

水集熱式太陽熱暖房システムの簡易設計法に関する研究

第2報 簡易設計法の検証

Studies on Simplified Design Method for Water Based Solar Heating System
Part.2 Verification of Simplified Design Method

北野博亮¹
Hiroaki KITANO

相良和伸²
Kazunobu SAGARA

岩田 剛³
Takeshi IWATA

Abstract

In this paper, the simple design method for a water-based solar heating system presented in Part 1 of this study, is verified by numerical simulations. The numerical simulations were conducted with a heating load of a detached house for five months. The results of the simulations are summarized as follows: (1) the solar heating systems designed by using the simple design method are generally adequate from a view point of ratio between collector area and thermal energy storage capacity, (2) when the design target on solar fraction is less than about 0.6, the heating coil which is able to cover the heating load except for the load at the beginning of early morning heating operation is sufficient in point of its maximum heating capacity, (3) a linear relationship exists between the design condition of daily heating load and the solar fraction.

キーワード：太陽熱暖房，温度成層型蓄熱槽，設計手法

Key Words: Solar heating, Temperature-stratified thermal energy storage tank, Design method

1. はじめに

住宅におけるエネルギー消費に占める暖房エネルギーの割合は3割程度と大きいことから、太陽熱暖房システムの利用による省エネルギーが期待できる。しかしながら、一般に太陽熱暖房システムの初期投資額を節約できるエネルギー費で短期に償却することは容易ではない。したがって、住宅の暖房負荷や集熱器設置条件等に応じた最適設計は重要であると言える。

太陽熱利用システムの設計^{1) 2) 3)}では、暖房期間全体の太陽熱依存率等の期間性能を指標とし、設計したシステムの期間性能を f -chart法により求める方法やシミュレーションによる方法等があるが、設計パラメータの最適な組み合わせを得るためには、試行錯誤により検討する必要がある、煩雑な作業が必要となる。したがって住宅設計に携わる小規模な設計事務所では対応が難しく、合理的で簡易な設計手法が必要であると考えている。

筆者らは、空気集熱式太陽熱暖房システムについて、設計条件として代表的な一日を想定し、その一日に集熱し蓄熱した太陽熱によって、その日の暖房負荷を過不足なく処理できるシステムを設計目標とした簡易設計法^{4) 5)}を提案

した。また、設計条件としての一日の気象条件や暖房負荷条件と期間性能との関係をシステムシミュレーションにより明らかにし、設計者が目標とするシステムの太陽熱依存率から気象条件や暖房負荷条件を適切に選定すれば、期間性能を考慮した設計が可能であること⁶⁾を示した。

本研究は水集熱方式の太陽熱暖房システムを対象とした簡易設計手法の開発を目的としている。第1報⁷⁾では、温度成層型蓄熱槽を有する太陽熱暖房システムについて、蓄熱槽効率の点で最適な蓄熱槽容量の理論的検討を行い、集熱温度と集熱器単位面積当たりの最適蓄熱槽容量および一日の蓄熱量の関係を近似的に表す関係式を示した。また、これらの関係式を用いた簡易設計法を提案している。本論文(第2報)では、本簡易設計法の検証を目的として暖房期全体の長期シミュレーションを行い、本簡易設計法により決まる蓄熱槽容量と集熱器面積等のバランスの妥当性について検討するとともに、気象条件や暖房負荷条件と期間性能の関係について検討する。

2. 対象システムと簡易設計法の概要

Fig. 1 に本研究で対象とする水集熱式太陽熱暖房システムの概略図を示した。本システムは平板型集熱器、温度成層型蓄熱槽、ファンコイルユニットから構成され、集熱器面積、蓄熱槽容量、集熱流量、加熱コイルの流量、熱通過係数および風量を設計パラメータとみなしている。

*1 三重大学大学院工学研究科助教(〒514-8507 津市栗真町屋町1577) e-mail: kitano@arch.mie-u.ac.jp

*2 大阪大学大学院工学研究科教授

*3 三重大学大学院工学研究科技術専門員
(原稿受付：2013年2月27日)

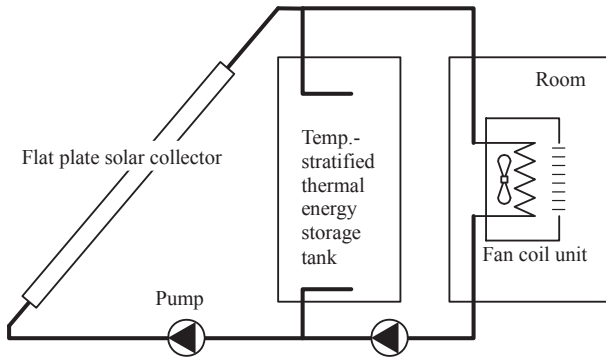


Fig. 1 Schematic diagram of solar heating system

図1 対象システムの概略図

Table 1 に、第 1 報⁷⁾ で提案した太陽熱暖房システムの簡易設計法をまとめる。本簡易設計法により、設計条件（暖房負荷、集熱器の特性、蓄熱槽の水深、集熱器面日射量、集熱設定温度、集熱時平均外気温度、加熱コイルの温水および空気の出入口温度）から、集熱器面積、蓄熱槽容量、集熱流量の制御上限値および加熱コイルの温水流量と風量の制御上限値および熱通過係数を以下の式(1)~(9)を用いて求めることができる。

$$R_{vw} = 0.988 - 5.01 \times 10^{-4} H_{st}^{-0.5} \frac{F'K(\theta_{col,v,set} - \theta_{amb})}{F'(\tau\alpha)_e I_{col,ave}} \times (\theta_{col,v,set} - \theta_{hww,o,dc} + 24.0) \left(\frac{1}{1 - R_{m0}} \right)^2 \quad \dots\dots(1)$$

$$I_{col} > \frac{F'K \left(\frac{\theta_{col,v,set} + \theta_{hww,o,dc}}{2} - \theta_{amb} \right)}{F'(\tau\alpha)_e} \quad \dots\dots(2)$$

$$A_{col} = \frac{Q_h}{R_{vw}} \left\{ F'(\tau\alpha)_e \int_{t_s}^{t_{ve}} I_{col} dt - \left(\frac{\theta_{col,v,set} + \theta_{hww,o,dc}}{2} - \theta_{amb} \right) F'K(t_{ve} - t_s) \right\}^{-1} \quad \dots\dots(3)$$

$$V_{opt} = \frac{1}{R_{vw}} \frac{Q_h}{c_w \rho_w (\theta_{col,v,set} - \theta_{hww,o,dc})} \quad \dots\dots(4)$$

$$F_{c,v,max} = \frac{A_{col}}{c_w \rho_w (\theta_{col,v,set} - \theta_{hww,o,dc})} \times \left\{ F'(\tau\alpha)_e I_{col,max} - F'K \left(\frac{\theta_{col,v,set} + \theta_{hww,o,dc}}{2} - \theta_{amb} \right) \right\} \quad \dots\dots(5)$$

$$F_{hwa,v,max} = \frac{1}{R_{vw}} \frac{q_{h,max}}{c_a \rho_a (\theta_{hwa,o,dc} - \theta_{hwa,i})} \quad \dots\dots(6)$$

$$F_{hww,v,max} = \frac{1}{R_{vw}} \frac{q_{h,max}}{c_w \rho_w (\theta_{hww,i,dc} - \theta_{hww,o,dc})} \quad \dots\dots(7)$$

$$\begin{cases} UA_{hex} = -\frac{c_{max} c_{min}}{c_{max} - c_{min}} \ln \left(\frac{1 - \varepsilon}{1 - \varepsilon \frac{c_{min}}{c_{max}}} \right) & (c_{min} \neq c_{max}) \\ UA_{hex} = c_{min} \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} & (c_{min} = c_{max}) \end{cases} \quad \dots\dots(8)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{R_{vw}} \frac{q_{h,max}}{c_{min} (\theta_{hww,i,dc} - \theta_{hwa,i})} \quad \dots\dots(9)$$

3. 簡易設計法の検証

既報（第 1 報⁷⁾ で提案した簡易設計法により設計した太陽熱暖房システムは、設計条件として設定した一日については、その日積算暖房負荷をその日に集熱した太陽熱によりほぼ賄うことができ、集熱器面積や蓄熱槽容量等のバ

Table 1 Summary of simplified design method for solar heating system

表 1 太陽熱暖房システムの簡易設計法（変流量水集熱方式）

		Heat transfer coefficient of heating coil, UA_{hex}					
		Upper control limit of hot water flow rate of heating coil, $F_{hww,v,max}$		Upper control limit of air flow rate of heating coil, $F_{hwa,v,max}$		Upper control limit of flow rate of solar collector, $F_{c,v,max}$	
		Volume of thermal energy storage tank, V_{opt}		Solar collector area, A_{col}			
Design conditions	Duration of solar heat collection in the day, $t_{ve} - t_s$	○					
	Correction factor, R_{vw}	○	○	○	○	○	○
	Heating load	○ ^{*3}	○ ^{*3}	○ ^{*1}	○ ^{*1}	○ ^{*1}	○ ^{*1}
	Water depth of thermal energy storage tank	○					
	Characteristics of solar collector	○	○	○	○		
	Solar radiation on solar collector	○ ^{*4}	○ ^{*2}	○ ^{*3}	○ ^{*1}		
	Set temperature of collector outlet	○	○	○	○		
	Initial dimensionless depth of mixed region R_{m0}	○					
	Mean ambient temp. during heat collection	○	○	○	○		
	Heating coil	Inlet hot water temp. (=set temp. collector outlet)					○
Outlet hot water temp. (=room temp. - 5)		○	○	○	○	○	○
Inlet air temp. (=room temp.)						○	○
Outlet air temp. (=inlet hot water temp. - 10)						○	○
Equations		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
						(7)	(8)
							(9)

○: necessary condition for calculation

Note *1: maximum value (W/m²), *2: instantaneous value (W/m²), *3: integrated value during heat collection (J), *4: mean during heat collection (W/m²)

ランスが適当であるといえるが、暖房期間全体に対しては、設計したシステムの妥当性が検証されていない。そこで、太陽熱暖房システムの暖房期間全体のシミュレーションを行うことにより、本簡易設計法の設計パラメータである蓄熱槽容量や加熱コイルの容量がシステムの期間性能へ与える影響を明らかにし、本簡易設計法により設計したシステムの妥当性について検討する。

3.1 シミュレーションのモデル

本研究では、集熱器以外の配管と蓄熱槽からの熱損失、ポンプやファンでの発熱や配管等での摩擦による熱取得が相殺されると仮定し、以下に示す集熱器のモデルと蓄熱槽の混合槽内モデルを用いて暖房期全体のシミュレーションを行った。

(1) 集熱器のモデル 本研究では、Hottel Whillier の集熱効率の一次の定義式³⁾に、集熱量と日射量(集熱器表面の入射全天日射量)の比で表される効率の式を代入した式(10)、式(11)を用いる。

$$F_{c,v} = \frac{F'(\tau\alpha)_e I_{col} - F'K \left(\frac{\theta_{col,v,set} + \theta_{col,i}}{2} - \theta_{amb} \right)}{c_w \rho_w (\theta_{col,v,set} - \theta_{col,i})} A_{col} \quad \dots\dots(10)$$

$$\theta_{col,v,o} = \left(c_w \rho_w \frac{F_{c,v,lim}}{A_{col}} + \frac{F'K}{2} \right) \left\{ \left(c_w \rho_w \frac{F_{c,v,lim}}{A_{col}} - \frac{F'K}{2} \right) \theta_{col,i} + F'(\tau\alpha)_e I_{col} + \theta_{amb} F'K \right\} \quad \dots\dots(11)$$

日射量や集熱器入口温度の与条件から集熱量を求めるためには、集熱器出口温度と集熱流量を求める必要がある。本研究では定温度集熱(変流量)を想定しているため、集熱器出口温度が設定値となる集熱流量を式(10)により求めることになる。なお、流量制御は集熱用ポンプの回転数制御によるものとし、制御可能な最小流量を本簡易設計法により求まる集熱最大流量の30%の値であるとした。そして、式(10)で求まる流量がこの制御範囲にないときは、最大または最小流量 $F_{c,v,lim}$ と式(11)から集熱器出口温度 $\theta_{col,v,o}$ を求めることとしている。なお、集熱器入口温度が集熱器出口設定温度よりも高くなる場合には、高温集熱による機器損傷を避けるため集熱を停止することとした。

(2) 蓄熱槽の槽内混合モデル 温度成層型蓄熱槽の槽内温度分布の計算には、流入温度および流量が変動する条件にも適用できる槽内混合モデル⁸⁾を用いた。このモデルでは鉛直方向の移流と拡散による熱移動と流入水と槽内水の混合を考慮している。このモデルを用いて蓄熱槽内の鉛直温度分布を求め、集熱器入口温度およびファンコイルの温水入口温度となる蓄熱槽からの取水温度を求めた。本モデルでは、流入水と槽内水が混合する領域の無次元深さを流入条件等に応じて式(12)の実験式により求めている。

$$R_m = R_{m0} + 0.5 t^* \quad \dots\dots(12)$$

$$R_{m0} = 0.8 Ar_{in}^{-0.5} \frac{d_{in}}{H_{st}} \quad \dots\dots(13)$$

Table 2 Design conditions of heating coil

表2 加熱コイルの設計条件

Inlet water temperature $\theta_{hww,i,dc}$	Preset temperature of collector outlet $\theta_{col,set}$
Outlet water temperature $\theta_{hww,o,dc}$	Control temperature of room +5 °C
Inlet air temperature $\theta_{hwa,i}$	Control temperature of room
Outlet air temperature $\theta_{hwa,o,dc}$	$\theta_{hww,i,dc} - 10$ °C
Exchanger heat duty q_{ex}	Maximum heating load $q_{h,max}$

$$Ar_{in} = g d_{in} \frac{1}{v_{in}^2} \frac{|\rho_{in} - \rho_{ref}|}{\rho_{ref}} \quad \dots\dots(14)$$

(3) 暖房運転の放熱量制御 暖房時の室温が一定に保たれるものとし、このときの暖房負荷を計算条件として与えている。この暖房負荷をファンコイルユニットからの放熱と補助暖房により賄うものとしている。なお、室への給気温度が室温+5°Cを下回る場合は放熱運転を停止することとした。

放熱用ポンプおよびファンも集熱用ポンプと同様に回転数制御がなされるとし、暖房負荷に応じた変流量制御とし、ファンコイルユニットの温水流量と風量のそれぞれの最大値および加熱コイルの熱通過係数は、Table 2 に示した設計条件の下で求めた。暖房時のシミュレーションにおいては、加熱コイルの入口水温 $\theta_{hww,i}$ と入口空気温度 $\theta_{hwa,i}$ 、暖房負荷 q_h および加熱コイルの熱通過係数 UA_{hex} から、加熱コイルの出口水温 $\theta_{hww,o,dc}$ が室温+5°Cに等しいとして、加熱コイルの温水流量 $F_{hww,w}$ と空気流量 $F_{hww,a}$ を求め、求めた流量が設計値の制御上限流量 ($F_{hww,w,max}$, $F_{hww,a,max}$) を超える場合には、流量が制御上限値に等しいとして、交換熱量(加熱コイルの放熱量) q_{ex} と加熱コイルの出口水温 $\theta_{hww,o}$ を求めることとした。また制御可能な最小流量を集熱用ポンプと同様に放熱流量および風量の上限値の30%とし、制御下限値を下回る場合は、その間の放熱量と暖房負荷が一致するように on-off 制御されることとして計算した。ファンコイルユニットの解析には、TRNSYS⁹⁾ で使用されているモデルを用いることとし、以下の式(15)から式(18)を用いた。

$$\theta_{hww,o} = \theta_{hww,i} - \varepsilon \frac{c_{min}}{c_w \rho_w F_{hw,w}} (\theta_{hww,i} - \theta_{hwa,i}) \quad \dots\dots(15)$$

$$q_{ex} = \varepsilon c_{min} (\theta_{hww,i} - \theta_{hwa,i}) \quad \dots\dots(16)$$

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{1 - \exp\left\{-\frac{UA_{hex}}{c_{min}} \left(1 - \frac{c_{min}}{c_{max}}\right)\right\}}{1 - \frac{c_{min}}{c_{max}} \exp\left\{-\frac{UA_{hex}}{c_{min}} \left(1 - \frac{c_{min}}{c_{max}}\right)\right\}} & (c_{min} \neq c_{max}) \\ \frac{UA_{hex}}{UA_{hex} + c_{min}} & (c_{min} = c_{max}) \end{cases} \quad \dots\dots(17)$$

$$q_{ex} = c_{pa} \rho_a F_{hw,a} (\theta_{hwa,o} - \theta_{hwa,i}) \quad \dots\dots(18)$$

ここに、 c_{min} と c_{max} はそれぞれ $c_a \rho_a F_{hw,a}$ と $c_w \rho_w F_{hw,w}$ のうち小さい方と大きい方の値である。

3.2 暖房負荷条件と気象条件

暖房負荷は住宅用熱負荷計算プログラム SMASH¹⁰⁾ を用いて算出した。暖房負荷計算の対象建物は、Fig. 2 に示し

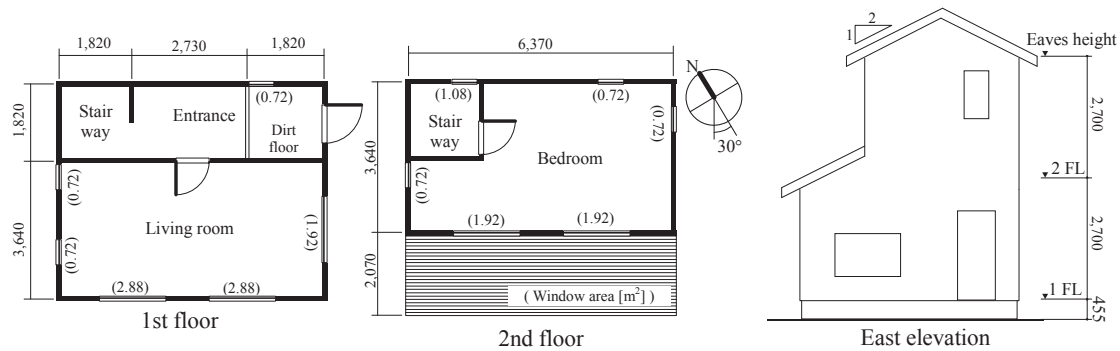


Fig. 2 Floor plan and elevation of target house for heating load calculation
 図2 暖房負荷計算の対象住宅の平面図および立面図

た SMASH ユーザーマニュアル¹⁰⁾ の木造戸建て住宅モデルと同じプラン・仕様の住宅とした。暖房負荷は、Table 3 に示した間欠暖房運転スケジュールを設定して、SMASH の東京の標準気象データを用いて求めた。また、集熱量計算のために必要な日射量（集熱器透過体表面の入射全天日射量）と外気温度については、集熱器をモデル住宅の勾配屋根に設置するとし、同気象データの一時間毎の値を直線補間した値を用いている。

3.3 設計パラメータのバランス

ここでは、集熱器面積を本簡易設計法により求められる値に固定し、蓄熱槽容量および加熱コイルの容量を変化させた場合の太陽熱依存率をシミュレーションにより求め、集熱器面積に対する蓄熱槽のバランスや加熱コイル容量の妥当性について検討する。

(1) 計算条件 Table 4, 5 には太陽熱暖房システムの設計条件を示している。Table 4 には、基準条件（下線部）および集熱器の特性や集熱設定温度等が異なる設計条件を示し、Table 5 には Table 4 の基準条件から設計条件としての一日の日射量と暖房負荷が異なる設計条件を示した。なお、暖房負荷と日射量についての基準条件としては、比較的負荷の大きい晴天日である 2 月 17 日の条件を選定した。基準条件とした一日（2 月 17 日）の外気温および集熱器面への入射日射量を Fig. 3 に示した。ここで、Table 5 の A-4 と A-8 は、実際の暖房負荷と日射量が基準条件（A-6）と同じ条件であり、太陽熱暖房システムで賄う瞬時暖房負荷の最大値 $q_{h,max}$ が異なる場合である。この最大暖房負荷 $q_{h,max}$ を下回る暖房負荷の日積算値 Q_h を設計条件とする。本簡易設計法では、設計条件として代表的な一日を想定し、その一日に集熱した太陽熱で、その日の暖房負荷 Q_h を過不足なく処理できるシステムを設計目標としている。したがって、設計条件とする日射量と暖房負荷の組み合わせによって、定まるシステムの規模が異なることになる。ここでは、1, 2 月の 2 ヶ月間の日積算日射量と日積算暖房負荷が最大値および中央値となる日の条件を組み合わせ、システムの規模が比較的小さくなる条件の B-4, 6, 8 および規模が大きくなる C-4, 6, 8 の設計条件を設定した。Table 5 には本簡易設計法により決定した設計パラメータの値もあわせて示した。

Table 3 Operational condition of heating system
 表3 暖房運転条件

	Heating schedule	Set temp. for heating
Living room	17:30~23:30, 5:30~7:30	20°C
Bedroom	21:30~0:30, 5:30~7:30	

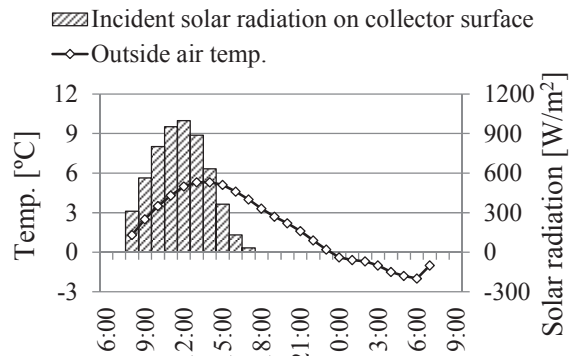


Fig. 3 Outside temperature and incident solar radiation on collector surface on Feb. 17
 図3 外気温と集熱器面日射量（2月17日）

(2) 計算結果と考察 Fig. 4 には、日射量と暖房負荷の基準設計条件とした 2 月 17 日を含む 2 月 15 日 6:00 から 18 日 8:00 までの 3 日間について、Table 4 に示した基準設計条件の下で設計したシステムの集熱量、太陽熱暖房システムによる暖房熱量、蓄熱槽の出入口水温等の計算結果を示している。間欠暖房を行う場合の暖房負荷は、温度が低下した建物躯体や家具等による蓄熱負荷を含むため、朝の暖房運転開始時（5:30-6:30）の負荷が日最大値となる。基準設計条件の一日（2 月 17 日 7:00~18 日 7:00）において、設計条件とした日積算暖房負荷 Q_h （6 kW を下回る暖房負荷の日積算値）と、この一日に集熱し蓄熱した日積算熱量および太陽熱暖房システムの日積算放熱量がほぼ等しいことから、概ね設計目標に適ったシステムとなっていることが分かる。また、Fig. 5 に示した 2 月 17 日 7:00 から 1 日間の蓄熱槽内温度分布から、蓄熱槽内の温度成層は良好に保たれており、設計条件として設定した一日の集熱量を蓄熱するために必要十分な蓄熱槽容量であることがわかる。

Fig. 6 には、集熱器の特性や集熱設定温度等が異なる条件の下で、蓄熱槽容量と加熱コイルの容量を変化させた場

Table 4 Design conditions of solar heating system for system simulation (1)
表4 太陽熱暖房システムの設計条件 (1)

Parameter	Size
Set point of room air temperature [°C]	20
Collector type ($F'K [W/(m^2K)] / F'(\tau\alpha)_e$)	Type A (3.98/0.82), <u>Type B (5.16/0.80)</u> , Type C (6.56/0.85)
Water depth of thermal energy storage tank [m]	1.0, <u>2.0</u> , 4.0
R_{m0} *	0.05, <u>0.1</u> , 0.4
Set point of collector outlet [°C]	40, <u>50</u> , 60
Amount of solar radiation on collector surface [MJ/(m ² day)]	<u>20.4 (Feb.17)</u>
Maximum handling load of solar heating : $q_{h,max}$ [kW]	<u>6.0</u>
Heating load applied to solar heating system: Q_h [MJ/day]	<u>113 (Feb.17)</u>

* Inlet temp. =25 °C, reference temp. of tank water = 50 °C and maximum flow rate at heating mode Underlined values are reference conditions

Table 5 Design conditions of solar heating system for system simulation (2)
表5 太陽熱暖房システムの設計条件 (2)

	A-4	A-6	A-8	B-4	B-6	B-8	C-4	C-6	C-8
Actual heating load [MJ/day]	142 (Feb.17)			118 ^{*2}			176 ^{*1}		
Design conditions									
Maximum handling load of solar heating : $q_{h,max}$ [kW]	4.0	6.0	8.0	4.0	6.0	8.0	4.0	6.0	8.0
Heating load applied to solar heating system: Q_h [MJ/day]	92	113	121	84	99	106	110	139	158
Amount of solar radiation on collector surface [MJ/(m ² day)]	20.4 (Feb.17)			23.5 ^{*1}			13.8 ^{*2}		
Designed variables									
Collector area [m ²]	8.2	10.1	10.8	6.4	7.5	8.0	18.6	23.3	26.6
Heat storage water tank volume [m ³]	0.89	1.09	1.18	0.82	0.96	1.03	1.08	1.35	1.54
Maximum hot water flow rate for heating [m ³ /h]	0.140	0.210	0.280	0.140	0.210	0.280	0.140	0.210	0.280

*1 Maximum value from Jan. 1st to Feb. 28th, *2 Median value from Jan. 1st to Feb. 28th.

Other conditions are equal to the reference conditions shown in Table 4

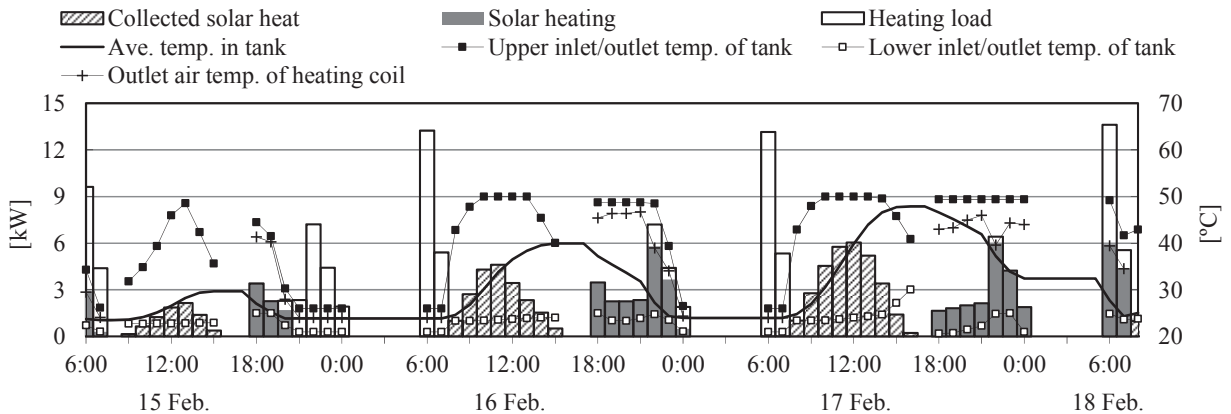


Fig. 4 Example of results of system simulations

図4 集熱量、太陽熱暖房熱量、蓄熱槽出入口水温等の計算例

合の暖房期間全体の太陽熱依存率の計算結果を示す。Fig. 6(a)は、蓄熱槽容量と太陽熱依存率に関する結果である。本簡易設計法により得られたシステム ($D_v=1.0$) の暖房期間の太陽熱依存率は、集熱器の特性や集熱設定温度等の設計条件による差が最大で0.05程度であり、日射量と暖房負荷の設計条件が同じであれば、他の設計条件が異なる場合でも太陽熱依存率が概ね同程度のシステムを設計できるといえる。また、蓄熱槽容量を $D_v=1.0$ よりも大きくすることで太陽熱依存率は若干増加するが、槽容量を2倍 ($D_v=2.0$) としても、太陽熱依存率の増加が比較的小さいことから、本簡易設計法により決定した蓄熱槽容量は概ね妥当であると考えられる。もちろん、蓄熱槽容量の最適値は、LCCやLCCO₂等のライフサイクル評価によるべきであるが、本簡易設計法によって定まる容量以上に蓄熱槽容量を大きくしても太陽熱依存率の増加量が小さいことから、蓄熱槽容量の上限を規定しているとも考えることもできる。

Fig. 6(b)には加熱コイルの容量と太陽熱依存率の関係を

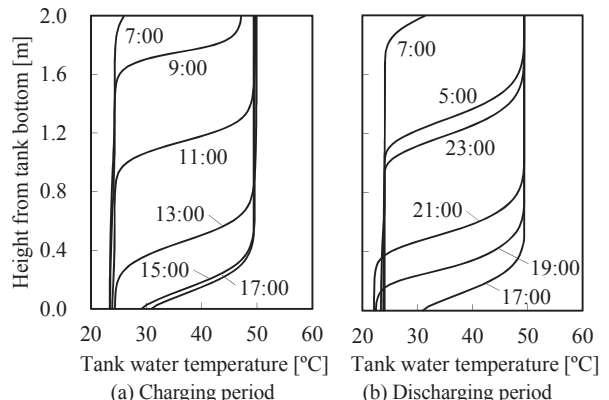


Fig. 5 Temperature distribution in the heat storage tank (from 7:00, 17 Feb. to 7:00, 18)

図5 蓄熱槽内温度分布

示している。横軸は設計目標とした加熱コイルの容量 (6 kW) に対する割合を示している。集熱器特性等の影響はなく、設定した加熱コイルの容量 (6 kW) は概ね妥当であると考えられる。

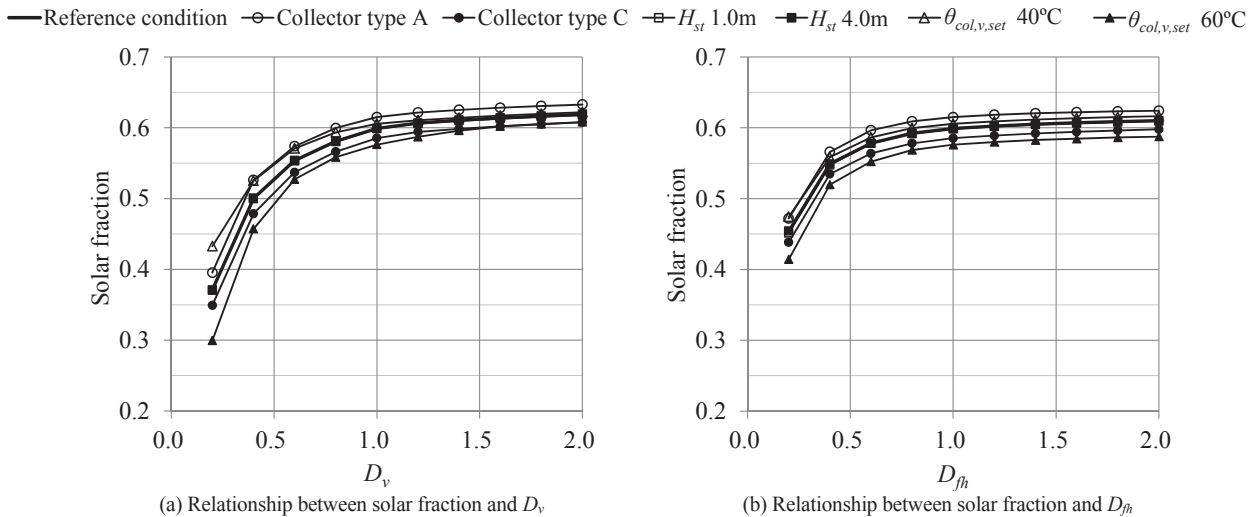


Fig. 6 Effect of heat storage tank volume and air and hot water flow rate of heating coil on the solar fraction under various design conditions of collector performance, set point of collector outlet temperature and so on

図6 蓄熱槽容量と加熱コイル容量の太陽熱依存率との関係（集熱器特性，集熱器出口温度設定値等の影響）

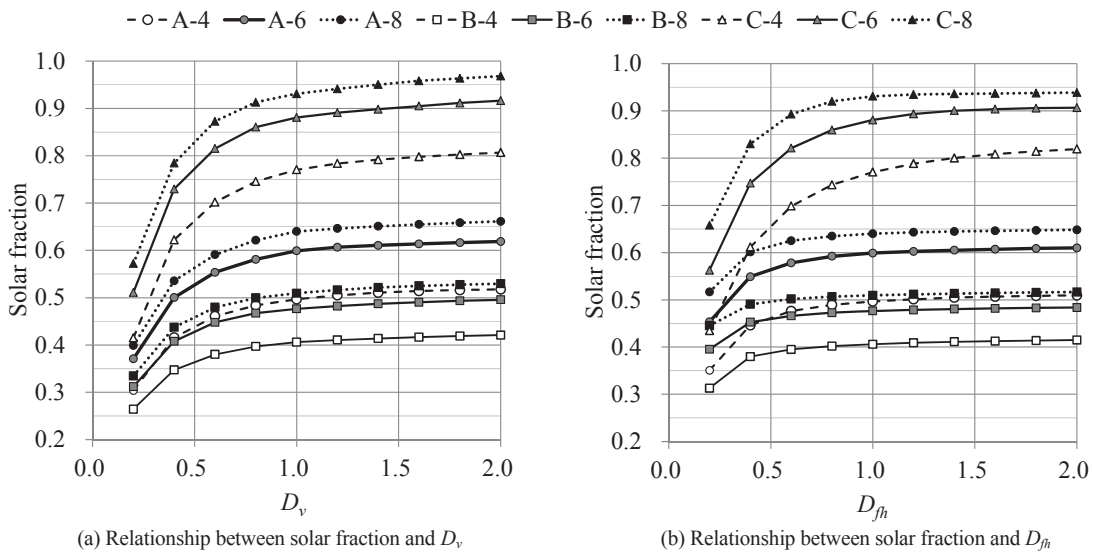


Fig. 7 Effect of heat storage tank volume and air and hot water flow rate of heating coil on the solar fraction under various design conditions of heating load and solar radiation

図7 蓄熱槽容量と加熱コイル容量の太陽熱依存率との関係（設計条件とする日射量と暖房負荷の影響）

Fig. 7には、日射量と暖房負荷の設計条件（Table 5）が異なる場合の結果を示した。Fig. 7(a)から、日積算日射量が期間の中央値となる日の気象条件下で集熱した太陽熱で期間の最大負荷日の負荷を賄えるように設計したシステム（C-4, 6, 8）では、集熱器面積に対する蓄熱槽容量が相対的に小さく、蓄熱槽容量を増大させることで太陽熱依存率が若干増加するが、図中のいずれの場合も本簡易設計法により決定した蓄熱槽容量は概ね妥当であると考えられる。

Fig. 7(b)に示した加熱コイルの容量については、設計したシステムの太陽熱依存率が低いほど、適切と思われる加熱コイルの容量が小さくなり、 $D_{fh} = 1.0$ 付近の加熱コイルの容量の低減による太陽熱依存率の低下量が小さくなる傾向にある。例えば、B-6では加熱コイルの容量を設定値（6 kW）の0.5倍程度としても太陽熱依存率の低下量が小さいことから、B-6の条件では加熱コイル容量の設定値（6 kW）は

過大であると考えられる。他方、C-6の条件では、設定値の6 kWは若干小さいと考えられる。以上の結果から、太陽熱依存率が0.6程度以下の実際的なシステムを設計目標とする場合、太陽熱暖房システムの最大暖房能力を暖房立ち上がり時の突出した負荷を除く暖房負荷を賄うことができる程度とすれば十分であり、太陽熱依存率がより小さいシステムを目標とする場合でも安全側の設計となると考えることができる。

3.4 設計条件の日射量と暖房負荷の太陽熱依存率との関係

(1) 計算条件 ここでは、設計条件として選定した一日の日射量（集熱器表面の入射全日射量）および暖房負荷と、この条件下で設計したシステムの太陽熱依存率の関係について検討する。設計条件とした日射量および暖房負荷条件を Fig. 8 に示した。これは全暖房期間の各日の日射量

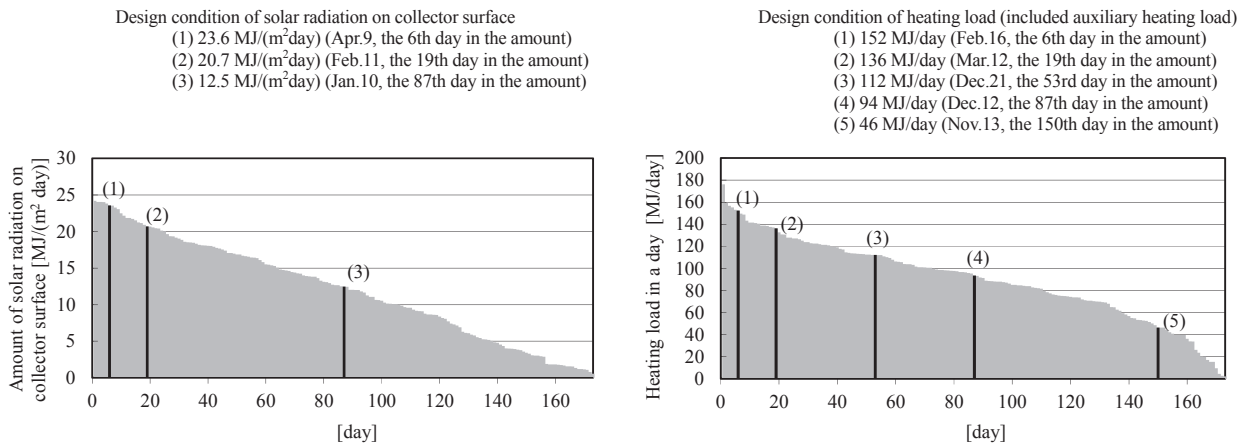


Fig. 8 Amount of solar radiation on collector surface and daily heating load (put in order of amount) and design conditions for solar fraction calculation

図8 集熱器入射日積算日射量と日積算暖房負荷（降順ソート）および計算条件

	12.5	Maximum heating load of solar heating			
		3.0	5.0	7.0	9.0 kW
Amount of solar radiation on collector surface [MJ/(m²·day)]	20.7	●	●	●	○
	23.6	▲	▲	▲	△
	23.6	■	■	■	□

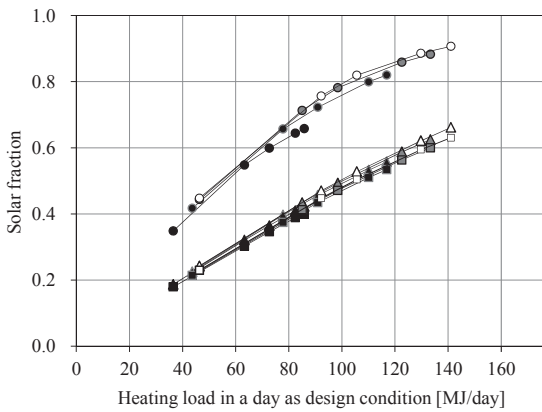


Fig. 9 Relationship between solar fraction and heating load for solar heating

図9 日積算暖房負荷と太陽熱依存率の関係

および暖房負荷の日積算値を降順に並べた図であり、設計条件とした日の日積算値を黒塗潰しで表している。なお、日射量と暖房負荷以外の設計条件は Table 4 に示した基準条件としている。

(2) 計算結果と考察 Fig. 9 には設計条件として設定した日積算暖房負荷と太陽熱依存率の関係を示した。Fig. 9 から、設計条件とする日積算暖房負荷が大きくなると、設計条件とした一日の日積算日射量が小さい条件 (12.5 MJ/m²day) では、設計条件とした一日の暖房負荷に見合う集熱量を少ない日射量で確保するために集熱器面積が大きくなり、実際には、設計時の想定よりも集熱量が大きくなるために、このような条件で設計したシステムの太陽熱依存率は高くなる。また、晴天日の日射量を設計条件とした場合、太陽熱暖房システムの最大暖房能力の影響は小さく、太陽熱依存率は日積算暖房負荷とほぼ比例関係にあることがわかる。この結果から、設計条件とする日射量と暖房負荷条件を適

切に選定することで、任意の太陽熱依存率の太陽熱暖房システムの設計が可能であると考えられる。

4. まとめ

本研究では水集熱方式の太陽熱暖房システムの簡易設計手法の開発を目的とし、本論文では、暖房期全体の長期シミュレーションを行い、第1報で提案した簡易設計法の検証を行った。本論文の内容を以下にまとめる。

- (1) 本簡易設計法により得られたシステムの集熱器面積と蓄熱槽容量のバランスは概ね妥当であることを確認した。
- (2) 太陽熱依存率が 0.6 程度の実際的なシステムを設計目標とする場合、太陽熱暖房システムの最大暖房能力を暖房立ち上がり時の負荷を除く暖房負荷を賄うことができる程度とすれば十分であり、太陽熱依存率がより小さいシステムを目標とする場合でも安全側の設計となると考えることができる。
- (3) 設計条件とする日積算暖房負荷と太陽熱依存率はほぼ比例関係にあり、また、設計条件とする日射量と暖房負荷条件を適切に選定することで、本設計法によって任意の太陽熱依存率の太陽熱暖房システムを設計できる。

記号

A_{col}	: 集熱器集熱面面積	[m ²]
Ar_{in}	: 入口アルキメデス数	[-]
c	: 比熱	[J/(kg K)]
d_m	: 水平円管流入口の直径	[m]
D_{ph}	: 設計目標とした加熱コイルの容量に対する加熱コイル容量の割合	[-]
D_v	: 簡易設計法により求められる槽容量に対する蓄熱槽容量の割合	[-]
$F_{c,v}$: 集熱流量	[m ³ /s]
$F_{c,v,lim}$: 集熱流量の制御下限値または上限値	[m ³ /s]
$F_{c,v,max}$: 集熱流量の上限値	[m ³ /s]
$F_{hw,a}$: 加熱コイルの風量	[m ³ /s]
$F_{hw,a,lim}$: 加熱コイル風量の制御下限値または上限値	[m ³ /s]

$F_{hw,a,max}$	： 加熱コイル風量の上限值	[m ³ /s]	9) TRNSYS The Transient System Simulation Program Reference manual, Vol.1, pp.(4.7.1-1)-(4.7.1-3), 1996
$F_{hw,w}$	： 加熱コイルの温水流量	[m ³ /s]	10) SMASH for Windows Ver.2 ユーザーマニュアル, (財)建築環境・省エネルギー機構, pp.33-46, 2000
$F_{hw,w,lim}$	： 加熱コイル温水流量の制御下限値または上限値	[m ³ /s]	
$F_{hw,w,max}$	： 加熱コイル温水流量の上限值	[m ³ /s]	
F'	： 集熱器効率因子	[-]	
g	： 重力加速度	[m/s ²]	
H_{st}	： 蓄熱槽の水深	[m]	
I_{col}	： 集熱器に入射する日射量	[W/m ²]	
$I_{col,ave}$	： 集熱器に入射する平均日射量	[W/m ²]	
K_{col}	： 集熱器の熱損失係数	[W/(m ² K)]	
t_s, t_{Ve}	： 集熱開始時刻, 終了時刻	[s]	
q_{col}	： 集熱器での集熱量	[W]	
q_{ex}	： 加熱コイルでの交換熱量	[W]	
q_h	： 暖房負荷	[W]	
$q_{h,max}$	： 太陽熱暖房システムで賄う最大暖房負荷	[W]	
Q_h	： 日積算暖房負荷(設計条件)	[J/day]	
R_m	： 混合域無次元深さ	[-]	
R_{m0}	： 初期混合域無次元深さ	[-]	
R_{vw}	： 規模補正係数	[-]	
t^*	： 無次元時間	[-]	
UA_{hex}	： 加熱コイルの熱通過係数	[W/K]	
v_{in}	： 蓄熱槽流入口での流入流速	[m/s]	
V_{opt}	： 最適蓄熱槽容量	[m ³]	
V_{st}	： 蓄熱槽容量	[m ³]	
ε	： 加熱コイルの熱通過有効度	[-]	
η	： 集熱器効率	[-]	
θ_{amb}	： 集熱器周囲温度(集熱時)(外気温度)	[°C]	
$\theta_{col,in}$	： 集熱器入口温度	[°C]	
$\theta_{col,v,set}$	： 集熱器出口設定温度	[°C]	
$\theta_{col,v,o}$	： 集熱器出口温度	[°C]	
$\theta_{hww,o}$	： 加熱コイルの出口温水温度	[°C]	
$\theta_{hww,i}$	： 加熱コイルの入口温水温度	[°C]	
$\theta_{hwa,i}$	： 加熱コイルの入口空気温度	[°C]	
$\theta_{hwa,o}$	： 加熱コイルの出口空気温度	[°C]	
θ_o	： 蓄熱槽の初期温度	[°C]	
θ_r	： 暖房運転時の室温	[°C]	
θ_{rin}	： 室への吹出し空気温度	[°C]	
ρ	： 密度	[kg/m ³]	
ρ_{in}	： 流入水の密度	[kg/m ³]	
ρ_{ref}	： 槽内基準密度	[kg/m ³]	
$(\tau\alpha)_e$	： 集熱器の日射吸収率	[-]	

添え字 a: 空気, w: 水

参考文献

- 1) Duffie A.J. and Beckman W.A : Solar engineering of thermal processes, John Wiley & Sons, pp.655-672, 2006
- 2) Simonson, J.R. : Computing methods in solar heating design, Macmillan Press, London, 1984
- 3) 新太陽エネルギー利用ハンドブック, 日本太陽エネルギー学会, 2000
- 4) 北野博亮, 相良和伸 : 空気集熱式太陽熱暖房システムの最適蓄熱槽容量に関する理論的検討, 日本建築学会計画系論文集, 第 532 号, pp.29-35, 2000.6
- 5) 北野博亮, 相良和伸 : 空気集熱式太陽熱暖房システムの簡易設計法に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第 582 号, pp.45-52, 2004.8
- 6) 北野博亮, 相良和伸, "シミュレーションによる空気集熱式太陽熱暖房システムの簡易設計法の検証", 太陽エネルギー学会誌, Vol.31, No.4, pp.37-47, 2005
- 7) 北野博亮, 相良和伸, 岩田剛, "水集熱式太陽熱暖房システムの簡易設計法に関する研究 第 1 報 簡易設計法の提案", 太陽エネルギー学会誌, Vol.38, No.6, pp.65-72, 2012
- 8) 北野博亮, 岩田剛, 相良和伸, "温度成層型蓄熱槽の変動入力条件に対応した槽内混合モデルに関する研究", 空気調和・衛生工学会論文集, No.96, pp.31-40, 2005