

太陽熱土壤消毒が土壤特性に及ぼす影響とその予測に基づく総合的な栽培環境作り

—養分動態の解析を切り口にして—

農研機構 中央農業研究センター 井 原 啓 貴

はじめに

太陽熱土壤消毒（以下、太陽熱消毒）は、太陽エネルギーを地中に取り込むことによって地温を上げ、土壤中の有害生物・雑草種子等の駆除を図る技術である。農薬を使わない、もっとも手軽な防除技術の一つであり、一般向けの園芸番組でも紹介されている。太陽熱消毒は、好適な処理条件のもとでは消毒効果は高く、臭化メチル剤代替技術の中でも、環境に配慮した選択肢として期待される。

今回、農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業「陽熱プラス（2012～15年）」において、近年の土壤養分・微生物・環境計測手法を取り入れて、太陽熱消毒をバージョンアップするべく研究を行った。本稿ではまず、太陽熱消毒に関する既往研究の系譜を紹介し「陽熱プラス」の位置づけを概説する。後半では、その中から筆者が担当した窒素動態と地温計測を切り口に、太陽熱消毒が土壤環境に及ぼす影響とその課題について記述する。

I 太陽熱消毒の手法改善の系譜と「陽熱プラス」

施設栽培における「太陽熱消毒（従来型）」は、夏季にハウスを密閉し地温を高める「ハウス密閉処理」において、地表面をフィルム被覆することで、より深くまで、また、長期間、地温を病害虫の死滅温度まで高めたものである。地表面を覆うフィルム資材は黒より透明のビニルがよく、厚みのあるものほど高温が得やすいが、0.05 mm 厚程度で十分（和歌山県農業試験場ら、1985）であり、現場では古いビニルが再活用される場合も多い。一方、フィルム被覆を二重にすることで消毒効果を高める「多重被覆法」も開発された（吉本・増田、2006）。やや高水分のほうが下層に熱が伝わりやすく消毒効果が高いため、灌水設備があれば十分に灌水した後に、露地で設備がなければ降雨後に消毒を開始するのが一般的であ

る。適切な水分条件は地域・土壤によっては指針が示されている。灌水は、施用有機物や圃場の排水性等によっては、後述する土壤還元消毒的な効果をもたらすが、酸化還元電位（駒田ら、1979）を見るに、灌水＝還元化ではない。駒田らは、消毒前の石灰窒素施用や堆肥・緑肥のすき込みについても検討した。これを応用して、フスマなど易分解性有機物を多量施用して土壤を強還元にすることで、寒冷地においても高い消毒効果を得ることができる。この技術が「土壤還元消毒」であり、糖蜜を用いて下層まで還元化し消毒する改良も図られた（新村、2002）。太陽熱消毒の発展型として、「改良型太陽熱土壤消毒法（宮崎型）」（白木ら、1998；白木 1999）がある。宮崎型では、従来型の作業手順を見直し、太陽熱消毒を施肥・耕起・作畝等の後に実施する。消毒後には改めて耕起作業を行わず、そのまま定植する。これによって、消毒後に、消毒効果が十分に行きわたっていない下層土やハウス端の土壤が耕土層へ混入することを防ぎ、防除効果を高める。「陽熱プラス」は、手法としては宮崎型を基本にししながら、生産現場における地温の計測手法をマニュアル化し、土壤の理化学性・生物性診断を取り入れて、太陽熱消毒の効果・利点を幅広く安定化することを目指したものである。

II 温度計測とその活用

過去には、融点が異なる数種のパラフィンを土壤中に埋設し、最高地温を確認することも行われたようである（和歌山県農業試験場ら、1983）。このような計測手法は簡易で普及しやすい。一方で、現在は地温の計測・記録機も1式2万円程度で入手可能になった。計測地温をデータベース化するメリットは、既知の病原菌などの死滅温度を目安に、消毒効果の推定が行える（越智、2015）点にある。また、その結果を蓄積し、生産者自身に、あるいは理想的には近隣の地域や対象病害を同じくする他地域にフィードバックする展開も可能である。伊藤ら（1978）、駒田ら（1979）、堀内（2001）に示されるように、太陽熱消毒については、主な適地である関東以西では研究蓄積がある。既往試験で測定した地温、病害虫の死滅温度について集約する必要がある。

Integrated Management of the Environments for Vegetable Production Using Some Recent Diagnostic Methods. By Hiroataka IHARA

（キーワード：太陽熱土壤消毒，養分動態，硝化）

筆者は、地温データは、土壤中の窒素無機化量の予測にも利用できることを示した(井原, 2015)。50～60℃以上では、後述する「硝化」も停止すると考えられる(MYERS, 1975)。このように、地温をもとに推定できる情報の範囲を広げることも有益である。

III 消毒中の養分動態

太陽熱消毒中の高温は、土壤中における養分動態にも影響すると考えられる。これまでの研究により部分的に知見は得られているが、中長期的な土壤理化学性・生物性への影響と制御技術等、未検討の要素が残る。ここでは、今回筆者が研究を進めた窒素動態を例に、既往知見と課題を紹介する。

1 消毒による無機態窒素の増加と予測

消毒後土壤において、無機態窒素が消毒前よりも増える場合のあることが報告されている(CHEN and KATAN, 1980 や STAPLETON et al., 1985 等)。無機態窒素の給源は、死滅した土壤微生物と土壤有機物であろうと考えられる(図-1)。無機態窒素の増加が、微生物の死滅のみを原因とするのであれば、死滅によって生じた無機態窒素の一部は、消毒後に微生物性が回復する過程において再び微生物に取り込まれるため、消毒後栽培する作物への養分供給効果は低い。一方で、土壤有機物の分解は消毒後栽培への基肥相当としてカウントしうる。

土壤の無機態窒素供給力は、通常温度条件下では、土壤を30℃で4週培養して評価されてきた(「可給態窒素」という土壤診断値である)。4週間という所要時間は普及の妨げになることから、より簡易・迅速に評価するために、土壤の窒素供給量を各種抽出手法で評価する技術も様々提案されてきた。上蘭ら(2010 a; 2010 b)は、既往の主要な抽出法を再評価するとともに、特殊な試薬を用いず生産現場でも実施可能な「80℃ 16時間水抽出法」を提案した。筆者らは、これを応用し、消毒に伴う土壤からの窒素供給量を推定する手法を開発した(井原, 2015)。

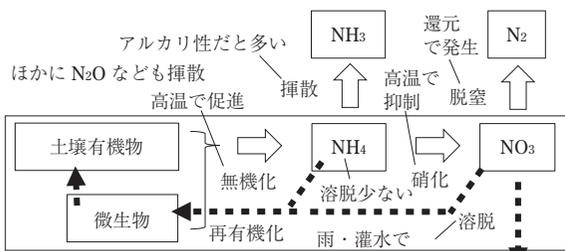


図-1 主な窒素形態と変化

2 消毒による有機物の消耗

消毒が土壤有機物の無機化を促進するとすれば、消毒を繰り返した畑では、中長期的には、土壤有機物は消耗するはずである。また、土壤有機物にも、熱によって無機化が進みやすいものと、そうでないものがあるはずである。消耗した有機物の内容をより細かく解析することで、消毒が多様な土壤の理化学性に及ぼす影響を評価する研究展開も考えられる。通常温度の農耕地土壤有機物の分画手法は様々あり、ここですべてを解説することはできないが、温度との関係については古くはコロイド(原田, 1959)やアミノ酸等(三井, 1948; 坂本ら, 1993)について研究されている。前述の上蘭らが提案した土壤診断法における抽出液中の含窒素有機物の組成を調べる森泉・松永(2012)の手法も開発された。通常の温度域においては、無機化の主なドライビングフォースは微生物の活動と考えられているが、高温は微生物バイオマス量の低下をまねく一方で、土壤有機物の無機化も促進する。おそらく、高温に伴う無機化促進作用は、生物的な作用と化学的な作用の両面によるのであろう。温度に対する生物・化学反応の知見から、実際に起きている現象に迫ることもできるであろう。

3 消毒が窒素揮散に及ぼす影響

窒素動態に関して、無機化以外に注目されるべきものとして、揮散がある(図-1)。その主な内容は、①脱窒；還元状態では、NO₃は還元されN₂ガスとして揮散する。②NH₃ガスの揮散；限られた条件で筆者が検討した範囲では量的に少なかった(未公表)が、高温と高pH、土壤中NH₄の蓄積が重なった場合には、無視できないかもしれない。③亜酸化窒素(N₂O)発生；脱窒に比べ量的には少ない(北川ら, 1980)が温室効果ガスであるN₂Oも注目される。NISHIMURA et al. (2012)は、太陽熱消毒時におけるフィルム透過量を含めたN₂O発生量の評価を行っているが、その中で、フィルムのガス透過性は高温ほど高まる点を考慮している。

4 消毒が微生物性に及ぼす影響(硝化を例に)

NH₄をNO₃に酸化する微生物活動「硝化」(図-1)も消毒の影響を受ける。通常の畑土壤では、NH₄は数週間以内に硝化されるが、消毒に伴い一時的に硝化活性が低下することが知られている(和田ら, 2008)。一方で、消毒の初年目に比べて2年目には硝化の抑制が軽減するという指摘もあるが、その検証事例は乏しい。IHARA et al. (2014)は太陽熱消毒やそれを模した45～50℃処理は、高温での硝化活性を高め、また、その影響は、消毒翌年まで持続することを見いだした。この中で、消毒は、高温に強い硝化菌を生残・集積させることが明らかにな

表-1 消毒後作土の無機態窒素

深さ	NH ₄	NO ₃
	mgN kg ⁻¹	
0～5 cm	120	313
5～10 cm	3	95
10～15 cm	2	51

IHARA et al. (2014) からデータを一部抜き出したもの。

った。このような微生物性の変化に伴う養分動態の変化は、硝化菌以外については報告されていないが、同様の変化は、他の養分動態などに関しても、今後発見される可能性がある。

表-1は、筆者が太陽熱消毒中の作土を深さ5 cm 刻みで採取しNO₃、NH₄を調べた結果である。このとき、深さ0～5 cmの硝化活性は高温と低水分のため著しく低下していた。硝化が抑制されてしかるべき深さ0～5 cmにNO₃が蓄積した理由は、下層から地表面への水移動のためと考えられた。消毒中の作土では、フィルム被覆の効果で蒸発は抑制されるが、それでも地表面から徐々に乾燥する。この過程で、下層から地表面への水移動が起こり、地表面付近にNO₃が集積したと考えられる。消毒後土壌を調べる場合には、このように土壌中の環境条件や理化学性が空間的に異なることも頭に入れておくべきである。

おわりに

「陽熱プラス」では、温度因子を研究対象としたが、太陽熱消毒には、有害微生物の温度致死という物理的効果に加え、生物的防除効果があると考えられている(渡辺, 1987)。太陽熱消毒に関する研究は、対象病原菌の死滅温度の検証にとどまらず、対象病原菌を攻撃する他の微生物への影響、その制御を含めた資材施用法の開発等にも広がった。GAMLIEL and STAPLETON (1997), GAMLIEL et al. (2000), STAPLETON (2000) は有機質資材による消毒効果の増強などに関する知見を整理した。一般微生物性について、従来から細菌・糸状菌・放線菌の計数データは取られているが、近年研究用ツールとしては普及が進んだPCR-DGGE(変性剤濃度勾配ゲル電気泳動)を用いた解析事例は、BONANOMI et al. (2008), YOKOE et al. (2015) や織毛虫に関するMURASE et al. (2015) 等に限られる。一般微生物性のかく乱と再汚染リスクとの関係評価は今後さらに研究が必要な課題である。

小玉・宮本(1982)や和歌山県農業試験場ら(1985)は、

必要な積算地温の確保や資材施用の効果、栽培体系を広く解説・検討して示唆に富む。今後、温度以外の要因について(例えば水分)、その影響を定量的に評価するためには、これまでの知見を再整理するとともに、系統立った評価データの蓄積による検証が必要である。

消毒が物理性に及ぼす影響については「硬くなり撥水性をもつ」、「適度に締まり活着がよくなる」、「土がやわらかくなる」と様々な報告があり興味深い。蒸気消毒後の乾燥に伴う土壌撥水性については牧(2009)の報告があるが、同じ物理化学的な現象が、元々の土壌の性質や施用資材の違いによって、消毒後土壌を調査した者に異なった印象を与えているのではないだろうか。

このように、太陽熱消毒に関しては、まだ多くの検討課題が残されている。太陽熱消毒の研究を通じて、総合的な防除にとどまらず、さらに総合的な栽培環境作りの技術開発が進展することを期待する。

謝辞 本稿は、農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業の支援のもと実施した「陽熱プラス」プロジェクトの全担当者が協力し集約した既往文献調査の結果をもとに作成した。関係する皆様に感謝申し上げます。

引用文献

- 1) BONANOMI, G. et al. (2008): Soil Biology & Biochemistry 40: 1989～1998.
- 2) CHEN, Y. and J. KATAN (1980): Soil Science 130: 271～277.
- 3) GAMLIEL, A. et al. (2000): Crop protection, 19: 847～853.
- 4) ——— and J. J. STAPLETON (1997): Phytoparasitica 25: 31S～38S.
- 5) 原田登五郎 (1959): 農業技術研究所報告 B9: 123～200.
- 6) 堀内誠三 (2001): 野菜の病害 26: 353～370.
- 7) IHARA, H. et al. (2014): Soil Science and Plant Nutrition 60: 824～831.
- 8) 井原啓貴 (2015): 「陽熱プラス」技術資料集, 農研機構中央農業総合研究センター, つくば, 13-1～13-11.
- 9) 伊藤 清ら (1978): 太陽熱・石灰窒素利用による土壌消毒と土づくり: 連作障害防止のため, 全国野菜技術研究連絡協議会, 東京, 155pp.
- 10) 北川芳雄ら (1980): 奈良農試験報 11: 21～30.
- 11) 小玉孝司・宮本重信 (1982): 農業技術 37: 353～357.
- 12) 駒田 旦ら (1979): 太陽熱利用による土壌消毒に関する実証的研究, 農業研究センター, 茨城, p.135～146.
- 13) 牧 浩之 (2009): 蒸気等熱消毒による土壌の撥水性の発現と対策, 研究成果情報, http://www.naro.affrc.go.jp/org/warc/research_results/h21/02_kankyo/p73/17_217.html (2016年1月時点)
- 14) 三井進午 (1948): 農事試験場報告 62: 1～48.
- 15) MURASE, J. et al. (2015): Soil Science and Plant Nutrition 61: 927～933.
- 16) 森泉美穂子・松永俊朗 (2012): 化学と生物, 50: 239～241.
- 17) MYERS, R. K. J. (1975): Soil Biology & Biochemistry 7: 83～86.
- 18) 新村昭憲 (2002): 新しい研究成果, 北海道農業研究センター, 札幌, p.106～110.
- 19) NISHIMURA, S. et al. (2012): Biology and Fertility of Soils 48: 787～795.
- 20) 越智 直 (2015): 「陽熱プラス」技術資料集, 農研機構中央農業総合研究センター, つくば, 12-1～12-9.
- 21) 坂本一憲ら (1993): 日本土壌肥科学雑誌, 64: 9～14.
- 22) 白木己歳ら (1998): 宮崎県総農試報 32: 1～11.

- 23) ——— (1999): 臭化メチルに頼らないハウスの新しい太陽熱処理法, 農山漁村文化協会, 東京, 135pp.
- 24) STAPLETON, J. J. (2000): *Crop protection* **19**: 837 ~ 841.
- 25) ——— et al. (1985): *Soil Biology & Biochemistry* **17**: 369 ~ 373.
- 26) 上菌一郎ら (2010 a): 日本土壌肥科学雑誌, **81** (3), 252 ~ 255.
- 27) ———ら (2010 b): 畑土壌可給態窒素の簡易・迅速評価法. http://www.naro.affrc.go.jp/narc/result_digest/files/snmanu.pdf (2016年1月時点)
- 28) 和田さと子ら (2008): 土と微生物 **62**: 21 ~ 31.
- 29) 和歌山県農業試験場ら (1983): 太陽熱利用による露地野菜の土壌病害防除, p.3.
- 30) ———ら (1985): 太陽熱利用による水田転換畑露地野菜の土壌病害防除技術確立, 和歌山県農業試験場, 和歌山, 147pp.
- 31) 渡辺文吉郎 (1987): 土壌病害, 全国農村教育協会, 東京, 247pp.
- 32) YOKOE, K. et al. (2015): *Soil Science and Plant Nutrition* **61**: 641 ~ 652.
- 33) 吉本 均, 増田吉彦 (2006): 太陽熱を利用した二重被覆による育苗ポット土壌の消毒: 研究成果情報. <http://agriknowledge.affrc.go.jp/RN/3010010637> (2016年1月時点)

新しく登録された農薬 (28.2.1 ~ 2.29)

掲載は、**種類名**、登録番号：**商品名**（製造者又は輸入者）登録年月日、有効成分：含有量、**対象作物**：対象病害虫：使用時期等。ただし、除草剤・植物成長調整剤については、**適用作物**、**適用雑草**等を記載。

【殺虫剤】

●スピノサド水和剤

23775: サービスエース顆粒水和剤 (北興化学) 16/2/17
23776: ノーカウント顆粒水和剤 (ダウケミカル) 16/2/17
スピノサド: 50.0%

稲 (箱育苗): フタオビコヤガ: 移植当日

●スワルスキーカブリダニ剤

23777: システムスワルクん (石原産業) 16/2/17
スワルスキーカブリダニ: 250 頭/パック

野菜類 (施設栽培, ただし, トマト, ミニトマトを除く):
アザミウマ類: 発生直前~発生初期

かんぎつ (施設栽培): ミカンハダニ: 発生直前~発生初期

マンゴー (施設栽培): チャノキイロアザミウマ: 発生直前~発生初期

●ミルベメクチン乳剤

23772: マツガードクイック (三井化学アグロ) 16/2/3
ミルベメクチン: 3.0%

まつ (生立木): マツノザイセンチュウ: マツノマダラカミキリ成虫発生前まで

【殺虫・殺菌剤】

●クロチアニジン・シアントラニリプロール・イソチアニル粒剤

23773: スタウトパディート DX 箱粒剤 (協友アグリ) 16/2/3
クロチアニジン 0.80%

シアントラニリプロール 0.75%

イソチアニル 2.0%

稲 (箱育苗): いもち病, イネミズゾウムシ, イネドロオイ

ムシ, ウンカ類, フタオビコヤガ, ニカメイチュウ: は種前

稲 (箱育苗): いもち病, 白葉枯病, もみ枯細菌病, 内穎褐変病, イネミズゾウムシ, イネドロオイムシ, ウンカ類, ツマグロヨコバイ, イネツトムシ, フタオビコヤガ, ニカメイチュウ: は種時 (覆土前) ~ 移植当日

稲 (箱育苗): 穂枯れ (ごま葉枯病菌): 移植当日

【除草剤】

●ピラクロニル・プロピリスルフロロン・プロモブチド水和剤

23778: アップレ Z フロアブル (協友アグリ) 16/2/17

ピラクロニル 3.7%

プロピリスルフロロン 1.7%

プロモブチド 16.8%

移植水稲: 水田一年生雑草, マツバイ, ホタルイ, ヘラオモダカ, ウリカワ, ミズガヤツリ, クログワイ, ヒルムシロ, セリ, アオミドロ・藻類による表層はく離

●ピラクロニル・フルセトスルフロロン・メソトリオン粒剤

23774: タンボパワー 1 キロ粒剤 (石原テクノ) 16/2/3

ピラクロニル 2.0%

フルセトスルフロロン 0.20%

メソトリオン 0.90%

移植水稲: 水田一年生雑草, マツバイ, ホタルイ, ヘラオモダカ, ミズガヤツリ, ウリカワ, クログワイ, オモダカ, ヒルムシロ, セリ, コウキヤガラ, エゾノサヤヌカグサ, シズイ, アオミドロ・藻類による表層はく離

直播水稲: 水田一年生雑草, マツバイ, ホタルイ, ミズガヤツリ, ウリカワ, ヒルムシロ, セリ