

自然災害のリスクを情報技術を使って自らの力で見出す探求型の教材開発

河元 信幸

情報技術課

1 はじめに

近年、時間雨量が 50mm を上回る豪雨が全国的に増加するなど雨の降り方が局地化・集中化・激甚化しており、明らかに雨の降り方が変化している。国土交通省も新たなステージに対応した防災・減災のあり方が重要として、最悪の事態も想定して主体的避難の促進など命を守る行動を推進している。また、自然災害を自分自身への身近な危険として認識し、必要な知識を持ち、日ごろからの備えをするなどの防災に関する教育も安全教育の一環として行われている。

防災教育をひろく広げるためには、過去の自然災害の様子や言い伝え、映像や写真、教訓に加えて、災害の危険性について情報技術を用いて自らの力で見出す探求型の教材が重要である。自然災害を身近な危険と認識して地域に潜む危機に備えるためには、危険を予測することが重要である。本研究で扱う土砂災害の発生件数は、令和元年1都1道1府 40 県で 1,996 件が発生しており、昭和 57 年の集計開始以降4番目に多く発生している¹⁾。また、土砂災害の危険度を示す「土壌雨量指数」の計算に利用するタンクモデル²⁾は、全国一律のパラメータを用いており、個々の地域における植生、地質、風化等を考慮していない。地域独自のパラメータの選択により、土砂災害発生の危険度には開きがあることが考えられる。

本研究では、危険の予知、防災意識の向上が育成できる教材の開発を試みる。具体的には、自然災害で被害が甚大になる土砂災害に着目し、メディアで見かける土砂災害の危険度を示す『土壌雨量指数』³⁾を自らの力で求めることで、情報技術を用いた自然災害への心構えを図る探求型の教材の作成を試みるものである。

2 タンクモデルと土壌雨量指数

タンクモデルは、図 1 に模式的に示した機構で、雨量を流量に変換している。菅原^{4),5)}は「直列貯留型とよんだが、一般にはタンクモデルとよばれている」と示している。雨は、タンクモデルの最上段の第1容器に注入される。2 段目以下の容器は、一段上の容器の底面の孔(浸透孔)から水を受ける。各容器内の水は、一部は側面の孔(流出孔)から外部に流出し、一部は底面の孔から一段下の容器に移行する。各段の容器の側面の孔からの流出のわが河川の流量となる。モデルでは、下の容器ほど流出孔を細くし、水を通しにくく作ってある。したがって、長い晴天続きで容器が空になっているところに小雨が降ると、容器内の水面は側面の流出孔の高さに達していないから流出は生じない。雨は地面に吸い込まれて、容器内の水面が流出孔の高さに達するまでは、流出が始まらない。それまで降った雨が、初期欠損と呼ばれるものである。このモデルは、雨量に対して水位や流出量が非線形であり、また降雨の挙動から河川への流出変化を表現できる。ただし、容器の段数などのモデル構造や、流出率、浸透率などのパラメータは、モデル応答値と観測値との比較や検証が必要で、試行錯誤しながら設定すること、パラメータの物理的な意味づけに難しいなどの問題がある。

菅原は、わが国の河川では各容器を線型近似したとき、第 1 容器の水の半減期は 1 日または 2~3 日程度、第 2 容器は数日~1 週間の程度、第 3 容器は 2~3 か月の程度、第 4 容器は年単位と示している。あわせて河川流量は近似的にこのような半減期を持つ 4 つの成分の和として表わされ、この 4 つの成分を表層から、表面流出、中間流出、準基底流出、基底流出と称している。

タンクモデルの計算は、図1の第1容器について、時系列の計算を以下のように行う。ここで、容器の断面積は1とし、容器内の水深と貯留高とは一致する。なお、計算は時系列で考えるものとする。

$$y_n = \begin{cases} 0 & (X_n \leq h_1) \\ \alpha_1 \cdot (X_n - h_1) & (h_1 < X_n \leq h_2) \\ \alpha_2 \cdot (X_n - h_2) + \alpha_1 \cdot (X_n - h_1) & (h_2 < X_n) \end{cases}$$

$$z_n = \beta \cdot X_n$$

$$X'_n = X_n - y_1 - z_1$$

$$X'_{n+1} = X'_n + x_{n+1}$$

ここで、流出孔の係数 α 、浸透孔の係数 β は、貯留高 X_n の α 倍が流出高 y_n 、 β 倍が浸透高 z_n となる。

貯留高 X_n から流出高 y_n 、浸透高 z_n を差し引いた残りが残高 X'_n になり、時点 $(n+1)$ における雨量 x_{n+1} を加えて時点 $(n+1)$ における貯留高 X_{n+1} となる。そのため、係数 α と係数 β の合算が1を超えると毎回全貯留量は容器から排出されるため、 $(\alpha + \beta) > 1$ という係数はありえない。これは時系列として計算することから生じた条件であるとしている⁴⁾。

気象庁では図1の第3容器までを使用し、直列3段タンクモデル³⁾として各容器に残っている貯留高の合計を算出し、土壤雨量指数としている。

$$S = X_1 + X_2 + X_3$$

土壤雨量指数は、土砂災害危険度を把握するための指標であり、タンクモデルにより土壤中の水分量を指数化したものである。土壤雨量指数は、

各地の気象台が発表する大雨警報や土砂災害警戒情報等の判断基準に用いている。なお、気象庁ではタンクモデルの各パラメータを Ishihara & Kobatake⁶⁾に沿って表1の値を用いている。そのため、下記のような留意点を含んでいる。

- ① 全国一律のパラメータを用いており、個々の傾斜地における植生、地質、風化等を考慮していない。
 - ② 比較的表層の地中をモデル化し、深層崩壊や大規模な地滑りなどにつながるような地中深い状況を対象としたものではない。
 - ③ 降水は雨/雪に関わらず即時に第1タンクへ流入する。降った雪が積雪として地表に蓄えられる過程やこれが融けて地中に浸み込む過程は考慮していない。
- としている⁴⁾。

3 探求型の教材作成

上述のように、土壤雨量指数を自らの力で求めるためには、地域独自のタンクモデルを構築する必要がある。情報技術を用いた自然災害への心構えを図る探求型の教材の作成を試みるために、汎用オフィスソフト Microsoft Excel を使用して、地域独自のタンクモデルの構築を試みる。

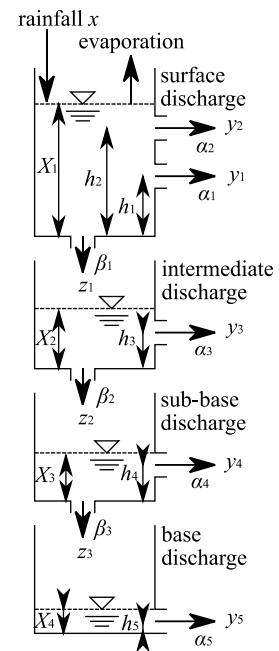


図1. タンクモデル

表1. タンクモデルのパラメータ

	一段目	二段目	三段目
流出孔の高さ	$h_1=15$	$h_3=15$	$h_4=15$
	$h_2=60$		
係数 α	$\alpha_1=0.1$	$\alpha_3=0.05$	$\alpha_4=0.01$
	$\alpha_2=0.15$		
係数 β	$\beta_1=0.12$	$\beta_2=0.05$	$\beta_3=0.01$

出典：国土交通省気象庁³⁾

3-1 観測データの収集

地域独自のタンクモデルの構築のために、降水量は国土交通省気象庁過去の気象データ⁷⁾から、流出量は国土交通省水管理・国土保全局が所管する観測所における観測データ⁸⁾を用いた。観測所は、山口県では佐波川水系、小瀬川水系の2水系に観測所があり、本研究では佐波川水系佐波川を対象とした。降水量は佐波川河口付近に位置する防府観測所のデータを、流出量は防府観測所に近く、沿岸の影響を受けないと考えられる新橋観測所とした。なお、観測所詳細諸元情報から河口から8.00 kmの位置で、その流域面積は423.10km²である。図3にそれぞれの観測所から得た年間流出量と年間降雨量の経年変化を示す。山口県の年間降水量は1939.5 mm⁹⁾とされており、防府観測所の年間降雨量1660 mmは、山口県年間降水量より少ないことがわかる。なお、本研究では降水量として、雪の影響を含めない降雨量とした。

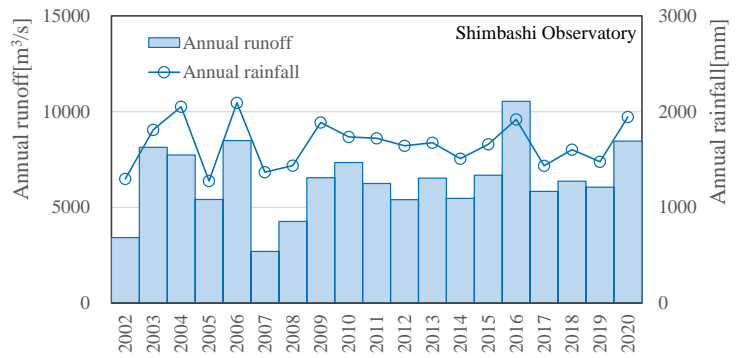
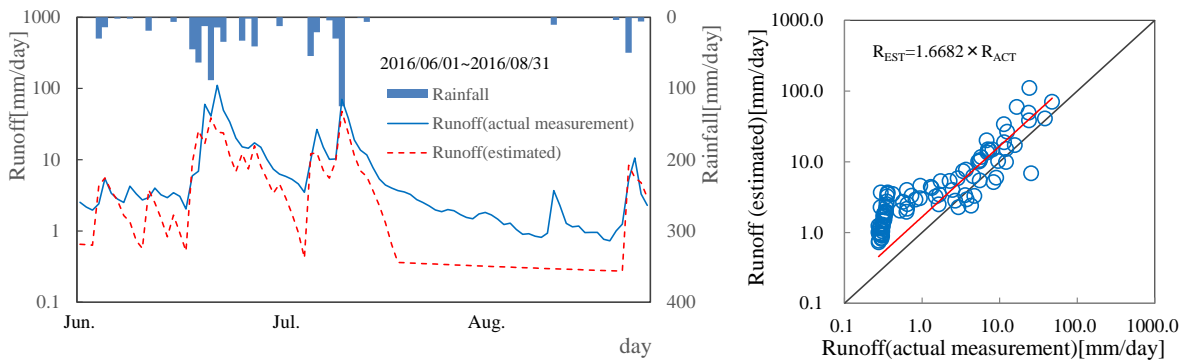


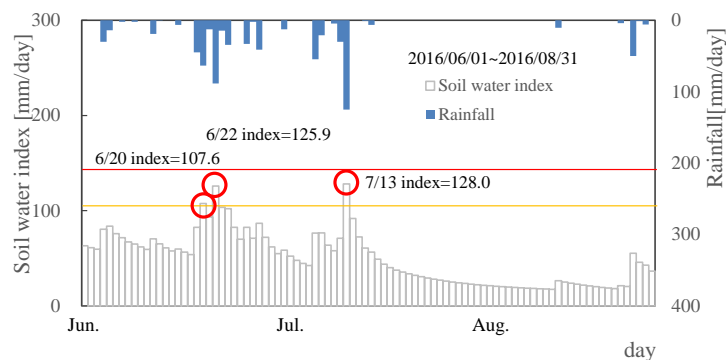
図3. 年間流出量と年間降水量

山口県の年間降水量は1939.5 mm⁹⁾とされており、防府観測所の年間降雨量1660 mmは、山口県年間降水量より少ないことがわかる。なお、本研究では降水量として、雪の影響を含めない降雨量とした。



(a) 降水量と実測流出量・推定流出量の関係

(b) 実測流出量と推定流出量



(c) 降水量と土壌雨量指数の関係

図4. 防府新橋地域のタンクモデル(2016年)

表2. 土砂災害警報

	6/22	7/13
土壌雨量指数(基準 144)	125.9mm	128.0mm
ID	20160622181500-3520600	20160713044000-3520600
発表時刻～解除時刻	6/22 18:15～6/23 5:40	7/13 4:40～11:15

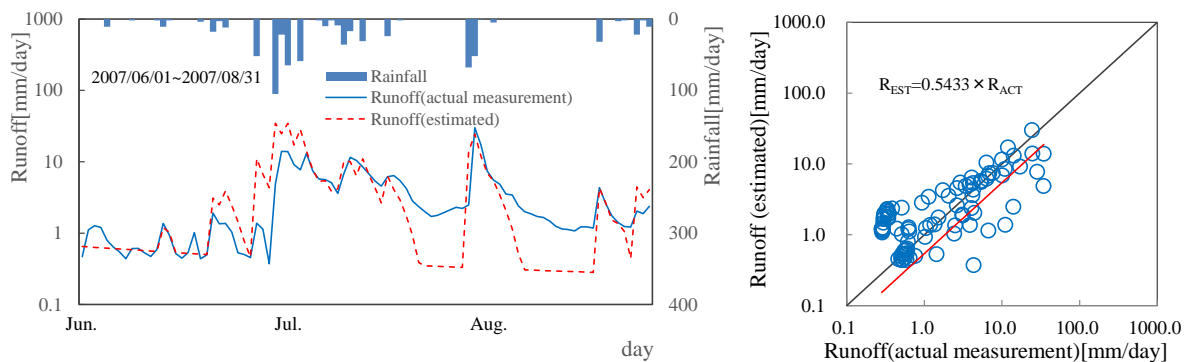
3-2 タンクモデルの計算

土壌雨量指数を自らの力で求めるための地域独自のタンクモデルを構築する場合、その期間は、第3容器での水の半減期の3か月とした。また、計算を簡略化させるために、図1に示されている蒸発量は考慮しないこととした。

土壌雨量指数は地域ごとに発表基準が定められており、山口県防府市では大雨による土砂災害に関する土壌雨量指数基準は警報で144、注意報で106である¹⁰⁾。

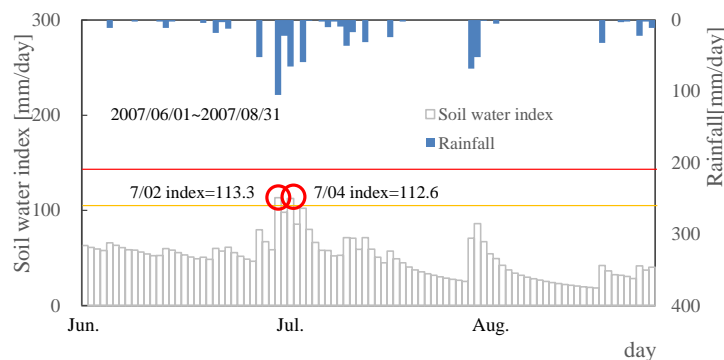
図4は、図3から近年比較的降水量、流出量が多い2016年の梅雨期付近の6/1～8/31の3か月データを用いて、表1に示す気象庁が定めた全国一律のタンクモデルの各パラメータを使用して計算(RUN.1)した結果である。図4(a)は、防府観測所からの降水量と、新橋観測所からの佐波川実測流出量を用いてタンクモデルの時系列計算を行い、佐波川実測流出量と佐波川推定流出量を対数表示して比較したものである。図から、実測流出量のピークと推定流出量のピーク時期は合致しており時系列変化がおおむね対応していること、しかしながら推定流出量は実測流出量よりも小さいことがわかる。図4(b)は、佐波川実測流出量と推定流出量の合致の度合いを示している。図から、推定流出量は実測流出量を全体的に過小算出していることがわかる。図4(c)は、降水量とタンクモデル第3容器までの貯留高の合計である土壌雨量指数の関係を示している。図中の赤実線、黄実線はそれぞれ山口県防府市での大雨による土砂災害に関する警報値と注意報値を示している。図から、2016年の梅雨期付近の3か月では大雨による土砂災害に関する警報値を超える日はなく、注意報値を超えて日があることがわかる。その注意報を超えた日は、6月20日、22日と7月13日であった。これは表2に示すように土砂災害警報情報¹¹⁾から防府市では、6月22日から23日にかけての11時間、7月13日に6時間、土砂災害警戒情報の発表あったこととおおよそ合致している。

図5は、図3から降水量、流出量が少ない2007年の梅雨期付近の6/1～8/31の3か月データを用いて、図4と同様の計算(RUN.2)を行った結果である。図5(a)は、降水量と実測流出量、推定流出量を対数表示して比較したものである。図から、実測流出量と推定流出量のピーク時期は合致していること、図4(a)と異なり推定流出量が実測流出量よりも大きく算出される時期があることがわかる。図5(b)は、図4(b)と同様に実測流出量と推定流出量の合致の度合いを



(a) 降水量と実測流出量・推定流出量の関係

(b) 実測流出量と推定流出量



(c) 降水量と土壌雨量指数の関係

図5. 防府新橋地域のタンクモデル(2007年)

示している。図から推定流出量は実測流出量を比較的良好に表示していることがわかる。図 5(c)は、降水量と土壌雨量指数の関係を示している。図から、2007年の梅雨期付近の3か月では大雨による土砂災害に関する警報値を超えた日が2016年と同様になかったことがわかる。注意報値を超えた日は、7月2日、4日であった。2016年では3回の注意報値を超えた日の降水量は63.5mm/day, 88.5mm/day, 125mm/dayであったが、2007年では2回の注意報値を超えた日の降水量は105mm/day, 65mm/dayであった。気象資料データを用いて気象庁が定めた全国一律のタンクモデルの各パラメータを使用して計算した結果、土壌雨量指数は警報値を超えることはなかった。

3-3 タンクモデルの各パラメータの最適化

タンクモデルの各パラメータの同定は、流出量の誤差が最小になるような非線形関数の最適化問題に置き換え、パラメータを推定しようとする研究は古くから行われてきた。2000年では遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて概念的雨水流出モデルの同定には有効であることを示している^{12,13)}。GAは、選択淘汰、交叉、突然変異といった生物進化の原理に基づくアルゴリズムで多点探査を行うという特徴がある。また、近年では人工知能(AI)の実現手段であるディープラーニングを用いた研究も盛んである。ディープラーニングの基本は「畳み込みニューラルネットワーク」であり、汎用オフィスソフト Microsoft Excel の機能でも利用¹⁴⁾可能であることから、タンクモデルのパラメータの同定の最適化を試みる。Microsoft Excel では、複数の変数を含む数式において、目標とする値を得るための、最適な変数の値を求めることができる機能であるソルバーを使用する。

ソルバーのパラメータは以下のように設定した。

- 1) 目的セルの設定:実測流出量と推定流出量の誤差
- 2) 目的値:最小値
- 3) 変数セルの変更:流出孔の係数 α , 浸透孔の係数 β , 流出孔の高さ h , 初期貯留高 X_n
- 4) 制約条件の対象:各容器での係数 α と係数 β の合算が1以下
- 5) 解決方法の選択:GRG 非線形

目的セルの設定と目的値

最小化の目的となる変数(目的変数)であるため、実測流出量と推定流出量の誤差が最小となるように設定する。誤差は、実測値と予測値の「誤差の絶対値」から算出する指標である「平均絶対誤差」とし、予測精度は0に近いほど高いとされている。

MAE (Mean Absolute Error)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Mea_i - Pre_i|$$

ここで、 Mea は実測流出量、 Pre は推定流出量である。目的変数は最小となるように設定する。

変数セルの変更

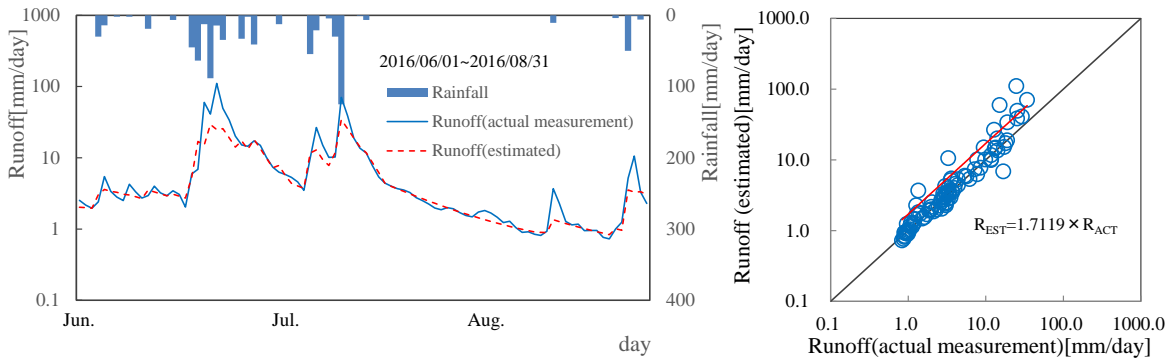
目的変数を得るための説明変数であり、表1の11変数とした。なお、Microsoft Excel のソルバーを求める最小値は、極小解であることから、それを回避するために表1に示す Ishihara & Kobatake の値を初期値として実行した。

制約条件の対象

タンクモデルは時系列として計算することから、係数 α と係数 β の合算が1を超える $(\alpha + \beta) \leq 1$ という制約を各容器に設けた。

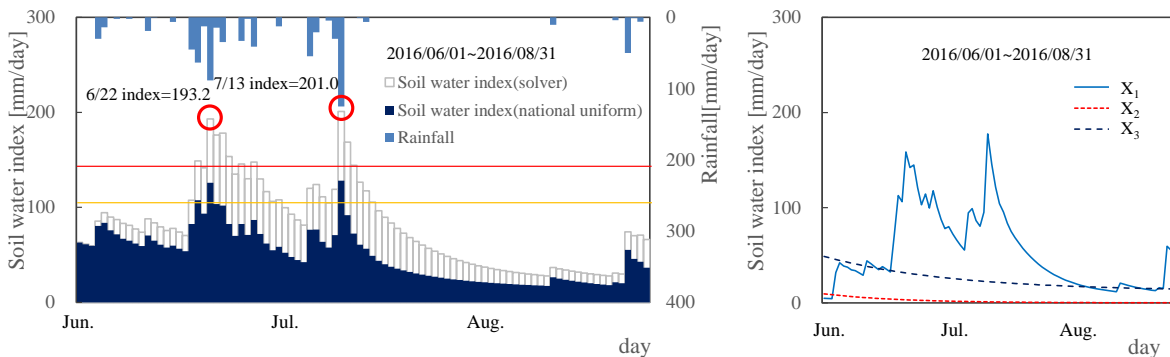
表 3. タンクモデルの各パラメータの最適化

	h_1	h_2	h_3	h_4	α_1	α_2	α_3	α_4	β_1	β_2	β_3
RUN.1	15	60	15	15	0.1	0.15	0.05	0.01	0.12	0.05	0.01
RUN.3	13.4	74.5	15.0	15.0	0.05	0.15	0.05	0.02	0.04	0.05	0.01



(a) 降水量と実測流出量・推定流出量の関係

(b) 実測流出量と推定流出量



(c) 降水量と土壌雨量指数の関係

(d) 各容器の貯留高の変化

図 6. 防府新橋地域のタンクモデルの最適化(2016 年)

各パラメータの最適結果

実測流出量と推定流出量の誤差が最小となるように最適化(RUN.3)を行った結果, 表 3 に示す各パラメータを得ることができた. なお, 平均絶対誤差は, $MAE = 0.64$ から $MAE = 0.18$ へと向上している.

表 3(RUN.3)の各パラメータを用いて降水量と実測流出量, 推定流出量を対数表示して比較したものが図 6(a)である. 図から, 図 4(a)と比較して実測流出量に推定流出量が良好に合致していることが確認できる. 図 6(b)は, 実測流出量と推定流出量の合致の度合いを示しており, 図 4(b)での過小算出が改善されていることがわかる. 図 6(c)は, 降水量と土壌雨量指数の関係を示している. 図中の土壌雨量指数において色塗りが RUN.1 の結果であり, 白抜きが RUN.3 の結果である. 最適化されたタンクモデルでは, 土壌雨量指数が大幅に増大していることが確認できる. これは表 3 の各パラメータ中で第 1 容器の流出孔の係数 α が小さくなることで, 貯留高が増加することで土壌雨量指数が大きくなったと推察できる. また, 浸透孔の係数 β も小さくなることで土壌雨量指数の低下が緩やかになったと考えられる. 図 6(d)は, タンクモデルの第 3 容器までに残っている貯留高の変化を示した. 図から第 1 容器の貯留高の変化に比べて, 第 2 容器, 第 3 容器とも経過日数とともに一定値へ緩やかに変化する. これは, 菅原が示したようにそれぞれの容器での水の半減期に相当すると考えられ, 土壌雨量指数は第 1 容器に大きく影響を受けることが推察される.

4 おわりに

本研究では、自然災害で被害が甚大になる土砂災害に着目し、土砂災害の危険度を示す土壌雨量指数を自らの力で求めることを目的に、汎用オフィスソフト Microsoft Excel を使用してタンクモデルの構築を行い、土壌雨量指数の算出を行った。新たに得られた知見は以下のとおりである。

1. 全国一律の各パラメータを使用して、降水量と流出量のみで得たタンクモデルから、土壌雨量指数を算出した。得られた土壌雨量指数の時系列変化から、大雨による土砂災害に関する警報値を超えた時期と、土砂災害警戒情報の発表時期はおおよそ一致した。
2. 汎用オフィスソフト Microsoft Excel を使用して地域独自のタンクモデルの各パラメータの同定に、ソルバーによる最適化は有効であった。また、地域独自のタンクモデルから得られた土壌雨量指数の時系列変化をみると対象地域(山口県防府市[2016年])では、土壌雨量指数が全体的に大きくなることが確認できた。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP 21H04102 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 国土交通省 報道・広報 https://www.mlit.go.jp/report/press/sabo02_hh_000091.html
- 2) 菅原正巳:タンク・モデル—河川の流量を雨量から算出する一つのモデルについて—, 地学雑誌, 94(4), pp. 209-221, 1985.
- 3) 土壌雨量指数 <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/dojoshisu.html>
- 4) 菅原正巳:水文学講座 7 流出解析法, 共立出版株式会社, 1972.
- 5) 菅原正巳:水文学講座 別巻 続・流出解析法, 共立出版株式会社, 1979.
- 6) ISHIHARA, Yasuo, KOBATAKE, Shigeki : Runoff Model for Flood Forecasting, Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, 29(1): 27-43, 1979.
- 7) 国土交通省気象庁 各種データ・資料 <https://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>
- 8) 国土交通省水管理・国土保全局が所管する観測所における観測データ:<http://www1.river.go.jp/contents.html>
- 9) 都道府県別の年間降水量ランキング:<https://47todofuken-ranking.com/kosuiryo/>
- 10) 警報・注意報発表基準一覧表(山口県):<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kijun/yamaguchi.html>
- 11) CPS-IIP(CPS Integrated IT Platform) プロジェクト 気象リスクウォッチ 土砂災害警戒情報:
<http://www.cps.nii.ac.jp/>
- 12) 田中丸治哉:タンクモデル定数の大域的探索, 農業土木学会論文集第 178 号(第 63 巻第 4 号), pp.103-112, 1995.8.
- 13) 鈴木誠, 百田博宣, 神野健二, 河村明:GAを用いたタンクモデル同定に関する統計的検討, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.115-120, 1988.2.
- 14) 涌井良幸, 涌井貞美:Excel でわかるディープラーニング超入門, 技術評論社