

# 熱水土壤消毒時及びその後の土壤中における溶質動態

落合博之<sup>1</sup>・登尾浩助<sup>1</sup>・北 宜裕<sup>2</sup>・加藤高寛<sup>1</sup>

Solutes dynamics in soil during and after sterilization using hot water

Hiroyuki OCHIAI<sup>1</sup>, Kosuke NOBORIO<sup>1</sup>, Nobuhiro KITA<sup>2</sup> and Takahiro KATO<sup>1</sup>

**Abstract:** It is very important to develop new techniques for soil sterilization because the use of methyl bromide, which had been widely used all over the world, was banned in 2005 in Japan. Using hot water for soil sterilization has become popular in Japan as an alternative for methyl bromide. However, because using hot water is relatively new, few studies have been conducted. In this study, we investigated solute dynamics by measuring temporal changes in the concentration of chloride, nitrate, nitrite, and ammonium ions in soil. Hot water with the temperature of 90 °C was applied to the soil surface at the rate of 204 L m<sup>-2</sup> during the experiment. Soil samples were manually collected for analyzing solute concentration in triplicates between the soil surface and 40 cm deep with a 5 cm interval just before starting, 9 days after, and 3 months after the hot-water application. As the result of the experiment, leaching with high temperature was found to be more hastened than that with normal temperature. We found that solute concentrations increased between 30 cm and 40 cm deep by solute diffusion from a deeper portion in 3 months after the hot-water application. On the other hand, applying hot water suppressed the form change at first because nitrifying bacteria was killed by the hot water in soil. However, ammonium nitrate decreased with time in deep layers by nitrifying bacteria restored from a deeper layer.

**Key Words :** leaching, hot water sterilization, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen

## 1. はじめに

オゾン層を破壊する恐れがあることから、我が国では土壤消毒の中心であった臭化メチルの使用が 2005 年に全面禁止された。それにより熱水を使った土壤消毒法が環境への負荷を軽減できる土壤消毒法として脚光を浴び始めた。この熱水消毒法は、70 °C から 95 °C の熱水を土壤に投入することによって細菌や線虫を死滅させる消毒法である。さらに熱水消毒には、殺菌や殺虫作用以外にも施肥によって過剰に蓄積された肥料分の溶脱を促進する作用があると報告されている(北, 2006)。ところ

が、熱水土壤消毒法は、國安・竹内によって 1985 年に農作物生産圃場で初めて実用化された消毒法のため研究例が少なく、とりわけ肥料成分の生化学的反応と物質移動に関しては、ほとんど研究事例がない。温室などの施設土壤では、施肥によって土壤中に大量の肥料成分が蓄積している場合が多い。このような土壤で熱水消毒法を行うと、土壤内の硝酸態窒素や塩素の溶脱を促して地下水汚染を引き起こす恐れがある。

土壤中の溶質移動に関するこれまでの研究では、佐久間ら(1975, 1979)による常温の水を用いた塩化物イオンと硝酸態窒素の溶質移動に関する室内実験がある。また、圃場においては、Bauder and Schneider(1979)が、塩化物イオンと硝酸態窒素の溶質移動について述べている。

特に硝酸態窒素やアンモニウム態窒素は、地下水汚染や温室効果ガスの発生といった環境への影響があるため広く研究されている。例えば、Misra et al.(1974)は、カラム実験による常温水の浸透に伴う硝酸態窒素とアンモニウム態窒素の溶質移動を調べた。また、小川ら(2000)は、畑地土壤を使ったカラム実験で、常温水の浸透に伴う硝酸態窒素と塩化物イオンの土壤中での溶質移動を調べた。落合・登尾(2003)は、糞尿灌漑を行っている圃場において降雨による水分浸透に伴う硝酸態窒素の地下浸透を研究し、降雨による突発的な水移動が溶質移動を引き起こすことを報告した。温室内における土壤中の硝酸態窒素の動態に関して、永井ら(1968)は、鉍質火山灰土と黒ボク土でのアンモニウム態窒素の揮散と硝化作用による土壤中の硝酸態窒素の関係を示した。大村・坂本(2000)は、暗渠排水中の硝酸態窒素の流出量を測ることによって、浸透に伴う硝酸態窒素の溶脱量の実態を示した。このように多くの土壤中の溶質移動に関する研究が行われてきたが、常温水を用いた研究が主で、熱水による溶質の溶脱に関する研究はあまり行われていない。溶質の水への溶解度は温度に依存するので(飯泉, 1975)、95 °C の熱水を土壤に散水する熱水消毒では、KNO<sub>3</sub> や KCl のような吸熱反応を示す溶質は、溶解度が增大して常温水より多量の溶脱が起こると考えられる。熱水を投入した際の溶質の溶脱に関するこれまでの研究は、永井ら(2006)によるポット実験のみである。

本報では、施設内で熱水消毒を実施した際の溶質の動態と肥料成分の生化学的反応について報告する。

<sup>1</sup>Meiji 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

<sup>2</sup>Kanagawa Agricultural Technology Center, 1617 Kamiyosizawa, Hiratsuka, Kanagawa 259-1204, Japan  
2008 年 10 月 27 日受稿 2009 年 3 月 24 日受理  
土壤の物理性 112 号, 9-12 (2009)

## 2. 実験材料と実験方法

実験は神奈川県農業技術センター内のガラス温室で行った。50 m × 25 m の温室に、11 m × 4 m の試験区を設定した。試験区内の土壌は実験前に深さ 50 cm まで耕起して土壌の理化学性を均一にし、土壌中の溶質濃度をできるだけ一様となるようにした。最大測定深度の深さ 50 cm までは関東ロームの単一層である。試験区の地表面に耐熱性散水チューブ 13 本を 30 cm 間隔で平行に設置した。耕起直後の土壌に熱水が浸透すると、土壌が圧密され、乾燥密度が変化する。この圧密を防ぐ目的で、熱水の散水 7 日前に常温の水を散水チューブから 204 L m<sup>-2</sup> 散水した。2007 年 8 月 24 日に、重油ボイラーで加熱した熱水を給水ポンプを用いて 3,000 L h<sup>-1</sup> で送水し、散水チューブから地表面に一様に散水した。散水量は 204 L m<sup>-2</sup> で、3 時間かけて地表流出しないように散水した（散水強度 68 mm h<sup>-1</sup> に相当）。なお、一般的な熱水の散水量は 200 ~ 300 L m<sup>-2</sup> である（北, 2006）。熱水散水直前に、散水チューブの上から試験区全体を耐熱性ビニールシートで覆い、熱水を試験区に散水した。熱水消毒後は散水チューブだけ取り除き、地表面を耐熱性ビニールシートで 3 ヶ月間覆うことにより地表面からの水分蒸発を抑えた。

100 cm<sup>3</sup> 定容積サンプラーを用いて試験区内の 3 地点で地表面から深さ 40 cm まで 5 cm 間隔で 8 深度、計 24 点で土壌試料を採取した。土壌採取は熱水の散水 3 時間前、熱水の散水 9 日後、熱水の散水 3 ヶ月後の計 3 回行った。採取した土壌試料は、遠心機（コクサン社製 H140 pF）を用いて（9600 min<sup>-1</sup>, 1 時間）土壌溶液を抽出した。抽出した土壌溶液のイオン濃度を、イオン分析計（TOA-DKK 社製 IA-300）で測定した。

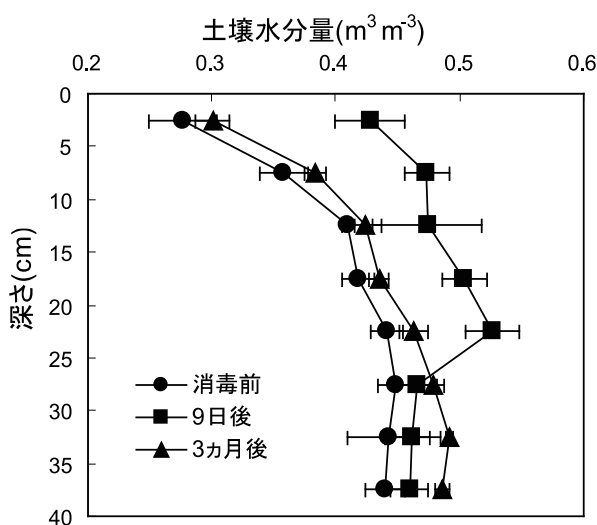


Fig. 1 熱水投入前後における深さごとの土壌水分量（エラーバーは  $\pm 1$  標準偏差を表す）。  
Water contents in each depth by before and after hot water sterilization. (Bars indicate  $\pm$  one S.D.)

## 3. 結果と考察

### 3.1 土壌溶質の溶脱

熱水の散水 3 時間前の深さ 40 cm までの耕耘土層は、乾燥密度 ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) が 0.614 ~ 0.713 の範囲で平均 0.668, 標準偏差 0.037 とほぼ均質であった。それぞれの測定時における深さごとの土壌水分量を Fig. 1 に示した。熱水の散水 9 日後は、地表面を覆った耐熱性ビニールシートが水の蒸発を防いだので、上向きの水分フラックスが抑制されて地表面から深さ 40 cm までほぼ一定の土壌水分量となった。熱水の散水から 3 ヶ月が経つと熱水消毒前とほぼ同じような土壌水分分布になった。このことは、耐熱性ビニールシートの影響で上向きの水分移動はかなり抑えられたが、水の移動は側面方向へ少なからずあったためと考えられた。

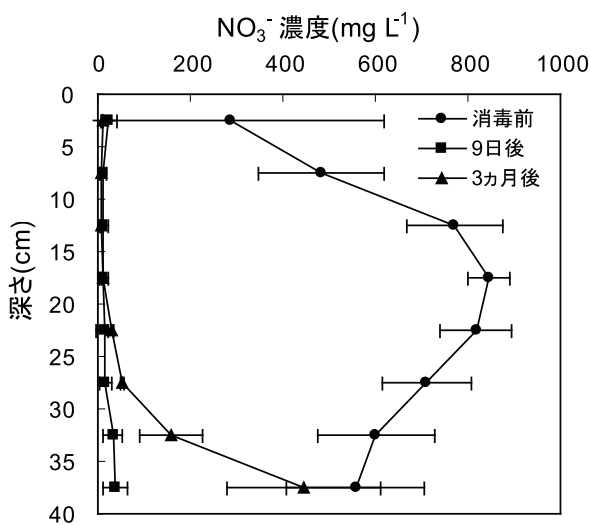


Fig. 2(a) 熱水消毒に伴った深さごとの  $\text{NO}_3^-$  濃度（エラーバーは  $\pm 1$  標準偏差を表す）。  
 $\text{NO}_3^-$  concentration in each depth with the hot water sterilization. (Bars indicate  $\pm$  one S.D.)

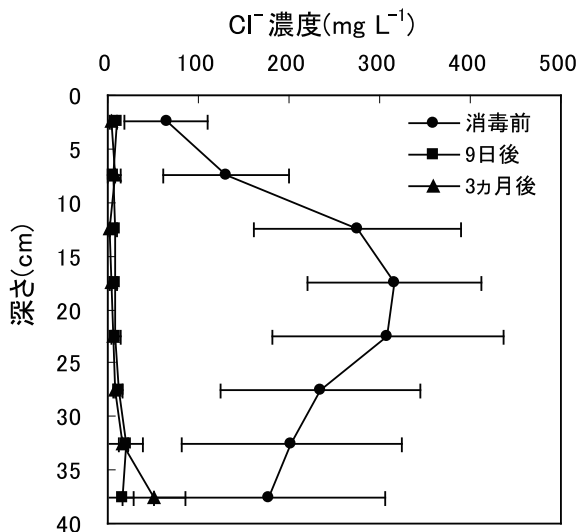


Fig. 2(b) 熱水消毒に伴った深さごとの  $\text{Cl}^-$  濃度（エラーバーは  $\pm 1$  標準偏差を表す）。  
 $\text{Cl}^-$  concentration in each depth with the hot water sterilization. (Bars indicate  $\pm$  one S.D.)

熱水の散水前にイオン濃度の高かった硝酸イオン ( $\text{NO}_3^-$ ) 濃度と塩化物イオン ( $\text{Cl}^-$ ) 濃度の分布を、それぞれ Fig. 2 (a), (b) に示した。熱水の散水前、熱水の散水 9 日後、熱水の散水 3 ヶ月後と全測定時期において、両イオン濃度は、ほぼ同じように変化した。

両イオン濃度は、共に熱水の消毒前では地表面から 12.5 cm までは、深くなるほど上昇し、12.5 cm から 22.5 cm まではほぼ一定となり、22.5 cm 以深では深くなるほど減少した。土壌を耕起したことにより、熱水の散水前のイオン濃度が深さ 50 cm までほぼ一定であったと仮定すると、熱水消毒の 1 週間前に常温水を散水したことにより、溶質移動が起き、地表面から深さ 12.5 cm までは両イオン濃度が低くなり、そして、深さ 12.5 cm から 22.5 cm には上層から移動してきた溶質が蓄積したと考えられた。

熱水消毒 9 日後には、熱水の散水前に多量に存在した溶質が、40 cm までのすべての深さにおいて劇的に減少した。熱水消毒により、永井ら (2006) がポット実験における極めて大きい溶質の溶脱や北 (2006) と同様に圃場における溶質の溶脱促進が確認された。

熱水消毒 3 ヶ月後では深さ 32.5 cm と 37.5 cm でイオン濃度が上昇し、さらに 37.5 cm のイオン濃度が 32.5 cm より高くなった。地表面を耐熱性ビニールシートで覆っていることから、熱水散水 9 日後の土壌水分量は高い状態で保たれていることから、上向きの水分フラックスは小さいながらもかなりゆっくりとした水移動があるものと推察できる。それに伴って深さ 40 cm 以深の土層に移動した溶質が上昇したものと考えられた。

### 3.2 土壌溶質の生化学的反応

熱水消毒前に濃度の低かった亜硝酸イオン ( $\text{NO}_2^-$ ) 濃度とアンモニウムイオン ( $\text{NH}_4^+$ ) 濃度の分布を、それぞれ Fig. 3 (a), (b) に示した。両イオン共に、熱水による溶脱は少なかった。 $\text{NO}_2^-$  濃度は、3 ヶ月後に 37.5 cm 深さで上がった。一方、 $\text{NH}_4^+$  濃度は、地表面から 7.5 cm までの深さでは、熱水の散水 9 日と熱水の散水 3 ヶ月を比較すると約  $0.25 \text{ mg L}^{-1}$  上昇した。これは、耐熱性ビニールシート内部の結露によるアンモニア補足が原因だと考えられる。西 (2004) と北 (2006) は、熱水消毒によって地表面から 10 cm 付近までのほとんどの菌類が死滅すると報告している。加えて、森国ら (1999) の行った表層土壌を使った培養実験では、熱水消毒した直後の土壌における硝化活性が顕著に低下した。このことから地表面付近では硝化がほとんど起きなかったと考えられる。そのため 7.5 cm 深さまでの  $\text{NH}_4^+$  濃度はほとんど変化しなかったと考えられる。一方 12.5 cm 以深では、9 日後に存在していた  $\text{NH}_4^+$  が 3 ヶ月後にほとんど存在しなくなった。さらに深層部からの硝酸化成菌の復活で 3 ヶ月後には硝化作用が深さ 10 cm 以深で起き、 $\text{NH}_4^+$  が検出限界以下に減少したと考えられる。

## 4. まとめ

温室における熱水消毒では、熱水の散水による溶質の

溶脱が認められた。特に、深さ 40 cm までの土壌における溶質濃度が熱水消毒により急激に減少したことから、熱水消毒による極めて強度な溶質の溶脱が確認された。

アンモニウム態窒素の濃度は、地表面から深さ 7.5 cm まで、熱水の散水から 3 ヶ月後まで、耐熱性ビニールシートに結露したアンモニウム態窒素の溶解による表層でのアンモニウム態窒素の上昇が見られ、12.5 cm 以深では熱水投入 3 ヶ月後に検出限界以下になった。このことは、過去の研究から深さ 7.5 cm までの硝酸化成菌が死滅し硝化作用が起きず、その後、硝酸化成菌の回復に伴い土壌の下層部で硝化が進んだことにより、アンモニウム態窒素が減少したことが要因と考えられる。

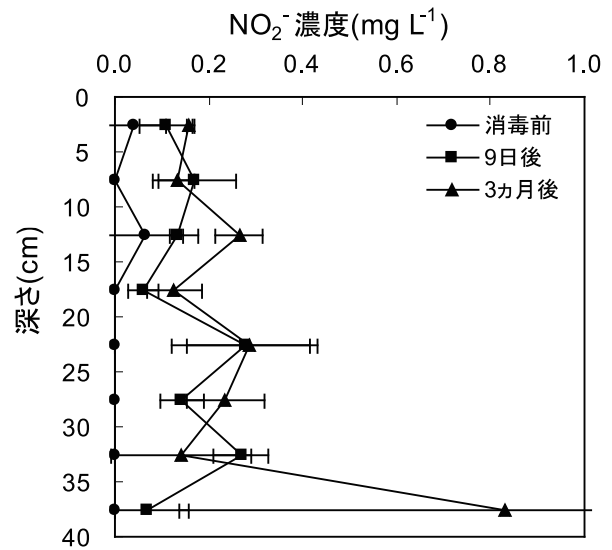


Fig. 3(a) 熱水消毒に伴った深さごとの  $\text{NO}_2^-$  濃度 (エラーバーは  $\pm 1$  標準偏差を表す)。

$\text{NO}_2^-$  concentration in each depth with the hot water sterilization. (Bars indicate  $\pm$  one S.D.)

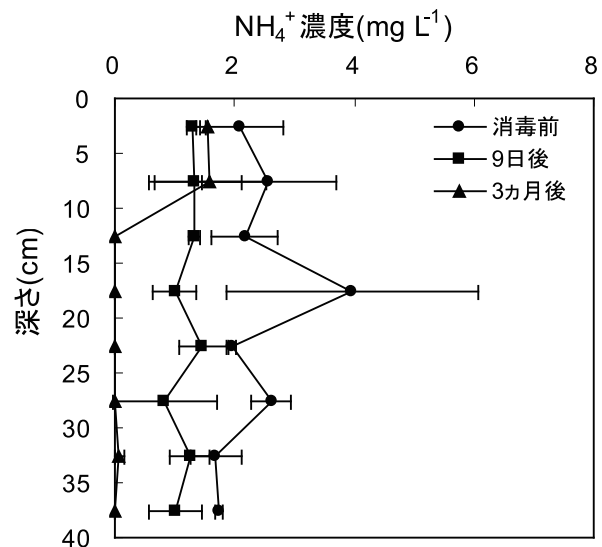


Fig. 3(b) 熱水消毒に伴った深さごとの  $\text{NH}_4^+$  濃度 (エラーバーは  $\pm 1$  標準偏差を表す)。

$\text{NH}_4^+$  concentration in each depth with the hot water sterilization. (Bars indicate  $\pm$  one S.D.)

## 引用文献

- Bauder, J.W., and Schneider R.P. (1979): Nitrate-nitrogen leaching following urea fertilization and irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43: 348–352.
- 飯泉新吾 (1975): 科学便覧基礎編 II. pp.777–797, 日本化学会, 東京.
- 北 宜裕 (2006): 物理的消毒法の効果と普及. 野菜茶業研究集報, 3: 7–15.
- 國安克人, 竹内昭士郎 (1986): 熱水注入による土壌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.
- 森国博全, 新妻成一, 嶋田永生 (1999): トマトの隔離床栽培における蒸気消毒後の硝酸化成菌の復活対策ならびに窒素施肥, 日土肥誌, 70: 542–549
- Misra, C., Nielsen, D.R. and Biggar, J.W. (1974): Nitrogen transformations in soils during leaching: II. Steady state nitrification and nitrate reduction. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 38: 294–299.
- 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壌の化学性に及ぼす影響. 近畿中国四国農研, 8: 12–15.
- 永井恭三, 久保田正垂, 小松鋭太郎 (1968): ビニールハウス土壌における硝化作用に基づく窒素の揮散について. 日土肥誌, 39: 199–203.
- 西 和文 (2004): 熱水土壌消毒—ポスト臭化メチル時代の注目技術—. 季刊肥料, 97: 58–62.
- 落合博之, 登尾浩助 (2003): 牧草地へのふん尿散布が地下水の水質に与える影響. 農土論集, 288: 1–8.
- 小川吉雄, 加藤英孝, 陽 捷行 (2000): 地下水直上部における降下浸透水中の硝酸態窒素の消長と土壌の脱窒能. 日土肥誌, 71: 494–501.
- 大村邦男, 坂本宣崇 (2000): 施設栽培における硝酸態窒素の流出と環境負荷の軽減対策. 北海道立農試集報. 79: 59–66.
- 佐久間敏雄, 飯塚文男, 岡島秀夫 (1975): 畑土壌における水分と無機塩類の挙動. 日土肥誌, 46: 126–132.
- 佐久間敏雄, 老松博行, 飯塚文男, 岡島秀夫 (1979): 粗大粒団を含むカラムからの  $\text{NO}_3^-$ . 日土肥誌, 50: 17–24.

## 要 旨

土壌消毒の中心であった臭化メチルの使用が全面禁止され, それにより低負荷消毒法として熱水土壌消毒法が脚光を浴び始めた. しかし, 熱水土壌消毒法は, 新しい消毒法のため研究例が少ない. そこで本研究では, 硝酸態窒素と塩素, 亜硝酸態窒素, アンモニウム態窒素の濃度変化を調べた. 実験は, 温度  $90^\circ\text{C}$  の熱水を土壌に  $204\text{ L m}^{-2}$  供給し, 熱水消毒前と熱水投入 9 日後, 熱水投入 3 ヶ月後の溶質濃度を, 地表面から深さ 40 cm まで 5 cm 毎に採土後, 土壌溶液を抽出し, 土壌溶液中の溶質濃度変化について調べた. その結果, 熱水消毒により溶脱が促進された. また, 熱水投下から 3 ヶ月後に, 硝酸態窒素, 塩素, 亜硝酸態窒素は, 30 cm 以深で溶質濃度の増加が見られた. 一方アンモニウム態窒素は, 熱水により硝酸化成菌が死滅したためにはじめはほとんど変化がなく, 時間経過と共に硝酸化成菌の復活により深層で減少したと考えられた.

キーワード: 溶脱, 熱水消毒, 硝酸態窒素, アンモニウム態窒素