

AR5 に向けた将来社会経済シナリオを用いた水関連災害リスクに関する研究

東京大学生産技術研究所 特任助教 木口雅司 (研究代表者)

東京大学生産技術研究所 教授 沖大幹

概要:

本研究では、将来社会経済シナリオを用いて、現在と 21 世紀末における洪水リスクが推定された。将来社会経済シナリオは「脱地球温暖化と持続的発展可能な経済社会実現のための対応戦略の研究 (ALPS)」のシナリオ A を採用した。将来の第 5 期結合モデル相互比較計画 (CMIP5) の予測シミュレーション実験結果 (代表的濃度経路 (RCP) 8.5) の流出量を河川氾濫モデル CaMa-Flood に入力し、洪水リスクを評価するために必要な河川流量や氾濫面積、浸水深が得られた。その浸水深データを被害割合に換算する関数を用いて、最終的に洪水リスクが各グリッドで推定された。

21 世紀末における洪水頻度は、アジアのほぼ全域で増加傾向、氾濫面積はスリランカやバングラデシュ、ラオス、ミャンマーで約 1.4~1.6 倍となる一方、日本、台湾、タジキスタン、キルギスではほぼ変わらない傾向であった。被害額の推定では、経済発展の影響が非常に大きく気候変動による影響は大変小さいが、適応策を考える際に区別して評価する重要性を示した。

キーワード: 洪水曝露人口と被害額推定、ALPS シナリオ、ダウンスケーリング、河川氾濫モデル

1. はじめに

最近公表された気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第 5 次評価報告書 (AR5) の各作業部会報告の中で、地球の気候システムの温暖化は疑う余地がなく、地表面気温だけでなくむしろ主に海洋の水温上昇としてその影響が表れていることが述べられている。人間活動が 20 世紀半ば以降に観測された温暖化の主要要因であった可能性が極めて高い (95%以上の可能性) とされ、90%の可能性とした第 4 次評価報告書の記述からさらに一步踏み込まれている。

IPCC でも第 4 次評価報告書以降、第 2 作業部会の評価報告書では緩和策と適応策とは気候変動対策における車の両輪である、と位置付けられている。その適応策を策定するにはより定量的なリスク推定が求められる。これまで、中北ら (2012)¹⁾などで、領域気候モデルを用いた梅雨前線に伴う集中豪雨の発生頻度などが将来どう変化するか調べられているが、その結果として発生する被害推計などは解析されていない。また Hirabayashi et al. (2013)²⁾において、将来の全球洪水リスク (曝露人口) が示されているが将来の社会経済シナリオに基づいた経済被害については求められてい

い。

水関連災害リスクの算出は、インフラ整備やハザードマップといったソフト対応などの政策決定に大変重要な基礎データと位置付けられる。そこで、本研究では、将来予想される気候変動による水関連災害リスクを、ダウンスケーリング情報を用いて、日本を中心にアジア域において提示することを本研究の目的とする。

2. 研究開発手法

(1) 手法

本研究で使用した気候変化シナリオは、用意されている 4 つの代表的濃度経路 (RCP) シナリオのうち、2100 年における 1750 年に対するおおよその合計放射強制力が約 8.5 Wm^{-2} となるもの (RCP8.5) を用いた。2100 年までの昇温量はおよそ 3.5°C である。将来の第 5 期結合モデル相互比較計画 (CMIP5)³⁾ に提出された予測シミュレーション実験結果のうち、Hirabayashi et al. (2013) で用いられた大気大循環モデル (GCM) から RCP8.5 シナリオの実験結果のある 8 つの GCM を用いた (表-1)。その GCM の実験結果から得られる流出量を河川モデルに入力

することで、将来のシミュレーションが可能となる。本研究では、Yamazaki et al. (2011)⁴⁾ で開発された河川氾濫モデル (CaMa-Flood) へ GCM から得られた流出量をダウンスケールして入力し、河川流量、氾濫面積および浸水深を得た。この詳細な手法は Hirabayashi et al. (2013) に記載されているので参照されたい。

表-1：本研究で使した GCM。

略称	格子数 (大気)	機関
canESM2	128 x 64	カナダ気候モデリング・解析センター (カナダ)
CNRM-CM5	256 x 128	フランス国立科学研究センター・欧州科学計算研究訓練センター (フランス)
GFDL_ESM2G	144 x 90	地球物理流体力学研究所 (アメリカ)
GFDL_ESM2M	144 x 90	地球物理流体力学研究所 (アメリカ)
MIROC5	256 x 128	東京大学大気海洋研究所・海洋研究開発機構 (日本)
MRI-CGCM3	320 x 160	国立気象研究所 (日本)
NCC-NorESM1-M	144 x 96	ノルウェー気候センター (ノルウェー)

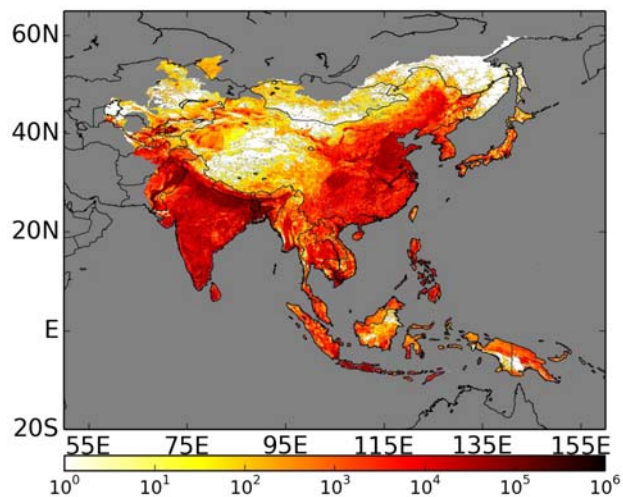


図-1：2100 年の ALPS のシナリオ A (中位技術進展シナリオ) の国別統計値に基づく人口分布図。

一方の社会経済シナリオは、公益財団法人地球環境産業技術研究機構 (RITE) において実施された「脱地球温暖化と持続的発展可能な経済社会実現のための対応戦略の研究 (ALPS)」が策定した人口、経済成長に関する長期の見通しを用いた⁵⁾。ALPS は、これまでの奇跡的とも言える高度経済成長から、先進国を中心に次第に緩やかな

る経済成長へと変化していくシナリオ A (中位技術進展シナリオ) と、奇跡的とも言える技術革新が今後も継続し一人当たり GDP 成長も大きく成長するシナリオ B (高位技術進展シナリオ) の 2 つの長期見通しを公開しており、そのうち本研究では、シナリオ A を用いた。これらのデータは国別値であり空間分布は示されていない。そこで空間解像度が 5 分の人口分布 (History Database of the Global Environment⁶⁾) から分布情報を引用し、それに対して国別値の比を乗することで、ALPS シナリオを用いた本研究を可能とした (図-1)。

土地利用データは、国土地理院と千葉大学が各国の国家地図作成機関と協力して衛星プロダクト MODIS データを用いて作成した地球地図土地被覆全球版 (GLCNMO) を用いた (図-2)。空間解像度は 30 秒であるが、本研究では洪水による経済リスク推計のため、18 秒にダウンスケールするとともに、21 種類ある元の分類を 4 種類 (森林、森林及び耕作地、耕作地、都市、その他) に再分類した。

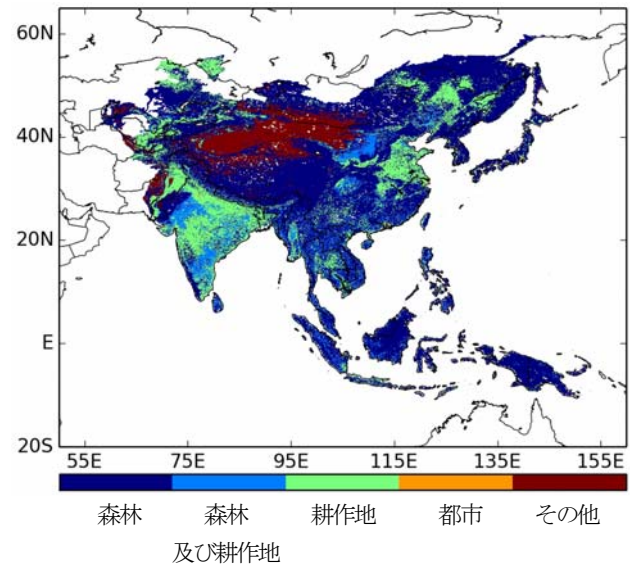


図-2：本研究の解析範囲と 2000 年の土地利用分布。

土地利用が異なれば同じ浸水深でも被害額が異なる。これまで各土地利用ごとの浸水深－被害関数が提案されてきた⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。本研究でもこの異なる土地利用を考慮するため、Sato et al. (2014)¹¹⁾によって提案された浸水深を関数とする被害額算定手法を基本として用いた。Sato et al. (2014) では楽観的シナリオと悲観的シナリオを提案しているが、本研究では楽観的シナリオを用いた。また、浸水深が 1m 以下の場合には被害をゼロと仮定した。

上述したデータおよびシミュレーション結果を用いて、洪水リスクは、曝露対象となる人口分布に基づく資産、災害外力となる洪水浸水深、そして脆弱性となる浸水深－被害関数を用いて評価した。人口分布に基づく資産とは、上述した人口分布データに、ALPS のシナリオ A によ

って提供される 2000 年および 2100 年の一人当たり GDP を乗ずることで推定した。また、洪水外力である洪水浸水深は年最大浸水深を用いた。その結果、各グリッドにおいて、人口分布、一人当たり GDP、浸水深－被害関数から、被害額が求められる。

(2) 河川氾濫モデルの検証

本研究で用いた河川氾濫モデルの精度を検証するため、世界河川流量データセンター (GRDC) の日河川流量データを用いて相関係数を算出した (図-3)。なお、用いた観測地点は集水面積が 62,500km² 以上の 743 地点である。

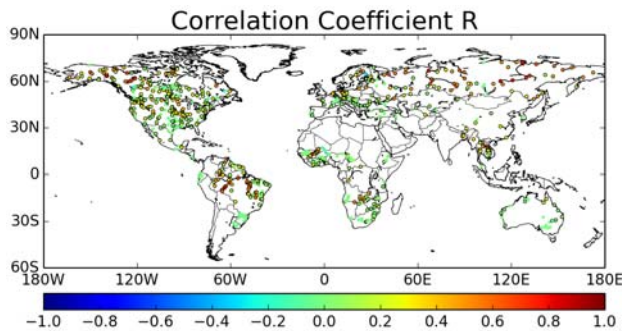


図-3：河川流量の相関係数。MIROC5 の例。

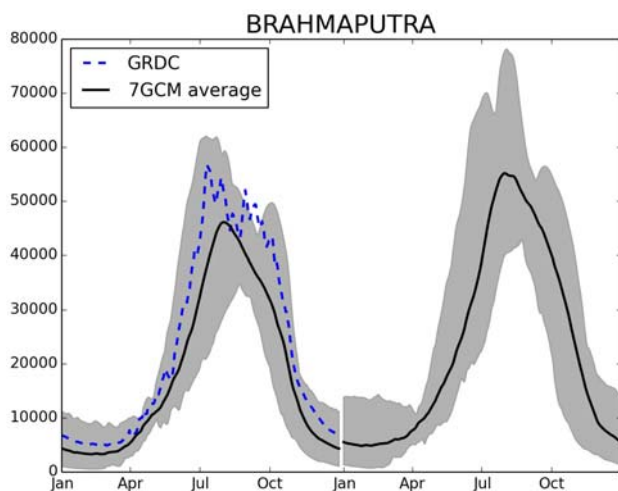


図-4：ブラマプトラの平均日流量比較。単位はm³/s。左が現在 (1970～2000)、右が 21 世紀末 (2070～2100)。青点線が GRDC による観測値。黒実線が使用した 7 つの GCM の平均。灰色はその 7 つの GCM の振幅。

その結果、各 GCM における 95% 有意な地点数は、canESM2 が 471 地点、CNRM-CM3 が 496 地点、GFDL_ESM2G が 466 地点、GFDL_ESM2M が 465 地点、MIROC5 が 526 地点、MRI-CGCM3 が 484 地点、NCC-NorESM1-M が 409 地点となった。また、河川流量の季節変化の再現性についても検証を行った。アジアの主要河川である、黄河、メコン、チャオプラヤ、ガンジス、ブラマプトラの 5 河川について

GRDC の日河川流量データを用いて検証した結果、ブラマプトラやガンジスについては季節進行をよく再現していたが、黄河の場合は初夏の河川流量の増加が再現できていない。また、チャオプラヤでは GCM が季節を通じて過大評価しており、メコンではピーク流量を過小評価している。図-4 は、ブラマプトラの例を示す。

3. 結果

(1) 河川流量の再現期間の変化

前章で検討された日河川流量を用いて、Yoshimura et al. (2008)¹²⁾ の計算手法を用いて各グリッドごとに再現期間を計算し、その将来変化を調べた。本研究では、現在再現期間が 20、50、80、100、150、200 年に 1 回の河川流量がそれぞれ何年に 1 回の河川流量となるかを示し、またその GCM 間でのばらつきを考慮するためその傾向の整合性についても評価した。

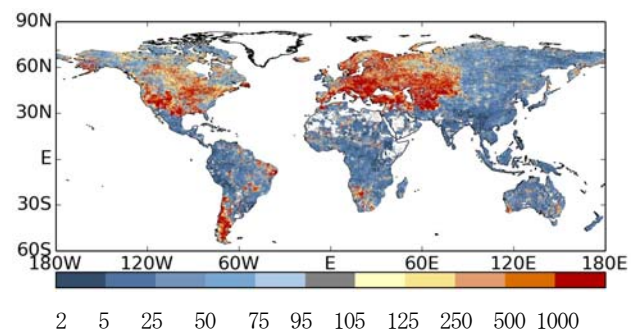


図-5：現在の再現期間が 100 年に 1 度の河川流量の将来変化。

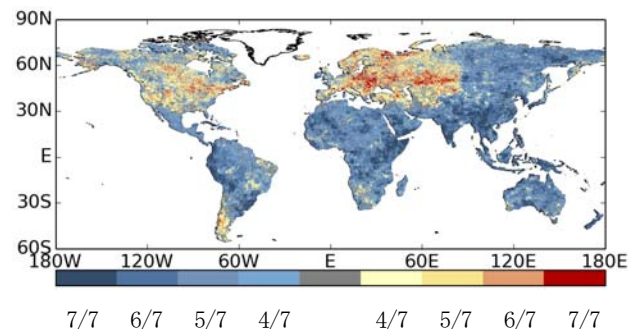


図-6：使用した GCM 間の合意度。暖色系は増加傾向、寒色系は減少傾向における合意度を示す。

図-5 は現在再現期間が 100 年に 1 度の河川流量の将来変化を示す。暖色系は将来より長い再現期間の河川流量になる、つまり 100 年に 1 度の洪水の頻度が減少することを意味する。一方、寒色系は将来より短い再現期間の河川流量になる、つまり 100 年に 1 度の洪水の頻度が増加することを意味する。Hirabayashi et al. (2013) と同様、ヨーロッパ、南米南部で 100 年に 1 度の洪水は減

少し、アジア、アフリカ、南米の湿潤地域で 100 年に 1 度の洪水は増加する。この傾向は、他の再現期間でも同様に示された。

一方 GCM の不確実性を考慮しその合意度を示すことは近年重要となっている。図-6 は、グリッドごとにいくつの GCM が増加、あるいは減少となっているかを示したものである。図-5 と図-6 を比較すると、ほぼその増減分布が一致しており、このことから本研究における GCM の不確実性を評価することができた。

(2) 氾濫面積

本研究では、河川氾濫モデル CaMa-Flood を用いて研究領域に限定して、現在 (1970～2000) および 21 世紀末 (2070～2100) について氾濫面積を計算した。図-7 は研究領域内の氾濫面積を時系列で示したものである。現在と 21 世紀末の両期間での中央値と標準偏差は表-2 のとおりであり、21 世紀末にはアジア域で氾濫面積が 1.1 倍になり、標準偏差が 1.27 倍になることが示された。

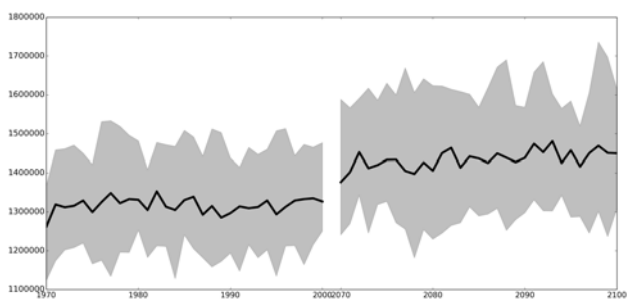


図-7: 研究領域内の氾濫面積の時系列。単位は km^2 。左が現在 (1970～2000)、右が 21 世紀末 (2070～2100)。黒実線が使用した 7 つの GCM の平均。灰色はその 7 つの GCM の振幅。

表-2: 研究領域内の氾濫面積の GCM 平均値における、現在 (1970～2000) と 21 世紀末 (2070～2100) との両期間での中央値と標準偏差。単位は km^2 。

	現在	21 世紀末
中央値	1,315,863	1,463,732
標準偏差	77,393	99,060

さらに国別 (表-3) では、氾濫面積の GCM 平均値における期間内中央値が、21 世紀末には、スリランカで約 1.6 倍、バングラデシュとラオスで約 1.5 倍、ミャンマーで約 1.4 倍となることが示された。一方、日本、台湾、タジキスタンではほぼ変わらず、キルギスでは約 0.9 倍と減少している。

続いて本研究領域内で主要な河川であるガンジス、チャオプラヤ、メコン、黄河の流域内 (表-4) では、氾濫面積の GCM 平均値における期間内中央値が 21 世紀末には、ガンジスで約 1.4 倍、チャオプラヤとメコンで約 1.2 倍、

黄河ではほぼ変わらなかった。標準偏差の 21 世紀末における変化の傾向もほぼ同様であった。

表-3: 現在 (1970～2000) に比べ 21 世紀末 (2070～2100) における、国別氾濫面積の GCM 平均値における期間内中央値と標準偏差の変化率。

国名	中央値	標準偏差
バングラデシュ	1.5	1.4
ブータン	1.2	1.2
ブルネイ	1.1	1.1
カンボジア	1.2	1.2
中国	1.1	1.0
インド	1.2	1.2
インドネシア	1.1	1.0
日本	1.0	1.0
韓国	1.1	1.2
北朝鮮	1.2	1.1
キルギス	0.9	1.0
ラオス	1.5	1.4
マレーシア	1.1	1.1
ミャンマー	1.4	1.3
ネパール	1.1	1.2
パプアニューギニア	1.1	1.1
フィリピン	1.1	1.1
東チモール	1.2	1.1
タジキスタン	1.0	0.9
タイ	1.1	1.1
スリランカ	1.6	1.4
ベトナム	1.1	1.1
台湾	1.0	1.1

表-4: 現在 (1970～2000) に比べ 21 世紀末 (2070～2100) における、主要 4 河川の氾濫面積の GCM 平均値における期間内中央値と標準偏差の変化率。

河川名	中央値	標準偏差
ガンジス	1.2	1.1
チャオプラヤ	1.4	1.3
メコン	1.0	1.0
黄河	1.2	1.2

(3) 被害額

本研究では、洪水リスクとして人口分布、一人当たり GCP、浸水深ー被害関数を用いて、各グリッド (空間解像度は 500m) で洪水による被害額を推定する。洪水リスクを考える際には経済発展による資産の増加を無視することは困難である。Hirabayashi et al. (2013) では、現在の人口分布を用いることで社会経済の変化を除き、将

来の洪水曝露人口における気候変動による洪水リスクの変化を議論した。本研究では、前述した ALPS のシナリオ A（中位技術進展シナリオ）における一人当たり GDP の 2000 年と 2100 年との両方のデータを 21 世紀末の洪水リスク推定に用いた。その結果、気候変動に伴う被害額の変化率とそれに経済発展も考慮した推定を可能とした。なお、GCM は MIROC5 のみである。表-5 は国別の被害額の期間内中央値の変化率を示す。これを見て分かるように、2100 年一人当たり GDP を用いた被害額推定では、その一人当たり GDP の違いが非常に大きくなる一方、2000 年一人当たり GDP を用いた推定はその気候変動による洪水の変化による影響がそれほど大きくないことを示している。如何に社会経済変動の影響が大きいか、大変重要な情報となる。国別に見ていくと、発展途上国と中進国、先進国で傾向が大きく異なっており、既に経済発展している国は 2100 年一人当たり GDP で推定しても大きく変わらないが、将来の大きな経済発展が潜在的にある発展途上国では非常に大きな値となっている。

表-5：現在（1970～2000）に比べ 21 世紀末（2070～2100）における、国別洪水被害額における期間内中央値の変化率。一人当たり GDP が左は 2000 年、右は 2100 年を用いた。

国名	2000 年 GDP	2100 年 GDP
バングラデシュ	1.2	64.7
ブータン	1.0	86.5
ブルネイ	1.0	12.1
カンボジア	1.6	123.1
中国	1.1	32.9
インド	1.2	61.6
インドネシア	1.1	23.9
日本	1.1	1.6
韓国	1.2	5.5
北朝鮮	1.1	28.4
キルギス	0.9	43.4
ラオス	1.3	110.3
マレーシア	1.5	21.6
ミャンマー	1.2	66.1
ネパール	1.1	67.2
パプアニューギニア	1.1	87.3
フィリピン	0.7	24.9
タジキスタン	0.9	74.9
タイ	1.6	18.7
スリランカ	2.0	70.1
ベトナム	1.2	55.6
台湾	0.9	2.5

続いて本研究領域内で主要な河川であるガンジス、チャオプラヤ、メコン、黄河の流域内（表-6）では、洪水

による被害額における期間内中央値が 21 世紀末には、2000 年一人当たり GDP ではチャオプラヤで約 1.8 倍と大きい、2100 年一人当たり GDP では約 22 倍と他の流域と比べて小さい。このことは、チャオプラヤ流域が属するタイがすでに中進国であることが大きい。逆にガンジスは 2000 年一人当たり GDP では約 1.2 倍だが、2100 年一人当たり GDP では約 61.7 倍と非常に大きくなり、インドにおける経済発展の影響の大きさを示している。

表-6：現在（1970～2000）に比べ 21 世紀末（2070～2100）における、流域別洪水被害額における期間内中央値の変化率。一人当たり GDP が左は 2000 年、右は 2100 年を用いた。

河川名	2000 年 GDP	2100 年 GDP
ガンジス	1.2	61.7
チャオプラヤ	1.8	22.0
メコン	1.4	45.6
黄河	1.1	32.4

(3) 主要なメガシティにおける洪水被害額の将来変化

これまで国別や流域別に見てきたが、洪水対策として適応策を考える際、人口集積域であるメガシティの優先順位はどうしても高くなるであろう。そのような社会的要請を考え、本研究では研究領域内におけるメガシティのいくつか（デリー、コルカタ、ダッカ、北京）を例として洪水被害額の推定をし、その将来変化を検討した。

被害額を推定する際、メガシティの範囲が必要となる。その方法は、まず各都市の中心を Google Map で仮に設定し、その周辺における最大の人口となるグリッドを中心とした。その中心となるグリッドから 1 グリッドずつ大きい正方形を 2 つ仮定し、それぞれの一番外側のグリッド群を n と $n+1$ とする。グリッド群 n のうち $n+1$ の平均値より大きいものから足していき、それを外側に向けて拡大していく。最終的にその各都市の人口¹³⁾に達したところで、グリッド群 n のうち大きい方から足していく。

表-7：主要なメガシティにおける洪水被害額の変化率。2000/2000 は 21 世紀末（2070～2100）の洪水被害額を 2000 年一人当たり GDP で、2100/2000 は 2100 年一人当たり GDP で算出した際の変化率。

都市名	2000/2000	2100/2000
デリー	2.2	116.9
コルカタ	0.8	42.4
ダッカ	1.6	86.0
北京	1.3	40.6

次に、範囲が決定されたメガシティごとの洪水被害額を表-7 に示す。2000 年一人当たり GDP と 2100 年一人当たり GDP の両方を比較するため、21 世紀末における洪水被害額を 2000 年一人当たり GDP と 2100 年一人当たり GDP

とで算出し、現在の洪水被害額で除し、その変化率を示した。コルカタを除いて、それぞれのメガシティが属する国よりも変化率は大きく、適応策を考える際に重要な情報となり得ることを示した。また、各メガシティにおいて標準偏差を見ると、やや年々変動が増加する傾向にあった(図-9)。これは国別や流域別に見た氾濫面積や被害額においても同様の傾向である。

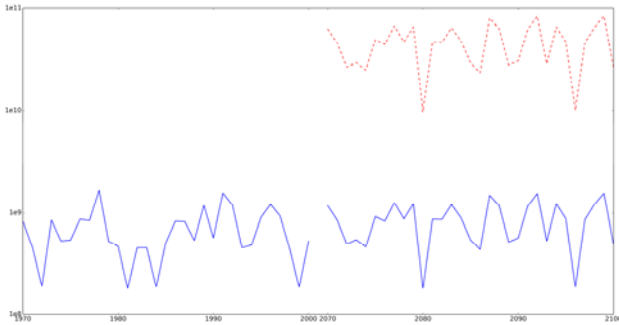


図-9：ダッカにおける洪水被害額の年々変動。単位は米ドル。

4. まとめ

本研究では、将来社会経済シナリオを用いて、現在と21世紀末における洪水リスクが推定された。将来社会経済シナリオはALPSのシナリオAを採用した。CMIP5の予測シミュレーション実験結果(RCP8.5)の流出量を河川氾濫モデルCaMa-Floodに入力し、洪水リスクを評価するために必要な河川流量や氾濫面積、浸水深が得られた。その浸水深データを被害割合に換算する関数を用いて、最終的に洪水リスクが各グリッドで推定された。

21世紀末における洪水頻度は、アジアのほぼ全域で増加傾向、氾濫面積はスリランカやバングラデシュ、ラオス、ミャンマーで約1.4～1.6倍となる一方、日本、台湾、タジキスタン、キルギスではほぼ変わらない傾向であった。被害額の推定では、経済発展の影響が非常に大きく気候変動による影響は大変小さいが、適応策を考える際に区別して評価する重要性を示した。

今後の課題として、被害額を減少させるための適応策のコストを推定し、被害額と適応策コスト、そして緩和コストを勘案して統合的な緩和・適応策の実施策定に向けた研究を実施する必要性が示された。

謝辞：本研究を推進するにあたり、東京工業大学大学院理工学研究科の鼎信次郎教授ならびに東京大学大学院工学系研究科平林由希子准教授には、研究構想の実現化に向けた有益な助言を頂いた。東京大学工学部学部生の池内寛明氏には、計算手法の基礎について情報を提供いただいた。東京大学大学院工学系研究科修士課程嶋野美佐子氏には、具体的な計算に携わり研究の推進に大きく貢献いただいた。ここに深く御礼を述べたい。

参考文献

- 1) 中北英一、宮宅敏哉、Kim Kyoungjun、木島梨沙子：気候変動に伴う梅雨期の集中豪雨の将来変化に関する領域気候モデルを用いた基礎的研究、土木学会論文集 B1 (水工学)、Vol.68, No.4, I_427-I_432, 2012.
- 2) Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., Kim, H. and Kanae, S.: Global flood risk under climate change, *Nature Climate Change*, doi:10.1038/NCLIMATE1911, 2013.
- 3) Taylor, K.E., Stouffer, R.J. and Meehl, G.A.: An overview of CMIP5 and the experiment design, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 485-498, 2012.
- 4) Yamazaki, D., Kanae, S., Kim, H. and Oki, T.: A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model, *Water Resources Research*, 47, W04501, doi:10.1029/2010WR009726, 2011.
- 5) 本間隆嗣、秋元圭吾、徳重功子、和田謙一：社会経済要因の分析に基づいた将来の社会経済シナリオの策定、第27回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、2011.
- 6) Klein Goldewijk, K., Beusen, A., van Dreht, G. and de Vries, M.: The HYDE 3.1 spatially explicit database of human-induced global land-use change over the past 12,000 years, *Global Ecology and Biogeography*, 20, 73-86, 2011.
- 7) Dutta, D., Herath, S. and Musiake, K.: A mathematical model for flood loss estimation, *Journal of Hydrology*, 277, 24-49, 2003.
- 8) Klijn, F., Baan, P., De Bruijn, K. and Kwadijk, J.: Overstromingsrisico's in Nederland in een veranderend klimaat, Q4290, *Delft hydraulics*, 166, 2007 (in Dutch).
- 9) Jongman, B., Kreibich, H., Apel, H., Barredo, J.I., Bates, P.D., Feyen, L. and Ward, P.J.: Comparative flood damage model assessment: towards a European approach, *Natural Hazards Earth System Science*, 12, 3733-3752, 2012.
- 10) Vanneville, W., Maddens, R., Collard, C., Bogaert, P., De maeyer, P., Antrop, M. and Geografie, V.: Impact op mens en economie tgv overstromingen bekeken in het licht van wijzigende hydraulische condities, omgevingsfactoren en klimatologische omstandigheden, FEA MIRA, UGent, 2006 (in Dutch).
- 11) Sato, T., Yamazaki, D., Lim, W.H., Koirala, S. and Kanae, S.: Modeling the impact of sea level rise to potential flood damage in the Mekong, *Journal of Japan Society of Civil Engineering Ser. B1*, Vol.70, No.4, I_103-I_108, 2014.
- 12) Yoshimura, K., Sakimura, T., Oki, T., Kanae, S., and Seto, S.: Toward flood risk prediction: a statistical approach using a 29-year river discharge simulation over Japan, *Hydrological Research Letters*, 2, 22-26, DOI:10.3178/HRL2.22, 2008.
- 13) Thomas Brinkoff: City Population, <http://www.citypopulation.de/>, downloaded on December 1, 2013.