

第2章 内水・外水による統合的浸水ハザード評価手法の開発

水災害による被害の低減を図るための情報として、洪水浸水想定区域（水防法第14条：国土交通省、2015）、雨水出水浸水想定区域（同14条の2）、高潮浸水想定区域（同14条の3）、これらに基づく各自治体のハザードマップ（例えば、国土交通省、2009）、浸水ナビ（国土交通省）等が提供されている。

しかし、住民・事業者が自ら建物浸水に対する被害防止・低減のための戸別対策について検討するための情報として活用するのは容易ではない。その要因として、氾濫を引き起こす事象別（河川氾濫、内水氾濫、高潮氾濫）にそれぞれ異なる確率規模で想定されているため、自らの建物に対してどの程度の浸水が想定されているのか（例えば、床上浸水が生じる確率など）といった「浸水ハザード」が把握しにくいことが挙げられる。

本章では、上記課題への取り組みとして、事象と確率規模を分けずに、発生確率の高い内水氾濫から発生確率は低いものの浸水する範囲や深さなどが大きい外水氾濫に至るまで統合的に扱って浸水ハザードを評価する手法について検討した結果をまとめて示すものである。

本研究では、以下に要点を示す2種類の手法について検討を加えた。

① 内水・外水の同時生起確率を考慮する手法

本川流域と内水河川流域の流域平均降雨量の同時生起確率分布から浸水深超過確率分布を算定する手法（2.1参照）

② 同一降雨量（確率規模）に対して生じうる浸水深の範囲（値域）を評価する方法

本川流域と内水河川流域の流域平均降雨量、河口水位など諸条件を系統的に変化させて浸水深を算定し、その結果を降水量の年超過確率と浸水深との関係図としてまとめることで、同一の年超過確率に対して生じうる浸水深の値域を得る手法（2.2参照）。

手法①は、降水量の年超過確率評価においては本川流域での一雨期間内での本川と内水それぞれの河川流域降雨量を2変数とした同時生起確率評価を行うものであり、内水・外水に分けずにそれらを統合して氾濫水深と確率の関係を評価する手法である。合理的である反面、確率評価の手順が複雑かつ労力が多いなど課題を有する。具体には、従来の降雨確率評価手法と比べると、同時生起とみなす降雨データ整理や2変数確率分布の設定などの作業が追加され、限られた降雨実績データからのパラメータ設定にさらなる工夫が必要であることが挙げられる。

手法②は、浸水ハザード情報の作成・提供を実践し、もって地域の様々な主体による対策実施判断を支援できるようにすることを優先し、また、全国の都市における適用を念頭に置き、厳密な内外水同時生起確率の議論に入り込まずに、既往実績等から想定しうる降雨事象等の発生シナリオを設定し、降雨量の超過確率と浸水深の関係を評価する手法について検討したものである。

両手法の技術的な観点からの対比については、2.1.1および2.1参考2)を参照されたい。また、気候変動による将来の降雨量増加について、上記手法②による統合的評価を活用して推算した結果を2.3に示す。

2. 1 外水・内水の同時生起を考慮した氾濫計算

2. 1. 1 同時生起確率による統合的浸水ハザード評価の基本的考え方

ある建物で防水板の高さを設定するにあたり、どの程度の確率規模の浸水まで防げるか（すなわち、防水板より低い水深にとどまる洪水の発生確率）は大きな関心事となるであろう。そうした場面で適用しうる浸水深一年超過確率の関係の算定方法として、以下の2手法が挙げられる。

- ・ **タイプ A**：ある降雨量に対して、他の要因（変数）についてはその生起しうる全範囲内のある一部（ある一定値または値域）をとるとした一定条件の下で算定した確率（条件付き確率）。一定条件の例としては浸水深や浸水継続時間が最大となるなどの浸水ハザードが最も厳しくなる条件が挙げられる。
- ・ **タイプ B**：上記のような条件を設けずに、複数の要因（変数）の様々な組み合わせを考慮して算定した確率

例えば、図 2.1.1 に示す単純な流域をもつ場合、本川河川の水深 h_r や氾濫水深 h_f が、総雨量 r のほか、河口水深（潮位） h_o や降雨時空間分布 d_i との関数として算定でき、 r, h_o, d_i がそれぞれ確率事象である場合、タイプ A の条件付き確率では h_o, d_i を上記の条件を満たす値に固定して確率を求めることに相当する。また、図 2.1.1 に示した内水河川（または雨水管路）からの氾濫のみを対象としてタイプ A の検討を行う場合、上に記した氾濫水深 h_f の条件付き確率の求め方において、河口水深 h_o を排水先となる河川水深 h_r に、かつ流域総雨量 r を内水河川等の小流域に降る短時間豪雨の雨量 r_p に置き換えればよい。統合的な確率評価の観点からは、 h_o, h_r を一定値とした条件付き確率から、それらを変数に戻して「条件付き」を外した確率評価を行う手法が別途必要となる^{参考 1)}。

タイプ B のアプローチを内水氾濫に適用する本研究では、 h_r を固定せず、 r, h_o, d_i の関数となる変数として扱う。したがって、 h_f は r_p, r, h_o, d_i の関数となり、生起確率の評価もその関係のもとで行うこととなる。そのため、取り扱う変数が増え、生起確率評価の手順が複雑かつ労力（データ整理や確率分布の設定など）が大きくなる。その反面、内水・外水の氾濫に関わる変数を一括して取り扱うので、内水・外水に分けずにそれらを統合して氾濫水深と確率の関係を合理的に評価できる特長がある^{参考 1)}。

本節では、タイプ B による統合的な確率評価の手順、具体には一雨期間内での r_p, r の同時生起確率を考慮する^{参考 2)} 手法を提示し、それをモデル流域に適用して氾濫水深と確率の関係を算定した結果を示す。あわせてタイプ B の複雑さ、労力を軽減する試み（近似的な手法とその適用条件）に関する考察を示す。

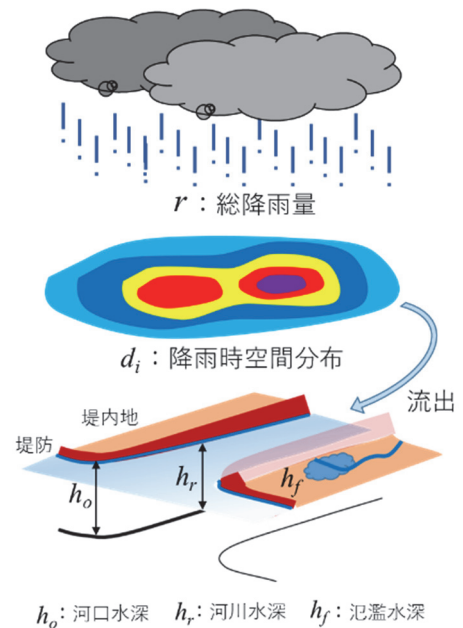


図 2.1.1 外水・内水氾濫水深 h_f に関わる水文・水理量

2. 1. 2 外水及び内水の同時超過確率の算出

(1) データ整理

まず、直近 30 年間のアメダス時間雨量データを用いて、ティーセン法で算出した研究対象河川（流域面積：約 1,700km²）の治水基準地点上流域における流域平均 1 時間雨量とモデル地区（研究対象河川の 1 つの氾濫ブロック、面積：約 7.5km²）近傍に設置されている雨量観測所における 1 時間雨量を

整理した。次に、図 2.1.2 に示すように、無降雨期間（洪水到達時間内の流域平均雨量が常に 0.5mm 未満の期間）を除いた降雨が連続する期間を一雨期間として設定し、一雨期間内の雨量から外水氾濫を規定する雨量（以下、外水氾濫規定雨量）として流域平均 2 日雨量、内水氾濫を規定する雨量データ（以下、内水条件規定雨量データ）として 2 日最大 1 時間雨量をそれぞれ算出した。

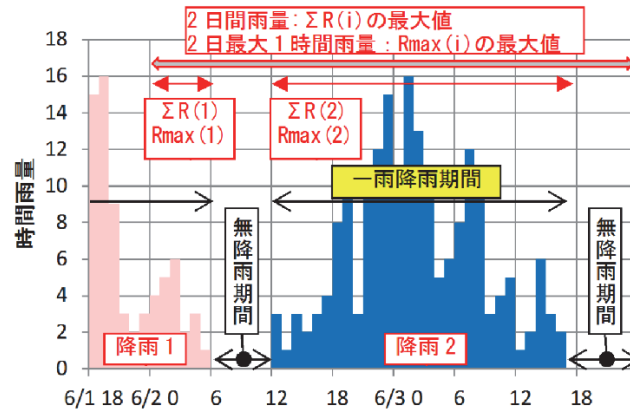


図 2.1.2 データ整理のイメージ図

上記の手順で外水条件規定雨量及び内水条件規定雨量を整理した結果、図 2.1.3 に示すように 30 年間で 3097 降雨が抽出された。

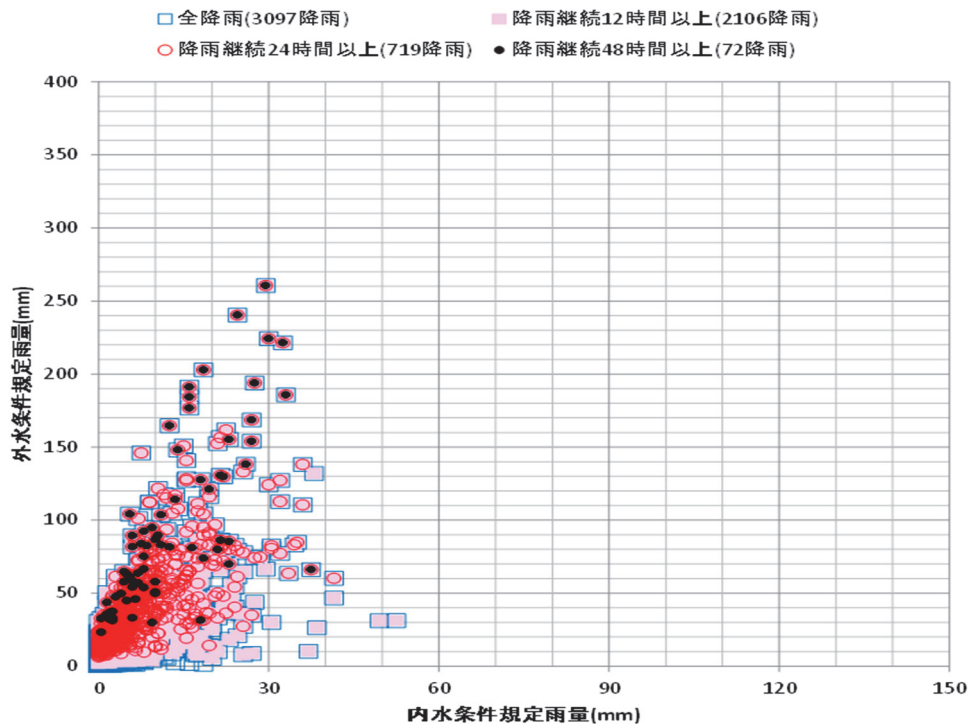


図 2.1.3 外水条件規定雨量及び内水条件規定雨量

雨量データを用いて極値統計解析を行う場合、通常は雨量観測で得られる年最大雨量データが用いられる。しかし、外水と内水の同時生起を考慮する場合、年最大雨量データを用いる手法では、外水と内水で同一の降雨事例を扱えない可能性がある。そこで、外水条件規定雨量及び内水条件規定雨量に対し

でそれぞれ閾値を設定した上で、いずれかの閾値を超過する降雨イベントのデータを全て使用して極値解析を行うことにした。なお、閾値の設定については、図 2.1.4 に示すように標本平均超過関数（高橋ほか、2016）と年平均生起回数（西岡ほか、2002）をもとに設定し、図 2.1.5 に示すように指数分布の SLSC(Standard Least Square Criterion)の値から閾値の妥当性を確認した。ここで、SLSC は値が小さいほどデータに対する確率分布関数の適合度が良いと判断される指数であり、0.04 以下であれば適合度を満足するとされる場合が多い。その結果、外水条件規定雨量の閾値は 70mm、内水条件規定雨量の閾値は 10mm となり、外水条件規定雨量及び内水条件規定雨量のデータ整理で抽出した 3097 降雨のうち、設定した閾値のいずれか一方の値を超過したのは 329 降雨となった。

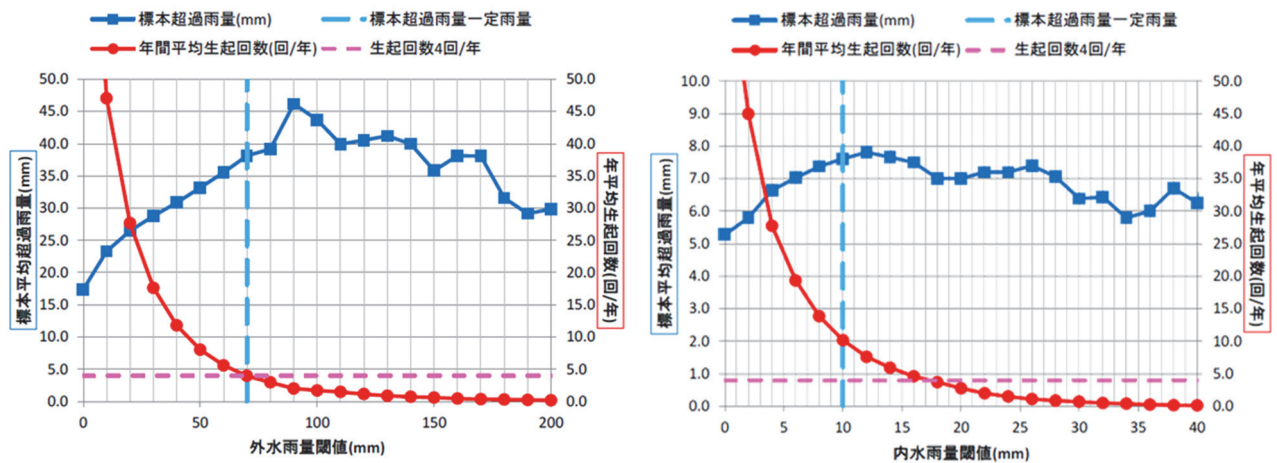


図 2.1.4 外水条件規定雨量及び内水条件規定雨量の閾値設定

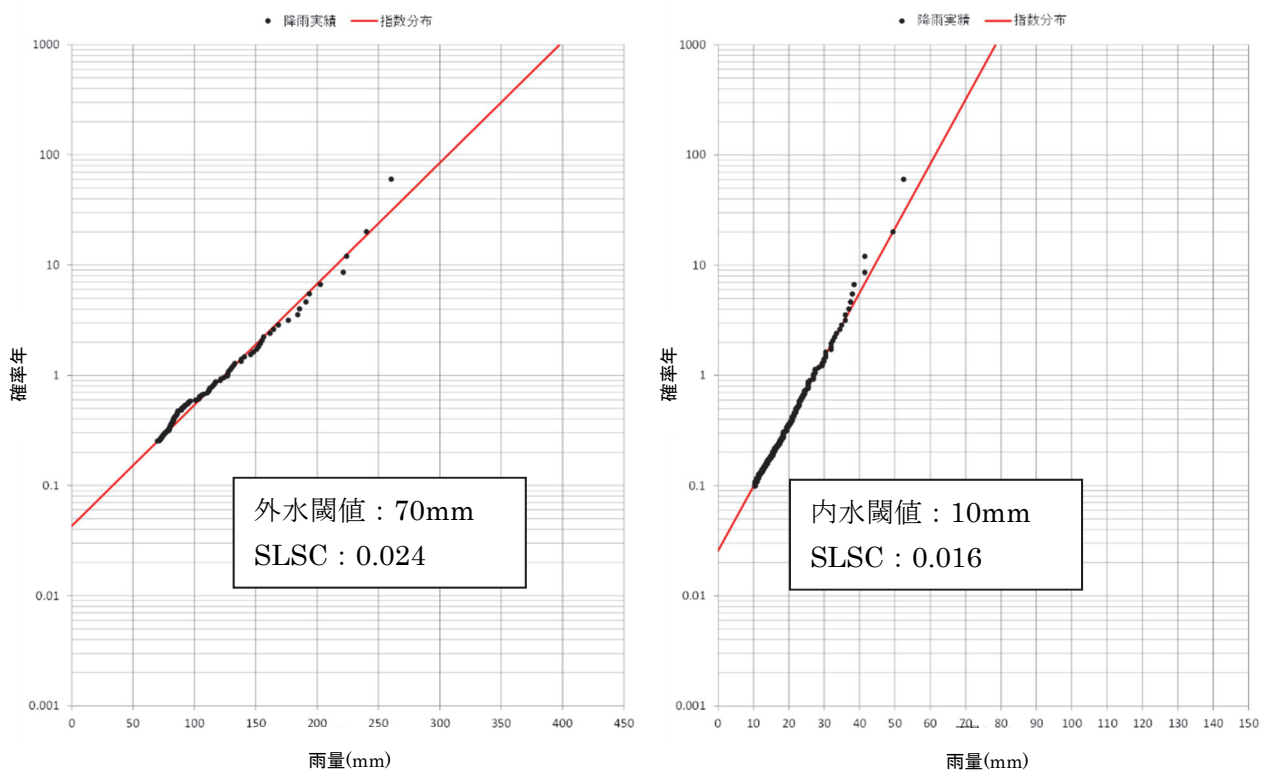


図 2.1.5 外水条件規定雨量及び内水条件規定雨量の指数分布の適合度評価

(2) Freund の二変数指数分布

閾値を超過したデータを使って極値統計解析を行う場合、通常は一般パレート分布が用いられる。本研究では2日最大1時間雨量等の短時間降水量を扱うことから、一般パレート分布ではなく指数分布を採用し(国土交通省、2014)、外水条件規定雨量及び内水条件規定雨量の二変数を扱う指数分布として、同時超過確率の解析解を得ることができる Freund の二変数指数分布(栗田ほか、2000)を適用することとした。

閾値を超過した 329 降雨を対象に、Freund の二変数指数分布を適用し、下記の式より外水条件規定雨量 r 及び内水条件規定雨量 r_p の同時超過確率を算出した。算出した同時超過確率 P の等値線として確率年 200 年まで整理したものを図 2.1.6 に示す。

$$\begin{aligned}
 &P(R \geq r, R_p \geq r_p) \\
 &\quad r > r_p \text{ の場合} \\
 &= \frac{b_1 \cdot \exp(-a_2 \cdot r)}{a_1 + b_1 - a_2} [\exp\{-(a_1 + b_1 - a_2)r_p\} - \exp\{-(a_1 + b_1 - a_2)r\}] + \exp\{-(a_1 + b_1)r\} \\
 &\quad r = r_p \text{ の場合} \\
 &= \exp\{-(a_1 + b_1)r\} \\
 &\quad r_p > r \text{ の場合} \\
 &= \frac{a_1 \cdot \exp(-b_2 \cdot r_p)}{a_1 + b_1 - b_2} [\exp\{-(a_1 + b_1 - b_2)r\} - \exp\{-(a_1 + b_1 - b_2)r_p\}] + \exp\{-(a_1 + b_1)r_p\}
 \end{aligned}$$

ここで、 r : 外水条件規定雨量、 r_p : 内水条件規定雨量、 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 : 母数パラメータである。

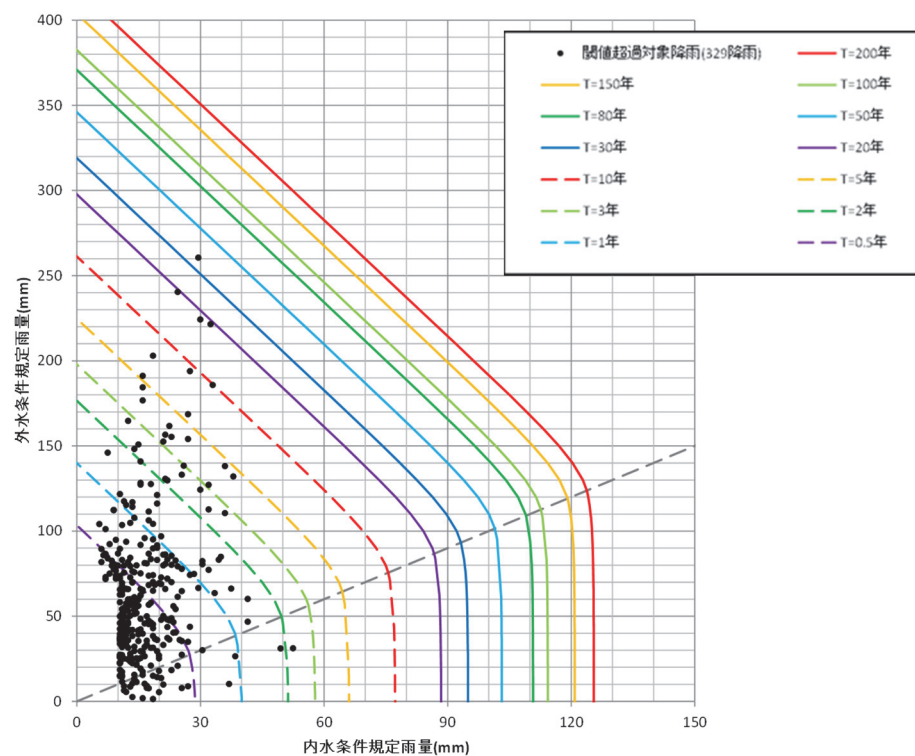


図 2.1.6 等確率年線図

2. 1. 3 外水及び内水の同時生起を考慮した氾濫計算

外水及び内水の同時生起を考慮した氾濫計算を実施するためには、外水氾濫を引き起こす降雨と内水氾濫を引き起こす降雨が同時に生起する確率を算出した上で、外水及び内水氾濫計算を実施する必要がある。本研究では、上記 2. 1. 2 の手法で外水条件規定雨量と内水条件規定雨量が同時に超過する確率を算出するとともに、「外水氾濫を引き起こす降雨の間に、内水氾濫を引き起こす降雨が発生した」という仮定のもと、外水氾濫及び内水氾濫による浸水深分布を算定することで、外水及び内水の同時生起を考慮した氾濫計算を試みた。

(1) 外水及び内水氾濫計算の実施

外水氾濫による浸水深分布を算定するために、研究対象河川の治水基準地点上流域における降雨の時空間分布を 0、50、100、150、200、250、300、350、400mm/2d の 9 ケース設定し（基準となる降雨波形を引き伸ばし、あるいは押し縮め）、貯留関数法によって河川流量を算出した。その後、河道の一次元不定流計算を行い、研究対象河川の氾濫想定地点において河道水位が計画高水位を超過した場合に破堤するものとした。破堤後は、モデル地区について平面二次元不定流計算を行い、外水氾濫による浸水深分布（空間解像度：25m メッシュ）を算定した。なお、破堤箇所は 1 地点とし、モデル地区近傍の河道について浸水シミュレーションを行い、最も浸水範囲が広がる地点を選定した。

また、内水氾濫による浸水深分布を算定するために、モデル地区における降雨の時間分布（空間的に一様と仮定）を同様に 6 ケース（0、30、60、90、120、150mm/h）設定し、モデル化した下水管路網流れの計算を InfoWorksCS によって行った。この算定結果からマンホール（立坑）における管内圧力水頭を抽出し、地盤面との差として浸水深を算定する簡略化を行っている。各マンホール位置での浸水深を線型補間することで、25m メッシュ（外水氾濫と同一）の浸水深分布を求めた。なお、モデル地区内の排水ポンプの影響を考慮するために、研究対象河川の水位が一定の水位まで上昇すると、排水ポンプの運転を停止する設定とした。

本川河口に与える出発水位は、河口がピーク流量に到達する時点までは河道計画検討に用いた水位と等しい一定値とし、その後は天文潮位変動を参考に降下・上昇を繰り返す時間変化値として設定した。この出発水位を与えて算定した本川水位の時間変化を、内外水氾濫計算に共通して与えている。ただし、内外水氾濫が重畳する氾濫計算は行わず、上記の内水・外水氾濫計算で得た最大浸水深の大きい方をとる簡略化を行っている。

(2) 外水及び内水の氾濫計算結果

表 2. 1. 1 に示すように、外水氾濫計算で設定した降雨の時空間分布及び内水氾濫計算で設定した降雨の時間分布を組み合わせた 53 ケースを設定し、外水及び内水氾濫計算を実施した。

氾濫計算結果の一例として、ある地点における等氾濫水深線図を図 2. 1. 7 に、またモデル地区における最大浸水深分布を図 2. 1. 8 示す。

表 2.1.1 外水及び内水の氾濫計算ケース

計算ケース		内水氾濫を規定する降雨外力(2日最大1時間降水量)					
		(1)0mm	(2)30mm	(3)60mm	(4)90mm	(5)120mm	(6)150mm
外水氾濫を規定する降雨外力 (流域平均2日降水量)	⑨400mm	⑨-(1)	⑨-(2)	⑨-(3)	⑨-(4)	⑨-(5)	⑨-(6)
	⑧350mm	⑧-(1)	⑧-(2)	⑧-(3)	⑧-(4)	⑧-(5)	⑧-(6)
	⑦300mm	⑦-(1)	⑦-(2)	⑦-(3)	⑦-(4)	⑦-(5)	⑦-(6)
	⑥250mm	⑥-(1)	⑥-(2)	⑥-(3)	⑥-(4)	⑥-(5)	⑥-(6)
	⑤200mm	⑤-(1)	⑤-(2)	⑤-(3)	⑤-(4)	⑤-(5)	⑤-(6)
	④150mm	④-(1)	④-(2)	④-(3)	④-(4)	④-(5)	④-(6)
	③100mm	③-(1)	③-(2)	③-(3)	③-(4)	③-(5)	③-(6)
	②50mm	②-(1)	②-(2)	②-(3)	②-(4)	②-(5)	②-(6)
	①0mm		①-(2)	①-(3)	①-(4)	①-(5)	①-(6)

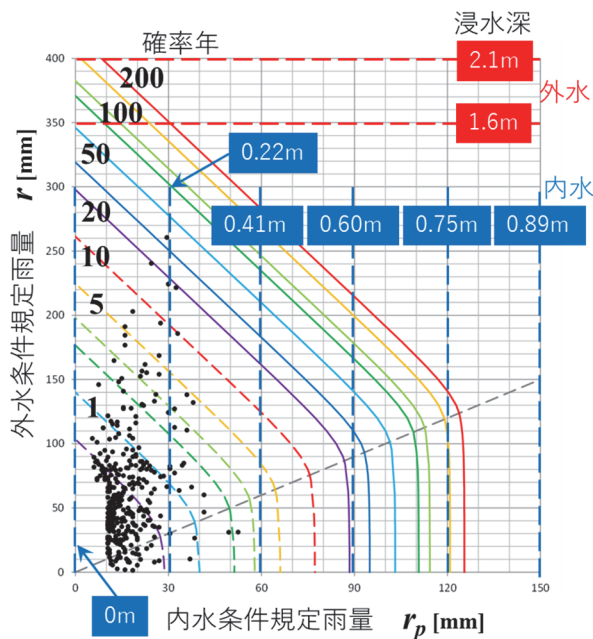


図 2.1.7 ある地点における等氾濫水深線図の一例
(浸水深：青囲みは内水氾濫、赤囲みは外水氾濫)

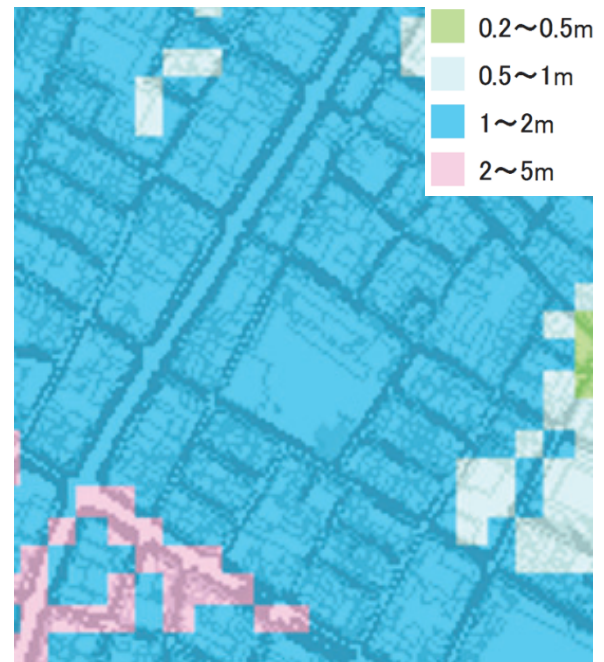


図 2.1.8 外水及び内水の最大浸水深分布の一例
(外水 400mm/2d、内水 150mm/h の場合)

(3) 最大浸水深別の確率年の算定

Freund の二変数指数分布で整理した確率年と 53 の氾濫計算ケースで得られた外水及び内水の氾濫計算結果を用いて、モデル地区の全てのメッシュを対象に、横軸を確率年、縦軸を最大浸水深とする散布図を作成した(以下、「最大浸水深—確率年」図)。ここで各プロットの確率年(年超過確率 P の逆数)は、各氾濫計算に与えた表 2.1.1 に示した雨量 r, r_p 値の組み合わせを式 $1/P(R \geq r, R_p \geq r_p)$ に与えて算定している。その一例を図 2.1.9 に示す。図中には、氾濫水深 h_f の確率年 $1/P(H_f \geq h_f)$ の算定結果を太水色線で併記した。 $P(H_f \geq h_f)$ は、ある h_f を超過する氾濫計算結果となる雨量 r, r_p の範囲を例えば図 2.1.7 から得て、その範囲において確率密度関数を積分することで得られる(参考 1)参照)。

図 2.1.9 を見ると確率年が 20 年ほどまでは最大浸水深が緩やかに増加しているが、その後は急激に増加しており、発生確率が高い内水氾濫から発生確率が低い外水氾濫までの最大浸水深の関係性がシームレスに表現できていることが分かる。また、40 年までは浸水していないが、その後、最大浸水深が急激に上昇しているメッシュもあれば、100 年を過ぎても最大浸水深が緩やかに増加しているメッシュもあり、モデル地区内の地域によって、確率年と最大浸水深の関係が異なっていることが分かった。

なお、図 2.1.9 に一例を示したようにある確率年を境に外水氾濫による浸水深が急増するのは、破堤箇所と氾濫開始水位、および降雨の時空間分布をそれぞれ一条件に絞った計算であることも要因の一つと考えられる。

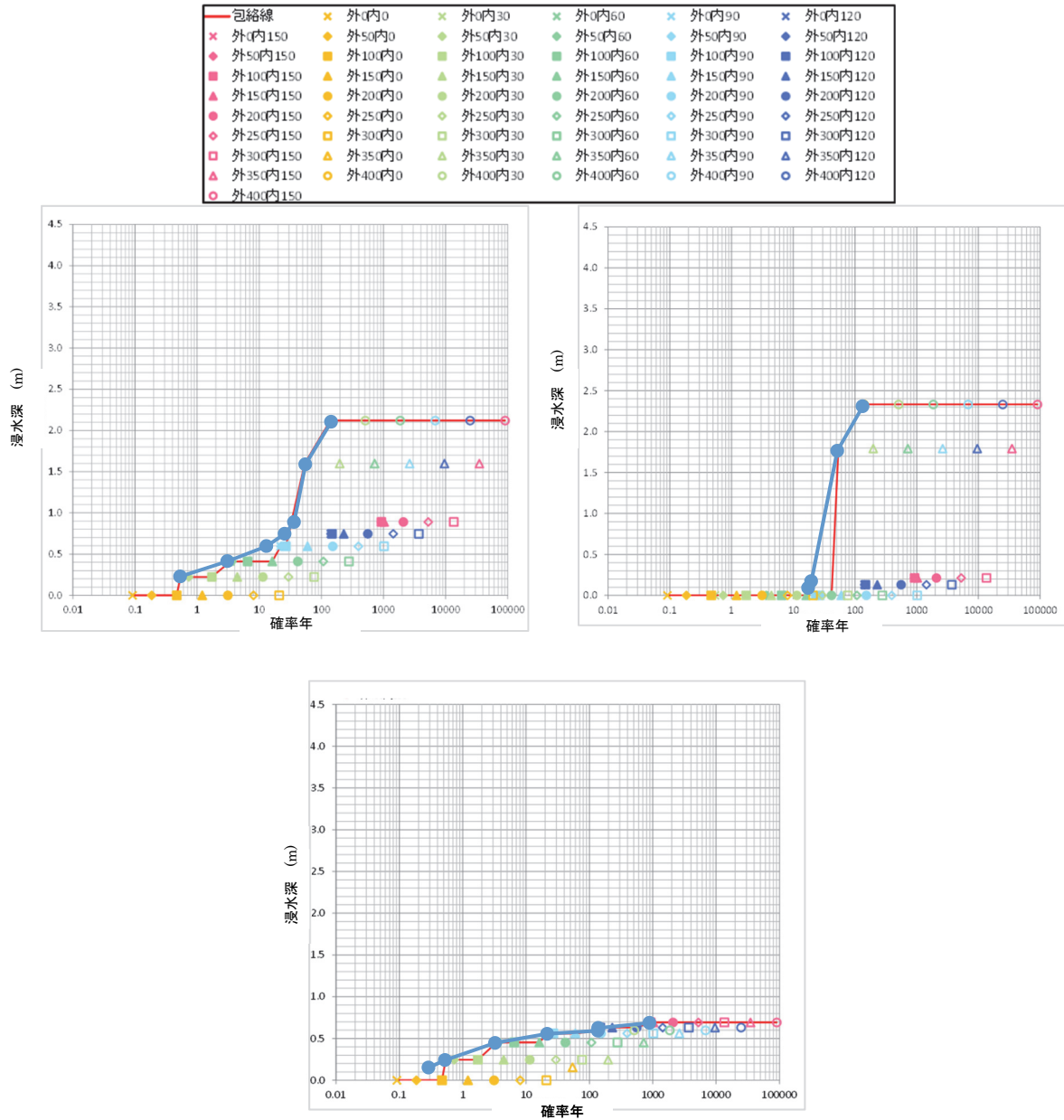


図 2.1.9 「最大浸水深—確率年」図の一例

モデル地区内の全てのメッシュを対象に作成した「最大浸水深—確率年」図をもとに、最大浸水深別にモデル地区における確率年の分布図を作成した。その一例を図 2.1.10～2.1.12 に示す。図 2.1.10 を見ると、最大浸水深が 10cm では確率年の分布が空間的に一様で、かつ確率年の値が小さいことから、主に内水氾濫による浸水と考えられる。また、図 2.1.11 を見ると、最大浸水深 100cm になると確率年が大きいことから、主に外水氾濫による浸水と考えられる。さらに、図 2.1.12 を見ると、最大浸水深 40cm では地域によって確率年の値に違いが見られ、内水氾濫と外水氾濫による浸水が混在していると考えられる。



図 2.1.10 確率年の分布図（最大浸水深 10cm）

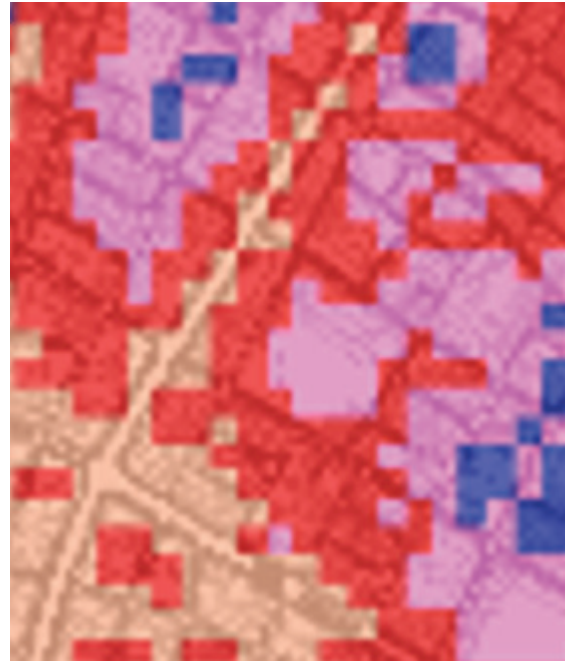


図 2.1.11 確率年の分布図（最大浸水深 100cm）



図 2.1.12 確率年の分布図（最大浸水深 40cm）

2. 1. 4 まとめ

本研究では、発生確率の高い内水氾濫から発生確率は低いものの浸水ハザードは大きい外水氾濫に至るまで、統合的に浸水ハザードを評価するための手法を検討した。その結果、Freund の二変数指数分布で算出された外水及び内水の同時超過確率の値と降雨の様々な組み合わせを適用した氾濫解析による最大浸水深分布を活用することで、任意の地点においてある浸水深を超える氾濫の生起確率を「最大浸水深—確率年」図を作成し、さらにそれを活用して最大浸水深別の確率年 $1/P(H_f \geq h_f)$ をモデル地区

平面図に重ね合わせた図を作成することができた。

本研究で検討した手法は、「最大浸水深—確率年」図を作成するには大量に氾濫計算を行う必要があるため、実用化に向け、計算コストを改善する等の課題がある。

今回のモデル地区では、図 2.1.7 に示したように、外水条件規定雨量のみによって内水のみと外水の氾濫発生を区分でき、かつ内水氾濫では外水条件規定雨量によらず内水条件規定雨量のみの関数として氾濫水深の変化が表せ、同様な関係が外水でも認められる結果となった。この場合には、超過確率 $P(H_f \geq h_f)$ を次式から算定できる。

内水氾濫のみ発生する範囲

$$P(H_f \geq h_f) = P(R \geq r_b, R_p \geq 0) + P(R \geq 0, R_p \geq r_p) - P(R \geq r_b, R_p \geq r_p)$$

外水氾濫の発生範囲

$$P(H_f \geq h_f) = P(R \geq r, R_p \geq 0)$$

ここで、 r_b は内水と外水の氾濫発生範囲を区分する外水条件規定雨量、 r, r_p は所定の氾濫水深 h_f に対応する外水・内水条件規定雨量である。

$P(R \geq r, R_p \geq 0)$ は、従来の高水計画などに用いている r に対する極値統計から導くことができる（例えば図 2.1.5 参照）。したがって外水氾濫については、 r_p との同時生起を考慮することなく従来の方法で統合的浸水確率が算定できることとなる。

また、 $P(R \geq r_b, R_p \geq r_p)$ が $P(R \geq r_b, R_p \geq 0) + P(R \geq 0, R_p \geq r_p)$ に比べて微小とみなせる場合には、上記した「内水氾濫のみ発生する範囲」の式で右辺最終項を省略することで近似値が求められる。今回のモデル地区の算定例である図 2.1.7 において内水氾濫水深 $h_f = 0.22m$ の場合にこの議論を当てはめると、同図から $P(R \geq r_b, R_p \geq 0) \approx 1/50$ (r_b は表 2.1.1 に示した計算ケースのうち外水氾濫水深が最小の $1.6m$ に対応する $150mm$ として設定)、 $P(R \geq 0, R_p \geq r_p) \approx 1/0.5$ ($r_p \approx 30mm$) に対して、 $P(R \geq r_b, R_p \geq r_p) \approx 1/200$ となり、1 オーダーの精度で近似値が求められる。このように上記議論の条件を満たすと、外水と同様に内水氾濫についても従来の方法で統合的浸水確率が算定できる場合があると考えてよいであろう。この場合、 r と r_p が確率事象として独立か否かによらずに成立するので、それに関わる検討、例えば同時生起確率の検討を省略できるという特長があげられる。

上記の知見を活用しつつ、今後も引き続き外水氾濫及び内水氾濫による土地毎の浸水ハザード評価手法（例えば、北野ほか、2018）について研究を進めていく予定である。

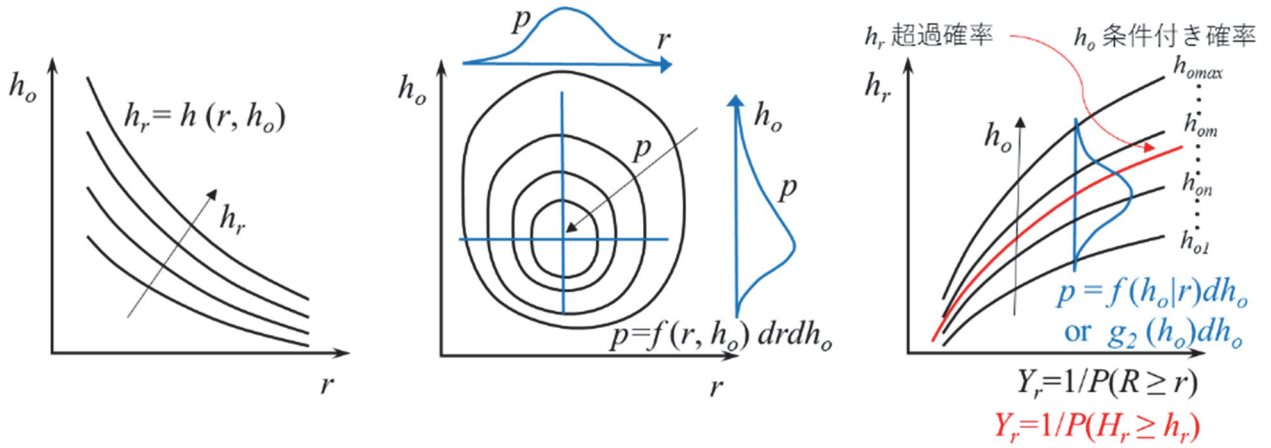
参考 1) 条件付き確率

河川水深 h_r が総雨量 r と河口水深 h_o と図-参 1a) に示す関係があり、この関係が降雨時空間分布 d_i によって変化する、という関数が成り立つことを仮定する。また、 r, h_o, d_i がそれぞれ確率事象であり、その生起確率 p は図-参 1b) に示す分布を持ち、それを式(1.1)に示す確率密度関数 f により表す。

$$p(r, h_o, d_i) = f(r, h_o, d_i) dr dh_o$$

$$D \ni (d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_{max}) \quad (1.1)$$

ここで、 $d_i (i=1 \sim max)$ は離散変数であり、生じうる降雨分布として定めた全集合 D の要素である。サフィックス i は同一の r, h_o に対して、 h_r が昇順となるように付すとする (h_r が最大値をとる降雨分布は d_{max})。



a) 河川水深 \$h_r\$ と河口水深 \$h_o\$・雨量 \$r\$ の関係 b) \$r\$ と \$h_o\$ の 2 変数生起確率密度 c) 河川水深 \$h_r\$ と年超過確率 \$P\$ の関係
図-参1 河川水深を例とした条件付き確率を考慮した確率水深に関する概念図

ここで、 $d_i = d_{max}$ とする条件付き確率は式(1.2)で与えられる。

$$p(r, h_o | d_{max}) = \frac{f(r, h_o, d_{max}) dr dh_o}{\iint_0^\infty f(r, h_o, d_{max}) dr dh_o} \equiv \frac{p(r, h_o, d_{max})}{p(d_{max})} \quad (1.2)$$

さらに条件を追加し、 h_o が最大値 h_{omax} とする条件付き確率は式(1.3)で与えられる。

$$p(r | h_{omax}, d_{max}) = \frac{f(r, h_{omax}, d_{max}) dr}{\int_0^\infty f(r, h_{omax}, d_{max}) dr} \equiv \frac{p(r, h_{omax}, d_{max})}{p(h_{omax}, d_{max})} \quad (1.3)$$

河川整備に関わる検討では、超過確率を用いるのが一般的である。式(1.2), (1.3)より、超過確率および $d_i = d_{max}$ かつ $h_o = h_{omax}$ の条件付き超過確率は式(1.4), (1.5)となる。

$$P(R \geq r, H_o \geq h_o, D_n \ni d_{i(n \leq i \leq max)}) = \sum_{i=n}^{max} \int_r^\infty \int_{h_o}^\infty f(r, h_o, d_i) dr dh_o \equiv F(r, h_o, d_n) \quad (1.4)$$

$$P(R \geq r | h_{omax}, d_{max}) = \frac{\int_r^\infty f(r, h_{omax}, d_{max}) dr}{\int_0^\infty f(r, h_{omax}, d_{max}) dr} \quad (1.5)$$

なお、 r, h_o, d_i が相互に独立である場合には関数 f は式(1.6)で与えられるので、超過確率式は式(1.7), (1.8)となる。

$$f(r, h_o, d_i) dr dh_o = g_1(r) g_2(h_o) p(d_i) dr dh_o \quad (1.6)$$

$$P(R \geq r, H_o \geq h_o, D_n \ni d_{i(n \leq i \leq max)}) = \sum_{i=n}^{max} \int_r^\infty \int_{h_o}^\infty g_1(r) g_2(h_o) p(d_i) dr dh_o \quad (1.7)$$

$$\equiv G_1(r) G_2(h_o) \sum_{i=n}^{max} p(d_i) \equiv P_1(R \geq r) P_2(H_o \geq h_o) P(D_n \ni d_{i(n \leq i \leq max)})$$

$$P(R \geq r | h_{omax}, d_{max}) = \frac{\int_r^\infty g_1(r) g_2(h_{omax}) p(d_{max}) dr}{\int_0^\infty g_1(r) g_2(h_{omax}) p(d_{max}) dr} \equiv G_1(r) \equiv P_1(R \geq r) \quad (1.8)$$

独立である場合は式が単純になるため、条件付きとなしで超過確率が異なり、条件付きの確率値のほ

うが大きくなることが明確に分かる。

ここまでする予備的な検討として、**図-参 1a** の関係を表す式(1.9)を用いて h_r についての超過確率 $P(H_r \geq h_r)$ を導く。なお、式の導出の本質を損なわずに複雑さを緩和するため、 d_i は独立と仮定する（すなわち $P(H_r \geq h_r | d_{max}) = P(H_r \geq h_r)$ ）。

$$h_r = h(r, h_o), \quad h_o = \eta(r, h_r), \quad r = \rho(h_r, h_o) \quad (1.9)$$

h_r を所与の値 h_r' として、この値以上の河川水深となる r と h_o の組み合わせは、式(1.10)で求められる。

$$h_o = \eta(r, h_r') \text{ および } r \geq 0, \text{ または } r = \rho(h_r', h_o) \text{ および } h_o \geq 0 \quad (1.10)$$

したがって、 $P(H_r \geq h_r | d_{max})$ はこれら組み合わせの範囲で積分することで式(1.11)のように導かれる。

$$P(H_r \geq h_r) \equiv P(R \geq \rho(h_o, h_r), H_o \geq 0) = \int_0^\infty \int_{\rho(h_o, h_r)}^\infty f(r, h_o) dr dh_o \quad (1.11)$$

また、河口水深が h_{omax} となる条件付きの超過確率は式(1.12)となる。

$$P(H_r \geq h_r | h_{omax}) \equiv P(R \geq \rho(h_{omax}, h_r) | h_{omax}) = \frac{\int_{\rho(h_{omax}, h_r)}^\infty f(r, h_{omax}) dr}{\int_0^\infty f(r, h_{omax}) dr} \quad (1.12)$$

r, h_o が相互に独立である場合は、式(1.11),(1.12)に式(1.6)を代入することで式(1.13),(1.14)が求められる。

$$\begin{aligned} P(H_r \geq h_r) &= \int_0^\infty \int_{\rho(h_o, h_r)}^\infty g_1(r) g_2(h_o) dr dh_o \\ &= \int_0^\infty G_1(\rho(h_o, h_r)) g_2(h_o) dh_o = \int_0^\infty P_1(R \geq \rho(h_o, h_r)) p_2(h_o) \end{aligned} \quad (1.13)$$

$$\begin{aligned} P(H_r \geq h_r | h_{omax}) &= \frac{\int_{\rho(h_{omax}, h_r)}^\infty g_1(r) g_2(h_{omax}) dr}{\int_0^\infty g_1(r) g_2(h_{omax}) dr} = \int_{\rho(h_{omax}, h_r)}^\infty g_1(r) dr \\ &= G_1(\rho(h_{omax}, h_r)) = P_1(R \geq \rho(h_{omax}, h_r)) \end{aligned} \quad (1.14)$$

式(1.11)～(1.14)から、**図-参 1c** に示す河川水深の年超過確率曲線図に関して以下の特徴が読み取れる。

- ・ 横軸に用いる超過確率は、 h_o について条件付きとする場合（タイプ A）と条件を設けない場合（タイプ B）では、本文中に述べたように異なる式となる（式(1.11)と式(1.12)）。
- ・ r, h_o が相互に独立である場合は、 h_{omax} について条件付き超過確率の関数は、 r の超過確率の関数 G_I として与えられる（式(1.14)）。
- ・ 同じく独立の場合には、関数形 G_I は h_o によらず同一となることに留意すると、式(1.14)の条件付き h_{omax} を様々な値 h_o に置き換えても同一関数 G_I で**図-参 1c** に示す横軸 $P(R \geq r)$ を算定できるので、黒実線群で示すように任意の h_o に対する分布曲線群を「同一横軸を持つ」図として表すことができる。
- ・ 上記のようにして描いた分布曲線群に、**図-参 1c** に青線で示すようにそれぞれの h_o の生起確率 $p = p_2(h_o) = g_2(h_o) dh_o$ を割り当てると、式(1.13)の積分式内に表れる P_1 と p_2 を表示することができる。このように図化すると h_r, P_1, p_2 間の関係から各変数の関係性を俯瞰できる（例えば同一の横軸 P_1 すなわち r に対する h_r の範囲など）ため便利である。
- ・ **図-参 1c** の分布曲線ごとに任意の縦軸 h_r 値に対応する P_1 と p_2 の値を横軸および青線の確率密度分布から読み取り、それらの積をとって積算すると、これは式(1.13)右辺の積分に相

当するので、 $P(H_r \geq h_r)$ が算定できることが分かる。この値を横軸に与えると、同図に赤線・赤字で併記したように $P(H_r \geq h_r)$ を図示することができる。ただしこの場合、横軸の超過関数はこれまで見てきた条件付き超過確率（黒字）と異なることに留意されたい。

- ・ 図-参 1c)は、上記のように情報理解のうえで利便性があるため、独立ではない場合にも用いられることがある。その場合、式(1.11)右辺の被積分項は式(1.1),(1.3)より $f(r, h_o)drdh_o = p(r, h_o) = p(r)p(h_o|r)$ である*)ので、図-参 1c)の横軸は $p(r)$ から算定される超過確率 $P(R \geq r)$ 、各曲線に付記した確率は青線で示す生起確率 $p = p(h_o|r)$ から与えられる。このように独立の場合と類似した図化が可能だが、 $P(H_r \geq h_r)$ の算定には、上記した図を活用した算定は適用できない。式(1.11)に立ち返って $p(r)p(h_o|r)$ の積分として算定することとなる。

$$*): p(r) = \int_0^\infty f(r, h_o)dh_o, p(h_o|r) = \frac{f(r, h_o)}{\int_0^\infty f(r, h_o)dh_o}$$

説明のために縦軸に河川水位を用いたが、上記は他の縦軸、例えば氾濫水深（ハザード曲線図）や浸水被害（リスク曲線図）にも同様に当てはまる。これら曲線図は、変数が独立であるか、また図化する上での情報の読み取りやすさの工夫の仕方から、厳密にみると上記したような差異がある。第2章以降では、これに細かく言及することはないが、記載内容について深く吟味される場合には十分に留意されたい。

参考2) 一雨期間内での r_p, r の同時生起確率

氾濫水深 h_f は、内水河川の小流域内の短時間豪雨雨量 r_p と排水先となる河川流域の総雨量 r と図-参 2a)に示す関係があり、この関係が河口水深 h_o および降雨時空間分布 d_i によって変化する、という関数が成り立つと仮定する。なお氾濫の特性として、ひとたび外水氾濫が生じるとその h_f は内水氾濫のみによる値に比べてかなり大きく、そのため外水氾濫が生じると不連続的に h_f が急増する場合を取り扱うこととする。このような特性をもつ例として、高さのある河川堤防により防護されている低平な堤内が挙げられる。

また、 r_p, r, h_o, d_i がそれぞれ確率事象であるが、以下では式の導出の本質を損なわずに式の導出を簡略化するため、 h_o, d_i は独立と仮定する。生起確率 p は式(1.15)により与えられるとする。

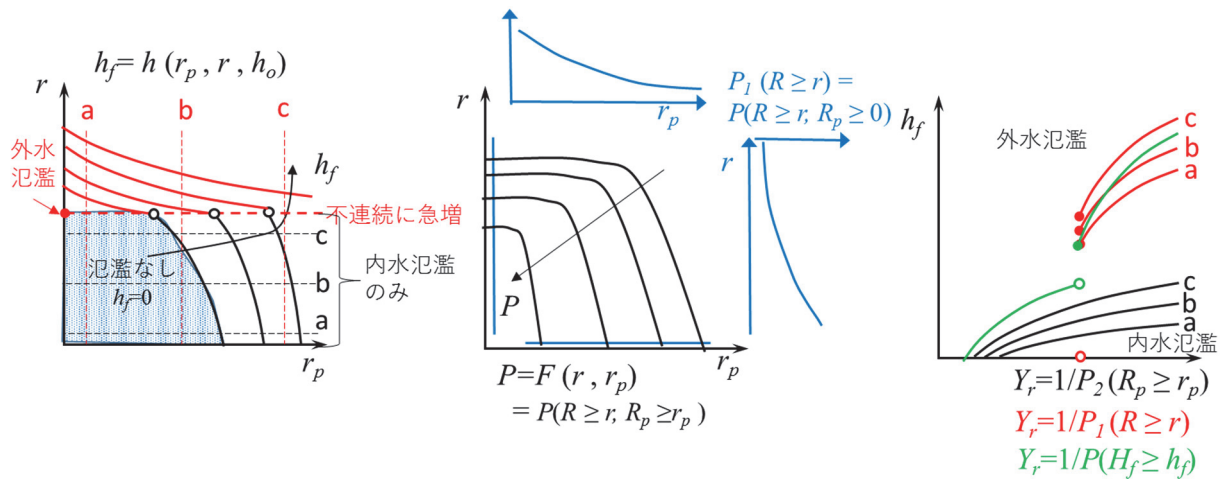
$$p(r_p, r, h_o, d_i) = f(r_p, r)g_2(h_o)p(d_i)dr_pdrdh_o$$

$$D \ni (d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_{max}) \quad (1.15)$$

確率密度関数 f を積分して得られる超過確率 P （関数 F ）は図-参 2b)に示すような分布、すなわち r が大きくなると小さな r_p の生起確率は相対的に小さくなるという分布をもつと仮定する。

図-参 2a)に併記した黒破線 a,b,c は、内水氾濫のみが生じる r の範囲内にあり、この破線に沿って h_f と r_p の関係が得られる。また、参考1)の最後の「・」に記載した考え方をここでも適用し、 r_p を超過確率 $P_2(R_p \geq r_p) \equiv P(R \geq 0, R_p \geq r_p)$ に換算することで、 h_f と P_2 の関係が黒破線 a,b,c ごとに得られる。これを図化したのが図-参 2c)の黒実線である。同様に赤破線 a,b,c について外水氾濫が生じる範囲における h_f と $P_1(R \geq r) \equiv P(R \geq r, R_p \geq 0)$ の関係を求め、図-参 2c)に赤実線で併記した。これらは、内水と外水に要因を分けて検討する場合に相当する。

これらに対して、内水・外水の統合確率評価により得られる h_f と $P(H_f \geq h_f)$ の関係を図-参 2c)に緑実線で併記した。緑実線は、図-参 2a)において任意の h_f 以上となる領域 (r, r_p) を求め、それと同一の領域に対して $f(r_p, r)dr_pdr$ を積分することで得られる。 h_o, d_i をそれらが定義される値域内で変えると、それぞれの組み合わせに応じた緑実線が得られる。その組み合わせの生起確率 $g_2(h_o)p(d_i)dh_o$ を各緑実線に乗じて積分することで、 r_p, r, h_o, d_i の全てを考慮した統合確率評価が算定できる。



a) 氾濫水深 h_f と本川・内水河川雨量 r, r_p の関係 b) r, r_p の 2 変数生起確率密度 c) 氾濫水深 h_f と年超過確率 P の関係

図-参2 同時生起確率を考慮した確率氾濫水深に関する概念図

2. 2 資産被害低減対策行動を促す統合的浸水ハザード評価手法

2. 2. 1 新たな統合的浸水ハザード評価手法開発の必要性

河川・下水道等の水害防止・低減施設の設計規模を超える豪雨等が頻発する現状において、社会全体で水害リスクを低減していくことが重要である。

このような社会全体での水害リスク低減施策を推進していく際には、想定する全ての規模の豪雨・洪水外力に対して当該施策による完全なる被害防止は見込めないことを前提とせざるを得ないことを踏まえ、水害被害の発生確率と被害の大きさとの関係を表現する水害リスクを指標として活用し、水害リスク情報の社会での共有を通じた水害被害防止・低減対策の推進を図ることが有効ではないかと考えられる。

現在、水害リスク情報の検討に必要な浸水ハザード情報として、洪水浸水想定区域（水防法第 14 条）、雨水出水浸水想定区域（同 14 条の 2）、高潮浸水想定区域（同 14 条の 3）の各図、これら等に基づく各自治体のハザードマップ、浸水ナビ（地点別浸水シミュレーション検索システム <http://suiboumap.gsi.go.jp/ShinsuiMap/Map/>）等が提供されているが、水害被害防止・低減対策の推進においてこれらの浸水ハザード情報を活用する際の主な課題を挙げると次のようになる。

(1)洪水浸水想定区域図の場合、想定最大規模（確率年が数百年を優に超える規模）等の洪水を対象とした浸水域・深であり、平均寿命、建物が存続する平均年数等を踏まえると、実感しにくい（使いにくい）浸水ハザード情報と考えられる。

(2)河川・下水道等の防災施設ごとの安全度（年超過確率・その逆数としての確率年）は比較的多くの場合に情報提供されているものの、建物立地地点等の場所ごとの浸水ハザード情報は国管理の大河川の洪水浸水想定区域図等に限られている。

(3)国管理河川、都道府県管理河川、下水道、高潮・津波等、所管・災害原因別に浸水ハザード情報（地図）が提供されており、これらを統合した場所ごとの浸水ハザード情報は提供されておらず、場所ごとの浸水ハザードの高低がわかりにくく、対策の優先順位の検討、浸水に脆弱な施設の立地場所の選定等において浸水ハザード情報を考慮しにくい。

(4)現行の浸水ハザード情報には主に①過去の浸水実績に基づくもの②仮想降雨に基づくシミュレーション結果に基づくものがあるが、前者は説得力はあるものの、その後河川・下水道施設整備等が進められた場合「もう大丈夫」と無視されてしまう可能性があり、同施設の整備後の状況を表現できない難点があると考えられる。また、経年的な浸水実績等に基づき浸水ハザード情報の説得力を継続的に維持・高めていくことが重要である。

なお、本節では以下「浸水ハザード評価手法」の開発について述べているが、当該浸水ハザード情報と浸水深別被害額等の関係情報を掛け合わせることで、水害リスク情報を作成することができるものである。

2. 2. 2 統合的浸水ハザード評価手法開発方針

上述の課題を踏まえ、下記の方針で新たな統合的浸水ハザード評価手法を開発した。開発に当たっては、広く全国へ展開することが可能な手法であることを重視し、必要なデータの収集・分析が過大と考えられる手法は除外することとした。

- 1) 河川・下水道施設等の整備による地域の水害リスク低減対策の推進を前提としつつ、施設設計規模を超える規模の豪雨・洪水生起時の被害を低減するための具体的な水害被害防止・低減対策の検討を技術的に支援するため、確率年が比較的小さい規模の豪雨・洪水を含めた浸水ハザード情報を作成・提供する。(2. 2. 1の課題(1)に対応)
- 2) 建物立地地点等の場所ごとの浸水ハザード情報を作成・提供するため、対象地域の25mメッシュで浸水ハザード情報を作成・提供する。(同(2)に対応)
- 3) 大・中小河川、下水道、高潮を統合した浸水ハザードを作成・提供する。(同(3)に対応)
- 4) 場所ごとの浸水深に影響すると考えられる降雨量、河口水位、排水ポンプの運転状況等を変化させたシナリオを複数設定し、シナリオごとの浸水範囲・深をシミュレーションした結果を浸水ハザード情報として整理・図示することにより、今後実際に発生する豪雨時の降雨量、河口水位、排水ポンプの運転状況等のデータに基づき浸水ハザード情報の信頼性の向上を図りうるものとした。(同(4)に対応)

2. 2. 3 統合的浸水ハザード評価手法の概要

評価手法の手順を図2.2.1に示す。その要点について以下に説明する。

(1) 対象地域に応じた災害種類・外力の抽出・整理

水害リスク低減対策の推進に必要な浸水ハザード情報の作成・提供を行う地域の過去の災害履歴、地形・河道特性、資産分布等を踏まえ、着目すべき災害種類(外水氾濫、内水氾濫、高潮氾濫など)を抽出する。災害種類の抽出に当たっては、発生確率は稀であるが発生した場合に極めて甚大な被害が生じる災害、頻発しているものの1回当たりの被害規模は比較的小さいものなど、地域の実情、関心事、優先事項に応じて抽出するものとし、抽出する災害種類の数は1つに限定しないものとする。

抽出された災害種類ごとに、当該災害種類の規模に大きく影響する外力を選定・整理する。例えば、下水管網の雨水処理能力を超える規模の豪雨による浸水(内水氾濫)を災害種類とするのであれば、1時間降雨量、排水ポンプの運転に影響する排水先河川の水位等を選定し、大河川の氾濫による浸水(外水氾濫)を災害種類とするのであれば、流域平均〇日雨量(流域の流出特性に応じて選定)、河口水位等

を選定する。

(2) 年最大降雨事象等の抽出・整理

抽出された災害種類ごとに選定された降雨量等について、降雨の時空間分布等を設定するために、過去の年最大降雨の時空間分布データ等を収集・整理する。なお、下水管網の雨水処理能力を超える規模の豪雨については、排水区の面積と地上雨量計による計測データの存在状況を踏まえ、空間分布は均一と仮定しても差し支えないものとし、10分雨量による時間分布を考慮するものとした（10分雨量データが入手できない場合には時間均一降雨を仮定するものとした）。

また、河口水位については、過去の最高・最低潮位・潮位偏差について、洪水との同時生起も考慮しつつ収集・整理する。

さらに、排水ポンプ場、排水門等の操作規則等を収集・整理する。

(3) 確率規模別浸水深分布の算定手順

内外水統合的浸水ハザード評価手法の手順例を図2.2.1に示す（図中カッコ内のパターン数等の数値は本手法をモデル地区において試験適用した際の値を参考までに示したもの）。ここで、モデル地区とは一級河川国土交通大臣直轄管理区間の河口付近の氾濫ブロックを念頭に想定した面積約7.5km²の地区であり、当該一級河川の流域面積は約1,700km²、同基準地点上流の流域面積は約1,500km²、モデル地区に接する同河川区間延長は約9.4km、既往検討における計画降雨継続時間は2日である。

また、高潮による浸水深分布の算出手順を図2.2.2に示す。

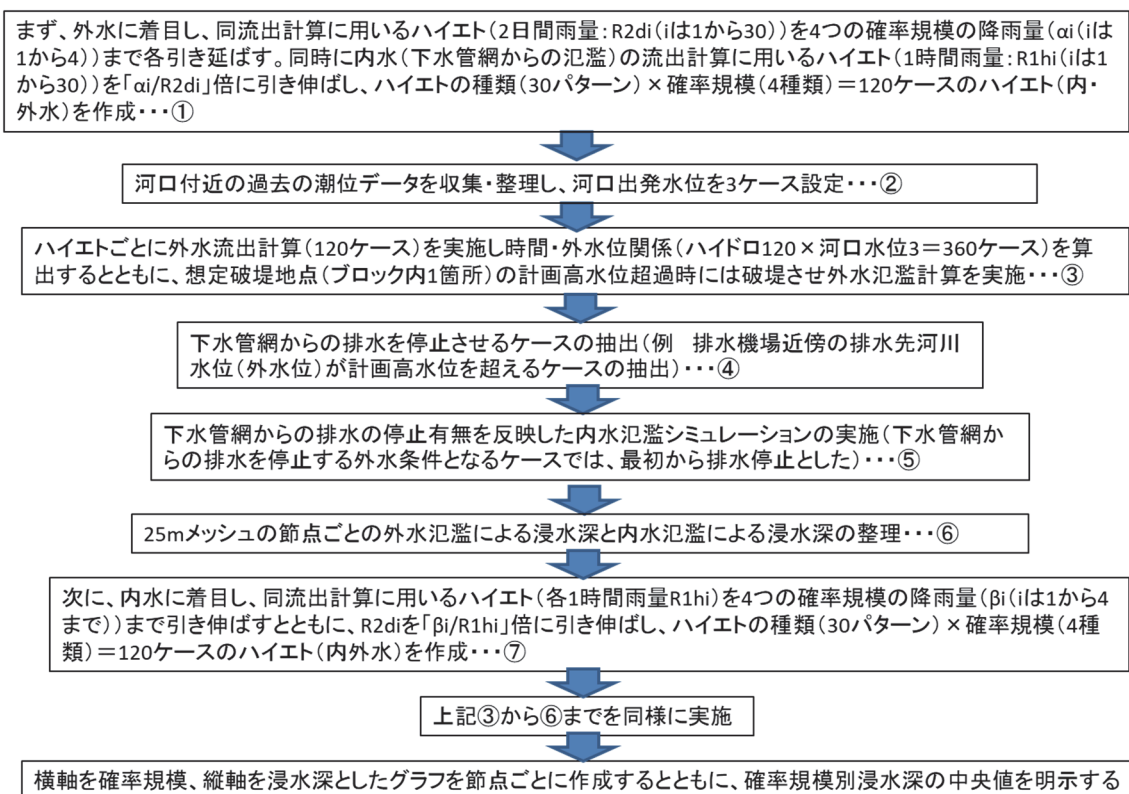


図2.2.1 統合的浸水ハザード算出手順例

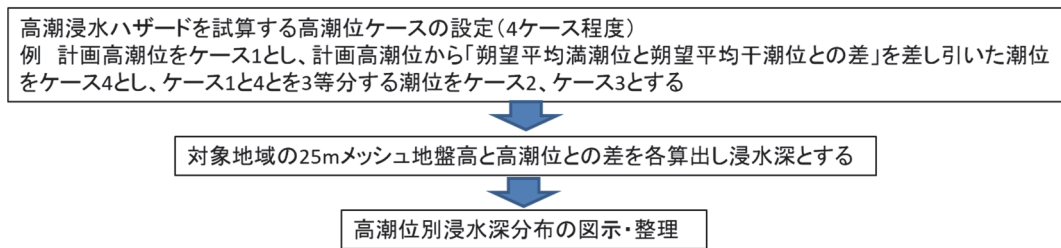


図2.2.2 高潮浸水深分布算出手順例

なお、本研究では、高潮については別途メッシュ別浸水深として考慮することとし、統合はしなかった。これは、高潮の潮位別再現期間の設定が困難であったためである。

2. 2. 4 統合的浸水ハザード評価例

以下に、モデル地区における統合的浸水ハザード情報試算例を示す。

本試算では外水氾濫計算は 25m メッシュの平面 2 次元不定流計算で行った。また、下水道からの氾濫計算（内水氾濫計算）は InfoWorks ICM による計算結果を外水氾濫計算と同じ 25m メッシュ値に換算した。具体的には、LP データによる地盤高情報から地表面を三角形の非構造メッシュに分割し、マンホールから流入出する水を地表面メッシュに与えて二次元の氾濫計算を行っている。

なお、2. 1 に示した同一のモデル地区で実施した内水氾濫計算結果（25m メッシュ浸水深）は、以下に示す本試算結果よりも大きい傾向にあった。この主たる要因は、2. 1 ではマンホール（立坑）における管内圧力水頭と地盤面との差として浸水深を算定する簡略化（2. 1. 3 参照）を行っている一方で、本試算では上記したように地表と下水道の水のやりとりを考慮した二次元氾濫計算を行っているためであると考えられる。

モデル地区の地盤高分布を図 2. 2. 3、試算手順を図 2. 2. 4 に示す。

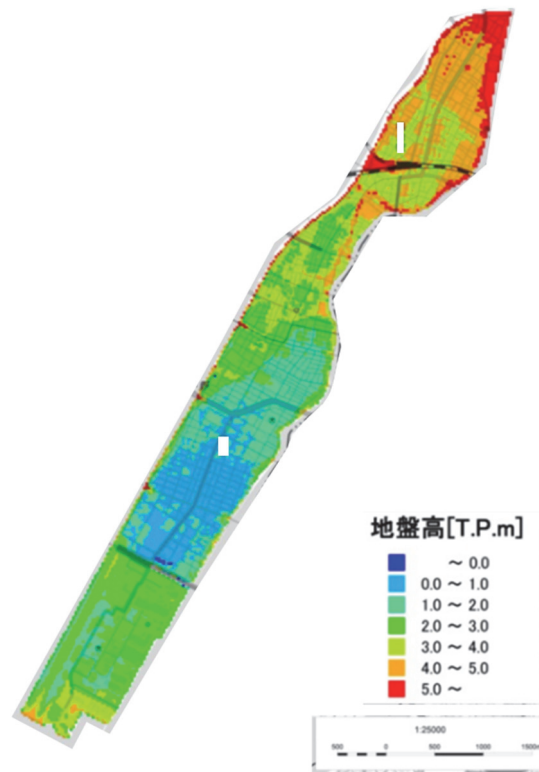
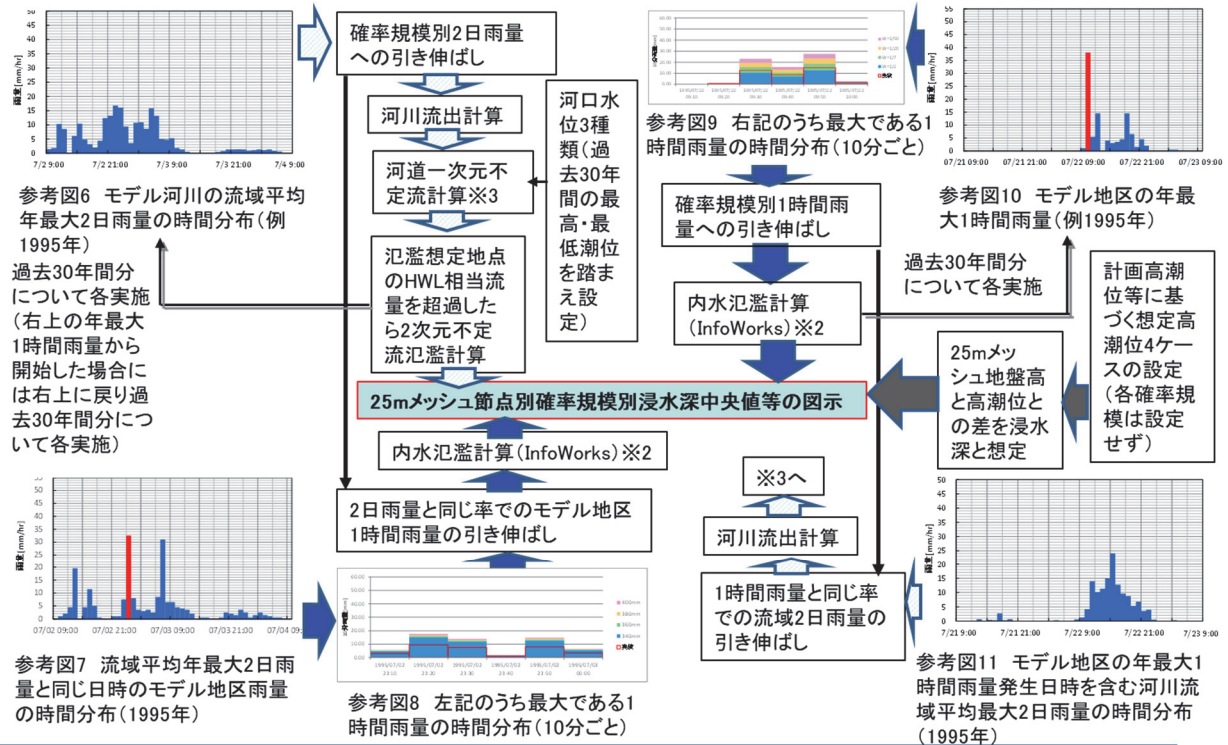


図 2.2.3 モデル地区地盤高分布



※1 モデル地区(面積約7.5km²)は国土交通大臣直轄管理区間を念頭に設定したモデル河川(流域面積約1,500km²)の河口近くの1氾濫ブロック(モデル区間に接するモデル河川延長約9.4km)に設定。
 ※2 排水機場近傍の河川流量(※3より)がHWL相当流量に達する場合機場運転停止条件で内水氾濫計算実施。

図 2.2.4 モデル地区での試算手順

試算例として、内外水を統合したメッシュ別浸水深分布（年超過確率 1/75 規模・河口出発水位中位）の結果を図 2.2.5 に示す。なお、同図中「最大値と最小値の平均」とは、数多くのシナリオに基づく浸水深評価をせずに簡便にシナリオ中央値に近い浸水深を求める手法を検討するために試算したものであるが、図 2.2.5(2) の「中央値」と「最大値と最小値の平均」との間には浸水深分布に明瞭な違いが認められるため、浸水深が最大値・最小値となりそうな浸水シナリオを最初から推定し、これら 2 シナリオのシミュレーション結果のみに基づき中央値を推定することは難しそうである。なお、後述の図 2.2.7 に例示するように、内水氾濫による節点ごとの浸水深分布は、最大値と最小値の差が小さい場合があるため、一定の条件を満たす場合には浸水深が最大値・最小値になりそうなシナリオを推定するなどしてシミュレーションを実施する、といったシナリオ数の削減ができそうであるが、引き続き研究が必要である。

また、高潮浸水深分布の試算例を図 2.2.6 に示す。

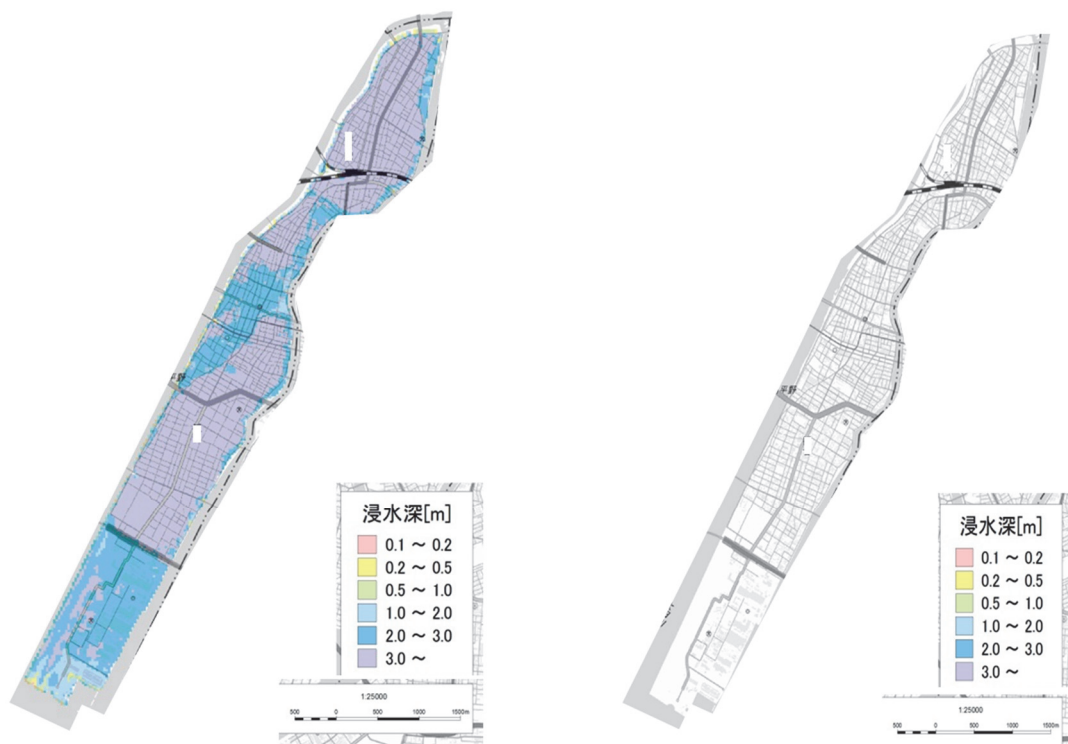


図 2.2.5(1) 年超過確率 1/75 規模降雨時の浸水深分布試算例（左：最大値 右：最小値）

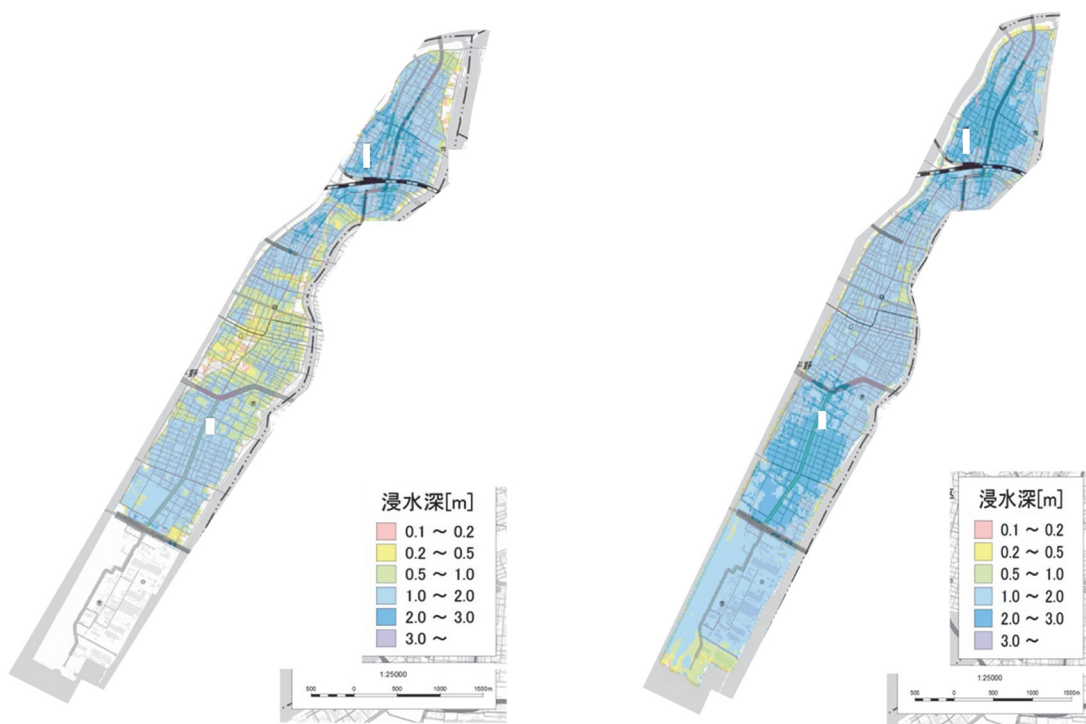


図 2.2.5(2) 年超過確率 1/75 規模降雨時の浸水深分布試算例（左：中央値、右：最大値・最小値の平均）

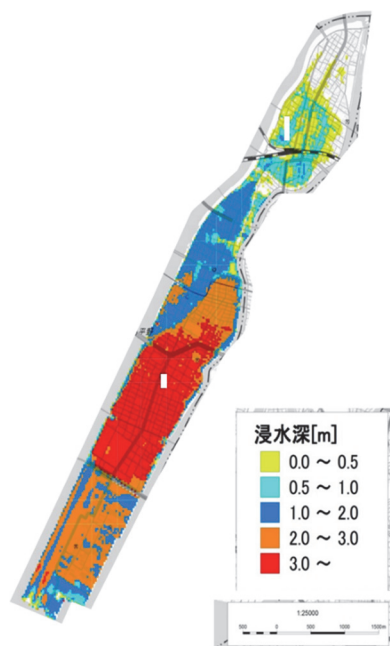


図 2.2.6 高潮浸水深分布試算例（計画高潮位）

節点ごとの浸水深分布の試算例を図 2.2.7 に示す。なお、確率規模別浸水深の中央値の表示に当たっては、内外水別々に表示している。図中水色線は浸水深の中央値を概略結んだ曲線である。

図 2.2.7 に示す浸水ハザード情報を利用した水害被害防止・低減対策の検討にあたっては、外水氾濫による浸水深が内水氾濫による浸水深を上回る確率規模においては、外水氾濫による浸水深を念頭に置

いた検討が妥当と考えられる（同図中外水による浸水深中央値が内水による浸水深中央値を上回る確率規模では外水による浸水深中央値についてのみ水色線を引いた）。

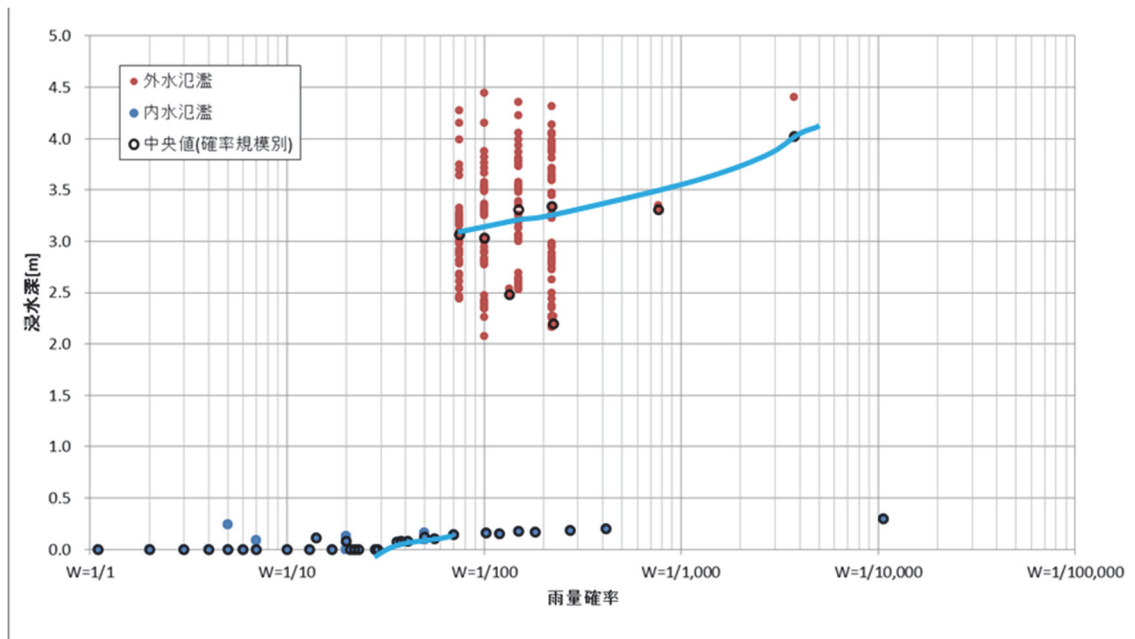


図 2.2.7(1) モデル地区のモデル商店②の近接節点のうちの南西節点（地盤高 3.42m）

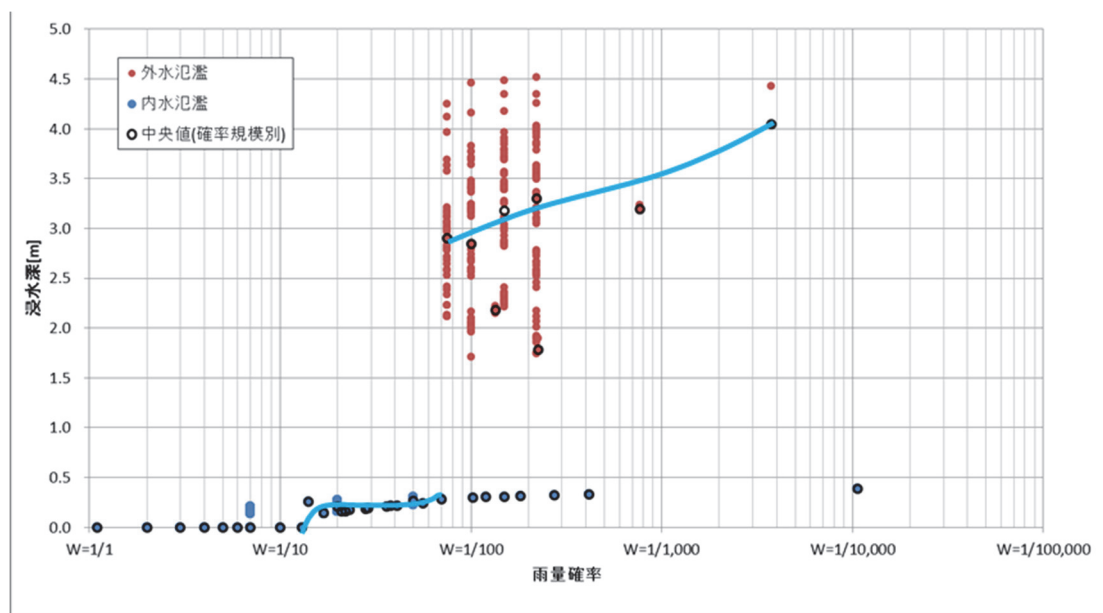


図 2.2.7(2) モデル地区のモデル住宅②から東へ約 75m 離れたメッシュ（地盤高 4.38m）

2. 2. 5 統合的浸水ハザード評価手法に関する考察

開発した統合的浸水ハザード評価手法の新規性について図 2.2.8、従来のハザードマップとの違いを図 2.2.9、統合的浸水ハザード情報活用を考え方を図 2.2.10 に示す。また、同手法の長短所については以下のとおり考えられる。

- ① 本研究で開発した手法は、図 2.2.11 のように、一定の降雨規模（横軸。内水であれば近傍の雨量観測所の 1 時間雨量等、外水であれば流域平均 2 日間雨量等）に応じた浸水深が降雨の時空間分布、潮位（河口出発水位）等により変化しうる幅を複数のシナリオを設定することにより概略想定し、これらの分布幅から、目的に応じた浸水ハザード情報を切り出すものである。例えば、避難場所・ルートの検討においては図 2.2.11 に水色で示す「試算上最大値」を検討することが望ましい浸水ハザード情報であり、個別建物の新・改築時のかさ上げについて検討する際には「試算上最大値」と共に同赤色で示す「試算上平均値」が適切な浸水ハザード情報と考えられる。
- ② このように、一定の降雨規模に応じた浸水深の起こりうる幅を踏まえた浸水ハザード情報を活用した水害被害防止・低減対策の検討・推進を行うことによる利点としては下記が考えられる。
 - (1) 同一規模の降雨事象が発生しても、浸水範囲・深が異なることがある（より小さくなることもある）ことが示されるため、浸水ハザード情報に対する信頼性が高まり、それに基づいて評価した水害リスク情報を踏まえた水害被害防止・低減対策の促進に寄与すると考えられる。
 - (2) 継続的に地域の降雨量と浸水範囲・深に関するデータを収集・蓄積し、浸水範囲・深評価手法・仮定条件の妥当性について検証していくことができる。また、検証結果に基づき評価手法・仮定条件の改善を行っていくことにより浸水ハザード情報の精度・信頼性の向上を継続的に図っていくことができる。（従来の単一シナリオ型では、例え実際の浸水範囲・深が浸水ハザード情報と異なっていたとしても、シナリオが異なるためなのか、評価手法・仮定条件に問題があるためなのか判然としない）

一方、欠点としては、

- (1) 情報が複雑で分かりにくい
- (2) 浸水ハザード情報作成により多くのデータが必要であるとともに計算等の手間が掛かる

ことが考えられる。

気候変動による将来の豪雨・洪水の外力変化を踏まえた浸水ハザード情報提供については、将来予測において現在の科学技術では避けることのできない不確実性が存在することを踏まえ、参考情報として提供することが考えられる。例えば、国総研資料第 749 号「気候変動適応策に関する研究（中間報告）」

（2013 年 8 月）の II-122～II-125 頁に降雨継続時間別の豪雨量倍率が全国 16 地域別（1 級水系の存在しない島嶼を除く）に例示されており、これらの倍率を現況の確率規模別降雨強度に掛け合わせるにより将来の同降雨強度の概略変化を想定し、それを用いた被害額推算を行うことで浸水ハザードの変化を評価し、参考情報として提供することが考えられる（2. 3、3. 3 参照）。

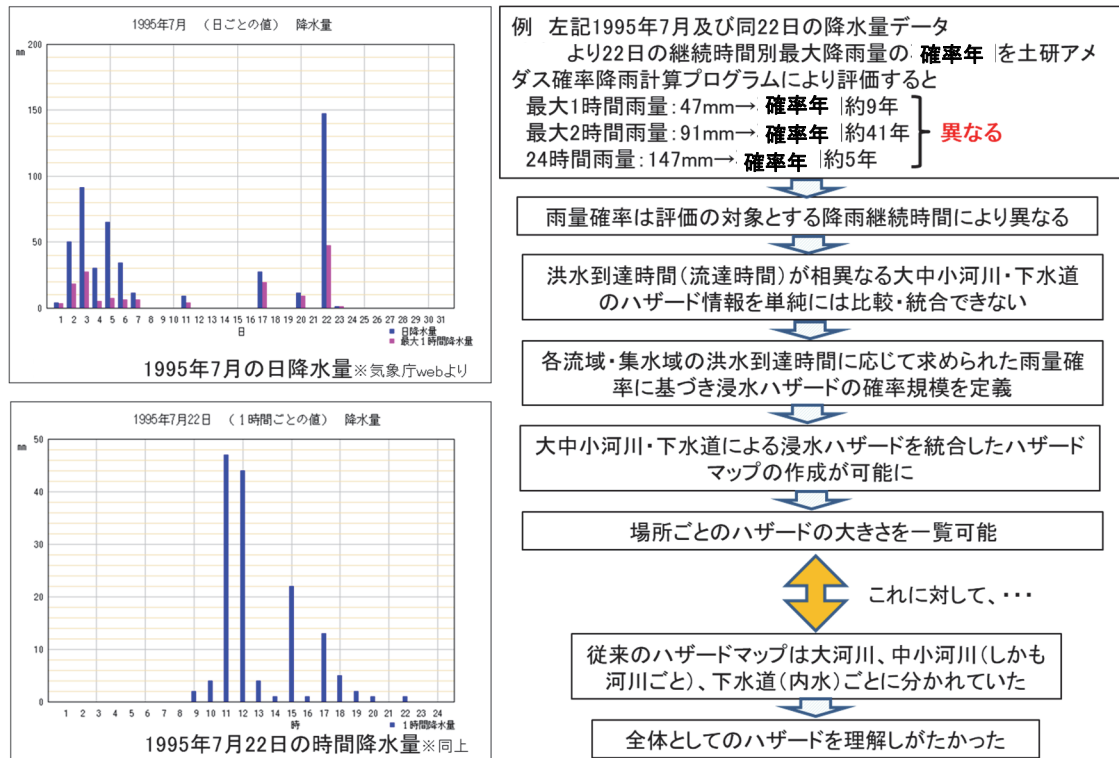


図 2.2.8 統合的浸水ハザード評価手法の新規性

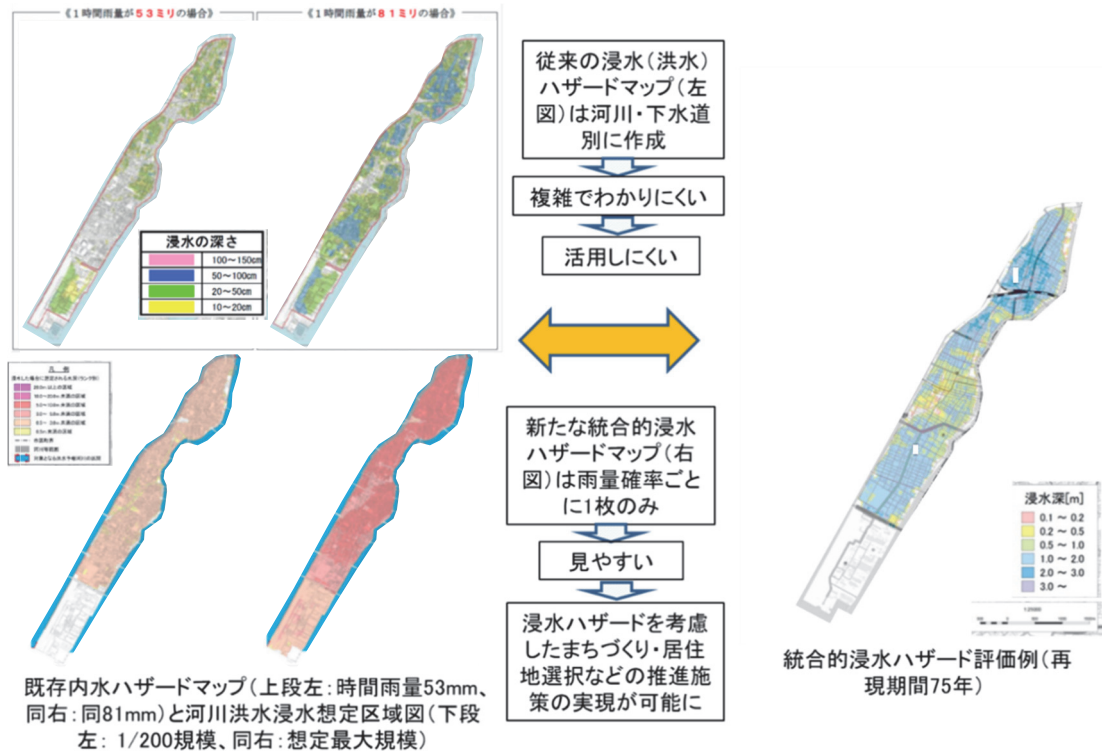


図 2.2.9 統合的浸水ハザード情報と従来のハザードマップとの違い

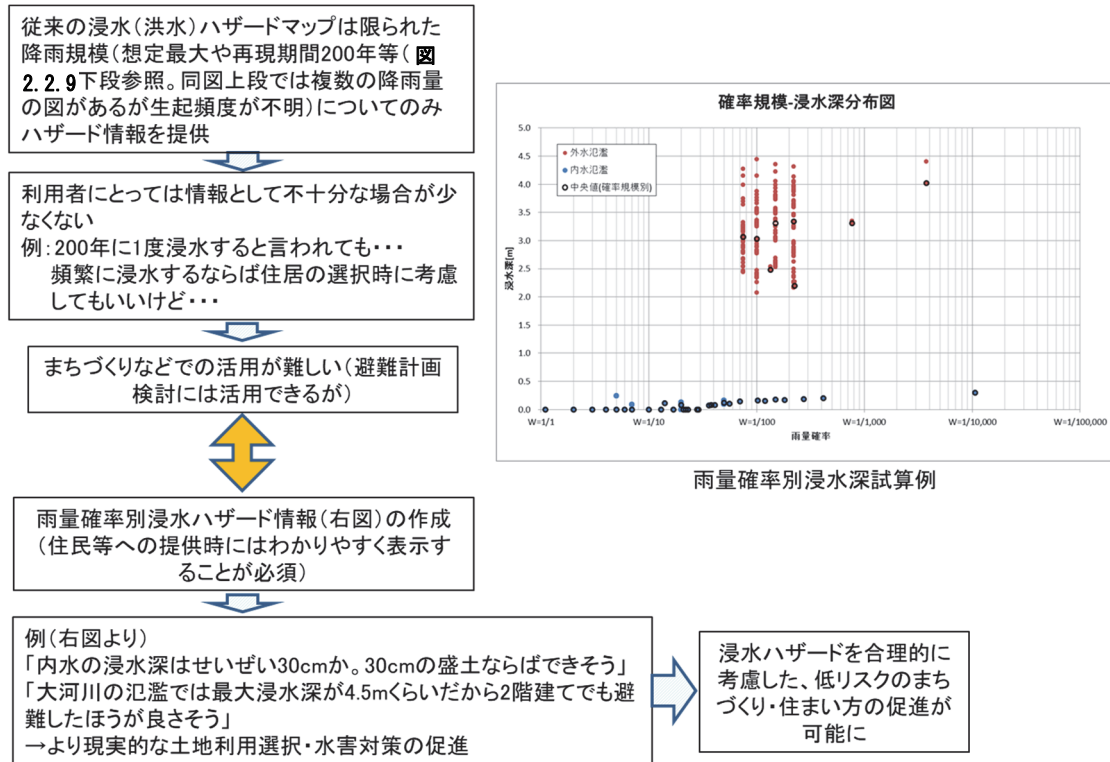


図 2.2.10 統合的浸水ハザード情報活用の考え方

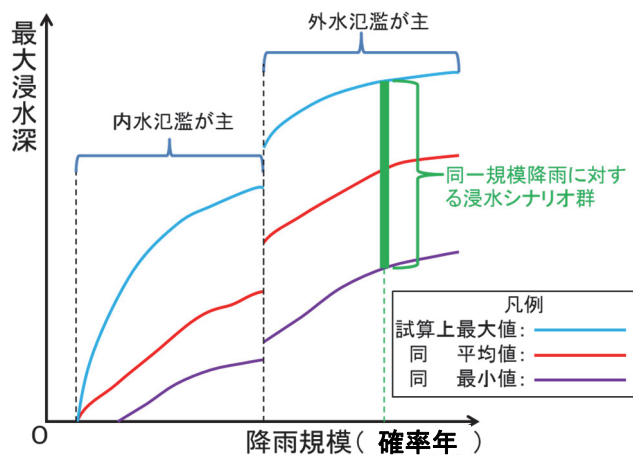


図 2.2.11 統合的浸水ハザード評価結果概念図

2.3 気候変動を考慮した統合的浸水ハザード評価

2.3.1 手法の概要

本節では気候変動による将来の豪雨・洪水の外力変化を踏まえた浸水ハザード情報の提供を目指し、現在気候の確率降雨量に対して気候変動影響を考慮した場合の将来における確率降雨量の評価手法について示す。

ここでは、気候変動の考慮にあたり、現在気候の降雨量に対して降雨継続時間別に(確率規模によらず)一定の降雨量の変化倍率をかけることで各確率規模に対する将来気候における降雨量を求める。その際、将来予測において比較的大きな不確実性を有することを前提として、気候変動予測の幅の上・中・

下位に相当する3種類の倍率を用いることとした（詳細については、気候変動適応研究本部（2013）を参照のこと）。

現在気候の各確率規模における降雨量（現在の降雨量－確率年関係）と地域別豪雨量倍率（図 2.3.1 に示す α ）の積をとることで引き延ばしを行い、将来気候における気候変動考慮後の確率規模別降雨量（気候変動後の降雨量－確率年関係）を導出する。上記2つの関係により、ある確率規模（図 2.3.1 の例では 50 年確率）の現在気候における降雨量について、同雨量の将来気候における確率年（図 2.3.1 の例では 35 年）を算出することが可能となる。

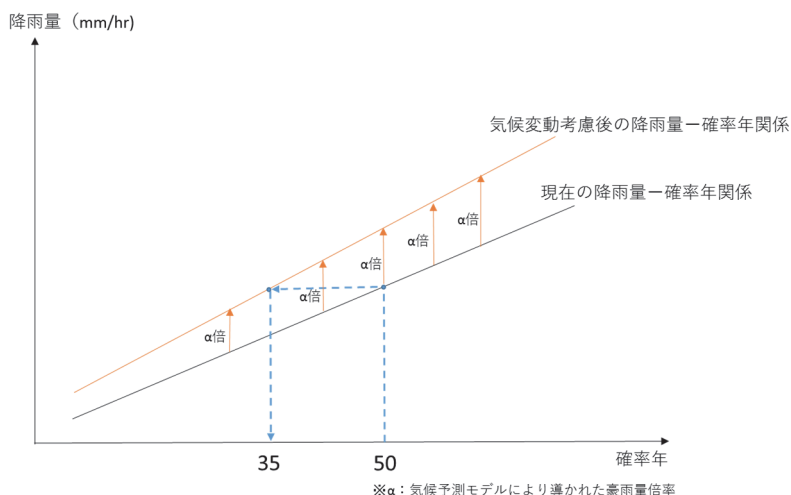


図 2.3.1 気候変動を考慮した確率年算出概念図

2. 3. 2 モデル地区における気候変動による降雨量の変化

2. 2にて統合的浸水ハザード評価の検討を行ったモデル地区を対象として、2. 3. 1にて示した現在気候の降雨量に対する気候変動考慮手法の適用を行う。まず、気候変動に伴う降雨継続時間別の地域別豪雨量倍率を現在気候における確率規模毎の降雨量に掛け合わせることで降雨量の引き延ばしを行う。ここで採用する降雨量の変化倍率は、国総研の試算（気候変動適応研究本部（2013））による地域別豪雨量倍率とする。国総研による地域別豪雨量倍率は、気候変動予測の不確実性を踏まえ複数のシナリオを想定することとし、将来気候における豪雨量倍率を上位値、中位値、下位値それぞれ導出されているが、本検討においては4つの気象予測シミュレーション結果（水平解像度 20km メッシュの 21 世紀気候変動予測革新プログラム GCM20 前期実験（以下、前期 GCM20）、同後期実験（以下、後期 GCM20）、また、前期 GCM20 及び後期 GCM20 をそれぞれ境界条件として実験された水平解像度 5km メッシュの前期 RCM5、後期 RCM5）による各豪雨量倍率を踏まえ、上位値は4つのシミュレーション結果の最大値、中位値は4つのシミュレーション結果の平均値、下位値は4つのシミュレーション結果の最小値として設定した。なお、2. 2にて統合的浸水ハザード評価を行うにあたり、内水については降雨継続時間 1 時間雨量、外水については 2 日間流域平均雨量（48 時間雨量）を用いていることを踏まえ、豪雨量倍率についても降雨継続時間 1 時間（表 2.3.1）と降雨継続時間 48 時間（表 2.3.2）をそれぞれ用いた。

表 2.3.1 モデル地区の属する地域における豪雨量倍率一覧表（降雨継続時間 1 時間）

	下位値	中位値	上位値
前期GCM20	1.21	1.25	1.29
後期GCM20	1.19	1.23	1.26
前期RCM5	0.97	0.98	0.99
後期RCM5	1.26	1.28	1.3
	0.97	1.19	1.3

表 2.3.2 モデル地区の属する地域における豪雨量倍率一覧表（降雨継続時間 48 時間）

	下位値	中位値	上位値
前期GCM20	1.12	1.15	1.18
後期GCM20	1.07	1.11	1.15
前期RCM5	0.99	1	1.02
後期RCM5	1.16	1.17	1.18
	0.99	1.11	1.18

降雨引き延ばしの対象とする現在気候における降雨および各豪雨量倍率により引き延ばしを行った降雨量一覧を、降雨継続時間 1 時間雨量について表 2.3.3、2 日間流域平均雨量（48 時間雨量）について表 2.3.4 に示す。

表 2.3.3 気候変動考慮後降雨量一覧（降雨継続時間 1 時間）

確率年 (年)	降雨量※ (mm/hr)	降雨量 (mm/hr) (将来気候)		
		上位	中位	下位
2	32.05	42	38	31
3	37.31	49	44	36
5	43.29	56	51	42
7	47.13	61	56	46
10	51.23	67	61	50
20	59.11	77	70	57
30	63.77	83	76	62
50	69.73	91	83	68
70	72.68	94	86	70
80	74.06	96	88	72
100	76.76	100	91	74
150	81.19	106	96	79
200	84.82	110	101	82

※実測値に基づく値

表 2.3.4 気候変動考慮後降雨量一覧（降雨継続時間 48 時間）

確率年 (年)	降雨量※ (mm/48hr)	降雨量(mm/48hr) (将来気候)		
		上位	中位	下位
2	150	177	166	149
5	200	236	222	198
10	243	287	269	241
30	279	329	309	276
40	293	346	324	290
50	320	378	354	317
75	340	401	377	337
100	360	425	399	356
150	380	448	421	376
200	395	466	437	391
220	400	472	443	396

※実測値に基づく値

表 2.3.3、表 2.3.4 に示した現在気候の降雨量と確率年の関係及び各豪雨量倍率による引き延ばし後の各降雨量と確率年の関係をそれぞれ図 2.3.2、図 2.3.3 に示す。また、一定期間内の日降水量等の短時間降水量は指数分布で表されることが多い（国土交通省、2014）ことから、モデル箇所における降雨量と確率年の関係は指数分布にて表されるものと仮定した上で、各プロットに対して指数近似により近似式を算出し、その結果を同図に点線で示した。

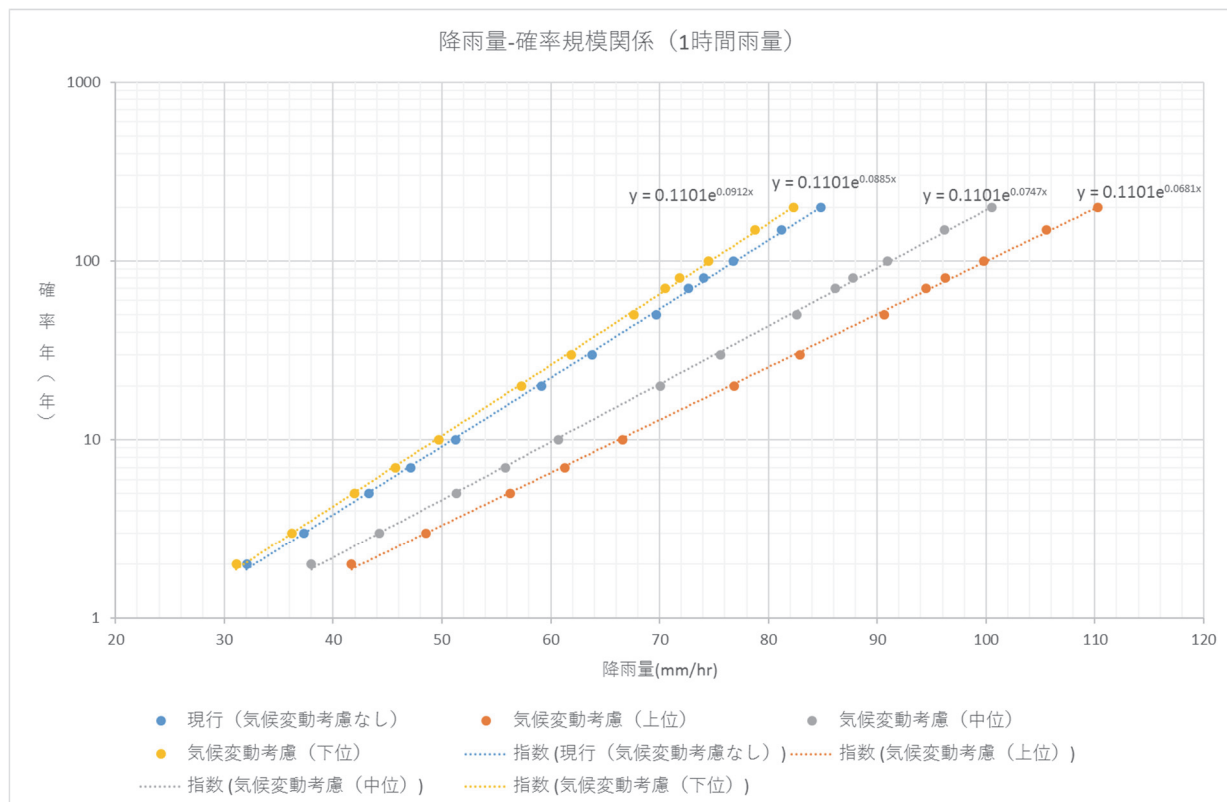


図 2.3.2 降雨量－確率年関係（降雨継続時間 1 時間）

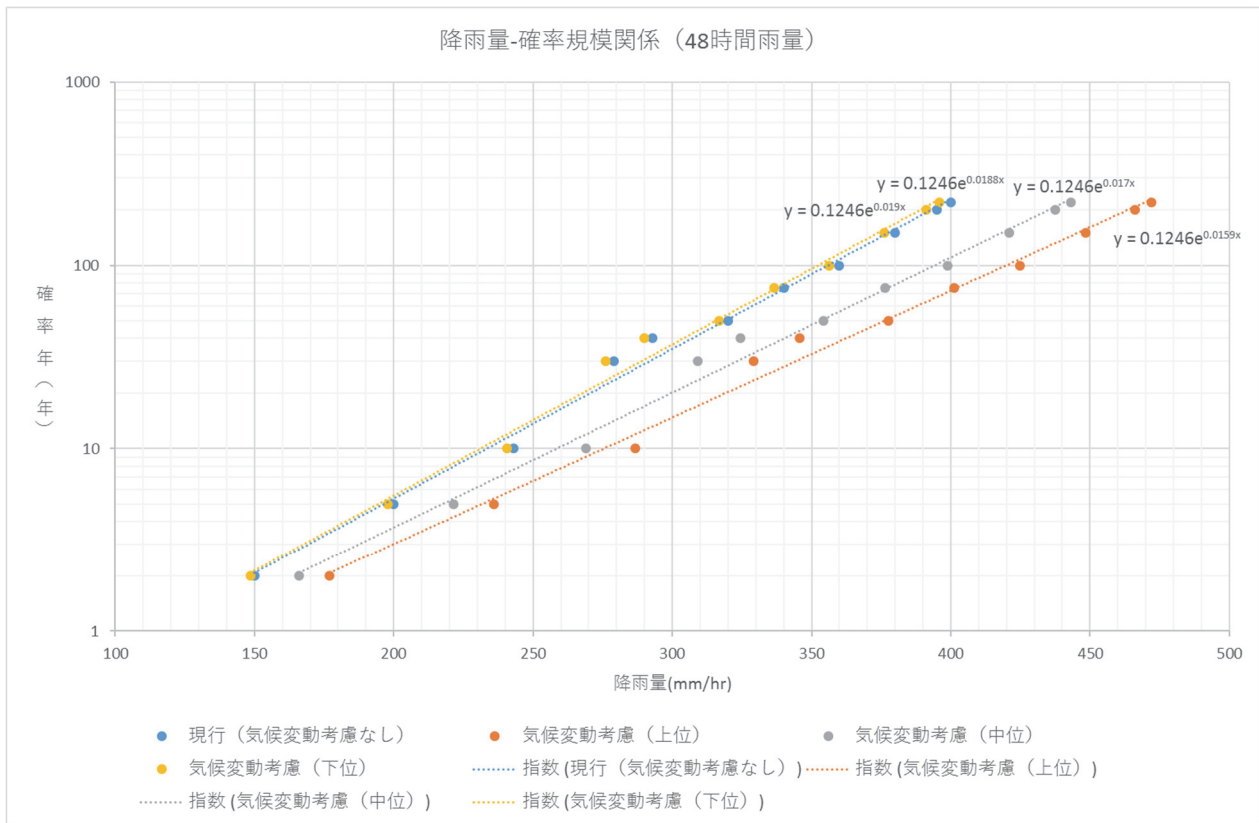


図 2.3.3 降雨量－確率年関係（降雨継続時間 48 時間）

各豪雨量倍率により導出した降雨量－確率年関係の近似式は以下の通り。

【降雨継続時間 1 時間】

- 現在気候の場合 $y = 0.1101 \times e^{0.0885x}$
- 将来気候（豪雨量倍率上位予測値）の場合 $y = 0.1101 \times e^{0.0681x}$
- 将来気候（豪雨量倍率中位予測値）の場合 $y = 0.1101 \times e^{0.0747x}$
- 将来気候（豪雨量倍率下位予測値）の場合 $y = 0.1101 \times e^{0.0912x}$

【降雨継続時間 48 時間】

- 現在気候の場合 $y = 0.1246 \times e^{0.0188x}$
- 将来気候（豪雨量倍率上位予測値）の場合 $y = 0.1246 \times e^{0.0159x}$
- 将来気候（豪雨量倍率中位予測値）の場合 $y = 0.1246 \times e^{0.017x}$
- 将来気候（豪雨量倍率下位予測値）の場合 $y = 0.1246 \times e^{0.019x}$

上記にて導出した気候変動考慮後の降雨量－確率年関係の近似式に基づき、将来気候における降雨量別確率年を算出した。算出結果を降雨継続時間別に表 2.3.5、表 2.3.6 に示す。

表 2.3.5 予測値別気候変動考慮後降雨確率年（降雨継続時間 1 時間）

降雨量	確率年	確率年（将来気候）		
		上位値	中位値	下位値
mm/hr	年	年	年	年
32.05	2	1	1	2
37.31	3	1	2	3
43.29	5	2	3	6
47.13	7	3	4	8
51.23	10	4	5	12
59.11	20	6	9	24
63.77	30	8	13	37
69.73	50	13	20	64
72.68	70	16	25	83
74.06	80	17	28	94
76.76	100	21	34	121
81.19	150	28	47	181
84.82	200	36	62	252

表 2.3.6 予測値別気候変動考慮後降雨確率年（降雨継続時間 48 時間）

降雨量	確率年	確率年（将来気候）		
		上位値	中位値	下位値
mm/48hr	年	年	年	年
150	2	1	2	2
200	5	3	4	6
243	10	6	8	13
279	30	11	14	25
293	40	13	18	33
320	50	20	29	54
340	75	28	40	80
360	100	38	57	116
380	150	52	80	170
395	200	67	103	226
400	220	72	112	249

2. 3. 3 気候変動による将来の豪雨・洪水の外力変化を踏まえた統合的浸水ハザード情報

2. 2にて導出した内外水の同時生起確率を統合的に評価したメッシュ別確率規模別浸水深分布及び2. 3. 2にて導出した気候変動を考慮した降雨量別確率年により、気候変動を考慮した将来気候における確率規模別浸水深を算出する。ここではモデル地区のモデル商店②の近接節点のうちの南西節点に位置するメッシュを対象とし、将来気候における豪雨量倍率のシミュレーション結果のうち中位値について試算を行うものとする。

2. 2にて導出した現在気候における外力に対する確率規模別浸水深分布図を図 2.3.4 に、また同

図について上記により試算した将来気候における確率規模別浸水深分布図を図 2.3.5 に示す。

現在気候における確率規模別の浸水深分布よりも将来気候における浸水深の方が図中左にシフトしていることが分かる。このことから、気候変動を考慮した場合、一定の浸水深が現在気候より高い確率で発生しうることがわかる。

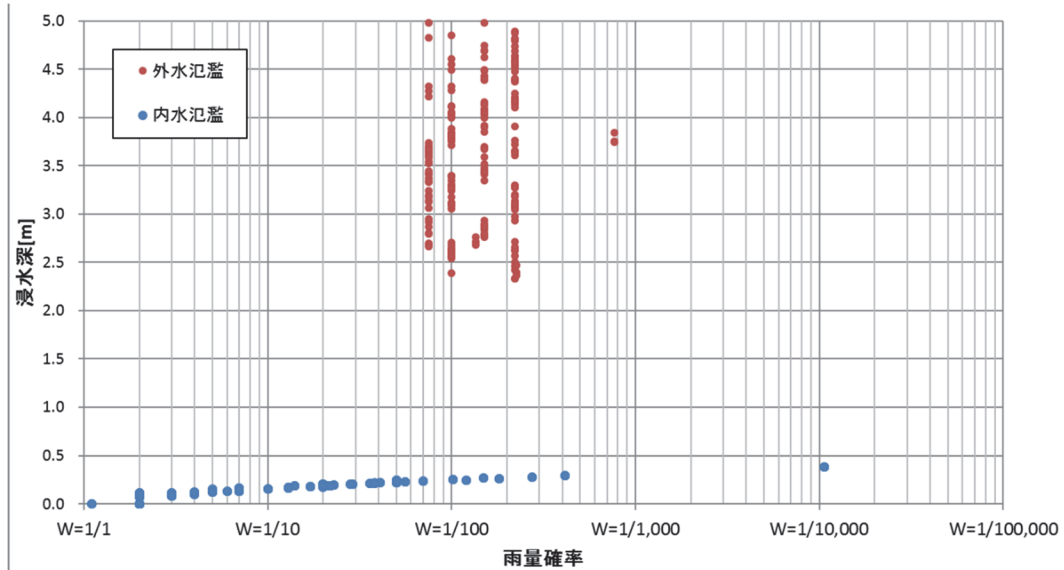


図 2.3.4 モデルメッシュにおける確率規模別浸水深分布（現在気候）

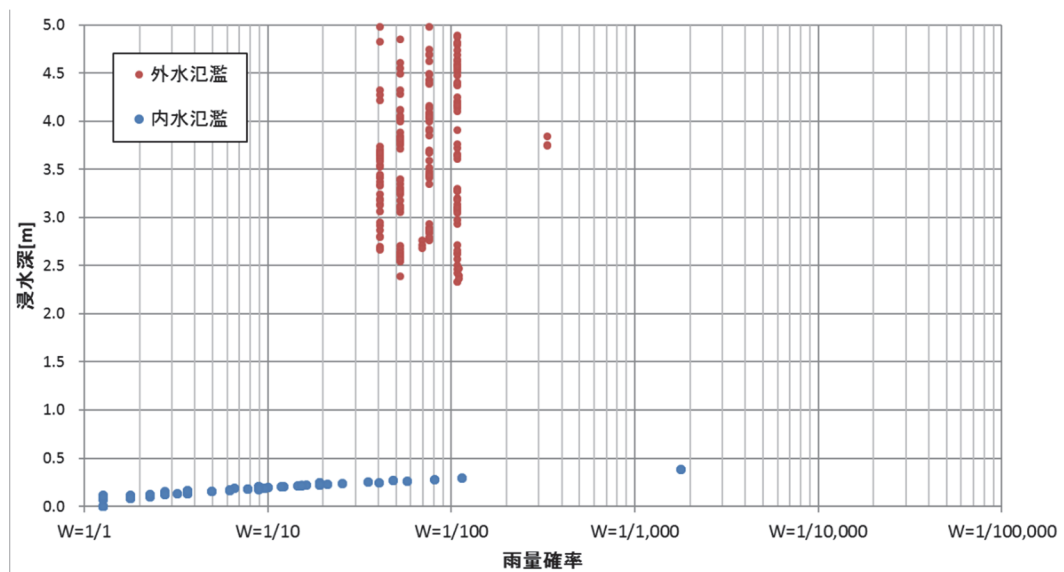


図 2.3.5 モデルメッシュにおける確率規模別浸水深分布（将来気候、中位値）

2. 4 まとめ

本章では、氾濫を内水と外水に分けずに統合的に扱い、浸水ハザードとしてある地点における浸水深とその年超過確率の関係を評価する手法について検討を加えた。検討対象とした 2 手法について、それぞれの主要な成果を以下にまとめて示す。

① 内水・外水の同時生起確率を考慮する手法

内水・外水に関わる雨量についてある閾値を超過する降雨イベントを抽出し、Freund の二変数指数分

布を適用した極値統計解析を行うことにより、両雨量の同時生起確率を評価できることを示した。一方、こうして得た雨量確率分布から「最大浸水深—確率年」図を作成するには大量に氾濫計算を行う必要があることが課題となった。ただし、氾濫水深が、内水氾濫では外水条件規定雨量によらず内水条件規定雨量のみの関数として表せ、同様な関係が外水でも認められる場合には、同時生起確率の検討を省略し、かつ既往の内水・外水それぞれについての氾濫解析結果を用いることで、近似的に統合的な評価が行えることを示した。

② 同一降雨量（確率規模）に対して生じうる浸水深の範囲（値域）を評価する方法

一定の降雨規模（内水であれば近傍の雨量観測所の1時間雨量等、外水であれば流域平均2日間雨量等）に応じた浸水深が、降雨の時空間分布、潮位（河口出発水位）等により変化しうる幅を複数のシナリオを設定することに算定する手法と、これらの分布幅から目的に応じた浸水ハザード情報を切り出す考え方を提示した。

両手法の技術的な観点からの特長（2. 1 参考2）や地域の浸水特性、目的に応じて使い分けることが望ましい。

第3章以降では、上記2手法による浸水ハザード試算結果および2. 3に示した気候変動による将来の降雨量増加の推算結果を用いて建物の浸水被害額などを算定している。なお、①の手法での内水氾濫試算例は②より大きめの値となっているが、その要因として、①の試算ではマンホール（立坑）における管内圧力水頭と地盤面との差として浸水深を算定する簡略化を行っていることや、河口水位が高い一条件のみとしたことなどが考えられる。

また、4. 1、4. 2では、異なる浸水ハザード（浸水深の超過確率分布）に対する水害リスク算定結果の変化について感度分析的に把握する目的で、上記①、②の手法による浸水深算定結果を与えて、浸水被害額の推算を行っている。

参考文献

- 北野利一、山地秀幸、川崎将生（2018）2変量G P分布による降水量の同時生起頻度の推定法・数学的なアイデアと現実データの接続 -, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.74, No.4, pp.I_319-I_324.
- 栗田秀明、岡田耕、神田徹、端野道夫（2000）都市河川における高潮・降雨の同時生起確率と内水排除計画への適用, 水工学論文集, 第44巻.
- 国土交通省 水管理・国土保全局 国土技術政策総合研究所 河川研究部（2015）洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第4版）, http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/pdf/manual_kouzuishinsui_507.pdf.
- 国土交通省 水管理・国土保全局：地点別浸水シミュレーション検索システム <http://suiboumap.gsi.go.jp/ShinsuiMap/Map/>
- 国土交通省 都市・地域整備局下水道部（2009）内水ハザードマップ作成の手引き（案）, <http://www.mlit.go.jp/common/000037234.pdf>.
- 国土交通省 水管理・国土保全局（2014）国土交通省河川砂防技術基準調査編, http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/chousa/pdf/00hyoushi.pdf.
- 国土交通省 国土技術政策総合研究所 気候変動適応研究本部（2013）気候変動適応策に関する研究（中間報告）, 国総研資料 No.749.
- 高橋倫也、志村隆彰（2016）極値統計学, 近代科学社.
- 西岡昌秋、宝馨（2002）季節性を持つ水文時系列に基づく PDS 法と AMS 法の比較, 水文・水資源学会誌, 第15巻.