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¹⁾

橋 本 康・森本哲夫・船 田 周*

愛媛大学農学部農業工学科*

本論文では、生体内水分のフィードバック系を湿度制御との関係においてとりあげた。まず生体内水分を検出し湿度を電算機制御する実験を行った。生体内水分を一定値に保つため湿度を PID 制御し、さらに生体内水分を一定値だけ変更するため、湿度を DP によって最短時間制御する実験をキュウリ、ヒマワリを用いて行った。上記の二つの異なった湿度制御によって生体内水分のダイナミクスが得られたが、これを前報で提案したモデルで説明できないかにつき、シミュレーションで検討した。モデルにおける蒸散要素に湿度の影響をくり込む修正により、モデルは湿度制御による複雑な生体内水分のダイナミクスを説明できることが明らかにされた。したがってモデルのシミュレーションから、湿度制御における生体内水分の予測や、湿度制御に関する生体の各要素のダイナミクスを推定することが可能となった。

1977 年 12 月 12 日受付

緒 言

前報¹⁾では生体内水分のフィードバック系をモデル化し、温湿度が一定に制御された環境条件下で葉温のダイナミクスを検討した。そこで次の課題として、前報で一定に制御された条件とした環境要因を種々変えた場合、その過渡現象としての生体内水分のフィードバック系を解明しようとした。そこで本報では環境要因のうち、水ストレスに関連の深い湿度をとりあげた。生体内水分のフィードバック系のダイナミクスと湿度との関係を、実測とシミュレーションの両面から検討し、生体内水分のダイナミクスが前報¹⁾で提案したモデルでどこまで説明できるかを明確にしたい。なお実験方法としては生体内水分を検出し、湿度を制御する生体制御に基づく。

生体制御の実験に関しては、葉温を検出し、空気温度を制御した松井、江口^{2,3)}の報告、自己反応制御方式によ

り生長温度を自動制御した相見ら⁴⁾の報告、光合成、呼吸を検出し、空気温度と CO₂ ガスを制御した高倉ら⁵⁾の報告などがみられるが、本実験で行う静電容量による生体内水分の検出による湿度制御について行った例はない。

材料と方法

植物材料としてはヒマワリ (*Helianthus annuus* cv. Large Russian) およびキュウリ (*Cucumis sativus* cv. Kinseisantoh) を用い、1/5000 a ワグナーポットに定植して、温度 25°C、湿度 70% RH の温室で栽培した。草丈約 80 cm ぐらいに生長したとき、植物をグロースキャビネット (コイトロン KG-208HLS) に移し、温度 25±0.1°C、相対湿度 60±2%~80±2% の環境条件で実験をおこなった。人工照明の光源は白色蛍光灯 (東芝 110 W) 32 本、白熱灯 (東芝 150 W) 8 本で構成され、照射面積は 3.3 m²、灯下約 1 m で約 30,000 lux の光強度を用いた。茎内水分の生体計測としてはインピーダンスメータ (横河電機 HGR-21S) で静電容量から求めた^{6,7)}。葉温は放射温度計 (松下電器 ER2005) で測定した。環境温度の計測は抵抗測温器 (横河電機 TBX-24)、湿度については乾湿球湿度検出器 (横河電機 HMT-11) を用いた。以上、生体情報 (茎内水分、葉温) の 2 チャンネル、環境情報 (温度、湿度) の 2 チャンネルの計 4 チャンネルは電子計算機に入力し、生体と環境のダ

¹⁾ Yasushi HASHIMOTO, Tetsuo MORIMOTO and Shu FUNADA*: Process Identification and Optimal Control of Plant Growth (V). Relationship between Dynamics in Plant-water Behaviour and Humidity Control.

* Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Ehime University, Matsuyama, Japan.

Fig. 1 Schematic diagram of experiment system.

Experiment system is composed of growth cabinet and computer control sub-system. Temperature and relative humidity in the growth cabinet are controlled by the digital computer (Melcom-70; 32 kW core memory and 2.5 MW disc memory).

イナミクスについての情報処理を行い、環境条件のうち温度は定値制御、湿度は過渡を含む種々の制御をオンライン電算機で行い、生体内水分のダイナミクスと湿度制御との関係を実験した。この実験装置の構成を Fig. 1 に示す。電算機制御系の詳細はすでに報告⁹⁾しているので省略する。

モデルとシミュレーション

生体内水分のフィードバック系のモデルは前報¹⁾で述

べた。その場合は湿度は一定に制御されたものとして扱ったが、本報では湿度を変えた場合の生体内水分のダイナミクスを扱うので、湿度を変えた過渡応答の項を基本モデルに加える必要がある。いま温湿度の初期条件を 25°C, 60% RH とし、その状態から湿度をステップ状に 10~20% RH だけ変えた場合、ヒマワリの茎内水分の応答は Fig. 2 の点線のようになる。キュウリの場合も同様の傾向となる。そこで、前報¹⁾のモデルに湿度に関する追加項を加えて Fig. 2 (点線) のような茎内水分

Fig. 2 Effects of the step input of relative humidity on dynamic characteristics of capacitance of stem in both experiment and simulation.

Sunflower (soil culture): — simulation (plant model), --- experiment.

モデルをアナログコンピュータが、湿度制御をデジタルコンピュータが分担したシミュレータである。Fig. 3 により、湿度と茎内水分の応答をシミュレーションから求めた結果は Fig. 2 の実線のようになる。Fig. 2 の実測と生体モデルのシミュレーション結果の比較から、本モデルは湿度の変化に対する生体内水分の過渡特性を十分表わしうるものであり、本研究の趣旨に沿ったものと考えて差支えない。なお、本研究で用いた Fig. 3 の諸係数の表を Table 1 に示す。

結果と検討

生体内水分は茎部で静電容量 (capacitance) によって検出することとし、何らかの条件で生体内水分が変化することを一定値に保つこと、あるいは、環境の湿度条件を変えることによって、生体内水分の状態を一定値だけ変える実験をした。この実験は、生体内水分のフィードバック系のダイナミクスと湿度との関係を見るには最も理

Fig. 3 Analog computer setup for the plant model and digital control of humidity.

の応答がえられるように試行する。すなわち、湿度は気孔からの蒸散に影響を与えることから、前報¹⁾の C 要素の入出力に関する項をパターベーションする。その結果、前報¹⁾のアナログコンピュータのパッチプログラムに相当するものとして Fig. 3 がえられる。これは、前報¹⁾のモデルに湿度に関する追加項を加え、さらに茎内の水分情報を判断して湿度制御をするデジタルコンピュータが加わったもので、ハイブリッドシミュレータとなっている。すなわち、Fig. 4 に示されるように、生体

Fig. 4 Hybrid simulator system.

想化され、かつ一般性を失わない実験であると考え、実験装置は Fig. 1 のごとくである。

この実験装置における情報の流れは Fig. 5 のように

Table 1 Set values of parameter a_i which are manipulated by potentiometer of analog computer.

Potentiometer	Standard value of potentiometer	
	Sunflower	Cucumber
a_1	0.2	0.05
a_2	0.5	0.5
a_3	0.15	0.05
a_4	0.5	0.5
a_5	1.0	1.0
a_6	0.9	0.9
a_7	0.9	0.4
a_8	1.0	1.0
a_9	0.2	0.2
a_{10}	0.5	0.5
a_{11}	1.0	1.0
a_{12}	0.3	0.2
a_{13}	0.5	0.5
a_{14}	0.4	0.4
a_{15}	0.5	0.5
a_{16}	0.04	0.04
a_{17}	0.5	0.5
a_{18}	0.002	0.002
a_{19}	0.5	0.5
a_{20}	0.6	0.4
a_{21}	0.1	0.1
a_{22}	0.5	0.5
a_{23}	0.2	0.2
a_{24}	0.6	0.6
a_{25}	0.2	0.2
a_{26}	0.2	0.2

表わせる。この実験でえられた結果についてモデルを用いたシミュレーションで検討しようとするものである。すなわち、Fig. 5 における CONTROL OF PLANT を前報¹⁾をもとにした植物モデルでおきかえたものをシミュレートする。

1. 生体内水分と湿度 PID 制御との関係

はじめに、湿度のデジタル制御を PID 制御に限定し、光入力に対する生体内水分一定保持の実験を行った。すなわち Fig. 5 において process control の PID 制御は、

$$P = K \left\{ e_n + \sum \frac{\tau}{T_I} \cdot e_n + \frac{T_D}{\tau} (e_n - e_{n-1}) \right\} \quad (1)$$

ただし、

P : 制御操作量

e_n : n 時刻サンプリングにおける偏差

K : 比例ゲイン (P 動作の係数)

T_I : 積分時間 (I 動作の係数)

T_D : 微分時間 (D 動作の係数)

τ : サンプリング周期

比例ゲインは系固有のもので、この実験の場合は生体内水分の偏差に対して湿度操作をどう対応させるかを表わす量であるから、湿度 60% RH の初期条件から $\pm 20\%$ RH 変化させた場合の静電容量の実測値から求められ、 $K=80$ [%/pF] となる。

次に T_I , T_D は制御を効果的にする補足係数であり、グロースキャビネットの湿度制御なので既報⁹⁾より $T_I=400$ sec, $T_D=6$ sec とした。これらは PID だけでなく P のみ、または PI のみ分割した場合でも用いられる。サンプリング周期は $\tau=12$ sec および 120 sec とした。デジタル制御の流れは Fig. 6 のようになり、具体的には 12 sec (あるいは 120 sec) ごとに生体内水分を示す静電容量値が読みとられ、その偏差にもとづき湿度の目標値が PID アルゴリズム、(1) 式より求めることが

Fig. 5 Block diagram of digital control in the experiment.

Fig. 6 Flow chart of digital control by PID algorithm in the experiment.

でき、その設定値に制御された。実際にはグロースキャビネットでは外乱もあり、また温度・湿度の制御は相互干渉が避けられないので、目標値に対する制御効果をも高める意味で、12 sec (あるいは 120 sec) ごとに定まる目標値に対して 2 sec ごとのサンプリングによる温湿度の定値制御を行った。

キュウリを用いた実験結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 (A) は $\tau=12$ sec の場合で実線が湿度一定の場合、他は生体内水分により湿度を P, PI, PID 制御した場合のそれぞれの生体内水分の応答と、湿度操作量とを対応させたグラフである。PI, PID で湿度を制御すると生体内水分が人工光照射にもかかわらずほぼ一定に保たれることが明らかとなった。Fig. 7 (B) は、 $\tau=120$ sec の場合と $\tau=12$ sec の場合を PID で湿度を制御した場合の比較で、サンプリングが比較的長くなっても生体内水分にそれほど差はみられなかった。

以上の実験では植物をブラックボックスとして扱っている。何故そうだったか、詳細な過程は判然としない。そこでモデルに基づいてシミュレートし検討してみたい。シミュレーション回路の応答速度を植物反応速度にマッチさせるため、タイムスケールに変換すると、その比は $1/220$ となる。そこで、実験のサンプリングのうち 12 sec の方は速すぎるので 120 sec を対応させてシミュレータでのサンプリング周期は $\tau=0.6$ sec とした。

(A) Response curves in $\tau=12$ sec.

(B) Response curves in $\tau=12$ sec, 120 sec.

Fig. 7 Response curves in the experiment where humidity is controlled by PID algorithm.

シミュレーションでは植物モデルが与えられブラックボックスではないので、実験では環境制御のみから PID 係数を定めたのに反し、一巡応答として PID 係数の適値が調べられた。この結果、 $K=240$ (%/pF), $T_I=40$ sec, $T_D=80$ sec が PID 係数の適値となった。シミュレーションの結果を Fig. 8 に示す。生体内水分についてはほぼ実測と同様の結果となっている。湿度については、実測とシミュレーションとで多少傾向が異なり、実測はゆるやかな変化を示している。これは、実測では湿度計の時定数およびおくれ時間のため、ゆるやかな変化

Fig. 8 Simulation curves in the equivalent conditions to those in Fig. 7.

Fig. 9 Flow chart of digital control by Dynamic Programming method in the experiment.

しか記録部に表われないため、シミュレーションの方が正しいと考える。

以上の実験におけるシミュレーションによる信頼性の裏づけから本研究でとりあげたモデルは湿度との関係で生体内水分のダイナミクスを明確に表わしうるものであることが判明した。

2. 生体内水分と湿度 DP 制御との関係

デジタル制御で生体内水分を一定値だけ変更する制御を DP (Dynamic Programming) によって最短時間に行う実験をした。すなわち、Fig. 5 において process control のところが DP による最短時間制御となる。デジタル制御の流れは Fig. 9 となるが、温湿度制御のフィードバック方式は Fig. 6 と同様に考えられる。Fig. 6 では生体内水分から PID により湿度操作の目標値を求めたが、Fig. 9 では DP により湿度操作の最適値を求める方法を採用した。Fig. 10 のように生体内の水分状態 X と湿度制御の操作量 U との実測関係がえられているので、これをもとに DP の演算をする。いま、気温 25°C、湿度 60% RH に定常制御されたグロースキャビネットに置かれている供試ヒマワリの生体内の水分状態を $X=0$ とし、静電容量で $X=0.125$ pF だけ水分状態を増加させたい場合、湿度を高めて蒸散を抑制する方法が考えられる。その実験結果を Fig. 11 に示す。図中、点線は上記の考えで湿度を 10% RH だけ高くし蒸散を抑制した場合であるが、目標値に落ち着くまで

Fig. 10 X (state)- U (control) relation observed by experiment for formulation of Dynamic Programming method.

数十分かかる。実線の DP による最適値^(10,11)は、欄外註*で示すように、はじめの2分間 20% RH だけ湿度を高くし、あとは 10% RH 戻すというもので、生体内水分がわずか数分間で目標値に落ち着いている。これをシミュレーションで検討する。前例とほぼ同様にしてシミュレーションを行うと Fig. 12 のごとき結果となり、実測

* DP による最適値の出し方

植物生体の状態方程式

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (2)$$

ただし、

x : 植物生体の状態ベクトル

u : 環境の制御ベクトル

最短時間の評価関数

$$J(x, u) = \int_0^{t_f} g(x, u) dt \quad (3)$$

ただし、

t_f : 最終時間

DP とは N 段決定過程問題を N 個の一段決定過程に変換し、次の N 個の方程式を電算機で解いて N 個の最適操作解を求める方法である。

$$f_N(x_i) = \min_{u_i} [J(x_i, u_i) + f_{N-1}(x_{i+1})] \quad (4)$$

(4)式で右辺の第1項は(3)式より、第2項の x_{i+1} は(2)式より代入して計算する^(10,11)。具体的には過渡状態のはじめの10分間を2分間ずつの5段決定過程とし、Fig. 10 を参考として近似式をたてる。すなわち、

$$(2) \rightarrow \frac{dx}{dt} = -x + 4u \quad (2)'$$

$$(3) \rightarrow J = \int_0^{t_f} \{0.1(x-3.0)^2 + 0.05(u-0.75)^2\} dt \quad (3)'$$

$$(4) \rightarrow \left. \begin{aligned} f_1(x_4) &= \min_{u_4} [0.1(x_4-3.0)^2 + 0.05(u_4-0.75)^2] \\ f_2(x_3) &= \min_{u_3} [0.1(x_3-3.0)^2 + 0.05(u_3-0.75)^2 + f_1(x_4)] \\ &\vdots \\ f_5(x_0) &= \min_{u_0} [0.1(x_0-3.0)^2 + 0.05(u_0-0.75)^2 + f_4(x_1)] \end{aligned} \right\} \quad (4)'$$

(4)'を電算機で計算し、次の最適解をうる。

$u_0 = 1.00$ (60% → 80% RH),

$u_1 = 0.75$ (70% RH),

$\vdots$

$u_4 = 0.75$ (70% RH)

すなわち、はじめの2分間湿度を60%から80%RHにし、以後70%RHに制御することが最短時間制御の最適値となる⁽¹²⁾。

Fig. 11 Response curves in the experiment where humidity is controlled by Dynamic Programming method.

Experiment (sunflower) ($25 \pm 0.1^\circ\text{C}$): — capacitance control (Dynamic Programming), --- capacitance control (step).

とほぼ同様の結果となっている。

以上より、本実験の結果はシミュレーションにより信頼性が裏づけられ、本モデルは湿度との関係で生体内水分のダイナミクスを明確に表わしうるものであることが判明した。このことは、次の意味で重要である。すなわち生体内水分が湿度との関係でどう変わったかということが入力（湿度）、出力（茎内水分）のみでわかるだけではなく、その中間に介在する蒸散量、気孔開閉その他多くの要素を推定することが可能となり、植物生理のダイナミクスを多面的に検討することができるということである。

結 論

前報¹⁾で提案した生体内水分のフィードバック系のモデルを環境要因の湿度との関係に適応させた。湿度条件と生体内水分のダイナミクスを調べるため PID と DP の二つの異なる制御方法における実験を行った。他方、同様の条件でモデルをシミュレートし、湿度との関係をうまく説明できるかどうかを検討した。その結果、次の結論をえた。

1) 実験の結果、生体内水分を制御変数として検出し、それにもとづいて湿度を操作する制御ループにおいて PID 制御、DP 制御とも有効に作用した。工学的な制御の方法論が植物にも適用され、良好な結果をえた。

Fig. 12 Simulation curves in the equivalent conditions to those in Fig. 11.

Simulation (sunflower) ($25 \pm 0.1^\circ\text{C}$): — capacitance control (DP), --- capacitance control (step).

2) PID 制御による実験の結果では植物をブラックボックスとして扱ったため、生体内水分の応答の必然性が不明であったが、生体内水分のフィードバック系のモデルによるシミュレーションで検討した結果、実験結果と同様の結果がえられ、実験の信頼性が裏づけられた。

3) 生体内水分のフィードバック系のモデルは、湿度との関係においても生体内水分のダイナミクスを十分に表わしうるものであることが明らかにされた。

4) 本モデルをシミュレートすることにより、湿度制御における生体内水分の予測や、湿度制御に関する生体の各要素のダイナミクスを推定することが可能となった。

本研究において部分的に、福屋章博、津村光男、原田豊史、北井一司、菅本企志子の各位の協力を得たことを感謝する。

文 献

- 1) 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 (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.
- 2) 松井 健・江口弘美. 1973. 葉温のフィードバック制御. 生物環境調節 **11**: 55-63.
- 3) 江口弘美・松井 健. 1974. 葉温のフィードバック制御 (II). 生物環境調節 **12**: 5-11.
- 4) 相見雲三・花見至晃. 1973. 自己反応制御方式による環境条件の自動制御. 生物環境調節 **11**: 65-68.
- 5) 高倉 直・大原源二. 1976. 植物生長の電算機制御 (II). キュウリ植物の生理. 農業気象 **32**: 107-115.
- 6) 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.
- 7) 橋本 康・一條文二郎・佐野真一・為積良郎. 1976. 植物生体情報の電子的測定. 計測自動制御学会論文集中 **12**: 440-446.
- 8) 橋本 康・大政謙次・船田 周. 1975. 植物育成用グロースキャビネットにおける空調システムの計算機制御 (I) (II). 冷凍 **50**: 16-36.
- 9) 橋本 康・大政謙次・船田 周. 1975. 植物育成用グロースキャビネットにおける空調システムの計算機制御 (IV). シミュレーションからみた空調システムにおける湿度 PID 制御の特性. 冷凍 **50**: 875-887.
- 10) BELLMAN, R. 1961. "Adaptive Control Processes" 51-99, Princeton Univ. Press.
- 11) TOUT, J. 1964. "Modern Control Theory" 48-53, 260-337, McGraw Hill.
- 12) 橋本 康・福屋章博・森本哲夫・船田 周. 1977. 植物反応制御系のプロセス・アイデンティフィケーション (III). 日本自動制御協会 第 21 期 学術講演会論文集 L5.

Summary

Dynamic behaviour of water content in plants was investigated in connection with humidity control.

Computer control of humidity by detecting water content in plants was carried out, using cucumber and sunflower. For constant control of water content in plants, humidity was controlled by PID algorithm. For transient control to newly desired value of water content in plants, humidity was controlled by DP (Dynamic Programming) method. Response curves in these different controls could be explained by examination of modelling-simulation procedure. It was concluded that such a modelling-simulation procedure as presented in this paper was one of the most effective approaches to explain the dynamic behaviour of water content in plants in both total feedback system and each element of the sub-system in connection with humidity control.

(Received December 12, 1977)