

貯留関数パラメータの一般性に関する 気候・地質条件の異なるダム流域における検討

STUDY ON GENERALIZATION OF PARAMETERS IN THE STORAGE-
DISCHARGE RELATION FOR DIFFERENT GEOLOGICAL AND
CLIMATOLOGICAL DAM BASINS

藤村和正¹・井芹慶彦²・岡田将治³・鼎 信次郎⁴・Thomas KJELDSSEN⁵・
村上雅博⁶

Kazumasa FUJIMURA, Yoshihiko ISERI, Shoji OKADA, Shinjiro KANAE, Thomas KJELDSSEN,
and Masahiro MURAKAMI

¹正会員 博(工) 明星大学教授 理工学部 (〒191-8506 東京都日野市程久保2-1-1)

²正会員 博(工) 東京工業大学 環境・社会理工学院 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)

³正会員 博(工) 高知工業高等専門学校准教授 (〒783-8508 高知県南国市物部乙200-1)

⁴正会員 博(工) 東京工業大学教授 環境・社会理工学院 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)

⁵Ph.D., Assoc. prof., Dept. of Architecture & Civil Eng., University of Bath (Claverton Down, Bath, BA2 7AY, UK)

⁶正会員 工博 高知工科大学名誉教授 (〒1782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口185)

The most utilized flood runoff model for engineering applications in Japan is based on the storage-discharge function of the type $S=kQ^p$. The parameters p and k vary between flood events, causing difficulty in estimating and forecasting the flood runoff hydrographs accurately. The aim of this study is to identify the parameters in the storage-discharge relationship for floods for the Sameura Dam basin, Sagae Dam basin, Taisetsu Dam basin and the Iwaonai Dam basin, located in different regions in Japan and representing different topographical, geological and climatological conditions. In order to optimize the parameters p and k by maximizing the Nash-Sutcliffe efficiency, 10,000 simulations are carried out for each flood event by changing the values of k and p . The results show that the optimum parameters in the storage-discharge function, the sets of p and k , for floods in each study basin are represented by the p - k curve on the log-log graph.

Key Words : storage-discharge function, optimum parameters, power law function,
flood event, mountainous basin

1. はじめに

日本では、台風や前線の影響による豪雨で水害が頻発している。平成27年は関東・東北豪雨災害、平成28年は北海道・東北豪雨災害が発生し、2年連続で甚大な洪水被害が生じた。洪水流量を高い精度で把握し、河川整備計画や洪水時のダム操作に反映させることは、これまで以上に必要になっている。降雨一流出の変換システムとして流出の非線形性を指数関数式により簡潔に表現した貯留関数式は、多くの流出モデルの基礎式になっている。当初は、流出量を河道の貯留量との関係としてHorton¹⁾が説明した式である。日本では、基礎式に貯留関数式を

用いた洪水追跡法の貯留関数法が木村²⁾により開発され、国内に広く普及し、現在では、多くの河川管理、河川計画に利用されている。

貯留関数式の利用に際して、式中の2つのパラメータ、指数 p と係数 k の性質は明らかになっていない。一般的には、指数 p はマニング則に基づき0.6が目安にされているが³⁾、洪水毎に値が変化することは以前から指摘されており、それ故、パラメータ特性に関する研究、あるいはパラメータの不確実性を考慮したモデルの開発が行われてきている^{4),5),6)}など。最近では、鉛直不飽和浸透流の考え方から0.3程度の値も説明されている⁷⁾。結局、 p 値と k 値は経験値が採用されているのが現状であり、必ずしも信頼性ある値が採用されているとは限らない。

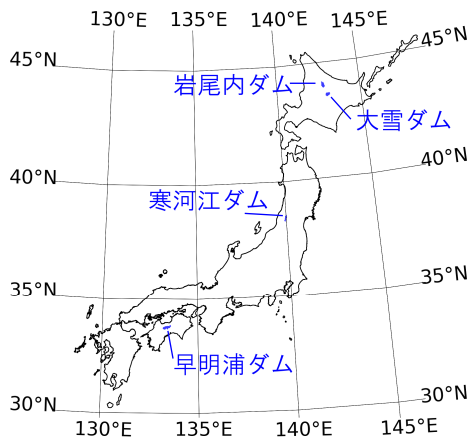


図 1 対象流域の位置

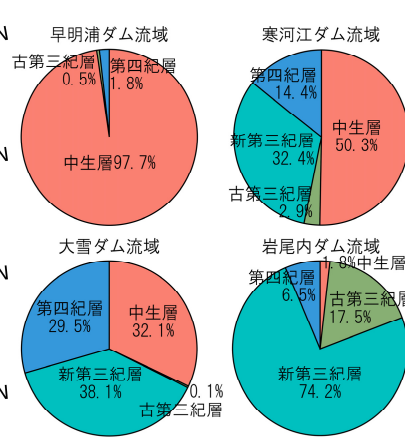


図 2 各流域の地質年代の分類

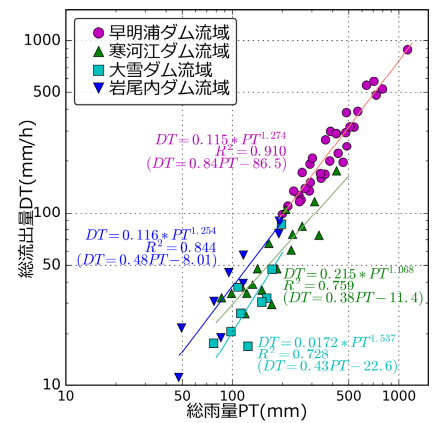


図 3 各流域の総雨量－総流出量関係

そこで筆者らは、貯留関数式のパラメータ特性を解明するため、まずは低水流出に対して長期流出解析を行ってきた⁸⁾。そして、洪水流出解析に用いる貯留関数式の検討を四国地方の早明浦ダム流域において行った⁹⁾。その結果、 p 値と k 値の相互関係を指数関数式の p - k 曲線として表せる可能性を示した。 p 値と k 値は独立したパラメータであると認識されているが、 p - k 曲線の存在は貯留関数式のパラメータに新たな解釈を加える可能性がある。 p - k 曲線については鏡川流域でも報告例があるが¹⁰⁾、鏡川流域は早明浦ダム流域と気候と地質がほぼ同じであるため、 p - k 曲線の一般性を示すに至っていない。

以上のことから、本研究では、貯留関数式のパラメータ特性を示すため、つまり、 p - k 曲線の存在を明確にするため、早明浦ダム流域の対象洪水数を増やすとともに、四国以外の東北地方の寒河江ダム流域、北海道地方の大雪ダム流域と岩尾内ダム流域の合計4つのダム流域において貯留関数式を用いた洪水流出解析を行い、最適パラメータを探索し、流域毎に整理してパラメータ特性について考察することを目的とする。

2. 対象流域の概要

(1) 対象流域

本研究の対象流域は、筆者らがこれまで扱った流域¹¹⁾から、気候・地質条件が異なる流域として、吉野川上流の早明浦ダム流域 (472 km²)、最上川上流の寒河江ダム流域 (233 km²)、石狩川上流の大雪ダム流域 (290 km²)、そして天塩川上流の岩尾内ダム流域 (331 km²)を設定する (図 1)。各流域の気候の特徴を記すと、太平洋側気候の早明浦ダム流域は年間降水量の大半が夏期にあり、日本海側気候の寒河江ダム流域は夏期には晴天が多く降水量は比較的少ない。そして、オホーツク海気候の大雪ダム流域と岩尾内ダム流域は梅雨期がなく台風の影響が少ない。表層地質に関しては、20万分の1日本シームレス地質図から地質年代を読み取った。流域毎に

表 1 雨量観測点

流 域	雨量観測所
早明浦ダム	長沢 寺川 桑瀬 黒丸 早明浦 (水機構) 小北川 (国交省)
寒河江ダム	寒河江ダム 中村 志津 日暮沢 (国交省) 大井沢 (AMeDAS)
大雪ダム	大雪ダム 迷沢 沼の原 銀泉台 (国交省)
岩尾内ダム	岩尾内ダム 二子森 上似峡 天塩岳 (国交省)

表 2 対象洪水の選定条件と洪水数

流 域	データ期間	年数	ピーク流出高	洪水数
早明浦ダム	1991-2010年	20年	10 mm/h以上	33個
寒河江ダム	2002-2016年	15年	4 mm/h以上	18個
大雪ダム	2002-2016年	15年	2 mm/h以上	10個
岩尾内ダム	2002-2016年	15年	1.5mm/h以上	9個

地質年代別の面積率を図 2に表す。早明浦ダム流域は保水性の低い中生層が98%を占めるが、岩尾内ダム流域は保水性の高い火山性地質の新第三紀層と第四紀層が80.7%を占め、表層地質の年代割合には大きな違いがある。地質年代が古い割合の順は、早明浦ダム流域、寒河江ダム流域、大雪ダム流域、岩尾内ダム流域となる。

(2) 水文データと対象洪水

水文データには、水資源機構、水文・水質データベースおよびAMeDASから入手した1時間単位の雨量およびダム流入量を使用する。表 1には各流域の雨量観測所を記す。収集したデータの期間は15年と20年であり、その中から6月1日から10月31日の間に発生した顕著な出水を解析対象とした。出水規模は流域毎に異なるため、選定基準をピーク流出高として表 2に示す値を設定した。なお、直接流出を分離しても基底流出が高いため、ピーク流出高が1 mm/h以下になる小さな洪水は対象外とした。4流域合計の洪水数は70個である。

(3) 流出特性の比較

各流域の総雨量－総流出量関係を1つの両対数グラフに集約し、流出特性として図 3に表す。早明浦ダム流域では、総雨量1,125 mm、総流出量887 mmの大規模な洪

水がある。そして、早明浦ダム流域の小規模の洪水は、大雪ダムおよび岩尾内ダム流域の選定期間内の最大規模の洪水に匹敵している。このように4つの流域の洪水規模は大きく異なり、表層地質と同様に流域間の顕著な自然条件の違いと言える。流域毎の近似曲線も図3中に示し、また、括弧内には直線近似した場合の一次式を表す。この一次式の傾きは流出率を意味している。早明浦ダム流域では0.84であるが、他の3流域は0.38～0.48と小さく、流出率に差が見られる。これは表層地質の違いが流出率に影響しているものと考えられる。なお、対象洪水には甚大な被害を生じさせた洪水を各流域とも含んでいる。四国地方では2004年と2005年に台風の影響により多大な人的・物的被害が生じており、山形県では、2013年7月の記録的豪雨により、山形県西川町の広域水道の浄水場に高濁度水が流入して断水し、54,000世帯が影響を受け、北海道地方では、2016年8月に4個の台風の襲来により、北海道東部を中心に氾濫、土砂災害が多発した。

3. 解析方法

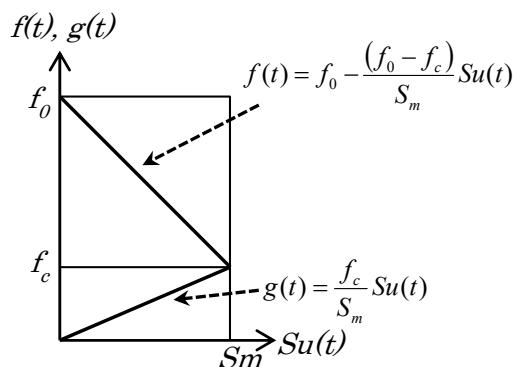
解析方法については既に前著⁹⁾で述べているので、ここでは手法の特徴そして要点について記す。

(1) 直接流出量の分離

直接流出の分離は、著者らの検討¹²⁾から、対数グラフ上のハイドログラフを減水部分の裾（先端）で分離する手法を用いる。裾部での分離位置が若干異なっても解析結果には大きく影響しないことを報告している。

(2) 有効降雨量の算定

洪水流出解析は、直接流出量を対象とした計算であるため、直接流出に有効となる降雨成分、つまり有効降雨量を算定する。本研究では、筆者らがこれまで利用してきたDiskin-Nazimovの雨水浸透モデル¹³⁾を用いる。Diskin-Nazimovモデルの特徴は、浸透能算定の概念図を



$f(t)$: 浸透能(mm/h) $g(t)$: 下層地下浸透量(mm/h),
 $Su(t)$: 表層水分貯留量 t : 時間,
 f_0 : 初期浸透能 f_c : 終期浸透能 S_m : 表層水分最大値

図4 Diskin-Nazimov モデルの浸透能算定の概念図

図4に示すように、表層土壌の水分量 Su が増加すると浸透能が減少し、一方で下層への浸透量 g が増加する点であり、そしてこの現象を合理的な線形式で表現していることである。また、降雨強度の変化に応じて浸透能の変化を算定できることも特徴である。流域は500mグリッドに分割し（岩尾内ダム流域のみ100mグリッド）、グリッド点での有効降雨量を算定する。グリッド点の降水量は逆距離加重法（Inverse Distance Weighting method）により算定する。流域内全てのグリッド点の有効降雨量を算術平均し、流域平均の有効降雨量 Re とする。有効降雨量 Re の算出の際、基底流出から分離された直接流出量とほぼ同等の値になるように、初期浸透能 f_0 、終期浸透能 f_c 、表層土壌水分量の最大値 S_m を調整している。本研究では、 f_0 は20～50 mm/hr、 f_c は1.5～15 mm/h、 S_m は10～60 mmの範囲の値を用いた。

(3) 流出量計算

流出量の計算には、(1)式の貯留関数式と(2)式の連続式を用いる。流域の有効降雨量 Re は(2)式に代入する。

$$S = k Q^p \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = Re - Q \quad (2)$$

ここに、 S : 貯留量(mm)、 Q : 流出量(mm/h)、 Re : 有効降雨量(mm/h)、 p : 指数、 k : 係数(mm^{1-p} h^p)。

貯留関数式の遅滞時間は、本来、貯留量と流出量のピーク時刻差を設定するが、本研究では、ピーク流出量の実測値と計算値が一致する時刻差を試算によって特定して、設定する。ピーク流出の時刻差は洪水毎に異なるが、早明浦ダム流域では40分～1時間、寒河江ダム流域では30分から1時間30分、大雪ダム流域では40分～2時間、岩尾内ダム流域では10分～4時間30分である。

(4) 誤差評価指標

本研究では、誤差評価指標に以下の式で算出されるNash-Sutcliffe係数（以下、Nash係数あるいはNSEと記す）を用いる。Nash係数は、1に近いほどモデルの精度は高く、0.7以上で良好な再現性があるとされている。

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (QO_i - QC_i)^2}{\sum_{i=1}^N (QO_i - QO_m)^2} \quad (3)$$

ここに、 QO_i : i 番目の実測流出量 (mm/h)、 QC_i : i 番目の計算流出量(mm/h)、 QO_m : 実測流出量の平均値、 N : データ個数。

(5) 最適パラメータの探索

1洪水イベントについて10,000組の p - k 値の流出計算を行い、Nash係数が最大となる p - k 値の組み合わせを特定し最適パラメータとする。 p - k 値の変動範囲とステップ

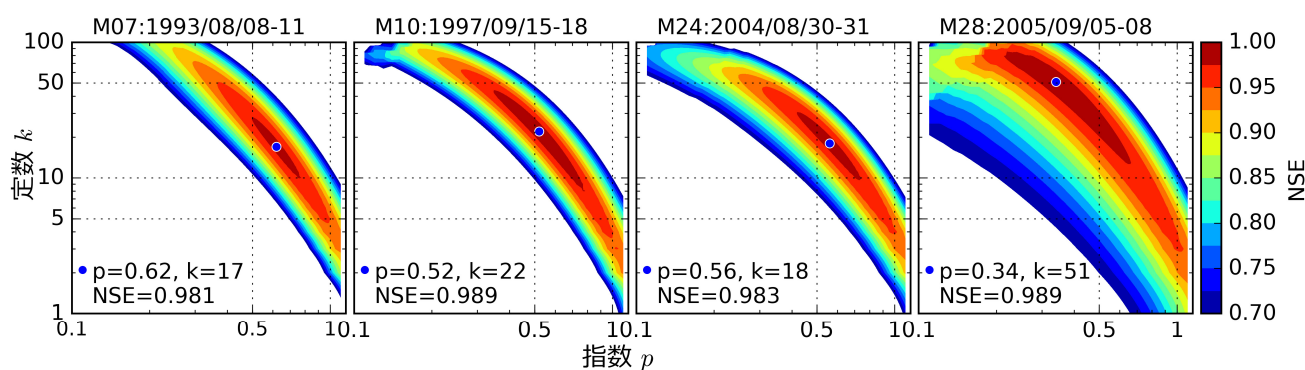


図 5 Nash係数の分布図（早明浦ダム流域のピーク流出量が多い4洪水の例）

表 3 対象洪水の諸元と最適パラメータの探索結果

流域	記号	年	解析期間 月日	総雨量 (mm)	総流出 (mm)	ピーク流出 (mm/h)	最適値 p	k	NSE
早明浦ダム流域	M01	1991	7.27- 8. 2	341	159	10.5	0.78	16	0.9339
	M02	1991	9.27- 9.28	251	127	13.8	0.68	11	0.9862
	M03	1992	8. 7- 8. 9	262	172	16.0	0.84	8	0.9856
	M04	1992	8.17- 8.20	479	294	14.1	0.66	14	0.9774
	M05	1992	8.24- 8.27	292	192	15.4	0.55	23	0.9587
	M06	1993	7.26- 7.29	796	522	17.8	0.52	26	0.9534
	M07	1993	8. 8- 8.11	484	382	31.1	0.62	17	0.9809
	M08	1993	9. 3- 9. 5	290	135	28.2	0.61	11	0.9865
	M09	1996	8.13- 8.15	359	168	13.4	0.67	13	0.9920
	M10	1997	9.15- 9.18	421	290	39.0	0.52	22	0.9885
	M11	1998	9.30-10. 1	233	135	15.1	0.83	6	0.9593
	M12	1998	10.15-10.19	302	207	24.8	0.60	17	0.9935
	M13	1999	7.25- 7.31	1,125	887	19.3	0.58	27	0.9680
	M14	1999	9.14- 9.17	337	169	23.4	0.55	19	0.9753
	M15	1999	9.23- 9.24	215	110	11.9	1.10	3	0.9758
	M16	2000	7.29- 8. 1	486	244	10.2	0.79	11	0.9652
	M17	2000	9.12- 9.16	538	316	10.6	0.45	25	0.9214
	M18	2002	7. 5- 7. 7	199	99	13.6	0.42	21	0.9650
	M19	2002	8.30- 9. 2	566	389	19.2	0.53	21	0.9619
	M20	2003	9.12- 9.13	258	120	17.7	0.59	10	0.9610
寒河江ダム流域	M21	2004	6.19- 6.22	253	117	11.5	0.62	16	0.9864
	M22	2004	7.31- 8. 3	730	482	21.7	0.35	55	0.9300
	M23	2004	8.17- 8.20	638	549	26.4	0.47	27	0.9327
	M24	2004	8.30- 8.31	388	299	29.5	0.56	18	0.9828
	M25	2004	9. 6- 9. 9	362	267	15.9	0.71	12	0.9754
	M26	2004	9.28- 9.30	418	290	29.2	0.66	12	0.9628
	M27	2004	10.19-10.21	431	221	26.7	0.70	11	0.9779
	M28	2005	9. 5- 9. 8	708	578	40.5	0.34	51	0.9894
	M29	2006	8.17- 8.20	384	200	10.7	0.60	24	0.9498
	M30	2007	7.16- 7.13	508	317	22.6	0.91	6	0.9928
	M31	2007	8. 2- 8. 4	294	151	12.9	0.59	21	0.9672
	M32	2007	9.14- 9.17	462	197	13.9	0.90	7	0.9638
	M33	2009	8. 8- 8. 9	273	139	13.0	0.66	13	0.8662

流域	記号	年	解析期間 月日	総雨量 (mm)	総流出 (mm)	ピーク流出 (mm/h)	最適値 p	k	NSE
寒河江ダム流域	Sg01	2002	7.10- 7.12	262	84	5.6	0.68	14	0.9232
	Sg02	2002	10. 1-10. 2	150	36	5.2	0.57	11	0.9372
	Sg03	2004	7.17- 7.19	209	106	6.5	0.64	11	0.8949
	Sg04	2005	6.27- 6.28	225	61	6.8	0.54	14	0.9805
	Sg05	2005	8.14- 8.15	119	26	3.9	0.63	8	0.9046
	Sg06	2006	7.12- 7.14	172	30	3.5	0.51	11	0.8966
	Sg07	2006	8.28- 8.29	122	34	4.9	0.72	7	0.9719
	Sg08	2009	6.29- 6.30	114	37	5.6	0.56	12	0.9866
	Sg09	2009	7.19- 7.20	99	34	6.6	0.87	5	0.9264
	Sg10	2010	8.14- 8.15	185	48	5.6	1.02	4	0.8328
	Sg11	2011	6.24- 6.27	422	175	6.2	0.73	10	0.9495
	Sg12	2011	9.20- 9.22	331	74	4.0	0.48	13	0.9438
	Sg13	2013	7. 8- 7. 9	86	32	5.0	0.59	10	0.9723
	Sg14	2013	7.14- 7.15	132	39	4.5	1.00	4	0.9305
	Sg15	2013	7.17- 7.18	311	117	17.9	0.77	7	0.9433
	Sg16	2013	7.22- 7.23	141	48	10.0	0.38	14	0.9954
	Sg17	2014	7. 9- 7.11	230	75	7.1	0.63	12	0.9426
	Sg18	2016	7. 6- 7. 7	166	67	6.6	0.68	10	0.9756
大雪ダム流域	T01	2002	10. 1-10. 3	77	18	2.4	0.34	16	0.9385
	T02	2003	8. 9- 8.11	124	17	2.1	0.51	12	0.8054
	T03	2005	9. 7- 9. 9	112	26	2.0	0.60	13	0.9564
	T04	2006	8.18- 8.20	161	32	3.3	0.72	9	0.9245
	T05	2010	8.23- 8.25	98	21	3.5	0.45	11	0.9805
	T06	2016	7.31- 8. 1	72	10	2.5	0.67	4	0.9904
	T07	2016	8.17- 8.18	150	30	4.3	0.37	21	0.9396
	T08	2016	8.20- 8.21	173	47	3.7	0.82	9	0.9440
	T09	2016	8.22- 8.24	108	37	5.3	0.49	15	0.9785
	T10	2016	8.29- 9. 2	197	86	5.0	1.04	9	0.9802
岩尾内ダム流域	Iw01	2006	10. 7-10.10	191	90	3.2	0.83	18	0.9622
	Iw02	2009	7.26- 7.29	78	31	1.3	0.80	20	0.9402
	Iw03	2011	9. 2- 9. 5	190	76	2.3	0.95	28	0.9534
	Iw04	2011	9.22- 9.23	69	16	1.0	0.95	17	0.9364
	Iw05	2012	8. 1- 8. 2	85	19	1.3	0.54	22	0.8114
	Iw06	2014	8. 5- 8. 6	116	57	3.4	1.10	9	0.9692
	Iw07	2015	7.31- 8. 2	95	45	3.7	0.84	16	0.9504
	Iw08	2016	8.20- 8.22	116	39	2.1	0.87	14	0.9479
	Iw09	2016	8.23- 8.24	50	22	1.5	1.27	12	0.9742

値は、 p 値は0.11～1.10まで0.01で100計算分、 k 値は1～100まで1.0で100計算分である。ただし、 p 値の最適値が1.10以上になる場合には、0.51～1.50のように変動幅を移動させる。プログラム上では2重ループのアルゴリズムにより計算を実行している。1洪水の流出計算回数は合計10,000回となる。また、解析に使用する電子計算機のCPU仕様は、Intel® Core™ i5-6600, 3.30 GHzである。

4. 解析結果と考察

(1) 最適パラメータの探索(Nash係数の分布図)

最適パラメータの探索の例として、早明浦ダム流域のピーク流出量の大きい4洪水を図5に表す。この図は0.7以上のNash係数の分布を両対数グラフで表し、可視化している。分布図には、左上から右下にかけて等値線（コンター）が伸びており、赤色になるほどNash係数は大きく、解析精度が良い結果であることを表している。また、

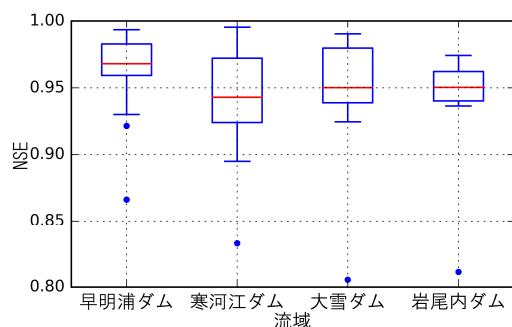


図 6 最適パラメータ適用時のNash係数の範囲

表 4 最適パラメータ適用時の Nash 係数の代表値

流域	早明浦ダム	寒河江ダム	大雪ダム	岩尾内ダム
洪水数	33	18	10	9
中央値	0.9680	0.9429	0.9502	0.9504
平均値	0.9655	0.9393	0.9438	0.9384

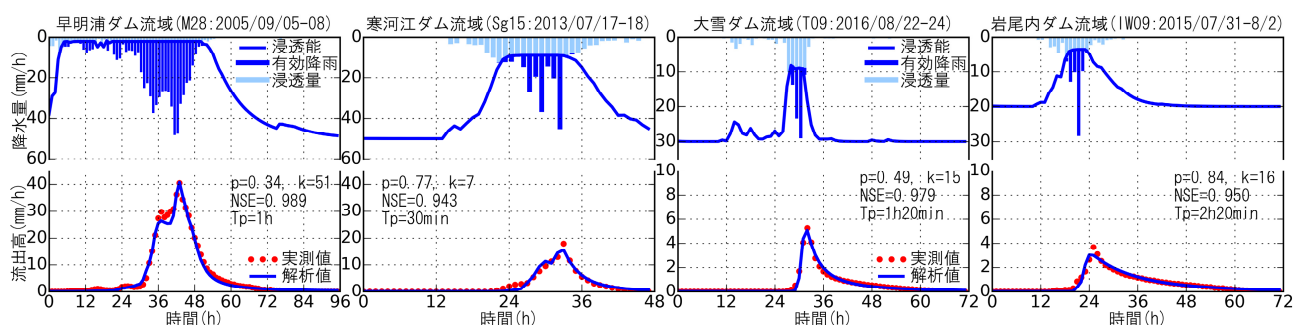


図 7 各流域の解析ハイドログラフの例

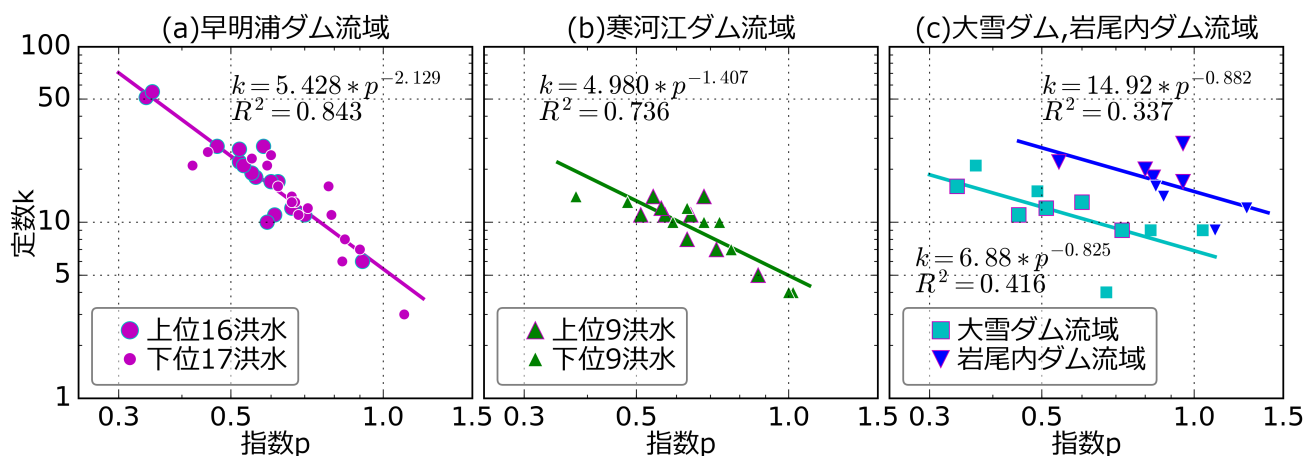


図 8 最適パラメータ p - k 値の分布と近似曲線

Nash係数が最大値となった p - k 値の位置を青丸で記す。この位置は、解析対象の洪水の最適 p - k 値、つまり、最適パラメータを表している。最適 p - k 値の位置は洪水毎に異なっている。これらの特徴は、早明浦ダム流域の他の29洪水、そして、他の3流域の全ての洪水でも同様であった。

(2) 最適パラメータ適用時の再現精度

表 3には、対象洪水の諸元および最適パラメータとそのNash係数を示す。また、図 6には対象洪水に最適パラメータを適用したときのNash係数の範囲を流域毎に箱ひげ図として表し、表 4にはその代表値を示す。4流域のNash係数の中央値は0.94以上、平均値は0.93以上である。また、外れ値は0.8以上になっている。洪水毎に探索した最適パラメータを適用した時の流出解析の再現精度は極めて高いことが伺える。次に、実測値と解析値のハイドログラフの比較を各流域でピーク流出高が最大の洪水について図 7に表す。なお、洪水規模が流域によって異なるため、降水量と流出高の目盛スケールを変えている。各流域ともDiskin-Nazimovモデルにより算定した浸透能値が降雨強度の変化に応じて降雨波形を浸透量と有効降雨量に分離している。ハイドログラフの解析値は実測値と比較すると、寒河江ダム流域と岩尾内ダム流域ではピーク流出高に若干ズレが見られるものの、波形としては概ね良好な再現性を得ている。

(3) パラメータ特性に関する考察

ここでは各流域の最適パラメータを整理し、パラメータ特性を流域間で比較して考察する。

a) 最適パラメータの近似曲線 (p - k 曲線)

図 8は、流域毎に最適パラメータ、 p 値と k 値を両対数グラフにプロットし、近似曲線で表した。なお、北海道地方の2流域は1つのグラフに集約した。近似曲線の決定係数 R^2 を見ると、早明浦ダム流域は0.843、寒河江ダム流域は0.736であり、いずれも相関性は0.7以上で高い。一方、大雪ダム流域は0.416、岩尾内ダム流域は0.337で高い値ではなく、図中においてもバラつきが見られるが、右肩下がりの近似曲線の傾向は明らかに現れている。これまで独立したパラメータであると見なされていた p 値と k 値は、4流域における検討では、相互関係が認められた。 p - k 値の近似曲線は、定数を a 、 b とした(4)式の指数関数式で表され、本研究ではこれを p - k 曲線と称する。

$$k = ap^{-b} \quad (4)$$

p - k 曲線は、良好な精度で流出解析を実行できる貯留関数パラメータが、 p - k 曲線の近傍に存在していることを意味している。

p - k 曲線の特徴を流域毎に見ると、傾き b の値は北海道の2流域で、0.882と0.825でほぼ同じである。また、寒河江ダム流域では1.407、早明浦ダム流域は2.129であり、北海道の2流域と比較すると負の傾きが大きい。これは、流域条件の違いである図 2に示す表層地質や図 3に示

す降雨規模、洪水規模が影響しているものと思われる。以上より、 p - k 曲線は流域の自然条件により規定されるパラメータ関数であると現段階では考えている。しかし、まだ具体的な検討は行っておらず、今後の課題としたい。

b) 最適パラメータと洪水規模に関する考察

各流域の最適パラメータは図 8において、 p - k 曲線の近傍の左上から右下まで幅広く分布している。分布の要因として洪水規模の違いが関係しているものと想定し、対象洪水のピーク流出量の大きさの順に上位半分と下位半分に分けて、プロットサイズを変えて表示した。大雪ダム流域と岩尾内ダム流域についても同様に表示した。しかし、最適パラメータは、ピーク流出量の規模に関係なく p - k 曲線の近傍に様に分布している。このことから、 p - k 曲線近傍の分布している最適パラメータの位置は洪水規模に関係していない可能性が大きい。

5. まとめ

本研究では、流出モデルの基礎式に多く用いられている貯留関数式のパラメータの特性解明に向けた研究として、気候と地質条件が異なる4流域を対象に洪水を選定して多数回の流出解析を行い、個々の洪水の最適パラメータを特定し、流域毎に整理した。本研究で得られた結果を以下に記す。

- ① p 値と k 値の10,000通りの組み合わせの洪水流出解析により、0.7以上のNash係数の分布を p - k 軸の両対数グラフで表し可視化した。その結果、Nash係数の等値線（コンター）を表すことができた。
- ② 個々の洪水についてNash係数を最大とする唯一の最適パラメータ p 値と k 値を特定した。
- ③ 最適パラメータを適用した洪水流出解析の結果を流域毎に整理したところ、4流域ともNash係数の中央値が0.94以上となる高い再現性を表すことができた。
- ④ 対象洪水の最適パラメータを近似して p - k 曲線として流域毎に表した。 p - k 曲線の決定係数および相関図から、いずれの流域においても p 値と k 値の相関性を確認することができた。
- ⑤ p - k 曲線の近傍に分布する最適パラメータの分布の位置が洪水規模に関係していることを想定して考察したが、現段階では、関係性は認められなかった。

地質と気候の異なる4つの流域において貯留関数式のパラメータの一般的特性として p - k 曲線の存在を追認できる。しかし、個々の洪水のパラメータ特性を洪水規模から説明することはできなかった。今後は、この点を課題としつつ、対象流域を増やしてさらに検討していくことを考えている。

謝辞：本研究は、独立行政法人水資源機構吉野川局、池田総合管理所から早明浦ダム流域の水文データを提供して頂いた。また、日本学術振興会の科学研究費補助金基盤研究(C)(一般) (JP15K06241) の支援により実施された。関係各位にここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Horton, R. E.: Natural stream channel-storage, *EOS T. Am. Geophys. Un.*, 17, 406-415, 1936.
- 2) 木村俊晃：洪水流出の推定法に関する研究(1) — 貯留関数に関する一考察 —, 土木研究所報告, 第102号, 建設省土木研究所, pp.9-16, 1959.
- 3) 建設省水文研究会：貯留関数の理論的展開, 流出計算例題集 2, (社) 全日本建設技術協会, pp.84, 1971.
- 4) 杉山博信, 角屋 睦：貯留関数モデル定数に関する一考察, 農業土木学会論文集, 第133号, pp.11-18, 1988.
- 5) 立川康人, 市川 温, 椎葉充晴：貯留関数法のモデルパラメータの不確定性を考慮した実用的な実時間流出予測手法, 水文・水資源学会誌, Vol.10, No.6, pp.617-626, 1997.
- 6) 大月友貴, 立川康人, 萬 和明, 椎葉充晴：貯留関数法の大規模洪水に対する適用性, 水文・水資源学会2013年研究発表会要旨集, pp.146-147, 2013.
- 7) Makoto Tani: A paradigm shift in stormflow predictions for active tectonic regions with large-magnitude storms: generalisation of catchment observations by hydraulic sensitivity analysis and insight into soil-layer evolution, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 4453-4470, doi:10.5194/hess-17-4453-2013, 2013.
- 8) 藤村和正, 井芹慶彦, 鼎 信次郎, 村上雅博：低水流出に適用する貯留関数式の定数の特性, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.71, No.4, I_301-I_306, 2015.
- 9) 藤村和正, 井芹慶彦, 岡田将治, 鼎 信次郎, 村上雅博：洪水流出を対象とした貯留関数パラメータの不確実性低減に向けた解析的研究, 土木学会論文集G(環境), Vol.72, No.5, I_35-I_43, 2016.
- 10) 鈴木勝好, 藤村和正, 井芹慶彦, 岡田将治：貯留関数式のパラメーター特性に関する鏡川流域における考察, 第43回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, II-34, 2016.3.
- 11) 藤村和正, 中嶋祐太：積雪ダム流域における気温上昇を想定した長期流出の変化, 水文・水資源学会2009年研究発表会要旨集, pp.30-31, 2009.
- 12) 藤村和正, 井芹慶彦, 岡田将治, 鼎 信次郎, 村上雅博：貯留関数式の最適パラメーターから評価する直接流出の分離について, 第43回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, II-26, 2016.3.
- 13) Diskin, M. H. & N. Nazimov, N.; Ponding time and infiltration capacity variation during steady rainfall, *J. Hydrology*, 178, pp.369-380, 1996.

(2017. 4. 3受付)