

12. 気候変動を考慮した全国主要河川下流域における洪水氾濫リスクの将来予測

塙 尚幸¹・横木 裕宗^{2*}・桑原 祐史³・三村 信男²

¹五洋建設株式会社 北陸支店 (〒950-8501新潟県中央区東大通2-5-1 KDX新潟ビル5F)

²茨城大学 広域水圏環境科学教育研究センター (〒316-8511 日立市成沢町4-12-1)

³茨城大学 工学部都市システム工学科 (〒316-8511 日立市成沢町4-12-1)

*E-mail: yokoki@mx.ibaraki.ac.jp

気候変動に伴い、今後大雨の頻度の増加や海面上昇が起こることが予測されている。これにより、洪水氾濫リスクの増加が懸念されている。そこで、本研究では2次元不定流モデルを用いて洪水氾濫解析をおこなった。将来流量の推定には気候シナリオの出力と応答関数法を用い、極値統計解析により、100年確率の洪水流量を推定した。これを、選定した11河川に適用したところ、ほぼ全ての流域で将来的に洪水リスクが増加することが明らかとなった。更に、洪水流量の推定誤差の少ない河川を対象に氾濫解析をおこなったところ、特に荒川、筑後川流域において将来における洪水氾濫リスクの増加が顕著であることが明らかとなった。

Key Words : climate change, sea-level rise, river discharge, river flood, inundation

1. 序 論

近年、気候変動に伴う異常気象の発生が世界中で問題となっている。IPCCの第4次評価報告書でも、将来にわたって気温や海面は上昇することが示された¹⁾。また今後、大雨の頻度の増加や熱帯性低気圧の強大化の可能性が高いという予測が示された。このような現象は、河川流量を増加させ、洪水を引き起こす恐れがある。また、日本には急峻な河川が多く、下流域には大都市が存在することが多い。そのため洪水氾濫リスクを予測することには大変意義がある。

そこで本研究では、対象河川を選定し、それぞれの河川流域における雨量と流量の観測値²⁾をもとに応答解析をおこない、それらの応答特性を明らかにした。また、気候統一シナリオ第2版³⁾を用いて将来流量を算出した。その後、それらの極値統計解析をおこなうことによって100年確率洪水流量を算出した。こうして得られた現在と将来の洪水流量をそれぞれ用いて氾濫解析をおこなった。このようにして、本研究では主要な河川下流域の将来の洪水氾濫リスクを推定することを目的とした。

本研究では、気候変動に伴う降雨の変化が氾濫リスクにどう反映されるのかに着目した。したがって、対象河

川によっては河川計画に用いる降雨・流量の再現期間が異なるが、本研究では一律に100年として解析をおこなった。

2. 研究対象

本研究では、解析対象河川として、石狩川、久慈川、那珂川、利根川、荒川、信濃川、天竜川、木曽川、淀川、吉野川、筑後川の11水系を選定した(表-1)。選定に際しては、河川延長や流域面積を考慮するとともに地域を代表する河川であることや、下流域の平野部に都市が広がっていることなどを考慮した。

なお、後述するように応答解析、極値統計解析の結果を考慮して、氾濫解析は久慈川、那珂川、荒川、吉野川および筑後川の5河川のみとした。

3. 線形応答解析

本研究では、将来の降水量から洪水量を推定するために線形応答解析を用いた。一般の水文学の線形応答解析

表-1 解析対象の水系名, 流量観測所, 雨量観測所一覧

水系名	流量観測所名	雨量観測所名
石狩川水系	石狩大橋	月形, 清幌, 西越, 深川, 松山
那珂川水系	野口	板室, 鷺子, 矢板, 下塩原, 大田原, 高林
久慈川水系	山方	大子, 棚倉
利根川水系	布川	沼田, 中之条, 三ノ倉, 下仁田, 神津下, 万湯, 足利, 作原, 草久, 真岡
荒川水系	大芦橋, 菅間	小鹿野, 小川, 三峰, 名栗
信濃川水系	小千谷	北牧, 長久保新町, 鹿教湯, 賛川, 鬼無里, 小赤沢, 湯沢, 上条, 大湯, 明神
天竜川水系	鹿島	伊那里, 大鹿, 大野, 三沢, 竜山, 鈴ヶ平
木曽川水系	犬山	胡桃島, 湯屋, 小川, 三川
淀川水系	枚方	尾山2, 雲ヶ畑
吉野川水系	岩津	大北川, 西峰, 谷道, 宮石, 半田
筑後川水系	瀬ノ下	杖立, 鯛生, 森, 横畑, 原田

では降水量 $r(t)$ と流出量 $y(t)$ の関係に式(1)のような線形関係が成り立つと考えられる⁴⁾。

$$y(t) = \int_0^{\infty} h(\tau)r(t-\tau)d\tau \quad (1)$$

ここで, $h(\tau)$ は線形応答関数, τ は現在時刻を原点として過去にさかのぼる時間である。応答関数を求めることにより, 雨量から流出量を算出することが可能となる。ただし本研究では, 流出量の代わりに流量を出力値として設定した。線形応答関数の同定には, 積分変換法の中のフーリエ変換法を用いた。算出の過程は, 神田・藤田⁴⁾を参考にした。式(1)をフーリエ変換すると式(2)となる。

$$Y(\omega) = H(\omega)R(\omega) \quad (2)$$

ここで, $Y(\omega)$, $H(\omega)$, $R(\omega)$ は, それぞれ $y(t)$, $h(t)$, $r(t)$ のフーリエ変換関数である。

解析は, 表-1 に示すような各流域の流量観測所 1 か所とそれより上流側の複数の雨量観測所の日流量・日雨量データを用い, 1981 年~2000 年までの 20 年間を対象におこなった。求めた各年の応答関数には, 経年変化が見られなかったため, 20 年分の平均をとった。その後, 平均応答関数と観測雨量の畳込み積分によって得た計算流量と観測流量の上位 30% 平均の相対誤差が 1% 以内となるように倍率による調整をおこなった。

なお, 流域によっては日流量や日雨量に欠測の多い年があった。このため, 天竜川では 1998 年を, 淀川では 1995, 96 年を, 吉野川では 1999, 2000 年をそれぞれ解

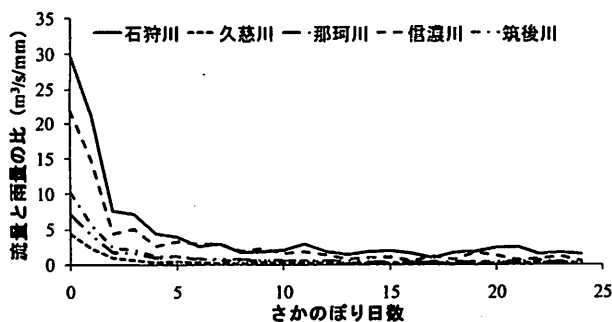


図-1 応答関数の比較

析対象期間から除外した。

また, 石狩川, 信濃川流域では春先に雪融け水による河川流量の増加が確認された。本研究では, 降水量と河川流量の応答を考えているため, 降雨によらない河川流量の増加は考慮することができない。よって, 両流域においては, 春先の時期を解析期間から除外することとした。

解析によって得られた応答関数の一部を図-1 に示した。図より, 流域面積が広く, 流量も多い石狩川や信濃川ほど応答関数も大きく, 流量の少ない久慈川は応答関数が小さいことが確認できた。本研究では, これらの応答関数と気候シナリオデータの日雨量を用いて, 将来流量を算出した。気候シナリオデータは観測雨量データと一致しないが, 本研究では, 将来の降雨量変化を系統的に調べるために, 雨量観測点の座標における気候シナリオデータの日雨量をそのまま用いて解析をおこなった。

4. 極値統計解析

確率統計量の推定をおこなう方法として極値統計解析がある。極大値のデータセットを用いて, 確率分布関数を推定することによって, 再現期間 (リターンピリオド) の推定が可能となる⁹⁾。

確率統計量の推定においては, 推定結果が当てはめる分布関数に依存する。本研究では, グンベル(Gumbel)分布, 一般化極値(GEV)分布, 対数正規(LN3)分布の 3 つとした。分布関数の推定には, Gumbel 分布と GEV 分布は L 積率法を, LN3 分布は積率法を用いた。また, 分布関数の適合度の評価には標準最小二乗基準(SLSC)を, 計算結果の安定性の評価には jackknife 推定法を用いた。

解析結果の一部を表-2 に示した。表中の観測値とは, 1981~2000 年の観測流量から求めた値である。また, 推定値, 推定誤差とは jackknife 法によって求めた値である。本研究では, 安定度のより高い jackknife 推定値を 100 年

表 - 2 極値統計解析の結果

(単位: m ³ /s)				
	観測値	1981~2000年	2031~2050年	2081~2100年
石狩川	7958	5028	6561	8017
	2299	545	676	999
久慈川	1558	1708	1606	1851
	313	292	169	141
那珂川	3303	2750	2555	3526
	696	312	330	370
利根川	8861	9815	9358	13130
	1176	1432	830	2028
荒川	3506	5387	4130	6576
	550	931	332	990
信濃川	10357	5544	4412	8727
	2093	785	556	1470
天竜川	7766	5195	5045	5195
	758	443	443	579
木曽川	6343	5240	6955	7925
	396	485	999	1160
淀川	5568	6828	5204	8432
	796	1137	701	1472
吉野川	10856	6171	5237	6568
	1965	767	451	830
筑後川	4450	3606	3791	5037
	569	620	399	605

(上: 推定値, 下: 推定誤差)

確率洪水流量として採用することとした。表より、観測値と気候シナリオ（1981~2000年）の結果に、河川によっては20~50%の開きがあることが確認された。これは、気候シナリオデータが現在の降水量を十分に再現できていないことが原因として考えられる。

次に気候シナリオの3時点での比較をおこなった。変化の仕方は3種類に分類できた。石狩川、木曽川、筑後川流域では現在と比較して2050年頃には増加し、2100年頃には更に増加している。天竜川流域では、全期間を通してあまり変化が見られなかった。一方、他の流域については、2050年頃には現在と同等かやや下回る値となり、2100年頃には現在よりも増加する傾向が見られた。ただし、このような傾向は本研究で用いた気候シナリオデータの特性に大きく依存している。今後精度の高い気候シナリオデータを用いてさらに検討する余地がある。

また、各流域における総雨量の検証をおこなったところ、いずれも2000年までと比べて、2050年頃にはやや増加するものの、2100年頃には2000年とほぼ変わらない値となることが確認された。このことから、雨が降るときには集中的に降り、降らない時には全く降らないという極端な気候に遷移することが予想され、将来的に洪水リスクだけでなく、渇水のリスクの増加も懸念される。

5. 洪水氾濫解析

(1) 基礎方程式

解析には、2次元不定流モデル⁹⁾を用いた。基礎方程式は式(3)の連続の式と、式(4)、(5)の x 、 y 方向の運動方程式からなる。数値計算には差分法を、変数の配置はstaggered格子を、氾濫水の先端条件には閾値法⁹⁾を、計算の進め方はleap frog法を用いた。なお、河道内も氾濫域として計算をおこなうこととした。また、地盤高が急変している地点については、段落ち・遡上の近似式⁷⁾を導入した。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(UM)}{\partial x} + \frac{\partial(VM)}{\partial y} \\ = -gh \frac{\partial(h+z_b)}{\partial x} - \frac{gn^2 U \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{1/3}} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(UN)}{\partial x} + \frac{\partial(VN)}{\partial y} \\ = -gh \frac{\partial(h+z_b)}{\partial y} - \frac{gn^2 V \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{1/3}} \end{aligned} \quad (5)$$

$$M_{or}N = 0.544h_h \sqrt{gh_h} \quad (\text{段落ち}) \quad (6)$$

$$M_{or}N = 0.35h_h \sqrt{2gh_h} \quad (\text{遡上}) \quad (7)$$

ここに、 h : 水深 (m)、 z_b : 地盤高 (m)、 n : Manningの粗度係数 (m^{1/3}/s)、 g : 重力加速度 (m/s²)、 U 、 V : x 、 y 方向の断面平均流速 (m/s)、 M 、 N : x 、 y 方向の流量フラックス (m²/s) ($=Uh$ 、 Vh)、 h_h : 上流側の水位と高い方の地盤高の差 (m) である。

(2) 使用データ

地盤高データ、土地利用データ、人口データは数値地図200000を基に作成した。また、河川の位置を決定するために治水地形分類図を用いた。

なお、地盤高、土地利用データは50mメッシュなのに対して人口データは250mメッシュであった。そのため、人口データは各メッシュ内に均等に配分し、50mメッシュに直してから、計算に用いた。河床高は解析領域内に点在する流量観測所付近での河道内断面積をもとに流域ごとに一定の値で掘り下げた。

また、将来における土地利用形態の変化や人口の推移を予測することは困難であるため、現状のデータをそのまま将来に対しても適用することとした。洪水流量は

2000年および2100年の100年確率洪水流量とし、将来における海面上昇値は横木ら⁹⁾と同様に0.59 mとした。

(3) 計算パラメータの設定

計算ではまず平水流量を流し、定常状態を作った。氾濫解析時には計算開始から1日後に上流端でピーク流量になり、2日後に平水流量に戻るよう流量を正弦関数を用いて与え、下流の到達時間を考慮し合計3日間の計算をおこなった。洪水流量は1981~2000年と2081~2100年の2種類の気候シナリオから算出した100年確率洪水流量を用いた。

ここで、洪水時の時間流量と日流量のピーク値の関係から、日流量をもとに時間流量を推定した本研究の洪水流量は、現実の洪水を過小評価しているといえる。しかし、日流量から時間流量を算出することは困難であるため、本研究では横木ら⁹⁾と同様に、降水量の変化と河口水位の上昇による将来の洪水・氾濫と現在の洪水・氾濫との比較をすることを優先した。

破堤(溢水)地点は各計算で1地点のみとした。選定基準は河川が蛇行し氾濫が予想される地点とした。本研究では、地盤高データの解像度(50m)の制限で、堤防高さを地形データに反映させることができなかった。そこで、河岸を不透過境界とみなして、選定した破堤(溢水)地点のみ透過境界とし、その高さを地盤高と設定した。計算格子は50 m×50 m、Manningの粗度係数は流域内の土地利用を考慮し、小谷ら⁹⁾を参考に表-3の通りとした。時間差分間隔は0.25 s(那珂川のみ0.20 s)、閾値水深は0.001 mとした。

(4) 解析結果

将来流量の推定誤差の少ない久慈川、那珂川、荒川、吉野川、筑後川を対象に氾濫解析をおこなった。解析領域は、応答解析時に使用した流量観測所またはその付近から河口までとした。本研究では、洪水・氾濫の要因として、気候変動による降雨の変化と海面上昇による河口水位の上昇を考えている。海面上昇により、下流部の平常時水位が上昇している状態で、洪水流量が重なるので、

表-3 土地利用の分類と粗度係数

INFM	凡例	粗度係数(m ^{-1/3} /s)
1	田	0.020
2	その他の農用地	0.020
5	森林	0.030
6	荒地	0.025
7	建物用地	0.060
9	幹線交通用地	0.025
10	その他の用地	0.025
11	河川地および湖沼(計算上は荒地とみなす)	0.025
12	海浜	0.025
13	海水域	0.025
14	ゴルフ場	0.025
20	本研究で河川と定めた格子	0.025

海面上昇前と比較すると同じ洪水流量でも洪水時の水位が上昇することになり、氾濫リスクが高まることになる。

浸水深1 cm以上の領域を対象に浸水面積と浸水人口を算出し表-4に、浸水深の時間的推移の一部を図-2に示した。まず、表-4より、全ての流域で将来的に最大浸水面積と浸水人口が増加していることが確認でき、特に荒川、筑後川流域では将来的に現在よりも甚大な被害が発生する恐れがあると考えられる。また、図-2より、久慈川流域は破堤後一気に浸水面積が広がっていったのに対して、荒川、筑後川流域では徐々に浸水面積が広がっていったことが確認できた。なお、那珂川流域については前者のような、吉野川流域は後者のような変化をしていることが確認できた。

また、久慈川、那珂川、吉野川については、最大浸水面積はあまり増加していないことが確認された。ここで、図-3で那珂川、久慈川の浸水深の分布を示した。那珂川は最大浸水面積を、久慈川は破堤後12時間後の氾濫域を示しており、図の中心が破堤地点となっている。図の四角で囲った部分等で浸水深に違いがみられる。吉野川についても同様に浸水深の増加がみられた。このことより、浸水面積自体にあまり違いがなくても、浸水深が変化したことから、那珂川、久慈川流域においても、将来における洪水リスクは増加するものと考えられる。

次に、洪水流量や浸水面積、氾濫流量、被害人口の2000年と2100年の比を取った。結果を表-5に示した。なお、浸水面積、被害人口は最大浸水面積を基に算出したものを使用し、氾濫流量は破堤地点で氾濫原に向かって流れ出た量の総和とした。表より、久慈川、那珂川流域では荒川、筑後川と比較して、洪水流量比に大きな違いは見られなかったが、氾濫流量があまり増加していないことが確認された。よって、久慈川、那珂川流域で浸水面積、被害人口があまり増加しなかったのは、氾濫流量が少なかったことが主要な要因として考えられる。こ

表-4 浸水人口および最大浸水面積

流域名	年	浸水人口 (千人)	最大浸水面積 (km ²)
久慈川	2000	122.80	10.99
	2100	123.40	11.07
那珂川	2000	398.70	10.02
	2100	445.50	11.80
荒川	2000	209.80	5.24
	2100	967.10	26.40
吉野川	2000	159.20	13.66
	2100	188.00	20.27
筑後川	2000	19.40	13.19
	2100	126.70	55.95

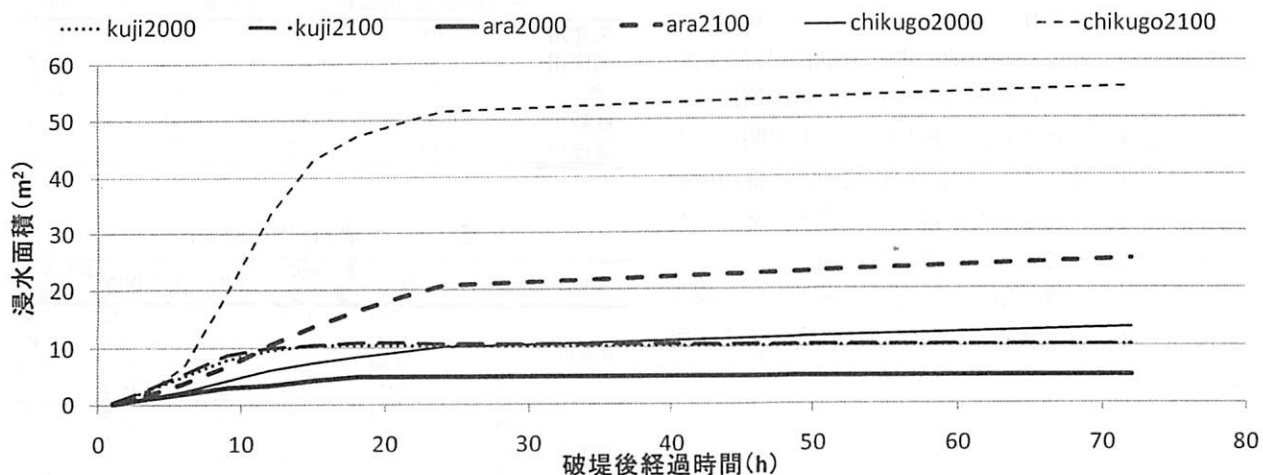


図-2 浸水面積の推移

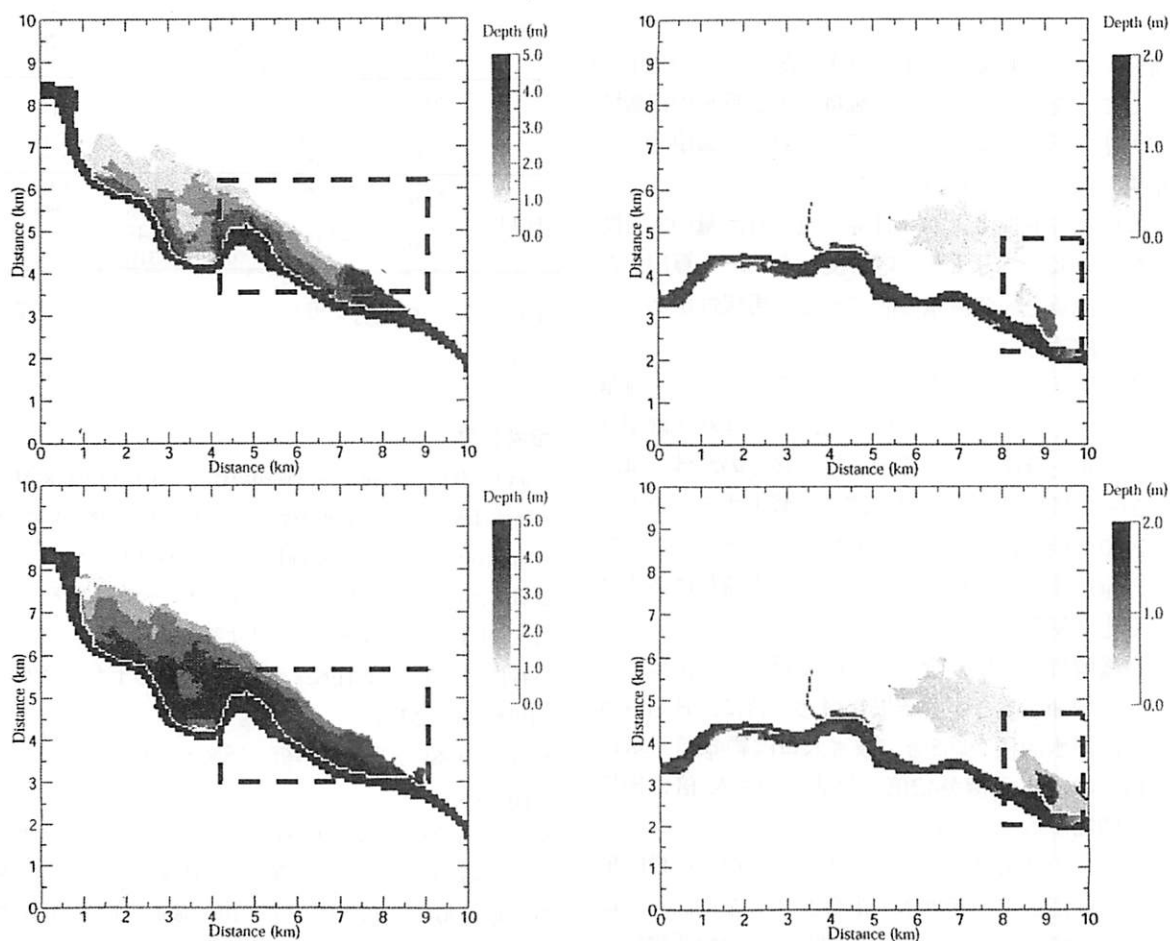


図-3 浸水面積 (左上：那珂川 2000年, 左下：同 2100年,
右上：久慈川 2000年, 右下：同 2100年)

これは両流域の破堤地点付近の地盤高が破堤地点と比較してあまり低いこと、そのため、氾濫流が河川に逆流していったことが原因であると考えられる。

一方、荒川、筑後川流域では洪水流量比に対して氾濫流量比が極端に増加していることが確認できた。これらの流域は破堤地点付近の地盤高が低くなっており、一度破堤して流出した水が再び河川に戻る事が出来にくいことが原因として考えられる。本計算では、排水機構は

計算に組み込んでいないため、いったん氾濫原に出ていった水は破堤地点を介さなければ、河川に戻っていかず、氾濫原にとどまり続けてしまう。しかしながら、氾濫流量比が極端に大きくなっていることから、荒川、筑後川流域の将来における洪水リスクは極めて高いものと推定される。

次に、土地利用別の浸水面積を算出した。表-6は土地利用別最大浸水面積と全浸水面積に占める割合を代表

的な用地について示した。また、荒地については、表 - 3 の INFM の 6 と 11 の和としている。表より、荒川については建物用地、幹線交通用地の占める割合が将来的に大きくなっていることがわかる。吉野川、筑後川流域については、荒地の占める割合が増加することが明らかとなった。これは、両流域が河川沿いに集中的に都市域を形成しているため、将来新たに浸水する場所があっても、そこは荒地になっているということである。しかし、破堤地点付近の浸水深は増加するため、被害という観点で見れば、これらの流域についても被害が増加する可能性がある。

6. 結論

本研究では、気候変動による洪水氾濫リスクの変化を予測することを目的とし、将来流量および将来の氾濫域の推定方法を示し、全国の主要河川に対して適用した。その結果、以下の結論が得られた。

- ・線形応答解析により、日降水量と日流量の応答関数を作成した。また、応答関数を用いて算出した河川流量と観測流量の間に一定の再現性があることを確認した。
- ・応答関数と気候シナリオデータを用い、将来流量を算出した。また、それを基にして 100 年確率洪水流量を算出した。その結果、多くの流域では、2050 年頃においては洪水流量が減少するものの、2100 年頃には洪水流量は増加することがわかった。天竜川流域では将来においても洪水流量にあまり変化が見られなかった。
- ・氾濫解析の結果、全ての流域で将来的に氾濫リスクが増加するという結果を得た。特に、荒川流域では浸水面積が約 5 倍、被害人口は約 4.6 倍、筑後川では浸水面積が 4.2 倍、被害人口が 6.5 倍と極端に増加することがわかった。
- ・これらの結果は、すべての水系で一律の比較的単純な仮定において洪水・氾濫リスクを検討した結果なので、直接各河川の管理計画と比較議論できるものではない。しかし、日本全体を俯瞰したときにどの地方、どの河川で洪水・氾濫リスクがより高まるのかという知見を与えるものであり、全国的に適応策を検討する際の基礎的な情報となるものと考えられる。

謝辞：本研究をおこなうにあたり、環境省地球環境研究総合推進費、および科学技術振興調整費（戦略的拠点育成）の事業のフラッグシッププロジェクト（茨城大学大

表 - 5 現在と将来の比

	洪水流量比	氾濫流量比	浸水面積比	浸水人口比
久慈川	1.08	1.61	1.01	1.01
那珂川	1.28	1.16	1.18	1.12
荒川	1.22	10.14	5.04	4.61
吉野川	1.06	1.86	1.48	1.18
筑後川	1.40	19.37	4.24	6.53

表 - 6 土地利用別浸水面積

流域名	年	田	その他の農用地	荒地	建物用地	幹線交通用地
久慈川	2000	5.62	1.15	1.29	1.72	0.49
		51%	10%	12%	16%	4%
	2100	5.64	1.16	1.32	1.73	0.49
		51%	10%	12%	16%	4%
那珂川	2000	5.24	1.96	0.27	1.6	0.48
		52%	20%	3%	16%	5%
	2100	6.66	2.01	0.29	1.76	0.51
		56%	17%	2%	15%	4%
荒川	2000	0.00	0.00	1.08	3.65	0.19
		0%	0%	21%	70%	4%
	2100	0.00	0.00	3.68	19.26	1.69
		0%	0%	14%	73%	6%
吉野川	2000	4.35	0.01	7.54	1.47	0.00
		32%	0%	55%	11%	0%
	2100	4.63	0.01	12.6	2.37	0.06
		23%	0%	62%	12%	0%
筑後川	2000	8.18	0.06	1.02	3.81	0.00
		62%	0%	8%	29%	0%
	2100	25.74	0.08	17.41	12.23	0.00
		46%	0%	31%	22%	0%

学担当) の援助を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) IPCC (2007): Summary for Policymakers, In: Climate Change 2007: The Physical Basis, contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change
- 2) 日本河川協会(2007): 雨量・流量年表データベース
- 3) 気象庁(2004): 気候統一シナリオ第 2 版
- 4) 神田徹・藤田睦博(1982): 水文学, 新体系土木工学 26, 技法堂出版, pp.182-186
- 5) 星清(1998): 水文統計解析, 開発土木研究所月報, No.540, pp.31-63
- 6) 中川一(1999): 氾濫域の解析, 水工学における計算機利用の講習会講義集, 土木工学水理委員会基礎水理部会, pp.43-50
- 7) 東博紀(2006): 平成 16 年 7 月新潟・福島および福井豪雨災害における豪雨・洪水氾濫特性, 防災科学研究所主要災害調査第 40 号, pp.79-92
- 8) 横木裕宗・戸村達也・塙尚幸・桑原祐史・三村信男(2008): 気候変動に伴う河川洪水・氾濫リスクの将来予測ー那珂川・久慈川流域における解析ー, 地球環境研究論文集, vol.16, pp.87-93
- 9) 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫(1998): GISを利用した津波遡上計算と被害推定法, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.356-360

(2009.3.6 受付)

(2009.6.3 受理)

Estimation of Future Flood and Inundation Risks Due to Climate Change
at Downstream Region of Major Rivers in Japan

Naoyuki HANAWA¹, Hiromune YOKOKI², Yuji KUWAHARA³
and Nobuo MIMURA²

¹Penta Ocean Construction Co. Ltd., Japan

²Center for Water Environment Studies, Ibaraki University, Japan

³Department of Urban and Civil Engineering, Ibaraki University, Japan

The changes in intensity of rain fall and sea-level rise are projected to be caused due to climate change in the IPCC report. Consequent increase in the risk of flood and inundation are also anticipated. In this study, we performed flood and inundation analysis. The future river flood discharge was calculated by a climate scenario using the transfer function method and the extreme statistics analysis, to obtain the flood flow whose return period was 100 years. It applied to the selected 11 river basins. These analyses showed that a flood risk increases at almost all the basins in the future. Furthermore, flood analysis was performed for the river with few presumed errors of flood flux. Consequently, especially at Arakawa river and the Chikugo River basins, the increase in the flood and inundation risk in the future was remarkable.