

マイクロ水力発電を用いた新上水道システムの提案

東京大学大学院 新領域創成科学研究科 環境システム学専攻
地球環境工学研究室 修士課程2年 56759 森永 建司

1. 背景

2005年2月に京都議定書が発効し地球温暖化対策への取り組みが求められる中、我が国では再生可能且つ純国産エネルギーとして水力発電が見直されている。しかし国内での大規模水力の開発可能地点の数は少なく、ダム開発の環境影響も懸念されている。このような状況の中で、経済産業省は既存の水路を利用できる1~100kW規模の水力発電である「マイクロ水力発電」の普及を促進しているが、マイクロ水力発電には小規模、流量変化への対応力の弱さ、制御が困難等の課題も存在する。また、現在日本国内の上水道普及率は約98%であるが、送水量は年々増加しており、送水ポンプ等水道システム全体のエネルギー消費量も増大している。一方で必要以上の圧力エネルギーを減圧弁により捨てるなど未利用エネルギーが存在し、エネルギーの有効利用が課題にあげられる。そこで国内ではマイクロ水力発電を水道内で利用しようとする試みが行われているが、すべて既存の流れに対して設置するという考え方である。既存水道への設置は実現性が高いため企業によって研究が行われるが、マイクロ水力発電を前提にしての水道システム見直しは、水道普及率の高い先進国では研究されていない。

2. 目的

本研究ではマイクロ水力発電を設置した上水道システムの実現可能性を分析することにより、水道の建設・再構築時に水道と同時にマイクロ水力発電機を設置することを提案し、持続可能な発展へ寄与する都市インフラの構築を目的とする。世界には水道が未普及かつ未電化の国も多数存在し、それらの国で上記水道を建設することは既存の技術を援助した場合に比べエネルギーの有効利用に繋がると考えられる。

3. 方法

関係者へのヒヤリングから数値計算モデルを作成し、大規模河川から導水する千葉県北部と盆地に位置する長野市での詳細な計算から導入可能性を探る。また作成したモデルを水道未建設の都市でも使用できるように一般化を行った。一般化したモデルを用いて提案する水道に適した都市を選定する方法を提案し、水道システム建設計画の際に考慮すべき点は何かについても検討を行った。

4. 数値計算モデル

4.1. 管網計算ⁱ

管網計算には取水点及び消費点（配水場）における圧力水頭及び各点を結ぶ管路に流れる流量を、最初に各点の圧力を仮定することにより計算する節点水頭法を用いた。各点に関して流量保存式を用い、各管の流量と各点の圧力の関係は式(1)のHazen-Williams公式を用いる。V:平均流速(m/s)、C:流速係数、R:管径(m)、I:導水勾配である。各配水場への配水量を入力し、配水場において必要な受水圧水頭が確保されるように各点での圧力を求める連立方程式をGauss-Seidel法により解く。

$$V = 0.849 \times C \times R^{0.63} \times I^{0.54} \quad (1)$$

4.2. Cost & Benefit

取水点での送水圧水頭が取水点の実際の標高よりも小さい場合、必要以上にかかる圧力を用いた発電を

「余剰落差利用型発電」、各配水場において受水に必要以上の圧力エネルギーを回収する発電を「圧力回収型発電」と定義する(10kWh/day以上得られる配水場のみ設置すると想定)。最大理論出力Pと最大流量時の有効落差から計算された比速度 $ns(m-kW)$ を用いて以下の式(2)ⁱⁱにより水車効率を計算した。発電機効率は発電量が小さい為、発電された電力がすべて消費されると仮定して1.0とした。

$$\eta = \frac{1.2207 \times \ln(P) + 79.687 - 0.0045 \times (ns - 500)}{100} \quad (2)$$

コストについては過去のマイクロ水力発電所建設の実績値から得られた回帰式ⁱⁱⁱを用いて概算工事費を算出する。初期投資である概算工事費を耐用年数均等化し、人件費等を含めた年経費を計算した。

4.3. プロジェクト評価指標

売電単価を11yen/kWh、耐用年数を22年間、金利を0.5%とした。プロジェクトの評価指標としては、22年間の総発電量、建設単価、発電原価、現在価値(NPV)、回収期間、二酸化炭素削減単価、二酸化炭素総削減量を用いる。現在価値については売電利益BP(円)と年経費AC(円)から以下の式(3)により求める。

$$NPV = \sum_{year=1}^{22} (BP - AC) / (1 + r)^{year-1} \quad (3)$$

5. 詳細モデルによる導入可能性評価

河川から導水する千葉では圧力回収型が、盆地に位置し貯水池等から導水する長野市では未利用落差利用型の発電方式で発電が可能である。両都市で発電を行う場合について計算した結果は以下の表1のようになり経済面、環境面について長野での導入の方が有利であることを示している。両都市とも建設単価は最も高価な一般水力と比較しても高いが、発電原価は長野において石油火力の11円/kWh^{iv}よりも安価となっている。長野市では耐用年数の半ばで投入資金を回収できる。削減単価は\$1=116円とすると約\$210/t-CO₂であり、市場取引価格\$3~7.15/t-CO₂^vと比べて非常に高価である。千葉で発電量が最も多いのが浄水場に近く配水量が多い西平井配水場の96kWh/dayであり、長野市では区間の標高差が500m近い往生地での発電量が最も多く662kWh/dayであった。各施設の圧力水頭の計算値と実測値を比較したところ、誤差は9.64%で計算値の方が概ね低い値となった。

表1 評価指標

	総発電量	平均発電量	総工費	年経費	建設単価	発電原価	NPV	削減単価
	kWh	kWh/day	million yen	million yen	yen/kW	yen/kWh	million yen	yen/kg-CO2
千葉北部	2,320,000	289	29	1.7	2,400,000	15.7	-10.4	42.1
長野市	7,040,000	877	54	3.1	1,470,000	9.7	9.50	25.8

6. 一般モデルを用いた導入可能地域の選定

6.1. 配水量、水道管網データの推定

水道がない地域での実現可能性を分析する場合、配水量や管網に関するデータが存在しない為、手に入るデータから管網計算に必要なデータを推算する必要がある。管網を円と仮定して各管の長さについて給水区域面積から推定し、管径は円環部を1m、その他を0.5mとした。配水量については配水量の月変動の大きさを表す「月変動幅」、配水量の偏りを示す「分布傾向」というパラメータを導入し、これらと給水人口及び1人1日当たりの水消費量から推算した。

6.2. 推定の有意性

上記の推定を用いた計算の有意性を確かめる為千葉・長野の給水人口等を入力し、5章での詳細な計算と比較を行った。表 1,2 を比較すると、各指標について一般化されたモデルを用いた場合の方が実現に有利な数値を示していると言える。千葉のように配水場が多い場合発電量等は近い値を示している。

表 2 一般モデルでの評価指標計算結果

	総発電量	平均発電量	総工費	年経費	建設単価	発電原価	NPV	削減単価
	kWh	kWh/day	million yen	million yen	yen/kW	yen/kWh	million yen	yen/kg-CO ₂
G-Model(C)	2,450,000	305	27	1.6	2,120,000	13.9	-7.12	37.2
G-Model(N)	7,040,000	877	40	2.3	1,090,000	7.2	26.9	19.2

6.3. 各パラメータの感度

一般モデルにおいて給水人口、給水区域面積、標高差、1人1日当たりの水消費量、月変動係数、分布傾向の各パラメータを、千葉に近似した都市(但し標高差を100mとする)をもとにそれぞれ-10%~+10%変化させ、総発電量、NPV、削減単価の値の変化を計算した。又配水場数を変えた場合の発電量の変化についても計算を行った。表 3 をみると給水人口、1人1日当たりの水消費量、標高差の各指標への影響が大きい。分布傾向・月変動幅についても小さいながら影響が見られた。また配水場数を変えた場合の発電量は図1のようになり、2つの発電方式で異なる傾向が見られる。

表 3 感度分析(値は100分率)

	給水人口		給水区域面積		一人当たり		標高差		月変動幅		分布係数	
	-10%	10%	-10%	10%	-10%	10%	-10%	10%	-10%	10%	-10%	10%
総発	8.84	8.42	0.60	0.63	9.25	8.42	12.1	12.3	0.08	0.03	0.30	0.30
NPV	16.5	15.6	1.42	0.02	17.4	15.4	23.1	24.1	0.20	0.06	0.71	3.7
削単	6.07	4.81	0.60	0.48	6.55	4.74	8.97	7.86	0.09	0.02	0.29	2.5

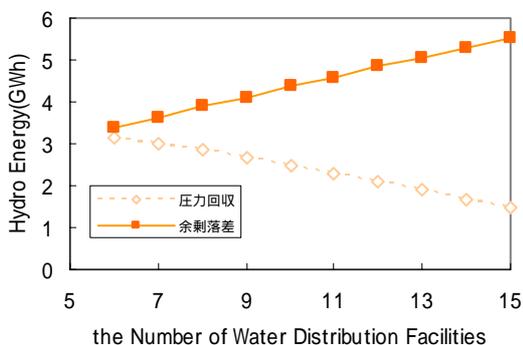


図 1 配水場数と発電量

6.4. 導入可能な都市の選定

6.3 から各パラメータの中で給水人口、1人1日当たりの消費量(積は給水量)及び標高差は、各指標に対する影響は大であった。よって本水道システムを建設するのに適した都市を選定する為に、ある給水人口に対してNPVが0円以上となる標高を「限界標高」と定義し計算した。対象都市の標高差が限界標高より大きければ、システムの導入を検討すべきと考える。給水人口データから図2の限界標高図(-10~100m)を用いて導入可能性を判断する。また各給水人口及び標高差に対応した発電原価の計算結果についても図3に示す。区域面積・配水場数・1人1日当たりの消費量は千葉と同規模とする。

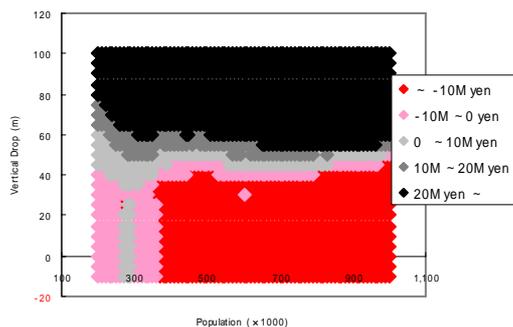


図2 限界標高図

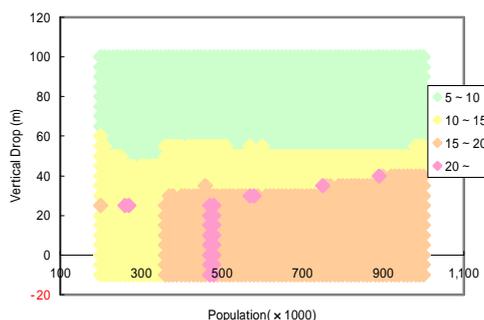


図3 都市の人口・標高差と発電原価(単位 円/kg-CO₂)

7. マイクロ水力発電を考慮した水道計画

マイクロ水力を導入する場合に水道計画において注意すべき点を、配水方法と管径の観点から以下に挙げる。感度分析にも示されているように配水量変動幅が小さいほど、得られる発電量は多くなる。また送水点に近い配水場ほど配水量が多くなるようにすることで、同じ総配水量で全ての配水場に同量配水する場合よりも総発電量を増やすことが可能である。配水場数については上図1に示すように圧力回収型の場合は配水場数が少ない方がよく、余剰落差利用型の場合は多いほどよい。

水道管径を大きくすると、Hazen-Williams の式より送水に必要な圧力水頭差は減少する。右図4のように圧力回収型が主の場合は管径が大きいほど発電量が小さくなり、余剰落差利用型ではその逆となる。右図のように発電量の倍率は頭打ちとなる為、コスト面を考慮して適切な管径にすべきである。

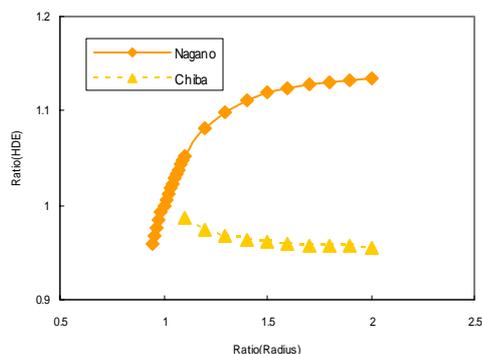


図4 管径倍率と発電量(長野及び千葉)

8. 結論

本研究ではマイクロ水力発電を設置した上水道システムの実現可能性を分析することにより、水道の建設・再構築時に水道と同時にマイクロ水力発電機を設置することを提案し、持続可能な発展へ寄与する都市インフラを構築することを目的とした。計算結果から長野市のように余剰落差が存在する都市の場合、マイクロ水力を設置した水道を建設することはエネルギーの有効利用となるだけでなく、発電原価も安価で経済的にも有意義であるといえる。圧力回収型発電については設置箇所が多く発電量も小さい為採算が取れない可能性が高い。水道という社会の礎であり長年研究されているシステムであっても、本研究のように持続可能な社会実現に向けて研究する余地は存在する。海外での水道建設に関わる技術援助の際に本研究で行ったような分析を行い、エネルギーを有効活用できる水道を提供していくことは、持続可能な発展へ繋がるとともに日本の水道建設分野における将来的なプライオリティになるのではないかと考える。

ⁱ Lewis A. Rossman, et, al : EPANET2 USERS MANUAL, EPA (2000)

ⁱⁱ NEDO 新エネルギー導入促進部：マイクロ水力発電導入ガイドブック(2003)

ⁱⁱⁱ 経済産業省資源エネルギー庁 財団法人新エネルギー財団：ハイドロパラー計画ガイドブック (2004)

^{iv} 電力中央研究所：ライフサイクルCO₂排出量による発電技術の評価(2000)

^v IETA : State and Trend of the Carbon Market 2005 (2005)