

# 中小河川等における発電ポテンシャルの見積り方法について

## － 水文学タンクモデルの武儀川への適用 －

河村 隆雄

### Estimation Method of Hydraulic Potential with Small Rivers

#### - Application of Hydrologic Tank Model to Mugi River -

Takao KAWAMURA

**あらまし** エネルギー資源の再生可能エネルギー化の重要性が叫ばれる中、岐阜県下で最も豊富といわれる水力エネルギーの利用を促進するために、中小河川の小水力発電ポテンシャルの簡便な評価方法の開発を目的として、洪水予測などに利用される直列タンクモデルを使用して河川の流況曲線を降水量から推定することを試みた。この手法に基づいて実際の武儀川の流況曲線との比較からタンクモデルの係数を調節したところ、本手法は小河川の発電ポテンシャルの推定に利用可能であると判断された。ただし短時間の流量変化の再現までは難しい。

**キーワード** 小水力発電、発電ポテンシャル、直列タンクモデル、流況曲線

## 1. はじめに

化石エネルギー資源の枯渇や地球温暖化に伴う環境破壊などのエネルギー問題への対応策として、エネルギー資源を化石燃料から太陽光や水力、風力、バイオマスなど再生可能エネルギーへの切替えの必要が叫ばれている。これらはエネルギー資源の国産化、地産地消に繋がり、国や地域経済の安定化に有効である。しかし現状では太陽光発電を除いて採算性の判断が難しく、普及ははかばかしくない。これに対処するにはこれら再生可能エネルギーのポテンシャル評価技術を開発する必要がある。

既に環境省では、平成20年度から23年度にかけて再生可能エネルギー導入ポテンシャルの調査を行い、結果をホームページ等に公開している<sup>[1~3]</sup>。ただし100kW未満はひと括りにされるなど、一般市民に再生可能エネルギーによる電力ポテンシャル活用のインセンティブを引き起こすほどきめ細かいものにはなっていない。

岐阜県下に幅広く存在する主な再生可能エネルギーとして、太陽光、水力、バイオマス、そして地熱が挙げられる。中でも水力の賦存量は全国一位とされている。しかし中小の河川について、小水力発電のエネルギーポテンシャル算出に関わる具体的データは乏しい。

岐阜県では平成23年から24年にかけて、1kW以上の出力が見込まれる635箇所の農業用水について水力ポテンシャルの調査が行われ、その結果に基づき推定出力20kW以上の48箇所について地元の意向が調査された。しかし実

施に動き始めた所は大きな出力の見込める数カ所であった。これは、設置場所ごとに水車の仕様が異なることや、関連施設の建設、維持管理などの費用を含めるとコストがかさむと判断されたことが原因とされている。

県下の中小河川においても発電可能な地点は多数存在すると予想されるが、これについて年間の流量データもそろっておらず、発電ポテンシャルの判定に多大の労力と時間を要し、発電設備設置への決断を妨げる要因となっている。そこで、県内各地について季節ごとの需要に応じたきめ細かな発電ポテンシャルの評価を迅速に行う手法の開発が期待される。これは小水力発電施設の設置個所の増加にも繋がり、設備および設置費用や管理運営コストを低減させる方策の一つになると考えられる。

近年、洪水などの水災害予防の観点から、水文学に則り、その地域の雨量に基づいて河川等の流量を予測する手法が発達している。そこで本報告では、中小河川の持つ小水力発電ポテンシャルの分布を市町村レベルよりも小さな空間スケールで明らかにするために、中小河川の流量の予測にこの手法を適用することを試みた。

## 2. 小水力発電ポテンシャルの評価方法

### 2.1 水力の発電ポテンシャル

水力発電のポテンシャルは、水車設置個所における河川もしくは用水の有効落差 $H$ [m]と流量 $Q$ [m<sup>3</sup>/s]から次式によって計算される。

$$P = \eta \rho g Q H \text{ [W]} \quad (1)$$

ただし、 $\rho$ は水の密度、 $g$ は重力加速度、 $\eta$ は発電施設の総合効率である。このように水力発電ポテンシャルは主に流量と有効落差から求めることができる。有効落差は実落差(水源の水面と水車からの流出水面の高度差)から、損失水頭(水の流動に伴うエネルギー損失を水位に換算したもの)を差引いたものである。実落差は地形図から得られるが、損失水頭は導水路の長さや形状などによって決まるものであり、ここでは損失水頭は考慮せず、有効落差は実落差に等しいとする。

流量については、既に計測データがある事例は少なく、新たに計測が必要な場合が多い。しかし発電ポテンシャルを評価するには数年から10数年にわたる継続的測定が必要であり、また一般に計測に手間がかかるため実施は容易でない。そこで本報告では、比較的入手の容易な地区近隣の雨量から河川等の流量を推定する方法を提案する。

### 2.2 流況曲線と発電ポテンシャル

河川の流量は日々変化するが、水車の運転可能な最大流量を超える流量、同じく最小流量未満の流量では発電できない。また、水車が効率よく動作する流量の範囲は、水車の設計点流量の両側のあまり広くない範囲に限られる。そこで水源に適した水車を選定するために、また年間の水力発電ポテンシャルを評価するために、水源の年間の流量分布を調べておく必要がある。これを見積もる道具として河川の流況曲線がある。

流況曲線とは、図1に示すように、1年間の日流量の観測値を順位付けし、縦軸に日流量、横軸に順位をとって表示したものである。この流況曲線において、水車の許容最大流量以上の領域(右上り斜線部)および、運転可能な最小流量より右側の領域(右下り斜線部)を切捨てた面積 a-b-c-d-e が年間に利用可能な総流量となる。この総流量を式1に当てはめて発電量を計算したものが、その地点において年間に期待できる発電電力量になる。

この図を描くには、その地点の流量の時系列データ

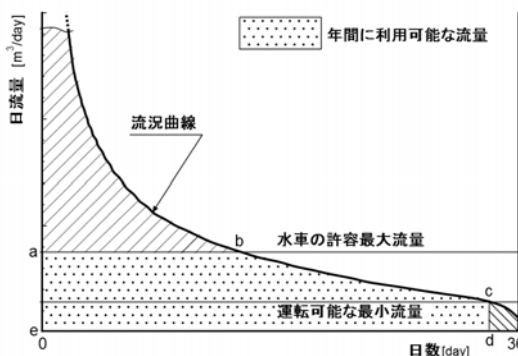


図1. 河川の流況曲線と年間の利用可能な流量

を長期間収集する必要があるが、これをその地域の降水量から推定できれば、短期間にその地点の発電ポテンシャルを推定できるとともに、何カ年にもわたる流量測定のコストが節減できる。

### 2.3 河川の流量と雨量の関係(タンクモデル)

水文学で河川の流量を予測するための最も簡便な方法として、直列タンクモデルと呼ばれる手法がある。このモデルは図2に示すように、一つもしくは複数の排出口を持つタンクを複数、縦に積み上げたものである。直列タンクモデルの各タンクは、その土地の地層に相当し、タンクの排出口からの流出水量は地層内を流れる地下水の流量に相当する。タンクの下部には下方の地層へ浸透する地下水の流量を与える。雨や雪などの降水はいったん第1タンクに貯えられ、タンク内の水位に応じてその一部が側方パイプを通して地表面上へと流れ出す。

気象庁では、土砂災害警戒情報及び大雨警報・注意報の発表の基準となる土壌雨量指数<sup>[4]</sup>を算定するにあたって、図2に示す Ishihara & Kobatake<sup>[5]</sup>の直列3段タンクモデルを使用している。これは第1タンクに二つの側方パイプを設け、ある水位以上になると流出量が折線状に増加して出水状況を表現する。本報もこれを踏襲するが、平常時の流量への対応に重きを置く。

### 2.4 評価対象流域の選定とその面積の算出

流量の推定を行う河川流域の選定にあたって、次の事項を条件とした。(1)流量観測所が存在すること(必須)、(2)雨量観測所が存在すること(必須)、(3)河川流量を支配する大規模発電所や他河川からの大規模な流入(農業用水など)が存在しないこと、(4)流域面積が過大でないこと、(5)現地確認が容易なこと、などである。結果として当研究所に比較的近い武儀川が残った。

次に、対象河川の流量観測所の観測流量に関わる流域の面積を調べた。これには図3に示すように、国土交通省<sup>[6]</sup>より入手した流域マップから谷口流量観測所への流入に関わる区域を切り出し、その区域のピクセル数を数えることで求めた。なお、流域面積算出の基準として、近隣の美濃市域のピクセル数を求め、これと比較することで流域面積137.2km<sup>2</sup>が求められた。また、後にこの流

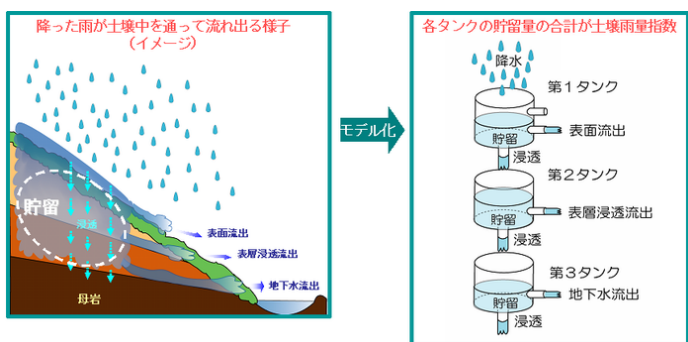


図2. 直列3段タンクモデル<sup>[4]</sup>



図3. 武儀川流域図

域を細分した小流域毎の流量推定を行うために、各小流域の面積も求めた。

### 2. 5 流域流量の推定方法

直列タンクモデルにおける各タンクの側面孔からの流出量  $q_i$  ( $i=1, 2, 3$ , 以下同様)は次のように記述される。

$$q_1(t) = \alpha_0 \{S_1(t) - L_0\} + \alpha_1 \{S_1(t) - L_1\}$$

$$q_2(t) = \alpha_2 \{S_2(t) - L_2\}$$

$$q_3(t) = \alpha_3 \{S_3(t) - L_3\}$$

ここで  $L_i$  は側面孔の高さ、 $\alpha_i$  は側面流出孔の流出係数、 $\beta_i$  は底面浸透孔の浸透係数で、各係数のタンク部位との対応を図4に示す。河川への流出水量は、各タンクの側面流出孔からの流出流量の総和によって与えられる。なおタンク内の水位  $S_i$  は次式で与えられる。

$$S_1(t + \Delta t) = (1 - \beta_1 \Delta t) \cdot S_1(t) - q_1(t) \cdot \Delta t + R$$

$$S_2(t + \Delta t) = (1 - \beta_2 \Delta t) \cdot S_2(t) - q_2(t) \cdot \Delta t + \beta_1 \cdot S_1(t) \cdot \Delta t$$

$$S_3(t + \Delta t) = (1 - \beta_3 \Delta t) \cdot S_3(t) - q_3(t) \cdot \Delta t + \beta_2 \cdot S_2(t) \cdot \Delta t$$

ここで  $R$  は降雨量である。係数  $L_i, \alpha_i, \beta_i$  の値は流域の地質、土地利用状況などによって様々に変化するが、当

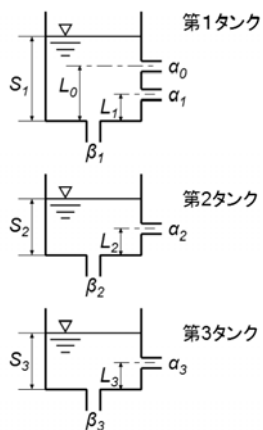


図4. 直列3段タンクモデルの各種係数

該流域については時期を選ばず普遍であるとみなす。すなわち、これらの係数が定めればどのような時期においてもこれらの係数を用いて流域の雨量から河川の流量を予測できる。しかし初めて予測を行う段階ではこれら係数の値を求めることが課題となる。一般的には各係数に仮の値を与えて流量を推定し、観測流量と推定流量の両者がフィットするよう係数を調整するが、この方法は多大な労力を要する。そこで本報告では、目的が流況曲線を得ることにあることから、直接、流況曲線をフィットさせることで係数を選定した。

求めた係数の普遍性を高めるには、長期間にわたる流量測定値との比較が必要である。今回選定した武儀川では谷口地区に流量観測所があり、2009年から2013年の5カ年にわたる流量観測データが貯えられている。また、流量推定に用いる降水量は、流域内の葛原の雨量観測所に1976年から2015年までの雨量データが蓄積されており、谷口の流量観測期間を全てカバーしており、これを用いることにした。後出の図6に2010年における武儀川谷口で観測された流量と葛原の降水量を示す。

なお、上記5カ年の観測期間の降水量及び流量観測値の総量を求めたところ、流量の総量は雨量の総量よりも約1割少なく現れた。これは、蒸発の効果というよりは、むしろ大出水時に流量観測データが多数「欠測」になっていることが影響していると考えられる。このため降水量は全て、いずれ河川に流入するとして扱う。

### 3. 各種係数の選定と流量の推定結果

降水量から推定した流況曲線が流量観測値に基づく流況曲線にフィットするよう係数を調整した。表1に、得られた係数を気象庁が土砂災害等の予測に使用している係数と比較して示す。着目する時間スケールの違いから両者は大きく異なる値になった。

図5に、2009年から2013年の5年間の武儀川の谷口流量観測所における観測値に基づく流況曲線を示す。図の縦軸は、単位流域面積あたりの流量[mm/day]であり、また小流量領域を見易くするために対数表示をした。上述の方法による推定流量から得た流況曲線を同じ図の中に一点鎖線で示す。出水域や渇水域以外では実際の流況曲線と良好な一致を示しており、今回、約140km<sup>2</sup>におよぶ広大な流域を一組の直列3段タンクモデルで近似したにも

表1. 流量の推定に使用した係数

No.		本報告			気象庁洪水予測		
Tank	Pipe	$L_i$	$\alpha_i$	$\beta_i$	$L_i$	$\alpha_i$	$\beta_i$
1	0	60	0.1	0.006	60	0.15	0.12
	1	25	0.001		15	0.1	
2	2	30	0.3	1.0	15	0.05	0.05
3	3	7	0.75	0.0	15	0.01	0.01

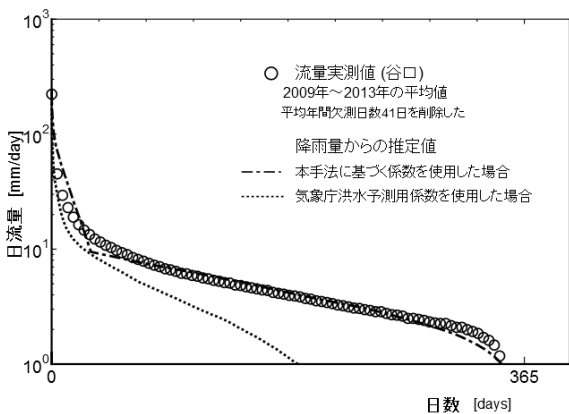


図5. 武儀川の流況曲線(実測値と推定値の比較)

関わらず、小水力発電に必要な流量域の流況曲線をほぼ再現できた。なお図中に気象庁の土砂災害等予想用係数による推定結果を点線で表示したが、出水域以外では流況曲線は再現されない。また図5の縦軸を図1のようにリニアに戻し、これに水車の許容最大流量、最小流量を設定すれば谷口流量観測所における年間発電能力を評価できる。

次に図6に、ここに得られた係数を用いて各時刻の流量を推定した結果を一点鎖線で、また谷口流量観測所における実測値を○印で示す。流量が平常なときの時間平均的な流量変化は、流量がごく少ない場合を除きほぼ再現されている。また大出水時の流量変化も表現されており、季節的な変動を含めた水力ポテンシャルの予測に役立つと考えられる。なお図中の点線は気象庁の土砂災害等予想用係数を用いた流量推定結果で、大出水時の流量変化は再現されるが、平常流量時は再現されない。

以上は、谷口流量観測所に関わる流域について推定したものである。実際に小水力発電所を設置する場合、これを当該発電所に関わる小流域に適用する必要がある。ここに求めた係数は土質や地層の厚さ、土地の利用状況などによって変化すると考えられるが、小流域のこれら

の性質が今回適用した広流域の平均値と類似であれば、ここで得られた係数はほぼ有効であり、ここで得られた面積当たりの推定流量を当該小領域の面積当たり流量とみなして発電ポテンシャルを推定することができる。

#### 4. まとめ

中小河川の水力発電ポテンシャルの簡便な推定手法開発のために、3段直列タンクモデルを武儀川流域に適用し、実測の流況曲線との比較によってタンクの各種係数の調整を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 流況曲線を小水力発電のポテンシャルの見積りに必要な程度に再現することができた。
- (2) これに基づく流量推定結果は、季節的な水力ポテンシャル変動がほぼ推定できることを示している。

この手法を小流域の発電ポテンシャル推定に使用していくには、流域の地質などいくつかの要因が各種係数に及ぼす影響について調査する必要がある。

#### 文 献

- [1] 環境省. 平成 21 年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書(2010,3)
- [2] 環境省. 平成 22 年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書(2011,4)
- [3] 環境省. 平成 23 年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書(H24,6)
- [4] 気象庁, 土壌雨量指数の解説,  
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/bosai/dojoshisu.html>
- [5] Ishihara, Y. and S. Kobatake (1979): Runoff Model for Flood Forecasting, Bull.D.P.R.I., Kyoto Univ.,29,27-43
- [6] 国土交通省, 主要水系調査成果一覧システム,  
<http://nrb-www.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/water/risui/suikai/index.html>

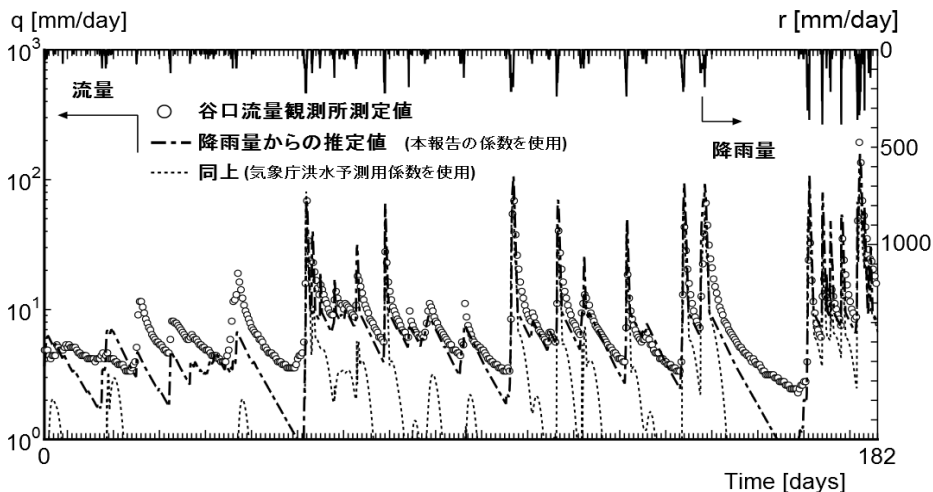


図6 得られた係数による推定流量と実測値との比較 (2010年1日～6日)