12 安定温度成層内の乱流ブルームの秩序運動

神戸大学工学部 能登勝久 堀井 勉

本田充信 松本隆一

COHERENT MOTION OF TURBULENT THERMAL PLUME IN STABLY STRATIFIED FLUID

K.NOTO,* T.HORII, M.HONDA and R.MATSUMOTO

An aim in this paper is to clarify an existence of coherent structure in a turbulent plane thermal plume in a stable-thermally stratified fluid inside a comparatively large enclosure. First, the thermal plume could be observed by means of a flow visualization. Secondly, statistical analyses were carried out on time series data of the turbulent plane thermal plume. Finally, physical characteristics were made clear on visualized vortex pair in the thermal plume inside a thermally stratified fluid. As a result, main conclusions obtained as follows. (1) An existence of vortexes near the top region of the thermal plume was discovered by means of flow visualizations. (2) From the spectrum analyses of thermal plume, it was found that this vortex is generated in the transition region and is transported to the turbulent region. (3) This vortex is an ordered and large scale coherent motion.

1. 緒言 安定温度成層内に設置された水平線熱源から発生するサーマルブルームについて、水平線熱源の加熱量が小さい場合のフューミゲーション状態、加熱量増大に伴う揺動振幅の増大、そして加熱量がさらに増大すれば揺動振幅は減少し、同時にブルームは乱流化することを、著者らは既に報告してきた。(1,2) この研究過程で、加熱量が高い場合の乱流ブルームの先端から、渦または渦対が放出されることに著者は気が付いていた。この渦の存在自体、したがってこの渦の特性について、従来のブルームの研究では、全く明らかにされていない。本報では、この渦または渦対を可視化し、次にスペクトル特性を求め、結論として、この渦が乱流の秩序運動であることを明らかにした。

2. 実験装置および方法 実験装置および測定系の概略を図1に示す。前報とほぼ同様であるが、本研究の目的達成のために、可視化の際の煙トレーサ法、照明系及びデータサンプリング時の熱電対出力の増幅器の改良を行った。その結果、乱流ブルーム内の比較的大きな渦の可視化、および高分解能でデータサンプリングが可能になった。すなわち、これらによって、可視化された渦が乱流状態にあるか否かを論究する手がかりを得ることが可能になった。

3. 乱流ブルームの可視化 本研究の目的のなかで、先ず乱流ブルームの可視化の比重は大きい。そのために、煙トレーサ運動の残骸として渦を観

Fig.1 Experimental Apparatus and Measurement system

察してしまわないこと、煙トレーサと周囲流体(空気)との温度バランス等に細心の注意を払って、可視化を行った。ブルームの可視化は、図1で、シート状光源(図1のP2)を照射し、カメラ(C2)で撮影された。

Fig.2 Thermal Plume

* Dept. of Mech. Engng., Kobe University, Nada, Kobe, 657 Japan

Fig.3 Visualization of Vortex in Ordinary Heat Rate

水平線熱源(Hw)から乱流渦に至る全ブルーム領域の可視化の一例を図2に示す。図2の上部に存在する渦領域可視化結果を図3、4に示す。

Fig.4 Visualization of Vortexes in Large Heat Rate ($Q=83.60W/m$)

各図でX, Yは水平線熱源からの鉛直および水平方向距離である。水平線熱源は(X, Y)=(0, 0)の位置に存在する。同図で縦軸Grxは、 $X^3 g \beta Q / \lambda Pr \nu^2$ で定義される局所グラスホフ数である。図3では、線熱源からブルームは図2のようにほぼ真すぐに立ち昇り、そして渦巻くようになる。なおi, ii, iiiは時刻のみが異なる。加熱量が増大すれば、渦の水平方向距離が増大し、渦が上方へ放出されるようになる。加熱量がさらに増大すれば、図4のように、渦巻いた流れが、上方へ放出されるが、渦の水平方向距離は減少する。図2～4に示すようにブルーム上端部で、渦巻いた流れが確実に発生している。この渦の存在およびその可視化は従来、全くなされていなかった。

4. 時間平均温度分布 ブルームが発生していない本密閉容器内では、 $-250 < X(mm) < 450$ の領

Fig.5 Time-Averaged Temperature

域で、温度 T が $T(X) = T_{x=0} + St \cdot X$ なる安定温度成層が形成されている。成層の上方ほど温度は高い。なお、線熱源からブルームを発生させると、ブルームの影響のため、ブルームから十分に離れた領域の上記の成層温度分布は、やや変化する。一方、ブルーム温度は上方ほど温度が降下する。すなわちブルームはある位置で周囲流体と温度バランスする。図5にブルームの時間平均温度分布と周囲温度の X 方向への変化を図4の条件について示す。ブルーム温度は時間変動するため、同図には、ブルーム各位置での温度偏差値を記号 $\mid - \mid$ で示した。図5で、ブルーム温度が周囲流体温度より高い領域では、ブルームの上昇力が存在し、 X が増大すれば両者間の温度差は小さくなる。図4に示す渦の存在領域の温度差は比較的小さい。Corrsin⁽³⁾は乱流噴流でメインフローと周囲流体との速度境界面に大規模渦運動が存在することを発見した。自由乱流でのこのCorrsinの秩序運動はよく知られている。一方、本報で扱っている乱流ブルームでは流れ状況が噴流と異なり図3、4に観察される渦は、周囲流体とブルームの各々の温度がバランスする位置より、やや下方で発生する。すなわち、立ち昇るブルームの軽い流体粒子群が上方の重い流体粒子群と入れ替わることが、図3、4に示す渦の形成原因の一つと考えられる。

5. 温度波形 ブルーム温度の時間変化を図6に示す。図6(1)には $Y=0$ の中心面上のそれぞれの高さ X での温度変化を示す。図4の渦発生領域より下方での温度変化は、最高温度が一定のいわゆる層流状態の温度変化である。渦が発生した位置近傍では、変化の極めて大きい温度波形になる。 X が増大すれば、温度偏差は減少する。印 $\blacktriangleleft$ および $\blacktriangleright$ は層流から乱流への遷移開始および終了点を示す。図6(2)および(3)には、遷移域および乱流域で、高さ一定で、 Y 方向の各位置での温度変化を示す。遷移および乱流領域では、 Y が増大すればブルーム外側の周囲流体の温度分布が現われてくることが特徴である。成層度 $St = 0.15$ (K/cm) の条件でも上記の傾向は同一であった。

6. パワースペクトル密度分布 図7に $Y=0$ の中心面上のパワースペクトル密度分布を示す。

Fig.6 Temperature Wave ($St=0.30$ K/cm, $Q=83.60$ W/m)

層流域では $-9/2$ 、 -8 の勾配、乱流域では $-5/3$ 、 -3 の勾配が存在する。これらの値は非成層ブルームでも存在した。(4) 図7に示されるように、遷移領域で小さなピークが存在する。これは乱れの非線形および偶然化現象に起因すると判断される。

図8に、層流域、遷移域および乱流域のY方向距離を変化させた各位置でのパワースペクトル密度分布を示す。層流域ではYを増大させても、層流状態のままである。遷移域では、Yを増大させれば遷移状態から層流状態になる。乱流域では、Yを増大させれば、遷移状態の分布、さらにYを増大させれば、層流状態の分布になる。

7. サーマルブルームの秩序構造渦 図4に示した渦は、上記のように遷移域および乱流域に存在する。したがって図4に示した渦はサーマルブルームの秩序構造渦と判断してもよい。すなわちサーマルブルームでも、小さなスケールの乱れに、比較的大きなスケールの秩序運動が重畳するという、乱流の2重構造モデルはあてはまる。ただ従来の秩序運動論では遷移領域については全く触れられていないが、本研究で可視化された渦は遷移領域から発生し、乱流状態に達することが特徴である。本研究では、成層度の最大値は 0.30 (K/cm) であったが、成層度がさらに増大すれば、図4に示される秩序構造渦は渦列を形成するようになると考えられる。

8. 結論 (1) 安定温度成層内で発生するブルーム上端部で、渦・渦対が発生することが、はじめて可視化された。(2) 上記の渦・渦対は、パワースペクトル密度分布から、遷移領域で発生し、乱流状態に達することがわかった。(3) したがって、本研究で可視化された渦・渦対は自由乱流の秩序運動であると結論される。文献 (1)Noto, K. et al., Proc. 4th Int. Symp. Flow Visual., Springer-Verlag(in print) (2)能登ら, 流れの可視化, Vol.16, No. 22, pp.357-362, 1986. (3)Corrsin, S., NACA. Wartime Rep., W-94, 1943. (4)Noto, K. et al., AIAA-86-1266, 1986.

Fig.7 Power Spectrum Density (on the Mid-Plane, $\text{St}=0.15\text{K/cm}$, $Q=83.60\text{W/m}$)

(1) Laminar Region ($\text{Grx}=3.34 \cdot 10^8$)

(2) Transition Region ($\text{Grx}=1.93 \cdot 10^9$)

(3) Turbulent Region ($\text{Grx}=6.45 \cdot 10^9$)

Fig.8 Power Spectrum Density (on the Section with Given Height, $\text{St}=0.15\text{K/cm}$, $Q=83.60\text{W/m}$)