日本全国の山地流域の気候・地理条件と流況曲線形状の関係*

福島大学理工学群共生システム理工学類　原田　賢州
福島大学共生システム理工学類・福島大学環境放射能研究所　横尾　善之

1.　序論

流況曲線は水利計画等に用いられ，効率的な水利用を行う上で重要であるが，河川流量の観測が行われていない流域では流況曲線の描画に必要な流量データを取得することができない。これに対し，流域の気候・地理に関するデータの取得は容易であることから，降水量，蒸発散量等の気候条件や地形，地質，土壌等の地理条件から流況曲線形状を推定する手法について多くの研究がなされている。例えば，Famer *et al*. (2003)，横尾・有働 (2007)，Mohamoud (2008)は，主にモデルの適合性に着目し，推定手法について報告している。また，志水 (1980)，虫明ら (1981)，地頭薗・竹下 (1987)，横尾・沖 (2010)は，流域の気候・地理条件と流況の関係について説明している。これら以外にも Sugiyama *et al*. (2003)，小松・横尾 (2013)は気候条件と流況曲線形状との関係を階層的に整理している。

しかし，これらの既往研究には対象流域の流域特性に流況曲線形状の推定結果が大きく依存してしまう問題点がある。これは，対象流域数が少ないこと，対象流域の選定が局所的であることが原因である。これにより流況曲線形状の推定手法を対象流域以外に適用できない可能性がある。

そこで，本研究ではこの問題点を踏まえ，日本の山地流域 144 流域を対象とし，気候・地理条件との関係について解析を行った。また、解析結果から流況曲線形状の推定を行い，実測値と推定値との比較・検証を行った。

2.　方法

2.1.　対象流域と使用データ

本研究では日本国内の山地流域 144 流域を対象とした。図-1 に対象流域の観測点位置を示す。対象流域は上流部に他のダムや観測所がなく，人為的な影響が少ないと考えられる位置にあること，流量データの欠損がないことを条件に選定した。使用データは対象年度を 2005~2007 年の 3 年間とし，3 年分の平均値を算出し用いた。それぞれのデータは流量データを国土交通省の水文水質データベースから，日降水量，月別平均気温データを気象庁のアメダスから，地形，地質，土壌データを国土交通省の国土数値ダウンロードサービスから取得した。流量データは単位を mm/day へ変換し，日流量として用いた。

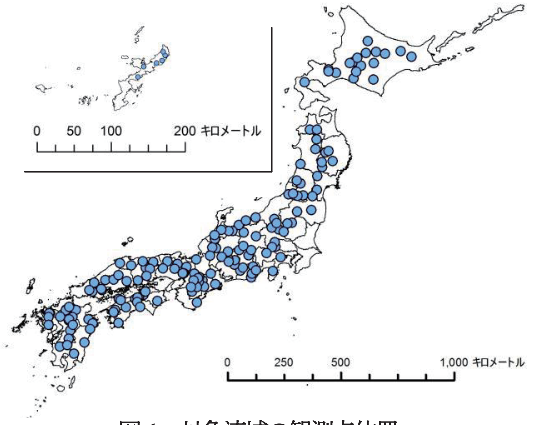

図-1　対象流域の観測点位置

2.2.　流量と気候・地理条件設定

*Exploring the relationships between physiographic characteristics and shapes of flow duration curves in Japanese mountainous watersheds by Kensyu Harada, Yoshiyuki Yokoo

本研究では流況曲線においてどの条件がどの部位に影響を及ぼしているかを確認するため，特に流況曲線上の超過確率 5%刻みの流量に着目した。図-2 に作成した対象 144 流域の流況曲線を示す。各対象流域の流況曲線上の超過確率 5%刻みの流量 Q を算出し解析に用いた。次に取得した日降水量から対象 144 流域の雨況曲線を作成した。図-3 に対象 144 流域の雨況曲線を示す。各対象流域の雨況曲線上の超過確率 5%刻みの日降水量 P を算出し，月別平均気温と共に気候条件として設定した。また，取得した地形，地質，土壌データから GIS を用いて対象流域内の各地形，地質，土壌成分の面積を算出し，地形条件として設定した。

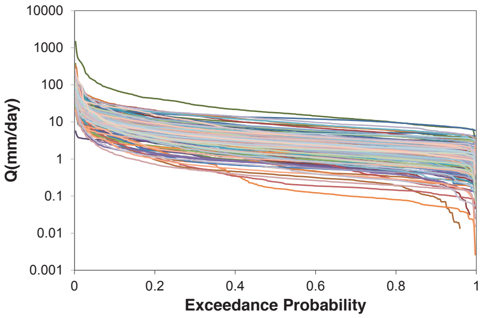

図-2　対象 144 流域の流況曲線

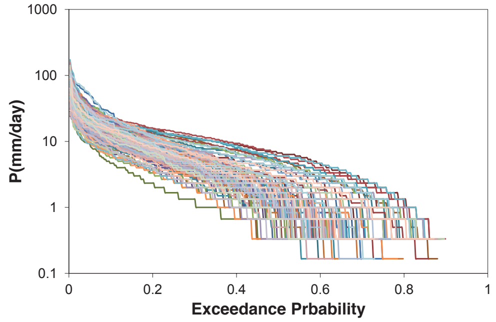

図-3　対象 144 流域の雨況曲線

2.3.　相関解析

流域の気候・地理条件に関する特性値が河川の流況曲線から得られる流況因子に与える影響を調べるため両者の相関解析を行った。流況曲線上のどの部位でどの条件がどの程度影響しているかを分かりやすくするために，Yokoo and Sivapalan(2011)，小松・横尾(2013)を参考に流況曲線を 3 区間に分割して区間ごとに気候・地理条件と流況因子の関係を調べた。3 区間はそれぞれ超過確率 0~30%，超過確率 30~70%，超過確率 70~100%で分割した。本研究では計 144 流域を対象としたので，標本数が 200 の場合の 5%有意水準および 1%有意水準，それぞれ 0.139，0.182 を基に，5%有意水準を超える有意な相関係数が得られた関係に着目して考察した。

3.　結果

3.1.　超過確率 0~30%区間における流量と気候・地理条件の関係

相関解析の結果，超過確率 0~30%の区間における流量 Q_{max}~Q_{30} については日降水量 P との相関が最も強いことが分かった。図-4 に超過確率 5%刻みの降水量 P_{max}~P_{30} と超過確率 5%刻みの流量 Q_{max}~Q_{30} との相関解析結果を示す。本研究では超過確率に関係なく P と Q の関係式を単純に 1 式で示した。1 式で示すことにより流域間の差が見られるが，超過確率ごとに P と Q の関係式を求め

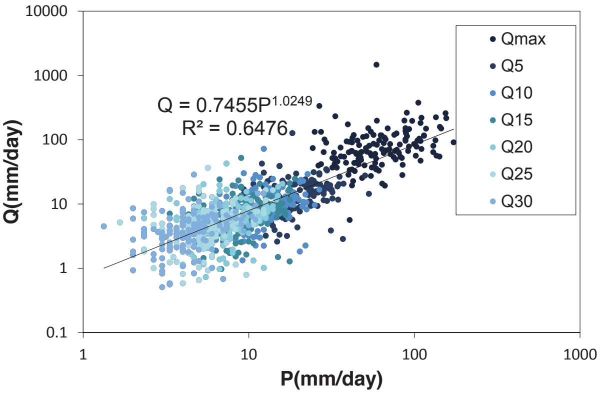

図-4　超過確率 0~30%間の P と Q の関係

るとサンプル数が減り決定係数値 R^2 も小さくなることからここでは1式で示す方が適している可能性がある。以上から日降水量 P と流量 Q の関係は強いことがわかる。また，超過確率0~30%の区間については流況曲線形状を雨況曲線を用いて説明できる可能性があることを示している。

3.2. 超過確率30~70%の区間における流量と気候・地理条件の関係

相関解析の結果，超過確率30~70%の区間における流量 Q_{30}~Q_{70} については火山性岩石，深成岩類との相関があることが分かった。しかし，超過確率30~70%の区間については流量の変化率が低いことから Q_{30} と Q_{70} の2点間を対数軸上で結ぶことで流況曲線形状を再現できる可能性がある。本研究では流況曲線形状の推定に関しては Q_{30} と Q_{70} の2点間を対数軸上で結ぶことによって再現することとした。

以上から，超過確率30~70%の区間の流量 Q_{30}~Q_{70} については火山性岩石，深成岩類との相関が強く，Q_{30} と Q_{70} の2点間を対数軸上で結ぶことによって流況曲線形状を再現できる可能性がある。

3.3. 超過確率70~100%の区間における流量と気候・地理条件の関係

流量 Q_{70}~Q_{100} と火山性岩石 V と灰色土壌 G との相関解析結果を図-5，図-6 にそれぞれ示す。これらの図から火山性岩石と灰色土壌に関しては流量との相関係数が小さく，相関がないように見受けられる。しかし，流量 Q_{70}~Q_{100} までの各流量と火山性岩石 V，灰色土壌 G との相関は強いことから超過確率70~100%の区間の流量 Q に関しては火山性岩石 V と灰色土壌 G との間に相関があるといえる。

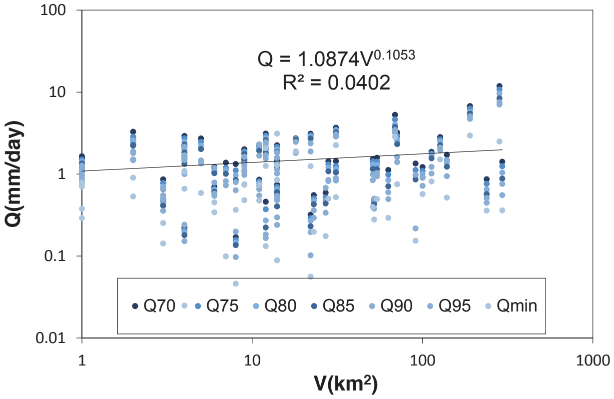

図-5 V と超過確率70~100%間の Q との関係

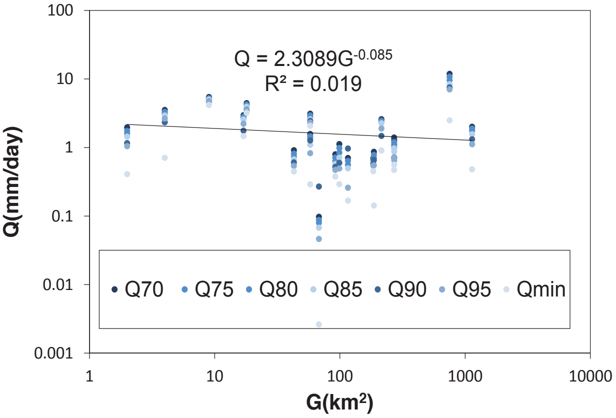

図-6 G と超過確率70~100%間の Q との関係

ここで，先ほど超過確率30~70%の区間について，流量の変化率が低いことから Q_{30} と Q_{70} の2点間を対数軸上で結ぶことで流況曲線形状を再現できる可能性があると述べたが，この区間は流域ごとに流量のばらつきが大きく，また流量の変化率も大きいため超過確率30~70%の区間のように Q_{70}~Q_{100} の2点間を対数軸上で結ぶことで流況曲線形状を再現するのは適さないと考えられる。よって，この区間においては火山性岩石 V，灰色土壌 G と流量 Q との関係式から流況曲線形状を推定するのが適すると考えられる。

また，先ほど超過確率0~30%の区間において日降水量 P と流量 Q の関係式について超過確率に関係なく1式で示したが，上述のようにこの区間は流量の変化率が

大きいため，1式に単純化することはせずに超過確率5%刻みの流量Qごとに式を求め推定を行うこととした。

以上から，超過確率 70~100%の区間の流量Q_{70}~Q_{100}については火山性岩石V，灰色土壌Gとの相関が強く，火山性岩石V，灰色土壌Gから流量Q_{70}~Q_{100}を推定できる可能性があることが分かる。

3.4. 実測値と推定値の比較

解析結果から得られた知見を基に対象流域の実測値から作成した流況曲線と関係式から推定した流量を基に作成した流況曲線との形状の比較，検証を行った。超過確率 0~30%の区間の流量Q_{max}~Q_{30}の推定値は図-4 中の式を用いて各流域のP_{max}~P_{30}から算出した。超過確率 70~100%の区間の流量Q_{70}~Q_{100}の推定値は超過確率 5%刻みごとに火山性岩石V，灰色土壌Gとの関係式を求め，算出した。また，超過確率 30~70%の区間についてはQ_{30}とQ_{70}の 2 点間を対数軸上で結ぶことで形状を再現した。

図-7，図-8，図-9 にそれぞれ今回の対象流域から選出した寺内観測所と岩出観測所と福山観測所の実測値から作成した流況曲線と推定値から作成した流況曲線をそれぞれ示す。

図-7 の寺内観測所については全体を通して，流量の値に差はあるものの形状自体は比較的再現できている。特に超過確率 30~70%の区間は形状をほぼそのまま再現できている。

次に図-8 は実測値と推定値の値が大きく異なってしまっている。これは今回用いた気候･地理条件以外に流量変動に作用してくる要因がこの流域には存在していると考えられる。しかし，形状自体は比較的よく再現できていることが読み取れる。

図-9 については実測値と推定値で形状が大きく異なっている。特に超過確率 30~70%の区間について大きく形状が異なっている。このことからQ_{30}とQ_{70}の推定値が実測値と大きく異なっているため直

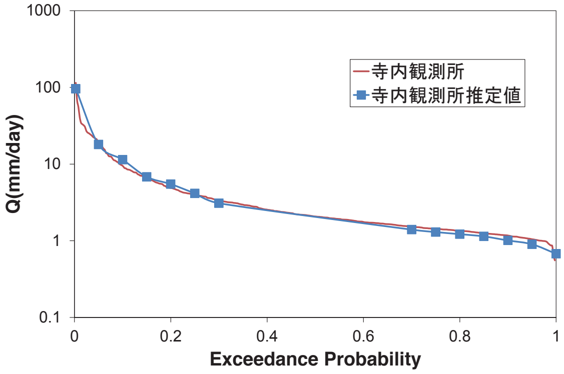

図-7 寺内観測所の形状比較

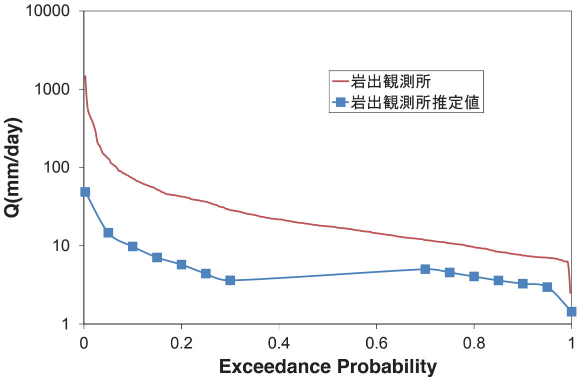

図-8 岩出観測所の形状比較

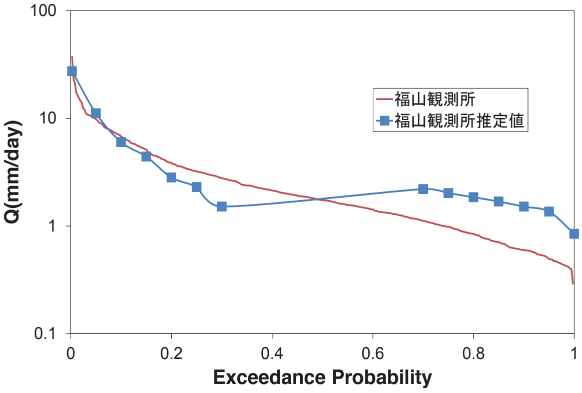

図-9 福山観測所の形状比較

線で結んだ際に再現性が悪くなっているとわかる。福山観測所流域に関しては超過確率 0~30%の区間と超過確率 70~100%の区間について更に細分化して気候・地理条件との解析が必要と考えられる。

4. 考察

図-4 から超過確率 0~30%の区間の流量と日降水量との相関が最も強く，実測値と推定値を用いた流況曲線の形状比較でも形状は比較的再現できていた。小松・横尾 (2013)の研究でもこの区間は雨況曲線から流況曲線の概形を説明できる可能性があるとしている。しかし，図-7，図-8 のように実測値と推定値では流況曲線の形状は比較的再現できていたが，値は異なってしまっていた。これは気候的・地理的多様性を考慮せず，全流域で雨況曲線との同一の関係式から試算を行ったためと考えられる。Mohamoud (2008)はアメリカの中部大西洋沿岸地域を対象として行った研究の中で，超過確率 0~30%の区間における流況因子として $Q_{0.1}$，$Q_{0.5}$，Q_1，Q_5，Q_{10}，Q_{20}，Q_{30} を扱っているが，その中で $Q_{0.1}$~Q_5 への影響については地理条件の方が気候条件に比べて大きいことをモデルによって示している。このことからこの区間の流量についてはさらに超過確率を細分化し，今回用いた地理条件以外の条件も加えて形跡が必要であると考えられる。

次に図-5，図-6 から超過確率 70~100%の区間では火山性岩石と灰色土壌との関係が強く，この区間の流況曲線形状をこの二つの条件を用いて説明できる可能性があると分かった。虫明ら(1981)でも平水量以降の流況因子に対する規定力が大きいのは地質要因であると報告されている。図-7，図-8，図-9 でも流況曲線の形状は比較的再現できている。しかし，どの流域も実測値と推定値は値に差が生じた。また，小松・横尾 (2013), Castellarin *et al.* (2004), Botter *et al.* (2008)は気候・地理条件と流況曲線形状の関係に季節性の影響があるとしていることから，この区間の流量には今回用いなかった季節性及び雨季乾季といった要因が影響を与えていると考えられ，今後はこれらの条件も加えた解析が必要である。

最後に流況曲線形状の推定結果に着目すると，おおむね図-7，図-8 のように比較的形状を再現できているが図-9 のように大きく形状が異なる流域も存在した。これは降雪の有無や無降雨日数等を考慮していないためと考えられ，今後は図-9 のように形状が異なった流域に関してはこれらを加えた気候・地理条件の見直しが必要と考えられる。

5. 結論

本研究では既往研究よりも対象流域を拡大し，流量と気候・地理条件との関係を考察することと，考察結果から流況曲線形状の推定を行うことを目的として，日本の山地流域 144 流域を対象に流量と気候・地理条件との相関解析を行った。得られた結果を以下に示す。

① 超過確率 0~30%の区間では雨況曲線を用いて流況曲線の形状を説明できる可能性があることが分かった。しかし，実測値と推定値の差異については超過確率を細分化し，地理条件も加えた解析が必要である。

② 超過確率 30~70%の区間では Q_{30} と Q_{70} の 2 点間を対数軸上で結ぶことで流況曲線形状を再現できる可能性があることが分かった。

③ 超過確率 70~100%の区間では火山性岩石と灰色土壌との相関が強く，流況曲線の概形を説明できる可能性があることが分かった。今後は実測値と推定値との差異について季節性や雨季乾季といった条件も加えた解析が必要である。

④ 流況曲線形状の推定について形状自体は再現できている流域と大きく形状が異なる流域に分かれてしまった。今後は大きく形状が異なった流域に関しては降雪の有無，無降雨日数等を加えた気候・地理条件の

見直しが必要である。

謝辞

JST/JICA-SATREPS「気候変動に対する水分野の適応策立案・実施支援システムの構築（IMPAC-T）」，東北大学災害科学国際研究所「特定プロジェクト研究（B-18）」，科学研究費補助金（若手研究 B，24760388），科学研究費補助金基盤研究 B，22360192）の成果の一部である．本研究では，国土交通省所管の水文水質データベース，国土数値ダウンロードサービス，気象庁の気象統計情報を活用した。ここに感謝の意を表す。

参考文献

Botter, G., Zanardo, S., Porporato, A., Rodriguez-Iturbe, I., Rinaldo, A. (2008), Ecohydrological model of flow duration curves and annual minima, *Water Resour. Res.*, 44, W08418, doi:10.1029/2008WR006814.

Castellarin, A., Vogel, R. M., Brath, A. (2004), A stochastic index flow model of flow duration curves, *Water Resources Reserch.*, 40, W03104.

Famer, D., Sivapalan, M., Jothityangkoon, C. (2003), 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.*,39,1035, doi: 10.1029/2001 WR000328.

Mohamoud, Y.M. (2008), Prediction of daily flow duration curves and streamflow for ungauged catchments using regional flow duration curves, *Hydrol. Sci. J.*, 53, 706-724.

Sugiyama, H., Vudhivanich, V., Whitaker, A.C., Lorsirirat, K. (2003), Impact of climate on flow regimes of the upper reaches of streams, *Water Resources Systems-Hydrological Risk. Management and Development, IAHS Pub. 281*, 141-147.

Yokoo, Y, Sivapalan, M. (2011), Towards reconstruction of the flow duration curves: development of a conceptual framework with a physical basis, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 2805-2819, doi: 10.5194/hess-15-2805.

小松和，横尾善之 (2013) 日本の流域における気候条件と流況曲線形状の関係に関する検討，土木学論文集 B1(水工学)，Vol.69，481-486.

志水俊夫 (1980), 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, 301, 109-128.

地頭薗隆，竹下敬司 (1987)，山地河川の流況と流域条件の関係　II流域地質が流況に及ぼす影響，鹿児島大学農学部演習林報告，15，61-81.

虫明功臣, 高橋裕, 安藤義久 (1981), 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, 309，51-62.

横尾善之，有働恵子 (2007)，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，373-378.

横尾善之，沖大幹 2010)，流域の気候・地形・土壌・地質・土地利用が河川の流況に与える影響，水工学論文集，第 54 巻，469-474.