温床紙の物理性とその効果に関する研究

(1) 通気性とその床内温度に対する効果について

内島善兵衛・三原義秋

(農業技術研究所物理統計部気象科)

Studies on the physical properties of the frame paper and its effects.

(I) On the aeration of the frame paper and its effect on the temperature of the seedling bed.

Z. UCHIJIMA, Y. MIHARA

(National Institute of Agricultural Sciences. Division of Meteorology)

1. はしがき

温床紙の一般的な機能としては油塗布等の方法によって増大された透過率をもつて太陽光線を床内に導くとともに、地面からの放熱を大きく支配する空気の渦乱流運動を抑制して、床内温度を高めることにある。他方温床紙は本来繊維の重層であつて、油の塗布によつてもなお多くの微細孔を残して、紙面両側の圧力差如何によつてはかなりの通気を示すのが普通である。この通気の有無は植物の生育に対しても何等かの効果が考えられるが、ここではまず温床紙の通気の種類と、それが床内の温度形成に持つ働きを検討してみた。紙の被覆による保温についてはこの外に熱線透過率及通湿性も重要な影響を持つので引続きそれらの効果については報告の予定であるが、本報では通気性が保温に対して持つ効果について論じたい。

2. 温床紙の通気性

一般に紙の通気を測るに使われる Densometer は紙に加えられる圧力が一定で変えられないので、ここでは福本¹⁾が報告している吸引法と呼ばれる方法に倣つて第一図(a)に示す様な装置を作つた。同図で A は約 6 l

の瓶で、その上部に U 字マンオメーターと試料をはさむパッキングをもつ直径 7 cm の罐を接続し、排水部 B には流量調節用コックを有する。

通気性の測定にあつてはまず温床紙をパッキングではさみ充分締付けたのちコック B を適度に開いて A 内の水を徐々に排水せしめる。その結果生ずる瓶内の負圧によつて温床紙を通して空気が吸込まれるが排水量と釣り合う時にマンオメーターの動きが停止する。その時の水位をコンパレーターで読み、B を開く前の水位との差を 2 倍して紙面内外の圧力差 g' とする。つぎに通気量はマンオメーターの動きが停止したのち 30~60 sec 間にわたつて測定した排水量をもつてした。本測定に用いた圧力差は 0~50 mmH₂O であるので排水量と通気量が等しいとした時の圧力低下にもとづく体積誤差は 0~0.48% であつて無視出来る範囲である。尙各接続部は気密を保持するために白色ワセリンを塗布した。

2~3 の温床紙について、圧力と通気量との関係を示すと第 2 図の様になる。図中で (a), (b) は夫々機械漉ロール紙の原紙とその紙に成分不明の油を塗布した油紙の通気性を示すもので油の塗布によつて通気が原紙のそれ

の約 1/2 に減じていることがうかがえる。但し、この試料は油紙としては最も通気性の高いものの一つである。尙最近多く使用されている樹脂加工紙及びビニールフィルム等はこの範囲の圧力差では殆ど通気性を示さなかつた。

紙の気体流出の性質を表現する方法としては 2~3 の方法があるが、本報告においては紙面に 1.0 mmH₂O の圧力が加つた時、単位面積を単位時間に通過する空気量を通気率として、また単位面積から単位時間に 0.1 cc の空気を流通さすに必要な圧力を通気抵

抗として表現した。(今、紙層を通る空気流が Darcy

Fig. 1 Apparatus for measuring the aeration of frame paper (a) and the heat transfer coefficient (b).

Fig. 2 Relation between pressure difference and aerated amount.

の法則に従うとすると、 $v_z = \frac{k}{\mu} \cdot p'$ が成立ち $v_z = Q/S$ なるゆえに $k = \frac{\mu QL}{S(p_1 - p_2)}$ と表わされ、この k は紙の通気率を与える。第2図の夫々の線上の値は p' が20のときの k の値を示すものである。但し μ は空気の粘性係数、 Q は流量、 S は面積、 L は紙の厚さ

温床紙を繊維の積層よりなる一種の多孔質体と考え、そこに存在する間隙を毛細管と想像すると、半径 r で単位長の毛細管に働く力は外力を無視すると次式で与えられる。

$$\pi r^2 p' = 2\pi r \tau_0 \quad (2.1)$$

但し r : 半径、 p' : 圧力差、 τ_0 : 管壁の摩擦応力
上式から

$$r = 2\tau_0 / p' \quad (2.2)$$

となり、この式は圧力差 p' の存在のもとに通気を許す最小孔半径を与えるものである。一方表面摩擦応力は次式の様になり、

$$\tau_0 = 4\mu \bar{w} / r \quad (2.3)$$

μ : 空気の粘性係数、 $\bar{w}$: z 方向への速度

(2.2), (2.3) を用い、 $\bar{w}$ を 0.5 cm/sec と仮定して温床紙の厚さ 0.0026 cm について、半径 r の毛細管を通過するに必要な圧力差を計算すると第一表のごとくなる

上表にみられる通り、毛細管の半径の微小なときは通気を許すに非常に高い圧力差を必要とし、その圧力は半径の増大につれて急減することがうかがえる。他方温

Table. 1 Values of the diameter of capillary tubes and the critical pressure-difference enough to aerate through them.

Dia meter (μ)	$2\tau_0$ ($\frac{\text{g}}{\text{cm}} \cdot \frac{1}{\text{sec}^2}$)	Pressure difference ($\frac{\text{cmH}_2\text{O}}{\text{cm}}$)	Pressure difference ($\frac{\text{mmH}_2\text{O}}{0.0026/\text{cm}}$)	Dia meter (μ)	$2\tau_0$ ($\frac{\text{g}}{\text{cm}} \cdot \frac{1}{\text{sec}^2}$)	Pressure difference ($\frac{\text{cmH}_2\text{O}}{\text{cm}}$)	Pressure difference ($\frac{\text{mmH}_2\text{O}}{0.0026/\text{cm}}$)
200	0.072	7.2	0.18	100	0.14	28	0.72
180	0.08	8.8	0.22	80	0.18	45	1.17
160	0.09	11	0.28	60	0.24	80	2.08
140	0.10	14	0.36	40	0.36	180	4.68
120	0.12	20	0.52	20	0.72	720	18.72

床紙を通過する空気量は次式で示される。

$$Q = \int_{2\tau_0/p'}^{\infty} \frac{gr^2 p'}{8\mu l} \cdot \pi r^2 f(r) dr \quad (2.4)$$

Q : 流量、 g : 重力の加速度、 l : 紙の厚さ、 $f(r)$: 毛細管の分布関数、 $f(r)$ の分布型及びその最多値が Q に対して大きな影響を有することが (2.4) からうかがえるが、分布型を正視分布と考え最多値として $2r = 10 \sim 20\mu$ とすると、紙を通して空気が流れ、熱等の拡散に寄与するためには第一表から考えて 18 mmH₂O の圧力差が必要とされる。種々の強さの風の下で、地面に張られた紙の内外の気圧差がどの程度になるか不明であるが、普通の気象状態では空気が自由に流通する程の圧力差が生ずることは考え難い。従つて通気量はあっても、一般に極めて小さいものと推定出来よう。

3. 通気性と表面熱伝達率

地表面の冷却は輻射と熱移譲(分子的、及渦動的伝導)によつてなされるが地面が温床紙で被覆されるときは、長波長の輻射をさえぎることはもちろん地面から熱を奪つて逃げる空気の運動を極度に減少させて放熱冷却を防ぐが、その程度は紙の性質と地面から紙面までの距離等によつて異なるものである。今他の条件は一定として通気率を変えたとき、地面からの放熱の多少を示す熱伝達率がどの様に変化するかを模型によつて実験的に調べた。試料としては、温床紙としては特殊であるが最も紙質が均一と考えられるグラシン温床紙(メラミン樹脂加工)を用い、直径約 0.1 mm の針孔を次表のような比率で穿つて通気率の異なるものを得た。

測定の装置としては第1図cのごときものを作つた。即ち直径10 cm、厚さ 0.3 cm の銅板を保温材の上部に置き下から電熱で加熱し、温床紙は銅板の表面から 1.5 cm 離して気密に張られた。このようにして銅板の中心部の表面と裏面に設置した熱電対 ($\phi = 0.25$ mm) で温度を測定した。今銅板の中心においては周辺の影響がないと

Table. 2 Aerating resistance of the frame papers given the various aerations.

Number of Pin Hole (/100cm ²)	Aerating Resistance (mmH ₂ O)	Transparency (%)	Number of Pin Hole (/100cm ²)	Aerating Resistance (mmH ₂ O)	Transparency (%)
0	340.0	74.3	30	0.028	76.7
15	0.12	73.4	50	0.016	75.8
20	0.032	74.3	00	0	100.0

すると、中心の単位面積を単位時間に上方へ流れる熱量は次式で与えられる。

$$Q = -k \left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{L} \right)$$

Q : 熱量 k : 熱伝導率 θ_1, θ_2 : 銅板の下, 上面の温度, 他方銅板の表面からの放熱は Newton の冷却則にしたがうとすると,

$$Q = \alpha(\theta_2 - t)$$

α : 熱伝達率 t : 気温

定常状態時には両式が等しい故に、無蓋の場合及各種通気率の温床紙を被せた場合の夫々の θ_1, θ_2, t の実測値を入れ α を求め、それらを各試料の通気抵抗とともに示すと第3図のようになる。

Fig. 3 Heat transfer coefficient for various aerating papers.

第3図では無蓋区は通気抵抗0として表現される。表面が紙で被覆されるときは熱伝達係数(或は放熱係数と考えてよい)は急速に減少し通気抵抗0.06(グラシン紙に15~20/100cm²の針孔を穿つた場合で、このように通気率の高い紙は温床紙にはない)前後から係数は殆ど一定になっている。即この程度以下の微細孔群の存在は放熱の大きさに関係しないことを示している。実際の温床紙の通気抵抗の範囲は大体100mmH₂O以上であることから、温床紙の通気率は殆ど床内の保温には影響を及ぼさないことが考えられる。然し乍ら、この場合に被覆されたものは蒸発をともしないものであるが、実際の苗代等の被覆の場合には水蒸気の問題が残っている。次に屋外に水田状態を模したものを作りその上で蒸発の項を加味して通気性と保温効果との関係を見よう。

4. 模型水田の熱経済と温床紙の通気性との関係

既に指摘したように温床紙は地面が受けた太陽輻射の大部分を水温地温の上昇に消費させる目的のために使用されるが、その場合の熱配分がどの様になっているか、又温床紙の通気性との関係を知るために模型水田の上に第2表に示した温床紙(人工的に通気性を高められた)を被覆して実験を行つた。実験は昭和27年8月に快晴無風乃至は軟風の気象条件下で行われた。

実験に使用した模型水田は60×60×30cmのコンクリート框で内に川砂をつめ、水深5cmで水面上4cmの間隔において温床紙を気密状態に張つた。温度測定は水底の地面と地面上2.5cmの水中、水面上1cm, 4cm, 8.2cmの各所で熱電対を用いて行つた。以上のようにしてえた観測値から紙の内外における熱経済と通気性との関係を求めた。以下に順を追つて説明する。

(1) 渦動拡散率について 水面上の空気の流れは蒸発と放熱に大きな影響を与えるが、温床紙はその空気の運動を著しく阻害して蒸発及び放熱を減少せしめる効果をもつ。今その阻害の程度を見る為に上記実験結果から渦動拡散率を求めて比較してみる。地表近くの空気の熱量はすべて地表面から与えられると考えると、地表近くの大気中の渦動拡散率 K は次式で与えられる。

$$K = \frac{(y_1 - y_2)^2}{(\log a_1 - \log a_2)^2} \cdot \frac{\pi}{T}$$

但し y_1, y_2 : 地表面からの二点の高さ T : 週期

a_1, a_2 : y_1, y_2 点に於ける気温の振幅

温床紙のある場合にはその内外に於ける大きな振幅差は温床紙の存在にもとづく空気の交換阻害によるとして、そのときの見掛けの渦動拡散率を水面上1cm(床内)、8.2cm(床外)の気温日変化の振幅から計算した。その結果を通気性とともに示すと第5図の点線のように、通気抵抗0—無蓋の場合に最高で46.5C.G.S., 通気抵抗0.06の附近までは抵抗値の増加にもなつて急激に減少し0.004C.G.S.となり、それ以上の高値域では通気抵抗の増加とは余り密接な関係がなく殆ど一定値0.003C.G.S.を示した。ここに計算した見掛けの渦動拡散率は実際の数値ではないが、その場所の空気交換の難易を代表する数値と見做していいだろう。それゆえに温床紙は極度に空気の交換を遮つて保温効果を上昇せしめていることが分る。

(2) 熱経済について、通気性の大小と、紙を通しての熱伝達係数及び渦動拡散率を求めて、普通の温床紙に見られる通気性ではその熱移流の働きは少いことを述べてきた。今、それらの関係の最終的結果として表現され

る被覆湛水田の熱経済について考察してみる。即ち、温床紙で覆われる結果としてどれ程紙面下の熱の温度上昇への消費が増大するか、又その割合と通気率との関係はどうなるかということ調べよう。

このような目的にたいしての表現法としては種々の方法が考えられる。例えば、高橋⁽²⁾は地表面が一度吸収した熱量 q と、 q のなかで空中へ逃げる量 q_a との比 q_a/q が大気の大気拡散率の函数であることを指摘した。又 Lettau⁽³⁾は地中へ入った熱量と、空中へ逃げた熱量との比が主として土壌の熱的性質と大気の状態等の函数であるとして地面の微細気象の特性を代表するものの一つとした。

今、湛水面における熱収支を単純化すると次のようになる。

$$S = B_s + B_w + L$$

但し S : 有効日射量

B_s : 地温上昇に費した熱量

B_w : 水温上昇に費した熱量

L : 乱流拡散又は蒸発による放熱量

有効日射量としてはゴルチンスキ日射計の観測値から水面反射及温床紙の吸収反射量を差引いたものを用いた。 B_s は水底地表面の温度観測値をフーリエ展開して次式の第3項迄を用いて求めた⁴⁾。

$$-k \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=0} = -k_i \sum_{i=1}^3 A_i \lambda_i \sin(ipt + \frac{\pi}{2} + \epsilon_i)$$

但し k : 飽水した川砂の熱伝導率

$\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=0}$: 地表面の温度傾度

A_i : 各項の振幅 ϵ_i : 位相の遅れ

λ_i : $(\log A_i - \log A_{i+1})/x_i$

川砂の熱伝導率は水底土の温度観測から求めた温度伝導率から $k = \kappa^s \cdot c \cdot \rho$ の関係を用いて得た $8.3 \times 10^{-3} \text{C.G.S}$ を使用した。 B_w は水深、2.5 cm の温度観測から計算した。 L としては $S - (B_s + B_w) = L$ から間接的にえたものを使用した。

著者等は通気性の異なる温床紙が空気の運動を防止してどのように微細気象的環境を変化せしめているかを知るために各時刻における S と $(B_s + B_w)$ の値から ΣL と $\Sigma(B_s + B_w)$ を求め両者の比、 $R = \Sigma(L) / \Sigma(B_s + B_w)$ を計算した。この値は Lettau の R とは逆の関係にあるが土壌の熱的性質と大気の状態の函数であることは明らかである。今水面以下の性質はすべて同一と見做されるから R は大気状態の時間的平均にだけ関係していることが分る。各温床紙下の R を通気抵抗にたいして表現すると第4図に示すようになる。

Fig. 4 Effect of the frame papers having various aerating resistances on the eddy diffusivity, the ratio of ΣB to ΣL , and the relative amplitude of water temperature. Resistance is for non-cover. (21.22 August 1952)

抵抗値0、即ち自由水面では $R=2.2$ で有効輻射量の66%が空中へ、残り34%が水地温の上昇に使用されるにすぎない。通気抵抗が僅かに増して0.04~0.08となると、 R は急減して約0.8を示し44%が空中へ56%が地水温の上昇に費される。それ以後では通気抵抗の増加に伴う R の変化は緩かとなり抵抗値340では $R=0.58$ を示し有効輻射量の37%が空中へ63%が地水温に消費されていることが解る。自由水面区での水温変動の振幅を1として他区との振幅比をもとめると第4図の実線のようになり、通気抵抗と R の関係から予想されるごとく通気抵抗0.06附近までは相対振幅は急激に増加するが、それ以後は殆ど変化を示さず、通気抵抗の高値域における変化は水温へ影響を与えないことが解る。

以上数項にわたつて温床紙の通気性及通気性と床内温度との関係について説明したが、それらを要約すると次のようになる。

最近使用されている温床紙は、その通気抵抗は殆どが50~100以上であつた。温床紙に通気性を与える原因を紙面に存在する毛細管群と考え、その平均直径を20~30 μ と考えるとこれを通して空気が流れるには、少なくとも10 mmH₂O以上の圧力差が紙面に必要であるが、軟風程度の気象条件ではかかる圧力差は期待出来ないといふと紙を通しての空気流は僅少で紙面における熱流は温床紙を伝導してなされることが出来るだろう。それ故に温床紙の通気性と温度の間には通気抵抗の高い範囲では余り顕著な関係を見出すことは出来なかつた。終

りに実験に協力された同僚矢吹万寿・薮原美代子両按官
にたいして深く感謝する。

文 献

- 1) 福本保, 1949: 紙の気体流出性質について; 応物
Vol. 18, No. 10~12
- 2) 高橋喜彦, 1944: 固体表面で熱の出入がある場合
の一次元熱伝導の図式解法, 気集, Ser. 2, Vol.

- 22, No. 3
- 3) H. Lettau, 1951: Theory of Surface Temperature and Heat Transfer Oscillations near a level Ground Surface, Trans. Amer. Geophys. Union., Vol. 32, No. 2
- 4) 八鍬利助, 1937: 札幌の地温について, 気集, Ser. 2, Vol. 18, No. 3

Résumé

At present, the frame paper which obstructs extremely the heat transfer with the air exchange and the evaporation from the surface is being used for the temperature rising in the seedling beds.

The transparency of the frame paper has been frequently studied by many researchers, but the relations between temperature in the seedling bed and physical properties, especially the aeration of the frame paper have not been studied.

In this report, then, authors experimentally deals the aeration of the frame paper and its effect on the temperature in the seedling bed of rice, and the experiments were carried on the three points, i.e. the measurement of the aeration of the frame paper, its effect on the heat transfer coefficient, and that on the heat balance in the paper frame.

The aeration of the frame paper was measured by means of so-called the sucker-method described in Fig. 1. The relation between the pressure-difference at the both side of paper and the aerated amount through the paper is shown in Fig. 2, in which the curve (a) and (b) show that of the original paper and oiled paper, respectively. This result shows that the aeration of the frame paper is decreased by the oiling.

If we assume that the frame paper is a kind of porous materials which is made from the cellulose, and that the pore in the frame paper is the capillary tube, then the forces acting to the air in the capillary tube are regarded the pressure-difference and the frictional stress, and those relation is shown in Eq. (2. 1). Eq. (2. 2) derived from Eq. (2. 1) indicates the critical pressure-difference enough to aerate through the each size of the capillary tubes. Provided that the external force can be neglected and the mean flow speed of the air in the capillary tubes is 0.5 cm/sec., the calculated values are shown in Table. 1.

After Fukumoto's paper, we can assume that the average diameter of capillary tubes in the frame paper is smaller than 20μ and that no larger pressure-difference than $10\text{ mmH}_2\text{O}$ between in and out of the frame will occur under ordinary weather condition, then it may be inferred that the air flow through the paper is very little.

We carried out following two experiments in respect to the effect of the aeration on the heat transport from the ground surface, and for them, some sheets of a specific paper given various aeration by means of varying the number of the artificial pinhole per unit area (Table. 2) were prepared.

At first, by using the apparatus as showed in Fig. 1b, how the heat-transfer coefficient at the heated surface varies on account of covering with the divers aeration paper was measured. The results are represented in Fig. 3.

Another experiment was done on the pattern of rice seedling-bed at outdoor. Above mentioned papers were spread on the soil tanks ($60\times 60\times 30\text{ cm}$) filled up with water 5 cm. in depth. During 13 days the temperatures at three places, middle of the water, soil surface in the bottom, and the air layer adjacent to the water surface, were measured by the thermo-junction, and the effect of aerating resistance (pressure-difference required to aerate the air 0.1 cc/cm. sec.) on the virtual eddy diffusivity in the air layer adjacent to the water surface and on the heat balance in the pattern of seedling bed was calculated. Those results are shown in Fig. 4, in together with the each aerating resistances and the each relative amplitudes of the water temperature change. The eddy diffusivity (K) and R (indicate the micrometeorological characteristics) decrease rapidly with increasing of the aerating resistance at the range lower than about $0.04\sim 0.06\text{ mm H}_2\text{O}$., but at the higher range those decrements become very slow and the variances of K and R with the increase of the aerating resistance were almost negligible.

According to the above results, we shall be able to conclude that the aeration of the practical frame papers having the higher value than $50\sim 100\text{ mm H}_2\text{O}$ of the aerating resistance does not affect to the temperature change in the frame under ordinary weather condition.