

# 新しい面積—高度比曲線の提案と それを用いた河川流域特徴の抽出可能性評価 Proposal of new hypsometric curves and evaluation of the possibility of extracting watershed characteristics using it

都市人間環境学専攻 阿部航

Department of Civil and Environmental Engineering / Wataru ABE

## 1. はじめに

河川流域地形は降水、河川の浸食、運搬、堆積といった作用、河川変動、地形変化など複雑な水文地形要素の集合体であり、全ての河川流域が唯一無二の性質を持っている。したがって、近年の激甚化、局所化している豪雨災害を鑑みると、河川流域の現状や水害の可能性などを流域単位で正確に把握し河川計画に反映させることが、水資源問題の軽減に繋がると言える。

流域を普遍的に特徴づける要素として、細長比や形状比といった指標が用いられており、その一つに河川流域内の標高と起伏量に着目した面積—高度関係がある。面積—高度関係は古くから研究されており<sup>1)2)</sup>、近年では多岐にわたって流域の様々な問題に応用されている。また、面積—高度関係は標高データから容易に求められる指標である。標高データは地球規模で整備されており、無償で入手できることから、東南アジア域においてもヒソメトリック分析を利用した地形解析が行われている<sup>4)</sup>。一方で、既往研究の多くはデータを基礎とした分析であり、面積—高度曲線の一般化への議論は進んでいないのが実情である。

面積—高度関係を一般化することで流域の地形的な特徴を分析することは、河川流域の状況を俯瞰的に考察する材料となる。結果として、複雑な地形要素の集合体であり独自の特徴を持っている河川流域に対し、それぞれの固有の地形的特徴を把握することへと繋がる。したがって、流域ごとの河川計画を作成することが可能となり、洪水などの水災害のみならず干ばつなどの水資源問題の軽減の一助にもなると考えられる。

以上を鑑みて、本研究では日本の109一級水系流域の面積—高度比曲線を作成し、モデル関数による面積—高度比曲線の最適化を行った。また、この曲線を利用した流域の地形的特徴の分類の可能性を評価した。

## 2. 使用データ

日本の109一級水系の流域界、土地利用、表層地層のデータ、500 mメッシュおよび1,000 mメッシュの標高データは、国土交通省から公開されている国土数値情報を用いた。5 mメッシュの標高データについては同じく

国土交通省から公開されている数値地図（5 mメッシュ）を用いた。また、流域面積や幹川流路延長、河川長のデータは国土交通省の河川データブック2021に掲載されているものを利用した。

## 3. 面積—高度曲線

面積—高度曲線とはある領域における標高の累積分布曲線のことであり、任意の高度 $h$ を縦軸、任意の高度 $h$ 以上の地域の面積 $a$ を横軸に取った曲線である。

本研究では、日本の109の一級水系流域を対象に、5 mメッシュ標高データを用いて各流域の高度分布を作成し、流域を高度50 mごとに区切り、各高度帯の面積を求めて累加値を曲線化することで、各流域の面積—高度曲線を作成した。図-1は日本の109一級水系流域の面積—高度曲線である。この図では個々の流域の特徴は明瞭であるが、面積や高度のスケールが異なる流域間を比較することは難しい。

次に、面積—高度曲線を作成する際の標高データの解像度を変化させた際に曲線がどう変化するかを分析した。まず、109一級水系流域を対象に、5 mメッシュの標高データを用いた面積—高度曲線（以下、5 mメッシュ曲線）に加え、500 mメッシュの標高データを用いた面積—高度曲線（以下、500 mメッシュ曲線）、1,000 mメッシュの標高データを用いた面積—高度曲線（以下、

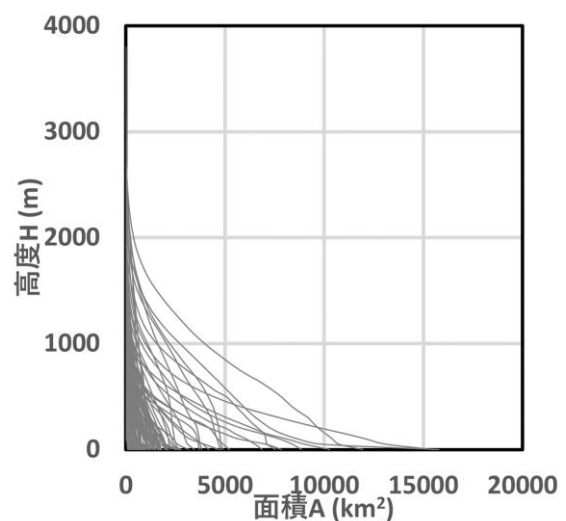


図-1 109一級水系流域の面積—高度曲線

1,000 mメッシュ曲線)の3本の曲線を作成した。この際、流域を区切る高度幅は50 mで統一した。次に $h = 10$ の時の5 mメッシュ曲線の $a$ である $a_{5(h=10)}$ 、500 mメッシュ曲線の $a$ である $a_{500(h=10)}$ 、1,000 mメッシュ曲線の $a$ である $a_{1000(h=10)}$ を求めた。そして5 mメッシュ曲線から500 mメッシュ曲線への $a$ の変化割合 $r_{5 \rightarrow 500(h=10)}$ 、5 mメッシュ曲線から1,000 mメッシュ曲線への $a$ の変化割合 $r_{5 \rightarrow 1000(h=10)}$ を以下の(1)式から求めた。

$$r_{5 \rightarrow 500(h=10)} = \frac{a_{500(h=10)} - a_{5(h=10)}}{a_{5(h=10)}} \times 100$$

$$r_{5 \rightarrow 1000(h=10)} = \frac{a_{1000(h=10)} - a_{5(h=10)}}{a_{5(h=10)}} \times 100$$

以上の操作を $\Delta h = 10$  mとし、 $h$ の値を10 m間隔で増加させて2種類の変化割合を求めた。これらの変化(1)の個数は流域の高低差により変化するた、 $r_{5 \rightarrow 500(h=10)}$ 、 $r_{5 \rightarrow 500(h=20)}$ 、 $r_{5 \rightarrow 500(h=30)}$ ・・・の中央値 $R_{5 \rightarrow 500}$ と、 $r_{5 \rightarrow 1000(h=10)}$ 、 $r_{5 \rightarrow 1000(h=20)}$ 、 $r_{5 \rightarrow 1000(h=30)}$ ・・・の中央値 $R_{5 \rightarrow 1000}$ を流域の代表値として採用した。

図-2は各流域の $R_{5 \rightarrow 500}$ と $R_{5 \rightarrow 1000}$ の分布を散布図として表している。標高データを500 mメッシュに変化させた場合、全ての流域で面積の変化率は10%以下である。一方で、標高データを5 mメッシュから1,000 mメッシュに変化させた場合、半数程度の流域で面積の変化率が20%を超えている。特に、土器川流域は68%、遠賀川流域は40%と非常に大きく変化している。したがって、面積—高度曲線を作成する際には500 mメッシュよりも細かいメッシュで作成する必要があることがわかる。

続いて、面積—高度曲線を作成する際の高度の階級幅を変化させた際に曲線がどのように変化するかを分

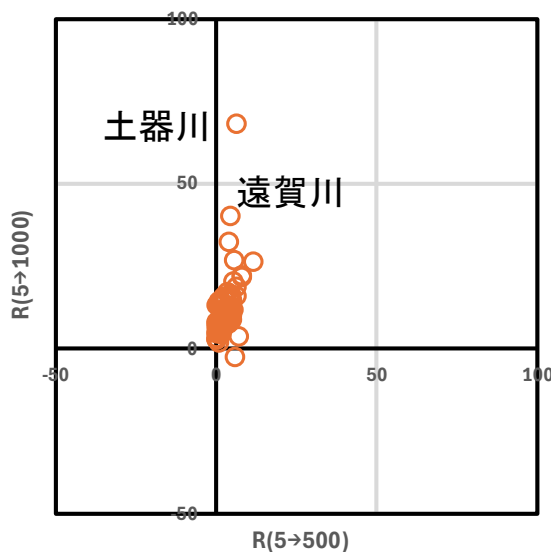


図-2 各流域の $R(5 \rightarrow 500)$ と $R(5 \rightarrow 1000)$ の分布

析した。まず、109一級水系流域を対象に5 mメッシュの標高データを用いて、流域を高度50 mごとに区切った面積—高度曲線(以下、50 m幅曲線)に加え、高度100 mごとに区切った面積—高度曲線(以下、100 m幅曲線)、高度200 mごとに区切った面積—高度曲線(以下、200 m幅曲線)の3本の曲線を作成した。次に $h = 10$ の時の50 m幅曲線の $a$ である $a_{50(h=10)}$ 、100 m幅曲線の $a$ である $a_{100(h=10)}$ 、200 m幅曲線の $a$ である $a_{200(h=10)}$ を求めた。そして50 m幅曲線から100 m幅曲線への $a$ の変化割合 $r_{50 \rightarrow 100(h=10)}$ 、50 m幅曲線から200 m幅曲線への $a$ の変化割合 $r_{50 \rightarrow 200(h=10)}$ を以下の(2)式から求めた。

$$r_{50 \rightarrow 100(h=10)} = \frac{a_{100(h=10)} - a_{50(h=10)}}{a_{50(h=10)}} \times 100$$

$$r_{50 \rightarrow 200(h=10)} = \frac{a_{200(h=10)} - a_{50(h=10)}}{a_{50(h=10)}} \times 100$$

以上の操作を $\Delta h = 10$  mとし、 $h$ の値を10 m間隔で増加させて2種類の変化割合を求めた。これらの変化(2)の個数は流域の高低差により変化するた、 $r_{50 \rightarrow 100(h=10)}$ 、 $r_{50 \rightarrow 100(h=20)}$ 、 $r_{50 \rightarrow 100(h=30)}$ ・・・の中央値 $R_{50 \rightarrow 100}$ と、 $r_{50 \rightarrow 200(h=10)}$ 、 $r_{50 \rightarrow 200(h=20)}$ 、 $r_{50 \rightarrow 200(h=30)}$ ・・・の中央値 $R_{50 \rightarrow 200}$ を流域の代表値として採用した。

図-3は各流域の $R_{50 \rightarrow 100}$ と $R_{50 \rightarrow 200}$ の分布を散布図として表している。全体として、階級幅を大きくするほど面積が大きくなることわかる。菊川と本明川は他の流域と比べて面積の変化割合が大きくなった。これは留萌川流域の最高標高が750 m、菊川の最高標高が500 mと、流域内の標高差が比較的小さく、面積—高度曲線のポイント数が少ないことに因ると考えられる。したがって、面積—高度曲線を作成する際、ほとんどの流

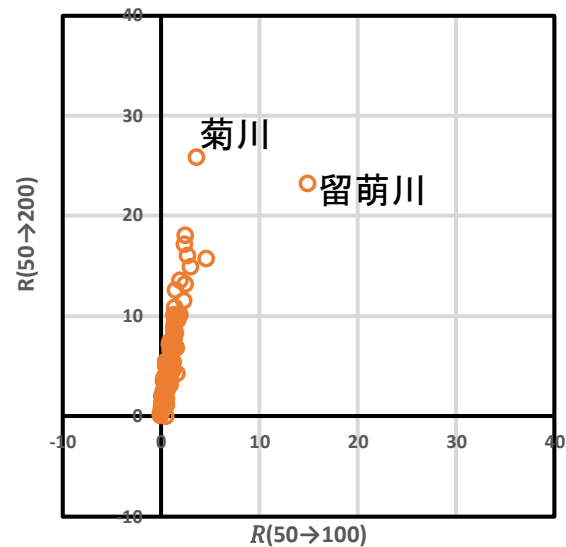


図-3 各流域の $R(50 \rightarrow 100)$ と $R(50 \rightarrow 200)$ の分布

域は階級幅を大きく取っても問題はないが、流域内の標高差概ね1,000m以下の流域は階級幅を細かく取る必要があることがわかる。

#### 4. 面積—高度比曲線

先述の通り、面積—高度曲線では個々の流域の地形を捉えることができる一方で、面積や高度のスケールが異なる流域間の比較には不向きである。

そこで、本研究では109一級水系の面積—高度比曲線を作成した。面積—高度比曲線は、面積—高度曲線の縦軸である任意の高度 $h$ を流域内の高低差 $H$ で割った $h/H$ を縦軸に、面積—高度曲線の横軸である任意の高度 $h$ 以上の地域の面積 $a$ を流域面積 $A$ で割った $a/A$ を横軸に取った曲線であり、面積—高度曲線を正規化した曲線である。図-4は109一級水系流域の面積—高度比曲線である。面積—高度比曲線を用いることで、流域面積や高低差のスケールが異なる流域間を、曲線形によって比較することができる。

#### 5. 面積—高度（比）曲線の最適化

面積—高度曲線はImamura<sup>9)</sup>によって初めて提唱され、Strahler<sup>6)</sup>が異なる面積—高度曲線に適合するように(3)式の曲線を提案した。

$$\left(\frac{h}{H}\right) = \left(\frac{d_0 - \frac{a}{A} \cdot a_0}{\frac{a}{A} \cdot d_0 - a_0}\right)^z$$

この式では $a_0$ 、 $d_0$ 、 $z$ の3つのパラメータが流域固有の値として用いられる。面積—高度比曲線につ (3) ; 高山<sup>7)</sup>や手計・林<sup>8)</sup>などがモデル関数による定式化を試みている。本研究では、109一級水系の面積—高度比曲線に対して、次の(4)式のモデル関数を提案し、非線形最

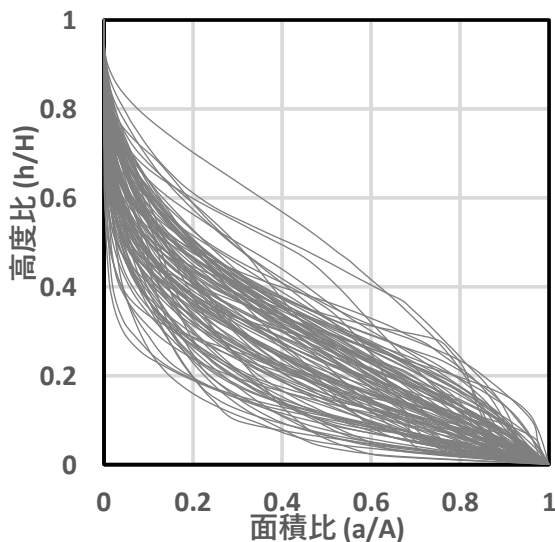


図-4 109一級水系流域の面積—高度比曲線

小二乗法の1つであるLevenberg-Marquardt法<sup>9)</sup>を用いて $s \sim w$ 、 $k \sim o$ の計10種類のパラメータを同定した。

$$\left(\frac{h}{H}\right) = se^{k\left(\frac{a}{A}\right)} + te^{l\left(\frac{a}{A}\right)} + ue^{m\left(\frac{a}{A}\right)} + ve^{n\left(\frac{a}{A}\right)} + we^{o\left(\frac{a}{A}\right)}$$

図-5は(2)式による最適化の決定係数の分布を空間的に表している。全体の80%以上の流域で決定係数が (4) ; 上回っており、このモデル関数により面積—高度比曲線を精度よく最適化できることがわかった。

#### 6. クラスタ分析

次に、(2)式のモデル関数による最適化で求められた10個のパラメータにより、流域の地形的な特徴を表現できるかを確認するために、クラスタ分析を行った。クラスタ分類の手法として、階層クラスタ法を用い、クラスタ数はエルボー法により5と決定した。まず、5章で各流域に対して同定した10個のパラメータによりクラスタ分析を行った。次に、各流域の地形的な情報として、表-6に示す12項目、計45種類の指標を収集し、これらのうちいくつかを用いてクラスタ分析を行い、パラメータによるクラスタ分析の結果に近い結果が得られる組み合わせを求めた。結果として、流域面積、幹川流路延長、河川延長、最低標高、最高標高、最大標高差、河川密度、表層地質の8項目、計24種類の指標を用いたクラスタ分析の結果が、パラメータによる分類と最も近い結果となった。

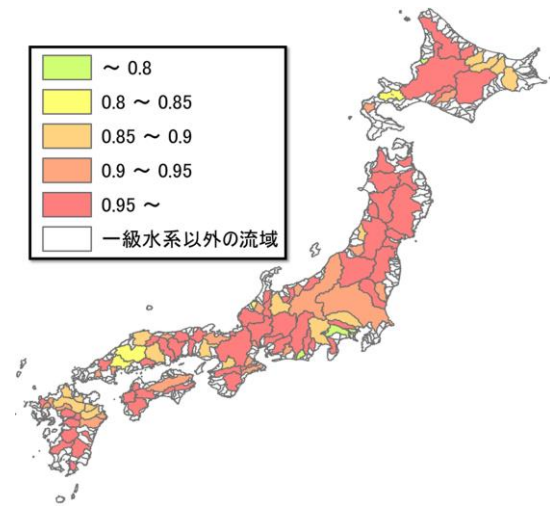


図-5 (2)式による最適化の決定係数の空間分布

流域面積	幹川流路延長	河川延長	最高標高
最低標高	最大標高差	表層地質	土地利用
流域平均勾配	流域平均幅	形状係数	河川密度

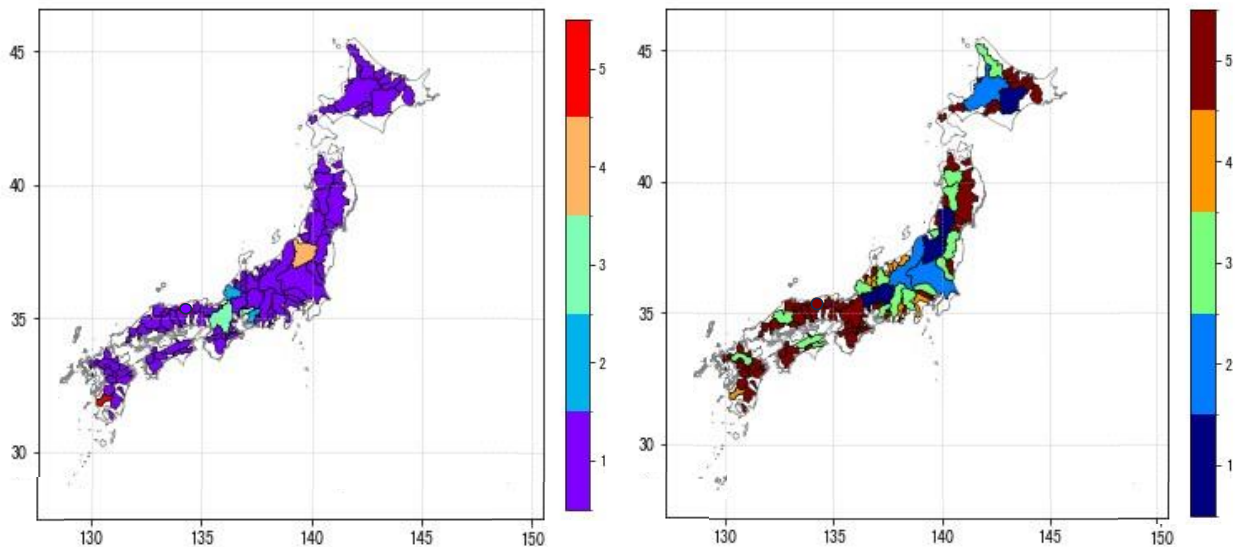


図-7 クラスタ分析の結果を空間的に示した図 (左図：パラメータ，右図：地形的な情報)

図-7はクラスタ分析の結果を空間的に示している。左図が(2)式のモデル関数のパラメータによる分析結果、右図が8項目の地形的な情報による分析結果である。モデル関数のパラメータによる分析では、クラスター1に川内川，クラスター2に阿賀野川，クラスター3に淀川と庄内川，クラスター4に矢作川と九頭竜川，クラスター5にその他の103河川が分類された。これは川内川の $t$ が38,641，阿賀野川の $n$ が10,891と，他の流域よりも大きな値を取ったことに因ると考えられる。一方，地形的な情報による分析では，クラスター1に荒川など78河川，クラスター2に石狩川，利根川，信濃川の3河川，クラスター3に天塩川など12河川，クラスター4に十勝川など5河川，クラスター5に相模川など11河川が分類された。

両者の分析結果を比較すると，淀川と庄内川，矢作川と九頭竜川はどちらの分類においても同じクラスターに分類されている。したがって，これらの4流域においてはモデル関数のパラメータにより地形的な特徴を表せていることがわかった。

## 7. まとめ

本研究では，日本の109一級水系流域を対象に面積—高度比曲線を作成し，モデル関数による面積—高度比曲線の最適化を行った。また，この曲線を利用した流域の地形的特徴の分類の可能性を評価した。結果として得られた主要な知見を以下に列挙する。

- 1) 面積—高度比曲線を作成する際，標高データのメッシュサイズは500m以下にする必要があること。
- 2) 面積—高度比曲線を作成する際，流域内の高低差が小さい流域においては高度の階級幅は小さく取る必要があること。
- 3) 指数関数型のモデル関数を用いて最適化を行うこ

とで一級水系のうち85%以上の流域で決定係数が0.85を上回り，面積—高度比曲線を精度よく再現できること。

- 4) モデル関数のパラメータを用いることで一部流域の地形的特徴を抽出できること。

## 参考文献

- 1) 山中大地：DEMを用いた地形計測による山地の流域分類の試み，地理学評論，71A-3，pp.169-186，1998。
- 2) 太田岳洋，八戸昭一：数値標高モデルによる地形計測の現状と応用例，応用地質，46(6)，pp.347-360，2006。
- 3) 木内信蔵：火山のヒブソグラフ曲線，地理学評論，11，pp. 688-702，1935。
- 4) Liem, N.V., Dat, N.P., Dieu, B.T., Phai, V.V., Trinh, P.T., Vinh, H.Q., Phong, T.V.: Assessment of geomorphic processes and active tectonics in Con Voi mountain range area (Northern Vietnam) using the hypsometric curve analysis method, *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 38(2), pp.202-216, 2016。
- 5) Imamura, G.: Past glaciers and the present topography of the Japanese Alps, *Science Reports of Tokyo Bunrika Daigaku, Sct. C*, 2(7), pp. 1-61, 1937。
- 6) Strahler, A. N.: Hypsometric (Area-altitude) analysis of erosional topography, *Bull. G.S.A.*, 63, pp. 1117-1142, 1952。
- 7) 高山茂美：河川地形，pp.9-11，共立出版，1974。
- 8) 手計太一，林義晃：北陸地方の1級河川における面積—高度比曲線，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol. 69, I-133, pp. 265-266, 2014。
- 9) Levenberg, K: A method for the solution of certain non-linear problems in least squares, *Quarterly of Applied Mathematics*, pp.164-168, 1944。