

ガラス室・ビニールハウス内の温度環境と CO₂ 環境

内 嶋 善 兵 衛*

1. はしがき

わが国の気候条件をみると、冬期においても日射量は作物の生育に十分な量であるが、温度が低いために作物栽培の妨げられていることがわかる。作物をとりまく微細な気象環境の制御は古くから利用されてきたが、第2次大戦後における合成化学工業の進歩は大きな変化を農業生産のなかにもたらした。すなわち、石油化学工業は日射をよく通す各種のプラスチック膜を低価格で多量に供給するようになった。これによって多くの栽培用ビニールハウスが全国的に作成され、現在われわれの身近かに見られるような農業生産とくに野菜生産に革命的な変化をもたらした。

しかしながら、各種栽培ハウス内の気象環境（温度場・湿度場・風速場・CO₂ 場など）の定量的な研究は現場技術の後塵を拝し、多くの技術が実際現場のなかで、芽生え育つことが多かった。最近、ハウスの規模は拡大の一途をたどり、集団化して一括して制御するという方向に進んでいる。これらの流れは環境制御との関連で、ハウス内環境の成立機構の解明を必要としている。現在、ハウス内の微細環境に関する多くの研究が国の内外で展開されている。それらのいくつかを参照しながら、簡単にハウス内の温度環境と CO₂ 環境とについて説明しよう。

2. ハウス内の温度環境

1. ハウスに作用する熱収支成分

上に説明したように、ハウスの第1目的は作物周辺の温度環境を改良して作物の生育を可能にさせることである。野外条件と同様に、ハウス内の温度環境はハウスに作用する種々な熱収支成分の作用の結果としてつくり出されている。温室の内外に作用している放射収支成分ならびに熱収

支成分をモデル的に表わすと図-1のようになる。図中の矢印の大きさは各項の役割の大小を近似的に表わしている。放射収支のなかで特に大きい役割を果たしているのは、太陽および天空からハウスに到達し入射する全短波放射（0.3~3.0μ波長域）である。極く一部が反射・吸収されるが60~70%以上の部分が床面に入射する。ハウス床面で反射された全短波放射の一部はガラス・フィルムを通して再び天空へ逃げてゆくが、残りは多重反射をくりかえしながら、床面と壁面に吸収されることになる。

ハウスに作用するのは、短波放射だけでなく、各物体（ガス体をふくむ）の絶対温度の4乗に比例して射出されるより波長の長い長波放射（または赤外放射、3.0μ以上）が作用している。天空中にふくまれている水蒸気・CO₂ ガスから下向きの長波放射が射出されており（約0.5~0.6ly/min, ly=cal/cm²）、常にハウス外壁に到達している。また、ハウス周辺の地面から射出された長波放射の一部はハウス外壁に作用している。ガラス・ビニールは長波放射に対して不透明で到達した放射は完全に吸収されるが、ポリエチレン膜は長波放射に対してかなり高い透過率をもっている。ハウス外壁面はその温度の4乗に応じた長波放射を周辺の地面および天空に対して射出している。これらの差引きによって壁面での温度変化に影響をもつ有効長波放射フラックスがきまってくる。

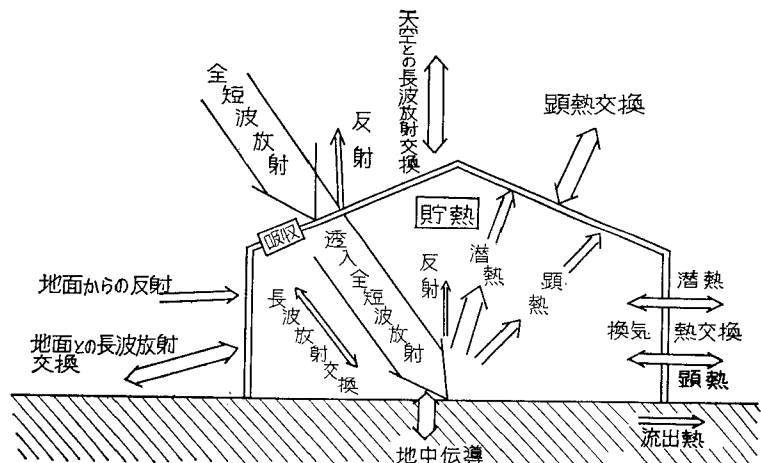


図-1 ハウスに作用する放射収支・熱収支成分 (内嶋原図)

* 農業技術研究所・気象科

る。

ハウス内部でも同様に長波放射交換が内壁面と床面との間に行なわれている。室内が乾いている場合には、内壁面と床面の温度はかなり近いので、ハウス内の有効長波放射フラックスはかなり小さい。しかし、床面が湿っていたり植物が密に茂っている場合には、床面は内壁面より温度が低い場合が多いので、床面は長波放射交換によって熱フラックスを獲得することになる。

床面に吸収された全短波放射と有効長波放射の和できまる放射フラックス量は床面の純放射とよばれ、地温・気温の上昇、蒸発・蒸散に使用される。また一部は植物体温の上昇に使われる。床面とハウス内空気との間には温度差と湿度差があり、熱交換（しばしば顕熱伝達とよばれる）と水蒸気交換（水蒸気フラックスに蒸発の潜熱を乗じたものは潜熱伝達とよばれる）が行なわれている。

床面からハウス内空気中に伝達された顕潜熱は壁面の隙間を通して（換気交換）、または壁材を通して外気中へと分散されている。壁材を通しての熱伝達係数（熱貫流率）の小さいほど、また隙間を通しての空気交換の悪いほど、単位熱量をハウス内から外気中へ運搬するのに大きな温度差が必要になってくる。すなわち、ハウス内気温は外気温より高くなっていく。これがハウスによる温度上昇の主な原因である。ハウスによる昇温の原因としては温室効果（ハウス壁材は全短波放射はよく通すが赤外放射はほとんど通さないという性質による）があげられてきたが、最近では、ハウスによる乱流交換現象の抑制が主な原因であることがわかってきた。

2. ハウス内外の放射

上の説明からわかるように、ハウスによる気温環境改

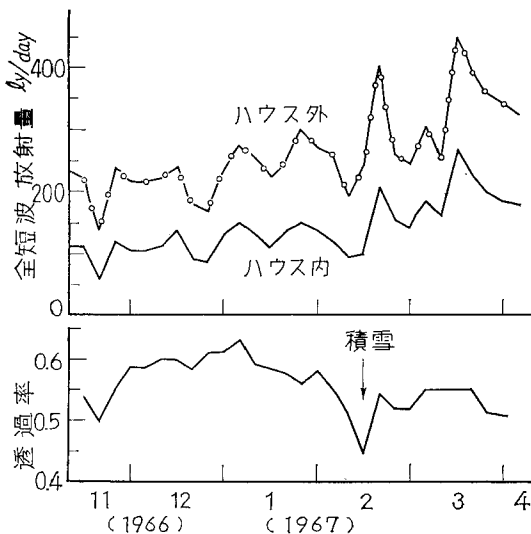


図-2 ガラス室内外の日射（全短波放射）環境（岩切1971）

善の主な原因は壁面を通して床面に入射した全短波放射（太陽熱）の外部への放散を抑えることである。それゆえに、ハウスによる温度の上昇は熱放散の抑制程度のみならず、入射する太陽熱の多少にも密接に関係している。それゆえ、ハウスの全短波放射透過率については数多くの研究が内外で行なわれている。

ガラス室（農技研）内外での日射環境の比較が図-2に示されている。日射量のすくない冬期においては床面での値は約 100ly/day で、ハウス外に比較してかなりすくないことがわかった。太陽高度が高くなってくると、床面日射量も次第に増加してくるが、ガラス面の汚れのために日射透過率は減少している。日射透過率は太陽高度、放射の組成（直達放射と散乱放射の割合）、ハウスの方位角と傾斜角、壁材の反射率と透過率、フレームの面積比などによって変化する。Edwards (1965) はガラス室の直達放射に対する透過率は夏に 0.57、冬に 0.68と変化するが、散乱放射に対する透過率は約0.69でほぼ一定といている。全短波放射に対するガラス室の平均透過率は、太陽高度約15度での0.6から太陽高度約65度での0.8までほぼ直線的に増加することが報告されている。

さきに説明したようにハウス内の温度場に直接影響を与えるのは、短波放射ならびに長波放射のさし引きによってきまる純放射量である。ガラス室内外での放射観測データから求めた結果が図-3に示されている。両者の

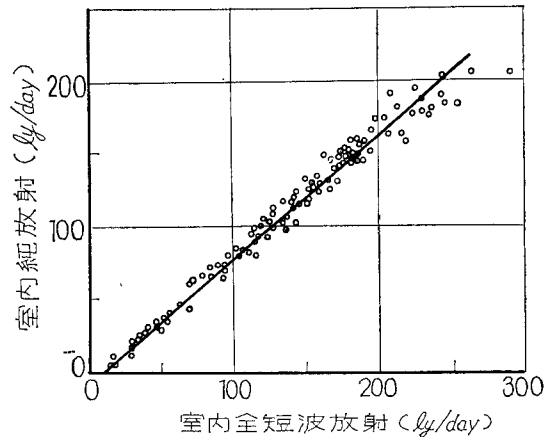


図-3 ハウス内における全短波放射と純放射の比較（岩切1971）

間には極めてよい比例関係があり、それは次式で近似できることがわかった。

$$\left. \begin{aligned} iS &= -8 + 0.87 i(Q+q), \\ iS &= -14 + 0.5 o(Q+q), \end{aligned} \right\} \text{ly/day} \quad (1)$$

ここで iS は室内の純放射量、 $i(Q+q)$ は室内の全短

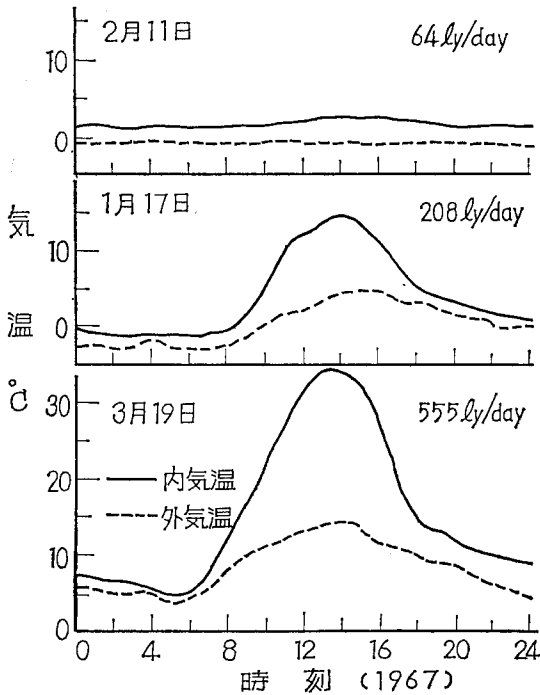


図-4 ハウス内外における気温日変化と日射量 (岩切, 1971)

波放射, $o(Q+q)$ は室外の全短波放射。この関係式はガラス室内の純放射量の粗い推定に用いることが可能である。

Ubing (1961) の提出したつぎの daylight coefficient (f) を利用すると、ハウス内の床面の純放射は次式で与えられる (小倉1968, 岩切1971)

$$iS = \frac{o(Q+q)f}{1-\tau a} (1-a) + 4\sigma \bar{T}^3 (iT_w - iT_s) \quad (2)$$

ここで a は床面のアルベド (全短波放射に対する反射率), τ は内壁面のアルベド, σ はステファン・ボルツマンの定数, \bar{T} は室内平均気温の絶対値, iT_w , iT_s は内壁面と床面の温度。図-3 に示されている結果は、床面での長波放射熱交換がかなり弱いことを物語っている。しかしながら、夜間においては $iT_w < iT_s$ となり、無視できない熱量が放射によって壁面に伝達されることが知られている。

ハウス内の放射環境においても一つの重要な問題は光合成有効放射 ($0.38 \sim 0.71 \mu$) および青色光の透過である。作物による物質生産ならびに良質な収穫 (蛋白質含量, ビタミン含量など) をうるには、光合成有効放射がより多くハウス内に透入することが大切である。しかしながら、現在農業の実際に使用されているハウス内外の光エネルギーの波長別分布は余り知られていない。特

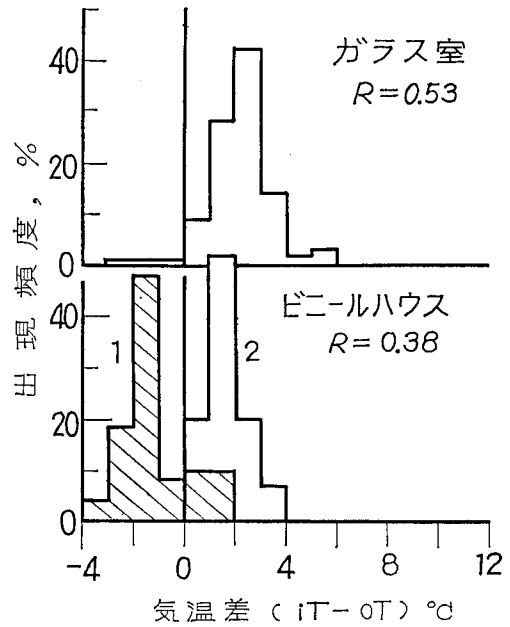


図-5 ハウス内外温度差の出現頻度 (内嶋・岩切, 1971)

に、変化する気象条件下および汚れたハウス内のそれらについては殆んど情報がえられていない。野外と同様な品質 (栄養的) をもった収穫をあげるためにも、光環境の研究が必要であるように思われる。

3. ハウス内の温度の実態

ハウス内外の気温日変化の比較が図-4 に示されている。図にみられるように、日射量がわずか 64 ly/day においては日変化はほとんどみられず、 $3 \sim 4^\circ\text{C}$ の差を保って両者はほぼ平行に経過している。日射量の増加につれて内気温と外気温の差は大きくなっていく。特に日中時においては約 20°C に達している。最高温度の差 $\Delta T_m (=iT_{a, \max} - oT_{a, \max})$ と日射量の日中最大値 ΔQ (ly/min) との間には比例関係があり、次式で近似できることがわかった。

$$\Delta T_m = 2.0 + 14.4 \cdot \Delta Q \quad (3)$$

これから、 $\Delta Q = 1 \text{ ly/min}$ であれば内気温は外気より約 16°C も高くなり、 $\Delta Q = 0 \text{ ly/min}$ でも 2°C 高くなることがわかる。この結果が普遍的に適用できるとは考えられないが、一般の栽培用ハウスについては当てはまるものと思われる。

しかしながら、われわれの観測から夜間におけるハウスの温度維持に対して床面からの地中熱流が非常に重要な役割を果していることがわかった。その結果が図-5 に示されている。図にみられるように、普通の状態にあるガラス室 (無栽植) およびビニールハウス (栽植) で

は、室内夜温は外気温より高い場合が95%以上で、室内夜温が外気温より低くなる例は2~3%にすぎない。しかし、床全面にポリスチロール板(厚さ3cm)をはって地中への(からの)熱伝達を遮断したハウスでは、観測例の多くの場合において室内の夜間気温は外気のそれより1~4℃低くなっている。このような逆転現象が5月という暖い季節においてもみられた。以上の例は、夜間におけるハウス内の温度場の形成に地中熱伝導が非常に重要な役割を果していることを示している。

4. ハウスによる温度環境の予測

ハウスによる温度上昇度の予測は内部環境の制御計画をたてるうえに非常に大切である。種々な方法(熱収支法、レスポンス法、ダイナミックシミュレーション法など)が工夫されているが、ここでは熱収支法について説明することにしよう。床面での熱収支式(床面での熱エネルギー保存則の一表現)はつぎのように表わされる。

$$A_f \cdot iS_o = A_f (B_o + lE_o + L_o) \tag{4}$$

ここで A_f は床面積 (cm²)、 iS_o は内部床面での純放射量 (ly/sec)、 B_o 、 lE_o 、 L_o は床面での地中伝導、潜熱および顕熱フラックス (ly/sec)。

$$\left. \begin{aligned} A_f \cdot lE_o &= \rho l V_c \frac{0.622}{P} \cdot \frac{d_i e_a}{dt} \\ &+ A_w \left\{ i k_w [i e_a - e(i T_w)] + k_v (i e_a - o e_a) \right\} \\ A_f \cdot L_o &= C_p \rho V_c \frac{d_i T_a}{dt} \\ &+ A_w \left\{ i h_w (i T_a - i T_w) + h_v (i T_a - o T_a) \right\} \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

ここで C_p 、 ρ は、空気比熱と密度、 V_c はハウスの体積 (cm³)、 $i h_w$ 、 $i k_w$ は内壁面での顕・潜熱伝達係数 (ly/sec²C, ly/sec mmHg)、 $i T_a$ 、 $i T_w$ は内気温と内壁温 (°C)、 $i e_a$ 、 $o e_a$ は内・外の水蒸気圧力 (mmHg)、 $e(i T_w)$ は内壁面での最大飽和水蒸気圧力 (mmHg)、 k_o と h_v は換気による潜、顕熱の伝達係数、 $d_i e_a/dt$ と $d_i T_a/dt$ は内部の水蒸気圧力と気温の時間変化率。問題を単純にするためつぎのような仮定をおく

$$\begin{aligned} i k_w [i e_a - e(i T_w)] &= 0, \\ \frac{d_i e_a}{dt} - \frac{d_i T_a}{dt} &= 0 \end{aligned}$$

すると、(4)、(5)式から次の関係が求まる。

$$A_f \cdot iS_o = A_f \cdot B_o + A_w (i T_a - o T_a) \times \left\{ h_t + h_v (1 + \beta') \right\} \tag{6}$$

ここで A_w は壁総面積 (cm²)、 h_t と β' はつぎのように表わされる熱貫流率と見掛けのポーエン比である。

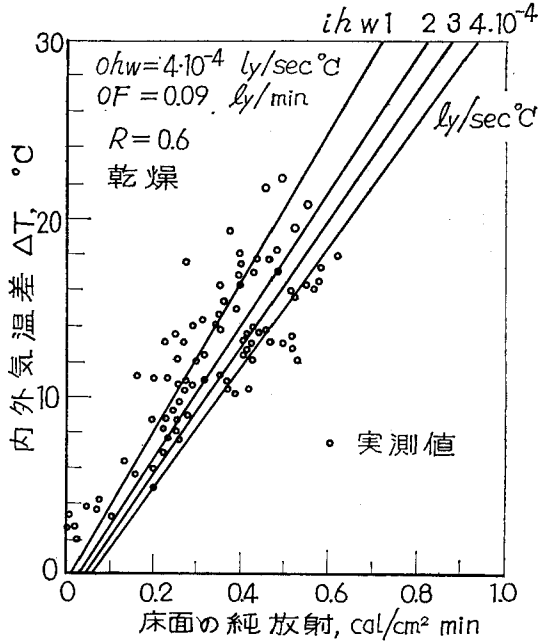


図-6 ガラス室による気温上昇度の推定値と実測値の比較 (岩切, 1971)

$$\begin{aligned} h_t &= [1/i h_w + 1/o h_w + l'/\lambda]^{-1} \\ h_v &= C_p \rho V_c N / 3600 A_w \\ \beta' &= 2.0 (i e_a - o e_a) / (i T_a - o T_a) \end{aligned}$$

ここで $o h_w$ は外壁面での顕熱伝達係数 (ly/sec²C)、 l' と λ は壁の厚さ (cm) と熱伝導率 (cal/cm sec²C)、 N は換気回数 (1/hr)。(6)式を変形すると、つぎの関係がえられる。

$$i T_a = o T_a + \frac{R (i S_o - B_o)}{h_t + h_v (1 + \beta')} \tag{7}$$

ここで $R = A_f/A_w$ は保温比。上式からハウス内気温は外気温と附加項の和として表わされ、附加項の値は床面純放射量(したがって透入全短波放射量)に比例し、熱貫流率と換気顕熱伝達数の和に逆比例することがわかる。すなわち、換気回数が増すとハウス内の気温は最初急激に低下するが、低下の度合は次第に緩やかになる。また、見掛けのポーエン比の大きくなるにつれて(床面が乾燥して顕熱伝達の割合が増すにつれて)、ハウスによる温度上昇度は次第に高くなっていく。また、保温比 R の大きいほど、温度上昇度は大きくなっていく。冬期保温の観点からは R の大きい温室がよいが、暖候期の冷房の点からは R は小さい方がよい。両者を加味した温室形態は、各地の気候条件でさまざらう。

完全密閉・完全乾燥条件を用いて $R = 0.6$ のモデルガラス室の昇温度を計算した結果と実測データとの比較が

図一六に示されている。内壁面での顕熱伝達係数の増加につれて、 $iS_o - \Delta T$ の関係直線の傾斜は若干ゆるやかになるが、昇温度 ($iT_a - oT_a$) は床面純放射につれて正比例的に増加している。実測点のちらばりはあるが、予想される $i h_w$ の範囲内に分布していて、非常に簡単な(7)式が大体予想に使用できることがわか。Businger (1963) は $o h_w$ は約 3.0×10^{-4} ly/sec°C (=10 kcal/m² hr°C) で、 $i h_w$ はその 1/2 であるといっている。しかし、これらの値は風速、ハウスの形状、換気回数、作物の生育状況、温度成層度などによって変化することが予想されるが、まだ十分確実な資料は整えられていない。特に、内部の拡散係数は葉面拡散速度を通して作物の体温・光合成・呼吸・蒸散活動に、また体表面での拡散速度を通して内部で働く人の体調に大きな影響をあたえるので、今後研究で進める必要がある。

5. デGREEアワーの地理的分布

冬期温室（ハウス類も含めて）を暖房する場合、必要とする燃料量は各地の気候条件・温室の形態・設定温度などによって変化することが予想される。これを予想することは温室暖房の設計にとって非常に重要である。つぎに、それを簡単に説明する。

ある暖房必要期間 τ に温室から逃げ出す熱量は次式で与えられる。

$$Q = (h_t + h_v + h_r) \int_{\tau} (t_c - t_a) dt + \tau(\alpha + \epsilon) \quad (8)$$

ここで t_c は暖房設定温度 (°C), t_a は外気温 (°C),

$$\alpha = A \cdot F_a \left\{ 1 - \frac{B}{A} \left\{ \left(1 - \frac{B_s}{F_a} \right) / \left(1 + \frac{h}{h_r} \right) \right\} \right\}$$

$$\epsilon = \frac{\lambda_s}{d} (t_c - t_s)$$

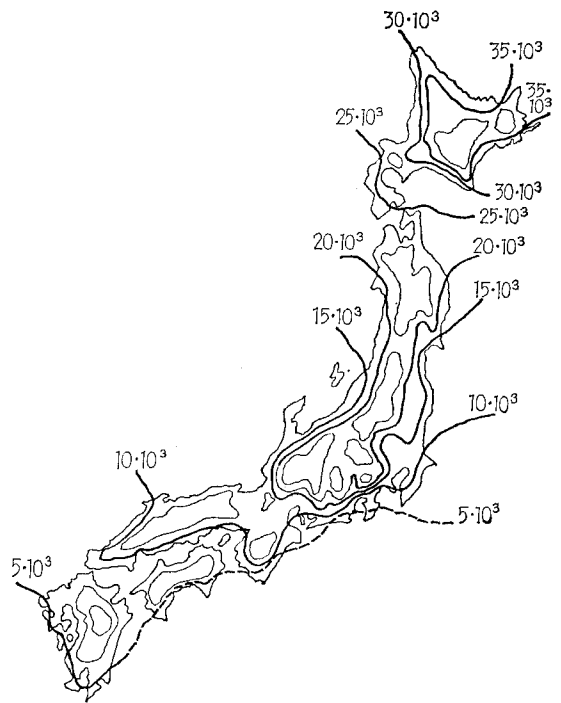
ここで F_a は気温・空中湿度・雲量から求めた有効放射量 (ly/sec), B は周辺地面の地中伝導フラックス (ly/sec), h, h_r は顕熱伝達係数と放射顕熱伝達係数 (ly/sec°C), λ_s は土壌の熱伝導率 (cal/cm sec°C), d は土層の深さ (cm), A と B は保温比 R に関係した係数。

(8)式において、右辺の第1項にふくまれている $\int_{\tau} (t_c - t_a) dt$ は放熱の割合に密接に関係した量で、デGREEアワー (D. H.) とよばれている。この量については川勝 (1962), 内嶋 (1968), 岩切 (1971) によって報告がなされている。

内嶋 (1968) は夜間温度の降下曲線を利用してつぎのようなベキ関係を報告した。

$$D. H. = a(T_c - T_{\min})^b \quad (9)$$

ここで T_{\min} は日最低気温 (°C)。そして、 $a=5.9, b$



図一七 暖房デGREEアワーの地理的分布 (内嶋, 1968)

=1.22 という値をえた。この関係式から求めたD. Hは川勝 (1962) の値とかなりよく一致することがわかった (差は5%以下である)。岩切 (1971) はハウス内での温度観測資料を用いて、 $a=0, b=1.65$ をえている。内嶋 (未発表) は一年間にわたる気温・水温の観測データを用いて暖房・冷房デGREEアワーを求めるベキ関係式のベキ指数値の年変化をしらべ余り大きく変化しないことを見出している。上のベキ関係式が設定温度の変化にもかかわらず保持されることは非常に面白いことである。

このベキ関係式と各地の気候資料とから求めたデGREEアワーの分布図が図一七に示されている。図にみられるように、 $T_c=15^\circ\text{C}$ では、年間のD. Hは九州地域の約10k°C hr から北海道東部の60k°C hr まで変化している。20k°C hr の線は関東南部から東海、近畿、四国、九州の海岸部と走っていて、暖流に洗われる地帯を示している。 T_c が10, 5°C と低下すると、九州と北海道におけるD. Hの違いは一層大きくなり、 $T_c=10^\circ\text{C}$ では約7倍、 $T_c=5^\circ\text{C}$ では約20倍となることがわかった。(8)式にふくまれている伝熱工学および気象に関連した物理的な値が明らかになると、図一七に示したようなD. H分布図から暖房に必要な燃料の量、したがって必要経費を推定することが可能である。

3. ハウス内の CO₂ 環境

ハウスはもともと乱流交換を極度に抑えて温度上昇を図るものであるので、内部の CO₂ 濃度が著しく低下することが予想される。金関 (1968)、矢吹 (1968) はポリトンネルやガラス室内での観測から、日中光合成の盛んな時期には CO₂ 濃度は 100ppm 以下に下ることを報告している。このような低 CO₂ 濃度下では作物の純光合成はほとんど 0 になる。最近、堆肥や稲ワラを使用しない栽培用がハウスに採用されるにつれて、ハウス内の CO₂ 環境が次第にわが国でも注目されるようになってきた。ヨーロッパのハウス農業では、全短波放射の強度が 0.2 ly/min 以上になると、自動的に CO₂ がハウス内へ供給されるというシステムが広く普及し、顕著な効果をあげている。そこで、ハウス内の CO₂ 環境について若干説明しよう。

1. ハウスに作用する炭酸ガス収支成分

ハウスに作物を栽培した場合に、ハウスに作用している CO₂ 収支項をモデル的に示すと図-8 のようになる。

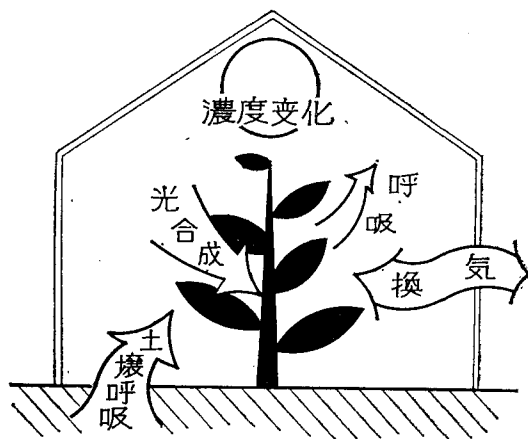


図-8 ハウスに作用する CO₂ 収支項 (内嶋原図)

ハウス内の作物は日中光合成活動によって CO₂ を吸収する一方、呼吸活動によって CO₂ をハウス内へ放出している。しかし、日中には光合成 > 呼吸なので、CO₂ が吸収されていて、それは室内気柱内にふくまれている CO₂、換気 (隙間をふくめて) によって外部から室内へ運びこまれる CO₂ および地面から土壌呼吸によって室内へ放出される CO₂ によって補われている。人工的に CO₂ をハウス内へ放出する場合にはそれも加わってくる。これらの収支項の間には質量保存の法則がなりたっていて、つぎのように表わされる。

濃度変化量 = 光合成 + 呼吸 + 換気 + 土壌呼吸 (10)

これを式で表わすとつぎのようになる。

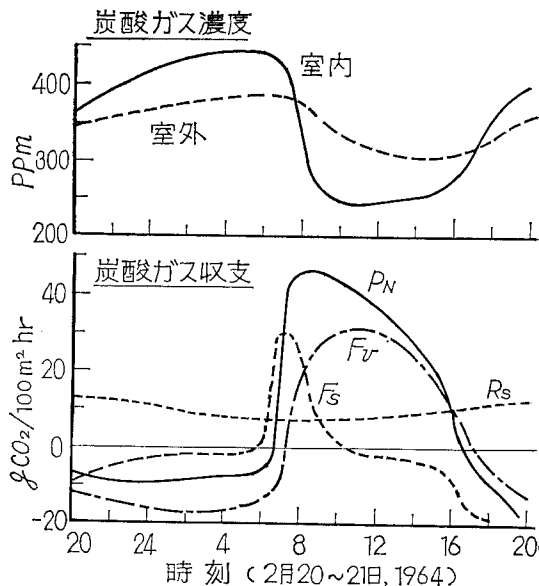


図-9 レタスハウス内の CO₂ 濃度と収支項の日変化 (矢吹, 1968)

$$V_c \frac{d_i C}{dt} = A_f \int_{F_i} p(F) dF + A_f \cdot R_p + Q(oC - iC) + A_f r_s \quad (10')$$

ここで F_i はハウス群落の葉面積指数、 $p(F)$ は光合一葉面積関数、 R_p は F_i なる群落の呼吸強度 ($\text{gCO}_2/\text{cm}^2 \text{sec}$)、 $Q = V_c N/3600$ は換気量 (cm^3/sec)、 iC と oC は内外の CO₂ 濃度 (gCO_2/cm^3)、 r_s は土壌呼吸強度 ($\text{gCO}_2/\text{cm}^2 \text{sec}$)、 $d_i C/dt = 0$ とすると定常状態時の CO₂ 収支式となり、ハウス内の CO₂ 環境の解明によく利用されている (内嶋, 1965, '66; 高倉, 1966, 高倉, 杉, 1965)。

図-9 にレタスを栽培したハウス内での CO₂ 収支項の日変化が示されている。ハウス外の CO₂ 濃度は 300 ~ 350 ppm の間で日中ひくく早朝に高くなるという緩やかな日変化をしている。内部の CO₂ 濃度も同じような位相の日変化を示しているが、最高は約 450 ppm、最低は約 250 ppm と非常に大きな日変化で、較差は 200 ppm に達している。特に、早朝 6 ~ 8 時の間に急減していて、日中期間は 250 ppm で保持されるという特徴的な変化をしている。早朝の急激な減少はレタスの光合成のためである。これに対応する CO₂ 収支項の日変化 ($F_s = V_c \cdot d_i C/dt$, $F_v = Q(oC - iC)$, $P_N = P_G - R_P$) が上図下半分に示されている。特徴的なことは、ハウス内の光合成活動による CO₂ の純吸収量が野外でみられるように正午を中心にして対称にならず、8 時頃に最高となり、その後次第に減少していることである。これは室内の CO₂

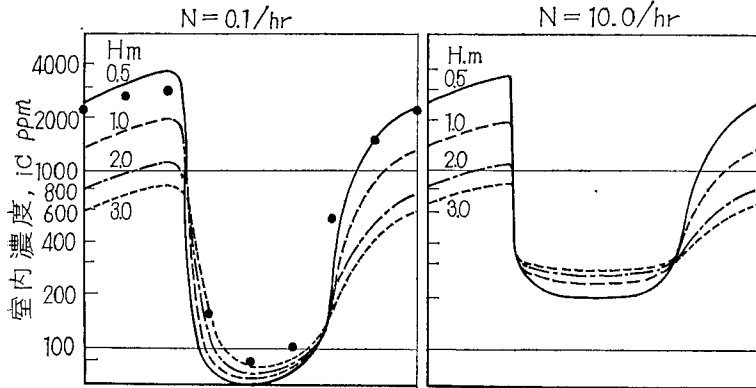


図-10 種々な大きさのハウス内のCO₂濃度のシミュレーション (内嶋, 1971)

濃度の異常な低下のために光合成活動が抑制されていることを示している。P_N は早朝は F₀ によって、あとは F₁ によって多く補われている。逆に夜間はハウス内に貯えられた CO₂ が換気によって外気へ放出されていることがわかる。

このようなハウス内の CO₂ 環境および光合成活動の日変化をモデル的に研究する試みも行なわれている (矢吹, 1968, 内嶋, 1971)。⑩' 式を Runge-Kutta 法を用いて数値的に解いてえられた結果の一部が図-10に示されている。図にみられるように、N=0.1/hr と極めて低い換気率のハウス内では、CO₂ 濃度日変化は異常に大きくなり、日較差は 3,000~4,000ppm に達している。日中の最低濃度は 60~80ppm と極端な低さになっている。ハウスの大きさの影響は夜間に特に著しく、小さなハウスでは 4,000 ppm に近い最高値が出現している。図-10には金関 (1968) が半径 40cm のポリトンネル内で観測した結果 (黒丸) も示されている。この結果は H=50cm のハウスについてシミュレートした CO₂ 濃度変化とかなりよく一致していることがわかる。N=10.0/hr になると、濃度の日中低下はかなり軽減されるが、H=50cm では約 200ppm、H=300cm では 300ppm とまだ大きさによる違いが残ることがわかる。これは矢張

表-1 フダンソウ・レタスに対するCO₂ 施用の効果 (今津, 矢吹, 1965, 1967)

施用濃度 (ppm)	フダンソウ			レタス	
	新鮮重	乾物重	草丈	新鮮重	乾物重
	gr		cm	gr	
300	2.6	0.3	8.2	434.8	16.7
900	2.8	0.3	9.4	861.1	26.3
3,000	4.4	0.4	9.0	882.3	28.6
6,000	8.4	0.8	14.1	1,048.9	31.2

り日中の光合成活動に影響を与えるものと思われる。これから、実際のハウス (密閉度の高い) では CO₂ 濃度の異常な低下が生じていて、それがハウス内の作物の光合成活動を抑えているものと思われる。土壌や稲ワラを使用しない合理的 (?) なハウス農業が進むにつれ、この傾向は更に広がるものと思われる。

2. 炭酸ガス施用の効果

植物の光合成活動が葉周辺の空气中の CO₂ 濃度に大きく依存す

ることは、植物生理学の分野では広く知られていたが、実際の作物栽培において CO₂ 施用技術が試みられるようになったのはそんなに古くはないようである。わが国では、1928年頃に若干の研究が行なわれたが、戦後になって水稲・野菜などの育苗に CO₂ を施用する試みが行なわれた (水稲, 野菜等の育苗における炭酸ガス施用に関する研究, 農林水産技術会議研究成果報告, 1968)。農業気象の分野でも CO₂ 施用が若干試みられ、矢吹ら (1965, '65, '67) が一連の研究を発表している。その結果の一部が表-1 に示されている。

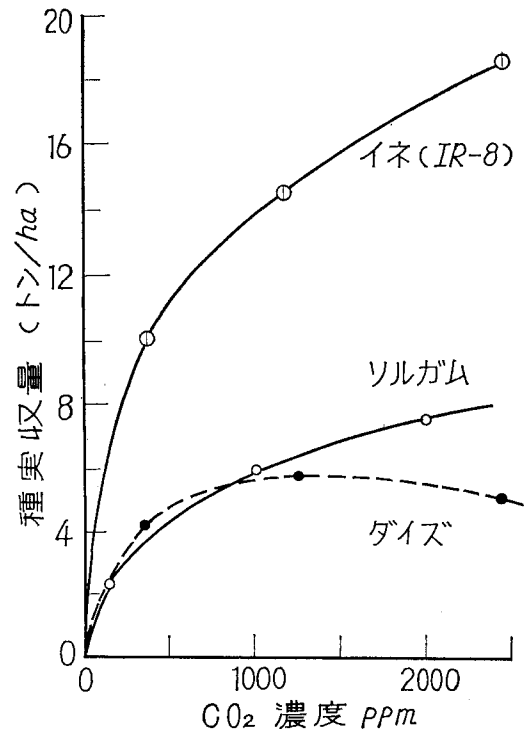
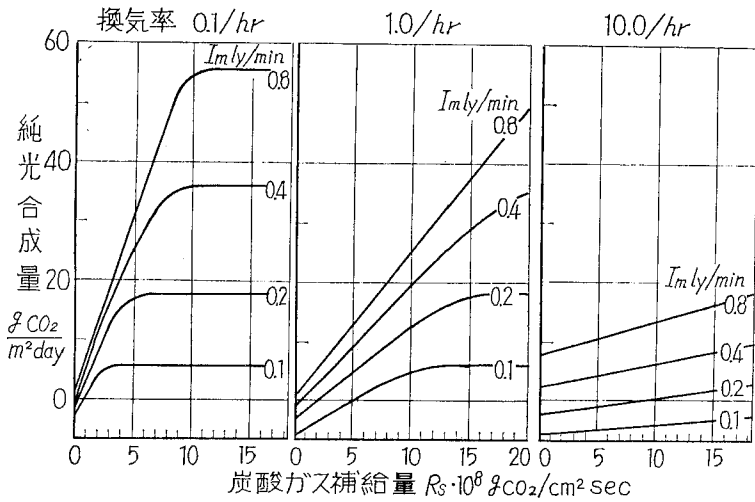


図-11 作物収量に対するCO₂施用の効果 (Riley et al., 1969)



図一十二 ハウス内のキュウリ群落の光合成と日射・換気・CO₂補給との関係 (内嶋, 1971). I_m は南中時の日射強度 (モデル計算)

表にみられるように、新鮮重、乾物重ともにハウス内の CO₂ 濃度の高まりにつれて増加しており、20倍の高まりで乾物重は約 2~3 倍増加している。葉菜のみならず、イネ科作物においてもかなり顕著な効果が認められている。図一十一にみられるように、イネとソルガムの種実収量はハウス内濃度の上昇につれて次第に増加している。特に、イネ (IR-8) では 8 倍濃度が上昇すると 2 倍の収量になっている。20 トン/ha という収量はわが国の最高レコードの約 2 倍の収量である。ダイズでは余り顕著な効果ではなく、高濃度ではかえて収量が減少するという結果になっている。このように、CO₂ 濃度レベルに対する作物収量の反応はかなり種で違うようである。これらの点についての情報はまだ余り多くない。

ある大きさのハウス (作物を栽培している) 内を一定の CO₂ 濃度 (g CO₂/cm³) に維持するために必要な炭酸ガス供給量は作物の種類、茂り、光合成能力、呼吸強度、日射強度、換気量などで広く変化する。(10' 式を変形すると (定常状態を考えて、左辺は 0 とおく)、必要供給量 (I_c) は次式で与えられる。

$$I_c = iC \left[\frac{Q}{A_f} - \frac{D_c}{k} \cdot X \right] - R_p - \frac{Q}{A_f} \cdot C \quad (11)$$

ここで k は群落の光消散係数、 D_c は周辺空気中から光合成作用点までの CO₂ 拡散を特徴づけている CO₂ 拡散速度 (cm/sec)、群落光合成量の特徴づけている X はつぎのようになる。

$$X = \ln \left\{ \frac{b(1-\tau) + kI_N}{b(1-\tau) + kI_N \exp(-kF_i)} \right\}$$

ここで b は単葉の光-光合成曲線の特徴づけている経験定数、 τ は葉の光透過率、 I_N は群落上面での日射強

度 (ly/min)。上式を用いると種々な環境条件、作物条件下で所要の CO₂ 濃度 (iC) にハウス内の空気を維持するために必要な CO₂ 補給量を求めることができる。

実際の温室やハウスでは、上にあげた条件は日変化をしているので、それらの影響を考慮して CO₂ 施用の作物生産 (ハウスによる) に及ぼす影響を明らかにしなければならない。Monteith ら (1964) は拡散抵抗理論を応用して若干の討論を行なっている。(10' 式による、数値実験の結果の一部を示すと図一十二のよ

うになる (実験はキュウリ群落を仮定して行なった)。換気が弱く日射強度の強いときは、CO₂ 供給による日光合成量の増加は著しく、しかも飽和点に達するのは $10 \cdot 10^{-8} \text{g CO}_2/\text{cm}^2 \text{sec}$ とかなり高い値である。日射強度の低下につれて、CO₂ 補給に伴う光合成の増加率は減少し、飽和点に達する補給量も低くなっていく。そして $I_m = 0.1 \text{ly/min}$ という完全曇天・雨天に対応する条件下では、ハウスへの CO₂ 施用の効果はほとんどみられなくなり、光合成量は一定になってしまう。換気率がますます、施用した CO₂ の多くが外部へ無駄に放出されるようになり、施用効果は次第に低下してくる。 $N > 10/\text{hr}$ では施用の効果は急減し、ほとんどみられなくなる。以上の結果はハウスへの CO₂ 施用の効果発現が気象条件・ハウス条件で大幅に変化することを示している。それゆえ、CO₂ 施用を実施するハウスでは極力換気を抑えることが必要である。また、日射強度の高い時に実施しなければならない。その点で、 $I_N > 0.2 \text{ly/min}$ で CO₂ 施用を開始するという西ヨーロッパの技術は合理的なものといえよう。

ここに使用したモデルでは温度の効果を入れていないので、換気を抑えた場合のハウス内気温の上昇が光合成活動にいかなる影響を与えるかは評価できなかった。野外条件下でのモデル実験から、口中の温度が過度に上昇すると光合成活動が低下し、呼吸活動が著しく高くなるために、地面近くの CO₂ 濃度が正午を中心にして逆に上昇する例が認められている。これと同様な現象がハウス内でも起るものと予想される。これはハウス内の温度環境と CO₂ 環境を同時に制御するためには明らかにしなければならない重要な問題である。それゆえ、(10' 式

に示されるモデルを更に発展させなければならない。

4. おわりに

以上かんたんに温室やハウス内の温度環境と CO₂ 環境の説明を行なったが、現実のハウス栽培技術の発展に比較すれば研究サイドからの寄与はまだ余り大きくない。しかし、総合的な制御技術の確立はハウス内の環境成立機構に関する定量的知見に基づかなければならないことを思うと、今後ハウス内の微細気象環境をさらに研究しなければならない。また、えられた定量的知見にもとづいて環境の予測と制御に必要な物理的モデルの開発を急がねばならない。

引用文献

- Businger, J. A., 1963 : In "Physics of Plant Environment". ed. by van Wijk, North-Holland, Amsterdam, 277—318.
- Edwards, R.I., Mousley, L.J., 1958 : J. Agric. Engng. Res., 3, 69—75.
- 今津正・矢吹万寿・織田弥三郎, 1965 : 農業気象, 21 41—46.
- 〃 〃 , 1967 : 園学誌, 36, 179—185.
- 〃 〃 , 1967 : 園学誌, 36, 275—280.
- 岩切敏, 1971 : 国立防災科学技術センター研究報告, No.6.
- 金関四郎, 1968 : 大阪府大, 学術報告, B—20, 49—121.
- 川勝義夫, 1962 : 農園, 37, 1792—1798, 1923—1928.
- Monteith, J. L., Szeicz, G., Yabuki, K., 1964 : J. appl. Ecol., 1, 321—337.
- 小倉祐幸, 1968 : 農業気象, 24, 1—5.
- Riley, J. J. Hodges, C. N., 1969 : Univ. of Arizona, Environmental Research Laboratory.
- Takakura, T., 1966 : Botanical Magazine, Tokyo, 79, 143—151.
- 高倉直・杉二郎, 1965 : 農業気象, 21, 99—104.
- Ubing, D. W. S. 1961 : Agronomy J., 53, 295—297.
- 内嶋善兵衛, 1965 : 農業気象, 21, 105—112.
- 〃 〃 , 1966 : 農業気象, 22, 65—70.
- 〃 〃 , 1968 : 農業気象, 24, 59—65.
- 〃 〃 , 1971 : 農業気象, 27, 45—57.
- 内嶋善兵衛・岩切敏, 1970 : 農業気象, 26, 77—89.
- 矢吹万寿・今津正, 1965 : 農業気象, 20, 125—129.
- 矢吹・田村・織田・今津, 1967 : 農業気象, 23, 25—29.