論文の内容の要旨

台風，洪水，地震などの自然災害の強さは，人間が制御できる範囲を超える時がある．そこで，安全性の水準を定めて，その水準までは防災工事などのハード対策で対応し，水準を超えた外力については，避難などのソフト対策で対応している．ハード対策のみでの絶対安全な防災設計は不可能である．設計基準を超えた災害が発生した際の対応はリスクマネジメントの重要な課題である．リスクの概念とは簡単に言えば，災害が発生する確率と災害が発生した時の被害の積である．つまりリスクを把握するには，災害が発生する確率を正確に予測することが非常に重要である．

本論文では，降雨流出過程と一次元不定流を対象として不確実性を有する物理システムの予測を行っている．基本式は山田らによって提案された単一斜面における降雨流出の理論式を用いている．ところで，流出解析で入力値として用いる降雨データは多種多様であり，観測手法の違いや観測地点数等によって，降雨データの時間分解能や空間分布が異なるため不確実性を含むデータである．この降雨の不確実性を考慮することで，伊藤の確率微分方程式と同型の支配方程式を得ている．そして，確率微分方程式と Fokker-Planck 方程式の対応関係を用いて流出高の確率密度関数の時間発展を求めることができることが示されている．本研究で提案された降雨流出過程の Fokker-Planck 方程式を解くことにより，降雨イベント全体の予測区間を計算することができる．本研究では問題を単純化するため，過去の降雨イベントの実測降雨データを用いている．決定論的な予測では，1 時間先の予測誤差と 2 時間先の予測誤差を同様に扱わなければならないが，本研究で提案された手法を用いることにより，予測“誤差”，あるいは物理量の不確実性の時間発展を正確に計算できるようになった．この点が今までの決定論的な予測手法との根本的な違いである．よって，設計基準を超えるような災害が発生する確率を計算することが可能になり，リスク管理において非常に有用であるといえよう．さらに既往の降雨の不確実性を考慮した流出計算手法に摂動解析とモーメント方程式を用いることで複雑なモデル式あるいは偏微分方程式に拡張している．また，Fokker-Planck 方程式を拡張カルマンフィルタの第 1 ステップに置き換えることで，新たな非線形フィルタを提案している．本研究で提案されたフィルタは従来の拡張カルマンフィルタと比較して，不確実性の拡散効果がより正しく表現できることを示している．さらに，偏微分方程式系に Fokker-Planck 方程式を適用する手法を提案し，この拡張した理論を一次元不定流へ適用している．一次元の開水路不定流を支配する方程式は連続式と運動方程式である．支配方程式である運動方程式の中に底面せん断応力の項があるが，任意の瞬間でみると，底面せん断応力は平均値の周りにふらつくことが既往の研究により分かっている．本研究では，このような底面せん断力応力の不確実性を考慮した一次元開水路の不定流における不確実性を検討している．その結果，観測値等の情報がある地点から離れるほど，また，マニングの粗度係数や，上流に与える流量過程のピーク値，あるいは底面せん断応力の変動成分が大きいほど開水路の流量と水深の不確実性が大きくなる事実を反映していることが本研究で示されている．本研究で提案されている手法は，計算効率が一般のサンプリング手法に比べ遥かに優れているため，実際のリアルタイム予測に使用することが期待できる．

（中央大学論文審査報告書）

論文審査の結果の要旨

１．博士学位請求論文

確率過程論に基づく不確実性を有する物理システムの予測に関する研究
―降雨流出過程への応用―

２．論文審査結果の要旨

（当該分野での位置づけ，論文構成，独自性及び成果，課題，評価等）

不確実性を有する物理システムの予測は防災計画やリスク管理に対して非常に重要である．不確実性を考慮した物理システムの予測手法として，カルマンフィルタ，拡張カルマンフィルタなどが挙げられる．これら手法の共通の特徴は，確率過程の時間発展を遷移確率で表現していることである．それに対し，2015 年に吉見，山田らが初めて伊藤の確率微分方程式と Fokker-Planck 方程式を降雨流出過程に導入し，降雨の不確実性が流出高に及ぼす影響を評価している．伊藤の確率微分方程式と Fokker-Planck 方程式による確率過程の時間発展の表現は，遷移確率と比較すると，時間的な連続性や，適用範囲の拡張性が高いという利点があるため，これからの応用が期待できる．本研究は吉見，山田らの研究を発展させたものである．

第１章では，既往の研究を精査した上で本研究の目的及び研究全体の体系について述べている．

第２章では，不確実性を有する物理システムの数学的な扱い方を紹介し，アンサンブル手法，遷移確率，伊藤の確率微分方程式，Fokker-Planck 方程式 4 つの手法の歴史と互いの関係，適用範囲について説明している．

第３章では，決定論的な降雨流出過程に関する既往研究と，吉見，山田らによって提案された Fokker-Planck 方程式を用いた降雨の不確実性が流出流量や水位に与える影響の評価方法を紹介している．さらに，Fokker-Planck 方程式の拡散係数と降雨の関係をより詳細に説明している．

第４章では，Fokker-Planck 方程式から状態変数に関するモーメントの時間発展式を導いている．導いた式は摂動展開と併用することで, Fokker-Planck 方程式の近似解を求めることが可能であることを示している．提案した手法で得られた近似解は，Fokker-Planck 方程式の解とアンサンブル計算との結果を比較することにより，手法の妥当性を示している．

第５章では，Fokker-Planck 方程式を拡張カルマンフィルタのステップ１に置き換えることで，新たな非線形フィルタを提案している．提案したフィルタは拡張カルマンフィルタと比較すると，不確実性の拡散効果がより正しく表現できることを示している．さらに，偏微分方程式系に Fokker-Planck 方程式を適用する手法を提案している．

第６章では，結語として，全体の研究成果を総括している．

上記いずれの成果も理論解析をベースとした新しい解析結果と解析手法が得られている．特に，Fokker-Planck 方程式に基づく新たなフィルタを提案したことで, 不確実性の拡散効果をより良く表現，予測できることが期待できる．さらに，Fokker-Planck 方程式の適用範囲を偏微分方程式系まで拡張したことで，河道の水位の予測にも提案したフィルタを使用することが可能となり，工学上，非常に意味のあるものである．

以上より，本博士学位請求論文は水理学及び河川工学において新規の知見を得た内容であり，実用上も重要な貢献をしていると認める．さらに，口述試問の試験結果も踏まえ，審査員一同は成岱蔚氏の博士学位請求論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと判断した．

（中央大学論文審査報告書）