

住宅用太陽熱利用給湯システムの性能

Performance of Solar Thermal Systems for Domestic Hot Water Supply

吉永美香*

1. 世界と日本における太陽熱の普及状況

図1に世界における太陽熱利用システムの設備容量の推移を、図2に2017年における世界の再生可能エネルギーの設備容量と年間のエネルギー供給量を示す⁽¹⁾。この10年、太陽熱利用設備は堅調に拡大を続けており、風力発電、太陽光発電と並ぶ再生可能エネルギーの三本柱の一つとなっていることは非常に喜ばしい。しかし、現在の全世界の最終エネルギー消費量の熱利用分約48%のうち、太陽熱を含む近代的な再生可能エネルギーによる供給はその約10%にとどまり⁽²⁾、より一層の普及加速が求められる。

さて、日本国内に目を向けると状況は一転する。

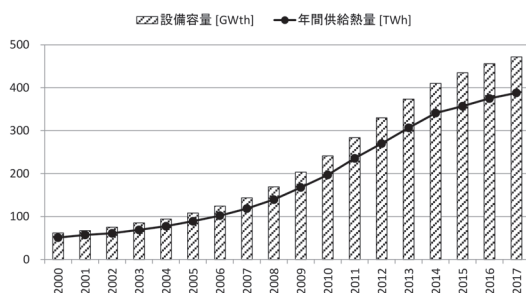


図1 世界の太陽熱システムの設備容量推移

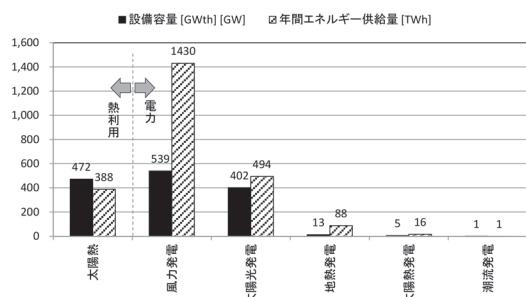


図2 世界の再生可能エネルギー設備容量と年間エネルギー供給量 (2017年)

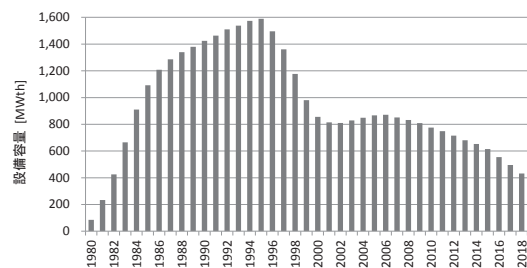


図3 日本の太陽熱システムの設備容量推移

図3は、ソーラーシステム振興協会調査をもとに、筆者が推計した太陽熱システムの設備容量推移である。また、総務省調査によると「太陽熱を利用した温水機器等」の普及率は全国平均で4.2%⁽³⁾となっており、これらのデータを見ても、近年の太陽熱利用機器の普及拡大は足踏み状態が続いていることは否めない。世界に先駆けて家庭用太陽熱給湯が大規模に普及した1980年代のような活気を再現するために、本学会員として、太陽熱の低温熱利用における優位性を明確にし、情報を発信していく責任があると考えている。

2. 日本における太陽熱普及のための課題

2.1 低温熱市場への期待

改めて指摘するまでもなく、我が国の低温熱需要の市場は非常に大きい。図4は家庭部門における用途別エネルギー消費量の5年ごと推移⁽³⁾を表している。2005年度をピークにやや落ち着いてきたものの、依然、給湯・暖房といった熱需要用途におけるエネルギー消費は大きい。2017年度データによると、家庭部門のエネルギー消費における暖房および給湯用途が占める割合はそれぞれ約28%⁽³⁾である(図5)。また、家庭用の給湯用途に対する要求

*名城大学理工学部

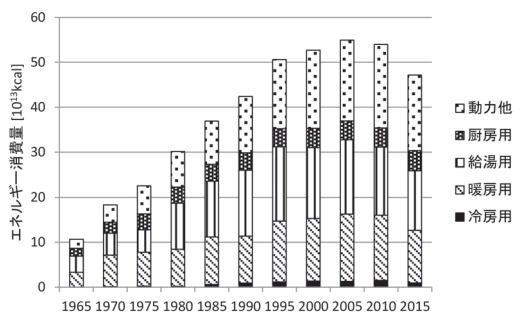


図4 家庭部門用途別エネルギー消費量推移

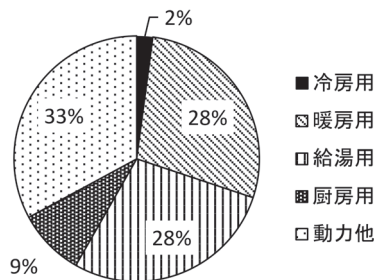


図5 家庭部門用途別エネルギー消費構成比（2017年度）

温度は、入浴で 40℃ 前後、台所で 20～40℃（ただし自動食器洗い器では～60℃）、洗面 20～40℃、洗濯で～40℃程度であり⁽⁴⁾、まさに太陽熱にうってつけの用途といえる。低温熱需要としては、他にも暖房・乾燥、また近年では冷房時の除湿（デシカント）での研究や導入事例も見られるが、給湯用途は年間を通じて需要が安定している（すなわち設備稼働率が高く、経済的に合理性がある）ため、太陽熱を適用するパートナーとしてはもっとも優先順位が高いといえよう。

2.2 システムの性能表示の必要性

ところで、近年の太陽熱温水器の購入層の多くは買い替え需要（いわゆるリピーター）であるという話をよく耳にする⁽⁵⁾。太陽熱温水器を使ってその良さを体感したユーザは、継続して使い続けたいと思うようである。石油危機を知らない若い世代や周囲に太陽熱を利用した例のない人にとって、太陽熱を積極的に採用するに足る動機づけが得られない理由はどこにあるのだろうか。

筆者が考える一つの理由として、太陽熱給湯システムが、他設備と比較して、性能を「絶対値」として表しにくいことがある。普及型の一般的な給湯器は、効率、COP、APF、といった値で、エネルギー性能をおおむね単純に比較することができる。また、これらはカタログ等に仕様として掲載されている。これらの性能値は給湯負荷に係わらず、機械的な性能としてほぼ一義的に決められるものである。しか

し太陽熱は、日射という自然現象を利用することだけではなく、熱交換器と蓄熱機器との組合せシステムであることも影響し、変動的な特性を持っている。言ってみれば、パフォーマンスに影響を与える上流境界条件（熱源側である日射）も下流境界条件（負荷側である給水温度・給湯流量）も変動するのに、その中間にある機械の性能をどうして単純な値で表現できよう、ということだ。

普及において好対照な成績を生んでいる、太陽光発電（PV）は、太陽エネルギー利用のなかでは後発隊であったが、FIT の導入で一気に普及にはずみがついたことは記憶に新しい。もともと、電力は熱よりも測定しやすいエネルギーであったことに加え、安定した価格の売買電が可能となったことが、転換点になったといえる。

これらの点を踏まえ、太陽熱給湯システムの性能をなんとか定量化して、市場に、ユーザに、明確に示す必要があるといえる。

2.3 太陽熱の性能評価とシミュレーション

太陽熱利用システムの性能を定量化するためには、変化する上流・下流側条件に対応できるコンピュータシミュレーションの利用が必要不可欠である。太陽熱のシミュレーションについては、本学会でも長期にわたり報告されており非常に長い歴史がある。ツールの例として、我が国で開発された有名なツールとして宇田川による EESLISM が、また海外に目を向けると TRNSYS, Polysun, TRANSOL, T*SOL, GetSolar などがある⁽⁶⁾。なかでも Polysun Online は、オンライン上で、無償で太陽熱利用給湯・暖房システムのシミュレーションができる魅力的なサービスである⁽⁷⁾。任意の土地を、またかなり多くのバリエーションのシステムを選択可能で、計算結果は E-mail で pdf 形式で送付されるなど、ユーザへの情報提供として優れたインターフェースを備えている。海外のソーラーシステム機種に対する結果であることや、気象データが地上観測データではないことなどから、シミュレーション結果に高い精度は期待できない（筆者の、日本の給湯用ソーラーシステムを再現しようとした試行では、太陽熱利用量がやや大きめに算出される傾向があるようだ）ものの、日本でも活用が期待される。

さて、日本では、平成 25 年の省エネルギー基準の改正により、建物の省エネルギー性は設備と建物とを一体化し年間の 1 次エネルギー消費量で判断することとなった。現在は、インターネット上に、汎用表計算ソフトウェアをプラットフォームとするエ



図6 フィールド試験中の太陽熱温水器三種

エネルギー消費性能計算プログラムが無償で提供され、使用すべき境界条件（気象条件、給水温度、負荷流量など）が指定されている⁽⁸⁾（以降、境界条件も含めて Web プログラムとよぶ）。海外の主要な基準では、コンピュータシミュレーションによる評価が当然のように活用されている昨今、ようやく年間計算という発想が日本の実務の現場でも取り入れたことは喜ばしい。しかし、現行の Web プログラムは簡単な定常・非収束計算であり、蓄熱システムや運転制御が良好に再現されるわけではないこと、太陽熱システムを始め、十分なデータを基に性能が評価できる計算となっていない設備が多数あること、などから、今後の改善が期待される。

シミュレーションツールの選定や評価に際しては、精度・正確さのみならず、価格（無償も含む）、GUI・操作性、計算時間、サポートといった多くの要素を勘案すべきだが、本報では、精度よく信頼性のあるデータが得られる、という点のみに焦点をあてる。筆者はこれまでに、経産省や NEDO 等の支援を得て、複数の、太陽熱温水器（図 6）、ガスボイラを補助熱源とするソーラーシステム、また電気ヒートポンプを補助熱源とするソーラーシステムの長期実証試験プロジェクトに携わってきた。また、これらのプロジェクトの中で、長期間の実証試験データをもとに、各システムを高い精度で再現できる詳細なシミュレーションモデルの構築を進めてきた^(9,10)。そこで本報では、過去に実証試験との比較により精度検証がなされた太陽熱利用システムの計算環境を用いて、年間シミュレーション結果をもとに各システムの一次エネルギー消費量の削減効果を紹介することとしたい。

3. 太陽熱給湯システムの性能

3.1 対象システムと条件

太陽熱給湯システムとして、本報では太陽熱温水器（SWH）、ソーラーシステム（SS）、CO₂ 冷媒ヒートポンプ給湯器一体型ソーラーシステム（ES）、の三機種を、非太陽熱システムとして、従来型都市ガ

ス給湯器（GB）潜熱回収型都市ガス給湯器（EJ）、CO₂ 冷媒ヒートポンプ給湯器（EC）の三種類のそれぞれから、代表的な機種を取り上げる。太陽熱利用システムのうち、SWH と SS は、従来型補助ボイラである GB と、高効率ボイラである EJ とをそれぞれ組み合わせたパターンを設定している。図 7～図 9 に各太陽熱利用システムのシステム概要を、表 1 にシステム一覧を示す。

検証用の計算ツールは TRNSYS18 で、対象期間は 1/1～12/31 の一年間、計算時間間隔は 1 分とし、給湯負荷流量（Web プログラム・4 人世帯用）も 1 分毎の条件を与える。気象条件は拡張アメダス標準

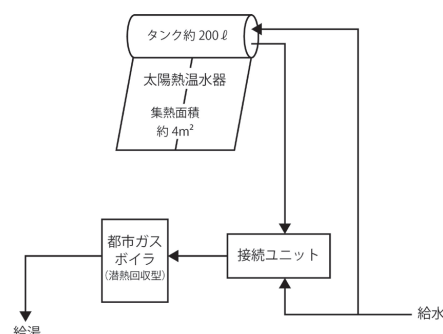


図7 太陽熱温水器のシステム例

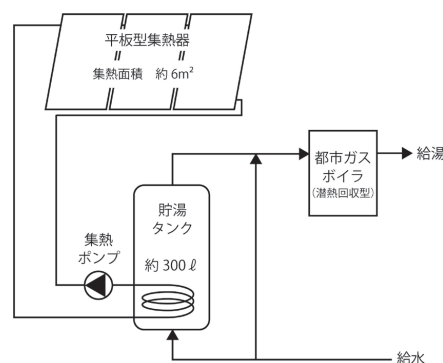


図8 ソーラーシステム（ガス補助）の例

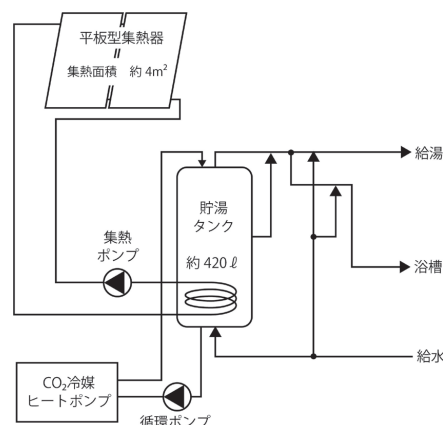
図9 ソーラーシステム（自然冷媒 CO₂ ヒートポンプ給湯器補助）の例

表1 対象システム

太陽熱有無	記号	商品名・通称	集熱面積 [m ²]	タンク容量 [L]
×	GB	都市ガス給湯器	-	-
×	EJ	潜熱回収型都市ガス給湯器	-	-
×	EC	CO ₂ 冷媒HP給湯器	-	420
○	SWH_GB	太陽熱温水器+GB	4	200
○	SWH_EJ	太陽熱温水器+EJ	4	200
○	SS_GB	ソーラーシステム+GB	6	300
○	SS_EJ	ソーラーシステム+EJ	6	300
○	ES	CO ₂ 冷媒HP一体型ソーラーシステム	4	420

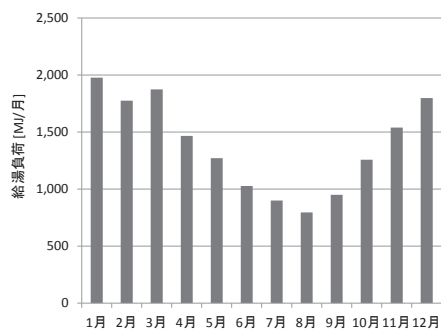


図10 給湯負荷 (東京, 4人世帯条件)

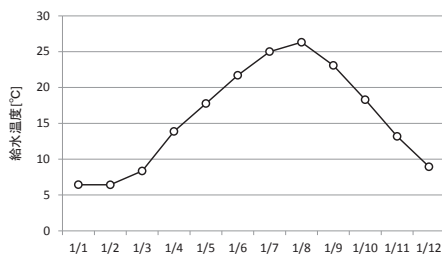


図11 給水温度 (東京)

気象データ (1995) で、これは Web プログラムでもベースとして使用している標準気象データである。各月の給湯負荷を図10に、給水温度を図11に示す。これらから計算された年間の給湯負荷は16.6GJである。

太陽熱温水器は、風呂の湯張りのみに使用することもあるが、ここでは接続ユニットを併用し、湯張り以外の全給湯負荷に利用できるとした。従来型の都市ガスボイラについては平均効率0.8、潜熱回収型の都市ガスボイラについては平均効率0.93とし、自然冷媒CO₂ヒートポンプ給湯器のヒートポンプ性能は、ソーラーシステム(自然冷媒CO₂ヒートポンプ給湯器補助)のヒートポンプと同じとした。なお、太陽熱利用システムの太陽熱利用量については長期実証試験をもとに精度検証を行ったものであるが、補助熱源(GBとEJ)のエネルギー消費については負荷から太陽熱利用熱量を差し引いた値に対し、上記固定値を代入して求めている。

評価には現在の省エネ法を鑑み、1次エネルギー消費量を用いる。都市ガス及び都市ガスを補助熱源とする太陽熱利用システムにおける、都市ガスと電力の1次エネルギー換算には、それぞれ45MJ/m³、9.76MJ/kWhを用いている。また、ESとECでは、午前7時から午後11時までの電力を9.97MJ/kWh、午後11時から翌午前7時までは9.28MJ/kWhとしている。参考として、太陽熱依存率と太陽熱有効利用率も示す。定義は以下のとおりである。

太陽熱依存率

$$= \text{太陽熱利用熱量} / \text{負荷熱量} \times 100 \quad [\%]$$

太陽熱有効利用率

$$= \text{太陽熱利用熱量} / \text{日射量} \times 100 \quad [\%]$$

3.2 結果

図12～図14に、1次エネルギー消費量、GBを基準としたときの各システムの1次エネルギー削減率、および太陽熱依存率と太陽熱有効利用率の結果をそれぞれ示す。

もっともシンプルな太陽熱給湯システムである太陽熱温水器(SWH)でGBを補助熱源とする場合でも、従来型GB給湯に比較して28%の1次エネルギーが削減できる。補助熱源を潜熱回収型のガス

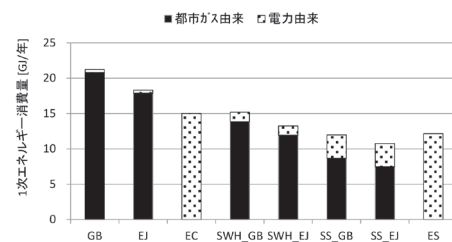


図12 年間1次エネルギー消費量

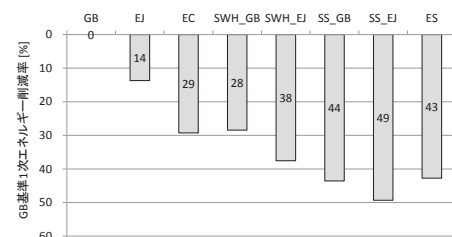


図13 従来型ガス給湯器に対する1次エネルギー削減率

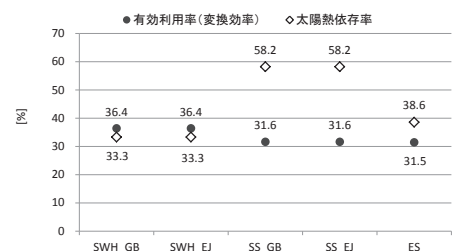


図14 太陽熱有効利用率と太陽熱依存率

ボイラとすることで、38%の削減となる。ソーラーシステムでは、GB補助44%削減、EJ補助で49%となり、ほぼ半分である。前述のとおり、世帯の全エネルギー消費に対し、給湯用途が占める割合は約28%であることから、SS + EJの採用で、世帯の全エネルギー消費の約14%が削減できることとなる。

比較的新しいシステムであるCO₂冷媒ヒートポンプは、非太陽熱給湯器（GB、EJ、EC）の中では最も1次エネルギー消費量が少ないが、太陽熱と一体化させることによる効果はやや控えめである。これは、太陽熱の集熱に先んじて、ヒートポンプが稼働することに起因する。安価な夜間電力を使用するというランニングコストの優位性が機器開発のベースとして存在するため、やむをえないところではあるが、太陽熱利用の視点からみると、非常に「もったいない」といえる。これからは夜間電力の価格の見直しも進むと考えられ、純粋に太陽熱の補助熱源として、集熱後に稼働する運転制御とすることを期待したい。

太陽熱有効利用率は、SWHで約36%、SSとESとともに約32%と、PVを大きくしのぐ変換効率を得られており、低温集熱を低温熱需要にそのまま利用する効果はきわめて大きい。

4. まとめ

本報では、まず、世界と日本とにおける太陽熱の導入の現状を概観し、日本におけるハードルについて検討をした。その上で、シミュレーションによって任意条件での年間性能を推定あるいは把握できる必要性について言及した。さらに、精度検証のなされたシミュレーションを利用した、Webプログラム条件（東京都の4人世帯）を仮定した場合の太陽熱利用システムの1次エネルギー消費量の削減効果を定量的に示した。

給湯設備の選択において、一般のユーザが太陽熱を検討の週上にあげられるようになるためには、このような情報をデータベースとして広く公開すべきであり、筆者らは、まさにその準備を行っているところである。太陽熱は、熱という性質上、電力よりも定量化しにくい性格をもっているが、そこを何とか克服し、熱ならではの優れた点を社会が正しく理解・評価できるよう、研究者や技術者が努力をしなくてはならない。

参考文献

- 1) Weiss, W. and Spork-Dur, M., SOLAR HEAT

WORLDWIDE 2018, IEA Heating & Cooling Programme (2018)

- 2) Renewables2018 Global Status Report, REN21
(日本語版：REN21 自然エネルギー世界白書 2018 ハイライト, 環境エネルギー政策研究所 (ISEP))
- 2) 総務省統計局, 平成 25 年住宅・土地統計調査, 省エネルギー設備等 (7 区分) 別住宅数, 2015
- 3) 省エネルギーセンター, エネルギー・経済統計要覧 2019, pp. 94-95
- 4) 岩本静男, 住宅における給湯負荷と省エネルギー, 太陽エネルギー, Vol.37. No.4, pp.3-8
- 5) 関知道, 戸建住宅に対する太陽熱温水器と太陽光発電の普及分析, 東京農工大学大学院博士論文, 2015.1
- 6) 吉永美香, 世界における太陽熱利用システムシミュレーションツールの比較と日本における一般的システムの再現性の検討, 太陽/風力エネルギー講演論文集, (2014) 357-360
- 7) Polysun online, Vela Solaris, 2019, <http://www.polysunonline.com/PsoPublic/app/home/access> (アクセス日 2019/4/10)
- 8) エネルギー消費性能計算プログラム (住宅版) Ver. 2.1.2, 国立研究開発法人建築研究所
- 9) 吉永美香, 須田礼二, 宇田川光弘, 奥宮正哉, 坊垣和明, 住宅用太陽熱利用給湯システムにおける太陽熱の環境価値化手法に関する研究 第1報 修正 M1 モード 4 人負荷に対する TRNSYS と EESLISM の計算精度検証, 太陽エネルギー, 440 (2014), pp. 61-68
- 10) 吉永美香, 城出浩作, 桑沢保夫, 浅井俊二, 住宅用太陽熱利用給湯システムに関する研究 第5報 太陽熱温水器とソーラーシステムの年間性能の計算と地域特性の分析, 太陽/風力エネルギー講演論文集, (2018), pp.327-330

略歴



吉永美香 (よしなが みか)

2002 年 名古屋大学大学院環境学研究科博士課程短縮修了・博士 (環境学)
2002 年 名古屋大学大学院環境学研究科助手

2006 年 名城大学理工学部建築学科講師

現在 同 教授

太陽熱エネルギーをはじめとする省エネルギーシステムの研究と、持続可能な建築設計に関する研究に従事。