

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

Study on Establishment of Environmental Value of Solar Thermal Utilization for DHW System
Part 1 Accuracy study of simulations using TRNSYS and EESLISM for deeming

吉永 美香¹ 須田 礼二² 宇田川 光弘³
Mika YOSHINAGA Reiji SUDA Mitsuhiro UDAGAWA
奥宮 正哉⁴ 坊垣 和明⁵
Masaya OKUMIYA Kazuaki BOGAKI

Abstract

Deeming is one of the effective ways to expand the utilization of solar thermal energy and this paper aims to clarify their accuracy of TRNSYS and EESLISM for deeming in Japan. We compared their simulation results and a field measurement data throughout three representative periods in winter, summer, and fall. The field measurement was examined with the modified M1 mode load pattern for a four-people household. As the important parameters for deeming, the solar energy supply and the electricity use for the collector pump were focused. The solar energy supply calculated by TRNSYS against the measurement were 99.5% in winter, 84.8% in summer, and 99.4% in fall, as those by EESLISM were 97.5%, 87.4%, and 93.9%, respectively. In a similar way, the electricity use of the pump simulated by TRNSYS were 92.4%, 94.5%, 94.2% and those by EESLISM were 91.1%, 110.2%, 105.2%. Because both programs could have estimated these parameters with less than 15% errors in all three seasons, we concluded that they are suitable for the deeming tools.

キーワード: 太陽熱, 給湯, シミュレーション, 見なし計量, TRNSYS, EESLISM

Key Words : Solar Thermal Energy, Domestic Hot Water Supply, Simulation, Deeming, TRNSYS, EESLISM

1. はじめに

化石燃料の枯渇や気候変動といった深刻な問題の対応として、太陽熱エネルギーに代表される再生可能エネルギーの利用拡大が急務である。平板型太陽熱給湯器を用いた太陽熱エネルギー利用システムは、90℃以下の温水を得ることに適しており、例えば家庭用の給湯や暖房といった 35～60℃程度の低温熱需要に適用することができる。また、2009 年度における世帯当たりエネルギー消費量(自家用車除く)の内訳をみると、給湯用途が 28.7%、暖房用途が 25.1%であり、合計で 53.8%と全消費量の過半を占めていることから、導入ポテンシャルの

高さを確認することができる。

しかし、1970～80 年代以降、我が国の太陽熱利用機器の市場は縮小しており、太陽熱エネルギーの利用拡大のためには、経済的なインセンティブが重要といえる。家庭用太陽熱利用システムの導入を対象とした支援制度の例として、2011 年 1 月に住宅エコポイント(その後、復興支援・住宅エコポイントに変更)制度の対象に強制循環型太陽熱利用システムが追加された。また東京都を始め、複数の地方自治体で太陽熱利用システムへの設置補助制度が提供されている。しかし、これら補助金として初期投資への一部支援を行う施策は、対象件数に制限があり大規模な普及拡大が見込み難いこと、また補助金の打ち切りにより再び市場が低迷する可能性があること、などの懸念がある。そこで、より長期的な市場サポートのしくみとして、グリーンエネルギー証書が注目されている。

我が国におけるグリーンエネルギー認証制度は、2001 年に風力発電を皮切りに民間主導のグリーン電力認証制度としてスタートした。その後バイオマス発電、太陽光発電、地熱発電

*1 名城大学理工学部准教授

(〒468-8502 名古屋市中天白区塩釜口 1-501)

E-mail : yoshi@meijo-u.ac.jp

*2 日本環境技研株式会社

*3 工学院大学名誉教授

*4 名古屋大学環境学研究科教授

*5 東京都市大学都市生活学部教授

(原稿受付:2014 年 2 月 19 日)

の認定も加わり、2010 年度末におけるグリーン電力の設備認定件数は 898 件、設備容量は 540,082kW に達している²⁾。電力証書に続き、現在までに、太陽熱、バイオマス熱、雪氷熱などのグリーン熱の認証制度も始まっている。太陽熱に関しては、2010年10月に埼玉県越谷市の集合住宅で初めて設備認定を受けたが、その後認定件数は伸び悩んでいる。

太陽熱のグリーン熱認証が進まない一つの要因に、計量の問題がある。比較的計量が容易な電力と異なり、熱量の計量には大きな設備投資が必要となる。また太陽光発電のシステム価格に比較して太陽熱利用システム価格は安価であるため、相対的にシステム全体に占める計量費の割合が大きくなり、積極的な認証取得に繋がらない点が指摘されている。同様の理由で、グリーン熱の認証制度は、世界的にみてもあまり事例は多くない。そのような中、豪州では2000年に制定された再生可能エネルギー法に関連し、家庭用電気温水器(電熱式)から太陽熱温水器またはヒートポンプ式給湯器への更新を図る中で、再生可能エネルギー証書(RECs)を活用し、太陽熱給湯の導入件数を増やしている³⁾。太陽熱の計量は、TRNSYS⁴⁾によるコンピュータシミュレーションを用いた見なし計量を採用しているため、導入家庭が計量のための経済的負担を負うことはない。

以上の背景より、本研究では、我が国における太陽熱グリーン熱証書の市場を拡大し、太陽熱利用システムの普及拡大を目指すために、見なし計量の技術確立を図ることを目的とする。第一報として、すでに海外での見なし計量への活用実績がある TRNSYS と、宇田川らにより開発され日本語での入力設定が可能であるなど利便性に優れた EESLISM^{5,6)}を対象に、標準的な太陽熱給湯システムにおける計算精度を検証する。比較のために、茨城県つくば市に設置された戸建住宅用給湯システムの実測結果を用いる。

2. 対象システムと実測概要

検討対象は、茨城県つくば市の建築研究所内の実験住棟屋上に設置された強制循環型太陽熱給湯システムである。システムの概要を Fig.1 に示す。2.01m²/枚(総面積)の平板型集熱器 2 枚が直列に接続され、設置方位を真南、傾斜角度を 30° として実験住棟の屋上に設置されている。集熱媒体はプロピレングリコール 50%水溶液である。Fig.2 に JIS A 4112⁷⁾の屋外暴露試験に基づく集熱性能特性式を示す。 $\Delta \theta$ は集熱平均温度と外気温度の差[K]、 I は集熱面全日射量[W/m²]を表す。本性能試験時の平均集熱媒体流量は約 63kg/h・m²であった。貯湯槽は外形寸法が H1900×W450×D650mm、容量が 200 リットルのコイル内蔵型円柱型貯湯槽で、周囲には GW12K(厚さ 40mm)の断熱が施されている。集熱器と貯湯槽の間の集熱配管は、往復約 25m、外径 17.3mm の架橋ポリエチレン管製で、電子線架橋ポリオレフィンフォームの断熱が厚さ約 5mm で施されている。集熱ポンプの定格動力は 80W で、貯湯槽内温度と集熱器出口温度との差温により、温度差 6°C 以上で稼働、3°C 以下で停止する自動制御が行われている。

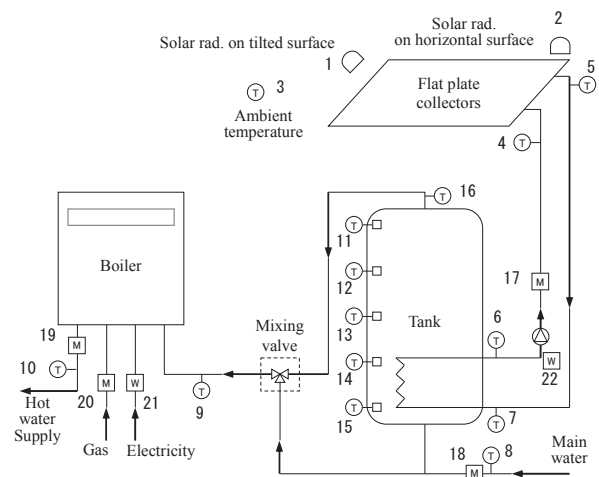


Fig.1 System overview

Table 1 Measurement points

No.	Parameter	No.	Parameter
1	Total radiation on tilted surface	13	Tank surface temperature 3
2	Total radiation on horizontal	14	Tank surface temperature 4
3	Ambient temperature	15	Tank surface temperature 5
4	Collector inlet temperature	16	Tank outlet temperature
5	Collector outlet temperature	17	Brine flow rate
6	Tank HX outlet temperature	18	Main water flow rate
7	Tank HX inlet temperature	19	Hot water supply flow rate
8	Main water temperature	20	Gas consumption rate
9	Mixing valve outlet temperature	21	Electrical energy consumption rate for boiler
10	Hot water supply temperature	22	Electrical energy consumption rate for pump and tank unit
11	Tank surface temperature 1		
12	Tank surface temperature 2		

追焚型の補助熱源として、定格能力 41.9kW、定格効率 95% の潜熱回収型都市ガスボイラが設置されている。貯湯温度が設定温度よりも高い場合は、ブレンダーユニットで貯湯槽の温水と給水とを混合して温度調整を行う。

模擬給湯負荷として、平日・休日の別、また在宅状況を考慮した、修正 M1 モード(4 人負荷)⁸⁾の 6 種類の負荷パターンが 6 日で一サイクルとなるように与えられた。各パターンの一日あたりの給湯量は、240、380、380、470、550、及び 650 リットルで、朝(7 時前後)、昼(12 時前後)、夜間(18~22 時頃)の 3 つの給湯時間帯のうち、いずれの負荷パターンでも夜間の需要が最も多い。補助熱源の出湯設定温度は 42°C とした。

計測点の概要を Fig.1 と Table1 に示す。測定点番号はそれぞれで対応している。また、すべての測定項目は、2 秒間隔で連続記録されている。

シミュレーションとの比較検証を行うために、2010 年 12/6~12/12 の 7 日間を冬期代表期間、2011 年 7/23~7/28 の 6 日間を夏期代表期間、2011 年 10/29~11/4 の 7 日間を秋期代表期間として選定する。冬期代表期間は最低外気温度が 2.1°C、最高外気温度が 16.1°C で、一日目と二日目はやや日射が少なく、三日目以降は晴天であった。夏期代表期間は、最低外気温度が 16.9°C、最高外気温度が 33.2°C で、最終日の日射量がやや少なかった。秋期代表期間は、最低外気温度が 7.5°C、最高外気温度が 23.4°C で、二日目と七日目が薄曇りで日射量がやや少なく、六日目は曇天で日射量が非常に少なかった。

3. シミュレーションの概要と評価指標

3.1 計算条件

TRNSYS と EESLISM の検討に共通する計算条件を Table2 にまとめる。集熱媒体であるプロピレングリコール 50%水溶液は、温度により物性値が変化するが、シミュレーションにおいては 40°Cにおける値を、一定値として採用した。給水温度は、各代表期間の実測における平均値を、各代表期間において一定のものとして与えた。給湯温度は、実測において給湯設定温度とのかい離がみられたため、実測における平均値を一定値で与えた。給湯流量は、実験と同様に修正 M1 モード(4 人負荷)の流量スケジュールを、1 時間毎の値として与えた。蓄熱槽の温度成層数は 5 層で、熱交換コイルは最下層に位置しているとした。集熱ポンプの電力消費は、稼働時に常に 71W(実測におけるポンプ稼働時の平均消費電力)が消費されるとし、電力消費量の 75%が排熱として集熱媒体を加温するものとした。なお、補助熱源等の補機電力はモデル化のための十分なデータが得られなかったため、計算モデルは構築せず、計算におけるシステム評価では実測値を用いた。

TRNSYS における検討では TRNSYS17 の標準ライブラリに加え、TESS library⁹⁾を使用した。集熱器には、熱容量を持つ非常定平板型集熱器モデル(Type539)を、分割数 5 として用いた。ガラスカバーの直達日射入射角依存特性は不明であったため、標準的な性能を有すると仮定した。集熱配管は、非常定集熱配管モデル(Type31)を用いた。計算では往還の配管の外周はすべて外気に暴露されていると仮定した。蓄熱槽は、シリンダ型熱交換コイル内蔵蓄熱槽(Tye534)を用いた。この計算モデルでは、内蔵コイル近傍の Nu 数と Ra 数からコイル内外表面の熱伝達率を決定するため、入力データとして槽とコイルの物理的形狀等を与えた。TRNSYS では計算時間間隔は任意に設定できるが、ここでは 0.1 時間とした。

EESLISM における検討のシステム構成機器は、集熱器、内蔵熱交換器付蓄熱槽、ボイラ、集熱配管、及び給湯配管であり、システム経路は集熱経路と給湯経路の 2 つである。これらシステム構成機器の基本式は、集熱器、集熱配管及び給湯配管は定常計算による熱収支式、蓄熱槽は完全混合槽モデルに後退差分を用いて熱収支式を導いている¹⁰⁾。また、ボイラは、給湯経路のボイラ通過水量、入口温度、設定出口温度から熱負荷すなわち必要加熱量の関係式を熱収支式としている⁶⁾。集熱経路、給湯経路それぞれに接続される各システム構成機器についての熱収支式から入口、出口温度を未知数とする連立方程式を構築、解くことにより、システム構成機器各部の温度を求めてゆき、その後、集熱量や利用熱量など必要な熱量計算を行う^{6,11)}。EESLISM では液体集熱媒体として水が設定されているので、熱容量流量が等しくなるように定格集熱流量を調整することで対応した。ガラスカバーの直達日射入射角依存特性^{6,8)}には 3mm 透明板ガラスの特性が採用されている。蓄熱槽内蔵熱交換コイルは、標準的な熱交換性能を有するものとして、熱交換器有効率を 0.3 とした。EESLISM の計算時間間隔は 1 分~1 時間を選択できるが、ここでは 1 時間とした。

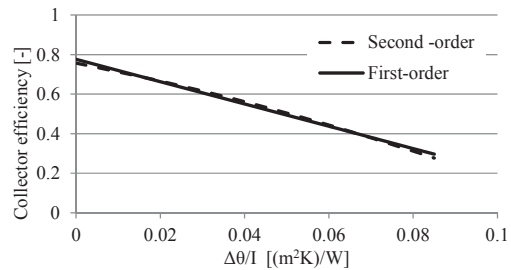


Fig.2 Collector efficiency curve (JIS A 4112)

Table 2 Simulation conditions and parameters

Period	Winter	Summer	Fall
Date	6-12 Dec. 2010	23-28 Jul. 2011	29Oct.-4Nov. 2011
Weather data	Field measurement data with radiation modification (1hour interval)		
Main water temperature	12.4 degC	24.8 degC	17.2 degC
Hot water temperature	37.6 degC	38.4 degC	37.8 degC
Hot water flowrate	Modified M1 mode (4 people)		
Flat plate collectors	Slope : 30deg Azimuth : South Total surface area : 4.02 m ² (number of collectors : 2) Media : Aqueous propylene glycol solutions (50%) Specific heat 3.6kJ/kgK, Density 1041kg/m ³ Efficiency : $\eta = 0.776 - 5.638\Delta\theta/l$		
Hot water tank	Volume : 0.2 m ³ Top heat loss coefficient : 1.68W/K Side heat loss coefficient : 0.28W/K Bottom heat loss coefficient : 0.28W/K		
Auxiliary heat source	Gas boiler with latent heat recovery system Nominal capacity : 41,900W		
Efficiency	82.0%	83.9%	83.2%
Pump	Rated flowrate : 312.3 kg/h Rated power : 71W Moter heat loss fraction : 75%		
Pipes	Length : 12.5m×2 Heat loss coefficient : 0.2W/mK		

【記号】 I : 集熱面日射量 [W/m²], η : 集熱効率 [-]
 $\Delta\theta$: 集熱平均温度と外気温度の差 [K]

3.2 日射データの補正

気象条件として、冬期代表期間では水平全天日射量と集熱面全日射量、外気温度を実測の時間平均値として 1 時間毎に与えた。夏期及び秋期の代表期間では、冬期代表期間の気象要素に水平面散乱日射量を追加した。但し、日射量の実測結果を分析する過程で、集熱面日射量を測定している日射計の出力特性が経年劣化していることがわかったため、2012 年 3 月に校正済みの日射計を追加設置した。この新しい日射計の出力を用いて、当初より設置してあった日射計の出力の校正定数を求め、2011 年 1 月から線形に誤差が拡大したと仮定して、補正作業を行った。本報告では、この補正後の集熱面日射量を実測値と表記する。

集熱面日射量の直散分離には、冬期代表期間においては TRNSYS では Reindl の式を、EESLISM では宇田川の式を用いて、水平面日射量から集熱面日射量の直達日射量と散乱日

射量の比を計算し、実測の集熱面日射量の値を案分して与えた。夏期及び秋期代表期間では、測定項目が追加されたため、水平面全天日射量と水平面散乱日射量から集熱面直達日射量を算出し、実測集熱面日射量と、算出された集熱面直達日射量との差を集熱面散乱日射量として求めた。

3.3 評価指標

まず、見なし計量に必須の諸量として、太陽熱利用量、集熱ポンプの電力消費量、及び1次エネルギー消費量に焦点を当てる。また、システムの挙動の把握のため、集熱量、集熱効率、各種温度推移にも着目する。さらに、システム性能の評価指標として、1次エネルギー換算のシステム COP (SCOP) [-]を用いる。ここで SCOP は、都市ガス $1\text{m}^3(\text{N})$ あたりの1次エネルギー量を $45,000\text{kJ}$ 、電力 1Wh あたりの1次エネルギー量を 9.76kJ として、式(1)で求める。

$$SCOP = \frac{Q_{load}}{45000G_b + 9.76(E_b + E_p)} \quad (1)$$

ここで、

Q_{load} : 実測の各代表期間における積算給湯負荷熱量 [kJ]

G_b : 補助熱源の都市ガス消費量 [$\text{m}^3(\text{N})$]

E_b : 補助熱源の補機電力消費量 [Wh]

E_p : 集熱ポンプの電力消費量 [Wh]

4. 実測結果と計算結果の比較

Fig.4~20に冬期代表期間、Fig.21~36に夏期代表期間、およびFig.37~51に秋期代表期間の結果をそれぞれ示す。また、Table3に集熱量と太陽熱利用量を、実測値に対する各計算結果の割合とともに示す。同様に、Table4に一次エネルギー消費量とSCOPの平均値を示す。なお、EESLISMでは集熱器、配管の計算モデルは定常式であるので、集熱ポンプ停止時の集熱出入口温度は計算されない。このため、Fig.11、Fig.12、Fig.28、Fig.29、Fig.44およびFig.45にはポンプ停止時の温度結果は記載していない。

4.1 冬期代表期間の結果

集熱量(Fig.4)と集熱効率(Fig.8)の推移をみると、いずれの計算値とも、実測値とよく一致していることがわかる。日積算集熱量(Fig.13)の差はTRNSYSで95.6~99.5%(平均97.5%)、EESLISMで91.0~97.9%(平均94.5%)の範囲であった。太陽熱利用量(Fig.5、Fig.14)も、TRNSYSで94.7~106.0%(平均99.5%)、EESLISMで91.7~106.5%(平均97.5%)の範囲であり、よく一致している。蓄熱槽最上部層の温度推移(Fig.9)より、12/8と12/9の夜間に、EESLISMが実測値よりも5~8°C程度高くなっていることがわかる。蓄熱槽最下部層での温度推移(Fig.10)は、日中にTRNSYSとEESLISMとのいずれの計算結果も実測値よりも1~3°C程度高めに推移したが、概ねよく一致しているといえる。集熱器の入口温度(Fig.11)において、とくに高温での集熱運転時に、EESLISMの結果が実測やTRNSYSの結果よりもやや高い温度で推移する傾向が確認できる。この原因としてまず、TRNSYSの熱交換器モデルが自然対流による対流熱伝達の挙動を考慮しているのに対し、EESLISMの熱

交換モデルでは、熱交換器有効率を固定値として与えていることが挙げられる。さらに、非常集熱器モデルを採用したTRNSYSでは集熱開始時の立ち上がりの時間遅れを再現しているのに対し、定常集熱器モデルを用いたEESLISMでは速やかに集熱温度が上昇していることも一因といえる。

都市ガスの消費量(Fig.6)では瞬間的な不一致がみられるものの、日積算(Fig.15)ではTRNSYSで90.8~108.2%(平均101.8%)、EESLISMで98.7~122.8%(平均107.4%)と実測によく一致した。瞬間的な不一致については、Fig.19に示す出湯流量プロファイルの通り、実証試験では実利用に近い秒刻みの出湯がなされているが、計算では、EESLISMの計算時間間隔を1時間としたことから、1時間負荷として与えていることが原因の一つであると考えられる。また、熱源の熱容量や時定数等を考慮していないことも、熱源稼働および停止直後の時間帯において影響があると考えられる。集熱ポンプの電力消費量(Fig.7、Fig.16)は、各代表日においてTRNSYSで84.7~96.5%(平均92.4%)、EESLISMで79.4~109.6%(平均91.1%)であり、平均値では近い結果であるが、EESLISMで代表日による変動がやや大きいことがわかる。関連して、Fig.20に代表日初日の集熱ポンプの消費電力量の1時間推移を示す。これより、TRNSYSでは計算時間間隔が0.1時間と短いため、実測に近い集熱ポンプの運転時間が再現できているが、計算時間間隔を1時間としたEESLISMでは、集熱の開始時と終了時の稼働・停止の状態が、当該日の結果に比較的大きく影響していることが確認できる。代表期間平均(Table3、Table4)でみると、1次エネルギー消費量は、TRNSYSで実測の100.6%と非常によく一致しており、EESLISMでも105.2%と誤差はごく小さかった。SCOPは、実測で1.25、TRNSYSで1.24、EESLISMで1.18であった。

4.2 夏期代表期間の結果

夏期代表期間の特徴として、集熱量(Fig.21)で実測値がいずれの計算値よりも二割程度高いことが挙げられる。日積算集熱量(Fig.30)では、実測値に対し、TRNSYSで77.2~84.1%(平均81.3%)、EESLISMで74.5~85.3%(平均79.8%)であった。集熱効率(Fig.25)においても、二つの計算結果と実測値に15ポイント前後の大きな離れがあった。そこで、Fig.2に示すメーカー提示の集熱効率式から推定集熱量を求め、実測または計算結果の集熱量と比較した(Fig.36)。ここで、実測のプロットに対しては、集熱効率式に含まれる①集熱入口温度、②集熱出口温度、③日射量、④外気温度のすべてに実測値を代入して得た集熱効率に、集熱面積と日射量とを乗じて得た値を推定集熱量(X軸)とした。Y軸は実測された集熱量である。また、TRNSYSとEESLISMのプロットに対しては、①と②にはシミュレーションによる計算値を、③と④には実測値を代入して得た集熱効率に、集熱面積と日射量とを乗じて得た値を推定集熱量(X軸)とした。Y軸は各シミュレーションによる計算集熱量である。Fig.36より、TRNSYSとEESLISMのいずれにおいても推定集熱量と計算集熱量とは同等であるのに対し、実測集熱量は推定集熱量よりも大きいことがわかる。このことより、今回対象とした集熱器は、メーカー提示の集熱特性式が実際の夏期

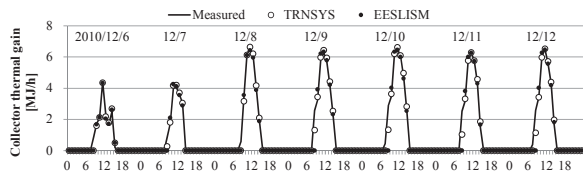


Fig.4 Collector thermal heat gain (2010 winter)

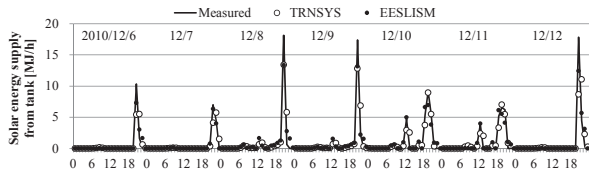


Fig.5 Solar energy supply from tank (2010 winter)

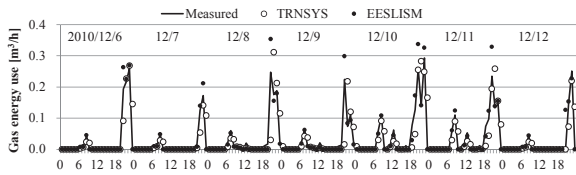


Fig.6 Gas energy use (2010 winter)

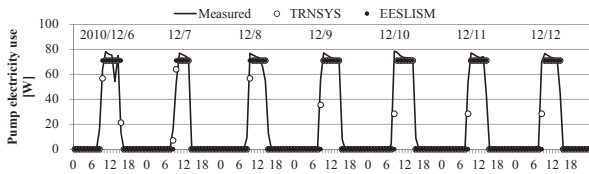


Fig.7 Pump electricity use (2010 winter)

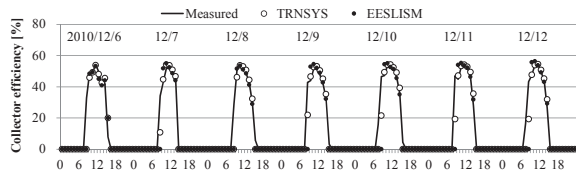


Fig.8 Collector Efficiency (2010 winter)

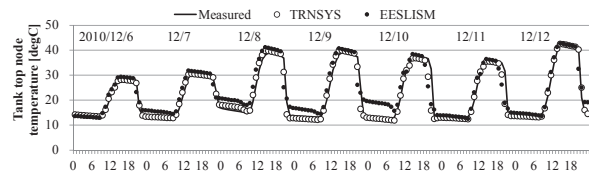


Fig.9 Tank top node temperature (2010 winter)

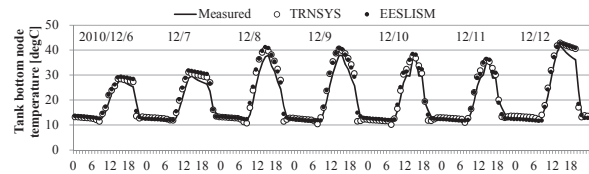


Fig.10 Tank bottom node temperature (2010 winter)

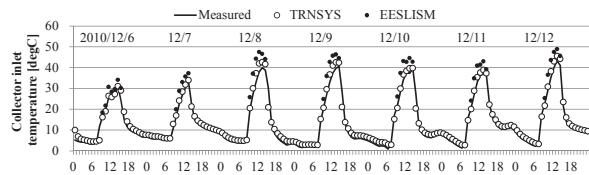


Fig.11 Collector inlet temperature (2010 winter)

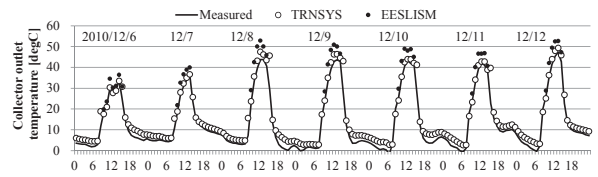


Fig.12 Collector outlet temperature (2010 winter)

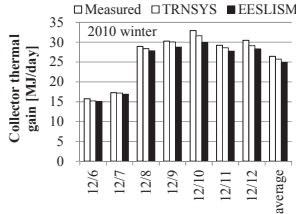


Fig.13 Collector thermal gain

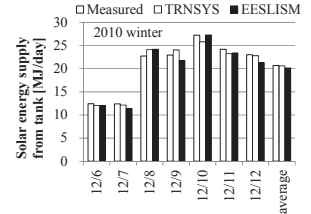


Fig.14 Hot water supply from tank

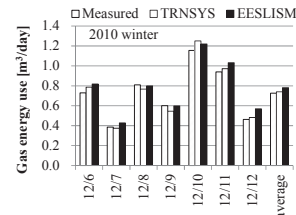


Fig.15 Gas energy use

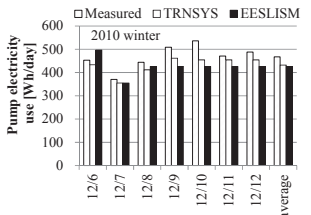


Fig.16 Pump electricity use

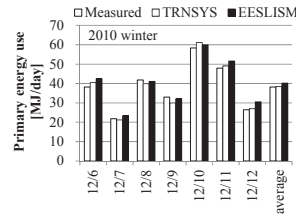


Fig.17 Primary energy use

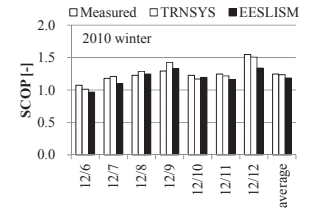


Fig.18 SCOP

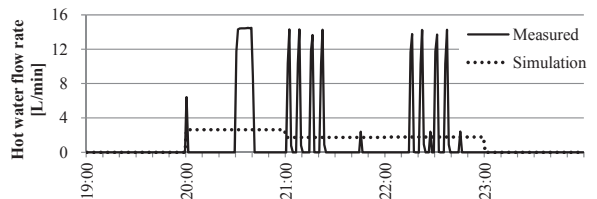


Fig.19 Hot water flow rate (2010/12/6 19:00-24:00)

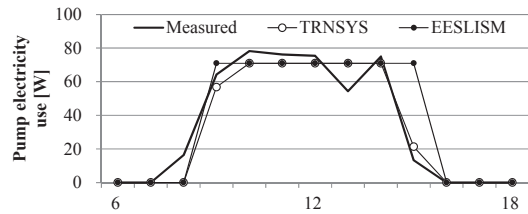


Fig.20 Electricity for pump (2010/12/6 6:00-18:00)

環境下における特性を十分に再現するものではなかったといえる。ただし、今回のように特性把握時の試験条件よりも周囲温度が高く、外気風速が小さい夏期の外界環境において集熱効率が向上するケースは、経験的にも知られている。計算においてこの現象を再現するためには、JIS で定められたパラメータ群よりも多くの機器情報が必要となり、見なし計量としての活用の利便性が低下すること、また計算が実測よりも低い性能で算出するため見なし計量としては安全側であることなどを鑑みる

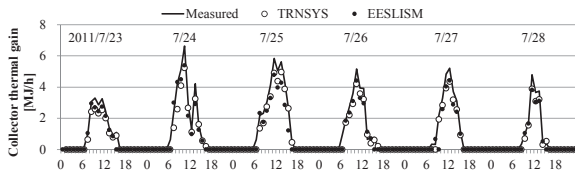


Fig.21 Collector thermal heat gain (2011 summer)

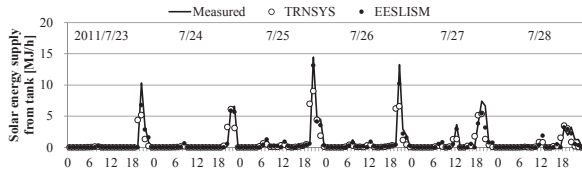


Fig.22 Solar energy supply from tank (2011 summer)

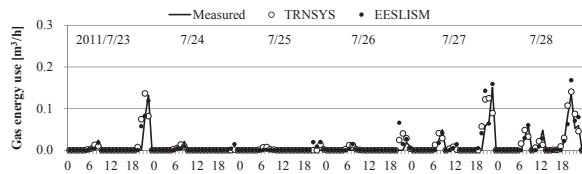


Fig.23 Gas energy use (2011 summer)

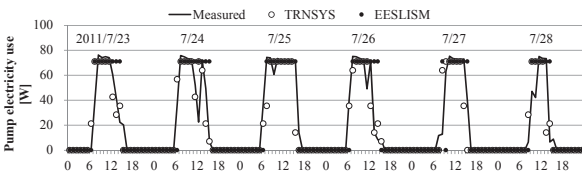


Fig.24 Pump electricity use (2011 summer)

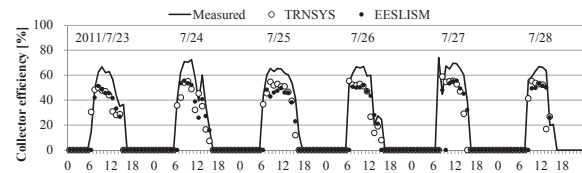


Fig.25 Collector Efficiency (2011 summer)

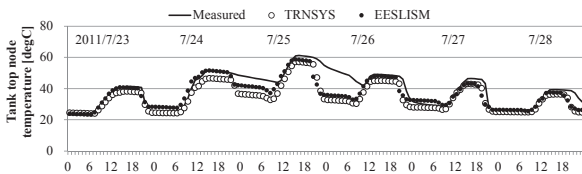


Fig.26 Tank top node temperature (2011 summer)

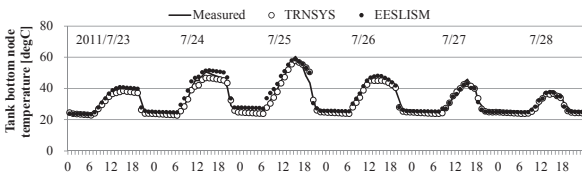


Fig.27 Tank bottom node temperature (2011 summer)

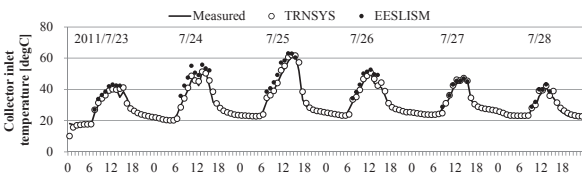


Fig.28 Collector inlet temperature (2011 summer)

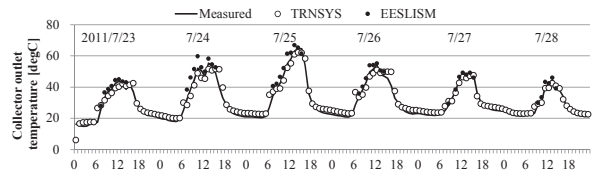


Fig.29 Collector outlet temperature (2011 summer)

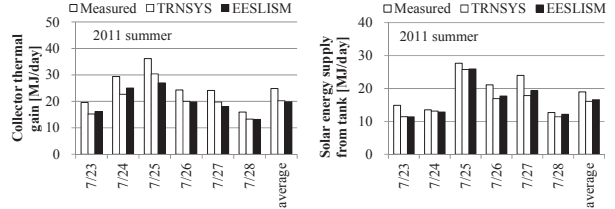


Fig.30 Collector thermal gain Fig.31 Hot water supply from tank

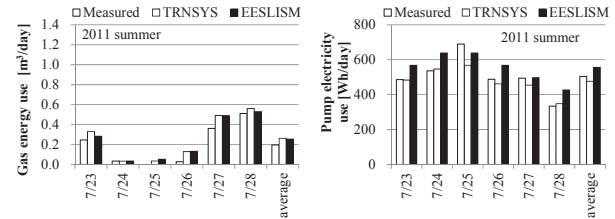


Fig.32 Gas energy use Fig.33 Pump electricity use

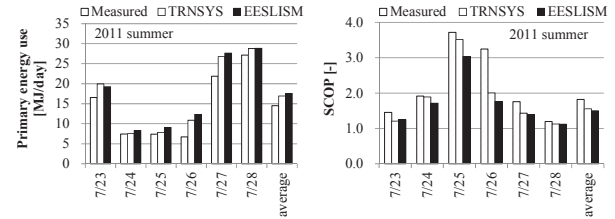


Fig.34 Primary energy use Fig.35 SCOP

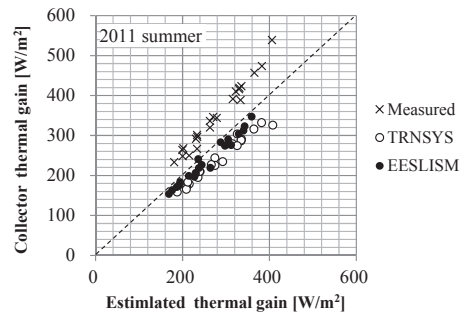


Fig.36 Comparison with Estimated thermal gain from the based efficiency formula

と、受容すべき範囲といえる。

一方、太陽熱利用量(Fig.22, Fig.31)においては、日積算結果はTRNSYSで実測の74.4~97.5%(平均84.8%)、EESLISMで76.5~96.1%(平均87.4%)と、前述の集熱量の差に比較して計算と実測との差がわずかに縮小された。蓄熱槽最上部層(Fig.26)、蓄熱槽最下部層(Fig.27)の温度推移をみると、最上部層温度に前述の集熱量の差が顕在化しており、とくに7/24と7/25の夜間、つまり残蓄の影響を受ける時間帯での差が確認できる。

補助熱源の都市ガス消費量推移(Fig.23, Fig.32)は、実測値に対して、TRNSYSで平均133.6%、EESLISMで平均129.1%

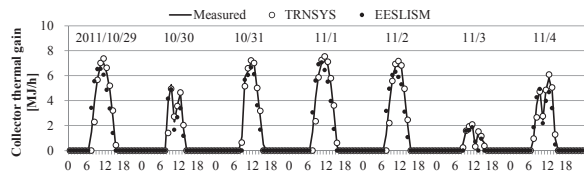


Fig.37 Collector thermal heat gain (2011 fall)

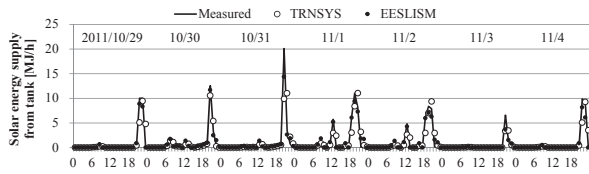


Fig.38 Solar energy supply from tank (2011 fall)

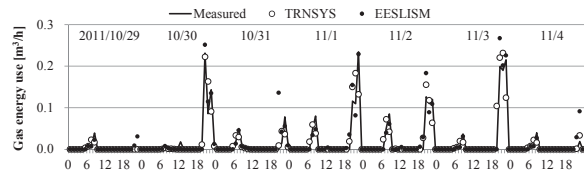


Fig.39 Gas energy use (2011 fall)

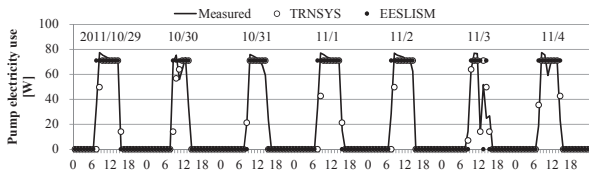


Fig.40 Pump electricity use (2011 fall)

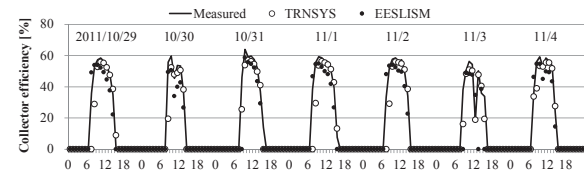


Fig.41 Collector Efficiency (2011 fall)

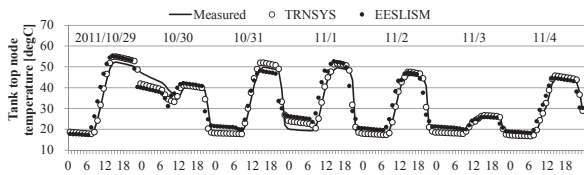


Fig.42 Tank top node temperature (2011 fall)

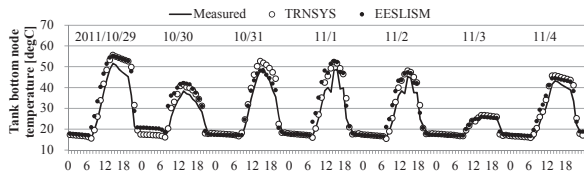


Fig.43 Tank bottom node temperature (2011 fall)

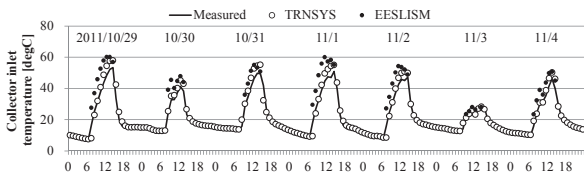


Fig.44 Collector inlet temperature (2011 fall)

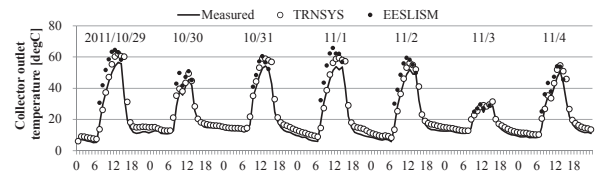


Fig.45 Collector outlet temperature (2011 fall)

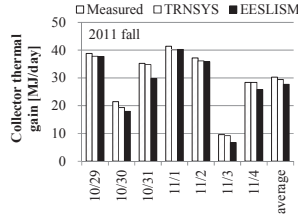


Fig.46 Collector thermal gain

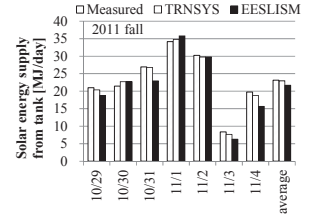


Fig.47 Hot water supply from tank

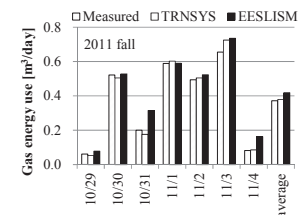


Fig.48 Gas energy use

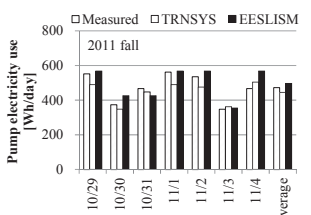


Fig.49 Pump electricity use

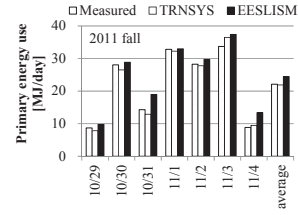


Fig.50 Primary energy use

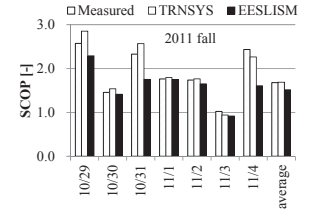


Fig.51 SCOP

Table 3 Collector thermal gain and Solar energy supply from Tank

	Collector thermal gain [kJ/day]			Solar energy supply from tank [kJ/day]		
	Measured	TRNSYS	EESLISM	Measured	TRNSYS	EESLISM
2010 winter	26407	25738 (97.5%)	24942 (94.5%)	20702	20591 (99.5%)	20181 (97.5%)
2011 summer	24897	20229 (81.3%)	19864 (79.8%)	18978	16096 (84.8%)	16582 (87.4%)
2011 fall	30295	29398 (97.0%)	27730 (91.5%)	23125	22982 (99.4%)	21706 (93.9%)

Table 4 Primary energy use and SCOP

	Primary energy use [kJ/day]			SCOP [-]		
	Measured	TRNSYS	EESLISM	Measured	TRNSYS	EESLISM
2010 winter	38155	38401 (100.6%)	40129 (105.2%)	1.25	1.24	1.18
2011 summer	14519	16955 (116.8%)	17572 (121.0%)	1.82	1.56	1.50
2011 fall	22076	21901 (99.2%)	24436 (110.7%)	1.68	1.69	1.52

と大きい結果となった。前述のとおり、夏期代表期間の太陽熱利用量が TRNSYS で約 15%、EESLISM で約 13% 小さかったことが影響していると考えられるが、都市ガスの消費量の誤差はこの差よりも大きいため、前段落で言及した蓄熱槽最上部層における熱損失の影響もあると考えられる。集熱ポンプの電力消費量 (Fig.24, Fig.33) は、TRNSYS は実測の 82.4~104.3% (平均 94.5%)、EESLISM は 92.7 ~127.7% (平均 110.2%) であった。前述の集熱量向上は、集熱時間の延長よりも、主として集熱効率の向上に起因していることが再確認できた。1 次エネルギー消費量 (Fig.34) は、TRNSYS で実測の 116.8%、EESLISM で 121.0% であり、メーカー提示特性よりも実際の集熱器の集熱効率が高かった影響により、いずれの計算値も実測値に対し 15~20 ポイント程度大きい結果となった。SCOP は、実測で 1.82、TRNSYS で 1.56、EESLISM で 1.50 であった。

4.3 秋期代表期間の結果

集熱量 (Fig.37) の時間推移はいずれの計算結果も実測値によく一致している。集熱量の日積算値 (Fig.46) では TRNSYS で実測の 89.9~99.8% (平均 97.0%)、EESLISM で 70.5~97.3% (平均 91.5%) であった。ただし、11/3 は日射の変動が大きく、集熱ポンプの稼働と停止が頻繁に行われたことで、EESLISM での集熱量がやや少なく算出されている。集熱効率の推移 (Fig.41) をみても、いずれの計算結果も実測結果によく一致していることがわかる。太陽熱利用量 (Fig.38, Fig.47) でも、TRNSYS で 91.7~105.9% (99.4%)、EESLISM で 74.9~106.0% (93.9%) と、よく一致している。蓄熱槽の最上部層の温度推移 (Fig.42) を確認すると、代表日初日の夜間において、実測での残蓄による高めの推移が確認できる。蓄熱槽の最下部層の温度推移 (Fig.43) を見ると、代表期間のほとんどで両計算結果は実測値よりも 3~5°C 程度高く推移しており、この差が、集熱器の入口温度 (Fig.44) にも影響していることが確認できる。冬期代表期間にはこのような温度低下は確認できておらず、実測フィールドにおいて経年により、蓄熱槽最下部層分での熱損失が増大している可能性もある。都市ガスの消費量 (Fig.39, Fig.48) は、実測値に対して、代表日初日や最終日のように絶対量がごく小さいときでは差があるものの、期間平均では、TRNSYS で 102.0%、EESLISM で 112.9% と概ねよく一致した。また、集熱ポンプの電力消費量 (Fig.40, Fig.49) も、実測値に対して、TRNSYS で 94.2%、EESLISM で 105.2% と、妥当な精度を確認した。期間全体での 1 次エネルギー消費量は、TRNSYS で 99.2%、EESLISM では 110.7% であった。SCOP は実測で 1.68、TRNSYS で 1.69、EESLISM で 1.52 であった。

5. まとめ

太陽熱利用システムの普及拡大を目指すために、見なし計量の技術確立を図ることが求められている。本報告では、見なし計量への活用実績がある TRNSYS と、我が国における利便性に優れた EESLISM を対象に、住宅用太陽熱給湯システムの計算精度を、茨城県つくば市における実証試験データと比較することで検証した。ここで、2010年12/6~12/12の7日間を冬期代表期間、2011年7/23~7/28の6日間を夏期代表期間、

2011年10/29~11/4を秋期代表期間とした。対象とする給湯負荷には、修正 M1 モード (4 人負荷) を用いた。

シミュレーションを用いた見なし計量において精度の担保が必要な諸量として、太陽熱利用量、集熱ポンプ電力消費量がある。太陽熱利用量の実測値に対する、冬期、夏期、秋期代表期間の計算結果は、それぞれ、TRNSYS で 99.5%、84.8%、99.4% で、EESLISM で 97.5%、87.4%、93.9% であった。同じく集熱ポンプの電力消費量は、TRNSYS で 92.4%、94.5%、94.2% で、EESLISM で 91.1%、110.2%、105.2% であった。いずれの計算結果も、誤差はほぼ ±15% 以内に収まっており、見なし計量としての利用に十分な精度を有することを確認した。

また実測結果との比較考察より、夏期代表期間において、実測の集熱量が、JISA4112 の屋外試験に基づくメーカー提示式よりもかなり大きくなっていることがわかった。ただし、既往の報告より、この傾向はどの集熱器に対しても確認できるわけではないこと、またシミュレーションでは安全側として機能する (計算で性能を過大評価はしない) ことから、見なし計量の精度検証としては問題点とはならない。また、期間に応じた、より正確な集熱器の性能情報が提供されることで、各シミュレーションの再現精度も向上すると考えられる。

【謝辞】

本研究を進めるにあたり、ソーラーエネルギー利用推進フォーラムの関係者の方々に多大なるご協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁:平成 22 年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2011), 第 212-2-4, 2011.10
- 2) 環境エネルギー政策研究所:自然エネルギー白書 2012, p.147-151, 2012.3
- 3) 「第3回ソーラーエネルギー利用推進フォーラムシンポジウム/ソーラーエネルギーが果たす役割」配布資料, 2011.9.26
- 4) TRNSYS17 Documentation, SEL/CSTB/TRANSOLAR/ TESS, 2010.7
- 5) 建築熱環境・エネルギーシミュレーションプログラム EESLISM 改訂版 7.2, 工学院大学 宇田川研究室, 2013.10
- 6) 宇田川, 佐藤: EESLISM の特徴と利用法, 空気調和・衛生工学会シンポジウム熱負荷空調ソフトウェアの現状と将来, pp.55-68, 2004.3
- 7) JIS A 4112:2011, 太陽集熱器, 日本規格協会
- 8) 宇梶ら: 自立循環型住宅の開発にともなう実証実験に関する研究 (第六報) 生活行動に伴うエネルギー消費検証用基本スケジュール, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, p.212-215, 2004.9
- 9) TESS Component Library Package, Thermal Energy System Specialists, 2011
- 10) 宇田川: 建築環境学 2 第 15 章 太陽熱利用システム, pp.219-226, 丸善, 1993.2
- 11) 宇田川, 村田, 遠藤: 要素モデルによる太陽熱利用システムシミュレーション, 日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会講演論文集, pp.181-184, 1993.12