

(原著論文)

環境影響評価のためのトウモロコシ花粉落下総数の予測手法

川島 茂人¹⁾・松尾 和人¹⁾・杜 明遠¹⁾・高橋 裕一²⁾・
米村 正一郎¹⁾・井上 聡¹⁾・酒井 英光¹⁾¹⁾ 農林水産省農業環境技術研究所 〒305-8604 つくば市観音台 3-1-1²⁾ 山形県衛生研究所 〒990-0031 山形市十日町 1-6-6

(2000年8月25日 受付, 2000年10月25日 受理)

Estimating Total Corn Pollen Deposition for Environmental Assessment

Shigeto KAWASHIMA¹⁾, Kazuto MATSUO¹⁾, Mingyuan DU¹⁾,
Yuichi TAKAHASHI²⁾, Seiichiro YONEMURA¹⁾, Satoshi INOUE¹⁾
and Hidemitsu SAKAI¹⁾¹⁾ *National Institute of Agro-Environmental Sciences,
3-1-1 Kannondai, Tsukuba, 305-8604 Japan*²⁾ *Yamagata Prefectural Institute of Public Health,
1-6-6 Tohkamachi, Yamagata, 990-0031 Japan*

Pollen dispersal and deposition was measured inside and outside of a corn field throughout the flowering period. Weather conditions, such as wind speed and wind direction, were measured simultaneously. Pollen dispersal peaked one week after the start of flowering and continued for 12 days after. The variation in daily pollen dispersal was similar at all observation points. Pollen dispersal and deposition both decreased exponentially with distance from the corn field on all days. We evaluated daily total pollen deposition with a statistical model considering the effects of wind direction, wind speed, and flowering period. The potential deposition, which occurred when wind conditions were suitable for pollen emission throughout the flowering period, was estimated using this model. In addition, the potential deposition was integrated for the flowering period. The relationship between distance from the field and the integrated potential deposition was estimated. It was possible to show the risk area rationally by combining the distance-deposition relation and the dose-response relation which could be derived from a laboratory assay for a problematic organism. The algorithm described here can be applied for various plants to estimate both potential and integrated pollen deposition.

Key Words : corn pollen, total deposition, estimation model, environmental assessment

はじめに

近年, 遺伝子組み換え技術を用いて作られた作物の安全性や環境への影響が問題視されている中, Losey

ら⁽¹⁾は, Bt (*Bacillus thuringiensis*) トウモロコシの花粉が標的外の昆虫を殺傷してしまう可能性を明らかにした. 彼らが, 花粉によってもたらされる環境への影響の重要性について問題提起をした意義は大き

い。しかしながら、彼らはトウモロコシ花粉の飛散距離や落下量については詳しく調べていない。今まで行われたトウモロコシ花粉の飛散に関する研究として、Raynor ら⁽²⁾は、粒径の大きなトウモロコシ花粉の飛散状況を、より粒径の小さな花粉の飛散状況と比較して検討した。彼らは、トウモロコシの花粉は大きいために、他の多くの花粉に比べて速やかに落下し、生成源の近くにほとんどが沈着することを明らかにした。また、生成源の風下 60m で花粉の濃度は、風下 1m の 1% 程度に減少すること、生成源の風下 60m で大気中に留まっている花粉の量は、風下 1m での量の 5% 程度に減少すること等を示した。彼らによれば、花粉の平均落下速度は、約 33cm/sec であった。Paterniani and Stort⁽³⁾は、いくつかの大きさの異なるトウモロコシ畑からの花粉の飛散数を測定した。その結果、植物の個体数が花粉飛散数を評価するのに重要であることを示した。

トウモロコシ以外の花粉を対象に、花粉が風によって拡散する過程を扱った研究の中で、比較的短い距離の拡散について検討した例として、Raynor ら⁽⁴⁾は、チモシーの花粉が拡散し沈着する過程を実験的に調べ、発生源からの距離と飛散数との関係を図示した。また、Raynor ら⁽⁵⁾は、点源および線源からの花粉の拡散状況を面的に測定し、花粉濃度や沈着速度と発生源からの距離の関係を明らかにした。Price and Moore⁽⁶⁾は、台地の周囲から谷風が吹き上げるような地形では、風が収束する台地中央部で多数の花粉が降下する現象があることを明らかにした。Giddings ら⁽⁷⁾は、*Lolium perenne* の花粉の飛散数を測定し、生成源からの距離と飛散数の関係に様々な関数をあてはめ比較検討した。その結果、観測された花粉数の変動はきわめて大きく、そのため従来型の花粉飛散理論や飛散式では、花粉によるリスクアセスメントには不十分であり、花粉の飛散は風向によって大きく影響されること等を明らかにした。

上記のような従来の研究では、空中花粉飛散数や飛散量(空中花粉濃度)について調べたものが多く、落下した花粉数についてはほとんど明らかにされていない。また、風速・風向などの気象条件の影響についても詳しくは調べられていない。そこで本研究では、実際のトウモロコシ畑を用いて、開花期間全体を通じて花粉飛散数と花粉落下数の計測を行うと同時に、風速・風向などの計測も行い、整理・解析した。

Bt コーンのように花粉による汚染量を問題にする場合、風速・風向が花粉飛散に好適でかつ落下花粉が

集中する条件で開花期間が推移した場合に、その総落下数が風下側でどれ位になるかが重要である。これを、花粉ポテンシャル落下数と呼ぶことにする。また、よりきめの細かい取り扱いをするには、風向や風速が変わった場合にどのような落下数になるかを予測する必要も生じる。ところが、実際に観測される落下花粉数は、風向や風速の影響を受けている。そこで、大気汚染物質に対する環境影響評価などで用いられる、風向や風速を考慮した評価手法と、汚染質の放出源である植物の生育特性を組み合わせた評価手法について検討した。まず、実際に観測された花粉落下数と風の関係についての解析結果に基づき、風向と風速が花粉落下数に与える影響をモデル化することを試みた。さらに、このモデルを用いて、花粉ポテンシャル落下数を推定するとともに、圃場からの距離とトウモロコシ花粉落下数の関係等について検討した。

材料と方法

1. 調査圃場の概要

調査は、つくば市観音台、農業研究センターの HA-16 圃場(面積約 40a)及び HA-17 圃場(面積約 40a)で、1999 年 7 月 25 日から 8 月 12 日の 19 日間に行った。HA-16 圃場に栽培したトウモロコシの品種はホワイトデントコーン、播種日は 1999 年 5 月 25 日、作付け面積は約 36.3a (40.4m × 89.8m)である。圃場の大きさは、主風向の方向の幅が約 40m、主風向に直交する方向の幅が約 90m である。調査期間における平均草高は約 306cm、花穂を有する個体密度は 536 本/a、対象圃場の推定総個体数は約 19460 本である。対象圃場の個体密度は、一般的なトウモロコシ圃場の個体密度(370 ~ 550 本/a、星川⁽⁸⁾)の範囲内である。調査は、梅雨明け後の風向が南よりに安定した期間であり、HA-17 圃場はトウモロコシ群落の風下にあたる。HA-17 圃場には生育初期のダイズが栽培されていた。ホワイトデントコーンの花粉は、ほぼ球形で、直径は約 92 μ m であった。

2. 花粉の観測方法

HA-16 圃場のトウモロコシ群落内 2 箇所(C, B1)と、群落外の風下側(HA-16, HA-17) 6 箇所(B2, N1, N2, N3, N4, N5)に、Durham 型花粉採集器(西精機製)を設置した(Fig. 1)。各花粉採集器では、地上 120cm 及び 125cm の高さにワセリンを塗布したスライドガラス(76mm × 26mm)を取り付けた。

地上 120cm のスライドガラスは空中花粉飛散数を計測するための通常の設置位置であり、下側の円盤の上面中央に置いた。ここで計測された花粉数は空中花粉飛散数である。これに対して、地上 125cm のスライドガラスは、上側の金属円盤の上面中央に置いた。通常は雨などの影響があるためにこの位置にはスライドガラスは置かないが、本実験では植生の表層葉面上への花粉落下数を求めるためにこの位置で計測した。幸い、調査期間中にはほとんど降水がなく、8月4日の深夜にのみ降水がみられた。そこで、8月4日から5日にかけて得られた落下数の計測値はこの点に留意して取り扱った。

スライドガラスの交換は、毎朝午前 10 時頃に行った。回収したスライドガラス上の花粉は、Carberla 液で染色し、18mm × 18mm のカバーガラスで覆った後、カバーガラス下のすべての花粉数を数えた。トウモロコシの花粉の平均粒径は約 100 ミクロンと大きいので、顕微鏡の倍率は低めの 100 ~ 200 倍が適していた。計数値は 1 cm² 当たりの値に換算し解析した。

3. 気象の観測方法

トウモロコシ圃場から風下側の距離が約 10m の地点 M1 と約 25m の地点 M2 において気象観測を行っ

た。地点 M1 においては、3 高度の風速（地上 1 m, 2 m, 4 m）、風向（地上 4 m）、気温・湿度（地上 1.5m）を測定した。地点 M2 においては、風速・風向（地上 1.5m）を測定した。風速・風向センサーはいずれの地点も、牧野応用測器社の光電式 3 杯風速計と光電式矢羽風向計を使用した。気温・湿度センサーは通風管の中に設置した白金抵抗温度計を使用した。測定されたデータは、英工精機社のデータロガー（SOLAC III）に記録した。圃場における気象観測データが欠けている場合や、今回の調査期間前後の気象状況を把握するために、調査圃場から東に約 300m 離れた所にある農業環境技術研究所気象観測タワーでの観測値も用いた。

結 果

1. 花粉飛散数

ダーラム型花粉捕集器の本来の位置に設置したスライドガラスで得られた日別花粉捕集数（朝 10 時 ~ 翌朝 10 時）を整理した。通常の呼び方に従って、この測定値は花粉飛散数と呼ぶ。これは、植生内部の葉面上に沈着する花粉数に対応すると考えられる。花粉飛散数の経日変化を地点別にプロットしたものを Fig. 2

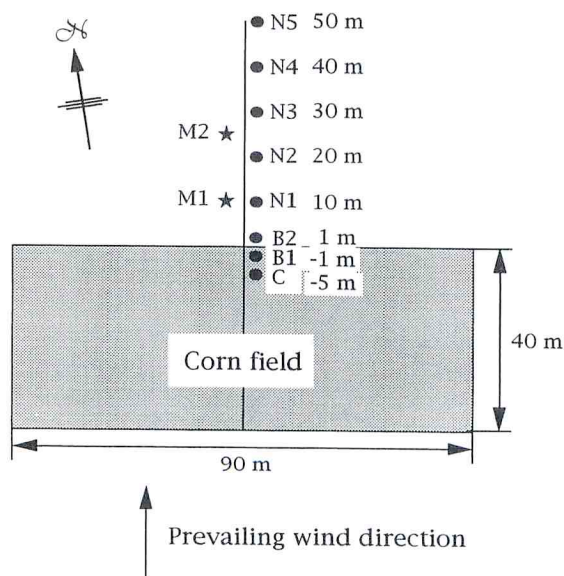


Fig. 1. Arrangement of the measuring instruments in the study site.

- : Pollen observation points with Durham sampler.
- ★ : Meteorological observation points.

に示す。この図から、地点 B2 の飛散数が特に多いこと、飛散開始から 1 週間で飛散数がピークとなり、その後 3~4 日で急に減少したこと、飛散期間の後半は数は少ないものの、ピーク後 12 日間は飛散が観測されたこと、等のことがわかる。

次に、圃場からの距離によって飛散数がどのように変わるかを調べた。その結果、ほとんどの日で B2 が最大で、C、B1 の順で大きな値を示すこと、圃場からの距離による圃場外の地点での飛散数は、どの日も指数関数的に減少していること、B2 地点が 100 個/cm² day を越える日のパターンは、日によってあまり変わらないこと、等のことが明らかになった。

2. 花粉落下数

ダラム型捕集器の上に設置したスライドガラスで得られた日別花粉捕集数(朝 10 時 ~ 翌朝 10 時)を整理した。本報告では、以後これを花粉落下数と呼ぶ。これは植生の表層葉面上に沈着する花粉数に対応すると考えられる。

花粉落下数の経日変化を地点別に示したものを Fig. 3 に示す。この図から、増加と減少の期間は飛散数と同様であるが、圃場内の C、B1 地点と圃場に近

接する B2 地点は、ほぼ同じ経日変化を示すこと、ピーク日は、圃場内及び近接地点の落下数は 1000 個/cm² day をこえること、ピーク後は、B2 地点が最も多くなる傾向を示すこと、8 月 4 日の減少は、夜間にあった降水の影響と考えられるが、直接降水がかかる場所に設置されているため、飛散数よりも顕著に減少していること等のことがわかる。

次に、圃場からの距離によって落下数がどのように変わるかを調べた。その結果、ほとんどの日で地点 C、B1、B2 は特に高い値を示すと同時にほぼ同じレベルであること、圃場外の 6 地点について圃場からの距離による落下数は、どの日も指数関数的に減少していること等のことが明らかになった。

3. 飛散数と落下数の関係

全観測地点の飛散数と落下数を日別に合計して求めた日別飛散数と日別落下数の関係を Fig. 4 に示す。この図から、日別の飛散数と落下数は高い相関があり、落下数は飛散数の約 3.3 倍であることがわかる。また、最も飛散数の多い 3 日間を除いて、増加期と減少期に分けると、増加期では落下数は飛散数の約 3.2 倍であるのに対し、減少期では落下数は飛散数の約

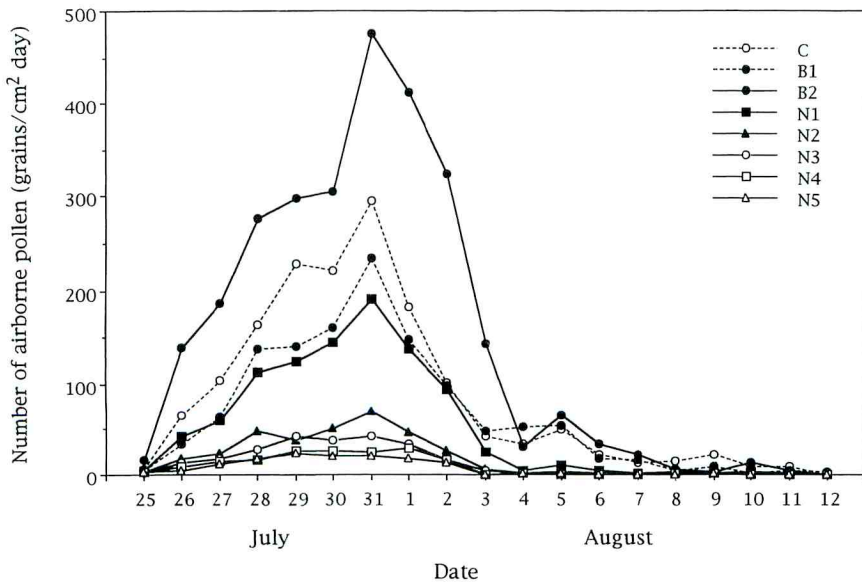


Fig. 2. Variation in the number of airborne pollen grains with passage of day. Pollen dispersal peaked one week after the start of flowering and continued for 12 days after.

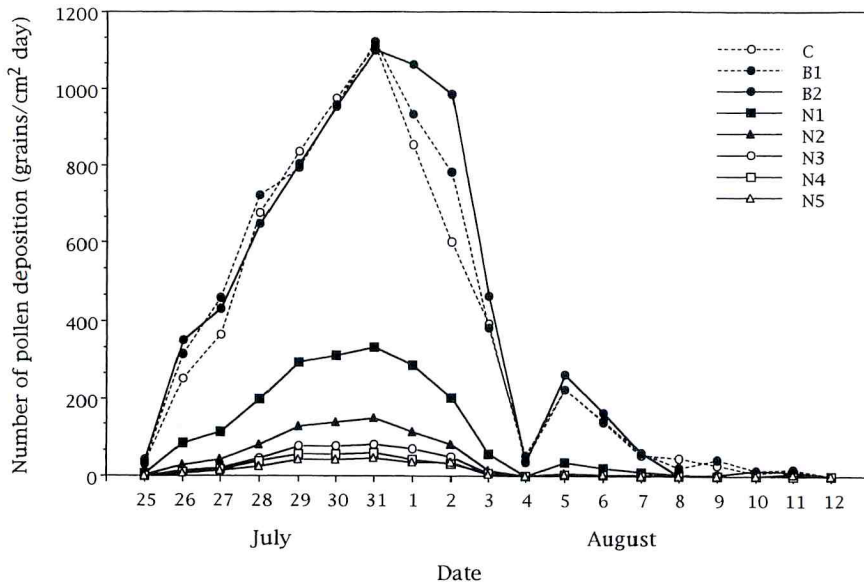


Fig. 3. Variation in the number of deposited pollen grains with passage of day. Large numbers of pollen grains were observed at the inside and near the border of the corn field.

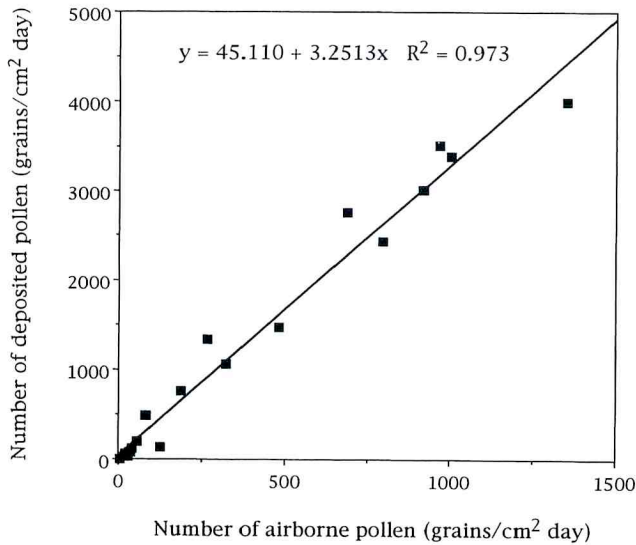


Fig. 4. Relationship between the number of airborne pollen grains and the number of deposited pollen grains. The number of deposited pollen grains shows three times of the number of airborne pollen grains.

4.2 倍になること等が明らかになった。

全観測期間の飛散数と落下数を地点別に合計して求めた地点別飛散数と地点別落下数の関係を調べた。そ

の結果、落下数と飛散数の比は、圃場内と圃場に近い地点の方が圃場から遠い地点よりも大きく、C 地点で約 4、B1 地点で約 6、B2 地点で約 3、N1～N5

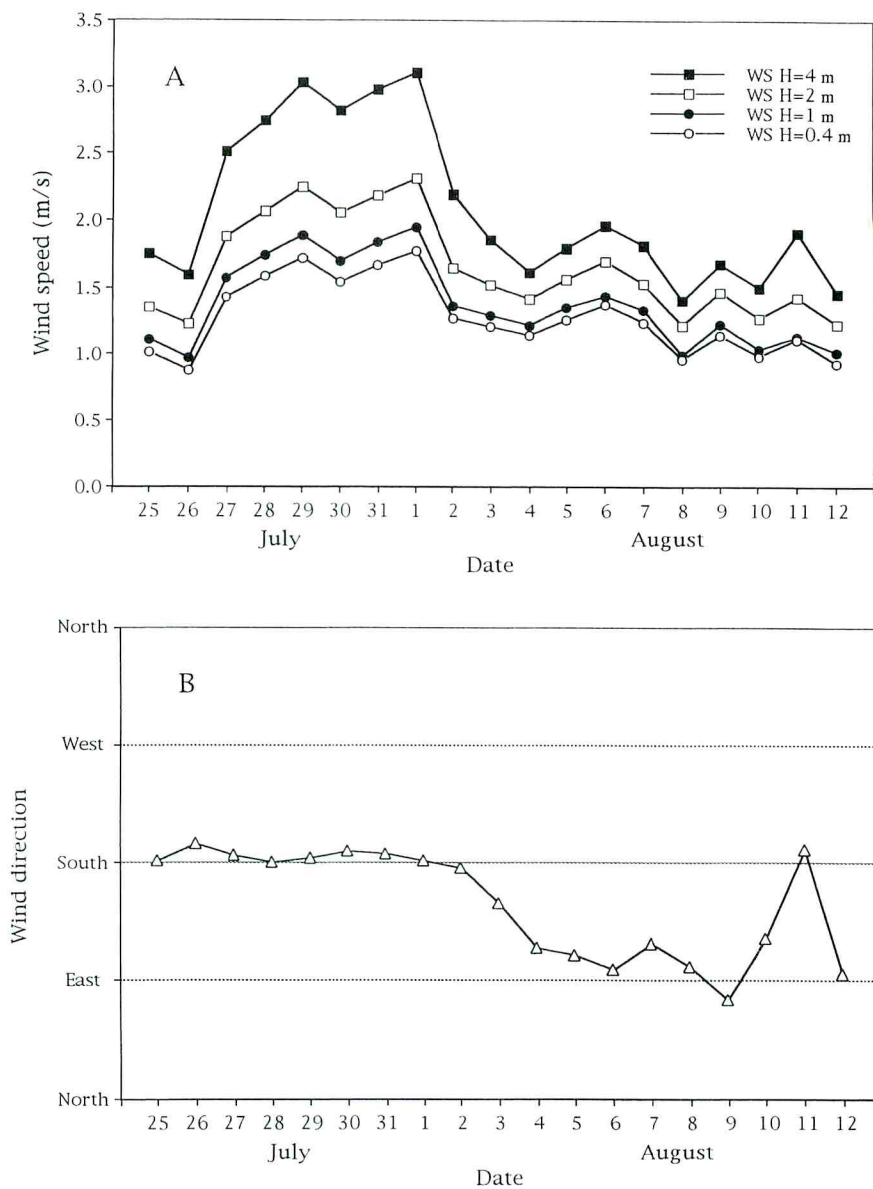


Fig. 5. Variation in the wind condition with passage of day.

A) Wind speed at four heights above the ground.

B) Wind direction at 4 m height above the ground.

地点では約2となった。

4. 気象観測結果

1) 風速と風向

Fig. 5A に調査期間（7月25日～8月12日）に

おける日平均風速の経日変化を示す。トウモロコシの群落直上である高さ地上4mの風速を見ると、調査期間全体の平均風速は2.1m/sであった。調査期間の最初と後半部は日平均風速は1.5～2.0m/s程度であったが、7月27日から8月1日までの6日間は

3.0m/s前後の強い風速を示した。実験地域に近いつくば市館野における1990～1996年の同期間の平均風速（測定高さ地上6m）は2.4m/sであることから、本調査期間の平均風速は、近年の平均値と比べて大きく異なることがわかる。

Fig. 5 Bに調査期間における日平均風向（地上4m）の経日変化を示す。調査期間の前半は非常に安定した南風であったが、8月3日から徐々に東よりの風にシフトし、後半は南東風が卓越した。館野における1990～1996年の同期間の平均風向は東南であり、風速と同様に風向も近年における平均の状態であったと考えられる。調査期間前半において風向が南で安定していたことは、調査圃場や花粉観測機器の配置等からして、大変好適であった。調査期間の後半部で、風向が東寄りにシフトした時のデータと合わせて解析することにより、風向や風速が圃場の風下側での花粉落下数に与える影響を解析するために好適なデータが得られた。

2) 気温, 湿度, 日射量

日平均気温は調査期間を通じて28℃前後を示し、暑い日が続いた。前半が後半よりやや高めで、7月27日は29.6℃と特に高かった。逆に、8月10日は26℃と期間中では特に低かった。相対湿度は70～80%の値を示し、その変化は気温と逆センスのパターンを示した。8月10日は93%と特に高い値となった。日射量は8月10日以外は18MJ/m²以上の値を示し、特に7月29日から8月2日の5日間は26MJ/m²以上の強い日射量となる晴天であった。降水は8月5日と8月10日に記録されている。8月5日の降水は深夜に集中的に降った雨であったため、日中の花粉飛散への影響は少なかったが、花粉捕集器上部に設置した落下数計測用のスライドグラスへの影響はあったものと推測される。

5. 風の影響を考慮した花粉落下数の評価モデル

花粉による汚染量を問題にする場合、開花期間を通じて風向や風速が花粉飛散に好適な条件で推移した場合に、その総落下数がどれくらいになるかが重要である。これを、花粉ポテンシャル落下数と呼ぶことにする。ところが、実際に観測される花粉落下数は、風の影響を受けている。そこで、風向・風速などの観測値を用いて、風が風下側で観測された花粉落下数に与える効果をモデル化することを試みた。このモデルを用いれば、風向や風速が変わった場合にどのような落下数になるかを予測することも可能となる。また、この

モデルを用いて、圃場からの距離とトウモロコシ花粉のポテンシャル落下数の関係を検討した。本報告では、統計的なモデルを検討する。モデル化の前提条件や仮定は以下の通りである。

1) 花粉観測値はトウモロコシ圃場の風下側6地点（圃場から1m, 10m, 20m, 30m, 40m, 50m）において観測された花粉落下数の日別合計値とする。

2) トウモロコシの雄花が伸長し、花粉を放出しうる期間は、個体ごとには1週間程度であるが、トウモロコシ群落全体としての開花期間は、個体ごとの生育状態にばらつきがあるため、より長期間となる。この群落全体としての開花総数の経時変化パターンを、群落の開花強度と呼び、2次曲線（上に凸な放物線）で近似する。

3) 観測される花粉落下数は、開花強度に比例する。

4) 観測される花粉落下数は、風速に比例する。

5) 観測される花粉落下数は、観測点と畑がなす方向と風向のずれに比例して減少する。風向が南（16方位で8）が観測点と畑がなす方向に風が吹き、風向が東（16方位で4）の時に観測点と畑がなす方向に直角に風が吹く。今回のデータでは、風向は8から4の間にある。

6) 花粉観測を開始した7月25日に、群落中に開花した個体は、まだほとんど見られなかった。よって、群落全体の開花強度を、7月24日をゼロとする。以上を式に表すと、以下ようになる。

$$P = a Sp Ws (1 - Wdd/90) \quad (1)$$

$$Sp = b t^2 + c t \quad (2)$$

ここで、Pは花粉落下数（個/cm² day）、Spは群落全体の開花強度（個/cm²）、Wsは日平均風速（m/s）、Wddは畑と花粉観測点を結ぶ直線からの日平均風向の変位角（度）、tは日付で7月24日をゼロとする、a, b, cは定数である。これらの式を展開し整理すると、

$$P = C1 Wd Ws t^2 + C2 Wd Ws t + C3 Ws t^2 + C4 Ws t \quad (3)$$

となるので、Pを目的変数に、実測値に基づいて重回帰分析を行い、4つの係数（C1, C2, C3, C4）を求めた。

6. 落下数観測値へのモデルの適用結果

1) モデルの妥当性と日々のポテンシャル落下数の推定

圃場外の観測点（B2, N1, N2, N3, N4, N5）で計測された落下数を日別に合計した値の経日

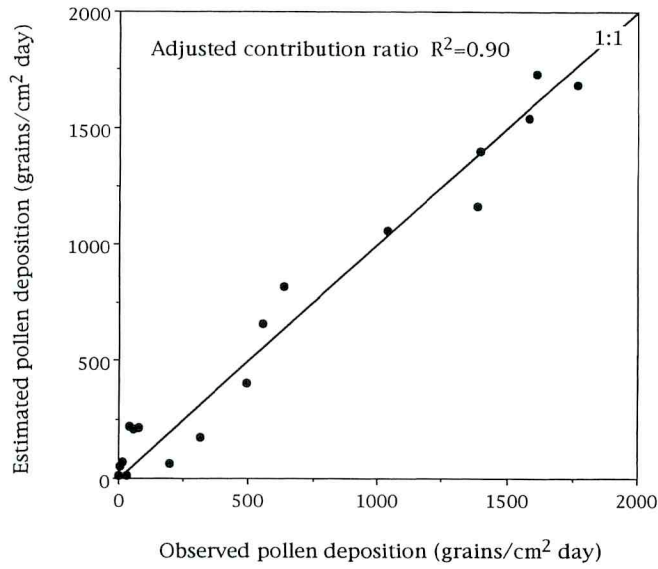


Fig. 6. Relationship between the number of observed pollen deposition and the number of estimated pollen deposition. Adjusted contribution ratio is 0.90.

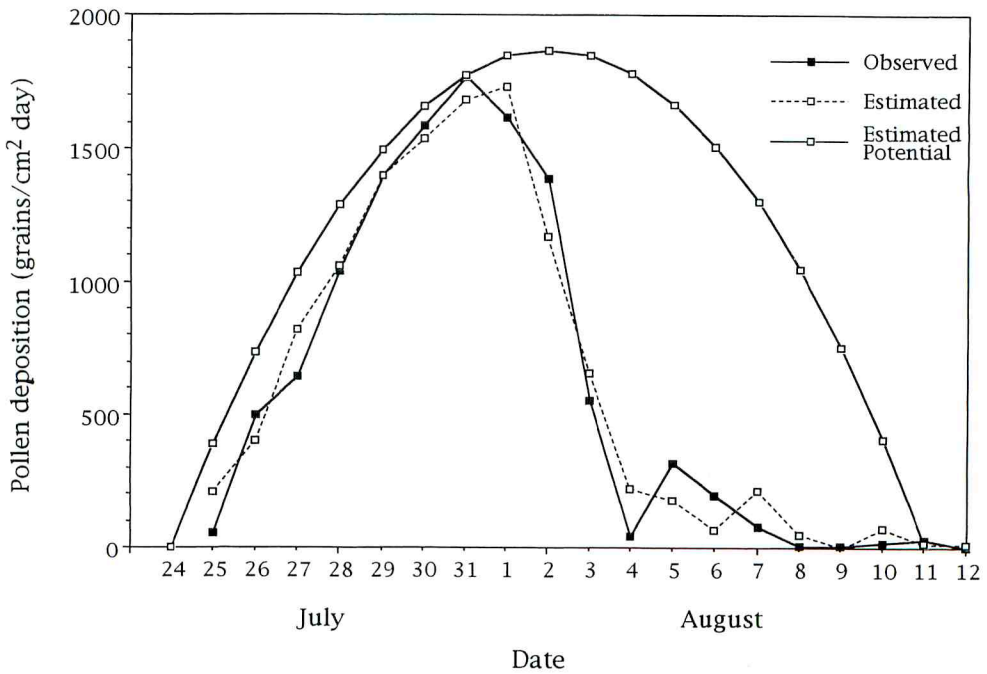


Fig. 7. Variation in the number of observed and estimated pollen grains with passage of day. White squares with a dashed line shows the variation of estimated pollen deposition using the observed wind condition. White squares with a solid line shows the variation of estimated potential deposition using the ideal wind condition.

変化を目的変数にして、上記式によって重回帰式を求めた。解析の結果得られた回帰統計は、観測数 19、重相関係数 R は 0.984、寄与率（重決定係数） R^2 は 0.968、自由度で補正した寄与率 R^2 は 0.896、標準誤差は 126 であった。この回帰式と、実測で得た風向・風速を用いて推定花粉落下数を計算した。Fig. 6 に、花粉の実測落下数と推定落下数の関係を示す。単純なモデルでありながら、観測された落下数の変動の約 9 割を説明できることがわかった。Fig. 7 に、花粉の実測落下数と推定落下数の経日変化を示す。全体的な経日変化の傾向はかなりよく再現できていること、8 月 4 日頃の変動でいくぶん誤差が大きくなっていることなどがわかる。8 月 4 日の夜には一時的に雨が降ったこと、8 月 5 日に薬剤散布が観測点近辺で行われたことなどが、落下数の観測値に影響を与えたと考えられる。

この観測期間では、前半は風向・風速ともに花粉の飛散には好適な条件で推移したものの、後半において風向は徐々に東にシフトするとともに、風速がやや弱くなる傾向が観測された。花粉の落下総数が問題となる場合には、ある群落の開花期間を通じて風の条件が好適なまま推移したと仮定して、花粉飛散数やその分

布がどのようになるかを予測する必要がある。そこで、上記の回帰モデルを用いて、全開花期間で日平均風向が南（16 方位で 8）、日平均風速が 3（m/s）であった場合の圃場外の観測点（6 地点）での合計落下数を推定した。これを日々のポテンシャル落下数と呼ぶことにする。今回実験を行ったつくば市観音台地域の過去の気象観測値に基づくと、7 月下旬から 8 月上旬にかけての日平均風速の期間内平均値が、3（m/s）以上になるのは、20 年に 1 回程度のことであることがわかった。Fig. 7 にポテンシャル落下数の経日変化を示す。そのパターンは、仮定条件から決まるものであるが、そのピークが観測されたピークよりかなり後にあることがわかる。すなわち野外実験で得られた落下数の後半部分は、風の影響によって大きく減少したものを観測していたと考えられる。

2) 圃場からの距離に伴うポテンシャル落下数積算値の変化

花粉による汚染量を問題とする場合、日々のポテンシャル落下数が全開花期間について堆積した場合の落下数積算値が危険度判定の目安となる。本報告では、これを最大堆積花粉数と呼ぶこととし、圃場からの距離に伴ってどのように変化するかについて検討した。

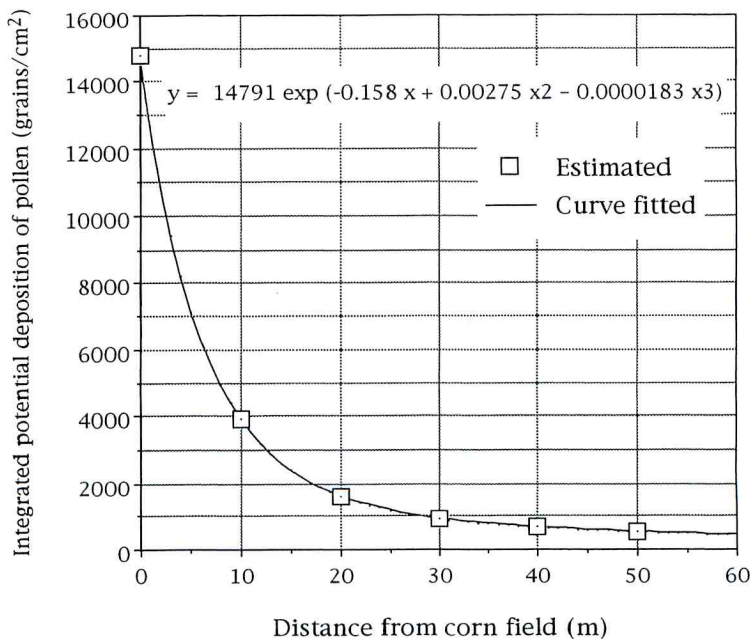


Fig. 8. Change in the number of the integrated potential deposition of pollen grains with the distance from the corn field.

日によって、距離による落下数減衰パターンがどの程度変わるかを調べるため、日別に圃場外6地点の落下数合計値で圃場外各地点の落下数を割り、毎日の落下数減衰パターンを調べた。この結果、ピークを含む主要な花粉飛散期間（7月26日～8月3日）では、風向が東寄りに変化した8月3日を除けば、圃場からの風下側距離に伴う落下数の減衰パターンは、日によらずほぼ一定であることがわかった。この主要飛散期間の落下数は、全飛散期間の落下数の94%を占める。

日々のポテンシャル落下数を全期間について合計したポテンシャル落下総数と、圃場外6地点での実測落下数を全期間について合計した実測落下総数の比を計算したところ、約2.0となった。そこで、各観測地点において、全開花期間の実測落下数合計値を2倍することによって、各観測地点のポテンシャル落下数積算値、すなわち最大堆積花粉数を推定した。Fig. 8に、圃場からの距離に伴う最大堆積花粉数の変化を示す。図の中の白抜き四角が実測値から推定した最大堆積花粉数、曲線は指数関数をあてはめて得られた以下の式を示したものである。

$$y = 14791 \exp(-0.158x + 0.00275x^2 - 0.0000183x^3) \quad (4)$$

ここで、 y は最大堆積花粉数（個/cm²）、 x は圃場の風下端からの距離（m）である。一般的には、できるだけパラメータの少ない曲線で距離と落下数の関係を表すのが望ましいが、ここでは、花粉落下数データを尊重して、これらをできるだけ滑らかに内挿する関数として式（4）を示した。この曲線を用いれば、圃場から任意の距離における最大堆積花粉数が推定できる。

このようなケース数の少ないデータから得られた曲線を用いて、外挿的な推定を行うことは危険であるが、あえて距離をのばした場合の最大堆積花粉数の様子を検討した。圃場から最も遠い観測点以遠は、以下の簡素化した指数関数（5）で距離と落下数の関係を表した。パラメータは、圃場から50mの地点における式（4）の導関数（ dy/dx ）が連続になるようにして決めた。

$$y = 1477.4 \exp(-0.02056x) \quad (5)$$

この関係式に基づけば、圃場からの距離が250m位までは、花粉が落下する可能性が高いと考えられる。

考 察

主風向方向の幅が約40m、主風向に直交する方向の幅が約90mのトウモロコシ畑を対象に、圃場内及

び風下側の圃場外において、開花期間を通じて、花粉飛散数と落下数の計測を行うと同時に、風速・風向など気象条件の計測も行い、整理・解析した。その結果、花粉飛散数および落下数の経日変化パターンは、地点によって大きく変わらないこと、圃場からの距離に伴う花粉飛散数や落下数の変化は、どの日も指数関数的に減少することなどが明らかになった。これらの観測結果や、風の状態と花粉落下数の関係を解析した結果に基づいて、風下側の日別総落下数を、風向と風速の影響を考慮した比較的単純な統計的モデルによって評価する手法を開発した。この手法を用いて得られる圃場の風下端からの距離と落下数積算値（最大堆積花粉数）の関係と、昆虫飼育実験によって得られる花粉落下数の危険密度値を組み合わせることによって、圃場近くの危険ゾーンを合理的に示すことができる。例えば本報告で用いた圃場の場合、総落下花粉数が4000（個/cm²）以上でなければ問題とならないのなら10m離れば安全であること、2000（個/cm²）以上でなければ問題とならないのなら20m離れば安全であること、1000（個/cm²）以上でなければ問題とならないのなら30m離れば安全であること、500（個/cm²）以上でなければ問題とならないのなら55m離れば安全であること、微量な花粉も問題にする場合は、250m位まで危険であること等を示すことができる。

ここで述べた方法は、トウモロコシだけでなく、様々な花粉のポテンシャル落下数や最大堆積花粉数を推定するために用いることができる。その手順の概要は、

- 1) 対象とする圃場において、主風向の風下において、開花期全期間を通じて、花粉落下数の測定を数地点において実測する。同時に、風向、風速、気温、湿度等の気象条件の観測を行う。
- 2) 開花状況の観察、および花粉落下数の観測値から、対象圃場全体としての開花期間を推定する。
- 3) 本報告で示したモデルにデータをあてはめることによって、パラメータを推定する。
- 4) 対象地域の、対象植物の開花時期における過去の風速記録をもとに、風速の最大値を決める。これは確率的な問題なので、例えば20年に1度の頻度で起こりうる強い風速を用いる。
- 5) 風向が変わらず、強い風速が続いたと仮定した場合のポテンシャル落下数を、実測値に基づいて同定したモデルを用いて推定する。
- 6) ポテンシャル落下数を全期間について合計したポテンシャル落下総数と、実測落下数を全期間につ

いて合計した実測落下総数を計算して、その比を求める。

- 7) 各観測地点において、全開花期間の実測落下数合計値に、前段で求めた比を乗ずることによって、各観測地点のポテンシャル落下数積算値、すなわち最大堆積花粉数を推定する。

対象とする作物や圃場の規模が異なる問題に対しては、上記の手順に従って、観測を行い、モデルを同定する。また、一度同定されたモデルは、作物の品種や圃場の規模が変わらなければ、適用させる地域の風速や風向の特性を考慮することによって、適用地域における、圃場からの距離と最大堆積花粉数の関係などを推定できる。

圃場の大きさが変化した場合に、風下側の花粉落下数がどのように変わるかについては、今後さらに野外実験を積み重ねたり、物理的シミュレーション手法などを用いて明らかにされなければならないが、汚染物質の拡散に関する既往の研究等も参考にして、以下のように考察される。風向の方向の幅が増加した場合には、圃場の風下端に近い場所での空中花粉濃度は増加するが、風向の方向の幅が2倍になっても空中花粉濃度は2倍にはならない。一方、圃場の風下端から離れるほど、風向の方向の幅の増加に比例して空中花粉濃度は増加すると考えられる。風向に直交する方向の幅が増加した場合に、圃場の風下端に近い場所での空中花粉濃度はほとんど影響を受けない。一方、圃場の風下端から離れるほど、風向に直交する方向の幅の増加に比例して空中花粉濃度は増加すると考えられる。例えば、圃場からの距離が100m位までを問題とする場合、風向に直交する方向の幅が数100mあるような場合には、風向に直交する方向の幅の増減は問題とするエリア内の空中花粉濃度の増減にあまり影響しないと推察される。

本報告では、圃場からの距離と花粉落下数の関係は、主風向の軸に沿ってしか考えていなかったが、本来、花粉の落下数は、圃場の風下側エリア内の面的分布として評価する必要がある。この問題は、今後さらに野外実験を積み重ねたり、シミュレーション手法などによって検討しなければならない。また、より正確なモデルを構築するには、多くの花粉飛散数データを必要とするが、その測定には多大な労力を要する。そこで、簡易かつ迅速に空中花粉数を計測できる手法の開発も今後の重要な課題である。

要 約

とうもろこし畑の内外において、花粉飛散数と落下数の計測を全開花期間にわたって行った。同時に、風速・風向など気象条件の計測も行った。花粉飛散は、開花開始から1週間でピークとなり、19日間続いた。飛散数の経日変化パターンは、地点によって大きく変わらなかった。圃場からの距離にともなう花粉飛散数や花粉落下数の変化は、どの日も指数関数的に減少した。日別総落下数を、風向と風速の影響を考慮した統計的モデルを用いて、評価することができた。このモデルを用いて、風向と風速が花粉の飛散に好適な条件が開花期間全体を通じて持続した時に生じるポテンシャル落下数を推定した。さらに、日々のポテンシャル落下数が全開花期間について堆積した場合の落下数積算値を求め、圃場の風下端からの距離と落下数積算値（最大堆積花粉数）との関係の評価した。この関係と、昆虫飼育実験によって得られる花粉落下数の危険密度値を組み合わせることによって、圃場の近くの危険ゾーンを合理的に示すことが可能となる。ここで述べた方法は、トウモロコシだけでなく、様々な花粉のポテンシャル落下数や最大堆積花粉数を推定するために用いることができる。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、農業環境技術研究所植生管理科の三田村強博士には異なった研究部門間のとりまとめ等において大変にお世話になった。また、同研究所昆虫管理科の松井正春博士には、研究に関する討議を通じて多くのインスピレーションをいただいた。さらに、同研究所大気生態研究室の歌川育子女史には、研究の支えとなる多くの仕事でお世話になった。この場をかりて、各位に対し、厚くお礼を申し上げたい。

引 用 文 献

- (1) Losey, J. E., L. S. Rayor and M. E. Carter : Transgenic pollen harms monarch larvae. *Nature* **399**, 214 (1999).
- (2) Raynor, G. S., E. C. Ogden and J. V. Hayes : Dispersion and deposition of corn pollen from experimental sources. *Agronomy Journal* **64**, 420-427 (1972).
- (3) Paterniani, E. and A. C. Stort : Effective

- maize pollen dispersal in the field. *Euphytica* **23**, 129-134 (1974).
- (4) Raynor, G. S., E. C. Ogden and J. V. Hayes : Dispersion and deposition of timothy pollen from experimental sources. *Agricultural Meteorology* **9**, 347-366 (1972).
- (5) Raynor, G. S., E. C. Ogden and J. V. Hayes : Dispersion of pollens from low-level, crosswind line sources. *Agricultural Meteorology* **11**, 177-195 (1973).
- (6) Price, M. D. R. and P. D. Moore : Pollen dispersion in the hills of Wales : A pollen shed hypothesis. *Pollen et Spores* **26**, 127-136 (1984).
- (7) Giddings, G. D., N. R. Sackville Hamilton and M. D. Hayward : The release of genetically modified grasses. Part 1 : pollen dispersal to traps in *Lolium perenne*. *Theor. Appl. Genet.* **94**, 1000-1006 (1997).
- (8) 星川清親 : トウモロコシ属 (堀田他編) 世界有用植物事典. 平凡社 pp.1116-1119 (1989).
-