

ハイドログラフの類似性に基づく小流域の分類に関する研究

Study on Classification of Small Bssins Based on Hydrographs Similarity

苫小牧工業高等専門学校 創造工学科 ○正員 八田茂実 (Shigemi HATTA)
正員 谷口陽子 (Yoko TANIGUCHI)

1 はじめに

近年日本各地で大雨による大規模な災害が頻発しており、特に中小河川での洪水被害が多い。中小河川では水位観測や流量観測が行われていない場合が多く、洪水予測のための基礎資料もない状況にある。このような、観測資料がない、あるいは資料の乏しい流域に対してモデルによる河川流量の推定を可能にするため、これまで多くの研究がなされてきている。流出モデルのパラメータを表層地質や地形、地被状態などに関連付けた「パラメータの総合化」もその解決法の1つである。小葉竹・石原¹⁾は流域をいくつかの小流域に分割し、分割した小流域にタンクモデルを配置し、これを河道系で合成した流出解析を行い、地質による4つのパラメータセットを提案している。奥泉ら²⁾は流域の表層地質の面積率によるタンク型貯留関数法のモデルパラメータの推定式を提案し、洪水流量を実用的な精度で推定できることを示している。横尾ら³⁾は長期流出を対象に地質と土地利用、流域面積と平均勾配からタンクモデルのモデルパラメータの設定を行っている。これらの方法は最も有力な方法と考えられるが、想定したモデル構造と流出のメカニズムの異なる流域では想定通りの結果が得られない可能性もある。

一方、空間的近接性も集水域の類似性の指標として利用される。Randrianasolo et al.⁴⁾は隣接する集水域で求めたモデルパラメータを使用して、フランスの計測されていない流域でのアンサンブル予測を行い、それらの流域でかなり良い予測を提供できることを示している。Vandewiele and Elias⁵⁾は、75のベルギーの集水域のうち72%がクリギングを使用してモデルパラメータを推定できること、44%は隣接する集水域のモデルパラメータを使用できることを示している。しかし、流域の特性と応答は空間内で急激に変化する可能性があり、空間的な近接性があいまいな指標で有ることは否めない。このように、我々は流出特性を決定する確実な方法を現状では持っておらず、現実的には現在観測資料のある流域に対して様々な方法を適用し、できるだけ多くの解析例を蓄積することは重要である。

観測されている流量資料は少ないとは言うものの、これまでに多くの観測資料が蓄積されてきており、現在では公開されている資料を容易に利用できる環境も整ってきている。国土交通省が公開している水文水質データベースでは、水位流量資料は石狩川水系だけで122箇所分ある。公開されていないものの、中小河川などで継続的に観測されているものも含めれば、我が国ではかなりの流量資料が存在する。このように蓄積されている過去の資料を収集し、モデル化をすすめることによって観測資料の乏しい流

表- 1 対象とした流域の概要

番号	河川名：観測点	流域面積 (km ²)	期間
1	白井川：白井	91.2	1998-2018
2	小川：薄別	10.8	1998-2018
3	盤の沢川：盤の沢	7.1	2001-2018
4	簾舞川：簾舞	22.0	2001-2018
5	オカバルシ川：オカバルシ	4.0	1998-2018
6	真駒内川：真駒内常磐	31.1	2001-2018
7	北の沢川：下北の沢	3.9	2001-2018
8	南の沢川：南の沢	1.7	1998-2018
9	ラルマナイ川：白扇	39.6	2007-2018
10	漁川：光竜	39.9	2013-2018

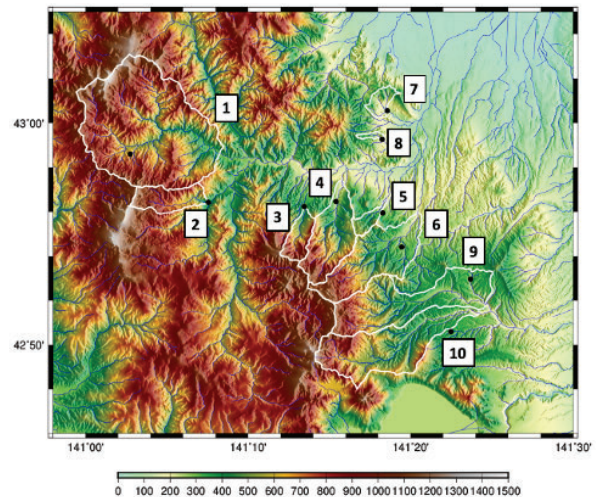


図- 1 対象流域の位置

域の参考資料として利用でき、検討の幅が広がる。しかし、資料数はかなり多いため、個々の流域のモデルを個別に求めることは非効率である。流出特性の類似した流域を分類することができれば、分類されたグループ単位で効率的にモデル化ができる。このような観点から、本研究では過去の資料から複数地点の類似した降雨を抽出し、降雨観測点近傍の流域の降雨に対する河川流出の類似性から流域の分類を試みる。

2 対象地域と観測資料

本研究では、試行的に流域間の降雨流出の類似度を直接比較する。このため、選定する資料は類似した降雨が発生するであろう比較的狭いエリアで、かつ多くの流量観測が行われているエリアから収集することとした。支笏湖から豊平川上流部周辺では、水文水質データベースで公開されている流量観測点が高密度で存在する。今回は、地点雨量を流域雨量として解析を行うため、これらの河川のうち、流量観測流域面積が100km²未満で、流域近傍で雨量観測がなされている10河川を対象とした。対象とした流域の

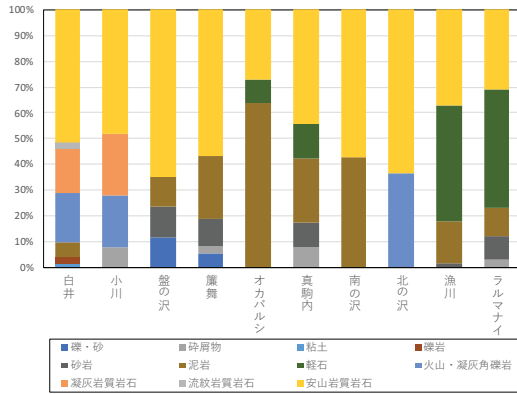


図-2 対象流域の表層地質の面積率

一覧と位置を表-1 および図-1 に示す。図中の番号は表-1 中の番号に対応しており、白い線は流域界、黒点は使用した雨量観測点の位置を示している。降雨・流量資料はすべて水文水質データベースから収集しており、収集期間は1998年から2018年の21年間であるが、観測点によって一律ではなく、欠測期間もところどころ存在する。

図-2 は対象流域の国土数値情報の土地分類メッシュから得られた表層地質分類（岩石区分）の面積率を表している。これによれば、表層地質は隣接する流域（白井川－小川、盤の沢川－簾舞川、オカバルシ川－真駒内川、漁川－ラルマナイ川）で類似していることがわかる。中野⁶⁾によれば、表層地質は基底流量の涵養に影響を受けるとされており、降雨流出に与える影響は少なくないと考えられる。

3 降雨流出応答の類似した流域の分類

3.1 流域分類の方法

数値モデルによる再現性の評価としては、Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) が特に水文学分野で用いられることが多い。 NSE は ASCE から推奨されている⁷⁾ が、最小値を持たないため、評価指標としての議論がある。Index of agreement はこれを解消するため提案されたもので、以下の式で表される。⁸⁾

$$d_j = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N [x_o(t) - x_c(t)]^j}{\sum_{t=1}^N [|x_c(t) - \mu| + |x_o(t) - \mu|]^j} \quad (1)$$

ここで、 x は水文量、 μ は平均値で、添字 o, c はそれぞれ、観測値、計算値を意味する。

d_j は 0~1 の間で規格化されており、完全一致で 1 の値を取る。本研究では、各流域間のハイトグラフ・ハイドログラフの類似度の評価に $j=2$ とした d_2 を用いることとした。具体的には、比較する 2 つの資料の片方を観測値、もう片方を実測値に見立てて d_2 を計算する。2 流域間で流出特性の比較をしたい場合には、ハイトグラフの類似性の高い降雨イベントを抽出し、ハイドログラフを直接比較するとよい。

本研究では流域をいくつかのグループに分類するため、ハイトグラフとハイドログラフを類似度の高い者同士で分類し、いずれも同じグループに分類されたものが降雨流出応答の類似度が高いものとしてグループ化する。分類に

表-2 分類に用いた降雨イベント

番号	20020928	20050802	20110901
期間	2002/9/28-10/3	2005/8/2-5	2011/9/1-10
番号	20160816	20180701	
期間	016/8/16-19	2018/7/1-9	

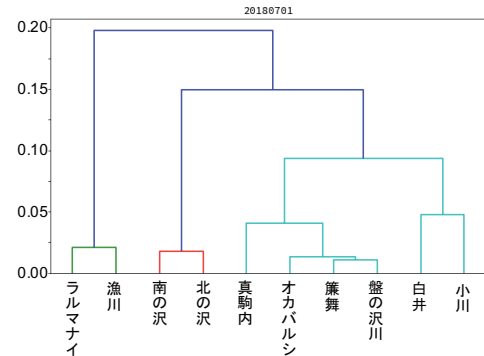


図-3 ハイトグラフのデンドログラム (20180701)

あたっては、計算された d_2 を用いて、各資料間の距離 dis を

$$dis = 1 - d_2 \quad (2)$$

により求め、これを距離行列として、Ward 法によりクラスター分析を行う。

3.2 流域分類の結果

本研究では、10 流域で同時に類似度を評価するため、似たようなハイトグラフが得られている規模の異なる降雨イベントを選定した。選定した降雨イベントは表-2 のとおりである。これらの降雨イベントを用いて、ハイトグラフ、ハイトグラフのクラスター分析を行った結果の一部 (20180701 洪水の例) をそれぞれ図-3,4 に示す。デンドログラム下層部では距離の近いクラスターで結合される。はじめから類似した降雨を選定しているため、ハイトグラフは全般に近い値となっている。クラスター数の選定は難しいが、表層地質の分類も考慮して 3~5 のクラスタになるよう、ハイトグラフについては高さ 0.1、ハイドログラフについては高さ 0.2 で一律にグループ化することとした。このようにしてグループ化された 20180701 洪水のハイトグラフとハイドログラフを図-5,6 に示す。この例ではハイトグラフは地理的に近い地点が同一のグループに分離され、同じグループの形状もよく似ていることが見て

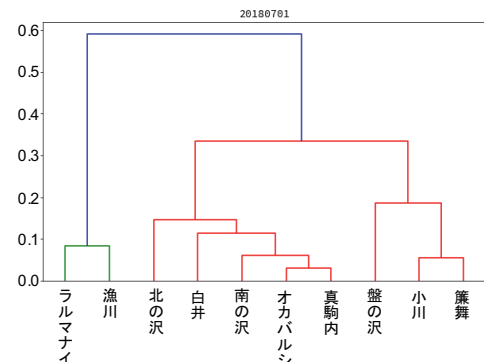


図-4 ハイドログラフのデンドログラム (20180701)

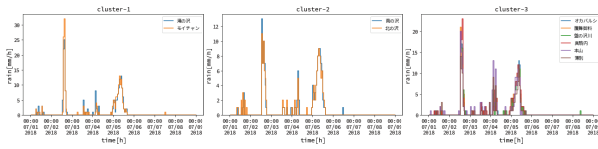


図- 5 ハイエトグラフの分類結果 (20180701)

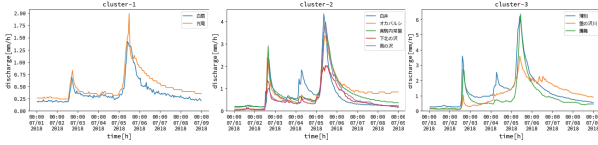


図- 6 ハイドログラフの分類結果 (20180701)

取れる。一方、ハイドログラフは盤の沢川は増水部中盤以降、オカバルシ川では減水部で異常値と思われる形状が含まれているが、それ以外ではほぼ類似したハイドログラフに分類されている。

同様にして他の洪水についてクラスタリングを行った結果を表-3に示す。表中には雨量観測点ごとの総雨量と観測された最大流量を示し、同じクラスターに分類されたものは同色で塗り分けている。また表中の最大流量に「？」のついているものはハイドログラフの形状に異常があると疑われるものである。これによれば、白井川・小川では同規模の降雨があった場合には常に同じグループに分類されていることがわかる。また、オカバルシ川と真駒内川、盤の沢川と簾舞川も類似の降雨に対しては同一のグループに分類される頻度が高い。なお、簾舞川に関しては同規模の降雨に対するピーク流量が他の流域に比べ大きくなる特徴がみられた。これらの3つのグループ間で見ると20180701洪水のように同規模の降雨イベントにに対しては、白井川・小川グループと、オカバルシ川と真駒内川グループが若干近いように見える。また、ラルマナイ川と漁川では共通する期間の同規模の雨量に対する流量資料が少ない。しかし、雨量に対する流量が他の地域と比べ目立って小さく、この2流域も同じグループとして扱えるものと予想される。これらの分類結果は、図-2の表層地質の面積率の類似性による分類とも概ね一致している。一方、北の沢川・南の沢川については今回用いた資料内でのグループ化の判断が難しい。

表- 3 クラスタリングの結果

流域	20020928		20050802		20110901		20160816		20180701	
	ΣR (mm)	Qmax (mm/h)	ΣR (mm)	Qmax (mm/h)	ΣR (mm)	Qmax (mm/h)	ΣR (mm)	Qmax (mm/h)	ΣR (mm)	Qmax (mm/h)
白井	139	4.31	136	4.24	259	5.03	91	2.17	190	4.33
小川	124	3.12	112	4.48	242	5.49	109	2.66	134	6.20
盤の沢	211	2.77	73	1.33	362	17.40	130	3.22	172	3.60?
簾舞	201	4.47	61	1.69	358	34.79	131	6.30	177	6.36
オカバルシ	201	5.44	77	1.70	307	8.27	156	3.92	186	3.35?
真駒内	172	4.08	70	0.97	291	19.57	172	4.71	190	3.97
北の沢	147	1.43	51	1.24	219	11.91	132	3.35	139	2.02
南の沢	130	1.53	55	0.77	259	8.33	132	2.55	141	3.71
ラルマナイ			83		300	10.45	180	2.60	198	1.42
漁川							158	1.30?	192	1.99

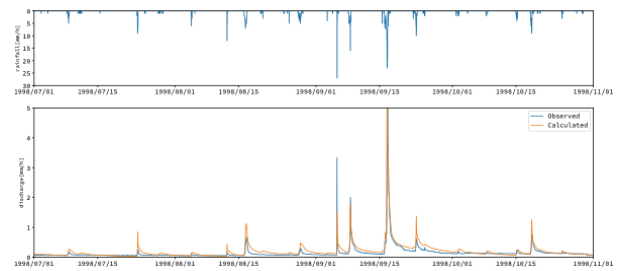


図- 7 オカバルシ流域の流用再現結果 (1998/07/01-11/01) d2=0.961

4 同一グループへの流出モデルの適用

今回の流域の分類方法では、類似した降雨によって類似したハイドログラフが得られるものをグループ化していることから、特に大きな降雨イベントでは流域の特性よりも降雨の影響を強く受けた結果とみなすこともできる。大小様々な降雨に対しても今回行った分類結果の妥当性を検証するため、流出モデルによる検証を行う。グループ化された流域では、類似した降雨に対して類似した流出を発生させることから、同一の流出モデルを用いても再現性の良い計算結果が得られることが期待される。

今回の検証では、降雨の影響を直接受ける洪水流出ではなく、長期的にみて一致しているかどうかを検証するため、長期間の連続した計算を行う。このため、長期の流出解析によく用いられるタンクモデルを採用した。タンクモデルでは、時刻 t における i 段目タンクの貯留量 $S_i(t)$ 、流出量 $q_i(t)$ 、下段タンクへの浸透量 $p_i(t)$ はそれぞれ次式のように表される。

$$S_i(t) = S_i(t-1) - q_i(t-1) - p_i(t-1) + p_{i-1}(t) \quad (3)$$

$$q_i(t) = \sum_{j=1}^2 \alpha_{ij} (S_i(t) - h_{ij}) \quad (4)$$

$$p_i(t) = \beta_i S_i(t) \quad (5)$$

ここで、 α_{ij} , h_{ij} , β_i はモデルパラメータで、1 段目タンクに流入する p_0 には観測雨量を与える。

今回の解析では、タンクを直列に3段重ねたタンクモデルを採用した。なお、今回の計算では蒸発散は考慮しない。このタンクモデルを4つの流域が属するグループのうち、最小の流域面積を持つオカバルシ川流域の1998年の資料に適用し試行錯誤的にパラメータ同定をお行った。求めた結果を図-7に、このときのモデルパラメータを表-4に示す。

このようにして得られたタンクモデルを、同じパラメータセットを使って10流域について1998年から2018年までの期間の計算を行う。モデルの適用にあたっては、融雪の影響を避けるため、各年の6月1日から11月1日までを計算期間とし、初期貯留量は初期流量に一致するように3段目のタンクのみに与えることとした。実測流量との一致度の評価は7/1～11/1の期間で行うものとし、低水流量の再現度に全体の結果が引きずられることを避けるため、一定値以下の低水流量では一致度の計算に含めないものとした。

表- 4 オカバルシ川で設定したタンクモデルのパラメータ

	i=1	i=2	i=3
α_{i1}	0.005	0.015	0.002
α_{i2}	0.1	0.02	-
h_{i1}	2	0	0
h_{i2}	10	25	-
β_i	0.2	0.04	0.0008

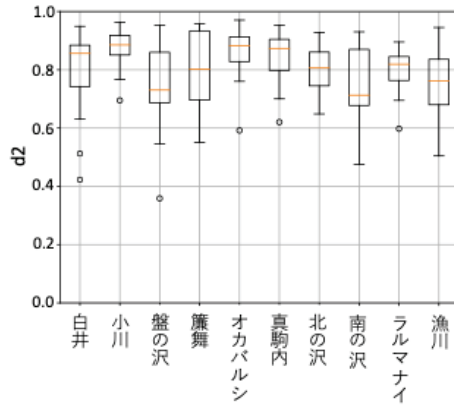


図- 8 オカバルシ川のパラメータセットを使ったタンクモデルによる実測値との一致度

図-8 は、各流域に適用した結果の一致度の分布を示している。大きな出水のない年では一致度が低下する傾向があり、年によって一致度は大きく変動する。前節でオカバルシ川と同じグループに分類された白井川、小川、真駒内川では他の流域よりも一致度が高く、この4流域については1つのグループとみなすことは妥当と考えられる。

5 おわりに

本研究では、支笏湖から豊平川上流部までの範囲の10個の小流域について、類似した降雨に対するハイドログラフの類似性によりグループ化することを試みた。この結果、2つの流域を除く8つの小流域を3つのグループに分類することができた。また、4つの小流域が属するグループのうちの1つの流域で求めたパラメータセットを使って、残りの9つの流域に適用したところ、同じグループにある流域のほうが実測流量をよく再現できることを確認した。

今回の計算は試行的に行ったため、流域平均雨量の算出がされていない点やモデルパラメータを試行錯誤的に求められている点など改善の余地は多い。今後さらなる検証が必要と考えている。また、今回の手法を利用すれば、複数の雨量観測点から類似した降雨を抽出し、その近隣の流域の流出特性を直接比較できることになる。今後多くの資料に適用していくためには、半自動化する必要があるが、今回の方法であれば比較的容易に実現できると考えられる。

参考文献

- 1) 小葉竹重機, 石原安雄: タンクモデルおよび集中面積図を利用した洪水流出モデルの総合化, 土木学会論文報告集, **337**, 129-135, 1983.
- 2) 奥泉宗一郎, 中津川誠, 白谷友秀: GISを用いた汎用的な流出計算手法の提, 水文・水資源学会誌, **29(1)**, 32-43, 2016.
- 3) 横尾善之, 風間聡, 西村仁嗣, 沢本正樹: 国土数値情報に基づくタンクモデル定数の推定, 水文水資源学会誌, **12(6)**, 481-491, 1999.
- 4) Randrianasolo, A., Ramos, M. H., and Andrèassian, V.: Hydrological ensemble forecasting at ungauged basins: using neighbour catchments for model setup and updating, Adv. Geosci., **29**, 1-11, doi:10.5194/adgeo-29-1-2011, 2011.
- 5) Vandewiele, G. L. and Elias, A.: Monthly water balance of ungauged catchments obtained by geographical regionalization, J. Hydrol., **170**, 277-291, 1995.
- 6) 中野秀章: 森林水文学, 共立出版, 1976.
- 7) ASCE Task Committee: Criteria for evaluation of watershed models, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, **119-3**, 429-442, 1993.
- 8) Willmott, C.J., Ackleson S.G., Davis, R. E., J.J. Feddesma J.J., Klink K. M., Legates D.R. and Rowe C.M.: Statistics for the evaluation and comparison of models, Journal of Geophysical Research, **90-C5**, 8995-9005, 1985.