トウモロコシ花粉飛散および交雑抑制に対して効果的な防風施設の配置方法に関する数値実験

牛山朋来[†]・芝池博幸・杜 明遠

(農業環境技術研究所)

Numerical study of the effective arrangements of windbreaks to suppress maize pollen dispersal and cross-pollination

Tomoki USHIYAMA[†], Hiroyuki SHIBAIKE, and Du MINGYUAN

(National Institute for Agro-Environmental Sciences, Tsukuba, 305–8604 Japan)

Abstract

Windbreak nets and plant windbreaks are effective in suppressing maize pollen dispersal and cross-pollination. This paper seeks effective arrangements of windbreak nets or plant windbreaks to suppress cross-pollination from a 50 m square maize donor plot. A pair of numerical models, the A2Cflow and A2Ct&d, which had previously validated the pollen dispersal and cross-pollination in the maize plot, were used. 3-m tall 1-mm mesh nets and 2-m tall sorghum windbreaks were confirmed to be effective in suppressing cross-pollination in a 1.8-m tall maize plot. The isolation distance for a 0.9% criterion of cross-pollination rate was reduced from 50 m without a windbreak to 22 m when four lines of windbreak nets were arranged. The wind speed was 3 ms⁻¹. In commercial cultivation, plant windbreaks may reduce installation and labor costs rather than windbreak nets. Three lines of plant windbreaks are equivalent to a one line windbreak net in suppressing cross-pollination.

Key words: Maize pollen, Numerical simulation, Windbreak forest, Windbreak net.

キーワード: 数値シミュレーション, トウモロコシ花粉, 防風植生, 防風ネット

1. はじめに

防風ネットは、作物の風害防除や飛砂防止、土壌侵食防止、気温や地温上昇などの目的でしばしば使用される資材で(真木ら1993, Maki *et al.*, 2004), 防風林に比べて短期間で安価に設置することができる。防風ネットや防風林の周囲の風速低減効果については、数値シミュレーションによって詳しく調査されている(Wang and Takle, 1995; 1996; Wang *et al.*, 2001; Bourdin and Wilson, 2008)。同様に、これらの作物増産効果や土壌侵食防止効果についても議論されている(Cleugh, 1998; Takahashi *et al.*, 1998)。また、風洞実験および数値実験によって、実際に入手可能な防風ネットの防風効果についても検証が行われている(牛山ら, 2009)。

近年、遺伝子組換え作物に導入された遺伝子の拡散を

防止するために、花粉飛散にともなう遺伝子フローの実態調査が進められている(川島ら, 2004)。これは、ある作物について、除草剤抵抗性などの特性を発現させるために人為的に遺伝子が導入された遺伝子組換え品種と、慣行農法で用いられる従来品種が隣接して栽培された場合に、風に乗って花粉が群落間を移動し交雑することによって、導入された遺伝子が従来品種に拡散するという問題である。防風ネットは、このような導入遺伝子の拡散を抑制するための手段としても有効であることが圃場実験や数値実験によって確認されている(Ushiyama *et al.*, 2009b)。しかしながら、これまでの研究では、防風ネットの規格(高さや目合い)による効果については議論されているものの、防風ネットの配置については調査されていない。

そこで本研究では、花粉拡散に伴う導入遺伝子の拡散を防ぐための効果的な防風ネットの配置について、すでに検証済みの防風ネットを用いて、数値実験による調

2010年11月4日 受付, 2011年3月15日 受理

[†] Corresponding Author: ushiyama55@pwri.go.jp

査を行った。さらに Ushiyama *et al.*, (2009b) によって、防風ネットと同様の交雑抑制効果を持つと報告されているソルガムによる防風植生についても同様の調査を行った。

本研究で調査するトウモロコシは、風媒性の雄性先熟の作物であるため他の個体が放出した花粉を受粉しやすく、花粉の寿命も 10 時間以上と長いために遠距離でも交雑が起こりやすい。またトウモロコシは世界的にも栽培面積が広く、重要性が大きい作物である。本研究では 50 m 四方の圃場に花粉親群落を栽培した場合について調査を行う。このように大きな圃場の場合、複数の防風ネットや防風植生を設置することにより、単一の防風ネット等を設置する場合よりも大きな交雑抑制効果を期待することができる。このような調査は実際の圃場実験により検証することも可能であるが、一つの圃場について 1 年に 1 回しかデータが取れないことや、気象条件や花粉放出を一定に保つことが困難であること、調査に多大な労力を必要とすることなどから、まずは数値実験により設置を予定する防風施設の配置方法について見当を付けることが先決である。本論文の 2 章では数値モデルと数値実験の方法、3 章で結果、4 章で考察、5 章でまとめを行う。

2. 実験方法

2.1 数値モデル

使用した数値モデルは、Yamada Science & Art 社によって開発された A2Cflow (別名 HOTMAC, Yamada and Bunker, 1988) と呼ばれる大気モデルと、A2Ct & d (別名 RAPTAD) と呼ばれる拡散輸送モデルである。前者は、3 次元大気場を予測する非静力学大気モデルであり、乱流中の速度成分などの量を統計的な平均値とそれからの偏差によって表現するレイノルズ平均モデルである。乱流の表現は、2 次の乱流クロージャーを用いている。また、Yamada (1982) の植生キャノピーモデルが組み込まれており、これを用いて風に対する植生や防風ネットの抵抗を評価することができる。後者は、ラグランジュ法による拡散輸送モデルであり、A2Cflow によって求められた気流をもとに、トレーサーの輸送を計算する。また、カーネルと呼ばれる、ある空間分布をもったトレーサーを用いることにより、少ない計算量で滑らかな輸送分布を計算することができる。モデルの乱流過程は数 m–数 10 km スケールの現象の計算に適用することができる。Yamada and Bunker (1988) に詳しい説明がある。

2.1.1 A2Cflow モデル

以下、方程式系の基本部分を説明する。平均流の運動方程式は、

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fV = -\frac{1}{\langle \rho \rangle} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z}(-\overline{uw}) - \eta C_d a(z) U |U| \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fU = -\frac{1}{\langle \rho \rangle} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}(-\overline{vw}) - \eta C_d a(z) V |V| \quad (2)$$

ここで、 U, V は平均風速の x, y 成分である。 u, v, w は、風速摂動成分の x, y, z 成分； f はコリオリパラメータ； $\langle \rho \rangle$ は水平平均空気密度； p は気圧摂動； η は植生面積比率で、 $0 \leq \eta \leq 1$ ； C_d は抵抗係数； $a(z)$ は植生密度 ($\text{m}^2 \text{m}^{-3}$) である。式 (1), (2) の最後の項が植生による抵抗を表わす。オーバーラインは、アンサンブル平均を表わす。

乱流エネルギー方程式は以下のようになる、

$$\begin{aligned} \frac{\partial \left(\frac{q^2}{2} \right)}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial t} \left[q l \tilde{S}_q \frac{\partial (q^2/2)}{\partial z} \right] - \overline{uw} \frac{\partial U}{\partial z} - \overline{vw} \frac{\partial V}{\partial z} \\ & + \beta g \overline{w \theta}_v - \frac{q^2}{B_1 l} + \eta C_d a(z) [|U|^3 + |V|^3] \end{aligned} \quad (3)$$

そして、乱流長さスケール l は次の式によって得られる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial (q^2 l)}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial t} \left[q l \tilde{S}_q \frac{\partial (q^2 l)}{\partial z} \right] \\ & - l E_1 \left[-\overline{uw} \frac{\partial U}{\partial z} - \overline{vw} \frac{\partial V}{\partial z} + \beta g \overline{w \theta}_v \right] \\ & - \frac{q^3}{B_1} \left[1 + E_2 \left(\frac{l}{kz} \right)^2 \right] \\ & + 2 \eta C_d a(z) l [|U|^3 + |V|^3] \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $q^2 = \overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}$ は、乱流運動エネルギー (TKE) の 2 倍； $\overline{w \theta}_v$ は乱流浮力フラックス； $E_1, E_2, \tilde{S}_q, B_1$ は経験的定数 (それぞれ 1.8, 1.33, 0.2, 16.6) で、室内実験から求められている (Mellor and Yamada, 1982)； β は熱膨張係数； g は重力加速度； θ_v は仮温位摂動である。式 (1) ~ (4) の乱流フラックスは、次の簡略化した 2 次モーメント乱流クロージャ方程式、 $(\overline{uw}, \overline{vw}) = -l q \tilde{S}_M \left[\frac{\partial U}{\partial z}, \frac{\partial V}{\partial z} \right]$, $\overline{w \theta} = -\alpha l q \tilde{S}_M \frac{\partial \theta}{\partial z}$, ここで $\tilde{S}_M$ と α は、フラックスリチャードソン数の関数であり、 $\alpha \equiv K_H K_M^{-1}$, K_H は渦拡散係数、 K_M は渦粘性係数である。

キャノピーモデルは、植生上で放射によって生ずる加熱や冷却の、大気との熱の出入りも予測している。内部熱エネルギー方程式は以下で与えられる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (-w\theta) + \frac{(1-\eta)}{\rho C_p} \frac{\partial R_N}{\partial z} + \frac{\eta}{\rho C_p} \left(1 + \frac{1}{B}\right)^{-1} \frac{\partial R_{NP}}{\partial z} \quad (5)$$

ここで、 B はボーエン比 (H/LE) であり、植生内では一定と仮定する。水蒸気混合比の保存式は、以下で与えられる。

$$\frac{\partial Q_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (-wq_v) \quad (6)$$

ここで、 Q_v と q_v は平均と摂動成分の水蒸気混合比である。蒸発散に伴う水蒸気の入出力は、本研究では無視する。

式(1)–(6)の下面境界条件は、Dyer and Hicks (1970) の経験式に基づいた、無次元風と温度プロファイルによって決められる。地表面温度は、放射、顕熱、潜熱を含む熱伝導方程式を解くことによって求められる。地中 50 cm の温度は、25℃に固定している。 U と V に関する上面境界条件は地衡風によって与え、乱流は消滅すると仮定している。雲水や雨などの雲物理パラメータは、本研究では計算していない。非静力学気圧摂動は、Hirt and Cook (1972) に従って計算している。

2.1.2 A2Ct & d モデル

A2Ct & d モデルは、ラグランジュ的手法に基づき、A2Cflow モデルによって得られた風速場を用いてトレーサー粒子の拡散輸送を求めるモデルである。

トレーサー粒子の位置は次の式によって求められる。

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + U_{pi} \Delta t \quad (7)$$

ここで、

$$U_{pi} = U_i + u_i \quad (8)$$

$$u_i(t + \Delta t) = au_i(t) + b\sigma_{u_i}\zeta + \delta_{i3}(1-\alpha)t_{Lx_i}\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\sigma_{u_i}^2\right) \quad (9)$$

$$\alpha = \exp\left(-\frac{\Delta t}{t_{Lx_i}}\right) \quad (10)$$

$$b = (1 - a^2)^{1/2} \quad (11)$$

上の式で、 U_{pi} は x_i 方向の粒子の速度、 ζ はガウス分布のランダム数で、平均が 0、大きさが 1 の分散を持つ。 t_{Lx_i} は、速度 u_i のラグランジュ積分時間、 σ_{u_i} は速度摂動

u_i の標準偏差、 δ_{i3} はディラックのデルタである。平均風速 U_i と風の標準偏差 σ_{u_i} は A2Cflow モデルから得られる。式(9)の最後の項は、乱流エネルギーが小さい領域に粒子が溜まるのを補正するためのものである。本研究では、ラグランジュ時間スケール $t_{Lz} = 20s$, $t_{Lx} = t_{Ly} = 10^4s$ を用いた。

理論的には、ある時刻と場所における粒子の集積密度を求めるには、無限個の粒子の航跡を計算する必要がある。ここでは、有限個の粒子の計算により滑らかな分布を予測するため、カーネル密度記述子を導入した (Yamada and Bunker, 1988)。これは、カーネルの中心の周囲にガウス分布に従う密度分布を持つものであり、密度分布の分散は速度分散の積分値によって決められる。そして、ある時刻と位置におけるトレーサー密度は、該当するカーネルが持つ密度分布の和として表現される。

(X, Y, Z) におけるトレーサーの集積密度 χ は次の式によって表わされる。

$$\chi(X, Y, Z) = \frac{Q\Delta t}{(2\pi)^{3/2}} \sum_{k=1}^N \frac{1}{\sigma_{xk}\sigma_{yk}\sigma_{zk}} \exp\left(-\frac{1}{2}\frac{(x_k - X)^2}{\sigma_{xk}^2}\right) \times \exp\left(-\frac{1}{2}\frac{(y_k - Y)^2}{\sigma_{yk}^2}\right) \times \left\{ \exp\left(-\frac{1}{2}\frac{(z_k - Z)^2}{\sigma_{zk}^2}\right) \exp\left(-\frac{1}{2}\frac{(z_k + Z - 2z_g)^2}{\sigma_{zk}^2}\right) \right\} \quad (12)$$

ここで、(x_k, y_k, z_k) は k 番目の粒子の位置； $\sigma_{xk}, \sigma_{yk}, \sigma_{zk}$ はガウス分布の標準偏差； z_g は地表高度である。分散 σ_y は次のように近似される：

$$\sigma_y = \sigma_v t \quad \text{for } t \leq 2t_{Ly} \quad (13a)$$

$$\sigma_y^2 = 2t_{Ly}\sigma_v^2 t \quad \text{for } t > 2t_{Ly} \quad (13b)$$

2.2 モデル設定

実験対象としたトウモロコシ圃場の配置を Fig. 1 に示す。花粉親群落は 51 m × 51 m、種子親群落は 51 m × 100.5 m であり、それらの周囲に幅 19.5 m の緩衝区 (ソルガムを栽培) を設けた。花粉親と種子親群落の境界には幅 3 m の裸地を設けた。花粉親と種子親のトウモロコシおよび緩衝区のソルガムの高さはすべて 180 cm とした。この実験圃場を数値モデルで表現する際に、水平格子間隔は 1.5 m、鉛直格子間隔は下層 3.6 m までは 0.3 m 間隔、それより上層では徐々に大きくして上部境界付近

Fig. 1. Arrangement of the numerical domain. Broken lines in the donor plot are locations of windbreaks. See text.

では 20 m とした。実験領域は $189 \text{ m} \times 88.5 \text{ m} \times 300 \text{ m}$ である。

A2Ct & d モデルの計算で必要となる、トウモロコシ花粉の落下速度は Aylor (2002) を参考に 0.3 ms^{-1} とした。また、花粉放出率は雄穂付近の気温の関数として与えた (川島ら, 2004)。このため、午前 9 時頃に花粉放出率は最大となった。なお、地面や葉などに落下して沈着した花粉の跳ね返りや再飛散は、計算が複雑になるため考慮しなかった。これらを考慮しなくてもある程度の精度で交雑分布が得られることは報告されている (Ushiyama *et al.*, 2009b)。

数値計算は、一つの設定につき午前 6 時から午後 6 時までの 12 時間行った。太陽放射はトウモロコシ開花期に対応する 2007 年 8 月 21 日の太陽高度をもとに計算した。また、気温・水蒸気量の初期値および境界条件は気象庁作成の GPV の 2007 年 8 月 21 日のデータを用いた。ただし、風のみは全層で x が正の向き (Fig. 1 で右向き) に 3 ms^{-1} を初期値および境界条件として与えた。風速 3 ms^{-1} の値は、Ushiyama *et al.*, (2009a, 2009b) で行われた茨城県つくば市や群馬県嬬恋村での実験圃場において、トウモロコシの開花期である 8 月の好天日の風速約 1.5 ms^{-1} の 2 倍とした。これらの期間でも、台風などに伴い 3 ms^{-1} 以上の風が吹く可能性は否定できないが、その場合は降水を伴うことが多いため花粉飛散に対する影響は小さいと考えられる。

2.3 ネットおよび防風植生の配置

Fig. 1 の花粉親群落内に破線で描かれているのが、防風ネットまたは防風植生の位置である。防風ネットは、高さ 3 m、格子間隔 1 mm のポリエチレンネットを想定している。その風の抵抗係数は風洞実験から得られており (牛山ら, 2009), $C_d = 1.02$, $a(z) = 10.0$ である。防風植

生は、高さ 2 m, $C_d = 0.2$, $a(z) = 10.0$ とした (Ushiyama *et al.*, 2009b)。一方、作物であるトウモロコシは、 $C_d = 0.2$, $a(z) = 1.05$ とした。防風ネットは幅 1 列の格子で表現し、防風植生の場合は幅 2 列の格子で表現した。これは、実際に防風植生の場合には 3 m 程度の幅を持って生育させることが想定されるためである。

数値実験により検証した防風施設の配置は、Fig. 1 にある①～⑤の 5 種類および防風施設の無い場合である。1 mm 目の防風ネットを 1 列配置した場合、約 60% 以下に風速を抑制する効果があるのは風下側に約 $9H$ 、風上側に $1H$ である。ただし、 H はネットの高さである。したがって、今回の実験設定では、防風ネットの有効高さが、 $3 \text{ m} - 1.8 \text{ m} = 1.2 \text{ m}$ と考えると、上記の風速抑制効果が見込まれるのは風下側 10.8 m 、風上側 1.2 m である。したがって、理論的には 12 m 毎に防風ネットを設置することによって、花粉親群落のすべての領域で風速を 60% 以下に抑えることができるはずである。その原理をもとにして、防風ネットの数を省いた場合の交雑抑制効果も調べるため、以下のような防風施設の配置について数値実験を行った。なお、抑風効果を 60% とする値は、防風施設を設置するための費用対効果を考慮して設定した。

配置①は、単純に花粉親と種子親群落の境界に防風施設を配置したものである。配置②は、防風施設の風下側の風速抑制領域を有効に利用して、花粉親群落の花粉の巻きあがりを抑えることを目的に、花粉親と種子親の境界より 10 m 上流側に防風施設を設置したものである。配置③は配置②に加えて、さらにその 12 m 上流側に防風施設を設置したもの、配置④、⑤はそれぞれさらに上流側 12 m 毎に 1 本ずつ防風施設を増やした場合である。

なお、防風植生についても同じ位置に設置することを前提にして、数値実験を行った。防風植生は高さが 2 m

なので、周囲のトウモロコシに比べて 0.2 m 高いだけである。しかし、周囲のトウモロコシに比べて 10 倍密に植えられていることを仮定しているので、群落内部および雄穂の高さ (180 cm) 周辺における風速はある程度抑えることが期待される。

交雑率 C は、ある格子点における花粉親花粉濃度 N_D と種子親花粉濃度 N_R を用いて式 (14) のように計算した。

$$C = \frac{\sum(N_D)}{\sum(N_D + N_R)} \quad (14)$$

本来トウモロコシは雄性先熟の作物であるため、数日間の計算をする場合は開花期間中の雄穂と雌穂の開花のずれを考慮する必要があるが、本研究では 1 日のみの計算であるため、この効果は無視した。また交雑率は、本来雌しべに沈着した花粉数で表わすべきであるが、単位時間当たりの沈着花粉数は花粉濃度と同じ比率になるために、本研究では花粉濃度で代用した。この手法で精度よく交雑率分布が計算できることは、Ushiyama *et al.* (2009b) に示されている。

3. 結 果

3.1 交雑抑制効果

Fig. 2 に防風ネットを設置しない場合と 5 種類の配置に防風ネットを設置した場合の交雑率分布の数値計算結果を示す。いずれの場合も交雑率は花粉親から離れるに従って低下する。また防風ネットを設置しない実験から実験①～⑤まで全体的に交雑率が低下していることがわかる。

花粉親と種子親の境界にネットを設置した実験① (長破線) と、それよりも 10 m 上流にネットを設置した実験② (短破線) を比較すると、②の方が全ての距離において明らかに交雑率が低下している。これは、防風ネットによって、

花粉親群落の風下側端の風速を抑えた方が、種子親群落の風上側端の風速を抑えるよりも交雑抑制に対して効果的であることを示している。したがって、交雑抑制には、花粉親群落上層の風速を抑えることによって花粉親が放出する花粉の舞い上がりを抑制することが有効であると推測される。

続いて、実験③、④、⑤はさらに上流側にも防風ネットを増やして花粉親群落上の風速を抑制した実験である。それらの交雑率は、実験③は実験②に比べて顕著な抑制効果の向上がみられるが、以後④、⑤と上流側に増えるに従い抑制効果は微増するにとどまっている。一方、花粉親からの距離が 70 ~ 100 m の区間では、実験⑤の結果が④に比べて大幅に減少しているように見える。しかし、この付近では計算上の誤差が大きくなるため、この差については注目しない。

さらに、ヨーロッパで採用されている遺伝子組換え作物の「意図せざる混入率 (adventitious contamination)」の許容水準である 0.9% (Fig. 1 の水平線) を達成するために必要な花粉親と種子親群落の隔離距離 (Messean *et al.*, 2006) を Table 1 にまとめた。防風ネットなしの場合は 50 m、実験①では 40 m、実験②では 30 m、以下ネットの本数が増えるに従って、27 m、25 m、22 m と減少した。結果を隔離距離の観点から整理すると、ネット無しの場合に比べて 1 本の防風ネットを設置することによって隔離距離を 60% に短縮することができ、防風ネットを 3 本以上用いることにより、隔離距離を 50% 以下に短縮できることが示された。

次に、防風植生を用いた実験による交雑率分布を Fig. 3 に示す。こちらも防風ネットの場合と同様に、防風植生の列が増えるに従って、交雑抑制効果が増加している。しかし、防風植生が最も多い実験⑤の場合でも、花粉親から最も遠い地点での交雑率は 0.09% であり、防風ネット

Fig. 2. Cross-pollination rate for windbreak net experiments averaged with the distance from the donor boundary. A horizontal line indicates 0.9% cross-pollination rate.

Table 1. Isolation distance for net and plant windbreak cases with respective windbreak arrangements.

Arrangement number	none	1	2	3	4	5
Windbreak net	50	40	30	27	25	22
Plant windbreak	50	40	35	33	32	31

トの場合の 0.05% に比べて大きな交雑率が示された。

防風植生を設置した場合についても、交雑率を 0.9% 以下に抑えるために必要な隔離距離を Table 1 に示した。防風植生なしの場合の 50 m に対して、実験①で約 40 m、実験②で 35 m、実験③～⑤が 31-33 m 程度である。この結果から、防風施設が①の位置にある場合には、隔離距離が防風ネットと防風植生とで変わらないことがわかる。しかし、実験②の位置では防風ネットの場合の 30 m に比べて防風植生ではやや長い 35 m の隔離距離が必要であり、実験③～⑤については約 33 m より隔離距離を短縮することはできなかった。結果を隔離距離の観点から整理すると、防風植生を 1 列設置することにより隔離距離を 70% に短縮することができ、十分な交雑抑制効果が示された。

以上の実験では風速や風向が一定の理想化された状態を想定しているため、得られた結果をすぐに実用化に結びつけることはできないが、実際に防風施設を設置する場合の交雑率について非常に有用な目安が示されたと考えられる。

3.2 風速分布

次に、3.1 で述べた交雑抑制効果を生みだした要因を解明するために、防風ネットおよび防風植生の風速抑制効果を調べた。Fig. 4 は防風ネット、Fig. 5 は防風植生の結果である。これらの図は、計算時間の中間である正午における、防風ネットや防風植生に垂直な鉛直断面における風速分布である。風速の値は、上流側末端を 1 と

した場合の比率で表わしている。まず Fig. 4 のネット 1 と 2 を比べると、抑制された風速の分布はほとんど同じで、位置が変わっているだけである。ネット 1 の場合は、抑風効果が大きいのは 70 ～ 80 m の領域であり、この領域は種子親群落上流側末端に入り込んでいる。一方、ネット 2 の場合は 60 ～ 70 m の領域で抑風効果が大きく、この領域は花粉親群落下流側末端に収まっている。つまり花粉親群落内に占める抑風領域の大きさの違いが、実験①と②で示された交雑率の差をもたらしたものと考えられる (Fig. 2)。ネット 3 ～ 5 については複数の防風ネットにより連続的に風速が抑制されており、ネット 5 については 20 ～ 70 m の花粉親全域にわたって風速が抑えられている。また、ネット 3 や 4 ではネット 5 と比べて花粉親群落の上流側末端付近で風速が大きめである。しかし、花粉親群落の上流側末端で巻きあげられた花粉も、種子親群落に達する前に防風ネットで弱められた風により花粉親群落内に落下するものが多くなり、結果としてネット 2 に比べて交雑率が抑制されたものと考えられる。

一方防風植生の場合は (Fig. 5)，防風ネットに比べて高さが低いために抑風効果は相対的に小さいものの、防風ネットと同様に花粉親群落上層の風速が効果的に抑制されている。

次に、防風ネットおよび防風植生を設置した場合の雄穂高における絶対風速を Fig. 6 に示す。Fig. 6a の防風ネットを設置した場合、Net 5 では花粉親群落内の -50 ～ 0 m の領域で風速が $0.4 \sim 0.7 \text{ ms}^{-1}$ に抑えられている。また、ネット 1 本よりも 2 本、3 本と増えるに従って、下流側の抑風効果もやや大きくなる傾向が見られた。

一方、Fig. 6b の防風植生による実験結果では、Fig. 6a の防風ネットと同様のパターンではあるが、抑風効果が小さくなっている。これは、防風植生の高さが防風ネットに比べて低いことが主な原因と考えられる。最も抑風効

Fig. 3. Cross-pollination rate for plant windbreak experiments averaged with the distance from the donor boundary. A horizontal line indicates 0.9% cross-pollination rate.

Fig. 4. Wind speed suppression rate with respect to the upstream boundary edge in windbreak net experiments described by color shade. The locations of the windbreak net are shown by arrows below the panel, and the donor and recipient plots are shown by brackets.

Fig. 5. Wind speed suppression rate with respect to the upstream boundary edge in plant windbreak experiments described by color shade. The locations of the windbreak net are shown by arrows below the panel, and the donor and recipient plots are shown by brackets.

Fig. 6. Wind speed at the height of maize tassel for windbreak net experiment (a) and plant windbreak experiment (b). Line types are correspond to the windbreak arrangements, same as Fig. 2 and 3 as, thin solid line (1), long broken line (2), short broken line (3), dot broken line (4), double dot broken line (5), and thick solid line (6).

果が高い Plant 5 では、風速は $0.85 \sim 1.0 \text{ ms}^{-1}$ に抑えられているが、これは上流側風速より $0.1 \sim 0.25 \text{ ms}^{-1}$ 程度小さくなっているに過ぎない。しかし、このようなわずかな抑風効果であっても交雑抑制に対して効果的であることは、Fig. 3 で示された通りである。

4. 考 察

今回の数値実験の結果から、高さ 3 m の防風ネットおよび高さ 2 m の防風植生が、作物高 1.8 m のトウモロコシに対して十分な交雑抑制効果があることが示された。これらは、交雑率を 0.9% 以下に抑えるために必要な隔離距離を、防風施設が無い場合の 50 m から防風ネットを設置することで最高 22 m、防風植生を設置することで最高 31 m まで低減させることができた。しかし、これらは風向風速を固定した理想化された条件での実験結果である。ここでは、実際の圃場でトウモロコシを栽培する場合に考慮すべき点について考察を行う。

まず、風向風速が変わった場合の効果について考察する。風向は、今回の実験では最も交雑が起こりやすい、花粉親群落から種子親群落の方向で行った。風向が変わった場合には、交雑率は一般的に減少する。なぜなら、花粉親群落から放出された花粉の多くは種子親群落以外の領域に運ばれることになるからである。また、防風施設の位置が②～⑤の場合、風向が斜めの場合（例えば、Fig. 1 の右斜め下向き）、部分的に花粉親群落と種子親群落の境界付近で防風施設の効果が無くなる領域が現れる。したがって、そのような境界付近の種子親群落の風上側（この例の場合、Fig. 1 の種子親群落の左上部分）では局所的に交雑率が大きくなることが考えられる。しかしこの場合、防風施設を外れて花粉親群落上空から種子親群落上空に流れる気流は花粉親群落上空における吹走距離が短いことと、種子親群落上空に輸送される花粉親花粉数は全体としては減少することから、平均的な交雑率は風向が花粉親群落から種子親群落方向に吹く場合に比べて大幅に減少する（図は省略）。

風速については、今回の実験では初期値として 3 ms^{-1} を仮定し、その後 1 日を通して上空の風速は 3 ms^{-1} を維持するように設定した。一般的に関東では、トウモロコシが開花する夏の晴天日の平均風速は 1.5 ms^{-1} 程度であり、今回の設定は風速を 2 倍程度過大評価したものである。したがって、一般的な晴天日の条件のもとでは今回の実験で求めた隔離距離により、十分な交雑抑制効果が期待できる。ただし、台風などの場合 3 ms^{-1} 以上の強風が吹く恐れもあるが、このような場合は悪天であることが予想されるので、花粉はほとんど放出されず、交雑には影響しないものと予想される。

次に圃場面積について、今回は花粉親群落を 50 m 四方と仮定した。実際には、それよりも大きな圃場で商用栽培がおこなわれることも想定される。しかし、花粉親群落と種子親群落の境界付近に設置された防風施設は交雑抑制に効果的であったが、上流側に防風施設の本数を増やした場合の交雑抑制効果は限定的であった。このことから、花粉親群落と種子親群落の境界から遠い上流側で放出された花粉の多くは種子親群落に達する前に落下してしまうため、境界付近から放出された花粉に比べて交雑に対する影響は小さいと推測される。そのため、上流側に設置した防風施設による交雑抑制効果は境界付近のものに比べて小さいと考えられる。このことから、花粉親群落が 50 m よりも大きくなった場合でも、今回設定した防風施設は十分な交雑抑制効果を発揮すると予想される。

数値実験では、より大規模な圃場についても調査することは可能であるが、本研究で使用したパーソナルコンピュータでは、計算能力の問題から今回の設定が限界であった。ただし、将来計算能力の高い計算機を利用して、さらに広い圃場について調査する可能性は残されている。

続いて、防風施設の設置費用の点について考察する。今回使用した防風ネットの規格は 1 mm 目のポリエチレン製のもので、2 mm 目以上のネットに比べ防風効果が高いために実験資材として採用した。ちなみに、1 mm 目ネットを 2 mm 目ネットに置き換えても、交雑率は 20% 程度しか増加しない (Ushiyama *et al.*, 2009b)。しかしながら、ネットを設置する場合には支持ポールを一定間隔で建設する必要がある、設置費用と作業時間が必要となる。このため、実際にはできるだけ防風ネットの設置本数は減らすことが望ましい。防風ネットを 1 本のみ設置する場合には、数値実験で示したように、単純に花粉親群落と種子親群落の境界の Fig. 1 の①に設置するよりは、より効果の大きい②の位置に設置するべきである。さらに、ネットの本数を増やして交雑抑制効果を高める場合は、③、④のように、上流側に増やしていくべきである。

防風ネットに代わって防風植生を用いる場合は、設置費用が軽減できると考えられる。栽培面積は多少犠牲になるが、栽培対象であるトウモロコシよりも生育が早く、より植生高の高いソルガムを密に栽培することによって、効果的な防風植生を完成させることができる。さらにトウモロコシの収穫後、ソルガムを土壌中に梳き込めば、翌年の堆肥としても利用できる。また、設置費用と作業時間が防風ネットに比べて軽減できるため、防風植生の本数を増やすことも容易である。②の防風ネット 1 本と④の防風植生 3 本による交雑抑制効果がほぼ同程度であることから、後者を選択することで経費を削減することができると考えられる。

今回の実験結果はすべて数値実験のみの結果であり、実際の圃場における測定結果による検証は行うことができない。そこで、数値実験結果の信頼性について、これまでの研究をもとに考察する。牛山ら (2009) では、防風ネットの風下側の防風効果について風洞実験を行い、その風速分布を A2C モデルで再現した。数値実験の結果は風洞実験を良く再現しており、精度についての正確な記述はないものの、図の比較から概ね 10% 以内と考えられる。Ushiyama *et al.* (2009b) では、A2C モデルを用いて防風ネットや防風植生によるトウモロコシの花粉交雑抑制実験の圃場実験結果を再現した。その結果、防風植生による交雑抑制効果は、花粉親から 52 m までのすべての実験領域で統計的に有意な精度で交雑率を再現した。しかし、高さ 6 m の防風ネットによる実験では、ネットから 25 m 以上離れた領域での精度が不十分であった。しかし、この不十分な精度はモデルに与えた境界条件のデータの問題によるものと考えられるため、必ずしも数値実験の結果の信頼性を否定するものではない。これらのことから、今回の数値実験による交雑分布は、信頼性について一定の検証を受けているものの、精度についてはある程度余裕を持って用いることが望ましい。

5. まとめ

防風ネットおよび防風植生によるトウモロコシの交雑抑制手法として、防風施設の効果的な配置について、数値実験により調べた。実験設定は、花粉親群落が 50 m × 50 m、それに隣接する種子親群落が 50 m × 100 m で、風向は花粉親群落から種子親群落方向、風速は 3 ms⁻¹ で一定とした。実験の結果、限られた防風施設により効果的に交雑を抑制するには、花粉親群落の下流側端の風速を抑えることが重要であることがわかった。そのためには、防風施設を、花粉親と種子親群落の境界よりもやや上流側に設置することが有効であった。さらに、花粉親群落内の上流側にも防風施設を増やすことで、花粉親群落内の風速をより小さく抑えることができ、交雑抑制に対して効果的であった。

これらの効果について、交雑率を 0.9% 以下に抑えるための隔離距離で評価すると、風速 3 ms⁻¹ の場合において、防風施設が無い場合の隔離距離 50 m から、防風ネットを設置することで 22 m まで最大短縮することができた。また、防風植生を設置することで最大 31 m まで短縮できることが示された。実際の商業栽培においては、広い圃場に防風ネットを設置するためには経費と労働力を投資することが必要であり、ソルガム等の防風植生を栽培する方が費用対効果に優れている場合も考えられる。そのような場合、防風植生を 3 本設置することにより、防風ネット 1

本を設置するのとはほぼ同じ交雑抑制効果を持つことが示された。

謝 辞

数値モデルの使用にあたって、YSA Inc. の山田哲司博士から数多くのアドバイスをいただいた。モデルの初期値および境界条件として、気象庁によって作成され、京都大学生存圏研究所によって NetCDF 形式に変換された GPV データを使用した。図の作成には、地球流体電脳クラブライブラリ (DCL) と Grid Analysis and Display System (GrADS) を使用した。ここ感謝いたします。

References

- Aylor, D. E., 2002: Settling speed of corn (*Zea mays*) pollen. *J. Aerosol Sci.*, **33**, 1601–1607.
- Bourdin, P., and Wilson, J. D., 2008: Windbreak aerodynamics: Is computational fluid dynamics reliable?. *Boundary-Layer Meteorol.*, **126**, 181–208.
- Cleugh, H. A., 1998: Effects of windbreaks on airflow, microclimates and crop yields. *Agroforestry Systems*, **41**, 55–84.
- Dyer, A. J., and Hicks, B. B., 1970: Flux-gradient relationship in the constant flux layer. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **96**, 715–721.
- Hirt, C. W., and Cook, J. L., 1972: Calculating three-dimensional flows around structures and over rough terrain. *J. Comput. Phys.*, **10**, 324–340.
- 川島茂人・松尾和人・芝池博幸・井上 聡・岡 三徳・杜 明遠・高橋裕一・米村正一郎, 2004: 気象条件が花粉飛散を介してトウモロコシの交雑率に与える影響. *農業気象*, **60**, 151–159.
- 真木太一・潘 伯榮・杜 明遠・上村賢治, 1993: 中国トルファン乾燥地における防風ネットによる微気象改良と飛砂防止. *農業気象*, **49**, 159–167.
- Maki, T., Hirayama, Y., Takemasa, A., and Obu, M., 2004: Meteorological alleviation by a windbreak net at reclaimed land of Isahaya Bay. *J. Agric. Meteorol.*, **60**, 243–251.
- Mellor, G. L., and Yamada, T., 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **20**, 851–875.
- Messean, A., Angevin, F., Gomez-Barbero, M., Menrad, K., and Rodriguez-Cerezo, E., 2006: New case studies on the coexistence of GM and

- non-GM crops in European agriculture. *European Commission, European Science and Technology Observatory. EUR22102EN*.
- Takahashi, S., Du, M., Wu P, Maki, T., and Kawashima, S., 1998: Three dimensional numerical simulation of the flow over complex terrain with windbreak hedge. *Environ. Model. Software*, **13**, 257–265.
- Ushiyama, T., Du, M., Inoue, S., Shibaike, H., Yonemura, S., and Kawashima, S., 2009a: Three-dimensional simulation of rice pollen dispersal and hybridization in field scale. *Proceedings of the 5th WSEAS international conference on mathematical biology and ecology (MABE'09)*, 27–32.
- Ushiyama, T., Du, M., Inoue, S., Shibaike, H., Yonemura, S., Kawashima, S., and Amano, K., 2009b: Three-dimensional prediction of maize pollen dispersal and cross-pollination and their suppression by windbreaks. *Environmental Biosafety Research*, **8**, 183–202.
- 牛山朋来・井上 聡・芝池博幸, 2009: 数値シミュレーションへの適用を目的とした風洞実験と数値実験による防風ネットの防風特性調査. *農業気象*, **65**, 273–281.
- Yamada, T., 1982: A numerical model study of turbulent airflow in and above a forest canopy. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **60**, 439–454.
- Yamada, T., and Bunker, S., 1988: Development of a nested grid, second moment turbulence closure model and application to the 1982 ASCOT Brush Creek data simulation. *J. Appl. Meteorol.*, **27**, 562–578.
- Wang, H., and Takle, E. S., 1995: A numerical simulation of boundary-layer flows near shelterbelts. *Boundary-Layer Meteorol.*, **75**, 141–173.
- Wang, H., and Takle, E. S., 1996: On three-dimensionality of shelterbelt structure and its influence on shelter effects. *Boundary-Layer Meteorol.*, **79**, 83–105.
- Wang, H., Takel, E. S., and Shen, J., 2001: Shelterbelts and windbreaks: mathematical modeling and computer simulations of turbulent flows. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **33**, 549–586.