ファイトトロンにおける環境要因と植物の反応との に関するバイオトロニクスの研究 (I)¹⁾

船田 周*・橋本 康*・松井 健**

愛媛大学農学部*

九州大学生物環境調節センター**

昭和 45 年 6 月 2 日受付

I. ま え が き

ファイトトロン,あるいはバイオトロンなどの生物環境調節装置の制御系では植物と環境との物質交換や熱交換は不規則外乱と考え,かつ微小項として扱われ,ほとんどの場合省略されてきた.しかし,研究の進展に伴い,各地に精度の良いファイトトロンが日進月歩で建設されるにつれ,最近,植物を省略項とせず,植物と環境との関連に注目して環境制御系を論じようという,いわゆるバイオトロニクス的研究の重要性がさげられ出した.本研究は,この線に沿って,昭和 44 年 10 月,九州大学生物環境調節センターで行なわれた最初の実験と,それに続き愛媛大学農学部大気環境調節室および調節ガラス室で行なわれた実験に基づき,従来の植物をネグリジブルとした制御系と,植物を積極的に考慮した制御系を実験的に考察したものである.

II. 実験装置および実験方法

実験は九大ファイトトロン(人工照明室)および愛媛大調節ガラス室に発芽後,約 2 か月を経過したキュウリを 32 個体入れて行ない,同時に 1 個体の精密な情報検出のため,愛媛大気環境調節室⁽¹⁾の中にダブルチャンパー方式としたパイロットチャンパーを用いた. Fig. 1 にパイロットチャンパーのブロックダイアグラムを示す. ①なるチャンパーを温度 20°C,湿度 60~80% に制御した大気環境調節室に入れ,①の中にキュウリ 1 個体を入れて,温湿度,植物からの水分蒸散量および CO₂

Fig. 1 Block diagram of pilot chamber

ガス濃度を光源の強度や湿度を操作しながら自記記録をとった. ③はチャンパーの空気取入れ口で,ここから赤外線 CO₂ ガス分析器へ送り込まれた空気の CO₂ 濃度を記録する. ②はチャンパー内の温湿度検出部, ④は,はかりで,この上にキュウリの個体を置き,水分蒸散による重量変動を差動変圧器で検出するものである. ⑤は人工照明として用いた 400 W の陽光ランプで 2 個チャンパー上部 50 cm にとりつけてある. Fig. 2 にファイトトロン(人工照明室)のブロックダイアグラムを示す.

Fig. 2 Block diagram of Phytotron

④⑤⑥については, Fig. 1 の記号と同じである. ⑤は水銀ランプ,白熱灯,蛍光灯等がつけられている. ⑥は温湿度の調節器で温度については比例制御,湿度については加湿 on-off 制御である. 循環空気は吹出し,吸込み約 1 m/sec である. 調節ガラス室^(2,3,4)については人工照明が無いのみで他は Fig. 2 と同様であるので省略する. Fig. 3 にパイロットチャンパーの写真を, Fig. 4

1) Shū FUNADA*, Yasushi HASHIMOTO* and Tsuyoshi MATSUI**: Studies on the Biotronics with the Correlation between the Response of Plant and the Environmental Elements in the Phytotron. (I)

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

** Biotron Institute, Kyushu University, Fukuoka.

Fig. 3 Pilot chamber

Fig. 4 Measurement of transpiration by differential trans-former in the Phytotron

Fig. 5 Biotronics experiment in the controlled Green-house

にファイトトロンで実験中のキュウリの蒸散量を測っている写真を、Fig. 5 に調節ガラス室での実験の写真をおのおの示す。ファイトトロンおよび調節ガラス室での実

Fig. 6 Characteristic of control system in the Phytotron

— Without plant - - - Lamp on Lamp off

験方法としては、まずキュウリの入れぬ空の状態での温湿度制御特性と部屋の伝達関数の推定、および人工照明室の場合には照明による特性を、次にキュウリを入れた場合について温湿度定常制御特性を計測した。

III. 実験の結果および理論的考察

(i) 温湿度定常制御における植物の影響

Fig. 6 に設定温度 25°C の人工照明室に 32 個体のキュウリを入れた場合と空の場合、さらにキュウリ搬入の場合には人工照明オンの場合とオフの場合の三つの場合についての定常制御特性を示す。Fig. 6 の上の一群のカーブは湿度のハンチング、下の一群のカーブは温度のハンチングである。空の場合には 22°C を中心に規則正しい自励振動をしているが、植物を入れた人工照明オンの場合には

ランプの輻射熱で温度上昇がみられるが、植物の同化作用とともに蒸散量が急激に増え、室内から気化熱を奪い大きな冷却負荷となるため温度が影響を受ける。次に人工照明オフの場合は、はじめは蒸散していたのが次第に減り冷却負荷がとりのぞかれるため温度上昇となっている。

Fig. 7 Distribution of temperature in the Phytotron

しかし温度上昇後、その曲線が空のときのそれよりも低いところで安定していることや、湿度下降開始が温度のそれより遅れていること、また、その下降勾配が小さいことなどから照明オフ後もまだ呼吸作用による蒸散が続いていると考えられる。以上、植物を入れた場合の蒸散による影響は、植物近傍の部屋中央床上 150 cm で、温度オフセットとして 1.7°C 低い値に安定している。Fig. 7 に室内の温度分布を示す。(a) は空の場合、(b) は植物を入れた場合の分布である。さて以上のように植

物の物質交換による影響が無視できず、しかも何らかの規則性があるとする、制御系の取扱いを再度、根本から考えなおす必要が生ずる。

いま、植物のための空調による環境制御装置の制御要因として光 (L), 温度 (Θ), 湿度 (W), CO₂ ガス濃度 (M) の 4 個とし、おのおのの制御操作変数を l, θ, w, m とし、制御対象、すなわち部屋の j 制御操作変数で i 要因が影響をうける伝達関数を G_{ij} とすると、オープン系では次式が成立つ、

$$\begin{pmatrix} L \\ \Theta \\ W \\ M \end{pmatrix} = G_{ij} \cdot \begin{pmatrix} l \\ \theta \\ w \\ m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11}G_{12}G_{13}G_{14} \\ G_{21}G_{22}G_{23}G_{24} \\ G_{31}G_{32}G_{33}G_{34} \\ G_{41}G_{42}G_{43}G_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l \\ \theta \\ w \\ m \end{pmatrix} \dots\dots (1)$$

たとえば温度要因については次の式をうる、

$$\Theta = G_{21} \cdot l + G_{22} \cdot \theta + G_{23}w + G_{24}m$$

すなわち、温度要因は光、温度、湿度、ガス濃度のそれぞれの操作によって、おのおの $G_{21}, G_{22}, G_{23}, G_{24}$ のきき具合で相互干渉をうけることを意味する。

他方、植物について環境との関連における交換量を l_p, θ_p, w_p, m_p とすると、環境要因によるこれらの交換量の植物伝達関数を P_{ij} とし次式がえられよう、

$$\begin{pmatrix} l_p \\ \theta_p \\ w_p \\ m_p \end{pmatrix} = P_{ij} \cdot \begin{pmatrix} L \\ \Theta \\ W \\ M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{11}P_{12}P_{13}P_{14} \\ P_{21}P_{22}P_{23}P_{24} \\ P_{31}P_{32}P_{33}P_{34} \\ P_{41}P_{42}P_{43}P_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G_{11}G_{12}G_{13}G_{14} \\ G_{21}G_{22}G_{23}G_{24} \\ G_{31}G_{32}G_{33}G_{34} \\ G_{41}G_{42}G_{43}G_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l \\ \theta \\ w \\ m \end{pmatrix} \dots\dots (2)$$

いま、湿度要因について考えると、(1) 式より、 $W = G_{31} \cdot l + G_{32} \cdot \theta + G_{33} \cdot w + G_{34} \cdot m$ が導かれ、(2) 式より蒸散量 $w_p = P_{31} \cdot L + P_{32} \cdot \Theta + P_{33} \cdot W + P_{34} \cdot M$ が導びかれる。すなわち、植物の蒸散量は照明強度、温度、湿度、CO₂ ガス濃度によって影響をうけるということを示している。

したがって、環境との関連で植物の特性を考える場合、上例のように蒸散の場合は w_p に注目すればよい。しかし、他方、環境制御を考える場合には、湿度要因 W は $G_{31}, G_{34} \approx 0$ と考えて $W \approx G_{32} \cdot \theta + G_{33} \cdot w$ とするだけでは不十分であり、 $W \approx G_{32} \cdot \theta + G_{33}(w + w_p)$ として w_p を外乱とするより、ある特性をもった湿度操作量と考え、補正してやらねば安定な制御特性は望めないだろう。

したがって、 G_{ij} や P_{ij} をいかにして評価するかが問題となる。 G_{ij} については、たとえば、ランプ、ヒーター、冷凍機、加湿器のそれぞれのオンオフ操作をし、他の条件を一定に保ちつつ計測し、部屋の巨視的応答から求めることができる。一般に、“むだ時間+1次遅れ”の伝達関数として求まる⁽³⁾。他方、 P_{ij} については複雑

であり、生育の時期によっても異なり問題も多いが、やはり 1 つの環境条件を変えて、その間、他のすべての環境条件を一定に保ち、植物の反応をみて評価する。なお、多変数制御系で、それらの要因が相互干渉をうける場合の制御系の解析および特性改善には、いくつかの難かしい問題があり、種々議論⁽⁴⁾がなされているが別の機会にゆずる。

(ii) P_{ij} の実験例

環境制御の面からみても従来の制御対象をブラックボックス視する古典的制御論より、制御対象の内部情報すなわち搬入植物の情報をくみとって制御するいわゆる広義の最適制御論の方法が望まれ、他方、この線からのアプローチは植物を最適制御する情報をうることになる。

その第 1 段階として、植物の P_{ij} の 1 例を蒸散のインディシアル応答に求めた結果を示す。Fig. 8 に温度と蒸散量、Fig. 9 に照明強度と蒸散量の実験結果を示す。また Fig. 10 にパイロットチャンバーで照明強度を変えた場合の蒸散量、CO₂ ガス濃度等の相互干渉の生データによるカーブを示す。

さて、Fig. 8, Fig. 9 より $w_p \approx P_{30} \cdot L + P_{32} \cdot \Theta \approx 8 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{hr}$ 人工照明室での実験では 1 本約 2,000 cm² の葉面積をもつキュウリ 32 個体搬入してあるので $\sum w_p \approx 32 \times 2 \times 10^3 (\text{cm}^2) \times 8 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{hr} = 512 \text{ g/hr}$ したがって、植物の P_{ij} の実験によって $\sum w_p$ が求めた。

ここで (i) の定常制御特性への植物の影響を再度考えてみよう。Fig. 6 では明らかに植物の影響によるオフセットがみられる。このオフセットは古典的制御論に沿う

Fig. 8 Correlation-characteristic between transpiration and temperature

Fig. 9 Correlation-characteristic between transpiration and light

Fig. 10 Transpiration characteristic in the pilot chamber

と、制御対象の内部情報を無視したブラックボックスの取扱いで、単なる不規則外乱の影響度の増大と考え、制御装置に高額のコストをかけ、たとえば積分動作を強調するコントローラに改善し、ある程度の解決策とする。しかし、 $\sum w_p$ は不規則外乱ではなく P_{ij} にある規則性がある以上、 $\sum w_p$ もある規則性をもった知りうる情報を提供しているわけで、この内部情報を制御系にくり込んで系全体の制御特性の改善に利用する方が、環境と植物との相関に基づく情報を知りうるわけであり、バイオトロニクスあるいは究極の最適制御への1ステップとなる。

さて、 $\sum w_p$ を不規則外乱から、制御対象の内部情報と取扱いを変えると、ランプ on の場合には、あらかじめ、それ相当の $\sum w_p$ を、またランプ off の場合には、同様にして $\sum w'_p$ を熱負荷として考慮し、ヒーターおよび冷凍機の出力を調整してやればよい。この場合、P.I.D. コントローラの積分動作を絶対の条件とせずともオンオフコントローラでも可制御となる。

なお、ここで本論とは異なるが、植物の入っている場合と入っていない場合とで部屋の壁面からの熱伝導、熱伝達率は同じとし、また実測により両者の熱交換のリミットサイクルをほぼ同じとしてよいし、またランプによる室内温度上昇特性 G_{21} の実測値および植物葉面への輻射量等から、Fig. 6 の定常オフセット負荷を求めると $\sum w''_p \approx 500 \text{ g/hr}$ となり、植物の影響、すなわち $\sum w_p$ が定常制御特性のオフセットに作用していることを裏づけていることがいえる。

IV. あとがき

ファイトロンにおける環境要因と植物の反応との相関に関するバイオトロニクス的な見方を行なう場合、

(1) 環境制御系を基本に戻って再考する必要がある

り、特に制御対象の情報をブラックボックスの取扱いをするよりは、植物と環境との相関からの情報を検出し、植物を不規則外乱とする従来の方法は望ましくない。

(2) 植物と環境要因との間には P_{ij} , G_{ij} による関係が考えられ、植物と環境との物理的物質交換、熱交換等は P_{ij} , G_{ij} によるリニアコンビネーションと考えられる。

(3) 1例として、定常制御特性の植物による影響の1つとしてのオフセットは植物の蒸散 $\sum w_p$ によると考えられる。

(4) (3) に対する特性改善はコントローラに積分動作を強調しても一つの解決策となるが、その場合は植物については永久に不規則外乱の取扱いでしかなく、バイオトロニクスのアプローチとならぬが、 $\sum w_p$ としての情報を考慮すると、オフセットの解決策になるのみでなく、植物と環境との相関に関する情報をえ、究極の植物の最適制御に一步近づくことになる。

以上、(1)~(4) が本研究でえた結論であるが、この研究は着手されたばかりであり、さらに多くの実験により P_{ij} や G_{ij} の定量化をおし進め、制御環境の改善、およびその際の植物の応答を追求せねばならぬが、昭和44年10月、九大生物環境調節センターで着手された実験と、それにつづく愛媛大学での基礎実験からの中間報告としてここに第I報として報告する。九大生物環境調節センターの実験に参加された関係各位に、多くの点で御指導をおおいだこと、ここに深甚の謝意を表明します。

Summary

Biotronics is a theme with the correlation between the response of plant and the environmental elements in the phytotron. For the first step of Biotronics-research, this paper is concerned with the correlation between environmental control system and the transpiration of plant. By transpiration, control system has an off-set (Fig. 6). So, control system should have an integral action to avoid off-set.

On the other hand, characteristic of transpiration with respect to environmental elements should be made clear. Figs. 8, 9 is an example of this characteristic. This characteristic perhaps leads us to the first step of the optimum control of plant.

(Received June 2, 1970)

文 献

- (1) 船田周 他 1970 生物環境調節 8(1): 39-46.
- (2) 船田周 他 1965 生物環境調節 3(1): 36-39.
- (3) 船田周 他 1966 生物環境調節 4(1): 40-51.
- (4) 船田周 他 1967 生物環境調節 5(1): 5-9.
- (5) 伊藤正雄 1970 制御工学 14(4): 205-209.