

太陽・未利用エネルギーシステムの 一般住宅への導入シミュレーション

SIMULATION ON SOLAR・UNUTILIZED ENERGY SYSTEM FOR A RESIDENCE

見 目 喜 重^{*1}
Yoshishige KEMMOKU

榊 原 建 樹^{*1}
Tateki SAKAKIBARA

Abstract

To reduce the fossil fuel consumption in a private residence, a simulation model for a solar-unutilized energy system is proposed in this paper. The system consists of a solar collector, a solar module and heat pumps through which solar energy, air heat and cooling waste-heat are utilized to the residential energy consumption. The simulation model is operated under weather data such as hourly insolation and atmospheric temperature over a year, and the primary energy supply and the utilized energy are estimated.

Simulation results show that, (1)the primary energy supplied with the solar-unutilized energy system is half of that with the conventional system, (2)the electric energy required in this new system is two times as great as that in the conventional system, because the heat pump operates considerably, (3)however, 30% of the electric energy is obtained with the photovoltaic module.

Key words : Solar energy, Unutilized energy, Simulation, Primary energy supply

1. はじめに

近年のエネルギー需要の増大が、化石燃料の大量消費による環境問題や将来的なエネルギー問題を引き起こしている。ここ数年のエネルギー需要に着目してみると、産業部門よりもむしろ民生部門の需要の伸びが堅調であり⁽¹⁾、エネルギー問題の今後を考えたときに、民生部門でのより一層の省エネルギー努力が必要であると言われている。

一方で、化石燃料消費量の削減を目的に、自然エネルギー利用システムの研究が数多くなされてきた。また、大気熱、河川水熱のような未利用エネルギーをヒートポンプ（HP）により利用するシステムも急激に普及してきている。

本研究では、こうしたことを背景に、太陽エネルギ

ーと未利用エネルギーとを組み合わせたシステムに関し、そのシステムの導入対象として一戸建て一般住宅を選び、シミュレーションモデルを作成した。そして、そのシミュレーションを用いて、太陽・未利用エネルギーシステムを導入した場合としない場合について、一般住宅に供給しなければならない1次エネルギー量を検討した。

2. モデル住宅のエネルギー消費

2.1 モデル住宅の規模

モデル住宅には、現在新築されている一戸建て住宅の平均的なものを取り上げた。1世帯4人家族用の床面積 109m²、4LDKの木造総2階建て住宅である。住宅の1階床部分、外壁・内壁部分、2階天井部分は50mm厚のグラスウールにより断熱がなされ、窓は通常の一重ガラス窓である。この住宅の主な部分の熱貫流率を表1に示す。表中の1階天井部分、ならびに2階床部分の熱貫流率については、文献(2)の値を参

* 原稿受付 平成5年12月24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)

表1 モデル住宅各部の熱貫流率

Part	Coefficient of over-all heat transmission [kcal/m ² ·h·k]
Floor at the first floor	0.82
Ceiling at the first floor	2.92
Outside and inside wall	0.69
Floor at the second floor	2.83
Ceiling at the second floor	0.69
Windowpane	5.50

考にした。

2.2 エネルギー消費

一般住宅におけるエネルギー負荷には、暖房負荷、冷房負荷、給湯負荷、電力負荷の4種類がある。これらのうち、特に暖房、冷房、給湯負荷の3種類は外気温や日射量などの気象条件や負荷の設定条件によって変化する。

冷暖房を行う部屋の概要を表2に示す。冷暖房時間に関しては、リビングでは7時から23時まで、他の2部屋では7時から9時までおよび17時から23時までとした。また、冷房期間は6月から9月までの4カ月、暖房期間は11月から3月までの5カ月とした。

給湯は主に入浴に使われるものとし、その出湯時を毎日19時とし、出湯量を500ℓとした。給湯温度に関しては、実際に導入されているヒートポンプ給湯システムの設定給湯温度を参考にして50℃とした。

このような負荷設定を行い、愛知県豊橋市の1987年の気象条件下でモデル住宅を建てたこととして、年間のエネルギー負荷を計算した結果を表3に示す。暖房負荷や冷房負荷の計算は、熱の流れを等価電気回路に置き換えて解析を行う方法⁽³⁾⁽⁴⁾を用いた。電力負荷は文献⁽⁵⁾を参考にした。表3の電力負荷には空調に

表2 冷暖房を行う部屋の概要

Type of room	Floor space [m ²]	Room volume [m ³]	Window area [m ²]	Wall area [m ²]
Living room	26.5	70.5	6.1	49.4
Japanese room	9.9	26.5	2.1	30.5
European room	9.9	26.5	4.1	28.5

表3 一戸建て住宅の年間エネルギー消費

Type of load	Consumption [Mcal]	Remarks
Heating	7,973	Set temp.: 20[°C]
Cooling	1,088	Set temp.: 27[°C]
Hot-water	6,054	Set temp.: 50[°C]
Electric load	2,432	= 2,742[kWh]

必要な電力量は含まれていない。なお、冷房負荷は室内から奪い取らなければならない熱量（エネルギー）を示している。

3. 太陽・未利用エネルギーシステム

3.1 システム構成

一般住宅のエネルギー負荷に対するエネルギー供給源と供給機器にはさまざまなものがある。

従来型システムのエネルギー供給源および供給機器としては、表4のような機器が代表的である⁽⁶⁾。これに対し、灯油やガスを全く使用しない太陽・未利用エネルギーシステムを想定する。そのシステムのエネルギー・フローを図1に示す。(a)は夏季、(b)は冬季で、図中の実線は熱エネルギーの流れを、破線は電力エネルギーの流れを表している。

このシステムは、太陽電池、インバータ、太陽熱集熱器、蓄熱槽、空調用HP、給湯用HPから構成される。太陽熱は集熱器により蓄熱槽へ蓄えられ、給湯に利用される。太陽光は太陽電池・インバータで電力に変換され、系統電力と共に電力負荷へ供給されたり、HPの動力として利用される。

未利用エネルギーのうち、大気熱は給湯用HPを介して給湯負荷に、さらに冬場は空調用HPを介して暖房負荷に供給される。夏場に発生する冷房排熱はHPで回収することにより給湯負荷へ供給される。図中でHP機器の上の“L”はHPの低熱源側を、“H”は

表4 従来型システムのエネルギー供給と機器

Type of load	Source of energy	Equipment
Heating	Kerosene	Oil fan heater
Cooling	Electric energy	Air conditioner
Hot-water	Gas	Gas heater
Electric load	Electric energy	

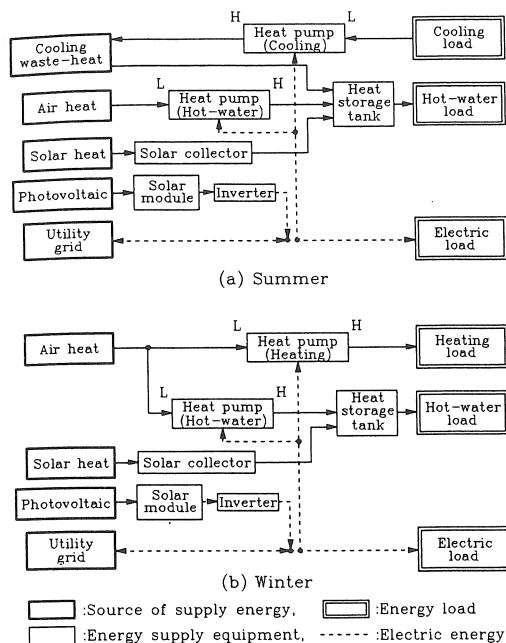


図1 太陽・未利用エネルギーシステムのエネルギー・フロー

高熱源側を表している。ここで、エネルギー供給源の一つである冷房排熱は、冷房負荷を発生源とし、HPの高熱源側から取り出されていることが他のエネルギー供給源と異なっている。

3.2 システム構成要素のモデル化

3.2.1 ヒートポンプ

冷暖房および給湯時のヒートポンプによる熱の移動を求めるには、ヒートポンプの成績係数(COP)を決定しなければならない。冷媒R22に対する暖房・給湯時のCOPの精算値を求める式が文献(7)に示されている。これに圧縮機の効率(65%)を乗じた(1)式により、COPを求めることにした。

$$COP = \{0.0065 (T_c - T_{cn}) + 0.35\} \cdot \frac{T_{cn}}{T_{cn} - T_{ev}} \cdot 0.65 \quad (1)$$

ここで T_c : 臨界温度 (369.32K)

T_{cn} : 凝縮温度

T_{ev} : 蒸発温度

T_{ev} を 273K, T_{cn} を 318Kとした場合、COP = 3.53となる。理想的なCOPの値は、蒸発温度と凝縮温度から計算できる。この設定温度条件での理想値(=7.95)との比率(成績係数比)を求めると、0.4

4となる。この成績係数比は、0.40~0.47になると言われているので⁽⁸⁾⁽⁹⁾、(1)式はHPのエネルギー収支を求める上ではほぼ妥当なモデル式と言える。

冷房時のCOPは

$$COP = \{0.0065 (T_c - T_{cn}) + 0.35\} \cdot \frac{T_{ev}}{T_{cn} - T_{ev}} \cdot 0.65 \quad (2)$$

となる。

3.2.2 太陽電池

太陽電池はシリコン単結晶型を想定し、その出力は、日射量に比例し、太陽電池セル温度の上昇に伴って、その変換効率が低下するものとした。このときのモデル式が文献(5)に示されている。これを(3)式に示す。

$$P = \eta S \Phi \{1 - 0.005 (T + 5)\} \quad (3)$$

ここで、 P : 太陽電池出力 [kW]

T : 外気温 [$^{\circ}\text{C}$]

η : 変換効率 (25 $^{\circ}\text{C}$)

S : 太陽電池面積 [m^2]

Φ : 傾斜面日射量 [kW/m^2]

なお、 η をここでは10%とした。

3.2.3 太陽熱集熱器および熱系統

建物冷暖房負荷、蓄熱槽および集熱器など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・電気抵抗に対応付け、その熱系統と等価な電気回路を計算した⁽³⁾⁽⁴⁾。その際、熱抵抗は、表1のような各部の熱貫流率から計算した。但し、冷暖房負荷を計算する際、日射については、窓を通過して室内に入るものは考慮したが、屋根や外壁などに吸収されるものについては取り扱わなかった。また、室内の照明器具や人体からの発熱については、その量が小さいものとして取り扱わなかった。

表5 システム構成要素の規模

System components	Size of component
Solar module	3 [kW _p] (= 30 [m ²])
Solar collector	10 [m ²]
Heat pump for air-heating	11,000 [kcal/h]
Heat pump for air-cooling	7,500 [kcal/h]
Heat pump for water-heating	1,500 [kcal/h]
Heat storage tank	500 [ℓ]

また、除湿は無視することとして、潜熱負荷は含めなかった⁽³⁾。

3.3 構成要素の規模

本研究では、システムの構成要素に関し、モデル住宅の規模や各負荷の大きさから判断し、現実設置可能な規模を想定した。その規模を表5に示す。

太陽電池は、今後、一般住宅での普及が期待されている最大出力 3kW_p のものを想定した。集熱器の面積は、現在普及しているものは $4\sim 6\text{m}^2$ が主流であるが、今回は給湯負荷を多めに設定したため、 10m^2 と大きめに設定した。太陽電池ならびに集熱器で必要となる面積の合計値は 40m^2 となり、モデル住宅の屋根面積の 40% 程度となる。蓄熱槽の容量は給湯体積に合わせ、 500l とした。

HP 冷暖房機の暖房能力および冷房能力は、想定した3部屋の空調を行う際に必要となる大きさを、各エアコンメーカーのカタログを参考に設定した。また、HP 給湯器の給湯能力については、後述する給湯負荷に対する一定加熱運用法において、HP 給湯器だけで十分に給湯が行えるような規模を求めて設定した。

4. シミュレーション

4.1 システムの運転方法

各負荷に対してどのようにエネルギーを供給するかを決定しておかなければならない。

前述したような3部屋をそれぞれの運転スケジュールで冷暖房を行う。このとき、冷房設定温度は 27°C に、暖房設定温度は 20°C にする。また、HP 暖房時は凝縮温度を 45°C 、蒸発温度と外気温の差を 10°C とし、冷房時は蒸発温度を 20°C 、外気温と凝縮温度の差を 10°C とする。

HP を用いて蓄熱槽を加熱する場合、時間的にどのように運転すればよいかが問題となってくる。ここでは、HP 運転に必要な系統からの購入電力を常に一定にさせる目的で、いわゆる「一定加熱運用法」⁽⁴⁾を採用する。この「一定加熱運用法」の具体的なアルゴリズムは次の通りである。蓄熱槽の水温をある時点での温度から 50°C までに上げるのに必要なエネルギーを求める。これを次の給湯までの残りの時間で割れば、1時間毎の必要エネルギーを得る。こうして求めたエネルギーをHP給湯により供給することにより、太陽熱が得られない場合でも、確実に給湯が行える。太陽熱が十分得られる場合には、HPは停止させる。

冷房排熱の蓄熱槽への回収は、HP冷房機の高熱源側の温度設定などを考慮して、蓄熱槽温度が 50°C に達

するまでは行うものとする。太陽熱や冷房排熱の供給量が多く、給湯時間前に蓄熱槽が 50°C に達した場合には、HPによる給湯は行わない。

電力負荷やHP運転に必要な電力は、系統電力と太陽光発電電力で賄われるものとし、太陽光発電電力がこれらの消費電力を超えるときには、その余剰となった分が系統へ送られるものとする。

4.2 シミュレーションのフローチャート

シミュレーションのフローチャートを図2に示す。準備段階として、システムの規模や冷暖房の運転スケジュール、その他システム各部の定数値を入力し、その後、年間の気象データを読み込む。

次に、冷暖房負荷、給湯負荷を計算し、これに必要な供給エネルギーを求める。そして、太陽熱集熱量・太陽光発電量を求め、蓄熱槽と各部屋の温度計算ならびに系統からの購入電力を計算する。これらの各計算を3章の記述に従い、年間を通して1時間毎に行うことにより各エネルギー供給源からの供給量を求める。

5. シミュレーション結果の例

5.1 気象データ

シミュレーションに必要な気象データとしては、5分毎に測定した値を1時間に亘って平均した値、すなわち、1時間平均値を使用した。なお、日射量については、集熱器や太陽電池で得られる太陽エネルギー量を計算するために 35° 傾斜面日射量を、また冷暖房負荷を計算する際に窓から入射する太陽エネルギー量を計

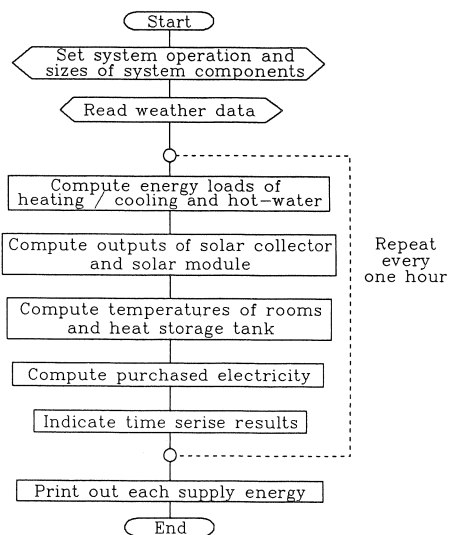


図2 シミュレーションのフローチャート

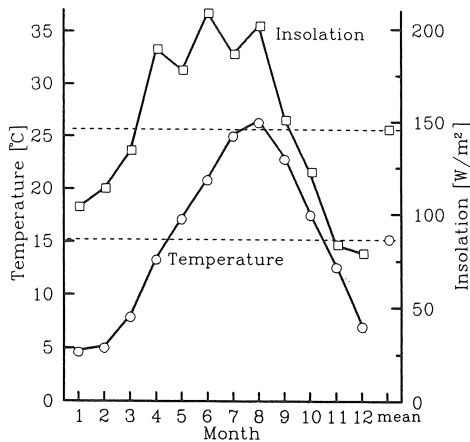


図3 全日射量ならびに気温の月別平均値
(1987年：愛知県豊橋市)

算するために 90度傾斜面日射量を、それぞれ I E A 法によって全日射量から変換した⁽¹⁰⁾。

図3にはその全日射量と気温の月毎の平均値を示す。1987年の豊橋地区の日射量は4月から8月にかけて多く、11月と12月は少ない。気温は8月に27°Cと最高になり、1月に4°Cと最低になる正弦波的形状を示している。なお、水道水温度の変化もほぼ気温変化に追従した傾向を示した。

5.2 時系列結果

図4にシミュレーション結果の一部を示す。ここでは、リビングの室温、冷房もしくは暖房熱量（3部屋分）、蓄熱槽温度、蓄熱槽への供給熱量（給湯熱量）、系統からの購入電力および太陽光発電電力の時系列結果を示す。

図4(a)は夏季の例である。冷房運転により室内から取り除かれる冷房熱量は、10時頃から発生し、日中と夕方にピークが現れている。夕方のピークは残りの2部屋の冷房運転が始まるためである。こうした運転により、リビングの室温が27°C以下に抑えられている。

蓄熱槽温度は、HP給湯により毎日20時から上昇し始め、日中は太陽熱と冷房排熱により急激に上昇する。蓄熱槽温度が50°Cに達すると、HP給湯は行われなくなり、冷房排熱も回収されなくなる。

電力を見てみると、太陽光発電量が大きい日中に、購入電力が負の値となっている。これは、電力系統へ逆潮流を行っていることを示している。

今回設定した冷房運転スケジュールの場合、冷房熱量のピークは夕方に発生している。この時間帯は太陽光発電量も減少しているため、購入電力のピークがこ

こで発生している。

図4(b)は冬季の例である。暖房運転が23時に終わるため、朝方には室温が低下し、そのため暖房開始

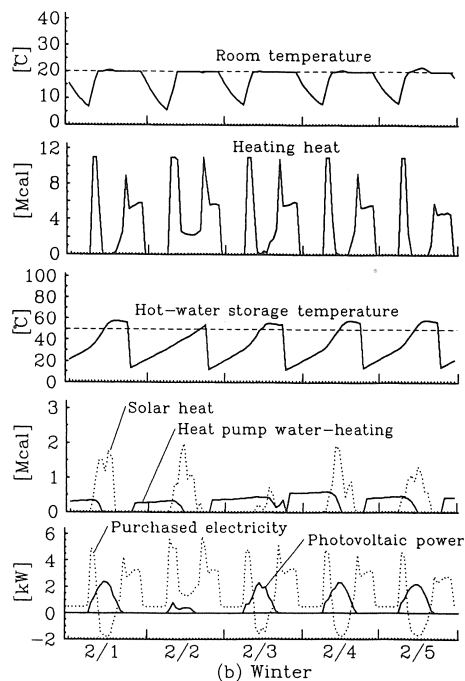
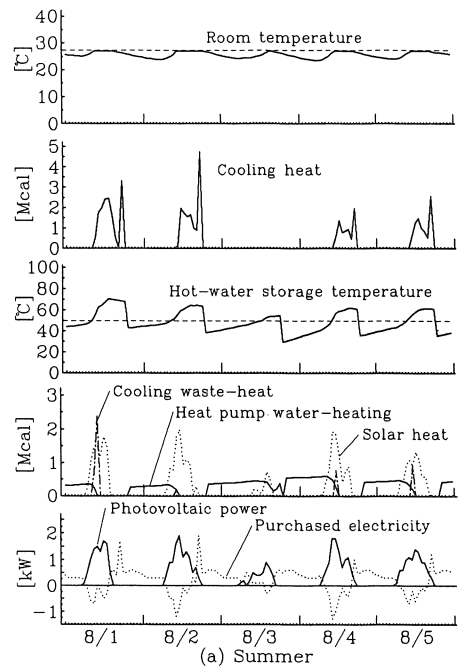


図4 シミュレーション結果
(1987年：愛知県豊橋市)

時（7時）には暖房熱量は設定規模の限界に達している。これに伴って、購入電力もピーク値をとる。なお、冬でも逆潮流が発生している。

5.3 1次エネルギーと活用エネルギー

太陽・未利用エネルギーシステムを導入する前と導入した後とのエネルギー消費量を1次エネルギー供給量に変換した。灯油・ガスに関しては、暖房負荷・給湯負荷を暖房機の効率（95%）や給湯器の効率（75%）で割ることにより1次エネルギーを求めた。

電力に関しては、システムが電力系統から購入する年間の購入電力量を熱量に換算し、それを送配電効率（94%）と発電効率（38%）で割ったものを1次エネルギーとした。

表6に従来型システムおよび太陽・未利用エネルギーシステムを介して一般住宅に供給される1次エネルギーを示す。従来型システムでは灯油、ガス、系統電力により供給される1次エネルギーは約24,000Mcalとなっている。これに対し、太陽・未利用エネルギーシステムでは、消費電力量は約2倍に増加するが、その内の30%程度が太陽光発電で賄われるため、系統電力が従来型の1.4倍程度に増加する。こうした結果、1次エネルギーは、従来型の44%に抑制されていることが分かる。

表7には太陽・未利用エネルギーシステムで活用された太陽エネルギー及び未利用エネルギーを示す。このシステムで活用された太陽エネルギー（太陽熱・発電）は約5,500Mcal、未利用エネルギー（大気熱・冷房排熱）は約5,300Mcalで、ほぼ同じである。

今回設定した集熱器面積は10m²である。この面積に供給される年間の太陽エネルギーは約10,900Mcalになる。従って、このシステムで熱として活用された太陽エネルギー2,498Mcalは23%となる。一方、太陽電池面積30m²に供給された年間の太陽エネルギーは32,700Mcalになる。従って、このシステムで

表6 従来型システム及び太陽・未利用エネルギーシステムの1次エネルギー供給

Source of supply energy	Primary energy supply [Mcal]	
	Conventional system	Solar-unutilized energy system
Kerosene	8,070	0
Gas	8,392	0
Electric energy	7,474	10,579
Total	23,936	10,579

表7 太陽・未利用エネルギーシステムで活用されたエネルギー

Type of utilized Energy	Utilized energy [Mcal]
Solar heat	2,498
Photovoltaic	3,064 (3,563[kWh])
Air heat	5,186
Cooling waste-heat	106
Total	10,854

発電に活用された太陽エネルギー3,064Mcalは9%程度ということになる。これら両者を足し合わせると、年間の太陽エネルギーの約12.7%程度を活用したことになる。

冷房排熱は年間に1,330Mcal発生するが、回収されて活用された分は、この8%程度にとどまっている。このように冷房排熱の回収量が少なくなるのは、冷房排熱が発生する時間帯では、HP給湯や太陽熱により蓄熱槽温度が50℃近くまですでに熱せられていることが、その要因として挙げられる。

6. まとめ

一戸建て一般住宅における化石燃料消費量の削減を目的に、太陽・未利用エネルギーシステムを導入することを想定し、そのシミュレーションモデルを作成した。そして、具体的なシステム規模および気象条件を設定し、年間の運転特性および消費エネルギー・活用エネルギーを算定した。

その結果、太陽エネルギー、大気熱および冷房排熱を活用することにより、化石燃料だけでエネルギー供給を行う従来型のシステムと比較して、1次エネルギーを約1/2に削減できることが分かった。このとき、システムの消費電力量は2倍以上に増加するが、太陽光発電によって、系統からの購入電力量を1.4倍程度の増加にとどめることができる。

文 献

- (1) 省エネルギーセンター：「省エネルギー便覧（平成4年度版）」、資源エネルギー庁、1992
- (2) 浅野他：「長野県における断熱気密化住宅の自然室温の解析」、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.765-768、1990
- (3) 榊原他：「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」、電気学会論文誌B, Vol.105, No.9, pp.70-76、1985

- (4) 見目他：「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
- (5) 谷, 横内：「系統連携型太陽光発電システムの最適設計」, 電気学会論文誌 D, Vol.111, No.6, pp.475-481, 1991
- (6) 手塚他：「都市におけるエネルギー代替の評価」, エネルギー資源, Vol.14, No.2, pp.27-33, 1993
- (7) 内山他：「太陽空気熱源ヒートポンプシステムの最適化に関する研究」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.161-162, 1989
- (8) 尾崎：「省エネルギーに貢献するヒートポンプ」, 電気学会論文誌 B, Vol.111, No.8, pp.827-834, 1991
- (9) K.Sagura & N. Nakahara : "THERMAL PERFORMANCE AND PRESSURE DROP OF ROCK BEDS WITH LARGE STORAGE MATERIALS", Solar Energy, Vol.47, No.3, pp.157-163, 1991
- (10) 日本太陽エネルギー学会編：「太陽エネルギーの基礎と応用」, オーム社, pp.27-31, 1978