

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23380136

研究課題名(和文) 乾湿に伴う水田土壌構造の変動レンジに関するメカノケミカル解析

研究課題名(英文) Mechano-chemical analysis of fluctuation range of paddy soil structure due to wet and dry cycle

研究代表者

吉田 修一郎 (Yoshida, Shuichiro)

東京大学・農学生命科学研究科・准教授

研究者番号：90355595

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,000,000円

研究成果の概要(和文)：有機物連用、酸化還元処理による水田土壌の膨潤収縮量や間隙構造の変動レンジについて不攪乱土壌および調整土壌の分析に基づき解析した。有機物連用により稲麦輪作に伴う酸化還元の変動レンジは拡大するが、高水分領域での膨潤収縮特性への影響は風乾調整試料でのみ認められた。また、湛水等の還元環境のもとでは、水ポテンシャル一定条件下であっても、時間の経過とともに体積比および含水比が増加する粘弾性的な挙動が認められた。還元処理は、間隙径分布を全体的に増加させ、練り返しは、狭い範囲に間隙径分布を収斂させる働きがあることを認められた。酸化還元の影響下にある水田土壌の膨潤収縮特性の解析における粘弾性モデルの有効性を提示した。

研究成果の概要(英文)：Fluctuation range of swelling/shrinkage volume and pore-size distribution of paddy soil due to continuous application of organic matter or redox treatments is studied for the undisturbed and air-dried soil samples. Although the application of organic matter increased the fluctuation range of redox potential under the rotational cultivation of rice and wheat, the influence on the swelling/shrinkage characteristics was exclusively revealed for the air-dried disturbed soil. Even under the stable soil water potential, the volume ratio and volumetric water ratio temporally increased as the progress in soil reduction. Pore size distribution shifted upward by the reduction treatment and converged into narrow pore-size range by the remixing. Visco-elastic modeling is found to be effective in the analysis of swelling/shrinkage of paddy soil under the influence of alternating redox condition.

研究分野：農業工学

キーワード：水田土壌 土壌構造 膨潤収縮 酸化還元 粘弾性的挙動

1. 研究開始当初の背景

水田の土壌構造は、水分の変動による収縮・膨潤と同時に、酸化・還元による化学性の変動によりダイナミックかつ複雑に変化している。これらの特性は、水田における水・物質移動に重要な役割をもつマクロポアの消長や懸濁物質の流出、土壌浸食などの挙動をコントロールしている。そのため、マクロ・ミクロな土壌構造の変動機構を解明し、モデル化を図ることは、現場での水・物質移動を評価する上で不可欠である。

2. 研究の目的

水稲作もしくは畑作物との輪作体系下にある水田の管理・作付と土壌構造の変動との関連を力学性・化学性の両者を一体的に解析することにより明らかにし、マクロポアの消長に直接的な影響を及ぼす膨潤収縮量や間隙構造の変動レンジを予測する手法を構築する。

3. 研究の方法

水田および水田転換畑における土壌構造の変動とその主要な要因(作付体系、有機物の投入、粘土鉱物等)との関わりを、全国3カ所の水田において栽培歴を考慮して複数回採取した土壌試料を用いて解析した。

(1)弾塑性変形や酸化還元条件を考慮した保水特性の分析

粘土質土壌では、水分変化が土壌の骨格構造の変形を伴うため、間隙サイズは排水されるサクションと必ずしも対応しない。すなわち、粘土質土壌の保水特性は、特定の間隙サイズではなく、むしろ骨格構造の変形特性を表していると考えられる。このような骨格の変形は、土質力学的には土壌水の負圧の増大に伴う有効応力の増加によって引き起こされる弾塑性変形とみることができ、本研究では、加圧板を用いて保水特性の計測を行った。ただし、1回目の-80kPaまで排水の後に吸水+再排水過程を組み込むことにより、塑性的な変形量と弾性的な変形量を区別して評価することを試みた。また、湛水条件下で採取した試料に対しては排水過程での土壌試料の酸化を抑制するために、窒素を用いた加圧とチャンバー内への脱酸素剤の配置を行い、酸化の進行を抑制した。

試料は、福岡県筑後市の稲小麦二毛作水田(以下、筑後と表す)および秋田県大仙市の水稲作田(以下、大仙と表す)で採取した。筑後では、麦収穫期、水稲湛水期、水稲収穫期の年3回を2011年および2012年、大仙では、水稲湛水期と収穫後の年2回を2011年に実施した。筑後の試験区は、いずれも稲麦二毛作で、有機物施用条件は稲わら堆肥20t/ha施用区、稲わら10t/ha施用区、麦わら6t/ha施用区、有機物無施用区の4区で構成される。一方、大仙の試験区は、3年間の畑作後稲わら無投入の水田区、水稲単作で稲

わら還元区、水稲単作で稲わら堆肥20t/ha¹投入区の3区で構成される。いずれも内径5cmのコアサンプラーで、深さ10-12.5cmおよび20-22.5cm層を各区2点、各点2個ずつ採取した。

(2)還元を伴う条件下での膨潤特性の分析

一旦乾燥収縮し、その後湿潤な状態に置かれた土壌の吸水膨潤過程について、水分が増加するだけの酸化的な条件下と還元化が進行する場合の違いを比較する実験を、不攪乱土および風乾土で行った。不攪乱コア試料については、一旦-80kPaで排水した大仙の土壌試料について、最初22日間は、2で湛水下に置き、10日後、22日後の体積含水比を求めた。その後さらに72日間、30の湛水下に置き、10日後と72日後の体積含水比を測定した。

風乾試料については、筑後の不攪乱土と同じ試料を一旦風乾した後に、サンプラーに詰め、それを3と30のチャンバー内で2週間吸水させた後、飽和時および加圧板で-10kPa、-80kPaで排水した後の体積含水比を測定、比較した。また、同時に活性二価鉄含量(pH3.0 1M酢酸ナトリウム抽出)の測定と各排水ステップでのEhの計測を行った。

(3)酸化還元条件と乾燥処理が土壌の間隙構造に及ぼす影響について定量的解析

乾燥程度、還元処理、繰り返しを調整した試料を作成し、鉄の還元量、水中沈定容積、細孔分布を調べた。試料は秋田県大湯村転換畑で採取した水田作土を風乾したものをを用いた。

水分については、ポテンシャルを-100kPaと-10MPaに調整した試料を作成した。-100kPaは、加圧板により調整し、-10MPaはH₂PO₄飽和溶液と平衡させることにより調整した。繰り返しについては、水中沈定容積の測定法に準じ、ゴム栓を用いて肉眼で見た際の構造がなくなるまで攪拌することによった。還元処理については、試料を蒸留水中に入れ、一部は30、一部は4で35日間培養することによった。還元状態については活性二価鉄含量を定量して評価した。

処理が終わった試料は、25の条件で、25%、50%、75%、100%のメタノールと置換させ、メタノール飽和試料とする。メタノール飽和試料をドライアイス法で臨界点乾燥し、シリカゲルを同梱した容器中で保存し、水銀圧入式ポロメータにて間隙径分布を計測した。

(4)力学性に時間依存性のある化学変化の影響を組み込んだ膨潤収縮モデルの検討

膨潤収縮挙動を弾塑性的な骨格変形を伴う土水連成挙動として評価するこれまでのアプローチに対し、さらに時間依存性を考慮した粘弾性的な変形モデルを導入して、水田における長期的な膨潤挙動を評価した。

4. 研究成果

(1)福岡県筑後市の採取時期(水稻湛水期、水稻収穫期、小麦収穫期)の異なる不攪乱作土の保水性について、以下の結論が得られた。

有機物施用区の方が無施用区よりも麦作後から水稻湛水期に向けての E_h の低下が著しく、逆に収穫期に向けての上昇も顕著であった。また、マトリックポテンシャル値 -80kPa における保水量は、有機物施用区の方が無施用区よりも多かった。しかし -80kPa より大きなポテンシャル領域では、水稻作期には保水量に有意な違いはどの時期も認められなかった。また、麦収穫期には、いわゆる粗間隙に相当する間隙量が有機物無施用区で有意に少なかった。以上から、有機物の施用により、酸化還元レンジは拡大するが、乾燥亀裂などの発達に与えるメソポア領域の間隙特性には余り影響せず、それより細かく硬い間隙量や、粗間隙形成に影響することが認められた。

(2)(1)の試料を風乾し、粉碎した後に再充填して飽和させた試料では、還元処理(高温湛水放置)を施した場合、有機物施用区では定サクション領域 ($<-10\text{kPa}$) の塑性的な間隙量が増加した。また、有機物の有無にかかわらず、還元処理は同サクション領域の弾性的な間隙量を増加させた。一方で、不攪乱土で見られたような還元による -80kPa 以下の堅密な間隙の増加は認められなかった。すなわち、還元による堅密な小さな間隙の変化には、長い時間を要することが示唆された。

(3)有機物の投入履歴が異なる秋田県大仙市の水田土壌を対象に保水性の違いや湛水時の温度が膨潤に及ぼす影響の差異を調べた。有機物投入のある土壌では、保水量が増加し、脱水時の収縮が顕著であること、湛水膨潤過程における還元が著しく、低温下(2)で22日間静置し、十分に吸水させた後、高温下(40)に置くと、温度を上げた後に著しい膨潤を示した。このような挙動は有機物投入のない試料ではほとんど認められなかった。以上から、水田土壌の吸水膨潤過程は、土壌水のサクションの減少のみで決まるものではなく、酸化還元による間隙の剛性の変化の影響も受けることが証明された。

(4)乾燥、練り返し、還元による間隙径分布の変化

還元処理を行うと 160nm 以上の孔隙の割合が増加した。また、試料を練り返すと孔隙は $1\mu\text{m}$ 付近に収斂した。還元処理した場合はこの収斂の程度が大きくなることから、還元処理が練り返しの効果を発現しやすくなることが明らかになった。また、乾燥すると孔隙が減少するとともに孔隙径のピークが 100nm 付近にシフトした。

上記の傾向を畑畑輪換に対応させると孔隙分布は、乾燥によって収縮し小さな孔隙

径にピークがシフト 復田による還元によって孔隙が増加 また、耕うん、代かきによって $1\mu\text{m}$ 付近にピークが収斂し、孔隙量は増加、といった変化が起こっていると考えられる。

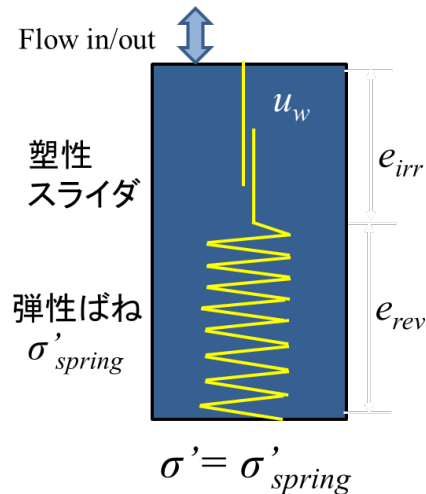


図1 弾塑性モデルでの有効応力

変位は不可逆な部分と可逆的な部分があり、有効応力はスプリングの伸びで決まる。

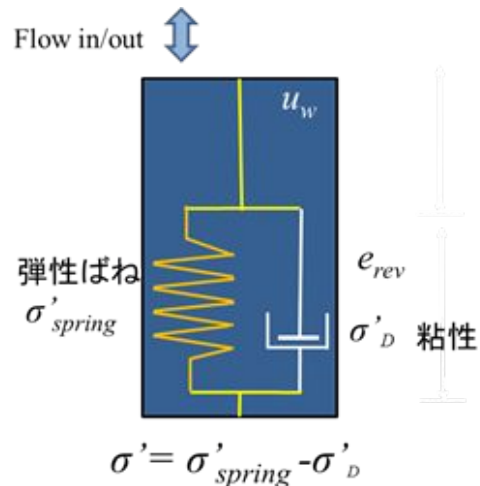


図2 粘弾性モデルでの有効応力

変位は可逆的な部分のみとなるが、膨潤時、粘性抵抗がスプリングの弾性抵抗を弱める働きをするため、有効応力はスプリングが伸びきらずとも低下する。体積の増加速度は、粘性の大小でコントロールされる。

(5)時間依存性を考慮した膨潤収縮過程のモデリング

膨潤収縮を表す最も単純な力学モデルとしては、弾塑性モデル(図1)が考えられる。このモデルにより、再吸水過程を含めた水分特性曲線の傾向を個々の時期について表すことができ、実験室内での収縮・膨潤試験に

については、問題無く表現できる。しかし、ほ場における数ヶ月におよぶ湛水や、乾燥に伴う膨潤収縮挙動については、サクシヨンの変化とその履歴のみにより間隙比が決まることを特徴とする弾塑性モデルでは、十分に挙動を再現できない。

弾塑性モデルにおいて、膨潤過程は、乾燥履歴を受けた状態からのサクシヨンの増大によるため、過圧密状態での弾性的な体積変化と考える。しかし、還元状態を誘起することにより、一旦膨潤を停止した試料がさらに膨潤するという実験結果が得られていることから、水田土壌での実際の膨潤過程を表すモデルでは、伸びうるばねの変形を遅らすファクターをモデルに加える必要がある。本研究では、粘性を弾性要素に並列する単純な粘弾性モデル(図2)を考え、粘性係数を還元の進行速度に対応させて調整することにより、本研究で得られているような酸化還元条件に影響を受ける時間依存性の強い膨潤挙動をモデル化することを提案した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

Yoshida, S., Adachi, K. Hosokawa, H., 2014, Analysis of seasonal change in paddy soil structure based on elasto-plastic deformation model, *Geoderma*, 228-229, 104-113. DOI 10.1016/j.geoderma.2013.08.002 査読有り

高橋智紀, 2012, 水田輪作体系での鉄の形態変化と土壌特性との関係, *日本土壌肥料学雑誌*, 83, 714-720. 査読有り

吉田修一郎, 細川寿, 足立一日出, 2013, 播種時の過湿・過乾燥リスクを伴う粘土質転換畑におけるダイズの適切な播種条件の解析, *土壌の物理性*, 125, 17-27. 査読有り

〔学会発表〕(計2件)

Yoshida, S., 2012, limitation of mechanical analysis of shrinkage and swelling in paddy field -From three years monitoring of WRC in a paddy-, Euro soil 2012, Bari, Italy.

Yoshida, S., 2014, Dynamic state of soil macropore structure governing hydrological aspect of paddy field, International Workshop on Establishment of Optimized Land-use for Symbiotic Urban System, 首都大学東京.

〔図書〕(計1件)

Hallett, P, Horn, R., Yoshida, S., 2013, A history of understanding crack propagation and the tensile strength of soil, *in* Longsdon, S. Berli, M. and Horn, R. (eds.) *Quantifying and modelling soil structure dynamics*, Soil Science Society of America, pp.93-120.

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

吉田 修一郎 (YOSHIDA Shuichiro)
東京大学・大学院農学生命科学研究科・
准教授
研究者番号：90355595

(2)研究分担者

高橋 智紀 (TAKAHASHI Tomoki)
農業・食品産業技術総合研究機構・東北
農業研究センター・主任研究員
研究者番号：00355562

西田 和弘 (NISHIDA Kazuhiro)
東京大学・大学院農学生命科学研究科・
助教
研究者番号：90554494

(3)連携研究者

中野恵子 (NAKANO Keiko)
農業・食品産業技術総合研究機構・九州
沖縄農業研究センター・主任研究員
研究者番号：40354089

鈴木克拓 (Suzuki Katsuhiro)
農業・食品産業技術総合研究機構・中央
農業総合研究センター・主任研究員
研究者番号：90354068

小田原孝治 (Odahara Koji)
福岡県農業総合試験場・筑後分場・専門
研究員(申請時)
研究者番号：10514995