

## 6. 長野でのケーススタディ (N-Case)

余剰落差利用型のマイクロ水力発電の実現可能性について評価する為、取水地点が高い長野市について計算を行った。

### 6.1. 実現可能性評価 (Feasibility Study)

戸隠水源・飯綱浄水場・往生池浄水場を結ぶ水道管、湯の瀬取水施設・夏目ヶ原浄水場・上野配水池を結ぶ水道管の 2 ルートでの発電量を計算する。3.5.2 で述べたような全部で 3 点×2 組の 6 点モデルで計算を行う。

#### 6.1.1. 方法 (Method)

各配水場への配水量はデータが 1 日平均配水量( $\text{m}^3/\text{day}$ )のみしか手に入らなかった為、1 日平均配水量を均等に時間平均した値に、乱数を用いてばらつきを平均の-1%から+1%の範囲で持たせて計算した。複数の水源から受水しているため 1 つの水源から受水する千葉の場合に比べて微細時間の流量変動は大きいと考えられる。よって千葉県北部地域での計算よりも、定常状態で発電量を計算することによる誤差は大きいと考えられる。発電量の日推移については仮定の上での計算のため、各配水場の時間推移を詳細に調べることはあまり意味がないと考え、長野については経済・環境指標及び月推移について計算を行った

#### 6.1.2. 結果 (Result)

##### 6.1.2.1. 経済・環境指標

計算結果は以下の表 14 のようになり 22 年間の総発電量は 7GWh、平均 1 日発電量は 877.5kWh/day である。1 人 1 日当たりの消費電力量を 20kWh とすると約 40 人分である。経済的な側面では概算工事費 5400 万円、年経費 310 万円、建設単価は 147 万円/kW、発電原価は 9.7yen/kWh である。現在価値は 950 万円であり、回収期間は 16 年となっている。建設単価は各種発電方式の中で最も高価な一般水力と比較しても高価である。しかしながら発電量が安定している為発電原価は石油火力よりも安価となっている。耐用年数の半ばで回収することができ、NPV もプラスである為経済面でみるとこのプロジェクトは有意義である。22 年間の総削減量 4720 t・CO<sub>2</sub> である。CER 価格は \$1=116 円として換算すると約 \$210/ t・CO<sub>2</sub> であり削減単価としては高価である。

システム全体での平均 1 日発電量は以下図 40 のように推移しており、8 月が 946kWh/day で最大であり、11 月が 842kWh/day で最小となっている。流量の変動と発電量の変動は一致している。

表 14 経済・環境指標（長野）

一般		経済面					
総発電量	平均発電量	総工費	年経費	建設単価	発電原価	回収期間	NPV
kWh	kWh/day	million yen	million yen	yen/kW	yen/kWh	年	yen
7,040,000	877	54	3.1	1,470,000	9.7	16	9,500,000

環境面	
総削減量	削減単価
kg	yen/kg-CO2
4,720,000	25.8

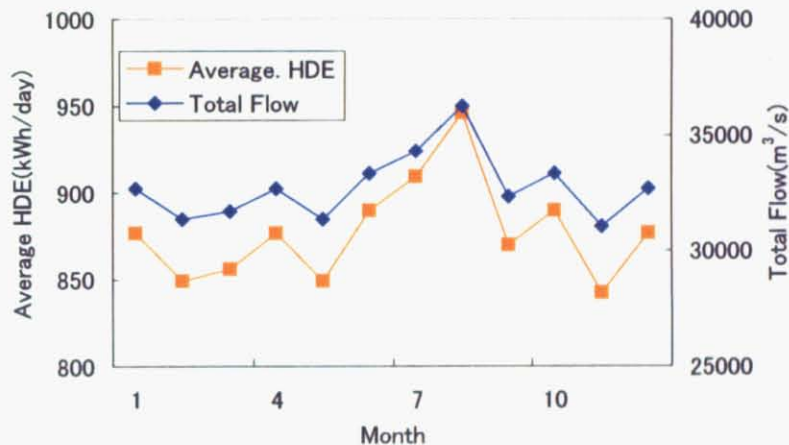


図 40 各月発電量、総送水量推移（長野）

#### 6.1.2.2. 個々の配水場

各地点についてみると表 15 のように飯綱、往生地間での発電量が最も多い。これはこの区間の落差が 500m 近くある為であると考えられる。夏目が原、上野間に関しても落差が 46m あり、また流量も比較的多いため他の 2 区間に比べて発電量が多い。

個々の地点での発電における有効落差、流量の変化、及びその変化による限界比速度、発電量の変化について以下に示す。図 41 をみると飯綱浄水場では受水量と有効落差が反比例して推移している。同じ太さ、長さの管においてより多くの流量を送水する為には、大きな圧力が必要となる。その為に未利用落差が小さくなる。この傾向は他の浄水場でも同様である。比速度の面でみると往生地浄水場では比速度が安定している為、安価な水車で発電することが可能である。表 16 をみると有効落差が非常に大きい為このように比速度が

安定していると推測される。発電量だけでなく比速度から判断しても往生地浄水場への設置を最も優先すべきである。千葉の場合とは異なり、取水点からの距離は関係なく余剰落差が大きい地点での発電が有利である。

表 15 各地点の総工費と発電量

		総工費(million yen)	平均発電量(kWh/day)
1	-2	5	38.6
2	-3	34	622
4	-5	8	86.2
5	-6	7	129

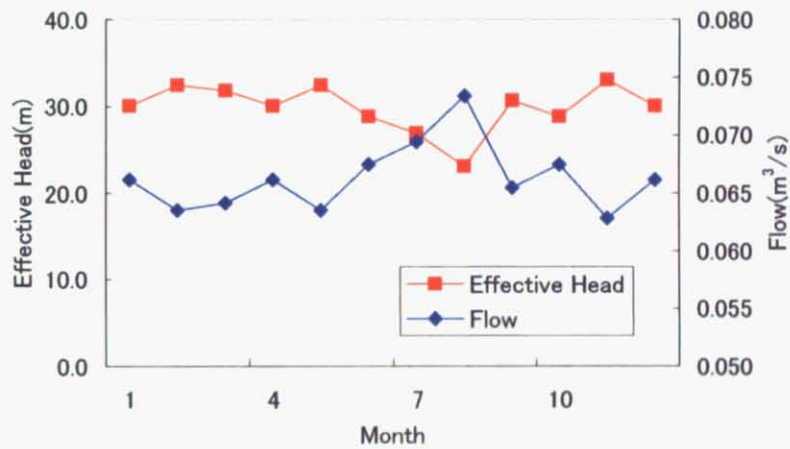


図 41 各月の有効落差及び受水量（飯網）

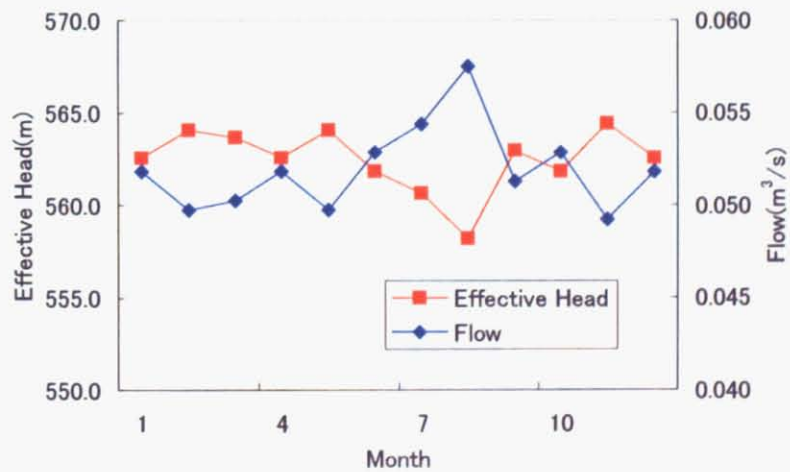


図 42 各月の有効落差及び受水量（往生地）

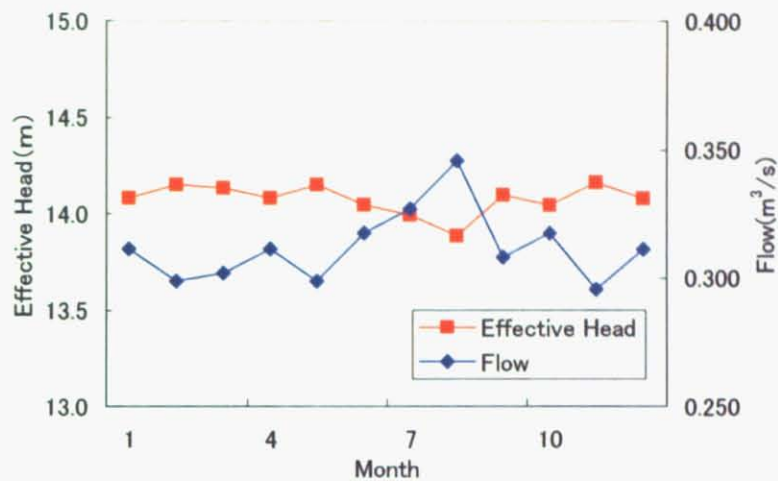


図 43 各月の有効落差及び受水量（夏目が原）

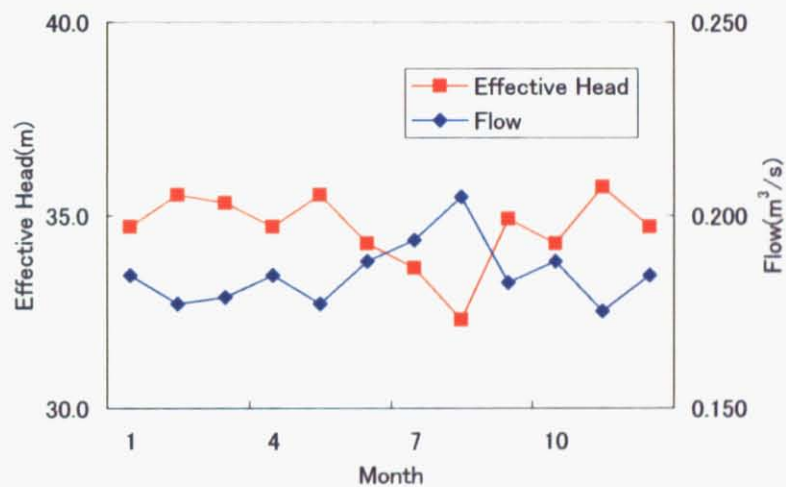


図 44 各月の有効落差及び受水量（上野）

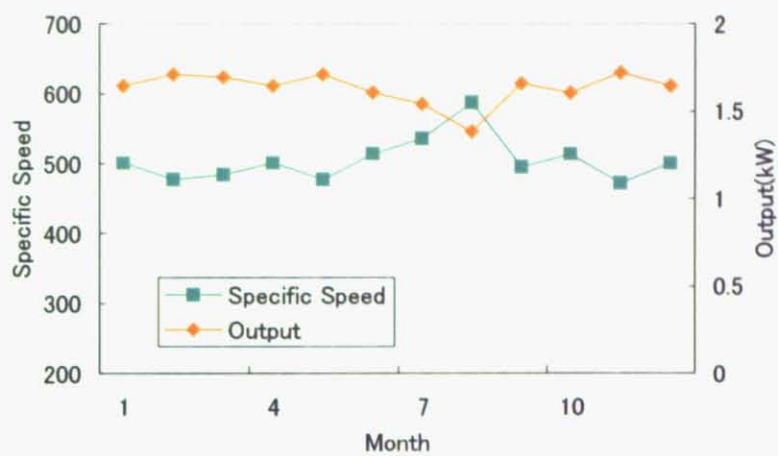


図 45 各月の限界比速度及び出力（飯綱）

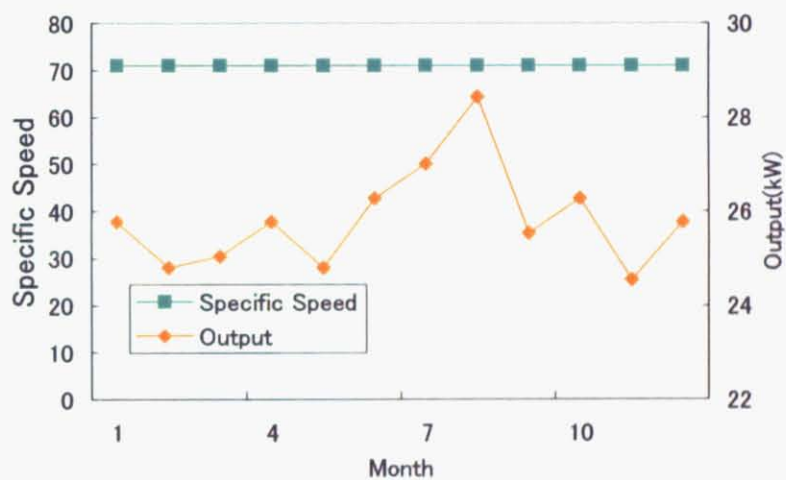


図 46 各月の限界比速度及び出力（往生地）

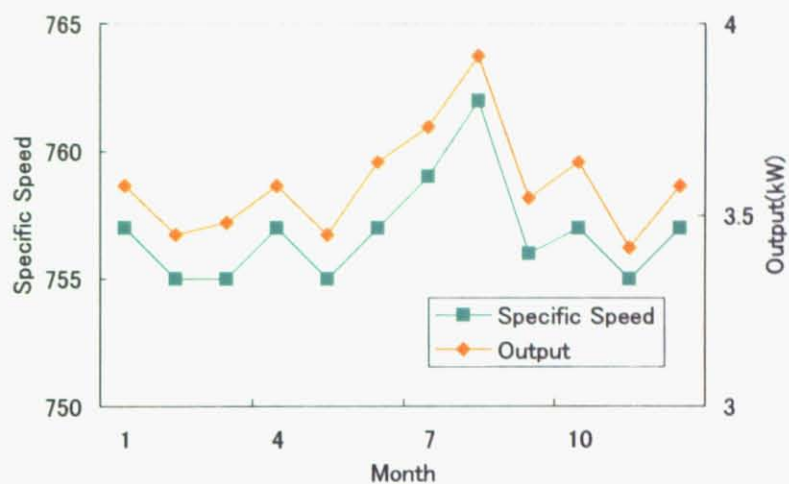


図 47 各月の限界比速度及び出力（夏目が原）

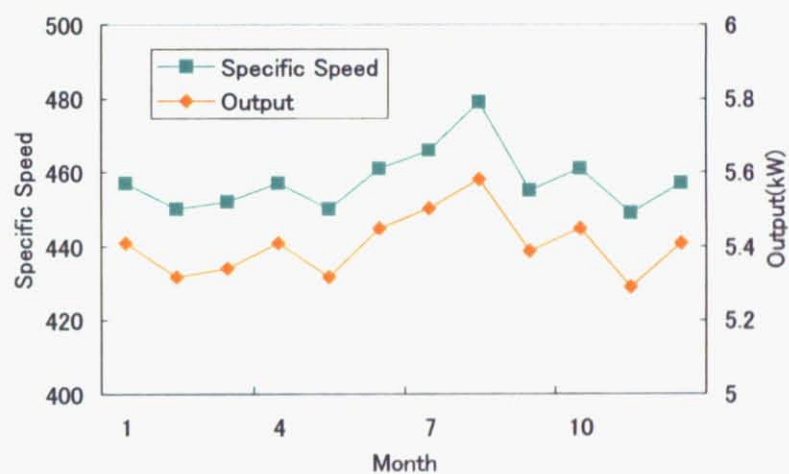


図 48 各月の限界比速度及び出力（上野）

表 16 各配水場での比速度、有効落差、流量の最大最小値及びその差

ID	Output(kW)	Specific Speed			Water Head(m)			Flow(m <sup>3</sup> /s)		
	Max	Max	Min	Max-Min	Max	Min	Max-Min	Max	Min	Max-Min
2	1.7	587	472	115	33.0	23.0	10.0	0.073	0.063	0.011
3	28.4	71	71	0	564	558	6	0.057	0.049	0.008
5	3.9	762	755	7	14.2	13.9	0.3	0.345	0.296	0.050
6	5.6	479	449	30	35.7	32.3	3.4	0.205	0.175	0.030



## 6.2. ケース 1：給水量の増減 (Growth Rate of Supplied Water)

平成 11 年から平成 16 年までの 1 日平均給水量を見ると、毎年増減率は $-3\%$ ～ $+4\%$ の間で推移している<sup>xxvi</sup>。今後 22 年間の間に上記増減率で給水量が変化した場合、発電量はどの要に推移するか計算を行った。給水量減少による発電量減少のリスクがどの程度存在するかについて調べることを目的とする。

### 6.2.1. 方法 (Method)

6.1 の状態から給水量を毎年増減率 $-3\%$ ～ $+4\%$ 変化させた。増減は各配水場同じ割合で行う。

### 6.2.2. 結果 (Result)

長野モデルを用いて給水量変化率が前年比 $-3\%$ から $4\%$ で推移した場合について年間可能発電量を計算したところ、以下の図 49 のようになった。年間可能発電量は $-3\%$ の場合は 20 万 kWh であり、 $4\%$ の場合は 55 万 kWh である。一人当たりの配水量は一定として計算しているため、人口の増加は配水量増加と同値である。 $-3\%$ から $4\%$ で推移した場合年間可能発電量は 200MWh/year から 550MWh/year の間で推移する。

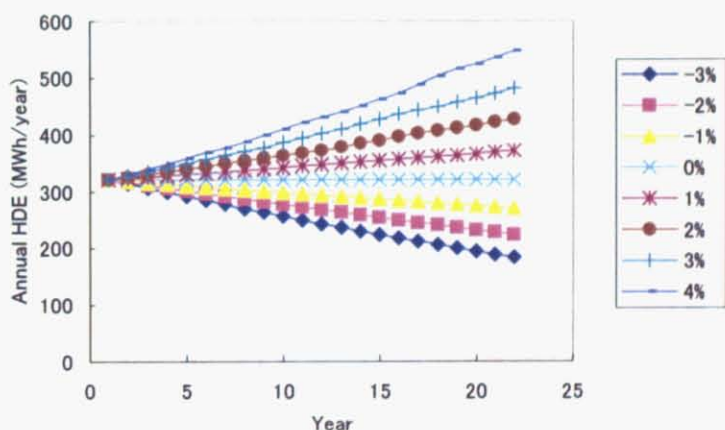


図 49 人口増加率の変化と年間可能発電量推移（長野）

## 6.3. ケース 2：管径の変化 (Radius)

水道管の管径を大きくすると Hazen-Williams 公式より送水必要圧を小さくすることが可能である。現在の水道管をある割合で大きくしたときに、発電量がどの程度大きくなるか計算した。発電量増加量を見積もることにより、水道管管径が発電量に与える影響について調べた。

### 6.3.1. 方法 (Method)

6.1 の状態から管径を 0.99 倍～2.0 倍変化させた。

### 6.3.2. 結果 (Result)

半径と総発電量の関係は図 50 のようになる。半径が大きくなるにつれて総発電量が低下する千葉とは異なり、長野市の場合半径が大きくなるにつれて発電量は増加する。未利用落差利用型の場合、半径が増大した場合送水必要圧が小さくなり余剰落差が増大する。従って総発電量は増加する。余剰落差は標高差という限界が存在する為、総発電量は 800 万 kWh 付近に収束している。

半径と建設単価の関係では、半径増大によって発電量が増加する為に建設単価は減少する。しかしながら発電量が 800 万 kWh 収束する為に建設単価としても 130 万円/kW 程度に収束する。NPV も同様の理由で 2000 万円付近に収束、削減単価は 22 円/kg-CO<sub>2</sub> に収束するという計算結果が得られた。

既存水道の半径を大きくすることによって、より多くの落差による位置エネルギーを利用することができる。水道管を大きくするには相応の費用がかかる為、ただ大きくすればいいという訳ではなく、適切な半径の大きさを見極める必要がある。水道管設置の工事費、水道管の費用（管径による値段）等のデータを手に入れることができれば、最適な半径を検討できる。工事の費用対効果及び上記各グラフを考慮すると、1.5 倍程度に管径を大きくすることを検討すべきであり、それ以上大きくした場合あまり各指標に改善は見られない。

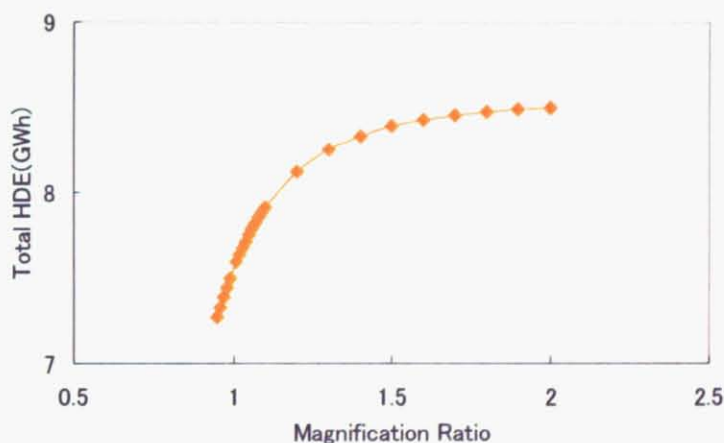


図 50 管径倍率と総発電量(kWh)



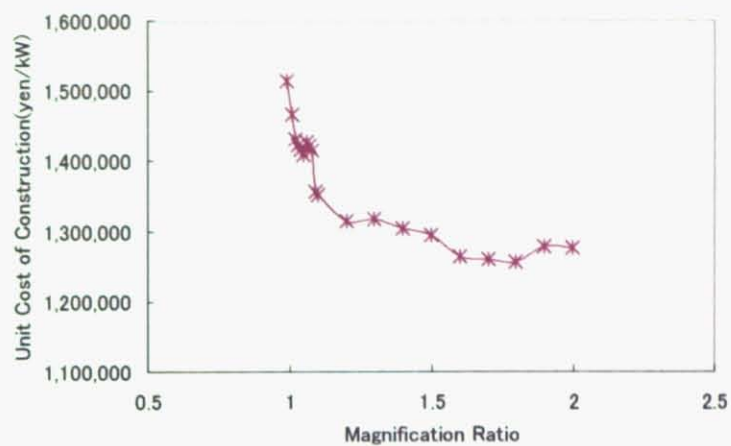


図 51 管径倍率と建設単価 (yen/kW)

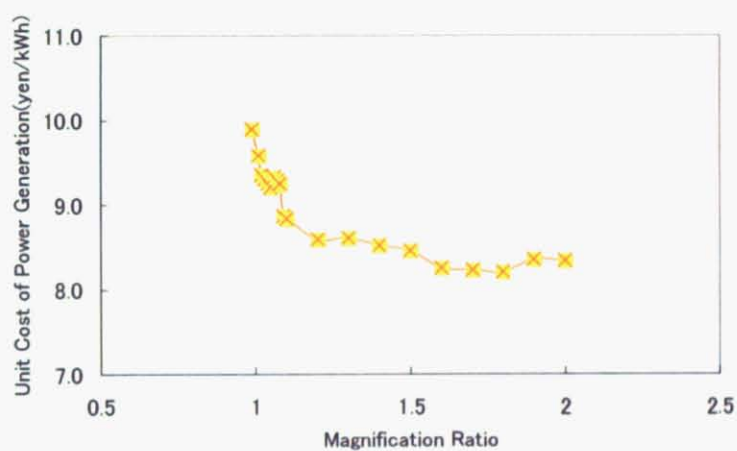


図 52 管径倍率と発電原価(yen/kWh)

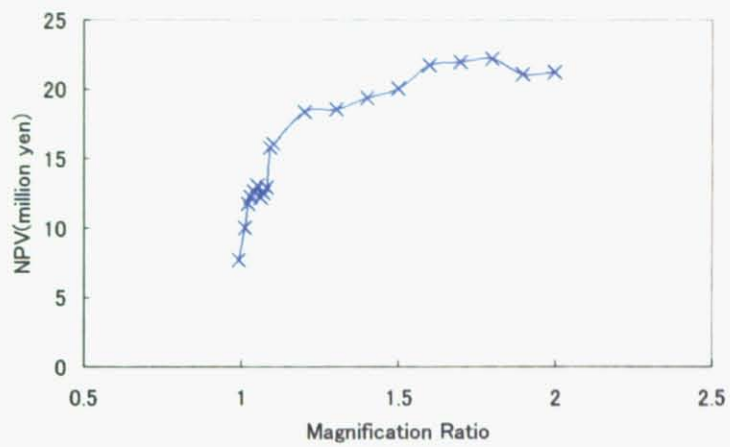


図 53 管径倍率と NPV (million yen)

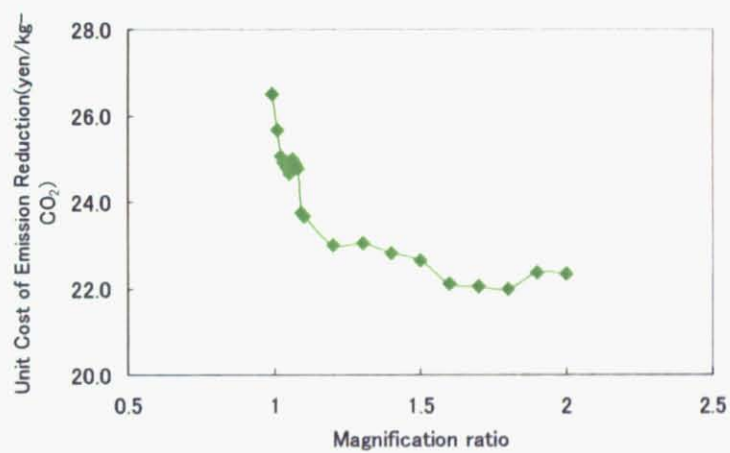


図 54 管径倍率と削減単価 (yen/kg-CO<sub>2</sub>)

## 7. 一般モデルでのケーススタディ(G-Case)

千葉県北部地域、長野と詳細なデータからモデルを作成し、年間可能発電量等の指標からプロジェクトの実現可能性について分析を行ってきた。本章ではより一般的な議論をする為に 3.5.3 で述べたような推定式を用いた一般モデルを用いて計算を行う。千葉県北部や長野と異なり、水道建設前では対象地域の配水場の位置や標高、水道管の長さ、直径などのデータが 5 章、6 章のように手に入るとは限らない。

7 章では給水人口・給水域面積という比較的入手が容易なデータと、配水量の月変動幅・1 人 1 日当たりの消費水量・取水点と消費地域の平均標高差・配水量の分布という予測値を用いてパイプライン、配水場に関する各種パラメータを推測し計算を行う。

第 1 に詳細なモデルと推定式を用いた一般モデルの計算結果を比較することにより推定式の有意性について検討を行う。その後各パラメータについて感度分析を行い、各指標への影響が大きいパラメータを変数として導入可能な地域の選定を試みる。加えて水道建設が計画されている具体的な都市での導入可能性についても分析を行った。

### 7.1. 詳細モデルとの計算結果比較 (Comparison with C-model and N-Model)

一般モデルでの計算結果と 5 章 6 章で用いた詳細なモデルの計算結果を比較し、一般モデルでの計算結果の値がどの程度現実を表しているかについて分析を行った。

#### 7.1.1. 方法 (Method)

3.5.3 の一般モデルに以下表 17 の千葉県北部地域及び長野市初年の給水人口、標高差、給水区域面積、1 人 1 日当たりの消費水量、配水場数を入力する。長野市の場合は複数取水点が存在し、取水量の少ない地点の標高が高い為、取水量の比の逆数を流量に乗じた値を平均した 109m という数字を用いた。また人口も配水量から逆算した 80,000 人という数字を用いて計算を行った。年間可能発電量等の計算結果について、詳細なモデルの結果とどの程度結果に差が出るかを調べた。月変動幅は 0.1 とし、分布傾向は 0 として計算を行った。

表 17 一般モデルへの入力値

	給水人口	面積 (km <sup>2</sup> )	消費量 (m <sup>3</sup> /day)	標高差 (m)	月変動幅	分布傾向	配水場数
Chiba	723,155	254.7	0.22	-17	0.1	0	13
Nagano	80,000	171.8	0.41	109	0.1	0	4

#### 7.1.2. 結果と考察 (Result and Conclusion)

一般モデルを用いた計算では 5,6 章での計算結果に比べ、各指標が同等かやや導入に対して有利に見積もられている。特に長野市ではずれが大きく現在価値については約 3 倍とな

っている。一般モデルの分布傾向を 0 として計算しており、配水量の分布にばらつきがある詳細なモデルに比べてずれが生じていると考えられる。特に長野市の場合は計算対象の地点が小さい為、分布のばらつきの各指標に対する影響大きいと考えられる。千葉のように配水場が多い都市ではある程度近い数字で計算されているため、規模の比較的大きな都市では各指標を導入するか否かの概算の参考にできると考えられるが、導入に有利な計算結果となることには注意しなければならない。表 18 の G-MI(C)は一般モデルに千葉のパラメータを入力した場合の計算結果を、G-MI(N)は長野のデータを入力した計算結果である。

表 18 モデル比較（一般モデルと詳細モデル）

	一般		経済面						環境面	
	総発電量	平均	総工費	年経費	建設単価	発電原価	回収	NPV	総削減	削減単価
	kWh	kWh/day	百万円	百万円	yen/kW	yen/kWh	年	百万円	t-CO <sub>2</sub>	円/kg-CO <sub>2</sub>
C-Model	2,320,000	289	29	1.7	2,400,000	15.7	*	-10.4	1,550	42.1
G-MI(C)	2,450,000	305	27	1.6	2,120,000	13.9	*	-7.12	1,640	37.2
N-Model	7,040,000	877	54	3.1	1,470,000	9.7	16	9.5	4,720	25.8
G-MI(N)	7,040,000	877	40	2.3	1,090,000	7.2	10	26.9	4,720	19.2

### 7.1.3. 各パラメータの感度分析 (Sensibility Analysis)

一般モデルにおいてあるパラメータを持った状態を初期状態とし、各パラメータをそれぞれ 90%から 110%の間で変化させた場合年間可能発電量、現在価値、削減単価が何%変化するかについて計算を行った。

本節における初期状態を以下の表 19 に示す。

表 19 感度分析の初期状態

給水人口	面積 (km <sup>2</sup> )	消費量 (m <sup>3</sup> /day)	標高差 (m)	月係数	分布係数	配水場数
500000	200	0.22	100	0.1	0	11

### 7.1.4. 給水人口(Supplied Population)

#### 7.1.4.1. 総発電量

給水人口の変化に対する総発電量の計算結果は以下図 55 のようになる。給水人口と総発

電量、圧力回収型・余剰落差利用による発電量は比例する。給水人口が 10%増加すると発電量は 19.6GWh(8.42%増)となり 10%減少すると 16.5GWh(8.84%減)となった。圧力回収型発電量、余剰落差利用型発電量は同程度増減している。給水人口が増加することにより、各配水場への配水量は増加し、必要送水圧はやや増加する。これに伴って回収される圧力エネルギーが微増する為発電量が増加する。未利用落差利用型の場合は必要送水圧増加によってやや発電に利用できる落差は減少するが、それ以上に流量増加による発電量が大きい為以下のようなグラフになると考えられる。

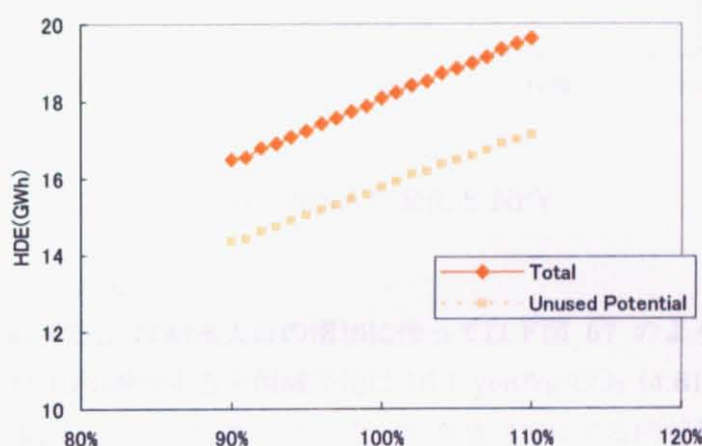


図 55 給水人口の変化と総発電量 (22 年間)

#### 7.1.4.2. 現在価値(Net Present Value)

NPV は給水人口が 10%増加すると 9710 万円(15.6%増)となり 10%減少すると 7010 万円(16.5 %減)となった。給水人口増加に伴う配水量増加のため、各配水場での最大出力が増大し、初期投資である概算工事費及び付随する年経費が増加する。しかしながら発電量増加による利益が支出を上回る為 NPV は上昇すると考えられる。



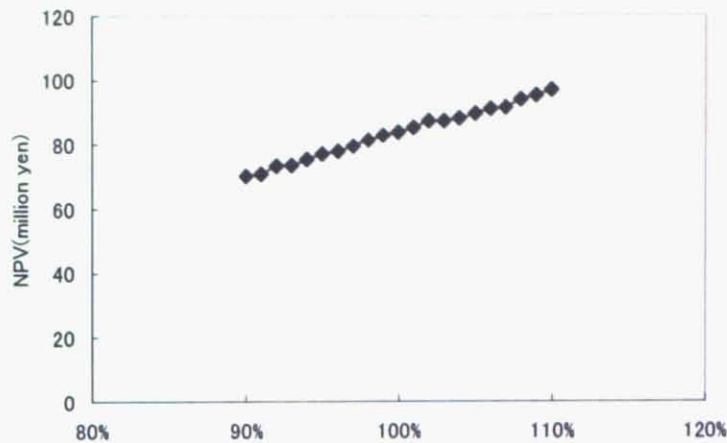


図 56 給水人口変化と NPV

#### 7.1.4.3. 削減単価

削減単価 (yen/kg·CO<sub>2</sub>) は給水人口の増加に伴って以下図 57 のように減少する。一人当たりの給水人口が 10%増加すると削減単価は 16.1 yen/kg·CO<sub>2</sub> (4.81%減)となり 10%減少すると 18.0 yen/kg·CO<sub>2</sub> (6.07%増)となった。発電量増加による削減量の増加が出力上昇によるコスト増加を上回っている為削減単価は減少していく。

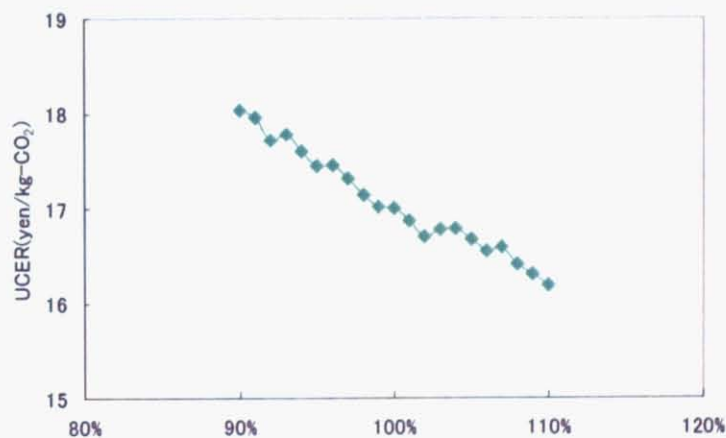


図 57 給水人口変化と削減単価

#### 7.1.5. 給水区域面積(Area)

給水区域の面積は現在の水道計画の際にも考慮され、どの地点に配水等水道設備を設置するか参考になる。マイクロ水力発電を考慮した場合も給水区域が変化すると、必要送水圧が大小すると考えられ、それに伴って発電量が変化すると考えられる。配水区域の

面積 200km<sup>2</sup> を 10%増減することにより 3 つの指標の変化を調べた。

#### 7.1.5.1. 総発電量

給水区域の面積変化に対する 22 年間の総発電量の変化は以下ようになった。給水区域の面積が 10%増加すると総発電量は 17.9GWh(0.63%減)となり 10%減少すると 18.1GWh(0.60%増)となった。圧力回収型発電による発電量が減少している。

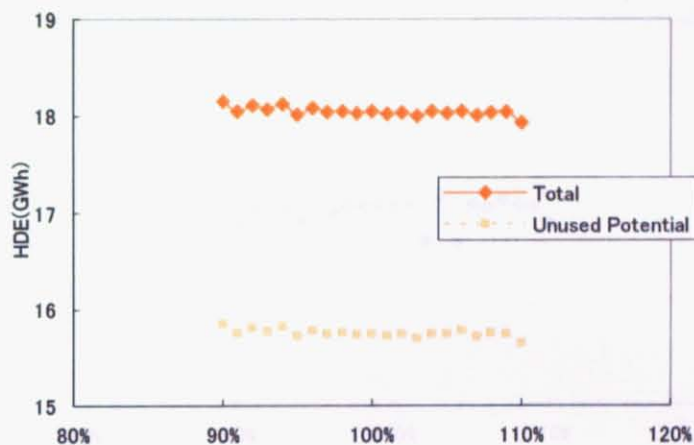


図 58 給水区域面積と総発電量

#### 7.1.5.2. 現在価値(Net Present Value)

プロジェクトの NPV は給水区域面積が 10%増加すると 8350 万円(0.02%増)となり 10%減少すると 8480 万円(1.42%増)となった。給水区域増加による 7.1.5.2 のような発電量の減少により NPV は減少すると見られるが、最大出力低下によりコストも減少したため微増となっていると考える。コスト減と利益のバランスにより波線となっているが傾向としては面積が広くなると現在価値は低くなっている。

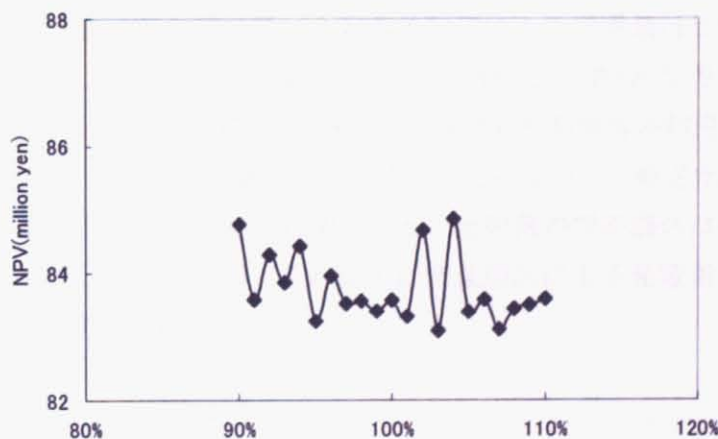


図 59 給水区域面積と NPV

### 7.1.5.3. 削減単価

削減単価 (yen/kg-CO<sub>2</sub>) は給水区域面積の変化によって以下図 60 のように推移する。一人当たりの給水人口が 10%増加すると削減単価は 16.95 yen/kg-CO<sub>2</sub> (0.48%減)となり 10%減少すると 16.93yen/kg-CO<sub>2</sub> (0.60%減)となった。給水区域の面積変化に対して削減単価は殆ど変わらなかった。

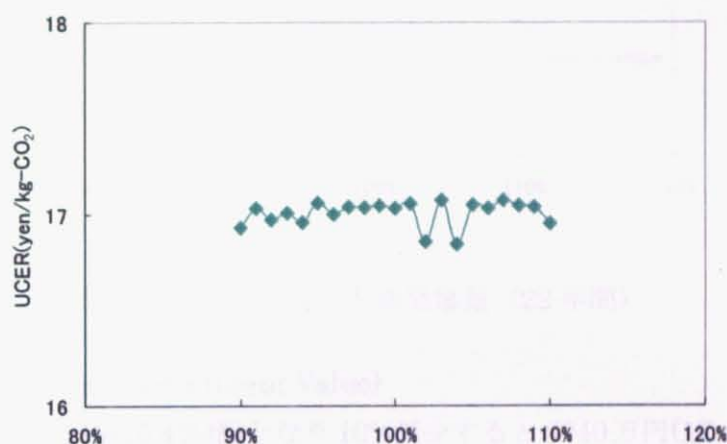


図 60 給水区域面積と削減単価

### 7.1.6. 一人当たりの平均水消費量(Consumption)

平均水消費量は文化、暮らしによって大きく異なる。水道計画の際にも重要なパラメータの1つである。

#### 7.1.6.1. 総発電量

1人が1日あたりに消費する水量の変化に対する総発電量の変化は以下図 60 のようになった。消費量と総発電量、圧力回収型・余剰落差利用による発電量は比例する。1日あたりの消費量が 10%増加すると発電量は 19.6GWh(8.42%増)となり 10%減少すると 16.4GWh(9.25%減)となった。圧力回収型発電は微増であり余剰落差利用型発電が大きく増加している。1人当たりの平均水消費量が増加することにより、必要送水圧はやや増加しそれに伴って回収できる圧力エネルギーも増加する。余剰落差型の場合は必要送水圧増加によってやや未利用落差は減少するが、それ以上に流量増加による発電量が多い為以下のようなグラフになると考えられる。

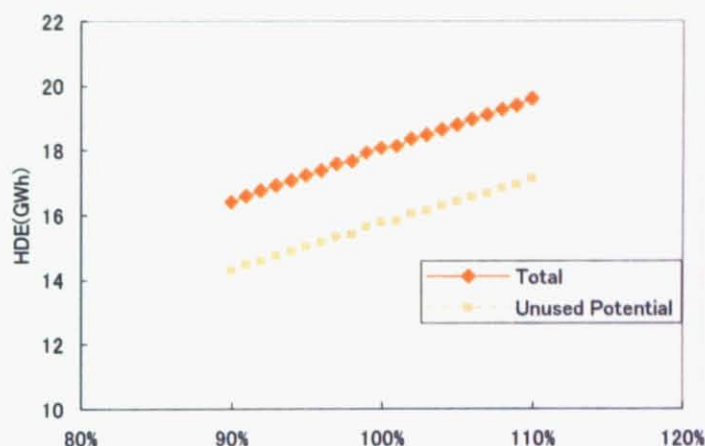


図 61 消費量の変化と総発電量 (22 年間)

#### 7.1.6.2. 現在価値(Net Present Value)

NPVは消費量が10万円(15.4%増)となり10%減少すると6940万円(17.4%減)となった。各配水場への配水量増加の為、各配水場での最大出力が増加し、初期投資である概算工事費及び付随する年経費が増加する。しかしながら発電量増加による利益がコスト増を上回る為 NPV は上昇する。

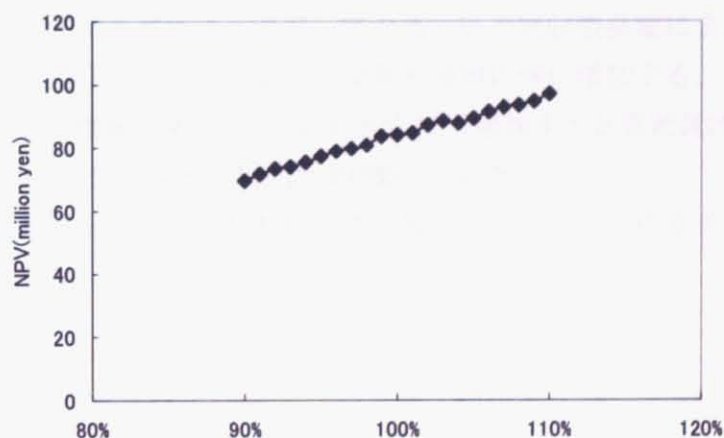


図 62 消費量変化と NPV

#### 7.1.6.3. 削減単価

削減単価 (yen/kg-CO<sub>2</sub>) は消費量の変化によって以下図 63 のように推移する。1人当たりの1日平均水消費量が10%増加すると削減単価は16.2 yen/kg-CO<sub>2</sub> (4.74%減)となり10%減少すると18.1 yen/kg-CO<sub>2</sub> (6.55%増)となった。削減単価は消費量増加に伴って発電



量増加割合がコストの増加割合を上回っている為減少する。

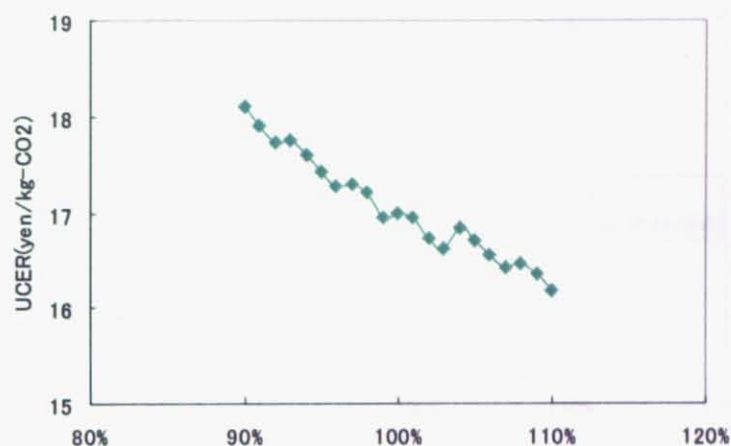


図 63 消費量変化と削減単価

#### 7.1.7. 標高差 (Vertical Drop)

取水地点と配水場郡が存在する都市との標高差は、水力発電にとって重要なファクターの1つである。標高差が各指標にどの程度影響を与えるかについて計算を行った。

##### 7.1.7.1. 総発電量

取水点と消費する地域の標高差変化に対する総発電量の変化は以下図 64 のようになった。配水量、各管に関するパラメータが一定の為、圧力回収型発電による発電量は一定であり、余剰落差利用型発電による発電量は標高差増加に伴い増加する。したがって標高差が大きくなるほど総発電量は増加する。標高差が 10% 増加すると発電量は 20.3GWh(12.1% 増)となり、10% 減少すると 15.9GWh(12.3% 減)となった。

未利用落差は取水点を結ぶ管で行われる為流量が多い。よって標高差が大きくなれば余剰落差利用型の発電量は大きく増加する。



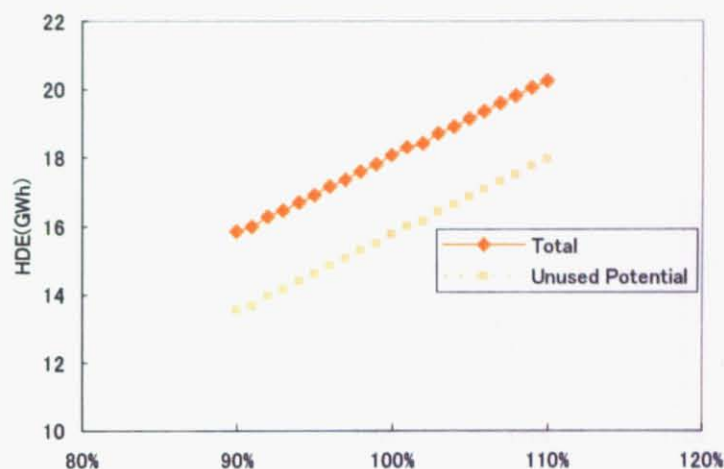


図 64 標高差と総発電量

#### 7.1.7.2. 現在価値(Net Present Value)

NPV は 10%増加すると 1 億 400 万円(24.1%増)となり、10%減少すると 6460 万円(23.1%減)となった。標高差の増減によって 7.1.7.2 で示したように未利用落差利用型発電の発電量が大きく増減する為、NPV についても大きく増減すると考えられる。

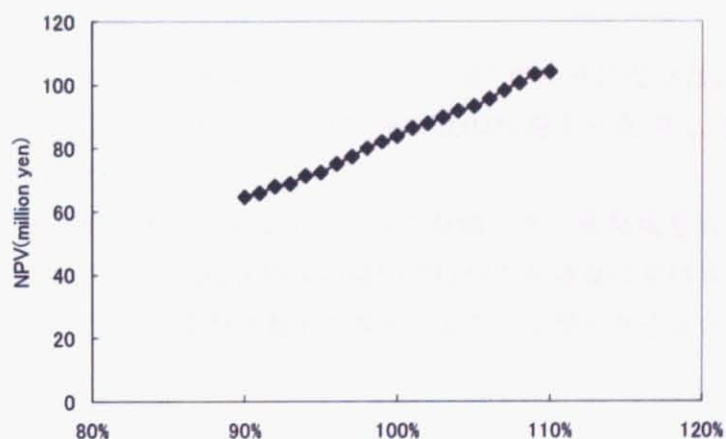


図 65 標高差と NPV

#### 7.1.7.3. 削減単価

削減単価 (yen/kg-CO<sub>2</sub>) は消費量の変化によって以下図 66 のように推移する。標高差が 10%増加すると削減単価は 15.7yen/kg-CO<sub>2</sub> (7.86%減)となり 10%減少すると 18.5 yen/kg-CO<sub>2</sub> (8.97%増)となった。削減単価は消費量増加に伴って発電量増加の割合が発電規模増大によるコスト増の割合を大きく上回っている為減少する。

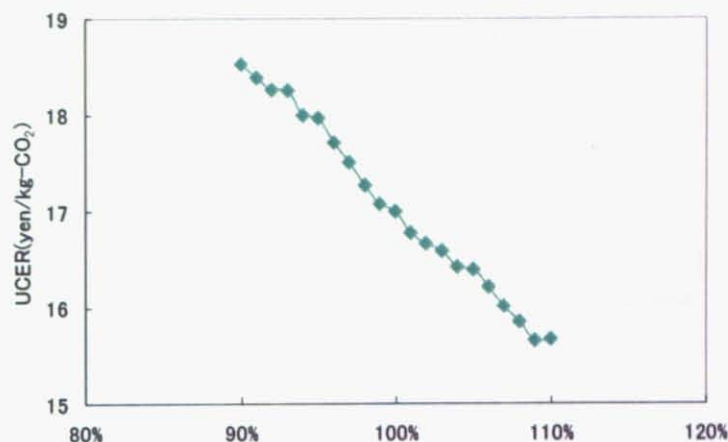


図 66 標高差と削減単価

#### 7.1.8. 月変動幅 (Fluctuation Range of Consumption)

月変動幅は初期状態では 0.1 であり、最大の月で平均配水量の 1.1 倍、最小の月で平均配水量の 0.9 倍である。月変動幅を 0.99 から 0.11 まで変動させた場合の各指標の変化について計算を行った。

##### 7.1.8.1. 総発電量

月変動係数変化に対する総発電量の変化は以下図 67 のようになった。22 年間の。標高差が 10 % 増加すると発電量は 18.07GWh(0.03% 減)となり、10% 減少すると 18.09GWh(0.08% 増)となった。

月変動が小さいほうが高効率のまま多くの月で発電でき、総発電量も大きくなると考えられるが、月変動係数が 1.11~0.99 程度の違いでは殆ど発電量に差は見られなかった。月変動係数の影響を見るには、月変動係数 0.5 等より大きな変動がある場合についても計算する必要がある。

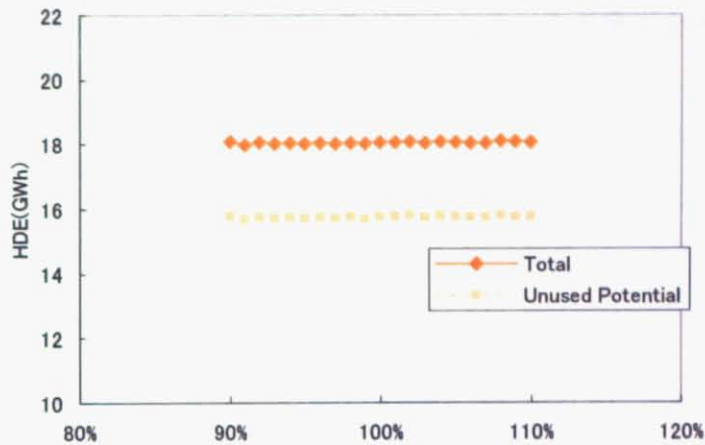


図 67 月変動係数と総発電量

#### 7.1.8.2. 現在価値(Net Present Value)

現在価値 NPV は月変動幅が 10%増加すると 8390 万円(0.06%減)となり、10%減少すると 8400 万円(0.20%増)となった。変動が小さいほど発電量が大きくなるという傾向は読み取れるが、NPV の場合も発電量と同じく微小な変化であった。

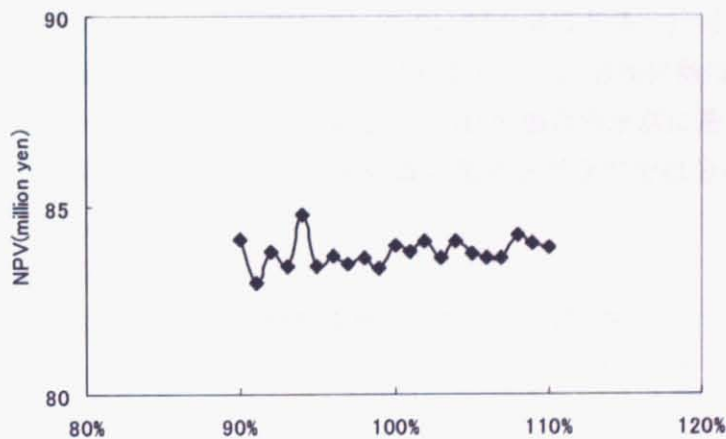


図 68 月変動係数と NPV

#### 7.1.8.3. 削減単価

削減単価 (yen/kg-CO<sub>2</sub>) は月変動幅の増減によって以下図 69 のように推移する。月変動幅が 10%増加すると削減単価は 17.0yen/kg-CO<sub>2</sub> (0.02%増)となり 10%減少すると 16.9 yen/kg-CO<sub>2</sub> (0.09%減)となった。

各配水場の最大出力に合わせて発電所を建設すると想定して計算をする為、月変動幅が

大きい場合、最大出力近くで発電できる月は小さい。よって月変動幅が小さいほど削減単価は安くなると予想される。しかしながら差が微小な為、この推定を確証するにはさらに大きな変動について試算する必要がある。

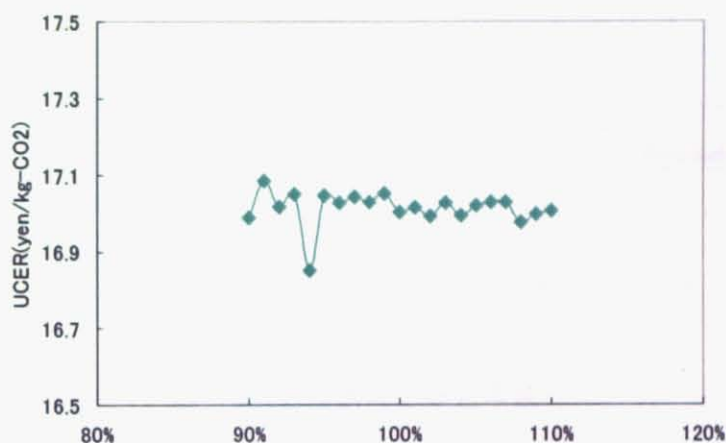


図 69 月変動係数と削減単価

#### 7.1.9. 分布傾向(Spread Factor)

各配水場への配水量が、「取水点（浄水場）に近い配水場ほど多い」場合と「取水点（浄水場）かに近い配水場ほど少ない」場合について比較を行う。分布係数は-10 から+10 まで計算を行った。3 章で定義したように分布係数  $S_p=10$  の場合取水点に最も近い配水場は平均の 10%増しの配水量となる。以下の分布係数に関するグラフでは分布係数  $S_p=10$  を 110%、 $S_p=-10$  を 90%とする。

##### 7.1.9.1. 総発電量

分布傾向の変化に対する 22 年間の総発電量の変化は以下図 70 のようになった。分布係数  $S_p=10$  のとき総発電量は 18.1GWh(0.30%増)となり、 $S_p=-10$  では 18.0GWh(0.30%減)となった。

分布傾向が大きいほど圧力回収型発電の発電量が大きく  $S_p=-10$  では 2.29GWh であるのに対して  $S_p=10$  では 2.31GWh であった。余剰落差利用型に関しても分布係数が高いほど送水必要圧が小さくなるため、分布係数が高いほど発電量も大であった。

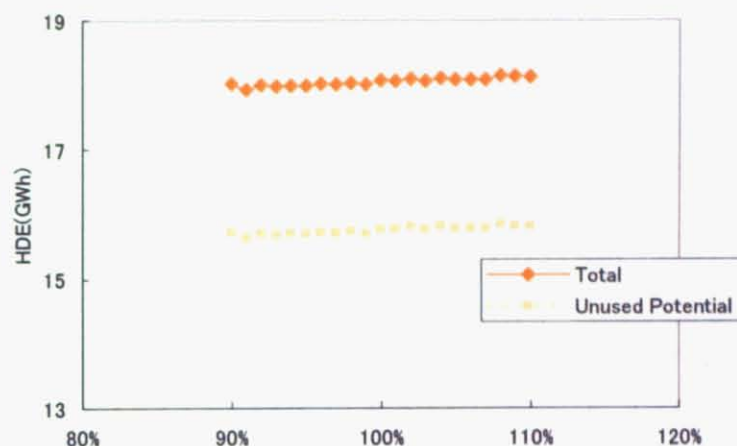


図 70 分布傾向と総発電量

#### 7.1.9.2. 現在価値(Net Present Value)

NPV は  $S_p=10$  では 8700 万円(3.7%増)となり、 $S_p=-10$  では 8330 万円(0.71%減)となった。分布係数が大きいほど取水点に近い配水場で大規模発電をする為発電量が増加し NPV は大きくなる。コスト面でも分布係数がマイナスの場合、余剰圧が大だが流量が小さい取水点近郊と、余剰圧が小さいが流量が多い取水点から離れた地点の両方で発電を行う為コストが大きくなることにより NPV は小さくなる。計算の都合上、配水場数の偶奇でグラフはジグザグになるが、傾向は偶奇別々にみると上のようになれる。

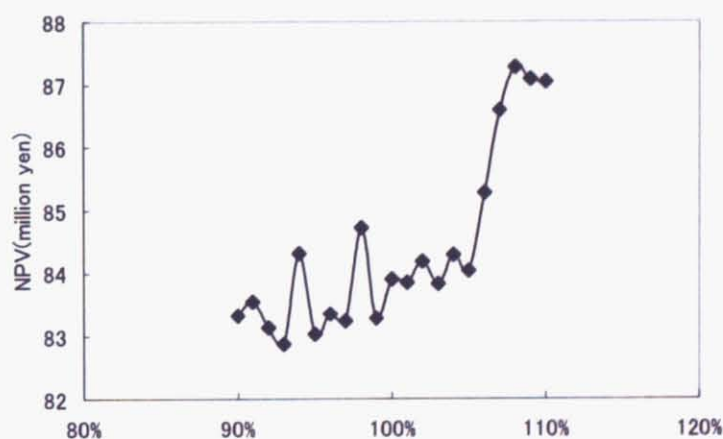


図 71 分布傾向と NPV



### 7.1.9.3. 削減単価

削減単価 (yen/kg-CO<sub>2</sub>) は分布傾向の変化によって以下図 72 のように推移する。S<sub>p</sub>=10 では削減単価は 16.7yen/kg-CO<sub>2</sub> (2.50%減)となり、S<sub>p</sub>=10 では 17.1yen/kg-CO<sub>2</sub> (0.29%増) となった。発電量増加とがコスト面での増加を上回る為削減単価は減少する。

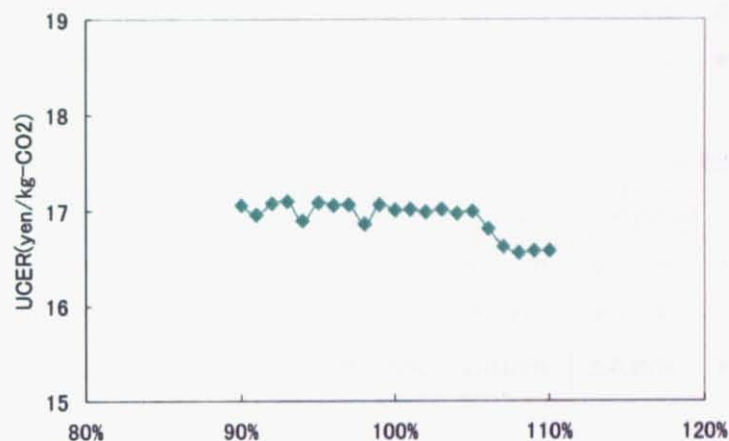


図 72 分布傾向と削減単価

### 7.1.10. まとめ (Summary)

感度分析の結果を表 20 にまとめる。総発電量、NPV、削減単価に影響が大きいパラメータは順に標高差、1人当たりの給水量、給水人口である。面積の観点では給水区域が広い都市ではなく狭い都市が望ましいが、上記 3 つのパラメータと比較して影響はそれほど大きくはない。総発電量の面でみると月変動幅はなるべく小さい地域での導入が望ましい。

ある特定地域に導入する場合 (人口、平均給水量、面積、標高差が決まっている)、取水点に近い配水場ほど配水量が多くなるような工夫も必要といえる。

表 20 感度分析（△はプラス、▼はマイナス）

	給水人口		給水区域面積		一人当たり	
	-10%	10%	-10%	10%	-10%	10%
総発電量	▼8.84%	△8.42%	△0.60%	▼0.63%	▼9.25%	△8.42%
NPV	▼16.5%	△15.6%	△1.42%	△0.02%	▼17.4%	△15.4%
削減単価	△6.07%	▼4.81%	▼0.60%	▼0.48%	△6.55%	▼4.74%

	標高差		月変動幅		分布傾向	
	-10%	10%	-10%	10%	-10%	10%
総発電量	▼12.1%	△12.3%	△0.08%	▼0.03%	▼0.30%	△0.30%
NPV	▼23.1%	△24.1%	△0.20%	▼0.06%	▼0.71%	△3.7%
削減単価	△8.97%	▼7.86%	▼0.09%	△0.02%	△0.29%	▼2.50%

## 7.2. 配水場数の感度 (The Number of Water Distribution Facilities)

前節では配水場の数を固定して計算を行ったが、配水場の数が減れば 1 つの配水場あたりの配水量が増加し、それに伴って受水圧も変化する為各指標が変化すると考えられる。よって本節では配水場数が各指標に与える影響について計算を行った。

### 7.2.1. 方法 (Method)

以下の条件の下で配水場の数を変えて計算を行った。規模は千葉県北部域とほぼ同等であり、余剰落差利用型発電への影響を見るために標高差を 50m とした

表 21 初期条件（配水場数の影響）

給水人口	面積 (km <sup>2</sup> )	消費量 (m <sup>3</sup> /day)	標高差 (m)	月変動幅	分布傾向
500,000	250	0.22	50	0.1	0

## 7.2.2. 結果と考察 (Result and Conclusion)

### 7.2.2.1. 総発電量

図 73 をみると配水場が多いほど総発電量は増加し、配水場数 15 の場合では 7 GWh を超えている。一方で配水場数 6 の場合は 6.51GWh となっている。内訳でみると図 74 のように配水場が多くなるほど圧力回収型による発電量は減少し、余剰落差利用型による発電量が増加している。余剰落差利用型の発電は最も流量の多い区間で発電する為、配水場数増加による送水圧の減少で、余剰落差利用型発電の配水量は増加する。結果として総発電量は増加傾向にあるが、余剰落差利用型による発電量には限界が存在する為伸びは頭打ち

になっている。

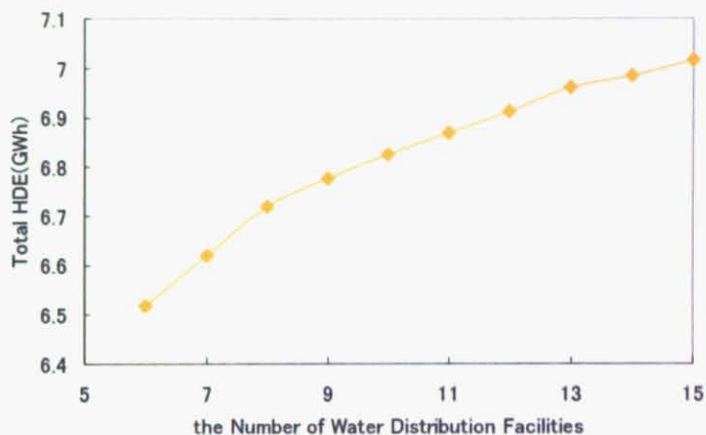


図 73 配水場数と 22 年間の総発電量

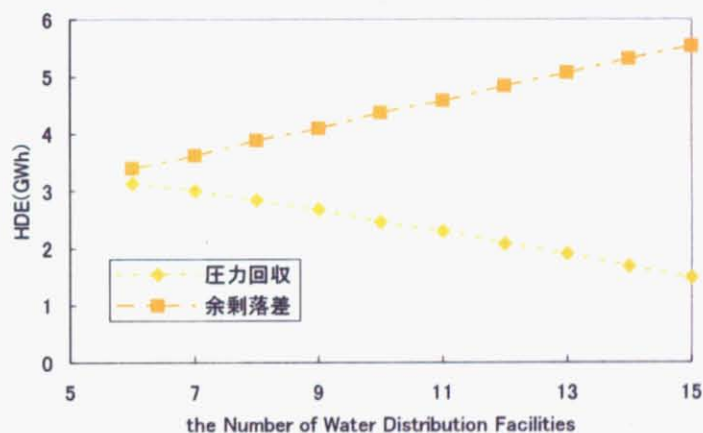


図 74 配水場数と 2 方式の発電による発電量

#### 7.2.2.2. 現在価値

NPV は配水場数 6 から 12 で負の値をとり、13 から 15 で正の値をとった。13 から 15 では 1000 万円前後の値をとっている。配水場数が少ない場合は上で述べたように圧力回収型発電により発電量を得るが、中でも配水場数が多い 10 箇所や 11 箇所の場合は多くの発電所を建設する為コストがかさみマイナスの値が大きくなっている。5 から 7 箇所の場合は発電量が小さく利益が小さいが、建設コストも小さい為以下の図 75 のように変動していると考えられる。NPV の面から考えると余剰落差を利用できる場合は配水場数が多いほうが有利であり、圧力回収型のみしか利用できない場合、配水場数は少なく抑えることにより

圧力回収による発電量を大きく、建設コストを小さく抑えることができる。ただしこの場合ポンプ揚圧に必要なエネルギーも増大すると考えられ、ポンプも考慮に入れて検討の必要がある。

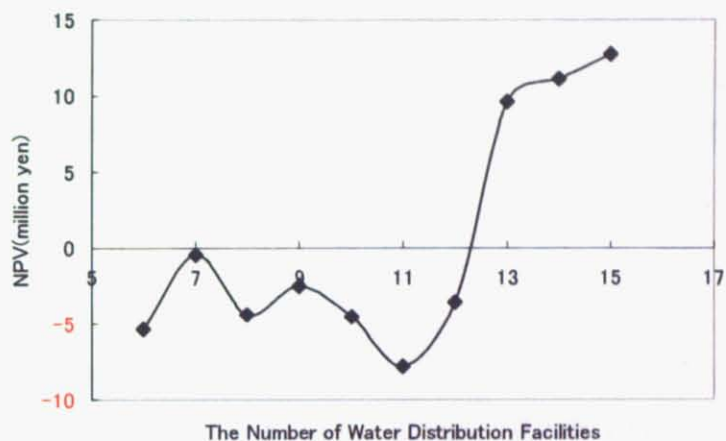


図 75 配水場数と NPV

#### 7.2.2.3. 削減単価

下図 76 のように配水場数が増加すれば削減単価も減少する。ただし未利用落差利用型発電の発電量は限界が存在する為これ以上配水場数が増加した場合も 25 円/kg-CO<sub>2</sub> 前後で推移すると考えられる。

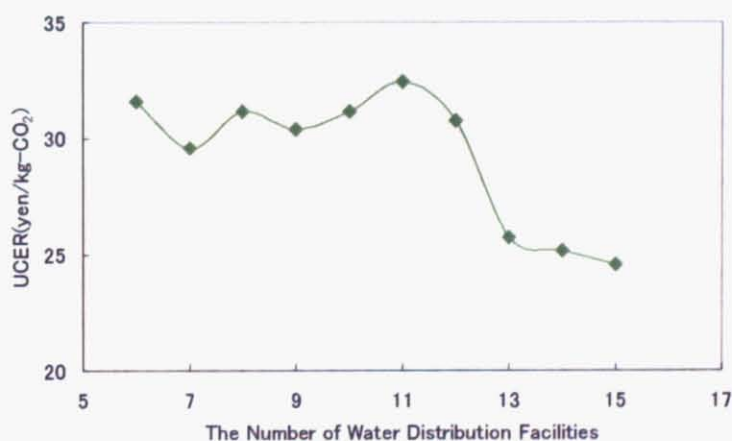


図 76 配水場数と削減単価

### 7.3. システム導入対象地域の選定 (Appropriate City)

7.1.10 より給水人口、標高差、一人当たりの水消費量という 3 つのパラメータが各指標

に与える影響は大きい。本節ではマイクロ水力発電付き水道システムの導入に適した地域を選定する為に、1人当たりの水消費量を定数として各指標について計算を行った。ここでは現在価値が赤字と黒字の境界となる標高を、「限界標高」と呼ぶこととする。限界標高を計算することによりプロジェクト導入を推進し得る都市を決める参考資料とすることがができる。7.1.2より一般モデルを用いて計算した各指標は、千葉県北部地域のような大規模な都市については近い数字をとる為、参考資料として計算結果は有用であると考え。1人あたりの消費量が異なる場合も、給水人口と1人当たりの消費量の積は総配水量であり、換算することにより同じ図を用いることができる。

7.3.1. 方法 (Method)

以下表 22 の条件の下で標高差及び給水人口を変えて計算を行った。標高差は 5m 単位、人口は 1 万人単位で計算を行った。人口の最大値は 100,000 人（人口密度 4,000 人/km<sup>2</sup>）、最小値は 200,000 人（人口密度 800 人/km<sup>2</sup>）。標高差は最大値 100m、最小値を 10m とした。またアジア・太平洋地域の平均人口増加率が 1.3% であり都市部は約 2 倍である<sup>xxvii</sup>という環境白書の記述を参考として、アジア地域の都市を想定して人口増加率 2.6% でも計算を行った。またアフリカの平均人口増加率である 3.5% についても計算を行った。

表 22 限界標高計算の初期条件

面積 (km <sup>2</sup> )	消費量 (m <sup>3</sup> /day)	月変動幅	分布傾向
250	0.22	0.1	0

7.3.2. 結果と考察 (Result and Conclusion)

平均年間可能発電量は図 77 のようになった。40m 以下では圧力回収型のみしか行われず、人口に関わらず 200MWh 以下となっている。30 万人規模の都市の場合標高差が大きくなっても 400MWh 程度である。

発電原価は図 79 のようになった。グラフを横に見た場合 30m 以下でグラフが黄色からオレンジに切り替わるが、圧力回収型発電の場合、流量が増加によるコスト増で単価が高くなってしまふことがわかる。標高の増減みると余剰落差が利用できる 35 から 45m 付近までは圧力回収型のみしか行われていない為、価格は一定である。余剰落差発電が利用可能な標高差より大きい場合、標高が大きくなるにつれて価格は小さくなる。

現在価値は図 80 のようになる。グラフを縦に見ると余剰落差利用型の発電導入時に、コスト増の割合が発電量の増加割合を上回り一端低下するものの、標高差が更に大きくなるにつれて黒字へと転じる。またグラフを横に見ると給水人口が 250,000 人付近では圧力回収型発電のみでも黒字となっている。250,000 人付近では標高差が大きくなった場合に、一旦赤字に転落してから黒字になっているところからも、余剰落差が小さい場合は採算が合



わなことがわかる。

削減単価は図 81 のようになる。グラフを横に見ると現在価値と同様に 250,000 人付近で安価となっている。グラフを縦に見た場合、余剰落差が利用できる標高以降で徐々に安価となっている。

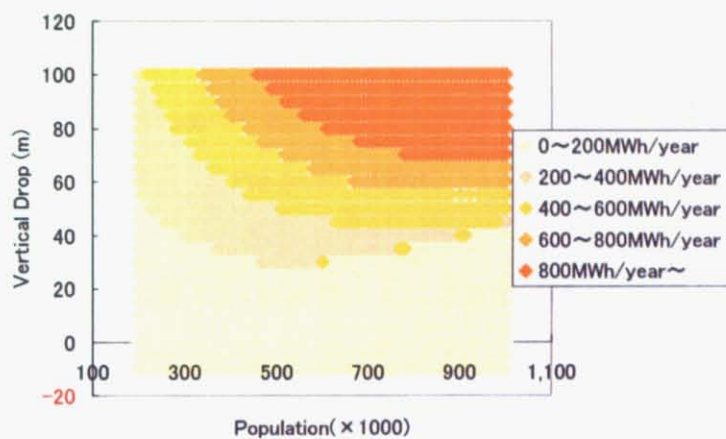


図 77 標高差・給水人口と平均年間可能発電量

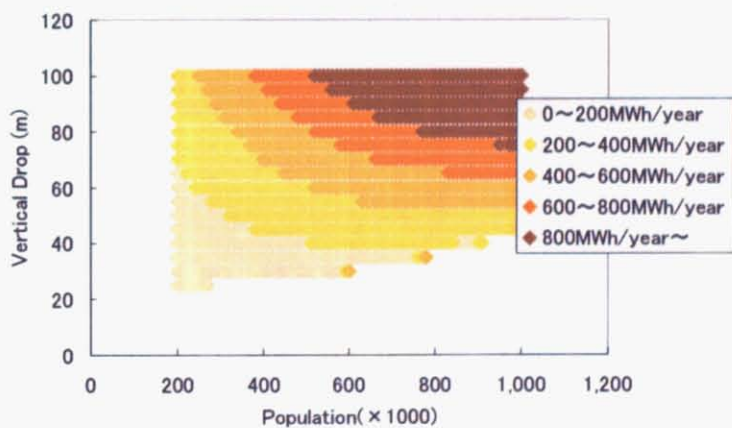


図 78 余剰落差利用型発電の平均年間可能発電量

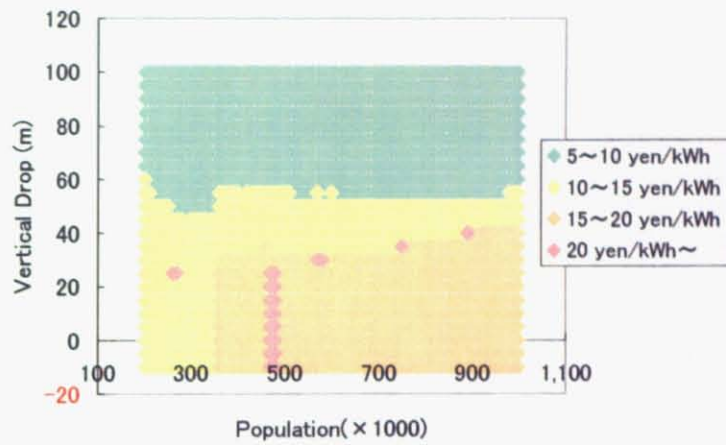


図 79 標高差・人口と発電原価

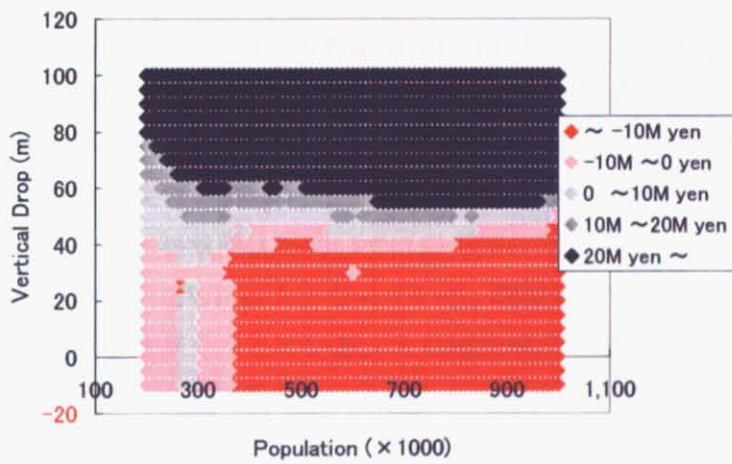


図 80 標高差・人口と現在価値



図 81 標高差・人口と削減単価(\$/t-CO<sub>2</sub>)

人口増加率を 2.6%、3.5%とした場合計算結果は以下の図のようになる。本研究の計算方法では、22 年後の送水量量に対応できる仕様のマイクロ水力発電機を導入するという計算を行う為、設置コストが増大する。現在価値でみると圧力回収型発電で黒字になっていた部分が赤字となっている。また限界標高も上昇しており、特に初期人口が多い場合ほど限界標高は大きくなっている。発電原価については圧力回収型で 10~15 円/kWh であった地点も 2.6%の上昇率では 20 円/kWh 以上となっている。削減単価も現在価値と同様にして初期人口が多いほど削減単価は高くなっている。人口増加率が 3.5%の場合送水に必要な圧力が大きくなる為、余剰落差利用型発電を行う為に必要な標高差が高くなり、図 83 のように標高差が 100m でも赤字となっている。圧力回収型発電についても配水量増加により設置コストの増大が流量増加に伴う発電量の増加の利益を上回り、赤字が大きくなっている。

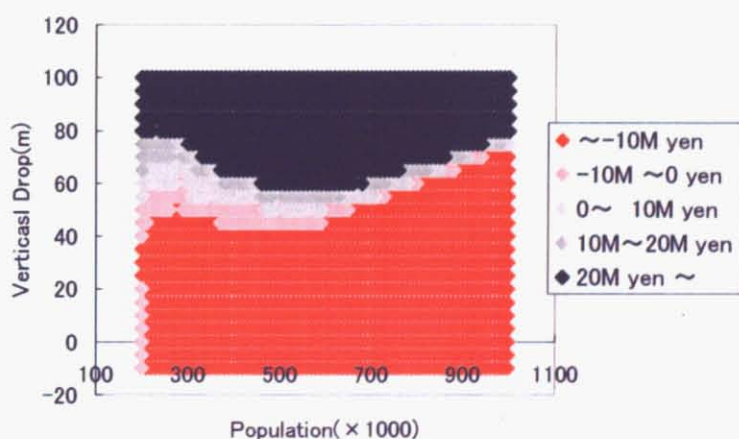


図 82 標高・人口と現在価値(人口増加率 年 2.6%)

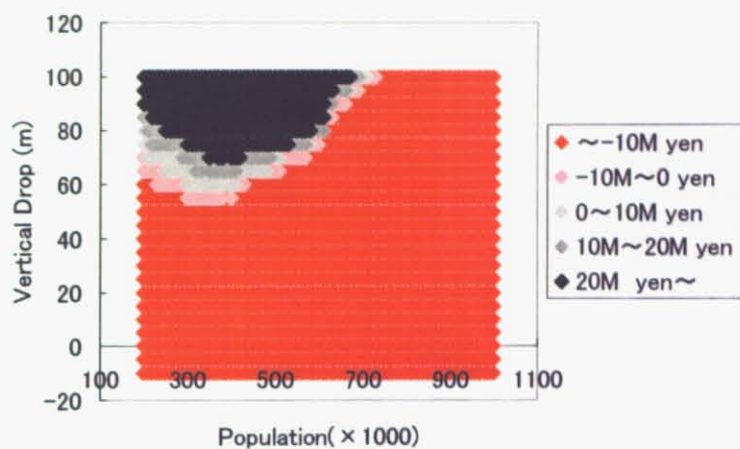


図 83 標高・人口と現在価値(人口増加率 年 3.5%)

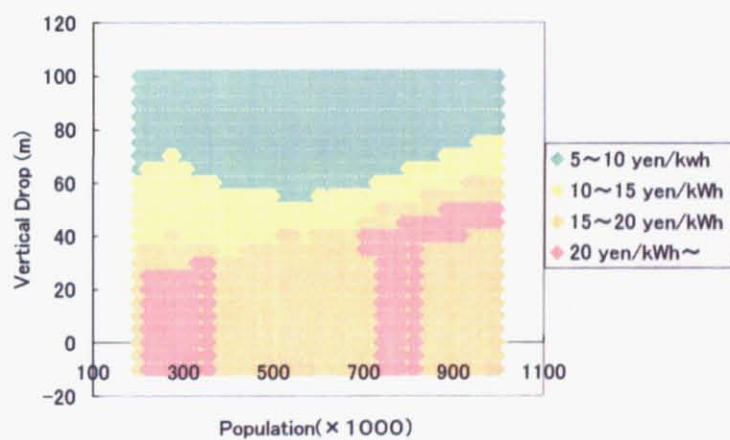


図 84 標高・人口と削減単価 (人口増加率 年 2.6%)

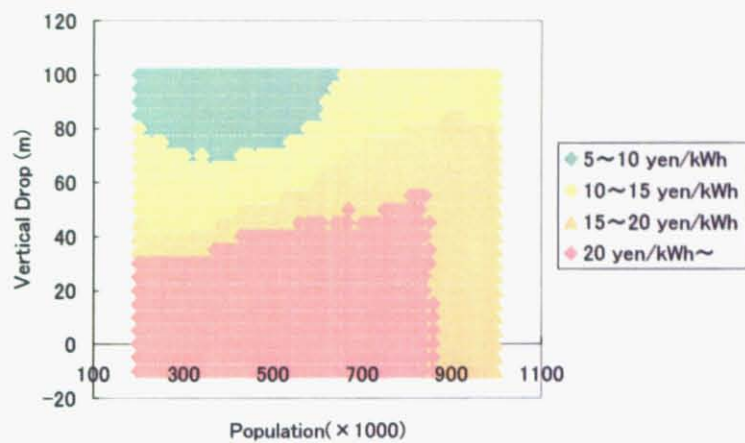


図 85 標高・人口と削減単価（人口増加率 年 3.5%）

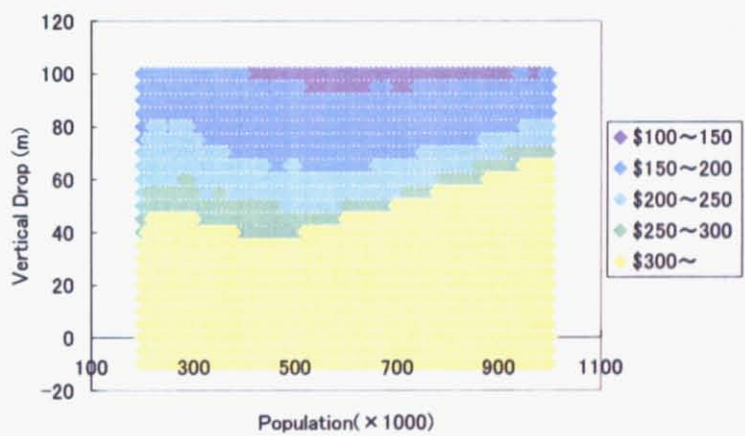


図 86 標高・人口と削減単価（人口増加率 年 2.6%）



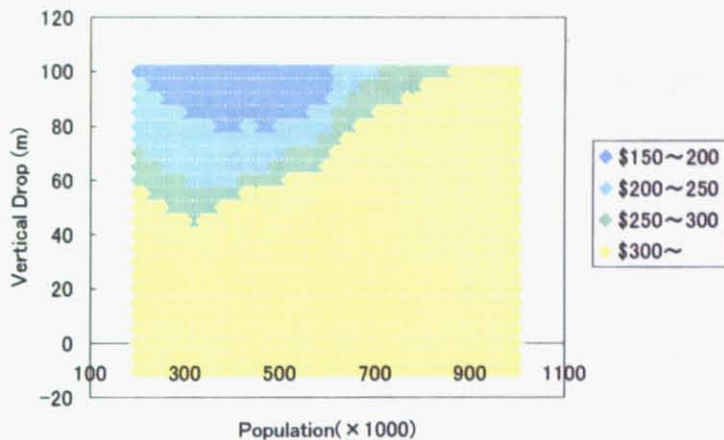


図 87 標高・人口と削減単価（人口増加率 年 3.5%）

#### 7.4. 具体的な都市での導入可能性検討 (Feasibility Study)

一般モデルを用いて具体的な都市について計画を作成する。JICA による水道建設計画が行われており、報告書が手に入ったホンジュラス共和国の首都テグシガルパ市の都市部及びトンガ王国ヌクアロファ市、スリランカ民主社会主義共和国のコロンボ市を対象として試算を行った。

##### 7.4.1. テグシガルパ市 (Tegucigalpa)

テグシガルパ市はホンジュラス共和国の首都テグシガルパ市の都市部（人口約 80 万人、面積 202km<sup>2</sup>）である。国際協力事業団の「ホンジュラス国テグシガルパ市水供給計画調査報告書 事前調査報告書」<sup>xxviii</sup>によると、ホンジュラス国は国土の 65%が山岳地帯であり標高 600~1500m の高原地帯に人口の 70%が居住している。主な水源はテグシガルパ市中心部から南西約 8 km にある Los Laureless ダムや南方約 11 km にある Conception ダムである。1998 年のハリケーンミッチによる被害が市内管網のみならず導水管、送水管、水源施設の多岐にわたっており、国際協力事業団を中心とした水道の再構築が現在行われている。仮にテグシガルパ市に導入した場合の発電量について試算した。

##### 7.4.1.1. 方法

以下の表 23 の条件を元に計算した。標高差が不明である為標高差を変数としてそれぞれの指標について計算を行った。給水人口、面積、月変動幅、人口増加率の値は事前調査報告書を参考とし、配水場数については千葉の場合と人口を比較し 15 箇所と仮定した。

表 23 テグシガルパ市計算条件

給水人口	面積 (km <sup>2</sup> )	消費量 (m <sup>3</sup> /day)	月変動幅	分布傾向	配水場数	人口増加率
898,500	202	0.437	0.5	0	15	3%

#### 7.4.1.2. 結果と考察

計算結果を以下に示す。図 88 は年平均可能発電量である。人口増加率が 3% であるため総発電量を耐用年数 22 年間で除して計算した。標高差が 30m 以下の場合、圧力回収型発電のみが可能であり、35m 以上の場合余剰落差利用型の発電が可能である。

現在価値は標高差によって図 89 のような値をとる。圧力回収型発電しか行えない場合現在価値は赤字である。40m 付近では余剰落差利用型の発電機を導入するものの発電量が小さく採算が取れない。65m 以上の落差があって初めて利益が上回るという計算結果である。

削減単価は図 90 のようになり NPV と同様に 35m 付近で高価となり、標高が 40m 以上では標高差が大きくなるとともに削減単価は小さくなる。図 88 のように発電量は 40m 以上では一次関数的に増加するが、出力増加によるコスト増加も伴う為削減単価は以下のようなグラフとなる。100m の標高差が存在したとしても単価は 15yen/kg-CO<sub>2</sub> であり、\$130/t-CO<sub>2</sub> と市場価格を大きく上回る。

7.1 から以上の指標はやや導入に有利な値を示していることを考慮して、標高差が 70m 以上存在すればプロジェクトの採算は取れると考えられる。標高 30m の場合の平均 1 日発電量と平均 1 人 1 日配水量の関係を示す。標高図 91 のようにテグシガルパ市には雨季乾季が存在する為配水量変動も多いことが予想されるが、配水量が多い時期に必ずしも発電量が多くなっていない。

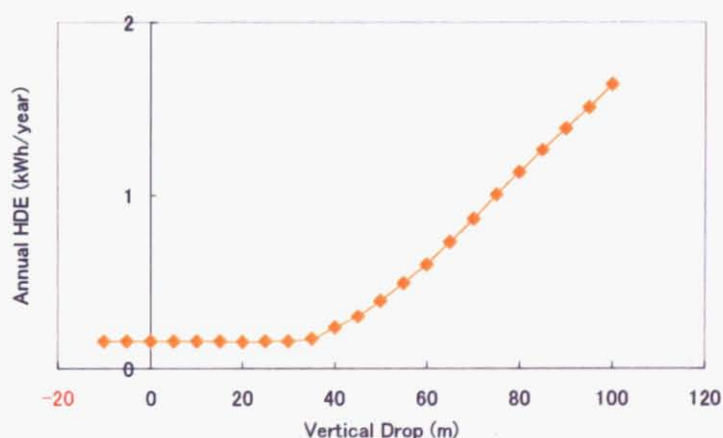


図 88 標高差と年平均可能発電量(テグシガルパ市)

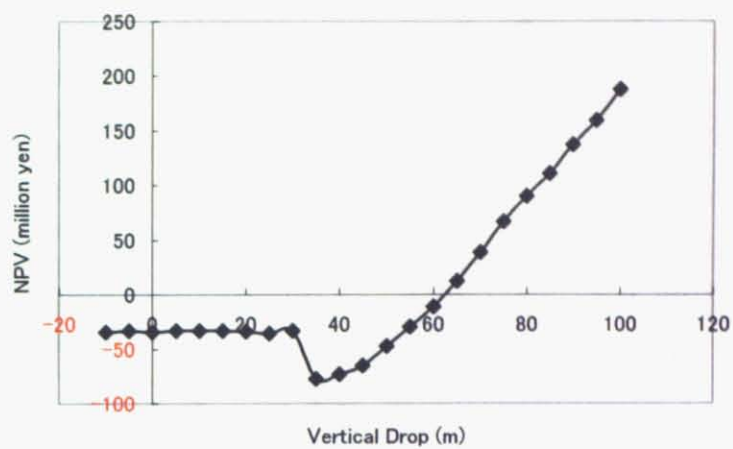


図 89 標高差と NPV (テグシガルパ市)

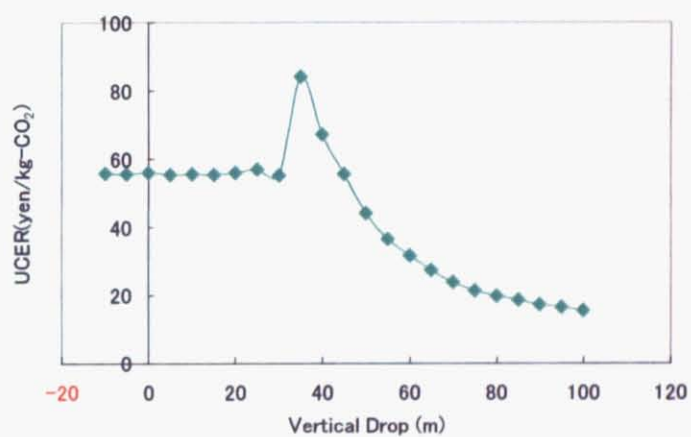


図 90 標高差と削減単価(テグシガルパ市)

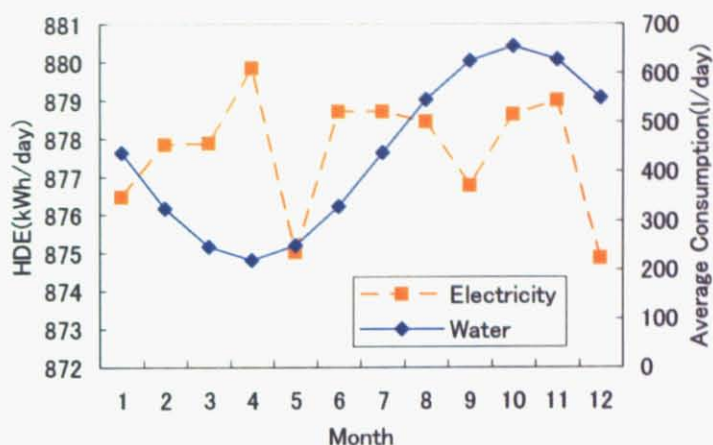


図 91 各月の平均 1 日発電量と平均 1 人 1 日配水量 (テグシガルパ市)

#### 7.4.2. ヌクアロファ市 (Nuku'alofa)

トンガ王国ヌクアロファ市では 1966 年に市中心域での水道による給水が開始されたが、はいかん末端地域や高台に住む住民の多くは水不足に悩まされており、需要のピーク時には水圧が低下し水が糸状にしか流れない場所も存在する。これらの地域の住民は独自で貯留槽を設置し、夜間に貯留するなどの対策を講じている。全市域に安定して水を供給するための上水道システム建設を JICA は支援している。

##### 7.4.2.1. 方法

以下表 24 の条件で計算を行った。人口、面積、消費量については「トンガ王国ヌクアロファ上水道整備計画 基本設計調査報告書」<sup>xxx</sup>を参考にし、月変動幅、配水場数、人口増加率については推定値を入力した。

表 24 入力パラメータ (ヌクアロファ市)

給水人口	面積 (km <sup>2</sup> )	消費量 (m <sup>3</sup> /day)	月変動幅	分布傾向	配水場数	人口増加率
30,706	30	0.13	0.5	0	4	3%

##### 7.4.2.2. 結果と考察

年間可能発電量は以下図 92 のようになる。30m 以下の場合は圧力回収型のみで、それ以上の標高差が存在すれば余剰落差利用型発電が可能である。図 93 の現在価値を見ると圧力回収型の建設はプラスとなっているが、35m 以降プラスとマイナスで振動している。これは計算の都合上概算工事費が 100 万円単位となっている為に、余剰落差利用型の出力が



大きくなりコストが高くなった場合に大きくコストが上昇する為であると考えられる。ヌクアロファ市のように小規模都市の導入を考える場合、概算工事費についてより細かな計算をする必要があり、削減単価も同様の理由から振動している。

ヌクアロファ市のような都市での導入を考える場合、全体の出力が非常に小さい為、経済性をみるためにはより細かな計算が必要となる。標高が 30m の場合の一日の配水量と発電量の関係を図 95 に示す。必ずしも配水量が多い月の発電量が多いわけではないということとは、テグシガルパと同様である。

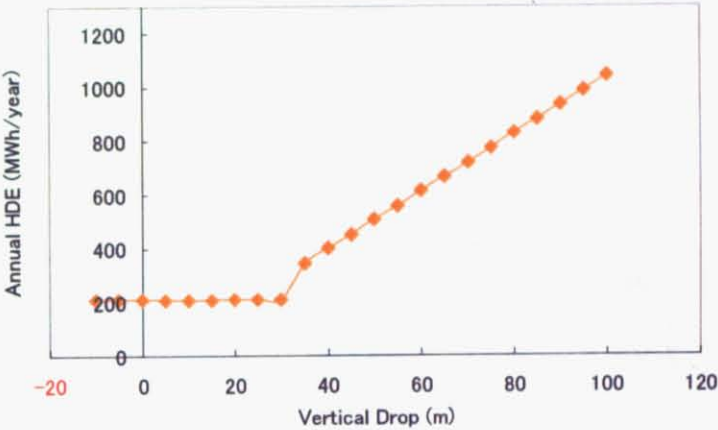


図 92 標高差と年平均可能発電量(ヌクアロファ市)

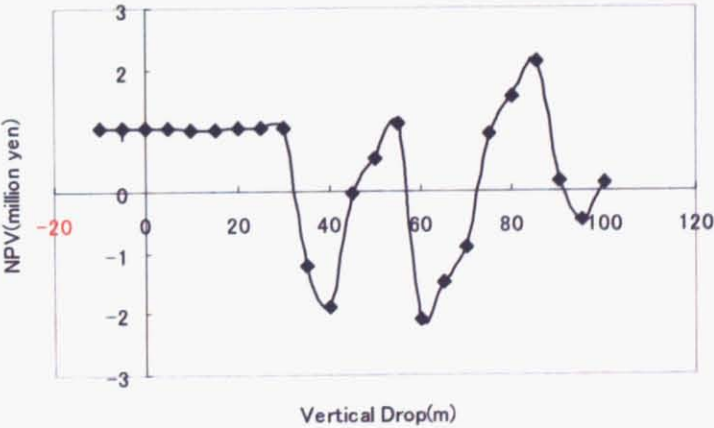


図 93 標高差と NPV (ヌクアロファ市)



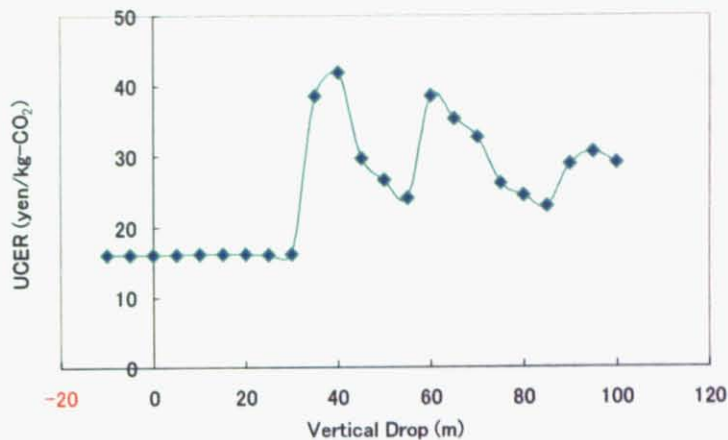


図 94 標高差と削減単価（ヌクアロファ市）

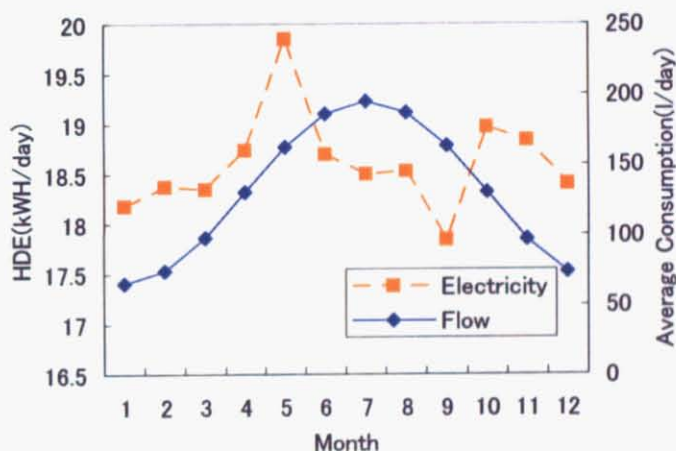


図 95 各月の平均 1 日発電量と平均 1 人 1 日配水量（ヌクアロファ市）

### 7.4.3. コロンボ市 (Columbo)

JICA の「スリランカ国コロンボ市上水道改修計画事業実施設計調査事前調査報告書」<sup>xxx</sup>によると、スリランカのコロンボ市上水道は老朽化のため無収率が 57%にものぼり、給水人口も増加しており早急な水道の再整備が必要となっている。コロンボ市を対象とした場合の計算結果を以下に述べる。

#### 7.4.3.1. 方法

給水人口、面積、人口増加率については上記報告書を参考とし、消費量は 1 日のコロンボ市への給水量が 60 万 t であり無収率が 57%、人口が 76 万人であることから推定した。

表 25 入力パラメータ (コロンボ市)

給水人口	面積 (km <sup>2</sup> )	消費量 (m <sup>3</sup> /day)	月変動幅	分布傾向	配水場数	人口増加率
760,000	37.3	0.39	0.5	0	15	1.5%

#### 7.4.3.2. 結果と考察

年間可能発電量は図 96 のようになる。標高差が 40m 以下の場合は圧力回収型のみ可能であるが、それ以上の標高差が存在すれば余剰落差利用型発電が可能である。図 97 の現在価値を見ると圧力回収型の建設は 5300 万円と赤字となっている。給水人口が多いため必要送水圧は大きく限界標高は他の地域と比べて高い。現在価値が正となるのは 75m 付近である。削減単価は 75m でも \$220/t・CO<sub>2</sub> となっている。

コロンボ市は人口密度が高く必要送水圧が大きい。このような都市では余剰落差利用型発電に必要な標高差も高くなってしまふ。ただし余剰落差利用型発電が可能な標高差が存在すれば、送水量が多いために発電量も多くなると予想される。

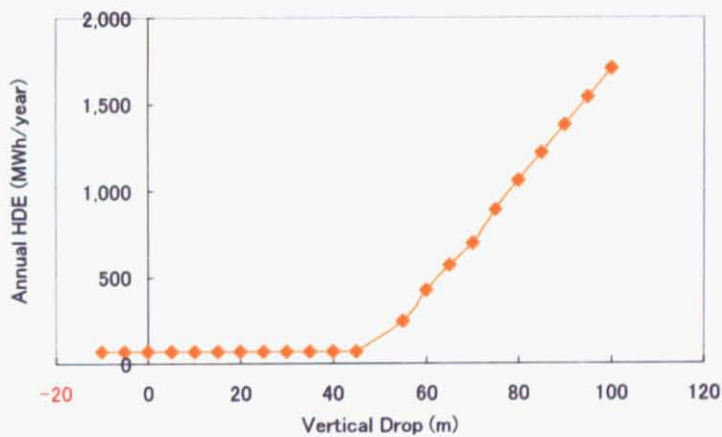


図 96 標高差と年平均可能発電量(コロンボ市)

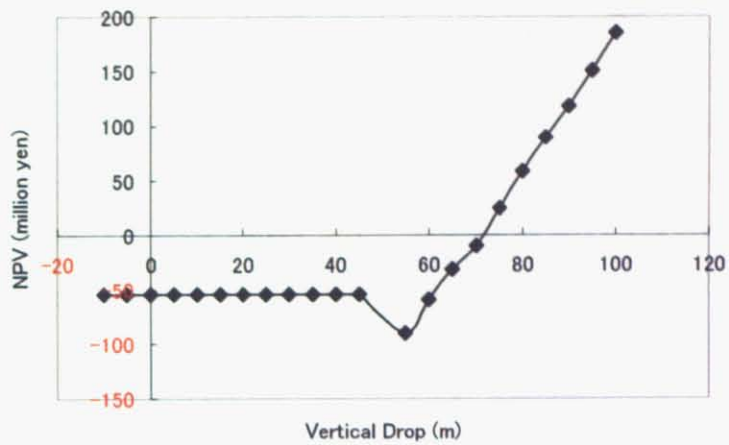


図 97 標高差と NPV (コロンボ市)

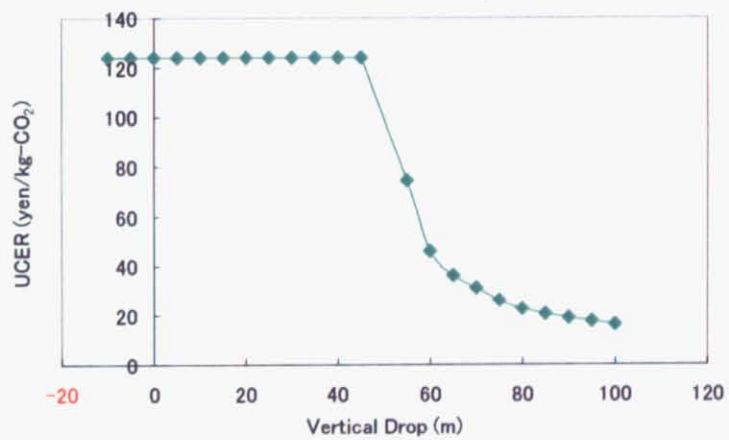


図 98 標高差と削減単価 (コロンボ市)

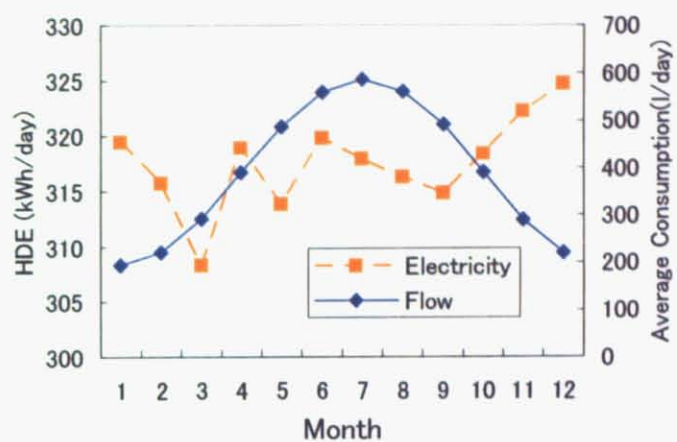


図 99 各月の平均 1 日発電量と平均 1 人 1 日配水量 (コロンボ市)

## 8. 結論 (Conclusion)

### 8.1. 実現可能性 (Feasibility Study)

マイクロ水力発電付き上水道の建設について、長野及び限界標高の計算結果から余剰落差利用を利用できる都市については、エネルギーを有効利用できるとともにプロジェクトの採算が取れると考えられる。発電原価についても長野市で 9.7yen/kWh と見積もられ、石油火力よりも安く抑えられるという計算結果が得られた。一方で千葉県北部地域のように、大規模河川から主に導水する圧力回収型マイクロ水力発電のみが可能な都市では、採算が取れないもしくは非常に小さい利益しか得られないと考えられ、金利変動・売電単価変動などの取り巻く環境の変化を更に検討した上で建設について考察すべきである。未利用エネルギーの利用により長野では年間 220 t 程度の削減が可能であるが、削減単価は取引市場の市場価格に比べ非常に高価格である。同様のプロジェクトを海外で行った場合、現状では投資家にとっては CDM プロジェクトの方法論としての魅力が小さいと考える。

### 8.2. 対象地域の選定 (Appropriate City)

7章では給水人口及び取水点と配水地域との標高差から、水道にマイクロ水力発電機を設置した場合の現在価値、発電原価等について計算を行った。この図を元にシステムを導入しうる都市を選定していくことが可能であると考ええる。給水人口のデータはす移動建設前にも手に入ると考えられ、ただし都市の人口増加率を考慮した場合、人口増加率が 0%の場合と比べて限界標高は高くなる。これは最大流量が年々大きくなる為、流量最大値に対応できるマイクロ水力発電機を導入するという仮定のもとの計算を行っている本研究では、設置コストが発電量の増分に比べて大きくなる為である。

J.K.Kaldellis らの研究<sup>viii</sup>によるとマイクロ水力発電所の実現可能性は、包蔵水力、概算工事費等の初期投資、対象地域の電力料金の 3 つが大きく影響するとされており、本研究では売電単価を固定して計算しているため、電力料金の変化についても考慮して計算を行うことが更に詳細な計算に繋がると考える。また 7.1 で示したように各指標は現実より有利な値を示す為、実際の都市での結果のデータとの比較から、数値の信頼性についてどの程度有利な結果であるか考察する必要がある。

### 8.3. 水道建設計画時の工夫 (Remaindings for Planning)

5.1 の千葉県での計算結果から圧力回収型発電の場合、浄水場に近い配水場程比速度差が小さく簡単な構造の水車で発電することができる。従って本研究で想定している比速度対応型の水車よりも設置価格が安価になると考えられる。また 7.1.9 の感度分析から取水点に近い配水場ほど配水量が多くなる工夫をおこなうことにより、同じ総配水量・標高でも発電量を増加させることができる。

5.3 から千葉県北部地域のような圧力回収型発電が主を締めると予想される地域では、管径が大きくなれば発電量が低下する為、管の大きさを今後大きくする可能性がないのか考



慮をしてから実現可能性について分析することが必要である。6.3 から余剰落差利用型発電の場合は管径を大きくすれば発電量が大きくなるが、余剰落差には限界値（標高差）が存在する為むやみに大きくすれば良いわけではない。水道管の値段を考慮して、モデルの計算から適切な半径の大きさを決定すべきである。通常の水道建設計画の場合、管網の隅々まで水が行き渡るという条件の下で、なるべくコストが安価ですむように決定されているが、マイクロ水力発電を考慮した半径の決定が有用である。例えば長野の場合は現在の 1.5 倍程度半径を大きくすることが発電量の面では適切である。

7.2 から余剰落差を利用できる場合、配水場数が多い程発電量が大きくなる。圧力回収型のみしか利用できない場合では配水場数は少なく抑えることにより、圧力回収による発電量を大きく建設コストを小さく抑えることができる。ただしこの場合ポンプ揚圧に必要なエネルギーも増大すると考えられ、ポンプのコストも考慮する必要がある。

#### 8.4. まとめ (Summary)

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はなく、経済的にも有意義であるといえる。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。

## 参考文献

- i 電力中央研究所：ライフサイクル CO<sub>2</sub> 排出量による発電技術の評価(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：平成 14 年度電源開発基本計画 (2002)
- iv 新エネルギー財団：ハイドロバレー計画開発促進調査の概要 (2005)
- v 新エネルギー財団：地球温暖化対策に資するわが国の水力発電を着実に推進していくための提言 (2006)
- vi M.R. Nouni et al : Techno-economics of micro-hydro projects for decentralized power supply in India, Energy Policy 34,1161-1174 (2006)
- vii NEDO：海外レポート No.919 (2003)
- viii J.K. Kaldellis, et al : Techno-economic evaluation of small hydro power plants in Greece:a complete sensitivity analysis, Energy Policy 33,1969-1985 (2005)
- ix Recap Bakis, Ayhan Demirbas : Sustainable Development of small Hydropower Plants, Energy Sources,26,1105-1118 (2004)
- x 松尾友矩：水環境工学, オーム社 (2001)
- xi 東京都水道局：東京都水道局環境計画 (2004)
- xii 厚生労働省：水道ビジョン (2004)
- xiii 日本水道協会：水道統計 (2004)
- xiv 村上雅博：深刻化する世界の水問題 (2000)
- xv 関東経済産業局資源・エネルギー環境部：マイクロ水力発電普及拡大フォーラム資料集 (2005)
- xvi マイクロ水力発電倶楽部 HP (<http://www2.tba.t-com.ne.jp/hmc/>)
- xvii 環境省地球環境局：平成 14 年度 CDM/JI に関する検討調査報告書(2003)
- xviii 環境省：2005 年度の温室効果ガス排出量速報値について (2006)
- xix Jane Ellis : CDM :Taking stock and looking forward, Energy Policy 35,15-28 (2007)
- xx Lewis A. Rossman : EPANET2 USERS MANUAL,EPA (2000)
- xxi 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：ハイドロバレー計画ガイドブック, (2004)
- xxii Lewis A. Rossman : EPANET USERS MANUAL ,EPA (2000)
- xxiii 資源エネルギー庁：発電方式による二酸化炭素排出量 (2005)
- xxiv IETA : State and Trends of the Carbon Market 2005 (2005)
- xxv 柏市水道局：水道報告書(2004)
- xxvi 長野県：長野県水道統計(2005)
- xxvii 環境省：環境白書 (1995)
- xxviii 国際協力事業団：ホンジュラス国テグシガルパ市水供給計画調査事前調査報告書 (1999)
- xxix 国際協力事業団：トンガ王国ヌクアロファ上水道整備計画基本設計調査報告書 (1999)
- xxx 国際協力事業団：スリランカ国コロンボ市上水道改修計画事業実施設計調査事前調査報告書(1999)

# 謝辞

本論文を執筆するに当たり、ご指導下さった、東京大学新領域創成科学研究科環境システム学専攻影本浩 教授、同 阿久津好明 助教授に心から感謝申し上げます。

また数値計算におけるデータを提供していただいた北千葉広域水道企業団、長野市水道局、関東経済産業局資源エネルギー環境部に深く感謝いたします。

研究の面で多くのアドバイスを頂きました影本・阿久津研究室博士課程の瀬尾美智子さん、阿部 Rene 曜さんに心から感謝の意を表します。

この研究室でともに研究に切磋琢磨していく中苦楽を分かち合ってきた井上桂佑君、薄井由紀さん、佐藤和子さんに心から感謝いたします。

また研究室で共に時間を過ごした影本・阿久津研究室 M1 の小川晃旦君、倉持祐一君、藤本浩介君、岡田摩耶さんにはお世話になりました。本当にありがとうございます。

7 年間大学に在中でお世話になりました学部の同級生、大学院での同級生、そして WARRIORS のメンバーに深く感謝の意を申し上げます。大学でであった皆様に活力を頂き、この論文を書き上げることができました。

そして、25 年間育てていただいた両親に心から感謝申し上げます。

最後に、私が本論文を作成するにあたりご協力くださった全ての方々に深く感謝いたします。