

(論文内容の要旨)

本論文は、分布定数系の降雨・流出モデリングにおいて、入出力データ、モデル構造、モデル定数推定などにおける不確定性の原因を分析し、こうした不確定性のもとで最適なモデルを決定するための枠組みを展開している。主な成果の概要は以下の通りであり、8章から構成されている。

第1章は序論であり、降雨・流出モデルの予測の不確定性が、1) 流出モデルのモデル構造の不確かさ、2) 流出モデルのパラメータ同定の不確かさ、3) 流出モデルへの入力データの不確かさに起因することを述べ、それぞれの不確定性の分析手法とそれらを基にした水文モデルの評価手法を述べて、本論の構成を示している。

第2章では、本論で評価の対象とする分布定数系の流出モデルと集中型の流出モデルを示すとともに、対象流域と水文データを詳細に述べている。

第3章では、水文モデルのモデル構造の不確かさに起因する流出予測の不確かさを評価する手法を展開し、この手法を用いて流出モデルのモデル構造の優劣を評価する手法を示している。この手法では、異なる強度・継続時間・時間変化パターンを持つ複数の洪水に対して、異なる目的関数を用いて同定したパラメータの安定性を評価の対象とし、この安定性をモデル構造の優劣の尺度として流出モデルの性能を評価した。第2章で示された分布型定数系モデルと集中型定数系モデル（貯留関数法）に対してこの評価手法を適用し、貯留関数法では目的関数ごとに同定されるパラメータ値が異なるが、分布定数系流出モデルではパラメータの安定性が高く、モデル構造の点で優れていることを指摘した。また、分布定数系流出モデルでは、パラメータの値が異なってもその組み合わせによって、どの洪水に対しても高い再現性を示すという equifinality（等完了状態）の問題があることも示した。

第4章では、パラメータ同定の不確かさに起因する流出予測の不確かさを分析し、降雨流出モデルにおける equifinality とモデルパラメータの不確定性が流出予測結果に及ぼす影響を分析している。また、equifinality の状態にあるパラメータの組み合わせを複数設定し、流出モデルに組み込んだ計算機トレーサーを用いて降雨流出過程の時空間的な発生状況を分析した。その結果、equifinality の状態では、流域下端の流出量の再現性が同様であったとしても、流域内部の水文量の変動は異なることがあることを示した。つまり、equifinality

の状態にあっても、流域内部の水文量の時空間変動は同じではなく、流域下端の流量以外の流域内部の水文量の変動を表す独立した観測データがあれば、パラメータ同定に有効であることが示された。

第5章では、分布型流出モデルの構成において適切な地形情報の空間分解能を、予測の不確かさの観点から評価している。まず、流出モデルの流れを支配するパラメータは、地形情報の空間分解能と密接な関係にあることを示し、地形情報の空間分解能が 250m よりも大きい場合は流れを支配するパラメータの感度が高く、逆に高分解能の分布型流出モデルは、流れのパラメータの感度が低いことを示した。これにより、分布型流出モデルの構成にふさわしい地形情報の空間分解能は 250m以下であることが望ましいことを示した。

第6章では、入力データである降雨データについて、様々な想定のもとでの空間分布データを作成し、降雨の空間分布の違いによる流出量の不確かさを分析している。その結果、対象とした流域(211km²)では空間分布よりも時間分布が流出量の形成に大きな影響があることを示し、降雨の空間分布が異なっても流出する過程でその空間分布の違いは小さくなっていくことを示した。

第7章では、最終的に、上記で得た結果を取りまとめ、二段階から構成される流出モデル選定の枠組みを提案している。選定の第一段階は候補となる流出モデルを選ぶ段階であり、モデル性能評価指標、モデル構造の安定性指標、モデルパラメータ同定指標からなる3つの評価指標を用いて、モデル構造の不確かさとパラメータ値の不確かさから流出モデルの性能を評価する手法が述べられている。第二段階は、第一段階で選定した流出モデルの中からより適切なモデルを選定する段階であり、第一段階で用いたデータとは独立な新たな観測データを用いることによって、適切なモデルを選定することの重要性を指摘しており、計算機トレーサーを用いた流出経路の特定とその観測情報が、第二段階の有力な選定プロセスであることを示している。

第8章は結論であり、本論文で得られた成果を取りまとめるとともに、今後の研究課題についてについて要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、分布定数系の降雨・流出モデリングにおいて、入出力データ、モデル構造、モデル定数推定などにおける不確定性の原因を分析し、こうした不確定性のもとで最適なモデルを決定するための枠組みを展開している。主な成果の概要は以下の通りである。

1. 降雨流出モデルのモデル構造の不確かさを評価する手法を提示した。この手法では、3つの目的関数に対して、異なる洪水を対象とした場合のパラメータの安定性を評価指標とし、ある形式の分布型流出モデルが他の形式の流出モデルよりもモデル構造が優れていることを見出した。
2. 降雨流出モデルにおける equifinality (等完了状態) とモデルパラメータの不確定性が流出予測結果に及ぼす影響を分析し、適合するモデルパラメータの分布特性を示した。また、降雨流出の時空間的な発生状況を流出モデルに組み込んだ計算機トレーサーを用いて分析し、流域下端の流出量を同様に再現したとしても、流域内部の水文量の変動は異なることがあることを明確に示した。
3. 分布型流出モデルの空間分解能を予測の不確かさから評価し、250m よりも小さいグリッドスケールが望ましいことを新たに見出した。
4. 降雨の空間分布の違いによる流出量の不確かさを分析し、対象とした流域(211km²)では空間分布よりも時間分布が流出量の形成に大きな影響があることを示し、降雨の空間分布の違いは流出する過程で減少していくことを示した。
5. 最終的に、上記で得た結果を取りまとめ、モデルの構造と定数空間を考慮したモデル評価の枠組みと指標を提案した。

以上のように、本論文は分布定数系の降雨・流出モデリングにおいて、入出力データ、モデル構造、モデル定数推定などにおける不確定性の原因を分析し、こうした不確定性のもとで最適なモデルを決定するための枠組みを提示したものである。この研究成果は、分布型流出予測モデルを用いた降雨流出予測の精度の向上と洪水災害の軽減に大きく寄与するものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成20年8月11日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。