

## 論文の内容の要旨

論文題目 全球における土壌水分及び地下水位の  
気候学的平衡状態に関する研究  
(Study on the climatological equilibrium state of soil  
moisture and groundwater table on global scale)  
氏 名 吉田 奈津妃

本論文は、土壌水分と地下水位の平衡状態が気候や土地被覆、土壌タイプなどによってどのように決まっているのかを水文気候学的に明らかにすることを目的としている。土壌水分と地下水は陸域水循環に重要な役割を果たす貯留量である。地球上の水は太陽からの熱の伝達とともに循環している。地表面に降った降水は蒸発散、流出に分配される。土壌水分・地下水は降水から蒸発散と流出への水の配分に影響を与え、放射から潜熱と顕熱の分配に影響を与える。土壌水分や地下水の果たす気候システムへの役割に関して理解が進む一方で、長期の気候によって土壌水分や地下水位はどのように説明できるのかに関する知見は少ない。全球の水収支をよりの確に把握するための手法として、陸面水文モデルでは初期化の方法が用いられている。水文気候システムの平衡状態に関して、どのような定義が妥当であるか議論が続いており、とくに陸面—地下水結合モデルが開発され、地下水位の平衡状態が論じられるようになったのは近年である。流域、地域スケールがほとんどで全球スケールを扱った研究は少ない。また反映している気候は数十年程であることが多く、地下水の動態を対象とするには数百年程度の時間スケールでの議論も必要である。

本論文では、地下水を陽に考慮した陸面水文モデルを用い、同じような気候の繰り返しによって決まる土壌水分および地下水位の平衡状態について気候学的平衡状態という概念を提案する。また、そうした平衡状態は存在するのか、地下水位の初期状態は平衡状態にどのような影響を与えるか、地下水位や土壌水分のモデルの推定は観測とどの程度対応しているのかを明らかにする。また、気候条件で平均的な土壌水分や地下水位がどのように説明できるか、土壌水分の平衡状態を気候から直接推計することはできるか、という議論を行った。全球で気候と土壌水分および地下水位の平衡状態について整理することは、これまで地点や地域特有とされてきた議論に一般性を提供できるため、第一に水文気候学の知見への貢献、第二に陸域水循環のモデリングに活用できる有用な情報を提供できると期待できる。

各章の要旨を以下にまとめる。

第2章では、同じような気候が繰り返されたときに、一定の変動を示す状態を気候学的平衡状態と定義した。次の三つの意義がある。

1. 自然状態の同じような気候が長らく続いたと仮定した場合の、水文気候のシステムにおける平衡状態を議論する枠組みになる。
2. 土壌水分と地下水位に関する水文気候学の知見への貢献となる。
3. 水文シミュレーションの初期化手法にも役に立つ。

第3章では、地下水の動態を考慮した陸面水文モデルに関して、土壌過程の検討と改良を行った。TOPMODELで考案された飽和透水係数の減衰式と地形を考慮した全球パラメータを適用した。標高データに基づいた現実的な基底流出の制約を設けた。さらに、土壌の水分移動特性モデルを変えた場合に、地下水位と土壌水分の平衡状態へ与える影響を検討した。水分移動特性モデルを変えたことで、地下水位と土壌水分の分布にはシフトがみられたが、降水と地下水位との関係はどちらも同様の傾向を示し、ヨーロッパでは観測とも整合していた。改良および検討した陸面水文モデルによって推定した地下水位、流出量、土壌水分量を観測と比較して検証した。井戸観測に比べて、モデルによる地下水面までの深さが $\pm 20$ [%]誤差内の地点は全体の9.8[%]で、36[%]の地点では20[%]以上深く推定し、64[%]では浅く推定していることをグローバルの分布で定量評価した。モデルで推定した地下水位は観測値との誤差はあるものの、降水と地下水位の関係はモデルと観測で同様の傾向を示しており、気候値で議論するには十分であると判断した。モデルによって推定した年間流出量および表層の土壌水分量は観測値と整合しており、本研究で解析に使用するには妥当である。

4章では、陸面水文モデルに異なる地下水面の初期状態を与えた鉛直次元計算を行い、地下水面と土壌水分の平衡状態に与える影響を調べた。検討した7ケースのうち、地下水面を $-11$ [m]から計算した場合とそれ以外の場合では異なる平衡状態となった。この違いは、土壌の物理量の解析から、土壌の飽和度が異なることによって、地表面から地下水面までの水フラックスの形成が異なることによると考えられる。また、土壌が湿潤な状態から始めた場合と乾燥した状態から始めた場合では、土壌の初期状態が地下水位の平衡状態に影響する地域とそうでない地域があった。湿潤な地域では、土壌水分量の初期状態による平衡状態への影響はほとんど生じないが、乾燥域や凍土域では初期の地下水位が長い期間保存されており、平衡状態に影響している可能性がある。さらに、凍土域においては、地下水位の初期状態や計算を始める季節によっても、平衡状態は異なり、土壌中の融解、凍結過程によると考えられる。乾燥域や凍土域では長期間前の土壌水分や地下水位の状態が現在気候下の状態を知る上でも重要であると推察される。

第5章では、気候学的平衡時間の概念を提案し、水文気候としてどのような意義があるかを論じた。気候学的平衡時間は、湿潤域では短く、乾燥域では長い傾向が確かめられた。気候学的平衡時間を気候の長さと比較することで、気候に対する地下水位の平衡状態の反応感度のような水文気候の特徴を反映しているのではないかと考えられる。気

候学的平衡時間が短い地域は気候が変動した場合の地下水位の平衡状態への反応も敏感で、気候変動の影響を受けやすい地域であり、気候学的平衡時間が長い地域は気候が変動した際の地下水位の平衡状態への反応が緩慢なために、気候変動の影響をすぐには受けにくい地域であると推察される。

第6章では、第2章で定義した気候学的平衡状態となった地下水位と土壌水分量を用いて、土壌タイプと土地被覆ごとに分類し、気候条件との関係を調べた。ここでの気候条件とは、降水、蒸発散、降水と蒸発散の比、差分、乾燥指数を指している。土壌水分量は根圏では土地の被覆が森林か、草原かによって、二つに分けることができる。これは根の存在比率が異なるからであるが、植生の根による吸い上げの違いが根圏の土壌水分量に反映されているのではないかと考えられる。また、土壌タイプや土地被覆ごとに分類することで、一部は気候と線形関係で説明できることを示した。アマゾンの土地被覆、広葉常緑樹林を例として、降水から線形回帰した体積含水率と陸面水文モデルで平衡状態となった体積含水率は整合している。このことにより、現在気候における土壌水分の平衡状態は土地被覆、土壌タイプによって分類することで、降水から線形回帰により簡易に推定できる方法を提案した。さらに、地下水位と気候には、地下水位が10[m]より浅い場合では、エネルギーが増えるにつれて、蒸発散量も増え、地下水位も深くなるというように、エネルギーによってコントロールされている可能性がある。またその変化の仕方は土壌や土地被覆によって異なる。さらに、蒸発散量が得られる水分量によってコントロールされている場合では、地下水位は得られるエネルギーに敏感に反応している可能性がある。

第7章に、全体のむすびとして、結論をまとめた。