

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：13701

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14940

研究課題名（和文）植物根が土壌の熱輸送特性に与える影響の解明と原位置根重密度測定法の開発

研究課題名（英文）Quantifying effects of plant root growth on soil thermal properties and developing in-situ plant root density measurement

研究代表者

小島 悠揮 (Kojima, Yuki)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号：70767475

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：植物根が土壌の構造および熱輸送に与える影響の解明を目指し、センサによる根混じり土壌の熱輸送特性の測定と、X線CTによる根混じり土壌の可視化を行った。複数種の植物と土壌を用い、その組み合わせによる影響の変化も検討した。センサを用いた測定から、植物根の成長によって土壌がより密な状態になり、土壌の熱輸送性が増加する傾向が得られた。その一方で、黒ボク土では植物根の成長によって土壌の乾燥密度が低下し、熱輸送性が変化しなかった。X線CTによる根混じり土壌の観察では、CT画像からの植物根の抽出方法を開発し、植物根、土粒子、間隙水、間隙空気の解析に成功した。植物根と土壌の研究を加速させる重要な成果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

植物根が土壌に与える影響は多岐にわたり、その中で土壌の熱輸送に与える影響を解明することは、土壌の炭素固定や生態系保全等において重要である。本研究では複数種の植物が複数の土壌の熱輸送特性に与える影響を定量的に評価した。また根混じり土壌のX線CT画像から根を抽出し、土粒子、水、空気の分節化を実現した。これは土壌の熱輸送研究のみでなく、様々な植物根関連研究に展開可能であり、重要な成果が得られた。

研究成果の概要（英文）：We measured the heat transport properties of root-mixed soil using sensors to elucidate the effects of plant roots on soil structure and heat transport. The impact of different combinations of plants and soils was examined. In addition, we visualized root-mixed soil using X-ray computed tomography. Sensor measurements showed that the growth of plant roots tended to make the soil denser and increase the soil's heat transport properties. In contrast, in kuroboku soil, root growth decreased the soil bulk density and did not change the heat transport properties. In observing root-mixed soil using X-ray CT, we developed a method for extracting plant roots from CT images and successfully analyzed plant roots, soil particles, pore water, and pore air. Important results were obtained to accelerate research on plant roots and soils.

研究分野：環境土壌物理学

キーワード：植物根 土壌構造 熱輸送特性 X線CTスキャン

1. 研究開始当初の背景

植物根は土壤中で様々な機能を発揮することが知られている。例えば、吸水によって土壤水分動態がダイナミックに変化したり、根からの分泌物により根圏微生物が活性化されたりする。また、植物根は斜面におけるせん断補強効果や浸食抵抗など力学的な機能も有するため、防災や土壤保全の観点からも注目されている。さらに植物根による土壤中の重金属類の吸収や、微生物活性効果による有機汚染物質の分解促進を利用した土壤汚染修復技術の開発も進められている。このような多様な機能を持つ植物根だが、土壤中の熱輸送にも影響を与えられられる。植物根は土壤中の間隙を縫うように成長するため、間隙率が減少し、土壤はより密な状態となると考えられる。その一方で、植物根によって土粒子が押しつけられることによって土粒子配列や間隙構造が変化する可能性もある。土粒子配列や間隙構造は土壤の熱輸送特性に強く関係するため、土壤の熱伝導率や体積熱容量などが変化すると考えられる。このような熱輸送特性の変化は、地中の水・温度環境を変化させるほか、炭素や窒素などの温室効果ガス発生に寄与する物質の存在量も変化させる。また地中の生態系にも影響を与えられられるために重要である。

植物根が土壤の熱輸送特性に与える影響は植物の種類や土壤の種類、それらの組み合わせによって変化すると考えられる。例えば植物根の形状はひげ根と主根・側根に分けられるし、植物によって径も様々である。主根・側根を持つ植物に対し、ひげ根を持つ植物の方が土壤中に広く根が分布し、その影響は大きいと予想される。また径の大きな植物根の方が土粒子配列に与える影響は大きいと考えられる。土壤に関して言えば、粒径の大きい砂粒子を多く含む砂質土壤では土粒子の移動には大きなエネルギーが必要となる一方、粒径の小さい粘土分を多く含む土壤では根が土粒子を移動させることは容易であると予想される。しかしながら、こうした植物根が土壤の構造とそれに強く関係する熱輸送特性に与える影響については現状十分に解明が進んでいない。

2. 研究の目的

本研究の主な目的は、植物根の成長が土壤構造および熱輸送特性に与える影響を明らかにすることである。本研究では特に数種類の植物および土壤を用いることで植物根の形状やサイズ、土壤の粒径分布や有機物含有量などの性質の違いによる影響の変化について詳細に検討する。また土壤の水分量および熱的性質が測定可能な土壤センサ(サーモ TDR)による評価や X 線 CT スキャンを用いた内部構造観察など、複数のアプローチによって目的の達成を目指す。さらに、植物根が土壤の熱輸送特性に与える影響を明らかにすることで、サーモ TDR によって土壤中の根重密度が推定可能か検討することも目的とした。

3. 研究の方法

(1) サーモ TDR を用いた植物根が土壤の熱特性に与える影響の評価

サーモ TDR は、土壤の水分量を測定する TDR 法と熱輸送特性を計測する双子プローブ熱パルス(DPHP)法を組み合わせたセンサである。3つの植物を2つの土壤にて栽培し、その根圏土壤の水分量と熱輸送特性(熱伝導率と体積熱容量)をサーモ TDR センサで測定し、植物根が熱輸送特性に与える影響の解明を試みた。黒ボク土と岐阜大学実験圃場土壌(以降、圃場土)を 500 cm³の容器に充填し、ダイズ、西洋芝、ギニアグラスを播種した。その後、適宜施肥と灌漑をしながら屋外で 100 日間栽培した。播種から 20 日、40 日、60 日、80 日、100 日において、容器から根交じり土壌を 100 cc サンプラを用いて採取した。各サンプラの体積含水率と熱輸送特性をサーモ TDR によって測定し、その後、土壤の乾燥密度と根の乾燥重量を測定した。

(2) X 線 CT を用いた土中の植物根分布の解析

植物根が土粒子配列や間隙構造に与える影響を微視的に解明するため、X 線 CT による土中の植物根と土粒子、間隙水、間隙空気分布の解析を試みた。内径 20 mm、高さ 50 mm のアクリルカラムに豊浦砂を充填し、ダイズ、イタリアングラス、ギニアグラスを生育した。一定期間の生育後に、Metrotom 1500 (Carl Zeiss, Oberkochen) によってボクセルサイズ 16.5 μm でカラムを撮影した。撮影した CT 画像の解析は、画像解析ソフト ImageJ (NIH, Maryland) と Python を用いた。CT 画像を ImageJ で読み込み、最表層の断面画像に対して、目視によって植物根と判断できるボクセルをすべてラベリングした。1 枚目の根の抽出は手作業となるが、2 枚目以降の画像では自動的に抽出できるよう region growing に基づいた Python のプログラムを作成した。これにより根の分節化をした後、ExFact VR (日本ビジュアルサイエンス、東京)を用いて土粒子、水、空気を kriging 法によって分節化した。

4. 研究成果

(1) サーモ TDR を用いた植物根が土壌の電気特性・熱特性に与える影響の評価

表 1 にサーモ TDR 測定時の土壌の乾燥密度および植物根重量を植物毎，土壌種毎に平均値を示した。圃場土では各植物の生育状態が良かった一方で，黒ボク土では植物の生育状態が悪く，圃場土と比較して根重量が小さくなった。乾燥密度に着目すると，圃場土では植物根の有無や種類に関わらず概ね一定の値を示したが，黒ボク土では植物根が生育することで乾燥密度が低下する傾向が見られた。特に最も大きい根重量を示したダイズでは乾燥密度も大きく低下した。

図 1 に西洋芝を栽培した圃場土および黒ボク土の体積熱容量を体積含水率の関数として示した。圃場土では植物を栽培していない土壌の体積熱容量と比較して植物根交じり土壌の体積熱容量は増加する傾向にあった。その一方で，黒ボク土に植物根による体積熱容量の変化はあまり見られなかった。図 2 には西洋芝を栽培した圃場土および黒ボク土の熱伝導率を体積含水率の関数として示した。圃場土において根の存在により熱伝導率は大きくなる傾向が見られた。その一方で，黒ボク土においては根の存在が熱伝導率に与える影響は小さかった。これらの変化にはいくつかの要因が考えられる。例えば，圃場土における熱伝導率や体積熱容量の増加は，植物根が間隙を満たした可能性や，根が土粒子を押しこむことで土粒子の接触点が増加した可能性がある。植物根の成長によって黒ボク土では，乾燥密度が低下したため，熱伝導率や体積熱容量も低下することが予想されたが，殆ど変化はなかった。これは乾燥密度低下による熱輸送特性低下と，植物根による熱伝導率上昇の効果が相殺した可能性が考えられる。植物根が熱輸送特性に与える影響を定量的に評価することはできたが，熱輸送特性変化の原因の詳細な検討は土壌センサでは困難であったため，CT スキャンによる微視的な解明が必要であると結論付けた。

図 1 と図 2 の熱輸送特性を表現するため，de Vries (1963) が提案した体積熱容量および熱伝導率モデルに，植物根に関する項を加えて修正した。このモデルを測定プロットに根重密度を変数としてフィッティングしたものを図 1 および 2 に示した。モデルによって体積熱容量および熱伝導率を表現できていることがわかる。これらのモデルとサーモ TDR による体積含水率および熱輸送特性の測定を組み合わせることで，原位置での植物根重密度の推定を試みた。しかしながら，サーモ TDR の測定誤差によって植物根重量の推定値がバラつき，推定は現状困難であった。今後のセンサ精度向上や新たな解析手法の提案が期待される。

図 1 と図 2 の熱輸送特性を表現するため，de Vries (1963) が提案した体積熱容量および熱伝導率モデルに，植物根に関する項を加えて修正した。このモデルを測定プロットに根重密度を変数としてフィッティングしたものを図 1 および 2 に示した。モデルによって体積熱容量および熱伝導率を表現できていることがわかる。これらのモデルとサーモ TDR による体積含水率および熱輸送特性の測定を組み合わせることで，原位置での植物根重密度の推定を試みた。しかしながら，サーモ TDR の測定誤差によって植物根重量の推定値がバラつき，推定は現状困難であった。今後のセンサ精度向上や新たな解析手法の提案が期待される。

(2) X 線 CT を用いた土中の植物根分布の解析

画像解析によって分節化された植物根を図 3 に示した。ダイズは主根と側根を有するが，主根を中心に側根がカラム内に広く分布している様子が確認できた。主根はやはり鉛直方向に伸長する傾向があり，側根は水平方向への伸長が特徴的であった。ダイズ根は表層部分では水平方向に伸長する傾向が強く，深くなるほど鉛直方向に伸長していたが，これはアクリルカラム壁面の土粒子による貫入抵抗の小さい箇所を通じて成長しているためと考えられる。イタリアングラスの根はひげ根であり，比較的均一な径の根がカラム全体において発達していた。ダイズの根と比較すると径が小さいため，伸長

表 1 乾燥密度と根重量

soil		Gifu-University field soil		
plant	no root	soybean	western turf	guinea glass
bulk density (g cm ⁻³)	1.25	1.21	1.24	1.25
Root mass (g)	-	4.62	3.04	4.58

soil		Kuroboku soil		
plant	no root	soybean	western turf	guinea glass
bulk density (g cm ⁻³)	0.75	0.68	0.70	0.72
Root mass (g)	-	0.79	0.24	0.27

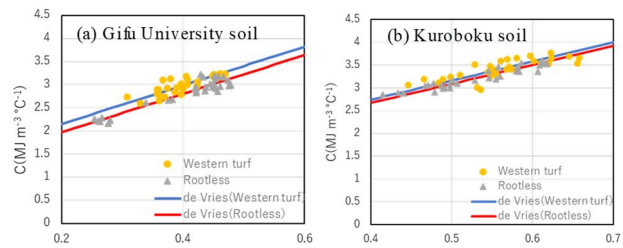


図 1 土壌の体積熱容量

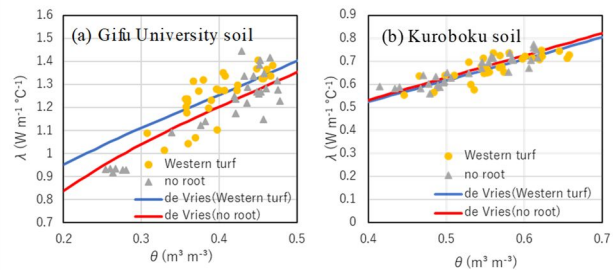


図 2 土壌の熱伝導率

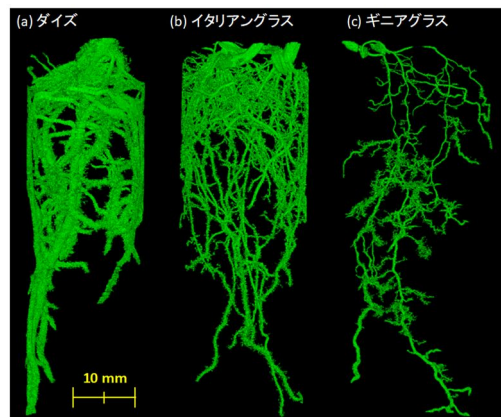


図 3 X 線 CT 画像から分節化した根

に対する土粒子の抵抗も小さかったと予想される。ギニアグラスは生育状態があまり良くなかったため、根量も少なく見えるが、鉛直方向の根の伸長は他の植物と大差ない。そのため、鉛直方向の伸長が先に生じた後に水平方向の伸長が支配的になると考えられる。

このように根の土壌中での植物分布を詳細に把握できた。植物根を分節化した画像に対して kriging を実施し、さらに土粒子、間隙水、間隙空気に分節化した画像を図4に示した。図4はダイズある深度の断面画像であり、間隙水の分布の解析のために植物根は空隙と同色となっている。間隙水の分布は空気と比較すると小さな間隙にあることがわかる。また植物根の周囲には水で満たされた間隙が多いことも見て取れる。このように本研究により植物根の分布と土粒子、間隙水、間隙空気が可視化でき、植物根周囲の土粒子配列および間隙構造の理解が可能となった。今後は間隙の屈曲率や配位数、土粒子の接合数などの各種解析を進め、植物根が土壌構造に与える影響について多様な抽出パラメータから網羅的に考察することが必要である。

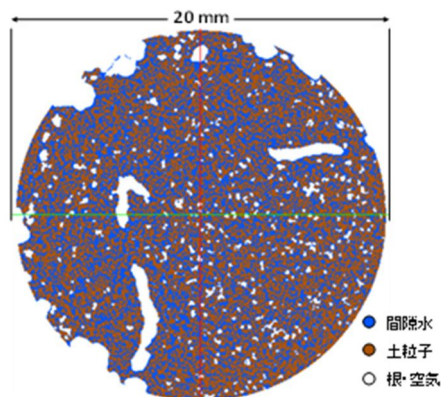


図3 分節化画像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Asano, J, Y. Kojima, C. Kato, K. Kamiya	4. 巻 1165
2. 論文標題 Climate change impacts on soil moisture and temperature in the plain and mountainous regions of Gifu Prefecture, Japan	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.	6. 最初と最後の頁 12045
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1755-1315/1165/1/012045	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kojima, Y, K. Okumura, S. Aoki, K. Noborio, K. Kamiya, R. Horton	4. 巻 429
2. 論文標題 A four-parameter-based thermo-TDR approach to estimate water and NAPL contents of soil liquid	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Geoderma	6. 最初と最後の頁 116263-116263
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.geoderma.2022.116263	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kojima, Y., Kawashima, T., Noborio, K., Kamiya, K., Horton, R.	4. 巻 188
2. 論文標題 A dual-probe heat pulse-based sensor that simultaneously determines soil thermal properties, soil water content and soil water matric potential	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computers and Electronics in Agriculture	6. 最初と最後の頁 106331
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compag.2021.106331	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 谷川原龍之介, 小島悠揮, 濱本昌一郎, 神谷浩二	4. 巻 149
2. 論文標題 TDRを用いた水中ファインバブル濃度推定手法の検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土壌の物理性	6. 最初と最後の頁 47-53
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34467/jsoilphysics.149.0_47	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11件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Juri Asano, Yuki Kojima, Chihiro Kato, Kohji Kamiya
2. 発表標題 Climate change impacts on soil moisture and temperature of plain and mountainous regions in Gifu Prefecture, Japan
3. 学会等名 The 8th International Conference on Climate Change (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浅野珠里, 小島悠揮, 加藤千尋, 鈴木拓実, 神谷浩二
2. 発表標題 GCMの選択が岐阜県平野部および山間部の土壌環境将来予測に与える影響
3. 学会等名 農業農村工学会2022年度大会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Asano, J, Y. Kojima, C. Kato, K. Kamiya
2. 発表標題 Predicting climate change impacts on soil environment in plain and mountainous areas of Gifu Prefecture, Japan
3. 学会等名 JpGU Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小田奈苗, 小島悠揮, 神谷浩二
2. 発表標題 植物根が土壌の電気特性および熱特性に与える影響の解明
3. 学会等名 農業農村工学会2021年度大会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Oda, N., Kojima, Y., Kamiya, K.
2. 発表標題 Evaluating effects of plant roots on soil thermal properties with a thermo-TDR sensor
3. 学会等名 JpGU Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 谷川原龍之介, 小島悠揮, 濱本昌一郎, 大竹豊, 神谷浩二
2. 発表標題 汚染履歴が異なる油汚染土壌の水理特性と土中油分存在形態との関連性評価
3. 学会等名 土壌物理学会2023年度大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木拓実, 小島悠揮, 浅野珠里, 坂井勝, 加藤千尋, 神谷浩二, Robert Horton
2. 発表標題 地表面アルベド制御による将来的な地温上昇抑制効果の数値解析的評価
3. 学会等名 土壌物理学会2023年度大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木拓実, 小島悠揮, 加藤千尋, 浅野珠里, 神谷浩二
2. 発表標題 GCMのバイアス補正が土壌水分量と地温の将来予測に与える影響
3. 学会等名 農業農村工学会2023年度大会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 浅野珠里, 小島悠揮, 加藤千尋, 鈴木拓実, 神谷浩二
2. 発表標題 土壌環境の将来予測における土壌水理・熱特性推定法の検討
3. 学会等名 農業農村工学会2023年度大会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Toda, T., Y. Kojima, S. Hamamoto, Y. Ohtake, K. Kamiya
2. 発表標題 Visualizing plant root distribution and its interaction with soil constituents using X-ray computed tomography
3. 学会等名 JpGU Meeting 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Min, T.Th, Y. Kojima, K. Kamiya
2. 発表標題 Insolubilizing Lead and Arsenic-contaminated Soils subjected to Freeze-thaw Cycles
3. 学会等名 JpGU Meeting 2023
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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------