

気候変動と人口増加によって、将来起こり得る洪水被害を予測し、あらかじめ対処する ～フィリピン・カガヤン川での実証～

氏 名：栗原 悠太

修学機関：政策研究大学院大学 博士課程（防災学プログラム）

National Graduate Institute for Policy Studies Doctoral Programs
(Disaster Management Program)

研究テーマ：フィリピン・カガヤン川流域における戦略的治水投資のための社会経済・
気候変動影響の統合評価

Integrated Assessment of Socio-Economic and Climate Change Impacts for
Strategic Flood Control Investment in the Cagayan River Basin, Philippines

略 歴（くりはら ゆうた）

現在、株式会社オリエンタルコンサルタンツグローバルにて防災エンジニアとして勤務。2021年に東京工業大学 環境・社会理工学院を卒業したのちに入社。入社後は防災エンジニアとして、フィリピンにて中央防災局の能力強化プロジェクトに従事。その他、パプアニューギニアにて空港マネジメントツールの導入、ホンジュラスにて道路計画における将来の都市域予測に従事している。2023年10月より、勤務を続けながら政策研究大学院大学の博士課程にて、防災学を専攻している。

- 気候変動と人口増加が引き起こす洪水リスクの増大とその把握は、多くの国にとって喫緊の課題であり、本研究ではそのリスクについてフィリピン国、カガヤン川において定量的に把握した。
- 研究手法として、気候モデル（CMIP6）による統計的ダウンスケーリングによる気候変動アセスメントと、人工ニューラルネットワーク（ANN）を用いた土地利用変化予測を組み合わせ、将来の洪水リスクを定量的に評価している。
- その結果、最も深刻なシナリオでは将来的に水田における洪水被害面積が最大約 870 km²増加すると推定され、地域の人口の最大 46%が洪水ハザードエリアに居住すると予測されている。
- 今後、科学的根拠に基づいた治水投資を促進し、途上国における効果的な防災政策の推進を目指している。

研究バックグラウンド

投資において重要なことは、一般論ではあるが、可能な限り未来を予測し、投資額に対して十分なリターンが見込まれると判断した場合に投資を行うことである。これは個人の投資にも、公共投資にも共通する基本的な考え方だと思う。

しかし現実には、将来の見通しが立たないことを理由に、リスクやリターンについての議論がなされないまま投資が見送られ、その結果として機会損失による被害を受けてしまうことが少なくない。

防災分野に関して言うと、私自身、防災エンジニアとして途上国の防災支援に携わる中で、上記のような防災投資への機会損失が、結果として大規模な災害被害や経済的損失につながっている国が多いのではないかと感じるようになった。

本研究では、防災投資、特に治水投資¹に着目し、その投資効果が実際にどの程度あるのかを、データと科学的知見に基づいて検証することを目的としている。もちろん、その結果として治水投資は投資に値しないといった結果が得られたとしても、それは一つの結論として価値のあるものだと思う。

もし治水投資のリターンを明確に示すことができれば、より多くの地域で投資が促進され、災害による被害を未然に防ぐことにつながると信じている。

研究手法

未来を予測することとは、本研究の文脈では地球システム、人間社会、経済活動の三つの領域で行われる。具体的には、

- ① 将来、気候変動が洪水強度に与える影響の分析、
- ② 将来、人口増加に伴う土地利用変化の分析、
- ③ 洪水被害が経済活動に与える短期、長期の影響の分析、である。

気候変動によって将来、降水パターンや極端現象に大きな変化が生じることが予測されている。複雑系の地球システムをモデルをもちいて統計的に解釈し、降雨量の変化として尤もらしい数値を導出することが本研究の第一の目的である。

さらに、人間社会もまた非常に複雑である。人口の増減に応じて、地形的制約を受けながら土地

¹ 洪水リスク削減に係る投資で、堤防やダム、遊水地整備などがある。

利用形態が大きく変化する。人間と自然は相互に影響を及ぼしながら動的に変化しており、こうしたプロセスについても将来起こりうるシナリオを可能な限り、現実的に予測することが求められる。

そして最後に、自然災害、とりわけ洪水が経済に与える短期、長期的な影響を評価する。マクロ経済モデルを用いることで、災害が社会に及ぼす潜在的リスクを可視化し、定量的に評価することが可能となる。これにより、科学的根拠に基づいた政策決定や治水投資の判断が実現できると考えている。

こうした将来予測の分野においては、各種モデルから得られる結果の解釈が極めて重要となる。モデル間で生じる確率的な誤差も適切に評価しつつ、政策立案に用いるに足る精度の成果を提示することが、本研究の基本的な命題である。

本エッセイでは、この三要素のうち、①気候変動の影響評価と②土地利用変化の評価について、概要を紹介することとする。

対象地域

対象地域であるフィリピンは東南アジアに位置する島嶼国家であり、台風、洪水、地震、津波など、様々な自然災害に頻繁に見舞われる「災害大国」である。その地理的特性は日本と類似しており、自然災害に対する高い曝露リスクを有している。人口は 2014 年に 1 億人を突破し、2025 年現在では約 1 億 2,000 万人に達しており、平均年齢は 24 歳と非常に若い。将来的には、日本の人口を 2030 年頃までに追い越すと予想されている。一方で、経済面では、GDP は日本の約 10 分の 1 に留まっている。

洪水リスクに関して、私の解析によれば、全国の 17% を占める洪水ハザードエリアの中に、フィリピンの全人口のうち 46% が居住している。そして、その人によって得られる生産活動は、国の GDP の 50% を占める。²

日本の場合は、国交省の資料によると、全国 10% の洪水氾濫区域に対して、50% の人口が住んでおり、75% の資産が集中している。資産と GDP では意味合いが異なるが、両国ともに非常に洪水リスクが高い地域に社会活動が集中していることは共通している。

² ハザードマップは MGB (Mines and Geosciences Bureau)、人口は WorldPop のメッシュデータを国勢調査の結果にて修正、GDP は PSA (Philippine Statistics Authority) が出している地域ごとの GDP/capita を用いて算出。

一方で、災害に対する脆弱性という観点では両国は大きな違いがある。日本では 1 級河川、2 級河川において、河川基本方針が全国で整備されており、方針に基づいた河川整備計画によって段階的に洪水リスクの削減を進めている。一方で、フィリピンでは河川のマスタープランは一部の河川に限られており、また、計画があったとしても治水事業は実施されず、結果として、治水インフラが十分に整備されていない地域が多い。あるいは治水インフラが老朽化しており、洪水の発生頻度や被害の程度はより深刻である。また、社会保障体制が脆弱であり、災害によって住居や生業（農業や家畜）を失った被災者が、政府からの支援を十分に受けられず、保険制度も限定的であるため、社会復帰が困難となる事例が多い。

カガヤン川流域は、全国最大の流域面積（約 27,000km²、利根川より約 10,000km²広い）および最長の河川延長（約 520km、信濃川より約 150km 長い）を有し、大規模なコメおよびトウモロコシ栽培が行われる、いわば国の穀倉地帯である。本調査では、この重要流域における将来の洪水リスクを定量的に把握し、適切な治水投資の検討に活用されれば幸いである。

気候変動予測

気候変動に関する将来予測には、国際的な研究の標準的枠組みである CMIP6（Coupled Model Intercomparison Project Phase 6）に参加している全球気候モデル（GCMs: General Circulation Models）の出力結果を用いた。GCM は、大気圏、陸圏、海洋圏の物質循環を記述する流体力学および熱力学に基づく数理モデルであり、各圏域のエネルギー・水・炭素の交換過程を相互作用として捉えつつ、地球全体の気候システムを時間積分によって再現するものである。

これらのモデルには、将来の温室効果ガス排出量を想定した社会経済シナリオ（SSP126、SSP245、SSP370、SSP585）が入力され、大気中の CO₂濃度の変化が長波放射量に影響を及ぼし、最終的には気温上昇、降水パターンの変化、風速の変化などが出力される。

表 1 温室効果ガス排出量を想定した社会経済シナリオ

シナリオ	シナリオの概要
SSP1-2.6	持続可能な発展の下で気温上昇を 2°C未満に抑えるシナリオ
SSP2-4.5	中道的な発展の下で気候政策を導入するシナリオ
SSP3-7.0	地域対立的な発展の下で気候政策を導入しないシナリオ
SSP5-8.5	化石燃料依存型の発展の下で気候政策を導入しない最大排出量シナリオ

Japan Center for Climate Change Actions のサイトより抜粋

34 の GCM の公開されているモデルの中から、対象地域であるフィリピン・カガヤン川流域において、過去 20 年間（1995～2014 年）の気候（降水量、気温、長波放射、風速）の再現性が高か

った 3 つの GCM モデル (ACCESS-CM2、CanESM5、EC-Earth3-Veg-LR) を選定した。

GCM モデルは地球の気候を再現できているとは言えども、局所的な気候を見てみるとモデル特有の“クセ”が残っており、この“クセ”を観測値の値を用いて統計的に補正する必要がある。(統計的ダウンスケーリング)

その後、3 つの GCM から得られた将来の降雨量を統計的処理を施したら、カガヤン川流域における将来の極端降雨のリスクがシナリオ SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5 において増加することが示された。

図 1 には、複数のシナリオに基づく洪水シミュレーション結果を示している。図 1A は現在の気候条件における 100 年確率降雨を用いた洪水シナリオ、図 1B~E は、社会経済シナリオ (SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5) に対応する将来気候下の洪水リスクを表している。

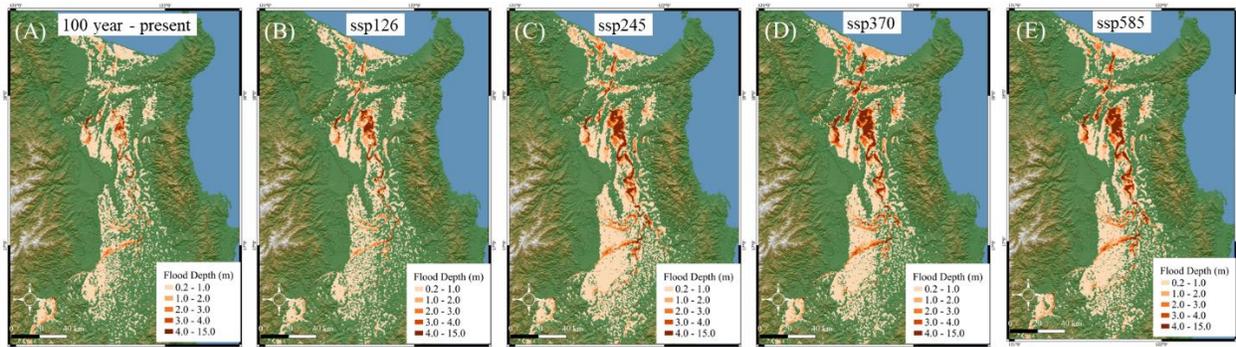


図 1 気候変動下における洪水シミュレーション結果

降雨の量だけでなく、時間的な降雨パターン、空間的な降雨パターン、台風の進路など様々な影響を加味した結果の洪水リスクを把握することが重要であり、結果的には、図 1 で示されているように、将来的には浸水範囲が拡大することが示唆された。

土地利用予測

将来の土地利用変化の推定にあたっては、①データ駆動型の開発空間予測と、②人口増加シナリオに基づく需要推計という二つのアプローチを統合した手法を採用した。

まず、開発空間予測としては、過去の土地利用変遷データをもとに、地形条件 (標高、傾斜)、交通インフラ (道路、河川) へのアクセス性、既存の都市および農地の分布といった地理的要因に基づき、土地利用変化が発生しやすい場所をスコアリングした。

すなわち、人間活動が行われやすい地域には、たとえば平坦で主要道路に近いといった何らかの

地形的特性が存在するという考えを元に行っている。こうした特性の因果関係を、人工ニューラルネットワーク（Artificial Neural Networks: ANN）によって明らかにし、将来も同様の傾向に基づいて開発が進むという前提のもと、空間的な予測を行っている。

一方、社会経済シナリオに基づく需要推計モデルでは、将来の人口構造を前提とし、各土地利用区分に必要となる面積を推定した。都市用地については、都市人口比率と想定人口密度を用いて、将来の都市用地の需要面積を算出した。農地については、国民一人あたりの年間コメおよびトウモロコシ消費量から全国レベルでの食料需要を推計し、対象地域における必要な生産量および農地面積を導出した。将来、増えた人口を居住させるための都市部が必要になるだろうし、国民に供給する分のコメやトウモロコシなどの主食を精算する必要があるという仮定である。

最後に、開発空間の予測と土地需要の双方からのアプローチを統合することで、土地利用の変化が起こりやすい場所に対して、土地利用ごとの需要に応じた面積の変化を反映するモデルを構築した。これにより、将来の都市部や農村部として開発されるだろう範囲を反映した土地利用図が得られた。

下図は、2020 年の土地利用・土地被覆（LULC）マップ（A）、シナリオ 2 に基づく 2070 年の予測 LULC マップ（B）、2020 年時点のトゥゲガラオ市周辺の LULC マップ（C）、および 2070 年における同地域の予測 LULC マップ（D）を示している。

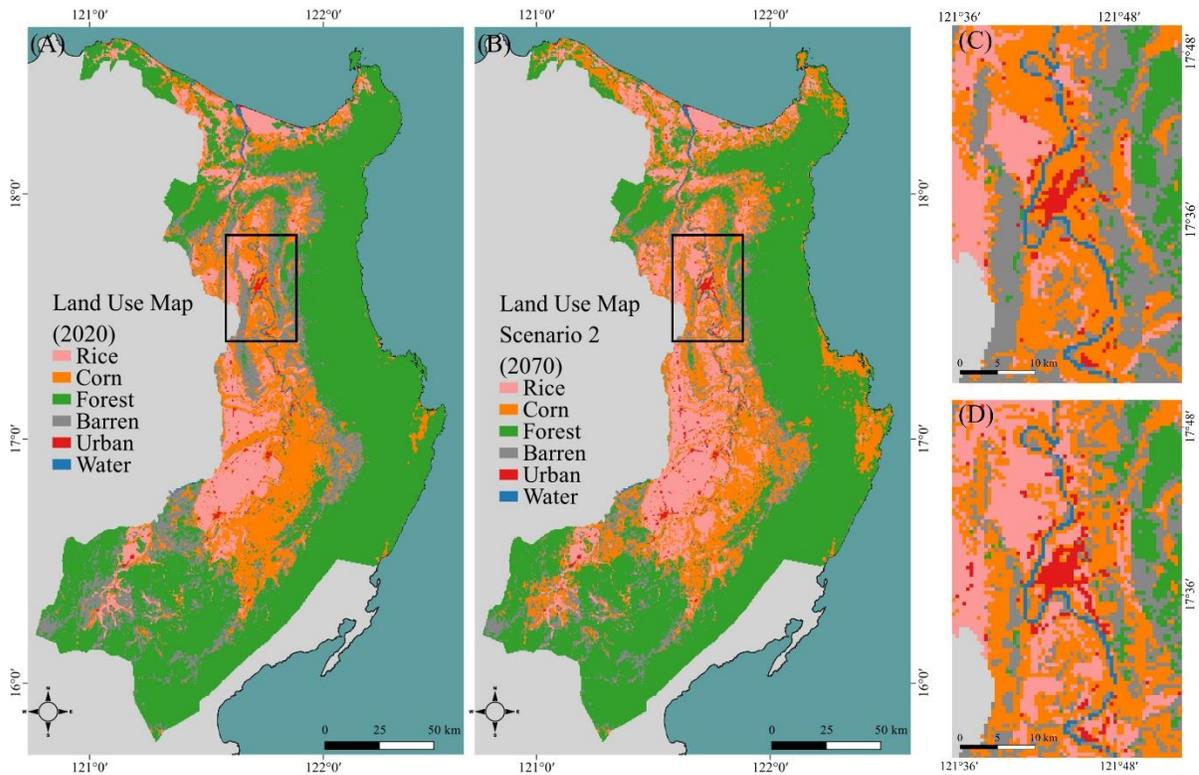


図 2 人口シナリオに基づいた将来の推定土地利用図

結論

気候変動に関する 4 つの SSP シナリオ (SSP126、SSP245、SSP370、SSP585) と、人口増加に関する 3 つの将来シナリオを組み合わせた計 12 通りの複合シナリオに基づき、将来的な洪水リスクの増加を定量的に評価した。

その結果、気候変動および土地利用の変化により、特に水田、人口集中地域、都市域において洪水リスクが顕著に増加することが明らかとなった。なかでも、最も深刻なシナリオでは、稲作地における洪水被害面積が最大で約 870 km^2 増加すると推定された。

一方で、トウモロコシ畑に関しては、土地利用の変化により、洪水被害を受ける農地の一部が水田へと転換されることで、リスクが相対的に低下する傾向も見られた。ただし、一部の地域では、気候変動に伴う降雨パターンの変化により、逆に洪水リスクが増加するという興味深い結果も得られた。

2070 年には、人口の最大 46% が洪水ハザードエリアに居住する状況が予測されており、特に

都市人口の過半数が洪水リスク下に置かれると推定されている。このような状況下では、洪水発生時における避難の混雑や、避難所での衛生環境および生活環境の維持といった新たな課題が顕在化することが懸念される。

以上の結果から、将来的な都市化と人口集中に対応した洪水リスク軽減のためには、土地利用規制を含む防災計画の強化、早期警戒システムの整備、避難所の配置と容量の最適化、ならびに避難経路の管理といった、多面的かつ戦略的な対策の立案と実施が、政府に対して一層強く求められる。

さらに今後は、各シナリオがどの程度確からしいかを議論せずに結果を出していることへの批判に対して、対応すべく、各シナリオの発生確率を求めたい。

つまり、これまでの気候変動および土地利用の変化に関する**決定論的シナリオ**の取り扱いから、**確率論的シナリオ**として取り扱うことで、各シナリオの生起確率を評価し、どの将来像がより現実的に生じやすいのかを明らかにしていきたい。

これにより、政策決定の根拠として用いることのできる、より実効的な洪水リスク分析が可能になると考えている。

この研究の成果は近々国際ジャーナルに投稿予定のため、詳細はそちらを参照してほしい。さらに、マクロ経済モデル床の洪水リスク予測の結合についても研究を進めていく予定である。

最後に

最後に、FASID 様から本奨学金の支援対象として採択いただいたことに、改めて深く感謝申し上げます。本奨学金のご支援を受けてから半年が経過し、研究は充実したものとなっていると思います。本文では紹介しませんでした。洪水被害の空間評価モデルを構築し、国際ジャーナル誌に成果を発表したほか、気候変動と土地利用変化を組み合わせた将来リスクの評価も順調に進行しております。加えて、近年注目されるマクロ経済モデルを取り入れた経済影響分析にも着手し、学際的な研究の幅を広げることができると思っております。

こうした研究が可能になっているのは、FASID 様からのご支援によって、時間的・資金的余裕をもって研究に集中できる環境が整ったからに他なりません。今後も、いただいた支援を最大限に活かし、途上国の防災政策の高度化に資する研究成果を発信できるよう、引き続き全力で取り組んでまいります。