

ラージ・エディ・シミュレーションによる高層建物周辺の突風特性に関する研究

Analysis of gust characteristics around a high-rise building using large-eddy simulation

東京工業大学 環境・社会理工学院 准教授 大風 翼

(研究計画ないし研究手法の概略)

建物周辺気流及び市街地風環境の分野にCFDが本格的に適用されるようになって、約30年が経過した。当初はRANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations)に基づくモデルを中心に検討が進められ、その適用範囲は拡大してきた。例えば、等温流れ場を対象としたRANSモデルによる屋外風環境予測は、ほぼ実用的な段階に達しており、日本建築学会によって、市街地風環境の予測にCFDを適切に利用するためのガイドラインが取りまとめられている (<https://www.aij.or.jp/jpn/publish/cfdguide/>)。

一方で、様々な検討結果からRANSモデルの限界も認識されるようになり、また、近年の計算機能力の向上も相まって、LES(Large-Eddy Simulation)の実用化への期待が高まっているのは事実である。しかしながら、LESは定常RANSと比べ、莫大な計算コストや非定常乱流を考慮した流入境界条件の設定の難しさから、現状、ごく一部の専門家によって、洗練された解析条件のもとで実施されることが、ほとんどである。従来RANSモデルに基づく風環境影響評価では、平均場風速にガストファクターを乗じ、最大瞬間風速を推定していたが、LESにより、直接、その予測が可能である。さらに、歩行者空間の強風域において、稀な強風が発生した前後の流れ場の構造を分析することで、発生メカニズムを考慮した効果的な強風対策も可能となる。

本研究では、単体角柱周辺流れのLESを実施し、建物風上の風速変動と建物周辺の歩行者空間の相関を分析するとともに、ある強風イベントに着目し、流跡線により、強風をもたらす空気塊の移流経路の分析を行った。

解析対象は、東京工芸大学グローバルCOEプログラム「風工学・教育研究のニューフロンティア」でデータベースが公開されている1:1:2単体建物(建物高さ0.2m)周辺の流れ場を対象とした風洞実験¹⁾とした。風洞断面は1.2m(W)×1.0m(H)である。建物高さ流入面での建物高さの平均風速から算出したレイノルズ数は、 $Re=4.5 \times 10^4$ 程度である。風洞実験の測定点は、主流方向の建物中心断面上に181点、 $z=1/16H$ の水平断面上に150点設けられており、風速はSplit-fiber probe(x方向成分: DANTEC 55R55、y方向成分: 55R57、z方向成分: 55R56)を用いたHot Wire Anemometry(DANTEC 90C10)で測定された。計算格子は、建物幅を20分割し、建物壁面及び風洞側面・上面から8%以下の拡大率で拡大した。流入変動風は、風洞実験のアプローチ部分のを忠実に再現した予備計算をより与えた。移流項の離散スキームは、3次精度の風上差分²⁾とし、その他の空間離散スキームは2次精度中心差分とした。圧力-速度場の連成にはSMAC法を用いた。流出境界条件は、滞留境界条件を与えた。壁面の摩擦応力の推定には、Werner and Wengleの二層モデル³⁾を用いた。サブグリッドスケールモデルは、コヒーレント構造スマゴリンスキーモデル⁴⁾を用いた。時間間隔は 1.0×10^{-4} sとした。30s(建物高さ流入平均風速で無次元化した時間で、およそ700)の助走計算後、30s分のデータを分析に用いた。

(実験調査によって得られた新しい知見)

以降で示す諸量は、代表長さとして建物高さ H 、代表速度として建物高さにおける流入平均風速 U_{ref} 、代表時間として H/U_{ref} を用い、無次元化した。

図1に鉛直断面における平均風速の主流方向の変化を示す。主流方向成分、鉛直方向成分ともに実験結果をよく再現できている。図2に2次の乱流統計量であるノルマルストレスの主流成分及び鉛直成分を示す。建物屋上の剥離域でのノルマルストレスの増加もよく再現できており、実験結果ともよく一致している。これらより、建物周辺の流れ場をよく再現できたと判断し、歩行者高さの風速分布の特性について、分析を進める。

図2に、歩行者高さを想定した $z/H=1/16(=0.0625)$ における平均スカラー風速を示す。建物風上角部付近から側方領域にかけて高風速域が形成されている。

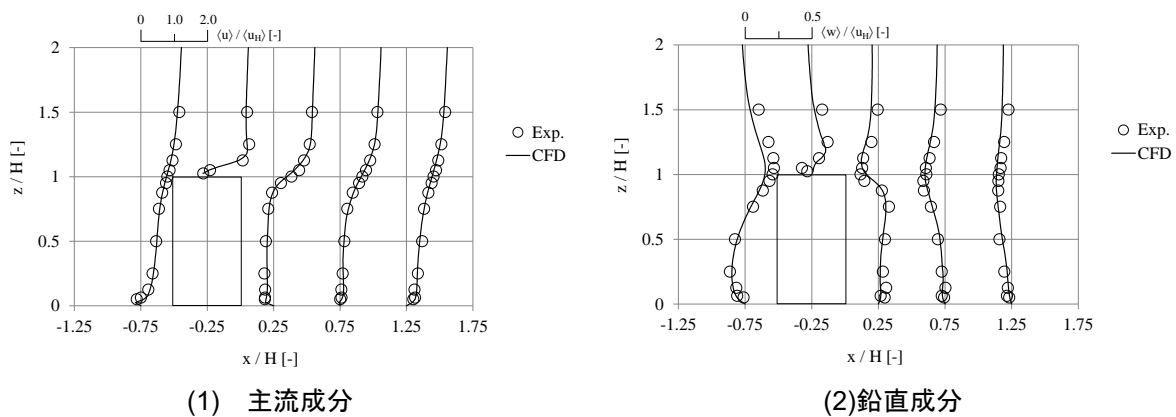


図1 平均風速の主流方向の変化

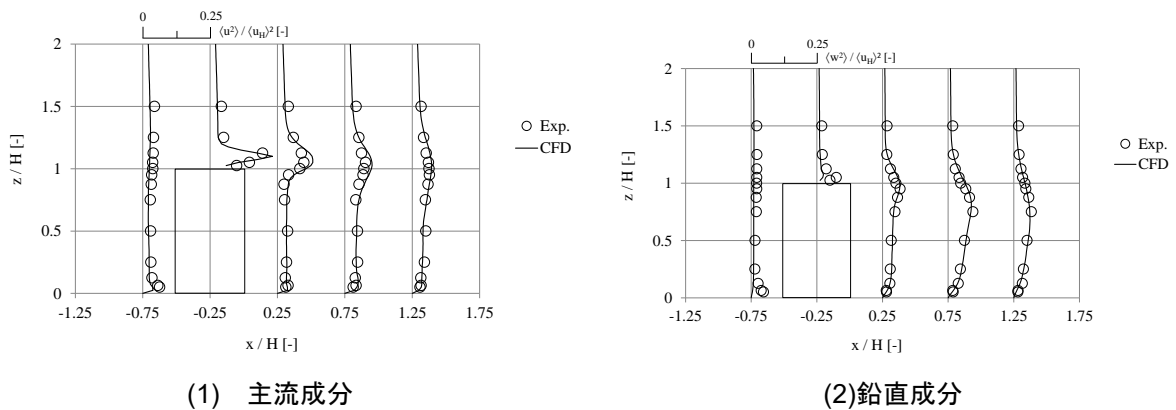


図2 ノルマルストレスの主流方向の変化

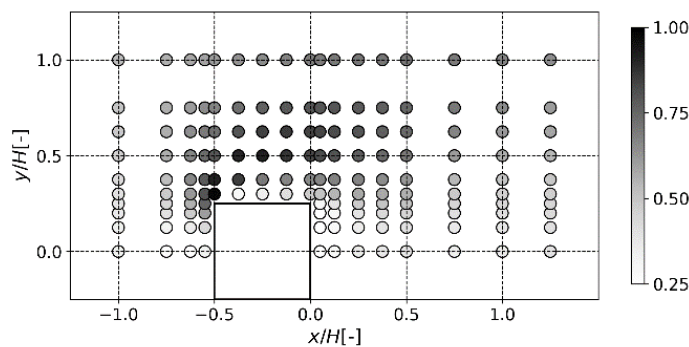
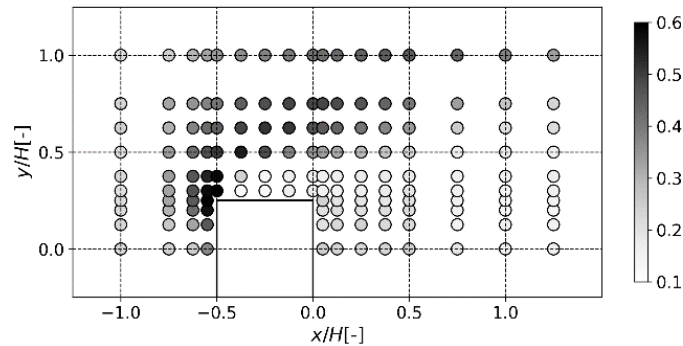
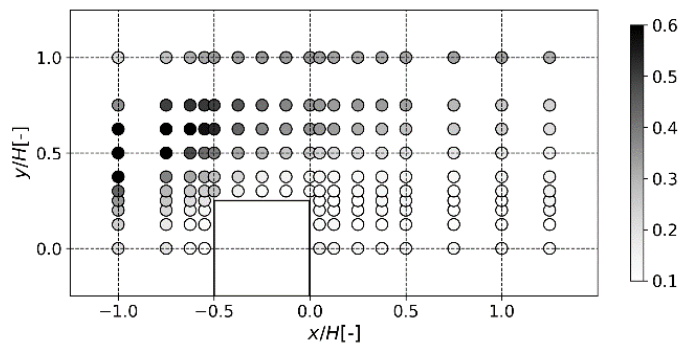


図2 $z/H=1/16$ における平均スカラー風速分布

図3に、2点のスカラ風速の相互相関係数の最大値を示す。風上の建物中心高さの $x/H=1.0$, $y/H=0.0$, $z/H=0.5$ 及び建物側方の高風速域の風上側の $x/H=1.0$, $y/H=0.5$, $z/H=0.0625$ の各々2地点と図3に示す歩行者高さの地点のスカラ風速の時系列データに対し、時間遅れとその時間遅れでの相関係数の関係を評価している。風上の建物中心高さとの相関係数(図3(1))は、概ね建物風上角部付近から側方領域にかけての高風速域で大きな値を示している。一方、歩行者高さの高風速域の風上地点との相関係数(図3(2))を見ると、自身の地点($x/H = -1.0$, $y/H = 0.5$, $z/H=0.0625$)から高風速域の境界までは大きな値であるが、高風速域内やその風下側では、相関係数が小さい。



(1) $x/H = -1.0$, $y/H = 0.0$, $z/H = 0.5$ (建物中央高さ風上位置)と歩行者高さの各点



(2) $x/H = -1.0$, $y/H = 0.5$, $z/H = 0.0625$ (歩行者高さ強風域の風上位置)と歩行者高さの各点

図3 $z/H=1/16$ における相互相関係数の分布

図4に、風上の建物中心高さの $x/H=1.0$, $y/H=0.0$, $z/H=0.5$ との相互相関係数が最大値を示した時間ラグを示す。なお、相互相関係数の最大値が0.3以上の地点のみを示している。建物風上角部から建物側方に移るにしたがい、時間ラグが徐々に増加しており、風上側の建物中心高さ近傍の空気は、歩行者高さの建物角部から側方の高風速域を順に通過していると考えられる。

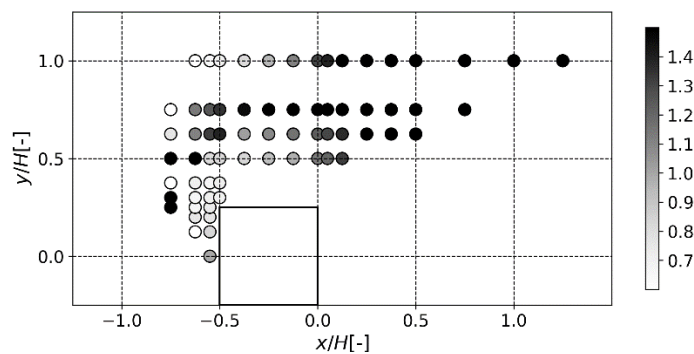


図4 $x/H = -1.0$, $y/H = 0.0$, $z/H = 0.5$ (建物中央高さ風上位置)と歩行者高さ各地点の時間ラグ

最後に、歩行者高さ建物側方の高風速域のひとつの地点($x/H=0.25$, $y/H=0.5$, $z/H=0.0625$)に着目して分析を進める。図5に $x/H=0.25$, $y/H=0.5$, $z/H=0.0625$ のスカラ風速の確率密度関数を示す。

平均値は0.9程度で、平均値から標準偏差の3倍を超える時間帯は、データを収集した30s間（無次元時間でおよそ700）に6回あった。この内の一つの稀な高風速のイベントに注目して、高風速域に至る流跡線を求めた結果を図6に示す。流跡線は、 $x/H = -0.25$, $y/H = 0.5$, $z/H = 0.0625$ で高風速のピークが観測された時刻に粒子を50個、地点近傍に発生させ、全計算格子で保存した時刻歴データを基に、時間を逆に進行させることで求めた。なお、計算負荷削減のために、流跡線を求める格子点データは、本解析の時間間隔の10倍の時間で保存したものをを用いている。流跡線の解析時間は、無次元時間でおよそ2である。大部分は、流入面 ($x/H = -2.5$) の高さ $z/H = 0.5$ あたりから、歩行者高さの建物風上角部近傍に降下し、建物側方に流れている。一部は、建物前面に向かって流れ、歩行者高さに降下後、建物角部近傍での剥離に伴い、建物側方へ向きを変えている他、ごく一部、建物前面に衝突後、歩行者高さまで降下し、その後、角部、建物側方へと流れているものもある。風上の建物中央高さ付近から、歩行者高さの建物風上角部に直接流入しており、接近流の乱流構造が建物側方の強風に大きな影響を及ぼす可能性があることが示された。引き続き、接近流の乱流構造と歩行者風環境の関係について、検討を行っていく予定である。

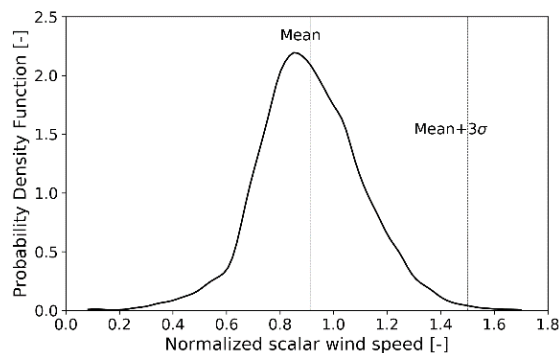


図5 建物側方強風域($x/H = -0.25$, $y/H = 0.5$, $z/H = 0.0625$)におけるスカラー風速の確率密度関数

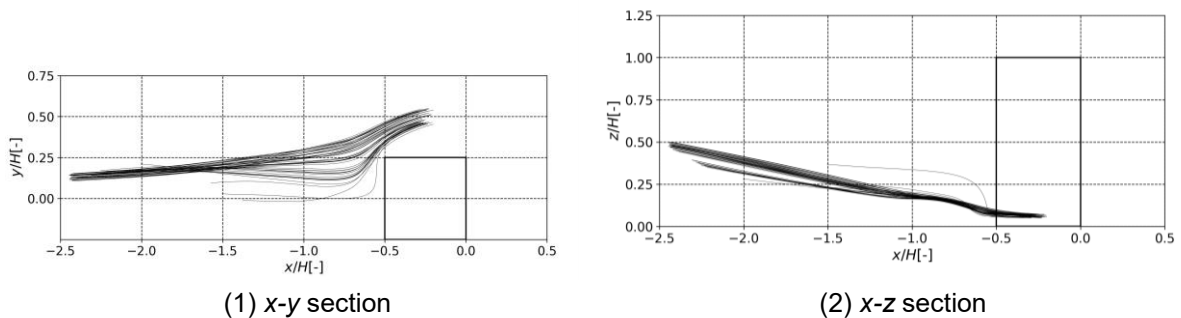


図6 無次元時間2の間での流跡線

参考文献

- 1) 東京工芸大学: Database of Indoor/Outdoor Air Pollution, A collection of data on Indoor/Outdoor pollution, http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/pollution/pollution.html
- 2) Kobayashi, H: Physics of Fluids (1994-present), 17(4), 045104, 2005
- 4) 梶島: 日本機械学会論文集 B 編, 60, 574, pp.2058-2063, 1994
- 5) Werner H., Wengle H.: Proc. 8th Symp. on Turbulent shear Flows, 19-4, pp.155-158, 1991

(発表論文)

大風翼, 菊本英紀, 池谷直樹: LESデータベースに基づく歩行者空間の強風の流跡線の逆追跡, 日本風工学会 2019年度年次研究発表会梗概集, 2019(投稿中)