ファイトトロンにおける気温変動のスペクトル解析

環境要因のデータ処理についてのシステム化に関する研究 (IV)¹⁾

船田 周*・橋本 康*・丹羽 登**・佐下橋市太郎**・松井 健***

愛媛大学農学部農業工学科*

東京大学宇宙航空研究所計測部**

九州大学生物環境調節研究センター***

ファイトトロンの温度制御系の評価をすすめるため気温と風速との関係をスペクトル解析により求めることを目的とした。そのため気温の変動を計測すること、えられた時系列の処理方法、スペクトル解析の妥当性について検討を加えた。

結果として、1) ファイトトロンの分布定数系の性質は気温のパワースペクトルで与えられる。2) 風を入力とし、気温を出力とする対応関係でのスペクトル解析は、線形性の考慮を行なうと、ファイトトロンの温度制御系の評価に有効であることが判明した。

1972 年 4 月 10 日受付

1. ま え が き

ファイトトロンの温度制御系を気温の変動からスペクトル解析を行なうため、その計測手段としての変動成分の測定可能な超音波によるファイトトロン用気温計の試作⁽¹⁾からはじめた。良好な特性の試作 1 号器でえられた温度変動の時系列から風速との関連でのスペクトル解析へと、定常確率過程の前提で議論をすすめた。一般に時系列からのスペクトル解析は、多変数かつ多数のデータ、高度な演算など多くの問題があり、そのシステムティックな取扱いは困難であるが、すでに開発したハイブリッドコンピュータを中心としたデータ処理システム^(2,3)を利用して解決した。

2. 測定ファイトトロンと測定方法

測定ファイトトロンは九州大学生物環境調節研究センターのプログラム制御室(Gs)を選んだ。その理由として、この部屋は気温 15~35°C まで温度変動幅を広く制御できるので各設定気温の定常状態および 5°C ステップなどの過渡状態の両者につき温度制御系を静的にも動的にも運転でき、それらの特性が測定できることがあげられる。さて、このファイトトロンで、まず風速計を吹出し点にすえ、気温計を吹出し点から部屋中央部、さらに吸込み点と移動させ、気温および風速の同時測定を行なった。ついで 15~35°C まで 5°C ずつの間隔で定常制御を行なわせ、各々での気温と風速を、さらに 5°C/step, 5°C/3.75 min, 5°C/7.5 min などの気温の過渡状態を測定した。計測方法は試作の超音波気温計と市販の超音波風速計を用い、それぞれのアナログ出力をビジュグラフ

¹⁾ Shu FUNADA,* Yasushi HASHIMOTO,* Noboru NIWA**, Ichitaro SAGEHASHI,** and Tsuyoshi MATSUI***: Spectrum Analysis of the Temperature-fluctuation in Phytotron. Studies on the Data Processing System on Environmental Factors (IV)

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

** Department of Electronics, Institute of Space and Aeronautical Science, University of Tokyo, Tokyo.

*** Biotron Institute, Kyushu University, Fukuoka.

Fig. 1 Block-diagram of the measurement-system of temperature-fluctuation.

Fig.2 Ultrasonic detector in Phytotron.

Fig.3 Measurement system.

Fig.4 Computer-system for spectrum analysis.

と F.M. データレコーダにとった。試作気温計の方は念のため周波数カウンタでチェックした。F.M. データレコーダに磁気記録をしたデータについては実験終了後レコーダをコンピュータの A/D コンバータに接続し、後述のスペクトル解析を行なわせた。このシステムを Fig.1 に示す。Fig.2 は測定しているところ、Fig.3 は計測システムの写真である。測定は約 50 回にわたり、各回、気温、風速ともに 1,000 点のデータが解析に必要なので、 $2 \times 50 \times 1,000$ 個のデータをコンピュータにかけることになるが、データのパンチに最大の労力がかかるので、当方式の F.M. データレコーダに収録されたアナログデータを A/D コンバータ経由で、人手を介さず直接コンピュータに入力せしめる方式が非常に有効である。Fig.4 にコンピュータシステムの写真を示す。

3. 時系列のスペクトル解析⁽⁴⁾

ファイトロンの気温や風速は不規則変動をしている。これら不規則変動の相互関連は、一般の気象空間では気温差による上昇気流が自然対流を生じさせて、風速に影響を与えるが、ファイトロンのような閉鎖空間では、プロアによる強制対流の場合であるため、風速による気温への応答を考える方が妥当である。そのためには風速や気温を時系列と考え、その処理方法としてスペクトル解析を行なうことが有効である。

さて、一般に時系列を $\{X_i(t)\}$ と書くとき、この確率過程が定常なら時系列の積の期待値が存在する。すなわち、

$$E[X_i(t_1) \cdot X_j(t_2)] = \varphi_{ij}(t_1, t_2)$$

これは時間差 τ を変数とし

$$\varphi_{ij}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T X_i(t) \cdot X_j(t+\tau) dt$$

とも書ける。

$i=j$ の場合、 $\varphi_{ii}(\tau)$ を自己相関関数、 $i \neq j$ の場合、 $\varphi_{ij}(\tau)$ を相互相関関数という。さらに $\varphi_{ij}(\tau)$ のフーリエ変換を $\Phi_{ij}(f)$ とすると、

$$\Phi_{ij}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-2\pi f j \tau) \varphi_{ij}(\tau) d\tau.$$

ここで、 $i=j$ の場合、 $\Phi_{ii}(f)$ は時系列 $\{X_i(t)\}$ のパワースペクトルといい、 $i \neq j$ の場合 $\Phi_{ij}(f)$ は 2 つの異なる時系列 $\{X_i(t)\}$ および $\{X_j(t)\}$ のクロススペクトルという。

さて、ファイトロンの風速と気温との関連は前述の理由で気温を風速で表わすとする。このように、あるブラックボックスの出力を入力で表わすには、そのブラックボックスを線形と考えることから出発する。すなわち、一般に線形系の入力と出力の間には重み関係 $g(\tau)$ を考え、その $g(\tau)$ と入力とのコンボリューションの関係で

出力は次式で表わされる.

$$X_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X_1(t-\tau)g(\tau)d\tau.$$

さらにこの関係をフーリエ変換すると,

$$Z_2(f) = G(f) \cdot Z_1(f)$$

と簡単に表わせる. ここで,

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-2\pi f j\tau) \cdot g(\tau)d\tau$$

を周波数応答関数と称し, 重み関数のフーリエ変換である. さて, これらは入出力がデターミニスティクな場合であるが, ファイトロンでは風速も気温もストカスティク, すなわち時系列と考えられる. このような場合, 入出力の関係は確率的な関係となり, その式は期待値の意味で成立つ. すなわち,

$$E[X_2(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau) \cdot E[X_1(t-\tau)]d\tau.$$

したがって, 出力の自己相関関数は次式のように入力
の自己相関関数で表わされる.

$$\begin{aligned} \varphi_{22}(\tau) &= E[X_2(t_1) \cdot X_2(t_2)] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} d\tau_1 \cdot g(\tau_1) \int_{-\infty}^{\infty} d\tau_2 \cdot g(\tau_2) \cdot E[X_1(t_1-\tau_1) \cdot \\ &\quad X_1(t_2-\tau_2)] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} d\tau_1 \cdot g(\tau_1) \int_{-\infty}^{\infty} d\tau_2 \cdot g(\tau_2) \cdot \varphi_{11}(\tau_2+\tau_1). \end{aligned}$$

この式をフーリエ変換すると,

$$\begin{aligned} \Phi_{22}(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-2\pi f j\tau) \varphi_{22}(\tau)d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} d\tau_1 \cdot g(\tau_1) \exp(2\pi f j\tau_1) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} d\tau_2 \cdot g(\tau_2) \\ &\quad \exp(-2\pi f j\tau_2) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} d\tau \cdot \exp\{-2\pi f j(\tau-\tau_2 \\ &\quad +\tau_1)\} \cdot \varphi_{11}(\tau-\tau_2+\tau_1). \end{aligned}$$

したがって,

$$\Phi_{22}(f) = \overline{G(f)} \cdot G(f) \cdot \Phi_{11}(f) = |G(f)|^2 \cdot \Phi_{11}(f).$$

これは出力のパワースペクトルが入力のパワースペクトルと周波数応答関数の自乗との積で表わされることを意味している. それゆえ, 入出力のパワースペクトルが求められると, この式から逆に $|G(f)|^2$ あるいは $|G(f)|$ が求められることになる. 他方, 入出力の相互相関関数に注目すると,

$$\begin{aligned} \varphi_{12}(\tau) &= E[X_1(t) \cdot X_2(t+\tau)] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau_1) \cdot E[X_1(t) \cdot X_1(t+\tau-\tau_1)] d\tau_1 \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau) \cdot \varphi_{11}(\tau-\tau_1) d\tau_1. \end{aligned}$$

この式をフーリエ変換すると,

$$\Phi_{12}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-2\pi f j\tau) \cdot \varphi_{12}(\tau)d\tau$$

$$\begin{aligned} &= \int_{-\infty}^{\infty} d\tau_1 \cdot g(\tau_1) \exp(-2\pi f j\tau_1) \\ &\quad \cdot \int_{-\infty}^{\infty} d\tau \cdot \varphi_{11}(\tau-\tau_1) \exp\{-2\pi f j(\tau-\tau_1)\} \\ &= G(f) \cdot \Phi_{11}(f). \end{aligned}$$

すなわち, 入出力のクロススペクトルは入力のパワースペクトルと系の周波数応答関数との積で表わされる. それゆえ, 入出力のクロススペクトルと入力のパワースペクトルとが求められるとこの式から逆に周波数応答関数 $G(f)$ が求められる. 一般に入出力のパワースペクトルから求められる周波数応答関数 $\overline{G(f)} \cdot G(f) = |G(f)|^2$ からはゲインのみが求められるが, 入出力のクロススペクトルおよび入力のパワースペクトルから求められる $G(f)$ からは, クロススペクトルが $\Phi_{12}(f) = C(f) - j \cdot S(f)$ のように複素数となるので, 次の諸量が求められる.

$$(i) |G(f)|^2 = \left\{ \frac{C(f)}{\Phi_{11}(f)} \right\}^2 + \left\{ \frac{S(f)}{\Phi_{11}(f)} \right\}^2$$

$$(ii) \text{ 位相 } \tan \theta_f = \frac{S(f)}{C(f)}$$

$$(iii) \text{ コヒーレンシー } |r|^2 = \frac{|G(f)|^2}{\frac{\Phi_{22}(f)}{\Phi_{11}(f)}}.$$

なおコヒーレンシーは, ブラックボックスと考えた系の線形性が強ければ1に近づき, 非線形性が強ければ0に近づく.

以上が時系列のデータからのスペクトル解析の概略であるが, これらは定常確率過程の前提でファイトロンの気温, 風速の変動, すなわち今回測定された時系列のデータにすべてあてはまる.

4. スペクトル解析のシステムマティク なデータ処理

さて実際の計算では実測のデータ数やサンプリング間隔の選び方によって母集団の推定の偏りが大きくなり, 望ましくない場合が生ずる. それゆえ, 計算のパラメータはできるだけ広くとれるようにし, 実測データを 2,3 のパラメータで試算してみる必要がある. パラメータとしてはデータ数 M , スペクトル分割数 h , サンプリング間隔 Δt などが考えられ, これらの間には $M \cdot \Delta t \geq 10 \cdot h \cdot \Delta t$ の関係が望ましいとされている⁽⁴⁾. Δt が小さいと計算時間がかかり, 大きいと aliasing による影響を受け, 他方 h が小さいと推定値の偏りが大きくなることなどを考慮し, $\Delta t = 100 \text{ ms}$ を中心に 10^2 の幅をもたせ $30s > \Delta t > 1 \text{ ms}$ とし, $h \approx 100$ を目標に $M \leq 1,000$ の条件でこれらのパラメータを自由に選べるようにシステムマティクなプログラムを用意した. さらにデータのフィルタとしてスペクトルウインドウ係数を3種採用した. 膨大なアナログデータをパンチカードやテープを使用せ

ず、A/D 変換器で直接デジタルコンピュータに読み込ませる方式をとっているため、コンピュータが大型や中型は使えずミニコンとなり、コアメモリーも 4 kWords の制約がある。パワースペクトルについては、時系列データから自己相関関数を求め、つづいてパワースペクトルを求める一貫したプログラム方式をとったが、クロススペクトルについてはメモリーが不足する。それゆえ、まずデータから一度相互相関関数を求めておき、ついでそのデータを新たに F. F. T. で処理してクロススペクトルを求める方式をとった。数値計算は次式によった。

$$\varphi_{11}(l \cdot \Delta t) = \frac{1}{M-l} \sum_{n=0}^{M-l} \{X_M(n \Delta t)\} \{X_M((l+n) \Delta t)\}$$

$$\Phi_{11}\left(\frac{r}{h} \cdot \frac{1}{2\Delta t}\right) = \Delta t \left\{ \varphi_{11}(0) + 2 \sum_{l=1}^{h-1} \varphi_{11}(l \cdot \Delta t) \cos\left(2\pi \cdot \frac{r}{2h} \cdot l\right) \right. \\ \left. + (-1)^r \varphi_{11}(h \cdot \Delta t) \right\} \cdot \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{sec}} \right]$$

$$r=0, 1, \dots, h.$$

さらにスペクトルウインドウとしては次の 3 種を用いた。

$$\begin{array}{llll} a_0 & a_1=a_{-1} & a_2=a_{-2} & a_3=a_{-3} \\ W_1 & (0.5132, 0.2434, & - & -) \\ W_2 & (0.6398, 0.2401, & -0.0600, & -) \\ W_3 & (0.7029, 0.2228, & -0.0891, & 0.0149) \end{array}$$

すなわち、最終的なスペクトル Φ_{11}' は上式で求めた Φ_{11} にウインドウ係数をかけ、次式のようにした。

$$\Phi_{11}'\left(\frac{r}{h} \cdot \frac{1}{2\Delta t}\right) = \sum_{n=-k}^k a_n \Phi_{11}\left(\frac{r-n}{h} \cdot \frac{1}{2\Delta t}\right).$$

具体的には W_1 では、

$$\begin{aligned} \Phi_{11}'\left(\frac{0}{h \cdot 2\Delta t}\right) &= 0.5132 \Phi_{11}\left(\frac{0}{h \cdot 2\Delta t}\right) \\ &+ 0.4868 \Phi_{11}\left(\frac{1}{h \cdot 2\Delta t}\right) \\ \Phi_{11}'\left(\frac{r}{h \cdot 2\Delta t}\right) &= 0.2434 \Phi_{11}\left(\frac{r-1}{h \cdot 2\Delta t}\right) \\ &+ 0.5132 \Phi_{11}\left(\frac{r}{h \cdot 2\Delta t}\right) \\ &+ 0.2434 \Phi_{11}\left(\frac{r+1}{h \cdot 2\Delta t}\right) \\ \Phi_{11}'\left(\frac{h}{h \cdot 2\Delta t}\right) &= 0.4868 \Phi_{11}\left(\frac{h-1}{h \cdot 2\Delta t}\right) \\ &+ 0.5132 \Phi_{11}\left(\frac{h}{h \cdot 2\Delta t}\right). \end{aligned}$$

相互相関からのクロススペクトルは、F. F. T. (Fast Fourier Transform)⁽⁶⁾ によった。

以上より風速の時系列を $\{x(t)\}$ [cm/sec]、気温の時系列を $\{y(t)\}$ [°C] で表わすと、諸量および単位は次式のようになる。

$$\text{風速の自己相関関数 } \varphi_x(\tau) = \frac{1}{M-l} \sum_{n=0}^{M-l} \{x(n \Delta t)\}$$

$$\cdot \{x((n+l) \Delta t)\} [\text{cm}^2/\text{sec}^2]$$

$$\text{気温の自己相関関数 } \varphi_y(\tau) = \frac{1}{M-l} \sum_{n=0}^{M-l} \{y(n \Delta t)\}$$

$$\cdot \{y((n+l) \Delta t)\} [^\circ\text{C}^2]$$

風速・気温の相互相関関数

$$\varphi_{xy}(\tau) = \frac{1}{M-l} \sum_{n=0}^{M-l} \{y((l+n) \Delta t)\} \cdot \{x(n \Delta t)\} \left[\frac{\text{cm} \cdot ^\circ\text{C}}{\text{sec}} \right]$$

風速のパワースペクトル

$$\begin{aligned} \Phi_x(f) &= \Delta t \left\{ \varphi_x(0) + 2 \sum_{l=1}^{h-1} \varphi_x(l \cdot \Delta t) \cos\left(2\pi \cdot \frac{r}{2h} \cdot l\right) \right. \\ &\left. + (-1)^r \varphi_x(h \cdot \Delta t) \right\} \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{sec}} \right] \end{aligned}$$

気温のパワースペクトル

$$\begin{aligned} \Phi_y(f) &= \Delta t \left\{ \varphi_y(0) + 2 \sum_{l=1}^{h-1} \varphi_y(l \cdot \Delta t) \cos\left(2\pi \cdot \frac{r}{2h} \cdot l\right) \right. \\ &\left. + (-1)^r \varphi_y(h \cdot \Delta t) \right\} [^\circ\text{C}^2 \cdot \text{sec}] \end{aligned}$$

風速・気温のクロススペクトル

$$\begin{aligned} \Phi_{xy}(f) &= \Delta t \left\{ \sum_{l=0}^h \varphi_{xy}(l \cdot \Delta t) \cos\left(2\pi \cdot \frac{r}{2h} \cdot l\right) \right. \\ &\left. - j \sum_{l=0}^h \varphi_{xy}(l \cdot \Delta t) \sin\left(2\pi \cdot \frac{r}{2h} \cdot l\right) \right\} [\text{cm} \cdot ^\circ\text{C}] \end{aligned}$$

5. スペクトル解析の結果

ファイトロンの気温および風速の可観測データが確率過程として定常であることを前提とし、3 で述べたスペクトル解析を 4 で述べた処理法によって行なった結果を以下に示す。

まず、今回のスペクトル解析の入力として考える風速のスペクトルを Fig. 5 および Fig. 6 に示す。Fig. 5 は吹出し中央点の風速のパワースペクトルである。Fig. 6

Fig. 5 Power spectrum density function (P. S. D.) of air-flow at the center of inlet in the phytotron.

Fig. 6

Fig. 7

Fig. 8

Fig. 6 P. S. D. of air-flow at the point 50 cm over the floor.

Fig. 7 P. S. D. of temperature at the point 50 cm over the floor.

Fig. 8 P. S. D. of temperature at the point 2 m over the floor.

Fig. 9

Fig. 10

Fig. 11

Fig. 9 P. S. D. of temperature at the center of outlet in the phytotron.

Fig. 10 P. S. D. of temperature with respect to transient characteristic of temperature-control.

Fig. 11 P. S. D. of temperature with respect to transient characteristic of temperature-control.

は部屋中央鉄板上 50 cm 点の風速のパワースペクトルである。

次に Fig. 7~Fig. 9 に気温スペクトルの場所による特性を示す。Fig. 7 は部屋中央鉄板上 50 cm 点の気温のパワースペクトルであり、設定温度条件は 25°C 定常制御で温度制御系をオフにし、送風のみが定常の特殊な条件としてある。これは熱の外乱を 1 時的にカットオフした状態での気温のスペクトルをみるための条件設定にあたる。Fig. 8 は部屋中央鉄板上 2 m 点の気温のパワースペクトルである。25°C 定常制御の条件設定である。Fig. 9 は吸込み中央点の気温のパワースペクトルである。条件設定は Fig. 8 の場合と同じである。次に場所は風速、気温ともに部屋中央鉄板上 50 cm 点に設置し、制御の過渡における気温スペクトルの特性を Fig. 10, Fig. 11 に示す。Fig. 10 は温度目標値を 30°C から 35°C まで 5°C/3.75 min の勾配で加温した場合と逆に 35°C から 30°C まで同じ勾配で冷却した場合の気温のパワースペクトルである。実線が加温、点線が冷却の場合である。Fig. 11 は、Fig. 10 と同じ条件で勾配のみを変えた場合の気温のパワースペクトルである。実線は 5°C/7.5 min、点線は 5°C/step の勾配でのスペクトルである。

次に、風速と気温との場所による応答関係をしらべるため、風速と気温の相互相関関数およびそのフーリエ変換であるクロススペクトルの例を Fig. 12~Fig. 15 に示す。25°C 定常制御の条件設定である。Fig. 12 は吹出し中央点の風速と部屋中央鉄板上 2 m 点の気温との同時測定データから求めた相互相関関数である。Fig. 13 は Fig. 12 からフーリエ変換によって求めたクロススペクトルである。Fig. 14 は部屋中央鉄板上 50 cm 点の風速と吸込み中央点の気温との同時測定データから求めた相互相関関数である。Fig. 15 は Fig. 14 から求めたクロススペクトルである。

次に風速と気温のクロススペクトルと風速のパワースペクトルから求められる周波数応答関数 $G(f)$ を Fig. 16

Fig. 13 Cross spectrum density function (C. S. D.) of Fig. 12.

Fig. 14 Cross correlation function of air-flow and temperature.

Fig. 15 C. S. D. of Fig. 14.

Fig. 12 Cross correlation function of air-flow and temperature.

Fig. 16 Frequency response function ($G(f)$) of Fig. 13.

Fig. 17

Fig. 18

Fig. 19

Fig. 17 $G(f)$ of Fig. 15.

Fig. 18 $G(f)$ of air-flow at the point 50 cm over the floor and temperature at the point 50 cm over the floor.

Fig. 19 $G(f)$ of air-flow at the point 50 cm over the floor and temperature at the point 2 m over the floor.

Fig. 20

Fig. 21

Fig. 22

Fig. 20 $G(f)$ of air-flow and temperature at the same point of Fig. 18 under the condition of cut-off thermal-control action.

Fig. 21 Coherency $r(f)$ of Fig. 20.

Fig. 22 $r(f)$ of Fig. 19.

Fig. 23 $r(f)$ of Fig. 16.

～Fig. 20 に示す。Fig. 16 は Fig. 13 のクロススペクトル、および同時刻で同じ点の風速のパワースペクトルから求めた周波数応答関数 $G(f)$ である。Fig. 17 は Fig. 15 のクロススペクトルと同様の風速のパワースペクトルから求めた $G(f)$ である。以下、相互相関関数およびクロススペクトルは省略するが、Fig. 18 は風速、気温ともに部屋中央鉄板上 50 cm 点での $G(f)$ である。Fig. 19 は風速は部屋中央鉄板上 50 cm 点、気温は部屋中央鉄板上 2 m 点での $G(f)$ である。Fig. 20 は風速、気温ともに部屋中央鉄板上 50 cm 点での $G(f)$ であるが、条件設定は Fig. 7 と同じに 25°C 定常から一時的温度制御系をオフにし熱の外乱を一時的にカットオフした状態とした。

次にコヒーレンシーの例を Fig. 21～Fig. 23 に示す。Fig. 21 は Fig. 20 のコヒーレンシーである。Fig. 22 は Fig. 19 のコヒーレンシーである。Fig. 23 は Fig. 16 のコヒーレンシーである。

6. 考察および結論

この研究はファイトロンの温度制御特性を気温の平均値で評価する従来の方法と異なり、試作の超音波気温計によって測定可能になった気温のランダム変動に注目してスペクトル解析から評価しようという、ファイトロンに対する新たな方法論の提示とその妥当性の検討にある。それゆえ、1) ファイトロンの入力を気流に求め、その特性の把握、2) その気流の入力でファイトロン内の場所による気温スペクトルのパターンの把握、3) ある定点での制御特性による気温スペクトルの把握、4) 風速と気温との対応関係とその変動周波数による特性、すなわち周波数応答関数の把握と検討、5) 風速と気温との対応の線形性の検討すなわちコヒーレンシーの

把握、などが考察する事項である。

(1) ファイトロンにおける気流のスペクトルについてはすでに報告した⁽⁶⁾。今回は吹出し点と鉄板上 50 cm 点の 2 箇所の気流をファイトロンの入力と設定した。Fig. 5 は吹出し点の風速変動のパワースペクトルである。Fig. 6 は有孔鉄板上 50 cm 点の風速変動のパワースペクトルである。吹出し点では約 2 m/sec の送風があり乱れも速い。他方、鉄板上 50 cm 点では約 10～30 cm/sec の風速のため乱れはおだやかである。したがってスペクトルの性質としては周波数の増加に対するパワー密度の減衰が Fig. 5 より Fig. 6 の方がはげしい。Fig. 5 および Fig. 6 は 2 種の設定における 1 例であるが、同じ条件設定における他の例でもパターンは全く同じことがみとめられた。Fig. 5 および Fig. 6 のスペクトルパターンを以て考察をすすめても一般性は失われない。

(2) 場所による気温変動のスペクトルは Fig. 7～Fig. 9 に示される。Fig. 7 と Fig. 9 は似たパターンである。Fig. 7 は一時的に外部からの熱をカットオフした場合であるが、ふつうの定常制御の場合もグラフは省略したが大体同じとみとめられた。しかし Fig. 8 は Fig. 7 および Fig. 9 とは異なるパターンと考えられる。これは Fig. 7 は部屋中央鉄板上の部屋空間への入口近傍、Fig. 9 は吸込み点の部屋からの出口近傍で、ともにソースとシンクにあたり、Fig. 8 は部屋中央鉄板上 2 m の部屋空間の中央に位置する点の気温変動であることからそのスペクトルパターンが異なることは妥当である。特に Fig. 8 の周波数の増加に対する気温パワーのスペクトル密度の減少の度合いは Fig. 7 および Fig. 9 に比較すると急激であり、部屋空間の中央部ではおだやかな気温変動をしていると考えられる一般的な常識を証明している。

(3) 部屋中央鉄板上 50 cm 点の制御特性による気温スペクトルは Fig. 10 および Fig. 11 に示される。Fig. 10 から実線と点線はほぼ同じパターンとみることができ、しいて差異をチェックすると、点線の方が周波数の増加に対する気温パワーのスペクトル密度の減少の度合いが実線より急激である。これは点線が冷却、実線が加温に相当することを考えると加温の場合の方が冷却より気温の変動が速いといえる。Fig. 10 の制御特性の条件設定は 5°C/3.75 min としたが、Fig. 11 においては実線は 5°C/7.5 min、点線は 5°C/step の条件設定で求められた気温スペクトルが示される。これらは同じパターンと考えられる。したがって 5°C を step から 7.5 分まで過渡制御する場合、気温変動におけるその差はパワースペクトルでみかぎりみとめられない。

(4) 風速と気温との相互相関関数の例は Fig. 12 および Fig. 14 に示される。これらのフーリエ変換によるクロススペクトルは Fig. 13 および Fig. 15 に示される。このクロススペクトルを風速のパワースペクトルで割ると周波数応答関数 $G(f)$ がえられる。それらが Fig. 16~Fig. 20 に示されている。Fig. 13 と Fig. 15 を比較すると Fig. 15 は周波数の増加でパワーが減少しないが、Fig. 13 は周波数の増加でパワーは減少する。Fig. 15 は入力風が鉄板上 50 cm 点で気温が吸込み点であり、Fig. 13 は入力風が吹出し点で気温が鉄板上 2 m 点であり、条件設定が大きく異なっている。

これを周波数応答関数で検討すると、Fig. 17 が Fig. 15 に対応する $G(f)$ であり、Fig. 16 が Fig. 13 に対応する $G(f)$ である。Fig. 17 は周波数の増加とともに $G(f)$ が増大し、Fig. 16 は周波数の増加でそれほど $G(f)$ が変わらない。これは Fig. 17 は風が鉄板上 50 cm のおだやかな変動を入力とし、出力の気温が吸込み点の速い変動に設定したため周波数の増加とともに系の応答のゲインを高めることが論理的必然であることを示している。これに反し、Fig. 16 は入力風を吹出し点に、出力の気温を部屋空間の中央点にそれぞれ設定したため、風速のスペクトルにリニヤなフィルターをかけたものが出力としてのおだやかな気温として求められることを意味している。Fig. 18 は風速と気温が鉄板上 50 cm 点に設定され、したがって局所空間での風速に対する気温の周波数応答関数である。Fig. 19 は風速は鉄板上 50 cm 点、気温は鉄板上 2 m の部屋空間中央の $G(f)$ であり、Fig. 20 は Fig. 18 と同じ場所での外部からの熱をカットオフした状態での $G(f)$ である。Fig. 18~Fig. 20 は Fig. 17 のパターンに似ている。ただ Fig. 18 および Fig. 20 は、0.55 Hz および 0.7 Hz に谷があり、0.45 Hz および 1 Hz に小さなピークがみとめられ、ほとんど同じパターンと考えてよいことが結論づけられるが、Fig. 19 では谷が 0.4 Hz、小さなピークが 0.85 Hz と差がみとめられる。これは Fig. 19 が部屋中央の気温を出力にする $G(f)$ であり、Fig. 18 および Fig. 20 と異なるのは妥当である。

(5) さて上述の (4) は線形な系については明解な議論とみとめられるが、実際にはファイトロンにおける風速と気温との対応関係は線形とは限らない。それゆえコヒーレンシー $r(f)$ を求め線形の度合いを検討する。Fig. 21~Fig. 23 がコヒーレンシー $r(f)$ の例である。Fig. 21 は Fig. 20 における $G(f)$ のコヒーレンシー、Fig. 22 は Fig. 19 の、そして Fig. 23 は Fig. 16 のそれぞれ $r(f)$ である。Fig. 21 と Fig. 22 はよく似ている。ともに 1 Hz 以下の周波数での $r(f)$ は 10^{-2} のオーダー

で線形性は少なく、非線形性が強いと考えられる。ともに 2 Hz で約 0.1, 5 Hz で約 0.5 であり、 $r(f)=1$ では線形といわれていることを考えると周波数の増加とともに線形に近づくことがわかる。

他方、Fig. 23 については、5 Hz でも 10^{-2} 以下で線形性は少なく非線形と考えられる。以上 (1)~(5) の考察から次の i)~v) が結論として誘導できる。

i) 温度制御によるファイトロン内の気温変動のパターンはパワースペクトルでとらえることができる。

ii) しかも、ファイトロン内の分布定数系の性質、すなわち場所による特性は気温のパワースペクトルで表示できる。

iii) 過渡制御による差異は気温のパワースペクトルではみとめられない。

iv) 風速を入力とし、気温を出力とする対応関係はスペクトル解析で求められるが、その際、線形性の検討から入力風速を吹出し点とするより、鉄板上の近傍をえらぶ方が出力の気温との線形対応で好ましい。

v) スペクトル解析の採用により、ファイトロンの気温変動の解明が可能となったが、この方法論をさらに詳細に検討することにより、制御特性の評価が著しく進展すると考えられる。

最後に、この方法論の前提になった定常確率過程については、ファイトロンのような再現性のある対象について、しかも 1 回の測定データの最大時間は 3 分であったことを考えると、エルゴード性を満し、充分に定常確率過程として取扱える。他分野でスペクトル解析を適用している対象とファイトロンを比較すると慣習上十分な妥当性があるとみて差しつかえがない。

文 献

- (1) 橋本康ほか 1972 ファイトロン用超音波気温計の試作. 生物環境調節 10(2): 37-42.
- (2) 船田周ほか 1970 環境要因のデータ処理についてのシステム化に関する研究 (I). 生物環境調節 7(2): 91-95.
- (3) 船田周ほか 1971 環境要因のデータ処理についてのシステム化に関する研究 (III). 生物環境調節 9(1): 1-9.
- (4) 磯部孝編 1968 相関関数およびスペクトル (東大出版会): 28-46.
- (5) 城戸健一 1969 高速フーリエ変換について. 電子通信学会誌 52(12): 1534-1541.
- (6) 船田周ほか 1971 環境要因のデータ処理についてのシステム化に関する研究 (II). 生物環境調節 8(2): 130-139.

Summary

In order to estimate the temperature-control system of Phytotron, spectrum analysis with temperature and air-flow has been carried out.

So, how to measure fluctuation of temperature, how to process data of time series and how to adapt spectrum analysis to Phytotron are discussed.

As a result, it is concluded that characteristic of temperature-distribution in Phytotron is given by power spectrum density function of temperature and that spectrum analysis with air-flow (input) and temperature (output) is good approach to estimate the temperature-control system of Phytotron under consideration of system-linearity.

(Received April 10, 1972)