

中央大学博士論文

谷底平野を流れる沖積河川の地形に着目した
極值的流量の推定に関する研究

Masaki Wakui

涌井 正樹

博士（工学）

中央大学大学院
理工学研究科
都市環境学専攻

平成28年度

2017年3月

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 本論文の構成と内容	2
第2章 既往の極值的流量の推定手法と評価	5
2.1 数値モデルによる未来の極值的流量の予測とその評価	7
2.2 古気候代替指標を用いた極值的流量の推定方法及び評価	8
2.3 地形・地質学的データに基づく極值的流量の推定方法及び評価	10
2.4 本章のまとめ	14
第3章 新しい極值的流量の推定方法	16
3.1 極值的流量の推定において着目する河川地形	16
3.2 河道形成流量としての安定的な河道断面形状に関する研究	23
3.3 谷底平野を流れる河川地形から極值的流量を推定する方法本章のまとめ	30
3.4 本章のまとめ	31
第4章 研究対象河川の選定	33
4.1 研究対象河川の選定条件の整理	33
4.2 選定河川の条件適合性	36
4.3 本章のまとめ	40
第5章 余笹川流域の概要	42
5.1 余笹川流域の河川概要	42
5.2 流域の地形・地質	45
5.3 自然環境	50
5.4 社会環境	51

5.5 余笹川・黒川の河道特性	52
5.6 平成10年8月出水と被災	55
5.7 那須（茶臼岳）火山史	56
5.8 余笹川流域の歴史	59
5.9 本章のまとめ	61
第6章 余笹川流域の谷底侵食低地における極值的流量の推定	63
6.1 余笹川における1998年洪水に関する既往研究のレビュー	63
6.2 余笹川における極值的流量に関する既往研究のレビュー	64
6.3 余笹川の谷底侵食低地における極值的流量の推定	64
6.3.1 余笹川検討断面の選定	64
6.3.2 現地での段差の計測及び表層地質の調査方法（検土杖の説明）	66
6.3.3 堆積土砂の年代測定方法	67
6.3.4 調査結果の整理及び考察	70
6.3.5 福岡の式を用いた極值的流量の推定	73
6.3.6 平成10年出水で側方侵食が大きくなかった箇所における極值的流量の考察	74
6.4 黒川の谷底侵食低地における極值的流量の推定	75
6.4.1 黒川検討断面の選定	75
6.4.2 調査結果の整理及び考察	77
6.4.3 福岡の式を用いた極值的流量の推定	78
6.5 本章のまとめ	80
第7章 余笹川流域の極值的流量の検証	82
7.1 余笹川の谷底堆積低地における極值的流量からの検証	82
7.1.1 検討箇所の選定	82
7.1.2 調査方法	82
7.1.3 調査結果	85
7.1.4 極值的流量の試算	91
7.2 余笹川流域における極值的流量	94

7.3 余笹川及び黒川の放射性炭素年代測定からの谷底形成過程の考察	94
7.3.1 放射性炭素年代測定結果の整理	94
7.3.2 洪水発生年代及び谷底低地形成過程の考察	98
7.4 本章のまとめ	101
第8章 余笹川流域の極值的流量と他の統計的手法との対比	102
8.1 余笹川1998年豪雨の確率規模	103
8.2 全国の比流量との対比	104
第9章 結論及び展望	108
9.1 本研究の結論	108
9.2 今後の展望と課題	109

謝辞

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

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。

1.2 本論文の構成と内容

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「既往の極值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「新しい極值的流量の推定方法」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屑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屑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值的流量の推定」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への侵食幅、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り、かつ、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った。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つであったが、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っ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ったことが分かった。

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った。

第7章「余笹川流域の極値流量の検証」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
の直下流で、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 $q=28 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ と求めた。

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。

第2章 既往の極值的流量の推定手法と評価

平成26年に「東日本大震災を教訓とした安全安心で持続可能な社会の形成に向けて」の提言¹⁾が日本学術会議より示された。この背景は次の通りである。平成20年に最近の大規模災害の増加を踏まえて地球惑星科学委員会より「陸域-縁部海域における自然と人間の持続可能な共生へ向けて」の提言²⁾が取りまとめられていた。それにも係らず、平成23年3月11日の東日本大震災ではこの提言が活かされず、また地震規模の過小評価、津波高の過小予測、津波警報の伝達不備等が重なり、被害が拡大した。これを受けて、大規模災害を地球人間圏科学の視点から捉え、安全安心で持続可能な社会の実現に向けて問題点を指摘し、あらためて提言を行うこととしたものである。

新たな提言の中には、「極端な気象・気候現象による災害リスク増大への対応」として、強い雨や台風の最大風速の変化等の極端な気象・気候現象の予測能力を更に高めるべきである、と指摘されている。このことも踏まえて、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」³⁾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。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」⁴⁾が公表され、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。

洪水に関する想定最大外力の研究は、様々な分野で行われている。IPCC第5次評価報告書⁵⁾では、地球温暖化に伴う気候変動により、21世紀末には大雨による降水量が全国平均で今よりも10.3～25.5%増加すると予測している。この予測は、大気・海洋・陸地・雪氷などの変化を考慮して、流体力学・力学・化学・物理学・生物学などの方程式を用いて地球の気候を再現し、気候の変化を表現する全球気候モデルにより行うものである。このモデルの検証は次のように行われている。いくつかの過去の気候のエポックについて統合的に古気候代替指標データを収集し、古気候シミュレーションを行い、それによって、過去の気候変動のメカニズムを調べるとともに、データとモデルの比較を通してモデルの評価・検証を行う。このように、気候変動予測に関する研究は進められているものの、想定し得る最大規模といった低頻度の現象に地球温暖化が及ぼす影響等の研究は現段階においては途上であり、気候変動予測シミュレーションから想定最大外力を予測することは難しいのが現状である。

このため、現時点での技術水準を踏まえ、これまでの水理・水文観測、気象観測等の結果を用いて、統計的手法により想定最大外力を設定する方法が海外、および我が国で行われている⁶⁾⁷⁾。我が国では、過去に観測された大雨は同じ地域区分内であれば同様の雨が降り得るとの考えのもと、地域区分ごとに観測された最大の降雨量に基づき、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している。

これらの方法とは別に、現在～未来の気候を過去の同様な気候と対比し参考にすることで、ある程度未来の想定最大外力を予測することも可能と考えられており、過去の洪水の最大流量（ここでは極値流量と称する）を調べる研究が行われている。

本章では、これまでの極値流量推定の研究内容を整理し、その課題について言及する。ここで極値流量とは過去の最大洪水流量を意味するものであるが、その過去の期間を決めておく必要がある。

21世紀末にける世界平均気温の変化は、温室効果ガス排出のシナリオに応じて、低位安定シナリオ（厳しい緩和対策を講じる場合のシナリオ）を除くすべての代表的濃度経路シナリオで1850～1900年の平均に対して1.5°Cを上回る可能性が高い（66%以上）、また高位安定シナリオと高位参照シナリオ（何も対策をとらない）では2°C

を上回る可能性が高く（66%以上）、中位安定シナリオではどちらかといえば上回る（確率 50%以上）、と予想されている⁵⁾。すなわち、世界平均気温は 100 年後には 2°C 程度上昇する可能性がある。一方、1 万年前から現在までの間の世界平均気温の経年変化を図 2-1 に示す。

1 万年前とは、およそ 7 万年前に始まった一番新しい氷期（最終氷期）がほぼ終了した時期であり（図 2-2）、その後 6,000 年前の縄文海進のピーク時には現在よりも気温が 2°C 程度高くなり海水準は現在よりも 2~3m 高い時期があった。その後、5,000~4,000 年前には気候は冷涼化・湿潤化し、降水量も増加した。一般に沖積平野はこの時期にできたとされている。4,000~3,000 年前には一旦温暖となるが、2,500~2,000 年前は気候が冷涼化し、その時期以降現在に至るまでは、徐々に気温は上昇傾向にある。

本研究における極値流量の対象期間は、これらの気温変化の動向を踏まえて、現在よりも平均気温が 2°C 程度高い時期（縄文海進）を含む、最終氷期終了の 1 万年前から現在に至るまでの、いわゆる現世（完新世）を対象とする。

これまでの極値流量を推定する方法には、図 2-3 に示すように上述の数値モデル（気候変動モデル）による方法、過去のデータから推定する方法がある。以下にこれらの極値流量を推定する方法とその評価について述べる。

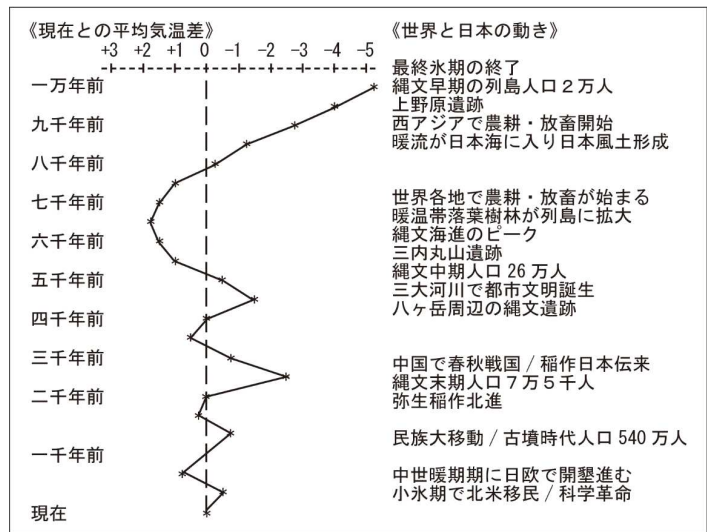


図 2-1 過去 1 万年間の平均気温の変動⁸⁾

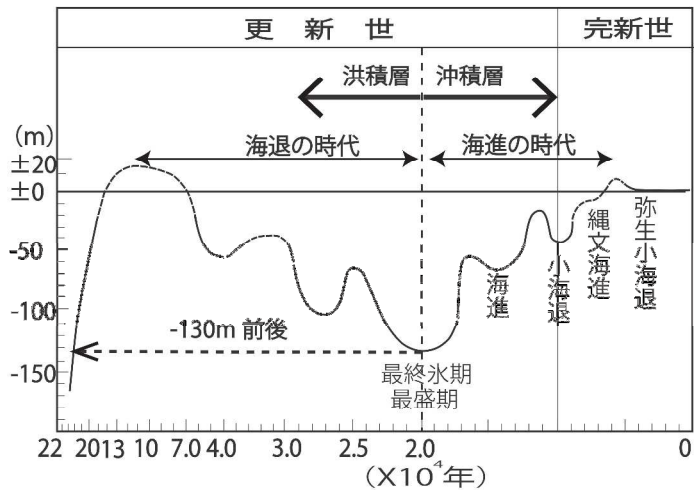


図 2-2 最終氷期の海水準面変動

- ◆ 数値モデルに依存する方法
 - 気候変動モデル（過去の気候を再現、未来の気候の予測）
- ◆ 過去のデータに依存する方法
 - 古気候学的データに基づく方法：気候変動モデル（過去の気候を再現）併用
 - 年輪からの推定
 - 花粉・化石からの推定
 - 氷床コアからの推定
 - 地形・地質学的データに基づく方法

図 2-3 これまでの極値流量の推定方法

2.1 数値モデルによる未来の極值的流量の予測とその評価

文部科学省研究開発局が平成 24 年に発表した「超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究」⁹⁾の中で将来の極端流量の予測結果が示されている。将来の極端流量変化について、現在 (1979-2004)・近未来 (2015-2039)・21 世紀末 (2075-2099) の 3 期間の気候実験 (シミュレーション) 結果に基づく日単位流量解析結果から 26 年 (現況) および 25 年 (近未来, 21 世紀末) 分の年最大日流量を全グリッドで出力し、確率流量を極値分布の Gumbel 分布 (L-Moment 法を使用) を適用することにより洪水流量と渇水流量について算出している。図 2-1-1 は 21 世紀末ならびに近未来における疑似温暖化モデルにおける極端洪水流量 (50 年確率の年最大日流量) の全球スケールでの分布図である。極端洪水流量については、全体的に将来大きくなる傾向が伺える。なお、増加/減少の空間的分布には大きな地域差が見られ、その分布は近未来および 21 世紀末とも全体的には似通った傾向であることが分かった。表 2-1-1 はこの結果 (平均および標準偏差) を大陸ごとに集計したものであるが、近未来では世界平均で 17~20% (標準偏差 37~44%), 21 世紀末では 40~45% (同 47~56%) と大きな増加が推定される (範囲は 3.1S と 3.2S* の値の違いに相当) 変化率では、オーストラリア、アフリカなど特に乾燥帯での変化が激しいが、21 世紀末ではアジア、北アメリカなどの変化も大きい。この結果によれば、最悪のケースは 3.2S モデルにおいて 21 世紀末に 101% (45%+56%) まで増大する可能性があることを示している。

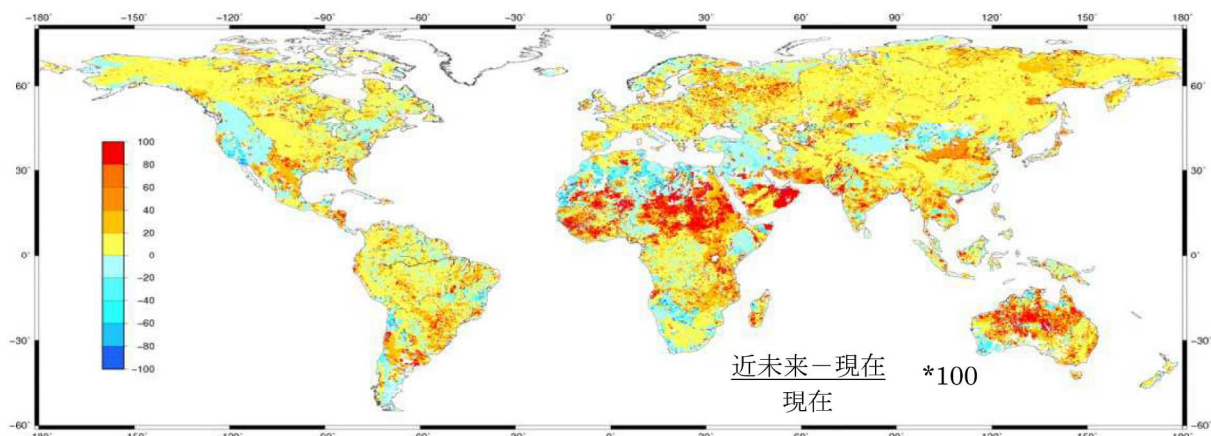
しかしながら、IPCC の第 5 次評価報告書では、『現段階において、このモデルは降水量の再現性能は地上気温ほど高くはない。地域規模では降水量はそれほどうまく再現されておらず、観測の不確実性があるために評価は依然として難しい』とまとめられている。これは、モデルのメッシュ間隔が雨域よりも大きいことにより、実際の局所的な降雨現象を再現できていないことなどが理由として考えられる。また、降雨量を再現できたとしてもその当時の流域の荒廃状況の再現や流出係数の評価にも課題があることから、その値の検証は依然として難しいと考えられる。

表 2-1-1 現在気候から近未来及び 21 世紀末気候への 50 年確率洪水の増加割合と標準偏差 (%)⁹⁾

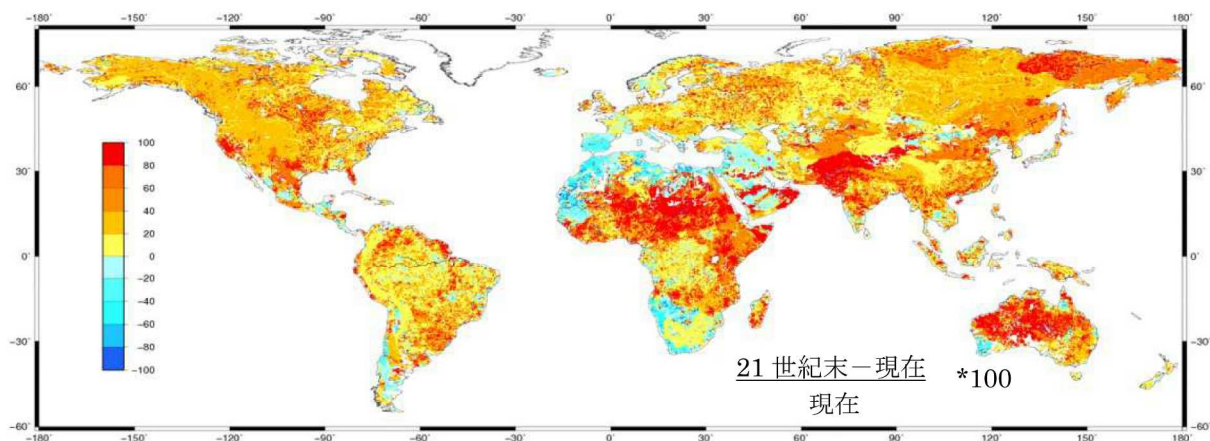
15 万 km² 以上の流域に属する 50 年確率年最大日流量 100 m³/s 以上の河道ピクセルについて集計

3.1S (mean)	World	Africa	Asia	Oceania	N. America	S. America	Europe
Near Future	17	30	12	13	15	12	13
End of 21C	40	56	42	32	35	32	15
3.2S (mean)	World	Africa	Asia	Oceania	N. America	S. America	Europe
Near Future	20	34	18	58	9	12	15
End of 21C	45	58	50	87	43	28	23
3.1S (stdv)	World	Africa	Asia	Oceania	N. America	S. America	Europe
Near Future	37	53	28	47	31	22	25
End of 21C	47	60	43	54	40	32	31
3.2S (stdv)	World	Africa	Asia	Oceania	N. America	S. America	Europe
Near Future	44	58	36	65	32	30	23
End of 21C	56	73	51	72	45	36	29

※3.1S, 3.2S モデルは、いずれも 20km メッシュの超高解像度全球大気モデルであるが、3.1S モデルに対し北西太平洋の熱帯低気圧発生数、東アジアおよび日本域における降水量・海面気圧・ジェット気流の季節変化の改善を試みたのが 3.2S モデル



近未来気候と現在気候の変化率 (3.2S 利用, BC 利用)



21世紀末気候と現在気候の変化率 (3.2S 利用, BC 利用)

図 2-1-1 極端洪水流量 (50 年確率年最大日流量) の現在気候から 21 世紀末気候への変化率 (%) ⁹⁾

2.2 古気候代替指標を用いた極值的流量の推定方法及び評価

古気候学が現代気候学と違うのは、対象となる気候を、直接、計測機器により科学的に観測した結果が得られない点である。そこで、地球科学に求められる「観測に基づいた推定や考察」を行うため、間接的に観測する方法が採られていることである。その手段には様々なものが用いられており、古気候代替指標と呼ばれている。その代表的な指標と古気候推定方法、および極値流量推定方法を以下に示す。

(1) 年輪

樹木年輪気候学を学問的に体系づけ、今日の樹木年輪年代学の礎を築いたのは、アメリカの天文学者 A. E. Douglass (1983) である¹⁰⁾。同年代に生育した多数の年輪サンプルから標準年輪曲線を作成し、その幅の大小から気候を知ることができる。温暖な時期は幅が広く、寒冷な時期は幅が狭くなる。さまざまな樹種・生育環境・樹齢のサンプルを集めた精度の高い標準年輪曲線を、地中の枯死した木の年輪と比較することで、

過去の気候の推定に応用することができる。現在、年輪に基づく推定では過去約1万年程度の気候が推定されている。高い精度で年代を特定することができる反面、樹木が生物であり、肥大成長量、即ち年輪幅の変動には気候学的因子だけでなく生理生態学的因子が大きく影響してしまうという問題がある。この問題に対して、樹木年輪の同位体比、特に年輪から抽出したセルロースの酸素同位体比には、樹木の生物学的因子の影響をほとんど受けず、ほぼ純粋に気候学的因子のみを記録できるという特長があることが近年明らかとなった¹¹⁾。中塚らは、本州の中部、東海地方や近畿地方において約2,500年前までの気候を1年単位で復元している。この技術により復元を行うには、4,000年、5,000年の材齢の長い木（試料）を一定量集めなければならないことなどの課題がある。

(2) 氷床コア

1935年にSorgeがグリーンランドのEismitteにおける15m深度の穴の調査を行ったのが最初の氷床内部の探査であった。氷床コアには、過去に降った雪が積み重なっており、雪が降った当時の空気もその中に閉じこめられている。したがって、その空気を抽出することで、その当時の空気の組成などを知ることができる。また、氷の水分子中の水素や酸素の同位体比を調べることで、過去の海面気温の変化を推定することができる。条件の良い資料では最大70万年前までの気候が推定でき（EPICA、ドームふじなど）、その他のものでも数十万年間程度の気候を推定できる。それより古いものは、融解によってすでに失われていると考えられている。また、氷床コア中の宇宙線生成核種を解析することで太陽活動や地球磁場の歴史を復元したり、雪氷コア中に含まれる微生物を解析することで生命の進化が解き明かされるように、学際的な研究への発展が期待されている。このように、地球の大局的な気候変動や環境変動を把握することに向いてはいるものの、極値流量といった限定的な地域での低頻度の気候を解明することは難しい。

(3) 花粉・化石

化石とは、過去の生物（古生物）の痕跡を言う。化石によって、地質年代が決められてきた。地質年代における時代の境界は、その当時の主要な生物の絶滅（大量絶滅）を意味する。従って、過去の地球史におけるさまざまなイベントの発生の結果を反映している。

化石を使った年代測定は、どの生物種がいつ出現していつ絶滅したかを事前に調べて年代尺度を作っておくことが必須となる。その尺度を作るためには放射年代測定法や、他の年代測定法の助けが必要となる。いちど年代尺度ができれば、あとは決め手になる化石や、化石の組み合わせを地層中から見つければ年代測定を容易に行うことができる。

また、湖底や海底の堆積物に含まれる動植物の化石や花粉、堆積物中の物質の同位体比の分析によっても過去の気候変化の様子を知ることができる。傾向として、温暖期には生物の死骸や花粉などの堆積物は増加し、寒冷期には減少する。それらの変化傾向と、放射年代測定などの年代測定法を組み合わせ推定する。

全球気候モデルを用いた数値実験（シミュレーション）により、(1)～(3)などの古気候データ（＝過去の気候状態を復元したデータ）の比較からモデルを検証しつつ、古気候の気温、降水量や大気・海洋循環の変化などを解析し、異なる気候状態を作り出した古気候のメカニズムを解明する。そこで得られた降水量を用いて降雨流出解析を行い、極値流量を推定することが可能となっている。IPCC第5次評価報告書では、再現された古気候の極端現象のモデル間の幅は、ほとんどの地域において観測結果に基づく推定値の幅と同程度である、と報告されている。さらに、20世紀後半における極端に暑い日と夜及び極端に寒い日と夜の頻度の変化は、モデルと観測結果の間で整合しており、アンサンブルした世界平均の時系列はおおむね観測推定値の範囲内に収まっており、過去

の極端現象をおおむね再現できる状況である。ただし、降雨量を再現できたとしてもその当時の流域の荒廃状況の再現や流出係数の評価などの流出解析の精度に課題は残る。

2.3 地形・地質学的データに基づく極值的流量の推定方法及び評価

地形・地質から過去の河川の流れを復元する方法は様々あり、20世紀中頃から多くの研究が行われている。代表的な方法は以下の3つである。

- 1) 当時つくられた川の河道の地形から復元する
- 2) 当時、河川が堆積した堆積物の粒の大きさから復元する
- 3) 洪水がどの高さまで上昇したかを示す洪水堆積物を使い過去の洪水を復元する

1) の研究は、河川蛇行の波長と河幅、流量等の間に経験式を定め、過去の流量を推定するものである。Dury (1964)¹²⁾は、無能河川における谷蛇行の波長と現河道の蛇行波長に著しい差があることに注目し、谷蛇行形成期には、現在よりはるかに大きな支配流量があったとし、その量を推定した。Speight (1965)¹³⁾は、流路に沿った蛇行の方位角の変化について、パワースペクトルを求め、蛇行波長に複数のモードが存在することを指摘した。Ferguson (1975)¹⁴⁾は、イギリスの河川について、同様の解析と自己相関解析から、複数の蛇行モードはそれほど顕著ではないことを指摘しながら、卓越波長と河幅の間に良い相関があることを確認している。また、William (1984)¹⁵⁾は Brice(1973)¹⁶⁾の方法に依って、蛇行流路跡の曲率半径を調べ、過去の流量の推定を試みている。しかしながら、これらの流量は蛇行時の流量であり、これが極値流量であるかどうかは不明である。さらに、スペクトル解析における長波長成分の抽出(分解能)精度に課題がある。

2) の研究は、堆積した堆積物の大きさから河川の状態を復元するものであり、堆積物の中でも粒径の大きなものに着目し、その運搬能力から降雨規模を大まかに推定する方法である。しかし、その当時の河道形状が不明なことから定量的な評価は難しく、激しい雨が少なかったようである、などの定性的な傾向を把握する程度であり、極値流量を推定することは難しい。

このように、1)、2)はその当時の川の流れの状態を大まかに把握する程度の方法である。極値流量を推定する方法としては、3)の方法が良く使われている。洪水堆積物に着目した研究は、合衆国の研究グループによって進められており、特に slack water deposits (以下 SWD と略す)(淀み水堆積物)の有効性が指摘されている(Baker et al., 1988)¹⁷⁾。SWDは、河川の洪水流の流速が局所的に低下する場所で、洪水流に含まれていた浮遊土砂(主に砂とシルト)が堆積して形成される。局所的な流速の低下は、支流の合流点や河川の側壁の窪みといった河幅が急に広がる場所で生じやすく、そこでは洪水のたびに新たな土砂が上に積み重なる。したがって、SWDには多数の洪水が記録されていることがあり、洪水の規模・頻度の復元に有用である。側壁の窪みに堆積したSWDの測定事例を図2-3-1に示す。

さらに、放射性炭素年代測定法などを用いて地層の年代が推定されると、洪水の発生周期を算出できる。SWDの高度と流出モデリングの結果を合わせることにより、洪水の流速と流量も推定できる。

放射性炭素量計測による堆積年代の測定の信頼性は高いものの、年代測定の精度に比べて堆積環境時の地形・動水勾配(河床勾配)、及び粗度係数が推定値となるため流量算定の精度が低いことが欠点となる。

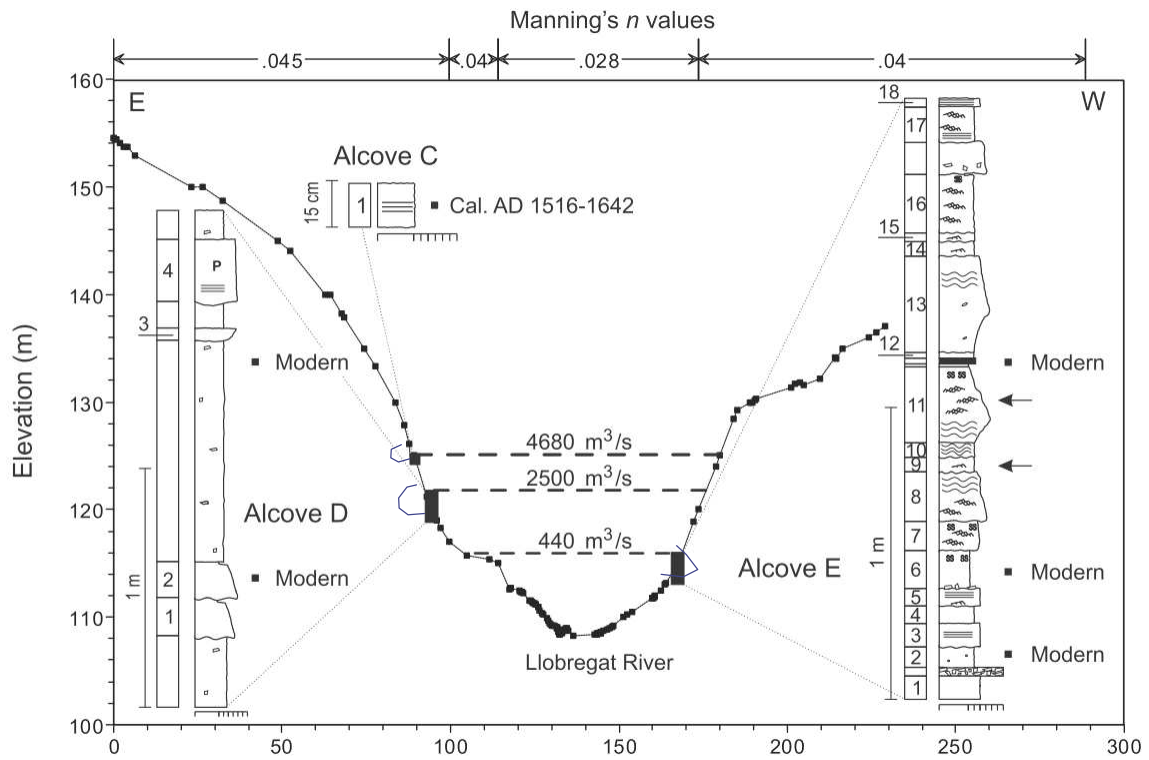


図 2-3-1 SWD による古洪水復元の事例（側壁の窪みに古洪水時の堆積物が堆積している）¹⁹⁾

SWD による古洪水の復元に関する研究は、世界各地で行われている。主な研究成果（極値流量の規模と時期）を表 2-3-1 に示す。世界各国の河川は、その規模や気象（降水量）が異なるため、単純な比較はできないものの、参考までに表 2-3-2 に代表的な河川の比流量を示す。

表 2-3-1 SWD による古洪水の復元に関する研究成果

河川名	国 州	流域面積 (km ²)	主な洪水の発生時期と規模 (m ³ /s)	年間 降水量 ¹⁾ mm
長江 ¹⁸⁾	中国	1,000 ×10 ³	1981年に最近の100年間で最大の $Q=85,700\text{m}^3/\text{s}$ が発生。SWDにより1870年の $Q=105,000\text{m}^3/\text{s}$ の洪水規模は過去3,000年間の最大流量であること、さらに3~4万年前に特大規模の洪水が $Q=120,000\sim 130,000\text{m}^3/\text{s}$ で発生していたことが分かった。1981年洪水が100年超過確率洪水規模とすると、極値流量はその1.4~1.5倍の規模となる。また、長江の平均流量の比流量は表2-2-2より $0.016\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ 。極値流量の比流量は $0.125\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ で平均流量比流量の約8倍に相当する。	南京 1,100 mm
リョブレガート川 ¹⁹⁾	ス ペ イン	4,948	SWDによる古洪水の復元により、約3,000年前まで遡り、平常時流量の約100倍の極値流量の痕跡を明らかにした。	マドリト 437mm
ペコス川	テ キ サ ス	90,000	最大洪水流量 $Q=23,000\text{m}^3/\text{s}$ 、比流量 $q=0.26\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ 2,000年遡る	エルパソ 246mm
デビス川	テ キ サ ス	11,150	最大洪水流量 $Q=16,600\text{m}^3/\text{s}$ 、比流量 $q=1.49\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ 2,000年遡る	エルパソ 246mm
ベルデ川	ア リ ゾ ナ	15,000	最大洪水流量 $Q=5,400\text{m}^3/\text{s}$ 、比流量 $q=0.36\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ 1,000年遡る	フェニックス 204mm
ボルダ川	ア リ ゾ ナ	461	最大洪水流量 $Q=400\text{m}^3/\text{s}$ 、比流量 $q=0.87\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ 180年遡る	フェニックス 204mm
エスカランテ川	ホ ス ト ラ リア	800	最大洪水流量 $Q=720\text{m}^3/\text{s}$ 、比流量 $q=0.9\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ 1,000年遡る	キャンベラ 587mm
キャサリン川	ホ ス ト ラ リア	6,390	最大洪水流量 $Q=40,000\text{m}^3/\text{s}$ 、比流量 $q=6.26\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ 100年遡る	キャンベラ 587mm
フィンク川	ホ ス ト ラ リア	5,000	最大洪水流量 $Q=6,000\text{m}^3/\text{s}$ 、比流量 $q=1.2\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ 1,000年遡る	キャンベラ 587mm

注1 気象庁, National Oceanic and Atmospheric Administration のデータ

表 2-3-2 世界の主な河川流量の比較²⁰⁾

河川名	流域面積(km ²)	長さ(km)	比流量 ¹⁾ (m ³ /s/100km ²)	平均流量 ²⁾ (m ³ /s)
長江	1,775,000	6,300	1.60	28,000
黄河	980,000	4,670	0.20	1,480
インダス川	960,000	2,900	0.84	6,700
メコン川	810,000	4,500	1.23	18,300
ナイル川	3,007,000	6,690	0.10	2,830
マレー川	1,080,600	2,590	0.034	740
ドナウ川	817,000	2,860	0.92	6,430
ライン川	224,000	1,320	1.45	---
セーヌ川	77,800	780	0.72	---
テムズ川	12,600	405	0.64	---
ミシシッピ川	3,248,000	6,210	0.27	18,400
コロラド川	590,000	2,320	0.094	640
アマゾン川	7,050,000	6,300	2.90	175,000
阿武隈川	5,400	239	2.36	124
那珂川	3,270	150	3.26	71

注1 流域面積, 長さ, 比流量は阪口ほか (1995) より引用

注2 国外河川の平均流量は, The World Resources Institute et al (1988) より引用

国内の平均流量は, 国立天文台編 (理科年表) より引用

表 2-3-1 より, 海外河川の古洪水の規模は, 平常時流量の 10~100 倍の結果が得られている. 表 2-3-2 より, 日本の河川は流域規模に比べ河川流量が豊富である. 日本の河川の比流量は海外諸河川に比べ 1~2 オーダー大きい. 古洪水の規模を平常流量の比で単純に比較することはできない.

SWD を用いた古洪水の復元は, 1980 年代以降に合衆国南西部の乾燥地域で活発になった. 乾燥地域で SWD が有効な理由として, 1) 雨の頻度が低いため堆積した SWD が侵食されにくい, 2) 化学的風化や動植物による地層の擾乱が生じにくく SWD の構造を読み取りやすい, 3) 植生の被覆が少なく現地で SWD を発見しやすい, などが挙げられる. その後, オーストラリア, スペイン, インドなどの乾燥~半乾燥地域でも SWD を用いて過去数百年~数千年間の洪水の履歴が明らかにされた. 一方, 日本のような湿潤地域では, 堆積物が侵食によって失われやすく, 仮に残されていても風化や動植物による擾乱によって堆積構造の把握が困難になるため, SWD の利用は困難と考えられていた (Baker et al., 1988). 近年, 日本においても栃木県烏山町的那珂川沿川の河岸の崩落により露出した SWD を発見し 30~40 回の洪水記録を確認したとの報告がある (Jones et al., 2001²¹⁾). 古洪水の流量規模までは再現されていないが, SWD の保存条件が揃えば今後日本においても SWD の研究が進む可能性がある.

一方, 河川が形成する侵食地形に着目した極値流量に関する研究は見当たらない. これは, 蛇行などの河道の変遷に伴い侵食作用による極値流量の痕跡は消えてしまい残っていないと考えられているためと推察される. 本研究は, 特定の地形種においてこの侵食地形の痕跡から極値流量の推定を試みるものである.

2.3 本章のまとめ

本研究は、東日本大震災を教訓として、また近年の地球温暖化に伴い雨の降り方が激甚化していることを踏まえ、災害リスク情報と危機感を共有し減災に取り組むために、河川での想定し得る最大規模の洪水流量の把握を目的とするものである。本章では、現在の我が国における想定し得る最大規模の洪水流量の設定方法、および未来の事象を予測するのに過去の事象を参考にしようとする研究として現世（今からおおよそ 10,000 年前まで）における最大洪水流量（極値流量）を復元する研究を整理し、その特徴や課題について言及した。以下に確認された事項を列記する。

- ① 地球の気候を再現する全球気候モデルを用いた洪水に関する想定最大外力の研究では、21 世紀末には大雨による降水量が全国平均で今よりも 10.3~25.5%増加すると予測している。しかし、想定し得る最大規模といった低頻度の現象に地球温暖化が及ぼす影響等の研究は現段階においては途上であり、気候変動予測シミュレーションから想定最大外力を予測することは難しいのが現状である。
- ② 現時点での技術水準を踏まえ、これまでの水理・水文観測、気象観測等の結果を用いて、統計的手法により想定最大外力を設定する方法が海外、および我が国で行われている。我が国の手法は、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である。
- ③ 現世における古気候代替指標を用いた極値流量の推定方法には、年輪、氷床コア、花粉・化石が代表的であり、それぞれ現在も古気候推定（復元）に寄与している。特に、年輪や花粉・化石は、全球気候モデルにおいて現世の気候の極端現象の再現を確認するための検証に使われている。そのモデルの確立により古気候の極端現象を地域的に定量化することが可能となり極値流量を推定することができる。近年の年輪に関する古気候復元は、1 年単位で数千年前までの気候を再現することが可能と言われている。ただし、降雨量を再現できたとしてもその当時の流域の荒廃状況の再現や流出係数の評価などの流出解析の精度に課題は残る。
- ④ 地形・地質学的データに基づき極値流量を推定する方法には、1) 当時作られた蛇行形状などの河道地形から推定する方法、2) 河川堆積物の粒径から推定する方法、3) 洪水時の洪水堆積物の高さから推定する方法がある。極値流量を求める方法として最も良く使われているのは 3) であり、特に slack water deposits（以下 SWD と略す）（淀み水堆積物）の有効性が指摘され、世界各国で古洪水の復元が行われている。SWD の高度と流出モデリングの結果を合わせることで、洪水の流速と流量を推定することが可能となる。また、放射性素年代測定法などを用いて地層（堆積物）の年代が推定されると、洪水の発生周期が明らかとなる。
- ⑤ SWD を用いた古洪水の復元は、1980 年代以降に合衆国南西部の乾燥地域で活発になった。乾燥地域で SWD が有効な理由として、1) 雨の頻度が低いいため堆積した SWD が侵食されにくい、2) 化学的風化や動植物による地層の擾乱が生じにくく SWD の構造を読み取りやすい、3) 植生の被覆が少なく現地で SWD を発見しやすい、などが挙げられる。その後、中国、オーストラリア、スペイン、インドなどの乾燥～半乾燥地域でも SWD を用いて過去数百年～数千年間の洪水の履歴が明らかにされた。
- ⑥ 日本のような湿潤地域における SWD の研究は、堆積物が侵食によって失われやすく、仮に残されていても風化や動植物による擾乱によって堆積構造の把握が困難になるため、SWD の利用は困難と考えられ、研究事例はほとんど無い。ただし、SWD の保存条件が揃えば今後日本においてもこの研究が進む可能性はある。
- ⑦ 一方、河川が形成する侵食地形に着目した極値流量に関する研究は見当たらない。これは、蛇行などの河道の変遷に伴い侵食作用による極値流量の痕跡は消えてしまい残っていないと考えられているためと推察される。本研究は、特定の地形種においてこの侵食地形の痕跡から極値流量の推定を試みるものである。

【参考文献】

- 1) 提言 東日本大震災を教訓とした安全安心で持続可能な社会の形成に向けて, 日本学術会議 地球惑星科学委員会 地球・人間圏分科会, 2014.
- 2) 提言 陸域一縁部海域における自然と人間の持続可能な共生へ向けて, 日本学術会議 地球惑星科学委員会, 2008.
- 3) 新たなステージに対応した防災・減災のあり方, 国土交通省, 2015.
- 4) 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), 国土交通省, 2015.
- 5) 気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第5次評価報告書(AR5), 環境省, 2014.
- 6) 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) 参考資料, 国土交通省, 2015.
- 7) 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, 国土交通省, 2015.
- 8) 大平一典: 縄文海進と地球温暖化に関する一考察, 国土交通省 国土技術政策総合研究所
- 9) 21世紀気候変動予測革新プログラム: 超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究 平成23年度研究成果報告書, 文部科学省, 2012.
- 10) G.E.Webb, Tree rings and telescopes. The scientific career of A.E. Douglass, University of Arizona Press, Tucson (1983).
- 11) 中塚武: 樹木年輪セルロースの酸素同位体比による古気候の復元を目指して, 北海道大学 Low Temperature Science, 65: 49-56, 2007.
- 12) DURY, G. H. : Principles of underfit streams, U. S. Geological Survey Professional Paper, 452-A 1964.
- 13) SPEIGHT, J. G. : Meander spectra of the Angabunga river. Journal of Hydrology, 3, 1-15, 1965.
- 14) FERGUSON, R. I., Meander irregularity and wavelength estimation. Journal of Hydrology, 26, 1975.
- 15) WILLIAMS, G. P., : Paleohydrological methods and some examples from Swedish fluvial environments, II -River meander. Geografiska Annaler, 66A, 89 -102. 1984.
- 16) BRICE, J., : Meandering pattern of the White river in Indiana. 178-200, In an Analysis of Fluvial Geomorphology(ed. M. MORISAWA), 1973.
- 17) Baker, V.R., Kochel, R.C. and Patton, P.C., Eds. : Flood Geomorphology. John Wiley & Sons, New York, 503pp, 1988.
- 18) 葛兆帥, 楊達源, 李徐生, 任朝霞: 晚更新世晚期以来的长江上游古洪水记录, 第四纪研究, 第24卷 第5期, pp555-560, 2004
- 19) V.R. Thorndycraft, G Benito, M. Rico, A. Sopena, Y. Sánchez-Moya, and A.Casas : A long-term flood discharge record derived from slackwater flood deposits of the Llobregat River, NE Spain, 2005.
- 20) 伊藤達也: ダムによる水資源開発の論理とその問題点, 金沢大学文学部地理学報告, No.8, 1997
- 21) Jones, A.P., Shimazu, H., Oguchi, T., Okuno, M., and Tokutake, M. : Late Holocene slackwater deposits on the Nakagawa River, Tochigi Prefecture, Japan. Geomorphology, 39, pp39-51, 2001