陸面・河川氾濫モデルによる 洪水影響人口の全球実時間算定システムの構築

DEVELOPMENT OF A GLOBAL FLOOD AFFECTED POPULATION
REAL-TIME CALCULATION SYSTEM
WITH A LAND SURFACE-FLOOD INUNDATION MODEL

鳩野 美佐子¹・芳村 圭²・山崎 大³・沖 大幹⁴
Misako HATONO, Kei YOSHIMURA, Dai YAMAZAKI and Taikan OKI

¹学生会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

²正会員 工博 東京大学准教授 大気海洋研究所 (〒277-8568 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

³正会員 工博 研究員 University of Bristol, School of Geograph. Sci. (University Road, Bristol BS8 1SS, UK)

⁴正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

Damage caused by floods can sometimes be catastrophic. When focusing on lessening the fatalities/victims, knowledge of a flood even just a day in advance could make a difference. Therefore, this research aims to develop a global real time calculation system for flood affected population. A new river model, CaMa-Flood, is introduced into the framework of Today's Earth, a real time calculation system for various hydrological aspects. Gridded population data was then combined to calculate the number of estimated affected population. Validations for the outputs of this system were conducted using multiple observation data. Comparison with floods in 2013 showed that this system was able to detect the occurrence of floods to a certain degree.

Key Words : Flood, real-time calculation, affected people

1. はじめに

2011年にタイを襲った洪水では被害を受けた農地は18,291km²にのぼり、被害額は約3.5兆円と推定されている¹⁾。一方日本でも熊本県で起きた平成24年7月12日熊本広域大水害では3,422棟の住家が被害を受け、被害額は約690億円とされている²⁾。また、1985年から2009年までの間に洪水は自然災害のうち最も頻繁に起こり(全体の40%)、自然災害による被害者の半分以上は洪水によるとされている³⁾。気候変動に関する政府間パネルによる第4次評価報告書⁴⁾では洪水被害は気候変動によって今後増加すると報告されており、洪水に対する予測技術の必要性はさらに高まると考えられる。

洪水評価に関してはある特定の地域に着目して行われることが多くある。これは洪水評価を行う際に用いるデータや条件が地域によって大きく異なるということが一つの原因として挙げられる。特定の地域に着目するのではなく全球で洪水評価を行うことにより、データが不足しがちな発展途上国でもある一定の精度を期待するこ

とができ、より多くの地域における洪水対策に貢献できると考えられる。また、それぞれの地域に特化した洪水評価は重要であるとしたうえで、全球での統一された洪水リスクの算定により俯瞰的な視点から洪水を分析することが可能と主張する研究⁵⁾や複数のモデルを用いて地球温暖化の影響による洪水影響人口の変化を算定する研究⁶⁾もある。これらのように洪水指標に関する研究は多くなされているが、それらを全球かつ実時間で算定しているものは少ない。

洪水を引き起こす天候などの自然的要因は時々刻々と変化し、多少の偏りはあるものの空間的に広い範囲で洪水は起こり得る。2010年6月にアメリカのミズーリ川の支流では上流で6時間のうちに約135mmの雨が降り、峡谷という地理状況により河川流量が激増して洪水が生じ⁷⁾、また、2010年7月にパキスタンで起こった洪水では北東部の3県で4日間のうち200mm以上の雨が降った⁸⁾。このように数時間から数日の間の悪天候により洪水が発生することもあり、時間とともに変化する状況に対応して洪水の深刻度評価も時々刻々更新されるべきであると考えられる。さらに、洪水による被害は発展

途上国に限らず先進国にももたらされるが、早期警戒システムによって多くの人的被害が軽減されてきている⁹⁾。これらを考慮し、本研究では洪水評価の指標の一つと考えられる洪水影響人口の全球実時間算定システムを構築した。

2. モデルと手法

(1) Today's Earth

Today's Earth¹⁰⁾は陸面水文過程を全球で実時間算定するシステムである。入力値としては気象庁の全球数値予報モデルGSMのGrid Point Value(以下GSM-GPVとする)を用いる。GSM-GPVは6時間毎に84時間先までの予報値が6時間間隔で計算されている。本研究で用いるGSM-GPVは東京大学生産技術研究所喜連川研究所にアーカイブされたものを利用した¹¹⁾。これらのうち12時間毎のGSM-GPVを入力値として陸面過程モデルMinimal Advanced Treatments of Surface Interaction and RunOff (MATSIRO)¹²⁾に水の安定同位体を組み込んだIso-MATSIRO¹³⁾、河川モデルTotal Runoff Integrating Pathways (TRIP)¹⁴⁾が用いられている。

(2) 河川モデルの更新

Today's Earthの従来の河川モデルであるTRIPは解像度が荒く、河道網に沿って水輸送が行われるだけである。また、流速は一定であり、現実的な河川網としての精度は低い。そこで、本研究ではTRIPの代わりにCatchment-based Macro-scale Floodplain model (CaMa-Flood)¹⁵⁾を用いた。以降CaMa-FloodをToday's Earthに導入したシステムをTE+CaMaと呼ぶこととする。CaMa-Floodは陸面過程モデルにより計算された流出量を河道網に沿って流下させる河川モデルである。既往研究¹⁵⁾に従って本研究では空間解像度を0.25度格子とした。河川流域は単位集水域へと分けられ、サブグリッド地形パラメータを用いてサブグリッドの物理過程として氾濫を表現している。従来の河川モデルでは、矩形の河道のみが貯水槽として考慮されていたが、CaMa-Floodでは河道に加えて氾濫原の貯水槽が定義されている。また、従来は流速が一定とされていたのに対してCaMa-Floodでは拡散波方程式で流速の変化も表現することが可能となり、より現実的な河道流下モデルとなっている。河川モデルとしてCaMa-Floodを用いることにより、高度化・高解像度化が図られる。

(3) 手法の概要

上記のとおり、Today's Earthの河川モデルを河川氾濫モデルCaMa-Floodに変更することにより流量や氾濫面積、水深などを得ることができる。観測値を用いてこれらの出力値の検証をおこなったのち、人口データなどを用いて洪水による影響人口の算定を行う。

図-1 GPCP と本システムによる降水量の
(a) 相関係数 (b) RMSE

本研究の対象期間は2008年から現在までである。2007年に気象庁の予報システムに大幅な変更があり、同条件で解析ができないと判断したため2008年からとしている。対象地域は全球であるが、検証はある特定の地域に着目して行っている。Today's EarthとTE+CaMaによる出力値はそれぞれ1度格子と0.25度格子である。

3. 結果および検証

Today's Earthの改良版として新たに加えられるものは高解像度の河川流量、河川貯留量、氾濫原貯留量、氾濫面積、水深などである。これらは1日2回計算されており、84時間先までの予測値が日単位で提供される。

それぞれのモデルの精度については既往文献¹⁰⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾を参照されたい。ここではGSM-GPVによる解析値から12時間予報値を連続的に用いた場合のモデルの出力値についての検証結果を示す。

(1) 降水量

Global Precipitation Climatology Project¹⁶⁾ (以下GPCPとする)による空間解像度1度、時間解像度1日のデータを用いてTE+CaMaによる降水量の検証を2008年から2012年について行った。モデルによる降水量の空間解像度は1度、時間解像度は6時間のため、日平均降水量へと変換した。本システムの目的は洪水評価であるため、図-1a, bに陸域のみの相関係数と平均二乗誤差RMSEをそれぞれ示す。相関係数は陸域の大部分について95%有意を示している。アフリカ大陸北部は特に低い相関を示して

いるが、これは全体的に降水量が少ない砂漠域であることによると考えられる。ここで検証している降水量は GSM-GPV を 1 度格子へと変換したものであり、本システムの入力値として用いられている。これまでの研究により、観測された降水量を用いると河川流量の再現性が高くなることが分かっているため¹⁵⁾、今後、気象庁の予報システムが改良することにより降水量予測の精度が向上すれば、本システムの精度も上がることが期待される。

(2) 河川流量

Global Runoff Data Centre¹⁷⁾ (以下 GRDC とする) による日流量データを用いて TE+CaMa による河川流量の検証を 2008 年から 2012 年において 1 年以上観測値がある点について行った。図-2a, b にそれぞれの観測地点についての相関係数と RMSE を示す。北アメリカやヨーロッパの河口付近では相関係数が高く、上流では相関係数が低くなる傾向がある。集水面積が広いほど降水の空間的・時間的に急激な変化の影響が鈍らされるため、結果的に流量の再現性が高くなることを示していると考えられる。また、上流になるほどデジタル河川網の表現による誤差が相対的に大きいことも理由として挙げられるほか、観測誤差の影響もあると考えられる。本システムにより出力される河川流量は貯水池操作などの人間活動が考慮されていないため、それによる誤差も存在すると考えられる。

2008 年から 2012 年の間で 1 年分以上データがあり、かつ集水面積が 1,000,000km²以上ある河川の最も上流面積が大きい観測地点における GRDC, Today's Earth, TE+CaMa の河川流量の日変動を図-3 に示す。CaMa-Flood を導入することにより図-3 に示されている 9 つの

図-2 GRDC と本システムによる河川流量の

(a) 相関係数 (b) RMSE

観測地点のうち 6 つ (Amazonas, Congo, Mackenzie, Missouri, Nelson, Parana Do Careiro) において相関係数は高くなっている。Mississippi では相関係数は低くなっているがその差は 0.001 以下であり変化はほとんどないと考えられる (図-3)。また、同様に 6 つ (Amazonas, Congo, Mackenzie, Mississippi, Missouri, Nelson) において RMSE は小さくなっている。最も RMSE が改善した Amazonas では RMSE が約 90,000m³/s 減少している (図-3)。

図-3 9 つの河川についての河川日流量。緑の実線は GRDC による観測値、青い点線は TE+CaMa, 赤い一点鎖線は Today's Earth により算出されたものを示す。

図-4 2011年10月21日から10月30日におけるチャオプラヤ流域の氾濫面積割合 (a)MODISによるデータ, (b)モデル出力値

(3) 氾濫面積

本システムによって計算される氾濫面積割合についてMODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) によるデータを用いてタイ王国の中央部を流れるチャオプラヤ流域についての検証を行った。ここで、氾濫面積割合は単位集水面積に対する氾濫面積の割合のことである。検証に用いるMODISによるデータは解像度500m格子のデータのうち水のスペクトルを検出することによって冠水域であるピクセルを抽出し¹⁸⁾、それらを0.25度格子のグリッドにおける氾濫面積割合へと変換されたものである。

図-4は2011年にチャオプラヤ川流域で洪水が起こっていた10月21日から10月30日における氾濫面積割合の比較である。MODISは通常10日間のデータを用いているため、モデル出力値としては同期間の平均値を用いた。図-4aがMODISによる衛星データであり、図-4bがモデルにより出力されたものである。モデル出力値では洪水が過大評価される傾向にある。これの一つの原因として、先述のとおり本システムではダムが考慮されていないことが挙げられる。また、CaMa-Floodでは各グリッドにおける上流流出量を用いて河道幅や河道深が経験式で定められているため、河道幅の観測値などを用いたチューニングを行うことにより精度向上が図られる。図-4bはチャオプラヤ川についてチューニングを行った後の計算結果だが、ピークのタイミングや起伏の形状を重視したため、さらに詳細なチューニングが必要である。

(4) 影響人口

洪水による被害の深刻さの一つの指標としてどの程度の人口が影響を受けるかが挙げられる。そこでグリッド単位の人口データを用いて氾濫による影響人口の算定を行った。毎年ある程度の洪水が起こっている地域ではなんらかの対策が行われているため、例年と同程度の氾濫では深刻な影響を受けないと想定される。これを考慮して、氾濫面積割合の月平年値からの差を各グリッドの影響人口の割合と仮定する。グリッド毎の人口データ

図-5 2011年10月25日における影響人口 (チャオプラヤ川流域周辺)

図-6 (a)中国における較正曲線の例 (b)洪水イベント毎のDF0の登録値とモデル出力値の比較 (三角:変換前, 丸:変換後), (c)中国における本システムによる影響人口の算定値の時系列変化 (青線)と洪水イベント (赤く塗られている期間)の比較

は解像度が 0.5 度格子のもの¹⁹⁾を本システムの出力値の解像度である 0.25 度へと変換した。図-5 は 2011 年 10 月 25 日におけるチャオプラヤ川流域周辺について算定された影響人口の図である。

上記のようなグリッド毎の影響人口算定には多くの不確実性がある。しかしながら、洪水の記録が国単位でしか存在せずグリッド単位での影響人口の検証が極めて困難であることにより、不確実性の定量化がほぼ不可能となってしまう。そのため、本システムにより算定されるグリッド単位の影響人口の意義は社会に対する相対的なリスクを提示するものが主となるが、現時点で可能な限り客観的手法に基づいて行った定量的な検証手法とその結果について以下に記述する。

国単位で Dartmouth Flood Observatory²⁰⁾ (以下 DFO とする) に登録されている各洪水イベントの影響人口について検証を行う。上記のように月平年値からの差を影響人口の割合とする単純な仮定では大幅な過大評価が行われるため、何らかの変換が必要となる。本研究の対象期間外である 1985 年から 2000 年における各国の洪水データを用いる。これらのデータにより各国における洪水の影響人口についての傾向を表す曲線が得られる。図-6a に 2008 年から 2012 年において特に洪水が多かった中国の較正曲線の例を示す。1985 年から 2000 年に起きた洪水による影響人口を少ない順に並べ (青点)、それにより得られる一次回帰曲線 (赤線) を用いて影響人口の時系列変化の変換を行う。検証データとして用いる DFO に登録されている洪水に関するデータは国単位であるため、洪水イベント毎の検証については国単位における合計値を用いる。図-6b, c が変換を行った影響人口の結果の一部である。図-6b は洪水イベント毎の登録値とモデル出力値の比較である (三角: 変換前, 丸: 変換後)。図-6c は中国について計算された影響人口の日変動である。青線が影響人口の日変動であり、赤く塗られている期間が DFO により洪水が起きていると登録されていた期間である。図-6b より過去の洪水データを用いて変換を行うことにより、洪水イベント毎に算定される影響人口の精度が上がっていることがわかる。また、図-6c より洪水が起きている期間中にモデルにより算出される影響人口が増加する傾向があることが分かり、洪水発生を検知することが可能であると考えられる。

4. 実時間算定

本システムのひとつの要素として実時間算定が挙げられる。X 日 00 時に算出された GSM-GPV を用いる場合は X 日から 2 日後まで、X 日 12 時に算出された GSM-GPV を用いる場合は X 日の 1 日後から 3 日後までの算定が行われる。これによって約 2 日前から洪水を検知することが可能となる。

図-7 2013年8月10日から8月16日までのフィリピンにおける影響人口の時系列変化

図-7にフィリピンにおける2013年8月10日から8月16日までの影響人口の時系列変化を示す。フィリピンのマニラでは豪雨により8月13日から8月21日までマニラで洪水が発生し、28万人が影響を受けたとされている。図-7に示されている結果はそれぞれ3日前の12時に算出された予測値である。洪水発生の日に向けて影響人口が増加し始めていることから洪水の検知に成功していると考えられる。2013年に起こったマニラ以外の洪水について検証したところ、2日前の予測値から氾濫面積割合や影響人口の増加がみられる場合が多く、ある程度の洪水の検知を行うことは可能であると考えられる。

5. まとめ

本研究では洪水影響人口の全球実時間算定を行った。陸面水文過程を実時間で算定するシステムである Today's Earth に河川氾濫モデル CaMa-Flood を導入することにより上記の目的を実現することとした。これにより、従来の河川モデルではできなかった氾濫原の物理的表現や高解像度化が可能となった。現段階では1日2回84時間先までの日単位の予測が行われ、氾濫面積割合・河川流量・影響人口が主な推計指標となっている。これらを観測値と比較することにより空振りなど精度に課題は残るものの、概ね洪水の検知アルゴリズムが適正に作動していることが分かった。

影響人口は氾濫面積を用いて算定された。平年値からの差とグリッド毎の人口データを掛け合わせたものを影響人口とした。影響人口に関しては過大評価が顕著であったため、国単位の過去の被害データを用いて求めた較正曲線により変換を行い、過大評価の緩和を図った。変換を行うことにより国単位の洪水影響人口の精度は上がり、また、洪水が起きている期間に影響人口が増加する傾向より洪水の検知が行えていると考えられる。

さらに、本研究を用いて2013年に起こった洪水の検知精度を確かめたところ、約2日前には洪水が発生する傾向を見ることができ、さらなる精度向上により洪水の短期予測・警報に役立つと考えられる。また、全球実時間

での評価にさらされることにより、ほぼ常に世界のどこかで起きている洪水についてシミュレーション精度を確認することができ、精度改良へ向けた具体的な経験と知識が蓄積されと考えられる。本研究は洪水影響人口の全球実時間算定システムの基礎が構築された段階にあるため、さらなる検証が必要である。本システムの大きな要素である氾濫面積の検証のために、今後衛星センサなどを用いた水面の観測が大いに期待される。

謝辞：本研究は科学研究費補助金基盤研究(S)23226012、文部科学省委託事業気候変動リスク情報創生プログラム、ならびにJST及びJICAによる地球規模課題対応国際科学技術協力事業(SATREPS/IMPAC-T)の成果の一部です。

参考文献

- 1) Komori, D., Nakamura, S., Kiguchi, M., Nishijima, A., Yamazaki D., Suzuki S., Kawasaki, A., Oki, K. and Oki, T.: Characteristics of the 2011 Chao Phraya River flood in Central Thailand, *Hydrological Research Letters*, Vol.6, pp.41-46, 2012.
- 2) 第8回被災者支援及び被災地の復旧・復興本部会議. 熊本県, 2013.
- 3) Ferreira, S., Hamilton K. and Vincent J.R.: Nature, socioeconomics and adaptation to natural disasters: new evidence from floods, Washington D.C. – The World Bank Policy Research working paper, no. WPS 5725, 2011.
- 4) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Climate Change: The 215 physical science basis. Contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, UK; 976pp, 2007.
- 5) Pappenberger, F., Dutra, E., Wetterhall, F. and Cloke, H.: Deriving global flood hazard maps of fluvial floods through a physical model cascade, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 9, 6615-6647, 2012.
- 6) Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., Kim, H. and Kanae, S.: Global flood risk under climate change, *Nature Climate Change*, 3, 816-821, 2013.
- 7) Holmes, R.R., Jr. and Wagner, D.M.: Flood of June 11, 2010, in the Upper Little Missouri River watershed, Arkansas, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2011-5194, pp.31, 2011.
- 8) Hashmi, H.N., Siddiqui, Q.T., Ghumman, A.R., Kamal, M.A. and Mughal, H.R.: A critical analysis of 2010 floods in Pakistan, *African Journal of Agricultural Research*, Vol.7(7), pp.1054-1067, 2012.
- 9) International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (IFRC): World Disasters Report : Focus on information in disasters, Eurospan, 246pp., 2005.
- 10) Yoshimura, K. and Oki, T.: Today's series contribution to PUB: Value-added water cycle information including flood risk prediction, *PUB Newsletter*, 2.3, 2007.
- 11) GPV Data Archive, <http://gpv.tkl.iis.u-tokyo.ac.jp/GPV>
- 12) Takata, K., Emori, S. and Watanabe, T.: Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff, *Glob. Planet. Change*, 38, 209-222, 2003.
- 13) Yoshimura, K., Miyazaki, S., Kanae, S. and Oki, T.: Iso-MATSIRO, a land surface model that incorporates stable water isotopes, *Glob. Planet. Change*, 51, 90-107, 2006.
- 14) Oki, T. and Sud, Y.C.: Design of Total Runoff Integrating Pathways (TRIP) - A global river channel network, *Earth Interactions*, 2, 1998.
- 15) Yamazaki, D., Kanae, S., Kim, H. and Oki, T.: A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model, *Water Resources Research*, 47, W04501, 10.1029/2010WR009726, 2011.
- 16) Adler, R.F., Huffman, G.J., Chang, A., Ferraro, R., Xie, P., Janowiak, J., Rudolf, B., Schneider, U., Curtis, S., Bolvin, D., Gruber, A., Susskind, J., Arkin, P. and Nelkin, E.: The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979-Present), *J. Hydrometeor.*, 4, 1147-1167, 2003.
- 17) Global Runoff Data Centre, http://www.bafg.de/cln_030/nm_299766/GRDC/EN/Home/homepage__node.html?__nnn=true
- 18) 澤田義人, 沖一雄, 遠藤貴宏, 沢田治雄: MODISデータを利用した広域洪水自動監視システムの開発, *生研研究*, 65(4), 601-611, 2013.
- 19) 木口雅司, 山崎大, 沖大幹, 渡部哲史, 平林由希子, Shen, Y.: 将来社会経済シナリオALPSを用いた気候変動下における水ストレス影響評価, *水文・水資源学会2012年度研究発表会要旨集*, 258-259, 2012.
- 20) Brakenridge, G.R.: Global Active Archive of Large Flood Events, Dartmouth Flood Observatory, University of Colorado, <http://floodobservatory.colorado.edu/Archives/index.html>.

(2013. 9. 30受付)