

中小河川群の氾濫域における 地形的湿潤度と浸水危険度に関する一考察

瀧 健太郎¹・渡邊 康司²

¹ 総合政策部 企画調整課 / 関西広域連合 本部事務局

² 土木交通部 流域政策局広域河川室

本研究では、琵琶湖に流入する中小河川群の氾濫域を対象に、地形的湿潤度および浸水危険度の相関分析を行った。浸水危険度は水理計算で求めた頻度別最大浸水深により表現した。50m×50m格子ごとに得た地形的湿潤指数(TWI)と頻度別最大浸水深の関係について、スピアマンの順位相関係数を用いて評価した。その結果、200年確率を超える低頻度の浸水に対してはかなり強い相関があること、また、低頻度であるほど両者の相関が高くなることが確認された。地形的湿潤指数は各地点の上流域面積と勾配から一意的に定まることから、低頻度で大規模な浸水が生じた場合の浸水危険度は地形条件に大きく依存することが示唆された。

キーワード 地形的湿潤指数, 地形解析, 浸水危険度, 頻度別予測浸水深, 相関分析

1. 序論

果たして浸水被害の危険度は遍く人々に正しく認識されているだろうか。さまざまなリスク情報も容易に入手し得る情報化社会の現代にあってもその答えは否である。例えば、筆者も河川管理に係る業務に没頭すると、一定の設計外力により河川整備が実施されれば、周辺地域はその外力に応じて一様に安全になるとの錯覚に陥ることがある。もちろん、氾濫し浸水が生じた場合、その被害の大きさが空間的に一様であるはずはなく、氾濫原の凹凸など地形条件により浸水の様態は異なる。ゆえに、人命に対し万全の備えを行うためには、地域ごとに異なる浸水特性に応じた適切な住まい方や避難方法が検討されるべきである。浸水危険度に関する情報としては、これまでも河川・下水道・ため池などの施設ごとに浸水想定区域図等が公表されてきた。また、滋賀県では、内外水を同時に考慮した水理計算を行い、中小河川群に囲まれた氾濫域各地点における浸水被害のリスク曲線(地先の安全度)を明らかにするとともに、土地利用や避難誘導方法の検討などの氾濫原管理の基礎情報として活用し始めている¹⁾。今後は他地域においても同様の危険度評価がなされるようになることが期待される。しかしながら、本来はこのような精緻な水理計算による情報を待つまでもなく、多くの先人がそうであったように、地形条件などからも浸水危険度はある程度の確度で広範囲に予見し得るし、先んじて対策を講じられるはずである。そこで本研究では、各地点のリスク曲線が既に整備さ

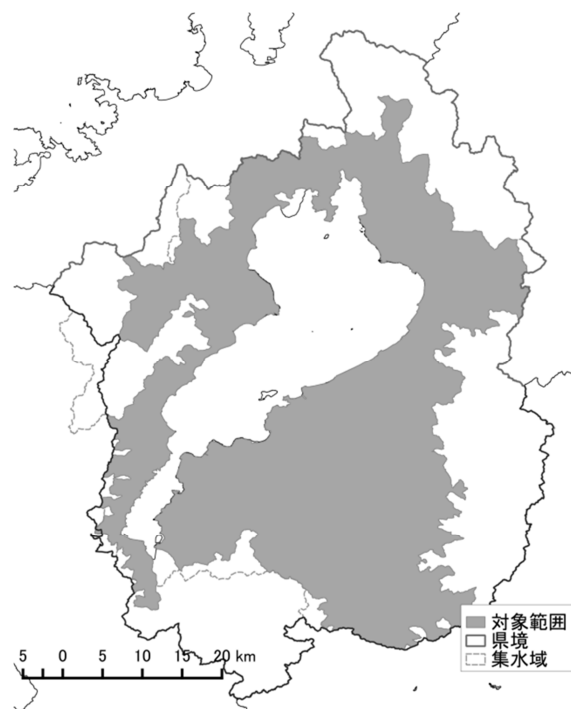


図-1 検討対象範囲

れている琵琶湖流入河川群の氾濫域を対象に、各地点の浸水危険度が地形条件にどれほど依存するのかを定量的に示すことを試みた。具体的には、水理モデルにより算出した氾濫域各地点の頻度別最大浸水深と地形的湿潤指数(Topographic Wetness Index)とで、スピアマンの順位相関係数を用いた相関分析を行った。

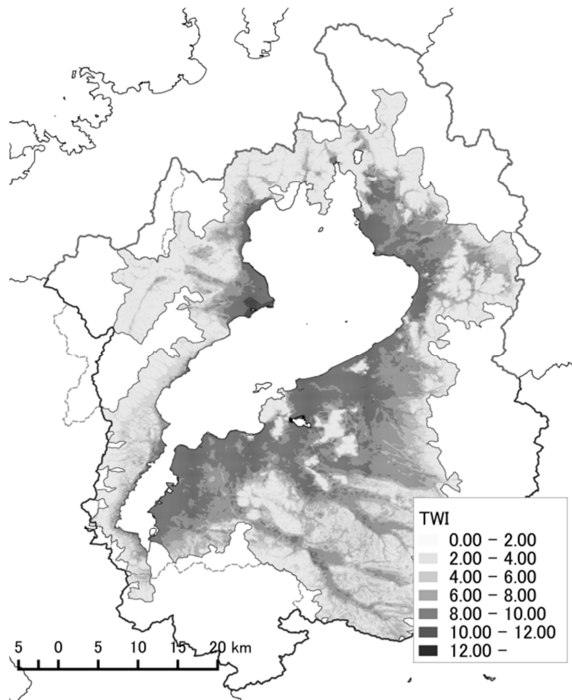


図-2 SAGA GISによる地形的湿潤指数(TWI)の計算結果

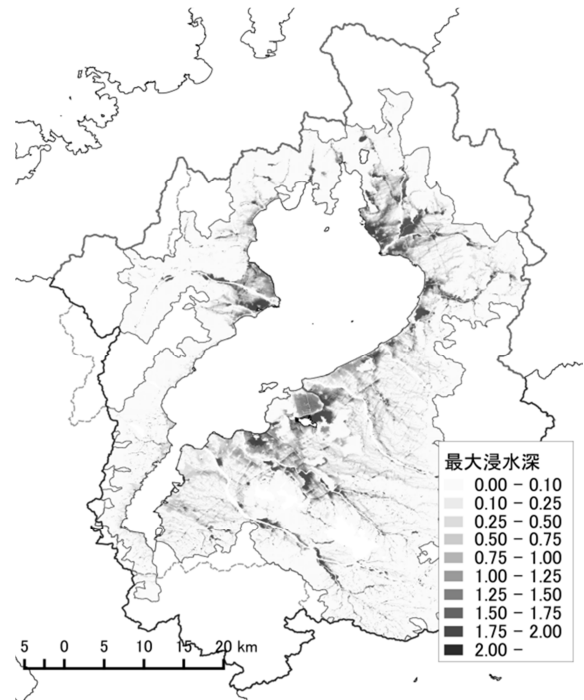


図-3 予測最大浸水深(200年確率降雨)

2. 方法

(1) 対象範囲

本研究では、図-1に示す範囲を対象とした。この範囲は、頻度別最大浸水深の算定結果が既に用意されており、琵琶湖流入河川群の氾濫域と概ね一致する。

(2) 地形的湿潤指数 (Topographic Wetness Index)

地形的湿潤指数(Topographic Wetness Index, 以下TWI)は、著名な降雨流出モデルであるTOPMODELの開発過程でBevenら²⁾が提案した指標である。水文過程に対する地形条件の影響を定量化したもので、恒常的な水の集まりやすさや溜まりやすさを表現している。現在では、ストリームパワー指数(Stream Power Index)などと並び、流域特性を把握するため地形解析によって求められる基礎的な水文指標として広く用いられている³⁾。主要な活用例としては、空間スケールが水文過程に与える影響の評価⁴⁾や物質循環モデルでの流路の設定⁵⁾、土壌水分量⁶⁾の推定といったものである。ほかに、年間純一次生産量⁷⁾、植物相⁸⁾、森林の立地条件⁹⁾など生物学的なプロセスを特徴づける研究などにも広く用いられている。

TWIは流域内の各点で定まり、式(1)で表現される。

$$W = \ln \left(\frac{A_s}{\tan \beta} \right) \quad (1)$$

ここに、 A_s ：単位幅当たりの上流域面積(m^2m^{-1})、 β ：傾斜角度である。(1)式からも明らかなように、TWIは各地点の上流域面積や傾斜角度など地形により一意的に定

められる値である。

本研究では、汎用性が高く地形解析の機能が充実したフリーソフトウェアであるSAGA GIS(ver. 2.1.2)を用いて標高データからTWIを算出した。TWIを算出する場合、前処理として標高データから凹地を取り除いたうえで、各格子に対する傾斜角度と上流域面積を求める必要がある。SAGA GISのTerrain Analysisの機能を用いれば、数値標高モデル(DEM)データからTWIを一括して自動計算できる。標高データについては、国土地理院が提供する国土基盤情報の数値標高モデル(DEM)による10mメッシュのデータを用いた。計算結果の一部(対象範囲内)を図化したものを図-2に示しておく。

(3) 頻度別予測浸水深

本研究では、頻度別予測浸水深として、瀧ら^{10), 11)}が開発した統合水理モデルによる計算結果を用いることとした。具体的には、10, 30, 50, 100, 200, 500, 1000年確率降雨を流域全体に一律に与えた場合の最大浸水深を採用した。瀧らの統合水理モデルは、流域内各地点のリスクカーブ(地先の安全度)を算出するために開発された数値計算モデルであり、降雨から氾濫までの一連の水文過程が再現される。氾濫計算モジュールでは、内外水の氾濫が同時に考慮され、50m×50m格子で浸水深や平均流速などの水理諸量が算出される。

降雨波形については、滋賀県降雨強度式¹²⁾を用いて作成された中央集中型モデル降雨(降雨継続時間は24時間)が採用されている。降雨継続時間6時間以上の降雨強度(滋賀県降雨強度式の適用範囲外)については彦根地方気象台の観測雨量(1894-2009)を用いて補完されている。ま

た、200、500、1000年確率(滋賀県降雨強度式の適用範囲外)の降雨波形については、彦根地方気象台で観測された年最大日雨量がGEV(一般化極値分布、SLSC(99%)¹³⁾が最小値)に従うと仮定し、100年確率の降雨波形をそれぞれ1.2、1.5、1.8倍に引き伸ばした波形が用いられている。このうち、10年確率は小河川(下水道(雨水)や農業用排水路も含む)の整備目標に相当する。また、30~50年確率は中規模河川(流域面積50km²以上の河川)で当面の整備目標とする戦後最大実績洪水を概ね包括する。100年確率は中規模以上の河川で将来的に(河川整備基本方針レベルで)目標とする整備水準であり、200年から1000年確率は超過外力を意図している。

破堤幅や破堤時間などの破堤過程に関する条件については、実務で一般に用いられる栗城ら¹⁴⁾の手法によることとし、次のcase.1)~3)により設定されている。

- case.1) 河道内の計算水位が堤防天端高を超えた時点で破堤が始まると仮定
 - case.2) 堤防天端高から河川管理施設等構造令に示される余裕高を差し引いた高さに計算水位が達した時点で破堤が始まると仮定
 - case.3) 河道内の計算水位によらず破堤しないと仮定
- 評価量としては、破堤現象の不確実性が考慮され、case.1)~3)の最大包絡値が採用されている。

紙面の都合上、計算結果のうち200年確率の予測最大浸水深のみ図-3に示しておく。

(4) 相関分析

TWI 値と頻度別最大浸水深の相関分析を行うため、10m×10m 格子毎に得られた TWI の計算値を、頻度別最大浸水深が格納されている 50m×50m 格子毎の値に換算しておく必要がある。ここでは、フリーソフトウェア QGIS(ver. 2.8.1)の地域統計プラグインの機能を用いて、格子ポリゴン内に含まれる TWI の平均値を求め、それを換算値とした。

TWIは地形条件より一意的に定まる。一方で、予測浸水深は、降雨パターン、流域の土地利用、河川・水路、洪水調節施設の整備状況、氾濫原の人工構造物の配置などの影響を受ける。したがって、両指標間の関係に線形性があるとは言えないため、本研究では、ノンパラメトリックな手法として一般的に用いられるスピアマンの順位相関係数により評価を行った。スピアマンの順位相関係数 ρ は(2)式によって与えられる。

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum D^2}{N^3 - N} \quad (2)$$

ここに、 ρ ：スピアマンの順位相関係数、 D ：対応する TWI との予測最大浸水深の順位の差、 N ：値のペア数である。なお、相関係数の算出には、統計解析用のフリーソフトウェア R(ver. 3.2.2)を用いた。

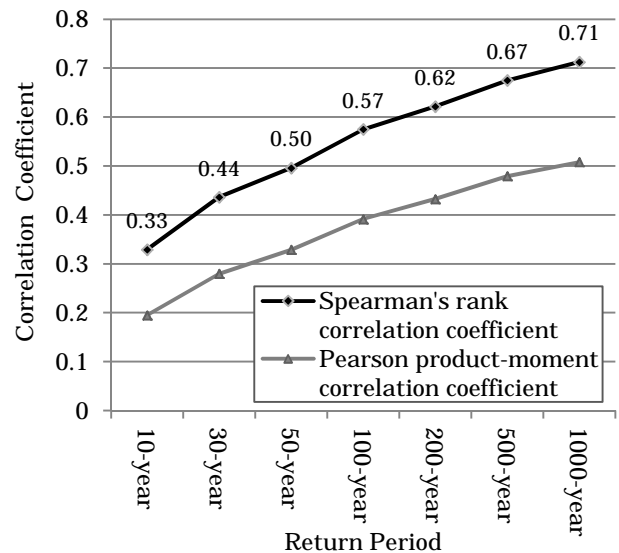


図-4 TWIと頻度別予測最大浸水深の相関係数

3. 結果

前節で示した方法により、スピアマンの順位相関係数を算出した結果を図-4に示す。参考として、普段いわゆる相関係数として用いられ、パラメトリックな(偏差の正規分布を仮定する)手法であるピアソンの積率相関係数についても図に示しておく。

この結果から、確率年が大きくなり外力が大きくなるほど、TWIと予測最大浸水深の相関が高くなることから分かる。スピアマンの順位相関係数に着目すると、10年確率~100年確率でも0.3~0.6とある程度の相関が見られるが、200年確率~1000年確率では0.5~0.7を超えており高い相関が確認された(いずれも有意確率 $P < 0.01$)。なお、確率年が大きくなるほど相関が高くなる傾向は、ピアソンの積率相関係数においても同様であった。

ところで、瀧ら統合水理モデルでは、各河川河口部の出発水位は、琵琶湖基準水位(B.S.L.)+0.40mで固定されており、琵琶湖洪水は陽に考慮されていない。B.S.L.はT.P.(東京湾中等潮位)+84.371mで与えられ、琵琶湖の常時満水位はB.S.L.+0.30mである。上記のB.S.L.+0.40mは、河川群からの流入量がピークとなる時刻の琵琶湖における100年確率水位に相当する¹⁶⁾。参考として、琵琶湖洪水を考慮するため、国土交通省近畿地方整備局が公表している琵琶湖浸水想定区域図で示されている最大浸水深(200年確率)を、統合水理モデルによる最大浸水深(200年確率)を重ね合わせてTWIとの相関係数を求めた。その結果、スピアマンの順位相関係数は0.65、ピアソンの積率相関係数は0.47となった。統合水理モデル単独で算出された最大浸水深(200年確率)との相関係数と比較して高い値(スピアマンの順位相関係数で+0.03、ピアソンの積率相関係数で+0.04)となっており、琵琶湖洪水を考慮しない場合よりも、琵琶湖洪水を考慮した方がTWIとの相関が若干高くなることが確認された。

4. 考察

琵琶湖流域に計画・整備されている各種の治水施設(河川堤防や洪水調節施設(ダム・洪水調整池など))は、主として滋賀県降雨強度式で与えられる10年確率降雨～100年確率降雨で生じる洪水を設計外力としている。したがって、200年確率降雨から生じる洪水は、県内のあらゆる治水施設に対する超過外力(以下、完全超過外力)である。すなわち、200年確率降雨を外力として与えるということは、整備途上・整備後に関わらずあらゆる施設能力を越える洪水を経験している状況、言わば、かなりカタストロフィックな状況を再現することを意味する。なお、滋賀県では、あらゆる洪水から人命を保護するという観点から、200年確率洪水で3.0m以上の浸水が予測される個所での建築物については高上げなどにより屋内避難が可能なスペースを確保するよう、条例による義務付けがなされている。

前節において、完全超過外力に相当する200年確率～1000年確率降雨による予測最大浸水深とTWIとのスピアマンの順位相関係数は0.6を超え、かつ、(再現期間が大きくなり)外力が大きくなるほど相関係数は単調増加することが明らかとなった。このことは、完全超過外力といったカタストロフィックな洪水が生じた場合には、流域・氾濫原における治水施設の整備状況や人工構造物(例えば、連続盛土構造物や住宅地など)などが浸水の程度に与える影響は限定的になり、ほぼ地形条件によって決まってくることを示唆している。河川整備を補完する目的で超過洪水対策あるいは起こり得る最大の洪水への対策を考える場合には、(滋賀県のように)完全超過外力を対象として人命保護を目的とした建築基準を定めておくことは妥当な選択肢のひとつであろう。

また、前述のとおり、TWIは水文過程だけではなく、一次生産量や植物相などの生物学的プロセスにも関係が深いことが知られており、いわゆるグリーンインフラストラクチャー(Green Infrastructure, 以下GI)や生態系インフラストラクチャー(Ecosystem Infrastructure, 以下EI)の配置計画を定めるための基礎的指標ともなり得る。GIの定義は各所でさまざまにされているが、西田ら¹⁶⁾は共通する記載として、「生態系の持つ恵み(生態系サービス、多面的機能)を活用した社会資本整備、土地利用」としている。近年、GIの概念は、欧米の行政機関において広く用いられるようになってきている¹⁷⁾。また、生物多様性条約締結国会議や国連防災会議等の国際会議においては、「生態系を活用した防災・減災(Eco-DRR: Ecosystem-based Solution for Disaster Risk Reduction)」という概念にも注目が集まっている。日本学術会議が提唱しているEIは、「広義のGIから人工的な緑地/水域などによるインフラストラクチャーを除き、生態系(自然・半自然環境)を活かすもののみを指すもの」と定義されており、よりEco-DRRに親和性の高い概念となっている¹⁸⁾。

わが国はまさに人口減少時代に入り、今後は、都市、農地、人工林などの縮退は避けられない状況となっている。言わば、開発から保全・再生へとフェーズがシフトしつつあると理解することができる。今後は、このことを前提にし、賢明な縮退を検討すべきである。これから100年の変化を冷静に分析しながら、防災・減災とともに生態系サービスが総体的に維持・向上できるよう、すなわち、安全で豊かな暮らしを持続していけるよう、県土デザインがなされなければならない。このとき、GIやEIは欠かせない概念となるはずである。

5. 結語

本研究では、琵琶湖流入河川群の氾濫域において、TWIと最大浸水深の予測値との相関分析を行い、(低頻度で)外力が大きいほどそれらの相関が高くなることを明らかにすることを通じ、当該氾濫域においてカタストロフィックな洪水が発生した場合に、水害危険度は施設条件よりもむしろ地形条件に大きく依存することを議論した。

本稿で紹介したTWIは、生物学的プロセスにも用いられる指標であり、これらの議論も加えていくことで、将来的には、流域管理・氾濫原管理と生態系管理とを統合できる可能性がある。人口減少下にあっても安心して豊かに暮らせる県土をデザインできるよう、これらの研究が今後さらに発展することを期待し結びとしたい。

謝辞：地形的湿潤指数(TWI)の算出にあたっては、兵庫県立人と自然の博物館 三橋弘宗 主任研究員にご助言をいただいた。また、土木交通部流域政策局 流域治水政策室 花房大輔 主任技師には浸水危険度に関するデータの整理に協力をいただいた。ご両名のご助力に心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 滋賀県, 滋賀県流域治水の推進に関する条例(滋賀県条例第55号), 2014.
- 2) K. J. Beven, M. J. Kirkby, A physically based, variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrological Sciences Bulletin*, 24, 43-69, 1979.
- 3) John P. Wilson, John C. Gallant : *Terrain Analysis -Principles and Applications*, pp.1-27, 2000.
- 4) 例えば, Beven, K. J., Wood, E. F., Sivapalan, M.: On hydrological heterogeneity - catchment morphology and catchment response, *J. Hydrol.*, 100, 353-375, 1988.
- 5) Robson, A., Beven, K., Neal, C.: Towards identifying sources of subsurface flow: a comparison of components identified by a physically based runoff model and those determined by chemical mixing techniques, *Hydrol. Process.*, 6, pp.199-214, 1992.
- 6) R. Sørensen, U. Zinko, J. Seibert: On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations, *Hydrology and Earth System Science*, 10, pp.101-112, 2006.

- 7) White, J. D., Running, S. W.: Testing scale-dependent assumptions in regional ecosystem simulations, *J. Veg. Sci.*, 5, pp.687-702, 1994.
- 8) 例えば, Moore, I. D., Norton, T. W., Williams, J. E.: Modelling environmental heterogeneity in forested landscapes, *J. Hydrol.*, 150, pp.717-747, 1993.
- 9) Holmgren, P.: Topographic and geochemical influence on the forest site quality, with respect to *Pinus sylvestris* and *Picea abies* in Sweden, *Scand. J. Forest Res.*, 9, pp.75-82, 1994.
- 10) 瀧健太郎, 松田哲裕, 鶴飼絵美, 藤井悟, 景山健彦, 江頭進治: 中小河川群の氾濫域における超過洪水を考慮した減災対策の評価方法に関する研究, *河川技術論文集*, vol.15, pp.49-54, 2009.
- 11) 瀧健太郎, 松田哲裕, 鶴飼絵美, 小笠原豊, 西島輝毅, 中谷恵剛: 中小河川群の氾濫域における減災型治水システムの設計, *河川技術論文集*, vol.16, pp.477-483, 2010.
- 12) 滋賀県: 設計便覧(案)河川編, pp.301-131, 2001.
- 13) 竇馨, 高棹琢馬: 水文頻度解析における確率分布モデルの評価基準, *土木学会論文集*, 393/II-9, pp.151-160, 1998.
- 14) 栗城穰, 末次忠司, 海野仁, 田中義人, 小林裕明: 氾濫シミュレーション・マニュアル(案) - シミュレーションの手引き及び新モデルの検証 -, *土木研究所資料*, 第 3400号, 1996.
- 15) 滋賀県土木交通部河港課長 通達, 滋賀県設計便覧(案)河川編の改訂について, 2003.
- 16) 西田貴明・岩浅有記, わが国のグリーンインフラストラクチャーの展開に向けて ~生態系を活用した防災・減災, 社会資本整備, 国土管理~, *季刊 政策・経営研究*, vol.1, pp.46-55, 2015.
- 17) 例えば, European Commission, *Building a Green Infrastructure for Europe*, 2013.
- 18) 日本学術会議 統合生物学委員会・環境学委員会合同 自然環境保全再生分科会, 提言「復興・国土強靱化における生態系インフラストラクチャー活用のすすめ」, 2014

(2015.11.6 受付)