

フェロモンの拡散

お茶の水女子大学理学部環境科学研究室 内嶋 善兵衛

はじめに

DDT や BHC などの合成有機塩素化合物系の農薬による食品・環境汚染が問題になってから、農林業の分野では総合防除の考えが広まってきた。その一環として、ごく微量で昆虫の性行動をかく乱して害虫の個体群密度をコントロールするフェロモンの応用に多くの関心が集まり、活発に研究がなされ、実用技術として普及しつつある。

よく知られているように、実用技術では耕地や果樹園の上の空気層内のフェロモン濃度がある臨界レベル (Threshold) 以上に維持することが大切である。フェロモン源は地表近くに設置し、揮発したフェロモンは空気流に乗りながら拡散される。それゆえ、接地気層内でのフェロモンの乱流拡散は、フェロモンによる害虫個体群の制御の実施において鍵的な役割を果たす。そこで、本文では接地気層内の物質の乱流拡散について簡単にふれ、実用技術の確立のための若干の問題点を説明したいと思う。

I 拡散の主なパターンと主な関係要因

大気中への物質放出のパターンによって、大気中の拡散は図-1 のように分ける。広い畑に一つの大きなディスペンサーを設けた場合は点源拡散と呼ばれ、点源から物質が常に連続して放出されるものを連続点源、そうでなく短い期間だけ瞬間的に出されるものは瞬間点源という。長いディスペンサーを一本畑地に設けた場合には線源拡散と呼ばれる。自動車が連続して通過している高速道路は一本の線源として取り扱うことができる。実際の害虫個体群のコントロールでは数多くのディスペンサーを広い畑上に配置する方法がとられる。これは物質の放出源がある広さの面上に分布していると考えられるので、面源拡散として取り扱うことができる。線源・面源についても、それぞれ連続と瞬間の二つを考慮することができる。

図-1 に示したような放出源から出る物質煙の広がり、公害物質や放射能汚染物質の大気中での拡散との関係で非常によく研究されている。そして、多くの実用的

な濃度予測法が示されている。大気中での拡散には現象のスケールが微妙に反映するので、煙突からの煙の拡散と作物・果樹園のディスペンサーからのフェロモン拡散には差が予想される。しかし、現時点では両者での拡散の違いに関する定量的な情報がないので、近似法として煙突からの煙拡散に関する知識を援用して説明する。

1 点源からの拡散

広い平面上のある高さ H m にフェロモンの点源があり、その上を U (m/s) なる一定風が吹き、また地面でフェロモンは吸収されないという条件では、瞬間源と連続源の場合の平均的なフェロモン分布 $\langle c(x, z, t) \rangle$, g/m³ は次式で表される。

瞬間点源：

$$\begin{aligned} \langle c(\mathbf{X}, t) \rangle = & \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x(t) \sigma_y(t) \sigma_z(t)} \\ & \exp \left[-\frac{(x - Ut)^2}{2\sigma_x^2(t)} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2(t)} \right] \\ & \times \left\{ \exp \left[-\frac{(z - H)^2}{2\sigma_z^2(t)} \right] \right. \\ & \left. + \exp \left[-\frac{(z + H)^2}{2\sigma_z^2(t)} \right] \right\} \quad (1) \end{aligned}$$

連続点源：

$$\begin{aligned} \langle c(\mathbf{X}) \rangle = & \frac{Q}{2\pi \sigma_y(x) \sigma_z(x) U} \\ & \exp \left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)} \right] \\ & \times \left\{ \exp \left[-\frac{(z - H)^2}{2\sigma_z^2(x)} \right] \right. \\ & \left. + \exp \left[-\frac{(z + H)^2}{2\sigma_z^2(x)} \right] \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

ここで Q は点源の放出強度 (g/s), x は点源から平均風向に沿って距離 (m), y は点源を通る X 軸からの Y 方向への距離 (m), z は地表面からの高さ (m), t は煙突出からの経過時間 (s), σ_x , σ_y , σ_z は煙の広がりの標準偏差 (m), (2) 式において, $z=0$ とおくと, 点源を通る $x-y$ 平面上での濃度は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \langle c(x, y) \rangle = & \frac{Q}{\pi U \sigma_y(x) \sigma_z(x)} \\ & \exp \left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)} \right) \exp \left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2(x)} \right) \quad (3) \end{aligned}$$

(3) 式を用いると、連続点源から放出される物質の地表

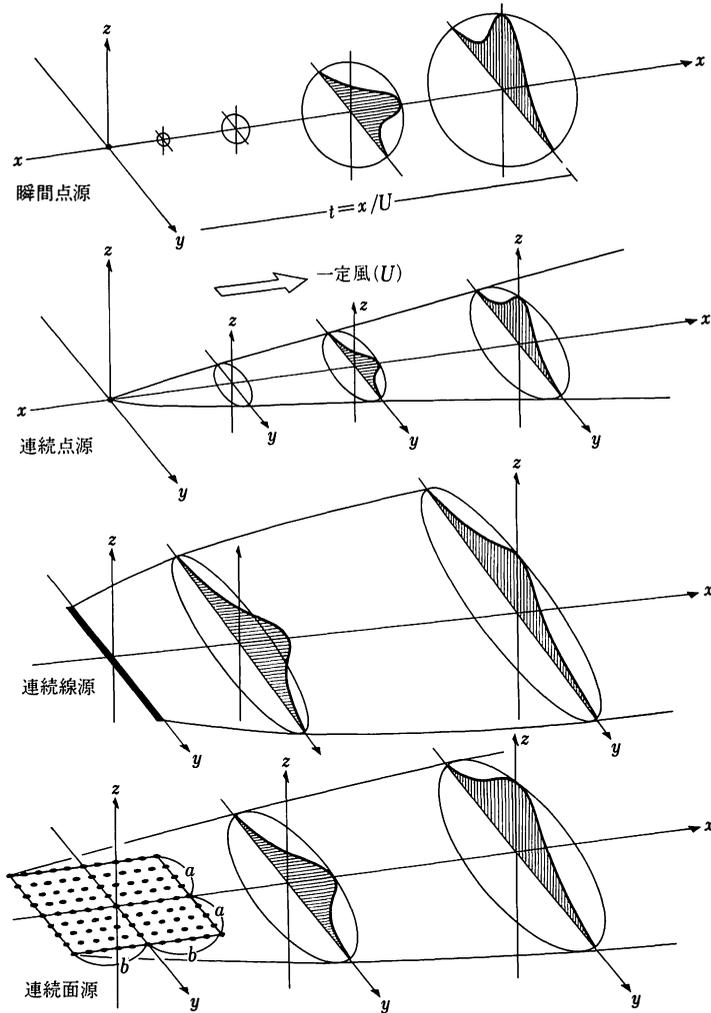


図-1 放出源からの煙雲の乱流拡散モデル

濃度が近似的に予想できる。また $y = 0$ とおくと、点源を通る X 軸上の地表濃度を示す次式が得られる。

$$\langle c(x) \rangle = \frac{Q}{\pi U \sigma_y(x) \sigma_z(x)} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) \quad (4)$$

これから、連続点源を通る X 軸上の濃度は指数関数的に減少することがわかる。

2 面源からの拡散

図-1のように、1辺が $2a$ 、他辺が $2b$ なる長方形内に放出源強度 Q なる点源が均一に分布していると、面源からの拡散現象と考えることができる。広い畑に多くのディスペンサーを配置した場合は、これに相当する。このような面源から風下の x - y なる平面上での平均濃度

分布 $\langle c(x, y) \rangle$ は、各点源の影響を加え合わせればよい。すなわち、(3)式を x 方向と y 方向について積分すればよい。

$$\langle c(x, y) \rangle = \frac{Q}{\pi U \sigma_y(x) \sigma_z(x)} \int_{x-a}^{x+a} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) \int_{y-a}^{y+b} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_x^2(x)}\right) dx dy \quad (5)$$

ある一定の広さの耕地上の平均濃度 $\langle\langle c \rangle\rangle$ は、上式から第一近似として次のようにおくことができる。

$$\langle\langle c \rangle\rangle \approx A \cdot Q / U \quad (6)$$

フェロモン拡散実験から、 $A=0.183$ が得られている(信越化学, 未発表)。この場合、 Q は $\text{mg}/(10a \cdot \text{day})$,

U は m/s, c は ng/m^3 がとられている。この係数値が広い耕地上で使用できると仮定すると、上式はある濃度 c を維持するための源強度 (Q) を求めるのに使用できるだろう。

3 濃度分布に関係する気象要素

接地気層内のフェロモンや汚染物質の濃度分布に関係する要素は、放出源から x なる距離での煙雲の広がりを示す $\sigma_y(x)$, $\sigma_z(x)$ である。いわゆる Fick の拡散方程式との対応から、煙雲の広がり、 z 方向及び y 方向の拡散係数 (K_z , K_y , m^2/s) と次式によって結び付いている。

$$\sigma_z(x) = \sqrt{\frac{2xK_z}{U}}, \quad \sigma_y(x) = \sqrt{\frac{2xK_y}{U}} \quad (7)$$

すなわち、それぞれの方向の乱流拡散係数の 1/2 乗に比例して大きくなる。

$\sigma_z(x)$ と $\sigma_y(x)$ については、Pasquill-Gifford によって $x \geq 100 \text{ m}$ 以上について計算図が示されている。この関係が $x \leq 10 \text{ m}$ 以下の範囲についても適用できると仮定して外挿すると図-2 のようになる。図-2 において A, B, C, D, E, F は気層内の気流の乱れを示す量で、A で乱れは最も強く、F では乱れが非常に弱い。A, ... F に対応する気象状態が表-1 に要約されている。表-1 と図-2 とから A と F とでは、 $x=100 \text{ m}$ での煙雲

の広がりには次のようになる：

	$\sigma_z(100)$	$\sigma_y(100)$
A	14.0	28.0 m
F	2.3	4.0 m

このように、日中の乱れの強い条件下と夜中の乱れの弱い条件下では、点源から放出拡散される煙雲 (プルーム) の広がりに約 6 倍の差が生じる。一般に昆虫の配偶行動は夜になされるものが多いので、この煙雲幅を考えてディスペンサーの配置間隔をきめることが重要である。

表-1 大気安定度の日本式分類

地上 10 m 風速 (m/s)	日 中			本ぐもりの日中 (8~18h)	夜 間	
	日射量 cal/(cm ² ·h)				上層雲 5~10	雲量
	50 以上	49~25	24 以下	本ぐもりの夜	中・下層雲 5~7	4~0
2 以下	A	A~B	B	D	—	—
2~3	A~B	B	C	D	E	F
3~4	B	B~C	C	D	D	E
4~6	C	C~D	D	D	D	D
6 以上	C	D	D	D	D	D

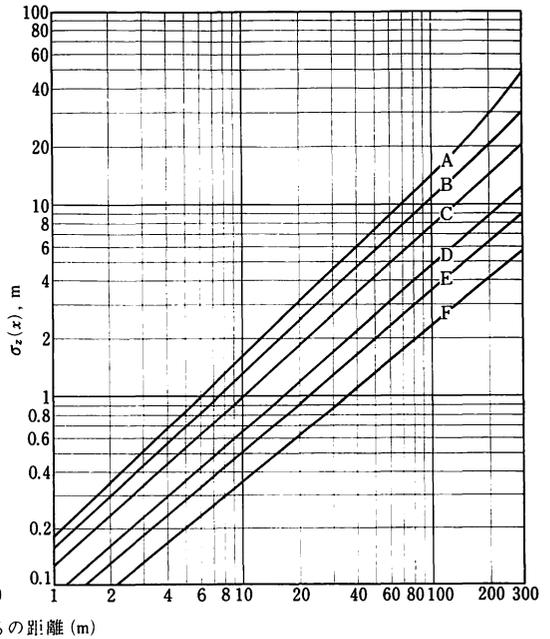
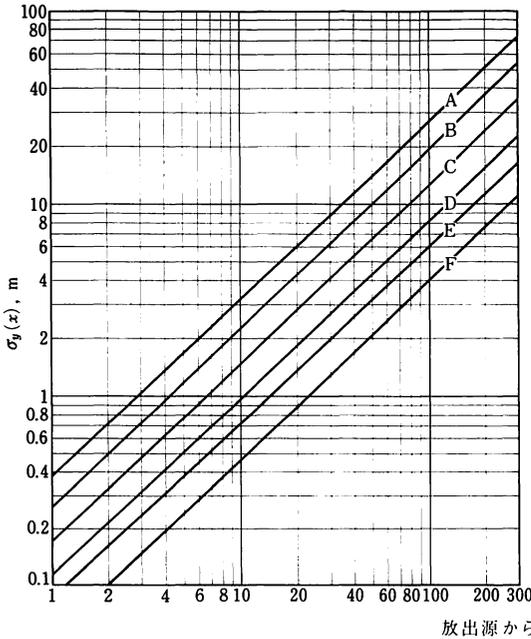


図-2 源からの距離による煙雲の拡散幅の変化 (Pasquill-Gifford 図) (例えば PASQUILL, 1974)

II 接地気層内の乱流拡散係数

上の説明からわかるように、煙雲の広がり (σ_z, σ_y) を決定しているのは、接地気層内の空気の乱れ、すなわち乱流拡散係数 (K_z, K_y) である。地表から数十 m までの接地気層内での鉛直方向の乱流拡散係数 (K_z) は、次のように表される。

$$K_z = x(z-d)u_* f(R_i) \quad (8)$$

ここで x ($=0.4$) はカルマン定数、 z は地面からの高さ (m)、 d は作物・果樹などの影響を表す高さ (m)、 u_* は摩擦速度 (m/s)、 $f(R_i)$ は気層の温度分布 (安定度) の影響を示す経験関数で、図-3 で与えられる。この図から気層が不安定 (地面近くの温度が上より高い) な場合には、 $f(R_i) > 1.0$ となり K_z は大きくなる。逆に、安定 (夜中のように地面近くの温度が上より低い) な条件では、空気の塊の鉛直混合が抑制され、 $f(R_i) < 1.0$ となり、 K_z は $x(z-d)u_*$ で与えられる値より小さくなる。

多くの観測データの解析及び理論的な分析から、次の関係が知られている。

$$\left. \begin{aligned} u_* &= \frac{x u_{*z}}{\ln((z-d)/z_0)} \\ \log z_0 &= -1.24 + 1.19 \log h \\ \log d &= 0.98 \log h - 0.15 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここで、 u_* は気温分布の発達しない (中立) 条件での高さ z での風速 (m/s)、 z_0 は下の面の空気力学的な粗さを示す粗度 (cm) で、植生の高さ h (cm) に関係してい

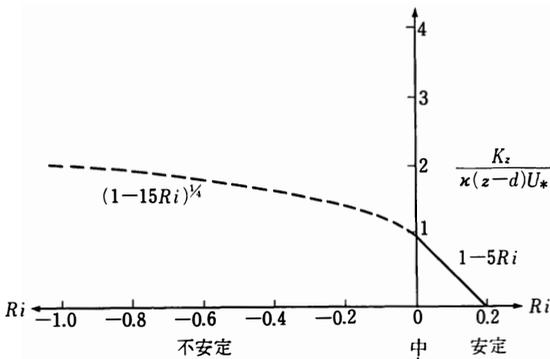


図-3 気層安定度 (R_i) の拡散係数 (K_z) への影響 (ARVA, 1988)

$$R_i = \frac{g}{T} \frac{d\theta}{dz} \left| \frac{du}{dz} \right|^{-2} : \text{リチャードソン数,}$$

g : 重力の加速度, T : 気温の絶対値, $\frac{d\theta}{dz}$: 気温の

鉛直勾配, $\frac{du}{dz}$: 風速の鉛直勾配

る。植生の高さを 100, 200 cm とすると、 z_0 と d とはそれぞれ 13, 41 cm と 64, 127 cm になる。イネやトウモロコシのように風によってなびくような植生では、 z_0 と d とは h だけではなく風速によっても変化する。一般に、風速の増大につれて z_0 はゆるやかに増大し、 d は減少する。

(8), (9) 式及び風速観測データから K_z の値が求まると、次の関係から K_y の値を推定できる。

$$K_y = aK_z \quad (10)$$

ここで、 a は比例係数で、放出源からの距離と気層の安定度で変化する。日中の空気混合の激しい時間には、10 ~ 100 m の間での \bar{a} の平均値は 3.8、空気混合の弱い夜間には $\bar{a} \approx 2.5$ になる。上にあげたような気象因子と前章で説明した関係式を用いると、ある源強度 (Q) の下での植被面近くのフェロモン濃度の分布を推定できる。

III 植被層内の微気候

多くの昆虫は葉の茂る植被層内に生息している。植被層内には空気の流れを弱め (風の運動量を吸収するため)、また日射の透入を強く妨げる葉群が密に茂っている。それゆえ、昆虫の生息する植被層内の微気候は、裸地上の接地気層のそれとかなり違っている。その様子をモデル的に示すと、図-4 のようになる。特徴的なことは、風速 (U) と拡散係数 (K) 及び純放射 (Rn) が植被内で指数的に減少することである。このため、植被内での空気の鉛直混合は、開けた場所に比べて著しく弱いのが普通である。

夜間には、植被上の風も弱く、それに応じて内部の風、そして空気の混合も相当に弱くなる。それゆえ、

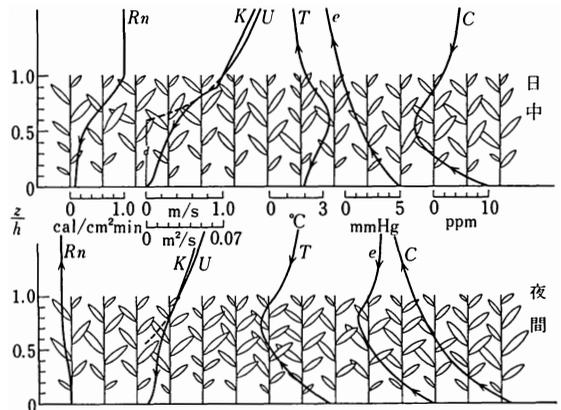


図-4 植被内の微気候の特徴 (内嶋, 1982)

Rn : 純放射, U : 風速, K : 拡散係数, T : 気温, e : 水蒸気密度, c : CO_2 濃度, d : 0-面補正

フェロモンなどの拡散による広がりはずかすか、フェロモン煙はディスペンサーから細いブルームの形で、蛇行しながら流れているものと思われる。このような条件では、さきに説明した連続点源をかなり密に配置しても、フェロモンのブルームの重なりは少なく、面源的な取り扱いは難しくなるだろう。

おわりに

上の説明からわかるように、煙雲の乱流拡散に関する物理的な関係は、フェロモンの拡散及び地表近くでのその濃度分布の予想に有効な方法である。しかし、広い平面や地表での非吸収などを仮定している。一方、実際の作物群落内では、フェロモン分子の吸着が葉面と土壌面で活発に生じているものと思われる。それらの吸着作用によってフェロモン濃度は上の物理的関係式からの予想よりは急激に低下するものと考えられる。耕地上でのフェロモン濃度の分布及び必要濃度の維持に必要な放出

源強度の決定を正確にするには、葉面と土壌面での吸着を考へて拡散方程式を解くことが必要である。また、フェロモンの多くは炭素、酸素、水素を主体とするかなり重い分子で、その拡散係数は水蒸気などより若干小さいことが予想される。それゆえ、空気混合の弱い植被内や夜間には、分布パターンや濃度の予測に無視できない影響を与えるだろう。

参考文献

- 1) ARYA, S. Pal (1988): Introduction to Micrometeorology. Academic Press., 370pp.
- 2) 早川一也・菱田一雄 (1974): 大気汚染, 昭晃堂, 412pp.
- 3) PLATE, E. J. (1971): Aerodynamic Characteristics of Atmospheric Boundary Layers. AEC Critical Review Series. 190pp.
- 4) 竹内清秀 監訳 (1968): 煙の拡散. 産業公害防止研究会, 250pp.
- 5) 内嶋善兵衛 訳 (1978): 大気汚染とその防止法. 農林水産技術会議, 調査資料 (海外), No. 73., 323pp.
- 6) 矢野雄幸・佐藤弘三 (1978): 拡散方程式入門. 公害研究対策センター, 166pp.

新刊!

本会発行図書 農薬適用一覧表 (平成5農薬年度)

農林水産省農薬検査所 監修

定価 3,000円 (本体 2,913円) 送料 380円

A5判 394ページ

平成5年9月30日現在、当該病害虫(除草剤は主要作物)に適用のある登録農薬をすべて網羅した一覧表で、殺菌剤、殺虫剤、除草剤、植物成長調整剤に分け、各作物ごとに適用のある農薬名とその使用時期、使用回数を分かりやすく一覧表としてまとめ、付録として、毒性及び魚毒性一覧表及び農薬商品名・一般名対比表を付した。農薬取扱業者の方はもちろんのこと病害虫防除に関係する方の必携書として好評です。

新しい「植物防疫」専用合本ファイル

本誌名金文字入・美麗装幀

本誌 B5判 12冊 1年分が簡単にご自分で製本できる。

- ①貴方の書棚を飾る美しい外観。 ②穴もあけず糊も使わず合本できる。
- ③冊誌を傷めず保存できる。 ④中のいづれでも取外しが簡単にできる。
- ⑤製本費がはぶける。 ⑥表紙がビニールクロスになり丈夫になった。

改訂定価 1部 720円 送料 360円

ご希望の方は現金・振替で直接本会へお申込み下さい。

