

学 位 論 文 題 名

Subsurface water movement in sphagnum bog

（ミズゴケ湿原における表層泥炭中の水分挙動）

学位論文内容の要旨

北海道サロベツ湿原ミズゴケ泥炭地において、地下水位の日変動およびその他の水文要素を観測した。さらにサロベツ湿原で観測された地下水位の日変動が、地下水の流入流出を遮断してもなお再現されるかどうかを再現実験によって確かめた。サロベツ湿原における野外観測では、降水直後の夜間における地下水位は低下した。その低下率は日毎に小さくなり、低下から上昇へと転じる場合もみられた。しかし観測地点のミズゴケ泥炭地は、降水涵養型の高位泥炭地であり、地下水の流入は考えられない。また、地下水位の夜間における低下率は、連続観測中では地下水位の低下と共に減少したが、観測期間全体から見ると、個々の低下率と地下水位との関係は見られなかった。一方、降水直後の低下率と直前に降った降水量には相関がみられ、直前により多くの雨が降った直後は、地下水位の低下はより大きかった。これらの結果は、従来用いられてきたタンクモデルによる地下水流モデルでは説明がつかない。

また、地下水流を完全に遮断した野外実験においても、夜間における地下水位は上昇するばかりでなく、降水直後には低下もした。このような夜間における地下水位の変動傾向は、サロベツ湿原における野外観測で得られた地下水位の変動傾向とほぼ一致した。夜間における地下水位低下は長く地下水流出によるものと考えられてきた。また、Godwin (1932)以来、夜間における地下水位上昇は地下水流入によるものと考えられてきた。本研究で得られた観測結果はこれらの解釈が適応できない場合があり、これらの現象を地下水流の影響なしで説明する新たな解釈が必要であることを示した。

一方、特徴的な土壌水分の日変化を不飽和帯において TDR (Time Domain Reflectometry) 法によって得た。土壌水分は深夜 0:00 頃から減少し始め、日中 12:00 頃から上昇し始めた。その変動幅は 1, 2% であった。このような特徴的な変動は、地下水位、地表面あるいは地温の変動からは説明できなかった。また、ライシメーターの重さの変化から換算した土壌水分量は、6:00 頃から減少し 18:00 頃まで減少し続け、次の日の 6:00 までほぼ一定であった。しかしライシメーター内に設置した TDR による土壌水分量は、やはり日中から上昇するという特徴的な変動を示した。この結果は、特徴的な土壌水分量変化が、単純なライシメーター内の水収支だけでは説明のつかない現象であることを示した。

ここで、地下水流の影響なしで起こる夜間における地下水位の変動や、特徴的な土壌水分量変化を説明する新しいモデルを泥炭の間隙構造に着目して開発した。ミズゴケ泥炭は、ミズゴケ細胞の内部も含めて様々な大きさの間隙が存在する。それらの間隙を水の浸透能に注目して 2 種類に分けた。1つは水が簡単に充填され、簡単に排水される粗間隙とし、体積比はおおよそ 0.4 であった。もう1つはその逆で、水が簡単には侵入せず、簡単には排水されない微細間隙とし、体積比はおおよそ 0.5 であった。微細間隙にはミズゴケの細

胞内およびミズゴケ同士が接触している小さな間隙、そして細胞の周りの吸着水が存在する間隙が考えられる。降水直後、粗間隙の水分ポテンシャルは微細間隙のそれよりも大きくなる。その結果、夜間に粗間隙から微細間隙へ水がゆっくりと流出し、夜間における地下水位はゆっくり低下する。ここで、直前に降った降水量が多ければ多いほど、水分ポテンシャル差は大きくなるので、その時の地下水位低下量はより大きくなる。これは本研究で観測された傾向と一致する。夜間における地下水位の低下率は、2つの間隙間における水分ポテンシャルの差が日毎に小さくなるにつれ小さくなる。そして水分ポテンシャルの差が0になると、夜間における地下水位の低下は0になる。その後、蒸発散によってより多くの水が粗間隙から失われることにより、粗間隙の水分ポテンシャルは逆に微細間隙のそれよりも小さくなる。そのため微細間隙から粗間隙へと水がゆっくり移動し、夜間における地下水位はゆっくり上昇する。このように、このモデルによって野外で観測された夜間の地下水位変動は矛盾なく説明できた。

次に粗間隙と微細間隙との水の交換を概算した。まず粗間隙からの水分損失の日変動を求めた。その結果、粗間隙からの水分損失は、日中ほとんどが蒸発散によって消費されていることがわかった。一方、夜間における粗間隙からの水分損失は、微細間隙の貯留量変化に使われた。粗間隙からの1日の水分損失量と日蒸発散量との差である微細間隙の1日の貯留量変化は、 $-1.9 \sim 2.1 \text{ mm day}^{-1}$ の範囲で変動した。これらの値は、その時の日蒸発散量と比べてもかなり大きな値であった。そしてその貯留量変化は、一連の連続観測の中では降水直後がもっとも大きく、その後低下し最終的には負の値をとる時もあった。これは、降水直後はいったん粗間隙に充填された水が、微細間隙へと貯留され、降水後数日経つと逆に微細間隙から粗間隙へと水が再分配されるということを意味する。つまりミズゴケ泥炭は地下水位の急激な変動を和らげる干渉帯の役割を果たしていた。

この間隙の2重構造モデルを用いて、不飽和帯における特徴的なTDRによる土壌水分量変化を説明した。ライシメーターによる土壌水分量変化との比較から、TDRによる土壌水分量変化は、全体の土壌水分量が変化していない場合にも上昇しているように観測することがわかった。これはTDR法の感度の特性による問題と考えられた。TDR法とは、土壌の比誘電率を量る器械である。通常状態の水の比誘電率は80程度で、土粒子の3程度や空気の1に比べはるかに大きいため、土壌水分量の変化を比誘電率の変化として、感度よく観測できる。しかし、水が土粒子に強く吸着されている時、水の比誘電率は最低で3程度と非常に小さくなる。

ここで、ミズゴケ細胞内などに拘束されている水が多く存在する微細間隙内の水は、自由度の高い水が多く存在すると考えられる粗間隙の水よりも、小さい比誘電率を持つことが考えられる。つまり、より比誘電率の高い粗間隙における水の変動をTDRは観測していることになる。それにより、午前中は蒸発散によって粗間隙の自由水がまず失われ、全体に占める粗間隙内の水の割合が少なくなった。結果として全体の土壌水分量の減少以上にTDRは土壌水分が減少したと観測した。この時、急激に粗間隙の水が減少したため、粗間隙と微細間隙との間に大きな水分ポテンシャル差が生じ、粗間隙へと水が流れ出した。その微細間隙からの水の供給と粗間隙の飽和帯からの水の供給との和が粗間隙からの蒸発散量よりも大きくなったためにTDRによる土壌水分量は日中から増加したと考えられる。このようにTDRの特徴的な変化は間隙の2重構造モデルとTDRの器械特性を考慮することで説明できた。不飽和帯における粗間隙と微細間隙の水の交換を考えると、日中の粗間隙からの水分損失を微細間隙が補っていた。つまり、飽和帯でのミズゴケ泥炭の働き同様、不飽和帯でも日中の過剰な水分損失を和らげる干渉帯としての働きをミズゴケ泥炭が果たしていた。

の後、蒸発散によって多くの水が粗間隙から失われ、粗間隙の水分ポテンシャルは微細間隙のそれよりも小さくなり、微細間隙から粗間隙に水がながれ夜間の地下水位は上昇する。このような粗間隙と微細間隙との水の交換量は、その時の蒸発散量に対し 50%前後におよぶかなり大きな値であった。微細間隙内への貯留量は降水直後に最も多く、数日後には逆に微細間隙から粗間隙へと水が流出した。

この間隙の 2 重構造を用いて、不飽和帯における TDR による土壌水分量変化を説明した。不飽和帯において、日中の粗間隙から過剰な水分損失が、微細間隙と粗間隙の間に水分ポテンシャルの差を生み、特徴的な土壌水分量変化をもたらしたと言える。

以上のように本研究で開発したミズゴケ泥炭層の粗間隙—微細間隙 2 重構造モデルとそれを用いたミズゴケ湿原表層水の挙動特性の解明は、半世紀以上前から未解決であった夜間地下水位微上昇現象に明解な解釈を与えた。また、従来は地下へ浸透したかあるいは湿原域外に流出したと見られていた降雨直後の地下水位低下量に相当する水のかかなりの部分がミズゴケ泥炭層内の微細間隙に蓄えられていることを明らかにした。これらの新しい発見は今後の湿原水収支の研究に大きな影響を及ぼすものと言える。

審査員一同は、これらの成果を高く評価し、また大学院課程における研鑽や取得単位なども併せ、申請者が研究者として誠実かつ熱心であり、博士(地球環境科学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと判定した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 平 川 一 臣

副 査 教 授 小 野 有 五

副 査 助 教 授 高 橋 英 紀

副 査 助 教 授 倉 茂 好 匡 (滋賀県立大学環境科学部)

学 位 論 文 題 名

Subsurface water movement in sphagnum bog

(ミズゴケ湿原における表層泥炭中の水分挙動)

高層湿原の地下水位が夜間に微上昇する現象は Godwin(1932)以来、世界各地の湿原で観測・解析が行われ、その原因は主として地下水の流入によるものとされてきた。しかし、非常に平坦な地形に発達した降水涵養型の高層湿原においてもこの現象が見られることから、地下水の流入以外に原因があるものと見て、その原因解明を含め、高層湿原表層水の挙動特性を明らかにする目的で本研究は行われた。

野外観測は北海道北部に位置するサロベツ湿原中央部に広がるミズゴケ泥炭地で行い、表層地下水位の日変動、秤量ライシメータを用いたミズゴケ層の水収支、TDR (Time Domain Reflectometry) 法による不飽和帯の土壤水分挙動などを観測した。

得られた結果によると降水直後の夜間における地下水位は低下し、その低下率は日ごとに小さくなり、上昇に転じる場合も見られた。しかし観測地点の地形は非常に平坦であるために地下水の流入は考えられない。また、ミズゴケ泥炭層の不攪乱サンプルを用い地下水の流入出を遮断した再現実験においても、降雨直後の夜間における地下水位は野外観測の結果と同様な変化傾向を示した。

TDR 法によって得られた不飽和帯の土壤水分は特徴的な変化傾向をしめし、深夜 0 時頃から減少し、日中 12 時ころから上昇した。ライシメータの重さから換算した土壤水分量の変動は、TDR によるそれと異なる傾向を示した。この結果は、特徴的な土壤水分量変化が単純なライシメータ内の水収支だけでは説明がつかない現象であることを示した。

以上の野外観測や再現実験で見られた諸現象を統一的に解釈するためにミズゴケ泥炭層の間隙を水分保持力に注目して 2 種類に分ける新しい泥炭層内水挙動モデルを開発した。その 1 つを地下水との水のやり取りが容易な水分ポテンシャルが -1kPa より大きな粗間隙とし、もう 1 つを -10kPa から -20MPa の水分ポテンシャルで維持されるミズゴケ細胞内を含む微細間隙とした。

降水直後、粗間隙の水分ポテンシャルは微細間隙のそれよりも大きくなる。その結果、粗間隙から微細間隙へと水が流れ、夜間の地下水位は低下する。そ