

論文審査報告書

氏 名	ばんばん あでい ぷりやんぼどほ Bambang Adhi Priyambodho
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博環第6号
学位授与日	令和4年3月19日
論文題目	Future Flood Projections in Jakarta, Indonesia based on Urban Development and Urban Climate Change (インドネシア・ジャカルタにおける都市開発と都市気候変動に伴う将来の洪水氾濫予測)
論文審査委員	(主査) 富山県立大学 准教授 呉 修一 教授 渡辺 幸一 教授 星川 圭介 准教授 久加 朋子 東北大学 教授 風間 聡

内容の要旨

本論文は、インドネシア・ジャカルタ特別州（以降、ジャカルタ）の将来の都市の成長が、豪雨および洪水に与える影響を、都市の将来成長の予測データ、地球温暖化予測データを入力とする洪水シミュレーションを用いて評価したものである。ジャカルタは経済発展を謳歌する一方で、年々、洪水氾濫の頻度・規模が増加しており、都市化による影響が指摘されている。急激な都市の発展にともない、上流域の森林の田畑や市街への変化や下流沿岸部の地盤沈下などの問題が生じている。従来からジャカルタのみならずアジアのメガシティを対象とした、地球温暖化の影響評価の研究や将来の土地利用の変化を評価する研究が数多く存在する。しかしながら、これら都市の成長を評価する際に、都市の複数発展シナリオや、ヒートアイランドなどの都市気象は考慮されていなかった。本論文では、これら地球温暖化と都市化の影響に加えて、ヒートアイランドが豪雨・洪水氾濫に与える影響が、複数シナリオに基づき評価されている。

第1章では、地球温暖化や将来の都市化、土地利用の変化が洪水に与える影響に関する既往研究や、ジャカルタを対象とした洪水予測シミュレーション、地球温暖化の影響評価などに関する既往研究のレビューが実施された。この結果、ジャカルタの洪水に関する研究は多数実施されているが、ヒートアイランドの影響を考慮した洪水氾濫計算の実施は、ジャカルタにおいては世界各地の洪水研究では殆ど見う

けられないことが明らかとなり、本論文の新規・重要性が明確にされた。

第2章では、ジャカルタおよび対象領域の概要が説明されている。ジャカルタおよび周辺領域の標高や河川網、土地利用などの基本情報が示され、下流域の殆どは市街化しており、上流域の山地も徐々に都市や田畑などへ変化が進行していることが明らかとなった。また過去に生じた洪水災害の特徴が示され、都市型水害を示すジャカルタでは非常に複雑な洪水氾濫機構を示すとともに、過去のデータや水害統計・詳細レポートが不足していることが明らかとなった。データに関して、グローバルに利用可能な水文データから、ジャカルタ政府などから提供されたデータの、概要説明も行われている。

第3章では、ジャカルタを対象とした洪水氾濫シミュレーションモデルが開発・適用されており、過去に実際に生じた2013年の洪水イベントでモデルの検証が実施されている。洪水シミュレーションモデルは、降雨流出モデル、河道部の洪水追跡モデル、氾濫域での2次元氾濫モデルの3つが動的に統合されたモデルとなっている。本論文では更に、海洋からの異常潮位時の浸水を考慮するために、海域と陸域を結合したモデル改良がなされている。モデルの適用検証結果より、2013年の洪水イベントに対して良好な結果を得ることに成功している。本モデルは、更に最近の洪水災害（2015～2020年）の6イベントでも検証されており、各洪水に対して良好な再現性を示している。海洋からの浸水の影響は、平均潮位のみを考慮する地球温暖化の影響評価では、多少の浸水しか生じないことが明らかとなり、以降の章では海洋からの浸水は考慮せずに陸域のみの解析で進められている。

第4章では、将来の都市成長の結果として、地盤沈下の進行、土地利用の変化が生じ、これらがジャカルタの洪水氾濫に与える影響が洪水シミュレーションより評価されている。地盤沈下に関しては、ここ30年の地盤沈下の進行スピードが、そのまま継続するものとして将来の地盤沈下状況の空間分布を推定し、地盤沈下を考量した地形で洪水シミュレーションが実施されている。将来の土地利用は、SLEUTHモデルという都市の将来成長を予測するモデルを用いて算定している。SLEUTHは、過去から現在までの都市の拡大状況を各グリッドの標高、土地利用、勾配などのデータの変遷をもとに、将来予測するものである。将来の都市の成長シナリオとして、SSP3（最悪シナリオ）とSSP1（コンパクト成長）に、二つの規制シナリオを追加した4ケースで検討を行った。このように複数の土地利用変化シナリオで将来展望を予測し洪水シミュレーションを実施した結果、2050年には、洪水氾濫量がSSP3（最悪シナリオ）では35%増加し、土地利用を最も規制したケース（Controlled Growth：規制シナリオ）でも25%増加することが明らかとなった。特に、地盤沈下と土地利用の変化が非線形的に影響しあい、洪水氾濫量を増加させる状況が明らかとなった。このため、土地利用変化の規制のみでは不十分で、地盤沈下の抑制も必要不可欠であることを示している。しかしながら、第4章の検討では地球温暖化およびヒートアイランドの影響が含まれていないため、以下の第5章でそれらの検討が行われた。

第5章では、地球温暖化とヒートアイランドが将来の雨量に与える影響が評価された。この影響評価では、領域気象モデルWRFが使用されている。領域気象モデルは、大気中の空気、熱、水分の移動を3次元かつ高解像度で計算するものであり、降雨予測や気象データの動的ダウンスケーリングなどで活用されている。特に本論文では、都市の影響を考慮するためにWRFの陸面モデルに都市のモデルを考慮したモデルが実装されている。この領域気象モデルWRFの境界条件として、地球温暖化の将来気象のみ、地球温暖化の将来気象+都市の将来成長、とで比較検討を行うことで、地球温暖化のみの場合と都市の発展を伴う場合を比較する。これにより、ヒートアイランド現象が豪雨・洪水氾濫に与える影響が算定される。解析結果より、ヒートアイランド、地球温暖化の影響により、豪雨の増加が将来生じ、これに伴い河川流量・洪水氾濫が増加することが定量的に評価された。特に、ヒートアイランドのみの

影響で 2050 年に洪水氾濫量は 5~7%程度増加することが明らかとなった。これは地球温暖化による豪雨の増加、土地利用の変化による河川流量の増加を考慮していない場合での値である。このように都市化に伴うヒートアイランドが洪水氾濫に与える影響が定量的に示された事例は、世界でも稀である。

第 6 章では、このような将来の洪水規模の増加を抑えるため、各種の適応策（洪水対策）が費用便益分析 (Benefit/Cost)の観点から評価された。本論文では、河道の拡幅、堤防の嵩上げ、土砂の浚渫などのハード面での B/C が算定された。また、既往の浸透井戸の増設、遊水池、グリーンインフラ、海岸防潮堤などと比較されている。適応策がある場合とない場合での洪水氾濫の被害額の差が Benefit として算定され、その適応策に要する費用が Cost として、算出されている。本論文で、算定した B/C は 0.06~0.08 程度であり、実施効果は低いと判断された。このように、洪水被害を軽減する有効な手法、特にハード対策はコストが高く B/C が低いため、ジャカルタへの実装は予算面の観点から現実的ではない。よって、洪水予測などのソフト面での対策が評価される必要がある。

第 7 章では、ジャカルタの洪水対策のソフト面として、衛星雨量に基づく洪水の予測が取り組まれている。全世界で高解像度で利用可能な衛星雨量 GSMaP を利用することで、ジャカルタでの洪水氾濫のリアルタイム予測に取り組んだ。使用した GSMaP は、GSMaP-NRT と GSMaP Gauge の 2 種類である。GSMaP-NRT は準リアルタイムで配信されるため、実用上で予測として使用するものである。また Gauge は、衛星観測後に地上雨量データなどで補正されたものであり、NRT のバイアスなどを改善し精度の高まったものである。地上雨量データ、河川流量、洪水氾濫マップとの比較より、やはり NRT では精度が低く、Gauge を使用することで衛星雨量を用いた洪水予測がある程度の精度で可能であることが示された。しかしながら、Gauge は補正されたデータであるため、今後は NRT の時々刻々のバイアス補正を考慮したリアルタイムでの利用方法の確立が必要となる。また衛星雨量以外にも、レーダの設置・運用や領域気象モデルを用いたアンサンブル降雨予測などの検討が必要であることが提案されている。

第 8 章では、上記した各章の概要と結論が述べられている。また、最後にジャカルタ政府への提言として、上流域の土地利用の規制、下流域での地下水利用の抑制を通じた地盤沈下のストップ、ヒートアイランドの緩和に向けてエネルギー効率の改善やグリーンインフラの促進、などの提言がなされている。

以上、本論文は、インドネシア・ジャカルタ特別州の将来の洪水規模を推定し、それに適応するための洪水対策を検討したものである。将来予測では、土地利用の変化、地球温暖化による降雨の変化、ヒートアイランドによる降雨の変化が算定され、これらを用いた洪水シミュレーションで河川流量と洪水氾濫量が算定されている。結論として、将来の洪水氾濫量は、SSP1（コンパクト成長シナリオ）で、現在と比べて、土地利用の変化：5.2 Mm³、気候変動：3.3 Mm³、ヒートアイランド：1.5 Mm³ の影響で上昇する。また SSP3（最悪シナリオ）で、土地利用の変化：5.8 Mm³、気候変動：6.8 Mm³、ヒートアイランド：1.9 Mm³ の影響で上昇することが算定された。これにより、将来、ヒートアイランド単独の影響では、洪水氾濫量が 5-7%程度上昇することが定量的に示されている。

このように地球温暖化のみならず、ヒートアイランドが地球温暖化に与える影響が定量的に評価された事例は、世界でも稀な事例であり、本論文で示された手法と結論は、今後の都市域における地球温暖化の影響評価の検討方法に対して、極めて大きい指針と影響を与えるものである。

審査の結果の要旨

本論文は、インドネシア・ジャカルタ特別州（以降、ジャカルタ）の将来の洪水規模を算定し、それへの適応策を提案することを目的としている。地球温暖化に加えて、都市の成長として土地利用の変化のみではなく、都市の成長に伴うヒートアイランドの影響が豪雨および洪水氾濫に与える影響が評価されている。本論文は、全8章で構成されており、各章で明らかとなった点は以下のとおりである。

第1章では、気候変動やジャカルタの洪水の数値モデリングなどの既往研究のレビューが実施され、ヒートアイランドの影響評価は既往研究では検討されておらず、本論文の新規性が明確にされている。

第2章では、対象領域の概要と使用したデータセットが説明されている。特に過去の水害の特徴が示されており、ジャカルタの複雑の洪水メカニズムや過去の水害資料の乏しさが明確にされている。

第3章では、使用する洪水シミュレーションモデルが説明された。本手法は既存のモデルであるが、ジャカルタへの適用において、海洋からの浸水を考慮できるよう沿岸域の地形の修正や境界条件の変更などの改良が行われている。これにより海洋からの浸水も本論文では定量的に評価している。

第4章では、将来の都市の成長が SLEUTH モデルを用い複数シナリオで予測され、シナリオに応じた洪水氾濫量の増加を定量的に評価している。最悪シナリオで洪水氾濫量は 35%増加し、制御シナリオでも 25%増加するという、かなりの規模で上昇が見込まれることが明らかにされた。

第5章では、地球温暖化のみならずヒートアイランドの影響を評価するため、領域気象モデル WRF の陸面モデルに都市キャノピーを組み込んだ世界最先端の手法が使用されている。これにより地球温暖化に都市の成長が加わるとヒートアイランドの影響が生じ、降雨強度が上昇することが確認された。付随する河川流量、洪水氾濫量の増加も確認され、将来のヒートアイランドは、洪水氾濫量を 5-7%程度上昇することが示され、都市熱環境の緩和も地球温暖化の緩和と同様に重要であることを示している。

第6章では、各種洪水対策の費用便益分析 (B/C)が行われている。ハード対策はコスト面から実用的ではないことが改めて示され、ソフト面での対策の必要性が述べられている。

第7章では、ソフト面の対策として衛星雨量 GSMaP を使用した洪水予測が実施されている。GSMaP-Gauge を使用することで、ある程度の予測が達成できることが示されている。

第8章では、上記の概要および結論が整理して述べられるとともに、インドネシア・ジャカルタ政府への今後の減災、ヒートアイランド抑制に向けた様々な提言が示されている。

以上、本論文はジャカルタの将来の河川流量、洪水氾濫の増加を定量的に評価するとともに、各種適応策を提案したものである。他の先行研究とは全く異なり、都市の成長や温暖化の影響が複数シナリオで検討されるとともに、ヒートアイランドの影響が定量的に評価されている。このような知見は審査委員らの知見の範囲では、世界でも初めての事例であり、多くの論文査読者からも今後の地球温暖化研究、特に都市域ではヒートアイランドの考慮が不可欠であることを示す極めて重要な内容との指摘を受けるなど、その工学的な価値は極めて高い。

上記の知見は、筆頭著者の論文4報（国際誌2報、国内誌2報）として掲載され、そのうち1報が IF 付きの国際誌であり、1報が土木学会地球環境論文奨励賞を受賞している。加えて関連論文が1報存在する。これらのことから、審査委員会は令和4年2月2日に博士論文の審査及び最終試験を実施した。申請者は当該分野および周辺分野に関して博士としての十分な全般的知識を持ち、学術研究にふさわしい討論ができ、独立して研究を遂行する能力を有するものと判定し、博士（工学）の学位論文として合格であると認められた。