

岐阜県南部における小水力発電ポテンシャルの推定

－タンクモデルパラメタの改善－

河村 隆雄, 棚橋 英樹

Estimation of Small Hydropower Potential in South Area of Gifu Prefecture

－ Improvement of Tank Model Parameters －

Takao KAWAMURA, Hideki TANAHASHI

あらまし 小水力発電ポテンシャルを平均降水量から簡便に予測する手法を開発する中、今回、予測精度の向上を目指してタンクモデルパラメタの改善を図った。これには、パラメタ相互の制約関係を求めることでパラメタの探索範囲を限定し、かつ、タンクモデルによって予測された流量を、短期間の実測ハイドログラフに適合させる手法と、長期の実測流況曲線に適合させる手法とを組み合わせることで、流況曲線とハイドログラフ双方に良好な近似を与えるパラメタを取得し、これを木曾川水系に適用した。

キーワード 小水力, 発電ポテンシャル, タンクモデル, パラメタ制約関係, 流況曲線

1. はじめに

岐阜県の特徴的な再生可能エネルギーである小水力発電について、手軽に発電ポテンシャルを取得するための実用的評価手法の開発を試みてきた。これまでに岐阜県南部をカバーする木曾川水系について、標準となる一組の直列3段タンクモデルを適用することで、地域の平均降水量から発電ポテンシャルをおよそ推定できることを示す^[1,2]とともに、これを実際の小水力発電の水源に当てはめて推定量の妥当性の確認を行ってきた^[3]。しかしポテンシャル推定の信頼度を高めるには、タンクモデルのパラメタをさらに改善する必要がある。

元来タンクモデルは、河川流量の変動を予測するためのツールとして開発され^[4]発展してきた。このためタンクモデルの各種パラメタの探索は、従来、実測降水量をモデルにあてはめて得られる予測流量のハイドログラフを実測流量によるハイドログラフに適合させることで、行う方法が採られてきた(図3(a)参照)。これには各種計算手法が駆使されるものの、有効なパラメタを得るには相応の経験が必要とされている^[5]。

一方、河川流量の時系列データから作成される流況曲線も、同じタンクモデルによって予測できることから、著者らは、予測された流況曲線を実測流況曲線に適合させることを通してタンクパラメタを見出す方法を提案し、実施してきた。しかし両手法ともに、適切なパラメタを

得る作業(以下、同定という)は試行錯誤的な要素を含んでいるため多大な手間を要するものであり、また、選定されたパラメタの有効性を評価するには多様な条件の実測データとの比較が必要であった。

そこでタンクモデルのパラメタ相互の制約関係を明らかにしてパラメタの探索範囲を絞り込むとともに、最適パラメタの同定手法として、上記のハイドログラフ適合法および流況曲線適合法を組み合わせることによって、長期・短期の双方にわたって信頼度の高いパラメタを得る手法を開発した。また、その手法を岐阜県南部の木曾川水系に適用してその有効性を調べた。

2 直列タンクモデルの特性

2.1 直列タンクモデル

図1に示す直列3段タンクモデルについて考える。各タンクの底面に下部タンクへの浸透流出孔、そして、側面には河川への流出を表す流出パイプが各1本(ただし最上位タンクのみ2本)設置されている。タンク番号(i)および流出孔番号(j)(側面パイプおよび浸透孔)を図1のように振る。タンク i の水位を s_i 、各流出孔 j の高さを $h_{i,j}$ 、流出係数を $\alpha_{i,j}$ とすると、各流出孔からの流出量 $q_{i,j}$ は、

$$q_{i,j}(t) = \alpha_{i,j} \{s_i(t) - h_{i,j}\} \quad (1)$$

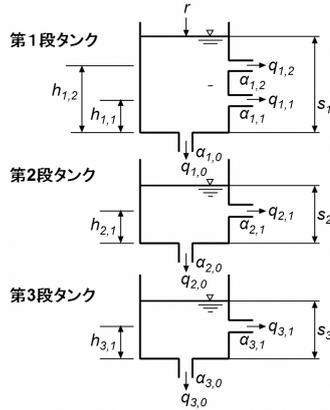


図 1. 直列 3 段タンクモデル

で表される。なお、下部タンクへの浸透流出比流量 $q_{i,0}$ 、そして、上位タンクからの浸透流入比流量 $q_{i-1,0}$ についても同様である。ただし最上位タンク ($i = 1$) については、浸透流入量 $q_{0,0}$ を降水量 r に置き換える。なお、本報告においては、他の研究者との比較を容易にするため、比流量の単位に [mm/hr] を使用する。

2.2 各タンク内の水位の変化

初めにタンクモデルの特性について調べる。各タンク内の水位の低下速度 ds_i/dt は、上位タンクからの流入量 $q_{i-1,0}$ から当該タンクの流出量の総和 $\sum_{j=0}^n q_{i,j}$ を差し引くことで求まり、これに式 (1) を代入すると次式になる。(以下簡便ため、 $\sum_{j=0}^n$ を Σ_j と記す。)

$$\frac{ds_i}{dt} = -s_i \Sigma_j \alpha_{i,j} + \Sigma_j (\alpha_{i,j} h_{i,j}) + q_{i-1,0} \quad (2)$$

ここで、 $\tau_i = 1/\Sigma_j \alpha_{i,j}$ (タンクの時定数)、および、 $D_i = \tau_i \Sigma_j (\alpha_{i,j} h_{i,j})$ (無降水時の水位収束値) と置く。そして現象の解析を容易にするため、上部のタンクからの浸透流入量 $q_{i-1,0}(\tau)$ を一定の時間幅 Δt 、高さ $\pi_i = \tau_i q_{i-1,0}$ のパルス状降水 (図 2) の配列とみなすことにする。このときタンクの水位は、各パルスに対する応答の重ね合わせで表されると考える。すると、式 (2) は次のように表現される。

$$\frac{ds_i}{d\tau} = -\frac{1}{\tau_i} \{s_i - D_i - \pi_i\} \quad (3)$$

これを $[t_s = 0, s_{i,s} = s_{i0}]$ から $[t, s_i] (t < \Delta t)$ まで、あるいは $[t_s = \Delta t, s_{i,s} = s_{i1}]$ から $[t, s_i]$ (この間 $\pi_i = 0$) ま

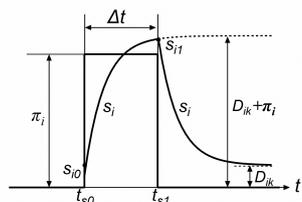


図 2. パルス状降水と水位の応答

で積分する。 π_i は各区内で定数であるので、

$$\int_{s_{i,s}}^{s_i} \frac{d(s_i - D_i - \pi_i)}{s_i - D_i - \pi_i} = - \int_{t_s}^t \frac{1}{\tau_i} dt$$

となり、これより、

$$s_i - D_i - \pi_i = \{s_{i,s} - D_i - \pi_i\} e^{-(t-t_s)/\tau_i} \quad (4)$$

が得られる。これはタンクの水位は、 $0 < t < \Delta t$ において、 $s_{i,0}$ から $D_i + \pi_i$ に向けて時定数 τ_i で上昇し、 $t > \Delta t$ ($\pi_i = 0$) では、 $s_{i,1}$ から D_i に向けて同じ時定数で低下することを表している。このように、タンクモデルにおいては、時定数 τ_i および D_i の二つのパラメタが重要な役割を担っている。

ここで、タンク内水位 s_i と $h_{i,j}$ との相対位置を、表 1 に示すように番号 k ($h_{i,j} < s_i < h_{i,j+1}$ のとき $k = j$) を用いて表すと、 τ_i 、および D_i は k によって変化する。これがタンクモデルの非線形性の原因であるが、同一水位番号 k の区間内では一定である。以下、これを表すためにこれらを $\tau_{i,k}$ 、 $D_{i,k}$ と記す。表 1 に $\tau_{i,k}$ 、 $D_{i,k}$ を示す。

表 1. 時定数 $\tau_{i,k}$ および水位の収束値 $D_{i,k}$ の定義

水位範囲 同番号 k	$s_i < h_{i,1}$ 0	$h_{i,1} < s_i < h_{i,2}$ 1	$h_{i,2} < s_i$ 2
時定数 $\tau_{i,k}$	$\frac{1}{\alpha_{i,0}}$	$\frac{1}{\alpha_{i,0} + \alpha_{i,1}}$	$\frac{1}{\alpha_{i,0} + \alpha_{i,1} + \alpha_{i,2}}$
収束水位 $D_{i,k}$	0	$\frac{\alpha_{i,1} h_{i,1}}{\alpha_{i,0} + \alpha_{i,1}}$	$\frac{\alpha_{i,1} h_{i,1} + \alpha_{i,2} h_{i,2}}{\alpha_{i,0} + \alpha_{i,1} + \alpha_{i,2}}$

2.3 タンクからの流出流量

タンク i の側面の番号 j のパイプから流出する流量 $q_{i,j}$ は式 (1) で与えられ、これを式 (4) に代入すると、

$$q_{i,j,k} = \alpha_{i,j} \{s_{i,0} - (D_{i,k} + \pi_{i,k})\} e^{-(t/\tau_{i,k})} + \alpha_{i,j} (D_{i,k} + \pi_{i,k} - h_{i,j}) \quad (5)$$

が得られる。式中の $\tau_{i,k}$ 、 $D_{i,k}$ 、 $\pi_{i,k}$ は水位番号 k の影響を受けるので、 $q_{i,j}$ にも添え字 k を追加した。なお、各タンクから河川へ流出する流量は、側面流出孔からの流出量 $q_{i,j,k}$ の総和 $\sum_{j=1}^n q_{i,j,k}$ で与えられる。

$$q_{r(i,k)} = (\sum_{j=1}^n \alpha_{i,j}) (s_{i,s} - D_{i,k} - \pi_{i,k}) e^{-(t-t_s)/\tau_{i,k}} + (\sum_{j=1}^n \alpha_{i,j}) \pi_{i,k} - \alpha_{i,0} D_{i,k} \quad (6)$$

2.4 各種パラメタ相互の制約関係

ここで、各タンクからの流出流量を支配する、時定数 $\tau_{i,k}$ 、および収束水位 $D_{i,k}$ の相互関係について調べる。初めに、全ての流出係数 $\alpha_{i,j}$ は正であるから、時定数の定義より次の関係が得られる。

$$\tau_{i,0} > \tau_{i,1} > \tau_{i,2} > 0 \quad (\text{条件 1})$$

また $\alpha_{i,j}$ を、 $\tau_{i,k}$ の定義に基づいて $\tau_{i,j}$ によって表し、これに条件 1 を課すと、

$$0 < \alpha_{i,0} < \alpha_{i,1} < \alpha_{i,2} \quad (\text{条件 2})$$

が得られる。そしてこれより、 $2\alpha_{i,0} < \alpha_{i,0} + \alpha_{i,1}$ および、 $\alpha_{i,0} + 2\alpha_{i,1} < \alpha_{i,0} + \alpha_{i,1} + \alpha_{i,2}$ となるから、

$$0 < \frac{\tau_{i,1}}{\tau_{i,0}} < \frac{1}{2}, \quad \frac{\tau_{i,2}}{\tau_{i,1}} < \frac{1}{2 - \frac{\tau_{i,1}}{\tau_{i,0}}} \quad (\text{条件 3})$$

が導かれる。

次に、 $D_{i,j}$ については、その定義を $\tau_{i,0}, \tau_{i,1}, \tau_{i,2}$ を用いて書き直すと、 $\frac{D_{i,1}}{h_{i,1}} = 1 - \frac{\tau_{i,1}}{\tau_{i,0}}$ 、および $\frac{h_{i,2} - D_{i,2}}{h_{i,2} - D_{i,1}} = \frac{\tau_{i,2}}{\tau_{i,1}}$ が得られ、これに条件3を課し、また現象の性質から、水位の収束値 D_i は h_i よりも低くなることを用いると、次の制約条件が得られる。

$$\frac{1}{2} < \frac{D_{i,1}}{h_{i,1}} < 1, \quad \frac{h_{i,2} - D_{i,2}}{h_{i,2} - D_{i,1}} < \frac{2}{3} \quad (\text{条件 4})$$

さらに、直列タンクモデルにおいては、より少ない流出量を扱う下部のタンクほど時定数が大きくなる傾向にあり、いま各タンクの $\tau_{i,1}$ を代表に選ぶと、

$$0 < \tau_{1,1} < \tau_{2,1} < \tau_{3,1} \quad (\text{条件 5})$$

と表されることも制約条件に加えられる。

このようにタンクモデルの各種パラメタの間には、相互に多数の制約関係が存在し、中でも条件(3)は厳しい制約を与える。タンクパラメタの同定にあたって、これらを枠組みとして利用することができる。

3 タンクパラメタの探索方法

3.1 ハイドログラフのみとの適合

従来、タンクパラメタの同定は、タンクモデルによる予測流量のハイドログラフを、実測流量のハイドログラフに適合させることによって行われてきた。図3(a)に、本報告で、木曾川水系の標準モデルとした武儀川のハイドログラフを示す。なお、本報告に示す図では、パルス状降水の時間刻み Δt を5分とした。

ハイドログラフを用いて適合を行う場合、目的とする流量範囲が現れる時期を選んで適合作業を行う必要がある。本報告は小水力発電用水源の流量を予測することを目的としており、流況曲線の低水から豊水の範囲がとりわけ重要である。そこで、小流量に係わる低位タンクについてのパラメタ探索が容易になるよう、無降水期間が長く続いて小流量の状態が明瞭に出現する事例として、2011年5月の約800時間を図3(a)に示す。

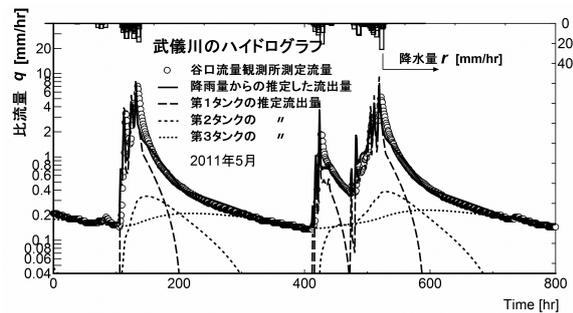
本手法ではパラメタの調整を、主としてタンクの時定数を用いて行う。このため、グラフの縦軸に対数をとる。すると、図にみられるように、実測流量のハイドログラフは、勾配の異なるいくつかの直線によって近似でき、かつ、流量が少ないほど勾配が緩やかになることから、下位のタンクほど時定数が大きいことが確認できる。この図より、各タンクが扱う流量範囲について時定数 $\tau_{i,1}$ の概略値を求め、前述の制約条件を満足するよう $\tau_{i,0}$ および $\tau_{i,2}$ を調節する。これを基に、表1の関係に従って各孔の流出係数 $\alpha_{i,j}$ を算出し、それを用いて河川流量を予測する。

これによって得られた予測ハイドログラフを実測ハイドログラフと比較し、より良い適合が得られるよう、制約条件を満足しつつ時定数および流出係数を調節する。以後これを繰り返すことで、良好な適合へと近づけていく。ただし、時定数はハイドログラフの勾配を与えるものであり、流出流量の絶対値を適合させるために、側面流出孔の高さや浸透孔の流出係数を調節する必要がある。その際、タンク毎の予測流出量も参考にした。

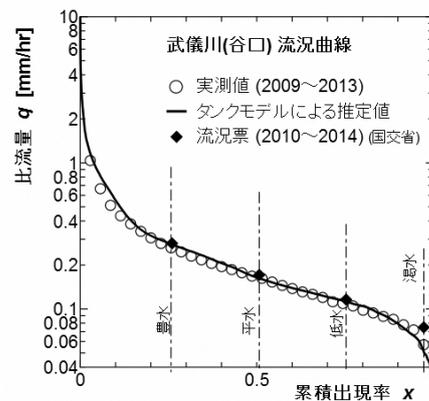
しかし、予測ハイドログラフは時定数の変化にあまり敏感ではなく、また、ハイドログラフとの適合に適した季節は限られること、そして、この手法は主として短期の流量変化への適合を目指しており、長期の流量変化にも適用可能な流出係数を正確に求めることは難しい。なお、図3(a)中の実線は、次節で示す流況曲線との適合とを組み合わせ得たタンクパラメタを用いた結果である。

3.2 流況曲線とハイドログラフの同時適合

発電用水源の流量予測を目的とする本研究では、長期間の実測降水量に基づいて作成された流況曲線をどの程度予測できるかが重要である。この目的に適したパラメタ取得の方法として、タンクモデルによって予測される流況曲線を、実測の流況曲線に適合させるようタンクパラメタを調整する方法^[1,2]が考えられる。しかし上述の手法と同様、この手法だけでハイドログラフと良好に



(a) ハイドログラフとの適合



(b) 流況曲線との適合

図3. ハイドログラフと流況曲線との交互適合

適合させることは困難である。

そこで本報告では、長期の流量データに基づく流況曲線への適合と、短期の流量変化を表現するハイドログラフとの適合とを交互に行い、二つの曲線を同時にフィッティングさせるタンクパラメタ探索手法を用いることにした。この手法を、流況曲線については2009年から2013年の5年間にわたる武儀川の実測流量を用いて試みた結果が図3(a),(b)である。この手法によって、流況曲線については低水から豊水の範囲だけでなく、豊水の数倍の流量に至るまで良く近似できており、また、ハイドログラフとの適合も良好である。表2に、本手法で得られたタンクパラメタを示す。

表2 本手法で得られた武儀川のタンクパラメタ

i	j	$h_{i,j}$	$\alpha_{i,j}$	$\tau_{i,j}$	$\frac{\tau_{i,j}}{\tau_{i,j}-1}$	$\frac{D_{i,k}}{h_{i,j}}$
1	2	108.0	0.0300	18	0.464	0.75
1	1	47.0	0.0180	38	0.308	0.69
1	0	0.0	0.0080	125		
2	1	11.2	0.0190	29	0.441	0.56
2	0	0.0	0.0150	67		
3	1	4.5	0.0055	133	0.267	0.73
3	0	0.0	0.0020	500		

4 木曾川水系の8河川の予測流況曲線

既報^[2,3]にて、武儀川について選定したタンクパラメタが岐阜県南部の木曾川水系にほぼ有効であることを示した。そこで、改善されたタンクパラメタについても同様な性質が存在するか否かについて検討した。

図4に木曾川水系内の中規模8河川の実測流況曲線(記号)と、上で求めたタンクパラメタを用いて予測した流況曲線(実線)とを比較して示す。前報と同様に、牧田川では農業利水の影響によって実測流況曲線は大きく低下し、また坂内川では積雪による貯留効果で実測値は予測値より大きく現れている。しかしこれらを除けば、予測流況曲線は豊水量を上回る流量域まで実測流況曲線に近接している。とりわけ武儀川より東側の地区については、平水量で予測誤差が10%以内にあるなど、水源の流出量を予測する用途には十分な精度を示している。

5 まとめ

小水力発電ポテンシャルの簡便な予測手法であるタンクモデルについて、同モデルの原理に基づくタンクパラメタ相互の制約関係を用いることでパラメタの探索範囲を縮減し、また、モデルの予測流量を、ハイドログラフに適合させる作業と、流況曲線に適合させる作業を交互に行うパラメタ同定手法を用いることでタンクパラメタの改善を図り、これによって次の結果を得た。

(1) 流況曲線およびハイドログラフ双方に、幅広い流量範囲で良好な近似を与えるタンクパラメタを取得できた。

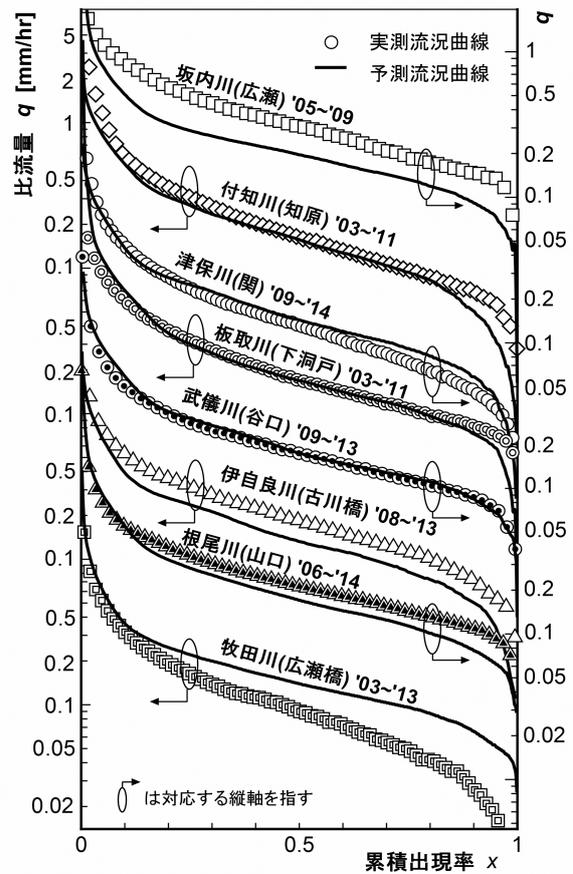


図4. 木曾川水系8河川の実測および予測流況曲線

(2) 上記パラメタを木曾川水系の中規模河川に適用したところ、不適合の原因が明瞭な場合を除けば予測流況曲線は実測曲線を良く近似しており、とりわけ岐阜県東部では優れた予測値を与えた。

文 献

- [1] 河村隆雄, "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", 岐阜県情報技術研究所報告第16号, pp.59-62, 2015
- [2] 河村隆雄, "降水量からの小水力発電ポテンシャルの見積り方法-流域面積が小さい水源への適用-", 岐阜県情報技術研究所報告第17号, pp.54-57, 2016
- [3] 河村隆雄, 棚橋英樹, 和田清, "平均降水量データによる小水力発電ポテンシャルの予測-岐阜県における小流域水源への適用-", 土木学会第44回環境システム研究発表論文発表会講演集, pp.285-290, 2016
- [4] 菅原正巳, "流出解析法", 共立出版, 1972
- [5] 藤原洋一ほか4名, "流出モデル定数の最適同定における誤差評価関数の選択に関する研究", 農業土木学会論文集, No.225, pp.137-149, 2003