

河川氾濫シミュレーションシステム Advance/RiverFlow を利用した洪水リスク評価 ～河口境界における海面高度変化の考慮～

高橋 邦生*

Simulation-based flood risk assessment using Advance/RiverFlow - Consideration of elevation change at downstream sea surface boundary -

Kunio Takahashi*

地球規模から詳細な地域の河川氾濫までを同時に扱うことができる河川氾濫シミュレーションシステム Advance/RiverFlow において、新たに海面上昇の影響を河口境界として考慮する機能拡張を実施した。本稿では、まず Advance/RiverFlow の概要と今回追加した機能等について述べ、本機能を利用した解析事例を紹介する。具体的には、台風接近時の気象潮位の変化と海洋潮汐に伴う海面上昇の影響を考慮した解析を行った。特に台風接近時の海面上昇の影響は沿岸浸水に大きな違いをもたらす可能性がある。

<https://doi.org/10.69290/j.001185-vol32>

Keywords: 河川、河川氾濫、洪水リスク評価、GFM、海洋潮汐、気象潮位

1. Advance/RiverFlow の概要

Advance/RiverFlow[1,2]はソルバーに東京大学生産技術研究所が開発した GFM (Global Flood Model) である CaMa-Flood (Catchment-based Macro-scale Floodplain model) [3,4]を採用することで、全球～大陸河川～中小河川をカバーしつつ、既存の 2 次元の氾濫モデルより数万～数百万倍高速な洪水氾濫計算を実現した河川氾濫シミュレーションシステムである。GUI を利用した解析条件の設定 (前処理) や可視化 (後処理) が可能となっている。

CaMa-Flood は、河川・氾濫原の水動態を浅水波方程式で計算するだけでなく氾濫原の水動態を地形パラメータから診断する手法 (サブグリッド物理スキーム) により、浸水深の計算も逐次行う。また、このようにして得られた水位・貯水量・浸水深を高解像度の地形データを用いてダウンスケールすることで高解像度の浸水域の

データを構築することができる。地形データ以外を入力データとしては、全球水文モデル (または陸面過程モデル) などから得られた流出量を与える。

CaMa-Flood の大きな特徴として、GFM の物理過程では、背水 (バックウォーター) 効果や河道分岐の扱いが重要であるが、一般的に解像度の粗い GFM は水面における勾配を十分に表現できないため、水動態の基礎方程式には背水効果を考慮できない運動波方程式が採用されることが多い。しかし、CaMa-Flood では全球スケールを扱うモデルでありながら、背水効果を扱うことができるモデルとなっている。河道分岐に関しても、全球スケールでは河道網に沿った 1 次元の流下のみ計算されることが多く、河道分岐を扱えないが、CaMa-Flood では河道網を構築する際に高精度な河川地形データを解析しておくことで、分岐河道や水位が上昇した際の集水域を跨ぐ流れが表現できるようにしている。

洪水リスク評価においては、気象外力を全球水文モデルに与えることで得られた長期の流出量データを入力として河川・氾濫原の水動態を

*アドバンスソフト株式会社 熱流動エンジニアリングセンター

Thermal Hydraulics Engineering Center, AdvanceSoft Corporation

連続的に計算する。その後、長期シミュレーションで得られた水位を極値統計解析する（年最大値に確率分布関数をフィティングすることである再現期間における水位や貯水量を求める）ことにより、洪水ハザードマップを作成することもできる。

2. Advance/RiverFlow のサポートと独自機能

CaMa-Flood のソースコードは Apache ライセンスの下で公開[5]（公式版と呼ぶ）されており、自由に改変・再配布することが可能となっている。そのため、Advance/RiverFlow では前処理・後処理の GUI 提供の他にユーザーの利便性を考慮したサポートと独自機能を提供している。具体的には、①Windows 環境におけるハイブリッド並列（OpenMP+MPI）に対応した実行形式の提供、②ERA5[6]、ERA5-Land[7]の NetCDF 形式データでも利用される場合がある 16 ビット符号付整数に圧縮された単精度浮動小数点数データへの対応（公式版ではデータを直接読み込むことができないため、変換処理が必要）、③独自のチュートリアル提供、④気象モデル WRF の流出量データを利用するための変換ツールの提供、⑤後処理ユーティリティの Python3 サポートなどがある。①～⑤に加えて、海面高度の変化の影響を河口境界（下流海面境界）として考慮する機能の拡張を実施した。公式版においても、海面高度の観測ステーションのデータを下流海面境界の水位変化として考慮する機能があるが、この機能とは別に海洋モデル・波浪モデル・高潮モデル・潮汐モデルなどから得られた時々刻々の海面高度変化マップを下流海面境界として与える機能を追加（本稿執筆時点では未リリース）した。この機能追加により、任意の時間分解能で海面高度変化を地形データと同じようにマップデータとして与えることが可能となった（公式版でも海面上昇を考慮した地表面高度を与えることは可能だが、時間変化は考慮できない）。

3. 海面高度変化を考慮した洪水イベント解析

本稿で紹介する解析事例は特定の洪水イベントを再現することを目的としていないため、ERA5 の再解析データから台風に伴う豪雨により発生した歴史的な洪水イベントを適当に選び解析対象とした。海面高度変化についても、簡便な方法で推計した値を用いた。まず、海洋潮汐については人工衛星（TOPEX/POSEIDON）搭載の海面高度計データに基づいた海洋潮汐モデルである NAOTIDE[8]を日本周辺海域について高解像度化した NAOTIDEJ を使用する。気象潮位（波浪・高潮）については、気圧低下による水位上昇（吸い上げ効果：Inverted Barometer Effect）と風の吹き寄せ効果による水位上昇（Wind Setup）のみを考慮し、以下の式で推計した。

$$\Delta h_{IBE} = \frac{P_0 - P_{MSLP}}{\rho_w g} \quad (1)$$

$$\Delta h_{WS} = \frac{\rho_a C_d U_{10}^2 L}{\rho_w g h} \quad (2)$$

ここで、 P_0 は標準気圧（1013 hPa）、 P_{MSLP} は平均海面気圧、 ρ_w は海水密度（1025 kg/m³）、 ρ_a は空気密度（1.225 kg/m³）、 g は重力加速度（9.81 m/s²）、 h は水深、 C_d は風応力係数（0.002）、 U_{10} は 10m 風速、 L はフェッチ（Fetch）で吹送（吹走）距離のことである。これは風が海面に作用する距離であり、高潮の吹き寄せ効果を評価する際の重要なパラメータである。フェッチの算出方法としては、風向データから風が吹き寄せる方向に対して海岸線から海上までの直線距離を用いる方法、海域ごとに経験的な値を用いる方法、強風半径を基にした推計方法などがあるが、今回は風速 15 m/s を閾値とする強風半径 R_{15} を用いて以下の式で与えた。

$$L \approx 2R_{15} \quad (3)$$

最終的な海面高度変化は、海洋潮汐と気象潮位の変化の和とする。使用したデータは ERA5（平均海面気圧、10m 風速）と ETOPO（基盤地形の高度）[9]である。水深は海面を高度 0m として計算した。なお、流出量のデータについても ERA5 を使用した。ここで、図 1 に台風が日本列

島に接近した時の平均海面気圧 (Pa) と海面高度変化 (m) を示す。

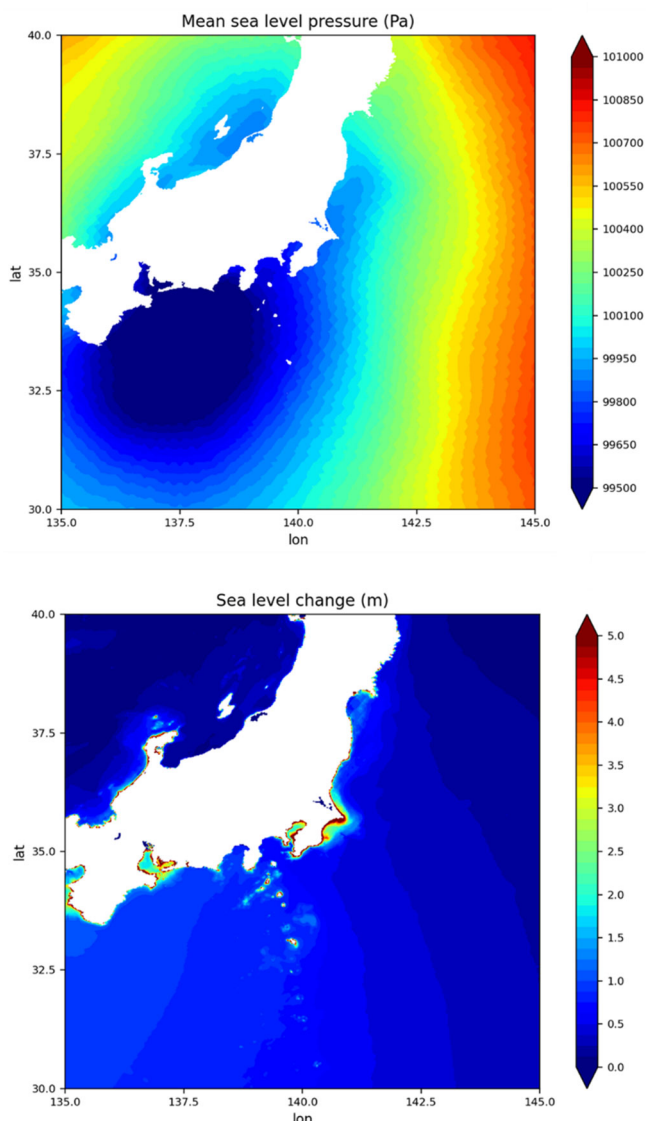


図1 平均海面気圧と海面高度変化

図1の海面高度変化を見ると、湾内や沿岸域で変化が大きいことが分かるが、これは風の吹き寄せ効果による水位上昇が、風速の二乗と吹送距離に比例し、水深に反比例することに対応したもので、本稿では簡便な方法で推計したものの高潮の影響が表現できていることが分かる。また、海洋潮汐による潮位の上昇も重要で特に大潮や満潮時に台風が接近すると、高潮による洪水が発生しやすくなる。高潮は海からの水が陸地に流れ込む現象であり、洪水は河川からの水が氾濫する現象であるから、両者は区別されるが、台風や低気圧の接近に伴い、海面が上昇

して海岸付近の低地が浸水するため、沿岸域の洪水リスク評価にとって、両者を同時に扱うことは重要である。そこで、河口境界（下流海面境界）で海面高度変化による水位の上昇を与えることで、河口境界からの水の流れや河道から流下する水の堰き止め効果の影響を考慮した。解析結果を図2に示す。

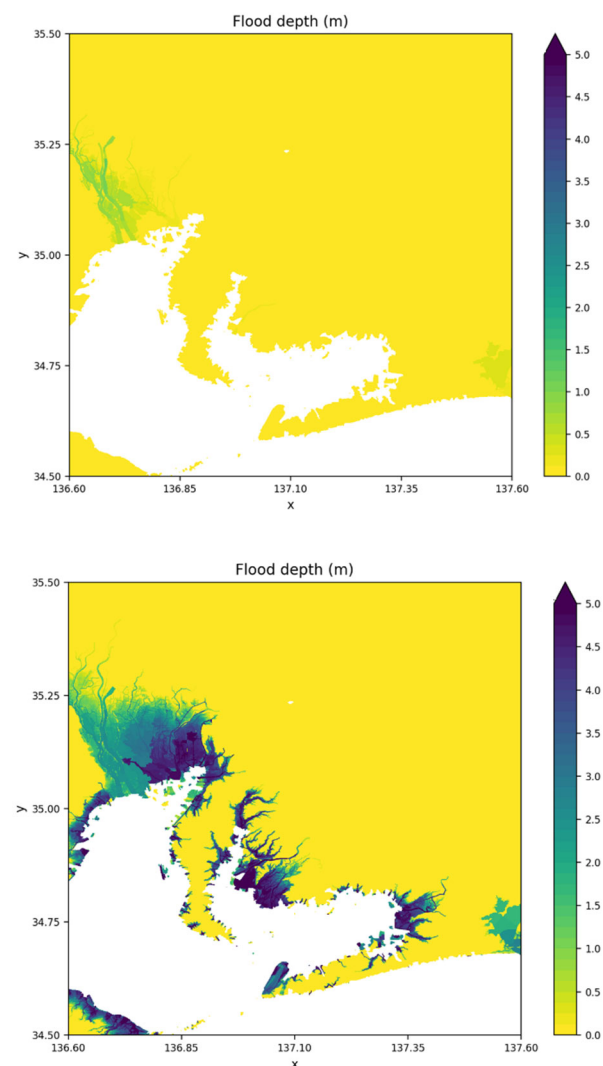


図2 浸水深(上:海面高度変化なし、下:あり)

図2は伊勢湾・三河湾の沿岸域において浸水面積が最大になる時刻（海面高度変化を考慮した場合）における浸水深 (m) である。比較のため、同時刻の海面高度変化を考慮しない場合の結果も載せる。両者を比較すると、明確な違いがあることが分かる。また、海面高度変化を考慮した場合の浸水エリアに注目してみると、「重ねるハザードマップ」[10]の高潮(想定最大規模)

に相当するエリア (図 3) とよく対応していることが分かった。

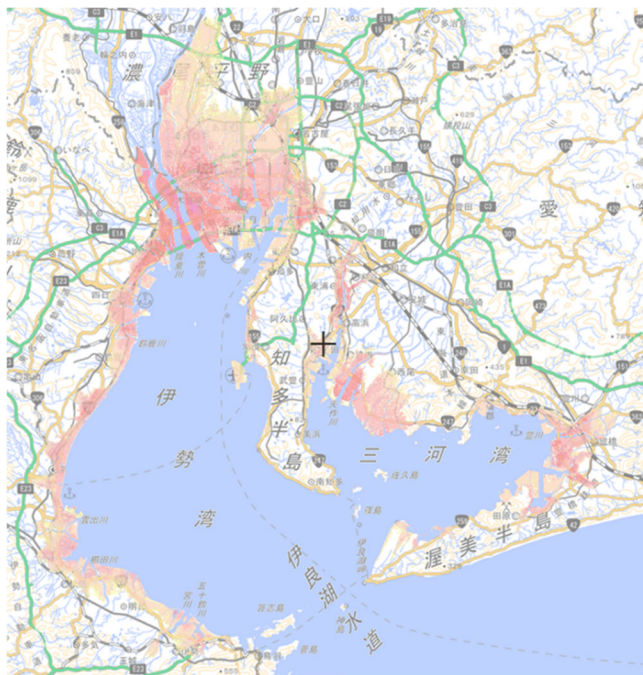


図 3 高潮 (想定最大規模) における浸水深[10]

4. 終わりに

本稿では、地球規模から詳細な地域の河川氾濫までを同時に扱うことができる河川氾濫シミュレーションシステム Advance/RiverFlow における河口境界の機能拡張について、紹介した。また、台風接近時の海面上昇の影響を河口境界で考慮することで、沿岸浸水に大きな違いをもたらす可能性があることを解析事例により示した。

今回は取り上げなかったが、気候変動 (地球温暖化) による海面上昇も重要である。温暖化した世界における洪水リスク評価にとって、本機能拡張は役に立つと考えている。

参考文献

- [1] 高橋 邦生、富塚 孝之、富永 直利、「河川氾濫シミュレーションシステム Advance/RiverFlow の紹介」アドバンスシミュレーション Vol.29, 2022.4, アドバンスソフト出版事業部
- [2] 高橋 邦生、富塚 孝之「河川氾濫シミュレーションシステム Advance/RiverFlow を利用した洪水リスク評価」アドバンスシミュレーション Vol.30, 2023.7.

- [3] Yamazaki, D., S. Kanae, H. Kim, and T. Oki, Water Resour. Res. 47 (2011) W04501 doi:10.1029/2010WR009726.
- [4] Yamazaki, D., T. Sato, S. Kanae, Y. Hirabayashi, and P. D. Bates, Geophys. Res. Lett. 41 (2014) doi:10.1002/2014GL059744.
- [5] https://github.com/global-hydrodynamics/CaMa-Flood_v4
- [6] <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>
- [7] <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land?tab=overview>
- [8] https://www.miz.nao.ac.jp/rise/s/nao99/README_NAOTIDE.html
- [9] <https://www.ncei.noaa.gov/products/etopo-global-relief-model>
- [10] <https://disaportal.gsi.go.jp/hazardmap/maps/index.html>

※ 技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、PDF ファイル (カラー版) がダウンロードできます。(ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。)