

山地河川の流況曲線形状を説明するための 表層地質の分類法に関する検討

HOW SHOULD WE CLASSIFY SURFACE GEOLOGY TO BEST EXPLAIN
THE SHAPES OF FLOW DURATION CURVES IN HEADWATER BASINS?

横尾善之¹・沖大幹²
Yoshiyuki YOKOO and Taikan OKI

¹正会員 博(工) 東京大学 「水の知」(サントリー)総括寄付講座(〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

²正会員 博(工) 東京大学 生産技術研究所(〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

The present study investigated which surface geology classification best explain the shape of flow duration curves in Japanese mountainous watersheds among five existing classification schemes with respect to the type and age of watershed geology. Firstly we represented flow duration curves of twelve different watersheds in Japanese mountainous areas with a mathematical model in order to characterize the curves through their four model parameters. Secondly we calculated the coverage ratios of particular geology types with the above five classification schemes for all the watersheds. Then the authors investigated the correlations between the four flow duration curve parameters and the coverage ratios of geology types for five different classifications. The results suggest that geology classification for age alone as well as for both type and age were most effective in explaining the shape of flow duration curves.

Key Words : *streamflow, correlation, geographic information, model, Japan.*

1. 序論

流域の気候・地理条件から流況曲線を描く手法の構築を著者らは目指している。このような研究の歴史は長く、数種類の流域の気候・地理条件等から流況曲線を描く方法に関する研究が1970年頃から始まっている。例えば、Singh¹⁾, Mimikou and Kaemaki²⁾, Franchini and Suppo³⁾, Croker *et al.*⁴⁾, Castellarin *et al.*⁵⁾⁶⁾はその好例である。これらの研究には、流況曲線形状を説明する流域の気候・地理条件についての検討を十分に行っていないという問題点があるため、研究成果が適用可能な地域はそれぞれの研究対象地域に限定されると考えるのべきであろう。

この問題に対処するには、流域の気候・地理条件と流況曲線形状の関係を丁寧に解き明かし、それを積み上げる研究が必要と考えられる。これまで、Burt and Swank⁷⁾は森林の影響、Ward and Robinson⁸⁾は土壌の影響、虫明ら⁹⁾は気候および地質の影響、志水¹⁰⁾は渇水量と表層地質・傾斜・植生との関係、Fennessey and Vogel¹¹⁾は流域面積や地質の流況曲線形状への影響を整理しており、知見の集積が進んでいる。さらに、横尾・有働¹²⁾は、25種類の地理条件と流況曲線形状の相関関係を報告している。

しかし、名称、年代、断層の有無など多様な分類基準を有する表層地質の最適な分類法については、十分に検討されていない。

そこで本研究は、流況曲線形状を説明する上で最適な表層地質の分類法を検討した。具体的には、流況曲線を横尾・有働¹²⁾が提案した単純な数学的モデルで再現し、そのモデルパラメータと表層地質の関係を5種類の表層地質分類毎に検討した。横尾・有働¹²⁾のモデルはLeBoutillier and Waylen¹³⁾, Cigizoglu and Bayazit¹⁴⁾, Castellarin *et al.*¹⁵⁾, Iacobellis¹⁶⁾などのモデルのように分布関数や平均、分散、標準偏差などの統計量に立脚しておらず、モデル自体の理論的拡張性が乏しい。しかし、本研究の目的は、流況曲線形状を説明するために最適な表層地質の分類法を見出すことにあり、横尾・有働¹²⁾のモデルでも十分に目的を達成できると考えている。本研究でとりあげた5種類の表層地質の分類法は、虫明ら⁹⁾の分類法、小葉竹・石原¹⁷⁾の分類法、Yokoo *et al.*¹⁸⁾の分類法、地質の名称による分類法、年代による分類法である。本論文はこれら5種類の分類法で算出した表層地質の面積率と流況曲線形状の関係をその物理的な意味を考えながら検討し、流況曲線形状を説明する上で最適な流域の表層地質の分類法を模索した結果を報告する。

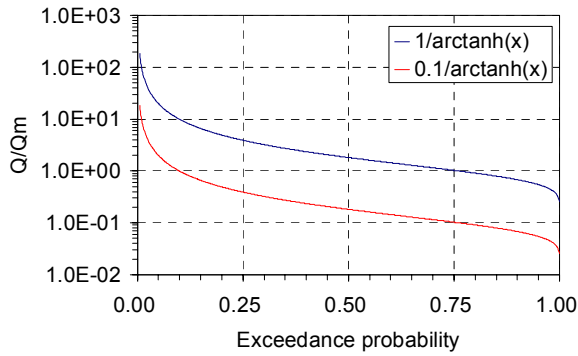


図-1 パラメータaの影響

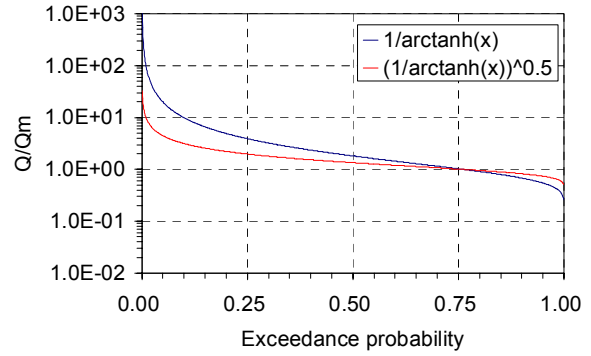


図-3 パラメータcの影響

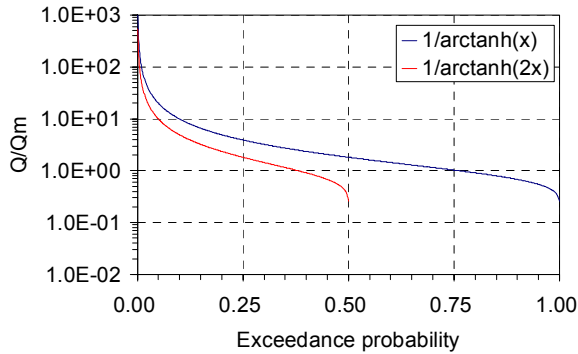


図-2 パラメータbの影響

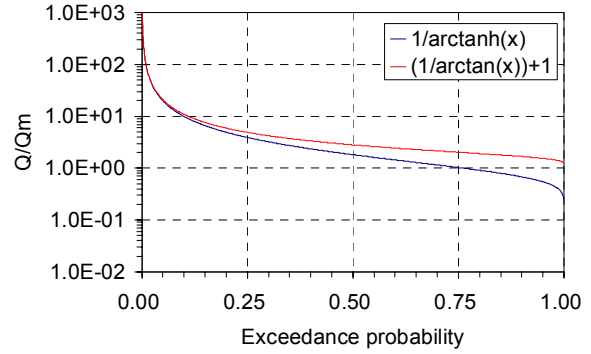


図-4 パラメータdの影響

2. 方法

本研究は、表層地質と河川の流況曲線形状の関係を明らかにするため、①数学的モデルによる流況曲線の再現、②表層地質の分類と面積率の算出、③流況曲線形状を決定するパラメータと表層地質の相関解析を日本の山地に位置する12流域を対象として行った。

(1) 流況曲線の数学的モデル

モデル表現する流況曲線は、多目的ダム管理年報^{19),20),21)}掲載の12流域における1991年からの3年間の日流入量データを利用し、日流入量を年平均日流量で除した無次元流量を縦軸、その超過確率を横軸として描いた。入手済みの3年間の短いデータを利用したため、水文データは気候の年々変動の影響を受けている可能性があり、流域の平均的な特性をつかむには不十分な条件下の解析であることに注意が必要である。観測値の流況曲線は式(1)¹²⁾でモデル化した。

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

ここで、 a 、 b 、 c 、 d ：パラメータ、 Q ：流出高(mm/d)、 p ：超過確率（ $0 \leq p \leq 1$ ）である。

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-1から図-4にまとめた。なお、図中の Q_m は平均流量である。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。よって、パラメータ a は流量が全体的に大きな流域で、パラメータ b は断流期間が長い流域で、パラメータ c は流量の大きさの分布が幅広い流域で、パラメータ d は低水位時流量が大きい流域で大きくなる。

パラメータは、非線形最小二乗法を用いて河川流量の観測値に対する再現値の残差平方和が最小になるように最適化した。パラメータ b は0.99から1の範囲に探索範囲を限定した。パラメータ a および c は、正值となる範囲で探索した。パラメータ d は探索範囲を限定していない。

表-1に対象流域の名称とパラメータ値等をまとめた。

(2) 表層地質の分類と面積率の算出

水文学的観点による表層地質の包括的分類法の種類は多くない。代表的なものは、虫明ら⁹⁾の分類とそれに類似した小葉竹・石原¹⁷⁾の分類、中野²²⁾の分類とそれを拡張したYokoo *et al.*¹⁸⁾の分類がある。これら以外では、国土地理院の数値地図情報に記載されている「火山性岩石」などの大分類の名称のみによる分類、地質年代による分類、断層の有無による分類が可能であるが、断層に関するデータは欠測が多いので利用できない。そこで本研究は、①表層地質の大分類の名称による分類、②地質年代による分類、③虫明⁹⁾による分類、④小葉竹・石原¹⁷⁾による分類、⑤Yokoo *et al.*¹⁸⁾による分類に従って流域の表層地質をそれぞれ分類し、各表層地質の面積率を分類種別に算出した。

表-1 対象流域の平均値で無次元化した流量の基本統計量、流況曲線のモデルパラメータ、ならびに表層地質の面積率。表中のm, sd, skはそれぞれ平均値で無次元化した河川流量の平均、標準偏差、歪度である。a, b, c, dは式(1)に示す流況曲線のモデルパラメータの値である。UD, SR, VR, PR, MeR, MyRはそれぞれ未固結堆積物、固結堆積物、火山性岩石、深成岩、変成岩、圧砕岩の面積率である。P, M, Tp, Tn, T, D, A, Qはそれぞれ古生層、中生層、古第三紀、新第三紀、第三紀（古第三紀と新第三紀の和）、洪積世、沖積世、第四紀（洪積世と沖積世の和）の面積率である。GTA, GTB, GTCはYokoo *et al.*¹⁸⁾に従って算出した「基底流量涵養に対する貢献度」がそれぞれ大きい地質、中程度の地質、小さい地質の面積率である。Vt, Vq, G, T, M, Pはそれぞれ第三紀火山岩、第四紀火山岩、花崗岩、第三紀層、中生層、古生層の面積率を虫明ら⁹⁾に従って計算した結果である。小葉竹・石原¹⁷⁾に従って分類した地質分類のうち、Vは火山岩であり、その他は虫明ら⁹⁾の分類と同じである。

		二川	一庫	岩瀬	厚東川	緑川	棕梨	永瀬	野村	下笠	青蓮寺	椿山	鶴田
基本統計量	m	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	sd	1.777	1.400	0.986	1.596	1.335	1.451	1.732	1.702	2.377	2.571	1.763	1.279
	sk	9.710	6.710	5.100	7.685	7.378	6.234	7.730	5.485	12.527	11.614	6.647	5.215
モデルパラメータ	a	0.363	0.415	0.200	0.316	0.225	0.319	0.332	0.260	0.221	0.229	0.270	0.217
	b	1.000	0.996	0.990	0.990	1.000	0.998	0.990	0.990	0.990	1.000	0.990	0.990
	c	0.573	0.542	0.558	0.618	0.606	0.595	0.595	0.682	0.750	0.663	0.662	0.622
	d	-0.207	-0.253	0.144	-0.153	0.073	-0.129	-0.177	-0.105	-0.034	-0.043	-0.111	0.067
名称による分類	UD	0.000	0.119	0.148	0.060	0.008	0.181	0.000	0.180	0.011	0.043	0.000	0.169
	SR	0.911	0.407	0.375	0.574	0.394	0.066	0.966	0.820	0.011	0.026	1.000	0.146
	VR	0.000	0.034	0.474	0.121	0.558	0.169	0.000	0.000	0.957	0.435	0.000	0.685
	PR	0.000	0.441	0.000	0.115	0.020	0.584	0.010	0.000	0.016	0.270	0.000	0.000
	MeR	0.089	0.000	0.000	0.130	0.020	0.000	0.024	0.000	0.000	0.226	0.000	0.000
	MyR	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
地質年代による分類	P	0.089	0.407	0.000	0.502	0.363	0.024	0.461	0.802	0.000	0.000	0.000	0.000
	M	0.911	0.076	0.052	0.429	0.071	0.711	0.539	0.017	0.005	0.191	1.000	0.088
	Tp	0.000	0.000	0.323	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.053
	Tn	0.000	0.000	0.008	0.000	0.042	0.000	0.000	0.000	0.778	0.461	0.000	0.391
	T	0.000	0.000	0.332	0.003	0.042	0.000	0.000	0.000	0.778	0.461	0.000	0.444
	D	0.000	0.008	0.564	0.000	0.516	0.048	0.000	0.000	0.200	0.035	0.000	0.316
	A	0.000	0.000	0.049	0.060	0.008	0.175	0.000	0.180	0.011	0.000	0.000	0.152
	Q	0.000	0.008	0.614	0.060	0.524	0.223	0.000	0.180	0.211	0.035	0.000	0.468
Yokoo ¹⁸⁾	GTA	0.102	0.541	0.000	0.516	0.181	0.000	0.201	0.000	0.000	0.316	0.241	0.000
	GTB	0.458	0.082	0.178	0.068	0.627	0.010	0.755	0.414	0.313	0.536	0.441	0.180
	GTC	0.432	0.376	0.686	0.397	0.193	0.966	0.043	0.083	0.461	0.148	0.148	0.820
虫明ら ⁹⁾	Vt	0.000	0.000	0.008	0.000	0.042	0.000	0.000	0.000	0.757	0.435	0.000	0.391
	Vq	0.000	0.000	0.466	0.000	0.516	0.000	0.000	0.000	0.200	0.000	0.000	0.294
	G	0.000	0.441	0.000	0.115	0.017	0.584	0.000	0.000	0.016	0.270	0.000	0.000
	T	0.000	0.000	0.323	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.026	0.000	0.053
	M	0.911	0.025	0.052	0.314	0.071	0.169	0.539	0.017	0.000	0.000	1.000	0.088
	P	0.089	0.407	0.000	0.502	0.346	0.024	0.461	0.802	0.000	0.000	0.000	0.000
小葉竹・石原 ¹⁷⁾	V	0.000	0.034	0.474	0.121	0.558	0.169	0.000	0.000	0.957	0.435	0.000	0.685
	G	0.000	0.441	0.000	0.115	0.017	0.584	0.000	0.000	0.016	0.270	0.000	0.000
	T	0.000	0.000	0.323	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.026	0.000	0.053
	M	0.911	0.000	0.052	0.193	0.071	0.000	0.539	0.017	0.000	0.000	1.000	0.088
	P	0.089	0.407	0.000	0.502	0.346	0.024	0.461	0.802	0.000	0.000	0.000	0.000

(3) 相関解析

表-1にまとめた流況曲線を再現する数学的モデルのパラメータの値a, b, c, dと表層地質種別の面積率の関係について上記の5種類の分類法別に相関解析を行った。合計12流域を対象としたので、相関係数の5%有意水準値は0.576である。この5%有意水準値を超える有意な相関係数が得られた関係に基づいて、流況曲線形状に対する表層地質の影響を考察した。

本研究は流況曲線形状に対する地質の影響評価に

向けた地質分類法を検討しているため、地質の影響が現れやすいと流況曲線の低流量部のみに着目する考え方もある。一方、小葉竹・石原¹⁷⁾は洪水流出モデルのパラメータと流域の地質の関係を報告しており、地質が流況曲線の高流量部に与える影響がないとは言えない。本研究は流況曲線全体の描画方法を目指しているため、モデルパラメータと地質の関係を調べる方針を採用したが、これによって、モデルパラメータは降雨特性の影響も受けている点に注意が必要である。

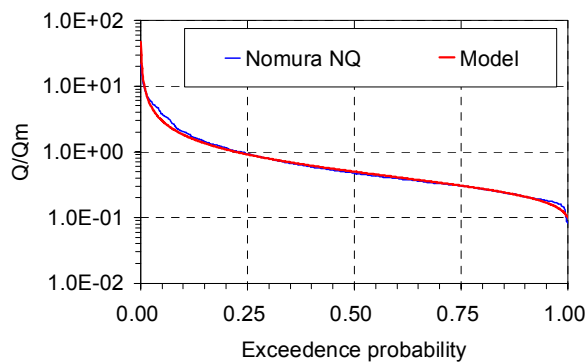


図-5 最も再現性が悪い野村ダムの流況曲線の再現結果

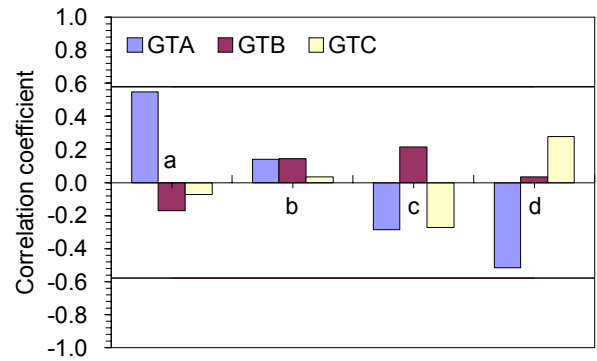


図-8 Yokooら¹⁸⁾が分類した表層地質の面積率とパラメータの関係

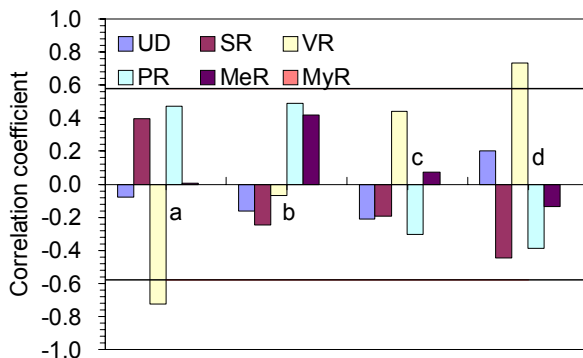


図-6 名称で分類した表層地質の面積率とパラメータの関係

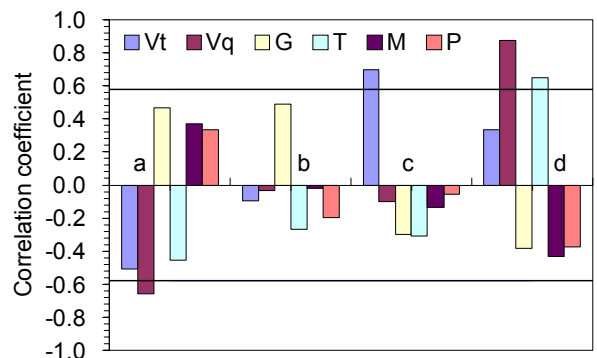


図-9 虫明ら⁹⁾が分類した表層地質の面積率とパラメータの関係

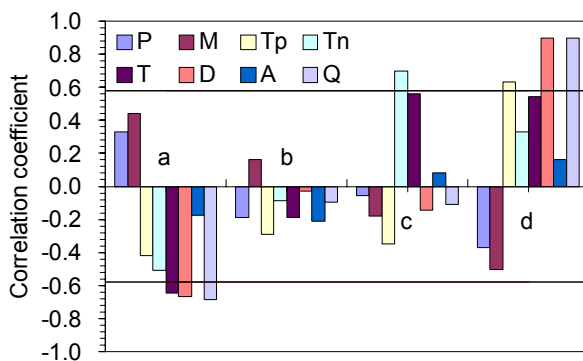


図-7 年代で分類した表層地質の面積率とパラメータの関係

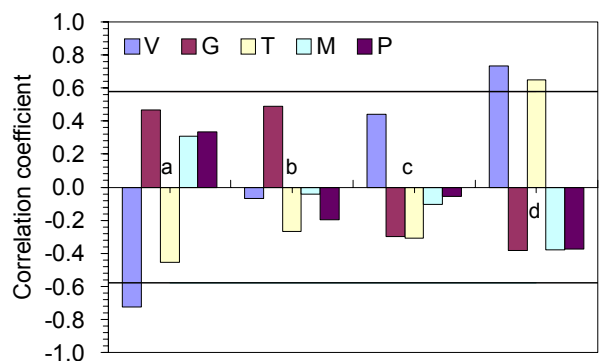


図-10 小葉竹・石原¹⁷⁾が分類した表層地質の面積率とパラメータの関係

3. 結果

(1) 流況曲線のモデル化

式(1)に従って再現した流況曲線のうち、最も再現性が悪かった結果を図-5に示す。この図から、式(1)の流況曲線モデルは、対象流域の流況曲線形状を高精度に再現していることがわかる。パラメータ c は表-1に示す無次元流量の標準偏差 sd と有意な相関があり、この標準偏差から決定できる可能性がある。

(2) 表層地質の分類と面積率の算出の結果

5種類の分類法に基づいて表層地質を分類し、それぞれの面積率を分類法別にまとめた結果が表-1である。この表において、火山岩類を第四紀と第三紀に分類する虫明ら⁹⁾の分類とそれらを同一の火山岩類とする小葉竹・石原¹⁷⁾の分類では、面積率が微妙に異なることに注意が必要である。具体的には、中生代の火山岩が存在する一庫、厚東川、棕梨の各ダム流域では、それらは虫明ら⁹⁾の分類では中生層に、小葉竹・石原¹⁷⁾の分類では火山岩に分類される。ただし、全体的に両者は類似している。

(3) 相関解析の結果

図6-10に相関解析の結果を示す。各図では、横軸を式(1)のモデルパラメータとし、分類した表層地質とモデルパラメータとの相関係数を表示している。各図に記載されている2本の水平線は5%有意水準を満たす相関係数の値である0.576を示している。ここでは、この5%の有意水準を満たす相関のみを取り上げ、それらの結果について検討する。

まず、モデルパラメータ間の相関を調べた結果、パラメータ a と d が負の相関があることがわかった。

図1-4を参考にすると、この結果は流況曲線の末端部が上昇する場合は、片対数軸上の流況曲線が下降することを意味している。つまり、渇水流量が多い流域では、河川流量は時間的に平均化されるという全流域共通の特性を示している。この関係に従えば、流況曲線モデルのパラメータ数は現状の4つから3つに減少できる可能性がある。

次に、名称で分類した表層地質の面積率とモデルパラメータの相関を調べた結果、火山性岩石が広く分布する流域では、パラメータ d が増加し、 a が減少することがわかる。これは、火山性岩石が広く分布する流域では、時間的に河川流量が平均化されることを示している。

年代で分類した表層地質の面積率とモデルパラメータの関係をみると、①古第三紀の表層地質が多く分布するとパラメータ d が増加して渇水流量が多くなること、②新第三紀の表層地質が多く分布するとパラメータ c が増加して流況曲線が急勾配となって河川流量の分散が大きくなること、③第三紀層の表層地質が多く分布する流域ではパラメータ a が減少して河川流量が全体的に減少すること、④第四紀（特に洪積世）の表層地質が多く分布する流域ではパラメータ a が減少、 d が増加して河川流量が平均化されることがわかる。

中野²²⁾の「基底流量涵養に対する貢献度」を基にYokoo *et al.*¹⁸⁾が分類した表層地質とモデルパラメータの関係をみると、両者に有意な相関がないことがわかった。つまり、この分類に従っても流況曲線形状に対する表層地質の影響を評価することは困難である可能性が高い。

虫明ら⁹⁾が分類した表層地質の面積率とモデルパラメータの関係については、①第三紀火山岩が多く存在する流域ではパラメータ c が増加して河川流量の分散が大きく流況曲線が急勾配になること、②第四紀火山岩が多く分布する流域ではパラメータ a が減少、 d が増加することにより河川流量が時間的に平均化されること、③第三紀層が多く分布する流域ではパラメータ d が大きくなり渇水流量が増えることがわかる。

小葉竹・石原¹⁷⁾が分類した表層地質の面積率とパラメータの関係をみると、①火山性岩石が多い流域ではパラメータ a が減少、 d が増加して流況曲線が緩勾配となり河川流量が時間的に平均化されること、②第三紀層が多く分布する流域ではパラメータ d が大きくなり渇水流量が増えることがわかる。分類法

が似ている虫明ら⁹⁾と同様の結果であるが、得られた知見は少ない。

流況曲線の形状の説明能力という視点で、本研究で取り上げた5種類の表層地質の分類法を比較すると、まず中野²²⁾の分類法を拡張したYokoo *et al.*¹⁸⁾の分類法は、流況曲線形状を説明できる可能性は少ないことが明らかである。また、名称のみの分類法では地質年代の影響が取り込めず、流況曲線形状の説明能力が低いと言える。一方、地質年代のみによる分類はパラメータ b 以外の3つのパラメータの変動を説明することができ、有効な分類法であると言える。虫明ら⁹⁾と小葉竹・石原¹⁷⁾の分類法は互いに類似しているため、どちらも同様に有効であるが、年代の違いによる影響を火山岩の分類に加味する虫明ら⁹⁾の分類法の方がより優れている可能性が高い。この虫明ら⁹⁾の分類法もパラメータ b 以外の3つのパラメータの変動を説明できる。以上より、流況曲線形状の説明能力という視点によると、年代による分類法あるいは虫明ら⁹⁾の分類法が有効と言える。

4. 考察

(1) 流況曲線の数学的モデル

横尾・有働¹²⁾のモデルは、パラメータの役割が直感的に分かり易く、調整も簡単な点が優れている。また、本研究の対象流域に適用した結果を見る限り、日本の山地流域における河川流量の観測値で描かれる流況曲線を高精度に再現することができると考えられる。しかし、LeBoutillier and Waylen¹³⁾、Cigizoglu and Bayazit¹⁴⁾、Castellarin *et al.*¹⁵⁾等のモデルの様に河川流量の平均値、分散、標準偏差などの統計量を利用しないため、モデルの理論的拡張性が乏しい。本研究は流域の表層地質が流況曲線形状に与える影響の評価に主眼があったため、統計量に基づく流況曲線のモデル化を行う必要はなかった。しかし、気候・地理条件のみから流況曲線を描く手法の提案を視野に入れると、今後、統計量に基づく流況曲線モデルパラメータ推定法を検討する必要がある。

(2) 流域の表層地質が流況曲線に与える影響

本研究の主要な成果は、①中野²²⁾の地質分類を拡張したYokoo *et al.*¹⁸⁾の分類法で分類した表層地質では流況曲線形状の説明は難しく、②年代のみによる分類法で分類した流域の表層地質の分類法は名称および年代を考慮した虫明ら⁹⁾の分類法と同程度に流況曲線形状を説明できる可能性があることを示したことである。

中野²²⁾の地質分類は経験に基づいた詳細なものであり、それを拡張したYokoo *et al.*¹⁸⁾の分類が流況曲線形状を最もよく説明すると著者らは予想していたが、結果は予想に反していた。これこそが、横尾・有働¹²⁾が流域の地質条件と流況曲線形状の有意な関係を見出せなかった原因と考えられる。

表層地質の名称と年代を両方考慮した虫明ら⁹⁾の

分類と同様に年代のみを考慮した分類も流況曲線形状の説明能力が高いことを示した。その理由を探すと、両分類法で分類した地質別面積率は、互いに相関が高いことがわかった。この相関は、対象流域に特有の結果である可能性があるため、対象流域の数を増加させて多くの流域で再検討し、結果を見極める必要がある。

本研究は表層地質の名称と年代に着目した分類法を対象として検討したが、地質の水理学的特性に影響すると考えられる断層の有無の影響は考慮していない。表層地質の断層の有無に関するデータは世界的に未整備であり、日本においても十分ではない。断層の有無の影響については、データの整備状況を視野に入れつつ検討する必要がある。

5. 結論

本研究は、流域の表層地質が流況曲線形状に与える影響の評価に向け、5種類の表層地質の分類法について検討を加えた。その結果、①日本の山地流域においては、これまで頻繁に利用されてきた虫明ら⁹⁾の地質分類法のみならず年代による分類法も流況曲線形状を説明する上で有効な分類法である可能性を見出した。また、②中野²²⁾の「基底流出涵養に対する貢献度」を応用したYokoo *et al.*¹⁸⁾の分類法は、流況曲線形状の説明能力が低く、虫明ら⁹⁾の地質分類法や年代による分類法に大きく劣ることを明らかにした。

今後は、横尾・有働¹²⁾にならい、虫明ら⁹⁾の地質分類法ならびに年代による分類法で求めた地質条件を他の地理条件や気候条件と合わせ、それらが流況曲線形状に与える影響の評価に取り組む。また、断層の有無の影響や表層地質と地形の関係についても検討を加える。

謝辞：本論文は、東京大学総括プロジェクト機構「水の知」(サントリー)総括寄付講座、平成17年前田記念工学振興財団研究助成、科学研究費補助金(若手研究B、18760381)の成果の一部である。水文および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) Singh, K. P.: Model flow duration, *Water Resour. Res.*, Vol.7, pp.1031-1036, 1971.
- 2) Mimikou, M and Kaemaki S.: Regionalization of flow duration characteristics, *J. Hydrol.*, Vol. 82, pp.77-91, 1985.
- 3) Franchini, M. and Suppp, M.: Regional analysis of flow duration curves for a limestone region, *Water Resour. Man.*, Vol.10, pp.199-218, 1996.
- 4) Croker, K. M., Young, A. R., Zaidman, M. D. and Rees, G. G.: Flow duration curve estimation in ephemeral catchments in Portugal, *Hydrol. Sci J.*, Vol.48, pp.427-439, 2003.
- 5) Castellarin, A., Galeati, G., Brandimarte, L., Montanari, A. and Brath, A.: Regional flow-duration curves: reliability for ungauged basins, *Adv. Water Resour.*, Vol.27, pp.953-965, 2004.
- 6) Castellarin, A., Camorani, G. and Brath, A.: Predicting annual and long-term flow-duration curves in ungauged basins, *Adv. Water Resour.*, Vol.30, pp.937-953, 2007.
- 7) Burt, T. P. and Swank, W. T.: Flow frequency responses to hardwood-to-grass conversion and subsequent succession, *Hydrol. Process.*, Vol.6, pp.179-188, 1992.
- 8) Ward, R. C. and Robinson, M.: *Principles of Hydrology*, McGraw-Hill, pp.264-266, 1990.
- 9) 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，Vol.309, pp.51-62, 1981.
- 10) 志水俊夫：山地流域における渇水量と表層地質・傾斜・植生との関係，林業試験場研究報告，Vol.301, pp.109-128, 1980.
- 11) Fennessey, N. and Vogel R. M.: Regional Flow Duration Curves for Ungaged Sites in Massachusetts, *J. Water Resour. Plan. Manag.*, ASCE, Vol.116, pp. 530-549, 1990.
- 12) 横尾善之・有働恵子：流域の地理条件が流況曲線形状に与える影響，水工学論文集，第51巻，pp.373-378, 2007.
- 13) LeBoutillier D. W. and Waylen P. R.: A stochastic model of flow duration curves, *Water Resour. Res.*, Vol.29, pp.3535-3541, 1993.
- 14) Cigizoglu, H. K. and Bayazit M.: A generalized seasonal model for flow duration curve, *Hydrol. Process.*, Vol.14, pp.1053-1067, 2000.
- 15) Castellarin, A., Vogel, R. M. and Brath, A.: A stochastic index flow model of flow duration curve, *Water Resour. Res.*, Vol.40, W03104, doi:10.129/2003WR002524, 2004.
- 16) Iacobellis, V.: Probabilistic model for the estimation of T year flow duration curves, *Water Resour. Res.*, Vol.44, W02413, doi:10.129/2006WR005400, 2008.
- 17) 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，第337号，pp.129-135, 1985.
- 18) Yokoo, Y., Kazama S., Sawamoto, M. and Nishimura, H.: Regionalization of lumped water balance model parameters based on multiple regression, *J. Hydrol.*, Vol.246, pp.209-222, 2001.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) 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.
- 22) 中野秀章：森林水文学，共立出版，1976.

(2008. 9. 30受付)