べたがけ資材の長波放射特性と被覆下の 正味放射量および葉温について

陳 青雲*・岡田益己**・相原良安*

(*筑波大学農林工学系
**農業環境技術研究所気象管理科)

Studies on Longwave Length Radiation Properties
of Row Cover (Plant Blanket), Net Radiation
and Leaf Temperature under Row Cover

Qingyun CHEN*, Masumi OKADA** and Yoshiyasu AIHARA*

(* Institute of Agriculture & Forestry Engineering,
University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan
** Division of Agrometeorology, National Institute of
Agro-Environmental Sciences, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan)

1. はじめに

“べたがけ”は、通気性を持つ被覆資材を作物に直接、あるいは若干の隙間を設けて被覆する方法の総称として使われている。またべたがけを利用した栽培をべたがけ栽培といい、その目的には生育促進、蒸散抑制、風害・寒害・霜害・鳥虫害の対策などがあり、使用される資材も不織布、ネット類、寒冷紗など多様である。べたがけの被覆方法には、作物に直接掛ける“じかがけ”，作物との間に空間を設ける“うきがけ”などがある。うきがけには側方を開放するものと閉鎖するものがあり、また作物との空間の大きさも目的に応じて様々である。さらに使用場面も露地、ハウス内、トンネル内などがあり、これらの組合せに対して、地域、季節、対象作物などによる選択が試みられている。しかし、膨大な組合せの中から適切な資材やその使用方法を選択するのは困難であり、各地で試行錯誤的な研究が続けられている。べたがけに関する現在までの研究は、主として栽培に関するものであり、資材の特性や物理的な環境に関するデータは非常に少ない。資材や使用方法の選択に有益なデータの整理と基準化が急務と考える。本研究では、べたがけ資

材の長波放射特性と夜間の被覆下の放射環境及び葉温について考察する。

正味放射量が上向きとなる夜間には、葉温が気温よりも低下する。葉温の低下を防ぐ手段として寒冷紗やネットによる被覆が古くから行われ、その効果については例えば、中川・坪井(1962)によって報告されている。また最近、五十嵐・岡田(1987, 1988)は側方を開放したうきがけの葉温がじかがけ区や露地のそれより高いこと、キャベツの凍害防止に有効だったことを報告している。正味放射量の減衰に最も影響を与えるのは、資材の長波放射特性であろう。べたがけ資材には素材や製法などに大きな違いがあるので、長波放射特性にもかなりの差があると考えられる。したがって、正味放射量の減衰効果や被覆下の葉温にも違いが生じるであろう。使用目的により適した資材の選択あるいは新製品の開発にとっては、資材の長波放射特性と被覆下の放射環境との関係解明が不可欠である。そこで、本研究では、代表的な5種類のべたがけ資材の長波放射特性を測定するとともに、被覆による正味放射量の減衰効果およびモデル葉を用いて葉温の違いを実測した。さらに、葉面の熱収支からべたがけ下の葉気温差(モデル葉面の表面温度と気温の差)を推定した。

2. 実験方法

実験に供したべたがけ資材はポリエステル製長繊維不織布2種(商品名: ラブシートWTD, パスライトWSO),

昭和62年4月5日および昭和63年4月12日全国大会にて発表

昭和63年9月19日 受理

** 現在: 東北農業試験場

** Present address: Tohoku National Agriculture Experiment Station, Morioka, Iwate.

ポリプロピレン製長繊維不織布 1 種（商品名：パオパオ 90 R）、ポリビニルアルコール製割繊維不織布 2 種（商品名：タフベル 3800 N、タフベル 3000 N）の計 5 種類である。以下これらを順に A、B、C、D、E と呼ぶ。

2.1 長波放射特性の測定

農業用フィルムの長波放射特性の測定法については、Horiguchi *et al.*, (1982) や岡田(1983)が報告している。ここでは、放射率計(AERD Emissiometer, D & S Co.)を使用する岡田の方法によって測定した。なお同方法は間隙のないフィルムに対して開発されたものなので、あらかじめポリ塩化ビニルとポリエチレンフィルムに一定の間隙を開けたサンプルを用意して、測定精度を検証した。透過率、反射率、放射率とも、同方法の精度 0.05 以内の値を得ることができたので、同方法がべたがけ資材にも適用可能と判断した。

べたがけ資材は、その厚みや間隙が極めて不均一なので、各資材からランダムに 10 個のサンプルを取り、1 個のサンプルに対して 5 回測定し、その平均を 1 サンプルの値とした。

2.2 間隙率の測定

ここで言う間隙率とは資材の一定面積に占める間隙面積の割合である。資材の間隙部分は長波放射に対してほぼ透明だと考えられるので、間隙率が資材の長波放射特性に及ぼす影響は大である。

長波放射特性の測定に使用したサンプルをモノクロフィルムに 3.5 倍に拡大撮影してから、さらに印画紙に拡大して焼き付けた。この結果、例えば繊維の部分が黒、間隙の部分が白という画像を得ることができる。不鮮明な部分については、適宜手で修正した。印画紙の白黒面積をイメージスキャンナ(日本電気製、PC-IN503 型)を通じてコンピュータに取り込み、この面積の比率から間隙率を求めた。

2.3 圃場実験

圃場実験は、べたがけ下の正味放射量の減衰とモデル葉を用いた葉気温差の測定を目的とした。2.5 m × 2.5 m の鉄パイプの枠組みを地上 40 cm に水平に設置し、供試資材を枠組みに固定した。側面には資材を被覆せず、開放状態とした。これは、被覆下の気温・風速などをできるだけ外気並みに保ち、正味放射量の違いが葉気温差に及ぼす影響だけを抽出しようとしてみたからである。なお、測定場所の地表面は裸地で、乾燥していた。

資材の中央直下 20 cm の高さに放射収支計(英弘精機、CN-11 型)を設置して、正味放射量を測定した。供試資材を約 10 分間展開し、その後 10 分間を無被覆状態として、被覆下の正味放射量 R_i (W/m^2) と無被覆下の正味放射量 R_o (W/m^2) を求めた。正味放射量の減衰を示す

指数として、Hanson (1963) が提案した PI (Protection Index) を使用した。 PI は次式で表される。

$$PI = 1 - R_i / R_o \quad (1)$$

葉温測定用のモデル葉を放射収支計の側方約 10 cm に設置した。モデル葉は厚さ 0.175 mm、5 cm × 5 cm の正方形の硬質ポリエステルフィルムで作成した。岡田・鮫島(1986)は同型のモデル葉を使用して、その表面温度が周囲葉温と近似することを示している。

葉気温差とモデル葉側方の気温をそれぞれ 0.1 mm、0.3 mm の T 型熱電対で測定した。また放射収支計のセンサ直下の地表面温度を放射温度計(Barnes Enging. Co., PRT-5)で測定した。モデル葉と同一高さに光電微風速計(牧野応用測器、AF750 S)を設置して、風速を連続記録した。

実験は茨城県つくば市にある農業環境技術研究所の圃場で 1988 年 1 月下旬から 2 月上旬にかけて行った。測定は正味放射量の変化が少ない夜間 8 時から 10 時の間に行った。

3. 葉気温差の計算式の誘導

葉面の熱収支に基づいて、正味放射量から葉気温差を求める式を次のように誘導した。実験期間中は空気がかかり乾燥しており、モデル葉面に結露が生じなかったことを目視で確認した。そこで、岡田・鮫島(1986)に準じて潜熱伝達を考慮しない次の熱収支式を立てた。

$$R_u + R_d + 2H - 2R_l = \sigma T_s^4 + R_d + 2h_c(T_a - T_l) - 2\sigma T_l^4 = 0 \quad (2)$$

ただし、 R_u 、 R_d 、 R_l は葉面に対する上向き、下向きと葉面からの放射量 (W/m^2)、 H は顕熱伝達量 (W/m^2)、 σ はステファンボルツマン定数 ($5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$)、 T_s 、 T_a 、 T_l は地温、気温、葉温 (K)、 h_c は対流熱伝達係数 ($W/m^2 K$) である。なお、葉面と地表面の放射率を 1 と仮定した。

葉温と正味放射量 (R_n , W/m^2) との関係性を調べるために、(2) 式を次のように書き直した。

$$2\sigma T_l^4 - 2h_c(T_a - T_l) - 2\sigma T_s^4 + R_n = 0 \quad (3)$$

ただし、 R_n は $\sigma T_s^4 - R_d$ で与えられ、上向きが正である。さらに、 $\Delta T_{as} = T_a - T_s$ と $\Delta T_{al} = T_a - T_l$ の 2 つの記号を導入して、これらを (3) 式に代入すると、

$$2\sigma(T_a - \Delta T_{al})^4 - 2h_c\Delta T_{al} - 2\sigma(T_a - \Delta T_{as})^4 + R_n = 0 \quad (4)$$

となる。 $(T_a - \Delta T_{al})^4$ と $(T_a - \Delta T_{as})^4$ をテーラー展開して、2 次以降を省略すると、(4) 式は次のようになる。

$$T_l - T_a = -\{(1 - PI)(R_n + 2h_r\Delta T_{as})\} / (2h_c + 2h_r) \quad (5)$$

ここで、 h_r は放射伝熱係数で $4\sigma T_a^3$ で与えられる。

(5) 式から $4T_{as}=0$ すなわち気温と地表面温度が同じならば、葉温は正味放射量に比例して低下することが分かる。

4. 結果と考察

4.1 長波放射特性

供試資材の素材と長波放射特性、間隙率の測定値（平均値±標準偏差）を Table 1 に示す。A, B 2 種類の資材の素材は同じポリエステルであるが、透過率と放射率にかなりの違いがある。これは主に間隙率の違いによるものと考えられる。また C の透過率が最も高く、0.81 になった。これはその素材が透過率の高いポリプロピレンであるためであろう。共にポリビニルアルコールを素材とした D, E では、間隙率の大きい E の透過率が D のこれよりやや大きくなった。そこで間隙率を横軸にとり、縦軸に透過率を示したのが、Fig. 1 である。C を除く 4 種の資材については、間隙率と透過率の間に直線的な関係があることが明らかになった。これはポリエステルとポリビニルアルコールの放射特性が似ているためであろう（岡田, 1986）。

4.2 PI

PI は (1) 式に示されるように、被覆材が正味放射量を減少する程度を表わし、その値の範囲は 0~1 である。PI の値が大きいほど正味放射量を減少する効果大きい。PI=0 は被覆内外の正味放射量が等しく、換言すれば無被覆と同じ放射環境になることを意味している。

Table 1 に圃場実験から求めた供試資材の PI の平均値と標準偏差を示した。PI の測定時の屋外風速、正味放射量は、それぞれ 0~2m/s, 20~110 W/m² の範囲であり、かなり広い気象条件下で、PI はほぼ一定の値を示した。このことから、PI が被覆下の放射環境を表わすのに適した指標であることが分かる。Fig. 2 に実験室内で求めた長波放射に対する資材の透過率 (Table 1) と PI の関係を示した。図中の曲線は透過率(τ)が 1 のときに PI が 0 になるようにした回帰曲線で、次式で与えられる。

$$PI = 1 - \exp \{-1.56(1 - \tau)\} \quad (6)$$

Table 1 Longwave radiation properties, porosity and protection index (PI) of row covers

	Raw material	Transmissivity	Emissivity	Reflectivity	Porosity	PI
A	Polyester	0.36±0.06	0.52±0.06	0.12±0.01	0.19±0.06	0.57±0.05
B	Polyester	0.58±0.03	0.31±0.02	0.11±0.01	0.39±0.07	0.53±0.06
C	Polypropylene	0.81±0.04	0.07±0.02	0.12±0.02	0.43±0.08	0.24±0.02
D	Polyvinylalcohol	0.61±0.02	0.30±0.02	0.09±0.01	0.48±0.05	0.50±0.02
E	Polyvinylalcohol	0.66±0.01	0.26±0.01	0.08±0.01	0.54±0.06	0.47±0.02

Fig. 1. Relationship between porosity and transmissivity to longwave radiation of row covers

Fig. 2. Relationship between the transmissivity of row covers and protection index (PI)

Table 1 から分かるように供試したべたがけ資材間には、反射率に大きな差がない。そのため PI は、透過率の関数としてよく表わすことができる。反射率が供試資材のように小さい場合には、透過率が 0 になっても PI は 1 すなわち (1) 式の R_i が 0 にならない。これは、吸収率が 1 に近くなるために、地表面から吸収した放射を、資材が天空に再放射するからである。Fig. 2 の結果は、この傾向もよく表わしている。

4.3 葉気温差の計算式の検証

ここでは、葉気温差の計算式(5)式による計算結果と実測値を比較して、この式の妥当性を検討する。(5)式の右辺の計算に必要な正味放射量、気温、地表面温度には実測値を使用した。また対流伝達係数 h_c は風速(v ; m/s)の関数として、Monteith(1973)より $h_c = \alpha(1.86 \times 10^3)^{1/2}$ とした。ここで、 α は風洞実験で求められた同式の関係を、圃場状態に適用するための経験係数である。例えば、堀江(1981)は α を2.5とすることで、実際の条件によく適合すると報告している。ここでは実測値と計算値がよく合うように α を求めた結果、 $\alpha=2$ を得た。

Fig. 3に葉気温差の計算値と実測値を比較した。(5)式は被覆の有無を問わず成り立つので、無被覆の葉気温差も同図に示した。計算値と実測値との差は平均して0.2℃であり、潜熱伝達を考慮する必要のない乾燥条件下では、(5)式による葉気温差の推定精度の高いことが判明した。

Fig. 3 Comparison of actual and estimated temperature difference between a model leaf surface and ambient air using eq. (5)

4.4 ベタがけが葉温に及ぼす効果の推定

(5)式を用いて、ベタがけが放射冷却による葉温の低下を緩和する効果の推定を試みた。想定した気象条件は、露地上の正味放射量 R_o が晴夜の典型的な値 100 W/m^2 、気温 T_a と地表面温度 T_s がともに 0°C 、風速が10から300 cm/sの範囲である。Fig. 4に葉気温差の計算結果を PI に対して示した。なお微風速域では、前述の対流熱伝達係数の関数形の適用に問題があるので、風速が10 cm/s以下の状態を同図から類推すべきではない。従来の放射冷却下の葉気温差のデータからみて、10 cm/sの線が葉温低下の最大値と考えるべきであろう。

Fig. 4から葉気温差は PI に対して直線的に変化すること、またその変化の程度は風速が小さいほど大きいことが分かる。同図では、 $PI=0$ が露地の状態に対応す

Fig. 4. Dependence of leaf-air temperature difference on PI calculated from Eq. (5) under the conditions of $R_o = 100 \text{ W/m}^2$ and $T_a = T_s = 0^\circ\text{C}$

る。例えば、側方を開放したうきがけで内外の気温、風速に差がないとすると、 $PI=0$ に対する葉気温差の値と所定の PI に対する値の差が、露地と被覆下の葉温の差になる。風速が10 cm/sのときに、 $PI=0.5$ の資材を導入すると、葉温の差は約2℃になる。この値は、五十嵐・岡田(1987)が測定した微風時のうきがけ内外の葉温差に一致している。また風速が大きいと、内外の葉温差が小さくなることも図から分かるが、この傾向も五十嵐・岡田(1988)の結果に符合する。さらに岡田・五十嵐(1987)は、B資材のパスライトのじかがけ下の風速(気流速)が、露地上のその約1/10になると報告している。Fig. 4からこの状態を考察するには、例えば、風速が100 cm/sの場合の $PI=0$ の葉気温差と10 cm/sの場合の $PI=0.5$ の値とを比較すればよい。この例では、後者の葉気温差の方が大きく、被覆下の葉温が露地よりも低くなることが分かる。五十嵐・岡田(1988)は、間隙率の小さい寒冷紗を使用したじかがけ下で、風速が大きい場合に同様な現象の起こることを報告している。

(5)式による推定は個葉の場合であり、群落状態ではFig. 4とは異なる結果になるものと考えられる。しかしキャベツの結球葉の温度を論じた五十嵐・岡田(1987, 1988)の結果と、絶対値はやや異なるものの傾向について多くの点で一致をみた。今回の解析方法が、ベタがけ下の葉温を考察する上で有効と思われる。

5. ま と め

本研究では、5種類のベタがけ資材に対して、その長波放射特性と被覆下の正味放射量や葉温の違いとの関係を論じた。主な結果を要約すれば次の通りである。

1) ベタがけ資材の長波放射特性と間隙率を測定した。素材の透過率の高いもの、また間隙率の高いものほど、長波放射に対する透過率が高かった。反射率には資

材間の差がほとんどなかった。

2) 被覆下の正味放射量の減衰を表わす指標として、 PI (Protection Index) を使用し、圃場実験から PI を求めた。 PI と長波放射透過率との関係は、(6) 式で表わすことができた。

3) 葉面熱収支から正味放射量と葉気温差の関係を表わす(5) 式を導いた。圃場における実測値と(5) 式による計算値がよく一致することを確認した。

4) 上式を使って PI と葉気温差の関係を推定した。この結果から、微風時には被覆下の葉温が露地よりも2℃程高くなること、じかがけでは、風速の大きいときに被覆下の葉温の方が露地よりも低下する可能性のあることなどが分かった。これらの傾向は、既往のデータとよく一致した。

最後に、本研究の実施に当たって多大なご協力をいただいた農業環境技術研究所気象生態研究室および業務科の関係各位に深く感謝致します。

引用文献

Hanson, K. J., 1963: The radiative effectiveness of plastic films for greenhouses. *J. Appl. Met.*, **2**, 793-797.

堀江 武, 1981: 気象と作物の光合成, 蒸散そして生長

に関するシステム生態学的研究. 農業技術研究所報告, **A-28**, 77-79.

Horiguchi, I., Sugaya, H. and Tani, H., 1982: The measurement of longwave radiation properties upon plastic films used in greenhouse. *J. Agr. Met.*, **38**, 9-14.

五十嵐大造・岡田益己, 1987: ベたがけによるキャベツ凍害防止効果. 昭和 62 年度日本農業気象学会全国大会講演要旨, 174-175.

五十嵐大造・岡田益己, 1988: ベたがけによるキャベツ凍害防止効果—寒冷紗の目合と保温性. 昭和 63 年度日本農業気象学会全国大会講演要旨, 46-47.

Montieth, J. L., 1973: *Principles of Environmental Physics*. Arnold, 241p.

中川行夫・坪井八十二, 1962: 寒冷紗の夜間放射防止効果について. 農業気象, **17**, 107-109.

岡田益己, 1983: 放射率計によるプラスチックフィルム

の長波放射特性の測定. 農業気象, **39**, 31-34.

岡田益己・鮫島良次, 1986: 温室作物葉面の露発生条件の推定. 農業気象, **42**, 51-55.

岡田益己, 1986: 温室の温度環境. 農業気象・環境学, 朝倉書店, 134-150.

岡田益己・五十嵐大造, 1987: ベたがけ下の環境と作物

生育の特徴. 昭和 62 年度日本農業気象学会全国大会講演要旨, 172-173.

Summary

The use of nonwoven fabrics or cheesecloth for covering crops has become a common practice to promote crop growth or to protect crops from extreme weather or pests. The term, "row cover", is used in the present study to refer to this type of covering. There are several different ways of employing a "row cover", e.g. direct covering without any supporting materials (contact type), and the use of simple frame structures for suspension of the cover (floating type). There are many kinds of row covers, each differing in material and/or in porosity. These differences in covering method or row cover type can affect the microclimate under the row cover. In the present study, the longwave length radiation properties of several row covers were determined and their effects on nocturnal radiation and leaf temperature under the row cover were examined.

Longwave length radiation properties, i.e., transmissivity, emissivity and reflectivity of the five different commercial row covers (A, B, C, D and E) were measured by the method proposed by Okada (1983). The porosity of the row covers was photographically determined. The results are shown in table 1. The relationship between transmissivity and porosity of the row cover is plotted in Fig. 1. The transmissivity depended linearly on the porosity except for row cover C. Row cover C is made from a highly transmissive material polypropylene, while the rest of the row covers are made from materials with low transmissivity, e.g. polyester (A and B) or polyvinylalcohol (D and E).

To express the reduction ratio of nocturnal net radiation flux under the row cover to the outside, a protection index PI , as given by Eq. 1, was used. The PI of each film was measured in field experiments. The PI was clearly related to the transmissivity (Fig. 2) as shown in the empirical Eq. 6 developed from the data.

Based on the heat balance of a leaf surface, Eq. 5 was derived to estimate the temperature difference between a leaf and the ambient air. The differences calculated from this equation showed

good agreement with those observed on the model leaf during night period.

By using Eq. 5, the relationship to describe the temperature difference between a leaf and the surrounding air within a space covered by a row cover and the PI was predicted (Fig. 4). The point of $PI=0$ corresponds to an uncovered condition in Fig. 4. From this figure, the leaf temperature under the row cover can be compared to an uncovered one. Assuming a floating type of row cover with open sides where the air temperature and wind speed are the same as the outside, the difference in the leaf temperature between covered and uncovered condition is about 2°C at a wind speed of 10 cm/s and $PI=0.5$. The leaf temperature under a row cover could drop below the outside air temperature for a contact type covering, where the wind speed typically is only one tenth of the outside wind speed. These tendencies agreed well with measured data given in previous reports.