

農業用ため池を用いたマイクロ水力発電に関する研究

— 水管理を考慮したポテンシャルの推定と評価 —

水利用学分野 深津竜也

キーワード：自然エネルギー，発電量推定モデル，サイホン取水，取水管理

1. はじめに

1.1 研究の背景

近年，自然エネルギーの需要増加からその1つである小水力発電が注目されている．鳥取県でも環境立県を目指してその利用を促進している¹⁾．中山間地域の多い鳥取県では小河川やため池が点在し，小規模な水力エネルギーが豊富であると考えられる．

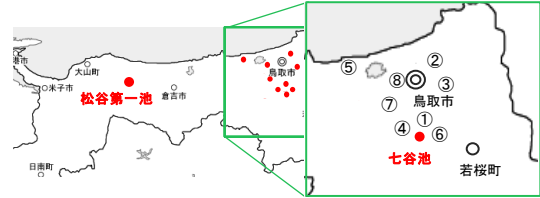


図1 対象ため池

しかし，鳥取県のため池の持つ発電量ポテンシャルは十分に把握されていない．そのため，水文観測を行わずに容易に発電量を推定することができる汎用モデルの構築が必要とされる．

1.2 研究の目的と方法

そこで，本研究の目的は，ため池台帳に記載されたデータと気象庁の日降雨量データのみで，容易に発電量ポテンシャルの推定が可能な，汎用モデルを構築することである．

研究方法は，以下のとおりである．まず七谷池と松谷第一池（図1）において水文観測に基づき発電量を算出する．次に，それらの値をもとに発電量推定モデル（以下推定モデル）を構築する．その後，ため池台帳に記載されている流域面積，総貯水量，および水田面積の物理的条件による取水管理の分類方法を作成し検証する．最後に，分類方法を加えた汎用モデルを8基のため池（図1 ①～⑧）へ適用し，取水管理を考慮した発電量の推定を行い，考察を加える．

なお，本研究では，現行の水管理下における農業用ため池から取水した灌漑用水で発電を行うことを想定している．また，ため池直下の用水路に発電機を設置し，サイホンで導水する．これらの想定によって，①有効落差の確保，②除塵，③発電システムの設置，の3点が容易になる．

2. 水文観測に基づく発電量の推定

2.1 対象ため池

対象とした七谷池と松谷第一池（以下松谷池）の諸元を表1に示す．両ため池共に県内のため池の中でも総貯水量が大きく，灌漑期を通して安定した発電が期待できる．また，両ため池の取水時間が異なり，取水管理の違いが発電量に与える影響の考察に適している．

表1 ため池の基本データ

名称	七谷池	松谷第一池
総貯水量 (m ³)	210,000	117,690
堤高 (m)	9	16.5
受益水田面積 (ha)	45	13
流域面積 (km ²)	0.28	0.62
貯水方法	自己流域	自己流域
取水時間	日中	常時

2.2 水文観測と発電量推定

発電出力および発電量は以下の式 (1)，式 (2) であらわされる．

$$\text{発電出力(kW)} = \text{重力加速度(m/s}^2\text{)} \times \text{密度(kg/m}^3\text{)} \times \text{流量(m}^3\text{/s)} \times \text{有効落差(m)} \times \text{発電効率} \quad (1)$$

$$\text{発電量(kWh)} = \text{発電出力(kW)} \times \text{発電時間(h)} \quad (2)$$

流量と発電時間は，現行の水管理下におけるため池からの取水量と取水時間とする．有効落差はため池の水面と発電機設置地点間の高低差である総落差から，発電機に水が到達する間の損失水頭を減じて求める．なお，発電効率は鳥取県産業技術センターの発電機を参考に0.5とした．発電量推定には，流量，有効落差，および発電時間の変動の把握が必要である．そこで，ため池の底に設置した圧力式水位計とため池直下の水路に設置した静電容量式水位計を用い，ため池と水路の水位の連続観測を行った．また，水路で流量観測を行い水位-流量曲線を作成し，流量を求めた．

2.3 結果と考察

水文観測による発電量推定結果を表2，発電出力の変動を図2に示す．七谷池では日単位の短い周

期で発電出力が大きく変動した(図2(a)). この要因として七谷池では基本的に日中(6~18時)のみ放水し, 夜間や日中の降雨時は放水しないためである. また, 降雨後に水田の状況に合わせ流量を低下させる斜樋操作が, 出力の変動が頻繁な要因となっている. また, 代かき, 中干し, および中干し後と時期別においても出力変動が大きい. 2011年は灌漑開始1週間前から続く降雨により代かき用水は行われなかったが, 2010年は代かき用水が行われ, その放水による発電出力は年最大を示した. また, 中干しの間(2011/7/10~16)は, 取水が行われず, 発電出力は0である. 一方, 松谷池では灌漑時期の違いや降雨の有無により取水量に大きな変動はみられない(図2(b)). この差の要因として, 松谷池は1日24時間の連続取水を行っており, 斜樋操作は基本的に4日に一度程度であることが挙げられる. このように, ため池ごとに異なる取水管理が発電に大きな影響を与えている.

3. 発電量推定モデル

3.1 発電量推定モデルの構築

対象ため池は前述の七谷池と松谷池である(図1). 推定モデルは, 実際の水文観測を行なくても, 気象庁から得る日降雨量とため池台帳に記載されたデータにより, ため池の水収支を推定し, 発電可能量を導出できるものとした. 本来水文観測が必要な発電流量, ため池水位および発電時間は図3の手順で求める. 灌漑開始時に満水であると仮定し, 貯水量変化の要因である降雨流出量は流出率を0.66²⁾として求めた. そして, 各ため池の水管理から減水深と発電時間を決定し, 発電流量を求め, 発電後の貯水量を導く. この貯水量は, 翌日の貯水量となる. また, 貯水量-水位曲線より求めたため池水位から有効落差を導く. 以上より求めた発電流量, 有効落差, および発電時間によって発電量を推定する. 過去30年間の灌漑期間(5/30~9/17)における降雨量のデータを用いて5年確率の多雨年, 少雨年における推定発電量を導き, 幅を持たせた発電可能量を求める.

なお, 減水深は各ため池の水文観測結果から七谷池を5.5 mm/d, 松谷池を15.7 mm/dとした. また, 貯水量-水位曲線は, 堤高, 満水面積, および総貯水量より求める.

ここで, 時期や降雨量にかかわらず一定の流量を放水する取水管理を連続取水型と呼び, 反対に時期や降雨に応じて流量を変動させる取水管理を断続取水型とする.

3.2 汎用モデルを用いた発電量推定結果の検証

汎用モデルによる発電量推定結果を表3に示す. なお, 台帳に記載された水田面積を実際の値に更新し, 総落差に発電機設置地点までの高さを加えた. また, 松谷池の総貯水量は台帳に記載されていなかったため, GPSを利用してため池の高さごとの水面積を計測し, 計算にて求めた.

七谷池では, 水文観測と推定モデルによって推定された総発電量の誤差は, 2010年, 2011年でそれぞれ0.3%, -8%と高い再現性が得られた. なお, 2010年において, 流量, 落差, および時間が異なるのは, 中干し前期において, 雨が断続的に続いたためである. 長雨に対して, モデルでは有効

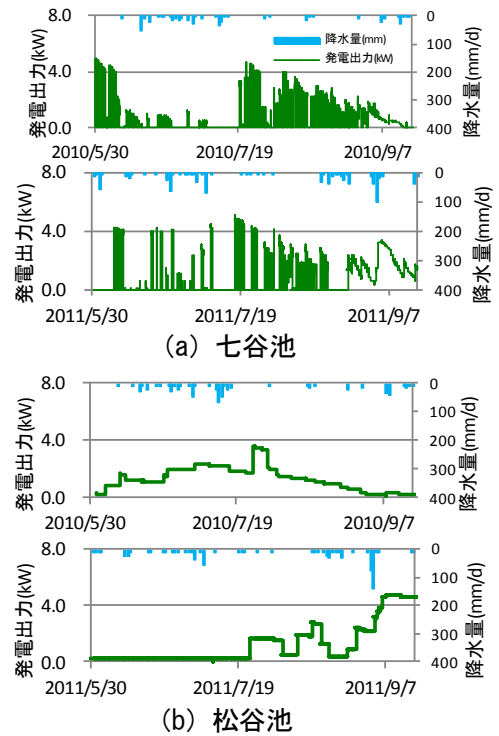


図2 発電出力変動

表2 水文観測による発電量推定結果

名称	七谷池		松谷第一池	
	2010年	2011年	2010年	2011年
総発電量 (kwh)	1,821	2,282	3,443	3,083
総放水量 (m ³)	199,735	241,011	265,182	192,884
最大出力 (kw)	4.99	5.11	3.60	4.75
平均出力 (kw)	1.69	2.03	1.32	1.85
観測時間 (h)	2,538	2,514	2,610	2,658
灌漑時間 (h)	1,080	1,122	2,610	1,671
発電時間 (h)	1,080	1,122	2,610	1,671
CO2換算 (kg-CO2)	1,011	1,266	1,911	1,711
原油換算 (ℓ)	463	580	874	783

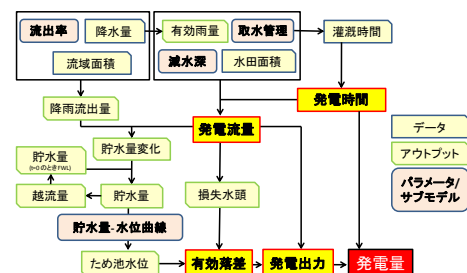


図3 推定モデルによる発電量推定フロー

雨量を考慮して灌漑を行わなかったが、実際はごく少量の灌漑が長期間続いた。それにより、流量と発電出力の小さい時間が続くことで、それらの平均値は低下するが、発電量や放水量にはほとんど差が生じないという結果となった。

松谷池では、水文観測と推定モデルによって推定された総発電量の誤差は、2010年、2011年でそれぞれ-7%、13%と比較的高い再現性が得られた。2011年においては灌漑時間が大きく異なった。これは、灌漑期前半の降雨による洪水吐きからの流出が灌漑用水に用いられ、取水が行われなかったためである。よって、2011年の発電量は灌漑期前半の取水を行った場合に期待できる発電量である。

七谷池では1,735~2,055 kWh、松谷池では2,331~3,815 kWhの発電量が見込まれる。七谷池と比べ、松谷池の見込まれる総発電量の多雨と小雨年の差が大きい。これは松谷池の総貯水量に対する流域面積が大きく降雨によ

表3 推定モデルによる発電量推定結果

名称	七谷池				松谷第一池			
	2010年		2011年		2010年		2011年	
年	2010年		2011年		2010年		2011年	
降水量(mm)	384.5		672.0		459.5		598.5	
推定方法	汎用モデル	水文観測	汎用モデル	水文観測	汎用モデル	水文観測	汎用モデル	水文観測
総発電量(kWh)	1,835	1,830	2,108	2,282	3,190	3,443	3,481	3,083
平均有効落差(m)	6.3	6.4	6.5	8.3	8.7	9.3	9.6	9.8
平均流量(m ³ /s)	0.071	0.049	0.067	0.060	0.028	0.028	0.028	0.032
平均出力(kW)	2.18	1.62	2.13	2.03	1.21	1.32	1.32	1.85
放水量(m ³)	221,798	204,510	252,883	241,011	269,176	265,182	265,812	192,884
灌漑時間(h)	876	1,167	1,044	1,122	2,640	2,610	2,640	1,671

って水位が大きく異なるためと考えられる。ここから、年単位の変動で考えた場合、松谷池の発電量の変動が七谷池よりも大きいことが示唆される。

4. モデルの汎用化

ため池の取水管理に直接関わる情報は、ため池台帳には記載されていない。そこで、ため池台帳に記載されているデータより、取水管理を決定する方法が必要である。本研究では、取水管理を前述の連続取水型（24時間取水）と断続取水型（12時間取水）の2種類と想定し、灌漑供給力と流入許容力という2つの物理的指標を用いてため池を分類する方法を提案する。次に、聞き取り調査により把握した8基のため池の取水管理と比較し、分類方法の検証を行った。その後、分類方法に従い決定した取水管理による発電可能量を推定した。

4.1 取水管理の決定方法

各ため池の有する水資源の豊かさに基づき散布図を作成した(図4)。縦軸はため池の流入許容力(Log(総貯水量/流域面積(mm))), 横軸は灌漑供給能力(Log(総貯水量/水田面積(mm)))とした。理論上では、流入許容力の値が大きいほど、流域単位面積当たりの流出量の貯留能力があり、大きな降雨量による流出量も貯水することが可能である。また、灌漑供給力の値が大きいほど、単位水田面積当たりの灌漑水量が多く、無降雨日における灌漑日数が増加する。汎用モデルにて、松谷池の水田面積と流域面積をそれぞれ変化させることで、連続取水型の取水管理において灌漑不足日が生じることのない組み合わせを求めた。それらの値を散布図上で結んだ線を、水管理決定ラインとする(図4)。ここで灌漑不足日とは水田用水量を満たす放水を行うことができない日のことである。なお、多雨年の結果である赤のラインより左に位置するため池は5年確率の多雨でも1日24時間の灌漑を行うことが出来ないため池であると考えられる。また、小雨年の結果である青のラインより右に位置するため池は5年確率の小雨でも24時間取水を続けることが可能なため池であると考えられる。

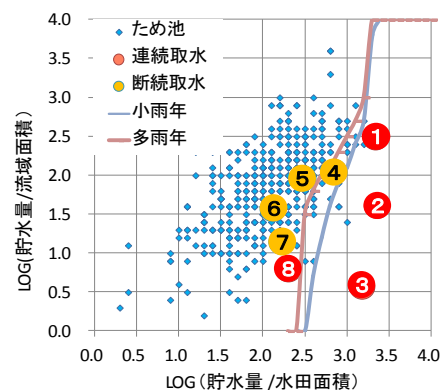


図4 ため池と水管理決定ライン

分類を検証するために聞き取り調査を行った(図1, 図4の①~⑧)。まず、汎用モデルの計算に必要なデータがため池台帳に記載されているため池で、自己流域からの流出のみに依存するため池を選らんだ(図4 ◆)。その後、ライン周辺のため池を対象ため池とした(図4 ●, ●)。ラインに基づいて取水管理を考えると、連続取水を行うことが可能なため池は、①, ②, および③の3基のため池である。また、④はどちらの管理の可能性もあるため池である。そして、⑤, ⑥, ⑦, および⑧のため池

は断続取水を行うと思われる。聞き取り調査の結果、①、②、③、および⑧（図4 ●）が連続取水型、④～⑦（図4 ▲）が断続取水型のため池であった。⑧の神子ヶ谷池はラインによると断続取水のため池であるが、聞き取り調査によると連続取水を行っている。この違いは、汎用モデルにおいて基底流出が再現されておらず、加えて、神子ヶ谷池は流入許容量が小さいため基底流出による貯水量の回復が大きいためだと考えられる。水管理決定ラインの結果と聞き取りによる結果がこの1基以外同じであったため、水管理決定ラインによる分類は妥当であると考え、汎用モデルに使用する。

4.2 モデルの適用結果と考察

2011年の鳥取の降雨量を用いたモデルの適用結果を表4に示す。減水深が小さく発電時間が短い断続取水の取水管理により最低限の発電量がポテンシャルを推定することができた。また、減水深が大きな漏水田に灌漑を行うようなため池に対しても、減水深が大きく発電時間が長い連続取水の取水管理を用いることで、上限の発電量がポテンシャル推定が可能である。

表4 汎用モデルによる発電量推定結果

	番号	名称	灌漑供給力	流入許容量	流域面積 (km ²)	総貯水量 (m ³)	受益面積 (ha)	総発電量 (kWh)
連続取水	①	大池	3.3	2.5	0.84	260,000	12.00	3,214
	②	荒田池	3.4	1.6	0.22	9,000	0.40	51
	③	後谷堤	3.2	0.6	0.80	3,000	0.20	14
	⑧	神子ヶ谷池	2.3	0.8	0.08	500	0.25	2
断続取水	④	大堤池	2.8	2.0	0.05	5,600	0.80	42
	⑤	新堤	2.5	2.0	0.13	12,000	4.00	124
	⑥	堂出池	2.1	1.6	0.35	13,000	10.00	136
	⑦	本谷溜池	2.2	1.1	1.17	16,500	10.00	255

5. 利活用に向けて

設置する発電機の選定等、水力発電の導入を検討する際には、総発電量のみならず、発電出力を考慮することも必要である。そこで、汎用モデルを用いて、各ため池の発電流量を縦軸、最大総落差を横軸とした発電出力の分布図を作成した（図5）。●は断続取水を、▲は連続取水を行うため池である。安定した発電が可能な連続取水のため池は16基と全体の約3%であり、それに比べて、不安定な発電となる断続取水を行うため池は多い。また、1kWと発電出力が低いため池が9割を占めることが示された。連続取水のため池も1基以外1kW以下である。

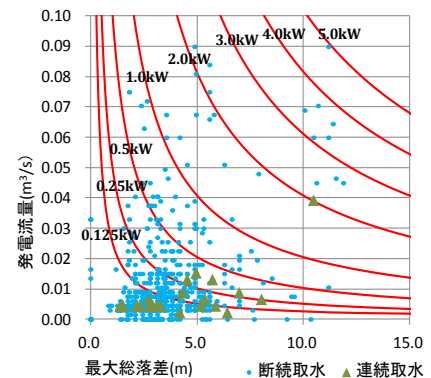


図5 水管理ごとの発電出力分布

ため池ごとの電力の利用方法を検討すると、連続取水でかつ発電出力が1kW以上のため池は、昼夜を問わず比較的大きな電力を生み出し、電力の利用方法の幅は広い。また、連続取水で出力が1kW以下のため池は、消費電力は少ないが常に電力を消費する、夜間の照明やため池および水路のモニタリングシステム等の利用に適している。一方、断続取水で出力が1kW以上のため池は、消費電量が比較的大きく、日中の使用や使用頻度の低い作業に適している。例えば、日中のハウスの冷房や水路の除塵等が挙げられる。そして、断続取水で出力が1kW以下のため池では、発電した電力の直接の利用が難しいため、バッテリーに蓄電して利用するといった工夫が必要であると考えられる。

6. おわりに

ため池台帳に記載されているデータと降雨量のみで、水管理を考慮した発電量推定を容易に行うことができる汎用モデルを構築した。それにより、比較的高い精度をもつ発電量ポテンシャルの推定が可能となった。より正確な発電量推定のためには、ため池台帳、特に水田面積の更新が求められる。今後は、水管理と発電出力に応じた電力の利活用方法を考慮した、ため池を用いたマイクロ水力発電の導入可能性の検討が必要である。

参考文献・Web サイト

- 1) 鳥取県：農業分野での再生可能エネルギーの利用促進，<http://www.pref.tottori.lg.jp/156404.htm>
- 2) 地頭菌隆，下川悦郎（1991）：突川水系川田川上流の森林流域における水文観測，鹿児島大学農学部演習林報告，19号，pp.43～60