温室の光環境改善のための研究

(I) フレネルプリズムの温室被覆への応用

蔵 田 憲 次

(東京大学農学部)

Studies on Improvement of the Light Environment in Greenhouses

(I) Application of a Fresnel Prism to Greenhouse Covering

Kenji KURATA

(Faculty of Agriculture, University of Tokyo,)
Yayoi 1-1-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113

1. はじめに

温室の冬期の光不足を補う方法として、たとえば反射板の利用が考案されている(古在等, 1972)。もう一つの可能性としてフレネルプリズムの応用が考えられる。Kirsten (1973)は、フレネルプリズムを温室の被覆に使用すると、冬期の温室への光透過量が増大することを示している。また押田(1981)は、フレネルプリズムの使用によって、温室の夏の過剰な光透過を抑制できることを示唆している。ここでフレネルプリズムとは、ガラスや透明プラスチックの片面を鋸歯状の断面に加工し、凹凸のひとつひとつがプリズムの働きをするようにしたものである。プリズムは光を屈折させる機能と、光の入射角によってはそれを全反射する機能をもっている。この二つの機能を利用すると、Kirsten や押田が示したように、光の不足する冬期はより多くの光を温室内へ透過させ、光が過剰になる夏期は全反射によって光を室外にはね返すことが可能となる。

そこで、フレネルプリズムの構造および被覆方法によって、各時期の温室の光透過率がどのように変化するかを、数値計算によって検討した。今後、実用化に際しての資料となると考えられるので報告する。

2. 計算方法

計算では、直達光だけを対象とした。したがって、今

昭和58年4月6日 全国大会で発表

昭和58年4月18日 受理

後光透過率という時、直達光の透過率を意味する。対象とした地域は北緯 34° とし、対象とした温室は最も一般的な単棟ガラス温室とした。Fig.1 にその温室の形状を示す。計算の簡易化のため、構造材の影響は無視し、温室は桁行方向に無限に長いと仮定した。フレネルプリズムの材質はガラスとした。Fig.1 には、ここで定義した3変数 w , z , ζ も示した。プリズムの稜線に垂直な断面 ($x-x$)での頂点の位置、高さをピッチ(頂点と頂点の間隔)で無次元化した変数が、それぞれ w , z であり、稜線と桁行方向とのなす角度が ζ である。温室の光透過率は、この3変数の関数として表わした。計算は、 w を $0 \sim 1.0$ まで 0.1 きざみで、 z を $0.1 \sim 0.5$ まで 0.1 きざみで、 ζ を $0^{\circ} \sim 170^{\circ}$ まで 10° きざみで変化させて行った。

なお、フレネルプリズムの厚さは、主に力学的観点から決定されるべきであり、ここでは力学的強度は考慮していない。光がガラス内を直進するときの吸収による減衰を考慮に入れると、厚さも光透過に影響を及ぼす要因である。しかし、本計算では力学的観点からの考察を省略していること、ガラスの吸収による透過量の減衰は後述する他の二つの減衰に比べて比較的小さいことから、無視した。また、ガラスによる光の吸収を無視すると、フレネルプリズムの光透過率は凹凸面の幾何学的相似が成立てば変りはない。したがって、凹凸の形状を規定する量として、無次元量 w , z だけをとりあげ、絶対値 (Fig.1 の a , b , c) はとりあげなかった。以上の仮定の上で、厚さが透過率に関係する唯一の例外は、光が Fig.2 に示した経路をとる場合である。このとき、入射光は境

Fig. 1. Dimensions of a greenhouse considered in this study and definitions of variables w , z and ζ .

界面1で屈折し、境界面2あるいは3で反射した後、再び境界面1で反射し、境界面2への入射と境界面3への入射に分配されるが(Fig.2には境界面3への入射を图示した)、その分配率には厚さが関係する。この場合は、単純に境界面1での反射光に垂直な面への境界面2および3の投影面積の比で、光は分配されるとした。Fig.2に示した経路を経る透過光量は、他の経路(たとえば、境界面1→境界面2あるいは3→室内)に比べて小さいので、この簡略法による誤差は無視できると考えられる。光透過率は、温室床面平均受光量 J_n (W/m^2) で評価した。 J_n は次式より算出される。

$$J_n = \frac{J \cdot \sinh}{fl} \sum_{i \neq f} Tok_i \cdot Ar_i + \frac{1}{fl} \sum_{i \neq f} \sum_j J_{ij} \cdot \sinh_{ij} \cdot Ar_{ij} \quad (1)$$

ここで、右辺第1項の $\sum$ は、普通の板ガラスによって被覆された面に関する総和を(f はフレネルプリズム面を意味する)、 J は法線面直達日射量(W/m^2)を、 Tok_i 、 Ar_i はそれぞれ直達光の面 i の透過率、直達光による面 i の温室床面への投影面積(m^2)を、 h は太陽高度を、 fl は温室床面積(m^2)を表わす。右辺第2項の最初の $\sum$ はフレネルプリズムによって被覆された面に関する総和を、2番目の $\sum$ はその面に関して考えられるすべての仮太陽に関する総和を、 J_{ij} 、 h_{ij} は面 i 、仮太陽 j のそれぞれ法線面平均光強度(W/m^2)、高度を、 Ar_{ij} は面 i の仮太陽 j による温室床面への投影面積(m^2)を意味する。ここで、仮太陽とは、プリズムによって屈折・反射された光経路の最終的な見かけ上の太陽を意味する。たとえばFig.2に示した光経路の場合、 S_0 が真の太陽、 S_4 が仮太陽と

なる。また法線面平均光強度とは、光の直進方向に垂直な十分大きな面での平均光強度を意味する。フレネルプリズムを通過した光は縞状をなすので平均化が必要となる。

仮太陽の計算は次のように行った。フレネルプリズムの単位面積に入射する直達日射量を F_0 (W/m^2) とする。 F_0 のうち、ある経路 l によって屈折あるいは反射を k 回繰り返した時のその経路によって直進する日射量を、 $F_{l,k}$ (W/m^2) とし、その時の見かけの太陽高度、方位を $h_{l,k}$ 、 $A_{l,k}$ とする。光がガラスと空気の境界面を通過、あるいは境界面で反射するとき、ベクトル $\mathbf{P}_{l,k} = \mathbf{P}_{l,k}$ ($h_{l,k}$ 、 $A_{l,k}$ 、 $F_{l,k}$) は変換を受ける。ここで、境界面 m での反射の場合の変換を $Tr_{m,n}$ 、屈折の場合の変換を $Tt_{m,n}$ と定義する。ここで添字 $n=1$ は、入射光が空気からガラスへ進む場合を、 $n=2$ はその逆の場合を意味する。Fig.2 に示した経路の場合($l=1$ とする)

$$\mathbf{P}_{1,4} = Tt_{3,2} \cdot Tr_{1,2} \cdot Tr_{2,2} \cdot Tt_{1,1} (\mathbf{P}_{1,0})$$

となる。ここで、 $\mathbf{P}_{1,0}$ は直達日射のベクトルである。 $\mathbf{P}_{1,4}$ より(1)式の右辺第2項の各変数は容易に算出される。 $Tt_{m,n}$ 、 $Tr_{m,n}$ のうち、 $h_{l,k}$ 、 $A_{l,k}$ の変換は球面三角法の公式より計算した。 $F_{l,k}$ の変換は二つの要素からなる。一つは屈折・反射での Fresnel の関係(たとえば、Threlkeld, 1970)より決定される光学的減衰であり、他の一つは境界面に入射した光のうち、経路 l に分割される割合より決定される幾何学的減衰である。幾何学的減衰は、 $h_{l,k}$ 、 $A_{l,k}$ およびフレネルプリズムの構造より決まる。

フレネルプリズム内での光の経路は複雑で、その全てを追う事は不可能である。そこで、境界面を通過する回数が4回以内で、光が室内に透入する場合だけを考えることにする。この簡略法での誤差を調べるために、容易に計算できる板ガラスで、境界面通過回数が4回以内の経路を考慮した場合と、全てを考慮した場合の透過率の

Fig. 2. An example of light paths through a Fresnel prism and imaginary suns introduced by the calculation of light transmissivity. Figures at the surfaces indicate the numbers of the surfaces.

比を検討したところ、入射角が $0^\circ \sim 75^\circ$ で有効数字4桁で1.000であった。入射角がそれ以上になると、比は小さくなるが、その時の透過率そのものも小さいため、以上の計算方法による誤差は無視できるものと考えられる。構造材の影響は考慮に入れていないので、透過率の絶対値そのものは意味がない。そこで、透過率は全面板ガラスで被覆した温室の透過率との比で評価することにし、次の二つの変数で表示した。なお、板ガラスの透過率を計算する場合も、ガラスの吸収による光の減衰は無視した。この方法によって、ガラスの吸収を無視したことによる誤差は、ある程度相殺されるものと考えられる。

$$\text{相対透過率: } \lambda_s = J_n / J_g \quad (2)$$

$$\text{相対日積算透過率: } \lambda = \int_{tr}^{ts} J_n dt / \int_{tr}^{ts} J_g dt \quad (3)$$

ここで、 J_g は全面板ガラス被覆温室の床面平均受光量を、 tr 、 ts は日の出、日の入り時刻を意味する。 J_g は(1)式の右辺第1項より算出される。ただし、 Σ は被覆面全面に関する和とする。なお、(3)式の積分は昼間を12等分し、シンプソン積分により計算した。

3. 結 果

3.1 東西棟温室の南側屋根面をフレネルプリズムで被覆した場合

Fig.3に $\zeta=0^\circ$ (プリズムの稜線が桁行方向に平行)の場合の冬至および夏至における相対日積算透過率 λ を示した。図より、 $z \geq 0.2$ 、 $w \geq 0.7$ で冬至の透過率が増加し、夏至の透過率は減少することがわかる。冬至の λ の最高値は、 $z=0.5$ 、 $w=0.8$ のときで、透過率は35%増加し、そのときの夏至の透過率は約半分に減少する。図には示さなかったが、 $z=0.5$ 、 $w=0.8$ の場合の ζ を変化させた

Fig. 3. Relative daily transmissivity λ (defined by Eq. 3) of an EW-oriented greenhouse with a Fresnel prism on the south roof as a function of w and z . The angle ζ (Fig. 2) is fixed at 0° .

場合、 ζ が増加するにつれて冬至の透過率は減少し、逆に夏至の透過率は増加した。したがって、この場合 $\zeta=0^\circ$ が最適である。この $z=0.5$ 、 $w=0.8$ 、 $\zeta=0^\circ$ の場合の時刻別相対透過率を、月別にFig.5(a)に示す。ここで、各月の透過率は20日を対象として計算した。冬期および夏期の相対透過率は、早朝および夕刻高く、正午前後で低い。春、秋では逆になる。冬期の傾向は、栽培学的に有利なものと考えられる。なお、各月の相対日積算透過率 λ は、冬至から遠ざかるにしたがって、ほぼ直線的に低下した。

3.2 南北棟温室の両屋根面をフレネルプリズムで被覆した場合

南北棟温室の片側屋根面をフレネルプリズムで被覆した場合の冬至における相対日積算透過率の増加は、計算した範囲内で最高10%と小さかった。Fig.4に南北棟温室の両屋根面を、棟に関して対称にフレネルプリズムで被覆したときの $z=0.5$ の場合の冬至および夏至における相対日積算透過率を示す。なお、この場合の ζ は東側屋根面を対象としている。 w が0.3~0.5で、 ζ が $80^\circ \sim 120^\circ$ で冬至における透過率が改善されることがわかる。 λ の

Fig. 4. Relative daily transmissivity λ of an NS-oriented greenhouse on the winter solstice (a) and on the summer solstice (b) as a function of the angle ζ . Both roofs are covered with Fresnel prisms symmetrically with respect to the ridge. The angle ζ is defined on the east roof and the figures at each curve indicate the values of w . The value of z is fixed at 0.5.

最高値は、 $w=0.4$ 、 $\zeta=100^\circ$ のときであるが、施工時の複雑さを考えると、 $\zeta=90^\circ$ （プリズムの稜線が最大傾斜方向）が現実的である。 $w=0.4$ 、 $\zeta=90^\circ$ のとき、冬至の透過率は20%弱増加し、夏至では約半分になる。 z が0.5以下のときの冬至の相対日積算透過率は、 $z=0.5$ の場合より小さかった。Fig.5(b)に、 $z=0.5$ 、 $w=0.4$ 、 $\zeta=90^\circ$ の場合の時刻別の相対透過率を示す。傾向は東西棟の場合（同図(a)）と類似しており、冬期の早朝および夕刻の相対透過率は高くなる。なお、各月別の相対日積算透過率は、冬至から遠ざかるにしたがって2次曲線的に急速に減少した。

Fig. 5. Diurnal variations of relative transmissivity λ_s (defined by Eq. 2) of an EW-oriented greenhouse with a Fresnel prism ($w=0.8$, $z=0.5$, $\zeta=0^\circ$) on the south roof (a) and of an NS-oriented greenhouse with Fresnel prisms ($w=0.4$, $z=0.5$, $\zeta=90^\circ$) on both roofs (b).

4. まとめおよび実用化に関する考察

フレネルプリズム応用の効果は、東西棟の場合顕著で、南側屋根面に適用すると、光透過率は冬至で最高35%増加し、夏至には半分になった。南北棟の両屋根面をフレネルプリズムで被覆した場合、冬至の透過率を20%弱増し、夏至の透過率を半減することが可能であった。夏期の透過率を約半分に減じることの可否は、栽培学的見地からも検討する必要がある。

フレネルプリズムを実用化する場合の限界および問題

点として、次の諸点が考えられる。

(1) 連棟温室には応用できない。冬期、本来なら隣の棟に入射する光を屈折させて、対象とする棟に入射させるのであるから、連棟温室に応用した場合、隣の棟の透過率が減少する。

(2) 日本海側のように冬期曇天日の多い地方では、効果は小さい。

(3) 設計に際しては、力学的強度の面からも検討されねばならない。その観点からは、材質としてアクリルが最適と考えられるが、その場合、温度による膨脹の問題を解決しなければならない。

(4) 埃の付着、凝結水の流下の問題を解決しなければならない。

最後の点に関する解決策の一案として、Fig.6に示したような2層板が考えられる。この際、光透過率は減少するが、保温効果の増大が期待される。

Fig. 6. Profile of a double-glazed Fresnel prism for greenhouse covering.

謝 辞

Fig.6に示したアイデアは、農業技術研究所の岡田益己博士との討論の中から生まれた。ここに記して謝意を表する。

引用文献

- 1) Kirsten, W., 1973: *Die natürliche Einstrahlung in Gewächshäuser in Abhängigkeit von deren Form und Aufstellungsrichtung sowie der Beschaffenheit des Hüllstoffes*, Dissertation Technische Universität Hannover.
- 2) 古在豊樹・杉 二郎, 1972: 温室内の日射量に関する研究(3)ー反射鏡の利用ー, 農業気象, **28**, 79ー88.
- 3) 押田勇雄, 1981: 太陽エネルギー, NHKブックス, 日本放送出版協会, 東京, p.240.
- 4) Threlkeld, J. L., 1970: *Thermal environmental engineering*, second edition, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 495p.