

エネルギーアナリシス及び地域特性からみた 太陽熱利用技術の評価

Energy Analyses and Regional Adaptability of Solar Systems

栗 津 啓 介*
Keisuke AWAZU

西 岡 秀 三**
Shuzo NISHIOKA

Abstract

One essential characteristic required to the utilization systems of renewable energy sources like solar energy is their self-sustainability. This characteristic largely depends on the regional characteristics such as climate and demand pattern of energy in each region. This report focuses on the self-sustainability of solar systems with respects to energy balance and regional adaptability.

Energy output/input ratio, estimated from energy analysis on practical facilities, of 5.8 for a large scale solar pool system and 2 to 4 for domestic heating systems, showed that those systems yield sufficient energy to compensate for the energy consumed in their production, which proved their sustainability from energy point of view.

The factor analysis applied to examine the local adaptability showed that the distribution of domestic solar systems strongly depends on ambient temperature, rate of insolation and degree of urbanization of each region. By way of cluster analysis, Japan is divided into five regions in relation to regional adaptability defined by the combination of those factors.

1. 再生可能なエネルギーの自立性と 地域性の評価

再生可能なエネルギーの利用が必要とされる理由のひとつは、地球全体、国、地方それぞれのレベルでエネルギー自立の必要性が高まってきたことにある。故に再生可能なエネルギーの利用技術自体が従来の化石燃料利用技術と比較して如何に自立性をもっているかは、この技術評価の重要なポイントである。エネルギー利用技術のシステムを、エネルギー源、エネルギー転換装置、利用エネルギーの3要素にわけて考えると、自立性の評価はエネルギー源に関する点—たとえば化石燃料の太陽熱による置換に伴う石油輸入依存度の低下—だけでなく、転換装置へのエネルギー投入や資源投入へも拡大してなされる必要がある。また化石燃料利用技術は、ひとつには化石燃料が高エネルギー密度をもつことからくるエネルギー源自体の移動容易性、またひとつには利用技術が低エントロピー源を実現するためどのような利用形態にも適合可能であるという特色をもつのに対し、再生可能なエネルギー利用

技術はその低エネルギー密度に起因する移動困難性からくる問題—制約されたエネルギー源しかない場所で、しかもその場所で要求されるエネルギー需要を満たす技術であるか否か—が生じる。地域のエネルギー源と地域のエネルギー需要形態との間をどれほどつなぐことができるものであるかは、利用技術の自立性評価のもうひとつのポイントである。

本研究は以上のような観点から、再生可能なエネルギーのひとつとして太陽熱利用技術とくに温水器をとり上げ、その自立性検討のためにエネルギーアナリシスによってエネルギー面での自立性を検討し3種の技術比較によってこの技術の特性を明らかにし、同時にエネルギーと資源との代替性についても考察する。また上記のように再生可能なエネルギーが地域依存形であることに注目し、太陽熱利用において日本でどのよ

* 大同特殊鋼株式会社 機械事業部
Daido Steel Co., Ltd., Machinery Division

** 環境庁国立公害研究所 総合解析部主任研究官
The National Institute for Environmental
Studies, Systems Analysis and Planning
Division

うな地域依存性がみられるかを現時点での太陽熱利用システムの普及率から解析し、その地域性を代表する要因を抽出し、これにもとづいて技術適合度の面からの日本列島の地域区分をこころみる。

これらによって再生可能なエネルギー利用技術評価における自立性及び地域性の観点を、実証的データから提示しようとするのが本研究の目的である。

2. エネルギーアナリシス

2.1 解析手法

代替エネルギー源が省エネルギーの観点から有効であるかどうかを判断するのに、そのシステムを生産する際に投入されたエネルギーとシステムが耐用年限までに生産するエネルギーの収支分析、いわゆるエネルギーアナリシスが一手法として考えられる。特に、ソーラーシステムのように、在来エネルギー源に付加されて運転するシステムの場合、少なくとも投入エネルギーよりも産出エネルギーが大きくなっては、省エネルギー効果を持たない。そこで、ソーラーシステムの省エネルギーに対する有効性を判断するために、産出エネルギーを投入エネルギーで割った値で定義されるエネルギー比が1よりも大きいことを確かめる必要がある。さらに、在来エネルギー源のエネルギー比と比較することにより、代替エネルギー源としての有効性を評価することができる。また、規模や形式の異なるソーラーシステムについて、それらのエネルギー比を比較することにより、省エネルギーの観点から最適ソーラーシステムの選択評価をすることができる。

このような目的から、エネルギーアナリシスの対象として、太陽熱利用による温水プール、家庭用自然循環型太陽熱温水器、家庭用強制循環型ソーラーシステムをとり上げた。なお、本稿においては太陽熱温水器等も含めてソーラーシステムと名称を統一する。

従来行なわれてきたエネルギーアナリシスの研究については、P. F. Chapman⁽¹⁾による原子力発電所のエネルギーアナリシスが草分け的存在である。我が国においてなされた同様の研究に、伊藤⁽²⁾による原子力発電のエネルギー収支分析があり、このような手法を代替エネルギー源に応用したものとして、斉藤⁽³⁾によるエネルギー収支分析の有効性と代替エネルギー評価などがみられる。さまざまな分野におけるエネルギーアナリシスをまとめたものが⁽⁴⁾ 茅によって書かれている。また最近科学技術庁資源調査会において自然エネルギー全般にわたってエネルギー収支解析が行なわれており、この研究には代替エネルギー・太陽熱利用に

関するものも含まれている。これらは太陽熱発電を対象にしており、小規模なシステムたとえば、温水器といったソーラーシステムについてはふれられていない。また、エネルギー収支分析ではないが、生活必需品及びその関連分野における製品の投入エネルギーやそれらの部材のエネルギー原単位をまとめたものに、科学技術庁資源調査会⁽⁵⁾による調査がある。

エネルギーアナリシスにおける投入エネルギーの計算には、システムを構成する各部材の質量とエネルギー原単位が必要である。本研究においては、各部材の質量は関係者に対する聞き取り調査によって求め、エネルギー原単位は文献調査によって求めた。いくつかの文献中では、科学技術庁資源調査会⁽⁵⁾による「衣・食・住のライフサイクルエネルギー」において比較的多くのエネルギー原単位がまとめられているので、ここでも本文献中の値を多く引用した。

エネルギー原単位を求める方法としては、各素材生産工場における生産量と生産のための各種エネルギー消費量をもとに、生産プロセスに沿って積み上げ計算を行なって求める方法と、産業連関表を用いて各素材生産に投入されたエネルギーコストを計算し、これをエネルギーに換算して求める方法の2種がある。本稿においては両方法による計算値を並記し検討する。

2.2 太陽熱利用による温水プールの例

大規模ソーラーシステムの一例として、茨城県筑波研究学園都市に建設された、洞峰公園体育館ソーラーシステムを対象としてエネルギーアナリシスを行なった。当ソーラーシステムの特徴は、1,912 m²の大きい集熱面積を持つこと、ミニ・コンピュータの制御により利用熱量を集熱量に応じて連動させていることなどであり、大規模ソーラーシステムとしては理想的なモデルと言えよう(図1)。

投入エネルギーは、機器を構成する資材の生産・加工プロセスにおいて消費されたエネルギー(以下材料エネルギー E_m と呼ぶ)、機器を生産工場から現地まで輸送する時に消費されたエネルギー(以下輸送エネルギー E_t と呼ぶ)及び集熱システムの運転時に消費されたエネルギー(以下運転エネルギー E_p と呼ぶ)から構成されるものと考えられる。

材料エネルギー E_m の算出には、システムを構成する各機器の使用材料別の重量とエネルギー原単位を用いる(表1)。これら各機器に投入された材料エネルギーの総和を求めると、表2に示すような数値が得られた。

機器の輸送エネルギー E_t については、詳細なデータ

の不足により正確に求めることは困難である。そこで一般貨物の平均輸送エネルギー原単位をもとに推定した。我が国の貨物輸送における資材・機器の単位重量当りの平均輸送エネルギー原単位 E_t の値は文献⁽⁵⁾によると、 $E_t=381$ (cal/g) である。一方当体育館のソーラーシステム部分の資材総重量 M の値は計算により、 $M=8.66 \times 10^7$ (g) である。これらから、資材輸送エネルギー E_t の値は、 $E_t=33.0 \times 10^9$ (cal) と推定できる。

集熱システムの運転時に消費されるエネルギーは、そのほと

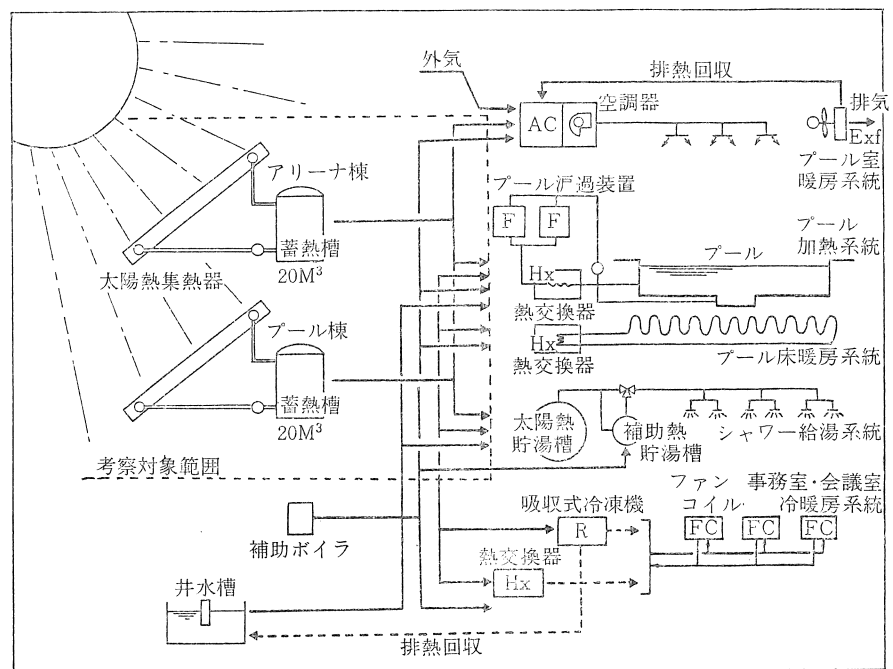


図1 洞峰公園体育館プールソーラーシステム

表1 洞峰公園ソーラーシステムの機器別材料エネルギー

太陽熱コレクターの材料エネルギー

使用材料	重量	エネルギー原単位		材料エネルギー	
		積み上げ方式	産業連関方式	積み上げ方式	産業連関方式
銅	(Kg)	(Kcal/Kg)	(Kcal/Kg)	(Gcal)	(Gcal)
ステンレス	11346.9	23.18	17.86	319.7	202.9
ガラス	20507.7	11.58	14.29	237.5	293.1
グラスウール	15823.2	3.785	*	59.9	59.3
ゴム	3331.2	3.785	*	12.6	12.6
アルミ	728.7	22.00	32.35	16.0	23.6
その他	520.5	43.70	21.56	22.7	11.3
計	624.6	10.00	*	6.2	6.2
	52882.8			674.6	609.5

アリーナ棟蓄熱槽・プール棟蓄熱槽の材料エネルギー

使用材料	重量	エネルギー原単位		材料エネルギー	
		積み上げ方式	産業連関方式	積み上げ方式	産業連関方式
ステンレス	(Kg)	(Kcal/Kg)	(Kcal/Kg)	(Gcal)	(Gcal)
銅材	8746.0	11.58	14.29	101.3	125.0
グラスウール	915.0	5.79	5.16	5.3	4.7
計	1680.0	3.79	*	6.4	6.4
	11342.0			113.0	136.1

集熱温水ポンプ及び集熱器水抜きポンプの材料エネルギー

使用材料	重量	エネルギー原単位		材料エネルギー	
		積み上げ方式	産業連関方式	積み上げ方式	産業連関方式
銅鉄	(Kg)	(Kcal/Kg)	(Kcal/Kg)	(Gcal)	(Gcal)
	252.0	5.790	5.168	1.459	1.302

水抜き槽（2基）の材料エネルギー

使用材料	重量	エネルギー原単位		材料エネルギー	
		積み上げ方式	産業連関方式	積み上げ方式	産業連関方式
ステンレス	(Kg)	(Kcal/Kg)	(Kcal/Kg)	(Gcal)	(Gcal)
銅材	308.0	11.58	14.29	3.567	4.401
計	77.0	5.790	5.168	0.446	0.398
	385.0			4.013	4.799

ステンレス網管・継手・保温材・シリコンホース・バルブ支持材料の材料エネルギー

使用材料	重量	エネルギー原単位		材料エネルギー	
		積み上げ方式	産業連関方式	積み上げ方式	産業連関方式
ステンレス網管	(Kg)	(Kcal/Kg)	(Kcal/Kg)	(Gcal)	(Gcal)
ステンレス継手	7376.0	11.58	14.29	85.41	105.40
シリコンホース	2212.8	11.58	14.29	25.62	31.62
バルブ	6600.0	3.79	*	24.98	24.98
保温材	63.6	22.00	32.35	1.40	2.06
計	1490.0	5.79	5.17	8.63	7.70
	4000.0	11.58	14.29	46.32	57.16
	21742.4			192.35	228.92

んどが集熱器循環ポンプに消費される電力であると考えられる。集熱器循環ポンプはオン・オフで運転されており、その消費エネルギー E_p は次式によって求めた。

$$E_p = \sum t_i \cdot W \cdot T \cdot R \dots\dots\dots (1)$$

ただし

E_p : ポンプの消費エネルギー (cal)

t_i : ポンプ i の年間運転時間 (hour/year)

W : ポンプの定格消費電力 (W)

T : ソーラーシステムの耐用年数 (year)

R : 熱の仕事当量 (cal/W・H)

表2 重量と材料エネルギーの総和

使用部材	重量	材料エネルギー	
		積み上げ方式	産業連関方式
集熱器	(ton)	(Gcal)	(Gcal)
蓄熱槽	52.9	674.6	609.5
ポンプ	11.3	113.0	136.1
水抜き槽	0.3	1.5	1.3
配管類	0.4	4.0	4.8
計	21.7	192.4	228.9
	86.6	985.5	980.6

今回分析対象とした洞峰体育館ソーラープールの昭和55年12月1日から昭和56年11月30日までの一年間の運転実績値から

$$\Sigma t_i = 5,359$$

また設計諸元から

$$W = 4,000 \text{ (対象ポンプの定格出力)}$$

$$T = 14 \text{ (システム設計の前提)}$$

及び $R = 860$

がパラメータとして与えられる。

式(1)にこれらの値を代入して計算した結果、集熱器循環ポンプの消費エネルギー E_p の値は、 $E_p = 258 \times 10^9 \text{ (cal)}$ となった。

以上の計算結果をもとに、全投入エネルギー E_{in} を求めると、表3に示すように約1,200 Gcal となる。

表3 全投入エネルギー

推定耐用年数	積み上げ方式	産業連関方式
(10年) 14年	(Gcal) (1200) 1280	(Gcal) (1190) 1260

一方、産出エネルギー E_{out} の値については、当体育館に設置されている制御用コンピュータから毎日出力される熱量データをもとに計算した。この日報データには、コレクターから取り出された集熱量と蓄熱槽から各熱交換器に送り込まれた利用熱量の2種類のデータが含まれている(図1)。これらのうち、エネルギーアナリシスの本来の目的を考慮して、産出エネルギーの計算には利用熱量の値を用いることにした。制御用コンピュータの故障等による欠損値の補正作業を施した後、昭和55年12月1日から昭和56年11月30日までの1年間にわたって積算した利用熱量 E_u の値は、 $E_u = 527 \times 10^9 \text{ (cal)}$ となった。この値に推定耐用年数14年をかけて、全産出エネルギー E_{out} を求めると、 $E_{out} = 7,380 \times 10^9 \text{ (cal)}$ となる。

これらの計算結果をもとに、当ソーラーシステムのエネルギー収支を考えると、エネルギー比 R_E 及びペイ・バック・タイム T_p は次のようになる。

a) 積み上げ方式で計算した場合

$$R_E = 5.78$$

$$T_p = 2.00 \text{ (年)}$$

b) 産業連関方式で計算した場合

$$R_E = 5.80$$

$$T_p = 1.99 \text{ (年)}$$

ただし

$$R_E = \text{全生産エネルギー} / \text{全投入エネルギー}$$

とする。

表4 自然循環型モデルの投入エネルギー

使用材料	重量	エネルギー原単位		材料エネルギー	
		積み上げ方式	産業連関方式	積み上げ方式	産業連関方式
機器本体	(Kg)	(kcal/Kg)	(kcal/Kg)	(kcal)	(kcal)
ポリエチレン	22.0	22.00	5.89	484.0	129.6
FRP	20.0	14.80	*	296.0	296.0
ガラス	24.0	3.785	*	90.8	90.8
ステンレス	4.0	11.58	14.29	46.3	57.2
発泡スチロール	5.0	22.00	5.89	110.0	29.5
AAS樹脂	2.0	22.00	5.89	44.0	88.0
銅板	7.0	5.79	5.168	40.5	36.2
その他	1.0	10.00	10.00	10.0	10.0
計	85.0	—	—	1121.7	737.3
架台					
銅板	35.0	5.79	5.168	202.7	180.9
配管					
ポリエチレン	11.1	22.00	5.89	244.2	65.3
合計	131.1	—	—	1569.6	1033.5

2.3 家庭用ソーラーシステムの例

家庭用ソーラーシステムについては、現在市販されているA社製の自然循環型モデル及び強制循環型モデルを例にエネルギーアナリシスを行なった。

まず、自然循環型モデルについて考える。このモデルの材料エネルギーとその内訳は表4に示すとおりである。資材輸送エネルギー E_t を資材総重量 M および資材の平均輸送エネルギー $\bar{E}_t$ から求めると、 $M = 131.1 \text{ (kg)}$ 、 $\bar{E}_t = 381 \text{ (cal/g)}$ より、 $E_t = 49.9 \times 10^6 \text{ (cal)}$ となる。自然循環型モデルは運転時にエネルギーを消費しないので、全投入エネルギー E_{in} は、材料エネルギー E_m と資材輸送エネルギー E_t の和と考えられる。そこで、自然循環型モデルの全投入エネルギー E_{in} は、

$$E_{in} = 1,619 \times 10^6 \text{ (cal)} \quad (\text{積み上げ方式})$$

$$E_{in} = 1,084 \times 10^6 \text{ (cal)} \quad (\text{産業連関方式})$$

となる。

次に、強制循環型モデルについて考える。このモデルの材料エネルギーとその内訳は表5に示すとおりである。資材輸送エネルギー E_t については、自然循環型モデルの場合と同様の手法により、 $M = 144.0 \text{ (kg)}$ 、 $E_t = 381 \text{ (cal/g)}$ から、 $E_t = 54.9 \times 10^6 \text{ (cal)}$ が得られる。強制循環型モデルの循環ポンプが消費する運転エネルギー E_p に関しては、次のようにして求めた。

$$E_p = W \times t \times T \times R \dots\dots\dots (2)$$

ただし

E_p : 循環ポンプの運転エネルギー (cal)

W : 循環ポンプの定格消費電力 (W)

t : 年間日照時間 (hour/year)

表5 強制循環型モデルの投入エネルギー

使用材料	重量	エネルギー原単位		材料エネルギー	
		積み上げ方式	産業連関方式	積み上げ方式	産業連関方式
	(Kg)	(kcal/Kg)	(kcal/Kg)	(kcal)	(kcal)
集熱器					
ポリエチレン	7.0	22.0	5.89	154.0	41.2
銅板	10.0	5.79	5.168	57.9	51.7
ポリカーボネイト	0.5	22.0	5.89	11.0	2.9
発泡スチロール	0.5	22.0	5.89	11.0	2.9
システムタンク					
ポリエチレン	12.5	22.0	5.89	275.0	73.6
発泡スチロール	1.9	22.0	5.89	41.8	11.2
グラスウール	1.0	3.765	*	3.8	3.8
銅板	39.7	5.79	5.168	229.9	205.2
銅板	15.0	5.79	5.168	86.9	77.5
その他	1.9	10.0	10.0	19.0	19.0
架台					
銅板	49.0	5.79	5.168	283.7	253.2
配管					
合成ゴム	5.0	22.0	32.35	110.0	161.8
合計	144.0	—	—	1284.0	904.0

T : 機器の耐用年数 (year)

R : 熱の仕事当量 (cal/W・H)

これらに次の実測値を与える。

$W=80$ (対象モデルの定格消費電力)

$t=1,972$ (昭和55年理科年表による東京都の値)

$T=7$ (メーカー推定値)

$R=860$

これらによる計算の結果、循環ポンプの運転エネルギー E_p の値は、 $E_p=950 \times 10^6$ (cal) となる。そこで、強制循環型モデルの全投入エネルギー E_{in} は、

$$\begin{cases} E_{in}=2,290 \times 10^6 \text{ (cal)} & \text{(積み上げ方式)} \\ E_{in}=1,910 \times 10^6 \text{ (cal)} & \text{(産業連関方式)} \end{cases}$$

となる。

一方エネルギーアナリシスにおける産出エネルギーとして、家庭における最終利用熱量を推定して用いる。家庭用ソーラーシステムの給湯利用は夕方・夜間が多く、昼間の集熱量が蓄熱の間に放射等によって失われる。給湯利用の時間的パターンによっては、この熱損失はかなりのものとみられる。このような熱供給制御が不可能な自然エネルギー利用システムの評価にエネルギーアナリシスを適用する場合、集熱量でなく家庭で有効に用いられた実効熱量でもって産出エネルギーとするのが妥当であろう。この考えに沿ってここでは家庭用ソーラーシステム利用者に対するアンケート調査(対象7県420世帯、回収率39.3%)結果をふまえて、家庭用ソーラーシステムから得られる実効消費熱量を推定し、エネルギーアナリシスの産出エネルギーとした。

アンケート調査結果より、システム配管の大半が風呂とシャワーに使われていることと、湯の使用形態も

表6 湯量の充足度

湯量の充足度	季節		
	夏	春・秋	冬
1. 充分足りる	60	33	21
2. とどき不足	10	19	12
3. しばしば不足	0	11	8
4. 毎日不足	2	15	15
計	72	78	56

風呂に使われる量が非常に多いことから、ここではソーラーシステムからの給湯はもっぱら風呂に利用されているものと仮定した。また、風呂で消費される熱量に占める太陽熱の割合は、湯量の充足度に関する調査結果(表6)をもとに推定した。風呂で消費される熱量に占める太陽熱の割合 R_s は次式により計算できる。

$$R_s = \frac{\sum_{i=1}^4 F_i R_i}{N} \dots\dots\dots (3)$$

ただし

i : 湯量の充足度を表わす項目の回答番号

F_i : i 項目の回答数

R_i : i 項目における太陽熱充足率

N : 全回答数

太陽熱充足率 R には次の値を仮定する。

$R_1=1.00$

$R_2=0.75$

$R_3=0.50$

$R_4=0.25$

これにより、 R_s は次のとおり求まる。

$R_s=67.4$ (%) : 冬期

$R_s=72.4$ (%) : 中間期

$R_s=94.4$ (%) : 夏期

$\bar{R}_s=76.7$ (%) : 平均値

このことはつまり、家庭用ソーラーシステム利用家庭の風呂において消費される熱量の77%が、ソーラーシステムによってまかなわれていることを示している。この計算における太陽熱充足率 R の設定は、アンケート調査による定性的質問内容を筆者の判断により定量化したものであり、データの見方による多少の差異が現われる可能性は否定できない。

一般家庭において風呂等の給湯に用いられる熱量は文献(6)によると次のとおりである。

冬 期: 4.05×10^6 cal/日・戸

中間期: 1.91×10^6 cal/日・戸

夏 期: 0.90×10^6 cal/日・戸

この資料には夏期における給湯熱量の実験データが含まれていないので、夏期の給湯熱量は冬期と中間期

のデータをもとに推定した。

これらの値に R_s をかけ合わせると、ソーラーシステムから有効に使われた熱量 H_W (冬期)・ H_M (中間期)

・ H_S (夏期) を求めることができる。

$$\begin{aligned} \text{冬 期: } H_W &= (4.05 \times 10^6) \times 0.674 \\ &= 2.62 \times 10^6 \text{ (cal/日)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{中間期: } H_M &= (1.91 \times 10^6) \times 0.724 \\ &= 1.38 \times 10^6 \text{ (cal/日)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{夏 期: } H_S &= (0.90 \times 10^6) \times 0.944 \\ &= 0.85 \times 10^6 \text{ (cal/日)} \end{aligned}$$

そこで、四季を各90日と仮定して、年間産出エネルギー E'_{out} を求めると、

$$E'_{out} = 561 \times 10^6 \text{ (cal)}$$

となる。

年間産出エネルギー E'_{out} に耐用年数(7年) をかけた全産出エネルギー E_{out} を求めると、

$$E_{out} = 3,930 \times 10^6 \text{ (cal)}$$

となる。

以上の計算値をもとに、家庭用ソーラーシステムのエネルギー収支を考えると、エネルギー比 R_E 及びペイ・バック・タイム T_p は表7に示すようになる。表には比較のために先述したソーラープールの値も再録した。

表7 ソーラーシステムのエネルギー収支

	エネルギー比 R_E		ペイバックタイム T_p	
	積み上げ	産業連関	積み上げ	産業連関
自然循環型	2.43	3.63	2.08 年	1.93 年
強制循環型	1.72	2.06	3.15 年	2.25 年
ソーラープール	5.78	5.80	2.00 年	1.99 年

つまり、自然循環型の R_E が2.43~3.63であるのに対して、強制循環型の R_E が1.72~2.06と低い値になっており、エネルギー収支の面からは自然循環型の方がよりすぐれていると言える。

一方これら家庭用小規模システムと先に求めたソーラープールのような大規模システムを比較すると、エネルギー比では大規模システムが勝りペイ・バック・タイムでみても大規模システムの方がよい。

3. ソーラーシステムの地域特性

3.1 地域特性の抽出

前章においてソーラーシステムのエネルギー収支を算出したが、ソーラーシステムは利用する地域によって、利用条件や地理的要因が異なるため、地域特性を把握する必要がある。ここでは、地域特性を導出する方法として、家庭用ソーラーシステムの都道府県別普

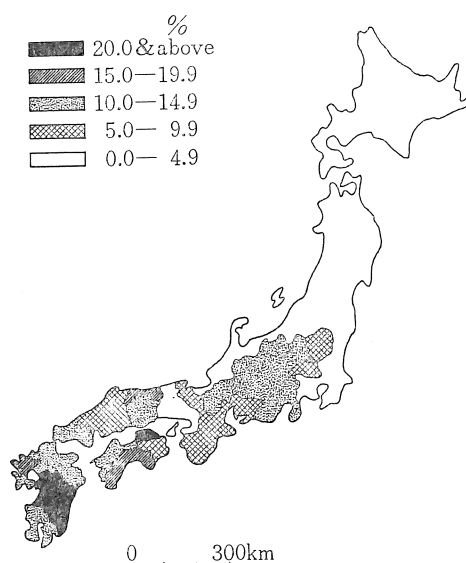


図2 家庭用ソーラーシステムの都道府県別普及率

及率(図2)を被説明変数とし、各種地理的要因を説明変数として、これらの多変量解析を行なった。

ソーラーシステムの購入は個人的選好であるが、これらを統計的に普及率としてとらえたものは、植物の植生と同様に、地域適合性を表わす指標として有意なものと考えられる。そこでソーラーシステムの普及率に対して各種地理的要因による重回帰分析を行ない普及率に対して相関を持つと思われる要因を抽出した。次に、普及率に影響を与えているいくつかの要因が絡み合った潜在因子を抽出するために、これらの要因について因子分析を行ない、普及率を説明する因子を求めた。さらに、これらの因子の因子得点をクラスター分析することにより、共通因子による都道府県別の地域分類を行なった。これによりソーラーシステムの地域的適応性が認識できるが、これはエネルギー収支の結果の地域による差を検討するのに用いられよう。

3.2 地理的要因の重回帰分析

家庭用ソーラーシステムの都道府県別普及率を被説明変数とし、地理的要因を説明変数として重回帰分析を行なった。普及率のデータは、「B. B. R. 資料(1981年版)」(中央調査社)によった。各要因の普及率に対する単相関係数は表8に示す。変数増加法により説明力の高い5変数までを投入して重回帰分析を行なった結果、表9の結果を得た。

この結果を調べると、第2段階で投入された変数の F 値10.3は自由度(1, 43)における有意水準5%の F 棄却値4.07よりも大きく、帰無仮説は棄却されるのに対して、第3段階で投入された変数の F 値2.55は、自由度(1, 42)における有意水準5%の F 棄却値4.07よ

表8 普及率と地域要因の相関関係

普及率に対する地域要因	相関係数
1) 水平面全日射量 (kcal/m ² ・日)	0.70654
2) 年間平均気温 (°C)	0.55258
3) 年間日照時間 (時間)	0.55857
4) 積雪10cm以上の年間日数	-0.45243
5) 積雪50cm以上の年間日数	-0.34568
6) 日最大風速15 (m/s) 以上の年間日数	-0.16184
7) 灯油小売価格 (円/18ℓ)	0.50541
8) 液化石油ガス小売価格 (円/5m ³)	-0.29242
9) 電燈料金単価 (円/KWH)	0.16659
10) 1世帯1か月間の可処分所得	-0.17255
11) 世帯主の平均年齢 (歳)	-0.07726
12) 世帯世帯数 (世帯)	-0.31286
13) 持ち家率 (%)	0.15767
14) 1世帯当りの世帯数 (世帯)	-0.24572
15) 着工住宅総戸数 (戸)	-0.32830
16) 1世帯当りの宅地面積 (m ²)	-0.01146
17) 1世帯1か月間の光熱費 (千円): 53年	-0.25142
18) 1世帯1か月間の住居費 (千円): 53年	-0.16548
19) 着工新設持ち家率 (%): 52年	-0.10267
20) 浴室の有る住宅比率 (%): 53年	0.37933
21) 住宅敷地面積 (千円/3.3m ²): 53年	-0.27938
22) 人口集中地区の人口割合 (%): 50年	-0.34649
23) 人口集中地区の面積割合 (%): 50年	-0.23577
24) 人口集中地区の人口密度 (人/km ²): 50年	-0.27001
25) 都市ガス小売価格 (円/kcal)	0.24728
26) 都市ガス普及率 (%)	-0.34058

資料: 1), 2) 機械振興協会・経済研究所 (53年度)
 3) ~ 6) 気象庁理科年表 (54年度),
 7) 石油資料 (55年度),
 8) 25) 26) ガス事業便覧 (55年度),
 9) 電気事業便覧 (55年度),
 10) ~ 16) 朝日新聞社・民力 (54年度),
 17) ~ 21) 総理府統計局調査 (55年度),
 22) ~ 24) 国勢調査報告 (50年度)

表9 第5段階までの変数増加法による重回帰分析の結果

段階	回帰式に含まれる変数					
	変数	重相関係数	重決定係数	増分	偏回帰係数と定数	標準誤差 F統計量
1	X ₁ 日射量	0.70654	0.49920	0.49920	b ₀ = -82.02458 b ₁ = -0.02963	0.00447 43.860
2	X ₂ D.I.D.の人口割合	0.77235	0.59654	0.09734	b ₀ = -75.51936 b ₁ = 0.029100 b ₂ = -0.11484	0.00407 51.223 0.03566 10.375
3	X ₃ 日照時間	0.78719	0.61967	0.02313	b ₀ = -87.89880 b ₁ = 0.04331 b ₂ = -0.10530 b ₃ = -0.01540	0.00975 19.745 0.03553 8.781 0.00963 2.554
4	X ₄ L.P.G.の小売価格	0.80033	0.64149	0.02182	b ₀ = -149.07908 b ₁ = 0.05503 b ₂ = -0.10593 b ₃ = -0.02431 b ₄ = 0.01907	0.01212 20.626 0.03492 9.203 0.01102 4.866 0.01208 2.494
5	X ₅ 浴室の有る住宅比率	0.80687	0.65103	0.00954	b ₀ = -165.20274 b ₁ = 0.05679 b ₂ = -0.07297 b ₃ = -0.02596 b ₄ = 0.02892 b ₅ = 0.12039	0.01222 21.600 0.04701 2.409 0.01130 5.696 0.01219 2.945 0.11509 1.094

りも小さく、帰無仮説は棄却されない。

そこで、ソーラーシステムの普及率は、日射量とD.I.D.(人口集中地区)の人口割合という2変数によって、次の式で表わされることがわかった。

$$Y = -75.52 + 0.029x_1 - 0.115x_2 \dots\dots (4)$$

Y: 普及率 (%)

x₁: 日射量 (kcal/m²・日)

x₂: D.I.D.人口割合 (%)

この時の重回帰式の説明力は60%である。また、式のF値は31.8であり、自由度(2, 43)における有意水準5%のF棄却値3.21よりも大きく、帰無仮説は棄却される。

3.3 地理的要因の因子分析

普及率に対する地理的要因の単相関係数が大きくなり、重回帰式にも2変数が採用されたにとどまった理由として、いくつかの普及要因が複合して作用し、本質的な因子が潜在化していることが考えられる。そこで、各要因を性格別にグループ化し、その共通因子の抽出を試みるために、これらの変数の因子分析を行った。

ここでは、説明力をほとんど持たない無意味な変数を取り除くため、普及率に対する単相関係数が0.25未満の変数を切り捨てた。この結果、因子分析には16変数が投入された。因子分析の結果、全分散の76.1%を説明する固有値1.00以上の3因子が抽出された。各因子とそのバリマックス回転後の因子負荷量を表10にまとめた。

表10 入力変数とその因子負荷量

因子		I	II	III
固有値		5.59332	4.71581	1.19654
説明力 (%)		35.9	31.1	9.1
説明力累積値 (%)		35.9	67.0	76.1
1	日射量	-0.01603	0.75270	0.60330
2	平均気温	0.14348	0.86983	0.06543
3	日照時間	0.06168	0.57530	0.73942
4	積雪10cm以上の日数	-0.11788	-0.96682	-0.03058
5	積雪50cm以上の日数	0.01367	-0.83774	0.13499
7	灯油価格	-0.03374	0.66327	0.07155
8	L.P.G.価格	0.09876	-0.66787	0.22555
9	電燈料	-0.16891	-0.12551	0.37745
12	世帯数	0.95576	-0.07344	0.09912
15	着工住宅数	0.94491	-0.09419	0.10219
17	光熱費	0.02874	-0.43782	-0.09538
20	浴室の有る住宅比率	-0.65427	0.33343	-0.00973
21	住宅敷地面積	0.30385	0.22046	-0.19222
22	D.I.D.の人口割合	0.95221	-0.01475	-0.04392
24	D.I.D.の人口密度	0.87043	0.16724	-0.16956
26	都市ガス普及率	0.86420	0.09397	-0.24500

第1因子では、世帯数、新設住宅数、敷地面積、D.I.D.人口の比率、D.I.D.人口密度、都市ガス普及率が特に高い正の因子負荷量を示し、浴室の有る住宅比率が高い負の因子負荷量を示す。これは、各都道府県の都市化傾向を表わす因子と解釈される。

第2因子では、平均気温、石油価格が高い正の因子負荷量を、10cm以上の積雪日数、50cm以上の積雪日数、L.P.G.小売価格が高い負の因子負荷量を示す。これは、各都道府県の気温に関する気候因子と解釈される。

第3因子では、日射量、日照時間が高い正の相関を示している。これは、各都道府県の日射に関する気候因子と解釈される。

これら3因子の因子得点を地図上に表わしたものが図3である。

ここで得られた3個の因子は、互いに独立かつ無相関という条件を満たしており、重回帰モデルにおける

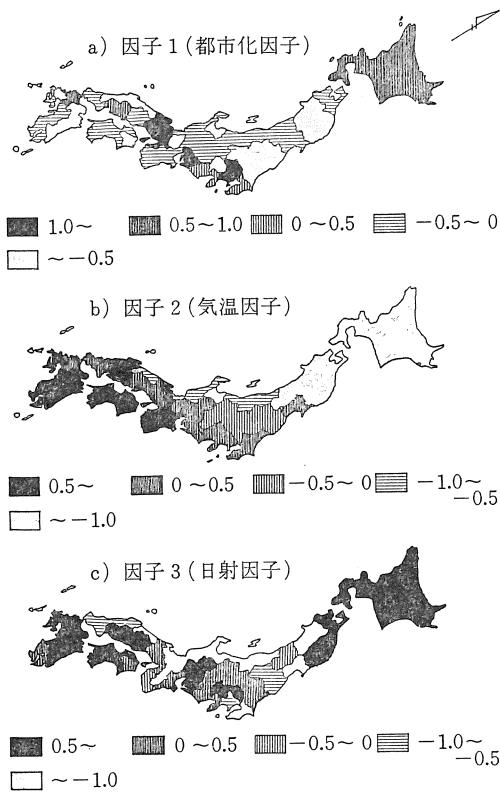


図3 因子得点の分布

独立変数間の独立性の前提に合致する。そこで、これらの因子を独立変数とし、普及率を従属変数として因子回帰分析を試み、普及率と各因子との対応関係について検討した。その結果を表11に示す。

この式の F 値は19.5であり、自由度 (3, 42) における有意水準5%の場合の F 棄却値3.22よりも大きく、帰無仮説は棄却される。

各因子の F 値は、自由度 (1, 42) における有意水準5%の場合の F 棄却値4.07を上回っており、帰無仮説は棄却される。

普及率と因子の重回帰式は次の式で表わされる。

$$Y = 8.487 - 2.157x_1 + 3.653x_2 + 2.915x_3 \quad \dots\dots\dots (5)$$

Y : 普及率 (%)

x_1 : 因子1 (都市化因子)

x_2 : 因子2 (気温因子)

x_3 : 因子3 (日射因子)

これにより、普及率に対する3因子の相関度は、気温因子が最も大きな正の相関を持ち、日射因子が次に大きな正の相関を持ち、逆に都市化因子は3因子の中で最も小さい負の相関を持っていることがわかる。

3.4 因子得点のクラスター分析

因子分析によって得られた因子得点をもとに、ワー

表11 重回帰分析の結果

段階	回帰式に含まれる変数						
	変数	重相関係数	重決定係数	増分	偏回帰係数と定数	標準誤差	F統計量
1	X2 因子2	0.54243	0.29423	0.29423	$b_0 = 8.48692$ $b_2 = 3.57201$	0.83401	18.344
2	X3 因子3	0.69281	0.47999	0.18576	$b_0 = 8.48710$ $b_2 = 3.65039$ $b_3 = 2.91847$	0.72444 0.74467	25.390 15.360
3	X1 因子1	0.76296	0.58211	0.10212	$b_0 = 8.48715$ $b_2 = 3.65332$ $b_3 = 2.91487$ $b_1 = -2.15670$	0.55711 0.67546 0.67319	30.910 18.623 10.264

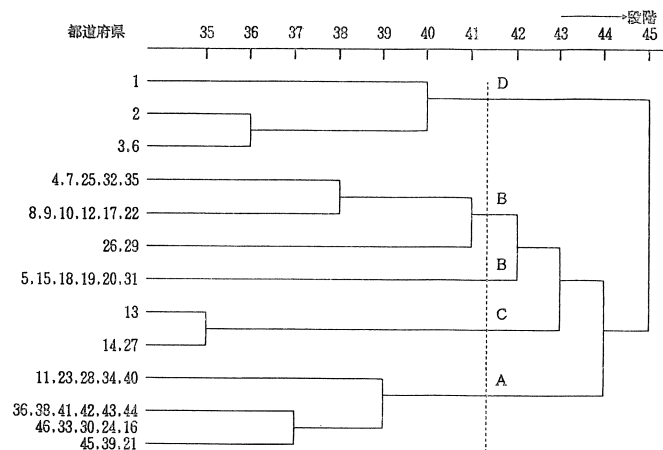


図4 地域類型のデンドログラム (番号は行政コードにもとづく都道府県の番号)

ド法によるクラスター分析を行ない、ソーラーシステムの普及率に影響を与える要因の地域区分を試みた。各因子に与える重みづけは因子回帰分析による相関係数をもって与えた。

グルーピングに伴う情報損失量の連続性を考慮して42段階で区切ると4グループを得る。しかし、この分類によると中間地域の特性が不明確なため、41段階で区切り1つのサブグループを加えた5グループをとり出した(図4)。グループ別標準得点の平均値から各5地域の地域類型の特徴を考えると、次のようにまとめられる(表12, 図5)。

A地域：地域としては九州・四国全域と瀬戸内海地方、南近畿及び中部・北関東の一部が含まれる。この地域は気温因子、日射因子共に高い得点を得ており、ソーラーシステムの普及には最も好適な地域であると考えられる。

B地域：地域としてはA地域を除く関東地方ほぼ全域に東北地方南部、近畿・中国地方の一部が加わる。この地域は日射因子はやや低いが気温因子がやや高い得点を得ており、ソーラーシステムの普及にはA地域に次ぐ好

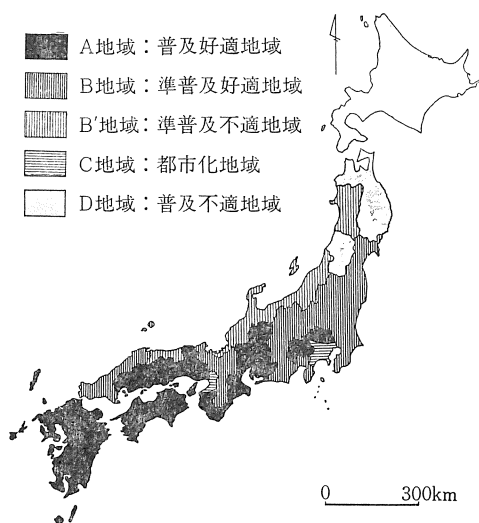


図5 因子得点のクラスター分析による普及要因の地域分布

表12 類型別標準得点の平均値

類型	特性	都市化因子	気温因子	日射因子
A	発達地域	0.03	0.31	0.31
B		0.08	0.13	-0.24
B'		0.16	-0.48	-0.61
C		-0.95	0.09	-0.17
D	未発達地域	0.04	-1.41	0.28

適な地域であると考えられる。

B'地域：地域としては本州日本海側地域に多く分布している。この地域は気温因子・日射因子共に低い得点を示しており、ソーラーシステムの普及にはやや困難な地域であると考えられる。

C地域：地域は東京都、神奈川県、大阪府の3都府県である。この地域は気温因子・日射因子は平均的な得点を示しているが、都市化因子が非常に高い得点を示している。都市生活様式とソーラーシステム設置の適合性が悪いため普及率を低くしているものと考えられる。しかし、これらの地域のうち都市部でない地区に関してはこの限りとはならないと考えられる。

D地域：地域としては、北海道と東北地方北部にみられる。この地域は日射因子は高い得点を示しているが、気温因子が非常に低い得点を示している。このことから、これらの地域は寒冷地としてソーラーシステムの普及が困難な地域であると考えられる。

4. 考察と今後の展望

太陽熱利用技術の性格を実用化されている太陽熱利用例から明らかにするために、大規模利用例としてソーラープール、小規模利用例として自然循環型及び強制循環型温水器についてエネルギーアナリシスを行ない、他のエネルギーシステムとの比較、太陽熱利用システム間での比較から、太陽熱利用技術の性格上考慮すべき点を抽出した。すなわち

(1) 温水器としての太陽熱利用技術（ソーラーシステム）は業務用、家庭用共にエネルギー比は1.0を上回っていることが確かめられ、投入したエネルギーよりも生産するエネルギーの方が大きいエネルギー生産システムであると言える。

しかしながらその評価はシステムの形態によってやや異なり、家庭用温水器においては簡易な利用形態である自然循環型と比較すると強制循環型は評価は下がる。これは太陽熱による温水の利用範囲が限られているため、単能型システムと比較してインテグレートされたシステムの限界効用が逓減しているからである。

(2) 業務用ソーラーシステム（ソーラープール）のエネルギー比は、かなり高い値が得られており、既存のエネルギー源と十分競合できるものと考えられる。この場合、既存のエネルギー源に比べて燃料の投入の必要がないソーラーシステムは、省エネルギーの観点から有効なものである。また、大都市部の公共施設等の給湯・冷暖房に使われるならば、大気汚染防止の観点からも有効である。

しかしこの高いエネルギー比が求められた背景としての2つの点が指摘される。ひとつは集熱エネルギーの算出にあたって、熱交換器におくりこまれた熱量を対象としていることである。実際この熱量が有効に利用されたか否かは、たとえば温水プールの場合入場者数を勘案してどれ程の効用が得られたかを考える必要があるかと考えられる。その点本施設は集熱量最大の運転を目標としており、公共施設としての効用面からの評価が十分反映されないエネルギー収入で評価されていることになる。

もうひとつの点はエネルギー収入のよさが投入材料すなわち物としてみた資源によって支えられている点いわばエネルギーと資源のトレードオフがみられることである。ソーラープールの場合銅・ステンレスなどの金属、ガラスウールなどが豊富に使用され、集熱・保温効果を高めている。冒頭に述べた再生

可能エネルギーの自立性の観点からみて、資源面での考慮も評価に入れれば表7の結果からただちには大規模利用のメリットを評価することはできない。

(3) エネルギーアナリシスで用いる太陽熱の利用可能量は地域によって異なる。この違いを明確化するために、現在の温水器の地域分布状況に関する相関分析、因子分析、クラスター分析から、太陽熱利用の地域性を解析した。

太陽熱利用の地域分析は、日射によって代表される要因、気候によって代表される要因、都市化の状況によって代表される要因の3因子で説明される。太陽熱利用の地域別ポテンシャルは、これら要因の組合わせにより点数づけされ、日本が太陽熱利用の可能性からみて大むね5つの地域に分類される。これからみてソーラーシステムが適合性をもつと考えられる地域は、日本の人口分布からみると非常に広く従ってソーラーシステム（特に家庭用）が普及できる可能性は大で、省エネルギー・汚染予防効果をもつエネルギー源として有望であるとみられる。またここで指摘された都市化の要因は、他の要因が自然的要因であるのに対し人為的な面が多く、高建物密度からくる日照権の問題、都市内建物への温水器設置に対する見ばえの問題、都市域居住者の生活様式の問題など、これまでも言われてきた要因であるがこの分析によって今後の普及の点で十分考慮すべき点であることが明示された。

ここで点数づけされた地域差が、エネルギーアナリシスによる評価にどうきいてくるかの感度分析は本研究に残された課題である。これは温水器利用の各家庭に対する詳細な調査によって解明されよう。

(4) このように、エネルギー収支・地域性の両面か

らみて、太陽熱利用は自立性を十分に備えたエネルギー源であると考えられる。

5. 謝 辞

本研究は筑波大学環境科学研究科橋本道夫教授の指導のもとで行なわれ、特に太陽エネルギーのもつ地域性に着目すべきであるという教授の示唆は貴重であった。研究調査にあたっては住宅・都市整備公団、筑波研究学園都市体育館関係者、温水器メーカー数社、ソーラーシステム振興協会、住宅設備協会及び各地域の温水器使用者の協力をいただいている。ここに記して感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) Peter F. Chapman: Energy Analysis of Nuclear Power Stations, Energy Policy, Dec. (1975).
- (2) 伊藤 勝: 原子力発電のエネルギー収支分析, 原子力工業, 第24巻3号 (1978)
- (3) 斉藤雄志: 「エネルギー収支分析」の有効性と代替エネルギーの評価, 東洋経済臨時増刊, No.53 (1980)
- (4) 茅 陽一: エネルギーアナリシス, 電力新報社, (1980)
- (5) 科学技術庁資源調査会: 衣・食・住のライフサイクルエネルギー, 大蔵省印刷局, (1979)
- (6) 東京大学生産技術研究所 勝田研究室: 密閉型燃焼器具を用いたホームセントラル暖房・給湯時の環境設備に関する実験的研究, 日本住宅公団建築部調査研究課, (1971)

(昭和58年1月19日 原稿受理)

—— 海外情報 ② ——

アメリカの81年のソーラーコレクタの生産

286-54051 069.71.0

Electl. Wld. 82-11 p.11

81年のコレクタの総面積は1995万 ft^2 に達し、80年との比較で2.8%の増加となった。この報告はDOEからなされたものであるが、79年から80年にかけての生産量の利用の増加と、プール用水加熱用のものの減少を特徴として挙げている。ちなみに81年の太陽熱利用では、プール用水加熱用が初めて50%を割っている。

ARCO社の1MWソーラ発電所の試運転状況(米)

286-54052 069.71.3

Electl. Wld. 82-12 p.9

カリフォルニア州バーストウ付近にあるARCO社の1MWの太陽熱発電所は82年11月18日、初のテストを行い、40kWの発電に成功した。この日は曇で風も強く、気温も50°Fという状態であったが、実験は成功裏に終わっている。建設工事は、残りの部分も順調に進んでおり、まもなくフル稼動に入ることとなると期待されている。なお、この工事は建設開始からほぼ6カ月で終了することである。