

令和元年度台風19号による洪水災害と降雨流出特性

Flood Disaster and Rainfall-Runoff Process of Typhon No. 19 (Hagibis) in 2020

佐山敬洋

Takahiro SAYAMA

Synopsis

Typhoon No. 19 caused severe flood disasters in October 2019 with total 142 levee breaching. Our field survey conducted mainly in Tochigi and Miyagi prefectures suggested that flooding along the tributaries were categorized into: A) ponding-type at river merging points with back-water effects, B) flowing-type on floodplains in flat areas, C) flowing-type from valley bottom plains or alluvial fans, and D) water and sediment disasters in mountain areas. Many flooding locations in Tochigi prefecture, including the upstream of the Watarase River, were categorized into C) with some cases of B). On the other hand, in the upstream of the Abukuma river, the group C) dominated with a few exceptions of D). These differences were mainly due to the rainfall intensity, contributing areas and topography. Numerical simulation covering the wide range indicated that flood peak runoff height reached or exceeded 30 mm/h along such tributaries where the levee breaching occurred in Tochigi prefecture.

キーワード: 中小河川, 洪水予測, メソアンサンブル, 台風19号

Keywords: tributaries, flood forecasting, meso-ensemble, Typhoon No. 19 (Hagibis)

1. はじめに

令和元年東日本台風(台風19号)は、10月8日から10日にかけて915 hPaの猛烈な台風として日本に接近し、10月12日19時前に伊豆半島に上陸した。10月12日から13日にかけて関東・東北・北陸地方を含む広域で大雨となり、箱根町で12日の日雨量が922.5 mm(降り始めからの総雨量は1001.5 mm)に達し、日雨量の全国記録を更新した。Fig. 1は、10月11日9時から14日9時までの(レーダアメダス解析雨量に基づく)累積雨量分布を示しており、特に関東山地の東向き斜面で総雨量が多いことが分かる。気象庁の報告によれば、12時間から24時間雨量でみたときに過去の記録を更新した地点数が多くなり、アメダス観測による統計で、それぞれ120地点、103地点で記録を更新した(国土交通省, 2019)。なお、西日本豪雨も広域で大量の雨が降った事例である。西日本豪雨は、

台風19号に比べると72時間雨量など、より長時間で過去の記録を更新した地点数が多い特徴を有していた(西日本豪雨による最大72時間降水量は122地点で記録を更新)。

Fig. 2は、主要流域の基準地点に着目した際の、流域平均雨量と河川水位を示す。本図の流域平均雨量は、日本気象協会(2019)の資料に基づいて作図している。計画降雨と実績2日雨量、計画高水位と実績水位を比較している。ここで示す主要な河川流域のうち、久慈川、那珂川、多摩川、相模川、千曲川、阿武隈川で計画雨量を上回る降水量が降っていたことが分かる。利根川と荒川の計画降雨は3日間雨量を基準としているのに対し、実績雨量は2日雨量を示す。特に利根川流域において2日間で計画に概ね匹敵する程度の降雨が確認された。また、河川水位に着目すると、多摩川、千曲川、鳴瀬川でそれぞれ実績水位は計画高水位を上回る。その他の河川流域についても、

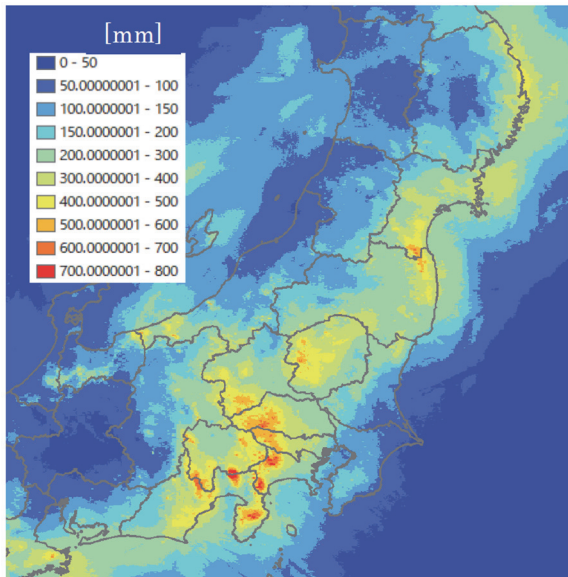


Fig. 1 Cumulative rainfall from October 11 (9 am) to October 14 (9 am) in 2019 estimated by the “Analysis Rainfall” produced by Japan Meteorological Agency

多くが計画高水位近くに達しており、特に利根川流域の栗橋地点において、氾濫危険水位を70 cm上回り、計画高水位まで30 cmに迫っていたことが分かる。

2. 堤防決壊と被災状況

台風19号により20水系71河川、合計142箇所（うち国管理河川14箇所）の堤防決壊が発生した(国土交通省, 2019)。この数は西日本豪雨による堤防決壊計37箇所（うち直轄2箇所）をさらに上回るものである。また両者の災害による住家被害を比較すると、台風19号は西日本豪雨に比べて特に半壊家屋数、一部損壊数が多い(内閣府, 2019)。Table 1は内閣府(2019)が発表している都道府県別の人的・物的被害の状況を示す。住家被害は福島県で最も多く、次いで栃木県に被害が集中していることが分かる。福島県は阿武隈川の洪水やその流域下流部（丸森町など）で発生した集中豪雨による水・土砂災害が主要な原因と考えられる。栃木県は、足尾山地から流出する渡良瀬川流域の支川が氾濫したことによって多くの住家が被災したものと考えられる。Fig. 3は栃木県が報告している堤防決壊等の被害発生箇所を示しており、秋山川や永野川など多くの中小河川で被害が発生したことが分かる。秋山川下流の決壊地点を例にとると、渡良瀬川合流部は直轄区間となっており、その上流の県管理区間で決壊が発生している。株式会社PASCOより提供された10月13日10時28分時点の衛星画像を確認すると、秋山川と渡良瀬川の合流部に氾

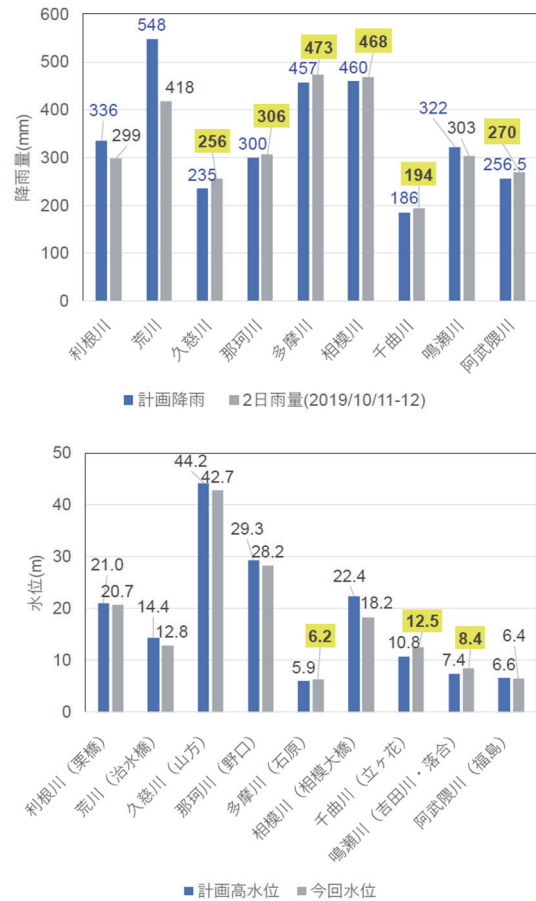


Fig. 2 Basin average rainfall at the upstream of the reference points along the main rivers and their water levels (top: comparisons between the design rainfall and observed two days rainfall, bottom: comparison between the design high water levels and observed water levels)

Table 1 Human and house damages by Typhoon No. 19 (based on report by Fire and Disaster Management Agency on January 10, 2020)

都道府県名	人的被害				住家被害				非住家被害		
	死者	行方不明者	軽傷者	重傷者	全壊	半壊	一部破損	床上浸水	床下浸水	公共建物	その他
北海道							4				1
青森県					1			1	7	9	
岩手県	3		4	3	41	395	935	44	315	0	445
宮城県	19		7	35	303	2,964	2,858	1,580	12,328	17	72
秋田県							9				
山形県			2	1		4	34	65	98		8
福島県	32		1	58	1,447	12,221	6,614	1,081	407	43	8,009
茨城県	2	1			20	146	1,601	1,501	27	523	946
栃木県	4		4	19	81	8,200	8,207	30	447	15	950
群馬県	4		1	8	22	289	521	20	112	3	24
埼玉県	4	1		1	32	124	541	699	2,370	3,388	0
千葉県	12			2	28	36	1,731	3,807	470	888	22
東京都	1				10	36	655	913	317	532	25
神奈川県	9			3	35	48	673	1,601	715	468	21
新潟県				2	3	3	9	49	23	278	3

濫水が広がっていることが確認される。上述のように堤防が決壊したのはFig. 4に示す秋山川左岸側で扇状地の地形にあたる箇所であり、氾濫した水が周辺に被害をもたらしながら氾濫平野まで到達していた。この氾濫形態は、扇状地における流下型の支川氾濫に分類されよう。堤防が決壊した付近では家屋の損壊や落橋なども確認された (Fig. 5)。その他、

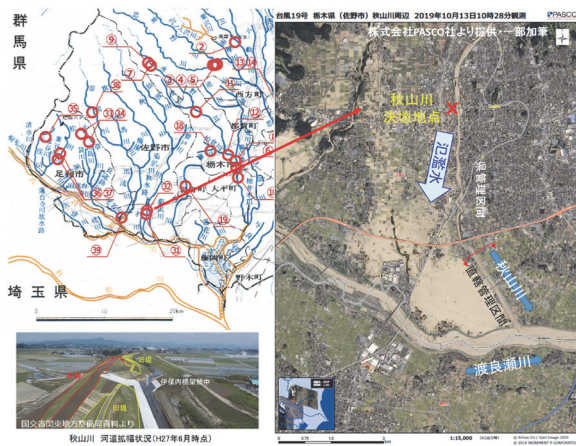


Fig. 3 Levee breaching points along the rivers managed by Tochigi prefecture (left top) and the downstream area of the Akiyama river (left bottom), whose flooding was monitored by remote sensing image on October 13 (10 am) (provided by PASCO added some words by the author)

永野川・思川などでは河川の上流部においても堤防決壊や越流による被害が確認されている (Fig. 6) .

Fig. 7は、後述の流出解析によって推定されたピーク流出高 (=ピーク流量/集水面積, 単位: mm/h) と当該箇所の集水面積 (単位: km²) を示している. 赤点で示した地点は、山地からの流出河川に分類されるもので、栃木県の堤防決壊箇所に着目した結果である. また荒川上流の越辺川で破堤した箇所における推定流量と集水面積との関係を参考にプロットしている. 青点で示した地点は、同じく栃木県の中小河川における堤防決壊箇所を示しているが、平野から流出する河川の結果を青点でプロットしている. この結果は後述のモデルのデフォルトパラメータ設定で推定したピーク流量である. そのため、本報告でのピーク流量は、実際よりもやや過大評価傾向となる可能性がある. そのことを踏まえたうえで集水面積が200 km²以下程度の中小河川に着目すると、ピーク流出高がおおよそ35 mm/hを超えるあたりで被害が出ていること、支川の上流部では局所的にさらにピーク流出高が高くなって40 mm/hを上回る地点があることが分かる. 同図に併記した秋山川と永野川の河川整備計画による計画流量 (流出高に換算した結果) と比較すると、今回の洪水ではそれらの値をはるかに上回っていたことが分かる. 後述のように、阿武隈川下流に流れ込む五福谷川のピーク流出高は約50 mm/hに迫る値となっており、山地における支川のピーク流出高がそのような値になるときは、斜面崩壊も同時に発生している可能性があり、土砂流出が河道を埋めて、水・土砂ともに氾濫するような水・土砂氾濫の発生が甚大な人的・家屋被害



Fig. 4 Land-type map at the downstream part of the Akiyama River (based on GIS map). Levee breaching occurred at the fluvial fan and the flooded water was ponded on floodplain in the downstream part.

をもたらす可能性がある.

以上のように、台風19号による洪水災害の特徴は、計142箇所へのぼる非常に多くの箇所で堤防が決壊して被害をもたらしたこと、その多くは中小河川に集中しており、特に福島県や栃木県で住家被害数が多かったこと、中小河川や大河川の支流における氾濫の形態は様々であり、谷底平野や扇状地部から溢れる流下型の支川氾濫や山間部における水・土砂災害など豪雨がより時空間的に集中した場合にみられる形態の氾濫も発生したことが分かる. 一方で、荒川や利根川といった首都圏を流れる大河川の重要な地点においても、例えば栗橋で氾濫危険水位を70 cm上回るといった危機的状况であったことにも注視しておく必要がある. このような点を踏まえたうえで、3. では関東、東北、北陸地方を対象に、すべての中小河川を反映した分布型の降雨流出解析を行い、台風19号時のピーク流出高の分布を推定する. また気象庁による最新のメソアンサンブル予測雨量をモデルに入力し、台風が日本に接近していた2019年10



Fig. 5 Levee breaching points along the Akiyama River (photos are taken by the author on Nov. 3, 2019)



Fig. 6 Levee breaching and overtopping points along the Nagano and Omoi rivers (photos are taken by the author on Nov. 3, 2019)

月12日9時を初期時刻として、39時間先までアンサンブルで予測した場合の結果に基づき、長時間の洪水予測可能性について述べる(Sayama, et. al., 2020).

3. 広域分布型流出解析

3.1 関東甲信越・東北地方の 150m空間分解能 RRI モデルの構築

従来の降雨流出解析は、流域単位で流出モデルを適用し、その結果を観測流量と比較しながら、モデルをキャリブレーションすることが一般的であった。しかし、台風19号や西日本豪雨のように、各地で同時多発的に発生する豪雨災害に対しては、観測情報の無い中小河川も含めて広域を一体的に解析することが望ましい。その場合、流域毎のキャリブレーションが難しくなるため、モデルの物理的妥当性と頑健性がより重要となる。そこで、空間解像度約150mで日本全国をカバーするRRIモデルを用いて、東北、関東、北陸地方を対象に流出解析を行った。ここで対象とする河川は流域面積1 km²以上の全ての河川とする。一方、流域面積約5,500 km²以上の大河川下流部(利根川下流など)については、計算効率の観点から今回は計算の対象外としている。

解析の入力情報は、気象庁レーダアメダス解析雨量とした。また、洪水予測の可能性を議論するために、気象庁メソアンサンブル降水予測 (MEPS) をRRIモデルに入力した結果を示す。解析雨量を入力したシミュレーションの期間は2019年10月11日9時~14日9時 (72時間) とする。一方、MEPSを入力した予測実験は12日9時を初期時刻とする39時間先までの予測とする。RRIモデルはパラメータのチューニングを行わず、デフォルト値を用いる。ただし、観測流入量と比較した結果、特に関東地方でデフォルト

パラメータによる解析結果に過大評価傾向が見られたため、関東地方全体でパラメータを変更した結果を示す (Table 2)。ダム操作の影響を反映するため、国交省・水資源機構のダムについては、実績放流量を境界条件に設定する。RRIモデルは降雨流出に加えて洪水氾濫を一体的に解析できるモデルであるが、氾濫の再現には河道断面情報の反映が重要となり、広域での断面情報の反映は実現できていないため、本報では矩形の河道断面を設定し、さらにその断面を実際よりもやや大きめの値で設定した解析を行い、河川流量の時空間分布に着目して結果を述べる。

河川ピーク流量を空間的に表示するために、ピーク流量を当該地点の集水面積で除して基準化した流出高 (単位は mm/hに換算した結果) を示す。仮に降雨が一定で継続すれば、仮想的には、定常状態 (雨量=流出量) に達して、降雨強度と流出高が一致する。実際には、降雨は時空間的に分布するため、流出高も流域面積に応じて減少する傾向がある。上述の通り、おおよその目安として、ピーク流出高が30 mm/hを超えるような状況になると、中小河川では、河川の流下能力を超えて堤防決壊や越水が発生することが分かってきている (Fig. 7)。

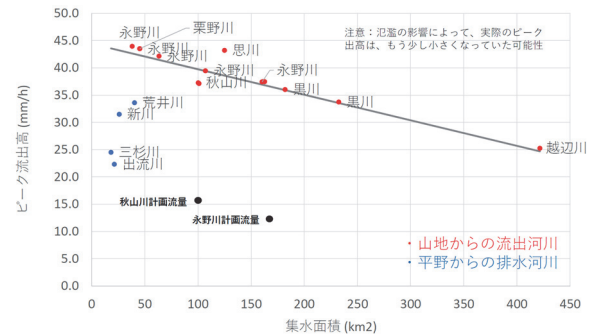


Fig. 7 Simulated peak runoff at levee breaching points in medium-to-small rivers in Tochigi prefecture (and Saitama prefecture for the Opepe river). The red points are rivers originated from mountains, while the blue points are rivers originated from plains

Table 2 Model parameters set in mountainous forest

パラメータ値	デフォルト値	関東に適用
n [m ^{-1/3} s]	0.4	0.4
d_a [m]	0.471	0.471
d_m [m]	-	0.05
k_a [m/s]	0.1	0.03
β [-]	-	7.0
n_{river} [m ^{-1/3} s]	0.03	

3.2 小河川を含めたピーク流出高の広域推定と豪雨災害との関連分析

解析雨量をRRIモデルに入力してピーク流出高を推定した結果をFig. 7に示す。左図は、流域面積が100～5,500 km²の主要な河川だけを示した図であり、実際の計算では右図に示すように流域面積1 km²以上の全ての河川の流量を一体的に解析している。まず左図に着目すると、ピーク流出高は、荒川支流(越辺川, 都幾川), 多摩川, 相模川で特に大きくなっており、25～30 mm/hに達していたことが分かる。信濃川, 那珂川, 久慈川, 阿武隈川など、今回被害を受けた主要河川で流域面積が大きい区間は、それに次いでピーク流出高が大きく13～20 mm/h程度(千曲川は約10 mm/h)である。その他、鬼怒川, 利根川上流, 阿賀野川上流などで高くなっている。次に右図に示された中小河川に着目すると、栃木県の足尾山地から流出する河川(永野川, 秋山川, 黒川など)でピーク流出高が極めて大きく30～45 mm/h程度に達している。荒川, 利根川上流の秩父山地, 多摩川上流の丹沢山地(いずれも東斜面)で同程度にピーク流出高が大きくなっている。東北地方では、特に太平洋沿岸の山地でピーク流出高が大きく、阿武隈

川支流の丸森町を流れる河川でその値が特に大きいことが分かった。

阿武隈川下流部に流入する支川(雉子川, 五福谷川)では、12日夜(10時頃)に流量のピークを迎えていたことがFig. 9より分かる。その後5～6時間後に阿武隈川がピークとなる(推定)。すなわち、先に支川の豪雨災害で被害が出て避難が難しくなり、さらに、本川水位が上昇し支川の流出が阻害されたことが推察される。

3.3 メソアンサンブル降雨予測データを用いた中小河川の長時間洪水予測の可能性分析

Fig. 10は、10/12 9:00の時点で、気象庁が39時間先(10/14 0:00)まで予測した降雨量(MEPS)をRRIモデルに入力して、ピーク流出高を計算した結果を示す。予測の不確実性を加味するため、MEPSは初期条件に摂動を加えて21メンバーの結果を有する。この図は、各メンバーの予測雨量を入力して、それぞれの河道地点において21メンバーの中央値(10位)の結果を示している。

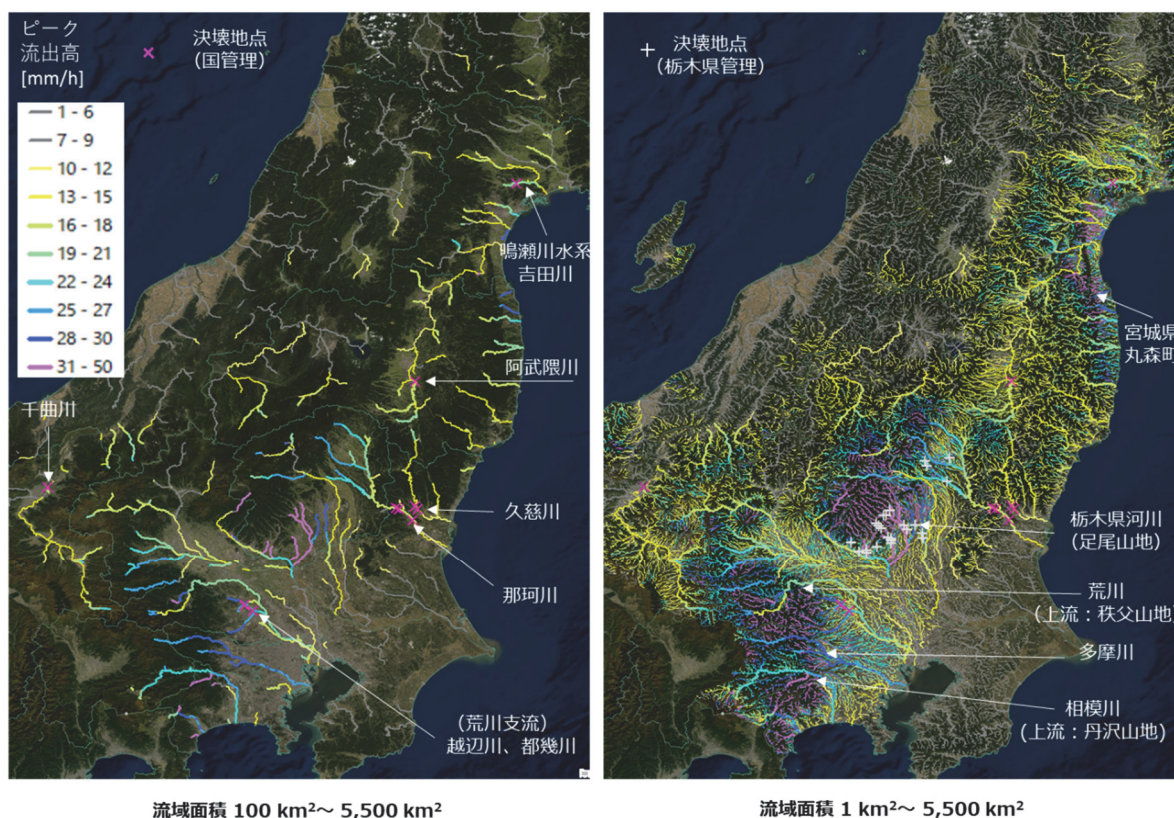


Fig. 8 The spatial distributions of the simulated peak runoff. Left: simulated result is shown only along the main rivers. Right: simulated result for all rivers.

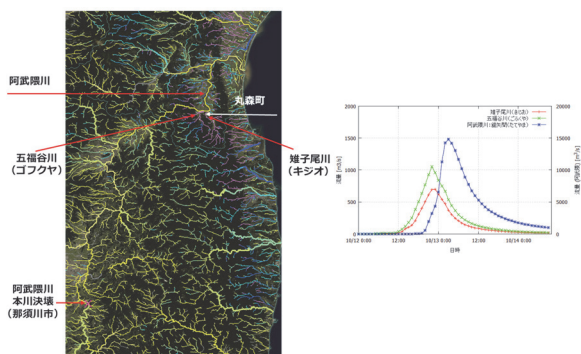


Fig. 9 Left: estimated peak runoff near the Marumori-township at the downstream part of the Abukuma River. Right: the estimated hydrographs along the Kijio (red), Gofukuya (green) and the main Abukuma Rivers (red).

流域面積 100 km²～ 5,500 km² に着目をする左図より、ピーク流出高の予測結果は、実績雨量を入力した再現計算結果の空間分布 (Fig. 10) とよく対応

することが分かる。特に那珂川、久慈川の決壊地点付近では予測流出高の中央値がそれぞれ15 mm/h, 12 mm/hとなり、実績(解析結果)のそれは17 mm/h, 13 mm/hであり類似している。また、荒川、多摩川、相模川上流は予測の中央値でもピーク流出高が30～40 mm/hを超えていた。実績(解析結果)では一部(相模川水系道志川)などを除き、25～30 mm/h程度であった。

一方、中小河川の予測結果も表示されている右図に着目すると、栃木県の足尾山地から流出する中小河川の予測結果は流出高で40 mm/hを超えていたことが分かり、実績(解析結果)の状況とよく符合する。新潟県南部など、一部の地域では、実際にはそれほど大きな流出高ではなかったが、高い流出高が予測されていた地域もあった。阿武隈川下流部の丸森町では、予測ピーク流出高の中央値(21メンバー中10位)はそれほど大きくないが、上位5位の結果によれば(図は省略)30mm/hを超える予想となっていた。

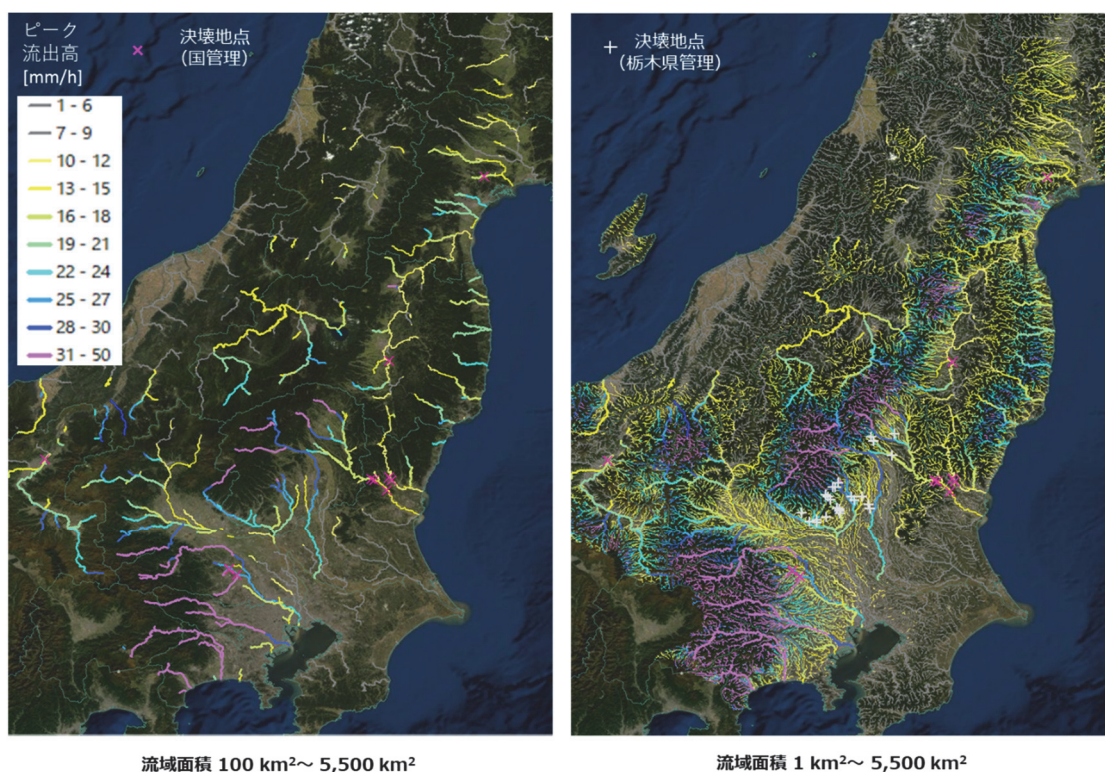


Fig. 10 The spatial distributions of the forecasted peak runoff (ensemble mean) based on MEPS and RRI with initial time at 9 am on October 11. Left: only along the main rivers, Right: for all rivers.

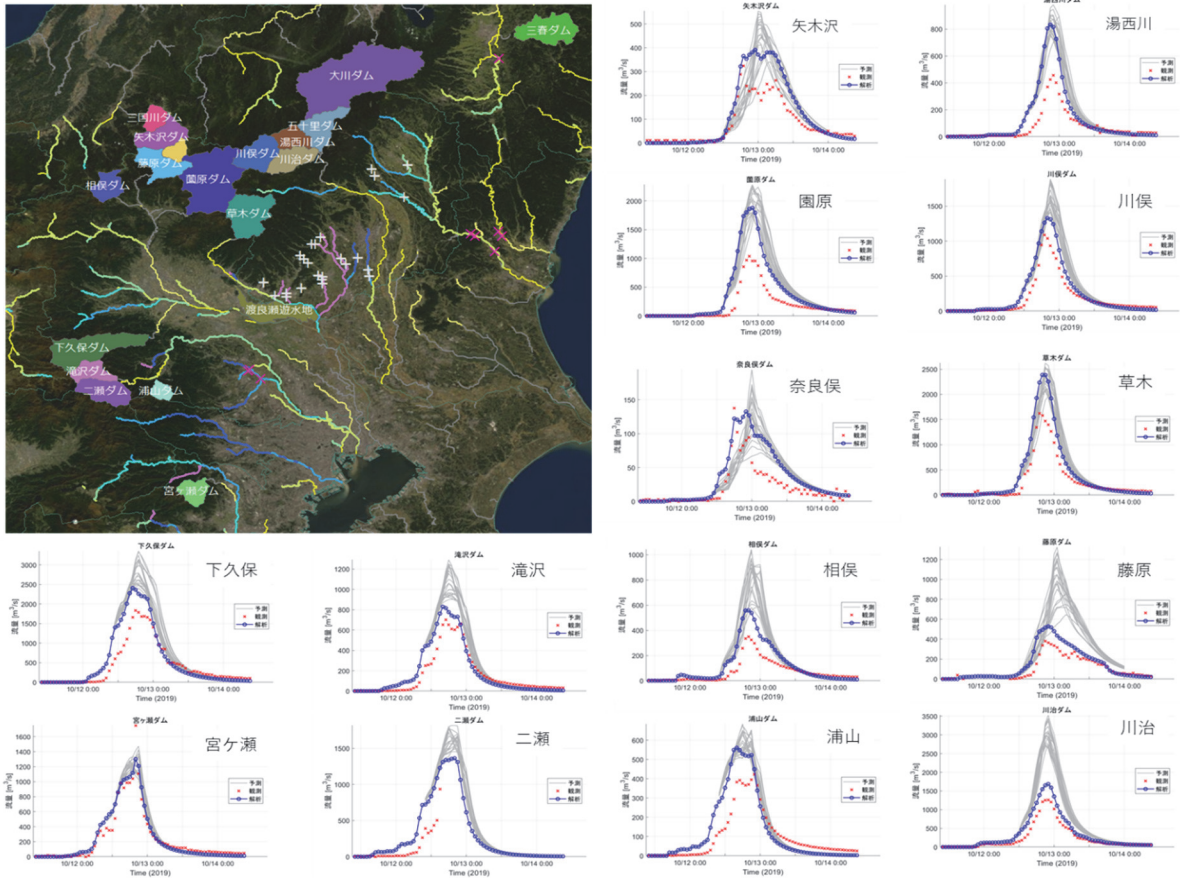


Fig. 11 Comparison of dam inflows in Kanto region by forecasted (gray), observed (red) and simulated (blue)

流出予測の精度を検証するため、ダム流入量の解析結果と予測結果を観測流入量と比較する。Fig. 11は関東地方、Fig. 12は東北地方のダム流域における結果を示している。図中赤線は観測結果を示しており、解析雨量を入力したモデルの出力結果（青線）と比較して両者が一致していれば、モデルの再現性が高いことを示す。前述のように、この結果は関東地方を除いてRRIモデルのデフォルト設定による結果であり、RRIモデルのデフォルト設定では、土壤中の不飽和側方流の影響を考慮せず、飽和側方流と表面流を解析するモデルとなっているため、一般的に過大評価傾向を示す。ただし、西日本豪雨の解析結果によると、西日本の多くの流域で大規模な洪水であれば、デフォルト設定でもおおよそ洪水を再現できることが分かっており、同様の結果は東北・北陸地方でもみられた。

一方、関東地方においては、大規模な出水にも関わらず、デフォルトパラメータによる過大評価の傾向が顕著であり、土壤中の不飽和流出成分を反映することの必要性が分かった。図中の灰色の線は21本のハイドログラフを示しており、MEPSを入力した予

測流入量の結果を示す。もちろんダムによって（場所によって）精度の違いがあるものの、西日本豪雨による前線性豪雨の予測結果に比べると、予測のばらつきが全体的に小さく、その精度も高かったことが分かった。ダム地点以外でも、例えば越辺川や都幾川の流量については、解析雨量を入力したものと非常によく合致しており、豪雨が深刻になる前の段階から予測できる可能性を示唆している（Fig. 13）。ただし、予測精度は上述のように地域的にもバラつきがあり、今後、アンサンブル予測情報を用いた洪水予測の実現に向けて、さらなる検証が必要である。

4. まとめ

中小河川における洪水氾濫の状況を調査するとともに、関東・東北・北陸を対象に、令和元年台風19号の降雨流出特性を分析した。本章の要点は以下のようにまとめられる。

台風19号によって計142箇所（うち14箇所は国管理）で堤防が決壊した。この数は、平成30年7月豪雨（西日本豪雨）による計37か所（うち2か所は国管理）の

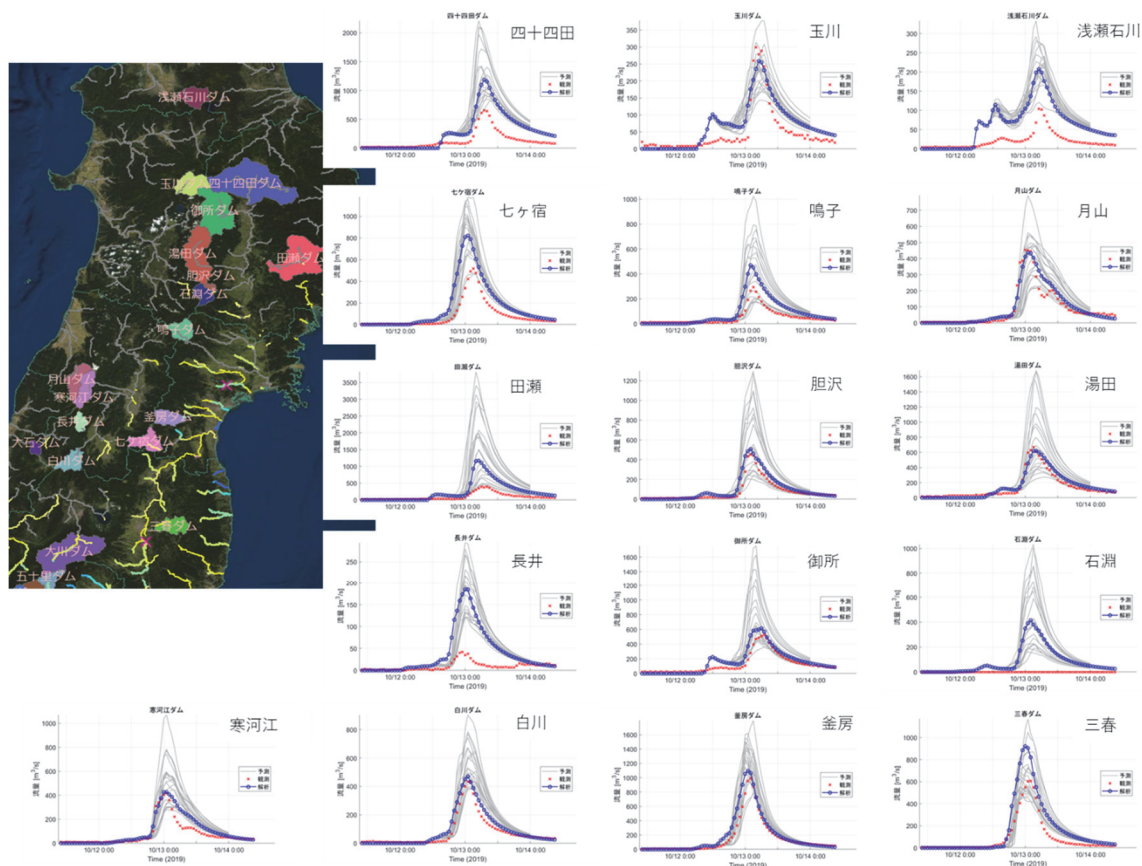


Fig. 12 Comparison of dam inflows in Tohoku region by forecasted (gray), observed (red) and simulated (blue)

堤防決壊箇所数を上回るものであった。台風19号や西日本豪雨のような広域・同時多発的な洪水災害の特徴を把握するためには、洪水流出の状況を広域で解析し、俯瞰的に議論する視点が必要となる。

今回の堤防決壊を伴う氾濫の多くは中小河川や大河川の支川において発生したものであり、調査の結果、おおよそ次の様に氾濫形態が分類された。合流部の貯留型氾濫、氾濫平野における沿川流下型の支川氾濫、谷底平野・扇状地から溢れる流下型の支川氾濫、山間部における水・土砂災害である。豪雨が山地で時空間的に集中すると、水・土砂災害や谷底平野・扇状地から溢れる流下型の支川氾濫が顕著となる。台風19号の事例では、阿武隈川下流部（丸森町周辺）で水・土砂災害が、栃木県の足尾山地を発する多くの中小河川で谷底平野・扇状地から溢れる流下型の支川氾濫が確認された。氾濫形態と周辺の土地利用に応じて、被害の形態を見極めようとして、その特性に応じた対策が必要である。対策には河川整備や予警報・早期避難に加えて、適切な土地利用管理についても検討を進めるべきである。

中小河川を含めた全国河川の長時間洪水予測を实

施した。気象庁が公表しているメソアンサンブル降水予測情報は、39時間のリードタイムを有する21メンバーの予測情報である。西日本豪雨を対象にした同様の解析結果に比べて、今回の台風19号の事例では、流量予測の幅が小さくなり、解析雨量を入力した場合とより整合する結果となった。今後、アンサンブル洪水予測の有効な活用方法を検討する必要がある。

今回は堤防決壊等の大規模な洪水氾濫は発生しなかったものの、首都圏を流れる主要河川の基準点でも多くの場所で計画高水位に迫る危険な状態であった。近年は決壊が生じていない主要な河川の下流部においても、最悪の事態を想定した備えを進める必要がある。

謝 辞

メソアンサンブル数値予報モデルGPVの降水予測情報は気象庁予報部よりご提供いただいた。また、令和元年度科学研究費補助金特別研究促進費「令和元年台風19号及び台風21号による広域災害に関する

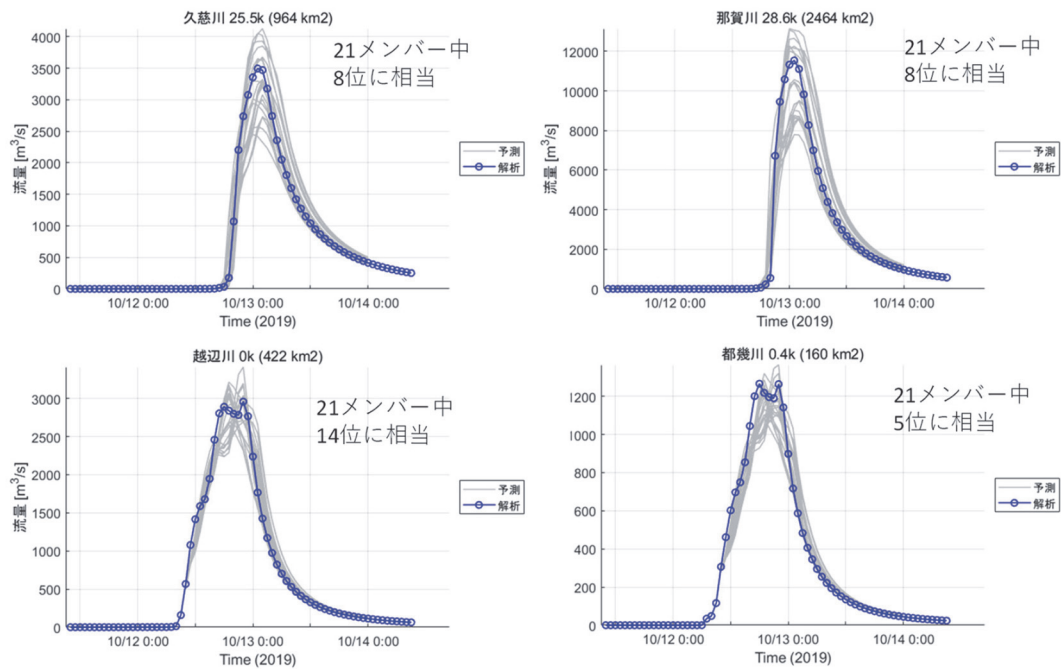


Fig. 13 Estimated discharge by the RRI model at Kuji, Naka, Ope and Toki (the upstream of Arakawa) rivers: 21 members based on the MEPS input (gray) and analysis rainfall (blue)

総合研究（研究代表者：二瓶泰雄）」の支援を受けて実施した。現地調査ならびに解析を実施するうえで、防災技術政策研究分野に所属する研究員の山田真史さん、博士後期課程学生の菅原快斗さんに多くの支援を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

気象庁(2019)：台風第19号による大雨，暴風等：令和元年(2019年)10月10日～10月13日，災害をもたらした気象事例。

<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2019/20191012/20191012.html>

国土交通省 (2019)：令和元年台風第19号による被害状況等について。

https://www.mlit.go.jp/saigai/saigai_191012.html

内閣府(2019): 令和元年台風第19号等に係る被害状況

等について。

<http://www.bousai.go.jp/updates/r1typhoon19/index.html>
日本気象協会(2019)：防災レポートVol. 1『台風19号の降雨量と一級河川「計画降雨」の比較を行いました』。

<https://www.jwa.or.jp/wp-content/uploads/2019/11/69a10cd326c9c84cc49c50f3d228c56c.pdf>

Takahiro Sayama, Masafumi Yamada, Yoshito Sugawara, Dai Yamazaki (2020): Ensemble Flash Flood Predictions Using a High-Resolution Nationwide Distributed Rainfall-Runoff Model: Case Study of the Heavy Rain Event of July 2018 and Typhoon Hagibis in 2019, Progress in Earth and Planetary Science, (in print)

(論文受理日：2020年8月31日)