

マイクロ水力・太陽光発電ハイブリッドシステムの一考察

Analysis of a Grid-Connected Hybrid Power System with Micro-hydroelectric and Photovoltaic System

花岡啓介 *1
Keisuke HANAOKA

三井博史 *1
Hirofumi MITSUI

谷 辰夫 *2
Tatsuo TANI

平田陽一 *3
Youichi HIRATA

Abstract

As a part of various electric power sources, the micro hydroelectric and photovoltaic systems are expected to be one of the important systems in distributed power systems. The authors have analyzed grid-connected hybrid power system with micro-hydroelectric and photovoltaic system from points of view of the environmental data (SUWA district) and so on. As for the result compared with the inter-regional association system and the distributed system, the former supplied electric power more efficiently.

キーワード: マイクロ水力発電システム, 太陽光発電システム, ハイブリッド発電システム

Key Words: micro-hydroelectric power system, photovoltaic power system, hybrid power system

1. はじめに

長野県では、水資源が豊富であると同時に大気透過率が高いため日射量が多く、マイクロ水力発電(以下MHシステムという)、太陽光発電(以下PVシステムという)の設置が有望である。本研究は安定した出力の「MHシステム」と不安定な出力の「PVシステム」とを組み合わせた複合システム(以下HBシステムという)のシステム特性を解析し論述したものである。

PVシステムは日中太陽光が利用できる時に限られるが、未利用空間が利用できることや可動部がなく静かな発電システムである。また、MHシステムは水の流れが安定していれば、一定の出力が得られる発電システムである。HBシステムはこれらの利点を活かしながら、単独システムの発電電力量を融通しあって負荷に供給することが可能であり、各システムを単独で使用するより有効利用が期待できる。

本論文は個人住宅10軒からなる小コミュニティに必要な年間消費電力量をHBシステムで5軒、PVシステムで5軒供給する単独システム方式と、この小コミュニティの年間消費電力量をHBシステムで供給する方式についてシステム特性や二酸化炭素排出量などを比較検討し、HBシステムの有効性を明らかにしている。これらのシステムはいずれも系統連系方式で動作させるが、筆者らは特に地域連系方式と称している。この地域連系方式は小コミュニティを構成する各住宅の電力負荷の平準化を図り、年間売買電電力量を最小にすることが可能である。

本研究で使用した15軒の各個人住宅の年間負荷消費電力量は

いずれも4,000kWhであるとした。

2. システム構成と条件

2.1 システム構成

図1はHBシステムの構成図である。このシステムは系統連系方式(地域連系方式)であり、矢印の方向は電流の流れる方向を示している。HBシステムは個人住宅No.1からNo.10の10軒で構成され、小コミュニティの年間消費電力量をMHシステム、PVシステムがあたかも1つの発電システムの様動作する。一方MH単独システム、PV単独システムはそれぞれ独立して5軒の個人住宅の年間消費電力量を供給している。

2.2 システム条件

(1) 負荷形状率

本論文では負荷を分類するために年間負荷形状率を定義し使用している。年間負荷形状率とは年間の負荷電力量に対する平均負荷レベル以上の負荷電力量の割合であり、式(1)で定義した値となる¹⁰⁾。

$$\text{年間負荷形状率}[\%] = \frac{\text{平均負荷レベル以上の負荷電力量}}{\text{年間の負荷電力量}} \times 100 \quad (1)$$

構成した15軒の電力負荷パターンの負荷形状率は12%から32%であり色々な生活様式を考慮して幅広い年間負荷形状率の電力負荷パターンを用意した。

(2) 日負荷パターン

個人住宅の年間負荷パターンは日負荷パターンで作成した。15軒分設定するに当たって、いずれも年間負荷電力量を4,000kWhとした。図2は諏訪地域の年間負荷パターンの一例である。年間負荷パターンは春季、秋季、夏季、冬季の3種類に

*1 諏訪東京理科大学電子システム工学科学生

*2 諏訪東京理科大学電子システム工学科教授

*3 諏訪東京理科大学電子システム工学科講師

(〒391-0292 長野県茅野市豊平5000-1)

e-mail: tani.labo@hotmail.co.jp

(原稿受付: 2007年3月10日)

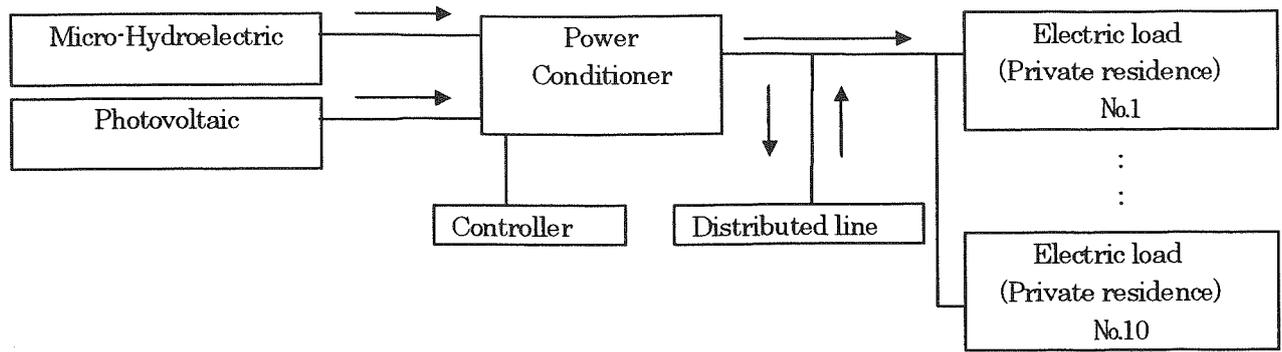


Fig.1 HB system configuration

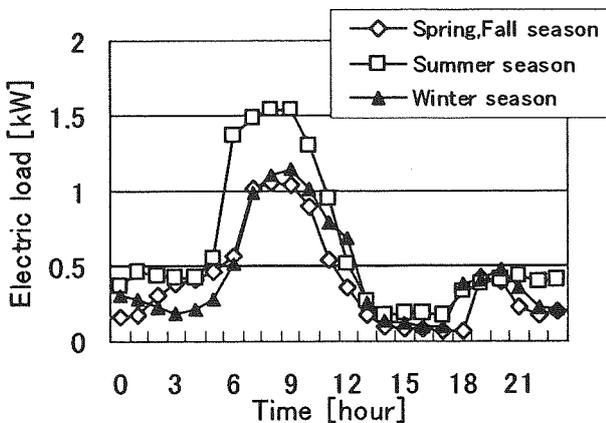


Fig.2 Daily electric load pattern

分け、この期間では同一の日負荷パターンで消費する。なお、春季は3~5月、夏季は6~8月、秋季は9~11月、冬季は12~2月とした。

(3) PV システム

太陽電池アレイの入力データとして、諏訪地区の日射量データ (METPV 諏訪) など気象データを用いた。太陽電池モジュールの傾斜角度は30度であり、真南設置時の1時間毎の日射量と外気温データのデータ1年分(365日)を入力データとした。

太陽電池モジュールの発電出力P(n)は式(2)で求められる。

$$P(n) = P_o \{1 - \alpha (t + 5^\circ\text{C})\} \quad (2)$$

本PVシステムの太陽電池パネルは単結晶シリコン太陽電池であり、これらは負の温度係数を持つ。本論文では温度係数 α は0.005とした。

ここでP(n)：1月1日零時からn時間後の発電量[kW] t：n時間後の外気温[°C] P_o：外気温25°Cの時の発電量[kW]である。また、ここでP_oは式(3)の関係がある。

$$P_o = I S_p \eta_1 \eta_2 \quad (3)$$

I：1時間当たりの日射量[kWh/h]、S_p：太陽電池アレイの面

積[m²]、 η_1 ：太陽電池アレイの変換効率 [%]、 η_2 ：パワーコンディショナの変換効率 [%] である。太陽電池アレイの変換効率を15%、パワーコンディショナの変換効率を全負荷に対して一定で95%とする。

(4) MHシステム

マイクロ水力発電機の設置を想定した河川は長野県茅野市内を流れる上川である。

マイクロ水力発電とは、中小河川、用水路(農業)、工業用水、上下水道等の現在利用されていない低落差で流量を利用して発電し、発電容量から100kW以下のものをいう。これは環境を破壊せず、河川生息動植物を害することなく我々の生活に必要なエネルギーを取り出すことが出来る。

さらに、小容量のため発電設備を設置する際の地形の改変が少なく、較的短期間の建設が可能であり、維持管理も容易に行うことができる。また年間の使用可能な水量データが比較的予想可能で発電量が計画できる。

マイクロ水力発電を計画する場合、落差と流量は定量的に評価される必要があり、水力発電出力の決定に重要な要素となる。

設置する河川などの流量と出力Pは次の式で求められる。

$$Q = S_h V \quad (4)$$

$$P = 9.8QH\eta \quad (5)$$

ここでQ：流量[m³/s]、S_h：断面積[m²]、V：流速[m/s] P：発電機から取り出すことのできる電力[kW]、Q：水車を流れる流量[m³/s]、H：有効落差[m]、 η ：水車と発電機の総合効率で水車効率[η_t]と発電機効率[η_g]を掛けたものである。

また、MHシステムではMHシステムの水車効率、発電効率、をそれぞれ0.75、0.95とし、水車の羽直径を0.4mとした。設置する河川は茅野市鬼場付近を流れる上川であり、年間の平均流速の測定値は0.87m/s、有効落差は1.5mである¹¹⁾。

3. 解析方法

3.1 システムの仕様

本論文で検討したシステムの仕様を表1に示す。MHシステムの容量は4kWで稼働時間はメンテナンスを考慮して7時から21時とした。また、PVシステムは単結晶シリコン太陽電池を用い、アレイ面積は100㎡(約14kW)である。

これらのシステム単独ではいずれも個人住宅5軒へ電力を供給するとして、また、HBシステムでは個人住宅10軒で構成される小コミュニティへ電力を供給することにした。

Table.1 Specifications

MH system	Rated capacity : 1kW×4 Operation hours : 7:00 to 21:00 Type : cross flow Diameter of water wheel : 0.4m Available heads : 1.5m Conversion efficiency (Water mill) : 0.75 Conversion efficiency (Generator) : 0.95
PV system	Single crystal Si solar array : 100㎡ Rated capacity : 14kW Air mass : 1.5 Conversion efficiency (PV) : 0.15 Conversion efficiency (Power conditioner) : 0.95 Environmental data : METPV・Suwa ²⁾
HB system	MH system plus PV system

3.2 システムの運用とフローチャート

MHシステム、PVシステム、HBシステムの3つのシステムの入力データは図2で1例を日負荷示したようなパターン、上川の流速、METPV(諏訪)データである。各システムの出力はパワーコンディショナを通して負荷に供給される。このときこの発電電力量が5軒あるいは10軒の個人住宅の負荷に対して過剰の時には余剰電力として商用電力系統を介して売電する。逆に不足するときには商用電力系統から買電する。この計算を1年間(8760時間)繰り返し、年間直接電力供給量[kWh/年]、年間買電電力量[kWh/年]、年間売電電力量[kWh/年]、年間負荷消費率[%]を積算、集計した。ここで年間負荷消費率は式(6)で定義された値とした。

$$\text{年間負荷消費率} [\%] = \frac{\text{年間直接供給電力量} [kWh / \text{年}]}{\text{全負荷電力量} [kWh / \text{年}]} \times 100 \quad (6)$$

すでに述べたように個人住宅の年間負荷パターンは日負荷パターンで作成された。本論文では年間負荷パターンは多様な電力消費パターンを想定して15種類(15軒分)とした。これらの年間消費電力量は4,000kWhである。解析では次の3つの組み合

わせについて計算した

- ① MHシステム、PVシステム単独では、15種類の年間負荷パターンから無作為に5種類のパターンを抽出したそれぞれ1,500通りの組み合わせ
- ② MHシステム、PVシステムの結果を対して平均値を求めた1,500通りの組み合わせで、本文では(MH+PVシステム)とした。
- ③ HBシステムでは、15種類の年間負荷パターンから無作為に10種類のパターンを抽出した3,003通りの組み合わせ

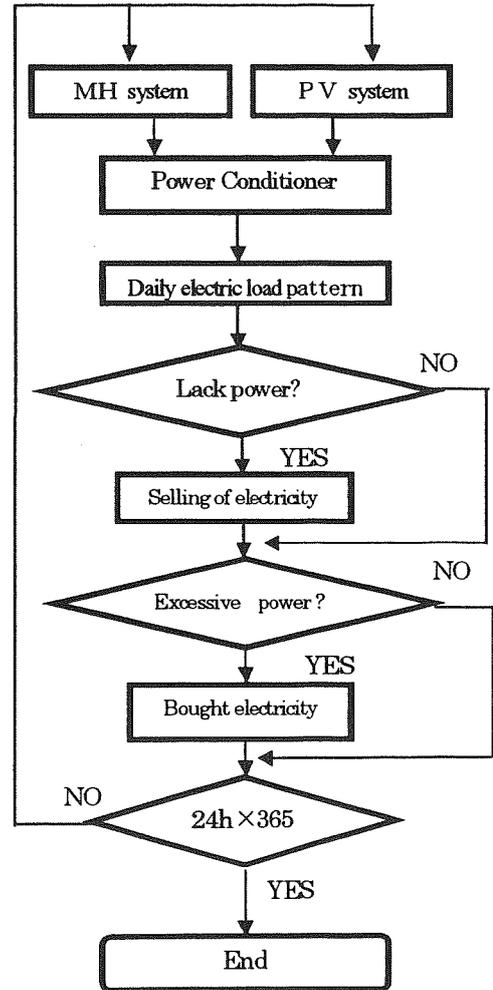


Fig.3 System architecture

3.3 二酸化炭素排出量削減率

HBシステムの二酸化炭素排出量削減率は、商用電力系統で年間消費電力量をまかなった場合の二酸化炭素排出量に対するHBシステムの二酸化炭素排出量削減率であり、次の式で求めた。単独システムについても同様の考え方で計算を行っている。

- 1) 年間消費電力量全てを商用電源で供給した際の二酸化炭素排出量CO_{2,1} [kg/kWh] とすると。

$$CO_{2,1} = f \times CP_c \quad (7)$$

ここで f : 年間負荷電力量であり HB システムでは 40,000kWh

2) HB システムの年間直接電力供給量に対する二酸化炭素排出量 $CO_{2,2}$ [kg/kWh] は MH システムと PV システムの年間直接電力供給量の和で表される。

$$CO_{2,2} = a + b \tag{8}$$

ここで a : MH システムによる年間直接電力供給量と MHc の積

b : PV システムによる年間直接電力供給量と PVc の積

3) HB システムの年間売電電力量に対する二酸化炭素排出量 $CO_{2,3}$ [kg/kWh] は MH システムと PV システムの年間直接電力供給量の和で表される。

$$CO_{2,3} = m + l \tag{9}$$

ここで m : MH システムによる年間売電電力供給量と MHc の積

l : PV システムによる年間売電電力供給量と PVc の積

4) HB システムの年間買電電力量に対する二酸化炭素排出量 $CO_{2,4}$ [kg/kWh] は商用電力系統からの年間買電電力量 y [kWh/year] を用いて表される。

$$CO_{2,4} = y \times CP_c \tag{10}$$

その結果、(7) 式から (10) 式により HB システムの二酸化炭素排出量削減率は以下ようになる。

$$\text{削減率}[\%] = \left(1 - \frac{CO_{2,2} + CO_{2,4} - CO_{2,3}}{CO_{2,1}} \right) \times 100 \tag{11}$$

なお MH システム、PV システムの削減率は式 (11) を用いて計算できる。

計算に用いた各システムの二酸化炭素排出量の原単位は表 2 であるとする⁵⁶⁾。

Table. 2 Carbon-dioxide emission basic unit

Systems	CO ₂ emission [kg/kWh]	quantifier
MH	0.011	MHc
PV	0.053	PVc
Commercial power	0.425	CPc

4. 結果と考察

4.1 システム特性

図 4 は単独の MH システム、PV システムと HB システムの年間

平均出力パターンである。PV システムは日中のみの発電であることや HB システムは河川の流速が安定しており、一定の出力が得られることがわかる。

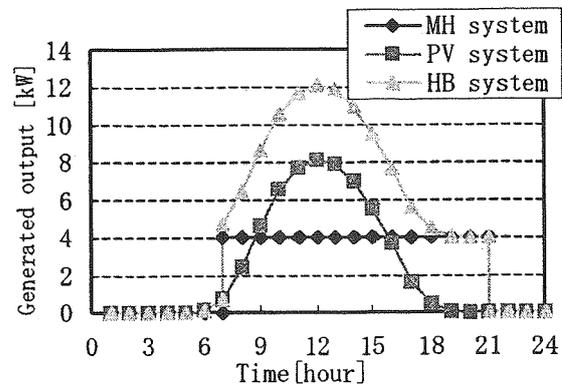


Fig.4 Output of three systems

本論文ではいろいろな生活様式を考慮して、15 軒、すなわち 15 種類の年間負荷パターンを作成し、その中から必要な軒数の年間負荷パターンを無作為に抽出して計算した。15 種類(15 軒)の年間負荷パターンから無作為に 5 軒の年間負荷パターンを抽出した際の組み合わせは 6006 (${}_{15}C_5$) 通りあり、10 軒を抽出した際の組み合わせは 3003 (${}_{15}C_{10}$) 通りある。たがって、年間電力負荷パターンの組み合わせによって負荷形状率は変化する。

図 5 は年間負荷形状率の変化に対する年間負荷消費率の関係である。図では MH システム、PV システム単独でそれぞれ 5 軒の個人住宅へ電力を供給した場合と両システムで 10 軒の個人住宅へ電力を供給した (MH+PV システム) の場合を表示している。(MH+PV システム) では単独システムのデータを対にして合計し 2 で除した値である。すでに述べたように、作成した年間負荷パターンは 15 種類である。図 5 の各単独システムについては、これらの年間負荷パターンから 5 種類の年間負荷パターンを無作為に抽出した 1,500 通りの組み合わせについて計算し表示した。また、(MH+PV システム) についても 1,500 通りのデータが表示されている。図から単独システムと (MH+PV システム) を比較すると、単独システムでの電力供給の年間負荷消費率は (MH+PV システム) のそれに比べ大きくばらつくことがわかる。

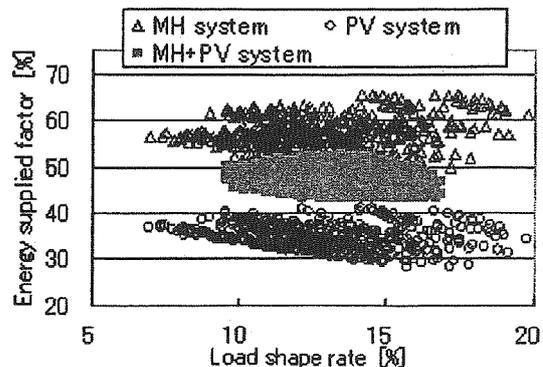


Fig. 5 Factor of electric load from vs. Energy supplied factor (MH system, PV system, MH+PV system)

一方、図6は図5と同様に年間負荷形状率の変化に対する年間負荷消費率の関係である。図の特性は図5の(MH+PVシステム)とHBシステムを特徴を明示したものである。HBシステムでは15種類の年間負荷パターンから10種類の年間負荷パターンを無作為に抽出した、すべての組み合わせについて計算しそのデータを表示した。図から、HBシステムの年間負荷消費率の平均値は(MH+PVシステム)のそれに比べ約6%上昇しており、発電電力量を負荷へ有効に供給していることがわかる。また、HBシステムの年間負荷消費率の変化幅も(MH+PVシステム)に比べ狭く、HBシステムでは安定した電力供給が可能である。

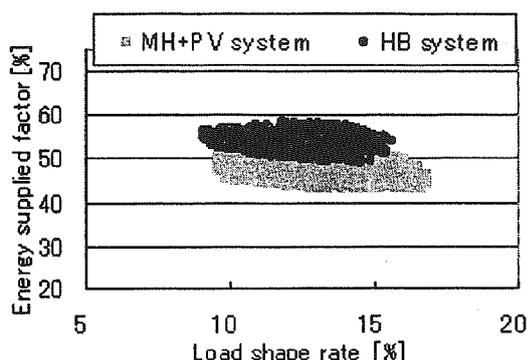


Fig. 6 Factor of electric load from vs. Energy supplied factor (MH system, MH+PV system)

表3は、解析結果をまとめたものである。HBシステムの年間売電電力量は単独のMHシステムとPVシステムの合計値に比べ10.9%程度少なく、発電電力量が小コミュニティ内の負荷に有効に供給されることが分かる。また、年間消費率についてもHBシステムは単独システムに比べ大きな値であるとともに、標準偏差が最も小さいことから負荷の平準化が図られていることを示している。

表4は、年間負荷消費率の変動係数を式12にしたがって求めた結果である。HBシステムの変動係数が一番小さく、負荷形状率の変化に大きく左右されないことがわかる。

$$\text{変動係数} = \frac{\text{標準偏差}}{\text{平均値}} \quad (12)$$

Table 3 Characteristic of systems

System	Number of houses	Sell electricity [kWh/yr]	Purchase electricity [kWh/yr]	Annual load consumption [%]	Annual load shape rate [%]
MH	5	8613	8175	59.1(4.0)	13.1(3.0)
PV	5	13373	12802	36.0(2.6)	13.1(3.0)
MH+PV	10	21986	20977	47.6(1.8)	13.1(1.3)
HB	10	19582	18573	53.6(1.7)	12.1(1.2)

(Standard deviation)

Table 4 Stability

systems	Coefficient of variation with Supply ratio of annual electric power	Coefficient of variation with Ratio of annual load form
MH	0.077	0.229
PV	0.072	0.229
MH+PV	0.039	0.099
HB	0.032	0.099

4.2 二酸化炭素排出量

図7は年間負荷形状率に対する二酸化炭素排出量削減率の関係である。図の特性は商用電源で小コミュニティの電力負荷へ供給した際の二酸化炭素排出量に対する単独で供給するMHシステム、PVシステムの二酸化炭素排出量の削減率の合計、HBシステムの二酸化炭素排出量の削減率を示している。前者の平均の削減率は約49%であり、HBシステムのそれは約53%と大幅な削減ができることがわかった。これはハイブリッド化することによりMHシステムとPVシステムからなる両システムの発電電力量を融通しながら、10軒の個人住宅へ供給することが可能となり、商用電源からの買電電力量を最小にすることができたためである。

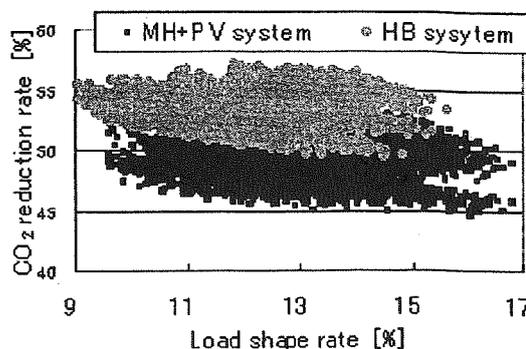


Fig. 7 Factor of electric load from vs. CO₂ reduction rate (MH system, MH+PV system)

5. まとめ

筆者らは電力供給が比較的安定しているマイクロ水力発電と不安定な太陽光発電を組み合わせたマイクロ水力発電・太陽光発電ハイブリッドシステムを提案した。また、個人住宅10軒からなる小コミュニティの電力負荷へ供給する単独のマイクロ水力発電と太陽光発電を加えたシステム、ハイブリッドシステムのシステム特性や二酸化炭素排出量の削減率を比較検討した。その結果限られたデータではあるが、次のことが明らかになった

- 異なる特性をもった二つのシステムをハイブリッド化することにより、負荷へ年間負荷供給率(負荷への直接供給量)は大きくなり、発電電力量を有効に利用できることがわかった
- ハイブリッド化により年間負荷供給率の変動係数が小さくな

り、負荷の平準化が図られることがわかった。

- 3) ハイブリッド化を図ることにより、商用電源から負荷への電力供給による年間二酸化炭素排出量は約53%削減できることがわかった。

参考文献

- 1) 車 孝軒；「太陽光発電システムの地域利用形態に関する研究」，平成11年度学位論文（2000）
- 2) 小林 良輔，下川 博範，谷 辰夫，平田 陽一；「太陽エネルギーによる水素利用システムに関する研究」，電気学会全国大会論文集 No 7-030（2005.3）
- 3) NEDO；NEDO 資料「標準気象データ [METPV-2]」
<http://www.nedo.go.jp/METPV2.exe>（2005.8）
- 4) NEDO；NEDO 資料「発電システム別ライフサイクル CO₂ 排出原単位」
[（http://www.nedo.go.jp/index.html）](http://www.nedo.go.jp/index.html)（2005.8）
- 5) 電気事業連合会；「電気事業における環境行動計画」
[（http://www.fepec.or.jp/）](http://www.fepec.or.jp/)（2006.9.22）
- 6) 千矢 博道；「これからやりたい人の小型水力発電入門（身近な水力利用術）」，パワー社，（1992）
- 7) 千矢 博道；「身近な水を活かす小型水力発電実例集（自然との共生を目指して）」，パワー社，（2004）
- 8) 谷・安藤・平田・関口；「太陽電池（原理から応用まで）」，パワー社，（2004）
- 9) (社) 日本建設学会 住宅内のエネルギー消費量に関する調査研究委員会；「住宅におけるエネルギー使用費データベース」
<http://tkkankyo.eng.niigata-u.ac.jp/hp/hp/database/index.htm>（2006.8）
- 10) 関口 直俊；「太陽エネルギーによる水素製造・貯蔵・利用システムに関する研究」，平成9年度学位論文 P.75（1998）
- 11) 小山 正和，森岡 隆介，谷 辰夫，平田 陽一，谷内 利明；「マイクロ水力・太陽光発電ハイブリッドシステムの最適構成法」 東京理科大学総合研究所 環境・エネルギー部門 平成17年度シンポジウム P.84（2005.12）