ほろ型プラスチックハウスにおける日射量解析

岸田 恭 允*・園 山 康 正**

(*九州農業試験場環境第1部農業気象研究室)
(**九州大学農学部農業工学科農業気象学研究室)

Analysis of Solar Radiation in Cylindrical Vaulted Plastic Greenhouse

Yasumitsu KISHIDA* and Yasumasa SONOYAMA**

(* Lab. of Meteorology, First Environment Division,
Kyushu National Agricultural Experiment Station,
Chikugo, Fukuoka, 833
** Lab. of Meteorology, Faculty of Agriculture,
Kyushu University, Fukuoka, 812)

1. は し が き

パイプ構造ハウスの急速な増加に伴い、ほろ型ハウスの普及は近年著しく、わが国の全ハウス面積の過半数に達している。また、この型のハウスはトンネルハウスや家畜ふん機械乾燥のための簡易施設などにも類似をみることができる。これらは、一部のアングル構造を除くと、透過する日射に及ぼす構造材の影響は比較的少ないのが特徴であるとともに、パイプ構造では組み立て分解が容易であるために水田裏作に単棟として使用されていることが多い。被覆材料は半年程度しか使用されないものが多いにもかかわらず、ガラスに比較すると汚染が目立つ上に、ハウス内面には微水滴の付着がみられるのが通常である。この報告は、このような実際のほろ型パイプハウス内外における直達日射と散乱日射に関するケーススタディーを行なうとともに、ハウスを円筒模型で近似することによって被覆材料の状態と棟方位が、透過する直達成分の季節変化に及ぼす影響を検討したものである。

なお、この観測と成果のとりまとめに対してご便宜をいただいた九州農業試験場環境第1部佐藤正一博士、九州大学農学部坂上務博士に感謝の意を表するものである。

2. 観 測 方 法

福岡県筑後市にある九州農業試験場(北緯 $33^{\circ}12'$)の圃場に設置された透明ビニール被覆のパイプハウス内外において、昭和50年1月~2月の間、全短波放射を直達成分と散乱成分とに分離して測定した。ハウス内部では、

自動追従装置付直達日射計と全短波放射計によって直達日射と全短波放射を連続記録するとともに、散乱放射を算出した。同時にハウス外部では、全短波放射計をシャドーバンド台に取り付け、他の1台をその影響外において、散乱日射と全短波放射を連続記録するとともに、直達日射を算出した。なお、シャドーバンドによって遮光される天空部分に対する補正因子の妥当性は、直達日射計と全短波放射計との同時観測によってあらかじめ確かめられた。

対象としたハウスは、間口4.5 m、中央高2.0 m、奥行13.5 m、棟方位は真南より西偏 6.25° 度、パイプ直径1.91 cm、パイプ間隔0.5 m、透明ビニール厚さ0.10 mm、1重被覆の単棟ハウスである。ハウス内部の日射測定は、ほぼ中央付近の地上高65 cmで行なわれた。

3. 観 測 結 果

(1) 水平面全日射の相対値

屋外直達日射がハウス内へ透過する割合は、ハウスの棟方位と時刻及び季節に依存する。屋外散乱日射が透過する割合は、ほぼ一定と考えることができる。従って、全日射(直達及び散乱)のハウス内外の相対値は、棟方位が同じであっても時刻、季節、天候に依存することとなる。観測された1日の水平面全日射量の相対値は、屋外全日射量の関数として、Fig.1に示されているが、天候によって変化がみられ曇雨天日に75%,快晴日に55%程度である。快晴日の値は季節によって変化すると思われるが、曇雨天日の値はハウス個有の値で、屋外散乱日射の透過割合、つまり天空散乱日射の相対値である、として支障ないであろう。

(2) 直達・散乱日射の割合

昭和51年4月6日 全国大会にて発表

昭和51年9月20日 受理

**現在:島根県庁

Fig. 1. Relationship between outside total radiation and inside/outside ratio of total radiation in the plastic greenhouse.

通常、透明被覆材料を使用したハウスでは、屋外の直達日射及び散乱日射は、それぞれハウス内部にも直達成分及び散乱成分として透過しているとして、近似的に取り扱われている。しかし、実際にはハウス内部の散乱日射が屋外の散乱日射より多いことが認められており、このことは、ハウス内散乱日射が屋外天空散乱日射の透過成分と、屋外直達日射の被覆材料による拡散と内部反射による拡散成分、の和であると考えなければならないことを示唆するものである。すなわち、いま τ ：全日射の相対値、 τ_Q ：直達日射の相対値、 τ'_Q ：直達日射の有効拡散率、 τ_q ：天空散乱日射の相対値とすれば、

$$\tau(Q+q) = (\tau_Q + \tau'_Q)Q + \tau_q q = \tau_Q Q + \tau'_Q Q + \tau_q q$$

ここで、 $Q+q$ は屋外全日射で、太陽直達日射と天空散乱日射の和、 $\tau(Q+q)$ はハウス内全日射、 $\tau_Q Q$ はハウス内直達日射、 $\tau'_Q Q + \tau_q q$ はハウス内散乱日射で、太陽直達日射の有効拡散成分と天空散乱日射の透過成分の和である。

さて、 τ_q はFig.1により曇雨天日における全日射相対値に等しいとすると75%である。観測期間中に得られた快晴日の資料から、上式における各要素について1日平均値を求めた結果を模式的にFig.2に示す。

屋外に比較すると、ハウス内部では直達日射の減少が著しいが、散乱日射はむしろ増加しており、約150%に達している。太陽直達日射から派生した有効拡散成分は透明プラスチックハウスにおいても天空散乱日射の透過成分に匹敵する大きさである。これは被覆材料の内側に微細な水滴が付着していたことに大きな関係があると思われる。しかし実際の栽培ハウスでは微水滴の付着はむしろ通常のことである。1975年1月14日から2月13にかけて太陽赤緯が大きく変化する1ヵ月間に、 τ は

Fig. 2. Schematic representation of direct and diffuse components of daily solar radiation inside and outside the greenhouse.

56.0から60.2%に増加した。これは、 τ'_Q が20.3から18.6%にやや減少したにもかかわらず、 τ_Q が30.8から37.9%に大きく増加したからである。直達日射の有効拡散率と直達日射相対値とは、全日射相対値の季節変化に対して、互いに逆の影響を及ぼすが、後者の影響力の方が大きい。

(3) 直達日射の拡散成分

ハウス内部における散乱日射の増加をもたらし直達日射の有効拡散成分と外部直達日射の関係は、太陽とハウスとの相対的な位置関係が同一であれば直線的であると考えられる。しかし相対的位置関係が異なれば、被覆材料の拡散率及び床面と被覆内面の反射率などの変化により、両者の関係は曲線的になると考えられる。今回得られた結果は、Fig.3(A)に示されている。派生した有効

Fig. 3. Inside effective scattered radiation and effective scattering coefficient, as a function of outside direct radiation.

拡散成分は、直達日射の増加に伴ってはじめるやかに、そして次第に急速に増加している。南北棟ほろ型ハウスにおける太陽とハウスの位置関係は、早朝と夕刻には対称的に同一であり、日中には大きく異なることによるものであろう。1月と2月における差異は季節変化を示唆するものである。

内島ら(1974, 1976)は、直達日射の有効拡散成分と外部直達日射の関係が床面状態によって異なることを示している。類似した床面での派生拡散成分を比較すると、今回得られた結果の方が大きく、直達日射の有効拡散率は約2倍にも達する。これは被覆材料の汚染程度、とりわけ微水滴付着の影響と思われる。

(4) 被覆材料の直達日射透過率

ビニールフィルムの透過率の入射角特性に関して、未使用品の事例は種々紹介されているところであるが(例えば、三原, 1972)、塵埃や水滴が付着した使用中の事例はあまりみられない。実際のハウスでは建設後もない新しい被覆材料でも、内面に微細な水滴がみられ、日射の透過特性は未使用品とはかなり異なっている。ここで対象としたハウスは前年10月に建設されたもので、ビニールフィルムは、この観測が開始される以前にすでに3カ月間使用されていた。ハウス内外の直達日射の同時測定から、快晴日の直達日射相対値を求めて使用中の透過率とし、入射角の関数としてFig.4(A)に示す。このビニール(ヤマト・ノービ・ウルトラFG, 0.10, S)は、3カ月の使用にもかかわらず農村地帯であるために汚染はあまりひどくないが、多くの栽培ハウスと同様にフィルム内面に微細な水滴がみられ、ところによっては大水

滴もみられる状態であった。また、比較のためにビニールフィルムの未使用品と、都市地帯で1カ年使用した汚染品の切片を、直達日射計の先端に種々の角度で取り付け、快晴日の直達日射に対する透過率と入射角の関係を求めた結果をFig.4(B)に示す。透過率は、入射角零度(垂直入射)では、未使用品切片「NEW」で87.5%、都市における塵埃汚染品切片「DIRTY」で48.0%、実際のハウスにおける微水滴付着の被覆材料「DEWY」で60.0%程度であるが、入射角60度では、それぞれ72.5%、28.5%、20.0%となる。小さな入射角における透過率は、これまでの報告(例えば、大沼, 1961. 稲田, 1971)と大差ない値である。しかし大きな入射角における透過率の低下は、「NEW」よりも「DIRTY」が著しく、特に「DEWY」は汚染程度が少ないうえにもかかわらず一層顕著となることがわかる。

4. 直達日射の相対値に関する考察

(1) 円筒模型による近似

ほろ型ハウスを円筒模型によって近似し、ハウス中央に到達する太陽直達日射のハウス表面における入射角 I を求めるために、次式を導いた(式の誘導の詳細は付録を参照のこと)。

$$I = \cos^{-1} |\sin h \cdot \operatorname{cosec} \omega \cdot \sin \rho|$$

$$\text{ただし、} \rho = \tan^{-1} \{ \sqrt{\sec^2 \omega - k^2} / k \}$$

$$\omega = \tan^{-1} (\operatorname{cosec} \theta \cdot \tan h)$$

ここで、 h : 太陽高度、 $\theta = \alpha - \alpha'$: 太陽方位 α とハウス棟方位 α' との間の角、 $k = l/r$: 円で近似したハウス断面の半径 r と中心から測定点までの高さ l の比である。

θ における α と α' は、真の南を零度にした角度として西側を正、東側を負とする。ただし、 $\theta = 0$ のときは $I = 90^\circ - h$ である。なお、 $k = 0$ のときは $\rho = 90^\circ$ と置くこととする。

実際のハウス断面を円で近似する際には種々の r と l が考えられるが、この計算によると、それらはただ1つの因子 k によって評価することができる。Fig. 5に対象としたハウス断面と円による近似例を示す。例えば2つの近似円の違いは、計算上 $k = 0.4$ と 0.5 の差異として評価することができる。

(2) 日変化における実測と理論の適用

Fig. 4. Dependence of transmissivities of the transparent polyvinyl chloride films (0.1 mm thick) on the angle of incidence.
 NEW: dry new film, DIRTY: dry film which was used for a year in the city, DEWY: dewy film which has been in use since three months in the country.

Fig. 5. The cross-section of the greenhouse and the cylindrical models.
P: experimental point, O: center of cylinder (radius r), O': center of cylinder (radius r'). Normal incidence pyrheliometer and pyranometers are installed at point P. Shadow band stand and pyranometers are placed outside the greenhouse.

屋外における法線方向の太陽直達日射は、 $Q_n = Q_{0,n} A \cos \theta$ 、ただし $Q_{0,n}$: 大気外日射量、 A : 大気透過率、 θ : 太陽高度である。次に直達日射のハウス表面における入射角 l は、前節の式で $k = 0.4$ 、 $\alpha' = +6.25^\circ$ として求め、さらに Fig. 4 (A) の関係を用いて透過率 τ_Q を得た。ハウス内部の直達日射は $\tau_Q Q_n$ である。また水平面直達日射は屋外で $Q = Q_n \sin \theta$ 、ハウス内部で $\tau_Q Q$ である。計算の結果は、実測値とともに Fig. 6 に例示してある。直達日射は、屋外では南中時刻を中心として対称であるが、ハウスの棟方位が真南よりわずかではあるが西偏しているためにハウス内では非対称となる。ハウス内の実測値には、水滴や汚染によって、透過率の局所的な差異を生じていると思われる極端なばらつきがみられるが、全体としてはよい近似が得られているといえよう。

(3) 季節変化に及ぼす被覆材料の汚染・微小滴の影響

ハウス内外の直達日射相対値の季節変化に及ぼすハウスの棟方位、形態などの影響については、すでに Buelow (1962), Manbeck and Aldrich (1967), Kingham and Smith (1971), 古在 (1974) その他多くの研究があるが、主に切妻型ガラス温室を対象としたものであり、被覆材料の経時変化は問題とされていない。ここでは、ほろ型ハウスを対象とし、更に汚染と微小滴の影響を検討しよう。まず、大気透過率 $A = 0.7$ として 30 分毎の屋外直達日射を求め、次に被覆材料を透過してほろ型ハウス中央の $k = 0.4$ となる高さに到達

Fig. 6. Diurnal variations of direct solar radiation inside and outside the greenhouse.

Observational values are indicated by signs (○) and (●). Calculated curves of inside radiation are obtained from the equation in section 4(1), the relation in Fig. 4 (A) and the diurnal courses of outside radiation. The diurnal courses of outside are calculated using the transmission coefficients of the atmosphere $A = 0.74$ (Jan. 14) and 0.71 (Feb. 13).

Fig. 7 Seasonal variations of the inside/outside ratio of daily direct radiation on a clear day.

する直達日射を求めて、それぞれ1日積算量の相対値を得た。被覆材料の透過率としてFig. 4の3種類を用い、ハウス棟方位として南北棟と東西棟について計算した結果は、Fig. 7に示してある。ここで「DEWY」の南北棟の季節変化曲線は、Fig. 2における τ'_0 の実測値(1月14日の30.8%及び2月13日の37.9%)に一致することが認められる。さて、Fig. 7において南北棟と東西棟との直達日射相対値の季節変化は、ほぼ逆の位相であり、「NEW」に比較すると「DIRTY」及び「DEWY」の値は、単に小さくなるだけでなく、季節較差が大きくなることがわかる。冬季の約4ヵ月間は、いずれも南北棟に比較して東西棟の有利性が明確である。冬至においては、東西棟の直達日射相対値は、南北棟の値に対して「NEW」で1.08倍、「DIRTY」で1.27倍、「DEWY」で1.69倍であり、新しいハウスよりも汚染したり微水滴が付着したハウスでは東西棟の有利性が増大する。都市地帯で1年間使用し塵埃汚染の著しい場合よりも塵埃汚染は少なくとも微水滴が付着した場合に、東西棟の有利性が増大する、すなわち南北棟の不利が助長される、ということは注目されるべきであろう。

一般に、冬季における東西棟温室の有利性は、高緯度で大きく低緯度で小さくなるとされている。この有利性は北緯35度付近には及ばないとする報告(Manbeck,

H. B. et al., 1967)もあるが、古在・木村(1975)は種々の切妻型ガラス温室の数値実験から、北緯35度における冬至の東西棟の直達日射相対値は南北棟のそれより5~20%(平均約10%)大きいことを示した。Fig. 7にみられる未使用品を想定したほろ型ハウスの値は、被覆材料、温室形状、床面日射分布の処理、そして緯度などいくぶんの違いがあるにもかかわらず、切妻型ガラス温室の値と大差ない結果となったものである。

なお、ほろ型ハウスの直達日射相対値の鉛直分布を計算した結果によると、いずれの棟方位であっても床面は高い方が不利となる。冬至においては、床高が円筒中心位置となる $k=0.0$ の直達日射相対値に対して、 $k=0.4$ の値は「NEW」で0.99倍、「DIRTY」で0.97倍、「DEWY」で0.93倍程度であり、やはり微水滴の付着したハウスで影響が大きく表

われた。これらの値の棟方位による差異は小さい。

5. まとめ

冬季、処々方々に建てられる真新しい透明ビニールハウスは、まもなく白っぽい半透明ハウスに変ぼうする。ハウス内では夜間や悪天日には終日霧が立ち込み、晴天日も内面に微水滴が残ったままである。そこで、このような実際の単棟ほろ型ハウスの内外における直達・散乱日射を実測して、屋外の直達日射がハウス内部に直達成分として透過する量と拡散成分として透過する量を調査した。その結果、直達日射の相対値は透明ガラス温室や未使用プラスチックを想定したハウスで見積られる値に比較して著しく小さく、また季節変化が明確であった。直達日射の拡散成分は天空散乱日射の透過成分に匹敵する大きさであるが、季節変化は明確でなかった。次に、ほろ型ハウスを円筒模型で理論的に近似することを試みた。この近似の妥当性は、ハウス内外直達日射の日変化と季節変化について実測値と対比することにより確かめられた。また、半年間にわたる直達日射相対値の季節変化を、未使用および塵埃汚染、微水滴付着の被覆材料ごとに求めた。そして直達日射相対値からみた棟方位の優劣程度は、特に微水滴が付着したハウスで助長されることが明らかとなった。なお、今回はハウス中央部の日射環

境について述べたが、平面分布及び妻の影響についての考察は別の機会にゆずることとする。

文 献

- 1) Buelow, F. H., 1962: Solar energy collector design. *Transactions of the ASAE*, 5, 1-5.
- 2) ———, 1967: Solar energy received by inclined surfaces. *Quart. Bull. Michigan Agric. Expt. Stn.*, 49, 294-327.
- 3) Drummond, A. J., 1956: On the measurement of sky radiation. *Arch. Meteorol. Geoph. Biokl.*, Series B, 7, 413-436.
- 4) ———, 1964: Comments on sky radiation measurement and corrections. *J. Appl. Meteorol.*, 3, 810-811.
- 5) *IGY Instruction Manual*, 1958: Vol. 5, Pt. 6, Radiation Instruments and Measurements. London, Pergamon Press, 426-429.
- 6) 稲田勝美, 1971: 農業用透明プラスチックフィルムの分光透過性. 生物環境調節, 8, 111-118.
- 7) 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.
- 8) 古在豊樹, 1974: 単棟温室の構造と日射透過について. 農林水産分野における環境工学. 愛媛大学農学部杉二郎教授還暦記念事業会, 91-134.
- 9) 古在豊樹, 木村元治, 1975: 棟方位による直達光日量床面平均透過率の相異 1-6. 施設環境制御に関する設計基準試案ならびに研究部会活動報告, 日本農業気象学会施設園芸研究集合, 34-72.
- 10) Manbeck, H. B. and Aldrich, R. A., 1967: Analytical determination of direct visible solar energy transmitted by rigid plastic greenhouses. *Transactions of the ASAE*, 10, 564-567 and 572.
- 11) 三原義秋, 1972: 施設園芸の気候管理. 誠文堂新光社, 11-13.
- 12) 大沼一巳, 1961: ポリエチレンフィルム及び温床紙被覆苗代の微気象と熱収支特性. 農業気象, 17, 15-20.
- 13) 内島善兵衛, 井上君夫, 木村 進, 1974: ビニールハウスの光環境. 農業技術研究所気象科物理第1研究室研究成果報告書, 昭和49年度, 25-29.
- 14) ———, ———, ———, 1976: ハウス内の散乱放射環境—特に角度分布について. 日本農業気象学会講演要旨, 昭和51年度, 13.
- 15) 内海修一, 1974: 施設の構造と設備. 博友社, 45-53.

付 録

ほろ型ハウスに透入する太陽直達放射のハウス表面における入射角を求める式を導く。ハウス棟方向にX軸、間口方向にY軸、天頂方向にZ軸をとり、ほろ型ハウスを円筒模型で近似する。Y-Z面における円筒の半径を r 、X軸と真南北方向との角(棟方位)を α' とする。太陽方位を α 、太陽高度を h で表わす。円筒中心軸上の点

Oに向う光線Qが表面Bから透入する際の入射角を i 、また円筒中心軸より高さ l にある点Pに向う光線Qが表面Bから透入する際の入射角を I とする。その他の記号はApp. Fig.1を参照のこと。

Appendix Fig. 1. Angular relationships for the derivation of the equations.

1. 点Oに向う光線のBにおける入射角 i

Y-Z面における円筒表面の曲線跡は、

$$Y^2 + Z^2 = r^2 \quad (1)$$

$\triangle BOC$ をY-Z面に正射影した $\triangle AOD$ においてOAを通る直線は、勾配を $\tan \omega$ とすると、

$$Z = \tan \omega \cdot Y \quad (2)$$

(1), (2)より点Aの座標として $\overline{OD} = r \cos \omega$, $\overline{AD} = r \sin \omega$ を得る。また $\theta = \alpha - \alpha'$ とすれば、 $\triangle COD$ において $\overline{OC} = \overline{OD} / \sin \theta = r \cos \omega / \sin \theta$ である。これらを、 $\triangle BOC$ における $\overline{OB} = \overline{OC} / \cos h = \overline{BC} / \sin h$, $\overline{BC} = \overline{AD}$ に代入すると、

$$\tan \omega = \operatorname{cosec} \theta \cdot \tan h \quad (3)$$

次に $\triangle AOB$ において $\cos i = \overline{OA} / \overline{OB}$, $\overline{OA} = r$ であるから、

$$\cos i = \sin h \cdot \operatorname{cosec} \omega \quad (4)$$

従って、

$$i = \cos^{-1} |\sin h \cdot \operatorname{cosec} \omega| \quad (5)$$

ただし、 $\omega = \tan^{-1} (\operatorname{cosec} \theta \cdot \tan h)$

2. 点Pに向う光線のB'における入射角 I

図形 $PB'C'O$ をY-Z面に正射影した図形 $PA'D'O$ において PA' を通る直線は、勾配を $\tan \omega'$ とすると、

$$Z = \tan \omega' \cdot Y + l \quad (6)$$

(1), (6)より点A'の座標として $\overline{OD'} = (-l \tan \omega' +$

$\sqrt{r^2 \sec^2 \omega' - l^2} / \sec^2 \omega'$, $\overline{A'D'} = (l + \tan \omega' \sqrt{r^2 \sec^2 \omega' - l^2}) / \sec^2 \omega'$ を得る。 $\overline{OA'}$ を通る直線の勾配は $\tan \mu = \overline{A'D'} / \overline{OD'}$, これと直交する直線, すなわち点 A' において表面に接する直線の勾配は $\tan \xi = -1 / \tan \mu = -\overline{OD'} / \overline{A'D'}$ である。PA' を通る直線 (6) と点 A' において表面に接する直線との交角は $\rho = \omega' - \xi + \pi$ であるから,

$$\begin{aligned}
 \tan \rho &= \tan (\omega' - \xi + \pi) \\
 &= (\tan \omega' - \tan \xi) / (1 + \tan \omega' \cdot \tan \xi) \\
 &= \sqrt{r^2 \sec^2 \omega' - l^2} / l
 \end{aligned} \quad (7)$$

いま $\overline{B'F} \perp \overline{FG}$, $\overline{A'E} \perp \overline{EH}$ となるように直角四辺形 EFGH をとり, $\overline{HG}$ を延長して $\overline{B'Q'}$ 上に点 K を定めると, $\overline{B'F} \perp \overline{FK}$ である。 $\triangle FB'K$ において $\cos I = \overline{B'F} / \overline{BK'}$, $\triangle GB'K$

において $\cos i' = \overline{B'G} / \overline{B'K}$, $\triangle FB'G$ において $\cos \{(\pi / 2) - \rho\} = \sin \rho = \overline{B'F} / \overline{B'G}$ であるから,

$$\cos I = \cos i' \cdot \sin \rho \quad (8)$$

さて i' , ω' は前節の i , ω に等しいので, (4) を (8) に代入して,

$$\cos I = \sin h \cdot \operatorname{cosec} \omega \cdot \sin \rho \quad (9)$$

従って,

$$I = \cos^{-1} |\sin h \cdot \operatorname{cosec} \omega \cdot \sin \rho| \quad (10)$$

ただし, $\omega = \tan^{-1} (\operatorname{cosec} \theta \cdot \tan h)$

$$\rho = \tan^{-1} (\sqrt{r^2 \sec^2 \omega - l^2} / l)$$

ここで, $k = l / r$ とおけば $\rho = \tan^{-1} (\sqrt{\sec^2 \omega - k^2} / k)$ 。

Summary

Direct and diffuse components of solar radiation were measured inside and outside a single cylindrical vaulted greenhouse. The greenhouse oriented quasi-north-south, had been constructed with thin steel pipes (1.9 cm dia.). The inner surface of the polyvinyl chloride film (0.1 mm thick) which is the covering material of the greenhouse had been wet with dew, under the same conditions as normal cultivation greenhouses.

The direct solar radiation transmitting the cylindrical vaulted greenhouse was calculated theoretically, and it was compared with actual measurements.

The differences in inside direct radiation between the greenhouse with the new film and that with the used film, were investigated.

1. Results of observation.

The components of direct and diffuse radiation inside and outside the greenhouse were expressed as follows:

$$\tau(Q+q) = (\tau_Q + \tau'_Q)Q + \tau_q q = \tau_Q Q + \tau'_Q Q + \tau_q q$$

where, $Q+q$: outside total radiation (direct solar radiation plus diffuse sky radiation), $\tau(Q+q)$: inside total radiation, τ : inside/outside ratio of total radiation, $\tau_Q Q$: inside direct radiation, τ_Q : inside/outside ratio of direct radiation, $\tau'_Q Q + \tau_q q$: inside diffuse radiation (effective scattered component of direct solar radiation plus transmitted diffuse sky radiation), τ_q : inside/outside ratio of diffuse sky radiation, τ'_Q : effective scattering coefficient of direct solar radiation. The numerical values in the formula were obtained on a clear day. Assuming that the inside/outside ratio of diffuse sky radiation is equal to the inside/outside ratio of total radiation on an overcast day, we have $\tau_q = 75\%$ as an average (Fig. 1). Inside direct radiation is lower than outside ($\tau_Q Q < Q$), conversely, inside diffuse radiation is higher than outside ($\tau'_Q Q + \tau_q q > q$). The intensity of $\tau'_Q Q$ is equally matched for $\tau_q q$, and it cannot be disregarded even in the transparent plastic greenhouse. The value of τ increased from 56.0% in January to 60.2% in February. The increase of τ depends on the increase of τ_Q from 30.8% to 37.9%, despite a little decrease of τ'_Q from 20.3% to 18.6% (Fig. 2). It appears that the seasonal variation of inside/outside ratio of total radiation is mostly affected by inside/outside ratio of direct radiation.

Generally, the transmissivities of direct solar radiation in the polyvinyl chloride films have a tendency to decrease with increasing angle of incidence (Fig. 4). The tendency of dirty film, contaminated by dust in the city, is steeper than that of new one. Moreover, this tendency is the most remarkable of dewy film now in use.

2. Consideration of inside/outside ratio of direct radiation.

An equation was deduced for calculating the solar incident angle on a curved surface of cylindrical vaulted greenhouse. The angle of incidence I is written as follows:

$$I = \cos^{-1} | \sin h \cdot \operatorname{cosec} \omega \cdot \sin \rho |$$

$$\rho = \tan^{-1} \{ \sqrt{\sec^2 \omega - k^2} / k \}$$

$$\omega = \tan^{-1} (\operatorname{cosec} \theta \cdot \tan h)$$

excepting that the angle $I=90^\circ-h$ for $\theta=0$, and $\rho=90^\circ$ for $k=0$. Where, h : solar altitude, $\theta=\alpha-\alpha'$: angle between solar azimuth α and greenhouse orientation α' , $k=l/r$: ratio of ground level above the center of cylinder l to radius of greenhouse section r (Appendix Fig. 1).

Diurnal variations of direct radiation inside the greenhouse under observation were calculated by using I in the above equation with the values of $k=0.4$ and $\alpha'=+6.25^\circ$, τ_Q for the dewy film and outside direct solar radiation Q . The calculated values approximately correspond to the observational values (Fig. 6).

Finally, seasonal variations of inside/outside ratio of direct radiation, of the north-south and east-west oriented greenhouses with three kinds of transmissivities of the films respectively, were calculated (Fig. 7). The inside/outside ratios of greenhouses oriented north-south and east-west, have systematic seasonal variations, are nearly opposite in phase, and of greater amplitude under dirty and dewy films, than under new film. All the cylindrical vaulted greenhouses oriented east-west are more profitable than those oriented north-south at a latitude of 33°N during four months in winter. On the winter solstice, the inside/outside ratios of direct radiation of the east-west oriented greenhouses are 1.08 times under new film, 1.27 times under dirty film and 1.69 times under dewy film as much as those of the north-south oriented ones.