

大気拡散の研究の一つの経過*

坂 上 治 郎**

まえがき

このたび思いがけずも藤原賞を戴き、誠に光栄に存じます。藤原先生には特に御面倒をかけた私にとっては、心から嬉しい事であります。個人的なことになりすぎますが、少しお礼やおおびのつもりで、昔の事を述べさせて戴きます。高校の2年から3年になる休みを主に使って、10人ばかり勝手に南洋旅行隊を結成して、サイパンやパラオ等に行くことにして、私は気象担当ということになり、出発前気象台の先生のところへ伺い、一日中先生のまわりにくっついていました。その後大学の気象学演習に、先生の御指導で藤井、能本両君と一緒に渦巻の実験をさせて戴き、その結果を先生が手づから英文を直して下さった上、物理学会の Proceeding に出して下さいました¹⁾。これが私らにとって、初めての論文になりました。その後社会に出て私は軍の研究所に入りましたので、その勤務先の性質上、自分の仕事を公表することは殆んどあり得ないと考えておりました。その後先生が所長の招きで来られ、先生が所長に「若い者の仕事を公表させるべきである」と強調されましたため、私が既にやっていた仕事を公表することが出来ました。これが私のその後今日までの研究の基礎となっている、「地面附近の渦動拡散」²⁾ という気象集誌に出したものでありました。終戦のとき多くの拡散実験の報告やデータがすべて焼かれて了ったので、頭に残った理論的なものや経験を忘れないため書きましたのを先生にお目につけたら、学位論文として出すようにといわれました。しかしデータがないので、全く別の仕事、すわち大気中の微細な乱れの仕事——これしか装置等の関係上手が出なかつたので——を初め、約10年ばかりしてから論文を提出し、前のは参考論文として出したわけでありました³⁾。しかしその時は既に先生は亡くなられておりました。

このように、私の学問的な生活の一段落ごとに常に先生の御指導と御尽力があり、そのためやっとその一段階を昇ることが出来たもので、先生のお蔭でようやく今日まで何とかやって来られたものでした。先生の学問の造詣の深さは今更申し上げることはありませんが、大学の講義でも、その他の指導の場合でも、本当に人間らしさがにじみ出ている、それが後輩を引きずり上げるのにかに強気に働いていたかが忘れられることはありません。教育の職にある私も少しでも先生のような人柄に近づきたいと努力しております。

大気拡散

私は実験屋ですから、実際の現象を根拠にしなければ気がすみません。勿論このためには実際の現象を正しい姿でつかまえてはなりませんので、測定器械、測定方法が研究の対象となります。いろいろな計器や測定方法を手がけました⁴⁾。社会に出て初めて野外実験に引っぱり出されて様子を見ると測定方法にいろいろ問題があり、それを次第に直して測定して行くと、地上の濃度の分布がどうも従来の Sutton 式では合わない。そこで鉛直測定を積極的に取入れて見ると、不一致が明瞭になったので、鉛直方向の拡散係数をとりあえず高さ按比例するとし、又微分方程式の形は運動量輸送の形ととって解き、この解の方が今までの式よりも適合することが判りました。これが後に気象集誌へ出したもので、結果としては殆んど同じ時期に出た Bosanquet-Pearson のものと一致していました。終戦前約10ヶ年極めて多くの野外実験をやり、数10m 4方の規模から1km×3kmの規模のもの、測定器材も2,000ヶ位用いたものもあり、鉛直分布も10数ヶ所で測り、濃度の時間的変化も12段切替のものを用いたりして現在の野外実験とくらべても必ずしも劣っているとはいえないものでありました。ただ当時の源の高さはせいぜい10mであったので、今日のように源の高さが100m~200mということになると、鉛直濃度分布の測定用器械は特別のものになることは当然であります。

終戦後も出来る限りの機会をとらえて野外の拡散実験をしたり、参加しました。館山海岸で溝を掘り、薪を入

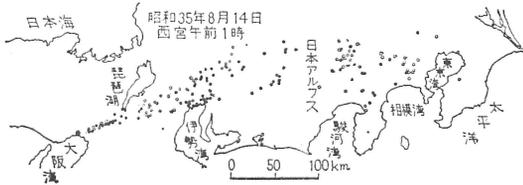
* A Course of the Research of the Atmospheric Diffusion.

(昭和43年度藤原賞受賞記念講演)

** Jiro Sakagami お茶の水女子大学理学部物理学教室

—1968年4月8日受理—

れて火をつけ、風下の熱拡散を熱電対で測ったり⁵⁾、二の宮や御前崎の海岸で Schlieren 法で熱拡散を測ったり⁶⁾、東海村の原子力気象の実験に参加したり⁷⁾、富士山初め全国 7ヶ所から総数約 50,000 ヶの風船を飛ばして水平方向の大規模な風下 400km 程度の拡散を調べ⁸⁾(第1図)、



第1図 風船による拡散

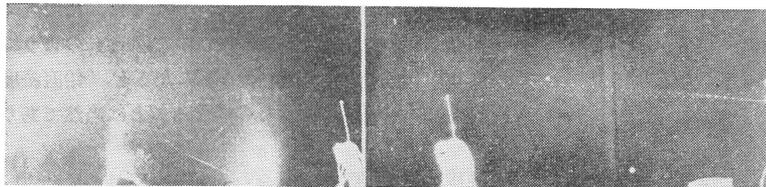
千葉の川崎製鉄の酸化鉄の赤い煙の分布を 3 km まで調べ⁹⁾、大型タンカーのベントからの石油の蒸気の拡散を調べたり¹⁰⁾した他、Prairie Grass Project のデータや¹¹⁾、Windscale の原子炉の暴走事故で飛散した I¹³¹ の分布のデータ¹²⁾、北陸農事試験所のイモチ菌の飛散のデータ¹³⁾等を利用して貰い、解析をしました。

大気拡散の機構

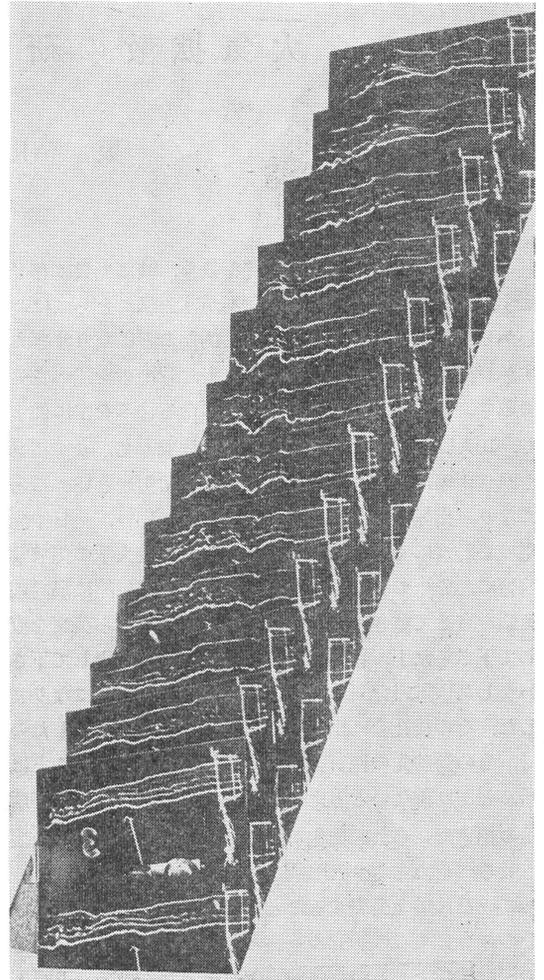
このような拡散の実測データの解析で、拡散の式の形が次第に裏づけされて来たのでありますが、一方もっと基礎的な事を知る必要を感じ、メタルデハイドの1mm位の大きさの羽毛状の結晶を夜野外で飛ばし、(第2図)これをストロボで連続的に立体写真にとり、各瞬時の3次元的位置を定め、位置の標準偏差 \bar{x}^2 , \bar{y}^2 , \bar{z}^2 を直接求め、一方その位置から各瞬時の Lagrange 的な速度変動 u' , v' , w' が求められ、Lagrange 相関 R_x , R_y , R_z が求められるので、Taylor の式、例えば z (鉛直)方向の式

$$\bar{z}^2 = \overline{w'^2} \int_0^T dt \int_0^t R_z(\xi) d\xi$$

を用いて左辺、右辺それぞれを計算して比較するとよく合う事が確められました¹⁴⁾。又分子拡散ならばそれを実行する作用因子は気体分子であって、その熱運動のため混在する別の粒子が次第に散らばって行くことはよく知られています。しかし大気(乱流)拡散の場合どういふ作用因子が働くのかをはっきりつき止める必要を



第2図 粒子による Lagrange 的な測定



第3図 乱流拡散の機構

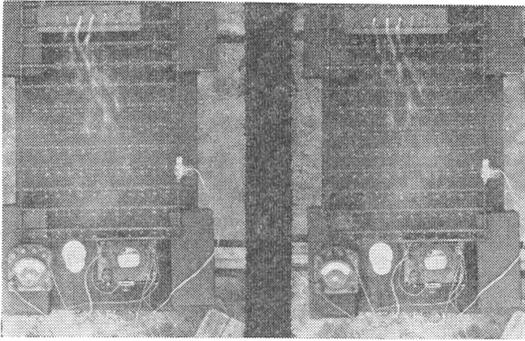
($\Delta\tau=0.06$ sec 毎の写真を順次に上に重ね、またその各々は $U\Delta\tau$ づつ風上にづらしてある。従って同一の鉛直線上にはほとんど同一の煙の部分が存在していることになる。ただし U は平均風速である。)

感じました。野外で小さいニクロムコイルにつけたペストを電流によって熱すると、濃い持続した煙が出ます。この煙は源から出た暫くは必ず直線であり、それが次第に直線でなくなり凸凹が生じ、更に次第に変形を強めて行き、この状態を立体映画にとり、これからその変形の状態を3次元的に測定すると、明らかにその変形は廻転性を示しています(第3図)、一方大気中の中に大小様々、廻転も

いろいろの向きや大きさの円筒状の渦があるとして、その渦が源のところを通過したら煙の形（流跡線）は時間的にどうなるかを計算して見ると、その時間的経過は前の測定結果に一致します。そしてその変形を起す、源を通った渦の大きさや強さが推定出来ます¹⁵⁾。

大気の乱れの微細構造

拡散の研究に一時手が出せなかったとき、大気中の風の息（風速、風向の変動）は何故起るかを確かめようとして、初めに数cm 間隔の6本の熱線風速計の出力を同時記録すると、その曲線の形は互いに関連のある特殊の形を示して、乱れに空間的の構造があることが推定され、それを調べると円形断面の渦がそこにあると解釈すべきでありました。その後小さい（2 cm位の）風向計や更に独特のタンポポの穂で作った風向計を、多いときは740個ばかりつけて立体映画にとりこれからそれぞれの風向計の頭と尾の3次元的位置を定めて風向を決定して円形断面の長い渦が存在することがつきとめられました¹⁶⁾。（第4図）。先年山中湖ヘスケートに行ったとき朝



第4図 タンポポ風向計による微細の乱れの測定

湖の面上に霧が細い糸のようになり動いて行くのが見られましたが、これは今の円筒状の渦の芯を表していたもので、興味深いものでありました。

このような解析から出た渦（数cm～数10cm）と、前に述べた拡散の作用因子としての渦とが一致しており、又位置の variance ($\overline{x^2}$ 等) がどのようにして生じるかが一応は理解出来るようになりました。

気象パラメーターと拡散パラメーター

拡散の式の形は一応の結論が出たので、次にその式の中には気象状態によって異なるべきパラメーターがあり、これがどのように気象状態と関連をもつかが次の問題になります。

大気拡散は作用因子は大気中の渦であり乱れであって、本質的には大気中の乱れの分布すなわち乱れの構造

丈によって拡散が左右されるものであります。例えば温度の高い煙がどこまで上昇するかという問題には確かに気温の鉛直分布が直接にきて来るが、拡散丈についていえば気温の鉛直分布は直接に効いて来るものでなく、それが乱れの構造に影響を与えて、間接的に作用するものでありまして、拡散に関しては乱れの構造丈で充分であります。しかし現在の計器で比較的簡単に乱れの構造（特に鉛直分布）を知ることはまだ不可能であり、現在は気層の安定度の状態を考慮に入れて何とか乱れの場、従って拡散の状態を推定しようとしています。勿論これは一応のやり方であり、まだ不完全なものであります。

安定度の表し方も Richardson 数、安定度比、安定度度長等による表し方がありますが、これらは局所的な値であり必ずしも拡散の行われている気層全体の性質を表しているともいえないか、又あるものはどの高さの量を用いるかによって値が異なるものもあります。私自身は近似的にも気層全体での量で表わす一つの方法を提示しましたが¹⁴⁾、外国の例にとらわれずにもっと物理的に意味のはっきりしたやり方を研究する人が増すことを期待したいものです。

風洞実験

大気の流動、拡散現象を再現し実験する手段に風洞実験があり、大規模な現地の観測は困難なので、それが任意の状態で調べることができる為に極めて有効なものであります。

流動現象でやや大規模なもの、すなわち山や丘のまわりの流れ、大きい建物による down draught 等は極めて厳密に云わなければ、乱れの影響があまり大きくないので、定性的には多くの利用場面がありまして、これについては多くの研究があり、今日でも尚いろいろの基礎的実験が少々無秩序と思われる位に行われています。

一方拡散の風洞実験には乱れの構造が大きい影響を与えるばかりでなく、定性的よりも定量的な結果を期待するため、簡単ではありません。拡散実験についてもいろいろの相似律が提唱されていますが、それらは平均速度分布を基準にしてその対応を考えています。しかし層流と乱流とはたしかに平均速度分布は異なりますが、乱流の場合乱れの構造が相当に異っても風速分布は測定によって区別出来る程には変わりません。従ってそのように理論は、理論としては意味があっても、実際には無力なものです。われわれは初め風洞の設計には乱れが極めて少いようにしておき、それに乱流発生装置を入れて、性質の知れた乱れの場を作り、その場の中で拡散をやらせま

す。その乱れの場については平均の速度の他各成分の変動速度分布や、必要に応じてスペクトル等を測ります。発生装置により、変動成分の鉛直分布や風下分布は大きく異なります。しかし平均速度分布は殆んど変わりません。しかし拡散の状態は非常に異なります。このように風洞内の乱れは発生装置によって多種多様のものが出来ます。一方大気の乱れも安定度、粗さ等が直接間接に影響してやはり千差万別の場合が生じます。従って風洞内の乱れの一つの状態が大気のどの状態に対応するかを、純粹に理論的に定めることは少くとも現在では無理であり、それをあたかも対応づけができるように取扱う理論は、現在では妥当なものと言えません。そこで私は極めて単純すぎる方法かも知れませんが、ある地形模型について拡散実験をしたとき、その場合の発生装置によって生じた乱れによる拡散状態を知るため平板をおき、その上での拡散を調べ、用いる地形模型の縮尺比によって現地の場合に換算し、ある風下距離のところでのどの位の広がりを持つ濃度分布になるかを計算します。一方従来の多くの平坦地での野外の拡散のデータを総合してありますので、ある濃度分布を示すのはどのような気象状態であるかを一応定められる程度の結果がありますから、前に述べた換算から得られた濃度分布に対応する気象状態が定められるので、それが風洞内のその場合の乱れに対応する気象状態であるとする方法であります。この方法はこの場合の拡散現象を対応させる最も直接的な、曖昧さのないものであります¹⁷⁾。

この場合にもし分布の標準偏差が風下距離(x)に比例する領域の中にあるならば、縮尺に無関係であります。もし \sqrt{x} に比例する領域の中にありますと、これは殆んどすべての拡散の調査ではこの領域が主に問題になります。模型が小さいと、同じ風洞の乱れの状態でも、大きい模型の場合より分布が広がることになり、乱れの大きい、より不安定な大気に対応することになります。

またどのような発生装置を使ったら、どんな構造の乱れが出来るかということは、充分なしかも一般的な結論を得ている状態ではありません。少しづつこの基礎をかためつつあります。従って全く任意の大気の乱れの状態に対応する風洞内の乱れを作るということはまだできません。しかし一応の結論らしいものが出来るのは時日の問題でありましょう。

時たま風洞実験の価値に疑いをもたれる意見があるとか聞きます。現在すべて完成したとはいえませんが、一

つの風洞実験が現地のどのような大気状態に対応するかは明瞭になっていますので、決していいかげんなものではなくて来ています。

従来の拡散実験は煙を使って目で見たり写真にとったりしていました。野外では特別な安定な状態では1 km程度まで見られますが、一般にはせいぜい4~500 mまでしか有効でありませんし、定量的なところまで云々するのははまだ問題がいろいろ残っています。風洞でも定性的には煙も充分意味がありますが、少しくわしく調べようとするとも何もわからなくなります。そこで何かを放出してその濃度を、特に3次元的に測る必要があります。私のところも初めは熱を放出して熱電対で風下の温度分布を測ったり、ガス(プロパン)の濃度を干渉計で測っていましたが¹⁹⁾、精度といい労力といい問題が多く、今はガスクロマトグラフの水素焰検知器を用いて、3次元的な濃度分布を自記記録させています。これによって何とか徹底的な測定が出来るようになりました¹⁷⁾。

現在は三菱重工の長崎研究所の人々の努力により、日本でも世界に誇れる拡散研究用風洞が、長崎、資源試、電力中央研、京大衛生工学科に出来、着々と成果をあげています。気象研の中野分室の風洞は、それらにくらべ大きさは違いますが、いろいろな結果を出しています。私のところは小さい風洞ですが、極めて使い易いようにいろいろな装置を整備しておりまして、他の大きい風洞の研究の基礎の部門を僅かの研究費と人員でやっています。この研究は今後も私のあまり長くない研究生活の大きい部分をしめることと思います。

結 言

いろいろとつまらぬ勝手な事を述べましたが、こんな事を云えるのも、私のところに配属された方々の献身な協力と、多くの研究仲間の厚意ある討論や援助によるものでありまして、心から感謝すると共に今後の御援助を願いたいと思います。

文 献

- 1) On the Character of Vortex "To Stand Perpendicularly On Walls", 1934. Proc. Physico-Math. Soc., Japan, 16 (1). pp. 16-34. (Collaborator:- Nomoto, O. and Fujii, Y.)
- 2) 地面附近の渦動拡散 1941, 気象集誌 II 19(9) 1~7
- 3) On the Atmospheric Diffusion of Gas or Aerosol Near the Ground, 1956, Natural Science

- Rep., Ochanomizu Univ. **7**, (1), pp. 25-61
- 4) Methoden zur Richtungsmessung mittels Hitzedratmesstechnik mit X- und V-Sonden 1964. Mitteilung 64-04, Deutsche Luft- und Raumfahrt, S.98-112(Mitarbeiter:-Fiedler,H.)
 - 5) On the Turbulent Diffusion in the Atmosphere near the Ground, 1954. Nat. Sci. Rep. Ochanomizu Univ., (1), pp. 79-91.
 - 6) —II, Diffusion in a Region within 6 cm from the Source, 1956. ditto, **6**, (2), pp. 194-203 (Collaborator:-Matsuda,M.)
 - 7) 「水戸における小規模拡散実験結果の整理について」1959, 東海村原子力気象調査資料 No.64. 「昭和34年6月の拡散実験の解析」1959, 東海村原子力気象調査資料, No. 72. On the Analyses of the Data of the Tokai Experiments, 1961, Nat. Sci. Rep., Ochanomizu Univ. **12** (1), pp. 7-27.
 - 8) Diffusion Experiments Using Balloons, 1962, ditto, **12** (2), pp. 1-24.
 - 9) On the Distributions of Dusts from Chimneys in the Neighbourhood of a Factory, 1963, ditto, **14** (1), pp. 17-36. (Collaborator:-Kimura, Y. and Kato, M.)
 - 10) 「独立ベントからの vapour の拡散」1967, 日本海難防止協会, 滞留ガス研究委資料 G-19.
 - 11) On the Relations between the Diffusion Parameters and Meteorological Conditions, 1960, Nat. Sci. Rep., Ochanomizu Univ., **11** (2) pp. 127-259.
 - 12) On the Analyses of the Results of Observations in the Windscale Accident, 1962, ditto, **13** (1), pp. 11-21
 - 13) On the Vertical Atmospheric Diffusion Close to the Ground—An analysis of data of dispersion of conidio-spores, 1962, ditto,**13** (2) pp. 33-45.
 - 14) Lagrangian Measurement of Small Scale Atmospheric Turbulence by Floating Fine Particles, 1957, ditto, **8** (2), pp. 67-79, (Collaborator:-Mochizuki, M.).
 - 15) Some Considerations on the Mechanism of Atmospheric Diffusion 1959, ditto, **10** (1) pp. 19-30.
 - 16) On the Structure of the Atmospheric Turbulence Near the Ground, 1951. ditto, **1**. pp. 40-50; Proc. 1st Japan Nat. Congr. Appl. Mech., pp. 475-480.
—II, 1951, Nat. Sci. Rep., Ochanomizu Univ., **2**, pp. 52-61.
—III, 1953. ditto, **4** (2), pp. 201-212.
—IV,1955, ditto, **6** (1), pp. 75-88.
—V, 1956, ditto, **6** (2), pp. 183-193.
 - 17) 「最近の拡散に関する風洞実験」第14回風のシンポジウム特別講演, 1967, 12月
 - 18) Heat Diffusion Close to a Solid Wall in Turbulent Boundary Layer 1965, Nat. Sci. Rep., Ochanomizu Univ., **16** (1), pp. 21-36.
 - 19) Turbulent Diffusion in Turbulent Boundary Layers 1966, ditto **17** (2), pp. 33-43, (Collaborator:-Kato, M.)