太陽エネルギー利用の実践と課題*

Practice and Problem of the Solar Energy Use

西村 伸也**

NISHIMURA Nobuya

Abstract This paper summarizes the results of author's studies on solar energy resource utilization. One is the development of a micro solar power generation which was combined with micro wind power generation at urban area. The other is the solar thermal utilization by an absorption heat pump for air conditioning. Daily fluctuations of energy supply in Osaka city both by electricity and by town gas were presented precisely in order to understand the energy consumption of urban area. Then, field test results about a micro hybrid power generation system were presented at urban coastal area where there is few wind power resource. Lastly, the performance of a solar-assisted absorption chiller heater of 352 kW refrigeration capacity has been introduced through a long series of proof examination of 17 months.

Keywords: Solar-wind power generation, Solar thermal system, Absorption refrigerator, Field test

1. はじめに

今年(2011年)の夏は、天気予報ならぬ電気予報に市民や企業が一喜一憂する異常な事態となっている。この原因は3月11日に発生した東日本大地震時に引き起こされた福島第一原子力発電所の事故によることは明白であるが、その後の展開は、わが国のエネルギー政策の不透明さと脆弱性とはあいまったものと言わざるを得ない。

一方、今年は地球温暖化に関する京都議定書達成計画の観点から大切な年である。わが国は、京都議定書の締約国として、二酸化炭素やメタンなど6種類の温室効果ガスの排出量を2008年から2012年の第1約束期間において6%削減することが求められている[1]。そして、東日本大地震以後も、日本政府は、温室効果ガス削減目標の断念を国際的に表明していない。したがって、震災の直接的な被害を受けていない地域においては、電力不足の解消と温室効果ガスの削減目標の達成の両方が求められている。

このようななか、企業や地方自治体には温室効

果ガス削減のための実行計画や条例などの策定が強く求められている。そこで、太陽エネルギーやバイオマスなどの再生可能エネルギーが一段と注目されており、特に上述のわが国の電力事情もあり、太陽電池をはじめとした種々の発電装置やそれを組み込んだエネルギーシステムに関する要素開発やシステム構築などが数多く報告されている。

しかしながら、その大半は、JISなどに定められた日射や外気条件などが一定の定格試験条件のもとでの性能か、あるいは短期間の実証試験に基づく性能である。よって、外気温や日射などの天候や、電力や熱などの需要が時々刻々と変化する現実の使用状況の下での機器性能やエネルギー消費量を反映しているとは言い難い。また、電力や暖房・給湯などの温熱利用、冷房や冷蔵・冷凍などの冷熱利用の日変動や季節変動を考慮したものは極めて少ない。このような理由から、第一次オイルショックを背景に企画されたサンシャイン計画など、過去に実施された、国家レベル

* 2011.8.22 受付

** 大阪市立大学大学院工学研究科機械物理系専攻 〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138

TEL: (06)6605-2664 FAX: (06)6605-2664 E-mail: nisimura@mech.eng.osaka-cu.ac.jp

での新エネルギー・再生可能エネルギー利用に関する研究の成果が現実のものとなっているとは言い難い。これは、それら過去の研究が、再生可能エネルギーを駆動源とした要素開発やそれらの効率向上に比重が置かれ、正味の利用可能量の評価や、需要側における利用方法の吟味が不十分であったためと考えられる。

そこで著者は、大都市の公立大学に在職していることもあり、再生可能エネルギーの種類や資源量が相対的に少ない都市部において、再生可能エネルギーの利用ポテンシャルを定量的に評価しその積極的な導入を計るべく、太陽エネルギーや風力、バイオマスなどの賦存量の実態調査を行うとともに、太陽光発電・風力発電を組み合わせたハイブリッド発電システムの開発や、太陽熱を駆動熱源として利用する、熱駆動の吸収式冷凍機や吸収ヒートポンプを用いた空調システム・産業用加熱システムの開発・実証試験を行ってきた。本稿では、それらのうち、太陽光の利用例として太陽光発電・風力発電を組み合わせたハイブリッド発電システムについて、また、太陽熱の利用例として太陽熱利用冷暖房システムについて述べる。

2. 都市のエネルギー消費と太陽エネルギー

都市のエネルギーシステムや再生可能エネルギーの導入について考える場合、エネルギー消費について知ることは極めて重要である。しかしながら、エネルギー消費データは年単位・都道府県単位で調べられた統計データであることが多く、再生可能エネルギーの導入に必要な、町丁目単位でのエネルギー消費量や温室効果ガスの排出量の推定に用いる特定の地域の時空間別エネルギー消費を知ることは困難である。

Fig.1 は大阪市統計書[2]に基づき大阪市域に供給された電力および都市ガスによるエネルギー供給量と年平均気温の変化を示したものであるが、このデータからは、市内の地域別、また時間別のエネルギー供給量を知ることはできない。そこで、著者らは、大阪市のヒートアイランド調査・温室効果ガス排出量予測の一環として、地理情報システム（GIS）を用い、電力と都市ガスによる単位地表面積当たりの合計エネルギー供給量の時空間分布を求めた。夏期の1日における推定結果例を Fig.2 に示す[3]。図中左上の 3:00～24:00 の数字は、地図上に示された各地域の棒グ

ラフが、3時から24時までの3時間ごとのエネルギー供給量であることを意味している。

また、棒グラフの高さは、各時刻におけるエネルギー供給量であり、最大値が 270 W/m^2 であることを表している。図よりわかるように、大阪市内においては、業務地区、商業地区などの都心、工業地区（西部・北西部）、および住宅地区（南部）など土地利用用途の違いにより、エネルギー供給量とその時間特性が大きく異なることが分かる。

Fig.1 Relation between annual mean temperature and the amount of energy supply since 1953.

Fig.2 Total amount of energy supply by electricity and town gas in each area at weekday.

一方、NEDO で公開されている全国日射量平均マップによれば、大阪市における年間水平面日射量は $3.58 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ であり、年平均では、約 150 W/m^2 の太陽エネルギーが注がれていることになるが、都心部では、これを上回るエネルギーが供給＝消費されており、太陽電池の発電効率を定格

(約 20%)で見積もっても、太陽光発電のみでは、都心部では再生可能エネルギーによるエネルギーの自立は困難であることが分かる。

3. 都市域における太陽光・マイクロ風量ハイブリッド発電に関する実証試験

著者はニッセイ財団環境問題研究助成 (2001 年 10 月～2003 年 9 月、代表 山口克人 大阪大学工学研究科教授 (当時)) の一環として、環境負荷の少ない自立型都市インフラシステムについての検討を目的に、都市部臨海域における太陽光・マイクロ風力ハイブリッド発電システムの導入可能性とそれを動力源とした閉鎖性海域の環境修復技術について、実証試験、地域住民へのアンケート調査、および理論的な検討から、多面的な評価を行った[4]。その中で、Fig.3 に示すように大阪湾に面した西宮市の臨海部夙川流域 (特に図中央の斜線を施された御前浜海域) をケーススタディ地域として、自然エネルギーと再資源化システムを導入したエネルギーネットワークシステムの実現性について総合的な検討を行った。エネルギーネットワーク全体については理論的な検討に留まったが、太陽光・風力自然エネルギーシステムについては 1 年間にわたる屋外調査を実施し、実性能に関する貴重なデータを得ることができた[5,6]。以下、実証試験の概略を述べる。

Fig.3 Total amount of energy supply by electricity and town gas in each area at weekday.

3.1 太陽光－風力ハイブリッド発電システム

発電システムには、発電量の時間的、季節的な変化、および都市における設置性を考慮して、風力発電機 Z-500XP (ゼファー社製) と太陽光パネル

SM-128H (京セラ製) から構成されるハイブリッド発電システムを採用した。Fig.4 に風力－太陽光ハイブリッド発電システムの概略を、風力発電機 Z-500XP の仕様を Table 1 に、また、太陽光パネル SM-128H の仕様を Table 2 に示す。

Fig.4 Wind solar Hybrid Power Generation System.

Table 1 Specifications of Wind Turbine.

Type	Horizontal Axis Type with Three Wings
Nominal Output	450W (Nominal Wind Speed 12.5m/s)
Cut-in Velocity	2.5m/s
Rotor Diameter	1.17m
Hub height	3.80m

Table 2 Specifications of Photovoltaic Module.

Type	Multicrystal Silicon Solar Cell
Power	128W
Tilt Angle	30°
Direction Angle	Due South

3.2 発電量の算定方法

風力発電量は、地上高 h_1, h_2 [m] における風速 U_1, U_2 [m/s] からハブ高さにおける風速 U_g [m/s] を決定し、風速 U_g の時の風力発生電力 $E(U_g)$ と風速 U_g の出現頻度 $f(U)$ の積をカットイン風速 U_{in} から U_{out} まで積分することによって算定した[6]。

一方、太陽光発電量の算定には、春期 (3～5 月)、夏期 (6～8 月)、秋期 (9～11 月)、冬期 (12～2 月) に分けた近似式を使用した。

3.3 測定結果

3.3.1 日変化特性

風力や太陽光エネルギーには、地球の自転と公転の影響により、1 日周期と 1 年周期の変化が見られる。そこで、まず 1 日の風況・日射の時間変化について調べた結果を示す。Fig.5 に風速の測定例、Fig.6 に日射量の測定例を示す。両図から分かるように、その日の天候などの気象状況によ

って風況・日射量共に大きく変化する。よって、対象期間を1ヶ月として、平均的な風況・日射の時間変化について調べた（一例として2003年11月の測定結果を示す）。

Fig.5 Daily Wind Speed Changes.

Fig.6 Total Amount of Solar Insolation.

Fig.7 Relation between Averaged Wind Speed And Amount of Wind Power Generation.

Fig.7 に風速と風力発電量、Fig.8 に傾斜面日射量と太陽光発電量、Fig.9 にシステム全体の発電量と消費電力の時間変化を示す。なお、負荷には150Wの白熱球を用いた。これらの図から、風が強くなる時間帯と日射量が多くなる時間は、ほぼ昼間に集中することがわかる。また、風が強くなる時間帯以外は、風速がカットイン風速以下にな

る時間帯がかなり多いことが分かった。つまり、風力発電に太陽光パネルが発電しない夜間の電力補完を期待する場合、夜間の風速でも発電可能な低風速に適した風力発電機を採用することが重要となる。

Fig.8 Relation between Averaged Total Insolation and Amount of Photovoltaic Power Generation.

Fig.9 Changes of Power Generation and Power Consumption.

Fig.10 Monthly Changes of Wind Power and Wind Speed.

3.3.2 月別発電特性

1日に得られる発電量は、その日の気象によって全く異なる。従って、発電量と風速や日射量との関係をより明確にするため、対象期間を1ヶ月として、1ヶ月間の日変化について調べた（例として2003年12月の測定結果を用いた）。風力発電量と風速の日変化を Fig.10 に、理論風力発電

量と実際に得られた風力発電量の比較を Fig.11 に示す。風力発電量は、計算値よりかなり小さい値となり、風速が大きくなるほど計算値に近づく傾向が見られた。次に、傾斜面日射量と太陽光発電量の日変化を Fig.12 に示す。太陽光発電量は傾斜面日射量にほぼ比例して増大するが、発電効率は低下する傾向が見られた。

Fig.11 Comparison of the Amount of Wind Power Generation by Observation and Theory.

Fig.12 Monthly Changes of Photovoltaic Power and Total Solar Insolation.

3.4 ハイブリッド発電に関するまとめ

2003 年 9 月から、1 年間にわたって自然エネルギーの利用に関する屋外調査を行い、以下の結論を得た。(1)調査地域では、風速が昼間に強くなる傾向があり、風力発電で太陽光発電が行われない夜間の電力を補完するという実験当初の目的は十分に果たせなかった。(2)また、風況測定から、平均風速、出現頻度とも一般的なマイクロ風車のカットイン風速を下回ることが判明した。なお、本稿では省略したが、実証試験後、カットイン風速が 1.0 m/s の低風速域に適した風力発電システムを導入し、調査地域においては約 2 倍の発電量が得られることを確認した[6]。

4. 太陽熱駆動吸収式冷暖房システムの開発

再生可能エネルギーの代表格として太陽光発電が世界的に注目されており、それを組み込んだ

空調システムが数多く開発されている。一方、太陽熱集熱器に代表される太陽熱利用は太陽光発電より以前から取り組まれ、また、エネルギー利用効率も太陽光発電より高いものの、太陽光発電の後塵を拝していると言わざるを得ない。そこで、著者らは、太陽熱利用の新たな用途拡大を目指して、集熱器により製造した 70~90℃ 程度の温水を熱駆動の吸収式空調システムの熱源として利用するソーラークーリングシステムの開発を進めてきた[7-9]。以下、その概要を述べる。

4.1 実証試験

4.1.1 システムの概要

大阪ガス西島導管技術センター屋上（大阪市此花区西島）において実証試験を行っている。このビルは延べ床面積 3029m²、地上 3 階建ての事務所ビルである。実証試験システムは Fig.13 に示すように、太陽熱集熱器、貯湯槽、熱交換器、吸収式冷温水機から構成されている。

Fig.13 Schematic of a solar-assisted absorption air-conditioning system.

太陽熱集熱器には真空管式 2 種類と平板式 1 種類の計 3 種類のタイプのものを採用した。総受光面積は 204m²、水を集熱媒体とし、ビル屋上に傾斜面の方位角が南南東へ約 20°、傾斜角は真空管式 25°、平板式 20° で設置した。吸収式冷温水機は冷房能力 352 kW、暖房能力 231 kW の排熱利用型を改良したものであり、太陽熱を優先利用する制御が組み込まれている。

4.1.2 計測項目および計測期間

実証試験の目的は、システムの省エネルギー量、CO₂ 削減量の測定、ならびに、日射特性の把握、各構成要素の個別性能の評価などである。データの解析期間は 2009 年 6 月 1 日から 2010 年 10 月 31 日までの 15 カ月間である。

4.2 試験結果

冷房期間における太陽熱集熱器およびシステム全体の性能とその特性を把握するために、夏期の測定結果を天候ごとに快晴、晴天、曇天、および雨天の 4 種類に分けて示す。

Fig.14 Solar irradiance and outdoor air temperature

Fig.15 Town gas reduction ratio by injection of solar energy

Fig.16 System COP of solar-assisted absorption chiller heater

ここでは快晴日として7月21日、晴天日として7月30日、曇天日として7月2日、雨天日として7月9日を代表日として、当日の測定値を使用した。なお、紙面の都合で雨天日のデータは示していない。

4.2.1 日射特性

それぞれの代表日の日射量と外気温の関係をFig.14に示す。上から順に快晴、晴天、曇天日の結果を示している。左の縦軸は日射量 I 、右の縦軸は外気温 t_0 、横軸は時刻である。天候による外気温に大きな変化は見られなかったが、日射量は大きく変化した。

4.2.2 太陽熱集熱器の集熱効率

次に三種類の太陽熱集熱器の瞬時集熱効率の比較を行った。集熱効率の時間変化グラフは紙面の都合上省略した。集熱効率は集熱量 Q_c と日射量 I より式(1)から得られる。真空管式1が、安定して高い集熱効率を示した。快晴日の9時～15時の平均値では78%、時間帯によっては80%を

超える場合もあった。次に真空管式2の集熱効率が高く、晴天日の9時～15時の平均値で約55%の値を示した。平板式は最も低い集熱効率を示し、晴天日の9時～15時の平均値で約45%となった。

$$\eta = \frac{Q_c}{I} \quad (1)$$

4.2.3 都市ガス消費の削減量と削減率

次に吸収式冷温水機を運転するのに使用した都市ガス消費量と太陽熱を利用することにより削減された都市ガス量、都市ガス削減率をFig.15に示す。都市ガス削減量は集熱器、熱交換器、貯湯槽を経て吸収式冷温水機に投入された熱量 Q_{ACH} と、吸収式冷温水機の排熱利用係数 α 、冷房時の平均COP $_{AVE}$ 、発熱量 Q_{HV} から式(2)により算出した。また、都市ガス削減率は式(3)により算出した。日射量が多く集熱量が安定している時間ほど都市ガス消費の削減が行われ、削減率が高くなった。天候が悪く、日射量の少ない日には、集熱

温水が、吸収式冷温水機の仕様温度レベルに達しないため、吸収式冷温水機への投入が行われない。都市ガス削減率は最高で 39% の値を示した。

$$V_{rdc} = \frac{Q_{ACH}}{Q_{HV}} \times \frac{a}{COP_{AVE}} \quad (2)$$

$$\zeta = \frac{V_{rdc}}{V_{TG} + V_{rdc}} \times 100 \quad (3)$$

4.2.4 成績係数 COP

次に太陽熱を利用した場合と利用しなかった場合の吸収式冷温水機の成績係数 (COP) を Fig.16 に示す。それぞれの COP は式(4)および式(5)から得られる。快晴日には COP が急激に増大し 11 時には 1.3 が 2.1 まで向上した。9 時～15 時の平均では 1.2 が 1.6 まで向上した。

$$\text{太陽熱利用時COP} = \frac{Q_{cool}}{V_{TG} \times Q_{HV}} \quad (4)$$

$$\text{都市ガス単独運転時COP} = \frac{Q_{cool}}{(V_{rdc} + V_{TG}) \times Q_{HV}} \quad (5)$$

4.3 システムの性能評価

4.3.1 集熱特性線図

集熱器の集熱効率・熱通過率を測定結果より求めた。集熱器の集熱量は吸収体に吸収された日射量から熱損失量を引いたものと考えられるので、式(6)で表わされる。また集熱効率 η は集熱量を日射量で割ることにより求められるので、式(6)より集熱効率は式(7)で表わされる。

$$Q_c = \alpha I - K_c (t_w - t_0) \quad (6)$$

$$\eta = \frac{Q_c}{I} = \alpha - K_c \frac{t_w - t_0}{I} \quad (7)$$

この関係を用いて実験結果を整理したのが集熱特性線図である。つまり横軸に集熱媒温度から外気温度を引いたものを日射量で割った値をとり、縦軸に集熱効率を示したものである。6 月～11 月の日射安定日を対象に、南中時刻付近 (11 時 40 分～12 時 20 分) の 10 分おき測定値 5 点平均をとった値から最小二乗法により、集熱特性の近似式を導いた。Fig.17 にその結果を示す。比較すると平板式の傾きが真空管式に比べて大きく、熱損失が大きい事がわかる。真空管式 2 の傾きは小さく天候や季節の変化により、熱損失量が影響を受け

にくいことが分かった。全体を通して真空管式 1 が一番高い集熱効率を示した。

Fig.17 Comparison of collector efficiency of three types of solar collector.

Fig.18 Overall heat transfer coefficient of solar Collector.

4.3.2 集熱器熱通過率

式(7)に日射量などの測定値を代入することにより、各集熱器の熱通過率を求めた。結果を Fig.18 に示す。90°C 付近までは真空管式 1 が一番小さく次に真空管式 2、そして真空管式の二つに比べて平板式は高い値となった。

4.4 ソーラークーリングシステムまとめ

- (i) 三種類の集熱器の集熱効率は、真空管式 1 (英国製) が最も高く、次に真空管式 2 (中国製)、平板式 (日本製) という結果となった。
- (ii) 太陽熱利用による都市ガス削減率の月毎の値の最大値は 2010 年 5 月で約 26% となった。また、計測期間の平均では 16% となった。

5. まとめにかえて

太陽エネルギーに限らず再生可能エネルギーは、一般にエネルギー密度が低く、時間的な変動が大きいことから取り扱いが難しい。ここでは、

その一例として、Fig.19 に 2009 年および 2010 年の 8 月における大阪地域における気温の出現頻度、ならびに Fig.20 に 2010 年 8 月の外気温と日射量の測定結果 (8 月 5 日および 6 日は試験装置改修のためデータ欠落) を示す。

Fig.19 には、同期間における大阪管区気象台の測定データ、および大阪の標準気象データを示す。同図より、測定結果・気象台データのいずれとも 2010 年のほうが高温になっていることが分かる。また、実証試験地 (西島) と管区気象台の気温では、西島の気温が低いことが分かる。これは西島が大阪管区気象台より西に約 10 km に位置し大阪湾の臨海部に位置しているうえに、淀川の河岸にも近いためである。一方、Fig.20 より、2010 年 8 月の期間中は晴天日が多く、気温が 35℃に達する猛暑日が多かったことが分かる。また、1 日ごとの日射の変化に拘わらず、気温はそれほど変化していないことがわかる。以上を考えると、太陽エネルギーの利用可能量は天候により、また、年により大きく変わることを、さらに比較的狭い地域であっても立地条件により大きく変わることが分かる。

巷間、太陽光発電に対する期待が大きい、そのほとんどが定格性能と統計的に得られた日射条件を用いた簡易推算によるものであることを考え合わせると、過大な期待は禁物であると言わざるを得ない。また、紙面の都合で省略したが、都市においては、住宅などの低層建物と、業務用ビルや高層マンションなどの高層建物が混在し

ているため、日当り率などの検討が不可欠となる。都市部における太陽光発電・太陽熱利用に関しては解決すべき課題が山積している。

都市における再生可能エネルギーの利用に関して、地に着いた地道な研究の成果を期待したい。

参考文献

- [1] United Nations, Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, 20(1998).
- [2] Planning and Coordination Bureau of Osaka City, Osaka city statistics, Vol.46(1958)-Vol.91 (2003).
- [3] Nishimura N., M.Nabeshima et al., J. of Heat Island Institute International, Vol.1, 43-50 (2006).
- [4] Nomura T. and N.Nishimura, Environmental symbiosis studies with the sea and the land(in Japanese), Edited by K.Yamaguchi, Osaka University Press, Chap.6 (2004).
- [5] Matsuo J., Nomura T., Nishimura N. and Iyota H., Proc. of JSES/JWEA Joint Conf., Kitakyushu 373-376 (2004).
- [6] Nishimura N., H.Iyota, J.Matsuo and T.Nomura, J. of JSES., Japan, Vol.33, 35-43 (2007).
- [7] Tsuruoka H., Proc. of the 44th Japanese Joint Conf. on Air-conditioning and Refrigeration, Tokyo, 77-79 (2010-4).
- [8] Yanagi N. Nishimura N., Iyota H., Tsuruoka H. and T.Iteya, 2010 JSRAE Annual Conf., Kanazawa 459-462 (2010).
- [9] Iteya T. N.Nishimura, H.Iyota and T.Matsubara, Proc. of the 2011 Symposium on Environmental Engineering, Tokyo, 268-271 (2011).

Fig.19 Comparison of the appearance frequency of the temperature in Osaka (August/2009&2010).

Fig.20 Outdoor temperature and solar irradiance changes with time (August/2010).