格子乱流中の点源プルームと円柱との干渉について*
(第3報, 条件付統計量の特性)角 田 博 之^{*1}, 酒 井 康 彦^{*2}, 中 村 育 雄^{*3}The Disturbance Effect of a Circular Cylinder on the Diffusion of Matter
by a Plume from a Point Source in Grid-generated Turbulence
(3rd Report, Characteristics of the Conditional Statistics)

Hiroyuki TSUNODA, Yasuhiko SAKAI, and Ikuo NAKAMURA

The effect of the disturbance of a circular cylinder on the diffusion process of matter from a continuous point source in grid-generated water turbulence has been investigated experimentally. In this paper, the characteristics of the conditional statistics are mainly examined and compared with the results concerning the mean and fluctuating concentration field reported in the previous papers. The data downstream of the cylinder show that the vertical profiles of the conditionally-averaged mean concentration in plume show near constancy in the extensive region containing the plume axis, and those of the conditionally-averaged concentration fluctuation rms value have double peaks. The auto-correlation coefficients of the intermittency function behind the cylinder have apparent periodicity, and this suggests that meandering of the plume is caused by the Karman vortex. On the plume centerline, it is found that the conditional relative intensity decreases downstream by the disturbance effect of the cylinder, whereas that without the cylinder does not change downstream.

Key Words: Turbulence, Diffusion, Non-buoyant Plume, Grid-turbulence, Circular Cylinder, Conditional Statistics

1. 緒 言

乱流中に発達する物質の点源プルームが、障害物によってかく乱を受ける場合について、その拡散場の詳細な構造を明らかにすることは、乱流中での化学反応速度や燃焼速度の促進を目的とした物質拡散問題、あるいは大気や海洋中での汚染物質の拡散問題などに関連して、工学、気象学などの広範な分野で重要となる。

本研究は乱流中に障害物が存在することによって生じる乱れ場の変化が、物質拡散場に及ぼす影響を実験的に調べることを目的とし、ここでは流れ場と障害物形状の単純さを考慮して、格子乱流中の点源プルームと円柱との干渉問題を取りあげることとする。著者らは前報⁽⁶⁾⁽⁷⁾において、この場合の平均濃度場および変動濃度場の特性を調べ、円柱下流域での濃度場の広がりやの促進および濃度変動 rms 値の下流方向への減衰速度の増加などの性質を明らかにした。本報ではこれらに加え、特に、円柱下流域で観察されたプルームの蛇行⁽⁷⁾によって生じる拡散場の間欠構造を明らかにす

るために、条件付抽出法を適用して濃度を検出した領域のみで平均をとった条件付統計量の特性を調べることとする。

一般に、乱流中のプルームによる物質拡散場に対し、条件付統計量まで含めて実験的に調べた研究例は著者らの知る限りでは少なく、ごく最近の Wilson ら⁽¹⁾による、乱流境界層内に発達する点源プルームについて、間欠係数や条件付濃度変動強度などの分布を調べ、簡単な理論的モデルを展開した例があるのみのものである。また、理論的研究として、O'Brien⁽²⁾は格子乱流中の点源プルームに対し、スカラー量の条件付確率密度方程式を導き、いくつかの特別な場合の解を得ているが、その実験的検証はなされていない。さらに、本研究と類似した障害物が存在する場合の拡散場についてみると、加熱円柱後流中の変動温度場に関して、条件付統計量の分布を調べた研究例⁽³⁾⁽⁴⁾があげられるが、これらの研究は乱れ場と拡散場の空間的広がりやが同一であるという点で本研究とは性質が異なる。

以上の点を考慮し、本報では前報⁽⁶⁾⁽⁷⁾に引き続き、格子乱流中の点源プルームがプルーム幅と同程度の直径の円柱によってかく乱を受ける場合について、主に円柱周辺および円柱下流域における物質拡散場に対し、その条件付統計量の特性を調べ、円柱によるかく

* 昭和63年3月30日 第65期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和62年8月27日。

^{*1} 正員、名古屋大学大学院 (〒464 名古屋市千種区不老町)。

^{*2} 正員、名古屋大学教養部。

^{*3} 正員、名古屋大学工学部。

乱を受けないブルームの場合⁽⁸⁾との比較を行った。以下に、この解析結果を述べる。

主 な 記 号

x, y, z : ブルーム軸と円柱中心軸の交点を座標原点として、それぞれ、主流方向、円柱スパン方向および x, y に垂直な方向 [文献(6), 図1参照]

x_r : 格子から円柱中心軸までの x 方向距離 [文献(6), 図1参照]

r, θ : 円柱半径方向座標および前方よどみ線と r 方向のなす角度 [文献(6), 図1参照]

$\tilde{I}$: 瞬時の濃度信号

Γ, γ' : 平均濃度, 濃度変動 rms 値

$\langle \Gamma \rangle$: 条件付平均濃度 [本文式(2)で定義]

$\langle \gamma' \rangle$: 条件付濃度変動 rms 値 [本文式(3)で定義]

Γ_f : 噴出試料濃度

$\tilde{I}$: 濃度検出領域において $\tilde{I}=1$, 濃度非検出領域において $\tilde{I}=0$ として定義される間欠関数

I_r : 間欠係数 [本文式(1)で定義]

d : 供試円柱直径

M : 正方形格子メッシュ寸法

b_{ry}, b_{rz} : y および z 方向平均濃度分布の半値幅
添 字

c : ブルーム中心軸上における値を示す。

その他の記号については、その都度定義する。

2. 実験条件とデータ解析方法

2.1 実験装置および条件 データ解析に用いた変動濃度信号は、前報(6), (7)と同一の実験で得られたものである。ここでは主な実験条件のみを示し、実験装置および実験方法についての説明は省略する。実験は供試円柱 (直径 $d=10$ mm) を正方形格子の下流 $x=35M$ ($M=10$ mm) の断面において、ブルーム中心軸と円柱中心軸とが直交するように固定して行った。ここで、 d および主流の平均流速 $U_0=13.9$ cm/s に基づくレイノルズ数は $Re=U_0d/\nu=1064$ (ν : 水の動粘性係数) であり、円柱固定断面における主流の乱れ強さ u'/U_0 (u' : x 方向速度変動 rms 値) および乱れの尺度 L/d (L : x 方向積分特性距離) はそれぞれ、1.9%, 0.8 であった。

2.2 データ解析方法 本論文では条件付抽出法を用いて変動濃度信号の性質を調べていくが、条件付抽出の方法は著者らによる文献(9)で述べたものと同様である。ここではその概要のみを示す。条件付

抽出は大きく二つの手順 **A, B** に分かれる。手順 **A** では、変動濃度信号の確率密度関数を利用して、間欠係数 I_r , 濃度非検出領域における平均電圧値 E_0 および変動 rms 値 e_n を決定する。次に手順 **B** では、 E_0 と e_n の関数式 $S=E_0+k \cdot e_n$ (k はしきいパラメータを示す) によって、濃度信号にしきい値 S を与えて間欠関数 $\tilde{I}$ を求めた後、あるホールド時間 τ_h よりも小さな時間間隔の濃度変化がなくなるように $\tilde{I}$ を補正し、この補正した $\tilde{I}$ から各種の条件付総計量を求める。本報で用いたパラメータ k およびホールド時間 τ_h は文献(9)と同様に $k=1.7, \tau_h=2$ ms であり、図には示さないが、この場合に得られる間欠関数 $\tilde{I}$ は、濃度信号との比較により、十分な精度で濃度検出領域と非検出領域とを識別していることを確認した。なお、データ処理は、データレコーダに記録した変動濃度信号を 5 kHz のサンプリング周期で A-D 変換して、1 測定点当たり 458 752 個のデータを得た後、パーソナルコンピュータ (PC 9801) を用いて行った。

3. データ解析結果と考察

3.1 円柱周りの半径方向特性 図1~3はそれぞれ、間欠係数 I_r , 条件付平均濃度 $\langle \Gamma \rangle$, および条件付濃度変動 rms 値 $\langle \gamma' \rangle$ の半径方向分布を、 $\theta=45, 90, 135^\circ$ の3方向について重ねて示したものである。ただし、半径方向の濃度測定はブルーム中心軸を含む面内で行われ、また3種類の θ に対して円柱のかく乱作用がおよぶ z 方向範囲を正確に比喩するために、各図中の横軸は各 r 方向測定のブルーム中心軸からの z 方向距離 $r \cdot \sin \theta$ を d で無次元化してある。また、図中の破線および一点鎖線は各々、 $\theta=90^\circ$ および $\theta=45, 135^\circ$ に対する円柱壁面の位置を表している。

ここで、 T を全観測時間とし、 T に対して濃度検出領域の占める時間を T_i とすると、 I_r は次式で定義される⁽⁵⁾,

$$I_r = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{T_i}{T} \dots\dots\dots (1)$$

一方、 $\langle \Gamma \rangle$ および $\langle \gamma' \rangle^2$ は変動濃度信号 $\tilde{I}$ に対し、濃度検出領域 (間欠関数 $\tilde{I}=1$ の領域) のみで平均を取ることによって得られ、それぞれ次式で定義される⁽⁵⁾。

$$\langle \Gamma \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T_i} \int_0^T \tilde{I} \cdot \tilde{I} dt \dots\dots\dots (2)$$

$$\langle \gamma' \rangle^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T_i} \int_0^T \tilde{I} \cdot (\tilde{I} - \langle \Gamma \rangle)^2 dt \dots\dots\dots (3)$$

また、濃度非検出領域においては、 $\tilde{I}=0$ となるので、 $\langle \Gamma \rangle$, $\langle \gamma' \rangle^2$ は、 I_r および平均濃度 Γ , 濃度変動

rms 値 γ' を使用して、以下の式で表すこともできる⁽¹⁾。

$$\langle \Gamma \rangle = \Gamma / I_r \quad \cdots \cdots (4)$$

$$\langle \gamma'^2 \rangle = \{ (\gamma')^2 - I_r \cdot (1 - I_r) \cdot \langle \Gamma^2 \rangle / I_r \} \quad \cdots \cdots (5)$$

図1～3からわかるように、半径方向の $I_r, \langle \Gamma \rangle$, および $\langle \gamma' \rangle$ は、 $r \cdot \sin \theta > d$ の領域で θ による分布形状の変化が小さく、円柱によるかく乱の効果は $r \cdot \sin \theta \leq d$ の領域で大きく現れているといえる。Britter ら⁽¹⁰⁾ は、円柱周りの速度の乱れ場の変化に関して、乱流渦の変形作用による乱れ場のかく乱の効果が、 $r \leq 1.5d$ の領域で支配的であることを指摘しており、乱れスケールと円柱直径の比が本実験とほぼ等しい、 $L/d = 0.78$ の場合に、よどみ線上 ($\theta = 0^\circ$) および $\theta = 90^\circ$ 方向における x 方向速度変動 rms 値 u' は円柱壁面に近づくにつれて増加し、特に、よどみ線上においてはよどみ点に近づくにつれて、低周波の乱れに比べて高周波の乱れが相対的に増加していくという実験結果を得ている。いま、 $r \cdot \sin \theta \leq d$ の領域のみに注目して本実験結果について見ると、図1から、 I_r は $\theta = 45^\circ$

から 90° に向けて減少した後、 $\theta = 135^\circ$ において再び増加し、円柱壁面近傍で $I_r \approx 1.0$ となっている。一方、図2, 3から、すべての θ に対し円柱壁面に近づくにつれて、 $\langle \Gamma \rangle$ および $\langle \gamma' \rangle$ の減衰が見られ、特に $\theta = 135^\circ$ における $\langle \gamma' \rangle$ の減衰が著しい。これらのことから以下のことが推測される。まず、 I_r は式(4)からわかるように、乱流拡散による Γ の減少と分子拡散による $\langle \Gamma \rangle$ の減少との相互作用によって変化するべきものであることを考慮すれば⁽¹⁴⁾、壁面近くでの Γ ⁽⁶⁾ および $\langle \Gamma \rangle$ はともに、 $\theta = 45^\circ$ から 90° に向けて減衰しているものの、前報⁽⁶⁾ で述べたような Γ の減衰が $\langle \Gamma \rangle$ の減衰に比べ大きく、結局、 $\theta = 45^\circ$ から 90° に向けて I_r は減少するものと考えられる。次に円柱壁面近くでの $\langle \Gamma \rangle$ および $\langle \gamma' \rangle$ の減衰について考える。Britter らの実験結果から、本実験においてもよどみ点近傍においては、高周波の小さなスケールの乱れの増大が生じていると予想され、このため、乱流拡散と分子拡散との相互作用により、染料を含んだ流体塊内の濃度の希釈と均一化が加速され、よどみ線上の $\langle \Gamma \rangle$, $\langle \gamma' \rangle$ は円柱壁面に近づくにつれて、円柱のない場合と比べて減衰が大きくなることが予想され、これは図9, 10からも明らかである。ここで、色付流体塊がほぼ平均の流線に沿って円柱周りを移動することを仮定すると、 $\theta = 45^\circ$ および $\theta = 90^\circ$ においては、円柱壁面近くの測定点ほど、よどみ点近傍における $\langle \Gamma \rangle$, $\langle \gamma' \rangle$ の減衰の影響を強く受けていることが示唆される。なお、本研究で $\bar{I}$ の補正に用いた τ_h よりも小さなスケールの濃度変動が高周波の乱れによって生じる可能性があるが、一般に高周波の乱れによって生じた濃度変動は上で述べた分子拡散による均一化のために、その高周波成分が減少すると考えられるので (この特徴はよどみ線上の濃度信号のスペクトル解析から確認されている)、 $\bar{I}$ の補正に対する高周波乱れの影響は小さいものと予想

図1 間欠係数の半径方向分布

図2 条件付平均濃度の半径方向分布

図3 条件付濃度変動 rms 値の半径方向分布

される。 $\theta = 135^\circ$ での円柱壁面近くで、 $I_r \approx 1.0$ となること、および $\langle \gamma \rangle$ が $\langle \Gamma \rangle$ に比べて急激に減衰していくことは、前報⁽⁷⁾で述べたように、円柱背面に存在する再循環領域内での濃度場の空間的な一様性⁽¹¹⁾を表すものと考えられる。

3.2 円柱下流域の特性 図4は、円柱下流域 $10 \leq x/d \leq 40$ における $\langle \Gamma \rangle$ の z および y 方向の分布を調べたものである。ただし、 Γ, γ 分布に良い相似性が得られていたこと⁽⁶⁾⁽⁷⁾から、ここでも同様の傾向が存在することを予想して、図4の横軸では z, y 座標をそれぞれの方向の平均濃度分布の半値幅 b_{rz}, b_{ry} で無次元化し、縦軸では $\langle \Gamma \rangle$ をブルーム中心軸上の値 $\langle \Gamma \rangle_c$ で無次元化してある。また、 z, y 方向の測定はブルーム中心軸を含む面内で行われ、 Γ, γ の z, y 方向分布の対称性を考慮して、データ処理は $z \geq 0, y \leq 0$ の領域についてのみ行った。図4中の破線は z, y 方向の Γ/Γ_c の実験点⁽⁶⁾を代表するものであり、実線は円柱のない場合の格子乱流中における $\langle \Gamma \rangle / \langle \Gamma \rangle_c$ の半径方向分布⁽⁶⁾を表している。まず、 z 方向の分布について見る。図4からわかるように、各測定断面における z 方向の $\langle \Gamma \rangle$ 分布は測定範囲内ですべて同様の傾向を示し、中心軸から半値幅付近にかけての $\langle \Gamma \rangle$ はほぼ一定の値を取り、この分布形状は Γ 分布や円柱のない場合の $\langle \Gamma \rangle$ 分布と著しく異なっている。このような $\langle \Gamma \rangle$ 分布の一定性は主にカルマン渦による大きなスケールの対流運動が一つの原因となっていることが予想され、またこの結果として全体的に見て濃度非検出部の間隔が中心軸から外縁に向かって急激に増大し、このため Γ 分布が $\langle \Gamma \rangle$ と比べ大きく減少していくことが示唆される。本実験における $\langle \Gamma \rangle$ 分布の特徴はLaRueら⁽³⁾やFabris⁽⁴⁾による加熱円柱後流中での条件付平均温度分布の特徴とかなり異なっており、彼らの実験における条件付平均温度分布は中心軸から外縁に向かって単調

に減少している。

次に、図4左側に示されている y 方向の $\langle \Gamma \rangle$ 分布から、円柱下流域における $\langle \Gamma \rangle$ のスパン方向変化は、円柱のない場合と同様に、濃度場中心軸から外縁部に向かって単調に減少するものであるが、その減少速度はかなり大きくなっていることがわかる。

円柱下流域におけるブルームの間欠係数 I_r の分布について調べた結果を図5に示す。図5中の実線は円柱のない場合のブルームに対する I_r の半径方向分布⁽⁶⁾を表している。式(4)から予想されるように、図4で z 方向の $\langle \Gamma \rangle / \langle \Gamma \rangle_c$ が中心軸付近の広い範囲でほぼ1の一定値を取っていたことと対応して、 I_r の z 方向分布は図4の破線で示されている Γ/Γ_c 分布とほぼ同一形状の分布となっている。

一方、図5左側の y 方向の I_r 分布からわかることは、平均濃度分布半値幅付近から外縁部にかけて、円柱を設置した場合の I_r/I_{rc} の値が円柱のない場合と比べて増大していることであり、これは円柱を設置した場合の y 方向の Γ/Γ_c 分布が円柱のない場合と同様にガウス分布で良く近似できたこと⁽⁶⁾を考慮すれば、式(4)から図4で示した $\langle \Gamma \rangle$ の y 方向分布において、濃度場外縁に向かっての減衰速度が円柱のない場合と比べ大きくなっていることと対応していることがわかる。

著者らは前報⁽⁷⁾において、乱流中の点源ブルームと円柱とが干渉した後、円柱下流域の後流中の速度場が相似となりつつある中間領域で発達するブルームに対し、大規模な渦列によって引き起こされる一種のブルームの蛇行運動に注目すべきであると述べ、また下流域 $x/d = 10$ の断面で測定された濃度信号のスペクトルに、わずかながらカルマン渦周期と一致するピークが見られることを示した(前報⁽⁷⁾, 付図1参照)。このブルームの蛇行は濃度場の間欠性や変動濃度場に大きな影響を与えることが知られており⁽¹²⁾、この意味において本研究はブルームの蛇行の影響を調べた数少な

図4 下流域における条件付平均濃度の z, y 方向分布

図5 下流域における間欠係数の z, y 方向分布

い例として見る事ができるであろう。ここで、本論文で求められる間欠関数 $\tilde{I}(t)$ は、濃度信号から濃度変化の振幅に関する情報を取り除き、濃度検出の有無に関する情報のみを残した信号といえるので、 $\tilde{I}(t)$ の性質を調べることににより、ブルームの蛇行による濃度検出の周期性のような情報が、記録された濃度信号そのものよりも明りょうに現れてくると考えられる。そこで、いまこのブルームの蛇行を検証するために、円柱下流域の各測定点で得られた濃度信号の間欠関数 $\tilde{I}(t)$ に対し、次の自己相関係数 $C_I(\tau)$ の分布を調べてみることにする。

$$C_I(\tau) = \frac{\overline{\{\tilde{I}(t) - I_r\} \cdot \{\tilde{I}(t+\tau) - I_r\}}}{\sqrt{\overline{\{\tilde{I}(t) - I_r\}^2} \cdot \overline{\{\tilde{I}(t+\tau) - I_r\}^2}}}$$

$$= \frac{\overline{\{\tilde{I}(t) \cdot \tilde{I}(t+\tau) - I_r^2\}}}{\overline{\{I_r \cdot (1 - I_r)\}}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $\overline{\quad}$ は時間平均を示し、 I_r および $I_r \cdot (1 - I_r)$ はそれぞれ $\tilde{I}(t)$ の平均値と分散である。いま、 $\tilde{I}(t)$ は零あるいは1の2値をとるのみであるので、 $C_I(\tau)$ と次式で定義される条件付確率 $P_I(\tau)$

$$P_I(\tau) = \text{Prob}\{\tilde{I}(t+\tau) = 1 \mid \tilde{I}(t) = 1\}$$

$$= \text{Prob}\{\tilde{I}(t+\tau) = 1 \cap \tilde{I}(t) = 1\} / \text{Prob}\{\tilde{I}(t) = 1\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

との間に次の関係式が成り立つ。

$$C_I(\tau) = (P_I - I_r) / (1 - I_r) \quad \dots\dots\dots (8)$$

したがって、間欠関数に対する自己相関係数 $C_I(\tau)$ は同時に、時間間隔 τ だけ離れた2時刻の変動濃度信号値 $\tilde{I}(t)(\geq 0)$ および $\tilde{I}(t+\tau)(\geq 0)$ に対し、 $\tilde{I}(t) > 0$ の条件の下で $\tilde{I}(t+\tau) > 0$ となる確率と関係する。

図6は $x/d = 10$ の断面において、 $z/d = 0.2, 0.8, 1.4, 1.8, 2.3, 2.8$ ($z/b_{rz} = 0.11, 0.43, 0.75, 0.96, 1.23, 1.49$) の測定点での $C_I(\tau)$ の z 方向変化を調べたものである。図6からわかるように、この六つの測定点における $\tilde{I}(t)$ は明らかな周期性を持っており、この傾向は特に $0.8 \leq z/d \leq 2.3$ で強い、また、この周期は約

0.36 s であり、これはストローハル数を本実験における $Re = 1064$ から予想される値0.2として得られるカルマン渦の周期と一致している。したがって、 $\tilde{I}(t)$ がこのような周期性を持つことの一つの理由として、カルマン渦列の大規模構造によって引き起こされるブルームの蛇行を考えることができる。なお、図6には示さないが、さらに下流の断面 $x/d = 20, 30, 40$ においても、 $\tilde{I}(t)$ の周期性が見られたが、これは下流に行くにつれて次第に不明りょうになっていく。

次に、円柱下流域における条件付変動濃度場の特性を調べる。図7に $\langle \gamma' \rangle$ の z および y 方向分布を、図4, 5と同様に無次元化して示す。図7中の破線と実線はそれぞれ、 γ' 分布⁽⁷⁾ および円柱のない場合の $\langle \gamma' \rangle$ 分布⁽⁸⁾ を代表するものである。図7からわかるように、円柱下流域における $\langle \gamma' \rangle$ 分布は z, y 方向ともに円柱のない場合と比べ著しく異なっている。また、 z 方向の分布には平均濃度分布半値幅付近にピークが見られ、このピーク値は γ' 分布のピーク値に比べ大きくかつ、より大きな z 位置にある。この $\langle \gamma' \rangle$ 分布のピークに関する物理的要因は現在の段階では不明であるが、図6から半値幅付近 ($z/d = 1.8$) における平均的な濃度検出領域の間隔が中心軸付近に比べ大きいことがわかり、したがってこの検出領域内部での濃度変動の $\langle \gamma' \rangle$ に対する寄与が半値幅付近で大きいことがこのピークの一要因となっていると予想される。ここで、 γ' と $\langle \gamma' \rangle$ との間の関係について調べることにする。式(5)からわかるように、 $(\gamma')^2$ は濃度検出領域内における濃度変動 $\langle \gamma' \rangle$ による寄与 $I_r \cdot \langle \gamma' \rangle^2$ とブルームの持つ間欠性による寄与 $I_r \cdot (1 - I_r) \cdot \langle I \rangle^2$ との和として表すことができる⁽¹⁾。いまの場合、その両者の寄与の比 $\alpha = (\langle \gamma' \rangle / \langle I \rangle)^2 / (1 - I_r)$ を調べると、ブルーム中心軸から半値幅付近にかけての範囲内で $\alpha \gg 1$ となっており、したがって、前報⁽⁷⁾ で示した γ' の z 方向分布に

図6 間欠関数に対する自己相関係数の z 方向変化

図7 下流域における条件付 rms 値の z, y 方向分布

ピークが存在したのは、ここで示した $\langle \gamma' \rangle$ 分布に存在するピークによる寄与が、相対的に大きいといえる。

次に、図7左側に示した y 方向の $\langle \gamma' \rangle$ 分布について見ると、これは図4の $\langle \Gamma' \rangle$ の y 方向分布の傾向と同様に、円柱のない場合と比べ濃度場外縁部への減衰が大きくなっていることがわかる。

図には示さないが、 z および y 方向の条件付相対濃度変動強度 $\langle \gamma' \rangle / \langle \Gamma' \rangle$ の分布は、 $x/d = 10$ の測定断面を除いて、中心軸から外縁部にかけての変化が γ' / Γ' に比べて小さく($\gamma' / \Gamma' = 1.0 \sim 8.0, \langle \gamma' \rangle / \langle \Gamma' \rangle = 0.8 \sim 1.2$)、測定断面内でほぼ一定とみなすことができ、このような傾向は、Wilsonら⁽¹⁾による条件付統計量のモデル化に用いられたブルーム断面内での $\langle \gamma' \rangle / \langle \Gamma' \rangle$ の一定性の仮定と一致している。

3.3 ブルーム中心軸上の特性 この節では円柱上流域および下流域におけるブルーム中心軸上での条件付統計量の特性について調べることにする。

図8～11に I_{rc} , $\langle \Gamma' \rangle_c$, $\langle \gamma' \rangle_c$ および γ'_c / Γ'_c の中心軸上の変化を、円柱のない場合における中心軸上の変化⁽⁶⁾と比較して示す。ただし、各図中の一点鎖線は円柱設置位置を表し、図9, 10および図11における実線は円柱を設置した場合の Γ_c / Γ_j , γ'_c / Γ'_j および γ'_c / Γ'_c

の実験点⁽⁶⁾⁽⁷⁾を示すものであり、破線は円柱のない場合の各々の実験点を代表している。

まず、円柱上流域でのブルーム中心軸上(よどみ線上)での特性について調べる。前報⁽⁷⁾でも述べたように、よどみ点近傍での濃度場に関してはいまだ不明な点が多いが、本実験結果については、図8～11よりわかるように、円柱よどみ線上の各種条件付統計量の分布は、 $-1 \leq x/d \leq -0.5 (34 \leq (x+x_r)/d \leq 34.5)$ の領域で、円柱のない場合と比較して異なる傾向を示し、よどみ点に近付くにつれて I_{rc} は増加し、一方 $\langle \Gamma' \rangle_c$, $\langle \gamma' \rangle_c$, γ'_c / Γ'_c は減衰していく。このような傾向は先に述べたように、よどみ点近傍での速度場の乱れ、特に、スケールの小さな乱れの増大と大きく関係していると予想される。

次に円柱下流域での条件付統計量の特性について調べる。図8～10よりわかるように、円柱によるかく乱を受けたブルームに対する I_{rc} , $\langle \Gamma' \rangle_c$, $\langle \gamma' \rangle_c$ の値は、かく乱を受けていない場合の値と比べ下流方向への変化のようすが異なっており、このかく乱の効果により、円柱のない場合と比べ I_{rc} の値が増大するとともに、その下流方向への減少が遅くなり、また $\langle \Gamma' \rangle_c$ および $\langle \gamma' \rangle_c$ の減衰は大きくなっている。さらに図11から、円柱のない場合のブルームに対する γ'_c / Γ'_c は

図8 間欠係数のブルーム中心軸上変化

図10 条件付rms値のブルーム中心軸上変化

図9 条件付平均濃度のブルーム中心軸上変化

図11 条件付相対強度のブルーム中心軸上変化

測定範囲内で下流方向にほぼ一定値をとるのに対し、円柱によるかく乱を受けた場合の $\langle \gamma' \rangle_c / \langle \Gamma \rangle_c$ は下流方向にいまだ減少していることがわかる。図11には、 γ'_c / Γ_c の分布も実線および破線で示してあるが、式(4)、(5)あるいは前報⁽⁷⁾、式(6)からわかるように、この値は I_{rc} および $\langle \gamma' \rangle_c / \langle \Gamma \rangle_c$ によって求めることができ、またブルームの微少スケールでの混合効果の大きさを表す一種のパラメータとも考えられ⁽¹³⁾、 γ'_c / Γ_c の値が小さくなるほど、混合の効果が大きいといえる。図8と図11を見てわかるように、円柱を設置した場合のブルームに対して γ'_c / Γ_c の値が下流方向に減少していくのは、主に、 $\langle \gamma' \rangle_c / \langle \Gamma \rangle_c$ の減少によるものと考えられ、一方、円柱のない場合には $\langle \gamma' \rangle_c / \langle \Gamma \rangle_c$ の変化は小さく、主に、 I_{rc} の減少によって γ'_c / Γ_c が下流方向に増加していくといえる。

4. 結 言

正方形格子乱流中に発達する点源ブルームが、ブルーム幅と同程度の直径の円柱によってかく乱を受ける場合について、得られた変動濃度信号のデータ解析を行い、条件付統計量の分布を調べ、以下の結論が得られた。

(1) 円柱下流域において発達するブルームに対して、 $\langle \Gamma \rangle$ や $\langle \gamma' \rangle$ などの条件付統計量は、 Γ 、 γ' などの統計量と比べ円柱によるかく乱の効果をより顕著に表し、特に、 z 方向の $\langle \Gamma \rangle$ 分布は濃度場中心軸付近の広い範囲でほぼ一定値を取り、また、 $\langle \gamma' \rangle$ の z 方向分布は $z = b_{rz}$ 付近に大きなピーク(中心軸上の値の約1.3倍)を持つことが示された。さらに、下流域の各測定点で得られた間欠関数の自己相関係数(式(6)参照)を調べることによって、円柱下流域のブルームに対し、カルマン渦の周期と一致する周期的な蛇行が存在する

ことが示された。

(2) 円柱下流側でのブルーム中心軸上における条件付統計量の特性を調べることによって、円柱によるかく乱の影響を受けたブルームの I_{rc} は円柱のない場合の I_{rc} よりも増大するとともに、その下流方向への減少速度がかなり小さくなること、および $\langle \gamma' \rangle_c / \langle \Gamma \rangle_c$ の値が下流方向に減少していくことが明らかとなり、このことから円柱の存在の有無による γ'_c / Γ_c の下流方向変化過程の違いが説明できた。

終わりに、実験に際してご協力を惜しまれなかった昭和59年度卒業研究学生の西田守氏に謝意を表す。また、本実験装置の製作については名古屋大学、櫛田武広助手ならびに神田博邦、村上初男両技官に多大のご協力をいただいた、ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) Wilson, D.G., ほか2名, *Atmospher. Environ.*, 19-7(1985), 1053.
- (2) O'Brien, E.E., *J. Fluid Mech.*, 89-2(1978), 209.
- (3) LaRue, J.C. and Libby, P.A., *Phys. Fluids*, 17-11(1974), 1956.
- (4) Fabris, G., *Turbulent Shear Flows*, 1(1979), 55, Springer-Verlag.
- (5) Dopazo, C., *J. Fluid Mech.*, 81-3(1977), 433.
- (6) 中村・ほか3名, 機論, 53-487, B(昭62), 765.
- (7) 中村・ほか3名, 機論, 53-487, B(昭62), 774.
- (8) 中村・ほか2名, 機論, 52-476, B(昭61), 1648.
- (9) 中村・ほか2名, 機論, 54-498 B(昭63).
- (10) Britter, R. E., ほか2名, *J. Fluid Mech.*, 92-2(1979), 269.
- (11) 辻, 機械の研究, 29-9, (昭52), 1123.
- (12) Hanna, S.R., *Atmospher. Environ.* 18-6(1984), 1091.
- (13) Georgopoulos, P.G. and Seinfeld, J.H., *AIChE J.*, 32-10(1986), 1642.
- (14) Monin, A.S. and Yaglom, A.M., *Statistical Fluid Mechanics*, 1(1971), 591, MIT Press.