農業気象 (*J. Agr. Met.*) 34(4): 165–176, 1979

防風網による水田の昇温効果

真 木 太 一

(農業技術研究所気象科)

Modification of Various Temperatures around Paddy Rice Fields
as Influenced by Windbreak Net

Taichi MAKI

(Division of Meteorology, National Institute of Agricultural Sciences,
Nishigahara, Kita-ku, Tokyo 114)

1. は し が き

防風施設による気象改良効果には台風、季節風などの強風を防ぐ目的以外に、寒・熱風害、潮(塩)風害、風食(飛砂)害、冷害、凍霜害、雪害を防いだり、大気汚染の原因である浮遊物質(煤煙、有害ガス、塵埃)、病原菌、微小昆虫を捕捉、沈降、沈着させて浄化作用を持つばかりでなく、防音、防臭効果も考えられる。さらに霧に対しても防霧効果を発揮する。たとえば、東北地方太平洋側のヤマセ風や北海道南東海岸地帯の海霧に対して防風・防霧林が冷害気象改善に重要な役割を果たしている。これには減風・昇温効果以外に霧粒の沈降・沈着・捕捉・蒸発作用が考えられる。

防風施設の内では防風林がもっとも一般的であるが、その他、垣、網、塙(牆)、塀(屏)、壁、柵、堤、囲い、格子などが含まれる。

防風施設の研究は従来より極めて多くある。以下主なものを示す。高須(1939)はヤマセ風地帯での気温、水温、地温、湿度面から防風林の有効性を、佐藤ら(1952)は耕地防風林の実験観測を、浅井(1952)は放置水では防風塙の効果はあるが、冷水で日射が少ない場合には水温上昇効果はマイナスであることを、田中ら(1953～1957)は防風垣前後の風について垣の形態、高さ、遮蔽度、風向の変動、乱れなどの研究を報告している。

鈴木(1954)は冷害対策への防風林・塙の効果についてまとめ、0.3～0.9℃(霧・曇天)、2.0℃(晴天)の昇温効果と生育・収量の調査例を報告し、川原(1957)は防

風塙による風速、気温、地温、湿度の変化を求め、谷(1958, 1960)は風洞実験から防風効果の大きい垣は密度(抵抗)をある程度高くする必要があるが、高すぎても効果が減するため、従来からの最適密閉度 70～80% を肯定し、さらに網の防風効果は風速 2m/sec 以上では風速の増大と共に低下するが、1m/sec 以下では急激に大きくなると述べ、さらに防風効果と密閉度との一次関係式を求めている。

Kaiser (1959)は風速・風向の性質を種々の防風垣との関連から詳細に研究を行っている。阿部ら(1960)は混植の防風林で 10H (高倍距離)までは水稻の栄養生長量を増大させる効果があることを、大根田(1962)は防風林と作物増収との関係を報告し、楠瀬(1963)はヨシズ囲い内では熱・水蒸気の垂直輸送が少なく、顕・潜熱共に日中は小さく夜間は大であることを、藤田(1963)は石狩地方での季節(南)風の特徴と防風林の効果を説いている。

Rosenberg (1966)は風速、気温、湿度、土壌水分、純放射、気孔開度について防風囲いの効果を、横田ら(1968)は寒冷紗(＃110, 間隙率 57%)を用いて水稻の生育期間中の平均で 0.5℃の気温上昇、日較差の増大、蒸発散量の減少を報告している。Skidmore *et al.* (1969)は蒸発散位を風速と湿度との関係で表わし、Radke & Burrows (1970)はトウモロコシ防風畝により 6 年間的大豆収量が -2～28% (平均 12.4%) の増収を示し、6～15H 毎にトウモロコシを植えると効果的であると述べている。白佐(1970)によると 2 列の寒冷紗(＃100)で -5～25H で約 10% の水稻収量の増加になっている。穴水ら(1971)は寒冷紗(＃200)とヨシズ防風垣を用いて

昭和 53 年 10 月 28 日 東北支部会にて発表

昭和 53 年 11 月 1 日 受理

地上 50~100 cm で 0.1~3.0℃, 0.5~3.4℃の保温効果が
あり, 最低気温の垂直分布より 50 cm 高では前者, 100
cm では後者が保温が良いことを述べている。

Seginer & Rosenzweig (1971, 1972)は小割板フェ
ンス(2m 高, 遮蔽率 50%)の 7.5H で安定度差による風
の入射角と剪断応力の関係を求め, Skidmore *et al.*
(1972)は小割板フェンスによる気温・気温差, 水蒸気
張力, ボーエン比の時間変化を, Frank & Willis(1972)
は春小麦の気孔拡散抵抗, 葉水分位などの防風垣(小割
板), 防風林(数列)による影響を報告している。横田
ら(1972)は密閉度 30, 40, 50, 60, 100% の模型防風垣
で気温の垂直分布を求め, 60%前後のものが最大昇温が
期待できることを, 高橋(1977)は温室の顕熱伝達の測
定から密閉度 60% の寒冷紗の 2~3H が効果大で, 温床
での測定から 65~80%の寒冷紗の 4H で有効であることを
述べている。

内島ら(1977)は石狩地方で水稻の生育・収量への防
風林の効果を 1976 年の冷害年の実測結果より明らかに
している。また, Takahashi (1978)は防風林の幅と風
速分布について, 諸橋(1978)は模型防風垣(平板)の後
方での熱伝達について蒸発量と乱流の関係を明らかにす
るために風洞実験を行っている。

泊ら(1978)は防風網とヤチダモの防風林で総合的気
象観測を行い, 防風網の-15H と 5H で水温・気温上昇
はそれぞれ, 日中最高 7℃, 2℃, 夜間 1℃, 1℃あり, 6
月下半期で気温は 2.4℃, 7月で 1.1℃の昇温を得ている。
また草丈, 茎数, 不稔歩合, 登熟歩合に好成績を得, 生
育ステージの幼穂形成期, 成熟期は 6 日, 10~11 日早
まり, 収量は 5, 10, 20, 40H でそれぞれ, 42, 24, 13,
14%の増収を得ている。さらに防風林でも昇温効果を
求め, 4H で日平均 0.5~1.2℃(7月上旬)の水温上昇お
よび約 1℃の気温上昇となっている。Maki (1978)は
松の防風林で風の乱れの水平・垂直分布を測定し, 樹冠
の下方からの吹上風の特徴について詳しく報告してい
る。

以上の文献の内, 水田の防風, 昇温についての研究に
は高須(1939), 鈴木(1954), 阿部ら(1960), 藤田
(1963), 白佐(1970), 穴水ら(1971), 横田ら(1972),
内島ら(1977), 泊ら(1978)などがあげられる。

防風林は防風の他に防霧効果が大きく, 昇温効果を判
定するには好都合であるが, 石狩地方の水田地帯に分布
する基幹防風林は背が高く, 植幅も広く幅員も長いので,
観測は大規模にならざるを得ない。従って本観測では比
較的手軽に設定, 除去でき, 観測に便利で背丈もあまり
高くなく, しかも研究上物理的に取扱い易い防風網を用
いた。

防風網の効果としては主として減風によって乱流輸送
を減少させ, 蒸発散量を少なくすると共に, 日射により
吸収した熱エネルギーの拡散を少なくする効果が考えら
れる。Fig.1 に温度(気・水・地・葉茎温)の上昇効果
に影響を及ぼす要素の流れをブロックダイアグラムで表
わした。図より昇温効果のメカニズムが説明できる。

2. 観 測 方 法

観測は 1978 年 6 月 22 日より 7 月 1 日まで北海道夕張
郡長沼町東 6 線南 6 号の水田で行われた(真木, 1979)。

温度関係の測定には赤外線放射温度計(表面温度計)
および熱電対温度計を用いた。表面温度計はバーンズ社
(Barnes Engineering Company)製の PRT-5 型で,
測定範囲は 10~45℃(3 段切換の 1 チャンネル), 感度
は 0.05℃, 標準波長帯域は 8~14 ミクロン, 応答速度は
3Hz で 50 ミリ秒(3 段切換の 1 チャンネル), 視野角は
2 度である。なお葉茎および水の射出率(放射率)はど
ちらも 0.98 (日本バーンズ社)であり, また水に対して
は 0.96 (Honeywell Research Center, 1960)である
ため, 1 として取り扱った。また, 熱電対温度計は 0.1
mm (葉温, 気温)および 0.5mm (水温, 地表温)の銀ろ
う付銅コンスタンタン熱電対(自作)である。

測定地点は防風網から風上側では 4m (-2H), 24m
(-12H), 40m (-20H), 風下側では 2m (1H), 4m (2

Fig. 1. Block diagram on effects of microclimate modification using windbreak facilities.

H), 10m(5H), 15m(7.5H), 20m(10H), 40m(20H), 60m(30H), 80m(40H)である。ただし、括弧内の数値は防風網からの高倍距離、Hは防風網の高さ(2m)を表わし、マイナスは防風網の風上側、プラスは風下側を表わす。なお一般に防風施設の風上・風下距離を表わす場合に防風施設の高さの倍数を用いるが、ここでもその方法に従い高倍距離として表わした。

表面葉茎温は表面温度計により地面上約15cm(草丈のはば中央)で、ヘッドを水平にして真横から測定した値であり、その視野には葉・茎部共に含まれている。表面水温は同測器により水面上10cmでヘッドを水面に垂直にして測定した値である。葉温(表の葉のやや先端部ではば垂直な葉の各2点の平均値)、気温(葉温測定の間直ぐ横の各1点の値)は地面上15cmで0.1mmの熱電対温度計を、水温(中位の水深、地表面より3cm)地表温(熱電対感部が土壤に隠れる程度の深さ)は0.5mmの熱電対温度計を用いて測定した。

温度測定は移動式であるため、表面温度計での測定には約15分、熱電対温度計での測定には約25分を要した。従って時間による温度補正を行った。

風速は風上側15H地点で水面上高度約50cm(地面上60cm)で光電式風速計(牧野応用測器社製)で測定し(北海道農試の測定データ)、風向は25H地点で吹流しの方向より求めた(南南西〜南, Fig.2)。また雲量は毎時間に求めた。

水稻(品種イシカリ)の生育調査として、草丈のみを温度測定と同じ地点で測った。なお詳しい生育・収量調

査は北海道農試、農業改良普及所が行った。

防風網は三晃化学社製のクレモナ寒冷紗(＃110)で、規格によると1枚の幅×長さは1.8m×10mである。敷設高度(H)は2mで175mにわたって設定されていた。ただし、防風網と地面との間には25cmの空間(網幅は実測175cm)を取って敷設されていた。

観測地域の状況をFig.2に示す。なお、図は北海道農試、農業改善普及所、長沼町役場・農協が観測を行っている地域である。風上側では同じ水田および北東側(隣)の水田で、風下側では南西側(隣)の水田で観測を実施した(真木, 1979)。

3. 結果および結果の考察

3.1 曇天、止水湛水田での観測(6月22日)

(1) 温度および温度差の水平分布

観測期間中は一日中曇量10の曇天であり、午前中は薄曇り、夕方には時々小雨がぱらつくような天気であり、かなりの強風(4~5m/sec, Fig.3-C)が吹く気象条件下で観測が行われた。Figs.3-A, 4-Aに温度の水平分布、Fig.3-Bに温度差の水平分布を示す。これはFigs.3-D, 4-Bに示す日中の11~18時の6回の測定の平均値を防風網からの距離について表わしたものである。

Fig.3-Aより2~10H程度では、表面葉茎温(t_l 、赤外線放射温度計で測定した平均の葉茎温)で0.3~1.0℃、表面水温(t_w 、同測器で測定した水温)で0.8~1.6℃の上昇が認められた。なお、基準温度は-20H地点の値(以下同様)である。さらに、20, 30, 40Hにおいて

Fig. 2. Situation around observational paddy rice fields and arrangements of precision radiation thermometer, thermo-junction thermometers and anemometer.

も t_l で $0.1 \sim 0.2^\circ\text{C}$, t_w で $0.5 \sim 0.6^\circ\text{C}$ の上昇を示している。また t_l のピークは 5H に, t_w では 2H に見出された。このように防風網による昇温効果が不良気象条件下においても明らかに認められることは興味深い。

Fig. 3-B に t_w と t_l の温度差 ($t_w - t_l = t_{wl}$) の水平分布を示す。日中においては t_w が t_l よりも常に $1.7 \sim 2.7^\circ\text{C}$, 平均値で 2.1°C 高温となっている。また防風網直前 1H より 2H でその較差が大きい。

(2) 温度および温度差の時間変化

各観測時における温度および温度差を Figs. 3-D, 4-B に示す。これは Figs. 3-A, B, 4-A に示した 11 地点の平均値である。Fig. 3-C のとおり風速が 11 時頃より大となったため風速減少効果の大きい 2H など以外では t_l は 11~18 時で減少しているが, t_w は 12~13 時にピークがあってその後減少している。その結果日射量の大きい時刻よりも少し遅れた 13~14 時に t_{wl} のピークが認められた。これは水と葉茎の熱容量差によるものと

Fig. 3. (A): Normalized horizontal variations of surface leaf-stem temperature (t_l) and surface water temperature (t_w). Temperatures at the point of -20 H are reference ones. The value (-20 H) is the distance from the windbreak net (-40 m) represented with its height (H). Minus sign indicates the windward side and plus sign leeward side. (B): Horizontal variation of temperature difference $t_{wl} (=t_w - t_l)$. (C): Change of windspeed at the height of 50 cm from the water level and the distance of -15 H. (D): Change of temperature difference (t_{wl}).

Fig. 4. (A): Variations of horizontal profiles (1430, 1800 and mean, June 22) of surface leaf-stem temperature (t_l) and surface water temperature (t_w). (B): Changes (2 H, 30 H, and mean from -20 H to 40 H) of t_l and t_w .

思われる。

なお, この日の熱電対温度計を使つての葉・気・水・地表温のデータは観測回数が少ないため省略する。

3.2 晴天, 止水湛水田での観測 (6月23・24日)

(1) 温度および温度差の水平分布

・表面葉茎温, 表面水温の場合 (赤外線放射温度計)

6月23日9時半より24日13時までの内, 代表的な0000, 0600, 1300および測定期間の平均の温度の水平分布をFig. 5-Aに, 測定期間の平均の温度差の水平分布をFig. 6-Aに示す。-2Hから10~15Hの間で昇温効果が十分認められる。平均値については-2~10H間で t_l では $0.2 \sim 1.4^\circ\text{C}$, t_w では $0.9 \sim 2.3^\circ\text{C}$ の効果がある。 t_l について最大の昇温効果のあった時刻は1700 (図省略) であり, 30Hの値と2Hの値 (水平分布中の最高値) を比較すると 2.7°C の昇温が確認された。また t_w については1000~1800が大きい効果を示し, なかでも1515が観測期間中最大の昇温効果があり, 30Hの値と2Hの値を比較すると 3.8°C も上昇している。また夜間においても, 昇温効果は小さくはなっているが常に認められ, t_l では4時に2Hと30Hで 0.5°C , t_w では0, 2, 6時に 0.7°C の差となっており, 防風網の有効性をよく表わしている。

一方興味深いことは1Hの t_l 、 t_w が2Hの値より低く
 なっており、さらに日中には-2Hより低い場合が相当
 多く認められる。 t_l では0800~1230の全観測値共に、
 ±2Hの値より1Hの値が低い変化傾向を示している。こ
 の原因は防風網下25 cmに網がなく、そこで風が収れん、
 発散するために吹き抜ける空氣の膨張による断熱冷却な
 らびに風速の増加による潜熱・顕熱輸送の増大とそれに
 伴う表面温度の低下が考えられ、さらにまた、防風網に
 よる日陰の影響、防風網の風上直前の農道の影響なども
 考えられる。Figs.5-B, 6-Bに示すように熱電対温度
 計で測定した1Hの葉・気・水・地表温が±2Hのそ
 れらより低い場合が多いことから考えると、この地点で
 冷却を生ずる何らかの原因があるものと思われる。 t_l
 では0800~1230であるが、 t_w では1200~1515に防風網
 直後の冷却が認められた。 t_w におけるこの現象の出現
 ・終了時間が、 t_l よりも遅くてタイムラグが認められ
 ることは、水と葉茎の熱容量差に原因していると考えら
 れる。

t_w と t_l の温度差(t_{wl})の水平分布をFig.6-Cに示
 す。これを見ると-2Hから10Hまたは15H間の値と-
 20H値との間には大きい差があり、40Hにおいてもか
 かなりの差が認められる。またこの場合にも1Hの値が±
 2Hの値よりも小さくなっており、防風網下を吹き抜け
 た冷風に原因していることがわかる。

Fig. 5. (A) and (B): Horizontal profile variations (0000, 0600, 1300, 0300, 0630 and 1220, June 24, and mean from June 23 to 24) of surface leaf-stem temperature (t_l), surface water temperature (t_w), leaf temperature (T_l), air temperature (T_a), water temperature (T_w) and surface ground temperature (T_g).

Fig. 6. (A) and (B): Temperature variations of t_l , t_w , T_l , T_a , T_w and T_g (same as in Fig. 5) normalized horizontally by reference temperature, i.e., the value at the distance of -20 H. (C) and (D): Horizontal profiles of temperature differences of t_{wl} ($=t_w-t_l$), T_{wl} ($=T_w-T_l$), T_{la} ($=T_l-T_a$) and T_{gw} ($=T_g-T_w$).

・葉・気・水・地表温の場合(熱電対温度計)

6月23日10時より24日12時半までの内、
 代表的な0030, 0630, 1220および平均の昇
 温効果の水平分布をFig.5-Bに、温度差の
 水平分布をFig.6-Bに示す。

全期間を通して防風網の効果がはっきり
 認められ、効果の高い範囲は-2~10Hであ
 り、その変化は t_l 、 t_w の場合と類似してい
 る。0.1mmの熱電対温度計で測定した葉温
 (T_l)、水温(T_w)について、1220(24日)
 に2H値と30H値の比較からそれぞれ2.0、
 2.8℃の昇温となっており、0.5mmの熱電対
 温度計で測定した気温(T_a)、地表温(T_g)に
 ついては、1300(23日、図省略)で3.5、3.8
 ℃の昇温となっている。-2Hと10H間の昇
 温効果(Fig.6-B)は T_l で0.3~1.0℃、 T_a で
 0.2~0.9℃、 T_w で0.9~2.2℃、 T_g で0.9~2.0
 ℃である。また、風下直後(1H)の温度の低
 下(±2H値と比較)現象は T_l では1300~
 1720に、 T_a では0920~1720(1150除)に
 認められている。また T_g では1220~0330
 と長時間にわたって多く認められる。しかし

T_w については、日中において変化が滑らかでない(± 2 H値と1H値を比較すると1H値と-2H値はほぼ同値、ただし0920, 1000, 1220) 場合はあるが、1H値が-2H値よりも小さい結果は日中には存在しなくて、夜間の2230~0630に存在している。 T_l , T_a と t_l を比較すると出現時間が遅く終了時間も遅くなっており、 T_w と t_w の比較では t_w は午後に出て、夜間には出現しない点で異なっている。これらは葉・気温と表面葉茎温、中位水深水温と表面水温の差によるものと考えられる。

なお、これらの関係をさらに明らかにするために各位置の表面葉茎温、葉温、気温、表面水温、中位水深水温、地表温の相互関係をFigs. 6-C, Dに示した。 T_{wl} では-2~2Hで差が大きい、 t_{wl} の場合のように風下直後の温度低下は認められない。 T_{la} については1~20H間で T_l の方が少し高く出ており、防風による昇温効果が認められる。 T_{gw} では5~7.5Hで T_w の方がわずかに高いが、その他は低く、とくに1Hでは0.9℃低くなっている。この T_{gw} の全般的な変化傾向は6月30日・7月1日の場合と比較してほぼ逆の傾向を示している。これは6月23・24日では地中への貯熱が+（下向）であるのに対して、6月30日・7月1日では地中からの熱の流出があるためと考えられる。

以上の結果より昇温効果を総合的に判定すると、 T_l , T_a では2~5Hで効果が0.7~1.0℃と大きく、 T_l では20H, T_a では15Hまでは十分効果が認められる。一方 T_w , T_g では-2~10Hで効果が大きく、とくに2~5Hが高いのは T_l , T_a の場合と同様である。しかしながら40Hでも0.5~0.7℃の効果が有り、さらに風上側でもかなりの効果が認められる。風上の効果範囲については測定点が少ないために判然としないが、せいぜい-10Hと推定される。

(2) 温度および温度差の時間変化

・表面葉茎温・表面水温の場合

-20Hから40Hまでの t_l , t_w の時間変化の代表例(-20, 2, 30H)をFig.7-Aに示す。図のように t_w が t_l よりも概して高くなっているが、-20H, -12Hの6時の観測値だけが t_w の方が低くなっている。 t_l , t_w の最高・最低値は、それぞれ14時頃、4~5時に現われており、タイムラグが認められる。

t_l と t_w の温度差(t_{wl})についてみるとFig.8-Bのようになり、14時頃に最高、日出直後6時頃に最低となっている。日中 t_{wl} が非常に大きい、日没後その格差は小さくなり、夕方6時頃より日出直前までの夜間にお

Fig. 7. (A) and (B): Temperature changes of t_l , t_w , T_l , T_a , T_w and T_g of values at the distances of -20 H, 2 H and 30 H and mean value at the distance from -20 H to 40 H. Notation is represented in Fig. 5.

Fig. 8. (A): Change of reference wind speed at 50 cm height and -15 H distance. (B) and (C): Temperature difference changes of t_{wl} ($=t_w - t_l$), T_{wl} ($=T_w - T_l$), T_{la} ($=T_l - T_a$) and T_{gw} ($=T_g - T_w$) indicated in Fig. 5.

いては、 t_{wl} は大体一定値を示している。日出直後は稲体と灌漑水の熱容量差のために t_l の上昇が急激で、一時 t_w を追い越す(24日6時)が、7時以後では再び t_w が急激に上昇し、 t_l よりも高くなるという日変化を示している。

この23・24日は気温、風向、風速 (Fig. 8-A), 日射, その他の気象条件がよく類似した変化であったために, 防風網の効果を判定する上で理想的な日時であったと考えられる。

・葉・気・水・地表温の場合

T_l, T_a, T_w, T_g の時間変化を Fig. 7-Bに, T_{w1}, T_{1a}, T_{gw} を Figs. 8-B, Cに示す。これらの変化傾向は t_l, t_w のそれと同様であるが, 日出後0630の T_l, T_a の値が T_w, T_g よりも明らかに高くなっている。なぜならば葉茎および空気の熱容量が小さいために, 中位水深の T_w や地表面の T_g よりも T_l, T_a が日射によって速かに高くなるからである。従って T_l, T_a よりも T_w, T_g にタイムラグが大きく出現している。

T_{1a} の変化について, 日中は T_l が高いが, 夜間は T_a の方が一般に高くなっている。その交代時間は17時頃と7時頃である。 T_{w1} では t_{w1} と類似した変化を示しており, 日中は格差が大である。日没から日出まではその格差は少しずつ減少して, 日出直後急激に格差がなくなり, T_l の方が逆に高くなっている。これは前述したように日出後 T_w よりも熱容量の小さい T_l が急激に上昇したことに原因している。その後は格差は急激に増加している。一方, t_{w1} と比較すると9時頃より夜半までは T_{w1} が大きくなっており, 夜半より日出直前まではほとんど一致した変化を示し, 日出直後より9時頃までは逆に t_{w1} の方が大きくなっている。これは夜半からの蒸発および結露の影響で t_l, T_l がほぼ同じであるのに, T_w が t_w よりも相対的に高い状態, すなわち $T_g > T_w > t_w$ で下方 (地中)からの熱の移動があるためと考えられる。 T_{gw} では日中は T_w の方が高いが, 夕方より T_g が高くなり, その傾向は7時頃まで続いていて, 夜間は地中からの熱移動があることを示している。 T_{gw} と T_{1a} はほぼ逆の変化傾向を示しているが, 23日の極大・極小値の位置はずれて T_{gw} の方が早い。

3.3 曇天, 掛流し湛水田での観測 (6月30日・7月1日)

(1) 温度および温度差の水平分布

・表面葉茎温・表面水温の場合

この日の観測は曇天でしかも掛流し条件下で実施したため, かなりの強風 (Fig. 10-E)ではあるが, 防風網による昇温効果は比較的小さいことが予想された。結果は Figs. 9-A, 10-Aに示すように, t_l, t_w 共に大きくはないが, 全測定期間共に明らかに昇温効果が認められる。不良気象条件のために時間, 場所による違いはあまり大きくない。平均温度 (Fig. 9-A) および温度差 (Fig. 10-A)の水平分布を見ても t_l, t_w 共に効果の比較的大きい範囲は2~7.5Hで, t_l では0.4~0.6℃, t_w

では0.8~1.0℃であり, -2~10Hでは t_l で0.2~0.6℃, t_w で0.5~1.0℃であり, 掛流しの場合でもこの範囲で十分昇温効果があるものと考えられる。20~40Hにおいても t_l, t_w 共にそれぞれ, 0.2℃, 0.3~0.4℃の昇温があるが顕著ではない。

以上のように±2Hの昇温についても他の2回のデータ (6月22, 23~24日)と比較して効果が小さく, しかも昇温のピークは5Hに存在して他の結果と異なっている。これはとくに掛流しに原因しているものと思われる。すなわち, この水田の水口が3~4Hにあるために1~2Hの t_l, t_w の昇温が小さくなり, 加えて下流域の2Hよりも停滞水域の5Hの方が高くなっている。この理由は, 水口から流入した灌漑水は直ぐ防風網下を通過して風上側の水田に流れるためである (Fig. 2の水流参照)。ただし, この流入水は隣 (左側)の水田ですでに変温した水であって掛流し水の影響は比較的小さいと予想される。

温度差 (t_{w1})の水平分布を Fig. 10-Cに示す。図より t_w が常に t_l より2.2~2.6℃高くなっており, 6月23・24日の変化傾向と類似している。また-2~20Hの値がわずかに大きくなっているが, その差は比較的小さい。

Fig. 9. (A) and (B): Variations of horizontal profiles (1400 June 30, 0530 July 1, 1230 June 30, 0600 July 1, and mean from June 30 to July 1) of t_l, t_w, T_l, T_a, T_w and T_g (same as in Fig. 5).

Fig. 10. (A) and (B): Temperature variations of t_l , t_w , T_l , T_a , T_w and T_g normalized horizontally by reference temperature, i.e., value at the point of -20 H. (C) and (D): Horizontal variations of temperature differences of t_{wl} ($=t_w-t_l$), T_{wl} ($=T_w-T_l$), T_{la} ($=T_l-T_a$), T_{gw} ($=T_g-T_w$). (E): Change of reference windspeed. (F) and (G): Temperature difference changes of t_{wl} , T_{wl} , T_{la} and T_{gw} . Notation is shown in Fig. 5.

・葉・気・水・地表温の場合

T_l , T_a , T_w , T_g の結果 (Figs. 9-B, 10-B) についても t_l , t_w と同様な変化傾向が認められる。昼・夜間共に昇温効果は認められるが、日中の方がわずかに大きい程度で、この点 6 月 23~24 日の結果と異なっている。各観測期間の平均温度 (Fig. 9-B) および平均温度差 (Fig. 10-B) を比較しても昇温の大きい範囲は $-2 \sim 10$ H で、 T_l では $0.4 \sim 1.1^\circ\text{C}$, T_a では $0.3 \sim 1.0^\circ\text{C}$ であり、風下だけの $1 \sim 10$ H の範囲では T_l で $0.6 \sim 1.1^\circ\text{C}$, T_a で $0.5 \sim 1.0^\circ\text{C}$ の効果が認められる。 T_w , T_g についてもほぼ同様な変化傾向であって、 $-2 \sim 10$ H の T_w では $0.8 \sim 1.1^\circ\text{C}$, T_g では $0.8 \sim 1.1^\circ\text{C}$ の昇温となっている。

この場合も t_w , t_l の場合と同様 5H が最大の効果を示している。ただし、 T_g のみが 2H, 7.5H 値より小さくなっている。 T_g の測定は感部を設定する場合の感部への土量 (深さ) の問題があって測定が難しく、測定精度に原因しているのかも知れない。

以上のように昇温は他の結果と比較して小さいが、曇天、掛流し条件下でも $-2 \sim 10$ H に防風網による昇温効果が確認された。

Figs. 10-C, D に日平均値 T_{wl} , T_{gw} , T_{la} の水平分布を示す。 T_{la} は観測期間中常に T_l の方が T_a よりも高くなっており、場所による差はわずかである。 T_{gw} についても T_g の方が T_w より高くなっている。2H と 5H で最高・最低値を示しているが、地表面での土壤中への感部の設定深度の差による測定誤差 (2H の T_g が 5H 値より高い) に原因しているのか明らかでないが、次のようなことが考えられる。水口のすぐ下流の 2H では T_w が低く、相対的に T_g が高い。一方 5H (水口の下流でなく停滞水領域) では T_w が高く、相対的に T_g が低い (T_g , T_w 差が少ない)。すなわち、3~4H に水口があるために比較的水温の低い流入水に原因していると考えることができる。

T_{wl} では常に $2.3 \sim 2.5^\circ\text{C}$, t_{wl} では常に $2.2 \sim 2.6^\circ\text{C}$ の差があり、 T_w , t_w がそれぞれ T_l , t_l よりも高い。これだけの差が何によってもたらされたか興味深いことである。日射の吸収および地中からの熱移動などが考えられる。同様な気象条件で止水田 (6 月 22 日) と掛流し田 (6 月 30 日・7 月 1 日) の日中 (11~18 時) の t_{wl} は、それぞれ $1.7 \sim 2.7^\circ\text{C}$ (平均 2.1°C), $2.7 \sim 3.3^\circ\text{C}$ (平均 3.1°C) であり、平均値の温度差で示せば止水田では T_w (22.7°C) - T_l (20.6°C) = 2.1°C , 掛流し田では T_w (21.4°C) - T_l (18.3°C) = 3.1°C となる。掛流し田の方の T_{wl} が大きい理由として、掛流し田の T_l が止水田の T_l より 2.3°C も低いのに対して掛流し田の T_w と止水田の T_w の差が 1.3°C しかなく、相対的に掛流し水が高温であることに起因している。

(2) 温度および温度差の時間変化

・表面葉基温・表面水温の場合

Fig. 11-A に示すように各観測地点共に時間変化はよく類似した変化を示している。 t_w は 14 時をピークにして減少し、5 時半に最低値を示している。 t_l では最高値は 11~14 時 (12 時頃)、最低値は 3~6 時 (5 時頃) に現われており、出現時間が測定地点によって分散している。日出直後 (6 時頃) に t_l と t_w が逆転する場合は 6 月 23・24 日では認められたが、曇天日の掛流し田では t_l が十分上がりきらない内に t_w が上昇しているために t_l と t_w の逆転は認められなかった。

t_{wl} (Fig. 10-F) の変化をみると 18~20 時にピークが認められる。これは水温の上昇にタイムラグがあることと風が弱まって乱流輸送量が少なくなったために t_w の低下率が t_l よりも比較的小さかったこと、ならびに t_l の放射冷却が比較的小さかったためと考えられる。ま

Fig. 11. (A) and (B): Temperature changes of t_l , t_w , T_l , T_a , T_g (expressed in Fig. 5) of values at the points of 2 H and 30 H, and mean value at the points from -20 H to 40 H.

た最低値は8時頃に出現している。

・葉・気・水・地表温の場合

Fig. 11-Bに示すように T_l は10時半~12時半、 T_a では10時半にピークがあり、最低値は3時半~6時になっている。 T_w 、 T_g のピークは15時頃、最低値は6時頃に現われている。これらの変化は t_l 、 t_w と類似した変化を示している。

Fig. 10-Fに示すように T_{w1} では日中に高く、15時頃に最高値を示し、その後は次第に減少して8時頃に最低値を示している。ピークの出現時間が t_{w1} とは異なっているが、これについては不明である。 T_w は常に T_l 、 T_a より1~4 $^{\circ}\text{C}$ 高い。

Fig. 10-Gに示すように T_{l1} は日中の6月30日正午頃より夜半まで T_l の方が高くなっているが、夜間0時頃より日出直前までは T_a の方が高くなっている。これは日中の太陽熱の吸収、夜間の放射冷却および蒸散による冷却が考えられる。 T_{gw} では観測期間中あまり変化しないが、0.1~0.5 $^{\circ}\text{C}$ の方が高くなっている、地中からの熱移流が常にあることを表わす。すなわち6月28・29日は網に平行に風が吹いたために解析を行っていないが、あまり日射の強い日ではなかったにしても30日より気

温が高く薄日も差したことを考えれば、27日もしくは28・29日の貯熱による地中からの熱放出が6月30日・7月1日に行われたことが推測される。

3.4 総合考察

前文で述べたように防風施設による水田の保温昇温効果についての報告はいくつかある。防風網の効果範囲について白佐(1970)は20H以上でも収量増があることを報告しており、泊ら(1978)は収量増の大きい地点は5Hであり、栄養生長では30Hまでの範囲の有効性を求めている。

防風林では阿部ら(1960)は収量増の大きい地点は5Hであり、栄養生長に効果を与えるのは10Hまでであると述べている。泊ら(1978)は13H以上の効果を求めている。防風林では効果範囲が一般に狭くなっているが、この理由は防風林は一般に背が高いため、その風下の影響範囲について、二次効果としての生育もしくは収量への影響は、林からの絶対距離が大きくて、均一な試験区での比較が行えなかったり、防風林に対して平行風とか逆風による予期できない影響が加わって、それ自体の効果が乱されるためと考えられる。それに対し防風網では絶対距離が短く均一田での比較が可能となり、しかも網以外の影響が小さいためにそれ自体の効果の及ぶ高倍距離が長くなると考えられる。

長期気温観測より横田ら(1968)は水稻生育期間中0.5 $^{\circ}\text{C}$ (60 cm 高)の効果を出し、短期間では横田ら(1968)、穴水ら(1971)は昼間は防風網区が高いが、夜間は逆に低くなることを報告している。しかし観測高度の低い植被層内での値では水面からの影響が大きく、水温が高い場合には夜間においても低温にならないことが今回の観測および泊ら(1978)より明らかになった。

著者は長期間にわたる観測も詳しい生育調査や収量調査(北海道農試が実施)も行っていないが、短期間にかなり詳しい温度観測を行った。その結果防風網による昇温効果が十分認められ、その範囲は止水・掛流し田および晴天・曇天条件下で5~20Hであった。また、比較的效果が小さい範囲も含めると10~40Hである。

なお、この期間の平均草丈は6月23日に29.3 cm、6月30日に35.6 cmであり、草丈測定からは大きな差異が認められなく、2H地点でわずかに効果が出ている程度であった。生育・収量に関して、詳しくは泊ら(1978)および北海道農試試験成績書(昭和52・53年度)を参照されたい。

4. ま と め

北海道夕張郡長沼町の水田地帯において防風網による昇温効果の観測を行った。従来の観測から防風施設の減

風効果は十分観測されているので、ここでは温度面のみに限定して実施した。得られた結果を以下に示す。

曇天日の止水湛水田(6月22日)の昇温効果は-2~10H(高倍距離)で t_1 (表面葉茎温)は0.3~1.0℃, t_w (表面水温)は0.8~1.6℃であった。

晴天日の止水湛水田(6月23・24日)の昇温効果は-2~10Hで t_1 は0.2~1.4℃, t_w は0.9~2.3℃, T_1 (葉温)は0.3~1.0℃, T_a (気温)は0.2~0.9℃, T_w (水温)は0.9~2.2℃, T_g (地表温)は0.9~2.0℃であった。また、2Hと30Hの差は、1700に t_1 は2.7℃, 1515に t_w は3.8℃であり、1220に T_1 は2.0℃, T_w は2.8℃, 1300に T_a は3.5℃, T_g は3.8℃の効果となっている。

曇天日の掛流し湛水田(6月30日・7月1日)の昇温効果は-2~10Hで t_1 は0.2~0.6℃, t_w は0.5~1.0℃, T_1 は0.4~1.1℃, T_a は0.3~1.0℃, T_w は0.8~1.1℃, T_g は0.8~1.1℃であった。

防風網の風下直後(1H)の昇温が±2H値よりも低く出ることがかなり認められる。すなわち、 t_1 では0800~1230, t_w では1200~1515, T_1 では1300~1720, T_w では2230~0630に認められ、 T_a では0920~1720, T_g では1220~0330に多く認められる。この理由は防風網下25cmの空間からの吹き抜け風および風速の増加による顕熱・潜熱輸送の増大に大きな原因があると考えられる。

温度差について、6月22日の $t_{w1}(=t_w-t_1)$ は1.7~2.7℃となっている。6月23・24日の t_{w1} , $T_{w1}(=T_w-T_1)$ はそれぞれ、3.1~4.1℃, 3.7~5.1℃となっている。 $T_{1a}(=T_1-T_a)$ は-0.0~0.4℃で、1~20Hで大きくなっている。 $T_{gw}(=T_g-T_w)$ は5~7.5Hで0.1~0.2℃, その他の地点では-0.1~-0.5℃, とくに1Hでは-0.9℃と低い。6月30日・7月1日の t_{w1} , T_{w1} はそれぞれ、2.2~2.6℃, 2.3~2.5℃, T_{1a} は0.1~0.3℃, T_{gw} は0.1~0.5℃となっている。

どの観測結果にもかなりの効果のある範囲は風上5高倍距離から風下20高倍距離程度と考えられる。

t_1 , T_1 , T_a の最高値, 最低値の出現時間は一般に t_w , T_w , T_g よりも早く, 最高値は12~14時, 最低値は3~5時, t_w , T_w , T_g ではそれぞれ13~15時, 4~6時に出現した。

晴天日において一般に t_1 , T_1 , T_a は t_w , T_w , T_g よりも低いが, 熱容量差と日射量の関係から6~7時に前者が後者を追い越して昇温することがあった。後者には全般的にタイムラグが認められた。

6月23・24日において t_{w1} , T_{w1} は日中は3~7℃, 夜間は3~4℃, 日出後から9時頃までは-0~3℃, T_{1a} は日中は+で, 夜間は-, T_{gw} は日中は-, 夜間は+に

なっている。

6月30日・7月1日において t_{w1} , T_{w1} は1~4℃で, 日射量よりも少しタイムラグのある日変化が認められ, T_{1a} は日中は+, 夜間は-, T_{gw} は常に+になっている。これは地中からの熱移流にもとづいている。

おわりに, 観測に際しお世話になった北海道農試の泊研究室はじめ研究室の方々ならびに小沢部長に, さらに空知南西部地区農業改良普及所の菊地所長・藤田主任はじめ普及所の方々に深謝いたします。

また観測のために水田を使用させていただいた北海道夕張郡長沼町の若沢弘氏に感謝いたします。

引用文献

- 1) 阿部亥三, 小田桐光雄, 小野清治, 1960: 防風林の機能に関する実験的研究, 農業気象, **16**(1), 10-16.
- 2) 穴水孝道, 小野清治, 1971: 寒冷紗による防風垣資材の防風保温効果について, 青森県農試研報, **16**, 25-33.
- 3) 浅井辰郎, 1952: 防風牆の水温上昇効果, 農業気象, **7**(3・4), 140-142.
- 4) Frank, A.B. and Willis, W.O., 1972: Influence of windbreaks on leaf water status in spring wheat, *Crop Science*, **12**, 668-672.
- 5) 藤田 進, 1963: 耕地防風林について, 北海道の農業気象, **13**, 7-10.
- 6) Kaiser, H., 1959: Die Strömung an Windschutzstreifen, *Berichte Deutschen Wetterdienstes*, **53**(7), 1-36.
- 7) 川原琢磨, 1957: 防風牆の研究, 三重大学術報告, **14**, 63-75.
- 8) 楠頼昌彦, 1963: 防風囲い内の微気象特性, 北海道農試彙報, **80**, 77-82.
- 9) Maki, T., 1978: Turbulence characteristics of a single line pine tree windbreak, *Proc. Soil and Crop Sci. Soc. Fla. U.S.A.*, **37**, 81-92.
- 10) 真木太一, 1979: 水田防風網による昇温効果について, 東北の農業気象, **24**, 投稿中.
- 11) 諸橋清一, 1978: フェンス後方のはくり域における蒸発を伴う熱伝達, 北海道教育大紀要(2A), **28**(2), 81-93.
- 12) 大根田 襄, 1962: 防風による作物の増収効果とその方法, 農及園, **37**(9), 1479-1483.
- 13) Radke, J.K. and Burrows, W.C., 1970: Soybean plant response to temporary field windbreaks, *Agron. J.*, **62**(3), 424-429.
- 14) Rosenberg, N.J., 1966: Microclimate, air mixing and physiological regulation of transpiration as influenced by wind shelter in an irrigated bean field, *Agric. Met.*, **3**, 197-224.
- 15) 佐藤敬二, 加藤退介, 田町正誉, 高田雄之, 寺田一

- 彦, 坂上 務, 渡辺恵弘, 岩崎松之助, 1952: 防風林に関する研究, 日本学術振興会, 科学試験研報, **8**, 1-201.
- 16) Seginer, Ido and Rosenzweig, Dan, 1971, 1972: Flow around oriented porous obstructions I, II, *Agri. Eng. Faculty, Technion-Israel Inst. of Tech.*, **138**, **160**, 1-108, 1-114.
- 17) 白佐貞義, 1970: 水稻に対する防風林(防風網)の効果例, 北海道の農業気象, **21**, 45-46.
- 18) Skidmore, E.L., Jacobs, H.S. and Hagen, L.J., 1972: Microclimate modification by slit-fence windbreaks, *Agron. J.*, **64** (2), 160-162.
- 19) Skidmore, E.L., Jacobs, H.S. and Powers, W.L., 1969: Potential evapotranspiration as influenced by wind, *Agron. J.*, **61** (4), 543-546.
- 20) 鈴木清太郎, 1954: 冷害対策としての防風林と防風牆, 農及園, **29** (10), 1231-1234.
- 21) 高橋英紀, 1977: 大気の熱的諸現象の模型実験とその農業への応用に関する研究, 北海道大農学部邦文紀要, **10** (2), 147-175.
- 22) Takahashi, H. 1978: Wind tunnel test on the effect of width of windbreaks on the wind speed distribution in leeward, *J. Agric. Met. Japan*, **33** (4), 183-187.
- 23) 高須謙一, 1939: 防風林の微細気象に及ぼす影響, 農及園, **14** (2), 529-535.
- 24) 田中貞雄, 谷沢恒夫, 佐野 洋, 柿沼 計, 小寺新二, 1953~1957: 防風垣前後の風に関する研究(1~9), 農業気象, **8**, **9**, **10**, **11**, **11**, **11**, **12**, **12**, **13**, 61-63, 66-68, 30-32, 49-52, 91-94, 97-99, 9-12, 73-78, 7-8.
- 25) 谷 信輝, 1958: 模型防風垣の風洞実験, 農技研報, **A** (6), 1-80.
- 26) 谷 信輝, 1960: 網の防風効果について, 農業気象, **15** (3), 88-92.
- 27) 泊 功, 藤原 忠, 石黒忠之, 1978: 防風林・網の微気象改善と水稻生育への効果について, 北海道の農業気象, **29**, 7-22.
- 28) 内島立郎, 小高真一, 藤田 実, 1977: 冷害年における防風林帯の水稻生育への効果, 北農, **44** (6), 35-40.
- 29) 横田廉一, 高橋英紀, 岡橋準治, 1968: 寒冷紗を使用した防風施設に関する研究(3), 北海道の農業気象, **19**, 17-21.
- 30) 横田廉一, 高橋英紀, 萩原 守, 1972: 農耕地における熱的現象の模型実験, 農業気象, **27** (4), 153-158.

Summary

An observation of various temperatures influenced by windbreak net was carried out at the paddy rice fields in Naganuma, Hokkaido from June 22 to July 1, 1978. As the decreasing effect of windspeed has been considerably recognized by many other references until now, an investigation was done only on a subject of various temperatures, *i.e.*, leaf, air, water and ground temperatures.

The following results were obtained.

Under the condition of overcast weather and "cutoff" flood irrigation system on June 22, the increasing rates of temperatures are 0.3 to 1.0 °C for t_1 (surface leaf-stem temperature) and 0.8 to 1.6 °C for t_w (surface water temperature) measured by precision radiation thermometer at the point from -2 H (distance represented windbreak height) (minus sign denotes windward side) to 10 H. The reference temperature denotes the value at the point of -20 H.

In the case of clear weather and "cutoff" flood irrigation system on June 23 to 24, the increasing rates of temperatures are 0.2 to 1.4 °C for t_1 , 0.9 to 2.3 °C for t_w , 0.3 to 1.0 °C for T_1 (leaf temperature), 0.2 to 0.9 °C for T_a (air temperature), 0.9 to 2.2 °C for T_w (water temperature) and 0.9 to 2.0 °C for T_g (ground temperature) measured by thermo-junction thermometer. Maxima of temperature differences between 2 H and 30 H were 2.7 °C for t_1 at 1700 June 23, 3.8 °C for t_w at 1515 June 23, 2.0 °C for T_1 at 1220 June 24, 2.8 °C for T_w at 1220, 3.5 °C for T_a at 1300 June 23 and 3.8 °C for T_g at 1300.

Under the circumstance of overcast weather and "continuous" flood irrigation system on June 30 and July 1, the increasing rates of temperatures are 0.2 to 0.6 °C for t_1 , 0.5 to 1.0 °C for t_w , 0.4 to 1.1 °C for T_1 , 0.3 to 1.0 °C for T_a , 0.8 to 1.1 °C for T_w and 0.8 to 1.1 °C for T_g .

An interesting result was come up that the increasing temperatures at the distance of 1 H just behind the windbreak were lower than those at the distances of -2 H and 2 H, *i.e.*, the values from 0800 to 1230 for t_1 , from 1200 to 1515 for t_w , from 1300 to 1720 for T_1 and from 2230 to 0630 for T_w , and the greater parts of values from 0920 to 1720 for T_a and from 1220 to 0330 for T_g . This seems to be mainly based on the reason that the adiabatic cooling wind of pretty high speed

blows through the open space of 25 cm between the net and the ground, and the increments of latent and sensible heat fluxes by increasing windspeed.

The temperature difference for t_{wl} on June 22 is 1.7 to 2.7°C and ones for t_{wl} and T_{wl} are 3.1 to 4.1°C and 3.7 to 5.1°C, respectively, T_{la} is -0.0 to 0.4°C at the points from 1 H to 20 H and T_{gw} at the points from 5 H to 7.5 H is 0.1 to 0.2°C and -0.1 to -0.5°C at other points, particularly -0.9°C at 1 H on June 23 to 24. The value of t_{wl} , T_{wl} , T_{la} and T_{gw} are 2.2 to 2.6°C, 2.3 to 2.5°C, 0.1 to 0.3°C and 0.1 to 0.5°C on June 30 and July 1, respectively.

According to the observation results mentioned above, it is considered that the region considerably effected by windbreak is from 5 H in the windward side to 20 H in the leeward side.

The appearances of maximum and minimum of t_l , T_l and T_a are generally earlier than those of t_w , T_w and T_g . Those of the former and the latter are 1200 to 1400 and 1300 to 1500 as a maximum value and 0300 to 0500 and 0400 to 0600 as a minimum one, respectively. Generally speaking, temperatures of t_l , T_l and T_a are lower than those of t_w , T_w and T_g , however, the former items only during 0600 and 0700 catch up with and pass the latter items because of differences of heat capacity, specific heat and radiation. The latter has a larger time lag compared with the former.

On June 23 and 24, the differences of t_{wl} and T_{wl} are 3 to 7°C in the diurnal time and 3 to 4°C in the nocturnal time, and the value is -0 to 3°C after sunrise until about 0900 under the condition of fine weather. The signs of T_{la} and T_{gw} are plus and minus in the day time, and are opposite in the night time.

On June 30 and July 1, the values of t_{wl} and T_{wl} are 1 to 4°C and the changing patterns of these have a time lag compared with radiation in the case of "continuous" flood irrigation. The sign of T_{la} is plus in the diurnal time and minus in the nocturnal time. T_{gw} has always plus sign. This is based on the heat transfer from the lower ground.