

## II-2 洪水被害の予測（定量的なリスク評価の例）

執筆担当

テーマ 3

東京工業大学	大学院理工学研究科	鼎信次郎
東京工業大学	大学院理工学研究科	井芹慶彦
東京工業大学	大学院理工学研究科	宮崎千尋
東京工業大学	大学院理工学研究科	Lim Wee Ho

## II-2- i これまでの知見

洪水は気候に関連した、最も主要な災害のひとつである。2001-2011年における洪水による損失は年平均240億ドルに達し、同期間の年平均死者数は数千人と言われている。洪水による経済的損失及び死傷者の数は、地球温暖化などの気候変化によって将来増加する可能性がある。

しかし、最近の気候変動に関する政府間パネル(IPCC)による、極端気候に関する IPCC 特別レポート(いわゆる IPCC SREX レポート)の中では、洪水の将来予測に関しては、「全体として、河川洪水の変化予測は信頼性が低い。証拠は限られており、地域的な変化が複雑なため、信頼性が低い。」と記されている。というのも、洪水のリスクの将来予測は社会的な関心の高い研究課題であるにも関わらず、地球温暖化時の洪水の変化とそのリスクを世界全体で解析した研究はごくわずかであった。それらの研究は、大気海洋大循環モデル(AOGCM)と河道モデルを用いてシミュレートした月単位や日単位の河川流量に基づいて、主要河川流域での大洪水の頻度の将来変化を予測していた。しかしこれらの単一の AOGCM による研究では、SREX に記されたように、証拠が限定的であり、複数の気候モデルを用いて温暖化の将来見通し結果の不確実性を評価した研究は、これまで存在しなかった。また、これらの研究では、河川流量そのものから計算される量(洪水流量の再現期間など)を洪水リスクの主たる指標としており、洪水に暴露される人口や経済被害を求めたものはなかった。しかし、社会にとっては洪水に暴露される人口は経済被害は重要な関心事であり、河川流量だけでなく暴露人口や経済被害額の形で洪水リスクが推計されることも重要課題であった。

当時は IPCC 第4次評価報告書のための第3期結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP3)が行われており、そこで用いられた AOGCM による河川流量データには入手制限があったため、全球規模の洪水予測は容易に実行できなかった。特に、複数の AOGCM による日単位の流出量データについては、データポータルなどの入手が容易な状況にはなかった。しかし IPCC 第5次評価報告書の時点からはこれらのデータが入手可能な状況になり、その結果 II-2- ii に紹介するような研究を実施することが可能になった。

## II-2-ii ICA-RUS により明らかにされた知見

この節では、将来の気候下における洪水暴露人口の推計を行った Hirabayashi *et al.* (2013)について、記者発表資料 ([http://hydroinfo.t.u-tokyo.ac.jp/Press20130609/hirabayashi20130606\\_v3.pdf](http://hydroinfo.t.u-tokyo.ac.jp/Press20130609/hirabayashi20130606_v3.pdf)) を基に紹介する。

本研究では、11 個という複数の気候モデルから推定された将来気候それぞれに対して、洪水暴露人口の将来変化を推計しその変化の一致度を調べた。このように、複数の気候モデルからの出力を利用して解析することで、気候モデルに起因する将来の洪水変化の不確実性を考慮した。また、洪水リスク変化の計算には最先端の河川・氾濫モデルを用いた。その結果、ヨーロッパの広い地域で洪水リスクが減少する一方で、アフリカやアジアの多くの地域で洪水リスクが増加し、世界全体では洪水リスクが増加する見通しであった。この傾向は大多数の気候モデルで一致しており、温室効果ガスの排出目標を設定する際には、洪水リスクについても考慮する必要があると考えられる。

また、本研究では現在から将来（2100 年）までの洪水暴露人口の年々変動も推計した所、洪水リスクは大きな年々変動を示していた。この結果から、洪水の増加トレンドが顕著になる前でも大規模な洪水が発生する可能性が考えられ、洪水の増加トレンドが顕著になる前の段階から適切な適応策を推進する必要があることが示唆された。

以下、本研究についてその詳細を述べる。なお以降の大部分は上記記者発表資料からの抜粋である。

本研究では、洪水氾濫の予測に用いるための気候データとして、11 の異なる研究機関の気候モデルから推定された将来気候を用いた。そして、それら複数の将来気候それぞれに対して最先端の河川・氾濫モデルを用いて将来の河川氾濫を推定し、その結果を基に将来の洪水暴露人口を推計した。現在および将来の気候をシミュレーションするモデルは、モデルで直接再現が困難な物理プロセスの表現方法や解像度に違いがあり、その結果として将来気候も気候モデルによって差異がある。その為、本研究では上記のように複数の将来気候の下で将来の洪水暴露人口の推計を行っている。また、このように複数の気候モデルを用いることで気候モデルに起因する不確実性を考慮するのみならず、各気候モデルに対して 4 つの異なるレベルの排出シナリオ毎に行われた将来気候予測の結果も用いることで、排出シナリオに起因する将来気候の不確実性も考慮した。ここで 4 つの排出シナリオとは、RCP (Representative Concentration Pathway) というものであり、その排出シナリオに相当する放射強制力（工業化以前と比較した 2100 年頃の放射強制力）に応じてそれぞれ、RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5 と呼ばれる。RCP の数字が大きいほど、温室効果ガスの排出濃度が高い将来像に相当する。

洪水暴露人口を推計するに当たり、将来気候として用いたデータは IPCC 第 5 次評価報告書に準拠した、第 5 次結合モデル相互比較プロジェクトによる将来見通し計算の結果である。これを最先端の河川・氾濫モデルに入力して数値シミュレーションを行い、将来の洪水の変化と、洪水リスクの推計を行った。ここで、洪水は「現在気候において、100 年に 1 度の超過確率(注 1)を持つ河川流量（以降、「現在気候の 1/100 洪水」と呼ぶ）」と定義する。将来の洪水頻度の変化は、現在気候の 1/100 洪水が将来気候では何年に 1 度生じるか、という超過確率の変化として計算される。

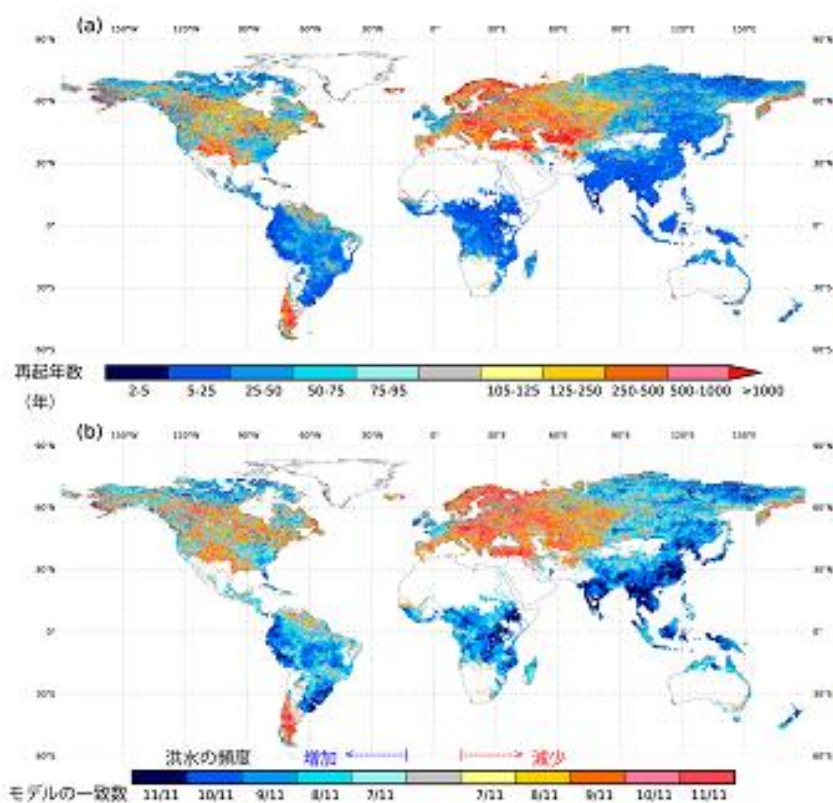
図 II-2-1 は、現在気候の 1/100 洪水が将来何年に 1 度生じるかを示している。なお前述のように将来気候の予測値は複数存在するため、ここでは 11 通りの将来気候を用いて計算した結果の中間値を示している。図 II-2-1 は RCP8.5、すなわち将来シナリオの中では最も温暖化が進行するシナリオの結果である。この図より、洪水の発生頻度は南アジア、日本と中国を含む東南アジア、北東ユーラシア、アフリカの東地域と低緯度地域、南アメリカの多くの地域で増加することがわかる。その逆に、ヨーロッパの北部と東部、アナトリア、中央アジア、北アメリカの中部、南アメリカの南部の多くの地域では、洪水の頻度は減少する。陸上の 26%にあたる乾燥地域と各研究機関の将来見通しのばらつきが大きい陸上の 14%を除くと、世界全体では陸上の 42%で洪水の頻度が増加し、18%で減少する。なお、将来の温暖化の程度が低い他の 3 つのシナリオにおいても、変化の大きさは異なるものの似たような傾向が見られた。

また、洪水の頻度が将来増加する地域の多くでは、各研究機関の気候モデル間の見通し結果が良く一致していた。洪水頻度が増加する陸上の 42%のうち、半分以上の 23%において、11 の研究機関の 9 以上が増加傾向を示していた。このように複数の研究機関による将来見通し結果を比較することにより、洪水変化の見通しの不確実性を同時に示すことに成功した。

次に、このような将来の洪水の変化が人間社会へ与える影響を、洪水リスクのポテンシャルが高い人の数を示す、洪水暴露人口というインデックスを用いて調べた。洪水暴露人口は、ある年に河川流量が

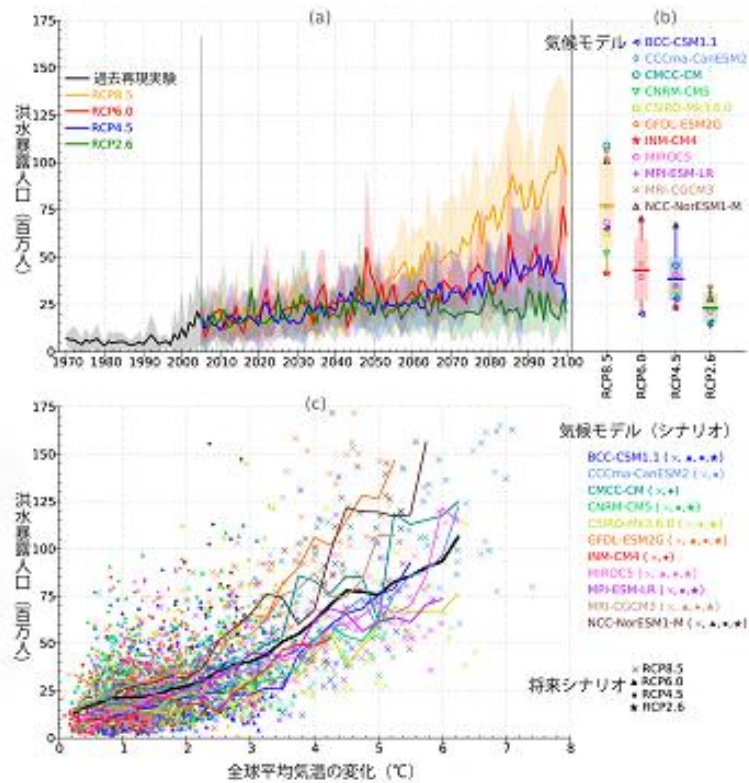
現在気候の 1/100 洪水の流量を超えた場合に、同じ場所のその年の最大の洪水の氾濫域に住む人の数を合計することで算出する。世界最先端の河川・氾濫モデルを用いることによって初めて、このような世界全体の洪水暴露人口の計算が可能となった。ただし温暖化によるリスクの変化に着目するため、人口は 2005 年の値に固定した。その結果、年あたりの平均の洪水暴露人口は現在気候では世界人口の約 0.1%であったのに対し、将来気候では 0.4~1.2%になることが判明した。世界全体の洪水暴露人口の増加は、人口の多い低緯度地域、特にアフリカとアジアにおける洪水頻度の増加が原因である。また、洪水リスクは毎年の変化が非常に大きいことから、洪水の被害を軽減するためには、洪水リスクの平均値のみならず最大値にも着目して、洪水の増加トレンドが顕著になる前に適切な対策を推進する必要があることが示唆された。

最後に、気温上昇量と洪水暴露人口の関係を散布図で示した。その結果、温暖化の程度に違いはあるものの、異なる研究機関による気候モデルの全てにおいて気温が上昇すると世界の洪水のリスクが増加する傾向が見出された(図 II-2-2)。現在気候における世界の洪水暴露人口は平均して 560 万人程度であるのに対し、陸上の気温が 2℃上昇すると平均で約 3 千万人、4℃上昇すると約 6 千万人になる。このような気温と洪水リスクとの関係から、温室効果ガスの削減目標を設定する際には洪水のリスクも考慮する必要があることが判明した。



※ a) 「現在気候の 1/100 洪水」の将来の再起年数 (年)。 b) 11 気候モデルの一致数。海上と乾燥地域 (過去再現実験における 1979-2010 の平均年流量が 0.01mm/日未満) は白抜きされている。\* 図 II-2-1 は Hirabayashi *et al.* (2013) の図を一部改変したもの。

図 II-2-1 洪水頻度の変化



※ a) 洪水暴露人口の時系列変化。太線が将来シナリオごとの気候モデルの平均、網掛けは気候モデル間の標準偏差を示す。 b) 洪水暴露人口の 2071-2100 平均の箱ひげ根図。記号は各気候モデルの値、箱の高さは気候モデルの標準偏差、箱の中の横線は気候モデルの中央値を示す。 c) 洪水暴露人口と海を含まない陸上の平均気温の変化 (1980-1999 平均からの偏差)。細線は各気候モデル・シナリオの 毎年値 (記号) を気候モデルごとに集計したもの、太線 (黒) はその平均を示す。 \* 図 II-2-2 は Hirabayashi *et al.* (2013) の図を一部改変したもの。

図 II-2-2 現在気候の 1/100 洪水以上の洪水に対する洪水暴露人口

## II-2-iii 今後 ICA-RUS が明らかにすること

II-2-ii で紹介した研究では、洪水暴露人口を指標として洪水リスクを推定している。その一方で、例えば 2012 年における洪水による全世界の経済損失は 1,900 億ドルに上るといわれており、洪水による経済損失も甚大なものがある。従って今後は、暴露人口のみに着目するのではなく、洪水による将来の経済損失を明らかにすることも重要である。将来の経済損失を推定するには将来の社会経済シナリオが必要となるが、将来の社会経済がどうなるかを特定することは困難であり、そのため将来の社会経済については複数のシナリオを用いる必要がある。将来の社会経済シナリオとして SSP s(Shared Socioeconomic Pathways) というものが近年作成されており、SSPs では複数の異なる社会経済シナリオが提供されている。本研究ではそれら提供されている複数の SSPs を利用することで将来の社会経済シナリオの不確実性を考慮しつつ、洪水による将来の経済損失を推定する予定である。

また、II-2-ii の研究で用いられた、「現在気候において、100 年に 1 度の超過確率(注 1)を持つ河川流量」を基準として洪水暴露人口を計算するという方法についても今後改良が望まれる。即ち、例えば日本の一級河川の多くは 100 年に 1 度程度の降水(や流量)を参照して河川計画が立案されていることから、日本の一級河川と同程度の河川整備が行われている地域においては、100 年に 1 度以上程度の流量を基準として洪水暴露人口を推定することには合理性があると言える。しかし、例えば発展途上国における、ほとんど河川整備がされていないような河川については、数年～数十年に 1 度程度の流量で河川が氾濫する恐れもありうる。従って今後は、100 年に 1 度以上の流量のみを基準として洪水リスクを推定するのではなく、各国の河川整備の実情を考慮して適宜適切な洪水流量の基準を模索しつつ、洪水リスクを推定することも肝要である。

更に、海面上昇や地盤沈下の影響を考慮して洪水リスクを推定することも重要である。海面上昇によりメガデルタでの洪水氾濫の危険性が高まる可能性は IPCC 第 4 次評価報告書でも指摘されているが、地下水の過剰揚水による地盤沈下を伴うことにより、メガデルタを含む沿岸部での洪水リスクは更に高まる。従って、将来の降水予測に加えて海面上昇や地盤沈下の影響も取り込みつつ沿岸域の洪水リスクを評価することは、今後の重要課題であるといえる。

## 補足・参考

注1：洪水の超過確率とは、洪水の規模を示す場合に用いる指標の1つであり、平均して何年に1度の割合でその値（この場合は河川流量）を超過する洪水が発生するかという確率を示す。

## 参考文献

Seneviratne, S.I., N. Nicholls, D. Easterling, C.M. Goodess, S. Kanae, J. Kossin, Y. Luo, J. Marengo, K. McInnes, M. Rahimi, M. Reichstein, A. Sorteberg, C. Vera, and X. Zhang (2012), Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment, in *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, edited by C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley, pp. 109-230, Cambridge University Press, UK, and New York, NY, USA.

Hirabayashi, Y., R. Mahendran, S. Koirala, L. Konoshima, D. Yamazaki, S. Watanabe, H. Kim, and S. Kanae (2013), Global flood risk under climate change, *Nature Climate Change*, *3*, 816-821.