

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

Verification of Simple Design Method for Air-based Solar Heating System
by System Simulation

北野 博亮 *1
Hiroaki KITANO

相良 和伸 *2
Kazunobu SAGARA

Abstract

In this paper, an outline of a simple design method for an air-based solar heating system is presented and the simple design method is verified by system simulation. The design method is applicable to two types of solar heating systems; one is a constant air flow rate system and the other is a variable air flow rate system. The results of simulation are summarized as follows: (1) the solar heating systems designed by using the simple design method, are generally adequate from a view point of balance for collector area, rock bed capacity and air flow rates, (2) a linear relationship exists between heating load as design condition and solar fraction, (3) an air-based solar heating system which has any solar fraction is designed by setting an appropriate value for heating load as a design condition.

キーワード：太陽熱暖房、簡易設計法、シミュレーション

Key Words : Solar heating, Simple design method, Simulation

1. はじめに

住宅でのエネルギー消費量と二酸化炭素排出量の抑制に貢献できる太陽熱暖房システムは、今後の更なる普及が期待されている。一般に、太陽熱暖房システムの設計¹⁾²⁾³⁾では、暖房期間全体の太陽依存率等の期間性能を指標としており、設計したシステムの期間性能を *f*-Chart 法やシミュレーション等により求め、性能や規模が妥当であるかを判断し、試行錯誤により集熱器面積や蓄熱槽容量等を決定している。このように煩雑な作業が必要となるため、住宅設計に携わる小規模な建築設計事務所では対応が難しいのが現状である。このことから太陽熱暖房システムの更なる普及のためには、合理的で簡易な設計手法が必要であると考えている。

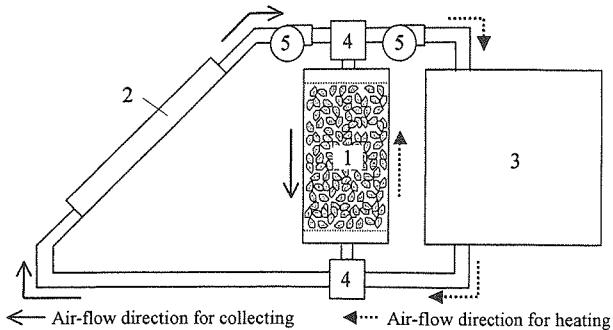
本研究では、空気集熱式太陽熱暖房システムの合理的な設計のための簡易な設計手法の開発を目的としており、冬季の一日に集熱した太陽熱でその日の暖房負荷を賄うことのできるシステムを設計の目安とし、簡易設計法の検討を行ってきた。これまで、定風量集熱の場合と変風量集熱の場合について、蓄熱槽容量効率の点で最適な蓄熱槽容量の理論的検討を行い、最適蓄熱槽容量および一日の蓄熱量を近似的に求めるための関係式を示し、これらの関係式を

用いた簡易設計法を提案している⁴⁾⁵⁾。

本論文では、空気集熱式太陽熱暖房システムの簡易設計法の概要を示し、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、集熱時および放熱時の風量の容量バランスの妥当性について検討する。

2. 簡易設計法の概要

本研究で対象としているシステムは、図 1 に示した碎石蓄熱槽を有する空気集熱式太陽熱暖房システムである。このシステムの集熱および放熱用ファンの制御方法としては、集熱時の風量（集熱風量）および放熱時の風量（放熱風量）が一定で、暖房負荷に応じて on-off 制御する定風



Air-flow direction for collecting Air-flow direction for heating
1: Rock bed 2: Flat plate collector 3: Room 4: Damper 5: Fan

Fig.1 System diagram of design target

*1 三重大学工学部助手 (〒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
(原稿受付: 2005 年 3 月 16 日)

Table 1 Simple design method for air-based solar heating system with constant air flow rate control

Design condition	1) Air flow rate per unit collector area for heat collection (eq.(1))				7) Air flow rate for heating : F_{hc}
	Heating load				6) Rock bed capacity: V_{st}
	Set point of room air temperature	○			5) Air flow rate for heat collection: F_{cc}
	Collector performance	○	○	○	4) Collector area: A_{col}
	Volumetric specific heat of rock bed				3) Adjustment factor for system capacity: R_c
	Height of rock bed (Length of rock bed along with air flow direction)	○			2) Time for collecting solar energy in a day: $t_e - t_s$
	Solar radiation on collector surface	○	○		
	Average ambient temperature around collector during collecting	○	○		
	Equations for calculation of the design parameter	eq.(2)	eq.(3)	eq.(4)	—
				eq.(5)	eq.(6) eq.(7)

量方式と集熱風量および放熱風量を日射量や暖房負荷に応じた変動風量とした変風量方式の2つの制御方法を対象としている。本簡易設計法では、冬季の一日に集熱した太陽熱で、その日の夜間と翌朝の暖房負荷をほぼ賄うことのできるシステムを設計の目安としている。なお、暖房負荷条件として早朝の瞬時負荷の大きい暖房負荷を設定すると、放熱側システムが過大な設計となってしまう。従って、本研究では太陽熱で賄う瞬時暖房負荷の最大値を設定して、これを上回る負荷は補助暖房により賄うこととし、瞬時暖房負荷の最大値とこの値以下の暖房負荷の日積算値を設計条件とした簡易設計法を提案している。

以下に、定風量方式と変風量方式の太陽熱暖房システムについての簡易設計法の概要を示す。

2.1 定風量方式の場合の簡易設計法⁴⁾

定風量方式の場合、集熱器面積、砕石蓄熱槽容量および集熱時と放熱時の風量を設計の際に決定するパラメーター（設計パラメーター）としている。式(1)から式(7)はそれぞれの設計パラメーターを求めるための関係式であり、表1には、各設計パラメーターを求めるための設計条件と使用する関係式の対応を示している。

$$\frac{F_{cc}}{A_{col}} = \frac{F'(\tau\alpha)_e I_{col} + \{\theta_{amb} - (\theta_{col,e,out} + \theta_r)/2\}FK}{c_{pa} \rho_a (\theta_{col,e,out} - \theta_r)} \quad \dots (1)$$

$$I_{col} > \frac{FK(\theta_r - \theta_{amb})}{F'(\tau\alpha)_e} \quad \dots (2)$$

$$R_c = 1 - \frac{A_{col}}{F_{cc}} \left(3.67 \times 10^{-4} - 8.34 \times 10^{-4} \frac{F'(\tau\alpha)_e}{FK} \right) - 2.35 \times 10^{-3} \frac{FK}{F'(\tau\alpha)_e} - 6.04 \times 10^{-3} \left((F_{cc}/A_{col})^{-1/2} - 1 \right) H_{st}^{-1/2} \dots (3)$$

$$+ 2.16 \times 10^{-3} (F_{cc}/A_{col})^{-1/2}$$

$$A_{col} = \frac{Q_h}{R_c} \frac{1 + \frac{1}{2} \frac{FK}{c_{pa} \rho_a} \frac{1}{(F_{cc}/A_{col})}}{F'(\tau\alpha)_e \int_{t_s}^{t_e} I_{col} dt - FK(\theta_r - \theta_{amb})(t_e - t_s)} \quad \dots (4)$$

$$V_{st} = \frac{c_{pa} \rho_a (t_e - t_s)}{c_s \rho_s (1-f)} F_{cc} \quad \dots (5)$$

$$F_{hc} = \frac{1}{R_c c_{pa} \rho_a (\theta_{st,ave} - \theta_r)} \frac{q_{h,max}}{q_{h,max}} \quad \dots (6)$$

$$\theta_{st,ave} = \frac{Q_h}{c_s \rho_s (1-f) V_{st}} + \theta_r \quad \dots (7)$$

以下に定風量方式の場合の設計手順を示す。

- 1) 集熱器単位面積当たりの集熱風量 F_{cc}/A_{col} を設定する。この値は集熱温度に影響することから、例えば、集熱器透過体表面の入射全天日射量（以下では単に日射量）とそのときの目標とする集熱器出口温度から式(1)により求めることもできる。
 - 2) 日射量から、式(2)の不等式を満たす集熱可能な時間 $t_e - t_s$ を求め、その間の集熱器に入射する積算日射量を求める。
 - 3) 式(3)によりシステムの規模補正係数 R_c を求める。この補正係数は、太陽熱暖房システムからの放熱量と設計条件として設定した暖房負荷が等しくなるようにシステムの規模を補正する係数である。
 - 4) 式(4)^{注1)}により集熱器面積 A_{col} を求める。
 - 5) 4)で求めた集熱器面積 A_{col} と 1)で設定した集熱器単位面積当たりの集熱風量 F_{cc}/A_{col} とから集熱風量 F_{cc} を求める。
 - 6) 式(5)により砕石蓄熱槽容量 V_{st} を求める。
 - 7) 放熱時の風量は、放熱温度を式(7)で表される蓄熱終了時の蓄熱槽内平均温度としたときに、本システムで賄う暖房負荷の最大値 $q_{h,max}$ を処理できる必要十分な風量として、式(6)で求める。
- ここで、規模補正係数 R_c を求めるための式(3)は、以下に示す手順で求めた。先ず、表2に示した条件の全ての組み合わせ（1944通り）について、規模の補正をせず $R_c=1$ としてシステムを設計する。次に、設計したシステムの蓄熱・放熱線返運転のシミュレーションを設計条件とした日射量と暖房負荷条件の下で行い、ほぼ周期的定常状態となったときの放熱量と暖房負荷のそれぞれの日積算値を求める。こうして求めた日積算放熱量を日積算暖房負荷で除した値が、各設計条件での規模補正係数である。この規模補正係数が小さくなるのは、集熱器単位面積あたりの集熱

Table 2 Calculation conditions for adjustment factor: R_c

Heating load	50, 100, 300 MJ/day (constant load during 6 h)
Set point of room air temperature	18, 20, 22 °C
Outdoor air temperature	0, 5, 10 °C
Air flow rate for solar heat collection per unit collector area	20, 40, 60, 80 (m³/h)/m²
Ratio of height to width of rock bed	0.5:1, 2:1, 5:1
Solar radiation on collector surface	Ideal insolation at the latitude of Tokyo on Feb. 1st and 0.7 times value of it
Collector performance	$(FK/F'(\tau\alpha)_e)^{6)} = 3.37/0.76, 5.42/0.68, 7.44/0.65$

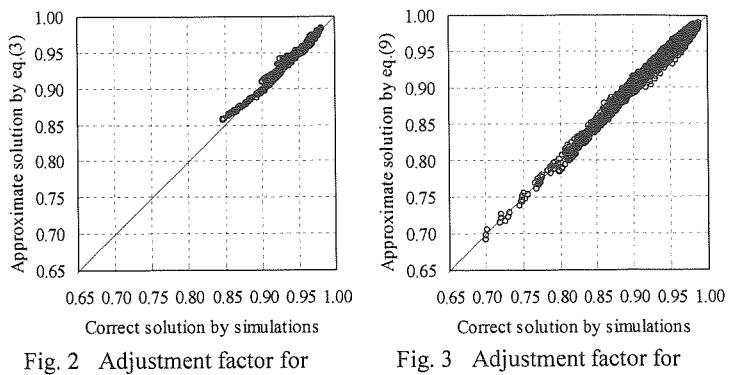
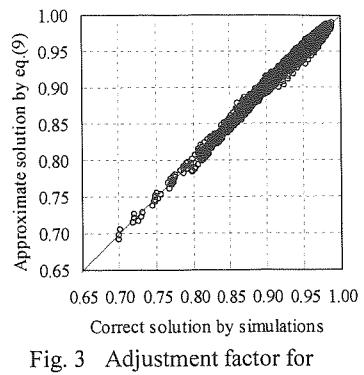
Fig. 2 Adjustment factor for system scale: R_c Fig. 3 Adjustment factor for system scale: R_v

Table 3 Simple design method for air-based solar heating system with variable air flow rate control

Design condition	Maximum air flow rate for heating: $F_{hv,max}$					
	Maximum air flow rate for heat collection: $F_{cv,max}$					
	4) Rock bed capacity: V_{st}					
	3) Collector area: A_{col}	○	○	○	○	○
1) Time for collecting solar energy in a day: $t_e - t_s$	○	○	○	○	○	○
Heating load			○	○	○	○
Set point of room air temperature	○	○	○	○	○	○
Collector performance	○	○	○		○	
Volumetric specific heat of rock bed				○		
Height of rock bed (Length of rock bed along with air flow direction)		○				
Solar radiation on collector surface	○	○	○		○	
Set point of air temperature at collector outlet	○	○	○	○	○	○
Outdoor air temperature during collecting solar heat	○	○	○		○	
Equation for calculation of the design parameter	eq.(8)	eq.(9)	eq.(10)	eq.(11)	eq.(12)	eq.(13)

風量が小さく、集熱器の熱損失係数が大きく、蓄熱槽の熱媒空気の流れ方向の長さが短い場合であり、他の条件の影響は小さい。そこでこの定性的な考察から回帰式の関数形を定め、5つの係数を修正パウエル法⁷⁾により同定し式(3)を得ている。

図2は、規模補正係数の式(3)による近似解とシミュレーションによる精算解を示している。結果から明らかなように、表2に示した設計条件の範囲内では、式(3)により±2%以内の誤差で規模補正係数を求めることができる。

2.2 変風量方式の場合の簡易設計法⁵⁾

変風量方式の場合の設計パラメーターは、集熱器面積、碎石蓄熱槽容量および集熱時と放熱時の風量の制御上限値（風量の上限値）である。これら設計パラメーターを求めるための関係式（式(8)～式(13)）と設計条件の対応を表3に示している。ここで、規模補正係数を求めるための式(9)は、定風量集熱方式の規模補正係数 R_c と同様の方法で求めている⁵⁾。ただし、計算条件として集熱器単位面積あたりの風量の代わりに、集熱器出口空気の設定温度（30, 40, 50, 60°C）を設定しているが、他の条件は表2と同じである。この式(9)による近似解とシミュレーションによる精算解を図3に示した。変風量方式の場合は規模補正係数が広い範囲に分布しているが、式(9)により定風量方式と同程度の±2%以内の誤差で規模補正係数を求めることができる。

$$I_{col} > \frac{FK \{ (\theta_{col,v,se} + \theta_r) / 2 - \theta_{amb} \}}{F'(\tau\alpha)_e} \quad \dots (8)$$

$$R_v = 1 - \left(8.50 \times 10^{-4} H_{st}^{-1/2} + 5.02 \times 10^{-4} \right) \times (\theta_{col,v,se} - \theta_r + 74.2) \frac{FK (\theta_{col,v,se} - \theta_{amb})}{F'(\tau\alpha)_e I_{col,ave}} \quad \dots (9)$$

$$A_{col} = \frac{Q_h}{R_v} \left[F'(\tau\alpha)_e \int_{t_s}^{t_e} I_{col} dt - \{ (\theta_{col,v,se} + \theta_r) / 2 - \theta_{amb} \} F'K(t_e - t_s) \right]^{-1} \quad \dots (10)$$

$$V_{st} = \frac{Q_h}{R_v c_s \rho_s (1-f) (\theta_{col,v,se} - \theta_r)} \quad \dots (11)$$

$$F'(\tau\alpha)_e I_{col,max} - FK \left(\frac{\theta_{col,v,se} + \theta_r}{2} - \theta_{amb} \right) A_{col} = \frac{c_{pa} \rho_a (\theta_{col,v,se} - \theta_r)}{c_{pa} \rho_a (\theta_{col,v,se} - \theta_r)} \quad \dots (12)$$

$$F'_{hv,max} = \frac{1}{R_v c_{pa} \rho_a (\theta_{col,v,se} - \theta_r)} \quad \dots (13)$$

以下に変風量方式の場合の設計手順を示す。

- 日射量から、式(8)の不等式を満たす時間（集熱可能な時間）を求め、集熱時の積算日射量を求める。
- 式(9)により規模補正係数 R_v を求める。
- 集熱可能な時間、規模補正係数および暖房負荷などの設計条件から式(10)^{注1)}により集熱器面積を求める。
- 暖房負荷等から碎石蓄熱槽容量を式(11)により求める。
- 集熱風量の上限値は、集熱器入口空気温度が暖房設定

- 室温に等しく、日射量が最大となるときに集熱器出口空気温度が設定温度となる風量として、式(12)により求める。
- 6) 放熱風量の上限値は、放熱温度が集熱器出口空気温度の設定値に等しいとしたときに、本システムで賄う暖房負荷の最大値 $q_{h,max}$ を処理できる必要十分な風量として、式(13)で求める。

本簡易設計法の関係式（式(1)～(13)）の右辺に含まれる変数のうち、日積算暖房負荷、積算日射量および集熱器の特性係数 ($F'K, F'(\tau\alpha)_e$) の値が得られれば、他の変数は設計者の判断で設定できる。また、式(1)～(13)を用いれば、集熱器面積および碎石蓄熱槽容量、集熱風量、放熱風量の設計パラメーターの値を求めることができる。ここで、集熱器の特性係数については、集熱器メーカーのカタログ等から情報を得ることができる。一方、日積算暖房負荷と積算日射量については、建物の熱的性能や集熱器の設置方位や勾配、気象条件等により異なる値となるので、標準気象データと冷暖房負荷計算プログラム等を利用して求めることとなる。

3. シミュレーションによる設計法の妥当性の検討

本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、集熱器面積や碎石蓄熱槽容量等のバ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を検討していない。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ーである蓄熱槽容量や風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を行う。

3.1 シミュレーションの方法と暖房負荷条件

(1) シミュレーションのモデル

本研究では、集熱器以外のダクトと蓄熱槽からの熱損失とファンでの発熱やダクト等での摩擦による熱取得を無視し、以下に示す集熱器のモデルと碎石蓄熱槽の伝熱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。

a. 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（集熱器透過体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（式(14)～式(16)）をモデル式として用いる。

$$\theta_{col,c,out} = \frac{\left(c_{pa} \rho_a \frac{F_{cc}}{A_{col}} - \frac{F'K}{2} \right) \theta_{col,in} + F'(\tau\alpha)_e I_{col} + F'K \theta_{amb}}{c_{pa} \rho_a \frac{F_{cc}}{A_{col}} + \frac{F'K}{2}} \quad (14)$$

$$F'(\tau\alpha)_e I_{col} A_{col} - F'K \left(\frac{\theta_{col,v,out} + \theta_{col,in}}{2} - \theta_{amb} \right) A_{col} \\ F_{cv} = \frac{c_{pa} \rho_a (\theta_{col,v,out} - \theta_{col,in})}{c_{pa} \rho_a (\theta_{col,v,out} - \theta_{col,in})} \quad (15)$$

$$\theta_{col,v,out} = \frac{\left(c_{pa} \rho_a \frac{F_{cv,lim}}{A_{col}} - \frac{F'K}{2} \right) \theta_{col,c,in} + F'(\tau\alpha)_e I_{col} + F'K \theta_{amb}}{c_{pa} \rho_a \frac{F_{cv,lim}}{A_{col}} + \frac{F'K}{2}} \quad (16)$$

集熱量を求めるためには、集熱器入口空気温度が条件として与えられるので、集熱器出口空気温度と集熱風量を求める必要がある。定風量集熱方式の場合には集熱風量が一定値であるため、式(14)を用いて集熱温度を求め、変風量集熱方式では集熱温度が一定となるように集熱風量を制御するため、式(15)を用いて集熱風量を求ることとした。なお、変風量集熱方式では、集熱用ファンの回転数制御を行うこととし、制御可能な最小風量を本簡易設計法により求まる集熱最大風量の30%の値であるとした。そして、式(15)で求まる風量がこの制御範囲にないときは、最大または最小風量 $F_{cv,lim}$ と式(16)から集熱器出口空気温度 $\theta_{col,v,out}$ を求ることとしている。また、変風量方式では、集熱器入口空気温度が集熱器出口設定温度よりも高くなる場合には、高温度集熱による機器損傷を避けるため集熱をしないこととした。

b. 碎石蓄熱槽のモデル

碎石蓄熱槽の伝熱モデルには、Schumann⁸⁾によって提案されたモデルを用いた。蓄熱槽内空気の熱収支式について、熱伝導による碎石蓄熱槽内の熱拡散と蓄熱槽からの熱損失を無視できるとすると、蓄熱槽内空気および碎石の熱収支式は式(17)、式(18)となる⁹⁾。

$$c_{pa} \rho_a F_{st} \frac{\partial \theta_{st,a}}{\partial x} = h_v A_{st} (\theta_{st,s} - \theta_{st,a}) \quad \cdots (17)$$

$$c_s \rho_s A_{st} (1-f) \frac{\partial \theta_{st,s}}{\partial t} = h_v A_{st} (\theta_{st,a} - \theta_{st,s}) \quad \cdots (18)$$

ここで、体積熱伝達率 h_v には、式(19)に示した Coutier and Farber¹⁰⁾の実験式を用いた。また、以下の計算では碎石の容積比熱 $c_s \rho_s$ を $1.92 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \text{ K})$ 、等価直径 d_e を 0.04m 、蓄熱槽の空隙率 f を 0.38 としている。

$$h_v = 700 \left(\frac{F_{st} \rho_a}{A_{st} d_e} \right)^{0.76} \quad \cdots (19)$$

c. 暖房運転の放熱量制御

本研究では、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。この暖房負荷を碎石蓄熱槽からの放熱と補助暖房により賄うものとし、室から碎石蓄熱槽への還り空気温度を室温の設定値で一定であるとしている。なお、室への給気温度が室温+5°Cを下回る場合は放熱用ファンを停止するとした。

定風量方式の場合の放熱用ファンは、風量が一定値であることから、単位時間当たりの放熱量が暖房負荷を上回る場合には、その間の積算放熱量が暖房負荷に一致するように on-off 制御されたとした。一方、放熱量が暖房負荷に満

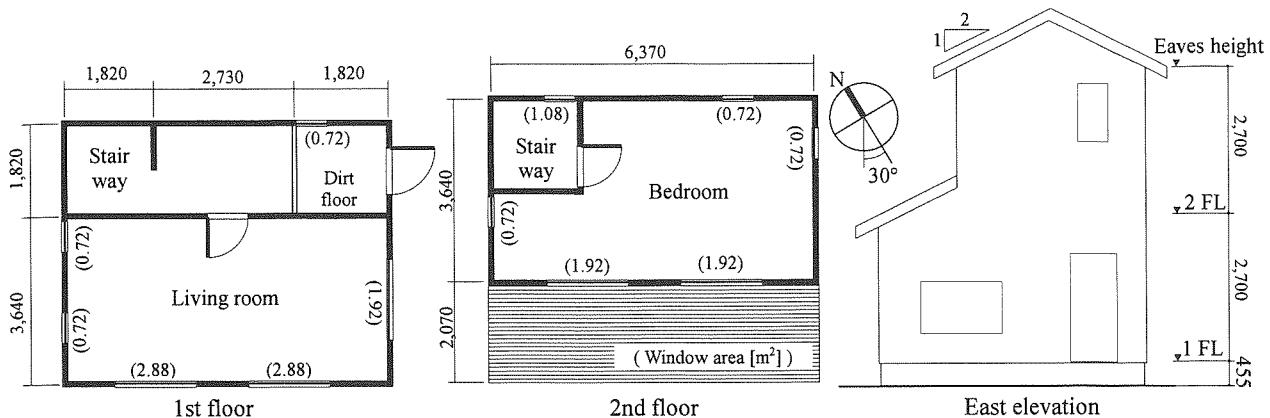


Fig.4 Floor plan and elevation of target house for heating load calculation

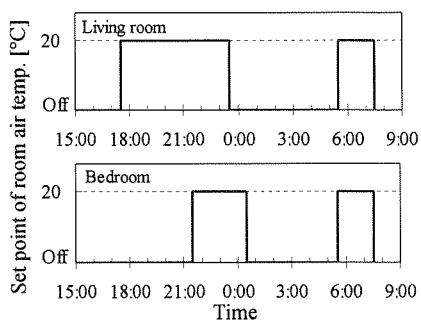


Fig.5 Schedule of heating system operation and set point of room air temperature

たない場合は、不足する熱量を補助暖房により処理することとしている。

変風量方式の場合は、放熱用ファンも集熱用ファン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風量制御としている。ここで、暖房負荷を過不足なく処理できる放熱風量 F_{hv} は式(20)で表される。

$$F_{hv} = \frac{q_h}{c_{pa} \rho_a (\theta_{r,in} - \theta_r)} \quad \dots (20)$$

この式(20)で求まる放熱風量が放熱風量の上限値を上回る場合は、放熱風量 F_{hv} が上限風量 $F_{hv,max}$ に等しいとし、不足する熱量は補助暖房により賄うこととした。また制御可能な最小風量を集熱用ファンと同様に放熱風量の上限値の 30%とし、式(20)で求まる放熱風量が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 on-off 制御されるとして計算した。

(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 SMASH¹¹⁾を用いて算出した。暖房負荷計算の対象建物は、図 4 に示した SMASH ユーザーマニュアル¹¹⁾のモデル住宅と同じプラン・仕様の住宅とした。暖房負荷は、図 5 に示した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日射量）と外気温度については、集熱器をモデル住宅のほぼ南面する勾配屋根（勾配 1/2）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。

3.2 簡易設計法の妥当性の検討

本簡易設計法の妥当性を検討するため、標準気象データを用いた暖房期間の長期シミュレーションを行う。本研究では、太陽熱暖房システムの碎石蓄熱槽容量や集熱器面積、集熱および放熱風量等の容量バランスに着目し、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、碎石蓄熱槽容量、集熱および放熱風量を変化させた場合の太陽依存率をシミュレーションにより求め、集熱器面積に対して碎石蓄熱槽容量や風量の値が妥当であるかどうかの検討を行う。

(1) 設計条件

表 4 には太陽熱暖房システムの設計条件を示している。ここでは、表 4 の下線を印した値を設計の基準条件として、集熱器の特性や日射量、暖房負荷等を変化させた設計条件を設定し、本簡易設計法により設計したシステムについて、碎石蓄熱槽容量や風量の値の妥当性の検討を行う。表 4において、Case 1, Case 2 は、暖房負荷と日射量が基準条件と同じ条件であるが、太陽熱暖房システムで賄う瞬時暖房負荷の最大値 $q_{h,max}$ が異なる場合であり、この最大暖房負荷を下回る暖房負荷を設計条件とするため、設計条件とする暖房負荷の日積算値 Q_h はそれぞれ異なる値となる。Case 3 から Case 6 は、日射量と暖房負荷の 1 月、2 月の 2 ヶ月間の日積算値のうち、最大値となる日と中央値となる日の条件を選び、これらを組み合わせた条件である。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。

表 5 には表 4 に示した基準条件の下で、本簡易設計法により決定した定風量方式および変風量方式のそれぞれの設計パラメーターの値を示した。

本シミュレーションでは、碎石蓄熱槽を空気の流れ方向に 100 分割し、計算時間ステップを 0.05 秒として前進型有限差分法により碎石蓄熱槽内の碎石および空気温度を求め、蓄熱量を計算している。碎石蓄熱槽の入口空気温度については、ダクト等での熱損失は無視して、集熱時は集熱器出口空気温度に、放熱時は室温に等しいとしている。

Table 4 Design conditions of solar heating system for system simulation

Set point of room air temperature [°C]	20					
Volumetric heat capacity of rock bed [MJ/(m ³ K)]	1.19					
Collector type ($F'K$ [W/(m ² K)] / $F'(\tau\alpha)_e$)	Type A (3.37 / 0.76)	Type B (5.42 / 0.68)	Type C (7.44 / 0.65)			
Height of rock bed [m]	1.0	2.0	4.0			
Air flow rate per unit collector area for collecting for constant air flow rate system F_{col}/A_{col} [(m ³ /h)/m ²]	30	40	60			
Set point of air temperature at collector outlet for variable air flow rate system [°C]	30	40	50			
Amount of solar radiation on collector surface in a day [MJ/(m ² day)]	Reference condition	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Heating load in a day [MJ/day] (for solar and auxiliary heating)	20.4 (Feb.17)	20.4	20.4	23.5 ^{*1}	23.5 ^{*1}	13.8 ^{*2}
Maximum handling load of solar heating: $q_{h,max}$ [kW]	142 (Feb.17)	142	142	176 ^{*1}	118 ^{*2}	176 ^{*1}
Heating load in a day as design condition: Q_h [MJ/day]	6.0	4.0	8.0	6.0	6.0	6.0

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

Underlined values are in reference condition

(2) 計算結果と考察

図6には、基準条件とした2月17日を含む2月15日6:00から18日8:00までの三日間について、表4に示した基準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、集熱器出口空気温度、太陽熱暖房システムから室への吹出し空気温度等の計算結果の例を示している。図6(a)には定風量方式の、図6(b)には変風量方式の計算結果例を示した。定風量方式では集熱器出口空気温度が日射量に応じて変動した集熱となるのに対して、変風量方式では日射量に応じて風量を制御するため、日射量が小さいときを除いてほぼ一定温度の集熱となる。定風量方式、変風量方式とも、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(6 kWを下回る暖房負荷の日積算値)と太陽熱暖房システムからの放熱量の日積算値がほぼ等しいことから、設計目標に適ったシステムとなっていることが分かる。

Table 5 Design parameters obtained by the simple design method under the reference conditions in table 4

(1) Constant air flow rate system

Collector area [m ²]	12.7
Rock bed capacity [m ³]	4.08
Air flow rate for heat collection [m ³ /h]	507
Air flow rate for heating [m ³ /h]	820

(2) Variable air flow rate system

Collector area [m ²]	12.0
Rock bed capacity [m ³]	4.93
Maximum air flow rate for heat collection [m ³ /h]	940
Maximum air flow rate for heating [m ³ /h]	934

以下では、定風量方式と変風量方式のそれぞれの場合について、集熱器面積を本簡易設計法により決まる値に固定し、碎石蓄熱槽容量、放熱風量または集熱風量を変化させた場合の暖房期間全体の太陽依存率の計算結果を示す。なお、碎石蓄熱槽容量は、碎石蓄熱槽の熱媒空気の流れ方向の長さ(高さ)を固定し、水平断面積を変えることで槽容量を変化させている。

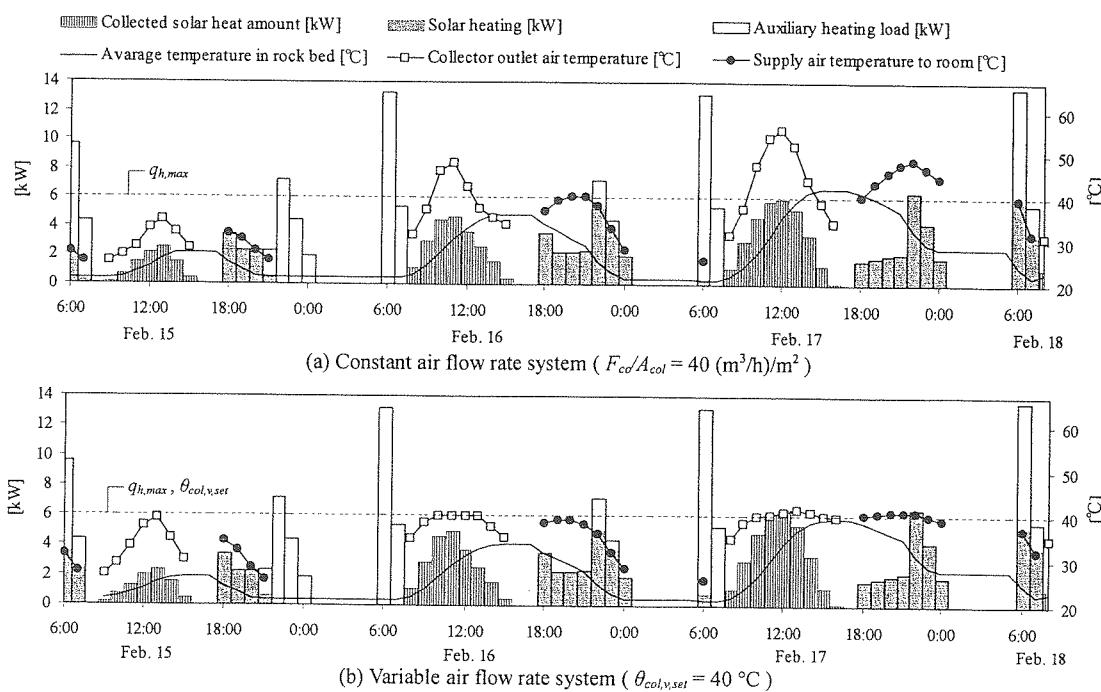


Fig.6 Example of results of system simulations (Feb. 15 - Feb. 18)

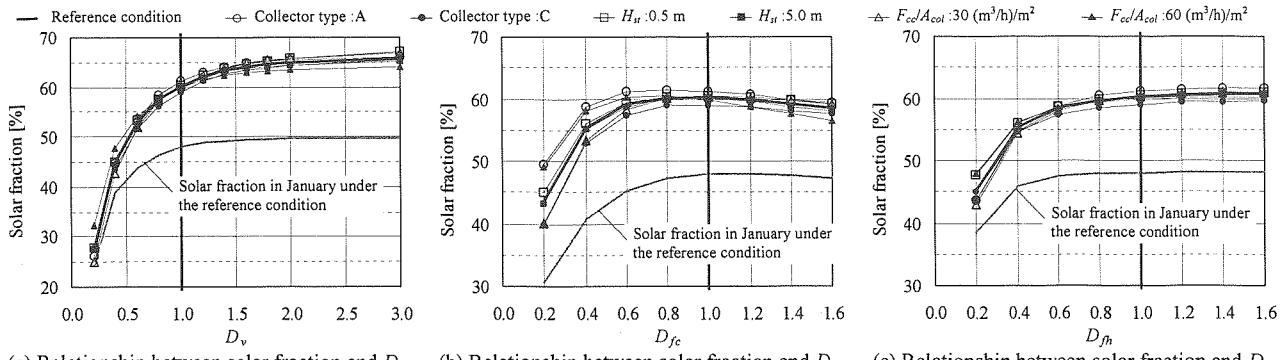


Fig.7 Effect of rock bed capacity, air flow rate for heating and air flow rate for heat collection on the solar fraction for constant air flow system under various conditions of collector performance, height of rock bed and air flow rate per unit collector area for heat collection

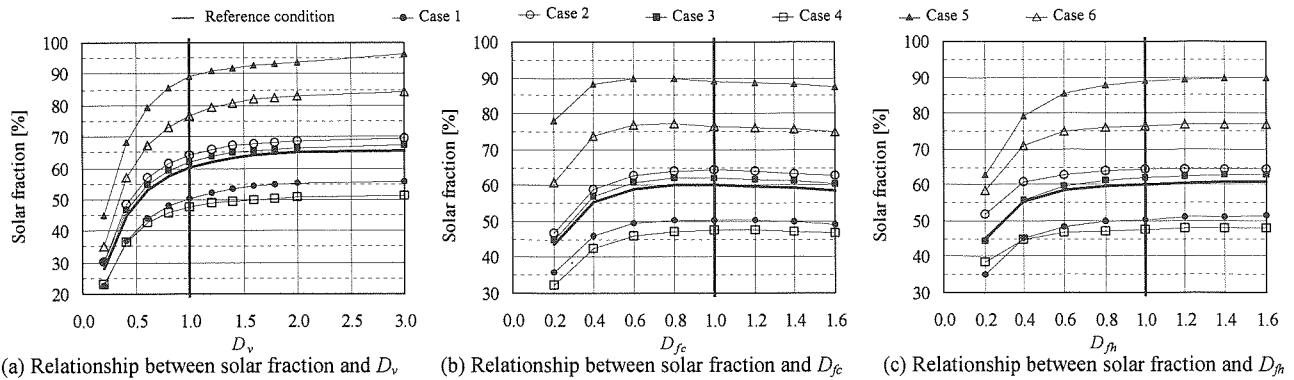


Fig.8 Effect of rock bed capacity, air flow rate for heating and air flow rate for heat collection on the solar fraction for constant air flow system under various conditions of heating load and solar radiation

a. 定風量方式の場合

図7には、定風量方式の場合の暖房期間の太陽依存率と碎石蓄熱槽容量、集熱風量または放熱風量との関係を、基準条件の場合と集熱器の特性、碎石蓄熱槽の高さまたは集熱器単位面積あたりの集熱風量を基準条件から変化させた場合について示し、図8には、設計条件とする日射量と暖房負荷の条件を変化させた場合について示している。図の横軸 D_v , D_{fc} , D_{fh} は、それぞれ碎石蓄熱槽容量、集熱風量および放熱風量の本簡易設計法により決定される値に対する割合であり、横軸の1.0が簡易設計法により決定される値を示している。

図7(a)の碎石蓄熱槽容量と太陽依存率の関係から、本簡易設計法により求められる値 ($D_v=1.0$) よりも、蓄熱槽容量を大きくすることで太陽依存率は上昇し、簡易設計法による値の2倍 ($D_v=2.0$) とすることで4.7%程度増加する。しかし、同図に示した1月の太陽依存率の結果では、蓄熱槽容量を増加させることの効果は小さく、本簡易設計法により決定した蓄熱槽容量は十分であるといえる。また、集熱器の特性や碎石蓄熱槽の高さ、集熱器単位面積あたりの集熱風量が槽容量と太陽依存率の関係に与える影響は、比較的小さいことがわかる。図8(a)からは、設計条件とする暖房負荷の値が大きく、日射量が小さいほど期間平均の太陽依存率は大きくなるが、ほぼ同様の傾向を示すことがわかる。以上の結果から、本設計法により決まる碎石蓄

熱槽容量よりも槽容量を大きくしても太陽依存率はそれほど増大しないことから、本簡易設計法による碎石蓄熱槽容量は概ね妥当な値であるといえる。

図7(b)の集熱風量と太陽依存率の関係から、 D_{fc} の値が0.8~1.0程度の範囲で太陽依存率が極大となることが分かる。集熱風量が過大な場合は集熱温度が低くなり、放熱量が低下するため太陽依存率が低下するが、その影響は小さい。また、1月の1ヶ月間の太陽依存率の結果では、太陽依存率が極大値をとる D_{fc} の値は若干大きく1.0~1.2程度の値となる。また、図7(a)と同様に集熱器性能や碎石蓄熱槽の高さ等の影響は小さいといえる。図8(b)の結果でも、設計条件とする日射量が小さい(Case 5, Case 6)場合を除いて、本設計法により決まる集熱風量は太陽依存率が極大となる風量付近の値であり、本設計法により決まる集熱風量の値は妥当であるといえる。

放熱風量については、図7(c)、図8(c)に示した放熱風量と太陽依存率の関係から、放熱風量が大きいほど太陽依存率は高くなるが、放熱風量を本設計法により決まる値よりも大きくしても、ほとんど太陽依存率は増加しないことがわかる。このことから本設計法により決まる放熱風量についても、妥当な値であるといえる。

以上の結果から、定風量方式のシステムについては、本設計法により決まる碎石蓄熱槽容量、集熱および放熱風量の値は、概ね妥当な値であるといえる。

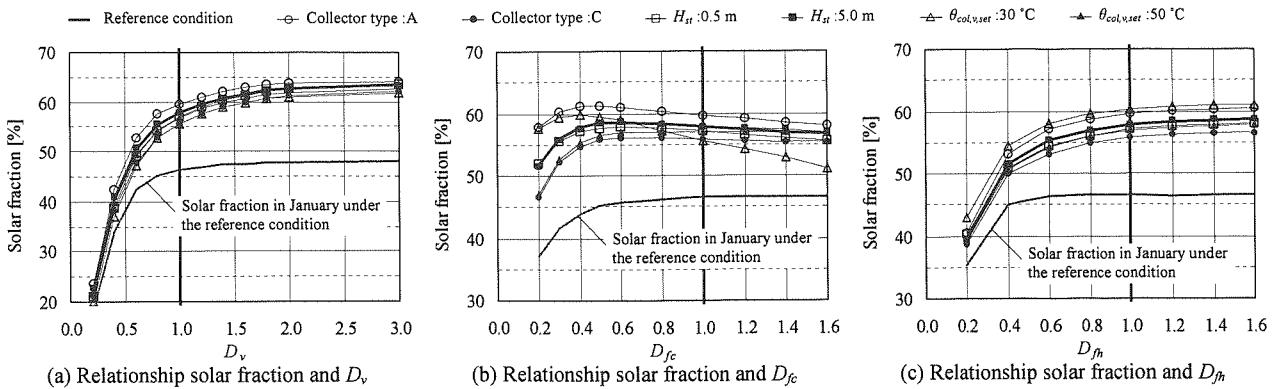


Fig.9 Effect of rock bed capacity, air flow rate for heating and air flow rate for heat collection on the solar fraction for variable air flow system under various conditions of collector performance, height of rock bed and set point for collector outlet air temperature

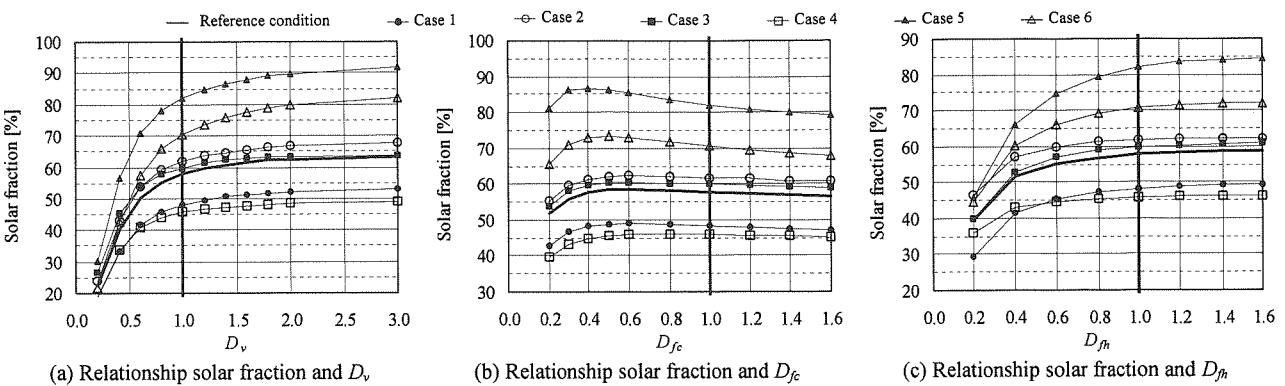


Fig.10 Effect of rock bed capacity, air flow rate for heating and air flow rate for heat collection on the solar fraction for variable air flow system under various conditions of heating load and solar radiation

b. 変風量方式の場合

図 9, 図 10 には、変風量方式の場合の太陽依存率と碎石蓄熱槽容量、集熱風量または放熱風量の制御上限値との関係を、図 7, 図 8 と同様に示している。

図 9(a)の碎石蓄熱槽容量と太陽依存率の関係から、定風量方式と同様に、本簡易設計法により求められる値 ($D_v=1.0$) よりも、蓄熱槽容量を大きくすることで太陽依存率は上昇し、槽容量を 2 倍 ($D_v=2.0$) とすることで 4.8% 程度増加する。しかし、同図に示した 1 月の太陽依存率の結果では、定風量方式の場合と同様に、蓄熱槽容量を増加させることによる効果は小さく、本簡易設計法により決定した蓄熱槽容量は十分であるといえる。また、集熱器の特性や碎石蓄熱槽の高さ等が槽容量と太陽依存率の関係に与える影響は、比較的小さいことがわかる。一方、日射量と暖房負荷の設計条件が異なる場合は、図 10(a)に示したように、槽容量を 2 倍 ($D_v=2.0$) とすることで、太陽依存率が Case 5 では 7.8%, Case 6 では 9.2% 程度増加する。しかし、晴天日の日射量を設計条件とした Case 1~4 では 5.0%未満と小さい。以上の結果から、設計条件とする日射量が小さい場合には、蓄熱槽の容量が若干不足していると思われるが、本設計法により決まる碎石蓄熱槽容量は概ね妥当な値であるといえる。

図 9(b), 図 10(b) には集熱風量の制御上限値と太陽依存率の関係を示している。変風量集熱方式の場合、集熱風量

の制御上限値 (D_{fc} の値) が小さいほど、日射量が大きいときに集熱器出口空気温度が高くなる場合が多いことから、集熱効率が低下し集熱量が減少することになる。しかし、日射量に対して暖房負荷が相対的に小さくなる春先等では蓄熱温度差が大きくなるために碎石蓄熱槽への蓄熱可能熱量が大きくなることから、日射量が十分にある日の余剰熱を蓄えておき、集熱量が不足する日の暖房負荷の一部を賄うことができるため、暖房期間の太陽依存率は増大することになる。結果的には、 D_{fc} の値が 0.4~0.8 の範囲で太陽依存率が極大となる。しかし、集熱風量の上限値を本設計法により求まる値としても、集熱設定温度が低い (30°C) 場合や設計条件とする日射量が小さい (Case 5, Case 6) 場合を除いて、太陽依存率の極大値からの低下量は小さいことがわかる。また、図 9(b)に示した 1 月の太陽依存率の結果では、集熱風量の上限値の低下とともに太陽依存率も低下することになる。以上の結果から、集熱風量の上限値についても、本設計法による値は概ね妥当であると考えている。もちろん、集熱風量の上限値を低くしても、太陽依存率が若干増加する場合もあるため、実際の設計では集熱用ファンが過大などならないように注意する必要がある。

図 9(c), 図 10(c) に示した放熱風量の制御上限値と太陽依存率の関係から、定風量方式と同様に、放熱風量の上限値を本設計法による値よりも大きくすることで太陽依存

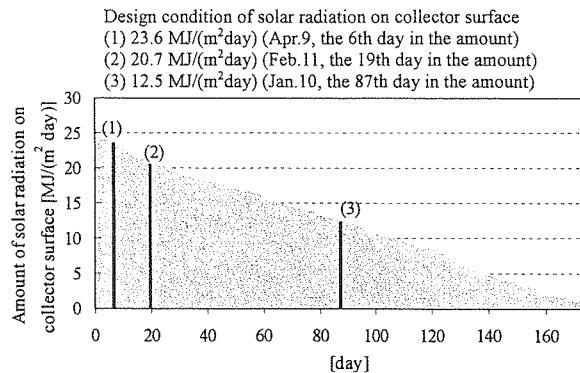


Fig.11 Amount of solar radiation on collector surface and heating load in each day during the heating period (put in order of amount) and design conditions for solar fraction calculation

率は若干高くなることがわかる。この太陽依存率の増加量は太陽依存率が大きいほど大きいが、その増加量は僅かであり、本設計法による放熱風量の値は適当であるといえる。

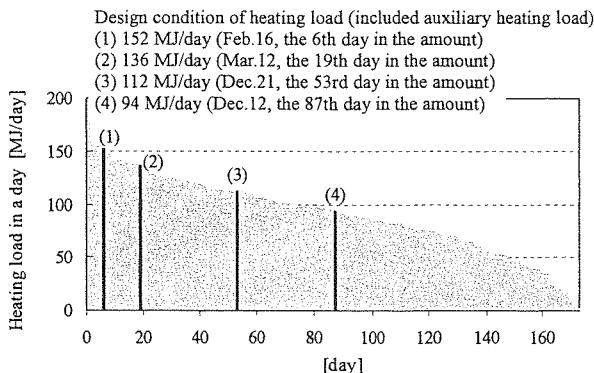
以上の結果から、変風量方式の場合の本簡易設計法により設計したシステムについても、概ね妥当であるといえる。

3.3 設計条件とする日射量と暖房負荷の太陽依存率との関係

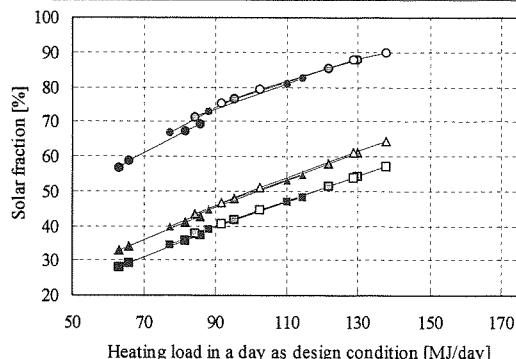
本節では、設計条件とする日射量（集熱器透過体表面の入射全天日射量）および暖房負荷と、この条件下で設計したシステムの太陽依存率の関係を明らかにする。設計条件とした日射量および暖房負荷条件を図11に示した。図11は、全暖房期間の各日の日射量および暖房負荷の日積算値を大きい順に並べた図であり、設計条件とした日の日積算値を黒塗潰しで表している。設計条件とした日射量は、全暖房期間（173日間）のうち日積算値が6番目、19番目、87番目に大きい日の値とした。これらは、それぞれ春先の晴天日（4月9日）、真冬の晴天日（2月11日）、日積算日射量が暖房期間の中央値となる日（1月10日）として選定している。暖房負荷条件としては、日積算暖房負荷が6、19、53、87番目に大きい日を選定し、それぞれ太陽熱暖房システムで貯う瞬時暖房負荷の最大値を3、5、7、9kWとしたときに、この瞬時暖房負荷を下回る暖房負荷を太陽熱で貯うとした。なお、日射量と暖房負荷以外の設計条件は表4に示した基準条件としている。

図12には設計条件として設定した日積算暖房負荷と太陽依存率の関係を示した。図12から、定風量方式と変風量方式のいずれのファンの制御方式でも、設計条件とする日積算暖房負荷が大きく、日射量の日積算値が小さいほど、集熱量を確保するため集熱器面積が大きくなり、太陽依存率は高くなる。また、日積算暖房負荷が等しければ、太陽熱暖房システムで貯う瞬時負荷の最大値が小さいほど太陽依存率が若干低下するが、太陽熱暖房システムで貯う負荷の最大値の影響は小さく、太陽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。

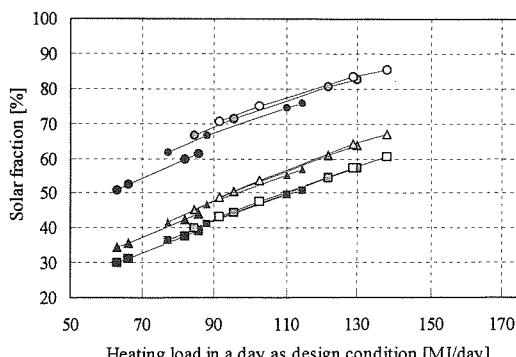
この結果から、設計条件とする日射量と暖房負荷条件を適切に選定することで、任意の太陽依存率の太陽熱暖房システムを設計できることが分かる。以下に、図4に示した



	Amount of solar radiation on collector surface [MJ/(m ² day)]	Maximum heating load of solar heating			
		3.0	5.0	7.0	9.0 [kW]
12.5	●	●	●	○	
20.7	▲	▲	▲	△	
23.6	■	■	■	□	



(a) Constant air flow rate system



(b) Variable air flow rate system

Fig.12 Relationship between solar fraction and heating load for solar heating

住宅に、太陽依存率が60%となる変風量方式の太陽熱暖房システムを設計する際の手順を例として示す。設計条件とする日射量を、日積算日射量が20.7MJ/(m²day)程度となる日（この場合は2月11日）の条件とすれば、暖房負荷条件としては暖房負荷の日積算値は、図12(b)から118MJ/dayと決まる。さらに、集熱器出口空気温度の設定値を50°C、碎石蓄熱槽の高さを2.0m、本システムにより貯う瞬時最大負荷を7.0kW、設定室温を20°Cとし、集熱器の特性係数の値が $F'K=5.42\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$, $F'(\tau\alpha)_e=0.68$ であるとすると、2.2節に示した変風量方式の場合の設計法の手順に従って算定することより、集熱可能な時間7.9h、集熱

時の積算日射量 19.8 MJ/m^2 , 規模補正係数 0.91 を求めることができる。これらの値から、設計パラメーターである集熱器面積 14.4 m^2 , 碎石蓄熱槽容量 3.63 m^3 , 集熱風量の制御上限値 $715 \text{ m}^3/\text{h}$, 放熱風量の制御上限値 $766 \text{ m}^3/\text{h}$ を得ることができる。

4. まとめ

本論文の内容を以下にまとめる。

- (1) 空気集熱式太陽熱暖房システムの簡易設計法の概要を、集熱および放熱風量の制御が定風量方式の場合と変風量方式の場合のそれぞれについて示した。
- (2) 標準気象データ（東京）を用いて暖房期全体の長期システムシミュレーションを行い、太陽依存率を指標として簡易設計法の妥当性について検討した。
- (3) 定風量方式および変風量方式の両システムとも、集熱器面積、碎石蓄熱槽容量、集熱および放熱風量の容量バランスは概ね妥当であることが明らかとなった。
- (4) 設計条件とする日積算暖房負荷と太陽依存率はほぼ比例関係にあることを示した。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依存率の太陽熱暖房システムを設計できることを示した。

注

- 1) 集熱器面積（式(4), 式(10)）は、一日の積算暖房負荷 (Q_h) を集熱器単位面積あたりの一日の積算集熱量 (Q_c/A_{col}) と規模補正係数 (R_c, R_v) で除した値として得ている。集熱器単位面積あたりの一日の積算集熱量 (Q_c/A_{col}) は、集熱器入口空気温度が常に室の暖房設定温度 θ_r に等しい場合の集熱量として、集熱器出口空気温度 ($\theta_{col,out}$) と集熱風量 F_c とから次式で求めることができる。

$$\frac{Q_c}{A_{col}} = c_{pa} \rho_a \int_{t_s}^{t_e} \frac{F_c}{A_{col}} (\theta_{col,out} - \theta_r) dt \quad (a)$$

定風量集熱の場合は、集熱器出口空気温度が日射量、外気温度等の関数の式(14)で表されるとして、式(a)に集熱器入口空気温度を室の暖房設定温度に等しいとした式(14)を代入した次式で、集熱器単位面積あたりの一日の積算集熱量を求めている。

$$\frac{Q_c}{A_{col}} = \frac{F'(\tau\alpha)_e \int_{t_s}^{t_e} I_{col} dt - F'K(\theta_r - \theta_{amb})(t_e - t_s)}{1 + \frac{1}{2} \frac{F'K}{c_{pa} \rho_a} \frac{1}{(F_{cc}/A_{col})}} \quad (14)$$

変風量集熱の場合は、式(15)で表される集熱風量と集熱器出口空気温度の設定値 ($\theta_{col,v,set}$) を式(a)に代入した次式で求めている。

$$\frac{Q_c}{A_{col}} = F'(\tau\alpha)_e \int_{t_s}^{t_e} I_{col} A_{col} dt - F'K \left(\frac{\theta_{col,v,set} + \theta_{col,in}}{2} - \theta_{amb} \right) (t_e - t_s) \quad (15)$$

記号

A_{col}	: 集熱器面積	[m ²]
A_{st}	: 蓄熱槽の断面積	[m ²]
c_{pa}	: 空気の定圧比熱	[J/(kg K)]
c_s	: 碎石の比熱	[J/(kg K)]
D_{fc}	: 簡易設計法により求められる集熱風量に対する集熱風量の割合	[-]
D_{fh}	: 簡易設計法により求められる放熱風量に対する放熱風量の割合	[-]
D_v	: 簡易設計法により求められる槽容量に対する	

d_e	: 碎石の等価直径	[m]
f	: 蓄熱槽の空隙率	[-]
F_{cc}	: 集熱風量(定風量方式)	[m ³ /s]
F_{cv}	: 集熱風量(変風量方式)	[m ³ /s]
$F_{cv,lim}$: 変風量方式の集熱風量の最大値または最小値	[m ³ /s]
$F_{cv,max}$: 変風量方式の集熱風量の最大値	[m ³ /s]
F_{hc}	: 放熱風量(定風量方式)	[m ³ /s]
F_{hv}	: 放熱風量(変風量方式)	[m ³ /s]
$F_{hv,max}$: 変風量方式の放熱風量の最大値	[m ³ /s]
F_{st}	: 蓄熱槽を通過する風量	[m ³ /s]
F'	: 集熱器効率因子	[-]
h_v	: 碎石と空気の間の体積熱伝達率	[W/(m ² K)]
H_{st}	: 蓄熱槽の高さ(熱媒の流れ方向の蓄熱槽長さ)	[m]
I_{col}	: 集熱器透過体表面での入射全日天日射量	[W/m ²]
$I_{col,ave}$: I_{col} の集熱時平均値	[W/m ²]
$I_{col,max}$: I_{col} の最大値	[W/m ²]
K	: 集熱器の熱損失係数	[W/(m ² K)]
t_s	: 集熱開始時刻	[s]
t_e	: 集熱終了時刻	[s]
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_c, R_v	: 定風量方式と変風量方式の規模補正係数	[-]
V_{st}	: 蓄熱槽容量	[m ³]
x	: 蓄熱槽入口側端部からの垂直距離	[m]
θ_{amb}	: 集熱時の集熱器周囲温度	[°C]
$\theta_{col,in}$: 集熱器入口空気温度	[°C]
$\theta_{col,c,out}$: 集熱器出口空気温度(定風量集熱方式)	[°C]
$\theta_{col,v,out}$: 集熱器出口空気温度(変風量集熱方式)	[°C]
$\theta_{col,v,set}$: 変風量集熱方式の集熱器出口空気の設定温度	[°C]
θ_r	: 暖房運転時の室温	[°C]
$\theta_{r,in}$: 室への吹出し空気温度	[°C]
$\theta_{st,a}$: 蓄熱槽内空気温度	[°C]
$\theta_{st,s}$: 蓄熱槽内碎石温度	[°C]
$\theta_{st,ave}$: 蓄熱終了時の蓄熱槽内碎石平均温度	[°C]
ρ_a	: 空気の密度	[kg/m ³]
ρ_s	: 碎石(蓄熱材)密度	[kg/m ³]
$(\tau\alpha)_e$: 集熱器の日射吸収率	[-]

参考文献

- 1) Duffie J.A. and Beckman W.A. : Solar engineering of thermal processes, John Wiley & Sons, pp.485-511, 1980
- 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) 田中俊六, 鈴木定彦, 他: 屋根一体形太陽熱・大気放射冷却装置に関する研究 その 4 各種空気集熱器の実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.569~570, 1982
- 7) 嘉納秀明著 : システムの最適理論と最適化, コロナ社, pp.81-84, 1995
- 8) Schumann T.E.W. : Heat transfer: A Liquid flowing through a porous prism, J. Franklin Inst. 208, pp.405-416, 1929
- 9) Sagara K. and Nakahara N.: Thermal Performance and Pressure Drop of Rock Beds with Large Storage Materials, Solar Energy, Vol.47 No.3, pp.157-163, 1991
- 10) Coutier J.P. and Farber E.A.: Tow Applications of a Numerical Approach of Heat Transfer Process within Rock Beds, Solar Energy, Vol.29, pp.451-462, 1982
- 11) 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