

流域の地理条件が流況曲線形状に与える影響

EXPLORATION OF GEOGRAPHIC WATERSHED CHARACTERISTICS SHAPING FLOW DURATION CURVE

横尾善之¹・有働恵子²

Yoshiyuki YOKOO and Keiko UDO

¹正会員 博(工) 足利工業大学講師 工学部都市環境工学科 (〒326-8558 足利市大前町268-1)

²正会員 博(工) 東北大学助手 災害制御研究センター (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-11)

This paper explores the effects of geographic characteristics on the shape of a flow duration curve. We investigated the effects through flow duration curve modeling and geographic characterizations of 14 Japanese watersheds. The suggested flow duration curve model based on hyperbolic tangent function was quite simple, easy-to-understand, and highly precise. The correlation analysis between model parameters and geographic characteristics revealed (1) over-all runoff equally decreases with covering ratio of paddy field and increases with that of forest, (2) covering ratios of three different soil types and three different geologic types in this research are not satisfactory watershed descriptors, and discoveries of satisfactory descriptors of watershed's soil and geologic features must be necessary for discussions on the effects of soil and geologic features, (3) watershed geometries are not effective descriptor for the shape of flow duration curve.

Key Words : model, geographic characteristics, mountainous watershed, dam, correlation.

1. はじめに

流域の気候・地理条件が流況曲線に与える影響に関する研究の歴史は長く、数多くの研究例がある。例えば、Burt and Swank¹⁾は森林の影響、Ward and Robinson²⁾は土壌の影響、虫明ら³⁾は気候および地質の定量的影響を、志水⁴⁾は降水量と表層地質・傾斜・植生との関係、Fennessey and Vogel⁵⁾は流域面積と地質の影響を整理しており、知見の集積が進んでいる。しかし、流域の多種多様な気候・地理条件が流況曲線形状に与える影響を包括的に説明するには至っていない。この原因は、気候・地理条件と流況曲線形状の関係の複雑さにあると考えられる。

著者らは、気候条件と地理条件を分けて考えるとこの問題の見通しが良くなると考えている。多様な流況曲線形状を決定する第1の因子は気候条件であると考えられる。このことは、Farmerら⁶⁾がオーストラリアの温帯および半乾燥地域の水文観測データを元に描いた流況曲線形状と乾燥指数の関係が証明している。世界の観測データを比較検討することで同様の結果が明らかになるはずであり、乾燥指数などを用いて気候区別の代表的な流況曲線を提示することは比較的容易であると考えられる。

したがって、第2の要因である流域の地理条件と流況曲線形状の関係を明らかにできれば、気候・地理条件と流況曲線形状の関係の概略を説明ができるのではないかと考えられる。

そこで本研究は、気候条件の影響を小さくするため、気候が互いに類似している日本のダム流域を対象を限定し、流況曲線と地理条件の関係の包括的検討を試みた。まず、降水量とダム流入量の観測値から劉ら⁷⁾が利用した雨況曲線(降水量について超過確率分布を描いたもの)と流況曲線を描き、これらを共通の簡単な関数でモデル化した。このモデルは役割が明確な4つのパラメータで構成され、既存の丸井・荒井⁸⁾、LeBoutillier and Waylen⁹⁾、Cigizoglu and Bayazit¹⁰⁾の各モデルに比べて簡単に扱いやすいだけでなく、流況曲線の再現性も極めて高い。次に、このモデルで再現した雨況曲線と流況曲線のモデルパラメータの変化率に地理条件の影響が現れていると仮定し、その変化率をまとめた。また、横尾ら¹¹⁾を参考に国土地理院の数値地図情報および1/200,000地勢図をもとに25種類の流域の地理条件を抽出して数値化した。最後に、流況曲線形状に支配的な地理条件を相関解析によって探索した。相関解析で得られた知見は、流域の地理条件と流況曲線形状の関係について検討した先行研究と相互比較し、その妥当性を検討した。

表-1 対象流域の諸元。LM:河川長, LT:総河川長, EH:最大標高, EL:最小標高, ED:最大標高差, BA:流域面積, WB:流域平均幅, SF:形状係数, SG:流域平均勾配, DD:河川密度, GA:表層地質A, GB:表層地質B, GC:表層地質C, SA:土壌型A, SB:土壌型B, SC:土壌型C, L1:田, L2:畑, L3:果樹園, L4:その他の樹木畑, L5:森林, L6:荒地, L7:建物用地(A), L8:建物用地(B), L9:幹線交通用地, L10:その他の用地, L11:内水地, L12:河川地(A), L13:河川地(B), L14:海浜, L15:海水域。%を付した値は面積率。

	二川	一庫	岩瀬	厚東川	緑川	棕梨	永瀬	野村	下笠	新豊根	青蓮寺	椿山	鶴田	湯原
所在地	和歌山	兵庫	宮崎	山口	熊本	広島	高知	愛媛	熊本	愛知	三重	和歌山	鹿児島	岡山
水系	大淀川	淀川	大淀川	厚東川	緑川	沼田川	物部川	肘川	筑後川	天竜川	淀川	日高川	川内川	旭川
LM(km)	43	18	42	38	27	23	37	28	18	21	25	53	71	31
LT(km)	102	60	161	112	200	33	120	55	75	59	44	164	370	86
EH(m)	1269	774	1700	821	1739	757	1893	799	1230	1415	1200	1269	1700	1202
EL(m)	137	79	71	9	109	227	115	113	240	360	202	154	45	332
ED(m)	1132	695	1629	812	1630	530	1778	686	990	1055	998	1115	1655	870
BA(km ²)	229	115	354	324	359	160	295	168	185	136	100	397	805	255
WB(km)	5.4	6.3	8.4	8.5	13.1	7.0	8.0	6.0	10.1	6.5	4.0	7.5	11.3	8.2
SF	0.13	0.35	0.20	0.22	0.48	0.31	0.22	0.22	0.55	0.31	0.16	0.14	0.16	0.26
SG	0.027	0.038	0.039	0.021	0.060	0.023	0.048	0.025	0.054	0.050	0.040	0.021	0.023	0.028
DD(1/km)	0.45	0.52	0.46	0.35	0.56	0.21	0.41	0.33	0.40	0.43	0.44	0.41	0.46	0.34
GA(%)	10.2	54.1	0.0	51.6	18.1	0.0	20.1	0.0	0.0	0.0	31.6	24.1	0.0	0.0
GB(%)	45.8	8.2	17.8	6.8	62.7	1.0	75.5	41.4	31.3	0.0	53.6	44.1	18.0	0.0
GC(%)	43.2	37.6	68.6	39.7	19.3	96.6	4.3	8.3	46.1	100.0	14.8	14.8	82.0	100.0
SA(%)	0.0	78.6	24.2	80.2	0.6	73.0	66.1	54.5	0.0	33.7	75.0	70.7	32.2	4.7
SB(%)	0.0	7.4	18.1	4.2	1.8	7.1	30.1	0.0	31.3	56.3	3.7	14.4	0.0	86.0
SC(%)	94.1	10.4	47.4	8.8	77.7	19.3	2.2	42.8	46.1	9.9	12.1	14.8	67.8	9.3
L1(%)	10.4	8.2	13.5	9.2	21.4	0.9	2.1	2.9	4.7	1.1	13.5	6.2	14.3	3.0
L2(%)	0.1	17.6	1.1	5.4	0.9	1.7	0.5	0.4	1.5	0.4	7.8	7.8	2.3	0.6
L3+L4(%)	0.2	0.2	0.4	0.0	0.3	0.2	0.0	0.9	0.1	0.0	0.7	0.0	0.6	0.4
L2+L3+L4(%)	0.3	17.8	1.4	5.4	1.1	1.9	0.5	1.3	1.6	0.4	8.5	7.8	2.9	0.7
L5(%)	83.0	64.6	75.9	64.6	74.7	90.2	92.5	90.9	90.2	96.4	69.0	82.6	76.4	92.0
L6+L10(%)	4.0	4.9	6.8	19.1	1.4	5.2	2.7	3.6	0.7	0.6	4.2	0.9	2.6	2.3
L7+L8(%)	1.9	3.2	1.2	0.9	0.8	0.5	0.6	0.7	0.8	0.2	3.0	0.6	3.1	0.6
L9(%)	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
L11+L12+L13(%)	0.3	1.3	1.0	0.8	0.6	1.3	1.6	0.5	1.9	1.4	1.8	1.8	0.7	1.4

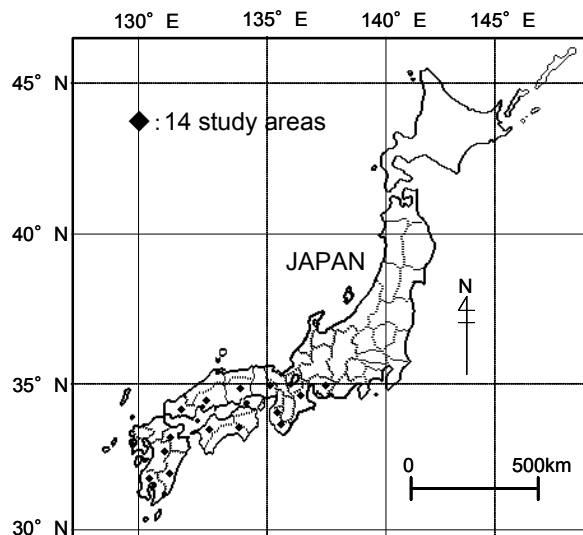


図-1 対象流域

2. 対象流域および利用データセット

本研究が対象とした流域の諸元および位置は、表-1 および図-1に示す通りである。流域選定の際には、①

積雪・融雪の影響が少ないこと、②人間活動の影響が少ない最上流域であること、③データ欠測がないこと、④流域面積が100km²以上であることを条件とし、西日本地域を中心とする14流域を選定した。

雨況曲線および流況曲線の描画に用いたデータは、多目的ダム管理年報^{12), 13), 14)}に掲載されている1991年から1993までの3年分のダム地点の日降水量およびダムへの日流入量の観測値である。

流域の地理条件の抽出には、1/200,000地勢図、国土地理院発行の数値地図情報に含まれるKS-156（土壌および表層地質データ）およびKS-202（土地利用データ）の2種類のファイルデータを利用した。

3. 流況曲線および雨況曲線のモデル化

流況曲線は、3年間の全観測データを利用して作成した。流況曲線は、時間軸を観測期間長で無次元化した超過確率で表現した。雨況曲線についても同様の手法で表現した。

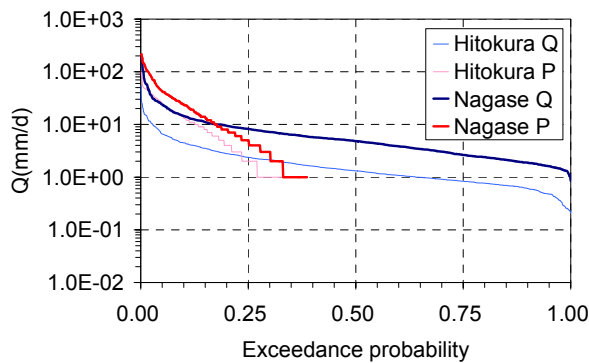


図-2 永瀬ダムと一庫ダムの流況曲線と雨況曲線

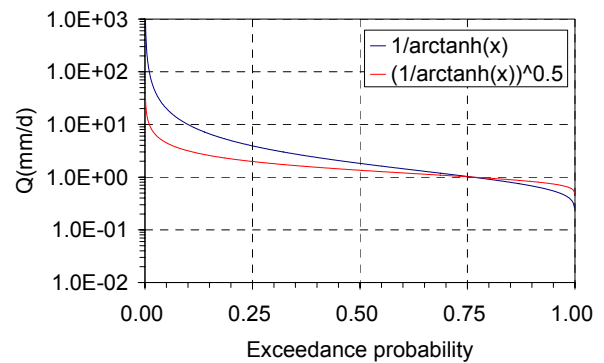


図-5 パラメータcの影響

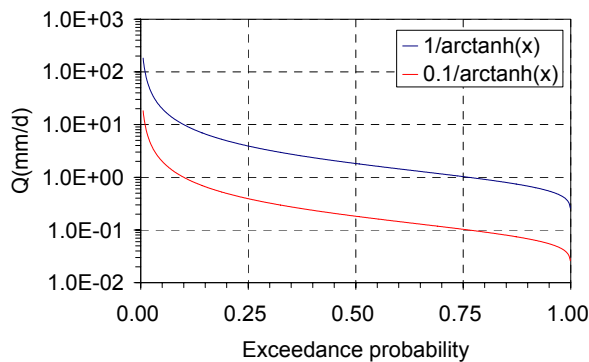


図-3 パラメータaの影響

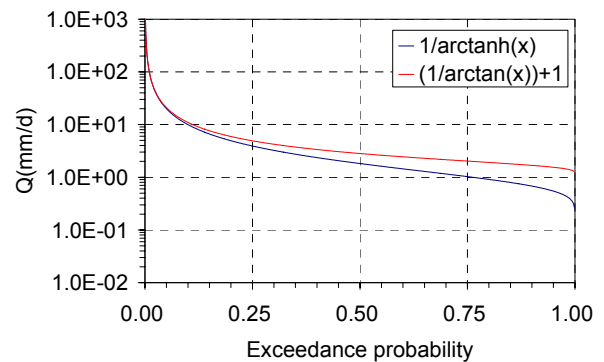


図-6 パラメータdの影響

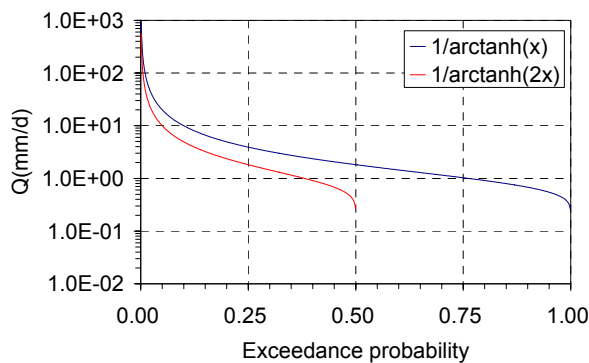


図-4 パラメータbの影響

図-2は、年間総流入量が最大となった永瀬ダムおよび最小となった一庫ダムの雨況曲線と流況曲線を示す。本研究で対象とするすべての流域の雨況曲線および流況曲線はほぼこの範囲におさまる。

雨況曲線および流況曲線は式(1)でモデル化した。

$$P \text{ または } Q = \left[\frac{a}{\tanh^{-1}(bp)} \right]^c + d \quad (1)$$

ここで、 a 、 b 、 c 、 d ：変数、 P ：降水量(mm/d)、 Q ：流出高(mm/d)、 p ：超過確率（ $0 \leq p \leq 1$ ）である。

本モデルは、LeBoutillier and Waylen⁹⁾やCigizoglu and Bayazit¹⁰⁾のモデルの様に分布関数を利用しないので拡張性に乏しいが、パラメータの役割が直感的に分かり易く、調整も簡単な点が非常に優れている。

パラメータ a 、 b 、 c 、 d を変化させた際の流況曲線形状の変化例を図-3から図-6にまとめた。パラメータ a 、 b 、 c 、 d はそれぞれ片対数軸上での上下移動、水平方向伸縮、全体的曲率、末端部の上下移動を決定している。したがって、パラメータ a は降水量または流量が全体的に大きな流域で大きく、パラメータ b は無降水期間または断流期間が長い流域で大きく、パラメータ c は降水または流量の大きさの分布が幅広い流域で大きく、パラメータ d は年間最小降水量または低水位時流量が大きい流域では大きくなる。

パラメータの決定は以下の手順で行った。雨況曲線を再現する場合、 b はデータ期間中の全降雨日数をデータ期間で除した値に10%程度を加えた値とした。これは、10%程度の値を加えないと、パラメータの最適化に失敗する場合があるためである。パラメータ a 、 c 、 d は、非線形最適化手法を用いて、降水量の観測値に対する再現値の χ^2 誤差が最小になるように最適化した。一方、流況曲線を再現する場合は、図-2に示した対象流域の流況曲線形状の範囲から判断して b は1に固定した。他のパラメータ a 、 c 、 d は、雨況曲線と同様に、流量の観測値に対する再現値の χ^2 誤差が最小になるように最適化した。

以上より、本モデルの実質的なパラメータは a 、 c 、 d の3つと少なく、さらに、各パラメータの役割も明確なモデルであるため、非常に扱いやすいモデルであると言える。

表-2 雨況曲線および流況曲線の最適パラメータ。流況曲線のパラメータには“'”を付して区別した。雨況曲線のパラメータ b は手動で決定したため、十分な最適化は行われていない。

	a	b	c	d	a'	b'	c'	d'
二川	12.25005	2.20	0.708395	-4.88232	4.548108	1	0.572896	-0.87943
一庫	21.86906	2.60	0.620838	-5.5636	1.657513	1	0.554771	-0.49189
岩瀬	14.0686	2.60	0.75716	-4.84071	3.99332	1	0.564471	0.883805
厚東川	15.71423	2.60	0.658186	-3.92977	2.022365	1	0.635682	-0.38547
緑川	16.40803	2.65	0.681013	-3.91964	3.33171	1	0.606587	0.375718
棕梨	7.822277	2.80	0.710992	-2.30717	1.244567	1	0.599486	-0.272
永瀬	18.099	2.40	0.716607	-5.61057	8.915074	1	0.616854	-1.06488
野村	16.28464	2.40	0.656913	-4.71958	1.297429	1	0.696151	-0.24373
下笠	14.6362	2.40	0.753667	-4.89694	2.439659	1	0.762108	-0.10407
新豊根	60.56414	2.40	0.596627	-10.2035	224.8694	1	0.35273	-4.24711
青蓮寺	19.73149	2.40	0.632147	-5.62223	1.662562	1	0.663154	-0.16061
椿山	9.42661	2.40	0.766166	-3.71306	3.808521	1	0.682323	-0.52419
鶴田	25.17238	2.40	0.675949	-6.4672	3.16914	1	0.629389	0.45768
湯原	11.41905	2.10	0.675334	-3.19806	76.65845	1	0.356158	-2.24844

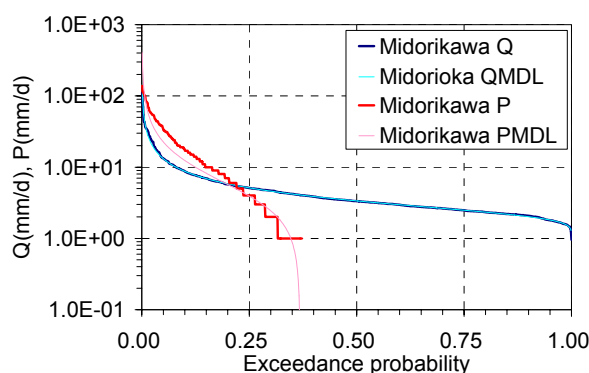


図-7 緑川ダムの再現結果

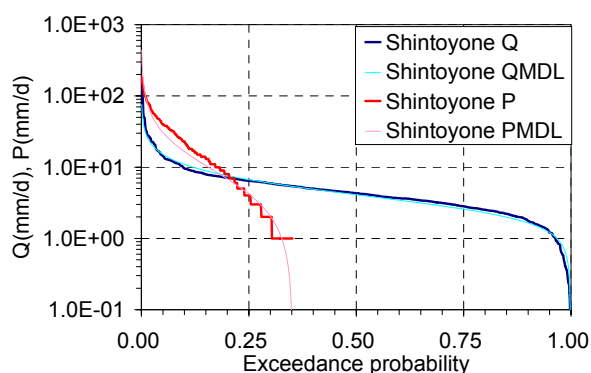


図-8 新豊根ダムの再現結果

流況曲線の再現性が高い緑川ダムおよび低い新豊根ダムの再現結果をそれぞれ図-7および図-8に示す。図中、PおよびQはそれぞれ降水量、流出量であり、MDLは再現結果であることを示す。緑川ダムと新豊根ダムの流入量に関する相対誤差の平均値はそれぞれ2.5%と12.0%と低く、再現した流況曲線は観測値にほぼ重なっている。本モデルで再現した雨況曲線は、流況曲線の場合に比べて観測値との適合性に劣り、相対誤差の平均値の最高は37.4%（棕梨ダム）と高いが、全体的な形状はよく再現されている。全ダム流域の雨況曲線および流況曲線のモデルパラメータは表-2にまとめた。

4. 流域の地理条件の抽出

流域の地理条件値として、河川長、総河川長、最大標高、最小標高、最大標高差、流域面積、流域平均幅、形状係数、流域平均勾配、河川密度、土壌型別面積率（3種類）、表層地質型別面積率（3種類）、土地利用型別面積率（9種類）の合計25項目を算出した。各流域

の地理条件値を調べた結果は表-1にまとめた。

流域面積、最大標高、最小標高、最大標高差、河川超ならびに総河川長は、1/200,000地勢図および各ダムの資料から調べた。河川長および総河川長は、地勢図上に数値地図情報の3次メッシュを加筆してメッシュと交差する河道地点を結んで擬似河道網を作成し、交点の座標を画像ソフトで読み込んで縮尺補正して算出したため、実際の値より小さい。

流域平均幅、形状係数、河川密度は、前述の疑似河道網から算出した河川および総河川長を用いて、河合ら¹⁵⁾にしたがって計算した。

土壌型別面積率、表層地質型別面積率、土地利用型別面積率は、横尾ら¹¹⁾の方法で国土地理院の数値地図情報から算出した。土壌型および表層地質の分類方法は、中野¹⁶⁾が自身の経験をもとに提案した分類法を元にしており、それぞれ“地下水流出涵養に対する貢献度”および“基底流出涵養に対する貢献度”に従って分類するものである。土地利用型の分類は、相互関係が在りそうな土地利用の組み合わせに従って、土地利用型の重複を許容して分類したものである。

表-3 相関解析の結果。相関係数0.5以上の値を太字で記した。

	$(a'-a)/a$	$(b'-b)/b$	$(c'-c)/c$	$(d'-d)/d$
LM(km)	-0.149	0.199	0.026	-0.217
LT(km)	-0.177	-0.003	0.057	-0.385
EH(m)	0.046	0.157	-0.241	-0.178
EL(m)	0.719	0.415	-0.564	0.711
ED(m)	-0.140	0.043	-0.085	-0.350
BA(km ²)	-0.132	0.025	0.041	-0.305
WB(km)	-0.048	-0.225	0.003	-0.295
SF	0.025	-0.307	0.047	-0.074
SG	0.011	-0.137	-0.054	-0.135
DD(1/km)	-0.185	0.010	0.053	-0.352
GA(%)	-0.321	-0.289	0.347	-0.130
GB(%)	-0.433	0.098	0.461	-0.344
GC(%)	0.579	0.078	-0.693	0.411
SA(%)	-0.354	-0.448	0.380	-0.108
SB(%)	0.922	0.540	-0.778	0.820
SC(%)	-0.315	0.084	0.157	-0.455
LI(%)	-0.381	-0.217	0.269	-0.619
L2(%)	-0.261	-0.270	0.285	-0.133
L3+LU4(%)	-0.058	0.182	0.317	-0.218
L2+L3+L4(%)	-0.282	-0.273	0.315	-0.160
L5(%)	0.467	0.392	-0.416	0.516
L6+L10(%)	-0.235	-0.347	0.207	-0.166
L7+L8(%)	-0.346	0.011	0.360	-0.359
L9(%)	-0.240	-0.154	0.135	-0.481
L11+L12+L13(%)	0.177	0.038	-0.028	0.248

5. 流域の地理条件が流況曲線形状に与える影響

(1) 影響評価方法

本研究は、流況曲線形状を主に決定している気候条件の影響を除外して、流域の地理条件が流況曲線形状に与える影響の評価を試みる。降雨の影響を除く方策として、流域というフィルターを通じて雨況曲線のモデルパラメータが流況曲線のそれに变化した際の変化率を指標として評価する方法を採用した。当然ながら、この方法によって気候条件の影響を除いて地理条件の影響だけをパラメータの変化率に見出せるのか、という点に議論の余地がある。しかし、著者らは温暖な気候条件下にある日本のダム流域の中から雪の影響が少ないことを条件に選定した対象流域の気候条件は互いに類似しており、この方法により流域の地理条件が流況曲線形状に与える影響を評価できると仮定した。以下の議論では、この点に留意する必要がある。

(2) 相関解析の結果に対する解釈

表-3は雨況曲線が流域というフィルターを通じて流況曲線に変化した際のモデルパラメータの変化率をまとめたものである。相関係数が0.5以上となった関係に着目すると、最小標高ELはaの増加率と正の相関、cの増加率と負の相関、dの増加率と正の相関があることが

わかる。基底流出涵養度が小さい表層地質の分布率GCはaの増加率と正の相関、cの増加率と負の相関がある。地下水流出涵養度が中程度の土壌の分布率SBは、a、b、dの増加率と正の相関があり、cの増加率と負の相関があることがわかる。水田面積率LIはdの増加率と負の相関があり、森林面積率L5はdの増加率と正の相関があることがわかる。

各モデルパラメータがどのような地理条件に影響を受けるかという視点から整理する。まず、パラメータaの増加率は、最小標高EL、基底流出涵養度が小さい地質の面積率GC、地下水流出涵養度が中程度の土壌の面積率と相関ある点について検討する。パラメータaの増加率とELの散布図を眺めると、新豊根ダムと湯原ダムのパラメータの増加率が際立って大きいことにより、データが偏在したことが高い相関の理由であった。GCおよびSBとの相関についても同様であった。ただし、SBについてはデータの偏在の影響は比較的小さいため敢えて物理的解釈を進めると、地下水流出貢献度が中程度の土壌が多く分布する流域では雨況曲線のパラメータaが流況曲線のそれに変換される際に、より大きくなる傾向があることになる。パラメータaは、片対数軸上での上下動を、通常軸上では増水時の流出量を増加するため、地下水流出貢献度が中程度の土壌が多く分布する流域では増水時の流出量が増えることになる。

パラメータbの増加率は流域の遅延フィルターとしての効果が現れる重要な値である。しかし、雨況曲線ではbを降水日数から算出し、流況曲線ではbを1に固定しているため、流域の地理条件の影響がそのまま表現されない可能性があるのでここでは触れない。

パラメータcの増加率は、最小標高EL、基底流出涵養度が小さい流域地質の面積率GC、地下水流出貢献度が中程度の土壌の面積率SBが増加すると減少する。ELとcの増加率に関する散布データは偏在が見られるが、敢えて解釈を行うと、ELが大きくなるとcは減少することがわかる。パラメータcの減少は流況曲線の平均化を意味するため、雨況曲線から流況曲線に変換される過程において最小標高が増加すると流況曲線が平均化されることになる。GCおよびSBに関してはcとの散布図における偏在はない。上述の解釈と同様の解釈を進めると、基底流出涵養度が小さい流域地質や地下水流出貢献度が中程度の土壌が多く分布する流域では、cが減少し、流況曲線が平均化されることがわかる。

パラメータdの増加率は、最小標高EL、地下水流出貢献度が中程度の土壌の面積率SB、ならびに森林面積率L5と正の相関があり、水田面積率LIとは負の相関がある。パラメータdの増加は、片対数軸上では流況曲線の右端が上昇すること、通常軸上では流況曲線全体が流量増加方向に平行移動することを意味する。従って、ELが大きく、地下水流出貢献度が中程度の土壌が多く分布し、森林面積率が高い流域においては、流量が全

体的に増加することになる。また、水田面積率が高い流域では、流量が全体的に減少することになる。

(3) 相関解析の結果に対する総括

散布図が偏在したケース以外の相関解析結果の総括として、実現象との対比および既往研究結果との比較を試みる。まず、最小標高 EL がパラメータ a 、 c 、 d と相関が高いという結果は、本研究が山間部に位置するダム流域を対象としたために得られた結果である可能性が高い。つまり、山間部の地形の複雑さゆえに、求めた最大標高差が流域の地形を代表する標高差になっていないことが原因である可能性がある。流域地形全体を反映するパラメータを新たに抽出して再検討することで、この問題を解決できる可能性がある。

“基底流出涵養度が小さい流域地質の面積率 GC が高い流域では、流況曲線が平均化される”という結果は、中野¹⁶⁾の経験的な分類と反する結果である。よって、虫明ら³⁾が採用した地質分類法なども採用し、異なる視点から再検討する必要がある。

地下水流出貢献度が中程度の土壌の面積率 SB は、パラメータ a の増加により対数軸上での流況曲線の上昇を、パラメータ c の減少および d の増加により流況曲線の平均化という結果をもたらした。中野¹⁶⁾の土壌分類法による“中程度の地下水流出貢献度の土壌”の存在が重要になった理由は不明確なため、Ward and Robinson²⁾のような粒径による分類の採用も検討する必要がある。

“水田面積率が低い流域や森林面積率が高い流域では流量が全体的に増える”という結果は、多くの既存研究との比較を行ってさらに検証する必要がある。

以上より、流域の地理条件の抽出法を見直した上で、再検討することが本研究の課題である。

6. まとめ

本研究は、気候条件が類似したダム流域を対象として共通のモデルで雨況曲線と流況曲線を表現した際、モデルパラメータの変化率に流域の地理条件が反映されていると仮定して両者の相関解析を行い、流域の地理条件が流況曲線形状に与える影響の評価を試みた。本研究で提案した流況曲線モデルは、流量の統計的分布に立脚していないが、極めて簡単かつ高精度に流況曲線を再現できる点が優れており、この点は大きな成果である。しかし、既存研究^{11), 16)}に従って抽出した流域の地理条件は雨況曲線から流況曲線への変換を十分には説明できなかった。この問題の解決に向け、パラメータの変化率に地理条件が本当に反映されるかどうかについての詳細な検討を行った上で、地理条件の抽出法の見直しを行うことが今後の課題である。

謝辞：本研究の発表に際し、平成18年度科学研究費補助金(若手研究B, 18760381)の補助を受けた。地理情報の取得には、国土交通省、水資源機構、各地方自治体のダム管理事務所の協力を得た。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) Burt, T. P. and Swank, W. T.: Flow frequency responses to hardwood-to-grass conversion and subsequent succession, *Hydrol. Process.*, Vol.6, No.2, pp.179-188, 1992.
- 2) Ward, R. C. and Robinson, M.: *Principles of Hydrology*, McGraw-Hill, pp.264-266, 1990.
- 3) 虫明功臣・高橋裕・安藤義久：日本の山地河川の流況に及ぼす流域の地質の効果，土木学会論文報告集，第309号，pp.51-62，1981.
- 4) 志水俊夫：山地流域における湧水量と表層地質・傾斜・植生との関係，林業試験場研究報告，第301号，pp.109-128，1980.
- 5) Fennessey, N. and R.M. Vogel, Regional Flow Duration Curves for Ungaged Sites in Massachusetts, *J. Water Resour. Plan. Manag.*, ASCE, Vol. 116, No. 4, pp. 530-549, 1990.
- 6) Farmer, D., Sivapalan, M. and Jothityangkoon C.: Climate, soil, and vegetation controls upon the variability of water balance in temperate and semiarid landscapes: Downward approach to water balance analysis, *Water Resour. Res.*, Vol.39, No.2, 1035, doi:10.1029/2001WR000328, 2003.
- 7) 劉若剛・鈴木雅一・芝野博文・太田猛彦：山地流域の流況曲線に与える降雨の年々変動の影響，日本林学会誌，第80巻，第3号，pp.184-188，1998.
- 8) 丸井信雄・荒井徳昭：流況曲線の一つの表現法，水理講演会講演集，第13巻，pp.35-37，1969.
- 9) LeBoutillier D. W. and Waylen P. R.: A stochastic model of flow duration curves, *Water Resour. Res.*, Vol.29, No.10, pp.3535-3541, 1993.
- 10) Cigizoglu, H. K. and Bayazit M.: A generalized seasonal model for flow duration curve, *Hydrol. Process.*, Vol.14, pp.1053-1067, 2000.
- 11) 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，第12巻，第6号，pp.481-491，1999.
- 12) 建設省河川局開発課：多目的ダム管理年報，平成2年度版，中国建設弘済会，1994.
- 13) 建設省河川局開発課：多目的ダム管理年報，平成3年度版，中国建設弘済会，1995.
- 14) 建設省河川局開発課：多目的ダム管理年報，平成4年度版，中国建設弘済会，1996.
- 15) 河合茂・和田清・神田佳一・鈴木正人：河川工学，コロナ社，pp.6-7，2002.
- 16) 中野秀章：森林水文学，共立出版，1976.