24.日本全域河道位数データと河道マスクデータを用いた河川地形の特徴分析

山本　道[1]*・多田　毅[2]・風間　聡[1]

[1]東北大学大学院　工学研究科（〒980-8579宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06）

[2]防衛大学校　建設環境工学科（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）

＊ E-mail: *yamamoto.tao.t8@dc.tohoku.ac.jp*

日本の複数流域を対象に，河道マスクデータから水面及び高水敷を含む河道幅を算出し，河道幅とStrahler河道位数の関係性を調査した．河道の横断線を 10 m 間隔で作成し，河道領域内の測地線長さを算出し，河道位数別に集計した．河道位数が増加するにつれて平均河道幅は増加した一方，Horton地形則のような等比級数的な河道幅の増加は確認されなかった．また，位数別の河道幅の度数分布を調査したところ，その分布はいずれの流域においても高次位数ほど多峰性を示し，低次位数ほど単峰性を示した．これらの結果から治水対策などによる広大な河川区域の確保が高次位数における河道幅の度数分布の多峰性に関連していることが示唆された．

Key Words : *floodplain mask dataset, Horton's law, river width, Strahler stream order*

1. はじめに

河川は流水と土砂移動を伴いながら，河道自身とその周辺地形を形成し，その地形は周辺環境に多大な影響を与えている．ゆえに現代の河川が抱える治水・利水・環境の問題を解決するためには，河川地形を定量的に理解することが非常に重要である．これまで河川地形を理解するために，河川などの流路網の構造を定量化する手段の一つとして河道位数が利用されてきた．河道位数とはHorton (1945) が提唱した手法であり[1]，合流を繰り返す山間部の河道網の流線を分類するためのシステムである．このシステムの導入とともに河道網と流域地形の特徴に現れる関係性を示したことが流域地形を定量的に表現する計量地形学の端緒を開いたといえる．その後Strahler (1952) によりこの分野は一層進展した[2]．StrahlerはHortonの河道位数則を改良し，新たな河道位数の割振方法を定義した．以降Strahler方式の河道位数は広く使用されている．日本においては，藤田らが河道網配列パターンにグラフ理論を適用し，河道網構造を単純な配列とすることにより各配列パターンの生起確率を理論的に求めた[3]．宮本らは河道位数と河川流量[4]や，水温[5]，土地利用・人口[6]，流域面積[7]の関係性を示した．このように河道位数はあらゆる河川とそれに関連する様々な要素を結び付けて議論できる普遍的かつ有用なシステムである．したがって河道位数を用いた河川環境場の議論はあらゆる河川に対応しうる．河川環境の理解の第一歩として，河川環境場の基礎的な特徴量の一つである川幅との関係に着目する．河道位数と川幅の関係性に言及した研究を例示すると，Downing *et al.*(2012) が世界各地の河川における水面幅と河道位数を文献収集及び衛星画像を用いた川幅の計測により整理している[8]．しかし日本においては，河川は堤防や護岸などの河川構造物により区切られた領域であることが多く，現代の河川に関わる諸問題を理解するためには，この河川区域と呼ばれる領域と河道位数を結び付けた議論が必要である．

本研究は日本の複数流域を対象に，筆者らが新しく整備した河道位数と河道マスクデータ[9]から位数別の河道幅を算出し，整理する．そして河道位数と河道幅の関係性を調査する．

2. データセット

筆者らが整備した河道位数と河道マスクデータを使用

した．データ作成の詳細については参考文献[9]に譲るが，ここでは各データセットを概説する．

(1) 河道位数データセット

本データセットはStrahler (1952) の位数理論[2]を基にしている．本来Strahlerの河道位数理論は流路の合流のみを想定したツリー状の山地河道構造を想定しているため，河道の分流や再合流を含むネットワーク状水路網への適用方法は定義されていない．そこで筆者らは便宜上新たにルールを加え，流域を一貫して河道位数を割り振る手法を考案した．以下I)からIII)に本来のStrahlerのルールを，IV)からVI)に筆者らが付加したルールを示す．I) 最上流河道の位数を1次とする．II) 2本の同位数河道が合流すると位数は1つ大きくなる．III) 低位数河道と高位数河道が合流すると合流後の河道は高位数河道と同位数の河道になる．IV) 2本に分流する場合，例えば農業用の取水による分流など本川とそれ以外が水理学的に明確に判別できる場合には，本川河道の位数は維持し，派川の位数は1とする．ただし，大河川の放水路など分流後の規模が本川と同程度であるなど，上流側の位数の性質を本川と同様に引き継ぐ場合には両方に本川の位数を与える．V) 一度分流した河道がそのまま再合流する場合，同位数河道同士の合流であるとしても合流後の位数は増やさない．VI) 勾配が緩やかで流量の少ない1次位数の河道同士の合流の場合位数は増やさない．

上記のルールを適用する河道の流路網データには国土数値情報の河川データを使用した．河道位数を割り振るためには全流路が連続的に接続されている必要あるため，データ作成の都合上流路が不連続になっている箇所を主に手動で修正し，連続的に接続された河道網を確立した．その後流向決定のために河道端点の標高を国土交通省国土地理院の標高APIにより0.1 m 単位の標高に書き換えた．そして上記位数ルールを整備し直した河道網に適用した．河川名（河川コード）が有名か無名かにより本川派川の判別したが，小規模派川にも関わらず有名河川の場合，高位数が小規模水路に伝播してしまうため，適宜河道の無名化を手動で実施した．

(2) 河道マスクデータセット

河道位数が4次以上の河道を対象にデータは作成されている．対象区間は主に実際の管理河川区間と河道位数の空間分布をGIS上において観察し決定されている．河道の領域の定義は水を流下させることを想定して整備されている領域である．したがって，堤防や護岸が存在する河道はその表法肩から堤外地側の領域が該当する．無堤区間や堀込河道区間においては，水の流下痕や周辺標高，周辺の河川構造物を参照して河道領域が決定されている．本データセットは上記の定義を基に，Google Earthを使用して衛星画像における河道領域を目視により判別して河道領域ポリゴンを描画することにより作成された．データの水平精度は河川構造物近傍で±10m以内である．河川構造物に乏しい区間においては，河道判定誤差が拡大するため精度は低下することが確認されている．

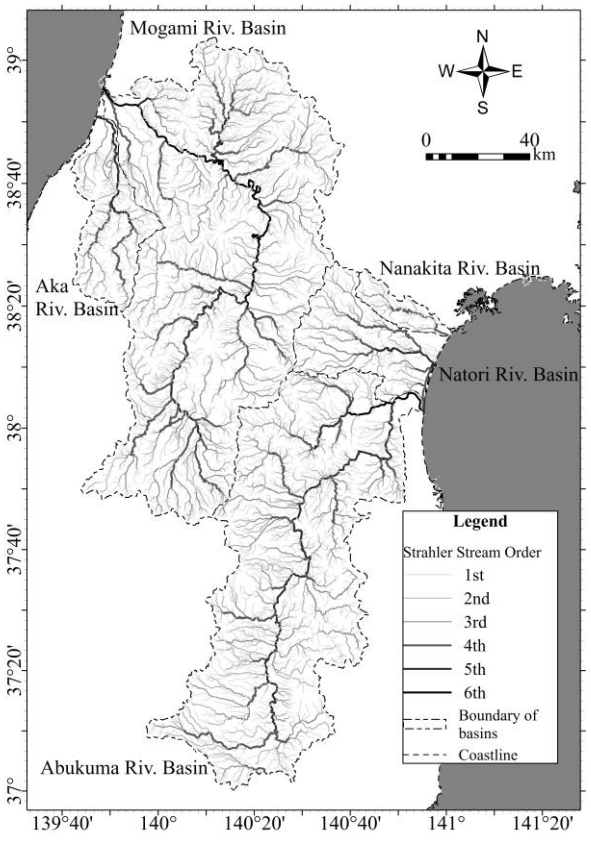


図-1 対象流域図

(3) 対象流域

本研究の対象流域は一級水系の最上川流域，阿武隈川流域，名取川流域，赤川流域と二級水系の七北田川流域である．流域図と河道位数を**図-1**に示す．各流域の最大河道位数は，最上川流域と阿武隈川流域，名取川流域において6次，赤川流域において5次，七北田川流域において4次である．最大位数が異なる流域であることと，流域面積に差異が生じるように対象流域を選択した．

3. 解析手法

河道マスクデータは河道形状ポリゴンを有するベクトルデータである．このポリゴンの中心線の横断線を作成しその測地線長さを計測することにより，河道幅を求めた．使用したソフトウェアは ArcGIS Pro3.0.3 である．

河道幅の算出方法は以下の通りである．ア）河道マスクポリゴンの中心線を「水域ポリゴンの単純化」ツールにより作成する．イ）生成された中心線の修正が必要であれば手作業による線形の修正を実施する．ウ）河道中心線に垂直な横断線を10m間隔で作成する．エ）河道マスクの境界線を用いて横断線を切り抜く．オ）作成した河道横断線の測地線長さを計測する．以上から得られた河道幅を各河道位数区間ごとに集計し整理した．なお河道幅を集計する際にはダムの貯水池とダム堤体直下の区間を除外して集計する．除外したダムを示すと，最上川流域においては寒河江ダム，水ヶ瀞ダム，長井ダム，白川ダム，綱木川ダム，上郷ダム，赤川流域においては月山ダム，八久和ダム，荒沢ダム，阿武隈川流域においては七ヶ宿ダム，摺上川ダム，名取川流域においては釜房ダムが除外された．

4. 結果及び考察

整理した位数別平均河道幅の箱ひげ図を**図-2**に示す．縦軸は対数表示の河道幅である．ほぼ全ての流域において河道位数が増加するにつれて，平均河道幅及び河道幅の中央値が増加する傾向が確認された．河道位数と物理的な次元を持つ地形量との関係性を示す有名な法則として河道長則[1)]と集水面積則[2,10)]があり，それぞれ式(1)，(2)のように書き表される．

$$\overline{L_u} = \overline{L_1} R_l^{u-1} \quad (1)$$

$$\overline{A_u} = \overline{A_1} R_a^{u-1} \quad (2)$$

ここに，$\overline{L_u}$，$\overline{A_u}$はu次位数河道の平均長及び平均集水面積である．また，

$$R_l = \frac{\overline{L_{u+1}}}{\overline{L_u}} \quad (3)$$

$$R_a = \frac{\overline{A_{u+1}}}{\overline{A_u}} \quad (4)$$

はそれぞれ河道長比と集水面積比と呼ばれ，同一流域においては，全ての位数についてほぼ一定値を取ることが確かめられている．このように位数別の河道長と集水面積は，河道位数が増加するとともに等比級数的に増加する．Leopold and Miller[11)]は観測流域の位数別平均河道幅が河道長則や集水面積則のように等比級数的に増加することを示した．式(1)や式(2)のような等比級数的増加傾向を平均河道幅が示す場合，各位数の平均河道幅の対数は直線的に増加するはずである．しかし本研究においては特に6次位数河道を持つ最上川流域と阿武隈川流域においては対数軸の河道幅プロットは直線的に増加せず，平均河道幅が等比級数的に増加する様子を観察できなかった．また，各位数の平均河道幅比を式(3)や式(4)のように算出したところ，最上川流域の位数6次と位数5次の比は1.51に対し，位数5次と位数4次の比は2.13となり，平均河道幅比に差異が生じる．同様に阿武隈川流域においても，位数6次と位数5次の比が1.80であるのに対し，位数5次と位数4次の比が2.91となり，こちらも同様に平均河道幅比は一定値を取らない．名取川流域においては6次位数河道区間が極端に短いため，位数6次と位数5次の

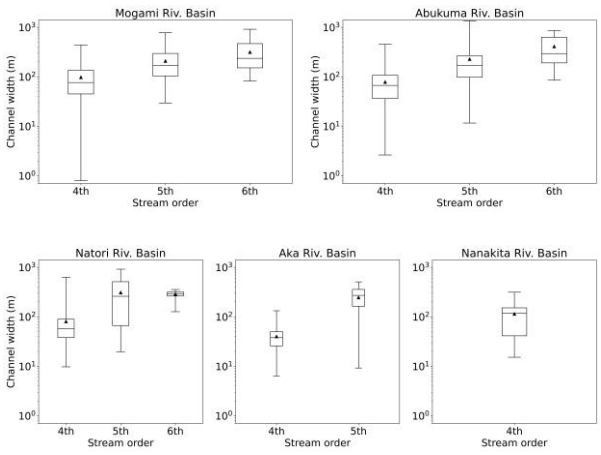


図-2 位数別平均河道幅
図中の三角は平均値を示す．

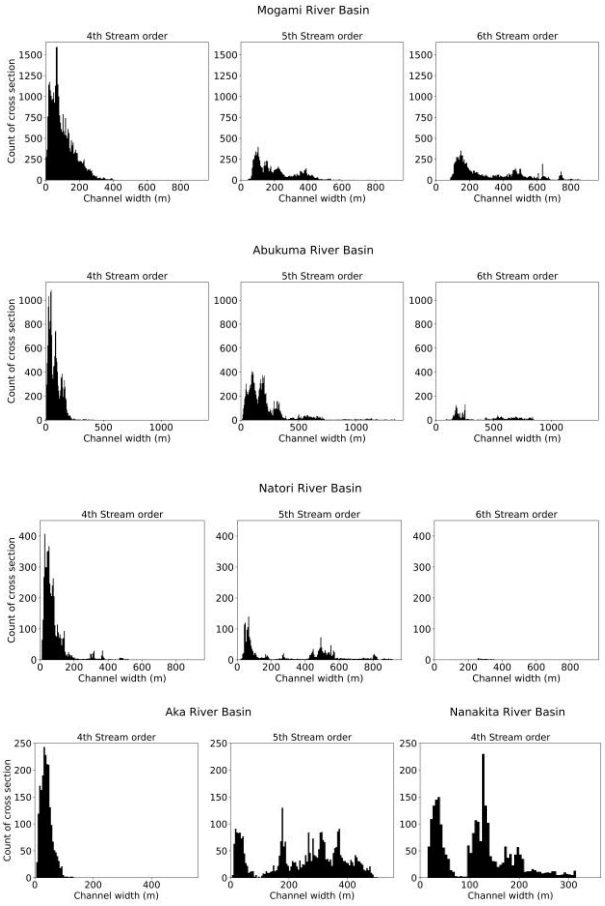


図-3 河道位数別河道幅のヒストグラム
河道幅の階級は5m刻みである．

比は0.93に対し，位数5次と位数4次の比は3.84となり，こちらも平均河道幅比が一定値にならない．

次に，河道位数別河道幅の度数分布を確認するため，河道幅のヒストグラムを**図-3**に示す．高次位数河道ほど河道幅の度数分布の幅が拡大する．これは高次位数ほど河道長が延長し，かつ集水面積が増加すると，一本の河道における流量の幅が拡大する．したがって，河道幅の度数分布も裾が広がる傾向になるためだと予想できる．また，各流域で共通して，最大河道位数の河道幅は複数のピークを持つ多峰性を示した．河道位数が低次に移行するにつれてピークが一つの単峰性を示した．これは高次位数になるほど河道は勾配の緩い平野を流下するようになるため，人為的な築堤等の河道整正により，河道幅を改変されるために，歪な河道幅の度数分布になると推察する．このことを検証するために多峰性が顕著な最上川の6次位数河道のうちヒストグラムのピークに該当する河道幅120 mから170 m及び455 mから505 mの河道幅を有する横断面をそれぞれ白線と黒線でマップに表示した（**図-4**）．黒線で示した455 mから505 mの河道幅横断面は下流と**図-4**中の③と④で示した区間を中心に存在し，それらに挟まれる狭窄区間においてもわずかに確認できる．下流に近づくにつれて，流量は増加するため，河道も徐々に拡幅されると考えられるが，**図-4**中の①から④に示した区間においては，水面幅に比べて，非常に大きく高水敷を確保し築堤されている．これらの区間は大きく蛇行したり，支川との合流点であったり，勾配の緩くなる地点であるため，氾濫リスクの高い地点だったと推察できる．こうした地点の治水対策の結果，河川区域が拡大したため，河道幅の度数分布も単峰性から多峰性に遷移したと考えられる．

また，Downing *et al.*(2012) は世界各地の河川の水面幅と河道位数データを整理し，式 (5) のような位数別水面幅の推定式を示した[8]．

$$w = 0.542 \cdot e^{0.824u} \qquad (5)$$

ここに，w：水面幅の中央値(m)，u：河道位数である．この推定式から推定される水面幅の中央値は4次位数河道において14.6 m，5次位数河道において33.4 m，6次位数河道において76.1 m である．これらの推定水面幅は本研究の位数別河道幅の度数分布において概ね最も狭い河道幅側の山に含まれる．式 (5) は水面幅を推定しているため，本研究において算出した河道幅より当然ながら小さい河道幅を示す．しかしながらDowning *et al.* の結果は自然状態の河川が有する河道幅を推定したものと考えることができ，本研究において観察された河道幅ヒストグラムの複数のピークは人為的な河道域の拡幅により出現したものだと考えることが出来る．

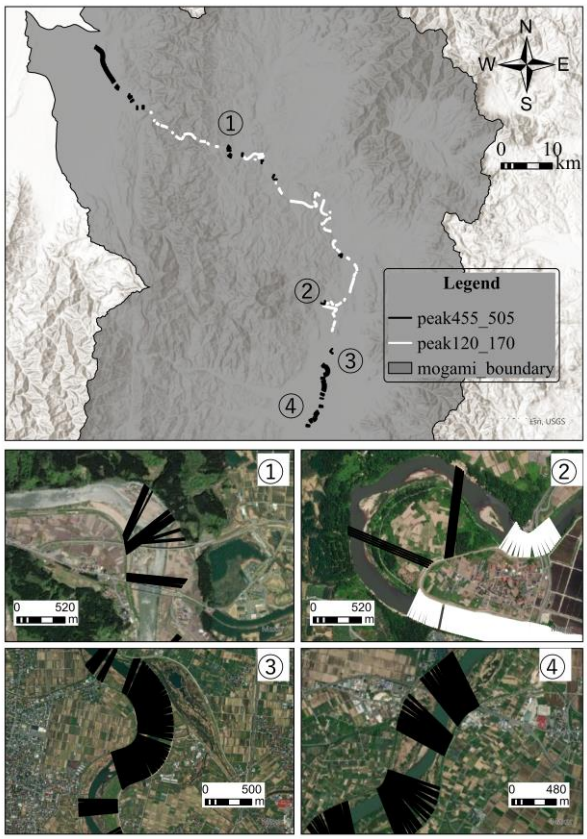


図-4 最上川流域における6次位数河道の河道幅度数分布のピーク部分に存在する横断面の空間分布と各地点の衛星画像

5. 結論

本研究は筆者らが整備した日本全域のStrahler河道位数データ及び河道マスクデータを用いて，河道位数と河道幅の関係性について調査した．位数別河道幅は位数が増加するとともに増加する傾向を示したが，一方で既往研究により示されていた等比級数的な増加傾向を必ずしも示さなかった．また，位数別に河道幅のヒストグラムを描画したところ，各流域の最大位数の河道幅は多峰性を示した．低次位数になるほど，ヒストグラムは単峰性へと変化することが確認された．最上川の6次位数河道の観察から，河道幅の度数分布に見られる多峰性は河川区域を拡幅する治水工事による可能性が高いことが明らかにされた．

これまであらゆる流域の河川区域を精度よく把握することは容易ではなかったが，河道マスクデータの整備により達成された．また，河道位数という河川流域地形を普遍的かつ定量的に評価できる指標を導入したことにより，あらゆる河川の河道幅を比較することが可能になった．本成果は計画された治水安全度を達成するために，治水工事が自然に形成された河川地形を改変した程度を示唆している．

謝辞：本研究は，科学研究費補助金（20H00256，代表：風間聡）及び，JSPS 科研費 JP23KJ0183，（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF20S11813），の支援を受け実施されました．ここに記して感謝の意を表します.

REFERENCES

1) Horton, R. E.: Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology, *Bulletin of the Geological Society of America*, 56, pp.275-370, 1945.
2) Strahler, A. N.: Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography, *Bulletin of the Geological Society of America,* 63, pp.1117-1142, 1952.
3) 藤田睦博：流域地形構造とその統計則に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，1975 巻 234 号，pp.73-82，1975．[Fujita, M.: Basic Study on the Geometric Structure in River Basins and Its Statistical Laws, *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers. Japan Society of Civil Engineers*, pp. 73-82, 1975.]
4) 宮本仁志，橋本翼，道奥康治：河道リンク/マグニチュードと流域面積・河川流量の関係，水工学論文集，54 巻，pp.1201-1206，2010．[Miyamoto, H.,Hashimoto, T. and Michioku, K.: Relationships of Stream Link / Magnitude with Drainage Area and River Discharge, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, Vol.54, pp.1201-1206, 2010.]
5) 宮本仁志，前羽洋，中山和也，道奥康治：日射遮蔽と流入水温の影響を補正した河川水温ネットワークモデルの精緻化，土木学会論文集 B1 (水工学)，67 巻，4 号，I_1243-I_1248，2011．[Miyamoto, H., Maeba, H., Nakayama, K. and Michioku, K.: Refinement of the Stream Temperature Network Model with Corrections for Solar Shadings and Inflow Temperatures, *Journal of Japan Society of Civil Engineering, Ser.B1(Hydraulic Engineering)*, Vol.67, No.4, pp.I_1243-I_1248, 2011.]
6) Miyamoto, H., Hashimoto, T. and Michioku, K.: Basin-wide distribution of land use and human population: stream order modeling and river basin classification in Japan, *Environmental Management*, 47, 5, pp.885-898, 2011.
7) 宮本仁志，橋本翼，道奥康治：流域面積の累積分布曲線，土木学会論文集 B1 (水工学)，67 巻，4 号，I_649-I_654，2011．[Miyamoto, H., Hashimoto, T. and Michioku K.: The Cumulative Distribution Curve for Drainage Areas, *Journal of Japan Society of Civil Engineering, Ser.B1(Hydraulic Engineering)*, Vol.67, No.4, pp.I_649-I_654, 2011.]
8) Downing, J. A., Cole, J. J., Duarte, C. M., Middelburg, J. J., Melack, J. M., Prairie, Y.T., Kortelainen, P., Striegl, R. G., McDowell, W.H. and Tranvik, L. J.: Global abundance and size distribution of streams and rivers, *Inland waters*, 2, 4, pp.229-236, 2012.
9) 山本道，多田毅，風間聡：日本全域河道位数データと河道マスクデータの整備，水文・水資源学会誌（印刷中）．[Yamamoto, T., Tada, T. and Kazama, S.: Datasets of Strahler Stream Order and Flood Plain Masks in Japan, *Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources*, (in print).]
10) Schumm; S. A.: Evolution of Drainage Systems and Slopes in Badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Bulletin of the Geological Society of America*, 67, 5, pp.597–646, 1956.
11) Leopold, L. B., and Miller, J. P.: Ephemeral streams: Hydraulic factors and their relation to the drainage net, Vol. 282, US Government Printing Office, pp.23, 1956.