煙 の 研 究

(3) 農薬散布技術に対する拡散理論の応用*

井 上 栄 一

(農業技術研究所 気象科)

Studies of the Diffusion Phenomena in the Atmospheric Surface Layer

Part 3. The Application of Theories of Turbulent Diffusion to the
Techniques of Dusting and Spraying of Agricultural Chemicals

E. INOUE

(Division of Meteorology, National Institute of Agricultural Sciences)

1. ま え が き

著者が 1951 年に農業技術研究所に入つて最初に当面したのは農薬散布における各種の気象要素の効果についての問題であり、著者はこの問題を乱流拡散理論の応用によつて解決したいと念願した。さて、接地気層内の乱流拡散現象が重要な問題と見なされるようになったのはもともと第 1 次大戦における毒ガスの使用がきっかけとなつており、O. G. Sutton を中心とする多くの科学者によつてなされた英国における拡散ならびに接地気層の乱流構造に関する研究は第 2 次大戦を通じて活潑に続けられた (Calder 1952)。第 2 次大戦後になると原子力兵器の使用や原子力の平和利用に伴う大気汚染の問題が生じ、取扱われる現象の規模が大きくなつて来たばかりでなく、半経験的な Sutton 理論だけでは現象を合理的に説明することが出来なくなつて来ていた。丁度そうした時に著者は農薬散布の問題に直面することになつたわけである。

そういう具体的な問題にぶつかる少し前から著者は Sutton とは異つた立場から接地気層内の乱流拡散現象を理論的に取扱うことを始めており (井上 1952)、その理論的な考察を農薬散布技術に応用する機会の来たことを幸運に感じたものである。しかし拡散理論自体がまだ発展段階の途上にあつて不完全な点を沢山に含んでいるのに対し、具体的な問題には到底理論に取入れかねるような条件が沢山に含まれているということがすぐ明らかとなつて、拡散理論を農薬散布技術に応用することが決して簡単なものではないことを痛感せざるを得なかつた。

すでに試作されていた大型の動力散粉機などを使用する広い圃場への散布試験が行なわれるたびに著者らも参加して、それらの圃場における微細気象特性の測定を行なつた。これらの試験は次のような各種の圃場で行なわれた：

1951 年 7 月, 静岡県西浦, 柑橘園;

* 1959 年 6 月 26 日 関東支部例会において発表

1952 年 7 月, 長野県菅平, 馬鈴薯畑;

1952 年 9 月, 千葉県青堀, 水田;

1952 年 10 月, 静岡県金谷, 茶樹園。

この当時はまだ著者らの使用し得る測定計器も限られており、散布試験の行なわれる時刻をはさむ色々な時刻に平均風速の高度分布の測定だけが行なわれたに過ぎないが、耕地の性質によつてその上の風の特性にも色々な相違のあることがまず明らかになつて来た (井上, 谷, 今井 1953)。

1953 年に入ると航空機による農薬散布が試験的に行なわれはじめ、航空機より散布された農薬の拡散と耕地風との関係についての問題がますます複雑となつて来た。使用された航空機の機種も多数であるとともに試験の行なわれた地面の性質も多様であつたが、著者らも多くの機会にこれに参加して、拡散に関係する所の多い風の乱流構造をも各種の装置で測定し得るようになって来ていた。実施された航空散布試験は概略つぎのようである。

(詳細は日本植物防疫協会農薬散布法研究会発行の「航空機による農薬の圃場散布に関する研究」昭和 34 年 12 月を参照されたい)：

1953 年 8 月, 神奈川県藤沢飛行場, 飛行機, 散粉;

1954 年 8 月, 茨城県潮来, 水田, 飛行機およびヘリコプター, 散粉;

1954 年 8 月, 埼玉県岡部, 水田, 飛行機およびヘリコプター, 散粉;

1954 年 9 月, 埼玉県妻沼, 水田, 同上, 同上;

1955 年 9 月, 埼玉県吉川, 水田, ヘリコプター, 液剤散布;

1956 年 10 月, 東京都東雲飛行場, ヘリコプター, 散粉および液剤散布。

このような多くの機会に試験に参加して測定結果が集積されると同時に、実際に農薬の拡散される状況を眺める機会にめぐまれると、これらの現象を簡単な理論によつて説明することの困難さがますます強まつて来るのを感じ

ぜずにはいられなかった。

さらに 1956 年より凍霜害防止の手段として煙霧剤の展開試験が行なわれるようになり、その展開拡散に関する研究に参加してみると、拡散現象に対する接地気層の安定度の影響の大きいことにあらためて感心させられるような始末で、各種の安定度条件のもとで使い得るような拡散理論をつくり出す必要にせまられた。

また 1958 年より著者は原子力気象調査会に参加して放射性廃気ガスの拡散に関する研究をも行なうこととなり、各種の実験に参加して測定を行なうとともに多くの研究資料を入手する機会にめぐまれた。

このようないろいろな経験をつみ、またそれらの経験から要求されて拡散理論の改良に努力しているのが著者の現在の立場であるが、いままでの所で修正された拡散理論が各種の農業散布技術にどの程度まで応用できるかを考察するのがこの報告の目的である。なお農業という特殊な物質を離れて一般的大気汚染の問題についても述べられるが、農業の散布された空気につつまれる害虫などにとってはこれは大気汚染の問題にはかならないであろう。

2. 農業散布にみられる拡散現象の特殊性

これまで普通に考えられてきた拡散現象は拡散物質としては大気と同じような性質をもつ気体を取りあつかいまた拡散気体が地面に吸収されないものと考えられていた。ところが農業散布では薬剤が地面あるいは作物に附着することが必要とされ、それを増進させるため薬剤に適当な比重と大きさなどを与えて地面に落下し易くまた附着し易いように考慮されている。

またこの場合の拡散は作物の栽培されている圃場の上で行なわれるから、作物の存在が拡散現象に影響を与えがちである。まず地面に相当するのは作物の存在によって生ずる地表面修正量 d の高さにある表面であり、その面で農業の吸収がないと考えることはもはや許されず、むしろ d の高さの面を通して農業が畦間に侵入することが考慮に入れられなければならない。

これらを考慮に入れた乱流拡散理論は最近例えば Monin (1956) などによつて発展させられつつあるが、著者はここでは簡単のためにまず d なる高さの面を見かけ上の地表面と考え、そこを通過したりあるいは作物に附着したりする農業量がその場所の農業濃度を吸収の無いという条件のもとに計算したものに比例すると考えることにする。

また散粉機などでは農業は可成り大きな風速で噴出され、噴出口附近の農業の濃度分布は散粉機自身の特性に

よつて決定される。すなわち噴出口附近では農業は大気によつて拡散されるよりはむしろ噴流内の乱れによつて拡散される。このような現象は煙の噴出速度の大きな煙突の出口附近における煙の拡散にもしばしば見られ、噴流による拡散の卓越する領域を“aerodynamical phase”, 出口から十分離れて大気乱流による拡散の卓越する領域を“meteorological phase”と呼んで区別することがある (Fig. 1, Barad 1951)。ここでは簡単のために“aerodynamical phase”の存在が無視できる場合だけを考えることにする。

Fig. 1. Two phases of the atmospheric diffusion of stack smoke.

3. 固定湧源型の農業散布

著者らが 1952 年頃に試験した大型の動力散粉機は、一箇所に固定されたまま連続的に農業を風の中に拡散させて風下の広い面積を農業でおおうことを狙ったものであった。

地表面修正量 d から高さ z をはかり、風下に x 軸を、横方向に y 軸をとつて空間的な農業の濃度分布 χ をあらわせば (第 1 報参照)

$$\chi = \frac{Q \exp\left(-\frac{y^2}{2\langle Y^2 \rangle}\right)}{2\pi U \langle Y^2 \rangle^{1/2} \langle Z^2 \rangle^{1/2}} \left[\exp\left\{-\frac{(z-h)^2}{2\langle Z^2 \rangle}\right\} + \exp\left\{-\frac{(z+h)^2}{2\langle Z^2 \rangle}\right\} \right] \quad (1)$$

となる。ここに h は修正された地面から測られた噴口の高さを、 Q は噴出農業の強度をあらわすものとする。修正された地表面 $z=0$ では濃度は

$$\chi_0 = \frac{Q}{\pi U \langle Y^2 \rangle^{1/2} \langle Z^2 \rangle^{1/2}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\langle Y^2 \rangle}\right) \exp\left(-\frac{h^2}{2\langle Z^2 \rangle}\right) \quad (2)$$

で与えられる。特に噴口が低くて $h \approx 0$ ならば

$$\chi_0 = \frac{Q}{\pi U \langle Y^2 \rangle^{1/2} \langle Z^2 \rangle^{1/2}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\langle Y^2 \rangle}\right) \quad (3)$$

となる。中心濃度 χ_0 が湧源からの風下距離 x とともに低下する仕方は第 1 報でくわしくのべられているので、ここではふれないで置く。

農薬濃度がある定まつた限界濃度 χ_{0*} より薄くなると農薬があつても病害虫に対して有効ではなくなると考えることは自然であろう。そこで (3) 式の χ_0 の代りに χ_{0*} を入れて求めた

$$y = \sqrt{2} \langle Y^2 \rangle^{1/2} \left(\ln \frac{Q}{\pi U \langle Y^2 \rangle^{1/2} \langle Z^2 \rangle^{1/2} \chi_{0*}} \right)^{1/2} \quad (4)$$

が農薬有効領域の輪郭を表わすことになる。ただしこの形を具体的に求めるためには $\langle Y^2 \rangle^{1/2}$ および $\langle Z^2 \rangle^{1/2}$ と噴口からの風下距離 x との関係が明らかにされていなければならない。これらの関係は第 1 報にのべられている通り、気層安定度によつて複雑に変化する。簡単のためここでは

$$\left. \begin{aligned} \langle Y^2 \rangle^{1/2} &\propto x, \\ \langle Z^2 \rangle^{1/2} &\propto x^m \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

という関係を一時的に採用して有効領域の特性をしらべてみよう。ただし指数 m は安定度によつて変化し、気層安定度が極不安定から中立状態を経て極安定にうつるにつれて 1.5 から 0.8 を経て 0.5 に減少することが第 1 報に述べられた。

さて (5) の関係を (4) に代入すれば

$$y = \text{const.} \cdot x \left(\ln \frac{\text{const.} \cdot Q}{U \chi_{0*} x^{1+m}} \right)^{1/2} \quad (6)$$

となり、有効領域の長さ $y=0$ とおくことによつて

$$x_* = \text{const.} \cdot \left(\frac{Q}{U \chi_{0*}} \right)^{1/(1+m)} \quad (7)$$

で与えられる。この関係は $m > 0$ である限り、農薬強度を 2 倍にしても x_* を 2 倍にまで伸ばし得ないことや、気層が不安定になるほど x_* が短くなることを示している。また y の最大値を与える x の位置は $(dy/dx)=0$ より計算されて

$$x_0 = \text{const.} \cdot \left(\frac{Q}{U \chi_{0*}} \right)^{1/(1+m)} \quad (8)$$

となり、その時の y の値は

$$y_* = \text{const.} \cdot \left(\frac{Q}{U \chi_{0*}} \right)^{1/(1+m)} \quad (9)$$

で与えられる。結局有効領域の最大幅についても x_* とまったく同様なことが云える。有効領域の面積 A は

$$A \propto x_* y_* \propto \left(\frac{Q}{U \chi_{0*}} \right)^{2/(1+m)} \quad (10)$$

と表現することができて、 A と Q との関係が気層安定度によつて変ることが示された。不安定になるほど m は大きな値になるから面積 A は小さくなることがわかる。

水田地帯では風が強くなると安定度はほぼ中立状態となるが稲の穂波が生じ $\langle Y^2 \rangle$ や $\langle Z^2 \rangle$ を決定する乱れの強さや乱子の寿命時間などが d と共に変化する。この変

化については先に「穂波の研究(3)」(井上 1956) に述べられたが、風が強くなれば穂波の様子によつて拡散された農薬の濃度分布が左右されることとなる。しかし拡散を特徴づける拡散係数(第 II 種)が穂波の卓越する風速(草高位置で約 3 m/sec) 以下ではほぼ一定に保たれる反面において、 d が風速と共に小さくなるという特性をもっているから、農薬が畦間にまで入りこむことをたすけるためには、無風状態で d が草高とほぼ一致する位置にまで高められている場合よりも適当な強さの風が吹いて d が草高の数分の 1 に低下している状態の方がのぞましいことになる。一方風速が低下すると僅かの輸送熱量の存在によつても気層の不安定性が著しくなる。すなわち、農薬濃度 χ の地表面における 2 次元的な分布は穂波状態と陽炎状態の如何によつて決定されることとなるから、農薬の有効最低濃度と散布される農薬量とを考慮に入れて各種の気象条件のもとに有効面積をそれぞれ計算できることになる。ただし前記の関係式によつて計算された結果には農薬の作物に対する附着や吸収が考えられていないことに注意されなければならない。

作物の凍霜害防止のために使用される煙霧剤の展開に当つても上と全く同様な考察を行なうことができる。この場合には地面における煙霧剤の 2 次元的な濃度分布よりも、空間に展開された煙を光が通過する時の減衰が問題となるためその方向について積分された濃度の分布が問題となるであろう。簡単のため一例として z 方向に通過する光の場合を計算すれば、

$$\chi_z = \int_0^\infty \chi dz = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} U \langle Y^2 \rangle^{1/2}} \exp \left(-\frac{y^2}{2 \langle Y^2 \rangle} \right) \quad (11)$$

となる。この結果には $\langle Z^2 \rangle^{1/2}$ が含まれてなく、展開された煙霧剤による垂直方向の光線の遮蔽効果はもつぱら $\langle Y^2 \rangle^{1/2}$ と x との関係で支配されることとなる。(4) 式は地上における遮蔽濃度の分布を示しているが、ある程度以下に濃度が低下してしまえば煙霧剤が展開されていても遮蔽効果はなくなるものと考えられる。積分濃度が χ_{z*} よりも大きい範囲を有効遮蔽領域と考えて、つぎにその領域の幾何学的特性を考えよう。

χ_z の代りに臨界濃度 χ_{z*} を (11) 式に入れて有効領域の幅 y を求めれば

$$y = \sqrt{2} \langle Y^2 \rangle^{1/2} \left(\ln \frac{Q}{\sqrt{2\pi} U \langle Y^2 \rangle^{1/2} \chi_{z*}} \right)^{1/2} \quad (12)$$

となり、その形は $\langle Y^2 \rangle^{1/2}$ と x との関係が与えられれば図示できる。第 1 報で示されたように一般には $\langle Y^2 \rangle^{1/2}$ は x にほぼ比例する第 I 種領域と $x^{1/2}$ に比例する第 II 種領域との組合わせによつて表わされる。従つてくわしくは第 1 報で求めた

$$\langle Y^2 \rangle^{1/2} = \sqrt{2} \langle v^2 \rangle^{1/2} \tau_v \left[\frac{x}{U \tau_v} - 1 + \exp\left(-\frac{x}{U \tau_v}\right) \right]^{1/2} \quad (13)$$

という関係を (12) 式に代入しなければならない。ここでは簡単のために有効領域の長さがあまり長くなって、 $\langle Y^2 \rangle^{1/2}$ として第 I 種領域のものだけを考えればよいとすれば、

$$\langle Y^2 \rangle^{1/2} = \frac{\langle v^2 \rangle^{1/2}}{U} x \quad (14)$$

となる。(12) および (14) 式より有効領域の幅は

$$y = \sqrt{2} \frac{\langle v^2 \rangle^{1/2}}{U} x \left(\ln \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \langle v^2 \rangle^{1/2} \chi_{*} x} \right)^{1/2} \quad (15)$$

で与えられ、その形は模式的に Fig. 2 で示されるよう

Fig. 2. Schematic representation of the effective region of dusting.

な葉巻型となる。その長さ x_* は上式より容易に

$$x_* = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \langle v^2 \rangle^{1/2} \chi_{*}} \quad (16)$$

となることがわかる。 Q は単位時間に放出される煙霧剤の量であるから、放出量に比例して有効領域の長さが伸びることになる。臨界濃度 χ_{*} は煙霧剤の性質 (物質や粒径など) に左右され、放出量 Q が同一であつても適当な粒径をえらぶことによつて χ_{*} を小さくして x_* を増すことが出来る。 y が最大になる位置 $x = x_m$ とそこでの y の値 y_* とは $dy/dx = 0$ とおくことによつて得られ計算の結果は

$$x_m = 0.606 \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \langle v^2 \rangle^{1/2} \chi_{*}} = 0.606 x_*, \quad (17)$$

$$y_* = \frac{0.606 Q}{\sqrt{2\pi} U \chi_{*}} = 0.242 \frac{Q}{U \chi_{*}} \quad (18)$$

となる。この結果は有効領域の幅もまた放出量に比例して大きくなることを示している。従つて遮蔽効果のある面積は Q^2 に比例することとなり、大型の煙霧機を使つて放出量 Q を増大することが遮蔽面積の増大に極めて効果のあることがわかる。

同じような問題は軍事的な煙幕展開技術に関係してすでに Sherwood (1949) によつて研究されている。ただし彼の取扱いは Sutton の拡散理論にもとづいているか

ら、本報における著者の結果とやや相違している。なお数台の煙霧機を風向に直角な線上に並べた場合の問題の取扱いかい法も Sherwood によつてのべられていて、 Q という放出能力をもつ 1 台の大型煙霧機の代りに (Q/n) の放出能力をもつ小型煙霧機を y_a という間隔で n 台ならべた場合の有効遮蔽領域の幾何学的特性を評価する方法も示されている。このように風向に直角に小型煙霧機を分散することは、当然のことながら有効領域の長さを減少させても有効幅を増大させる効果を持つている。遮蔽を必要とする圃場の形と気象状況とに応じて煙霧機の配列や各煙霧機の放出量が適当にえらばなければならない。風向に直角な y 軸上に $y_1, y_2, \dots, y_n$ という位置に n 台の煙霧機が並べられ、それぞれ $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ という放出量をもつとするならば、それらの合成による遮蔽濃度は

$$\chi_s = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \langle Y^2 \rangle^{1/2} U} \sum_{i=1}^n Q_i \left[\exp\left\{-\frac{(y-y_i)^2}{2\langle Y^2 \rangle}\right\} + \exp\left\{-\frac{(y+y_i)^2}{2\langle Y^2 \rangle}\right\} \right] \quad (19)$$

で与えられる。一例として 3 台の煙霧機を並べた場合に生ずると考えられる遮蔽有効領域を Sherwood になつて模式的に図示したものが Fig. 3 である。

Fig. 3. Screened area by a battery of smoke generators.

なおこれまでに述べられた遮蔽領域の形は十分に長い時間についての統計的なものであつて、瞬間的に見れば展開された煙霧剤は一般にはメアンダーしながら煙の筋となつて流れて行くものと思われる。期待されるメアンダーの特性については第 2 報にくわしく述べたからここでは触れないですませることとする。

多数の煙霧機を間隔をちぢめて並べた場合には線源からの拡散現象となり、濃度分布を表わす式には $\langle Y^2 \rangle$ が含まれなくなる。その形は (1) を y 方向に積分した結果に一致し、

$$\chi = \int_{-\infty}^{\infty} \chi dy = \frac{Q}{\sqrt{\pi} U \langle Z^2 \rangle^{1/2}} \left[\exp \left\{ -\frac{(z-h)^2}{2 \langle Z^2 \rangle} \right\} + \exp \left\{ -\frac{(z+h)^2}{2 \langle Z^2 \rangle} \right\} \right] \quad (20)$$

となる。ただしこの場合の Q は線源の単位長さについての湧源の強さを表わすことになる。

線源と同様な効果をあらわすために1台の煙霧機を風向に直角の方向に反覆して移動させる方法が考えられる。移動速度 V が風速 U にくらべて無視できない大きさをもつ場合には拡散は合成速度 $(U^2 + V^2)^{1/2}$ をもつ風の中で起る形となり、拡散の軸は風向に対し $\theta = \tan^{-1}(V/U)$ だけ傾むく(Fig. 4)。この拡散軸の周りに図のような拡散の起ることが期待されるが、拡散幅の決定には $\langle v^2 \rangle$ と $\langle u^2 \rangle$ とが同時に寄与することとなる。これらの変化はいずれも定まった風下距離における拡散濃度を低下させるようにはたらく。

Fig. 4. Screened area by a laterally moving smoke generator.

4. 浮游湧源型の農薬散布

高度 H を飛行する航空機から散布された農薬が空中を浮游しつつ落下して拡散する現象は、その浮游の経過だけに着目すれば浮游源型の拡散とみなし得るであろう。特に高度 H が大きい、農薬の落下速度が小さく浮游している時間が長いほどその拡散には浮游源型の特性が著しく表われることとなる。

1回の飛行によつて生じた農薬のまき幅(Swath)は煙突の煙の水平的なうねりと同様なうねりを生ずることとなるであろうが、平均的なまき幅はそういう個々のまき幅を10本位重ね合わせるによつて得られるものと期待される。平均的なまき幅は農薬が航空機から散布されてから地面に落下するまでに要する時間 $t(=H/w, w$ は農薬の落下速度)と地面から H までの高度についての平均的なエネルギー逸散率 ε とをつかつて

$$\langle L^2 \rangle^{1/2} = \frac{1}{3} \varepsilon^{1/2} t^{3/2} \quad (21)$$

で表わされるものと考えられる(第2報参照)。農薬が全

部地上に落下するものとし、まき幅の中心線に直角な方向についての農薬の濃度分布を中心線からの距離 l について

$$\chi = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \langle L^2 \rangle^{1/2}} \exp \left(-\frac{l^2}{2 \langle L^2 \rangle} \right) \quad (22)$$

という形で表わされると考えることは自然である。ただし Q は航空機が単位距離を飛行する間に放出する農薬量である。上の二式を組合せて中心の濃度を求めれば

$$\chi_0 = \frac{3Q}{\sqrt{2\pi} \varepsilon^{1/2} t^{3/2}} \quad (23)$$

となるから、中心濃度と散布条件との関係などについてつぎのことがわかる。

(1) 有効まき幅の広さ 農薬の有効限界濃度を χ_* とすれば有効まき幅の広さを特徴づける量は

$$l_* = \sqrt{\frac{2}{3}} \varepsilon^{1/4} t^{3/4} \left(\ln \frac{3Q}{\sqrt{2\pi} \chi_* \varepsilon^{1/2} t^{3/2}} \right)^{1/2} \quad (24)$$

で与えられる。この長さは $t=0$ と

$$t = \left(\frac{3Q}{\sqrt{2\pi} \chi_* \varepsilon^{1/2}} \right)^{2/3} \equiv t_* \quad (25)$$

とでそれぞれ0となり、 $dl_*/dt=0$ として計算して求まるように

$$t = \frac{t_*}{e^{2/3}} = \frac{t_*}{2.10} = 0.477 \left(\frac{3Q}{\sqrt{2\pi} \chi_* \varepsilon^{1/2}} \right)^{2/3} \quad (26)$$

という時間で l_* は極大値をとることとなる。この特性は浮游する煙塊の可視面積が最初は時間と共に増大するが後には逆に減少しはじめて遂に見えなくなってしまうことと同様のもので、有効まき幅も最初は落下時間 t あるいは落下高度 H と共に増すけれども、さらに t あるいは H を増加すると有効まき幅はかえつて減少し $t=t_*$ でついに0になつてしまう。そして(26)式で示された落下時間あるいはそれに落下速度 w を乗じて得られる飛行高度をえらぶことによつて有効まき幅を最大にすることが出来るということが判り、飛行高度の選定に一つの指針が与えられることになる。

(2) まき幅および中心濃度と気象条件との関係 もし航空機の飛行高度、速度、農薬散布強度 Q が一定に保たれるとすれば、散布された農薬の中心濃度 χ_0 は(23)式より明らかなように $\varepsilon^{1/2}$ に逆比例する。また有効まき幅 l_* と ε との関係も(24)式で示されている。一方 ε は気象要素によつて決定される量であるから、 ε を媒介としてまき幅や中心濃度を気象要素の函数として表わすことができる。したがつて接地気層における ε の大小によつてその時の気層状態が航空散布によつて適しているかあるいは適していないかを判定できることになる。たとえば ε が大きい場合(これは気層が不安定であるかまたは風の強い場合に相当する)には散布された農

葉が拡散し過ぎて有効まき幅が減ってしまうことになるから航空散布を行う時機としては不適当であるということになる。 ε の大小を最も簡単に判別する方法の一つとして考えられたのが Thorntwaite (1955) の火薬の煙を使う方法である。これは圃場で少量の火薬に点火して煙を出し、その煙が見えなくなるまでの時間の大小によつて ε の大きさを判定しようとするものであり、煙が早く消えてしまう状態では散布葉量を多くしなければならないということを実験的に見出している。

第 2 報でのべられたように、浮游する煙塊が目に見えなくなるまでの時間 (smoke dissipation time) t_d は ε に関係し、

$$t_d \propto Q^{2/3} / \varepsilon^{1/3} \quad (27)$$

で表わされる。これは (26) の関係と全く同一の性質のものである。この t_d を使つてまき幅 $\langle L^2 \rangle^{1/2}$ および中心濃度 X_0 を表わせば

$$\left. \begin{aligned} \langle L^2 \rangle^{1/2} &\propto (t/t_d)^{3/2} \\ X_0 &\propto (t_d/t)^{3/2} \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

となり、煙の消散時間の効果が明らかである。

このほかに煙を使わなくとも風速変動や風向変動によつても ε を評価できるし、平均風速と平均気温の高度分布から ε を計算することも可能である。いずれにしても農業散布を合理的に行なうには接地気層乱流の特性を知ることが極めて必要なことである。

5. 農業散布に関する気象要素の選定とその予想

すでにのべられた各種の方法で行なわれる農業散布や煙霧剤の展開において見られる拡散現象は多かれ少なかれ連続固定源型拡散や瞬間浮游源型拡散についての知識によつて説明することができる。そしてその知識から明らかになったことはこれらの拡散現象に対する決定的な要素は接地気層の乱流特性であるということである。しかし残念ながら接地気層の乱流特性に関する我々の知識はまだ十分とは云い得ない。ただ乱流特性に最も関係の深い要素が (a) 高度 z , (b) 地面の粗さ z_0 , (c) 風速 U あるいは摩擦速度 V_* , (d) 輸送熱量 q あるいは安定度長さ $\{L \equiv -V_*^3 / k(g/\Theta_0)(q/c_p \rho)\}$ であることなどが次第に明らかとなつて来た。そして乱流拡散現象を上記の諸要素で記述するための研究が各方面で進められていて、現在には多くの野外実験のくりかえしによつてまず経験的な諸法則を見出すための努力がなされている。

これらの実験あるいは農業散布の実施に当つて測定を必要とされる気象要素についてもまだ断定的な結論は得られていないが、著者はここに一つの試案を提出しておきたい。それは上記の要素を最も簡単に測定する方法で

あり、(A) 一定高度 (普通には 2m) における風速 U , (B) 二つの高度における温度差 $\Delta\Theta$ (普通には 4m 高度の気温 Θ_{4m} と高度 1m における気温 Θ_{1m} との差, $\Delta\Theta = \Theta_{4m} - \Theta_{1m}$), (C) 一定高度における風向変動量 $\sigma_A (= \langle v^2 \rangle^{1/2} / U)$ を同時に測定することである。こうして気象要素だけによつて十分によく拡散現象が記述出来るようになれば、拡散現象の予想は気象要素の予想にほかならないことになる。

例えば翌朝の最低気温の予想と同時に他の気象要素の予想ができるようになれば、拡散現象の予想もできるようになり、それに応じて煙霧機の配置なども事前に合理的に行い得るようになるであろう。この「煙の研究」を行いつつある著者の最終目標の一つも実はそこにあることをここに附言しておきたい。

6. 拡散現象の人工的制御の可能性

最近特に大気汚染問題に関係して拡散現象の人工的制御についての考察がしばしば行なわれるようになってきている。煙突から出る煙について言えば煙突の高さ h と煙の放出量 Q とを変更することによつて地上の汚染濃度 X を制御することであり、それらの効果は (1) 式によつて評価される。

今後はさらに接地気層の乱流特性を人工的に変えて拡散現象を制御する方法も現われて来る可能性がある。それには地表面の性質を変えて接地気層の安定度に変化を与えることがまず最も可能性が高いものと思われ、土地の熱伝導度と熱容量とを大きくすることによつて強い大気汚染が地上に起る危険をさけ得ることが Frankenberger (1958) によつて指摘されている。

なお大気汚染問題の制御のため煙突の煙の拡散についてしばしば風洞内で模型実験が行なわれているが、この場合の相似法則についての考察は先に著者 (井上 1959a) も行なつていたのでここでは特にふれないでおこう。

7. 大気汚染の計算方法について

(1) 式などに表われた X を農業濃度と考える代りに有害ガス濃度と考えれば、これまでの議論の多くはそのまま大気汚染問題に転用できる。そして有効面積として考えられた (10) 式の関係は今度は有害汚染面積として解釈される。

最近では特に原子力発電所からの放射性廃棄ガスの拡散が問題になり、地表面におけるガス濃度の分布を計算するために各種の方法が提案されている。その一つは (1) 式を採用してその中に含まれる $\langle Y^2 \rangle$ および $\langle Z^2 \rangle$ を合理的に与えようとするものである (例えば Maede 1959, 井上 1959b)。もし煙突の高さ h が十分に大きくて、 $\langle Z^2 \rangle$ の計算にも Taylor 法が適用されるとするならば、

$$\langle Y^2 \rangle = 2 \langle v^2 \rangle \int_0^t \int_0^\eta R_{Lv}(\xi) d\xi d\eta \quad (29)$$

および

$$\langle Z^2 \rangle = 2 \langle w^2 \rangle \int_0^t \int_0^\eta R_{Lw}(\xi) d\xi d\eta \quad (30)$$

で与えられるそれぞれの拡散幅を(1)に代入して計算を進めて行けばよい。しかしこの計算は一般には極めて困難であり、最も簡単には水平および垂直拡散がいずれも第I種拡散領域の関係で表わされるものと仮定して、

$$\langle Y^2 \rangle^{1/2} = \frac{\langle v^2 \rangle^{1/2}}{U} x = \sigma_A x \quad (31)$$

および

$$\langle Z^2 \rangle^{1/2} = \frac{\langle w^2 \rangle^{1/2}}{U} x = \sigma_E x \quad (32)$$

を(2)に代入すれば

$$\chi_0 = \frac{Q}{\pi U \sigma_A \sigma_E x^2} \exp\left(-\frac{y^2}{2 \sigma_A^2 x^2}\right) \exp\left(-\frac{h^2}{2 \sigma_E^2 x^2}\right) \quad (33)$$

で地上のガス濃度が与えられる。有害限界濃度を χ_{0*} として上式に入れば、それから有害汚染領域の輪郭が計算出来る。特に中心線上($y=0$)の濃度は

$$\chi_0 = \frac{Q}{\pi U \sigma_A \sigma_E x^2} \exp\left(-\frac{h^2}{2 \sigma_E^2 x^2}\right) \quad (34)$$

で与えられ、その形の特性は Fig. 5 に示される通りであり(Cramer 1957), 最大濃度 $\chi_{0 \max}$ とその現われる位置 x_m はそれぞれつぎの通りである:

Fig. 5. Alongwind ground level concentration from a stack of height h .

$$\chi_{0 \max} = \frac{2Q}{e\pi U h^2} \cdot \frac{\sigma_E}{\sigma_A}, \quad (35)$$

$$x_m = \frac{h}{\sqrt{2} \sigma_E}. \quad (36)$$

もし $\chi_{0 \max}$ が常に χ_{0*} より小さければ有害汚染領域は存在しないこととなる。そして有害な大気汚染を生ずるおそれのあるガスを放出する煙突では h を十分に大きく Q を十分に小さくして、 $\chi_{0 \max}$ が χ_{0*} を越すことのないようにしなければならない。しかしこの計算は水平お

よび垂直拡散のいずれもが Taylor 法で表現され、しかも第I種領域に属しているという仮定のもとでなされたことを忘れてはならない。そして安定度の影響が強くなって $\langle Z^2 \rangle$ の計算に対して Taylor 法が到底適用されなくなつて来ると、その代りに Monin 法(第1報参照)の適用が要求されて来るとと思われる。しかしこの方法はまだ十分には展開されていない。

これに対して Maede (1959) による方法(しばしば英国法ともよばれる)は $\langle Y^2 \rangle$ および $\langle Z^2 \rangle$ を従来の実験結果にもとづいて全く経験的に与えようとしているものであるが、この方法が極めて巧妙で効果的であることが著者(井上 1959b)によつて示された。

8. 結 び

連続固定源型拡散と瞬間浮游源型拡散について得られた知識をもとにして、拡散に関係のある各種の農業技術の中で起りそうないろいろな問題を理論的に考察した。これらの結果はこれまでの多くの経験的事実に理論的な説明を加えることを可能にしているが、実験結果のとばしいために、実験的な検証はまだ十分になされたわけではない。ただ米国の Project Prairie Grass で汚染面積を計算した Elliott (1959) の結果が著者の与えた(10)式によつてかなりよく説明できるというのが唯一の実験的検証である。しかし最近各方面で拡散実験が行なわれるようになったから、近い将来には著者の得た各種の理論的な結果の検討と理論の改良とが可能になるものと著者は期待している。

なおここで取残されたつぎの諸問題も今後解決されなければならない:

- (1) 拡散する粒子の大きさ、形、重さなどと拡散現象との関係
- (2) 地面における拡散物質の吸着や沈降を考慮に入れた濃度分布
- (3) 拡散の aerodynamical phase から meteorological phase へのうつり変り
- (4) 航空機の飛行による接地気層の変形
- (5) 煙幕に対してななめに光の当たる場合の遮蔽度の分布

引 用 文 献

- Barad, M. L. 1951: Meteorological Monograph, 1, 9~14
- Calder, K. L. 1952: Proc. U.S. Tech. Conf. Air Pollution, McGraw Hill, 787~792.
- Cramer, H. A. 1957: Paper presented at 1st Nat. Conf. Appl. Mech., Hartford, Conn., U. S. A.
- Elliott, W. P. 1959: Int. J. Air Poll., 2, 115~126.
- Frankenberger, E. 1958: Beitr. Phys. Atmos., 30, 170~176

- 井上栄一 1952: 農技研報告, A 2 号, 93 pp.
 ——— 1956: 農業気象, 11, 41~151.
 ——— 1959a: 農業気象, 15, 41~45.
 ——— 1959b: 「大気汚染の計算方法について」,
 原子力気象調査会報告, no. 77, 36 pp.
 井上・谷・今井 1953: 農業気象, 8, 45~48.
 Maede, P. J. 1959: Paper presented at the Intern.
 Symp. Safety and Siting of Nuclear Plants,

- Rome, June 1959.
 Monin, A. S. 1956: Trudy Geofiz. Inst. AN. SSSR,
 no. 33 (160), 3~47.
 Sherwood, T. K. 1949: J. Meteor., 6, 416~419.
 Thornthwaite, C. W. 1955: "Weather Studies Help
 Develop a Practical Crop Dusting Program",
 manuscript.

Summary

Making use of knowledge obtained in preceding papers of the turbulent diffusion of both continuous fixed-source-type and instantaneous floating-source-type, the applications of diffusion theories to several agricultural techniques are theoretically dealt with. The dusting procedure of agricultural chemicals with the dusting machine and the extending procedure of smoke screen to prevent the frost damage to agricultural products are dealt with from the theoretical viewpoint following the continuous fixed-source-type diffusion theory. The surface distribution of concentration of chemicals from the dusting machine on the ground is expressed by the gaussian profiles and the area of the effective dusting region, within which the concentration is greater than a certain critical value χ_{0*} , is shown to be

$$A \propto \left(\frac{Q}{U \chi_{0*}} \right)^{2/(1+m)},$$

where Q and U denote the source strength of dusting machine and the appropriate mean wind speed at the dusting outlet, respectively, and m is a number depending upon the thermal stratification of the atmospheric surface layer. From the preceding paper m is shown to be 1.5, 0.8 or 0.5 under the thermally unstable, neutral or stable conditions, respectively. The effective shading region of smoke screen is analogously discussed with the vertically integrated smoke concentration. In this case, the region does not depend upon the vertical characteristics of smoke screen and the area is shown to be in proportion to $(Q^2/\langle v^2 \rangle^{1/2} U \chi_{z*})$, where $\langle v^2 \rangle^{1/2}$ and χ_{z*} denote the lateral component of wind turbulence and a certain critical value of vertically integrated smoke concentration over which the shading is effective. The problems of diffusion area due to a battery of several smoke machines and to moving machines are discussed, too.

The aerial dusting from aircrafts of agricultural chemicals is dealt with as the floating-source-type diffusion during the time t from the release. The width l_* of effective swath is shown to be

$$l_* = \sqrt{\frac{2}{3}} \varepsilon^{1/4} t^{3/4} \left(\ln \frac{3Q}{\sqrt{2\pi} \chi_* \varepsilon^{1/2} t^{3/2}} \right),$$

where χ_* is the critical value of concentration and ε is the mean rate of turbulent energy dissipation within the height from the ground surface to the dusting aircraft. The maximum of the effective swath is obtained under the condition of $t = 0.477 (3Q/\sqrt{2\pi} \chi_* \varepsilon^{1/2})^{2/3}$. This problem is similar to that of the smoke dissipation time and the application of smoke dissipation time as a measure to the aerial dusting procedure is discussed. The importance of micrometeorological elements, such as the mean wind velocity, the fluctuations in wind direction, and the temperature difference between two heights, are stressed, and the possibility of artificial control of diffusion phenomena through the modification of micrometeorological conditions is pointed out. Finally, the general calculation methods of air pollution are discussed only briefly.