

平均降水量データによる小水力発電 ポテンシャルの推定 —岐阜県における小流域水源への適用—

河村 隆雄¹・棚橋 英樹²・和田 清³

¹非会員 岐阜県情報技術研究所 情報システム研究部 (〒509-0109 岐阜県各務原市テクノプラザ1-21)

Email:kawamura-takao@rd.pref.gifu.jp

²非会員 岐阜県情報技術研究所 情報システム研究部 (〒509-0109 岐阜県各務原市テクノプラザ1-21)

Email:tanahsi-hideki@pref.gifu.lg.jp

³正会員 岐阜工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒501-0495 岐阜県本巣市上真桑2236番地2)

Email:wada@gifu-nct.ac.jp

岐阜県下に存在する全国有数規模の小水力発電ポテンシャルについて、その活用意欲を生み出すために、具体的水源候補地の発電能力に関する情報の提供が待たれる。これには当該水源流域の特性を反映した流況曲線を推定する手法の確立が急がれる。本研究では、目的とする水源の流況曲線を、実流量の測定を行うことなく、直列タンクモデルを用いて流域の平均降水量データから推定し、これを用いてその水源の発電能力を簡便に評価する手段について検討した。その結果、岐阜県南部のほぼ中央を流れる木曽川水系の典型的な河川のタンクパラメーターを使用することで、木曽川水系の主要な多数の中規模河川の流況曲線を良い精度で近似できること。また、本報告に示す手法に基づいて、発電実績のある複数の水源について年間発電電力量を推定した結果は、発電実績値とよい整合性を示した。

Key Words : small hydropower generation, power potential, serial tank model, duration curve

1. はじめに

化石エネルギー資源枯渇や地球温暖化に伴う環境破壊などへの対応策として、化石燃料から太陽光や水力、風力、バイオマスなどの再生可能エネルギーへと資源の切替えに迫られている。これはエネルギー資源の国産化、地産地消化に繋がり、国や地域経済の安定化に有効とされるが、現状では太陽光発電を除き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を詳しく評価する必要がある。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って、結果をホームページ等に公開している¹⁾²⁾。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エネルギー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。

ところで岐阜県下に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。中でも水力資源の賦存量は全国一位とされてい

る。そこで岐阜県では、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を行い、それに基づき推定出力20kW以上の48箇所について地元の意向が調査された。

なかでも郡上市では、石徹白地区をはじめとしていくつかの水車が設置され、小水力活用の機運が高まっている。また中津川市でも、市として再生可能エネルギーの活用を力を入れており、多数の候補地について水車の設置の検討が行われた³⁾。しかし実施に移された所は大きな出力の見込める数カ所であり、その他は、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採算に合わないかと判断されたことが原因とされている。

岐阜県下には他にも多数の発電可能な水源が存在すると予想されるが、これらについては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するため、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、県内各地において、発電ポテンシャルの評価を迅速に行う技術の開発が必要である。これは小水力発電施設設置の増加にも繋がり、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る。

近年、洪水などの水災害予防の観点から、流域の降水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。本報告では、小水力発電ポテンシャルの分布を小さな空間スケールで明らかにするために、最も簡単なモデルである直列タンクモデルを用いることとし、主に岐阜県南部を支配する木曽川水系における中小の河川や水源を対象に、小水力発電に利用される流量範囲である高水から低水に到る領域の流量を予測し、水源の発電ポテンシャルを推定することを試みた。

2. 小水力発電ポテンシャルの評価方法

(1) 水力の発電ポテンシャル

水力発電のポテンシャルは、水源が持つ落差 H [m]と流量 Q [m^3/s]から次式によって計算される。

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

ただし、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 η は発電施設の総合効率である。この中で最も重要な値は流量である。しかし、中小の河川や水源の流量を測定する作業は一般に手間がかかり、また信頼できる値を得るには数年から10年以上にわたる継続的計測が必要となるため、流量データの取得は容易ではない。そこで本報告では、比較的入手の容易な水源の近隣地区の平均降水量から河川等の流量を推定することにした。

(2) 流況曲線と発電ポテンシャル

水源に設置した水車の発電能力を見積るには、縦軸に流量 Q 、横軸に年間のそれ以上の流量の発生日数の和をとった流況曲線が使用される。本報告では多年にわたる流量データを用いるので、横軸には累積出現率($x = \text{期間内の累積発生日数}/\text{期間の総日数}$)を使用する(図-1参照)。

水車の規模を決定する大きな要因は流量であり、とりわけ水車が扱う最大流量 Q_{Max} と最少流量 Q_{min} は水車の形式や形状・寸法を決定する上で重要である。

小水力発電では水源の流量は大きく変動する一方、河川環境を維持し、また様々な利用目的を実現するための最低限の流量(維持流量)を配慮する必要がある。すなわち、発電に流量 Q_R の水源を用いるとすれば、維持流量 Q_{mt} を上回った流量分($Q = Q_R - Q_{\text{mt}}$)だけが利用可能である。維持流量の大きさについては種々の考え方があるが、経済産業省の報告書⁴⁾によれば、河川の流域面積 100 km^2 について $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 、すなわち、比流量 $0.005 \text{ [m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)]$ の維持流量を確保することが提示されている。しかし河川水は様々な用途に使用されるため、本報告では実情に照らして、これの4倍の $0.02 \text{ [m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)]$ の維持流量を確保することとした。

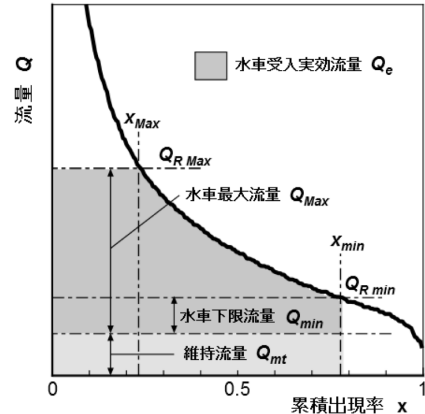


図-1 河川の流況曲線と年間に利用可能な流量

また、水車に与える流量についても、最大流量 Q_{Max} を超える流量は水車に流し込むことはできず、さらに下限流量 Q_{min} 以下では水車を運転することができない。これらのことから、年間に水車が利用できるのは、図中の濃く着色した部分の面積として見積もられる。以下、これを有効流量(Q_e)と呼ぶ。年間の有効発電ポテンシャルは、この有効流量を式(1)に代入して求める。そして、年間の発電電力量は、これを年間の時間数倍することで得られる。

(3) 水源の流域面積の算定

発電機を設置する水源の降水利用 R は、その水源流域に集まる降水量の総和として与えられる。このことから、本手法では、流域面積 1 km^2 当たりの平均降水量 $r \text{ [m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)]$ に水源の流域面積 $A_c \text{ [km}^2]$ を掛け合わせることで水源全体の降水量とする。このため水源の流域面積を求める必要があるが、これは、等高線地図上で水源を取り囲む稜線を描き、その内側の面積を求めることとした。

3. 木曽川水系のタンクモデル代表パラメーター

水源の流況曲線は、流域の平均降水量から直列3段タンクモデルを用いて推定する。

(1) 木曽川水系の比流量による流況曲線

はじめに木曽川水系内にある様々な流域面積を持つ河川の流況曲線を比較する。このため縦軸の流量には、比流量 $q = Q/A_c \text{ [(m}^3/\text{s})/\text{km}^2]$ を使用する。国土交通省の水文・水質データベース⁴⁾上に流量観測データが存在する中規模8河川について、同データベースから取得した流量観測値に基づいて作成した、比流量による流況曲線(以下、実測流況曲線という)を図-2に示す。

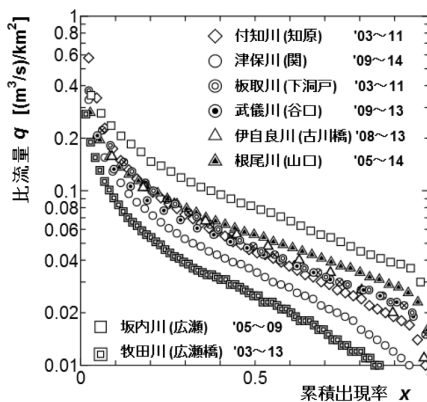


図-2 木曽川水系の中規模河川の実測流況曲線

図に見られるように、木曽川水系の代表的な中規模河川の実測流況曲線は、流域面積の効果を消去してもかなりのばらつきを示しており、これは、各河川の流域によって降水特性が異なることが反映されたものと考えられる。

(2) 木曽川水系の代表タンクパラメータ

本報告では河川の降水特性と流況曲線の関係を、図-3に示す直列三段タンクモデルを用いて近似する、こ

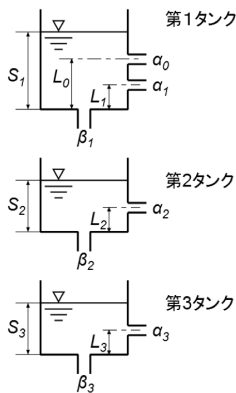


図-3 直列3段タンクモデルの各種パラメータ

表-1 武儀川のタンクパラメータ
(比流量に基づく値)

Tank	Pipe	L	α	β
1	0	16.7	0.10	0.006
	1	6.94	0.001	
2	2	8.33	0.30	1.0
3	3	1.94	0.75	0.01

L: 側管の高さ, α : 側管の流出係数
 β : タンク底面ホールの流出係数

のとき、降水特性と流況曲線との関係を表すものがタンクの各種の係数(以下タンクパラメータという)である。

もし、木曽川水系にある多数の河川流域の多くを同一のタンクパラメータ(以下、代表タンクパラメータという)を用いて近似することができれば、降雨量から流況曲線を推定する作業は著しく容易になると期待される。そして、図-2の流況曲線群の中ほどに位置する河川は、木曽川水系の平均的な性質を持つものと推測され、代表タンクパラメータを持つ河川の候補として期待される。中でも武儀川は大規模発電や農業用水など河川水の利用が少なく、降雨と流量の関係が素直であると予想されることから、候補として優れていると判断した。

河川のタンクパラメータの決定は、従来、タンクに降水量を与えたときのタンクシステムからの流出量が河川の実測流量の変化に合致するようパラメータを調節して行われた。しかし、これには多大の労力を要した。

本報告においては、タンクモデルは降水量と流況曲線の関係を表すものとして使用するため、タンクパラメータの決定にあたっては、長期間にわたってタンクに流域の平均降水量を与えたときに現れる流況曲線が、できる限り実際の流況曲線に一致するようにタンクパラメータを調節することで求める。この作業は、モデルの各パラメータを微小に変化させた時の豊水点($x=0.38$)、平水点($x=0.63$)、低水点($x=0.86$)の流量(以下、位況値という)に及ぼす効果の程度を把握することにより、従来の方法に比べて容易に行なうことができる。

このようにして求めた武儀川のタンクパラメータを、比流量に関わる値に換算したものを表-1に示す。

(3) 木曽川水系の主要な中規模河川の流況曲線

図-4は表-1のタンクパラメータを用いて武儀川の降水量データから比流量を推定し、これに基づいて作成した推定比流量の流況曲線(以下、推定流況曲線という)と、武儀川の実測流況曲線とを比較したものである。

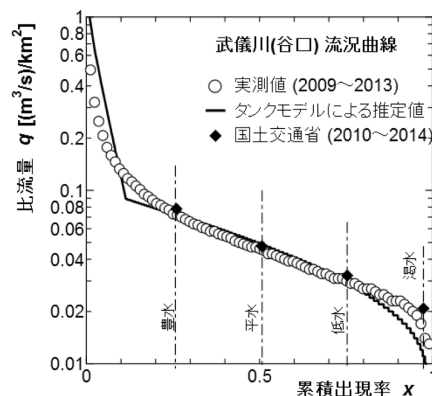


図-4 武儀川の実測流況曲線と推定量況曲線

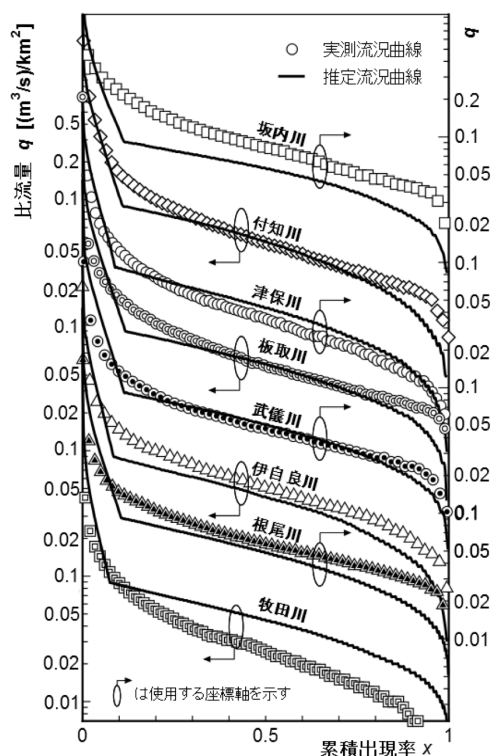


図-5 木曽川水系の中規模8河川の実測流況曲線と推定流況曲線

図中には、国土交通省が同河川について提示している位況値を示す。二つの曲線および位況値は良好な一致を示している。

図-5は、木曽川水系の中規模8河川の実測流況曲線と各河川流域の平均降雨量に武儀川のタンクパラメータを適用して求めた推定流況曲線を比較したものである。

はじめに最下段の牧田川について考える。この河川においては、実測流況曲線が推定流況曲線を大きく下回っており、推定流況曲線を水車出力の評価ツールとして使用することの妥当性が問題になる。この河川においては、関係市町の広報資料および地形図などから農業用の水利用が盛んであり、この場合、実測流量に利水流量を加えて推定の適否を検討する必要がある。

また最上段に示した坂内川については、実測流況曲線が推定流況曲線を50%程度上回っている。この河川流域の平均標高は高く、積雪による貯水効果、すなわち冬季の積雪が降水を貯えて大出水を緩和し、春以降に流れ出すことによって図のように豊水点から低水点の流量を押し上げるものと推測される。これら利水および積雪の効果については今後の課題とする。

上記2河川を除く6河川に関しては、武儀川のタンクパラメータを使用して求めた推定流況曲線は、実測流況

曲線と平水点において約20%以内の精度で一致し、推定曲線は実測曲線をかなり良く近似している。このことから本報告では武儀川のタンクパラメータを、木曽川水系の代表タンクパラメータとして使用する。

4. 水源の発電能力の推定方法

水源の発電可能電力量の推定は、以下に示す1)から、5)の手順で行った。

1) 発電用水源の有効落差

まず、水源地の水面と、水車からの流出水面との高度差(実落差)を測量などによって求める。発電出力を評価するには本来、この実落差から、水源から排水路に至る導水路における流動損失水頭を差し引いた有効落差を求める必要がある。損失水頭は導水路の長さや形状などに依存するが、流路の平均流速を低くとれば大まかには無視できるので、ここでは損失水頭は考慮しないこととする。

2) 水源の降水量データの取得

これは、国土交通省の水文水質ベースを利用して、該当地区の時間雨量データ $R[\text{mm/h}]$ を取得する。水源の流域面積が小さい場合、雨量観測点が当該水源の流域内、あるいはその近傍に存在しないことが多いが、その場合は水源流域を囲む近隣の雨量観測点のデータを複数取得し、簡便のため、それらを単純平均することでその地区の平均降水量とした。のちに示す表2には、各水源について利用した雨量観測所名を記載した。

なお、次の比流量を推定する作業のために、時間雨量 R を単位面積当たりの降水量 $r(=R/3.6)$ $[(\text{m}^3/\text{s})/\text{km}^2]$ に換算しておく必要がある。

3) 降水量 r からの水源の流量 Q の推定

この単位面積当たり降水量 r に表1に示す木曽川水系のタンクパラメータを適用して、時間毎の水源の比流量の推定値 q $[(\text{m}^3/\text{s})/\text{km}^2]$ を算出する。これに流域面積 A_C を掛けて、水源の推定流量 Q_R を得る。

4) 推定した流量 Q により流況曲線を描く

推定流量 Q を大数順にソートしたのち、各比流量までの累積出現数を全データ数で割って各流量の累積出現率 x を求める。その後、図5に示すように縦軸に Q 、横軸に x を取って流況曲線を描く。なお図6では、雨量の長期欠測期間およびその後の48時間は除外して計算している。

5) 流況曲線から水源の発電能力を推定する。

はじめに、流況曲線から水源の単位流域面積当たりの年間有効流量 Q_e を求める。これは2節で説明した方法による。

量 Q_{Max} は累積出現率 $x=0.22$ の位置で、また最少流量 Q_{min} は $Q_{Max}/4$ で与えた。

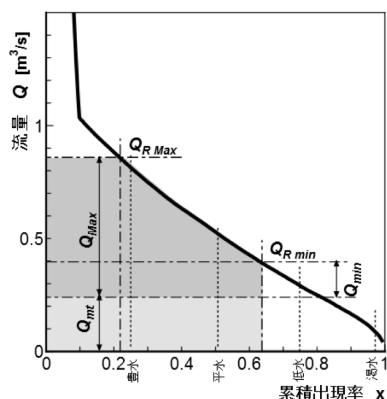


図-6 中津川市小郷の推定流況曲線と水車出力見積り

一例として、図-6 に中津川市小郷の水源について求めた推定流況曲線を示す。この図から求めた有効流量を式(1)に代入して、通年有効出力を求める。式中の η は水力発電システムの効率であるが、これは水車のスケールや形式、その他によって異なるので経験力から予測する必要があるが、ここでは、簡便のため、比較的输出の大きな水車については 0.8、小型の水車については 0.5 とした。このようにして得られた推定発電出力 P_p に 1 年間の時間数を掛けあわせることで、水源の見込年間発電電力量 W_p [kW h] が得られる。なお水車の最大流

5. 既設および検討済み小水力発電との比較

本報告に示した発電ポテンシャル推定方法の妥当性を確認するため、既設の水力発電施設の実績データ、あるいは計画段階で、発電施設の規模などについて具体的に調査された施設の調査データとの比較を試みた。

中津川市により詳細に調査・検討された、比較的発電規模が大きい 3 地区の計画データを表-2 の中に示す。3 地区の流域面積はほぼ同じで、水源の実効流量も似通っている。ただし、水源の落差は様々である。なお小郷地区では、慣行水利権により他の水源より大きな流量の利用が認められたため、年間発電電力量も大きくなって経済性に優れることから実施に移された。平成 26 年から運用を開始し、過去 2 か年にわたり発電記録が残されている。それに基づいて、上記の手続きに従って見積もった水源の通年有効出力 P_e と（見込）年間発電電力量 W_e 、および、中津川市担当者から提供された計画最大出力 P_p 、実績年間発電電力量 W_a を表-2 に示す。

計画最大出力は見込最大出力と同程度で、その範囲内にあり、この 2 年間の平均実績発電電力量は本手法による見込発電電力量に近く、それよりも優れた値を示している。また、小郷の発電所と同時期に検討された夕森、

表-2 小水力発電実施地区および検討地区における発電能力推定結果

地区	中津川市			郡上市	
	小郷	夕森	横川	大和町	和良町
雨量観測所	小和知	川上	川上付知	八幡 栃洞 白鳥	和良
水源の流域面積 A_c [km ²]	11.6	11.0	11.1	1.19	2.25
水源の落差(計画値) H_p [m]	64.6	25.0	10.0	10.0	10.5
水源最大流量 Q_{RMax} [m ³ /s] = Q_R (at $x=0.22$)	0.874	0.788	0.828	0.089	0.158
水源最小流量 Q_{Rmin} [m ³ /s] = Q_R (at Q_{min})	0.386	0.361	0.373	0.040	0.073
水源維持流量 Q_{mt} [m ³ /s] = $0.02 \times A_c$	0.232	0.219	0.221	0.024	0.045
水車最大流量 Q_{Max} [m ³ /s] = $Q_{RMax} - Q_{mt}$	0.615	0.569	0.607	0.065	0.111
計画最大流量 Q_p [m ³ /s]	0.460	0.200	0.200	0.060	0.100
水車最小流量 Q_{min} [m ³ /s] = $Q_{Max}/4$	0.154	0.142	0.152	0.016	0.028
水車有効流量 Q_e [m ³ /s] = $\int Q dx$	0.29	0.26	0.30	0.032	0.051
水車効率 η	0.80	0.80	0.80	0.50	0.50
見込最大出力 PM_{Max} [kW] = $\eta \rho g Q_{Max} H$	311.570	111.520	47.600	3.21	5.73
計画最大出力 P_p [kW]	220.000	40.000	12.000	3.000	7.000
通年有効出力 P_e [kW] = $\eta \rho g Q_e H$	145.06	50.45	23.39	1.590	2.620
見込年間発電電力量 W_e [MWh] = $P_e \times 24 \times 365$	1270	442	205	13.9	22.9
実績年間発電電力量 W_a [MWh]	1442*	--	--	10.780	3.400

斜体文字は事業者から提供された数値を示す

* 2014、2015 年度の平均値

横川の計画出力は、本手法による推定出力と同程度で、その枠内に収まっている。

次に、郡上市には、すでにいくつかの水車が設置され、稼働している。ここでは同市内に設置された極く小規模の流域面積を持つ2か所の小水力発電施設所について実績データを得ることができたので、本手法で予測した結果と比較した。郡上市大和町の水車は、計画最大出力が見込最大出力の約9割とほぼ一致しており、また、実績年間の発電電力量は見込年間の発電電力量の約8割を発生しており、その機能を十分に発揮しているものと判断できる。一方和良町の発電施設はほぼ同規模であるにも関わらず、実績発電電力量は見込値の約15%と発電余力を大きく残している。設置事業者によれば、水車設置後の初年度で、現地の流量変動が予想外に大きく稼働時間が不足したため、十分に性能を発揮できなかったとしており、これは本手法を極く小さい流域に適用する際に課題となる問題である。

良好な実績データが得られた中津川市小郷地区および郡上市大和町は、いずれも冬季に積雪が見られる地域であることを考慮すれば、実際の年間発電ポテンシャルはさらに大きなものであると予想される。しかしそれを考慮するまでもなく年間の発電電力量推定値は実績値と大きくかけ離れていないことや、また、計画段階の水源地の推定出力についても同様な傾向にあることから、本報告に示す推定方法は、実際の小水力発電の計画に役立つものであることを示している。

6. まとめ

木曾川水系における小水力発電について、流域の平均降水量から水源の発電ポテンシャルを推定する手法の開

発を試み、また開発した手法を既設ならびに設置が検討された小水力発電用水源に適用したところ、以下の事項が明らかになった。

- (1) 流況曲線推定のための河川のタンクモデルのパラメータを決定するにあたって、発電運用レンジを想定した豊水から低水の範囲について実測流況曲線との適合を図ることで、タンクパラメータ決定作業を簡易化できる。
- (2) 県南部の木曾川水系の主要な6つの中規模河川について、一組の代表タンクパラメータを使用することにより、各々の河川流域の平均降水量を用いて河川の流況を比較的良好な精度で推定できる。
- (3) 本報告に示す手法に基づいて、発電実績のある水源や水車の設置が検討された水源について発電出力や年間発電電力量を推定した結果は、発電計画値や発電実績値とよい整合性を示した。

参考文献

- 1) 岐阜県, 岐阜県次世代のエネルギービジョン, 2011.
- 2) 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, 2012.
- 3) 中津川市, 中津川小水力発電基本構想, <http://www.city.nakatsugawa.gifu.jp/wiki/index.php/中津川小水力発電基本構想>, 2009.
- 4) 経済産業省, 平成25年度中小水力改質促進始動事業基礎調査(発電水力調査(流量資料整備に関する調査))報告書, 新エネルギー財団, pp.2-15, 2014.
- 5) 国土交通省, 水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp>

(2016. 8. 26受付)

ESTIMATION OF HYDRAURIC POTENTIAL FROM RAIN FALL - APPLICATION TO WATER SOURCES WITH SMALL BASIN AREA -

Takao KAWAMURA, Hideki TANAHASHI and Kiyoshi WADA

The proper information is expected recently to utilize micro hydraulic power generation potential. Therefore, it is necessary to establish technique to estimate discharge-duration curve which reflected the characteristic of the basin. This study is considered for a method to evaluate the generation potential of the basin easily using a tandem tank model. This method is estimated by the average precipitation data of the basin without measuring real discharge quantity. As a result, it is clarified that it was similar with good precision in discharge-duration curve of many rivers by using the tank parameter of the typical river of the Kiso-river basin system. In some generation spots, it is found that real values accorded with an estimate of the quantity of annual generation well.