

円山川の超過洪水時におけるリスク軽減のための 計画的氾濫に関する研究

Study on Premediated Overflow for Risk Reduction against Excessive Flood in Maruyama River

大西左海⁽¹⁾・角哲也・竹門康弘・Sameh KANTOUSH

Sakai ONISHI⁽¹⁾, Tetsuya SUMI, Yasuhiro TAKEMON and Sameh KANTOUSH

(1) 五洋建設（株）技術研究所

Synopsis

This study examines a flood control countermeasure, premediated overflow, to increasing external flood forces. It's a flood mitigation measure to effectively use available low risk areas as floodplains under considering topography and property distribution in a watershed. Areas and flood retention volumes are determined by uniformly lowering existing levee elevations. After choosing appropriate inundation areas, their amount of flood damages and risk reduction effects in downstream are both calculated by changing the height of overflow levee. The results indicate that suitable design of premediated overflow could reduce total flood damages to the entire watershed.

キーワード: 計画的氾濫, 氾濫解析, 洪水調節, 超過洪水

Keywords: premediated overflow, inundation analysis, flood control, extreme event

1. はじめに

1.1 研究の背景

気候変動の影響により、水害のさらなる頻発化・激甚化が懸念されるため、国土交通省は令和2年7月、流域治水の考えを打ち出した。流域治水とは、氾濫域も含めた流域全体が協働して水害対策を行うという治水思想である。流域治水では、霞堤や遊水地といった「氾濫」を許容する治水施設が見直されている。こうした流れの中で、「計画的氾濫」という概念も生まれている(石川, 2020)。「計画的氾濫」とは、氾濫が不可避である大洪水を“無計画に”氾濫させず、氾濫原における人口・資産分布の縦断分布を考慮して氾濫させることである(石川, 2020)。そして、超過洪水を「河川水位が計画高水位(以下HWLとする)を超える洪水」と再定義し、阿武隈川や北上川流域において、計画的氾濫の検討を行っている(妹尾ら, 2022; 石川ら, 2021; 石川ら, 2022)。具体的には、

河川上流区間の谷底平野における、堤防と山地で囲まれた閉鎖性氾濫原を対象とし、堤防高を部分的にHWLまで切り下げることで超過洪水用の遊水地を作り、そのピーク低減効果を計算している。

以上のように、日本では、治水計画の流域治水への方針転換を受けて、霞堤・遊水地といった氾濫による治水対策への見直しが行われており、さらには計画的氾濫という考えも生まれているということが、研究の背景としてある。

1.2 研究の目的

石川らの計画的氾濫の研究は、主に上流域の、堤防と山地で囲まれた閉鎖性氾濫原(Fig. 1)を対象にして行われている(妹尾ら, 2022; 石川ら, 2022)。計画的氾濫は、現在の土地利用を継続したまま、超過洪水時には遊水地として機能させることを考えている。そのため、遊水地として利用する氾濫原(以下計画的氾濫域とする)は、治水地形分類図を参照し、現在の

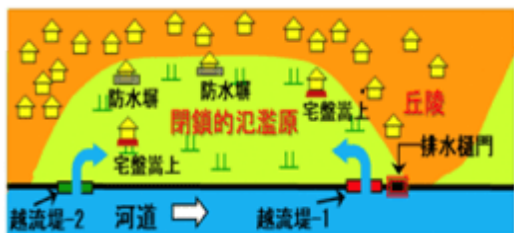


Fig.1 Conceptual Diagram of Premeditated Overflow (Senoo et.al, 2022)

土地利用をも考慮して選定されている。しかし、計画的氾濫域の選定手法や優先順位のつけ方は明確ではない。また、計画的氾濫による効果は、計画基準点の治水効果だけでなく、代わりに氾濫を誘導する地域の被害を含めた、流域全体の被害も勘案する必要があると考える。

そこで、本研究では、1)円山川流域で計画的氾濫域の選定手法を検討し、一般化すること、2)流域全体の経済被害額を考慮した計画的氾濫の治水効果を検討すること、を目的とする。なお、計画的氾濫を複数箇所で段階的に行う治水対策を「氾濫誘導」と定義し、本研究では氾濫誘導を計画するための基礎的検討を行った。

2. 研究の手法

2.1 対象地

研究の目的を達成するために、本研究では、兵庫県円山川流域の豊岡盆地を対象にして数値シミュレーションを行った。円山川は、源を兵庫県朝来市生野町円山に発し、支川と合流して豊岡盆地を貫流し、豊岡市において出石川、奈佐川等を合わせて日本海にそそぐ、幹川流路延長68km、流域面積1300km²の一級河川である。

低地に人口・資産が集中する豊岡盆地では、軟弱地盤のため、地盤沈下が今なお継続している。そのため、昭和30年代以前から、円山川の堤防は沈下と嵩上げが繰り返されてきた。また、市街地を含む下流の低平地では、河口から出石川合流部までの河床勾配が約1/9000と非常に緩いため、当該区間において河川からの氾濫が発生すると、浸水が盆地全体に広がる恐れがある。

これらの地形条件を考慮し、円山川流域は上流域での計画的氾濫を考慮する意義のある流域であると判断した。

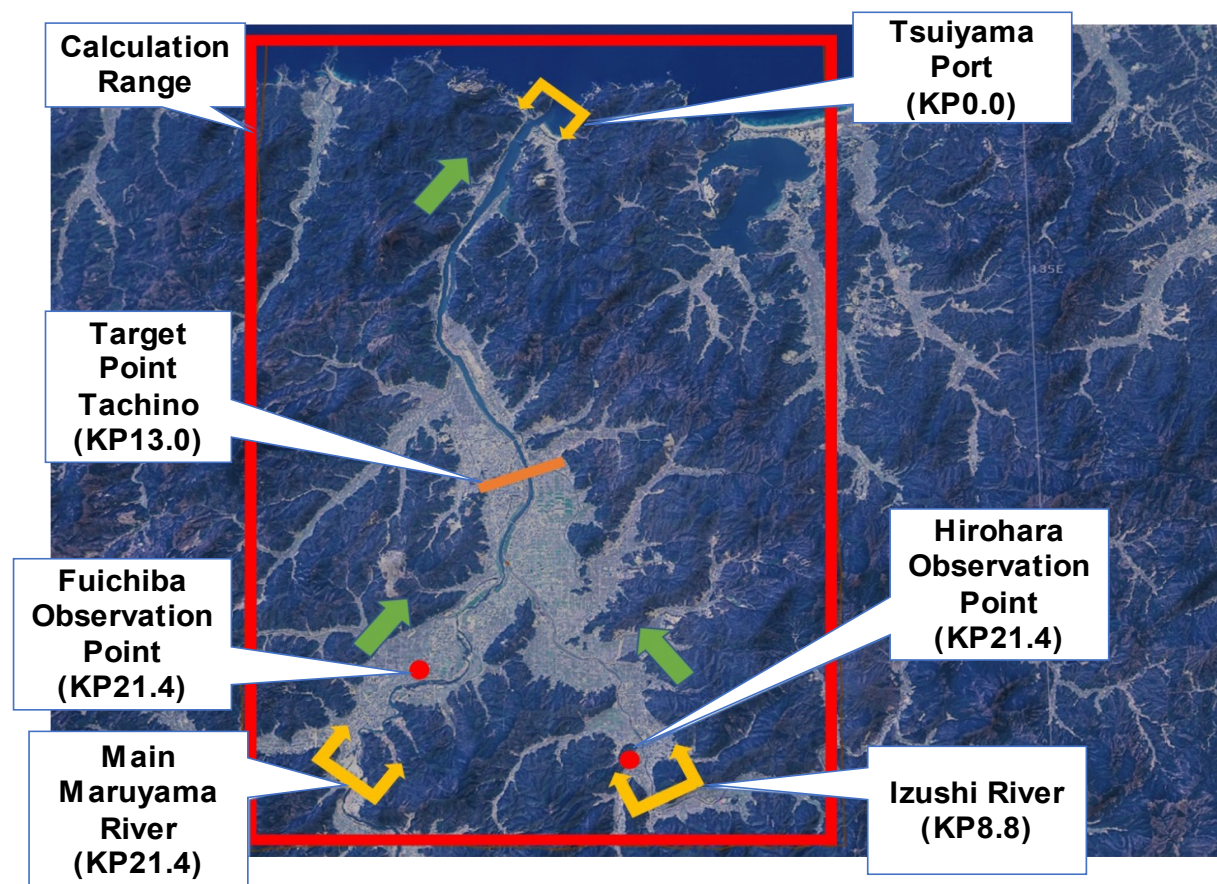


Fig. 2 Calculation Range

2.2 使用方程式

氾濫解析には、日立パワーソリューションズ(株)が提供するソフトウェア、DioVISTA/Floodを用いた。基礎方程式は、河道モデルに一次元浅水方程式が、氾濫モデルには二次元浅水方程式が実装されている。また、越流部の計算には、本間の正面越流公式を補正した横越流公式である栗木らの式が実装されている。また、排水樋門の計算は、洪水浸水想定区域図作成マニュアル(第4版)でモデル化の対象となっている、ボックスカルバート・樋管等と同様の考え形で実装されている。計算式は省略する。

2.3 パラメータ設定

本研究では、外水氾濫による治水対策である氾濫誘導の効果を検討するため、外水のみを対象とし、内水は考慮しない。そのため、降雨流出は考慮せず、氾濫解析のみを行う。

計算範囲は、直轄区間である全範囲とした。具体的には、本川円山川は、K.P.0.0~26.6、支川出石川は、円山川合流点よりK.P.0.0~8.6の区間である。豊岡盆地に貫流する主要な支川として、もう一つ主要な支川として奈佐川も存在するが、円山川、出石川と比較して流量が小さく、また豊岡市街地より下流にそそぐため、計算の対象外とした。計算領域をFig.2に示す。

氾濫域の地形データには、国土地理院の数値地図50m標高メッシュが実装されている。また、河道部の地形データは、平成31年度の定期横断測量データを用いた。概ね200mピッチである。メッシュサイズは、25mを用いて使用した。これは、越流堤部における越水を再現できる最小のメッシュ数である。

上流端条件として、本川円山川には府市場観測所における流量ハイドログラフを、支川出石川には弘原観測所における流量ハイドログラフを、それぞれ与えた。また、下流端条件は、津居山港における潮位を与えることとした。具体的には、朔望平均満潮位T.P.+0.6m、に異常潮位として0.11mを加えた値である0.71mを一定値で与えた。

2009年台風21号洪水の波形を用いてキャリブレーションを行い、河道断面の粗度を本川は0.032、支川は0.030と決定した。氾濫粗度は、同モデルにおいてデフォルトの値を用いた。計算時間は72時間、計算タイムステップは300秒である。

同波形によってモデルの適合度を評価した(Fig. 3)。計算値と、立野地点における水位ハイドログラフとの相関係数は0.991、また流量ハイドログラフとのNash-Sutcliffe係数は0.987となり、高い再現性を有していると考えられる。それに加えて、計算にはもう一つ別の波形として、2017年10月洪水の波形(Fig. 4)

も用いた。これは、後方集中の降雨波形によるハイドログラフである。超過洪水のピーク流量の確率評価は、立野地点におけるピーク流量を利用して行い、1/100、1/150、1/200確率規模のピーク流量を算出し、引き伸ばしを行うことで超過洪水の波形を作成した。

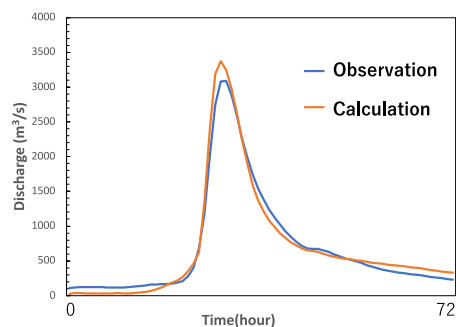


Fig. 3 Comparison of Hydrograph of Typhoon 21 in 2009

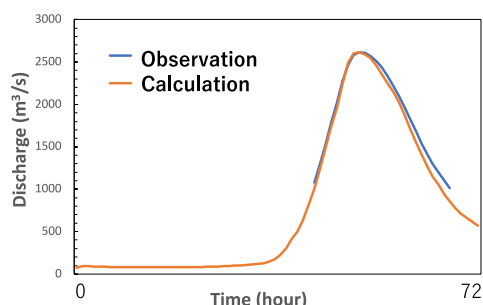


Fig. 4 Comparison of Hydrograph of Typhoon 21 in 2017

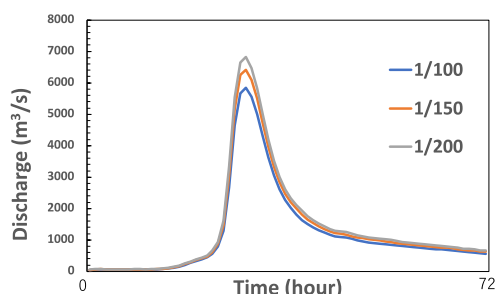


Fig. 5 Extreme Event Hydrograph Using 2009 Shape

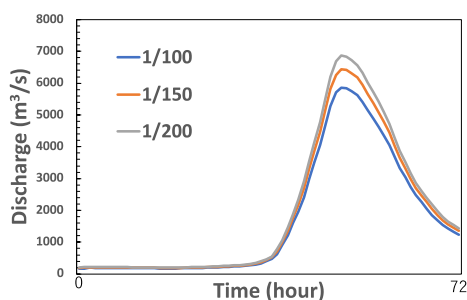


Fig. 6 Extreme Event Hydrograph Using 2017 Shape

2.4 計画的氾濫域選定の手法

築堤によって、主に上流域には閉鎖性の氾濫原が点在している。それらの氾濫原は、築堤がされるより以前は、自然の遊水地として機能していたと思われる。しかし、築堤に伴って、かつての氾濫原の持つ水害危険性が低下した結果、宅地化が進行したと考えられる。この場合築堤は、地域の高度利用を可能にしたが、潜在的な水害リスクを増大させたことにもなる。

ここでさらに逆の見方をすると、堤防高を高くすることは、その地域の期待洪水貯留量を増大させることにもなると考えられる。したがって、これらの地域で、越流堤と排水門を設け、あらかじめ超過洪水に対しては遊水地として利用するように備えておけば、かつて以上に下流の被害軽減に寄与できる可能性がある。

以上を踏まえて、計画的氾濫域は、歴史的な氾濫履歴を確認し、かつ現在の土地利用も考慮して決定することとした。その手法は以下のとおりである。

- a) 対象流域の氾濫ポテンシャルの評価
- b) 計画的氾濫域ポテンシャルの評価
 - 1) 防御対象地の選択
 - 2) 流域の標高の確認
 - 3) 閉鎖性氾濫原の確認
 - 4) 現在の土地利用の確認
 - ア) 一定以上の面積を有する
 - イ) 病院・文化財等の重要施設がない
 - ウ) 施設による貯留の阻害がない
 - エ) 家屋の戸数が少ない

対象流域の氾濫ポテンシャルの評価では、計算範囲の河道の全ての断面で堤防高を左右岸ともに一律に1mずつ切り下げ、2009年波形の1/100確率規模洪水を与えて、Caseごとの最大浸水面積、浸水箇所を比較した。計算条件をTable 1にまとめた。

計画的氾濫域ポテンシャルの評価では、1)-4)の項目による評価を順に行い、計画的氾濫域を選定した。

これらのフローを円山川流域にあてはめ、計画的氾濫域を選定した。

Table 1 Calculation Condition
for Evaluation of Inundation Potential

Contents	Bank Hight	Hydrograph
Case 0	Original	1/100 probability scale of 2009 Typhoon No.21 shape
Case 1	Totally 1m Down	
Case 2	Totally 2m Down	
Case 3	Totally 3m Down	
Case 4	All cut	

3. 計画的氾濫域の選定結果

3.1 円山川流域の氾濫ポテンシャルの評価

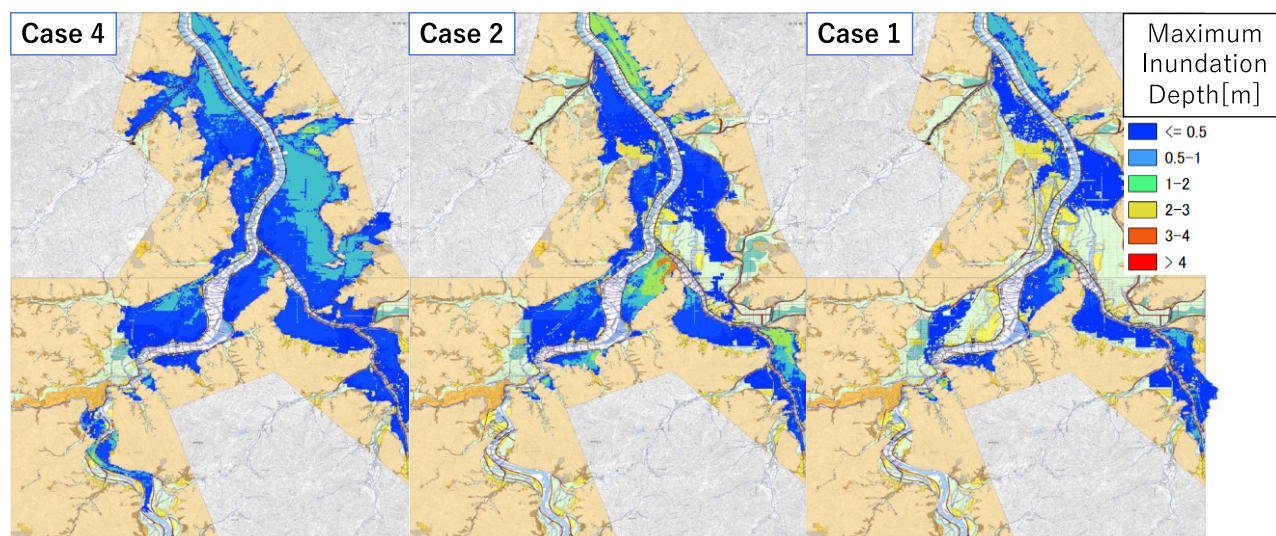


Fig. 7 Comparison of Maximum Inundation Depth

Fig. 7に、Case 4, Case 2, Case 1における最大浸水面積時の氾濫域の変化を示す。最大浸水面積の広がりから、この流域が元来氾濫ポテンシャルの高い流域であることが分かる。また、微視的にも、計画的氾濫域ポテンシャルの高い地域の目安もつけることができる。以下では、これらの地域を先に示したフローに従って絞り込んだ。

3.2 計画的氾濫域ポテンシャルの評価

まず、1) 防御対象地の選択においては、豊岡市街地を選択した(Fig. 8)。本流域においてもっとも人口・資産の分布が集中しているためである。これにより、市街地より下流域は計画的氾濫域の対象外となる。

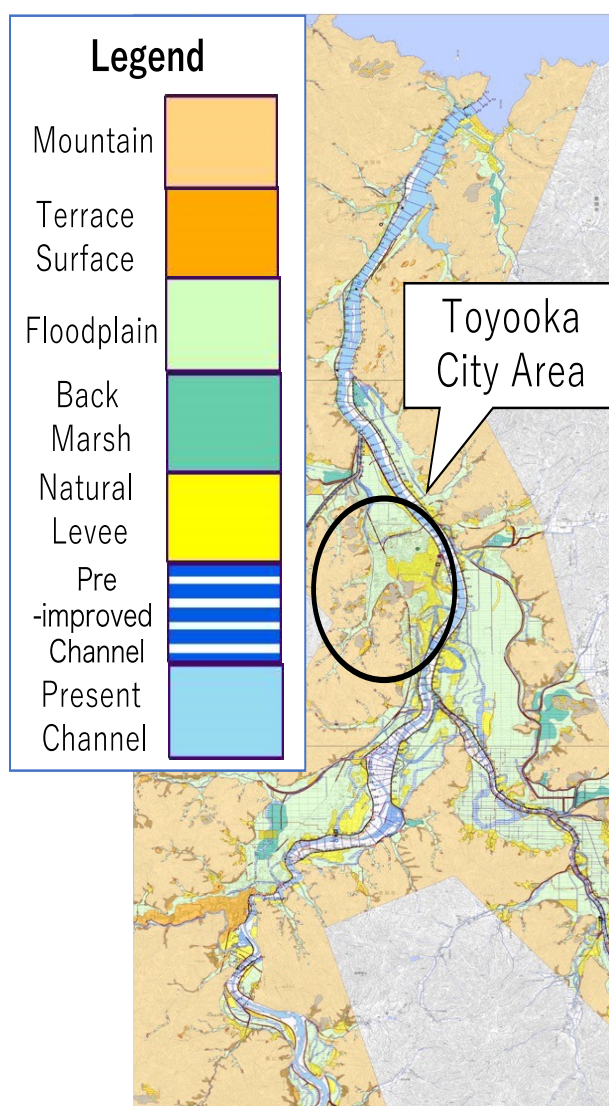


Fig. 8 Landform Classification Map for Flood Control in Maruyama River

次に、2) 流域の標高の確認を行った。これは、防御対象地と同標高で、また勾配も緩い地域では、治水上の効果が低く、かつ自然排水がされずに浸水面積も大きくなるためである。これにより、市街地对岸に位置する大きな盆地地域(Fig. 9 中の対岸地域)は除外した。

さらに、3) 残された地域で、閉鎖性の氾濫原を確認した。これは、河道と山地・道路等で囲まれている盆地地形を用いることで、氾濫域が自然に限定されるためである(Fig. 1)。

その結果、Fig. 10に示す地域A-Dが計画的氾濫域の候補地となった。

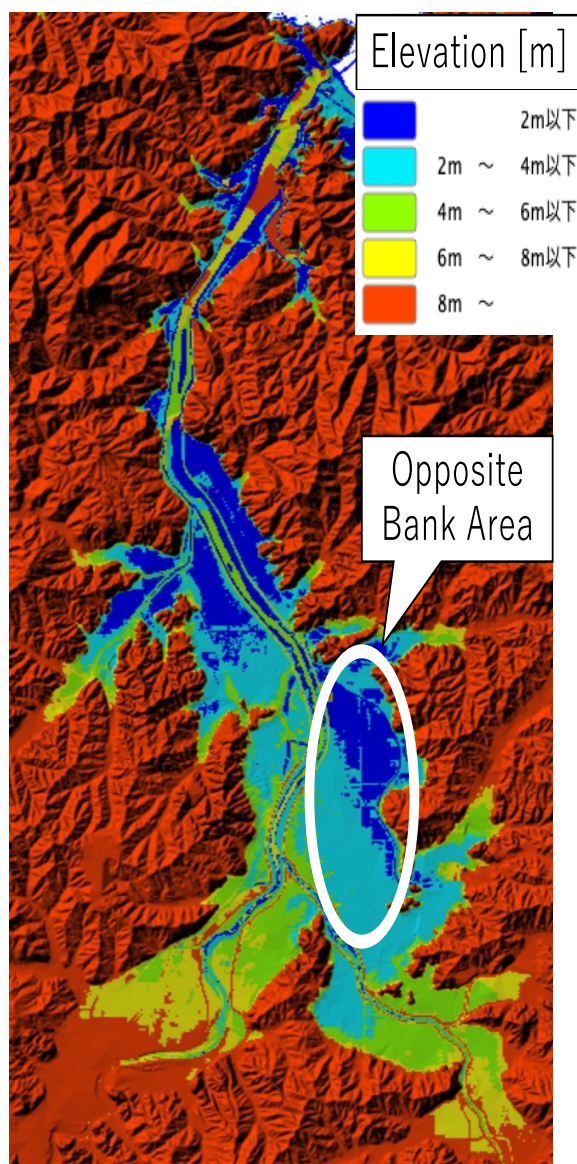


Fig. 9 Elevation Map in Maruyama River

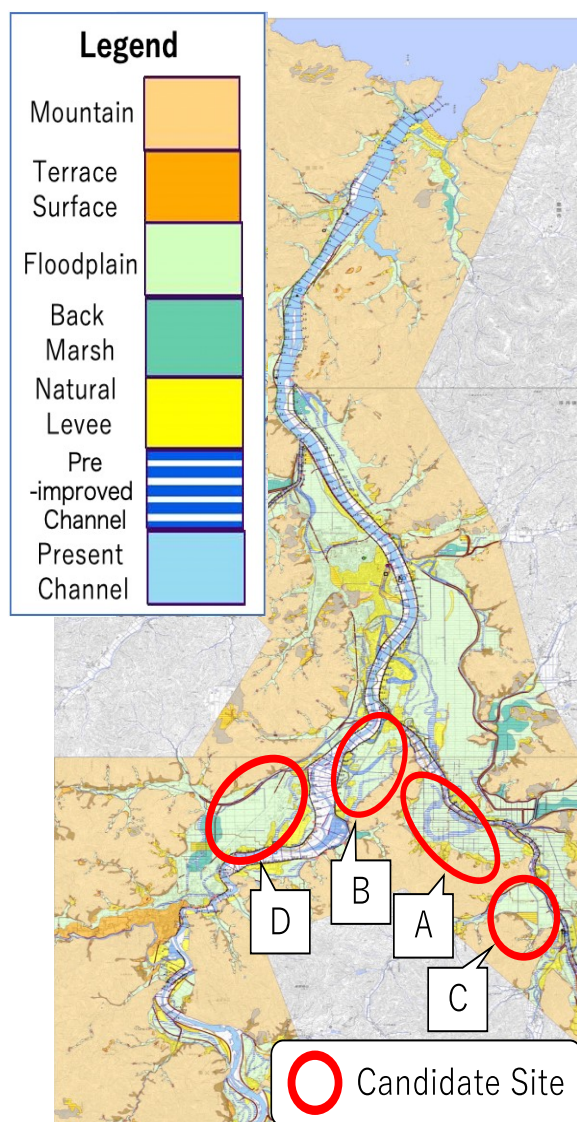


Fig. 10 Candidate Site for Premediated Overflow Area

最後に、4) 現在の土地利用の確認を行い、計画的氾濫域を絞り込んだ。Fig. 11に、治水地形分類図に現在の土地利用を重ねた地図を示す。支川上流の左岸地域 (C地域) は、面積が小さく、計画的氾濫の効果小さいと考えられるため除外した。本川上流左岸の地域 (D地域) は、JRの線路があり、それにより貯留が阻害される可能性があることから除外した。

除外された地域と比較し、A地域・B地域はある程度の面積を有しているため計画的氾濫による治水効果が期待でき、また点在している家屋も微高地に集中しているため、当該地域内の被害も抑えられると考えられる。

以上により、支川左岸に位置する半月状の閉鎖性氾濫原(A地域)と、本川と支川の合流点に位置する閉鎖性氾濫原(B地域)を、計画的氾濫域として選定した。

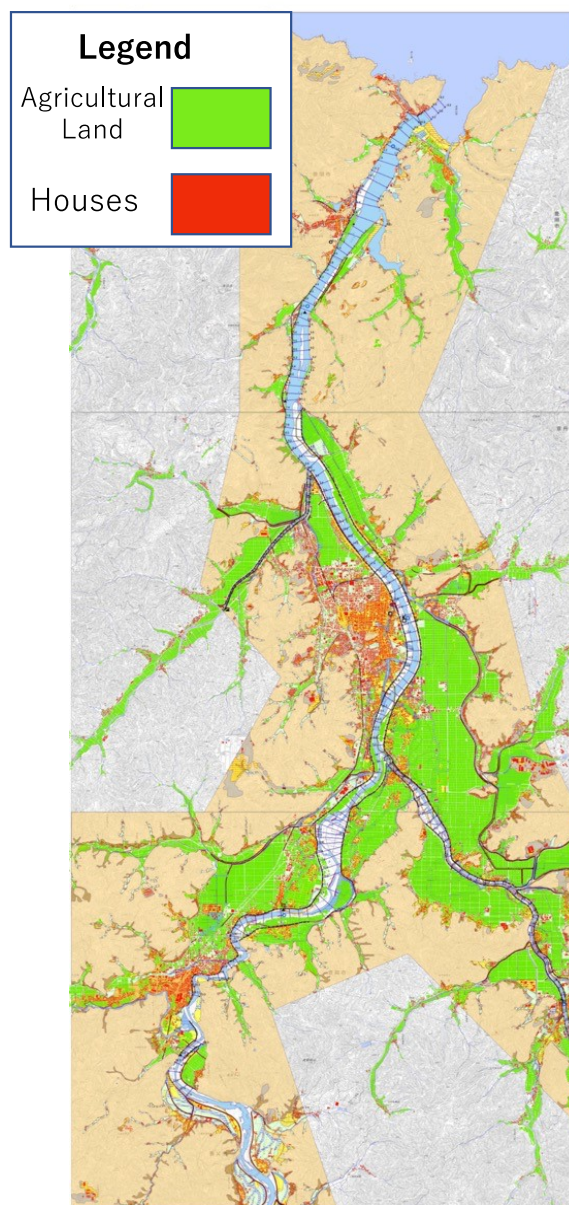


Fig. 11 Distribution of Houses and Agricultural Land in Maruyama River Basin

3.3 選定した計画的氾濫域の詳細

A地域を拡大したものをFig. 12に示す。この地域の面積は2.35km²である。この地域の建物分布をみると、主に山際の自然堤防上に位置していることが分かる。そのため、この地域で計画的氾濫を行っても、建物への浸水被害は少ないと考えられる。また、対岸の河道沿いにある自然堤防上には建物分布が集中しており、A地域で計画的氾濫を行うことは、下流域だけでなく、対岸を防御することにもつながるだろう。

A地域の越流堤の位置は、旧河道の跡が残り、付近に家屋のないKP4.8地点とした。また、下流部のKP2.0地点に排水樋門・ポンプを設定した。

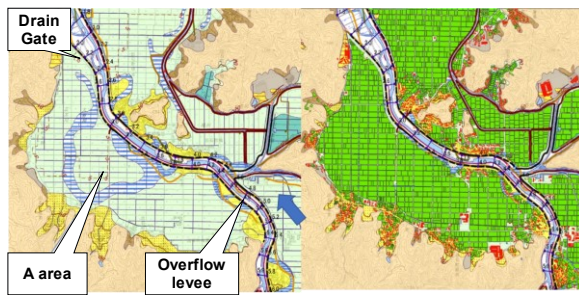


Fig. 12 Details of A area

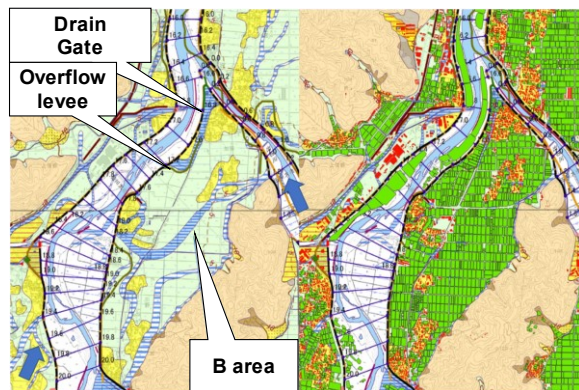


Fig.13 Details of B area

B 地域を拡大したものをFig. 13に示す．面積は約 2.1km²である．図を見ると，この地域にある建物は自然堤防上に集中していることが分かる．ただし，その分布は，山際ではなく域内に点在しており，また現河道に対しても近い位置関係にある．越流堤の位置は，図中のKP17.2地点に設定した．これは，現在の土地条件と，第二章で確認した氾濫履歴による越水の順序を考慮して決定した．下流のKP16.8地点には排水樋門とポンプを設定した．

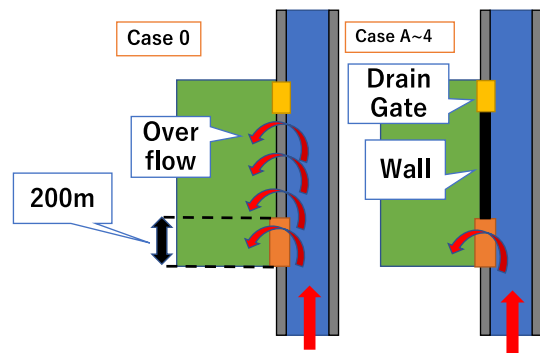


Fig. 14 Schematic Diagram of Retarding Basin

4. 治水効果分析

4.1 計算条件

本研究では，越流堤部の高さを主要なパラメータとして取り扱った．計算条件をTable 2にまとめた．A, B地域それぞれに設けた越流堤の高さを，現状の堤防高から1mずつ4mまで切り下げた計6ケース(Fig. 14, 15)について，超過洪水の波形計6種類(Fig.5, 6)をそれぞれ与えた．そして，ピークカット量(Case 0との比較)，最大貯留量を算出した．

なお，越流堤部の高さの変化による計画的氾濫の効果把握することに重きを置くため，計画的氾濫域では，越流堤部以外の堤防は壁立て条件とし，越流箇所を越流堤部に限定した．越流堤の幅は，モデルの都合上，河道横断面間隔でしか設定できないため，本研究では定期横断測量のピッチ幅である200mに設定している．

下流には排水樋門に加えてポンプを設定した．外水位が内水位を上回っている際には10m³/sでポンプ排水を行い，内水位が外水位を上回っている際には自然排水を行う．排水樋門の幅は10m，高さは2mとした．

Table 2 Consideration of Contents

Contents	Overflow Levee Hight	Hydrograph						Remarks
		2009 Shape			2017 Shape			
Case 0	Original	1/100	1/150	1/200	1/100	1/150	1/200	for comparison
Case A	Original							overflow only overflow levee
Case 1	1m Down							
Case 2	2m Down							
Case 3	3m Down							
Case 4	4m Down							

4.2 計画的氾濫域による治水効果分析

A地域について、2009年波形に対するピークカット量(Fig. 16)、2017年波形に対するピークカット量(Fig. 17)、最大貯留量(Fig. 18)を示す。A地域では、2009年波形に対しては、越流堤高を切り下げるほど、ピークカット量も大きくなった。また、2017年波形に対しては、Case 3の場合が1/150確率規模以上の超過洪水に対して最も効果を発揮する結果となった。これは、Case 4では切り下げが大きく、洪水ピーク前に貯留量が限界に達するためである。

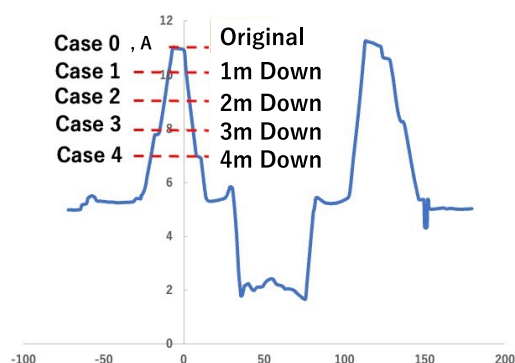


Fig. 15 Conditions of Overflow Levee

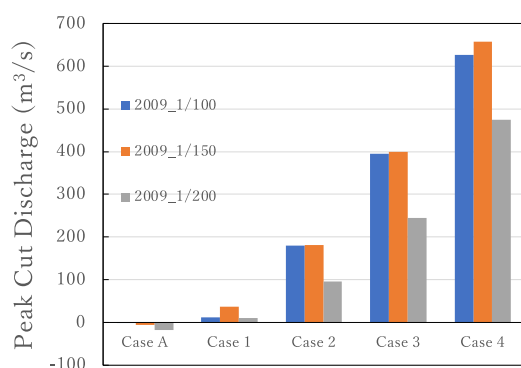


Fig. 16 Peak Cut Discharge of 2009 Shape in A area

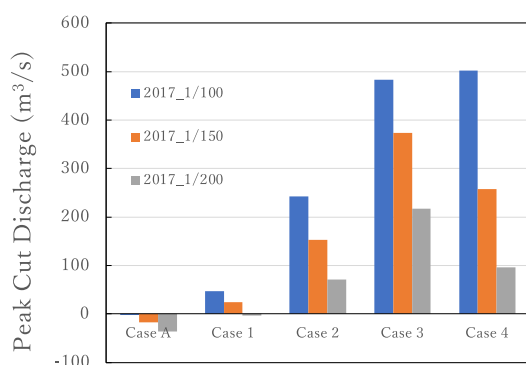


Fig. 17 Peak Cut Discharge of 2017 shape in A area

また、Fig. 18より、どちらの波形に対しても、越流堤高を切り下げるほど、貯留量は大きくなるのが分かる。以上より、どちらの波形に対しても、A地域では3-4mの切り下げが有効と考えられる。

次に、B地域について、2009年波形に対するピークカット量(Fig. 19)、2017年波形に対するピークカット量(Fig. 20)、最大貯留量(Fig. 21)を示す。B地域でも、2009年波形に対しては、越流堤高を切り下げるほどピークカット量が増大している。また、2017年波形に対しては、1/150確率規模以上の超過洪水に対してCase 2が最も効果を発揮する結果となった。2009年波形よりもピーク付近の時間が長いことが原因である。

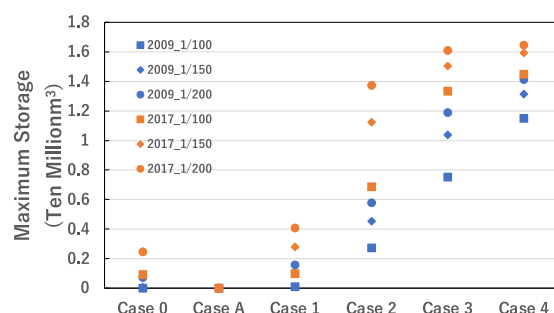


Fig. 18 Maximum Storage in A area

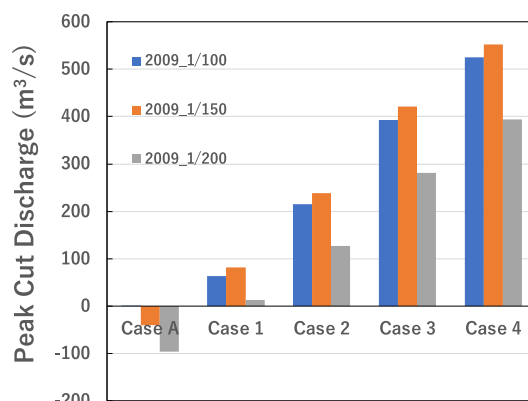


Fig. 19 Peak Cut Discharge of 2009 Shape in B area

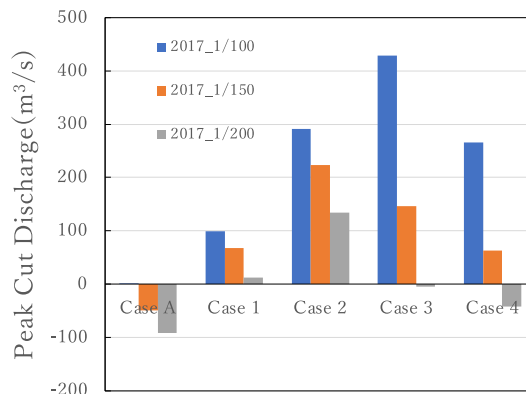


Fig. 20 Peak Cut Discharge of 2017 shape in B area

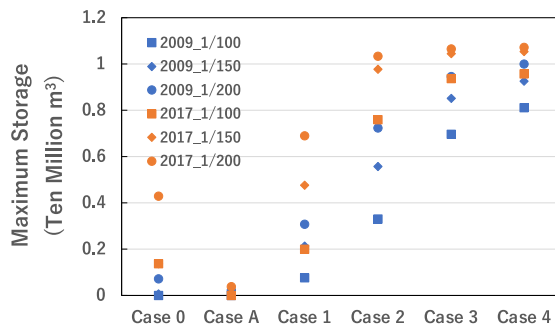


Fig. 21 Maximum Storage in B area

貯留量を見ると、B地域もA地域と同様、堤防高を切り下げるほど貯留量が増加していることが分かる。以上より、B地域では、2009年波形に対しては4mの切り下げ、2017年波形に対しては2mの切り下げが最も有効であると考えられる。

4.3 流域全体の経済被害推定

先の計算により得られた最大浸水面積を、治水経済調査マニュアル(案)を用いて経済被害に換算し、計画的氾濫による経済面の効果を確認した。

家屋資産額は床面積[m²]×都道府県別家屋1m²当たり評価額[円/m²]として求め、適当な被害率を乗じて家屋資産額を算定した。なお、勾配に応じて被害率が変わるが、流域全体に対してAグループとして計

算した。床面積には、国土地理院の基盤地図情報の建物ポリゴンデータを用いた。

また、農作物はすべて水稲とし、農作物資産額を(水田・畑面積[アール])×(平年収量[kg/10アール])×(農作物価格[円/kg])として、農作物資産額に適当な被害率を乗じて農作物被害額を算定した。水田・畑面積は、農林水産省が提供する、農地の区画情報(筆ポリゴン)を用いた。なお、浸水時間によって被害率が変わるが、浸水は48時間ですべて解消されると仮定して計算を行った。

そして、家屋と農作物の被害額の合計を流域全体の被害額として算出した。計算は、フリーGISソフトウェアであるQGISを用いて行った。

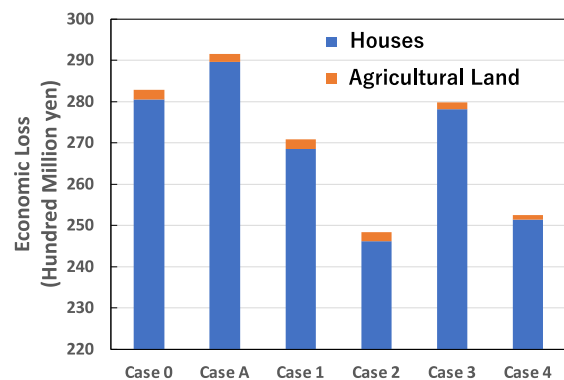


Fig. 22 Economic Loss by 1/200 Probability Scale of 2009 Using A area

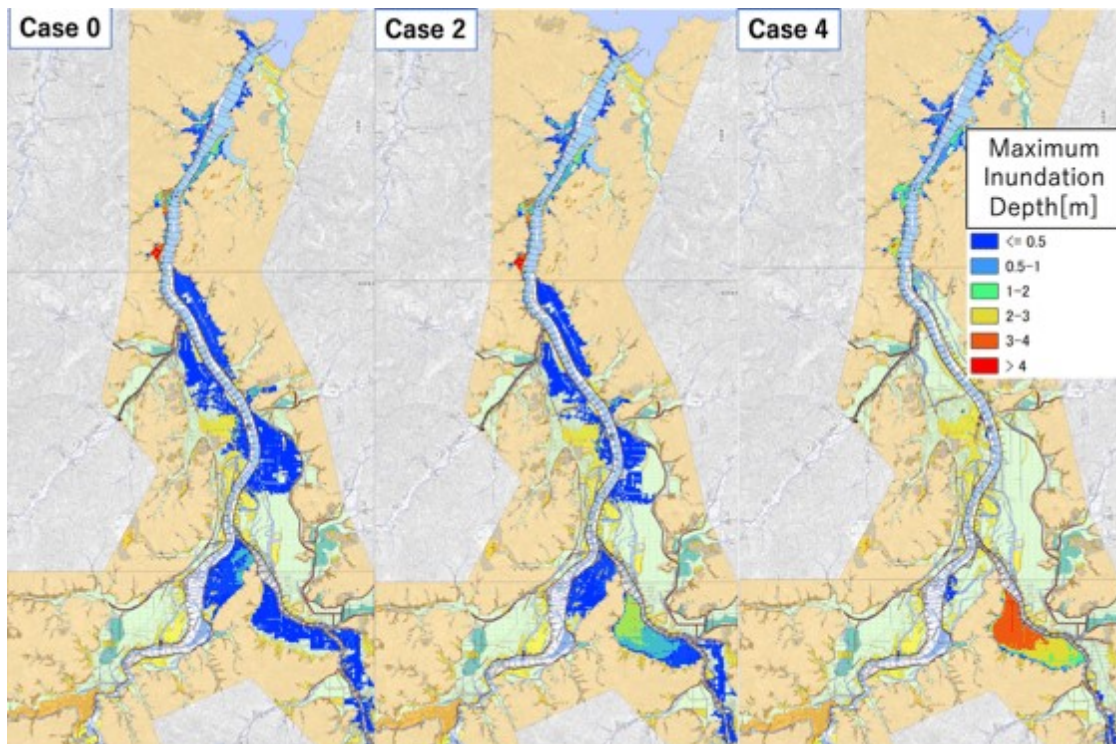


Fig. 23 Maximum Inundation Depth by 1/200 Probability Scale of 2009 Using A area

計算結果の一例として、Fig. 22 に 1/200 確率規模の 2009 年波形に対して A 地域を用いた場合の経済被害額を示す。堤防高を切り下げることによって、現状である Case 0 よりも被害額を低減させることができおり、中でも 2m の切り下げが最も有効となった。

この場合の代表 Case について、最大浸水面積時の浸水深を比較した(Fig. 23)。A 地域に着目すると、堤防高を切り下げるほど、A 地域の貯留量が増加し、それに伴って下流の浸水深、浸水面積が共に低減していることが分かる。しかし、4m の切り下げを行う Case 4 では、A 地域での局所被害が大きくなる。そのため流域全体では Case 2 が最も被害額が小さくなると考えられる。

また、Fig. 24 に 1/200 確率規模の 2017 年波形に対して B 地域を用いた場合の経済被害額を示した。この場合は、越流堤高の切り下げを行うほど、被害額は増大していく結果となった。最大浸水面積時の浸水深(Fig. 25)を比較してみると、B 地域では現状でも貯留が行われており、2m 程度の切り下げにより、下流の浸水面積を軽減できているが、B 地域の局所被害が大きくなっている。

また、4m 程度の切り下げを行うと、Case 2 と比較して浸水深が大きくなる地域も存在することになる。これは、切り下げが大きく、ピークに効いていないことが原因である。

計画的氾濫域内の家屋の被害が流域全体の経済被害に与える影響が大きいため、計画的氾濫を行う際には、この点を考慮して候補地を選定することが必要であることが示唆されている。

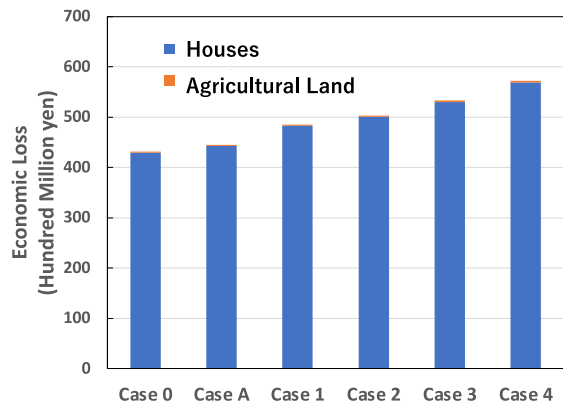


Fig. 24 Economic Loss by 1/200 Probability Scale of 2017 Using B area

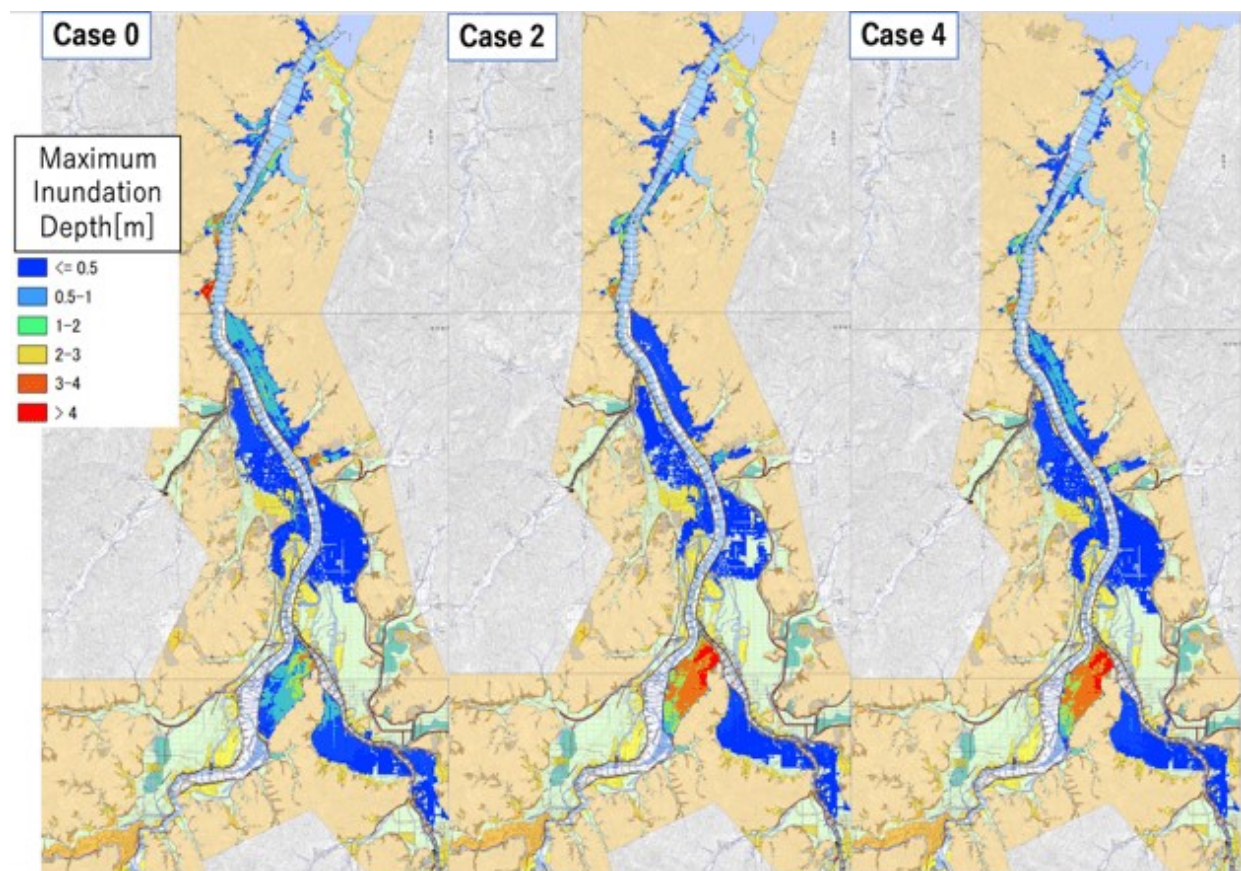


Fig. 25 Maximum Inundation Depth by 1/200 Probability Scale of 2017 Using B area

5. 結論

本研究では、流域治水の実現に際して、上流域において堤防高の切り下げを行い、超過洪水を適切な地域に計画的に氾濫させる対策について、数値シミュレーションを行って検討した。

具体的には、円山川流域を対象として、流域の地形・資産分布を考慮し、堤防高を一律に切り下げることで過去の地形を簡易的に再現して、計画的氾濫域を選定する手法を提案した。そして、その手法によって決定された計画的氾濫域において、堤防高の一部を1mごとに切り下げ、中央集中と後方集中の波形による超過洪水を与え、越流堤条件ごとの局所的な治水効果を算出した。さらに、流域全体の治水効果として、経済被害額も算出した。本研究により明らかになったのは以下のとおりである。

- 1) 本研究における計画的氾濫域を選定するためのポテンシャル評価手法を、流域治水のための計画的氾濫の手法として一般化できる。
- 2) 家屋が、山際など堤防から離れた地域に分布している A 地域においては、堤防の一部の1-2mの切り下げにより、ピークの立ち上がりが必要な波形に対して流域全体の経済被害を減少させることができる。それに対して、家屋がわずかな微高地の自然堤防上に点在している B 地域においては、流域全体の経済被害は増大する。これらより、計画的氾濫域内の家屋の配置が重要な要素になる。
- 3) 遊水地によって流域全体の浸水面積を減少させても、局所的な被害の増加により流域全体の経済被害も増加する場合がある。

今回は、円山川の二つの盆地地形を個別に検討したが、それらを組み合わせ、氾濫の順序も考慮した氾濫誘導の検討を進めることが重要である。流域治水の実現のため、上流域の氾濫を含めた対策に関する検討を進めていくことが必要である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、日立パワーソリューションズ(株)様より、DioVISTAの詳細についてご教授いただいた。本研究で利用した河道の定期横断測量データは、豊岡河川国道事務所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

- 石川忠晴 (2020) : 今後の超過洪水対策における計画的氾濫について, 水文・水資源学会誌, Vol.33, No.6, pp.263-270.
- 石川忠晴・名本伸介 (2022) : 築堤に伴い谷底平野に発生する閉鎖性氾濫原での治水対策に関する提案と試算, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.78, No.2, pp.223-228.
- 石川忠晴・原田翔太 (2021) : 盆地地形を利用した超過洪水用遊水地について, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.77, No.2, pp.409-414.
- 妹尾泰史・石川忠晴 (2022) : 河川上流部における超過洪水用分散型遊水地の提案と阿武隈川を対象とした試算, 河川技術論文集, Vol.28, pp.439-444.
- 国土交通省 : 円山川水系河川整備基本方針.
- 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 水管理・国土保全局 河川環境課 水防企画室, 国土技術政策総合研究所 河川研究部 水害研究室 (2015) : 浸水想定区域図作成マニュアル(第4版).
- 国土地理院 (2022) : 基盤地図情報ダウンロードサービス.
- 社会資本整備審議会 (2020) : 答申「気候変動を踏まえた水害対策のあり方〜あらゆる関係者が流域全体で行う持続可能な「流域治水」への転換〜」.
- 農林水産省 (2022) : 筆ポリゴン公開サイト.

(論文受理日 : 2023年8月31日)