

論文の内容の要旨

論文題目 大陸河川沿岸デルタ域における複合洪水氾濫モデリングに関する研究
Development of a modelling framework for compound flooding in coastal deltas of the world's continental rivers

氏 名 池内 寛明

河川洪水および高潮災害は、世界各地において毎年のように甚大な人命被害・経済被害を引き起こす代表的な自然災害である。21世紀初頭を生きる現代の我々にとって既に大いなる脅威であるということに留まらず、現在進行中の地球温暖化に伴う気候変化により、水害リスクが今後更に増加するのではないかと懸念が強まっている。それだけではなく、複数の災害が同時もしくは僅かな時間差をもって来襲するケースにおいては、それらのいずれかが個々に起こる場合よりも深刻な被害を生みかねない。水害の分野において同事象は「複合水害」と呼ばれ、近年になって社会的・科学的な関心の高まりが見られる。

そのような複合水害に対し特に脆弱なのが、河川の河口部に形成されるデルタと呼ばれる地域である。デルタは、河川が運搬する土砂によって形成される地形であり、河口部に位置し河川流量が大きくなりがちであるため、河川洪水の影響を受けやすい。一方で、強風や急激な気圧変化に伴って生ずる高潮は、海底の水深が急激に浅くなる沿岸部において大きくなる傾向があるため、多くのデルタ地域にとって高潮は深刻な課題である。このことを考慮すると、デルタ地域における水害リスクを推定する上では、河川洪水と高潮の双方を同時に考慮することが重要であると言える。

全球規模の河川氾濫モデルは、衛星データの整備や計算機能力の向上など技術の進歩に伴い、ここ10年間で急速な発展を遂げ、洪水ハザードマップの作成や洪水予報システム、気候変化影響評価など、幅広い分野で活用されている。最下流のデルタ地域を含む流域全体における河川流下と氾濫過程を一体的に解析可能であること、また全球任意

の地域に対し適用可能であることから、デルタ地域における洪水氾濫解析において全球モデルは有用なツールとなりうる。しかし、全球河川氾濫モデルを用いた既往の研究において高潮の影響を考慮したものはこれまでに存在していなかった。

以上の背景を踏まえ本論文では、全球河川高潮結合モデルを開発し、デルタ地域における河川洪水と高潮の複合水害シミュレーションを行う枠組みを構築することを目指す。最先端の全球河川氾濫モデルと全球潮汐高潮再解析データセットを結合することによって、全球規模での河川高潮結合モデルの開発を行う（第3章）。また全球モデルの枠組みを維持しつつ、モデルの計算解像度よりも細かな物理過程が表現できるようになることを目的として、任意の領域に対し領域2次元氾濫モデルを展開するための手法を提案する（第4章）。さらに、開発した全球河川高潮結合モデルと2次元氾濫モデル構築手法を統合することによって、沿岸デルタ地域における河川洪水高潮複合水害シミュレーションを実行する（第5章）。以下、各章の要旨を記述する。

第2章では、本論文で用いた河川氾濫モデルと沿岸水位再解析データセットについて説明している。河川氾濫モデルについては最先端の全球規模（CaMa-Flood）・領域規模のモデル（LISFLOOD-FP）を選定し、各々の特徴およびモデルを用いる上での課題について議論する。沿岸水位データセットについては、全球潮汐高潮再解析データセット（GTSR）、熱帯低気圧による高潮イベントの再現実験、および感度分析のための仮想的なデータの作成について述べている。

第3章では、全球潮汐高潮再解析より得られる時系列の沿岸水位を全球河川氾濫モデルに導入する枠組みを構築し、河川洪水・高潮複合水害シミュレーションを実行するとともに、ガンジスデルタでのサイクロン・シドルによる高潮遡上の再現実験を行う。全球規模でのシミュレーションの結果、特に低平地や沿岸部において、海面水位変動が河川洪水氾濫に対し有意に影響を及ぼすことが明らかになった。特に影響の大きかった東南アジアの主要な6河川を対象として詳細な分析を行った結果、ピーク水位の増大や河川水位季節変動の強化など、海面水位変動が及ぼす影響の地理的な違いを考察した。またガンジスデルタとメコンデルタにおいて、結合モデルにおいて水位の観測値の再現性が向上することを確認した。さらに開発したモデルを、ガンジスデルタに2007年に来襲したサイクロン・シドルに対し適用し、河川を通じた高潮の遡上現象の再現に取り組んだ。その結果、河口において生じた6mを超える高潮が、河川を遡上し河口から遥か200 km離れた地点においてもなお0.7 m程度の水位の上昇を引き起こすことが確認でき、高潮が河川氾濫シミュレーションに対し及ぼす影響の大きさを明らかにした。

第4章では、全球河川氾濫モデルをネスティングする領域2次元河川氾濫モデルの構築手法を開発する。全球規模でデータ整備がなされシミュレーションが実行可能な全球モデルの利点を活用し、任意の領域を対象として領域モデルを構築することが可能なツールを作成した。これによって、全球河川モデルの計算解像度よりも小さいスケールで生じるような現象を表現することを目的として、広大な流域の最下流部に対象領域を絞

って2次元モデルでの解析を実行することができるようになった。2次元モデルに必要な地形データの整備にあたっては、流下方向が上下左右の4方向のいずれかによって定義されることを踏まえ、標高と河道位置に関するデータ補正手法を提案した。この補正を適用することで、河川洪水氾濫解析における流下方向の連続性を確保し、滑らかな水面標高分布を表現することが可能になった。

第5章では、第3章と第4章にて得られた知見を統合し、デルタ地域における複合水害シミュレーションを実行する。全球河川高潮結合モデルの枠組みに立脚して、下流部のデルタ域に対して領域2次元モデルを構築することによって、任意のデルタ域を対象として複合水害シミュレーションを行う手法を提示する。エルベ川およびメコン川を対象とし、過去の文献の情報を元に仮想的な高潮データを作成して感度実験を行うとともに、全球モデルと領域2次元モデルとの間での氾濫解析結果の比較を行った。大規模な水文過程によって規定される河川流量については2実験で大差なかったが、氾濫域については2次元モデルと全球モデルで大きく異なっていた。具体的には、氾濫域の計算結果は高潮なし実験では過小、高潮実験では過大な浸水域を示し、その差はおよそ1m程度であった。この原因について考察した結果、全球モデルにおいて高速計算を実現可能にする単位集水域の仮定が、浸水域の推定において大きく影響を及ぼしていることが示唆された。また高潮来襲時期が河川洪水のピークと一致する複合水害の事例を想定したシナリオの作成及び感度実験を行い流路方向の水面標高分布について解析した結果、水面標高の絶対値については河川洪水時よりも非河川洪水時の方が大きい一方で、高潮による水面標高の増加分については河川洪水時よりも非河川洪水時のほうが大きいことが分かった。これは、上流河川流量が大きい場合には高潮によって水面標高が増加することへの影響が相対的に小さくなることが原因として挙げられた。さらに、メコン川を対象におこなった実験では、LISFLOOD-FPでは平坦な沿岸地形に沿って高潮が陸域内部へと侵入する過程が表現された一方で、CaMa-Floodではそれが表現されなかった。これについては、CaMa-Floodにおいて高潮を河口グリッドでの水位上昇として与えることによって、河道内での水位の上昇の結果として陸域での浸水深の増加が表現されることとなり、陸域での高潮遡上が表現できないことが理由として考えられる。最後に、全球モデルの枠組みにおいて2次元モデルを導入することによって、新たに得られる情報について議論した。その結果、全球モデルでは見られたような単位集水域の影響を受けずに浸水深のピーク到達日時空間分布を得られる点や、全球モデルでは得られなかった2次元流速分布によって、細かいスケールで生じる浸水プロセスを可視化できる点が明らかになった。これらの知見は、今後モデルを洪水リスク評価や洪水予測などへ応用・実装していく際に有用であり、意義のあることである。

第6章では、本論文の主要な結論を要約するとともに、今後の研究の方向性の提示を行う。