パルス光によるサラダナ光合成速度の多変数システム同定

易 佑 林・丹生谷 太・橋 本 康

愛媛大学農学部

Multivariable System Identification of CO₂ Uptake in Lettuce as Affected by the Pulsed Light Illumination

Youlin YI, Futoshi NYUNOYA and Yasushi HASHIMOTO

Faculty of Agriculture, Ehime University, Tarumi, Matsuyama 790, Japan

In our previous study, we identified the effect of the pulsed light illumination on the photosynthesis of Okayama Saradana with an one input-output system model and showed the possibility of saving electrical power by the application of the new artificial light source in the plant factory.

Photosynthesis of plant is also affected by CO₂ concentration besides the pulsed light. So, the dynamic characteristics of the photosynthesis to CO₂ concentration is also important to the analysis of the cultivating processes in the plant factory.

In this paper, we used a multivariable system model to estimate the effect of the pulsed light illumination on the photosynthesis of Okayama Saradana. Pulsed light illumination and CO₂ concentration were taken as two input signals and the net CO₂ uptake as the output signal. Impulse responses of net CO₂ uptake to the two inputs were estimated. From the simulation, we got the same result to that of the one input-output system model discussed in our previous study that the net CO₂ uptake of the plant under the illumination of low duty ratio of the pulsed light could be increased if CO₂ concentration of the environment is increased.

Furthermore, we discussed the differences between the result from the one input-output system model and the multivariable system model. It seems that the one input-output system model could not give a reasonable result when CO₂ concentration had great change as to ± 50 ppm, but the multivariable system identification could do.

Plant and environments make up a very complicated system, in which many factors are included. We think that the multivariable system identification is a powerful method to analyse this system.

(Received December 18, 1987)

1987年12月18日受付

緒 言

植物工場のような生産システムにおいて、植物の生育に適した環境を造成するために、植物の生理生態的反応と環境要因との関係を調べることはきわめて重要である。植物の生理生態のプロセスの解析にはシステム同定が有力な方法である。

一般に、システム同定を行う際、できるだけ簡単な方法で同定対象となる系をモデリングすることは取扱い、

計算上に利点が多い。そのため、前回の研究においてある範囲に制御された CO₂ 濃度をパラメータとして設定しておき、パルス光だけを入力変数としてシステム解析を行った。しかし、光合成速度はパルス光だけを入力としては CO₂ 濃度に関するダイナミックスが求められない。また、CO₂ 濃度をパラメータとするため、実験量も増え、さらに、CO₂ 濃度の変動が無視しえない場合、システム同定の誤差が大きくなることもある。そのため、多変数システムとした解析が必要になる。

そこで、本研究は、パルス光および CO₂ 濃度をとも

に入力変数とし、それらに対する光合成速度を出力としてシステム同定を行った。さらに、その結果を、CO₂濃度の変動が無視しえない場合、パルス光だけをシステム入力として同定した場合と比較して検討した。

システム同定の原理

本研究における一入力一出力システムの同定は前報と同じ方法としたが、多変数システム同定は次の原理に基づいて行った³⁾。

同定対象となるシステムは離散時間システムとして次のように記述する。

$$y(k) = \sum_{i=0}^{m_1} b_i u_1(k-i) + \sum_{j=0}^{m_2} c_j u_2(k-j) + v(k) \quad (1)$$

ここに、 $y(k)$ は出力、 $u_1(k)$ 、 $u_2(k)$ は入力、 $b_0, b_1, \dots, b_{m_1}$ 、 $c_0, c_1, \dots, c_{m_2}$ はそれぞれの入力 $u_1(k)$ 、 $u_2(k)$ に関するインパルス応答、 $v(k)$ はシステム雑音とする。インパルス応答 $b_0, b_1, b_2, \dots, b_{m_1}$ 、 $c_0, c_1, c_2, \dots, c_{m_2}$ は入出力データから次のように求められる。

まず、(1) 式をベクトルに書くと、次のようになる。

$$y(k) = u \cdot q + v(k) \quad (2)$$

ここに、

$$u = \begin{bmatrix} u_1(k) & u_1(k-1) & \dots & u_1(k-m_1) & u_2(k) \\ & u_2(k-1) & \dots & u_2(k-m_2) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$q = [b_0 \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_{m_1} \ c_0 \ c_1 \ c_2 \ \dots \ c_{m_2}]^T \quad (4)$$

データ数を N とし、 $k=0, 1, 2, \dots, N$ まで (2) 式を展開すると次の式が得られる。

$$Y = U \cdot q + V \quad (5)$$

ここに、

$$Y = [y(0) \ y(1) \ y(2) \ \dots \ y(N)]^T \quad (6)$$

$$U = \begin{bmatrix} u_1(0) & u_1(-1) & \dots & u_1(-m_1) & u_2(0) \\ u_1(1) & u_1(0) & \dots & u_1(1-m_1) & u_2(1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_1(N) & u_1(N-1) & \dots & u_1(N-m_1) & u_2(N) \\ & u_2(-1) & \dots & u_2(-m_2) \\ & u_2(0) & \dots & u_2(1-m_2) \\ & \dots & \dots & \dots \\ & u_2(N-1) & \dots & u_2(N-m_2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$V = [v(0) \ v(1) \ v(2) \ \dots \ v(N)]^T \quad (8)$$

(5) 式について、 V を平均値零の白色雑音とすると、インパルス応答列 q は最小二乗法を適用することによって次式から得られる。

$$q = [U^T \ U]^{-1} U^T Y \quad (9)$$

本実験においてインパルスの次数は $m_1=m_2=30$ とし、計算した。

システム同定の実験およびデータの処理方法

本研究に用いられた植物材料、生育条件および計測システムは前報²⁾と同じとしたので、ここで詳しい説明は省略させていただき、システム同定の実験とデータ処理方法だけを述べておくことにする。

1. システム同定の実験方法

システム同定の実験を行う際、光合成速度がパルス光および CO₂ 濃度と線形関係となるように、CO₂ 濃度および光強度を設定した。すなわち、CO₂ 濃度は 350 ppm から 600 ppm との間に变化させ、光強度はパルス光を遮光することによって、60~155 $\mu\text{Em}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の間に限定した。パラメータとしてはパルス光のデューティ比を設定した。また、測定誤差を減らすため、CO₂ 濃度を後に示す Fig. 1, 3 のように緩慢に変化させた。サンプリング時間は 10 秒とし、システム同定のための一実験は 90 分を要した。

2. データ処理方法

本研究においては、CO₂ 濃度に関するインパルス応答も同定対象となっているが、CO₂ 濃度の変動が緩慢であり、またそのデータ長が Fig. 1, 3 のように短いため、よいインパルス応答が得られにくいと考えられる。そこで同じデータを 4 回繰り返して処理した。しかし、このようにすると、データ数が増え、長い計算時間を要した。このため、サンプリング時間を長く取り、すなわち 40 秒としてインパルス応答を求めた。また、一入力一出力システムとして同定する場合、サンプリング時間を 10 秒として、35 分間のデータを使って計算した。光に関する光合成速度の応答が速いため、これだけのデータで一変数システム同定が十分に行われた。

結果および考察

多変数システム同定の原理およびデータ処理方法はすでに述べたとおりである。Fig. 1 はパルス光のデューティ比を 50% とした条件において、パルス光の M 系列および CO₂ 濃度のゆるやかな増減を入力とした場合のサラダナ光合成速度の応答である。これらのデータを用いて求めた光合成速度のパルス光、CO₂ 濃度に関するインパルス応答を Fig. 2 に示す。Fig. 3 はデューティ比 100% の場合の入出力データであり、Fig. 4 はそれに関するインパルス応答である。このように求めたインパルス応答により得られた計算値と実験で得られた計測値との比較について、デューティ比が 50% の場合の例を Fig. 5 に示す。両者の変動の傾向は同種のものと考えてよい。

Fig. 1 Response of net CO₂ uptake to the pulsed light illumination and CO₂ concentration. The duty ratio of the pulsed light is 50%.

Fig. 3 Response of net CO₂ uptake to the pulsed light illumination and CO₂ concentration. The duty ratio of the pulsed light is 100%.

Fig. 2 Impulse responses of net CO₂ uptake to CO₂ concentration and the pulsed light illumination of 50% duty ratio. A: to CO₂ concentration. B: to the pulsed light illumination.

Fig. 4 Impulse responses of net CO₂ uptake to CO₂ concentration and the pulsed light illumination of 100% duty ratio. A: to CO₂ concentration. B: to the pulsed light illumination.

Fig. 6 は同定されたインパルス応答から計算されたステップ応答である。A, B はデューティ比が 100%, CO₂ 濃度がそれぞれ 600 ppm, 350 ppm の条件下における応答であり, C, D はデューティ比が 50%, CO₂ 濃度がそれぞれ 600 ppm, 350 ppm の場合である。図からわかるように CO₂ 濃度が 600 ppm, パルス光のデューティ比 50% (C) における光合成速度は, 連続光 (デューティ比 100%) で, 通常の CO₂ 濃度 (350 ppm) (B) における光合成速度と大差がみられない。この結果は CO₂ 濃度をパラメータとして同定した前報と類似しており, デューティ比による消費電力の削減の可能性がこの

Fig. 5 The comparison of calculated and observed responses of net CO₂ uptake under the pulsed light illumination of 50% duty ratio.

Fig. 6 Step responses of net CO₂ uptake to different duty ratio of the pulsed light illumination and CO₂ concentration. A: 100% duty ratio, 600 ppm CO₂. B: 100% duty ratio, 350 ppm CO₂. C: 50% duty ratio, 600 ppm CO₂. D: 50% duty ratio, 350 ppm CO₂.

Table 1 The comparison of estimation error between the two system models.

	Duty ratio (%)	C (ppm)	$\bar{C}$ (ppm)	Error ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) ²
A	100	350–600		0.038
	50	350–600		0.027
B	100	350–520	415	0.64
	100	530–600	565	0.15
	50	350–590	430	0.28
	50	520–600	538	0.15

Note:

1) C is the range of the change of CO₂ concentration.

2) $\bar{C}$ is the average of CO₂ concentration.

3)
$$\text{Error} = \sum_{i=0}^N ((\text{Cal} - \text{Mea})^2 / N)$$

Cal: Estimated values, Mea: observed values.

4) A: With the multivariable system model.
B: With the one input-output system model.

多変数システムとした解析によって判明されることになる。

Fig. 7 The comparison of the estimated and observed responses of net CO₂ uptake using the one input-output system model. The pulsed light is taken as the input signal. ---: Calculated response. —: Measured response.

以上、多変数システム同定により、光合成速度のダイナミクスを明解に示した。

つぎに、多変数システム同定がどの程度有効かを調べるために、本研究ではさらに同じ実験データを用いて、パルス光だけを入力変数とした一変数システム同定との比較検討を行った。まず、両者の方法による同定誤差について説明する。Table 1 は 2 つの方法による同定誤差の 2 乗平均値である。一変数とした場合は二変数とした場合より、誤差のオーダーが 1 桁大きい値を示している。一変数としての同定において、デューティ比が同じである場合、CO₂ 濃度の変動幅が大きいほど誤差も大きい値を示している。これはパルス光だけを入力としたモデルでは精度よく同定されないからである。この誤差について、一例としてデューティ比 50% の場合で、CO₂ 濃度が 350 ppm から 520 ppm まで変化したとして、一変数モデルで同定したときの計算値と実測値の比較を Fig. 7 に示す。CO₂ 増加によって光合成速度も高くなるが、この傾向は一変数モデルでは同定できない。

つぎに、上記に示した 2 つの方法によるステップ応答を Fig. 8 に示す。(a) は二変数とした場合の応答であり、(b) 一変数とした場合である。二変数に関するステップ応答は一変数として同定するときの CO₂ 濃度の変動の平均値をステップ入力として与えた場合の応答である。まず、立ち上がりのところを見ると、二変数モデルのほうは CO₂ という要因があるため、安定までかなり時間を要する。つぎに、安定した時点での値についてはデューティ比 100% の A, B, C, D においては、A (二変数, CO₂ 濃度 564 ppm) と B (一変数, CO₂ 濃度平均値 564 ppm) では大差は認められないが、しかし、C (二変数, CO₂ 濃度 414 ppm) と D (一変数, CO₂ 濃度

Fig. 8 The comparison of step responses estimated with the one input-output system model and the multivariable system model.

(a) Estimated with the one input-output system model

(b) Estimated with the multivariable system model

A : 100% duty ratio, 564 ppm $\overline{\text{CO}_2}$.

B : 100% duty ratio, 564 ppm $\overline{\text{CO}_2}$.

C : 100% duty ratio, 414 ppm $\overline{\text{CO}_2}$.

D : 100% duty ratio, 414 ppm $\overline{\text{CO}_2}$.

E : 50% duty ratio, 540 ppm $\overline{\text{CO}_2}$.

F : 50% duty ratio, 540 ppm $\overline{\text{CO}_2}$.

G : 50% duty ratio, 430 ppm $\overline{\text{CO}_2}$.

H : 50% duty ratio, 430 ppm $\overline{\text{CO}_2}$.

$\overline{\text{CO}_2}$ is the average of CO_2 concentration.

平均値 414 ppm) では差が大きい。これは D に関して CO_2 濃度の変動が大きかったことによるものである。同じことはデューティ比 50% の E, F, G, H についても現れている。E (二変数, CO_2 濃度 540 ppm) と F (一変数, CO_2 濃度平均値 540 ppm) では差は小さいが, G (二変数, CO_2 濃度 430 ppm) と H (一変数, CO_2 濃度平均値 430 ppm) とは差が大きい。これはつまり CO_2 濃度の変動があまり大きくないときに, 光合成速度とパルス光との関係が一変数システムとして同定できるが, CO_2 濃度の変動が大きくなると, 多変数モデルで同定したほうが有効であることを示している。

結 言

本研究は CO_2 濃度およびパルス光によるサラダナ光合成速度への影響について, 多変数システムモデルで検討した。システム同定からパルス光のデューティ比の減少によるサラダナ光合成速度の低下は CO_2 濃度の増加によって防ぐことができることを示した。この結果は前報の CO_2 濃度をパラメータとしたシステム同定の場合

と一致している。さらに一変数モデルを用いた同定結果との比較によって, 多変数システム同定は光合成のような生理生態的プロセスのダイナミクスを把握するのになり有効であることを確かめた。

本研究のパルス光装置の使用に関し, 種々の御援助をいただいた三菱電機商品研究所ならびに同応用機器研究所の関係者各位に厚くお礼を申し述べる。

文 献

- 1) 橋本 康・丹生谷 太・易 佑林・仁科弘重・安西良矩・山崎広議・中山繁樹・池田 彰, 1987, パルス光照射光源によるサラダナの光合成特性, 生物環境調節 **25**: 127-129.
- 2) 易 佑林・丹生谷 太・橋本 康, 1987, パルス光によるサラダナ光合成速度のシステム同定, 生物環境調節 **25**: 173-177.
- 3) 相良節夫・秋月影雄・中溝高好・片山 徹, 1981, 「システム同定」, 計測自動制御学会。