

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

高橋 邦生* 富塚 孝之*

Simulation-based flood risk assessment using Advance/RiverFlow

Kunio Takahashi* and Takayuki Tomizuka*

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 を利用した洪水リスク評価について述べる。まず、GFM (Global Flood Model) を用いた洪水リスク評価の特徴や利用可能な地形データ、流出量データについて説明する。次に洪水リスク評価の事例として、極値統計解析を利用した洪水ハザードマップの作成を紹介する。また、洪水リスク評価における最近の動向についても取り上げる。

Keywords: 河川、河川氾濫、洪水リスク評価、洪水ハザードマップ、GFM

1. Advance/RiverFlow の概要

河川氾濫シミュレーションシステム Advance/RiverFlow[1]は河川氾濫プログラムに東京大学生産技術研究所が開発した全球～大陸河川～中小河川をカバーする最先端の河川氾濫モデルを採用することで、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ている。また、高精度な標高データ[2]と河川地形のデータ[3]が利用可能であり、GUIを利用した解析条件の設定や可視化が可能となっている。

河川氾濫モデルに採用した CaMa-Flood (Catchment-based Macro-scale Floodplain model) [4][5]は、河川流域を多数の要素(グリッド)に区切って、その要素ごとに物理パラメータを当てはめて計算するモデルとなっている。また、河道だけでなく、氾濫原についても計算を行う。地球規模での河川・氾濫原の水動態を計算できる河川氾濫モデルは GFM (Global Flood Model) と呼ばれる。全球水文モデル(または陸面モデル)などから得られた流出量を入力として、各グリッドの水

位・貯水量・流量などを計算することができる。

2. GFM (Global Flood Model) を用いた洪水リスク評価の特徴

洪水リスク評価の考え方として、ある再現期間で発生する洪水における洪水ハザードマップがある。例えば、国土地理院の「重ねるハザードマップ」[6]では、洪水浸水想定区域を示す洪水ハザードマップとして、想定最大規模と計画規模の2種類のマップを公開している。ここで、想定最大規模は1000年1度、計画規模は河川の規模によって異なるが、10～200年に1度の規模の洪水を表している。モデル計算によって、このような洪水ハザードマップを作る場合、まず入力として何を与えているかが重要である。また、モデルが扱うことができる物理過程にはどのようなものがあるのか等の諸条件にも注意する必要がある。

本章では GFM を用いた洪水リスク評価の特徴をモデル構造・物理過程・基盤地形データ・洪水防御・ダムおよび貯水池データ・沿岸浸水の観点から整理した解説記事[7]より、Advance/RiverFlow に関わる部分について取り上げる。

まず、GFM のモデル計算の流れとして、ゲージ流量型とカスケード型がある。カスケードの原義は何段も連なった小さな滝のことであるが、カス

*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

ケード型のモデル計算の流れは、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・氾濫原の水動態を連続的に計算する。このモデル計算から洪水ハザードマップを作成するためには、長期シミュレーションで得られた水位や貯水量を極値統計解析する必要がある。具体的には、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。Advance/RiverFlow が採用する CaMa-Flood では、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）によって、浸水深の計算も逐次行っているため、ある再現期間における水位や貯水量から浸水深を求めることができる。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して洪水ハザードマップを作成する。カスケード型のモデル計算の欠点としては、境界条件として上流端に流量を直接与えるゲージ流量型と比べると不確実性が大きいことが挙げられる。これは、流出量データに気象外力や全球水文モデルに起因する不確実性が含まれるためである。

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となる。例えば、水動態の基礎方程式に拡散方程式や局所慣性方程式（浅水波方程式の近似式）を用いる 2 次元の氾濫モデルでは背水効果は表現されている。ただし、解像度の粗いカスケード型の GFM では、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キネマティック方程式を用いることが多い。しかし、全球スケールまで扱えるカスケード型の GFM としては、例外的に CaMa-Flood では背水効果を扱うことができるモデルとなっている。さらに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、一般的には河道分岐を扱えないが、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。しかし、堤防や排水設備などの洪水防御やダムや貯水池による河川流量の調節、潮汐や高潮による沿岸浸水は現時点では扱うことができない（限定的に扱う機能の開発が進められている）。また、都市域の内水氾濫は GFM では扱われない。

3. 利用可能な地形データと流出量データ

Advance/RiverFlow では、既存の衛星標高データに衛星レーザー高度計や衛星森林マップなどの複数の衛星地球観測情報を組み合わせることで、樹木によるバイアスや衛星観測におけるノイズを分離・除去した高精度な標高データ[2]と衛星水面マップと地理情報から作成された河川地形データ[3]が利用可能となっている。表 1 に配布元[8]から無償で公開されているものを示す。その水平解像度は、全球では 1arcmin まで、日本域についてはダウンスケール時で 15arcsec までとなっている。それ以上の解像度についても配布元とのライセンス契約により利用可能となるが、モデルやデータの制約から水平解像度は計算時で 1arcmin までダウンスケール時で 1arcsec までとなる。

表 1 Advance/RiverFlow で利用できる地形データの水平解像度

領域	計算時	ダウンスケール時
全球	15arcmin	1arcmin
	6arcmin	
	5arcmin	
	3arcmin	
	1arcmin	
日本域	3arcmin	15arcsec
	1arcmin	

流出量データについては、公開データの利用が可能となっている（表 2）。洪水リスク評価のためには、長期間のデータが必要となるが、過去はもちろん将来の温暖化予測に基づくデータも入手できる。ただし、これらのデータを利用する際には、データごとにライセンスが異なるので注意が

必要である（一部、商用利用が禁止されているデータがある）。なお、Advance/RiverFlow では、これらの流出量データを利用するためのサポート（前処理に必要なツール作成や河川氾濫モデルの機能追加）を提供している。

表 2 Advance/RiverFlow で利用可能な公開の流出量データ

データ名	対象期間	提供元
Earth2Observe[9]	1981～2014	ECMWF
ERA5[10]	1940～現在	
ERA5-Land[11]	1950～現在	
CMIP5[12]	非温暖化実験、過去実験、温暖化実験（期間はモデルや実験により異なる）	ESGF
CMIP6[13]		
ISIMIP[14]		
d4PDF[15]	1951～2011（非温暖化実験、過去実験）、1.5℃、2℃、4℃上昇実験	DIAS
GRFR[16]	1980～2019	reachhydro.org

ECMWF : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ヨーロッパ中期予報センター)

ESGF : Earth System Grid Federation

DIAS : Data Integration and Analysis System

GRFR : Global Reach-level Flood Reanalysis

4. 洪水リスク評価の事例

Advance/RiverFlow を用いた洪水リスク評価の事例として、極値統計解析を利用した洪水ハザードマップの作成について紹介する。まず、水平解像度 1arcmin の日本域を計算領域として、流出量データには過去 30（1981～2010）年分の Earth2Observe[9]と d4PDF[15]（領域モデルの 1 ア

ンサンブル）のデータ（ただし、河川流量が観測と合うように調整している）を用いて計算を行った。次に 30 年分の計算結果から年々の日最大値の水位（水深）または貯水量を求め、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。さらに前述したサブグリッド物理スキームから浸水深を診断的に求め、さらに 15arcsec の地形データを用いてダウンスケールすることで洪水ハザードマップを得た。このとき、再現期間を 1000 年として、確率分布関数には Gumbel 関数を用いた。また、ダウンスケールする領域は淀川周辺域とした。図 1 と図 2 にそれぞれの結果を示す。また、比較のため「重ねるハザードマップ」の想定最大規模の洪水浸水想定区域を図 3 に示す。

浸水深については過小・過大評価している箇所があるが、浸水域については概ね一致している。洪水リスク評価における注意点としては、確率分布関数でフィティングして再現期間に相当する値を求めている都合上、外挿に伴う過大・過小評価だけでなく、グリッド単位で極値統計解析を行うため、氾濫イベントが発生しない限り氾濫水深は 0m になってしまう問題がある。また、氾濫原に関しては、河道内の水位が越水する水位に到達して越水したとしても一般に越水した箇所の下流側に広がるため上流側では浸水履歴がなく極値統計解析の結果では浸水範囲に含まれないことがある。仮に浸水履歴があったとしても下流と上流で水位を比較したときに上流の方が下流よりも小さくなってしまう場合（逆勾配）もある。

氾濫イベントが発生しない問題については、より長期間の計算を行うか、アンサンブル数を増やすなどして、氾濫のイベント数を稼ぐなどの方法が考えられる。ただし、流出量データ自体にもバイアスが存在するので、注意が必要（バイアス補正されたデータ[16]を用いるなどの工夫は可能）となる。また、水位が逆勾配になってしまう問題については、補正する手法[17]が提案されている。

5. 洪水リスク評価における最近の動向

近年、大規模な風水災害の発生が頻発しており、

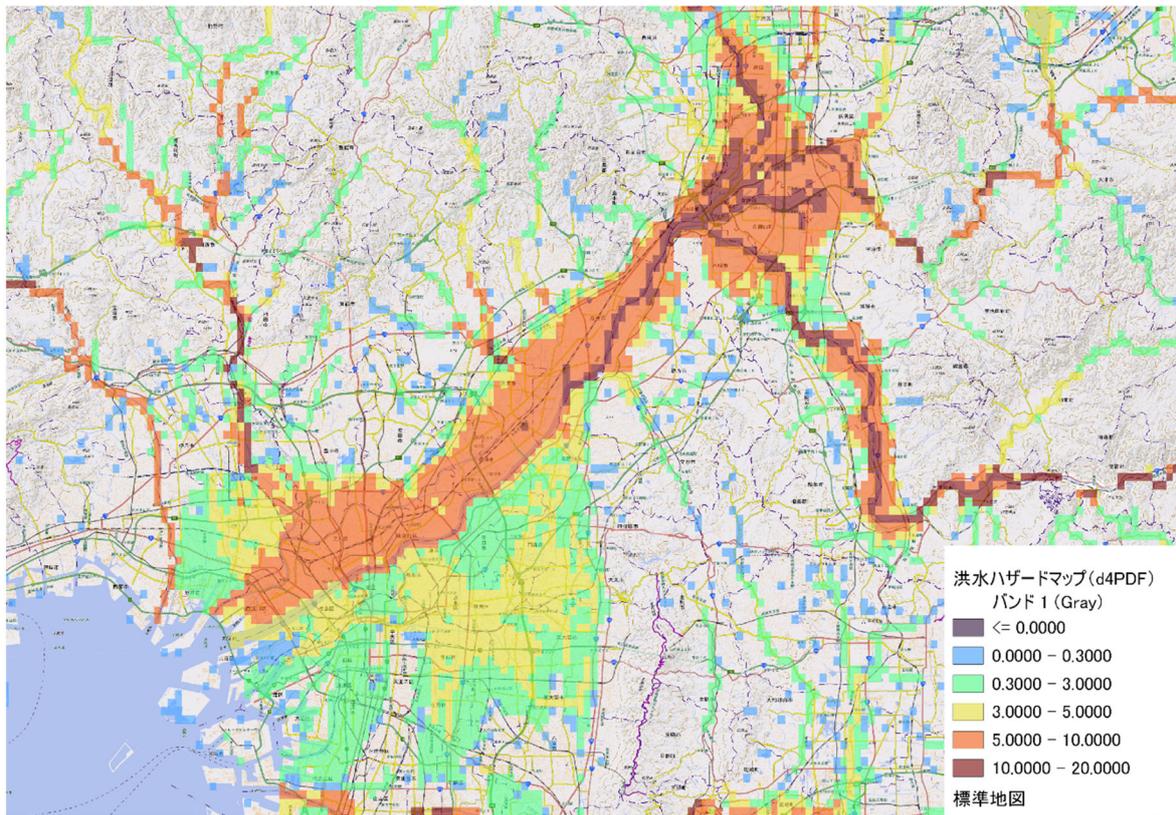


図1 淀川周辺域の再現期間 1000 年における浸水深 (m) ※流出量データに d4PDF を使用

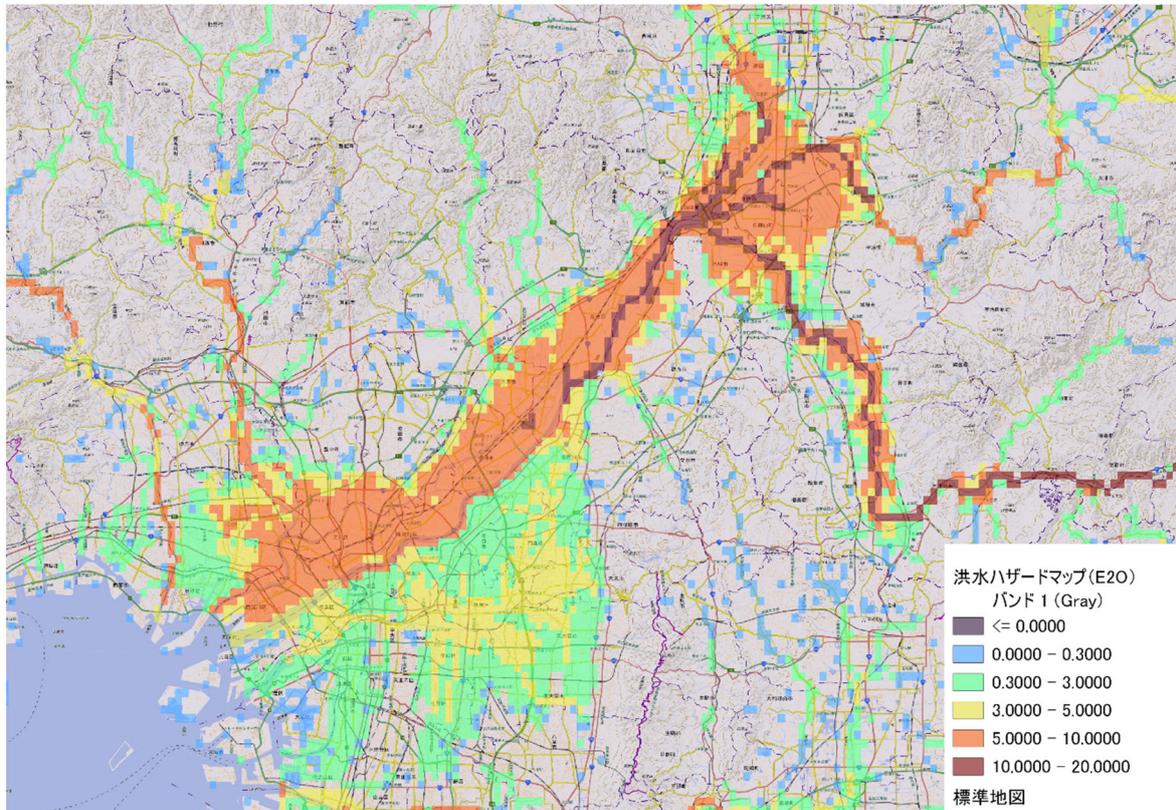


図2 淀川周辺域の再現期間 1000 年における浸水深 (m) ※流出量データに Earth2Observe を使用

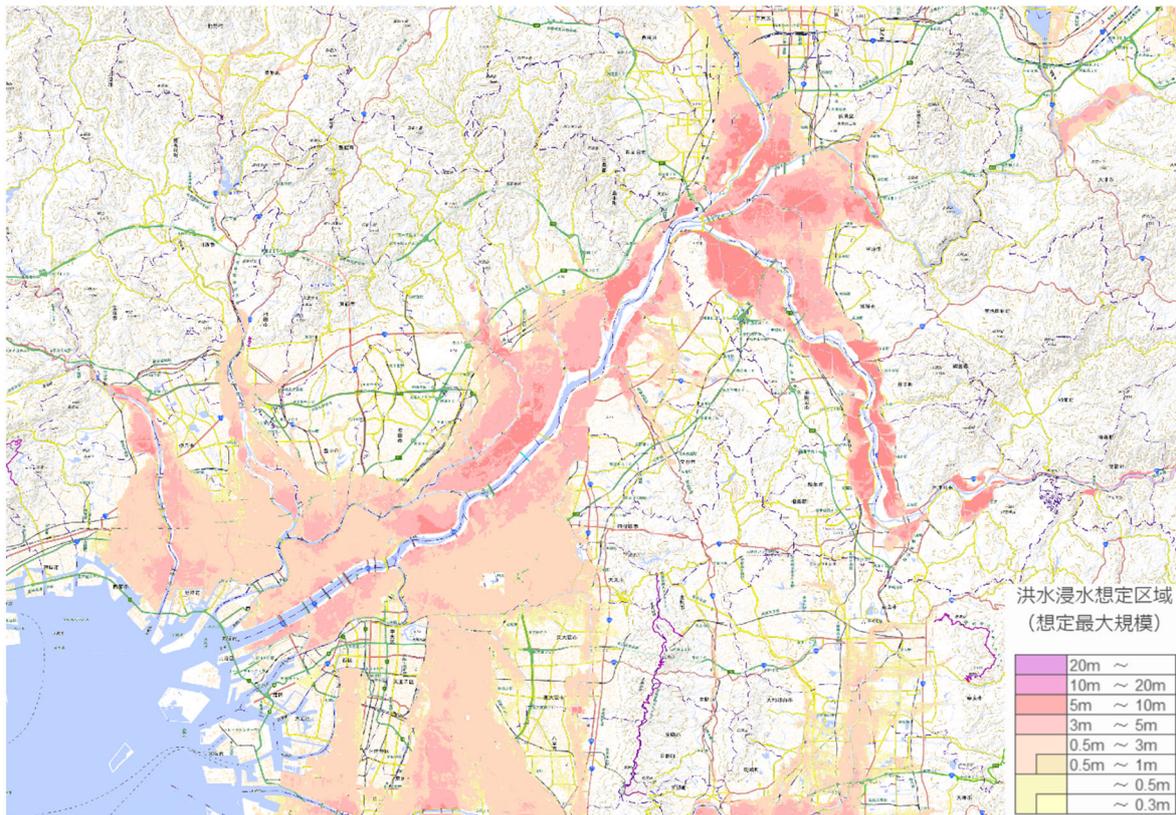


図3 重ねるハザードマップの洪水浸水想定区域図（想定最大規模）

地球温暖化の影響が指摘されているが、気候変動により変わりつつあるリスクについて、その影響を評価することが重要になっている。企業に対しては、気候関連財務情報開示タスクフォース（TCFD）などで気候変動関連の情報開示の強化が求められており、金融機関に対しては、気候変動リスクに関わる金融当局ネットワーク（NGFS）により、気候シナリオに基づく気候変動リスク（移行リスクと物理的リスク）の評価が求められている。また、2021年にNGFSから公表された気候シナリオにおける洪水リスク評価では、本稿で取り上げたGFMを用いた評価手法が例示されるなどNGFSははじめ気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の地球温暖化シナリオなどの各シナリオにおける洪水リスク評価への活用が期待されている。Advance/RiverFlowが採用する河川氾濫モデルは全球スケールで中小河川も含めて一度の計算で背水効果や河道分岐も考慮した洪水リスク評価が可能であることから、各シナリオにおける洪水ハザードマップの整備への活用が期待される。実際、国土交通省

による「気候関連情報開示における物理的リスク評価に関する懇談会」[18]で策定された「TCFD提言における物理的リスク評価の手引き」[19]においても、今後活用できるハザードマップとしてGFMによる広域ハザードマップを取り上げている。

洪水リスク評価のための技術基盤としては、国土技術政策総合研究所が「流域治水デジタルテストベッド」[20][21]の構築を進めている。その目的は、気候変動による水災害の頻発・激甚化への備えとして、必要な流域治水立案技術や洪水予測技術の開発を加速するため、サイバー空間に流域を再現（デジタルツイン）し、サイバー空間上の実証実験基盤（デジタルテストベッド）を整備することである。

以上、洪水リスク評価における最近の動向を簡単に紹介した。技術面においては、事例で示したように比較的手軽に洪水リスク評価ができるようになったが、利用に際しては学術的な正確性等を一定程度担保するのはもちろんのこと、不確実性の評価を行った上で利用することが重

要である。今後は、そのためのソリューションを提供したいと考えている。

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] http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/MERIT_DEM/
- [3] http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/MERIT_Hydro/
- [4] Yamazaki, D., S. Kanae, H. Kim, and T. Oki, Water Resour. Res. 47 (2011) W04501 doi:10.1029/2010WR009726.
- [5] Yamazaki, D., T. Sato, S. Kanae, Y. Hirabayashi, and P. D. Bates, Geophys. Res. Lett. 41 (2014) doi:10.1002/2014GL059744.
- [6] <https://disaportal.gsi.go.jp/maps/>
- [7] 平林 由希子、山田 果林、山崎 大、石川 悠生、新井 茉莉、大塚 俊之、久松 力人、小山田 大吉、「広域洪水ハザードマップの比較評価と企業実務活用への提言」、水文・水資源学会誌, Vol.35, No.3 May 2022
- [8] <http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/cama-flood/>
- [9] <https://wci.earth2observe.eu/thredds/ncss/grid/ecmwf/wrr2-daily-aggr.nc/dataset.html>
- [10] <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>
- [11] <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land>
- [12] <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip5>
- [13] <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6>
- [14] <https://esg.pik-potsdam.de/projects/isimip>
- [15] [https://diasjp.net/service/d4pdf-data-](https://diasjp.net/service/d4pdf-data-download)

download

- [16] <https://www.reachhydro.org/home/records/grfr>
- [17] Kimura, Y., Hirabayashi, Y., Kita, Y., Zhou, X., and Yamazaki, D., EGU sphere. 2022 (2022) doi:10.5194/hess-27-1627-2023
- [18] https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/tcfd/index.html
- [19] https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/tcfd/pdf/tcfd_01.pdf
- [20] http://www.nilim.go.jp/lab/feg/DTBseminar_1kaisiryoku.pdf
- [21] http://www.nilim.go.jp/lab/feg/DTBseminar_2kaisiryoku.pdf

※ 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。)