

氏名・(本籍)	みず の たて き 水 野 建 樹
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理第 792 号
学位授与年月日	昭和60年9月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当
最終学歴	昭和43年3月 東京都立大学大学院理学研究科 (修士課程)物理学専攻修了
学位論文題目	大気境界層中における浮力のない物質の鉛直拡散に関する研究
論文審査委員	(主査) 教 授 近 藤 純 正 教 授 田 中 正 之 教 授 鳥 羽 良 明

論 文 目 次

第一章 序 論

第二章 大気拡散の理論

第三章 地上源からの鉛直拡散

3.1 はじめに

3.2 拡散場の条件設定

3.2.1 混合層

3.2.2 中立層

3.2.3 安定層

3.3 拡散方程式

3.3.1 無次元化

3.3.2 拡散幅の特徴

3.4 数値計算

3.4.1 計算結果の比較方法と、観測結果との比較方法

- 3.4.2 計算結果と観測結果との比較
- 3.5 鉛直方向への濃度分布形
- 3.6 地上源からの鉛直拡散についての結論
- 第四章 上空源からの鉛直拡散
 - 4.1 はじめに
 - 4.2 上空源の拡散係数
 - 4.2.1 拡散係数のモデル
 - 4.2.2 σ_w の分布形と乱流特性時間 t_L
 - 4.3 数値計算
 - 4.3.1 地上源との比較
 - 4.3.2 上空源からの拡散の相似性
 - 4.4 拡散実験
 - 4.5 計算結果との比較
 - 4.6 上空源からの鉛直拡散についての結論
- 第五章 発達しつつある混合層中の鉛直拡散
 - 5.1 はじめに
 - 5.2 混合層内の乱流が準平衡状態にあるための条件
 - 5.3 非定常状態における拡散
 - 5.4 計算結果の特徴
 - 5.5 非定常状態の拡散についての結論
- 第六章 結 論

論文内容要旨

地上から2 Km程度の上空までに形成される大気境界層の乱流モデルとして、Yokoyama et. al (1977 a. b. c) によって提案されたモデルと、今までに得られている地上から100 m程度までの接地境界層に関する知識を加えて拡散場のモデルを設定して、乱流輸送に関する「K-理論」を適用し、大気境界層中における浮力のない物質の鉛直拡散について考察した。ここで、K-理論とは乱流による物質や熱、運動量の輸送量（フラックス）が、それらの平均値の勾配に比例すると仮定し、この比例係数を速度変動や大気安定度の関数として表し、拡散を記述する方法である。比例係数は一般に渦拡散係数あるいは単に拡散係数とよばれており、濃度を求めるにはこれを物質の移流、拡散を表す拡散微分方程式に代入して解けば良い。なお、拡散場は大気安定度により、晴れた日中に形成される混合層、曇って風の強いときの中立層、および夜間放射冷却の下で形成される安定層に分けられるとし、また、乱流は水平方向には一様とし、地球の自転によるCoriolis力も無視した。

鉛直方向の拡散については、拡散物質の放出源高度によって拡散の扱い方を変える必要があると考えられたので、ここでは地上源と上空源とに分けて計算し、それぞれについて観測と比較した。これらの計算では拡散場を定常と仮定したが、実際には場は時間変化するので、最後に非定常の拡散問題として発達段階にある混合層中の鉛直拡散について考察した。なお、拡散幅としては、最高濃度の現れる高さ、その60%となる高さ間の距離によって定義し、 Z_σ と表して用いることにした。一般には濃度分布の標準偏差を σ_z と表し、これを代表的拡散幅として用いることが多いが、観測ではほとんどの場合、定義どおりの σ_z が求められないので、観測と比較しやすいと思われる量 Z_σ を用いたのである。

はじめに地上源の場合、拡散微分方程式の無次元化の過程で、拡散幅 Z_σ は一般に

$$\frac{Z_\sigma}{h} = f\left(\frac{\alpha x}{Reh}, \frac{Z_0}{h}, \frac{h}{L}\right) \quad (1)$$

と表されることが導びける。ここに、 h は境界層の高さ、 x は煙源からの風下距離、 Re は境界層上端の風速 U_h と境界層中で物質の拡散係数最大値および h から成る無次元量($U_h h / K_{m, \max}$) α は物質の拡散係数 K_z と運動量拡散係数 K_m の比、 Z_0 は地表面粗度長、 L はMonin-Obukhov長さである。 h/L は境界層の平均的な大気安定度を表す無次元量であるが、乱流モデルによると(1)式では安定層に限って現れるパラメータである。

この無次元化により各成層中の拡散の特徴が把握できる。結果として、中立層や安定層では拡散幅は単に風下距離だけの関数になるのに対して、混合層では煙の移流時間に依存して拡散幅が一義的に決まることが導びかれる。これは中立層や安定層では乱流の発生原因が地表面と空気の摩擦による機械力学的な力によるのに対して、理想的な混合層では乱流エネルギーのもとが熱的なものであるから、水平方向の平均風速とは本質的に無関係となるためである。また、(1)式で無次元拡散幅 Z_σ/h にとって重要なパラメータは右辺第一項の $\alpha x / Reh$ であり、 Z_σ/h の特徴は

とんどこのパラメータの大きさによって決まると言ってもよい。これは Re が乱流強度 σ_w/U (σ_w は乱流変動速度鉛直成分の標準偏差) に反比例するため、この項には Z_0/h や h/L の影響が間接的に含まれているからである。(1)式中にある Z_0/h , L/h は風速や拡散係数の鉛直分布形が変ることをとおして拡散に影響していることを表しており、第一項に対して補正項のような役割をしている。

ところで、拡散微分方程式は解析的に解くことができないため、差分近似により数値的に解き、得られた拡散幅 $Z\sigma$ と地上濃度 C_0 について、大気中での拡散実験結果と比較した。その結果、混合層では乱流による物質の拡散係数 K_z を運動量拡散係数 K_m の2倍としたとき、観測結果とよく合うことがわかった。この比率は接地境界層の大気が強い不安定である $Z/L = -1$ 程度のときの熱拡散係数 K_h と運動量拡散係数 K_m の比率に近い。また、このモデルで計算した結果は、安定度 Z/L を $-\infty$ とした極限でなりたつ混合層の相似理論から予測される濃度変化 ($C_0 \propto t_p^{3/2}$, t_p : 移流時間) をよく再現していた。

中立層、安定層では K_z/K_m を 1.55 としたときに観測とよく合う結果が得られた。これは中立層、安定層で Businger et. al. (1971) が得た $K_h/K_m = 1.35$ に比べれば若干大きい。結論的には、混合層まで含めて K_z は K_h に近く、 K_m よりも大きい。これはこのモデルによる計算、および今までの他の計算と観測の比較などからみて、確かであろうと思われる。

濃度鉛直分布形を $\exp(-Z^2)$ で近似すると、計算では指数分布のベキ数 S が混合層で小さく、安定層で大きくなり、煙源からの距離や地表面粗度によっても変化する結果が得られた。これを観測結果と比較すると、安定度によるベキ数 S の変化については同じ傾向にあった。

次に、上空源からの拡散では、乱流の Lagrange 時間スケールが大きくなることを考慮に入れて、Taylor (1921) の拡散統計理論を拡張し、拡散初期には煙源高さ付近の乱流強度 (σ_w/U) に比例する拡散係数を与え、その後は移流時間に比例して拡散係数は増加するものとし、十分時間を経た後には地上源と同じ拡散係数になるようにした。(なお、Lagrange 時間スケールとは大気中の微小粒子の移動速度(これを Lagrange 的速度という)がどの程度の時間変化せず持続するかを示す時間的な尺度であり、Taylor の拡散統計理論は Lagrange 的に測定した速度の自己相関関数と粒子の拡散幅を統計的に関係づけた理論である。)

ここで与えた拡散係数モデルは煙源高度を地上に近づけた極限では地上源に適用した拡散係数とも矛盾しないようになっている。この拡散係数モデルから、Lagrange 時間スケール (τ) に相当する時間 ($t_L = K_z/\sigma_w^2$) が得られるので、これを観測から得られた実際の Lagrange 時間スケールと比較したところ、どのような成層状態の大気でも τ と t_L はほぼ等しい大きさであることがわかり、拡散係数のモデルは妥当であると考えられた。

数値計算の結果を地上源からの拡散計算結果と比較すると、地上源からの濃度鉛直分布形は大気安定度により大きく変化したのに対し、ここで扱った上空源の範囲 ($0.2 < h_s/h < 0.8$, h_s : 煙源高度) では安定度に関係なくガウス分布に近い結果が得られた。地上源と上空源とで濃度分布形が異なっているため、特に混合層と中立層の場合、拡散幅の風下側への変化パターンも煙源

位置によって大きく異なっていた。ただし、安定層では濃度分布形の差は小さく、拡散幅は煙源が高い程、小さくなる傾向を示した。

ところで、上空源については、煙源高度 h_s における乱流統計量を代表的なパラメータとし拡散方程式を無次元化すると、一般に拡散幅は

$$\frac{Z_\sigma}{l_s} = f\left(\frac{tr}{t_{L,s}}, \frac{Z_0}{h}, \frac{h_s}{h}, \frac{h_s}{L}\right) \quad (2)$$

と表されることが導びける。ここに $l_s = K_{z,s} / \sigma_{w,s} = \sigma_{w,s} \cdot t_{L,s}$ (添字 S は煙源高度を表す) で定義される長さであり、乱流“渦”の空間スケールに相当する量である。計算した拡散幅から Z_σ / l_s を求め、(2)式にあるパラメータ Z_0/h , h_s/h および h_s/L をいろいろ変えて Z_σ / l_s に及ぼす影響を調べたところ、これらはすべて Z_σ / l_s に対して大きな効果は及ぼさないという結果が得られた。このことは、上空源の場合、拡散はほぼ一般的な乱流中で行われたとして扱ってよいことを意味している。そこで、乱流速の Lagrange 相関関数として指数分布を仮定し、一般乱流中での Taylor の拡散統計理論を適用して拡散幅を解析的に求め、数値計算の結果と比較した。(この解析解自体はここではじめて得られたものではなく以前からよく知られているものである) その結果、両者はよく似ていたため、この解析解により計算結果を代表させ、これと実験結果を比較した。実験結果は安定層の例が少なく、また、データにかなりのばらつきがあったが、大気安定度によって予想される Lagrange 時間スケールの範囲内で、両者は一致していることがわかった。この結果を用いて、パラメータをさらに簡略化し、上空源の拡散幅に関する実用式を提案した。

以上、ここで設定した拡散場のモデルにより、大気境界層中の鉛直拡散について計算した結果は拡散についての観測結果をよく説明していると言える。ただし、上空源の拡散実験では安定層の例が少ないため、そのような条件下でのモデルの有効性は十分確かめることは出来なかった。

最後に、非定常状態の拡散の問題として、発達中の混合層内での拡散について考察した。非定常状態の拡散といっても、今までの拡散モデルが使えるためには混合層中の乱流が準平衡状態(混合層中の乱流が常にある釣合を保ちながら時間変化をしている状態)にあることが必要である。この状態は大気が混合するのに要する特徴的な時間 $T_c (= h / W_*)$, (W_* : 混合層内の代表的乱流速度) が、混合層発達に必要な特徴的時間 $T_h (= h / (d_h / dt))$ に比べて十分小さいときに満足される。混合層の発達に関する簡単なモデルによって、これらの時間スケールを見積ったところ、 $T_c / T_h \ll 1$ の条件は、通常、混合層発達後、数十分から1時間もすれば満たされることがわかった。そこで、混合層発達開始直後の数十分間は除外して、その後の状態での拡散について議論した。

発達中の混合層内での地上源からの拡散の場合、その時々混合層の高さで無次元化した拡散幅や地上濃度は、一般に tr / T_c と tr / T_h だけの関数として表されることが導びける。(拡散が準定常とみなせるのは $tr / T_h \ll 1$ の状態である。) 計算結果によると、 tr / T_h が変化することによる非定常性の効果は小さく、結論的には定常状態で得られた無次元の拡散幅や濃度と無次元移

流時間の関係は、そのまま発達中の混合層内の拡散にも適用できることがわかった。ただし、これらの関係を実際のスケールにもどすと、混合層が発達しているために定常状態のものとは等しくならない。急速に発達しつつある混合層の中で、30分～1時間程度にわたって平均した濃度は定常として計算した場合に比べて10～20%高くなると推定される。

論文審査の結果の要旨

近年、産業活動の発達に伴って、大量の汚染物質が大気境界層内に排出され、大気汚染として大きな社会問題となった。そのため大気中での汚染物質の濃度や、環境への影響を知ることが重要な課題となっている。しかしこの問題は、まだ十分解決されたとは言い難い。その原因は、大気境界層の性質が場所や高さ方向によって、また昼・夜によって時間的に大きく変化し、複雑なふる舞いを示すからである。

著者は近年提案された、高度約2 Kmまでの大気境界層モデルと、現在はほぼ確立されている接地境界層に関する知識を加えて、拡散場のモデルを設定し、乱流輸送に関する「K理論」を適用し、大気境界層中における鉛直拡散を計算し、観測と比較した。

この研究で得られた主な知見はつぎの通りである。まず拡散源が地上にある場合については、適当なパラメータを用いて拡散方程式を無次元化することによって拡散の特徴を把握した。大気が中立または安定な時の拡散幅は風下距離の関数になるのに対し、混合層では乱流エネルギーが熱的原因で生成されることから拡散幅は煙の移流時間の関数になることを見出した。計算結果は観測結果をよく説明しており、モデルの妥当性を示した。

上空源の場合は地上源の場合と拡散状態が異なることを示した。さらに拡散はほぼ一様な乱流中で行なわれるとして近似してもよいことを見出した。その結果を簡略化して拡散幅に関する実用式を提案した。

最後に、非定常状態の問題として、発達中の混合層内の拡散についても考察し、準平衡状態の取り扱いのできる条件を示した。

以上の結果は、著者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示すものである。よって、水野建樹提出の論文は、理学博士の学位論文として合格と認める。