

浸水被害の発生した中小河川におけるため池の 洪水調節機能の評価と有効活用方策

EVALUATION OF MEASURES AND EFFECTIVE USE OF FLOOD CONTROL
PONDS IN SMALL AND MEDIUM-SIZED RIVERS WITH FLOOD DAMAGE

小河健一郎¹・田村隆雄²・武藤裕則³・瀧川紀子⁴

Ken-ichiro OGAWA, Takao TAMURA, Yasunori MUTOU, Noriko TAKIGAWA

¹正会員 学(農) 徳島大学 大学院先端科学技術教育部 博士後期課程 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

²正会員 博(工) 徳島大学 准教授 大学院ソシオテクノサイエンス研究部 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

³正会員 Ph.D 徳島大学 教授 大学院ソシオテクノサイエンス研究部 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

⁴学(農) パシフィックコンサルタンツ株式会社 大阪本社国土保全事業部 (〒541-0052 大阪市中央区安土町2-3-13)

In this paper, was constructed to target the small and medium-sized river basins distributed runoff model that can evaluate the function of flood control ponds for agricultural. Analyzed by this model for flood, flood damaged, were discussed with respect to reduction effect of flow reduction and flood damage.

As a result was estimated, ponds and flood is cleared approximately 14% by reducing the peak flow of approximately 10%. Therefore, it was suggested that existing ponds for agriculture have contributed to the reduction of flood damage. Furthermore it was suggested that, as a result of verification the effect of pre-discharge ponds, flood damage reduction effect of flow reduction and further has been confirmed, in the small and medium-sized rivers and the introduction of effective measures basin.

Key Words : *small and medium-sized rivers, ponds for agricultural, distributed runoff model, flood analysis model, flood reduction function, effective utilization*

1. はじめに

中小河川では、戦後の高度経済成長に伴い都市化が進出し流域の貯留・浸透機能の低下などの影響を大きく受けやすく、これまでは河川改修により速やかに洪水を流下させることに主眼を置いた対策を講じてきた。こうした中、近年のいわゆるゲリラ豪雨の急増に伴い特に流域規模が小さく、洪水到達時間の短い中小河川での浸水被害が急増してきており、沿川の開発も相まって河道拡幅など通常の河川改修による対応に限界を生じてきている。このため、頻発する浸水被害を軽減するには流域における対策、特に山地や丘陵地からの流出抑制対策等を講じていくことの必要性が改めて認識されている。

しかし、昨今の社会経済情勢から新たにダム等の治水施設を建設し流出抑制を図る対策は現実的に難しく、極力流域内の既存の貯留施設を有効活用して、流域の治水安全度を高めることが求められている。

筆者らは、これまで流出抑制施設として既存の農業用ため池の有する流量低減機能に関して、大河川である大

和川流域に分布型流出モデルを適用して現況施設の機能の定量的な評価を試みた¹⁾。しかし、ため池の有する流量低減効果は2%程度と限定的であり、効果的な有効活用策の方向性を示すまでには至っていない。さらに、流域に面的に分布するため池群の効果に関して、複数の流域に適用して定量的に比較・評価した事例は少ない²⁾。

本論文で対象とする中小河川H川流域では、平成23年台風12号の接近に伴う集中豪雨により大規模な浸水被害を受けたが、本出水時に流域内に存在する137箇所もの農業用ため池群が流量低減や浸水被害の軽減に関係しているものと推測された。

そこで、本論文では、H川流域における農業用のため池分布を反映した分布型流出モデル及び氾濫モデルを構築し、本出水における現存ため池の流量低減及び浸水被害の軽減機能に関してシミュレーションを実施して定量的に評価することを試みた。さらに、施設の流量低減特性について大河川と比較した中小河川におけるため池の流量低減効果の発現状況に関して評価し、これら施設の有効活用による一層の浸水被害軽減の可能性について考察する。

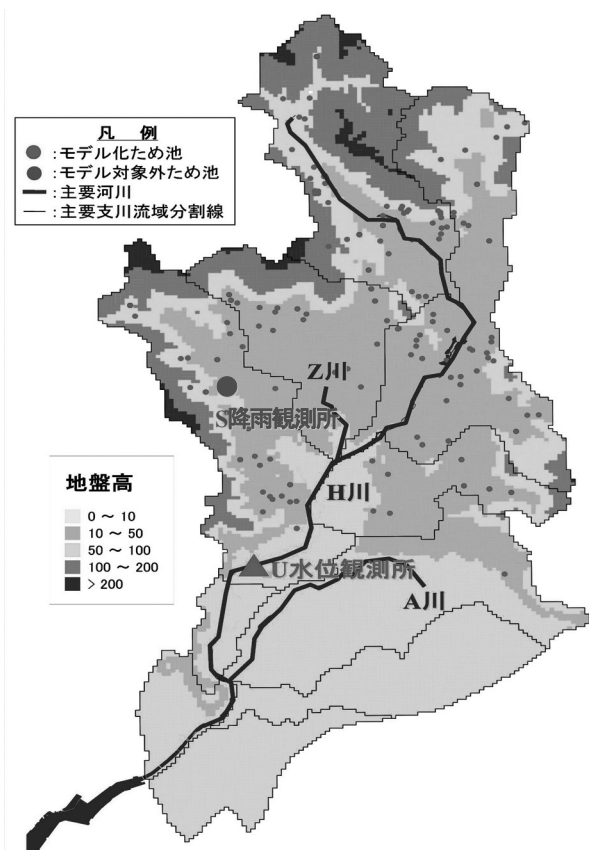


図-1 H川流域概要図

2. 対象流域及び出水概要と農業用ため池の状況

(1) 対象モデル河川流域の概要

本論文で対象とするH川はA県中部に位置し、上流の丘陵地域に源を発し、水田地帯を南下して途中支川を合流しつつ海に注ぐ流域面積約42.2km²、流路延長約16kmの中小河川である。

H川流域は昭和20年代には流域のほとんどを農地と山地が占めていたが、その後の高度経済成長期にベッタウン化が進み、平成23年現在市街地が約25%、農地が約30%、山地が約45%の土地利用形態となっており、特に下流部は密集市街地が形成されている。

流域の地形は、上流部は流域を囲む200～300mの丘陵が流域界を形成し、中流部はH川の氾濫原的な地形となっている。下流部は、東を流れるK川の氾濫原である低平地が広がっており、支川A川に代表される内水区域が沿川に分布しており、流域面積約42.2km²の内、約11.6km²を内水流域が占めている（図-1）。

(2) 平成23年台風12号による出水状況

H川では過去の出水被害を受けて全川において護岸整備や密集市街地の広がる下流部において河床掘削を主体とする河川改修が実施されてきていたが、平成23年9月の台風12号は既往最大の出水となり、各所で溢水及び内

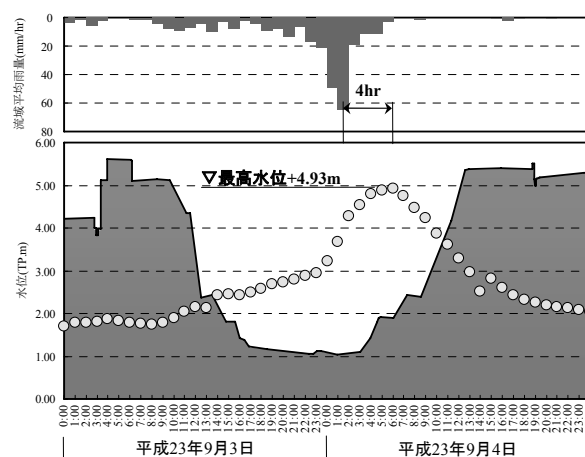


図-2 U水位観測所の実績水位ハイドロ

水氾濫が発生し、浸水面積約418ha、浸水家屋数約1,400戸という甚大な被害をもたらした。

本出水時のH川流域のレーダー雨量の分布を見ると流域のほぼ全域において時間雨量60mmを越える降雨が分布していることが伺えた。また、流域内に位置するS降雨観測所では最大時間雨量69mmを観測し、これは昭和58年9月洪水で観測された時間雨量54mmを更新し、観測史上最大の降雨となった。図-2はH川において唯一水位観測の実施されているU地点（流域面積27.1km²）の流域平均降雨ハイドログラフ及び水位ハイドログラフである。本台風による降雨特性としては、時間雨量20mmを超えるような降雨が6時間程度の短期間に集中している。水位は20mmを超える降雨が観測された9月3日23時くらいから急激に上昇し、翌9月4日5時ごろに最高水位となるT.P.+4.93mを観測しており、本出水では降雨のピークから水位のピークまで約4時間程度の遅れが認められた。本出水では、このような短期集中型の降雨が急激な水位の上昇をもたらす、河道の流下能力の不足や内水排除施設の能力不足等も相まって、溢水氾濫や内水氾濫を各所で生じたものと推測される。

(3) 対象流域におけるため池の分布状況

図-1に示すように対象流域には、平成23年現在大小合わせて全137箇所もの農業用ため池が分布している。本論文では、これら農業用ため池が平成23年台風12号に伴う出水に対してどの程度の流量低減や浸水被害の軽減に寄与したのか評価するため、個々のため池ごとに洪水調節計算を実施する。なお、農業用ため池は、施設として治水容量は有していないが、洪水時にはため池に設置されている余水吐による洪水調節が期待される。

筆者らが和歌山の奈良県域においてため池の流量低減機能に関して分布型流出モデルにより評価した結果、集水面積の小さいため池は流量低減に寄与する割合が集水面積の大きいため池の25%に過ぎないと推測された¹⁾。このため、本論文では、全137のため池の内、①背後に

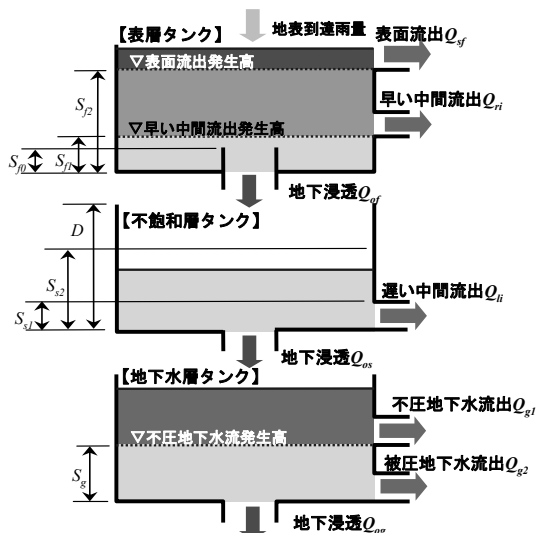


図-3 タンクモデルの概念図

山地などを有し流量低減を期待できる集水面積を有し、②洪水調節効果を期待できる貯水量を有するため池として全22施設を抽出した。その上で、机上及び現地踏査、施設台帳等によって、これら全ての施設の集水面積や余水吐諸元、貯留特性を把握し洪水調節モデルに反映した。

H川の流域面積42.2km²に対して、本論文で抽出した22農業用ため池の集水面積は約6.6km²と流域の約15%を占めている。また利水容量は約149万m³に達する。

3. 解析手法とモデルの概要

構築した流出モデルは、図-3に示す流出機構を追跡する鉛直方向3段タンクモデルと河道流を追跡するKinematic-wave法からなる分布型流出モデルを基本とした。本論文ではH川流域（42.2km²）を50mメッシュとし、16,106メッシュに分割しタンクネットワークを構築の上、抽出した農業ため池を実分布に則り配置し、洪水調節機能を評価できるようにした。

ところで、本論文で対象とする平成23年台風12号では各所で氾濫しており、これら氾濫による河道通過流量の減少を評価の上、ため池の流量低減効果を評価することが重要である。さらに、本論文ではため池が浸水被害の軽減にどの程度寄与しているのかについてもシミュレーションにより定量的な評価を試みる。

そこで、H川本川（13.3km）及び支川Z川（1.3km）及びA川（1.8km）について一次元不定流モデルを構築し、下流端境界として実績潮位ハイドロを、流量境界として分布型流出モデルの落水網による流入域を集計し一次元不定流河道に投入した。なお、本出水の浸水被害の実態調査より、①本川の背水による影響による浸水、②樋門閉鎖に伴う内水の影響による浸水として位置付けられている地区については、被害実態を表現できるように、流入水路や排水樋門（24基）、3箇所合計14.7m³/sの排水ポン

表-1 検証対象洪水 観測データ

検証洪水名	U地点		
	流域平均 最大時間雨量	最高水位 (T.P.m)	ピーク流量
平成16年 台風23号	27mm	+4.10m	111m ³ /s
平成23年 台風12号	66mm	+4.93m	176m ³ /s

プをモデル化した。排水樋門の設置箇所では、不定流計算により得られる外水位が内水位より低い段階では自然排水し、外水位が内水位を上回った段階で樋門閉鎖するものとした。また、排水ポンプの設置されている箇所では樋門閉鎖と同時にポンプが稼働するものとした。

このような河道・水路網ネットワークに氾濫原の二次元不定流氾濫モデルを統合した。氾濫原は50mメッシュに分割し、河道からの溢水に伴う氾濫流の拡散や内水氾濫に伴う湛水状況を追跡可能とした。

なお、本論文で採用した分布型流出モデルの概要及びパラメータや河道区間のKinematic-wave法及び不定流計算手法、二次元不定流氾濫モデルの詳細は参考文献^{3),4),5)}に譲る。

4. 解析モデルの妥当性の検証

(1) モデルパラメータの同定方針と計算条件

本論文で採用する分布型流出モデルは、流域で唯一の水位観測所であるU地点の実績データによりパラメータを同定した。なお、U地点の実績流量については現況（H23年出水時）河道を対象に不等流計算によりH-Q曲線を作成の上、水位から流量に変換して実績流量を推定した。

ところで、本論文でシミュレーションの対象とする平成23年台風12号では、U水位観測所上流で氾濫し、観測値には氾濫による河道通過流量の減少の影響を含んでおり、分布型流出モデルのパラメータの同定が困難である。このため、U地点上流で氾濫実績を有しておらず、H川において近年発生した比較的規模の大きい出水である平成16年台風23号時の実績データにより分布型流出モデルのパラメータを同定する（表-1）。その上で、同定パラメータを平成23年台風12号に適用し、分布型流出計算及び氾濫シミュレーションを実施して、U地点の氾濫後の不定流計算通過流量と実績流量との適合を確認する。さらに、本出水後の浸水痕跡調査より整理した実績浸水区域と氾濫シミュレーションによる計算浸水区域との適合を確認する。

パラメータについては、既往文献値^{6),7)}を参考に表層モデルは土地利用分類毎に、不飽和層・地下水層は土壌貢献度毎に設定し、土地利用及び表層地質に応じて分布させた。農業用ため池は抽出した22施設をモデル化し、こ

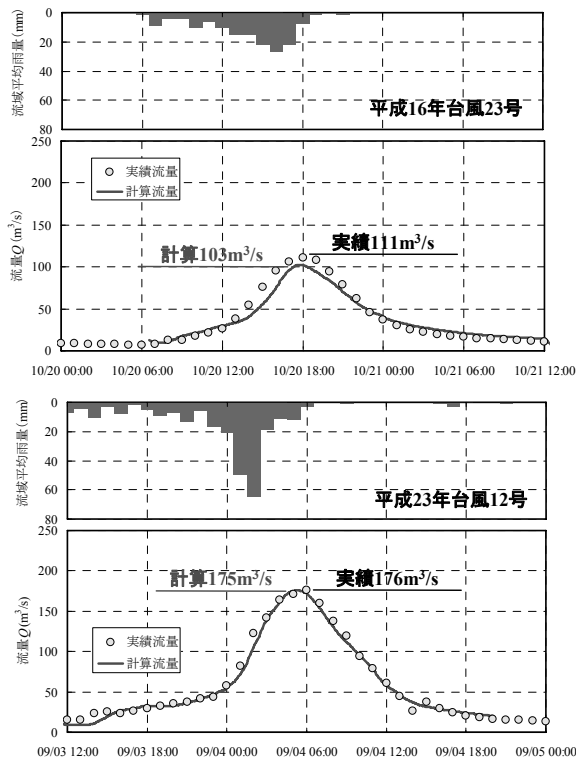


図-4 U地点実績再現ハイドロ

これらの調節効果も踏まえてモデルの妥当性を評価する。ここで、農業用ため池の初期水位は、本出水時は灌漑期であったことから利水利用の状態を想定して、満水状態（＝余水吐高）として設定した。

(2) パラメータ探索手法

本論文で採用している分布型流出モデルの鉛直方向3段タンクモデルについては、探索すべきパラメータの数が19に及び同定作業が容易ではない。そこで、本論文では遺伝的アルゴリズムによるパラメータ同定⁸⁾を試みた。なお、本手法を適用するに当たっては、例えば表層モデルの等価粗度 N などの土地利用に応じたパラメータバランスを崩さないことや各種文献に示される値のバンドを超過しないなどの制約条件を設けた。適合度の評価については、実績と計算流量により次の3つの誤差評価関数を用いて、 $\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$ とし、 δ が小さいほど適応度は高いものとした。

$$\delta_1 = \frac{1}{N} \sqrt{\sum \frac{(Q_j - Q_c)^2}{Q_j}} \quad (1)$$

$$\delta_2 = \frac{1}{N} \sum \frac{|Q_j - Q_c|}{Q_j} \quad (2)$$

$$\delta_3 = \frac{|Q_{j\max} - Q_{c\max}|}{Q_{j\max}} \quad (3)$$

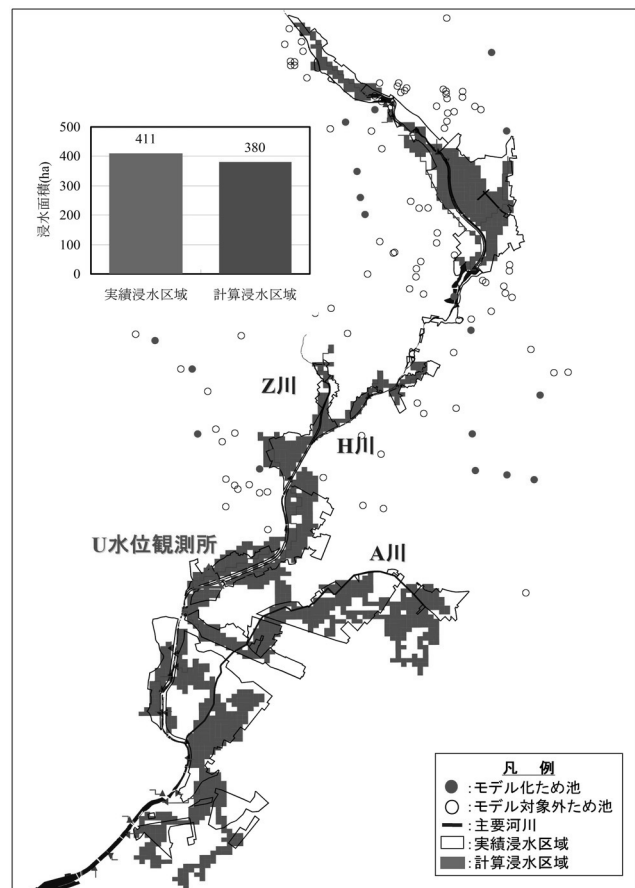


図-5 実績再現氾濫計算結果

ここに、 Q_j ：実績流量(m^3/s)、 Q_c ：計算流量(m^3/s)、 $Q_{j\max}$ ：実績ピーク流量(m^3/s)、 $Q_{c\max}$ ：計算ピーク流量(m^3/s)である。

(3) 実績検証結果

図-4に検証対象洪水のU地点流量ハイドログラフを示す。なお、図中の計算流量は不定流通過流量である。本図より両洪水ともにピーク流量の再現誤差は数%以内に収まっており、流出波形も全般的に良好に再現できている。図-5には実績及び計算浸水区域図を示すが、浸水面積は実績約411haに対して計算約380haとなっており、約8%少なく見積もられているものの計算浸水区域は概ね実績の浸水区域を捉えている。ただし、A川上流など下流内水区域における適合性がやや劣っている。これは内水区域での詳細な排水系統が反映出来ていないこと等に起因すると推測され、再現精度向上は今後の課題でもある。

5. ため池の効果考察と有効活用策の検討

(1) 現存施設の流量低減・浸水軽減に関する考察

対象洪水において、溢水・内水氾濫や22箇所の農業用ため池がどの程度の流量低減効果を発揮していたのか推定するため、CASE-1ため池考慮・氾濫戻し、CASE-2ため池戻し・氾濫考慮の2ケースのシミュレーションを実

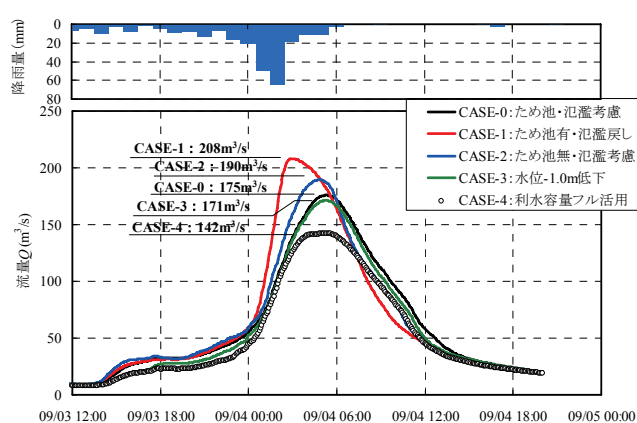


図-6 CASE毎のU地点通過流量ハイドロ

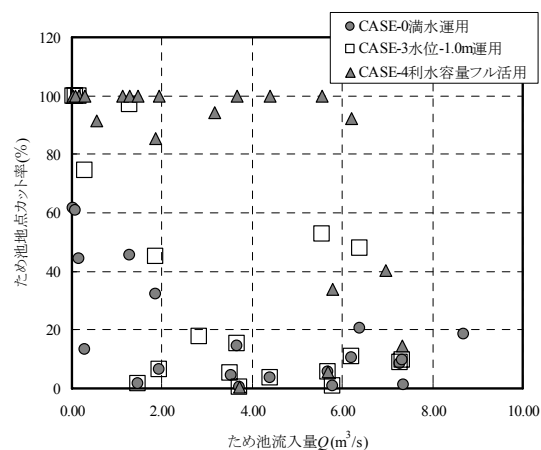
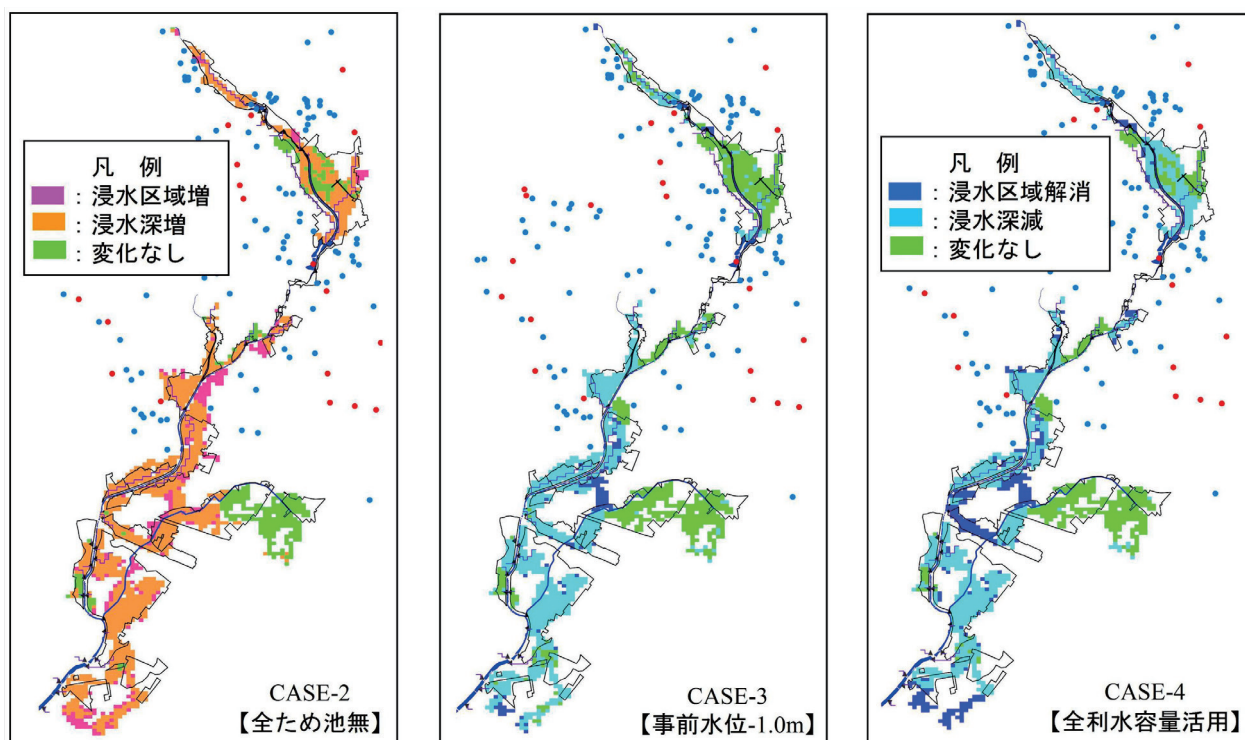


図-8 CASE毎の流入量とカット率相関図



注) 浸水区域の変化はCASE-0の現況ため池満水運用 (図-5) と比較したものである

図-7 ため池の有無・有効活用による浸水区域の変化

施して、CASE-0ため池・氾濫考慮のU地点における通過流量と比較して変化量を把握し、氾濫及びため池のピーク流量の低減効果を推測した。

図-6には各ケースのU地点における通過流量を示す。上流の氾濫戻しをすると (CASE-1)、U地点の通過流量は208m³/sと推算され、氾濫による河道通過流量の減少は33m³/sと推定された。22箇所の農業用ため池がないとの想定に基づいて (CASE-2)、U地点の通過流量は190m³/sと推算され、流量低減効果は15m³/sと推定され、これは洪水ピーク流量の約1割に相当すると推測された。

次に、農業用ため池の有無による浸水区域の変化に着目する。図-7の左図 (全ため池無) はCASE-0とCASE-2のシミュレーション結果より、浸水区域が解消・浸水深が軽減する箇所の分布を示している。農業用ため池を考慮しないCASE-2の浸水面積は438haの浸水面積になるも

のと推測され、CASE-0の浸水面積380haとの差分58haが農業用ため池の浸水解消効果 (約14%の軽減) と推算された。また、380haの浸水区域の内、304haでは浸水深が低下すると推算され、ため池は浸水被害軽減にも寄与していると推測された。

(2) 大河川のため池群と比較した洪水調節状況の考察

H川流域におけるため池地点のピーク時の総流入量は約74m³/sと見積もられ、これは概ねU地点のため池氾濫戻し流量 (223m³/s) にため池集水面積の流域に占める割合 (約24%) を乗じた値に相当している。ため池地点では総流入量に対して放流量は66m³/sであり概ね11%の流量カット効果を有し、ため池地点のカット効果がU地点にほぼそのまま伝播している。

これに対して筆者らが別に解析した大河川である大和

川奈良県域¹⁾では、ため池地点では約60%のカット効果があるものの基準地点（流域面積712km²）では2%程度まで低減していると推算された。大和川の奈良県域にはため池が全3,667箇所存在するが、それらの集水面積は約29.27km²と基準地点流域面積の約4%を占めている程度である。また、これらため池の約半分が集水面積を有さない皿池と呼ばれる奈良盆地の平野部に位置するため池であり、個々のため池への流入量は少ないものと推算された。さらに、池面積と流入量に有意の相関は認められず、ため池の貯水機能と流入規模のアンバランスから有効に貯水機能が活用できていないものと推測された。

大和川のような大河川ではため池地点のカット効果は大きいものの、個別ため池の流入量の少なさ、施設地点から本川までの流下過程が長く、その過程で効果が徐々に低減していくのに対し、H川のような中小河川では流域規模から、施設地点の効果が薄れることなく本川の流量低減に寄与しているものと推測され、このことが、大河川と中小河川のため池の効果の発現状況の差異に関係しているものと推察された。

(3) 既存施設の有効活用方策の検討

図-8は各ため池ごとの施設地点のカット率の分布を示している（図中CASE-0●）。全ため池の平均カット率11%を下回るため池が8箇所見受けられ、これらは施設の貯留機能に比して流入規模が大きく、流出ピーク時には調節機能がほぼ喪失している施設と推測された。この結果より、ため池への流入規模が大きい調節機能が喪失しているため池の利水容量を有効活用することで、流量低減機能の向上が期待された。具体的には出水前の放流等により水位低下を図り、出水時に貯留する容量を確保することである。そこで、平成23年台風12号を対象にCASE-3事前放流により1.0mの水位低下を図るケースとCASE-4事前放流によりため池を空運用し全利水容量を活用する2ケースを想定したシミュレーションを実施し、それぞれのケースでH川本川U地点における流量低減効果と浸水被害の軽減効果を推算した。

通過流量に関しては満水運用のCASE-0の通過流量175m³/sに対して、CASE-3では171m³/sと4m³/s程度の流量低減効果の増加が認められた。CASE-4では142m³/sと33m³/sの流量低減効果の増大が認められた（図-6）。浸水面積については、満水運用では380haの浸水が発生すると推算されたのに対して、CASE-3では357haと23ha（約6%）の浸水が解消され、CASE-4では313haと67ha（約18%）の浸水が解消されると推算された（図-7）。

図-8（図中CASE-3□、CASE-4▲）に示すように、事前水位低下によりカット率は向上し、本川通過流量の低減や浸水被害の軽減に直接的に寄与するものと推測され、このような流域対策の推進がH川のような中小河川では効果的と示唆された。

6. まとめ

本論文では、中小河川流域にため池の洪水調節機能を考慮した分布型流出モデルを適用し、浸水被害を受けた出水を対象に解析し、流量低減機能及び浸水被害の軽減効果に関して、以下のような結論を得ることができた。

- (1) 平成23年台風12号時のため池の流量低減効果はピーク流量の約1割に相当すると推定され、これにより約14%の浸水面積が解消され、現存する農業用ため池は浸水被害の軽減にも寄与していると推測された。
- (2) H川のような中小河川では施設地点のカット効果と本川のカット効果はほぼ同等であり、大和川のような大河川と比して施設地点の効果が本川の流量低減に直接的に現れるという特性を有すると推測された。
- (3) 農業用ため池の有効活用方策として、事前放流による効果を検証した結果、一層の流量低減や浸水被害の軽減効果が期待され、中小河川ではこのような流域対策の導入が効果的と示唆された。

本論文では、農業用ため池の流量低減及び浸水被害軽減機能の評価を試み、その効果を定量的に評価することができた。しかし、本出水では、H川から離れた地域でも浸水が発生しており、本モデルではこれら进行评估することができていない等の課題も残っている。今後は、分布型内水氾濫モデルの開発など流域全体の流出・氾濫現象をシミュレーション可能としつつ、解析対象洪水や流域をさらに広げ、施設の有効活用も含めた流域対策推進に寄与する研究を進め、新たな知見を得て、河川計画実務への適用に発展させたいと考えている。

参考文献

- 1) 小河健一郎他：大和川奈良県域における治水・流域対策施設の有する洪水ピーク流量の低減機能，水工学論文集，Vol.56,pp. I_1495-1500,2012.
- 2) 大八木豊他：ため池を用いた御笠川流域の治水強化策，水工学論文集，Vol.50, pp.187-192, 2006.
- 3) 安陪和雄他：分布型流出モデルの広域的適用，水工学論文集，Vol.46, pp.187-192, 2002.
- 4) 鈴木俊朗，寺川陽他：実時間洪水予測のための分布型流出モデルの開発，土木技術資料，Vol.38-10,pp.26-31,1996.
- 5) 浸水想定区域図作成マニュアル，国土交通省河川局治水課，平成17年6月
- 6) 改定新版 建設省河川砂防技術基準（案）同解説 調査編，建設省河川局監修，社団法人日本河川協会編
- 7) 中野秀章：「森林水文学」共立出版，1980.
- 8) 田中丸治哉：遺伝的アルゴリズムによるタンクモデル定数の同定，京都大学防災研究所年報，第36号B-2，pp.1-9,1993

(2012. 4. 5受付)