安定成層流中に置かれた単純建物模型からの汚染質拡散の風洞実験

建物屋上面からの排ガス拡散への大気安定度の影響 その1

WIND TUNNEL EXPERIMENT OF CONTAMINANT DISPERSION FROM SIMPLIFIED BUILDING
UNDER STABLY STRATIFIED FLOW

Effect of thermal stratification on dispersion characteristics from rooftop exhaust Part 1

小野 浩己*, 瀧本 浩史**, 道岡 武信**, 佐藤 歩**

*Hiroki ONO, Hiroshi TAKIMOTO, Takenobu MICHIOKA
and Ayumu SATO*

Wind tunnel experiments were carried on the concentration fields with rooftop exhaust under neutral and stably stratified flow. Mean velocity distribution behind the building was not affected by atmospheric stability, nevertheless turbulence intensity and contaminant distribution became quite different. Partial spread width was estimated with assuming Gaussian distribution; therefore it was found that strength of thermal stratification behind the building was attenuated locally by wake from the building.

Keywords : Contaminant dispersion, Stably stratified flow, Wind-tunnel experiment, Spreading width

汚染質拡散, 安定成層流, 風洞実験, 拡散幅

1. はじめに

大気安定度が汚染質の拡散に強く影響を及ぼすことは古くから知られており^{1),2)}, 近年では風洞実験や数値シミュレーションを用いてその影響が検討されてきた。例えば, 村上・大場ら³⁾や Ohya⁴⁾等は平地を対象とした様々な大気安定度における風洞実験を行い, 乱流構造や汚染質拡散への影響を調査している。また, 白形ら⁵⁾は温度成層風洞を用いて, 原子力施設の安全解析で用いられる Pasquill-Meade⁶⁾の拡散パラメータ A~F 相当の大気安定度を精度よく再現することに成功している。

単一建物や建物群と大気安定度の影響を同時に調べた風洞実験の例としては, 上原ら^{7),11)}のストリートキャニオン内の流れを対象とした一連の研究や, 田中ら¹²⁾による建物背後の逆流域からの拡散を対象としたものなどがある。また, こうした風洞実験の結果は数値流体力学(CFD)を始めとした数値シミュレーション手法の精度検証やモデル開発にも利用されており^{13),14)}, 複雑な流れ場における拡散現象の解明に活用されている。

ところで, これらの例のほとんどは, 道路など地表面付近から汚染質が発生すると想定された実験条件にて行われている。一方で, 屋上駐車場からの自動車排気やコージェネレーションシステムに代表される都市分散型電源の屋上排気, また地熱発電所の冷却建屋など, 建物屋上面から汚染質が発生するとみなせる状況は現実には数多く存在する。しかし, こうした状況に対して大気安定度の影響を考慮して行われた風洞実験・数値シミュレーションの例はほとんどない。そのため, 建物屋上面での剥離・再付着の影響に加え, 大気安定度

の影響が混在する流れ場においては, 汚染質の拡散性状がよくわかっていないばかりでなく, 数値シミュレーションの精度検証を行うための基礎データも不十分である。

そこで本研究では, 温度成層風洞を用いて安定および中立時の大気境界層を再現し, 単純建物模型の屋上部から放出されたトレーサーガスの拡散性状を測定することで, 大気安定度が建物周辺の気流および, 屋上面からの汚染質拡散におよぼす影響について調査した。大気安定度の再現性評価には, Pasquill-Gifford(P-G)による大気安定度分類^{1),2)}の拡散幅を指標として用い, 拡散現象に関わる実大気との相似性を担保した。

2. 温度成層風洞を用いた安定および中立大気境界層の再現

2.1 温度成層風洞の概要

測定に用いた温度成層風洞の概要を表1・図1に示す。本報ではP-G大気安定度分類の安定度F(並安定)およびD(中立)の再現を目標とした。安定度Fの測定を行う場合は, 風洞に流入する気流を縮流部手前の気流冷却装置にて約10°Cまで冷却し, 温度成層装置にて約0.02K/mmの鉛直温度勾配を与えた。風洞床面は約10°Cに冷却され, 側面は断熱されている。加えて側壁から70mmの位置に2次流れ抑制板(5mm厚アクリル板)を設置し, 風洞内外の温度差による対流の影響を抑えた。温度成層装置による上下温度差制御に加えて, 測定洞の入口部にスパイア・アングルを設置し, 乱流境界層を発達させた。安定度Dの測定を行う場合には, 安定度Fの場合と同様にスパイア・アングルを設置し, 気流温度を27°C一定とした。

* 電力中央研究所 特別契約研究員・博士(工学)

** 電力中央研究所 主任研究員・博士(工学)

Visiting Researcher, Central Research Institute of Electric Power Industry, Dr. Eng.
Research Scientist, Central Research Institute of Electric Power Industry, Dr. Eng.

図1 測定の概要

実線：安定，破線：中立

図2 模型位置における温度分布

表1 温度成層風洞の概要

測定洞の寸法	幅1m，高さ1m，長さ10m
気流制御範囲	0.1～20 m/s
温度制御範囲	気流：12～100℃，床面：12～90℃

2.2 建物模型の設置位置における気流と大気安定度の確認

建物模型の中心位置(以降、この位置を $(x, y) = (0, 0)$ とする)において、建物模型を設置せずに、平均風速および乱流統計量の測定を行った。速度測定にはレーザードップラ流速計(プローブ径 $\phi=14\text{mm}$)を用い、1点につき60秒間の測定を行った。温度測定には白金測温抵抗体を用いて20点同時に計測した。平均温度 θ を図2、平均速度 U および変動速度の二乗平均平方根(RMS)値 u'_{RMS} 、 w'_{RMS} を図3に示す。速度の測定結果については、それぞれ模型高さ $H(=100\text{mm})$ における主流方向平均速度 U_H (中立：0.79，安定 0.78[m/s])で基準化している。

中立ではすべての高さにおいて、空気温度が測定胴外部の気温と概ね等しい 27°C 程度となっている。安定では、床面が約 10°C 、天井付近が約 43°C となっており、模型高さを基準にしたバルクリテリヤードンソン数 Ri_b は0.061で、概ね並安定相当の安定度といえる¹⁵⁾。

主流風速は高さ H より上方では安定の方が大きく、下方では中立の方が大きい。また、高さ $2H$ より下方では安定の方が鉛直方向の勾配が大きい。変動速度は主流方向・鉛直方向ともに高さ $3H$ より上方では安定の方がわずかに強いものの、下方では中立の方が強く、一般的な大気境界層の特徴を再現していると言える。また、中立時の上下分布は $1/6$ をべき指数とするべき乗則分布にほぼ従い、縮尺を $1/500$ とすると境界層高さは約 300m となる。よって、郊外もしくは低層の建物が並ぶ市街地・住宅地相当の鉛直分布を概ね再現していると判断した。

P-G 指標を用いた大気安定度の判定を行うため、 $x=0$ の位置において床面のごく近傍からトレーサガス(空気とエチレンの混合ガス)を放出し、測定した濃度分布を正規分布曲線にフィッティングすることで水平・鉛直各方向の拡散幅の算定を行った。濃度測定には全炭化水素計を用いた。風洞実験の縮尺を $1/500$ としてP-G図にプロットした結果を図4に示す。鉛直拡散幅は、風下距離が 0.25km (模型寸法で $0.5\text{m} = 5H$)まではそれぞれ安定度D、Fのラインとよく一致しており、風下距離 0.25km 以降についてもわずかに小さくなるものの安定度D、Fの範囲内といえる。水平拡散幅は、風下距離

実線：安定，破線：中立，黒：主流方向，灰：鉛直方向

図3 模型位置における平均速度，変動速度の分布

○：安定，□：中立

図4 Pasquill-Gifford図を用いた大気安定度の確認

図5 模型周辺の測定点配置(点線の交点が測定位置を表す)

0.5km (模型寸法で $1.0\text{m} = 10H$)以降で安定度D、Fのラインから大きく外れてしまうものの、本報における測定範囲である $7H$ までの領域では概ね安定度D、Fの範囲内に収まっている。

図 10 模型周辺における濃度分布(ただし放出濃度を 1 とし、コンターは対数で描かれている)

3.2 測定結果

(1) 平均速度分布

図 6 に $y = 0$ と $z = 0.5H$ のそれぞれの断面における平均速度ベクトルの測定結果を示す。 $y = 0$ の断面においては安定・中立ともに、建物模型によって剥離した気流が建物後方において床面に再付着して循環渦を形成している様子が確認できる。再付着位置は、安定・中立ともに $x = 2H$ よりやや建物模型よりの位置であり、大気安定度の違いによる差はほとんどみられない。 $z = 0.5H$ の断面においては、建物模型前面の角部によって剥離した気流が建物後方において再び合流する様子がみられる。合流地点は安定・中立ともに $x = 2H$ 付近であり、両者の平均速度分布はほぼ一致している。図 9 に循環領域内の主流方向速度プロファイルを示すが、やはり差異はわずかである。なお、本実験では H および U_H を基準としたレイノルズ数は 5200 程度となるが、既往のより高いレイノルズ数(数万程度)の実験結果^{16),17),18)}と比べても、模型後方の再付着位置や気流分布には大きな差異は見られなかった。

(2) 乱流統計量分布

図 7 に $y = 0$ の断面における主流方向の変動速度 u の RMS 値、鉛直方向の変動速度 w の RMS 値を示す(両者とも U_H にて無次元化)。主流方向・鉛直方向ともに最も大きな値をとるのはガス放出地点のごく近傍であり、建物模型からの剥離気流によるシアストレスと、放出されたガスと周辺気流との速度差によるシアストレスとによる生産が主な要因と考えられる。安定の場合も中立の場合も最大値をとる地点にほとんど違いはみられないが、中立の場合は安定の場合

図 11 模型後方($x = 1H$)における濃度分布

に比べて主流方向で 1.8 倍程度、鉛直方向で 1.5 倍程度大きな値となった。また、建物模型から後方に行くに従って両者ともほぼ同様に減衰するが、中立では $x = 7H$ においても主流方向・鉛直方向ともにほぼ 0.1 以上であるのに対し、安定では主流方向で 0.1 前後、鉛直方向では 0.1 未満となっており、中立に比べて小さな値となった。この要因としては、①そもそもアプローチフローの乱れが安定の方が小さいこと(図 3)、②安定では風洞内ほぼ全域で鉛直温度勾配が正であり、常に乱れを抑制する側に浮力が働くこと、が考えられるが、それぞれがどの程度寄与しているかは不明であり、今後 CFD 計算結果などと合わせて検討する予定である。

a)最大濃度周辺3点から H_e を同定 b)上下にわけてそれぞれ拡散幅を同定

図12 拡散幅同定手法

図13 同定された煙軸高さの推移

図14 同定された上下別拡散幅の推移

図15 局所勾配リチャードソン数の分布

図8に $y=0$ の断面におけるレイノルズシアストレスの分布を示す (U_{ref}^2 にて無次元化)。変動速度と同様に放出地点付近で最大となり、放出地点付近・建物模型後方ともに安定より中立の方が大きい。

(3) 濃度分布

図10に模型周辺の濃度分布の測定結果を示す。ただし、放出地点の濃度を1として基準化し、 10^{-5} 以上となる領域のみコンターで示した^{注1)}。安定・中立ともに、放出されたトレーサーは強く拡散さ

れ、屋上面の外縁付近ではすでに 10^{-3} 程度まで低下している。既往の実験結果^{16),18)}等から、本報におけるガス排出位置は屋上面の逆流域に位置していると推測される。大半のガスは排出の運動量によって逆流域の外部に達するものの、一部は逆流域の複雑な気流に巻き込まれて大きく拡散しているものと考えられる。建物模型後方では、中立に比べて安定の方が拡散が抑えられている様子が確認できる。

放出地点高さでは、安定の方がより下流までトレーサーが輸送されており、 $x=7H$ の地点においても 10^{-4} 以上の濃度を有しているのに対し、中立では $x=6H$ 付近ですでに 10^{-4} を下回っている。

地表濃度については、中立が $x=1.5H$ 付近から 10^{-4} 以上となる領域が存在し、 $x=3H$ の地点で最大濃度となっているのに対し、安定では 10^{-4} 以上となるのは $x=3H$ 以降であり、着地濃度が最大となる点は $x=5H$ と、 $2H$ 程度下流側に移動する結果となった。最大着地濃度はいずれも 1.2×10^{-4} 程度で、ほぼ一致している。図11からも、煙軸上では安定の方が濃度が高いが、それより低い領域では中立の方が濃度が高くなるのがわかる。本ケースのように屋上面から主流方向に汚染質が排出された場合、中立では建物近傍の地表面付近が特に汚染され、安定では遠方の地表面に加えて放出源と同程度の高さに存在する建物などで汚染が問題になる可能性があるといえる。

3.3 拡散幅の同定

トレーサーの拡散度を定量的に評価するため鉛直拡散幅 σ_z の同定を行った。 $y=0$ 断面の各測定位置における濃度の鉛直分布について煙軸高さを境に上下に分離することで、それぞれが異なる拡散幅を持った正規分布に従うと仮定し、最小二乗法を用いて上側拡散幅 σ_z^{up} ・下側拡散幅 σ_z^{down} を求めた。具体的な手順を以下に示す^{注2)}。ただし、フィッティングには地表面における濃度の反射を考慮した以下の式を用いた。

$$f(z) = C_0 \left\{ \exp \left(-\frac{(z - H_e)^2}{2\sigma_z^2} \right) + \exp \left(-\frac{(z + H_e)^2}{2\sigma_z^2} \right) \right\} \quad \dots(1)$$

ただし、 C_0 はピーク濃度、 H_e は煙軸高さである。

- ① それぞれの鉛直分布において、濃度が最大となる測定点とその上下の3点を用いて、式(1)とフィッティングを行い C_0 、 H_e 、 σ_z を求める(図12-a)。
- ② ①で求めた H_e をもとに鉛直分布を上側と下側に分割する。上側・下側それぞれについて式(1)とフィッティングし、 σ_z を求める(図12-b)。このときの H_e は①で求めたものを用いる。

図13に以上の方法で同定した煙軸高さ H_e の推移を示す。放出されたトレーサーは建物の剥離気流に乗って上昇し、 $x=1H$ では H_e は安定・中立ともに約 $1.1H$ となった。以降、下流側にいくにつれて煙軸高さは下降していくが、中立の方がややその程度が大きい。

図14に上下別拡散幅の推移を示す。各点付近に付された数値は実測結果とフィッティング結果とにおける疑似決定係数 R^2 である(ただし 0.990 以上の点については表記を省略した)。煙軸より下側の $x=2H$ 以内の領域では R^2 が比較的小さいが、この領域では建物模型からの剥離渦の影響で拡散挙動が複雑化し、単純な正規分布では表現できないためと考えられる。一方、煙軸より上側の領域や、下側でも $x=2H$ 以降であれば概ね 0.99 以上となり正規分布を用い

て表現可能であるといえる。上下別にみると、安定・中立ともに総じて下側の方が拡散幅は大きく、建物模型の影響によって生じた乱れによって乱流拡散が盛んになっているためと考えられる。安定度別では、上側・下側ともに安定の方が拡散幅は小さくなるが、上側では建物模型近傍ではほぼ同程度の値となり、下流側にいくにつれて差が広がる傾向にある。上側の建物模型近傍では、建物模型の風上コーナー部からの剥離の影響が支配的になり、安定度の影響が顕在化していないためと考えられる。一方、下側では(推定精度の悪い $x = 2H$ 以内を除くと)下流側にいくにつれて拡散幅の差異は小さくなり、 $x = 5H \sim 6H$ 付近ではほぼ一致している。建物模型の影響によってその後流側で温度の混合が進み、鉛直方向の温度勾配が小さくなり、局所的に安定度が中立寄りになっていると考えられる^{注4)}。そこで、局所的な大気安定度を評価する指標として次式より勾配リチャードソン数を算出した。

$$Ri = -\frac{g}{T} \frac{\partial T / \partial z}{(\partial U / \partial z)^2} \quad \dots(2)$$

ただし、 g は重力加速度(= $-9.8[m/s^2]$)、 T は各測定点の絶対温度(= $\theta + 273.15[K]$)である。

結果を図 15 に示す。放出位置から後方 $2H$ 程度までの領域と、 $x = 3H$ 以降の床面付近で概ね 0.04 未満で非常に弱い安定状態となっている。また、この領域は上述の拡散幅の差異が小さくなる箇所とほぼ対応しており、安定成層流中であっても建物模型の影響によって局所的に安定成層が崩れ、汚染質の拡散が進行することを示唆している。

4. まとめ

建物屋上面から汚染質が拡散する際に大気安定度が流れ場や拡散性状に及ぼす影響を明らかにするため風洞実験を行った。本報では大気境界層中の汚染質拡散に対する相似を十分に担保するため、Pasquill-Gifford による大気安定度分類を指標として、温度成層装置を有する風洞内に F(並安定)および D(中立)相当の大気境界層を模擬した環境を再現した。建物形状は単純な立方体とし、屋上面から運動量を持って放出させたトレーサの拡散性状および流れ場について測定した。結果、以下の知見を得た。

1)スパイヤやアングルといったラフネスを配置して中立相当の拡散幅を有する乱れをもった大気境界層乱流を再現することができ、また、同じラフネス配置のまま鉛直温度勾配を制御することで、並安定相当の大気境界層乱流を実現の $1/500$ スケールを想定した風洞内で再現することができた。

2)アプローチフローは大気安定度によって大きく異なるにも関わらず、建物後流では平均速度の分布は大気安定度によらずほぼ一致する結果となった。中立～並安定程度の差異では、建物の幾何形状の影響の方が卓越するためと考えられる。

3)建物後流における乱流統計量については、大気安定度によって明確に異なる結果となった。分布形状に関しては大きな差異はなく、ほぼ模型形状によって決定されていると考えられるが、絶対値に関しては安定の場合は中立に比べて 3 割～5 割程度小さくなった。

4)汚染質の拡散性状は大気安定度によって異なり、本ケースにおいては、中立では比較的建物周辺(建物高さの 4 倍以内)で、安定では遠方(建物高さの 4 倍以降)で濃度が高くなる傾向となった。

5)建物の影響によって局所的な大気安定度には分布が生じ、拡散性状もそれに応じて変化した。本ケースでは、放出されたガスの大半は放出時の運動量で建物後流域へと輸送されていると考えられ、建物後方の循環流が形成される領域を除けば、汚染質の拡散性状は通常の平地における拡散と同様に正規分布で表現できる可能性を示した。局所的な拡散幅や煙軸高度の低下度合いを何らかの手法によって推定できれば、迅速な拡散予測モデルの構築につながると期待できる。

参考文献

- 1) Pasquill, F: The Estimation of The Dispersion of Windborne Material, Meteorological Magazine 90(1063), 1961
- 2) Gifford, F.A. : Use of Routine Meteorological Observations for Estimating Atmospheric Dispersion, Nuclear Safety 2(4), pp.47-51, 1961
- 3) 村上周三, 大場正昭, 高橋岳生: 床面に温度差のある成層流の気流性状並びに拡散に関する風洞実験(その 1～その 3), 日本建築学会 研究報告集 計画系 48, pp.153-164, 1977.7
- 4) Ohya, Y : WIND-TUNNEL STUDY OF ATMOSPHERIC STABLE BOUNDARY LAYERS OVER A ROUGH SURFACE, Boundary-Layer Meteorology 98, pp.57-82, 2001
- 5) 白形昌二, 永井清之, 水本伸子: 様々な大気安定度を考慮した大気拡散の風洞実験, 大気環境学会誌 37(2), pp.141-154, 2002
- 6) 原子力安全委員会: 発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針, 原子力安全委員会審査指針集, 大成出版社, pp.376-406, 2000
- 7) 上原清, 村上周三, 老川進, 若松伸司: 温度成層流中のストリートキャニオン内の流れに関する LDV を用いた風洞実験, 市街地における汚染物の拡散に関する実験的研究 その 2, 日本建築学会計画系論文集, 492, pp.39-46, 1997.2
- 8) 上原清, 村上周三, 老川進, 若松伸司: 温度成層流中のストリートキャニオン内の濃度分布に関する風洞実験, 市街地における汚染物の拡散に関する実験的研究 その 3, 日本建築学会計画系論文集, 499, pp.9-16, 1997.9
- 9) 上原清, 村上周三, 老川進, 若松伸司: 温度成層下のストリートキャニオン内部流れに対する道路幅の影響に関する風洞実験, 市街地における汚染物の拡散に関する実験的研究 その 4, 日本建築学会計画系論文集, 510, pp.37-44, 1998.8
- 10) 上原清, 村上周三, 老川進, 若松伸司: ストリートキャニオン内部の大気汚染物質拡散に対する道路幅および大気安定度の影響に関する風洞実験, 市街地における汚染物の拡散に関する実験的研究 その 5, 日本建築学会計画系論文集, 524, pp.45-52, 1999.10
- 11) 上原清, 村上周三, 若松伸司, 池澤正: 高さの異なるストリートキャニオン内の流れと拡散に関する風洞実験, 市街地における大気汚染物質の拡散に関する実験的研究 その 6, 日本建築学会計画系論文集, 541, pp.37-42, 2001.3
- 12) 田中英之, 義江龍一郎, 白澤多一, 栗田剛, 小林剛: 逆流を伴う非等温流れ場における風速・温度・濃度の同時測定方法, 日本建築学会環境系論文集 73, 628, pp.799-806, 2008.6
- 13) 小林剛, 白澤多一, 田中英之, 義江龍一郎, 持田灯: 弱風領域を対象とした流れ場・温度場・拡散場に関する風洞実験と数値解析, その 6 各種改良型 k-ε モデル、応力方程式モデル、LES による拡散場の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.955-956, 2008.7
- 14) 香月壮亮, 大岡龍三, 高橋岳生, 加藤信介: 様々な大気安定度での大気境界層発達に関する風洞実験と数値シミュレーション, 日本建築学会環境系論文集 74, 640, pp.735-743, 2009.6
- 15) Environmental Sciences Research Laboratory : Guideline for Fluid Modeling of Atmospheric Diffusion, United States Environmental Protection Agency EPA-600/8-81-009, 1981.4
- 16) 富永禎秀, 黒澤広大: 単体立方体モデル周辺の汚染質拡散を対象とした RANS と LES の比較, CFD による建物近傍の汚染質拡散の予測精度に関する研究 その 2, 日本建築学会環境系論文集 74, 646, pp.1307-1313, 2009.12
- 17) 老川進, 石原孟, 安田龍介, 西村浩一, 長谷実: 建物近傍拡散の予測に

関する基礎的研究, その1 風洞実験, 大気環境学会誌 34(2), pp.123-136, 1999

- 18) Uehara, K., Wakamatsu, S., Ooka, R. : STUDIES ON CRITICAL REYNOLDS NUMBER INDICES FOR WIND-TUNNEL EXPERIMENTS ON FLOW WITHIN URBAN AREAS, Boundary-Layer Meteorology 107, pp.353-370, 2003

注

注 1) 測定に使用した全炭化水素計の測定下限値は、ノイズ等の影響で 5×10^{-6} 程度であるため、本論文では 10^{-5} までを有効な測定結果とした。また、測定に用いた風洞は本来回流式であるが、本測定時には吹き出し式として運用しており、バックグラウンド濃度も上述の測定下限値以下であった。

注 2) はじめに上下に分割し、一度に 3 パラメータを同定することも可能であるが、山なりになる分布の片側のみで同定することになるために、煙軸高さ H_e のばらつきが大きくなり、場合によっては明らかに不自然な位置に H_e が同定される。そのため、このような方法をとった。

注 3) 中立の $x = 7H$ の地点においては、煙軸より下側の鉛直濃度分布がほぼ直線となっており、有意な推定が行えなかった。

注 4) 建物模型の表面温度は高さ $0.25H$ で 18.28°C 、高さ $0.75H$ で 21.17°C であり(ともに風上側表面)、図 2 の気流温度と 0.2°C 未満で整合していることから、冷却された床面とはほぼ熱的に切り離されていると考えられる。よって温度の混合は、建物模型によって気流が乱されたことを主要因として起きていると考えられる。

(2013年11月27日原稿受理, 2014年4月11日採用決定)