

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

TRIAL EVALUATION OF THE EFFECT OF DISTRIBUTED DETENTION PONDS FOR EXTRAORDINARY FLOOD IN THE UPPER ABUKUMA RIVER

妹尾泰史¹・石川忠晴²

Hiroshi SENOO and Tadaharu ISHIKAWA

¹正会員 工修 (株)東京建設コンサルタント 河川本部 (〒170-0004 東京都豊島区北大塚 1-15-6)

²正会員 工博 東京工業大学 名誉教授 (〒251-0035 神奈川県藤沢市片瀬海岸2-4-15)

近年の豪雨災害の頻発化と今後の全球的気候変動に備えるため、河道容量を超える洪水（以下では超過洪水）に対処するための新たな治水計画手法が模索されている。超過洪水に対しては河川氾濫を縦断的に分散して水害を軽減することが重要になるが、一般的には、人口・資産密度の低い上流域氾濫原での遊水によるピーク流量低減が効果的であると考えられる。そこで本研究では、我が国の河川上流部に多く存在する河岸段丘と堤防に囲まれた閉鎖性氾濫原を利用して超過洪水時のみに機能する分散型遊水地を構想した。2019年に超過洪水が発生した阿武隈川の上流部10 km区間を対象に数値シミュレーションにより洪水調節効果を検討したところ、年生起確率1/40程度に対応する整備段階においても、基本方針に記載される1/150規模の計画高水流量に対して約15%のピーク流量低減率を期待できると考えられた。

Key Words: new type detention pond, extraordinary flood, river basin topography, numerical study

1. はじめに

2000年の社会資本整備審議会中間答申¹において「流域での対応を含む効果的な治水の在り方が示され、水防災対策特定事業（2001）、土地利用一体型水防災事業（2006）、浸水想定区域図作成（2005）など氾濫原における施策が創設された。また2020年の答申²では「気候変動を踏まえた治水計画のあり方」が示され、翌年には水系ごとの「流域治水プロジェクト」の案が公表された。

現行の流域治水プロジェクトは、できるだけ氾濫を防ぐ・減らすための河川区域対策と、氾濫を前提とした事前・事後の対応に関する氾濫域対策から構成され、前者が従前の治水事業に概ね対応している³。しかし気候変動による今後の洪水規模増大の蓋然性は極めて高いことから、前者において「大出水時における氾濫のさせ方（計画的氾濫）」についての戦略的計画論が必要ではないかと思われる。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・資産の縦断分布を考慮して氾濫させることである。

我が国の河川上流域は一連の狭窄部と小盆地から成っている場合が多い。また氾濫原の大部分は水田として利

用され、集落の多くは河岸段丘上にある。このような地形は、曾ては自然的遊水機能を有していたと思われるが、近年の連続的築堤によりその機能が失われてきていると思われる。そこで本研究では、連続堤防のストックを生かしつつ地形の持つ遊水機能を活用する「大出水のピークカット専用の分散型遊水地」を構想し、阿武隈川上流部を例として洪水調節効果を試算した。

2. 上流域の地形を利用する分散型遊水地の概要

上流山地の河谷は地盤の隆起と河川流による下刻によって谷地と河岸段丘に分離していることが多い。谷地には上流から運ばれる土砂の堆積により谷底平野が形成される。また、河岸段丘は河川の蛇行により浸食されるが、下刻速度が側方浸食速度より大きいと狭窄部が形成される。その結果、盆地状の谷底平野の連続する地形が形成されやすい。このような地域では、冠水頻度の高い谷底平野は水田として利用され、段丘上や比高の大きな自然堤防上に集落が形成されている。また水田の冠水頻度を減らすために築堤が進められた結果、段丘崖と堤防に囲まれた閉鎖性の氾濫原が河道兩岸に形成されている。



図-1 阿武隈川の概要 右：流域図，左：上流域の地形特性（右図の赤枠部分を時計回りに90°回転している）

図-1は、阿武隈川上流域に見られる河道山付部と盆地地形を示している。紙面の制約により北を右側にしており、その範囲は右の水系図に赤枠で示している。この図は治水地形分類図と色別標高図を重ねて疑似立体化したものだが、前者は右下の一級河川の国管理区間近辺しかないため、左上は地形がやや不鮮明となっている。★は主要な山付部を示しており、その上流の盆地地形（主要な盆地には数字①～⑦を付している）は河川堤防と河岸段丘に囲まれた閉鎖性氾濫原となっている。本研究では、このような閉鎖性氾濫原を「超過洪水」のピーク低減に活用することを考えている。

図-2は阿武隈川の第一期（現行）河川整備事業の開始時（2004年）と終了時（2035年頃）の河道流下能力達成度を示している⁴⁾。100%は基本方針の目標治水安全度に対応し、棒グラフより上の空白は第二期、第三期の整備事業で段階的に埋められる予定である。なお阿武隈川は2019年の東日本豪雨で大きな水害を生じたために、現行整備事業を前倒しで進めているが、いずれにしても基本方針にある治水安全度達成にはかなりの時間を要すると考えられる。また今後の気候変動に対処するための計画流量変更も考えられており⁵⁾、図には20%の計画拡大を赤線で記入しているが、空白部分はかなり増加する。

ところで、河川用語辞典⁶⁾では「基本方針における治水計画の対象洪水を超える規模の洪水」を超過洪水とし、「河道整備が全て終了した時点の計画対象洪水の最高水位」を計画高水位（HWL）としている。しかし基本方針にある目標治水安全度（1/150）の達成がかなり先である現状では、この定義は実質的意味を持たない。そこで本研究では、河川整備の各段階における堤防の安全性を保障できる水位をHWLと呼び、それを超える流量の洪水を超過洪水と呼ぶことにする⁷⁾。第二期の河川整備計画はまだ示されていないが、第一期計画で予定されている上流部の達成率が60%であることから、本研究では河道整備達成率が75%程度の時点を対象に直轄区間上流域の計画的氾濫を考えることとした。

図-3に施設構造を模式的に示す。山付部上流側に越流堤-1（赤）を設けて超過洪水を下流から上流向きに氾濫

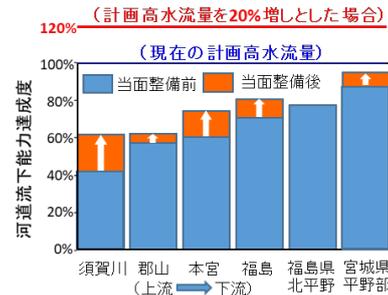
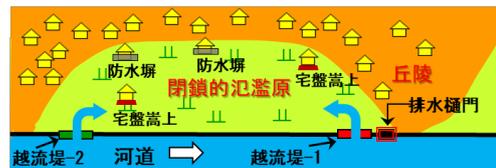


図-2 阿武隈川の現行整備計画の河道流下能力達成度

(a) 遊水地構造平面図



(b) 遊水地構造側面図

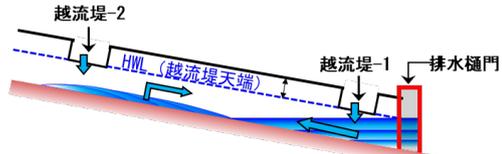
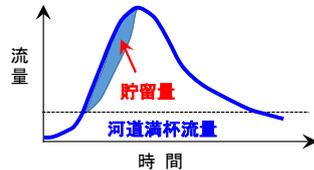


図-3 閉鎖性氾濫原を利用する遊水地の概念図

(a) 霞堤



(b) 越流堤

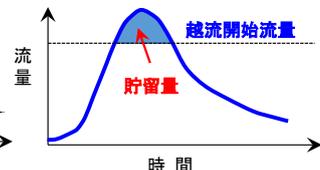


図-4 霞堤と越流堤の洪水ピークカットの違い

させ、減水時に樋門から自然排水する。氾濫のさせ方は霞堤と類似するが、通常の霞堤は単に開口しているため、図-4(a)に示すように洪水ピークカットの効果は少ない。これに対して越流堤方式では超過洪水のピークカットのみを目的としている（図-4(b)）。また氾濫原の延長が長い場合は上流側にも越流堤-2（緑）を設け、流水型遊水地の機能を付加する⁸⁾。なお、ほとんどの家屋は周囲の段丘上にある場合が多いので、自然的遊水機能を最大限

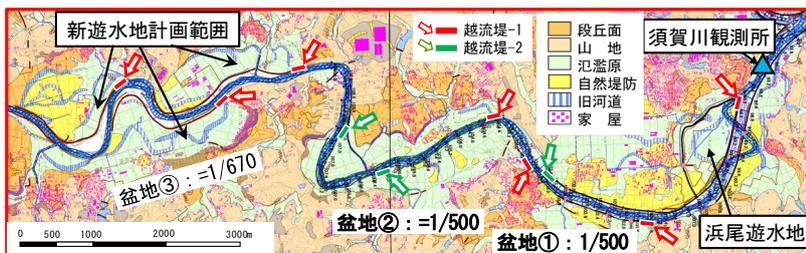


図-5 検討対象区間の治水地形分類と建物分布

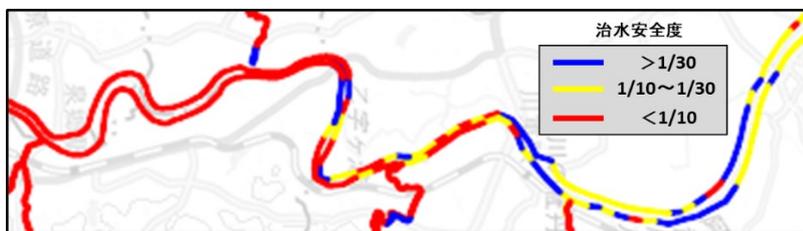


図-6 検討対象区間の堤防完成度

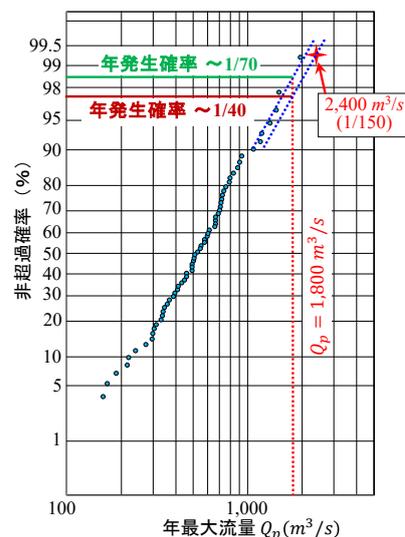


図-7 須賀川観測所年最大流量

活用するために遊水地には周囲堤を設けず、少数存在する家屋については宅盤高上げや防水堤により対処する。

ところで、河川上流部の氾濫原地盤は縦断方向に傾斜しているため、中下流部に造られる遊水地のように貯水容量を大きくできない。そこで通常は地盤掘削による容量確保がなされるが、それにより農地が消失する。農業従事者は他の職業に変わることが困難な場合が多いので、用地買収の金額の多寡よりも生業を失うことを恐れている⁹⁾。そこで図-3の遊水地案では地盤掘削を行わないものとする。また超過洪水時のみ冠水するので、その頻度は数十年に1回であり、冠水時の損害補償の制度化の余地はあると思われる。ただしその前提として設置箇所を増やして氾濫を分散する必要がある。しかし図-1に示したように上流域の盆地地形は多数あり、また工事としては堤防の一部を越流堤にするだけなので、流域にもよるが、検討する価値は十分あると思われる。

3. 洪水調節効果の検討対象区域と検討方法

(1) 検討対象区域と地形特性

本研究では図-1に①～③と記した3つの盆地を検討対象区域とした。直線距離は約10 kmである。その部分の治水地形分類図に建物分布（ピンク）を重ねて図-5に示す。なお図中の赤と緑の矢印は越流堤-1と越流堤-2（図-3参照）の位置の候補を示している。ほとんどの家屋は段丘上にあるが、盆地内の自然堤防上にも存在している。なお、各盆地の平均地盤勾配は図の下段に示している。

盆地①の下流端にある浜尾遊水地は、1998年の大水害以降に計画され2004年に竣工した。当時としては珍しい直轄区間上流端に近い遊水地で、貯留容積を確保するため約2 mの地盤掘削が行われたが、2019年洪水ではピーク前に満杯となり効果を発揮できなかった¹⁰⁾。そこで出水後の緊急治水対策プロジェクトでは、直轄管理区

間を延伸して盆地③の全体を遊水地化する計画が進められている。ここでも地盤掘削を行うので、2017年に完成した大規模圃場整備が無効になると言われている¹¹⁾。

図-6に同区域の堤防の完成度を示す¹²⁾。下流の治水安全度は1/30内外、上流は1/10以下であり、今後増強される予定である。前述のように本研究では対象区間の河道流下能力が基本方針の計画流量（2400 m³/s）の75%に達した時点想定しており、その値は1800 m³/sである。

図-7に須賀川観測所における年最大流量の確率プロットを示す。1800 m³/sの年生起確率は同図からは1/70となるが、過去の出水では随所で氾濫が生じていたので、この流量の発生頻度はさらに高いと考えられる。そこで図の右上にある計画目標の点を通るようデータ線をシフトし、1800 m³/sに対応する年生起確率を1/40程度と推測した。元来は全ての出水で氾濫戻し計算をすべきと思われるが、かなりの計算量となるので、本稿では概算値として1/40を用いる。

(2) 数値シミュレーションモデルと計算条件

洪水浸水想定区域図作成マニュアル¹³⁾で推奨されているモデルを用いた。このモデルは河道流に対して一次元不定流式を、氾濫流に対して矩形格子の浅水流方程式を用い、両者を連立して解を求めるものである。具体的な数式については同文献を参照されたい。地形条件は阿武隈川洪水浸水想定区域図作成で用いられた地形データ（計算格子は25 m×25 m）を使用した。なお浜尾遊水地の周囲堤は除去した。

盆地①の上流端河道における2019出水の氾濫戻し計算結果を簡略化した波形¹⁴⁾をピーク流量 $Q_p=2400$ m³/sまで引き延ばし、これを超過洪水として上流端に与えた。以降では「検討対象波形」と呼ぶ。また下流端では、2019年出水において須賀川観測所で得られたH-Q関係式を外挿して使用した。

検討対象は次の2つのケースである。

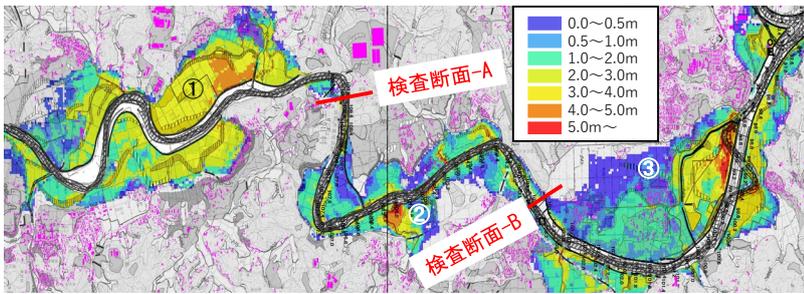


図-8 自然状態（無堤）での最大浸水深分布

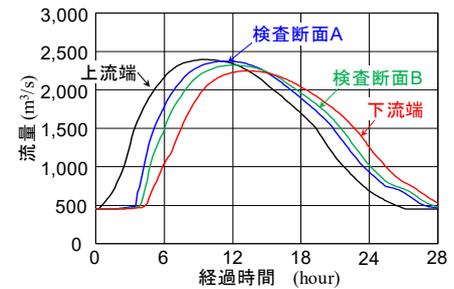


図-9 自然状態（無堤）での洪水伝播

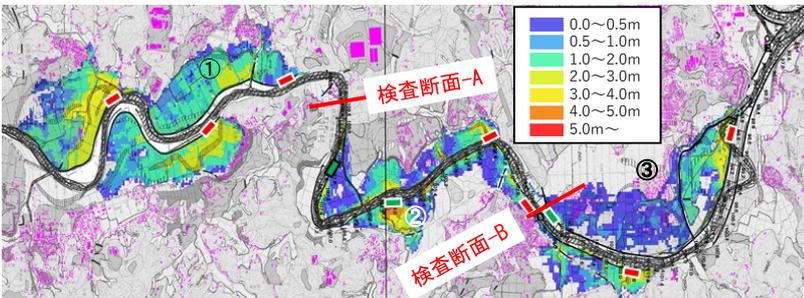


図-10 分散型遊水地での最大浸水深分布 ($Q_p=1800\text{m}^3/\text{s}$ で溢水開始)

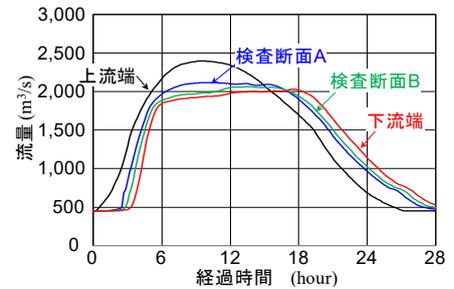


図-11 分散型遊水地での洪水伝播

a) 自然的遊水効果の検討

前述のモデルから河川堤防を除去し、自然地形のみによる洪水ピーク低減効果を調べた。なお自然遊水機能の洪水規模への依存性を調べるために、上述の超過洪水波形の他に、ピーク流量 Q_p が $1600\text{m}^3/\text{s}$ から $3000\text{m}^3/\text{s}$ の間で波形を縮小または拡大した7ケースについても計算した。

b) 分散型遊水地の効果の検討

図-5に矢印で示す位置に流量 $1800\text{m}^3/\text{s}$ で溢水開始する越流堤を設置した。各越流堤の天端高は事前に行った不等流計算から定め、越流堤長は全て 200m とした。なお、図-5では省略しているが、図-3の概念図にあるように越流堤-1の直下流には幅 10m 、地盤からの高さ 2m の開口部を有する排水樋門を設置し、内水位 $>$ 外水位となった場合に自然排水するようにしている。なお、洪水規模と調節効果の関係を調べるために、前述の超過洪水の他に、波形を縮小または拡大してピーク流量 Q_p を $2000\text{m}^3/\text{s}$ から $3000\text{m}^3/\text{s}$ まで変化させた5ケースについても計算した。

4. 計算結果および考察

(1) 自然的遊水効果

図-8に $Q_p=2400\text{m}^3/\text{s}$ の場合の最大浸水深分布を示す。盆地③では下流狭窄部での塞き上げにより約 $3\sim 4\text{m}$ の浸水が発生している。盆地②では中央右岸の支川流入部窪地で局所的に 5m を超える浸水深が生じているが、全体的には $1\sim 2\text{m}$ の範囲であり、盆地③より減少している。盆地①に至ると浸水深はさらに小さくなり、浜尾遊水地の地盤掘削部以外の浸水深は概ね 2m 以内である。なお浸水域の外縁は概ね段丘崖線に一致していることから、

段丘面上の宅地では水害が生じることはない。しかし盆地内の自然堤防上にある宅地は完全に水没している。

図-9は流下に伴う流量波形の変化を示している。上流端と下流端の他に、図-8に示す検査断面位置での波形も示している。下流端までの洪水到達時間は約4時間で、ピーク流量は $2400\text{m}^3/\text{s}$ から $2250\text{m}^3/\text{s}$ まで低下している。浸水深が非常に大きいにも関わらず、ピーク流量低減はそれほど大きくない。この理由は、洪水ピーク到達以前に盆地の主要部分が洪水で満たされてしまっているからである。以上をまとめると、自然地形による遊水効果は洪水流下を遅延させるものの、ピーク流量低減にはそれほど有効でないものと言える。

(2) 超過洪水用分散型遊水地の調節効果

a) 流量 $1800\text{m}^3/\text{s}$ で越流開始する場合

$Q_p=2400\text{m}^3/\text{s}$ の場合の最大浸水深分布を図-10に示す。図-8の自然状態での計算結果と比較すると、浸水深が全体に小さくなっていることがわかる。自然状態では洪水初期から盆地内に湛水するのに対し、本研究で考えている遊水地では、一定流量以上の洪水部分だけを貯留するからである。盆地②と盆地①の最大浸水深は概ね 1m 以下であり、自然堤防上の宅地部分では 0.5m 以下となっている。ただし最上流の盆地③では 2m を超える箇所もある。これについては次項で検討する。

図-11は上流から下流への洪水波形の変化を示している。流量 $1800\text{m}^3/\text{s}$ までは通常の河道流であり、計算下流端への到達時間は1時間半ほどである。それ以上の流量では下流端波形がほぼ平滑化され、最大流量は $2030\text{m}^3/\text{s}$ となった（ピーク流量低減率 15% 強）。図-8に示した自然状態と比較すると、流量 $1800\text{m}^3/\text{s}$ までの伝播時間は短い、ピーク流量低減率がかなり大きくなっている。

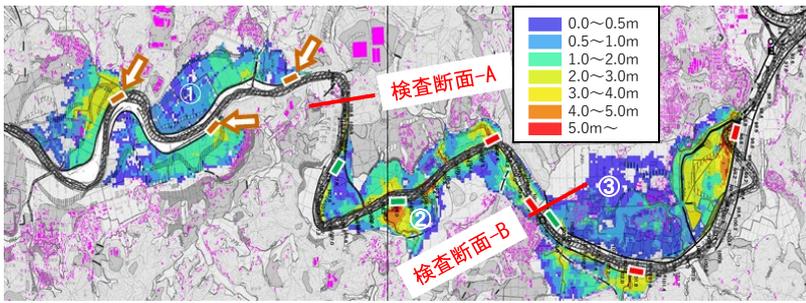


図-12 上流越流堤嵩上げ後の最大浸水深分布

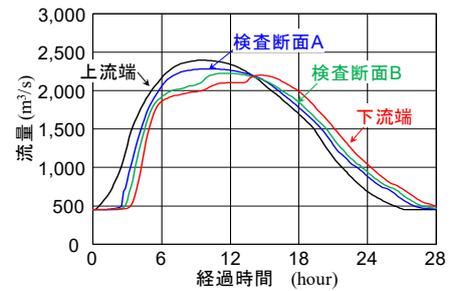


図-13 上流越流堤嵩上げ後の洪水伝播

b) 上流側盆地の負荷を減少させる方法

図-10に示した計算結果では、上流側の盆地③において比較的大きな浸水深が発生していた。本計算区間には大きな支川流入がないので、越流堤からの溢水により流量は2400 m³/sから徐々に減少する。一方、前項の計算では全ての越流堤の天端を1800 m³/sから越流するように設定しているので、下流側に比べて上流側での溢水量が大きくなるわけである。

そこで本項では、盆地③の3つの越流堤が2100 m³/sで溢水開始するよう天端高を変更した。この場合の最大浸水深分布を図-12に示す。なお天端高を変更した越流堤を茶色で示している。上流の盆地③での浸水深が減少し、下流の盆地①では逆に溢水量が増加する。しかし浜尾遊水地の地盤掘削部を除き、最大浸水深は概ね1 m以内に収まっている。したがって図-2で述べた宅盤嵩上げや防水堀によって家屋の安全性は確保できると考えられる。

図-13は洪水波形の縦断変化を示している。上流で溢水を抑制したため、洪水ピークを完全にはカットできていないが、ピーク流量は約200 m³/s低下している（流量ピーク低下率10%弱）。越流堤天端高をさらに個別に調整すれば、各盆地の浸水深をより均一にできると考えられる。ただし上記の計算はあくまで3(2)で述べた流量設定についてのものであり、洪水波形が異なれば計算結果も異なるはずである。したがって、堤防整備の進捗状況に合わせて対象とする超過洪水規模を定め、越流堤天端高を調整するのが現実的であると思われる。

5. 洪水調節効果の総合的考察

(1) ピーク流量低減率および最大湛水量

ここまでは、超過洪水のピーク流量 Q_p を 2400 m³/s として検討を進めてきたが、超過洪水の Q_p には上限はない。そこで流入波形を縮小・拡大して、洪水調節効果の変化を調べた。図-14に3種類の設定によるピーク流量低減率の計算結果を一括して示す。図中の分散型遊水地-1は流量1800 m³/sで越流開始するよう越流堤天端高を設定したケース(4(2)a)、分散型遊水地-2は上流側の盆地③の越流堤を流量2100 m³/sで越流するよう嵩上げたケース(4(2)b)である。自然地形のみの場合は小

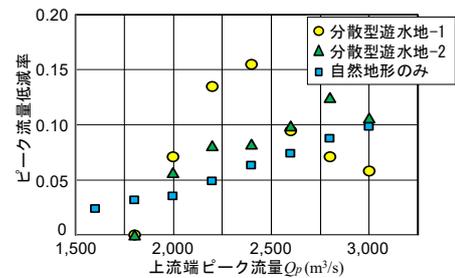


図-14 ピーク流量の低減率の比較

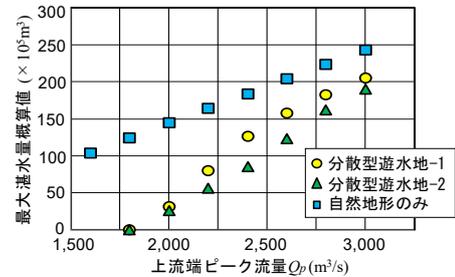


図-15 最大湛水量の比較

洪水からピーク流量低減が認められ、洪水規模の増大とともに低減率が漸増する。一方、分散型遊水地-1ではピーク流量 Q_p が 1800 m³/s を超えると急激に増加し、 $Q_p = 2400$ m³/s では 15% に達するが、その後は急減する。紙面の制約で詳述できないが、一つの原因は氾濫原の水位の増加によって洪水ピーク時における越流堤での河道内外水位差がなくなってしまいうからである。これに対して分散型遊水地-2のピーク流量低減率の立ち上がりは遅いが、増加傾向は $Q_p = 2800$ m³/s まで継続する。しかし 3000 m³/s では前述と同じ理由でピーク低減率が減少している。

図-15は、図-8、図-10、図-12に示した最大浸水深を面積分して求めた最大湛水量の概算値である。自然地形のみの場合は頻度の高い小洪水から湛水量が大きく、農地への影響が大きいと考えられる。分散型遊水地では湛水量が $Q_p = 1800$ m³/s から徐々に増加する。溢水が生じるのは40年に1度程度であるから(図-7参照)、それを前提とすれば営農を継続する余地があると考えられる。

(2) 超過水位縦断分布

分散型遊水地は超過洪水時に機能するものであるから、その時には河道内水位が HWL を超えていることになる。一方、河川管理施設等構造令によれば、計画高水流量に

応じた余裕高を設けることになっており、須賀川観測所における計画高水流量 2400 m³/s に対応する余裕高は 1.2 m である。そこで $Q_p=2400$ m³/s (超過洪水) の場合の計算最高水位と HWL の差 (超過水位という) の縦断分布を求め、余裕高の範囲に収まるかどうかを調べた。その結果を図-16 に示す。計算結果は全区間において 1.2 m 以内に収まっていることがわかる。堤防安全上の観点からすれば、水位が HWL を越えることは望ましくはないが、超過洪水は数十年に一度の稀な現象であり、また水位が HWL を超える時間は限られている。そのような非常事態における余裕高の活用は許されるべきと考えられる。なお通常は堤高の変動を考慮してさらに余盛が行われる。普通土での築堤では 20 cm 以上とされているので、実際の余裕はさらに大きいと言える。

6. おわりに

気候変動の進行が今後どの程度の豪雨増加をもたらすかは定かでない。しかしいずれにせよ現在の河川整備の進捗状況や年間治水関係予算の制約、および堤防増強に伴う関係費用 (橋梁や樋門の改築など) の増加を考えれば、河川整備基本方針の目標安全度を従来型の河川事業だけで達成するには長期間を要する恐れがある。したがって、他の方法の可能性についても並行して検討する必要があると考えられる。

そこで本研究では次の 4 点に留意して、新しいタイプの上流域遊水地を検討した。①周囲堤の代わりに地形を利用し建設費を抑制すること、②超過洪水ピークカットを効率的に行うこと、③堤防整備が基本計画の治水安全度に達していない時点も対象とすること、④地盤掘削を行わずに営農継続可能性と超過洪水対策を両立すること。

上記の考えに基づく施設について、阿武隈川の直轄区間上流部の 10 km 区間での可能性を検討した。具体的には、治水安全度 1/40 程度まで堤防整備が進んだ状況を想定し、河道山付部上流に超過洪水 (年発生確率 1/40 以上) のピークを有効に低減するよう越流堤を配置する方法を検討した。その結果、現行の計画高水流量 (年生起確率 1/150) 程度まで効果を持つことが確認された。

本研究は一つの事例検討であり、他の河川流域の類似地形に対する検討も必要である。国土交通省が最近示した新施策¹⁹⁾なども合わせて、上流部の狭隘な氾濫原の治水活用をさらに検討していきたいと考えている。なお筆者らは阿武隈川上流で進行中の新遊水地計画を妨げるつもりは毛頭なく、本研究の発表については国土交通省東北地方整備局の了解も得ている。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、国土交通省東北地方整備局から種々のデータを提供いただき、また現地の状況に関する情報をいただいた。記して謝意を表す。

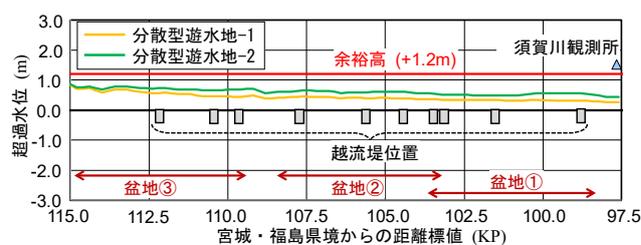


図-16 超過水位の縦断分布

参考文献

- 1) 国土交通省website：社会資本整備審議会中間答申「流域での対応を含む効果的な治水の在り方」2000.
- 2) 国土交通省website：社会資本整備審議会答申「気候変動を踏まえた治水計画のあり方について」2020.
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局：気候変動を踏まえた水災害対策のあり方について(答申報告)、河川、日本河川協会、No.890, pp.10-14, 2020.
- 4) 国土交通省東北地方整備局：阿武隈川河川整備計画 [大臣管理区間], 2012.
- 5) 石田卓也, 前田裕太：気候変動を踏まえた計画・基準の見直しに向けた検討, 河川, 日本河川協会, No.890, pp.15-19, 2020.
- 6) 国土技術政策総合研究所：河川用語集～川の言葉, 2004.
- 7) 石川忠晴：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, pp263-270.
- 8) 伊藤 康, 石川 忠晴, 赤穂 良輔：数値シミュレーションによる山間河川における流水型遊水地の水理機能に関する考察, 土木学会論文集B1, Vol.76, No. 2, I_451-I_456, 2020.
- 9) 読売新聞オンライン：台風19号 計画に乗るのも手、しっかり補償を, 2021年10月13日。
<https://www.yomiuri.co.jp/local/fukushima/news/20211013-OYTNT50063/> (2022年3月参照)
- 10) 原田翔太, 石川忠晴, 赤穂良輔, 伊藤康：令和元年台風19号出水における阿武隈川上流浜尾遊水地の洪水調節効果の検証, 土木学会論文集B1, Vol.77, No. 2, I_103-I_108, 2021.
- 11) 河北新報 Online News：仮住まい今も3100人 台風19号豪雨から2年 遊水地化で犠牲になる地域も, 2021年10月12日。
<https://kahoku.news/articles/20211011khn000024.html> (2022年3月参照)
- 12) 国土技術政策総合研究所水害研究室：航空レーザー測量を活用した治水安全度の評価, 2019.
- 13) 国土技術政策総合研究所河川研究部：洪水浸水想定区域図作成マニュアル(第4版), pp.15-17, 2015.
- 14) 石川忠晴, 原田翔太：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, Vol.77, No. 2, I_409-I_414, 2021.
- 15) 国土交通省水管理・国土保全局：流域治水型の災害復旧の促進, 令和4年度国土交通省水管理・国土保全局関係予算概算要求概要, P.15, 2021. (2022年2月参照)

(2022. 3. 25受付)