

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月14日現在

機関番号：50103

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560181

研究課題名（和文） 蛇行プルームの断面可視化による拡散物質濃度測定と拡散モデルの構築に関する研究

研究課題名（英文） A study on concentration measurement of diffusion matter and construction of diffusion model by visualization of area of a meandering plume.

研究代表者

小杉 淳 (KOSUGI ATSUSHI)

釧路工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：60290673

研究成果の概要（和文）：蛇行運動を伴う粒子の乱流拡散現象が小型風洞に装着されたアクティブ・グリッド（動的乱流発生装置）により形成された近似大気乱流場で調べられた。蛇行拡散現象についてデジタルカメラを用い瞬間可視化画像の解析を行った。乱流拡散は多数の瞬間可視化画像から輝度値を抽出し、統計処理することで評価された。乱流場の規模を表す指標である乱流レイノルズ数に対して、全拡散における相対拡散と蛇行拡散の割合が求められた。これらの拡散パラメータは Lee & Stone のモデルと良い一致を示す。

研究成果の概要（英文）：The characteristics of turbulent particle diffusion were investigated in atmospheric like turbulence generated by an active turbulence generator installed to in a small wind tunnel. Turbulent diffusion was estimated by extracting the brightness value from a large number of instantaneous visualization image, and are statistical processing. Contribution of relative diffusion and meandering diffusion in total diffusion is obtained for turbulent Reynolds number that index on scale of turbulent field. And those diffusion parameters were reasonable agreement with Lee & Stone's model

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：乱流拡散，蛇行プルーム，風洞実験，可視化画像計測

1. 研究開始当初の背景

大気汚染の予測技術を確立することは公害を引き起こす様々な化学物質の環境リスクを評価する上で必要となる。このうち煙突など汚染物質放出源の比較的近傍で観察されるプルーム（汚染物質のガス雲）の蛇行を伴う拡散現象

のモデル化は、生活圏における汚染物質の高濃度輸送などの観点から特に重要性が高い。しかし、蛇行プルームおよびそのプルーム内部の濃度特性（相対拡散）については、実験および計測の困難さから定量的実験データおよびモデル化は十分進んでいない背景がある。

2. 研究の目的

工場などから排出されるばい煙や汚水は、大気・海洋等の流れの作用により拡散・希釈されるが、この拡散現象を正確に理解し有害物質の生活環境に与える影響を調べることは環境評価において極めて重要である。大気中の渦の作用によっては有害物質が高濃度のまま地表近くまで輸送されることがあり、生活環境の評価においては汚染物質の平均的な広がりだけではなくプルームの大きな蛇行の環境への評価を考慮に入れた拡散予測モデルの構築が急務である。このためにはプルームの瞬間的な挙動（蛇行の大きさや瞬間的な広がり幅）とプルーム内部の濃度特性（平均濃度と変動濃度）の把握が必要となる。特に乱流中の大きな乱れと渦運動に起因するプルームの蛇行を伴う乱流拡散現象の再現は難しく、プルームの蛇行が支配的となる拡散現象の定量的評価から現象の理解やモデル化が望まれている。そこで本研究では可視化実験より得られるプルームの流れ方向断面の画像解析からプルームの瞬間挙動を実験的に明らかにし、拡散現象の解明と拡散モデルの構築を目的とした。

3. 研究の方法

(1) 実験準備 ①速度成層形成装置の製作

本研究では、風洞内に任意の速度分布を形成できる速度成層形成装置の制作と、これを用い形成した一様せん断乱流場の特性評価を行った。図1に示す本装置は流路を鉛直方向に主流と平行に等間隔に仕切りその中に金網や有孔板などの抵抗体を挿入してせん断流れを形成する Champagne 式を採用した。流路の分割数は乱流発生装置の回転軸と同じ 15 とし、仕切られる流路の中には3つのスリットを設け、この

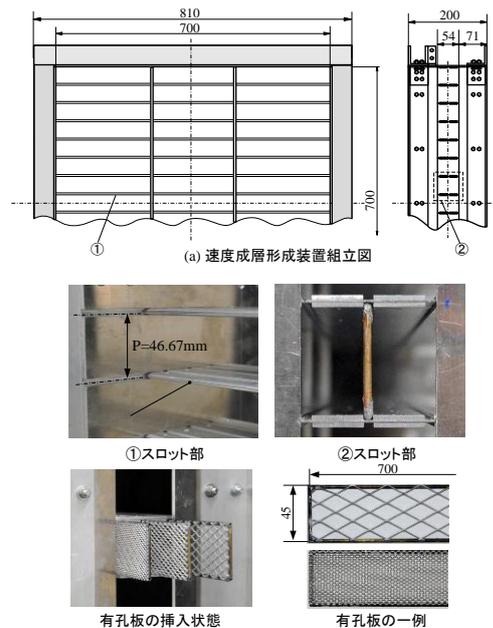


図1. 製作した速度成層形成装置の概要

部分に開口比の異なる抵抗体を挿入し任意の速度分布を得ることができる。一様せん断乱流場の評価は熱線風速計とX型プローブを使用し、異なる勾配を持つ一様せん断流れ場を形成するのに必要な有孔板の組合せを求めるとともに、拡散実験を評価するため基本的な乱流特性量の算出を行った。

②デジタルカメラのリニアリティ補正の確立 本研究ではプルームの画像から輝度値を抽出し濃度評価を行う。可視化に一般撮影用デジタルカメラを用いる場合、その感度特性が人間の視覚特性に合わせ補正がなされており、入力光量と出力の関係は非線形性を示す。本研究では以下の方法で感度特性を求め、この逆関数を乗じ輝度値の補正、すなわち濃度のリニアリティ補正を行う方法を検討した。図2に感度特性測定実験の概要を示す。実験は暗室内で一定光量を放出する白色LEDビューアーの画像をカメラの露光時間を適当に変化させ撮影し、入出力光量の関係を調べた。撮影には一般撮影用のデジタルカメラとして Nikon D300 を使い、比較のためリ

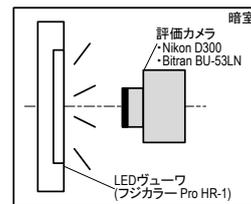


図2. デジタルカメラの感度特性評価実験概要

ニアリティの確立している計測用カメラ Bitran BU-53LN でも行った。また、両カメラとも輝度値の算出では、ダーク補正およびフラット補正を行った。

(2) 拡散実験 図3にプルーム断面可視化実験の概略を示す。風洞は風路断面 $0.7 \times 0.7 \text{ m}^2$ 、長さ5mの測定洞を有する吹出し型である。乱流発生装置（アクティブグリッド）は多数の攪拌翼を振れ角 $\pm \theta$ (deg) でランダムに回転させることで、乱流場の規模を表す指標である乱流レイノルズ数 (R_λ) を変化できる。トレーサ（活性白土、嵩密度=0.6）は粒子分散装置を通し、ノズル（内径 $d=5\text{mm}$ ）から定常的に放出した。ストロボ7基から成る可視化照明は測定洞上部に設置し、幅約10mmのスリット光として用いた。プルーム断面の撮影にはデジタルカメラ（Nikon D300）を用い、撮影は実験室を暗室状態にした後、カメラのシャッター開放し、ストロボを発光（約 $1/3200$ 秒）させて行った。なお、撮影はノズル噴出口を原点とし、下流方向に約 $X/d=0 \sim 300$ の範囲でおこなった。実験条件は図3中の表に示すように主流流速 $U=5\text{m/s}$ とし、アクティブグリッドを制御することで5種類の異なる R_λ を持つ乱流場を成形した。表中の u' / U , Lux はそれぞれ流れ方向の乱れ強度、渦スケールを示す。なお、撮影枚数は R_λ の値に応じ、1000~7000枚程度とした。

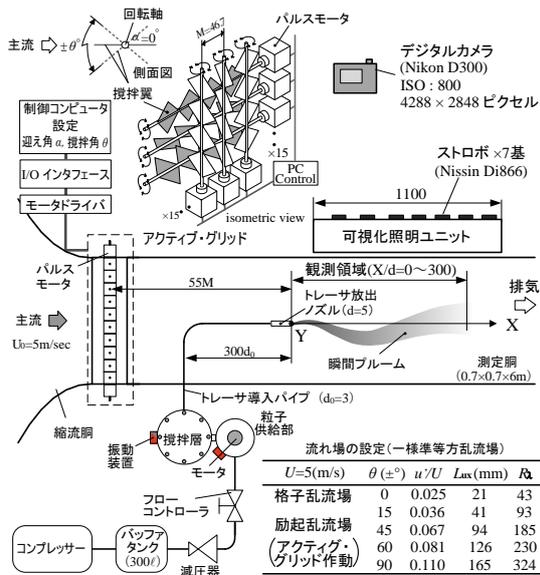


図3. 可視化実験の概要と流れ場の設定

(3) 解析方法 図4に可視化画像の解析方法を示す. 図中(a)に示すようなブルームの可視化画像はRaw現像時にグレースケール化し, $X/d=10\sim 280$ の範囲において $X/d=10$ おきに Y 方向の瞬間輝度分布を抽出した. 合わせて図中(b)のように重心を基準とした座標で平均化したブルームの瞬間幅 σ_T (σ :標準偏差), 絶対座標で平均化した全拡散の拡がり幅 σ_T , 重心位置とノズル中心軸との距離 σ_m を求めた. ただし $R_\lambda=324$ の場合, ブルームの蛇行が大きく測定胴の壁面に達するため解析範囲を $X/d=10\sim 150$ とした. なお, 解析で得られた輝度値は, 輝度と濃度の関係が比例するよう

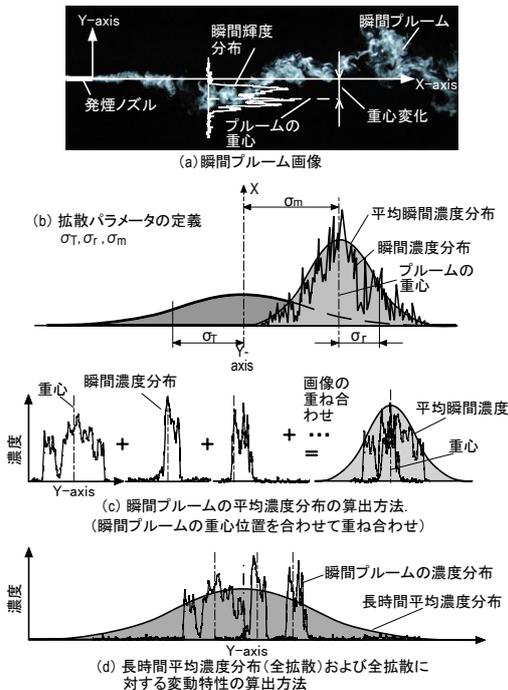


図4. 可視化画像の解析方法概要

カメラの特性に合わせたリニアリティ補正を行い, 平均濃度分布を可視化照明の光量変化の影響を受けないP.D.D (確率密度分布) で評価した. また, 画像解像度は0.4mm/Pixelである.

4. 研究成果

(1) 一様せん断乱流場の形成 図5は速度成層形成装置に挿入した有孔板のパターンを示したものである. 表中の記号U.M.Dは図中に示す有孔板挿入スロット部への挿入順番であり, 有孔板には各抵抗板の開口率を示した. 有孔板挿入による速度分布の変化は, その上下に配置される有孔板との相互干渉による非線形現象となるため, 有孔板の組み合わせでどのような速度分布となるかは理論的に予測出来ない. 図6は図中に示した9種類の有孔板を試行錯誤的に組み合わせで一様せん断流れを形成した結果である. なお, 格子乱流場での実験をCase1~3とし, 励起乱流場での実験をCase4~6として表している. また, Case1とCase4は比較のために行った有孔板を挿入していない非成層状態を表す. 多少ばらつきはあるが, 良好な速度成層流れを形成できることが確認できた.

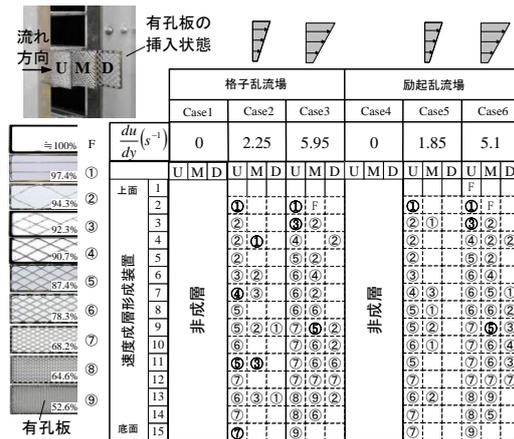


図5. 一様せん断乱流形成時の有孔板挿入パターン

(2) デジタルカメラのリニアリティ補正

図7に感度特性の実験結果を示す. グラフの横軸・縦軸はそれぞれ露光量・輝度値の最大値で無次元化してある. 図に示すようにD300の感度特性は対数曲線的な変化となる非線形であり, 輝度値=濃度として評価すると大きな誤差につながる事がわかる. そこで, このD300の感度特性の近似式の逆関数を求め, それを乗じることで補正が可能か確認するために図中に示す多階調チャートを撮影して評価した. 図8に多階調チャートの撮影結果を示す. 横軸はチャートの長さに対応し, 縦軸は最大輝度値で無次元化してある. 補正後のD300の結果は計測用カメラ(BU-53LN)とほぼ一致しており, 輝度の補正が良好に行われていることがわかる.

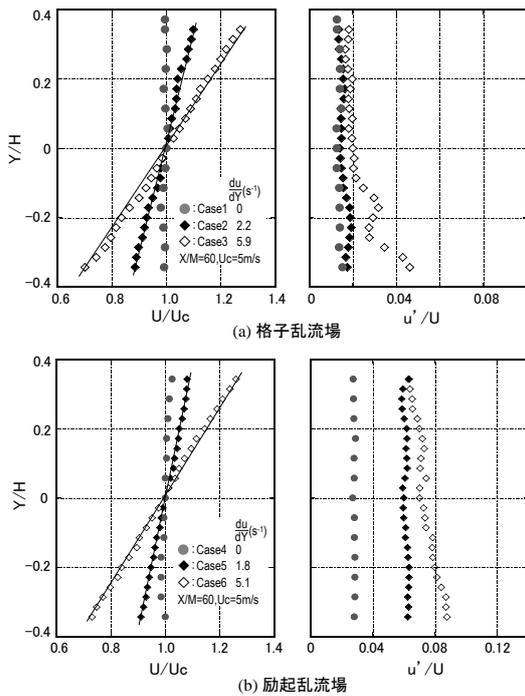


図 6. 一様せん断乱流場の平均速度分布および乱れ強度分布

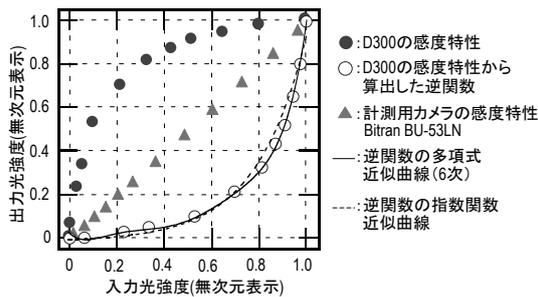


図 7. デジタルカメラの感度特性評価結果および逆関数の算出.

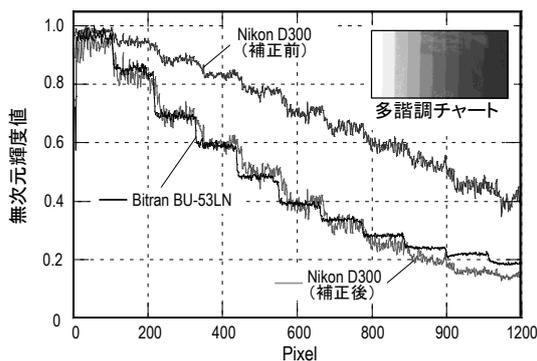


図 8. デジタルカメラのリニアリティ補正結果

(3) プルーム断面可視化による蛇行プルームの評価

①乱流レイノルズ数 (R_λ) の違いによる拡散形態の変化 図 9 に一様準等方乱流場における R_λ を変化させた場合の瞬間プルームの

流れ方向断面の可視化画像を示す. R_λ の値に対応して拡散の形態が変化し, R_λ が大きなほど蛇行運動が大きいことが理解できる.

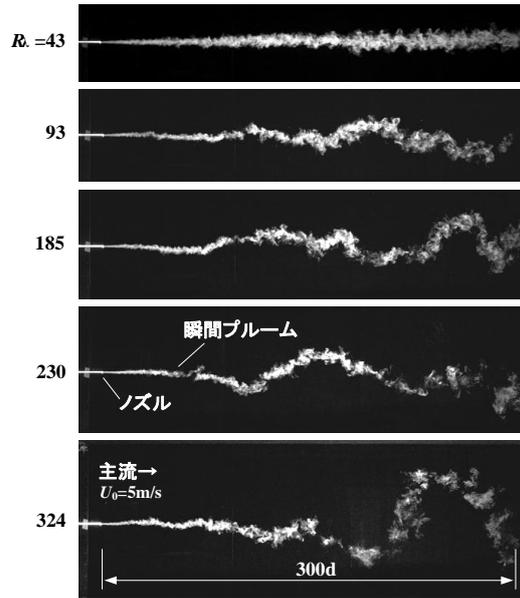


図 9. 瞬間プルームの流れ方向断面の可視化画像

②平均濃度分布 (全拡散, 相対拡散)

図 10 に $X/d=100$ における, 全拡散と相対拡散の輝度の存在確率密度分布 (P. D. D.) の R_λ 依存性を示す. 即ち単位鉛直方向距離 (Y/d) 当たりの輝度割合であり平均濃度分布に相当する. 全拡散および相対拡散とも平均濃度分布は, ほぼ正規分布曲線と一致しており, 各乱流場の計測範囲内ですべてにおいて同様である. 平均濃度の分布幅は R_λ の増加とともに拡大し, 同一主流速で, 乱れと渦スケールにより拡散能が大きく異なる拡散場を形成している. また, 分布は R_λ が小さい場合, 全拡散と相対拡散に大きな違いはないが, R_λ の増加に伴い, 蛇行による拡散も加わり粒子の存在範囲を広げるため, 相対拡散の濃度が相対的に高くなっていることがわかる.

③拡散パラメータの下流方向変化

図 11 に拡散パラメータ ($\sigma_r^2, \sigma_r^2, \sigma_m^2$) の下流方向変化 (拡散時間変化) を示す. なお, 全拡散の図にある実線は(1)式で表される Taylor の拡散理論式中のラグランジュパラメータ (u_l^2, T_l^2) を実験で得られた全拡散の分散値から最小二乗法で求め描いたものである. また, 同図中にはレーザ計測で得られた全拡散の結果を□で合わせて表示している. 全拡散の分散値は R_λ の増加に伴い, 可視化画像でも示したようにプルームの蛇行が大きくなるため急激に増加している. また, 本結果とレーザ計測の結果はほぼ一致して

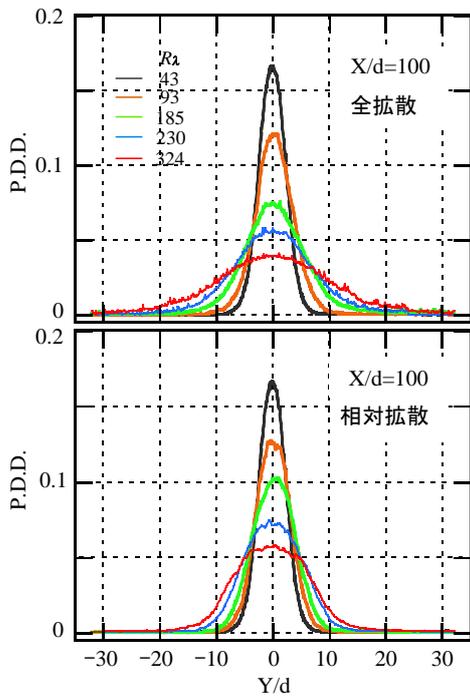


図 10. 平均濃度分布

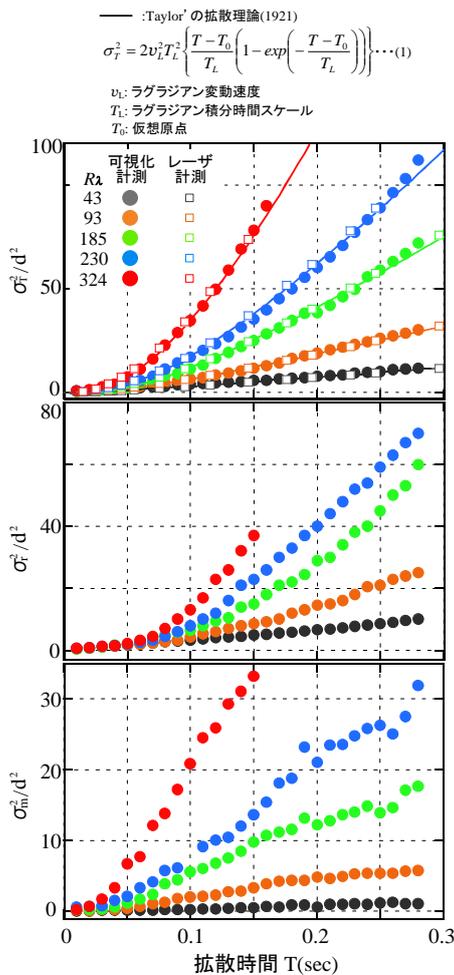


図 11. 拡散パラメータの拡散時間変化

おり、このことから本可視化画像計測の正確性が裏付けられる。相対拡散の傾向はほぼ全拡散

と同様であり、これは R_λ の増加によりブルーム内部の相対拡散に寄与する渦スケールも大きくなるためである。 σ_r^2 の傾向については後述する。蛇行拡散 σ_m^2 は格子乱流場ではほぼ無いが、 R_λ の増加にともない乱流場の渦スケールが大きくなり、ブルームを大きく揺さぶるような形で作用するため大きな値を持つ。

④ラグラジアンパラメータを用いた拡散場の評価 ③で述べたように本研究では全拡散の分散値から Taylor の拡散理論式にあるラグラジアンパラメータの算出を行った。図 12 はこれらパラメータを使い横軸縦軸とも無次元化した全拡散の分散値の流れ方向変化委である。拡散時間が乱流場の最大渦スケールを超えない場合、蛇行拡散が支配的な短時間拡散となり、超える場合は相対拡散が支配的となる長時間拡散となる。本研究では R_λ を変化させることで、一般に再現の困難な短時間拡散領域を含む長時間拡散領域までの拡散場を再現し濃度特性を抽出できていることがわかる。また、図 13 は相対拡散の分散値の無次元拡散時間変化を表したものである。Batchelor によれば、相対拡散の広がり傾向は図中に示したイラストのような傾向を取ることが知られている。ノズルからの噴出しや後流の影響により、上流側でデータの傾向にばらつきが見られるが、乱流場の速

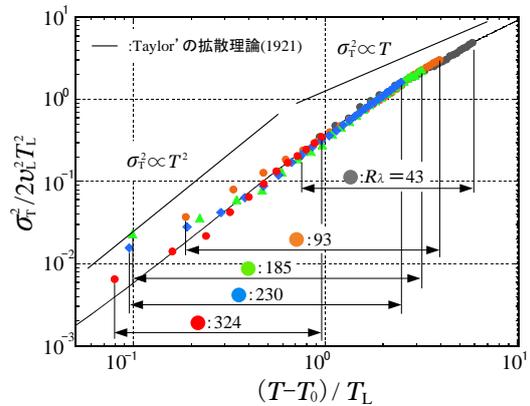


図 12. 全拡散の無次元拡散時間変化

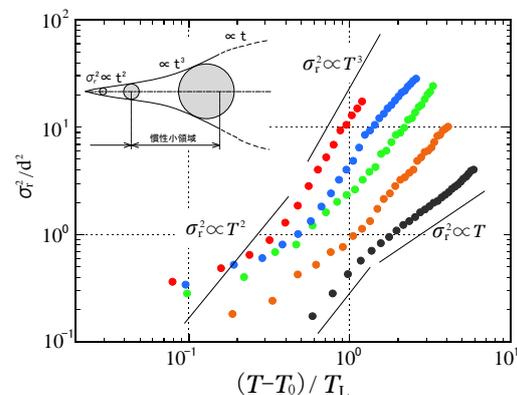


図 13. 相対拡散の無次元時間変化

度変動スペクトル中に明確な慣性小領域を有する規模の大きな乱流場では、イラストとほぼ同様な傾向が観測され、乱流場の規模が小さくなるにつれ、 $\sigma_r^2 \propto T^3$ に従う部分はなくなり、 $\sigma_r^2 \propto T^2$ から $\sigma_r^2 \propto T$ へ移行するようになる。

⑤Lee & Stone の理論との比較

Lee & Stone は、トレーサ放出源口径が有限の場合について、Gifford 理論を random-force theory に基づき拡張し、乱流場のラグランジアンおよびオイラー特性量から拡散パラメータ (σ_T , σ_r , σ_m) の時間変化を示した。図 14 は本実験結果と Lee & Stone のモデルを比較したものである。 $R_\lambda=43$ ではノズルからの噴き出しの影響が拡散場に残るため、放出原近くで σ_r と σ_m にモデルとの不一致が見られる。また、拡散場の大部分が長時間拡散に相当し、全拡散に占める蛇行拡散の影響は小さく、相対拡散が支配的である。この場合、理論的には蛇行拡散はトレーサ放出後の極短い拡散時間においてのみ相対拡散よりも支配的となる。しかし、実質的には蛇行拡散を観測することは難しく、 R_λ の小さな格子乱流場の拡散実験では、相対拡散のみによる拡散現象しか評価できない。一方、

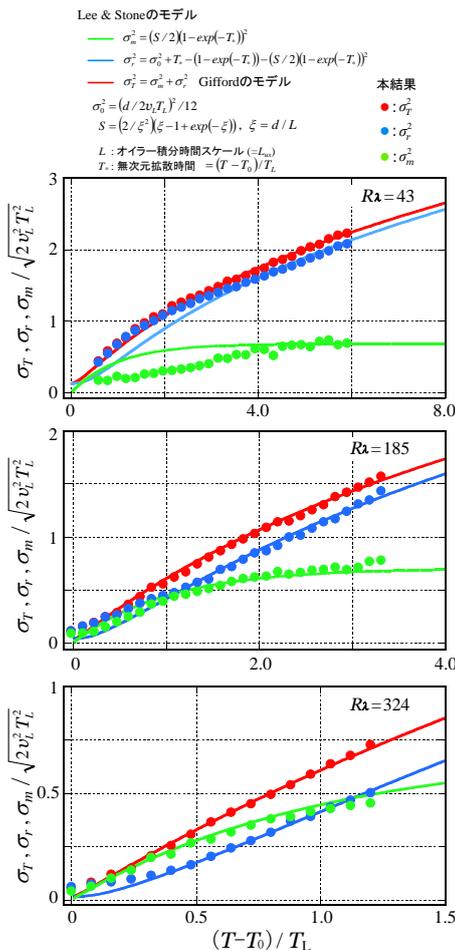


図 14. Lee & Stone のモデルとの比較

$R_\lambda=185, 324$ ではモデルとよく一致しており、特に $R_\lambda=324$ では測定領域のほとんどが短時間拡散に相当し、全拡散に占めるブルームの蛇行拡散の寄与が非常に大きいことがわかる。よって本研究は、モデル実験における蛇行現象を含む濃度場の数少ない定量評価の成功例の一つであり、ブルームの間欠性を伴うような濃度場の変動特性の評価に適していると言える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 3 件)

①小杉淳, 三間宏崇, 蒔田秀治, 風洞実験における速度成層形成装置の製作と流れ場の基本評価, 日本機械学会北海道支部講演会, H22.11.7, 札幌市

②小杉淳, 菅原稔, 関下信正, 蒔田秀治, 大気乱流拡散に関する風洞実験 (可視化画像の濃度情報抽出に関する較正方法の検討), 日本機械学会北海道支部講演会, H23.10.1, 旭川市

③Atsushi Kosugi, Hiroyuki Haniu, Hideharu Makita, Wind Tunnel Experiments on Turbulent Diffusion of Particles from a Continuous Point Source.(Variation of Mean Concentration Properties with Turbulent Reynolds Number.), IWMST 2012, H24.8.30, Tokyo

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小杉 淳 (KOSUGI ATSUSHI)
釧路工業高等専門学校 准教授
研究者番号: 60290673

(2) 研究分担者

関下 信正 (SEKISHITA NOBUMASA)
豊橋技術科学大学工学研究科 准教授
研究者番号: 70283489

(3) 連携研究者

蒔田 秀治 (MAKITA HIDEHARU)
豊橋技術科学大学工学研究科 名誉教授
研究者番号: 40135413