

論文の内容の要旨

近年、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、平成 27 年 5 月に「水防法」が改正された。そこには、浸水想定区域は想定し得る最大規模の降雨を前提とする内容が盛り込まれた。本研究では、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）における谷底平野の既往最大洪水流量（ここでは、極値流量と称する）の地形痕跡から推定する。

第 1 章「序論」では、研究の目的、既往研究の課題、および研究の特徴を述べている。

第 2 章「既往の極値的流量の推定手法と課題」では極値流量推定手法の特徴と本研究の位置づけを示している。

第 3 章「新しい極値的流量の推定方法」では、研究対象とする河川地形は、過去の大規模洪水が溢れることなく流下したと考えられる谷底平野である。福岡は、河道形成流量、河床勾配、代表的な河床材料粒径の間に明確な力学関係が存在することを示し、多くの自然河川の河幅や断面形を表現する「福岡の式」を導いた。本章では、谷底平野の洪水痕跡を示す地形データから「福岡の式」の河幅を侵食幅に代えて極値流量の推定を行っている。

第 4 章「研究対象河川の選定」では、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。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流域を選定した。

第 5 章「余笹川流域の概要」では、余笹川流域の地形、地質の特徴を述べている。

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を河幅として極値流量を推定した。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 年大洪水最大流量の約 2 倍に相当する規模であることが分かった（比流量 $q=28\sim 31\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ ）。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。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分かった。

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の形で比較することにより行った。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同程度の値となった。これより、いずれも同一の洪水であると見なされ、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、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「余笹川流域の極値的流量と他の統計的手法との対比」では、クリーガー比流量曲線との対比において、極値流量の値がほぼ、南西日本の比流量曲線上にプロットされ、余笹川の極値流量規模の洪水は我が国においても起こり得る洪水規模であることが分かった。

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、他の谷底侵食低地を流れる河川においても本手法を用いて極値流量を推定し、全国規模の極値流量マップを作成することにより、気候変動に伴う極値流量規模を考慮した防災・減災計画に資することの展望が述べられている。

論文審査の結果の要旨

近年、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、平成 27 年 8 月に社会資本整備審議会より、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、減災対策に取り組むことなどが示された。現在、想定最大外力の設定は、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、平均気温が現在よりも 2°C 程度高い時期（6,000 年前の縄文海進）を含む現世における想定最大規模の洪水（極値流量と呼ぶ）を、谷底平野に残されている地形、地質から推定し、減災計画に資することを目的としている。

本論文は 9 章で構成されている。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ている。

第 2 章「既往の極値的流量の推定手法と課題」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、本研究の位置づけを示している。

第 3 章「新しい極値的流量の推定方法」では、着目する河川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を対象とした。水理学的に一般性、適合性を備えている沖積河川の河幅に関する「福岡の式」において、谷底平野の洪水痕跡を示す地形データを調査し、地形侵食幅を河幅に代えて沖積河川の極値流量の推定を行っている。

第 4 章「研究対象河川の選定」では、過去の侵食地形が残存しやすい谷底侵食低地を対象河川とした。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余笹川流域を選定した。

第 5 章「余笹川流域の概要」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。

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 8 月洪水は、余笹川流域観測史上最大の記録的な降雨となり、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。この洪水では、詳細な水理、地形調査が行われている。坂口・福岡らは余笹川最大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 年洪水最大流量の 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。本章では、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、坂口・福岡らが設定した 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り、その水面幅は 1998 年洪水時の極値流量の河幅を示すものであることを示した。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「福岡の式」で表現されるものと考え、高位段差位置の河幅から流量を算出した。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 $q=28\sim 31\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ ）。次に、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分かった。

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の形で比較することにより行った。調査地点では、粗砂～細砂、シルト、粘土の堆積層序を確認し、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た。極値流量流下時の無次元限界掃流力は、氾濫堆積物に粗砂を堆積させた洪水位 (氾濫水深) の条件から流量を算定した結果、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 $q=28 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ が求められた。

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同程度となり、同一の洪水であると思われ、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 6,100～5,500 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。

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、クリーガー比流量曲線との対比において、極値流量の値がほぼ、南西日本の比流量曲線上にプロットされる。このことは、余笹川の極値流量規模の洪水は、我が国においても起こり得る洪水規模であることが分かった。

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、本手法により他の谷底侵食低地を流れる河川においても極値流量を推定し、汎用性を高め、全国の極値流量マップを作成することにより、気候変動に伴う極値流量規模も考慮した防災・減災計画に資するための展望が述べられている。

以上要するに、本論文は今後の気候変動に伴う洪水流量の増大、災害の激甚化に対し重要となる洪水の極値流量の推定法について、学術、技術の両面から新しい考え方、検討方法、結果を与えるものであり、学術上、河川技術上極めて重要な貢献を与えている。よって本論文は、博士 [工学] 論文として価値があるものと認める。