

大規模せん断乱流中に置かれた連続点源からの熱拡散の特性

宮田仁奈（豊橋技科大院）、蒔田秀治（豊橋技科大）

Characteristics of Thermal Diffusion in a Thermal Plume from a Point Source in Large-Scale Shear Turbulence Fields

N. Miyata* and H. Makita*

* Dept. of Mech. Eng., Toyohashi University of Technology

ABSTRACT

Thermal diffusion from a point source was experimentally investigated in actively agitated homogeneous and uniform-shear flows with velocity gradients of $\partial U/\partial y=0, 2.6, 6.3 \text{ s}^{-1}$ and turbulent Reynolds numbers of $R_\lambda=36\sim 490$. Simultaneous measurement was conducted on temperature and velocity fluctuations. Short-time diffusion was realized in the excited turbulence fields of $R_\lambda=310\sim 410$. Then, the centroid of the plume meandered around the center-line irrespective of the velocity gradient. The lateral integral scale, L_{vx} , strongly affected the streamwise growth of the time-averaged plume width. The streamwise decay rate of intermittency factor at the point of the peak temperature, $I_{\theta p}$, increased with R_λ .

Key Words: Thermal Diffusion, Plume, Meandering Motion, Shear Flow, Concentration Fluctuation, Flow Control

1. 緒論

本研究室では、高 R_λ 実現可能な大気乱流風洞¹⁾を開発し、それを用いた一様流中の粒子拡散実験²⁾および熱拡散実験³⁾において、プルームの蛇行現象を風洞中に再現することに初めて成功した。実際の大気の流れは、地表近くで鉛直方向に速度勾配を持つ非定常な複雑乱流場を形成している。本実験は熱拡散に対する速度せん断の影響を解明するため、大規模一様せん断乱流中で熱拡散実験を試み、大規模乱流渦とプルームの蛇行運動との相関関係を定量的に決定することを目的としている。

2. 実験装置および条件

大気乱流風洞測定洞上流に、速度成層形成部と乱流発生部から構成されるせん断乱流発生装置¹⁾を設置した(図1)。速度成層形成部は、鉛直方向に分割された流路に開孔率の異なる多孔板を挿入し、速度せん断を形成した。乱流発生部の格子状に組まれた回転軸(格子間隔: $M=35\text{mm}$)に取付けた攪拌翼の動作モード(平均迎角: α° 、最大攪拌角: $\pm\beta^\circ$)を制御して、各種の乱流場を形成できる。さらに、測定洞天井壁面に境界層制御装置⁴⁾を設置し、壁面近傍の気流の加速、吸込み制御を行うことにより、天井面に発達する境界層の影響を低減した。

格子乱流場($\beta=\pm 0^\circ$)と、励起乱流場($\beta=\pm 20\sim 180^\circ$)で、それぞれ平均速度勾配 $\partial U/\partial y=0.0, 2.6, 6.3 \text{ s}^{-1}$ の一様流および一様せん断乱流場(乱流レイノルズ数 $R_\lambda=36\sim 490$; Case1~6)を形成するため、せん断乱流発生装置の多孔板の開孔率および攪拌翼の α, β を調整した(表1)。

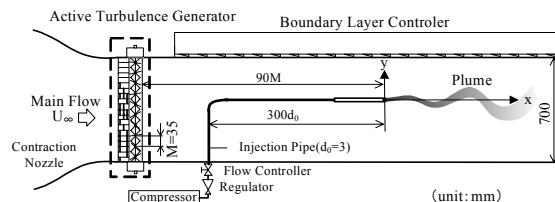


図1 実験装置概略

表1 実験条件および乱流特性量 ($x/d=0$)

Case	β [$^\circ$]	$\partial U/\partial y$ [1/s]	u'/U [%]	v'/U [%]	L_{ux} [mm]	L_{vx} [mm]	R_λ [-]
Case1		0.0	0.98	0.92	23	11	36
Case2	0	2.8	1.45	1.26	26	11	50
Case3		6.1	3.47	2.87	28	13	90
Case4	± 20	0.0	8.9	5.7	584	47	310
Case5	\sim	2.8	11.7	7.0	957	62	430
Case6	180	6.1	15.5	9.8	950	78	490

いずれも断面中心の平均流速 $U_c=5.0\text{m/s}$ で、断面内において良好な一様性を保っている。

主流と平行に設置したパイプに送られた気流を先端のヒーター(内径: $d=5.4\text{mm}$ 、供給電力: $6\sim 7\text{W}$)で加熱して放出した。パイプ先端は乱流場が十分に発達した乱流格子 90M 下流に位置し、そこを座標軸の原点とし、流れ、鉛直方向を x, y 軸とした。

I-X型冷熱二線式温度流速計⁵⁾(S/N比: 60dB)を用いて、加熱気流放出時の温度変動・速度変動2成分の同時分離計測を行った。

3. 実験結果

図2に温度場の確率密度関数を示す。縦軸は平均温度から室温を差引いた相対度数から算出したもので、一様流のCase1, 4ではほぼ正規分布に従い、本研究の加熱気流は平均場には浮力の影響が見られない。しかし、せん断乱流中では、格子・励起乱流場とも速度勾配の大きさに比例して、平均温度分布に非対称性が現れ、ピーク位置も鉛直下向きへ移行し、速度せん断の影響が見られる。格子乱流場のCase1, 2, 3では、 $x/d=200$ まで明確なピークが確認できるのに対し、励起乱流場のCase4, 5, 6では鉛直方向に大きく広がる。このため、励起乱流場では、 $x/d=200$ における拡散係数 K が $K=149\sim 405\text{ cm}^2/\text{s}$ と非常に大きい拡散能を有している。

図2の平均温度分布の標準偏差で与えられる拡散幅 σ と放出パイプ内径 d (初期拡散幅) の流れ方向変化を図3に示す。格子乱流場では、乱流場の横方向インテグラルスケール L_{vx} と d の比が $L_{vx}/d=2.0\sim 2.4$ であるため、乱流渦がプルームを蛇行させず、 $\sigma \propto x^{1/2}$ の長時間拡散場となる。一方、励起乱流場では $L_{vx}/d=8.7\sim 14.4$ に達し、大規模乱流渦によりプルームの蛇行運動が活発となり、 $\sigma \propto x$ の短時間拡散場が実現されている。しかし、 $\sigma \approx L_{vx}$ に達すると、それ以降は大規模渦もプルームに内包されるようになるため、長時間拡散場へ移行すると考えられ、大規模渦のスケールが拡散場の平均的広がりやを決定する重要なパラメータであることが分かる。

ここでは図示しないが、温度変動の間欠率 I_{θ} の鉛直方向分布は、格子乱流場では台形状の分布となり、平均温度分布同様、ピーク位置が下向きとなるのに対し、励起乱流場では $x/d=40$ から中心軸でほぼ対称なガウス状の分布を形成している。これは、プルームは速度勾配によらず、ほぼ真っ直ぐに流下するが、乱流場の大規模渦スケール L_{ux}, L_{vx} が上方向に向かって増大し、同時に拡散能も大きくなるため、平均温度分布のピーク位置が下方向へ移動すると考えられる。図4に示す平均温度のピーク位置における間欠率 $I_{\theta p}$ の流れ方向変化は、格子乱流場ではほぼ $I_{\theta p}=1.0$ であるのに対し、 R_{λ} が大きいCase6では急速に減少し、 $x/d=200$ において $I_{\theta p}=0.25$ まで減少している。励起乱流場では大規模渦によるプルームの蛇行運動が行われることに加え、図4に示すように、 L_{ux}, L_{vx} が流れ方向にも増加するため、下流ほどプルームの蛇行運動の振幅が大きくなったことが影響している。

4. 結論

(1)励起乱流場でプルームの蛇行運動が支配的な短時間拡散場が実現された。(2)プルームの鉛直方向の広がりが、横方向インテグラルスケールと同程度となると、長時間拡散へと移行する。(3)速度せん断によらず、プルームの蛇行運動の重心は直進するが、中心軸より高速側でインテグラルスケール L_{ux}, L_{vx} が大きくなるため、平均温度の鉛直方向分布が低速側へひずみ、速度せん断の影響が現れる。(4)平均温度の鉛直方向分布のピーク位置における間欠率 $I_{\theta p}$ の流れ方向変化は、乱流レイノルズ数 R_{λ} に強く依存し、 R_{λ} が大きいほど減衰率が大きい。(5)乱流場の

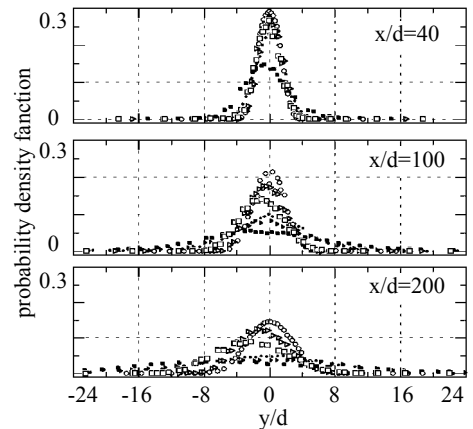


図2 平均温度の鉛直方向分布
○, △, □ : Case1, 2, 3 ●, ▲, ■ : Case4, 5, 6

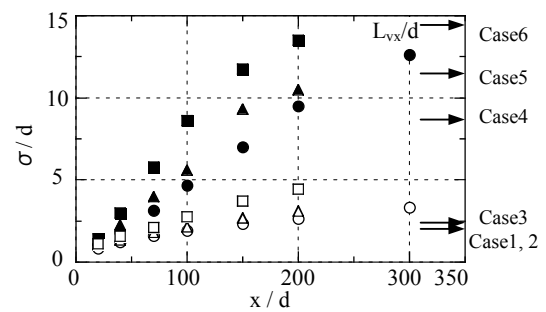


図3 拡散幅 σ の流れ方向変化
○, △, □, : Case1, 2, 3 ●, ▲, ■ : Case4, 5, 6

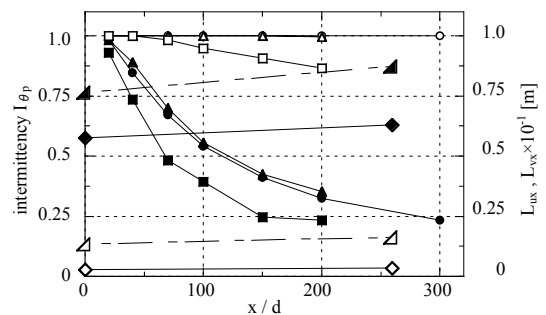


図4 ピーク位置における間欠率 $I_{\theta p}$ の流れ方向変化
 $I_{\theta p}$; ○, △, □, : Case1, 2, 3 ●, ▲, ■ : Case4, 5, 6
 L_{ux}, L_{vx} ; ◇, △ : Case3 ◆, ▲ : Case6

統計量がスカラー場の拡散に強い影響を与える。

日本学術振興会研究費補助金基盤研究(c)No.17560145の援助を受けた、ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) H. Makita: Fluid Dyna. Res., **8**, (1991), pp.53-64.
- 2) 蒔田, 佐々, 飯田, 茂山: 機論 B, **56**, (1990), pp. 388-395.
- 3) 蒔田, 宮田, 関下: 機論講, **05-32**, (2005-10), pp. 250.
- 4) 蒔田, 谷口, 関下: 第4回日本流体力学会中部支部講演論文集, (2006-11), pp. 21-22.
- 5) 蒔田, 森, 澤田: 機論 B, **56**, (1992), pp. 90-97.