

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2023

課題番号：18K05921

研究課題名(和文) 土壌耕盤が規定する土壌物理化学環境と炭素貯留能

研究課題名(英文) Soil physicochemical environment and carbon storage capacity regulated by soil tillage

研究代表者

西脇 淳子(Nishiwaki, Junko)

東京農工大学・(連合)農学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00549892

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：畑地圃場試験により、土壌耕盤の有無でガス動態への影響があることが確認された。耕盤の存在しない場所では夏場にCO₂ガス放出量が多く、耕盤の存在する場所では秋にかけて徐々に放出量が増すこと数年、数か所で観測された。さらに室内ポット試験では、乾燥密度の違いによる間隙中の浸透水と蒸発の差が生じ、土中内での水分と窒素分の分布に差が生じること、それにともない、表層が酸化状態となることで、CO₂とN₂Oの生成、CH₄の消失が起こることが確認された。また、間隙率が大きい場合には下方への水移動が起こりやすく、表層が酸化状態となりやすかったために大きなCO₂とN₂Oの生成とCH₄の消失が生じたと考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

土壌の耕盤の有無が土中温室効果ガス動態と大気への放出フラックス、および土中有機物量に影響することが確認された。また、乾燥密度の違いでさまざまな土中での物質動態に差が生じること、結果として土中でのガス生成量と地表面への放出量が変化することが確認された。土中での物質動態は複雑ではあるが、乾燥密度と土中の水・溶質移動、および酸化還元状態の関係をさらに追うことで、土中での温室効果ガス生成の抑制、大気への移動経路の遮断を検討できることが示唆された。したがって、今後さらなる調査を加えることで、温暖化抑制のための耕起-不耕起、耕盤破碎などの農作業手法の決定に役立つことが期待される。

研究成果の概要(英文)：The soil hard pan influences gas dynamics in the soil have confirmed in upper field tests. We destroyed soil hard pan by tillage to know the effect of soil hard pan on gas movement. It was observed in several locations over several years that CO₂ gas emissions were higher in summer in areas with no tillage, and that emissions gradually increased through fall in areas with tillage. In addition, laboratory pot experiments confirmed that differences in water infiltration and evaporation in the pore due to differences in dry bulk density cause differences in the distribution of water and nitrogen content within the soil, and that the resulting oxidation state of the surface layer leads to the formation of CO₂ and N₂O and the disappearance of CH₄. It was also considered that the larger porosity caused a greater downward water movement, and the surface layer was more likely to be in an oxidized state, resulting in greater CO₂ and N₂O formation and CH₄ disappearance.

研究分野：農業工学

キーワード：土壌耕盤 炭素貯留 温室効果ガス 土壌物理・化学性

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

土壌は大気中の 3.3 倍、生物相の 4.5 倍もの炭素 (2500 Gt) を貯留する炭素シンクであり、特に農地および荒廃地の土壌による炭素吸収は非常に大きい (Lal, 2004, SCIENCE)。また、不耕起やカバー cropping、施肥管理、灌漑方法等により、土壌炭素蓄積量は増加する (Lal, 2004, SCIENCE)。申請者は、以前より不耕起-カバー cropping 土壌の炭素貯留と地球温暖化抑制への寄与 (Yagioka et al., 2015, Agriculture, Ecosystems and Environment) を研究してきた連携研究者の小松崎らとともに、不耕起-カバー cropping 土壌中の環境条件変化に着目し、耕起-不耕起間で微生物相 (太田ら, 2017, 土肥学会)、および温室効果ガス動態 (Nishiwaki et al., 2017, SSSA meeting) が変化することを突き止めた。またその際、土壌耕盤の存在で土壌環境条件、土中 CO₂、CH₄ ガス濃度が変化することを明らかにしてきた (Nishiwaki et al., 2017, SSSA meeting)。そこで、耕盤層が遷移領域となり、ガスや水分動態が規定され、ガス発生・分解に影響を与えたのではないかと、という問いをたてた。

実際、耕盤より浅層においては CO₂ ガス濃度が低く、深部で CO₂ 濃度が増加することが確認され (図 1)、CH₄ はその逆であった。さらに、不耕起では耕起よりも浅い位置から土壌硬度が大きくなっていくこと、耕起-不耕起でのガス濃度の差異が、土壌深部で大きくなることから、耕盤層、および耕盤層に近い土壌硬度が変化する層が遷移領域として働き、土壌の水分保持やガス拡散係数などの深部土壌物理環境に大きく影響して、土中ガス濃度を規定する生物相や炭素分解に影響していると考えられた。

さらに近年、耕盤下の深部土壌は嫌気的で生物攪乱も少ないため深耕により土壌深部へ炭素を埋設できれば、長期的にさらなる炭素貯留量の増加を図れるという研究報告がなされた (Alcántara et al., 2017, NATURE)。これまで地球温暖化抑制のために農地土壌の炭素貯留に関する研究は多くなされ、不耕起や減耕起の有用性が示されてきた。しかし、多くは耕盤よりも浅層に着目し、微生物活性や生物や植物根などの呼吸に関して研究したものであり、耕盤下の環境に関しては、ガス動態、生物相変化、水分・地温変化等の土壌環境データが少ないのが現状である。特に、水分・熱特性変化は生物活動だけでなく、炭素自身の溶解や分解にも影響する。これらのデータを蓄積し、炭素貯留メカニズムを明らかにすることで、土壌中での炭素貯留量をさらに増加することができるのではないかと考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、耕盤および耕盤下層における炭素貯留メカニズムの解明を目指し、耕盤が規定する土壌物理化学環境条件の測定と、特に水分・温度条件の違いによる土中炭素貯留能評価を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

本申請課題では研究期間内に土壌物理化学性と土壌ガス動態、さらに最終目標である炭素貯留量の把握のために、下記の 4 項目を実施した。調査対象地は、炭素分解が遅いと考えられる寒冷気候の福島県 (年平均気温 10.0°C) 山村の畑農地 (飯舘村) と中間的な気候で農業県である茨城県 (年平均気温 14.4°C) の農地 (茨城大学畑地圃場) で行う予定であったが、令和 2 年からのコロナ感染症拡大により、県外への移動が困難となり、かつ高齢者の多い農山村地域に出向くことが難しくなったため、研究対象地を一部室内へと変更した。また、申請者の所属変更にもない茨城県での継続測定も難しくなったため、フィールド地を東京に変更した。当初予定の圃場試験は耕盤のある畑地とない畑地をそれぞれの地域で設定して行った。

1) 耕盤上下での土壌物理環境 (熱・水分) 条件測定 (平成 30 年-32 年度 (令和 5 年度まで))

地温と土壌熱特性は、分担者の小島が専門とする熱センサを利用した測定・解析、水分量は土中埋設センサとデータロガーを用いた継時自動測定を行った。圃場試験では TDR を、室内試験では ECH2O センサを利用して土壌物理環境測定を行った。

2) 耕盤上下での土壌 CO₂、CH₄ ガス濃度、および地表面フラックス測定 (平成 30 年-32 年度 (令和 5 年度まで))

地中埋設ガス採取管を現場に設置し、土壌深度別にガス採取を行った。また、地表面にアクリル製のチャンバー (40x40x50 cm) を設置し、地表面ガスフラックスを測定した。ガス分析にはガスクロマトグラフ (GC-FID, TCD, ECD) を利用した。ガス測定は主に代表者の西脇が担当した。

3) 耕盤上下での土壌物理化学性、および炭素貯留量測定 (平成 30 年-32 年度 (令和 5 年度まで))

土壌サンプリングは年 3 回程度行い、物理性として透水性、保水性、通気性の測定を行った。また、土壌硬度測定を行った。化学性としては主として土壌炭素、窒素量をターゲットとし、CN

コーダを利用して測定した。物理性の測定は主に代表者の西脇が、化学性の測定は主に分担者の浅木が担当した。

4. 研究成果

1) 気候の違いによるガス動態の違いと土壌耕盤の影響

当初予定の圃場試験では、CO₂ ガスフラックスに関しては、両試験区ともに 8 月に耕盤なしプロットで大きな放出を示す傾向が見られた。また、10 月は茨城では耕盤の有無での差はなく、福島では耕盤ありのプロットで放出量が大きく、11 月は茨城にて耕盤ありのプロットで放出量が大きい傾向が確認された。総放出量は福島より茨城が多かった。CH₄ ガスフラックスに関しては、両区において年間を通じて基本的に吸収傾向を示したが、11 月に福島で大きな放出が確認された。耕盤ありプロットでの総吸収量が耕盤なしプロットより大きかった。また、耕盤有のプロットでは時間経過とともに徐々に CO₂ 放出量が増加する傾向が確認された一方、耕盤無しのプロットでは減少する傾向が確認された。ガスフラックス変化を図 1 に示す。

土中ガス濃度は 7.5 cm 深では地域差、季節差ともに確認できず、60 cm 深では茨城より福島の CO₂ ガス濃度が高い傾向を示した。特に耕盤なしプロットで高い値と示した。CH₄ ガスは、両区の間での差、および季節差はほぼ確認されなかった。土壌硬度と透水係数が福島では逆比例の関係であったが、茨城では区画ごとの差が大きく、硬度と透水係数の間に一様な関係は確認されなかった。硬度だけでは測れない土壌構造の差があると予想された。したがって、同一圃場の近接区域にて耕盤のガス動態への影響を調べるために、耕盤破碎による影響を観測する必要があると考えられた。また、測定土中ガス生成から放出までの流れが土壌の耕盤と関係することは確認されたが、耕盤の性質として何がどのように影響しているかを明確にすることはできなかった。したがって、室内試験などを通して、ターゲットを絞った詳細な検討が必要と考えられた。また、耕盤による

*成果公表：令和元年度農業農村工学会大会

2) 土壌耕盤の存在と CO₂ ガス動態

試験は茨城大学内の畑地圃場で行った。圃場は試験前の 5 年間は不耕起状態で、作物は栽培されていなかった。8 x 4 m の圃場を 2 分し、片方は不耕起 (耕盤有りプロット)、もう一方は 7 月に耕起を行い土壌耕盤を破碎した (耕盤破碎プロット)。土壌硬度 1700 kPa 以上の層を耕盤とした。耕盤は 15~27 cm の深度で確認された。

7-9 月に耕盤破碎プロットでガスの放出フラックスが大きい傾向を示し、10-11 月には耕盤ありプロットで放出フラックスが大きい傾向を示した。夏から秋にかけて、耕盤破碎プロットで放出フラックスは減少傾向であった (図 2)。

土壌有機物量の測定は深度 2.5、7.5、12.5 および 17.5 cm の土壌に対して行った。耕盤破碎後 8 月と 11 月を比較すると、11 月に耕盤破碎プロットの土壌有機物量の減少が確認されたことから、耕盤より上層にて有機物の分解が促進されていた。また、土中ガス濃度は、7.5~20 cm 深にかけて 7-9 月に耕盤破碎プロットでの濃度が高く、10-11 月に耕盤ありプロットでの濃度が高い傾向が確認された。耕盤破碎後の夏場に上層で有機物が分解されてその量が減少し、耕盤ありプロットでは夏から秋にかけて土中に存在している有機物が徐々に分解していたことが考えられた。

土壌物理性として、飽和透水係数は耕盤破碎プロットで、耕盤より上層の値が小さいことが確認され、耕盤破碎によりマクロポアの連続性が切断されたことが推察された。また、土中ガス拡散係数は、破碎プロットの上層で大きい傾向を示し、破碎により粗間隙が増加したと予想された。さらに保水性試験より、2.5 cm 深度では耕盤破碎プロットで高 pF での保水性が低く、低 pF での保水性が高いこと、12.5 cm では破碎プロットで保水性が高いことが確認され、耕盤破碎によ

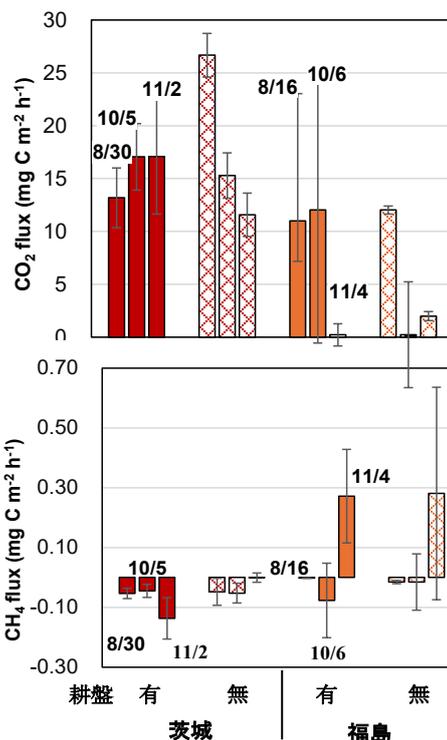


図 1 気候の異なる地域での耕盤の有無と地表面ガスフラックスとの関係

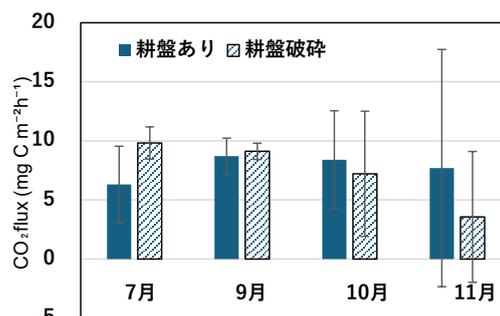


図 2 耕盤破碎と CO₂ ガスフラックスの関係

りマクロポアの連続性が切断されたという推察を支持した。また、体積含水率に関しても耕盤ありと破砕プロットとで差が見られた。

本圃場試験より、耕盤破砕で土壌への酸素ガスの供給や水分保持能が変化することで、土壌有機物分解の様式が変わり、ガス動態に影響したことが確認された。よって、耕盤の存在意義を再確認。

*成果公表：令和2年度農業農村工学会関東支部大会、令和3年度土壌物理学大会

2) 土壌乾燥密度と土中温室効果ガスガス動態

これまでの研究により、土壌耕盤によるガス動態への影響があることは確からしいと確認されたが、硬度や透水性などとの関係は不明であり、土壌状態によるガス動態メカニズムの解明には至っていない。そこで、さらに詳細に土壌条件の影響を確認するため、ここでは、室内ポット試験により3種類の土壌乾燥密度を設定して、CO₂、CH₄、N₂Oガスの土中での生成、および大気への放出に関して検討した。

乾燥密度の違いによる間隙中の浸透水と蒸発の差で、乾燥密度 0.67 と 0.84 Mg m⁻³ 条件下では水分と窒素分のポット内分布に差が生じた。そこでは、表層が酸化状態となることで、CO₂ と N₂O の生成、CH₄ の消失が確認された。また、土壌の深さが増すと生成・消失量は減少した。この影響は乾燥密度 0.67 g cm⁻³ 条件下で大きかったことから、間隙率が大きい場合には下方への水移動が起こりやすく、表層が酸化状態となりやすかったために大きなCO₂とN₂Oの生成とCH₄の消失が生じたと考えられた。また、浸透水量の違いは溶解ガスの移動とガス生成の基質となる窒素の移動にも影響し、土中でのガス濃度差が生じ、ガスフラックスおよび生成量に影響した。

*成果公表：土壌の物理性（2024）掲載決定

<引用文献>

Rattan Lal, Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security, SCIENCE, 304, 2004, 1623-1627

Atsushi Yagioka, Masakazu Komatsuzaki, Nobuhiro Kaneko and Hideto Ueno, Effect of no-tillage with weed cover mulching versus conventional tillage on global warming potential and nitrate leaching, Agriculture, Ecosystems and Environment, 200, 2015, 42-53

太田寛行、零田麻衣、中根麻冴美、西澤智康、橋本知義、西脇淳子、小松崎 将一、不耕起・草生栽培畑地土壌の微生物生態学：耐水性団粒構造と微生物の分布について、日本土壌肥料学会大会要旨集、2017

Junko Nishiwaki, Marina Kowa, Masakazu Komatsuzaki and Hiroyuki Ohta, Net CO₂ and CH₄ Gas Fluxes and Concentrations at Conventional and No Tillage Upland Fields, ASA, CSSA and SSSA International Annual Meetings, 2017

Viridiana Alcántara, Axel Don, Lars Vesterdal, Reinhard Well and Rolf Nieder, Stability of buried carbon in deep-ploughed forest and cropland soils - implications for carbon stocks, NATURE Scientific Reports, 7, 2017, 5511

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kojima, Y., Y. Nakano, C. Kato, K. Noborio, K. Kamiya, and R. Horton.	4. 巻 174
2. 論文標題 A new thermo-time domain reflectometry approach to quantify soil ice content at temperatures near the freezing point	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Cold Region Science and Technology	6. 最初と最後の頁 103060
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.coldregions.2020.103060	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 西脇淳子, 北原香織, 土井俊弘, 岡山 毅	4. 巻 XX
2. 論文標題 土壌乾燥密度とダイズ生育が温室効果ガス動態へ与える影響の実験的検討	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 土壌の物理性（掲載決定、巻号未定）	6. 最初と最後の頁 XX
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 西脇淳子、井上智弘
2. 発表標題 土壌層構造の違いによる溶存有機炭素の移動特性
3. 学会等名 農業農村工学会関東支部大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松尾朋実、西脇淳子、小林政広、伊藤優子
2. 発表標題 森林土壌における温室効果ガスの深度別生成・分解量の推定および深層土壌での高濃度N ₂ O-の原因の検討
3. 学会等名 ISPUセミナー
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西脇淳子、谷口和也、小松崎将一
2. 発表標題 土壌耕盤の存在と土壌物理性、CO ₂ ガス動態
3. 学会等名 第72回農業農村工学会関東支部大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西脇淳子、谷口和広、小松崎将一
2. 発表標題 耕盤破碎にともなうCO ₂ 、CH ₄ ガス動態に関する一考察
3. 学会等名 2021年度土壌物理学大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ゴン・インティン、李沛然、西脇淳子、坂上伸生、廬文藝、小松崎将一
2. 発表標題 不耕起とカバークロップの組み合わせによる脱炭素型農作業システムの評価
3. 学会等名 2021年度日本農作業学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Junko NISHIWAKI, Masakazu KOMATSUZAKI & Masaru MIZOGUCHI
2. 発表標題 CO ₂ and CH ₄ Gas Movement in the Soil with Hardpan
3. 学会等名 ASA, CSSA & SSSA International Annual Meetings (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西脇淳子、谷口和也、小松崎将一
2. 発表標題 土壤耕盤と CO ₂ 、CH ₄ ガス動態の関係
3. 学会等名 第71回農業農村工学会関東支部大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西脇淳子
2. 発表標題 CO ₂ gas flux from farm land soil in cold area
3. 学会等名 Symposium on Freezing and Cold Region Phenomena (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷口和宏、西脇淳子
2. 発表標題 耕盤破碎による土壤有機物分解の変化について
3. 学会等名 土壤物理学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kojima, Y, Y. Nakano, C. Kato, K. Noborio, K. Kamiya, R. Horton
2. 発表標題 A new thermo-time domain reflectometry approach to quantify soil ice content at temperatures near the freezing point
3. 学会等名 Symposium on Freezing and Cold Region Phenomena
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kojima, Y, T. Kawashima, K. Noborio, K. Kamiya, R. Horton
2. 発表標題 A heat pulse based sensor that simultaneously determines soil thermal properties, water content, and matric potential
3. 学会等名 SSSA annual meeting
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西脇淳子, 小松崎将一, 溝口 勝
2. 発表標題 土壤耕盤上下層におけるCO ₂ , CH ₄ ガス発生と地表面ガスフラックス
3. 学会等名 農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小島悠揮, 中野雄太, 加藤千尋, 登尾浩助, 神谷浩二, Robert Horton
2. 発表標題 サーモTDRを用いた凝固点近傍の温度域における凍土氷含有量の新たな測定法
3. 学会等名 農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西脇淳子, 小松崎将一, 溝口 勝
2. 発表標題 土壤耕盤上下層における土壤物理特性とCO ₂ ガス発生
3. 学会等名 土壤物理学会大会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川島知之, 小島悠揮, 登尾浩助, 神谷浩二
2. 発表標題 双子プローブ熱パルス法を用いた土壌水分量およびマトリックポテンシャルの同位置測定法の開発
3. 学会等名 農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 浅木 直美, 萩山 鉄也, 伊藤 竜太郎, 小松崎 将一
2. 発表標題 オオムギリピングマルチの利用がサツマイモの生育と収量におよぼす影響
3. 学会等名 日本作物学会関東支部会第107回講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西脇淳子
2. 発表標題 農地の土壌物理特性と温室効果ガス動態
3. 学会等名 土壌肥料学会北海道支部シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	浅木 直美 (Asagi Naomi) (40571419)	茨城大学・農学部・准教授 (12101)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	小島 悠揮 (Kojima Yuki) (70767475)	岐阜大学・工学部・准教授 (13701)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関