

【16】

氏 名 (本 籍)	樋 口 政 男 (山梨県)
学 位 の 種 類	理 学 博 士
学 位 記 番 号	博 甲 第 16 号
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 53 年 3 月 25 日
学 位 授 与 の 要 件	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻 の 名 称	地 球 科 学 研 究 科 地 理 学 ・ 水 文 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	不 飽 和 帯 に お け る 水 の 挙 動

論 文 の 概 要

不飽和帯の水の挙動は、大気中の水と地下水をつなぐ過程として、水循環系の中で重要な位置を占めている。

本研究の目的は不飽和帯と接地気層の水文現象を一体として取り扱い、降雨の浸透・蒸発・地下水への降下浸透の過程を定量的に把握することにある。そこで、まずこれらの過程の実体を野外観測によりとらえ、観測によりとらえられた現象を数値シミュレーションによって、理論的に再現し、一般化を行う。次に、不飽和帯の任意の深度において水の流束の定量的評価を行う。

降雨は地表面を媒介として、浸透・蒸発・表面流出にわかれるが、本研究の主目的は地中に浸透した水の挙動の解明にあるので、現象を単純化するため、表面流出が無視できる平坦な東京都清瀬市中清戸の畑地を研究の対象に選び、地表面における降雨の浸透、蒸発、乾燥過程に伴う不飽和帯の水の挙動の解明を試みた。

東京都清瀬市中清戸の野外観測地は標高約 46 m の平坦な洪積台地上に位置している。観測地点の地層層序は厚さ約 6 m の関東ローム火山灰層の下に、武蔵野礫層が分布する。

野外観測により、不飽和帯の水の挙動をとらえるため、水のエネルギーレベルを測定すると共に、降雨量を測定し、同時に蒸発量を算定するための観測を実施した。観測は第一次観測（1977年4月26日から5月4日）と第二次観測（同年8月16日から9月18日）の2回行った。

野外観測は不飽和帯と接地気層について実施した。不飽和帯については、テンシオメーター（12点）、地温計（6点）、接地気層については、10分間平均風向風速計（1点、5点）、温湿度計（3点）、全天日射計、放射収支計、気圧計、及び雨量計を設置した。

テンシオメーターから求めた毛管ポテンシャルに、ある深度（第一次観測では深度 300 cm、第二次観測では深度 450 cm）を基準点として求めた重力ポテンシャルを加えた全ポテンシャルの勾配から液

状水の流束の方向を決定した。

流束は Darcy の式などから、原理的に差分で求めることができるが、野外観測においては測定上の問題として、技術的に近接して多数の測器を埋設することが非常に困難である。従って、野外観測においては、全ポテンシャルの勾配がほぼ 1 に等しい深度 148 cm 以深のうち、深度 300 cm における流束だけを求め、他の深度では流束の方向だけを決定した。

野外観測の結果、不飽和帯における液状水は蒸発・乾燥、降雨・浸透に伴い、極めて動的に挙動していることが明らかになった。すなわち、(1). 深度 100 cm 以深は常に下向きの流束である。(2). 深度 148 cm 以深の全ポテンシャルの勾配はほぼ 1 である。(3). 蒸発による乾燥化の影響は深度が増すにつれ遅れがあり、深度 100 cm まで上向きの流束になるのに約 8 日を要する。(4). 地雨性の降雨の場合、深度 50 cm まで下向きの流束が現われるのに約半日を要する。(5). しゅう雨性の降雨の場合、比較的早く全層が下向きとなり、少なくとも深度 450 cm までサクションが減少し、浸透水の浸入が認められる。蒸発による乾燥化が進むと、深度 100 cm 以浅に水分の発散域が現われ、この発散域の出現時刻は深度が増すにつれ遅れる。(7). 蒸発による乾燥化が継続した後の降雨の場合、深度 100 cm 以浅に収束域が現われ、深度 100 cm 付近に発散域が残り、約 1 日経ると、全層下向きの流束となり、収束域も発散域もなくなる。(8). 深度 300 cm における水の流束は大雨時には、乾燥時 ( $2.6 \text{ mm day}^{-1}$ ,  $950 \text{ mm year}^{-1}$ ) の 4 倍にも増える。

蒸発・乾燥過程、降雨・浸透過程の水の挙動を定量的に把握するためには、特に地表面付近における蒸気状水も含めた水の流束を評価することが重要である。数値シミュレーションにより、理論的に不飽和帯の水の挙動を再現することができれば、任意の地点における水の流束を評価できることになる。

数値シミュレーションは蒸発・乾燥過程と降雨・浸透過程に分けて行い、前者を 2 例、後者を 4 例行った。

脱水過程の水分特性曲線（毛管ポテンシャルと体積水分量の関数関係）は深度 3 cm, 25 cm, 50 cm, 75 cm, 及び 90 cm から採土した土壌サンプルについて、吸引法と遠心法を用いて求められた。不飽和透水係数は Jackson の方法を用いて、水分特性曲線と飽和透水係数とから推定した。

蒸発・乾燥過程の数値シミュレーションは快晴時を対象にした。

蒸発・乾燥過程の基礎方程式は毛管ポテンシャルと不飽和透水係数が体積水分量の一価関数でなく、ヒステリシスが存在する場合にも成り立つように、Philip et al. の方程式を修正した式である。また、この式は野外観測において、体積水分量より毛管ポテンシャルの方が正確、かつ迅速に測定できる点も考慮した。

地表面での境界条件は次のように決めた。観測結果によると、風速の垂直分布は対数法則が成り立っているため、傾度法によって、大気への顕熱の流束と大気への潜熱の流束を求めた。地中への顕熱の流束は観測で得られた正味放射量、大気への顕熱の流束、大気への潜熱の流束から求めた。

深度 300 cm での境界条件は次のとおりである。水の流束については観測から算定される値を与え、熱の流束はないとした。

初期条件は1977年4月30日午前10時の毛管ポテンシャルと地温の垂直分布を与え、5月1日午後8時まで計算した。また、1977年5月3日午前8時から午後10時までも同様に計算された。その結果、計算値は観測値と非常によく対応しており、不飽和帯の水の挙動を再現できることが判明した。従って、任意の深度の水の流束を評価できる。水の流束を評価した結果は次のとおりである。(1). 深度50 cm以浅の全流束は蒸発・乾燥、降雨・浸透により大きく変化する。(2). 深度50 cmから150 cmの間の全流束はほとんど0に等しい。(3). 深度150 cm以深では常に全流束が下向きで、下層ほど全流束の大きさが増す。(4). 全流束の大部分は均一温度でのポテンシャルの勾配による液状水の流束である。(5). 地温変化の大きい日中や夜間においては温度の勾配による流束も大きく、日中は下向き、夜間は上向きとなる。(6). 温度勾配による蒸気状水の流束は地表面近くほど大きく、深度が増すにつれて小さくなる。(7). 温度勾配による液状水の流束は、温度の勾配による蒸気状水の流束とは反対に、深度が増すにつれて大きくなる。(8). 均一温度での蒸気状水の流束は、全層で小さく無視する。

降雨・浸透過程の数値シミュレーションは地雨性の降雨としゅう雨の降雨を対象にした。降雨・浸透過程の基礎方程式は Richards の式である。地表面での境界条件は観測から得た降雨量を与え、深度450 cmでの境界条件は蒸発・乾燥過程と同様に算定した流束を与えた。

吸水過程について、水分特性曲線と不飽和透水係数を求めることは技術的に困難であるので、脱水過程の値を使った。

地雨性の降雨の場合のシミュレーションは1977年8月22日0時の毛管ポテンシャルの垂直分布を初期条件として、8月23日0時まで計算された。他の例は8月26日0時から8月27日0時までである。計算の結果は観測値と非常によく対応しており、不飽和帯の水の挙動を再現できることが判明した。

しゅう雨性の降雨・浸透過程のシミュレーションは2例行った。1例は1977年8月16日12時の毛管ポテンシャルの垂直分布を初期値として、8月17日12時まで計算した。他は9月8日0時を初期値とした計算である。後者の計算において、不飽和透水係数を深度3 cm層で8倍、深度25 cm層で1.6倍に修正すると計算値と観測値の一致度は著しく向上することがわかった。これは、割れ目流の可能性および湛水条件下の急速な降下浸透の可能性を暗示している。

## 審 査 の 要 旨

気象現象の推移に伴う関東ローム層中の水分の挙動を野外観測によってとらえ、観測で得られた降雨の浸透、蒸発、地下水への降下浸透の各過程を数値シミュレーションで理論的に再現することにより、不飽和帯の水の流束分布の時間的変化を定量的に評価した研究である。

降雨は地表面を媒介として、浸透、蒸発、表面流出にわかれるが、この研究の主目的は地中へ浸透した水の挙動の解明にあるので、現象を単純化するために、表面流出を無視できる平坦な地域を研究

対象に選んでいる。研究地域に選ばれた清瀬市郊外の畑地は、武蔵野面に区分される平坦な洪積台地上にあり、台地面を形成している武蔵野礫層を厚さ約 6 m の関東ローム層が覆っている。

土壌水の挙動をとらえ、数値シミュレーションを行うには、不飽和帯と接地気層を一体とした観測データが必要である。そのため前記の観測地点で通算 40 日間、毛管ポテンシャル、地温、風速、気温、湿度の各鉛直プロファイルと、正味放射、全天日射、アルベド、降雨の観測が実施された。その結果、不飽和帯における液状水の挙動は蒸発による乾燥と降雨による浸透の影響を受けて、次のように極めて動的な挙動を示すことが明らかにされた。

- 1) 深度 100 cm 以深の水の流束は気象条件のいかんにかかわらず常に下向きである。
- 2) 深度 148 cm 以深の全水分ポテンシャルの傾度は常にほぼ 1 になる。
- 3) 蒸発による上向きの流束の出現時期は深度の増加とともに遅れ、深度 100 cm まで及ぶのに約 4 ~ 8 日を要する。
- 4) 地雨性降雨の場合は、深度 50 cm まで下向きの流束に変化するのに約半日を要する。
- 5) しゅう雨性降雨の場合は、約 1 日後に全層の流束が下向きに変化し、サクシジョンの減少状態から、少なくとも深度 450 cm まで浸透水の降下が確認された。
- 6) 蒸発による乾燥が続いた後に降雨があると、深度 100 cm 以浅に水分の収束域が現われ、深度 100 cm 付近に発散域が残るが、約 1 日経過すると全層の流束は下向きになり、収束域も発散域も消失する。
- 7) 深度 300 cm での水の流束は大雨時には蒸発時の 4 倍にも増加する。

次に、不飽和帯における水分移動の鉛直一次元数値シミュレーションが行われた。基礎方程式として、降雨・浸透過程については、Richards のポテンシャル方程式を、乾燥・蒸発過程については液状水と蒸気状水の流れを考慮した拡散型のポテンシャル方程式を用いている。地表面の境界条件として、乾燥過程については気象観測より得られた潜熱と顕熱流束が、浸透過程については降雨量が、また地中の下側の境界条件としては不飽和透水係数と全水分ポテンシャル傾度の積で求まる流束が与えられている。不飽和透水係数は Jackson の方法による推定値を用い、水分特性曲線は室内実験で求めている。

数値シミュレーションは、快晴時の蒸発過程、地雨性降雨による浸透過程、およびしゅう雨性降雨による浸透過程について各 2 例ずつ行われた。しゅう雨性降雨を除くと、観測値と計算値はよく一致し、観測からは知ることのできない以下のような水の挙動が明らかにされた。

- 1) 深度 50 cm 以浅の全流束は蒸発および浸透の影響を受けて大きく変動する。
- 2) 深度 50 cm から 150 cm の間の全流束は、乾燥時にはほとんどゼロに等しくなる。
- 3) 深度 150 cm 以深の全流束は常に下向きで、下層ほど大きく、各深度からの一様な排水を暗示している。
- 4) 全流束の大部分は均一温度での全水分ポテンシャル傾度による液状水の流束である。

しゅう雨性降雨による浸透のシミュレーションについては、乾燥割れ目や土壌空気役割の定式化が困難で、今後の問題として残されている。

不飽和帯の水の挙動は、大気中の水と地下水をつなぐ過程として水循環系の中で重要な位置を占めているが、従来までは室内実験や理論的研究が多く、自然界における実態の解明が遅れている。

著者は不飽和帯と接地気象の水文現象を一体として取り扱い、短い時間間隔の継続観測を実施してその実態を明らかにしている。また観測で得られた現象を数値シミュレーションによって再現し、地中の水の流束の定量的評価を行っている。

著者の試みたこれら一連の成果は、微気象学、土壌物理学、地下水学の境界部分の空白を埋め、水文学の今日的な研究課題の一つである地下水涵養機構の研究に新しい手法を導入したのものとして高く評価することができる。

上記論文審査と最終試験の結果、著者は理学博士の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。

昭和53年2月17日

主査 筑波大学教授 理学博士 山 本 荘 毅

副査 筑波大学教授 理学博士 市 川 正 巳

副査 筑波大学教授 理学博士 吉 野 正 敏

副査 筑波大学助教授 理学博士 榎 根 勇