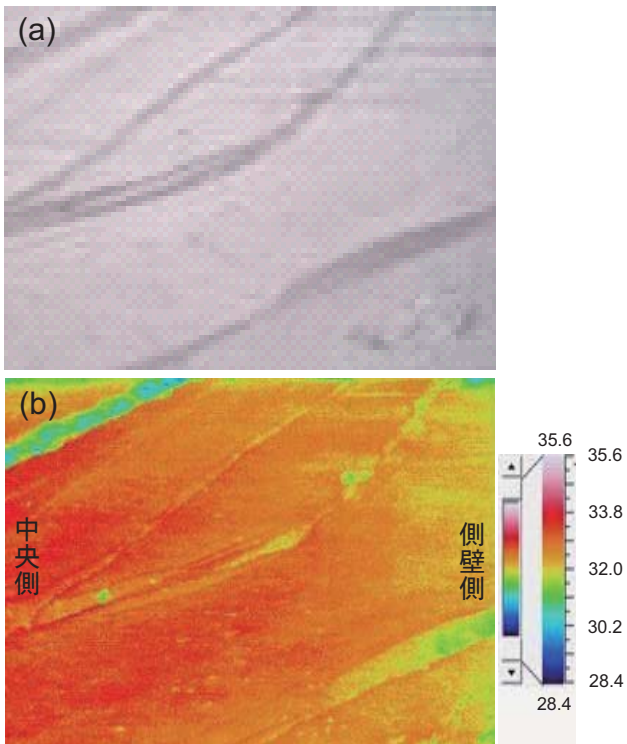


Photo. 1 熱水散布前の地表面（ビニール被覆無し）(a), 熱水散布前の地表面温度（ビニール被覆無し）(b).
Picture of soil surface before applying hot water (without cover) (a), Thermographic image of soil surface before applying hot water (without cover) (b).

2. 実験方法

実験は、神奈川県平塚市の神奈川県農業技術センターのガラスハウス内（幅 9.0 m, 長さ 30 m）土壌で行った。熱水散布には、神奈川県農業試験センターが中心となって開発した牽引方式を用いた。牽引方式では、ウインチを用いて散水用鉄パイプを一定速度で引っ張ることで、土壌表面に熱水を定量散水した。本実験では熱水の温度を 94°C に、散水パイプの移動速度を 2.5 m h^{-1} 、散水量を 4000 L h^{-1} (204 L h^{-1} で 3 時間、散水強度 68 mm h^{-1} に相当) となるように設定した。熱水散布時と散布後は、地表面からの熱損失を低減するために地表面を耐熱性の高いビニールシートで覆った。ビニールシートは地表面と接触していることからビニールシート表面の温度変化が地表面の温度変化を反映していると思われ、熱水散布前と熱水散布終了直後にサーモグラフィー (TVS-500EX, NEC) で地表面の温度分布を測定した。サーモグラフィーの精度は 100°C 以下で $\pm 2^{\circ}\text{C}$ である。また、同時に土壌水分量と温度の測定を経時的に行うため、温室の入り口から 10 m, 側壁から 4 m の地点に TDR センサーを深さ 100 cm まで 20 cm 毎に埋設し、それぞれの TDR プロブの横に熱電対を埋設した。

3. 結果と考察

3.1 圃場全体における熱水処理による地表面温度分布の評価

Photo. 1 に熱水散布前に撮影した通常写真 (a) とサーモグラフィーによる温度分布 (b) を示した。ハウス内の地表面温度は $31.0 \sim 34.0^{\circ}\text{C}$ であった。地表面の温度分布は、ハウスの側壁付近 (Photo. 1 (b) 右側) に比べてハウス中央 (Photo. 1 (b) 左側) の温度が約 1°C ほど高かった。これは、測定精度を考慮すると熱水土壌消毒前のガラスハウス内の土壌表面温度は、ほぼ一様であると言える。

Photo. 2 に熱水散布直後の通常写真 (a) とサーモグラフィーで測定したビニールシート表面温度分布 (b) を表した。熱水散布中のため、地表面にビニールシートを被せた。そのため、実際はビニールシートの温度を測定した。Photo. 2 (b) 右上に高温の部分を確認されたが、これは終了直後に撮影したため、熱水の一部が土壌中に浸透しないで地表面に残っている部分として目視で確認できた。また、熱水が地表面に残っていない場所のビニールシート表面温度がハウス内全域で $68.0 \sim 73.0^{\circ}\text{C}$ で 5°C の範囲内であることがわかった。西 (2001) は黒ボク土で、北・植草 (1999)、加藤ら (2009) は関東ロームで、地表面温度が、 65°C 以上に達していると、深さ 30 cm までの土壌では 45°C 以上で 5 時間以上保たれたことを報告している。従って、本研究の結果から、けん引方式による熱水散布はハウス内すべての場所で一様に消毒効果があると考えられる。

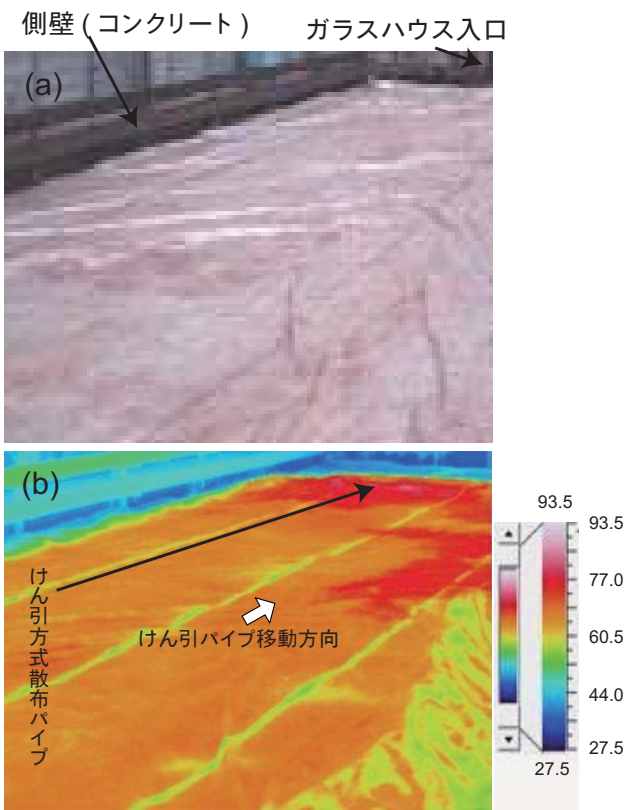


Photo. 2 熱水散布直後のビニールシート表面（ビニール被覆越し）(a), 熱水散布直後のビニールシート表面温度（ビニール被覆越し）(b).
Picture of soil surface after applying hot water (with cover) (a), Thermographic image of soil surface after applying hot water (with cover) (b).

3.2 熱水処理による地表面温度分布の経時変化

Photo. 3 に熱水散布 1 日後のセンサー埋設場所の通常写真 (a) とサーモグラフィーで測定したビニールシート表面温度分布 (b) を表した。Photo. 3 (b) の左側にピンク色の部分 (黒枠内) があり、他の部分に比べ 3 ~ 7°C 高いことがわかった。ここは、土壤水分センサー等を埋設するために掘った穴を埋め戻した部分である。熱水散布の影響によりセンサーが水没してしまい測定不可能となったことから、センサー埋設の土壌かく乱の影響を調査するため、熱水散布 9 日後に再びセンサー埋設部分に穴を掘り、土壤断面の温度分布を測定した (Photo. 4 (a, b))。Photo. 4 (b) は、地表面から深さ 70 cm までの土壤断面の温度である。中心より左側がセンサー埋設時に穴を掘り埋め戻した部分で右側が何もなかった部分である。地表面から深さ 40 cm まではほぼ等しい温度分布を示した。このことから、熱水土壤消毒時に約 3 ~ 7°C の温度差が起きたとしても、9 日後の作土層の地温はほぼ均一と考えてよいことがわかった。一方、深さ 40 cm 以深では右側に比べて左側での温度が平均で約 3°C 高いことがわかった。土壤水分センサー等を埋設するために掘った穴を埋め戻した部分で乾燥密度と透水係数が他の部分と異なったため、透水係数が高くなり、深層土壤へ熱水が選択的に浸透したことにより、熱水散布 9 日後でも埋め戻した場所で土壤温度が高かったと考えられる。さらに、熱水土壤消毒前に行った耕起の深さで深までセンサー埋設のために穴を掘ったことによって、耕盤層上部で水平方向の水移動も起こり、より多くの熱水の浸透が起きた影響と考えられる。地表面からの選択流に対しては、センサー埋設の際に穴を掘って埋め戻した部分の土壤沈下が熱水散布後に目視で確認できたことから、この部分に選択的に熱水が浸透した可能性が大きいと考えられる。このことから、埋め戻しを正確に行わない場合、土壤水分量や地温に影響する可能性があると考えられる。

センサー埋設部分を再び掘り起こす前にビニールシート表面温度を調べた。Photo. 5 に熱水散布 9 日後のセンサー埋設場所の通常写真 (a) とサーモグラフィーで測定したビニールシート表面温度分布 (b) を表した。センサー埋設のため穴を掘った埋め戻し部分の温度の上昇はほとんどなくなり、熱水散布翌日に比べ、埋め戻した場所と通常でビニールシート表面温度の差は、ほとんどなかった。これは、熱移動が頻繁に起こる地表面付近では 9 日間の間に熱拡散によって温度が平衡になったと考えられる。また、ビニールシート表面と地表面の温度差を検証するため、ビニールシートを剥がし、センサー埋設部分の地表面温度を測定した (Photo. 6 (a, b))。Photo. 5 (b) と Photo. 6 (b) の比較からビニールシート越しとビニールシート無しでの温度差は、2 ~ 3°C あるが、温度分布はほぼ等しくなることから、ビニールシート表面の温度分布が地表面の温度分布を反映していることとみなせることがわかった。センサー埋設部分による温度

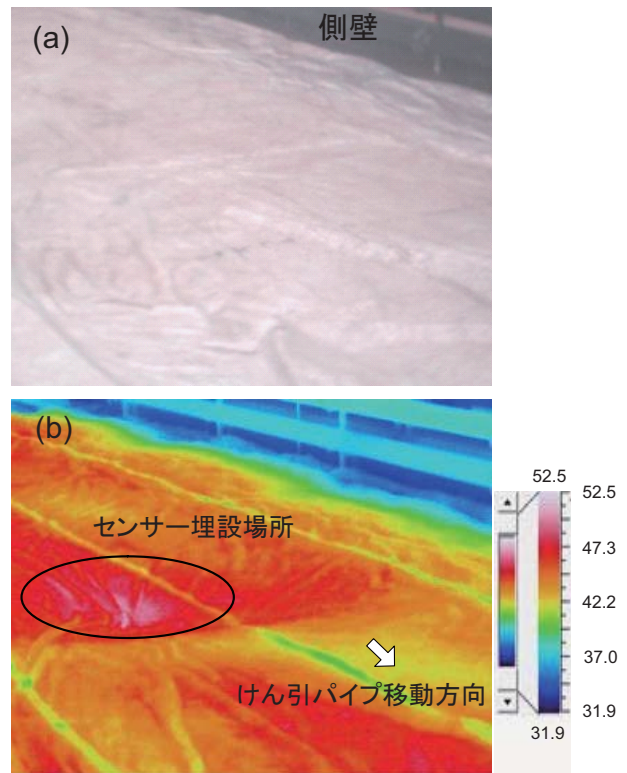


Photo. 3 熱水散布 1 日後のビニールシート表面 (ビニール被覆越し) (a)、熱水散布 1 日後のビニールシート表面温度 (ビニール被覆越し) (b)。

Picture of soil surface in one day after applying hot water (with cover) (a), Thermographic image of soil surface in one day after applying hot water (with cover) (b).

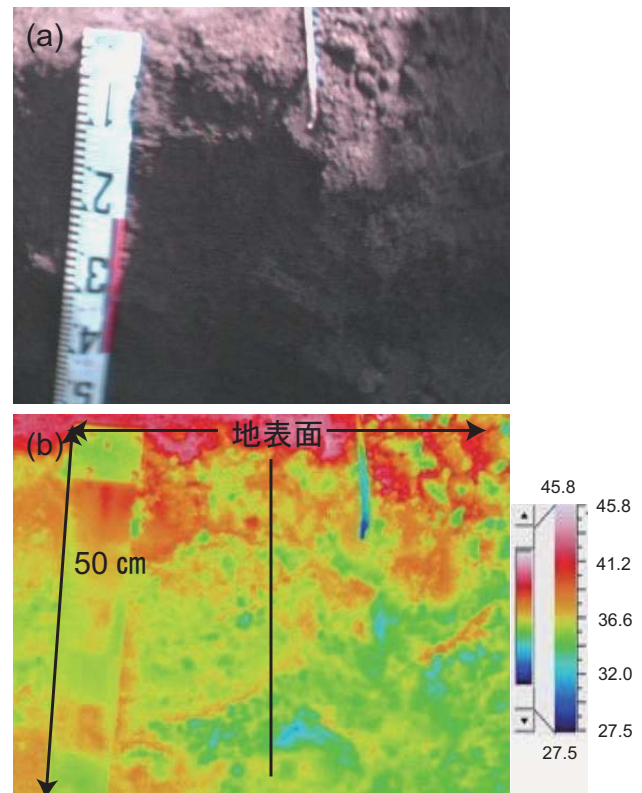


Photo. 4 熱水散布 9 日後の土壤断面 (ビニール被覆無し) (a)、熱水散布 9 日後の土壤断面温度 (ビニール被覆無し) (b)。

Picture of soil section in nine days after applying hot water (without cover) (a), Thermographic image of soil section in nine days after applying hot water (without cover) (b).

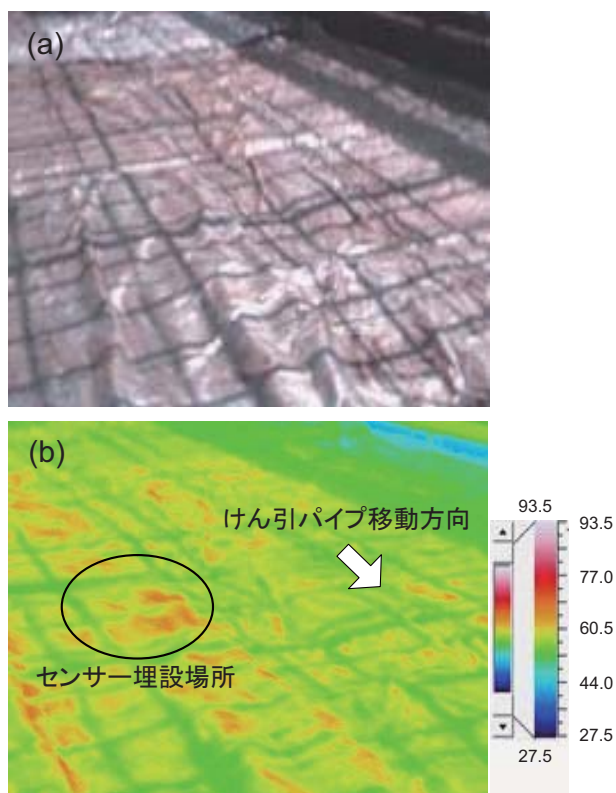


Photo. 5 熱水散布 9 日後のビニールシート表面（ビニール被覆越し）(a), 熱水散布 9 日後のビニールシート表面温度（ビニール被覆越し）(b).

Picture of soil surface in nine days after applying hot water (with cover) (a), Thermographic image of soil surface in nine days after applying hot water (with cover) (b).

差よりも日向と日陰の温度差のほうが明らかに大きかった。このことから熱水散布 9 日後には地表面温度は、どの部分でもほぼ均等になることがわかり、熱拡散によってハウス内の地表面温度はほぼ等しくなることがわかった。熱水散布から 9 日後でのビニールシート表面温度と地表面温度の比較だったため、地表面の乾燥が進んだことが考えられる。それを考慮すると、熱水散布直後や熱水散布 1 日後は、地表面とビニールシートが密着しており温度差はほとんどなかったと考えられる。

4. まとめ

サーモグラフィーを用いた地表面温度解析の結果、熱水土壤消毒後における地表面での空間的な温度分布はほとんど一様であることがわかった。このことから、熱水土壤消毒による土壤温度は、ハウス内全体で線虫や細菌を死滅させる条件に十分に達していると考えられた。しかし、センサーを埋設するために掘った穴を埋め戻した場所では、熱水散布 1 日後に地表面温度が 3~7 °C、他の部分に比べて高くなった。これは、透水係数が他の部分より大きいことによって起こる選択流により、他の部分より深い部分まで高温の水が浸透したことが原因であると考えられた。また、熱水散布 9 日後は、地表面の温度分布は、日照の影響や熱拡散の影響により、すべての場所でほぼ等しくなるのに対して、深層土壤では、

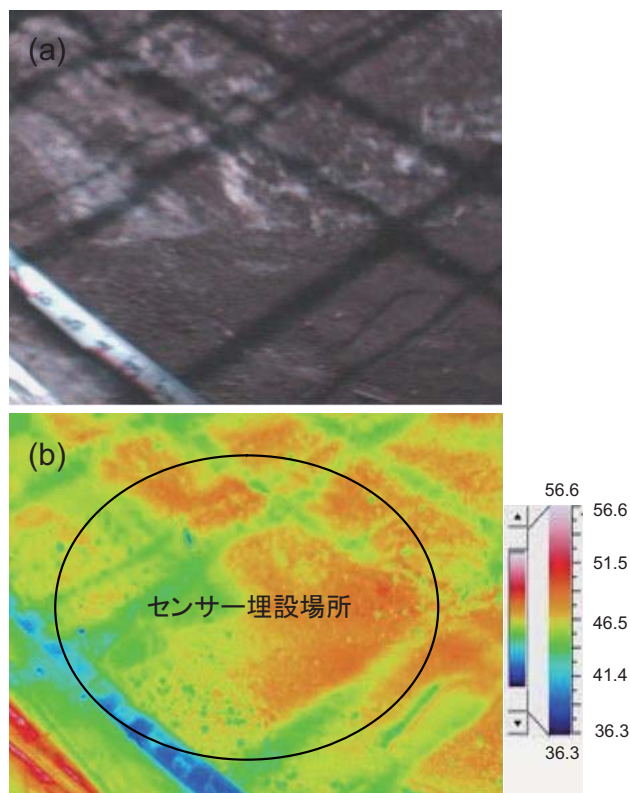


Photo. 6 熱水散布 9 日後の地表面（ビニール被覆無し）(a), 熱水散布 9 日後の地表面温度（ビニール被覆無し）(b).

Picture of soil surface in nine days after applying hot water (without cover) (a), Thermographic image of soil surface in nine days after applying hot water (without cover) (b).

選択流によって起こった温度上昇の影響が残っていることがわかった。このことから、センサー埋設後の埋め戻しを適切におこなうことの重要性を、温度変化を指標にして評価することができたと考えられる。

本研究は、関東ロームのみでの成果であることから、他の土壤においてもサーモグラフィーを用いて熱水散布後に地表面温度のばらつきがないかを調べる必要があり、同時に埋め戻しによる土壤中の温度分布にどのような影響があるかを調べる必要があると考えられる。さらに、今回はセンサーの水没により土壤水分量と地温の経時測定がうまくいかなかったが、今後は、温度・水分センサーによる地温と土壤水分の鉛直プロファイルと熱画像を併用することで、より詳細な検討が可能であると考えられる。

引用文献

- 加藤高寛・登尾浩助・北 宣裕 (2009) : 熱水土壤消毒時における熱・水・溶質移動の測定. 明治大学農学部研究報告, 58: 75-84.
- 北 宣裕 (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.
- 北 宣裕・植草秀敏 (1999) : 熱湯散布による土壤消毒. 農業と園芸, 54: 105-109.

- 國安克人・竹内昭士郎 (1986) : 熱水注入による土壤消毒のトマト萎ちょう病に対する防除効果. 野菜試報, A14: 141-148.
- 永井耕介・牧浩之・小河 甲・竹川昌宏 (2006) : 熱水消毒における熱水の温度と量が土壤の化学性に及ぼす影響. 近畿中国四国農研, 8: 12-15.
- 西 和文・國安克人・高橋廣治 (1990) : 熱水土壤消毒によるダイズ黒根腐病の防除. 菌草研究所研報, 28: 293-305.
- 西 和文 (2001) : 熱水を利用した最新の土壤消毒法. 農業および園芸, 76: 485-489.
- 落合博之・登尾浩助・北 宜裕・加藤高寛 (2009) : 熱水土壤消毒時及びその後の土壤中における溶質動態. 土壤の物理性, 112: 9-12.

要 旨

土壤への熱水の浸透が均一でない圃場における研究では、温度分布の状況把握が行われていない。本研究ではサーモグラフィーを用いて熱水土壤消毒後のハウス内での熱水散布時における地表面温度分布について調べた。同時にセンサー埋設での埋め戻しによる土壤状態の変化によって起こる土壤中の水分移動の影響を温度変化を指標として評価した。熱水散布後、ハウス内全域で地表面温度分布がほぼ同様であることがわかり、これまで行ってきた1点での温度測定がハウス内全体の代表値となりうることがわかった。また、センサー埋設のために掘った穴の埋め戻し部表面では、熱水の浸透の影響と耕盤層破壊の影響で他の場所より温度が高くなった。このことより、埋め戻し部から選択的に熱水が浸透して深層土壤で不均一になることがわかり、不適切な埋め戻しが土壤水分量や地温の測定値に大きく影響する可能性があることがわかった。

キーワード：熱水消毒，サーモグラフィー，温度，地表面