Growth Chamber 内の微気候*

(1) 微気候と換気との関係

内 島 善 兵 衛

(農業技術研究所 気象科)

The Climate in Growth Chamber (1)

—Influence of ventilation on microclimate—

Z. UCHIJIMA

(Div. of Meteorology, National Institute of Agricultural Sciences, Nishigahara, Tokyo)

1. は し が き

野外に栽培されている作物の光合成量や蒸散量をできるだけ自然のままに測定しようという試みの一つにいわゆる Growth Chamber 法がある。これは同化箱または蒸散箱とよばれる透明な箱を作物体に被せて、強制的に通気して、空気の出・入の炭酸ガスや水蒸気の濃度差から光合成量・蒸散量を知ろうとする方法である。

このような方法で得られた結果と完全自然条件下での結果(主として傾度法や熱収支法でえられる)とがよく一致するためには、箱内の植物をとりまく微気候と自然での微気候とがよく似ていることが必要である。植物をとりまく微気候因子としてはつぎのようなものが考えられる: 放射(強度とスペクトル特性)、気温、湿度、炭酸ガス濃度、葉面と周辺空気間の交換係数、植被空間内の拡散係数(絶対値ならびに垂直分布型)。

これらの因子の植被内での分布の問題は現在微気象のなかで活発に研究されているが、生育箱内のそれらの特徴の研究はまだ極めて不十分なようである。最近、同化箱による結果と自然条件下の結果との比較から箱内の微気候が重要視されるようになってきた。また、箱内の気象の人工的制御法を確立する立場からも研究がはじめられている。

著者はまず温度・湿度・炭酸ガス環境と生育箱の通気速度との関係について研究を進め、さらに生育箱内の微気候について若干の検討を行なつたので発表したいと思う。これらの結果は温室内環境の制御法確立のためにも役立つものと思われる。

2. 生育箱内の気象環境と換気

生育箱内の気象環境を最も大きく支配しているのは換気である。それゆえ換気と内部環境との関係の解明は生育箱をできるだけ自然に近い条件で使用するうえに大切である。そこで、最も重要な環境要素である気温・湿度・炭酸ガス濃度と換気率との関係を説明してみよう。

* 昭和 40 年 10 月 27 日 農農関東支部例会にて発表

A) 生育箱内の気温

生育箱内の温度環境を研究するにあたって、問題を単純化するためにつぎのような仮定をしよう:

1. 熱源として作用するのは生育箱の床に作用している純放射だけである、
2. 生育箱内の気温は均一で場所による違いはない、
3. 通気速度によつて壁面と内部空気との間の顕熱伝達係数は変化しない。

すると、ある任意温室の定常状態時における熱収支式はつぎのようになる:

$$A_f(iS_0 - iB_0) = A_w \{ {}_0L_w + {}_0L_{ad} + {}_0lE_{ad} \}, \quad (1)$$

ただし、 $A_f \cdot A_w$: 生育箱の床面積と総壁面積 (cm^2), iS_0, iB_0 : 箱内の地面での純放射と地中伝導量 (ly/sec), ${}_0L_w$: 壁面を通つての貫流熱 (ly/sec), ${}_0L_{ad} \cdot {}_0lE_{ad}$: 単位壁面あたりに換算した換気による正味の移流顕熱・潜熱フラックス (ly/sec)。一方、上式右辺の熱収支項はつぎのように近似することができる。

$$\left. \begin{aligned} {}_0L_w &= h_t(iT_a - {}_0T_a), \\ {}_0L_{ad} &= h_{ad}(iT_a - {}_0T_a), \\ {}_0lE_{ad} &= k_{ad}\{r \cdot e(iT_a) - {}_0e_a\}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし、 h_t : 壁面を通しての総括熱伝達係数 ($\text{ly/sec}^\circ\text{C}$), $h_{ad} \cdot k_{ad}$: 換気顕熱伝達係数 ($\text{ly/sec} \cdot ^\circ\text{C}$) と換気潜熱伝達係数 ($\text{ly/sec} \cdot \text{mmHg}$), $iT_a \cdot {}_0T_a$: 箱内外の気温 ($^\circ\text{C}$), r : 箱内の相対湿度 ($0 \sim 1.0$), $e(iT_a) \cdot {}_0e_a$: 箱内の気温における最大飽和水蒸気圧力と外気の水蒸気圧力 (mmHg)。さらにつぎのような仮定をおくと:

$$\left. \begin{aligned} r \cdot e(iT_a) &\approx r\{e({}_0T_a) + \varphi'(iT_a - {}_0T_a)\}, \\ h_{ad} &= C_p \rho \frac{Q}{A_w}, \quad k_{ad} = \frac{0.622 \rho l Q}{P A_w}, \\ k_{ad}/h_{ad} &\approx 2, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ただし、 $e({}_0T_a)$: 外気温での最大飽和水蒸気圧力, φ' : 飽和水蒸気圧力曲線の外気温でのスロープ ($\text{mmHg}/^\circ\text{C}$), $C_p \rho$: 空気の容積比熱 ($\text{cal}/^\circ\text{C} \cdot \text{cc}$), Q : 換気量 (cc/sec), P : 大気圧 (mmHg), l : 蒸発の潜熱 ($580 \text{ cal}/\text{H}_2\text{Og}$)。

(2)(3)の関係を用いて(1)式をかきかえるとつぎようになる。

$$\frac{A_f}{A_w} (iS_0 - iB_0) = (iTa - oTa) \{h_t + h_{ad} + k_{ad} \cdot r \cdot \varphi'\} + k_{ad} \{r \cdot e(oTa) - oea\}. \quad (4)$$

それゆえに、同化箱内外の気温差はつぎようになる：

$$(iT_a - oT_a) = \frac{R(iS_0 - iB_0) - 2h_{ad} \{r \cdot e(oT_a) - oea\}}{h_t + h_{ad}(1 + 2r \cdot \varphi')}. \quad (5)$$

ただし、 $R = \frac{A_f}{A_w}$ ：保温比。

上式からわかるように、保温比・純放射が大きくて、見掛けの飽差 $\{r \cdot e(oT_a) - oea\}$ ・総括熱伝達係数ならびに換気熱伝達係数が小さいほど生育箱内外の温度差は大になる。(3)式に示した換気熱伝達係数はつぎのように表わされるので、

$$h_{ad} = 8.04 \times 10^{-7} \frac{V_c}{A_w} N, \quad (6)$$

ただし、 V_c は生育箱の体積 (cm^3)、 N は V_c を単位にした1時間あたりの換気回数 (n/hr)、換気回数 N の増加につれて直線的に増すことがわかる。その増加率は V_c/A_w と共に大きくなる。 V_c/A_w は単位壁面あたりの負担容積を示す係数で長さの次元をもっている。この係数が違う生育箱では同一換気回数でも、換気熱伝達係数は著しく違うことが予想される。それゆえ、換気回数だけを基礎にして生育箱内の温度環境を比較することは危険である。 $50 \times 50 \times 100 \text{ cm}^3$ というサイズの極く普通の角形生育箱について、一定の気象条件を仮定して求めた生育箱内外の温度差と換気回数との関係が第1図Aに示されている。計算にあたって、内部の相対湿度は85%、外気のそれは75%と仮定した。この角形生育箱の保温比は0.11となり冷却効率の高いことが予想される。図にみられるように、温度差 $(iT_a - oT_a)$ は純放射が大きくなるにつれて大きくなるが、換気回数 N が増すと減少してくる。換気回数 N に伴う温度差の減少は $10 < N < 100$ の範囲で最も著しい。そして、 $N=100$ では 0.8 ly/min の純放射で 3°C 、 0.6 ly/min で 2°C 、 0.4 ly/min で約 1°C 、 0.2 ly/min でほとんど 0°C になる。それ以上に通気が増してくると逆に室内の温度が低くなる。これは蒸散の熱源として顕熱が使用されるためだろう。この結果からもわかるように、生育箱内の気温を外気に近く維持するには毎時100回位の換気が必要である。さきにあげたように、単位壁面あたりの負担容積 V_c/A_w によつてこの換気回数が大きく変わることを注意する必要がある。

B) 生育箱内の湿度

生育箱内に作物がおかれている時には、蒸散によつて箱内の空中湿度は高くなるのが普通である。この湿度の上昇と通気量とから蒸散を求める方法も開拓されている(加藤・内藤・谷口・鴨田：1960)。このような方法が割合広く使用され始めているにもかかわらず、生育箱内の湿度環境については十分な注意が払われていない。湿度環境は蒸散量のみならず、葉温にも密接な関係をもっているのできわめて重要な環境因子と考えることができる。そこで、生育箱内における湿度環境について若干の考察を進めてみる。

さきと同様に、生育箱内の水蒸気収支を考えると、つぎのような関係がえられる：

$$aV_c \frac{d_i e_a}{dt} = A_f(E_s + E_T) + E_{ad}, \quad (7)$$

ただし、 $a = \frac{0.622 \rho}{P}$ ($\text{g/cm}^3/\text{mmHg}$)、 $i e_a$ ：生育箱内の水蒸気圧力 (mmHg)、 E_{ad} ：換気による水蒸気移流 (g/sec)、 E_s 、 E_T ：地面蒸発と蒸散量 ($\text{g/cm}^2 \text{ sec}$)、上式の左辺は生育箱内の空気柱の水蒸気含量変化を、右辺第1項は水蒸気発生量を示している。一方、第1・2第項はつぎのように表わすことができるので、

$$A_f(E_s + E_T) = A_f \left[\frac{iS_0 - iB_0}{l(1+\beta)} \right],$$

$$E_{ad} = aQ(oea - i e_a),$$

(7)式は結局つぎのように整理することができる：

$$\frac{d_i e_a}{dt} + \frac{Q}{V_c} i e_a = \frac{A_f}{aV_c} \left[\frac{iS_0 - iB_0}{l(1+\beta)} + \frac{aQ}{A_f} oea \right], \quad (7')$$

この式をつぎのような条件で解くと

$$t=0 \text{ で } i e_a = e_0,$$

したのような関係式がえられる：

$$i e_a(t) = e_0 + \left[\frac{A_f}{aQ} \left\{ \frac{iS_0 - iB_0}{l(1+\beta)} + \frac{aQ}{A_f} oea \right\} - e_0 \right] \times \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{Q}{V_c} t \right) \right\}. \quad (8)$$

これは生育箱内の湿度の過渡的な変化を示すものである。時間 t が充分に長くとつて、湿度状態が定常的になった場合には、上式の最後の指数項は0となる。それゆえ、平衡水蒸気圧力 $i e_a(\infty)$ はつぎようになる：

$$\left. \begin{aligned} i e_a(\infty) &= \frac{A_f}{aQ} \left[\frac{iS_0 - iB_0}{l(1+\beta)} + \frac{aQ}{A_f} oea \right], \\ \text{または} \\ i e_a(\infty) - oea &= \frac{A_f}{aQ} \frac{iS_0 - iB_0}{l(1+\beta)}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$1/Q = 3.6 \times 10^3 / N \cdot V_c$ となるので、ある所定の大きさの生育箱内の水蒸気圧力は N の増加につれて逆数的に減少し、外気のそれに接近する。また、純放射 iS_0 が大でボ

ーエン比が小さいほど、水蒸気圧力差は大きくなること
がわかる。純放射が 0.6ly/min, 地中伝導熱量が 0.06
ly/min, 外気温 30°C, 外気の湿度 23.8mmHg という
条件を (9) 式に代入して計算した生育箱 (50×50×100
cm³) の水蒸気圧力が第 1 図 B に示されている。

図にみられるように、生育箱内に植被があつて蒸散が
活発に行なわれている場合 ($\beta=0.1\sim0.3$) には、換気回
数が 100 回/hr でも、内部の水蒸気圧力は外気のそれに

比べて約 20% ほど高くなっている。しかしながら、内
部が乾燥していて純放射のほとんどが顕熱伝達に放出さ
れる場合 ($\beta>5\sim10$) には、内外の湿度差はごくわずか
な値にしかならない。よく生育した植被に生育箱を被せ
て同化または蒸発散の測定をやる場合に、箱内の湿度環
境を外気とほぼ同様にするには約 200 回の換気が必要な
ことがわかる。これは温度環境の制御で説明した約 100
回の必要換気回数の 2 倍になっている、これはある一環

境要素の考慮だけでもとづく生育箱内の微
気候調節が不十分なことを物語っている。

C) 生育箱内の炭酸ガス濃度

生育箱または閉じられた温室内の炭酸ガ
ス環境が作物による物質生産に密接な関係
をもつことは最近再び強調されるようにな
ってきた (例えば矢吹・牛山, 1965)。し
かし、箱内の炭酸ガス環境の制御に関する
研究は最近発表された高倉・杉 (1965) の
ものと他に若干があるだけである。いわゆ
る同化箱による光合成の研究が作物関係の
なかで広くなされているが、このなかの炭
酸ガス環境に関する研究はすくない。ただ、
経験的に出口と入口との炭酸ガス濃度差は
30ppm 内外に保持することが必要である
といわれている。この値は多分に赤外線ガ
ス分析計の精度に関係しているようであ
る。そこで、著者も生育箱内の炭酸ガス環
境について若干の考察を進めたのでここに
説明する。

ここでも矢張り同化箱内における炭酸ガ
ス収支から出発する。問題を単純にするた
めにつぎのような仮定をおく：

1. 植物の単位葉面積あたり炭酸ガスの
吸収は周辺空気の CO₂ 濃度に比例す
る。

この仮定は、作物の見掛けの光合成量が普
通の CO₂ 濃度から著しく外れていない範
囲では周辺空気中の CO₂ 濃度にはほぼ比例
するという事実 (例えば、村田, 1961; 津
野・藤瀬, 1965) にもとづいている。

以上のような仮定をおくと、生育箱の空
気の炭酸ガス収支式はつぎのようになる：

$$V_c \frac{d_i \bar{C}}{dt} = A_f \{ r_s + F r_p - D_i F_i \bar{C} \} + \\ + Q (\bar{C}_o - \bar{C}_i), \quad (10)$$

ただし、 $\bar{C}_i, \bar{C}_o$: 生育箱内ならびに外気の

Fig. 1. Change of air temperature, water vapor pressure and carbon dioxide concentration in chamber with ventilating rate.

平均 (空間) 炭酸ガス濃度 (g/cm^3), r_s : 単位土壌面の炭酸ガス放出量 ($\text{g/cm}^2 \cdot \text{sec}$), r_p : 単位葉面の呼吸量 ($\text{g/cm}^2 \cdot \text{sec}$), F : 生育箱内の植物群落について求めた葉面積指数, D_i : 周辺空気と葉緑体との間における CO_2 拡散量を特徴づけている積分拡散係数 (cm/sec)。上式右辺の最後は換気による炭酸ガスの補充をあらわしている。上式を $i\bar{C}$ について整理すると, つぎのような微分方程式がえられる:

$$\frac{d_i\bar{C}}{dt} + i\bar{C} \frac{(A_f D_i F + Q)}{V_c} = \frac{A_f}{V_c} \left(r_s + F r_p + \frac{Q}{A_f} {}_0\bar{C} \right). \quad (11)$$

上式を $t=0$ で $i\bar{C} \rightarrow C_0$ という条件で解くと, つぎのような関係がえられる。

$$i\bar{C}(t) = C_0 + \left(\frac{r_s + F r_p + \frac{Q}{A_f} {}_0\bar{C}}{D_i F + \frac{Q}{A_f}} - C_0 \right) \times \left[1 - \exp \left(- \frac{A_f D_i F + Q}{V_c} t \right) \right]. \quad (12)$$

この式は生育箱内の平均炭酸ガス濃度の過渡的变化を示している。さきと同様に, 充分時間が経過すると右辺最後の指数項は 0 に近くなってしまうので, 平衡状態時における炭酸ガス濃度 ($i\bar{C}(\infty)$) は結局つぎのようになる:

$$i\bar{C}(\infty) = \frac{\left(\frac{r_s}{F} + r_p + \frac{Q}{F A_f} {}_0\bar{C} \right)}{\left(D_i + \frac{Q}{F A_f} \right)}. \quad (13)$$

上式において, $r_s \cdot r_p$ は他にくらべて小さいので, 生育箱内の平衡炭酸ガス濃度は主として拡散を特徴づけている D_i , 生育箱内の作物の全葉面積 $A_f F$, ならびに換気量 Q によつて変化することがわかる。

上式から生育箱内の平衡炭酸ガス濃度を求めるには積分拡散係数の値を予めしることが必要である。多くの研究者によつて報告されている光一光合成曲線における光飽和値を用いてえた D_i の値を示すと第 1 表のようにな

る。この積分拡散係数は植物の葉の組織的特徴 (気孔の大きさと密度, 柔組織の構造など) や葉の老若ならびに光強度・水分補給などによつて大きく変化することが予想される。さきと同様に, $50 \times 50 \times 100 \text{ m}^3$ の同化箱に水稻 ($D_i = 0.068 \text{ cm/sec}$) を入れた場合の平衡炭酸ガス濃度を (13) 式から計算した結果が第 1 図 C に示されている。この場合, 水面からの炭酸ガス発生はないと考え, また単位葉面積あたりの呼吸量は同化による CO_2 摂取の 1/10 と仮定して計算を行なつた。

第 1 図 C にみられるように, 換気回数の増加につれて箱内の平衡炭酸ガス濃度はしだいに増加するが, その変化は $N=20$ から $N=80$ の範囲で最もいちじらしい。箱内の水稻の繁茂につれて関係曲線は右へ平行的に移動し, 一定濃度を維持するに必要な換気回数は箱内群落の葉面積指数の比に正比例していることがわかる。このように, 単なる作物栽培面積ではなく作物群落の繁茂なかでも光合成活動面積の広さを特徴づけている葉面積指数によつて必要換気回数が増加することは極めて大切なことである。外気の CO_2 -濃度のほぼ 90% の箱内濃度で同化実験をやるには, $\text{LAI}=2$ で 42 回, $\text{LAI}=4$ で 84 回, $\text{LAI}=8$ で 168 回の換気回数 (1 時間あたり) が必要である。この必要換気回数が第 1 表に示されているような D_i の違いによつて増減するのは当然なことで, D_i が大になると N も増加する。

以上のように生育箱内の CO_2 -濃度が変化した場合, それに応じて作物による炭酸ガス摂取も変化するわけであるが, それはつぎのようにして近似的に評価される。

$$P_g = D_i A_f F_i \bar{C}(\infty) = \frac{D_i A_f F \left(\frac{r_s}{F} + r_p + \frac{Q}{A_f F} {}_0\bar{C} \right)}{\left(D_i + \frac{Q}{F A_f} \right)}.$$

一方, 生育箱と同一面積の土地に生育している作物群落の自然条件下での CO_2 -摂取をつぎのように近似する (植被は光で飽和していると仮定する)

$$P_f = D_i A_f F {}_0\bar{C},$$

ただし, p_0, p_f : 栽培面積 A_f で葉面積指数 F なる作物群落による CO_2 -摂取量 ($\text{g}/A_f \cdot \text{sec}$)。すると, 箱内の群落による CO_2 -摂取の野外のそれに対する割合はつぎのように与えられる:

$$\frac{P_g}{P_f} =$$

Table 1. Integral exchange coefficient of carbon dioxide between external air and chloroplasts.

Species	Integral exchange coefficient D_i , cm/sec	Total resistance $r_t = 1/D_i$, sec/cm	Reference
Rice	0.068	14.64	Murata (1961)
Alfalfa	0.132	8.35	" (1965)
Corn (maize)	0.151	6.63	" (1965)
Sweet potato	0.059	16.90	Tuno-Fujise (1965)
Soybean	0.114	8.77	Ojima-Fukui (1965)
Barnyard millet	0.196	5.07	Murata (1965)

$$= \frac{\left(\frac{r_s}{F} + r_p + \frac{Q}{A_f F} {}_o\bar{C} \right)}{{}_o\bar{C} \left(D_t + \frac{Q}{A_f F} \right)} \quad (14)$$

上式にみられるように、生育箱内の作物の CO_2 摂取（同化量にほぼ比例する）の野外のそれに対する割合は主として単位葉面積あたりの換気量 $(Q/A_f F)$ に支配されている（ただし $D_t \cdot r_p \cdot r_s$ を与えた条件で）。そこで、つぎのような条件を仮定して

$$r_s \approx 0, \quad r_p = 0.1 D_t F {}_i\bar{C}, \quad A_f = 2.5 \times 10^8 \text{ cm}^2,$$

$${}_o\bar{C} = 300 \text{ ppm}, \quad F = 2, 4, 8, \quad D_t = 0.068 \text{ cm/sec},$$

(14) 式から求めた p_o/p_f と $Q/A_f F$ との関係が第2図に示されている。この図上には村田 (1961) が水稻で実験

Fig. 2. Dependence of assimilation efficiency of crops in a chamber on ventilating rate.

的にえた光合成量と通気速度との関係図から求めた点もプロットされている。図にみられるように、横軸にパラメーターとして $Q/A_f F (\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{hr})$ をとると F が 2, 4, 8 と変化しても同一曲線で表示することができる。1000 $\text{cc}/\text{cm}^2 \cdot \text{hr}$ 以下では急激に p_o/p_f は減少し、同化箱を用いて測定した群落光合成量が自然条件下でのそれと大きく違うことが予想される。計算結果によると、自然条件下のすくなくとも 90% の光合成強度を生育箱内で維持するには約 1500 $\text{cc}/\text{cm}^2 \cdot \text{hr}$ の換気量が必要なのである。村田の結果との比較は大体満足すべきであるが、詳細な点についてはまだ不十分である。これは少ない換気量域における葉温の過上昇にもとづく CO_2 -摂取の急激な減少と高換気量域における群落内部の光未飽和現象のためと考えられる。それゆえ、葉の CO_2 -摂取に対する葉温と光強度の影響を (13) 式に加味することが今後の問題として必要である。

最近、閉じた温室内を高濃度の CO_2 レベルに維持して増収を図ることが試みられているが、 CO_2 レベルを維持するために必要な炭酸ガス給源の強度については余り明らかにされていない。温室または生育箱内の炭酸ガス収支式 (11 式) を若干変形すると、ある箱内濃度 ${}_i\bar{C}$ を維

Fig. 3. Dependence of source intensity of carbon dioxide on ventilating rate and level of carbon dioxide concentration.

持するに必要な CO_2 給源の強度（単位床面積あたり）はつぎのようになる：

$$I_c = \left[{}_i\bar{C} \left\{ D_t F + \frac{Q}{A_f} \right\} - \left\{ r_s + F r_p + \frac{Q}{A_f} {}_o\bar{C} \right\} \right] \quad (15)$$

ただし、 I_c : CO_2 給源の強度 ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$)。いま、 $F = 4$, $A_f = 2.5 \times 10^8 \text{ cm}^2$, ${}_o\bar{C} = 5.7 \times 10^{-7} \text{ g}/\text{cm}^3$, $D_t = 0.068 \text{ cm/sec}$, $r_p = 0.1 D_t F {}_i\bar{C}$ と仮定して、(15) 式から求めたある所定濃度 ${}_i\bar{C}$ を維持するために必要な給源強度と換気回数との関係が第3図に示されている。図にみられるように、外気と同一の 300 ppm に箱内の CO_2 濃度を維持するには $({}_i\bar{C} D_t F - r_s - F r_p)$ に相当する CO_2 を換気に無関係に補給すればよい。しかし、外気より高濃度に維持するには多量の CO_2 供給が必要になり、給源の強度は換気とともに直線的に増加する。これは換気によつて多量の炭酸ガスが生育箱から搬出されるためである。

3. 生育箱内の気象要素の分布

生育箱内の平均的な気温・水蒸気圧力・炭酸ガス濃度と換気量と関係について今まで説明してきた。しかし作物群落は立体構造をもつていて、それに応じて植被内には特別な気象環境が発達している。とくに、各気象要素の垂直分布は特徴的な形をもっており、その形は蒸発散構造に密接に関連している。それゆえ、平均的な気象要素とならんで、生育箱内の気象要素の垂直分布を自然植被のそれらと比較することが必要である。これらの問題についてはまだ殆んど研究されていない。幸いなことに植被内の微気象の解析的研究は最近急激に進歩しているので、それらの方法を用いて若干の考察をしてみよう。

いま、植被層内のある単位厚さの層を考え、その層内の葉に吸収された純放射は葉と周辺空気との顕・潜熱交

換に完全に配分されてしまうと仮定すると、この層についての熱収支式はつぎのようになる：

$$-\frac{dS}{dz} = C_p \rho D_l \frac{dA}{dz} \left[(T_l - T_a) + \frac{l}{C_p \rho} (a_l' - a_a) \right], \quad (16)$$

ただし、 dS/dz ：単位厚さの植被層に吸収された純放射 ($\text{ly/cm}^2 \cdot \text{sec}$)、 D_l ：葉面と周辺空気との乱流交換を特徴づけている積分拡散係数 (cm/sec)、 dA/dz ：単位植被層内の葉面積密度 (cm^2/cm^3)、 $T_l \cdot T_a$ ：葉温と気温 ($^{\circ}\text{C}$)、 $l=580 \text{ cal/H}_2\text{Og}$ 、 $a_l' \cdot a_a$ ：葉面ならびに周辺空気の絶対湿度 (g/cm^3)。この場合、空気ならびに植物体の加熱に費された貯留熱が無視されている。つぎに、よく知られているつぎの関係を利用すると、

$$\theta_l' = T_l + \frac{l}{C_p \rho} a_l',$$

$$\theta_a = T_a + \frac{l}{C_p \rho} a_a.$$

(16) 式はつぎのようになる：

$$-\frac{dS}{dz} = C_p \rho D_l \frac{dA}{dz} (\theta_l' - \theta_a). \quad (16, a)$$

いま、葉温と気温との差が余り大きくないと考え、葉面における相当温度をつぎのように近似しよう：

$$\theta_l' = T_l + \frac{l}{C_p \rho} r \{ a(T_a) + \varphi' (T_l - T_a) \},$$

ただし、 r ：葉面の相対湿度 ($0 \sim 1.0$)、 $a(T_a)$ ：気温 T_a での飽和絶対湿度 (g/cm^3)、 φ' ：最大飽和絶対湿度曲線の T_a での傾度 ($\text{g/cm}^3/^{\circ}\text{C}$)。すると、相当温度差 ($\theta_l' - \theta_a$) はつぎのようになる：

$$(\theta_l' - \theta_a) = (T_l - T_a) \left(1 + \frac{l}{C_p \rho} r \varphi' \right) + \frac{l}{C_p \rho} \{ r a(T_a) - a_a \}. \quad (17)$$

(16, a), (17) 式から葉温と気温との差はつぎのようになる

$$\begin{aligned} (T_l - T_a) &= \\ &= \frac{\left[\frac{dS/dz}{C_p \rho D_l (dA/dz)} \right] - \frac{l}{C_p \rho} \{ r a(T_a) - a_a \}}{\left(1 + \frac{l}{C_p \rho} r \varphi' \right)}. \end{aligned} \quad (18)$$

一方、熱収支の関係から近似的につぎの関係がえられる

$$\begin{aligned} C_p \rho D_l \frac{dA}{dz} (T_l - T_a) &= \\ &= -C_p \rho \left[\frac{d}{dz} \left(K \frac{dT_a}{dz} \right) - \frac{dWT_a}{dz} \right] \end{aligned} \quad (19)$$

ただし、 K ：拡散係数 (cm^2/sec)、 W ：風速 (生育箱内では垂直に風が流れている、 cm/sec)。いまきわめて粗い近似として、右辺の括弧内の第1項は第2項に比べて

充分小さいと仮定すると、上式からつぎの関係がえられる：

$$\frac{dT_a}{dz} = \frac{D_l \frac{dA}{dz} (T_l - T_a)}{W}. \quad (20)$$

対象としている生育箱において、換気は下から上へと一定風速でなされ、下から入る空気の気温 (T_0)、湿度 (a_0) が与えられていると考えると、気温分布はつぎのようになる：

$$T_a(z) = T_a(0) + \int_0^z \frac{D_l \frac{dA}{dz} (T_l - T_a)}{W} dz. \quad (21)$$

上式から $T_a(z)$ をしるには、まず (18) 式から ($T_l - T_a$) を求めなければならない。数値計算を行なうにあたってつぎのような仮定を採用した：

1. 生育箱 ($50 \times 50 \times 100 \text{ cm}^3$) には草丈 60 cm の水稻が入れられ、その葉面積指数は 4 である。葉面積密度分布は図にみられるように単純な矩形である、
2. 作物体とその周辺の層流底層とによる空間の占有率は 0.4 である、
3. D_l は一定とし、 0.69 cm/sec とする、
4. 換気回数は 100 回/hr で、下方から上方へと通風し、 $T_a(0) = 25^{\circ}\text{C}$ 、 $a_a(0) = 16.3 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3$ とする、
5. 植被層を一定厚さ $b(5 \text{ cm})$ に切り、ある n 番目の気温・湿度はつぎのように仮定する：

$$T_a(n) = T_a(n-1) + \left[\frac{b D_l \frac{dA}{dz} (T_l - T_a)}{W} \right]_{n-1}$$

$$a_a(n) = a_a(n-1) + \left[\frac{b D_l \frac{dA}{dz} \{ r a(T_a) - a_a \}}{W} \right]_{n-1}$$

6. 葉面の相対湿度は 0.8 で、植被内での純放射の減衰は指数法則 $[S(z) = S_H \exp(-0.44 A)]$ 、 $S_H = 0.61 \text{ ly/min}$ ：植被上面での値に従う。

これらの仮定からえた数値計算の結果が第4図に示されている。図にみられるように、気温は下方から上方へ流れるにつれて次第に高くなるが、上昇の度合は植被表面近くになるにつれて大きくなる。植被を通過した空気は 27.42°C に暖められ、 2.42°C の温度上昇をうけたことになる。平均して生育箱内の平均上昇は 1.30°C (地中伝導熱を 0.061 ly/min とした場合の補正を加えて) になり、(5)式から 1.8°C のにはほぼ近い値がえられた。気温は余り上昇しないが、葉温の変化は約4倍になっている。生育箱下層では葉温は気温より低くなり、熱が葉に与えられていることがわかる。この熱は蒸散の熱源に消費されている。上部へ移つるにつれて葉温の上昇は著しくなり、最上層では 32.51°C となり、葉温と気温との差は 5.55

Fig. 4. Profiles for microclimatic factors within plant canopy in growth cabinet.

°Cに及んでいる。

他方、空中湿度は高さと共に高まり、植被を通過した空気の水蒸気圧力は 21.23mmHg となつている。生育箱内の平均的な水蒸気圧力の上昇は 2.47 mmHg となり(地中伝導熱量の違いの補正を考え)、(9)式からの計算値 2.65mmHg と非常によく一致している。葉面の水蒸気圧力 ($0.8e(T_l)$) は葉温の上昇につれて増大し、最下層の 18.45mmHg から最上層の 29.34mmHg と約 11 mmHg も高くなつている。このために、蒸散量を規制している水蒸気圧力差 $\{0.8e(T_l) - e_a\}$ は最下層の 1.85 mmHg から最上層の 8.85mmHg へと増大している。

第4図につぎのような方法で求めた顕熱フラックス・潜熱フラックス・foliage ボーエン比・普通のボーエン比の植被内での垂直分布が示されている：

$$\left. \begin{aligned} L(z) &= C_p \rho W \int_0^z \frac{dT_a}{dz} dz, \\ IE(z) &= lW \int_z^0 \frac{da_a}{dz} dz, \\ \beta_0(z) &= C_p \rho W \int_0^z \frac{dT_a}{dz} dz / lW \int_0^z \frac{da_a}{dz} dz, \\ \beta_f(z) &= C_p \rho D_l \frac{dA}{dz} (T_l - T_a) / lD_l \frac{dA}{dz} \times \\ &\quad \times \{ra(T_a) - a_a\}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

ただし、 $\beta_0(z)$ ：高さ z における普通の Bowen ratio, $\beta_f(z)$ ：高さ z における Foliage Bowen ratio。普通の Bowen 比はある高さにおける 顕熱フラックスと潜熱フラックスとの比であるが、foliage Bowen 比は葉面における純放射の配分を特徴づけている。上方への通気による Mass flux の増加を示す $L(z)$ と $IE(z)$ は底より植被

上面に接近するにつれて次第に増加している。増加は潜熱フラックスにおいて著しく、植被上面では約 0.4ly/min に達している。しかしながら、顕熱フラックスの増加はごく僅かである。普通のボーエン比は底部での -0.1 から次第に増加するが、増加は特に 20 cm までの間で著しい。

一方 Foliage Bowen ratio の変化は普通のボーエン比より著しい。底部の -0.15 から上層での 0.3 まで変化している。そして、Foliage Bowen ratio と普通のそれとの間には同一レベルでも 40~50% の違いがある。このような Bowen 比の違いは圃場作物のなかでも明らかに見出された(内島, 1966)。このことは Foliage Bowen ratio の代わりに普通のボーエン比を使用して層別

湧源(顕・潜熱)の決定の不正確なことを示している。

β_0 と β_f との植被層内における変化は野外作物の群塔内のそれにはほぼ近似している。

第4図に示されている微気象環境と比較できる充分な資料はえられていないが、ここに示した環境は換気によつて大きく変化することは明らかである。とくに、葉面での積分拡散係数の値によつて変化することが予想される。この計算では植被層を通じて一定と仮定したが、実際の野外の植被層内では指数的に減少することが知られている。 D_l の垂直分布の違いは微気象に著しい違いをもたらすことが予想される。

4. 要 約

同化箱または蒸散箱による同化量や蒸散量の測定法は農学分野のなかで広く重宝されているにもかかわらず、それらのなかの微気象の研究、とくに微気象の制御の研究は余りなされていない。そこで著者は生育箱内での熱・水蒸気・炭酸ガスの収支式から出発して、箱内の微気象と換気率との関係を研究した。つぎに、生育箱内の植被層内部の気象要素の分布を数値計算的にしらべた。それらの結果を要約するとつぎのようである。

箱内の気温は外気温と複合項の和として表わされ、複合項は純放射に比例し、総括顕熱伝達係数と換気顕熱伝達係数の和に逆比例することがわかつた(5式参照)。換気顕熱伝達係数は(6)式にみられるように換気率 N に比例するが、その割合は単位壁面あたりの箱容積 (V_c/A_w) によつて変化する。 V_c/A_w は保温比 ($R=A_f/A_w$) に箱の平均高さを乗じたものに大体ひとしい。(5)式からの結果が第1図Aに示されている (50×50×100

cm³の生育箱について)。この生育箱では約100回/時間の割りで換気すると、内外気温の差は3°C以下になることがわかった。

箱内の水蒸気圧力は(8, 9)式のように示され、平衡水蒸気圧力は純放射量・ボーエン比・ A_f/Q の3量によつて大きく影響されることがわかった。純放射が多くて蒸発散が多い場合(湿つて β が小)には内部の水蒸気圧力は著しく高くなる。上と同様な生育箱について(9)式から求めた結果が第1図Bに示されている。

箱内に植被がある場合の炭酸ガス収支式は(10)のように表わされ、これから平衡時の炭酸ガス濃度は(13)式のようになることがわかった。平衡炭酸ガス濃度は主として単位葉面積あたりの換気量、外部の炭酸ガス濃度、葉内と葉外との炭酸ガス拡散のための積分拡散係数とによつてきまることがわかった。同一生育箱に葉面積指数をかえて植物を入れた場合の炭酸ガス濃度と換気率との関係が第1図Cに示されている。換気がますますつれて箱内濃度は増加して外気のそれに接近するが、箱内の葉面積指数に応じてある濃度を保つに必要な換気率は大きくなる。箱内と野外の作物の光合成量の比と通気量との関係が第2図に示されている。単位時間単位葉面積あたりの換気量が800cc以下では光合成能率は急減することがわかった。この模様は第1表に示されている D_i

の大小によつて著しく変化する。

生育箱内の気象要素の垂直分布を明らかにするために、植被層微気象の研究手法を利用した。その結果が第4図に示されている。気温はゆるやかに下から上へむけて高くなるが、葉温は下層での24°Cから上層の33°Cまで高まっている。湿度も上にゆくほど高くなっている。普通のBowen比とFoliage Bowen ratioとは植被層内での変化の形は似ているが、絶対値は著しく違うことがわかった。

参考文献

- 1) BUSINGER, J. A. (1963): In *« Physics of Plant Environment »* edited by W. K. Van Wijk, North-Holland Publishing Co.
- 2) 伊藤浩司 (1965): 日作紀 33, 482~486.
- 3) 加藤・内藤・谷口・鴨田 (1960): 日作紀 28.
- 4) 村田吉男 (1961): 農技研報 D-9, 1~169.
- 5) 小島睦男・福井重郎・渡辺 巖 (1965): 日作紀 33, 437~442.
- 6) PHILIP, J. R. (1964): J. Applied Meteor., 3, 390~395.
- 7) 高倉 直・杉 二郎 (1965): 農業気象, 21.
- 8) 内島善兵衛 (1964): 農業技術, 19, 390~395.
- 9) UCHIJIMA, Z (1966): Bull. NIAS. A-13, (in press)

Summary

In recent years, the chamber method in determining photosynthesis and transpiration of crops has become in common use among the crop scientist, and a number of studies have been published of the amount of transpiration and photosynthesis of crops. But little attention has been paid into the control of microclimatic environments in a chamber. In this paper, the relationship between microclimatic conditions and the ventilation rate was numerically studied on the basis of heat balance, water vapor and carbon dioxide balance techniques. Vertical profiles of several microclimatic elements within a plant canopy in the chamber were also studied by the micrometeorological method.

As can be seen in Eq. (5), the difference in temperature between in and out the chamber is determined in terms of total heat transfer coefficient h_t , advective heat transfer coefficient h_{ad} , net radiant energy iS_0 , apparent vapor deficit $\{r \cdot e(T_a) - e_a\}$, coefficient of keeping warm $R = A_f/A_w$ and relative humidity r in the chamber. The results obtained from Eq. (5) is presented in Fig. 1. It was found that the value of water vapor pressure in the chamber is closely related to net radiant energy, Bowen ratio and ventilating rate per unit area of the chamber floor. The relationship between ventilating rate and water vapor pressure in the chamber is shown in Fig. 1.

Carbon dioxide concentration in the chamber was found to be determined in terms of total gas exchange coefficient D_i and ventilating rate per unit leaf surface. The result obtained from Eq. (13) is presented in Fig. 1. The value of total gas exchange coefficient for several crops is summarized in Table 1. The efficiency of photosynthesis of crops in the chamber was evaluated from Eq. (14) and compared with experimental results obtained by MURATA(1961) in Fig. 2. In the range lower than ventilating the rate of about 1000 cc/leaf cm²hr, the photosynthetic efficiency of crops in the chamber decreased drastically with the decrease of ventilating rate. Fig. 4 illustrates the vertical profiles of relevant quantities within a canopy of crops in the chamber obtained by micrometeorological techniques. A notable result shown in this figure is that the remarkable discrepancy in amount is between foliage Bowen ratio and ordinary Bowen ratio. This result agreed with that obtained within a corn plant canopy under field conditions.