

極値降雨と極値流出の関係に基づいた 洪水被害分布推定

SPATIAL FLOOD DAMAGE ESTIMATIONS BASED ON RELATIONSHIP BETWEEN EXTREME PRECIPITATION AND EXTREME DISCHARGE

手塚翔也¹・小野桂介¹・風間 聡²
Shoya TEZUKA, Keisuke ONO and So KAZAMA

¹学生会員 東北大学大学院工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-20)

²正会員 博(工) 東北大学大学院工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-20)

This study presented a method to assess the economical flood damages based on a hydraulic model, which took into account a spatial distribution of extreme precipitation estimated by statistical and meteorological characteristics. In order to calculate subsequent discharges due to an extreme precipitation, a regression relationship between catchment areas and coefficient of discharges was derived using the historical data of river discharges at 89 stations throughout Japan. The potential economic damage for a flood of 100-year return period was estimated to be 790 billion USD.

Key Words: *return period, coefficient of discharge, hydraulic model*

1. 序論

近年, 地球温暖化に伴う気候変動に対して, 社会の関心が寄せられている. 気候変動による負の影響を最小限に抑えるための対策は, 1)地球温暖化の原因となる温室効果ガスの排出を削減して地球温暖化の進行を抑え, 大気中の温室効果ガス濃度を安定化させる「緩和策」, 2)気候変動に伴う気温・海水面の上昇などに対して人間・社会・経済活動のシステムを調節することで影響を軽減する「適応策」, に分類される. 一般的に気候変動が人間社会に与える悪影響を軽減するために緩和策と適応策を組み合わせた対策が望まれる一方, 緩和策の限界を示す報告も存在する. 例えば, 2007年2月に公表された気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第4次評価報告書¹⁾によると, 温暖化の緩和策には限界があり, 緩和策を行ったとしても気温の上昇は数世紀続くことが指摘されている. また, 同報告書は豪雨頻度の増加や熱帯低気圧の活発化を報告しており, 豪雨に伴う自然災害に対する適応策の構築が重要課題になると考えられる. この動向を受けて, 地球温暖化リスク予測において適応策にまで言及した研究も行われている²⁾.

日本においても, 降水量や降水パターンの変化により洪水や渇水のリスクの高まりが予測されている. 気象庁・気象研究所の地域気候モデルによると, 2100年の100年確率日降水量は, 現在に比べ全国的に20%程増加すると予測される³⁾. この傾向は, 平成23年7月の新潟・

福島豪雨や平成22年10月の奄美豪雨のような異常多雨が頻発する可能性を示唆している. また国土交通省河川局水害統計⁴⁾によると, 日本列島においては国土の1割にすぎない河川氾濫区域に資産の75%が集中しており, 特に洪水に伴う河川災害が懸念される. 温暖化適応策を考える際には, 雨量の増加を考慮した上で洪水氾濫被害を定量的に評価することが重要である.

先行研究として, Kazamaらは日本全国を対象として洪水氾濫被害を定量的に評価し⁵⁾, 現在の治水レベルが50年確率降雨に対応していると仮定すると, 100年確率降雨による潜在被害額は約21兆円であると積算した. また都道府県毎の被害額を算定し, 3大都市圏の被害額は郡部より2桁ほど多く, 都市周辺地域の被害額が高くなることを示した. しかし, 石原らにより氾濫モデルから得られた被害額は, 国土交通省試算被害額の約0.5倍, 水害統計被害額の約10倍であることが示された⁶⁾. つまり, 実被害額と比較して, 氾濫モデルを用いて推定された被害額は過大評価である. この理由として, Kazamaらの研究では全国一律に同じ再現期間の極値降雨を与えているため, 流量を過大評価している可能性があることが考えられる. より現実的な洪水被害額を算出するためには, 任意の集水面積に対して生起確率が等しくなる流量に着目して氾濫計算を行うべきである.

本研究では, 流量の発生確率に着目して日本全国の洪水被害額を算出することを目的とする. また, その結果を降雨の発生確率に注目したKazamaらの先行研究と比

較することを目的とする。洪水の確率分布関数を得るため、一級河川水系における降水量、流量、集水面積データから流出係数を算出し、集水面積－流出係数の関係を求めた。この関係を基に、日本全国の任意地点における集水面積－流出係数の関係を明らかにし、再現期間の降雨分布データを集水面積に応じ重みをつけた。この重みを用いて任意地点における再現期間100年、50年、30年、10年、5年の流量を生じさせる降雨（確率洪水寄与降雨と呼ぶ）を作成し、氾濫計算により日本全国における洪水被害額を算出した。

2. データセット

氾濫計算に、標高、土地利用、再現期間の極値降雨の数値地理情報を用いる。使用した日本全土の数値地理情報は空間解像度 $1\text{km} \times 1\text{km}$ のグリッドセルデータである。氾濫計算と同様に、次章で説明する浸水被害額の算定も $1\text{km} \times 1\text{km}$ の解像度で示される。 1km^2 の解像度は、国土地理院により多くの基盤地図情報が整備されているため、日本全土を対象として解析を行う場合に適しており、気候変動に伴う社会リスクの算定および適応策の考察に有用である。

(1) 地図情報データ

標高データとして、国土数値情報の KS-META-G04-56M データに格納された 1km^2 の平均標高値を用いた。

土地利用データは、国土数値情報の KS-META-L03-09M データに格納された 1km^2 の土地利用情報から、各グリッドセル内において、最も占める割合が多い土地利用をそのグリッドセルにおける土地利用と設定した。

(2) 降雨データ

AMeDAS観測所における1980年から2000年の24時間降水量データとメッシュ気候値2000（発行：気象庁）を利用して極値降雨の数値地理情報を作成する。牛山らが検証した極値降雨と暖候期平年値の関係のアルゴリズムを基に開発した極値降雨の算出方法から⁷⁾ 極値降雨の数値地理情報を得た。図-1に再現期間100年の極値降雨分布を示す。九州地方や四国地方、紀伊半島に、 600mm/d 以上の強い降雨が広く分布している。

(3) 被害額データ

国土交通省試算被害額として、国土交通省がWebsiteにて公表している直轄河川改修事業の費用便益分析データ⁸⁾より、年平均被害軽減期待額を求める際に使用された流量規模ごとの被害額を用いて作成した。実水害被害額として、国土交通省が公表している水害統計^{9) 10) 11) 12)}を用いて作成した。

3. 極値降雨分布の解析

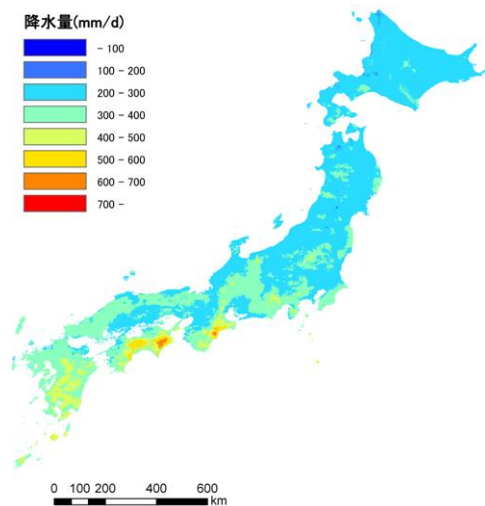


図-1 再現期間100年の極値降雨分布（単位：mm/d）

一般的に集水面積が増加するにつれて、流量も増加する。このため全国の任意地点において各再現期間の流量を生じさせる降雨量（確率洪水寄与降雨）をグリッドセル毎に推定するために、集水面積（対象グリッドセルの上流にあるセルの総数）を考慮する必要がある。本研究ではこの確率洪水寄与降雨の分布を求めるために、集水域内の降雨が流出する割合に着目した。この割合を求めるために、全国109の一級河川水系における集水面積データ、再現期間100年、50年、30年、10年、5年の降雨データおよび流量データを用いて解析を行った。各再現期間の流量は、各一級河川水系の最下流部に位置する流量観測所における、過去40年間の年最大日流量を、GEV(Generalized Extreme Value)分布を用いて頻度解析することにより算出した。これらのデータを用いて各再現期間の降雨と流量の関係を表す係数 $RF_m(A)$ （極値流出係数と呼ぶ）を以下の式(1)により算出した。

$$RF_m(A) = 86.4 \times \frac{D_m}{AR_m} \quad (1)$$

ここで、 D_m ：再現期間 m 年の流量(m^3/s)、 A ：集水面積(km^2)、 R_m ：再現期間 m 年の日降雨高(mm/d)、 m ：再現期間(yr)である。なお86.4は次元を合わせるための係数である。得られた再現期間100年の集水面積と極値流出係数の関係を図-2に示す。ここで以下の回帰式を得た。

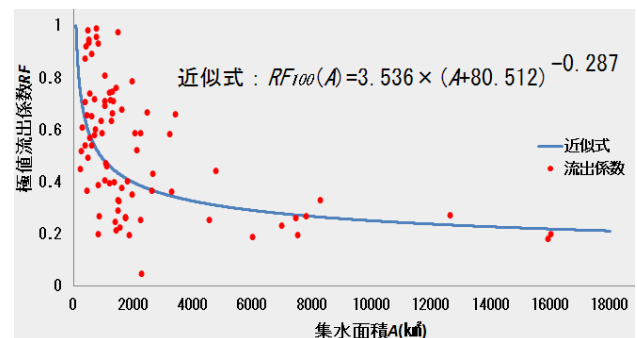


図-2 集水面積と極値流出係数の関係

この回帰式は、各一級河川水系の流域全域における集水面積に対する再現期間100年の降雨と流量の関係を表す。

$$RF_{100}(A) = 3.536 \times (A + 80.512)^{-0.287} \quad (2)$$

極値流出係数は、集水面積の増加とともに指数関数的に減少する。雨域の増加に伴い降雨量が減少することはDAD(Depth-Duration-Area)解析などでも示されている。つまり、全国一律に極値降雨を与えたKazamaらの手法は、集水面積の大きい河川において流量を過大評価していたことが示された。

次に、極値流出係数を基に全国の任意地点（集水面積 A_n ）における各再現期間の降雨に対する流量の割合である地点流出係数を算出する。つまり地点流出係数とは、ある地点の極値流出係数を満たすように、上流域の各セルに配置された流出係数である。各セルの流出量に着目すると、以下の式(3)が成り立つ。

$$RF_m(A_n) \times \sum_{i=1}^n R_m(A_i) = \sum_{i=1}^n \{RC_m(A_i) \times R_m(A_i)\} \quad (3)$$

上式を変形して、

$$RC_m(A_n) = \sum_{i=1}^{n-1} \left\{ \frac{R_m(A_{n-i})}{R_m(A_n)} \times (RF_m(A_n) - RC_m(A_{n-i})) \right\} + RF_m(A_n) \quad (4)$$

$$n=2,3,\dots \quad RF_m(A_1) = RC_m(A_1) = 1$$

が得られる。

ここで、 $R_m(A_i)$ は集水面積 A_i における再現期間 m 年の日降雨高(mm/d)、 n は各セルの集水面積の番号（最上流から1, 2...）、 $RC_m(A_n)$ は地点流出係数である。集水面積が1km²の地点（最上流）は、流出のみで流入が無い。このため与えた降雨が完全に流出すると仮定し、極値流出係数および地点流出係数を1とする。式(3)の左辺は流域全域に着目し、流域全域の流出係数である極値流出係数に流域総降雨高を乗じたものである。これに対し右辺は、各セルに流出係数と再現期間 m 年の降雨を乗じたものである。この各セルの流出係数を地点流出係数と呼ぶ。両辺ともにセルからの流出量を表す。Kazamaらの研究で用いた極値降雨分布に地点流出係数 $RC_m(A_n)$ を乗じることにより、任意地点において再現期間 m 年の流量を生じさせる確率洪水寄与降雨の分布を作成した。再現期間100年に対する確率洪水寄与降雨の分布を図-3に示す。また、例として秋田県雄物川流域における再現期間100年に対する確率洪水寄与降雨の分布を図-4に示す。集水面積（対象グリッドセルの上流にあるセルの総数）が増加するにつれて極値流出係数（式2）を極値降雨分布（図-1）に乘じたため、下流へ行くほど降水量が減少する降雨分布となっている。また、図-2に示した回帰式の決定係数は0.3程度であり、特に集水面積の小さい流域において流出係数のばらつきが大きい。誤差の要因として最も大きいのは降雨データの持つ不確実性であると考

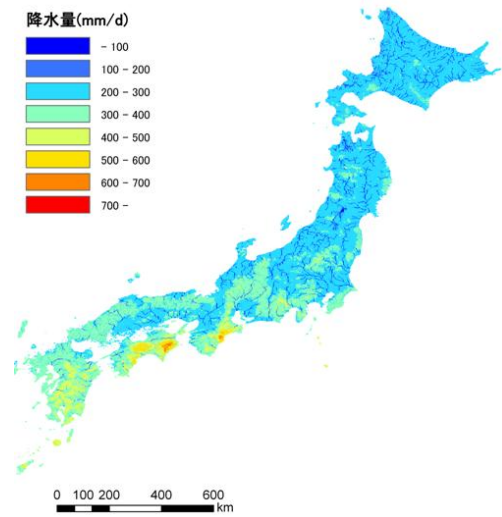


図-3 再現期間100年の確率洪水寄与降雨の分布（単位：mm/d）

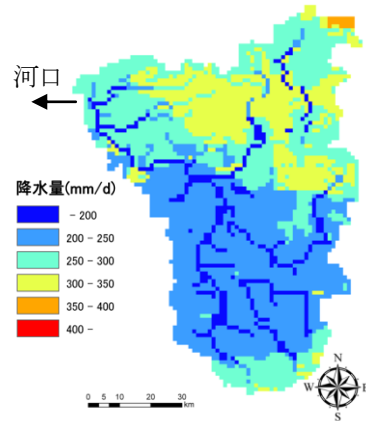


図-4 雄物川流域における確率洪水寄与降雨の分布（単位：mm/d）

えられる。本研究ではKazamaらの研究において示された極値降雨分布を利用しているが、この降雨分布は長い再現期間の豪雨を対象としているため、最大250mm/dの誤差を含む。極値流出係数の算出に用いた全国の一級河川水系における降水高は約200mm/dから約500mm/dであるため、降雨データの不確実性は極値流出係数に影響を与える。例えば名取川において、極値降雨を250mm/d増加させると、極値流出係数は0.72から0.37へと減少する。式(1)より、特に集水面積の小さい流域において、降雨データの誤差が大きく影響することが分かる。第6章で、確率洪水寄与降雨を用いて氾濫計算を行い算出される被害額と実被害額との比較をすることにより、極値流出係数の精度を確認する。

4. 洪水氾濫計算

本研究では、堤防やポンプ場といった河川構造物を考慮しない原始河川を仮定し、氾濫計算を行う。これは、氾濫計算に用いる数値地理情報の解像度が1km×1kmのため、堤防など微地形の情報を反映できないためである。つまり標高のみに依存し、氾濫水は標高の低い部分に流

表-1 土地利用毎の被害額単位

土地利用	土地利用毎の被害額単価
田	田被害(千円)=単位面積当たりの水稻平年収量の全国平均値(t/km ²)×米の単位評価額(千円/t)×浸水面積(km ²)×浸水深別被害率
畑地	畑地被害(千円)=単位面積当たりのトマト平年収量の全国平均値(t/km ²)×トマト評価額(千円/t)×浸水面積(km ²)×浸水深別被害率
建物用地	建物用地被害=住宅地被害+事業所被害 住宅地被害=家屋被害+家庭用品被害 家屋被害(千円)=都道府県別家屋1km ² 当たり評価額(千円/km ²)×浸水面積(km ²)×浸水深別被害率 家庭用品被害額(千円)=1世帯当たりの評価額(千円/世帯)×浸水世帯数(世帯)×浸水深別被害率 事業所被害=家屋被害+償却・在庫資産 償却資産被害額(千円)=事業所従業者1人当たりの償却資産平均値(千円/人)×浸水影響従業員数(人)×浸水深別償却資産被害率 在庫資産被害額(千円)=事業所従業者1人当たりの在庫資産平均値(千円/人)×浸水影響従業員数(人)×浸水深別在庫資産被害率
ゴルフ場	ゴルフ場被害=償却資産+在庫資産(サービス業) 償却資産被害額(千円)=サービス業従業者1人当たりの償却資産評価額(千円/人)×影響従業者数(人)×浸水深別被害率 在庫資産被害額(千円)=サービス業従業者1人当たりの在庫資産評価額(千円/人)×影響従業者数(人)×浸水深別被害率
新幹公用地	新幹公用地被害=一般資産被害額×一般資産被害額に対する公共土木施設の被害率 一般資産被害額=家屋被害+家庭用品被害+事業所償却・在庫資産被害額
森林	浸水に伴う被害はないものと仮定し、被害額は考慮しない。
荒地	
その他の用地	
河川地及び湖沼	
海浜	
海水域	

れ込む。また複数の再現期間を用いる解析方針は、規模の違う洪水による被害額の差を考慮することで治水施設の便益が計算できるという考えに基づいたものであり、治水計画に利用される手法である。この解析方針によって広域の対象洪水の潜在治水便益を知ることが可能となる。本研究では、戦後60年で再現期間50年までの洪水に対する日本の河川整備事業は完成したと仮定し、各再現期間と被害額の差をとる検討を行った。この手法は、Kazamaらにより平成16年新潟・福島豪雨に対して比較・検証され、流域単位での評価においては実績被害を概ね再現できているとの結果を得ている。この手法により、河川整備水準を再現期間50年まで引き上げることににより軽減される被害額が求まる。

氾濫モデルとして、氾濫流の伝播現象を最も詳細に再現することができる二次元不定流モデルを用いる¹³⁾。モデルを(5)から(8)に示す。

連続方程式

$$\gamma \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial \gamma M}{\partial x} + \frac{\partial \gamma N}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

運動方程式

(x方向) :

$$\lambda \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{MN}{D} \right) + \gamma g D \frac{\partial (D+h)}{\partial x} + \gamma g n^2 \frac{M \sqrt{M^2 + N^2}}{D^{7/3}} + \frac{1}{2} \frac{(1-\gamma)}{B} C_D \frac{M \sqrt{M^2 + N^2}}{D} = 0 \quad (6)$$

(y方向) :

$$\lambda \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{N^2}{D} \right) + \gamma g D \frac{\partial (D+h)}{\partial y} + \gamma g n^2 \frac{N \sqrt{M^2 + N^2}}{D^{7/3}} + \frac{1}{2} \frac{(1-\gamma)}{B} C_D \frac{N \sqrt{M^2 + N^2}}{D} = 0 \quad (7)$$

$$\lambda = \gamma + (1-\gamma)C_M \quad (8)$$

ここで、 x : 東向きの座標、 y : 北向きの座標、 t : 時間、 D : 水深、 h : 標高、 M 、 N : x 、 y 方向の単位幅流量、 g : 重力加速度、 n : マニングの粗度係数、 $(1-\gamma)$: 家屋占有率、 B : 家屋の平均寸法、 C_M : 家屋の付加質量係数、 C_D : 家屋の抗力係数である。家屋は正方形と想定して $C_M = 0.2$ 、 $C_D = 1.0$ とした。 n 、 γ 、 B は土地利用に応じて値を変化させる。

家屋の占有率は市街地で大きい傾向があるが、家屋の平均寸法は場所による傾向はみられないことが認識されている¹⁴⁾。土地利用が建物用地の場合、家屋の平均寸法は一定とした。粗度係数は水深によって変化するとし、水深がある程度深くなると底面の影響は無視できるため、粗度係数はその土地利用による値となる¹⁴⁾。

5. 被害額算定

国土数値情報 KS-META-L03-09Mデータに格納されている15の土地利用分類に従い、治水経済調査マニュアル¹⁵⁾の「直接被害の対象資産」を参考に、土地利用ごとの計算手順を表-1のように11つに分類した。計算式は治水経済調査マニュアルで示されている手法をそのまま用いた。ここで、浸水深別被害率は浸水深および浸水期間に応じて決定される。治水経済マニュアルにおいて浸水深は0.5m未満、0.5～0.99m、1.0m以上の3つに分類され、浸水期間は1～2日、3～4日、5～6日、7日以上と4つに分類されている。本研究では、洪水氾濫計算において計算期間を7日間と設定し、全国の各セルにおいて浸水期間を算出し、被害額算定に用いた。

6. 解析結果と考察

氾濫計算の結果として、再現期間100年の確率洪水寄

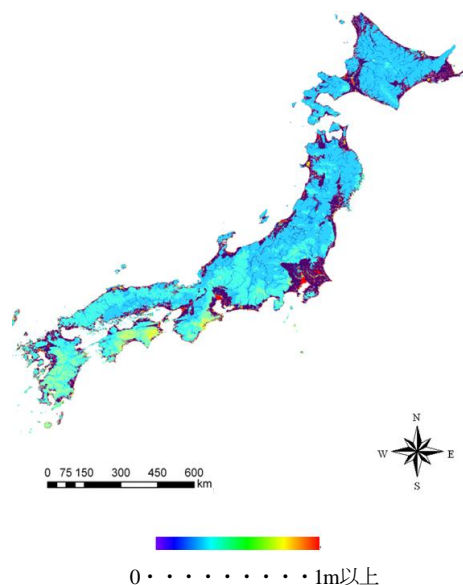


図-5 再現期間100年の最大浸水深（単位：m）

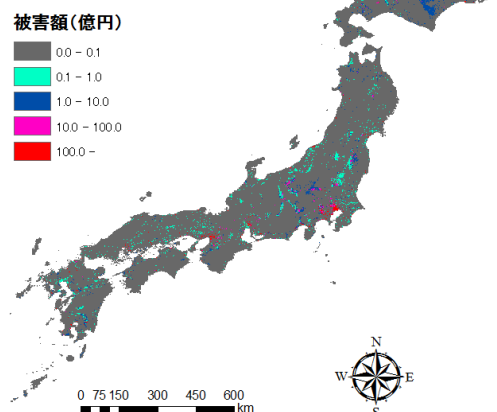


図-6 再現期間100年における被害額（単位：億円）

表-2 再現期間毎の年平均被害期待額（単位：億円）

再現期間 (年)	年平均 超過確率	被害額	区間平均被害額 (A)	区間確率 (B)	年平均被害額 (A×B)	累計 Σ(A×B)
5	0.20	400549	431191	0.100	43119	43119
10	0.10	461833	528514	0.067	35234	78357
30	0.03	595194	618914	0.013	8252	86606
50	0.02	642633	714394	0.010	7144	93749
100	0.01	786155				

与降雨に対する氾濫計算の結果による、各グリッドセルの最大浸水深の分布を図-5 に示す。なお浸水深は最大11mのセルが存在するが、被害額算定の際に1m以上は同じ被害額となるため、図-5 では1m以上の浸水深を全て赤で示した。図-3 に示した再現期間100年の確率洪水寄与降雨の分布と比較すると、九州地方や四国地方、紀伊半島など確率洪水寄与降雨の大きい地域では、最大浸水深も比較的大きい傾向にある。一方、確率洪水寄与降雨の比較的小さい地域である北海道や東北地方では、最大浸水深も比較的小さい傾向が現れている。

再現期間100年における洪水被害額を図-6 に示す。各再現期間に対する年平均超過確率、被害額、各再現期間間隔の区間平均被害額、区間確率、年平均被害額およびその累計を表-2 に示す。再現期間5年、10年、30年、50年、100年における、再現期間の被害額の相加平均値は区間平均被害額、超過確率の差は区間確率である。これらに乗じることにより年平均期待被害額が求まる。これより1年あたりに期待される再現期間100年の洪水による被害額は7144億円である。このように再現期間毎の被害を定量的に対比させることにより、降水量や確率規模の違いによって期待される被害の大きさを把握することができる。基準年とした再現期間5年の浸水被害額は約40兆円、再現期間100年の浸水被害額は約79兆円であることが示されている。再現期間100年の降雨量は

再現期間5年の降雨量の概ね2倍である。基準年に対して、再現期間10年では、1.2倍、30年では1.5倍、50年では1.6倍、100年では2.0倍ほどの被害が潜在的に見込まれる。

また計算された日本全国における洪水被害額を基に、流域毎の洪水被害額を算定し、国土交通省試算被害額および水害統計被害額と比較した。現在、日本の洪水対策が想定している流量の再現期間は各流域において一定ではないが、1級河川がおおむね50～70年、2級河川が50年以下である。よって本研究では、現在の日本全国の洪水対策が想定している流量の再現期間を50年であると仮定し、計画規模の被害額と再現期間50年の被害額の差を流域毎の被害額とした。氾濫計算により推定された浸水被害額と、7つの一級河川水系における国土交通省試算被害額および2000年以降に発生した豪雨に起因する洪水被害が大きかった7県市の水害統計被害額の関係を図-7 に示す。小規模な水害は図の左下にプロットが集中するだけなので、空間的なばらつきを考慮し7県市を選定した。それぞれに対し回帰直線を算出し、その傾きを比較した。結果として、本研究において氾濫計算により得られた推定被害額は、国土交通省試算被害額の約0.1倍であり、水害統計被害額の約2倍である。推定被害額が国土交通省試算被害額よりも小さい理由として、国土交通省は資産価値の高い地域に対して、目的流

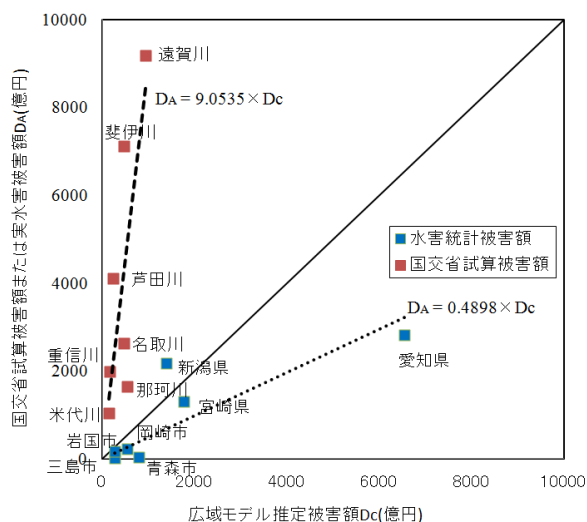


図-7 氾濫モデル被害額と国交省試算被害額または水害統計被害額（単位：億円）

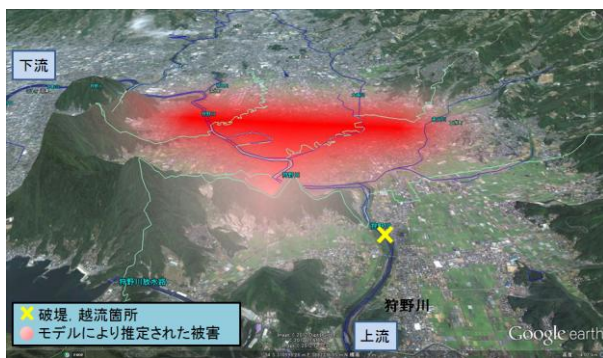


図-8 三島市における被害予測および実際の破堤箇所

量規模における堤防の決壊を仮定して浸水想定区域を設定して浸水被害額を試算しているため、被害額を過大評価していることが考えられる。また実被害額である水害統計被害額と比較し、本研究の被害額が大きくなる要因は、多くの水害が整備水準の低い地域に生じ、そうした地域の資産価値が低いためであると考えられる。2007年9月の豪雨による、静岡県三島市周辺における本研究の被害予測および実際の破堤・越流箇所を図-8に示す。赤色の濃い地点が被害の大きい地域を示す。モデルにより推定された被害が広がっている地点は資産価値の高い都市部である。これに対し、実際は資産価値の低い水田の周辺において破堤した。このように、実際の水害は整備水準の低い地点、すなわち資産価値の低い地点において発生することが多いため、実被害額は推定被害額と比較して過小傾向になる。三島市と同様に、愛知県も実際の被害発生箇所とモデルにより推定された被害発生箇所が異なり、この結果が回帰直線を過少傾向に引っ張っている。本研究の結果は、適応策により防護すべき箇所を決定する際の意思決定に役立つ。

全国一律に極値降雨を与えた際の各流域における被害額が、水害統計被害額の約 10 倍であったのに対し、本研究により得られた被害額は水害統計被害額の約 2 倍である。確率洪水寄与降雨を与える本研究手法により、

より実被害に近い値を推定することができた.

7. 結論

日本全国において確率洪水害与降雨の分布データを用いて氾濫計算を行い、潜在的な洪水被害を定量的に示した。得られた被害額と国土交通省の試算被害額および水害統計被害額と比較し、それらの関係を示した。

本研究から，以下の結論を得た．

- 1) 集水面積と流出係数の関係を明らかにし、任意地点において極値流出を生じさせる確率洪水寄与降雨の分布を作成した。
- 2) 確率洪水寄与降雨の分布データを用いて算出した再現期間 100 年の洪水被害額は、約 79 兆円である。全国一律に極値降雨を与えた被害額と比較し、より実被害に近い値が得られた。
- 3) 得られた氾濫モデル被害額は、国土交通省試算被害額の約 0.1 倍、水害統計被害額の約 2 倍である。

謝辞：本研究は、環境省の環境研究総合推進費(S-8)の支援により実施された。福島大学大学院共生システム理工学研究科川越清樹准教授には、極値降雨データを提供していただいた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 経済産業省，気象庁，環境省：IPCC第4次評価報告書統合報告書政策決定者向け要約，pp.1-24，2007.
- 2) William Solecki, Robin Leichenko, Karen and O'Brien : Climate change adaptation strategies and disaster risk reduction in cities, Environmental Sustainability, Vol.3, pp.135-141, 2011.
- 3) 和田一範，村瀬勝彦，富澤洋介：地球温暖化に伴う降雨特性の変化と洪水・渇水リスクの評価に関する研究，土木学会論文集No.796／II-72，pp.23-37，2005.
- 4) 国土交通省河川局：平成16年版水害統計，104p，2006.
- 5) So Kazama, Ayumu Sato and Seiki Kawagoe : Evaluating the cost of flood damage based on changes in extreme rainfall in Japan, Sustainability Science, Vol.4, pp.61-69, 2009.
- 6) 石原健志，風間聡：異なる流域で見た浸水被害における流域地勢の影響，土木学会東北支部技術研究発表会，II -13，2011.
- 7) 牛山素行，寶馨：AMeDASデータによる暖候期降水量と最大1時間・日降水量の関係，水文・水資源学会誌，Vol.13，No.4pp.368-374，2004.
- 8) 事業評価カルテ検索：<http://www.mlit.go.jp/tec/hyouka/public/jghks/chart.htm>
- 9) 国土交通省河川局：平成20年版水害統計，2008.
- 10) 国土交通省河川局：平成19年版水害統計，2007.
- 11) 国土交通省河川局：平成18年版水害統計，2006.
- 12) 国土交通省河川局：平成17年版水害統計，2005.
- 13) 宮城昌和：水路の粗度係数を考慮した氾濫シミュレーション，東北大学卒業論文，65p，2005.
- 14) 風間聡，長尾昌朋，武藤裕則，多田毅：土地利用を考慮した氾濫水理解析と予測，平成16年度河川懇談会共同研究資料，117p，2005.
- 15) 国土交通省 河川局：治水経済調査マニュアル（案），91p，2005.

(2012. 9. 30 受付)