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

SIMPLIFIED DESIGN METHOD FOR AIR-BASED SOLAR HEATING SYSTEM

北野 博亮*, 相良 和伸**
Hiroaki KITANO and Kazunobu SAGARA

The purpose of this research is to develop a simplified design method for an air-based solar heating system with a rock bed storage tank. In this paper, several equations to determine capacity of rock bed and collector area according to design conditions, are obtained. They are derived from results of system simulations and the necessary and sufficient capacity of rock bed is calculated by using the equations. And the design method using several simple equations is presented. And as a result of system simulations under various design conditions, it is found that the simplified design method allows to design appropriate heating system under ordinary design conditions.

Keywords : solar energy, heating, rock bed, simplified design method

太陽エネルギー, 暖房, 碎石蓄熱槽, 簡易設計法

1. はじめに

一般に太陽熱暖房システムは, 初期投資額を節約できたエネルギー費で短期に償却することは容易ではないことから, 太陽熱暖房システムの最適設計は非常に重要であると言える。太陽熱暖房システムの設計手法¹⁾としては, 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。従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とされている。

本研究は, 碎石蓄熱槽を有する空気集熱式太陽熱暖房システムについて, 合理的な最適設計のための簡易な設計手法の開発を目的としている。本簡易設計法では, 設計条件としてのある一日に, 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ている。一般に, 太陽熱利用システムの設計では, 暖房期間全体の太陽熱依存率等の期間性能を指標としており, 設計したシステムの期間性能を f-chart 法²⁾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, 試行錯誤によりコレクター面積や碎石蓄熱槽容量等を決定している。本論文では期間性能については検討していないが, 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等により明らかにすることで, 設計者が目標とするシステム

の性能から適切な気象条件や暖房負荷条件を決定でき, 本簡易設計法でも, 期間性能を考慮した設計が可能となると考えている。

既報²⁾では, 集熱ファンの制御が単純な定風量集熱の場合について, 蓄熱槽効率の点で最適な蓄熱槽容量について理論的検討を行い, 集熱風量と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。

本論文では, 変風量集熱方式の場合について, 集熱温度に応じた最適蓄熱槽容量について理論的検討を行い, 集熱温度, 最適蓄熱槽容量および一日の蓄熱量の関係が近似的に得られる関係式を導出し, これらの関係式を用いた簡易設計法を提案する。また, この簡易設計法により設計されたシステムの蓄熱・放熱繰返し運転のシステムシミュレーションを行い, 本簡易設計法の適用範囲についても検討する。

2. 対象システムと設計条件

対象としたシステムは, その概略を図1に示したような, 平板型コレクター, 碎石蓄熱槽, 室から構成される空気集熱式太陽熱暖房システムである。ここで, 集熱および放熱のためのファンは, インバータにより回転数制御がなされるとした。本論文で対象とする変風量集熱方式は, 定風量集熱方式と比較して初期コストが高くなるが, 定風量集熱方式では集熱温度が暖房に利用できない低温度とな

* 三重大学工学部建築学科 助手・修士(工学)

** 大阪大学大学院工学研究科建築工学専攻 教授・工博

Research Assoc., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Mie University, M. Eng.

Prof., Dept. of Architectural Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University, Dr. Eng.

図1 対象システムの概略図

る場合でも、集熱風量を絞ることで暖房に有効な温度で集熱でき、蓄熱槽からの放熱温度が比較的高温となるため、放熱側のファンでのエネルギー消費量を削減できると考えている。

一般に、太陽熱暖房システムだけでは冬季の暖房負荷を全て処理することはできないので、補助暖房器具が必要である。本研究では、補助暖房として居室に設置する強制対流式の暖房器具を想定しているが、設計条件とした日に補助暖房は使用しなくとも負荷を処理できる太陽熱暖房システムの設計法の検討を行っているので、本論文の対象システムの図(図1)には補助暖房器具は示していない。

表1には設計条件を示した。ここでは、気象条件として東京の2月1日の晴天日を例として検討している。コレクターの方位角を0°(真南)、傾斜角を45°とし、集熱を行う日中の外気温度は0°Cで一定であると仮定した。コレクター面への日射量は、Bouguerの直達日射量の式とBerlageの天空日射量の式から計算される値を用いた³⁾。碎石蓄熱槽は、熱媒空気の流れ方向が鉛直方向となるように設置し、形状は水平断面が正方形の直方体で、高さは水平断面の辺の長さの二倍であるとした。蓄熱槽内初期温度は、20°C一様としているが、これは暖房時に放熱が完了した時点で、槽内が暖房設定温度となっているとしているためである。

3. シミュレーションによる蓄熱槽容量と蓄熱量の関係

3.1 シミュレーションのモデル

集熱・蓄熱特性の把握のため、コレクターのモデルと碎石蓄熱槽の伝熱モデルを用いて数値計算を行った。このシミュレーションでは、コレクター以外のダクトや蓄熱槽からの熱損失とファンでの発熱や摩擦による熱取得は相殺されるものと仮定し、これらの影響は無視している。

(a) コレクター

変風量集熱の場合の集熱風量は、Hottel-Whillierのコレクター効率の一次の定義式^{1), 3)}(式(1))と、集熱量と集熱面に入射する日射量の比で表される効率の式(式(2))から集熱効率(η)を消去し、コレクターの出口空気温度($\theta_{col,out}$)をコレクター出口空気温度の制御の目標値(以下では集熱設定温度)($\theta_{col,set}$)に置き換えた式(3)で計算できるものとした。

$$\eta = \frac{F'(\tau\alpha)_e - F'K_{col}(\theta_{col,out} + \theta_{col,in})/2 - \theta_{amb}}{I_{col}} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{c_a \rho_a F_a A_{col} (\theta_{col,out} - \theta_{col,in})}{I_{col} A_{col}} \quad (2)$$

表1 設計条件

設置位置	東京(北緯35.4° 東経139.5°)
設定日	2月1日
天候	快晴
大気透過率 ³⁾	0.78
太陽定数 ³⁾	1.37 kW/m ²
外気温度	0°C(集熱時一定)
コレクター	
方位角	0°(真南向き)
傾斜角	45°
蓄熱槽	
槽形状	1:1:2(熱媒空気流れ方向)
碎石の容積比熱	1.92 MJ/(m ³ ·K)
碎石の等価直径	0.04 m
空隙率	0.38 m ³ /m ³
初期温度	20°C

表2 コレクターの特性と仕様

コレクターの種類	Type A	Type B	Type C
$F'K_{col}$ [W/(m ² ·K)]	3.37	5.42	7.44
$F'(\tau\alpha)_e$ [-]	0.76	0.68	0.65
集熱板	選択吸収面	黒色塗装	黒色塗装
集熱方式	裏面集熱	裏面集熱	表面集熱

$$Fa_{col} = \frac{F'(\tau\alpha)_e I_{col} A_{col} - F'K_{col} \{(\theta_{col,set} + \theta_{col,in})/2 - \theta_{amb}\} A_{col}}{c_a \rho_a (\theta_{col,set} - \theta_{col,in})} \quad (3)$$

シミュレーションに用いたコレクターの特性係数とその仕様を表2に示した。これらの特性係数は、田中等⁴⁾の実験結果の図から読み取った値である。ここでは、集熱風量、長波長放射および日射のコレクター面への入射角度の影響は無視し、定数と仮定している²⁾。

(b) 碎石蓄熱槽

碎石蓄熱槽の伝熱モデルには、Schumannによって提案されたモデルを用いた。Schumannモデル⁵⁾は以下の仮定に基づいている。

- (1) 蓄熱材として小径の碎石を想定しているので、個々の碎石内部の温度は一様である。
- (2) 槽内空気は一次元流れであり、流速分布は断面全体にわたって一様である。

さらに、Schumannモデルの蓄熱槽内空気の熱収支式について、空気の熱容量は碎石に比べて十分小さいのでこれを無視し、熱伝導による碎石蓄熱槽内の熱拡散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(4)、式(5)となる⁶⁾。

$$c_a \rho_a Fa_{st} \frac{\partial \theta_{st,a}}{\partial x} = h_v A_{st} (\theta_{st,s} - \theta_{st,a}) \quad (4)$$

$$c_s \rho_s A_{st} (1-f) \frac{\partial \theta_{st,s}}{\partial t} = h_v A_{st} (\theta_{st,a} - \theta_{st,s}) \quad (5)$$

ここで、体積熱伝達率(h_v)には、Coutier等の実験式⁷⁾(式(6))を用いた。

$$h_v = 700 \left(\frac{Fa_{st} \rho_a}{A_{st} d_e} \right)^{0.76} \quad (6)$$

一日の蓄熱量(Q_c)は、集熱終了時の蓄熱槽内碎石温度($\theta_{st,s}|_{t=end}$)から、蓄熱槽内空気の熱容量を無視できるものとして、次式を用いて計算した。

$$Q_c = c_s \rho_s (1-f) A_{st} \int_0^{H_{st}} (\theta_{st,s}|_{t=end} - \theta_o) dx \quad (7)$$

3.2 計算条件および計算方法

本論文で検討している太陽熱暖房システムは、変風量・定温度集

熱方式としているので、集熱用ファンは、集熱温度が設定値となるようにインバータにより制御されるとし、その制御下限値を風量の上限値の30%とした。集熱風量の上限値は、コレクター入口空気温度($\theta_{col,in}$)が蓄熱槽初期温度(θ_0)であり、コレクター面への日射量が最大値となるときの、集熱温度が集熱設定温度となる風量とし、次式により求めた。

$$Fa_{col}|_{max} = \frac{F'(\tau\alpha)_e I_{col}|_{max} A_{col} - F'K_{col} \left\{ (\theta_{col,set} + \theta_0) / 2 - \theta_{amb} \right\} A_{col}}{c_a \rho_a (\theta_{col,set} - \theta_0)} \quad (8)$$

式(3)で求めた集熱風量が制御範囲外の場合には、式(3)の集熱風量を集熱風量の上限値または下限値($Fa_{col,l}$)として、コレクター出口空気温度について整理した次式により集熱温度を求めた。

$$\theta_{col,out} = \frac{\left(c_a \rho_a \frac{Fa_{col,l}}{A_{col}} - \frac{F'K_{col}}{2} \right) \theta_{col,in} + F'(\tau\alpha)_e I_{col} + \theta_{amb} F'K_{col}}{c_a \rho_a \frac{Fa_{col,l}}{A_{col}} + \frac{F'K_{col}}{2}} \quad (9)$$

集熱運転をする条件は、コレクター入口空気温度が集熱設定温度よりも低く、式(9)で集熱風量($Fa_{col,l}$)を0としたときにコレクターの出口空気温度が集熱設定温度($\theta_{col,set}$)よりも高くなるとした。すなわち、コレクター面への日射量が式(10)を満たし、コレクター入口空気温度が集熱設定温度よりも低いとき集熱することとした。

$$I_{col} > \frac{F'K_{col} \left\{ (\theta_{col,set} + \theta_{col,in}) / 2 - \theta_{amb} \right\}}{F'(\tau\alpha)_e} \quad (10)$$

一日の蓄熱量(Q_c)を求めるための集熱終了時の蓄熱槽内碎石温度分布は、式(4)と式(5)を前進型有限差分法により求めた。碎石蓄熱槽を空気の流れ方向に100分割、時間の差分刻み(Δt)は、式(11)で求められる値とした。

$$\Delta t = \frac{c_s \rho_s (1-f) V_{st}}{c_a \rho_a Fa_{col}} \times 10^{-7} \quad (11)$$

この時間刻みは、次式で定義した無次元時間(t^*)で、単位無次元時間を 10^7 分割するときの実時間刻みであり、計算の安定性のため槽容量が小さく風量が大いほど差分時間刻みが小さくなるようにしている。

$$t^* = \frac{c_a \rho_a \int_0^t Fa_{col} dt}{c_s \rho_s (1-f) V_{st}} \quad (12)$$

碎石蓄熱槽入口空気温度(コレクター出口空気温度)および集熱風量は、コレクターの入口空気温度が碎石蓄熱槽の出口空気温度に等しいとして、コレクターのモデル式から求めた。

3.3 計算結果と最適蓄熱槽容量

図2は、コレクター単位面積あたりの一日の蓄熱量の計算結果であり、コレクター単位面積あたりの蓄熱槽容量との関係を、集熱設定温度毎に、性能の異なる3種のコレクターについて示している。この図はコレクター面積が 20m^2 の場合の結果であるが、コレクター面積が異なる場合であってもほぼ同様の結果が得られる。一般に、蓄熱槽容量が大きくなるほど槽出口空気温度(=コレクター入口空気温度)が上昇し難くなるため、平均集熱効率が高くなり蓄熱量が増大するが、槽出口空気温度は槽内初期温度(θ_0)以下にはならないので、コレクターへの入口空気温度が常に槽内初期温度である場合の積算集熱量以上には増大しない。この蓄熱量を以下では限界蓄熱量と呼ぶ。また、集熱温度が低いほど蓄熱密度は低くなるが、コレクターの効率が高くなる条件で集熱するため、この限界蓄熱量を増大することになる。

図3には、コレクターの出入口空気温度および集熱風量をコレクター単位面積あたりの蓄熱槽容量が $0.10, 0.25, 0.50\text{m}^3/\text{m}^2$ の場合に

図2 シミュレーションによるコレクター単位面積あたりの蓄熱槽容量と蓄熱量の関係

図4 集熱終了時の蓄熱槽内温度分布 (コレクターの種類: Type B, 集熱設定温度: 50°C)

図3 コレクター出入口空気温度およびコレクター単位面積あたりの集熱風量の日変化 (コレクターの種類: Type B, 集熱設定温度: 50°C)

ついて示しており、図4には、集熱終了時の槽内温度分布を、蓄熱槽上端から下方への垂直距離を蓄熱槽高さで除した無次元距離を横軸として示している。これらの図から、蓄熱槽容量が、 $0.1\text{m}^3/\text{m}^2$ の場合には、図3(a)に示したように、コレクター入口空気温度(蓄熱槽出口空気温度)の上昇が早く、日射量が十分あるにもかかわらず集熱が早く終了することから、蓄熱槽容量が不足であると言える。また蓄熱槽容量が $0.50\text{m}^3/\text{m}^2$ の場合には、図4から蓄熱槽下部の碎石温度は初期温度にほぼ等しく、蓄熱槽を有効に利用できていないことが分かる。一方、蓄熱槽容量が $0.25\text{m}^3/\text{m}^2$ の場合には、一日の集熱量は図2から上述の限界蓄熱量にほぼ等しく、また図4から蓄熱槽全体の温度が集熱温度でほぼ一様であることから、この蓄熱槽容量は限界蓄熱量を蓄熱するのに必要十分であると言える。

シミュレーション結果から、本論文では、限界蓄熱量をほぼ蓄熱できる最小の蓄熱槽容量を容量効率の観点から見た最適蓄熱槽容量と定義する。次章ではこの最適蓄熱槽容量を近似的に求めるための関係式を導出し、その関係式を利用した簡易設計法を提案する。

4 簡易設計法

4.1 集熱側システム

最適蓄熱槽容量を近似的に求めるため、以下に示す蓄熱量についての二つの関係式を導出した。両式の導出にあたって、集熱風量に制限は無く、集熱している間はコレクター出口空気温度は集熱設定温度に等しいと仮定した。

〔槽容量が最適蓄熱槽容量よりも十分に大きい場合の蓄熱量〕

蓄熱槽容量が最適蓄熱槽容量よりも十分に大きい場合には、図3(c)に示したコレクター単位面積あたりの蓄熱槽容量が $0.5\text{m}^3/\text{m}^2$ のコレクター入口空気温度の日変化から分かるように、集熱時はコレクター入口空気温度が常に初期温度に等しいと仮定でき、コレクター面への日射量が式(13)を満たす間は集熱できる。このとき一日の蓄熱量は集熱量に等しく、式(14)で表すことができる。この式(14)はコレクター性能と集熱設定温度に応じた限界蓄熱量を近似的に表す式である。

$$I_{col} > \frac{F'K_{col} \{(\theta_{col, set} + \theta_o)/2 - \theta_{amb}\}}{F'(\tau\alpha)_c} \quad (13)$$

$$Q_c = c_a \rho_a (\theta_{col, set} - \theta_o) \int_{t_i}^{t_f} F a_{col} dt \quad (14)$$

〔槽容量が最適蓄熱槽容量よりも十分に小さい場合の蓄熱量〕

一方、蓄熱槽容量が最適蓄熱槽容量よりも十分小さい場合には、図3(a)に示したように、蓄熱槽下部の碎石温度が集熱終了前に上昇して、コレクター入口空気温度が上昇し、コレクター出口空気温度を集熱設定温度に制御するために、集熱風量が增大する。図5には、コレクター単位面積あたりの蓄熱槽容量が $0.1\text{m}^3/\text{m}^2$ 、集熱設定温度が 50°C 、コレクターの種類がType Bの場合で、集熱風量に制限が無く、集熱温度が常に集熱設定温度となる条件での蓄熱槽内碎石温度と集熱風量の経時変化を示した。この図から、集熱終了直前には、集熱風量が急増し、蓄熱槽の上端と下端の碎石温度がほぼ等しく集熱設定温度になっていることが分かる。理論的にも、コレクター入口空気温度が集熱設定温度に等しくなるときには、集熱風量は無限大の値となり、集熱終了時に蓄熱槽内が一様に集熱設定温度になると考えられる。このときの蓄熱量は、蓄熱槽の熱容量と蓄熱開始時

と終了時の温度差から次式で求められる。

$$Q_c = c_s \rho_s (1-f) (\theta_{col, set} - \theta_o) V_{st} \quad (15)$$

図6には、集熱設定温度が 40°C の場合について、シミュレーションによる碎石蓄熱槽容量と一日の蓄熱量の関係および式(14)と式(15)の計算結果を示した。この図から、式(14)と式(15)の交点として、それぞれの集熱温度での限界蓄熱量と容量効率的に最適な蓄熱槽容量を近似的に得られることが分かる。ここで、槽容量が最適蓄熱槽容量よりも小さい部分で、シミュレーションによる蓄熱量の値が式(15)で求めた値よりも大きくなっているのは、集熱風量に上限値を設け、集熱温度が集熱設定温度よりも高くなることを許容しているためである。

さらに、式(14)と式(15)の交点として近似的に得られる最適蓄熱槽容量は、式(14)と式(15)から一日の蓄熱量(Q_c)を消去して、蓄熱槽容量(V_{st})を最適蓄熱槽容量(V_{opt})とした次式で表される。

$$V_{opt} = \frac{c_a \rho_a \int_{t_i}^{t_f} F a_{col} dt}{c_s \rho_s (1-f)} \quad (16)$$

この式は、既報²⁾で示した定風量集熱の場合の最適蓄熱槽容量の近似式を包含している式となっており、定風量集熱の場合は、集熱風量の時間積分の項は集熱時間と集熱風量の積となる。

式(14)、式(16)の集熱風量にコレクター入口空気温度を蓄熱槽初期温度とした式(3)を代入し、一日の蓄熱量(Q_c)が、本簡易設計法による太陽熱暖房システムで、蓄熱し、放熱できると見込む熱量(Q_s) (以下では蓄熱容量)と等しいとして解くと式(17)、式(18)となる。ここで、式(17)はコレクター面積を、式(18)は碎石蓄熱槽容量を求

図5 集熱風量に制御範囲の制限が無い場合の集熱風量と蓄熱槽内碎石温度 ($V_{st}/A_{col}=0.1$, 集熱温度 50°C , コレクター Type B の場合)

図6 シミュレーションによる碎石蓄熱槽容量と一日の蓄熱量の関係および式(14)と式(15)の計算結果 (集熱設定温度 40°C)

めるための設計条件との関係式である。

$$\frac{Q_s}{A_{col}} = \left\{ \theta_{amb} - (\theta_{col, set} + \theta_o) / 2 \right\} F'K_{col} (t_e - t_s) + F'(\tau\alpha)_e \int_{t_s}^{t_e} I_{col} dt \quad (17)$$

$$\frac{V_{api}}{A_{col}} = \frac{F'(\tau\alpha)_e \int_{t_s}^{t_e} I_{col} dt + \left\{ \theta_{amb} - (\theta_{col, set} + \theta_o) / 2 \right\} F'K_{col} (t_e - t_s)}{c_s \rho_s (1-f) (\theta_{col, set} - \theta_o)} \quad (18)$$

4.2 放熱側システム

放熱側システムで設計する値は、本簡易設計法では放熱用ファンの最大風量のみとし、ダクトの設計とダクト等での圧力損失の計算は別途行われるものとした。放熱最大風量は、蓄熱槽から放熱し、室に吹出す空気温度が集熱設定温度に等しい場合に、暖房負荷の最大値をこのシステムで処理できる必要十分な吹出し風量とすれば、次式を用いて算出できることになる。

$$Fa_{h, max} = \frac{q_h |_{max}}{c_a \rho_a (\theta_{col, set} - \theta_o)} \quad (19)$$

この章で示した簡易設計法のまとめを表3に示した。表中の○印は設計パラメータ等を決定するために必要な設計条件である。例えば、コレクター面積は、設計条件として、集熱可能な時間、蓄熱容量、室設定温度、コレクターの特性、コレクター面日射量の集熱時の積算値、集熱設定温度、集熱時平均外気温度が必要であり、式(17)により算出することができる。

以下に設計手順を示す。①コレクター面日射量から、式(13)の不等式を満たす時間（集熱可能な時間）を求める。②集熱可能な時間、その間の積算日射量および設計条件から式(17)によりコレクター面積を求める。③碎石蓄熱槽容量を式(18)により求める。④集熱風量と放熱風量の最大値は、式(8)、式(19)により求める。

表3 4章での簡易設計法のまとめ

				風量の最大値	
碎石蓄熱槽容量				集熱時	放熱時
コレクター面積				○	○
集熱可能な時間				○	○
設計条件	蓄熱容量(=日積算暖房負荷)	○	○		
	暖房負荷		○		○ ¹⁾
	室設定温度	○	○	○	○
	コレクターの特性	○	○	○	○
	蓄熱槽の容積比熱			○	
	コレクター面日射量	○ ²⁾	○ ²⁾	○ ²⁾	○ ¹⁾
	集熱設定温度	○	○	○	○
集熱時平均外気温度				○	○
設計に用いる関係式				式(8)	式(19)
				式(13)	式(17)
				式(18)	式(19)

表中の太字は設計パラメータ。○印は設計パラメータ等を決定するために必要な設計条件

(注) *1:一日の最大値。*2:任意の時刻の値。*3:集熱時の積算値

5. 蓄熱・放熱シミュレーション

ここでは、本簡易設計法により決定した設計値を用いて、蓄熱および放熱の繰返し運転のシミュレーションを行い、周期的定常状態の太陽熱暖房システムによる室への供給熱量を算出し、本簡易設計法の妥当性と適用範囲について検討を行った。

5.1 放熱シミュレーションのモデルと計算方法

放熱シミュレーションでも、碎石蓄熱槽のモデルとして、3.1で示した伝熱モデルを用いた。このモデルでは、熱伝導による熱の垂直方向への拡散や蓄熱槽からの熱損失、ファン停止時の蓄熱槽内の空気の対流を無視しているため、放熱停止時は、蓄熱槽内の温度分布は変化しないことになる。

室モデルは、暖房時間帯は室温が20℃一定に保たれるものとし、室から碎石蓄熱槽への還り空気温度を室温の設定値の20℃で一定であるとした。ここで、室を20℃に保つための暖房負荷を計算条件として与え、この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た。補助暖房の方法としては、居室に設置する強制対流式の暖房器具を想定している。

放熱シミュレーションは、蓄熱終了時の蓄熱槽内温度を初期条件として、放熱温度が設定室温+5℃(25℃)以下となるか、暖房時間が終了するまで行い、放熱終了時と蓄熱終了時の蓄熱槽内温度の差から積算放熱量を求めた。蓄熱槽内温度は、蓄熱槽を空気の流れ方向に100分割、時間の差分刻み(Δt)は、0.01sとして求めた。

暖房負荷(q_h)を処理できる放熱風量(Fa_{h,i})は、放熱温度(θ_h) (碎石蓄熱槽出口空気温度)から、次式で表される。

$$Fa_{h,i} = \frac{q_h}{c_a \rho_a (\theta_h - \theta_o)} \quad (20)$$

ここで、放熱用ファンもインバータにより制御されるとし、その制御下限値を式(19)より求まる放熱風量の上限値の30%とした。このときの、放熱風量(Fa_h)および補助暖房熱量を表4に示した。

表4 放熱風量と補助暖房熱量

	放熱風量 Fa _h [m ³ /s]	補助暖房熱量 q _i [W]
Fa _{h,i} < 0	0	q _h
0 < Fa _{h,i} < Fa _{h,min}	Fa _{h,min}	0
Fa _{h,min} < Fa _{h,i} < Fa _{h,max}	Fa _{h,i}	0
Fa _{h,max} < Fa _{h,i}	Fa _{h,max}	q _h $\frac{Fa_{h,max}}{Fa_{h,i}}$

ここで、0 < Fa_{h,i} < Fa_{h,min} のとき、単位時間あたりの太陽熱暖房システムからの供給熱量が、暖房負荷を上回ることになるので、放熱量と暖房負荷が一致するように、差分計算時間ステップ(Δt)内でON-OFF制御されると考えて、太陽熱暖房システムを運転する時間(Δt_r)を(Δt_r = Δt Fa_{h,i} / Fa_{h,min})として計算した。

5.2 計算条件

表5に、蓄熱・放熱シミュレーションの条件を示した。システムの蓄熱容量(Q_s)は100, 200, 400MJの3通り、暖房時間は、夜間の4時間と翌朝の2時間の合計6時間、および夜間6時間と翌朝3時間合計9時間の2通り、計算に用いた暖房負荷パターンは、図8に示したように4通りを設定し、さらに、それぞれの負荷パターンで、設定負荷の最大値(図中③)と最小値(図中①)の比が2:1, 3:1, 5:1となる場合を設定した。さらに暖房負荷パターンT1については夜間と翌朝の負荷が等しい場合も含めて、合計26通りの負荷パターンについて蓄熱・放熱シミュレーションを行った。暖房負荷パターンのT1は夜間と翌朝のそれぞれの負荷が一定であり、T2からT4は蓄熱負荷を考慮したものである。

表6、表7には、式(8)および式(17)～式(19)を用いて算出した設計値を示している。表6には、蓄熱容量が100MJの場合のコレクタ

表5 蓄熱放熱シミュレーション条件

暖房時間	6時間(夜間4h, 翌朝2h), 9時間(夜間6h, 翌朝3h)
蓄熱容量	100, 200, 400 MJ
コレクターの種類	Type B
集熱設定温度	30, 40, 50, 60℃

- ① 設定暖房負荷の最小値 $q_{h\min}$
 ② 設定暖房負荷の最小値と最大値の平均 $(q_{h\min} + q_{h\max})/2$
 ③ 設定暖房負荷の最大値 $q_{h\max}$

(a) 暖房時間が6時間の負荷パターン

(b) 暖房時間が9時間の負荷パターン

図8 暖房負荷のパターン

一面積、蓄熱槽容量および集熱風量の最大値を集熱設定温度毎に示し、表7には放熱風量の上限値を負荷パターン毎に示している。

蓄熱・放熱シミュレーションでは、初期蓄熱槽内温度が室温設定温度で同様であるとして、蓄熱・放熱を繰り返してほぼ周期的定常状態となった7周期目の太陽熱暖房システムの一日の積算放熱量、積算補助暖房熱量等を算出した。

5.3 計算結果と考察

図9には、蓄熱・放熱シミュレーションにより算出された、太陽熱暖房システムからの積算放熱量の日積算暖房負荷に対する割合（以下では充足率）を図示している。これは、蓄熱容量を100MJとした場合の、表7に示した全ての暖房負荷条件についての計算結果である。

蓄熱容量が積算暖房負荷に等しいとして設計したシステムでは、暖房負荷の90～98%程度しか賄うことができない。充足率への影響は、設定した条件の範囲では集熱設定温度と負荷パターンの違いによるものが比較的大きく、暖房時間と設定負荷の最大値と最小値の比の影響は小さい。蓄熱容量が異なる場合でも同様の結果であり、図10に示すように、充足率が最大および最小となる暖房負荷条件は同じであり、蓄熱容量が大きくなるほど充足率が若干大きくなるが、蓄熱容量が100MJと400MJの間でも、最大で1.5%程度の差である。

充足率は、集熱設定温度が高くなるほど低い値となるが、これは、図11に示した槽内無次元温度分布の図から分かるように、集熱設定温度が高いほど、集熱終了時の「(碎石温度-室温)/(集熱設定温度-室温)」で定義した無次元温度が低くなるからである。これは、同

図9 充足率（蓄熱容量 100MJ、表7の条件についての計算結果。図中実線は、最大値と最小値）

図10 充足率の最大値と最小値（蓄熱容量 100MJ, 200MJ, 400MJ）

図11 蓄熱槽内碎石無次元温度分布（蓄熱容量 100MJ、負荷の最小値と最大値の比 1:1、暖房時間 6時間）

表6 簡易設計法による集熱側システムの設計パラメータの値*（設計用積算暖房負荷が100MJの場合）

	集熱設定温度			
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
コレクター面積 [m ²]	9.69	10.49	11.40	12.46
碎石蓄熱槽容量 [m ³]	8.39	4.20	2.80	2.10
集熱風量上限値 [m ³ /h]	1,522	782	536	415

設計用積算暖房負荷が200MJ, 400MJの場合は、これらの値は2倍, 4倍となる。

表7 暖房負荷条件ごとの放熱風量の最大値（蓄熱容量が100MJで、集熱設定温度が30°Cの場合）

暖房負荷条件番号	暖房負荷パターン (図8)	暖房時間 [h]	設定負荷の最大値と最小値の比	暖房負荷* [kW]		放熱風量の最大値 [m ³ /h]
				最大値	最小値	
1	T1	6	2:1	6.94	3.47	2,073
2	T2			7.94	3.97	2,370
3	T3			7.41	3.70	2,212
4	T4			6.94	3.47	2,073
5	T1	9	3:1	4.63	2.31	1,382
6	T2			5.56	2.78	1,659
7	T3			5.29	2.65	1,580
8	T4			4.83	2.42	1,442
9	T1	6	5:1	8.33	2.78	2,488
10	T2			10.42	3.47	3,110
11	T3			9.26	3.09	2,764
12	T4			8.33	2.78	2,488
13	T1	9	1:1	5.56	1.85	1,659
14	T2			7.58	2.53	2,262
15	T3			6.94	2.31	2,073
16	T4			5.95	1.98	1,777
17	T1	6	5:1	9.92	1.98	2,962
18	T2			13.89	2.78	4,147
19	T3			11.57	2.31	3,456
20	T4			9.92	1.98	2,962
21	T1	9	1:1	6.61	1.32	1,975
22	T2			10.68	2.14	3,190
23	T3			9.26	1.85	2,764
24	T4			7.31	1.46	2,182
25	T1	6	1:1	4.63 (一定)		1,382
26	T1	9	1:1	3.09 (一定)		921

* 蓄熱容量が200MJ, 400MJの場合は、この値の2倍, 4倍の値となる。

** 集熱温度が異なる場合、この値の1/2倍(40°C)、1/3倍(50°C)、1/4倍(60°C)の値。蓄熱容量が異なる場合は、さらに、2倍(200MJ)、4倍(400MJ)した値となる。

じ無次元温度差でも、集熱設定温度が高いほど外気温度と集熱時のコレクター内温度との差が大きくなるため、熱損失が大きくなるためである。

本研究では、ある想定した一日の集熱量で、その日の暖房負荷をすべて賄うことのできるシステムを前提としており、この前提を守るためには、システムの規模を決定する式(17)中の蓄熱容量(Q_s)は、日積算暖房負荷よりも若干大きい値とすべきであることが分かる。

表8 計算条件

暖房負荷	表7で暖房負荷条件番号25の条件
設定室温	18, 20, 22℃
集熱時の外気温度	0, 5, 10℃
集熱設定温度	30, 40, 50, 60℃
蓄熱槽の形状(槽高さ:幅)	0.5:1, 2:1, 5:1 (水平断面は正方形)
コレクター面への日射量	表1の値の0.7倍, 1倍,
蓄熱容量	50, 100, 300MJ
コレクターの特性 ($F'K_{col}/F'(\tau\alpha)_e$)	3.37/0.76(Type A), 5.42/0.68(Type B), 7.44/0.65(Type C)

図12 充足率(表8に示した条件の全ての組み合わせについての計算結果)

図13 充足率の回帰式による近似解と精算解の比較

5.4 システムの蓄熱容量

設定室温、外気温度、蓄熱槽の形状、コレクターの特性等の充足率に与える影響を調べ、蓄熱容量として設定すべき値と積算暖房負荷の関係の検討を行う。ここでは、表8に示した条件の全ての組み合わせ(1,944通り)について、前述の蓄熱・放熱シミュレーションと同様に、ほぼ周期的定常状態になる7周期目まで蓄放熱を繰返し、最終周期の計算結果から充足率を求めた。ここで、負荷パターンが充足率に与える影響は大きい(表7に示した負荷パターンのうち充足率の低い条件(暖房負荷条件番号25)について検討を行う。

図12には、充足率の計算結果を示している。定性的に充足率が低くなる条件は、(1)集熱設定温度が高い、(2)コレクターの熱損失係数が大きい、(3)コレクターの日射吸収率が小さい、(4)日射量が小さい、(5)外気温が低い、(6)蓄熱槽の熱媒空気の流れ方向の長さが短い等である。そこで、上記の定性的考察から回帰式の形を定め、3つの係数を修正パウエル法⁸⁾を用いて同定し、式(21)を得た。

$$R_{sol} = 1 - (p_1 H_{st}^{-0.5} + p_2) (\theta_{col, set} - \theta_o + p_3) \frac{F'K_{col}(\theta_{col, set} - \theta_{amb})}{F'(\tau\alpha)_e I_{col, ave}} \quad (21)$$

ここで、回帰式の係数は、 $p_1=8.50 \times 10^{-4}$ 、 $p_2=5.02 \times 10^{-4}$ 、 $p_3=74.2$ 、説明変数は、蓄熱槽の熱媒空気の流れ方向の長さ(H_{st})、集熱設定温度

($\theta_{col, set}$)、設定室温(θ_o)、コレクターの特性係数($F'K_{col}$ 、 $F'(\tau\alpha)_e$)、コレクター面へ入射する平均日射量($I_{col, ave}$)および集熱時の平均外気温度(θ_{amb})である。

図13は、式(21)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、表8に示した設計条件の範囲内では、式(21)により、 $\pm 2\%$ 以内の誤差で充足率を予測できることがわかる。

システムの蓄熱容量(Q_s)は、日積算暖房負荷(Q_h)を蓄熱容量に等しいとして設計したシステムの充足率(R_{sol})を式(21)により算出し、この充足率で日積算暖房負荷を除いた値となる。このことから、式(17)を日積算暖房負荷と式(21)で得られる充足率を用いて表すと式(22)となる。

$$\frac{Q_h}{A_{col}} = R_{sol} \left\{ \left(\theta_{amb} - \frac{\theta_o + \theta_{col, set}}{2} \right) F'K_{col} (t_e - t_s) + F'(\tau\alpha)_e \int_{t_s}^{t_e} I_{col} dt \right\} \quad (22)$$

この補正によって、コレクター面積は、4章で示した簡易設計法による設計値の $1/R_{sol}$ 倍となる。これに伴って、碎石蓄熱槽容量と集熱時の最大風量も同様に $1/R_{sol}$ 倍となる。また、このことは設計条件としての暖房負荷が $1/R_{sol}$ 倍になることに相当するので、放熱用ファンの最大風量も、充足率により次式で補正する。

$$Fa_h|_{max} = \frac{1}{R_{sol}} \frac{q_h|_{max}}{c_a \rho_a (\theta_{col, set} - \theta_o)} \quad (23)$$

5.5 簡易設計法のまとめ

本論文で提案する簡易設計法のまとめを表9に示す。本簡易設計法により、表9に示した設計条件(暖房負荷、室設定温度、コレクターの特性、碎石蓄熱槽の容積比熱、蓄熱槽の高さ、コレクター面日射量、集熱設定温度、集熱時平均外気温度)から、表中に太字で示したコレクター面積、碎石蓄熱槽容量および集熱時と放熱時の風量の最大値を求めることができる。

以下に具体的な設計手順を示す。①コレクター面日射量から、式(13)の不等式を満たす時間(集熱可能な時間)を求める。②集熱可能な時間と設計条件から、式(21)により充足率を求める。③集熱可能な時間、充足率および暖房負荷などの設計条件から式(22)によりコレクター面積を求める。④コレクター面積等から碎石蓄熱槽容量を式(18)により求める。⑤集熱風量および放熱風量の最大値は、式(8)、式(23)により求める。

表9 簡易設計法のまとめ

					風量の最大値	
					集熱時	放熱時
碎石蓄熱槽容量						
コレクター面積					○	○
充足率					○	○
集熱可能な時間					○	○
設計条件	暖房負荷		○ ¹⁾	○		○ ²⁾
	室設定温度	○	○	○	○	○
	コレクターの特性	○	○	○	○	○
	蓄熱槽の容積比熱				○	
	蓄熱槽の高さ		○			
	コレクター面日射量	○ ³⁾	○ ⁴⁾	○ ⁴⁾	○ ²⁾	
	集熱設定温度	○	○	○	○	○
	集熱時平均外気温度	○	○	○	○	○
設計に用いる関係式		式(13)	式(21)	式(22)	式(18)	式(8) 式(23)

表中の太字は設計パラメータ。○印は設計パラメータ等を決定するために必要な設計条件
(注) *1:一日の積算値。*2:一日の最大値。*3:任意の時刻の値。*4:集熱時の積算値

6. まとめ

碎石蓄熱槽を有する空気集熱式太陽熱暖房システムについて、合理的な最適設計のための簡易設計法について検討を行った。

最初に蓄熱のシミュレーションを行い、その結果から集熱設定温度に応じた限界の蓄熱量をほぼ蓄熱できる最小の蓄熱槽容量を最適蓄熱槽容量であると定義し、理論的検討からこの最適蓄熱槽容量を近似的に求める方法を示し、設計条件と暖房負荷に見合ったシステムの蓄熱容量から、コレクター面積と蓄熱槽容量を求めるための関係式を示した。

次に、この関係式を利用した簡易設計法を提案し、これにより決定した設計値を用いて、蓄熱・放熱の繰返し運転のシミュレーションを行い、本簡易設計法の適用範囲について検討を行った。その結果、設計条件を説明変数とした回帰式をシステムの蓄熱容量の補正式として使用することで、現実的な設計条件の範囲内では十分適切な設計ができることを示した。

記号

A_{col}	: コレクター集熱面面積	[m ²]
A_u	: 蓄熱槽の断面積	[m ²]
c_a	: 空気の比熱	[J/(kg K)]
c_s	: 碎石の比熱	[J/(kg K)]
d_e	: 碎石の等価直径	[m]
f	: 蓄熱槽の空隙率	[-]
$F_{a,col}$	: 集熱風量	[m ³ /s]
$F_{a,col,l}$	: 集熱風量の制御下限値または上限値	[m ³ /s]
$F_{a,u}$	: 蓄熱槽を通過する風量	[m ³ /s]
$F_{a,h,t}$	: 暖房負荷に応じた放熱風量	[m ³ /s]
$F_{a,h}$	: 制御範囲を考慮した放熱風量	[m ³ /s]
F'	: 集熱器効率因子	[-]
h_v	: 碎石と空気間の体積熱伝達率	[W/(m ³ K)]
H_u	: 蓄熱槽の高さ	[m]
I_{col}	: コレクターに入射する日射量	[W/m ²]
$I_{col,ave}$	: コレクターに入射する平均日射量	[W/m ²]
K_{col}	: コレクターの熱損失係数	[W/(m ² K)]
t_{start}, t_s	: 集熱開始時刻	[s]

t_{end}, t_e	: 集熱終了時刻	[s]
q_{col}	: コレクターでの集熱量	[W]
q_h	: 暖房負荷	[W]
Q_c	: 一日の蓄熱量	[J]
Q_s	: 蓄熱容量	[J]
Q_h	: 日積算暖房負荷	[J]
R_{col}	: 日積算暖房負荷に占める太陽熱暖房システムからの積算放熱量の割合(充足率)	[-]
V_{opt}	: 最適蓄熱槽容量	[m ³]
V_u	: 蓄熱槽容量	[m ³]
η	: コレクター効率	[-]
θ_{amb}	: コレクター周囲温度(集熱時)(外気温度)	[°C]
$\theta_{col,in}$	: コレクター入口空気温度	[°C]
$\theta_{col,out}$	: コレクター出口空気温度	[°C]
θ_h	: 放熱時の蓄熱槽出口空気温度(放熱温度)	[°C]
θ_s	: 蓄熱槽の初期温度	[°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]
ρ_a	: 空気の密度	[kg/m ³]
ρ_s	: 碎石(蓄熱材)密度	[kg/m ³]
$(\tau\alpha)_c$	: コレクターの日射吸収率	[-]

参考文献

- 1) Duffie A.J. and Beckman W.A.: Solar engineering of thermal processes, John Wiley & Sons, pp.485-511, 1980
- 2) 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
- 3) 松尾陽, 他 17 名, 日本太陽エネルギー学会, 新太陽エネルギーハンドブック, 初版, pp.1~42, 141, 142, 2000
- 4) 田中俊六, 鈴木定彦, 黒木恵, 和気隆: 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
- 5) Schumann T. E.W.: Heat transfer: A Liquid flowing through a porous prism, J. Franklin Inst. 208, pp.405-416, 1929
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 嘉納秀明: システムの最適理論と最適化, コロナ社, 1987

(2003年11月20日原稿受理, 2004年4月23日採用決定)