

21

# 浮力のあるガスが排出された場合の 建物周辺の濃度変動, 乱流拡散構造に関する風洞実験

Wind Tunnel Tests on Turbulent Diffusion  
and Concentration Fluctuation of Buoyant Gas near Building

富永 禎秀\*1      村上 周三\*2      持田 灯\*3  
Yoshihide TOMINAGA      Shuzo MURAKAMI      Akashi MOCHIDA  
渋谷 亜紀子\*4      野口 康仁\*1  
Akiko SHIBUYA      Yasuhiro NOGUCHI

ABSTRACT

A Series of wind tunnel measurements of fluctuating gas concentration near a building model was carried out using a high response FID for three cases in which the densimetric Froude Number was specified at -8.6, 0 and 8.6 respectively. Large influence of the buoyancy effect on distributions of  $\langle c \rangle$ ,  $\langle c'^2 \rangle$  and spectrum shape of  $c'$  was observed in the area near the tracer outlet. The structures of the turbulent diffusion fields of the cases were discussed precisely. Special attention was paid to local stability of air which changes significantly in space according to buoyant gas diffusion, so that many features of turbulent diffusion fields under stable and unstable conditions were clarified.

1 序

汚染質濃度の変動性状に関する研究は、拡散場の構造の解明や汚染質の短期被曝に関わる環境影響評価のために不可欠であるが、これに関する風洞実験例は濃度計の応答性の問題から非常に少ない。本報では、高応答性のFID型炭化水素濃度計<sup>x1~3)</sup>を用いて立方体モデル周辺における浮力の働くガスの濃度変動を風洞実験により測定し、平均濃度及び濃度変動の分散の分布性状、濃度変動の波形・スペクトルの形状等について検討した。更に浮力の働くガスが排出された場合に建物後方に生じる安定状態、不安定状態の領域における濃度変動の分散の生産構造について、風洞実験結果と $\langle c'^2 \rangle$ ,  $\langle u_i' c' \rangle$ の輸送方程式の構造より考察した。

2 実験概要

1) 風洞 境界層型風洞を使用した。2) 模型 一辺20cmの立方体を用い、立方体模型背面から10cm風下の中心軸上の床面より $\langle w_s \rangle / \langle u_b \rangle = 0.5$ でガスを排出した(図1)。排出口形状は一辺0.5cmの正方形。3) 実験条件 実験種類を表1に示す。接近流は $\langle u_1(x_3) \rangle = x_3^{1/4}$ の指数則に従う(図2)。表1のCase2-1~2-3では $\langle u_b \rangle$ は0.4m/s、Re数は $5.7 \times 10^3$ とした<sup>\*)</sup>。

<記号>

- $u_i$  : 風速3成分 ( $i=1$ :主流( $x_1$ )方向,  $i=2$ :横( $x_2$ )方向,  $i=3$ :鉛直( $x_3$ )方向、上向きが正)
  - $c$  : 排出口から排出された混合ガスの各測定点における濃度の瞬時値 (希釈率)
  - $\langle c_0 \rangle$  : 基準濃度 ( $=q / \langle u_b \rangle \cdot H_b^2$ ,  $q$ はガス発生量。本実験では $\langle c_0 \rangle = 312.5ppm$ )
  - $\langle c \rangle$  : 平均濃度 (ここでは $\langle c_0 \rangle$ で基準化)
  - $\langle c'^2 \rangle$  : 濃度変動の分散 (ここでは $\langle c_0 \rangle^2$ で基準化)
  - $\sqrt{\langle c'^2 \rangle} / \langle c \rangle$  : 濃度変動の乱れの強さ
  - $\langle f \rangle$  : 変数  $f$  の時間平均  $f'$  : 時間平均値からのずれ ( $f' = f - \langle f \rangle$ )
  - $H_b$  : 建物高さ  $u_b$  : 棟高風速  $w_s$  : ガス排出速度
  - $\rho$  : 気体密度  $\rho_s$  : 排出ガス密度  $\rho_a$  : 空気密度  $\Delta\rho = \rho_s - \rho_a$
  - $k$  : 乱流エネルギー ( $=1/2 \langle u_i' u_i' \rangle$ )  $\nu$  : 動粘性係数
  - $K$  : 分子拡散係数  $Re$  : レイノルズ数 ( $=\langle u_b \rangle \cdot H_b / \nu$ )
  - $g$  : 重力加速度 (9.8m/s<sup>2</sup>)  $Fr_d$  : 密度フルード数 ( $=g \Delta\rho \cdot H_b / \rho_a \cdot \langle u_b \rangle^2$ )
  - $S(n)$  : パワースペクトル  $n$  : 周波数  $n_p$  : ピーク周波数
- 結果は $\langle u_b \rangle$ ,  $H_b$ ,  $\langle c_0 \rangle$ で無次元化して表示。

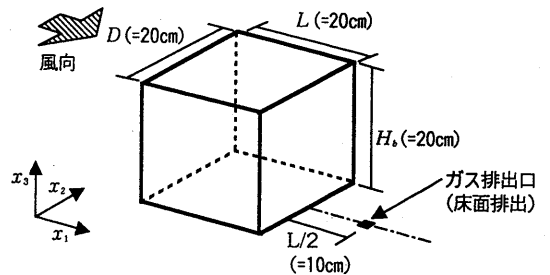


図1 模型概要

\*1 東京大学 大学院生 日本建築学会

\*2 東京大学生産技術研究所 教授 日本建築学会

\*3 東京大学生産技術研究所 助手 日本建築学会

\*4 (株) 間組 (当時東京大学 大学院生) 日本建築学会

Graduate Student of University of Tokyo

Professor of Institute of Industrial Science, University of Tokyo

Research Associate of Institute of Industrial Science, University of Tokyo

HAZAMA Co.

空気と等密度のガスには $C_2H_4$ 、軽いガスには $C_2H_6$ と $He$ 、重いガスには $C_2H_4$ と $SF_6$ を混合したものを使用した。4)測定器 風速はタンデム型熱線風速計、濃度は時定数約3msの高応答のFID型炭化水素濃度計(Cambustion社、HFR300)<sup>※2</sup>を用いた。 $\langle u_b \rangle = 0.4m/s$ の実験では $\Delta t = 100ms$ 、 $\langle u_b \rangle = 4.0m/s$ の場合は $\Delta t = 10ms$ とし、いずれのCaseとも4096個の瞬時値を採取し、以下に示す諸量を算出した。

### 3 実験結果

#### 1) 平均濃度 $\langle c \rangle / \langle c_0 \rangle$ の分布 (図3)

①  $\rho_s/\rho_a = 1.0$  (Case2-1) 排出されたガスは模型後方の循環流により風上に移流される(図3(1))。

②  $\rho_s/\rho_a = 0.3$  (Case2-2)  $\rho_s/\rho_a = 1.0$  (図3(1))と比較して、wake内下部( $x_3/H_b \leq 0.5$ )の濃度が全体的に小さい(図3(2))。特に排出口から建物背面の間で、ガスが浮力のために斜め風上に拡散され、床面付近の濃度が半減している。又、排出口後方の地表面付近も低濃度となっている。③  $\rho_s/\rho_a = 1.7$  (Case2-3)  $\rho_s/\rho_a = 1.0$ の場合と比較してwake内下部の平均濃度は高く、排出口風上の床面付近に非常に高濃度域が発生する(図3(3))。

#### 2) 濃度変動の分散 $\langle c'^2 \rangle / \langle c_0 \rangle^2$ の分布 (図4)

各Caseとも濃度変動の分散は平均濃度の分布と対応した性状を示し、平均濃度の大きい領域では分散の値も大きいという対応関係が見られる。この理由に関しては後で詳しく述べる。

#### 3) 濃度変動 (瞬時値) の波形 (図5)

いずれの場合も間欠的に平均値の数倍から数十倍以上の高いピークが発生する。文献2で指摘したように、風速に比べて濃度変動のガストファクター(G.F.)の値は非常に大きく、10~100程度となる。

①  $\rho_s/\rho_a = 1.0$  (Case2-1, 図5(1)) 濃度変動の乱れの強さ( $\sqrt{\langle c'^2 \rangle} / \langle c \rangle$ )はPoint1(循環域中央部)、Point2(床面付近)ともほぼ同程度である。

②  $\rho_s/\rho_a = 0.3$  (Case2-2, 図5(2))

図3(2)および図8(1)(後述)より、Point2の位置するガス排出口から建物背面の間の地表面付近では $\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_3} > 0$ 、即ち $\frac{\partial \langle \rho \rangle}{\partial x_3} < 0$ の安定状態となっているものと判断される。一方、point1が位置する $\langle c \rangle / \langle c_0 \rangle \geq 10$ の高濃度域の上方では $\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_3} < 0$ 、すなわち $\frac{\partial \langle \rho \rangle}{\partial x_3} > 0$ の不安定状態となっていると判断される。Point2では

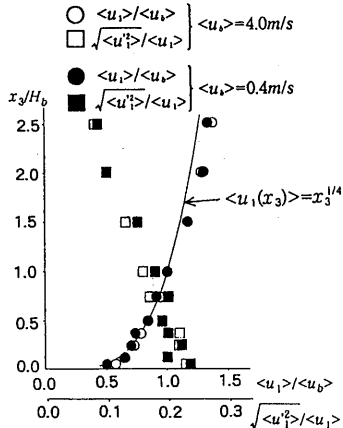
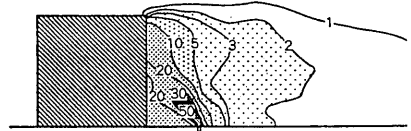


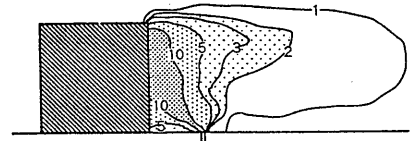
図2 接近流の分布 ( $u_1$ 成分)

表1 実験種類

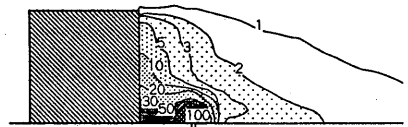
実験 Case	$\langle u_b \rangle$ (m/s)	Re数	$\rho_s/\rho_a$	$\frac{\langle w_s \rangle}{\langle u_b \rangle}$	Fr.d数	実験概要
1	4.0	$5.7 \times 10^4$	1.0	0.5	0.0	レイノルズ効果の検討 (Case2-1との比較) <sup>※1)</sup>
2-1	0.4	$5.7 \times 10^3$	1.0	0.5	0.0	浮力の働くガスの拡散性状
2-2	0.4	$5.7 \times 10^3$	0.3	0.5	-8.6	
2-3	0.4	$5.7 \times 10^3$	1.7	0.5	+8.6	



(1)  $\rho_s/\rho_a = 1.0$  (Case2-1)

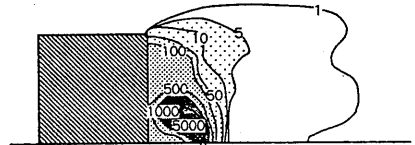


(2)  $\rho_s/\rho_a = 0.3$  (Case2-2)

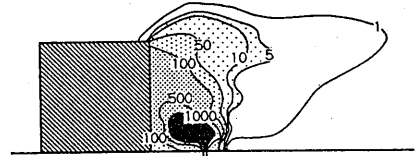


(3)  $\rho_s/\rho_a = 1.7$  (Case2-3)

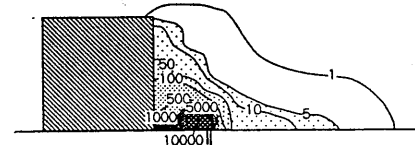
図3  $\langle c \rangle / \langle c_0 \rangle$  の分布 (鉛直断面、中心軸上)



(1)  $\rho_s/\rho_a = 1.0$  (Case2-1)



(2)  $\rho_s/\rho_a = 0.3$  (Case2-2)



(3)  $\rho_s/\rho_a = 1.7$  (Case2-3)

図4  $\langle c'^2 \rangle / \langle c_0 \rangle^2$  の分布 (鉛直断面、中心軸上)

ピークの発生頻度がPoint1より少なく、比較的変動が少ないが、時々発生するピークは非常に高い。Point2の濃度変動の乱れの強さ( $\sqrt{\langle c'^2 \rangle} / \langle c \rangle$ )は、 $\rho_s / \rho_a = 0.3$ のPoint1(図5(2)),  $\rho_s / \rho_a = 1.0$ の場合のPoint1, Point2(図5(1))より大きな値を示している。Point2のこの高いピークは上方の高濃度域との空気交換が時々発生するためと考えられる。

③  $\rho_s / \rho_a = 1.7$  (Case2-3, 図5(3)) 模型後方の流れ場全域で  $\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_3} < 0$  となっているので(図3(3), 図8(1))  $\rho_s / \rho_a = 1.7$ の場合  $\frac{\partial \langle \rho \rangle}{\partial x_3} < 0$ の安定成層中にPoint1, Point2ともに位置している。濃度変動の乱れの強さを比較すると、 $\rho_s / \rho_a = 1.0$ ,  $\rho_s / \rho_a = 0.3$ の場合と比べて小さい。

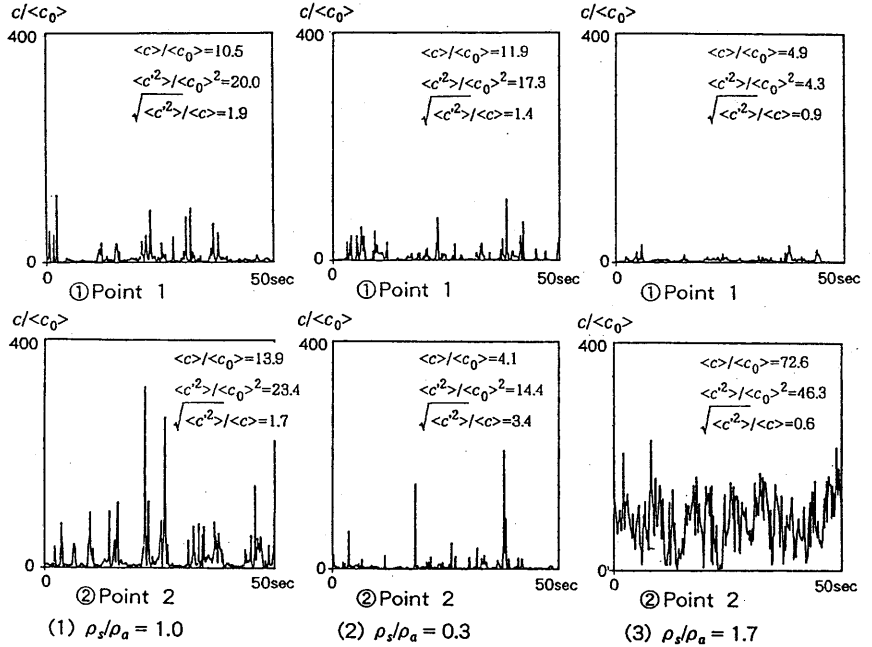


図5 濃度変動の波形(測定点は左下の図参照)

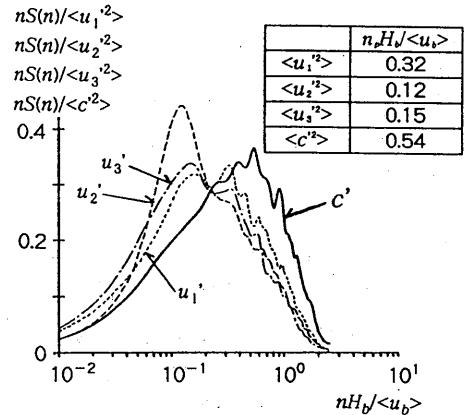
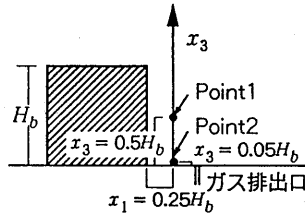


図6 濃度変動, 風速変動のパワースペクトル ( $\rho_s / \rho_a = 1.0$ , Point1)

#### 4) 濃度変動のスペクトルの性状

##### 4)-1 濃度変動と風速変動のスペクトルの比較(図6)

$\rho_s / \rho_a = 1.0$ の場合の濃度変動のスペクトルは風速変動のそれより高周波域にパワー、ピークを持つ。又、ここには示さぬが、排出口から遠ざかるに従ってその形状は風速のスペクトルのそれに近づく。

##### 4)-2 浮力による濃度変動のスペクトル形状の変化(図7)

$\rho_s / \rho_a = 0.3$ の場合、 $\rho_s / \rho_a = 1.0$ に比べて低周波領域でパワーがやや減少し、高周波側に偏る傾向が見られる。 $\rho_s / \rho_a = 1.7$ の場合、低周波側にパワーを持ち、ピークは平坦である。ここには示さぬが、他の測定点でも同様の傾向が見られた。

#### 4 排出ガスの浮力が乱流拡散場に及ぼす影響に関する考察

##### 1) 濃度変動の分散 $\langle c'^2 \rangle$ と濃度勾配 $\partial \langle c \rangle / \partial x_3$ (図8, 表2, 表3)

①  $\rho_s / \rho_a = 1.0$  (●-) 濃度変動の分散が最大となる高さと同平均濃度が最大となる高さは一致している。この対応関係は $\langle c'^2 \rangle$ 方程式中の生産項の形 ( $-2 \langle u_i' c' \rangle \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_i}$ )<sup>註3)</sup>から見て妥当と

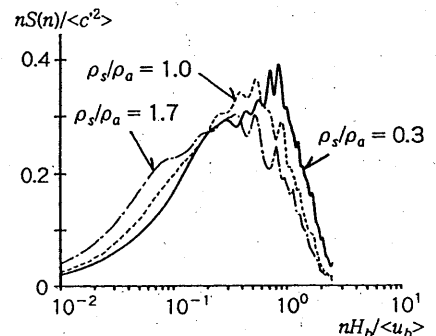
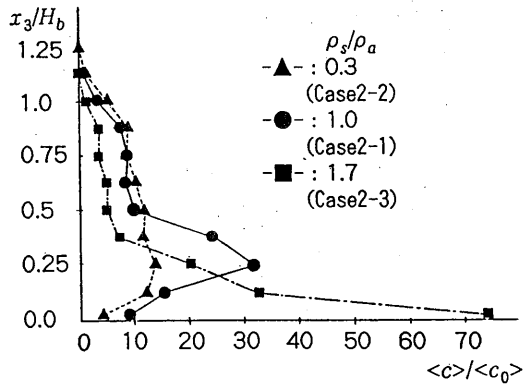
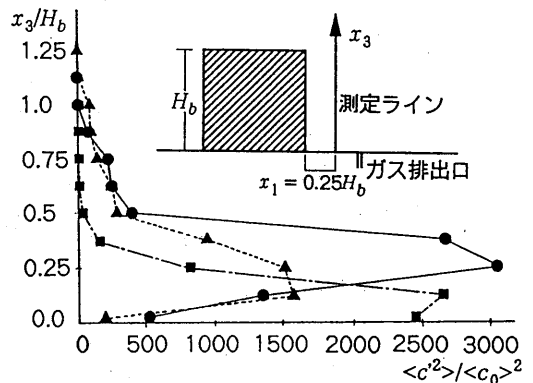


図7 濃度変動のパワースペクトル (Point1)

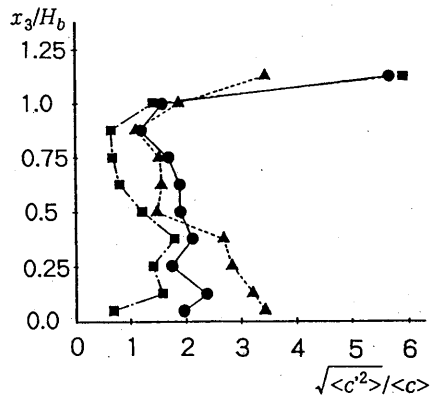
思われる。即ち、 $\langle c \rangle$  のピーク値 (高さ  $x_3/H_b=0.25$  付近) の上下に存在する  $\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_1}$  の大きな値が生産項を通じて  $\langle c^2 \rangle$  の値に大きな影響を及ぼす。②  $\rho_s/\rho_a=1.7$  (■) 前述したように、 $\rho_s/\rho_a=1.7$  の場合は模型後方の流れ場全域で安定成層が形成されている。このため、安定、不安定が混在する  $\rho_s/\rho_a=0.3$  の場合に比べて現象を理解しやすい。この場合  $x_3/H_b \leq 0.25$  では  $\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_3}$  の絶対値は  $\rho_s/\rho_a=1.0$  の場合に比べて非常に大きくなっているが (図8(1)、表2⑤)、この領域のなかの濃度変動の分散 ( $\langle c'^2 \rangle / \langle c \rangle^2$ ) の最大値は  $\rho_s/\rho_a=1.0$  の場合よりやや小さめである (図8(2))。同じく、濃度変動の乱れの強さ ( $\sqrt{\langle c'^2 \rangle} / \langle c \rangle$ ) を見ても、 $\rho_s/\rho_a=1.7$  の場合、wake 内部では  $\rho_s/\rho_a=1.0$  の場合よりかなり小さい (図8(3))。  $\rho_s/\rho_a=1.7$  の場合、この領域で  $\langle c \rangle$  が極めて大きく、これに伴って濃度勾配  $\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_3}$  の絶対値が他の2ケースより格段に大きくなっている。従って、前述した  $\rho_s/\rho_a=1.0$  の場合の濃度勾配  $\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_3}$  と  $\langle c^2 \rangle$  の生産項の関係に関する考察では、ここで  $\langle c'^2 \rangle$  や  $\sqrt{\langle c'^2 \rangle} / \langle c \rangle$  が  $\rho_s/\rho_a=1.0$  の場合よりも小さくなることは説明できず、濃度変動に対する負の浮力の影響<sup>24)</sup>を考慮する必要がある。この領域では  $\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_3}$  の絶対値が非常に大きい、負の浮力の影響で<sup>24)</sup>正の  $\langle u_3'c' \rangle$  が小さくなるものと推測され (表2③、④)<sup>25)</sup>、 $\langle c^2 \rangle$  の生産項中の  $\langle u_3'c' \rangle$  と  $\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_3}$  が相殺しあい  $\langle c^2 \rangle$  は  $\rho_s/\rho_a=1.0$  よりやや小さめの値となる (表2の⑥ (=  $-2 \times ④ \times ⑤$ ))。③  $\rho_s/\rho_a=0.3$  (▲) 濃度変動の分散が最大となる高さと同様に平均濃度が最大となる高さは等密度の場合と同様ほぼ一致している (図8(1)、(2)、表3①)。又、後述するように平均濃度が最大値を示す  $x_3/H_b=0.25$  付近で  $\langle u_3'^2 \rangle$  も最大となる (図9(3)参照)。図8(1)(2)において濃度勾配と濃度変動の分散の値を比較すると、 $x_3/H_b \geq 0.5$  では  $\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_3}$  およびそれに対応する  $\langle c^2 \rangle$  の値は  $\rho_s/\rho_a=0.3$  の場合 (-▲-) も  $\rho_s/\rho_a=1.0$  (-●-) とほぼ同じである。  $\rho_s/\rho_a=0.3$  の場合、 $x_3/H_b=0.2 \sim 0.4$  までの  $\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_3}$  は、 $x_3/H_b \geq 0.5$  の  $\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_3}$  とあまり変わらないが、対応する  $\langle c^2 \rangle$  の値は  $x_3/H_b \geq 0.5$  の領域でのそれと比較して格段に大きくなっている。又、濃度変動の乱れの強さ  $\sqrt{\langle c'^2 \rangle} / \langle c \rangle$  (図8(3))を見ても、 $\rho_s/\rho_a=0.3$  (-▲-) の場合、 $x_3/H_b=0.2 \sim 0.4$  では  $\rho_s/\rho_a=1.0$  (-●-) と比べて大きな値を示している。以上よりこの領域では  $\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_3}$  よりも正の浮力の影響による正の  $\langle u_3'c' \rangle$  (表3⑤、④)<sup>25)</sup>の増加<sup>24)</sup>により  $\langle c^2 \rangle$  の生産が促進されているものと推定される (表3の⑥ (=  $-2 \times ④ \times ⑤$ ))。又、高濃度域下部 ( $x_3/H_b < 0.2$ ) では  $\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_3}$  が上方の負から正に変化し (図8(1)、表3⑤)、 $\langle u_3'c' \rangle$  の符号が正から負に転化しているものと推定される<sup>25)</sup>。このため  $\langle u_3'c' \rangle$  の浮力生産項の正の値は、負の  $\langle u_3'c' \rangle$  の絶対値を減少させ (表3④)、これにより  $\langle c^2 \rangle$  の生産項が減少し (表3⑥)、 $\langle c^2 \rangle / \langle c \rangle^2$  も  $x_3/H_b < 0.2$  で急速に低下する (図8(2)、-▲-)。



(1) 平均濃度  $\langle c \rangle / \langle c_0 \rangle$



(2) 濃度変動の分散  $\langle c'^2 \rangle / \langle c_0 \rangle^2$



(3) 乱れの強さ  $\sqrt{\langle c'^2 \rangle} / \langle c \rangle$

図8 平均濃度、濃度変動の分散、濃度の乱れの強さの分布 ( $x_1/H_b=0.25$ , 中心軸上)

2) 風速変動の分散,  $k$  の鉛直分布への浮力の影響

2)-1 風速変動の分散 (図9)  $\langle u_3'^2 \rangle$  (図9(3))は正の浮力を持つ  $\rho_s/\rho_a=0.3$  (Case2-2,  $\blacktriangle$ ) の場合に特徴的な分布を示す。即ち、床面付近を除いて大きな値を示し、平均濃度が最大を示す  $x_3/H_b=0.25$  で最大となる。これは  $\langle u_3'^2 \rangle$  の輸送方程式の浮力生産項 ( $-2Fr_d \langle u_3'c' \rangle$ ) の正の寄与によるものであると考えられる<sup>26)</sup>。また、 $x_3/H_b$  が0.2以下の領域では  $\langle u_3'^2 \rangle$  は急激に低下する<sup>27)</sup>。他の2成分(図9(1)、(2))は  $\langle u_2'^2 \rangle$  の場合に床面付近 ( $x_3/H_b < 0.2$ ) に見られる差異を除いて浮力の有無の影響は比較的小さい。 $\langle u_2'^2 \rangle$  (図9(2))は床面付近で  $\rho_s/\rho_a=0.3$  ( $\blacktriangle$ ) が最大、 $\rho_s/\rho_a=1.7$  ( $\blacksquare$ ) が最小になっている。 $\rho_s/\rho_a=0.3$  の  $\langle u_2'^2 \rangle$  はこの部分では  $\langle u_3'^2 \rangle$  (図9(3)) より大きな値を取る<sup>28)</sup>。

2)-2 乱流エネルギー  $k$  (図10)  $\rho_s/\rho_a=0.3$  ( $\blacktriangle$ ) は  $\langle u_3'^2 \rangle$  (図9(3))と同様の分布を示し、床面付近の一部以外では  $\rho_s/\rho_a=1.0$  よりも大きな値を示す<sup>29)</sup>。 $\rho_s/\rho_a=0.3$  の場合一番下の測定点 ( $x_3/H_b=0.05$ ) ではその上の測定点 ( $x_3/H_b=0.125$ ) に比べて  $k$  の値は大幅に低下しており、これも  $\langle u_3'^2 \rangle$  の分布と対応している。 $\rho_s/\rho_a=1.7$  ( $\blacksquare$ ) の場合、 $\rho_s/\rho_a=1.0$  ( $\bullet$ ) に比べて  $k$  が全体的に小さい<sup>27)</sup>。

5 まとめ

- 1) 本実験で正の浮力の働く場合 ( $\rho_s/\rho_a=0.3$ ,  $Fr_d=-8.6$ ) はガスは浮力の影響で斜め風上に拡散され、負の浮力の働く場合 ( $\rho_s/\rho_a=1.7$ ,  $Fr_d=8.6$ ) はガスは床面付近に滞留し、濃度分布には等密度の場合と明確な差異が認められた。
- 2) いずれの場合も平均濃度分布と分散の分布はほぼ対応しており、全般に平均濃度が高いところではその分散が大きくなる傾向にあった。
- 3) 濃度変動の分散  $\langle c'^2 \rangle$  の分布性状には浮力の影響が明らかに認められる。
- 4) 風速に比べて濃度変動のG.F. は非常に大きく、模型後方の高濃度域で10~100程度となった。
- 5) 等密度のガスの濃度変動のスペクトルピークは排出口の比較的近傍の高濃度域では風速変動のそれより高周波側に存在した。又、軽いガスでは低周波域でのパワーが減少し、ピークは等密度より更に高周波側に存在する。重いガスでは、パワーが低周波域に偏り、ピークは平坦となる傾向にあった。
- 6) 軽いガス排出の場合、高濃度域及びその上方の不安定状態の領域で  $\langle u_3'^2 \rangle$ ,  $k$  の値は等密度の場合より正の浮力の影響で大きくなる。重いガスの場合、全般に負の浮力の影響で  $k$  の値が等密度の場合よりやや小さくなった。
- 7) これらの構造は  $\langle u_3'^2 \rangle$ ,  $k$ ,  $\langle c'^2 \rangle$  や  $\langle u_i'c' \rangle$  の輸送方程式中の生産項と関連付けて明確に説明される。実際の現象は生産項の他に移流や拡散の効

表2  $\rho_s/\rho_a=1.7$  ( $Fr_d=+8.6$ ) の場合の  $\langle c'^2 \rangle$  生産の構造(注5)

① 高さ $x_3/H_b$	② 安定度	③ $\langle u_3'c' \rangle$ の浮力生産項 $-Fr_d \langle c'^2 \rangle$	④ $\langle u_3'c' \rangle$	⑤ $\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_3}$	⑥ $\langle c'^2 \rangle$ の生産項 $-2 \langle u_3'c' \rangle \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_3}$
上方 ( $\approx 1$ )	安定 ( $\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_3} < 0$ )	⊖ ↓ 絶対値増 大きな負	⊕ ↓ 減 0に近づく	⊖ ↓ 絶対値増 非常に大きな負	⊕ ↑ 増加せず
下方 ( $< 0.2$ )					

・  $\langle u_i'c' \rangle$  の浮力生産項③は常に負

表3  $\rho_s/\rho_a=0.3$  ( $Fr_d=-8.6$ ) の場合の  $\langle c'^2 \rangle$  生産の構造

① 高さ $x_3/H_b$	② 安定度	③ $\langle u_3'c' \rangle$ の浮力生産項 $-Fr_d \langle c'^2 \rangle$	④ $\langle u_3'c' \rangle$	⑤ $\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_3}$	⑥ $\langle c'^2 \rangle$ の生産項 $-2 \langle u_3'c' \rangle \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_3}$
上方 ( $\approx 1$ )	不安定 状態 ( $\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_3} < 0$ )	⊖ ↑ 増 常に最大 ⊕	⊕ ↑ 増 ⊖ 絶対値減	⊖ ↑ 減 ⊕	⊖ ↑ 増 ⊕ 減
0.4 0.2 下方 ( $\approx 0$ )					

・  $\langle u_i'c' \rangle$  の浮力生産項③は常に正

( 表2, 表3の③, ⑥の列は測定値。④, ⑥は図4, 図8等により総合的に判断して推定したもの。 )

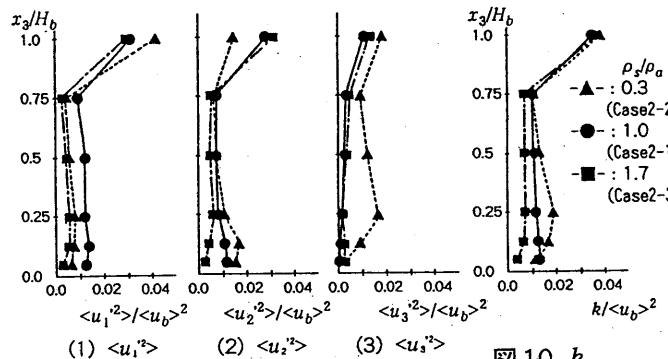


図9 風速変動の分散 ( $x_3/H_b=0.25$ , 中心軸上)

図10  $k$  ( $x_3/H_b=0.25$ , 中心軸上)

果も関与しており、これらも含めたより詳細な考察は今後の課題としたい。又、このような考察を行う上ではLESやDSM等の数値解析を行うことが必須と考えられるので、今後は本データを利用した数値解析結果の精度検証も行っていきたいと考えている。

**注1** 低風速が要求される浮力の働くガスの実験におけるレイノルズ効果の検討のために  $Re$  数 =  $5.7 \times 10^4$  と  $5.7 \times 10^3$  の2つの  $Re$  数の下で同一の排出条件で等密度のガスを排出し(表2 Case1とCase2-1)、平均風速、乱流エネルギー  $k$ ,  $\langle c \rangle$ ,  $\langle c'^2 \rangle$  の分布を比較し、レイノルズ効果が比較的小さいことを事前に確認した。(図11参照。  $Re$  数 =  $5.7 \times 10^4$  の  $\langle c \rangle$ ,  $\langle c'^2 \rangle$  については文献5参照。)

**注2** 本濃度測定システム(図12)の特徴は、①FIDヘッドを風洞内に設置し、サンプルガスは短い流路で直接FIDヘッドに吸引される。②測定点からFIDヘッドへ至る流路には直径0.15mmのキャピラリーチューブを用いているため、流路容積が非常に小さく、また、チューブ内の混合ガスを促す拡大や縮小等は存在しない。従来のFIDへの上記改良の結果、時定数約3msの高応答性が実現される<sup>(2)(3)</sup>。

**注3** 濃度変動の分散  $\langle c'^2 \rangle$  の輸送方程式は、

$$\frac{\partial \langle c'^2 \rangle}{\partial t} + \langle u_i \rangle \frac{\partial \langle c'^2 \rangle}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ -\langle u_i c'^2 \rangle + K \frac{\partial \langle c'^2 \rangle}{\partial x_i} \right] - 2 \langle u_i c' \rangle \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_i} - 2K \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_i} \frac{\partial \langle c' \rangle}{\partial x_i} \quad (1)$$

で表され( $K$ は分子拡散係数)、生産項は\_\_\_\_\_の付された右辺第2項である(文献4)。

**注4**  $\langle u_i c' \rangle$  の輸送方程式は

$$\frac{\partial \langle u_i c' \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i c' \rangle}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left\{ -\langle u_i u_k c' \rangle + \nu \langle c' \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \rangle + K \langle u_i \frac{\partial c'}{\partial x_k} \rangle \right\} - \langle c' u_k \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_k} + \langle u_i u_k \rangle \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_k} - \langle c' \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \rangle - (\nu + K) \langle \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial c'}{\partial x_k} \rangle - Fr.d \delta_{i3} \langle c'^2 \rangle \quad (2)$$

で表され、\_\_\_\_\_の付された右辺第2項と最後の項( $-Fr.d \delta_{i3} \langle c'^2 \rangle$ )が生産項である。 $\rho_j / \rho_a = 1.7$  ( $Fr.d > 0$ ) の場合、 $\langle u_i c' \rangle$  の浮力生産項( $-Fr.d \delta_{i3} \langle c'^2 \rangle$ )は負の浮力の影響で常に負の値を取る。一方、 $\rho_j / \rho_a = 0.3$  ( $Fr.d < 0$ ) の場合、 $\langle u_i c' \rangle$  の浮力生産項( $-Fr.d \delta_{i3} \langle c'^2 \rangle$ )は正の浮力の影響で、常に正の値を取る。

**注5** 表2、表3の  $\langle u_i c' \rangle$  の正負は、勾配拡散モデル( $\langle u_i c' \rangle \propto -\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_i}$ )を仮定し、 $\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_i}$  の測定値より推定した。

**注6**  $\langle u_i u_j \rangle$  の輸送方程式は、

$$\frac{\partial \langle u_i u_j \rangle}{\partial t} + \langle u_k \rangle \frac{\partial \langle u_i u_j \rangle}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left\{ -\langle u_i u_j u_k \rangle + \langle u_i u_j \rangle \delta_{ik} - \langle u_i u_j \rangle \delta_{jk} + \nu \langle u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \rangle + \nu \langle u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \rangle - \langle u_i u_k \rangle \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_k} + \langle u_j u_k \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_k} + \rho' \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} - 2\nu \langle \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \rangle - \nu \left( \langle \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \rangle + \langle \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \rangle \right) - Fr.d \langle u_i u_j \rangle \delta_{i3} + \langle u_i u_j \rangle \delta_{i3} \quad (3)$$

で表され、\_\_\_\_\_の付された項が  $\langle u_i u_j \rangle$  の浮力生産項であり、 $\langle u_i u_j \rangle$  ( $i, j=3$ ) の場合のみ値を持ち、 $-2Fr.d \langle u_i u_j \rangle$  となる。

**注7**  $\rho_j / \rho_a = 0.3$  の場合、 $Fr.d$  は負であるので、 $\langle u_i c' \rangle$  が正の場合  $\langle u_i c' \rangle$  浮力生産項( $-2Fr.d \langle u_i c' \rangle$ )は正となる。図8(1)に示す様に  $x_j/H > 0.2$  領域では  $\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_3}$  が負(表3⑥)であり、勾配拡散モデルが成立するとすれば  $\langle u_i c' \rangle$  は正となる。反対に床面付近 ( $x_j/H < 0.2$ ) では、 $\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_3}$  は正(図8(1)、表3⑥)であるので、 $\langle u_i c' \rangle$  が負で、浮力生産項( $-2Fr.d \langle u_i c' \rangle$ )も負となるものと推定される。

**注8** この原因の一つとして、床面付近における床面の壁効果(wall reflection)の影響で、床鉛直成分  $\langle u_3'^2 \rangle$  が減少し、 $\langle u_2'^2 \rangle$  へのエネルギーの再配分が生じたことも寄与していると考えられる。

**注9**  $k$  の浮力生産項は、 $-Fr.d \langle u_i c' \rangle$  となり、 $\langle u_i \rangle$  の浮力生産項  $-2Fr.d \langle u_i c' \rangle$  (注6(3)式の\_\_\_\_\_の項)のちょうど1/2の値を持つ。

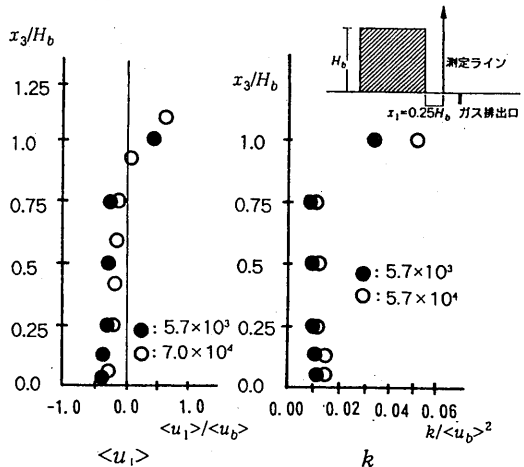


図11 平均風速と乱流エネルギー  $k$  の分布 ( $x_1/H_b=0.25$ , 中心軸上)

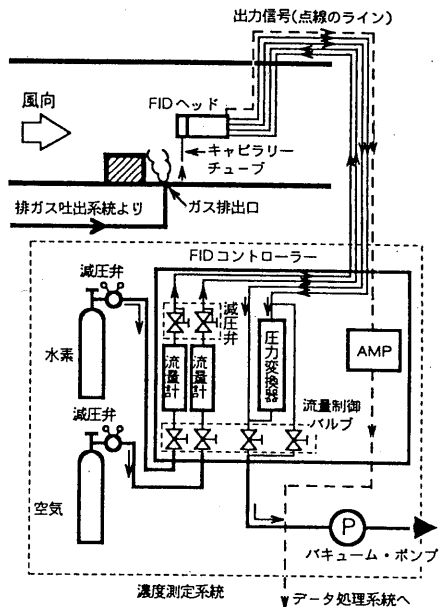


図12 測定システム図

**文1** Collings, N., "A New Technique for Measuring HC Concentration in Real Time, in a Running Engine", International Congress and Exposition, Detroit, MI, 1988

**文2** 村上、持田、高橋、渋谷、林:「高応答性濃度計による建物周辺の濃度変動に関する風洞実験」、日本風工学会誌第47号、平成3年4月

**文3** 持田、村上、林、金、渋谷:「高応答性濃度計による建物周辺の濃度変動に関する風洞実験(その1)」、日本建築学会 関東支部研究報告書、1990

**文4** 村上、加藤、近藤:「代数応力モデルによる室内気流解析-2次元等温・非等温流れ場の検討」、生産研究、1989.1

**文5** 富永、村上、持田、渋谷:「LESによる建物周辺のガス拡散の非定常解析(その1)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、1992.8