システム同定による温室内温度環境の解析

仁科弘重・松本文・橋本康

愛媛大学農学部

Analysis of Thermal Environment inside Greenhouse by Means of System Identification

Hiroshige NISHINA, Aya MATSUMOTO and Yasushi HASHIMOTO

College of Agriculture, Ehime University, Matsuyama 790, Japan

The purpose of this study is to analyze the thermal environment inside greenhouse by means of system identification and to indicate the applicability of system identification. The experiment was carried out in a vinyl house with the floor area of 58 m² and the surface area of 190 m² in July and August of 1991.

At first, the authors investigated the mechanism which determines the thermal environment inside greenhouse under no ventilation. The assumed mechanism is shown in Fig. 1. The measurement points in this experiment are shown in Fig. 2. Figure 3 is the block diagram of the heat flow which expresses the assumed mechanism of Fig. 1.

The results of identification of a system with an input of radiation outside greenhouse and an output of air temperature at the point 2M are shown in Fig. 4. The calculated air temperature is in good accordance with the measured air temperature. The step response indicates that increase of 1 kW·m⁻² in radiation causes increase of about 30°C of inside air temperature. Figure 5 shows the relationship between order and error in identification of the system.

The results of identification of a system with an input of air temperature at the point 2L and an output of air temperature at the point 2M are shown in Fig. 6.

Figure 7 shows the measured and calculated air temperature at the point 2M. Calculation was executed according to the block diagram of Fig. 3 from radiation outside greenhouse.

Furthermore, the authors investigated the mechanism where the thermal environment inside greenhouse is determined by both radiation and ventilation. The block diagram of system which determines air temperature at the point 2M based on radiation outside greenhouse and on-off of ventilating fan is shown in Fig. 8. Figure 9 shows the results of identification, indicating that system identification is effective in analysis of condition with on-off of ventilating fan.

Figure 10 shows the results of identification of the same system of Fig. 4. In Fig. 10, identification was made for every 3 hr and the calculated air temperature was linked. The calculated air temperature is in much better accordance with the measured air temperature than that of Fig. 4, indicating that system of greenhouse is changing slowly and that the latest data is needed for more precise calculation of the system.

(Received August 31, 1992)

1992年8月31日受付

序 論

施設園芸における温室内環境の制御, また, その基礎となる環境の解析については, 本学会, 日本農業気象学

会, 国際園芸学会を中心として, 理論的および実用的に多くの研究がなされ, 現在の施設園芸の発展を工学的側面から支えたと言っても過言ではない。

これらの研究のほとんどは, 熱・物質収支の考え方^{1,2)}を基礎としている。これは, 温室内外の物理的移

Fig. 1 Assumed mechanism which determines thermal environment inside greenhouse.

動現象を数式で表し、各点での熱および物質の収支を考え、各点の温度などを定常または非定常として求めるものであり、温室内環境に対する物理モデルの作成ともいえる。熱・物質収支の考え方は、実用的研究の解析などにも適用され⁸⁾、また、最適設計などのための非定常シミュレーションには非常に有効な手段となっている⁹⁾。

いっぽう、システムの考え方を温室内環境に導入しようとする研究も、国際自動制御連盟における発表に見ることができる⁵⁻⁷⁾。これは、あるシステムの入力と出力からそのシステムの数学モデルを作成するものであり、システム同定と呼ばれている。システム同定を行うことによって、入力の時系列データから出力の時系列データを求めることができるようになるため、とくに、環境条件（たとえば放射量）の変動の大きい状態、または、環境制御機器の運転状況を変化させる場合には、有効である。今後、温室内環境の制御もより精度の高いものが求められるようになって考えられるが、そのためにも、システム同定の考え方の導入が必要である。

本研究の目的は、線形システム同定によって温室内温度環境の解析を行い、システム同定の適用性の検討を行うことである。具体的には、無換気時の温室内の温度環境が Fig. 1 のようなメカニズムで決定されると仮定し、その各部分にシステム同定を適用した。仮定したメカニズムでは、まず、温室内に入射した放射は地表面で吸収され、地表面温度が上昇する。地表面で吸収された熱の一部は地中に伝導していくが、大部分の熱は、温室下部、中部、上部の順に対流によって伝達し、空気温度を上昇させるというものである。また、放射量が変動しつつある状態で、換気扇を ON/OFF させた場合の解析も行った。

計算方法

システム同定については、すでに多くの出版物^{8,9)}が

ある。その概要を、本論文の最後に付録として記載した。

本論文では、システム同定の前処理として、以下のように入力・出力の実測値の時系列データ（入力： $u'(t)$ 、出力： $y'(t)$ ）から、それぞれの平均値（ $\bar{u}'$ 、 $\bar{y}'$ ）を引いた時系列データ（ $u(t)$ 、 $y(t)$ ）を作成し、これらをシステム同定の計算対象の時系列データとした。

$$u(t) = u'(t) - \bar{u}'$$

$$y(t) = y'(t) - \bar{y}'$$

ここで、

$$\bar{u}' = \frac{1}{N+n+1} \sum_{t=-n}^N u'(t)$$

$$\bar{y}' = \frac{1}{N+n+1} \sum_{t=-n}^N y'(t)$$

本論文における出力の計算値は、付録の（４）式で得られる値に、 $\bar{y}'$ を加えたものとした。

計算プログラムは、マイクロソフト社の Quick BASIC で作成した。

実験方法

実験は、1991 年の 7 月から 8 月に行った。

供試温室は、愛媛大学農学部構内に建設した、間口 6.0 m、奥行 9.7 m、棟高 3.3 m、軒高 1.8 m、床面積 58 m²、外表面積 190 m²、容積 137 m³ の、単棟で、南北棟のパイプハウスである。南側表面には高さ 1.8 m のところに換気扇（フルタ電機（株）：BFSG521：風量（カタログ値）160 m³・min⁻¹）を、北側表面には吸気口を取り付けた。被覆材には、厚さ 0.1 mm の透明な農業用塩化ビニールフィルム（シーアイ化成（株）：シーアイノービ）を使用した。

計測点の配置を、Fig. 2 に示す。温室内を南北（奥行）方向に 3 等分し、それぞれの中央の地点を北から 1、2、3 とし、それらの 3 地点において、地表面から高さ 0.5 m (lower layer)、1.5 m (middle layer)、2.5 m (upper layer) の、合計 9 点（以後、1U、3L などと呼ぶ）で気温を計測した。地点 1、2、3 では、地表面温度と地中温

Fig. 2 Measurement points inside and outside the greenhouse.

度（深さ 5 cm）も計測した。地中伝熱量は、地点 2 で計測した。また、温室内外の放射量・日射量、外気温（高さ 1.5 m）、被覆材温度も計測した。点 2M と外気では、湿度も計測した。

温度の計測には、直径 0.32 mm の銅-コンスタンタン熱電対を用いた。空気の温湿度は、乾球・湿球温度を計測することによって求めた。塩化ビニール製のパイプ（外径 45 mm、内径 41 mm、長さ約 25 cm、外側アルミ箔被覆）の中に熱電対で製作した乾球・湿球を通し、一端にシロコファン（オリエンタルモーター（株）：MB6U-B）を取り付けて、通風状態で計測した。

温室外の放射量（下向き）は有効放射計（英弘精機（株）：CN-40A）で、温室内の純放射量は放射収支計（英弘精機（株）：CN-11）で計測した。温室外の日射量はネオ日射計（英弘精機（株）：MS-42）で、温室内の日射量は太陽電池式日射計（英弘精機（株）：MS-100）で計測した。地中伝熱量の計測には、熱流板（英弘精機（株）：CN-9L）を用いた。無換気時の隙間換気量はガストレーサ法によって、また、換気扇運転時の換気量はガストレーサ法および直接法によって求めた。

これらの計測・制御には、汎用パーソナルコンピュータ（日本電気（株）：PC-9801 シリーズ）と、A/D 変換とリレー出力のできる信号入出力装置（（株）イー・エス・ディ：Green Kit 88）を使用した。計測・制御プログラムは、マイクロソフト社の Quick BASIC で作成した。計測は、10 秒ごとに連続で行った。

今回の実験では、システムを単純化するために、温室内で植物の栽培は行わなかった。

結果および考察

Fig. 1 に示した無換気時の温室内の熱の流れをブロック線図で表すと、Fig. 3 のようになる。Fig. 3 は、温室の中央部分（地点 2）について表しており、地表面温度は点 2A の温度である。放射量は、温室外の下向き放射量とした。

ここでは、無換気時の以下のシステムについて解析を行った。

- (1) 放射量一点 2M の気温のシステム
- (2) 点 2L の気温一点 2M の気温のシステム
- (3) ブロック線図に従って求めた点 2M の気温

Fig. 3 Block diagram of heat flow which expresses the assumed mechanism of Fig. 1.

また、換気時の次のシステムについても解析を行った。

(4) 放射量・換気扇一点 2M の気温のシステム

なお、無換気時の隙間換気量は $0.54 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ （換気回数では $0.21 \text{ 回} \cdot \text{hr}^{-1}$ ）、換気扇運転時の換気量は $56 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ であった。

1. 放射量一点 2M の気温のシステム

入力を放射量（温室外の下向き放射量）、出力を点 2M の気温としたシステムの同定の結果を、Fig. 4 に示す。これは、放射量の変動が大きい日（8 月 11 日）の 6:00～17:59 の 1 分ごとのデータに対して、次数 60 で計算し

Fig. 4 Results of identification of a system with an input of radiation outside greenhouse and an output of air temperature at the point 2M.

Impulse response (c) is output for unit impulse input of $60 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ and step response (d) is output for step input of $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$.

Fig. 5 Relationship between order and error in identification of a system with an input of radiation outside greenhouse and an output of air temperature at the point 2M.

たものである。したがって、インパルス応答は $60 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ を単位インパルス入力としたもの、また、ステップ応答は $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ をステップ入力としたものである。なお、1分ごとのデータに対して次数60で行ったシステム同定であるため、出力の計算値が得られるのは、6:00から60分後の7:00からである。

Fig. 3にも示したように、放射量と点2Mの気温の間には、放射量から地表面温度、地表面温度から点2Lの気温、点2Lの気温から点2Mの気温という、三つの伝熱プロセスが存在するため、このシステムの応答は速くない。インパルス応答、ステップ応答からわかるように、60分後でも、放射量の影響が点2Mの気温に伝わりきっていないとはいえない。しかし、出力からもわかるように、放射量から内気温を計算するには十分な精度を有している。また、ステップ応答から、放射量が $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 大きくなると、60分後には点2Mの気温が約 30°C 上昇することがわかる。

Fig. 5に、次数と誤差の関係を示す。このシステムの場合、応答が遅く、誤差も小さくない。しかし、次数が大きくなるに従って、誤差は小さくなっている。次数を大きくすれば、システム同定の計算時間が長くなる。実際の温室でシステム同定によって制御を行う場合、使用できるコンピュータはパソコン程度と予想されるので、誤差と計算時間の関係を考慮すると、次数は60くらいが適当と考えられる。

2. 点2Lの気温一点2Mの気温のシステム

Fig. 3に示したブロック線図の点2Lの気温を入力、点2Mの気温を出力としたシステムの同定の結果を、Fig. 6に示す。これは、放射量一点2Mの気温のシステム同定と同じ日時の10秒ごとのデータに対して、次数60（時間では10分）で計算したものである。したがって、インパルス応答は $10^\circ\text{C} \cdot \text{sec}$ を単位インパルス入力としたもの、また、ステップ応答は 1°C をステップ入

Fig. 6 Results of identification of a system with an input of air temperature at the point 2L and an output of air temperature at the point 2M.

Step response (b) is output for step input of 1°C .

力としたものである。

このシステムは、空気から空気への伝達であり、また、ブロック線図に示したように直接行われる伝達であるため、応答が非常に速く、インパルス応答は1分後にはほぼ0に収束している。出力も、実測値と計算値がグラフ上で重なり、非常によい一致を示した。また、ステップ応答からわかるように、点2Lの気温が 1°C 上昇すると、点2Mの気温は1分後には 0.9°C 、2分後には 1°C 上昇する。

誤差は、放射量一点2Mの気温のシステムと比べて、非常に小さい。10秒ごとのデータに対して次数6（時間では1分）から次数90（15分）までの5段階についてシステム同定を行ったところ、次数36（6分）以上では、次数を増やしても誤差はほとんど変わらなかった。このため、点2Lの気温から点2Mの気温を計算するには、次数36で十分であった。

3. ブロック線図に従って求めた点2Mの気温

Fig. 3のブロック線図に従って放射量から計算した点2Mの気温を、Fig. 7に示す。計算は次のように行った。まず、あらかじめ求めた放射量—地表面温度のシステムのインパルス応答と、放射量とから、地表面温度を計算する。同様に、計算で求めた地表面温度から点2Lの気温を計算し、最後に、点2Lの気温から点2Mの気温を求めた。なお、各インパルス応答には、これま

Fig. 7 Measured and calculated air temperature at the point 2M.

Calculation was executed according to the block diagram of Fig. 3 from radiation outside greenhouse.

Fig. 8 Block diagram of system which determines air temperature at the point 2M based on radiation outside greenhouse and on-off of ventilating fan.

でと同じ日時の1分ごとのデータに対して次数30として求めたものを用いた。

Fig. 7に示したように、実測値と計算値はほぼ一致している。このことは、システム同定を用いることによって、温室内温度環境の成立メカニズムを解析でき、さらに、任意の点の温度を計算することができることを示している。

4. 放射量・換気扇一点2Mの気温のシステム

ここでは、放射量変動しつつある状態で、換気扇をON/OFFさせた場合の、温室内気温の解析を行った。

換気扇をON/OFFさせた場合の温室内気温が、放射量と換気扇のON/OFFによって決定されるメカニズムを、Fig. 8のように仮定した。計算は次のように行った。まず、別の日の無換気時の放射量一点2Mの気温のシステムのインパルス応答と、放射量から、放射量の影響だけによる無換気状態の点2Mの気温を求める。これを2M①とする。この2M①を点2Mの気温の実測値から引くと、放射量の影響を除いた、換気扇のON/OFFの影響だけによる点2Mの気温が求まる。これを出力とし、換気扇のON/OFFを入力としてシステム同定を行い、インパルス応答、ステップ応答、出力の計算値を求める。この出力の計算値を2M②とする。そして、2M①に2M②を加えて、点2Mの気温の計算値を求める。

Fig. 9 Results of identification of system which determines air temperature at the point 2M based on radiation outside greenhouse and on-off of ventilating fan.

Impulse response (c) is output for unit impulse input of 1 min operation of ventilating fan and step response (d) is output for continuous operation of ventilating fan.

実験は、8月2日の11:00~13:30に、換気扇をランダムにON/OFFさせて行った。システム同定は、1分

ごとのデータに対して次数30で行った。

結果を Fig. 9 に示す。(a) は入力放射量、(b) は入力の換気扇の ON/OFF である。換気扇の ON/OFF は、ON を 1, OFF を 0 とした。黒く塗りつぶしている部分は、換気扇を連続運転していることを示している。(c) と (d) は換気扇だけによる点 2M の気温のインパルス応答とステップ応答、(e) は点 2M の気温の実測値と計算値である。インパルス応答は、1 分間だけ換気扇を ON にした時の応答である。

(d) のステップ応答から、換気扇を ON にすると、15 分後には点 2M の気温が約 9°C 低下することがわかる。また、(e) の点 2M の気温の出力を見てもわかるように、実測値と計算値はよい一致を示しており、このような方法によって温室内気温の計算ができることを示している。

これらのことから、放射量変動しつつある状態でも、システム同定によって温室内気温を予測し、設定値に達する前から換気扇を ON/OFF させることによって、より精度の高い制御が可能になると考えられる。

5. インパルス応答の適用性に関する若干の考察

Fig. 4 は、入力を放射量、出力を点 2M の気温としたシステムの同定を、12 時間の 720 データに対して行った結果である。いっぽう、Fig. 10 は、Fig. 4 と同じ日であるが、3 時間 (180 データ) ごとにシステム同定を行い、それらの出力の計算値を繋げたものである。次数は、すべて 60 とした。Fig. 10 は、Fig. 4 と比べると、実測値と計算値がかなりよく一致している。この理由としては、以下のようなことが考えられる。

温室では、地中温度、外気温、土壌の熱容量・熱伝導率などが、少しずつではあるが変化しており、そのため

Fig. 10 Results of identification of a system with an input of radiation outside greenhouse and an output of air temperature at the point 2M.

Identification was made for every 3 hr and calculated air temperature was linked in the figure.

に、放射量と温室内気温との間の動的な特性も変化することになる。すなわち、入力を放射量、出力を点 2M の気温としたシステムのインパルス応答は、時々刻々変化している。ある日の時系列データから計算したインパルス応答が、その前日のインパルス応答と同じであることはない。さらに細かく考えれば、ある時刻のシステムをより精度よく表すためには、その時刻にできるだけ近い時間の時系列データを用いてシステム同定を行うことが必要である。

ある温室で計算したインパルス応答をその他の温室に適用できるかについては、精度よく適用できる可能性は少ないと考えられる。たとえば、大きさが異なる温室では、保温比も異なるため、インパルス応答は若干違ってくるはずである。ある温室のある日の時系列データで計算したインパルス応答が、その他の温室、その他の日に適用できるかについては、今後の検討課題であろう。

あとがき

本研究では、温室内温度環境の解析にシステム同定の手法が適用できることを明らかにした。今回は線形システム同定を行ったが、温室内外の伝熱現象は線形性が仮定できるものが多いためか、温室内温度環境の解析には十分であった。今後、システム同定を利用した環境制御の高度化について検討を行う予定である。また、熱・物質収支に基づいた物理モデルと、システム同定による数学モデルについて、それらの長所・短所の比較・検討も必要である。

システム同定にはコンピュータが不可欠であるが、施設園芸においてもコンピュータの導入は着実に増えており、システム同定の考え方を環境制御に取り入れることができる状況になりつつある。さらに、コンピュータを用いてオンラインでシステム同定をすることによって、時々刻々変化するインパルス応答も計算でき、より精度の高い制御が可能となる。

また、今後わが国においても温室の大型化が進むと考えられるが、大型温室では、入力 (放射量などの気象条件、機器の操作量) に対する出力 (温室内気温など) の応答が遅いために、動的な変化を表すことができるシステム同定の考え方をういた環境制御は、より有効であると考えられる。

本実験を行うにあたって多大な協力を賜った、愛媛大学農学部大学院生田中基司氏に感謝の意を表す。また、温室の建設にあたってご協力を賜った、愛媛大学農学部助教授山下 淳博士にも謝意を表す。さらに、

験に用いた農業用ビニールフィルムを提供くださった、シーアイ化成(株)殿にも謝意を表する。

文 献

- 1) 高倉 直・立花一雄・古在豊樹・錠宏八郎. 1968. 温室の熱収支. 農業気象 24: 115-118.
- 2) TAKAKURA, T. 1993. "Climate under Cover" 1-155, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- 3) NISHINA, H., T. TAKAKURA, and Y. HASHIMOTO. 1988. Solar heating of a commercial greenhouse by means of latent heat storage. Acta Hortic. 230: 555-558.
- 4) 仁科弘重. 1989. 「施設園芸における潜熱蓄熱方式導入の手引」1-34, 日本施設園芸協会, 東京.
- 5) HASHIMOTO, Y. and T. MORIMOTO. 1984. System identification of plant response for optimal cultivation in greenhouses. "Proc. of IFAC 9th Triennial Congress" 2039-2044, Pergamon Press, Oxford.
- 6) UDING TEN CATE, A. J. and J. VAN DE VOOREN. 1984. Modelling of greenhouse temperatures using time-series analysis techniques. "Proc. of IFAC 9th Triennial Congress" 2033-2038, Pergamon Press, Oxford.
- 7) NISHINA, H., I. H. CHO, and Y. HASHIMOTO. 1991. Two approaches to environmental control in greenhouses—Heat balance analysis and system identification in heating system with heat pump. "Proc. of IFAC/ISHS Workshop on Mathematical and Control Applications in Agriculture and Horticulture" 63-66, Pergamon Press, Oxford.
- 8) 相良節夫・秋月影雄・中溝高好・片山 徹. 1981. 「システム同定」1-304, 計測自動制御学会, 東京.
- 9) 中溝高好. 1988. 「信号解析とシステム同定」1-232, コロナ社, 東京.

付録 「システム同定」

対象とするシステムの入力・出力の時系列データから、そのシステムのインパルス応答、ステップ応答を求めることを、システム同定という。インパルス応答は、単位インパルス入力に対する応答として定義され、システムの動特性を表す基本的なものである。原理的には、あるシステムに単位インパルス入力を加え、その時の出力を計測すれば、インパルス応答が求められる。しかし、実在のシステムでは、単位インパルス入力を与えることが不可能なことが多く、そのシステムの入力・出力

の時系列データから、最小二乗法によって、インパルス応答を求めることになる。

線形システムは、入力を $u(t)$ 、出力を $y(t)$ 、雑音を $v(t)$ とすると、

$$y(t) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \cdot u(t) + v(t) \quad (1)$$

で表現される。 $A(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$ は、次のような時間遅れ演算子 z^{-1} の多項式である。

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \cdots + a_n z^{-n}$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \cdots + b_n z^{-n}$$

ここで、MA モデル (moving average model: 移動平均モデル) を仮定すると、 $A(z^{-1}) = 1$ となり、(1) 式は、

$$y(t) = b_0 \cdot u(t) + b_1 \cdot u(t-1) + \cdots + b_n \cdot u(t-n) + v(t) \quad (2)$$

となる。 n は次数で、過去の影響をどこまで考慮するかに関するパラメータである。

($N+n+1$) 組の入力・出力の時系列データに (2) 式を適用し、ベクトル表示すると、

$$y = Ub + v \quad (3)$$

$$y = [y(0), y(1), \dots, y(N)]^T$$

$$U = \begin{bmatrix} u(0) & u(-1) & \cdots & u(-n) \\ u(1) & u(0) & \cdots & u(1-n) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ u(N) & u(N-1) & \cdots & u(N-n) \end{bmatrix}$$

$$b = [b_0, b_1, \dots, b_n]^T$$

$$v = [v(0), v(1), \dots, v(N)]^T$$

となる。(3) 式に対する最適モデルを、

$$\hat{y} = U\hat{b} \quad (4)$$

と定義すると、最小二乗法によって、 $\hat{b}$ は、

$$\hat{b} = (U^T U)^{-1} U^T y \quad (5)$$

によって求められる。この $\hat{b}$ がインパルス応答であり、インパルス応答の積算値がステップ応答である。出力の計算値 $\hat{y}$ は、(4) 式によって入力とインパルス応答から求められる。また、誤差 E は次式で求める。

$$E = \{e^T e / (N+1)\}^{1/2} \quad (6)$$

$$e = y - \hat{y}$$