太陽熱冷暖房システムの動特性の推定*

真野和生^{*1}, 縄田 豊^{*1}, 岩井善太^{*2}

The Dynamic Behavior of a Solar Cooling and Heating System

Kazuo MANO, Yutaka NAWATA, and Zenta IWAI

In this paper, we study the dynamic behavior of a solar cooling and heating system and try to express its mathematical model in terms of a discrete time model. The mathematical representation is derived by taking the solar radiation as an input and the chilled water temperature as an output. Parameter identification of the solar cooling and heating system is implemented by means of the adaptive observer with the exponential convergence which has been proposed by the authors. It is shown that simulation results based on the discrete time model introduced here agree well with experimental results of the actual solar cooling system.

Key Words: Application of Control, Solar Cooling and Heating System, Dynamic Behavior, Adaptive Observer, Parameter Identification

1. 緒 言

太陽エネルギーはクリーンで無尽蔵であるため、現在最も広く利用されている代替エネルギーである。なかでも太陽熱冷暖房システムは、自然エネルギー有効利用の面から盛んに研究され、また、実用化も進んでいる。近年、太陽エネルギー依存率を高めるという観点から現代制御理論に基づく最適制御方式がいくつか提案されているが⁽¹⁾⁽²⁾、これらの理論を実際に適用する場合には、制御対象の動特性を知ることが前提となる。これまでの太陽熱冷暖房システムの動特性の研究については、集熱器、蓄熱槽からなる暖房システムの動特性検討がほとんどであり⁽³⁾、冷凍機を含めた冷房システムの動特性を検討した例は見あたらない。

本研究では、実際に稼働中の太陽熱冷暖房システムの動特性の推定を試みている。太陽熱冷暖房システムのような熱移動を伴うシステムでは、一般にその動特性モデルは偏微分方程式で表される分布定数系となる。そのようなモデルは、取扱いが困難であり、また計算に時間もかかるためオンライン制御に不向きである

という欠点を持っている。したがって、制御の観点から言えば、何らかの方法で集中定数系近似を行い、状態変数で表示することが望ましい。ここでは、定性的な考察からヒューリスティックに集中定数系モデルを構成し、そこに含まれるパラメータをモデルのふるまいと実測結果が一致するように調整する、いわゆるモデルフィッティング法⁽⁴⁾を用いて動特性モデルを導く。さらに、デジタル制御を意図して動特性モデルの離散時間形式による表現を試みる。モデルのパラメータは、試行錯誤で決められることが多いが、本報告では、著者らが提案した可変減衰度指定形の適応観測器⁽⁵⁾⁽⁶⁾を用いてパラメータ同定を行う。最後に、シミュレーション結果と実測データとを比較することで導出したモデルが有効であることを示す。

2. 動特性数学モデル

考察の対象となる太陽熱冷暖房システム⁽⁷⁾は図1に示すように、集熱器、蓄熱槽、吸収式冷凍機の各要素からなっている。その諸元、計測システムの詳細については文献(7)に示されているのでここでは省略する。モデル化に当たってはつぎの仮定を置く。

- (1) 蓄熱槽は完全混合状態にある。
- (2) 配管からの熱損失はない。

* 昭和61年11月3日 中国四国支部・九州支部合同大分地方講演会において講演、原稿受付 昭和62年9月3日。

^{*1} 正員、八代工業高等専門学校 (〒866 八代市平山新町2627)。

^{*2} 正員、熊本大学 (〒860 熊本市黒髪町39-1)。

本論文で用いる記号はつぎのとおりである。

[集熱器系] θ_c : 集熱器出口流体温度 $^{\circ}\text{C}$, θ_s : 蓄熱槽内部流体温度 $^{\circ}\text{C}$, I : 日射量 W/m^2 , Q_s : 集熱量 W , Q_{SL} : 蓄熱槽から外気への熱損失 W , $\dot{m}_c$: 集熱器循環水流量 kg/s

[冷凍機系] θ_p : 冷凍機出口熱媒温度 $^{\circ}\text{C}$, θ_{RO} : 冷凍機出口冷却水温度 $^{\circ}\text{C}$, θ_{RI} : 冷凍機入口冷却水温度 $^{\circ}\text{C}$, Q_{he} : 熱媒による冷凍機への供給熱量 W , Q_R : 冷却塔からの放熱量 W , $\dot{m}_p$: 熱媒流量 kg/s , $\dot{m}_R$: 冷却水流量 kg/s

[負荷系] θ_f : 冷凍機出口冷温水温度 $^{\circ}\text{C}$, θ_{fl} : 冷凍機入口冷温水温度 $^{\circ}\text{C}$, Q_e : 負荷への供給熱量 W , $\dot{m}_f$: 冷温水流量 kg/s

[その他] θ_a : 外気温 $^{\circ}\text{C}$, F : 集熱器有効面積 m^2 , M_s : 蓄熱槽熱容量 J/K , A_s : 蓄熱槽表面積 m^2 , η_0 : 集熱効率曲線の定数, G : 集熱効率曲線のこう配 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, c : 水の比熱 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, U_s : 蓄熱槽内流体から外気までの熱通過係数 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

2.1 集熱器 仮定2を考慮すれば集熱器で集熱される熱量 $Q_s(t)$ は日射量から次式で求められる⁽⁷⁾。

$$Q_s(t) = \dot{m}_c c [\theta_c(t) - \theta_s(t)] \quad (1)$$

ただし, $\theta_c(t)$ は日射量から求められる集熱器出口流体温度であり, 次式で与えられる。

$$\theta_c(t) = (1 - Y) \bar{\theta}(t) + Y \theta_s(t) \quad (2)$$

$$\bar{\theta}(t) = \frac{\eta_0}{G} I(t) + \theta_a(t) \quad (3)$$

$$Y = \frac{2\dot{m}_c c - FK}{2\dot{m}_c c + FK} \quad (4)$$

2.2 蓄熱槽 仮定1より蓄熱槽の熱収支は

$$M_s \dot{\theta}_s(t) = Q_s(t) - Q_{he}(t) - Q_{SL}(t) \quad (5)$$

で与えられる。ここに, $\dot{\theta}_s(t)$ は時間に関する一階微分を意味する。また, Q_{he} , Q_{SL} は

$$Q_{he}(t) = \dot{m}_p c [\theta_s(t) - \theta_p(t)] \quad (6)$$

$$Q_{SL}(t) = U_s A_s [\theta_s(t) - \theta_a(t)] \quad (7)$$

で与えられる。式(5)~(7)より

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_s(t) = & -a_1 \theta_s(t) + b_1 [Q_s(t) - Q_{he}(t)] \\ & + a_1 \theta_a(t) \end{aligned} \quad (8)$$

なる蓄熱槽に関する動特性方程式を得る。ただし,

$$a_1 = \frac{U_s A_s}{M_s}, \quad b_1 = \frac{1}{M_s} \quad (9)$$

2.3 吸収式冷凍機 吸収式冷凍機は, 蓄熱槽に蓄えられた高温の熱媒体が冷凍機へ流れ込むことにより蒸発, 吸収, 再生, 凝縮を繰返して負荷側の流体の水温 θ_f を冷やすことで冷房を行っている。このタイプの冷凍機は内部構造が極めて複雑であり, また動特性解析に当たっては熱収支ばかりでなく物質収支も考慮しなければならないためモデルの方程式が複雑になる⁽⁸⁾⁽⁹⁾。ここではモデル構造を集中定数系で仮定し, モデルのパラメータを実測結果と合致するよう調整する, いわゆるモデルフィティング法⁽⁴⁾を用いて動特性モデルを求める。

いま, 冷凍機モデルを図2に示す熱収支モデルで仮定する。すなわち, 流入熱量 Q_{he} , 放熱量 Q_{RD} , 熱媒温度 θ_p , 熱容量 M_p の熱媒体モデルで表される要素1と, 流入熱量 Q_{RD} , 冷却塔への放熱量 Q_R , 流入熱量 Q_e , 損失熱量 Q_{fL} , 冷水温度 θ_f , 熱容量 M_f の要素2とのカスケード結合で表されると仮定する。このとき, 次式が成立する。

$$M_p \dot{\theta}_p(t) = Q_{he}(t) - Q_{RD}(t) \quad (10)$$

$$M_f \dot{\theta}_f(t) = Q_{RD}(t) - Q_R(t) + Q_e(t) - Q_{fL}(t) \quad (11)$$

ここに

$$Q_{RD}(t) = U_p A_p [\theta_p(t) - \theta_f(t)] \quad (12)$$

$$Q_R(t) = \dot{m}_R c [\theta_{RO}(t) - \theta_{RI}(t)] \quad (13)$$

$$Q_e(t) = \dot{m}_f c [\theta_{fl}(t) - \theta_f(t)] \quad (14)$$

$$Q_{fL}(t) = U_f A_f [\theta_f(t) - \theta_a(t)] \quad (15)$$

である。ただし, M_p , M_f は相当熱容量, U_p , U_f は相当熱通過係数, A_p , A_f は相当表面積である。このとき, 次式の動特性モデルを得る。

$$\dot{\theta}_p(t) = -a_2 \theta_p(t) + b_2 Q_{he}(t) + a_2 \theta_f(t) \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_f(t) = & -a_3 \theta_f(t) + b_3 [Q_{RD}(t) - Q_R(t) + Q_e(t)] \\ & + a_3 \theta_a(t) \end{aligned} \quad (17)$$

ただし,

図1 太陽熱冷暖房システム概略図

図2 吸収式冷凍機熱収支モデル

$$a_2 = \frac{U_p A_p}{M_p}, b_2 = \frac{1}{M_p} \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$a_3 = \frac{U_f A_f}{M_f}, b_3 = \frac{1}{M_f} \quad \dots\dots\dots (19)$$

以上の結果から太陽熱冷暖房システムのブロック線図は図3のように与えられる。図3から明らかなように、このシステムは日射量 I を入力とし、外気温 θ_a 、冷却塔からの放熱量 Q_R 、冷水の冷凍機入口温度 θ_{fi} を外乱入力とするシステムとみなせる。ただし、式(16)、(17)は冷凍機が作動するときのみ成立する。また、暖房の場合には、蓄熱槽の熱媒体が直接負荷へ供給される ($\theta_s = \theta_f$, $\theta_p = \theta_{fi}$) 構造となっているため、暖房システムの動特性モデルは式(8)のみとなる。

3. 離散時間モデルとパラメータ同定

近年、マイクロエレクトロニクス技術の発達に伴いデジタル制御が用いられ始めており、制御対象の離散時間形式での取扱いが望まれるようになってきた。そこで、以下では太陽熱冷暖房システムの離散時間モデルを導く。まず、2章で得られた動特性モデルの離散モデル化を行い、つぎに、そのパラメータを適応観測器⁽⁵⁾⁽⁶⁾を用いて同定する。適応観測器とは、線形時不変かつ次数既知ではあるが、そのパラメータが未知であるプラントに対して、検出可能な入出力情報のみを用いて状態推定およびパラメータ同定を同時に行う機能を持つシステムである。この適応観測器は1973年Carrollら⁽¹⁰⁾によって提案されて以来多くの研究が成されているが、実在系への適用例⁽⁵⁾⁽⁶⁾の報告は少ない。

3.1 離散時間モデル いま、式(8)、(16)、(17)をサンプリング間隔 T で離散化すれば

$$\theta_s(k+1) = \bar{a}_1 \theta_s(k) + \bar{b}_1 [Q_s(k) - Q_{he}(k)] + (1 - \bar{a}_1) \theta_a(k) \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$\theta_p(k+1) = \bar{a}_2 \theta_p(k) + \bar{b}_2 Q_{he}(k) + (1 - \bar{a}_2) \theta_f(k) \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$\theta_f(k+1) = \bar{a}_3 \theta_f(k) + \bar{b}_3 [Q_{RD}(k) - Q_R(k) - Q_e(k)] + (1 - \bar{a}_3) \theta_a(k) \quad \dots\dots\dots (22)$$

なる離散時間モデルを得る⁽¹¹⁾。ここに、 $\theta_i(k)$ ($i=s, p, f$) は時刻 $t=kT$ における状態量であり、パラメータ $\bar{a}_i$, $\bar{b}_i$ は次式で与えられる。

$$\bar{a}_i = \exp(-a_i T),$$

図3 システムモデルブロック線図

$$\bar{b}_i = \frac{[1 - \exp(-a_i T)] b_i}{a_i} \quad \dots\dots\dots (23)$$

($i=1, 2, 3$)

3.2 適応観測器 式(20)~(22)の離散時間モデルのパラメータ $\bar{a}_i$, $\bar{b}_i$ は著者らの提案した可変減衰度指定形の適応観測器⁽⁷⁾⁽⁸⁾を用いて決定する。このタイプの適応観測器は収束速度と同定精度の向上を同時に実現でき、しかも観測ノイズが混入する場合でも良好な精度でパラメータ同定が実行できる点に特長を有しており、より実用的な同定機構である。

適応観測器

$$y_i(k) = z_{i1}(k) [\hat{\bar{a}}_i(k) - K_i] + z_{i2}(k) \hat{\bar{b}}_i(k) + z_{i3}(k) [1 - \hat{\bar{a}}_i(k)] \quad \dots\dots\dots (24)$$

ただし、 K_i は $|K_i| < 1$ なる任意のスカラー定数であり、スカラー $z_{ij}(k)$ はフィルタの出力、 $\hat{\bar{a}}_i(k)$, $\hat{\bar{b}}_i(k)$ は可調整パラメータである。

フィルタ

$$z_{ij}(k+1) = K_i z_{ij}(k) + v_{ij}(k) \quad \dots\dots\dots (25)$$

ここに、 $v_{ij}(k)$ は

$$\begin{cases} v_{11}(k) = \theta_s(k) \\ v_{12}(k) = Q_s(k) - Q_{he}(k) \\ v_{13}(k) = \theta_a(k) \end{cases} \begin{cases} v_{21}(k) = \theta_p(k) \\ v_{22}(k) = Q_{he}(k) \\ v_{23}(k) = \theta_f(k) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (26)$$

$$\begin{cases} v_{31}(k) = \theta_f(k) \\ v_{32}(k) = Q_{RD}(k) + Q_e(k) - Q_R(k) \\ v_{33}(k) = \theta_a(k) \end{cases}$$

パラメータ調整則

$$\begin{bmatrix} \hat{\bar{a}}_i(k+1) \\ \hat{\bar{b}}_i(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\bar{a}}_i(k) \\ \hat{\bar{b}}_i(k) \end{bmatrix} - R_i^{-1}(k) \varepsilon_i(k) \quad (27)$$

ただし、二次元ベクトル $\varepsilon_i(k)$ および 2×2 対称行列 $R_i(k)$ は、次式で与えられる補助信号である。

補助信号

$$\varepsilon_i(k+1) = -\beta_i Z_i(k) Z_i(k)^T R_i^{-1}(k) \varepsilon_i(k) + \beta_i Z_i(k) e_i(k) \quad \dots\dots\dots (28)$$

$$R_i(k+1) = \alpha_i(k) R_i(k) + \beta_i Z_i(k) Z_i(k)^T \quad \dots\dots\dots (29)$$

ただし、 $\varepsilon_i(0) = 0$, $R_i(0) > 0$ である。また、 $Z_i(k)$, $e_i(k)$ は

$$\begin{aligned} Z_i(k) &= [z_{i1}(k) - z_{i3}(k), z_{i2}(k)]^T \\ e_1(k) &= y_1(k) - \theta_s(k), e_2(k) = y_2(k) - \theta_p(k) \\ e_3(k) &= y_3(k) - \theta_f(k) \quad \dots\dots\dots (30) \end{aligned}$$

で与えられ、 $\alpha_i(k)$, β_i は

$$0 < \alpha_{\min} \leq \alpha_i(k) \leq \alpha_{\max} < 1, \beta_i > 0 \quad \dots\dots\dots (31)$$

を満たすように選ばれる適応ゲインである。

入力が十分一般的ならば

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \begin{bmatrix} \hat{\bar{a}}_i(k) \\ \hat{\bar{b}}_i(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{a}_i \\ \bar{b}_i \end{bmatrix} \dots\dots\dots (32)$$

成立する⁽⁷⁾⁽⁸⁾。したがって、同定値 $\hat{\bar{a}}_i$, $\hat{\bar{b}}_i$ から離散時間モデルのパラメータを知ることができる。

3.3 パラメータ同定 同定に用いたデータは、昭和57年8月2日の冷房運転結果である。同定に必要な入出力データはすべて入手可能である。そのときの日射量 I 、蓄熱槽内部流体温度 θ_s 、冷凍機出口冷水温度 θ_f および外気温 θ_a の実測データを図4に示す。

パラメータ同定の結果を図5～7に示す。この場合サンプリング間隔は $T=1/60$ hとした。また、集熱器におけるパラメータは、文献(7)の結果から $F=76.4 \text{ m}^2$, $\eta_0=0.69$, $G=5.63 \text{ W/m}^2$ を用いた。パラメータ同定に用いたデータは蓄熱槽に関しては6:00～18:00、冷凍器に関しては9:32～17:00のデータである。なお、図5で b_1 に関して Q_s が得られる144 min (8時24分) 後から同定が開始されている。

この、同定結果より離散時間モデルのパラメータは

$$\begin{aligned} a_1 &= 0.99997 & b_1 &= 0.73958 \times 10^{-5} \\ a_2 &= 0.98725 & b_2 &= 0.99764 \times 10^{-4} \dots\dots\dots (33) \\ a_3 &= 0.99749 & b_3 &= 0.29992 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

と求められる。 b_2 についてはパラメータ変動を生じているため、その中間値を選んだ。

4. モデル精度の検討

モデル精度の確認については、普遍的手法は現在までのところまだ確立されていない。ここでは、モデル精度を実データに対するモデル出力の当てはまりの良さによって評価する。

シミュレーションモデルは、式(33)のパラメータ値を持つ離散時間モデル式(20)～(22)である。シミュレーション区間は、蓄熱槽と冷凍機が同時に作動している9:32から16:00までとした。この場合、日射量 I 、外気温 θ_a 、冷却塔放熱量 Q_c 、冷水の冷凍機入口温度

図4 実測データ (昭和57年8月2日)

図5 蓄熱槽に関するパラメータ同定結果

図6 冷凍機(要素1)に関するパラメータ同定結果

図7 冷凍機(要素2)に関するパラメータ同定結果

図 8 θ_s に関するシミュレーション結果と実測結果 図 10 θ_f に関するシミュレーション結果と実測結果 図 9 θ_p に関するシミュレーション結果と実測結果

θ_H および流量 $\dot{m}_c, \dot{m}_p, \dot{m}_f, \dot{m}_R$ は実測データを用いた。このときの $\theta_s, \theta_p, \theta_f$ のシミュレーション結果と実測結果を、それぞれ図 8~10 に示す。この結果から明らかなように、立上りにわずかの差異が見られるものの、両者はよく一致していることがわかる。

5. 結 言

本報では、太陽熱冷暖房システムを対象とした離散時間モデルを提案し、その妥当性を計算機シミュレーション結果と実際の運転結果とを比較することで示した。蓄熱槽については理論的考察から動特性モデルを求め、冷凍機については熱収支の観点からヒューリスティックにモデルを定めた。さらに、得られた連続時間形式の動特性モデルを離散化することで離散時間モデルを導いた。モデルのパラメータは、実データとの当てはまりの良さを見て適当に調整するのが一般的で

あるが、ここでは可変減衰度指定型の適応観測器を用いてシステムティックに決定した。このようにして求められた離散時間モデルに基づいてシミュレーションを行ったが、実データとかなり良く一致することが確かめられた。ここで示したような、ヒューリスティックにモデルを構成し、適応観測器でパラメータを決定するモデリングの例は少ないが、太陽熱冷暖房システムのようにある程度の物理法則を考慮できるシステムに対しては本方法は有効な手法であると考え、ここで得られた動特性モデルを用いれば、太陽熱冷暖房システムの最適制御系の設計が可能となる。この点については今後の検討課題としたい。

文 献

- (1) Austlander, D. M., ほか 2 名, *Trans. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Control*, **101** (1979), 138.
- (2) Winn, C. B. and Hall, D. E., *Solar Energy*, **23** (1979), 529.
- (3) Klein, S. A., ほか 2 名, *Trans. ASME, J. Eng. Power*, (1974), 109.
- (4) 須田・砂原, 計測と制御, **19-7** (昭 55), 1.
- (5) 井上・ほか 2 名, 計自論, **18-1** (昭 57), 1159.
- (6) 真野・ほか 3 名, 機論, **51-464, A. B. C** (昭 60), 797.
- (7) 縄田, 機論, **50-451, B** (昭 59), 852.
- (8) 小笠原・ほか 2 名, 冷凍, **46-520** (昭 51), 1.
- (9) 八橋・ほか 4 名, 冷凍, **56-648** (昭 56), 815.
- (10) Carroll, R. L. and Lindorf, D. P., *IEEE Trans. Autom. Control*, **AC-18-5** (1973), 428.
- (11) 高橋, 制御と力学系, (昭 52), 37, コロナ社.