

降水確率に基づく日射量予測を用いた 太陽光・熱利用システムの効率的運用

Effective Operation of Solar Photovoltaic/Heat Utilization System
Using Insolation Forecasted from Precipitation Probability

中 川 重 康*¹ 杉 岡 伸一郎*¹ 見 目 喜 重*¹ 榊 原 建 樹*¹
Shigeyasu NAKAGAWA Shinichiro SUGIOKA Yoshishige KEMMOIU Tateki SAKAKIBARA

Abstract

Forecasting solar insolation of a next day is important for operation of a solar energy utilization system. In this paper, the next day insolation is forecasted on the basis of relation between daily solar insolation and precipitation probability measured during past four years. Using the hourly data of forecasted and measured solar insulations, and atmospheric temperature for a year, a computer simulation is performed for the solar photovoltaic/heat hybrid utilization system which is assumed to be installed in an old people's apartment house. The photovoltaic and heat energies are mainly supplied to the electric and hot-water loads of the home, respectively. The simulation results show that Forecasting solar insolation can reduce the peak of electric power and the electric energy purchased from an electric utility to 82% and 31% of those of the conventional operation(without forecasting) respectively.

Key words: Solar Photovoltaic/Heat Utilization System, Simulation of System Operation, Insolation Forecast, Precipitation, Purchased Power, Purchased Energy

1. はじめに

電力や熱エネルギーを消費する需要家が、太陽エネルギー利用システムを導入しようとするとき、太陽電池・蓄電池・集熱器・蓄熱槽などのシステムの規模が問題となる。それらのシステム規模は、需要家の電力および熱エネルギーの使用状況、年間に得られる太陽エネルギーなどによって決まる。その際、システムの運用法が重要となる。例えば、需要家がシステムの導入によって、電気事業者から購入する電力のピーク値および電力量を削減しようとするならば、その運用に適したシステム規模を求めなければならない⁽¹⁾。

太陽エネルギー利用システムの従来の運用法は、購入ピーク電力を削減するために、夜間に電力を貯蔵し、電力負荷がピークとなる昼間に貯蔵電力を放出する運用であった⁽²⁾。その運用では、翌日に得られる日射量がどの程度かわからないため、貯蔵容量限度

いっぱいまで、電力を貯蔵する。そうすると、翌日、日射量が充分得られる場合には、太陽電池出力で負荷電力が賄えることになり、そのため、夜間に貯蔵しておいた電力を活かしきれないことになる。もし、翌日の日射量が予測できれば、このようなことはなくなる。

太陽熱利用システムの予測制御に関する研究は少なく、例えば、代表的気象日(TMD)のシステム性能解析から長期性能を予測する研究⁽³⁾、ニューメキシコ州において予測年間太陽エネルギーとデグリーデー(温水負荷に要するエネルギーを見積もるために用いる指数)の関係をを用い、太陽温水システムの性能を予測する研究⁽⁴⁾などがあるにすぎない。これらの研究においては、1日ごとの日射量の変動を予測するものではない。

本研究では、翌日の日射量を予測することによって、夜間に貯蔵する電力量を適切に設定する運用法を提案し、その運用方法を適用することによって需要家の購入ピーク電力および購入電力量がどれだけ削減できるかを、シミュレーションにより検証する。その際、需要家の代表として、ある老人福祉施設を取り上げ、また、日射量予測の手法として降水確率から翌日の日射量を予測する方法を採用する。

* 原稿受付 平成6年9月3日

*¹ 会員、豊橋技術科学大学工学部
(〒441 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

2. システム概要

2.1 システム導入対象

太陽エネルギー利用システムの導入対象として、収容人員が100人、建物の屋上面積が1000 m²の豊橋市の老人福祉施設を想定する。この施設の電力負荷と給湯負荷に対して太陽エネルギーを利用する。

2.2 電力負荷

老人福祉施設の月ごとの負荷電力量と日間負荷曲線とから1時間ごとの年間負荷曲線を算出する。すなわち、月ごとの負荷電力量をその月の日数で割って1日の負荷電力量を求め、日間負荷曲線の積算値がその負荷電力量になるようにする。なお、年間負荷電力量は219 MWh（平均電力：25 kW）である。

2.3 給湯負荷

給湯負荷の使用目的を入浴のみに限定する。給湯量は1日に10 m³、給湯時刻を毎日19時とする。給湯設定温度を50℃とし、容量10 m³の蓄熱槽を設け、給湯時刻の直前まで後述する運用により集熱器および系統電力で加熱する。1日の給湯負荷は、10 m³の水を水道水温度から給湯設定温度まで加熱するのに必要なエネルギーに放熱損失を加えたものとする。

2.4 システム構成

表1に本システムを構成する機器の規模を示す。その他、太陽電池の傾斜角は35°、集熱器（平板型）の傾斜角は35°、集熱器の透過体の日射透過率は0.87、集熱材の日射吸収率は0.97、蓄熱槽の熱損失時定数は100.0 hとする。

表1 本システム構成機器の規模

Component	Size
Solar Cells	400 m ²
Heat Collector	400 m ²
Storage Battery	300 kWh
Storage Tank	10 m ³

これらの規模は、この老人福祉施設に太陽光・熱／風力ハイブリッドシステムを導入する際に、適切な規模として得られた値⁽¹⁾と等しい。

図1に、このような機器で構成するシステムのエネルギーフローを示す。太陽電池および集熱器から得られる電力および熱をそれぞれ電力負荷および給湯負荷へ供給する。太陽エネルギーで負荷を賄いきれない分は系統電力からの購入電力で補い、太陽電池の発電電力に余剰がでる場合には、その余剰電力を蓄熱槽へ回すものとする。

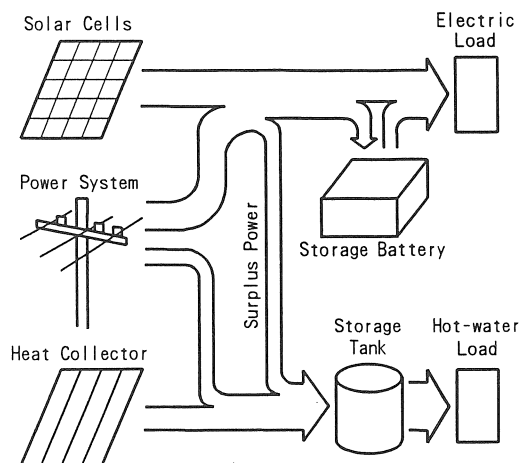


図1 太陽エネルギー利用システムのエネルギーフロー

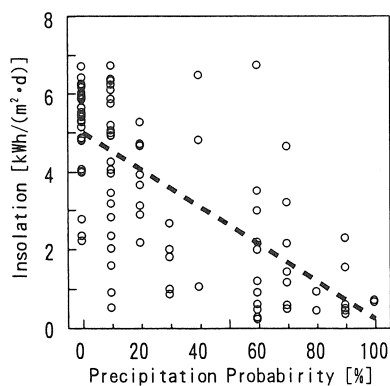
本構成において、電気ヒータによる加熱方式をとっている理由は、深夜電力を利用する負荷平準化を図っているためである。また、蓄電池を設置した理由は、翌日に日射量が全くない場合にも、深夜電力で充電しておいた蓄電池を放電することによって昼間の購入電力のピークを削減するためである。

3. 日射量予測

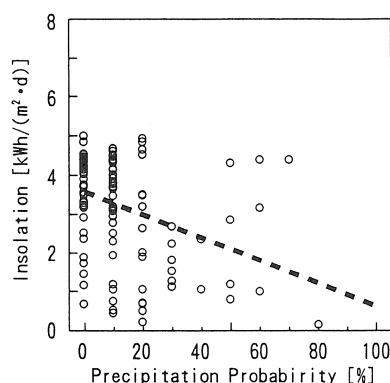
日本気象協会から提供される気象予測情報には、天気予報や短時間降水量予測などがあるが⁽⁵⁾、日射量予測はない。日射量予測に関しては、天気図をデータベースとして用いる方法⁽⁶⁾、日射量の日変化に関し3つの統計的標準パターンを用いる方法⁽⁷⁾が提案されている。本研究の目的は日射量を正確に予測することにあるのではなく、ある程度予測された日射量があればこと足りるので、降水確率から日射量を予測することにする。ここで対象とする予測日射量は翌日の日積算全天日射量 [kWh/(m²・d)] であり、前日の18時の時点で発表される降水確率から、翌日の日射量を予測する。

3.1 日射量と降水確率との関係

降水確率から日射量を予測するために、まず日積算全天日射量と降水確率との関係を調べた。図2 (a)、(b)に1984年から1987年までの3月および12月の結果を示す。降水確率は新聞紙上⁽⁸⁾に掲載されたもので、全天日射量は本学に設置されている総合気象観測システムで記録し当該日の日射量データから計算したものである。日射量の分布の範囲は3月では約7 kWh/(m²・d)



(a) 3月



(b) 12月

図2 日積算全天日射量と降水確率との相関
(1984~1987年, 豊橋)

以下, 12月では $5 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 以下となっている。図中の破線は次式で表わされる回帰直線である。係数A, Bは最小2乗法により各月ごとに求めた。

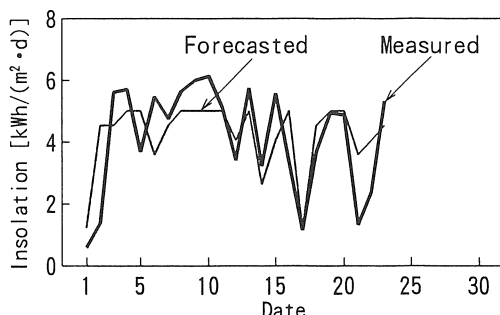
$$I_d = AX + B \quad (1)$$

ここで, I_d : 日積算日射量 [$\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]
 X : 降水確率 [%]
 A, B: 係数

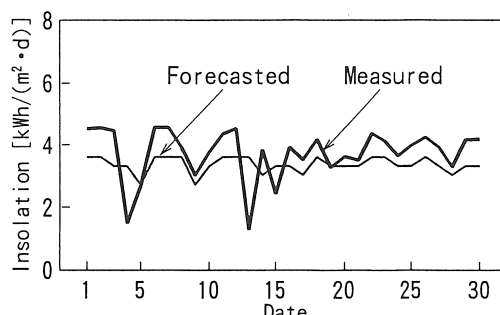
回帰直線はどちらも右下がりになっており, 降水確率が高いときには日射量が少ないという関係を定量的に示している。

3.2 日射量の予測値と実際値

式(1)の X に当該翌日の降水確率を代入し, 翌日の日積算日射量を推定した。1988年1年間のうち, 3月および12月の結果を図3に示す。同図には日射量の実際値も示した。3月に関しては, 2, 21, 22日などで予測



(a) 3月



(b) 12月

図3 日積算日射量の予測値と実際値との比較
(1988年, 豊橋)

値が実際値を大きく上回っているが, 変化の傾向はほぼ一致している。12月に関しては, 予測値は実際値によく追従している。

3.3 時刻別日射量の推定法

1日の時刻別日射量を次式の正弦波で近似する。

$$I_h = \frac{I_d}{12} \left\{ \sin\left(\frac{t+3}{6}\pi\right) + 1 \right\} \quad (6 \leq t \leq 18) \quad (2)$$

$$I_h = 0 \quad (0 \leq t < 6, 18 < t \leq 24)$$

ここで, I_h : 時刻別日射量 [kWh/m^2]
 I_d : 日積算日射量 [$\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]
 t : 時間 [h]

上式を積分すると I_d となる。

4. システム運用

4.1 電力負荷に対する運用

電力負荷に対するシステム運用の目的は太陽電池発電電力を十分に活用しつつ, 購入ピーク電力をできるだけ低減することにある。

4.1.1 太陽電池出力と蓄電池

太陽電池の出力は日射量に比例するものとし、次式で表す。

$$P = \eta SI \quad (3)$$

ここで、 P : 太陽電池出力 [kW]
 η : 変換効率 (0.1)
 S : 太陽電池面積 [m²]
 I : 傾斜面日射量 [kW/m²]

蓄電池の充電効率を70%、放電効率を100%とする。

4.1.2 従来の運用

購入ピーク電力を低減する運用法として、蓄電池を用いた「購入電力平準化運用法」がある⁽⁹⁾。この運用法は負荷電力の低い夜間に電力を購入し、蓄電池を充電しておき、負荷電力の高い昼間に蓄電池を放電する運用である。こうすることによって、購入電力のピーク値を抑えることができる。しかし、昼間に太陽電池の発電電力が充分ある場合には夜間に蓄電池に充電された分が使用されないことになる。

4.1.3 日射量予測に基づく運用

日射量が予測できると、翌日の太陽電池発電電力量を前もって知ることができる。従って、夜間に蓄電池に充電しておくべき電力量がわかることになり、蓄電池の充放電の運用が無駄なく実行できるようになる。

4.2 給湯負荷に対するシステム運用法

給湯負荷に対するシステム運用の目的は、太陽熱を活用し、購入電力量をできる限り抑制することにある。給湯負荷を満たすためには、給湯時刻までに蓄熱槽水温が給湯設定温度に到達するように、集熱器出力と購入電力とによって蓄熱槽を加熱しなければならない。

4.2.1 集熱量および蓄熱槽水温

集熱器および蓄熱槽の熱の流れに関しては、熱系統における熱流・温度・熱抵抗を電気回路における電流・電圧・電気抵抗に対応づけ、その熱系統と等価な電気回路を用いて、1時間ごとに集熱量 I_t および蓄熱槽水温 T_t を計算する⁽¹⁰⁾。本シミュレーションで採用した給湯システムの等価回路を図4に示す。同図における各量の関係は次式で表される。

集熱量(蓄熱槽に移動する熱量) :

$$I_t = \frac{T_c - T_t}{R_d} \quad (4)$$

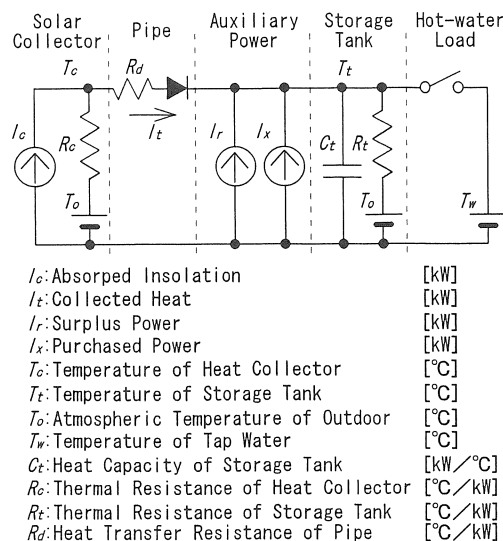


図4 給湯システムの等価回路

集熱器出口水温 :

$$T_c = (I_c + \frac{T_o}{R_c} + \frac{T_t}{R_d}) \frac{R_c R_d}{R_c + R_d} \quad (5)$$

吸収日射量(集熱面に吸収される熱量) :

$$I_c = \tau \alpha IS \quad (6)$$

蓄熱槽水温上昇 :

$$\frac{dT_t}{dt} = \{I_t + k(I_r + I_x) - W_t\} \frac{1}{C_t} \quad (7)$$

パイプ間熱伝達抵抗 :

$$R_d = \frac{1}{PC} \quad (8)$$

蓄熱槽放熱損失 :

$$W_t = \frac{T_t - T_o}{R_t} \quad (9)$$

ここで、 τ : 集熱器透過体の日射透過率

α : 集熱器集熱材の日射吸収率

I : 入射日射強度 [kW/m²]

S : 集熱器面積 [m²]

t : 時間 [h]

k : 電力ヒータの効率

P : ポンプ流量 [m³/h]

C : 水の比熱 [kWh/(m³・°C)]

W_t : 蓄熱槽放熱損失 [kW]

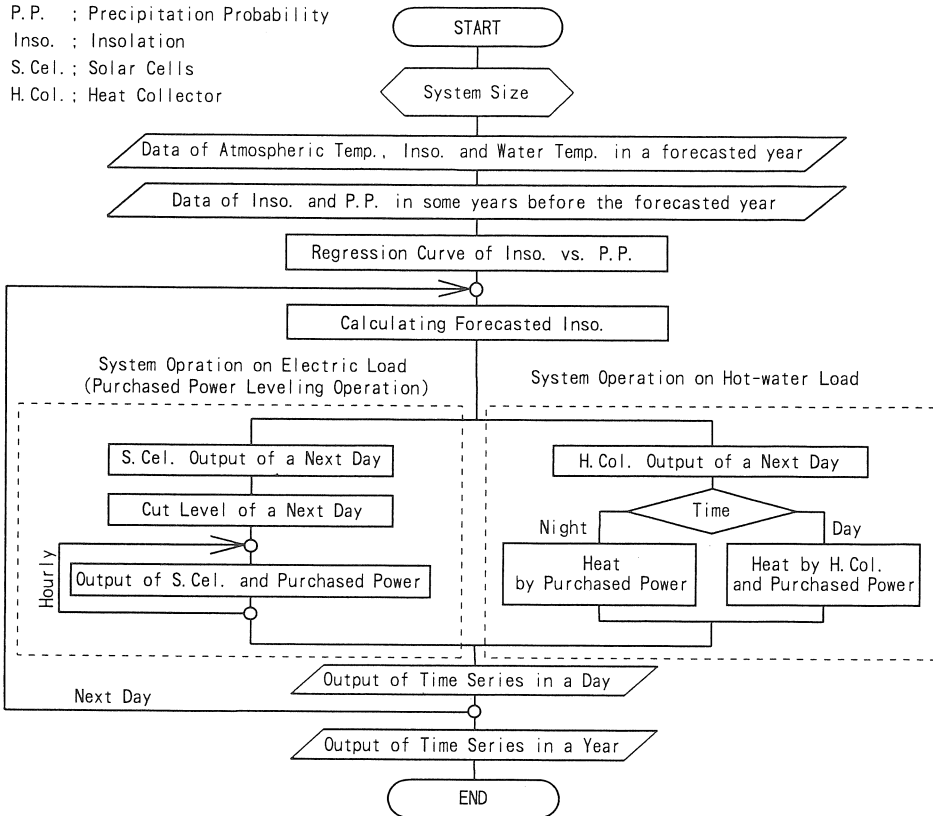


図5 シミュレーションのフローチャート

4.2.2 従来の運用

従来の給湯負荷に対するシステム運用法には「均等加熱運用法」がある⁽²⁾。これは、日中に集熱器出力が全くない場合にも、給湯時刻に蓄熱槽水温が設定温度に達するように、蓄熱槽へ連続的に一定のエネルギーを供給する運用法である。各時刻の蓄熱槽への供給エネルギーは、各時刻における蓄熱槽水温を設定温度まで上昇させるのに必要なエネルギーを給湯時刻までの時間数で割ったものとなる。この供給エネルギーを集熱器出力、太陽電池からの余剰電力および系統電力で賄う。しかし、日中に集熱器出力が十分にあるときには、蓄熱槽水温が設定温度を大きく超えてしまい、結果的に夜間の購入電力が過剰だったことになる。

4.2.3 日射量予測に基づく運用

翌日の日射量が予測できれば、翌日の集熱器出力を前もって知ることができる。蓄熱槽の水温を給湯設定温度（50℃）までにあげるのに必要なエネルギーからこの予測集熱量を差し引いた分のエネルギーを深夜電

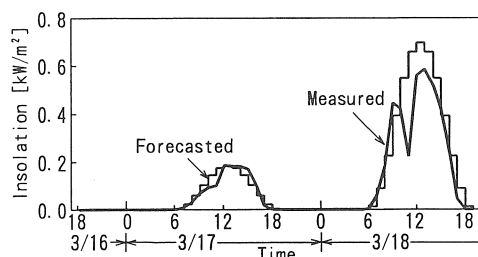
力で賄うものとする。その際の購入電力はその深夜電力量を深夜帯時間で割った値となる。こうすることにより夜間の過剰な購入電力を抑えることができる。

5. シミュレーション

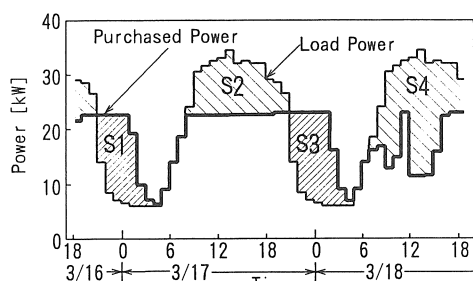
5.1 シミュレーションのフローチャート

図5にシミュレーションのフローチャートを示す。まず、システム規模の設定を行う。使用するデータは1988年の気温、日射量および水道水温で、5分ごとの実測データを1時間平均値に換算する。これらのデータとは別に翌日の日射量を予測するために、1984年から1987年までの日積算全日射量およびその日の降水確率を入力し、日射量-降水確率の回帰直線を求める。この回帰直線を用いて、翌日の降水確率が発表される時点（18時）に翌日の日射量を予測する。

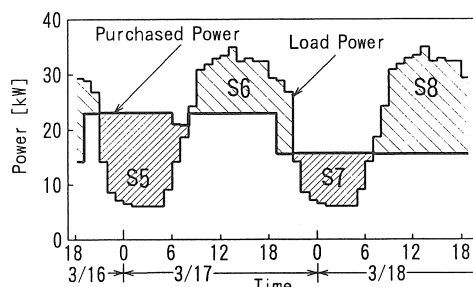
電力負荷に関する運用法について述べる。予測日射量と負荷電力量と蓄電池の充電量とから翌日のカット



(a) 日射量



(b) 日射量を予測しなかった場合の購入電力

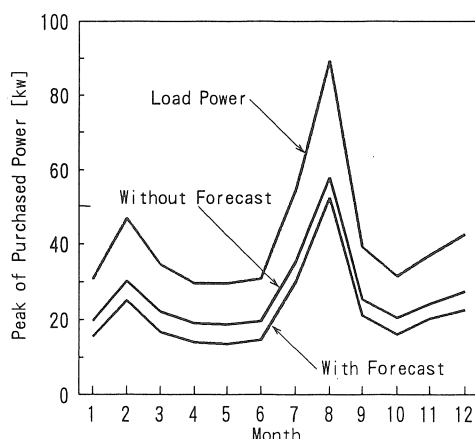


(c) 日射量を予測した場合の購入電力

図6 シミュレーション結果の時系列例
(電力負荷)

レベル(購入電力の最大値)を決定する。また、予測日射量の1日の日射近似曲線を用いて1時間ごとの日射量の値を求める。これらのカットレベルと日射量との値を考慮しながら、負荷電力に対する太陽電池出力および購入電力を、毎時、計算する。

次に予測日射量から集熱器で得られる蓄熱槽水温の温度上昇を計算する。この温度上昇を考慮し、翌朝6時に達成すべき蓄熱槽水温の目標温度を計算し、この温度に向かって夜間に一定電力を購入し蓄熱槽を加熱する。予測日射量だけで蓄熱槽温度を設定温度まで上昇できるならば、夜間に加熱する必要はない。翌朝7時から給湯時刻の直前18時までは集熱器出力で加熱し、足りない分は、一定電力を購入することによ


図7 日射量予測による購入電力の削減
(1988年)

て、給湯設定温度まで均等加熱を行う。蓄熱槽の湯は19時の時点ですべて浴槽に排出し、その後、ただちに水道水で蓄熱槽を満たす。

このようにして電力負荷、給湯負荷に関するシステム運用を行い1日の時系列結果を得る。これを年間に渡って繰り返す。

5.2 電力負荷に対するシミュレーション結果

従来法すなわち購入電力平準化運用法、および日射量予測に基づく運用法を適用して、1988年の1年間のシミュレーションを実行した。そのうち、日射量の弱い日と日射量の強い日とが連続する3月17日と18日とのシミュレーションの時系列結果を図6に示す。同図(a)は日射量の予測値と実際値とを、(b)は日射量を予測しなかった場合の購入電力を、(c)は日射量を予測した場合の購入電力を示す。なお、(b)および(c)には負荷電力も並記した。

図6(a)を見ると、17日の日射量予測値は実際値とほぼ等しいが、18日には予測値が実際値を上回っている結果が得られている。同図(b)および(c)において、購入電力が負荷電力を上回っている夜間の時間帯では、(購入電力) = (負荷電力) + (蓄電池への充電電力)、また、負荷電力が購入電力を上回っている昼間の時間帯では、(負荷電力) = (購入電力) + (太陽電池出力) + (蓄電池からの放電電力)が成立するように運用されている。更に、昼間の負荷電力曲線と購入電力曲線とで囲まれる電力量、すなわち、面積{S2, S4, S6, S8}で表される電力量は前日の夜間の充電電力量{S1, S3, S5, S7}とその日の太陽電池出力量との和にそれぞれほぼ等しくなければならない。と

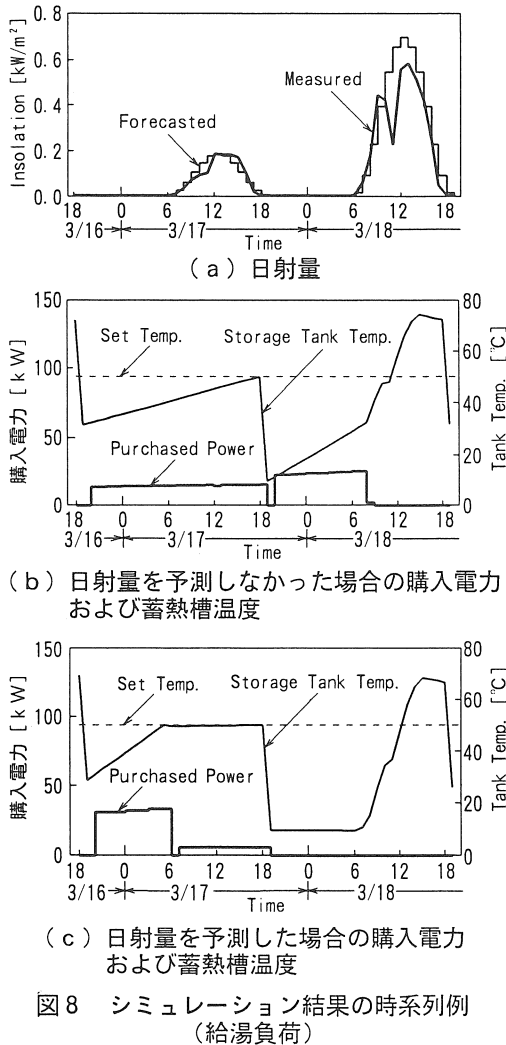


図8 シミュレーション結果の時系列例 (給湯負荷)

ところで、日射量を予測しなかった場合の夜間の充電電力量は日によってそんなに変わっていない、すなわち、 $S1 \sim S3$ である。しかしながら、日射量を予測した場合には日によって変わっている、すなわち、翌日の日射量が弱いと予測される前日の夜間の充電電力量は多く、翌日の日射量が強いと予測されると少なくなる、すなわち、 $S5 \sim S7$ である。また、購入電力の変動は、図 (b) に見られるように日射量を予測しなかった場合、かなり激しいが、予測した場合には、図 (c) に見られるように変動は抑えられている。

1年間のシミュレーション結果のうち、2日間の時系列結果を図6に示したが、負荷電力のピークの平均値および購入電力のピークの平均値を月ごとに求め

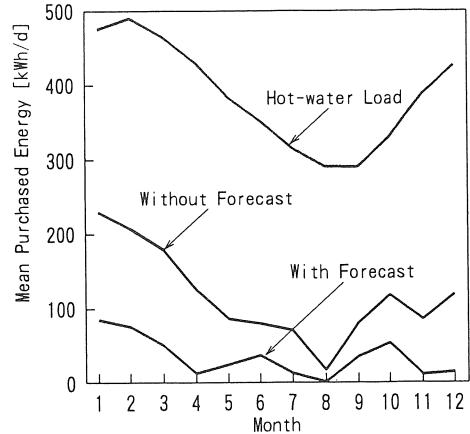


図9 日射量予測による給湯負荷用購入電力量の削減(1988年)

ロットすると図7のようになる。同図から、太陽エネルギー利用システムを導入することによって購入電力のピーク値を大幅に下げることができ、同システムを用いて日射量を予測する運用法を採用することによりこれを更に下げられることがわかる。下げ幅の年平均値はほぼ18%である。

5.3 給湯負荷に対するシミュレーション結果

図8に給湯負荷に関するシミュレーション結果の時系列例を示す。同図 (b) は従来の均等加熱法による運用結果である。3月17日は、購入電力のみによって蓄熱槽を加熱し、給湯時刻に蓄熱槽水温が設定温度に到達している。18日は17日の給湯直後の蓄熱槽水温から設定温度に向かって均等加熱を行うが、日中の集熱器出力によって蓄熱槽水温は設定温度を大きく超えてしまう。従って、17日20時から18日8時までに購入した電力量が過剰だったことになる。

図8 (c) に日射量を予測した場合のシミュレーション結果を示す。この運用においては、日射量は同図 (a) の細線のように予測されている。17日の日射量が少ないことを予測して夜間に加熱が終わっている。18日は、日射量が十分得られることを予測し、夜間の購入電力をゼロにして無駄な加熱を抑制している。

図9に、給湯負荷に必要な1日当たりの購入電力量の月別平均値を示す。日射量を予測することによって、購入電力量は年間を通して削減されている。特に、給湯負荷の大きい冬季の削減量が大きい。年間を通して購入電力量の平均値は、日射量予測なしの場合には117 kWh/dであるのに対し、日射量予測ありの場合は

36 kWh/dとなり、前者の31%に減少し、日射量を予測する効果が顕著に現れている。

6. まとめ

本論文で提案した日射量予測に基づいたシステム運用を行うことによって、従来の太陽エネルギー利用システムの規模を何ら変えることなく購入ピーク電力の低減および購入電力量の削減が図れ、そのシステムのエネルギーセービングが可能になることを示した。年間のシミュレーションによって得られた具体的な結果を次に要約する。

- (1) 前日になされる翌日の降水確率から、翌日の日射量がある程度の精度で予測することができる。
- (2) 電力負荷に対する日射量予測に基づくシステム運用法は、システムの購入ピーク電力の年平均値を予測しない場合に比べて82%に低減することができる。
- (3) 給湯負荷に対する日射量予測に基づくシステム運用法は、システムの購入電力量を予測しない場合に比べて31%に削減することができる。

このように、日射量がある程度の確率で予測することによっても、購入ピーク電力および購入電力量をかなり低減できることがわかった。日射量をもっと精度よく予測できるならば、購入ピーク電力および購入電力量をさらに低減できよう。

文 献

- (1) 小池 他：「需要家のための太陽光・風力ハイブリッドシステムの基本的運用法」，電気学会論文誌B, Vol. 107, No. 1, pp. 41-48(1987)
- (2) 見目, 野村, 榊原：「福祉コミュニティに適した太陽光・熱/風力ハイブリッドシステムの運用とその規模」，太陽エネルギー, Vol. 18, No. 5, pp. 39-45(1992)
- (3) D. Feuermann, J. M. Gordon, Y. Zarmi: "A typical meteorological day(TMD) approach for predicting the long-term performance of solar energy systems.", Solar Energy, Vol. 35, No. 1, pp. 63-69(1985)
- (4) R. Farrer, R. Polka, J. Thunborg: "Simplified performance predictions for solar hot water systems in New Mexico.", Solar87, pp. 209-213(1987)
- (5) 日本気象協会：気象情報提供サービス
- (6) 福森 他：「衛星データを活用した翌日利用可能な太陽エネルギーの予測」，電気学会全国大会講演論文集, p. 1285(1986)
- (7) Y. Ookouchi, Y. Nawata: "Forecasting diurnal changes in weather variables for available solar energy usage.", J. of Solar Energy Engineering, Vol. 1991, pp. 21-27(1991)
- (8) 中日新聞社：中日新聞縮刷版
- (9) 見目, 金子, 榊原：「太陽光・風力ハイブリッド発電システム導入によるピーク負荷の抑制とCO₂排出削減の効果」，電気学会論文誌D, Vol. 112, No. 3, pp. 264-269, (1992)
- (10) 榊原, 水野, 東山, 榎本：「風力・太陽熱ハイブリッド利用暖房システムのシミュレーション」，電気学会論文B, Vol. 105, No. 9, pp. 786-792(1985)