

学 位 論 文 題 名

Water transport process of air-vegetation-soil system in the Arctic tundra

（北極ツンドラにおける大気－植生－土壌系の水分輸送過程）

学位論文内容の要旨

北極域のツンドラの水循環過程は永久凍土、表面植生であるコケ類、表層の有機物層によって特徴づけられる。永久凍土層の存在は北極域の少ない降水量にも関わらず地下水位の高い状態を維持し、土壌内を湿潤に保つ役割を担っている。ツンドラの地表面を広範囲にわたって被覆するコケ類は葉面に気孔を持たず、蒸散を行わないといった特徴がある。また、表層の有機物層は空隙が非常に大きく、透水性は下層の無機土壌層に比べて非常に大きいことが知られている。

陸面からの水損失としての蒸発を考えた場合、ツンドラでは土壌が湿潤な環境にあるため、蒸発量は可能蒸発量に近くなると考えられる。しかしながら、高緯度に位置するため可能蒸発量が小さくなることに加えて、これまでの研究では可能蒸発量に対する実際の蒸発量の比である蒸発比が小さくなると報告されていることから、実蒸発量は小さな値を示す。また、維管束植物の植生地で水蒸気輸送に対する植物生理の影響を表す指標として用いられる地表面抵抗をツンドラに適用した結果、北極域の植物生理の影響が強く表れる維管束植物の植生地と同程度の地表面抵抗を示すことがこれまでにわかっている。蒸発比が小さくなることや地表面抵抗が大きくなることは、ツンドラにおいて蒸発抑制が生じていることが示唆されるが、植物生理の影響が小さいと考えられるツンドラの蒸発抑制のメカニズムはこれまで明らかになっていない。

本研究では東シベリアのツンドラにおける気象・水文観測の結果をもとに、北極ツンドラの水分輸送過程の特徴を明らかにすることを目的とした。特に水蒸気交換面が存在する表面植生であるコケ類を含む有機物層の役割に着目し解析を進めた。

観測は 1997～1999 年の夏期に、東シベリアのティクシ周辺部の湿潤ツンドラにおいて実施し、1999 年の集中観測から以下の結果が得られた。

- 1) 地下水位が地表から 5～20 cm と浅く、土壌内は湿潤な状態にあった。
- 2) 地表に供給される正味放射量のうち約 40 %が蒸発に使われ、その割合は夏期を通じて大きな変動を示さなかった。また、潜熱フラックスと顕熱フラックスと同程度の値であった。
- 3) 蒸発比は他の湿潤ツンドラと同様に小さく 0.44 という結果が得られた。

これらの結果は、土壌内が湿潤、かつ十分なエネルギーが地表に供給されたとしても、蒸発に使われるエネルギーは小さくなり、蒸発抑制が生じていることを示している。

蒸発抑制の指標として地表面抵抗を用い、抵抗を変動させる要因を考察した。地表面抵抗は観

測期間中、 $150 \sim 400 \text{ s m}^{-1}$ の間を推移し、6月下旬に最大値 600 s m^{-1} となった。また、大気の乱流輸送の抵抗である空気力学的抵抗に比べ地表面抵抗は 2~6 倍と大きく、水蒸気輸送に対して強い影響を及ぼしていることがわかった。さらに、地表面抵抗を変動させる要因を明らかにするために、大気条件(気温、日射、飽差)、表層の土壤水分量との比較を行った。その結果、地表面抵抗と大気側の条件とは関係がみられず、土壤水分量の減少にともない地表面抵抗が増加するという関係がみられた。これらの結果から、湿潤かつ植物生理の影響の小さいコケ類が優位なツンドラにおける蒸発特性は、表層の土壤水分変動によって変化する地表面抵抗の変動によって特徴づけられることが明らかになった。

地表面抵抗を変動させる表層の土壤水分量は、土壤内が湿潤であるにも関わらず下層に比べて相対的に小さく、表層の有機物層内には大きな土壤水分勾配が生じていた。有機物層内をコケ類や植物の根によって構成される表層の植物生活層と下層の泥炭層にわけ、それぞれの水分保持特性を求めた。この解析から得られた主要な結果を以下に示す。

- 1) 泥炭層に比べ植物生活層は水分の保持能力が低く、同じ水分ポテンシャルであっても植物生活層に保持されている水分量は相対的に小さくなることがわかった。
- 2) 植物生活層と泥炭層の二重構造をもったモデルを持った水分輸送モデルを構築し水分分布を求めた。その結果、植物生活層と泥炭層の境界で大きな水分勾配が生じ、観測された水分プロファイルが生じる要因は植物生活層の土壤構造にあることがわかった。
- 3) 二重構造モデルを用いて、地下水位の変動に対する地表面付近の水分量の関係をみた。地下水位が地表面付近にあるときは、地下水位の低下とともに土壤水分量が急激に減少したが、地下水位が構造境界以深になると緩やかな減少傾向を示した。この結果から、地下水位が泥炭層内にあるときには表層の土壤水分量は相対的に低くなり、融解層内に地下水面が存在している場合であっても表層は乾燥状態になることがわかった。

これらの結果から、表層の土壤水分量は植物生活層の土壤特性の影響を強く受けており、蒸発に寄与する水分量が表層付近で少なくなることが、地表面抵抗を変動させる要因であることが明らかになった。

さらに有機物層内の間隙径の鉛直分布を断面写真の画像処理から求めた。その結果、泥炭層に比べて植物生活層の平均間隙径は大きく、平均間隙径の差が植物生活層と泥炭層の水分保持特性の違いを生じさせる主要な要因であると考えられる。また、植物生活層の水分特性曲線と平均間隙径の関係から、空隙中には蒸発に寄与する毛管力によって保持されている水分量が少ないことがわかった。これは、蒸発が地表面ではなく土壤内部で起こっていることを示唆している。そこで、水蒸気の平均的な供給面から地表面までの水蒸気の移動経路の長さ(Vapor path length, VPL)を土壤水分量の関数としてパラメータ化し、水蒸気の分子拡散係数、地表面抵抗との関係からVPLの値を推定した。その結果、土壤水分量の減少とともにVPLが数mm程度増加する関係が得られた。このパラメータVPLの導入によって、従来の実験式よりも物理的に地表面抵抗を表現することが可能になった。

以上の成果は、これまで研究が不十分であった北極ツンドラの蒸発過程が、空隙が大きく水分保持能力の低い植物生活層の影響を受けていることを明らかにするとともに、地球温暖化に伴う気候変動の影響を強く受ける北極域の気候モデルの改良に貢献する新しい知見を与えるものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 大 畑 哲 夫
副 査 教 授 福 田 正 己
副 査 助 教 授 石 川 信 敬
副 査 サブリーダー 山 崎 剛

((独) 海洋研究開発機構・地球環境観測研究センター)

学 位 論 文 題 名

Water transport process of air-vegetation-soil system in the Arctic tundra

(北極ツンドラにおける大気-植生-土壌系の水分輸送過程)

北極域のツンドラの水循環過程は少ない降水量にも関わらず土壌表層が湿潤であることにより特徴付けられている。地下水位を高く維持させる永久凍土層の存在、広範囲にわたって表面を被覆するが葉面に気孔を持たないコケ類、また空隙が大きく下層の無機土壌層に比べて非常に大きい透水性をもつ表層の有機物層が大きな影響を持っていると考えられている。ここでの蒸発特性は高緯度に位置するため可能蒸発量が小さくなること、及び可能蒸発量に対する実際の蒸発量の比である蒸発比が小さい値をとることが一般的に知られている。しかしながら、蒸発比が小さくなることや地表面抵抗が大きくなること、つまり蒸発抑制に関する具体的なメカニズムについての研究は皆無に等しい。本論文は東シベリアのツンドラにおける気象・水文観測の解析により蒸発の特徴を見出し、水分輸送・蒸発モデルを用いて地表面抵抗の増大要因を説明することを目指した。

観測は 1997～1999 年の夏期に東シベリアのティクシ周辺部の湿潤ツンドラにおいて実施し以下の結果を得た。

- 1) 地下水位が地表から 5～20cm と浅く、土壌内は湿潤な状態にあった。
- 2) 地表に供給される正味放射量のうち約 40 %が蒸発に使われその割合は夏期を通じて大きな変動がなかった。また潜熱フラックスと顕熱フラックスはほぼ同程度の値であった。
- 3) 蒸発比は他の湿潤ツンドラと同様に小さく 0.44 であった。

これらの結果は、土壌内が湿潤でかつ十分なエネルギーが地表に供給されたとしても、蒸発に使われるエネルギーは小さく蒸発抑制が生じていることを示している。

次に蒸発抑制の指標として地表面抵抗を用い、抵抗を変動させる要因を考察した。観

測期間中、地表面抵抗は $150 \sim 400 \text{ s m}^{-1}$ の間を推移し、6 月下旬に最大値 600 s m^{-1} となった。また大気の乱流輸送の抵抗である空気力学的抵抗に比べ、地表面抵抗は 2~6 倍と大きかった。さらに、地表面抵抗を変動させる要因を明らかにするために大気条件（気温、日射、飽差）と表層の土壌水分量を比較すると、両者には特定関係はみられず土壌水分量の減少にともない地表面抵抗が増加するという関係のみが得られた。これらの結果からこのツンドラではコケを含む地表下の影響が顕在化し、地表面抵抗を変化させていることが推測された。これはコケの地表面被覆率が高いことと一致する。

次に地表面下の水分輸送・蒸発過程の検討を上記の観測データを用いて行った。その際、有機物層をコケ類や植物の根によって構成される表層の植物生活層と下層の泥炭層に分け、画像処理から間隙径の鉛直分布を求めた結果、泥炭層に比べて植物生活層の平均間隙径が大きいことが分かった。さらに土壌中の水分輸送についてモデルを用いて解析を行うと

- 1) 植物生活層と泥炭層の境界で大きな水分勾配が生じ、観測された水分プロファイルが生じる要因は植物生活層の土壌構造にある。
- 2) 融解層内に地下水面が存在している場合であっても表層は乾燥状態になることがわかった。

これらの結果から表層の土壌水分量は植物生活層の土壌構造の影響を強く受けており、蒸発に寄与する水分量が表層付近で少なくなることが地表面抵抗を大きくする第一の要因であることが明らかにした。次に最表層での蒸発過程を検討した。植物生活層の水分特性曲線と平均間隙径の関係から、空隙中には蒸発に寄与する毛管力によって保持される水分量が少なく、蒸発が地表面ではなく土壌内部で起こっていることを示唆する結果を得た。そこで、その距離を定量的に把握するために、水蒸気の平均的な供給面から地表面までの水蒸気の移動経路の長さ (Vapor path length、VPL) を考えその値を推算したところ、VPL は 10mm 程度であることが分かった。これが地表面抵抗を高くする第二の原因であることを明らかにした。

本研究の前半の観測と解析は、従来指摘されている傾向を東シベリアのツンドラについて追認するものであった。本研究の特徴は後半部にあり、コケに覆われた地表下の土壌構造特性を調べること、また水輸送モデルにより現象を解明することによって大きな地表面抵抗をもたらしている物理過程を具体的に説明することができた。これらの結果は、今後の北極域の陸面モデルの改良に貢献する新しい知見を与えると考えられる。

審査委員一同は、これらの成果を高く評価し、大学院課程における研鑽や取得単位などもあわせ申請者が博士（地球環境科学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。