

温室内の日射量に関する研究(2)

誌名	農業氣象
ISSN	00218588
著者	古在, 豊樹 杉, 二郎
巻/号	27巻3号
掲載ページ	p. 105-115
発行年月	1972年3月

温室内の日射量に関する研究 (2)

古 在 豊 樹・杉 二 郎

(東京大学農学部)

Studies on the Solar Irradiation in Glasshouses (2)

Toyoki KOZAI and Jiro SUGI

(Faculty of Agriculture, Tokyo University)

1. はしがき

温室は温度に関しては、はるかに外界に勝る条件が容易に得られるが、日射に関しては屋外に比べておおよそ、40~60%の減少は免かれない。従つて、一般に、通例の温室では、冬季は常に日射量が作物の物質生産の制限因子のひとつとなつていゝと考えられる。

この不足する日射量を人工光源で補なうことに期待することは、現在の技術を以つてしても、一般作物では、経済的に殆んど不可能で、天与の日射の効果的利用に多くを依存する他はない。

また、温室内への日射量は温室内気温、湿度、CO₂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。従つて、我国のように、夏季に温室内が異常に高温になる所では、温室の周年利用の立場から、効果的な日射量調整による生育適温の維持あるいは冷房機採用の際の負荷軽減にも強く興味が持たれている。

このようなことから、温室の構造・形態と温室内日射量との関係を明らかにすることは、温室の設計・改良、更には、温室内作物に対する種々の環境条件を最適に制御する際に必須となる。

温室内の日射量に関する研究は決して少なくはない。実験的な研究としては、whittle et al. (1959) の代表的な資料があるが、温室内の日射量を決めるメカニズムは極めて複雑であるために、実測のみからこの種の結論を種々の温室について得ることは、実際には不可能に近い。

他方、最近になつて、各種温室内の日射量を数式モデルから電子計算機を利用して数値的に求めようという試みが幾つかはじめられている。この種の研究としては、Nisen (1962), Manbeck et al. (1967); Takakura et

al. (1969), Bowman (1970); 古在 (1970); Seginer et al. (1971) がある。しかるに、それらはいずれも、今日の段階では、モデル自体の簡単化のために、棟方向に無限に長い温室を仮定したり、フレームの無い総ガラス張りの温室を考えたりして、かなり理想化された温室についてであり、研究結果の適用範囲がせばめられ、未だ、温室内日射量に対する正しい認識は著るしく欠けているように思われる。

本報告は第1報(古在, 1970)に続くものではあるが、前に使用したモデルに大幅な改良を加えて、直達および天空日射量に対するフレームの影の影響、直達日射に対する時期および建設方位の影響等の検討を主眼としたものである。この数理解析によつて、温室設計に際しての基本的指針が幾つか得られた。

しかしながら、今回使用したモデルにも条件として、いくつかの制限が残されており、すべての温室に適用できる訳ではない。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、現段階では未だ完全な結論を得たとは言えないが、研究方向を推論し得る一応の結果を得たのでここに発表する。

2. 計算の理論的基礎

モデルの作成に際しては、次の3つの基本的仮定がなされた。

1. 直達日射は完全な平行光線とする。
2. フレームの厚さは非常に薄い(ゼロ)とする。
3. 温室内における日射の2次以上のガラス面での反射は無視する。

上記の仮定はいずれも、ある条件の下では、多少現実的な仮定でないきらいがある。特に、2次以上の反射の無視については問題があるが、これについては次報で取り上げることとする。従つて、今回は、上記の仮定が余り問題にならない範囲内での論議とした。

* 昭和46年4月2日 全国大会にて発表
昭和46年10月7日 受理

(1) 直達日射

計算手順の概略が図1に流れ図として示されている。以下この手順に沿って具体的な計算方法を示す。なお、ここでは、便宜上、ガラス板はすべて矩形であるとして、説明を進めるが、三角形等であつても同様な手順で良い。

太陽高度 H 、太陽方位 A 、屋外水平面直達日射量は、それぞれ次式で求められる。

$$\begin{aligned}
 H &= \sin^{-1}[\sin L \sin D + \cos L \cos D \cos T] \\
 A &= \sin^{-1}[\cos D \sin T \sec H] \\
 JDH &= [JZ/(R/RZ)^2] P \operatorname{cosech} H \cdot \sin H \quad (2 \cdot 1)
 \end{aligned}$$

ここで、 L 、その土地の緯度； D 、太陽赤緯； T 、正午をゼロとしたときの時角； JZ 、太陽定数； R 、地球・太陽間の実距離； RZ 、地球・太陽・の平均距離； P 、大気の透過率である。

その時、 N 個のガラス板のうち k 番目のガラス板 G_k への入射角 ANG_k は次式で表わされる。

$$\begin{aligned}
 ANG_k &= \cos^{-1}[\sin H \cos TH_k + \cos H \sin TH_k \cdot \\
 &\quad \cos(A - AG_k)] \quad (2 \cdot 2)
 \end{aligned}$$

ここで TH_k と AG_k はそれぞれガラス板 $G(K)$ の水平傾角と傾斜方位とする。

そこで、ガラス板 G_k への日射の入射角が ANG_k の時の透過率を TG_k とすれば、 G_k と直達日射によつて規定される温室内空間における水平面直達日射量 JID_k は、

$$JID_k = TG_k \cdot JDH$$

となる。ここで JDH は屋外水平面直達日射量。なお、若し、水平面日射量ではなく、温室内の傾斜角 TH 、傾斜方位 AG の面上の日射量を求める時は、(2・1) 式の右辺の $\sin H$ を (2・2) 式で求め、その傾斜面に対する入射角 ANG を使つて、 $\cos ANG_k$ に置き代える。

また、番号 k のガラス板 G_k の影が床平面上の何故に落ちるかは次のようにして求める¹⁰⁾。 G_k の4つの端点の x 、 y および座標をそれぞれ X_{kj} 、 Y_{kj} および Z_{kj} ($j=1\sim 4$) とし、対応する床の x - y 平面上の影の4点の座標を SX_{kj} 、 SY_{kj} 、($j=1\sim 4$) とすれば、

$$\begin{aligned}
 SX_{kj} &= -Z_{kj} \cdot \cot H \cdot \sin A + X_{kj} \\
 SY_{kj} &= -Z_{kj} \cdot \cot H \cdot \cos A + Y_{kj} \quad (2 \cdot 3)
 \end{aligned}$$

となる。但し、 $j=1\sim 4$ 。

勿論、(2・3) 式の4点で囲まれる4辺形が常に温室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がある。そこで、ガラス板 G_k の影の床面

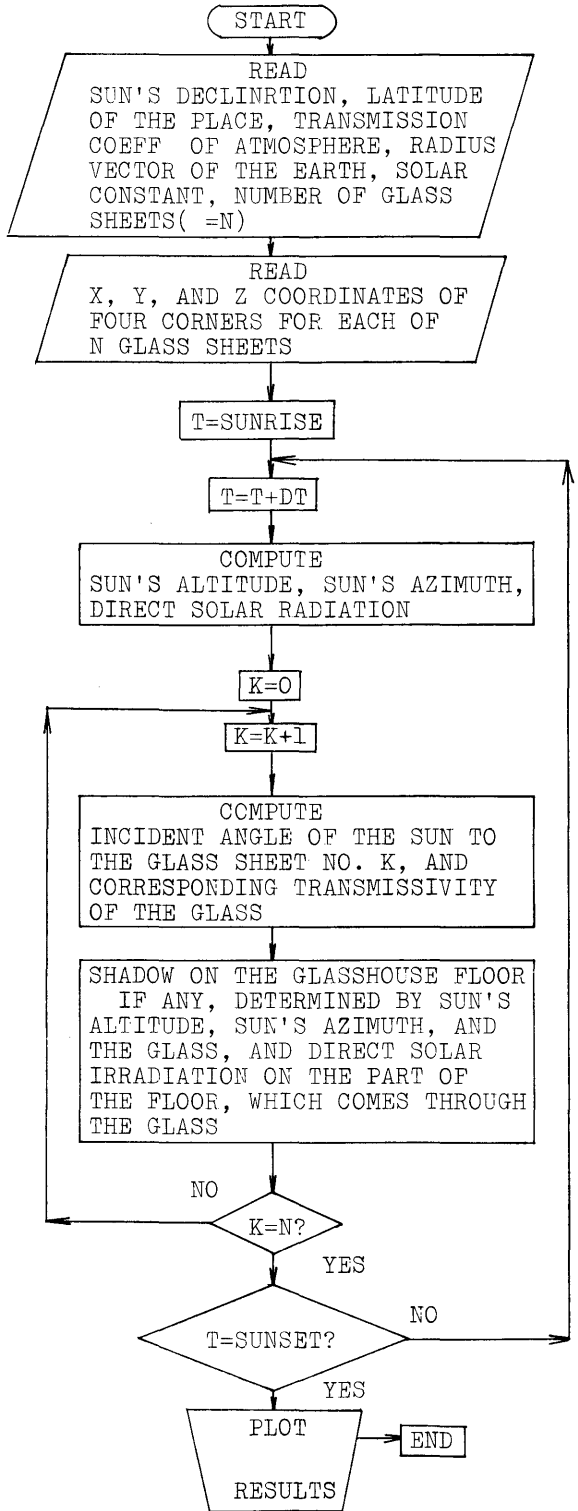
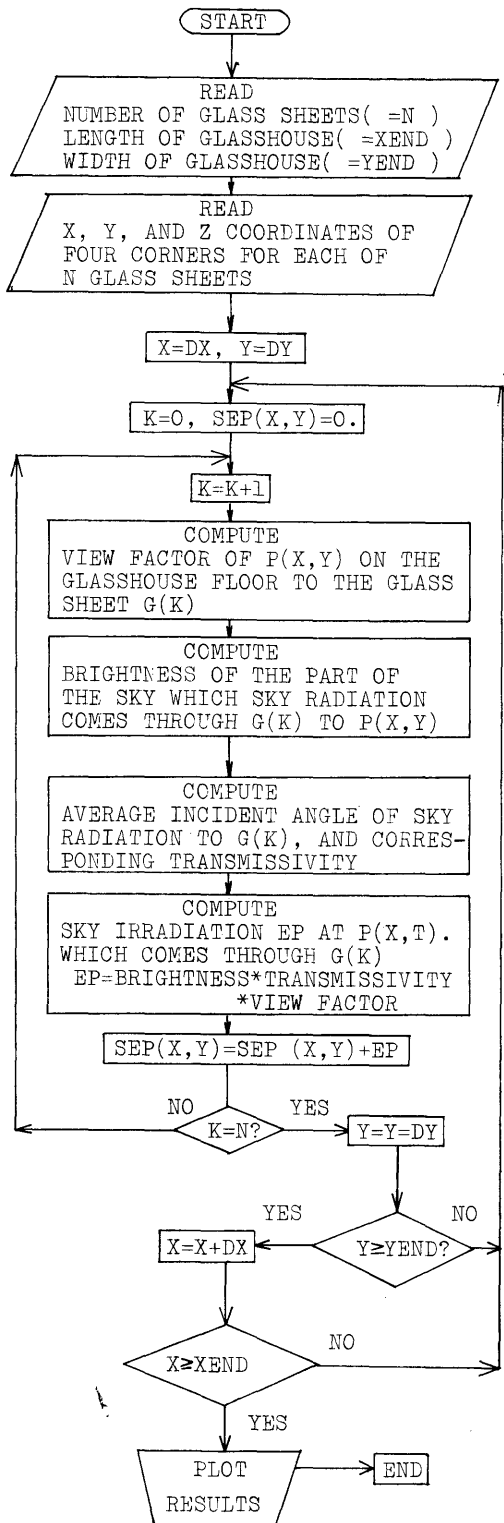


Fig. 1. General flow chart of computer program for calculating direct solar irradiation in greenhouse



へ落ちる部分だけの面積を S_k とすれば、温室床面での水平面直達日射量の平均値 JDA は、

$$JDA = \sum_{k=1}^N JJD_k \cdot S_k / FA \quad (2.4)$$

となる。但し、 FA は全床面積、 N はガラス板の総枚数である。

以上の手順を日の出から日没までにわたって適当な時間間隔で繰り返せば、各時刻の温室内直達日射量の分布および平均が求められ、更に、それらを積分すれば、一日間の積算日射量の分布およびその平均も求めることが出来る。

(2) 天空日射

床面上の或る微小水平面 $P(X, Y)$ から見た番号 k のガラス板 G_k の形態係数を FPG_k 、 $P(X, Y)$ と G_k の中心を結ぶ直線と床面のなす角（高度）に対する天空の輝度を B_k 、 G_k を通過し $P(X, Y)$ に達する天空日射の G_k への平均入射角に対する G_k の日射透過率を TG_k とすれば、 G_k を通過し、 $P(X, Y)$ に達する天空日射量 EP_k は、

$$EP_k = B_k \cdot TG_k \cdot FPG_k \quad (2.5)$$

となる。従つて、点 P における全天空日射量 SEP は、

$$SEP = \sum_{k=1}^N B_k \cdot TG_k \cdot FPG_k \quad (2.6)$$

で表わされる。但し、 N はその温室で使われているガラスの総枚数。

他方、屋外水平面天空日射量 JSH は、松尾らの式から次のように与えられる。

$$JSH = 1.2 JZ \cdot \sin H \frac{(1.0 - P)(2.0 - P \operatorname{cosec} H)}{1.0 - 1.4 \log_e P} \quad (2.7)$$

但し、 JZ は太陽定数、 H は太陽高度、 P は大気の日射透過率。すると、屋外と温室内の天空日射量の比 RAT は、

$$RAT = SEP / JSH \quad (2.8)$$

となり、点 $P(X, Y)$ を床平面上に適当な間隔で動かして、各点における RAT または SEP を求めれば、温室内部天空日射量の分布が求められる。

以上の計算手順の概略を示す流れ図が第2図に示されている。

このように、温室内部での反射を無視すれば、温室内部直達日射量は、それが透過してきたガラス板からの日射だけが関係し、天空日射量は、常にガラス板全体からの日

Fig. 2. General flow chart of computer program for calculating diffused solar irradiation in greenhouse

射が関係し、その計算方法が全く異なる。

温室内床面上の点 P における全日射量はその点の直達日射量と天空日射量の代数和として求められ、それは、大気の透過率、ガラスの透過率と入射角の関係および温室の形状が決まれば、太陽方位と太陽高度のみの関数となる。

3. 定数の設定

計算の対象とした地理的位置 L は北緯 $35^{\circ}41'$ (東京) で、時期は冬至、春分および夏至である。秋分については、日射条件が春分と余り変わらないので省いた。従つて、各時期の太陽赤緯 D は、冬至 $-23^{\circ}27'$ 、春分 $0^{\circ}15'$ 、夏至 $23^{\circ}27'$ となり、地球の動径 (地球・太陽間の平均距離と実距離の比 R/RZ) は、冬至 0.9836、春分 0.9662、夏至 1.0164 となる。

なお、大気の日射透過率 P は、渡辺¹⁰⁾等を参考にして、冬至 0.75、春分 0.70、夏至 0.65 を選び、太陽定数 JZ は $1167 \text{Kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$ とした。

次に、今回の数値実験の主たる対象とした温室の外観およびその大きさが第3図に示されている。

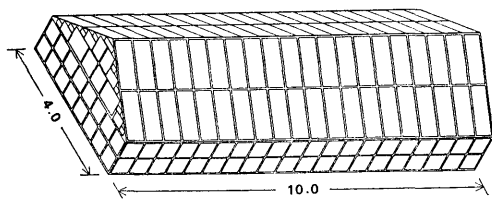


Fig. 3 Size of greenhouse used in the present simulation

length	10.0	height of sides	1.0
width	4.0	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)			
number of glass sheets	230		
slope of roof	32°		
thickness of glass	3mm		
extinction coeff. of glass	0.45		
index of refracttion of glass	1.526		

但し、図中の数値は、各々の長さの相対的な値だけを示すように無次元化した。と言うのは、温室床面での単位面積当たりの日射量は、幾何学的に相似であるすべての温室に対して同じ値を示し、実際の大きさには無関係に決まるので、このように表わした方が一般的であると考

えたからである。温室の建設方位は、東西棟、南北棟、北東—南西棟、および南東—北西棟の4種を選んだ。実用的にはこの種の建設方位が基本的になると思われるからである。なお、この温室の、いわゆる、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。

温室の形状は代表的なものを選ぶよう努力したが、勿論、これだけでは充分とは言えない。特に最近の温室構造の大型化に伴ない、連棟による大型化が、単棟による大型化かが問題になつている。これは、日射に関しても興味深い問題で、今回の単棟温室について得られた結論が連棟温室に関しては全く適用出来ない場合も充分あり得る。連棟温室に関しては今後、引き続いて究明する予定である。

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 の式から求めた結果、透過率は、およそ、入射角 0° で 0.86、 50° で 0.82、 70° で 0.65、 80° で 0.40、 90° で 0.0 となり、良く知られているように、入射角が 60° を越えると透過率が急激に小さくなる特性を持つている。但し、上記の数値は清浄なガラスについてのものであり、汚れている場合は、当然、透過率もつと低くなる。汚れたガラスやその他の被覆材についての日射透過率を入射角別に調べた文献が余り見あたらないので、断言は出来ないが、その場合は、清浄な被覆材について求めた結果に、汚れ度に応じて、或る係数を乗ずれば、およその見当がつけられる。

また、現在、我国では、各種の被覆材が利用されており、ガラス温室の比重は、むしろ比較的少ない。そして、それらの波長別の放射の透過特性は、各々異なつている。しかし、今回の数値実験には、波長別透過特性は考慮されておらず、日射全体 (およそ $0.3 \mu \sim 3 \mu$) を一括して扱つており、日射のガラス面への入射角とその入射角に対応する透過率の関係だけを問題としていて、この入射角—透過率関係が同じであるならば、他の被覆材についても今回の結果をそのまま適用できる。但し、スリガラスや梨地フィルムのような拡散性の被覆材については、入射機構が全く異なり、計算の理論的基礎が異なるので、適用はできない。その場合の方法および結果の若干については第1報に報告 (1970) してある。なお、前述の各数値を定数として選んだ理由およびその妥当性も第1報で検討されている。

更に、温室内天空日射量を求める際には、天空をすべて等輝度としたが、この仮定についての妥当性の検討は次節で触れることとする。

4. 計算の具体的方法

ここでは第2節で得られた理論式を使つて実際に計算を進めるに当つて用いた手法、具体的方法、その際に留意した点などについて、直達日射と天空日射に分けて述べる。

温室の建設方位、季節等による温室の日射透過特性の差異を比較するために、主に、次の3点について検討して見た。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直達日射量。3. 各時刻の床面における平均直達日射量 3. 床面における天空日射量の分布。但し、温室内日射量はすべて屋外の水面日射量に対する百分率で表わすこととした。これによつて、今回の計算に用いた各種の日射条件に関連する定数（大気の日射透過率等）の値に基づく特殊性をかなり取り除くことが出来るので、各種温室の比較、実測との比較等に便利であろうと考えたからである。

(a) 直達日射

温室床面における各時刻および1日間の積算日射量の分布を求めるために、まず、床面の長さ方向を20に、幅方向を8に等分割し、床面上に $(20-1) \times (8-1) = 133$ 点の格子状に配置された点を設け、各時刻におけるそれらの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日の計算回数を100回程度にするために、冬至については5分に、春分と夏至については、7.5分とした。積算日射量は日の出から日没までの各時刻の日射量を数値積分すれば求められる。一般的に言えば、床面上に設定する格子交点の数を多くし、調べる時間間隔を短かくすればする程、日射量の分布は精度良く求められる。但し、今回のように、それらの点を格子状に一温室のフレームに平行にとると、或る場合には、温室の床面全体を見れば床面上の大部分はフレームの影になつていないのに、格子交点のかなりの部分がフレームの影になつてしまう場合—またはその逆—がある。その場合の各格子交点上の日射量の平均値は、格子交点の数をかなり多くしても、日射の真の平均値とは大きく異なつてくる。従つて各時刻の平均日射量 JDA は、前節の(2・4)式によつて別に求めておく必要がある。その際、 JDA の精度は主に(2・4)式の右辺の影の面積 S_k の算定の精度で決まる。今回は、比較的簡単に解析的に求められる S_k 以外には乱数を利用してモンテカルロ法によつて求めた。その際、各時刻毎に使用した乱数の数はおよそ10,000個である。

このように、数値実験に際しても、誤差の問題がつきまとうが、種々の検討を加えた結果、実用的には上述の

方法でおよそ充分であつた。なお、これらの問題は、たとえ日射によつて実際の温室において測定するにしても同様に起き得ることであり、実測から帰納的に何らかの結論を得ることの難かしさも示すものである。

(b) 天空日射

温室内天空日射量を求めるのにも、直達日射の際と同様に、温室床面上に格子状に配置された各点での日射量から、その分布を求めた。次に、(2・6)式から分かる様に、ガラスの透過率 TG_k は、そのガラスへの天空日射の平均入射角に対応する値として求められている。従つて、ガラス板が比較的大きい場合、ガラス板と考えている点 $P(X, Y)$ が非常に近い場合には、或る程度誤差が生じ得る。今回検討する温室は、およそ同じ大きさの190~230枚のガラスから出来ているので、上に述べた点は余り問題とならない。また、前節で述べたように、天空日射に関して、天空は等輝度と仮定した。

曇天時の天空の輝度分布を表わすものとしては、Moon および Spencer らが実測から見出した次の実験式がある¹⁰⁾。

$$\frac{B_o}{B_z} = \frac{1+2 \sin \theta}{3}$$

ここで、 B_o は高度 θ の輝度、 B_z は天頂輝度である。しかし、温室内の天空日射量を求めるために、上式を使用しても、等輝度としても、特殊な形態の温室を除いては、殆んど差が無いと云う、Bowman (1970)の研究があるので、今回は、等輝度の場合だけについて計算を行なつた。実際に、各種温室に対してどの程度の差があるのかを数値的に検討することは、今後の課題としたい。

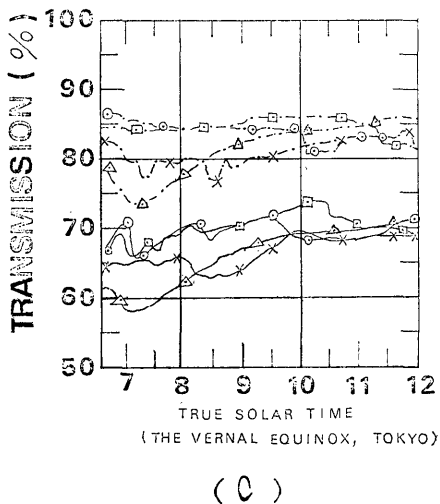
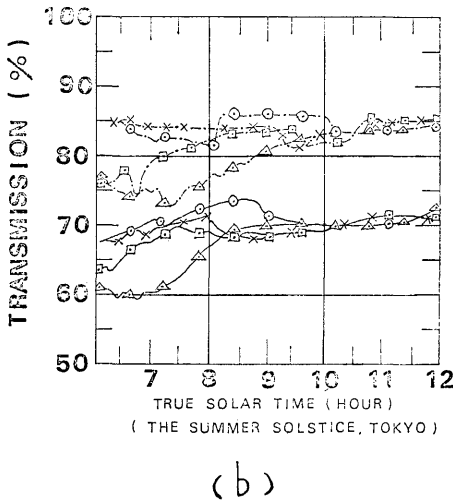
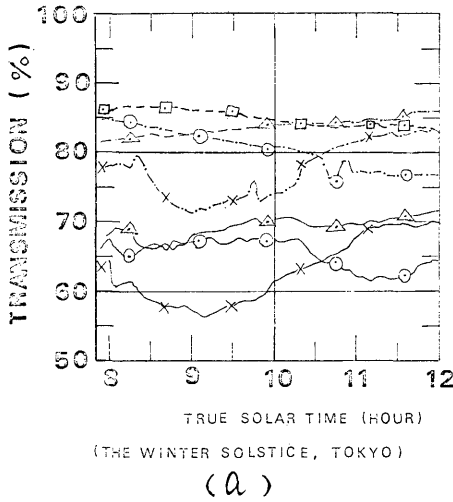
5. 温室内日射量の解析

5-1. 直達日射量

(1) 冬至

(a) 各時刻の日射透過率

図4(a)に冬至における日の出後から正午までの温室の平均日射透過率の変化を、図3に示した温室について、各建設方位毎に実線で示してある。但し、北東—南西棟のそれは、日の出後8時30分頃までを除いて、東西棟のそれに極めて近い値を示したので省略した。なお、平均日射透過率は、温室内床面平均直達日射量の室外水平面直達日射量に対する百分率である。また、日射透過率の午後の変化は、東西棟および南北棟については正午に関して午後と対称、南東—北西棟および北東—南西棟については、それぞれ、正午に関して、北東—南西棟、南東—北西棟と対称になる。更に、図中には、比較のために、図3と同形で総ガラス張りの温室の日射透過



率の変化をも破線で示してある。

図からわかるように、各温室の日射透過率はおよそ55~70%の範囲にあり、また、総ガラス張りの温室のそれは、およそ70~85%の範囲にある。従つて、フレーム等の不透明構造物による日射の減少は約15~22%になる。このフレームの影による減少日射量の変化は、主として屋根と側壁のフレーム率に差があることによる。すなわち、冬至において、直達日射は日の出後8時30分頃まで殆んど側壁面(フレーム率20%)だけから入り、屋根面(フレーム率13%)からは入らないのでフレームによる日射の減少が平均フレーム率に対するそれより大きくなる。従つて、太陽高度が低い時刻に多くの日射を温室内に採り入れたい場合は側壁面のフレーム率を可能な限り小さくすれば良い。この効果は側壁の高さが高くなればなる程、顕著になる。

次に、日射透過率の変化を建設方位別に見ると、東西棟が他に比して最も高く、一日中、70%前後の透過率を維持している。南北棟は正午前後の日射が一番強い時刻に透過率が低くなつている。北東一南西棟は8時~10時にかけて透過率が低くなるが、午後のその変化は東西の棟それとほぼ同じになり、午後のそれは平均的に高い。

これらの透過率は、各ガラス面への日射の入射角の大小に大きく左右され、一般的に言えば、冬期のように、太陽高度が一日中低い場合には、側壁から、しかもその面に対する入射角がより小さくなるような状態で日射を採り入れる方が透過率が高くなるのであるから、東西棟の透過率が他に比して高いのは、むしろ、当然となる。なお、これに関連する詳しい数値的な説明は前報(1970)で述べてある。また、実際の温室内日射量は透過率に室外の日射量を乗じたものであるから、一日中快晴であるとすれば、南北棟より、南東一北西棟あるいは北東一南西棟の方が一日の積算日射量は多くなる。

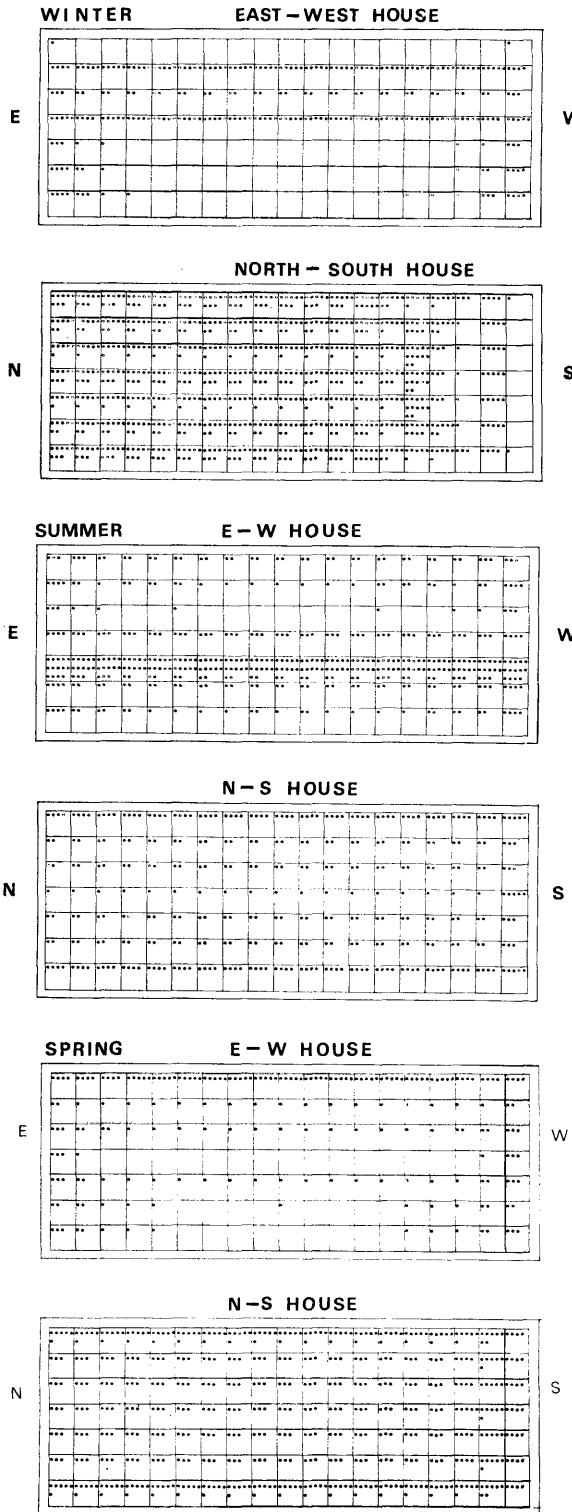
(b) 日積算日射量の床面における分布

床面上に設定した133の格子交点における日積算日射透過率の東西棟と南北棟に対する値が、図5の上段に示

Fig. 4. Mean daily variation of direct solar radiation transmission in a greenhouse showed in Fig. 3.

○——○ N-Shouse ○—·—○ N-Shouse
 □——□ NE-SWhouse □—·—□ NE-SWhouse
 △——△ E-Whouse △—·—△ E-Whouse
 ×——× NW-SE house ×—·—× NW-SEhouse
 (assumed no frames)

upper: : the winter solstice
 middle: : the summer solstice
 lower: : the vernal equinox



されている。図中、各格子内の小点 (dots) の数が多い程、その場所の日積算日射量は少ない。つまり、ドットの数 $= (80 - R) / 2$ として表示してある。但し、 R は各格子交点における積算日射量の室外のそれに対するパーセント (積算日射透過率) とする。この図から、東西棟の方が南北棟より積算日射透過率が高いことが一見して理解される。

東西棟における積算日射透過率 R の格子交点上の最大は79%、最小は69%で、場所による差は最高10%となつている。図中、南側壁面に近い床面における R が低いのは、前節でも述べたように南側壁面のフレーム率が大きいことによる。実際には、北側壁面近くの床面は、北側壁内面で反射された日射をも受けるであろうから、その差は更に大きくなるであろう。これらのことから、東西棟において、冬季に、温室内に直達日射を多く採り入れ、しかも、その分布を出来得る限り均一にするためには、南側壁面のフレームを少なくすることが効果的であろう。

次に南北棟について見てみると、 R の格子点上の最大は80%と高いが、最小は55%と著るしく低く、殆んど場所が60—70%の範囲にある。但し、床面の南北を結ぶ中心線に沿つて R が低いのは、主として“棟”の影による日射量の減少に原因し、東西両側壁付近の床面での R が低いのは、主として、正午付近に、それらの面への日射の入射角がかなり大きくなることに原因する。

北東—南西棟あるいは南東—北西棟に対する積算日射量の分布は、図に示す余裕がないが、概して前二者よりも均一で、格子交点での R の最大は75%、最小は65%となつた。

(2) 夏至

(a) 各時刻の日射透過率

夏至における温室の平均日射透過率の時刻別変化を図に示してある。図から分かるように、建設方位による平均日射透過率の差異は、午前9時30分頃から正午までの間、殆んど無い。これは、夏至においては、太

Fig. 5. Distribution of daily direct solar irradiation on the floor in the greenhouse (Tokyo)

upper: the winter solstice
middle: the summer solstice
lower: the vernal equinox
number of dots $= (80 - R) / 2$

$$R = \frac{\text{daily direct solar irradiation on the floor at that point inside the greenhouse}}{\text{daily direct solar irradiation outside}} \times 100$$

陽高度が午前9時30分では53°、正午では78°とかなり高いために、どの建設方位の温室に対しても直達日射の殆んどは屋根から入り、その入射角が、建設方位が異なつても、余り変わらないことによる。しかし、日の出後、午前9時30分までは、東西棟の日射透過率は南北棟のそれよりかなり低く、両者の透過率の差は最大20%にも及んでいる。また、北東—南西棟および南東—北西棟の日射透過率は、南北棟のそれにやや似た変化をしている。また、午前9時以降正午までの日射の強い時間に、建設方位による日射透過率の差が殆んど無いために、後で見るように、積算日射透過率の平均値に、建設方位による差が余り認められない。

(b) 日積算日射量の床面における分布

東西棟の南北棟に対する積算日射透過率 R の各格子交点上の値が図5の中段に示されている。同図中、東西棟の R の格子交点上の最大は79%、最小は52%となっている。最大は南屋根面を透過してくる日射を主として受ける上から3行目に現われ、最小は棟の影が正午前後に長時間とどまる5行目に現われており、その差は27%におよんでいる。他方、南北棟における R は最大77%、最小70%、南東—北西と北東—南西棟の R の最大と最小はそれぞれ76%と67%であった。

(3) 春分

図4(c)に春分における温室の平均日射透過率の時刻変化が各建設方位毎に、また、図5の下段には積算日射透過率 R の東西棟と南北棟に対する各格子交点上の値が示されている。図4(c)から、南北棟と東西棟の日射透過率の変化の様子は夏至のそれとよく似ているが、北東—南西棟、南東—北西棟のそれは夏至の場合とかなり異なつていくことが分かる。また、図4(c)と図5の下段を比較検討して見ると、腑に落ちない点がある。それは、図4において、東西棟の日射透過率は、日の出後9時30分頃まで、南北棟のそれより常にも5~10%低く、それ以後正午までは、東西棟のそれが南北棟のそれより低いとはいえ、その差は極く僅かであるにもかかわらず、図5の下段の R の値は東西棟の方が全体的に4~5%高くなつていくと云うことである。この理由としては次の2つが考えられる。第1に、日の出後9時30分までの積算日射量は日の出後正午までの積算日射量の25%程度を占めているだけであるから、その期間の日射透過率の4~5%の差は R にそれ程大きな影響をおよぼさないと云うことである。しかし、それだけでは、東西棟の R が南北棟の R より全体的に大きくなることは説明できない。そこで第2の理由としては、図5に示してある R の各値は、各格子交点上の丁度その

点における値であつて、何らその付近の平均的な値を示していないということがある。例えば、図5の下段の東西棟においても、図5の中段の東西棟の上から5行目あるいは上段の冬至における東西棟の4行目に見られるような棟および軒の影が長時間とどまることによる R の低下が、7行目と北側壁の間、および1行目と2行目の間に実際は存在するはずであるが、それは同図中には現われてない。すなわち、若し、床面上の R の真の平均値を求めたとすれば、当然、南北棟の R の平均は東西棟のそれよりやや高い値を示すはずであるが、図5に示したような表現方法ではそれが表われていないのである。そして、このことは、各温室の床面上における積算日射量の場所による差が甚しいことをも同時に示している。今述べた第2の理由は、総ガラス張りの温室に対してはその影響が極端に現われないので、その結果を使つて、逆に、第2の理由の数値的な根拠を示すこともできる。

このように、今まで述べてきた R の最大・最小あるいは R のバラツキと云うのは、飽くまで、それらの格子交点における値に対する最大・最小等を意味するもので、床面全体についての最大・最小等とは異なると考えなければならない。その意味で、図4と図5の結果は必ずしも良く対応するとは云えず、偶々、春分において、その影響が強くてできたことと云えよう。従つて、総合的な判断は、図4と図5を比較対照しつつ、注意深く行なわなければならない。

(4) 考察

以上、温室内における直達日射を、季節・建設方位等を変えて、数値的に解析してきたが、ここで、それらの結果から得られる一般的な結論を簡単にまとめてみると次のようになるであろう。

1. 各時刻の温室の平均日射透過率はおよそ50~70%の範囲にあるが、それは建設方位、季節等によつてかなり異なる。一般的に、東西棟は冬に透過率が高く、夏および春に低い。南北棟はその逆である。
2. 温室内の日積算日射透過率 R は温室内の場所によつてかなり違いがあり、その最大と最小の差は、例えば、夏至における東西棟では27%にも及んでいる。
3. 日積算日射透過率 R の場所による差異は、温室の形態、建設方位によるよりも、むしろ、フレーム等の不透明構造物による入射日射の減少の影響の方が強い。すなわち、 R が低い場所は、他のフレームに比して幅の広い棟木、軒等による影が長時間一定地点にとどまる所に多い。
4. 従つて、全体のフレーム率を変えずに、単にフレームの配置を変えるだけで、 R および各時刻の平均日射透

6. 要 約

温室の設計、改良およびその効果的な環境調節を行なうに際しての、温室内日射量に関する基礎資料を得るために、温室内日射の透過機構を理論的に解析し、3次元の上に凸な温室の床面における直達および天空日射量の各時刻および日の積算日射量の平均値およびその分布を、任意の季節、建設方位および日射条件に対して、与える計算モデルを示した。このモデルでは、各ガラス面への直達および天空日射の入射角がそのガラス面の日射透過率に及ぼす影響およびフレーム等の不透明構造物による入射日射の減少等が考慮されている。但し、モデルの作成に際しては、次の3つの基本的な仮定がなされた。1. 直達日射は完全な平行光線とする。2. フレームの厚さは非常に薄い(ゼロ)とする。3. 温室内における日射の2次以上のガラス面での反射は無視する。

このようにして得られた計算モデルに基づいて、今回は、温室の建設方位、季節等による温室内の日射特性の差異を比較検討するための幾つかの数値実験を電子計算機を利用して行なった。その結果、大略各、次のような事が分つた。

1. 各時刻の温室の平均日射透過率はその建設方位の違によつてかなり異なり、その差はおよそ15%にもなることがある。
2. 温室内の日積算日射透過率は場所によつてかなり違いがあり、その最大と最小の差は約30%にも及ぶことがある。
3. 日積算日射透過率の場所による違いは、温室の形態よりもむしろフレーム等の不明構造物の配置による影響が強い。
4. 現存する温室の一般的な形態は、日射に関しては必ずしも好ましいとは云えず、改良の余地が残されている。
5. 温室床面における天空日射透過率は中央で高く、周辺で低いという分布になり、その差の最大は普通約10%内外である。

なお、上に述べた仮定3を取り除いた計算モデルおよび実測値と計算値との比較は続報として引き続き取り扱う予定である。

終りに、この研究にあたって御指導・貴重な助言をたまわつた当研究室立花助教授、千葉大学三原教授、高倉助教授、東京大学理学部及川氏に深甚の意を表す。な

お、数値計算のための FORTRAN プログラムの作成は東京大学大型計算機センターの‘植物生育とその環境条件に関する応用ライブラリープログラム開発プロジェクトの一環として、HITAC 5020/5020 E を利用して行なわれた。このプログラムは近く登録、公開され、共同利用に供される予定である。関係者各意の助力に謝意を表す。

参考文献

- 1) Bowman, G. E., 1970 : The transmission of diffuse light by a sloping roof. *J. Agric. Engng. Res.*, **15**, 105-105.
- 2) Businger, J. A., 1963 : The glasshouse (greenhouse) climate, in *Physics of plant Environment* (ed. by W. R. van Wijk), North-Holland Publ. Co., Amsterdam, 277-318.
- 3) Edwards R. I. and Lake, J. a., 1965 : The transmission of solar radiation in a small east-west glasshouse with diffusing glass. *J. Agr. c. Engng. Res.*, **10**, 197-201.
- 4) Manbeck, H. B. and Aldrigh R. A., 1967 : Analytical determination of direct visible solar energy transmitted by rigid plastic greenhouses. *TRANSACTIONS of the ASAE.*, 564-567 and 572.
- 5) Nisen, A., 1962 : Calculation of natural light for horticulture structure. (Fr.) *Proceedings of International Horticultural Congress*, 16th. (Vol. 4), 283-289.
- 6) 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.
- 7) 齊藤・松尾・落藤, 1964 : 日射とその応用上の問題点. *空気調和・衛生工学*, **38**, 260-279.
- 8) Seginer, I., and Levav, N., 1971 : Models as tools in greenhouse climate design. Technion Research and Development Foundation, Publication NO. 115 80 pp.
- 9) 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.
- 10) 渡辺要編, 1965 : 建築計画原論 I. 丸善 Co., 東京.
- 11) Whittle, R.N., and Lawrence, W. J. C., 1959 : The climatology of glasshouse: I. Natural Illumination. *J. Agric. Engng. Res.*, **4**, 326-340.

Summary

This paper describes an analytical method for calculating both the direct and the diffuse solar irradiation in an isolated gable roofed greenhouse. The effect of multiple reflection is neglected and the effect of incidence angle on the reflectivity and transmissivity is taken into consideration. The decrease of the solar irradiation due to the effect of the structural elements (frames etc.) has also been taken into account in the computational model.

The computational procedure was programmed for a computer, and was applied to a particular greenhouse with various orientations. Calculations were made for the winter solstice, the summer solstice, and the vernal equinox at Tokyo and similar latitudes.

The following conclusions were obtained from this analysis:

1. The variation of the space averaged transmissivity at the floor varies between about 55% and 70% depending upon the amount of structural elements shading the floor area. A higher transmissivity for direct solar radiation is obtained in an East-West orientation than with a North-South orientation in the winter whereas a lower transmissivity is obtained in an E-W orientation in summer and spring.
2. The ratio of the daily integrated direct solar irradiation on the floor to the irradiation outside varies between about 0.52 and 0.80 in one case and between about 0.69 and 0.79 in another.
3. The structural elements have a more important effect on the distribution of the daily integrated direct solar irradiation than the shape or the orientation of the greenhouse.
4. The intensity of the diffuse solar irradiation is higher at the center of the floor than near the side walls. The difference of the transmissivity is about 10% for a usual greenhouse.