建物群内外における流れ場の乱流特性と組織運動 Turbulence Characteristics and Organized Motions in and above Building Clusters

孟 岩*1 老川 進*2
Yan MENG Susumu Oikawa

This review considers observational and experimental knowledge of turbulence characteristics and organized motions in and above building clusters, drawing from both atmospheric and laboratory data. The former describe the structure of the roughness sublayer in which the roughness has a direct dynamical influence, whereas the latter resolve the flow structure within building clusters in some detail. Topics considered include the turbulent velocity fields and organized motions above the cluster layer, properties of the wake flow within building clusters, and the nature of the separation bubble on the building roof. Overall, there are three types of turbulent flows which play important roles in the transport of heat and pollutants in and above building clusters: the organized motions transport heat near the cluster layer and decrease unstable conditions in the urban area, the turbulent wake flows determine the maximum values of concentration at ground-level, and the separations on the building roof control transport and dispersion of tracer gas emitted from the rooftop.

Key Words : Roughness sublayer, Building clusters, Turbulence characteristic, Organized motion,
Flow pattern, Separation bubble.

1. はじめに

近年、コージェネレーションシステム（熱電併給システム）の急速な普及に伴い、建物近傍の大気汚染問題が懸念されている。コージェネシステムは、高いエネルギー効率を有する反面、燃焼過程で生成される高レベルの窒素酸化物(NO_x)を建物近傍に排出する。高い煙突から排出される大気汚染物質の拡散問題と異なり、低い煙突から排出される大気汚染物質の拡散現象は建物群内外における流れ場の乱流特性とそこに存在するいろいろなタイプの乱流組織運動に強く依存する。

一般に都市域の大気境界層はFig.1に示すような3つの層に分けることができる。上層のエクマン層はコリオリス力の影響を受け、風向は上層に行くにつれ時計方向に回転し、風速分布は速度欠損法則に従う。一方、中間の慣性層（あるいは接地層と呼ぶ）は地表面の粗度及び大気安定度の影響を受け、風向はほぼ一定であり、風速分布は普遍化対数則により表される。高い煙突から排出される大気汚染物質はこの二つの層の重なり合うところで拡散し、その濃度分布は正規型の拡散モデルにより容易に予測される。しかし、低い煙突からの大気汚染物は最下層のラフネスサブレイアに排出されるため、その濃度分布の予測は困難が伴う。その理由としては、ラフネスサブレイア内の流れは建物の存在により、高さ方向にも水平方向にも複雑な構造をもっていることが挙げられる。更に建物屋上に排出源がある場合には汚染物質の拡散プロセスが建物近傍の剥離性状に大きく依存することとなる。ラフネスサブレイア内の大気拡散現象の解明には、建物群内外における複雑な乱流運動を明らかにする必要がある。

本報告では、著者ら^{1)~7)}の近年建物群内外における流れ

と拡散に関して行った現地観測及び風洞実験の結果について紹介する。建物群内外における流れ場の乱流特性およびそこに存在するいろいろなタイプの乱流組織運動を示すと共に、建物屋上に排出される汚染物質の拡散プロセスと建物近傍の複雑乱流場との関係を明らかにする。

Fig. 1 都市域における大気境界層の構造

2. 観測及び風洞実験の結果

建物群内外における流れ場の乱流特性及びそこに存在する乱流組織運動を明らかにするために、本研究では以下に示す3つの実験を行った。一番目はラフネスサブレイアを着目した現地観測を行い、建物群上層の流れ場の乱流構造を調べる^{1),2)}。二番目は風洞実験により建物群内の流れ場を測定し、建物密度が流れと拡散のパターンに及ぼす影響を明らかにする^{3),4)}。三番目は建物の屋上の流れ場を調べ、流

*1 清水建設(株)技術研究所 研究員 工博
Research Engineer, DR. ENG, SHIMIZU Corp.

*2 清水建設(株)技術研究所 主任研究員 工博
Chief Research Engineer, DR. ENG, SHIMIZU Corp.

— 32 —

力 ($-u'w'>0$) が、ほぼ同時刻にキャノピー上層18mとキャノピー内5.4mにおいて出現している。sweep時($u'>0, w'<0$)においては、上方からの高速流が地表方向に移動し、この流れに伴い、冷たい空気はキャノピーの上方から下方に輸送され負の温度変動を生じさせる。一方、ejection時($u'<0, w'>0$)には、低速流が下方から上方に運ばれ、この流れに伴い、暖かい空気が持ち上げられ正の温度変動を起こす。sweepとejection運動に伴う温度変動は高度5.4mと18mにおいてほぼ同時に生じており、その周期は約100秒である。また温度変動はゆるやかな上昇の後に急激に降下することから、温度のramp現象と呼ばれている。本研究は、相対的に大きなramp現象を抽出するために、アンサンブル平均法を用いて解析を行った。Fig. 6には、高さ5.4m、10.3mおよび18mでのアンサンブル平均した速度変動と温度変動をxz断面に示すものである。点線および実線は、各々温度変動が平均値以下の値と平均値以上の値を0.05℃刻みで表示したものである。温度変動のゼロ値を示す線が上昇流および下降流の領域を分離し、各々の領域に正および負の温度変動が生じている。その結果、正の熱フラックスが作られ、キャノピー内外の温度場が均一化されることになる。

Fig. 5 高度18m および5.4mの速度変動、瞬時レイノルズ応力および温度変動の時系列変化

Fig. 6 xz断面におけるアンサンブル平均した速度変動のベクトルと温度変動のコンター

このように、正の温度変動はejection運動によって起こされ、負の温度変動はsweepによって起こされていることから考えると、ここで得られた組織運動は、建物群内外で熱

熱の輸送に重要な役割を担っていることが明らかである。ラフネスサブレイア内において、日中強い温度勾配が破壊されるメカニズムは組織運動による機械的な混合そのものである。Fig. 7にはラフネスサブレイアにおける組織運動の概念図である。

Fig. 7 ラフネスサブレイア内における組織運動の概念図

2.2 建物群内の流れ構造

建物群内の流れ場は建物群上層のそれより複雑である。特に建物密度が高い場合、建物群内の流れ場のパターンが建物密度によって変化し、その影響で建物近傍の拡散パターンも変化する。その結果、単体建物の場合に比べ、建物群内の地表面濃度は1桁大きくなることもある。このような現象については建物密度が建物群内の流れ場と濃度場を与える影響を系統的に調べる必要がある。実際の都市の形態は、建物が整然と並んでいる場合もあれば、不規則に並んでいる場合もある。その時の流れ場は、前後の建物の干渉により影響を受ける以外に、近隣の建物間の相互作用による影響も受ける。こうした流れ場については、これまで定量的に調べた例はない。本研究では、風洞において立方体のモデル建物を千鳥状に配列し、建物密度を系統的に変化させた時の流れ場と拡散場を定量的に調べた。

実験は清水建設(株)技術研究所の小型回流式風洞を用いて行った。風洞の測定部の長さは7m、測定断面の高さと幅はそれぞれ0.9mと1.1mである。Fig. 8には本風洞実験の概要を示した。高さ8cmの木製の立方体モデル建物を測定部入り口より主流方向に千鳥状に配置し、その密度を10%から40%まで変化させた。Fig. 9は建物の配置状況を示す。

Fig. 8 風洞実験の概要

Fig. 9 建物の配置状況

Fig.10 $y/H=0$ の鉛直断面内における平均速度のベクトル図
(a) 密度10%; (a) 20%; (a) 30%; (a) 40%

Fig.11 流れパターンの模式図

Fig.10(a)~(d)には建物密度を10%から40%まで変化した時の平均速度のベクトル図 ($y/H=0$ の鉛直断面内)を示す。各速度成分は、基準風速 U_0 で無次元した。基準風速 U_0 は建物の影響を受けていない高さ $5H$ ($z=40\text{cm}$)の風速値を用いた。建物密度10%の場合 (Fig.10(a))、建物M1の後流域に顕著な lee eddyが生じ、その下に弱い下降流に伴う2次流(secondary flow)が存在する。後流の再付着は、建物背面から約 $1H$ 離れたところに見られる。再付着点を離れると、建物下層での風速が回復し始め、速度ベクトルも上向きに転じる。一方、建物M2風上面の前では、建物高さ $2/3$ 以下の領域に frontal eddyと呼ばれる小さな渦が見られ、また、建物M2前縁の角部に強い上昇流が存在する。建物密度10%時の流れのパターンは、全体的に見ると、単体建物の場合のそれによく似ている。建物密度が20%になると (Fig.10(b))、流れのパターンはすこし変化する。建物M1の後流域の lee eddyが小さくなる一方、建物M2風上面の前方の frontal eddyがかなり大きくなる。また、建物M2前縁の角部の上昇流は、10%の場合に比べかなり弱くなっている。建物密度が30%以上になると (Fig.10(c), (d))、流れのパターンは単体建物の場合と全く異なっている。まず、建物M2の前縁の角部には上昇流が全く見られず、風があたかも建物の屋根面を滑るように流れている。一方、建物M1と建物M2の間に、二つの大きな循環流が形成されてい

る。この二つの循環流の大きさは、それぞれ建物M1と斜め後の建物M3 (Fig.11を参照)の間の距離、または建物M2と斜め前の建物M3との間の距離にほぼ等しい。建物M2の前方に存在する循環流は、建物M2の前面に強い下降流を引き起こしている。以上の結果から、建物が千鳥状に配列した場合の流れ場の特徴をFig.11に示すような模式図で表すことができる。建物密度が10%以下の場合 (Fig.11(a))は、建物群落内の個々の建物周辺の流れ場が単体建物周辺の流れ場とほぼ同様であり、"isolated roughness flow"と呼ぶことができる。一方、建物密度が30%を越えると (Fig.11(b))、安定した循環流 (cavity flow) が建物間に形成される。この場合、建物群落の上空の流れも、建物間に入りにくくなり、"skimming flow"と呼ばれるような流れとなる。isolated roughness flowからskimming flowへの遷移状態である建物密度20%の場合、上流側の建物M1背後の lee eddyと斜め後方の建物M3前方の frontal eddyと、あるいは下流側の建物M2前面の frontal eddyと斜め前の建物M3背後の lee eddyと相互干渉し始める。その結果、建物背後の lee eddyが小さくなる一方、建物M2前面の frontal eddyがかなり大きくなる。また建物側面近くに馬蹄形渦が見られなくなる。上流側の建物の後流が斜め後方の建物前方の流れ場を干渉することで、"wake interference flow"と呼ぶことができる。

建物群内の流れパターン変化は、そこに排出されたトレーサガスの拡散パターンにも大きな影響を与える。Fig.12には、建物密度が10%から40%までに変化させた場合に $y/H=0$ の鉛直断面における濃度分布のコンターを示す。建物背後の高濃度域は建物密度によらず高さ $z=H$ 近傍に形成されるが、地表面での最大濃度は建物密度が高くなるにつれ大きくなる。これは建物屋上から排出されたガスが風下にある建物の前面に存在する cavity flowにより地表面へ向かって輸送されたことによるものである。

Fig.12 $y/H=0$ の鉛直断面内における濃度コンター
(a) 密度10%; (a) 20%; (a) 30%; (a) 40%

2.3 剥離に伴う流れ場の乱流構造

建物屋上に排出源がある場合には汚染物質の拡散プロセスが建物近傍の剥離性状に大きく依存する。平均濃度分布を予測する場合には、建物屋上における風速の平均値とその標準偏差が必要となるが、瞬間濃度を予測する場合には、更に建物屋上の風速のパワースペクトルが必要となる。しかし、建物屋上の各速度成分のパワースペクトル特性を報告した研究例は殆どない。本研究では、自然風を模擬した乱流境界層に置かれたモデル建物の屋上の各速度成分の平均値、標準偏差及びパワースペクトルを調べるとともに、流れの剥離と汚染物質の拡散プロセスとの関係を明らかにする。

Fig.13は風向角0度の屋根面上の平均的な流れパターンを概念的に示したものである。ここで対称軸線上に3つの測定点を設け、流れ場の乱流特性を詳細に調べた。Fig.14には風向0度における平均速度 U 、 V 、 W の鉛直分布を示す。平均速度の値は軒高風速により基準化されている。屋根面前縁A点での平均速度 U の鉛直分布が接近流のそれとほぼ一致しているのに対して、平均速度 W は屋根面近傍において大きく増大している。平均速度 W の最大値は風洞風速の7割にも達し、吹上角度に換算すると39度となっている。一方、屋根面の中央と風下側の測定点BとCでは平均速度 U が屋根面近傍において接近流の値よりかなり小さくなるが、屋根面から離れると反対に大きくなる。平均速度の屋根面上の増大は流れが建物屋面前縁で剥離することにより気流が屋根面上の上空に排除されることによるものである。この剥離流の影響で平均速度 W の値は測定点B、Cにおいて若干負の値となっている。Fig.15には風向0度における変動速度の標準偏差 σ_u 、 σ_v 、 σ_w の鉛直分布を示す。変動速度の標準偏差の値は軒高での接近流の各速度成分の標準偏差により基準化されている。屋根面前縁A点における変動速度の標準偏差 σ_u の分布は接近流のそれによく一致しているが、 σ_v 、 σ_w の鉛直分布は屋根面に近づくにつれ大きくなっている。それに対して、屋根面の中央の測定点Bでは σ_u 、 σ_w の分布に大きなピークが見られる。これらの大きな乱れは建物屋根面前縁の剥離渦によって作られたもので、剥離渦の影響は屋根面の風下側の測定点Cにも見られる。また、剥離剪断層の発達に伴い測定点Cでの σ_v 、 σ_w の値は屋根面から離れる所において測定点Bでの値より大きくなっている。

Fig.16(a)~(f)には風向0度の場合の速度成分 u 、 v 、 w のパワースペクトルを示す。縦軸は軒高での接近流の各速度の分散により無次元化し、横軸は建物の見付け幅と軒高風速により無次元化した。高さ $z/h=1/16$ における速度成分 u のパワースペクトルの値は、風上面上の測定点Aを除いて、0.2~3までの周波数域において接近流の値の約10倍となっている。一方、速度成分 v のスペクトルの増大は低周波数域にも見られ、その影響は屋根面近傍に大きく、 σ_u の最大値が屋根面近傍に形成される原因にもなっている。屋根面前縁の剥離渦の影響は速度成分 w のパワースペクトルに最も顕著に現れている。屋根面の中央と風下側に位置する測定点B、Cでの速度成分 w のパワースペクトルに見られた大

Fig.13 屋根面上の流れパターンの概念図

Fig.14 風向0度における平均速度の鉛直分布

Fig.15 風向0度における変動速度の鉛直分布

Fig.16 風向0度における建物屋上の変動速度のスペクトル

きなピークはその結果である。このピークの無次元周波数は約1であり、建物後流渦の無次元周波数より一桁高い。屋根面前縁剥離渦の移流速度が軒高風速の5~7割であると考えると、屋根面の剥離渦の規模は建物の見付け幅の0.5~0.7倍と推定される。屋根面上の剥離渦の規模が小さいが、そのエネルギーがかなり大きく、無次元ピーク周波数近傍では速度成分 w のポワースペクトルの値が接近流の値の約10倍となっている。建物屋上に排出源がある場合には汚染物質の拡散プロセスが建物近傍の剥離性状に大きく依存する。Fig.17にはその一例を示す。建物密度10%では、トレーサガスが排出源の上流および下流側の両方に拡散されるが、建物密度30%を超えると、上流側にはトレーサガスが検出されず、排出源の下流側に高濃度域が形成されている。このような濃度パターンの変化は、屋根面上における流れの性状の違いによるものである。建物密度が10%の場合は、屋根面上の流れが剥離するために屋根面上の逆流の発生頻度が13.7%となり、そのため排出源の上流側にもトレーサガスは輸送される。一方、建物密度が大きくなると、屋根面上の流れの剥離がなくなり、その結果トレーサガスは排出源の下流側に流される。一般に平均濃度の分布は流れの平均値とその標準偏差が分かれば予測可能である。Fig.18には建物中心軸上の濃度分布を示す。図中の実線は(1)式による予測値を表し、実験結果をよく再現していることが分かる。

$$C^* = \frac{U}{U_{ROOF}} \frac{H^2}{I_c^2 x^{2m}} \cdot c_r \quad (1)$$

ここで濃度の減衰を表す指数 m と比例定数 c_r は実験から定め、それぞれ0.63と0.55である。式中の乱流強度 I_u と風速比 U/U_{Roof} は流れの測定結果を用いた。

Fig.17 屋根面上の水平濃度分布 (a)密度10%; (b)30%

Fig.18 建物中心軸上の濃度分布

3. まとめ

本研究では大気境界層の最下層のラフネスサブレイア内の流れ場を現地観測及び風洞実験により調べ、ラフネスサブレイア内の流れと拡散現象を支配する幾つかのタイプの乱流組織運動の性質を明らかにした。Fig.19にはこれらの乱流組織運動の概念図を示す。建物群上層には大規模組織運動が存在し、建物群内外の物質の輸送に重要な役割を担う。一方、建物群内にはカルマン渦やlee eddyに代表されるような乱流組織運動が存在し、建物群内の流れ場と拡散現象をドラマチックに変化させる。更に個々の建物屋根面を見ると、剥離渦は屋根面上の流れと拡散現象を支配する。スケールの見ると、建物群上層の乱流組織運動の長さは建物見付け幅の約50倍であるのに対して、建物後流域のカルマン渦は建物見付け幅の約5倍程度、また建物屋根面の剥離渦は建物見付け幅の0.5倍である。その差は2桁にもなる。

Fig.19 ラフネスサブレイア内における各種の乱流運動

参考文献 1) 孟岩、老川進：都市キャノピー近傍における組織的乱流運動，ながれ，Vol.14, 1995, pp.233-244. 2) S. Oikawa and Y. Meng : Turbulence characteristics and organized motion in a suburban roughness sublayer, Boundary-Layer Meteorol., Vol. 74, 1995, pp.289-312. 3) 孟岩、老川進：建物群内における流れと拡散に関する実験的研究，その1 流れ場の測定，大気環境学会誌，Vol.32, No.2, 1997, pp.136-147. 4) 老川進、孟岩：建物群内における流れと拡散に関する実験的研究，その2 濃度場の測定，大気環境学会誌，Vol.32, No.2, 1997, pp.148-156. 5) 孟岩、日比一喜：高層建物屋上の流れの乱流特性と組織的な渦運動，日本風工学会誌，No.72, 1997, pp.233-244. 6) S. Oikawa and Y. Meng : A field study of diffusion around a model cube in a suburban roughness sublayer, Boundary-Layer Meteorol., Vol. 84, 1997, pp.399-410. 7) 老川進、孟岩：建物後流における短時間ピーク濃度性状について，大気環境学会誌，1998（印刷中）