

## 論文内容の要旨

生物・環境工学 専攻

平成23年度博士課程 進学

氏名 宮坂 加理

指導教員名 塩沢 昌

論文題目 乾燥地草原における土壌水分・塩分環境に関する研究

乾燥地草原では降雨が少ないため、植物は常に水ストレスや塩ストレスにさらされている。本研究では、このような過酷な環境で生育している植物が土壌水分をいつ、どの深さから吸水しているのかを問題意識として、第Ⅰ部において根圏における土壌中の塩分布の基礎となる溶質拡散係数の低水分における特性を実験により明らかにした、第Ⅱ部において寒冷乾燥地モンゴルの草原における土壌水分環境を現地調査から明らかにした。

### 第Ⅰ部 低水分領域における溶質拡散係数と土壌水分量

土壌水中の溶質分布は、水移動に伴う移流と、溶質の濃度差に伴う溶質分散により形成される。溶質分散には、水移動によってもたらされる水理学的分散と分子運動による分子拡散があり、降雨浸透のように水フラックスが大きい場合は、前者が卓越し、蒸発プロセスのように水フラックスが小さい場合は、後者が卓越する。乾燥地草原において、根による吸水や地表面蒸発によって土壌中の水が上向きに移動すると、土壌水中の塩も一緒に地表面近傍まで運ばれ、蒸発時に塩だけ地表に取り残され、大きな濃度勾配が発生し、分子拡散(溶質拡散)によって下方に移動する。このとき低水分における拡散係数が小さいほど地表面に集積した塩が下方に拡散せず、地表面に大きな濃度勾配が維持される。本研究では、乾燥地における塩の挙動を解析する上で重要な低水分域での溶質拡散係数と水分量との関係およびそのメカニズムを明らかにすることを目的とした。ここで、溶質拡散フラックス  $J$  を次式で定義する。

$$J = -\theta D_p \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

ただし、 $J$ : 溶質拡散フラックス、 $\theta$ : 体積含水率、 $D_p$ : 土壌中の溶質拡散係数、 $x$ : 空間座標である。また、水中における溶質拡散係数  $D_0$  を基準としたときの土壌中の溶質拡散係数  $D_p$  の値を相対拡散係数  $D_r$  と定義するとき、 $D_r$  は以下の実験式で表される ( $\alpha$ ,  $n$ : 実験定数)。

$$D_r = \alpha \theta^n \quad (2)$$

式(2) のべき定数  $n$  の値は、高水分領域を対象とした研究では 1~2 とされてきた。しかし、低水分になると、 $n$  の値は約 4 となり、 $\theta$  の減少によって著しく拡散が抑えられるとの報告がある (Mehta et al. 1995)。この原因として、土粒子の表面電荷により土壤中と同じ極性の溶質イオンが土粒子表面近傍から排除され拡散できなくなる (すなわち電気拡散二重層の影響) 可能性が指摘されている。しかし、これは実験で検証はされておらず真相は不明である。そこで、本研究では、土粒子の表面電荷の影響を受ける電解質 (一価の陽イオン: NaCl, 二価の陽イオン: CaCl<sub>2</sub>) と、影響を受けない非電解質 (グリセリン) の  $D_r$  と  $\theta$  の関係を測定した。この実験では、異なる溶液濃度で同一水分量の 2 つのカラムを連結し拡散させ、所定の時間が経過した後にカラムを切断して濃度分布を求め、解析解と比較することで溶質拡散係数を求めた。その結果、 $D_r$  と  $\theta$  の関係には溶質の電荷による明確な差は認められず、庄内砂丘砂、関東ローム土ともに低水分域での  $n$  は約 4 となった (図 1)。低水分域における溶質拡散係数の著しい低下は、土粒子の荷電によるもの (電気拡散二重層の影響) ではないことを証明した。一般に低水分では、わずかな  $\theta$  の減少が土壌水の連続性を著しく低下させ、溶質の拡散経路のボトルネックとなる部分の抵抗を著しく増加させるためであると考えられる。

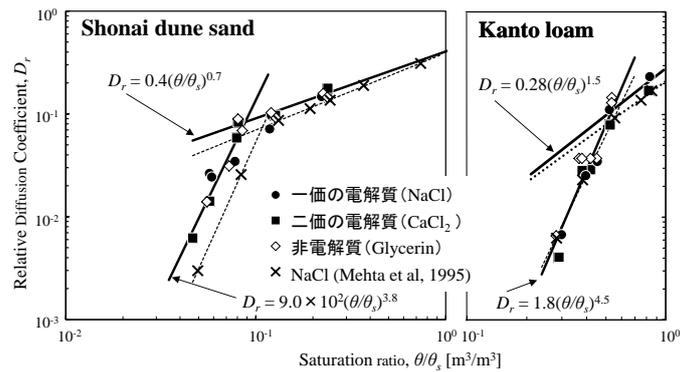


図 1 相対拡散係数 ( $D_r$ ) と飽和度 ( $\theta/\theta_s$ ,  $\theta$ : 体積含水率,  $\theta_s$ : 飽和体積含水率) の関係

## 第 II 部 モンゴル草原における土壌水分環境

寒冷乾燥地のモンゴル国では、年平均降水量 211 mm, 年平均気温はほぼ 0°C という過酷な環境の下、長い歴史にわたって自然草原を利用する遊牧が営まれてきた。本研究では遊牧の行われているステップ草原の土壌水分環境を明らかにするために調査研究を行った。

### (1) 典型的なステップ草原の土壌水分環境

ステップ草原における土壌水分環境の基本的な特徴を把握するため、土性、気象条件、植生条件が異なるステップ草原内の 4 地点で、植物の生育直前 (4 月下旬), 生育最盛期 (7 月下旬), 生育終了時 (9 月下旬) の含水比・マトリックポテンシャルの鉛直分布を土壌サンプリングにより測定した。表層から深度 20~40 cm までの土壌水分は、雨季であっても永久シオレ点よりも乾燥した状態 (-5~-8 MPa) からサイクロメータの測定限界である -0.2 MPa 以上の湿った状態まで

時期により大きく変動していた。一方、深度 20～40 cm 以深の土壌は、年間を通じて永久シオレ点 (-1.55 MPa) よりも乾燥しており、深度や時期による土壌水分の違いは見られなかった(図 2)。永久シオレ点付近の不飽和透水係数は、一般的に著しく小さい ( $10^{-2}$  mm/y 程度) ことから、年間スケールで見ても下方への浸透は無視できると言える。これより、乾燥地草原における土壌水分環境は、降水により根圏域の土壌水分の変動をもたらしつつも、ほぼ全てが蒸発散で失われ深部(深度 20～40 cm 以深)への浸透はほとんどない

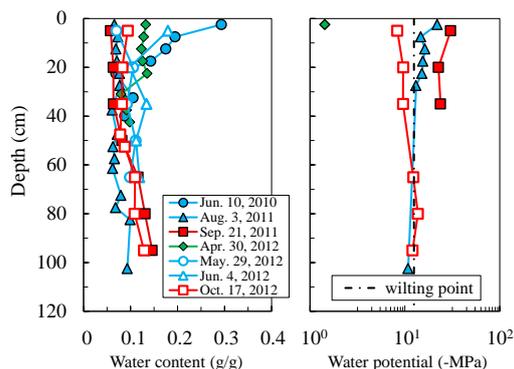


図 2 ステップ草原における左) 含水比, 右) マトリックポテンシャルの鉛直分布の一例

ことを示した。ステップ草原における植物は生育期に降雨後以外は根からの吸水は行わず、降雨後の水分が多いときのみ吸水し生育していると言える。

## (2) ステップ草原における浸透能と表面流の発生

ステップ草原の植生は、限られた降水により維持されているが、浸透能を上回る強度の降雨が発生すると、表面流が発生し、降水の一部は土層へ供給されなくなる。よって、ステップ草原の土壌の水分環境は、降水量のみならず土壌の浸透能の影響を受ける。ステップ草原においては、放牧の有無が浸透能に与えるとする報告が多数あることを踏まえ、本節では観測された降雨強度と浸透能との大小関係を放牧との関連性で解析し、表面流の発生に放牧が及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。草原内で隣接する放牧地と 7 年間禁牧区において定水頭インテグレート試験により浸透能を測定した結果、禁牧区の浸透能は放牧地の約 3.5 倍であり、禁牧により浸透能が回復することを示していた。調査地の 10 分間降雨強度を測定した結果、局地的に 15 mm/10min もの強い降雨が観測された。両区の浸透能(放牧地: 29.9 mm/h, 禁牧区: 99.8 mm/h)と観測期間(2012～2014 年)の 10 分間降雨強度を比較すると、放牧地では年に 1～2 回降雨強度が浸透能を上回っていたが、禁牧区では降雨強度が浸透能を超えることはなかった。観測期間中最大の降雨イベント時(78 mm)には、放牧地では表面流の発生が実際に観察されたが、禁牧区では観察されなかった。

## (3) 表面湛水による土壌水分の不均一性

降水量が比較的多い地域において、わずか数メートル離れた地点間で深部の土壌水分が著しく異なる現象が見られた。前節に示したように、調査地域では浸透能を超える豪雨時に表面湛水の生じることがあり、微地形の高い所と低い所とで浸透量に差が生じたと考えた。そこで、地表面が周りより 10～15 cm 程度窪んだ地点とそこから 2～3 m 離れた高い地点において観測期間中最

大の降雨（78 mm）の前後に土壌の含水比の鉛直分布測定を集中的に行い、当該降雨イベントによる土壌の貯水量増加を算出した。その結果、78 mm の降水量に対して、貯水量の増加は窪んだ地点で 137~146 mm 以上、高い地点で 73~74 mm であった（図 3）。これは、浸透能を超えた降雨が表面湛水したことにより、地表面の高い地点では、浸透量は表面流で失った分だけ降水量よりも減少し、地表面の窪んだ地点では、浸透量は周りから流れ込み湛水時間が長い分だけ降水量よりも増加したことを示している。以上から、降雨強度が浸透能を上回ると湛水が生じ、わずかな地表面の高低差によっても著しく不均一な浸透を生じることを明らかにした。さらに、窪んだ地点において根圏より深い深度まで水が到達した場合には、植物の利用できない水となるため、植物の利用できる水分量は、降雨が全て均一に浸透すると考えた場合の水分量より不均一な浸透の方が減少しうることを指摘した（図 4）。

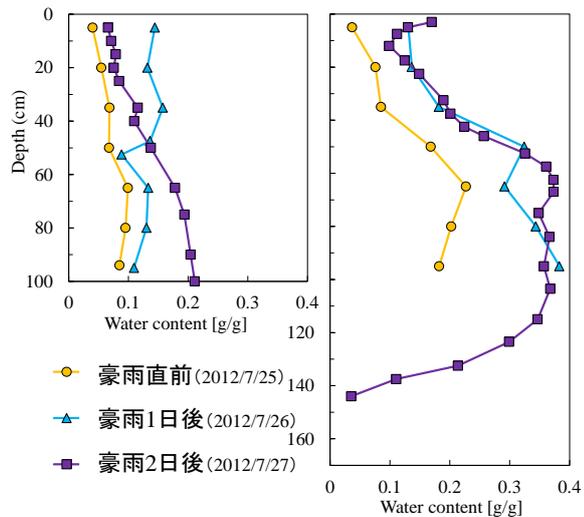


図 3 2012/7/25 の豪雨前後の含水比分布。左) 地表面が周りより高い地点、右) 地表面が周りより低い地点。

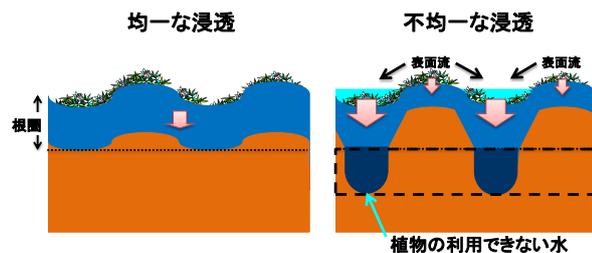


図 4 地表面のわずかな凸凹による降雨の浸透。左) 均一な浸透：降雨強度<浸透能、右) 不均一な浸透：降雨強度>浸透能、のときの降雨の浸透量の模式図

#### (4) 乾燥地における砂丘草原の土壌水分環境

モンゴル草原には一部砂丘地が広がっており、草原とは異なる植生がみられた。そこで砂丘草原における土壌水分環境を明らかにすることを目的とし、以下の観測を行った。前節での観測の対象としたステップ草原と隣接する砂丘草原で土壌水分およびテンシオメータ圧(砂丘草原のみ)の鉛直分布を連続測定した。さらに、両地点での蒸発量をマイクロライシメーター試験により測定した。砂丘草原における土壌水分量は全層においてステップ草原の 10 分の 1 程度と低い値であった。テンシオメータ圧の鉛直分布から算出した動水勾配は、深度 155 cm 以下への重力による下方浸透が降雨の有無に関係なく常に生じていることを示した。砂丘草原では、降雨の直後から乾燥層が形成され、ステップ草原と比べて蒸発が抑制されていた。このように、砂丘草原では、保水できる水分量は少ないものの、ステップ草原と比較して蒸発による損失は少なく、土層深部に根の吸水が可能な水分状態にある。したがって、砂丘地は根の深い植物は生育しにくい、が、根の深い木本類が低密度で生育できる土壌水分環境となっていることが確認された。