

温室の光透過に関する数値実験 (第1報)

| | |
|-------|------------|
| 誌名 | 農業氣象 |
| ISSN | 00218588 |
| 著者 | 古在, 豊樹 |
| 巻/号 | 29巻3号 |
| 掲載ページ | p. 179-187 |
| 発行年月 | 1973年12月 |

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



温室の光透過に関する数値実験（第1報）

古 在 豊 樹

(大阪府立大学 農学部)

Numerical Experiments on Light Transmission in Greenhouses (1)

Toyoki KOZAI

(College of Agriculture, University of Osaka Prefecture, Sakai, Osaka, Japan)

1. はじめに

温室の構造要素（棟木、垂木、フレーム等）の配置、すなわち、温室の骨組み構造は、第一義的には、構造力学的観点から決定されるべきであろうが、それは、また、温室内への日射透過およびその分布にも大きな影響をおよぼす。さらに、温室内日射量の多少は、温室内気温、湿度、炭酸ガス濃度等の他の環境条件、ひいては、温室内作物の生長そのものに強く関連している。したがって、実際に温室の骨組み構造を決定するときには、その構造は、構造力学的観点と合わせて、環境工学的にも十分検討されなければならない。

温室内の日射量は時間的にも空間的にもきわめて不規則に変化するために、少ない測定例から帰納的に、ある普遍的な結論を導くことは困難なことが多い。他方、温室内への日射の透過機構そのものは、原理的には、幾何光学の問題に帰着する面が多く、その理論的定式化の学術上の困難は、2, 3の問題を除いては、それ程ない。ただし、それによって得られる数式から、現存する温室内の日射量を数値的に算定するための計算手順はかなり複雑で、その数値計算は電算機を利用してのみ実現可能となる。

このような観点の下に、近年、電子計算機を利用して、温室内日射量を数値実験的に求めようとする試みがいくつか行なわれている（Bowman 1970, Kimball 1973, Kingham and Smith 1971, Manbeck and Aldrich 1967, Nisen 1962, Takakura, Jordan and Boyd 1969）。著者らも同様な試みを行ない、温室の構造・形態・建設方位と日射量分布、温室内における日射の反射ならびに反射鏡による温室内日射量の増大効果、拡散および非拡散性被覆材で覆った温室内の天空日射量分布な

どに関して検討し、いくつかの知見を得て来た（古在 1970, 古在・杉1972 a, 1972 b）。そして、現在も、温室内の日射量を総論的、且つ普遍的に把握するために、理論の精密化への努力が、何人かの研究者によって、なされつつある。ところが、それから得られる結論は、きわめて複雑な計算の後にはじめて得られるものであるために、我々の直感に馴染みにくいものが少なくない。とは言え、それらの結果は、幾何光学的な基本的関係の幾つかの組み合わせによって得られるものであるから、それら基本的関係をよく把握しておけば、理解し易い。そして、実際の温室の設計・利用に際して重要なことは、それら基本的関係の十分な理解であろう。そこで、本報告では、温室を構成する基本要素の解析方法およびその解析から得られるいくつかの基本的事実について述べ、温室の設計・利用に際しての基礎資料の一つを提供しようと思う。ただし、今回は、直達日射についてのみ論じ、温室の被覆材はガラスのような非拡散性のものについてのみ考えることにする。また、実際の温室への理論の適用およびその結果については、続報において述べることにする。

2. 温室壁を構成する基本要素

温室外表面に到達した日射は、椽・柱などの不透明構造物およびガラス等の被覆材によって、その一部は反射・吸収され、その残りが温室内へ入射する。そこで、温室内への日射透過機構を解明するための基本単位として、図1に示したモデルを考え、これを温室壁面を構成する基本要素、あるいは単に、基本要素と呼ぶことにする。基本要素はひとつのフレームとその内側または外側に張られた被覆材からなるが、それらを、各々、フレーム要素（あるいは単にフレーム）、被覆材要素と呼び、また、フレームを構成する四辺の材の各々を構造要素と呼ぶことにする。基本要素は温室壁面の一区画に相当

昭和48年4月4日 全国大会で発表

// 48年9月20日 受理

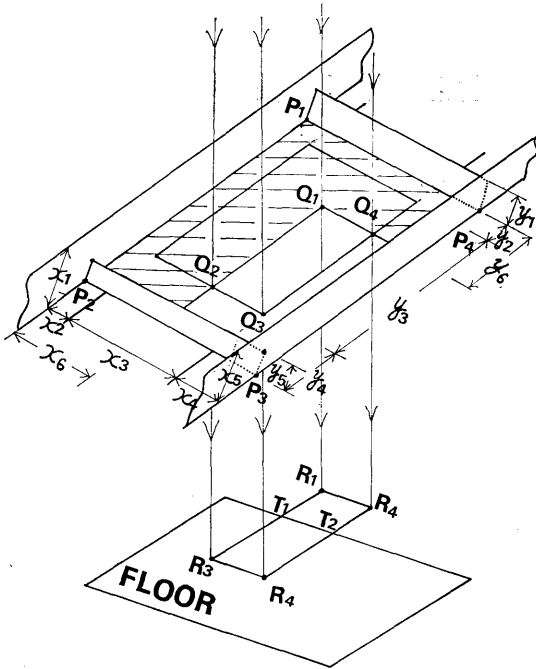


Fig. 1 Schematic illustration of a fundamental element (a frame with a glass sheet) constructing greenhouse walls.
 glass area= $x_3 \cdot y_3$
 sunlit glass area=rectangle $Q_1Q_2Q_3Q_4$
 sunlit floor area=parallelogram $T_1R_3R_4T_2$

し、同図中に示した諸元およびそのフレームの傾斜角、傾斜方位などによって特徴づけられる。ただし、フレームの四辺を構成する各々は厚さ（同図中の x_1, x_5, y_1, y_5 ）は有限であるが、幅はゼロであるとする。したがって、実際の温室の各壁面は、これら基本要素がある間隔毎に並んでいることになり、その間隔がその構造要素の幅を表現することになる。また、同図中の x_2, x_4, y_2 、および y_4 は被覆材の固定材料（たとえば、ガラスを固定するために使われるパテ）あるいは構造要素の断面形がそのようになっているものを表現したものであるが、それを無視し得る場合は、その長さはゼロであるとする。なお、基本要素を構成するフレームとしては、図1のような矩形フレームの他に、例えば、三角形フレームなどがあり、また、ただ一つの構造要素だけからなる基本要素などもあるが、その理論的取り扱い、矩形のそれと同様であるので、ここでは、その説明を省略することにする。

3. 基本要素の直達日射透過率

基本要素の表面上に到達した日射の一部は、フレーム

とガラスによって反射、吸収され、その残りが基本要素を透過する。図1に示した例では、面積が $x_3 \cdot y_3$ であるガラス面の一部——四角形 $Q_1Q_2Q_3Q_4$ ——だけが直達日射を透過し、残りのガラス面はフレームの影になっているので直達日射は到達しない。したがって、基本要素の日射透過率 $TR(\%)$ は、ガラスの日当たり面積率 $(\%)$ を SF 、その時のガラスの日射透過率 $(\%)$ を TG とすれば、

$$TR = SF \cdot TG / 100 \quad (1)$$

と表わされる。

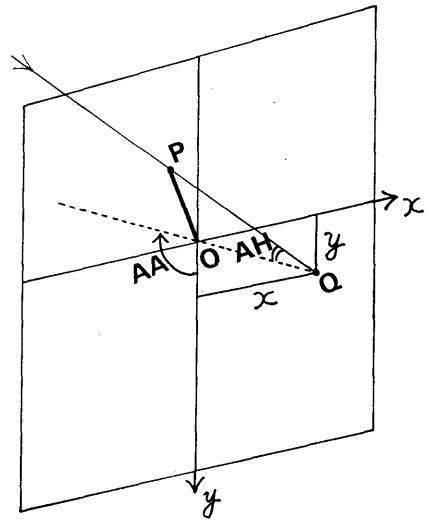


Fig. 2 The x, y coordinates of the point Q which is the shadow of the top of the pole perpendicular to a tilted surface.
 AA and AH denote sun's azimuth and sun's altitude expressed relative to the surface, respectively.

ガラスの日当たり面積率を求めるには、図1の x_6 と y_6 が分かれば良い。これは、傾斜面に垂直に立つ棒の先端の影の位置を、図2のような幾何学的関係から求める問題に帰着する。同図中の AH, AA はそれぞれ斜面を基準にした太陽高度と太陽方位である。

基本要素を透過した日射を受ける床平面上の範囲は、図1の四角形 $Q_1Q_2Q_3Q_4$ と太陽との位置関係によって定められる。そして、その範囲と床面との共通部分（床面受照部、図1の四角形 $T_1R_3R_4T_2$ ）が受ける単位面積当りの水平面直達日射量 JID は、

$$JID = JDH \cdot TG / 100 \quad (2)$$

と表わすことができる⁵⁾。ここで、 JDH は屋外水平面直達日射量である。実際に、 SF, TG などを求める手順はかなり複雑であるが、その概要を次節で述べる。

4. 計算手順

本節では、太陽位置、日当り面積率、ガラスの日射透過率、および屋外水平面直達日射量の算定方法の概略を述べる。なお、本節中の諸式の一部は、Takakura et al. (1969), 松尾ら (1972), 木村ら (1972) から引用した。

4.1 太陽の位置³⁾

4.1.1 計算に必要なデータ

MO: 月, MD: 日, LA: 前月の末日の通し番号,
L: 緯度, LN: 経度, TS: 時刻 (中央標準時)

4.1.2 計算順序

1) 1年通し番号の日

$$LD = LA(MO) + MD$$

2) LD を1年周期のラジアンに直す

$$W = 2\pi LD / 366$$

3) 太陽の赤緯を求める (近似式)

$$D = 0.3622133$$

$$-23.24763 \cos(W + 0.1532310)$$

$$-0.3368908 \cos(2W + 0.2070988)$$

$$-0.1852646 \cos(3W + 0.6201293)$$

4) 均時差を求める [h] (近似式)

$$E = -0.0002786409$$

$$+0.1227715 \cos(W + 1.498311)$$

$$-0.1654575 \cos(2W - 1.261546)$$

$$-0.00535383 \cos(3W - 1.1571)$$

5) 太陽時による時角 (ラジアン) を求める

$$T = (15\pi (TS - 12 + E) + L - 135) / 180$$

6) 太陽高度Hと太陽方位A

$$H = \sin^{-1}(\sin L \sin D + \cos L \cos D \cos T)$$

$$A = \sin^{-1}(\cos D \sin T \sec H)$$

4.2 日当り面積率と床面受照部

4.2.1 計算に必要なデータ

点 P_j ($j=1 \sim 4$) の x, y および z 座標 (図1)

x_i, y_i ($i=1 \sim 5$) の寸法 (図1)

AG: フレームの方位角, TH: フレームの傾斜角

H: 太陽高度, A: 太陽方位

(AG, TH および x_i, y_i の一部は P_j から導出できる)

4.2.2 計算順序

1) 傾斜面を基準にした太陽高度AHと太陽方位AA。ただし、太陽方位は、 y 軸 (最大傾斜線下向方向) を始線として、面の表から見て、時計回りに計るものとする (図2)。

$$AH = \sin^{-1}(\cos TH \sin H + \cos H \sin$$

$$TH \cos(A - AG) \quad (3)$$

$$AA = \cos^{-1}((\cos TH \cos(A - AG) \cos$$

$$H - \sin TH \sin H) / \cos AH) \quad (4)$$

2) 傾斜面に垂直に立てられた長さ1の棒の影の先端Qの x, y 座標 (図2)

$$x = -\cot AH \sin AA \quad (5)$$

$$y = -\cot AH \cos AA \quad (6)$$

3) x, y の正負の判定を行ない、どの構造要素がガラス面に落すかを見い出す。ここでは、それが x_1 と y_1 であると仮定するが、他の場合も同様に扱える。

4) ガラス平面上への影の長さ (図1)

$$x_6 = x_1 \cdot x$$

$$y_6 = y_1 \cdot y$$

5) ガラスに日当り部分が出る場合の判定⁵⁾

$$x_3 + x_2 > x_6 > x_2 \quad y_3 + y_2 > y_6 > y_2 \quad \text{のとき}$$

6) 日当り面積率 (%)

$$SF = 100 (x_3 + x_2 - x_6)(y_3 + y_2 - y_6) / (x_3 \cdot y_3) \quad (7)$$

7) 四角形 $Q_1Q_2Q_3Q_4$ の頂点座標 (QX_j, QY_j, QZ_j , ($j=1 \sim 4$)) を求める (図1)。

8) 四角形 $Q_1Q_2Q_3Q_4$ の床平面上への投影である四角形 $R_1R_2R_3R_4$ の頂点座標 (RX_j, RY_j) ($j=1 \sim 4$) を求める。

$$RX_j = -QZ_j \cot H \sin A + QX_j$$

$$(j=1 \sim 4) \quad (8)$$

$$RY_j = -QZ_j \cot H \cos A + QY_j$$

$$(j=1 \sim 4) \quad (9)$$

9) 四角形 $R_1R_2R_3R_4$ と床面との共通部分 (四角形 $T_1R_3R_4T_2$) を求める (図1)。

4.3 ガラスの日射透過率¹²⁾

4.3.1 計算に必要なデータ

n : ガラスの屈折率, l_g : ガラスの厚さ

α : ガラスの吸収係数

ϕ : ガラスに対する直達日射の入射角 ($=\pi/2 - AH$, (3式))

4.3.2 ガラスの日射透過率 (%)

$$TG = 100(1 - \tau)^2 b / (1 - \tau^2 b^2) \quad (10)$$

ここで

$$b = \exp(-\alpha \cdot l_g')$$

$$l_g' = l_g / ((1 - \sin^2 \phi) / n^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\tau = 0.5 (\sin^2(\phi - \phi') / \sin^2(\phi + \phi')$$

$$+ \tan^2(\phi - \phi') / \tan^2(\phi + \phi'))$$

$$\phi' = \sin^{-1}(\sin \phi / n)$$

4.4 基本要素の直達日射透過率

$$TR = SF \cdot TG / 100 \quad (11)$$

4.5 屋外水平面直達日射量

4.5.1 計算に必要なデータ

JZ : 太陽定数, P : 大気の日射透過率

H : 太陽高度, W : 1年の通し番号の日を1年周期のラジアンに直したもの(第4.1.2節の2)参照)

4.5.2 計算順序

- 1) 地球の動径の2乗 r_s (地球・太陽間の実距離と平均距離の比の2乗) を求める (近似式)

$$r_s = \frac{a_0}{2\pi} + \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^{11} 0.001 \cdot a_i \cos(iW)$$

ただし, $a_0=6.2776$, $a_1=-105.06$, $a_2=2.958$, $a_3=-0.194$, $a_4=0.983$, $a_5=-0.333$, $a_6=-1.131$, $a_7=0.972$, $a_8=1.207$, $a_9=-0.080$, $a_{10}=-0.531$, $a_{11}=-0.613$

- 2) 屋外水平面直達日射量

$$JDH = (JZ/r_s) \cdot P \cdot \text{cosec} H \cdot \sin H \quad (12)$$

5. 空間に位置する線分の影の動き

本節では, 単位長さの線分(幅も厚さもゼロの一本の材, これも基本要素の特殊な一例である)を考え, その床平面上への影の動き方を, 太陽位置と関連させて調べてみよう。それらの影の動きは, 温室内日射量の空間的・時間的分布と強く関連している。

単位長さの線分は空間上にいかようにも配置できる

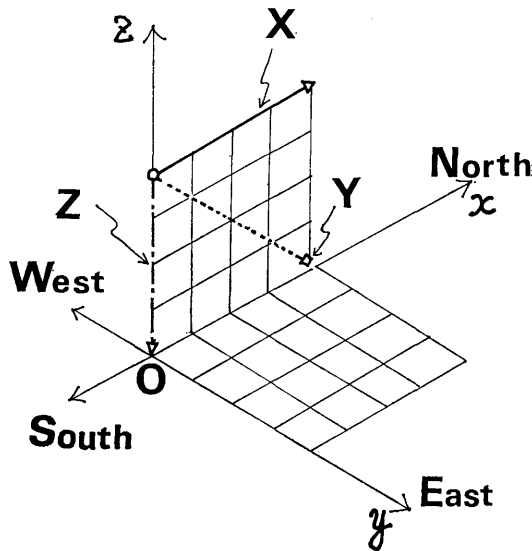


Fig. 3 An arrangement of segments of lines used in this analysis.

- X: Parallel to a floor plane, N-S oriented,
- Y: Parallel to a floor plane, E-W oriented,
- Z: Perpendicular to a floor plane.

が, ここでは, それらの基本となるものとして, 図3に示した3種を取り上げる。すなわち, 床平面上に平行で南北方向, 床平面上に平行で東西方向, および床平面上に垂直の3種である。3つの線分は点(0, 0, 1)で一点に会し, この点の床平面上への影の x, y 座標は, 太陽高度と太陽方位が分かれば, (5)および(6)式から求められる。同様に, 同図中の線分XおよびYの他端の x, y 座標は, それぞれ, $(1+x, y)$, $(x, 1+y)$ で表わされる(8), (9)式参照)。

図4に, 計算結果の一例が図示されている。これは, 東京における9時から15時(真太陽時)までの, 各線分の影を, 冬至, 春分および夏至について示したものである。なお, 図中の数字は, 時刻あるいは原点からの距離を示す。図から明らかなように, 一日間を通じて床平面上に最もむらなく影を作るのは線分X, 次いで, Z, Yの順である。特に, 線分Yの影は, 春分においては, 一日中, 同一直線上を動き, 床平面上に影の出来る部分と

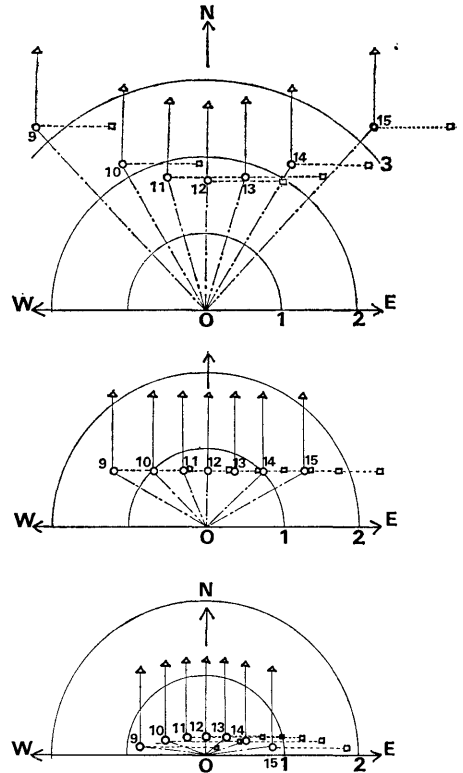


Fig. 4 Daily changes of the shadows of the segments of a line shown in Fig. 3 (at Tokyo).

- upper: the winter solstice
- middle: the spring equinox
- lower: the summer solstice

出来ない部分が極端に分かれる。したがって、実際の温室において、温室の南側の側壁、屋根面などに東西方向の床面に平行な構造要素があると（それが太くて長い場合は特に）、それは温室内日射量分布の不均一性を増大させる大きな原因のひとつになる。

図4の線分の影の動きから、実際の温室の基本要素の床面上における影の動きがおおよそ理解できるであろう。一般に、最も日射が強い時間帯に影になっている部分の一日間の積算日射量は他の場所に比してかなり少なくなることが予想される。

6. 基本要素の直達日射透過率

本節では、前節の考察を一步進めて、第3節で定義した基本要素の直達日射透過率を基本要素の諸元、太陽と基本要素との位置関係、ガラスの日射透過特性などと関連させて明らかにする。

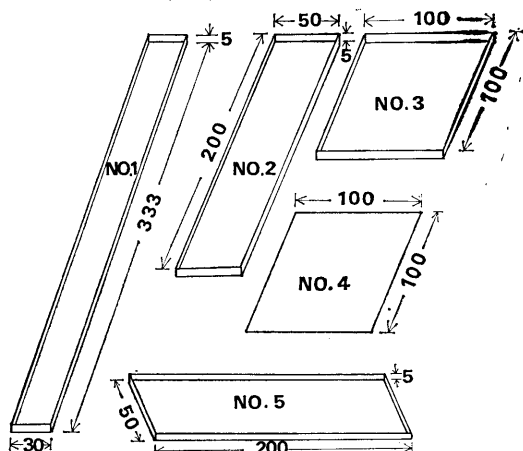


Fig. 5 Dimensions of fundamental elements used in this analysis.

図5に、本節で解析の対象とされる基本要素の諸元が、また図6には、ガラスの日射透過特性が与えられている。ただし、解析の複雑さを避けるために、基本要素は、図1の基本要素を簡略化して、幅、長さおよび厚さだけを持つものとした。基本要素の諸元としては、同図に示した5種を選んだ。No. 1とNo. 2は傾斜方向に長辺を有し、No. 5はNo. 2と同形で傾斜方向に短辺を有する。No. 3とNo. 4は正方形であるが、No. 4はフレームの厚さがゼロ、すなわち、ガラスだけからなる基本要素である。実際の温室で使われるフレームの形としてはNo. 2が最も一般的であろう。ガラスの日射透過率は一般に、第6図に見られるように、入射角が60°を越えると急激に減少する。同図中に示したものは、Takakura *et al.* (1969)を参考にして、(10)式中の n ,

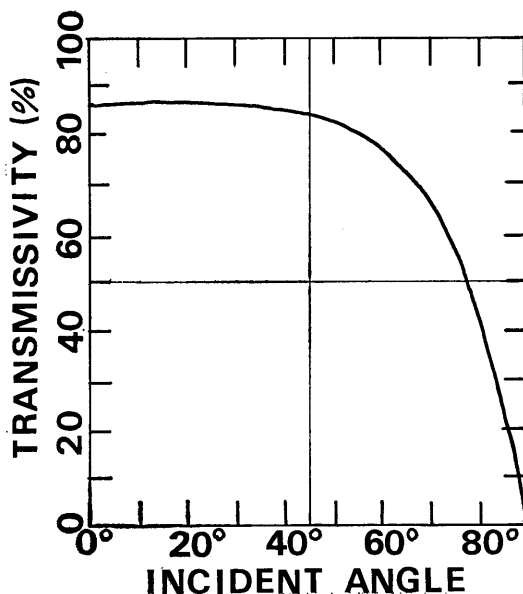


Fig. 6 Transmissivity for a glass sheet used in this analysis.

α , l_g を、各々、1.526, 0.45, 1/8インチ (= 3 mm) として得られたもので、汚れのないガラスに関する標準的な値である。

6.1 日当り面積率

図7は、図4に示した諸元を有する基本要素の日当り面積率 SF を太陽高度と太陽方位の関数として表わしたものである。ただし、太陽方位は基本要素傾斜面を基準にして計られている。同図から、太陽高度40°以下のときの SF は太陽方位・太陽高度によって大きく変化することが分かる。また、太陽方位による SF の変化率は基本要素の SF の形状によって異なる。開口部が正方形の基本要素の SF は太陽方位が変わってもあまり変わらないのに比して、開口部が長方形のもの SF は太陽方位によって大きく変化する。ただし太陽高度が40°以上になると、太陽方位に関係なく、いずれの基本要素の SF も0.9以上となり、太陽方位・太陽高度による SF の差が小さくなるので、それらに対する SF の値は同図中には図示されていない。なお、基本要素No. 5の SF の曲線は、No. 2の SF 曲線を太陽方位±45°を軸に反転した曲線に等しく、また、No. 4の SF はすべての太陽方位・太陽高度に対して、1となる。

以上の事実から、実際の温室においても、フレームの厚さが、温室内への日射透過を強く制限していることが理解できる。そして、その制限の度合は、フレームの厚さおよび開口部分の面積が同一であっても、開口部分の

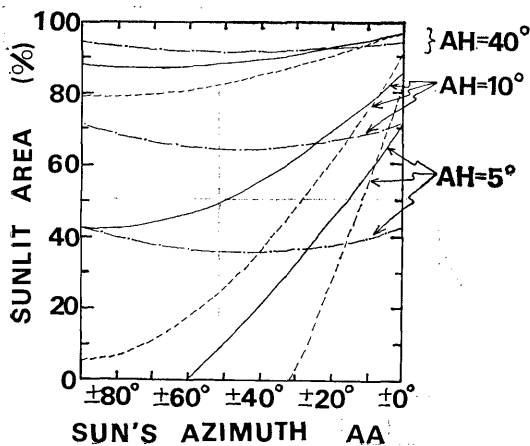


Fig. 7 Relation between the ratio of sunlit area to the total glass area and the position of the sun relative to the glass.

..... No. 1 in Fig. 5

———— No. 2 in Fig. 5

- · - · No. 3 in Fig. 5

AA and AH denote sun's azimuth and sun's altitude expressed relative to the glass, respectively.

形状によって異なる。ところが、従来、温室内への日射透過の減少割合を表現する指標のひとつとして良く使われている。いわゆる、フレーム（減光）率は、フレームの幅だけを考慮したもので、その厚さを無視している。このことは、すべての太陽方位・太陽高度に対して、また、いかなる形状の基本要素についても SF を100%であると仮定することであるから、それは温室内への日射透過を制限する因子としてのフレームの影響を過少評価することになる。

6.2 基本要素の直達日射透過率

図8は、図6に示した各種基本要素の直達日射透過率を太陽高度と太陽方位の関数として表わしたものである。したがって、これは図7の各太陽高度・太陽方位に対する日当り面積率にその時のガラスの直達日射透過率を乗じたものである。図7と図8を比較して見ると、基本要素に対する太陽高度が高いときは、日当り面積率と日射透過率との間にそれ程差異が無いが、太陽高度が低いときの両者の差異は著しいことが分かる。これは太陽高度が低いとガラス面への日射の入射角が大となり、ガラスの日射透過率が急激に小さくなるために、その時の日当り面積率が大きであっても、基本要素としての日射透

過率は小さくなるからである。同図中の破線は基本要素 No. 4 の日射透過率であるから、これはガラスの日射透過率そのものになる。それゆえ、各太陽位置に関して、破線と他の基本要素との透過率の差はその基本要素のフレームの厚さに帰因する透過率の減少を表現している。

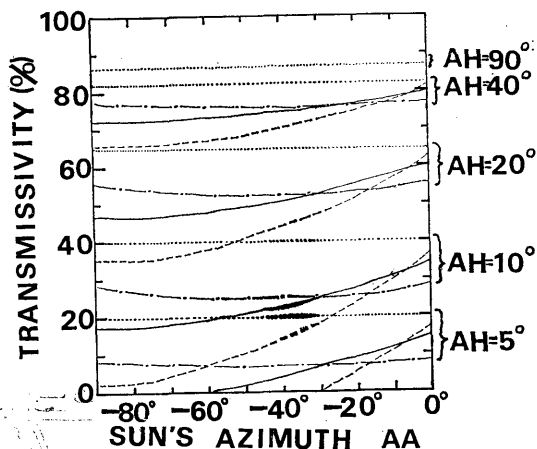


Fig. 8 Transmissivity for fundamental elements as a function of position of the sun relative to the glass sheet.

----- No. 1 in Fig. 5

———— No. 2 in Fig. 5

- · - · No. 3 in Fig. 5

..... No. 4 in Fig. 5

次に、正方形の基本要素 No. 3 (図中の一点鎖線の) 透過率は太陽方位に殆ど依存せず、しかも、太陽方位が $\pm 20^\circ$ の範囲を除いては、その透過率が他のそれに比して高いことは注目して良いだろう。これは、図7に見られるように、正方形フレームの日当り面積率が太陽位置に殆んど依存しないことによる。この事実は、フレームの形状を決定する際に考慮すべきことであろう。

6.3 日射透過率の日変化

前項では各種基本要素の直達日射透過率を、基本要素を基準とした太陽位置と関連させて、一般的に検討したが、本項では、特定の基本要素の日射透過率が一日の太陽の動きにつれてどのように変化するかを見てみよう。例としては、図5の No. 4, すなわちガラスだけからなる基本要素, No. 2 および No. 2 と同形で横に長い No. 5 の3種を取り上げる。また、各基本要素の傾斜方位は南とし、傾斜角は 90° すなわち、地面に垂直とする。

図9は上記基本要素の、冬至と夏至における、日射透過率と屋外水平面直達日射量の日変化をしめしたものである。ただし、屋外水平面直達日射量は、夏至および冬至の大気の日射透過率 P を、それぞれ、0.66, 0.73とし

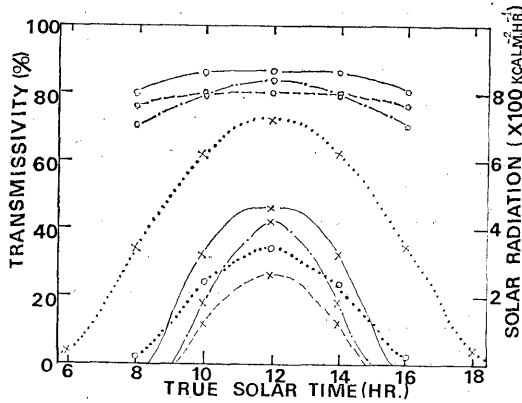


Fig. 9 Diurnal variations of transmissivity for fundamental elements shown in Fig. 5. (Tokyo)

- · - · No. 2 in Fig. 5
 ——— No. 4 in Fig. 5
 - - - - No. 5 in Fig. 5
 ······ direct solar radiation incident upon a horizontal surface
 Open circles and crosses denote winter solstice and summer solstice, respectively.

て、(12)式から求めた。同図の夏至における各基本要素の透過率が朝夕でいずれもゼロであるのは、その時刻にはそれらの面に直達日射が当たらないからである。同図から、前述の傾斜角と傾斜方位を有する上記基本要素の透過率は、冬至と夏至では著しい差異があることが分かる。例えば、基本要素 No. 2 (一点鎖線) の正午における透過率は、冬至では82%, 夏至では42%である。他方、その時刻の屋外水平面直達日射量は冬至では $340 \text{ kcal m}^{-2}\text{hr}^{-1}$, 夏至では $720 \text{ kcal m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ である。したがって、この基本要素を透過した日射を受ける床面受照部の水平面日射量は冬至では $279 \text{ kcal m}^{-2}\text{hr}^{-1}$, 夏至では $302 \text{ kcal m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ となり余り差が無い。しかし、No. 2はその差が現われにくいたて長の基本要素であり、横長のNo. 5 (図中の破線) では、上述の現象は更に顕著になる。勿論、図9は南向きの、垂直な基本要素についてのみの結果であるから、その差異が、直接、温室全体の透過率と結びつく訳ではない。しかし、同図は、東西棟温室の透過率が冬に高く夏に低いという実験的・理論的結果を説明する根拠のひとつとなるだろうことは容易に想像できる。

7. 要 約

温室の不透明構造物の配置、すなわち、温室の骨組み

構造は、温室内日射量の時間的・空間的分布に大きな影響をおよぼす。本報告は、温室の骨組み構造と温室内日射量の関係を基礎的・解析的に考察し、更に、若干の計算例を与えたものである。ただし、今回は直達日射についてのみ論じ、被覆材はガラスのような非拡散性のものについてのみ解析した。

温室内への日射透過機構を解明するための基本要素としては、被覆材が張られたひとつのフレームを考え、実際の温室はこの基本要素が或る間隔毎に並べられることによって構成されているとした。そして、基本要素の諸元、太陽位置等の要因が基本要素の直達日射透過率におよぼす影響の正確な把握につとめた。その結果次のようなことが明らかになった。

1. 温室の南側壁および南屋根に位置する東西方向の床面に平行な構造要素は温室内積算日射量分布の空間的不均一性を増大させる。他方、南北方向の床面に平行な構造要素は積算日射量分布の空間的均一性をそれ程乱さない。
2. フレーム開口部面積 (ガラス面積) が 1 m^2 で、フレーム材の厚さが 5 cm の基本要素において、フレーム材の厚さに帰因する透過日射量の減少率は20~30%に達することがある。
3. 基本要素の直達日射透過率は、フレーム面積、フレーム材の厚さが同一でも、その開口部分の形状によって大きく異なり、概して、正方形の基本要素のそれの方が長方形のそれより10%前後高い。
4. 南向きに地面に垂直に立てられた基本要素の直達日射透過率は、フレーム材の厚さを考慮すると、正午において、冬至では82%, 夏至では42%となり、その基本要素を透過した日射を受ける植物は、冬至でも夏至でも、ほぼ同じ強さの日射量を受ける。

実際の温室への理論の適用およびその結果については続報において述べる予定である。

終りに、本研究にあたって貴重な助言をたまわった当研究室矢吹万寿教授、東京大学杉二郎名誉教授、千葉大学三原義秋教授、東京大学松尾陽助教授に深甚の謝意を表す。特に、松尾助教授には東京大学大学院の講義を通じて、多くの有益な示唆をいただいた。例えば本報告中の第4節の(4)式は氏の導出した未発表の式を引用させていただいたものである。

数値計算は大阪府立大学計算センター TOSBAC 3400 を利用して行なった。関係各位に誠意を表す。

引用文献

- 1) Bowman, G.E., 1970: The transmission of dif-

- fuse light by a sloping roof. *J. Agric. Engng. Res.*, (15). 100—105.
- 2) Kimball, B.A., 1973: Simulation of the energy balance of a greenhouse. *Agr. Meteorol.* (11). 243—260.
 - 3) 木村・石野, 1972: 電算機による動的負荷計算法, 空気調和・衛生工学, (46), 215—250.
 - 4) Kingham, H.G., and Smith, C.V., 1971: Calculated glasshouse light transmission: the effects of orientation of single glasshouse. *Experimental horticulture*. No. 22. 1—8.
 - 5) 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.
 - 6) 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.
 - 7) 古在・杉, 1972 b: 温室内の日射量に関する研究(3)農業気象, (28), 79—88.
 - 8) Manbeck, H.B. and Aldrich R.A., 1967: Analytical determination of direct visible solar energy transmitted by rigid plastic greenhouses. *TRANSACTIONS of the ASAE.*, 564—567 and 572.
 - 9) 松尾・近藤, 1972: 日照面の算法. 建築学会学術講演梗概集.
 - 10) Nisen, A., 1962: Calculation of natural light for horticultural structure. (Fr.) *Proceedings of International Horticultural Congress*, 16 th. (Vol. 4), 283—289.
 - 11) Smith, G. V., and Kingham, H.G., 1970: A contribution to glasshouse design. *Agr. Meteorol.*, (8): 447—468.
 - 12) Takakura, T., Jordan, K.A., and Boyd, L.L., 1969: Dynamic simulation of plant growth and environment in the greenhouse. *ASAE paper No. 69—942*, ASAE st. Joseph, Mich.

Summary

Light transmission in the greenhouse is an important factor influencing the design and layout of commercial greenhouse enterprises, since the quantity of solar light is quite often the limiting factor for plant growth in the greenhouse during winter months in Japan.

Recently several workers have developed mathematical models which are capable of predicting the light transmission of greenhouses. While these models have been of great value, most of them have not considered the width and depth of the structural element, the shape of a frame, and the arrangement of structural elements. Several experiments, on the other hand, have shown that the structural frame can account for 60 to 70 percent of the total light losses in the greenhouse, and that a relationship exists between the arrangement of structural elements and materials of a greenhouse and the resulting distribution of transmitted solar light.

This paper presents an analytical approach to this problem. A frame with a glass sheet is considered as a fundamental element of greenhouse walls for analyzing transmission mechanisms of direct solar light into a greenhouse. The approach is based on a general model so that it can be adapted to any single greenhouse for which the light transmission characteristics and dimensions of each frame have been defined. But no provisions are made for internal reflection of light and for light diffusing covering materials in the present model. Models considering these effects have already been described in the other paper. Applications of the present model to complete greenhouses will be described in a later paper.

Transmissivities of solar light have been calculated of fundamental elements. The results obtained from this analysis show that the transmissivity for a fundamental element can vary widely with the dimensions of a frame and geometrical position of the sun (relative to the frame), and that the arrangement of structural elements has an important effect on the distribution of the daily integrated solar light in the greenhouse.

Some of the results for the particular fundamental element whose dimensions are given in Figs. 3 and 5 are as follows:

1. The horizontal structural element running E-W direction constructing the south roof and wall causes an ununiform space distribution of the daily integrated light in the greenhouse.
2. The depth of a frame can account for 20 to 30 percent of total light losses in the greenhouse.
3. A higher transmissivity for a fundamental element is obtained in a greenhouse with square frames than with rectangular one.
4. The transmissivity of a vertical fundamental element whose azimuth is south is 82% in winter and 42% in summer.