

令和元年6月27日現在

機関番号：50103

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06097

研究課題名（和文）大気拡散風洞を用いた蛇行ブルーム内部のライン画像計測による濃度変動特性のモデル化

研究課題名（英文）Modeling of characteristics of concentration fluctuation by line image measurement using an atmospheric diffusion wind tunnel

研究代表者

小杉 淳（Kosugi, Atsushi）

釧路工業高等専門学校・創造工学科・准教授

研究者番号：60290673

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：動的な乱流発生装置を装着した拡散実験用風洞を使用し、一様準等方性乱流場においてトレーサ粒子を放出することで蛇行ブルームの拡散現象（近距離拡散現象）を再現した。このときの蛇行ブルームの瞬間的な挙動（ブルーム内部の濃度特性、蛇行の大きさ）の評価は、流れと直角な方向からブルーム断面にレーザー光線を照射し、線状に可視化されるブルームをブルームのスパン方向からラインスキャンカメラにて連続的に撮像し、その輝度変化から濃度データを抽出することで行った。全拡散と相対拡散（ブルーム内部の拡散）について濃度特性の一つである間欠率を分離評価し、下流方向への変化や蛇行拡散との関連性について明らかにすることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ブルームの蛇行拡散は大気拡散現象を代表する代表的な現象の一つであるが、風洞などによる定量評価が難しい側面があり、その中でも特にブルーム内部の濃度特性は計測自体が困難である。本研究では実験的にブルームの瞬間的な濃度特性を取得できる実験手法を確立できたことで、より詳細な拡散モデルの構築を行うことができると期待される。また、本研究手法をベースとして、今後は大気境界層内の拡散現象や、突風に伴う拡散現象についても評価できると考えられ、学術面における意義も大きいと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Particle diffusion experiments were conducted in a short-time diffusion field where the meandering diffusion is dominant using a wind tunnel with active grid. Relative diffusion and meandering diffusion were separately measured by visualization line measurement using laser and line scan camera. Each diffusion scales, total diffusion, relative diffusion, and meandering diffusion were obtained, and it was confirmed that they almost agreed with the Gifford's theorem. The intermittency shows a different tendency in the total diffusion and relative diffusion in the downstream direction and the relationship with the meandering ratio which is the scale of the diffusion field was obtained.

研究分野：流体工学

キーワード：大気乱流拡散 風洞実験 ブルームの蛇行 相対拡散 ライン計測 濃度変動特性 連続点源 一様乱流場

# 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

## 科学研究費助成事業 (科学研究費補助金) 研究成果報告書

### 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ブルーム (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、蛇行ブルームおよびそのブ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

一様乱流場と一様せん断乱流場中において乱流拡散に直接寄与するパラメータ (乱れ強度および渦スケール) を制御することで、拡散場における観測領域をブルームの蛇行による拡散が支配的となる短時間拡散領域からブルーム内部の拡散が支配的となる長時間拡散領域へ任意に変化させることができる。本実験では主に図2に示すブルームの蛇行が拡散の主体となる短時間拡散領域における濃度特性に着目し、レーザとラインスキャンカメラ (以下 LSC) を組み合わせたブルーム断面の濃度を取得することにより、これまでほとんど報告例のないブルーム内部の濃度特性について、以下の点に関し実験を行い拡散モデルの構築を行う。

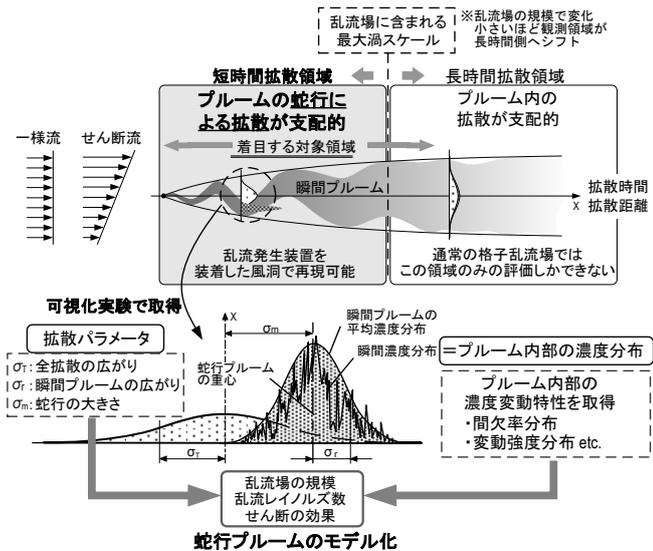


図1. 蛇行ブルームの拡散モデル構築

### 3. 研究の方法

#### (1) 実験準備

#### ①レーザおよびラインスキャンカメラ (LSC) のトラバース装置の製作

本計画では既存設備である大気拡散用実験風洞と測定室内にせん断流れを形成できる速度成層装置を用いるが、風洞上部に設置するレーザとこれに同調して移動が必要となる LSC のトラバース装置を保有していないため図2に示すように、風洞上部に既設されているトラバース用レールを流用するような形で製作し設置した。トラバース本体の製作には主にアルミフレームを使用した。また、LSC およびレーザには微動ユニットを組み合わせた位置調整機構を設け、カメラのセンサ部に線状可視化部が正確に導けるようになっている。

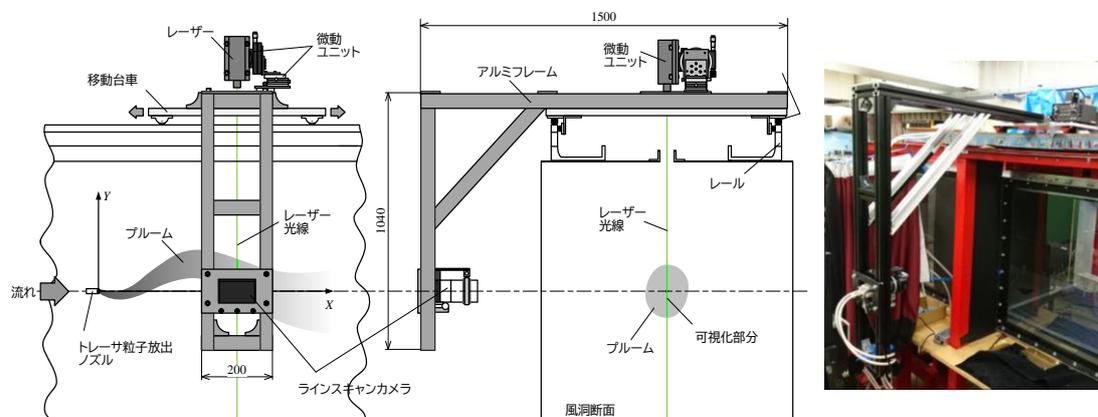


図2. トラバース装置およびレーザ、カメラの設置状態

②画像データの解析方法の確立：導入したLSCで取得する輝度情報から濃度を抽出する方法（について検討を行った。図3に基本的な解析方法を示す。図中の画像は、鉛直（Y軸）方向の画像（1×2048pixel）を時間軸方向に並べたものである。サンプリング時間が500fpsで計測時間が180secの場合、時間軸方向に約9万枚の画像が連結された状態となる。この画像より、フレームごとに輝度（濃度）情報を抽出し、瞬間濃度分布やブルーム重心位置の算出を図中(a)に示すように行った。各画像の瞬間濃度分布を図中(b)に示すように単純に平均化すると全拡散の平均輝度分布が得られ、また各瞬間輝度分布の重心を算出し、その重心位置を基準として濃度分布を重ね平均を求めると図中(c)の相対拡散を求められる。また、相対拡散、蛇行拡散の解析においては、蛇行の影響によりブルームの検出されない画像はあらかじめ削除して解析を行っている。なお、各ピクセル位置での時系列濃度データを取得することも可能である。

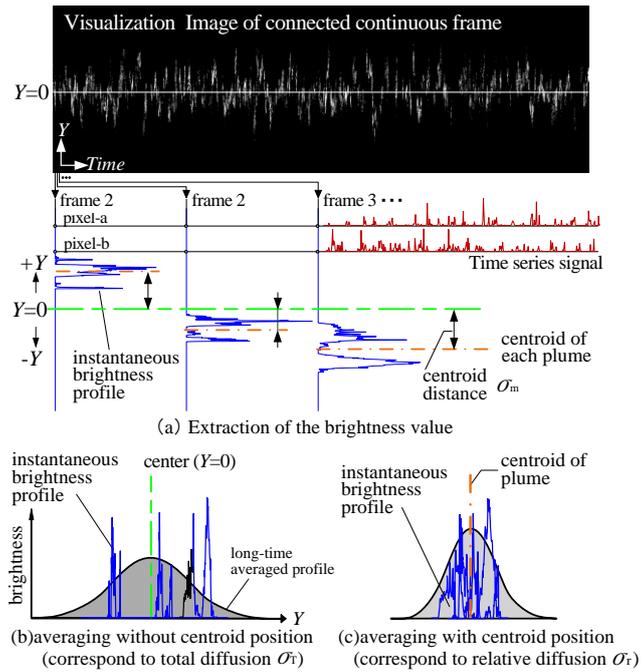


図3. 連結可視化画像からの解析方法

③トレーサ粒子供給装置の改良

予備実験を行ったところ、計測領域下流部においては既存のトレーサ供給装置では濃度が薄くレーザを最大出力にしてもS/N比が低い状態では撮像できないことが判明したためトレーサ供給装置の大幅な改良を行った。図4にトレーサ供給系の構造を示す。従来型は上部ポッパーより定量的に供給される粒子を圧縮空気で分散させ攪拌槽内で再度混合させた後、浮き上がる軽い粒子を選択的に供給パイプを通して放出していた。本研究で製作した改良型は、既存の供給系を流用する形で構成し、攪拌槽内に図に示される流動層方のトレーサ発生装置を設置している。流動層ユニット下部の空気室からエアノズルを通して圧縮空気が連続

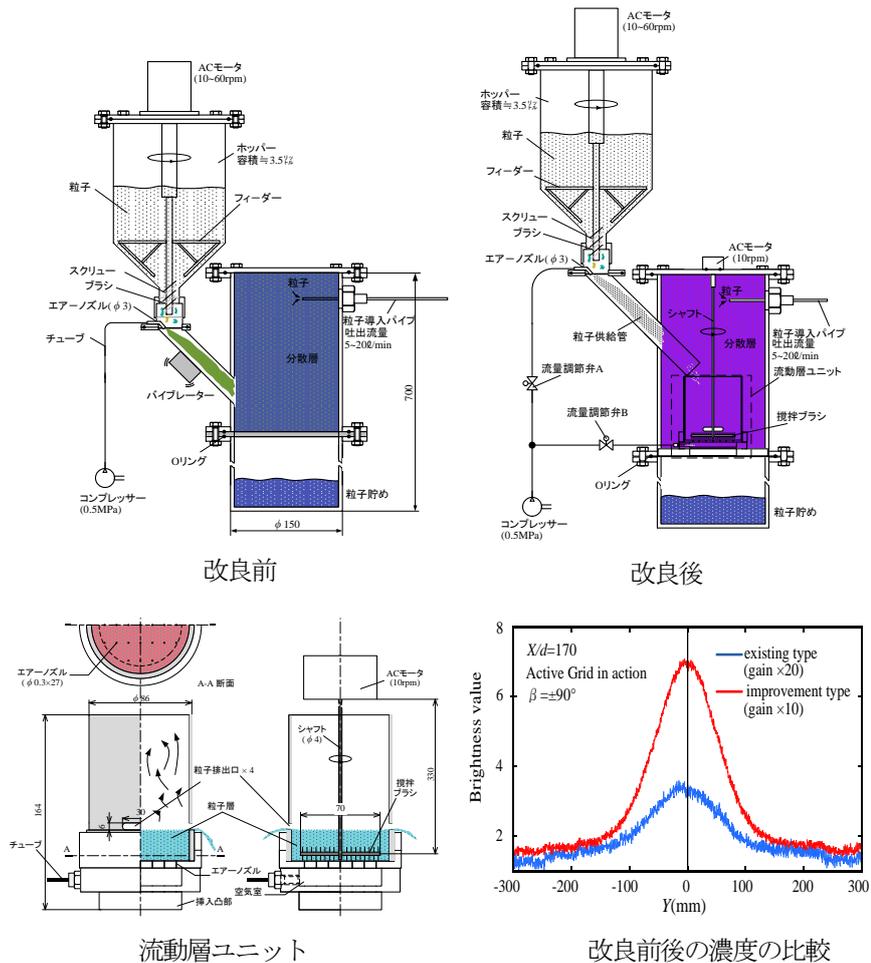


図4. トレーサ供給装置の改良

的に供給され、その上部にある粒子層を混合する。粒子層は同時に回転ブラシで連続的に攪拌されるため、エアノズル上部には常に粒子が存在することになり長時間に渡り安定した濃度のトレーサを供給できる。濃度調整は流動層のエアノズルからの流量と直接分散槽に供給される空気量の比を調整することで行うことができる。また、上部ホッパーから粒子を連続的に流動層ユニット内に供給するが、流動層上部の粒子層の厚さが変わるとトレーサ濃度が変化するため、余分に供給された粒子は、回転ブラシにより流動層外に排出され、常に粒子層は一定の厚さに保たれる。図中に改良前後の濃度の違いをします。測定領域最下流部において、6倍程度の濃い濃度が観測できており、S/N比を大きく向上させた状態で実験が行えることを確認した。

## (2) 風洞実験

図5に風洞実験の概要を示す。風洞は測定断面0.7m角、長さ5mの測定部を有し、乱流場の規模を制御するActive Gridは測定洞の上流にある。トレーサには活性白土を用い、既述した流動床ユニットにより分散し攪拌層内で空気と混合した後、ノズル(内径d=5mm)から放出した。ノズルは風路断面中心に釣糸で固定され、その先端は乱流場がほぼ平衡とみなせる位置とした。座標系はノズル先端を原点とし、流れ方向をX、鉛直方向をY(上面図では紙面と垂直方向)とした。プルームの可視化にはレーザー(最大出力100mW、波長532nm)を用い、測定部上方から風路断面中央に垂直に照射し、撮影には

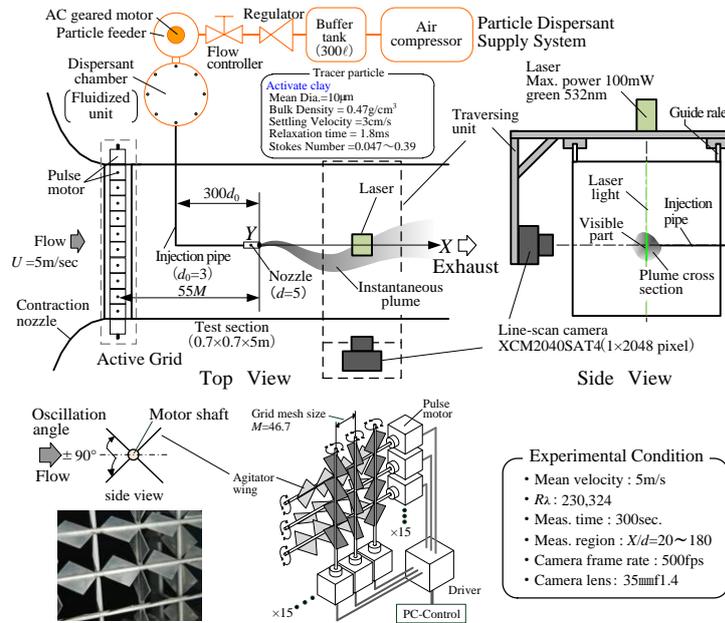


図5. 風洞実験の概略

Line-Scanカメラ(1(X方向)×2048(Y方向)pixel, 分解能0.467mm/pixel)を用い、輝度抽出の諧調は8bit, 撮影速度は500fpsとし、記録時間は300secである。カメラレンズには、レーザー光を選択的に透過する干渉フィルターを装着しS/N比の向上を図った。実験は主流 $U_0=5\text{m/s}$ とし、観測領域が蛇行拡散の支配的な短時間拡散場となるActive Gridの振れ角 $\pm 90^\circ$ 乱流レイノルズ数 $R_\lambda=324$ および短時間拡散領域から長時間拡散領域に相当する振れ角 $\pm 60^\circ$ ( $R_\lambda=230$ )、の場で行った。

## 4. 研究成果

(1)全拡散の分散の流れ方向変化および拡散場の同定:図6にActive Gridの振れ角が $\pm 60^\circ$ における全拡散の平均濃度分布の分散 $\sigma_T^2$ の拡散時間変化( $T$ )を示した。なお、ここでは示していないが、平均濃度分布は全ての測定断面で正規分布に従う。同図には、レーザー濃度計の点計測で得られたデータも比較のためプロットした。また、実線は実験で得られた分散 $\sigma_T^2$ の $T$ に対する変化に一致するように

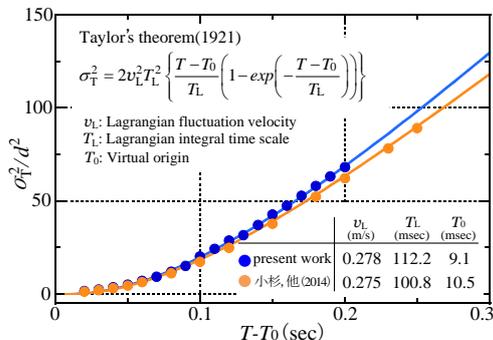


図6 全拡散平均濃度分布の分散値の拡散時間変化

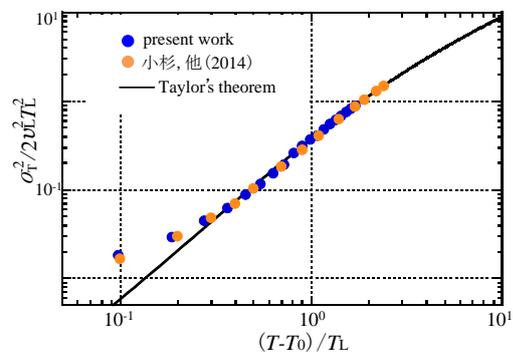


図7 全拡散平均濃度分布の分散値の拡散時間変化(無次元表示)

図中に表される Taylor の拡散理論式の Lagrangian 特性量を最小二乗法により、その誤差の二乗和が最小になる 3 つの特性量の組み合わせを求め描いたものである。本結果と点計測の値はほぼ一致しているが下流方向にその差は大きい。これは計測機器の感度などによる影響と考えられるが、最大でも 5% 程度の違いである。なお、同図中には算出した Lagrangian 特性量を示すが、これまでに得られている値とほぼ一致し、本実験手法の精度を裏付けている。次に Lagrangian 特性量を使い拡散場の推定を行う。図 7 は、図 6 の横・縦軸を Lagrangian 特性量で無次元化したものである。拡散場が渦の寿命時間  $T_L$  を超えない短時間拡散場から、それを超える長時間拡散場までに相当しており、従来の計測結果ともほぼ一致していることがわかる。

(2) 相対拡散および蛇行拡散の評価: 図 8 に Active Grid の振れ角が  $\pm 90^\circ$  における  $X/d=100$  の全拡散と相対拡散の Y 方向平均濃度分布、およびブルームの蛇行に伴う重心位置変化の広がりを表す蛇行拡散の変化を示す。いずれの分布も縦軸は確率密度で表している。なお、重心位置の算出では、バックグラウンドノイズによる重心位置の変化を避けるため、しきい値処理を行い、また、ブルームが映っていないフレームは除き処理した。各分布とも正規分布に良く従う。これらの傾向は他の断面においても同様である。下流方向への広がり傾向を明確にするため、各分布の分散( $\sigma^2$ )の流れ方向変化を図 9 に示す。拡散場がブルームの蛇行拡散の支配的な短時間拡散場となるため、全拡散 ( $\sigma_t^2$ ) に占める蛇行拡散 ( $\sigma_m^2$ ) の割合が大きく蛇行拡散の性質を明確に捉えられる場であることがわかる。また、Gifford の変動ブルームモデルによれば、全拡散は相対拡散と蛇行拡散の重ね合わせとして各分散値の間には、 $\sigma_t^2 = \sigma_r^2 + \sigma_m^2$  の関係が成立つ。この関係式を使い、本研究で計測した  $\sigma_r^2$  (●) と  $\sigma_m^2$  (●) から求めた全拡散 (●) は、実測された全拡散 (●) とほぼ一致しており、すなわち相対拡散および蛇行拡散が正確に求められていることを示している。

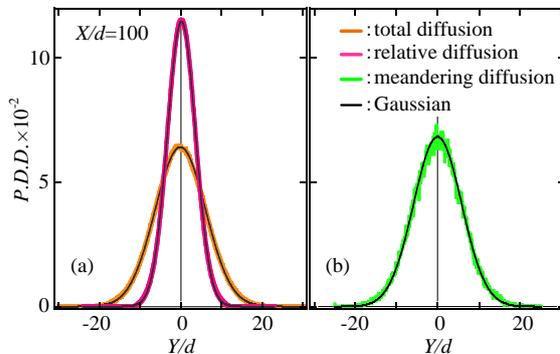


図 8.  $X/D=100$ における確率密度分布(a)全拡散および相対拡散, (b)蛇行拡散

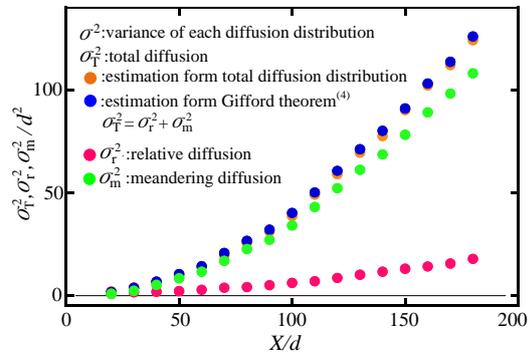


図 9. 拡散パラメータの下流方向変化およびGifford理論との比較

(3) 全拡散および相対拡散の間欠率 図 10 は、本実験条件において撮影された瞬間ブルームの流れ方向断面の可視化画像である。濃度場の間欠性は、ブルームの蛇行運動によるものに加え、ブルーム内部 (相対拡散内) にも存在する間欠性の両者によってもたらされることがわかる。図 11 (a) と (b) に全拡散と相対拡散 (in plume) の間欠率分布の流れ方向変化を示す。間欠率  $I$  は観測時間における濃度検出時間の割合として求められ、 $I=1$  は常に濃度が観測されることを意味する。(a)(b)ともに下流方向に広がりながら値を低下させ間欠性が高まっていくが、ブルームの蛇行による間欠性も加わる全拡散の方が Y 方向に広がり、またその値自体も小さい。

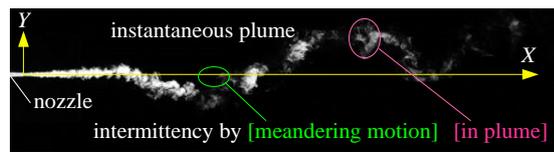


図 10. 瞬間ブルームの可視化画像( $R_\lambda=324$ )

間欠率の下流方向への傾向を明確にするため中心軸上の変化を対数表示したものを図 12 に示す。データにばらつきはあるが測定範囲内において、全拡散と相対拡散の間欠率変化は、 $X/d=100$  前後から傾向が入れ替わるように見える。すなわち、これはブルームの蛇行による間欠率が支配的な状

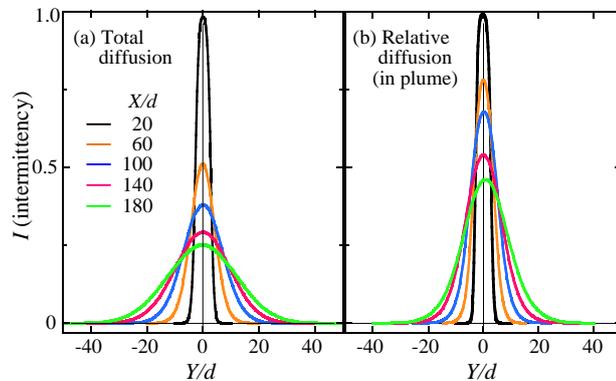


図 11. 間欠率分布の流れ方向変化

態から、ブルーム内部（相対拡散）の間欠性が徐々に高まっていくためと考えられる。拡散場のスケールの変化が間欠率に及ぼす影響を調べるため、図 1 3 に蛇行率と間欠率の関係を示した。蛇行率は蛇行拡散と相対拡散の分散値の比として与えられる。蛇行率は本計測範囲では  $X/d=150$  付近でピークを取るような変化傾向となり、蛇行率の増加に伴い全拡散相対拡散の間欠率はともに減少傾向を変えながら変化することがわかり、このようなスケール比による濃度変動特性の整理が蛇行ブルーム拡散現象の解明に有効であると考えられる。

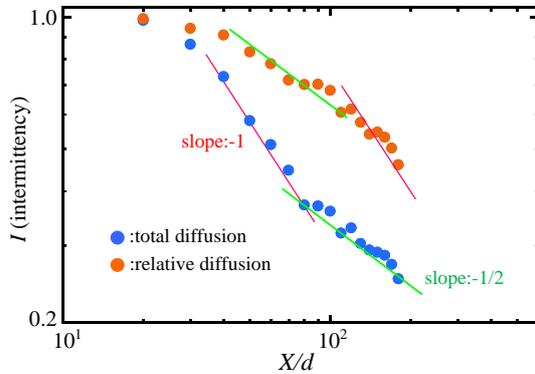


図 1 2. 中心軸上間欠率の流れ方向変化

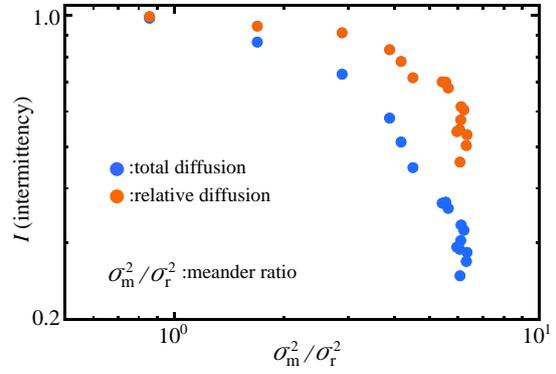


図 1 3. 中心軸上間欠率と蛇行率の関係

## 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, 古舘朋樹, 福井聡, 大気乱流拡散に関する風洞実験(レーザと高速度カメラを用いたライン計測の基礎検討), 日本機械学会北海道支部第 54 回講演会, 2016
- ② 小杉淳, 西山正晃, 大気乱流拡散に関する風洞実験 (蛇行ブルームのライン計測による間欠率の測定), 日本機械学会北海道支部第 55 回講演会, 2017
- ③ 小杉淳, 菅原千早, 気拡散風洞を用いた蛇行ブルーム内部のライン画像計測による濃度変動特性の計測, 日本機械学会流体工学部門第 96 期講演会

## 6. 研究組織

研究分担者なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。