

氏名・（本籍）	あ だち たか し 安 達 隆 史
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理第 793 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45年 3 月 東北大学大学院理学研究科 (修士課程) 地球物理学専攻修了
学位論文題目	大気汚染濃度予測のための上層風と拡散パラメータの推定法の研究
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

まえがき

第 1 章 序 論

第 2 章 従来に関連する主な研究

2. 1 平坦地における定常状態の大気境界層の支配方程式
2. 2 温度成層の効果
2. 3 温度風の効果
2. 4 温度風と温度成層の両方の効果

第 3 章 平坦地における温度風を考慮した上層風と乱流拡散係数の推定法

3. 1 乱流拡散係数を未知量とする K-理論による上層風の数値シミュレーション手法
3. 2 従来の風速シア関数を使用した上層風推定結果の検討
3. 3 大気境界層の混合距離の検討
3. 4 新しい風速シア関数の提案とその試用結果

3.5	上層風と乱流拡散係数の推定法の改善と検証
第4章	傾斜地における上層風と乱流拡散係数の推定法
4.1	斜面下降風推定の計算モデル
4.2	一様な斜面における斜面下降風と乱流拡散係数の推定
4.3	斜面の風下の平坦地に達する斜面下降風と乱流拡散係数の推定
第5章	微風時の接地層における拡散パラメータの推定法
5.1	研究の必要性
5.2	微風観測と大気拡散実験の方法
5.3	データ解析
第6章	結 論
	謝 辞
	引用文献
付録A	大気境界層の運動方程式の解析解の求め方 (従来の解と新しい解)
B	南極の写真

論文内容要旨

第1章 序論

産業活動等にもなって各種の施設から排出される大気汚染物質は主に大気境界層内の気流によって運ばれ、拡散するので、大気汚染濃度を予測するためには、大気境界層内の風向風速と乱流拡散係数の鉛直分布を知る必要がある。しかし、これらを長期間にわたって連続的に観測する技術はいまだに確立しておらず、これらを理論的に推定する計算モデルの精度も充分ではない。

さらに、風速が非常に弱い場合には風向が定まらなかったり、風向の予測が難しいために、大気拡散実験の実施が難しく、これまでに関連する気象や濃度の実測データがほとんど得られておらず、このような場合の大気汚染濃度の推定法も確立していなかった。

以上の問題点を解決するために、本論文では大気境界層における気流と乱流拡散の構造に目を向けながら、煙の移流拡散を支配する風向風速、乱流拡散係数、拡散パラメータ、さらに大気汚染濃度を気象学の理論と試験式を併用することによって推定する方法を述べる。

ただし、研究目標を、計算量が非常に多い約1年間にわたる大気汚染濃度予測や日常的な局地風予測への応用においているので、厳密ではあってもむやみに複雑で計算時間のかかる方法は採用しなかった。

第2章 従来に関連する主な研究

<上層風推定法>

上層の風向風速の古典的な推定法には、(1)と(2)式で表わされる大気境界層の運動方程式を解析的に解いて得られる有名なエクマン・スパイラルがある。

$$i f (\mathbf{V} - \mathbf{V}_g) = \frac{d}{dz} \left(\frac{\boldsymbol{\tau}}{\rho} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\boldsymbol{\tau}}{\rho} = K \frac{d\mathbf{V}}{dz} \quad (2)$$

ただし、 $i = \sqrt{-1}$ 、 f ：コリオリパラメータ、 \mathbf{V} ：風速ベクトル、 \mathbf{V}_g ：地衡風ベクトル、 Z ：高さ、 $\boldsymbol{\tau}$ ：シアーストレスベクトル、 ρ ：密度、 K ：乱流拡散係数。

しかし、この解には以下の三つの問題点が含まれている。

(a) シアーストレスは(2)式で示されるように、風速の鉛直勾配に比例すると仮定され、その比例係数の形で乱流拡散係数(K)が導入されている。(この仮定を採用した理論は従来から K -理論と呼ばれ、よく使われる。)

(b) 解析解を得るための簡単化のために、 K は高さによらない既知量と仮定されているが、実際には K は高さ、気温勾配、風速勾配等によって変化し、既知量ではない。

(c) 地衡風が高さによって変化しないと仮定されているが、実際は水平方向に気温勾配が存在するのが一般的であるので、この仮定はいつも成立するとは限らない。

まず、(a)の仮定は、序論でも述べたように計算モデルの取扱い易さと計算時間の短縮のために当研究でも踏襲するが、(b)と(c)の仮定は必ずしも現実的でないので改善する必要がある。

(b)の問題に取り組んだ例として、接地層での理論を上層に拡張した Yamamoto et al. (1968) の数値解があるが、Kに改善の余地がみられる。(c)の問題では Mendenhall (1967) が多くの高層風観測値をまとめて、ウインドスパイラルに地衡風の鉛直シアー即ち温度風の影響が現われることを示し、安達 (1970) はそれを数値計算によってある程度再現したが、やはりKに問題が残った。

この様に、(b)と(c)の問題を同時に解決した上層風推定のモデルはまだ完成していないので、それを当研究は前進させ、その結果を平坦地だけでなく傾斜地にも応用して成功した。

<微風時大気拡散>

これまでに「微風」の定義は明確にされていないので、当論文では静穏時または10分平均風速が2m/s未満の場合を「微風」と称することにして研究対象とした。

従来、このような非常に弱い風速の場合の大気拡散機構は、実験手法が難しいのでほとんど明らかにされておらず、高濃度が予想されるにもかかわらず微風時の大気汚染濃度の推定法は確立していない。この点に関心を持った Sagendorf et al. (1974) は米国のアイダホ州の砂漠で弱風安定時のエアトレーサ拡散実験を行い、異常に幅の広い拡散状況を報告しているが、データ数が不足していてまとまらなかった。

第3章 平坦地における温度風を考慮した上層風と乱流拡散係数の推定法

大気境界層の運動方程式を解く場合に、乱流拡散係数(K)を既知量として与える方式を採用すれば数値計算は簡単になるが、Kは場の関数であるので、Kの正しい鉛直分布を前もって与えることは難しい。そのため、当研究では地衡風と温位の鉛直分布を前もって与えるが、上層風とKとシアーストレス等を同時に推定する下記の数値モデルを開発した。

$$0 = \frac{d}{dz} \left(K \frac{du}{dz} \right) + f (v - v_g) \quad (3)$$

$$0 = \frac{d}{dz} \left(K \frac{dv}{dz} \right) - f (u - u_g) \quad (4)$$

$$\frac{\tau}{\rho} = K \frac{dV}{dz} \quad (5)$$

$$K = k_z \left| \frac{\tau}{\rho} \right|^{\frac{1}{2}} / \phi \quad (6)$$

$$\phi = \phi \left(\frac{z}{L} \right) \quad (7)$$

$$\frac{z}{L} = -k_z \frac{g}{\theta} \frac{q}{c_p \rho} \left/ \left| \frac{\tau}{\rho} \right|^{\frac{3}{2}} \right. \quad (8)$$

$$\frac{q}{c_p \rho} = -K \frac{d\theta}{dz} \quad (9)$$

ただし、上記の7つの方程式において未知量は、 u , v , K , τ , ϕ , L , q の7個で、 z は独立変数である。 u_g と v_g は地衡風成分、 k はカルマン定数、 ϕ は風速のシア関数、 L はモーニン・オブコフの安定度の長さ、 g は重力加速度、 c_p は定圧比熱、 θ は温位、 q は顕熱フラックス、 f はコリオリパラメータである。

(7)式の ϕ に、接地層で成立するとされている従来式を採用して数値計算を行ったところ、あまり良い結果にならなかった。しかし大気の中立または安定状態の場合に、新しい次式が大気境界層全体において成立することを見出した。

$$\phi = \left(1 + \alpha \frac{z}{L}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad \alpha = 12 \sim 24$$

上記の、 K を未知量とする K -理論による、温度風を考慮できる上層風推定の数値モデルを用いて、米国のオクラホマ州とネブラスカ州の平原での上層風の数値シミュレーションを実施したところ、推算値と実測値は良く一致した。

第4章 傾斜地における上層風と乱流拡散係数の推定法

ここでは、一様な斜面を吹き降りる冷気流すなわち斜面下降風の推定法を取り扱う。

斜面下降風の元となる力は次式に示すように、冷気の密度を ρ_1 周囲の大気の密度 ρ_2 とすると、冷気の温位(θ_1)と周囲の大気の温位(θ_2)との差および斜面の傾斜角(r)に比例する。

$$F = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} g \sin r = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_2} g \sin r \quad (10)$$

この F を(3)式の右辺に加えて、鉛直座標を斜面に垂直に、水平座標を斜面に沿ってとり、 x 軸を斜面下方にとると、斜面上の大気境界層の運動方程式は次式になる。

$$0 = \frac{d}{dz} \left(K \frac{du}{dz} \right) + f(v - v_g) + F \quad (11)$$

$$0 = \frac{d}{dz} \left(K \frac{dv}{dz} \right) - f(u - u_g) \quad (12)$$

ただし、 u_g , v_g , F , θ は既知量とし、 K , ϕ , $\frac{z}{L}$, q については(5)~(9)式と同じものを使用する。

上記の K を未知量とする K -理論による斜面下降風推定の数値モデルを用いて、南極大陸の斜面上にあるみずほ基地および斜面の下端にある昭和基地における上層風の数値シミュレーションを実施したところ、推算値は実測値に良く一致した。

また、特別に K を定数と仮定した場合に、(11)と(12)式の解析解を得ることに成功した。これは従来得られている解析解よりも一般的な条件に適用できる新しい解であり、数値計算を行う余裕がない場合に利用できる。

第5章 微風時の接地層における拡散パラメータの推定法

微風時の接地層における大気汚染濃度推定法を研究する目的で以下の気象観測と野外実験を行

った。

(a) 茨城県筑波研究学園都市の気象研究所構内の草地において、超音波風速計2台による微風の自動観測を断続的に6年間にわたって実施し、大気が安定、中立、不安定状態のデータを多数取得した。

(b) 半径150mの円形の草地で、SF₆ガスを地上1.5m高から放出し、半径80または130mの円弧上に配置したエアサンプラーで捕集するエアトレーサ大気拡散実験を5年間にわたって実施し、68組の微風時の濃度と風のデータを取得した。

(c) 上記の場所で、8台の超音波風速計による微風の特別観測とエアトレーサ大気拡散実験を1週間実施した。

解析は10分平均の風ベクトル、流跡線、3成分の風速変動の標準偏差 ($\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$)、水平および鉛直方向の風向変動幅 (σ_A, σ_B)、30秒平均の風向風速の時系列、SF₆濃度の水平分布、拡散パラメータ (σ_y)、SF₆濃度の最大値等について行った。

第6章 結論

大気汚染濃度を予測する過程で必要になった平坦地および傾斜地における上層の風向風速、乱流拡散係数(K)、および微風時の接地層における拡散パラメータ (σ_y) と大気汚染濃度の推定法を大気境界層に関する理論、気象観測データの解析または野外におけるエアトレーサ拡散実験の手法を用いて研究した。

上記の研究成果を上層風推定法と微風時の大気汚染濃度推定法に関する部分とに分けて以下にまとめる。

<上層風推定法>

平坦地における温度風を考慮した上層風推定法では計算モデルの取り扱い易さと計算時間の短縮のためにK-理論を用い、各高度における風速の水平2成分ばかりでなく、Kやシアーストレスをも未知量として扱い、数値解として得る1次元の数値モデルを開発し、検証した。また、斜面上の冷気におよぼす局地的な加速度を実測の温位鉛直分布から推定し、これを上記の平坦地モデルに組み込むことによって斜面下降風推定の数値モデルを開発し、検証した。さらに、Kに一定値を仮定し、地衡風が高度変化する一般的な場合の斜面下降風の解析解を導いた。

以上の結果、次のことが明らかにされた。

- (a) 一様な平坦地および傾斜地においてK-理論が大気境界層の全体に適用できる。
- (b) 大気境界層の各高度でモーニン・オブコフの相似側が成立する。
- (c) 大気境界層の鉛直構造に重要なかわりを持つ風速のシア関数 (ϕ) は、大気境界層の全体において、大気が中立または安定状態において次式が成立する。

$$\phi = \left(1 + \alpha \frac{z}{L}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad \alpha = 12 \sim 24$$

<微風時の大気汚染濃度推定法>

静穏時または10分平均風速が2 m/s 未満の場合を「微風」と称することにして、このような風速が非常に弱い場合に、従来、あまり知られていなかった流跡線、風速変動、風向変動、濃度分布、拡散パラメータ等の性質を明らかにし、微風時の拡散パラメータと主軸濃度の推定法を研究した。その際に得られた主な新しい結果は次の通りである。

(a) 微風時で安定状態では、10分間の濃度の水平分布の横幅が小さい場合と異常に大きくて、放出点を中心とした開角が100度あるいは360度にもわたる場合があり、流跡線や風向の変化もそれにはほぼ対応していた。

(b) σ_A , σ_E および σ_y は、約1 m/sの風速値を境目にして弱風側で、Uの減少とともに増大することが明らかにされた。

(c) 微風時で安定状態において、 σ_y について、次式が成立することが明らかにされた。

$$\sigma_y = \sigma'_A x^{0.92}, \quad (80 \leq x \leq 130 \text{ m})$$

ただし、 x は放出点からの風下距離、 σ'_A は σ_A をラジアン単位にしたものである。

以上のように、大気境界層内の移流拡散に関する新しい知見を得た。

論文審査の結果の要旨

大気汚染濃度の予測の目的のために、気温勾配が鉛直方法にも水平方向にも存在する、一般の場合について、大気境界層内の風向・風速および拡散パラメータの鉛直分布を推定する方法と、微風時の拡散パラメータについて研究した論文である。

風の推定法ではまづ、境界層全層に適用できる、風のシア関数を計算と観測の比較によって見出し、境界層各高度で相似則が成立する仮定の有効性を確かめた。これは上層風の推定方法を簡単化でき、計算時間を短縮できる点で有用な成果である。

うえの成果を傾斜地における斜面下降風の推定法に適用し、南極大陸の斜面で得られた観測データと比較することによって、モデルの妥当性を示した。さらに、簡単化した場合について、解析解を求め、従来得られている解析解より一般的な条件に適用できることを示した。

最後に、静穏時または微風時の拡散パラメータと流跡線、風向・風速変動等の関係を野外観測から明らかにし、従来、よく知られていなかった微風時の拡散物質の濃度分布を推定する方法を見出した。

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、安達隆史提出の論文は、理学博士の学位論文として合格と認める。