植物生育のプロセス同定とその最適制御 (X)

スペクトル解析による植物-水系のプロセス同定

橋 本 康・大西 真 吾・船 田 周*

杉 二 郎**

愛媛大学農学部*

東京農業大学**

植物・水系のシステム同定をスペクトル解析で検討した。入力としては光や相対湿度を、出力としては葉温や茎内水分をとり、それら入出力の対応関係は周波数領域では周波数応答関数で、また時間領域では重み関数で計算から求められた。さらに、この方法を検定するため、葉温と茎内水分の応答を重み関数と光入力とのコンボリューション積分から計算し求めた。とくに葉温では、上記の同定法で求めた応答と実測とがきわめて傾向が似ていた。この事実からみると、水欠乏や光合成の最適制御は葉温をモニターすることにより実現可能であろう。

1981年7月3日受付

緒 言

植物体の水の動的特性を解明するため、茎内水分と葉温との対応関係を基に工学的アプローチを試みてきた¹⁻³⁾。この対応関係は外乱となる環境要因、とくに光、相対湿度の過度的変化により大きな影響を受けた。多くの測定結果に基づいてモデルを作り⁴⁾、シミュレーションの助けをかりることにより葉温、茎内水分の動特性が明確になってきた^{5,6)}。また、葉温は分布特性をもつことから画像処理⁷⁾を導入することにより、気孔開度分布⁸⁾やみかけの光合成速度⁹⁾とも密接に関係することがわかってきた。このことから茎内水分、葉温の対応関係を追求することは水の動的特性にとって重要なだけでなく、気孔開閉という植物生体における力学的動作を介して、光合成とも密接に関係する領域まで上記の対応関係をもとに議論できる見通しとなった。そこで、本報では、光および相対湿度を入力として、上記、茎内水分および葉温

を工学的な同定手法によってどこまで議論することができかに的をしぼってみた。植物には、生長または発育レベルからホルモレベルなど多くの生理学的な過程があり、とてもそれらが一括した工学的な手法で扱えないことは疑う余地のないことであるが、もし上記関係だけでも工学的手法の適用が有益であることがわかると、葉温や茎内水分をモニターして工学的アルゴリズムで環境を最適制御する妥当性がえられるからである。工学的同定法は工業における自動制御の学問的進歩とともに発展してきた¹⁰⁾。既に1967年にIFAC (International Federation of Automatic Control) 内に Identification in Automatic Control Systems のシンポジウムが開かれ、1979年の第5回シンポジウムでは理論より応用に比重が移ってきており植物を除いた生物学への応用も増えている¹¹⁾。同定法は、1入力1出力線形システムのノンパラメトリックな表現を対象とするものからパラメトリックな表現さらに多変数システムへの拡張などその手法は多岐にわたっている¹²⁾。本報では、1入力1出力線形システムのノンパラメトリックな手法で光および、相対湿度の入力に対する葉温、および茎内水分を調べることとする。

問題の記述と数学的处理

本報においては、Fig. 1 の1入力1出力線形システムを考える。入力 $x(t)$ に光、および相対湿度を、出力 $y(t)$ に葉温および茎内水分を想定する。この系をスペクトル

Yasushi HASHIMOTO,* Shingo ONISHI,* Shu FUNADA* and Jiro SUGI**: Process Identification and Optimal Control of Plant Growth (X). Process Identification of Plant-Water System by Spectrum Analysis.

* Faculty of Agriculture, Ehime University, Matsuyama 790, Japan.

** Tokyo University of Agriculture, Tokyo 156, Japan.

Fig. 1 Input-output relationship of mono-variable linear system. In the time domain, input is $X(t)$, output is $Y(t)$ and $g(t)$ of black box is weighting function, where $Y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau) \cdot X(t-\tau) d\tau$. In the frequency domain, input is $X(\omega)$, output is $Y(\omega)$ and $G(j\omega)$ of black box is frequency response function, where $Y(\omega) = G(j\omega) \cdot X(\omega)$.

解析法によって検討する。スペクトル解析法は既に多く報告^{10,12-14)}されているが、その概要を整理すると以下のようになる。 $x(t)$ を定常確率過程における時系列と仮定すると、その期待値は、

$$E\{x(t)\} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) dt \quad (1)$$

他方 $x(t)$ と時刻 $t+\tau$ における $x(t+\tau)$ との積の期待値は、

$$E\{x(t) \cdot x(t+\tau)\} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) \cdot x(t+\tau) dt = \phi_{xx}(\tau) \quad (2)$$

となり、この $\phi_{xx}(\tau)$ を $x(t)$ の自己相関関数と称する。 $y(t)$ も同様の時系列とすると、 $x(t)$ と $y(t)$ との積の期待値は、

$$E\{(x(t) \cdot y(t+\tau))\} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) \cdot y(t+\tau) dt = \phi_{xy}(\tau) \quad (3)$$

となり、この $\phi_{xy}(\tau)$ を $x(t), y(t)$ の相互相関関数という。次に $\phi_{xx}(\tau), \phi_{xy}(\tau)$ をそれぞれ Fourier 変換すると

$$\Phi_{xx}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{xx}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (4)$$

$$\Phi_{xy}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{xy}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (5)$$

ここで、 $\Phi_{xx}(\omega)$ を $x(t)$ のパワースペクトル、 $\Phi_{xy}(\omega)$ を $x(t), y(t)$ のクロススペクトルという。他方、FFT (Fast Fourier Transform) の普及により $x(t)$ の直接の Fourier 変換を

$$X(j\omega) = \int_{-T/2}^{T/2} x(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (6)$$

で表わし、複素 Fourier 関数と称し、その共役な X^* との積

$$X(j\omega) \cdot X^*(j\omega) \quad (7)$$

を生スペクトルという場合がある。さて、確率変数でない一般の変数では出力は入力と重み関数 $g(t)$ とのコンボリューション

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\sigma) x(t-\sigma) d\sigma \quad (8)$$

で与えられるので、これを Fourier 変換すると、

$$Y(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) e^{-j\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega t} dt \int_{-\infty}^{\infty} g(\sigma) x(t-\sigma) d\sigma$$

ここで $t-\sigma=t'$ とおくと

$$Y(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t') e^{-j\omega t'} dt' \int_{-\infty}^{\infty} g(\sigma) e^{-j\omega\sigma} d\sigma = X(\omega) \cdot G(j\omega) \quad (9)$$

ただし、

$$G(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\sigma) e^{-j\omega\sigma} d\sigma \quad (10)$$

この $G(j\omega)$ は周波数応答関数と称し、重み関数 $g(t)$ を Fourier 変換したものである。次に時系列にもどり (8) 式の両辺に $x(t-\tau)$ をかけて期待値をとると

$$\begin{aligned} \phi_{xy}(\tau) &= E\{x(t-\tau) \cdot y(t)\} \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} g(\sigma) \cdot E\{x(t-\tau) \cdot x(t-\sigma)\} d\sigma \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} g(\sigma) \cdot \phi_{xx}(\tau-\sigma) d\sigma \end{aligned} \quad (11)$$

これを Fourier 変換すると (9) 式を求めたのと同様にし

$$\Phi_{xy}(\omega) = G(j\omega) \cdot \Phi_{xx}(\omega) \quad (12)$$

同様にして

$$\begin{aligned} \phi_{yy}(\tau) &= E\{y(t-\tau) \cdot y(t)\} \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} g(\sigma) \cdot E\{y(t-\tau) \cdot x(t-\sigma)\} d\sigma \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} g(\sigma) \cdot \phi_{xy}(\sigma-\tau) d\sigma \end{aligned} \quad (13)$$

ここで、(11)式を用いると

$$\phi_{yy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\sigma) d\sigma \cdot \int_{-\infty}^{\infty} g(n) \phi_{xx}(\tau+\sigma-n) d\eta$$

これを Fourier 変換すると

$$\Phi_{yy}(\omega) = |G(j\omega)|^2 \Phi_{xx}(\omega) \quad (14)$$

(12), (14) から線形性の目やすとなるコヒーレンシー $r^2(\omega)$ は

$$r^2(\omega) = \frac{|\Phi_{xy}(\omega)|^2}{\Phi_{xx}(\omega) \Phi_{yy}(\omega)} \quad (15)$$

となる。さて、入力が白色雑音であると、その自己相関関数はディラックの $\delta(t)$ で表わされるインパルスとなるので

$$\phi_{xx}(\tau) = A \cdot \delta(\tau) \quad (16)$$

(11), (16)式を用いると

$$\phi_{xy}(\tau) = \int_0^\infty g(\sigma) \cdot \phi_{xx}(\tau - \sigma) d\sigma = A \cdot g(\tau) \quad \dots\dots (17)$$

従って、重み関数 $g(t)$ はインパルス応答を表わすので

$$g(\tau) = \frac{1}{A} \cdot \phi_{xy}(\tau) \quad \dots\dots\dots (17)'$$

以上が理論的な根拠であるが、実際には限られた離散的データから、相関関数やスペクトルを推定するわけで、ラグウインドウまたは、その Fourier 変換であるスペクトルウインドウにより平滑する必要がある。本報では Hamming のラグウインドウ

$$\omega(\tau) = \begin{cases} 0.54 + 0.46 \cos(\pi\tau/M), & |\tau| \leq M \\ 0 & |\tau| > M \end{cases} \quad \dots\dots (18)$$

を用いた。なお、Fourier 変換は全て FFT を用いたのでもとえば、パワースペクトルでは、(5)式の代りに $x(t)$ から FFT により(6)式を求め、次いで(7)式を求めさらにそれを Fourier 逆変換して相関関数を求め、それに(18)式を演算して自己相関関数を求め、それを Fourier 変換してパワースペクトルをえた。すなわち FFT を3回使用している。クロススペクトルも同様である。周波数応答関数 G は(10)式より求めるのではなく、(12)式から求めたので $x(t)$, $y(t)$ から FFT を合計6回用いた。また、重み関数 $g(t)$ は G の Fourier 逆変換により求めたので、 $x(t)$, $y(t)$ から計7回の FFT を用いた。検定に用いたステップ応答は入力と重み関数とのコンボリューションから計算した。コヒーレンシは、(15)式によったので FFT を計9回用いた。

材料と方法

実験材料としてはメロン (*Cucumis melo* var *reticulatus* Naud. cv. Muskmelons Tokai G35) を用い、播種約2ヵ月後に内径28 cm、高さ22 cmの素焼きのポットに定植し、ガラス温室で栽培した。実験は播種後約3ヵ月たってから、グロースキャビネット(コイトロン KG-208 HLS)に移して行った。人工照明は白色蛍光灯(東芝110W)32本、白熱灯(東芝150W)8本で構成される光源によった。照射面積は3.3 m²、灯下1 mで約30 kluxの光強度であった。葉温は放射温度計(松下電器 ER 2005)³⁾、茎内水分はキャパシタンスメータ(横河電機 HGR-21S)²⁾、空気湿度は電気抵抗湿度計(エース, AKL)で測定し直接コンピュータに入力させた。実験は、光と相対湿度を入力としグロースキャビネットの温度は25±0.1℃の条件で葉温と茎内水分の変化を測定した。光入力の場合は、15 kluxと30 kluxの2値をリレーで切換えて与えた。切換え方法はM系列による疑似白色雑音を想定し、単位パルス幅4分、M系列周期15

で1周期60分の光入力とした。解析には葉温、茎内水分のデータからサンプリング間隔1分で約256個のデータを必要とするので、実験は約5時間継続した。この場合、相対湿度は60±2% RHに制御されていた。次に相対湿度入力の場合は、65% RHと73% RHの2値をプログラム制御用のドラムで切換え、単位パルス幅6分強、M系列周期15で1周期92分の湿度入力とした。解析のための生体情報のデータは光入力と同じであるので、実験も約5時間継続した。この場合光は、30 kluxにした。スペクトル解析は、入出力の時系列データをA/D変換期を経てコンピュータ(三菱電機 MELCOM70-10B)に入力し、256個のデータからFFTに基づいて処理した。

実験結果とその検討

Fig. 2に光入力に対する葉温および茎内水分の応答を示す。上段には光が2段階のランダム信号により切換えられた様子が、すなわちM系列のパルスによって操作された15 kluxと30 kluxの2種の光強度が示されている。中段が茎内水分の変化を静電容量(pF)で検出^{1,2)}している図であり下段が葉温の変化を放射温度計で測っている³⁾図である。それぞれは時間軸上で同期をとってある。Fig. 3に相対湿度入力に対する葉温および茎内水分の応答を示す。上段には相対湿度が前と同様にM系列で操作されている様子が示してある。実線が湿度操作信号で破線が実際の湿度変化である。中段および下段には前と同様に茎内水分と葉温の応答を示す。Fig. 2, Fig. 3のそれぞれのパワースペクトルをFig. 4, Fig. 5に示す。Fig. 4には、左側からM系列信号による光入力、それに応答する葉温ならびに茎内水分のそれぞれのパワースペクトルが並べてある。たて軸はそれぞれの物理量、横軸はすべて周波数でcycle per minuteとしてある。M系列は疑似白色雑音を想定して用いたが、その際、光のパワースペクトルはなるべく平坦であることが望ましい。その場合には(17)式より光入力に対する葉温や茎内水分の重み関数 $g(t)$ は容易に求まることになる。しかし、Fig. 4にみられるように光入力のパワースペクトルは平坦ではない。それゆえ重み関数または、その Fourier 変換である周波数応答関数を求めるには、(12)式あるいは(14)式によらねばならぬ。Fig. 5には、左側からM系列信号による湿度入力、それに応答する葉温ならびに茎内水分のそれぞれのパワースペクトルが並べてある。湿度入力のパワースペクトルは光入力のそれよりも平坦度が悪いが、これはM系列信号で湿度操作を行っても湿度制御の時定数などのため光ほど速やかに追従しないためと考

Fig. 2 Effects of input of light on leaf temperature and water content in stem. The top figure shows input of artificial light on random binary signal. The center figure shows output of water content in stem. The bottom figure shows output of leaf temperature. Each figure is synchronized.

Fig. 3 Effects of input of relative humidity on leaf temperature and water content in stem. The top figure shows input of relative humidity on random binary signal. The broken line is actual response of humidity manipulated on the solid line. The center figure shows output of water content in stem. The bottom figure shows output of leaf temperature. Each figure is synchronized.

Fig. 4 Power spectra of light, leaf temperature and water content in stem obtained from Fig. 2. The left figure shows power spectrum of artificial light on random binary signal. The center figure shows power spectrum of leaf temperature. The right figure shows power spectrum of water content in stem.

Fig. 5 Power spectra of relative humidity, leaf temperature and water content in stem obtained from Fig. 3. The left figure shows power spectrum of relative humidity on random binary signal. The center figure shows power spectrum of leaf temperature. The right figure shows power spectrum of water content in stem.

Fig. 6 Frequency response function obtained by spectrum analysis, where the artificial light is the input and leaf temperature is the output. The top figure shows the "gain" of the frequency response function. The bottom figure shows the "phase" of the frequency response function.

えられる。従って、湿度入力の場合も(17)式より $g(t)$ を求めることは誤差が大きくなり得策ではない。しかし、光入力にしろ、湿度入力にしろ小振幅の連続的な入力を与えて生体の応答の物理的生理機構を同定するには、ランダム性があり、しかもノイズに強い M 系列信号は最も効果的な入力信号の一つといえよう。次にスペクトルを基にして計算した周波数応答関数 $G(j\omega)$ を Fig. 6~Fig. 9 に示す。Fig. 6 には、光入力に対する葉温の応答における周波数応答関数 G を示す。上段が G のゲイン、下段が位相であり横軸は両者とも周波数で単位は cycle/min としてある。Fig. 7 には光入力に対する茎内水分の応答における周波数応答関数 G を示す。同様に上段はゲインで下段は位相を示す。次いで、相対湿度入力に対する葉温および茎内水分の応答における周波数応答関数 G を示す。Fig. 8 には湿度入力に対する葉温応答の G 、Fig. 9 には湿度入力に対する茎内水分の G をそれぞれ示す。なお上段がゲイン、下段が位相であることは、前

Fig. 7 Frequency response function obtained by spectrum analysis, where the artificial light is the input and water content in stem is the output. The top is the gain and bottom is the phase as mentioned above.

図と同様である。Fig. 6, 7 より光入力に対しては葉温、茎内水分とも位相が正負に振動している。とくに茎内水分の応答は、 0.04 cycle/min 、すなわち 25 分に 1 回の変化以上の速い変化に対してはゲイン、位相とも振動が激しくなる。その点、葉温のほうは 0.1 cycle/min 、すなわち、10 分に 1 回程の変化まではゲインの減少も少なく、またゲイン、位相の振動も茎内水分に較べておだやかといえる。Fig. 8, 9 より相対湿度入力に対しては、葉温、茎内水分ともゲインは 0.14 cycle/min 、すなわち 7 分に 1 回程度の変化までは振動が少ない。これは相対湿度が気孔蒸散に直接的に関与するため光入力より湿度入力のほうが

Fig. 8 Frequency response function obtained by spectrum analysis, where the relative humidity is the input and leaf temperature is the output. The gain and phase are the same as above.

Fig. 9 Frequency response function obtained by spectrum analysis, where the relative humidity is the input and water content in stem is the output. The gain and phase are the same as above.

Fig. 10 Leaf temperature obtained from spectrum analysis. The top figure shows weighting function of leaf temperature affected by light input, which is obtained by inverse Fourier-transform of frequency response function. The bottom figure shows step response of leaf temperature by computing the convolution integral containing both the weighting function of leaf temperature and step function of light.

応答性が良いと解釈すれば当然のことである。他方、湿度入力に対しては葉温では位相が低周波で遅れ 0.05 cycle/min あたりから進み 0.1 cycle/min あたりから正負に振動し、茎内水分では大体において進み気味となっている。茎内水分の位相進みについては今後の問題として検討を要する。以上で入出力の応答関係がスペクトル解析による同定法により明らかにされた。そこで、以下最もシンプルなステップ光入力に対する葉温ならびに茎内水分の応答を上記同定法で求められた周波数応答関数 $G(j\omega)$ あるいは重み関数 $g(t)$ で計算し、実測と比較し検定してみよう。Fig. 10 に暗条件から 30 klux にステップ入力した光に対する葉温応答の例を示す。上段が、本論文で試みられた同定法から求めた重み関数 $g(t)$ である。この $g(t)$ は、インパルス応答関数ともいわれている。この $g(t)$ と 30 klux のステップ光入力とをコンボリューションで計算した結果を下段に示す。同様に求めて茎内水分応答の例を Fig. 11 に示す。これに対する実測結果を Fig. 12 に示す。Fig. 10, 12 とを較べると、葉温応答は光のステップ入力後約 90 分までは、同定法に

基づく計算結果と実測結果とは良く似た傾向を示す。90 分以後では大幅に異なってくるが、これは FFT でのラグウィンドウやコンボリューションに関する誤差が入ってくるためと考えられる。次に Fig. 11, 12 を較べてみる。茎内水分の応答は光入力後約 25 分までは、両者とも減少し良く似ているが、実測では約 40 分まで少し回復し、以後ゆるやかに減少しているのに反し、計算結果では約 50 分まで大きく回復し以後減少している。葉温応答に較べると茎内水分応答は実測結果とかなりの差を示している。この原因は種々考えられるが、最も基本的には、本論文の同定法が線形の入出力を仮定している点にあると考えるのが妥当である。それならば、葉温応答のほうが茎内水分応答より、より線形に近く、逆に茎内水分応答は、より非線形性が強いことが予想される。この点を調べるために(15)式のコヒーレンシーを計算してみた。Fig. 13 に示す。一般にコヒーレンシー r^2 は線形では 1 でありその値が 1 より小さくなるに従って、非線形性が強くなり周波数応答関数 $G(j\omega)$ の推定精度が劣化するといわれている。Fig. 13 から葉温応答のコヒーレ

Fig. 11 Water content in stem obtained from spectrum analysis. The top figure shows weighting function of water content in stem identified by electric capacitance affected by light input as same method. The bottom figure shows step response of water content in stem by computing the convolution integral containing both the weighting function of capacitance and step function of light.

Fig. 12 Actual result obtained from the experiments of the step input of light. The top figure shows water content in stem as affected by the step input of light, which is identified by electric capacitance. The bottom figure shows leaf temperature as affected by the step input of light. These are the response in the case of light-on after the darkness of 5 hours.

Fig. 13 Coherency computed from power spectrum and cross spectrum of input-output. The solid line shows coherency in the system of leaf temperature as affected by the step input of light. The broken line shows coherency in the system of water content as affected by the step input of light.

ンシーは $0.01 \sim 0.1$ cycle/min で 1 に近いが、茎内水分応答のそれは、大幅に 1 から離れている。従って葉温応答の計算結果が茎内水分応答のそれより、実測に近い傾

向がえられたのは、葉温応答の周波数応答関数の推定精度がより優れていたためであり、このことが Fig. 13 より証明された。従って、スペクトル解析による工学的な同定法が植物生体応答を解明するうえでかなり有効であり、しかも、その生体情報は水生理においては茎内水分よりも葉温において顕著なものがあることが判明した。

結 言

植物-水系の同定をスペクトル解析で行い以下の結論をえた。

(1) M 系列信号で 15 klux と 30 klux の 2 値を操作する小振幅の光入力を与えた場合の葉温応答ならびに茎内水分応答がスペクトル解析で明らかになった。入力的光に対して葉温ならびに茎内水分のそれぞれの周波数応答関数、ならびに重み関数が FFT を用いた計算で得られた。

(2) M 系列信号で 65% RH と 73% RH の 2 値を操作する小振幅の相対湿度入力を与えた場合の葉温ならびに茎内水分のそれぞれの周波数応答関数が同様に得られた。

(3) 以上の同定法を検定するため、暗条件から 30 klux の光のステップ入力に対する葉温応答ならびに茎内水分応答を同定法から計算によって求め、他方実測結果と比較した。その結果、計算による葉温応答は実測と良く似たが茎内水分応答はかなりズレていた。コヒーレンシーの計算結果から葉温の周波数応答関数の推定精度が茎内水分のそれよりはるかに良いことが判明し、上記の差の理由が明らかとなった。

(4) 以上から工学的な同定法が、植物-水系でも十分利用できることがわかったが、葉温を対象とした場合にはとくに効果的であることが明らかとなった。このことは葉温をモニターし、コンピュータで植物の水生理の状態を判断しながら環境を制御する、いわゆる最適制御が妥当であることを側面から証明している。

なお、環境調節とは、植物の生命現象にかかわるファジイ性と環境の時系列との相互関連で議論されるべきものであり、植物生体情報のファジイ性を無視することはできないことはいうまでもない。ただ本論文ではファジイ性が前提となる生体情報のうち、1次近似として工学的同定法により扱えるもの、逆にいうとファジイ性があるにもかかわらず、それが同定にとって支障とならぬものが葉温であったと付言しておきたい。今後、数理工学的手法を植物に適用するにあたっての基本的態度としてここに重ねて強調しておきたい。

文 献

- 1) 橋本 康・安保文彰・福屋章博・船田 周. 1975. 植物生育のプロセス同定とその最適制御(I). 環境要因のステップ入力に対する植物生体内水分の動特性. 生物環境調節 **13**: 133-140.
- 2) 橋本 康・福屋章博・安保文彰・船田 周. 1976. 植物生育のプロセス同定とその最適制御(II). 環境要因のステップ入力に対する植物生体内水分の動特性と植物生理情報との関係. 生物環境調節 **14**: 59-65.
- 3) 橋本 康・森本哲夫・船田 周. 1976. 植物生育のプロセス同定とその最適制御(III). 環境要因のステップ入力に対する植物葉温の動特性. 生物環境調節 **14**: 67-73.
- 4) 橋本 康・森本哲夫・船田 周. 1977. 植物生育のプロセス同定とその最適制御(IV). 葉温のダイナミクスのモデル化とシミュレーション. 生物環境調節 **15**: 113-120.
- 5) 橋本 康・森本哲夫・船田 周. 1978. 植物生育のプロセス同定とその最適制御(V). 生体内水分のダイナミクスと湿度制御との関係. 生物環境調節 **16**: 17-25.
- 6) 橋本 康・森本哲夫・船田 周. 1979. 植物生育のプロセス同定とその最適制御(VI). 葉温のダイナミクスと湿度制御との関係. 生物環境調節 **17**: 47-53.
- 7) 橋本 康・五百木啓三・船田 周・丹羽 登・杉 二郎. 1979. 植物生育のプロセス同定とその最適制御(VI). 葉温の画像処理. 生物環境調節 **17**: 27-33.
- 8) 橋本 康・五百木啓三・金子昌二・船田 周・杉 二郎. 1980. 植物生育のプロセス同定とその最適制御(VII). 葉温分布と気孔開度との関係. 生物環境調節 **18**: 57-65.
- 9) 橋本 康・桑原典和・野中佳昭・船田 周・杉 二郎. 1980. 植物生育のプロセス同定とその最適制御(VIII). 葉温と光合成との関係. 生物環境調節 **18**: 85-91.
- 10) EYKHOFF, P. 1974. System Identification. John Wiley & Sons, New York.
- 11) BROVKO, O. *et al.* 1981. The extended Kalman Filter as a pulmonary blood flow estimator. Automatica **17**: 213-220. (この号は 5th Symposium on Identification の特集論文号で他にも多くの同定に関する論文が掲載されている.)
- 12) 片山 徹, 他. 1981. システム同定. 計測自動制御学会, 東京.
- 13) 磯部 孝編. 1968. 相関函数およびスペクトル——その測定と応用——. 東京大学出版会, 東京.
- 14) BENDAT, J. S., and A. G. PIERSON. 1971. Random Data: Analysis and Measurement Procedures. Wiley-Interscience, New York.

Summary

System identification of "plant-water" is examined by spectrum analysis, where the relationship between the input of light or relative humidity and the output of leaf temperature or water content in stem are obtained by computing frequency function or weighting function.

Furthermore to prove the method, the step response of leaf temperature and water content in stem are obtained by computing the convolution integral of both weighting function and the step input of light. Especially, the response of leaf temperature obtained by the present system identification is closely related to that actually observed, which is found to be valid on the examination of coherency.

On these findings, optimal control of water deficit and photosynthesis might be realized by monitoring leaf temperature.

(Received July 3, 1981)