

氏名	アブル ハサン ムハマド バディウル アラム Abul Hasan Mohammad Badiul Alam
学位(専攻分野)	博士(農学)
学位記番号	農博第1609号
学位授与の日付	平成19年3月23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	農学研究科地域環境科学専攻
学位論文題目	Development of Distributed Rainfall- Runoff Model with Soil Moisture Model and Its Parameter Identification (土壌水分モデルを用いた分布型降雨・流出モデルの開発とそのパラメータ同定)
論文調査委員	(主査) 教授 河地利彦 教授 三野 徹 教授 谷 誠

### 論文内容の要旨

本論文は、蒸発散や浸透といった水文過程を動的に扱うことのできる土壌水分モデルを採用した分布型降雨-流出モデルを開発し、併せてモデルに含まれるパラメータの同定手法について論及したものである。これまでに国内外において様々な分布型の短期・長期流出モデルが提案されている。その中で、特に長期流出モデルにおいては、表層土壌の水分状態によって蒸発散量や浸透量が変化することから、その現象のモデル化の重要性が指摘されてきた。本研究では、こういった現象の経時変化をモデルに組み入れるため、集中型流出モデルで用いられていた土壌水分モデルを分布型モデルの各セルに適用し、地表水と地下水の水平流動を分布型タンクモデルで表した分布型降雨-流出モデルを開発している。また、分布型モデルの適用において必要となる膨大な数のモデル・パラメータの同定を効率よく行うため、既存の知見を活用することのできるファジィ推論とファジィ集合を規定するメンバシップ関数のパラメータを、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて推定するモデル・パラメータの同定システムを開発している。さらに、継続的に流出量が計測されている流域において、同定期間ごとに異なった値で得られるモデル・パラメータを、ベイズ推論を用いて不確実性を考慮しながら更新していくシステムを提案している。

第1章は緒論であり、人類に対する水資源の重要性を再確認した上で、持続的な農業生産を行うための水資源管理における水文循環モデルの果たすべき役割を指摘し、本論文の目的と意義を示している。

第2章では、既往の分布型流出モデル並びにモデル・パラメータ同定の重要性とその不確実性について概説し、第3章から第5章において提案する分布型降雨-流出モデルとそのモデル・パラメータの同定手法の開発における方向性を示している。また、モデル開発において必要となる地理情報システム(GIS)とファジィ理論について要約している。

第3章では、本研究の核となる分布型降雨-流出モデルの構築と実流域への適用を行っている。まず、モデル全体の構成を示し、流域のセル分割法、流下セルと河川セルの識別方法について述べている。次に、各セルに適用される土壌水分モデルの構造とその実蒸発散量の推定方法、降水時における直接流出量や浸透能、貯留量などの水文要素の推定方法について述べるとともに、地表水と地下水のセル間流動に関するモデル化法を示している。そして、開発した分布型降雨-流出モデルを滋賀県南部の大戸川流域へ適用し、モデルにより推定された流出流量と観測流量とを比較することでモデルの有効性を検証している。

第4章では、既存の知見や情報を用いて合理的に分布型降雨-流出モデルのパラメータ値を推定することのできるファジィ推論を援用したパラメータ同定システムを開発している。まず、ファジィ推論による同定システムの概要と具体的な同定の手順を述べている。続いて、各モデル・パラメータの値に影響を与える要因について考察を行い、それに基づいてファジィ・ルールを作成している。そして、構築されたファジィ推論同定システムによって推定されたモデル・パラメータの値を用いて計算される流出流量と観測流量との乖離が最小化されるような、ファジィ・ルールにおけるファジィ集合を規定するメンバシップ関数を決定変数とする最適化問題を定式化し、この問題の遺伝的アルゴリズム(GA)による求解法を示している。本システムによって推定されたモデル・パラメータの値を用いて流出解析を行った結果、物理的意味を勘案しながら

モデル・パラメータの値を試行錯誤的に推定した第3章の結果と比較して流出解析の精度が向上することを示し、本同定システムの有効性を明らかにしている。

第5章では、第4章で構築したファジィ推論同定システムにより同定されるモデル・パラメータの母数（母平均，母分散）を推定するためにベイズ推論を用いて母数を更新していくシステムを提案している。母数の事前分布から，ある期間ごとに同定されるモデル・パラメータの値を用いて事後分布を得るプロセスについて述べ，母平均と母分散がともに未知の場合のベイズ推論について定式化を行っている。第3章及び第4章における分布型降雨-流出モデルとモデル・パラメータの同定に対して本システムを適用し，母平均と母分散を推定することにより，流域内の各モデル・パラメータの特性並びに不確実性を明らかにしている。

終章である第6章では，以上によって得られた知見を要約・整理するとともに，問題点と今後の課題について述べている。

## 論文審査の結果の要旨

従来の分布型降雨-流出モデルにおいては，降水の地下への浸透はタンクモデルを用いてモデル化するのが一般的であり，また保持されている土壌水分量によって変化する浸透能や蒸発散能に対するモデル化も不十分な点が多いため，これらの効果を考慮したモデル開発が必要とされてきた。モデル・パラメータの同定には，遺伝的アルゴリズム（GA）や大域的探索法といった手法が用いられてきているが，分布型降雨-流出モデルの場合，求めるべきモデル・パラメータの数が膨大となるため，これらの手法を適用するだけでは不十分な場合が多く，モデルを実用的なものとするにはより効率的な同定手法の開発が必要となる。本論文においては，土壌水分や浸透，蒸発散，降下浸透，貯留といった要素を動的に扱うことのできる土壌水分モデルを採用した分布型降雨-流出モデルを開発するとともに，モデル・パラメータの同定に関して，ファジィ推論やベイズ推論を採用して効率的かつ合理的にパラメータの値が推定できる手法を提案している。評価できる主要な点は以下のとおりである。

- (1) 流域を構成する各セルに土壌水分モデルを適用することにより，保持されている土壌水分量に応じた蒸発散量，浸透量，降下浸透量が得られる分布型降雨-流出モデルを開発した。表層土壌の効果を無視した従来の単純なモデルに代えて土壌水分モデルを採用したことにより，単に流出量や各セルにおける貯留量を求めるだけでなく，流域内の土地利用や植生の違いによる土壌の浸潤・乾燥過程も示すことが可能となった。
- (2) 膨大な数になるモデル・パラメータの同定において，これらを直接決定変数として最適化問題を定式化するのではなく，ファジィ推論を用いてモデル・パラメータに影響を与える要因の定量的，定性的な特徴からパラメータの値を推定する方法を提示した。すなわち，分布型降雨-流出モデルのモデル・パラメータに影響を与える土地利用や表層地質，傾斜度などの要因の定量的，定性的な特徴をファジィ推論を用いた同定システムへの入力とし，モデル・パラメータの値を出力とする新たなシステムを構築した。このファジィ推論同定システムによって推定されるモデル・パラメータの妥当性を確保するため，ファジィ集合のメンバシップ関数を決定変数とし，観測流出量と計算流出量の二乗誤差を最小化する最適化問題を定式化した。これにより，求めるべき決定変数の数を大幅に減少させることができ，効率的かつ合理的にモデル・パラメータの値を同定することが可能となった。
- (3) 継続的に流量が観測されている流域に対して，ある期間ごとに次々と同定されていくモデル・パラメータの値を用いて，それまでに推定されていたモデル・パラメータ値の母数（母平均，母分散）をベイズ推論に基づいて逐次更新していくプロセスを導入して，パラメータ値の流域内におけるばらつき具合を得ることによって各セルにおける推定されたパラメータ値の信頼性を明らかにすることのできる方法論を提示した。

以上のように，本論文は，流域に分布型降雨-流出モデルを適用する際の，表層土壌のモデル化，モデル・パラメータの同定と評価といった主要な課題に対して新規な接近を試み，これまでになく実用性の高い分布型降雨-流出モデルの開発に成功したものであり，水文学，水資源工学の発展に寄与するところが大きい。

よって，本論文は博士（農学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお，平成19年2月14日，論文並びにそれに関連した分野にわたり試問した結果，博士（農学）の学位を授与される学力が十分あるものと認めた。