

# 北九州市における太陽エネルギー 利用に関するシステム分析

前田 博, 村上 周太

## 1. はじめに

1973年のオイルショック以来、わが国では石油代替エネルギーの開発研究が強力に推進されてきた。その中で、自然エネルギーを利用したローカルエネルギーシステムの導入は資源、環境の両面から望ましく、将来の有望なエネルギー供給形態の1つとして検討されている。ローカルエネルギー源は地域特性に依存して多様であり、またその供給形態はエネルギー密度の希薄さ故に、地方都市、町、村単位の小規模分散型とならざるを得ない。この意味から、全国の多くの都市でローカルエネルギーシステムの検討が必要とされる。

本研究は、北九州市を対象として、本市で実用性の高いローカルエネルギーである太陽エネルギー利用に関するシステム分析を行なうものである。すなわち、太陽エネルギー利用システムとして太陽光発電システムおよび太陽熱給湯システムを北九州市に導入した場合、その実現の可能性や有効性をシミュレーションを通して検討する。

この時、検討の視点として省エネルギー性と経済性の2点を考えるが、太陽光発電システムの経済性は現時点では既存電力

システムに明らかに劣っているので、ここで取り扱う太陽光発電システム相互間の相対コストのみを検討する。一方、すでにある程度普及している太陽熱給湯システムについては、ランニングコストも含めた費用・便益分析を試みる。

## 2. 太陽エネルギーの賦存量

北九州市の太陽エネルギーの賦存量を知るために、表1で気象台で観測されている水平面上の全天日射量を他都市と比較してみる。ここで、北九州市は昭和57年の下関気象台の時間ごとの実測データを月単位に累積したものであり、他都市は標準気象データ[1]である。北九州市は冬期で日射量が少ないものの、春・夏・秋期で鹿児島なみの日射量を有し、全体として十分な太陽エネルギー賦存量を有していると言える。

## 3. 太陽光発電システム

### 3.1 太陽光発電システムの仕様

ここで想定する太陽光発電システムは、図1に示す蓄電池使用・商用電源併給型であり、これを

表 1 北九州市における水平面全天日射量(cal/cm<sup>2</sup>・day)

地 点	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
北九州	158	212	327	411	468	499	366	458	310	309	186	144
仙 台	172	233	311	385	417	366	334	346	277	232	184	146
東 京	211	257	306	363	394	350	372	386	282	233	199	186
鹿児島	204	253	323	364	381	360	426	445	368	311	246	201

まえた ひろし, むらかみ しゅうた  
九州工業大学 工学部 情報工学科  
〒804 北九州市戸畑区仙水町1の1  
(受付 62.2.9, 受理 62.3.4)

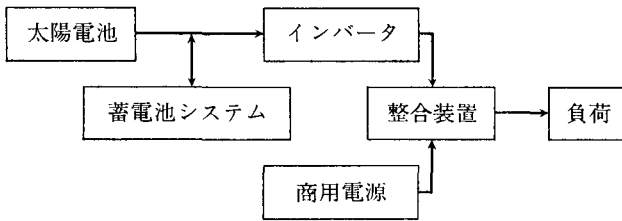


図 1 太陽光発電システムの概要

一般の一戸建て住宅の屋根南面に設置するものとする。システムを構成する各要素の仕様を表 2 にまとめる。これらは電力中央研究所の実験プラントに用いられたシステム [2] に準拠している。この時の太陽電池  $I-V$  (電流-電圧) 特性は以下のように与えられている。

$$I = I_{sc} - I_0 [\exp(C(V + I \cdot R_s)) - 1] \quad (1)$$

$$I_{sc} = L \cdot I_{sc}(28) [1 + \alpha(T - 28)] \quad (2)$$

$$I_0 = I_0(28) \cdot \exp[\gamma - (T - 28)] \quad (3)$$

ここで、 $L$  は日射量 ( $\text{kW}/\text{m}^2$ )、 $T$  は素子温度、 $I_{sc}(28)$ 、 $I_0(28)$  はそれぞれ短絡電流と逆飽和電流の  $28^\circ\text{C}$  値であり、その他のパラメータは、 $C = 0.686$ 、 $\alpha = 9.2 \times 10^{-4}$ 、 $\gamma = 4.96 \times 10^{-2}$  となっている。また、素子温度  $T$  と日射量  $L$ 、外気温  $T_0$ 、風速  $V_w$  との関係は

$$T = T_0 + [22.6 / (V_w + 1.36) + 8.45] L \quad (4)$$

で与えられている。

蓄電池システムは一般の鉛蓄電池を用い、サイクル寿命を考慮して放電深度を低めに 60% とする。充放電効率は 80% とし、さらに放電深度や充放電の制御のための電力をみずから供給するものとしてその損失を 5% 見込んでいる。インバータには定格入力 (太陽電池モジュール当り 45W) 時の直交変換効率 91%、入力比例損失 3% を想定している。

### 3.2 モデル世帯の設定

太陽光発電システムの設置規模、すなわち太陽電池モジュールの設置枚数を決定するために、以下のようなモデル世帯の住宅を設定した。

1 階延べ床面積：70 $\text{m}^2$

住宅屋根面積：74 $\text{m}^2$

1987 年 7 月号

表 2 太陽光発電システム仕様

要素	仕様
太陽電池モジュール	NEDO タイプ 45W モジュール (4 インチセル 46 枚使用) 28 $^\circ\text{C}$ 真性効率：9.1% モジュール面積：0.5 $\text{m}^2$ 出力：最大出力追尾方式
インバータ	自動式 効率：定格時 91%、 入力比例損失 3%
蓄電池	充放電効率：80% 充放電制御損失：5% 放電深度：60%

表 3 日の総電力負荷 ( $\text{kWh}/\text{day}$ )

冬季	準冬季	春秋季	夏期	準夏期
12.5	10.1	6.9	14.5	11.6

太陽光発電利用可能屋根面積：30 $\text{m}^2$

太陽熱集熱器占有屋根面積：7 $\text{m}^2$

太陽電池モジュール 1 枚当たりの面積は 0.5 $\text{m}^2$  であるので、この住宅には最大 60 モジュールの設置が可能である。

次に、1 日の電力負荷を、一般家庭で使用される電気器具 13 品目を時間単位に積み上げることに よって 5 期分設定した。これを表 3 に示す。ここで各期に対応する月は、冬季：1 月、2 月、12 月、準冬季：3 月、11 月、春秋季：4 月、5 月、6 月、10 月、夏期：7 月、8 月、準夏期：9 月である。各期の 1 日電力負荷はそれぞれに時間特性が設定されており、夏期の例を図 2 に示す。

### 3.3 発電シミュレーション

太陽光発電システムの有効性を省エネルギー性と経済性 (システム相互間の相対コスト) の 2 面からシミュレーションによって評価する。そこで、省エネルギー率： $S$  と相対コスト指数： $C$  を定義する。

$S$  = システムの電力供給量 / 負荷電力量

$C$  = (各システムのコスト / システム内の最大コスト)  $\times$  100

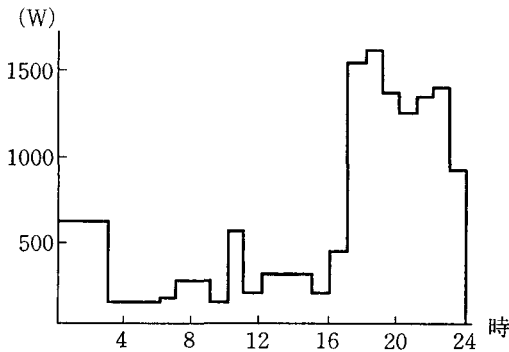


図2 夏期における電力負荷の時間特性

システムの規模として、モジュール数：40枚、50枚、60枚、蓄電池容量：0, 3kW, 6kW, 9kW, 15kW, 25kW, 45kWの組合せによる21通りを設定した。システムのコスト見積は、相対コストということでもあり、やや古いが1977年時の為替レートを240円/\$として以下のデータを用いた。

- (1) 蓄電池システム [3]
  - 本体：8,880円/kWh
  - 付属設備：5,280円/kWh
  - メンテナンス：295円/kWh
- (2) 太陽電池、インバータ [4]
  - 太陽電池：20,160円/kW
  - インバータ：2,400円/kW

発電シミュレーションは以下の手順で行なった。

- (1) 時間単位に測定された1m<sup>2</sup>当りの水平面全天日射量から傾斜面前天日射量を求める。この時のシステムの設置場所の傾斜角、緯度、経度はそれぞれ31°、北緯33°56′、東経130°57′である。
- (2) (1)式のI-V特性から、太陽電池1m<sup>2</sup>当りの直流最大電力を求める。
- (3) 各システムのモジュール数からシステムの総直流電力を求める。
- (4) (3)の直流電力がインバータの入力電力となるので、この値をインバータの定格値(モジュール当り45W)で正規化して直交変換効率を求め、交流出力電力を算出する。

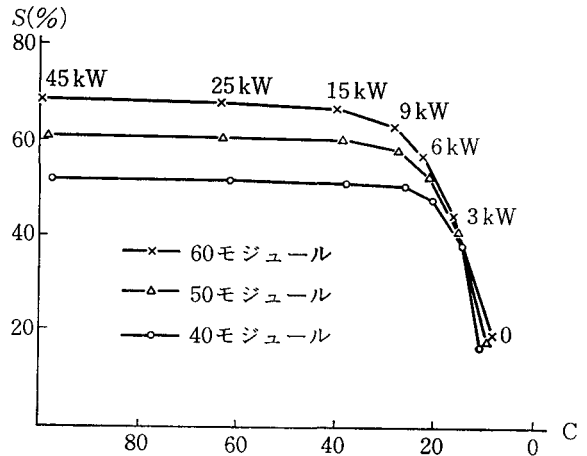


図3 太陽光発電シミュレーション結果(年間)

- (5) 負荷に対するシステムの供給電力に応じて蓄電池システムの充放電過程をシミュレートし、省エネルギー率を算出する。

以上の手順で、太陽光発電システムによって発電される1時間単位の交流電力と省エネルギー率を算出することができる。

まず、時間単位を1年間累積し年間の省エネルギー率と相対コストを見たのが図3である。これから次のことが言える。

- (1) 蓄電池容量は15kW以上ではほとんど効果が見られない。一方、モジュール数増加の効果は大きい。
- (2) 蓄電池容量9kW、モジュール数60枚のシステムの有効性が最も高く、負荷の約65%を太陽光発電で代替可能である。

次にモジュール枚数を60枚とし、蓄電池容量0, 9kW, 45kWのシステムについて月別に省エネルギー率を見たのが図4である。これからも蓄電池容量9kWのシステムの有効性が明らかであり、日射量の大きい3月から10月にかけて蓄電池システムの効果が大きく発揮される。7月で省エネルギー率が低いのは梅雨による日射量低下のためである。最後に、同一システムについて月平均の時間別に省エネルギー率を見たのが図5(1月)、図6(5月)である。1月は日射量が小さいため、

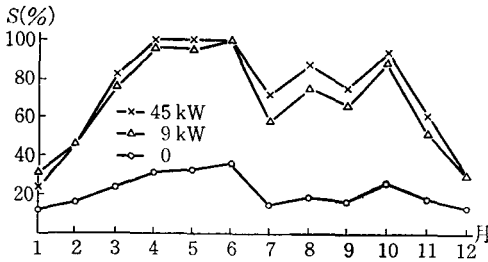


図4 太陽光発電シミュレーション結果(月平均)

蓄電池の効果がわずかしか認められない。一方5月では、日射量がなくなった19時以後も蓄電池によって電力が供給されていることがわかる。蓄電池容量45kWと9kWでは、省エネルギー率に大きな違いはなく、コストを考えると9kWシステムの有効性が高いといえよう。

#### 4. 太陽熱給湯システム

##### 4.1 太陽熱給湯システムの仕様

モデル世帯の使用湯量を京都市の事例[6]をもとに表4のように設定する。項目1, 3は冬期のみ、他は1年中使用するものとする。使用水温は冬期43℃, 夏期37℃, 中間期40℃とする。給湯システムは一般に普及している貯湯式太陽熱集熱器であり、集熱器の集熱面積は3m<sup>2</sup>, 負荷に対して集熱量が不足する場合は補助エネルギー(都市ガス)を使用するものとする。集熱量推定のための細かな仕様[7]は省略する。なお、集熱器の設置傾斜角は31°としている。

##### 4.2 集熱シミュレーション

表4 使用湯量(ℓ)

項目	湯量
1. 手洗, 洗面	98
2. 食事片付け	78
3. 掃除	29
4. 風呂注水	142
5. 入浴	61

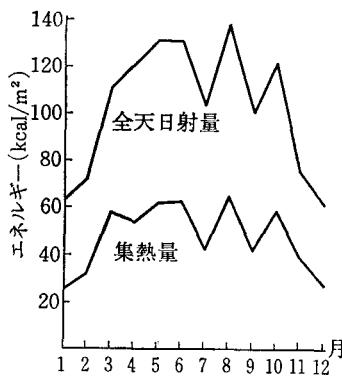


図7 月別の日射量と集熱量

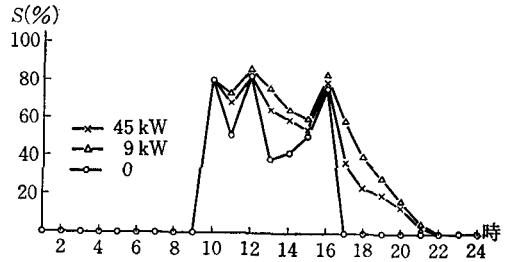


図5 太陽光発電シミュレーション結果(1月の時間平均)

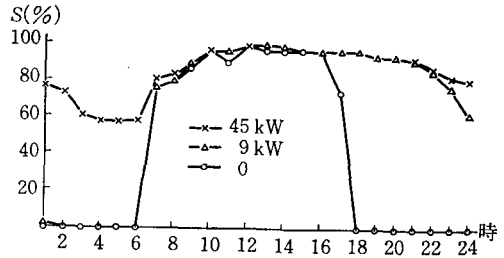


図6 太陽光発電シミュレーション(5月の時間平均)

発電シミュレーションと同様に、傾斜面全天日射量から集熱器による集熱量を推定する。月別の1m<sup>2</sup>当りの日射量と集熱量を図7に示す。これから本システムの月別集熱効率率は40%から53%の間である。まず、月別の省エネルギー率(供給熱量/必要熱量)を見てみると図8のようになる。太陽光発電システムと比べて、夏期に高くその他は低くなる。年平均省エネルギー率は43%程度である。次に、1月, 5月の日別省エネルギー率を見たのが図9である。1月は天候の変化によって省エネルギー率の変動が激しく日平均18%である。5月は比較的安定した省エネルギー率を示し日平均77%と高い。

##### 4.3 費用・便益分析

太陽熱給湯システムはすでにある程度普及して

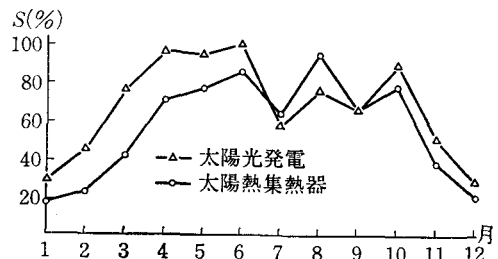


図8 太陽熱利用シミュレーション結果(月平均)

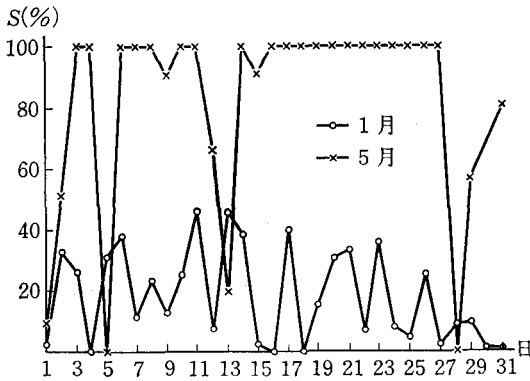


図9 太陽熱利用シミュレーション結果(日平均)

いるので、ここではその有効性を現在価値を用いた費用・便益分析によって検証してみたい。ただし、通常取り扱われない定期保守費や修理費といったランニングコストも分析の対象に含める。分析に当たって以下の前提をおく。

(1) システムの設置費(機器費, 工事費)は一括して設置時に支払われるものとし、これを $S$ とする。

(2) 保守点検は年1回行ない、設置時の1保守当りの費用を $M$ とする。設置時から $n$ 年目の保守費は賃金上昇年率 $r_1$ によって $M(1+r_1)^n$ に変化するものとする。これを割引引き率 $r$ によって現在価値に変換すると

$$M\{(1+r_1)^n/(1+r)^n\} \quad (5)$$

となる。したがって、 $n$ 年目までに支払う全保守費 $M_n$ は

$$M_n = \sum_{i=1}^n M\{(1+r_1)^i/(1+r)^i\} \quad (6)$$

と表わすことができる。

(3) 修理費は使い始めて $x$ 日目の故障率 $h(x)$ を用いた期待値によって表わす。すなわち、システムの故障確率密度がワイブル分布にしたがうものと仮定すると

$$h(x) = \lambda\beta x^{(\beta-1)} \quad (7)$$

であり、耐用年数15年(5475日)に達したとき、必ず使用不能になるものとする、 $\beta$ の値を決めると $\lambda$ が

$$\lambda = 1/[\beta(5475)^{(\beta-1)}] \quad (8)$$

と定まる。設置時の1修理当りの費用を $W$ とし、修理費の上昇率および割引引き率を保守費と同様に扱えば、設置後 $x$ 日目の期待修理費の現在価値 $W_x$ は

$$W_x = W\{(1+r_1)/(1+r)\}^{(x/365)} \lambda\beta x^{(\beta-1)} \quad (9)$$

(4) 便益は1日ごとの集熱量を都市ガスによって代替した場合の料金に換算したものとする。すなわち、1日の必要熱量に対して集熱量が充足する場合は必要熱量を、また集熱量が不足する場合は集熱量を都市ガス料金に置き換える。必要熱量は(使用量)・{(使用水温)-(源水温)}によって求められる。ここで、都市ガス料金はエネルギー価格が下落する以前のもの(昭和59年価格)を用い $1\text{ m}^3$ 当り4,500kcal, 84.5円とする。これは、もし現状のようなエネルギー価格の下落状況を設定すると、このようなシステムの経済性がいちじるしく低下することは自明であるからである。

さて、都市ガスで湯を沸かす場合のエネルギー変換効率 $p$ を考慮して、湯沸器で $p=0.9$ とすると、設置後 $j$ 日目の便益 $E_j$ は、

$$E_j = (\text{換算熱量})_j \cdot 84.5 / (4500 \cdot p) \quad (10)$$

となる。またエネルギー価格上昇率を $r_2$ とする。

以上から、システム設置後 $m$ 日目( $n$ 年目)における総費用 $T_n$ および総便益 $B_m$ は

$$T_n = S + \sum_{i=1}^n M\{(1+r_1)/(1+r)\}^i + \quad (11)$$

$$W\{(1+r_1)/(1+r)\}^{(m/365)} \lambda\beta m^{(\beta-1)}$$

$$B_m = \sum_{j=1}^m E_j\{(1+r_2)/(1+r)\}^{(j/365)} \quad (12)$$

と表わされる。

さて、分析対象とするシステムの仕様を以下のように設定する。

設置費：機器費	15万円	} 計 52万円
給湯器費	20万円	
工事費	17万円	

設置時の1保守当りの費用：1万2千円

設置時の1修理当りの費用：5万円

このシステムに対する感度分析も含めた分析結

果を図10 (割引率による感度分析), 図11 (エネルギー価格上昇率による感度分析) に示す. 設定パラメータは, 図10では  $r_1=0.06$ ,  $r_2=0.06$ ,  $\beta=2.0$ , 図11では  $r=0.06$ ,  $r_1=0.06$ ,  $\beta=2.0$  である. 両ケースとも, コスト的には15年間で設置費を償却することはできず, 20万円以上の未償却部分が生じる. 感度分析では, エネルギー価格上昇率の感度が最も高く, 前にも指摘したように, エネルギー情勢の緩和した現状では, 設置費の未償却部分が拡大することは容易に推定される. 保守費・修理費上昇率や故障率に関するパラメータ  $\beta$  の感度は小さいので, 分析結果を省略した. 図10, 図11からシステムがコスト的に有利なケースを推定してみると, エネルギー価格上昇率が割引引き率や保守費などの上昇率よりも相対的に高い,  $r=0.05$ ,  $r_1=0.05$ ,  $r_2=0.07$ ,  $\beta=2.0$  となり, それでも18万円程度の未償却部分が生じる.

このギャップをコスト以外の, たとえば, 快適性等に相当するものとして受け入れられる家庭では, 本システムの導入が有効であると言える.

## 5. 北九州市における省エネルギー率

モデル世帯で設定した太陽エネルギー利用システムを北九州市全体に導入したと想定した場合, 最大に見積ってどの程度の省エネルギーが達成できるか推定してみよう.

そのためにまず, 住宅地面積と建坪率に関する500m×500mメッシュデータを用い, 住宅の1階延べ床面積が建坪率上限いっぱい建てられていると仮定して, 7行政区ごとに総1階延べ床面積を推定する. 次に, この値をモデル世帯の1階延べ床面積で除してシステム設置可能世帯数を算定

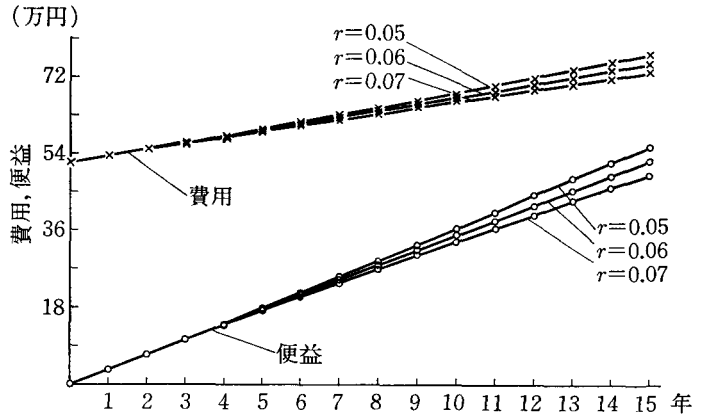


図10 費用・便益分析結果 (割引き率感度)

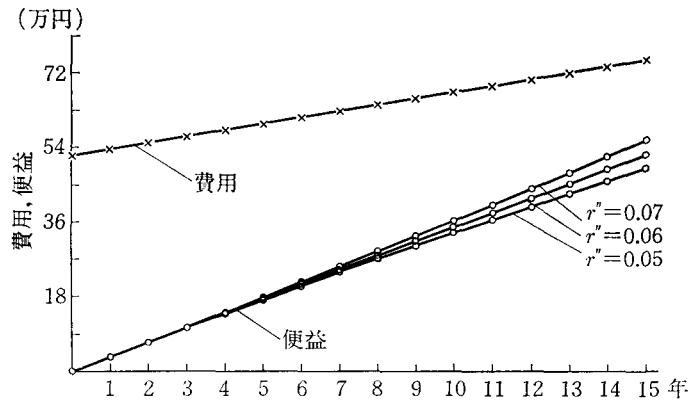


図11 費用・便益分析結果 (エネルギー価格上昇率感度)

する. この結果が表5である.

都心部周辺の小倉北区, 戸畑区, 八幡東区などでは, 集合住宅が多いため設置可能世帯数は50%台と相対的に低い. 郊外住宅地の多い小倉南区, 八幡西区, 若松区では, 一戸建て住宅が多いため設置可能世帯数は高率になっている. 北九州市平均では, 総世帯数の70%がシステム設置可能である. モデル世帯当りの省エネルギー率が, 太陽光発電によって年間電力の65%, 太陽熱給湯システムによって年間ガスエネルギーの43%であるので, 市全体では電力45% ( $0.65 \times 0.7$ ), ガス30% ( $0.43 \times 0.7$ ) の省エネルギーが期待できる.

## 6. おわりに

本研究によって次のような結果が得られた.

(1) 北九州市の気象条件は太陽エネルギー利用システム環境に適合している。

(2) モデル世帯を仮定したシミュレーションでは、太陽電池2.7kW、蓄電池9kWの太陽光発電システム、集熱面積3m<sup>2</sup>の貯湯式太陽熱給湯システムが最も有効であり、年間使用電力の65%、熱量の43%という大きなエネルギーを代替可能である。

(3) 太陽熱給湯システムに関する費用・便益分析の結果、耐用年数を15年と考えるとシステムの設置費を償却することはできない。この未償却部分をコスト以外の効用として受け入れられる家庭では、本システムの導入が有効であると言える。

(4) (2)の結果を基に、北九州市全体に太陽エネルギー利用システムを導入したとの想定で、既存エネルギーの代替率をやや楽観的に推定してみると、電力で45%熱量で30%との結果を得た。

以上から、北九州市のローカルエネルギーシステムとして、太陽エネルギー利用システムは有効であると言える。しかしながら、節減できるエネルギーコストが既存システムのコストに到底太刀打ちできないことは周知の通りであり、この方面の一層の研究が必要とされる。

最後に、本研究が日本証券奨学財団の援助の元に行なわれたことを記し、深く謝意を表します。

表5 太陽エネルギー利用システム設置可能世帯数

行政区	世帯数	1階延床面積 (m <sup>2</sup> )	設置世帯数	比率
門司	41474	2278182	26413	0.64
小倉北	86646	3899525	45212	0.52
小倉南	54034	4235457	49106	0.91
戸畑	31542	1408697	16332	0.52
八幡東	39251	1969670	22836	0.58
八幡西	79563	5981575	69351	0.87
若松	24674	1637494	18985	0.77
市計	357194	21410610	248235	0.70

#### 参考文献

- [1] 辻 高輝：太陽電池，パワー社，1983年
- [2] 滝川 清，武田幸宏：地域気象条件を考慮した太陽光発電・運転特性評価方式，電力中央研究所報告，183044，1985年
- [3] W. Feduska et al: Energy Storage in Combined Photovoltaic/Battery Plants in Utility Networks, Proc. of Symposium on Load Leveling, pp.21-60, 1977
- [4] 浜川圭弘：最新太陽光発電技術，槇書店，1984年
- [5] 太陽エネルギー学会：太陽エネルギーの基礎と応用，オーム社，1978年
- [6] 末石富太郎，山田 淳：用途別給排水に関する基礎的研究，土木学会第24回年次学術講演会講演集，pp.403-404，1969年
- [7] 田中俊六：太陽熱冷暖システム，オーム社，1977年

### 第1回 APORS 論文募集

きたる1988年8月24日～26日，韓国ソウルにおいて第1回のAPORSの大会を開催します。APORSはご承知のようにIFORS加盟学会のアジア・大洋州地域の連合です。1985年に発足以来，APORSを引き受けた日本OR学会がニューズレターの編集発行，またシンガポールとニュージーランドが協力してAPORSの論文誌を年2回発行しています。

会長は韓国のOR/MS学会長の羅 雄培博士が務めています。同氏は韓国の通産相をも務める有力者ですから，韓国流の木目の細かいもてなしをしてみらえるものと思います。

日本としてはAPORSの最大の学会でもありますし，アジア諸国に役立つ品質の高い論文をたくさん発表することと，近隣国でありますから，たくさんの大会参加者を送ることがわれわれの役目かと考えます。

会員諸兄の積極的なご協力をお願いいたします。

#### [重要日程]

1987. 12. 31 アブストラクト締切

1988. 1. 31 受理通知

1988. 5. 31 事前参加登録締切

1988. 8. 24～26 大会開催日

論文発表をされたい方は，学会事務局までお問い合わせください。  
(国際委員会より)