

戸建住宅における太陽光発電と太陽熱給湯の エクセルギー評価

平野 勇二郎¹・稲村 實²

¹正会員 群馬大学助教 大学院工学研究科電気電子工学専攻 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

E-mail: hirano@el.gunma-u.ac.jp

²群馬大学教授 大学院工学研究科電気電子工学専攻 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

E-mail: inamura@el.gunma-u.ac.jp

本研究では戸建住宅を対象とし、太陽光発電パネルと太陽熱温水器の導入効果を比較した。とくに電力は様々な用途に利用できるが、温熱は例えば風呂用の給湯などのように用途が限定されるというエネルギーの質的な違いを考慮し、エネルギー量だけでなくエクセルギーについても比較した点に本研究の特徴がある。この結果、エネルギーによる評価では太陽熱温水器の効率がよく、エクセルギーによる評価では太陽光発電パネルの方が効率がよいという結果を得た。この結果は、給湯用の温熱を得るために化石燃料を燃焼させている現状では太陽熱温水器は有意義であるが、例えばヒートポンプ給湯器の効率向上などの技術的対策による今後のCO₂排出削減の余地は太陽光発電パネルの方が大きいことを示唆している。

Key Words : exergy analysis, solar power, residential energy, hot-water supply, photovoltaics

1. はじめに

京都議定書第一約束期間を目前に控え、化石燃料消費を削減するための手段として太陽エネルギー利用技術はますます重要視されてきている。その中でも、太陽光発電パネルや太陽熱温水器は一般的な戸建住宅の屋根に導入可能であるため、今後の普及促進が望まれる。ただし、これらには屋根面積の制約やコスト制約による競合が生じるため、普及促進するには単独の評価ではなく、両者の比較評価が必要である。そこで本研究では典型的な戸建住宅を対象とし、太陽光発電パネルと太陽熱温水器の導入効果を比較することを目的とした。ただし、これらを比較する際には、太陽光発電パネルは電気エネルギー、太陽熱温水器は熱エネルギーを得る技術であるため、エネルギーの質的な違いがあることに注意する必要がある。電気は理論上、その全てのエネルギーを仕事に変えることができるが、熱は一部しか仕事に変えることができない。このため、太陽光発電パネルは様々な用途に利用できるが、太陽熱温水器は例えば風呂用の給湯など用途が限定されるといった違いが生じる。したがって、こうしたエネルギーの価値の違いを無視し、エネルギーの量(熱量)のみで評価することは不適切である。そこで本

研究では、エネルギーの量だけでなく、エネルギーから理論上取り出しうる力学的仕事の最大値で定義される「エクセルギー」を指標として比較した。

2. 評価対象設備の概要とエネルギー評価

本研究で評価対象とした太陽光発電パネルおよび太陽熱温水器を図-1に示す。

太陽熱温水器については、本研究では現時点で普及率が高い自然循環式を想定し、文献^{1),2)}等を参考に平均的なサイズとして集熱面積3.5[m²]、容量280

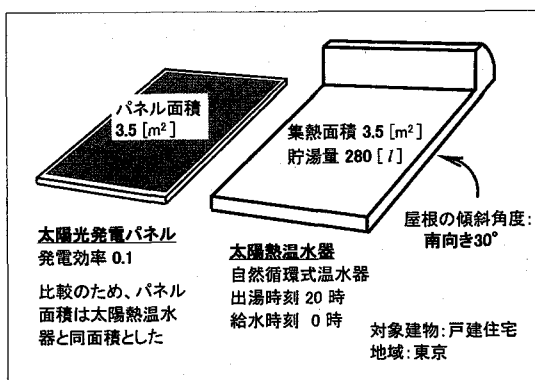


図-1 計算条件とパラメータ設定

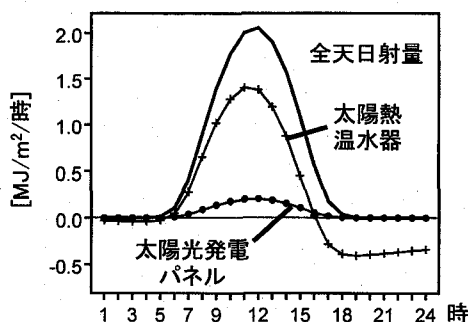


図-2 日射量および取得熱量の計算結果
(年間の時刻別平均値)

[4]と設定した。なお近年は研究・技術開発レベルでは強制循環式の太陽熱温水器や、太陽熱暖房なども統合した太陽熱利用システムが技術開発の主流になりつつあるため、今後こうした様々なシステムについて同様の評価を行う必要があると考えている。ただし本研究では、京都議定書第一約束期間を目前に控え化石燃料消費削減は緊急課題であるため、コスト面も踏まえた現時点での普及のフィジビリティを考慮した上で自然循環式を選択した。

太陽熱温水器の集熱量は式(1)とした^{1),3)}。

$$Q_{swh} = b_0 I - b_1 (T_{swh} - T_a) \quad (1)$$

ここで、 T_a : 外気温度 [°C]、 T_{swh} : 集熱媒体平均温度 [°C]、 Q_{swh} : 集熱量 [W/m²]、 I : 集熱面全日射量 [W/m²]、 b_0 、 b_1 : 集熱特性を示す係数である。本研究では文献¹⁾を参考に $b_0=0.77$ [-]、 $b_1=5.0$ [W/m²/K]と設定した。計算を単純化するため、本研究では温水器への給水時刻は0時、出湯時刻を20時とし、余剰熱量が生じた場合は翌日へは持ち越さないものとして計算した。

太陽光発電パネルについては、本研究では太陽熱温水器と比較するため面積は3.5 [m²]とした。また発電効率は10%と設定した。

上記の各設備について、日本建築学会拡張アメダス気象データ⁴⁾による標準年の365×24時間の計算を行った。計算された発電量・集熱量について通年の時刻別平均値を図-2に示す。太陽熱温水器の集熱量は式(1)の通り熱損失項があるため効率定数にはならないので、タイムステップを1時間とした非常計算を行なった。この結果、図-2の通り16時頃に集熱から放熱へ転じている状況が表現された。ただし、この集熱量は集熱面積、容量の設定と、 b_0 、 b_1 の係数の設定に依存する。そこでこの妥当性について検討するため、日別の太陽熱給湯器による温度の計算結果を図-3に示す。また給湯温度、給水温度も図-3

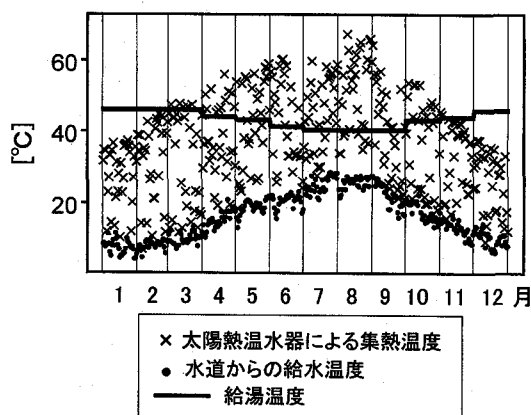


図-3 太陽熱温水器の水温の計算結果 (日別値)

に加えた。水道水からの給水温度は式(2)に示すCEC/HWの水温算定式⁵⁾を用いて拡張アメダス気象データ⁴⁾の気温データから算出した。

$$T_{sw} = 0.8516 \cdot T_a + 2.473 \quad (2)$$

ここで、 T_{sw} : 給水温度 [°C]である。図-3の給湯温度はLPガス資料年報⁶⁾に掲載された月別の想定値である。なお、LPガス資料年報⁶⁾では風呂釜と湯沸しを区別して想定値が示されているが、本研究では風呂釜のみを対象とした。図-3では出湯時の集熱温度は、夏季晴天日は60~70°C、冬季晴天日は30~40°Cとなっており、文献^{1),2)}と概ね一致する。したがって、標準的な太陽熱温水器の性能が表現できていると考えられる。

太陽光発電パネルと太陽熱温水器の省エネルギー効果について検討するため、日別の発電量・集熱量と電力・熱需要とを比較した(図-4)。なお戸建住宅の電力使用量は、エネルギー消費原単位調査データ⁷⁾および月別変動パターン⁸⁾から算出した。給湯用熱需要は、図-3に示した給湯温度、給水温度と、LPガス資料年報⁶⁾に掲載された湯量の想定値から算出した。

図-4(a)から分かる通り、太陽光発電パネルの発電量は平均的な戸建住宅の電力使用量に比べて小さく、電力の省エネルギー効果は年平均で9.9%程度と算定された。ここでは前述の通り、太陽熱温水器との比較のためにパネル面積を3.5 [m²]と設定したため、省エネルギー効果は必ずしも大きいとは言えないが、もちろん導入面積を増やすことでより大きな省エネルギー効果が期待できる。

一方、太陽熱温水器では集熱効率(集熱量/日射量)は49.8%、太陽依存率(集熱量/給湯用熱需

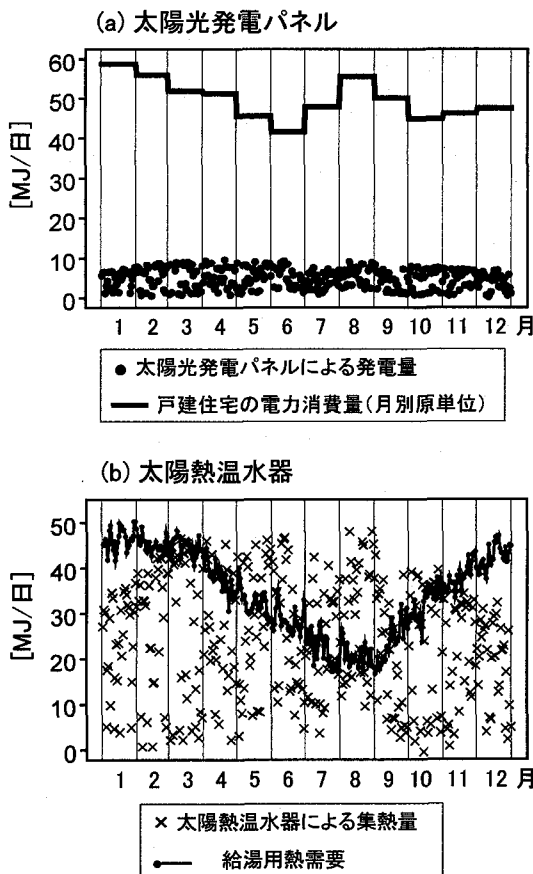


図4 取得日射エネルギーとエネルギー需要（日別値）

要)は62.3%を得た。なお、太陽依存率の計算には、夏季に生じる余剰熱量は差し引いて計算している。ここで、仮に熱効率100%のガス給湯器を代替システムとして想定すれば、給湯の省エネルギー率が62.3%であると言い換えることができるため、大きな省エネルギー効果が期待できる。

図-4より太陽光発電パネルと太陽熱温水器の効果をエネルギー量（熱量）で比較した場合、今回の計算条件では、太陽光発電パネルの省エネルギー効果は太陽熱温水器の1/5程度であった。したがって、本研究のような太陽熱温水器の熱量に概ね見合う給湯需要があるという前提では、太陽熱温水器の方が高効率であると言える。ただしこれは給湯需要や太陽熱温水器の容量などは一般的な計算条件として設定した上での、同面積の太陽光発電パネルとの比較である。実際には、太陽光発電のパネル面積はさらに増やすことが可能であるが、太陽熱温水器の場合は給湯需要を超える集熱をしても余剰熱量を利用し難いというエネルギーの質の違いがあることは、別途に考慮する必要がある。

3. エクセルギー評価

前章で設定した対象設備について、エクセルギーを算出して比較する。

まず図-5(a)および(b)の棒グラフにそれぞれ月別に集計した日射エネルギー、日射エクセルギーを示す。ここでは直達日射と天空日射とでは有効比が異なるため、まず直散分離を行ない、それぞれについてエクセルギーを計算した。日射エクセルギーの計算方法は文献⁹⁾に従い、

直達日射：

$$X_{DN} = I_{DN} - T_o \times 0.000462(I_{DN})^{0.9} \quad (3)$$

天空日射：

$$X_{SH} = I_{SH} - T_o \times 0.0014(I_{SH})^{0.9} \quad (4)$$

とした。ここで I_{DN} : 直達日射量 [W/m²], X_{DN} : 直達日射エクセルギー流 [W/m²], I_{SH} : 天空日射量 [W/m²], X_{SH} : 天空日射エクセルギー流 [W/m²], T_o : 環境温度 [K]である。環境温度は各時刻における外気温を用いた。なお、外気温は変動するが、異なる環境温度下においてエクセルギーが対等に比較できるため¹⁰⁾毎時の外気温をその時刻の環境温度として用いて差し支えない。この結果、有効比（全エネルギーに対するエクセルギーの割合）は晴天日に高く、日中の平均値では直達日射が92%、天空日射が76%となった。

次に前章で設定した太陽光発電パネルおよび太陽熱温水器について、エネルギーおよびエクセルギーについて月別に集計した結果を図-5上に示した。電力は理論上、すべてのエネルギーを仕事に変換することができるため、エネルギー量とエクセルギー量が一致する。一方、太陽熱温水器による温熱のエクセルギーの計算は次式により行った。

$$X_w = C\rho_w V_w (T_w - T_o) - C\rho_w V_w T_o \ln \frac{T_w}{T_o} \quad (5)$$

ここで、 X_w : 温水のエクセルギー量 [J], T_w : 水温 [K], $C\rho_w$: 水の体積熱容量 [J/m³/K], V_w : 水量 [m³]である。図-5から、エネルギー効率は前章で示した通り太陽熱温水器が高いが、エクセルギー効率を比較すると太陽光発電パネルの方が高いことが分かる。

さらに一般的な住宅における電力や給湯の需要と比較するため、図-4をエネルギーではなくエクセルギーで表現した。ここでは図-4(b)の太陽熱温水器についてエクセルギーで表現したもののみを図-6に示

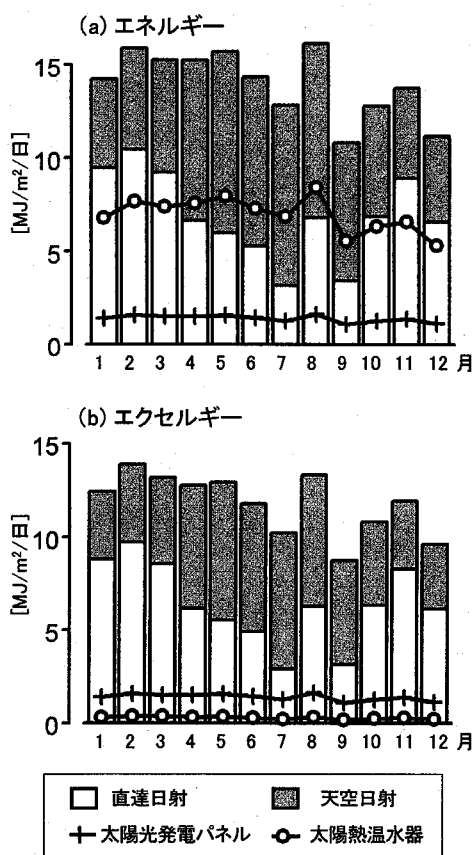


図5 エネルギーとエクセルギーの計算結果 (月平均値)

す。一方、電力は有効比が1であるため、図-4(a)はエクセルギーで表現しても同じ図となる(図省略)。図-6から、集熱による取得エクセルギーは0~3 [MJ/日]程度であり、図-4(b)とを比較すると非常に小さい。有効比は環境温度等により変動するが、概算値では夏季は2%程度、冬季は6%程度であった。

ここで、図-4(a)と図-6を比較すると、エクセルギー効率は明らかに太陽光発電パネルの方が高い。したがって日射エネルギーの効率的利用のポテンシャルは太陽光発電パネルの方が高いと言える。ただし、ここで注意しなければいけないことは、図-4(b)および図-6に示した通り風呂の給湯需要という熱量としては大量であり、かつ低エクセルギーの温熱需要が現実にあるということである。このため、太陽光発電パネルのエクセルギー効率は太陽熱温水器よりも高いが、もしこの給湯用の温熱を電力により供給するとすれば、電力から温熱を得る際のエクセルギー損失も考慮する必要がある。

図-7に、太陽光発電パネルとヒートポンプ給湯器とを組み合わせると給湯を行った場合のヒートポンプ

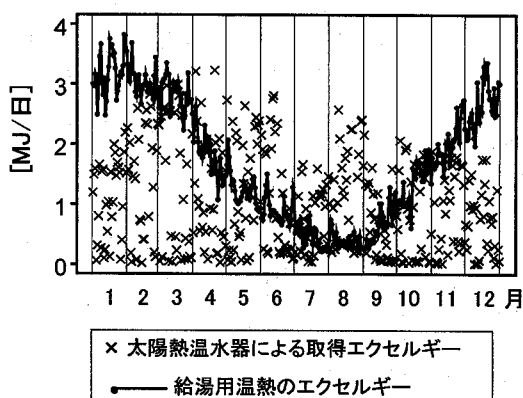


図6 太陽熱温水器と給湯用温熱のエクセルギー (日別値)

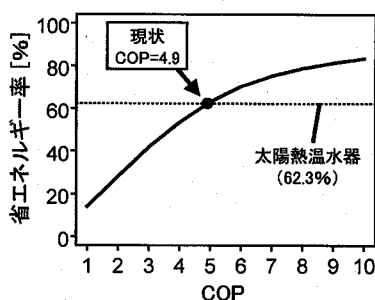


図7 ヒートポンプ給湯器のCOPと省エネルギー率の関係

給湯器のCOPと給湯の省エネルギー率の関係を示した。ここではCOPは固定値として計算した。省エネルギー率とは、ここでは給湯用熱需要に対し、太陽エネルギーにより供給できる割合とした。なお太陽光発電パネルは太陽熱温水器とは異なり余剰電力を他用途に利用できるというメリットがあるが、COP=5付近で給湯用熱量に対して熱量比でせいぜい2%程度であったため、ここでは無視した。ここで一般的な家庭向けヒートポンプ給湯器をCOP=4.9とすると¹¹⁾、省エネルギー率は62.5%となり、前述した太陽熱温水器の太陽依存率(62.3%)とほぼ一致するという結果となった。したがって今回の計算条件では、太陽光発電パネルとヒートポンプ給湯器を組み合わせれば、太陽熱温水器とほぼ同程度の日射エネルギー利用効率を得られるということになる。ただし、経済性評価は本研究の対象外であるから断定的な記述は避けるが、コストも考慮すれば現時点では太陽熱温水器の方が現実的であることは十分に予想できる。このため、省エネルギーが緊急の課題となっている今日においては、まずは太陽熱温水器の普及を推進することが現実的である。一方、

COP=4.9のヒートポンプ給湯器のエクセルギー効率は、環境温度等により異なるが概算値では20%程度である。したがって熱力学の第二法則に基づく理論上の効率の限界にはまだ遠く、今後の技術開発による効率向上のポテンシャルが大きいと考えられる。

4. まとめ

本研究では、一般住宅における実用的な太陽エネルギー利用技術である太陽光発電パネルと太陽熱温水器について比較評価を行なった。とくに電力と温熱の価値の違い評価するため、エネルギーだけでなく、エクセルギーについても比較した点に本研究の特徴がある。本研究の成果をまとめると次のようになる。

まず一般的な太陽光発電パネルと太陽熱温水器を想定して省エネルギー効果を算定した。この結果、今回の計算条件では同面積で比較すれば太陽熱温水器は太陽光発電パネルの約5倍の省エネルギー効果が得られることが示された。ただしこれは、給湯需要や太陽熱温水器の容量などは一般的な計算条件として設定した上で、同面積の太陽光発電パネルと比較した結果である。実際には給湯需要を満たすまでは太陽熱給湯が有利であるが、それ以上に導入面積を増やせば太陽光発電が有利になると考えられる。

次に上記の太陽光発電パネルと太陽熱温水器についてエクセルギー効率を比較し、太陽光発電パネルの方が高効率であるという結果を得た。この結果は、今後、例えばヒートポンプの効率向上などの技術開発による省エネルギーのポテンシャルは太陽光発電の方が高いことを示唆している。ただし現状では電力から低エクセルギーの温熱を供給する際のエクセルギー損失が大きいので、給湯需要に対しては必ずしも太陽光発電パネルが有利とは言えない。給湯用の温熱を得るために化石燃料をそのまま燃焼させて

いる現状では太陽エネルギー利用の導入は緊急の課題であり、当面は太陽熱温水器の普及を優先すべきであると考えられる。一方、エクセルギー評価の結果からヒートポンプ給湯器は技術開発による今後の効率向上の余地が大きいことが予想されるため、今後の進展が期待できる。

参考文献

- 1) 田中俊六: 省エネルギーシステム概論, オーム社, 320p, 2003.
- 2) 建築環境・省エネルギー機構: 住宅・建築省エネルギーハンドブック 2002, 国土交通省住宅局住宅生産課/国土交通省住宅局建築指導課監修, 651p, 2001.
- 3) 宇田川光弘: 太陽熱集熱量の標準算定法について, 太陽エネルギー, Vol.8, No.5, pp.10-17, 1982.
- 4) Architectural Institute of Japan; Expanded AMeDAS Weather Data, 日本建築学会, 2003.
- 5) 建築環境・省エネルギー機構: 平成 15 年度 建築物の省エネルギー基準と計算の手引 性能基準 (PAL/CEC), 2003.
- 6) 石油化学新聞社: 2005 年版 LP ガス資料年報, Vol.40, 2005.
- 7) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 民生部門エネルギー消費実態調査, 委託先 財団法人日本エネルギー経済研究所エネルギー計量分析センター, 1999.
- 8) 空気調和・衛生工学会: 都市ガスによるコージェネレーションシステム計画・設計と評価, 1994.
- 9) 宿谷昌則 編著: エクセルギーと環境の理論 流れ・循環のデザインとは何か, 北斗出版, 2004.
- 10) 西川竜二, 高橋達, 宿谷昌則, 浅田秀男: エクセルギーの計算における環境温度に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, p.495-496, 1997.
- 11) 山川 智: ヒートポンプ・蓄熱システムの普及で進む温暖化対策, 省エネルギー, Vol.59, No.7, pp.22-25, 2007.

EXERGY ANALYSIS OF SOLAR WATER HEATER AND PHOTOVOLTAIC POWER GENERATION SYSTEM FOR RESIDENTIAL HOUSES

Yujiro HIRANO and Minoru INAMURA

In order to reduce fossil-fuel consumption to cope with global warming, solar energy use technologies become increasingly important in recent years. This paper presents the result of a comparative evaluation of the solar water heater and the photovoltaic power generation system installed on the roof of a detached house. The results of this study showed that the energy efficiency of the photovoltaic power generation system is lower than that of the solar water heater, whereas the exergy efficiency of the photovoltaic power generation system is higher than that of the solar water heater.