

氏名・（本籍）	さい 三	ぐさ 枝	のぶ 信	こ 子
学位の種類	博 士 （理 学）			
学位記番号	理 博 第 1 3 0 4 号			
学位授与年月日	平 成 5 年 3 月 25 日			
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当			
研究科専攻	東北大学大学院理学研究科 （博士課程）地球物理学専攻			
学位論文題目	A Study on Evaporation from Bare Soil Surfaces （土壤面蒸発の研究）			
論文審査委員	（主査） 教 授 近 藤 純 正			
			教 授 田 中 正 之	
			教 授 鳥 羽 良 明	
			助 教 授 木 村 富 士 男	
			助 教 授 中 澤 高 清	

論 文 目 次

Chapter 1. Introduction

Chapter 2. A Parameterization of Evaporation from Bare Soil Surfaces

Chapter 3. A Model and Pan Experiments of Evaporation

Chapter 4. Field Observation

Chapter 5. Modeling the Evaporation with a Formula for Vaporization in the Soil Pores

Chapter 6. Summary and Conclusions

Acknowledgments

List of symbols

References

論文内容要旨

本研究の目的は、裸地面蒸発に伴うエネルギーと水の輸送過程を明らかにし、半乾燥裸地面からの蒸発量を推定する方法を確立することである。

地球の表面は、海面、雪水面、植生地、裸地などの、さまざまな地表面によって構成されている。地表面と大気間のエネルギー・運動量・水の交換過程は、それぞれの地表面によって異なる特徴を持つ。

土壌や岩石の露出した裸地面は、地球上の乾燥気候帯に、砂漠や灌木林として広く分布している。また、砂漠の周囲には、雨季・乾季の明瞭な季節変化を繰り返す半乾燥地帯が広がっている。半乾燥裸地面の大気に対する応答を考える場合、その最も大きな特徴は、土壌が十分に湿潤である時と乾燥した時で、地表面における蒸発効率が大きく異なることである。従って、裸地の地表面温度や裸地から大気への潜熱・顕熱供給量は、土壌の湿潤度によって大きく変化することになる。特に、裸地の湿潤度が大陸スケールで季節変動あるいは年々変動する場合、裸地の応答の変化は、グローバルスケールでの大気の循環場にも影響を及ぼすことが予想される。

また、近年では、砂漠の拡大が深刻な問題となり、乾燥・半乾燥地域の気象と水循環を理解することが緊急の課題となってきた。乾燥域の蒸発現象のもう一つの特徴は、蒸発量が気象条件よりむしろ土壌の保水性や水輸送機構に支配されていることである。しかし、乾燥した土壌中の水輸送と蒸発量は、土壌種類と土壌の物性に強く依存するために定量化が困難であり、蒸発量評価の有効な方法は現在でも確立していない。このため、土壌中の水輸送を理解し、裸地面蒸発量を予測することは、乾燥・半乾燥地域の気象現象と水循環を理解するうえで重要な課題となっている。また、砂漠化や裸地の拡大による地表面状態の変化が大気の循環場や気候に及ぼす影響を理解するためにも、裸地面蒸発の定量化が必要とされている。

従来、裸地面からの蒸発量は、土壌面湿潤度と呼ばれるいくつかのパラメータを用いて表現されてきた。1950年代までに、土壌面湿潤度 β （実際の土壌面からの蒸発量と、十分に湿った土壌面からの蒸発量の比）は経験的に土壌の含水率の関数と考えられ、土壌が十分に湿っているときには1、土壌が乾燥して蒸発が起きないときは0の値をとるとされた。この考え方は、Manabe (1969) らの大気大循環モデルに取り入れられ、近年まで広く用いられてきた。

一方、土壌表面の相対湿度に相当する土壌面湿潤度 α を推定する方法も考えられた。乾燥した土壌中では、水は土壌粒子の隙間に保持されて表面張力を持つため、土壌中の水蒸気圧は、自由水面上の飽和水蒸気圧より低い値をとる。そこで、表面張力と関係づけて熱力学的に得られる土壌中の湿度を、土壌表面の相対湿度 α と等しいとする方法や、経験的に α を含水率の関数として表す方法などが考えられた。

しかし、土壌表面湿潤度が理論的にどのような関数であるか、また含水率以外の気象条件に対する依存性などの点はこれまで不明であった。そこで本研究では、最初に、蒸発量と土壌表層の

含水率の関係を求め、これまで広く用いられてきた土壌面湿潤度についての考察を行った。

第2章では、土壌面蒸発のパラメータ化について述べる。まず、表層土壌から大気への水輸送を表現する、簡単な表層土壌モデルを提案した。ここで、表層土壌中の水輸送に対する抵抗を表すパラメータ F が新たに導入された。 F は土壌が湿潤で蒸発に対する抵抗が小さいと 0 に近い値をとり、土壌が乾燥し蒸発が起きにくくなるにつれて大きな値をとる。 F は土壌の体積含水率の関数であり、含水率は便宜的に土壌表層 0–2 cm の平均値とした。

F の値は、土壌種類ごとに小型の容器を用いた実験によって求められた。 F を用いた表層土壌モデルによって、これまで経験的に含水率のみの関数と考えられてきた土壌面湿潤度 α や β の一般的な関数形を導き出した。 α や β は含水率の他に、風速、大気の比湿、地表面温度にも依存することがわかり、この依存性は実験によって確かめられた。

表層土壌モデルによって、半乾燥裸地面の蒸発量は、いろいろな土壌の抵抗 F をあらかじめ求めておけば、風速、大気の比湿等の気象条件によって推定できることがわかった。

第3章では、土壌面蒸発のモデルと小型の容器を用いた実験について述べる。蒸発量の時間変化を予測するためには、土壌の下層から表層へ供給される水分輸送量を知る必要がある。そこで、表層土壌モデルと地中の熱・水輸送モデルを組み合わせた土壌の数値モデルを開発した。土壌は多くの層に分割され、土壌中の熱輸送と水分輸送は、熱伝導方程式および水分拡散方程式によって同時に計算される。

直径 30 cm の円形の容器と土壌を用いた蒸発実験を行い、モデル計算と実験による地温と含水率の鉛直分布、および蒸発量の時間変化を比較した。その結果、粒径の比較的小さい土壌については、モデル計算は実験結果と非常によく一致した。

粒径の大きい土壌については、一つの問題が残った。すなわち、これまで水の蒸発は土壌の表層部分で起きるものと仮定し、表層の含水率と季節条件によって各時刻の蒸発量を推定する方法を用いてきた。ところが、粒径の大きな砂地や岩石地帯などの多孔性の地表面では、乾燥が進むにつれて水は土壌の深いところで蒸発し、土壌の空隙内を通過して大気中へ拡散してくるようになる。その結果、蒸発量は表層の含水率にはよらず、地中から拡散してくる水蒸気量に支配されるようになる。ところが現在のところ、地中での水の気化や、地中深くからの水蒸気拡散による蒸発過程を表現する方法は確立していない。

そこで、第4章では、砂地における水輸送を詳しく知る目的で行った野外観測について述べる。従来、裸地面蒸発の観測には、含水率の鉛直分布を観測し、土壌の水収支から蒸発量を求める方法（水収支法）と、地上気象観測を行い、地表面から大気へ輸送される水蒸気フラックスを測定する方法（熱収支法、渦相関法等）がある。今回の観測の特徴は、含水率と地温分布、および気象要素を詳細に観測し、水収支法（東京大学グループ担当）と熱収支法に基づいて蒸発量を求めたことである。すなわち、蒸発量は、土壌中と大気中で同時に独立の方法で評価された。

観測期間は 1990 年の 8–10 月、観測場所は東京大学生産技術研究所千葉実験所内の広さ約 30 m × 30 m の裸地である。土壌は、成田砂と呼ばれる細かい砂である。

観測期間中、降水による土壌の湿潤化とその後数日間の乾燥化が繰り返され、蒸発量および地温・含水率分布の時間変化が観測された。水収支法と熱収支法による蒸発量はほぼ一致し、観測の妥当性が示された。これまで裸地の水輸送と熱輸送を、同時に長期間にわたって連続観測した例はごくわずかであり、この観測により、今後裸地面蒸発に関する研究を行う上での貴重なデータが得られた。

第5章では、土壌空隙内の水の気化と水蒸気拡散を取り入れた土壌の数値モデルについて述べる。ここでは土壌中での水の気化のしやすさを表すパラメータを導入し、土壌中各深さでの水の気化を表現する方法を開発した。

このモデルでは、土壌を固体粒子と空隙から成る多孔性の物質と考え、水の気化は含水率により、土壌中どの深さでも起きると考える。多孔質中の水蒸気拡散は、土壌粒子による障壁効果を考慮に入れた水蒸気の拡散方程式によって表現される。土壌中の熱輸送と液体水輸送は、それぞれ熱伝導方程式と液体水分拡散方程式によって表現される。気化のしやすさを表すパラメータを含むいくつかの土壌パラメータの値は、野外観測結果と室内および野外実験結果を用いて求められた。モデル計算による土壌中の温度・含水率の鉛直分布と蒸発量の時間変化は、野外観測結果をよく再現した。

本研究の土壌多層モデルでは、土壌中の空気比湿度分布と地表面の比湿度はモデルの中で予測することができる。従来の研究では、土壌空隙内の空気は常に土壌水と平衡状態にあると仮定され、土壌中の湿度は含水率と地温によって決定されると考えられていた。しかし本研究の土壌モデルと観測結果によると、日中、表層土壌中（今回の観測条件では表層1~2 cmまで）の湿度は、平衡状態にある場合の湿度より低くなることがわかった。これは、蒸発期間中は表層土壌から大気へ水が連続的に輸送されるため、空隙内の空気と土壌水が平衡状態に達し得ないためと考えられる。

この結果は次のことを示唆する。すなわち、多孔性の土壌では、熱と水の交換は土壌表面だけでなく、いろいろな深さの土壌中で多層的に行われている。そこで、乾燥の進んだ砂地や団粒の発達した土壌からの蒸発量推定では、特に土壌中の水の気化と水蒸気拡散量を正確に理解することが重要である。また、従来の土壌モデルは地中の水蒸気拡散を評価することができないために、非常に乾燥した土壌や多孔性の土壌を扱う場合、蒸発量推定に誤差を生むことがわかった。

第6章には、本研究によって得られた主な結果をまとめる。

まず、簡単な表層土壌モデルによって、地表面湿潤度の一般的な関数形が得られた。地表面湿潤度は、土壌の含水率だけでなく、大気条件にも依存することがわかった。地表面湿潤度の関数形は、簡単に裸地面蒸発量を評価したい場合に利用することができる。

次に、土壌モデルの検証と地中の水輸送機構の解明のため、小型の容器を用いた蒸発実験と、砂地における熱収支・水収支同時観測を行った。特に、後者の野外観測では、長期間にわたる土壌の熱輸送・水輸送の観測データが得られた。

最後に、土壌空隙中の水の気化と水蒸気拡散を表現する方法を提案し裸地面蒸発を、地中から

大気への連続した拡散現象として表す数値モデルを開発した。

今後は、水の気化に対する抵抗をいろいろな土壌または地表面について知ることが必要である。気化に対する抵抗は、地表面を構成する物質中の空隙の大きさと複雑さ、例えば土壌の粒径組成と大きく関係することが予想される。

また、本研究で開発した土壌モデルは、今後適切な単純化を行うことによって、大気の大規模モデルや大循環モデルの陸面過程に組み入れることが可能である。

本論文で提示した土壌中の水の気化と水蒸気拡散の表現方法は、将来、土壌からの蒸発現象のみならず、広く多孔性の地表面から大気への蒸発を表現する場合にも応用可能であると考えられる。例えば、従来の土壌モデルで表現できるのは一様な密度の土壌に限られていたが、将来、ひび割れの生じやすい土壌や、岩石地帯、都市からの蒸発にも本研究の考え方を応用できるのではないかと考えている。

論文審査の結果の要旨

砂漠を含む裸地面の特徴は、土壌が十分に湿潤なときと乾燥したときで、地表面における蒸発効率が大きく異なることである。このような地表面からの蒸発量を定量的に表す方法はまだ確率されていなかった。

三枝信子提出の論文は、土壌空隙内における水蒸気輸送の抵抗の概念をはじめて提出し、土壌面蒸発の定式化を行った。抵抗は、主として表層土壌の含水率と風速などの関数で表わされ、土壌の種類により異なることも明らかにした。さらに、土壌の乾燥化が進んだ状態では、土壌中の水分は比較的厚い層内で気化し大気へ輸送され、土壌内の相対湿度は大気湿度と蒸発速度に依存することを明らかにした。これらを取り入れ、液体水と水蒸気輸送の抵抗を組み合わせた蒸発モデルを確立した。このモデルは画期的なもので、野外観測における土壌面からの潜熱輸送量と土壌水分の時間変化をよく説明することができた。

これは本人が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。よって、三枝信子提出の論文は博士（理学）の学位論文として合格と認める。