ファイトトロン用超音波気温計の試作¹⁾

橋本 康*・佐下橋市太郎**・丹羽 登**・船田 周*

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**

ファイトトロンの気温変動を計測するため、超音波共振方式による超音波気温計を試作した。

従来の気温計に比較すると、応答が 100 Hz までは十分にえられるのと、測温空間の距離が 1 cm と狭いことが長所としてあげられる。さらにファイトトロンで予備実験を行ない、電磁誘導の対策も考慮し、ファイトトロンで計測しやすい仕様を完成し、このほど試作 1 号器の実現をみた。試作 1 号器によるファイトトロンの計測では良好な結果がえられた。えられたデータの解析は他の機会に報告するが、実験室と実際のファイトトロンでの検討から試作 1 号器の完成までを本報で報告する。

1972 年 3 月 21 日受付

1. ま え が き

ファイトトロンの環境要因としての気温に注目すると、代表点検出によるフィードバック制御系の制御量として、定常では設定気温を中心にハンチングをしている。しかし、ファイトトロンは分布定数系であり、代表点での情報のみでは、中に入れる植物への影響は、特に発芽時などの生理学的閾値（スレッシュホールド）にある植物の場合、充分とはいえない。それゆえ、系の分布特性を平均値および変動値の両面からおさえることが必要である。平均値の計測については従来の気温計が有効であるが、変動値については局所空間を速い応答で計測する気温計が必要になるが、従来、適切なものがみあたらなかった。それゆえ筆者らは、すでに開発シラボラトリーで良好な結果をえ、さらに、たばこ群落などの野外でのテストにも有効と認められた超音波共振方式による気温計をファイトトロン用に試作した。

ファイトトロン用の試作にあたっては、ファイトトロ

ンは吹き出し点では風速が 2 m/sec ぐらいにもなるが、植物を置くチャンパー内では数十 cm/sec の低速の流れ場であり、気流についてみても平均値と同様、変動値も大きな意味をもつ空間であること、さらに、電磁場についてみても、たばこ群落などと異なり、多くの冷凍機や、ヒータ、その他、かなり強い電磁場であることなどの点を特に留意した。そして実験室での特性試験と同様、実際のファイトトロンでの特性試験も行ない、一応の仕様を確立し、このほどファイトトロン用の試作 1 号器が完成した。

2. 共振法による超音波気温計

1) 気体の温度と音速との関係

空気中の音速は、空気を理想気体とみなせば、

$$C = 20.67 \sqrt{T} \quad [\text{m/s}] \quad (1)$$

T : 絶対温度 (°K)

で与えられる。

常温付近では気温 $[\theta]$ に摂氏 $[^{\circ}\text{C}]$ を用いると、近似的に次式となる。

$$C = 331.5 + 0.61 \theta \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

超音波気温計はこの関係式を基として、音速を測定することにより、気温を計ろうとするものである⁽¹⁾。この音速を測定する方法として、これまで (1) パルス伝播時間差法、(2) シングアラウンド法、(3) 位相差法、(4) 共振法などが提案、試作されている⁽²⁾。

これらをファイトトロン用として使用する立場からみると、その測定空間が短いものでも 10 cm はあり、空間

¹⁾ Yasushi HASHIMOTO,* Ichitaro SAGEHASHI,** Noboru NIWA,** and Shu FUNADA*: Ultrasonic Thermometer for Phytotron.

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

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

Fig. 1 Received level and phase changes.

的、時間的に微細で応答速度の大きい気温変動を測定する必要があるファイトトロン用としては不適當である。

2) 共振法の原理⁽³⁾

さて、今回製作された共振法による超音波気温計は、Fig. 1 (a) に示すような、対向した送・受波器の間に構成される気柱の共振周波数を測定し、気温を求めようとするものである。この測定空間は $10 \times 14 \phi$ (mm) と小さく、応答速度も大きく、ファイトトロン用超音波気温計として最も適したものである。

さて、Fig. 1(a) に示すように、距離 l で送・受波面を平行にして対向させ、周波数 f の超音波を送・受する。超音波の波長 λ の $1/2$ 波長の整数 n 倍と l が等しい関係 ($l = n\lambda/2$) になると、気柱には定在波がたち、共振状態となり次式の関係が得られる。

$$f = \frac{C}{\lambda} = \frac{C \cdot n}{2l} = \frac{n(33.150 + 61\theta)}{2l} \text{ [Hz]} \quad (3)$$

(3)式が共振法による気温測定の基本式であり、気柱の共振周波数を測定することにより、気温を求めることができるわけである。

Fig. 1(a) 構成で、気温をパラメータとし、周波数を変えて、受波レベルおよび送・受波器間の位相を測定した例を Fig. 1(b), (c) に示す。

共振時では受波レベルは最大値となり、位相も急変している。共振時の伝播損失は約 $-60 \sim -70$ dB である。また共振時の位相差は測温範囲内ではほぼ一定である。したがって、気柱の共振周波数を位相、または受波レベル等を測ることにより求めれば、(3) 式から気温を求めることができる。

すでに、共振点を自動追尾して測定するいくつかの方式が試作されており、そのうち位相追尾方式による装置で、先にたばこ群落中における気温測定を行なった⁽²⁾。また、発振方式による装置⁽⁴⁾では、九大ファイトトロンにおける予備実験例もあり、ともに良い性能を示した⁽⁵⁾。とりわけ発振方式の装置は、他の方式に比べ回路の簡略化、電池動作等ファイトトロン用として充分な性能があることがわかり、今回ファイトトロン用試作1号器に採用された。

3) 気柱を共振器とした発振系による超音波気温計

Fig. 2 に発振方式の超音波気温計の原理的構成図を示す。送・受波器間の共振時の伝播損失 $[G_0]$ 、位相 $[\phi_0]$ を増幅器 G_1, G_2 、移相器 ($-G_3$, 移相量 ϕ_1) で補正して、次の2つの条件が満たされれば、この閉ループは発振する。

$$\left. \begin{aligned} G_1 + G_2 - G_3 - G_0 &\geq 1 \\ \phi_0 + \phi_{\text{electric}} &= 2\pi \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ϕ_{electric} ; 増幅器1の入力から増幅器2の出力間の位相
この場合、発振周波数は位相器を調整して、 ϕ_0 の位相で発振するように電気系位相を調整すれば、気柱の共振

Fig. 2 Block diagram of Ultrasonic thermometer.

周波数となる（ただし実際には、広い周波数範囲にわたり、 ϕ_0, ϕ は一定とならず、微少量ずれるから気柱の共振周波数近傍で発振することになる）。

以上、発振方式を採用した共振法による超音波気温計は、気温の変動があれば、その発振周波数は、測定温度の音速で気柱が共振する周波数に自動的に追尾する機構になっている。したがって発振周波数を周波数カウンタ、または周波数弁別器でアナログ出力として測定すれば、気温を求めることができるわけである。

3. ファイトロン用共振法超音波気温計の仕様

前述の原理に基づいた超音波気温計をファイトロン用として改造試作した装置の仕様は次のとおりである。

- 1) 測温方式：気柱を共振系とした発振方式
- 2) 測温範囲： $-20^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$
- 3) 測温用送・受波器：圧電素子、またはコンデンサーマイクロホンを使用し、送・受波器の面は平面になっていること。また、電氣的、機構的に温度、湿度等の変化に対して安定なこと。
- 4) 送・受波器保持器：送・受波器を特定の間隔（ $\approx 1\text{ cm}$ ）で平行に対向させて測温部を構成させる保持器で、微調機構により間隔を調整できるようにし、ゆるみを生じないよう固定できる機構とする。また測温部は三脚に固定する等により移動して使用できるよう、ケーブル長は 10 m とする。
- 5) 測温範囲
 - a レンジ： $-20^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$
 - b レンジ：切換えにより下記区分とする。
 - i) $-20 \sim 0 \quad ^{\circ}\text{C}$
 - ii) $-10 \sim +10 \quad "$
 - iii) $0 \sim +20 \quad "$
 - iv) $10 \sim +30 \quad "$
 - v) $20 \sim +40 \quad "$
 - vi) $30 \sim +50 \quad "$
- 6) メータ表示：a レンジ、b レンジをスイッチで切換え使用。
- 7) 出力 1：a レンジに対して $-1 \sim 0 \sim 1\text{ V}$ 。
- 8) 出力 2：b レンジの各区分に対して $-1 \sim 0 \sim 1\text{ V}$ 。レスポンスは出力 1・2 とともに最大 100 Hz 。
- 9) 出力 3：周波数測定用ディジタル出力、 1 V 。
- 10) 安定性：a) 使用部品には金属皮膜抵抗、シルバードマイカ等を使用のこと。
b) アナログ出力はドリフト 0.1°C 以内。
c) 送・受波器の保持部は、熱膨張に対して充分注意する。
- 11) 電源：使用電源は、A. C. 100 V と、3 時間使用可

Fig. 3 System of Ultrasonic thermometer.

能な充電式蓄電池を使用することができる 2 電源方式のこと。

- 12) 構成：基本構成図は Fig. 3 による。

- a) 超音波気温計本体 1 台
- b) 測温部、座、取手 (50 cm) 付属 1 台
- c) 測温部ケーブル 10 m 2 本
- d) 出力コード 2 m (B. N. C 付) 3 本

なお、具体的な装置内容は Fig. 3 を基にした打合せによる。

- 13) 発振周波数：(3)式で $l=1\text{ cm}$, $n=2$ となるような周波数。例、 0°C のとき $33,150\text{ Hz}$ 。

以上の仕様で海上電機 K. K. に製作を依頼した。

4. 装置の主な特性

試作した装置は、1) 応答速度が大きい、2) 放射熱の影響が少ない、等の大きな特徴がある。以下、装置の諸特性を測定した結果を示す。

1) 較正 測温温度と発振周波数を較正した。Fig. 4 にその結果を示す。これは乾燥空気についての較正值である。 1°C の変化では 47 Hz の変化となっている。

2) 放射熱の影響 無風状態の室内で、測温部およびそれと接近して設けた熱電対を、 1 m 離れた位置から 300 W の赤外線電球で照射し、指示の変化を記録した。結果は Fig. 5 に示す。熱電対は 2.5°C 程度の変化を示

Fig. 4 Calibration curve of temperature vs. resonance frequency.

Fig. 5 Effect of radiation.

したが、超音波気温計は影響は認められない。

3) 応答速度 測温応答速度は、本装置ではアナログ変換部の時定数で決まり、ファイトロン用としての使用目的から 100 Hz に設定してある。

3 m/sec の風の中に測温部と熱電対 (0.2 mmφ C.A.)

Fig. 6 Response of warm air.

を置き、風上でブロワーを使って、暖風を急に混ぜ、気温をできるだけ速やかに上昇させるようにしたときの測温値を、熱電対と同時記録した例を Fig. 6 に示す。

超音波気温計はステップ応答に近い測温記録が得られ、かつ細かい変動も測定している。熱電対では、時間遅れがあり、微細な気温変動は測定せず平均的な指示となっている。

4) 風速の影響 ファイトロン用としては、吹出しこそ 2 m/sec であるが、中心部では数十 cm/sec の風速であり、測定値に与える影響は少ない。

実測によれば 3 m/sec で無風時に比べ、a) 風が送・受波器間を横切る方向のとき、約 2 Hz の増加 (0.05°C 相当)、b) 風が送・受波器対向方向に吹く場合、約 7 Hz の増加 (0.15°C 相当) が認められた。

5. ファイトロンにおける測定例

Fig. 7 に、試作した超音波気温計の検出部を示す。市販の超音波風速計と同時測定を行なっている。

Fig. 8 に、ファイトロン用試作 1 号器の本体を示す。上方に見えるのが周波数カウンタである。実験室での他の温度計との比較などは既に報告してあるので、ファイトロンの測定例を示す。

Fig. 9 に、部屋中央床上 1 m 点の気温変動の測定チャートを示す。中央床上 20 cm 点の風速変動を参考のために同時測定してある。

Fig. 10 は、上から順次中央床上 20 cm 点、中央床上 2 m 点、吸込み点での気温変動の測定チャートである。いずれも Fig. 9 と同様、床上 20 cm 点の風速変動を同時測定している。

これらの変動の 1 つにつき時系列と考え処理をしたものを Fig. 11 に示す。これは気温変動の自己相関関数で

Fig. 7 Ultrasonic detector.

Fig. 8 Ultrasonic thermometer.

Fig. 10 Example of measurement.

Fig. 9 Example of measurement.

ある。さらに周波数領域でのスペクトルをみるためフーリエ変換し、求めた気温変動のパワースペクトルを Fig. 12 に示す。

ファイトロン用試作 1 号器を作るためのファイトロンでの予備実験では、ファイトロンが予想以上に強い電磁場で、ハムの影響が非常に強く受けたが、そのときの気温変動のパワースペクトルを参考のため Fig. 13 に示す⁽⁵⁾。60 Hz の影響が、Fig. 13 で 20 Hz, 40 Hz のところでの強いスペクトルとなって現われている。

6. 結 論

ファイトロン用の超音波気温計の試作について報告したが、現在もお各種のランニングテストを行ないつ

Fig. 11

Fig. 12

Fig. 13

Fig. 11 Autocorrelation function of temperature.

Fig. 12 Power spectrum density function of temperature.

Fig. 13 Power spectrum density function of temperature with noise.

つある。さらにこのテストより、キャリブレーション値の付設や、高湿で温度をプログラム制御で下げてやる場合の結露の問題など、いくつかの問題点を見だし、その対策を検討し、試作2号器を設計中である。しかし、現時点で次のことが結論できる。

(1) ファイトトロンの局所空間の気温変動の測定としては、本試作器は 100 Hz まで測定可能。

(2) このアナログ信号を、A-D 変換器でディジコンに直結し、スペクトル解析が可能。

(3) 日射の影響は熱電対や、抵抗温度計などの熱平衡による測温素子に比較すると、ほとんどないといえる。

(4) ファイトロンは、風速がただか 2 m/sec であり、ふつうは数 10 cm/sec であるので、風速の影響は考慮しなくてよい。

(5) 湿度については、音波の減衰ではなく共振方式のため、影響はないといえるが、ただ、コンデンサーマイクロホンをトランスデューサとして使用のため、気温のプログラム制御などでの過渡現象による結露には、厳重に注意する必要がある。

(6) ファイトロンでの強い電磁場によるハム対策は、良好な結果をえている。

最後にこの研究は文部省科学研究補助金特定研究「生物環境制御」に依った。班長の九大生物環境調節センター松井健博士をはじめとするメンバー各位、ならびに科研補助金関係各位に厚くお礼申上げる。

文 献

- (1) 丹羽 登 1964 空気中の超音波による計測と制御. 計測と制御 3(7): 483-491.
- (2) 杉二郎ほか 1967 超音波気温計の生物環境調節工学への応用. 生物環境調節 4(2): 43-56.
- (3) 丹羽登ほか 1967 超音波共振法による気体温度の測定. 計測と制御 6(7): 463-471.
- (4) 丹羽登ほか 1967 空気柱を共振器とした発振器による超音波気温計. 電子通信学会全国大会要旨, No. 236.
- (5) 橋本康ほか 1971 超音波共振法による気体温度の測定 (II) ファイトロンにおける計測. 第 10 回計測自動制御学会講演会要旨, No. 817.

Summary

Ultrasonic thermometer for Phytotron was designed. Block-diagram of this instrument is shown in Fig. 2. Received level and phase changes are shown in Fig. 1. Calibration curve of temperature vs. resonance frequency is shown in Fig. 4. Characteristic of this instrument is shown in Figs. 5 and 6. Measurements of temperature in Phytotron are shown in Figs. 9 and 10.

This work was partially supported by the Grant-in-Aid from the Ministry of Education.

(Received March 21, 1972)