

大気乱流拡散に関する風洞実験 (可視化による瞬間プルーム特性の評価)

小杉 淳* 永野雄霸** 松野文矢***

Wind Tunnel Experiments on Atmospheric Turbulent Diffusion.
(Evaluation of Relative Diffusion by the Flow Visualization)

Atsushi KOSUGI Yuuha NAGANO Fumiya MATSUNO

Abstract - A flow visualization experiments were conducted on turbulent diffusion in a wind tunnel. The features of instantaneous plume were detected for grid turbulence with $Re=52$ and large-scale turbulence with $Re=526$ excited by an active turbulence generator. Instantaneous plume characteristics that are relative diffusion and meandering diffusion were analyzed from brightness data of visualization image. In addition, a smoking nozzle that generate tracer and a slit lighting unit was designed for to obtain clear plume image. The present experiments clarified the instantaneous plume characteristics for two typical types of the turbulent diffusion, i.e., far field diffusion in the small-scale turbulence and near field diffusion in the large-scale turbulence under the effect of the plume's meandering motion.

Key Words : turbulent diffusion, meandering motion, relative diffusion, flow visualization

1. 緒言

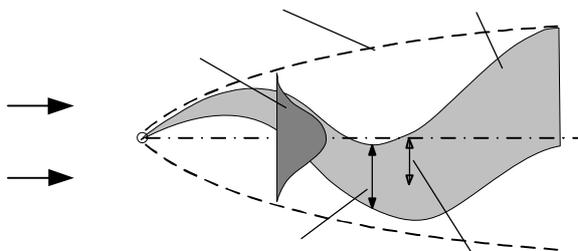
大気乱流拡散はプルームの蛇行運動に代表されるように、非常にダイナミックな挙動が見られる流体现象の一つであり、その特性を解明することは拡散モデルの構築のみならず乱流特性の理解という観点からも興味深い。これまで格子乱流場を主体としたモデル実験⁽¹⁾⁻⁽³⁾や数値シミュレーション⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾が行われ、濃度場の平均・変動特性が調べられてきたが、その多くは乱流拡散に本質的に寄与する乱れ強度や渦スケールが小さく、拡散時間が渦の寿命時間を越える長時間拡散場に相当している。しかし、実際の乱流拡散現象を理解する上では、プルームの蛇行による拡散が主体的となる短時間拡散場を再現できる濃度場での定量的な評価が重要となる。

筆者らは動的な乱流発生装置⁽⁷⁾を取付けた風洞を用い、乱流レイノルズ数 (R) を制御することで短・長時間拡散場を実現し、点源からの粒子拡散実験を行っている。これまでレーザ濃度計を使用し Taylor 型の濃度場⁽⁸⁾に相

当する平均特性および変動特性について、乱流場の規模の違いによる変化を報告してきた⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。しかし、拡散現象の深い理解のためにはプルームの瞬間的な挙動に着目した定量的評価も重要となる。この場合、レーザ等による点計測ではプルームの瞬間的な拡がりや蛇行運動を捉えることは困難であるため可視化を利用した画像計測が行われている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。Nappo ら⁽¹³⁾は大型加圧風洞によりプルームの蛇行を再現できる乱流中において可視化計測を行っているが、定性的な傾向を示すのみでプルームの瞬間挙動に関する詳細なデータは得ていない。そこで本研究ではプルームの瞬間的な挙動を可視化画像の輝度情報から評価し、プルームの瞬間的な拡がりである相対拡散ならびにプルームの蛇行運動の大きさについて定量的解析を試みることを目的とした。

2. 発煙ノズルおよび可視化用照明の製作

2-1. 発煙ノズルの製作 可視化実験で用いられるトレーサには様々なものがあるが、筆者らはレーザ計測において、流れ場への追従性や散乱光強度、また粒子の分散性がよく長時間安定して放出できることなどの条件から雪模型用活性白土(日本活性白土株)を使用してきた。しかし、予備的な可視化実験の結果、活性白土では拡散で希釈の進む測定領域下流において画像解析に十分な濃さが得られないことから、本研究では白色の濃いトレーサとなる揮発性の高い流動パラフィン等の液体を直接気化させてトレーサとして用いる発煙ノズルの製作を行った。本実験の場合トレーサは風洞内に設置される全長約 1.5m の空気導入パイプ(3)の先端に取付ける放出ノズルから直接発生させ供給しなければならない。これは別のチャンバー等でトレーサを気化して供給しても長い



* 釧路高専 機械工学科

** 株式会社フルヤ金属 (H17 年度卒業生)

*** 株式会社ニコン (H17 年度卒業生)

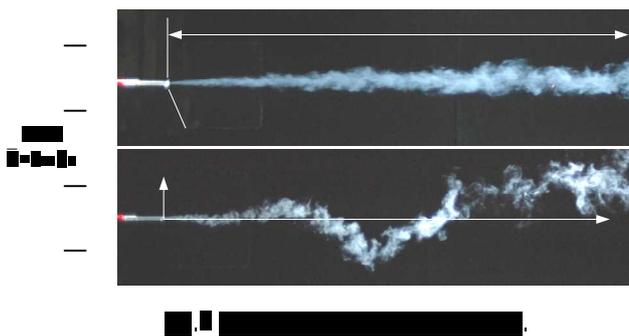
る。このノズルは乱流場の諸特性がほぼ平衡状態となる乱流発生装置下流 52M の位置に 9 本のテグス (0.5) を使用して風路断面中央に固定された空気導入パイプ (3) の先端に取り付けられる。発煙液には流動パラフィンを使用し、発煙部の発熱による浮力の影響が出ない範囲でできるだけトレーサが濃くなる様、流動パラフィンと電力の供給量を調整した。また、ノズルへの送風は図中 (c) に示す空気供給系により行われ、このときの噴出速度は可能な限りノズル出口近傍から速度場が一様になるように設定し、格子乱流場で主流の約 2 倍、乱流発生装置作動時でおよそ 1.4 倍程度とした。なお、座標原点は発煙ノズル出口とし流れ方向を X、鉛直方向を Y とした。

3 - 3 . 可視化実験 コントラストの高い可視化画像を得るため測定胴風路内壁には照明の乱反射を抑えるため黒色塗装または黒画用紙を貼り付けてある。撮影には一眼レフデジタルカメラ (Nikon D70) を使用し、使用レンズ (35mm, f1.4 開放) の画角の関係から $X/d=0 \sim 110$ と $100 \sim 200$ の 2 つの範囲に分けて可視化を行った。撮影は前述のストロボを流用したスリット光源を風路上部に設置し (スリット幅 2mm) , 実験室内を暗室の状態にした後、カメラのシャッターを開放、ストロボの発光時間を $1/2000$ 秒に設定して行った。なお、このときノズル近傍ではトレーサが濃く可視化画像の輝度値が飽和する場合があるため、3 台のストロボの内、最上流の 1 台については発光強度を適宜調整して実験を行った。

実験は主流流速 $U=5\text{m/s}$ のもと、乱流発生装置を作動させた励起乱流場 (Excited) と比較のため格子乱流場 (Grid) の 2 通りで行い、トレーサを含む気流は室外排気している。

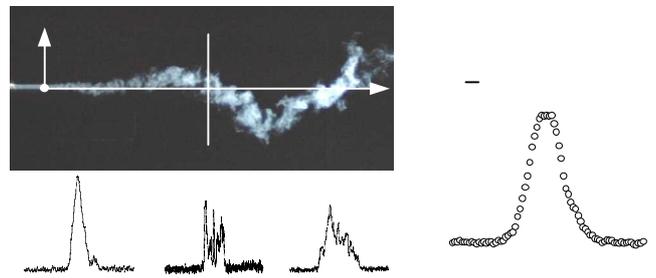
4 . 可視化画像の解析方法

ブルームの瞬間画像の一例を図 5 に示す。図よりブルームを鮮明に撮影できていることが確認でき、この画像から本研究では以下に述べる方法でブルームの瞬間幅である相対拡散の大きさおよびブルームの重心位置の変化 (蛇行の規模) を評価した。なお、画像解像度は 3pixel/mm 程度であり、解析は $X/d=10 \sim 200$ の範囲で 20 の Y 方向断

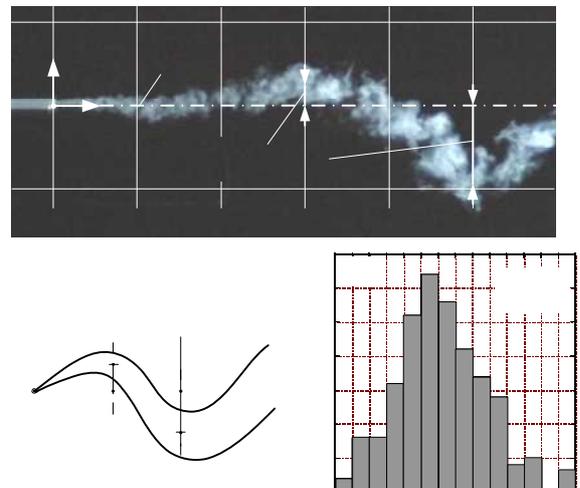


面について行った。

4 - 1 . ブルームの瞬間幅の抽出 本研究では撮影した可視化画像からブルームの瞬間幅を求めるため、図 6(a) に示すように解析対象断面の輝度分布 (グレースケール 8 ビット 256 階調) を抽出した。この輝度分布は、画像毎に大きく形状が異なり瞬間幅の算出が難しいため、本解析ではサンプル数を数十枚程度にして図 6(b) に示すように各段面の輝度分布を平均化したデータから確率密度分布 (PDF) を求め、これに正規分布を適用することでその分散値 (σ^2) からブルームの瞬間幅を評価した。なお、輝度分布の平均化に際しては画像のバックグラウンドレベルが同程度になるよう調整を行い可視化画像間のばらつきを抑えた。



4 - 2 . ブルームの蛇行重心の抽出 図 7(a) に示すようにノズル中心軸上から解析対象断面におけるブルームの中心 (重心) までの距離は、画像処理ソフトを使用し画面上で目測により求めた。サンプル数は蛇行運動のほとんど見られない格子乱流場では数十枚程度としたが、励起乱流場ではブルームの拡散が進行し下流ではその重心位置を明確に決定することが難しいことと、解析者の主観による誤差を抑えるため各測定断面で 300 枚程度にし

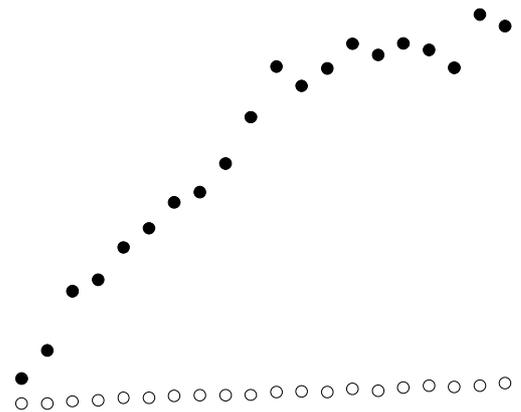


て計測の信頼性を上げるよう配慮した。重心位置の変化は図中(b)に示すようなヒストグラムとして表し、出現回数 n の極端に少ないデータを削除した後、統計処理により蛇行の大きさを分散(σ_m^2)として算出した。

5. 実験結果および考察

5-1. プルーム瞬間幅(相対拡散)

図8にプルーム瞬間幅(相対拡散)の流れ方向変化を対数表示したものを示す。また、図9は相対拡散を模式的に表したもので、図中 t は拡散時間(Taylorの凍結仮説により流下方向距離に相当)である。Richardson⁽¹⁶⁾によると乱流場の渦スケールが小さいか、拡散時間が十分長く乱流場の最大渦スケールよりプルームの拡散幅が大きな場合、図9(a)のような傾向を取る。一方、乱流場のスペクトル中に慣性小領域が存在するような規模の大きな乱流場の場合、Batchelorの理論⁽¹⁷⁾によって示された、図9(b)のようにその途中に拡散時間の $3/2$ 乗でプルーム幅が急激に広がる領域があることが知られている。本実験の場合、渦スケールの小さい格子乱流場は(a)の拡散時間が渦の寿命時間を越える長時間拡散に対応し、励起乱流場は拡散時間が渦の寿命時間を越えない(b)の短時間拡散⁽⁹⁾にほぼ相当している。このことから単に乱れや渦スケールの大小によって相対拡散の大きさが相似的に変化するわけではなく、プルームに作用する渦スケールの大きさにより相対拡散の進行に大きな違いが生じることを理解できる。また、励起乱流場の結果に見られるプルーム幅が下流方向に $3/2$ 乗で増加傾向は、実地観測を除き室内実験レベ

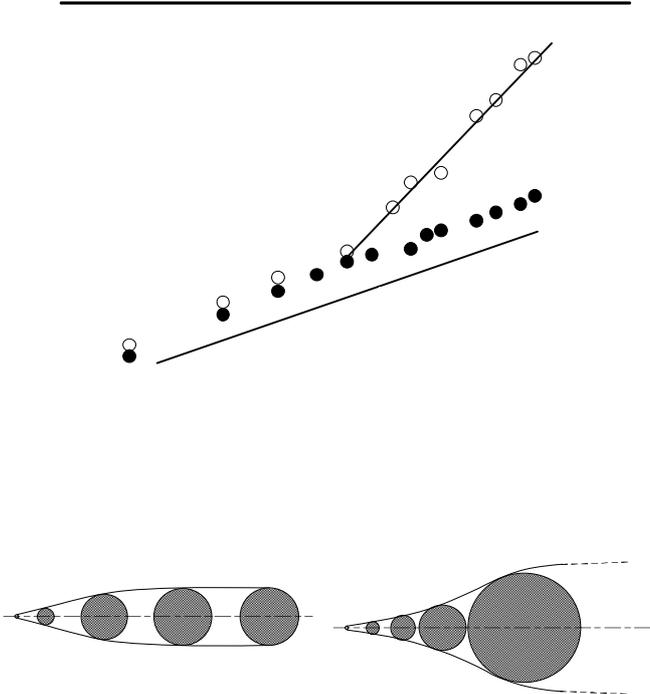


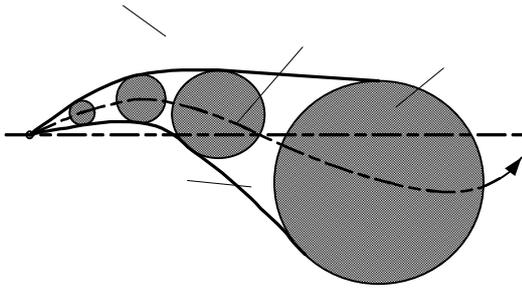
ルで定量的に求められている例は極めて少なく、本実験が大気乱流拡散をある程度模擬できうることを示すものであり、今後、主流流速の変化等により異なる Re の場でのデータ収集から相対拡散の更なる理解が望まれる。しかし、両乱流とも図9に見られる放出源近傍においてプルームの幅が拡散時間に比例する傾向は見られない。これは主流に対してノズルからの噴出速度が速くプルームが渦による拡散効果を受けにくいこととトレーサ放出源が完全な点源ではないことなどが考えられる。また、励起乱流場では、より下流で $r \propto t^{1/2}$ の傾向をとることが予測されるが、プルームの拡散が測定胴壁面付近まで大きくなり $x/d > 200$ のデータ収集を行うことができず本実験では確認できなかった。

5-2. プルームの蛇行による拡散

図10にプルームの重心位置変化 m の下流方向変化を示す。励起乱流場の場合、下流方向に大きく増加していくが $x/d = 120$ 付近からその傾向は緩やかとなっている。これはプルームの蛇行運動はプルームの幅が乱流場の最大渦径(インテグラスケール)よりも小さな場合ほど顕著であることに対応している。したがって放出源に近いほど濃度特性にプルームの蛇行が大きく影響を与えることがわかる。一方、格子乱流場では図5に示した可視化画像からもわかるように、プルームの蛇行を誘起できる渦スケールが存在しないため蛇行運動による重心変化は非常に小さなものとなっている。

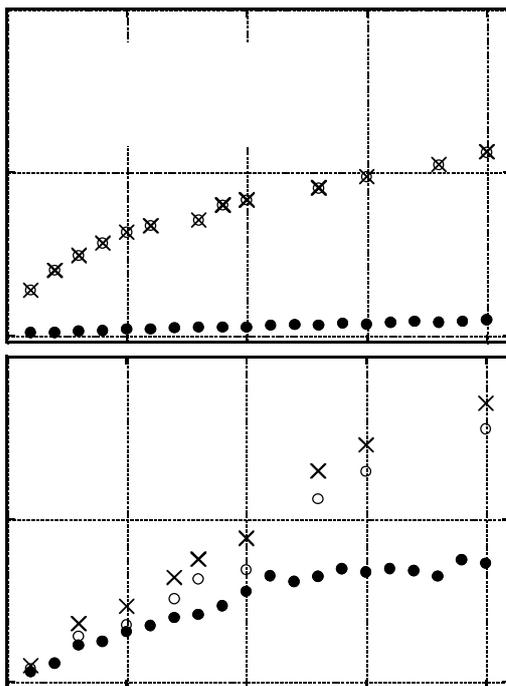
以上、述べたように大気中の乱流拡散はプルーム内の相対拡散とプルームの蛇行による重心位置変化が重ね合う形態となり、図11に示した日野による模式図からも理解を深めることができる。この相対拡散によるプルームの拡がり σ_r と蛇行によるプルームの拡がり σ_m の間には $\sigma_t^2 = \sigma_r^2 + \sigma_m^2$ の関係があることが知られている。ここで σ_t は全拡散といわれるTaylor型の拡散すなわち平均濃度分布の広がりに対応する。本実験でも当初これに相当す





る長時間露光写真から τ を抽出し、上式より τ と m の可視化計測に対する妥当性を検証する予定であったが、SN比の高い可視化画像を得るれず求められなかった。このためここでは本実験で求められた τ と m から τ を算出しプロットしたものを図 12 に示した。プルームの平均的な幅以下の小さな渦スケールしか存在しない格子乱流場では、全拡散に対する蛇行の効果はごくわずかであり、拡散の主体は相対拡散であることがわかる。これに対し励起乱流場では蛇行による効果がとくにトレーサ放出源近傍で顕著に見受けられる。しかし、 $X/d=120$ 付近からは先ほども述べたようにプルームが相対拡散である程度広がってしまい、蛇行による割合は緩やかなものとなり一定値に近づく傾向にある。

今後も実験技術の向上を図りながら可視化実験を行い、濃度場の情報から間接的に乱流特性量の算出を行うことで実験精度の確認や、相対拡散やプルームの蛇行に関する



様々なモデルとの検証を進めていく予定である。

6. 結論

可視化による大気乱流拡散に関する風洞実験を行い以下の結論を得た。

- (1) トレーサ発生用の発煙ノズルとカメラ用ストロボを流用したスリット照明を製作することで、鮮明な瞬間プルームの可視化写真を得ることができた。
- (2) プルームの瞬間幅すなわち相対拡散の大きさは、乱流場のスペクトルに明確な慣性小領域が認められる乱流レイノルズ数の大きな励起乱流場では Batchelor の理論に示される拡散時間の $3/2$ 乗で急激に広がる領域が見られた。一方、乱流レイノルズ数が小さく拡散機構に作用する渦スケールが限られる格子乱流場では拡散時間の $1/2$ 乗で緩やかに広がる。しかし、両乱流場とも放出源近傍では Batchelor の理論（拡散時間に比例）とは一致せず、これは放出源が完全な点源ではないことと、ノズルからの噴出しによる影響のためと考えられる。
- (3) プルームの蛇行による拡がり（重心位置の変化）は、励起乱流場の場合、拡散時間が渦の寿命時間を越えず、プルームの蛇行による拡散が支配的となるため下流方向に大きく増加していくが、 $X/d=120$ 付近から相対拡散による拡がりとともにその増加傾向は小さなものとなっている。一方、長時間拡散に相当する格子乱流場では、拡散の主体は相対拡散となるため蛇行による拡散は非常に小さい。

参考文献

- (1) Gad-el-Hak, M. & Mrton, J.B., AIAA, 17(1979), 17, 558
- (2) Nakamura et. al., JFM, 178(1998), 379
- (3) Yee, E. & Wilson, D.J., Boundaly Layer Meteology, 94(2000), 253
- (4) Hanna, S.R., Atoms. Environ., 18-6(1984), 1091
- (5) Squirers, K.D. & Eaton, J.K., JFM, 226, (1991), 1
- (6) Sykes, R.I. & Henn, D.S., Atoms. Environ., 26A-17(1992), 3127
- (7) Maikita, H., Fluid Dyna. Res., 8(1991), 53
- (8) Taylor, G.I., Proc. Lond. Math. Soc., 20(1921), 196
- (9) 小杉他 2 名, 機構論(2000), No.002-1
- (10) 小杉他 1 名, 流体工学部門講演概要集(2005), No.05-32
- (11) Deardorff, J.W & Willis G.E., Atoms. Environ., 18-7(1984), 1297
- (12) Olivari, D & Palli, E., Atoms. Environ., 25A-8(1991), 1635
- (13) Nappo C.J., Atoms. Environ., 18-2(1984), 299
- (14) 小杉他 3 名, 釧路高専紀要, 37(2003), 11
- (15) 小杉他 1 名, 釧路高専紀要, 34(2000), 7
- (16) Richardson, L.F., Proc. Roy. soc. A110(1926)
- (17) Batchelor G.K., Proc. Cambridge Phys. Soc., 48(1952), 345