

平成 30 年 6 月 24 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26249072

研究課題名(和文) 可能最大洪水に対応できる数理科学的な河川計画手法の確立

研究課題名(英文) Establishment of mathematical scientific river planning method which capable of responding to the possible maximum flood

研究代表者

山田 正 (Yamada, Tadashi)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：80111665

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,040,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、経験的要素を排除した数理科学的な河川計画のあり方を提示した。従来型の河川計画では、基本高水位や計画高水位は、決定論的に一つの値が決められ、それに基づいて計画が立案されてきたが、水文諸量には観測手法の違いやその精度といった不確実な要素を内包している。本研究の成果である不確実性を考慮した極値統計理論と流出解析手法より得られる水位の分布(不確実性)は、洪水時の避難情報発令タイミングを議論する素材として極めて有用であることを示した。さらに、従来は経験的に取り扱っていた流砂量や河道形状の抵抗を、不確実性として河川計画に取り込むことで、新たな社会認識に対応した数理科学的な計画手法を提示した。

研究成果の概要(英文)： We suggested a way of mathematical scientific river planning excluding empirical factors. In conventional river planning, flood control standards such as design high water level are decided deterministically and single-valued, and the detail of river planning are based on these single-valued standards. However, there are uncertainties in hydrological quantities because of the differences in observation methods and their accuracy.

In this research, we suggested a distribution of water level (uncertainty) obtained from extreme value statistical theory and runoff analysis method considering the uncertainty of hydrological quantities, and showed the distribution is extremely useful as a material to decide the timing of evacuation information. In addition, we method to introduce the effect of sediment and the resistance of the river channel shape as uncertainty into river channel design. This kind of mathematical scientific planning method is corresponding to new social awareness.

研究分野：水工学

キーワード：河川計画 可能最大降雨量 極値統計理論 実河川の流量観測 河床波の力学機構 画像解析 河床形態の変化

1. 研究開始当初の背景

衝撃があまりにも大きな経験は社会的な共通認識さえも容易に変容させる。2011年の東日本大震災は、我々の防災計画の計画規模に対する認識を、長くとも100年程度の統計値に基づいて設定された計画規模の満足から、計画規模に上限を設けないことが前提へと根本的に転換させた。上限を設定しないことを前提とした防災計画の具現化においては、目標設定が曖昧なため困難となることと、人間のライフサイクルと比べて発生間隔が極めて長いことによる被災記憶の風化の2つが大きな妨げとなる。自然災害に対する関心が高い現在の社会的情勢を逃せば、防災計画の新しい方向性の形骸化、さらには思考停止のもとでの当座しのぎの対策がやがて講じられるようになることは必至である。

この趨勢を受け、河川計画においては、既存の計画規模を大幅に上回る外力への備えとして津波への対策を模倣した外力規模を2段階に設定する計画手法の議論がはじめられている。しかし、この2段階の計画手法の河川計画に対する有効性は不明である。このため、計画規模の上限撤廃がそもそも合理的かどうかを学術的に再考し、速やかに計画の方向性を先導しなければならない。

前述の社会的要請と照らし合せて既存の河川計画手法を俯瞰すると、早急に改善が必要な2つの課題が浮き彫りになる。1つ目は、大規模洪水への対応である。既存手法には経験的な概念の混在がもたらす理論的な不完全性があり、計画規模が200年程度を大幅に越えると種々の綻びを生じるためである。2つ目は、物理過程の忠実な記述のための水文及び水理のそれぞれの相互作用の反映である。2011年新潟・福島豪雨など最近の計画規模の大規模洪水は、流域間及び本川・支川間の相互作用を河川計画に反映しなければ安全の確保が困難なことを強く示唆している。東日本大震災を経験した現在、水文学と水理学が学術的に連携するかたちで、大規模な外力への包括的な対応とともに水文及び水理のそれぞれの相互作用を考慮できる河川計画手法を確立することが学術と実務の両面から求められている。

2. 研究の目的

本研究では、洪水の発生要因である降水現象は流体力学により説明される物理現象と捉え、少なくとも河川計画においては物理的な計画規模の上限設定が可能との立場を取り、その上限値として可能最大降雨を採用する。また、既存の河川計画手法は、1) 大規模洪水への対応が困難、2) 流域間や河道間の相互作用を適切に反映できないという2つの問題がある。この2つを解消するために、水文学及び水理学の基盤概念の更新を図るための要素研究を行う。さらに、これらの要素研究を結合して、新たな社会認識に対応した数理科学的な計画手法を確立することを目的

とする。

3. 研究の方法

(1) 可能最大降雨量に対する確率統計理論の確立と物理的妥当性の検証

既存の水文統計理論は観測期間が100年程度の降雨集団に対しては優れた適合度を示す一方で、近年の記録を更新するほどの極めて大規模な降雨は棄却値として扱われるという欠点がある。この問題を踏まえ、大規模降雨に対しても確率的な解釈を与えられるように、確率水文量が取りうる値を理論的に算出する手法を構築する。

(2) 物理的合理性を有する損失雨量と降雨の時空間偏在性を考慮した流出過程

過去100年程度の水文データを対象とした既往研究において、ほとんどの流域は未だに可能最大降雨量を経験していない可能性が高いことや、既往最大降雨量では飽和に達しないほどの貯留ポテンシャルを有する等の流域の飽和経験を示す新しい特性値の導出が示唆されている。このように、我々が観測し得ない特性値を不確実性として降雨流出解析に取り込み、流出過程の再現や予測性能を改善できる解析手法を構築する。

(3) 実河川の流量観測に基づいた小規模河床形態がもたらす形状粗度の把握

可能最大洪水時の水位推算においては小規模河床形態がもたらす形状粗度の見積りが重要となる。先行研究としてこれまでにADCP(超音波流速計)を用いた洪水時の流量観測に取り組み、世界に先駆けて小規模河床形態の形状捕捉の目処を立て、実河川における三者同時計測値(流速・水位・河床位)を多数蓄積してきたが、現状では計測結果の分析と考察は未着手である。そのため、本研究において分析を進め、実河川の観測値に基づいた小規模河床形態がもたらす形状粗度と水理量との対応関係、及び流砂量への影響を明らかにする。

(4) 流路の幾何学形状に着目した中規模河床形態の把握

中規模河床波の既往研究は川幅水深比により砂州形態を区分できるとしている。しかし、実河川においては川幅水深比による形態区分が無効なことがしばしばある。これに対し、先行研究において直線型でさえ河道の平面形状が川幅水深比よりも中規模河床形態の形成に対して支配的な役割を果たすことが明らかにされている。流路の平面形状と中規模河床形態の関係性に着目して、可能最大規模の洪水の安全な流下に適した、樹林化を免れやすい河床材料の更新が活発な河床形態を自律的に維持できる河道の設計方針を提示する。

上記の4つが、既存の河川計画の2つの弱点を補強するために基盤概念の更新が求められている水文学および水理学の主な研究課題であり、本研究で得られる成果によって、現在の標準的な技術を大幅に上回る水準で

の流出過程や河道の水理が的確に把握することが可能となる。また、最終的にはこれらの有機的に結合することで、水文学及び水理学それぞれの相互作用を考慮した流域一貫の忠実な物理過程を記述することが可能となり、可能最大洪水を視野に入れた治水計画の策定やリスクガバナンスの情報基盤が構築されることになる。

4. 研究成果

(1) 可能最大降雨量に対応した極地統計理論の構築を行った。限られた水文量の極値データを基に推定した水文統計量（確率水文量、モデル母数等）に内在する不確実性は、数理統計学的観点から極めて大きいため、確率限界法検定理論に信頼区間を導入した。その結果、大規模降雨を信頼限界線上の値として取り扱うことで、当該値の生起リスクを、従来採用してきた極値分布を与える超過確率と信頼限界線とを与える超過確率の積によって定量化することで、可能最大降雨を確率的に解釈することが可能となった。(図1)

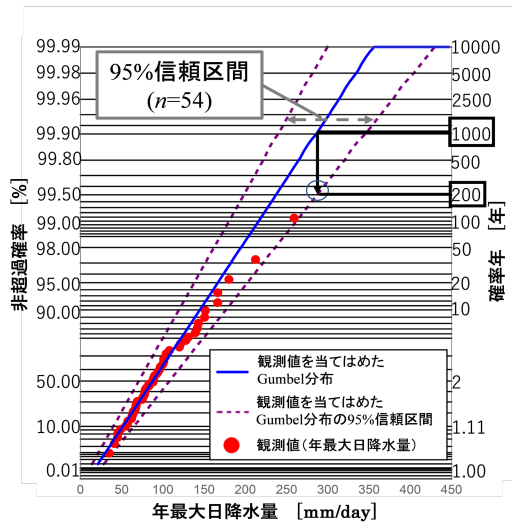


図1 信頼区間を導入した水文頻度解析結果 (利根川水系八斗島観測所における 54 年間の年最大日降水量の観測値及びこれら 54 個の観測値に当てはめた Gumbel 分布と確率限界法検定を応用し導出した当該分布の 95% 信頼区間 ※ n は観測値の総数)

(2) 降雨流出過程に確率過程論を導入し、降雨の不確実性に起因する水位・流量の不確実性を定量的に評価できる理論を構築した。そして、その理論を拡張し、河道内の粗度係数等の物理量の不確実性の時間発展が及ぼす流量と水位の不確実性を算出した。その結果、カルマンフィルタ等の既存の洪水予測手法と比較して不確実性の拡散効果をより正確に表現できる洪水予測システムの基礎を確立することができ、従来のサンプリング手法と比較して計算効率が遥かに高い洪水予測手法として提案した。(図2)

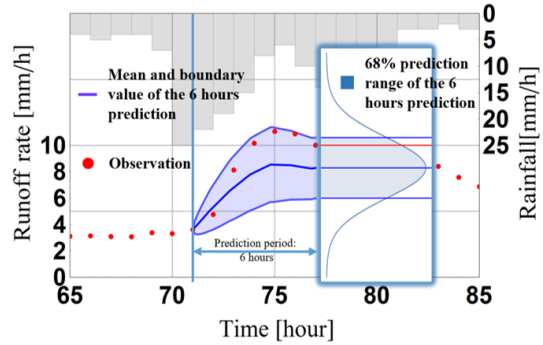


図2 本研究で構築した洪水予測の一例 (ある時間から 6 時間先の流量 (水位) 予測範囲と実測値を示す。従来よりも計算コストが高く、リアルタイムでの洪水予測が可能なモデルを構築した。)

(3) 面的な河床形状と流況を同時に観測することができる計測システムを開発することによって、洪水時の河床高分布と小規模河床波による形状抵抗を算出することを可能とした。本手法で観測された小規模河床波の移動速度を検証した結果、掃流砂量の観点から妥当であるという結論に達した。また、観測された河床波の波高と波長の関係について、既往研究で提案されている実験式との比較を行い、整合性が高いことも確認している。(図3)

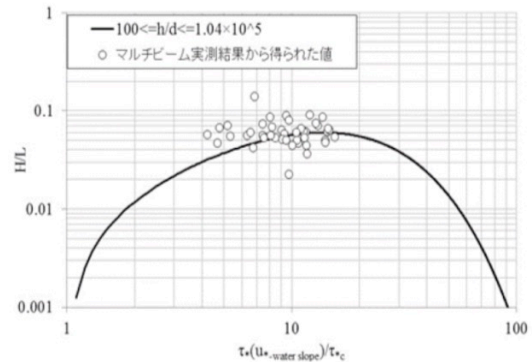


図3 河床波の形状特性 (横軸：無次元掃流力を限界無次元掃流力で除したもの、縦軸：河床波の波高と波長の比を対数で表したもの。図の曲線は既往研究で提案されている曲線で、図中の点が本研究の観測値)

(4) 移動床模型実験を実施し水表面と水底面の高密度な同時計測を実施した。その結果、計測値から流路変動の発達時に水底面に対応した水表面の曲面形状が形成されていることが明らかとなった。さらに、計測値から求めた水面勾配から交互砂州の流下停止、横断方向への砂州の伸長などの流路変動の発達機序を説明できるようになった。(図4) この結果を応用することで、河床形態を自律的に維持できる河道の設計方針を示すことが

可能となった。

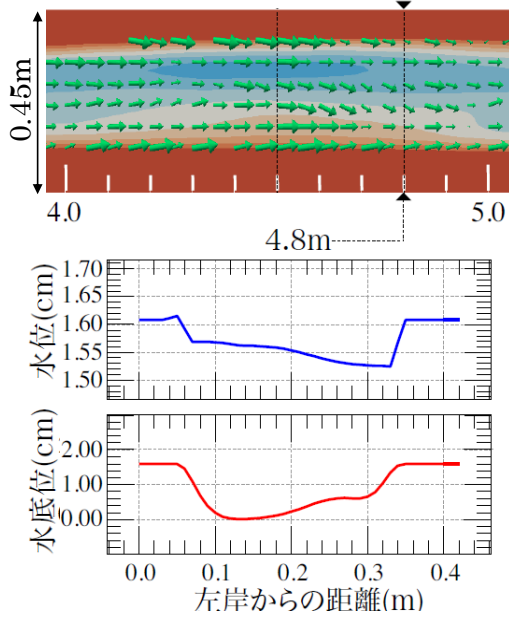


図4 水表面と水底面同時観測結果の一例
(移動床上における水表面と水底面を同時かつ高解像度で計測が可能な動的光切断法を用いて、両者の対応関係を明らかにした。)

(5) 以上の水文学と水理学の基盤概念の更新を目的とする要素研究の成果に基づき、経験的要素を排除した数理科学的な河川計画のあり方を提示する。

従来型の河川計画では、洪水外力として設定する基本高水位や計画高水位は、決定論的にただ一つの値が決められ、それに基づいて計画が立案されてきたが、水文諸量には観測手法の違いやその精度、及び人間の認識限界といった不確実な要素を内包している。本研究で得られた成果について、(1) (2)の不確実性を考慮した極値統計理論と流出解析手法より得られる水位の分布(不確実性)は、洪水時の避難情報発令タイミングを議論する素材として極めて有用であることに加え、水位に対する堤防の破壊確率を求めることができれば、水位の分布を外力、堤防の破壊確率を耐力とした信頼性解析を行うことが可能となる。さらに、従来は経験的に取り扱っていた流砂量や河道形状の抵抗を、不確実性として降雨流出過程及び河道計算を含む河川計画に取り込むことで、経験的要素を排除した数理科学的な河川計画のあり方が可能となる。(図5)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 57 件)

① 清水啓太、山田朋人、山田正：確率限界法

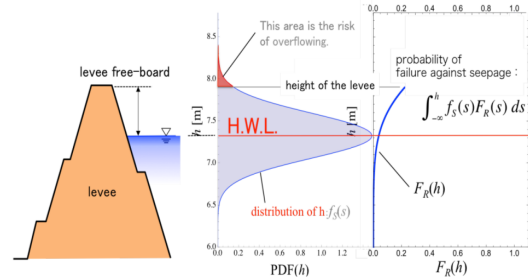


図5 堤防と水位のイメージ図(水位の確率分布を图中的赤い領域の面積は越水確率を表している。また、右図の青い曲線は各水位における越水確率を算出し内挿した関数である。両者をそれぞれ外力と耐力として信頼性解析を行うことで、ある水位までに堤防がすべり破壊する確率を算出でき、さらに破壊確率と越水確率を比較することができる)

検定に基づく確率分布モデルの信頼区間を導入した新しい水文頻度解析手法、土木学会論文集 B1(水工学)、74、331-336、2018、査読有

② 諸岡良優、郷津勝之、寺井しおり、布村明彦、山田正、五十嵐拓実、安田浩保：2015年9月関東・東北豪雨における鬼怒川洪水時の避難情報及び浸水状況が住民の避難行動へ及ぼした影響に関する研究、河川技術論文集、23、127-132、2017、査読有

③ 吉見和紘、Chao-Wen WANG、山田正、山田朋人：確率過程論に基づいた降雨流出過程における不確実性評価の理論的枠組の提示、土木学会論文集 B1(水工学)、72、4、1225-1230、2015、査読有

④ Chao-Wen WANG、吉見和紘、辛島史嗣、山田正：降雨の不確実性に基づく確率過程論を導入した堤防の信頼性評価、土木学会論文集 G(環境)、71、5、1-6、2015、査読有

⑤ 星野剛、安田浩保、利根川明弘：動的光切断法を用いた河床波形成過程における水面・水底面の幾何学形状の計測、土木学会論文集 B1(水工学)、72、883-888、2016、査読有

⑥ 五十嵐拓実、安田浩保：流路変動の発達機序の解明に向けた水表面と水底面の曲面形状の対応関係の把握、土木学会論文集 B1(水工学)、74、1123-1128、2018、査読有

⑦ 星野剛、安田浩保、倉橋将幸：交互砂州の形成機構の解明に向けた水面と底面の同時計測手法の開発、土木学会論文集 A2(応用力学)、74、1、63-74、2018、査読有

⑧ 柏田仁、二瓶泰雄、中西徹真、鈴木佑弥、

平謙二、上田英滋、梶純也、藤田一郎：非接触計測と水理解析による河川水位・流量観測システムの確立に向けた検討、河川技術論文集、23、263-268、2017、査読有

⑨辻一成、谷昂二郎、藤田一郎、能登谷祐一：UAV 空撮動画に STVV を適用した広域河川流況解析、土木学会論文集 B1(水工学)、74、811-816、2018、査読有

⑩清水義彦、岩見収二、加藤千恵：砂州の樹林化と河岸条件が単列蛇行流路の形成に及ぼす影響に関する数値実験土木学会論文集 B1(水工学)、72、781-786、2016、査読有

⑪ Supuraba Intan、Tomohito Yamada：UNCERTAINTY OF PEAK RUNOFF HEIGHT ASSOCIATED WITH UNCERTAINTY OF WATER HOLDING CAPACITY AND RAINFALL PATTERN、土木学会論文集 G(環境)、71、17-22、2015、査読有

⑫小林彩佳、岡地寛季、グエンレズン、山田朋人：降雨観測の空間分布と気象予測に起因する山地流域における降雨量と河川流量の不確実性、土木学会論文集 G(環境)、73、5、63-69、2017、査読有

⑬山田朋人、星野剛、舛屋繁和、植村郁彦、吉田隆年、大村宣明、山本太郎、千葉学、戸村翔、時岡真治、佐々木博文、濱田悠貴、中津川誠：北海道における気候変動を伴う洪水リスクの変化、河川技術論文集、24、391-396、2018、査読有

⑭橘田隆史、萬矢敦啓、小関博司、吉川世里子、岡田将治、工藤俊：流況河床高同時観測システムの構築と観測から得られた河床波の挙動、土木学会論文集 B1(水工学)、73、4、535-540、2017、査読有

⑮小関博司、萬矢敦啓、工藤俊、橘田隆史、岩見洋一：実河川における掃流砂量と有効摩擦速度の評価方法、土木学会論文集 B1(水工学)、73、4、763-768、2017、査読有

⑯工藤俊、萬矢敦啓、小関博司、笛田俊治、中津川誠：実河川における流水抵抗の分析、土木学会論文集 B1(水工学)、73、4、769-774、2017、査読有

⑰工藤俊、萬矢敦啓、小関博司、笛田俊治、中津川誠：洪水時の河床変動を考慮した流量の推定、土木学会論文集 G(環境)、72、5、313-320、2016、査読有

[学会発表] (計 69 件)

①Yamada T、Evaluation of Uncertainty in Runoff Application of Flood Control and

Risk Management、2014 年 10 月 28 日、中国水利学会 (中国・天津市)

②山田正、山地及び低平地流域における近年の防災技術に関する動向と展望、2015 年 5 月 19 日、リバーテクノ研究会講演会、オフィス東京 (東京都・中央区)

③山田正、2015 年 9 月関東・東北豪雨による洪水氾濫災害、第 60 回水工学講演会河川災害に関するシンポジウム、2016 年 3 月 14 日、東北工業大学八木山キャンパス (宮城県・仙台市)

④山田正、近年の洪水対策のメカニズムと減災に向けた先端研究の動向、地盤工学会関東支部平成 28 年度第 2 回評議員会、2016 年 3 月 14 日、公益社団法人地盤工学会大会議室 (東京都・文京区)

[図書] (計 2 件)

①藤田一郎 (分担執筆)、事例・演習でよくわかる水理学～基本をイメージして理解しよう～、コロナ社、2015、181

②山田正、藤田一郎 (分担執筆)、豪雨のメカニズムと水害対策～降水の観測・予測から浸水対策、自然災害に強いまちづくりまで～、NTS 出版、2017、97-105・117-124・177-187

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 正 (YAMADA、Tadashi)
中央大学・理工学部・教授
研究者番号：80111665

(2) 研究分担者

安田 浩保 (YASUDA、Hiroyasu)
新潟大学・災害復興科学研究所・准教授
研究者番号：00399354

藤田 一郎 (FUJITA、Ichiro)
神戸大学・工学研究科・教授
研究者番号：10127392

清水 義彦 (SHIMIZU、Yoshihiko)
群馬大学・理工学研究院・教授
研究者番号：70178995

山田 朋人 (YAMADA、Tomohito)
北海道大学・工学研究院・教授
研究者番号：10554959

萬矢 敦啓 (YOROZUYA、Atsuhiko)
国立研究開発法人・土木研究所・主任研究員
研究者番号：00314740