

浸水確率の空間分布を考慮した洪水氾濫リスク 評価法の鬼怒川洪水への適用

APPLICATION OF THE FLOOD RISK EVALUATION METHOD CONSIDERING SPATIAL DISTRIBUTION OF INUNDATION PROBABILITY TO KINU-RIVER FLOOD DISASTER

多田 毅¹・榊 将志²
Tsuyoshi TADA, Masashi SAKAKI

¹正会員 工博 防衛大学校准教授 設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

²学生会員 防衛大学校 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

This study investigates the effectiveness of the flood risk evaluation method considering spatial distribution of inundation probability by applying to Kinu-river flood disaster in 2015. This method can treat explicitly the uncertainty of location and size of dike breaks. The result shows that the extent of the inundation area of the disaster can be captured by the high probability area on the probability distribution map estimated by this method. Then the influences of floodplain separation by a road embankment on flood risks are evaluated. The floodplain separation reduces the inundation probability and economic damages all over the region though maximum inundation depth increases in some areas.

Key Words : Flood risk evaluation, inundation probability, Kinu-river flood disaster

1. はじめに

2015年9月に発生した平成27年関東・東北豪雨では、台風17号と台風18号の影響で湿った空気が長時間にわたって流れ込んだことにより発生し、各地で記録的な降水量が観測された¹⁾。この豪雨により鬼怒川が決壊し、その周辺地域、特に茨城県の常総地区は甚大な被害を受けた。事前のハザードマップの整備、さらには国交省が事前対策として多数の地点における想定破堤氾濫シミュレーションを実施²⁾していたにもかかわらず、避難場所として指定されていた常総市役所が浸水し、庁舎電源も浸水のため停電するなど、事前のリスク情報が十分に生かし切れたとは言えなかった。一般に広く配布されることを想定したハザードマップでは詳細なリスクを読み取ることに限界があることはやむを得ず、一方で様々な状況を想定した詳細なシミュレーションの結果が多数提示されても、そこから有意な情報を読み取ることは容易でない。したがって、複雑なリスク要因を、容易に判別できる一覧性の高い形式で提示することは重要であり、そのための方法も模索されている（たとえば佐藤ら³⁾ など）。一般に、広義のリスクは外力の大きさ（ハザード）と

被災確率の両者の性質を考慮して評価されるべきであるにも関わらず、治水に関するリスク評価では現状で浸水深、流速、流体力など外力の評価に偏っている。また被災確率が明示的に取り扱われる場合でも時間軸に関するもののみであることがほとんどである。そこで筆者らは、外力と被災確率両方の空間的な偏りを同時に考慮する新たなリスクの評価法を提案した⁴⁾。この手法は、想定し得るあらゆる破堤地点で、想定し得る全ての氾濫規模を想定した網羅的なシミュレーションを実施し、浸水確率の空間分布という一覧性の高い情報を元に浸水リスクを評価する方法である。現時点で公表されている浸水想定区域図やハザードマップでは切り捨てられている破堤地点および破堤規模の不確定性の影響を評価することが可能であり、低頻度で大被害のケースだけでなく高頻度で小被害のケースも考慮することができ、地球温暖化に伴う豪雨の頻度の増大に対する適応策の策定にも資することが期待される。

本論文は、浸水確率の空間分布を考慮した洪水氾濫リスクの評価法を平成27年関東・東北豪雨において被災した常総地区に適用することで、本手法の有効性を確認し、まちづくりや住民の安全対策に資することを目的とする。

2. 対象領域および想定シナリオ

(1) 対象領域

本研究は、茨城県の常総地区を流れる鬼怒川の2km地点から32km地点までの約30kmの区間を対象とした。氾濫計算およびリスク評価を実施する範囲は、右岸側は常総市の洪水ハザードマップで浸水する可能性が示されている領域まで、左岸側は小貝川までを含む。対象領域の概要を図-1に示す。この地区は平成27年の豪雨時に21km付近で大規模な破堤が、25km付近で溢水が発生し、鬼怒川と小貝川の間で約40km²に及ぶ大規模な浸水が生じた。その時の破堤・溢水地点と最大浸水範囲⁵⁾を図-1に併せて示す。

(2) シナリオの想定

a) 想定出水の設定

本研究は関東・東北豪雨時をシナリオの基本とした。国土交通省の水文水質データベースより取得した鎌庭観測所（27.34km）の観測水位に対し1982年9月のH-Q曲線を適用して流量を推定した結果、ピーク時に約4500～5000m³/sとなり、十数時間かけて2000～1500m³/sまで減少したと推定された。現地ではピークの時点で溢水が発生しており、事前の予備計算においても複数地点で溢水が生じた。任意の1地点のみで破堤または溢水が発生するというシナリオを複数組み合わせることが本研究の趣旨であることから、予備計算において溢水の発生しない計算上の最大流量4000m³/sの時点で一気に破堤が発生すると想定し、そこから12時間かけて1500m³/sまで線形に減少するとした。このシナリオは、10日の11時頃に溢水が始まり12:50に破堤発生、その後ある程度時間をかけて破堤幅が拡大した⁶⁾という実際の被災の過程と大きく矛盾しない。計算で与えたハイドログラフを図-2に示す。

b) 破堤地点および破堤規模の設定

想定破堤地点として、右岸側は6.25km地点から31km地点までの27地点、左岸側は7.5kmから29.5kmまでの22地点、計49地点を設定した（図-1）。これらは全て国土交通省による鬼怒川・小貝川氾濫シミュレーション²⁾の想定と同じ地点である。それぞれの破堤地点において、4種の破堤規模を想定した。H27洪水時の破堤幅は約200mとされているが⁶⁾、完全に破堤した範囲を航空写真上で計測すると約150～180mであったことから、最大規模の破堤幅を180mと設定し、高水敷または堤内地地盤のいずれか高い方まで完全に破堤するとした。最小規模は、幅、深さ共に最大規模の1/2とした。大きい方から2番目の想定が、おおむね国土交通省のシミュレーションに相当する規模である。1種の出水シナリオに対し、49種の破堤地点についてそれぞれ4種の破堤規模を想定することで、最終的に全196のシナリオが用意される。

この手法のポイントは、大小様々な氾濫規模を想定したシナリオ群に基づく多数の網羅的なシミュレーション

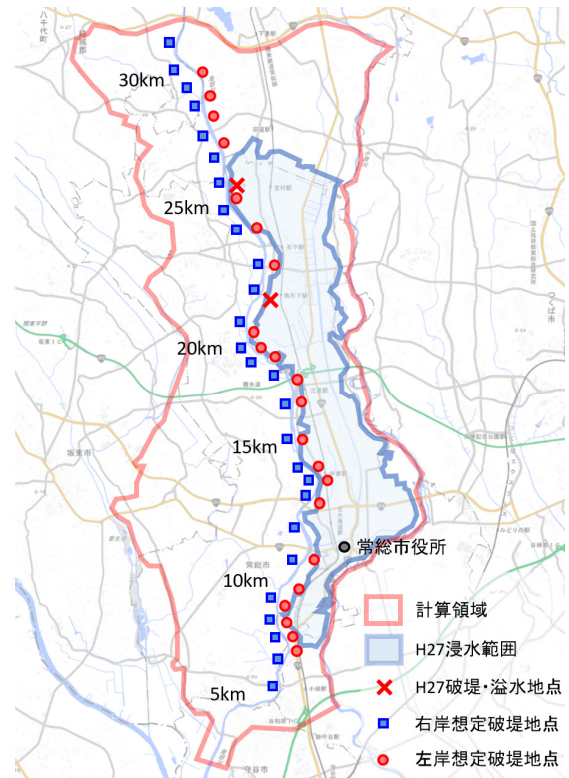


図-1 対象領域（国土地理院電子国土基本図を利用）

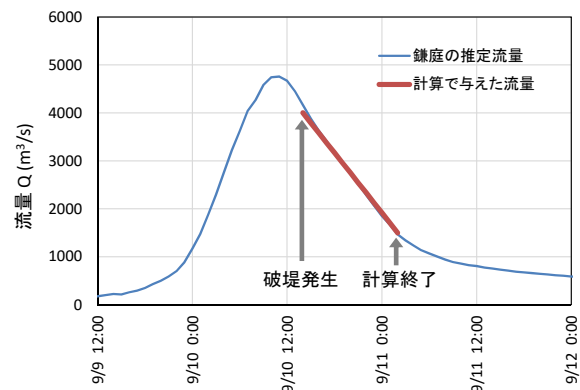


図-2 想定シナリオのハイドログラフ

を実施することにある。今回は、一ケーススタディとして破堤規模の想定範囲をH27洪水に準ずる規模をからその約1/4までと設定したが、この設定には議論の余地が残されている。改正された水防法の趣旨を汲めば、より大きな「想定し得る最大規模」をシナリオに含めるべきであろうし、小規模な溢水が高頻度で発生するようなリスクが無視できないのであれば、より小さな規模のシナリオが必要となる。いずれの場合も、次節で述べる発生確率の与え方についても併せて検討する必要がある。

c) 破堤確率の設定

本研究では、それぞれのシナリオに対し相対的な発生確率を想定し、確率で重みづけして重ね合わせることでリスク評価を行う。今回は、全49の破堤地点について破堤する確率は全て等しいと設定した。これは対象領域の全域において兩岸の堤防は十分に整備されており、目立って脆弱な場所は存在しないとの想定に基づく。別の

見方をすれば、堤防の整備状況の影響を取り除いた後の、純粋に地形的なリスクの評価を行ったとも言える。より実際の検討のためには、地点ごとの破堤確率を、堤体の構造や覆工などに関連付ける、最大水位と天端高との差などの水理量と関連付ける、さらには熟練した技術者の主観的なスコアリングで表現する、などの方法が考えられる。また、破堤規模ごとの発生確率も全て等しいと仮定した。こちらも破堤プロセスに関する既往の研究を応用することで、より現実的な値を与えることが可能であろう。

d) 氾濫域のブロック化の想定

関東・東北豪雨において、左岸20～25kmの破堤・溢水地点からの氾濫水が下流側に向かい約10kmに渡り広がったことで被害が拡大した。そこで、左岸17km付近の三坂町から小貝川まで県道331号線と123号線をかさ上げし、氾濫域をそれより上流側と下流側にブロック化した場合のリスク評価を実施する。ブロック化により浸水域の拡大が抑制され、特に下流側ブロックの浸水確率が減少することが期待されるが、同時に逃げ場を失った氾濫水により破堤地点周辺の浸水深が増大することが予想されることから、対象領域全体としてのリスクがどのように変化するかを検討する。

3. 解析方法

(1) 使用データ

氾濫計算のために必要な標高データには、国土地理院の基盤地図情報（数値標高モデル）の5mメッシュを利用した。この標高データを元に、三角形の非構造格子を生成し、氾濫計算に利用した。メッシュサイズは基本的に堤外地で30m程度、堤内地で60m程度とした。ただし、堤内地であっても道路盛土や水路など氾濫流に影響を与える特徴的な形状については、格子の分割線を適切に配置しつつ、必要に応じて細かいメッシュを配置することにより、5mメッシュに相当する地形の再現に努めている。同数値標高モデルは航空レーザー測量または写真測量によって取得されているため、水面下の標高は不正な値または欠落していることが多い。そこで、河床標高の縦断データを用いて手作業にて滞筋の標高に補正を加えた。また、堤防の天端部分のメッシュの標高にも縦断データを用いて補正を加えた。

地表面の粗度係数を与えるために、国土数値情報土地利用細分メッシュデータの100mメッシュデータを用いた。粗度係数の値は文献⁷⁾を参考に、水田・畑で0.02、宅地で0.04、山林で0.06とした。

(2) 氾濫計算

氾濫計算には、USGS（アメリカ地質調査所）および北海道河川情報センターを主体に開発されているシミュレーションソフトiRIC(International River Interface

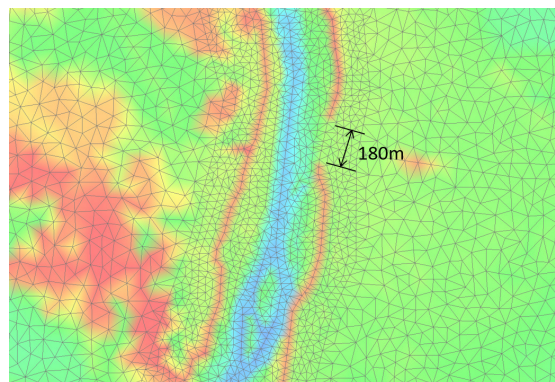


図-3 計算格子および破堤地点の例

Cooperative)を使用した⁸⁾。同ソフトは複数のソルバーを持つが、本研究では、USGSのSToRMを使用した。SToRMは、有限体積法により平面2次元の浅水方程式を解くものであり、非構造格子を用い、常・射流混在流れを扱うことも可能である。本研究において、計算手法自体は重要でないことから、詳細は省略する。

前述したように、計算領域は河道付近で約30m、それ以外で約60mの3角形格子で構成されており、河道内と氾濫域を一体計算しており、破堤は堤防天端を構成する格子点の標高を下げることで表現している。計算格子および破堤地点の例を図-3に示す。図中の破堤地点は左岸22.25kmで最大規模のものである。

全てのシナリオにおいて破堤の存在しない状態で、溢水の発生しない最大流量である4000m³/sを長時間流下させ定常状態とした後、一気に破堤させ、高水敷も含めた河道全体に前章で作成した流量時系列を与え12時間の計算を実施した。下流側は計算開始時に堤防天端高、12時間後に高水敷高となるよう線形の水位時系列を与えた。堤内地の計算領域の端部は、主に山地、小貝川の堤防、または道路の築堤で構成されるよう領域を設定したので、境界部での水の出入りは無いものとした。

(3) リスクの評価

a) 最大浸水深分布と浸水確率分布

まず全ての想定破堤地点に対し、区間長の情報と、破堤確率を与える必要がある。破堤が地点*i*で発生する確率を P_{Pi} と表し、破堤地点の区間長を L_i とし、それぞれに適切な値を与える。ただし、 P_{Pi} は次の式を満足する。

$$\sum_{i=1}^N P_{Pi} = 1 \quad (1)$$

N は想定破堤地点の総数である。さらに、破堤地点*i*において破堤が発生するとき、規模*j*で発生するという条件付き確率を P_{Mij} と表す。ここで P_{Mij} は次式を満足する。

$$\sum_{j=1}^M P_{Mij} = 1 \quad (2)$$

ここで M は想定破堤規模の総数である。最後に、堤内地のある位置*x*（具体的には緯度経度またはメッシュ番号

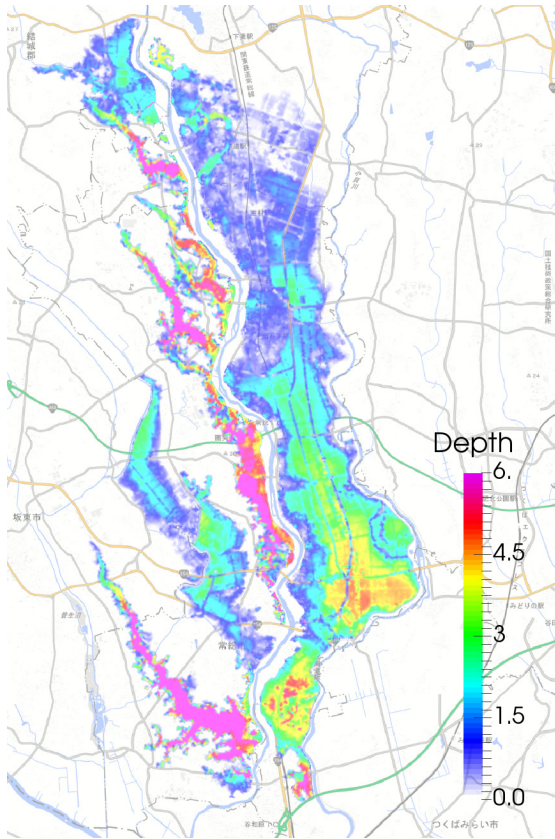


図-4 最大浸水深分布（標準シナリオ）

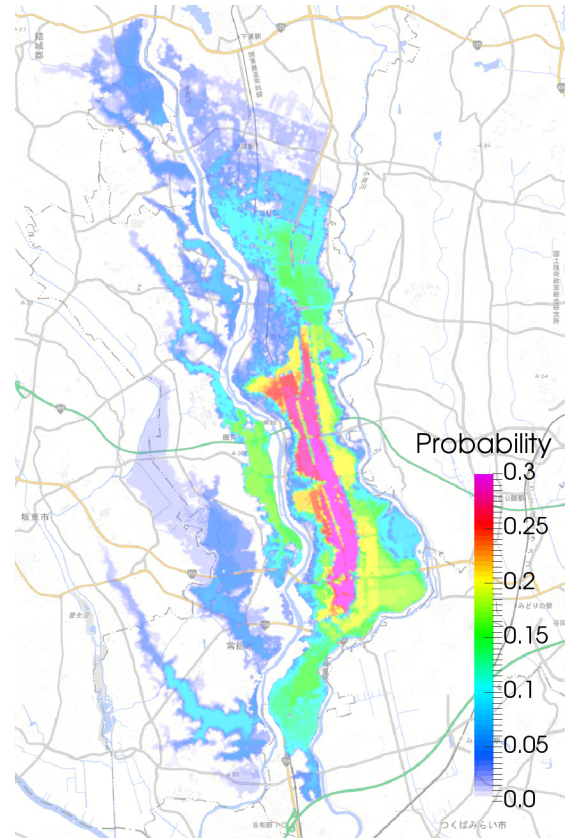


図-5 浸水確率分布（標準シナリオ）

などで表される)における, シナリオ (i, j) での浸水の有無を表す変数を $I_{x,ij}$ とし, 次のように定義し, 浸水計算の結果より値を与える.

$$I_{x,ij} = \begin{cases} 0 & (\text{浸水なし}) \\ 1 & (\text{浸水あり}) \end{cases} \quad (1)$$

なお, 浸水の有無の閾値は10cmとした. 以上の値より, 全シナリオを通して位置 x が浸水する確率 P_x は, 次式で計算することができる.

$$P_x = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M L_i P_{P_i} P_{M_{ij}} I_{x,ij}}{\sum_{i=1}^N L_i} \quad (2)$$

この確率 P_x の空間分布が浸水確率の分布となる.

b) 破堤地点ごとの被害額の算定

想定する破堤地点や破堤規模によって, 浸水面積や浸水深の分布は異なり, 当然経済的な被害にも差異が生じる. そこで196全てのシナリオについて, 治水経済調査マニュアル⁹⁾に従いそれぞれ被害額を算定した. シナリオ (i, j) での被害額を D_{ij} とすると, 地点 i で破堤が生じるとした時の期待被害額を次式で算定できる.

$$D_{exp_i} = \sum_{j=1}^M P_{M_{ij}} D_{ij} \quad (5)$$

この期待被害額 D_{exp_i} と最大被害額 D_{max_i} より, どこで破堤した場合に被害が大きくなるか, 判断することが可能となる.

(4) 氾濫域のブロック分割

左岸の氾濫域を南北の2ブロックに分割するために, 県道331号線と123号線上の格子点の標高を最大5m程度かさ上げし, 上流側の氾濫が分割線以南に流下しないよう地形を修正した. 修正後の地形データを用い左岸側の氾濫計算を全てのシナリオについて再計算し, 最大浸水深分布, 浸水確率分布, 破堤地点ごとの被害額の関係を算定した.

4. 結果および考察

(1) 標準シナリオの結果

全シナリオを通じた最大浸水深の分布を図-4に, 全シナリオの計算結果から式(2)で計算された浸水確率の分布を図-5に示す. 最大浸水深分布は, 既存のハザードマップとほぼ同様の分布となっており, 右岸側で5mを超える部分が散見されるが, 左岸はほとんど5m以下となっている. 一方, 浸水確率分布を見ると, 明らかに右岸側の浸水確率が高いことがわかる. 平成27年の豪雨時の浸水範囲と比較すると, ある一定のリスクを上回る範囲(浸水確率の等値線)と概ね一致する. 国土交通省の20.25km, 22.25km, 23.25km, 25.25kmのシミュレーション結果²⁾はいずれも単体ではこの浸水範囲をカバーできていない. これは想定した破堤規模が過小であったため, 一つのシナリオに基づくシミュレーション単独では実際

の浸水範囲をカバーできなかったものと思われる。このように、特定のシナリオに基づく計算結果よりも、破堤地点も破堤規模も限定しない本浸水確率分布図の方が浸水リスクを取りこぼす恐れが少ないと期待できる。

前報⁴⁾では浸水確率の相対的な大小を比較検討するために浸水確率を最大値で正規化した値で図化した。本論文では確率の絶対値について考察する。浸水確率が最も高いのは鬼怒川と八間堀川間の20km付近から12km付近の常総市役所周辺までで、最大で0.3を超える部分が存在する。これは、「5kmから32kmまでの区間の右岸または左岸のどこか1か所で、規模を問わず破堤または溢水が発生した」場合に、 $P = 1/3$ の確率で浸水することを意味する。これを左岸に限定すれば $P_L = 2P = 2/3$ となり、さらに平成27年の豪雨のように左岸の2か所で同時に破堤・溢水が発生したと仮定すると、浸水する確率は $P_{L2} = 1 - (1 - P_L)^2 = 8/9$ となり、常総市役所は浸水するべくして浸水したことがわかる。氾濫を100%防ぐことが保証できない限り、防災拠点などの重要施設をこの P_{L2} が数十%を超える場所に設定することは避けるべきと判断できるだろう。一方、右岸の浸水深の大きなエリアはお互いが自然地形によりブロック化されているため、浸水確率はいずれも0.1程度と、左岸に比べると小さな値となっている。右岸または左岸の1か所が破堤した時の確率が $P = 0.1 = 1/10$ の場合、右岸のどこか2か所で破堤・溢水が発生した場合の浸水確率 P_{R2} はおおよそ1/5となり、左岸との差はさらに大きくなる。このように、破堤・溢水の確率が全域で同様と仮定した場合であっても、既存のハザードマップで浸水の可能性ありとして着色されている場所同士で数倍の浸水リスクの差が存在する。

次に、右岸の破堤地点ごとの被害額を計算した結果を図-6に、左岸の結果を図-7に示す。明らかに左岸の方が被害額が大きい。これは、図-4、図-5からも明らかのように、右岸側から左岸側に向かいゆるやかに標高が低下している地形のために左岸側の氾濫面積が大きくなるのが原因である。また、氾濫域全体の大きな地形だけでなく、破堤地点付近の局地的な地形によっても被害額に大きな差が生じている。平成27年の水害で破堤した左岸21km付近は区間内で最も被害額が大きな場所であることがわかる。

(2) 氾濫域のブロック分割の効果

左岸の17km付近で氾濫原を2つのブロックに分割した氾濫計算を実施し、得られた最大浸水深分布を図-8に、浸水確率分布を図-9に示す。左岸の広い範囲で標準シナリオよりも浸水深が増大していることがわかる。特に、17kmより上流側から流下してきた氾濫水が分割線に妨げられ貯留されることで、標準シナリオで3m程度だった浸水深が5m程度にまで増大している。また、分割線より下流側の常総市役所周辺部も、若干浸水深が増大している。これは、分割線より下流側で破堤した場合でも、

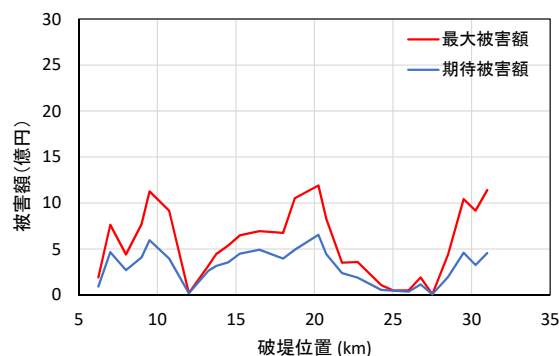


図-6 破堤地点ごとの被害額（右岸，標準シナリオ）

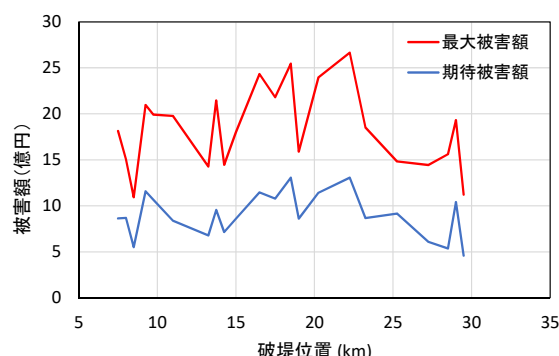


図-7 破堤地点ごとの被害額（左岸，標準シナリオ）

氾濫域の下流側だけでなく上流側にも氾濫が広がっていたのが、ブロック化により氾濫水が全て下流側に流下したことが原因である。一方、浸水確率分布を見ると、左岸全域で浸水確率が低下していることが明確に読み取れる。特に、極端に確率の高かったエリアが解消されており、右岸との差が小さくなっている。ブロック化したことにより、氾濫水が一部に留まるようになった結果、浸水範囲が限定されることで浸水確率が全域で低下し、それと引き換えに貯留された氾濫水により浸水深が増大するエリアが生じていると言える。

次に、ブロック分割した場合の破堤地点ごとの被害額を図-10に示す。ブロック化により解析対象区間全域で被害額が減少しており、特に20kmより上流側での減少率が大きい。これは、17km付近でブロック分割すると、20km付近で破堤した場合の周辺の浸水深は大きく増加するが、治水経済調査マニュアルにおける浸水深別被害率の値が浸水深3m以上で一定となっていることから、被害額があまり増大せず、浸水範囲が限定されることによる効果が優れていることが原因であると考えられる。分割線より下流側での破堤でも、分割線よりも上流側に氾濫が広がることが抑制され、被害額が減少している。このように、一定以上の浸水深で被害が飽和するとみなすことが可能であれば、ブロック分割によって被害の拡大を防ぐことができると言える。ただし、浸水深が数メートルに達するような氾濫は、経済被害以前に避難の可否や人命に係わる危険が無視できないことから、従前の外力に基づくリスクの評価を併せて実施し、総合的にリスクを評価する必要がある。

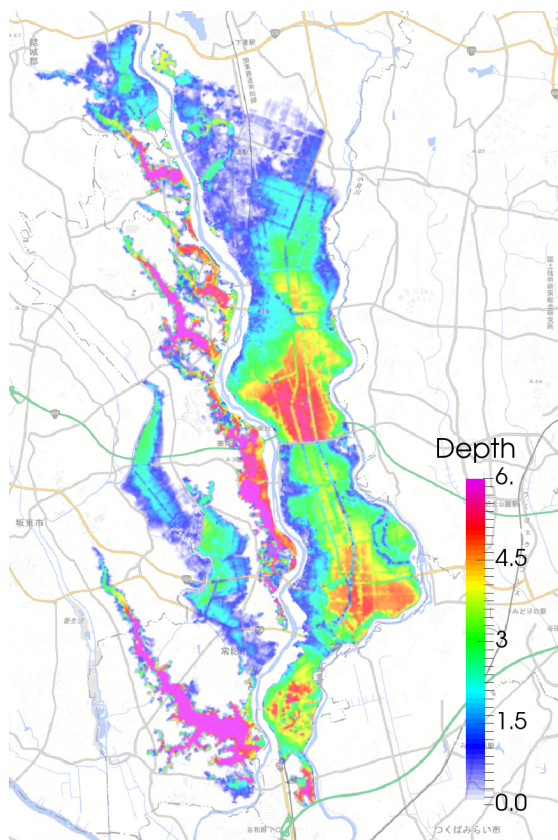


図-8 最大浸水深分布（左岸ブロック分割）

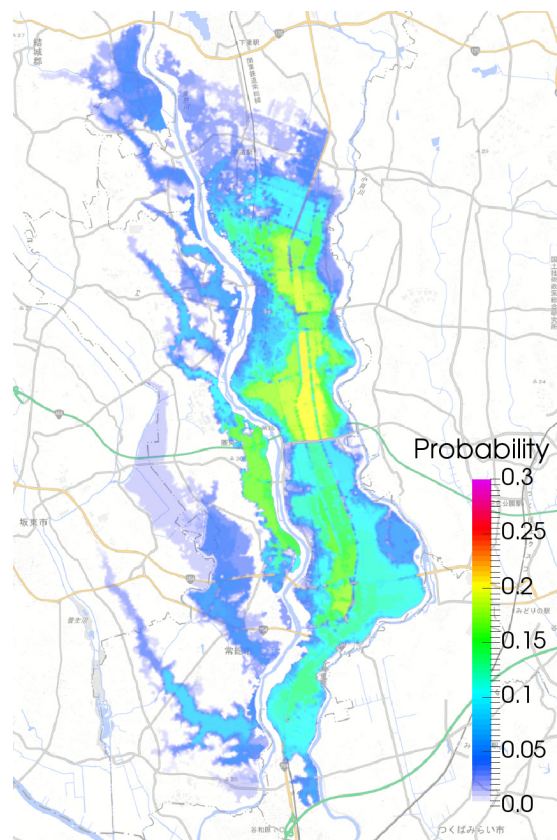


図-9 浸水確率分布（左岸ブロック分割）

5. おわりに

本研究は、浸水確率の空間分布という一覽性の高い情報を元に浸水リスクを評価する手法を平成27年9月の関東・東北豪雨における鬼怒川の氾濫に適用し、実際の浸水域が浸水確率の高い地域と一致していることを確認した。また、氾濫域をブロックに分割した場合の浸水深、浸水確率、経済被害などのリスクの変化を検討できることを示した。この手法は「危険な場所」の概念を従来の「浸水深や流体力が大きい場所」から、「浸水し易い場所」や「破堤すると被害が大きくなる場所」に広げ、それらを定量的に評価できることから、防災計画や都市計画などの立案に役立つことが期待される。

参考文献

- 1) 気象研究所：平成27年9月9日から11日に関東地方及び東北地方で発生した豪雨の命名について（参考資料），2015.
- 2) 国土交通省関東地方整備局：鬼怒川・小貝川氾濫シミュレーション <http://www.ktr.mlit.go.jp/shimodate/shimodate00241.html>
- 3) 佐藤裕和，遠藤雅実，砂原啓人，黄光偉，磯部雅彦：マルチ指標による洪水ハザードマップの開発，土木学会論文集B1(水工学) Vol.73, No.4, pp.I_1285-I_1290, 2017.
- 4) 多田毅：浸水確率の空間分布を考慮した浸水リスクマップの提案，土木学会論文集B1(水工学) Vol.72, No.4, pp.I_1339-I_1344, 2016.
- 5) 電子国土Web災害対応 風水害 平成27年9月関東・東北豪雨 茨城県常総・坂東地区 正射画像 <http://maps.gsi.go.jp>
- 6) 国土交通省 鬼怒川堤防調査委員会：第2回鬼怒川堤防委員会資料，2015.
- 7) 建設省土木研究所：氾濫シミュレーション・マニュアル(案) 平成8年2月版，2006.
- 8) iRIC：<http://i-ric.org/>
- 9) 国土交通省河川局：治水経済調査マニュアル（案），2005.

(2017. 4. 3受付)

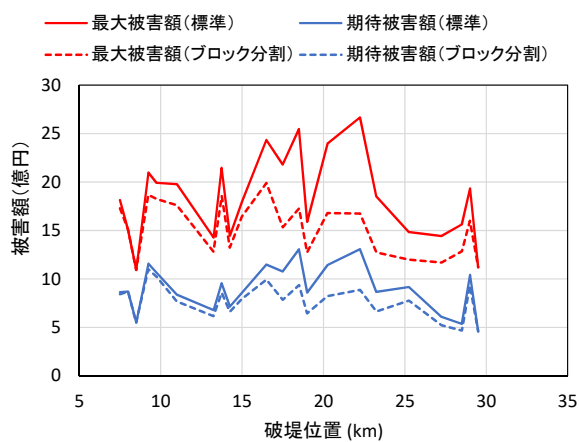


図-10 左岸ブロック分割後の破堤地点ごとの被害額