乱流境界層内に設置されたビル模型後方の物質拡散過程

Mass Diffusion Process behind a Building Model in Turbulent Boundary Layer

○ 渡邊 拓也(名工大) 正 保浦 知也(名工大)
正 田川 正人(名工大)

Takuya Watanabe, Tomoya Houra and Masato Tagawa
Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466-8555

Recently, various detrimental substances exhausted from a large number of cars and/or factories have been making a large influence on living environments in the large urban area. Thus, it is necessary to predict accurately the diffusion processes of such substances in the city area, which has a very complex flow field because of the existence of various buildings in size and shape. To tackle this problem, we need simplify the flow field to find the relations between mass diffusion and the flow behind a building model. In the present study, we investigate experimentally the fluid-dynamical relationship between mean velocity and concentration fields formed behind the building model by focusing attention on the behaviors of the streamwise mass flux and turbulence intensity.

Key Words : Turbulent Boundary Layer, Building Model, Mass Diffusion, Mass Flux

1. 緒言

近年の都市部では、自動車や工場などが排出する有害物質による環境問題が取り上げられ、その拡散過程の予測や都市計画への提言が求められている。大気汚染を流体力学的な立場から考えるとき、都市を構成する建築物の存在がそれに及ぼす影響は大きい。そのため、建築物によって変化する速度場と物質の移流拡散過程との関係を調べることは非常に重要である。

建物近傍の物質拡散については、物質が建物上面(屋根面)⁽¹⁾⁽²⁾や上流の一点⁽³⁾から排出される場合の建物後方の濃度分布特性が調べられている。とりわけ、物質を点源供給する場合には、供給口と建物との位置関係によって拡散過程が多様に変化すると考えられるので、さらなる調査が必要である。建物に衝突する流れは上壁や側壁の存在によって大きく曲げられる。例えば、ビル模型側面において上方から下方へ吹き下がる流れがあることが知られている。このような特徴的な速度場が、上流から供給された物質の拡散過程に及ぼす影響は非常に興味深い。

本研究では、乱流境界層内に単一のビル模型を設置し、物質が上流から点源供給された場合に観察されるビル模型後方の物質拡散過程を実験的に調べてその発現機構を明らかにする。

2. 実験装置および方法

風洞⁽⁴⁾⁽⁵⁾は吸込み式の低乱風洞であり、コントラクション比4:1、測定部断面積 $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$ 、長さ4 mである。乱流境界層を安定に発達させるために、測定部入口にトリッピングプレートを設けた。測定部入口から $X = 2250 \text{ mm}$ の位置にビル模型($D \times D \times H = 20 \times 20 \times 50 \text{ mm}$)を設置し、この中心位置を $x = 0 \text{ mm}$ とする。ビル模型は主流に対して角度 $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ で設置した。ビル模型周りの速度場はPIV(粒子画像流速測定法)によって計測した。物質には空気と分子量がほぼ等しくシュミット数が1に近いエチレンを用いて、その時間平均濃度をガスクロマトグラフ(島津製作所製GC2014)により測定した。エチレンは $X = 1950 \text{ mm}$ ($x = -300 \text{ mm}$)の位置で図1のように点源供給される。供給口は真鍮製のパイプで内径1 mm、外径1.4 mmである。供給高さは $y_s = 15, 25, 35 \text{ mm}$ 、供給速度 $U_s = 5 \text{ m/s}$ ($Q = 0.235 \text{ l/min}$)とした。エチレン濃度分布は、口径 $50 \mu\text{m}$ のガスサンプリングプローブを模型後方 $x = 20, 40, 60 \text{ mm}$ の位置で y, z 方向にトラバースして測定される。

本実験では、主流速度を $\bar{U}_0 = 8 \text{ m/s}$ に設定した。このとき、模型設置位置 $X = 2250 \text{ mm}$ ($x = 0 \text{ mm}$)での速度境界層厚さは $\delta = 44 \text{ mm}$ であった。なお、模型の幅 D に基づくレイノルズ数は $Re_D = \bar{U}_0 D / \nu = 11000$ 、運動量厚さに基づくレイノルズ数は $Re_\theta = 2800$ であった。

3. 実験結果および考察

3.1 ビル模型後方の平均濃度場の特性

図2は角度 $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ 、供給高さ $y_s = 25 \text{ mm}$ の場合の $x = 20 \text{ mm}$ における平均濃度分布 $\bar{C}$ [ppm]をビル模型の下流側から見た結果である。図2から、上流から供給された物質はビル模型に衝突したのち、その側面や上面を回り込みながら模型後方へと輸送されていくことがわかる。平均濃度場のピーク位置は、供給口高さ $y_s = 15 \text{ mm}$ および $y_s = 25 \text{ mm}$ の場合にはそれぞれ $y = 5 \text{ mm}$ 、 $y = 20 \text{ mm}$ となり、供給口の高さよりも低くなる。一方、 $y_s = 35 \text{ mm}$ ではピーク位置が $y = 35 \text{ mm}$ となってピーク位置の低下は見られない。この原因は、PIVによる速度場の測定結果によれば、模型側面の $y < 35 \text{ mm}$ ($y/H < 0.7$)の領域に存在する吹き下がり流れ($\bar{V} < 0 \text{ m/s}$)が物質輸送過程を支配しているためと考えられる。また、図2からわかるようにスパン方向の分布はいずれの設置角、供給口高さについても模型側面から5 mm程度離れた位置に濃度のピークをもつ。

そこで、物質の拡散過程において、その濃度のピーク位置の挙動とビル模型後方の速度場の関係を明らかにするために、

Fig. 1 Experimental apparatus and measurement system

Fig. 2 Mean concentration distribution $\bar{C}$ behind a building model ($x = 20$ mm)

Fig. 3 Positional relationship between mean concentration distribution $\bar{C}$ and $\bar{U} = 0$ m/s behind a building model

濃度場が下流方向に発達する様子を調べた。結果を図3に示す。図3では、主流方向の3点 $x = 20, 40, 60$ mm における平均濃度分布 $\bar{C}$ を、 $y = 20$ mm で流れ方向平均速度が $\bar{U} = 0$ m/s となる位置と併せて示した。これによると、物質濃度は流れ方向平均速度 $\bar{U} = 0$ m/s 付近でピークとなって下流へと拡散していくことが明らかになった。

3.2 ビル模型後方における流れ方向物質流束の挙動

本節では、物質が流れ方向平均速度 $\bar{U}$ で濃度測定面 ($y-z$ 平面) に流入する場合の物質流束を $\bar{U}\bar{C}$ で評価してその特性を明らかにする。図4に $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ 、供給口高さ $y_s = 25$ mm の場合の $x = 20$ mm における流れ方向物質流束 $\bar{U}\bar{C}$ の分布を示す。図4では、物質流束 $\bar{U}\bar{C}$ と平均濃度 $\bar{C}$ の分布を、それぞれ実線と破線で示す。図4からわかるように、両者のピーク位置の高さは変化しないが、スパン方向については物質流束 $\bar{U}\bar{C}$ は平均濃度 $\bar{C}$ に対して5 mm 程度外側にシフトする。そこで、物質がビル模型後方へと拡散していく過程において、速度場が物質流束 $\bar{U}\bar{C}$ のピーク位置に及ぼす影響を調べた。結果の一例を図5に示す。ここでは、ビル模型後方 $x = 20, 40, 60$ mm における物質流束 $\bar{U}\bar{C}$ の分布と $y = 20$ mm において流れ方向速度乱れ強さが大きい領域 ($u_{rms}/\bar{U}_0 = 0.2 \sim 0.3$) を同時に示している。図5から、物質流束 $\bar{U}\bar{C}$ は速度乱れ強さ

Fig. 4 Comparison between streamwise mean mass flux distribution $\bar{U}\bar{C}$ (solid lines) and mean concentration distribution $\bar{C}$ (dashed lines) behind a building model ($x = 20$ mm)

Fig. 5 Positional relationship between streamwise mean mass flux distribution $\bar{U}\bar{C}$ and $u_{rms}/\bar{U}_0 = 0.2 \sim 0.3$ ($y = 20$ mm) behind a building model

が最大となる付近でピークをとりながら下流へと広がっていくことがわかる。

4. 結言

作動流体を空気とする乱流境界層内にビル模型を設置し、上流から点源供給された物質 (エチレン) が模型後方へ移流拡散する過程を実験的に調べた。結果は以下のとおりである。

- (1) ビル模型側面の $y < 35$ mm ($y/H < 0.7$) の領域に壁面方向に吹き下がる特徴的な流れが存在する。この流れに支配されて、供給口高さ $y_s = 15, 25$ mm の場合には平均濃度 $\bar{C}$ のピーク位置が供給口高さより低くなる。
- (2) ビル模型後方の平均濃度場 $\bar{C}$ は、流れ方向速度 $\bar{U} = 0$ m/s 付近でピークとなって下流へ拡散していく。
- (3) 流れ方向物質流束 $\bar{U}\bar{C}$ は、ビル模型後方の速度乱れ強さが最大となる付近にピークをもつ。

謝辞 本研究の一部は、財団法人日東学術振興財団の助成による。ここに記して謝意を表する。

文献

- (1) 西村浩一ら他2名, 大気環境学会誌 **34-2** (1999), 103-122
- (2) 老川進ら他4名, 大気環境学会誌 **34-2** (1999), 123-136
- (3) 田村哲郎ら他2名, 大気環境学会誌 **40-2** (2005), 51-66.
- (4) Houra, T. and Nagano, Y., Flow, Turbulence and Combustion, **83** (2009), 389-406.
- (5) Houra, T. et al., Turbulence, Heat and Mass Transfer 6 (2009), 857-860.