## 温室内の日射量に関する研究 (3)

---反射鏡の利用----

古 在 豊 樹 • 杉 二 郎 (東京大学農学部)

Studies on the Solar Irradiation in Glasshouses (3) ——Use of Reflective Mirror—— Toyoki KOZAI and Jiro SUGI (Faculty of Agriculture, Tokyo University)

- 7 -

### 1. はしがき

温室は,植物の生長を阻害または抑制する自然環境か らその植物を保護し,更には,植物の物質生産を積極的 に高める目的で作られたものである。温室は,温度に関 しては,外界に勝る条件が容易に得られるが,日射に関 しては,通常,屋外に比べておよそ40~60%の減少は免 がれない。従って,通例の温室では,冬季は常に日射量 が植物の生長の制限因子の1つになっていると考えられ る。また,温室内の日射量は,温室内気温,湿度,炭酸 ガス濃度等の他の環境条件の成立に直接または間接に強 く関連している。それ故,今後,施設園芸の質的発展に 伴ない,温室内の植物に対する環境条件を,電子計算機 等を利用してオンラインで正確にコントロールしようと する試みがはじめられる際には,温室内日射量の正確な 算定に基づく,光合成量,暖冷房負荷の推定が,より良 い制御を行なうために,必須のものとなる。

近年,温室内日射量を数理モデルから電子計算機を利 用して数値実験的に求めようとする試みが幾つか行なわ れている<sup>1,2,6,7,8,9)</sup>。著者らも第1報(1970)および第2 報(1972 a)において同様の試みを行ない,幾つかの知 見を得てきた。本報告はそれらに引き続くものではある が,前報までに使用したモデルを更に改良し,温室内に おける反射日射量を考慮し,温室内の反射日射量と温室 構成材の諸元との関連を明らかにしようとしたものであ る。その中で,特に,冬季,温室内にアルミ板等の整反 射板を置いた場合の反射日射量の増加の程度を検討し, 反射板利用の効果について論究してみた。そして,この 数理解析によって,温室の設計,改良に際しての指針を 幾つか得ることが出来た。

昭和47年4月12日 全国大会にて発表 昭和47年6月1日 受理 しかしながら、今回使用したモデルにも、未だ、現実 的でない仮定がいくつか含まれており、おおいに改良す べき余地が残されている。とは言え、この方法は、今後、 更に発展させることは充分可能であり、それについては 引き続き考究する予定であるので、今回は、その1段階 として、現在までに得られた結果をここに発表する。

#### 2. 温室内日射量を規定している因子

温室内の平均日射量およびその空間的・時間的分布 は、大別して次の3つの因子によって規定されていると 考えることができる。

 外部因子 2. 構造因子 3. 内部因子 1番目の外部因子には,主に,太陽の高度と方位および 大気の日射透過率によって決まる直達および天空日射量 のことであるが、場合によっては、地面や周囲建物から の反射日射量をも含み、これらは、温室内日射を規定す るシステムへのインプットとなるものである。2番目の 構造因子とは、温室外の日射を温室壁面において温室内 の1次日射に変換する因子のことで,温室の形態,建設 方位,被覆材の日射透過特性,棧などの不透明構造物の 配置等が含まれる。ここで,温室内の1次日射とは,外 部日射が被覆材を透過した後,直接,植物または床面に 到達する日射を意味し、温室内植物または床面への直接 日射とでもいうべきものである。それに対し,壁面を一 度透過した日射が, ついで温室内壁面あるいは植物・床 面等によって1回以上反射した後に,再び植物・床面上 に到達した日射を温室内の2次日射と呼ぶことにする。 すなわち,2次日射量とは,通常,反射日射量といわれ ているものである。そうすると、3番目の内部因子と は、2次日射量を規定する因子のことで、温寒内壁面、 植物および床面の日射反射特性とそれらの3次元的な配 置に関する因子ということになる。なお,温室内の1次

źġ

日射と2次日射に対するインプットである外部日射が直 達日射であるか,天空日射であるかを区別する必要があ る場合は,それぞれを,直達1次日射,直達2次日射, 天空1次日射および天空2次日射とよぶことにする。ま た,直達1次日射と直達2次日射の和を全直達日射とよ ぶことにする。第1回に,上記3因子の関係が示されて いる。本報告では,主として,同図中にしめした内部因 子のひとつである被覆材内面での日射反射特性と2次日



- Fig. 1. Factors which influence the solar irradiation on the floor and plants in a greenhouse.
  - A : direct and diffused solar radiation
  - B : solar radiation reflected from surrounding surfaces
  - C : primary (or straight) solar radiation on the plants and floor in a greenhouse, which comes directly through covering meterials (diffused and/or non-diffused transmission).
  - D : secondary (or reflected) solar radiation on the plants and floor, which is reflected flom internal sulfaces of covering materials (specular and/or diffuse reflection).
- External Facters: sun's altitude, sun's azimuth, direct and diffused solar radiation, and solar radiation reflected from surrounding surfaces etc.
- Structural factors: geometry and orientation of a greenhouse, transmission characteristics of covering materials including condensed droplets and dirts on them, an arrangement of structural elements etc.
- Internal factors: geometry of a greenhouse, plants, and the floor, reflecting characteristics of covering materials, plants, and the floor.

射量との関係を検討する。

#### 3. モデルの概要

前節の第1図で検討したように、日射の温室内への透 過機構は、2次日射量まで含めて考えると、極めて複雑 なものとなっている。この複雑な機構を、その複雑さを 少しもそこなわずに数理モデル上に実現されることは現 実には不可能であり、また、それから得られる知識をも 考えあわせれば、必ずしも得策とはいえない。そこで、 今回のモデルの作成に当っては、簡単化のために次のよ うな仮定を置くことにした。

- 1. 床面および植物葉面の反射率はゼロとする。
- 2. 2次日射は直達日射のみについて考える。
- 3. 被覆材は非拡散性透過(正透過)をするものとする。
- 4. フレームの厚さはゼロとする。
- 5. 被覆材内面での日射は整反射(入射角=反射角)す るものとする。
- 6. 温室内における直達日射は2次反射まで考慮する。
- 温室の形態は、すべての側壁が床面に垂直な両屋根 切妻型単棟温室とする。
- 8. 周囲延物からの反射は無視する。
- 9. フレーム等の不透明構造物による2次日射量の減少 は、次節で述べる簡便法で推定する。
- 10. 直達光は完全な平行光線とする。
- 11. モデルは3次元的に取り扱う。

仮定1を置くことによって、1次日射と2次日射は完 全に切り離して取り扱うことができるようになる。すな わち,1次日射量と2次日射量を合わせた全日射量は, 1次日射量 2次日射量を別々に求めて、それらを加え 合せることによって求められるようになる。仮定2は, 2次日射量(反射日射量)における直達日射の重要性を 考えて,まず,直達日射だけを問題とした。仮定3は, ある条件のもとでは、あまり現実的なものとはいえな い。と言うのは、たとえガラスのような非拡散性の被覆 材であっても、それに水滴が附着すると、その水滴によ って透過日射の一部が拡散されるようになる から であ る。一般に,拡散透過は,2次日射を減少させると考え られるので、これについては、引き続き考究する予定で ある。仮定4も多少現実的でないきらいがあるこの仮定 を取り除くことは、それほど困難なことではないので、 続報においてその検討を行なう予定で ある。した がっ て、今回は、上記の仮定があまり問題とならない範囲内 での論議とした。

さて、上述の仮定1~11を置くと、温室内の植物群あ るいは床面に達する日射の到達径路は、大別すると、

- 8 ---



- - 第2図に、本報告で考慮された、これら7通りの日射 の到達径路が各1例づつしめされている。



Fig. 2. Schematic representation of direct solar radiation transmission through covering materials and its reflection in a greenhouse, which are considered in the present analysis.

$$\begin{array}{l} 1 a: R(t) \rightarrow P \\ 1 b: S(t) \rightarrow P \\ 2 a: R(t) \rightarrow S(r) \rightarrow P \\ 2 b: S(t) \rightarrow S(r) \rightarrow P \\ 2 c: R(t) \rightarrow R(r) \rightarrow R(r) \rightarrow P \\ 2 c: R(t) \rightarrow R(r) \rightarrow R$$

 $\begin{array}{c} 2 \text{ C: } R(t) \rightarrow R(t) \rightarrow F \\ 3 \text{ a: } R(t) \rightarrow R(r) \rightarrow S(r) \rightarrow P \\ 3 \text{ b: } S(t) \rightarrow S(r) \rightarrow S(r) \rightarrow P \end{array} \right)^{\text{irradiation}}$ 

where R, S, P, t, and r denote roof, sidewall, pl ants (or floor), transmission, and reflection, respectively.

# 4. 非拡散性被覆材で作られた温室内における直達2次日射量

温室内における1次日射量の理論的な求め方およびその具体的な計算方法については,第2報(1972a)で述

べてあるので,ここでは,2次日射量(反射日射量)の 求め方についてだけ述べることにする。

さて,以下の解析を簡単にするために,次のことに注 意する。

それは、計算の対象とする温室の形態を指定するため の,各ガラス板のエ,yおよび z 座標は、同じ形態の温室 に対しては、建設方位が異っていても、全く同じに与え れば良いということである。なぜなら、建設方位の差異 は、計算をする際に、その時の太陽方位を、基準となる 建設方位とその温室の建設方位との差だけ、見かけ上、 進め、あるいは、遅らせることによって、解消できるか らである。そこで、この節で考察の対象とする温室の基 準建設方位は東西とし、その北側の側壁はエ軸上に、ま た、東側の側壁は y 軸上にあり、温室の形態を指定す る、エ、y および z 座標は、すべて正または ゼロ とす る。すると、ある東西棟温室と同型の南北棟温室内の1 次日射あるいは 2 次日射を求めるには、各時刻の実際の 太陽方位を、計算時に、常にそれより90°進め、あるい は、遅らせれば良いことになる。

#### 4.1 側壁から入導する日射

この節では, 側壁から入射する直達日射の温室内にお ける2次日射量およびその日射を受ける床面上の位置を 求めるための解析式について述べる。

今,温室を構成する k 番目の短形側壁面の 4 つの端点 の, x, y および 2座標を, それぞれ,  $X_{kj}$ ,  $Y_{kj}$  および  $Z_{kj}$ (j=1~4) とし,それに対応するその時の床のx - y平面上へのその側壁面の影の 4 つの端点の x および y座 標を  $SX_{kj}$  および  $SY_{kj}$  (j=1~4) とすれば,

 $SX_{kj} = -Z_{kj} \cdot \cot H \cdot \sin A + X_{kj}$ 

 $SY_{kj} = -Z_{kj} \cdot \cot H \cdot \cos A + Y_{kj}$ 

(1)

の関係がある。ここで、Hは太陽高度、Aは太陽方位で ある<sup>4</sup>。ただし、各端点の高さを Z<sub>kj</sub>、南をy軸のプラ ス、西をx軸のプラスとする。

当然,(1)式で表わされる4点で点で囲まれる四辺形の 全面積が常に床面上にあるとは限らず,その1部分また は全部が床面外にある場合もある。そして,その場合に だけ,床面は,温室内壁面で反射された2次日射を受け ることになる。ここで,次の記号を設定し,上述したこ とを数式で表現すると,側壁が床面に垂直であることか ら,以下のようになる。

 $X_l = 温室の棟方向の長さ, Y_w = 温室の幅$  $X_{max} = \frac{max}{j} \{SX_{kj}\}, X_{min} = \frac{min}{j} \{SX_{kj}\}$  $Y_{max} = \frac{max}{j} \{SY_{kj}\}, Y_{min} = \frac{min}{j} \{SY_{kj}\}$ 

とすると、温室内壁面で1回だけ反射した後に、床面に 達する2次日射を受ける床面の範囲は、次の4つの場合 について、それぞれ、各項点の座標が $\{RX_{kj}, RY_{kj}\}$ (j=1, 4)で表わされる四辺形と床面全体の範囲を示す 4点( $X_{l}$ , 0),( $X_{l}, Y_{w}$ ),(0,  $Y_{w}$ ),(0, 0)からな る矩形との共通範囲(積集合)になる。

- 1.  $Y_{min} < 0 \mathcal{O} \geq \mathbb{F}, \begin{cases} x : RX_{kj} = SX_{kj} \\ y : RY_{kj} = -SY_{kj} \end{cases}$ 2.  $Y_{max} > Y_w \mathcal{O} \geq \mathbb{F}, \\\begin{cases} x : RX_{kj} = SX_{kj} \\ y : RY_{kj} = 2 \cdot Y_w - SY_{kj} \end{cases}$ 3.  $Y_{min} < 0 \mathcal{O} \geq \mathbb{F}, \qquad \begin{cases} x : RX_{kj} = -SX_{kj} \\ y : RY_{kj} = SY_{kj} \end{cases}$
- $\begin{array}{l} 4. \quad X_{max} > X_l \quad \mathcal{O} \succeq \gtrless, \\ \begin{cases} \mathbf{x} : \mathrm{RX}_{kj} = 2 \cdot X_l \mathrm{SX}_{kj} \\ \mathbf{y} : \mathrm{RY}_{kj} = \mathrm{SY}_{kj} \\ & (\mathbf{j} = 1 \sim 4) \end{array}$

 $X_{min} > 0$ ,  $X_{max} \ge 0$ ,  $X_{max} \le X_l$ ,  $Y_{min} \ge 0$   $\ddagger U Y_{max}$ ≦Ywの時は、2次日射量はゼロである。また、上の4 つの場合の2つ以上が同時に起きたときは、そのおのお のについて,別々に考える。たとえば,ある,{SXkj, SY<sub>kj</sub>} (j=1~4)の組では、 $X_{min} < 0$ かつ Y<sub>max</sub>>  $Y_w$  であったとすると、その時の2つの { $RX_{kj}$ ,  $RY_{kj}$ } の組、 すなわち、  $\{SX_{kj}, 2 \cdot Y_w - SY_{kj}\}$  と  $\{-SX_{kj},$ SY<sub>kj</sub>}からなる2つの四辺形の共通範囲は、2つの異な る壁面からの2次日射を同時に受けることになる。ま た,上記の4点 { $RX_{kj}$ ,  $RY_{kj}$ } (j=1~4) からなる 四辺形と床面との共通範囲が無い場合は、温室内壁面で 1回だけ反射した後に床面に到達する2次日射量はゼロ で、その場合は、内壁面で2回以上反射した日射が床 面に到達することになる。その時は、(1)式の、 {SXkj, SY<sub>ki</sub>} を, (2)式でえられた, {RX<sub>kj</sub>, RY<sub>kj</sub>} で置き代え て, その {SXkj, SYkj} を使って, (2)式から, もう一 度、{RX<sub>kj</sub>, RX<sub>kj</sub>} を求め, それと床面との共通範囲を とれば、それが、内壁面で2回反射した後に床面に達す る2次日射を受ける範囲となる。

次に,その範囲が受ける直達2次日射量 JRH<sub>k</sub>は,

1. 内壁面での反射が1回だけのとき,

 $JRH_k = JDH \cdot TG_k \cdot REF_k' \cdot (1 - FR_k) \cdot$ 

 $(1 - FR_{k'})$ 

2. 内壁面での反射が2回のとき,

 $JRH_k = JDH \cdot TG_k \cdot REF_k' \cdot REF_k''$ 

(1-FR<sub>k</sub>)・(1-FR<sub>k</sub><sup>'</sup>)・(1-FR<sub>k</sub><sup>''</sup>)
 となる。ここで, JDHは屋外水平面直達日射量, TG<sub>k</sub>は
 側壁番号kの, その時の入射角に対する日射透過率,

REF<sub>k</sub>、と REF<sub>k</sub>、は、それぞれ、透過した日射の1回 目および2回目の反射がおこる側壁番号k(およびk) の内壁面での日射反射率、FR<sub>k</sub>、FR<sub>k</sub>、FR<sub>k</sub>、は、それぞ れ、側壁番号 k, k、および k、の壁面のフレーム率であ る。ただし、各フレームの反射率と透過率は共にゼロで あるとする。フレーム等の不透明構造物による2次日射 量の減少量を、(3)および(4)式のような形で考慮すること は、厳密にいえば、正しくない。しかし、通常の温室の ように、各壁面ごとに見れば、フレームが、およそ等間 隔に配置されているとみなせる温室に対しては、上式 が、かなり良い近似値を与えるであろうことは容易に想 像できる。

側壁面が、矩形でなく、両屋根型温室の妻の部分のよ うに三角形の場合も、上に述べたのと同様の手順で、2 次日射を受ける床面上の範囲とその量を求めることがで きる。

以上の計算を,すべての側壁面について実行すれば, それによって,ある時刻の, 側壁から入射した直達日射 による,床面上の次日射量の分布を知ることができる。

#### 4.2 屋根から入射する日射

この節の目的は,屋根から入射する直達日射の温室内 における2次日射量を求めるための解析式を与えること である。屋根から入射した日射は,温室の屋根の傾斜角 SLOPE がその時の太陽高度Hよりも小さい時は,反対 屋根の内表面での反射は起こり得ない。すると,その時 の日射の到達径路は,第2図にしめしたうちのケース1 aとケース2aの2通りだけで,その場合の理論的取り 扱いは前節でのべた方法と全く同じである。他方,屋根 傾斜角 SLOPE が太陽高度Hより大きい時は,同図中の ケース2cおよびケース3aが起き,また,ケース2a についても,前節で与えられた式の若干の修正が必要と なる。

#### (a) 屋根→→側壁 (反射)→床面

最初に、ここでは、すでに(1)式によって、番号kの屋 根の直達日射による床面への投影を定める四辺形の端点  $\{SX_{kj}, SY_{kj}\}$  (j=1~4)、が与えられているとし、か つ、SLOPE-H>0であるとする。すると、その屋根か ら入射した日射の一部は反対側の屋根で反射され、残り は側壁で反射されるか、直接床面に達する。そして、そ の時、直接床面に達する日射を受ける範囲は、(1)式で定 められる四辺形と床面との共通範囲である。ところが、 屋根で1回反射されてから床面に達する日射の範囲は、 屋根が床面に対して直角でないために、その $\{SX_{kj}, SY_{kj}\}$  を(2)式によって単純に  $\{RX_{kj}, RY_{kj}\}$ , に変換し

(3)

ただけでは求められず,次のようになる。	
まず,(1)式で得られる SY <sub>kj</sub> を,小さい順に並べ換	
え,それらを、あらためて $SY_{k_1}$ , $SY_{k_2}$ , $SY_{k_3}$ および	
SY $_{k4}$ とし,その各SY $_{kj}$ (j=1~4)に対応するSX $_{kj}$	
$(j=1\sim 4)$ を、SX $_{k_1}$ 、SX $_{k_2}$ 、SX $_{k_3}$ およびSX $_{k_4}$ とする。	
すなわち,	
$\{SX_{kj}, SY_{kj}\} \ (j=1 \sim 4)$	
$(SY_{k_1} \leq SY_{k_2} \leq SY_{k_3} \leq SY_{k_4}) $ (5)	
とする。次に、	
$RS = -\cos A \cdot SIDE / \tan H $ (6)	
と置く。ここで,Aは太陽方位,SIDE は側壁の高さ,	
Hは太陽高度である。そして,	
$\mathbf{k}$ =北屋根 (north roof) ならば, $\mathrm{RD}$ = $\mathrm{Y}_w$ +RS として	
$SY_{k_3} = SY_{k_4} = RD \tag{7}$	
<b>k</b> =南屋根 (south roof) ならば, RD=RS として,	
$SY_{k1} = SY_{k2} = RD \tag{8}$	
と各 SY $_{kj}$ の値を変える。ここで, $Y_w$ は温室の幅であ	
る。次に,第3図にしめすように,	
$RA = SY_{k_4} - SY_{k_2}, RB =  SX_{k_4} - SX_{k_2} , RF = SY_{k_4} -$	
RD として,	
$RC = (RF/RA) \cdot RB \tag{9}$	
とする。そして、	
(A) $SX_{k_4}-SX_{k_2}>0$ のとき,	
SX $_{k_1} \ge 0$ ならば、	
$SX_{k4} \leftarrow SX_{k4} - RC$	
X	
f G(βγ,BZ) ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓	



Fig. 3. Schematic representation of  $\{SX_{kj}, SY_{kj}\}$ (j=1,2,3,4) where direct iradiation is through the glass roof k.

 $P_j$  and  $P_{j+4}$  (j=1~4) correspond to  $\{SX_{kj}, SY_{kj}\}$  (j=1~4) in  $E_q$ . (10) and Eq. (11), respectively.

(In this example, SLOPE-H>0, k= south roof,  $SX_{k4}\text{-}SX_{k2}\text{>}0$  and  $SY_{k1}\text{<}0.)$ 



と各 SX<sub>kj</sub>の値を変更し、これらの変換によってえられた、あたらしい {SX<sub>kj</sub>, SY<sub>kj</sub>}の組を、前節の(2)および (3)式に代入すれば、求める範囲と2次日射量が得られる。要するに、(10)式によって、屋根を透過した日射の床平面への投影の中から、その反対側の屋根で反射されることになる部分だけが取り除かれているのである。(10)式の意味を第3図でしめせば、点P3およびP4の*x*座標を、点P1およびP2の*x*座標からRCだけ滅じて求めていることになる。

(b) 屋根→→屋根 (反射)→→床面,および,

**屋根→→屋根(反射)→→側壁(反射)→→床面** 太陽方位,太陽高度および屋根の傾斜角が,それぞ れ,A,H,および SLOPE のとき,ある一方の屋根を透 過し,他方の屋根の内表面で1回反射した日射の床平面 への影 {SX<sub>kj</sub>, SY<sub>kj</sub>} (j=1~4)の**y**座標は,第3図 にしめすように,見かけ上は,太陽高度が(H+SLOPE) であるときの反対側の屋根の床平面への影によって定め られる**y**座標とひとしい。たとえば,3図において,点 P5およびP6の**y**座標は,

 $AY = -\cos A/\tan (H + SLOPE)$ 

とおくと、AY・RIDGE+Y $_w/2$  であたえられる。同様 に、点P7およびP8のy座標は、AY・SIDE であた えられる。また、たとえば、点P7およびP8のx座標 は、AX=-sin A/tan (H+SLOPE)とすると、それぞ れ、BX+AX・SIDE および BX+AX・SIDE+X $\iota$ であ たえられる。ただし、BX は、

 $BZ = Y_w \cdot \tan H \cdot \tan SLOPE / (\tan H + \tan SLOPE)$ + SIDE  $BY = BZ / \tan H$ 

としたとき,

 $BX = -tan A \cdot BY$ 

としてもとめられるものである。ここに, (BY, BZ) に よってさだめられる点は, 第3図中の点Gに対応してい る。

上に述べたことを,前節からの記号にしたがって,一

(10)

— 1**1** —

(11)

般的にあらわすと、  $SX_{k1} = AX \cdot RIDGE$   $SX_{k2} = SX_{k1} + X_{l}$   $SX_{k3} = AX \cdot SIDE + BX$   $SX_{k4} = SX_{k3} + X_{l}$   $SY_{k1} = SY_{k2} = AY \cdot RIDGE + Y_{w}/2$  $SY_{k3} = SY_{k4} = AY \cdot SIDE$ 

となる。ただし、SIDE は側壁の高さ、RIDGE は棟の 高さ、X<sub>l</sub> は温室の棟方向の長さ、Y<sub>w</sub>は温室の幅である (第3図参照)。すると、(11)式であたえられる四辺形の 頂点 { $SX_{kj}$ ,  $SY_{kj}$ } ( $j=1 \sim 4$ ), と床面の共通範囲は、 (3)式であたえられる2次日射量を受ける。そして、(11)式 でさだめられる四辺形のうち、床面外に出た部分は、側 壁内面で2回目の反射をした後に床面を照射し、その2 次日射量は、(4)式で与えられ、その2次日射量を受ける 範囲は、実際的には(11)式から求めた { $SX_{kj}$ ,  $SX_{kj}$ } e(2)式によって、{ $RX_{kj}$ ,  $RY_{kj}$ } に変換してえられる床平面 上の4点からなる四辺形と床面との共通範囲であるとみ なすことができる。

#### 5. 計算条件

計算の対象とした位置は北緯35°41′(東京)で,時期 は冬至である。したがって,その時の太陽赤緯は, -23 °27′となり,地球の動径(地球・太陽間の平均距離と実 距離の比)は,0.9836となる。また,大気の透過率は 0.75,太陽定数は 1,167kcal. m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> とした。

つぎに,今回の数値実験の主たる対象とした単棟温室 の外観およびその大きさを第4図にしめす。ただし,図 中の各長さは無次元化し,相対的な長さだけをしめして ある。

温室の建設方位は東西棟とした。この温室のフレーム 率は、およそ、屋根が13%、側壁が20%で、平均15%程 度になる。なお、建設方位を東西棟のみとしたのは次の 理由による。すなわち、温室内に反射板を設置する場 合、その反射板は、面積が大で、かつ、温室内に入射す る直達日射に対して影をつくらないような位置にあると 効果的となる。したがって、その位置は、温室の北側に 限られてしまい、北側に大面積の反射板を置けるような 建設方位は東西もしくはそれに近いもの以外になくなっ てしまう。

温室の被覆材としては、一応、ガラスを取り上げた。 ガラスの日射透過率および反射率と入射角の関係は、 Takakura et. al. (1969) を参考にして、ガラスの吸光 係数を0.45,屈折率を1.526,厚さを3mmとし、Fresnelの式から求めた。それによると、透過率(反射率)



Fig. 4. Sizes of the greenhouse used in the present simulation

length	10.0
width	4.0
height of sides	1.0
height of ridge	2.25
outer length of frames (for roof)	1.15
(for wall)	0.50
inner length of frames (for roof)	1.09
(for wall)	0.44
outer width of frames	0.50
inner width of frames	0.46
(dimensionless)	
slope of roof	32°
thickness of glass	0.003m.
extinction coefficient of glass	0.45
index of refraction of glass	1.526
number of grass sheets 23	30
reflectivity of reflective mirror	
(specular reflection)	0.8
East-West orientation	

は、それぞれ、入射角0°で 0.86 (0.08)、50° で 0.82 (0.12)、70°で0.65 (0.28)、80°で0.40 (0.54)、90°で 0.0 (1.0) 等々となる。

温室内壁面における反射条件としては,以下の4種を 考えてみた。

- 1)通常のガラスのみの場合:GG温室
- 2) 北側壁面においてのみ反射率80%の整反射し,その 他の内壁面では通常ガラスによる反射:AG温室
- 3)北屋根面においてのみ反射率80%の整反射:GA温 室
- 4) 北屋根面および北側壁面において完全整反射:AA 温室

ただし、上記のいずれの場合においても、フレーム等の 不透明構造物の反射率は、入射角によらずゼロであると した。ただし、その側壁面が反射板で作られている場合 は、そのフレーム率はゼロとし、その面は、日射の80% を整反射し、残りの20%はその面で吸収されるものとす る。

以上の各場合についての温室内床面における1次およ び2次直達日射量の差異を比較するために,おもに,次 の2点について検討してみた。1.日の出から日没までの 温室床面の各点における日積算全直達日射量。2.各時刻 の床面における平均全直達日射量。温室床面における各 時刻および日積算日射量の分布を求めるためには,床面 上に133の格子状に等間隔に配列された点を設け,各時 刻におけるそれら格子交点での日射量を求めるという方 法を採用し,その際の時間間隔は,1日間の計算回数を 100回程度にするために,5分とした。そして,積算日 射量は,日の出から日没までの各格子交点上の日射量 を,台形公式によって数値積分をして求めた。

なお,この節で,側壁の高さというときは,実際上 は,床面から軒までの高さではなく,(温室内の)植物 群落上層から軒までの高さを意味している。したがっ て,床面における日射量というときも,それは便宜上の 表現であって,実際は,温室内植物群落上層における水 平面日射量という意味でもちいることにする。

#### 6. 結果および考察

#### 6.1 直達日射平均透過率

第5図に,前節で述べた4種の東西棟温室における, 日の出後から正午までの、温室の平均直達日射透過率の 変化がしめされている。午後の透過率の変化は、正午を 軸に午前中と対称である。図中の縦軸は、屋外水平面直 達日射量に対する温室内床面平均直達日射量の百分率で ある。同図中の破線は、4種の温室に共通な直達1次日 射の透過率で、約63~71%の範囲にある。そして、通常 のガラス温室 (GG温室) においては、それに、屋外直 達日射量の10%前後の2次日射量が加わり、全直達日射 透過率は約70~80%となっている。そして、この透過率 の値は、北屋根面に反射板を設置したGA温室において も殆んど変わらない。その理由は、冬期、北屋根面に射 入する直達日射の入射角が終日、大きく、たとえ、それ がガラスであっても反射率が60~80%と高く、反射板の それと余り変わらないからである。ところが、北側壁内 面を反射板にしたAG温室の2次日射量は,屋外直達日 射量の25~45%にも達し、全直達日射透過率は約 105~ 120%になっている。

図から、AAおよびAG温室の日射透過率が正午に近 づくにつれて、低くなっているのがわかる。これは、太 陽高度が高くなるにつれて、北側壁の反射板からの2次 日射を受ける床面の範囲が、しだいにせまくなってくる ことによる。ただし、これらの計算値は、フレームの厚



Fig. 5. Daily variation of space averaged direct solar radiation transmission including its reflection in an East-west greenhouse showed in Fig. 4.

	north wall	north roof th	le others
×——× Туре ЛА	alumin:um foil	aluminium foil	g ass
●——● Type AG	alumin.um foil	glass	glass
△——△ Type GA	glass	aluminium foil	glass
□□ Type GG	glass	glass	g ass
mune transmissi	vity assuming n	o reflection	

さをゼロとし、ガラスは清浄であると仮定して得られた ものであるから、実際の温室のように、フレームの厚さ が3~5 cm あり、さらに、ガラスが汚れたり、水滴が 附着している場合には、上記の値より15~30%程度低い ことが充分予想される。とは言え、そのことは、反射板 をもちいない通常の温室についても言えることであるか ら、上述の仮定によって、反射板の効果までを過大に評 価したことにはならないだろう。フレームの厚さ、形お よび水滴の附着等の日射透過率におよぼす影響について は、引さ続き検討する予定である。

以上のことから,一般に,北側壁面の反射板に,冬 期,東西棟温室の2次日射量を増加させるの方法として かなり効果がある<sup>6</sup>といえる。他方,北屋根面の反射板 は,2次日射量の増加に効果が少ない上に,天空日射の 透過率をかなり低下させる原因となる。

#### 6.2 直達日射量の分布

---- 13 -----

第6図に、北側壁面のみに反射板のあるAG温室およ ひ通常のガラス温室であるGG温室の床面上における全 直達日射量が,屋外直達日射量に対する比として、しめ してある。同図から、GG温室では、2次日射を強く受 ける位置は、北側壁に極く近い範囲に限られていること がわかる。これは、その2次日射の殆んどが、第2図で 示したケース2 c  $\geq$  2 a によるものであるからである。

次に、同図の下側にしめされている北側壁内面を反射 板にしたAG温室についてみてみると、図中、北側壁の



Fig. 6. Cross-s tional distribution of daily integrat.d direct solar irradiation at the middle of the E-W house showed in Fig. 4. (the winter solstice, Tekyo)

- : primary (or straight) direct solar irradiation
- : secondary (or reflected) direct solar irradiation (the ratio of direct solar irradiation on the froor to the irradiation outside)

The ltters G and R denote glrass and reflect ve mirror, respectively

近くは10~126%とかなりの2次日射量を受けている。 特に,北側壁直下の床面における全直達日射量は,屋外 直達日射の2倍以上にもなっている。これは,この位置 が,午前9時午後3時にわたり,フレームの影になる時 刻をのぞいては,図2にしめした7種の到達径路のう ち,1a,2a,2cおよび3aの4種のそれからの日 射を同時に受けていることによる。しかしながら,南側 壁付近の床面における2次日射量はきわめて少なく,床 面における日積算日射量は著るしく不均一となってい る。

#### 6.3考察

前節でみたように,通常の形態の東西棟温室の北側面 に反射板を設置すると,温室内の平均日射量はかなり増 大するものの,その場所による分布の不均一性は著るし い。そこで,反射板を利用して,しかも,その不均一性 を少なくする方法としては次の2つを考えたい。一つ は,北側壁面の反射板をやや南に傾ける方法で,他は, 北側壁を更に高くする方法である。第1の方法は,日射 量分布の均一性を増すことには効果があるが,平均日射 透過率をも同時に増すことはほとんど望めない。次に, 第2の側壁を高くする方法であるが,第6図からわかる ように,2次日射を強く受ける床面は,北側壁から,側 壁の高さの約2倍の距離までである。したがって,この 側壁の高さを2倍にすれば,日射量の分布はほぼ均一に なることが期待できる。しかも,この場合は,反射板の



Fig. 7. Cross-sectional distribution of direct solar irdadiation in an Fast-West oriented greenhouse with reflective mirror on the north side wall

primary solar irdiadiation

secondary solar irradiation

sun's altitude:  $20^{\circ}(above)$  and  $30^{\circ}(below)$  frame ratio: 0.8

reflectivity of reflective mirror: 0.72 (specular reflection)

The value of AV is the space averaged ratio of direct solar irradiation (primary +secondary) on the floor to the irradiation outside at a given sun's altitude

--- 14 ----

面積も2倍になるから,平均日射透過率も高くなる。た だし,側壁の高さは高ければ高い程よいという訳ではな い。また,上述の第1の方法と第2の方法は排反するも のではなく,当然,それらを組み合わせて考えることも でき,さらに,反射板の傾斜角を太陽高度に応じて変え ることも考えられる。それでは,実際に,どのような形 態の温室が,反射板を使う上で,良いのかということに なると,今の所,その結論は得られていない。それは, 使用目的によっても異なるし,他の環境条件および経済 性等も考慮に入れて,総合的に検討してみなければなら ない。そこで,ここでは,比較的,実用的であると思わ れる温室の形態の1例を第7図にしめしておくだけにと どめることにする。

最後に,北側壁を反射板にした場合の温室の天空日射 透過率は,それがガラスである場合よりも,5%前後減 少することが古在(1972b)によってしめされている が,それは,我国の表日本のように,冬期の直達日射量 の多い地帯では,直達2次日射量の増加によって十分お ぎなわれ,実用上はほとんど問題にならないと思われ る。

#### 7. 要 約

本報告では,通常の ガ ラ ス 温室内の直達 2 次日射量 (反射日射量)の時間的,空間的分布を検討するととも に,日射の不足する冬期に,温室内において反射される 日射を有効に利用する ための方策を検討した。すなわ ち,温室内に反射板を置いた場合の日射量の増加の程度 を,その反射板を置く位置と温室の形態とに関連させて 検討し,その意義を明らかにしようと試みた。その結果 得られた結論の主要は次のようである。

1. 通常のガラス温室の東西棟における直達2次日射 量は,屋外直達量の10%前後である。ただし,その分布 はきわめて不均→である。

2. 通常の東西棟ガラス温室の北側壁内面に反射率80 %の整反射板を置くと,温室内の平均全直達日射量の1 日の積算値は,屋外のそれと同程度,あるいは,それ以 上になる。

3. 直達2次日射量の東西棟温室内における空間的分 布は、側壁の高さと反射板の傾斜角を適切に決めること によって、ほぼ、均一に近くすることができる。また、 北側壁に反射板を置くことによる温室内の天空日射量の 減少は、実用上、それ程問題とならない。

ただし、以上の結論は、フレームの厚さをゼロである とし、かつ、水滴の附着、汚れ等による被覆材の日射透 過率の減少、あるいは、透過時の日射の拡散はないと仮 定して得られた数値計算の結果であるから、現実の温室 でえられる平均的な値は、ここで得られた値よりも、相 対値にして15~30%程度低いものであることは十分想像 できる。その点と関しては、今後、考究する予定であ る。

終りに,この研究にあたって貴重な助言をたまわった 当研究室の研究員諸氏,千葉大学三原義秋教授,農電研 宮川逸平氏,兵庫農試森俊人氏に深甚の意を表する。特 に,本報告中の第7図にしめした温室の形態の着想は森 氏の示唆に負うところが多い。数値計算は東京大学計算 機センターの HITAC5020E を利用して行なった。

#### 引用文献

- Bowman, G.E., 1970: The transmission of diffuse light by a sloping roof. J. Agric. Engng. Res., 15, 100-105.
- Kingham, H.G., and Smith, C.V., 1971: Calculated glasshouse light transmission: the effects of orientation of single glasshouse. Exparimental horticulture. No. 22. 1-8.
- 古在豊樹、1970:温室内の日射量に関する研究(1). 農業気象.26,123-130.
- 4) 古在・杉, 1972 a: 温室内の日射量に 関する研究
   (2). 農業気象, 27, 105-115.
- 5) 古在豊樹, 1972 b: 温室内の日射量に関する研究. 東京大学博士論文. 350pp.
- 6) Manbeck, H.B. and Aldrich, R.A., 1967: Analytical determination of direct visible solar energy transmitted by rigid plastic greenhous s. Transactions of the ASAE., 564-567, 572
- 7) Nisen, 1962: Calculation of natural light for horticulture structure. (Fr.) Proceedings of International Horticultural Congress, 16th. (Vol. 4), 283-289.
- 8) Smith, 6. V., and Kingham H.G., 1970: A contribution to glasshouse design. Agr. Meteorcl.,
  β: 447-468.
- 9) Tekekure, T., Jordan, K.A., and Boyd, L.L., 1969: Dynamic simulation of plant Growth and environment in the greenhose. ASAE paper No. 69-942, ASAE St. Jos dh, Mich.

87

- 15 ----

#### Summary

Transmission of solar radiation into greenhouses is an important factor in greenhouse design. Factors which influence the solar irradiation in a greenhouse can be divided into three groups. They are external, structual, and internal factors (see Fig. 1).

This paper describes an analytical method for calculating the direct solar irradiation in an isolated gable roofed greenhouse. The effect of the first and second order internal reflection in a greenhouse is taken into consideration. The effect of incident angle on the reflectivity and the decrease of the solar radiation due to the shading effects of the structural elements have also been taken into account in the computational model. But the thickness of the structural elements, the decrease of transmissivity due to dirts on covering materials, and diffuse transmission (reflection) due to water droplets condensed on them are neglected. The calculation, therefore, may include some overestimations for an actual greenhouse.

The computational procedure was programmed for a computer, and was applied to four types of East-West crient d greenhouse: one of which is a usual glasshouse and the others are a glasshous with reflective mirror on the wall and/or roof. Calculations were made for the winter solstice at  $35^{\circ}$  latitude for use at Tekyo and smilar latitudes. The total direct solar radiation received by the floor of the house is assessed by summing the primary (or straight) and secondary (or reflected) direct solar radiation contributed by each wall and roof suface separately (see Fig. 2).

The following cnoclusions were obtained:

- 1. The ratio of the daily integrated secondary solar irradiation on the floor to the direct irradiation cutside is about 0.1 for a usual glasshouse placed in East-West orientation. But its distribution on the floor is not uniform.
- 2. The average total direct solar irradiation on the floor in an East-West oriented glasshouse with reflective mirror on the north side wall is more than the direct solar irradiation outside.

--- 16 ----