

太陽熱を利用した農耕地土壌の消毒が窒素動態に
及ぼす影響の評価に関する研究

2018

井原 啓貴

謝辞

本研究とりまとめにあたり、京都大学大学院 地球環境学堂 環境調和型産業論分野の藤井滋穂教授には、終始熱心に、また多くのご配慮の下、ご指導と励ましのお言葉を賜りましたこと、心より御礼申し上げます。また、同学堂 陸域生態系管理論分野の舟川晋也教授には、本稿執筆において懇切なご指導をいただきました。資源循環科学論分野の高岡昌輝教授、社会基盤親和技术論分野の勝見武教授には、本稿の審査過程において、多様な視点からのコメントをいただき、また、熱心にご議論下さいました。環境調和型産業論分野の田中周平准教授には、研究進捗の報告会等のご指導と励ましのお言葉を賜りました。同分野の原田英典助教、鈴木裕識博士、学生および院生諸氏には、筆者のゼミでの拙い研究発表に対し、質の高いご指導と刺激を度重なり頂戴しました。教務補佐員の汐崎文氏には、遠方に居住する筆者の事情をくんで、学位申請にあたり多くのお力添えをいただきました。深く感謝申し上げます。

本研究を主に実施した農研機構 中央農業研究センターの加藤直人博士（現 農業環境変動研究センター）には、本研究の端緒を与えていただくとともに、研究遂行、とりまとめに多大なご指導賜りました。同センター高橋茂博士（現 東北農業研究センター）には、本研究の遂行にあたり特段のご配慮をいただき、また有意義なご助言を多く賜りました。長岡一成博士には、土壌微生物性の評価技術を教授いただき、また激励いただきました。前田守弘博士（現 岡山大学教授）には、本研究につながる研究技術の習得の過程で特段のご指導を賜りました。13年の在籍期間には御礼しきれませんが、他にも同センター土壌肥料部、業務科をはじめ多くの方々に、研究遂行にあたり様々なご配慮を賜り、また圃場管理や実験作業にも多大なご協力をいただきました。また、現所属である農研機構 九州沖縄農業研究センターの皆様には、本稿執筆にあたり多くのご助言賜りました。中でも古賀伸久博士には、本稿への懇切なご指導を賜りました。

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研究プロジェクト「太陽熱土壌消毒効果を活用した省エネ・省肥料・親環境栽培体系「陽熱プラス」の確立」を総括された農研機構 中央農業研究センター橋本知義博士には、本研究の遂行にあたり格段のご配慮をいただきました。また、共同で研究実施した宮崎県総合農業試験場、長崎県農林技術開発センター、和歌山県農業試験場、片倉チッカリン（現片倉コープアグリ）株式会社、長崎総合科学大学、名古屋大学、農研機構の皆様には、実験の遂行にご協力、ご助言いただくとともに、生産現場の状況も含め多くを教わりました。

農研機構 畜産草地研究所の永西修博士（現 農研機構 畜産研究部門）には、有機質資材の分析手法をご教授いただきました。三重県、山形県、岡山県、山梨県の

皆様には、各種有機質資材をご提供いただきました。熊本県農業研究センターの身次幸二郎室長には、生産現場の土壌サンプル採取にあたり県内各地に同行いただき多大なご協力を賜りました。他にも、北海道、静岡県、岐阜県、新潟県、千葉県の皆様には、貴重な土壌をご提供いただきました。厚く御礼申し上げます。

最後に、ここまで力をくれた妻子と支えてくださった両親に感謝いたします。

お世話になった全ての皆様に感謝いたします。

平成30年2月9日 井原啓貴

要旨

太陽熱土壌消毒（以下、太陽熱消毒）は、圃場表面を透明フィルムで被覆し、太陽エネルギーを地中に取り込むことによって地温を高め、土壌中の植物病原体や雑草種子の駆除を図る消毒法である。消毒中の土壌では、日最高地温が 40～50℃を超えることから、本土壌消毒法は、副次的に、土壌中における窒素動態にも強く影響すると考えられるが、知見は乏しかった。そこで、本研究では、

1) 太陽熱消毒条件下における土壌環境条件と土壌中での窒素動態の特徴を明らかにすることを目的し、既往知見をもとに、消毒後の作物栽培の肥培管理において重要な窒素動態である、硝化および無機化が大きな影響を受けると考察した。

2) 地温と硝化活性の関係を示すため、茨城県つくば市から採取した畑地土壌を培養温度 30～60℃で処理した。培養温度が高いほど硝化は遅れ、60℃では硝化は停止し、いったん 60℃で処理した土壌を 30℃に戻しても硝化は回復しなかった。

3) 茨城県つくば市の畑圃場で、太陽熱消毒後の土壌では、「一般的には温度が高すぎて硝化活性が低下するとされる培養温度 45℃条件下における硝化」が未消毒土壌より進みやすくなることを発見した。太陽熱消毒をはじめて行うときと、2 回目以降で、太陽熱消毒時の硝化抑制の程度が異なることを念頭に、消毒後の肥培管理を行うべきである。

4) これまで系統立って調べられてこなかった太陽熱消毒中の高地温条件下における土壌や堆肥等施用有機質資材の窒素無機化量を評価するために、74 土壌、30 資材を培養温度 30～60℃で培養した。高地温条件下では、土壌の窒素無機化量が大幅に増えた一方で、有機質資材の窒素無機化量は増えなかった。

5) 太陽熱消毒後の栽培における施肥量適正化に向けて、太陽熱消毒中に想定される高地温（または高い培養温度）条件下における土壌窒素無機化量を反応速度論的モデルで解析した。モデルは太陽熱消毒中の窒素無機化量に及ぼす培養温度および期間の影響を評価できることを明らかにした。茨城県つくば市の淡色黒ボク土畑で得たオンサイトのデータによりモデルを検証し、モデルが有効であることを示した。

6) 培養実験データベースを構築した各土壌を、土壌可給態窒素含量（風乾土を培養温度 30℃で 28 日間培養したときの土壌窒素無機化量で評価される）の簡易評価法として開発された上菌ら (2010b) の方法で評価し、本評価法が、培養温度 45℃条件下における窒素無機化量の予測にも有効であることを明らかにした。

キーワード：太陽熱土壌消毒、窒素、無機化、硝化、適正施肥

太陽熱を利用した農耕地土壌の消毒が窒素動態に及ぼす影響の評価に関する研究

第1章 緒論 ————— 8

- 1.1 研究の背景
- 1.2 本研究で取り組む課題
- 1.3 論文の構成

第2章 文献考察 ————— 14

- 2.1 概要
- 2.2 太陽熱消毒の手法とその改善の系譜
- 2.3 太陽熱消毒中の地温と土壌水分
- 2.4 太陽熱消毒が窒素動態に及ぼす影響
 - 2.4.1 土壌中窒素動態の概要と本節の目的
 - 2.4.2 窒素無機化への影響
 - 2.4.3 硝化への影響
 - 2.4.4 窒素ガス揮散への影響
- 2.5 近年の土壌や有機質資材の分析診断による施肥量の適正化技術
 - 2.5.1 土壌診断とは
 - 2.5.2 窒素施肥適正化のための土壌可給態窒素の評価
 - 2.5.3 地温や培養期間が土壌窒素無機化量に及ぼす影響の評価
 - 2.5.4 家畜ふん堆肥の窒素肥効評価
- 2.6 まとめ

第3章 消毒が硝化活性に及ぼす影響 ————— 22

- 3.1 概要
- 3.2 土壌および肥料の特性評価の方法
 - 3.2.1 土壌の物理性と理化学性
 - 3.2.2 有機質肥料の理化学性
 - 3.2.3 硝化活性
 - 3.2.4 アンモニア酸化菌数の計数
- 3.3 太陽熱消毒を想定した 30~60°Cの培養温度条件下における硝化の進みややすさ
 - 3.3.1 背景と目的
 - 3.3.2 方法
 - 3.3.2.1 供試土壌と資材
 - 3.3.2.2 硝化抑制が生じる地温条件の検討のための高温での培養
 - 3.3.2.3 高温で硝化抑制が生じた後の土壌に対する培養温度 30°Cでの培養
 - 3.3.3 結果と考察
- 3.4 高い培養温度での培養が培養後土壌の硝化活性の至適温度に及ぼす影響
 - 3.4.1 背景と目的
 - 3.4.2 方法
 - 3.4.2.1 供試土壌
 - 3.4.2.2 前培養の方法

- 3.4.2.3 前培養後の土壌の硝化活性の評価
- 3.4.3 結果と考察
- 3.5 太陽熱消毒後の圃場で採取した土壌の高温（45℃）における硝化活性
 - 3.5.1 背景と目的
 - 3.5.2 方法
 - 3.5.2.1 試験圃場
 - 3.5.2.2 太陽熱消毒の方法と試験枠の設置
 - 3.5.3 結果と考察
 - 3.5.3.1 前年に消毒した区と未消毒区における 45℃における硝化活性の比較
 - 3.5.3.2 前年に消毒した区と未消毒区における硝化菌数の比較
- 3.6 消毒中の地温と消毒前後の土壌の 30、45℃における硝化活性への影響
 - 3.6.1 概要
 - 3.6.2 方法
 - 3.6.2.1 太陽熱消毒の方法
 - 3.6.2.2 地温の観測
 - 3.6.2.3 土壌のサンプリング
 - 3.6.3 結果と考察
 - 3.6.3.1 2012 年試験期間中の気温と降水量
 - 3.6.3.2 消毒中の地温
 - 3.6.3.3 消毒後の作土中における無機態窒素の深さ別の含量と硝化活性
- 3.7 消毒後に 45℃における硝化活性が高まる現象に及ぼす肥料や堆肥施用の影響
 - 3.7.1 方法
 - 3.7.2 結果と考察
 - 3.7.2.1 有機質肥料の施用が硝化活性に及ぼす影響（実験 1）
 - 3.7.2.2 有機栽培し堆肥施用した圃場の事例（実験 2）
- 3.8 まとめ

第 4 章 高温条件下における土壌や有機質資材の窒素無機化量 —————46

- 4.1 概要
- 4.2 分析方法
 - 4.2.1 土壌の物理性と理化学性
 - 4.2.2 有機質資材の理化学性
 - 4.2.3 酸性ディタージェント法による有機質資材の分解と評価
- 4.3 高温条件下における土壌の窒素無機化量
 - 4.3.1 供試土壌
 - 4.3.2 培養の方法
 - 4.3.3 結果と考察
 - 4.3.3.1 30℃から 45 や 60℃に培養温度を高めた時の窒素無機化の促進効果
 - 4.3.3.2 高温による土壌窒素無機化の促進効果の土壌や前処理による違い
- 4.4 高温条件下における有機質資材の窒素無機化量
 - 4.4.1 背景と目的
 - 4.4.2 供試資材と土壌
 - 4.4.3 培養の方法と窒素無機化量の計算方法
 - 4.4.4 培養実験の結果と考察
 - 4.4.4.1 有機質肥料、ナタネ油かす、骨粉

- 4.4.4.2 家畜ふん堆肥、米ぬか
- 4.4.4.3 総合考察（高温が有機質資材の窒素無機化量に及ぼす影響とその評価法）
- 4.5 まとめ

第5章 消毒時の基肥適正化のための土壌・気象条件の評価 69

- 5.1 概要
- 5.2 反応速度論的土壌窒素無機化モデルの高地温条件への適用可能性の検討
 - 5.2.1 方法
 - 5.2.1.1 解析に用いた培養実験データ
 - 5.2.1.2 Q_{10} 則を導入した簡易な土壌窒素無機化モデルによる解析
 - 5.2.2 結果
 - 5.2.3 考察
- 5.3 モデルのオンサイトでの検証
 - 5.3.1 方法
 - 5.3.2 結果および考察
- 5.4 高温条件下における窒素無機化量予測への簡易土壌評価法の適用
 - 5.4.1 背景と目的
 - 5.4.2 方法
 - 5.4.2.1 検証に用いた培養実験のデータ
 - 5.4.2.2 土壌可給態窒素含量の簡易評価法
 - 5.4.3 結果
 - 5.4.4 考察
- 5.5 モデルと土壌の簡易評価法を組み合わせた土壌窒素無機化量予測の実用化に向けた課題
- 5.6 まとめ

第6章 結論 86

付録 89

- A 茨城県つくば市で実施した圃場試験の概要と調査方法の整理
- B つくば市圃場における気温、降水量、地温計測結果
- C つくば圃場における太陽熱消毒前後の土壌特性の調査結果
- D 培養中および埋設試験時のアンモニア揮散の影響に関する補足的実験
- E 土壌窒素無機化量に対する培養温度の影響のアレニウス則による解析
- F 硝化と温度の関係（3.3節）実験全データ
- G 土壌・有機質資材の診断に基づく窒素施肥量適正化の考え方

引用文献一覧 168

図一覧

- 図 1-1 太陽熱消毒の様子
- 図 1-2 太陽熱消毒の手順
- 図 1-3 従来型太陽熱消毒と宮崎型改良太陽熱消毒の違い
- 図 1-4 宮崎型太陽熱消毒のメリットとデメリット
- 図 1-5 論文の構成
- 図 2-1 主な窒素形態とその動き
- 図 3-1 第 3 章の概要
- 図 3-2 30～60℃で 42 日間その後 30℃で 90 日培養した時の土壤無機態窒素含量
- 図 3-3 前処理の温度と期間が前処理後土壤の硝化活性に及ぼす影響
- 図 3-4 つくば露地圃場の概要
- 図 3-5 2012 年に消毒した処理区と未消毒の試験区で翌年に採取した土壤の 45℃における経時的な硝酸化成量
- 図 3-6 太陽熱消毒の様子
- 図 3-7 2012 年試験期間中の降水量
- 図 3-8 淡色黒ボク土における地温の推移
- 図 3-9 過去の太陽熱消毒、施肥管理が異なる 4 処理における 45℃における硝化活性
- 図 4-1 30℃、45℃、60℃で培養中の土壤窒素無機化量の推移
- 図 4-2 30℃28 日間と 45℃21 日間培養中の土壤窒素無機化量の比較
- 図 4-3 45℃で 21 日間培養したときの土壤窒素無機化量と土壤全炭素含量の関係
- 図 4-4 45℃で 21 日間培養したときの土壤窒素無機化量と土壤全窒素含量の関係
- 図 4-5 肥料・資材の窒素無機化量の調べ方

- 図 4-6 有機質肥料、油かす、骨粉の窒素無機化特性
- 図 4-7 牛ふん堆肥および米ぬかの窒素無機化特性
- 図 4-8 豚・鶏ふん堆肥の窒素無機化特性
- 図 4-9 30℃で4週間および45℃で3週間培養のときの供試 30 資材が含有する有機態窒素の無機化量
- 図 4-10 供試牛・豚ふん堆肥の培養前から含有する $\text{NH}_4\text{-N}$ (HCl 抽出) + $\text{NO}_3\text{-N}$ 量と 45℃3 週間培養後の資材由来無機態窒素の関係
- 図 5-1 第 5 章の概要
- 図 5-2 土壌窒素無機化のモデル解析結果
- 図 5-3 45℃で 21 日間培養中の土壌窒素無機化量と上菌らの方法により土壌から抽出された TOC 含量の関係 (a)風乾土について、(b)未風乾土について
- 図 5-4 太陽熱消毒前後の土壌中無機態窒素含量の例
- 図 6-1 論文の構成と結論
- 図 A-1 試験地一覧
- 図 A-2 つくば露地圃場の概要
- 図 A-3 太陽熱消毒の様子
- 図 B-1 2010 年 6～12 月の気温と降水量
- 図 B-2 2011 年 6～12 月の気温と降水量
- 図 B-3 2012 年 6～12 月の気温と降水量
- 図 B-4 2013 年 6～12 月の気温と降水量
- 図 C-1 土壌水分含量は消毒開始後ゆっくり低下するが大きな雨があれば直接雨があたることのないフィルム被覆下の深さ 5 cm でも土壌水分含量が増えることもある

図 C-2 消毒前に深さ 0-15 cm に均一に混和した Br^- の消毒後における深さ別分布から深さ 5-15 cm から深さ 0-5cm に向けて上向きに塩類が移動したことが示唆される

図 C-3 太陽熱消毒した試験区と対照区の土壌表面の様子（消毒終了約半月後）

図 E-1 各培養温度における土壌窒素無機化モデルの適用結果およびアレニウスプロットによる活性化エネルギーの計算結果

図 G-1 陽熱プラスの研究体制とテーマ

図 G-2 窒素無機化量の予測手法の概念図

表一覧

表 2-1 既往報告における太陽熱消毒中の最高地温（単位： $^{\circ}\text{C}$ ）

表 3-1 第 3 章の各実験の概要

表 3-2 45°C で計数されるアンモニア酸化菌数の消毒前歴による違い

表 3-3 土壌別、深さ別の最高地温

表 3-4 2012 年消毒前後の深さ別、時期別の土壌中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量

表 3-5 2012 年太陽熱消毒後土壌の硝化活性（ 30°C ）と 45°C における硝化活性の各土壌および処理区における比較

表 3-6 有機栽培または慣行栽培条件下における太陽熱消毒と堆肥施用が 45°C での硝化活性に及ぼす影響

表 4-1 供試土壌一覧（風乾土 49 点）

表 4-2 供試土壌一覧（未風乾土 25 点）

表 4-3 室内培養実験の供試資材

表 5-1 地温の計測深および消毒期間ごとの 30°C換算日数、土壤窒素無機化量のモデル計算値と圃場試験における計測値

表 A-1 共同研究者の圃場試験概要とそこで著者が実施した調査概要

表 A-2 処理区的设计 (消毒の繰り返しが土壤特性に及ぼす影響の評価)

表 A-3 各年次における調査方法与日程

表 B-1 2011 年の地温観測結果まとめ

表 B-2 2012 年の地温観測結果まとめ

表 B-3 2013 年の地温観測結果まとめ

表 C-1 2010 年の土壤調査結果

表 C-2 2011 年の土壤調査結果

表 C-3 2012 年の土壤調査結果

表 D-1 2013 年の圃場埋設試験結果

表 F-1 前培養 (30~80°C、0~42 日) 後 30°Cで 0~90 日培養した土壤の $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量

表 G-1 地温・期間と N_{min}/N_0 の値

第1章 緒論

1.1 研究の背景

農耕地土壌では、単一の作物を作り続けることにより、作物に有害な糸状菌、細菌、線虫など各種の微生物が増殖しやすい。そのため、農地では、これら有害微生物を死滅させて無毒化する土壌消毒が一般的に行われる。近代日本では、効果の安定性やコスト面で優位な農薬を用いる方法が、長らく最も一般的な土壌消毒法であった。しかし、土壌病害対策に広く用いられた臭化メチル剤が1992年のモントリオール議定書締約国会合でオゾン層破壊物質に指定され、我が国では2012年末に全廃されたことを受け、その代替として、熱を利用した土壌消毒も見直されている。太陽熱土壌消毒（以下、太陽熱消毒）は、圃場表面を透明フィルムで被覆し、太陽エネルギーを地中に取り込むことによって地温を高め、土壌中の植物病原体や雑草種子の駆除を図る消毒法である（図1-1、図1-2）。わが国では30年以上前に導入され、農薬を使わない、もっとも手軽な土壌消毒法のひとつとして広く知られている。熱を利用した土壌消毒法には他に、「蒸気消毒法」や「熱水土壌消毒法」等も開発されたが、太陽熱消毒は、化石燃料を用いて加熱した水を用いるこれら手法に比べ自然エネルギーを活用する省資源な方法であり、また、設備投資を必要としない利点がある。



図1-1 太陽熱消毒の様子（左：施設試験圃場、右：露地試験圃場）



①かん水し土を湿らせる ②シートを圃場に運ぶ ③シートを土にかぶせる ④シート被覆は数週間以上継続

図 1-2 太陽熱消毒の手順

太陽熱消毒は、クロルピクリンやヨウ化メチルなど各種の臭化メチル代替農薬に比較して、近隣住民や営農者自身への悪影響がない。また、農産物の消費地においては、高品質で、しかも安全・安心な農作物への期待から有機農業等に対する関心が高く、有機 JAS 認証制度やエコファーマー等の取り組みが増加し、農薬を使わない土壌消毒法にとって追い風となっている。このように、太陽熱消毒は、臭化メチル代替消毒技術として有望である。

しかし、太陽熱消毒には、気象条件によっては十分に地温が高まらず、消毒効果が不安定であるという懸念があった。そのため、高地温を確保するための被覆方法などの改良が検討された (2.2 節)。その改良の 1 つの到達点が、本研究で研究対象とした宮崎型改良陽熱消毒(西原, 2008)である。宮崎型では、施肥・耕起・作畝の後に太陽熱消毒し、消毒後には耕起せず、そのまま定植する (図 1-3)。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が耕土層 (以下、作土) へ混入することを防ぎ、防除効果を高める。

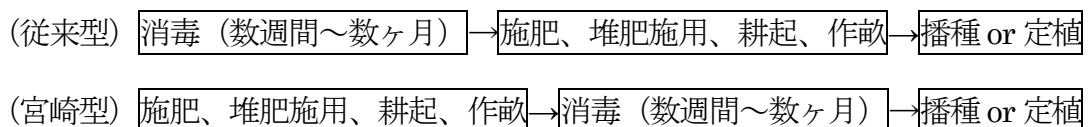
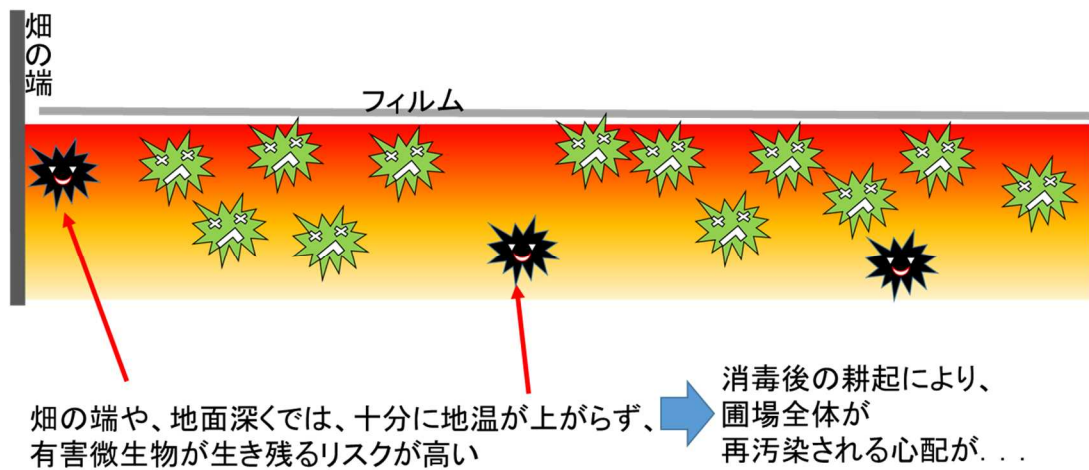


図 1-3 従来型太陽熱消毒と宮崎型改良陽熱消毒の違い

宮崎型は、そのような防除面でのメリットがある一方で、施肥を消毒前に行うために、太陽熱消毒が土壤中の養分動態に及ぼす影響を事前に考慮する必要性が生じるといふデメリットがある（図1-4）。また、従来型では消毒後の基肥施用時に堆肥を混和し硝化菌などの有用微生物の回復を図っていたが、その工程がないため、有用微生物の回復についても、従来型よりも注意を要する。

従来型太陽熱消毒では・・・



本研究で扱う宮崎型改良陽熱消毒では・・・

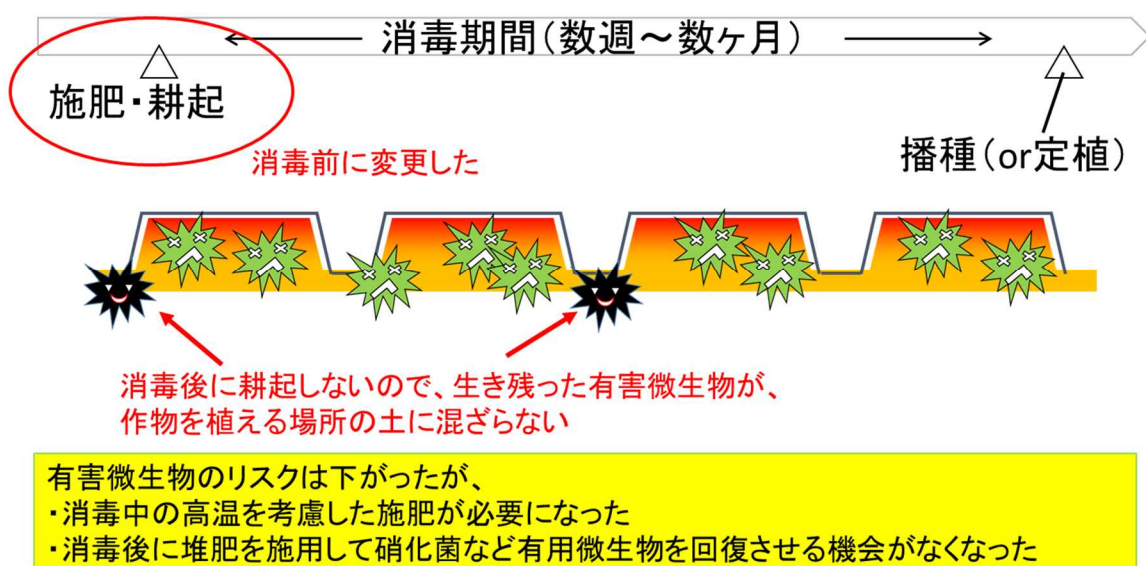


図1-4 宮崎型太陽熱消毒のメリットとデメリット

太陽熱消毒中の地温は地表面に近いほど高く、深さ 5~10 cm では 50°C を超える高い日最高地温が報告されている（具体的データは 2.3 節で示す）。太陽熱消毒中の高い地温は、作物の必須元素である窒素の動態にも大きな影響をもたらすと予想できる。しかし、太陽熱消毒の病害虫防除効果に関する研究は数多く報告されているものの、養分動態に関する知見は乏しく、一般化された情報としては、通常の畑地では微生物の働きにより速やかに進行する硝化（アンモニウム態窒素（以下、 $\text{NH}_4\text{-N}$ ）から亜硝酸態窒素（以下、 $\text{NO}_2\text{-N}$ ）、硝酸態窒素（以下、 $\text{NO}_3\text{-N}$ ）への変化）が抑制されること（2.4 節）、その対策として、消毒後に堆肥を施用して硝化菌数を回復させることが推奨されている程度であり、その他の太陽熱消毒時に求められる肥培管理への配慮については、主に生産者の経験則にまかされていた。

しかし、近年では、現場ごとの土壌や施用有機質資材（家畜ふん堆肥や有機質肥料）の特性を、化学分析により評価し、適正施肥につなげる技術が生産現場にも普及しつつある（2.5 節）。また、地温のデータロガーが低価格化するなど、生産者レベルで土壌中の環境条件を計測しうる状況になってきた。このことは、太陽熱消毒の土壌中環境条件の特徴を明らかにした上で、通常的地温条件で検証された各種診断技術や観測手法を、太陽熱消毒を実践する農地においても適用できるように改良、検証することができれば、植物の健全な生育に資する土作りと施肥量の適正化による環境負荷低減の取り組みが普及可能であることを示す。

1.2 本研究で取り組む課題

太陽熱消毒は土壌中の有害生物の防除技術として捉えられてきたが、消毒中の高い地温は養分動態にも影響すると考えられる。太陽熱消毒後の土壌中に蓄積する無機態

窒素量を見積もり、施肥量を適正化することができれば、土壌中の過剰な養分蓄積による作物への害や環境負荷を低減でき、化学肥料使用量を減らして施肥コストの低減にもつながる。

すでに、既存の土壌・有機質資材の診断によって、施肥量の適正化を図る技術が開発されている状況はあるが、これら診断技術は、通常の農耕地で想定される地温で検証されたのみであり、太陽熱消毒で想定される特殊な環境条件下において、その有効性は検証されていない。

以上の課題を踏まえ、本研究では、

- 1) 太陽熱消毒条件下における土壌環境条件と土壌中での窒素動態の特徴を明らかにすること
- 2) 太陽熱消毒中の高地温条件下における土壌や施用有機質資材の窒素無機化量を評価するため、高温条件下での培養実験を行い、データベース化すること
- 3) 太陽熱消毒後の栽培における施肥量適正化のために、土壌・有機質資材の診断技術を開発すること

以上を目指す。

1.3 論文の構成

本論文は6章で構成されており（図 1-5）、それぞれの内容は以下のとおりである。

第2章では、既往文献から、太陽熱消毒中の土壌環境を整理し、その条件下において想定される土壌中の窒素動態について整理、考察した。第3章では、太陽熱消毒が硝化に関わる微生物の特性に及ぼす影響を明らかにした。第4章では、太陽熱消毒を想定した高地温条件下において、多様な土壌および資材を培養実験に供し、そのとき

の窒素無機化の特性をデータベース化した。第5章では、土壌窒素無機化量に太陽熱消毒の高地温が及ぼす影響をモデル解析した。また、土壌の簡易な化学分析に基づいて、土壌ごとの窒素無機化量の違いを推定するための手法を検証した。第6章では結論を記す。また、オンサイトでの実験（圃場試験）の概要と調査方法、地温データ等を整理し付録とした。

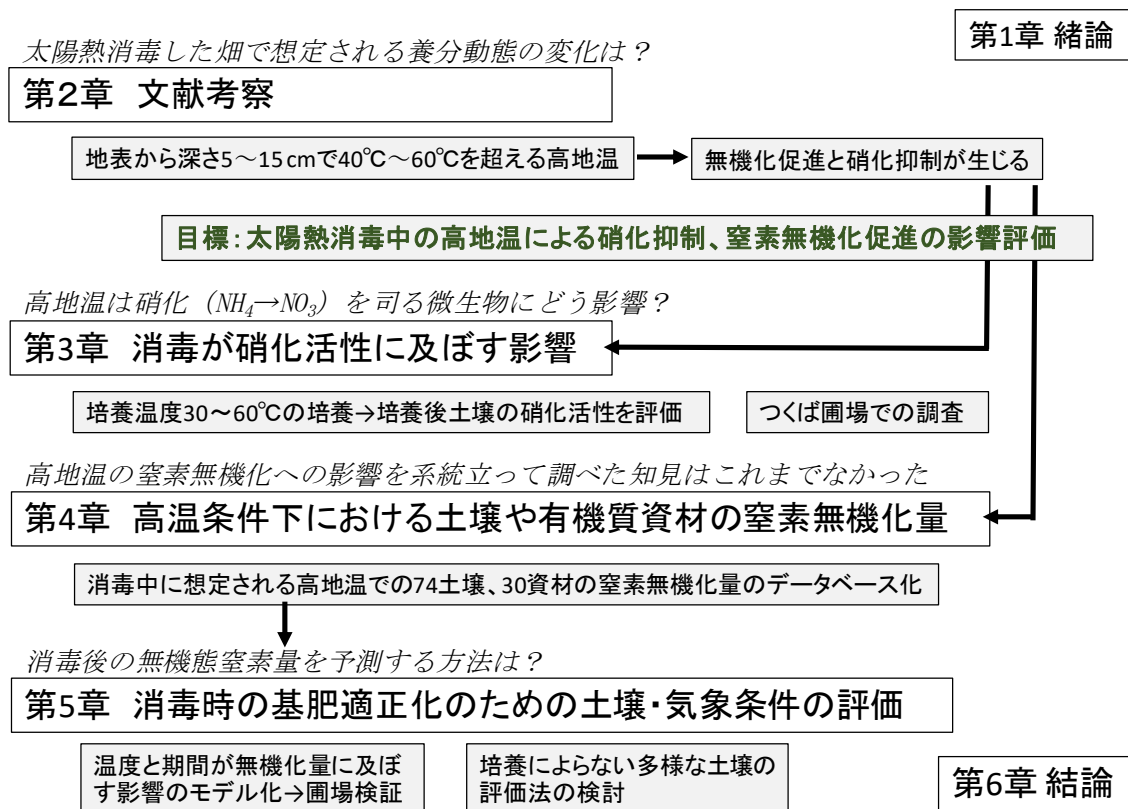


図 1-5 論文の構成

第2章 文献考察

2.1 概要

太陽熱消毒中の養分動態に関する研究は少ないが、太陽熱消毒の病害虫防除技術としての効果は多く研究されている。本章ではまず、それらの報告をもとに、太陽熱消毒の手法やそのときの地温、土壌水分含量などの条件を整理した(2.2節、2.3節)。また、太陽熱消毒やそれに近い高地温条件が窒素動態に及ぼす影響を整理した(2.4節)。また、土壌および堆肥など有機質資材の特性を化学分析で評価した結果をもとに、実際の生産現場で施肥量を調整する技術を整理し、また、それを太陽熱消毒を行う生産現場に導入するにあたっての課題を記載した(2.5節)。

なお、図表を含め本章の内容の一部は、一般社団法人日本植物防疫協会発行の「植物防疫」誌に掲載ずみの内容(井原, 2016)から転載した。

2.2 太陽熱消毒の手法とその改善の系譜

太陽熱消毒以前には、夏季にハウスを密閉し地温を高める「ハウス密閉処理」があった。このハウス密閉処理に加えて、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のが「太陽熱消毒」である。太陽熱消毒の効果を高めるために、地温を確保するための手法が検討され、地表面を覆うフィルム資材は黒より透明のビニルが良く、厚みのあるものほど地温が高まりやすいが、0.05 mm 厚程度で十分である(和歌山県農業試験場ら, 1985a)こと等が示された(なお、生産現場では他の用途で使用後の古い透明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)。高土壌水分含量のほうが下層に熱が伝わりやすく消毒効果

が高い(江種ら, 2008)ため、消毒する畑にかん水設備があれば十分にかん水した後、かん水設備がなければ梅雨のまとまった降雨の後に消毒を開始するのが一般的である。適切な土壤水分条件は太陽熱消毒が先進的に導入された近畿や九州等の一部地域・土壤では指針が示されている。小玉・宮本 (1982)や、和歌山県農業試験場ら (1985a)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して示唆に富む。

高地温が長期間継続するほど作物病原体となる微生物等へのダメージは大きい、消毒対象とする作物病原体ごとに、死滅条件は異なる。そのため、これら様々な病原体を培地や土壤、植物片などに接種し、高温で培養した後に生残した病原体の数や罹病性を確認する試験が行われている。また、圃場においてその検証が行われている。農林水産省農林水産技術会議事務局 (2001)、関東東山東海地域技術連絡会議 (1982)、伊藤ら (1978)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一定の研究蓄積がある。その後、第1章でも述べたとおり、消毒後に、消毒効果が十分に行きわたっていない下層土が作土に混入することを防ぐ改良が行われた。

2.3 太陽熱消毒中の地温と土壤水分

太陽熱消毒中の最高地温は地表面に近いほど高く、深さ 5~10 cm では 50℃を超え、また、深さ 15 cm でも 40℃を超える観測値が報告されている (表 2-1)。40~50℃を超える地温は、国内の一般的な農耕地土壤の地温よりもかなり高く、太陽熱消毒中の土壤中環境条件を特徴付けるものである。

太陽熱消毒中の土壤水分含量の推移を示した報告はほとんど皆無であるが、前節で述べたとおり、消毒開始時にはかん水し、土壤が保持できる最大量まで土壤水分含量

を高めることから、その後、水が地下へ浸透したり蒸発したりするとしても、消毒中の土壌水分含量は比較的高い状態にあると考えられる。

表 2-1 既往報告における太陽熱消毒中の最高地温（単位：℃）

地表 面	深さ						計測地	引用 文献
	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm		
露地								
51			37				神奈川	伊藤ら (2000)
75		53		47		39	京都	萩森ら (2007)
	55	50		41			滋賀	清水 (1987)
	53	48	45				和歌山	家村 (1986)
	51		41				長崎	坂口ら (1982)
		50		43			アメリカ	Stapleton (2000)
	55		43			37	アメリカ	Pullman ら (1981)
	43		42	35			インド	Coates-Beckford ら (1997)
64				38			イタリア	Bonanomi ら (2008)
施設								
72		60				52	奈良	田中・草刈 (1978)
56			43				大阪	田中・草刈 (1978)
		54				44	高知	西内ら (1978)
	52	47	43	43			和歌山	和歌山県農業試験場ら (1985b)
72						49	和歌山	江種ら (2008)
				48			宮崎	白木ら (1998)

一部の数値は引用元文献のグラフから読み取った

2.4 太陽熱消毒が窒素動態に及ぼす影響

2.4.1 土壌中窒素動態の概要と本節の目的

前節において、太陽熱消毒中の最高地温は地表面からの深さ 5~15 cm において 40~50℃を超えることを述べた。農耕地において耕され、肥料が混和される一般的な土壌の層（いわゆる作土）は、農地毎の土壌特性や耕起に用いる農機、生産者の意思に

よって幅があるが、一般的には 15 cm 程度と思われる。すなわち、太陽熱消毒では、生産者が施肥による養分のコントロールを行う作土において、40～50℃の極めて高い地温環境になり、土壌中の窒素動態が影響を受けると考えられる。そこで、本節では、作土中における窒素動態の概要と、太陽熱消毒の影響について既往の知見を整理する。

図 2-1 に、作土中における主な窒素形態と変化を示す。土壌中においては、土壌有機物（非生物の土壌腐植物質や人為的に施用された有機質資材など）や土壌微生物に含まれる窒素が無機化し、生じた $\text{NH}_4\text{-N}$ は硝化により $\text{NO}_3\text{-N}$ に変化し、降雨に伴い作物が利用できない深層土壌に溶脱する。また、土壌中では、その他にも様々な窒素形態の変化が起きる。以降の節では、主要な窒素形態の変化ごとに、太陽熱消毒の影響を記述する。

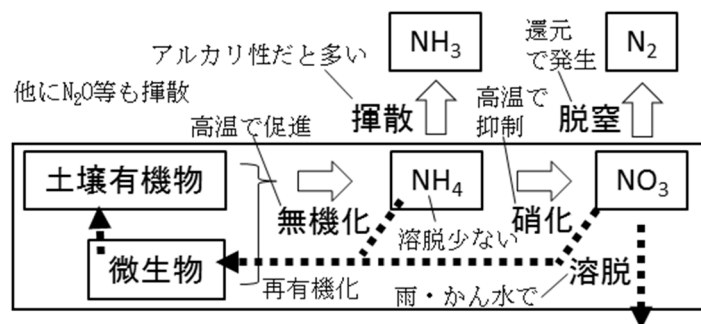


図 2-1 主な窒素形態とその動き

2.4.2 窒素無機化への影響

太陽熱消毒後の土壌において $\text{NH}_4\text{-N}$ が消毒前よりも増える場合があることが報告されている (Chen・Katan (1980); Stapleton ら (1985))。太陽熱消毒とは条件が異なるが、島本ら (1995)は、窒素の安定同位体 (^{15}N) で標識した土壌を 50～200℃で 10～20 日熱処理したときに、熱で死滅した土壌微生物と、非生物の腐植物質の双方から

無機態窒素が放出されたと報告している。また、Hwang・Frank(1938)は、50℃の高い培養温度は、微生物バイオマス量の低下をまねく一方で、高温処理後の土壤中で無機態窒素が増加したと報じている。これらの知見から、太陽熱消毒中の高地温は、土壤中の生物、非生物に由来する窒素の無機化を促進すると推察される。

2.4.3 硝化への影響

硝化は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ から $\text{NO}_2\text{-N}$ (アンモニア酸化)、 $\text{NO}_2\text{-N}$ から $\text{NO}_3\text{-N}$ (亜硝酸酸化) への窒素の形態変化である。硝化が抑制され土壤中に過剰な NH_4 が蓄積すると、植物に生理障害を起こすアンモニアガスが発生することがある。また、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は $\text{NH}_4\text{-N}$ よりも土壤中で移動しやすいため、降雨に伴う地下への窒素浸透による損失(以下、溶脱)のリスクは $\text{NO}_3\text{-N}$ のほうが高い。そのため、硝化もまた、生産者が施肥を行う上で注目される窒素動態の一つである。通常の畑土壌中では、有機物の窒素無機化や施肥によって土壤中に生じた $\text{NH}_4\text{-N}$ は数週間以内に $\text{NO}_3\text{-N}$ へと変化するが、和田ら(2008)は、太陽熱消毒後の土壌では、アンモニア酸化細菌数やその活性が一時的に低下し、土壤中に $\text{NH}_4\text{-N}$ が蓄積することを報告した。

2.4.4 窒素ガス揮散への影響

窒素の形態変化として、土壌中からガス化して大気へ揮散する変化もある。主なものに、1) 脱窒： $\text{NO}_3\text{-N}$ が還元され窒素ガス(N_2)に変化し揮散する現象、2) アンモニア(NH_3)ガス揮散：高pH、高地温、土壌中における過剰な $\text{NH}_4\text{-N}$ 蓄積などが重なった場合に NH_3 ガスが揮散する現象、3) 亜酸化窒素(N_2O)発生：硝化や脱窒の過程などで生じる N_2O が揮散する現象、がある。

太陽熱消毒あるいはそれを模した実験系で揮散する各種窒素ガスの濃度を計測した北川ら(1980)や河森(1978)は、揮散するガスの中では、脱窒による窒素ガス揮散が

量的に最も多く、NH₃ガス揮散は少なかったことを報告した。N₂Oは一般的に、量としてはN₂やNH₃に比べて少ないが、温室効果ガスであることから注目される。そのため、Nishimuraら(2012)は太陽熱消毒時におけるN₂O発生量を評価している。

2.5 近年の土壌や有機質資材の分析診断による施肥量の適正化技術

2.5.1 土壌診断とは

作物の生育にとって、土壌の状態が好適であるか否かを判断する技術体系として、土壌診断がある。土壌診断の項目は多数あり、各種の実験法によって、土壌の物理的、化学的、生物的な状態を評価する。土壌診断として調べられる基本的な項目に、土壌の無機態窒素含量がある。窒素は作物の必須元素であり、生育への影響が大きい。そのなかでも硝酸態窒素、亜硝酸態窒素(以下、NO₂-N)、アンモニウム態窒素は、無機態窒素と呼ばれ、最も作物に吸収されやすい土壌中窒素形態であることから、pHやECに並んで、基本的な評価項目となっている。

2.5.2 窒素施肥適正化のための土壌可給態窒素の評価

一方で、土壌には、多くの窒素が有機物として含まれる。有機物は徐々に分解して、作物に吸収されやすい無機態窒素が生じる(無機化する)。前述(2.4.2)のとおり、高地温条件下では土壌中の有機物の分解が促進されるため、太陽熱消毒後の施肥においては、土壌有機物の窒素無機化量を評価することが重要になる。

従来、土壌毎に異なる窒素供給力は、一定条件で培養したときの土壌窒素無機化量を指標として比較されてきた。培養の方法は様々ある(Keeney, 1982)が、国内では30℃一定で28日間、土壌水分を最大容水量の50~60%として培養し、その間の土壌窒素無機化量を土壌可給態窒素量と呼んでいる。また、培養に関わる時間や労力を

省くために、化学分析による土壤可給態窒素量の簡易評価法の開発が取り組まれており、近年では、全国の様々な土壤を対象に毒劇物試薬を用いずに、他の主要な簡易評価法よりも精度良く土壤可給態窒素量を推定できる手法(上菌ら, 2012)が開発され、その手法は国内の複数地域で普及しつつある。

しかし、上菌らの方法による評価値に対して、太陽熱消毒で想定される高地温条件下における培養時の窒素無機化量がどの程度に見積もられるかは未検討である。

2.5.3 地温や培養期間が土壤窒素無機化量に及ぼす影響の評価

上菌らの方法は、土壤の可給態窒素含量（30℃4週間培養条件での土壤窒素無機化量）を簡易評価する手法であるが、当然ながら、農耕地の地温は30℃一定ではない。そのため、Arrheniusの法則（あるいは簡易的にはいわゆる Q_{10} 則）を用いて、温度が生物活性に及ぼす影響を指標化する手法が検討された。しかし、この手法を用いた既往の土壤窒素無機化量の評価事例では、熱帯土壤を対象としたSierra (2002)であっても、検証データとして用いる培養実験の最高地温を40℃に設定しているように、太陽熱消毒で想定される高地温条件下での有効性は未検証である。

2.5.4 家畜ふん堆肥の窒素肥効評価

家畜ふん堆肥の肥料的効果は、速効的な部分と、施用1～数ヶ月かけて効果をあらわす緩効的な部分、また、数年かけて効果をあらわす部分がある。過去には、堆肥は長期的に土壤に養分を蓄積する効果や土壤物理性の改善など副次的な効果に主な焦点があてられ、短期的な肥料としての効果はほとんど評価されなかった。しかし近年では、土壤と同様に、家畜ふん堆肥など有機質資材の肥料的効果を、化学分析値をもとに評価する手法も開発が進んでいる。たとえば、牛・豚ふん堆肥の無機態窒素の定量において、塩化カリウム抽出ではなく、塩酸抽出を行うことで、リン酸マグネシウム

アンモニウム態窒素が抽出され、速効性窒素の評価精度が向上すること(棚橋ら, 2010)や、緩効的な窒素肥効の目安として、飼料の評価手法である酸性ディタージェント可溶性有機物含量が有効であること(小柳ら, 2010)などが明らかにされた。

しかし、著者の知る限り、太陽熱消毒で想定される高い培養温度条件で堆肥等有機質資材の培養を行い、高い培養温度が窒素無機化量に及ぼす影響を検討した報告はなく、そのため、開発された資材の診断手法が太陽熱消毒で想定される高地温条件においても有効であるか検証できない状況にある。

2.6 まとめ

太陽熱消毒中の地温は40~50°Cを超える。このような高い地温により、太陽熱消毒後の土壌では硝化抑制が起きることが知られていた。また、土壌有機物の窒素無機化量を増やすと推定された。窒素無機化は、本研究の目標である太陽熱消毒のための施肥の適正化に直接的につながる窒素動態であり、また、硝化は、消毒後の栽培期間における無機態窒素の地下流亡しやすさを決める重要な窒素動態であることから、第3章以降において主要な研究対象とした。

窒素無機化量を推定する具体的な手段として、個々の土壌や有機質資材の特性を評価し、また、温度条件を評価することにより、作物への無機態窒素供給量を評価する手段が開発されているが、それらは、太陽熱消毒で想定される高温では検証されていなかった。

なお、脱窒やアンモニアガス揮散は、排水不良や高pHの土壌では量的に無視できない要因であるが、本研究では扱わず、本研究の実験条件(圃場試験および培養実験)において影響が小さいことを示すための補足的な試験を行うにとどめた。その内容は付録Dに示した。

第3章 消毒が硝化活性に及ぼす影響

3.1 概要

硝化は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ から $\text{NO}_3\text{-N}$ への変化であり、微生物の働きによる。通常の畑土壌では、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は数週間以内に硝化されるが、太陽熱消毒に伴いアンモニア酸化細菌数などが減少し、硝化が抑制されることが知られている(和田ら, 2008)。菌数が減少した影響は数週間から数ヶ月程度継続すると考えられる。土壌中に $\text{NH}_4\text{-N}$ がきわめて過剰に蓄積した場合には、土壌から揮散したアンモニアガスが植物に生理障害を起こす危険がある。また、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は作物への利用しやすさが異なり、どちらを好むかは作物ごとに異なるが、現場では、消毒後土壌中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量が高い場合に作物が窒素をうまく吸えていないと推察されるケースもあるとされ、基本的には硝化抑制は避けるべきである。なお、 $\text{NH}_4\text{-N}$ に比べ $\text{NO}_3\text{-N}$ は土壌への吸着力が弱く、降雨にともなって、作土から作物根が届かない地下へと溶脱しやすいという影響もある。

2.3 節において、太陽熱消毒中の最高地温は消毒を行う場によって異なり、また、地表面ほど高地温であり、下層に向かうほど地温が低下することを示した。しかしながら、硝化抑制の程度を地表面からの深さ別に分けて評価した結果は著者の知る限りこれまで報告されていない。また、近年では地温の計測機器も低価格化しており、生産現場で地温を計測した結果を用いやすい環境も整ってきたから、地温と硝化抑制の関係が明らかであれば、生産現場で地温を計測したときに、硝化抑制の程度の目安が得られると考えられる。しかし、太陽熱消毒で想定される高い日最高地温が数週間継続する条件下で、何°Cまでの高温処理であれば、アンモニア酸化細菌などの硝化を担う微生物が処理後土壌に生残し、硝化活性が回復しうるのかについては、知見が乏しい。さらに、また、太陽熱消毒を繰り返した圃場では、硝化を担う微生物群集の中で

も、高地温条件に適したものが選抜され、太陽熱消毒時の硝化抑制が起こりにくくなるのでは、という指摘もあるが、検証した報告は見られない。そこで、以下および図3-1に示す内容を研究した。

本章では複数の実験を行っているが、まず、そこで共通する分析手法を整理した(3.2節)。次に、30~60°Cの高い培養温度と硝化抑制の関係を室内培養実験により調べた(3.3節)。次に、太陽熱消毒を繰り返した圃場では、太陽熱消毒時の硝化抑制が起こりにくくなるという情報を検証するため、室内培養実験(3.4節)および実際に消毒を数年おこなった圃場における調査(3.5、3.6節)により検証した。また、消毒や施肥、栽培等の処理条件が異なるその他の圃場条件でも検証した(3.7節)(図3-1)。

なお、図表を含め本章の内容の一部は、一般社団法人日本土壌肥料学会が発行するSoil Science and Plant Nutrition誌に掲載ずみの内容(Iharaら, 2014)から転載した。

また、本章では高地温が硝化活性に及ぼす影響を調べるため、一見類似する実験を複数実施したことから、以下に、各実験の概要を整理する(表3-1)。

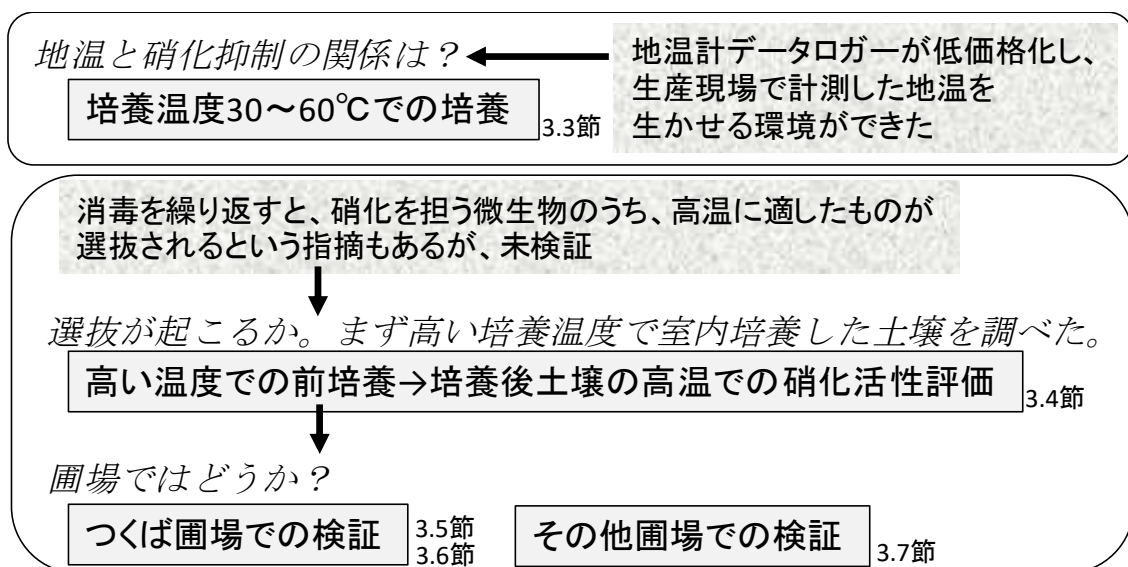


図3-1 第3章の概要

表 3-1 第 3 章の各実験の概要

節	概要
3.3	圃場から採取した土壌に肥料を混和しガラスビンに入れ、培養温度 30、40、50、60℃で 2～6 週間培養し、何℃で硝化抑制するか調べた。また、それらの高い培養温度における培養実験のために「硝化が停止した土壌」について、培養温度を硝化菌の活動に適した 30℃に変更してさらに 90 日間培養し、硝化活性が回復するか調べた。
3.4	3.3 と同じように圃場から採取した土壌を、培養温度 40、45、50℃で 1～28 日間「前培養」したときに、「前培養」後の土壌では、高地温条件下で硝化が進みやすくなるか検証するために、「前培養」前後の土壌に NH ₄ -N を添加し培養温度 40～50℃で培養し硝化活性を調べた。
3.5	3.4 で「培養温度 45℃の前培養後の土壌は、培養温度 45℃における硝化活性が高まった」ことから、太陽熱消毒後の圃場で「45℃における硝化活性」を調べた。
3.6	隣接するが土壌の種類が異なる 3 圃場において、太陽熱消毒中の地温の推移が各土壌でどのように異なるか示すとともに、消毒後の土壌中無機態窒素含量を示すことで、消毒前に計測した各土壌の硝化活性の違いの影響を考察した。
3.7	消毒後に「45℃での硝化活性」が高まる現象を 3.5 とは別の圃場で調べた。

3.2 土壌および肥料の特性評価の方法

3.2.1 土壌の物理性と理化学性

含水率（土壌水分含量を（水分重量）÷（水分+土壌乾物の重量）で表したもの）

は、土壌を 105°C で 1 日間乾燥して求めた。容積重 (単位容積あたりの土壌乾燥重量) は、高さ 5 cm、100 mL 容のステンレス製円筒 (大起理化工業 DIK-1801) に土壌サンプルを採取し、105°C で 2~5 日間乾燥して求めた。pH は、土壌 : 水 = 1 : 2.5 の土壌懸濁液について計測した (土壌養分測定法委員会, 1970b)。

最大容水量は、Hilgard 法を一部変更し計測した。その詳細は、100 mL 容のステンレス製円筒 (大起理化工業 DIK-1801) に土壌サンプル (深さ 5-10 cm) を採取し、薄く水を張ったプラスチック容器内でしばらく静置して、毛管飽和したときの水の量とした。

土壌の全炭素、全窒素含量は、全窒素・全炭素・全水素測定装置 NCH-22F (住化分析センター) を用いて、乾式燃焼法で計測した。

土壌の $\text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量は、10%塩化カリウム抽出 (土 : 液 = 1 : 10) 後、ろ紙 5C (ADVANTEC) でろ過した液中の濃度を、 $\text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$ はヒドラジン還元法、 $\text{NH}_4\text{-N}$ はインドフェノール法の変法で測定する水質自動分析装置 QuAAtro2 (Seal Analytical) によって測定した。なお、本稿では以降、 $\text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$ を硝酸態窒素含量と記載することがある。なお、本研究で培養実験、圃場試験で得た土壌サンプルを複数年にわたり一定数計測した結果、常に $\text{NO}_2\text{-N}$ 含量が $\text{NO}_3\text{-N}$ に対して無視できる程度に少なかったことを確認している。

3.2.2 有機質肥料の理化学性

一般的な実験書あるいは、実用技術開発事業 18053 の成果資料として Web で公開されている分析マニュアル (石岡ら, 2009) に準じて計測した。含水率は、土壌と同様に資材を 105°C で 1 日間乾燥させ求めた。有機質肥料の全炭素・全窒素含量は、全窒素・全炭素・全水素測定装置 NCH-22F (住化分析センター) を用いて、乾式燃焼法で

計測した。NO₂-N+NO₃-N 含量、NH₄-N 含量は 0.5M 塩酸抽出（資材：液=1：10）（石岡ら，2009）したあと、土壌と同じ方法で計測した。

3.2.3 硝化活性

硝化活性は、アンモニウム態窒素を土壌に添加し、一定期間の培養後に生じた硝酸態窒素の量により評価される（井田ら，1970b）。培養の方法は、土壌水分含量を最大含水量の 60 % に調整した土壌を 250 mL 容のポリエチレン製ボトル内に入れ、塩化アンモニウム溶液（一部試験では都合によりアンモニア水あるいは硫酸アンモニウム溶液）で 350 mg-N kg-soil⁻¹ を加え、水分の透過を低減する一方で酸素透過能が比較的高いポリエチレン製フィルムでボトルの口を覆い、30°C で培養した。培養開始 n 日後の硝化活性 (N_A) は以下の式(1)で計算される。

$$N_A = N_n - N_0 \quad (1)$$

ここで、 N_n は培養開始 n 日後の土壌の硝酸態窒素含量 (mg-N kg)、 N_0 は培養開始 0 日後（培養前）の土壌の硝酸態窒素含量である。

3.2.4 アンモニア酸化菌数の計数

硝化を担う主要な微生物であるアンモニア酸化菌数の定量は、MPN 法（木村，1975）に準じた。その詳細は、未風乾土壌 3 g を 27 mL の滅菌水と混ぜ（10 倍希釈液）、同様に 10⁸ 倍希釈液が得られるまで水との混和を繰り返した。それぞれの倍率の希釈液 1 mL とアンモニア酸化細菌計数培地（(NH₄)₂SO₄ を 0.5 g、K₂HPO₄ を 1.0 g、MgSO₄・7H₂O を 0.3 g、NaCl を 0.3 g、FeSO₄・7H₂O を 0.03 g、CaCO₃ を 7.5 g、1L の蒸留水に溶解させたもの）6 mL を混和し、30°C で 35 日培養した。5 反復とした。培養終了後に、NH₄-N が酸化され NO₂-N またはさらに酸化して NO₃-N が生成したことを確認するために、まず NO₃-N を NO₂-N に還元するために培養後の液に亜鉛粉末を添加し、その後 NO₂-N を Griess Ilosvay 溶液で発色させた。

なお、後述（3.6 節）のとおり、培養温度を 45°C に変更した実験も行った。

3.3 太陽熱消毒を想定した 30~60°C の培養温度条件下における硝化の進みやすさ

3.3.1 背景と目的

硝化が抑制（以下、硝化抑制）される温度条件を調べるために、培養温度を 30~60°C の範囲で変化させ、硝化の進みやすさに温度が及ぼす影響を調べた。また、それら各培養温度で培養後の土壌を、硝化に好適と考えられる温度（30°C）でさらに 90 日間培養し、その期間中も硝化抑制が継続するか調べた。

3.3.2 方法

3.3.2.1 供試土壌と資材

供試土壌は 3.5.2.1 で後述する茨城県つくば市の圃場 A の淡色黒ボク土試験区から採取した作土（深さ 0-15 cm）である。作土の理化学性は、全窒素が $4.1 \text{ mg g-soil}^{-1}$ （105°C 乾燥土壌あたり、以下同じ）、全炭素が $46 \text{ mg g-soil}^{-1}$ 、pH（水）が 6.9 であった。採取後、均一化するために、2 mm メッシュのふるいをかけ、含水率は 33%（最大含水量の 60% 程度）に調整して後述する室内培養実験に用いた。供試資材は市販有機質肥料の有機アグレット 6-6-6（朝日工業（株））である。資材の全炭素含量は 330 mg-C g^{-1} 、全窒素含量は 73 mg-N g^{-1} 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量は 43 mg-N kg^{-1} 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量は 426 mg-N kg^{-1} であった。

3.3.2.2 硝化抑制が生じる地温条件の検討のための高温での培養

土壌 120 g に対し、有機質肥料 0.24 g を混和し、容量 100 mL のガラス製ビンに充填した。肥料を混和しない処理も設けた。土壌からの蒸発による土壌水分の損失を低減するため、一般的には培養容器の口に酸素透過性があるフィルムをかける。それに

準じて後述する多くの培養実験でも培養容器の口にフィルムをかけたが、この実験を実施した時点では、培養実験の経験も少なく、フィルムをかけることにより培養容器内の酸素分圧が大きく低下するかもしれないと考えていた。そのため、培養容器にはフタをせず、1/5000 a ワグネルポットにビン 3 個と純水を入れた容器（加湿のため）を入れ、ワグネルポットの口はポリ塩化ビニリデン製ラップ（サランラップ、旭化成）でフタをした。あるいは、1/10000 a ホワイトポットにビン 1 個と純水を入れた容器を入れ、口はポリ塩化ビニリデン製ラップ（サランラップ、旭化成）でフタをした。

土壌のみ、肥料混和土壌それぞれについて、培養温度および期間が異なる 12 処理を設けた。具体的には 30、40、50、60°C で 14、28、42 日間であった。また、設定温度が 30°C 17 時間 50°C 7 時間で繰り返したインキュベーター内でも同様の培養実験を行った。培養中適宜（60°C で週 2 回以上、40°C で週 1 回程度）、蒸発によって失われた土壌水分を純水で補給した。反復は培養期間 14 日間では 2 連、培養期間 28、42 日間では 1 連とした。

3.3.2.3 高温で硝化抑制が生じた後の土壌に対する培養温度 30°C での培養

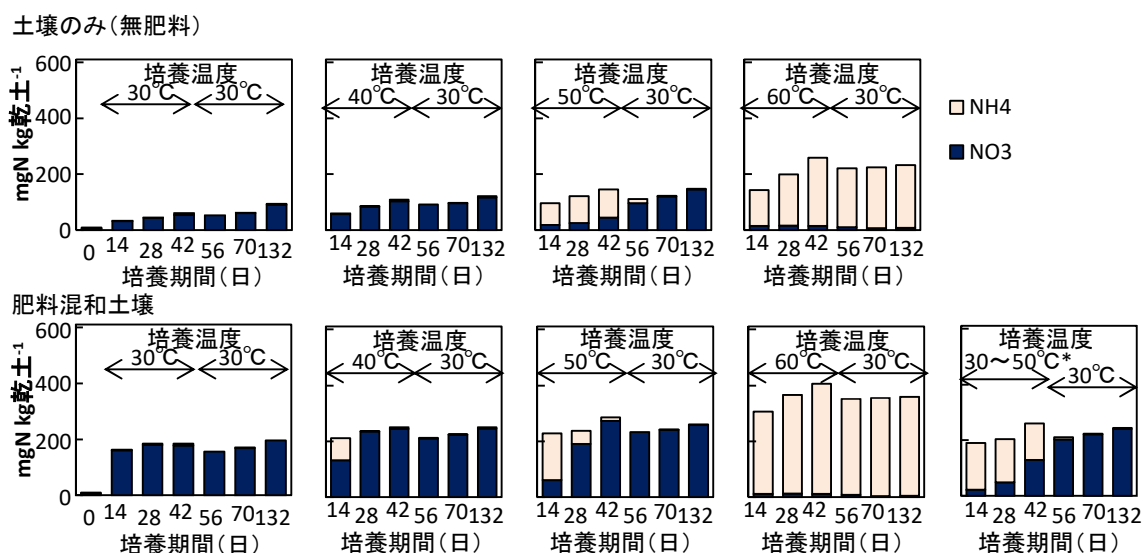
前節のとおり高温で 42 日間培養した後の土壌について、別の容器に取り分け、30°C に戻したあとの無機態窒素の推移を調査した。土壌 13 g（乾土約 10g 相当）をプラスチック製容器（容量 250 mL）に入れ、口にポリエチレン製フィルム（無添加ラップ、宇部フィルム）をかぶせ、輪ゴムで固定し、30°C で 14、28、90 日後（前節の培養開始を 0 日後とするとそれぞれ 56、70、132 日後）の土壌中無機態窒素量を定量した。2 連で培養した。

3.3.3 結果と考察

土壌のみ（無肥料）では、培養温度が 30、40°C では土壌中に $\text{NH}_4\text{-N}$ が蓄積しなかつ

った。培養温度 50°Cでは、培養開始 42 日後まで土壤 NO₃-N 含量は徐々に増えたが、土壤有機態窒素からのアンモニア化成速度に対して硝化速度が追いつかず、土壤中に NH₄-N が蓄積した。培養温度が 60°Cになると硝化は停止し、その後土壤を 30°Cに戻して培養しても硝化しなかった。肥料混和土壤では、土壤のみに比べて培養後土壤の NH₄-N+NO₃-N 含量が多かったが、培養温度 30°Cでは培養開始 14 日後でも土壤中に NH₄-N は蓄積しなかった。培養温度 40、50°Cでもそれぞれ培養開始 28、42 日後には土壤中の NH₄-N 蓄積が解消された。

培養温度 50°Cでは、培養開始 42 日後にかけての硝酸化成量が、肥料混和土壤で土壤のみより速かった。また、肥料混和土壤で設定温度を 30~50°Cで日内変動させたときの培養開始 42 日後までの硝酸化成量は、培養温度が 50°C一定温度のときより遅かった (図 3-2)。このことから、高温培養と同時に肥料混和すると硝化に関わる微生物群集に何らかの影響を及ぼす可能性も考えられたが、この実験の結果のみからは、何が起きたのか明らかではない (後述の 3.5 節以降の研究内容が関連する可能性がある)。



*高温処理期間中、インキュベータを30°C17時間50°C7時間のサイクルで運転した。なお培養開始 14、28日後に培養温度を30°Cに変更した結果および前培養温度を80°Cとした結果は付録Fに示す。

図 3-2 30~60°Cで 42 日間その後 30°Cで 90 日培養した時の土壤無機態窒素含量

3.4 高い培養温度での培養が培養後土壌の硝化活性の至適温度に及ぼす影響

3.4.1 背景と目的

前述のとおり、過去に太陽熱消毒をしたことがある農耕地の土壌では、硝化菌が高地温に慣れ、高地温でも硝化が進みやすくなるのではないかという指摘がある。その検証のため、「高い培養温度で培養した後の土壌」中での硝化活性について、以下の2つの観点から評価した。1)培養温度 40、45、50°Cにおける硝化の進みやすさは、これら培養温度で事前に1~28日間土壌を「前培養」することで、「前培養」前の土壌に比べて変化するのか。2)培養温度 40、45、50°Cで1~28日間、前培養を行った土壌では、硝化の至適温度が変わったのか。すなわち、前節で得られた結果「(前培養前の土壌では)培養温度が30°C以上高いほど土壌中での硝化が進みにくかった」ものが、「(前培養後の土壌では)培養温度30°Cでも、より高い培養温度でも、硝化が進みやすくなった」のか、「(前培養後の土壌では)培養温度30°Cでの硝化が進みにくくなった代わりにより高い培養温度で硝化が進みやすくなったのか」を検討した。

3.4.2 方法

3.4.2.1 供試土壌

圃場 A の淡色黒ボク土試験区において深さ 0-10 cm から採取した土壌を用いた。採取した土壌は 2 mm メッシュのふるいを通したあと、硝化活性を高めるために、試薬の硫酸アンモニウムを $50 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ soil}$ 添加し、培養実験を開始するまでの 18 日間、プラスチック製のコンテナに入れ 30°C 条件で保管した。培養実験を開始した時点の土壌の無機態窒素含量は、 $\text{NO}_2\text{-N}$ が 0 mg kg^{-1} 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が 121 mg kg^{-1} 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ が 1 mg kg^{-1} であった。土壌の含水率は 33% (最大容水量の 60%) であった。

3.4.2.2 前培養の方法

100 mL 容のガラス製ビンに乾土 80 g 相当の土壌を入れ、0.02 mm 厚のポリエチレン製フィルム（積水化成、一連の太陽熱消毒の圃場試験で土壌に被覆したものと同一フィルム）で口を覆い 40、45、50°C で培養した。培養期間は 0、1、7、28 日間（培養温度 40°C では 0、7、28 日間のみ）であり、反復は 2 連であった。

3.4.2.3 前培養後の土壌の硝化活性の評価

前培養（40、45、50°C で 0、1、7、28 日間）後の土壌に $\text{NH}_4\text{-N}$ を添加し硝化活性を評価した。硝化活性の計測方法は 3.2.3 に示したが、培養温度を変更した。すなわち、高温処理後の土壌にアンモニア水を $350 \text{ mgNH}_4\text{-N kg-soil}^{-1}$ 添加した後 2 週間、前培養と同じ温度（40、45、または 50°C）または 30°C で硝化活性を計測した。

3.4.3 結果と考察

前培養の培養温度が 40°C のときには、7 日後、28 日後と前培養の期間が長くなるほど前培養後土壌の「30°C における硝化活性」と「40°C における硝化活性」はともに低下した（図 3-3(a)）。一方で、前培養の培養温度が 45°C あるいは 50°C のときには、前培養 0 日後に比べて、1、7、28 日後の「30°C における硝化活性」が低下した一方で、「45°C における硝化活性」あるいは「50°C における硝化活性」は高まった（図 3-3(b), (c)）。培養温度 45°C で前培養した後の土壌の「45°C における硝化活性」は、前培養の培養期間 7 日後では硝化活性は $274 \text{ mg-N kg-soil}^{-1}$ と、添加した $\text{NH}_4\text{-N}$ 量 $350 \text{ mg kg-soil}^{-1}$ の 78% に達した。このとき、「30°C における硝化活性」が $0 \text{ mg-N kg-soil}^{-1}$ に近かった。これらのことは、約 45°C で高い硝化活性を持つ微生物群が、30°C で高い硝化活性を持つ微生物群とは別に存在する可能性を示唆する。近年では硝化を担う微生物は多様であり (Hayatsu ら, 2008)、従来知られていた *nitrosomonas* や *nitrobacter*

等の細菌(Grunditz・Dalhammar, 2001)のほか、古細菌の役割も指摘されるが、本研究の土壤条件では土壤アンモニウム態窒素含量が高く、土壤アンモニウム態窒素含量の低い環境に強いと考えられる古細菌(Erguder ら, 2009; Prosser・Nicol, 2012; Verhamme ら, 2011)の活動が活発化したというよりは、細菌群集が変化した可能性が高いと推察される。

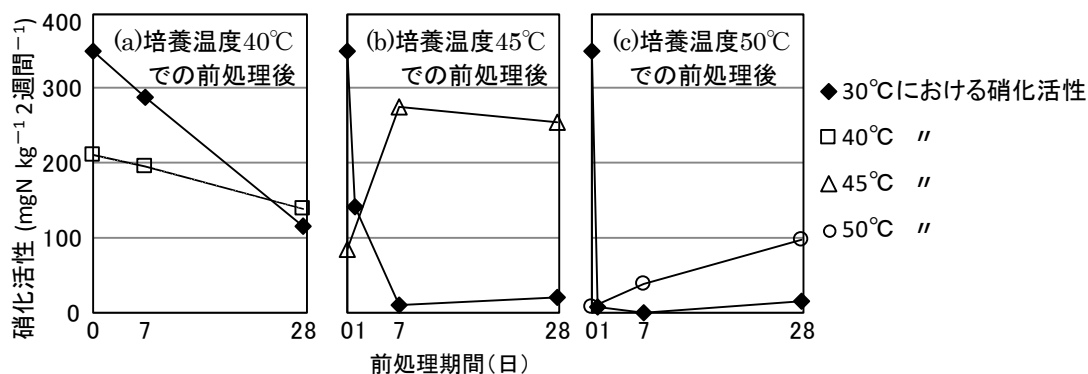


図 3-3 前処理の温度と期間が前処理後土壤の硝化活性に及ぼす影響

3.5 太陽熱消毒後の圃場で採取した土壤の高温 (45°C) における硝化活性

3.5.1 背景と目的

前節では、室内培養実験により、培養温度 45°C で前培養した後の土壤の「45°C における硝化活性」が高まる現象を明らかにした。続いて、太陽熱消毒した圃場においても、45°C における硝化活性が高まるか検討した。また、その影響は翌年まで継続するか検討した。

3.5.2 方法

3.5.2.1 試験圃場

茨城県つくば市の農研機構中央農業研究センター (36°02'N、140°05'E) 内にある圃場 A は、昭和 49 年に、茨城県内の他の場所から異なる 3 種類の土壤を持ち込み、深さ 70 cm まで充填したものである (図 3-4)。このように造成された 3 試験区は、

それぞれ採取地における土壌分類から淡色黒ボク土試験区、多腐植質厚層黒ボク土試験区、灰色低地土試験区と呼ばれている。各試験区の広さは幅 20 m、奥行き 25 m である。この圃場は造成以降、本研究を開始した 2010 年まで、太陽熱消毒を行ったことがなかった。2012 年に未消毒の箇所から採取した作土（深さ 0-15 cm）の全炭素含量は淡色黒ボク土 46 g C kg⁻¹、多腐植質厚層黒ボク土 77 g C kg⁻¹、灰色低地土 17 g C kg⁻¹。全窒素含量は淡色黒ボク土 4.1 g N kg⁻¹、多腐植質厚層黒ボク土 5.1 g N kg⁻¹、灰色低地土 1.7 g N kg⁻¹。pH は 淡色黒ボク土 6.8、多腐植質厚層黒ボク土 6.2、灰色低地土 6.8 であった。

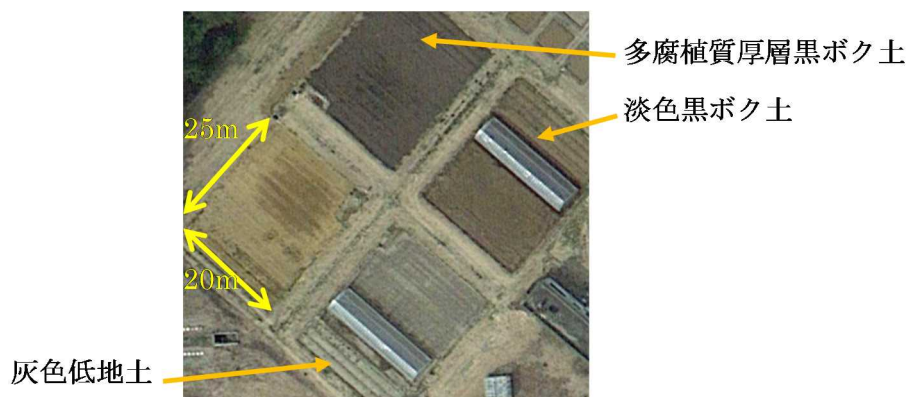


図 3-4 つくば露地圃場の概要

3.5.2.2 太陽熱消毒の方法と試験枠の設置

2012 年の 7 月に、圃場 A の淡色黒ボク土、多腐植質厚層黒ボク土、灰色低地土試験区において、それまで太陽熱消毒を行ってこなかった場所から深さ 0-10 cm の土壌を採取した。採取した土壌は均一化のため、4 mm メッシュのフルイでふるった。土壌を採取した場所の周辺において、土壌を全体に深さ 15 cm まで耕起した後、鍬で幅、長さともに約 100 cm、高さ 5 cm の形状に整え、そこにポリ塩化ビニル製の枠(0.0167 m²、深さ 15 cm)を設置した。太陽熱消毒ありとなしの 2 処理で、3 反復を 3 土壌で行ったので、計 18 枠を設置した。事前に採取した土壌を枠内に周辺の土壌と同じ容積

重となるように充てんした。その後、2012年の7月から33~35日間太陽熱消毒を行った。太陽熱消毒なし処理の枠は、2012年の太陽熱消毒を行わなかった以外は同じ条件とした。翌年の6月に、枠内の土壌を深さ15cmまで全て取り出した。採取した土壌をよく混和したあと、45°Cにおける硝化活性を計測した。また、それぞれの土壌サンプルにおけるアンモニア酸化細菌数を、無機栄養塩培地で培養する一般的な硝化菌数の計数法(木村, 1975)、方法の詳細は3.2.4を参照)において、培養温度を45°Cに変更し計測した。

3.5.3 結果と考察

3.5.3.1 前年に消毒した区と未消毒区における45°Cにおける硝化活性の比較

3種類の土壌の試験区いずれにおいても、2012年に太陽熱消毒を行った処理区の土壌は、太陽熱消毒を行わなかった処理区の土壌に比べて、2013年に採取した土壌に添加したNH₄-Nの45°Cにおける硝化が早かった(図3-5)。

土壌中において、典型的な硝化菌は35°C以上で著しく活性が落ちるMyers(1975)とされるが、太陽熱消毒やそれに類する高い地温が、農耕地土壌において高温での硝化活性を高め、その効果が消毒翌年まで持続するとする報告は、著者の知る限り本研究がはじめてである。

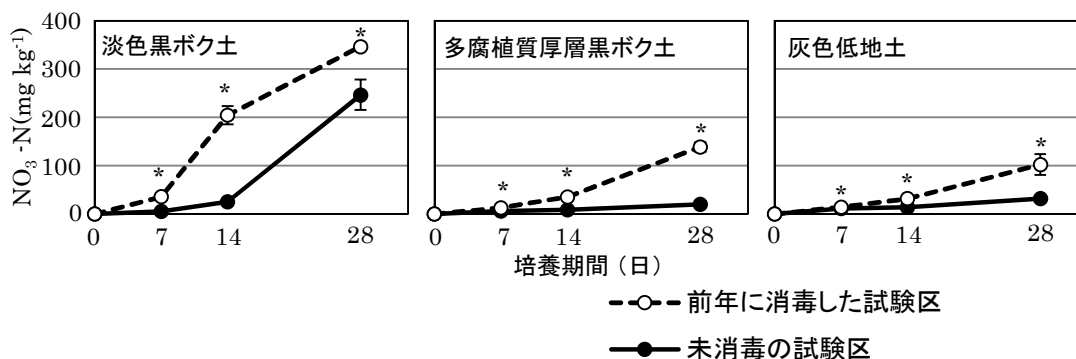


図3-5 2012年に消毒した処理区と未消毒の試験区で翌年に採取した土壌の45°Cにおける経時的な硝酸化成量

3.5.3.2 前年に消毒した区と未消毒区における硝化菌数の比較

前年に消毒した土壌では、未消毒土壌に比べて培養温度 45°C で計測されるアンモニア酸化細菌数が多かった（淡色黒ボク土試験区、表 3-2）。この結果は、前節において、前年に消毒した土壌において培養温度 45°C における硝化が進みやすかった原因が、45°C で高い硝化活性を持つ硝化細菌の増加を要因とするものであることを示唆する。

表 3-2 45°C で計数されるアンモニア酸化細菌数の消毒前歴による違い

	乾土 1 g あたり、（平均値）±（標準誤差）	
	前年に消毒した試験区	未消毒の試験区
アンモニア酸化細菌数（45°C）	2935 ± 1772	15 ± 5

3.6 消毒中の地温と消毒前後の土壌の 30、45°C における硝化活性への影響

3.6.1 概要

茨城県つくば市の圃場 A において、太陽熱消毒を 2010～2012 年の 3 カ年行った。目的は、太陽熱土壌消毒中の地温条件を示すとともに、太陽熱消毒が消毒後土壌における硝化抑制（一般的な手法で計測された硝化活性（培養温度 30°C）の低下により評価）と、培養温度 45°C における硝化活性に及ぼす影響を示すことである。

3.6.2 方法

3.6.2.1 太陽熱消毒の方法

圃場 A の淡色黒ボク土試験区、多腐植質厚層黒ボク土試験区、灰色低地土試験区において太陽熱消毒を行った。各試験区の基本的な土壌理化学性は前述（3.5.2.1）のとおりである。各試験区に、2010～2012 年のあいだに、以下の 3 処理区を設けた。(1) 毎年太陽熱消毒し有機質肥料（後述）を施用（処理 SF）。(2) 2010、2011 年には太陽熱消毒せず有機質肥料を施用し、2012 年は太陽熱消毒し有機質肥料を施用（処理 UF）。(3) 太陽熱消毒せず有機質肥料も無施用（対照）。

太陽熱消毒は各年1回行った。各年の消毒期間は以下のとおりである。2010年は、6月15日に消毒を開始し、淡色黒ボク土試験区では8月16日まで、多腐植質厚層黒ボク土試験区では8月4日まで、灰色低地土試験区では8月2日まで。2011年は、6月23日に消毒を開始し、淡色黒ボク土試験区では8月1日まで、多腐植質厚層黒ボク土試験区では8月4日まで、灰色低地土試験区では7月26日まで。2012年には7月3日に消毒を開始し、淡色黒ボク土試験区では8月9日まで、多腐植質厚層黒ボク土試験区と灰色低地土試験区では8月16日まで、茨城県内のニンジン有機栽培に取り組む生産者が実施されている方法を参考に、太陽熱消毒した(図3-6、調査日程の詳細は付録A)。土壌を深さ15cmまで耕起後、市販有機質肥料である有機アグレット6-6-6(朝日工業)を2010年には 16.5 g-N m^{-2} 、2011、2012年には 15 g-N m^{-2} 施用した。その後、耕耘機(クボタTA-800)で幅100cm、高さ5cmの形状に土壌を成形しつつ、0.02mm厚の透明フィルムで被覆した(図3-6)。対照区では、同じ期間、施肥・畝立てのみ行いフィルム被覆しなかった。消毒期間以外は作物は栽培せず、毎年6月～翌年2、3月頃までは手作業で除草し、3～5月には雑草の抑制のため数回、耕耘機で耕起した。



図3-6 太陽熱消毒の様子

3.6.2.2 地温の観測

地温計を設置するため、いったん被覆したフィルムを端から2m程度はがし、畝表面から深さ5、15cm(一部年次、試験区では1cmでも)の位置に、地温センサTR-

0406、TR-5106、1220、5320、5220 (T and D Corp.、長野、日本) のいずれかを設置したあと、再度畝にフィルムをかぶせた。地温は1時間毎に記録した。

3.6.2.3 土壌のサンプリング

2012年には無機態窒素の定量および硝化活性の計測のため、土壌サンプルを採取した。採取方法は、(1)太陽熱消毒開始前については、耕起後すぐ、太陽熱消毒開始の数時間前に、深さ0-15 cmの土壌を採取した。(2)太陽熱消毒の終了直後、終了約11週間後には、深さ0-5 cm、5-10 cm、10-15 cmの土壌を採取した。高さ5 cm、100 mL容のステンレス製円筒(大起理化工業 DIK-1801)を用いて同じ処理区内の同じ深さ6~8箇所から採取した土壌を混ぜて(コンポジットして)1サンプルとした。太陽熱消毒の終了約4週間後には、深さ0-5 cm、5-10 cmから同様に採取した。採取後の土壌はサンプルの均一性を高めるため、2 mmメッシュふるいにかけた。その際、微生物性への影響を最小限にするため乾燥はせず、また、おおむね1日以内に硝化活性計測のための培養実験に供した。

3.6.3 結果と考察

3.6.3.1 2012年試験期間中の気温と降水量

2012年の太陽熱消毒とその後の土壌調査期間における気温と降水量(圃場Aから約1 km離れた農業環境変動研究センターで観測、http://www.naro.affrc.go.jp/org/ni_aes/aws/)を図3-7に示す。日平均気温は8月に最高で30°Cを観測し、その後11月にかけて低下した。降水量は太陽熱消毒期間中にあたる7月上旬から8月上、中旬には日降水量46 mmの雨が1日あったのを除けば日降水量20 mm以上の降雨はなかった。その後、消毒約4週後の土壌サンプリングを行った9/11~14までに計57 mmの雨が降った。消毒約11週後の土壌サンプリングを行った10/30~11/1までには、さ

らに計 214 mm の雨が降った。

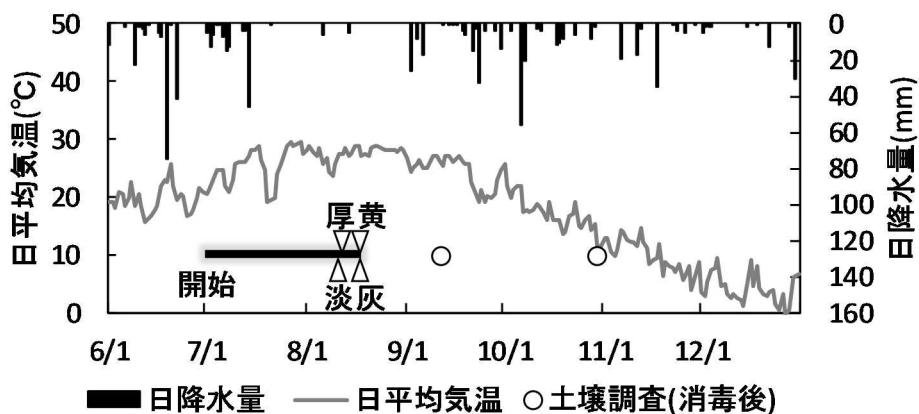


図 3-7 2012 年試験期間中の降水量

3.6.3.2 消毒中の地温

淡色黒ボク土試験区における地温推移を図 3-8 に示す。地温の日変動は浅いほど大きく、深さ 1 cm の最高地温は 60°C 前後であった。対照区に比べて、マルチありの処理区では、深さ 5 cm において日最高地温が 10°C 以上高かった。なお、他の年次の地温計測結果は付録 B に示す。表 3-3 に、多腐植質厚層黒ボク土、灰色低地土試験区の観測値も合わせて示す。淡色黒ボク土、多腐植質厚層黒ボク土は灰色低地土より地温が高かった。これは、土壌によって日光の反射率や熱の伝達特性、水分の保持能等が異なるためと考えられた。

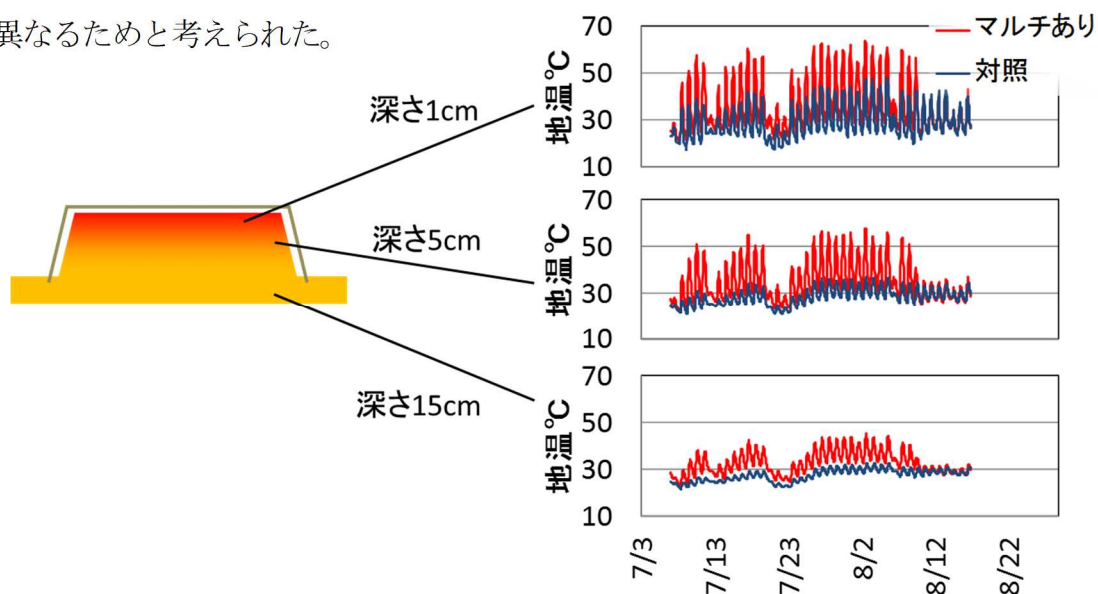


図 3-8 淡色黒ボク土における地温の推移

表 3-3 土壌別、深さ別の最高地温

単位：℃

	深さ1cm		深さ5cm		深さ15cm	
	最高地温	平均地温	最高地温	平均地温	最高地温	平均地温
淡色黒ボク土	64	36	54	35	43	33
多腐植質厚層黒ボク土	67	37	58	36	43	33
灰色低地土	57	35	51	32	42	31

深さ 5 cm の最高地温は 51、54、58℃、深さ 15 cm の最高地温は 42、43、43℃であった。表 2-1 で示した既往報告と比較して同程度の最高地温となり、太陽熱消毒の環境条件を再現した適切な試験条件であったと考えられる。

3.6.3.3 消毒後の作土中における無機態窒素の深さ別の含量と硝化活性

前節で示したとおり、地表面に近いほど太陽熱消毒期間中に高地温に達したことを反映して、いずれの処理区においても、深さ 5-10 cm の土壌中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量は深さ 0-5 cm に比べて少なかった。消毒終了直後において、深さ 0-5 cm の土壌は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ を 60~203 mg kg^{-1} 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ を 161~313 mg kg^{-1} 含有した (表 3-4)。2012 年太陽熱消毒直後の土壌 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量は、2010、2011 年に太陽熱消毒した処理 SF において、2010、2011 年に太陽熱消毒しなかった処理 UF よりも少ない傾向があった。2012 年太陽熱消毒直後の土壌 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量が最も多かったのは多腐植質厚層黒ボク土試験区の処理 UF であり、この試験区では消毒前土壌の硝化活性が 30、45℃いずれについても、全処理区中最も低かった (表 3-5)。この結果は、前年までの消毒履歴が硝化を担う微生物活性に影響を及ぼし、それが翌年以降の太陽熱消毒中の硝化の進みやすさに影響する、という仮説を支持する。

表 3-4 2012 年消毒前後の深さ別、時期別の土壤中 NH₄-N、NO₃-N 含量

	深さ (cm)	淡色黒ボク土		多腐植質厚層黒ボク土		灰色低地土	
		UF	SF	UF	SF	UF	SF
<i>NH₄-N (mg kg⁻¹)</i>							
消毒前	0-15	6	8	7	6	1	8
消毒直後	0-5	140	120	203	177	116	60
	5-10	3	3	48	5	2	1
	10-15	2	2	2	2	1	1
消毒約4週後	0-5	113	64	193	124	91	61
	5-10	10	7	33	18	6	1
消毒約11週後	0-5	19	3	160	27	49	13
	5-10	2	6	6	2	1	1
	10-15	1	4	2	1	1	0
<i>NO₃-N (mg kg⁻¹)</i>							
消毒前	0-15cm	9	6	7	6	9	6
消毒直後	0-5cm	180	313	236	201	161	203
	5-10cm	123	95	87	109	54	45
	10-15cm	65	51	46	58	52	35
消毒約4週後	0-5cm	91	120	174	236	265	241
	5-10cm	224	157	98	106	60	53
消毒約11週後	0-5cm	28	13	18	22	7	7
	5-10cm	28	11	26	17	13	37
	10-15cm	43	50	31	33	42	56

表 3-5 2012 年太陽熱消毒後土壌の硝化活性 (30°C) と 45°Cにおける硝化活性の各土壌および処理区における比較

時期	Depth (cm)	淡色黒ボク土		多腐植質厚層黒ボク土		灰色低地土	
		45°C	30°C	45°C	30°C	45°C	30°C
2010 年と 2011 年は消毒せず 2012 年に消毒した処理区 (UF)							
太陽熱消毒前	0-15	105 ± 22	274 ± 33 ‡	7 ± 0	154 ± 5 ‡	15 ± 1	129 ± 9 ‡
	0-5	113 ± 7	29 ± 3 †	1 ± 1	1 ± 2	14 ± 1	1 ± 2 †
消毒直後	5-10	182 ± 8	159 ± 1 †	51 ± 0	68 ± 4 ‡	53 ± 6	48 ± 2
	10-15	67 ± 2	209 ± 37 ‡	27 ± 0	95 ± 1 ‡	19 ± 2	61 ± 7 ‡
2010~2012 年いずれも消毒した試験区 (SF)							
太陽熱消毒前	0-15	355 ± 10	281 ± 3 †	76 ± 18	248 ± 12 ‡	111 ± 13	115 ± 6
	0-5	242 ± 47	35 ± 2 †	91 ± 1	13 ± 1 †	61 ± 7	5 ± 2 †
消毒直後	5-10	340 ± 5	212 ± 1 †	167 ± 1	107 ± 17 †	168 ± 2	26 ± 3 †
	10-15	347 ± 4	245 ± 33 †	111 ± 7	118 ± 7	132 ± 2	59 ± 27 †

3 反復で培養した結果の算術平均値 ± 標準偏差 (n=3)

†45°C における硝化活性が 30°C における硝化活性より有意に高い (t 検定、 $P \leq 0.05$)。

‡30°C における硝化活性が 45°C における硝化活性より有意に高い (t 検定、 $P \leq 0.05$)。

3.7 消毒後に 45°Cにおける硝化活性が高まる現象に及ぼす肥料や堆肥施用の影響

3.7.1 方法

施肥は、硝化を担う微生物にとって基質である $\text{NH}_4\text{-N}$ の供給であり、また、堆肥の施用は、硝化菌を接種する効果も期待され従来から行われてきた。そこで、太陽熱消毒時に有機質肥料や堆肥を施用した場合と非施用の場合について、45°Cでの硝化活性を比較した。

硝化活性の調査方法は、土壤に $350 \text{ mgNH}_4\text{-N kg}^{-1}$ を添加し、実験 1 では 45°Cで 2 週間培養したとき、実験 2 では 45°Cで 1 週間培養したときの硝酸態窒素の生成量を硝化活性とした。

(実験 1) 圃場 A の淡色黒ボク土試験区に 4 つの処理区を設定した。(1) 2010~2011 年の 2 年間、有機質肥料を施用し太陽熱消毒した区(SF)、(2)施肥し、消毒しなかった区(UF)、(3)施肥せず太陽熱消毒した区(SN)、(4)施肥せず太陽熱消毒もしなかった区(UN)である。施肥は市販有機質肥料(有機アグレット 6-6-6、朝日工業)を 2010 年には 16.5 g N m^{-2} 、2011 年には 15 g N m^{-2} 施用した。45°Cにおける硝化活性を 2012 年 7 月に採取した土壤で評価した。

(実験 2) 圃場 A から約 500 m 離れた淡色黒ボク土の露地圃場 N で調査を行った。この圃場では、太陽熱消毒の有無、牛ふん堆肥施用の有無、有機栽培(有機質肥料を施用し無農薬栽培)か慣行(化成肥料を施用し農薬は通常通り用いる)かの 8 処理区を設け、2008~2012 年にレタスとニンジンが毎年栽培されていた。試験区の概要は表 3-6 の脚注に示すが、有機栽培区では、肥料として市販有機質肥料、鶏ふん堆肥、魚かすが施用され、慣行栽培区では、化成肥料が施用されていた。太陽熱消毒区は毎年 1 回行われており(ただし、事情により、有機栽培区では 5 年間毎年消毒したのに

対し、慣行栽培区では 2012 年のみ消毒した)、慣行栽培区のみ、化学農薬 (除草剤、殺虫剤、殺菌剤) が用いられていた。その試験が終了後の 2013 年に土壌を採取し 45°C における硝化活性を計測した。

3.7.2 結果と考察

3.7.2.1 有機質肥料の施用が硝化活性に及ぼす影響 (実験 1)

施肥の有無にかかわらず、太陽熱消毒は 45°C における硝化活性を高めた (図 3-9 中、UN < SN かつ UF < SF)。また、45°C における硝化活性は、消毒前に施肥を行った場合には高い (SF > SN) 一方、消毒せずに施肥だけ行くと低かった (UN > UF)。

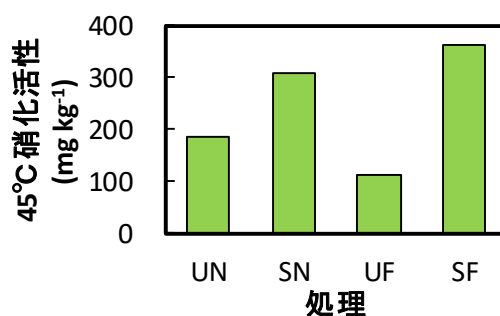


図 3-9 過去の太陽熱消毒、施肥管理が異なる 4 処理における 45°C における硝化活性

3.7.2.2 有機栽培し堆肥施用した圃場の事例 (実験 2)

有機栽培で 2008 年から 2012 年の 5 年間太陽熱消毒を行った処理区では、未消毒の処理区に比べて 45°C での硝化活性が顕著に高かった (表 3-6)。すなわち、45°C における硝化活性が太陽熱消毒により高まる現象は、圃場 A 以外の圃場でも確認できることが明らかになった。慣行栽培では 2012 年に 1 度だけ太陽熱消毒したが、未消毒の処理区との違いは統計的に有意ではなかった。牛ふん堆肥施用区では、太陽熱消毒の有無や有機、慣行の違いによらず、非施用区に比べて、平均値としては 45°C における硝化活性が同じかそれ以上であったが、その差はいずれも統計的に有意ではなかった。

表 3-6 有機栽培または慣行栽培条件下における太陽熱消毒と堆肥施用が 45°Cでの硝化活性に及ぼす影響

処理			45°C硝化活性 mg kg ⁻¹	処理			45°C硝化活性 mg kg ⁻¹
有機	+S ₂₀₀₈₋₂₀₁₂	+M	105 ± 16 a	慣行	+S _{2012のみ}	+M	24 ± 9 a
有機	+S ₂₀₀₈₋₂₀₁₂	-M	105 ± 3 a	慣行	+S _{2012のみ}	-M	9 ± 10 a
有機	-S	+M	19 ± 7 b	慣行	-S	+M	11 ± 5 a
有機	-S	-M	17 ± 1 b	慣行	-S	-M	1 ± 3 a

+S₂₀₀₈₋₂₀₁₂: 消毒あり (2008-2012年)、+S_{2012のみ}: 消毒あり (2012年)、-S: 未消毒

+M: 牛ふん堆肥施用 (2008-2012年)、-M: 堆肥未施用

同じ列において同じアルファベットを付した処理には Tukey の HSD 検定で優位な差がなかった (p<0.05)。

3.8 まとめ

第3章では、太陽熱消毒が硝化活性に及ぼす影響について明らかにした。得られた結果は、以下のように整理できる。

1. 30~60°Cの範囲で培養温度条件を変化させた室内実験の結果、高地温条件ほど硝化は遅れるが、50°Cまでは硝化は停止せず、60°Cでは、硝化が停止し、処理後土壌を30°Cに戻しても、硝化活性は回復しないことが明らかになった。
2. 太陽熱消毒の作土中の地温条件を模した培養温度 45°Cの培養は、培養後土壌において、45°C前後で高い硝化活性を持つ微生物を増殖させる効果があることを見いだした。
3. 圃場においても、太陽熱消毒後、翌年に採取した土壌についても 45°Cにおける硝化活性が高まることが明らかになった。
4. 茨城県つくば市の畑 (圃場 A) の 3 種類の土壌が異なる試験区で太陽熱消毒を行い、そのときの地温を観測した結果、太陽熱消毒中の地温の日変動は地表面に近いほ

ど大きく、深さ 1 cm の最高地温は 60℃前後であった。対照区に比べて、マルチありの消毒区は、深さ 5 cm において日最高地温が 10℃以上高かった。地表面付近ほど高地温であったことに対応して、消毒後には、地表面に近い土層ほどアンモニウム態窒素の土壌中含量が多かった。深さ 0-5 cm の土壌中アンモニウム態窒素含量は、前 2 年間太陽熱消毒した試験区では、未消毒の試験区よりも低い傾向にあった。

5. 以上から、実際の営農現場においても、消毒初年目と、2 年目以降において、太陽熱消毒時の硝化のしやすさが異なる可能性があることを念頭に、肥培管理を行うべきであると結論できる。

第4章 高地温条件下における土壌や有機質資材の窒素無機化量

4.1 概要

第4章では、これまで系統だてて調べられていない、高地温による有機質資材や土壌の窒素無機化の促進効果について、多数資材や土壌を対象に評価した。

第2章で示したとおり、太陽熱消毒中の地温は40～50℃を超える。そのような環境条件下では、土壌有機物や堆肥等有機質資材の分解が促進され、通常的地温条件では長期間かけて生じる窒素無機化が短期間のうちに生じる可能性があると考えられる。本章では、まず共通する分析方法を整理した(4.2節)あと、太陽熱消毒で想定される高地温条件下における土壌有機物(4.3節)および堆肥、有機質肥料等(4.4節)の窒素無機化特性をデータベース化した。供試サンプルの点数は、土壌が74点(風乾土49点、未風乾土25点)、有機質資材が30点(市販有機質肥料5点、家畜ふん堆肥21点、その他4点)である。実験シリーズは、2012年から2015年にかけて18回(予備実験を入れれば23回)行った。

なお、図表を含め本章および次章の内容の一部は、一般社団法人日本土壌肥料学会が発行する日本土壌肥料学雑誌で印刷中の内容から転載した。

4.2 分析方法

4.2.1 土壌の物理性と理化学性

土壌の含水率、pH、全炭素・全窒素含量、 $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量の計測方法は3.2.1に準じた。最大容水量は、4.3.2で後述する土壌74点(表4-1、表4-2)のうち、採取地が熊本(d-AB～d-AMおよびnd-E～nd-P)、福岡(d-AN)、青森(d-A B～d-AMおよびnd-U、nd-V)のものと、和歌山の一部(d-B、d-C、d-N～d-AA)についてはHilgard法(京都大学農学部農芸化学教室、1965)により計測した。採取地

が茨城および愛知のもの (d-AP、d-AU~AW、nd-A、nd-C、nd-Q、nd-R、nd-W および nd-X) は、Hilgard 法を一部変更し計測して計測した。その詳細は、100 mL 容のステンレス製円筒 (大起理化工業 DIK-1801) に土壌サンプル (深さ 5-10 cm) を採取し、薄く水を張ったプラスチック容器内でしばらく静置して、毛管飽和したときの水の量とした。その他の土壌は、独立行政法人農林水産消費安全技術センター (http://www.famic.go.jp/ffis/fert/sub2_7.html) の方法をもとに一部変更した。すなわち、100 mL のメスシリンダーにロートをのせ、これに水で湿した直径 150 mm のろ紙 5 C (ADVANTEC) をおき、ろ紙の中に乾土 (105°C で乾燥した土壌) 30 g を入れ、土壌表面から 100 mL の水を静かに注ぎ、ろ液の滴下終了を確認後、その滴下水量から土壌に保持された水量を求め最大容水量とした。

4.2.2 有機質資材の理化学性

含水率は、土壌と同様に資材を 105°C で 1 日間乾燥させ求めた。粗灰分は石岡ら (2009) のガスコンロで灰皿上に載せた資材を加熱灰化する簡易法に準じた。

堆肥の全炭素含量は、全窒素・全炭素・全水素測定装置 NCH-22F (住化分析センター) を用いて、乾式燃焼法で計測した。全窒素含量は後述するいずれかの分析方法で分析した。1) 全窒素・全炭素・全水素測定装置 NCH-22F (住化分析センター) を用いて、乾式燃焼法で計測。あるいは、2) 硫酸一過酸化酸素分解法 (松永・塩崎, 1989) による湿式分解液のアンモニウム態窒素を、水質自動分析装置 QuAAtro2 (Seal Analytical) によって測定した。

堆肥の $\text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$ は、10%塩化カリウム抽出 (資材 : 液 = 1 : 10) 液を土壌と同じ方法で測定した。 $\text{NH}_4\text{-N}$ は、10%塩化カリウム抽出 (資材 : 液 = 1 : 10) 液と 0.5M 塩酸抽出 (資材 : 液 = 1 : 10 以上) (石岡ら, 2009) の 2 とおりの抽出を行っ

たあと、土壌と同じ方法で濃度を測定し両者を比較した。

4.2.3 酸性ディタージェント法による有機質資材の分解と評価

酸性ディタージェント分解は、自給飼料利用研究会（2009）のろ紙法を一部変更した。その詳細は、ANKOM 社製 F57 フィルターバッグに分析試料約 0.5 g を入れ、シールしたあと、500 mL 容のトールビーカー1 個につきフィルターバッグ 6 個以内を入れ、入れたバッグの個数×50 mL の酸性ディタージェント溶液（硫酸（1+37）に臭化セチルトリメチルアンモニウムを 20 g L⁻¹溶解したもの）を加えたあと、トールビーカーの口を冷却器で覆い、蒸発水量を低減するとともに、それでも蒸発した水分は純水で補いながら 1 時間煮沸した。分解後の試料入りのバッグを熱水とアセトンで洗浄し、乾燥したあとに重量計測し、酸性ディタージェント不溶解物含量（以下 ADF）（mg g⁻¹）を求めた。また、その後灰化して酸性ディタージェント不溶解物中の灰分含量（ADFlash）（mg g⁻¹）を定量した。酸性ディタージェント有機物含量は、以下の式(2)により計算した。

$$1000 - \text{Ash} - (\text{ADF} - \text{ADFlash}) \quad (2)$$

ここで、Ash は粗灰分（mg g⁻¹）。

また、資材の酸性ディタージェント可溶性窒素（以下、AD 可溶性窒素）含量は、資材の全窒素含量と、ADF に含まれる窒素含量の差し引きにより求めた。

4.3 高温条件下における土壌の窒素無機化量

4.3.1 供試土壌

供試土壌は風乾土 49 点（表 4-1）と未風乾土 25 点（表 4-2）の合計 74 点である。ただし、うち 18 点は同じ土壌について未風乾土と風乾土の両方を供試した。各土壌は培養実験開始前にふるいに通した。ふるいの目合いは土壌 nd-A と nd-X は 5 mm メ

ツシュ、その他の土壌は2 mm メッシュであった。

後述する（実験1）では、このうち土壌 d-C、d-T、d-AQ、nd-A、nd-T、nd-V、nd-X を用いた。また、（実験2）では、表 4-1、表 4-2 中の全ての土壌を用いた。

表 4-1 供試土壌一覧（風乾土 49 点。次ページにつづく）

記号	分類 [‡]	採取地	全窒素	全炭素	備考
			mg g ⁻¹	mg g ⁻¹	
d-A	黄色土	静岡	1.2	16	チンゲンサイなど。化成液肥など施用。
d-B	黄色土	和歌山	3.8	32	実エンドウ。施肥情報なし。
d-C	黄色土	和歌山	3.3	27	実エンドウ。施肥情報なし。
d-D	黄色土 [†]	和歌山	*	*	情報なし。
d-E	黄色土 [†]	和歌山	*	*	情報なし。
d-F	黄色土 [†]	和歌山	*	*	情報なし。
d-G	黄色土 [†]	和歌山	*	*	情報なし。
d-H	黄色土 [†]	和歌山	*	*	情報なし。
d-I	黄色土 [†]	和歌山	*	*	情報なし。
d-J	黄色土 [†]	和歌山	*	*	情報なし。
d-K	黄色土 [†]	和歌山	*	*	情報なし。
d-L	黄色土 [†]	和歌山	*	*	情報なし。
d-M	黄色土 [†]	和歌山	*	*	情報なし。
d-N	灰色低地土	和歌山	3.8	45	実エンドウ。施肥情報なし。
d-O	灰色低地土	和歌山	3.9	41	実エンドウ。施肥情報なし。
d-P	灰色低地土	和歌山	3.1	35	実エンドウ。施肥情報なし。
d-Q	灰色低地土	和歌山	4.0	43	実エンドウ。施肥情報なし。
d-R	灰色低地土	和歌山	2.7	27	実エンドウ。施肥情報なし。
d-S	灰色低地土	和歌山	2.0	21	実エンドウ。施肥情報なし。
d-T	灰色低地土	和歌山	2.1	23	実エンドウ。施肥情報なし。
d-U	灰色低地土	和歌山	1.9	16	実エンドウ。施肥情報なし。
d-V	灰色低地土	和歌山	2.0	20	実エンドウ。施肥情報なし。
d-W	灰色低地土	和歌山	1.5	17	実エンドウ。施肥情報なし。
d-X	灰色低地土	和歌山	1.8	21	実エンドウ。施肥情報なし。
d-Y	灰色低地土	和歌山	1.3	12	実エンドウ。施肥情報なし。
d-Z	灰色低地土	和歌山	1.5	20	実エンドウ。施肥情報なし。
d-AA	灰色低地土	和歌山	1.5	15	実エンドウ。施肥情報なし。

‡土壌分類は e-土壌図 (<http://soil-inventory.dc.affrc.go.jp/>、2017 年 11 月時点) により地図上で調べた採取地周辺の代表的な土壌タイプと、採取した土壌やその圃場の環境条件から判断した。

*未計測。†同じ圃場から採取した 10 土壌。過去の施肥の影響により可給態窒素含量が異なる。

表 4-1 供試土壌一覧（風乾土 49 点。前ページからのつづき）

記号	分類 [‡]	採取地	全窒素	全炭素	備考
			mg g ⁻¹	mg g ⁻¹	
d-AC	灰色低地土	熊本	2.7	27	キュウリ。施肥情報なし。
d-AD	灰色低地土	熊本	1.9	17	トマト。施肥情報なし。
d-AE	灰色低地土	熊本	2.6	26	トマト。施肥情報なし。 土壌採取前に麦稈がすき込んであった。
d-AF	灰色低地土	熊本	2.0	20	トマト。施肥情報なし。
d-AG	灰色低地土	熊本	2.1	19	トマト。化成肥料、有機質肥料、 その他資材施用。
d-AH	灰色低地土	熊本	1.4	13	イチゴ。肥料は少ない。
d-AI	灰色低地土	熊本	2.3	22	キュウリ。施肥情報なし。
d-AJ	灰色低地土	熊本	2.4	20	キュウリ。通常は化成主体。 椿油粕ペレット散布。
d-AK	灰色低地土	熊本	1.5	16	トマト。施肥情報無し。
d-AL	灰色低地土	熊本	2.2	20	キュウリ。有機質肥料、化成両方を使用。
d-AM	灰色低地土	熊本	1.1	11	イチゴ。肥料はとても少ない。
d-AN	灰色低地土 [§]	福岡	2.9	39	トマト、ナスなど。施肥情報なし。
d-AO	灰色低地土	静岡	1.1	14	チンゲンサイなど。化成液肥など施用。
d-AP	灰色低地土	茨城**	2.1	20	無作付け無施肥 (過去に麦。牛ふん堆肥連用)。
d-AQ	淡色黒ボク土	北海道	5.6	59	牧草。堆肥多量施用。
d-AR	淡色黒ボク土	青森	3.8	49	トマト。施肥情報無し。
d-AS	淡色黒ボク土	青森	1.4	16	トマト。施肥情報無し。
d-AT	淡色黒ボク土	青森	1.4	16	トマト。施肥情報無し。
d-AU	多腐植質 厚層黒ボク土	茨城**	5.3	78	無作付け無施肥 (過去に麦。牛ふん堆肥連用)。
d-AV	多腐植質 厚層黒ボク土	茨城**	5.7	88	無作付け無施肥 (過去に麦。堆肥非施用)。
d-AW	淡色黒ボク土	茨城**	4.9	52	無作付け無施肥 (過去に麦。牛ふん堆肥連用)。

[‡]土壌分類は e-土壌図 (<http://soil-inventory.dc.affrc.go.jp/>、2017 年 11 月時点) により地図上で調べた採取地周辺の代表的な土壌タイプと、採取した土壌やその圃場の環境条件から判断した。

[§]表層 20cm まで客土した造成地、下層土はシラス。

**3、4 章の主な圃場試験を行った圃場 A。

表 4-2 供試土壌一覧（未風乾土 25 点）

記号	分類 [‡]	採取地	全窒素	全炭素	備考
			mg g ⁻¹	mg g ⁻¹	
nd-A	黄色土	愛知 [‡] **	0.5	8	無作付け無施肥 （過去に麦。堆肥非施用）。
nd-B	褐色低地土	新潟	1.8	19	トマト。有機質肥料施用。 毎年稲わら鋤込み。
nd-C	灰色低地土	茨城**	2.1	20	無作付け無施肥 （過去に麦。牛ふん堆肥連用）。
nd-D	灰色低地土	岐阜	1.2	9	トマト。化成肥料と牛ふん堆肥。
nd-E	灰色低地土	熊本	3.9	36	キュウリ。有機質肥料と牛ふん堆肥。
nd-F	灰色低地土	熊本	2.7	27	キュウリ。施肥情報なし。
nd-G	灰色低地土	熊本	1.9	17	トマト。施肥情報なし。
nd-H	灰色低地土	熊本	2.6	26	トマト。施肥情報なし。 土壌採取前に麦稈がすき込んであった。
nd-I	灰色低地土	熊本	2.0	20	トマト。施肥情報なし。
nd-J	灰色低地土	熊本	2.1	19	トマト。化成肥料、有機質肥料、 その他資材施用。
ns-K	灰色低地土	熊本	1.4	13	イチゴ。肥料は少ない。
nd-L	灰色低地土	熊本	2.3	22	キュウリ。施肥情報なし。
nd-M	灰色低地土	熊本	2.4	20	キュウリ。通常は化成主体。 椿油粕ペレット散布。
nd-N	灰色低地土	熊本	1.5	16	トマト。施肥情報無し。
nd-O	灰色低地土	熊本	2.2	20	キュウリ。有機質肥料、化成両方を使用。
nd-P	灰色低地土	熊本	1.1	11	イチゴ。肥料はととも少ない。
nd-Q	淡色黒ボク土	青森	3.8	49	トマト。施肥情報無し。
nd-R	淡色黒ボク土	青森	1.4	16	トマト。施肥情報無し。
nd-S	多腐植質 厚層黒ボク土	茨城**	5.3	78	無作付け無施肥 （過去に麦。牛ふん堆肥連用）。
nd-T	淡色黒ボク土	茨城**	4.9	52	無作付け無施肥 （過去に麦。牛ふん堆肥連用）。
nd-U	多腐植質 厚層黒ボク土	茨城**	5.7	88	無作付け無施肥 （過去に麦。堆肥非施用）。
nd-V	淡色黒ボク土	茨城**	4.3	48	無作付け無施肥 （過去に麦。堆肥非施用）。
nd-W	淡色黒ボク土	長崎	2.0	22	バレイショ。有機質肥料、堆肥施用。
nd-X	淡色黒ボク土	長崎	1.1	16	バレイショ。化成肥料。堆肥非施用。
nd-Y	淡色黒ボク土	千葉	3.9	46	情報なし。

[‡]土壌分類は e-土壌図 (<http://soil-inventory.dc.affrc.go.jp/>、2017 年 11 月時点) により地図上で調べた採取地周辺の代表的な土壌タイプと、採取した土壌やその圃場の環境条件から判断した。

**3、4 章の主な圃場試験を行った圃場 A。

[‡]愛知県で採取した土壌を用い 1974 年頃に茨城県つくば市に造成した幅 20 m×奥行き 25 m×深さ 0.7 m の圃場から 2015 年に採取した。

4.3.2 培養の方法

(実験1) 30、45、60°Cの3温度水準の培養実験

培養温度 30、45、60°Cの3水準で土壌を培養し土壌窒素無機化量の経時変化を計測した。培養の方法は、土壌養分測定法委員会 (1970a)を一部改変した。土壌水分を最大容水量の60%に調整した土壌を100 mL容のガラス製ビンに入れ、ポリエチレン製フィルムで口を覆い、輪ゴムでとめて、インキュベーター内で培養した。各培養温度での培養期間は30°Cでは28日間、45°Cと60°Cでは7、21、28、42日間である。

培養期間中、培養温度45°Cと60°Cの実験では毎週2~3回、培養温度30°Cの実験では3~5週間に1回、減少した土壌水分含量を純水で補給した。

(実験2) 30°Cと45°Cの2温度水準の培養実験

実験1よりも多様な土壌な土壌74点について、培養温度30°Cで28日間と、培養温度45°Cで21日間の2条件で土壌窒素無機化量を調べた。

培養実験の方法は、実験1に準じた。各培養温度での培養期間は30°Cでは28日間、45°Cでは21日間である。培養期間中、蒸発によって失われた土壌水分は週1回以上重量を計測して確認し、30°Cでは28日間の培養期間中に0~3回、45°Cでは1週間に1~3回の割合で、減少した土壌水分含量を純水で補給した。

4.3.3 結果と考察

4.3.3.1 30°Cから45や60°Cに培養温度を高めた時の窒素無機化の促進効果(実験1)

土壌窒素無機化量は、供試7土壌とも、培養温度が高いほど、また、培養期間が長いほど多かった(図4-1)。土壌窒素無機化量は土壌nd-A、nd-Xでは少なく、d-T、d-Cでは中間的で、nd-T、nd-V、d-AQでは多かった。土壌ごとの窒素無機化量の多少は、これまでの圃場管理に起因すると考えられる。たとえば、土壌窒素無機化量が少

なかった土壌 nd-X は、馬鈴薯の病害であるそうか病が有機物施用で助長されることから、有機物がほとんど施用されてこなかった圃場であり（表 4-2）、土壌窒素無機化量が多かった土壌 d-AQ は堆肥を大量に施用した履歴のある圃場であった（表 4-1）。

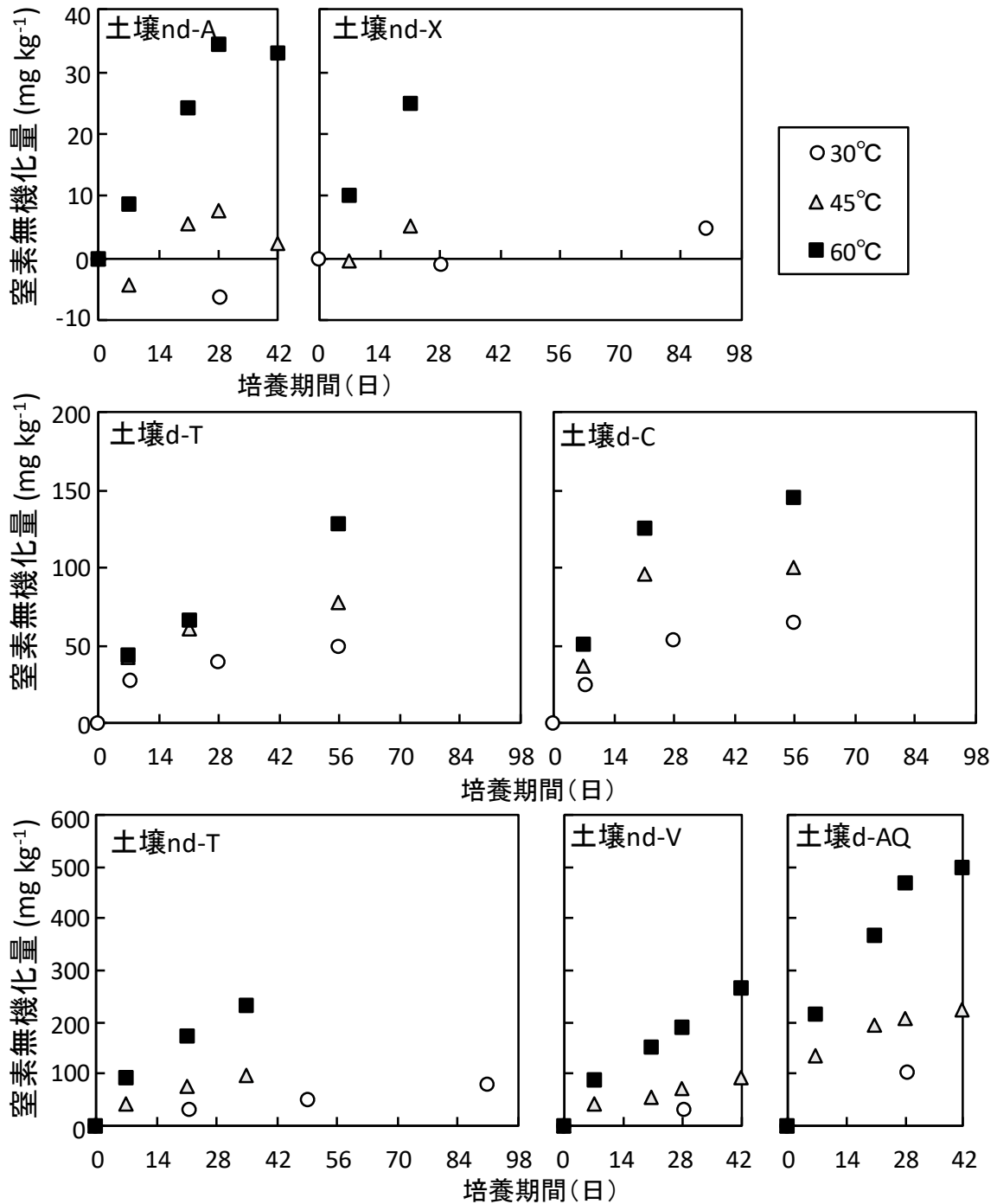


図 4-1 30°C、45°C、60°Cで培養中の土壌窒素無機化量の推移

4.3.3.2 高温による土壤窒素無機化の促進効果の土壤や前処理による違い（実験 2）

風乾土 49 点について、培養温度 30°C で 28 日間培養したときの土壤窒素無機化量は 12~107 mg kg⁻¹ の範囲にあり、培養温度 45°C で 21 日間培養したときのそれは 30~193 mg kg⁻¹ の範囲にあった（図 4-2）。また、30°C 28 日間培養したときの土壤窒素無機化量が多い土壤ほど、45°C 21 日間培養したときの土壤窒素無機化量が多い傾向にあった。未風乾土 25 点を培養温度 30°C で 28 日間培養したときの土壤窒素無機化量は -6~72 mg kg⁻¹ の範囲にあり、培養温度 45°C で 21 日間培養したときのそれは 5~115 mg kg⁻¹ の範囲にあった。

風乾土、未風乾土とも、すべての土壤において、45°C で 21 日間培養したときの土壤窒素無機化量は、それよりも培養期間としては 7 日長い、30°C で 28 日間培養したときの土壤窒素無機化量よりも多かった。この結果は、実験 1 で土壤 7 点について得た結果「培養温度を 30°C から 45°C や 60°C に高めたときに、培養日数が同じでも土壤窒素無機化量が多くなった」と符号する。

このように、地温を高めたときに土壤窒素無機化が早まる現象は「地温上昇効果」と呼ばれるが、土壤を採取した地域や土壤タイプ別には、風乾土（図 4-2(a)）で、和歌山県で採取した黄色土が、最も土壤窒素無機化量が多かった 1 点を除き、他の土壤タイプ、土壤採取地域よりも「地温上昇効果」がやや大きかった。Campbell ら（1984）は、培養温度 15、25、35°C で本研究と類似の室内培養実験を行い、「地温上昇効果」は、土壤を採取した地域や土壤タイプによって異なることを示しており、本研究の結果はそれと同じ傾向といえる。

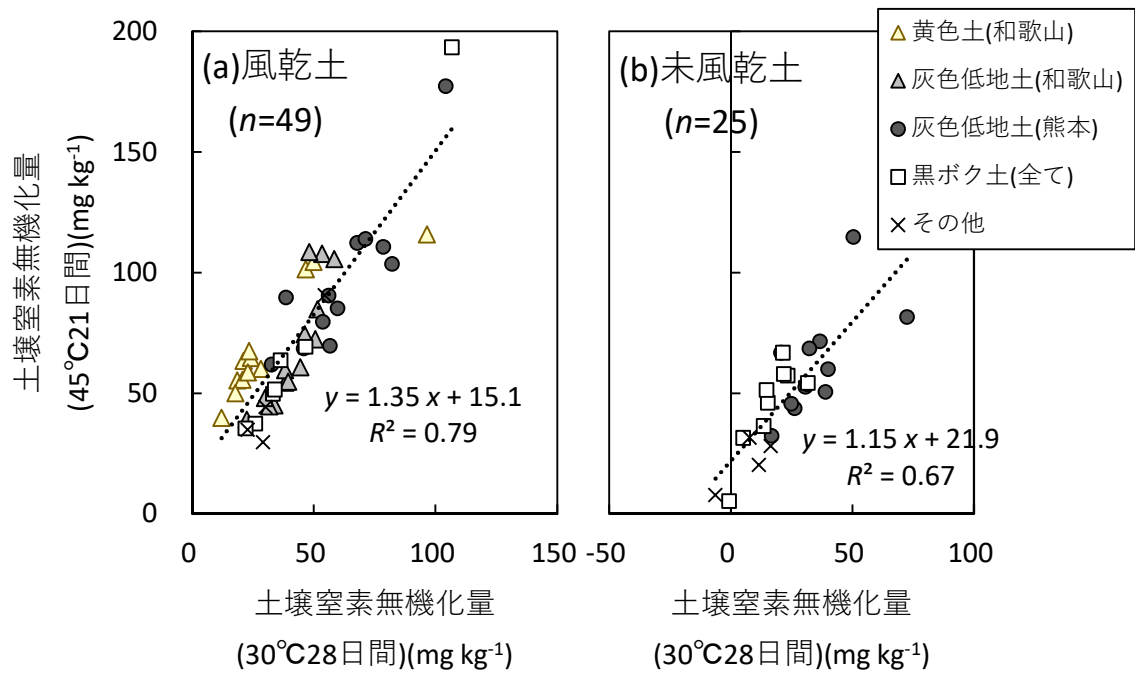


図 4-2 30°C28 日間と 45°C21 日間培養中の土壌窒素無機化量の比較

「培養温度 45°C で 21 日間培養したときの土壌窒素無機化量」と土壌の全炭素、全窒素含量との関係を図 4-3、図 4-4 に示す。風乾土に関する結果（図 4-3 (a) および図 4-4 (a)）から、「培養温度 45°C で 21 日間培養したときの土壌窒素無機化量」と土壌の全窒素あるいは全炭素含量の間には、同じ地域の同じ土壌タイプの土壌については、強い正の相関が認められた（決定係数は和歌山県の灰色低地土が 0.80、熊本県の灰色低地土が 0.82 であった）。このことは、土壌の全炭素、全窒素含量が、各土壌の管理履歴の違い等に起因する土壌の肥沃さの指標になることを示している。しかし、供試土壌全体では両者の間に相関は認められなかった。これは、土壌の採取地域や土壌タイプが様々であったために、ベースとなる土壌の特性が異なることが原因と考えられた。

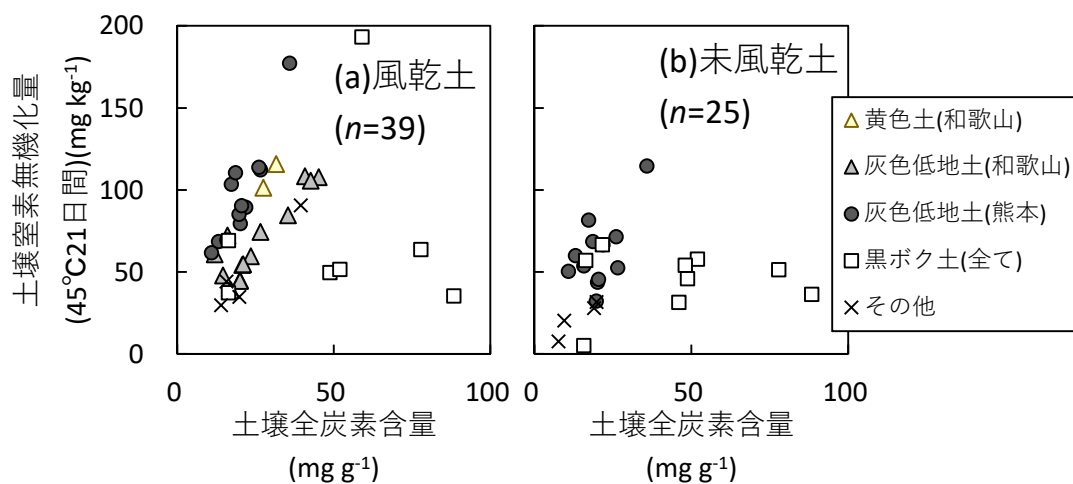


図 4-3 45°Cで21日間培養したときの土壤窒素無機化量と土壤全炭素含量の関係

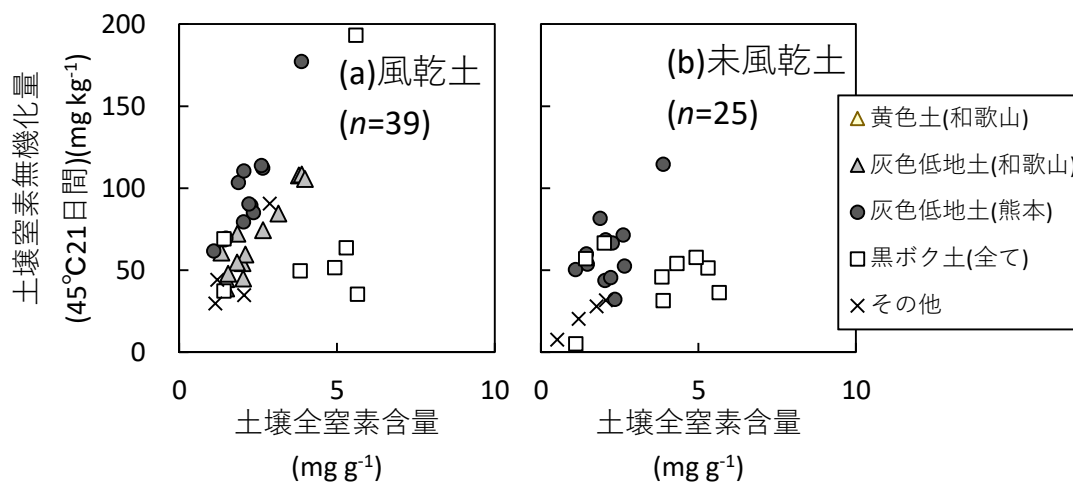


図 4-4 45°Cで21日間培養したときの土壤窒素無機化量と土壤全窒素含量の関係

4.4 高温条件下における有機質資材の窒素無機化量

4.4.1 背景と目的

消毒中の高地温は、消毒前に施用した有機質資材（堆肥や有機質肥料（肥料効果が高い動植物由来の各種有機質資材を配合し、造粒して施用しやすくしたもの）など）の窒素無機化にも影響する可能性があるが、著者の知る限り報告されていない。そこで、多数資材について、土壤に混和し 30~60°Cで培養したときの窒素無機化量を明ら

かにした。

4.4.2 供試資材と土壌

供試資材は、表 4-3 に示す牛、豚、鶏ふん堆肥、市販有機質肥料、ナタネ油かす、米ぬか、骨粉である。豚ふん堆肥 T1、T3~6 は、入手時点で風乾物であったため風乾物を培養したが、その他の資材は、特に記載のない限り、未風乾のまま培養した。

有機質肥料は未粉碎状態で培養した。堆肥も、ほとんどの資材は粉碎しなかったが、試料中に 5 mm 程度以上の大きな塊が目立つものはミルサーで軽く粉碎した。

4.4.3 培養の方法と窒素無機化量の計算方法

堆肥の土壌への混和量は、おおむね牛、豚ふん堆肥が現物で約 $1 \text{ t } 10 \text{ a}^{-1}$ 、鶏ふんが $0.5 \text{ t } 10 \text{ a}^{-1}$ 、肥料は $10 \text{ kg-N } 10 \text{ a}^{-1}$ 相当量を深さ 15 cm の淡色黒ボク土試験区の作土に混和した場合に近い量になるように設定した。すなわち、最大容水量の 60% に調整した土壌 100~120 g に、有機質肥料は 0.3%、家畜ふん堆肥は 0.4~1.2%、その他の資材は 0.5~0.7% 混和した (表 4-3)。100 mL 容量のガラス製ビンにいれ、蒸発量を低減する一方で酸素透過性がある程度高いポリエチレン製ラップで口を覆い、輪ゴムでとめて、30、45、60°C に設定した恒温培養器内で保管した。培養温度と期間は 30°C 28、90 日、45°C と 60°C が 7、21 日を基本としたが、一部資材については異なる条件であった (60°C での培養をしていない、あるいは培養期間が異なるなど、図 4-6、4-7、4-8)。3 反復で試験した。培養中に蒸発によって失われた土壌水分含量は 4.3.2 と同様、純水で補給した。

表 4-3 室内培養実験の供試資材

種類		含水率	粗灰分	全炭素	全窒素	C/N比	NO ₃ ⁺	NH ₄ -N	NH ₄ -N	AD可	AD可溶	資材混和量 †
							NO ₂ -N	(10% KCl で抽出)	(0.5M HCl で抽出)¶	溶有機物	有機態窒素	
		10 mg g ⁻¹ §					mg 100g ⁻¹ §			mg g ⁻¹ §		g-資材現物 100g-土壌 ⁻¹
牛ふん 堆肥 C/N比 18未満	G1	34	56	25	1.8	14	91	0	6	80	8	1.2
	G2	51	49	29	2.0	15	68	0	6	100	7	1.2
	G3	41	35	36	2.3	16	337	2	11	131	12	1.2
	G4	49	14	48	3.3	14	400	70	80	196	10	1.2
	G5	40	23	42	2.6	16	0	63	379	206	12	1.2
	G6	47	25	41	3.0	13	60	272	542	240	16	1.1
	G7	37	25	39	2.3	17	0	163	533	241	10	1.1
牛ふん 堆肥 C/N比 18以上	G8	63	26	46	1.8	25	0	0	5	0	6	1.2
	G9	39	23	41	2.2	18	175	0	11	121	7	1.2
	G10	71	18	45	1.5	31	210	*	8	196	4	1.2
	G11	25	37	34	1.4	24	0	8	122	424	10	1.2
豚ふん 堆肥	T1	13	21	40	2.5	16	4	68	492	251	12	0.4
	T2	47	45	25	2.2	12	296	4	6	274	13	1.2
	T3	11	17	41	2.7	15	3	186	347	367	18	0.4
	T4	12	27	38	3.5	11	2	154	599	415	24	0.4
	T5	12	21	40	4.7	8	2	562	723	590	33	0.4
	T6	12	21	40	4.6	9	1	337	621	638	35	0.4
鶏ふん 堆肥	K1	23	52	20	2.0	10	19	183	707	270	7	1.2
	K2	28	49	31	4.0	8	2	720	1223	*	*	0.5
	K3	22	27	39	6.9	6	9	834	1107	*	*	0.7
	K4	32	45	28	4.4	6	34	1305	1748	*	*	0.7
有機質 肥料	F1	9	23	41	6.1	7	1	788	966	609	30	0.3
	F2	11	26	42	5.6	7	4	816	810	675	46	0.3
	F3	17	37	34	6.2	5	0	715	1168	470	45	0.3
	F4	10	31	40	10.0	4	1	150	175	609	89	0.3
	F5	8	32	38	7.1	5	2	53	69	611	62	0.3
ナタネ 油かす	H1	10	23	49	2.5	20	1	23	29	*	*	0.5
	H2	12	22	47	6.7	7	1	25	35	*	*	0.7
骨粉	H3	6	40	31	4.9	6	1	36	27	*	*	0.5
脱脂 米ぬか	H4	11	25	47	6.8	7	2	18	18	*	*	0.7

図中*は未計測。

§のうち、含水率は未乾燥試料の重量あたりの水分重量、粗灰分～AD可溶有機態窒素は乾燥資料の重量あたりの含量で表記した。

¶は0.5MのHCl溶液で抽出されるNH₄の資材中含量であり、10%KClで抽出するのに比べて資材中のリン酸マグネシウムアンモニウム(MAP)態のアンモニウムを高い効率で抽出でき

ることから速効性窒素成分の評価として有効であるとされる(棚橋ら, 2010)。

‡資材混和量は培養実験の実験条件で、供試資材を土壌 100g あたり何 g 混和したかを示す。

資材の窒素無機化量は、図 4-5 のように、培養前後の土壌中無機態窒素の測定値から、以下の式(3)により求め、土壌重量あたりの無機態窒素量として求めたあと、混和した資材重量あたりに換算した。

$$(NF_{T,t} - NS_{T,t}) - (NF_0 - NS_0) \quad (3)$$

ここで、

$NF_{T,t}$: 資材混和土壌の培養温度 T 、期間 t のときの無機態窒素含量 (mg-N kg^{-1})

$NS_{T,t}$: 資材未混和土壌の培養温度 T 、期間 t のときの無機態窒素含量 (mg-N kg^{-1})

NF_0 : 資材混和土壌の培養開始前の無機態窒素含量 (mg-N kg^{-1})

NS_0 : 資材未混和土壌の培養開始前の無機態窒素含量 (mg-N kg^{-1})

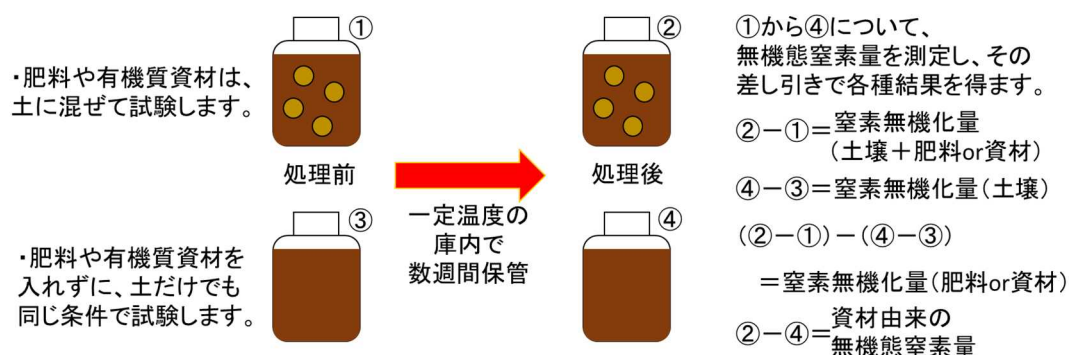


図 4-5 肥料・資材の窒素無機化量の調べ方

また、資材の窒素無機化量に、培養前の資材の無機態窒素量含量を加えたものを、以下では資材由来無機態窒素と呼ぶ。

培養は 2012 年から 2015 年にかけて 8 回にわけて実施した。土壌は圃場 A の淡色黒ボク土試験区から、深さ 0-15 cm の土壌を、培養実験を開始する前に、その都度採取した。その間、土壌採取地点は無作付けで、除草のためときどき耕起していた。採

取した土壌は未風乾のまま、均一化するために2 mm メッシュのふるいをかけ、含水率は33%（最大容水量の約60%）に調整して用いた。なお、後で示す図4-6中に示すとおり、一部資材については長崎県馬鈴薯研究室（雲仙市）育種4号露地淡色黒ボク土圃場から採取した作土（深さ0-15 cm、表4-2中の土壌nd-X）を用いた。茨城県の圃場Aの土壌、長崎県の土壌いずれも、圃場から採取した土壌は風乾させずに（湿潤状態のまま）、均一化のために、4 mm メッシュのフルイでふるった。

4.4.4 培養実験の結果と考察

4.4.4.1 有機質肥料、ナタネ油かす、骨粉

有機質肥料の窒素無機化量は、肥料F1は 20 mg g^{-1} 、F2は $20\sim 30 \text{ mg g}^{-1}$ 、F3は 30 mg g^{-1} 、F4は 70 mg g^{-1} 、F5は 50 mg g^{-1} 程度で頭打ちになった（図4-6）。土壌とは異なり、いずれの資材も、培養温度を高めても窒素無機化量が増えなかった。

後述する家畜ふん堆肥とは異なり、有機質肥料の窒素無機化量は、ロットや年次によって極端に変わるべきものではないので、肥料銘柄ごとの窒素無機化量は、理化学的分析値からではなく、製造者が培養実験を行い明示すれば良いと思われる（培養温度は 30°C でもよい）。

なお、実用上の留意点として、太陽熱消毒前に肥料を施用した場合には、施用されてから消毒終了までに日数があり、その間に窒素無機化が進むため、有機質肥料を利用する生産者にとって、肥料としての効果が栽培初期に偏り、栽培後半に肥料切れを起こすと感じる場合もあると考えられる。

ナタネ油かすと骨粉は、窒素無機化量が多く、有機質肥料と同じように活用できると考えられる。 30°C に比べて 45°C や 60°C での窒素無機化量は同等以下であった。

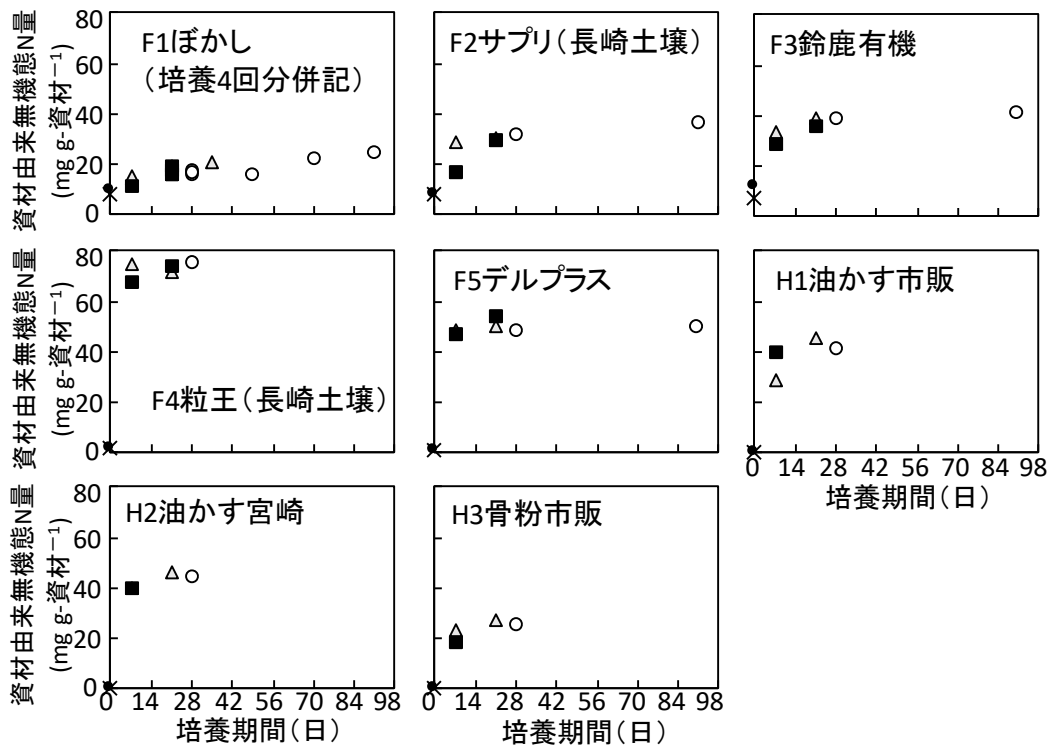


図 4-6 有機質肥料、油かす、骨粉の窒素無機化特性

図中、資材名の横に(長崎土壤)とある資材は、長崎県で採取した土壤 nd-X に混和した。それ以外の資材は茨城県の土壤 nd-T と同じ圃場(圃場 A の淡色黒ボク土畑、3.3.1.1)で採取した土壤に混和した。

培養期間 0 日後のプロットは土壤に混和する前の資材に含まれる無機態窒素含量であり、●はアンモニウム態窒素を 0.5M 塩酸で抽出したときの、×はアンモニウム態窒素を 10% KCl 溶液で抽出した含量を示す。図中○は培養温度 30°C、△は同 45°C、■は同 60°C の結果。なお、以下の議論では資材の窒素無機化量は、各培養温度、培養期間ごとに得られた資材由来無機態窒素量 (0.5M 塩酸で抽出) と、培養 0 日後の無機態窒素含量の差し引きから求めた。

4.4.4.2 家畜ふん堆肥、米ぬか

家畜ふん堆肥と米ぬかの培養実験の結果を図 4-7、図 4-8 に示す。

牛ふん堆肥では、培養 0 日後の無機態窒素量との差し引きから求めた窒素無機化量は資材 1 g あたり数 mg 以下と少なく、また、C/N 比が高い資材のうち比較的 AD 可溶性有機物含量が高かった牛ふん堆肥 G10、G11 では窒素無機化量は培養 0 日目に対してマイナスとなる場合があった。これは無機態窒素の土壤微生物による取り込

み（有機化）が原因と考えられる。

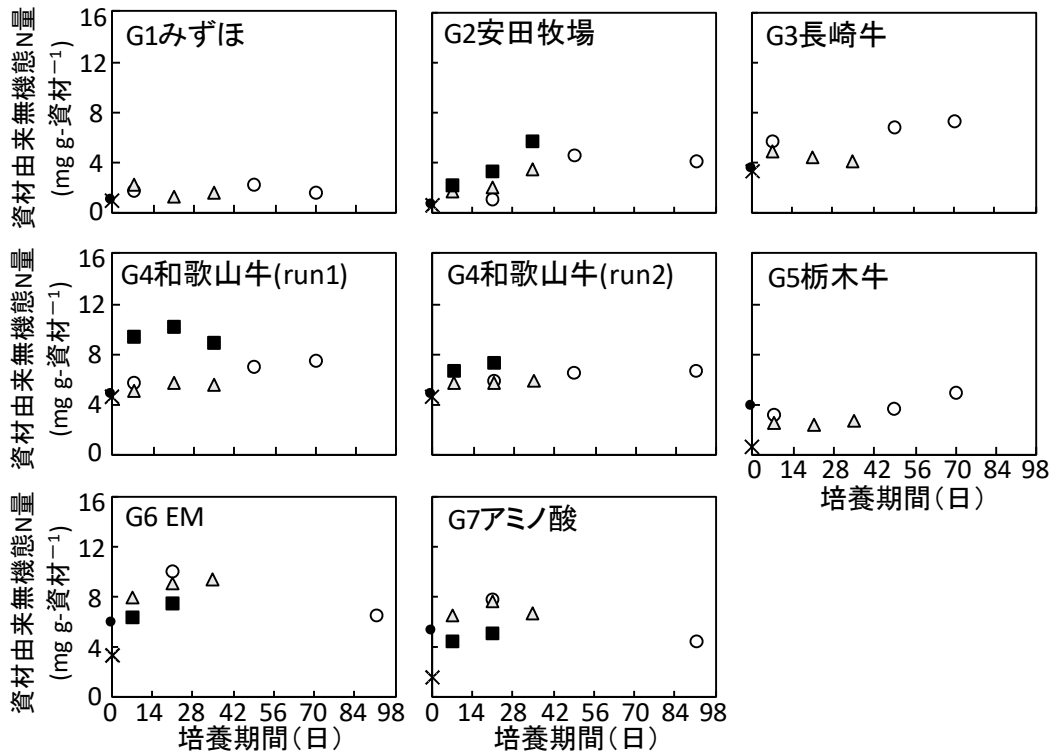
米ぬか H4 はいずれの培養温度、期間についても、窒素無機化量は少ないか、あるいは培養 0 日目に対してマイナスであった。

供試堆肥の酸性ダイタージェント可溶性有機物は、牛ふん堆肥は 0~420 mg g⁻¹、豚ふん堆肥は 160~410 mg g⁻¹であった（表 4-3）。実用技術開発事業 18053 マニュアル作成委員会（2009b）によれば、炭素/窒素比（C/N 比）が 18 未満で、AD 可溶有機物量が 250 mg g⁻¹以上の牛、豚ふん堆肥は緩効性の窒素肥効を考慮すべきとしており、供試堆肥の一部はこの条件にあてはまった。しかし、本研究では、全ての資材について、地温を高めても窒素無機化量が大幅に増えることはなかった。

鶏ふん堆肥は、窒素無機化量が多いもの（K2）がある一方、窒素無機化量がマイナスになる場合（K4）があった。30°C に比べて 45°C や 60°C での窒素無機化量は同等以下であった。

これは、前述のとおり、土壌では、培養温度が 30°C のときに比べて培養温度を 45°C や 60°C に高めると窒素無機化量が大幅に増えたのとは異なる結果であった。

牛ふん堆肥(C/N比18未満)



牛ふん堆肥(C/N比18以上)、米ぬか

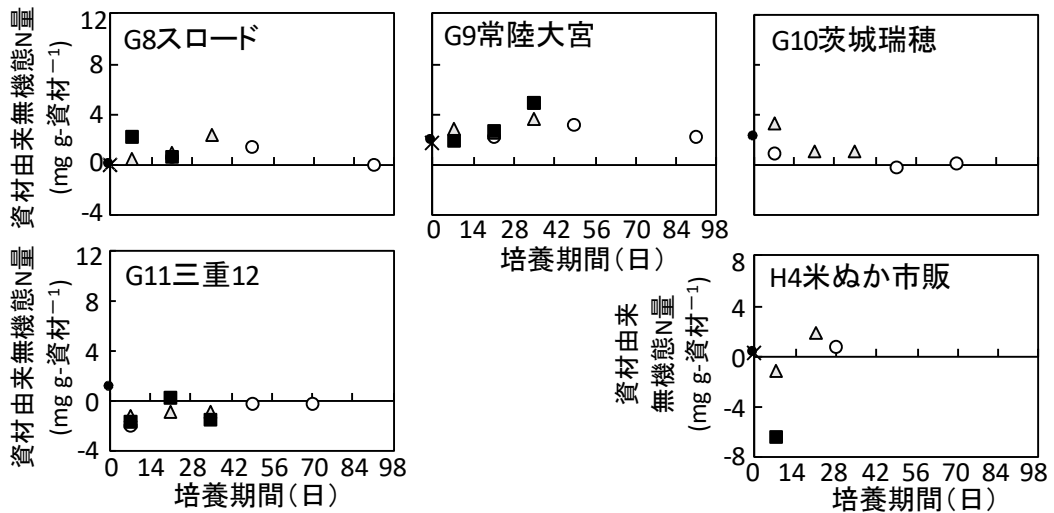


図4-7 牛ふん堆肥および米ぬかの窒素無機化特性

資材 G4 は 2 回培養実験を実施し、それぞれで得た結果を(run1) (run2) として示した。培養期間 0 日後のプロットは土壌に混和する前の資材に含まれる無機態窒素含量であり、●はアンモニウム態窒素を 0.5M 塩酸で抽出したときの、×はアンモニウム態窒素を 10% KCl 溶液で抽出した含量を示す。図中○は培養温度 30°C、△は同 45°C、■は同 60°C での結果。

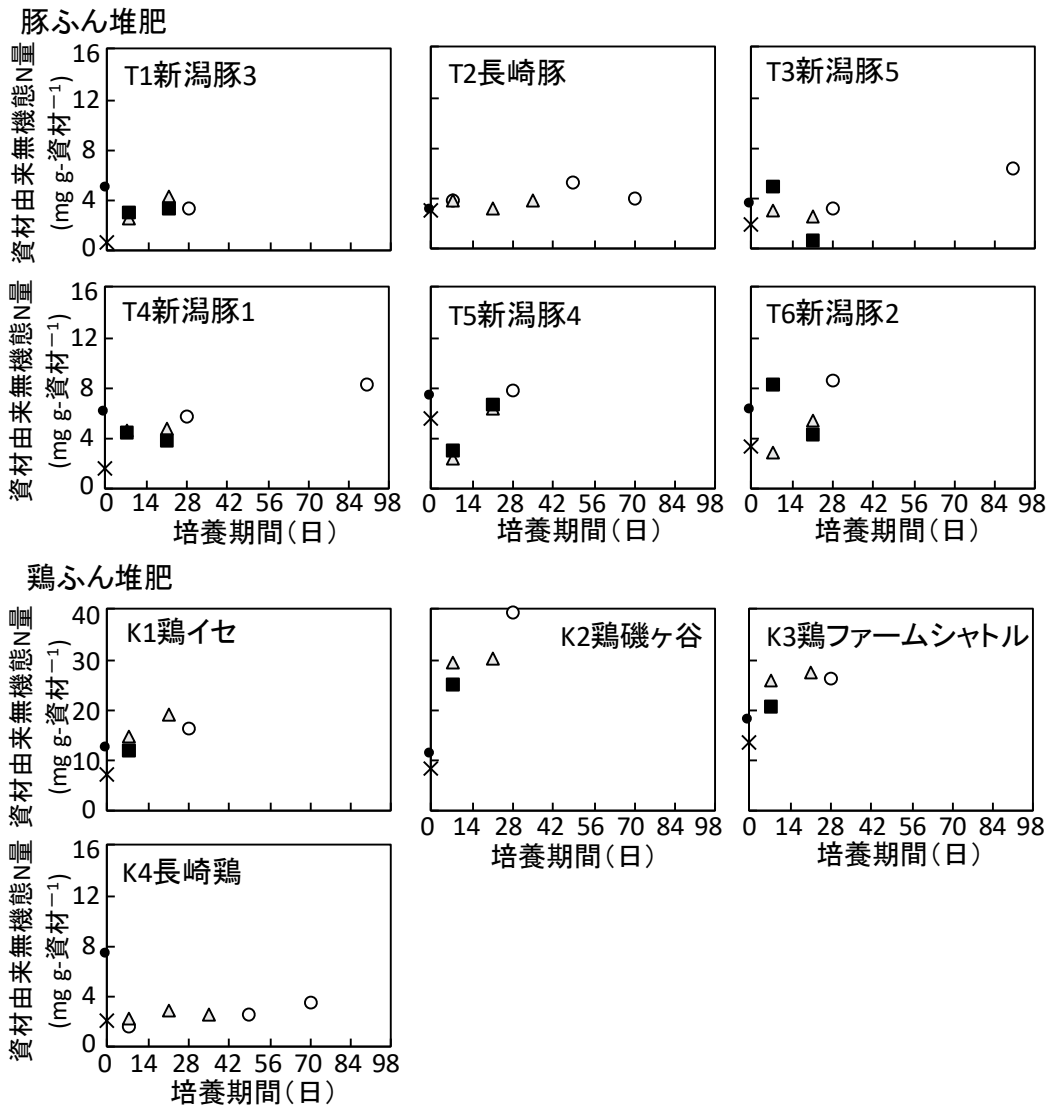


図 4-8 豚・鶏ふん堆肥の窒素無機化特性

培養期間 0 日後のプロットは土壤に混和する前の資材に含まれる無機態窒素含量であり、●はアンモニウム態窒素を 0.5M 塩酸で抽出したときの、×はアンモニウム態窒素を 10% KCl 溶液で抽出した含量を示す。図中○は培養温度 30℃、△は同 45℃、■は同 60℃での結果。

4.4.4.3 総合考察（高温が有機質資材の窒素無機化量に及ぼす影響とその評価法）

供試資材のいずれも、培養温度を 30°C から 45、60°C に高めても窒素無機化量が大きく増えることはなかった。30°C で 28 日間と 45°C で 21 日間の培養に伴う各資材の窒素無機化量は図 4-9 のとおりで、両者はほぼ 1:1 の関係にあった。この事実は、窒素無機化量を予測するうえで重要な知見である。太陽熱消毒中の高い地温によって無機化が促進されるのでなければ、消毒後における資材の窒素無機化量は、通常の温度条件向けに開発、検証された既往の肥効評価手法が適用できると考えられる。

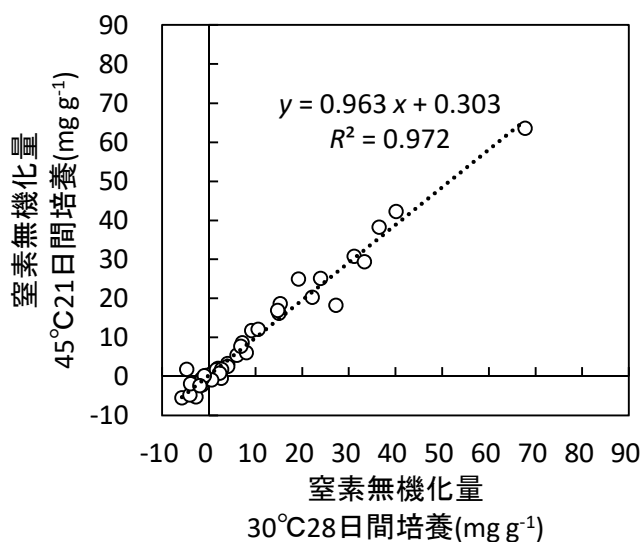


図 4-9 30°C で 4 週間および 45°C で 3 週間培養のときの供試 30 資材が含有する有機態窒素の無機化量

実用技術開発事業 18053 マニュアル作成委員会 (2009a) は、完熟牛・豚ふん堆肥の短期的（施用後 4 週間以内）窒素肥効は、培養前から堆肥に含まれていた無機態窒素量で評価可能とした。その妥当性を検討する目的で、本試験の供試堆肥についても、堆肥中の無機態窒素含量と、45°C で 3 週間培養したときの堆肥由来の無機態窒素量をプロットしたところ、おおむね 1:1 の直線近傍に分布した（図 4-10）。

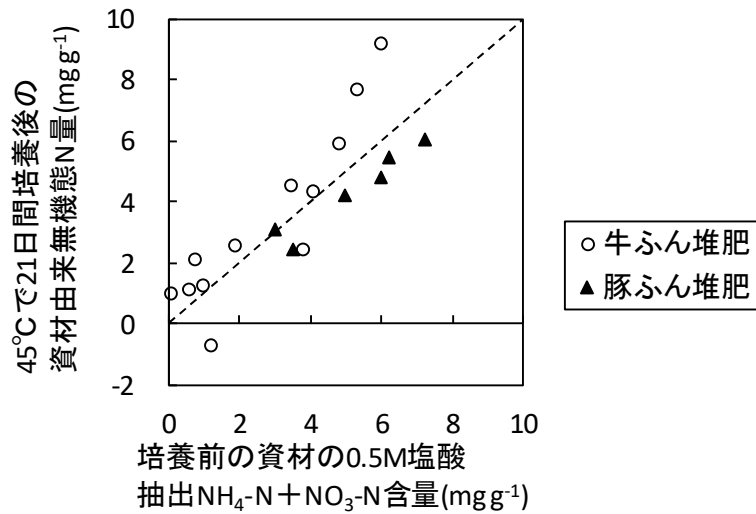


図 4-10 供試牛・豚ふん堆肥の培養前から含有する NH₄-N (HCl 抽出) + NO₃-N 量と 45°C 3 週間培養後の資材由来無機態窒素の関係

4.3 節で示したとおり、土壌については、地温が高いほど有機態窒素の無機化量が多かった。しかし、供試した有機質資材については、高温は有機態窒素の無機化を促進しなかった。土壌と有機質資材で異なる結果が得られた原因は未解明であるが、発酵段階で高温にさらされる家畜ふん堆肥は、高温による有機態窒素の無機化量への影響を受けにくいのかもかもしれない。有機質肥料やなたね油かす、骨粉については、培養温度 30°C でも有機態窒素の無機化が極めて速く、30°C で 28 日間培養したときと 45°C で 21 日間培養したときの有機態窒素の無機化量には大きな違いが認められなかった可能性がある。なお、病虫害防除の効果を得るために十分な積算地温を得るという観点から、一般的に太陽熱消毒は数週間以上の期間行われることから、3~4 週間という本研究の培養期間の設定は適切である。

有機質肥料に関しては、地温の高低の影響よりも、肥料施用後、栽培開始までに消毒のために数週間空くことに注意すべきと考えられる。すなわち、生産者が、これま

で、太陽熱消毒を行っていない条件で、同じ有機質肥料を利用するにあたり、栽培を開始してから徐々に窒素無機化が進む（緩効性の窒素肥料としての）効果を期待している場合は、太陽熱消毒前に同じ肥料を施用した場合には、消毒が終わり、栽培開始した時点では、すでに有機質肥料の窒素無機化が進んだ状態となり、そのため、生産者の感覚として、栽培開始時点での土壌中無機態窒素含量は多く、その後の栽培期間の土壌中無機態窒素の供給は少なく感じる可能性がある。この問題への実用的な対策としては、栽培期間中に行う追肥で調節する方法や、熱の影響を受けにくいタイプの緩効性肥料を併用することが考えられる。

4.5 まとめ

第4章では、多様な土壌、有機質資材を高い培養温度で培養し、窒素無機化量に及ぼす培養温度と期間の影響をデータベース化した。結果は以下のようにまとめられる。

1. 土壌は、30℃に比べて、45℃、60℃と培養温度が高まるに従って、また培養期間が長期になるほど窒素無機化量が増加した。
2. 土壌の窒素無機化量は土壌サンプルごとに異なった。30℃で4週間培養したときの土壌窒素無機化量が多い土壌は、45℃で3週間培養したときの土壌窒素無機化量も多い傾向にあった。
3. 上記から、太陽熱消毒後の栽培にあたっては、消毒中の高地温により、土壌からの無機態窒素供給量がどの程度増えるのかを評価することが有効といえる。
4. 供試有機質資材はいずれも、培養温度30℃のときに比べて、培養温度を45や60℃に高めても窒素無機化量が大きく増えることはなかった。そのため、施用有機質資材の窒素肥効の評価は、非消毒条件において従来から利用されている評価法によること

が合理的と考えられた。

5. ただし、熱による影響とは別に、太陽熱消毒前に有機質肥料や油かす、骨粉のように窒素無機化量が多い資材を施用する場合は、肥料施用後栽培開始までに数週間以上の期間があることから、消毒を行わない場合に比べて、施用有機質肥料や有機質資材の窒素肥効が栽培開始初期に前倒しされることに注意が必要である。

第5章 消毒時の基肥適正化のための土壌・気象条件の評価

5.1 概要

第4章において、高温は土壌の窒素無機化を促進し、有機質資材の窒素無機化には影響が小さいことを明らかにした。そこで、本章では、高温条件下における土壌窒素無機化量の推定手法を構築することを目指す。

4.3.3.1 で示したとおり、土壌の培養温度が高いほど、また、培養期間が長いほど、土壌の窒素無機化量は多かった。既往研究において、土壌窒素無機化の速さに及ぼす温度や期間の影響は、アレニウスの法則や有効積算温度の法則、 Q_{10} 則を用いてモデル化されてきた(金野・杉原, 1986)。これら手法により、例えば 25°C、30°C、35°C の異なる培養温度における土壌窒素無機化量の推移を、1 つのモデル式で表すことが可能になる。また、これら 3 温度水準の培養実験の結果から得られたモデルパラメータに基づいて、25~35°C の間で培養温度が変動する場合の土壌窒素無機化量を推定することも可能になる。しかし、培養や窒素無機化速度のモデル化を、太陽熱消毒で想定される 40°C を大きく超える高地温条件下に適用した報告は見られない。

上記のように、培養実験に基づきモデルパラメータが得られた土壌については、培養温度や期間ごとに土壌窒素無機化量を推定できる。一方で、生産現場には多様な土壌があり、土壌の元来の特性や過去の肥培管理によって、同じ温度で同じ期間培養しても、窒素無機化量は土壌ごとに異なる。そのため、国内では一般に 30°C で 28 日間、土壌水分含量を最大容水量の 50~60% とする条件で土壌を培養し、その間の土壌窒素無機化量を土壌可給態窒素含量と呼ぶことにしている(井田ら, 1970a)。また、培養に関わる時間や労力を省くために、化学分析による土壌可給態窒素含量の簡易評価法の開発がこれまで取り組まれている。近年では、全国の様々な土壌を対象に、中性リン

酸緩衝液抽出法(小川ら, 1989)や、120°Cや105°Cでの熱水抽出法(北海道立中央農業試験場北海道農政部農業改良課, 1992)などに比べて精度良く、また毒劇物試薬を用いずに土壤可給態窒素含量を簡易評価できる手法(上菌ら, 2012) (以下、上菌らの簡易評価法)が開発され、その手法は、国内の複数の地域で普及しつつある。土壤可給態窒素含量の簡易評価法は上菌らの手法に限られたわけではないが、上菌ら(2010a)の手法は、抽出液として80°Cの水のみを用い、また、抽出液の分析は、生産者でも評価ができるように市販のキット(CODパケットテスト、共立理化学研究所)を用いる簡易評価法である(なお、分析機関での分析には全有機体炭素(以下、TOC)計を用いる)ことから、生産現場へ普及する上のメリットが大きい。しかし、太陽熱消毒で想定される高地温条件下では、土壤窒素無機化量を多様な土壤で観測した研究自体が行われていないこともあって、その簡易評価法も未検証のままである。

そこで、図5-1に示したように、1)4章で実施した30、45、60°Cの3温度水準の培養実験の結果をもとに、土壤窒素無機化量に培養温度と期間が及ぼす影響について、既存の反応速度論的モデル解析手法で解析し、その後、推定精度を向上させるため改良を試みた。また、モデルのオンサイトでの検証のため、茨城県つくば市の淡色黒ボク土畑で太陽熱消毒を実施した。2)5章で示した、風乾土49点、未風乾土25点の「培養温度45°Cで3週間培養したときの土壤窒素無機化量」に対する上菌らの簡易土壤評価法の有効性を調べた。

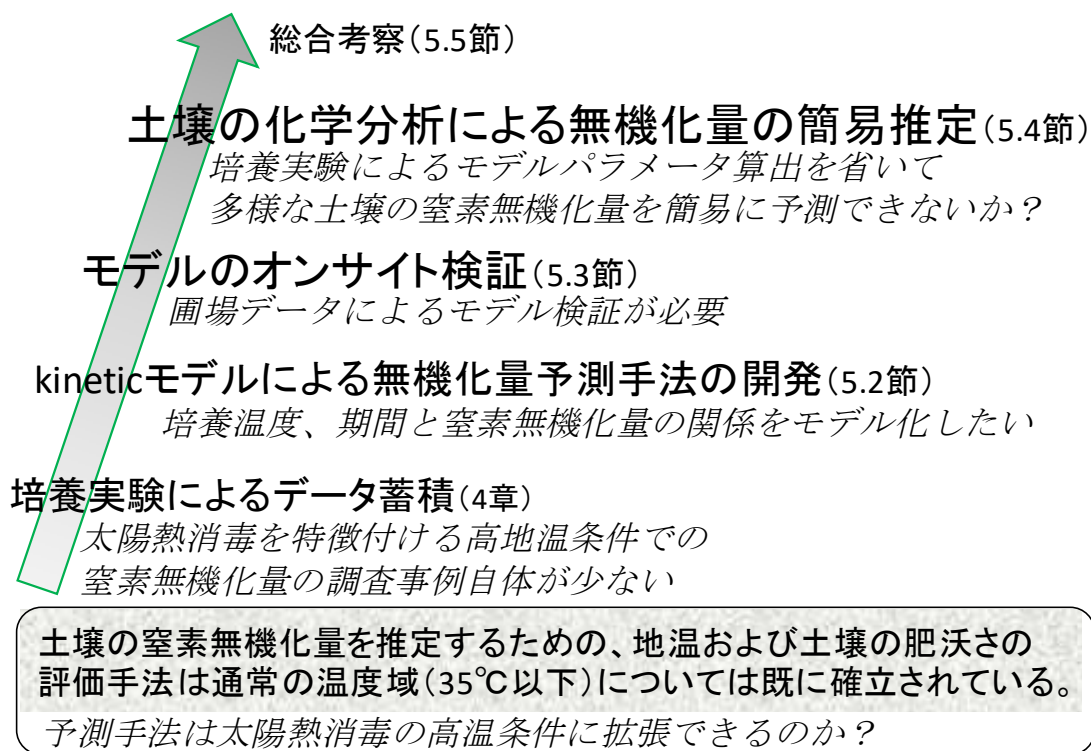


図 5-1 第 5 章の概要

5.2 反応速度論的土壌窒素無機化モデルの高地温条件への適用可能性の検討

5.2.1 方法

5.2.1.1 解析に用いた培養実験データ

モデル解析には、4.3.3.1 で示した 7 土壌に関する 3 温度水準の培養実験の結果のうち、土壌窒素無機化量が比較的多かった土壌 d-AQ、nd-T、nd-V に関する実験結果を用いた。

5.2.1.2 Q_{10} 則を導入した簡易な土壌窒素無機化モデルによる解析

用いたモデルは、モデルパラメータが少なく、比較的計算が容易という観点から、Sierra (2002)を参考に、一次元モデル(Nuske・Richter, 1981; Campbell ら, 1984; Myers ら, 1982)に、温度が上昇すると窒素無機化速度が指数関数的に高まるとするいわゆる Q_{10} 則を導入した以下の式を用いた。

$$N_{\min} = N_0 \times (1 - \exp(-k_0 \times Q^{(T-30) \div 10} \times t)) \quad (4)$$

ここで、 T は培養温度（℃）である。 Q は土壌窒素無機化速度が温度でどう変わるかを表す係数である。また、以下の議論および実用上のわかりやすさを高めるため、金野・杉原（1986）が温度影響の指標として提案した 25℃換算日数に近い概念の指標として、本報告では 30℃を基準とし、 $Q^{(T-30) \div 10} \times t$ （日）を実際の培養期間 t に温度が窒素無機化速度に及ぼす影響を組み込んだ指標として扱い、これを「30℃換算日数」と呼ぶこととした。

培養実験によって T と t の組み合わせごとに得られた実験値に対して、式(1)の計算値 N_{\min} との残差の平方和を最小とする係数 N_0 、 k_0 、 Q を Microsoft Excel2013 または 2016 のソルバー機能により計算した。

5.2.2 結果

土壌 d-AQ、nd-T、nd-V について、全ての培養温度（30、45、60℃）、培養期間（7～91 日間）の組み合わせで得た土壌窒素無機化量の実験値を基にモデルパラメータを算出し、縦軸を土壌窒素無機化量、横軸を 30℃換算日数にとった図を描くと、培養温度 30、45、60℃で得た土壌窒素無機化量の実験値は全て同一のモデル式曲線の近傍に分布した（図 5-2(b), (e), (h)）。培養温度が土壌窒素無機化量に及ぼす影響は大きく、得られたパラメータ Q は 2.3～2.4 となった（すなわち、地温が 10℃高まると土壌窒素無機化の反応は 2.3～2.4 倍速く進むと評価された）。

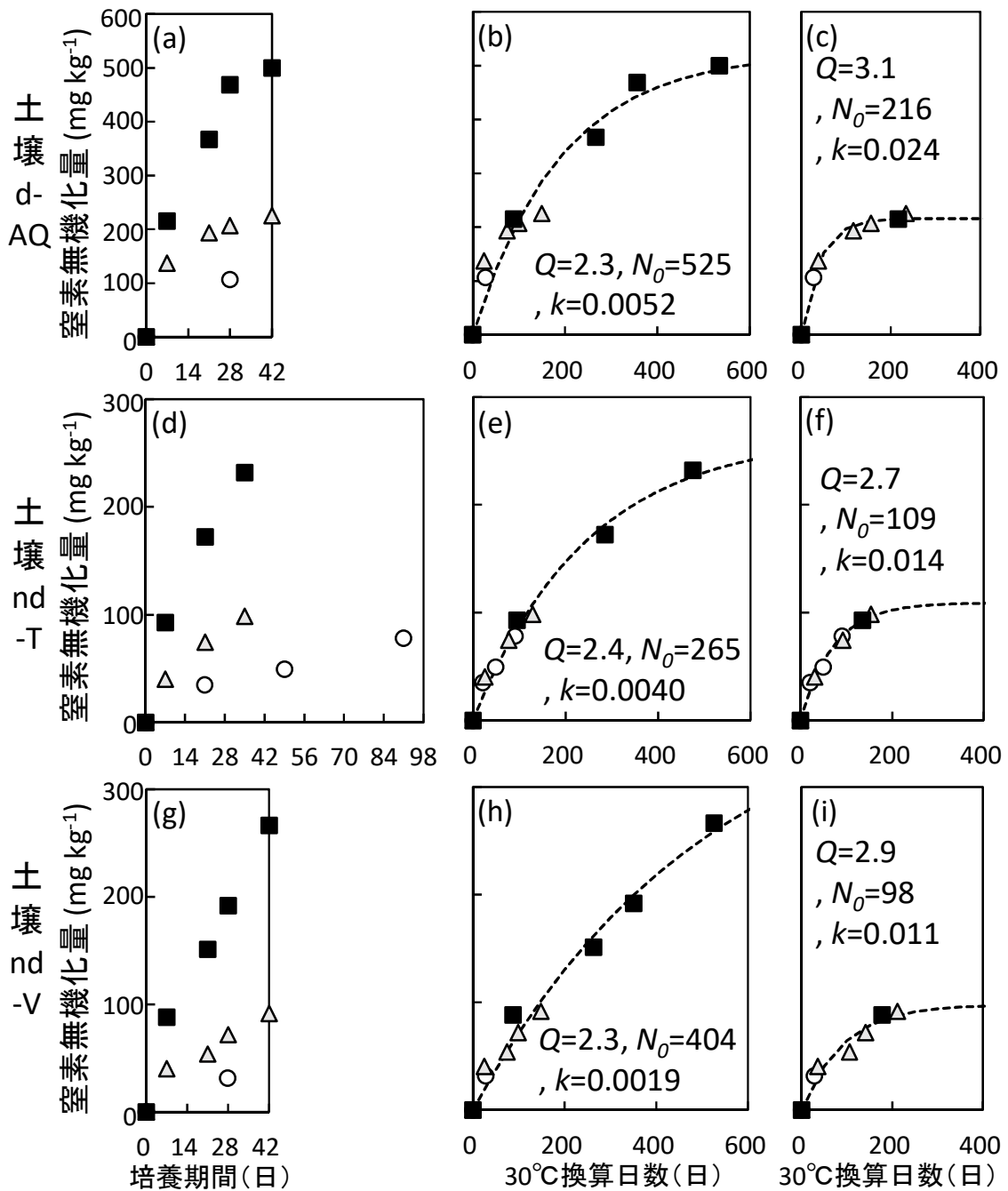


図5-2 土壤窒素無機化のモデル解析結果

○は培養温度 30°C、△は同 45°C、■は同 60°Cのときの結果。(a)、(d)、(g)は無機化量の経時変化。(b)、(e)、(h)は全ての実験値を用いてパラメータ算出した結果。(c)、(f)、(i)は培養温度 60°Cについて培養期間 8 日間以降の結果を除いてパラメータ算出した結果。図中、 Q 、 N_0 、 k は算出したパラメータ値。点線はモデル計算結果。

5.2.3 考察

一般的に、土壤窒素無機化は土壤微生物の働きによる。しかし、太陽熱消毒により多くの土壤微生物が数を減らす（イチゴ萎黄病(小玉・福井, 1982)など植物病原体に関する多数の報告の他に、例えば糸状菌・グラム陽性細菌・蛍光性シュードモナスなど(Stapleton・DeVay, 1982)、線虫・アンモニア酸化菌など(和田ら, 2008; Ihara ら, 2014)) ことが指摘されている。このことから、45°Cや60°Cといった太陽熱消毒を特徴づける高い培養温度条件下では、土壤微生物による土壤有機物の分解特性は通常温度域とは異なる可能性がある。また、高温になるほど、死滅した土壤微生物菌体からの無機態窒素の供給や、高温が土壤有機物に及ぼす化学的な影響（例えばタンパク質の変性）も無視できなくなると考えられる。以上のことから、60°Cの高い培養温度条件下では、既往の研究に比べて異なる要因で土壤窒素無機化が進んだ可能性も否定できない。しかし、本研究の結果は、太陽熱消毒条件下における土壤窒素無機化量に及ぼす培養温度の影響が既存の反応速度のモデルで評価できることを示している。

しかし、より細かい議論としては、用いるモデル式やモデルパラメータを得るための培養実験の温度や期間について課題が残る。金野・杉原(1986)は、20、25、30°Cの3水準での土壤窒素無機化量のモデル解析において、土壤窒素無機化量を経時的に調査したときに、一定期間後には窒素無機化量は最大値に達し、その到達点は温度によらず同じ N_0 に収束すると仮定した。本研究(式(4))でも準じたこの仮定は、未知パラメータ数を少なくし、培養実験の結果をもとにしたパラメータの算出を容易にしている。一方で、本研究では、太陽熱消毒中の最高地温の計測値を参考に、30、45、60°Cの3水準の培養温度条件を設けたが、60°Cでは、30°Cや45°Cに比べて極端に土壤窒素無機化量が多かった。Benbi・Richter(2002)も、 N_0 は培養温度や期間によって異なる

る値に算出されうることを指摘しており、本研究では、培養温度が高かったことと、温度水準の幅が 15°C 間隔で大きかったことから、培養温度毎の最大土壌窒素無機化量の違いが顕著であったものと考えられる。このことは、本研究で実施した 30、45、60°C の 3 培養温度水準における土壌窒素無機化量のモデル化に、式(4)ではなく、培養温度によって N_0 を変化させる別のモデル式を用いるべきではないか、という疑問を投げかける（このことは、付録 D で示したアレニウス則を用いた解析結果ではより明確に示された）。そのようなモデルとの比較は、今後の課題である。

一方で、実用的には、パラメータの算出が容易な式(4)を用いつつ、モデルパラメータの算出に用いるデータを得るための培養実験の培養温度と期間の設定の工夫で、モデルによる土壌窒素無機化量予測のあてはまりを改善することもできる。本研究を実施した茨城県および共同研究機関のある長崎県において、露地 4 件で太陽熱消毒を 36～48 日実施したときの深さ 5 cm、15 cm における地温を計測したところ、最高地温が 51～59°C の範囲であり、45°C 以上にはのべ 63～181 時間（2.6～7.5 日間）到達した（データ略）。この結果を背景に、4.3.3.1 で示した 7 土壌に関する 3 温度水準の培養実験で各培養温度、期間ごとに計測した土壌窒素無機化量のうち、培養温度 60°C については培養期間が 7 日間の結果のみを採用して（土壌 d-AQ と nd-V では培養温度 60°C で 21、28、42 日間の結果を除いて、土壌 nd-T では培養温度 60°C で 21、35 日間を除いて、また、培養温度 30°C と 45°C については全ての培養期間の結果を採用して）モデルパラメータ算出した結果を図 5-2(c)、(f)、(i)に示す。これにより、モデル計算値は実験値により近い値となった。例えば、図 5-2(h)において、培養温度 30°C および 45°C の中で培養期間が最も短い（30°C 換算日数 28 日前後の）実験値に対して、モデルはやや過小の計算値を与えたのに対し、図 5-2(i)では実験値と計算値が近くなっ

た。なお、同様に施設 5 件（和歌山県、宮崎県）で太陽熱消毒を 26～36 日間実施したところ、最も高地温であった試験地では、60℃以上の地温はのべ 139 時間（5.8 日間）、45℃以上の地温は 566 時間（23.6 日間）計測された。生産現場では 4 ヶ月や半年以上のように長期間太陽熱消毒を行う場合もあるので、30℃換算日数が多いと予想される場合には、高地温条件でのモデル予測精度を重視して、モデルパラメータの算出において培養温度 60℃での長期の実験値を採用すべきである。

5.3 モデルのオンサイトでの検証

5.3.1 方法

ここでは、太陽熱消毒前の圃場の作土から採取した土壌を培養して、前節のモデルのパラメータを求め、そのパラメータを用いて、実際に農耕地で太陽熱消毒をしたときの消毒後の作土の無機態窒素含量をモデル予測可能か検証した。

モデル検証に用いる圃場データ（地温と土壌窒素無機化量）を得るため、茨城県つくば市にある農研機構中央農業研究センター内圃場（淡色黒ボク土）で太陽熱消毒を実施した。2013 年 8 月 13 日に、深さ 15 cm まで耕起後、幅 90 cm、畝高 5 cm の平畝を立てた。畝内土壌の一部を畝表面から深さ 15 cm まで掘り取って、そこに直径 14 cm の円筒形で深さ 16 cm の形状にしたシート（畦平シート、岩谷マテリアル）で無底枠を 10 枠作り、そこに土壌（2013 年 8 月 6 日にその圃場において過去に消毒履歴が無い箇所から採取し、均一化のため未風乾のまま 8 mm メッシュのふるいを通し、含水率を 37%に調節したもの）を枠あたり 2 kg 充填し、周辺をスコップで元どおりの畝の形状に整えた。10 ある枠のうち、6 枠は土壌窒素無機化量の評価のため無施肥とし、1 枠は地温計測用として深さ 5、15 cm に温度センサ（TR-0406 または TR-5106、T&D 社）を設置した。残り 3 枠には、太陽熱消毒中における硝酸態

窒素の溶脱の影響を推定するため、臭化カリウムを混和した土壌を充填し、太陽熱消毒開始から 37 日後に土壌中の臭化物イオン (Br^-) 含量を計測して、試薬として消毒前に混和した Br^- の消毒後土壌における残存率を評価した。枠外は無施肥とした。なお、枠外でも別途深さ 5、15 cm において 1 反復で地温を計測し、枠内とほぼ同じ地温を得たことから、枠内外で計測した地温を平均して 2 反復の計測値とした。その後、0.02 mm 厚のフィルム（透明マルチ、積水フィルム）で全面を被覆し消毒を開始した。

太陽熱消毒は 59 日間実施した。1 時間毎に計測した地温 T から計算される $Q^{(T-30) \div 10} \div 24$ をその 1 時間の 30°C 換算日数とし、これを消毒期間を通じて積算することで、消毒期間を通じた 30°C 換算日数とした。無機態窒素含量計測用の土壌は、消毒開始 37 日後と 59 日後の 2 回（各回 3 枠ずつ）採取した。枠内の土壌を深さ 15 cm まで全量取り出し、重量を計測するとともに、均一化のためよく攪拌した。太陽熱消毒前後の土壌中無機態窒素含量の差し引きで得た値を、土壌窒素無機化量の圃場での観測値とした。

5.2 節で使用した土壌 nd-T は、本節のオンサイトでのモデル検証実験を実施した圃場において消毒履歴のない場所から 2013 年 9 月に採取した作土である。そのため、図 5-2(f) のモデルパラメータ N_0 、 k_0 、 Q により圃場データによる検証を行った。

5.3.2 結果および考察

太陽熱消毒 37 日後における枠内土壌の Br^- 含量は、3 反復の枠それぞれ当初の 90、96、98% であり、消毒中の溶脱は少なかった（データ非掲載）。このことから、土壌有機物の分解によって生成する硝酸態窒素の溶脱も少なかったと考えられる。フィルム被覆をすると、降雨はフィルムを被覆していない畝間を浸透し、畝内からの無機態窒

素の溶脱量が低減するという報告は他にもある(松本, 2002; 大塚ら, 2007)が、溶脱量が無視できない場合には、モデルの計算値は太陽熱消毒後の作土の無機態窒素含量を過大評価することに注意が必要である。

消毒 37 日後、59 日後いずれにおいても、深さ 5 cm での計測地温を用いて算出したモデル計算値は圃場での観測値よりわずかに高く、深さ 15 cm での計測地温を用いて算出したモデル計算値は圃場での観測値以下となった (表 5-1)。

表 5-1 地温の計測深および消毒期間ごとの 30°C換算日数、土壤窒素無機化量のモデル計算値と圃場試験における計測値

地温の 計測深さ —cm—	消毒期間 —日—	地温 (平均(最低～最高)) —°C—	30°C換算 日数 —日—	無機化量 計算値 N_{min} * —mg kg ⁻¹ —	無機化量 実測値
5	37	32.9(20.1～48.0)	55	55	58
	59	30.7(17.3～48.0)	74	70	69
15	37	31.2(24.9～36.9)	41	41	58
	59	29.3(21.3～36.9)	57	54	69

*この圃場で採取した土壌を培養した結果 (図 5-2(f)) 得られたモデルパラメータを用いた

圃場における土壤窒素無機化量は、太陽熱消毒後に深さ 0-15 cm から採取した土壌を混ぜて均一にしたサンプルを分析して得たが、太陽熱消毒中の地温は、深さ 0 cm から深さ 15 cm にかけて異なる。地温を土壤消毒の効果を確認する目的で用いるのであれば、一般的には、太陽熱消毒中の地温は、地表面に近いほど日内変動が大きく、また、日最高地温が高い (すなわち土壤消毒の効果が高い) 傾向があるから、消毒対象とする土層の下端で地温を計測し、そこで十分な積算地温が得られたことをもって消毒効果の目安とするのが合理的である。一方で、圃場における土壤窒素無機化量を精緻に予測するための地温の計測方法としては、2～3 点以上の深さで地温を観測し、観

測値をもとに作土のそれぞれの深さにおける 30℃換算日数を推定し、それらを平均化するの望ましい。実験 2 と同じ圃場で 2012 年に深さ 1、5、15 cm の 3 深度で太陽熱消毒中の地温を計測した結果をもとに、作土（深さ 1～15 cm）の平均的な 30℃換算日数を計算したところ、それは深さ 6～7 cm の地温推定値から計算される 30℃換算日数に近い値であった（データ未掲載）。この結果は、深さ 5 cm での地温を用いた場合に、土壌窒素無機化量のモデル計算値は圃場での観測値よりわずかに多かったとする前述の結果に近かった。作土を代表する 30℃換算日数を与える地温の観測深さは土壌の種類や水分含量、作土深、日照などによって圃場ごとに異なるが、作土の中間的な深さよりやや上の位置（本研究では約 5 cm）と考えられる。

5.4 高温条件下における窒素無機化量予測への簡易土壌評価法の適用

5.4.1 背景と目的

多様な土壌について、培養実験によりモデルパラメータを算出することなく土壌ごとの窒素無機化量の大小を簡易に評価することを目指し、生産者にも活用可能な土壌有機物含量の簡易評価法として新しく提案された上菌らの簡易土壌評価法が、高温条件下における土壌窒素無機化量の予測に有効か検討した。

5.4.2 方法

5.4.2.1 検証に用いた培養実験のデータ

4.3.3.2 で土壌 74 点について定量した、培養温度 45℃で 21 日間培養したときの土壌窒素無機化量を用いた。

5.4.2.2 土壌可給態窒素含量の簡易評価法

土壤可給態窒素含量の簡易評価法は、上菌ら (2010a)の方法に準じた。すなわち、風乾土 3 g と 80°Cの温水約 50 mL を三角フラスコ中で混和し、フタをして 80°Cの送風定温乾燥機内で 16 時間静置後振とう、放冷した。そこに 10%硫酸カリウム溶液を 5 mL 添加し、再度振とう後ろ過して得た抽出液の全有機炭素 (TOC) 濃度を全有機体炭素計 (TOC-L、島津製作所) で計測した。以降、このように土壤から抽出された TOC 量を「抽出 TOC」含量と呼ぶ。なお、この値を上菌らの経験式に当てはめれば、簡易評価法により推定した土壤可給態窒素含量が求まる。

5.4.3 結果

風乾土 49 点について、抽出 TOC 含量は 287~1608 mg kg⁻¹であった。抽出 TOC 含量と 45°C21 日間培養中の土壤窒素無機化量との相関を調べたところ、回帰式は、 $y = 0.105x + 7.6$ ($R^2=0.68$)となり、正の相関が認められた (図 5-3)。

未風乾土 25 点について、抽出 TOC 含量は 148~1170 mg kg⁻¹であった。抽出 TOC 含量と「45°C21 日間培養中の土壤窒素無機化量」との回帰式は、 $y = 0.085x + 3.1$ ($R^2=0.63$)であり、正の相関が認められた (図 5-3)。

5.4.4 考察

図 4-3 および図 4-4 で示したとおり、「45°Cで 21 日間培養したときの土壤窒素無機化量」と土壤全炭素、全窒素含量の間には、土壤を採取した地域や土壤タイプが同じであれば、強い正の相関があった。それに対して、抽出 TOC 含量は、土壤を採取した地域や土壤タイプによらず、正の相関が認められた (図 5-3)。

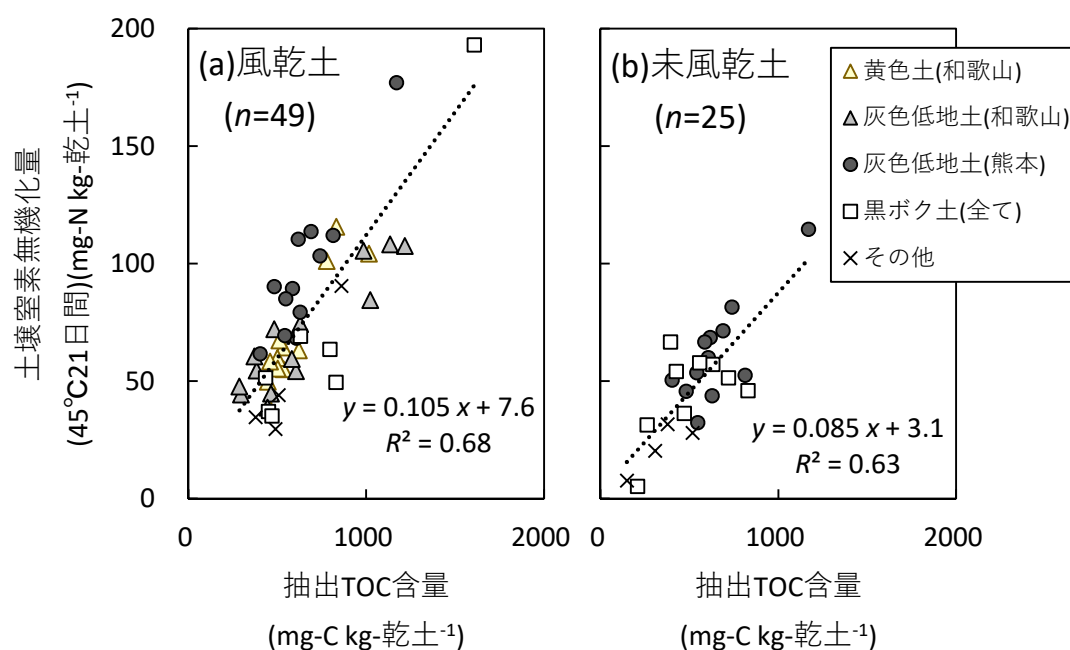


図5-3 45°Cで21日間培養中の土壌窒素無機化量と上菌らの方法により土壌から抽出された TOC 含量の関係 (a) 風乾土について、(b) 未風乾土について

上菌らの簡易評価法は、「風乾土」を 30°C で 28 日間培養したときの土壌窒素無機化量の推定に有効とされている。本研究により、上菌らの簡易評価法は、風乾土、未風乾土の 45°C における土壌窒素無機化量の目安としても有効であることが示された。

土壌を採取した地域や土壌タイプ別にみると、風乾土では、同じ灰色低地土でも、熊本で採取した土 (図 5-3(a) 中○) は和歌山で採取した土 (図 5-3(a) 中△) より抽出 TOC に対して土壌窒素無機化量がやや多かった。このように、抽出 TOC は地域・土壌タイプが異なる場合にも有効であるが、地域や土壌タイプを絞ればより精密に評価可能なものと考えられた。そのため、今後より多くの土壌について土壌の種類、地域性、また過去の肥培管理などの影響についてデータを蓄積し、非消毒条件についてとりまとめた古江・上沢 (2001) にならい、検証データを集約することが望まれる。

5.5 モデルと上菌らの簡易評価法を組み合わせた土壌窒素無機化量の予測と課題

本研究では、太陽熱消毒に伴う土壌窒素無機化量をモデル予測することを目指し、室内およびオンサイトで検証実験を行った結果、培養実験によりモデルパラメータを得れば、比較的簡易な Q_{10} 則を導入したモデルにより、土壌窒素無機化量に培養温度および培養期間（あるいは太陽熱消毒中の地温および消毒期間）が及ぼす影響を評価できることを示した。また、多様な土壌について、培養実験によりモデルパラメータを算出することなく土壌ごとの窒素無機化量の大小を簡易に評価することを目指し、上菌らの簡易評価法が 45°C で 21 日間培養したときの土壌窒素無機化量の推定に有効であることを示した。

本研究の先にある目標は、上記の 2 つの予測手法（モデルと土壌の簡易評価法）を組み合わせることで、培養実験を行なうことなく、太陽熱消毒に伴う土壌窒素無機化量を推定することである。その方法と課題を以下に記す。 45°C で 21 日間培養したときの土壌窒素無機化量を $N_{\min 45^{\circ}\text{C}, 21 \text{ 日}}$ とすると、 N_0 は式(1)から、

$$N_0 = N_{\min 45^{\circ}\text{C}, 21 \text{ 日}} \div (1 - \exp(-k_0 \times Q^{(45-30) \div 10} \times 21)) \quad (5)$$

で表すことができる。 $N_{\min 45^{\circ}\text{C}, 21 \text{ 日}}$ が図 5-3(a)の回帰式を用いて「上菌らの簡易評価法により推定した土壌可給態窒素含量」から推定でき、かつ、パラメータ Q 、 k_0 を経験的に複数の土壌で共通の値に定めることができれば、式(5)により土壌ごとの N_0 が推定できる。こうして得た N_0 を式(4)に返すことにより、任意の期間、地温に対して土壌窒素無機化量の推定値を計算することができる。パラメータ Q 、 k_0 を経験的に複数の土壌で共通の値に定めるためには、パラメータに及ぼす地域性や土壌の種類、過去の肥培管理などの影響を明らかにするためデータの蓄積が望まれる。また、地温上昇が土壌窒素無機化量に及ぼす影響のメカニズムベースでの評価もさらに必要である。

それによって、例えば、培養温度 45°Cにおける土壤窒素無機化量の推定に上菌らの簡易評価法を用いる場合に、実際の圃場の土壤条件に近い未風乾土について、風乾土よりも精度がやや劣る原因の解明が期待される。

図 5-4 は、圃場 A で 2013 年に実施した太陽熱土壤消毒で、消毒後の土壤中無機態窒素含量を、無肥料の試験枠と化成肥料を混和した試験枠について比較したものである。圃場 A の作土（土壤 nd-T）は、上菌らの方法による抽出 TOC 含量が 558 mg kg^{-1} であったから、供試土壤の中では土壤可給態窒素含量は中庸といえる（図 5-3）。この例では、太陽熱消毒後の土壤中無機態窒素のうち、土壤有機物の分解に伴う窒素無機化量（土壤由来）は 58 mg kg^{-1} と見積もられた。化成肥料（窒素施肥量 10 g-N m^{-2} ）由来が同 92 mg kg^{-1} であったから、土壤由来としては窒素施肥量 $10 \times 58 \div 92$ で 6.3 g-N m^{-2} 相当であったといえる。例えば、作型や地域にもよるがトマトへの基肥窒素量は 10 g-N m^{-2} 前後であるから、太陽熱消毒後の栽培では、施肥量を調整する必要がある。付録 G に、本研究の成果をもとに施肥量を調節する場合の考え方と手順を記した。このように本技術を利用する際の課題としては、前述のように、推定には一定の誤差がある中で、推定結果を実用的に施肥に活かすためには、消毒後作物で窒素過剰害が危惧される場合と、窒素過剰害は予測されないが環境負荷低減や良好な土壤環

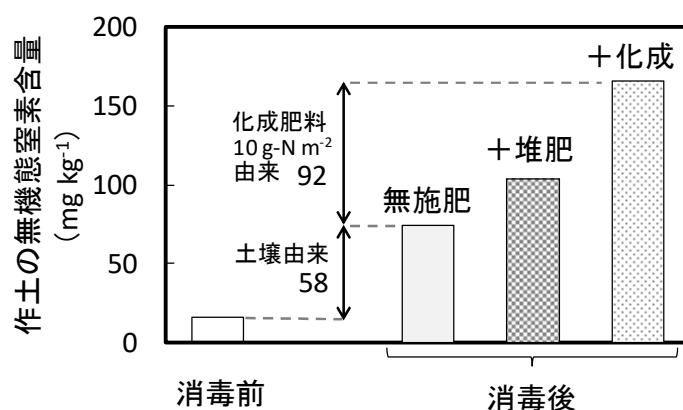


図 5-4 太陽熱消毒前後の土壤中無機態窒素含量の例

境づくりの観点から施肥量を削減したい場合などのケースごとに、また消毒後の栽培において追肥で窒素供給量を調整できる環境にあるかどうかも考慮の上で、施肥量の推奨値を算出するための安全率を定める手法のマニュアル化と、さらなる検証が求められる。

5.6 まとめ

第5章では、高温条件下での土壤窒素の無機化特性をモデル解析し、太陽熱消毒の高地温条件での検証とモデルの改良を行った。また、高温条件下での土壤窒素無機化量予測への簡易土壤診断法の適用可能性を検証した。得られた結果は以下のようにまとめられる。

1. 30・45・60℃の3水準の培養温度における土壤窒素無機化量を、既往の土壤有機物の無機化モデル式に、温度影響の項を導入した、以下の式で推定することを試みた。

$$N_{min} = N_0 \times (1 - \exp(-k_0 \times Q^{(T-30)^{-10}} \times t)) \quad (6)$$

なお、 N_{min} ：土壤窒素の無機化量予測値 (mg-N kg-soil⁻¹)、 t ：時間 (日)、 T ：地温 (°C) であり、 N_0 (mg-N kg-soil⁻¹)、 k_0 (単位なし)、 Q (単位なし) は係数である。

2. 式(6)により、培養温度・期間が異なるときの土壤窒素無機化量を、比較的少ないパラメータで統一して表すことに成功したが、土壤によっては、式(4)による推定値は、培養実験による実測値との誤差が大きかった。その原因として、培養温度が45℃と60℃では、長期培養したときに頭打ちになる窒素無機化量が異なったことを、モデル式がうまく表現できないことが考えられた。

3. 太陽熱消毒中の実測地温9件から、消毒中に想定される典型的な地温条件を整理した結果、露地畑での太陽熱消毒など、比較的地温が低く推移すると考えられる場合に

は、60°Cで長期培養したときの窒素無機化量をモデルパラメータの算出に用いる教師データから除くことで、モデル計算値と培養実験による実測値の誤差を小さくできることを見いだした。

4. 太陽熱消毒を行った圃場から採取した土壌を室内実験に供し、その結果でパラメータフィッティングしたモデルは、その後圃場で太陽熱消毒したときの消毒後土壌の無機態窒素含量の予測にも有効であった。つくばの圃場 A における研究事例では、深さ 5 cm と深さ 15 cm の 2 深度でそれぞれ 1 時間ごとに観測した地温をもとにモデルパラメータ 30°C 換算日数 ($Q^{(T-30)+10} \times t$) を計算し、一方で、深さ 0-15 cm から採取した土壌の無機態窒素含量をモデル計算値の検証に用いたところ、深さ 5 cm の地温を用いたときに、モデル計算値は実測値に近い値を与えた。深さ 15 cm の地温を用いた場合には、モデル計算値は実測値に対して過小評価になったので、留意すべきである。

5. 上菌ら (2010b)が開発した土壌可給態窒素含量の簡易評価法は、培養温度 45°C での土壌窒素無機化量の予測にも有効であることを明らかにした。

第6章 結論

本研究で得られた主な結果は以下のように整理できる。

1. 太陽熱消毒中の土壌中環境条件を特徴づけるのは、深さ 5~10 cm では 40~50°C 以上になる高地温である。
2. 消毒中の高地温によって、硝化、窒素無機化といった、消毒後の作物栽培に大きく影響する窒素動態への影響が生じる。
3. 硝化は培養温度 30°C以上では培養温度が高いほど抑制された。50°C以下では抑制されつつも硝化は進んだが、60°Cでは硝化は停止し、いったん 60°Cで処理した土壌を 30°Cに戻しても硝化は回復しなかった。硝化抑制と培養温度の関係を示したことで、今後、生産現場で地温を計測したときに、硝化抑制の程度を判別しやすくなると考えられる。
4. 消毒後土壌では、45°Cにおける硝化活性が高まることを発見した。硝酸態窒素とアンモニウム態窒素では、作物による利用しやすさや、降雨時の地下流亡しやすさが異なることから、硝化抑制の程度は作物の生育に影響する可能性がある。消毒をはじめて行ったときと、2 回目以降で、太陽熱消毒時の硝化抑制の程度が異なることを念頭に、消毒後の肥培管理を行うべきである。
5. 消毒は土壌有機物の窒素無機化を著しく促進する一方で、家畜ふん堆肥や有機質肥料といった有機質資材の窒素無機化量への影響は限定的であった。これまで調べられてこなかった、これら特性をデータベース化した。
6. 土壌については、反応速度論的なモデルにより窒素無機化量に及ぼす培養温度および期間の影響を評価できることを明らかにした。消毒前の圃場で採取した土壌を用いて培養実験し、その結果でパラメータフィッティングしたモデルは、圃場で観測した

土壌窒素無機化量の予測に有効であった。

7. 上菌ら (2010b)が開発した土壌の簡易評価法 (80°C16 時間水抽出法) は、風乾土 45°C培養時の窒素無機化量の予測にも有効であることを明らかにした。

本研究によって、生産現場で地温を計測した上で、土壌・有機質資材の診断手法等を活用することにより、太陽熱消毒時の窒素基肥量を高度化しうる事が明らかになった。その考え方に関するパンフレット、マニュアルを作成し、現在普及および手法の改善に努めている。

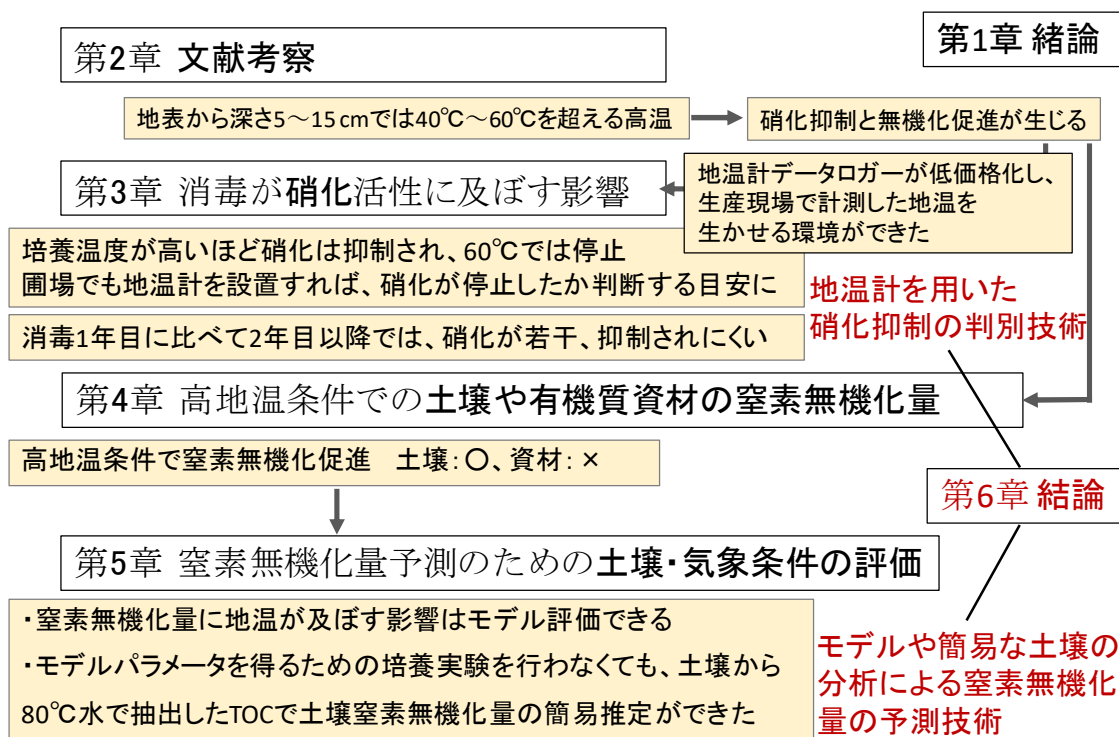


図 6-1 論文の構成と結論

付録A 茨城県つくば市で実施した圃場試験の概要と調査方法の整理

本研究では、室内実験に加えて屋外の農耕地（以下、圃場）土壌の調査を行った。著者自身が試験設計した圃場試験地に加えて、共同研究者等が試験実施した圃場においても地温の観測や土壌理化学性の分析を行った。これら調査の結果は、本文中の4、5、6章において、各章の論旨に添うデータを抜き出す形で分けて記載したが、ここでは、本稿に関連する圃場調査の全体像を概説する。

付録A.1 圃場試験地一覧

著者自身が主に研究を行ったのは茨城県つくば市にある農研機構中央農業総合研究センター（現在、中央農業研究センター）内の露地畑試験圃場（以下、圃場A）である。この他に、同じ中央農業研究センター内の施設トマト栽培圃場、太陽熱消毒を活用しつつニンジンレタスを有機栽培した露地圃場、長崎県の露地バレイショ栽培圃場、宮崎県のトマト栽培圃場、和歌山県の施設実エンドウ栽培圃場において、地温観測や土壌調査を行った（図A-1、表A-1）。なお、図1-1の写真左は圃場H、写真右は圃場Fで撮影した。



図A-1 試験地一覧

表 A-1 共同研究者の圃場試験概要とそこで著者が実施した調査概要

場所		作物	対象病害	年次	著者が関わった調査の内容と年次
茨城県	施設	トマト	トマト立枯病	2014 -2015	地温・土壌水分含量の計測 (2014)。
茨城県	露地	ニンジン レタス	雑草、線虫など (有機農業体系の一環)	2008 -2011	消毒の有無、堆肥施用の有無の履歴が異なる処理区から土壌を採取し、硝化活性等を評価 (この圃場における主な栽培試験が終了した後の 2012 年に採取した土壌を供試した)。→3.8.2.2。
長崎県	露地	バレイシヨ	そうか病	2013 -2015	地温※・土壌水分含量の計測 (2014)、採取した土壌の硝化活性、可給態窒素含量の評価 (2013-2014)。
宮崎県	施設	トマト	トマト立枯病	2013 -2015	地温※の計測 (2013)
和歌山県	施設	実エンドウ	苗立枯れ症状	2013 -2015	地温※の計測 (2014)、採取した土壌の可給態窒素の評価 (2013-2014)。

※：地温計測方法を著者が指定した上で、実際の観測は共同研究者が実施した

なお、茨城県の施設トマト栽培圃場での研究については越智直ら (2015)、有機農業栽培条件下におけるニンジン、レタス作の研究については建部雅子ら (2014) が報告した。

付録 A.2 茨城県つくば市の圃場 A の概要

茨城県つくば市の農研機構中央農業研究センター (36°02'N、140°05'E) 内にある圃場 A は、昭和 49 年に、茨城県内の他の場所から異なる 4 種類の土壌を持ち込み、深さ 70 cm まで充填したものである (図 A-2)。充填した土壌は、それぞれ採取地における土壌分類から淡色黒ボク土試験区、多腐植質厚層黒ボク土試験区、灰色低地土試験区、黄色土試験区と呼ばれている。各試験区の広さは幅 20 m、奥行き 25 m である。

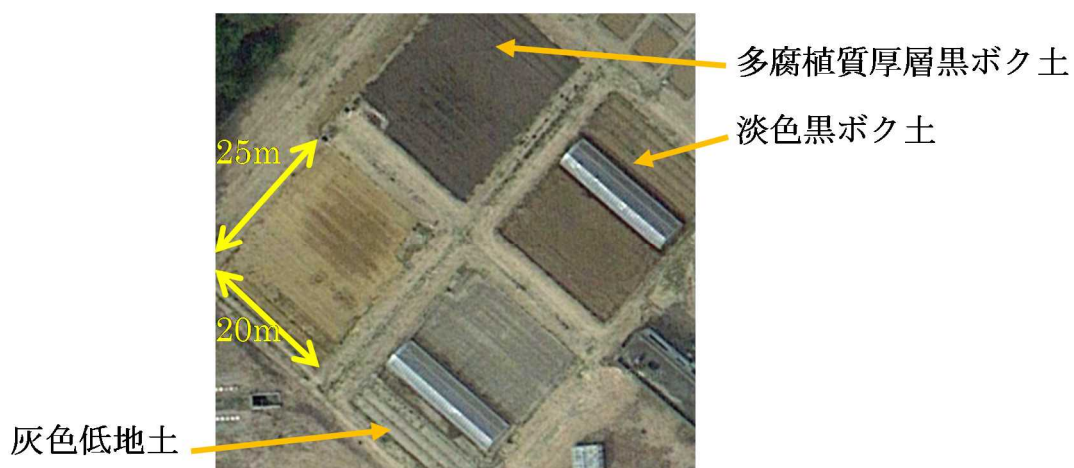


図 A-2 つくば露地圃場の概要

付録 A.3 圃場 A で実施した試験の方法

圃場 A では、2010 年から 2013 年にかけて、茨城県内のニンジン有機栽培に取り組む生産者が実施する方法を参考に、各年夏季に 1 回太陽熱消毒した（図 A-3）。



図 A-3 太陽熱消毒の様子（左；消毒中の試験区遠景、右；枠試験区（土壌採取のため奥からフィルムを剥ぐ作業の途中））

そのうち、2010～2012 年の 3 カ年には、太陽熱消毒と施肥が短期的（消毒直後～数ヶ月後）、中長期的（消毒翌年～数年後）な土壌特性に及ぼす影響を評価するため、消毒の有無、施肥の有無が異なる 6 処理を設けた（表 A-2）。

表 A-2 処理区の設定（消毒の繰り返しが土壌特性に及ぼす影響の評価）

	2010年		2011年		2012年	
	消毒	施肥	消毒	施肥	消毒	施肥
1	1年目	あり	2年目	あり	3年目	あり
2		なし		なし		なし
3	対照 (非消毒)	あり	1年目	あり	対照 (非消毒)	あり
4		なし		なし		なし
5			対照 (非消毒)	あり	1年目	あり
6				なし		なし

図 A-2 に示した 3 土壌それぞれに設定した（計 18 処理）。各処理区は幅 1m×長さ 9m。消毒のためフィルム被覆を継続した期間は、2010 年は 6 月～8 月、2011 年は 6 月～8 月、2012 年は 7 月～8 月である（表 A-3）。なお、生産現場であれば通常、消毒後に作物を栽培するが、本研究では、作物栽培に伴う土壌中養分の吸収や土壌物理性の変化の影響を除いた条件で消毒が土壌の諸特性に及ぼす影響とその後の回復過程を評価するために、消毒後に作物は栽培せず、また、耕起せずに消毒時に立てた畝を維持した。その間、除草剤を含め農薬は一切使用せず、翌年の 3 月頃まで、生えてきた雑草を手作業で抜きながら、土壌の調査を継続した。春以降、太陽熱消毒の開始までは、耕耘機で深さ 15 cm まで耕起して除草した。耕起時には、異なる処理区間での土壌の移動を極力抑えるため、処理区ごとに耕起した。

上記試験区とは別に、2012 年と 2013 年には、牛、豚、鶏ふん堆肥や市販有機質肥料など多数の有機質資材を小面積の枠内で土壌に混和し、消毒後における土壌理化学性を調査した（結果の一部は付録 C に示す）。また、2011～2012 年には、未消毒の場所に小面積の消毒区を設定し（図 A-3 右）、消毒が硝化活性に及ぼす影響について、その影響が消毒翌年に採取した土壌でも持続しているか確認した（3.7 節）。この小面積の消毒区における土壌の成形方法は、土壌を深さ 15 cm まで耕起後、鍬で幅、長さともに約 100 cm、高さ 5 cm の形状に整えた。

各年、太陽熱消毒の開始前および終了直後、また、終了後一定期間後において、土壌を採取した（表 A-3）。土壌の採取方法は、1) 調査深度が深さ 0-15 cm や 0-20 cm から 1 サンプルを採取する場合は、ハンドオーガー（大起理化工業 DIK-100A 等）を利用した。2) 5 cm 刻みで深さ 0-5 cm、5-10 cm、10-15 cm の土壌分けて採取する場合は、高さ 5 cm、100 mL 容のステンレス製円筒（大起理化工業 DIK-1801）を用いた。同じ処理区内の同じ深さ 4～8 箇所から採取した土壌をコンポジットした。

表 A-3 各年次における調査方法と日程

2010年

	消毒前	消毒途中	消毒終了直後	消毒後(無作付)	
	6月15日	7月7日	8月2～16日	10月4日	12月7日
調査深度	作土 (深さ0-15cm)	深さ0-20cm	深さ0-5cm, 5-10cm, 15-20cm	深さ0-5cm	深さ0-5cm, 5-10cm, 10-15cm, 15-20cm
含水率	○	○	○		○
容積重	○		○		○
土壌硬度				○	
pH	○		○		
EC	○		○		
全炭素・ 全窒素	○		○		
80°C16時間 水抽出TOC	○		○		
無機態窒素	○	○	○		
硝化活性		アンモニア添加後 30°C培養0, 7, 21日 後の硝酸化成量	アンモニア添加後 30°C培養0～23日後の 硝酸化成量 *一部区は48日後まで		

2011年

	消毒前	消毒終了直後	消毒後(無作付)			
	6月23日	7月26日～8月4日	8月17～18日	9月15～16日	10月18～19日	12月5～6日
調査深度	作土 (深さ0-15cm)	深さ0-5cm, 5-10cm, 10-15cm, 15-20cm	0-5cm, 5-10cm *一部区のみ	0-5cm, 5-10cm *一部区のみ	深さ0-5cm, 5-10cm, 10-15cm	深さ0-5cm
含水率	○	○	○	○	○	○
容積重	○	○	○	○	○	○
土壌硬度						○
pF-水分曲線	○		○			
飽和透水係数		○				
pH	○	○			○	
EC	○	○			○	
全炭素・ 全窒素	○					
80°C16時間 水抽出TOC	○	○			○	
Br-	○	○				
無機態窒素	○	○	○	○	○	
硝化活性		<ul style="list-style-type: none"> ・アンモニア添加後30°C培養0, 7, 14日後の硝酸化成量 ・アンモニア添加後45°C培養0, 7, 14日後の硝酸化成量 				
地温計測		深さ5cm				
土壌水分 センサ		深さ5, 15cm				

表 A-3 各年次における調査方法と日程（つづき）

2012年

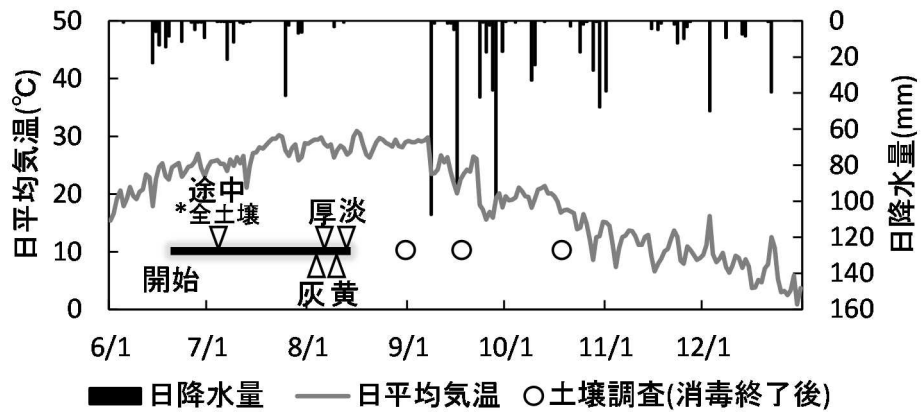
	消毒前	消毒終了直後	消毒後(無作付)			
	7月4日	8月9～17日	8月24日	9月11～14日	9月27日	10月30日～ 11月1日
調査深度	作土 (深さ0-15cm)	深さ0-5cm, 5-10cm, 10-15cm		0-5cm, 5-10cm *一部区のみ	0-5cm *一部区のみ	深さ0-5cm, 5-10cm, 10-15cm
含水率	○	○		○	○	○
容積重	○	○		○	○	○
土壌硬度			○			
pH	○	○		○		
全炭素・ 全窒素	○					
80°C16時間 水抽出TOC	○	○				○
30°C4週間 培養可給態 窒素		○				
Br-	○	○				
無機態窒素	○	○		○	○	○
硝化活性	・アンモニア添加後30°C培養0, 7, 14日後の硝酸化成量 ・アンモニア添加後45°C培養0, 7, 14日後の硝酸化成量					
地温計測	深さ1, 5, 15cm					
土壌水分 センサ	深さ5, 15cm ※畝中心と肩付近					

※調査終了直後の日付が複数日に分かっているのは、消毒終了の日付が3圃場それぞれに違ったためである。具体的には、2010年が8/2に灰色低地土、8/4に厚層多腐植質黒ボク土、8/16に淡色黒ボク土。2011年が7/26に灰色低地土、8/1に淡色黒ボク土、8/4に厚層多腐植質黒ボク土。2012年が8/9が淡色黒ボク土、8/16が灰色低地土と厚層多腐植質黒ボク土であった（消毒終了が8/16で、土壌調査が8/17まで継続したため、表中の調査日程は8/17までと記載した）。土壌硬度は、プッシュコーン（大起理化工業 DIK-5553）を土壌表面に上から刺して計測した。

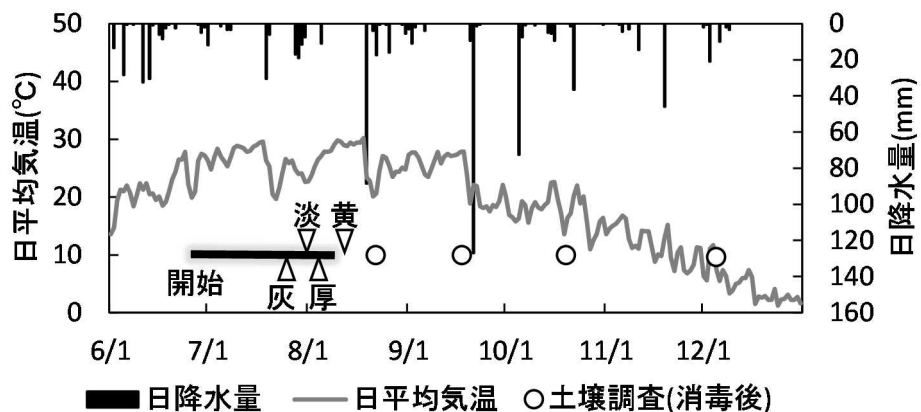
土壌採取方法：調査深度が深さ 0-15 cm や 0-20 cm の場合は、土壌採取器具（ハンドオーガーなど）を利用して調査対象の深さ全体から土壌を採取した。0-5 cm のように 5 cm 刻みで採取したときには、高さ 5 cm、100 mL 容のステンレス製円筒に採取した。4～8 サンプルを採取しコンポジットした土壌サンプルを理化学性の分析に供した。理化学性の分析方法は本文中に記載した。

付録B つくば市圃場における気温、降水量、地温計測結果

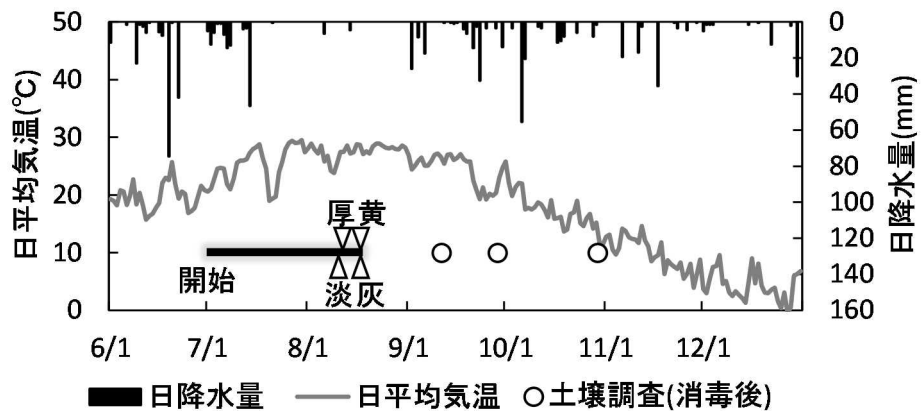
付録A で示したつくば市の圃場A から約1 km 離れた農業環境変動研究センターで観測された2010～2013年の気温と降水量を示す(図B-1、B-2、B-3、B-4)。



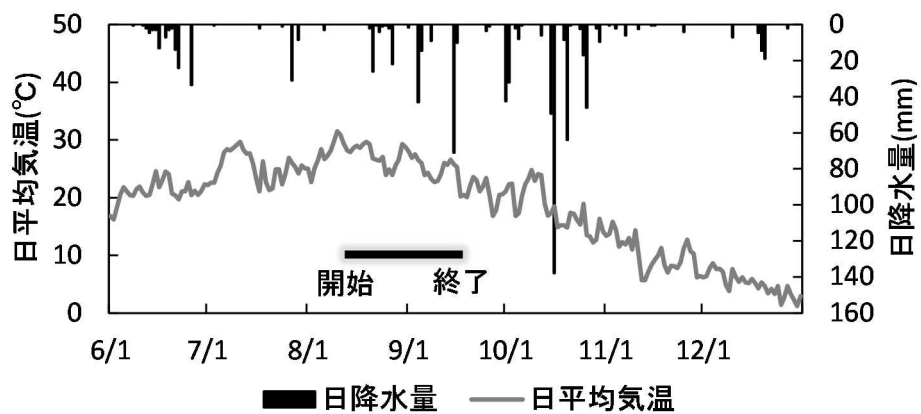
図B-1 2010年6～12月の気温と降水量



図B-2 2011年6～12月の気温と降水量



図B-3 2012年6～12月の気温と降水量



図B-4 2013年6~12月の気温と降水量

太陽熱消毒中の地温は3.6.2.2に示す方法、あるいは同様の方法で、デカゴン社5TE センサや5TM センサで計測した。1時間毎に記録した。結果は2011、2012、2013年について記す(表B-1、B-2、B-3)。なお、2010年も地温計測したが、センサの埋設深さの記録を散逸し、深さ5、7.5、10 cmのいずれで地温計測したのか判別できなくなったため、記載していない。

表 B-1 2011 年の地温観測結果まとめ

		2011淡色黒ボク土				2011厚層多腐植質黒ボク土				2011灰色低地土			
		マルチあり1年目		マルチあり2年目		マルチあり1年目		マルチあり2年目		マルチあり1年目		マルチあり2年目	
		5cm	15cm	5cm	15cm	5cm	15cm	5cm	15cm	5cm	15cm	5cm	15cm
マルチ設置日		2011/6/23		2011/6/27		2011/6/23		2011/6/27		2011/6/23		2011/6/27	
マルチ除去日		2011/8/1 11:00		2011/8/1 11:00		2011/8/4 12:00		2011/8/4 12:00		2011/7/26 11:00		2011/7/26 11:00	
処理日数	日	38		34		41		37		32		28	
処理時間数	時間	912		816		984		888		768		672	
60℃以上時間数	時間	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50℃以上時間数	時間	21	0	30	0	31	0	52	0	39	0	7	0
45℃以上時間数	時間	77	0	85	0	92	0	100	0	104	0	70	0
40℃以上時間数	時間	146	17	160	0	177	53	182	53	179	64	143	19
35℃以上時間数	時間	281	141	293	103	352	212	338	200	306	201	267	164
35℃未満時間数	時間	631	771	523	713	632	772	550	688	462	567	405	508
最高地温	℃	54	42	53	39	55	44	56	44	55	45	51	42
平均地温	℃	33	31	34	30	34	32	35	32	35	32	35	32
積算地温0℃ベース	℃・日	1261	1164	1160	1035	1393	1306	1282	1191	1114	1035	975	907
積算地温35℃ベース	℃・日	487	222	510	158	609	338	596	319	544	325	460	257
積算地温40℃ベース	℃・日	277	29	304	0	337	92	354	92	347	112	268	32
積算地温45℃ベース	℃・日	155	0	173	0	188	0	209	0	215	0	139	0
積算地温50℃ベース	℃・日	45	0	64	0	67	0	114	0	86	0	15	0

積算地温 x ℃ベースは、1時間毎に記録した地温 T (℃) が x (℃) 以上の場合は $(T-x) \div 24$ (℃・日)、 $T < x$ のときには 0 (℃・日) を観測値として、それを太陽熱消毒期間中の観測地温全てについて積算した値。

表B-2 2012年の地温観測結果まとめ

		2012淡色黒ボク土					
		対照(フィルム被覆なし)			消毒(フィルム被覆あり)		
		1cm	5cm	15cm	1cm	5cm	15cm
フィルム被覆開始日		2012/7/3					
フィルム被覆終了日		2012/8/9					
処理日数	日	36					
処理時間数	時間	864					
60℃以上時間数	時間	0	0	0	21	0	0
50℃以上時間数	時間	0	0	0	134	41	0
45℃以上時間数	時間	8	0	0	184	124	0
40℃以上時間数	時間	70	0	0	251	216	56
35℃以上時間数	時間	158	92	0	346	378	280
35℃未満時間数	時間	706	772	864	518	486	584
最高地温	℃	48	39	33	64	54	43
平均地温	℃	28	28	27	36	35	33
積算地温0℃ベース	℃・日	1011	1008	973	1289	1267	1173
積算地温35℃ベース	℃・日	261	141	0	675	666	443
積算地温40℃ベース	℃・日	124	0	0	527	414	96
積算地温45℃ベース	℃・日	16	0	0	408	251	0
積算地温50℃ベース	℃・日	0	0	0	309	88	0

		2012厚層多腐植質黒ボク土					
		対照(フィルム被覆なし)			消毒(フィルム被覆あり)		
		1cm	5cm	15cm	1cm	5cm	15cm
フィルム被覆開始日		2012/7/3					
フィルム被覆終了日		2012/8/16					
処理日数	日	43					
処理時間数	時間	1032					
60℃以上時間数	時間	0	0	0	35	0	0
50℃以上時間数	時間	0	0	0	137	83	0
45℃以上時間数	時間	0	0	0	180	181	0
40℃以上時間数	時間	52	0	0	232	291	49
35℃以上時間数	時間	151	108	0	301	448	312
35℃未満時間数	時間	545	924	1032	395	584	720
最高地温	℃	44	40	33	67	58	43
平均地温	℃	30	28	27	37	36	33
積算地温0℃ベース	℃・日	856	1218	1172	1086	1532	1400
積算地温35℃ベース	℃・日	245	166	0	609	813	491
積算地温40℃ベース	℃・日	90	0	0	502	570	84
積算地温45℃ベース	℃・日	0	0	0	410	377	0
積算地温50℃ベース	℃・日	0	0	0	325	183	0

積算地温 x ℃ベースは、1時間毎に記録した地温 T (℃) が x (℃) 以上の場合は $(T - x) \div 24$ (℃・日)、 $T < x$ のときには0 (℃・日) を観測値として、それを太陽熱消毒期間中の観測地温全てについて積算した値。

表 B-2 2012 年の地温観測結果まとめ（つづき）

		2012 灰色低地土					
		対照(フィルム被覆なし)			消毒(フィルム被覆あり)		
		1cm	5cm	15cm	1cm	5cm	15cm
フィルム被覆開始日		2012/7/3					
フィルム被覆終了日		2012/8/16					
処理日数	日	43					
処理時間数	時間	1032					
60℃以上時間数	時間	21	0	0	0	0	0
50℃以上時間数	時間	117	0	0	70	2	0
45℃以上時間数	時間	169	11	0	166	63	0
40℃以上時間数	時間	233	86	2	265	163	38
35℃以上時間数	時間	326	210	128	408	299	260
35℃未満時間数	時間	370	822	904	624	733	772
最高地温	℃	63	49	40	57	51	42
平均地温	℃	38	29	31	35	32	31
積算地温0℃ベース	℃・日	1093	1264	1320	1492	1379	1339
積算地温35℃ベース	℃・日	633	347	194	740	512	409
積算地温40℃ベース	℃・日	488	153	3	518	301	65
積算地温45℃ベース	℃・日	375	21	0	343	124	0
積算地温50℃ベース	℃・日	272	0	0	154	4	0

表 B-3 2013 年の地温観測結果まとめ

		2013(淡色黒ボク土)	
		マルチあり	
		5cm	15cm
マルチ設置日		2013/8/13	
マルチ除去日		2013/9/18	
処理日数	日	35	
処理時間数	時間	840	
60℃以上時間数	時間	0	0
50℃以上時間数	時間	0	0
45℃以上時間数	時間	29	0
40℃以上時間数	時間	131	0
35℃以上時間数	時間	281	68
35℃未満時間数	時間	399	772
最高地温	℃	48.0	36.9
平均地温	℃	32.9	31.2
積算地温0℃ベース	℃・日	1186	1122
積算地温35℃ベース	℃・日	458	100
積算地温40℃ベース	℃・日	235	0
積算地温45℃ベース	℃・日	54	0
積算地温50℃ベース	℃・日	0	0

積算地温 x ℃ベースは、1 時間毎に記録した地温 T (℃) が x (℃) 以上の場合は $(T-x) \div 24$ (℃・日)、 $T < x$ のときには 0 (℃・日) を観測値として、それを太陽熱消毒期間中の観測地温全てについて積算した値。

付録C つくば圃場における太陽熱消毒前後の土壌特性の調査結果

本文では窒素動態に関わる議論に必要なデータのみを示したが、ここでは、それ以外の結果も含めて調査年次毎に示す（表 C-1）。調査項目と日程は付録 A に示した。得られた主な結果は以下のとおりである。

- ・土壌 pH が低いと（例えば pH が 4 程度では）硝化が抑制されることが知られている。試験圃場の消毒前の土壌 pH は、全ての試験区について 7 付近であり、それだけで硝化が著しく抑制される水準にはなかった。
- ・太陽熱消毒前に施肥した試験区では、太陽熱消毒終了直後の深さ 0-5 cm から採取した土壌サンプルは、深さ 5 cm 以深から採取した土壌サンプルに比べて、土壌 EC が高かった（表 C-1(b)、表 C-2(i)）。関東地方で太陽熱消毒後のニンジン種子の発芽が悪いことがあるという相談を受けたことがあるが、ニンジン種子を埋める位置での土壌 EC の高まりは、発芽不良の一因と考えられる。
- ・太陽熱消毒後の深さ 0-5 cm で土壌 EC が高まった原因としては、地表面付近ほど高地温により土壌有機物の分解が進み、無機養分が多く土壌中に蓄積されることに加え、深さ 0-5 cm の土壌は、深さ 5-15 cm の土壌に比べて乾燥が進み（これを傍証するデータとして、2012 年に圃場 A の淡色黒ボク土試験区に設置した土壌水分センサの観測結果例を図 C-1 に示す）、降雨後には畝間（フィルムを被覆していない）から進入した水が畝の下層土を湿らせるので、深さ 5-15 cm の土層から深さ 0-5 cm の土層に上向きの水と水溶性塩類の移動が生じたためと考えられた（これを傍証するデータとして、2011 年の太陽熱消毒前に圃場 A の淡色黒ボク土試験区で、深さ 0-15 cm の土壌中に混和した臭化カリウム試薬に由来する Br^- イオンが、消毒後の土壌中において深さ別にどのように分布したかを図 C-2 に示す）。

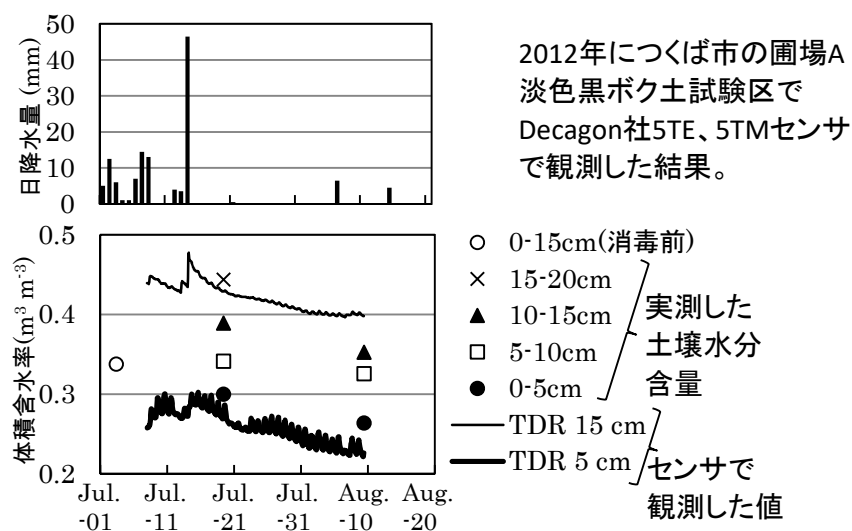


図 C-1 土壌水分含量は消毒開始後ゆっくり低下するが大きな雨があれば直接雨があたることがないフィルム被覆下の深さ 5 cm でも土壌水分含量が増えることもある

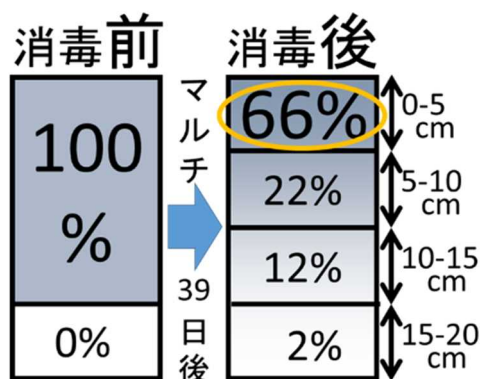


図 C-2 消毒前に深さ 0-15 cm に均一に混和した Br^- の消毒後における深さ別分布から深さ 5-15 cm から深さ 0-5 cm に向けて上向きに塩類が移動したことが示唆される
2011 年の圃場 A 淡色黒ボク土試験区における太陽熱消毒前後の計測事例

・目視により、太陽熱消毒した処理区では対照区に比べて、太陽熱消毒後、フィルムを被覆し降雨が畝にあたるようになっても、数ヶ月の間、畝の土壌表面が乾きやすい状況が観察された。この状況を客観的データで計測したところ、畝の沈下が少なく (表 C-1(f)) 土壌が膨軟に保たれる傾向が見て取れた (図 C-3)。膨軟な土壌では水

浸透が速く水持ちも低下するため、降雨後、若干ではあるが土壌表面が乾きやすい。ニンジンの発芽には高い土壌水分が必要であるから、前述の発芽不良の一因として、このように土壌表面付近が乾燥しやすくなることも影響する可能性がある。

・上記のように太陽熱消毒後の土壌の硬さについての既往研究について井原（2016）で簡単に触れた。

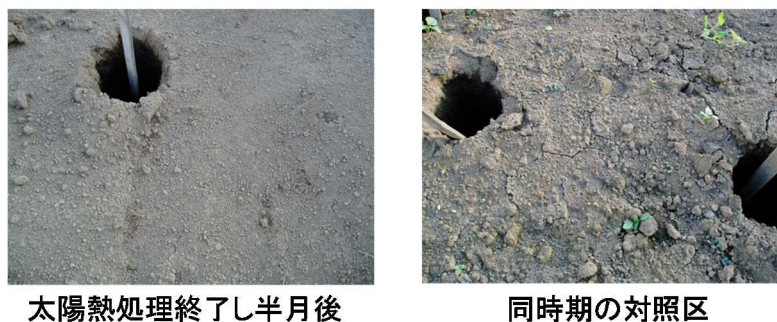


図 C-3 太陽熱消毒した試験区と対照区の土壌表面の様子（消毒終了約半月後）

・太陽熱消毒を過去に2年繰り返した試験区では、太陽熱消毒を未経験の処理区に比べて80°C16時間水抽出TOC含量（土壌可給態窒素含量と正の相関がある（上菌ら，2010b））が低下する可能性が示唆された（処理区の設定が事情によりわかりにくい、表C-3(p)および(q)中において、淡色黒ボク土、多腐植質厚層黒ボク土、灰色低地土試験区では、2012年の消毒前土壌は、処理区RZとRFは過去に2年間太陽熱消毒した土壌、処理区SZとSFは過去に未消毒の土壌であるから、これらを比較した結果として）。ただし、試験区に反復がないので統計的な差は評価できなかった。同様の傾向は、土壌全窒素、全炭素含量についてもいえた。このことから、第5章で論じた土壌可給態窒素の簡易評価は、極力毎年行ったほうがよい。

表 C-1 (a) 2010 年の土壌調査結果 (つづく)

容積重(g 100cm⁻³)

	淡色黒ボク土				多腐植質厚層黒ボク土				灰色低地土				黄色土			
	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2010年6月15日)																
作土*	58 ± 3				62 ± 0				80 ± 2				120 ± 1			
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した																
消毒途中(2010年7月6~7日)																
0-20cm																
消毒後(2010年8月2日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月10日(黄色土)、8月16日(淡色黒ボク土))																
0-5cm	63	65	59	61												
5-10cm	65 ± 1	65 ± 5	62 ± 3	59 ± 1	65 ± 4	65 ± 6	60 ± 2	72 ± 20	101 ± 1	101 ± 2	89 ± 3	94 ± 18	124 ± 5	131 ± 4	132 ± 8	131 ± 8
10-15cm																
15-20cm	67	72	69	73												
太陽熱消毒収量約4ヶ月後(2010年12月7日、マルチ除去後は裸地で雑草は手刈り)																
0-5cm	59 ± 1		55 ± 1		60 ± 4		60 ± 5		94 ± 2		86 ± 1		125 ± 1		125 ± 3	
5-10cm	65 ± 1		59 ± 4		64 ± 1		60 ± 1		101 ± 1		90 ± 1		140 ± 13		138 ± 2	
10-15cm	69 ± 5		71 ± 7		76 ± 5		72 ± 7		112 ± 5		107 ± 6		150 ± 4		149 ± 3	
15-20cm	65 ± 1		74 ± 5		73 ± 4		73 ± 3		113 ± 3		111 ± 3		153 ± 8		155 ± 1	

含水率(%)

	淡色黒ボク土				多腐植質厚層黒ボク土				灰色低地土				黄色土			
	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2010年6月15日)																
作土*	33				31				20				11			
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した																
消毒途中(2010年7月6~7日)																
0-20cm	38	37	35	35	36	36	34	33	20	20	23	23				
消毒後(2010年8月2日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月10日(黄色土)、8月16日(淡色黒ボク土))																
0-5cm	23	24	30	30	25	27	31	28	16	17	18	16				
5-10cm	30	29	34	33	30	30	33	32	20	20	21	21	14	14	17	14
10-15cm	31	32	35	34	31	31	34	33	22	21	23	22				
15-20cm																
太陽熱消毒収量約4ヶ月後(2010年12月7日、マルチ除去後は裸地で雑草は手刈り)																
0-5cm	36 ± 0		36 ± 0		33 ± 1		34 ± 0		22 ± 0		22 ± 0		17 ± 0		18 ± 0	
5-10cm	37 ± 0		37 ± 0		34 ± 0		35 ± 0		23 ± 0		24 ± 0		16 ± 1		18 ± 0	
10-15cm	37 ± 0		38 ± 0		35 ± 0		35 ± 1		24 ± 0		25 ± 0		17 ± 1		19 ± 0	
15-20cm	37 ± 0		38 ± 0		35 ± 0		36 ± 0		24 ± 0		25 ± 0		18 ± 1		19 ± 0	

表中 UZ : 太陽熱消毒せず施肥なし、UF : 太陽熱消毒せず市販有機質肥料あり、SZ : 太陽熱消毒し施肥なし、SF : 太陽熱消毒し市販有機質肥料施肥あり。表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-1 (b) 2010 年の土壌調査結果 (つづき)

pH

	淡色黒ボク土				多腐植質厚層黒ボク土				灰色低地土				黄色土			
	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2010年6月15日)																
作土*	6.8				6.4				7.0				6.7			
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した																
消毒途中(2010年7月6~7日)																
0-20cm																
消毒後(2010年8月2日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月10日(黄色土)、8月16日(淡色黒ボク土))																
0-5cm	6.8 ± 0.0	6.5 ± 0.0	6.6 ± 0.0	6.4 ± 0.0	6.5 ± 0.0	5.8 ± 0.0	6.1 ± 0.0	5.9 ± 0.0	6.9 ± 0.0	6.4 ± 0.0	6.7 ± 0.0	6.3 ± 0.0				
5-10cm	6.9 ± 0.0	6.8 ± 0.0	6.8 ± 0.0	6.6 ± 0.0	6.5 ± 0.0	6.1 ± 0.0	6.2 ± 0.0	6.0 ± 0.0	7.0 ± 0.0	6.5 ± 0.0	6.8 ± 0.0	6.6 ± 0.0	6.8 ± 0.0	6.3 ± 0.0	6.7 ± 0.0	6.5 ± 0.0
10-15cm																
15-20cm	6.9 ± 0.0	6.9 ± 0.0	6.9 ± 0.0	6.8 ± 0.0	6.6 ± 0.0	6.3 ± 0.0	6.3 ± 0.0	6.3 ± 0.0	7.0 ± 0.0	6.6 ± 0.0	6.7 ± 0.0	6.7 ± 0.0				

EC(mS m⁻¹)

	淡色黒ボク土				多腐植質厚層黒ボク土				灰色低地土				黄色土			
	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2010年6月15日)																
作土*	-				11				10				6			
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した																
消毒途中(2010年7月6~7日)																
0-20cm																
消毒後(2010年8月2日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月10日(黄色土)、8月16日(淡色黒ボク土))																
0-5cm	17 ± 0	48 ± 0	42 ± 0	80 ± 0	12 ± 0	64 ± 1	23 ± 0	79 ± 0	11 ± 0	21 ± 0	19 ± 0	97 ± 1				
5-10cm	12 ± 0	21 ± 0	19 ± 0	20 ± 0	9 ± 0	26 ± 0	17 ± 0	29 ± 1	8 ± 0	11 ± 0	14 ± 0	16 ± 0	8 ± 0	13 ± 0	8 ± 0	13 ± 0
10-15cm																
15-20cm	12 ± 0	15 ± 0	18 ± 0	14 ± 0	10 ± 0	14 ± 0	12 ± 0	16 ± 0	8 ± 0	9 ± 0	15 ± 0	14 ± 0				

UZ : 太陽熱消毒せず施肥なし、UF : 太陽熱消毒せず市販有機質肥料あり、SZ : 太陽熱消毒し施肥なし、SF : 太陽熱消毒し市販有機質肥料施肥あり。表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-1 (c) 2010 年の土壌調査結果 (つづき)

全炭素 (g-C 100g⁻¹)

	淡色黒ボク土				多腐植質厚層黒ボク土				灰色低地土				黄色土			
	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF
太陽熱消毒前 (2010年6月15日)																
作土*	5.3				8.8				1.8				1.3			
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した																
消毒途中 (2010年7月6~7日)																
0-20cm																
消毒後 (2010年8月2日 (灰色低地土)、8月4日 (多腐植質厚層黒ボク土)、8月10日 (黄色土)、8月16日 (淡色黒ボク土))																
0-5cm	5.3	5.2	5.2	5.4	8.7	8.3	9.1	8.8	2.0	1.8	1.9	2.2				
5-10cm	5.2	4.9	5.1	5.4	8.6	8.0	8.4	8.8	1.8	1.5	1.7	1.9	1.4	1.2	1.3	1.3
10-15cm																
15-20cm	5.4	4.7	5.1	5.2	8.7	8.3	8.9	8.9	1.8	1.4	1.9	1.9				

全窒素 (g-N 100g⁻¹)

	淡色黒ボク土				多腐植質厚層黒ボク土				灰色低地土				黄色土			
	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF
太陽熱消毒前 (2010年6月15日)																
作土*	0.52				0.63				0.20				0.15			
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した																
消毒途中 (2010年7月6~7日)																
0-20cm																
消毒後 (2010年8月2日 (灰色低地土)、8月4日 (多腐植質厚層黒ボク土)、8月10日 (黄色土)、8月16日 (淡色黒ボク土))																
0-5cm	0.51	0.52	0.55	0.59	0.61	0.61	0.68	0.74	0.23	0.19	0.25	0.30				
5-10cm	0.50	0.48	0.51	0.54	0.62	0.59	0.61	0.69	0.21	0.19	0.23	0.23	0.17	0.16	0.16	0.16
10-15cm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
15-20cm	0.54	0.46	0.53	0.52	0.59	0.57	0.64	0.67	0.20	0.17	0.24	0.23				

UZ : 太陽熱消毒せず施肥なし、UF : 太陽熱消毒せず市販有機質肥料あり、SZ : 太陽熱消毒し施肥なし、SF : 太陽熱消毒し市販有機質肥料施肥あり。表中空欄は未計測。

表 C-1 (d) 2010 年の土壌調査結果 (つづき)

NH₄-N(mg kg⁻¹)

	淡色黒ボク土				多腐植質厚層黒ボク土				灰色低地土				黄色土			
	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2010年6月15日)																
作土*	0				0				0							
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した																
消毒途中(2010年7月6~7日)																
0-20cm	2 ± 0	1 ± 1	0 ± 0	99 ± 4	2 ± 1	3 ± 3	1 ± 1	42 ± 3	0 ± 0	0 ± 1	0 ± 0	0 ± 0				
消毒後(2010年8月2日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月10日(黄色土)、8月16日(淡色黒ボク土))																
0-5cm	8	7	51	126	1	4	84	210	0	3	51	159				
5-10cm	5	1	7	6	0	1	21	28	1	2	12	19	4	4	4	3
10-15cm																
15-20cm	6	4	4	6	0	0	3	0	1	3	1	0				

NO₃-N(mg kg⁻¹)

	淡色黒ボク土				多腐植質厚層黒ボク土				灰色低地土				黄色土			
	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2010年6月15日)																
作土*	25				21				11							
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した																
消毒途中(2010年7月6~7日)																
0-20cm	21 ± 1	101 ± 1	52 ± 0	199 ± 2	23 ± 1	127 ± 3	46 ± 1	110 ± 2	10 ± 0	59 ± 1	28 ± 1	54 ± 2				
消毒後(2010年8月2日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月10日(黄色土)、8月16日(淡色黒ボク土))																
0-5cm	47	200	212	433	27	363	104	432	27	67	69	446				
5-10cm	10	40	65	53	11	100	67	118	9	10	38	53	11	27	8	31
10-15cm																
15-20cm	9	13	54	34	12	43	28	63	8	8	42	44				

UZ : 太陽熱消毒せず施肥なし、UF : 太陽熱消毒せず市販有機質肥料あり、SZ : 太陽熱消毒し施肥なし、SF : 太陽熱消毒し市販有機質肥料施肥あり。表中空欄は未計測。

表 C-1 (e) 2010 年の土壌調査結果 (つづき)

80°C16時間水抽出TOC(mg kg⁻¹)

	淡色黒ボク土				多腐植質厚層黒ボク土				灰色低地土				黄色土			
	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2010年6月15日)																
作土*	675				977				561				511			
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した																
消毒途中(2010年7月6~7日)																
0-20cm																
消毒後(2010年8月2日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月10日(黄色土)、8月16日(淡色黒ボク土))																
0-5cm	658 ± 27	546 ± 7	541 ± 19	612 ± 47	891 ± 27	702 ± 7	962 ± 72	946 ± 11	612 ± 11	641 ± 11	700 ± 18	675 ± 13				
5-10cm	646 ± 0	545 ± 2	546 ± 10	669 ± 39	865 ± 47	832 ± 16	877 ± 25	871 ± 61	588 ± 17	566 ± 2	707 ± 3	739 ± 4	450 ± 24	472 ± 2	527 ± 13	474 ± 1
10-15cm																
15-20cm	658 ± 24	451 ± 28	621 ± 15	699 ± 25	811 ± 31	715 ± 68	924 ± 36	912 ± 20	568 ± 25	547 ± 26	673 ± 29	690 ± 6				

Truog-P(mg kg⁻¹)

	淡色黒ボク土				多腐植質厚層黒ボク土				灰色低地土				黄色土			
	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2010年6月15日)																
作土*	688				954				1265				995			
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した																
消毒途中(2010年7月6~7日)																
0-20cm																
消毒後(2010年8月2日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月10日(黄色土)、8月16日(淡色黒ボク土))																
0-5cm	695 ± 74	714 ± 71	712 ± 6	775 ± 21	1083 ± 17	1113 ± 219	959 ± 33	1207 ± 59	1232 ± 15	1397 ± 109	1520 ± 25	1427 ± 4				
5-10cm	730	671 ± 6	723 ± 3	884 ± 13	1089 ± 58	1243 ± 68	1011 ± 5	1280 ± 13	1198 ± 14	1462 ± 351	1544 ± 18	1462 ± 45	1081 ± 57	1080 ± 52	1163 ± 33	1178 ± 30
10-15cm																
15-20cm	693 ± 11	526 ± 23	725 ± 4	823 ± 39	1133 ± 25	876 ± 10	1053 ± 13	1287 ± 37	1163 ± 28	1165 ± 61	1599 ± 13	1427 ± 13				

UZ：太陽熱消毒せず施肥なし、UF：太陽熱消毒せず市販有機質肥料あり、SZ：太陽熱消毒し施肥なし、SF：太陽熱消毒し市販有機質肥料施肥あり。表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-1 (f) 2010 年の土壌調査結果 (つづき)

畝の高さの変化(太陽熱消毒前に畝立てした時点からの沈下、単位はmm)

	淡色黒ボク土			多腐植質厚層黒ボク土			灰色低地土			黄色土			
	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF	
消毒後(2010年8月2日)													
0-5cm	-3	-2	-2	-2	-2	-4	-4	-1	-2	-1	-3	-8	
太陽熱消毒終了1.5ヶ月後(2010年9月22日)													
0-5cm	-9	-8	-2	-2	-6	-2	-2	-3	-2	-7	-10	0	
太陽熱消毒終了約4.5ヶ月後(2010年12月21日、マルチ除去後は裸地で雑草(は手刈り))													
0-5cm	-12	-12	-11	-6	-10	-5	-7	-11	-1	-13	-19	-12	

畝上面の土壌表面に上から貫入式土壌硬度計を差し込んだ時の読み値

	淡色黒ボク土			多腐植質厚層黒ボク土			灰色低地土			黄色土						
	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF	UZ	UF	SZ	SF				
太陽熱消毒終了2ヶ月後(2010年10月14日)																
0-5cm	8.7 ^a ± 1.2	6.3 ^{ab} ± 2.5	2.3 ^b ± 1.5	3.3 ^{bc} ± 1.2	8.0 ^{ab} ± 2.0	11.7 ^a ± 0.6	2.5 ^b ± 0.9	3.3 ^b ± 4.9	12.0 ^a ± 1.0	13.3 ^a ± 1.8	6.5 ^b ± 3.1	7.0 ^b ± 1.7	11.8 ^a ± 2.9	11.8 ^a ± 2.4	10.7 ^a ± 0.6	12.7 ^a ± 3.8

UZ：太陽熱消毒せず施肥なし、UF：太陽熱消毒せず市販有機質肥料あり、SZ：太陽熱消毒し施肥なし、SF：太陽熱消毒し市販有機質肥料施肥あり。表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。表中、同じ土壌の試験区中、異なるアルファベットが記載された処理区間には観測値の平均値に統計的に有意な差があった (tukey 法、 $p=0.05$)。

以上、2010 年観測値

表 C-2(a) 2011 年の土壌調査結果 (つづく)

容積重(g 100cm⁻³)

	淡色黒ボク土							多腐植質厚層黒ボク土								
	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF
太陽熱消毒前(2011年6月23日)																
作土*	59 ± 1		60 ± 1						62 ± 1		61 ± 1					
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した																
消毒後(2011年7月26日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月1日(淡色黒ボク土))																
0-5cm	62 ± 2	60 ± 2	59 ± 1		62 ± 3				63 ± 0		64 ± 1			66 ± 5		
5-10cm	67 ± 1	70 ± 4	68 ± 4		68 ± 2				68 ± 0		71 ± 6			77 ± 4		
10-15cm	70 ± 7		75 ± 2		72 ± 4				68 ± 5		75 ± 1			74 ± 4		
15-20cm	72 ± 4		75 ± 2		72 ± 4				72 ± 3		74 ± 0			80 ± 1		
消毒2~3週間後(2011年8月17-18日)																
0-5cm	66 ± 1	65 ± 1	66 ± 4	66 ± 2	64 ± 1				67 ± 1		69 ± 1			66 ± 4		
5-10cm	71 ± 5	68 ± 1	73 ± 7	71 ± 2					75 ± 4		71 ± 5			75 ± 2		
消毒1.5ヶ月後(2011年9月15-16日)																
0-5cm	63 ± 1		64 ± 2		62 ± 1				67 ± 1		66 ± 2			66 ± 2		
5-10cm																
消毒2.5ヶ月後(2011年10月18-19日)																
0-5cm	62 ± 2		62 ± 3		65 ± 4				67 ± 2		64 ± 1			63 ± 1		
5-10cm	68 ± 2		66 ± 4		71 ± 10				73 ± 7		74 ± 12			73 ± 6		
10-15cm	74 ± 5		75 ± 6		74 ± 5				70 ± 4		73 ± 8			70 ± 1		
15-20cm	70 ± 4		77 ± 0		74 ± 0				73 ± 3		71 ± 4			74 ± 5		
消毒4ヶ月後(2011年12月5-6日)																
0-5cm	63 ± 1		61 ± 2		62 ± 1		60 ± 2		65 ± 2		66 ± 3			63 ± 2		63 ± 2

USZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

USF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

SSZ : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SSF : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

NUZ : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)ー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

NUF : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)ー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-2 (b) 2011 年の土壌調査結果 (つづき)

容積重(g 100cm⁻³)

	灰色低地土								黄色土					
	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF	UZ	UF	SZ	SF	NSZ	NSF
太陽熱消毒前(2011年6月23日)														
作土*	86 ± 4		88 ± 3						107 ± 5		106 ± 9			
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した														
消毒後(2011年7月26日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月1日(淡色黒ボク土))														
0-5cm	85 ± 3		88 ± 2		87 ± 2				114 ± 0		114 ± 3			
5-10cm	92 ± 2		102 ± 11		95 ± 2				121 ± 10		135 ± 4			
10-15cm	110 ± 3		110 ± 3		107 ± 6				132 ± 8		143 ± 5			
15-20cm	105 ± 2		105 ± 2		110 ± 5				139 ± 8		151 ± 3			
消毒2~3週間後(2011年8月17-18日)														
0-5cm	95 ± 3	92 ± 3	92 ± 1	94 ± 1	93 ± 2				113 ± 3		127 ± 2		119 ± 2	
5-10cm	103 ± 6	94 ± 2	98 ± 7	103 ± 5	104 ± 2				135 ± 9		140 ± 6		142 ± 7	
消毒1.5ヶ月後(2011年9月15-16日)														
0-5cm	95 ± 2		96 ± 4		93 ± 2				122 ± 2		125 ± 1		125 ± 4	
5-10cm														
消毒2.5ヶ月後(2011年10月18-19日)														
0-5cm	94 ± 3		93 ± 3		93 ± 3		84	89	123 ± 5		133 ± 3		131 ± 3	
5-10cm	103 ± 3		102 ± 2		99 ± 4		102	100	131 ± 1		141 ± 2		137 ± 6	
10-15cm	108 ± 3		109 ± 7		101 ± 2		108	109	140 ± 0		147 ± 3		152 ± 2	
15-20cm	111 ± 1		112 ± 1		115 ± 5		119	113	149 ± 3		156 ± 5		153 ± 1	
消毒4ヶ月後(2011年12月5-6日)														
0-5cm	95 ± 2		95 ± 3		94 ± 4		88 ± 4		129 ± 3		136 ± 4		135 ± 3	

USZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。USF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。SSZ : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。SSF : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。NUZ : 2010 年は試験せず (番外として畝立ても耕起も行わなかった)ー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。NUF : 2010 年は試験せず (番外として畝立ても耕起も行わなかった)ー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。黄色土は試験区設計が異なり、UZ : 2010、2011 年とも太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。UF : 2010、2011 年とも太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用した。SZ : 2010、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。SF : 2010、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-2(c) 2011 年の土壌調査結果 (つづき)

真比重(g cm⁻³)

	淡色黒ボク土							多腐植質厚層黒ボク土								
	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF
太陽熱消毒前(2011年6月23日)																
作土*																
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した																
消毒後(2011年7月26日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月1日(淡色黒ボク土))																
0-5cm																
5-10cm																
10-15cm																
15-20cm																
消毒2~3週間後(2011年8月17-18日)																
0-5cm	2.8 ± 0.0	2.8 ± 0.0	2.8 ± 0.0	2.8 ± 0.0	2.7 ± 0.0				2.6 ± 0.0		2.7 ± 0.0		2.4 ± 0.0			
5-10cm	2.7 ± 0.1	2.8 ± 0.0	2.8 ± 0.0	2.7 ± 0.1	2.7 ± 0.0				2.6 ± 0.1		2.5 ± 0.0		2.5 ± 0.0			
消毒1.5ヶ月後(2011年9月15-16日)																
0-5cm																
5-10cm																
消毒2.5ヶ月後(2011年10月18-19日)																
0-5cm	2.8 ± 0.0		2.6 ± 0.0		2.7 ± 0.0				2.5 ± 0.0		2.6 ± 0.0		2.5 ± 0.0			
5-10cm	2.8 ± 0.0		2.7 ± 0.0		2.7 ± 0.1				2.6 ± 0.0		2.6 ± 0.0		2.5 ± 0.0			
10-15cm	2.8 ± 0.1		2.7 ± 0.1		2.7 ± 0.0				2.5 ± 0.0		2.5 ± 0.0		2.5 ± 0.0			
15-20cm	2.8 ± 0.1		2.6 ± 0.0		2.6 ± 0.0				2.6 ± 0.0		2.5 ± 0.0		2.5 ± 0.0			
消毒4ヶ月後(2011年12月5-6日)																
0-5cm																

USZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

USF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

SSZ : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SSF : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

NUZ : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)ー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

NUF : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)ー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-2 (d) 2011 年の土壌調査結果 (つづき)

真比重(g cm⁻³)

	灰色低地土								黄色土					
	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF	UZ	UF	SZ	SF	NSZ	NSF
太陽熱消毒前(2011年6月23日)														
作土*														
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した														
消毒後(2011年7月26日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月1日(淡色黒ボク土))														
0-5cm														
5-10cm														
10-15cm														
15-20cm														
消毒2~3週間後(2011年8月17-18日)														
0-5cm	2.7 ± 0.0	2.8 ± 0.1	2.7 ± 0.0	2.7 ± 0.0	2.7 ± 0.0				2.7 ± 0.0		2.7 ± 0.0		2.8 ± 0.0	
5-10cm	2.4 ± 0.1	2.5 ± 0.0	2.4 ± 0.1	2.4 ± 0.1	2.3 ± 0.0				2.7 ± 0.0		2.7 ± 0.0		2.7 ± 0.0	
消毒1.5ヶ月後(2011年9月15-16日)														
0-5cm														
5-10cm														
消毒2.5ヶ月後(2011年10月18-19日)														
0-5cm	2.8 ± 0.0		2.8 ± 0.0		2.7 ± 0.1									
5-10cm	2.7 ± 0.0		2.7 ± 0.0		2.8 ± 0.0									
10-15cm	2.7 ± 0.0		2.7 ± 0.1		2.7 ± 0.0									
15-20cm	2.8 ± 0.0		2.7 ± 0.0		2.6 ± 0.0									
消毒4ヶ月後(2011年12月5-6日)														
0-5cm														

USZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。USF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。SSZ : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。SSF : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。NUZ : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)ー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。NUF : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)ー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。黄色土は試験区設計が異なり、UZ : 2010、2011 年とも太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。UF : 2010、2011 年とも太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用した。SZ : 2010、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。SF : 2010、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-2(e) 2011 年の土壌調査結果 (つづき)

含水率(%)

	淡色黒ボク土								多腐植質厚層黒ボク土							
	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF
太陽熱消毒前(2011年6月23日)																
作土*	34	34	35	34	33		35		32	33	33	32	32		33	
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した																
消毒後(2011年7月26日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月1日(淡色黒ボク土))																
0-5cm	34	34	34	33	34		34		30	30	30	30	29	28		
5-10cm	35	35	36	36	36		36		32	33	33	33	34	33		
10-15cm	36	36	37	36	37		36		33	33	33	34	34	33		
15-20cm	37		37		37				33		34		36			
消毒2~3週間後(2011年8月17-18日)																
0-5cm	35	36	35	35	36				29	29	28	29	28			
5-10cm	37	37	37	37	38				30	31	32	32	33			
消毒1.5ヶ月後(2011年9月15-16日)																
0-5cm	27	27	26	27	25	26	25		24	25	25	24	26	25		
5-10cm	32	31	33	33	32	32	33		30	30	31	31	31	31		
消毒2.5ヶ月後(2011年10月18-19日)																
0-5cm	33	33	33	33	33	34			31	30	30	30	31	31		
5-10cm	35	35	36	36	36	36			33	32	33	33	33	33		
10-15cm	35	36	36	36	37	36			33	33	34	34	34	34		
15-20cm	36		37		37				35		35		35			
消毒4ヶ月後(2011年12月5-6日)																
0-5cm	34		34		34		34		32		32		32		31	

USZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

USF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

SSZ : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SSF : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

NUZ : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)ー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

NUF : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)ー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。

表 C-2(f) 2011 年の土壌調査結果 (つづき)

含水率(%)

	灰色低地土							黄色土						
	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF	UZ	UF	SZ	SF	NSZ	NSF
太陽熱消毒前(2011年6月23日)														
作土*	22	21	22	22	20		23				16			
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した														
消毒後(2011年7月26日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月1日(淡色黒ボク土))														
0-5cm	18	16	18	16	17	16			8	8	11	11	11	10
5-10cm	21	20	21	21	21	21			13	13	14	14	15	14
10-15cm	21	21	22	22	22	21			14	14	15	15	15	15
15-20cm	22	21	22	22	23	22								
消毒2~3週間後(2011年8月17-18日)														
0-5cm	14	14	15	13	15				10		10	11	11	10
5-10cm	19	19	20	20	21				14		15	14	16	14
消毒1.5ヶ月後(2011年9月15-16日)														
0-5cm	15	14	15	15	15	15			9	8	9	8	8	8
5-10cm	19	19	20	20	21	21			13	13	14	14	14	13
消毒2.5ヶ月後(2011年10月18-19日)														
0-5cm	18	18	19	18	20	20	20	21	12	14	12	11	13	15
5-10cm	22	23	23	23	24	24	23	24	12	11	12	14	10	13
10-15cm	23	24	24	24	25	24	24	24	12	14	13	14	14	14
15-20cm	23		24		25		25	26						
消毒4ヶ月後(2011年12月5-6日)														
0-5cm	21		21		22		21							

USZ : 2010 年は太陽熱消毒せず-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。USF : 2010 年は太陽熱消毒せず-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。SSZ : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。SSF : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。NUZ : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。NUF : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。黄色土は試験区設計が異なり、UZ : 2010、2011 年とも太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。UF : 2010、2011 年とも太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用した。SZ : 2010、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。SF : 2010、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-2 (g) 2011 年の土壌調査結果 (つづき)

pH(水)

	淡色黒ボク土							多腐植質厚層黒ボク土								
	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF
太陽熱消毒前(2011年6月23日)																
作土*	7.3	7.5	7.4	7.3	7.2				6.9	6.7	6.7	6.9	6.7			
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した																
消毒後(2011年7月26日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月1日(淡色黒ボク土))																
0-5cm	7.1	7.1	7.0	6.8	7.2	7.1			6.6	6.6	6.5	6.6	6.6	6.3		
5-10cm	7.1	7.2	7.3	7.0	7.2	7.0			6.8	6.6	6.6	6.6	6.5	6.3		
10-15cm	7.2	7.4	7.4	7.1	7.0	7.0			6.8	6.6	6.6	6.7	6.5	6.3		
15-20cm																
消毒2~3週間後(2011年8月17-18日)																
0-5cm																
5-10cm																
消毒1.5ヶ月後(2011年9月15-16日)																
0-5cm																
5-10cm																
消毒2.5ヶ月後(2011年10月18-19日)																
0-5cm	7.1	7.1	7.2	7.3	7.1	7.0			6.6	6.2	6.5	6.4	6.5	6.3		
5-10cm	7.1	7.1	7.0	6.9	7.0	7.0			6.6	6.4	6.6	6.4	6.4	6.4		
10-15cm																
15-20cm																
消毒4ヶ月後(2011年12月5-6日)																
0-5cm																

USZ：2010年は太陽熱消毒せずー2011年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

USF：2010年は太陽熱消毒せずー2011年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

SSZ：2010年、2011年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SSF：2010年、2011年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

NUZ：2010年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)ー2011年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

NUF：2010年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)ー2011年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-2 (h) 2011 年の土壌調査結果 (つづき)

pH(水)

	灰色低地土							黄色土						
	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF	UZ	UF	SZ	SF	NSZ	NSF
太陽熱消毒前(2011年6月23日)														
作土*	7.2	7.1	7.2	7.2	7.1				6.9		6.9			
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した														
消毒後(2011年7月26日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月1日(淡色黒ボク土))														
0-5cm	7.1	6.8	6.9	6.7	6.8	6.5			6.9	6.4	6.7	6.5	6.7	6.5
5-10cm	7.2	6.7	6.9	6.7	6.8	6.8			7.0	6.5	6.7	6.6	6.6	6.7
10-15cm	7.2	6.8	6.9	6.8	6.9	6.9			6.8	6.7	6.8	6.8	6.9	6.8
15-20cm														
消毒2~3週間後(2011年8月17-18日)														
0-5cm														
5-10cm														
消毒1.5ヶ月後(2011年9月15-16日)														
0-5cm														
5-10cm														
消毒2.5ヶ月後(2011年10月18-19日)														
0-5cm	6.9	6.7	6.9	6.7	6.8	6.7			6.6	6.5	6.8	6.7		6.5
5-10cm	6.8	6.7	6.9	6.7	6.8	6.9			6.7	6.5	6.8	6.6		6.7
10-15cm														
15-20cm														
消毒4ヶ月後(2011年12月5-6日)														
0-5cm														

USZ : 2010 年は太陽熱消毒せず-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。USF : 2010 年は太陽熱消毒せず-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。SSZ : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。SSF : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。NUZ : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。NUF : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。黄色土は試験区設計が異なり、UZ : 2010、2011 年とも太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。UF : 2010、2011 年とも太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用した。SZ : 2010、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。SF : 2010、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-2(i) 2011 年の土壌調査結果 (つづき)

EC(mS m⁻¹、pH(水)計測用の抽出液を計測したもの)

	淡色黒ボク土						多腐植質厚層黒ボク土									
	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF
太陽熱消毒前(2011年6月23日)																
作土*	4	0	3	8	6				0	0	3	3	5			
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した																
消毒後(2011年7月26日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月1日(淡色黒ボク土))																
0-5cm	27	58	30	105	13	19			26	30	23	56	8	27		
5-10cm	17	17	14	25	13	32			10	14	12	17	9	26		
10-15cm	15	13	12	16	21	42			10	15	13	12	13	31		
15-20cm																

EC(mS m⁻¹、pH(水)計測用の抽出液を計測したもの)

	灰色低地土							黄色土						
	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF	UZ	UF	SZ	SF	NSZ	NSF
太陽熱消毒前(2011年6月23日)														
作土*	1	1	2	9	6				6		8			
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した														
消毒後(2011年7月26日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月1日(淡色黒ボク土))														
0-5cm	23	112	23	64	25	61			7	26	17	70	15	78
5-10cm	15	20	16	26	20	32			8	11	9	20	22	9
10-15cm	14	13	15	18	17	19			8	10	10	14	11	9
15-20cm														

USZ : 2010 年は太陽熱消毒せず - 2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。USF : 2010 年は太陽熱消毒せず - 2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。SSZ : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。SSF : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。NUZ : 2010 年は試験せず (番外として畝立ても耕起も行わなかった) - 2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。NUF : 2010 年は試験せず (番外として畝立ても耕起も行わなかった) - 2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。黄色土は試験区設計が異なり、UZ : 2010、2011 年とも太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。UF : 2010、2011 年とも太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用した。SZ : 2010、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。SF : 2010、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-2(j) 2011 年の土壌調査結果 (つづき)

NH₄-N(mg kg⁻¹)

	淡色黒ボク土							多腐植質厚層黒ボク土								
	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF
太陽熱消毒前(2011年6月23日)																
作土*	1	1	0	0			0		1	3	2	0			0	
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した																
消毒後(2011年7月26日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月1日(淡色黒ボク土))																
0-5cm	55	174	26	360	0	0			74	207	71	421	0	15		
5-10cm	0	0	0	0	0	0			8	22	0	8	0	0		
10-15cm	0	0	0	0	0	0			1	0	0	0	0	0		
15-20cm																
消毒2~3週間後(2011年8月17-18日)																
0-5cm	50	135	37	132	5				79	210	53	211	5			
5-10cm	5	37	4	14	6				8	11	3	4	6			
消毒1.5ヶ月後(2011年9月15-16日)																
0-5cm	16	9	8	14	3	3			84	170	33	190	4	6		
5-10cm	4	7	3	3	2	7			7	4	4	8	5	6		
消毒2.5ヶ月後(2011年10月18-19日)																
0-5cm	5	6	4	9	3	3			7	18	13	46	6	4		
5-10cm	6	7	6	5	4	4			4	2	8	4	0	6		
10-15cm	5	3	6	8	7	12			6	9	11	3	5	6		
15-20cm																
消毒4ヶ月後(2011年12月5-6日)																
0-5cm																

USZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

USF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

SSZ : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SSF : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

NUZ : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)ー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

NUF : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)ー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-2(k) 2011 年の土壌調査結果 (つづき)

NH₄-N(mg kg⁻¹)

	灰色低地土						黄色土							
	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF	UZ	UF	SZ	SF	NSZ	NSF
太陽熱消毒前(2011年6月23日)														
作土*	0	1	2	1			0		0		0			
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した														
消毒後(2011年7月26日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月1日(淡色黒ボク土))														
0-5cm	45	176	23	276	8	23			1	3	12	40	13	84
5-10cm	13	37	6	22	5	6			2	0	0	0	0	1
10-15cm	0	3	4	0	0	0			0	2	1	0	0	1
15-20cm	1	4	6	7	0	0								
消毒2~3週間後(2011年8月17-18日)														
0-5cm	41	216	9	152										
5-10cm	0	9	0	0										
消毒1.5ヶ月後(2011年9月15-16日)														
0-5cm	20	55	6	28	1	0			0	1	4	15	6	12
5-10cm	1	2	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
消毒2.5ヶ月後(2011年10月18-19日)														
0-5cm	4	13	0	3	0.0	0			2	6	3	7	3	4
5-10cm	0	1	4	0	1.9	0			4	5	4	3	6	3
10-15cm	5	2	3	3	7.2	2			2	1	2	3	8	3
15-20cm														

USZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。USF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。SSZ : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。SSF : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。NUZ : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)ー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。NUF : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)ー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。黄色土は試験区設計が異なり、UZ : 2010、2011 年とも太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。UF : 2010、2011 年とも太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用した。SZ : 2010、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。SF : 2010、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-2(I) 2011 年の土壌調査結果 (つづき)

NO₃-N(mg kg⁻¹)

	淡色黒ボク土						多腐植質厚層黒ボク土									
	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF
太陽熱消毒前(2011年6月23日)																
作土*	1	1	0	0			0		1	3	2	0			0	
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した																
消毒後(2011年7月26日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月1日(淡色黒ボク土))																
0-5cm	72	183	87	302	6	17			66	50	53	78	2	51		
5-10cm	42	38	25	63	13	76			11	21	23	38	10	67		
10-15cm	35	23	15	34	50	131			10	29	31	25	28	100		
15-20cm																
消毒2~3週間後(2011年8月17-18日)																
0-5cm	1	2	2	4	2				7	8	11	45	4			
5-10cm	2	11	2	11	3				16	33	13	73	5			
消毒1.5ヶ月後(2011年9月15-16日)																
0-5cm	32	130	29	142	25	35			38	95	42	209	28	68		
5-10cm	14	22	13	32	17	36			10	29	19	56	15	43		
消毒2.5ヶ月後(2011年10月18-19日)																
0-5cm	3	3	2	5	1	2			26	78	9	44	2	2		
5-10cm	3	4	3	5	4	4			7	19	4	13	4	4		
10-15cm	4	10	5	7	5	5			9	23	5	8	5	8		
15-20cm																
消毒4ヶ月後(2011年12月5-6日)																
0-5cm																

USZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

USF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

SSZ : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SSF : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

NUZ : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)ー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

NUF : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)ー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-2 (m) 2011 年の土壌調査結果 (つづき)

NO₃-N(mg kg⁻¹)

	灰色低地土						黄色土							
	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF	UZ	UF	SZ	SF	NSZ	NSF
太陽熱消毒前(2011年6月23日)														
作土*	0	1	2	1			0		0		0			
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した														
消毒後(2011年7月26日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月1日(淡色黒ボク土))														
0-5cm	48	122	51	172	49	124			6	50	30	142	28	137
5-10cm	29	33	28	56	36	68			5	10	7	34	34	6
10-15cm	28	23	26	31	28	35			6	10	8	20	14	5
15-20cm	22	19	20	23	21	22								
消毒2~3週間後(2011年8月17-18日)														
0-5cm	46	73	37	188										
5-10cm	21	36	24	69										
消毒1.5ヶ月後(2011年9月15-16日)														
0-5cm	52	133	34	163	30	72			9	15	12	36	11	32
5-10cm	17	27	19	76	24	39			5	8	6	10	5	7
消毒2.5ヶ月後(2011年10月18-19日)														
0-5cm	12	35	3	15	2.0	4			3	3	2	3	2	3
5-10cm	7	10	4	11	5.3	6			2	2	2	2	2	2
10-15cm	10	10	9	22	9.2	8			3	3	3	3	3	3
15-20cm														
消毒4ヶ月後(2011年12月5-6日)														
0-5cm														

USZ : 2010 年は太陽熱消毒せず-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。USF : 2010 年は太陽熱消毒せず-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。SSZ : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。SSF : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。NUZ : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。NUF : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。黄色土は試験区設計が異なり、UZ : 2010、2011 年とも太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。UF : 2010、2011 年とも太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用した。SZ : 2010、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。SF : 2010、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-2 (n) 2011 年の土壌調査結果 (つづき)

硝化活性①土壌にNH₄-Nを350 mg kg⁻¹加え培養温度30°Cで1週間保温静置培養したときの硝酸化成量(mg kg⁻¹)

	淡色黒ボク土							多腐植質厚層黒ボク土								
	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF
太陽熱消毒前(2011年6月23日)																
作土*	219 ± 2		220 ± 5						145 ± 1		131 ± 3					
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した																
消毒後(2011年7月26日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月1日(淡色黒ボク土))																
0-5cm	3 ± 1	8 ± 2	15 ± 1	42 ± 3	234 ± 20	312 ± 3			-2 ± 2	-2 ± 1	1 ± 1	7 ± 0	103 ± 4	272 ± 2		
5-10cm	57 ± 0	88 ± 5	91 ± 1	91 ± 2	215 ± 5	229 ± 11			25 ± 1	22 ± 0	36 ± 0	48 ± 1	153 ± 7	236 ± 2		
10-15cm	110 ± 3	137 ± 1	140 ± 4	123 ± 4	184 ± 4	159 ± 2			58 ± 2	65 ± 1	62 ± 0	80 ± 2	152 ± 5	125 ± 2		
15-20cm																
消毒2~3週間後(2011年8月17-18日)																
0-5cm	16 ± 1	27 ± 1	23 ± 0	97 ± 4					7 ± 1	12 ± 1	24 ± 2	58 ± 2				
5-10cm	86 ± 1	123 ± 4	109 ± 2						61 ± 3	95 ± 2	43 ± 0	176 ± 7				
消毒1.5ヶ月後(2011年9月15-16日)																
0-5cm	59 ± 1	190 ± 6	45 ± 0	132 ± 1	110 ± 1				41 ± 0	32 ± 0	27 ± 0	90 ± 0	51 ± 1			
5-10cm	45 ± 0	114 ± 3	60 ± 0	121 ± 8					42 ± 2	52 ± 1	30 ± 1	167 ± 1				
消毒2.5ヶ月後(2011年10月18-19日)																
0-5cm	181 ± 6	259 ± 9	136 ± 2	284 ± 13	133 ± 5											
5-10cm	96 ± 3	128 ± 2	104 ± 2	166 ± 6												
10-15cm																
15-20cm																
消毒4ヶ月後(2011年12月5-6日)																
0-5cm																

USZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

USF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

SSZ : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SSF : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

NUZ : 2010 年は試験せず (番外として畝立ても耕起も行わなかった)ー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

NUF : 2010 年は試験せず (番外として畝立ても耕起も行わなかった)ー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-2(o) 2011 年の土壌調査結果 (つづき)

硝化活性①土壌にNH₄-Nを350 mg kg⁻¹加え培養温度30°Cで1週間保温静置培養したときの硝酸化成量(mg kg⁻¹)

	灰色低地土								黄色土					
	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF	UZ	UF	SZ	SF	NSZ	NSF
太陽熱消毒前(2011年6月23日)														
作土*	143 ± 8		147 ± 3						109 ± 3		102 ± 3			
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した														
消毒後(2011年7月26日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月1日(淡色黒ボク土))														
0-5cm	12 ± 6	3 ± 5	17 ± 0	58 ± 3	144 ± 4	244 ± 6								
5-10cm	76 ± 4	64 ± 2	80 ± 4	81 ± 1	157 ± 47	148 ± 3								
10-15cm	114 ± 2	111 ± 1	111 ± 5	128 ± 3	145 ± 1	148 ± 3								
15-20cm														
消毒2~3週間後(2011年8月17-18日)														
0-5cm	7 ± 1	14 ± 2	16 ± 2	46 ± 7										
5-10cm	66 ± 0	70 ± 4	43 ± 2	108 ± 11										
消毒1.5ヶ月後(2011年9月15-16日)														
0-5cm	82 ± 2	157 ± 4	26 ± 2	104 ± 5	72 ± 3									
5-10cm	57 ± 1	103 ± 4	52 ± 0	126 ± 5										
消毒2.5ヶ月後(2011年10月18-19日)														
0-5cm	130 ± 7	204 ± 2	71 ± 2	190 ± 7	98 ± 2		16 ± 3	9 ± 4						
5-10cm	87 ± 2	160 ± 3	81 ± 7	132 ± 2			23 ± 7	45 ± 3						
10-15cm														
15-20cm														
消毒4ヶ月後(2011年12月5-6日)														
0-5cm														

USZ : 2010 年は太陽熱消毒せず-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。USF : 2010 年は太陽熱消毒せず-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。SSZ : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。SSF : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。NUZ : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。NUF : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。黄色土は試験区設計が異なり、UZ : 2010、2011 年とも太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。UF : 2010、2011 年とも太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用した。SZ : 2010、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。SF : 2010、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-2 (p) 2011 年の土壤調査結果 (つづき)

硝化活性②土壤にNH₄-Nを350 mg kg⁻¹加え培養温度30°Cで2週間保温静置培養したときの硝酸化成量(mg kg⁻¹)

	淡色黒ボク土								多腐植質厚層黒ボク土							
	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF
太陽熱消毒前(2011年6月23日)																
作土*	372 ± 3		370 ± 5						363 ± 7		362 ± 8					
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壤を採取した																
消毒後(2011年7月26日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月1日(淡色黒ボク土))																
0-5cm	12 ± 1	32 ± 4	64 ± 1	97 ± 4	321 ± 2	337 ± 1			7 ± 1	1 ± 1	5 ± 1	23 ± 1	204 ± 18	321 ± 3		
5-10cm	206 ± 4	269 ± 10	297 ± 15	315 ± 11	334 ± 2	339 ± 4			146 ± 21	104 ± 3	185 ± 3	241 ± 4	284 ± 6	320 ± 4		
10-15cm	323 ± 8	340 ± 2	342 ± 2	324 ± 4	341 ± 1	331 ± 2			213 ± 4	205 ± 5	222 ± 14	283 ± 7	271 ± 14	169 ± 138		
15-20cm																
消毒2~3週間後(2011年8月17-18日)																
0-5cm	113 ± 5	163 ± 4	140 ± 2	314 ± 4					52 ± 4	65 ± 3	102 ± 10	184 ± 38				
5-10cm	320 ± 11	344 ± 14	319 ± 9						270 ± 17	284 ± 4	226 ± 13	340 ± 1				
消毒1.5ヶ月後(2011年9月15-16日)																
0-5cm	185 ± 16	283 ± 3	161 ± 2	278 ± 9	242 ± 3				107 ± 2	95 ± 0	91 ± 6	251 ± 5	140 ± 1			
5-10cm	207 ± 7	271 ± 2	224 ± 10	275 ± 2					204 ± 0	235 ± 10	167 ± 2	318 ± 2				
消毒2.5ヶ月後(2011年10月18-19日)																
0-5cm	352 ± 6	366 ± 4	336 ± 7	365 ± 2	333 ± 14											
5-10cm	311 ± 14	393 ± 96	310 ± 10	352 ± 2												
10-15cm																
15-20cm																
消毒4ヶ月後(2011年12月5-6日)																
0-5cm																

USZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

USF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

SSZ : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SSF : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

NUZ : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)ー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

NUF : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)ー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-2 (q) 2011 年の土壤調査結果 (つづき)

硝化活性②土壤にNH₄-Nを350 mg kg⁻¹加え培養温度30°Cで2週間保温静置培養したときの硝酸化成量(mg kg⁻¹)

	灰色低地土								黄色土					
	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF	UZ	UF	SZ	SF	NSZ	NSF
太陽熱消毒前(2011年6月23日)														
作土*	336 ± 7		334 ± 13						283 ± 8		266 ± 3			
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壤を採取した														
消毒後(2011年7月26日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月1日(淡色黒ボク土))														
0-5cm	8 ± 4	-6 ± 4	62 ± 1	100 ± 3	293 ± 9	339 ± 3								
5-10cm	145 ± 17	154 ± 4	213 ± 5	217 ± 2	245 ± 3	256 ± 5								
10-15cm	213 ± 21	224 ± 6	241 ± 3	268 ± 7	265 ± 2	261 ± 1								
15-20cm														
消毒2~3週間後(2011年8月17-18日)														
0-5cm	39 ± 12	63 ± 5	78 ± 8	169 ± 21										
5-10cm	228 ± 7	217 ± 4	194 ± 7	274 ± 12										
消毒1.5ヶ月後(2011年9月15-16日)														
0-5cm	178 ± 2	282 ± 3	108 ± 4	234 ± 1	175 ± 5									
5-10cm	216 ± 4	269 ± 7	211 ± 4	299 ± 3										
消毒2.5ヶ月後(2011年10月18-19日)														
0-5cm	230 ± 5	285 ± 45	183 ± 11	288 ± 19	223 ± 6		74 ± 95	30 ± 2						
5-10cm	248 ± 20	348 ± 1	282 ± 5	329 ± 8			127 ± 9	154 ± 17						
10-15cm														
15-20cm														
消毒4ヶ月後(2011年12月5-6日)														
0-5cm														

USZ : 2010 年は太陽熱消毒せず-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。USF : 2010 年は太陽熱消毒せず-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。SSZ : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。SSF : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。NUZ : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。NUF : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。黄色土は試験区設計が異なり、UZ : 2010、2011 年とも太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。UF : 2010、2011 年とも太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用した。SZ : 2010、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。SF : 2010、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-2(r) 2011 年の土壤調査結果 (つづき)

硝化活性③土壤にNH₄-Nを350 mg kg⁻¹加え培養温度45°Cで1週間保温静置培養したときの硝酸化成量(mg kg⁻¹)

	淡色黒ボク土						多腐植質厚層黒ボク土									
	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF
太陽熱消毒前(2011年6月23日)																
作土*																
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壤を採取した																
消毒後(2011年7月26日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月1日(淡色黒ボク土))																
0-5cm	31 ± 8	154 ± 40	120 ± 3		36 ± 1				3 ± 2	0 ± 1	4 ± 1		14 ± 0			
5-10cm	64 ± 10	109 ± 1	152 ± 7					13 ± 0	8 ± 1	16 ± 0						
10-15cm																
15-20cm																
消毒2~3週間後(2011年8月17-18日)																
0-5cm	76 ± 1							30 ± 1								
5-10cm	65 ± 4							46 ± 6								

硝化活性③土壤にNH₄-Nを350 mg kg⁻¹加え培養温度45°Cで1週間保温静置培養したときの硝酸化成量(mg kg⁻¹)

	灰色低地土						黄色土							
	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF	UZ	UF	SZ	SF	NSZ	NSF
太陽熱消毒前(2011年6月23日)														
作土*														
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壤を採取した														
消毒後(2011年7月26日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月1日(淡色黒ボク土))														
0-5cm	13 ± 2	4 ± 6	48 ± 4		21 ± 2									
5-10cm	23 ± 3	6 ± 1	26 ± 2											
10-15cm														
15-20cm														
消毒2~3週間後(2011年8月17-18日)														
0-5cm	34 ± 6													
5-10cm	50 ± 6													

USZ : 2010 年は太陽熱消毒せず-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。USF : 2010 年は太陽熱消毒せず-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。SSZ : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。SSF : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。NUZ : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。NUF : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。黄色土は試験区設計が異なり、UZ : 2010、2011 年とも太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。UF : 2010、2011 年とも太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用した。SZ : 2010、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。SF : 2010、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-2(s) 2011 年の土壌調査結果 (つづき)

硝化活性④土壌にNH₄-Nを350 mg kg⁻¹加え培養温度45°Cで2週間保温静置培養したときの硝酸化成量(mg kg⁻¹)

	淡色黒ボク土								多腐植質厚層黒ボク土							
	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF
太陽熱消毒前(2011年6月23日)																
作土*																
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した																
消毒後(2011年7月26日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月1日(淡色黒ボク土))																
0-5cm	191 ± 26	402 ± 74	345 ± 4		211 ± 18				44 ± 8	13 ± 3	54 ± 8		23 ± 2			
5-10cm	307 ± 29	331 ± 2	340 ± 4						99 ± 5	85 ± 1	111 ± 5					
10-15cm																
15-20cm																
消毒2~3週間後(2011年8月17-18日)																
0-5cm	409 ± 10								139 ± 25							
5-10cm	381 ± 5								163 ± 8							

硝化活性④土壌にNH₄-Nを350 mg kg⁻¹加え培養温度45°Cで2週間保温静置培養したときの硝酸化成量(mg kg⁻¹)

	灰色低地土								黄色土					
	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF	UZ	UF	SZ	SF	NSZ	NSF
太陽熱消毒前(2011年6月23日)														
作土*														
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した														
消毒後(2011年7月26日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月1日(淡色黒ボク土))														
0-5cm	90 ± 15	40 ± 14	174 ± 16		110 ± 29									
5-10cm	190 ± 16	41 ± 10	118 ± 20											
10-15cm														
15-20cm														
消毒2~3週間後(2011年8月17-18日)														
0-5cm	152 ± 5													
5-10cm	151 ± 36													

USZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。USF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。SSZ : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。SSF : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。NUZ : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)ー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。NUF : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった)ー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。黄色土は試験区設計が異なり、UZ : 2010、2011 年とも太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。UF : 2010、2011 年とも太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用した。SZ : 2010、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。SF : 2010、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用した。表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-2(t) 2011 年の土壌調査結果 (つづき)

80°C16時間水抽出TOC(mg kg⁻¹)

淡色黒ボク土							
	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ NSF
太陽熱消毒前(2011年6月23日)							
作土*	698	649	711	705	716		
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した							
消毒後(2011年7月26日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月1日(淡色黒ボク土))							
0-5cm	534	511	559	650	631	593	
5-10cm	549	494	587	559	643	558	
10-15cm	501	496	572	578	652	525	
15-20cm							
灰色低地土							
	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ NSF
太陽熱消毒前(2011年6月23日)							
作土*	486	516	592	590	710		
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した							
消毒後(2011年7月26日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月1日(淡色黒ボク土))							
0-5cm	480	774	524	511	645	558	
5-10cm	413	503	498	611	650	502	
10-15cm	415	429	477	617	667	522	
15-20cm							

USZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

USF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

SSZ : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SSF : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

NUZ : 2010 年は試験せず (番外として畝立ても耕起も行わなかった)ー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

NUF : 2010 年は試験せず (番外として畝立ても耕起も行わなかった)ー2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-2(u) 2011 年の土壤調査結果 (つづき)

80°C16時間水抽出TON(TN-無機態窒素) (mg kg⁻¹)

淡色黒ボク土								
	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF
太陽熱消毒前(2011年6月23日)								
作土*	95	97	118	104	109			
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壤を採取した								
消毒後(2011年7月26日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月1日(淡色黒ボク土))								
0-5cm	50	-4	58	48	75	70		
5-10cm	51	53	74	60	75	59		
10-15cm	52	55	64	65	81	29		
15-20cm								
灰色低地土								
	USZ	USF	SSZ	SSF	NUZ	NUF	NSZ	NSF
太陽熱消毒前(2011年6月23日)								
作土*	61	63	79	88	104			
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壤を採取した								
消毒後(2011年7月26日(灰色低地土)、8月4日(多腐植質厚層黒ボク土)、8月1日(淡色黒ボク土))								
0-5cm	66	77	64	52	86	42		
5-10cm	59	66	67	88	91	63		
10-15cm	59	53	76	89	90	72		
15-20cm								

USZ : 2010 年は太陽熱消毒せず-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

USF : 2010 年は太陽熱消毒せず-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

SSZ : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SSF : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

NUZ : 2010 年は試験せず (番外として畝立ても耕起も行わなかった) -2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

NUF : 2010 年は試験せず (番外として畝立ても耕起も行わなかった) -2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

以上、2011 年観測値

表 C-3(a) 2012 年の土壌調査結果 (つづく)

容積重(g 100cm⁻³)

	淡色黒ボク土						多腐植質厚層黒ボク土					
	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2012年7月4日)												
0-5cm	55 ± 1					55 ± 1						
5-10cm	61 ± 2					61 ± 2						
10-15cm	68 ± 2					68 ± 2						
15-20cm	76 ± 1					76 ± 1						
消毒後(2012年8月9日(淡色黒ボク土)、8月16日(多腐植質厚層黒ボク土、灰色低地土))												
0-5cm	61 ± 1	60 ± 2	58 ± 1	58 ± 0	57 ± 1	57 ± 0	62 ± 1	63 ± 1	60 ± 0	61 ± 4	59 ± 2	59 ± 1
5-10cm	63 ± 3	68 ± 2	64 ± 1	65 ± 4	65 ± 5	63 ± 3	68 ± 2	68 ± 3	66 ± 0	65 ± 0	64 ± 3	66 ± 2
10-15cm	69 ± 3	68 ± 3	65 ± 4	68 ± 4	69 ± 1	68 ± 1	67 ± 1	71 ± 1	70 ± 0	72 ± 1	69 ± 0	74 ± 2
消毒1ヶ月後(2012年9月11-14日)												
0-5cm	61 ± 1	60 ± 1	62 ± 0	62 ± 0	60 ± 2	62 ± 2	64 ± 1	63 ± 2	63 ± 1	65 ± 3	62 ± 1	65 ± 2
5-10cm	64 ± 1	64 ± 1	63 ± 1	64 ± 1	64 ± 2	62 ± 5	67 ± 2	66 ± 2	68 ± 2	69 ± 1	65 ± 1	69 ± 3
消毒1.5ヶ月後(2012年9月27日)												
0-5cm												
5-10cm												
消毒2.5ヶ月後(2012年10月30日-11月1日)												
0-5cm		61 ± 1		62 ± 1		60 ± 3		62 ± 3		65 ± 4		62 ± 1
5-10cm		62 ± 2		66 ± 3		67 ± 6		66 ± 2		66 ± 2		64 ± 2
10-15cm		71 ± 7		71 ± 2		71 ± 6		72 ± 1		76 ± 4		74 ± 7

UZ：2010年は太陽熱消毒せずー2011年は太陽熱消毒しー2011年は太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。

UF：2010年は太陽熱消毒せずー2011年は太陽熱消毒しー2011年は太陽熱消毒せず。有機質肥料を施用した。

RZ：2010、2011、2012年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

RF：2010、2011、2012年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SZ：2010、2011年は太陽熱消毒せずー2012年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SF：2010、2011年は太陽熱消毒せずー2012年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-3(b) 2012 年の土壌調査結果 (つづき)

容積重(g 100cm⁻³)

	灰色低地土						黄色土					
	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2012年7月4日)												
0-5cm	82 ± 3						117 ± 7					
5-10cm	93 ± 9						138 ± 2					
10-15cm	112 ± 4						152 ± 9					
15-20cm	122 ± 1						165 ± 4					
消毒後(2012年8月9日(淡色黒ボク土)、8月16日(多腐植質厚層黒ボク土、灰色低地土))												
0-5cm	98 ± 4	93 ± 0	79 ± 3	82 ± 4	83 ± 1	83 ± 0	129 ± 2	121 ± 0	119 ± 5	109 ± 11	119 ± 19	112 ± 5
5-10cm	102 ± 3	97 ± 5	98 ± 5	94 ± 6	94 ± 3	93 ± 1	136 ± 4	135 ± 8	148 ± 1	134 ± 4	142 ± 3	139 ± 4
10-15cm	108 ± 3	95 ± 2	110 ± 3	109 ± 4	102 ± 3	102 ± 4	140 ± 5	153 ± 1	150 ± 5	144 ± 3	152 ± 2	152 ± 0
消毒1ヶ月後(2012年9月11-14日)												
0-5cm	98 ± 5	94 ± 2	87 ± 1	91 ± 3	92 ± 1	93 ± 6						
5-10cm	101 ± 3	98 ± 4	98 ± 4	100 ± 5	96 ± 3	97 ± 5						
消毒1.5ヶ月後(2012年9月27日)												
0-5cm												
5-10cm												
消毒2.5ヶ月後(2012年10月30日-11月1日)												
0-5cm		89 ± 2		85 ± 5		87 ± 2						
5-10cm		96 ± 3		98 ± 6		92 ± 2						
10-15cm		109 ± 1		111 ± 3		109 ± 4						

USZ : 2010 年は太陽熱消毒せず-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。USF : 2010 年は太陽熱消毒せず-2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。SSZ : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。SSF : 2010 年、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。NUZ : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった) -2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。NUF : 2010 年は試験せず(番外として畝立ても耕起も行わなかった) -2011 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。黄色土は試験区設計が異なり、UZ : 2010、2011 年とも太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。UF : 2010、2011 年とも太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用した。SZ : 2010、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。SF : 2010、2011 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用した。表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-3(c) 2012 年の土壌調査結果 (つづき)

含水率(%)

	淡色黒ボク土						多腐植質厚層黒ボク土					
	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2012年7月4日)												
作土*	35	35	36	35	35	35	33	33	33.3	33.1	34.1	33.3
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した												
消毒後(2012年8月9日(淡色黒ボク土)、8月16日(多腐植質厚層黒ボク土、灰色低地土))												
0-5cm	25	24	32	31	31	31	26	26	31	31	31	30
5-10cm	30	30	34	34	33	33	29	29	32	32	32	32
10-15cm	30	31	34	34	34	34	29	29	32	32	33	32
消毒1ヶ月後(2012年9月11-14日)												
0-5cm	28	27	28	29	28	27	27	27	28	27	27	27
5-10cm	31	31	32	32	32	32	30	30	31	31	31	31
消毒1.5ヶ月後(2012年9月27日)												
0-5cm			30		30				28		28	
5-10cm			30		30				28		28	
消毒2.5ヶ月後(2012年10月30日-11月1日)												
0-5cm	34	34	33	33	34	33	30	30	30	31	30	30
5-10cm	35	35	36	35	36	36	32	32	33	33	33	33
10-15cm	35	35	36	36	37	36	33	33	33	33	34	33

UZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。

UF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料を施用した。

RZ : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

RF : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SZ : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SF : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-3(d) 2012 年の土壌調査結果 (つづき)

含水率(%)

	灰色低地土						黄色土					
	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2012年7月4日)												
作土*	23	22	23	23	24	23	18	18	19	18	18	17
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した												
消毒後(2012年8月9日(淡色黒ボク土)、8月16日(多腐植質厚層黒ボク土、灰色低地土))												
0-5cm	15	15	20	19	20	19						
5-10cm	18	18	22	21	23	22						
10-15cm	18	19	22	22	23	23						
消毒1ヶ月後(2012年9月11-14日)												
0-5cm	14	14	15	15	15	15						
5-10cm	18	18	20	20	21	21						
消毒1.5ヶ月後(2012年9月27日)												
0-5cm			17		18							
5-10cm			17		18							
消毒2.5ヶ月後(2012年10月30日-11月1日)												
0-5cm	22	22	23	23	23	23						
5-10cm	23	24	24	24	24	25						
10-15cm	23	24	24	24	25	25						

UZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。

UF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料を施用した。

※ただし黄色土では、2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒しなかった処理区を UZ、UF とした。

RZ : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

RF : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SZ : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SF : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-3(e) 2012 年の土壌調査結果 (つづき)

pH(水)

	淡色黒ボク土						多腐植質厚層黒ボク土					
	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2012年7月4日)												
作土*	6.9	7.0	7.0	6.9	6.8	6.8	6.4	6.3	6.3	6.4	6.2	6.2
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した												
消毒後(2012年8月9日(淡色黒ボク土)、8月16日(多腐植質厚層黒ボク土、灰色低地土))												
0-5cm	6.7	6.3	6.7	6.4	6.4	6.6	6.2	5.7	5.9	6.0	5.9	5.8
5-10cm	6.9	6.7	6.8	6.5	6.6	6.5	6.4	6.1	6.1	6.0	6.0	6.0
10-15cm	6.8	6.9	6.9	6.6	6.7	6.7	6.5	6.3	6.2	6.1	6.0	6.0
消毒1ヶ月後(2012年9月11-14日)												
0-5cm	6.8	6.6	6.8	6.5	6.6	6.6	6.3	5.8	5.9	5.9	5.8	5.9
5-10cm	6.7	6.5	6.6	6.4	6.4	6.2	6.3	5.9	6.1	5.9	5.9	5.8
	灰色低地土						黄色土					
	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2012年7月4日)												
作土*	6.9	6.7	6.8	6.8	6.7	6.8	6.6	6.5	6.6	6.6	6.7	6.9
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した												
消毒後(2012年8月9日(淡色黒ボク土)、8月16日(多腐植質厚層黒ボク土、灰色低地土))												
0-5cm	6.6	6.0	6.3	6.3	6.3	6.3						
5-10cm	7.0	6.4	6.6	6.5	6.4	6.4						
10-15cm	7.0	6.5	6.6	6.7	6.5	6.5						
消毒1ヶ月後(2012年9月11-14日)												
0-5cm	6.3	5.8	6.3	6.2	6.2	6.2						
5-10cm	6.7	6.4	6.6	6.4	6.4	6.3						

UZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。UF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料を施用した。

※ただし黄色土では、2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒しなかった処理区を UZ、UF とした。

RZ : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。RF : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。SZ : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。SF : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-3(f) 2012 年の土壌調査結果 (つづき)

NH₄-N(mg kg⁻¹)

	淡色黒ボク土						多腐植質厚層黒ボク土					
	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2012年7月4日)												
作土*	3	5	7	8	7	6	2	7	6	6	1	7
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した												
消毒後(2012年8月9日(淡色黒ボク土)、8月16日(多腐植質厚層黒ボク土、灰色低地土))												
0-5cm	1	1	35	120	41	140	15	16	42	177	83	203
5-10cm	1	2	2	3	2	3	11	1	2	5	5	48
10-15cm	1	1	1	2	1	2	12	12	2	2	1	2
消毒1ヶ月後(2012年9月11-14日)												
0-5cm	6	5	34	64	42	113	9	9	38	124	67	193
5-10cm	6	5	4	7	6	10	3	7	2	18	7	33
消毒1.5ヶ月後(2012年9月27日)												
0-5cm			25	66	29	124			35	73	57	141
5-10cm												
消毒2.5ヶ月後(2012年10月30日-11月1日)												
0-5cm	2	1	6	3	8	19	1	4	16	27	39	160
5-10cm	1	1	1	6	3	2	1	1	1	2	4	6
10-15cm	1	1	1	4	1	1	1	1	2	1	1	2

UZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。

UF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料を施用した。

RZ : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

RF : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SZ : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SF : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-3(g) 2012 年の土壌調査結果 (つづき)

NH₄-N(mg kg⁻¹)

	灰色低地土						黄色土					
	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2012年7月4日)												
作土*	6	7	7	8	1	1	6	3	5	6	3	4
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した												
消毒後(2012年8月9日(淡色黒ボク土)、8月16日(多腐植質厚層黒ボク土、灰色低地土))												
0-5cm	12	17	26	60	51	116						
5-10cm	12	12	1	1	1	2						
10-15cm	9	2	1	1	1	1						
消毒1ヶ月後(2012年9月11-14日)												
0-5cm	4	10	18	61	40	91						
5-10cm	1	1	1	1	1	6						
消毒1.5ヶ月後(2012年9月27日)												
0-5cm			21	35	41	77						
5-10cm												
消毒2.5ヶ月後(2012年10月30日-11月1日)												
0-5cm	1	0	9	13	14	49						
5-10cm	1	0	1	1	1	1						
10-15cm	1	0	0	0	0	1						

UZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。

UF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料を施用した。

※ただし黄色土では、2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒しなかった処理区を UZ、UF とした。

RZ : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

RF : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SZ : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SF : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-3 (h) 2012 年の土壌調査結果 (つづき)

NO₃-N(mg kg⁻¹)

	淡色黒ボク土						多腐植質厚層黒ボク土					
	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2012年7月4日)												
作土*	6	6	6	6	8	9	6	5	5	6	6	7
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した												
消毒後(2012年8月9日(淡色黒ボク土)、8月16日(多腐植質厚層黒ボク土、灰色低地土))												
0-5cm	58	426	113	313	182	180	71	322	148	201	125	236
5-10cm	20	75	55	95	53	123	14	37	49	109	58	87
10-15cm	17	36	41	51	44	65	12	20	38	58	46	46
消毒1ヶ月後(2012年9月11-14日)												
0-5cm	27	86	40	120	52	91	34	195	120	236	141	174
5-10cm	54	149	91	157	99	224	39	118	51	106	67	98
消毒1.5ヶ月後(2012年9月27日)												
0-5cm			5	13	3	9			9	48	19	52
5-10cm												
消毒2.5ヶ月後(2012年10月30日-11月1日)												
0-5cm	2	1	5	13	8	28	2	4	4	22	5	18
5-10cm	2	6	3	11	5	28	2	11	7	17	10	26
10-15cm	3	9	6	50	9	43	4	10	13	33	9	31

UZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。

UF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料を施用した。

RZ : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

RF : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SZ : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SF : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-3(i) 2012 年の土壌調査結果 (つづき)

NO₃-N(mg kg⁻¹)

	灰色低地土						黄色土					
	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2012年7月4日)												
作土*	5	6	6	6	13	9	4	5	4	4	4	4
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した												
消毒後(2012年8月9日(淡色黒ボク土)、8月16日(多腐植質厚層黒ボク土、灰色低地土))												
0-5cm	54	208	115	203	174	161						
5-10cm	9	17	29	45	47	54						
10-15cm	8	13	30	35	45	52						
消毒1ヶ月後(2012年9月11-14日)												
0-5cm	98	302	135	241	188	265						
5-10cm	19	40	30	53	45	60						
消毒1.5ヶ月後(2012年9月27日)												
0-5cm			10	21	14	19						
5-10cm												
消毒2.5ヶ月後(2012年10月30日-11月1日)												
0-5cm	2	4	2	7	6	7						
5-10cm	3	36	8	37	26	13						
10-15cm	14	36	16	56	24	42						

UZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。

UF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料を施用した。

※ただし黄色土では、2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒しなかった処理区を UZ、UF とした。

RZ : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

RF : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SZ : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SF : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-3(j) 2012 年の土壌調査結果 (つづき)

硝化活性①土壌にNH₄-Nを350 mg kg⁻¹に加え培養温度30°Cで2週間保温静置培養したときの硝酸化成量(mg kg⁻¹)

	淡色黒ボク土						多腐植質厚層黒ボク土					
	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2012年7月4日)												
作土*	284 ± 38	281 ± 13	267 ± 12	281 ± 3	249 ± 14	274 ± 33	169 ± 16	255 ± 16	130 ± 2	248 ± 12	128 ± 5	154 ± 5
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した												
消毒後(2012年8月9日(淡色黒ボク土)、8月16日(多腐植質厚層黒ボク土、灰色低地土))												
0-5cm	155 ± 12	257 ± 6	67 ± 1	35 ± 2	24 ± 0	29 ± 3	62 ± 8	74 ± 1	6 ± 1	13 ± 1	0 ± 0	1 ± 2
5-10cm	167 ± 1	285 ± 8	204 ± 10	212 ± 1	121 ± 10	159 ± 1	96 ± 10	215 ± 28	77 ± 7	107 ± 17	42 ± 3	68 ± 4
10-15cm	178 ± 26	225 ± 10	222 ± 27	245 ± 33	183 ± 14	209 ± 37	93 ± 3	152 ± 2	90 ± 17	118 ± 7	56 ± 14	95 ± 1
消毒1ヶ月後(2012年9月11-14日)												
0-5cm	308	352	84	124	50	63	116	199	11	19	2	1
5-10cm	238	309	151	153	104	114	92	204	64	131	52	129
消毒1.5ヶ月後(2012年9月27日)												
0-5cm			135 ± 6	136 ± 6	81 ± 3	108 ± 1			14 ± 1	41 ± 1	8 ± 1	10 ± 0
5-10cm												
消毒2.5ヶ月後(2012年10月30日-11月1日)												
0-5cm	284 ± 5	347 ± 38	271 ± 11	292 ± 7	266 ± 12	335 ± 18	135 ± 2	265 ± 14	47 ± 2	164 ± 20	30 ± 1	94 ± 2
5-10cm	279 ± 19	371 ± 1	176 ± 22	248 ± 10	136 ± 5	320 ± 9	140 ± 2	255 ± 15	64 ± 2	133 ± 16	46 ± 1	183 ± 2
10-15cm												

UZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。

UF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料を施用した。

RZ : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

RF : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SZ : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SF : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-3(k) 2012 年の土壌調査結果 (つづき)

硝化活性①土壌にNH₄-Nを350 mg kg⁻¹加え培養温度30°Cで2週間保温静置培養したときの硝酸化成量(mg kg⁻¹)

	灰色低地土						黄色土					
	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2012年7月4日)												
作土*	116 ± 11	134 ± 13	87 ± 6	115 ± 6	93	129 ± 9	21 ± 1	30 ± 3	17 ± 2	24 ± 1	26 ± 1	24 ± 1
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した												
消毒後(2012年8月9日(淡色黒ボク土)、8月16日(多腐植質厚層黒ボク土、灰色低地土))												
0-5cm	38 ± 3	31 ± 1	0 ± 0	5 ± 2	-1 ± 1	1 ± 2						
5-10cm	34 ± 2	67 ± 0	14 ± 8	26 ± 3	20 ± 4	48 ± 2						
10-15cm	31 ± 8	22 ± 4	23 ± 12	59 ± 27	42 ± 4	61 ± 7						
消毒1ヶ月後(2012年9月11-14日)												
0-5cm	71	89	5	7	4	5						
5-10cm	60	111	33	54	30	58						
消毒1.5ヶ月後(2012年9月27日)												
0-5cm			5 ± 0	20 ± 2	5 ± 0	6 ± 1						
5-10cm												
消毒2.5ヶ月後(2012年10月30日-11月1日)												
0-5cm												
5-10cm												
10-15cm												

UZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。

UF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料を施用した。

※ただし黄色土では、2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒しなかった処理区を UZ、UF とした。

RZ : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

RF : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SZ : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SF : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-3(I) 2012 年の土壌調査結果 (つづき)

硝化活性②土壌にNH₄-Nを350 mg kg⁻¹に加え培養温度45°Cで2週間保温静置培養したときの硝酸化成量(mg kg⁻¹)

	淡色黒ボク土						多腐植質厚層黒ボク土					
	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2012年7月4日)												
作土*	363 ± 5	363 ± 9	302 ± 0	355 ± 10	178 ± 7	105 ± 22	41.6 ± 0	66.1 ± 2	25.9 ± 6	76 ± 18	18 ± 2	6.87 ± 0
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した												
消毒後(2012年8月9日(淡色黒ボク土)、8月16日(多腐植質厚層黒ボク土、灰色低地土))												
0-5cm	70 ± 20	90 ± 8	253 ± 13	242 ± 47	124 ± 1	113 ± 7	21 ± 1	31 ± 4	40 ± 3	91 ± 1	6 ± 1	1 ± 1
5-10cm	195 ± 41	198 ± 21	324 ± 13	340 ± 5	248 ± 40	182 ± 8	38 ± 2	48 ± 2	118 ± 0	167 ± 1	56 ± 2	51 ± 0
10-15cm	187 ± 8	197 ± 11	295 ± 44	347 ± 4	130 ± 18	67 ± 2	43 ± 7	47 ± 5	57 ± 1	111 ± 7	22 ± 1	27 ± 0
消毒1ヶ月後(2012年9月11-14日)												
0-5cm	311	306	366	390	261	315	31	26	45	99	20	9
5-10cm	304	321	347	337	274	306	29	22	61	91	44	42
消毒1.5ヶ月後(2012年9月27日)												
0-5cm												
5-10cm												
消毒2.5ヶ月後(2012年10月30日-11月1日)												
0-5cm												
5-10cm												
10-15cm												

UZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。

UF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料を施用した。

RZ : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

RF : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SZ : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SF : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-3 (m) 2012 年の土壌調査結果 (つづき)

硝化活性②土壌にNH₄-Nを350 mg kg⁻¹加え培養温度45°Cで2週間保温静置培養したときの硝酸化成量(mg kg⁻¹)

	灰色低地土						黄色土					
	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2012年7月4日)												
作土*	63 ± 25	75 ± 30	56 ± 31	111 ± 13	26 ± 2	15 ± 1	2 ± 0	3 ± 0	5 ± 1	12 ± 2	5 ± 1	3 ± 0
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した												
消毒後(2012年8月9日(淡色黒ボク土)、8月16日(多腐植質厚層黒ボク土、灰色低地土))												
0-5cm	25 ± 1	16 ± 0	34 ± 3	61 ± 7	15 ± 6	14 ± 1						
5-10cm	48 ± 11	23 ± 0	85 ± 0	168 ± 2	80 ± 1	53 ± 6						
10-15cm	40 ± 0	22 ± 5	44 ± 1	132 ± 2	51 ± 2	19 ± 2						
消毒1ヶ月後(2012年9月11-14日)												
0-5cm	24	18	43	76	28	34						
5-10cm	33	40	76	122	48	49						
消毒1.5ヶ月後(2012年9月27日)												
0-5cm												
5-10cm												
消毒2.5ヶ月後(2012年10月30日-11月1日)												
0-5cm												
5-10cm												
10-15cm												

UZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。

UF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料を施用した。

※ただし黄色土では、2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒しなかった処理区を UZ、UF とした。

RZ : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

RF : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SZ : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SF : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-3(n) 2012 年の土壤調査結果 (つづき)

土壤可給態窒素(30°C28日間培養中の土壤有機態窒素の無機化量mg kg⁻¹)

	淡色黒ボク土						多腐植質厚層黒ボク土					
	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2012年7月4日)												
作土*												
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壤を採取した												
消毒後(2012年8月9日(淡色黒ボク土)、8月16日(多腐植質厚層黒ボク土、灰色低地土))												
0-5cm	14 ± 1	19 ± 2	3 ± 1	-24 ± 13	-6 ± 1	-20 ± 1	-3 ± 0	-3 ± 6	-4 ± 4	-12 ± 8	-1 ± 1	5 ± 3
5-10cm	10 ± 0	8 ± 1	7 ± 1	4 ± 1	4 ± 0	1 ± 0	1 ± 1	14 ± 0	6 ± 0	8 ± 1	5 ± 1	7 ± 5
10-15cm	10 ± 0	9 ± 0	11 ± 3	7 ± 0	8 ± 0	7 ± 1	-1 ± 0	-3 ± 4	10 ± 2	7 ± 3	9 ± 1	10 ± 2
消毒1ヶ月後(2012年9月11-14日)												
0-5cm												
5-10cm												
消毒1.5ヶ月後(2012年9月27日)												
0-5cm												
5-10cm												
消毒2.5ヶ月後(2012年10月30日-11月1日)												
0-5cm				24 ± 0			28 ± 1					
5-10cm				14 ± 1			26 ± 1					
10-15cm				15 ± 1			17 ± 2					

UZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。

UF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料を施用した。

RZ : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

RF : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SZ : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SF : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-3(o) 2012 年の土壌調査結果 (つづき)

土壌可給態窒素(30°C28日間培養中の土壌有機態窒素の無機化量 mg kg⁻¹)

	灰色低地土						黄色土					
	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2012年7月4日)												
作土*												
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した												
消毒後(2012年8月9日(淡色黒ボク土)、8月16日(多腐植質厚層黒ボク土、灰色低地土))												
0-5cm	-3 ± 5	2 ± 3	3 ± 0	0 ± 0	6 ± 1	7 ± 1						
5-10cm	-6 ± 0	0 ± 1	5 ± 1	9 ± 1	6 ± 1	6 ± 1						
10-15cm	-2 ± 1	8 ± 0	5 ± 0	6 ± 0	9 ± 1	11 ± 1						
消毒1ヶ月後(2012年9月11-14日)												
0-5cm												
5-10cm												
消毒1.5ヶ月後(2012年9月27日)												
0-5cm												
5-10cm												
消毒2.5ヶ月後(2012年10月30日-11月1日)												
0-5cm												
5-10cm												
10-15cm												

UZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。

UF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料を施用した。

※ただし黄色土では、2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒しなかった処理区を UZ、UF とした。

RZ : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

RF : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SZ : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SF : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-3(p) 2012 年の土壌調査結果 (つづき)

80°C16時間水抽出TOC(mg kg⁻¹)

	淡色黒ボク土						多腐植質厚層黒ボク土					
	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2012年7月4日)												
作土*	474 ± 11	452 ± 29	488 ± 37	521 ± 29	541 ± 4	507 ± 13	588 ± 31	601 ± 12	649 ± 1	711 ± 45	703 ± 1	655 ± 14
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した												
消毒後(2012年8月9日(淡色黒ボク土)、8月16日(多腐植質厚層黒ボク土、灰色低地土))												
0-5cm	459 ± 18	349 ± 11	408 ± 26	366 ± 11	386 ± 0	387 ± 1	557 ± 59	493 ± 2	486 ± 4	629 ± 6	526 ± 6	634 ± 40
5-10cm	434 ± 10	355 ± 5	379 ± 10	369 ± 10	421 ± 30	337 ± 13	623 ± 8	563 ± 31	503 ± 14	573 ± 14	550 ± 39	543 ± 7
10-15cm	429 ± 9	355 ± 0	358 ± 21	375 ± 4	438 ± 3	368 ± 0	623 ± 5	534 ± 23	529 ± 3	558 ± 7	517 ± 21	545 ± 24
消毒1ヶ月後(2012年9月11-14日)												
0-5cm												
5-10cm												
消毒1.5ヶ月後(2012年9月27日)												
0-5cm												
5-10cm												
消毒2.5ヶ月後(2012年10月30日-11月1日)												
0-5cm	502 ± 36	473 ± 13	481 ± 45	523 ± 3	493 ± 13	482 ± 22	691 ± 6	659 ± 19	656 ± 29	695 ± 38	757 ± 22	877 ± 9
5-10cm	451 ± 30	444 ± 7	468 ± 1	560 ± 61	516 ± 14	476 ± 2	650 ± 0	610 ± 18	622 ± 11	719 ± 7	718 ± 5	666 ± 20
10-15cm	476 ± 12	407 ± 8	572 ± 16	490 ± 13	512 ± 1	442 ± 11	632 ± 17	609 ± 13	622 ± 27	706 ± 13	683 ± 13	678 ± 27

UZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。

UF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料を施用した。

RZ : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

RF : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SZ : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SF : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-3(q) 2012 年の土壌調査結果 (つづき)

80°C16時間水抽出TOC(mg kg⁻¹)

	灰色低地土						黄色土					
	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2012年7月4日)												
作土*	299 ± 12	350 ± 1	382 ± 22	416 ± 12	523 ± 0	458 ± 24	248 ± 20	260 ± 14	285 ± 18	276 ± 21	285 ± 28	265 ± 12
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した												
消毒後(2012年8月9日(淡色黒ボク土)、8月16日(多腐植質厚層黒ボク土、灰色低地土))												
0-5cm	318 ± 34	309 ± 23	327 ± 11	295 ± 5	460 ± 10	407 ± 1						
5-10cm	292 ± 22	376 ± 13	291 ± 9	288 ± 3	386 ± 5	336 ± 0						
10-15cm	295 ± 5	336 ± 19	300 ± 20	290 ± 26	389 ± 16	327 ± 28						
消毒1ヶ月後(2012年9月11-14日)												
0-5cm												
5-10cm												
消毒1.5ヶ月後(2012年9月27日)												
0-5cm												
5-10cm												
消毒2.5ヶ月後(2012年10月30日-11月1日)												
0-5cm	355 ± 13	350 ± 22	354 ± 21	360 ± 15	353 ± 17	397 ± 2						
5-10cm	323 ± 9	354 ± 17	302 ± 3	320 ± 35	372 ± 52	366 ± 14						
10-15cm	273 ± 5	314 ± 24	316 ± 13	285 ± 9	352 ± 7	360 ± 3						

UZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。

UF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料を施用した。

※ただし黄色土では、2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒しなかった処理区を UZ、UF とした。

RZ : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

RF : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SZ : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SF : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-3(r) 2012 年の土壌調査結果 (つづき)

80°C16時間水抽出TON(TN-無機態窒素) (mg kg⁻¹)

	淡色黒ボク土						多腐植質厚層黒ボク土					
	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2012年7月4日)												
作土*	38 ± 1	41 ± 4	43 ± 6	49 ± 5	56 ± 5	39 ± 6	47 ± 3	46 ± 0	54 ± 1	60 ± 5	60 ± 3	54 ± 0
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した												
消毒後(2012年8月9日(淡色黒ボク土)、8月16日(多腐植質厚層黒ボク土、灰色低地土))												
0-5cm	37 ± 9	-27 ± 3	2 ± 7	-103 ± 26	-59 ± 1	-52 ± 10	65 ± 3	-39 ± 0	-14 ± 1	-29 ± 3	0 ± 5	-37 ± 8
5-10cm	33 ± 0	18 ± 1	24 ± 4	-14 ± 5	10 ± 1	6 ± 1	62 ± 2	19 ± 1	18 ± 4	30 ± 15	21 ± 0	15 ± 0
10-15cm	27 ± 1	25 ± 3	23 ± 22	3 ± 8	11 ± 3	20 ± 2	39 ± 5	26 ± 2	27 ± 0	24 ± 5	26 ± 5	23 ± 2
消毒1ヶ月後(2012年9月11-14日)												
0-5cm												
5-10cm												
消毒1.5ヶ月後(2012年9月27日)												
0-5cm												
5-10cm												
消毒2.5ヶ月後(2012年10月30日-11月1日)												
0-5cm	62 ± 21	47 ± 4	41 ± 3	60 ± 13	45 ± 3	49 ± 5	66 ± 6	70 ± 5	72 ± 7	67 ± 6	87 ± 18	72 ± 4
5-10cm	39 ± 2	38 ± 12	40 ± 2	58 ± 1	50 ± 1	45 ± 6	65 ± 11	65 ± 5	61 ± 9	65 ± 6	64 ± 3	53 ± 1
10-15cm	45 ± 6	40 ± 1	66 ± 36	33 ± 2	48 ± 7	36 ± 6	65 ± 10	63 ± 5	65 ± 5	74 ± 10	57 ± 8	61 ± 10

UZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。

UF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料を施用した。

RZ : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

RF : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SZ : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SF : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-3(s) 2012 年の土壌調査結果 (つづき)

80°C16時間水抽出TON(TN-無機態窒素) (mg kg⁻¹)

	灰色低地土						黄色土					
	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF
太陽熱消毒前(2012年7月4日)												
作土*	28 ± 1	28 ± 3	36 ± 12	40 ± 7	50 ± 2	47 ± 3	23 ± 8	25 ± 1	28 ± 1	24 ± 1	26 ± 2	25 ± 0
*太陽熱消毒開始の数時間前、耕耘機で深さ15cmまで耕起した後、深さ5-10cmの土壌を採取した												
消毒後(2012年8月9日(淡色黒ボク土)、8月16日(多腐植質厚層黒ボク土、灰色低地土))												
0-5cm	8 ± 6	-18 ± 5	-10 ± 1	-40 ± 0	-8 ± 2	-18 ± 6						
5-10cm	18 ± 10	25 ± 9	12 ± 1	19 ± 3	24 ± 1	13 ± 0						
10-15cm	15 ± 1	34 ± 0	15 ± 1	13 ± 1	29 ± 8	13 ± 9						
消毒1ヶ月後(2012年9月11-14日)												
0-5cm												
5-10cm												
消毒1.5ヶ月後(2012年9月27日)												
0-5cm												
5-10cm												
消毒2.5ヶ月後(2012年10月30日-11月1日)												
0-5cm	69 ± 4	48 ± 1	57 ± 2	51 ± 2	48 ± 2							
5-10cm	48 ± 3	46 ± 10	45 ± 7	31 ± 0	38 ± 1							
10-15cm	38 ± 8	59 ± 9	45 ± 3	29 ± 3								

UZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。

UF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料を施用した。

※ただし黄色土では、2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒しなかった処理区を UZ、UF とした。

RZ : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

RF : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SZ : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SF : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-3(t) 2012 年の土壌調査結果 (つづき)

畝の高さの変化(太陽熱消毒前に畝立てした時点からの沈下、単位はmm)

淡色黒ボク土						多腐植質厚層黒ボク土					
UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF
消毒後1~2週間後(2012年8月22日)											
-4 ± 1.5		-2 ± 1.0		-3 ± 0.7		-4 ± 1.0	-3 ± 2.1				

灰色低地土						黄色土					
UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF
消毒後(2012年8月9日(淡色黒ボク土)、8月16日(多腐植質厚層黒ボク土、灰色低地土))											
-4 ± 6.1	-2 ± 0.6					-11 ± 3.1	-13 ± 5.0	0 ± 0.0		-1 ± 1.2	

土壌硬度(畝表面に上から土壌高度計を差した条件)

淡色黒ボク土						多腐植質厚層黒ボク土					
UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF
消毒後1~2週間後(2012年8月22日)											
2.2 ± 1.3	1.4 ± 2.1	1.2 ± 0.4	2.8 ± 0.4	3.2 ± 1.3	1.0 ± 1.0	16.8 ± 3.9	9.2 ± 4.5	3.4 ± 1.1	3.0 ± 1.4	5.0 ± 1.2	5.4 ± 3.4

灰色低地土						黄色土					
UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF
消毒後(2012年8月9日(淡色黒ボク土)、8月16日(多腐植質厚層黒ボク土、灰色低地土))											
1.8 ± 1.3	2.0 ± 1.2	1.2 ± 1.3	2.2 ± 1.3	2.8 ± 2.2	2.6 ± 1.7	19.8 ± 1.1	13.2 ± 3.7	10.2 ± 5.5	5.9 ± 6.0	13.4 ± 7.4	14.8 ± 6.9

UZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。
 UF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料を施用した。
 ※ただし黄色土では、2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒しなかった処理区を UZ、UF とした。
 RZ : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。
 RF : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。
 SZ : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。
 SF : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。
 表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

表 C-3(u) 2012 年の土壌調査結果 (つづき)

作土深(畝に上から物差しを差し込んで抵抗なく差し込めた深さ、cm)

淡色黒ボク土						多腐植質厚層黒ボク土					
UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF
消毒後1~2週間後(2012年8月22日)											
17.5 ± 6.6		17.7 ± 0.6	18.3 ± 0.6	16.0 ± 1.7		19.0 ± 1.0	20.3 ± 1.5	17.0 ± 2.6	18.0 ± 1.0	18.7 ± 1.2	
灰色低地土						黄色土					
UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF	UZ	UF	RZ	RF	SZ	SF
消毒後(2012年8月9日(淡色黒ボク土)、8月16日(多腐植質厚層黒ボク土、灰色低地土))											
15.7 ± 4.9	16.7 ± 7.6	15.3 ± 4.5	14.3 ± 1.5	15.7 ± 1.5		7.3 ± 3.5			10.7 ± 8.0		7.5 ± 0.7

UZ : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料は施用せず。

UF : 2010 年は太陽熱消毒せずー2011 年は太陽熱消毒しー2011 年は太陽熱消毒せず。有機質肥料を施用した。

※ただし黄色土では、2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒しなかった処理区を UZ、UF とした。

RZ : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

RF : 2010、2011、2012 年とも太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SZ : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料は施用せず。

SF : 2010、2011 年は太陽熱消毒せずー2012 年は太陽熱消毒した。有機質肥料を施用した。

表中空欄は未計測。(算術平均値) ± (標準偏差)。

付録D 培養中および埋設試験時のアンモニア揮散の影響に関する補足的実験

アンモニアガス揮散は、高 pH の土壌では量的に無視できない要因である。本研究の実験条件（圃場試験および培養実験）において影響が小さいことを示すための補足的な試験を行ったので、以下に付す。

（実験 1）室内培養実験

（方法）4.4 節の有機質資材培養実験と同じ手法で、資材を混和した土壌の培養を行った際に、その一部の培養容器を密閉容器に入れ、その中に硫酸溶液を入れたビーカーを共存させ、培養中の土壌から揮散したアンモニアガスを硫酸溶液にトラップさせて、土壌からの培養中のアンモニア揮散量を定量した。具体的には、1)土壌 110 g のみ、2)土壌 110 g に牛ふん堆肥 G4 を 0.77 g 混和したもの、3)土壌 110 g に有機質肥料 F2 を 0.39 g を混和したものを、100 mL 容のガラス製ビンに入れ、口をポリエチレン製フィルム（商品名無添加ラップ、宇部フィルム）でフタし、輪ゴムでフィルムを固定した。容器に土壌も資材も入れないブランク実験も設定した。同時に、0.5M 硫酸 15 mL を入れた 20 mL 容のガラスビンを用意し、これら 2 つのビンを、300 mL 容のプラスチック製広口ビン（フタポリプロピレン製、パッキンポリエチレン製、本体塩化ビニル樹脂製）に入れ、しっかりフタをした。30、45、60°C で 21 日間培養後、硫酸溶液中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量を水質自動分析装置 QuAAtro2 で定量した。

（結果）ブランク実験の硫酸溶液中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は 30°C と 45°C では 0.23 mg L^{-1} 、60°C では 0.64 mg L^{-1} であった。これに対し、土壌あるいは土壌と堆肥もしくは有機質肥料を入れたいずれの処理においても、硫酸溶液中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は $0.10 \sim 0.75 \text{ mg L}^{-1}$ の範囲であり、ブランク実験との差し引きの濃度を、土壌重量あたりに換算すると、 $-0.07 \sim +0.06 \text{ mg-N kg-soil}^{-1}$ の範囲に分布した。これは、4.3 節で示

した土壌窒素無機化量が数十から数百 mg-N kg-soil^{-1} であったのに比べて、無視できる量であった。

(実験 2) 圃場埋設試験

(方法) 2013 年に、茨城県つくば市にある圃場 A 淡色黒ボク土試験区で調査した。供試資材は表 4-3 に示した牛ふん堆肥 G4 および有機質肥料 F1 および化成肥料 (硫酸アンモニウム) である。

耕耘機で耕起 (耕起深 15 cm)、畝立て機で畝立て (幅 1 m 長さ 9 m 畝高さ 5 cm) した後、畝の一部を深さ 15 cm まで掘って、そこに直径 14.6 cm、深さ 15 cm の円筒状の枠を置き、資材を混和した土壌 (あらかじめこの圃場の作土から採取しておいた土) を約 2 kg 充填した。枠周辺を埋め戻し、畝全体を 0.02 mm 厚の透明マルチで被覆した。消毒は 8 月 13 日から 9 月 18 日の 35 日間行った。

資材 G5 と F2 については、枠外にも枠内と同じ資材を、面積あたり同じ量で施用した畝を別に設け、そこにも枠を設置した。畝の長さを 1 m とした以外は付録 A と同じ方法で太陽熱消毒した。また、資材 G4 についてはさらに、この枠外施用区の中に、資材を表面施用した枠も設けた。

なお、化成肥料区には同時に臭化カリウムを混和し、消毒前後の枠内土壌について、土壌：純水=7 g：200 mL で抽出される臭化物イオン (Br^-) を計測した。

(結果) 枠外施用処理を設けた資材 G4、F1 とも、無機態窒素は「枠外も施用した場合>枠外施用なし」であった。表面施用は全層に混和した試験区に比べて無機態窒素量が少なかった (表 D-1)。

化成肥料区においては無肥料区よりも無機態窒素量が 9.2 mg kg^{-1} 多かった。消毒

前には化成肥料として 11.2 mg kg^{-1} のアンモニウム態窒素を施用したので、その 82%が残存したと計算される (表 D-1)。Br⁻は施用量の 94%が作土に残存した (図表なし)。

(考察) 北川ら (1980)は、太陽熱消毒中には溶脱や脱窒によって、無機態窒素の損失が生じることを指摘した。また、三井ら (1954)は、アンモニア揮散について、通常は施肥窒素の収支に与える影響は限定的とことわりつつも、高 pH や高地温時には、肥料を土壌表面に施用し土壌中に混和しない施用法は避けるべきと指摘した。

このように、圃場では、窒素無機化に好適な条件を維持して行った室内培養実験に比べて、無機態窒素の損失が起こる可能性があることに留意しなくてはならない。本試験では、消毒後作土における施用硫酸アンモニウム由来の無機態窒素量は、施用量の 82%であった。また、消毒前に施用した Br⁻の消毒後土壌における作土中の残存率は 94%であった。消毒前に比べて消毒後に無機態窒素や Br⁻が減ったのは、アンモニア揮散や溶脱の影響と考えられる。この結果のみを見ると、溶脱が $100-94=6\%$ 、アンモニア揮散による損失が $94-82=12\%$ と計算されるが、化成肥料について

表 D-1 2013 年の圃場埋設試験結果

資材	土壌の 無機N 含量* mg kg-乾土 ⁻¹	同左 無肥料区 との差①	資材の 無機N 含量② mg kg-乾土 ⁻¹ あたり	資材N 無機化量 (①-②)	同左 mg g-資材 ⁻¹	資材 混和量 g kg-乾土 ⁻¹
無肥料(消毒前)	16 ± 19					
無肥料(消毒後)	74 ± 4					
G4	104 ± 6	30		2	0.5	11.1
G4(枠外も施用)	115 ± 12	41	27	14	2.6	
G4(表面施用)	88 ± 6	14		-14	-2.7	
F1	119 ± 7	45		21	9.7	2.8
F1(枠外も施用)	132 ± 9	58	24	58	15.2	
化成肥料(硫安)	166 ± 4	92	112	-20		0.5

*3反復の算術平均±標準偏差

得られた結果は、枠外には資材を施用しない条件で得られた結果であるから、アンモニア揮散の影響は過大評価されていると考えられる。それを考慮すると、硫酸アンモニウム肥料施用土壌からのアンモニア揮散量は12%よりもさらに少なかった考えられる。

付録E 土壌窒素無機化量に対する培養温度の影響のアレニウス則による解析

5.2.1.2 では、モデル解析になじみのない者にもパラメータ解析が容易な Q_{10} 則を導入した土壌窒素無機化モデルを用いて、土壌窒素無機化量に及ぼす培養温度の影響をモデル解析した。しかし、 Q_{10} よりも、化学反応速度論的により意味づけが明確なアレニウス則を用いた解析のほうが、既存の研究成果との比較などにおいて有益という指摘がある。そこで、以下では、5.2.1.2 と同様の解析を、アレニウス則を用いて実施した結果を示す。

(方法) 土壌有機物の分解のモデル化に一般的に用いられている一次元モデル

(Nuske・Richter, 1981; Campbellら, 1984; Myersら, 1982)すなわち、

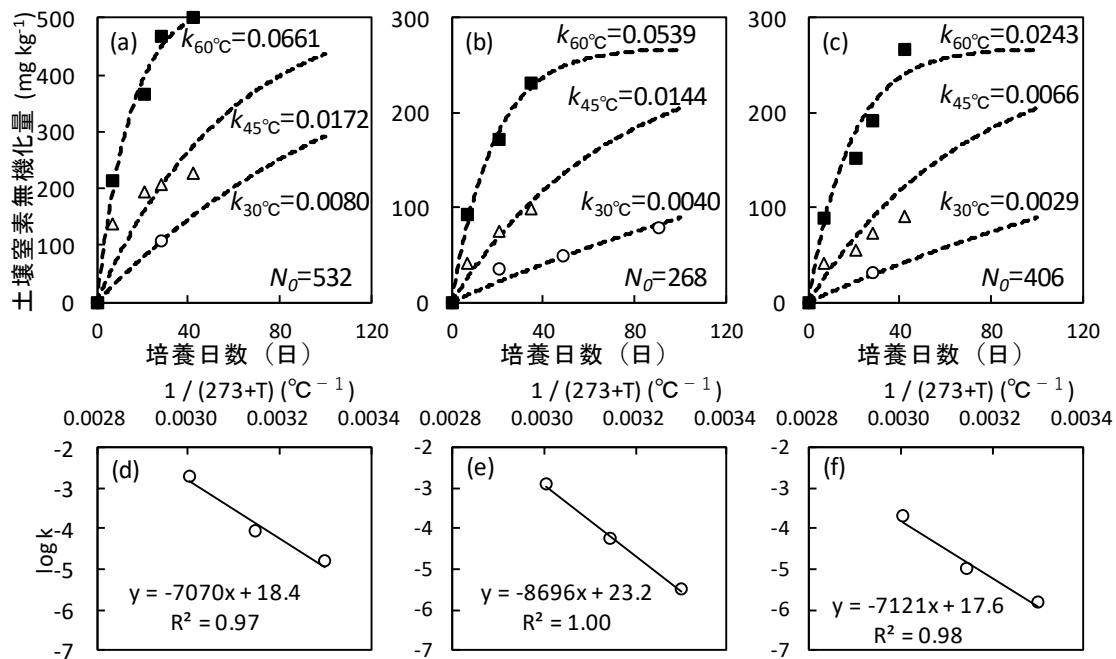
$$N_{\min} = N_0 \times (1 - \exp(-k_T \times t)) \quad (7)$$

を用いた。ここで、 N_{\min} は乾土あたりの土壌窒素無機化量の計算値 (mg-N kg-soil^{-1}) であり、 t は培養期間 (日) である。 N_0 は培養を長期間継続したときに土壌窒素無機化量が頭打ちになった時の土壌窒素無機化量を表す係数。 k_T は培養期間の経過とともに無機化量計算値 N_{\min} が N_0 に近づく早さを調整する係数であり、 T は培養温度 ($^{\circ}\text{C}$) である。

まず、30、45、60 $^{\circ}\text{C}$ の3水準の培養温度での実験のうち、いずれの土壌でも土壌窒素無機化量が最も多かった培養温度60 $^{\circ}\text{C}$ の実験において、培養期間 t ごとに得られた土壌窒素無機化量の計測値 (実験値) に対して、式(7)の計算値 N_{\min} との残さの

平方和を最小とする係数 N_0 、 k_T を Microsoft Excel2013 または 2016 のソルバー機能により計算した。次に、係数 N_0 はそのまま固定して、30、45°C の実験値に対して、式(7)の計算値 N_{\min} との残さの平方和を最小とする係数 k_T を同様にソルバー機能により計算した。各培養温度の絶対温度 ($273+T$ (°C)) と $\log k_T$ 3 点をプロットし、最小二乗法により得られる回帰直線の傾きに気体定数 1.987 を乗じて活性化エネルギー E_a (cal mol^{-1}) の値を計算した。

(結果) ソルバー機能によるパラメータ算出の結果、土壌 nd-T では培養温度 30、45、60°C それぞれで得た土壌窒素無機化量の実験値がモデルによる計算値の曲線近傍に分布した (図 E-1)。しかし、土壌 d-AQ、nd-V では、培養温度 60°C で得た土壌窒素無機化量の実験値はモデルによる計算値の曲線近傍に分布した一方で、培養温度 45°C では、培養日数が少ないときには実験値が計算値より大きく、培養日数が多いときには実験値が計算値より小さかった。絶対温度と $\log k_T$ のプロット 3 点の回帰直線の傾きをもとに計算された活性化エネルギーは、土壌 d-AQ は 14048 (cal mol^{-1})、nd-T は 17278 (cal mol^{-1})、nd-V は 14148 (cal mol^{-1}) であった。このように、30、45、60°C の 3 温度水準の培養実験の結果から、活性化エネルギーを算出することは可能ではあったが、図 E-1(a)や(c)では、培養温度 45°C の実験値のプロットが、モデル計算値の点線から離れた。用いたモデルおよび活性化エネルギーの算出方法は、既往研究ではおおむね 40°C 以下の培養温度条件で用いられてきたものであり、本研究ではそれよりも高い培養温度条件を含むために、土壌窒素無機化量が極端に増えたことによって、培養 3 温度水準で土壌窒素無機化量が同じパラメータ値 N_0 で頭打ちになるというモデル式(7)のあてはまりが低下したものと考えられた。



図E-1 各培養温度における土壤窒素無機化モデルの適用結果および

アレニウスプロットによる活性化エネルギーの計算結果

(a), (d)は土壤 d-AQ、(b), (e)は土壤 nd-T、(c), (f)は土壤 nd-V についての結果。

図中○は培養温度 30°C、△は同 45°C、■は同 60°C での結果。

活性化エネルギー (E_a) は(d), (e), (f)の傾きの絶対値に気体定数 1.987 を乗じて算出する。

付録F 硝化と温度の関係 (3.3 節) 実験全データ

3.3 節では実験データのうち、前培養の期間が 42 日間の場合のみを示したが、ここでは前培養の期間が 14、28 日間の場合の結果も併せて示す。また、前培養の温度を 80°C とした結果も併せて示す。

この結果から、前培養 60°C の期間は 3.3 節で示した 42 日間よりも短い 14 日間でも、その後の培養温度 30°C での硝化は進まなくなることがわかる。

表F-1 前培養 (30~80°C、0~42日) 後 30°Cで0~90日培養した土壌のNH₄-N、NO₃-

N含量 (つづく)

	前培養 温度(°C)	前培養 期間(日) ①	前培養後土壌の 培養温度30°Cでの 培養期間(日)②	培養開始後 日数(①+②) (日)	NH ₄ -N (mg kg ⁻¹)	NO ₃ -N (mg kg ⁻¹)
土 壌 の み (肥 料 な し)	0	0	0	0	3	6
			0	14	2	313
			14	28	3	363
	14	14	28	42	1	470
			90	104	1	805
			0	28	1	444
	30	28	14	42	4	489
			28	56	0	540
			90	118	4	848
	42	42	0	42	7	544
			14	56	0	536
			28	70	1	611
	40	28	90	132	3	911
			0	14	3	580
			14	28	1	597
	50	28	28	42	1	645
			90	104	1	891
			0	28	2	846
	40	42	14	42	3	812
			28	56	0	803
			90	118	2	1016
	50	42	0	42	6	1035
			14	56	0	916
			28	70	1	962
50	28	90	132	4	1178	
		0	14	79	180	
		14	28	63	182	
50	42	28	42	71	220	
		90	104	1	1129	
		0	28	98	244	
50	28	14	42	95	227	
		28	56	77	346	
		90	118	3	1316	
50	42	0	42	101	449	
		14	56	15	970	
		28	70	2	1210	
50	28	90	132	2	1455	

表F-1 前培養（30～80℃、0～42日）後30℃で0～90日培養した土壤のNH₄-N、NO₃-

N含量（つづき）

	前培養	前培養	前培養後土壤の	培養開始後	NH ₄ -N	NO ₃ -N
	温度(°C)	期間(日) ①	培養温度30°Cでの 培養期間(日)②	日数(①+②) (日)	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)
土 壤 の み (肥 料 な し)	60	14	0	14	129	146
			14	28	114	125
			28	42	120	120
			90	104	138	95
	60	28	0	28	183	160
			14	42	172	113
			28	56	168	158
			90	118	177	81
	60	42	0	42	245	145
			14	56	211	102
			28	70	218	66
			90	132	225	79
	80	14	0	14	257	123
			14	28	211	102
			28	42	222	100
			90	104	256	87
	80	28	0	28	409	141
			14	42	371	95
			28	56	353	101
			90	118	389	71
80	42	0	42	534	107	
		14	56	474	88	
		28	70	474	37	
		90	132	501	56	

表 F-1 前培養 (30~80°C、0~42 日) 後 30°C で 0~90 日培養した土壌の NH₄-N、NO₃-

N 含量 (つづき)

	前培養 温度(°C)	前培養 期間(日) ①	前培養後土壌の 培養温度30°Cでの 培養期間(日)②	培養開始後 日数(①+②) (日)	NH ₄ -N	NO ₃ -N	
					(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	
肥料 混 和 土 壌	0	0	0	0	4	6	
			0	14	3	161	
			14	28	2	154	
	14	14	28	42	1	160	
			90	104	1	196	
			0	28	4	181	
	30	28	14	42	2	175	
			28	56	1	174	
			90	118	0	210	
	42	42	0	42	7	178	
			14	56	0	156	
			28	70	3	169	
			90	132	0	197	
			14	0	14	79	133
				14	28	1	196
	28	42		1	197		
	40	28	90	104	0	224	
			0	28	2	235	
			14	42	6	221	
	42	42	28	56	1	209	
			90	118	3	233	
			0	42	5	245	
	50	28	14	56	2	210	
			28	70	2	224	
90			132	5	245		
14	14	0	14	166	62		
		14	28	123	78		
		28	42	105	108		
28	28	90	104	1	226		
		0	28	47	191		
		14	42	27	196		
42	42	28	56	2	207		
		90	118	4	234		
		0	42	13	273		
90	90	14	56	0	233		
		28	70	2	241		
		90	132	2	258		

表F-1 前培養 (30~80°C、0~42 日) 後 30°Cで 0~90 日培養した土壤の NH₄-N、NO₃-

N 含量 (つづき)

	前培養 温度(°C)	前培養 期間(日) ①	前培養後土壤の 培養温度30°Cでの 培養期間(日)②	培養開始後 日数(①+②) (日)	NH ₄ -N	NO ₃ -N
					(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)
肥料 混 和 土 壤	60	14	0	14	294	12
			14	28	252	11
			28	42	252	10
			90	104	269	8
		28	0	28	353	13
			14	42	329	9
			28	56	311	12
			90	118	323	6
		42	0	42	394	12
			14	56	343	9
			28	70	351	4
			90	132	354	5
	80	14	0	14	352	7
			14	28	291	6
			28	42	309	6
			90	104	336	4
		28	0	28	494	8
			14	42	448	5
			28	56	418	6
			90	118	472	3
		42	0	42	591	6
			14	56	515	5
			28	70	516	1
			90	132	565	1
30°C17時 間 50°C7時 間のくり かえし	14	0	14	168	22	
		14	28	138	32	
		28	42	69	116	
		90	104	0	220	
	28	0	28	155	49	
		14	42	70	121	
		28	56	0	183	
		90	118	0	212	
	42	0	42	131	129	
		14	56	8	203	
		28	70	2	221	
		90	132	4	240	

付録G 土壌・有機質資材の診断に基づく窒素施肥量適正化の考え方

はじめに

本研究の一部、窒素無機化量の予測手法の開発は、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研究プロジェクト「太陽熱土壌消毒効果を活用した省エネ・省肥料・親環境栽培体系「陽熱プラス」の確立」（平成25～27年度）において行われた。「陽熱プラス」プロジェクトでは、図G-1に示す研究機関が連携し、太陽熱消毒の改良に取り組んだ。

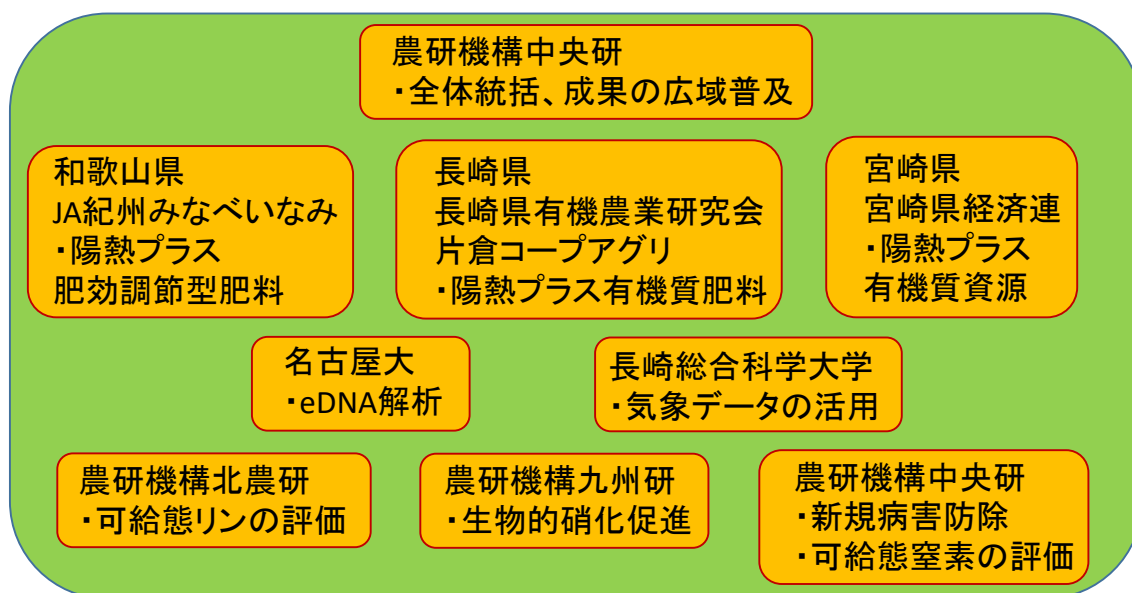


図 G-1 陽熱プラスの研究体制とテーマ

「陽熱プラス」では、生産現場に地温計測機器を設置し、計測した地温を「消毒効果の見える化」に結びつけることを通じて、太陽熱消毒の「その年の気象条件による消毒効果の不安定さ」の不安を解消しようとした。また、計測した地温を土壌中の養分動態や消毒対象以外の土壌微生物への影響評価にも活用しようとした。

著者は、「陽熱プラス」において、地温計測手順とデータ処理方法のマニュアル化

と、窒素無機化量の予測手法の開発の2点を担当した。

地温計測マニュアルでは、

- ・必要な機器を、一般に購入可能な市販品からリストアップ
- ・「観測は圃場の端を避け、また、畝の中央で計測する」といった設置上の注意点をまとめた小冊子を作成

・回収した地温データから、30℃換算日数を計算する表計算のひな形を作成

・地温計の設置方法を解説した動画を、DVD およびオンラインで配布

した。

作成したマニュアルには、窒素無機化量の予測手法についても記載した。予測手法の概要を図示したものとして図 G-2 を示す。また、より具体的な方法を以下に示す。

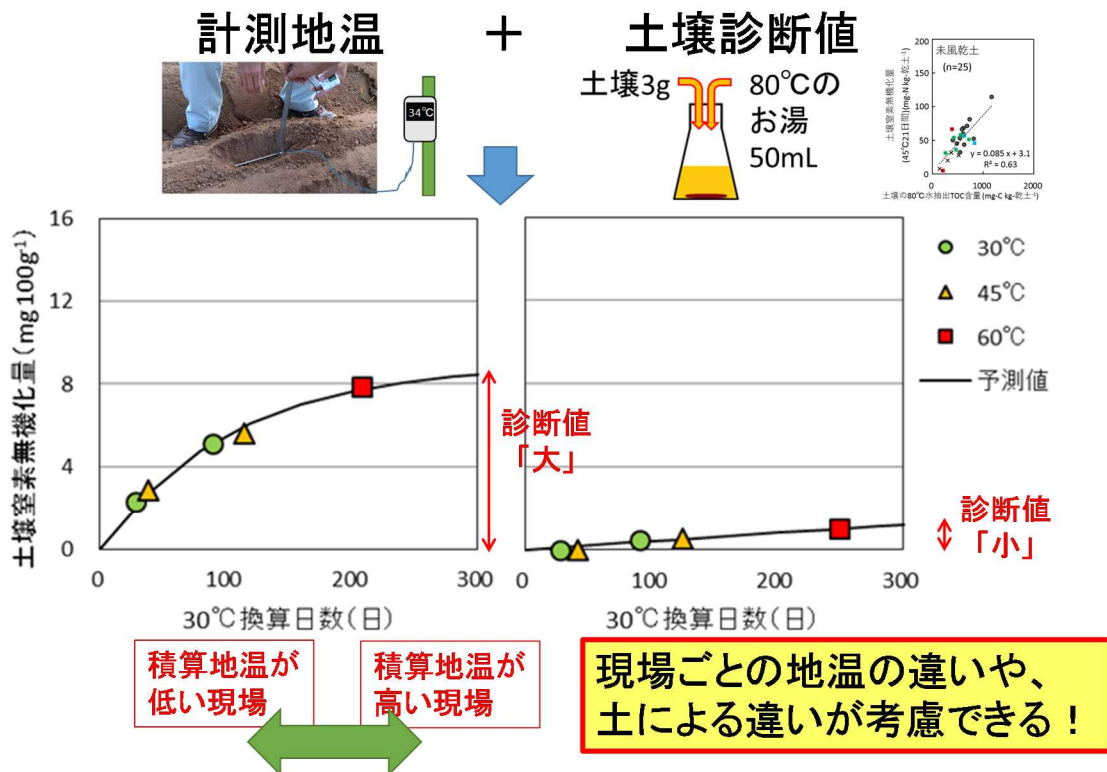


図 G-2 窒素無機化量の予測手法の概念図

予測法の手順

窒素無機化量予測法はどんな場面で有効か？

これまで太陽熱消毒を行ってこなかった農地で新たに太陽熱消毒を導入する場合や、過去に消毒時の施肥が難しく感じられた場合など、客観的な評価法で、土の違いを考慮した施肥量調整の目安にできる。土壌由来の窒素量を特に考慮すべきなのは、元来の土壌の特性やこれまでの堆肥等有機質資材の施用によって、土壌肥沃度が比較的高い農地で太陽熱消毒を行う場合である。なお、消毒初年目と、2年目以降で、土壌可給態窒素含量が変化する場合もあるので、できれば毎年、消毒前に診断すると良い。

診断手順1：土壌の診断と土壌毎の N_0 の計算

診断用の土壌は、消毒前、できれば全面耕起した状態で採取する。

診断の方法は別冊子「畑土壌可給態窒素の簡易・迅速評価マニュアル」（2010年、農業・食品産業技術研究機構）に紹介されている。概略は、①診断用の土壌を採取する（作土を10アールにつき3～5カ所から採取し、混ぜて1サンプルとする）。②風乾土3g（または乾かす前の土4g）と、電気ポットなどで80℃にあたためたお湯50mLを混ぜ、電気ポット内または通風乾燥機などで80℃で16時間土壌有機物を煮出す。③冷ましたあと、泥水をろ過して、ろ液の有機物量を理科実験用キットなどで計測する。というもので、評価は2日以内に完了する（土の乾燥には別途数日以上要する）。結果、土壌診断値として抽出TOC含量が得られるので、図5-3(b)の回帰直線から、「培養温度45℃で21日間培養したときの土壌窒素無機化量の推定値」を計算する。

診断手順2：土壤窒素無機化量（土壤重量あたり）の見積もり

記録計を設置した場合でも消毒前に地温を知ることはできないため、消毒前の段階では消毒中の30℃換算日数は仮定する（実測した地温は仮見積もりとのずれを認識するのに役立つ。また、翌年以降にも活用できる）。

たとえば、30℃換算日数を76日と仮見積もりすると、表G-1から、温度45℃14日処理に相当し、このときの N_{min} は $N_0 \times 0.53$ で計算できることになる。

表 G-1 地温・期間と N_{min}/N_0 の値

温度 ℃	期間 日	30℃換算 日数 日	N_{min}/N_0
30	7	7	0.07
30	28	28	0.24
30	90	90	0.59
45	7	38	0.32
45	14	76	0.53
45	21	115	0.68
60	7	209	0.88

Q=3.1, k=0.01の場合

診断手順3：土壤窒素無機化量（面積あたり）の見積もり

作土深が15 cm とすれば、1 m²あたりの土壤は0.15 m³の体積があり、容積重が0.7 Mg m⁻³なら、作土の重量は0.15×0.7=0.105 Mg m⁻²である。この値を換算係数として、診断手順2で計算した土壤重量あたりの土壤窒素無機化量を、面積あたりに換算できる。

診断手順4：資材からの無機態窒素供給量の見積もりと施肥量調整

4章で述べたとおり、供試した市販有機質肥料は分解が早く、消毒期間中に無機化が進んだ。有機質肥料F2では、図4-6から、肥料1 gあたり30~40 mgの窒素施肥量になる。堆肥は、消毒前に資材の硝酸態窒素含量とアンモニウム態窒素含量（資材施用後に土壤を湿らせるために多量にかん水する場合はアンモニウム態窒素含量のみ）を計測し、その量が速効性の窒素肥料分とする。

上記の手順1~4の結果、たとえば土壌から 5 g m^{-2} 、堆肥から 1 g m^{-2} が供給されると診断されたとすれば、あわせて基肥窒素は 6 g m^{-2} 減らすことができる。もし、通常の窒素施用量が農地 1 m^2 あたり 10 g であったとすれば、これを 4 g m^{-2} に減らす。

利用上の留意点、残された課題と今後の予定

窒素減肥の提案量よりも実際の無機態窒素量が少なくなる例としては、土壌還元消毒を行う場合（酸素不足により無機化量が低下する。また、硝酸態窒素が脱窒揮散する）、消毒中や消毒後に多量のかん水をする場合（無機化して生じた硝酸態窒素が溶脱する）、土壌が乾いた条件で消毒した場合（微生物活性の低下により土壌中の有機態窒素の無機化量が低下する）、pHが高くアンモニアが揮散する場合などがある。各適用現場において、これらの影響が無視できるか検討する必要がある。

なお、上記では、消毒開始前に土壌に含まれる無機態窒素量は評価していない。この理由は、十分なかん水を行った後に消毒することが推奨されていることから、前作収穫時に残存した硝酸態窒素は下層へ溶脱しやすい状況にあると考えたためである。

肥料・資材を消毒前に施用する太陽熱土壌消毒での活用を念頭に記載している。有機質資材を消毒前ではなく、消毒後に施用する場合には、今回提案した資材評価は不要である。その場合、資材の効果は、土壌診断値に含まれると考える。

施肥は消毒前に行うが、消毒前に消毒中の地温は得られないため、予測は見積もりで行う必要がある。地域毎に代表値を示すことも一つの案であるが、将来的には、気象データからの予測を目指している。共同研究者の下高らは、日最高気温をもとに回歸により地温を推定する手法に取り組んでおり（下高ら，2016）、現在も改良中であ

る。1 km メッシュ気象データ等の気象観測値と組み合わせて、今後、地域と予定消毒期間から 30℃換算日数を見積もりが可能になると考えられる。ただし、一般的な気象観測項目から圃場の地温を観測する場合には、圃場ごとに異なる立地や施設の特性なども影響するので、誤差が大きくなる。見積もりと実際の積算地温の違いを評価し、翌年度の消毒に役立てるという意味で、筆者は、地温の実測は必要と考える。

引用文献

- Benbi Dinesh K, Richter Jörg 2002. A critical review of some approaches to modelling nitrogen mineralization. *Biol Fertil Soils*, 35, 168-183.
- Bonanomi Giuliano, Chiurazzi Mario, Caporaso Silvia, Del Sorbo Giovanni, Moschetti Giancarlo, Felice Scala 2008. Soil solarization with biodegradable materials and its impact on soil microbial communities. *Soil Biol. Biochem.*, 40, 1989-1998.
- Campbell C. A., Jame Y. W., Winkleman G. E. 1984. Mineralization rate constants and their use for estimating nitrogen mineralization in some Canadian prairie soils. *Can. J. Soil. Sci.*, 64, 333-343.
- Chen Y., Katan J. 1980. Effect of Solar Heating of Soils by Transparent Polyethylene Mulching on Their Chemical Properties. *Soil Sci.*, 130, 271-277.
- Coates-Beckford Phyllis L., Cohen Jane E., Ogle Laura R., Prendergast Christopher H. 1997. Effects of plastic mulches on growth and yield of cucumber (*Cucumis sativus* L.) and on nematode and microbial population densities in the soil. *Nematropica*, 27, 191-207.
- Erguder Tuba H, Boon Nico, Wittebolle Lieven, Marzorati Massimo, Verstraete Willy 2009. Environmental factors shaping the ecological niches of ammonia - oxidizing archaea. *FEMS Microbiol. Rev.*, 33, 855-869.
- Grunditz Camilla, Dalhammar Gunnel 2001. Development of nitrification inhibition assays using pure cultures of *Nitrosomonas* and *Nitrobacter*. *Water Res.*, 35, 433-440.
- Hayatsu M., Tago K., Saito M. 2008. Various Players in the Nitrogen Cycle: Diversity and Functions of the Microorganisms Involved in Nitrification and Denitrification. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 33-45.
- Hwang Y., Frank M. 1938. Mikrobiologische und biochemische Untersuchungen über das Auftreten von zwei Maxima der Ammoniakanhäufung im Boden. *Archives of Microbiology*, 9, 469-476.
- Ihara Hirotaka, Kato Naoto, Takahashi Shigeru, Nagaoka Kazunari 2014. Effect of soil solarization on subsequent nitrification activity at elevated temperatures. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 60, 824-831.
- Keeney Dennis R. 1982. Nitrogen-Availability Indices. 編 Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties, p. 711-733. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Wisconsin

USA.

Myers R. J. K., Weier K. L., Campbell C. A. 1982. Quantitative relationship between net nitrogen mineralization and moisture content of soils. *Can. J. Soil. Sci.*, 62, 111-124.

Myers R.J.K. 1975. Temperature Effects on Ammonification and Nitrification in a Tropical Soil. *Soil Biol. Biochem.*, 7, 83-86.

Nishimura Seiichi, Komada Michio, Takebe Masako, Yonemura Seiichiro, Kato Naoto 2012. Nitrous oxide evolved from soil covered with plastic mulch film in horticultural field. *Biol Fertil Soils*, 48, 787-795.

Nuske A., Richter J. 1981. N-mineralization in Loess-Parabrownearthes: Incubation experiments. *Plant Soil*, 59, 237-247.

Prosser James I, Nicol Graeme W 2012. Archaeal and bacterial ammonia-oxidisers in soil: the quest for niche specialisation and differentiation. *Trends in microbiol.*, 20, 523-531.

Pullman G. S., DeVay J. E., Garber R. H. 1981. Soil solarization and thermal death: a logarithmic relationship between time and temperature for four soilborne plant pathogens. *Phytopathology*, 71, 959-964.

Sierra J. 2002. Nitrogen mineralization and nitrification in a tropical soil: effects of fluctuating temperature conditions. *Soil Biol. Biochem.*, 34, 1219-1226.

Stapleton J. J. 2000. Soil solarization in various agricultural production systems. *Crop protection*, 19, 837-841.

Stapleton J. J., DeVay J. E. 1982. Effect of soil solarization on populations of selected soilborne microorganisms and growth of deciduous fruit tree seedlings. *Phytopathology*, 72, 323-326.

Stapleton J. J., Quick J., DeVay J. E. 1985. Soil solarization effects on soil properties, crop fertilization and plant growth. *Soil Biol. Biochem.*, 17, 369-373.

Verhamme Daniel T, Prosser James I, Nicol Graeme W 2011. Ammonia concentration determines differential growth of ammonia-oxidising archaea and bacteria in soil microcosms. *The ISME J.*, 5, 1067-1071.

伊藤 喜誠, 豊田 剛己, 木村 真人 2000. 各種土壌消毒処理のメロンホモプシス根腐病への効果とそれに伴う土壌微生物群集の変化. *土肥誌*, 71, 154-164.

伊藤ら 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.

井原 啓貴 2016. 太陽熱土壌消毒が土壌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. *植物防疫*, 70, 237-240.

井田 明, 深山 政治, 森 哲郎, 徳永 美治, 赤塚 恵 1970a. 可給態窒素. 土壤養分測定法委員会編 土壤養分分析法, p. 205-208. 養賢堂, 東京.

井田 明, 深山 政治, 西尾 道徳, 森 哲郎, 徳永 美治, 草野 秀 1970b. 畑土壤の硝酸化成力. 土壤養分測定法委員会編 土壤養分分析法, p. 158-170. 養賢堂, 東京.

越智直, 櫛間義幸, 井原啓貴, 仲川晃生, 寺本敏, 橋本知義 2015. 太陽熱土壤消毒による *Haematonectria ipomoeae* の密度低減効果. *関東東山病害虫研究会報*, 2015, 9-12.

下高 敏彰, 小川 さつき, 篠原 陽子, 菱池 政志, 渡邊 亘, 橋本 知義, 大場和彦 2016. 土壤の太陽熱消毒法の効果を示す陽熱負荷指数のモデル化. *生物と気象*, 16, 86-93.

家村 浩海 1986. 太陽熱利用による露地野菜の土壤病害防除技術. *農業技術*, 41, p529-532.

河森 武 1978. 施用した肥料成分(窒素)の揮散について. 編 太陽熱・石灰窒素利用による土壤消毒と土づくり —(連作障害防止のため)—, p. 62-65.

関東東山東海地域技術連絡会議 1982. 太陽熱利用による土壤消毒に関する実証的研究.

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壤の消毒：研究成果情報.

京都大学農学部農芸化学教室 1965. 農芸化学実験書, 産業図書, 東京.

金野 隆光, 杉原 進 1986. 土壤生物活性への温度影響の指標化と土壤有機物分解への応用. *農環研報*, 巻数なし, 51-68.

建部雅子, Takebe, M, 唐澤敏彦 *et al.* 2014. 有機栽培転換期における土壤無機態窒素の推移と堆肥施用がニンジン, レタス収量に及ぼす影響. *中央農業総合研究センター研究報告*, 巻数なし, 25-51.

古江 広治, 上沢 正志 2001. 反応速度論的手法での土壤および有機質資材の有機態窒素の無機化特性値データ集. *農業研究センター研究資料*, 43, 1-50.

江種 伸之, 加瀬 広大, 山本 秀一, 増田 吉彦, 平田 健正 2008. 太陽熱を利用した農地消毒時の土中温度の変化特性. *土木学会論文集 B*, 64, 267-279.

坂口 荘一, 豊村 順, 松原 徳行 1982. 夏季,ほ場のビニル被覆によるジャガイモそうか病ならびに青枯病発生防止効果. *九州病害虫研報*, p34-36.

三井 進午, 尾崎 清, 森山 真明 1954. 尿素のアンモニア化揮散に就いて. *土肥誌*, 25, 17-19.

自給飼料利用研究会 2009. 三訂版粗飼料の品質評価ガイドブック, 日本草地

畜産種子協会.

実用技術開発事業 18053 マニュアル作成委員会 2009a. 主な家畜ふん堆肥の窒素肥効とその有効利用方法.

実用技術開発事業 18053 マニュアル作成委員会 2009b. 主な家畜ふん堆肥の窒素肥効とその利用方法.

小玉 孝司, 宮本 重信 1982. 太陽熱利用による土壌消毒法. *農業技術*, 37, p353-357.

小玉 孝司, 福井 俊男 1982. ハウス密閉処理による太陽熱土壌消毒法について: V. イチゴ萎黄病防除に対する適用. *日本植物病理學會報*, 48, 570-577.

小川 吉雄, 加藤 弘道, 石川 実 1989. リン酸緩衝液抽出による可給態窒素の簡易測定法. *土肥誌*, 60, 160-163.

小柳 涉, 棚橋 寿彦, 村松 克久, 小橋 有里 2010. 易分解性有機物の指標としての AD 可溶有機物の有用性. *土肥誌*, 81, 383-386.

松永 俊朗, 塩崎 尚郎 1989. 硝酸態窒素を含む作物中の全窒素定量のための硫酸: 過酸化水素分解法. *土肥誌*, 60, 458-460.

松本 英一 2002. 施肥管理が窒素溶脱に及ぼす影響. *茨城県農業総合センター農業研究所研究報告*, 43-53.

上蘭 一郎, 加藤 直人, 森泉 美穂子 2010a. 80°C16 時間水抽出液の COD 簡易測定による畑土壌可給態窒素含量の迅速評価. *土肥誌*, 81, 252-255.

上蘭 一郎, 加藤 直人, 森泉 美穂子 2010b. 日本の畑土壌に対する 80°C16 時間水抽出法による可給態窒素簡易評価法の適用性. *土肥誌*, 81, 39-43.

上蘭 一郎, 加藤 直人, 森泉 美穂子 2012. 露地畑土壌における可給態窒素の各種簡易測定法の推定精度と抽出有機物の特性比較. *土肥誌*, 83, 555-563.

清水 寛二 1987. 太陽熱利用による水田転換畑露地野菜の土壌病害防除に関する研究-3-野菜の苗立枯病に対する太陽熱消毒の防除効果. *滋賀県農試報*, p23-30.

西原 基樹 2008. 宮崎型改良太陽熱消毒法を用いた土壌消毒効果. *土肥誌*, 79 巻, 393-396.

西内 美武, 森本 松男, 中越 謙三, 斎藤 正 1978. 太陽熱による密閉ハウスの高温処理が土壌中の *Fusarium oxysporum* の生存に及ぼす影響. 編 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) —, p. 24. 全国野菜技術研究連絡協議会, 東京.

石岡 巖, 小柳 涉, 加藤 直人, 棚橋 寿彦, 平柳 恵子, 村上 圭一 2009. 分析マニュアル. p. 1-129.

大塚 英一, 金子 文宜, 松丸 恒夫 2007. ニンジンのマルチ内施肥による肥料窒素の溶脱抑制効果. *千葉県農業総合研究センター研究報告*, 31-37.

- 棚橋 寿彦, 矢野 秀治, 伊藤 元, 小柳 涉 2010. 牛ふん堆肥・豚ふん堆肥中のリン酸マグネシウムアンモニウムの存在とその評価のための抽出法. *土肥誌*, 81, 329-335.
- 田中 寛, 草刈 真一 1978. 太陽熱・石灰窒素利用による土壤病害の消長について. 編 太陽熱・石灰窒素利用による土壤消毒と土づくり — (連作障害防止のため) —, p. 16. 全国野菜技術研究連絡協議会, 東京.
- 土壤養分測定法委員会 1970a. 可給態窒素. 編 土壤養分分析法, p. 205-209. 養賢堂, 東京.
- 土壤養分測定法委員会 1970b. 土壤養分分析法.
- 島本 光久, 坂本 一憲, 吉田 富男 1995. 熱乾処理土壤における地力 N 発現に対する微生物バイオマス N の寄与. *土肥誌*, 66, 27-31.
- 農林水産省農林水産技術会議事務局 2001. 野菜の病害 II 項目別 土壤消毒. *野菜の病害*, 巻数なし, 353-370.
- 萩森 学, 尾島 一史, 長坂 幸吉, 安部 順一郎, 亀野 貞 2007. 太陽熱利用土壤消毒とネットトンネルおよび BT 剤を組み合わせたアブラナ科野菜の環境保全型露地栽培体系. *近中四農研報*, 113-123.
- 白木 己歳, 小岩崎 規寿, 串間 秀敏 1998. 太陽熱利用土壤消毒の効果安定策としての土壤管理体系の開発. *宮崎県総農試研報*, 1-11.
- 北海道立中央農業試験場北海道農政部農業改良課 1992. 熱水抽出性窒素. 編 土壤および作物栄養の診断基準-分析法-, p. 80-81.
- 北川 芳雄, 水田 昌宏, 若山 譲 1980. イチゴの促成型栽培における土地生産力の保全に関する研究第 1 報. *奈良県農業試験場研究報告*, 巻数なし, 21-30.
- 木村 龍介 1975. 硝化作用の測定と硝化菌の計数, 分離. 編 新編土壤微生物実験法, p. 207-214. 養賢堂, 東京.
- 和歌山県農業試験場, 滋賀県農業試験場, 兵庫県農業総合センター 1985a. (総合助成試験中核研究成果) 太陽熱利用による水田転換畑露地野菜の土壤病害防除技術確立.
- 和歌山県農業試験場, 滋賀県農業試験場, 兵庫県農業総合センター 1985b. (総合助成試験中核研究成果) 太陽熱利用による水田転換畑露地野菜の土壤病害防除技術確立. 編.
- 和田 さと子, 藤野 智絵, 豊田 剛己, 岡本 保 2008. 1,3-ジクロロプロペン, クロルピクリン及び太陽熱による土壤消毒がセルロース分解能及び硝化菌に及ぼす影響. *土と微生物*, 62, 21-31.