炭酸ガス濃度調節装置*

矢吹万寿・牛山治男

(大阪府立大学農学部)

The Automatic Control of Carbon Dioxide Concentration in
Growth Cabinet and Greenhouse

K. YABUKI and H. USHIYAMA

(College of Agriculture, University of Osaka Prefecture)

1. 緒 言

植物群落内空気の CO_2 濃度は標準状態空気の CO_2 濃度よりも低く、特にガラス室・ビニールハウス等の密閉系の栽培施設内では、換気に留意しても CO_2 濃度は非常に低くなっている^{2,5,7)}。空気を循環して温度調節をするファイトトロンのような植物育成装置では、さらに濃度は低下しているものと考えられる。温度環境については古くから注意が払われ、最近では日射についても充分な注意の下に栽培試験が行なわれるようになって来たが、 CO_2 環境については全く考慮が払われていないようである。植物の炭素同化作用には CO_2 は必須要素であり、しかも CO_2 濃度に略比例して同化量が変化することは多くの生理実験の示すところであつて、 CO_2 環境を無視して作物の生育試験は考えられない。正確な試験を行なう場合、常に一定の濃度の下で栽培する必要がある。また最近問題になつている CO_2 濃度と作物の生育に関する試験においても育成箱内の CO_2 濃度をある規定濃度に維持する必要がある。

植物育成箱内の CO_2 濃度制御は原理的には余り問題点はないが、制御装置製作上最大の問題点は、空気中の CO_2 濃度は標準状態でも約 300 ppm という低濃度であり、しかも制御のためには僅かの濃度変化を如何にして迅速感知せしめるかということである。赤外線ガス分析法を応用すれば容易であるが、これは極めて高度の技術と経費とを要し、筆者らの手で簡単に試作するという事は困難である。筆者らは熱伝導方式による CO_2 測定法の開発を試みたが、

この方法の応用によつて CO_2 制御が可能と考えられたので、その開発を試みた。最大の問題であつた安定度も解決され、筆者らが行なつている CO_2 濃度と作物の生育に関する研究に使用できる程度までになつたので報告したい。

2. CO_2 濃度制御原理

細い白金線に電流 i を通ずるとき、その温度変化は

$$\rho_w \cdot c_w \cdot \frac{d\theta_w}{dt} = q - a \cdot k_m (\theta_w - \theta_c) \quad \dots\dots\dots (1)$$

となり、定常状態を考えると

$$q = a \cdot k_m (\theta_w - \theta_c) \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここに q : 発熱量 $= i^2 R_w$, R_w : 白金線の電気抵抗, k_m : ガス体の熱伝導率, θ_w : 白金線の温度, θ_c : 周囲温度, a : 装置の常数。

いま CO_2 成分が入つて熱伝導率が $(k_m + \Delta k)$ となり、温度が $(\theta_w + \Delta\theta)$ に変化したとする。また q は近似的に変化しないものとする、

$$k_m (\theta_w - \theta_c) = (k_m + \Delta k) (\theta_w + \Delta\theta - \theta_c) \\ \therefore \Delta\theta = -\frac{\Delta k}{k_m} (\theta_w - \theta_c) \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表わされ、この $\Delta\theta$ の変化に対する抵抗変化は

$$\Delta R_w = \alpha R_{w0} \cdot \Delta\theta \\ = -\alpha R_{w0} \cdot \frac{\Delta k}{k_m} (\theta_w - \theta_c) \quad \dots\dots\dots (4)$$

Fig. 1. Principal circuit of the equipment of carbon dioxide control.

* 昭和 39 年 4 月 8 日農気全国大会にて発表

となる。ただし R_{w0} は $\theta_w=0$ の抵抗である。そこでこの白金線をブリッジに組むと、 ΔR_w に応じて検流計の両端に電位差を生ずることになる。すなわち第1図のごとく標準空気を送り込む標準セルと測定空気を入れる測定セルの中に白金線を張り、ブリッジに組む。先ず両セルに標準空気 (CO_2 を除去した空気) を送り込むとブリッジは平衡しているから $i_g=0$ となる。次に標準セルにはそのまま標準空気を送り、測定セルに測定空気を送ると (4) 式のごとき抵抗変化を生じ、不平衡電流 i_g が流れる。そこで r_1 を $\frac{1}{2} \Delta R_w$ だけ調節すると再び平衡を保つことになる。そこで制御の場合はこれと全く逆の操作を行ない、 CO_2 濃度変化に伴う Δk の変化に対する ΔR_w を知り、 ΔR_w に応ずる値に r_1 を変位しておく和不平衡電流が流れる。この i_g を増幅し CO_2 ポンベの電磁弁に流せば、電磁弁は開いて CO_2 はフアイトロンあるいは育成箱の中に放出される。室内の CO_2 濃度が規定量に達するとブリッジは平衡に達するから、電磁弁は閉じて CO_2 の放出は止む。この様に熱伝導方式により on, off 制御によつて規定濃度を保たしめるものである。

3. CO_2 制御装置の

構造と特性

制御装置の配線ならびに配管を第2図に示す。検知部のセルは4本用い、ブリッジの対辺を一組とし、それぞれを標準セルと測定セルとする。第1図のごとくセルを2本用いた方が直線性がよいが、感度をあげるために4本使用した。またセルは拡散型を用い、送風量は 50 cc/min とした。

標準空気としては Soda lime などによつて CO_2 を除去した空気を用うのが最も都合がよいが、外気の CO_2 濃度日変化を無視できる程

Fig. 2. Electric circuit and piping of automatic controlling equipment of carbon dioxide concentration.

度でよい場合には、単に乾燥した外気を使用する方が簡便である。空気の乾燥も充分に行なう必要があり、まずシリカゲルで一応の水分を取除いた後、塩化カルシウムによつて更に乾燥した。

検知部は温度の影響を受けるから、常に恒温状態にして、セルの温度が均一になるようにしなければならない。不平衡電流はごく僅かであるため、増巾度を高め約 120db. 程度とした。また CO_2 濃度が規定よりも高くなつた場合にも逆の不平衡電流が流れ、電磁弁が作動することになるから、これを避けるために同期整流回路を取付けた。

この装置の操作手順としては、まずすべてのセルに標準空気を流す。この場合理論上は平衡している筈であるが、実際には幾らか不平衡となつてゐるから、 r_2 を調節して平衡させる。次にコックを切換え、標準セルに標準空気を、測定セルには生育箱内空気を送りこむとともに、 r_1 を規定濃度に対する抵抗値とする。以上の操作で規定濃度に維持出来ることになる。

試作した CO_2 濃度調節装置は標準状態空気の CO_2 濃度の約 10 倍まで調節出来るようにしたが、濃度調節抵抗の目盛と CO_2 濃度との関係を示すと第 3 図のごとくでかなりよい直線性を示している。

Fig. 3. The relation between carbon dioxide concentration and scale of regulating resistance.

この装置の最大の問題点は安定性である。安定性の問題はこの種の装置共通のものであるが、本装置でもこの点に腐心した。不安定の主な原因は二つあり、一つはセル内の温度不均一によるため、他の一つはセル内検知熱線に加えられる電圧変動である。前者のためには検知部

を恒温槽に入れることにより外気温の変動からの影響を取除くことが出来る。後者については精密級の電圧調整器を使用する必要がある。検知熱線に加える電源に電池を使用すればこの点について問題はないが、長期間連続しなければならないためセルの消費電力の問題および出力増巾の容易さから、本装置では交流電源を用いた。ただし電圧変動による濃度変動の問題は短時間の問題で、長時間についての平均値は規定濃度となる。第 4 図はスイッチを入れてから安定するまでの状態を示すものである。約 20 分後には実用上の安定を得るが、栽培試験は長期に亘るから、最初の過渡的不安定は余り問題にならない。何れにせよ長期に亘る栽培であるから時々平衡を前述の操作手順によつてチェックする必要がある。

Fig. 4. Setting time of the equipment.

この装置は植物育成装置内の CO_2 が規定濃度以下になつた場合に CO_2 を附加するだけで、規定濃度以上になつた時 CO_2 を取り除く機構はない。したがつて本装置はあくまで CO_2 が消費される場合に使用されるものであるが CO_2 濃度が規定濃度からはずれると直ちに検知、発信するようにしなければならない。そして添加する CO_2 量についても充分考慮されなければならない。すなわち、植物育成装置から検知部へ空気が導かれる吸気管の容積が Dead space となるから、その容積と吸気量とによつて応答時間が決定され、この時間遅れと単位時間の CO_2 添加量との積が規定量よりも多く CO_2 が添加される量になる。高濃度になることを防ぐためには Dead space を出来るだけ少くすることが必要である。勿論消費量に等しく添加せしめればよいことになるが、実際問題としては換気率が外界条件によつてたえず異なり、日射量によつても同化量が異なるから CO_2 消費量に

等しくすることは困難であり、消費量より多量の CO_2 を室内に送り込み、on, off 制御を行なうことになるわけである。ところが on, off 制御であるから室内の CO_2 濃度は鋸形波形を描いて変化することになる。そこでその平均値が規定濃度になるように波形を描かす必要があり、添加する CO_2 量もある規準量が必要となつてくる。勿論前述のごとく、外界条件によつて CO_2 消費量も違ってくるから添加量を規定する事は困難であるが、一つの規準を示す必要がある。

いま単位時間の CO_2 消費量 Q をつぎであらわす。

$$Q = p + q$$

$$\Rightarrow \alpha (\varphi_i - \varphi_0) A + n (\varphi_i - \varphi_a) V \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし p : 同化作用により固定される CO_2 量, q : 換気により消費される CO_2 量, φ_i : chamber 内の CO_2 濃度 g/m^3 , φ_0 : 作物表面上の CO_2 濃度, φ_a : 外気の CO_2 濃度, α : CO_2 伝達係数, n : chamber と外気との換気率, A : 作物生育層上面面積, V : chamber の容積である。(5) 式で Q を求めることは困難であるが, p に比べ q が大きいから近似的には次のごとくなる。

$$Q \approx \beta (\varphi_i - \varphi_0) V \quad \dots\dots\dots (6)$$

すると, chamber 内の CO_2 濃度変化は

$$(\varphi_i - \varphi_a) = (\varphi_i - \varphi_a) e^{-\beta t} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。したがつて

$$\beta = -\ln \left(\frac{\varphi_i - \varphi_a}{\varphi_i - \varphi_a} \right) / t \quad \dots\dots\dots (8)$$

となり, Cabinet 内の CO_2 濃度の時間的变化を測定して β を求め, Q を知ることが出来る。

電磁弁が閉じて CO_2 が消費される時は (7) 式のごとき濃度低下をするから、電磁弁が開き CO_2 が添加される時には (7) 式と対称的な濃度上昇線

$$(\varphi_i - \varphi_a) = (\varphi_i - \varphi_a) (1 - e^{-\beta t}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

を描くようにするならば、その平均値は規定濃度 φ_i となる筈である。それがためには添加する CO_2 量は $2Q$ とすればよいことになる。上述のごとく Q は変化するから、 $2Q$ は平均値から出す一応の規準量と言えよう。

濃度変化の波形は出来るだけ振巾の小さいことが望ましいが、そのためには検知部までの Dead space を少くすることが好ましく、また Chamber の気密性を高め換気率を小さくすると Q が減少し変動も少くなるから制御の精度が向上する。

4. 結 び

熱伝導方式によつて CO_2 濃度を約 $\pm 50 \text{ ppm}$ の精度で調節できるようになった。この程度の精度では 300 ppm 程度の濃度での調節には不充分であるが、 600 ppm 以上の濃度調節には充分使用出来る。熱伝導方式による CO_2 濃度測定感度は $\pm 5 \text{ ppm}$ 程度まで可能であるから、さらに $\pm 10 \text{ ppm}$ 程度まで精度をあげたい。試作装置は電磁弁の on, off 制御であるが、この方法は上述のごとく CO_2 添加量に考慮を払う必要があり、また必要 CO_2 量 Q が外界条件によつてかわるので、検知部の精度を高めても制御精度は高まらない。そこで今後は調整弁の開度によつて添加 CO_2 量を制御する追従方式について研究を進めたい。

参 考 文 献 (省略)

Summary

On studies of plant growth using growth cabinet or greenhouse, there have been paid little attention to carbon dioxide concentration of air. However it is supposed that owing to circulated re-using of air for air-conditioning in growth cabinet of phytotron, the carbon dioxide concentration is quite decreased and the plants do not grow properly. Therefore, it is necessary to cultivate plants under the normal concentration of carbon dioxide. The same problem should be considered in greenhouse.

Even in the case of carbon dioxide nutrient system which practically used recently, it is necessary to keep the effective and economic level of the carbon dioxide concentration.

The authors tried to make the automatic controlling equipment of carbon dioxide concentration in closed system culture.

The heat conductivity principle was used for determining CO_2 concentration. The circuit and piping of it are shown in Figs. 1 and 2. After the standard air (outside air or carbon dioxide free air) is sucked into the reference and detector cells of the bridge, the bridge is balanced by the balancing resistance r_2 . And then, the bridge is unbalanced a fixed value which correspond to a given concentration of carbon dioxide of the cabinet air with the regulating resistance r_1 and the cabinet air is sent to the detector cell. Until the carbon dioxide concentration in the growth cabinet reaches a given value, the bridge is retained in the unbalanced condition and the magnetic valve of carbon dioxide bomb opens and the carbon dioxide is sent into the cabinet. The synchronous rectifying circuit is equipped so as not to open the magnetic valve by the opposite unbalance of the bridge when the concentration becomes higher than the fixed value.