

古地図・古書による歴史的洪水災害の数値解析に関する研究

京都大学防災研究所 所長・教授 寶 馨
国連大学サステナビリティ高等研究所 ポストドク研究員 羅 平平

概要：

本研究では、歴史的な極端気象の下での洪水事象について統計的な手法で洪水災害の傾向を把握した。歴史的な古文書や古地図を使って、歴史的な電子式土地利用図を再現するモデルを開発し、150年前の歴史的な電子式土地利用図を再現し、古代と将来の極端気候と環境を用いて、統計的なモデルと物理的な水文モデルを用いて古代の極端事象下の洪水流量を再現した。古洪水の痕跡や古文書から、大規模な洪水の流量を推定して、将来の極端気候下で治水政策に科学的な情報を提供できると考えている。また、本研究手法では、将来の古水文の研究にも大変役割を立つことになる。この研究成果によって、極端事象下の持続可能な洪水災害の管理には工学的な視点からの長期的な参考になる。

キーワード：洪水災害、数値解析、極端気候、古地図、古水文、古土地利用再建モデル

1. 研究説明

豪雨・台風(ハリケーン)などの極端事象の下で、洪水災害が世界各地で近年頻発している。また、途上国の人口増加や各国の産業・経済成長により「21世紀は水危機の時代」と言われている。このような極端事象下での甚大な洪水災害によって人間社会は大きな被害を受けることになる。先行研究では、現代の洪水災害における事例研究、水文モデルによる数値計算などを行った。

本研究には以下の研究目的を完成した。

(1) 古地図・古書による歴史的な大規模な洪水災害について統計的な手法と流出モデルを用いて数値解析するシステムを構築した。

(2) 古地図・古書から、歴史的洪水災害の記録を分析し、極端気象の下での洪水災害の原因・規模・頻度を解明した。

(3) 古代から将来にわたる洪水災害発生に関わる時間・空間・環境などの要素を明らかにし、長期的気候変動と人間活動の河川流況への影響を定量化した。

(4) 過去の流域環境を再現した流出モデルによって大規模な古洪水の解析を行った。

本研究の具体的研究手法(図1)は以下のように述べている。

1. 資料収集については、特に古地図、古書と歴史的情報資料などを集めて、集めた資料から古代の環境と河川状況、歴史的記録した流量、古代の記録気候状況などを抽出し、次の段階の入力データとして準備する。
2. 現在の土地利用のデータと古地図、古書と歴史的情報資料から導いた古代の環境と河川状況を入力して、歴史的な土地利用を再現するモデルを構築し、古代の土地利用地図を作成する。
3. 作成した古代の土地利用地図と古代の気候状況を水文モデルに入力データとして、古代の洪水災害の発生する原因・規模を再現し、人間活動からの影響を検証し、それらの影響を定量化して計算する。
4. 以上の研究成果をまとめて、研究報告書を作成する。

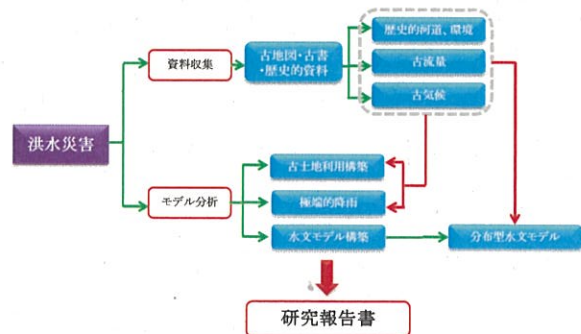


図1 研究手法

2. 対象流域とデータ

鴨川の本川(図2)は、その源を京都市西北部椋敷ヶ岳に発し、途中鞍馬川などを合流しながら左京区下鴨付近で、山地流域をほぼ二等分する高野川と合流して京都市内を貫流し、伏見区下鳥羽町において桂川に合流している。その流路延長は、鴨川上流部21km、下流部12km、高野川では23kmである。また河川勾配は本川の山地部が1/30、平地部は1/150、高野川は同じくそれぞれ1/50、1/110となっている。急峻な山地部となだらかな平地で構成されており、上流の大量の降水は短時間に鴨川に流れ込み、滞留し排水しにくい。

鴨川本川上流部の流域面積は73.1km²、高野川は70.1km²であり、基準地点とみなす荒神橋上流域の流域面積は143.2km²となる。四条地点では、滋賀県境山地に源を発する白川(10.4km²)及び左岸残流域を合流し162.0km²、勧進橋地点では鴨川兩岸の市街地をとり込み176.4km²となり、さらに流下して市街地河川の堀川(14.7km²)、西高瀬川(16.2km²)等を含めて207.7km²で桂川に注いでいる。207.7km²のうち、山地の占める割合は約7割、平地の占める割合は約3割である。流域内の地質は、秩父古生層に属し、硬砂岩・粘板岩・角岩等が最も広く散在し地表は沖積層に覆われている。水源山地の林相は常緑針葉樹林と落葉広葉樹林の混生をなしている。

最近の土地利用データは国土交通省の国土数値情報にあるものを用いる。国土数値情報には、昭和51年度、昭和62年度、平成3年度、平成9年度、平成18年度の土地利用データが整備されている。この研究には昭和51年度と平成18年度の土地利用データを利用し、土地利用データは細分メッシュで3次メッシュの1/10区画で、1辺100mである。数値標高モデルは国土交通省の50mのメッシュの数値標高モデルのデータを使っている。

3. 解析手法

(1) 歴史的土地利用再現方法

まずはじめに、歴史的京都都市図(図4)と照らし合わせるために基準となる土地利用データの年を定める。上で述べた通り、国土数値情報には昭和51年(1976年)から整備されているので、それを基準データとする。次に、対象となる昔の土地利用図(1843年、1902年、1927年)の位置とその名前が分かる場所のうち、基準データ(1976年)にも載っている場所を特定し、それをもとに昔と基準年とを照合して変化した場所を特定する。この様子を図4に示す。歴史的京都都市図は多くの場所情報は書かれている一方でその名前は判別できない場合が多いが、例えば1902年の土地利用図の場合、御所や相国寺、京都繊維工場など6つの場所を特定することができた。それをもとに1902年の土地利用図と1976年のとを照合

した。次にそれをもとに、寺社や川、三条通り、四条通りなどの大通りの場所は変わらない、などのいくつかのルールを決めて流域全体のポリゴンフィーチャを作成する。そして土地利用ごとに番号をふり、ポリゴンをラスターデータに変換すれば完成する¹⁾。こうした作業はArcGISで行う。

(2) 分布型降雨流出モデル

流域は矩形の斜面要素の集合体と、それが結合する河道網によって表現される。流れ方向に従って、すべての矩形斜面要素での流れを逐次追跡して河道への流出量を算定する²⁾。また、河道における流れを追跡して、河川流量を算定する。流れの追跡計算には斜面部、河道部ともキネマティックウェーブモデルを用いる。斜面部の土層は重力水が発生する大空隙部分と毛管移動水の流れの場であるマトリックス部分から構成されると考える³⁾。土層厚をDとし、マトリックス部の最大水分量を水深で表した値をdc、重力水を含めて表層土壌中に存在し得る最大水深をdsと考え、流量流積関係式(1)を仮定する。この流量流積関係式と連続式(1)を用いて上流の斜面要素から順次、雨水を追跡する。河道においては矩形断面を仮定し土層厚をゼロとして表面流のみを考える⁴⁾。

$$q = \begin{cases} v_m \cdot d_m \cdot \left(\frac{h}{d_m}\right)^\theta & 0 \leq h \leq d_m \\ v_m \cdot d_m + v_a \cdot (h - d_m) & d_m \leq h \leq d_a \\ v_m \cdot d_m + v_a \cdot (h - d_m) + \alpha \cdot (h - d_a)^m & d_a \leq h \end{cases} \quad (1)$$

$$v_m = k_m i, v_a = k_a i, k_m = \frac{k_a}{\theta}, \alpha = \sqrt{i/n}$$

$$d_m = D\theta_m, d_a = D\theta_a$$

そこに、qが単位幅の流量、hが水深さ、iが斜面勾配である。km (mms⁻¹)が毛管帯の飽和透水係数、ka (mms⁻¹)は非毛管帯の飽和透水係数、dmは毛管の土層(飽和していない)の深さです、daは非毛管の土層の深さ、vmとvaはそれぞれ不飽和と飽和した表面下の流れの流速、θは不飽和の流れのための非次元のパラメータ、多孔性土層はD)を、θmは不飽和の層の効果的多孔性、そして、n (m⁻¹/3s)は土地カバー・クラスに基づくマンニングの粗さ係数である。

(3) デザイン AIDF 降雨量

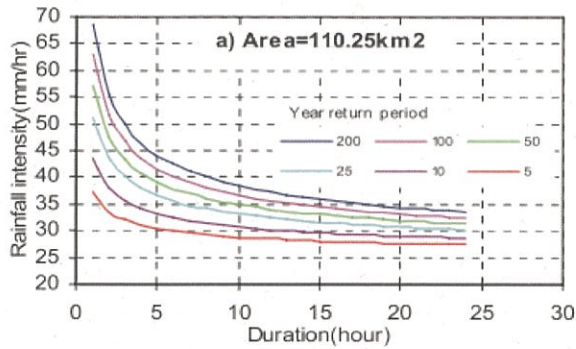


図5 淀川流域のArea Rainfall Intensity Frequency Curves (AIDF) 図⁵⁾

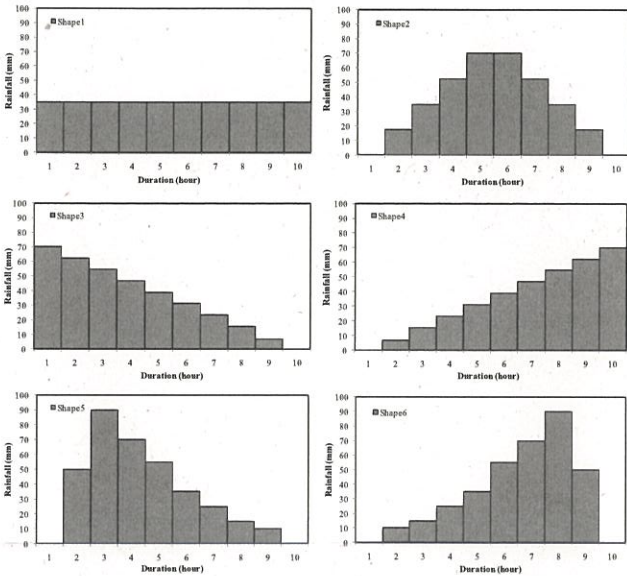


図6 六タイプのデザイン AIDF 極端的降雨⁶⁾

この研究には Nhat さんの 2007 年に発表された研究結果の淀川流域の Area Rainfall Intensity Frequency Curves (AIDF) を利用して、分布型降雨流出モデルの入力データとして、六タイプのデザイン AIDF 極端的降雨 (図6) を開発した。この六タイプのデザイン AIDF 極端的降雨の形は歴史的な降雨の形を参考して作りした。

4. 研究結果

(1) 流域の土地利用変遷

図7に鴨川流域全体の土地利用の1843年、1902年、1927年と1976年データを示す。図7から、森林の面積は1843年には約82%あり、1902年までで約1%増加するもののその後緩やかに減少し、ここ30年は80%で横ばいとなっている。建物用地は数%しかなかったのが10%以上にまで伸びている。田の面積は1843年に10%あったのが2006年には約2%しかない。その他の用地や幹線交通用地はほぼ変化していない。ここ120年間で不透水性面積率は約5%増加し、一方で透水性面積率は約

5%減少している。図7に参考にすると、1886年から1902年で透水性面積率が約1%増加しているのは森林の面積が約1%増加したためであると読み取れる。またその後減少しているのは、田の面積が減少しその分建物用地の面積が増加した影響が大きいことも読み取れる。この傾向をみると、1902年以降に田の面積が減少し続け代わりに建物用地の面積が増加していることが確かめられる。以上から、ここ120年間で不透水性面積率が増加し透水性面積率が減少したのは、田が減少した分建物用地が増加した影響が大きいことがわかる。

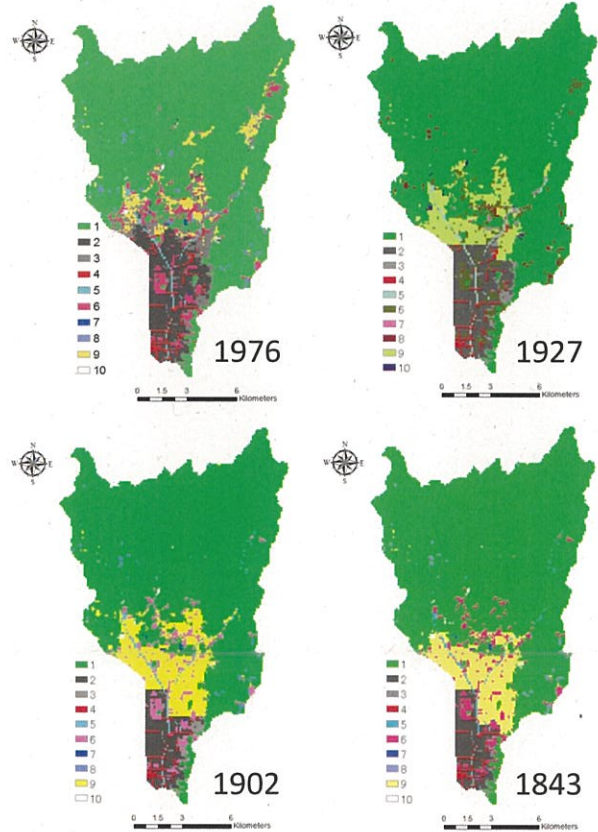


図7 1976年、1927年、1902年と1843年の土地利用図¹⁾

(2) モデルの検証

本研究では、観測された流量データの不足のために1953年洪水災害時の降雨データを使用してCDRMV3モデルを校正した。図4には、モデルのシミュレーションの結果は観測流量のデータとよく合った。このキャリブレーションのナッシュ・サトクリフ係数は約0.95である。シミュレーションのピーク流量が観測された流量より少し低いである。午後6時20:00までと23:00以降16:00-12時の間にシミュレーション流量は、観測された流量より高いである。

CDRMV3モデルとモンテカルロシミュレーションを結合された解析結果に基づいて、一番高いパフォーマンスのCDRMV3モデルの校正のパラメータセットを得た ($Nw=0.51 \text{ m}^{-1/3} \text{ sec}$, $Nu1=0.14 \text{ m}^{-1/3} \text{ sec}$, $Nu2=0.19$)

m-1/3 sec, $Nf=0.47$ m-1/3 sec, $NRv=0.012$ m-1/3 sec, $da=105.43$ mm, $ka=0.0004$ mm s⁻¹, and $\theta=6.86$ 。1959年8月13-14日の観測流量データは、検証のために使用した。図10は、シミュレーションのピーク流量が観測された流量より低く、8月13日の24時までに19時00分からのシミュレートされた流量を過小評価していることを示している。8月14日の2:00まで1:00からシミュレートされた流量が観測された流量に非常に近い。8月14日3時後のシミュレートされた流量が減少傾向を示している。1959年8月13日から8月14日の検証結果は、0.91のNSEである。

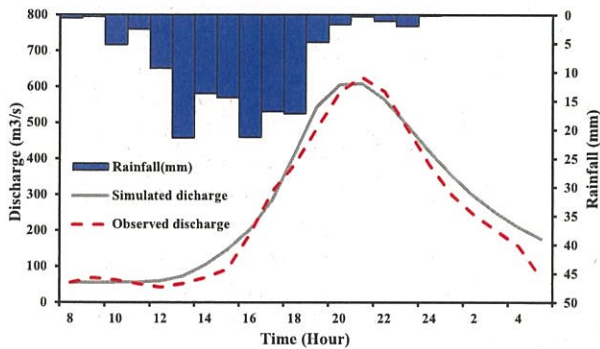


図9 CDRM3 モデルの校正結果 (期間: 1953年9月25日から9月26日)⁷⁾

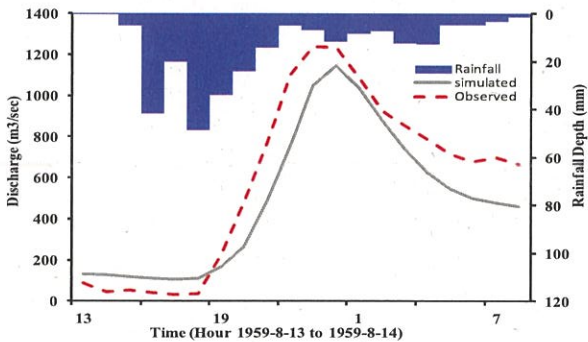


図10 CDRM3 モデルの校正結果 (期間: 1959年8月13日から8月14日)⁸⁾

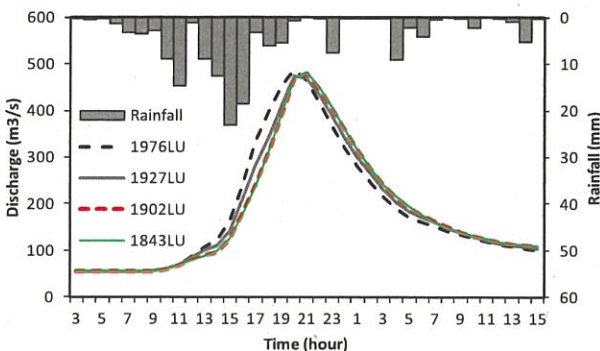


図12 歴史的洪水災害流量の再現及び水文応答⁸⁾

(3) モデルの検証

図12では、ピーク降雨量は1930年7月31日に15:00

に到着し、1843年土地利用下でこの時間での流量は、1976年土地利用のピーク流量のより約40m³/s低くである。1976年土地利用の下でのピーク流量はピーク雨量到着した5時間後に1930年7月31日の20時に到着した。1843年土地利用の下でピーク流量が1時間遅れて21時に到着し、1976年土地利用の流量より約6m³/s低くである。1927年土地利用の流量線が1976年と1843年土地利用の流量線の間位置し、1927年土地利用のピーク流量が20:00に到着したが、これは1976年土地利用の流量より13m³/s低くである。

これらの研究結果は、将来の極端降雨の気候状況下の治水政策に大変重要な科学的な情報を提供することである⁹⁾。

5. 結論

本研究では、次の研究結果が得られた:

- (1) このセル分布型降雨流出モデルは、毎時シミュレーション中に過去の洪水の流量の再現がよく表現できた。
- (2) 古書と古地図によって、古土地利用再構築モデルを開発し、1843年、1902年と1927年など古土地利用図を再構築した。1843年から1976年までに京都市の都市化によって、森林や水田の面積が減少し、建築現場AとBがに増加した。
- (3) 歴史的な記録降雨量とデザイン降雨量下での土地利用変化による水文応答の結果がえられた。建築面積が増加することによって、ピーク流量が高くなり、この結果の原因になるのは森林と水田の面積を下げるの土地利用の変化など人間の活動と考えている。
- (4) 降雨の形状は、洪水リスク管理、治水政策、土地利用変化によって水文応答の影響などに非常に重要です。

この研究結果は、今後の都市計画、古水文の再構築と洪水リスクマネジメントのために重要な学術的な情報をサポートするために使用することができる。

謝辞

本研究は国土技術研究センターの研究助成金第13003号を受けて実施しました。

参考文献

- 1) Luo P., Takara, K., APIP, He, B., and Nover, D., 2014a. Reconstruction assessment of historical land use: a case study at the Kamo River basin, Kyoto, Japan, Computers & Geosciences 63, 106-115.
- 2) Kojima, T. 1997. Application of remote sensing and GIS to hydrological analysis. Doctorate of Engineering Dissertation, Kyoto

- University, Japan (in Japanese).
- 3) Sayama, T., Takara, K., Tachikawa, Y., 2003. Reliability evaluation of rainfall-sediment-runoff models, Erosion Prediction in Ungauged Basins: Integrating Methods and Techniques (Proceedings of symposium HS01 held during IUGG2003 at Sapporo, July 2003). IAHS Publ. no. 279. 131-141.
 - 4) Apip, Sayama, T., Tachikawa, Y., and Takara, K., 2012. Spatial lumping of a distributed rainfall sediment runoff model and effective lumping scale, Hydrological Processes, Volume 26(6), 855-871.
 - 5) Nhat, L. M., Tachikawa, Y., Sayama, T. and Takara, K., 2007. A simple scaling characteristics of rainfall in time and space to derive intensity duration frequency relationships. Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.51, 73-78.
 - 6) Luo P., APIP, He, B. Duan, W., Takara, K., and Nover, D., 2015. Impact assessment of rainfall scenarios and land-use change on hydrologic response using synthetic Area IDF curves, Journal of Flood Risk Management, Article ID: 12164, Proof Editing.
 - 7) Luo P., Takara, K., APIP, He, B. and Nover, D., 2014. Paleoflood simulation in the kamo river basin by using a grid-cell distributed rainfall-runoff model, Journal of Flood Risk Management. Vol.15, pp.1052-1061.
 - 8) Luo P., Takara, K., APIP, He, B., Nover, D., and Yosuke YAMASHIKI, Land use change analysis and paleo-flood in the Kamo River basin, Kyoto, Japan, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.56, pp. 127-132, 2012.
 - 9) Luo P., He, B. Takara, K., Xiong, Y. E., Nover, D., Duan, W., and Fukushi, K., 2015. Historical Assessment of Chinese and Japanese Flood Management Policies and Implications for Managing Future Floods, Environmental Science & Policy, Vol. 48, pp. 265-277.