

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：32665

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2021

課題番号：18H06026・19K21163

研究課題名（和文）なぜ低水分時に土壤水中の溶質拡散は著しく抑制されるのか

研究課題名（英文）Why is solute diffusion in soil water significantly reduced at low moisture?

研究代表者

宮坂 加理 (MIYASAKA, Katori)

日本大学・生物資源科学部・助手

研究者番号：00780173

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：低水分における土壤水中の溶質拡散係数（ D_{dif} ）が低下するメカニズムを明らかにするためには、低水分における D_{dif} の測定が必須であるものの、通常行われてきた D_{dif} の測定方法は、時間が非常にかかりかつ実験誤差がしやすいものであった。そこで、4極センサーを用いて土壤の電気伝導度と体積含水率の関係を測定することで、高水分から低水分までの領域で土壤の電気伝導度測定からも D_{dif} の測定が可能であることを砂丘砂を用いて実験により確認を行った。以上から、低水分において土壤の電気伝導によっても D_{dif} が推定できることを明らかにしたことから、低水分における D_{dif} が容易に推定できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

土壤水中の溶質拡散係数は、多くの実験から高水分時には体積含水率の1～2乗に比例することが知られている。しかし、低水分時の溶質拡散係数（ D_{dif} ）については、測定例は限られており、さらに特定の水分以下では D_{dif} が体積含水率の4乗に比例し著しく溶質拡散が抑制されると報告されている。しかし、この原因はまだ解明されていなかった。本研究において、土壤の電気伝導によっても低水分における D_{dif} が測定できることを明らかにしたことから、今後この方法を用いて、低水分における D_{dif} の測定を行っていくことで、溶質拡散と低水分における溶質拡散のメカニズムを比較することができると考えられる

研究成果の概要（英文）：Although measurement of solute diffusion coefficient in soil water (D_{dif}) at low soil water content is essential to elucidate the mechanism of the decrease in D_{dif} at low water content, the conventional method of measuring D_{dif} is very time-consuming and prone to experimental errors. Therefore, we confirmed experimentally using dune sand that it is possible to measure D_{dif} from the measurement of electrical conductivity in soil in the range from high to low soil water content using the four electrode sensor. From the above, it is clear that D_{dif} can be estimated by the electrical conductivity of the soil at low moisture content, which indicates that D_{dif} can be easily estimated at low moisture content.

研究分野：土壤物理学

キーワード：低水分 砂 溶質拡散係数 乾燥土 電気伝導度 EC

1. 研究開始当初の背景

土壌水中の溶質拡散係数 (D_{diff}) は乾燥地で塩類集積が生じた場合に塩濃度分布を決める重要な値である。高水分時には、一般的に D_{diff} は体積含水率 (θ) の 1~2 乗に比例することが知られている。これは、飽和状態から徐々に水分が減少すると、土壌中の大きな間隙から順に空気が侵入し、それに伴って、土壌水中の溶質がその部分を迂回しながら拡散し、拡散経路長が長くなることから説明されている。一方で、低水分時における D_{diff} を実測している研究は非常に少ないものの、Mehta et al. (1995) は特定の水分以下での D_{diff} は θ の約 4 乗に比例し、溶質拡散が著しく抑制されることを示した (図1中の点線)。また、その要因として土壌の固相表面電荷によるイオン排除の影響を示唆していた。

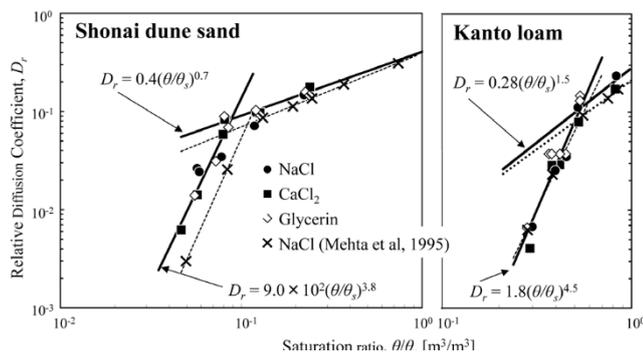


図1 溶質拡散係数と体積含水率の関係。実線は Miyasaka et al. (2014)、点線は Mehta et al. (1995)の結果である。

この結果を受けて、Miyasaka et al. (2014)は、これまでに電解質と固相表面電荷の影響を受けないはずの非電解質を用いて、カラム実験により低水分時の D_{diff} の測定を行うことで、土壌の固相表面電荷によるイオン排除の影響を検証した。その結果、溶質電荷の有無に関わらず、 D_{diff} と θ の関係に違いは見られず、非電解質においても低水分時に溶質拡散が抑制された (図1中の実線)。この結果から、低水分時に溶質拡散が抑制される要因は固相表面電荷のイオン排除によるものではないことを示した (Miyasaka et al. 2014)。

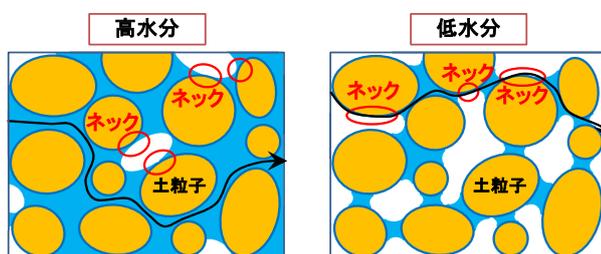


図2 土壌中の溶質拡散経路の模式図。低水分では水で満たされた連続間隙がないため、ネックの部分の拡散が溶質拡散に影響する。

そこで、低水分時に溶質拡散が著しく抑制された原因は、高水分時と低水分時において土壌水の連続性が異なるためではないかと考えた。土壌間隙に空気が侵入すると、水膜の薄い部分が拡散を抑制するボトルネック (以下ネック) となる。高水分では水で満たされた連続間隙があるため、 D_{diff} は拡散経路長の長さによって決まり、ネックは影響しない (図2左図)。しかし、低水分では水で満たされた連続間隙がなくなりネックが拡散経路となり、 D_{diff} が抑制される (図2右図)。さらに水分が低下すると、より小さな間隙にも空気が侵入するだけでなく、すでに空気の侵入している間隙の水膜の厚さも薄くなるため、ネックにおける拡散はさらに抑制されると考えられる。これらの影響によって、低水分時には D_{diff} が著しく低下すると考えた。

2. 研究の目的

以上から、本研究では、仮説「低水分時の土壌水中の溶質拡散は土粒子に付着した水膜の薄い部分 (ネック) によって著しく低下する」を検証することを目的とした。

本研究の特色は、通常では測定不可能な水膜の薄い部分 (ネック) における溶質拡散の抑制を実際に測定する点である。可能であるならば、ネックの部分のみの溶質拡散係数を測定し、土壌全体の土壌水中の溶質拡散係数 (D_{diff}) と比較すれば、仮説を検証することができる。しかし、実際にはネックの部分のみの溶質拡散係数を測定する方法はない。そこで、申請者は水膜の融点が間隙水よりも低い点に着目した。土壌水には土粒子に近い順から三つに分類することができる。土粒子と強く相互作用しており配向している水 (強結合水)、その外側に存在し弱い相互作用を受けている水 (弱結合水)、及び土粒

子の影響を受けない自由な水(自由水)である(ロージェ, 1963)。強結合水は不凍水とも呼ばれており、通常では取り除くことのできない水で、塩やその他の物質を溶解する能力をもたないといわれている。弱結合水は、強結合水と自由水の中間の特性をもつが、土粒子に近いほど強結合水に、離れるほど弱結合水に極めて近い特性をもつ。また、融点は 0°C よりも低くなる。この三分類を用いると、土壌間隙を満たしている水の大半は「自由水」のことであり、間隙に空気が侵入した際にできる土粒子に付着した水膜の薄い部分が強結合水や弱結合水と言い換えることができる。土壌水が飽和状態から乾燥していく過程も、土壌が凍結していく過程も、自由水から弱結合水へ順に進行する。つまり、乾燥過程と凍結過程では、土壌中の水の分布形状やエネルギー状態をおおむね同様と見なすことができる。これを踏まえると、低水分時に結合水における溶質拡散係数によって D_{diff} が著しく低下したのであるならば、飽和土壌水を徐々に凍結させていったときの液状水の量と D_{diff} の関係からも同様の結果が得られると想定される。

3. 研究の方法

仮説「低水分時の土壌水中の溶質拡散は土粒子に付着した水膜の薄い部分(ネック)によって著しく低下する」を検証するために、飽和土壌を凍結させていく過程の D_{diff} と液状水との関係も測定する。用いる土壌試料としては、Mehta et al. (1995) や Miyasaka et al. (2014) が使用した団粒構造をもつ関東ローム土や単粒土である庄内砂丘砂だけでなく、それ以外の構造や粒度分布をもつ土壌も使用する。湿润地である国内の畑地土壌、森林土壌、砂丘砂以外にも、乾燥地であり土壌の性質が大きくことなるモンゴルの土壌も用いる。さらに、様々な粒度分布を組み合わせたガラスビーズも用いて、低水分時に溶質拡散が著しく低下するモデル化を行う。

各土壌試料およびガラスビーズにおいて飽和土壌を凍結させていく過程の D_{diff} と液状水分量の関係を温度補正したものが、別途測定している乾燥過程における D_{diff} と θ の関係と一緒にあるならば、 0°C 付近で自由水による連続間隙が凍結により塞がれ、弱結合水を拡散せざる終えなくなったためだと考えられ、低水分時の土壌水中の溶質拡散が抑制されるのは水膜の薄い部分(ネック)の影響によると言える。

4. 研究成果

低水分において D_{diff} が低下するメカニズムを明らかにするためには、低水分における D_{diff} の測定が必須であるものの、通常行われてきた D_{diff} の測定方法は、時間が非常にかかりかつ実験誤差が大きいものであった。そこで、4 極センサー(図 3: 井上・塩沢, 1994)を用いて土壌の電気伝導度と体積含水率の関係を測定することで、高水分から低水分までの領域で土壌の電気伝導度測定からも D_{diff} の測定が可能であることを砂丘砂を用いて実験により確認を行った。

以上から、低水分において土壌の電気伝導によっても D_{diff} が推定できることを明らかにしたことから、低水分における D_{diff} が容易に推定できることを示した。今後、この方法を用いて、凍結土壌による D_{diff} と低水分における D_{diff} の測定を行っていくことで、凍結土壌における溶質拡散と低水分における溶質拡散のメカニズムを比較することができると思われる。

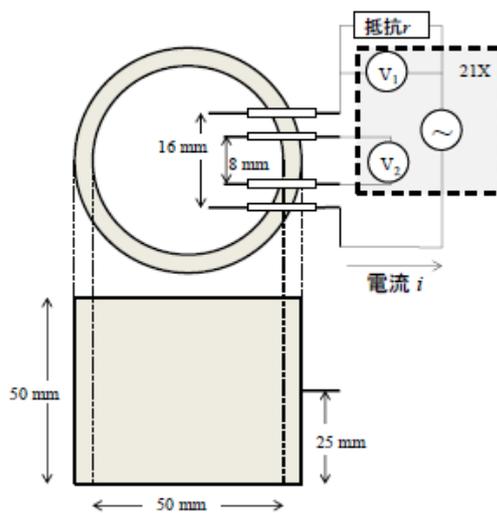


図3 土壌の電気伝導度測定に用いた4極センサーの模式図
(井上・塩沢, 1994)。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Miyasaka Katori, Shiozawa Sho	4. 巻 384
2. 論文標題 Relationship Between Solute Diffusion Coefficient and Electrical Conductivity Under Extremely Low Soil Water Conditions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Soil Science and Plant Nutrition	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s42729-022-00792-1	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 -

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------