

## 学位請求論文要旨

### 谷底平野を流れる沖積河川の地形に着目した極値的流量の推定に関する研究

Study on the extreme discharge estimation focused on geomorphologic features  
of alluvial rivers flowing in valley plains

都市環境学専攻 涌井正樹

Civil and Environmental Engineering , Masaki Wakui

#### 【研究の背景と目的および研究成果】

平成 27 年 1 月に「新たなステージに対応した防災・減災のあり方」が国土交通省において取りまとめられ、同年 2 月には水防法等の一部を改正する法律案が閣議決定された。そこでは、現在の想定を超える浸水被害をもたらす洪水が多発していることを踏まえ、洪水浸水想定区域は、従来の河川整備の基本となる降雨を前提とした設定から想定し得る最大規模の降雨を前提とした設定に拡充する内容が盛り込まれた。また、同年 8 月に社会資本整備審議会より「水災害分野における気候変動適応策のあり方について～災害リスク情報と危機感を共有し、減災に取り組む社会へ～ 答申」が公表され、水災害分野における気候変動適応策の基本的な考え方などが示された。この答申等では、地球温暖化により激化する水災害に対処するため、施設では守りきれない事態を勘案し、社会全体が想定最大外力（想定し得る最大規模の外力）までの様々な外力についての災害リスク情報を共有し、施策を総動員して減災対策に取り組むことなどが示された。現在、この想定最大外力の設定は、平成 27 年 7 月に公表された「浸水想定（洪水、内水）の作成等のための想定最大外力の設定手法」により行われている。その手法は、過去 100 年程度の降雨量の観測データに基づき、欧米の計画規模も参考にしながら年超過確率 1/1,000 の降雨量から想定し得る最大規模の洪水流量を設定するものとしている。

本研究は、想定し得る最大規模の洪水流量を現在よりも平均気温が 2°C 程度高い時期（約 6,000 年前の縄文海進）を含む現世（完新世）における既往最大洪水流量（ここでは、極値流量と称する）から推定する。極値流量を過去のデータから推定する手法には、年輪、化石、花粉などの生物データから当時の気象を再現し推定する方法と、洪水により形成された河川地形より流量規模を推定する方法がある。河川地形から推定する手法には、河道内に残された過去の洪水堆積物の位置（高さ）とその放射性年代測定から、洪水規模と時期を推定する SWD（slackwater deposits）を利用した洪水復元方法がある。しかし、SWD の手法は乾燥地域で有効な方法であるため湿潤地域の我が国での実績は少ない。また、河川地形から推定する研究のほとんどは堆積地形に着目しており、過去の洪水痕跡が消える可能性の高い侵食地形に着目した研究は見当たらない。

本研究は、河川地形に極値流量の痕跡が残っている沖積河川の谷底平野を流れる洪水流量に着目した。研究対象河川は、1998 年の大洪水において河岸侵食が顕著であって、かつ、多くの有効なデータのある栃木県の余笹川を選定した。余笹川の谷底平野の微地形と地質構成を詳細に調査した結果、蛇行河川の内岸側に形成された段差地形が過去の極値流量の側方侵食の痕跡であることを見い出した。また、沖積河川の河道形成流量時の無次元河道形成流量と無次元河幅についての福岡の式で、無次元河幅を無次元侵食幅に置き換えることにより福岡の式の適合性を確認した。その関係式を用いて谷底平野における横断方向の高位の段差位置の河幅を極値流量が流れた際の侵食幅と推定した。これらの結果より、1998 年洪水ピーク流量の約 2 倍の洪水流量が極値流量として生じた可能性があり、その洪水発生時期は、谷底堆積物の放射性炭素年代測定結果より、現在から 5,500 年前の間に発生したものと推定された。この極値流量推定値を検証するために、余笹川中流域の谷底堆積低地において氾濫堆積物の層序を調査し堆積土砂（粒径）と掃流力の関係から極値流量を求めた。また、谷底侵食低地を形成す

る余笹川支川の黒川においても侵食段差地形から極値流量を推定した。これらの極値流量をクリーガーの比流量曲線で対比した結果、余笹川谷底侵食低地で推定した極値流量が概ね妥当な値であることが明らかになった。

### 【本論文の内容と成果】

本論文は9章で構成される。各章の内容と成果の概要は以下の通りである。

第1章「序論」では、研究の目的、既往研究の課題、および本研究の特徴を述べた。

第2章「既往の極値的流量の推定手法と評価」では、過去の歴史的データに基づいた極値流量の既往の推定手法を調べ、その特徴を整理した。

第3章「新しい極値的流量の推定方法」では、極値流量の推定において着目する河川地形として過去の大規模洪水が溢れることなく確実に流下したと考えられる谷底平野に着目した。谷底平野を蛇行して流れる河川は平常時及び中小出水時は蛇行に沿って流れるものの、大規模洪水時には湾曲部をショートカットして直線的に流れ湾曲部内岸側の側方侵食が顕著になることを既往洪水の被災状況より確認した。これより、湾曲部内岸側の段差地形は極値流量の側方侵食が形成したものと考えた。

沖積地を流れる河川の河幅や断面形の決まり方には、自然の力学法則が作用し、その河道区間の支配的な流量、河床勾配、代表的な河床材料粒径の間に明確な関係が成立していることを、我が国109水系の一级河川基準地点とカナダ・アメリカにおける多くの自然河川等において福岡を示した。この関係式は「福岡の式」と呼ばれている。本研究は、国内・海外の多くの沖積地を流れる河川において、適合性が確認され一般性を備えている「福岡の式」を適用し、沖積河川の極値流量の推定を行う。

極値流量の推定では、「福岡の式」における河幅を侵食幅と考えている。すなわち、谷底平野の河道横断方向の高位の段差位置における河幅は過去の大規模洪水により形成された侵食幅である。その時の河道形成流量が極値流量を表すものとして既往洪水の無次元流量と無次元侵食幅の関係式から極値流量を推定する方法を示した。

第4章「研究対象河川の選定」では、本研究の対象河川の選定条件を述べている。過去の大規模洪水の痕跡が残っていると考えられる谷底平野を流れる河川に着目し、さらに過去の侵食地形が残存しやすい侵食が卓越する谷底侵食低地を対象河川とした。

一般に河川地形学における段差の形成要因には、地殻変動(隆起・沈降)、海水準変動(低下)、そして洪水時の侵食作用によるものがあり、前2者によって形成された段差は河成段丘の段丘崖とよばれている。本研究では、段差の形成要因を洪水時の侵食作用に限定するため、地殻変動や海水準変動の影響が小さく、過去の大規模洪水のデータが残されている栃木県の余笹川を研究対象として選定した。

第5章「余笹川流域の概要」では、研究対象河川の余笹川流域について述べている。余笹川流域の地形・地質では、那須火山群の火山砕屑物で覆われた流域内の表層地質から余笹川流域の地形形成史を考察している。余笹川及びその支川の黒川の谷底平野は、50~40万年前に発生した黒礫岩層なだれ堆積物を開析したものであり、余笹川の下流域および黒川の中・下流域では侵食が卓越する谷底侵食低地を、余笹川中流域は4~3万年前に発生した御富士山岩層なだれ堆積物により谷底堆積低地の様相を呈している。

1998年8月洪水は、栃木県北部と福島県南部を中心として東日本一帯にわたる広範囲な前線活動による集中豪雨によりもたらされた。余笹川流域の那須町では総雨量1,200mmを超える観測史上最大の記録的な降雨となり、那須町を流れる余笹川と黒川は河道流下能力の2~5倍の洪水流量により激甚な被害となった。この洪水のピーク流量は余笹川で $Q=1,740\text{m}^3/\text{s}$  (流域面積 $A=127\text{km}^2$ 、比流量 $q=13.7\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ )であった。

第6章「余笹川流域の谷底侵食低地における極値的流量の推定」では、余笹川および黒川の谷底侵食低地における1998年洪水の側方侵食幅とピーク流量の関係を「福岡の式」で表し、その関係式を用いて高位の段差地形位置の河幅から極値流量を推定している。

1998年洪水は、側方侵食による流路の拡大と、蛇行部で洪水流がショートカットして新流路を形成した箇所が多数見られ、詳細な調査が行われている。また、坂口・福岡らは谷底低地を流れる河川においてピーク流量時の流況を平面二次元洪水流解析により再現できること、および1998年洪水ピーク流量の99%流量流下時の水面幅が河道形成流量の河幅であることを示している。本研究では、これらの新流路形成箇所の侵食幅、99%流量流下時の水面幅、流路横断方向の段差地形位置での河幅との関係を調べた。その結果、坂口・福岡らが設定した1998年洪水時の99%流量の水面幅は、高位段差位置の河幅に相当するものであることが明らかになり、99%流量の水面幅は、極値流量の河幅を示すものであることが分かった。なお、現況の段差地形の位置は圃場整備などによる人工改変の影響を受けた可能性があることから、その影響が小さい昭和22年の米軍撮影の空中写真を判読し、その位置と現在の段差位置の違いを確認した。その結果、昭和22年当時の段差は上下流方向に連続しており、河川の侵食作用により形成された河川地形であることが分かり、本研究ではこの空中写真判読の段差位置に基づき極値流量の推定を行うこととした。

谷底侵食低地における検討断面は、極値流量が谷底幅いっぱいに流下することを想定し、谷底部中心線が比較的直線区間に位置する箇所であつ、昭和22年当時の段差地形が明瞭な箇所を複数箇所選定した。

谷底部の横断面形状を既往の測量成果および補足測量を基に作成した結果、谷底部横断方向には1~2段の段差地形が存在し、その高低差は0.3~1m程度であることが分かった。段差の形成過程を把握する目的で、検土杖を用いた表層1~2m(砂礫で貫入不能となる深さまで)の試料採取により、砂・シルト・粘性土・腐植土の堆積層序の確認、および放射性炭素年代測定を行った。検土杖の調査位置は、昭和22年当時の段差位置を確認しながら人工改変の影響を受けていない自然作用による堆積層序と年代を確認できる箇所として選定した。

その結果、段差の上段と下段で不連続な堆積層序が見られる場合、段差が過去の洪水の侵食作用により形成された側方侵食崖の可能性を示した。

次に、1998年洪水時の側方侵食崖位置を災害後の測量成果より読み取り、無次元侵食幅を求め、洪水ピーク流量から無次元流量を算出し、これらを「福岡の式」にプロットした。その結果は、おおむね「福岡の式」の平均式に近い関係式で表され、この式の適合性を確認できるものであつた。ここでは、1998年洪水時の侵食断面形状と極値流量流下時の侵食断面形状は相似形であり同一の無次元関係式で表現されるものと考え、大規模洪水時の侵食幅を人工改変の影響が少ない昭和22年の米軍撮影空中写真の高位段差位置の河幅から読み取り、その無次元河幅から1998年洪水時の関係式を用いて無次元流量を算出した。これより求まる極値流量は $Q=3,600\sim 3,900\text{m}^3/\text{s}$ となり、1998年洪水ピーク流量の約2倍に相当する規模であることが分かった(比流量 $q=28\sim 31\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ )。

1998年洪水は蛇行部をショートカットする新流路により湾曲部内岸側の側方侵食が拡大したことが特徴の1つであつたが、側方侵食があまり拡大しない箇所も見られた。岡田・福岡らによる複断面蛇行河道の相対水深比 $Df$ (高水敷水深/低水路全水深) $=0.3$ を閾値とする複断面低水路蛇行流れの考え方を適用することにより、側方侵食が拡大しなかつた箇所の理由が示され、その場所は低水路の深さが大きい箇所であつたことが分かった。

余笹川の左支川の黒川の谷底侵食低地においても余笹川谷底侵食低地と同様の手順により、高位の段差地形から極値流量の推定を行った。その結果、極値流量は1998年洪水ピーク流量 $Q=810\text{m}^3/\text{s}$ の約3倍の $Q=2,200\sim 2,800\text{m}^3/\text{s}$ 、比流量は $q=22\sim 29\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ と求まった。また、黒川の高位の段差位置での放射性炭素年代測定から6,100~5,600年前の堆積物の存在が明らかとなり、谷底部の地形は余笹川とおおむね同じ年代に形成されたものであることがわかつた。

第7章「余笹川流域の極値的流量の検証」では、第6章で求めた余笹川及び黒川の谷底侵食低地で求めた極値流量推定結果の確認を行っている。検証は、堆積が卓越する余笹川谷底堆積低地での洪水氾濫堆積物の痕跡から過去の洪水規模を推定し、その洪水規模と第6章で求めた極値流量を比流量で比較することにより行った。

余笹川中流域には、4～3 万年前の御富士山岩屑なだれ堆積物や 1.6 万年前以降活動が活発になった那須岳（茶臼岳）の火山噴出物の土砂供給により谷底部が埋め尽くされて形成された谷底堆積低地に過去の大規模洪水で運搬された土砂が堆積している。調査地点は、両岸が岩屑なだれ堆積物の流れ山により流路が規制されている箇所直下流で、洪水氾濫堆積物が扇状地状に堆積しやすい箇所を選定した。流路の左右岸への氾濫堆積物の分布状況を面的に把握するために、左右岸を面的に検土杖により調査し、粗砂～細砂、シルト、粘土の堆積層序を確認した。その結果、左右岸ともに 5 つの洪水ユニット（5 回の洪水氾濫堆積物）の存在が認められ、最も深い（古い）氾濫堆積物にのみ粗砂が含まれていることを確認した。

また、1998 年洪水時の氾濫堆積物の範囲と洪水位（痕跡水位）の調査から、既設護岸高よりも 0.5m 高い位置まで洪水位が上がり氾濫し、氾濫堆積物として細砂を堆積させた洪水であったことを確認した。極値流量流下時の無次元限界掃流力は、1998 年洪水時の値と同じと仮定して、氾濫堆積物に粗砂を堆積させた洪水位（氾濫水深）の条件からその流量を試算した結果、1998 年洪水ピーク流量  $Q=400 \text{ m}^3/\text{s}$  の約 2.7 倍の  $Q=1,080 \text{ m}^3/\text{s}$ 、比流量換算  $q=28 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$  と求まった。

余笹川谷底侵食低地で求めた極値流量の値は、余笹川中流域の氾濫堆積物の堆積環境から推定した過去の洪水規模の推定値、および支川の黒川の谷底侵食低地で求めた極値流量の推定値と比較した結果、比流量が概ね  $28 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$  程度の値となり、同じ洪水を表しているものと考えられた。これより、余笹川の極値流量は 1998 年洪水ピーク流量の約 2 倍の比流量  $q=28 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$  と判断した。

また、放射性炭素年代測定より、余笹川及びその支川の黒川の谷底侵食低地の高位の段丘面で確認された年代は 5,500～6,100 年前であり、この時代に現在の谷底低地の原形は形成されていたと推察した。さらに、3,300～3,400 年前の洪水堆積物が谷底侵食低地の中位段丘面や旧河道内に堆積しており、谷底堆積低地では極めて多量の氾濫堆積物を堆積させた年代でもあり、5,500 年前から現在の間で最も規模の大きな洪水（極値流量）が発生した時代と推定した。

第 8 章「余笹川流域の極値流量と他の統計的手法との対比」では、クリーガー曲線比流量との対比において、極値流量の値が南西日本の比流量曲線上付近にプロットされることが分かった。このことは、余笹川の極値流量規模の洪水は我が国において発生する可能性のある洪水規模であることを意味している。

第 9 章「結論及び展望」では、本研究で得られた成果を総括し、今後の展望について述べている。

本研究では、谷底平野（谷底侵食低地）を流れる蛇行河川が大規模洪水時にショートカットする流れにより湾曲部内岸側の側方侵食が拡大する事象に着目し、1998 年に観測史上最大の洪水被害が発生した栃木県余笹川を対象に現地の詳細な地形・地質調査を行った。その結果、谷底低地の横断方向には 0.3～1m 程度の段差地形が 1～2 段存在し、段差の上段と下段で地質構成が不連続になっている箇所ではその段差が過去の大規模洪水により形成された侵食崖であると考えた。その段差位置の河幅（侵食幅）から福岡の式を用いて極値流量を推定した。

余笹川における現世の極値流量は、1998 年洪水ピーク流量の約 2 倍で比流量  $q=28 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$  程度の洪水が 3,300～3,400 年前頃に発生したことを示した。その流量規模は、クリーガー比流量曲線における南西日本の比流量に相当し、現世における過去の気候変動を踏まえると我が国で起こり得た洪水規模であると判断した。

今後は、我が国の他の谷底侵食低地を流れる河川においても同様な手法により極値流量を推定・検証し、汎用性を高めることにより、全国の極値流量マップが作成されるようになり、気候変動に伴う極値流量規模も考慮した防災・減災計画の一助になり得ると考えている。