

亀岡盆地の流出・氾濫解析に基づく 日吉ダムの治水操作手法の検討

Study on Flood Control Operation Method of Hiyoshi Dam Based on Runoff Inundation Analysis in Kameoka Basin

岩本麻紀⁽¹⁾・竹門康弘・野原大督・小柴孝太⁽¹⁾・角哲也

Maki IWAMOTO⁽¹⁾, Yasuhiro TAKEMON, Daisuke NOHARA, Takahiro KOSHIBA⁽¹⁾ and Tetsuya SUMI

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

Heavy rainfall caused severe flood disasters across the western Japan in July 2018. In order to decrease frequent inundation in the downstream reaches where river improvement works have never been completed, some reservoir dams are often operated to control small and/or medium floods by releasing a less discharge than originally designed. However, this operation can increase a risk of severe flood inundation in case of large floods, because the water level of the reservoir increases faster to the full storage level and eliminates the flood control function of the reservoir. This study aims at analyzing impacts of different flood control operations for floods of various scales including large flood events using rainfall runoff inundation analysis in order to identify an effective operation rule for flood risk reduction.

キーワード: 貯水池操作, 氾濫解析, 洪水調節, RRIモデル, 超過洪水

Keywords: reservoir operation, inundation analysis, flood control, RRI model, extreme event

1. はじめに

近年, 河川整備の水準を上回るような大規模な水害が頻発している. 2018年7月に西日本を中心に発生した平成30年7月豪雨では, 前線や台風7号の影響により, 日本付近に温かく湿った空気が流入し, 合わせて11府県に大雨特別警報が発表されたほか, 全国の120地点を超える気象庁アメダス観測地点において最大48時間降水量や最大72時間降水量の記録を更新するなど, 記録的な豪雨が生じた(気象庁, 2018). 多くの流域でダム貯水池による洪水調節操作が行われ, 下流河川の水位低減に貢献した. 一方で, ダムの洪水調節中に満水となる恐れが生じたことから, 8基のダムで異常洪水時防災操作が実施され, 洪水調節

の最中にその洪水調節機能が失われることとなった. このうち, 野村, 鹿野川, 一庫, 日吉の各ダムでは, ダム下流の河川整備が進んでいないことから, 現況の河道流下能力に合わせ, 中小規模洪水を重視した洪水調節(ダムの洪水調節開始流量を切り下げる運用)が暫定的に行われている. 例えば, 肱川上流の野村ダムでは, 平成7年7月洪水で浸水被害が発生したことをきっかけに, 頻繁に発生する中小規模の洪水を対象とした洪水調節操作ルールに変更されていた. しかし, 平成30年7月豪雨では, 野村ダムへの最大流入量は計画洪水流量の約1.5倍(既往最大の約2.4倍)となる1,942 m³/sを記録し, 流入量のピーク到達前に異常洪水時防災操作が開始されたこともあって, 最大放流量は計画最大放流量の約1.8倍となる

1,797 m³/sとなった。下流の西予市野村町では死者5名、床上浸水約570戸、床下浸水約80戸の被害が発生するなど、大きな被害が生じた。平成30年7月豪雨では、肱川流域では計画規模を超えるような外力であったため、暫定的な洪水調節操作ルールを採用だけに氾濫拡大の責を負わせることはできない。しかし、中小規模洪水を対象とした放流方式では、出水中のダムへの貯留をより多く行うことから、大規模洪水時におけるダム洪水調節容量の枯渇を早める危険性がある。そのため、こうした洪水調節操作に伴うリスクを事前に把握することが重要である。

気候変動の影響により大規模洪水の発生の危険性が高まることが懸念されており、既存のダムを最大限に活用する治水操作手法について検討がなされている（国土交通省国土技術政策総合研究所, 2018）。こうした操作手法の一つとして、ダムの事前放流操作が挙げられ、洪水調節開始時点の累積雨量や予測雨量情報に基づいて事前放流の時機や量を決める方法（下坂ら, 2009；猪俣ら, 2015；木谷ら, 2018）などの検討が行われている。ただし、事前放流によって確保できる追加の洪水調節容量には限界があり、また、洪水調節時の放流制限率が大きければ洪水前半で空き容量を先使いし、超過洪水時には結局洪水調節容量が不足する危険性がある。

一方、実時間でダム洪水調節手法の最適化についてはこれまでも多く研究されている（高棹・瀬能, 1970；佐山ら, 2010；Masuda and Oishi, 2013）が、将来の河川流量の状態に関する想定が外れた場合に操作の最適性が確保されないリスクがある。加えて、実時間で操作量が決められるため、沿川での操作に対する事前の合意形成が難しいという課題がある。

また、超過洪水に対するダム洪水調節操作の検討事例としては、三石ら（2010）によるVR方式でのダム治水操作の検討や、沖・中津川（2017）による治水施設の効果に関する分析、そのほか河川計画実務分野での検討事例（道場, 2010）などがあるが、実際に超過洪水におけるダム治水操作手法による下流への影響を詳細に分析した研究は依然として少ない状況である。

本研究では、こうした状況を鑑み、暫定的な洪水調節操作ルールが適用されている桂川水系日吉ダムを対象として、洪水調節容量が使い切られた場合に浸水被害がより深刻になることが想定される大規模洪水にも着目し、中小洪水を含む複数の洪水シナリオでのダム治水操作手法の有効性を分析した。具体的には、日吉ダムのピークカット流量を変化させた場合について、桂川上流域の氾濫解析を行うことで、ダム治水操作手法の違いによる亀岡盆地での治水効果の違いについて分析を行った。

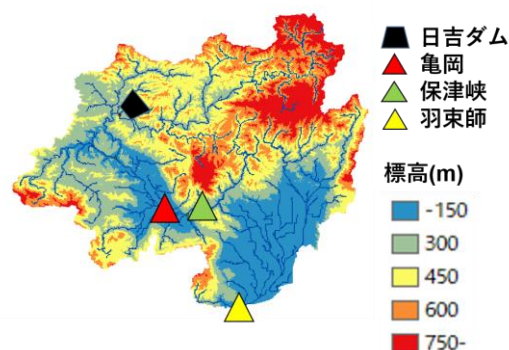


Fig. 1 The Katsura river basin

また、亀岡市内の桂川の堤防は、支川の合流部を開口部とした霞堤となっており、洪水を一時的に堤内地に流入させて下流への浸水被害を軽減させ、洪水が終われば堤内地の水が速やかに本川に排水されるようになっている。河川整備計画では、霞堤を計画高水位まで嵩上げすることで流下能力の向上を図るとし、当面は段階整備として、現況から1m嵩上げするとされている。しかし、大規模洪水の場合には霞堤では浸水は徐々に進み、洪水が終われば堤内地の水が速やかに排水されるのに対し、連続堤防では堤防高を超えた水が一気に堤内地に流れ込み、排水もされにくいために浸水時間が長くなることが考えられる。このことから、霞堤の治水機能についても大規模洪水を踏まえた評価が重要であると考えられる。

上記の点を踏まえ、大規模洪水時でも亀岡盆地周辺の氾濫被害の軽減が期待できる治水操作手法の検討を行った。

2. 対象流域の概要

2.1 桂川・亀岡盆地の概要

桂川は、丹波山地を水源とし、亀岡盆地、保津峡を経て嵐山から京都盆地へ流下し、大山崎付近で木津川、宇治川と合流して淀川となる流域面積約1,100 km²、幹川流路延長約114 kmの一級河川である。Fig. 1に桂川流域を示す。本研究では、この上流に位置する亀岡盆地を対象とする。亀岡盆地では、洪水時に下流の狭窄部である保津峡によって水位がせき上げられ、農地や家屋の浸水被害が頻繁に発生してきた。

2.2 日吉ダムの諸元と洪水調節方式

亀岡盆地の上流には1998年に日吉ダムが建設されている。日吉ダムは流域面積290 km²、有効貯水容量5,800万m³（うち洪水期の洪水調節容量4,200万m³）で、洪水調節に加えて利水・発電目的を含む多目的ダム

Table 1 The original and current flood control operation rules of the Hiyoshi dam

	当初計画	暫定運用
放流方式	一定率一定量 放流方式	一定量 放流方式
最大流入量 (再現確率)	2,200 m ³ /s (1/100年)	1,510 m ³ /s (約1/20年)
洪水調節開始流量	300 m ³ /s	150 m ³ /s
最大放流量	500 m ³ /s	150 m ³ /s

Table 2 Parameters for the RRI model

	山地	平地
n [m ^{-1/3} s]	0.3	0.2
d [m]	1.0	0.8
ϕ [-]	0.471	0.471
k_v [m/s]	-	6.540×10^{-5}
S_f [m]	-	0.1
k_a [m/s]	0.1	-
ϕ_u [-]	0.05	-
n_{river} [m ^{-1/3} s]	0.02	0.02



Fig. 2 The confluence of the Katsura river and the Sogatani river

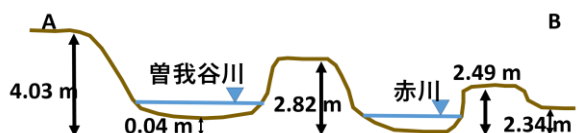


Fig. 3 The cross section of the confluence point

である。日吉ダムでは300 m³/s~500 m³/sの一定率一定量方式で洪水調節を行う実施方針であるが、下流の亀岡地区では河川整備が進んでおらず、亀岡市の洪水被害の軽減への期待が大きいことを踏まえて、中小規模洪水をより重視した暫定的な洪水調節方法の検討が行われた。その結果、300 m³/s一定量方式が実

施方針操作より浸水被害が軽減できることから最適な洪水調節操作と判断された(道場, 2010)。しかし、亀岡地区では特に治水安全度が低く、残流域からの流出によっては浸水被害が発生するということを鑑みて、最終的に150 m³/s一定量放流が実施されることとなった。150 m³/s一定量放流では、浸水被害がもっとも少なく、かつ、実施方針操作に対して被害の逆転が生じず、また、再現確率1/10程度の洪水に対しては300 m³/s一定量放流よりも浸水面積が小さくなっている。日吉ダムの洪水計画での操作ルールと、現在実施されている暫定操作ルールの比較をTable 1に示す。日吉ダムの建設以降は、亀岡盆地における浸水被害は軽減されたが、2004年台風23号や2013年台風18号では浸水被害が発生している。平成30年7月豪雨では、日吉ダムの洪水調節容量が使い切られて異常洪水時防災操作が実施され、曾我谷川西側の水田が一時的に冠水した。

2.3 霞堤の調査結果

亀岡市内の霞堤の堤防高さなどについて調査を行った。例として、Fig. 2に示す曾我谷川と桂川の合流部についての調査結果をFig. 3に示す。

3. 研究手法

3.1 研究手法の概要

研究手法の概要は以下の通りである。まず、対象流域における過去の出水データなどを元に、降雨シナリオを作成した。その際、複数の規模や波形の降雨が含まれるようにし、ダム治水操作方式の違いによる下流への効果や影響をより多角的に分析できるようにした。次に、日吉ダムの洪水調節操作を加味した降雨・流出・氾濫解析を行い、亀岡盆地における桂川の水位や氾濫域・氾濫被害等の分析を行った。解析には、佐山・岩見(2014)によって開発されたRRIモデルを利用した。日吉ダムの治水操作方式は一定量放流方式を対象とし、現在採用されている150 m³/s一定量放流方式に加えて、300 m³/s一定量および500 m³/s一定量放流方式について、計算結果の比較を行った。その上で、浸水被害の軽減が期待できる治水操作手法について検討を行った。

3.2 降雨・流出・氾濫モデルの設定

大規模洪水を予測するには、流域内の水文量が時空間分布を再現・予測できる分布型流出モデルが必要となる。そこで本研究では、流域の各地で氾濫が発生する大規模洪水を予測するために、降雨流出と氾濫を一体的に解析することができRRIモデルを用いて、氾濫解析を行った(佐山・岩見, 2014)。

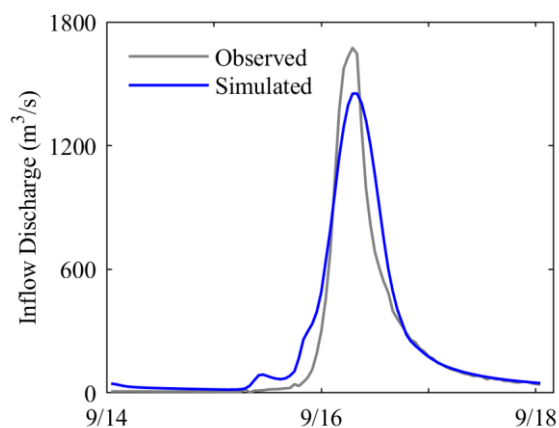


Fig. 4 Inflow of the Hiyoshi dam in Typhoon Man-yi in 2013

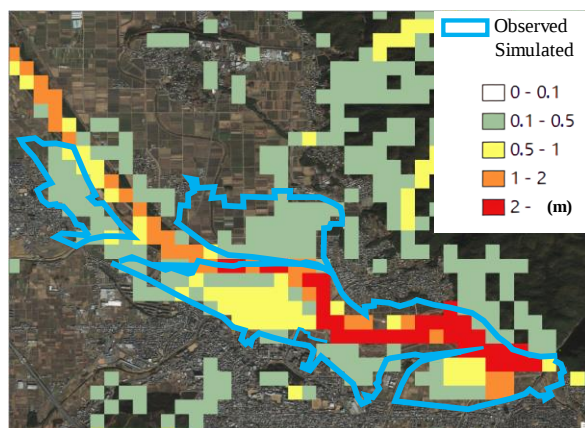


Fig. 5 Simulated and observed distribution of the maximum inundation depth in Typhoon Man-yi

Table 3 Rainfall scenarios for the simulation

	降雨シナリオ	最大 24 時間 雨量[mm]	最大 48 時間 雨量[mm]	再現確率 (24 時間雨量)	再現確率 (48 時間雨量)	降雨波形
A	1989 年前線	181	197	約 1/5	約 1/3	複数ピーク
B	2004 年台風 23 号	169	224	約 1/5	約 1/5	後方集中
C	2013 年台風 18 号	304	337	約 1/80	約 1/30	中央集中
D	2018 年 7 月豪雨	277	410	約 1/30	約 1/80	複数ピーク
E	仮想豪雨	294	497	約 1/200	約 1/400	複数ピーク

入力地形データとして、山崎ら (2018) によって開発された空間解像度 30 m の日本域表面流向マップの表面流向データおよび水文補正標高データを使用した。日本域表面流向データでは、入力データの高精度化と計算手法の改良により、既存の HydroSHEDS などと比較して正確かつ詳細な河道ネットワークが表現されている。水文補正標高データは、この表面流向データにより、オリジナルの基盤地図情報標高データを下流が上流より低くなるという条件を満たすように修正されている。本研究では、計算負荷の軽減のため、上述の流域データを元に空間解像度を 150 m にダウンスケールしたデータを用いて、請田地点より上流の亀岡盆地を含む流域を対象地域とした。

モデルパラメータの設定については、国土地理院基盤地図情報サービスの国土数値情報の土地利用細分メッシュデータにより、対象地域を山地と平地に分類し、パラメータをそれぞれ Table 2 のように設定した。ここで、Table 2 のパラメータについて、 n [$\text{m}^{-1/3}\text{s}$] は斜面の粗度、 d [m] は土層厚、 ϕ [-] は有効間隙率、 k_v [m/s] は鉛直方向の透水係数、 S_f [m] は湿潤前線における吸引圧、 k_a [m/s] は側方の透水係数、 ϕ_u [-] は不飽和間隙率、 n_{river} [$\text{m}^{-1/3}\text{s}$] は河道の粗度である。また、本研究では堤防の開口部である霞堤からの浸水を想

定しているため、堤防の決壊などは考慮していない。

以上のように設定したモデルを使って、2013 年台風 18 号時の日吉ダムへの流入量の再現性を確認した。Fig. 4 に日吉ダムの流入量を示す。流入量についての Nash-Sutcliffe 係数は 0.92 となった。総流入量は概ね実績に近いが、ピークの再現性がやや弱く過小であり、その分、流入量が多い時間帯が前後にやや伸びる形となった。また、このときの計算による最大浸水深と実績の浸水域を Fig. 5 に示す。

3.3 降雨シナリオの作成

降雨シナリオについては、既往の出水事例から、再現確率の異なる 4 ケース (1989 年前線, 2004 年台風 23 号, 2013 年台風 18 号, 2018 年 7 月豪雨) を採用した。

また、上述の降雨シナリオに加えて、平成 30 年 7 月豪雨時の 7 日未明に由良川流域・加古川流域にかかった強雨域が南東にずれ、同時期に桂川上流域にかかったと仮定した場合 (仮想豪雨) のシナリオを設定した。仮想豪雨の作成に当たっては、鎌倉、周山、殿田、新町、園部の 7 月 6 日 18 時以降の雨量として、それぞれ、綾部味方、福知山、奥山、氷上、杉原の観測雨量を用いることで作成した。

降雨量の確率統計解析には、水文統計ユーティリ

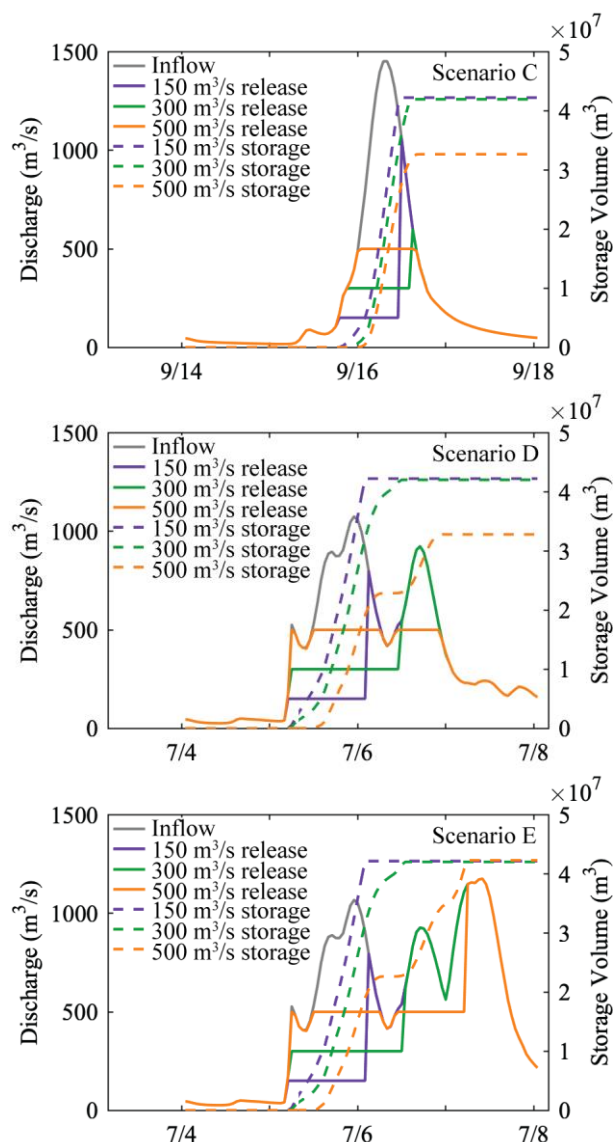


Fig. 6 Inflow, release discharge and storage volume on reservoir operation for scenario C, D, and E

ティーVer.1.5を使用し、Gumbel分布とGEV分布を比較してJackknife推定誤差が小さいGumbel分布を用いた。以上の5ケースの降雨シナリオの概要をTable 3に示す。

4. 日吉ダムの治水操作の検討

4.1 氾濫解析の結果

氾濫計算結果の例として、降雨シナリオ(C), (D), (E)の日吉ダムの流入量、放流量、貯水量をFig. 6に、亀岡地点の水深と流量をFig. 7に、亀岡地点の最大浸水深をFig. 8に示す。Fig. 6から、シナリオ(E)の場合には150 m³/s~500 m³/s放流のいずれの場合にもダムの洪水調節容量が使い切れ、異常洪水時防災操作が実施される。しかし、異常洪水時防災操作が始まるタイミングは、150 m³/s, 300 m³/s放流の場合には

最後のピークが始まる前であるのに対し、500 m³/s放流の場合には最後のピークの最大流入量となる直前であるため、Fig. 7に示すように下流での最大水位が500 m³/s放流の場合に最も小さい結果となった。Fig. 8から、シナリオ(C)では洪水調節開始流量が150 m³/s, 300 m³/s, 500 m³/sと大きくなるに従って、浸水範囲が大きくなるが、500 m³/s放流の場合でも、住宅地は浸水がほとんど発生していない。また、シナリオ(D)では洪水調節開始流量が150 m³/s, 300 m³/s, 500 m³/sと大きくなるに従って、浸水範囲は小さくなった。シナリオ(E)では、洪水調節開始流量が大きくなっても、浸水範囲は大きく変わらず、住宅地にも浸水が発生したが、最大浸水深は500 m³/s放流の場合に最も小さくなることがわかった。

4.2 経済被害額の算定

亀岡盆地周辺の洪水による経済被害額を求めるために、過去の浸水実績に基づいて対象地域を設定し、対象地域内の各グリッドセルに含まれる農地と住宅の面積の割合を算出した。住宅の位置と面積については、国土地理院基盤地図情報の建物データを参考にした。4.1で得られた各降雨シナリオの浸水範囲と浸水深から、対象地域内の全ての浸水した各グリッドセルの経済被害額を算出し合計することで、対象地域の経済被害額とした。経済被害額の算出については『治水経済調査マニュアル(案)』(国土交通省河川局, 2005)に基づいて、農作物の資産額を(水田・畑面積) × (平均収量) × (農作物価格)の式から求め、この資産額に被害率を乗じることで、農作物被害額を求めた。また、家屋の被害については、家屋資産額を(床面積) × (京都府の家屋1 m²当たり評価額)から求め、浸水深別の被害率を乗じて家屋被害額を求めた。治水操作手法ごとに家屋と農地の被害額の合計を求め、対象地域の被害額とし、150 m³/s放流の場合の被害額との差を求めた。被害額の差については、150 m³/s放流よりも被害額が大きい場合を赤色で、小さい場合を青色でTable 4に示す。また、日吉ダムからの最大放流量と亀岡地点での最大水深も併せてTable 4に示す。

Table 4より、48時間雨量の再現確率1/3~1/30の中小規模洪水では150 m³/s放流が、1/80~1/400の大規模洪水では500 m³/s放流が浸水による被害額が最も小さくなることが確認できた。確率規模が大きい場合には、住宅の浸水被害が増加するため、150 m³/s放流に比べ300 m³/s放流もしくは500 m³/s放流の優位性が際立つ結果となった。また、Fig. 7の降雨シナリオ(E)の水位と流量のグラフから、最後のピークの途中で、500 m³/s放流の場合は150 m³/s放流に比べ流量が大きい

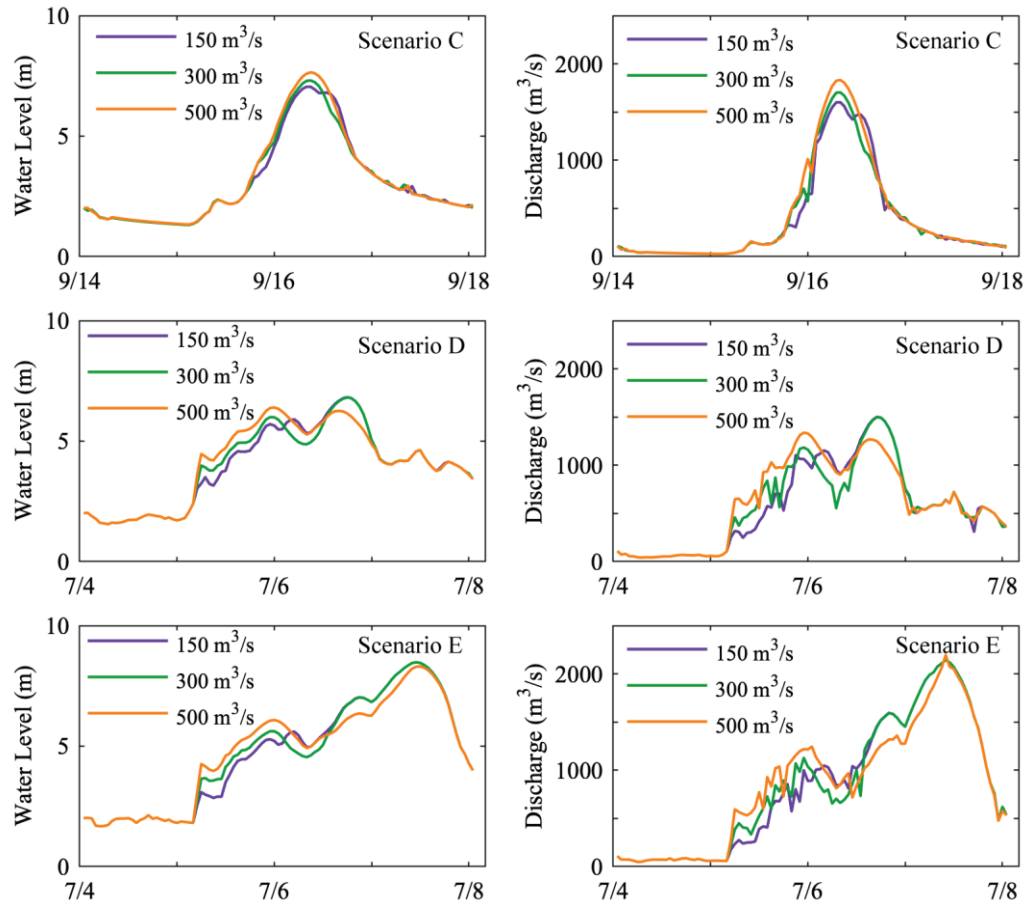


Fig. 7 The water depth and discharge in Kameoka for scenario C, D, and E

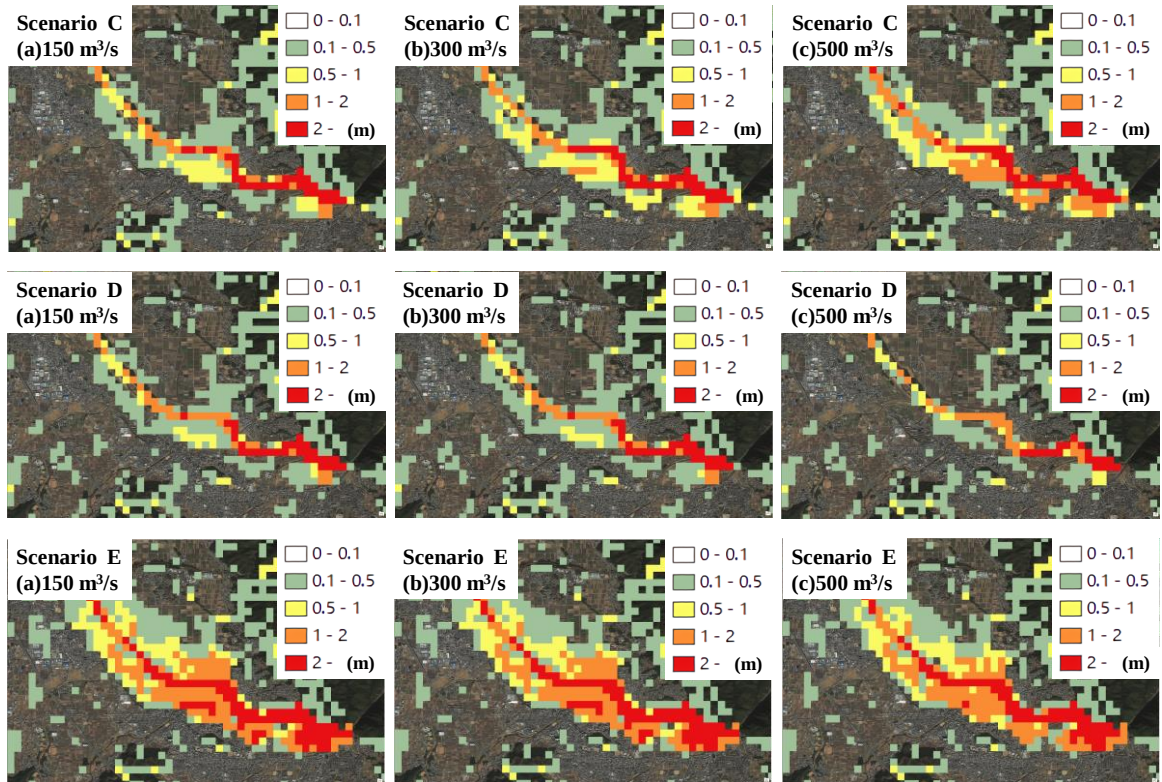


Fig. 8 The maximum inundation depth in Kameoka for scenario C, D, and E

Table 4 Results of the maximum release of the Hiyoshi dam, the maximum water depth and flood damage in Kameoka

降雨シナリオ	再現確率 (48 時間雨量)	150 m ³ /s			300 m ³ /s			500 m ³ /s		
		最大放流量 [m ³ /s]	最大水深 [m]	被害額の差 [億円]	最大放流量 [m ³ /s]	最大水深 [m]	被害額の差 [億円]	最大放流量 [m ³ /s]	最大水深 [m]	被害額の差 [億円]
A	約 1/3	150	5.0	0	300	5.4	0.6	500	5.9	2.4
B	約 1/5	150	5.8	0	300	6.1	3.6	500	6.5	8.7
C	約 1/30	1,056	7.1	0	598	7.3	14.8	500	7.7	47.0
D	約 1/80	924	6.8	0	924	6.8	0	500	6.5	-5.2
E	約 1/400	1,176	8.5	0	1,176	8.5	0	1,176	8.3	-32.2

いが、水位は小さいことがわかる。これは、降雨シナリオ(E)では、洪水初期の残流域からの流出が少ないために下流の水位が高くなく、洪水初期での放流量が多い500 m³/s放流の場合で最大水深が抑えられた可能性が考えられる。下流での水位上昇の速さは、住民の避難行動などに重要な影響を及ぼすため、このように放流のタイミングによる下流河川での水位上昇の変化への影響を分析することは重要であると考える。残流域からの流出は、降雨の時空間分布によって異なるため、今後さらに多くのシナリオを用いた分析が必要である。

5. 結論

本研究では、日吉ダムの治水操作手法の違いによる亀岡盆地での治水効果を比較検討するため、桂川上流における過去の出水データを元に複数の確率規模や降雨波形を含んだ降雨シナリオを作成し、降雨・流出・氾濫解析を行った。亀岡盆地における氾濫域や被害額等の分析を行った結果、中小規模洪水の場合には150 m³/s放流が、大規模洪水の場合には500 m³/s放流が下流の氾濫被害の軽減に有効であることを確認した。

また、150 m³/s放流に比べ500 m³/s放流では洪水初期の放流量が多くなるものの、最大水深を小さくできる可能性が示された。これらの結果は、降雨の時空間分布によるため、今後はさらに多くの降雨シナリオを用いて詳細な分析を行う必要がある。

洪水時に霞堤の開口部から浸水する堤内地の土地利用に関しては、水田の水稻の冠水時期や期間、水深によっては浸水被害を大幅に軽減できる可能性がある(皆川ら, 2016)。このことを考慮して被害額と浸水深の関係を表す脆弱性カーブを作成し、どのような洪水に対してもバランス良く浸水被害の

軽減が期待できるダムの治水操作方式を検討していくことや、モデルのパラメータを改善し、解像度の高い地形データを用いて対象域の再現性を高めることで、霞堤の治水効果について分析を行うことが肝要である。

浸水被害が最小となる治水操作は、降雨の確率規模や降雨時間によって異なると考えられる。被害額と超過確率の関係を表す水害リスクカーブ(田中ら, 2016)を作成し、ダムの治水操作ごとに水害リスクカーブを比較して治水効果を評価することが有効であると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、京都大学防災研究所の佐山敬洋准教授にRRIモデルについて種々の助言をいただいた。また、東京大学生産技術研究所の山崎大准教授に日本域表面流向マップのデータをご提供いただいた。本研究で使用した亀岡盆地周辺の浸水実績のデータは、京都府ならびに亀岡市よりご提供いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 沖岳大・中津川誠(2017): 超過洪水による氾濫被害を軽減するための治水施設の総合的な効果分析手法の研究, 土木学会論文集, B1(水工学), Vol.73, No.4, pp. I_367-I_372.
- 気象庁(2018), 平成30年7月豪雨(前線及び台風第7号による大雨等)。
- 国土交通省 河川局(2005): 治水経済調査マニュアル(案)。
- 国土交通省 国土技術政策総合研究所(2018): ダムの機能を最大限活用する洪水調節方法の導入に向

- けたダム操作規則等点検に関する資料.
- 佐山敬洋・岩見洋一 (2014) : 降雨流出氾濫 (RRI) モデルの開発と応用, 土木技術資料, 56-6.
- 佐山敬洋・立川康人・菅野浩樹・寶馨 (2010) : 分布型流出モデルと動的計画法の統合による貯水池制御最適化シミュレータの開発, 水工学論文集, 第 54 巻, pp. 547-551.
- 下阪将史・呉修一・山田正・吉川秀夫 (2009) : 既存ダム貯水池の洪水調節機能向上のための新しい放流方法の提案, 土木学会論文集 B, Vol. 65, No. 2, pp. 106-122.
- 高棹琢馬・瀬能邦雄 (1970) : ダム群による洪水調節に関する研究 (I) —DP の利用とその問題点—, 京都大学防災研究所年報, 第 13 号 B, pp. 83-103.
- 田中智大・立川康人・市川温・萬和明 (2016) : 降雨継続時間に対する総降雨量の条件付き確率分布を用いた水害リスクカーブの作成, 土木学会論文集, B1 (水工学), Vol. 72, No.4, pp. I_1219-I_1224.
- 道場正治 (2010) : 日吉ダムの洪水調節について～下流河道の流下能力を踏まえた洪水調節方式～, 語り継ぐ河川技術—技術体験集—, 近畿地方整備局, pp. 136-153.
- 三石真也・角哲也・尾関敏久・松木浩志 (2010) : VR 方式によるダム洪水調節の適用性に関する検討, ダム工学 20(2), pp. 105-115.
- 皆川裕樹・北川巖・増本隆夫 (2016) : 洪水時の流域管理に向けた水田域の水稻被害推定手法, 農業農村工学会論文集, No.303(84-3), I_271-I_279.
- 山崎大・富樫冨佳・竹島滉・佐山敬洋 (2018) : 日本全域高解像度の表面流向データ整備, 土木学会論文集, B1 (水工学), Vol.74, No.5, pp. I_163-I_168.
- Masuda, H. and Oishi, S. (2013) : Study on optimization of the integrated operation of dams using ensemble prediction in the upper reaches of the Nabari river, Proc. 35th IAHR World Congress, S10065.

(論文受理日 : 2019年6月17日)