

jh190014-NAH

## 日本全土の洪水氾濫被害推定の高精度化

風間 聡（東北大学）

二次元不定流モデルを用いた日本全土の洪水被害額推定において、複数の GCM を用いた場合の被害額のばらつきと異なる空間解像度を用いた被害額の差額を比較した。6 種類の GCM を使用した場合、その被害額の標準偏差は 2050 年 RCP2.6 シナリオにおいて 507 億円、2050 年 RCP8.5 シナリオにおいて 680 億円と推定された。この標準偏差の年期待被害額に占める割合はそれぞれ 3.56% と 4.70% である。一方、空間解像度を 1 km から 250m に引き上げた場合、年期待被害額は 2239 億円減少した。この差額の年期待被害額に占める割合は 1km 解像度において 13.9%、250m 解像度において 16.1% である。GCM の不確実性は無視できないものの、空間解像度の及ぼす影響を考慮する必要性が示された。

### 1. 共同研究に関する情報

#### (1) 共同研究を実施した拠点名

東北大学

#### (2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

#### (3) 参加研究者の役割分担

風間聡、東北大学、洪水氾濫モデル適用  
多田毅、防衛大学、洪水氾濫モデル開発  
山下毅、東北大学、数値計算高速化  
滝沢寛之、東北大学、数値計算高速化

### 2. 研究の目的と意義

近年、地球温暖化に伴う気候変動への対策に社会の関心が寄せられている。温暖化に伴い激甚化する水災害への対策は、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・経済活動システム調節や、防災投資の増加などにより影響を軽減する適応策と呼ばれる。気候変動に関する政府間パネルの第 5 次評価報告書（IPCC AR5）によると、世界平均地上気温が上昇するにつれて、中緯度の陸域のほとんどと湿潤な熱帯地域において、今世紀末までに極端な降水がより強く、より頻繁となる可能性が非常に高い。これは豪雨の頻度や熱帯低気圧の活動度の増加、海面の

上昇を示唆しており、気候変動により今後増加するとされる水災害に対する適応策の構築は不可欠である。

日本における気候変動の影響については、降水量や降水パターンの変化により、洪水氾濫リスクの増加が予測されている。気象庁—気象研究所の地域気候モデルによると、2100 年の再現期間 100 年相当の日降水量は、現在に比べ全国的に 20% 程増加すると予測されている。これは平成 22 年 10 月の奄美豪雨や平成 23 年 7 月の新潟・福島豪雨、平成 30 年 7 月の西日本豪雨、令和元年東日本台風のように、極端な降水が更に強くなり、水害の規模の拡大を引き起こす可能性を示唆している。

多くの洪水の適応策研究は気候変動の影響評価や適応策を地域毎または、全球規模での評価にのみ焦点を当てており、国内の地域の適応策の効果を考察していない。また、本研究では、これを可能とするために、先にやられた 1km の空間分解能を 250m 分解能まで上げ、それに伴う事例数が減少しないように、計算速度の上昇と工夫を行い、詳細な適応策の効果について評価することを目的とする。

### 3. 当拠点公募型研究として実施した意義

研究目的を達成するためには、洪水予測・評価の数値シミュレーションの高速化が不可欠であり、その開発のための計算機資源が必要である。これまでの研究により、特に日本全域の計算には、地方または流域に分ける並列化による高速化の効果が高いことがわかっている。しかし、本研究では日本全土を空間分解能 250m かつ時間刻み 30 秒程度で数日間のシミュレーションによって浸水域と浸水期間を求めるには、単純な並列化だけでは十分な高速化を実現できない。さらに被害金額推定や将来気候モデルの活用、リアルタイム降雨の直接入力などは、計算負荷をますます増加させるため、現在利用可能な計算機環境では実現が不可能となっている。これに答えるための様々な条件下での計算には、高性能計算システムの有効利用が不可欠である。水理学・流体力学的な計算技術は土木工学において用意されるが、高速計算や資源の有効活用についてはサイバーサイエンスセンターにおいてノウハウがあり、これらを併せることによって、高精度な洪水リスク計算が可能となる。

### 4. 前年度までに得られた研究成果の概要 該当しない

### 5. 今年度の研究成果の詳細

#### 5.1 データセット

##### (1) 現在気候の日降水量データ

降水量データとして Tezuka ら (doi:10.1016/j.ijdr.2014.03.004) によって作成された極値降雨データを用いた。このデータは AMeDAS 観測所における 1971 年から 2000 年の最大日降雨量を頻度分析し得られた各再現期間における日降雨量と、任意の点における集水面積と地点流出係数の関係から作成されており、任意地点において確率洪水となる降雨の分布データである。

### (2) GCM 及びシナリオデータ

気候予測情報として、日本全国 1km 地域気候シナリオによる 6 つの気候モデルと 2 つの RCP シナリオを利用した。温暖化影響・適応評価において、利用する GCM により気候予測結果が異なることが知られている。これは気候システムをモデル化する際の不確実性によるものである。本研究においては、GCM の不確実性をより深く考察するため、以下に示す 6 種類の GCM を用いた。GFDL-CM23, HadGEM2-ES, MIROC5, MRI-CGCM3, CISRO-Mk3-6-0, IPSL-CM5A-LR の 6 つである。使用した期間は 1981 年～2005 年（現在）、2031～2055 年（近未来）である。

気候モデル出力値を用いて気候変動の影響評価を行う際、気候モデル出力に含まれる系統誤差すなわちバイアスが妨げになる。バイアスは気候モデル内部のパラメータ処理などにより生じ、時空間解像度の変換を伴う作業を含めてダウンスケーリングにより処理される。本研究において使用する 6 モデルのうち GFDL-CM23, HadGEM2-ES, MIROC5, MRI-CGCM3 の 4 モデルはデルタ法によりダウンスケーリングされている。デルタ法とは、GCM 出力値と観測値の統計的特徴を比較する際、平均のみを補正する手法である。この時気候変数の平均値はテイラー展開により近似的に表される。残りの CISRO-Mk3-6-0, IPSL-CM5A-LR の 2 モデルは正規分布型スケール法によりダウンスケーリングされている。この方法は補正後の値が正規分布に従うと仮定し、確率分布の母数を補正する手法である。

RCP シナリオは RCP2.6, RCP8.5 の 2 つを対象にした。RCP8.5 は 2100 年における最大温室効果ガス排出量に相当するシナリオであり、RCP2.6 は将来の気温上昇を 2°C 以下に抑えるという目標のもとに将来排出量を最も低く設定したシナリオである。

### (3) 土地利用データ

洪水氾濫計算および浸水深から被害額を

算出する過程において利用する土地利用データとして、3次メッシュの土地利用データ及び5次メッシュの土地利用データを使用した。5次メッシュデータは、国土数値情報、土地利用細分メッシュデータに格納された3次メッシュ1/10細分区画(100mメッシュ)の土地利用情報から、250mのメッシュ内において最も占める割合が多い土地利用を、そのメッシュにおける土地利用として抽出し作成されたものである。土地利用の内訳は、(1)田(2)畑地(3)森林(4)荒地(5)建物用地(6)幹線交通用地(7)その他の用地(8)河川地および湖沼(9)海浜(10)海水域(11)ゴルフ場である。なお、土地利用の将来変化については考慮しないこととする。

#### (4) 標高データ

洪水氾濫計算に用いた標高データは国土数値情報の標高・傾斜度3次メッシュ及び5次メッシュデータを使用した。なお、5次メッシュデータについては河川上に窪地地形が多く生じたため、国土数値情報の河川データの形状データに重なる窪地については標高を隣接するメッシュ中の最低標高まで埋める処理を施した。

#### 5.2 解析手法

洪水による被害額推定の手法は既往研究に倣う。大まかな流れとして、洪水モデルである二次元不定流モデルにより、洪水時の最大浸水深を求め、治水経済調査マニュアル(案)に則り被害額を推定する。洪水モデルと被害額算出法の詳細については田中ら(7)での成果)に譲る。

##### (1) 将来気候の推定方法

始めに6つのGCMおよび2つのRCPシナリオ(現在:1980年~2005年,近未来:2030年~2055年)から得られる毎日の降水量データから県庁所在地に稚内,釧路,帯広,函館を加えた全国50地点ごとに各年の最大日降水量を抜き出し、頻度分析を行う。この頻度分析において、確率分布型として一般化極値分

布であるGEV(Generalized Extreme Value)分布,母数推定法としてPWM(Probability Weight Moment)法を用いる。PWM法とは確率分布の母数推定の基準として通常の積率に変えて、確率で加重した積率を用いる手法である。GEV分布は、ある母集団に対する最大値および最小値の漸近分布である。1975年にNatural Environment Research Councilによって、イギリスにおける河川の年最大日流量の分布に推奨されて以来、降雨や洪水流量の最大値抽出など水文頻度解析において重要な役割を担っている。GEV分布関数は、式(2a)から式(2c)で与えられる。PWM法は、式(2d)から式(2f)により与えられる。ここで、 $S$ :標準変数, $\beta_r$ :確率重み付積率(PWM), $E\{\cdot\}$ :期待値演算子, $F(X)$ :確率変数 $X$ の分布関数, $x_{(j)}$ : $N$ 個の標本を大きさ順に並べ換えたときの小さい方より $j$ 番目の値, $\beta_r$ :標本によるPWMの推定値, $F(x_{(j)})$ : $x_{(j)}$ のプロットティングポジション, $\lambda_r$ : $L$ 積率, $\Gamma(\cdot)$ :ガンマ関数, $c, a, k$ は母数パラメータである。

$$F(x) = \begin{cases} \exp\left\{-\left[1 - \frac{k(x-c)}{a}\right]^{\frac{1}{k}}\right\} & (k \neq 0) \\ \exp\left\{-\exp\left[-\frac{x-c}{a}\right]\right\} & (k = 0) \end{cases} \quad (2a)$$

$$F(x) = \exp\{-\exp(-s)\} \quad (2b)$$

$$s = \begin{cases} -\frac{1}{k} \ln\left\{1 - \frac{k(x-c)}{a}\right\} & (k \neq 0) \\ \frac{x-c}{a} & (k = 0) \end{cases} \quad (2c)$$

$$\beta_r = E\{X[F(X)]^r\} = \int_0^1 x F^r dF \quad (2d)$$

$$\beta_{r1} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{(j)} \{F(x_{(j)})\}^r \quad (r = 0, 1, 2)$$

$$\begin{cases} \lambda_1 = \beta_0 \\ \lambda_2 = 2\beta_1 - \beta_0 \\ \lambda_3 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0 \end{cases} \quad (2e)$$

$$\begin{cases} \lambda_1 = c + \left(\frac{a}{k}\right)[1 - \Gamma(1+k)] \\ \lambda_2 = \left(\frac{a}{k}\right)(1 - 2^{-k})\Gamma(1+k) \\ \frac{2\lambda_2}{\lambda_3 + 3\lambda_2} = \frac{1 - 2^{-k}}{1 - 3^{-k}} \end{cases} \quad (2f)$$

頻度分析により各地点における各再現期間の日降水量を現在気候と将来気候のそれぞれに対し求め、得られる日降水量の比を降水量の増加率とした。これを ArcGIS の Spatial Analyst ツールの逆距離荷重法により日本全土に分布させて降水量の増加率分布とした。これに Tezuka らによって作成された極値降雨分布を掛け合わせて得られる降雨分布を将来気候における極値降雨分布とした。

(2) 年期待被害額

日本において国土交通省は一級河川や都市河川の計画規模を概ね 1/50 以下として設定している。さらに、発生確率の低い再現期間 100 年以上の災害は年期待被害額に大きな影響を及ぼさないと仮定した。以上より、年期待被害額を以下の式 (3) により算出することとした。

$$AED = \frac{PD(50)+PD(100)}{2} \times \left( \frac{1}{50} - \frac{1}{100} \right) \quad (3)$$

ここで、AED：年平均期待被害額、PD(x)：再現期間 x 年における潜在被害額である。

5.3 GCM による被害額の違い

(1) 降水量分布の違い

図-1 に RCP2.6 シナリオと RCP8.5 シナリオにおける各 GCM による将来確率洪水寄与降雨量の分布を示した。九州地方や四国地方において GCM 間の降水量の差異が大きいことが見受けられる。

(2) 被害額の違い

図-2 に各 GCM 各シナリオにおいて推定された年期待被害額をグラフに示した。また、表-1 に各 GCM 各シナリオにおいて推定された年期待被害額の平均値及び標準偏差と標準偏差の平均値に対する割合を示した。標準偏差は 600 億円前後であり、シナリオ間の平均年期待被害額の差額は 192 億円である。シナリオ間の差額を考える際には GCM による推定被害額のばらつきとシナリオ間の差額を包含する可能性があり、GCM の不確実性に十分留意する必要がある。例えば、図-2 から

GFDL-CM23 と MIROC5 では RCP8.5 シナリオにおける年期待被害額の方が小さくなる。使用する GCM によっては緩和が進むほど洪水被害が拡大すると解釈できる場合もある。

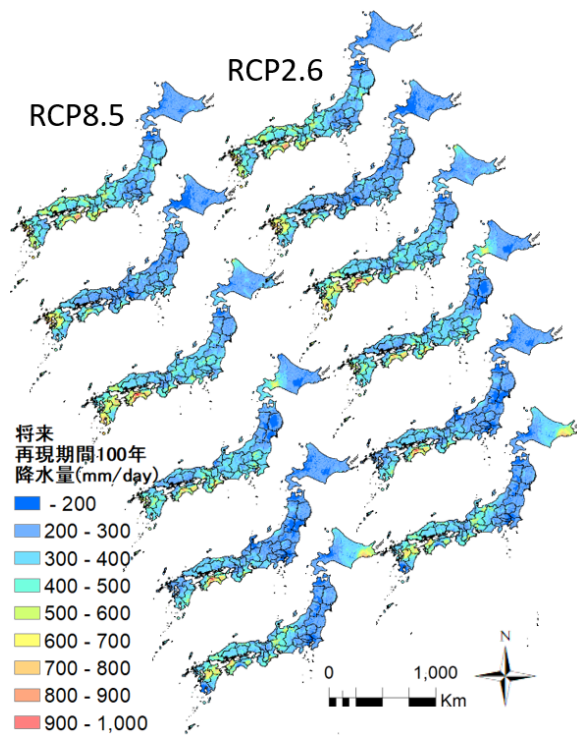


図-1 RCP2.6 シナリオ(右)と RCP8.5 シナリオ (左)における再現期間 100 年確率洪水寄与降雨分布 (上から CISRO-Mk3-6-0, GFDL-CM23, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC5, MRI-CGCM3)

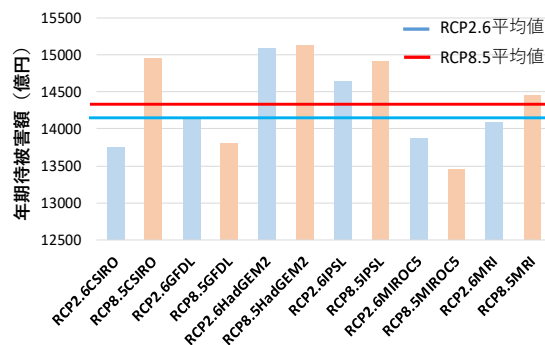


図-2 各 GCM による推定年期待被害額

表-1 GCM による推定年期待被害額のばらつき

シナリオ	平均年期待被害額 (億円)	年期待被害額の標準偏差	標準偏差の平均値に対する割合 (%)
RCP2.6	14266	507	3.56
RCP8.5	14458	680	4.70

## 5.4 空間解像度による被害額の違い

### (1) 浸水状況の違い

図-3 は長野県において再現期間 100 年の洪水が発生した場合の最大浸水深分布を 1km 解像度と 250m 解像度において示した図である。浸水深が大きくなりやすい地域はどちらの解像度を用いても推定できる。しかし、図-3 中央部にあたる松本市や安曇野市の近郊において特に顕著に見られるように 250m 解像度の浸水範囲をぼかしたように拡大した 1km 解像度の浸水範囲が確認できる。

### (2) 被害額の違い

表-2 に解像度ごとに推定した年期待被害額を都道府県ごとにまとめたものを示した。高解像度化により年期待被害額の全都道府県合計は 2239 億円減少した。その一方、都道府県により高解像度化に伴う年期待被害額の増減の傾向は大きく異なる事が示された。図-4 に年期待被害額が最も減少した香川県の被害額分布を示した。図-5 には逆に年期待被害額が最も増加した茨城県の年期待被害額の分布を示した。なお、図-4 及び図-5 の被害額は全て 250m×250m の 1 メッシュ当たりの年期待被害額であり、年期待被害額の図の階級は 1km 解像度の階級を 250m 解像度の 16 分の 1 にしてある。図-4 の北側に位置する讃岐平野において高解像度化に伴い、赤いメッシュが黄緑色のメッシュに遷移している。すなわち 1km 解像度においては大きい被害額を算出していたメッシュが被害額の小さいメッシュへ変化した。図-5 においては高解像度化に伴い赤いメッシュは減少した。しかし赤のメッシュが全て黒や黄緑色のメッシュに遷移したのではなく、茨城県南西部の鬼怒川周辺に依然赤いメッシュが残されている。また、特に茨城県北部に新しく赤いメッシュが出現したことから、1km 解像度においては被害額の生じなかった地域に 250m 解像度の場合被害額が生じていた。このように被害額が大きいメッシュが高解像度化しても残されるケースや、高解像度化により新しく被害額の生じるメッシュが出現するケー

害額の分布を示した。なお、図-4 及び図-5 の被害額は全て 250m×250m の 1 メッシュ当たりの年期待被害額であり、年期待被害額の図の階級は 1km 解像度の階級を 250m 解像度の 16 分の 1 にしてある。図-4 の北側に位置する讃岐平野において高解像度化に伴い、赤いメッシュが黄緑色のメッシュに遷移している。すなわち 1km 解像度においては大きい被害額を算出していたメッシュが被害額の小さいメッシュへ変化した。図-5 においては高解像度化に伴い赤いメッシュは減少した。しかし赤のメッシュが全て黒や黄緑色のメッシュに遷移したのではなく、茨城県南西部の鬼怒川周辺に依然赤いメッシュが残されている。また、特に茨城県北部に新しく赤いメッシュが出現したことから、1km 解像度においては被害額の生じなかった地域に 250m 解像度の場合被害額が生じていた。このように被害額が大きいメッシュが高解像度化しても残されるケースや、高解像度化により新しく被害額の生じるメッシュが出現するケー

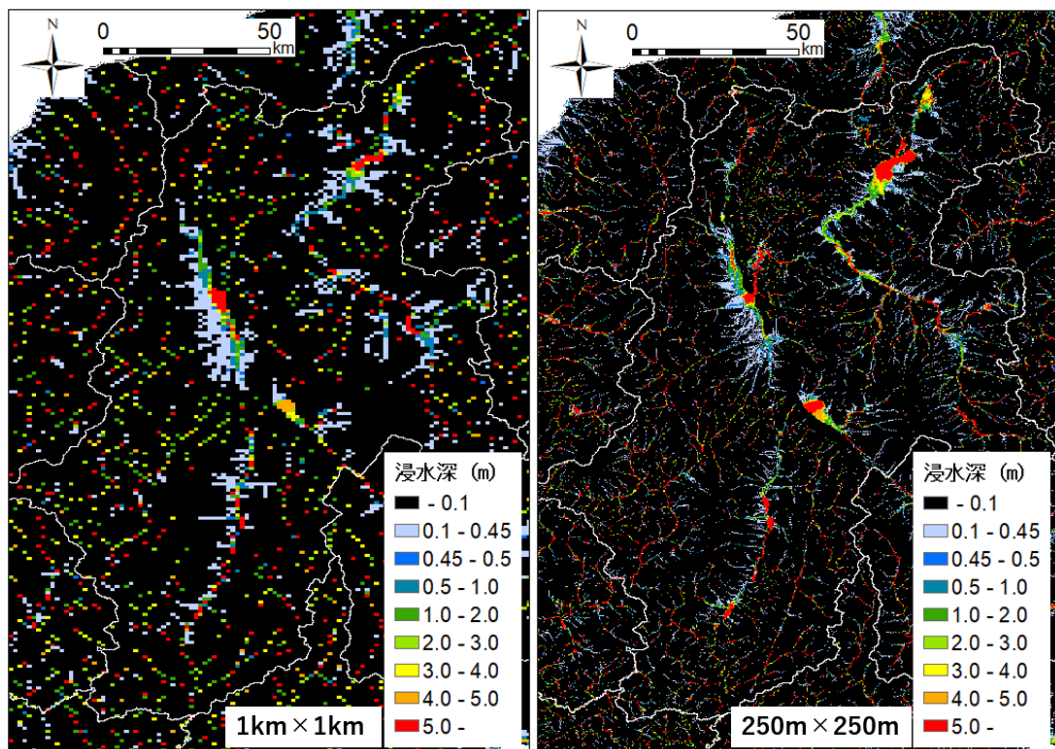


図-3 異なる空間解像度による長野県における再現期間 100 年の最大浸水深の違い

表-2. 解像度による年期待被害額の違い

	年期待被害額(億円)			高解像度化に伴う被害額の変化率(%)	年期待被害額(億円)			高解像度化に伴う被害額の変化率(%)	年期待被害額(億円)			高解像度化に伴う被害額の変化率(%)
	1km解像度	250m解像度	250m解像度		1km解像度	250m解像度	250m解像度		1km解像度	250m解像度	250m解像度	
北海道	769	614	-20.1	富山県	73	61	-16.4	鳥取県	74	82	10.4	
青森県	139	130	-6.5	石川県	148	117	-20.9	島根県	146	159	9.4	
岩手県	90	80	-11.7	福井県	199	194	-2.3	岡山県	457	353	-22.8	
宮城県	285	257	-9.9	山梨県	128	161	25.7	広島県	809	574	-29.1	
秋田県	83	98	17.7	長野県	197	206	4.7	山口県	605	353	-41.6	
山形県	26	25	-4.4	岐阜県	481	484	0.6	徳島県	90	85	-5.7	
福島県	464	289	-37.8	静岡県	773	656	-15.2	香川県	152	81	-46.7	
茨城県	311	399	28.2	愛知県	1095	908	-17.1	愛媛県	291	211	-27.7	
栃木県	81	94	16.1	三重県	325	296	-9.0	高知県	193	125	-35.2	
群馬県	120	109	-8.7	滋賀県	28	24	-12.4	福岡県	868	751	-13.4	
埼玉県	807	786	-2.6	京都府	290	223	-23.2	佐賀県	125	140	12.0	
千葉県	390	334	-14.4	大阪府	1016	883	-13.0	長崎県	209	126	-39.5	
東京都	1055	897	-15.0	兵庫県	500	489	-2.4	熊本県	300	374	24.5	
神奈川	762	592	-22.3	奈良県	94	106	12.0	大分県	200	176	-12.3	
新潟県	186	214	15.5	和歌山県	166	104	-37.4	宮崎県	164	145	-12.0	
								鹿児島県	368	331	-10.3	
								合計	16134	13895	-13.9	

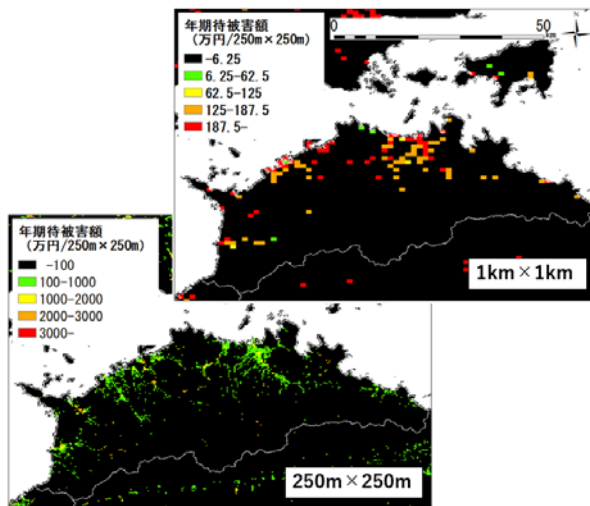


図-4 香川県における年期待被害額の分布

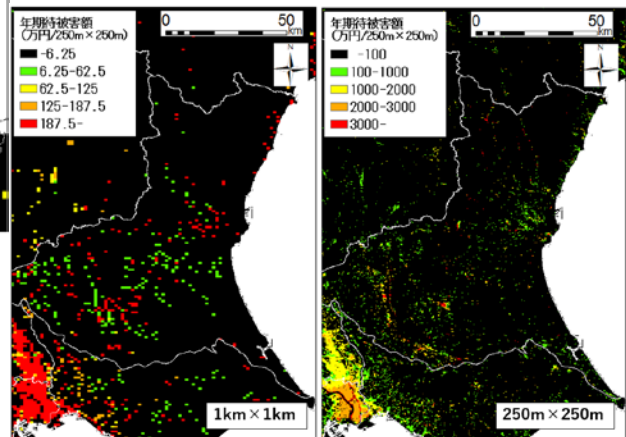


図-5 茨城県における年期待被害額の分布

すが他の被害額が増加した県においても見られた。これらの原因について、高解像度化により山間部の小河川においても氾濫が再現されるようになった結果、下流域の被害が減少したのではないかと考えられる。また、上流域にも住宅地や商用地、田畑が比較的多く分布している都道府県は上流域における洪水氾濫が再現されるようになり被害が増加したと推察される。

#### 5.5 GCM による影響と解像度による影響の比較

5.3 に示したように、GCM 間の年期待被害額のばらつきの大きさは標準偏差を見ると RCP2.6 シナリオにおいて 507 億円, RCP8.5 シナリオにおいて 680 億円である。各シナリオの平均年期待被害額に対するこの標準偏差の割合はそれぞれ 3.56%と 4.70%である。一方、5.4 より異なる解像度による年期待被害額の差額は 2239 億円である。1km 解像度と 250m 解像度の年期待被害額に占めるこの差額の割合はそれぞれ 13.9%と 16.1%である。先にも述べたように GCM による不確実性が及

ぼす影響が議論されている。本研究においても、使用 GCM によりシナリオ間の洪水被害の傾向の逆転が見られ、この不確実性を無視できない。しかしながら解像度の違いによる被害額の差額はさらに大きいオーダーとなる。故に空間解像度の方が GCM よりも大きな影響を及ぼすと言える。

## 6. 今年度の進捗状況と今後の展望

ほぼ計画通りに実施することができた。今後は被害額推定値の違いを詳細に分析するとともに、より複雑な洪水事象（土石流や内水氾濫など）も考慮できるモデルの開発を進める予定である。

## 7. 研究業績一覧（発表予定も含む）

### (1) 学術論文（査読あり）

田中裕夏子, 風間聡, 多田毅, 山下毅, 小森大輔, 治水安全度を考慮した洪水・高潮リスク評価, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 75, No. 2, I\_109-I\_114, 2019.

山本道, 風間聡, 峠嘉哉, 田中裕夏子, 多田毅, 山下毅, 気候変動による洪水被害額の推定における GCM と空間解像度の影響, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 75, No. 2, I\_1087-I\_1092, 2019.

山本直, 風間聡, 峠嘉哉, 多田毅, 山下毅, 気候変動による洪水被害に対する緩和策と適応策の評価, 土木学会論文集 G(環境), Vol. 75, No. 5, pp. I\_15-I\_24, 2019.

### (2) 国際会議プロシーディングス（査読あり）

### (3) 国際会議発表（査読なし）

So Kazama, Risk Evaluation of Compound Disaster by Storm Surge and Flood in Lowland Areas of Japan, HS13-A003, AOGS, Singapore, 2019. 7. 31.

Tao Yamamoto, So Kazama, Tsuyoshi Tada, Tsuyoshi Yamashita, Estimation of the Flood Damage Caused by Climate Change and Effect of the Adaptation, HS13-A014, AOGS, 2019. 7. 31. Singapore.

Tao Yamamoto, So Kazama, Yoshiya Touge, Tsuyoshi Tada, Takeshi Yamashita, Estimation of the flood damage caused by Climate change and effect of the adaptation(P), The 7th International Symposium on Water Environment Systems --with Perspective of Global Safety, pp. 38-39, 2019. 11. 15. Sendai.

### (4) 国内会議発表（査読なし）

気候変動下の水災害とその適応, 阿武隈川 100 周年事業 気候変動に対する適応策を考えるシンポジウムー気候変動と阿武隈川流域圏の将来像一, 福島, 2019. 7. 25. (基調)

### (5) その他(特許, プレスリリース, 著書等)