

都市歩行者空間における風速確率性状の把握と低頻度風速による環境評価

川南, 太志

<https://hdl.handle.net/2324/7182516>

出版情報 : Kyushu University, 2023, 博士 (工学) , 課程博士
バージョン :
権利関係 :



令和 5 年 度

博士論文

都市歩行者空間における風速確率性状の把握と
低頻度風速による環境評価

川南 太志

提出年月日 令和 6 年 1 月 7 日

目次

第 1 章 序論	1
1.1 研究背景	2
1.2 論文構成	4
参考文献.....	7
第 2 章 屋外風環境に関する先行研究と現状.....	8
2.1 諸言	9
2.2 先行研究の整理.....	9
2.3 近年の研究動向と課題	12
2.4 結語	17
参考文献.....	18
第 3 章 単純都市全域を対象とした歩行者高さ風速とスカラー濃度の確率性状に関する研究.....	24
3.1 諸言	25
3.2 数値流体解析技術について	25
3.2.1 Large-Eddy Simulation のフィルタ操作と支配方程式	26
3.2.2 SGS 応力モデル	27
3.2.3 スカラー拡散の支配方程式	27
3.2.4 SGS スカラー束モデル	28
3.2.5 支配方程式	28
3.3 解析対象モデル.....	29
3.4 均一高さ、不均一高さ模型群における LES の解析条件.....	29
3.5 均一高さ、不均一高さ模型群における LES の基礎的検討	32
3.5.1 使用するデータの決定.....	32
3.5.2 風速空間分布による平均化時間の検討	34
3.5.3 主流方向風速と Reynolds stress, RMS 速度による平均化, 統計時間の検討	35
3.5.4 Dispersive Stress による平均化時間の検討	37
3.5.5 既往研究結果との比較	39
3.5.6 確率密度分布による解析時間の検討	40

3.6 均一高さ及び不均一高さの都市配列における気流性状と濃度分布	44
3.6.1 xz 断面における平均流分布	44
3.6.2 xy 断面における平均流とスカラー濃度場	47
3.7 風速及びスカラー濃度の確率性状	52
3.7.1 風速確率密度分布	52
3.7.2 スカラー濃度確率密度分布	54
3.8 超過風速及び超過スカラー濃度	54
3.9 結語	56
参考文献	57
第 4 章 単体角柱周辺流れにおける歩行者高さ風速の確率性状に関する研究	59
4.1 諸言	60
4.2 1:1:2 単体角柱周辺気流場における LES の解析条件	61
4.3 解析対象モデル	61
4.4 1:1:2 単体角柱周辺気流場における LES の基礎的検討	63
4.4.1 使用するデータの決定	63
4.4.2 鉛直, 水平断面の速度分布による風洞実験結果との比較	63
4.4.3 鉛直, 水平断面の速度, 乱流エネルギープロファイル	67
4.5 風速確率密度分布	68
4.5.1 各成分風速の確率密度分布	69
4.5.2 スカラー風速の確率密度分布	75
4.6 各成分風速, スカラー風速の規格化確率密度分布	78
4.7 超過風速と統計量の関係	81
4.7.1 超過風速と平均風速の関係	81
4.7.2 一次直線による超過風速の予測	85
4.7.3 平均風速, 標準偏差による正規分布を仮定した超過風速の予測	87
4.8 結語	91
参考文献	92
第 5 章 単体角柱周辺流れにおける歩行者高さ風速に対する統計モデル適用に関する研究	93

5.1 諸言	94
5.2 予測手法について	95
5.2.1 2W 法・3W 法	95
5.2.2 GCS 法	95
5.3 解析条件	96
5.4 風速確率密度分布	97
5.5 2W・3W 法, GCS 法それぞれの低頻度発生強風の予測精度	100
5.6 結言	105
参考文献	105
第 6 章 結論	107
謝辞	112

第 1 章 序論

1.1 研究背景

都市空間内における気流分布は都市内外の空気交換を意味する都市換気や、ビル風に代表される突風による歩行者安全性など、都市域における環境評価に大きな影響を与える要素の一つである。都市建物群は多様な高さや形状の建物が複雑に平面配置されることで構成されている。この建物群は、風からの抗力を受けることにより空気塊の持つ運動量を吸収する。一方、運動量を吸収された風は減速し、空間的な速度分布を生じさせるだけではなく、周辺風速との大きな速度シアーを形成する。このように建物群の影響が直接的に及ぶことで空間的な風速分布が発生する領域を都市キャノピー層と呼び、その低層部分である地面から高さ1.5m から 2m 程度の範囲を歩行者空間や歩行者高さとして定義している。都市キャノピー層の風速場は、複雑配置された建物群による抗力分布に起因する速度分布、建物により形成させる速度シアーによる流体力学的不安定性、さらには動粘度の極めて小さな空気を対象としていることなどから、時空間的に乱れた速度場となる。その主たる要因が都市の幾何形状であることは容易に想定されるが、都市建物群の複雑さや都市の多様さから、現在に至るまで建物群の幾何形状が屋外風・濃度環境に与える影響を解明する多くの研究が行われてきた。

その中でも、都市換気の観点から都市空間内の平均風速に注目し、都市の幾何形状と関係を明らかにすることを目的とした風洞実験及び数値計算が数多くある。例えば、義江(2008)⁽¹⁾らは、実在都市を対象に、建蔽率や建物高さ、ポディウム形状など実在都市の幾何形状の特徴量を維持した単純化模型を用いた風洞実験を行い、都市空間内の平均風速がグロス建蔽率によって一次関数で表現できる事を示した。また、竹林ら⁽²⁾は、実スケール整形配列モデルを対象とした数値計算を Reynolds Averaged Navier-Stokes シミュレーション (RANS) により行っている。その結果、グロス建蔽率が大きい密集した建物群において、建物高さに分布を与えることで街路内平均風速が増加し、風通しが向上することを示している。以上のように、対象としている街区形状や建物密度、速度比の定義は研究者によって異なるものの、都市幾何形状と都市内平均風速については、都市内の建物密度の増加に対して都市内平均風速が減少するという点、及び、建物群の建物高さのばらつきにより都市内平均風速は増加する傾向にあるという点については統一的理解が得られていると言える。

こうした都市空間の風速と幾何形状の関係が調査されてきた背景は、都市内部の平均風速と熱や汚染物質などのスカラー濃度が十分な風速の確保により希釈され、都市換気が促進されるという考え方による。そのため、風速比の幾何学的な依存性を調べる研究だけでなく、都市内外へのスカラーの拡散を評価する研究も行われている。例えば、Hu and Yoshie (2013)⁽³⁾は都市空間内の平均風速とスカラー濃度の関係性を調べるために数値計算を行い、その結果、平均風速比と規格化されたスカラー濃度の間に負の相関関係があることを示し、高速流によって都市キャノピー内での汚染物質の滞留を低減できる事を示した。さらに、Boppana et al. (2010)⁽⁴⁾は一様建物高さ及び非一様建物高さの一般的な都市を対象に、都市気流と都市ス

カラー濃度の LES を実施した。その結果、非一様高さの都市幾何条件において都市キャノピー内の水平面内平均スカラー濃度が一様高さの条件に比べて低くなる事、一方でキャノピー外においては非一様高さの条件のスカラー濃度が一様高さの条件に比べて高くなる事を示した。このことは建物高さばらつきの導入によって都市キャノピー内への空気導入が向上し、キャノピー内外の効率的な換気をもたらす事を示唆していると言える。以上要するに、歩行者空間の風速を適切に保つことは都市域の環境改善に役立つと考えられており、風の道の確保や空気導入の促進を善とする考え方である。

一方で、風環境問題に対する意識の高まりは 1970 年前後の高層建物の建設に伴うビル風による風環境の悪化である。日本最初の超高層ビルは、1968 年に竣工した霞ヶ関ビルディング（高さ 147m, 36 階建）であり、建設後の建物周辺での強風の発生が問題視されるようになった。ビル風の発生メカニズムは極めて単純である。都市周辺気流において、人々の居住域は都市キャノピー層であるが、さらに退いて都市域を観れば、都市建物群という粗面が形成する乱流境界層に他ならない（都市乱流境界層と呼ぶ場合もある）。したがって、地面から都市キャノピー層、接地境界層、外層と上空になるほど、吹走する風の速度が大きくなる。そのため、都市キャノピー層や接地境界層から突き出るほどの超高層建物が建設されると、都市キャノピー層よりも大きな運動量を持った風の動圧が建物により静圧に変換され、建物上下に大きな静圧差が生じることで、強い下降流が発生し、歩行者空間に強風をもたらす。通常、風環境評価というと、前述の都市換気よりも強風の発生を評価することを指すことが多い。こうした風環境評価については、1970 年以降の活発な議論の末、評価方法が提案され、現在では村上ら⁽⁵⁾による指標または風工学研究所⁽⁶⁾による指標の二つの評価指標を用いた風環境アセスメントが行われるに至っている。すなわち、都市換気概念と相反し、強風を悪として弱風にすることを改善と評する指標が用いられている。

以上の背景の基、図 1-1 に都市域における風環境評価の概念図を示す。図 1-1 より、都市換気の視点においては、都市域全体を捉え時間平均風速や熱や汚染物質などのスカラー濃度に対する都市幾何形状の関係を明らかにすることが主な目的であり、それぞれの都市幾何形状と平均風速、スカラー濃度分布の関係性は十分に知見が得られている。一方、風環境評価の視点では、平均風速ガストファクターを乗じることにより推定した局所的な最大風速を用いて、建物建設前後の風環境を評価するという手法は確立されている。しかしながら、都市環境に大きな影響を与える突風や、稀に発生する高濃度な事象を評価するためには、都市気流の時空間的な変動を考慮した評価が重要である。このような視点に基づいて、Ikegaya et al.⁽⁷⁾はさまざまなアスペクト比で構成される直方体ブロックの規則的配列を対象とした LES を実施し、歩行者高さの水平面内を対象とした風速の確率密度分布を基に、低頻度強風の発生確率の評価を行う手法を提案した。また、都市換気と風環境という評価対象の違いに捉われる

ことなく、弱風から強風までを含めた時空間変動する都市域の乱流現象を確率性状に着目して評価する一連の研究が必要であろう。

以上のように、近年では都市キャノピー空間を対象に突風現象の評価を試みる研究がなされているが、平均風速評価において考慮されている高さ変動の影響は、突風現象の評価においては十分に議論されていない。加えて、突風現象と瞬間的なスカラー濃度分布との関係性についても検討されていない。さらに、既往研究では、都市キャノピー空間を対象とした平均風速および瞬時風速を都市幾何形状によって整理することが行われているが、これらの方法は歩行者高さの街区全体を対象とすることで、都市空間の代表的な平均風速および強風を評価するというものである。一方で、歩行者空間において実際に問題となるビル風のような突風現象は、建物との相対的な位置により大きく発生頻度は異なると考えられる。特に、既報研究⁷⁾による街区全体を対象とした評価は、弱風域と強風域が混在する都市キャノピー内の空間代表値として平均風速や超過風速を算出しているため、建物隅各部などで局所的に発生する強風域での超過風速の発生確率を過小評価している可能性があると言える。

このような背景から、本研究では都市建物群が形成する速度・濃度場について、従来の都市換気や風環境の評価対象の枠組みに捉われることなく、流体現象の粗過程としての確率性状を把握することで、歩行者空間の快適性と安全性を包括的かつ普遍的に評価する方法を提案する。それにより、歩行者空間の屋外環境の改善に向けた風速・濃度の評価手法の発展に資することを目的とする。解析においては、都市キャノピー空間の風速や濃度の確率性状を分析する手法を導入し、稀に発生する強風や弱風事象や汚染物質の高濃度事象などに代表される低頻度事象を、非定常解析の結果を元に推定した確率密度分布から評価する方法を提案する。加えて、確率性状の把握が困難な場合を想定して、強風や弱風を比較的容易に取得可能な平均風速や風速の標準偏差などの基本統計量との相関関係を調査することに加え、より高精度な低頻度事象推定に向けて、風速の確率密度分布関数を確率モデルにより表現する複数の手法の開発を行う。乱流現象に対する普遍的な強風・弱風の推定評価方法を提案することを念頭に、都市建物群を模擬した単純建物街区及び単純単体建物の周辺気流場を数値流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）により数値求解する。また、CFD 解析は一貫して非定常求解とし、時変動する乱流場を対象に高精度な数値解析風速データを取得し、ポスト解析によりその確率性状を緻密に分析する。

1.2 論文構成

本論は以下の構成から成り立つ。

第1章では本研究の研究背景と目的を述べる。

第2章では先行研究のレビューを行う。

第3章では高さ分布のある都市配列における平均的・瞬間的な気流場について述べる。
第4章では1:1:2単体角柱周辺の複数の測定点を対象に風速の統計量について述べる。
第5章では孤立した建物周辺における低頻度発生風速の予測モデルについて述べる。
第6章では本論文の総論について述べる。

第2章では、各分野で行われてきた都市換気と風環境評価に関わる文献を包括的に調査し、既往研究における屋外都市空間の環境評価での共通認識と問題点を明らかにする。ビル風問題が発生してから50年近く取り組まれてきた風環境に関わる文献を初期の研究にまで遡り概説する。また、都市換気概念が提唱された以降の都市の快適性に関わる文献についても調査する。両者に関わるこれまでの文献を調査することにより、風環境評価と都市換気のこれまでの動向を把握するとともに、当該分野における問題意識を明確にする。加えて、特に近年になり多くの研究成果が報告されているCFD解析を適用した屋外気流場・濃度場の分析と評価に関する既往文献を中心に、それぞれの分野におけるCFD解析が果たしてきた役割について整理する。第3章においては、都市換気の評価に対して、確率的解析手法を取り入れた風速と濃度の評価方法を提案するとともに、濃度場と速度場の相関関係を解明した。建物高さにはばらつきのある単純建物群周辺気流について、高さ変動が突風現象及び瞬時のスカラー濃度分布に与える影響を明らかにするために、非定常な都市気流及びスカラー濃度場のCFD解析を行った。一様高さ、非一様高さの都市幾何条件を持つ合計6つの都市配列について、歩行者高さ水平面内全体を対象に、速度及びスカラー濃度の確率分布を比較する事で、高さ変動が突風現象及び瞬時のスカラー濃度分布に与える影響について考察した。

第4、5章では、より基礎的な風速の確率性状を把握し強風・弱風の評価を行うことを目的として、単体建物周辺気流を対象とした非定常CFD解析の実施と速度場の統計解析を行った。第4章においては、Okaze et al. (2017)⁽⁸⁾による1:1:2単体角柱周りを対象としたLESの結果を再解析することで、建物周囲の複数の地点を対象として歩行者高さにおける速度の確率分布性状の特性について詳細に検討した。風速の確率分布を元に、低頻度発生強風と弱風を定量化し、それらと平均風速との関係性を考察するとともに、単純な正規分布関数との関係を調査した。第5章においては、第4章で得られた知見を元に、確率密度分布を統計量によりモデル化する手法を提案することで、強風と弱風を予測する手法を提案した。確率密度分布関数として、ガウス分布の直交展開によるGram-Charlier series (GCS)を用い、ガウス分布では表現できない風速確率密度の歪みを適切に取り入れた確率密度分布関数モデルを提案し、より高精度に強風と弱風を推定する方法を開発した。

以上により得られた知見を第6章に総括するとともに、本研究の制限と今後の研究の発展のための課題を述べ、本論の結論とする。

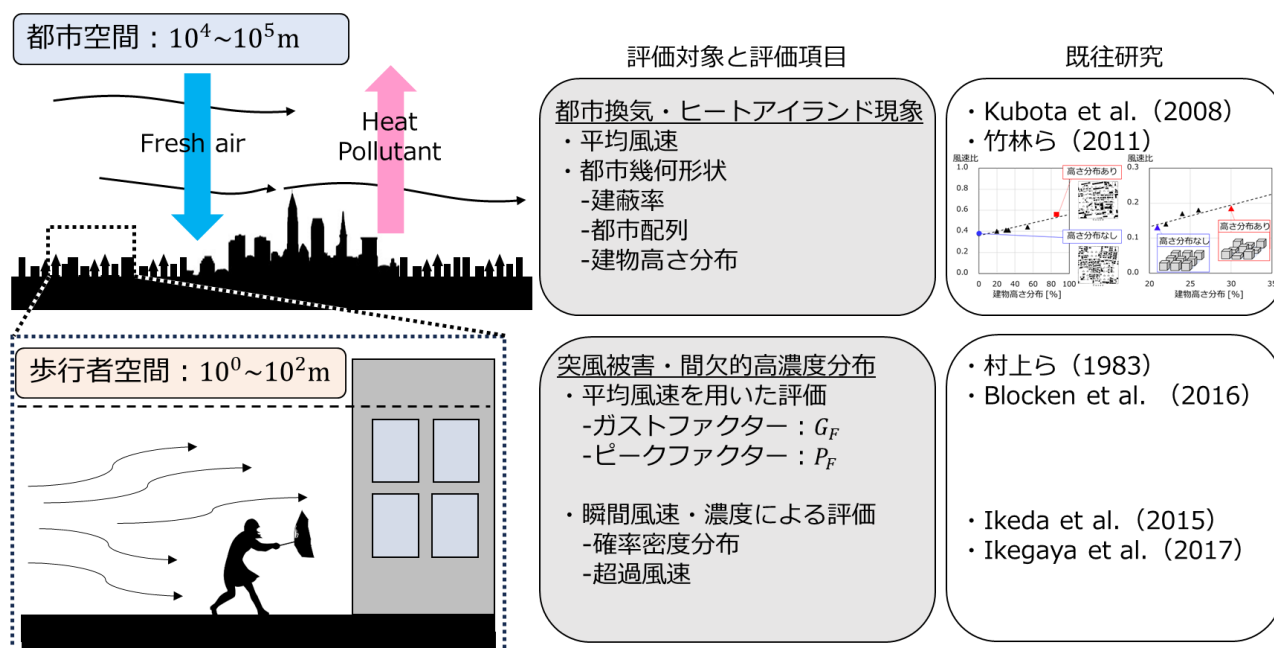


図 1-1 都市域における風環境評価の概説

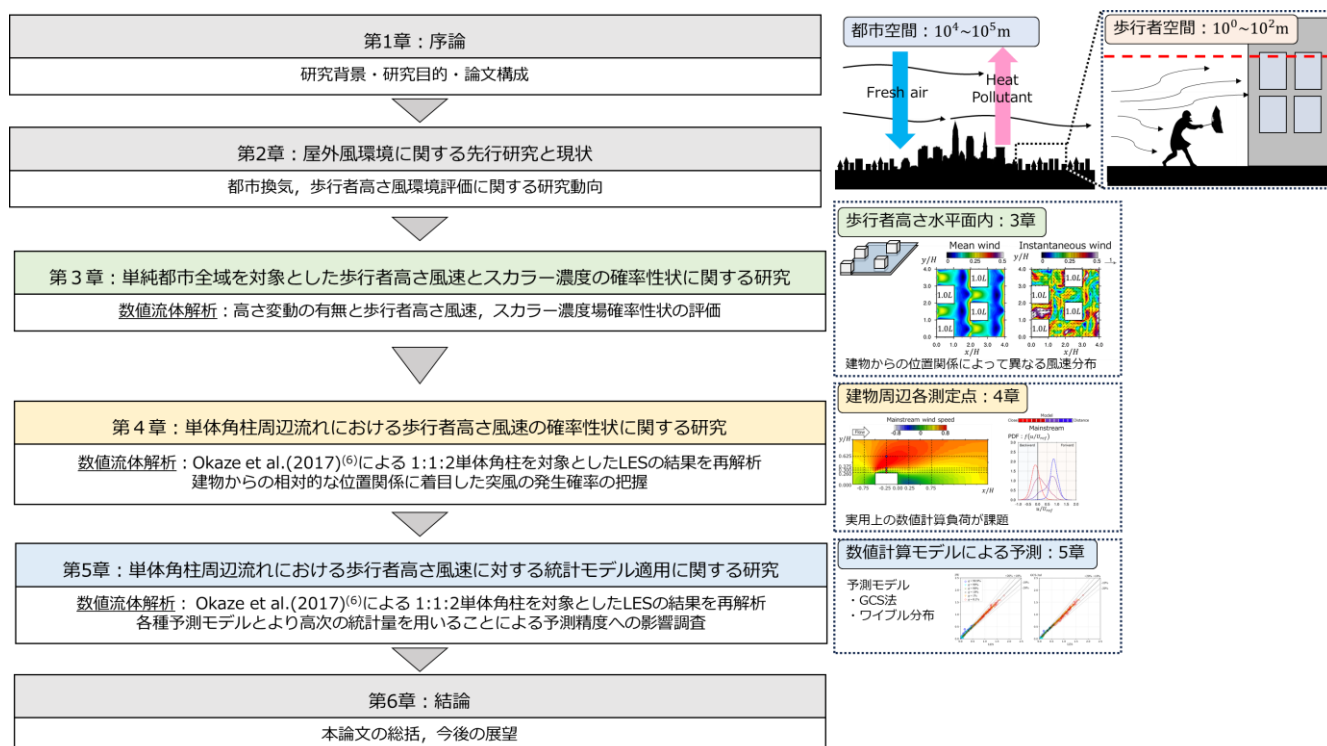


図 1-2 本研究のフローチャート

参考文献

- [1] 義江龍一郎, 田中英之, 白澤多一, 小林剛, 高層密集市街地における建物群の形態が歩行者レベルの風速・気温分布に与える影響, 日本建築学会環境系論文集 627, (2008), pp.661-667.
- [2] 竹林英樹, 山田俊明, 森山正和, 街区の空間特性が街路空間の風通し環境に及ぼす影響, 日本建築学会環境系論文集, 第 670 号, pp1087-1092, (2011)
- [3] Hu, T., Yoshie, R., 2013. Indices to evaluate ventilation efficiency in newly-built urban area at pedestrian level. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 112, 39–51.
- [4] Boppana, V.B.L., Xie, Z.T., Castro, I.P., 2010. Large-eddy simulation of dispersion from surface sources in arrays of obstacles. Bound.-Layer Meteorol. 135(3), 433–454.
- [5] 村上周三, 岩佐義輝, 森川泰成, 居住者の日誌による風環境調査と評価尺度に関する研究 : 市街地低層部における風の性状と風環境評価に関する研究-III, 日本建築学会論文報告集, 1983, 325 巻, p. 74-84.
- [6] 風工学研究所編, 新・ビル風の知識, 鹿島出版会, 1989.
- [7] Ikegaya, N., Ikeda, Y., Hagishima, A., Razak, A.A., Tanimoto, J., 2017. A prediction model for wind speed ratios at pedestrian level with simplified urban canopies. Theor. Appl. Climatol. 127(3–4), 655–665.
- [8] Okaze, T., Kikumoto, H., Ono, H., Imano, M., Hasama, T., Kishida, T., Nakao, K., Ikegaya, N., Tabata, Y., Tominaga, Y., “Large-Eddy Simulations of flow around a high-rise building: validation and sensitivity analysis on turbulent statistics”, EACWE2017

第 2 章 屋外風環境に関する先行研究と現状

2.1 諸言

本節では、3章・4章・5章にて報告する研究内容の位置づけを明確にすることを目的として、各分野で行われてきた都市換気と風環境評価に関わる文献を包括的に調査し、既往研究における屋外都市空間の環境評価での共通認識と問題点を明らかにする。ビル風問題が発生してから50年近く取り組まれてきた風環境に関わる文献を概説する。一方、都市換気概念はヒートアイランド現象の顕在化により、高温化する都市を快適な屋外空間にするために屋外風を活用するという発想のもと研究が行われてきた。本章では、両者に関わるこれまでの文献を調査することにより、風環境評価と都市換気のこれまでの動向を把握するとともに、当該分野における問題意識を明確にする。加えて、特に近年になり多くの研究成果が報告されているCFD解析を適用した屋外気流場・濃度場の分析と評価に関する既往文献を中心に、それぞれの分野におけるCFD解析が果たしてきた役割について整理する。以上を基に、一連の本研究で取り組む研究課題について述べる。

2.2 先行研究の整理

(a) 都市の全域の評価に関する研究 - 都市換気

都市空間における廃熱や汚染物質の滞留によって引き起こされるヒートアイランド現象や大気汚染が問題化されて長い年月が経過した⁽¹⁾⁽²⁾。日本においては、経済発展と人口集中、建物の都市化に伴い、建築物は高層化・高密度化し、都市空間内の人工排熱は滞留、増加することになった。加えて、都市郊外まで都市化が進んだ結果、緑地は減少し、より熱容量の大きいアスファルトに置き換わることになった。これら複数の要因を包括して、ヒートアイランド現象が引き起こされていると考えられており、建物の高層化・高密度化は汚染物質の滞留を引き起こすとの報告もある⁽³⁾。これらは都市居住者の熱的快適性だけでなく、空調設備の使用量の増加に伴うエネルギー使用量の上昇にも影響を与える。そのため、ヒートアイランド現象の解消を目的とした取組が多方面で行われてきた。特に、地球温暖化の深刻化とヒートアイランド現象により、屋外空間は昼夜問わず不快なほどに気温が高いことが多くなると認識されるようになった。

こうした背景から、都市風環境の分野では、都市空間内の気流性状に着目し、都市内で発生する排熱や汚染物質を効率的に都市外に排出することを屋外空間の都市換気と名付け、建物の幾何性状や都市配列と都市換気の関係性を整理する研究が数多く行われてきた。都市換気概念は、冷涼な屋外空間が好まれる欧州における風の道にヒントを得た概念であるが、超高層・超高密な都市が多く、また温暖気候域に属する日本では、単純に風の通り道を確認するだけではなく、冷涼な上空風や海風を効果的に歩行者高さにまで導入する鉛直方向の風の道を確認する必要性が議論されてきた。また、超高密・高層建物からなるアジアの大都市、例えば、香港や上海などでは、高層建物によるビル風よりも、超高密条件による歩行者空間の空気質の悪化の方が問題視される傾向にあり、都市換気重要性は広く認知されるに至っている。

このような都市建物群の幾何形状が気流場に与える影響を把握する研究は、建物群を

単純建物に簡単化することで、流れ場に影響する主要な幾何パラメータを解明する手法が取られることが多い。例えば、Oke et al.⁽⁴⁾は粗度密度に応じて粗度周辺気流を三つの **flow regime** により分類し、粗度密度によって気流場が定性的にどのように変化するかを示している。この **Flow Regime** は、粗度周辺気流が干渉し異なる定常渦が形成される粗度周辺気流の特徴をよく反映したもので、丸山ら⁽⁵⁾は立方体粗度群に作用する抗力係数と建物密度が上凸分布の関係となることをこの気流分布の変化を基に説明している。他にも、萩島ら⁽⁶⁾⁽⁷⁾は高さ分布や建蔽率といった複数の幾何条件を与えた立方体粗度群周辺の風洞実験を行い、粗度上空と粗度空間内における運動量交換を表すパラメーターである抗力係数と建蔽率、高さ分布の関係性を調べた。その結果、建蔽率条件によって抗力係数は上凸分布になること、高さ分布の導入によって、抗力係数は増加することを示している。他にも、幾何条件と抗力係数を取り扱った研究は数多く行われており、高さ分布の導入によって抗力係数が増加することについては統一的な見解が得られていると考えられる (Xie⁽⁸⁾, Leonardi⁽⁹⁾, Zaki⁽¹⁰⁾, Cheng⁽¹¹⁾, Coceal⁽¹²⁾, Iyenger⁽¹³⁾)。これらの研究は、建物群に作用する抗力、すなわち、上空を吹走する流体の運動量吸収量を定量化していると捉えることもでき、建物群の幾何形状が歩行者空間の風速に大きく影響を与えることを示唆するものである。

また、都市外部の乱流構造と都市空間内のスカラー排出との関係についても研究されている Kanda⁽¹⁴⁾, Yoshida⁽¹⁵⁾。例えば、Michioka et al.⁽¹⁶⁾は二次元及び三次元単純模型群のから粗度境界層について、建物群の床面付近からスカラーを排出し、その拡散現象を LES によって解析を行った。その結果、粗度上空に形成される低ストリークと呼ばれる大規模乱流構造が、キャニオン内部のスカラー排出を促進することを示した。すなわち、乱流境界層における速度場が都市域の汚染質濃度の希釈、延いては屋外環境の快適性に影響することを示唆する結果であろう。

また、都市キャノピー内部スケールにおいては、都市換気を直接評価する指標として、キャノピー内平均風速と都市幾何形状の関係性を整理した研究が数多く行われてきた。例えば、久保田ら⁽¹⁷⁾は複数の都市模型を用いた風洞実験により、歩行者高さにおける水平面内時間平均風速が都市の粗度密度の増加に対して、単調減少することを示している。加えてさまざまな実在街区の幾何形状と歩行者高さ風速の関係を整理することで、建物高さにばらつきがあるほど歩行者風速が大きくなることを明らかにし、建物高さの導入が都市換気に対して有効であることを示した。他にも、義江ら⁽¹⁸⁾は実在都市をモデルに建蔽率や容積率のパラメーターに変化を与えた単純粗度模型を用いた風洞実験を行い、歩行者空間における速度および温度を計測することで、建物密度の増加が風速現象と温度増加に寄与することを示している。Razak et al.⁽¹⁹⁾は立方体や直方体が規則的に配置された単純化された建物群周辺気流の LES を実施し、建蔽率及び建物形状の平均風速への影響を整理している。それによれば、歩行者高さの水平面内平均風速が粗度立面積密度の指数関数によって表現できることが示されている。Zhang et al.⁽²⁰⁾は 実在都市を元に都市配列や建物高さに変更を加えた都市配列周辺気流の RANS を実施し、千鳥配列が上空の気流を取り込む都市換気の観点では有用であると述べている。上記の研究をはじめと

して、平均風速と都市幾何形状の関係性に注目した研究は数多く行われており、(竹林ら⁽²¹⁾, Kubota⁽²²⁾, Hu and Yoshie⁽²³⁾, Edward⁽²⁴⁾, Letzel et al.⁽²⁵⁾, Ciao et al.⁽²⁶⁾) いずれの研究においても高さ分布の導入によって、都市空間内の平均風速は増加することが示されていると言える。

また、都市空間内の気流分布における廃熱や汚染物質といったスカラー量について、分布性状の調査 (Hang et al.⁽²⁷⁾) も行われている。その中でも Park et al.⁽²⁸⁾ はアスペクト比が 1 の理想化されたキャニオン内及びその上空における乱流・拡散の熱効果を含めた気流性状の LES を行い、建物壁面を加熱、床面からスカラー放出し、風速分布性状を観察した。また、Boppana et al.⁽²⁹⁾ は一様建物高さ及び非一様建物高さの一般的な都市を対象に、都市気流と都市スカラー濃度の LES を実施した。その結果、非一様高さの都市幾何条件において、都市キャノピー内の水平面内平均スカラー濃度が一様高さの条件に比べて低くなる事、一方でキャノピー外においては非一様高さの条件のスカラー濃度が一様高さの条件に比べて高くなる事を示した。

以上要するに、これらの既往研究から都市の建物密度の増加によって歩行者空間速度が低下すること、都市空間内において、建物高さ分布の導入によって上空の高速流の取り込みが促進されること、歩行者空間の平均風速とスカラー濃度に逆相関の関係にあり濃度低下に風速増加が重要であること、の 3 点については、風洞実験や CFD など様々な解析手法、または、対象建物群の差異などに関わらず統一的な見解が得られているといえよう。こうした知見を踏まえて、都市換気の観点における風通しの評価指標や都市幾何形状に関するガイドラインが策定されているに至っている (Edward⁽³⁰⁾, Mochida et al.⁽³¹⁾, Robert et al.⁽³²⁾)。

(b) 歩行者高さの局所的な評価に関する研究 – 風環境

一方で、風環境の観点では、歩行者高さスケールにおける風環境リスクについても考慮することが重要である。歩行者高さスケールにおける居住者の快適性や安全性に影響を与える要因として、建物内外の自然換気 (Peterka et al.⁽³³⁾, Ramponi et al.⁽³⁴⁾, Tominaga et al.⁽³⁵⁾, Peterka et al.⁽³⁶⁾) に加えて、ビル風に代表される突風現象も居住者の安全性・快適性に影響を与えるとして、リスク低減や環境アセスメント時の評価手法の確立が求められてきた。国内では、ビル風問題は比較的低層の住宅居住地に高層ビルやマンション等の高層建築物が建築され始めた 1970 年～1980 年代ごろに社会問題として認識され始めた。日本初の超高層ビルである霞が関ビル周辺で発生した風害はその代表である。ビル風に関するアセスメント手法については、村上ら⁽³⁷⁾による 2 年間に及ぶ風環境調査と住民意識アンケート調査の結果を基に、歩行に重大な影響を与える指標として、日最大瞬間風速 (3 秒平均風速の 10 分間最大値の日最大値のこと。屋外風速の評価においては、3 秒移動平均風速を瞬間風速、その 10 分間平均風速を平均風速と定義している。また、瞬間最大風速は、3 秒平均風速の 10 分間の最大値、日最大平均風速は 10 分間平均風速の 1 日の最大値と定義されている) を用い、その基準が 15m/s であることを指摘してした。また、街区の用途ごとに、強風の頻度と大きさの基準を用いて許容値を決める指針

が示されている。また、風工学研究所は、平均風速（10分平均風速）の累積度数を元に、55%超過風速と95%超過風速による基準とし、その値に応じて4つの領域により風環境を定義している。これらの指標は、村上らによる指標または風工学指標として、現在の風環境アセスメントに導入されている。上記をはじめ、CFDや風洞実験を用いた歩行者高さ風環境評価のガイドラインや既往研究の整理が行われている（Blocken et al. (2004, 2016)⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾, Tominaga et al.⁽⁴⁰⁾, Yoshie et al.⁽⁴¹⁾, Mochida et al.⁽⁴²⁾, Stathopoulos⁽⁴³⁾）。

(c) 屋外空気環境評価におけるCFD解析の活用

こうした都市換気や風環境の評価においては、従来的には風洞模型実験や屋外実測が主たる研究手法として活用されてきた。しかしながら、表2-1に示すように昨今ではCFD解析が主要な解析方法になっている。例えば、歩行者空間の平均風速と建物形状の関係を明らかにした久保田ら(2000)⁽¹⁷⁾や義江ら(2008)⁽¹⁸⁾の研究は、風洞実験により複数の建物形状の歩行者空間を対象として風速を評価したもので、都市換気研究において、平均風速を建物形状パラメーターにより説明するという大局的な方向性を示したものである。しかしながら、その後、Razak et al. (2013)⁽¹⁹⁾, Ikegaya et al. (2017)⁽⁴⁴⁾, Ahmad et al. (2017)⁽⁴⁵⁾ らによる緻密な幾何形状と風速の関係を調査する研究はLESによるものである。すなわち、基礎研究の分野においても、単純街区から実街区まで、非定常数値解析を活用により、これまでの都市換気研究の発展が進んでいる。また、実務においても、通常の風環境アセスメントにおいては、風洞実験に替わってRANSモデルによる平均風速の評価とガストファクターによる強風の予測が用いられている。こうした動向を受け、屋外建物周辺気流に数値流体解析を実施するためのガイドラインが策定される至っている。

2.3 近年の研究動向と課題

基礎研究から実務に至るまで、都市換気と風環境に関わる多くの蓄積と実務レベルにおいて両者の知見が社会実装される段階にある現在においても、屋外環境評価には未だ残されたいくつかの課題がある。

例えば、歩行者高さにおけるビル風に代表される間欠的な強風事象について、都市幾何性状との関係性を調査する研究が行われているものの多くはない。ビル風のような突風現象や瞬間的な高濃度イベントの評価を行う上では、風速の非定常性と空間的分布の両方を考慮する必要があるが、従来は、実街区での実測や風洞実験、時間平均された流れ場の解析であるRANSを用いた解析が多数であり（Janssen et al.⁽⁴⁶⁾, Blocken et al.⁽⁴⁷⁾,）計測や数値計算、解析負荷の観点から時空間に変動を含む気流性状の報告例は多くはなかった（Letzel et al.⁽⁴⁸⁾）。一方で、計算機の処理能力の向上やPIV (Particle Image Velocity) といった新しい風洞実験手法の確立によって、時空間に変動を含む気流場のデータ取得や大容量の数値計算データの解析を行えるようになりつつある。例えば、He et al.⁽⁴⁹⁾は実在都市を対象としたLESを実施し、建物回りの気流分布の解析を行っている。Ahmad et al.⁽⁵⁰⁾は実在都市の高域な市街地を再現した計算領域におけるLESを実施し、上空風と

歩行者高さの最大平均風速の比（ガストインデックス）が建蔽率の増加に伴って単調減少することを示した。また，Ikeda et al.⁽⁵¹⁾は一樣高さ条件において，様々な建蔽率，建物高さ条件を与えた粗度群周辺気流場の LES を実施しており，幾何パラメーターを基にした歩行者高さの水平面内における風速の予測モデルを提案している。また，Ikegaya et al.⁽⁴⁴⁾は単純化された都市粗度配列周辺の LES を実施し，水平面内全域を対象として，平均風速と標準偏差によって定義されるピークファクターに準ずる予測式によって低頻度発生強風の予測を行っている。また，実街区の計測データや風洞実験による突風発生現象の評価も行われており，Mun et al.⁽⁴⁵⁾はマレーシアの都市大学キャンパスを対象として，キャノピー内部の平均風速と乱流風速に注目して，高層ビルの影響を調査しており，風速比が 0.5 より大きい条件において，平均風速とその標準偏差を用いることで，場所や風向によらず，強風を正規分布に基づくピークファクターで予測できることを示している。こうした非定常な強風を如何に計測または推定し，評価するかという点においては，非定常解析手法や計測手法を活用することにより今後も大いに発展の余地がある。

また，非定常風速の評価をより発展させる試みとして，都市キャノピー空間を対象とした突風現象の確率的評価を試みる研究がなされているが，幾何的特性と突風の発生確率を普遍的にまとめることを試みた研究は多くはない。中でも，都市換気の観点において，幾何的特性と平均風速評価の関連性を述べる上で考慮されていた高さ変動による影響は，突風現象の評価においては十分に議論されていない。さらに，時間的，空間的変動を含む流れ場における幾何的特性と瞬間的なスカラー濃度分布との関係性についても十分に検討されていない。また，既往研究では，都市キャノピー空間を対象とした平均風速および瞬時風速を都市幾何形状によって整理することが行われているが，これらの方法は歩行者高さの街区全体を対象とすることで，都市空間の代表的な平均風速および強風を評価するというものである。一方で，歩行者空間において実際に問題となるビル風のような突風現象は，建物との相対的な位置により大きく発生頻度は異なると考えられるため，建物からの相対的な位置における突風の発生確率の評価を行うことは，歩行者高さの居住者の安全性評価の観点から重要であると言える。この観点に基づき，近年では Hirose et al.⁽⁵²⁾によって，一樣高さの単純粗度モデルを使用して周辺気流場の PIV や Ikegaya et al.⁽⁵³⁾による 1:1:2 単純建物周辺気流の LES によって，平均風速が大きいポイントにおいて，ガストファクターが大きくなる傾向にあること，一方で，正規分布に基づくピークファクターによって，計測位置によらず測定精度がガストファクターによる予測と比べて向上することを示されているが，表 2-1 に示す一覧の通り，同様の研究報告は多くなく，都市域の乱流場の確率的な振る舞いに着目して，まれに発生する強風や弱風，高濃度現象や低濃度現象を評価するという点においては，十分な知見が得られているとは言えない。

加えて，風速の確率分布を用いた予測という点では，風速の瞬時値を取得することなく，その確率性状だけを予測するという取り組みも報告されている。確率モデルにより風速の分布関数を推定することができれば，圧倒的に扱うデータ量の少ない情報によって低頻度発生強風の予測が可能になるであろう。そのような観点から，近年では風速の統計

的物理量を用いた低頻度発生強風の予測が提案されている。例えば、Efthimiou et al.⁽⁵⁴⁾はベータ分布、Wang et al.⁽⁵⁵⁾はワイブル分布⁽⁵⁶⁾で風速の母集団が記述できると家庭することで、パラメトリックに分布関数、延いては稀に発生する風速を予測する統計モデルの枠組みを提案している。その中でもワイブル分布は統計モデルとして多くの研究において使用されている (Monahan et al.⁽⁵⁷⁾, Carta et al.⁽⁵⁸⁾, Karthikeya et al.⁽⁵⁹⁾, Masseran et al.⁽⁶⁰⁾, Morgan et al.⁽⁶¹⁾, Carta et al.⁽⁶²⁾, Morgan et al.⁽⁶³⁾, Hu et al.⁽⁶⁴⁾, Tatiane et al.⁽⁶⁵⁾, Fan et al.⁽⁶⁶⁾)。これらの手法はいずれも必要なデータ量を削減することには成功しているが、更なる予測精度の向上が重要である。Wang et al.⁽⁵⁵⁾によると、平均風速と標準偏差を用いた2次のワイブル法に比べて、歪度を加えた3次のワイブル法によって、予測精度が向上することが指摘されており、より高次の統計量を用いることで更なる精度の向上が期待できる。しかし、ワイブル分布による低頻度発生強風の予測はワイブル分布に組み込まれるモデルを記述するパラメーターの数が2~3と少ないことから精度向上には限界があると考えられる。一方で、ガウス分布を基に高次の統計量を基に計算された補正項によって修正を行うGram-Charlier C series 法⁽⁶⁷⁾は与えられた統計量を満たす確率密度分布を記述することができるもので、高次統計量を基にした低頻度発生強風の推定が可能である。こうした確率モデルの提案は、これまでの屋外風環境評価における都市換気と風害の評価対象に依存した強風と弱風の考え方を統一的な風速の確率事象として捉えることで、評価を行うという枠組みを示すもので、今後の屋外風の評価方法を刷新する可能性を秘めていると考えているが、歩行者高さ風速の確率性状の把握による統計モデルの妥当性の検証は今後の課題であろう。

表 2-1 都市空間内風環境評価に関する既往研究一覧

著者	年	文献	手法	対象モデル	解析対象となる特性	検証項目	評価対象
Song et al.	1999	49	LES	実在建物	建物からの位置関係	瞬間風速分布	歩行者高さ風環境評価
久保田ら	2000	17	風洞実験	都市の縮小模型	粗度密度 建物高さ変動	平均風速	都市換気
Zhang et al.	2005	20	RANS	実在都市を単純化した粗度	都市配列	平均風速	都市換気
Yoshie et al.	2007	41	RANS・LES	単体角柱	—	平均風速	都市換気 歩行者高さ風環境評価
義江ら	2008	18	風洞実験	実在都市を単純化した粗度	粗度密度	平均風速 平均温度	都市換気
Kubota et al.	2008	22	風洞実験	都市の縮小模型	建蔽率	平均風速	都市換気
Michioka et al.	2010	16	LES	単純粗度	粗度密度	平均スカラー濃度	都市換気
Boppana et al.	2010	29	LES	単純粗度	建物高さ変動	平均風速, スカラー濃度 風速・濃度確率密度分布	都市換気 歩行者高さ風環境評価
竹林ら	2011	21	RANS	単純粗度	粗度密度 建物高さ変動	平均風速	都市換気
Edward et al.	2012	24	RANS	実在都市を単純化した粗度	壁面緑化	平均風速 平均温度	都市換気
Letzel et al.	2012	25	LES	実在都市	—	平均風速 風速確率密度分布	都市換気 歩行者高さ風環境評価
Chao et al.	2012	26	RANS	実在都市	風向, 建蔽率 建物形状	平均風速	都市換気

Hang et al.	2012	27	RANS	単純粗度	建物高さ変動 通路本数	平均風速 平均スカラー濃度	都市換気
Park et al.	2012	28	LES	単純粗度	熱源位置	平均風速・温度 瞬間風速・温度分布	都市換気
Blocken et al.	2012	47	RANS	実在建物	風向	平均風速	歩行者高さ風環境評価
Letzel et al.	2012	48	LES	実在都市	建物からの位置関係	平均風速	歩行者高さ風環境評価
Razak et al.	2013	19	LES	単純粗度	粗度密度 建物高さ変動	平均風速	歩行者高さ風環境評価
Janssen et al.	2013	46	RANS	実在都市	建物形状	平均風速	歩行者高さ風環境評価
Ikeda et al.	2015	51	LES	単純粗度	建蔽率, 建物高さ	平均風速 風速の確率密度分布	歩行者高さ風環境評価
Ikegaya et al.	2017	44	LES	単体角柱	建物からの位置関係	風速の確率密度分布 超過風速	歩行者高さ風環境評価
Ahmad et al.	2017	50	LES	実在都市	建蔽率	平均風速 ガストインデックス	歩行者高さ風環境評価
Yoshida et al.	2021	15	LES	単純粗度	建物高さ変動	平均風速	都市換気
Mun et al.	2022	45	風洞実験	実在都市	建物からの位置関係 風向	風速の確率密度分布 超過風速	歩行者高さ風環境評価
Hirose et al.	2022	52	風洞実験	単純粗度	建物からの位置関係	風速の確率密度分布 超過風速	歩行者高さ風環境評価

2.4 結語

以上の先行研究の整理から、屋外風環境に関する研究は都市内外の都市換気スケールから歩行者高さにおける人体に与える影響に至るまで様々なスケールでの研究が行われており、それぞれ相互を引き起こしながら発展いると考えられ、既往研究の包括的レビューを基に、本研究にて取り扱うべき残された課題を3つ選定した。

- 都市空間内の歩行者高さにおける突風現象について、幾何的特性との関係を調べた研究は多くはない。特に、平均風速評価において考慮されている高さ変動の影響については十分に議論されていない。また、時間的空間的な変動を含む流れ場において、スカラー濃度場の分布と流れ場との関係性について検討されていない。
- 都市空間内の歩行者高さを対象とした平均風速および瞬時風速を都市幾何形状によって整理することが行われているが、これは街区全体を対象に代表的な平均風速および強風を評価するというものである。しかし、実際に問題となるビル風のような突風現象は、建物との相対的な位置によって発生頻度は大きく異なると考えられるため、建物からの相対的な位置における突風の発生確率の評価を行うことが肝要であるが、その研究報告は多くなく、更なる知見の蓄積が必要であると言える。
- 低頻度発生強風の推定について、計算負荷の観点から、より低次の統計量を用いた統計モデルによる予測が求められている。予測手法として GCS 法とワイブル法がよく用いられているが、それぞれの手法における予測精度の差や、より高次の統計量を用いることによる精度の向上について系統的にまとめることが重要である。

上記課題を元に、第2章では、本研究では高さ変動が突風現象及び瞬時のスカラー濃度分布に与える影響を明らかにするために、単純化された都市配列を対象に、非定常な都市気流及びスカラー濃度場の LES を行った。第3章では、Okaze et al. (2017)⁽⁶⁹⁾による 1:1:2 単体角柱周りを対象とした LES の結果を再解析し、歩行者高さ風速の統計的性質を明らかにするとともに、平均風速を用いた単純モデルによる強風・弱風の予測方法について議論した。第5章では、第4章を受け、建物周囲の複数の地点を対象として歩行者高さにおける速度の確率分布性状の特性と GCS 法とワイブル法の予測精度について検討することで、統計モデルの妥当性を検証した。以上を以て、本論は上記の研究課題に答えるものである。

参考文献

- [1] Oke, T.R. (1981), Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. *J. Climatol.*, 1: 237-254.
<https://doi.org/10.1002/joc.3370010304>
- [2] Karim, M, M., Matsui, H. Effects of wind speed on the dispersion of pollutant concentration in a road of Nagoya City. In: *Proceedings of Fourth International Conference in Urban Planning and Urban Management*, Melbourne, Australia. 1995. p. 189-199.
- [3] Sotiris, Vardoulakis., Bernard, E.A Fisher., Koulis, Pericleous., Norbert, Gonzalez-Flesca. Modelling air quality in street canyons: a review, *Atmospheric Environment*, Volume 37, Issue 2, 2003, Pages 155-182, ISSN 1352-2310, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00857-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00857-9).
- [4] T.R. Oke., Street design and urban canopy layer climate, *Energy and Buildings*, Volume 11, Issues 1–3, 1988, Pages 103-113, ISSN 0378-7788, [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90026-6).
- [5] 丸山敬, "立方体粗度ブロックの配列形状の違いによる抗力の変化について", *日本風工学会誌*, 49, pp.15-24, 1991
- [6] 萩島理, 谷本潤, 永山浩二, 古賀正浩, "高さの分布のある立方体粗度群の抗力係数に関する風洞実験", *日本建築学会環境系論文集*, 619, pp.39-45, 2007
- [7] Hagishima A., Tanimoto J., Nagayama K., Meno S., "Aerodynamic parameters of regular arrays of rectangular blocks with various geometries", *Boundary-Layer Meteorology*, 132, pp.315-337, 2009
- [8] Xie Z.T., Coceal O., Castro I. P., Large-Eddy simulation of flows over random urban-like obstacles, *Boundary-Layer Meteorology*, 129, pp.1-23, 2008
- [9] Leonardi S., and Castro, I.P., Channel flow over large cube roughness-a direct numerical simulation study, *Fluid Mechanics*, 651, pp.519-539, 2010
- [10] Zaki S.A., Hagishima A., Tanimoto J., Ikegaya N., "Aerodynamic parameters of urban building arrays with random geometries", *Boundary-Layer Meteorolog*, 138, pp.99-120, 2011
- [11] Cheng H., and Castro I.P., Near wall flow over urban-like roughness, *Boundary-Layer Meteorology*, 104, pp.229-259, 2002
- [12] Coceal O., Thomas T. G., Castro I. P., Belcher S. E., Mean flow and turbulence statistics over groups of urban-like cubical obstacles, *Boundary-Layer Meteorology*, 121, pp.491-519, 2006

- [13] Iyenger A.K.S., and Farell C., Experimental issues in atmospheric boundary layer simulations: roughness length and integral length scale determination, *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89, pp.1059-1080, 2011
- [14] Kanda, M. (2006). Large-eddy simulations on the effects of surface geometry of building arrays on turbulent organized structures. *Boundary-Layer Meteorology*, 118(1), 151–168.
- [15] Yoshida, T., & Takemi, T. (2021). Spatial characteristics of turbulent organized structures within the roughness sublayer over idealized urban surface with obstacle-height variability. *Environmental Fluid Mechanics*, 21(1), 129–154.
- [16] Michioka T., Sato A., Takimoto H., Kanda M., Large-eddy simulation for the mechanism of pollutant removal from a two-dimensional street canyon, *Boundary-layer Meteorology*, 138, pp.195-213, 2010
- [17] 久保田徹, 三浦昌生, 富永禎秀, & 持田灯. (2000). 実在する 270m 平方の住宅地における地域的な風通しに関する風洞実験: 建築群の配置・集合形態が地域的な風通しに及ぼす影響 その 1. *日本建築学会計画系論文集*, 65(529), 109-116.
- [18] 義江龍一郎, 田中英之, 白澤多一, & 小林剛. (2008). 高層密集市街地における建物群の形態が歩行者レベルの風速・気温分布に与える影響. *日本建築学会環境系論文集*, 73(627), 661-667.
- [19] Abd Razak, A., Hagishima, A., Ikegaya, N., & Tanimoto, J. (2013). Analysis of airflow over building arrays for assessment of urban wind environment. *Building and Environment*, 59, 56-65.
- [20] Zhang, A., Gao, C., & Zhang, L. (2005). Numerical simulation of the wind field around different building arrangements. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 93(12), 891-904.
- [21] 竹林英樹, 山田俊明, & 森山正和. (2011). 街区の空間特性が街路空間の風通し環境に及ぼす影響 気候資源としての風の利用を目的とした街路形態と街路空間の風通しの関係の分析 その 2. *日本建築学会環境系論文集*, 76(670), 1087-1092.
- [22] Kubota, T., Miura, M., Tominaga, Y., Mochida, A., 2008. Wind tunnel tests on the relationship between building density and pedestrian-level wind velocity: development of guidelines for realizing acceptable wind environment in residential neighborhoods. *Build. Environ.* 43 (10), 1699–1708.
- [23] Hu, T., & Yoshie, R. (2013). Indices to evaluate ventilation efficiency in newly-built urban area at pedestrian level. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 112, 39-51.
- [24] Edward Ng, Liang Chen, Yingna Wang, Chao Yuan, A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong, *Building and Environment*, Volume 47, 2012, Pages 256-271.

- [25] Letzel, M. O., Helmke, C., Ng, E., An, X., Lai, A., & Raasch, S. (2012). LES case study on pedestrian level ventilation in two neighbourhoods in Hong Kong. *Meteorologische Zeitschrift*, 21(6), 575–589.
- [26] Yuan, C., & Ng, E. (2012). Building porosity for better urban ventilation in high-density cities—A computational parametric study. *Building and Environment*, 50, 176-189.
- [27] Hang, J., Li, Y., Sandberg, M., Buccolieri, R., & Di Sabatino, S. (2012). The influence of building height variability on pollutant dispersion and pedestrian ventilation in idealized high-rise urban areas. *Building and Environment*, 56, 346-360.
- [28] Park, S. B., Baik, J. J., Raasch, S., & Letzel, M. O. (2012). A large-eddy simulation study of thermal effects on turbulent flow and dispersion in and above a street canyon. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(5), 829-841.
- [29] Boppana, V. B. L., Xie, Z. T., & Castro, I. P. (2010). Large-eddy simulation of dispersion from surface sources in arrays of obstacles. *Boundary-layer meteorology*, 135, 433-454.
- [30] E. Ng, Policies and technical guidelines for urban planning of high-density cities -air ventilation assessment (AVA) of Hong Kong, *Build. Environ.* 44 (2009) 1478–1488.
- [31] Mochida, A., & Lun, I. Y. (2008). Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 96(10-11), 1498-1527.
- [32] Meroney, R., Ohba, R., Leitl, B., Kondo, H., Grawe, D., & Tominaga, Y. (2016). Review of CFD guidelines for dispersion modeling. *Fluids*, 1(2), 14.
- [33] Peterka, T.,A., Cermak, J.,E., 1975. Wind pressures on buildings. In: *Probability Densities, Procs. Of the American Society of Civil Engineers*, vol. 101. ST6.
- [34] R. Ramponi, B. Blocken, CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters, *Building and Environment*, Volume 53, 2012, Pages 34-48,
- [35] Tominaga, Y., & Stathopoulos, T. (2009). Numerical simulation of dispersion around an isolated cubic building: Comparison of various types of $k-\varepsilon$ models. *Atmospheric Environment*, 43(20), 3200-3210.
- [36] Peterka, T.,A., Cermak, J.,E., 1975. Wind pressures on buildings. In: *Probability Densities, Procs. Of the American Society of Civil Engineers*, vol. 101. ST6.
- [37] 村上 周三, 岩佐 義輝, 森川 泰成, 居住者の日誌による風環境調査と評価尺度に関する研究 : 市街地低層部における風の性状と風環境評価に関する研究-III, *日本建築学会論文報告集*, 1983, 325 巻, p. 74-84.

- [38] Blocken, B., & Carmeliet, J. (2004). Pedestrian wind environment around buildings: Literature review and practical examples. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 28(2), 107-159.
- [39] Blocken, B., Stathopoulos, T., & Van Beeck, J. P. A. J. (2016). Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment. *Building and Environment*, 100, 50-81.
- [40] Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., & Shirasawa, T. (2008). AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 96(10-11), 1749-1761.
- [41] Yoshie, R., Mochida, A., Tominaga, Y., Kataoka, H., Harimoto, K., Nozu, T., & Shirasawa, T. (2007). Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the Architectural Institute of Japan. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 95(9-11), 1551-1578.
- [42] Mochida, A., & Lun, I. Y. (2008). Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 96(10-11), 1498-1527.
- [43] Ted Stathopoulos, Pedestrian level winds and outdoor human comfort, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 94, Issue 11, 2006, Pages 769-780,
- [44] Ikegaya, N., et al.: Evaluation of rare velocity at a pedestrian level due to turbulence in a neutrally stable shear flow over simplified urban arrays, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 171, pp. 137–147, 2017.
- [45] Mun, Yin., Ikegaya, N., Ahmad, S., Hagishima, A., Faiz, A. (2022). Wind-tunnel estimation of mean and turbulent wind speeds within canopy layer for urban campus. *Urban Climate*. 41, 101064.
- [46] W.D. Janssen, B. Blocken, T. van Hooff, Pedestrian wind comfort around buildings: Comparison of wind comfort criteria based on whole-flow field data for a complex case study, *Building and Environment*, Volume 59, 2013, Pages 547-562
- [47] Blocken, B., Janssen, W. D., & van Hooff, T. (2012). CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus. *Environmental Modelling & Software*, 30, 15-34.
- [48] Letzel, M. O. (2015). Urban large-eddy simulation—advanced computational fluid dynamics for urban climatic maps. In *The Urban Climatic Map* (pp. 473-480). Routledge.
- [49] He, J., Song, C.C., 1999. Evaluation of pedestrian winds in urban area by numerical approach. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* 81 (1–3), 295–309.

- [50] Ahmad, N.H., Inagaki, A., Kanda, M., Onodera, N., Aoki, T., 2017. Large-Eddy Simulation of the Gust Index in an Urban Area Using the Lattice Boltzmann Method. *Bound.-Layer Meteorol.* 163(3), 447–467.
- [51] Ikeda, Y., Hagishima, A., Ikegaya, N., Tanimoto, J., Razak, A.A., 2015. Estimation of wind speed in urban pedestrian spaces on the basis of large-eddy simulation. *J. Environ. Eng.* 80 (709), 259–267.
- [52] Hirose, C., Nomichi, T., & Ikegaya, N. (2022). Distributions of gust and peak factors at a pedestrian level in a simplified urban canopy obtained by particle image velocimetry. *Building and Environment*, 222, 109350.
- [53] Ikegaya, N., Kawaminami, T., Okaze, T., & Hagishima, A. (2020). Evaluation of exceeding wind speed at a pedestrian level around a 1: 1: 2 isolated block model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 201, 104193.
- [54] Efthimiou, G.C., Hertwig, D., Andronopoulos, S. et al. A Statistical Model for the Prediction of Wind-Speed Probabilities in the Atmospheric Surface Layer. *Boundary-Layer Meteorol* 163, 179–201 (2017).
- [55] Wang, W., & Okaze, T. (2022). Statistical analysis of low-occurrence strong wind speeds at the pedestrian level around a simplified building based on the Weibull distribution. *Building and Environment*, 209, 108644.
- [56] Weibull, W.: A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, *J. Appl. Mech.*, vol. Vol. 18, pp. 293–297, 1951.
- [57] He, Y., Monahan, A.H., Jones, C.G., Dai, A., Biner, S., Caya, D., Winger, K., 2010. Probability distributions of land surface wind speeds over North America. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 115 (4), 1–19.
- [58] Carta, J. A., Ramirez, P., & Velazquez, S. (2009). A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis: Case studies in the Canary Islands. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(5), 933-955.
- [59] Karthikeya, B.R., Negi, P.S., Srikanth, N., 2016. Wind resource assessment for urban renewable energy application in Singapore. *Renew. Energy* 87, 403–414.
- [60] Masseran, N., Razali, A.M., Ibrahim, K., Zaharim, A., Sopian, K., 2012. The Probability distribution model of wind speed over east Malaysia. *Res. J. Applied Sciences, Eng. Tech.* 6 (10), 1774–1779.
- [61] Morgan, E. C., Lackner, M., Vogel, R. M., & Baise, L. G. (2011). Probability distributions for offshore wind speeds. *Energy Conversion and Management*, 52(1), 15-26.

- [62] J.A. Carta, P. Ramírez, S. Velázquez, A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis: Case studies in the Canary Islands, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 13, Issue 5, 2009, Pages 933-955.
- [63] Morgan, E.C., Lackner, M., Vogel, R.M., Baise, L.G., 2011. Probability distributions for offshore wind speeds. *Energy Convers. Manag.* 52 (1), 15–26.
- [64] Hu, C., Li, D., Chen, C., Ge, J., Muller - Karger, F. E., Liu, J., ... & He, M. X. (2010). On the recurrent *Ulva prolifera* blooms in the Yellow Sea and East China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C5).
- [65] Carneiro, T. C., Melo, S. P., Carvalho, P. C., & Braga, A. P. D. S. (2016). Particle swarm optimization method for estimation of Weibull parameters: A case study for the Brazilian northeast region. *Renewable energy*, 86, 751-759.
- [66] Fan, M., Vittal, V., Heydt, G. T., & Ayyanar, R. (2012). Probabilistic power flow studies for transmission systems with photovoltaic generation using cumulants. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(4), 2251–2261.
- [67] Hald, A. (2000). The early history of the cumulants and the Gram - Charlier series. *International Statistical Review*, 68(2), 137-153.
- [68] Okaze, T., Kikumoto, H., Ono, H., Imano, M., Hasama, T., Kishida, T., Nakao, K., Ikegaya, N., Tabata, Y., Tominaga, Y., “Large-Eddy Simulations of flow around a high-rise building: validation and sensitivity analysis on turbulent statistics”, EACWE2017

第 3 章 単純都市全域を対象とした歩行者高さ風速とスカラー濃度の確率性状に関する研究

3.1 諸言

都市空間内に存在する気流分布は、都市内外の空気交換を促す都市換気や、ビル風に代表される突風事象等、都市域における環境評価に大きな影響を与える要素の一つである。その中で、都市の幾何形状に着目し、都市空間内の気流性状の関係を明らかにすることを目的として数多くの研究が行われてきた。例えば、久保田ら⁽¹⁾は実在都市のスケール模型を用いた風洞実験によって、グロス建蔽率が同じ条件において、建物高さの分布が小さい低層住宅群よりも、中高層の建物が混在した高さばらつきのある住宅群のほうが、歩行者高さにおける空間平均風速が増加することを示している。このような都市内の平均風速に注目し、都市幾何形状との関係性を明らかにすることを目的とした既往研究が行われてきた一方、都市環境に大きな影響を与える突風や、稀に発生する高濃度な事象を評価するためには、都市気流の時間的、空間的な変動を考慮する事が重要であるといえる。これを受けて本節では単純化された都市配列を対象に、非定常な気流場を対象とした LES を実施し、高さ変動が突風現象と非定常スカラー濃度場に及ぼす影響を整理した。

3.2 数値流体解析技術について

本研究で取り扱うような都市域における気流場は複雑な都市形態によって乱されていることや、対象とするスケールが $10^1 \sim 10^3$ と非常に大きいために、一般に乱流の様相を示す。市街地における風の流れを測定する手法には大きく分けて三つあり、実在スケールの環境下で行う屋外実験、風洞によって人工的に風を作り出し、幾何学的に相似な模型に衝突させる事によって測定を行う風洞実験、流れに関する基礎方程式にモデル化や近似を施し、初期条件や各種パラメーターを変化させる事で様々な解析対象系に形成される流れの様子を観測する手法である数値流体解析が存在する。数値流体解析による測定の利点は、風洞実験のように測定機器を設置する必要が無く、実験において起こりうるような実験装置の測定誤差や、測定点のずれのような不確かさが存在しない点、及び、風洞実験では限られた測定点における風速情報しか得ることができないことに対して、三次元的な流れの分布性状を明らかにする事ができる点である。

本研究が対象とする市街地空間における強風現象は、非定常な流れによって引き起こされることから、その分布は三次元的、間欠的であると考えられる。また、非定常な流れにおける強風現象のような極値を考える研究においては、測定機器における不確かさの影響を受ける可能性が大きいと考え、本研究では数値解析による測定を行った。数値解析による測定方法は、流れ場の最小スケールもしくはそれに相当する小スケールの渦を十分に細かい格子点(離散点)によって解像し、支配方程式を数値的に直接計算する DNS (Direct Numerical Simulation: 直接数値シミュレーション) という手法が存在する。しかしながら、その数値計算に用いる膨大な格子点によって多大な計算コストや計算時間が必要となるために、現段階で適用は非現実的である。実際に DNS で必要となる三次元の格子点数 N を次元解析によって概算すると、

Reynolds 数の 9/4 乗に比例することがわかっており⁽²⁾, 大気の流れが Reynolds 数で 10^6 以上のオーダーとなることが多いことを考えれば, 都市域への気流場への DNS の適用の難しさが伺える. 対して, 工学的利用を目的とする場合には, 流れ場の平均的な性状やある程度大きなスケールの渦運動が許容範囲内の精度で解析できることができればその大半の目的は達成されることが考えられる. このような観点から, 流れ場の平均成分のみに着目する手法である RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations: レイノルズ平均) モデルや, 離散化操作を格子点スケールでの空間フィルタ操作と見なし, フィルタサイズより大きな渦運動のみを解像する手法である LES (Large-Eddy Simulation: ラージ・エディ・シミュレーション) が一般的に用いられている.

本論で対象とする実在スケールの都市域には大小さまざまな渦が存在しており, それら全てを計算するのは計算負荷の観点から困難であると考えられる. したがって, 本論では時空間双方にデータが取得できる LES の特長を活かし, LES を用いた非定常計算を行った. なお, 数値解析にはオープンソース CFD 解析ソフトウェアである OpenFOAM (Version 2.1.1) を用いている. 続いて, 次節 (3.2.1 節) に LES の支配方程式を示す.

3.2.1 Large-Eddy Simulation のフィルタ操作と支配方程式

本論で対象とするような非圧縮粘性流れに対する支配方程式は以下の連続の式と Navier-Stokes 式であり, それぞれ次のように表される.⁽³⁾

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3-1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \frac{\partial (U_i U_i)}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (3-2)$$

ここで, インデックス $i, j, k \in [1, 2, 3]$ に対し U_i は (U, V, W) , x_i は (x, y, z) を示している. U_i は風速[m/s], P は圧力[Pa], ρ は空気密度[kg/m³]である. また, ν は動粘性係数[m²/s]である.

LES では, 対象量 Φ に対して空間離散化を行うことが, 格子スケール以上の解像成分 (GS: Grid Scale 成分) とそれ以下の微小スケール成分 (SGS: Sub-Grid Scale 成分) とに分離するような空間フィルタを導入したことに相当する.

$$[\Phi] = \int_V \Phi(t, x', y', z') g(t, x - x', y - y', z - z') dV \equiv [\Phi](t, x, y, z) \quad (3-3)$$

ここで $g(t, x, y, z)$ はフィルタ関数で, 中心差分を適用した場合は, トップハットフィルターに相当する.⁽⁴⁾ この時, 対象量 Φ は解像成分 $[\Phi] = \phi$ と Sub-grid Scale (SGS) 成分 ϕ'' で表現される.

$$\Phi = [\Phi] + \phi'' = \phi + \phi'' \quad (3-4)$$

非圧縮連続の式と Navier-Stokes 式にフィルタ操作を施し, LES の支配方程式が得られる.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3-5)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3-6)$$

ここで、インデックス $i, j, k \in [1, 2, 3]$ に対し u_i は (u, v, w) 右辺第三項の τ_{ij} は次式で示される SGS 応力項であり、フィルタ操作によってカットされた SGS 成分の影響を表す項である。

$$\tau_{ij} = [U_i U_j] - [U_i] \cdot [U_j] \quad (3-7)$$

しかしながら、この項の支配方程式には新たな高次の相関項が現れるために、この項の数値解を直接求めることはできない(乱流の Closure 問題⁽⁵⁾)。そこで、次節(3.2.2)で取り扱うような SGS モデルが必要となる。

3.2.2 SGS 応力モデル

SGS モデルは、その多くが式(3-12)で表現される Boussinesq の渦粘性近似(乱流拡散と分子拡散の相似性から SGS 応力が GS の速度勾配に比例すると仮定する近似)に基づき構成されている⁽⁴⁾。

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2\nu_t S_{ij} \quad (3-8)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3-9)$$

ここで、 S_{ij} : ひずみ速度テンソル、 ν_t : SGS 渦動粘性係数である。この SGS 渦動粘性係数 ν_t のモデル化に際し、LES の SGS モデルとして広く用いられている Smagorinsky モデル⁽⁵⁾では、SGS 運動エネルギーの生成と散逸が等しいとする局所平衡を仮定し、次元解析的に渦動粘性係数 ν_t を次式のように与えている。

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 |S| \quad (3-10)$$

ここで、 C_s : Smagorinsky 定数、 $|S|$: グリッドスケールのひずみ速度テンソルの大きさ、 Δ : フィルタ幅の長さスケールであり、通常、以下のように定義される。⁽⁶⁾

$$\Delta = (\Delta_1 \Delta_2 \Delta_3)^{1/3} \quad (3-11)$$

$$|S| = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (3-12)$$

3.2.3 スカラー拡散の支配方程式

前節では、LES における非圧縮性流れの支配方程式をモデル化した。本節では、LES におけるスカラー拡散の支配方程式について考える。最初に非圧縮性流れにおける、スカラーの移流拡散方程式を示す。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(u_j C)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \quad (3-13)$$

ここで C をスカラー濃度[-], α はスカラー拡散係数[m²/s]を意味している. スカラーの移流拡散方程式にフィルタ操作を施し, LES におけるスカラーの移流拡散方程式を導出する.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(u_j c)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial f_j}{\partial x_j} \quad (3-14)$$

右辺第二項の f_j は次式に示される SGS 乱流スカラー束項と呼ばれる項である.

$$f_j = [U_j C] - [U_j] \cdot [C] \quad (3-15)$$

この項の支配方程式には前節の SGS 応力項と同様に新たな高次の相関項が現れるためにこの項の数値解は直接求めることができない. したがって次節で取り扱うような SGS モデルの適用を考える.

3.2.4 SGS スカラー束モデル

SGS 乱流スカラー束項に SGS スカラー拡散係数 α_t を用いた勾配拡散近似により以下のようにモデル化している.

$$h_j = -\alpha_t \frac{\partial c}{\partial x_j} \quad (3-16)$$

ここで, SGS スカラー拡散係数 α_t は式(3-10)に示される SGS 渦動粘性係数 ν_t と SGS 乱流シュミット数 Sc_t を用いて次式のようにモデル化される.

$$\alpha_t = \frac{\nu_t}{Sc_t} \quad (3-17)$$

SGS 乱流プラントル数は定数として扱い, 本研究では $Sc_t = 1$ とした.

3.2.5 支配方程式

LES の支配方程式(3-3), (3-4), を基に, 高さ分布のある建物群を対象とした数値計算の支配方程式としてフィルタリングされた連続の式, Navier-Stokes 式, スカラー輸送方程式を基礎式とする.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3-18)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\nu + \nu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (3-19)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(u_j c)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\alpha + \alpha_t) \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - Q_{sink} \quad (3-20)$$

スカラー輸送方程式中の Q_{sink} [s⁻¹] は sink 項であり, 3.4 節で詳細を述べる.

3.3 解析対象モデル

本研究で対象とする都市モデルは、均一高さ及び不均一高さの模型群が形成された都市配列である。次節より均一高さ、不均一高さ模型群を有する都市配列における LES について、その解析条件や配列条件について述べる。さらに、数値計算の助走時間や解析時間に関する検討や、既往研究との比較によるデータの優位性の確認といった基礎的検討を行った。

3.4 均一高さ、不均一高さ模型群における LES の解析条件

始めに、均一高さ及び不均一高さの模型群が形成された都市配列について、図 3-1 に解析対象領域の模式図を示す。主流方向、スパン方向、鉛直方向をそれぞれ x, y, z 、対応する各方向の風速を u, v, w と定義する。計算領域床面には、均一高さおよび不均一高さの模型群を形成するために、立方体もしくは直方体模型を 2 列×2 列で配置する。模型群の幾何形状は、模型水平断面一辺を $1L$ ($=25\text{m}$)、模型平均高さを H_{av} 、模型群の最大模型高さを H_{max} により表現する。なお、解析領域の水平方向長さを $4L$ 、鉛直高さを約 $4H_{max}$ と設定している。主流方向およびスパン方向には周期境界条件を適用し、水平方向に一樣な建物配列が無限で繰り返されることで形成される都市気流場を想定している。

流れ場は、主流方向の断面平均風速が 10m/s となるように、各セルに主流方向圧力勾配 $dp/dx/\rho$ (ρ は空気密度) を外力として課している。上端の境界条件を Free-slip、地表面及び建物壁面を Non-slip としている。格子は解像度が $L/16$ の等間隔格子としている。スカラーの境界条件に関しては、床面は一定の鉛直勾配の境界条件を与えることで、キャノピー底部から一定量のスカラーが供給される状況を模擬している。また、速度と同様に主流方向、スパン方向には周期境界、上空境界、建物壁面にはゼロ勾配を課している。また、実際のスカラー境界層では、床面放出と主流方向移流によるスカラーフラックスが平衡状態になることで、境界層が定常状態になると考えられるが、本解析系では、スパン方向境界面に周期境界条件を課しているために系内部の積算スカラー値が増加してしまう。そこで、主流方向移流によるスカラー放出に替え、床面から流入するスカラーフラックスと同量のスカラーを体積 Sink 項 $Q_{sink} [\text{s}^{-1}]$ として式(3-20)に付加した。これによって擬似的に道路面近傍でスカラーが放出され上空に拡散していく濃度プロファイルを再現している。図 3-2 及び表 3-1 には、解析対象となる配列条件の一覧を示した。解析対象模型群は、主として建物の高さばらつきの影響を明らかにする目的で、以下のように設定した。高さ分布がない条件については、模型高さ $0.5L, 1.0L, 1.5L$ の三条件を解析対象とした。平均模型高さ $1.0L$ の高さ分布がある模型群については、高さ $0.5L$ と $1.5L$ の模型と、高さ $0.6L$ と $2.2L$ の模型をそれぞれ 1:1 及び 3:1 の割合で組み合わせた条件とした。模型高さの標準偏差 σ はそれぞれ $\sigma/H_{av} = 1.0, 1.39$ となる。平均模型高さ $1.5L$ の条件に対しては、高さ $1.0L$ と $2.0L$ の模型を 1:1 の割合で組み合わせている。それぞれの配列条件に対する名称は平均模型高さ H_{av} と高さの標準偏差 σ を用いて、 $STH_{av}-\sigma/H_{av}$ と表記している。なお、いずれの条件についても、建蔽率は 25%としている。

本解析では、勾配項には 2 次精度中心差分スキーム、移流項には、速度は TVD (Total Variation Diminishing (Versteeg & Malalasekera (2007)⁽⁷⁾) 法によって 1 次精度の風上スキームと 2 次精度の中心差分スキームをブレンド係数 $\gamma = 1.0$ として適用し、スカラーに関しては 2 次精度中心差分スキームを適用した。また、時間微分項には 2 次精度の後退差分スキームを用いた。数値計算における時間刻み Δt は 0.1s とした。完全陰解法を用いているが、時間発展を精度良く計算するために、主流方向断面平均風速の設定値を基にクーラン数が 1 以下になる時間刻みを設定している。しかし、局所的に大きな風速が発生する場合があるため、全時間、全領域での最大クーラン数は約 1.3 となった。

また、速度と圧力の方程式を解く際の反復法としての計算アルゴリズムには、非定常状態の計算に一般に用いられる PISO 法 (Pressure-Implicit Split-Operator)⁽⁸⁾ を適用した。

本研究の助走時間及び解析時間は Coceal et al (2006)⁽⁹⁾ の千鳥配列 25% の DNS において式(3-21)に示すように摩擦速度 u^* と粗度高さ L で示した基準時間 T を用いて判断を行った。以下にその式を示す。

$$T = \frac{L}{u^*} \quad (3-21)$$

以下の解析における統計量は、初期条件からの助走時間として 20000s (約 $1350T$, $T = L/u^*$, u^* は摩擦速度 [m/s]) 経た後に、4000s 間 (約 $270T$) のデータから算出している。Ikegaya et al⁽¹⁰⁾ は、1000 秒から 4000 秒間の風速値から算出した 0.1% 超過風速の変化が 1% 以下になることを示していることから、本解析における 4000s の解析時間は、0.1% 超過風速の多寡を議論するためには十分であると言える。また、本研究のモデルの代表スケールは $L = 25$ m であり、粗度長を $0.1L$ 、摩擦速度を $u^* = \sqrt{-L_z dp/dx/\rho}$ とした場合の粗度レイノルズ数は約 $Re^* = 2.6 \times 10^5$ となることから、Snyder and Castro (2002)⁽¹¹⁾ による $Re^* > O(1)$ の基準を満たしており、気流場のレイノルズ数依存性は十分に小さいと考えられる。そこで、建物高さを十分に大きな任意スケールに置き換えることができると考え、建物群の低層に当たる $0.2H_{av}$ の空間を建物群からなる代表的な都市空間と定義した。表 3-2 に均一高さ及び不均一高さ建物群についての解析条件一覧を示す。

計算結果は 2 種類の方法でアウトプットを行っている。一方は計算結果を 4000s ごとに時間平均した平均流であり、 $y=1.5L$, $y=2.5L$ における xz 断面と $z=0.25H_{av}$ における xy 断面、 $x=1.2L$ における yz 断面を対象に、助走時間ののち 4000s 刻みに 20000s までの計算結果を出力している。もう一方は瞬時の計算結果を毎秒出力した瞬間流であり、容量の関係から 20000s~24000s までの値を $y=1.5L$, $2.5L$ における xz 断面と $z=0.25H_{av}$ における xy 断面を出力している。

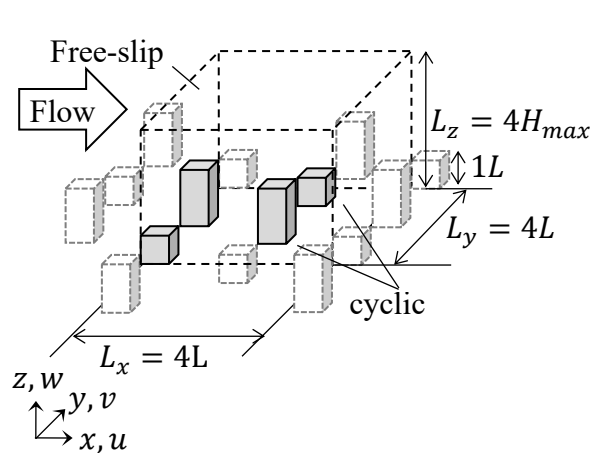


図 3-1 解析領域

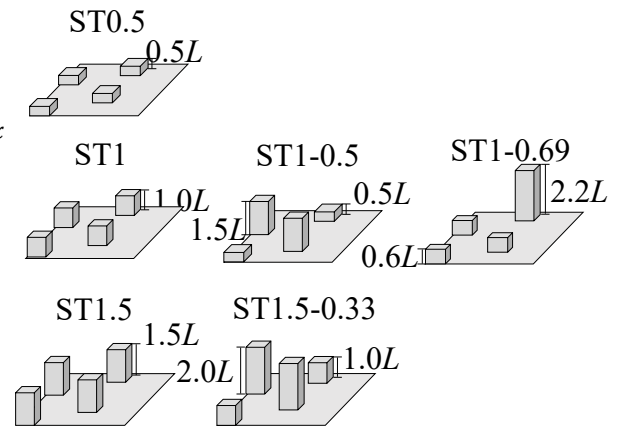


図 3-2 配列条件

表 3-1 解析条件

支配方程式	連続の式 Navier-Stokes 式 スカラー輸送式
乱流モデル	標準 Smagorinsky モデル ($C_s = 0.12, Sc_t = 1.0, \alpha_t = \nu_t / Sc_t$)
時間発展項	2 次精度後退差分
移流項	速度 : TVD スキーム スカラー : 2 次精度線形補間
拡散項	2 次精度線形補間
駆動力	圧力勾配駆動 $\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\rho u^{*2}}{L_z} = 0.026$
解像度	$L/16$
時間発展	0.1 s
助走時間	$1350T (= 20000 \text{ s})$
解析時間	$270T (= 4000 \text{ s})$

C_s : Smagorinsky 定数, Sc_t : , ν_t : SGS 渦粘性係数, α_t : SGS スカラー拡散係数, p : 圧力, u^* : 摩擦速度, ρ : 空気密度, L_z : ドメイン高さ, L : 標準長さ(= 25 m), $T = L/u^*$: 基準時間

表 3-2 粗度配列条件

配列名	λ_p [%]	λ_f [%]	(L_x, L_y, L_z)	配列条件
ST0.5	25	12.5	(4L,4L,2L)	一様高さ $L \times L \times 0.5L$
ST1	25	25.0	(4L,4L,4L)	一様高さ $L \times L \times L$
ST1-0.5			(4L,4L,6L)	低層($L \times L \times 0.5L$) : 高層 ($L \times L \times 1.5L$) = 1 : 1
ST1-0.69			(4L,4L,9L)	低層($L \times L \times 0.6L$) : 高層 ($L \times L \times 1.5L$) = 3 : 1
ST1.5	25	37.5	(4L,4L,6L)	一様高さ $L \times L \times 1.5L$
ST1.5-0.33			(4L,4L,8L)	低層($L \times L \times L$) : 高層 ($L \times L \times 2L$) = 1 : 1

λ_p : 建蔽率, λ_f : 粗度立面積率, L_x, L_y, L_z : ドメイン長さ (x, y, z), L : 代表長さ (=25 m)

3.5 均一高さ, 不均一高さ模型群における LES の基礎的検討

続いて, 解析の基礎的検討としてシミュレーションデータの有意性を確認するとともに, キャニオン内平均流の解析に用いるうえで最適な平均化時間を決定することを目的として圧力勾配の時間変動のプロファイルを用いて検討した. 始めに, 均一高さ及び不均一高さを対象とした LES による数値計算による結果について, ST1 の配列条件に注目して基礎的検討を行った.

3.5.1 使用するデータの決定

図 3-3 の(a), (b)に ST1 の圧力勾配に無次元化を施したものを示す. ここで, $u_{2H_{av}}$ [m/s] は高さ $z = 2H_{av}$ における風速である. 図 3-3 の(a)について, 横軸は計算開始から 20000 秒間, (b)は計算開始から 1000 秒間を示し, 横軸は計算開始後の経過時間, 縦軸は無次元化された圧力勾配を示している. 図 3-3 (a), (b)を見ると計算開始直後は圧力勾配の変動が激しいが, 1000s ほど経過した段階で圧力勾配の値の振動が穏やかになっていることがわかる. しかしながら, 圧力勾配の値は時間変動に応じて振動しており, 加えて本研究では風速に加えてスカラーの要素についても考えているので, 助走時間を考えるに即して, スカラーの時間変動についても考えることにした.

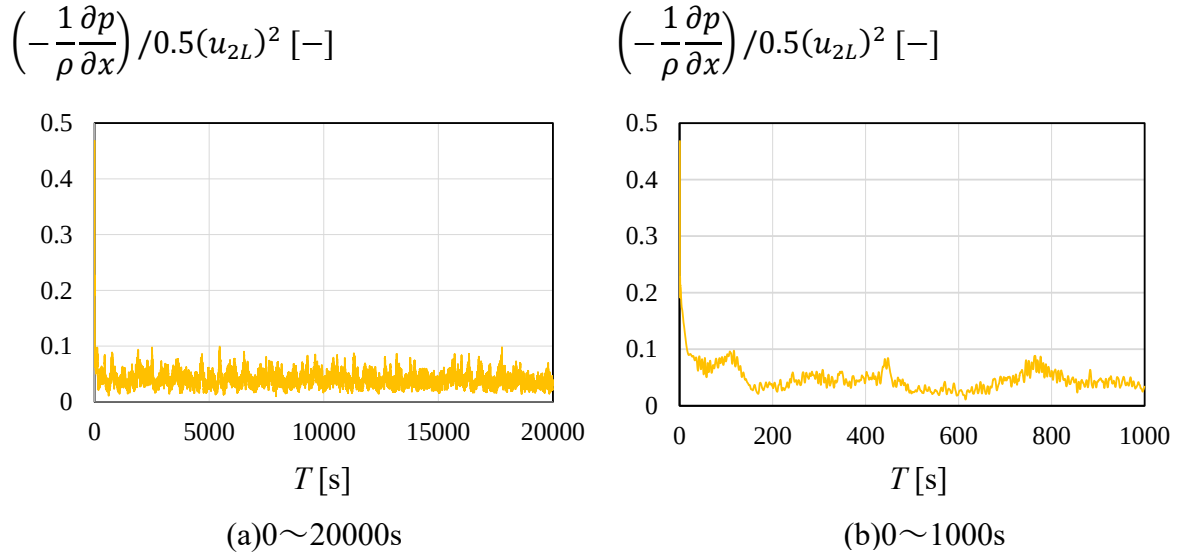
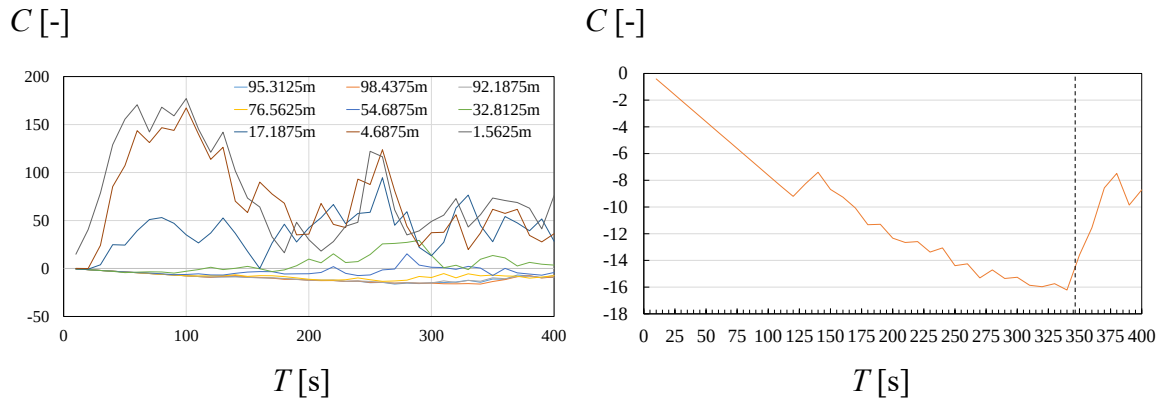


図 3-3 無次元圧力勾配の時間変動 (ST1)

図 3-4 の(a), (b)に ST1 のスカラー濃度の時間変動のプロファイルを示す. 図 3-4 の(a), (b)共に横軸は計算開始から 400s までの経過時間を示し, 縦軸はスカラー濃度を示す. 図 3-4(a)を見ると, 計算開始後から $z = 32.815m$ 以上の高さでスカラー濃度が単調に減少し続けていることがわかる. これは, 本解析では計算領域内の平均スカラー濃度を一定値とするため, スカラー拡散方程式に, 式(3-14)に示したスカラーsink 項を付加しているためである. 図 3-4(b)は, ドメイン上端近傍高さにおけるスカラー濃度の時系列変化を示している. 計算開始後しばらくの間は, シンク項により単調に濃度が減少しているが, 図中の点線部 $T=340s$ 程度において, スカラー濃度の変動が確認できる. すなわち, この助走時間において, 移流・拡散したスカラーが計算領域上端部に到達していると言える. 以上の圧力勾配, スカラー濃度の時間変動のプロファイルから助走時間として 1000s で十分であると判断した. 尚, 本研究では助走時間を 20000s としそれ以降のデータを解析に用いることにした. Coceal et al. (2006)⁽⁹⁾による基準化時間 T を用いると, 本研究の助走時間は約 $1350T$ と表せる.



(a) スカラー濃度の時間変動 (0s ~ 400s) (b) $z=98.4375m$ におけるスカラー濃度の時間変動 (0s ~ 400s)

図 3-4 スカラー濃度の時間変動 (ST1)

3.5.2 風速空間分布による平均化時間の検討

図 3-5 に平均化時間を変化させた場合の $x=1.2h$ での yz 断面における風速空間分布を示す。それぞれ(a)20000~24000s, (b)20000~28000s, (c)20000~32000s, (d)20000~36000s における時間平均値である。上空の風速空間分布はいずれの平均化時間においても空間変動が大きく、キャノピー上空の気流性状について言及する場合にはさらに大きな平均化時間を確保する必要があることがわかる。一方、キャニオン内の分布をみると空間変動は平均化時間によらず概ね同じ分布形状を示しているように見える。

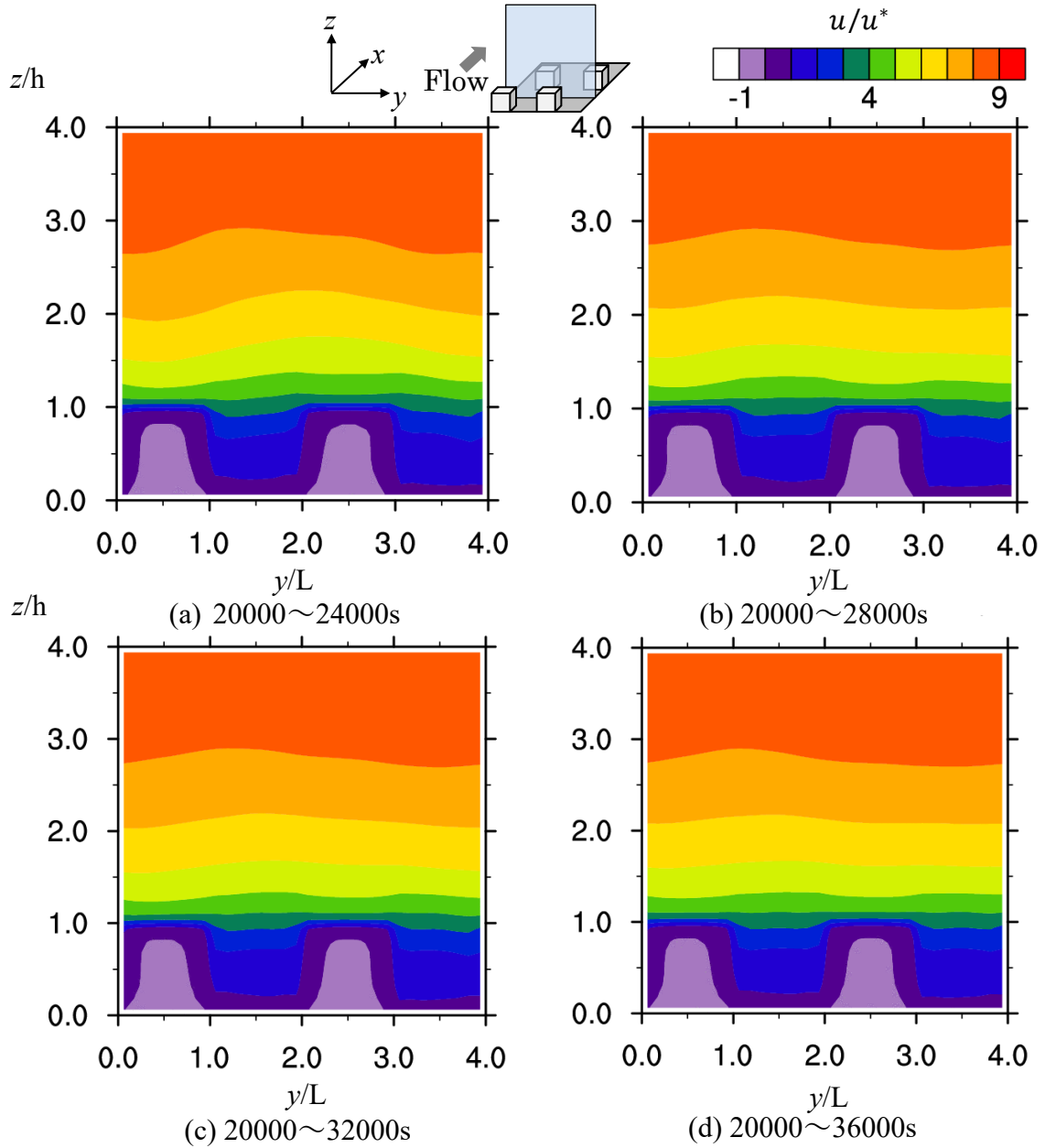


図 3-5 平均化時間を変化させた場合の気流場 (ST1)

3.5.3 主流方向風速と Reynolds stress, RMS 速度による平均化, 統計時間の検討

次に, 平均化時間による風速空間分布の収束をより定量的に議論するため, UW フラックスの時空間変動成分を示す dispersive stress を抽出して比較した.

LES により得られた解像成分と SGS 成分から, 空間平均と時間平均により系の乱流統計量の分析を行う. 時間平均を次式で定義し, 瞬時値 Ψ をとして平均成分 $\bar{\Psi}$ と変動成分 Ψ' で表現する.

$$\bar{\Psi} = \frac{1}{T} \int_T \Psi(t, x, y, z) dt \quad (3-22)$$

$$\Psi = \bar{\Psi} + \Psi' \quad (3-23)$$

時間平均された対象量 $\bar{\Psi}$ の空間 V 内の空間平均を次式で定義し、平均成分 $\langle \bar{\Psi} \rangle$ 変動成分 $\tilde{\Psi}$ で表現する.

$$\langle \bar{\Psi} \rangle = \frac{1}{V} \int_V \Psi(t, x', y', z') dV \quad (3-24)$$

$$\bar{\Psi} = \langle \bar{\Psi} \rangle + \tilde{\Psi} \quad (3-25)$$

また、本論ではキャノピー層を解析の対象としているが、はじめに平均化時間の妥当性を検証するため乱流境界層内の主流方向風速と Reynolds Stress の鉛直プロファイルを測定した. その後に、主流方向風速の二乗平均平方根速度の鉛直プロファイルを基に統計値を定義する時間について検討する.

全 UW フラックスは次式のような解像成分と SGS 成分の和で与えられる.

$$UW = uw + \tau_{13} \quad (3-26)$$

これに対し時間平均を施すと

$$\overline{UW} = \bar{u} \cdot \bar{w} + \overline{u'w'} + \bar{\tau}_{13} \quad (3-27)$$

ここで右辺第一項は平均流フラックス, 第二項は乱流フラックス(Reynolds Stress), 第三項は時間平均 SGS 応力である. 同様に, 空間平均を行うと

$$\langle \overline{UW} \rangle = \langle \bar{u} \rangle \cdot \langle \bar{w} \rangle + \langle \tilde{u} \cdot \tilde{w} \rangle + \langle \overline{u'w'} \rangle + \langle \bar{\tau} \rangle \quad (3-28)$$

ここで右辺第二項が Dispersive Stress である.

また、主流方向風速の二乗 UU についても、時間平均を施すと、

$$\overline{UU} = \bar{u} \cdot \bar{u} + \overline{u'u'} + \bar{\tau}_{11} \quad (3-29)$$

ここで右辺第二項の平方根を取ったものが、二乗平均平方根速度(root-mean-square speed RMS 速度)である.

図 3-6, 3-7, 3-8 にそれぞれ主流方向風速と Reynolds stress, 主流方向の二乗平均平方根速度を示す. 平均化時間は前節と同様に 4000s ずつ変化させている. 縦軸には高さを粗度高さで除した無次元高さ z/L をとっている. 横軸について, 図 3-6 と 3-8 は摩擦速度で, 図 3-7 については摩擦速度の 2 乗で無次元化されている. 主流方向速度と Reynolds Stress については, 平均化時間 4000s の段階で収束していることがわかる. また, RMS 速度についてはキャノピー外においては平均化時間 8000s で, キャノピー内においては平均化時間 4000s で収束していることがわかった. そこで, 本論では統計値を定義する時間についてはキャノピー外では 8000s, キャノピー内では 4000s とすることにした. 平均化時間については, Dispersive Stress の鉛直プロファイルを測定し, 空間的な変動に

ついて考察した.

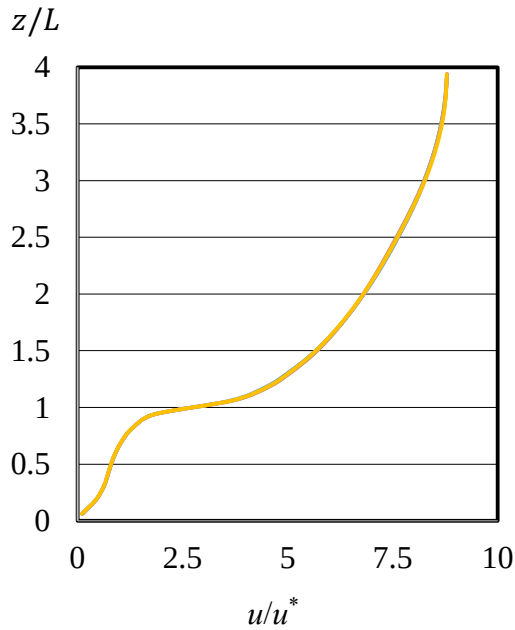


図 3-6 主流方向速度

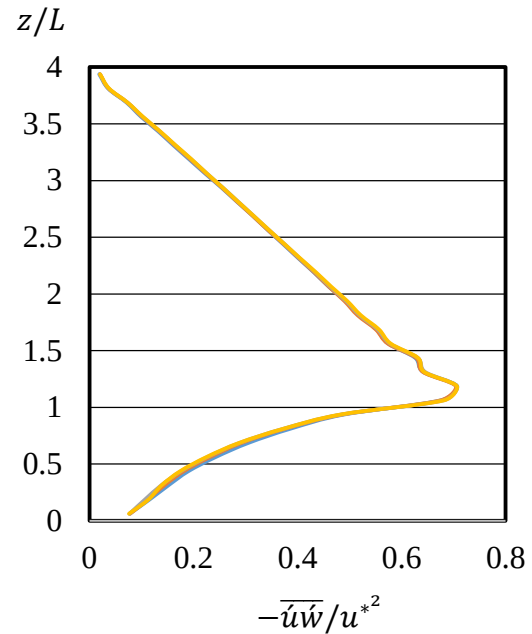


図 3-7 Reynolds Stress

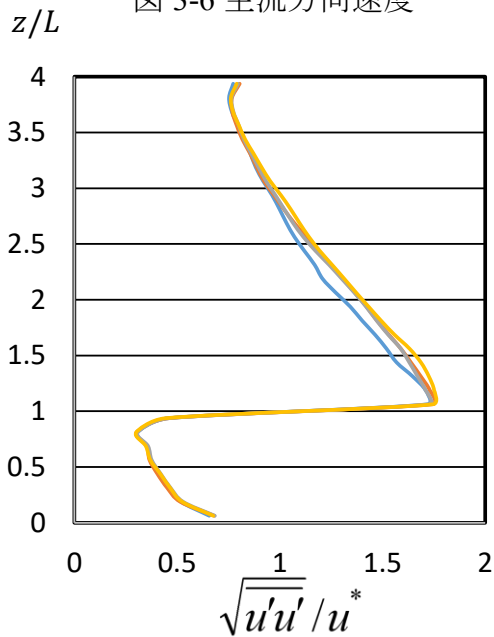
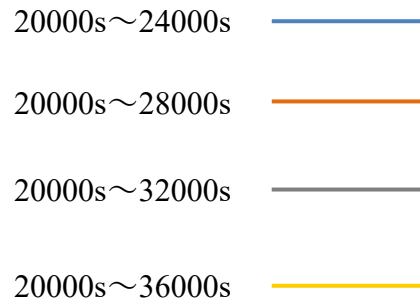


図 3-8 RMS 速度



3.5.4 Dispersive Stress による平均化時間の検討

次に、平均化時間による風速空間分布の収束をより定量的に議論するため、UW フラックスの時空間変動成分を示す dispersive stress を抽出して比較した。

dispersive stress は一般的にキャノピー上空では無視できる程小さくなる事が風洞実験等により報告されている⁽¹²⁾。しかし数値計算において、不十分な平均化時間では低周波数の変動を捉えられず平均流が水平面内で非一様となりキャノピー上空で dispersive

Stress がゼロにならない場合が報告されている⁽¹³⁾。また古賀ら⁽¹⁴⁾は異なる計算領域において平均化時間を変えながら **dispersive stress** のプロファイルを計測しており、計算領域の大きさによって **dispersive stress** が収束するまでの時間が異なる事を指摘している。また同程度の計算領域で計算をした場合でも建蔽率条件によって平均化時間が異なることも分かっており、このことからキャノピー上空における **dispersive stress** の収束に必要な平均化時間とキャノピー内の流れ場も関連があることが推測できる。そこで、本論では平均化時間を変えながらキャノピー内外における **dispersive stress** の収束状況を確認している。

図 3-9 に **dispersive stress** の結果を示す。図 3-9 を観ると、粗度上空において **dispersive stress** は全 UW フラックスの 5%以下となっており、先に述べたように小さなオーダーに収束する傾向を示している。しかしながら、**dispersive stress** について、粗度上空では平均化時間の増加に伴って収束していないことが明らかになった。この原因として粗度上空には今回比較した平均化時間より長い周期をもつ低周波成分の変動が存在すること、またはドメインサイズの影響が考えられる。また、 $z/L = 1$ までのキャノピー層では全 UW フラックスに対する **dispersive stress** の割合は 40%程度であることが確認できる。これは粗度による影響と考えられる。また、キャノピー層については今回比較したいずれの平均化時間についても収束していることがわかった。以上の根拠により、平均流の解析にあたって本論で主に扱っているキャノピー層の解析には 4000s (約 270T) の平均化時間によるデータを用いることとする。また上空の風速分布について検討する際には最も長い平均化時間 20000s (約 1350T) の平均流データを使用する。

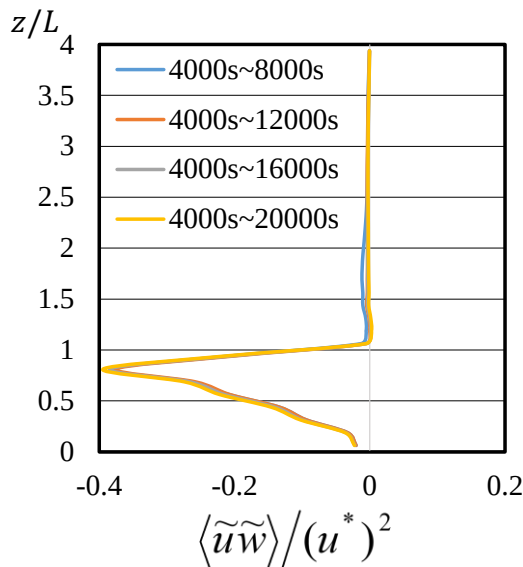


図 3-9 Dispersive Stress

3.5.5 既往研究結果との比較

前節において、風速及びスカラー濃度に関してその助走時間及び解析時間に関する検討を行い、圧力勾配及びスカラー濃度の時間変動から 20000s (約 1350T) と、解析時間を 4000s (約 270T) 変化させた鉛直 - スパン断面の速度分布及び主流方向風速, RMS, Reynolds 応力の鉛直プロファイルより 4000s (約 270T) と決定した. ここまでの検討によって、助走時間の影響が排除された統計的に有意な解析時間の判定を行った. 一方で、数値計算による流れ場の解析を行う際には、既往研究結果と比較する事で実際の物理現象と整合しているかどうかの検証が必要である. したがって、本節では数値計算結果を Coceal et al. (2006)⁽⁹⁾ による同一の都市配列を対象とした LES による数値計算結果と比較する事で、本研究の数値計算結果の再現性について考察した.

図 3-10 に ST1 の条件について、 $x = 1.5L$ の解析対象断面で得られた LES による数値計算の結果と同一配列条件、建蔽率条件下で得られた Coceal et al. (2006)⁽⁹⁾による LES による数値計算結果について、主流方向風速及びレイノルズ応力の鉛直プロファイルを示す. 粗度配列はいずれも建蔽率 25%及び粗度アスペクト比 1 の千鳥配列である. また、いずれの結果も解析対象断面において、時間平均及び主流方向に空間平均が施されている. 結果を比較すると主流方向風速については、 $0 \leq z/L \leq 1.5$ の範囲において、Coceal et al. (2006)⁽⁹⁾による数値計算結果と良く一致しており、レイノルズ応力の結果についても、 $0 \leq z/L \leq 1$ の範囲において、良く一致している事が確認できる. キャノピー外 ($1 \leq z/L \leq 4$) においては、負流方向風速の鉛直プロファイルについて、Coceal et al. (2006)⁽⁹⁾による結果からの乖離が見られるが、レイノルズ応力については、キャノピー外においても良く一致している. また、キャノピー外において Coceal et al. (2006)⁽⁹⁾による結果からの乖離が見られた要因については、本研究の鉛直プロファイルが解析対象断面 $x = 1.5L$ で得られた鉛直プロファイルであるのに対して、Coceal et al. (2006)⁽⁹⁾によるものは空間全体の鉛直プロファイルであり、本研究の鉛直プロファイルではスパン方向への速度分布の変動が再現されていないためであると考えられる. 一方で、本研究の解析対象は都市キャノピー内の歩行者高さであることを考慮して、キャノピー内 ($0 \leq z/L \leq 1$) では、Coceal et al. (2006)⁽⁹⁾による数値計算結果を十分に再現できているとして、解析を行う事にした.

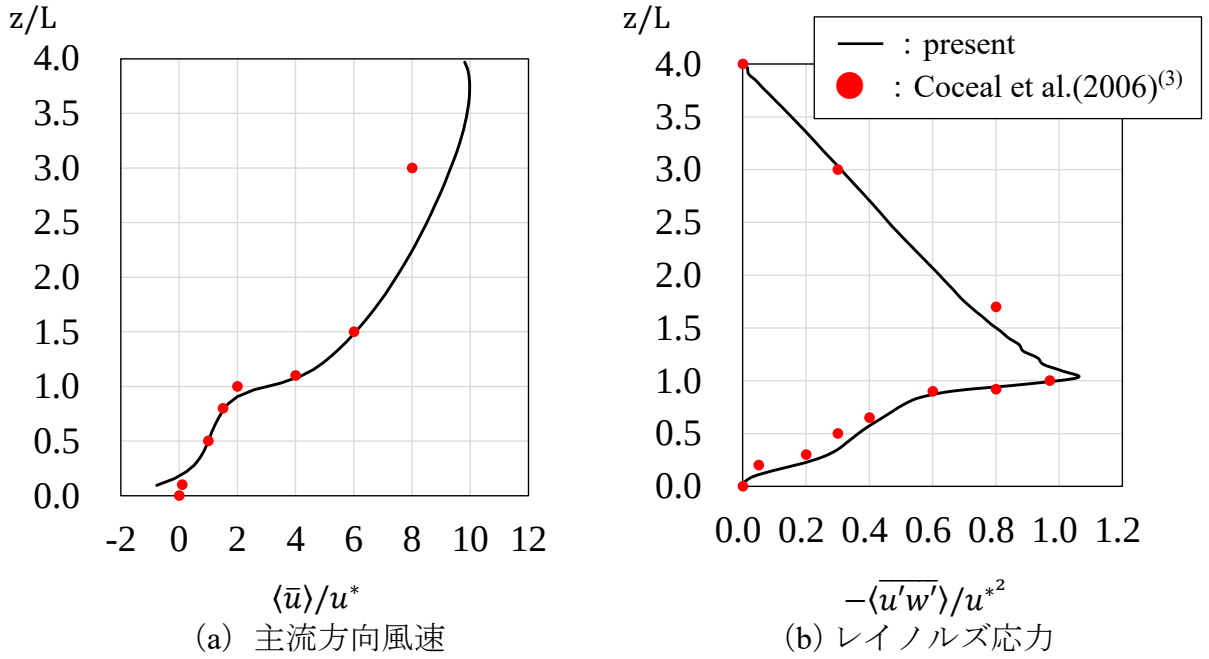


図 3-10 鉛直プロファイルの既往研究との比較 (ST1)

3.5.6 確率密度分布による解析時間の検討

前節では風速及びスカラー濃度について、その助走時間と解析時間の検討を時間平均された風速及びスカラー濃度を基に検討し、助走時間と解析時間を決定した。本研究では、時間的、空間的な変動を考慮した解析を各成分風速及びスカラー風速の確率密度分布及び超過風速、超過スカラー濃度を基に行う。しかしながら、瞬時の統計量を考える際に、解析時間の検討は十分に成されていない。そこで、本節ではスカラー風速及びスカラー濃度の解析時間による不確実性について検討し、本研究の解析を進める上で適当な解析時間の決定を行う。はじめに、スカラー風速 v_a は次式で定義される。

$$v_a = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (3-30)$$

ここで、スカラー風速は解析高さ $0.2H_{av}$ において取得された各成分風速を基に導出されている。また、スカラー風速の確率密度分布は $f(v_a/V_{a2H_{av}})$ で定義される。ここで、 $V_{a2H_{av}}$ は参照高さ $2H_{av}$ で取得された時間平均及び空間平均を施されたスカラー風速の値を表している。同様に、各成分風速 u_i の確率密度分布は $f(u_i/V_{a2H_{av}})$ で定義される。スカラー濃度については、以下の式で表される規格化スカラー濃度 β を用いる。その定義式は以下に示すとおりである。

$$\beta = \frac{C - C_{ref}}{C_0} \quad (3-31)$$

ここで、 C_0 はスカラー濃度の規格化定数であり、次式で表される。

$$C_0 = \frac{q_{flux} A_f}{V_{a2H_{av}} L^2} \quad (3-32)$$

(3-32)式中の q_{flux} は計算領域床面から流入するスカラーフラックスを表す．また， A_f は計算領域床面の総面積を表す．また，本研究では水平方向境界条件に周期境界条件を適用しているため，床面から流入したスカラー濃度が拡散せず滞留してしまう．そこで，本研究では体積 sink 項 Q_{sink} をスカラー方程式中に課す事でスカラー濃度の拡散を擬似的に再現している．一方で，体積 sink 項によって実験条件ごとに異なるスカラー濃度の値となるためその比較が困難である．そこで，参照高さ $2H_{av}$ における時間平均及び空間平均を施したスカラー濃度 C_{ref} とスカラー濃度 C の差を考えることで，実験条件ごとのスカラー濃度の比較を行った．ここで，規格化スカラー濃度の確率密度分布は， $f(\beta)$ で定義される．また，各成分風速，スカラー風速及び規格化スカラー濃度の確率密度分布は歩行者高さ $z = 0.2H_{av}$ における水平面全体の各格子点で取得された値を基に計算される．各成分風速，スカラー風速，規格化スカラー濃度の確率密度分布を基に，各々の累積度数分布は次式で表される．

$$F(u_{i_F}) = \int_{v_{a_F}}^{\infty} f(u_i) du_i \quad (3-33)$$

$$F(v_{a_F}) = \int_{v_{a_F}}^{\infty} f(v_a) dv_a \quad (3-34)$$

$$F(\beta_F) = \int_{\beta_F}^{\infty} f(\beta) d\beta \quad (3-35)$$

ここで， u_{i_F} ， v_{a_F} ， β_F はそれぞれ累積度数 $F\%$ を与える値の下限值を表し，本研究では， $F\%$ 超過風速及び $F\%$ 超過スカラー濃度と各々定義する．

解析時間が瞬時の統計量に与える影響については，Ikegaya et al. (2017)⁽¹⁰⁾ によって議論されており，Ikegaya et al. (2017)⁽¹⁰⁾ は均一建物高さを対称に，解析時間がスカラー風速の確率密度分布に与える影響を調べ，その結果，超過確率 0.1% を超える超過風速の値を評価するためには，4000s (100T) の解析時間が必要であると結論付けた．本研究では，Ikegaya et al. (2017)⁽¹⁰⁾ による研究と同じ長さスケール $L = 25m$ を使用しているため，スカラー風速の確率密度分布に際して，同程度の解析時間が適用可能であると考えられる．しかしながら，本研究では，スカラー濃度分布及び非一様の建物高さを有する都市配列を使用しているため，本研究では，解析時間のスカラー濃度に与える影響及び，不均一建物高さによる解析時間への影響について考慮する．本研究では解析時間として，4000s, 2000s, 1200s, 800s, 400s (それぞれ 270T, 135T, 81T, 54T 及び 27T) を比較対象とした．

図 3-11 に不均一建物高さを対象としたスカラー風速及びスカラー濃度の確率密度分

布，累積度数分布を示す．図中には比較対象とした解析対象時間ごとの確率密度分布及び累積度数分布が示されており，表 3-1 に示される全ての解析条件について同様の分析が行われたが，ここでは ST1-0.69 の配列条件についての結果のみを示す．はじめに，図 3-9 の(a-1)及び(b-1)のスカラー風速及びスカラー濃度の確率密度分布の結果に注目すると，データの解析時間が長くなるにつれて，スカラー風速とスカラー濃度の確率密度分布が解析時間 4000s の結果に収束している．特に 2000s (灰色実線) と 4000s (黒色実線) の結果において，その傾向は顕著であり，確率密度分布の差はほとんど見られない．このことは，不均一建物高さの条件についてスカラー風速及びスカラー濃度の統計量を考慮する際には 4000s 以上の解析時間で十分である事を示唆していると言える．より定量的に考察するために，図 3-11 の(a-2)，(b-2)のスカラー風速及びスカラー濃度の累積度数分布に基づいて解析時間の影響について評価を行う．図中の縦軸は対数軸になっている．また，図中のエラーバーは超過確率 80，10，1，0.1%の解析時間 4000s を対象に解析時間 2000s との誤差を表したものである．図 3-11 の(a-2)より，各々の解析時間と解析時間 4000s の差は解析時間が長くなるにつれて小さくなり，解析時間が 2000s となるときに最も 4000s の結果に近づく．また，スカラー濃度についても同様に，図 3-11 の(b-2)より，超過スカラー濃度の値は解析時間が長くなるにつれて徐々に 4000s の結果に近づく．また，本研究で対象とする最大超過確率 0.1%以下に置いて，解析時間 4000s と 2000s の誤差はスカラー風速で 2%未満，スカラー濃度で 3%未満になる．また，スカラー風速及びスカラー濃度が参照風速 $V_{a_{2H_{av}}}$ 及び規格化スカラー濃度によって規格化されている事を考慮すると，これらの結果は規格化された結果に対する統計的不確かさを意味するため，参照風速及び規格化スカラー濃度の不確かさは影響を及ぼさない．一方で，超過確率が 0.01%以上と発生頻度が極端に低い現象になると，4000s と 2000s の解析時間の間の誤差は 5%以上と大きい値になるため，十分に許容できる制度を保証するためには超過確率 0.01%以上の現象についてはより長い解析時間が必要であると言える．

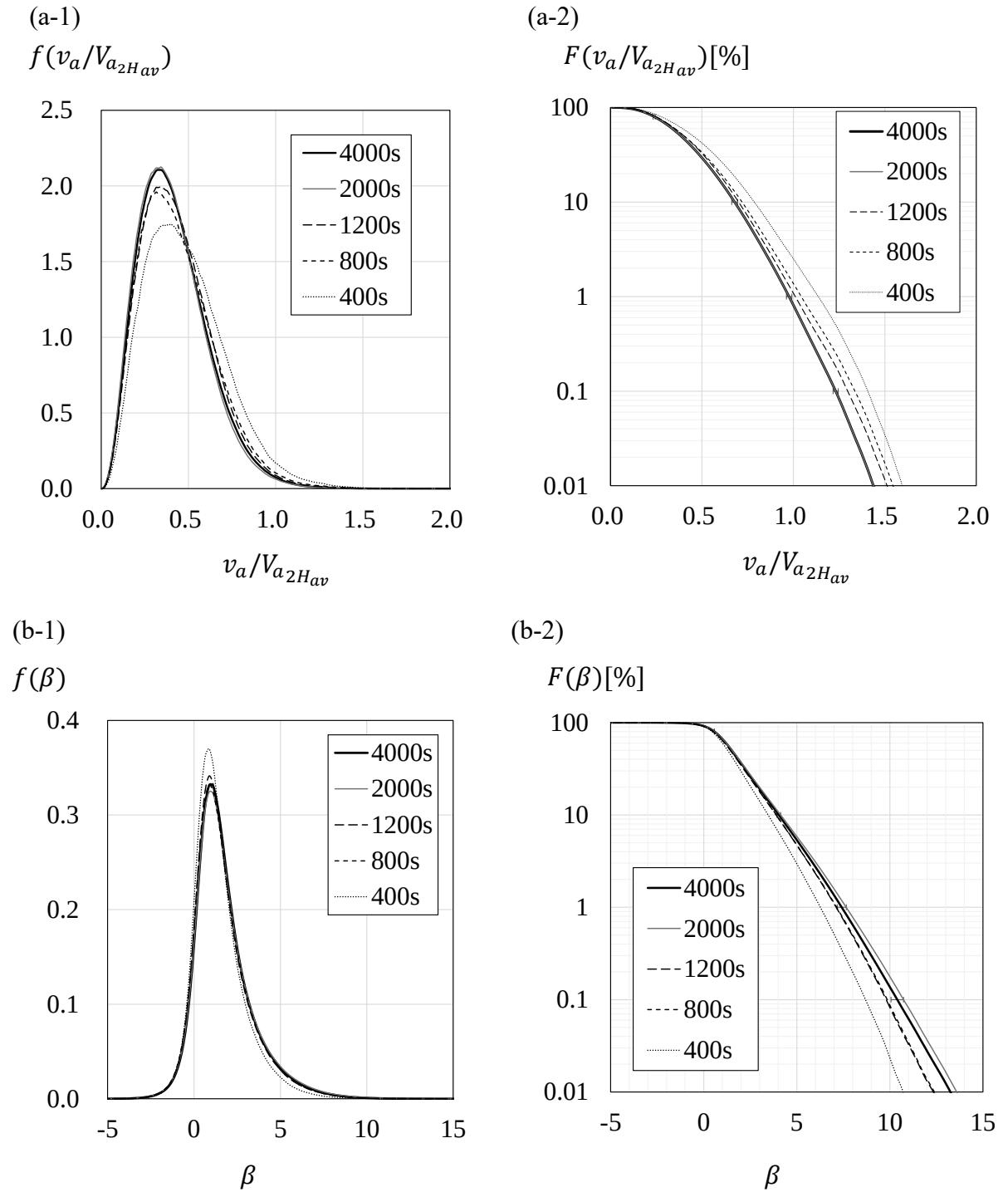


図 3-11 不均一建物高さ (ST1-0.69) を対象とした、歩行者高さ $z = 0.2H_{av}$ のスカラー風速とスカラー濃度の確率密度分布及び累積度数分布によるそれぞれの解析対象時間の比較. 黒実線: 4000s, 灰実線: 2000s, 長破線: 1200s, 破線: 800s, 点線: 400s

3.6 均一高さ及び不均一高さの都市配列における気流性状と濃度分布

本節では時間平均された気流場の構造とスカラー濃度場の分布について検討するために xz 断面及び xy 断面における主流方向，スパン方向，鉛直方向の流線図，並びにスカラー濃度のコンタマップを用いて均一高さ及び不均一高さの都市配列における速度分布，スカラー濃度分布の特性について，図 3-12 に示す解析対象断面を対称に，視覚的な考察を試みた．

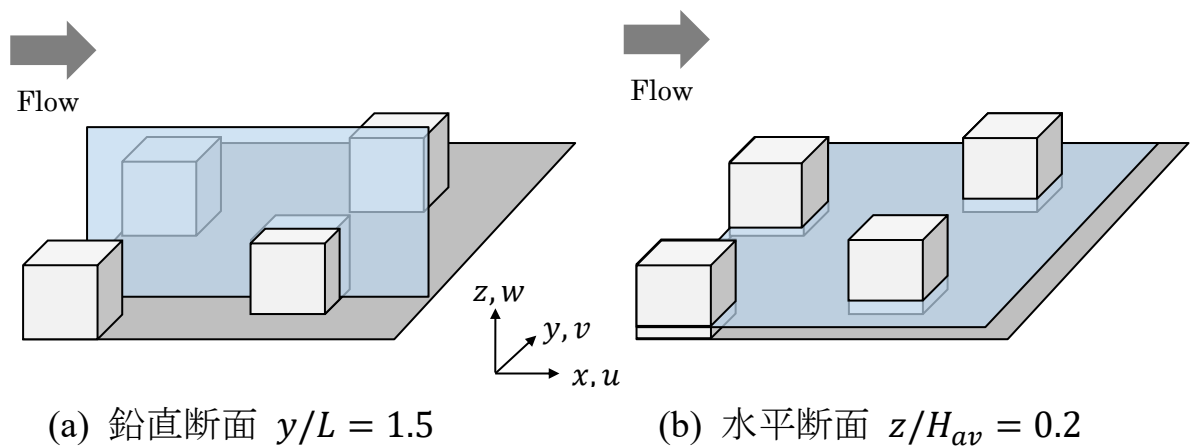


図 3-12 解析対象断面

3.6.1 xz 断面における平均流分布

始めに表 3-1 に示されるそれぞれの配列条件について， xz 断面における平均流分布図を作成することで，建物周辺の気流場について考察した．

図 3-13，図 3-14 に平均模型高さ $H_{av} = 1.0L$ の配列条件において，高さばらつきのない条件(ST1)及び高さばらつきのある条件(ST1-0.5)鉛直断面の各成分風速の速度分布を示す．図中の各成分風速は参照風速 $V_{a2H_{av}}$ によって無次元化されている．始めに，図 3-13 の均一高さの配列条件における各成分風速の速度分布に注目する．主流方向風速の速度分布(a)について，キャノピー内部の模型背面の後流域において主流方向風速が強風となる領域が見られる．また，模型背面近傍においては，弱風域や逆流域が形成されており，後流域と比べて弱風となるような領域が形成されている．また，鉛直方向風速の速度分布について，模型背面の後流域において下降流が生じており，上空がキャノピー内に取り込まれている様子が確認できる．また，模型背面においては，上昇流が生じており，模型背面の後流域で発生した下降流と併せて，都市キャノピー内で鉛直方向に循環するような気流の存在が示唆される．このことから，主流方向風速の速度分布が模型背面の後流域に置いて強風となった事については，下降流によって上空の高速流がキャノピー内に取り込まれた事が原因であると推測される．また，主流方向風速の速度分布が

スパン方向，鉛直方向の気流分布に比べて大きくなっている，これは，平均速度場においてスパン方向，鉛直方向の気流分布に比べて，主流方向風速分布の寄与が大きくなっていることを示唆している．

続いて，高さ分布がある条件（ST1-1）における高層建物後方の鉛直，流れ方向断面の各成分風速の速度分布に注目する．図 3-14 の高さ分布がある配列条件における各成分風速の速度分布について，図 3-13 に示した平均建物高さが同じ条件の一様建物高さの条件と比較すると，高さ分布のある条件の高層建物の後方において，各成分風速のいずれも平均風速の値が増加している．また，図 3-14(c)に示されるように，高層建物の模型背面の後流域で上空流の導入が生じていることから，高層建物上空のより大きな平均風速を持つ上空流がキャノピー内に取り込まれることで，キャノピー内における各成分平均風速が向上したのではないかと推測される．

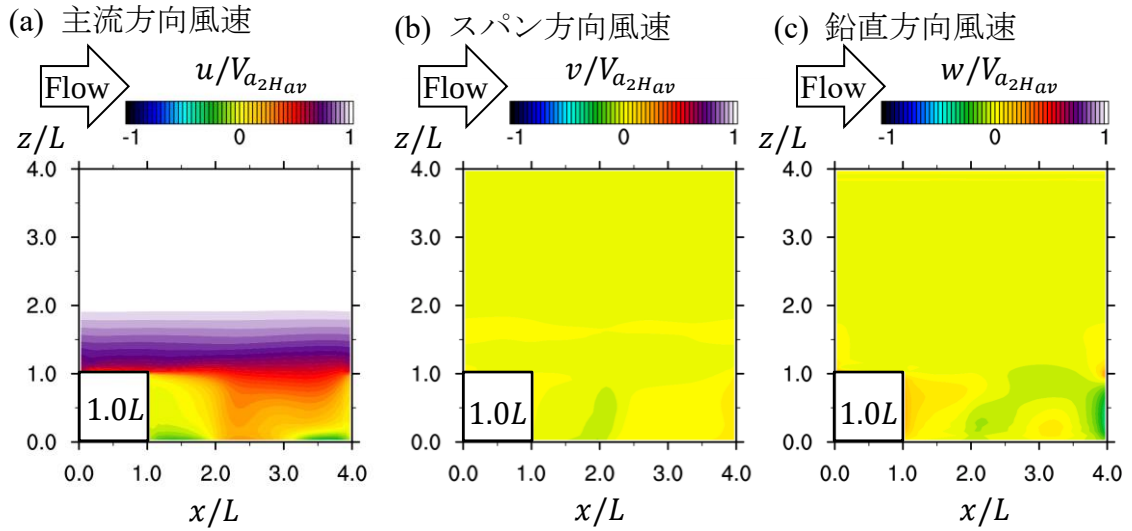


図 3-13 均一高さ条件(ST1) を対象とした鉛直 - 流れ方向断面 $y/L = 1.5$ における(a) 主流方向風速と(b) スパン方向風速及び(c) 鉛直方向風速の速度分布

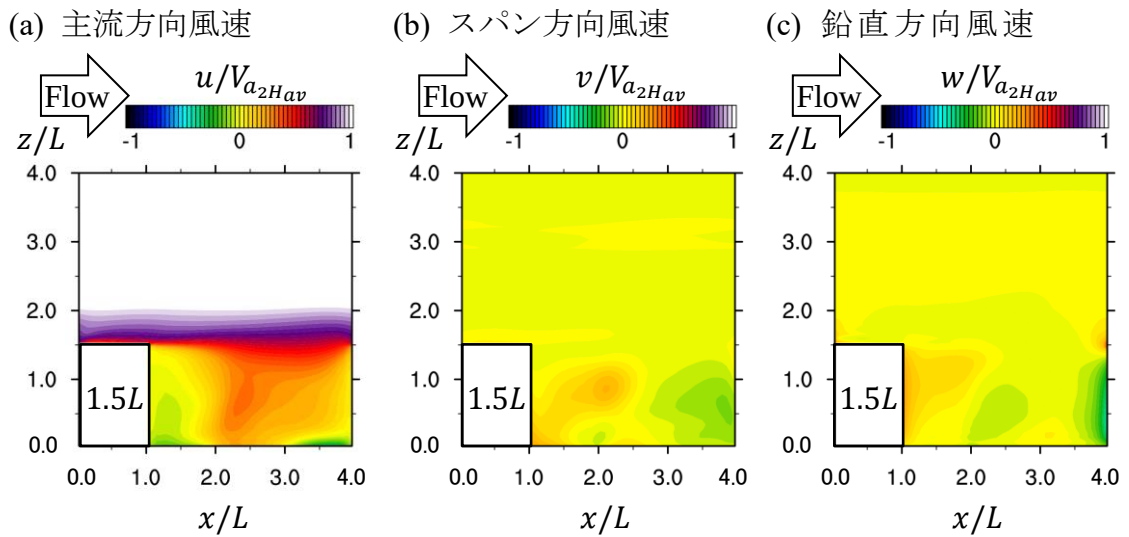


図 3-14 不均一高さ条件(ST1-1) を対象とした鉛直 - 流れ方向断面 $y/L = 1.5$ における(a) 主流方向風速と(b) スパン方向風速及び(c) 鉛直方向風速の速度分布

3.6.2 xy 断面における平均流とスカラー濃度場

続いて、表 3-1 に示されるそれぞれの配列条件について、xy 断面における平均流とスカラー濃度場の分布図を作成することで高さ分布のある建物の有無による周囲の速度場およびスカラー濃度場への影響を考察した。また、本論ではすべての配列条件について結果を作成しているが、高さ分布の有無による速度場および濃度場への影響を明らかにすることを目的として、平均建物高さが同一の配列条件における、均一建物高さ条件 ST1 および不均一高さ ST1-0.5, ST1-0.69 に注目して結果の考察を行う。初めに、図 3-15 に歩行者高さ $z = 0.2H_{av}$ における各成分風速の速度分布を示す。各成分風速は参照風速 $V_{a2H_{av}}$ によって無次元化されている。初めに図 3-15(a), (b), (c) の主流方向風速の速度分布に注目すると、高さ分布なしの条件 (ST1) では模型周りに左右対称な様な速度分布になっている。対して高さ分布のある条件 (ST1-0.5, ST1-0.69) では高層建物周辺で、流れが加速されるような速度分布になっている。特に、図 3-15(c) の ST1-0.69 の配列条件において、その傾向が顕著であり、高層建物によって流れが分断され、高層建物側面において上空風 $V_{a2H_{av}}$ の半分程度の強風が発生していることが確認できる。また、図 3-15(d), (e), (f) のスパン方向風速、図 3-15(g), (h), (i) においても同様に高層建物による気流の分断、及び高層建物周囲での強風域の形成が起きている。また、図 3-15(h), (i) の高さ分布のある条件における鉛直方向風速の速度分布について、異なる高さばらつきのパターンの配列条件においても、高層模型の前方で、周辺の低層建物と比べて大きな下降流が発生している。高層建物周辺で図 3-15(g) の一様高さの条件より広い範囲の下降流域が形成されていることを踏まえ、高層建物周辺で広範囲に大きな下降流が生じた事によって、より上空の高速流がキャノピー内に導入される事で高層建物周辺における時間平均された各成分風速の値が大きくなっているのではないかと推測される。

次に、図 3-15 と同様に、歩行者高さ $z = 0.2H_{av}$ 水平面内における平均スカラー風速分布と平均スカラー濃度分布を比較することでその関係性及び、高さ分布のスカラー濃度分布に与える影響について考察した。図 3-16 にそれぞれ均一建物高さ条件 (ST1)、不均一建物高さ条件 (ST1-0.5, ST1-0.69) における歩行者高さ水平面内の平均スカラー風速分布および平均スカラー濃度分布を示す。初めに、図 4-5(a) の均一建物高さの配列条件における平均スカラー風速分布の結果に注目すると、ブロック周辺で左右対称となる速度分布になっている。また、ブロック前方の領域において、周辺気流と比べて平均風速が大きな速度分布になっており、周辺と比べて平均的に強風となる領域が形成されている。このことは、一様高さの模型群においても、模型前方に衝突した気流によって上空の高速流が導入されていることが示唆される。一方で、弱風域は模型と模型の間の通路に、スパン方向に広がる形で形成されている。また、図 4-5(d) の平均スカラー濃度分布については、床面からは流入条件として様な濃度流量が与えられているが、歩行者高

さの水平面内においては、模型からの位置関係によって大きく異なる濃度分布になっている。特に、図 4-5(d)の平均スカラー風速分布において、強風域が形成されていたような模型前方付近においては、スカラー濃度が低くなる領域が形成されており、一方で、模型と模型の間や模型背面のような平均スカラー風速が弱風域となるような領域においては、スカラー濃度が高くなる領域が形成されている。このことは、模型背面の後流域において、上空の高速流がキャノピー内において取り込まれた際にスカラー濃度とともに模型背面近傍に循環されることによって、模型背面での高濃度域が形成されたのではないかと推測する。

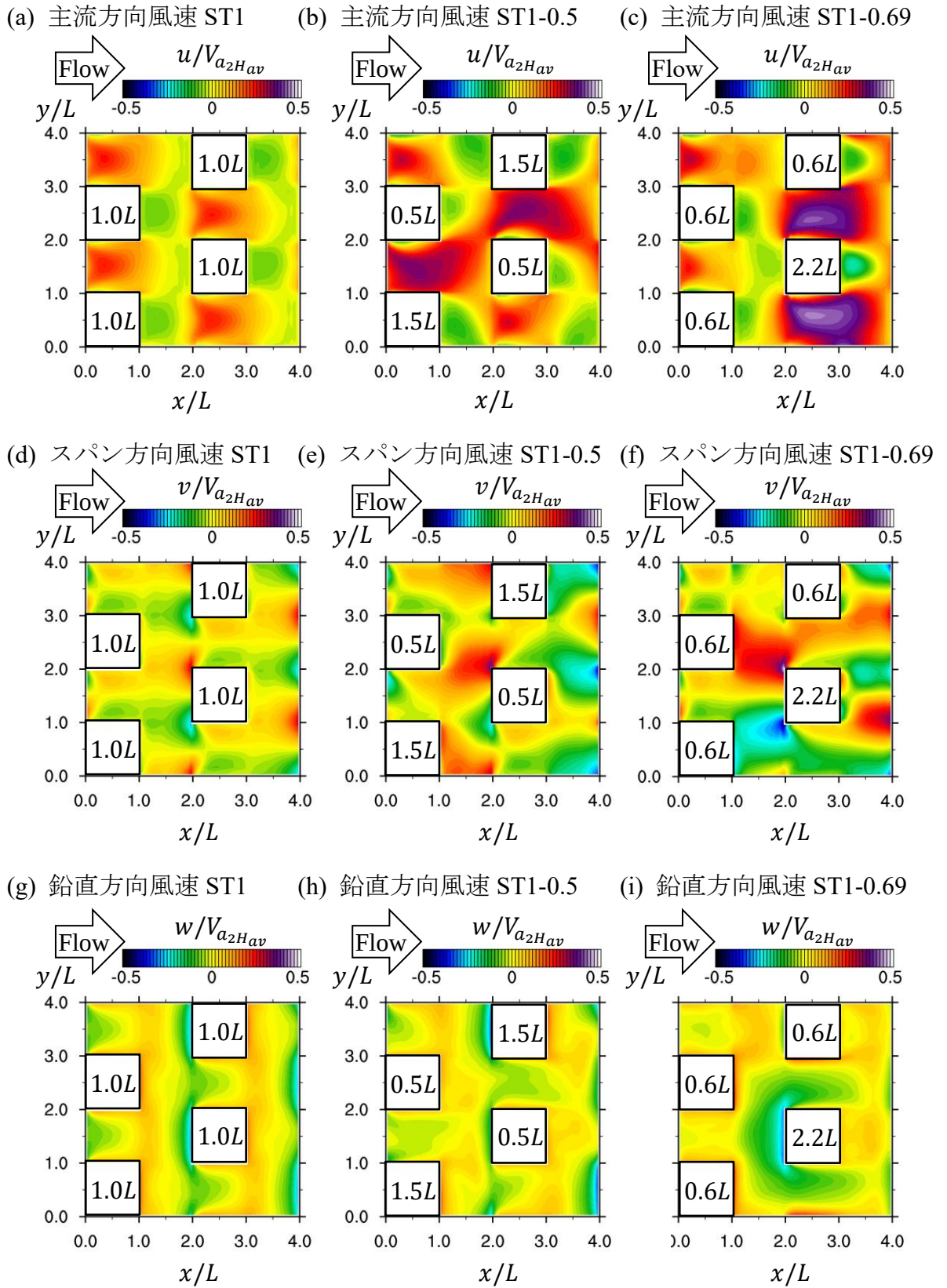


図 3-15 均一高さ条件(ST1)と不均一高さ条件(ST1-1, ST1-0.69)を対象とした歩行者高さ $z/H_{av} = 0.2$ における主流方向風速, スパン方向風速及び鉛直方向風速の速度分布

次に、図 3-15 と同様に、歩行者高さ $z = 0.2H_{av}$ 水平面内における平均スカラー風速分布と平均スカラー濃度分布を比較することでその関係性及び、高さ分布のスカラー濃度分布に与える影響について考察した。図 3-16 にそれぞれ均一建物高さ条件 (ST1)、不均一建物高さ条件 (ST1-0.5, ST1-0.69) における歩行者高さ水平面内の平均スカラー風速分布および平均スカラー濃度分布を示す。初めに、図 3-16(a) の均一建物高さの配列条件における平均スカラー風速分布の結果に注目すると、ブロック周辺で左右対称となる速度分布になっている。また、ブロック前方の領域において、周辺気流と比べて平均風速が大きな速度分布になっており、周辺と比べて平均的に強風となる領域が形成されている。このことは、一様高さの模型群においても、模型前方に衝突した気流によって上空の高速流が導入されていることが示唆される。一方で、弱風域は模型と模型の間の通路に、スパン方向に広がる形で形成されている。また、図 3-16(d) の平均スカラー濃度分布については、床面からは流入条件として一様な濃度流量が与えられているが、歩行者高さの水平面内においては、模型からの位置関係によって大きく異なる濃度分布になっている。特に、図 3-16(d) の平均スカラー風速分布において、強風域が形成されていた模型前方付近においては、スカラー濃度が低くなる領域が形成されており、一方で模型と模型の間や模型背面のような平均スカラー風速が弱風域となるような領域においては、スカラー濃度が高くなる領域が形成されている。このことは、模型背面の後流域において、上空の高速流がキャノピー内において取り込まれた際にスカラー濃度とともに模型背面近傍に循環されることによって、模型背面での高濃度域が形成されたのではないかと推測する。

続いて、高さばらつきのある建物群 (ST1-0.5, ST1-0.69) について、図 3-16(b), (c) のスカラー風速の速度分布に注目すると、図 3-15 の各成分風速の速度分布の結果と同様に、高層建物の側面において強風域が形成されている。また、ST1-0.5 の配列条件に注目すると、低層建物の後方において、広範囲に弱風域が形成されており、高層模型前方にまで及んでいる事が確認できる。しかしながら、水平断面全体では平均風速が増加しており、高さ変動の導入によって風通しが向上している事が確認できる。また、ST1-0.69 の配列条件においても高層建物周辺での平均風速が増加しており、図 3-15(h), (i) の結果と併せて、鉛直方向の空気導入が盛んになったためであると考えられ、この傾向は Kubota et al. (2008)⁽¹⁵⁾ による風洞実験や Adb Razak et al. (2013)⁽¹⁶⁾ による結果と整合する。

また、図 3-16(e), (f) のスカラー濃度分布に注目すると、高層模型の周辺でスカラー濃度が低濃度になる領域が形成されている。これは、図 3-16(b), (c) に示されるように、高層模型前面において、より上空の高速流が高層模型に衝突すると同時に高層模型に衝突した流れが両側に分断され、高層模型側面に最も大きな強風域が形成されたことによ

て生じたものであると推測される．また，この空気導入は図 3-16(d)に示されるような一様高さの建物群においても生じており，一様建物高さの条件の建物の後流における低スカラー濃度の領域の形成にも寄与している．Yoshie et al. (2008)⁽¹⁷⁾は風洞実験を実施し，時間的，空間的に平均化された風速とスカラー濃度の間には負の相関があることを明らかにしている．本研究の結果は Yoshie et al. (2008)⁽¹⁷⁾によって確認された傾向と一致している．さらに，図 3-16 で示される結果によって，強風によってキャノピー内の空気がいかに効果的に混合されているかが明らかとなった．

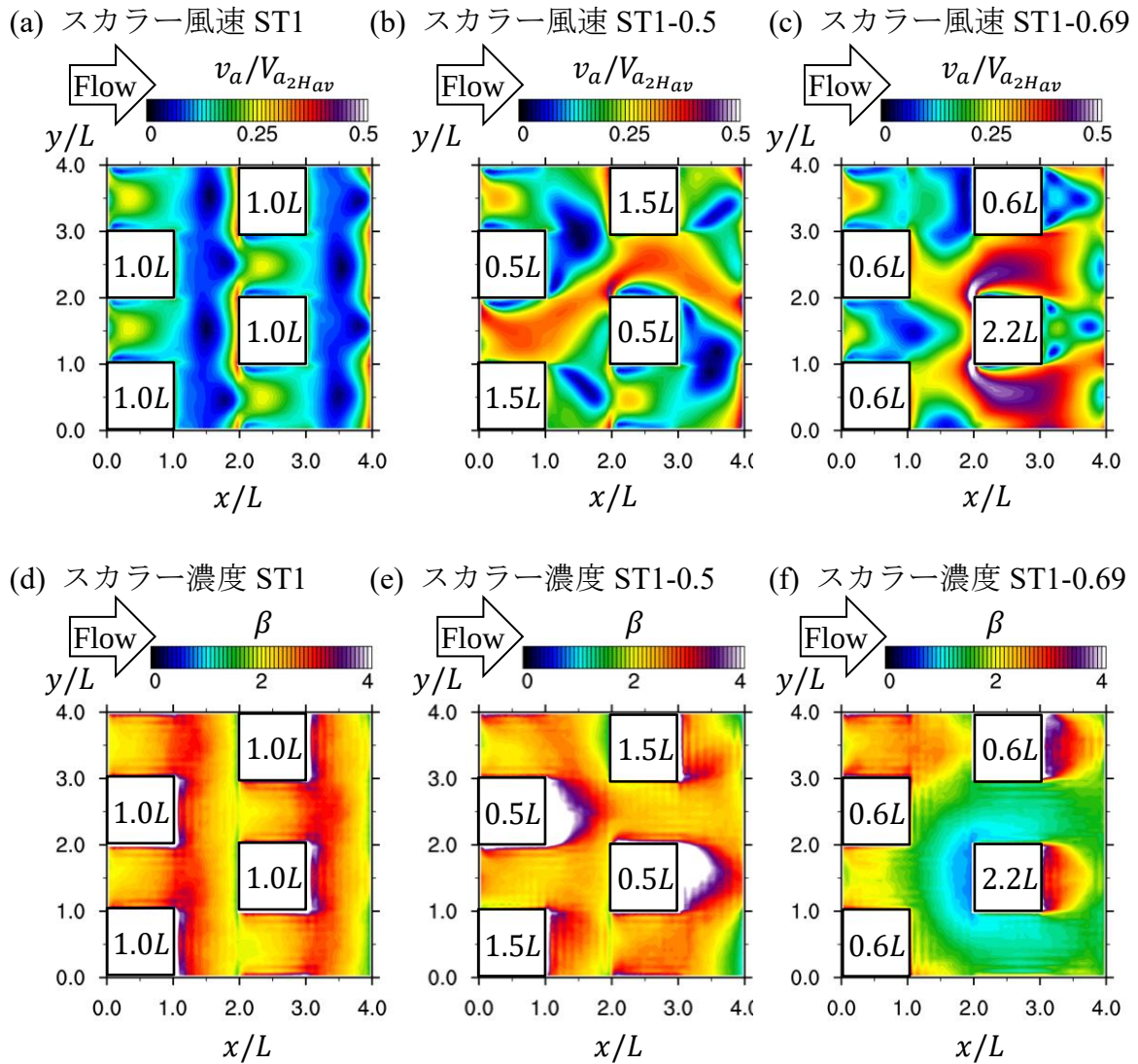


図 3-16 均一高さ条件(ST1)と不均一高さ条件(ST1-1, ST1-0.69)を対象とした歩行者高さ $z/H_{av} = 0.2$ におけるスカラー風速分布及びスカラー濃度分布

3.7 風速及びスカラー濃度の確率性状

前節では歩行者高さ水平面内を対象に時間平均された風速及びスカラー濃度の水平面内分布を作成することで、高さ分布の速度分布、スカラー濃度分布への影響を考察した。本節では $z=0.25h$ における xy 平面内を対象としてスカラーと風速の確率密度分布図を作成し、速度場と濃度場の確率性状の間に見られる関係性について考察を行うことにした。さらに、時空間平均値のみでは議論しえない瞬時の高濃度イベントについても検討することとする。

3.7.1 風速確率密度分布

本節では、高さ $z = 0.2H_{av}$ の水平断面内における各成分風速及びスカラー風速の確率密度分布に対する、模型群の高さ分布の影響について考察する。図 3-17 に各風速 u , v , w を参照風速 $V_{a2H_{av}}$ で規格化した無次元風速の確率密度 $f(u_i/V_{a2H_{av}})$ (u_i は各方向の風速) を示す。図中の点線は、それぞれの配列条件における平均風速を示している。

まず、図 3-17 (a), (d) に示した主流方向風速について、高さ分布がある条件の平均風速は、高さ分布なしの条件に比べて上昇していることがわかる。この傾向は、Razak et al. (2013)⁽¹⁶⁾ や Takebayashi et al. (2011)⁽¹⁸⁾ の結果と整合しており、高さ分布がある模型群によるキャニオン内気流の平均値の特性を良く再現できていると言える。

続いて、確率密度分布の特性について考察する。平均模型高さ $1.0L$ の ST1, ST1-0.5, ST1-0.69 の三条件では、模型高さの標準偏差 σ が大きくなるほど、順流方向および逆流方向の強風側に歪んだ分布になることがわかる。特に、逆流方向に比べて順流方向の速度分布の裾野が強風の範囲へ顕著に延びている。平均模型高さ $1.5L$ の ST1.5 と ST1.5-0.5 の二条件についても、同様の傾向が見られるが、模型高さ $1.5L$ の条件では粗度面積率が 37.5% と言う ST1 の条件と比べ大きな立面積を有する事から、キャノピー内への空気導入が妨げられるため、高さばらつきによる高風速頻度の増加の程度は小さいと考えられる。また、図 3-17(b), (e) 及び図 3-17 (c), (f) のそれぞれに示されるスパン方向風速、鉛直方向風速の確率密度についても、高さばらつきによって正負の強風側での発生確率が増加した分布となっている。

以上のことから、いずれの風速成分においても、建物高さのばらつきが大きくなるほど大きな風速の発生頻度がより増加し、確率密度分布の裾が広がる傾向が見られることが明らかとなった。特に、主流方向風速だけではなくスパン方向風速や鉛直方向風速についても同様の傾向が見られたことから、高さばらつきの大きな条件では、高層建物が存在することで大きな主流方向風速を持つより上空の高速流が都市空間に取り込まれているのだと考えられる。その結果として都市空間の主流方向、スパン方向、鉛直方向風速が大きくなり、領域平均風速が増加するのだと推測することができる。このことから、キャノピー内の平均風速の増加が、鉛直方向の空気の流入だけでなく、主流方向と

スパン方向両方の風速についても起因している事が確認された。3.6.1 節では、各成分風速の時間平均速度場を観察し、スパン方向風速や鉛直方向風速に比べて主流方向風速が平均風速の増加に大きく寄与していることを示したが、図 3-17 の各成分風速の確率密度分布を見ると、瞬間的な分布としては、スパン方向風速、鉛直方向風速も主流方向風速に対して同程度の大きさの分布を有している。このことから、歩行者高さにおける瞬間的な気流分布は各成分風速の寄与が同程度である三次元的な気流性状である事が示唆される。

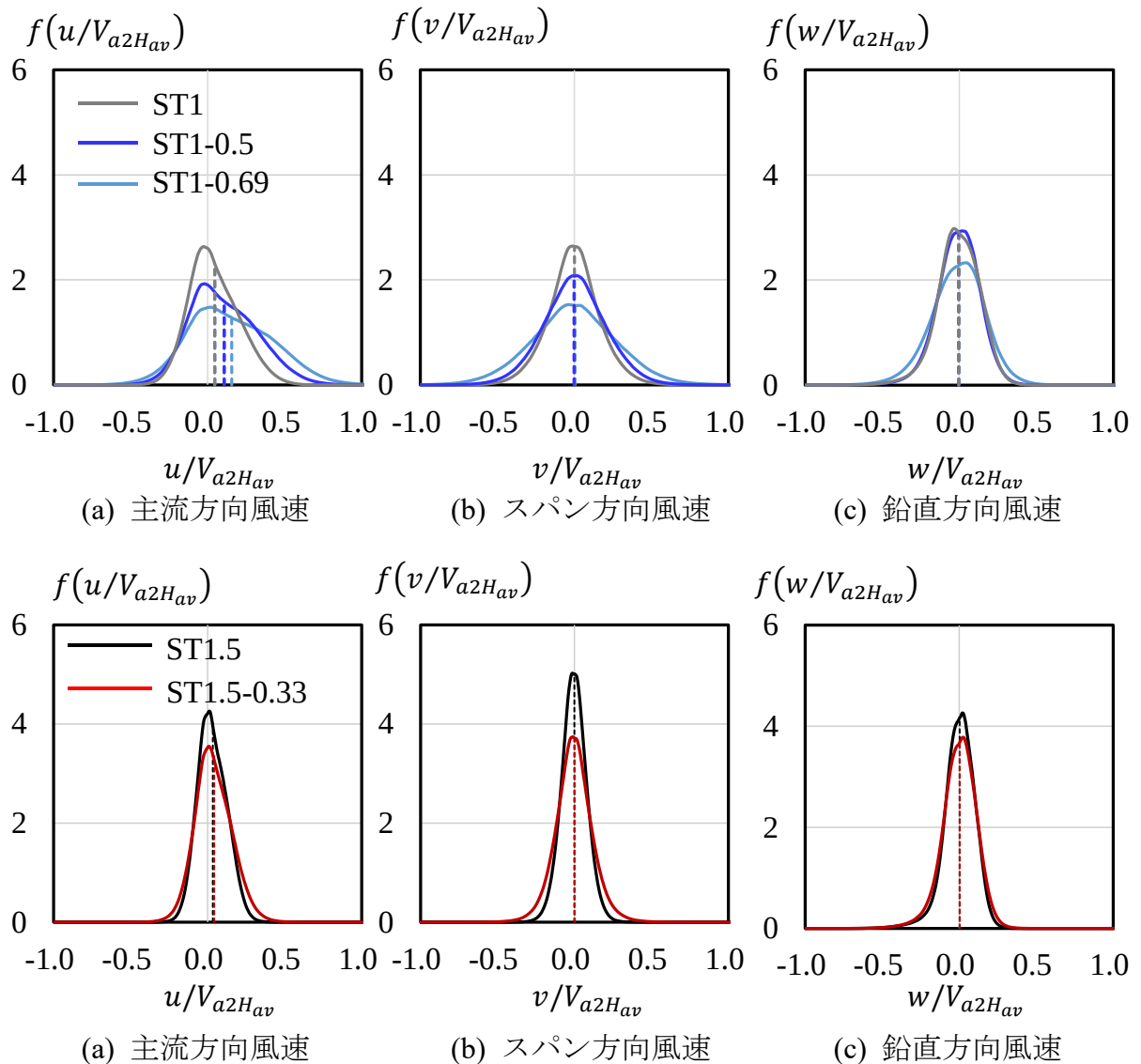


図 3-17 歩行者高さ $z = 0.2H_{av}$ における ST1, ST1-0.5, ST1-0.69 を対象とした(a)主流方向風速, (b)スパン方向風速, (c)鉛直方向風速の確率密度分布と ST1.5 と ST1.5-0.5 における各成分風速(d), (e), (f)の確率密度分布.

3.7.2 スカラー濃度確率密度分布

図 3-19 は全ての配列条件を対象としたスカラー濃度の確率密度分布を示す．図中の点線は各条件における平均スカラー濃度を表している．図 3-19 より，スカラー濃度の確率密度分布はすべての配列条件に付いて，正の値にひずんだ分布になっている．図 3-18 に示したスカラー風速の結果と比較して，高さ分布の有無による影響は顕著には確認されないが，最も低いスカラー濃度となる配列条件は最大の高さ変動を有する ST1-0.69 の配列条件である．これは，3.6.2 節でも確認したように，キャノピー内における風速が大きいと，スカラーの拡散が促進され，ほかの配列条件に比べ，より低いスカラー濃度分布を示すためであると考えられる．また，スカラー濃度において高さばらつきの影響が小さかった原因は，スカラーソースの境界条件に起因するものであると考えられる．このことは，スカラー濃度はすべての配列条件に付いて底面からのみ流入するのに対して，運動量は各建物における抗力によって吸収されるため，高さばらつきの有無によって吸収量が直接影響を受けるためであると考えられる．

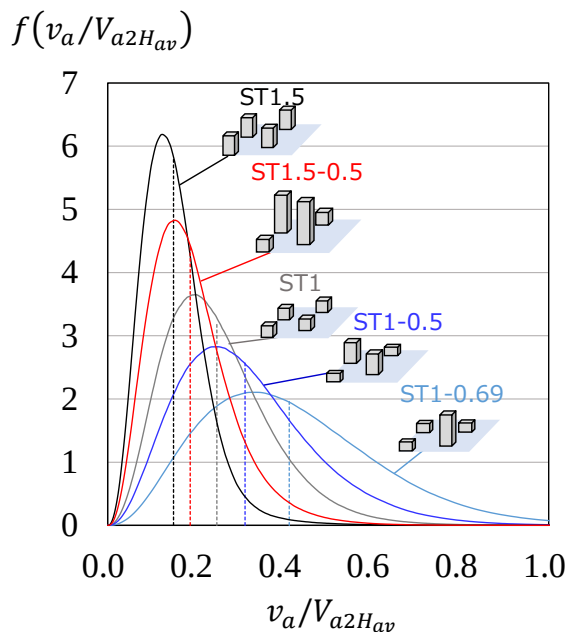


図 3-18 歩行者高さ $z = 0.2H_{av}$ における全ての配列条件におけるスカラー風速の確率密度分布．

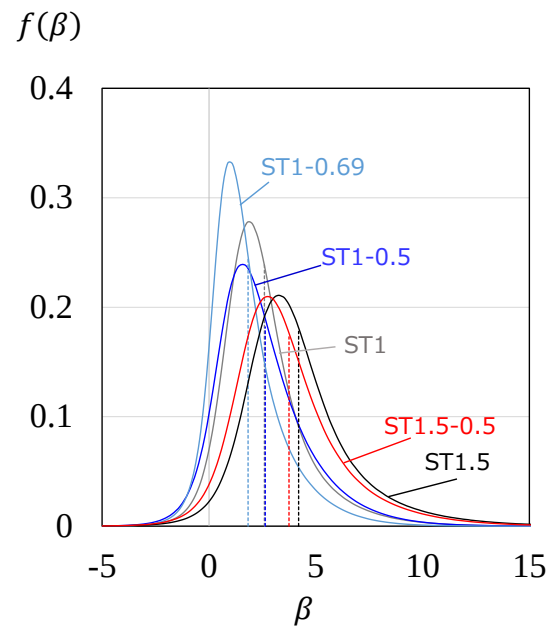


図 3-19 歩行者高さ $z = 0.2H_{av}$ における全ての配列条件におけるスカラー濃度の確率密度分布．

3.8 超過風速及び超過スカラー濃度

本節では，風速とスカラー濃度の超過確率及び超過風速を算出し，歩行者高さにおける強風と高濃度イベントに対する高さ分布高さ分布の影響を評価する．超過風速と超過スカラー濃度は式(3-34)，(3-35)で定義されるスカラー風速及びスカラー濃度の累積度数

分布を基に、累積度数 $F\%$ を与える値の下限値を $F\%$ 超過風速及び $F\%$ 超過スカラー濃度と各々定義している。また、それぞれの配列条件において、上空風の違いを考慮するために、超過風速は平均模型高さ H_{av} の 2 倍の高さにおける時空間平均風速 $V_{a2H_{av}}$ によって以下の式で無次元化されている。

$$\gamma_F = \frac{v_{aF}}{V_{a2H_{av}}} \quad (3-36)$$

図 3-20 に歩行者高さ $z = 0.2H_{av}$ における時空間平均風速と (a) 超過風速比 γ_F 及び (b) 超過スカラー濃度の関係を示す。超過確率は 0.1%, 1%, 10% の強風及び高濃度イベントを示した。また、比較のために超過確率 80% の低速及び低濃度イベントについても同様に示す。なお、高さばらつきがある条件は白抜きのプロットで表している。また、図中のエラーバーは、3.5.6 節の結果を基に求めた各配列条件において予測されうる超過風速値及び超過スカラー濃度の不確実性を表す。図 3-20(a), (b) より、予想される誤差の値は平均風速と超過風速、超過スカラー濃度の関係を考慮する上で十分に小さい。また、図中に示した直線は、高さばらつきのない ST1, ST1.5 の二条件に対して、一次直線を最小二乗法により決定したものである。これによって平均風速と各超過値の関係を明確に示す事ができる。図 3-20(a) の超過風速と平均風速の関係に注目すると、高さばらつきのある配列条件の超過風速の値は、高さばらつきのない条件から求めた一次直線と一致している。このことは、均一建物高さ及び不均一建物高さの両者の超過風速の値がキャノピー内平均風速によって整理する事ができることを示している。歩行者高さ水平面内全体において、低頻度で発生する強風の大きさが同じ歩行者高さにおける水平面内平均風速にほぼ比例する傾向は Ikegaya et al. (2017)⁽¹⁰⁾ による様々な幾何条件を持つ均一建物群周りの気流場を対象とした LES によって既に確認されている。様々な粗度立面積を持つ不均一な建物群を対象とした本解析結果は歩行者高さ水平面内全体を対象とした条件において、超過風速と平均風速の間の線形関係が建物の配置条件とは無関係のより一般的な特性である事を示唆している。

次に、図 3-20(b) の超過スカラー濃度と平均風速の関係に注目すると、超過スカラー濃度は平均風速の増加に伴って単調減少する傾向が観察されるが、超過確率 1% や 0.1% のような低い超過値においては、一次直線からの偏差が超過風速の結果と比べて大きくなっている。

これらの結果は、発生頻度の低い高スカラー濃度にさらされる危険性がキャノピー内の平均風速を増加させる事によって低減できる事を示している。したがって、キャノピー内の平均風速を向上させる事は熱的な快適性を改善し、キャノピー内における汚染物質を希釈させるため、都市換気の観点では有用である。しかし、キャノピー内の平均風

速を増加させる事は同時に強風の発生頻度が増大し、突風現象によって引き起こされる歩行者の転倒や瓦の飛散などのリスクを増加させる事が明らかとなった。

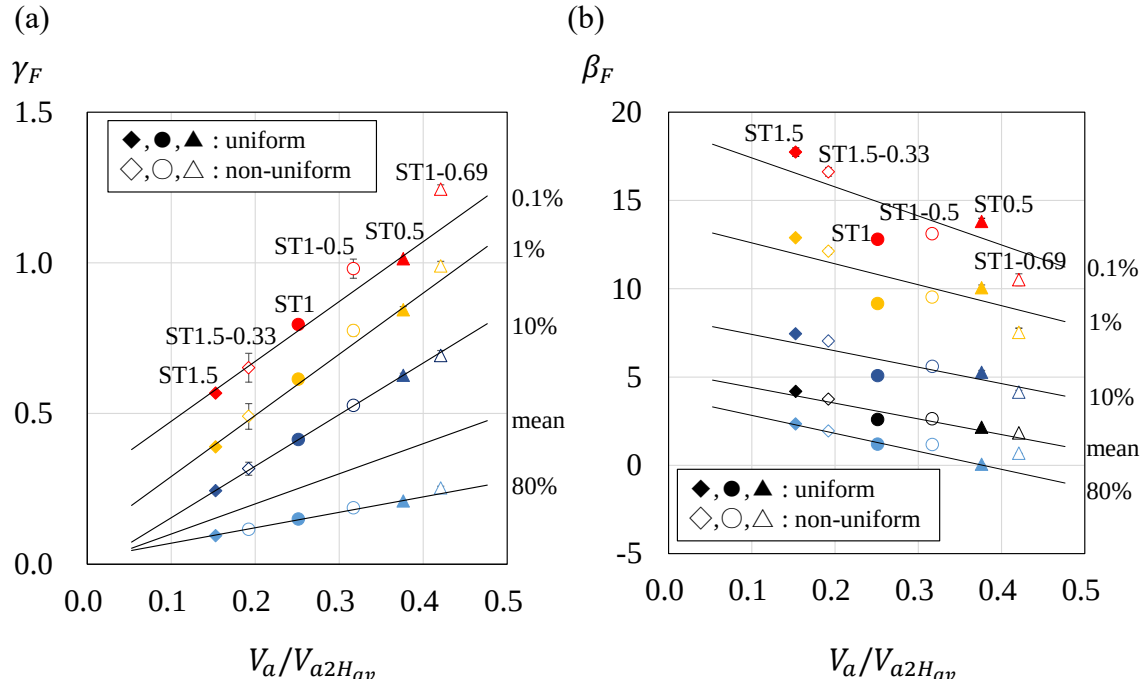


図 3-20 歩行者高さ $z = 0.2H_{av}$ における時空間平均風速比 $V_a/V_{a2H_{av}}$ と (a) 超過風速比 $\gamma_{F\%}$ 及び超過スカラー濃度 $\beta_{F\%}$ の関係。エラーバー：それぞれのプロットにおいて予想される不確定性 (3.1.6 節)。実線：均一建物高さの配列を対象に最小二乗法を用いて求めた一次直線

3.9 結語

本章では、都市空間の風環境評価の観点から、都市配列要素の一つである建物高さ分布が都市歩行者高さにおけるビル風や稀に発生する高濃度の事象のような時間的、空間的に変動を含む事象に及ぼす影響に着目し、非定常な気流場の幾何的依存特性や都市内平均風速との関係性を調査した。

本章では、流れを低圧力勾配で駆動し、計算領域の水平方向の境界条件に周期境界条件を適用しているため、粗度による乱れが十分に発達するまで助走時間が必要となる。助走時間を決定するために無次元圧力勾配の時間変動を観察した。また、スカラー濃度分布も考慮しているため、スカラー濃度が上端部に到達する間にかかる時間を算出し、その結果、1350T 以上のデータであれば乱れが十分に発達し数値計算上有意な結果が得られる事が明らかになった。また、統計的優位性を有する解析対象時間を調べるために、異なる平均化時間における主流方向風速の気流場、主流方向風速、Reynolds stress, RMS 速度, Dispersive stress の鉛直プロファイルを観察し、その結果、キャノピー層内では 270T, 上空においては 1350T の解析時間が必要である事が明らかになった。また、LES で得ら

れた結果の優位性を調べるために同じ配列条件、建蔽率条件の既往研究結果と主流方向風速、Reynolds stress の鉛直プロファイルを基に比較を行い、本節の数値計算結果の有意性を確認した。結果、キャノピー内 ($0 \leq z/L \leq 1$) では、既往研究による数値計算結果を十分に再現できているとして、解析を行う事にした。また、解析時間が風速及びスカラー濃度の確率密度分布に与える影響を検討するために、複数の解析時間を対象に風速、スカラー濃度の確率密度分布を作成し、その結果、最大超過確率 0.1%以下に置いて、解析時間 4000s と 2000s の誤差はスカラー風速で 2%未満、スカラー濃度で 3%未満になる事を示し、本節では解析時間を 4000s とし、超過確率 0.1%以下を対象に超過風速、超過スカラー濃度の解析を行った。

これらの解析条件を基に、都市空間内の時間平均された速度分布を調査した結果、高さばらつきによって都市空間内の平均風速は増加し、平均スカラー濃度も減少することを示した。続いて、非定常のスカラー分布に注目すると、瞬時のスカラー濃度について、高さばらつきの導入によって瞬間的な高スカラー濃度が減少した。これらの結果は、発生頻度の低い高スカラー濃度にさらされる危険性がキャノピー内の平均風速を増加させる事によって低減できる事を示している。このように、キャノピー内の平均風速を向上させる事は熱的な快適性を改善し、キャノピー内における汚染物質を希釈させるため、都市換気の観点では有用である。一方で、非定常の気流分布では高さ分布によって瞬間的な強風の発生確率が上昇し、突風の大きさも増加している。したがって、キャノピー内の平均風速を増加させる事は同時に強風の発生頻度が増大し、突風現象によって引き起こされる歩行者の転倒や瓦の飛散などのリスクを増加させる事が明らかとなった。

参考文献

- [1] 久保田徹, 三浦昌生, 富永禎秀, & 持田灯. (2000). 実在する 270m 平方の住宅地における地域的な風通しに関する風洞実験: 建築群の配置・集合形態が地域的な風通しに及ぼす影響 その 1. 日本建築学会計画系論文集, 65(529), 109-116.
- [2] 吉澤 徹, “流体力学”, 東京大学出版, 2001.
- [3] 小垣 哲也, “複雑形状乱流場解析に適した一般座標系差分スキームの構成とラージエディシミュレーションへの応用”, 博士論文, 1999.
- [4] 梶島 岳夫, “乱流の数値シミュレーション”, 養賢堂, 1999.
- [5] 中林 功一, 鬼頭 修己, “大学院のための流体力学”, コロナ社, 2002.
- [6] Smagorinsky, J., “General circulation experiments with the primitive equations”, Monthly Weather Review, 91, (1963), pp.99-164.
- [7] Versteeg, H.K., Malalasekera, W., 1995. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, first ed. Pearson, London.

- [8] OpenCFD Ltd., “OpenFOAM Foundation Training”,2013.
- [9] Coceal, O., Thomas, T.G., Castro, I.P., Belcher, S.E., 2006. Mean flow and turbulence statistics over groups of urban-like cubical obstacles. *Bound.-Layer Meteorol.* 121(3), 491–519. <http://doi.org/10.1007/s10546-006-9076-2>
- [10] Ikegaya, N., Ikeda, Y., Hagishima, A., Tanimoto, J., 2017. Evaluation of rare velocity at a pedestrian level due to turbulence in a neutrally stable shear flow over simplified urban arrays. *J. Wind Eng Ind. Aerodyn.* 171, 137–147.
- [11] Snyder, W.H., Castro, I.P., 2002. The critical Reynolds number for rough-wall boundary layers. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 90(1), 41–54. [http://doi.org/10.1016/S0167-6105\(01\)00114-3](http://doi.org/10.1016/S0167-6105(01)00114-3)
- [12] Cheng H., and Castro I.P., Near wall flow over urban-like roughness, *Boundary-Layer Meteorology*, 104, pp.229-259, 2002
- [13] Kanda, M., Moriwaki, R., Kasamatsu, F., Large-Eddy Simulations of turbulent organized structures within and above explicitly resolved cube arrays, *Boundary layer Meteorology*, 122, (2011), pp.343-368.
- [14] 古賀 康彦 “都市キャノピー上空の乱流性状に関する Large Eddy Simulation” , 修士論文, 九州大学 (2012), pp.23-28.
- [15] Kubota, T., Miura, M., Tominaga, Y., & Mochida, A. (2008). Wind tunnel tests on the relationship between building density and pedestrian-level wind velocity: Development of guidelines for realizing acceptable wind environment in residential neighborhoods. *Building and environment*, 43(10), 1699-1708.
- [16] Abd Razak, A., Hagishima, A., Ikegaya, N., & Tanimoto, J. (2013). Analysis of airflow over building arrays for assessment of urban wind environment. *Building and Environment*, 59, 56-65.
- [17] Yoshida, T., & Takemi, T. (2021). Spatial characteristics of turbulent organized structures within the roughness sublayer over idealized urban surface with obstacle-height variability. *Environmental Fluid Mechanics*, 21(1), 129–154.
- [18] Takebayashi, H., & Oku, K. (2014). Study on the evaluation method of wind environment in the street canyon for the preparation of urban climate map. *Journal of Heat Island Institute International Vol*, 9, 2.

第 4 章 単体角柱周辺流れにおける歩行者高さ風速の確率性状に関する研究

4.1 諸言

都市空間内歩行者高さにおける気流分布は都市内外の空気交換や都市に居住する人々の安全性や快適性に影響を及ぼす要素の一つである。そのため、都市空間内の風環境を評価することを目的とした研究が数多く行われており、義江(2008)⁽¹⁾らは、実在都市を対象に幾何形状の特徴をある程度維持するような単純化を施した模型を用いた風洞実験を行い、都市空間内の平均風速がグロス建蔽率によって一次関数で表現できる事を示した。また、Razak et al.(2013)⁽²⁾は立方体や直方体が規則的に配置された単純化された建物群周辺気流の Large Eddy simulation (LES) を実施し、建蔽率及び建物形状の平均風速への影響を整理している。これらの既往研究は、都市換気の観点から都市幾何性状と都市内平均風速の關係に着目したものである。ほかに、Ikeda et al(2015)⁽³⁾は単純化された建物配列において周辺気流の LES の結果を基に平均風速の建物の建蔽率や粗度アスペクト比を用いた都市歩行者高さ風速の予測モデルを提案している。これらの研究はいずれも歩行者レベルでの風環境評価において、時間的に平均化された風速に着目しているが、一方で都市歩行者高さにおける非定常、非一様に分布する気流性状を考慮するうえでは、瞬間的に発生する強風や弱風といった稀に発生する現象も評価することが重要である。このような視点に基づいて、Ahmad et al.⁽⁴⁾は実在都市の高域市街地を再現した計算領域における LES を実施し、上空風と歩行者高さの最大平均風速の比（ガストインデックス）が建蔽率の増加に伴って単調減少することを示した。また、Ikegaya et al.⁽⁵⁾はさまざまなアスペクト比で構成される直方体ブロックの規則的配列を対象とした LES を実施し、歩行者高さの水平面内を対象とした風速の確率密度分布を基に、低頻度強風の発生確率の評価を行った。

既往研究では、都市キャノピー空間を対象とした平均風速および瞬時風速を都市幾何形状によって整理することが行われているが、これらの方法は歩行者高さの街区全体を対象とすることで、都市空間の代表的な平均風速および強風を評価するというものである。一方で、歩行者空間において実際に問題となるビル風のような突風現象は、建物との相対的な位置により発生頻度は大きく異なると考えられる。

特に、既報研究⁽⁴⁾⁽⁵⁾による街区全体を対象とした評価は、弱風域と強風域が混在する都市キャノピー内の空間代表値として平均風速や超過風速を算出しているため、建物隅各部などで局所的に発生する強風域での超過風速の発生確率を過小評価している可能性があると言える。

したがって、本節では Okaze et al. (2017)⁽⁶⁾による 1:1:2 単体角柱周りを対象とした LES の結果を再解析することで、建物周囲の複数の地点を対象として歩行者高さにおける速度の確率分布性状の特性について詳細に検討した。加えて、建物から相対的に離れた各測定ポイントにおける低頻度発生強風と平均風速の關係性を考察した。

4.2 1:1:2 単体角柱周辺気流場における LES の解析条件

本節では、Okaze et al. (2017)⁽⁶⁾ により行われたアスペクト比 1:1:2 の単体角柱周りの流れを対象とした LES の時系列データについて、計算条件および対象を概説する。

本節の数値計算流体の手法である LES の概要については、3.2 節を参照されたい。

なお、本節の Okaze et al (2017)⁽⁶⁾ による LES の支配方程式系は式(3-18), (3-19)で表現されるフィルタリングされた連続の式, Navier-Stokes 式を基礎式としている。

数値計算にはオープンソース CFD 解析ソフトウェアである OpenFOAM を用いている。また、乱流モデルとして、標準 Smagorinsky model (Smagorinsky 定数 $C_s = 0.12$)、連続式と Navier-Stokes 式のカップリングには PISO 法⁽⁷⁾を適用している。また、拡散項には二次精度線形補間を、移流項には、局所的に数値振動が発生した場合に最大 40%までの数値粘性を一次風上補間により混合する filteredLinver2V スキーム⁽⁸⁾を適用している。時間発展項には二次精度の後退差分スキームを用い、数値計算における時間刻み Δt はクーラン数が 0.5 以下になるように、 10^{-4} s と設定されている。

4.3 解析対象モデル

図 4-1 に計算領域の模式図を示す。主流方向、スパン方向、鉛直方向をそれぞれ x , y , z 対応する各方向の風速を u , v , w と定義する。模型高さを $h = 0.2$ m とし、解析領域の主流方向長さを $12.5h$, スパン方向長さを $6.0h$, 鉛直方向長さを $5.0h$ としている。計算領域は東京工芸大学により公開されている 1:1:2 単体角柱周りの気流場の検証用実験を基に設定されており⁽⁹⁾, 風上にバリア, スパイヤー, およびラフネスを設置した風洞のテストセクションのみを再現している。計算領域流入面の境界条件には、スパイヤーやラフネスを含む風洞を再現した LES により得られた流入変動風を与えている。模型壁面及び床面, 計算領域の上面と側面には Spalding 則を適用した壁境界条件, 流出面には、対流境界条件を適用している。対流境界条件の定義は式(4-1)に示すとおりであり、流出断面に対して垂直な速度成分の移流及び時間発展が存在しないことを意味している。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + U_c \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4-1)$$

ここで、 U_c は流出断面に垂直な対流速度を表している。

解像度は $h/40$ とし、建物および風洞壁面からの距離に応じて格子幅を 1.08 倍まで拡張している。また、本研究の各種解析条件を表 4-1 にまとめる。本研究では、測定高さ $z = 0.0625h$ の模型周辺の測定点（図 4-2）における時系列データを用いて、各点の確率密度分布および超過風速を算出し、各速度成分の確率性状の分析と、超過風速と平均および分散との関係について考察する。

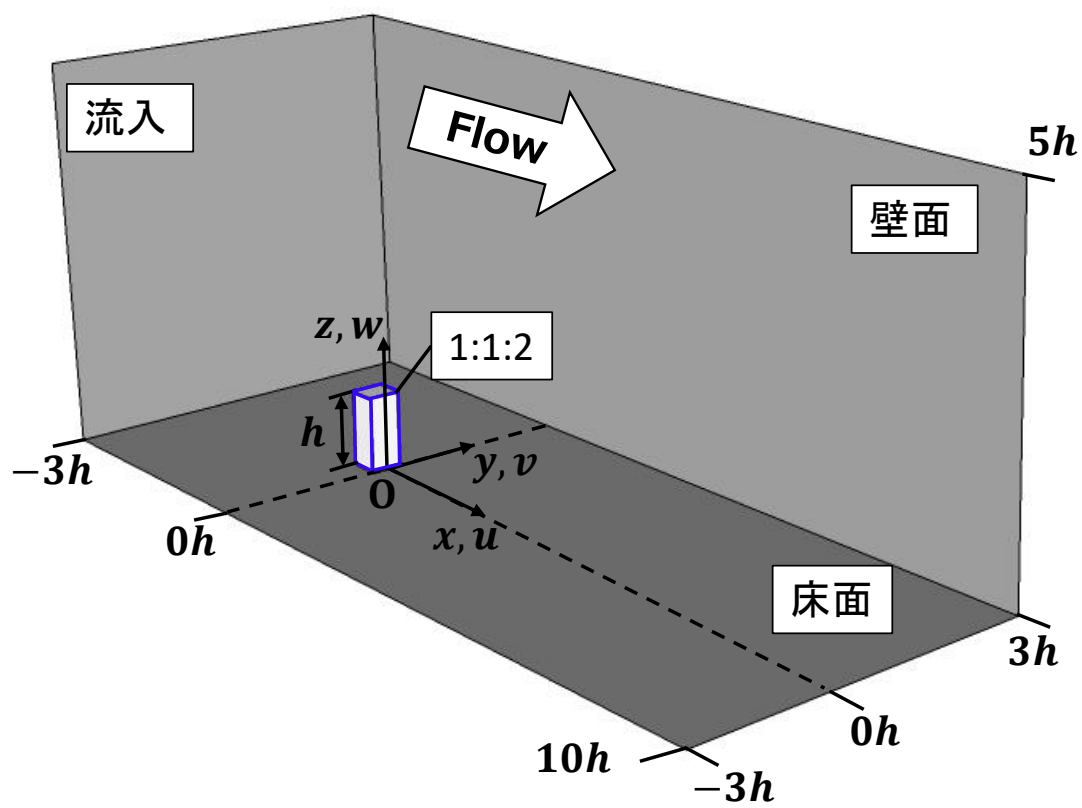


図 4-1 解析領域

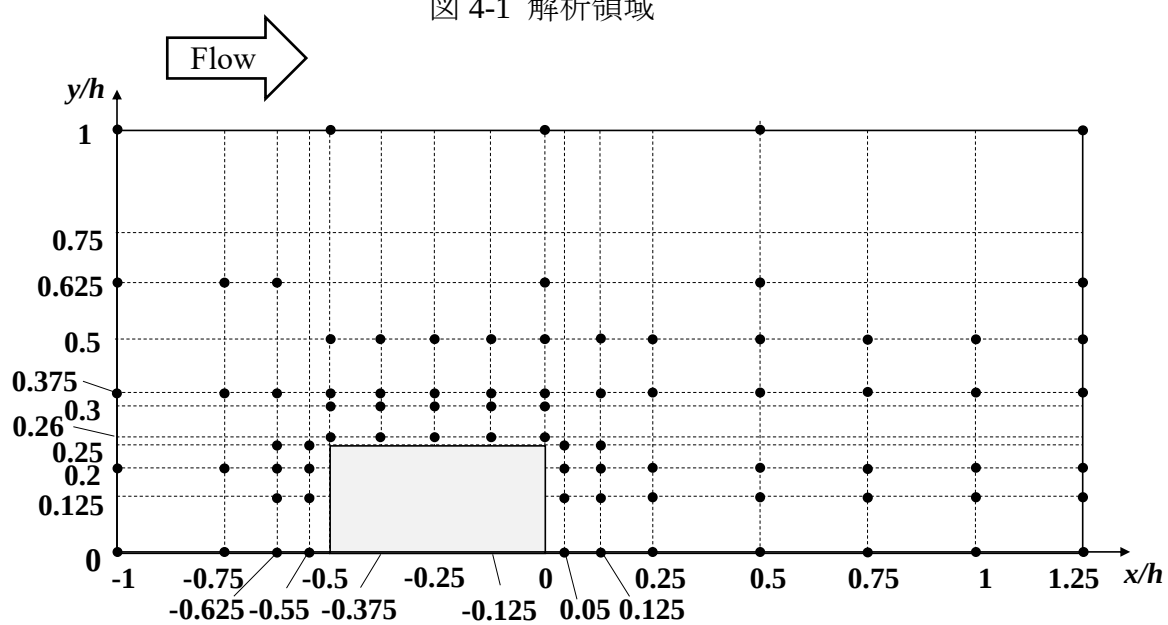


図 4-2 測定点 (水平断面 $z = 0.0625h$)

支配方程式	連続の式 Navier-Stokes 式
乱流モデル	標準 Smagorinsky モデル ($C_s = 0.12$)
時間発展項	2 次精度後退差分
移流項	2 次精度線形補間 + 1 次精度風上補間 (filtered Linear 2V, OpenFoam))
拡散項	2 次精度線形補間
解像度	$h/40$ ($h = 0.2\text{m}$) ※最大拡大幅 8%でメッシュを拡大
時間発展	$1.0 \times 10^{-4} \text{ s}$

表 4-1 解析条件

4.4 1:1:2 単体角柱周辺気流場における LES の基礎的検討

本節では、Okaze et al. (2017)⁽⁶⁾による 1:1:2 単体角柱流れの LES について、解析対象時間や再現性の検討を行う。

4.4.1 使用するデータの決定

はじめに 1:1:2 単体角柱周りの LES について、その解析対象時間及び、助走時間の検討を行う。助走時間について、本数値解析が東京工芸大学の風洞を模擬しており、小野ら (2016)⁽⁹⁾によって別途スパイヤーやラフネスを含む風洞全体を再現した数値計算によって得られた流入変動風を流入部の境界条件として与えているため、十分に発達した流入風が導入されている。したがって流入部より流入した気流が、流出部に到達するまでの時間 30s を助走時間とし、助走時間の後、60s 間を解析対象時間として解析を行った。

4.4.2 鉛直、水平断面の速度分布による風洞実験結果との比較

Okaze et al. (2017)⁽⁶⁾による 1:1:2 単体角柱周辺気流の LES は東京工芸大学の風洞を再現しており、検証用の風洞実験データ⁽⁹⁾が取得されている。そのため、本節では、LES による結果と検証用風洞実験データ⁽⁹⁾による結果を比較する事で、風洞実験結果の再現性について考察する。

図 4-3 に Okaze et al (2017)⁽⁶⁾によって取得された主流方向風速、スパン方向風速、鉛直方向風速の解析対象高さ $z/h = 0.0625$ における水平断面内分布を示す。図 4-4 は単体角柱周辺のスパン方向 $-1.0 \leq y/h \leq 1.0$ 、主流方向 $-1.0 \leq y/h \leq 2.0$ の範囲を出力しており、これを基に風洞実験結果との整合性に関する定性的な評価を行う。尚、各成分風速は建物高さ $z/h = 1$ における流入部の時間空間平均風速 U_{ref} によって無次元化されており、 U_{ref} を本章における参照風速とする。また、図中の流線は水平断面内の流れの様子

を表している。

始めに、図 4-3(a), (b)の主流方向風速の速度分布に注目すると、模型前方領域において、模型に衝突した気流によって弱風域が形成している。また、模型側面においては、模型に衝突した気流によって縮流が発生しているため、模型前面、背面に比べて参照風速程度の強風が発生している領域が大きくなっている。これらの傾向は風洞実験結果、数値計算結果ともに見られることから、風洞実験結果をよく再現できていると言える。また、模型背面においては実験値、数値計算による結果ともに逆流域が生じており、その範囲、大きさについても類似している。図 4-3(c), (d)のスパン方向風速の速度分布についても、模型によって分断された気流の流速は風洞実験による結果に比べて過少になるものの、その性状は類似しており、風洞実験、数値計算共に模型によって気流が分断される様子がよく再現されている。図 4-3(e), (f)の鉛直方向風速の速度分布についても、模型前方で模型に衝突した気流による吹き下ろしが発生しており、風洞実験結果をよく再現していることが確認できる。続いて、Okaze et al (2017)⁽⁶⁾ によって取得された $y/h = 0$ の解析対象断面における各成分風速の鉛直断面内分布を図 4-4 を示す。図中の縦軸は鉛直方向 (z/h)、横軸は主流方向 (x/h) を表している。また、図 4-4(a), (c), (e) の風洞実験結果について、風洞実験で取得しなかった部分の床面付近及び $z/h \geq 1.5$ の領域は白抜きになっている。図 4-4(a), (b)に注目すると、主流方向風速の速度分布についてはキャノピー内外共に風洞実験による結果とよく一致している。また、模型前方には模型に衝突した気流による弱風域が、模型上端には縮流による強風域が生じている。また、模型後流には逆流域が生じている。図 4-4(c), (d)のスパン方向風速の速度分布については、鉛直断面内において、風洞実験、LES による数値計算ともに 0 の値となっている。これは、解析対象断面が $y/h = 0$ の模型のスパン方向中心であるためであるためと考えられる。また、図 4-4(e), (f)の鉛直方向風速の速度分布に注目すると、模型後流において下降流が生じており、キャノピー外からキャノピー内に空気導入が起きていることが確認できる。このことから、模型後流では、キャノピー内に上空からの空気導入が起きることによって、図 4-4(a), (b)の主流方向風速の速度分布で確認されたような逆流域が生じ、キャノピー内において空気循環が行われているのではないかと推測する。以上より、風洞実験結果と LES による数値計算結果による比較を行い、LES によって、風洞実験結果をよく再現できていることを定性的に確認した。

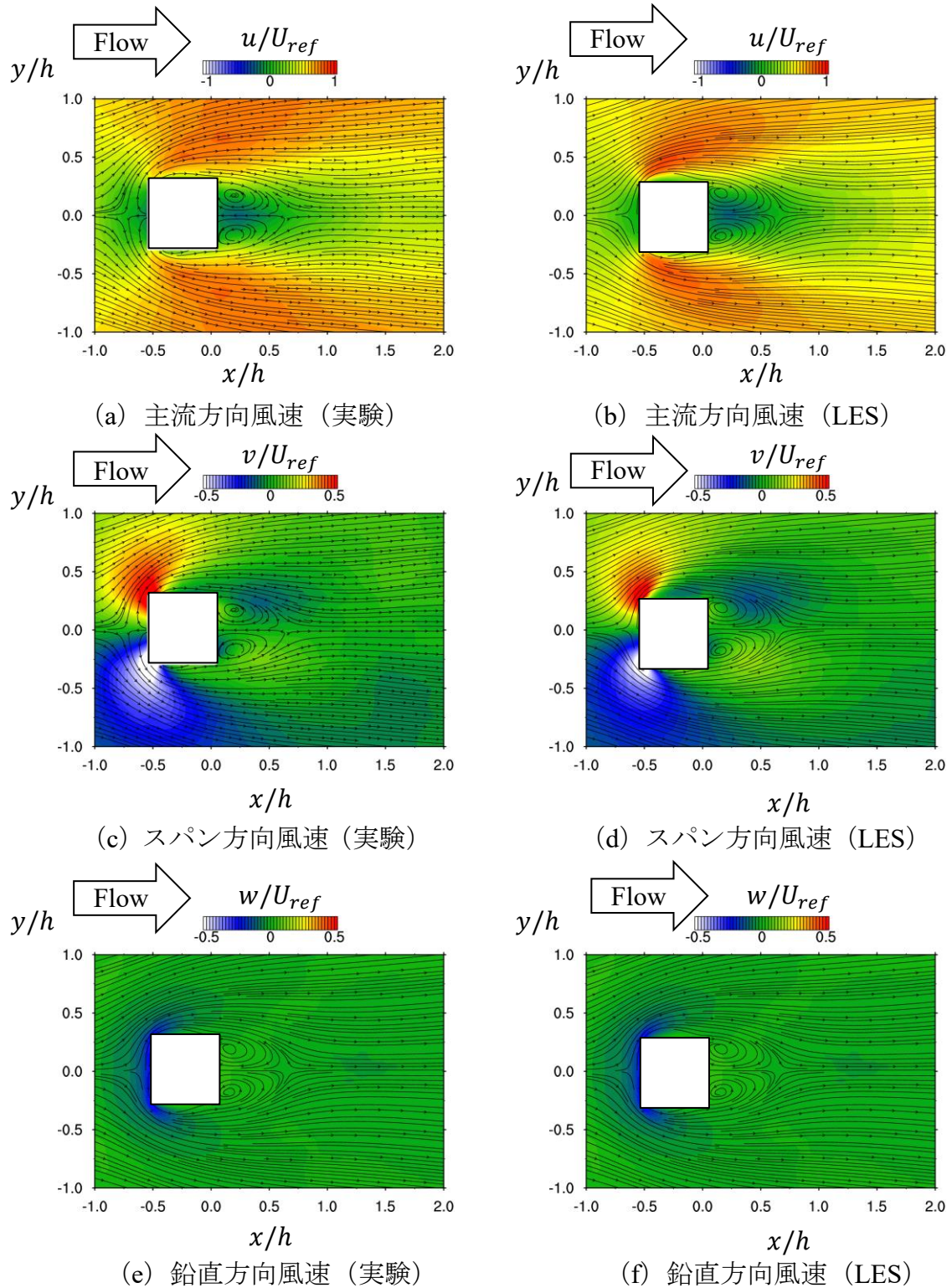


図 4-3 $z/h = 0.0625$ の水平断面内における各成分風速の流線図による実験値 (a), (c), (e) と数値計算 (b), (d), (f) の比較. 風洞実験は, 東京工芸大学 Database of Indoor/Outdoor Air Pollution データベースより引用⁽⁹⁾. 数値解析結果は Okaze et al. (2017)⁽⁶⁾ により解析された結果を比較用に再描画したもの.

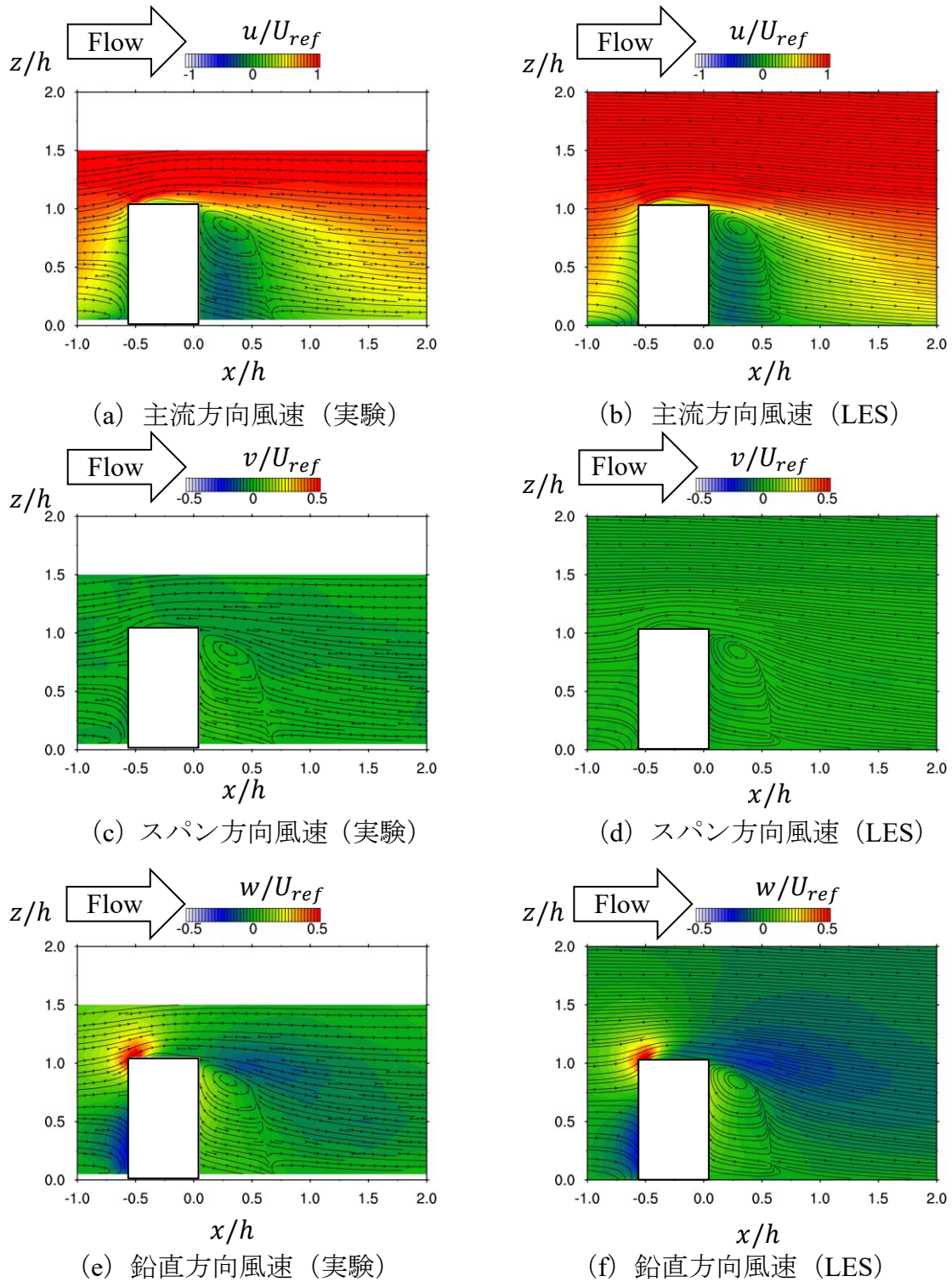
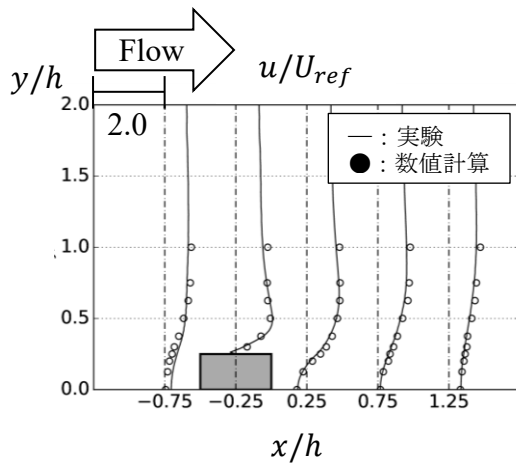


図 4-4 $y/h = 0$ の水平断面内における各成分風速の流線図による実験値 (a), (c), (e) と数値計算 (b), (d), (f) の比較. 風洞実験は, 東京工芸大学 Database of Indoor/Outdoor Air Pollution データベースより引用⁽⁹⁾. 数値解析結果は Okaze et al. (2017)⁽⁶⁾ により解析された結果を比較用に再描画したもの.

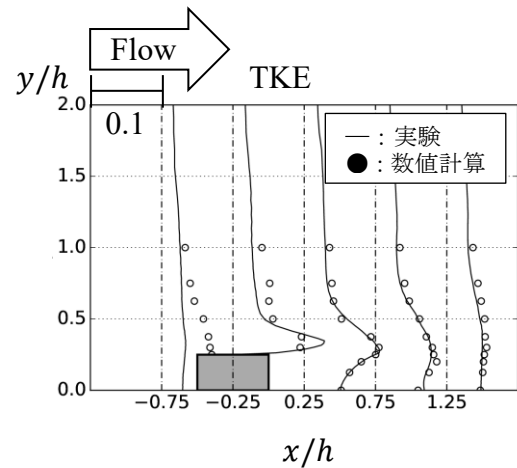
4.4.3 鉛直，水平断面の速度，乱流エネルギープロファイル

前節では，Okaze et al.(2017)⁽⁶⁾による 1:1:2 単体角柱周辺気流を対象とした LES による数値計算結果について，鉛直，水平断面における速度分布の結果を検証用風洞実験結果⁽³⁾と比較することで，使用するデータの再現性を定性的に検討した．しかしながら，前節で行ったのは定性的な検討であり，風洞実験結果の再現性をより詳細に把握するためには，定量的な検討が必要である．そこで，本節では，各成分風速及び乱流エネルギー（TKE：Turbulent Kinetic Energy）の鉛直，水平プロファイル結果に注目することで，定量的な風洞実験結果の再現性について考察する．

図 4-5，図 4-6 に Okaze et al. (2017)⁽⁶⁾によって取得された主流方向風速及び乱流エネルギーの鉛直，水平プロファイルの結果をそれぞれ示す．図中の実線は実験結果を表しており，図中のプロットは LES による数値計算結果を表している．はじめに，図 4-5 の水平断面の結果に注目すると，主流方向風速の結果については数値計算による結果が数値計算によるものと良く整合している事が確認できる．また，乱流エネルギーの結果については，模型前方において数値計算結果が風洞実験結果に比べて大きくなる傾向にあるが，模型側方及び後方については実験結果と整合している．また，図 4-6 の鉛直プロファイルについては，主流方向風速は図 4-5 と同様に実験結果と良く整合した結果になっている．また，乱流エネルギーの鉛直プロファイルについても，風洞実験の結果と良く整合している．このことから，主流方向風速の水平，鉛直プロファイルは風洞実験結果と良く整合していることが確認された．同様に，乱流エネルギーについても，模型前方や，模型近傍において，風洞実験結果から乖離した分布も見られたが，概ね風洞実験結果と一致している．以上に結果を基に，風洞実験結果と数値計算結果を比較し，主流方向風速については風洞実験結果と良く一致していると考えて，解析を行った．また，乱流エネルギーのような高次の統計量については，測定点によっては風洞実験結果からの乖離が見られるものの，主流方向風速結果のような低次の統計量が風洞実験結果と整合している事を踏まえ，高次の統計量結果が及ぼす影響は小さいと考え，解析を行った．

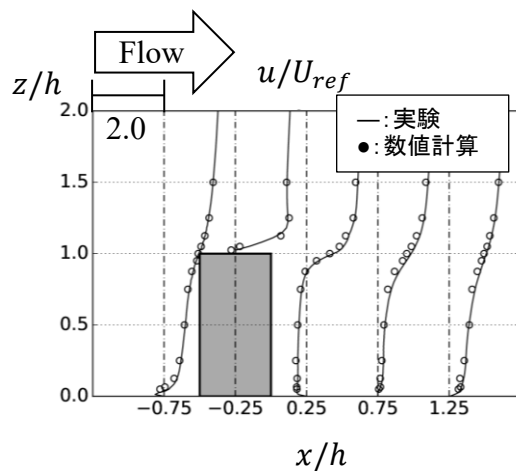


(a) 主流方向風速

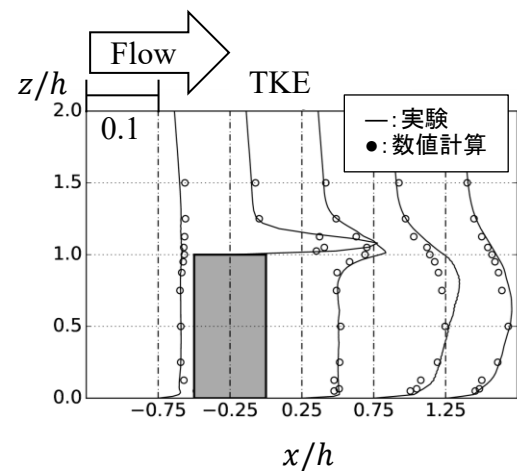


(b) 乱流エネルギー

図 4-5 $z/h = 0.0625$ における(a)主流方向風速と(b)乱流エネルギーの水平断面における実験値と数値計算の比較．風洞実験は，東京工芸大学 Database of Indoor/Outdoor Air Pollution データベースより引用⁽⁹⁾．数値解析結果は Okaze et al. (2017)⁽⁶⁾ により解析された結果を比較用に再描画したもの．



(a) 主流方向風速



(b) 乱流エネルギー

図 4-6 $y/h = 0$ における(a)主流方向風速と(b)乱流エネルギーの鉛直プロファイルによる実験値と数値計算の比較．風洞実験は，東京工芸大学 Database of Indoor/Outdoor Air Pollution データベースより引用⁽⁹⁾．数値解析結果は Okaze et al. (2017)⁽⁶⁾ により解析された結果を比較用に再描画したもの．

4.5 風速確率密度分布

本節では，図 4-2 に示した測定高さ $z = 0.0625h$ における 1:1:2 単体角柱周辺の複数の測定点について，各成分風速，スカラー風速の確率密度分布を作成し，建物の存在が建物周辺の局所的な気流性状に与える影響について考察した．

4.5.1 各成分風速の確率密度分布

図 4-7 に測定高さ $z = 0.0625h$ の水平断面内における時間平均された主流方向風速分布と角柱周辺の測定点を示す．測定高さ $z = 0.0625h$ の測定点全てに対して，各成分風速 u , v , w の確率密度分布を作成した．図 4-8 に $x = -0.75h$ (角柱前方)， $x = -0.55h$ (角柱前面付近)， $x = -0.5h$ (角柱側方前方)， $x = -0.25h$ (角柱側方中央)， $x = 0h$ (角柱側方後方)， $x = 0.05h$ (角柱後面付近)， $x = 0.25h$ (角柱後方) $x = 0.75h$ (角柱最後方) における各成分風速 u , v , w の確率密度分布を示す．

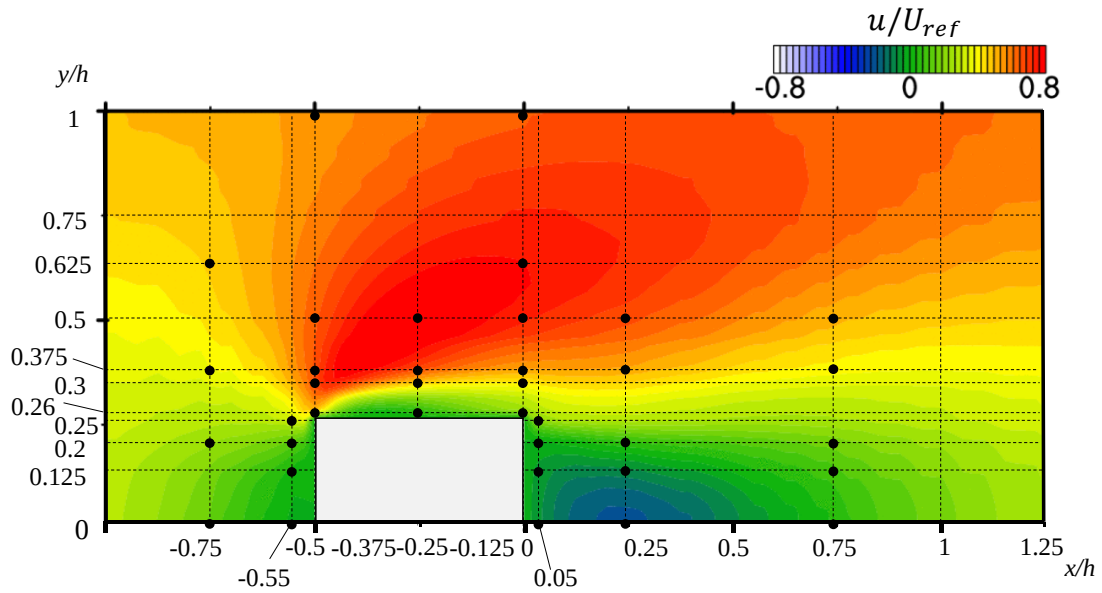
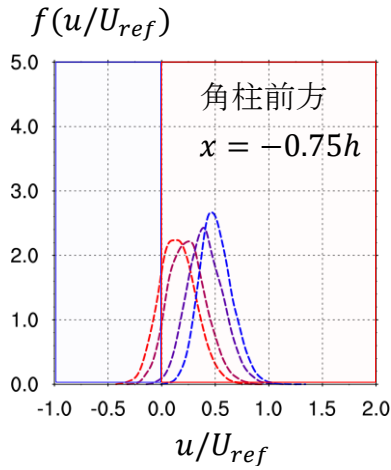
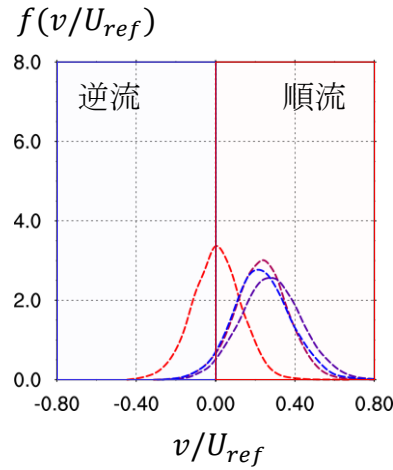


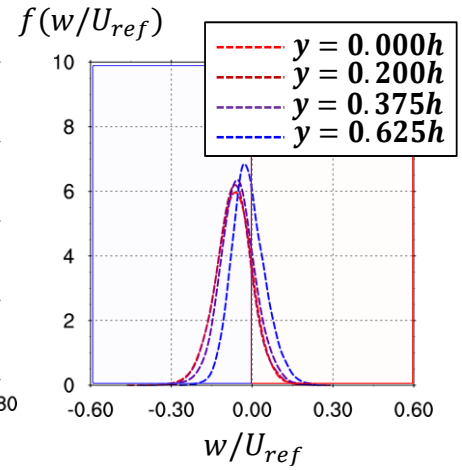
図 4-7 歩行者高さ $z = 0.0625h$ の水平面内における主流方向時間平均風速と角柱周辺の測定点



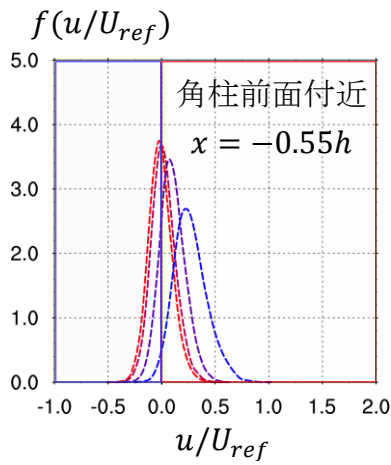
(a) 主流方向風速



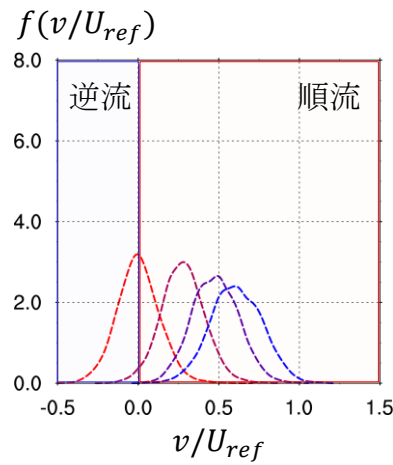
(b) スパン方向風速



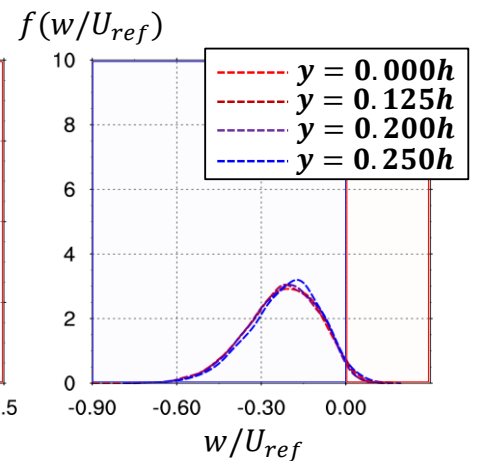
(c) 鉛直方向風速



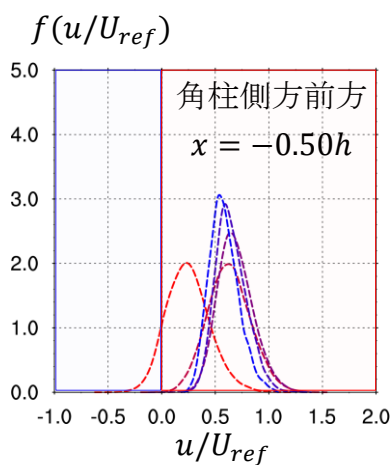
(d) 主流方向風速



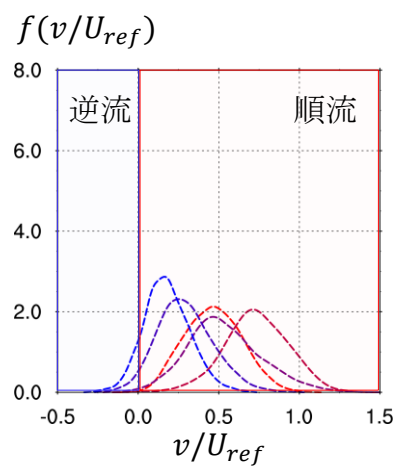
(e) スパン方向風速



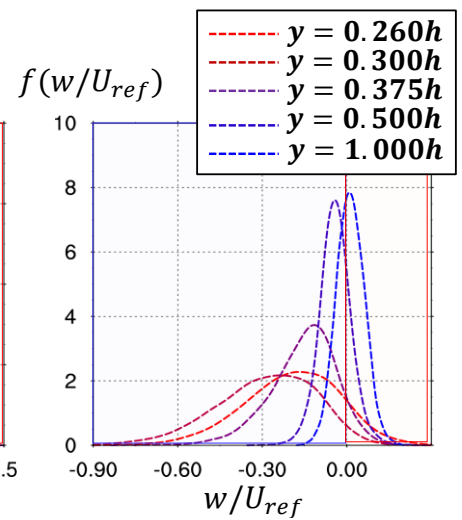
(f) 鉛直方向風速



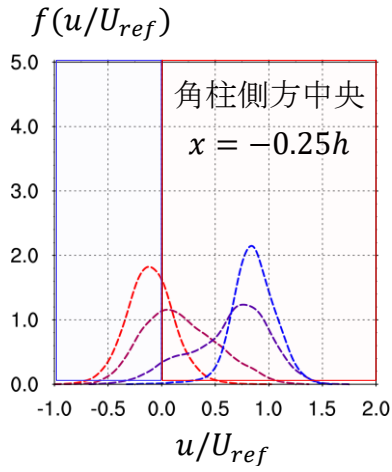
(g) 主流方向風速



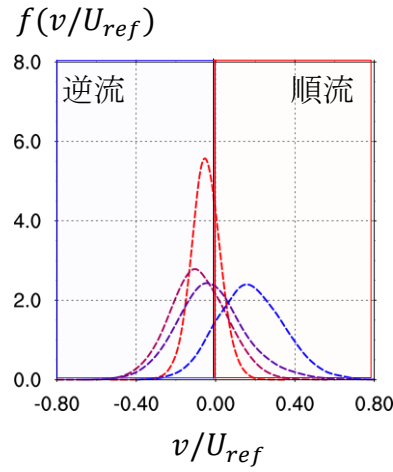
(h) スパン方向風速



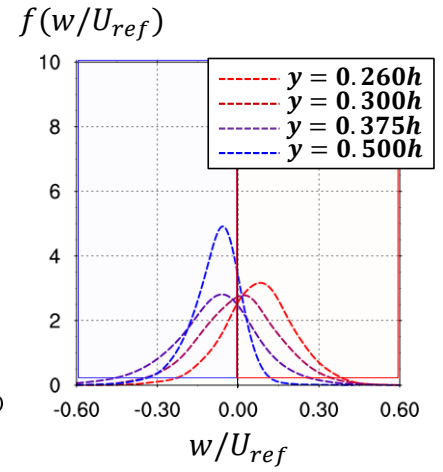
(i) 鉛直方向風速



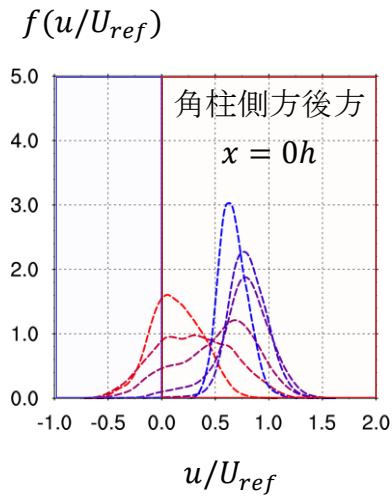
(j) 主流方向風速



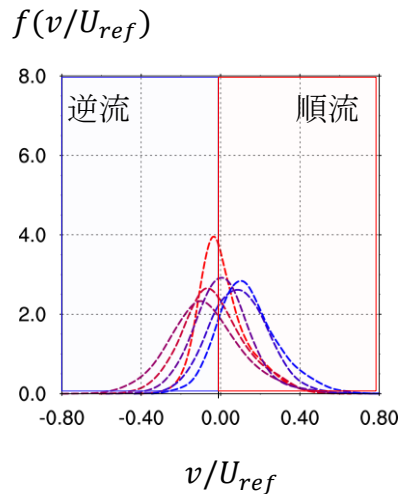
(k) スパン方向風速



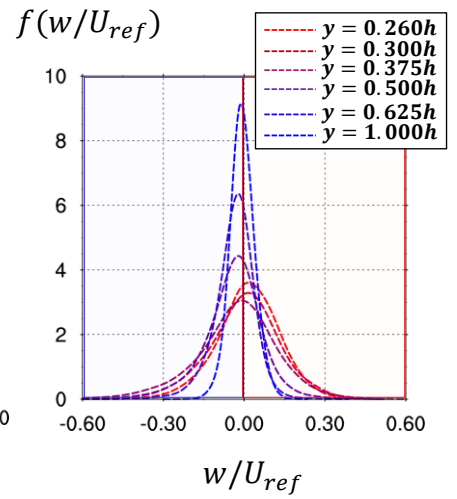
(l) 鉛直方向風速



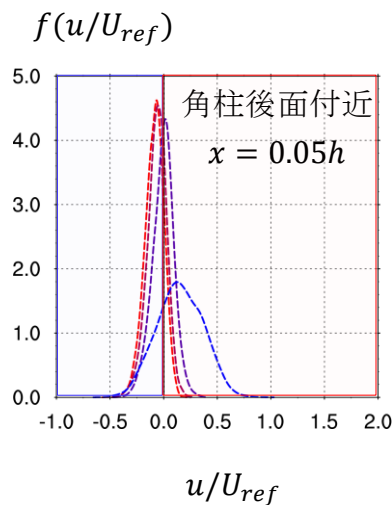
(m) 主流方向風速



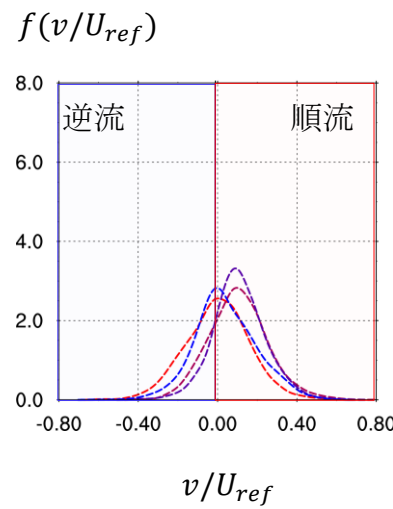
(n) スパン方向風速



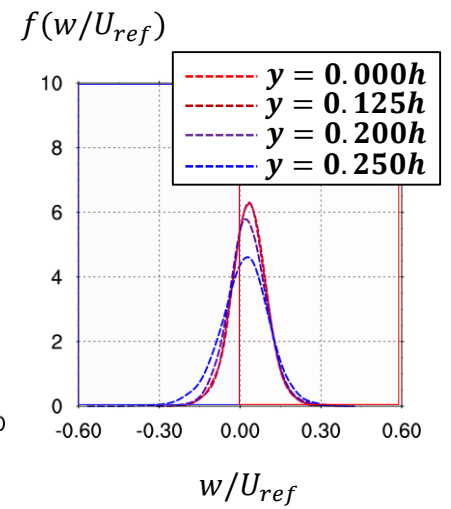
(o) 鉛直方向風速



(p) 主流方向風速



(q) スパン方向風速



(r) 鉛直方向風速

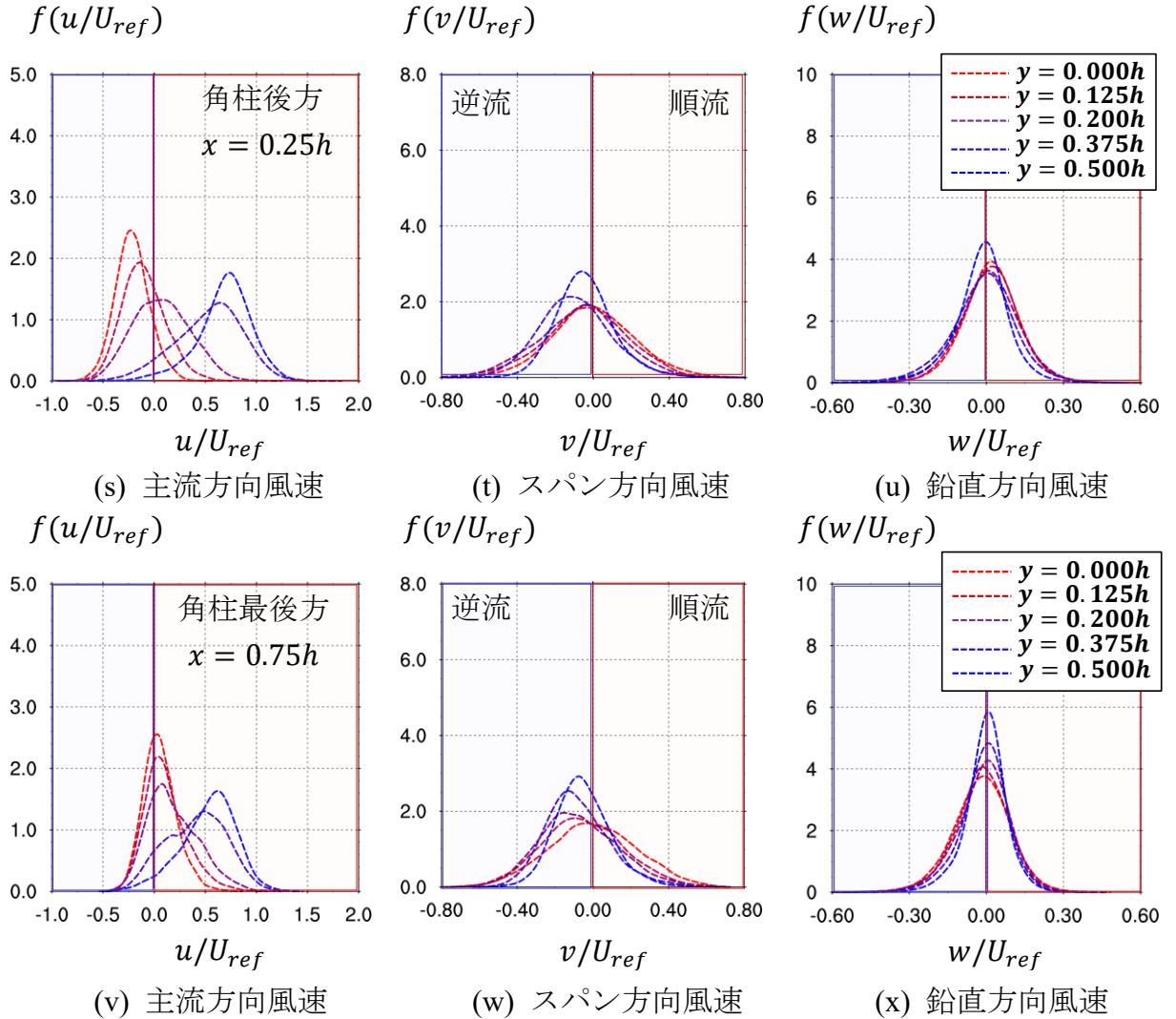


図 4-8 歩行者高さ $z = 0.0625h$ の角柱周辺の複数の測定点における各成分風速の確率密度分布. (a)-(c) : $x = -0.75h$ (角柱前方), (d)-(f) : $x = -0.55h$ (角柱前面付近), (g)-(i) : $x = -0.5h$ (角柱側方前方), (j)-(l) : $x = -0.25h$ (角柱側方中央), (m)-(o) : $x = 0h$ (角柱側方後方), (p)-(r) : $x = 0.05h$ (角柱後面付近), (s)-(u) : $x = 0.25h$ (角柱後方), (v)-(x) : $x = 0.75h$ (角柱最後方)

図 4-8 の各測定点における確率密度分布は図 4-7 の主流方向時間平均風速の速度分布図をもとに、単体角柱周辺の特徴的な気流性状を有する測定点の結果を示している。図は同じ主流方向座標におけるスパン方向の座標ごとに分けられている。また、図中の点線の色はスパン方向模型中央に最も近い測定点を赤色で、最も遠い測定点の結果を青色で表現している。確率密度の横軸は、計算領域流入面の模型高さにおける時間平均風速を参照風速 U_{ref} として無次元化している。

はじめに、角柱前方 ($x = -0.75h$) の各成分風速の確率密度分布に注目する。主流方向風速の確率密度分布について注目すると、平均値の値は測定点ごとに異なるものの、その分布性状については類似していることがわかる。スパン方向風速、鉛直方向風速に

についても同様の傾向が見られる。

続いて、角柱前面付近 ($x = -0.55h$) の主流方向風速の確率密度分布に注目すると、角柱前方 ($x = -0.75h$) と同様にその分布性状は類似しているが、角柱前方と比べ平均風速は及び速度分布の裾野の広がり小さくなった分布になっていることが確認できる。特に角柱中央付近の測定点では平均風速が 0 に近い値となっており、これは建物壁面付近で平均風速が低減されることと整合している。一方で、建物の隅角部 $y = 0.25h$ では平均風速の値が 0 より大きな値をとっており、速度分布の裾野が広がった分布となっており瞬間的には参照風速程度の強風が発生していることが確認される。スパン方向風速の確率密度分布についても同様に、建物の隅角部に近づくにつれて平均風速は増加し速度分布の裾野が参照風速程度の強風域まで伸びている。図 4-7 に示した主流方向時間平均風速の値も建物隅角部周辺では大きくなっており、このことから建物隅角部周辺では平均風速が増加するだけでなく、瞬間的な強風の大きさ及び発生確率も増加していることが確認された。また、鉛直方向風速の確率密度分布は平均値が負の値かつ下降流の方向に大きく歪んだ分布になっており、下降流が発生し、かつ瞬間的に大きな下降流が流入している。図 4-4(f) に示した様に、角柱前方の領域には角柱に衝突した気流によって下降流が生じているからであると考えられる。一方で、鉛直方向風速の確率密度分布は負の値だけでなく正の値を有している。このことは角柱前面付近 ($x = -0.55h$) の平均的に下降流が形成される領域においても瞬間的には上昇流も発生していることを意味する。また、興味深いことに主流方向風速、スパン方向風速は建物隅角部において平均風速、強風の発生確率が上昇するのに対して、鉛直方向風速の角柱前面付近 ($x = -0.55h$) 確率密度分布は角柱中央においても角柱隅角部付近においてもほぼ同じ平均風速及び分布性状を有している。このことから、角柱に衝突した気流によって角柱前面の広い範囲に平均的、瞬間的に一様な速度分布が生じているのではないかと推測される。

次に、図 4-8(g)-(i) に示した角柱側方前方 ($x = -0.5h$) の確率密度分布においては、角柱によって分断された気流によって生じた強風域によって主流方向風速、スパン方向風速ともに平均風速が大きな分布性状となっている。特にスパン方向風速の確率密度分布について、角柱近傍の測定点 ($y = 0.26h$) では角柱前面に衝突することで分断された気流が建物隅角部で縮流の影響で加速するため平均風速が大きくなっている一方で、模型から離れるにつれて ($y = 0.5h$)、模型による影響が小さくなるため平均風速が減少している。また、鉛直方向風速の確率密度分布についても模型周辺では下降流が支配的となるような速度分布になっており、瞬間的に大きな下降流が生じているが、模型から離れた測定点 ($y = 0.5h$) では平均風速が 0 の値の左右対称な確率密度分布になっており、模型による影響が小さくなったためであると考えられる。

図 4-8(j)-(l) に示した角柱側方中央 ($x = -0.25h$) と図 4-8(m)-(o) の角柱側方後方 ($x = 0h$) の結果に注目する。図 4-7 より、角柱側方中央及び角柱側方後方の壁面近傍では逆流領域が形成されており、実際に図 4-8(j), (m) の主流方向風速の確率密度分布を見ると、壁面近傍 ($y = 0.26h$) においては逆流方向の流れが支配的になるような分布性状になっている。図 4-8(k), (n) に示したスパン方向風速の確率密度分布も同様に、壁面近傍に置

いては逆流方向の流れが支配的になっており模型に向かって吹き込むような流れが平均的にだけでなく瞬間的にも支配的になっていることが確認できる．一方で，壁面近傍の平均的には逆流渦が観測されるような測定点 ($y = 0.26h$) においても，主流方向風速及びスパン方向風速の確率密度分布は正の分布も有している．このことは，模型近傍においては，瞬間的には模型に向かって吹き込むような逆流渦だけでなく，模型から噴出するような流れについても同様に発生していることを示している．また，図 4-8(j), (m) の主流方向風速の確率密度分布について ($y = 0.3h, 0.375h$) の測定点における確率密度分布が低風速側と参照風速程度の強風側に 2 つのピークを持つ二峰性を有するような確率密度分布になっている．これは，図 4-7 より，角柱側方中央 ($x = -0.25h$) 及び角柱側方後方 ($x = 0h$) の ($y = 0.3h, 0.375h$) の測定点は，模型側面の壁面近傍に形成される逆流渦の領域と模型前面に衝突し，流れが分断された事によって形成される強風域の境界上に存在することに起因すると推測される．すなわち，($y = 0.3h, 0.375h$) のような弱風域と強風域の境界線上では，瞬間的には模型壁面の逆流渦が大きくなることで，低風速が支配的な気流分布になる一方で，逆流渦が小さくなることで強風が支配的な気流性状になっている．これによって ($y = 0.3h, 0.375h$) の測定点における確率密度分布が低風速側と参照風速程度の強風側に 2 つのピークを持つ二峰性を有するような確率密度分布になっているのであると考えられる．このことは風環境評価の観点では模型側面の模型によって平均風速が減少している領域においても，瞬間的には弱風域と強風域が混在しており，歩行者空間の風環境評価を考える上で平均風速のみならず瞬間的な気流の分布性状を考慮することの重要性を示唆していると言える．

続いて，図 4-8(p)-(r) に示した角柱後面付近 ($x = 0.05h$) の確率密度分布に注目する．図 4-8(p) に示した角柱後方付近の主流方向風速の確率密度分布について，模型後面の中央付近 ($y = 0h, 0.125h, 0.2h$) では平均風速が 0 に近い値を有し，なお確率密度分布の裾野が非常に狭い確率密度分布になっている．このことは模型背面付近においては平均的に 0 となる速度分布となっているだけでなく，瞬間的にも，0 に近い風速を有していることが確認できる．

最後に，図 4-8(s)-(u) に示した角柱後方 ($x = 0.25h$) 及び図 4-8(v)-(x) に示した角柱最後方 ($x = 0.75h$) の各成分風速の確率密度分布を示す．図 4-8(s), (v) に示した主流方向風速について，模型風下となる ($y = 0h, 0.125h, 0.2h$) では，模型風下の後流域で引き起こされる逆流により，確率密度分布のピークが負の値をとる分布になっている．一方，模型後方領域から離れた測定点 ($y = 0.375h, 0.5h$) では，確率密度分布のピークが正の値をとる分布になっていることから，順流方向の風速が支配的になっている．このことは，模型からスパン方向に離れるにつれて，その影響が小さくなることを意味している．また，速度分布の裾野に注目すると，順流方向強風側にひずんだ分布になっている測定点 ($y = 0h, 0.125h, 0.2h$) と，逆流方向にひずんだ分布とに分別することができる．前者では速度分布の裾野が参照風速と同じ程度の値を示す場合があり，模型後方であっても稀に模型接近流程度の強風が発生していると考えられる．一方で，模型から十分離れた点では，速度分布の強風側への歪みは小さくなっており，稀に発生する強

風現象が、模型が存在することによって引き起こされていると推測できる。図 4-8(t), (w)のスパン方向風速の確率密度分布に注目すると、模型後流域 ($y = 0h, 0.125h, 0.2h$) では速度分布が速度ゼロを中心に左右対称な分布を有している。一方で、模型から離れた点 ($y = 0.375h, 0.5h$) になるにつれて、速度分布が徐々に正に歪んだ分布となっていくことが確認できる。速度分布の裾野に注目すると、模型から十分に離れた点 ($y = 0.5h$) では速度分布の広がりが小さくなっているのに対して、模型後流 ($y = 0h, 0.125h, 0.2h$) では、速度分布の広がりが大きくなっている。以上のことは、模型から離れた点に比べて、模型近傍では瞬間的な強風が発生する頻度が増加すること、強風の発生頻度の増加が模型に起因することを示唆している。続いて、図 4-8(u), (x) の鉛直方向風速の確率密度分布について、いずれの測定点においても速度分布が負の値にひずんだ分布になっており、いずれの測定点においても稀に大きな下降流が生じている。また、図 4-8(s), (v) の模型後流 ($y = 0h, 0.125h, 0.2h$) での大きな主流方向風速が稀に発生する現象とあわせて考えると、模型背面及び側面近傍において、上空の高速流が下降流によって床面近傍の測定高さ $z = 0.0625H$ まで導入されていることが示唆される。

4.5.2 スカラー風速の確率密度分布

前節では測定高さ $z = 0.0625h$ に示した 1:1:2 単体角柱周辺の複数の測定点について、各成分風速の確率密度分布を作成し、角柱周辺の局所的な速度分布について考察した。一方で、都市キャノピー下層における都市換気の評価においては、キャノピー内風速が極めて三次元的になることから、スカラー風速を用いることが適切であると考えられる。そこで、図 4-9 に図 4-8 に示したのと同じ測定点におけるスカラー風速 v_a の確率密度分布を示す。スカラー風速の確率密度分布の分布性状については、既往研究 (Ikegaya et al.(2017))⁽⁵⁾による様々な建蔽率条件における単純粗度群を対象とした LES によって、歩行者高さ全体を対象としたスカラー風速の確率密度分布は強風側に大きく歪んだ Weibul 分布のような速度分布になることが示されている。一方、図 4-9 に示した各測定点の確率密度分布に注目すると、模型前方付近ではいずれの測定点においても概ね Weibul 分布に近い分布になっているが、角柱側方付近では角柱から離れた測定点に置いてピーク値を軸に左右対称となるような確率密度分布になっていることが確認できる。これは歩行者高さ全体においてはスカラー風速の確率密度分布が Weibul 分布に近い分布になる場合であっても、局所的には異なる分布性状を示すことが明らかになった。また、図 4-9(a), (b)に示した角柱前方 ($x = -0.75h$) 及び角柱全面付近においては、模型中心から遠ざかるにつれてスカラー風速の確率密度分布のピークが強風側へと移っていく様子が確認できる。これは図 4-8(a)-(c), (d)-(f)に示すように、スパン方向風速が模型中心から離れた測定点になるにつれてピーク値が強風側へと移り変わるからであると考えられる。一方で、図 4-9(c), (d), (e)に示すように、角柱側方では模型に近い測定点において速度分布のピークが模型から離れた測定点に比べて弱風側に移っている。これは、模型側面付近では逆流渦の形成によって弱風域が形成しているためであると推測する。また、模型側面近傍の測定点において、速度分布の裾野は、模型から離れた測定

点に比べて広がっており、模型の存在によって、模型側面の近傍の瞬間的な強風の発生確率が上昇していることを示唆している。また、図 4-9(f), (g), (h)に示した模型後方で測定点では、模型中央付近の測定点では逆流域が形成されているため、平均風速が小さい確率密度分布になっている。一方で、模型近傍における速度分布の裾野は強風側へと広がった分布性状になっており、模型近傍においても稀に参照風速程度の強風が発生していることが確認できる。また、模型中心から離れるにつれて平均風速が増加しており、図 4-8(p)-(r), (s)-(u), (v)-(x)の各成分風速において主流方向風速の平均風速が模型中心から遠ざかるにつれて増加していることから、主流方向風速による寄与が大きいことが示された。また、図 4-9(a), (b)ではスパン方向風速の寄与が大きかったことを踏まえ、歩行者高さ水平面内では各測定点でスカラー風速に対する寄与が異なること、及び主流方向風速だけでなく、スパン方向風速、鉛直方向風速も測定点ごとのスカラー風速の確率密度分布に寄与しており、三次元的な気流性状が局所的な測定点において形成されていることが確認できる。

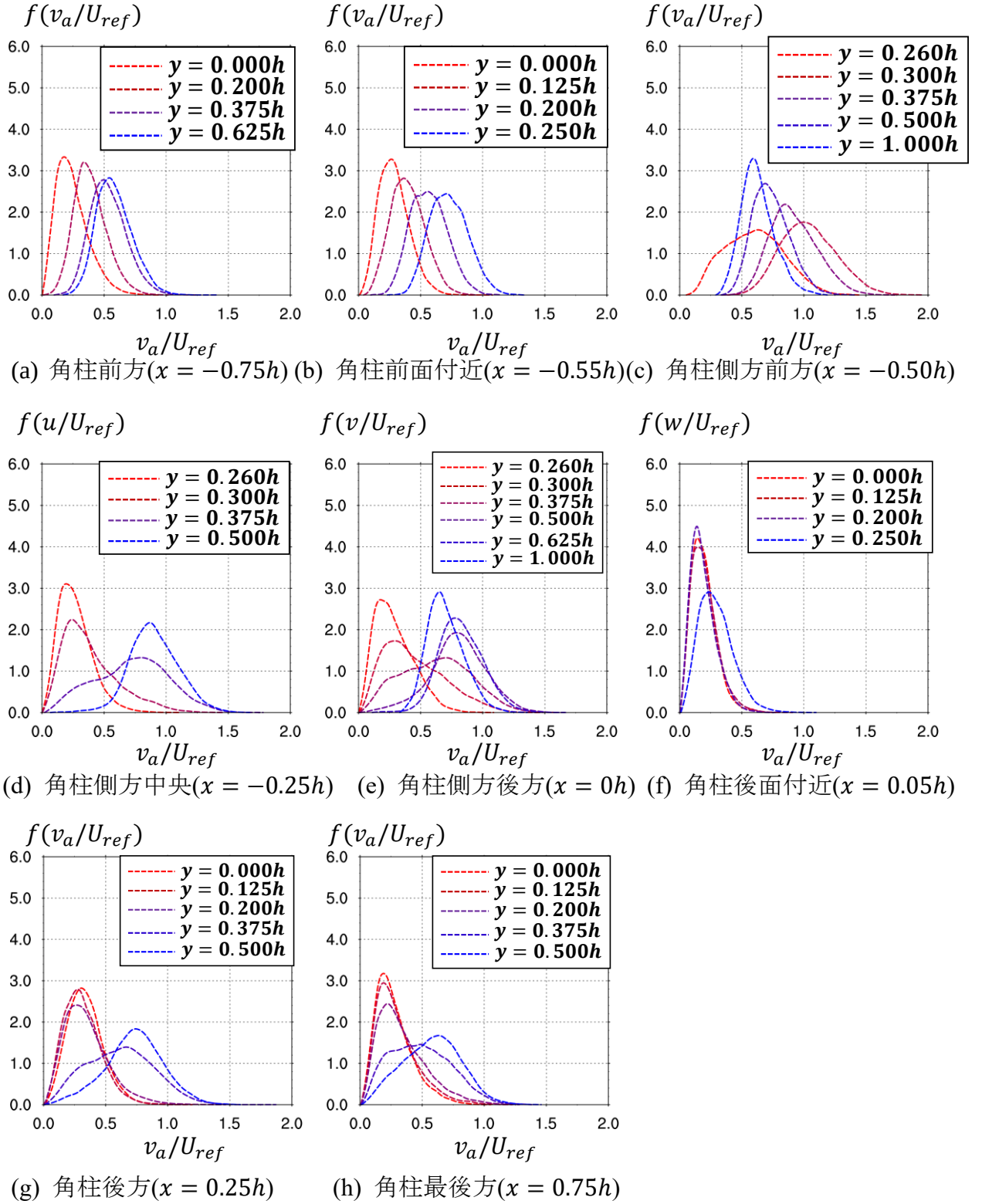


図 4-9 歩行者高さ $z = 0.0625h$ の角柱周辺の複数の測定点におけるスカラー風速の確率密度分布. (a): $x = -0.75h$ (角柱前方), (b): $x = -0.55h$ (角柱前面付近), (c): $x = -0.5h$ (角柱側方前方), (d): $x = -0.25h$ (角柱側方中央), (e): $x = 0h$ (角柱側方後方), (f): $x = 0.05h$ (角柱後面付近), (g): $x = 0.25h$ (角柱後方), (h): $x = 0.75h$ (角柱最後方)

4.6 各成分風速，スカラー風速の規格化確率密度分布

前節では各成分風速及びスカラー風速の確率密度分布を基に建物周辺のそれぞれの測定点における瞬間的な気流性状について詳細に検討した．本節では各成分風速，スカラー風速の普遍性について考察するために，規格化を施し，標準正規分布との比較を行った．布と標準正規分布と比較を行い，その普遍性について考察する．各成分風速 u_i ，スカラー風速 v_a について，それぞれの規格化確率変数 u_{in} , v_{an} 及び正規分布 $f(u_{in})$, $f(v_{an})$ は平均 $\overline{u_i} = \frac{1}{T} \int u_i dt$, $\overline{v_a} = \frac{1}{T} \int v_a dt$, 標準偏差 $\sigma_{u_i} = \sqrt{(u_i - \overline{u_i})^2}$, $\sigma_{u_i} = \sqrt{(v_a - \overline{v_a})^2}$ を用いて，次式のように表記できる．

$$u_{in} = \frac{u_i - \overline{u_i}}{\sigma_{u_i}} \quad (4-2)$$

$$v_{an} = \frac{v_a - \overline{v_a}}{\sigma_{v_a}} \quad (4-3)$$

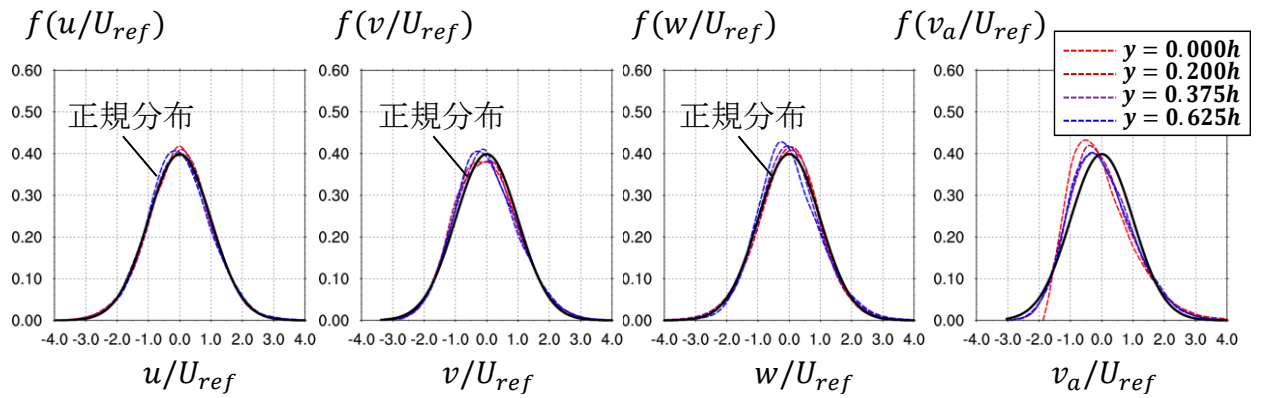
$$f(u_{in}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}u_{in}^2\right) \quad (4-4)$$

$$f(v_{an}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}v_{an}^2\right) \quad (4-5)$$

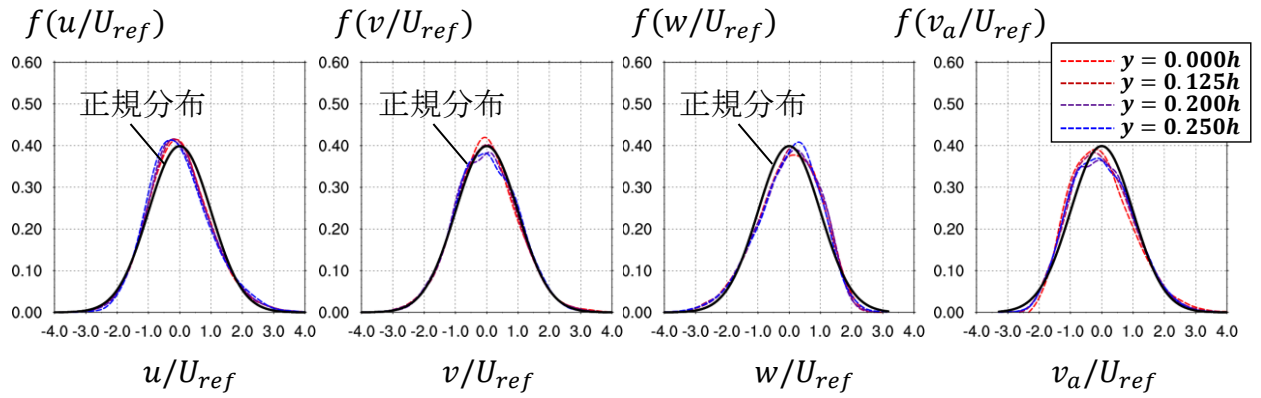
図 4-10 に図 4-8，図 4-9 に示したものと同様の測定点における各成分風速及びスカラー風速の規格化確率密度分布の結果を示す．図中の実線は標準正規分布を，点線は各測定点における結果を表している．図 4-10 より，各成分風速の速度分布は，いずれの測定点においても最頻値付近では標準正規分布からの乖離が多く見られるが，速度分布の裾野 $\pm\sigma_{u_i}$ 付近では標準正規分布と概ね一致している．このことから，各成分の速度分布の広がりには標準偏差 σ_{u_i} で特徴付けられ，概ね左右対称な分布になっていると言えよう．また，スカラー風速の結果に注目すると，順流方向強風側における確率密度分布の裾野は概ね正規分布と一致しているが，最頻値付近や，逆流方向裾野付近において，標準正規分布からの乖離は大きい．これは，図 4-9 に示したように，スカラー風速の確率密度分布が，Weibull 分布のような正の値に大きくひずんだ確率密度分布を示すためであると考えられる．

したがって，今回の結果によれば，各速度成分の確率分布は，観測場所によっては若干の正負の歪みが観測されるものの，概ね左右対称の正規分布と良く一致していることが確認された．

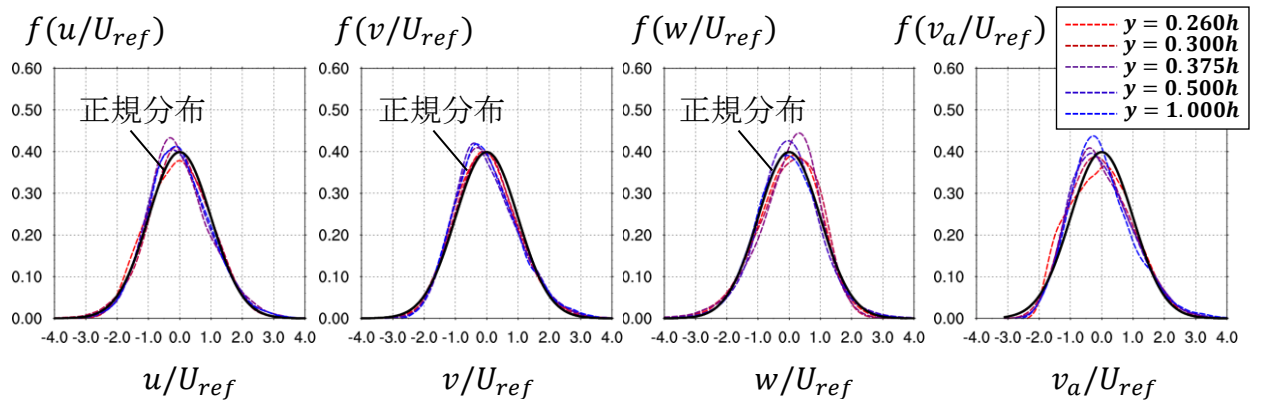
角柱前方 ($x = -0.75h$)



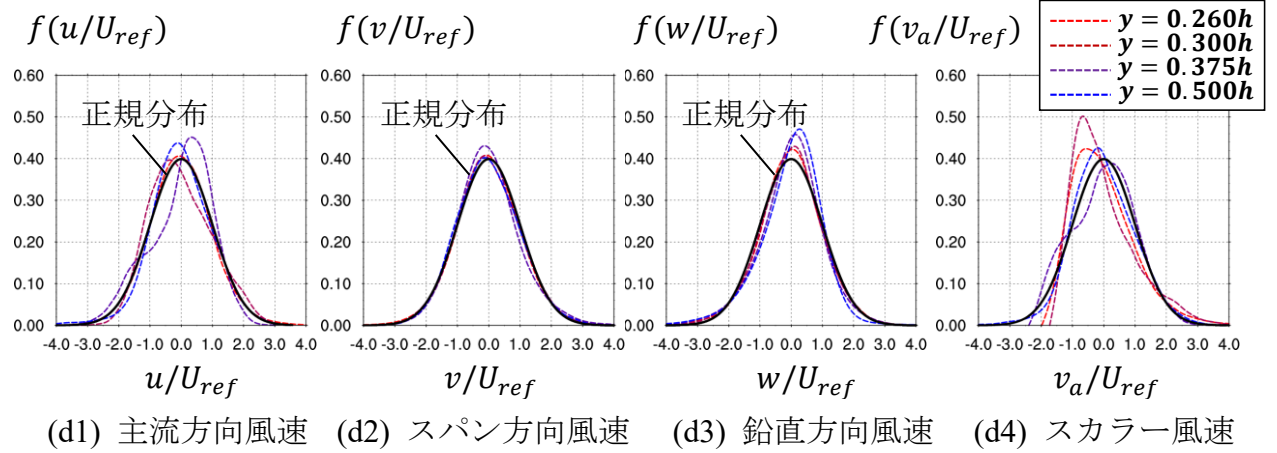
角柱前面付近 ($x = -0.55h$)



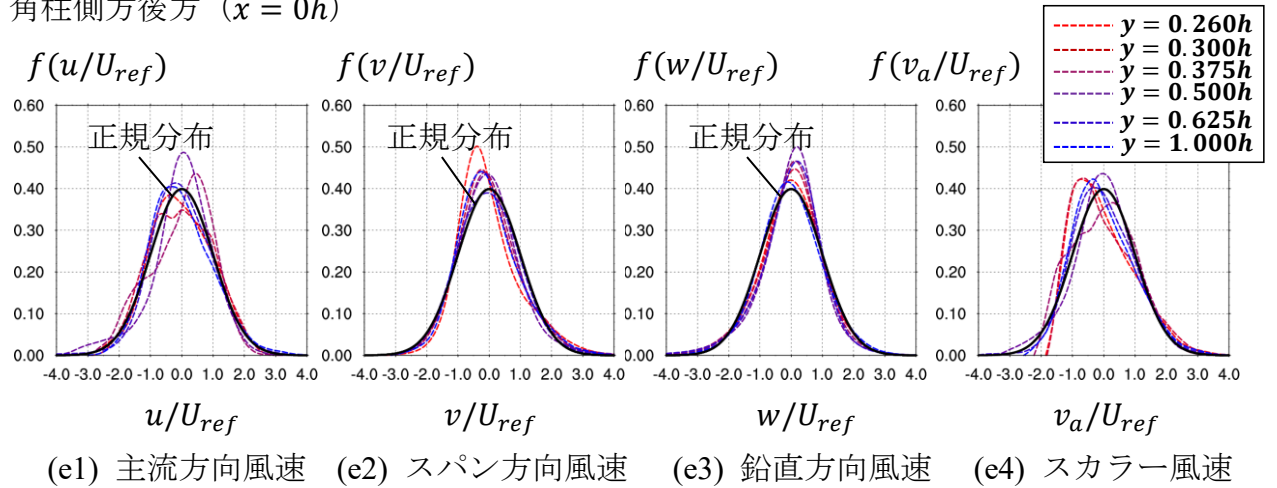
角柱側方前方 ($x = -0.50h$)



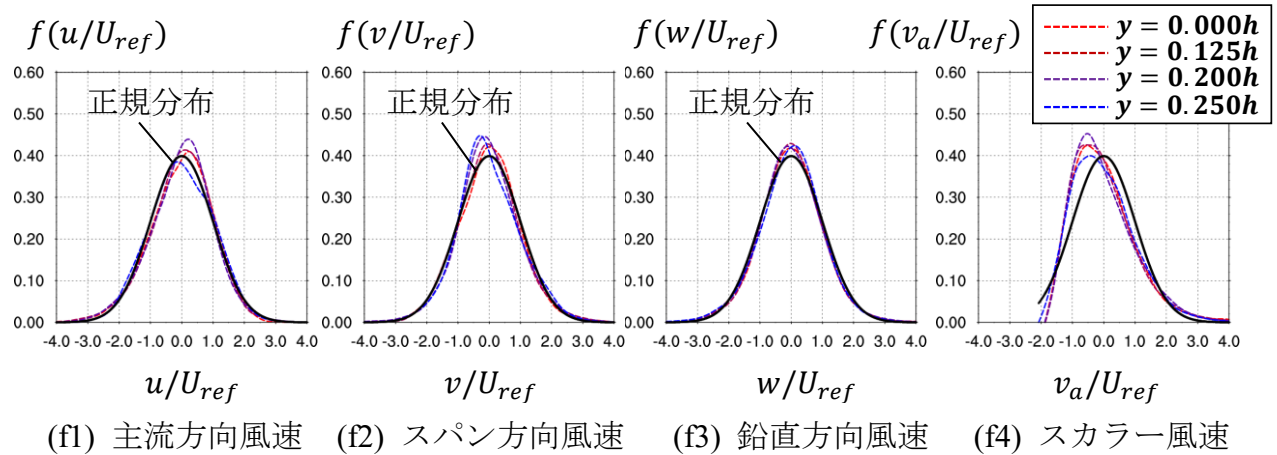
角柱側方中央($x = -0.25h$)



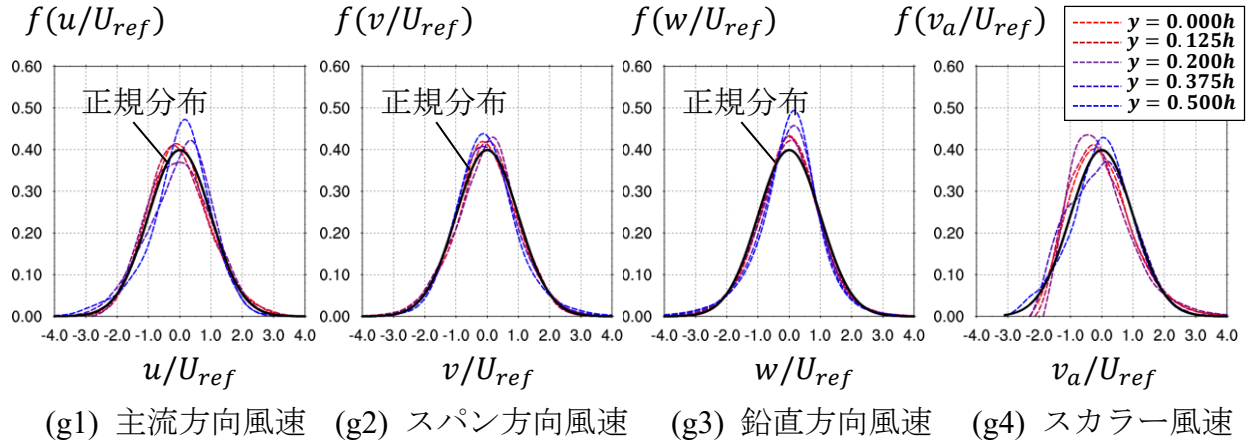
角柱側方後方 ($x = 0h$)



角柱後面付近 ($x = 0.05h$)



角柱後方($x = 0.25h$)



角柱最後方 ($x = 0.75h$)

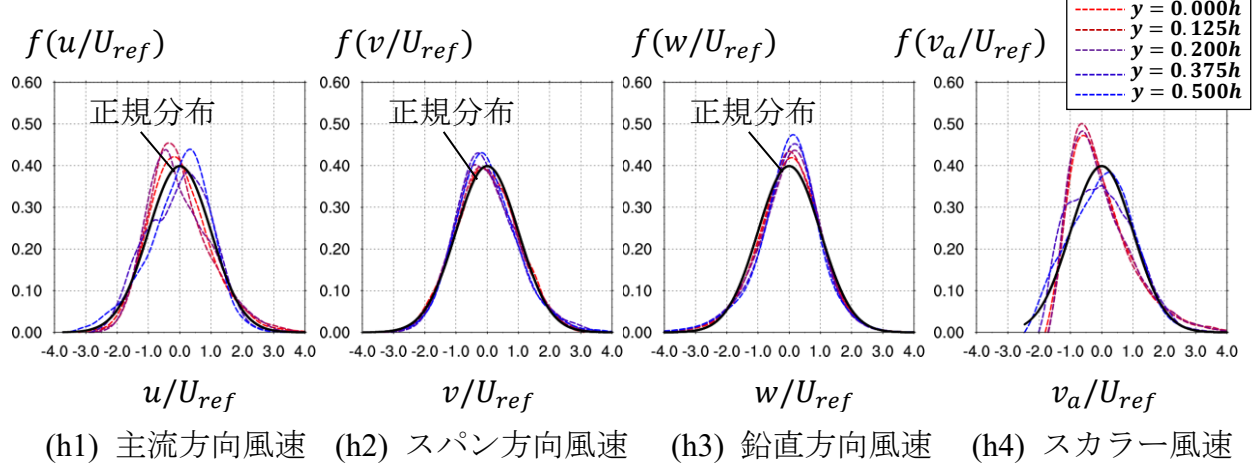


図 4-10 歩行者高さ $z = 0.0625h$ の角柱周辺の複数の測定点における各成分風速，スカラー風速の規格化確率密度分布. (a1)-(a4): $x = -0.75h$ (角柱前方)，(b1)-(b4): $x = -0.55h$ (角柱前面付近)，(c1)-(c4): $x = -0.5h$ (角柱側方前方)，(d1)-(d4): $x = -0.25h$ (角柱側方中央)，(e1)-(e4): $x = 0h$ (角柱側方後方)，(f1)-(f4): $x = 0.05h$ (角柱後面付近)，(g1)-(g4): $x = 0.25h$ (角柱後方)，(h1)-(h4): $x = 0.75h$ (角柱最後方) 実線：標準正規分布

4.7 超過風速と統計量の関係

4.7.1 超過風速と平均風速の関係

本節では，前節で示した各速度成分の確率分布に基づき，超過確率及び超過風速を算出し，超過風速の予測方法について考察する．各成分超過風速と超過スカラー風速は式 (3-33)，(3-34) で定義される各成分風速，スカラー風速の累積度数分布を基に，累積度数 $F\%$ を与える値の下限値を $F\%$ 超過風速及び $F\%$ 超過スカラー風速と各々定義してい

る.

第3章では歩行者高さを対象に空間代表値としての超過スカラー風速とスカラー風速の関係性を調べた。その結果、平均風速の増加に伴って、超過風速が単調増加する傾向を示した。一方で、第3章は歩行者高さ水平面内全体を対象に弱風域と強風域が混在する都市キャノピー内の空間代表値として平均風速や超過風速を算出しているため、建物隅各部などで局所的に発生する強風域での超過風速の発生確率を過小評価している可能性があると言える。そこで、本節では建物周辺の測定点を対象に、各成分超過風速 u_{iF} 、超過スカラー風速 v_{aF} と平均風速 $\overline{v_a}$ との関係性について考察した。

図4-11、図4-12に各成分超過風速 u_{iF} 、超過スカラー風速 v_{aF} と平均風速 $\overline{v_a}$ の関係性を示す。図4-11は順流方向強風域である超過確率0.1%、1%、10%の結果を示し、図4-12には各成分風速では逆流方向強風域、スカラー風速については低風速域である超過確率90%、99%、99.9%の結果を示した。測定高さ $z = 0.0625H$ における全ての測定点での超過風速を算出し、超過風速、及び平均風速は参照風速 U_{ref} で無次元化されている。図中の直線は、各超過風速に対して最小二乗法により決定した一次直線を示している。図4-11より、主流方向風速、スパン方向風速、スカラー風速は平均風速の増加に伴って単調増加している傾向があることを確認できる。鉛直方向風速は平均風速の増加に伴って減少する傾向が見受けられるが、結果のバラツキが大きくなっている。また、各成分風速及びスカラー風速についていずれも一次直線からの乖離は大きくなっている。また、図4-12に示した超過確率90%、99%、99.9%においても同様に、平均風速の増加に伴って主流方向風速、スパン方向風速、スカラー風速の超過風速は単調増加し、鉛直方向風速は単調減少しており、一次直線からの乖離も大きくなっている。特に、この乖離は稀に発生する超過風速になるほど顕著であり、同じ平均風速においても異なる超過風速を示している。

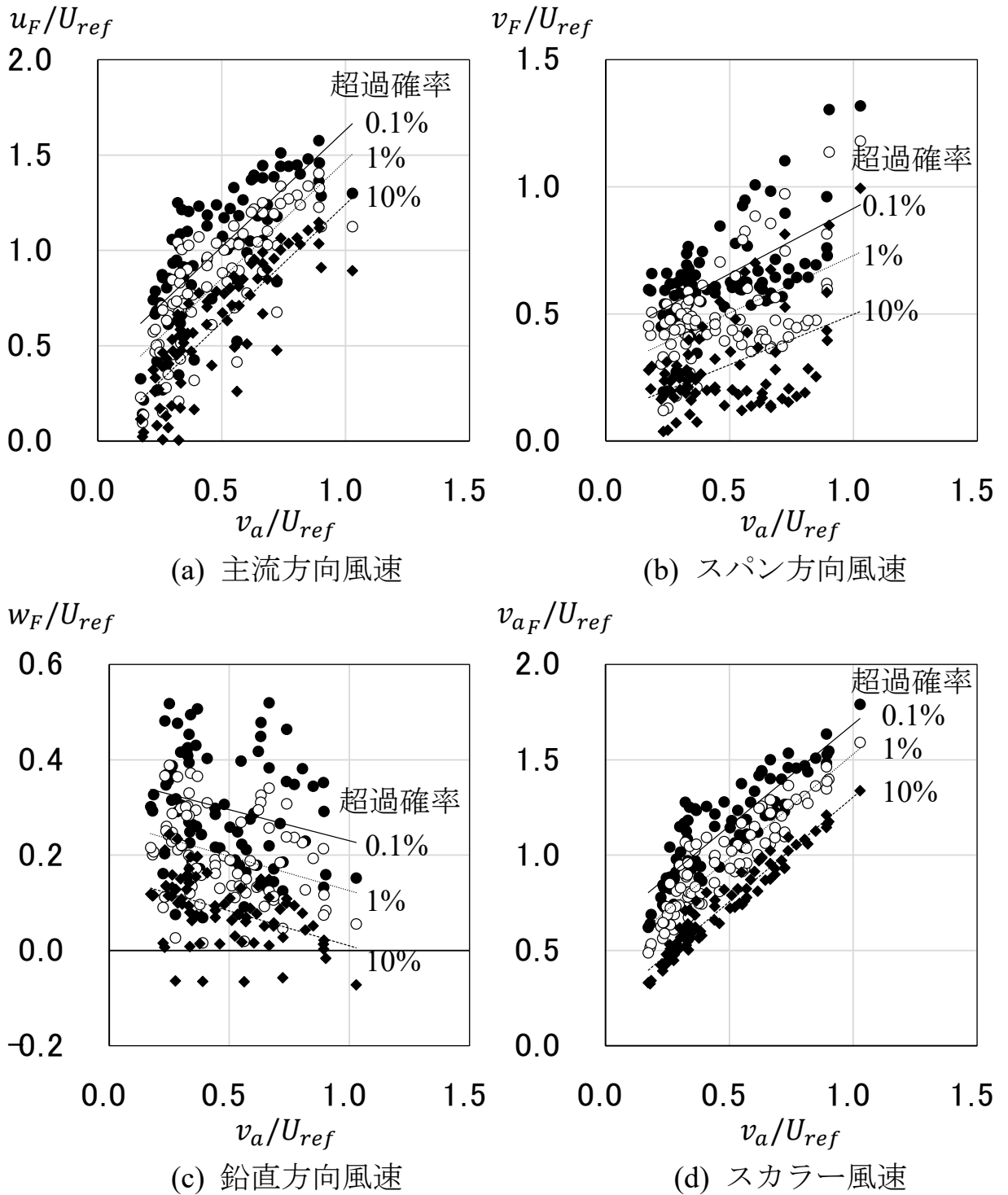


図 4-11 歩行者高さ $z = 0.0625h$ における平均風速 v_a/U_{ref} と(a)-(c) 各成分超過風速 u_{iF} 及び(d) 超過スカラー風速 v_{aF} の関係. 実線: 最小二乗法を用いて求めた一次直線. ●: 超過確率 0.1%, ○: 超過確率 1%, ◆: 超過確率 10%

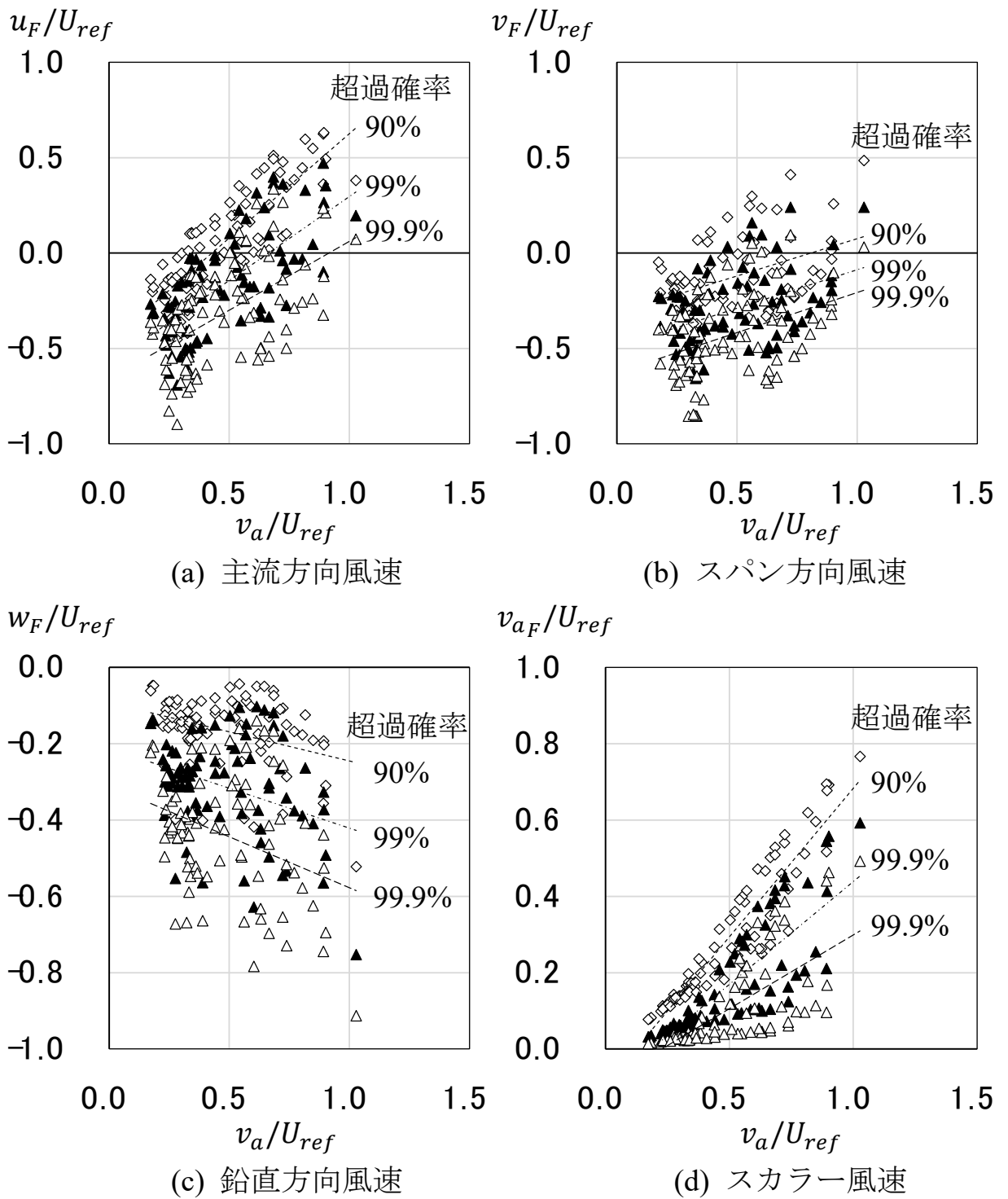


図 4-12 歩行者高さ $z = 0.0625h$ における平均風速 v_a/U_{ref} と(a)-(c) 各成分超過風速 u_{iF} 及び(d) 超過スカラー風速 v_{aF} の関係. 実線: 最小二乗法を用いて求めた一次直線. $\diamond$: 超過確率 90%, $\blacktriangle$: 超過確率 99%, $\triangle$: 超過確率 99.9%

4.7.2 一次直線による超過風速の予測

続いて，図 4-11，図 4-12 で求めた一次直線を用いて予測した超過風速と LES より求めた超過風速との関係を示す．一次直線による超過風速の予測は以下の式で行われる．

$$u_{i_F}^{lpre} = C_1 v_a + C_2 \quad (4-6)$$

ここで，定数 C_1 ， C_2 はそれぞれの超過確率における一次直線の傾き，切片を表している．図 4-13 に各成分風速，スカラー風速の超過風速とその予測値の関係を示す．超過確率 0.1%，1%，10%，90%，99%，99.9%を対象に，式(4-6)を用いて予測を行った．また，図中の実線は 45 度線を，点線はそれぞれ 45 度線からの誤差±10%，20%を表している．図 4-13 より，スカラー風速については，予測値との差が 20%以内に収まっており，一次直線を用いる事で，概ね超過風速を予測できていると言える．一方で，主流方向風速について，順流方向強風側の超過風速と，その予測値との差は 20%程度となっている．さらに，スパン方向風速，及び鉛直方向風速は主流方向風速に比べ，予測値との差が大きくなっており，どちらも予測値との差は 50%程度と大きくなっている．このように，各成分風速において，超過風速とその予測値との間に差が見られたのは，平均風速が同じ場合でも標準偏差が異なることにより，速度の確率密度分布に大きな差が生じるためであると予想される．

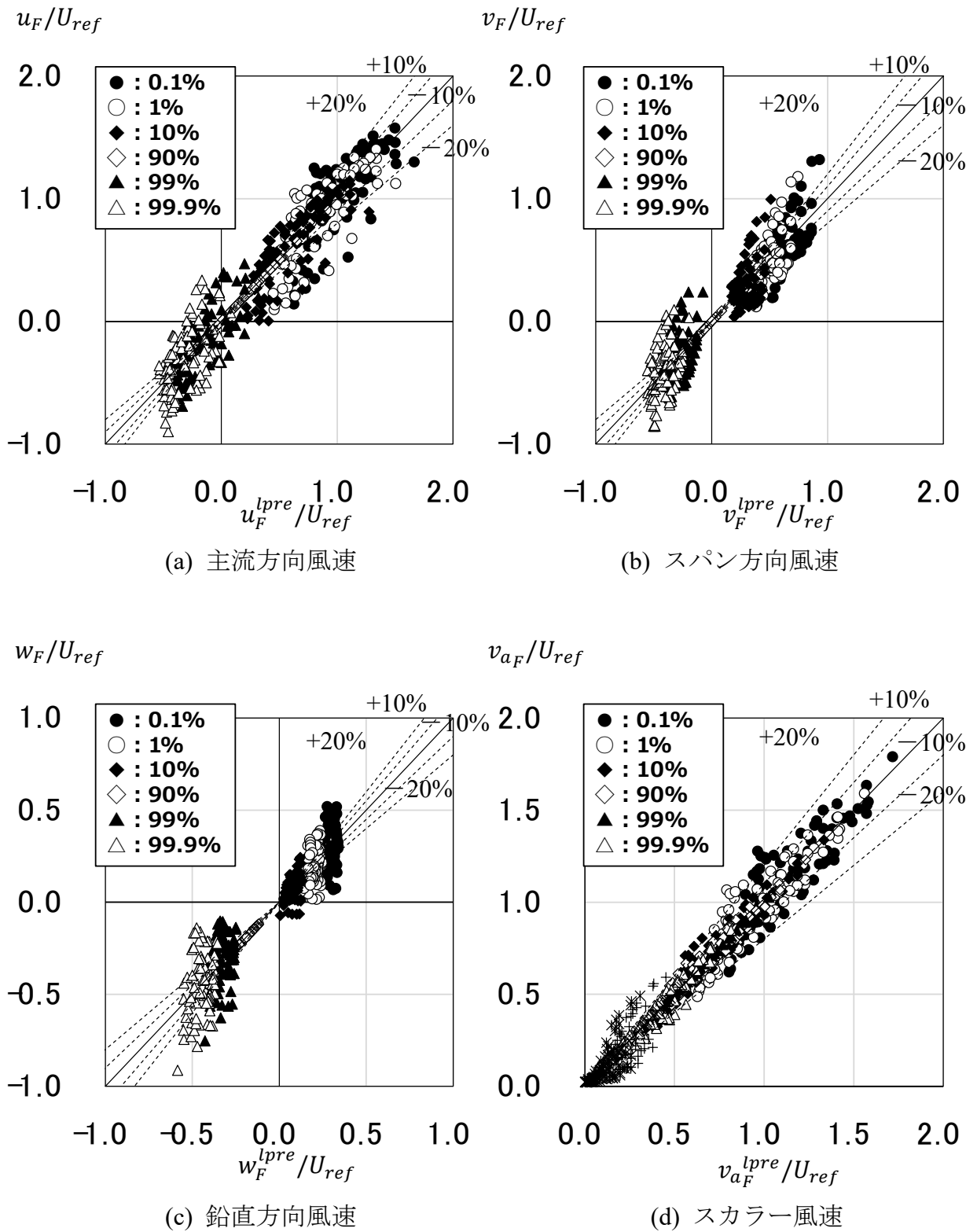


図 4-13 歩行者高さ $z = 0.0625h$ における超過風速 u_{iF}/U_{ref} , v_{aF}/U_{ref} とその予測値 u_{iF}^{pre} , v_{aF}^{pre} の関係. 実線: 45 度線. 点線: 45 度線 ± 10 , 45 度線 ± 20 .

4.7.3 平均風速，標準偏差による正規分布を仮定した超過風速の予測

前節では平均風速と超過風速の関係を調べ，平均風速と超過風速の関係を調べた．加えて，平均風速による一次直線を基に，超過風速の予測を行い，超過風速と予測値との間の差を調べた．その結果，各成分風速とスカラー風速の超過風速とその予測値との間に差が見られ，これは平均風速が同じ場合でも標準偏差が異なることにより，速度の確率密度分布に大きな差が生じるためであると予想した．本節では，前節の結果を踏まえ，平均風速及び標準偏差を考慮した超過風速の整理を考える．最大瞬間風速 $\hat{u}$ に対して，平均風速 $\bar{u}$ 及び標準偏差 σ_u により，ピークファクターは以下の式で定義される．

$$P_f = \frac{(\hat{u} - \bar{u})}{\sigma_u} \quad (4-7)$$

これは，最大瞬間風速を平均風速と標準偏差により定義した規格化確率変数 $u_n = (\hat{u}_i - \bar{u})/\sigma_u$ とみなす事ができる．4.6 節で各成分風速の規格化確率密度が概ね正規分布で表現できたことを考慮し，超過風速 u_{iF} は，平均風速 $\bar{u}_i$ と標準偏差 σ_{u_i} を用いて，ピークファクターに準じた規格化超過変数 $P_F = (u_i - \bar{u}_i)/\sigma_{u_i}$ で評価できると考えられる．

図 4-14 に超過風速よりもとめた規格化超過変数 P_F と平均風速の関係を示す．標準正規分布との対応を調べるために，図 4-14 には標準正規分布よりもとめた規格化超過変数 P_F の値を線で示している．図 4-14 より，各成分風速について，平均風速の増加に伴って規格化超過変数 P_F の値が概ね一定の値になっていることが確認できる．また，低頻度超過確率におけるスカラー風速では，低風速側では平均風速の増加に伴って P_F の値が単調減少しているが，平均風速が 0.5 より大きい値では概ね一定になり，標準正規分布より求めた規格化超過変数に近い値になっている．これは 4.5.2 節で示したように，平均風速が小さい条件では速度分布の裾野が強風側に大きく歪んだ Weibul 分布になるため，標準正規分布による予測精度が低くなるのに対して，平均風速が大きい条件では左右対称の分布に近づくために，標準正規分布に近い分布性状を示すからであると考えられる．また，各成分風速の規格化超過変数はいずれの超過確率においても正規分布よりもとめた P_F と概ね一致している．特に超過確率 10%から 90%，（区間 $\pm 1.64\sigma$ 以内）ではよく一致しており，全ての測定点について正規分布より求めた P_F の誤差が $\pm 10\%$ 以内になっている．以上より，任意の平均風速における超過風速は正規分布より求めた P_F から予測可能であると考えられる．

最後に，超過風速 u_{iF} を次式で定義される $F\%$ 超過風速の予測値 u_{iF}^{npre} によって整理した．

$$u_{iF}^{npre} = u_{i_{nF}}\sigma_{u_i} + \bar{u}_i \quad (4-8)$$

ここで， $u_{i_{nF}}$ は標準正規分布より求めた超過確率 $F\%$ を与える値である．図 4-15 に測定高さ $z = 0.0625h$ における各成分風速，スカラー風速の超過風速 u_{iF} ， v_{aF} と，式 (4-8) による予測値の関係を示す．対象とする超過確率は 0.1%，1%，10%，90%，99%，99.9%とした．図中の点線は $\pm 10\%$ の計算結果と予測値の差を表している．図 4-15 に注目すると，主流方向風速の超過風速の予測値が，正規分布による予測値と非常によく一

致している．また，超過確率が 0.1%のような低頻度で発生する強風イベントになるにつれて正規分布による予測値が LES の結果に比べて小さくなる傾向がみられるが，その差は誤差 $\pm 10\%$ 程度に収まっている．図 4-15(b)，(c) に示したスパン方向風速及び鉛直方向風速についても同様に，正規分布による予測値と計算結果が $\pm 10\%$ 以下の精度でよく一致している．また，スカラー風速についても，超過確率 0.1%や 1%，10%といった稀に発生する強風イベントについては正規分布による予測値と $\pm 10\%$ 以下の精度で一致している．しかし，超過確率 90%や 99%，99.9%のような弱風イベントにおいては，正規分布による予測値との差が大きくなっている．これは，スカラー風速がスカラー値であり，0 より小さい値を持たないためであると推測される．以上より，図 4-15 で示した一次直線による予測値に比べ，標準偏差を考慮した予測を行う事によって， $\pm 10\%$ 以下の精度で各成分風速の予測を行う事ができると示された．スカラー風速についても同様に，強風側の予測については， $\pm 10\%$ 以下の精度で予測を行う事ができると示された．

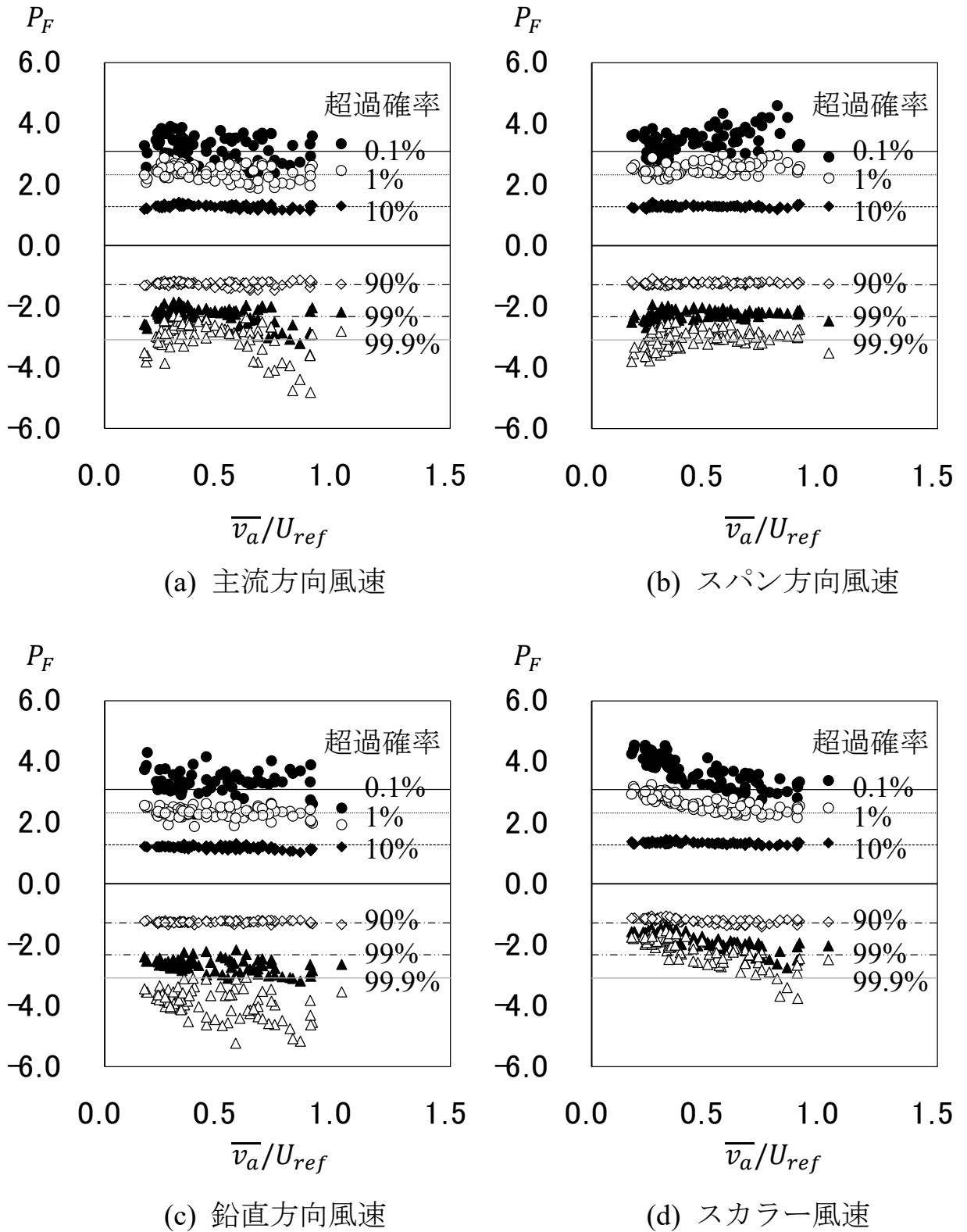
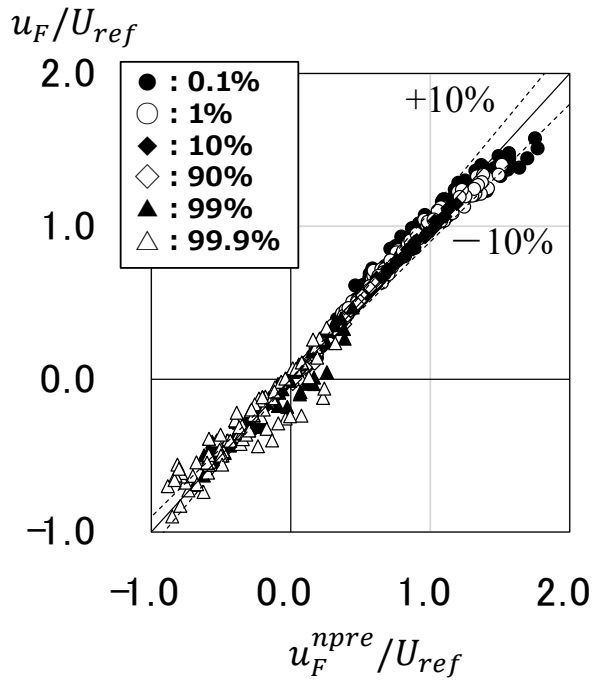
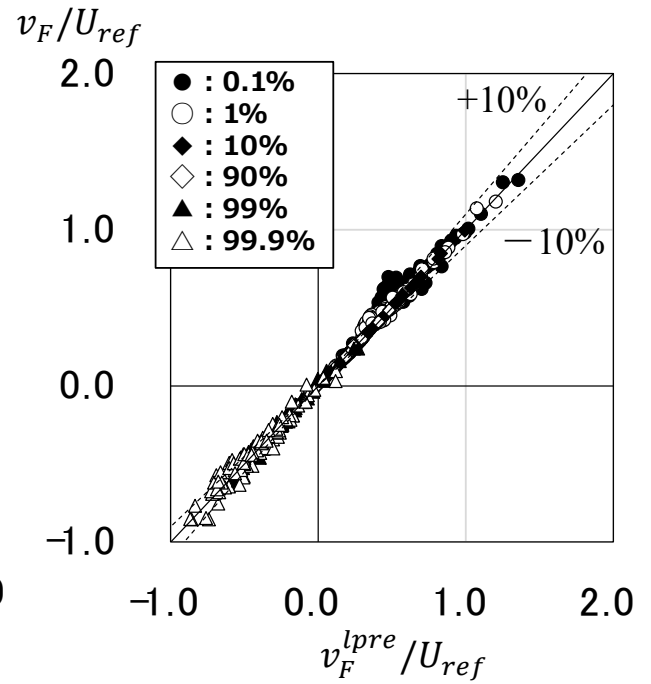


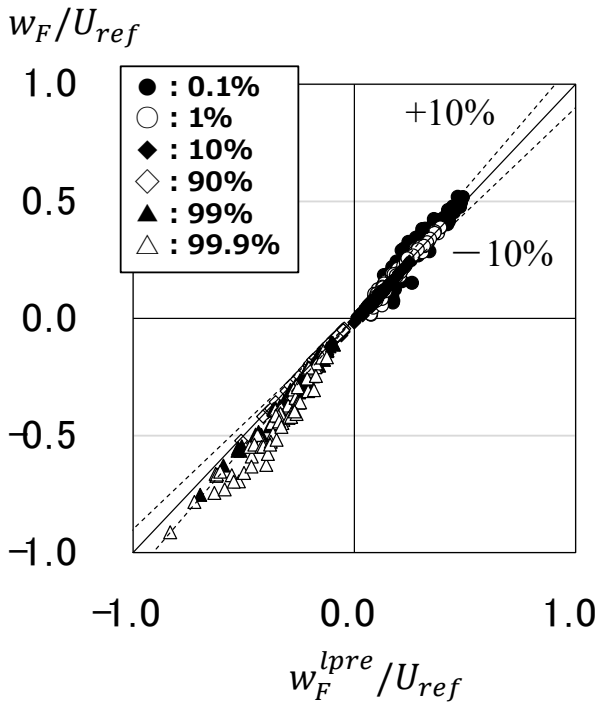
図 4-14 歩行者高さ $z = 0.0625h$ における各成分風速，スカラー風速の規格化超過変数 P_F と平均風速の関係．線：標準正規分布よりもとめた各超過確率における規格化超過変数 P_F ．



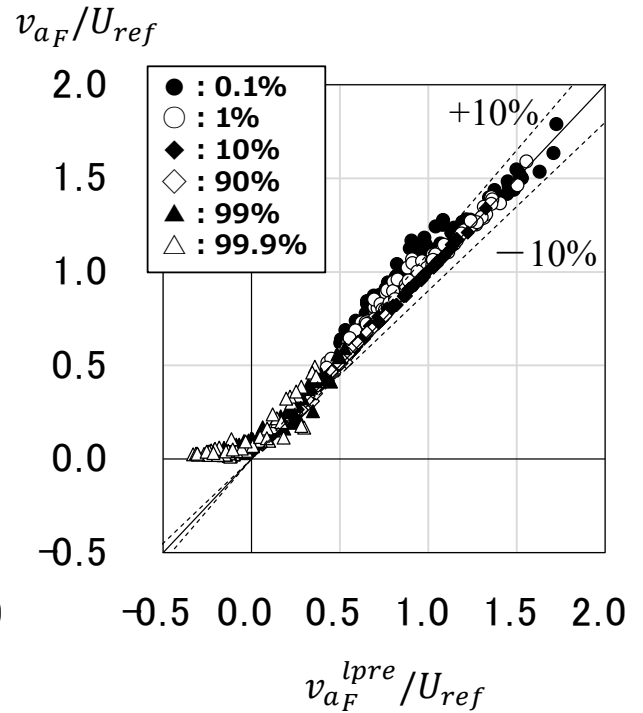
(a) 主流方向風速



(b) スパン方向風速



(c) 鉛直方向風速



(d) スカラー風速

図 4-15 歩行者高さ $z = 0.0625h$ における超過風速 u_{iF}/U_{ref} , v_{aF}/U_{ref} と正規分布よりもとめた規格化超過変数 P_F を用いた超過予測値 u_{iF}^{npre} , v_{aF}^{npre} の関係. 実線 : 45 度線. 点線 : 45 度線 ± 10 .

4.8 結語

本章では都市空間内歩行者高さにおけるビル風に代表される突風現象の空間的な分布特性を明らかにすることを目的に Okaze et al. (2017)⁽⁶⁾による 1:1:2 単体角柱周りを対象とした LES の結果を再解析することで、建物周囲の複数の地点を対象として歩行者高さにおける速度の確率分布性状の特性について詳細に検討した。初めに、検証用の風洞実験データ⁽⁹⁾を用いて、鉛直・水平方向各成分風速のコンタマップと各成分風速及び乱流エネルギーの鉛直、水平プロファイルを基に数値計算結果の再現性について確認を行った。

その後、各成分風速・スカラー風速の各測定点における確率密度分布を算出し、空間的な分布特性について検討を行った。その結果、弱風域と強風域の境界線上に位置する測定点では、瞬間的には模型壁面の逆流渦が大きくなることで、低風速が支配的な気流分布になる一方で、逆流渦が小さくなることで強風が支配的な気流性状になっており、二峰性の分布を有していることが明らかになった。このような測定点では平均風速は弱風域の影響を受けて小さくなる一方で、瞬間的には強風のリスクが残る領域であり、このような測定点での強風現象を考慮すると、平均風速だけでなく瞬間的な気流性状を検討することの重要性を示唆していると言える。

また、各速度成分の確率分布に基づき、超過確率及び超過風速を算出し、超過風速の予測方法について考察を行った。その結果、平均風速の増加に伴って主流方向風速、スパン方向風速、スカラー風速の超過風速は単調増加し、鉛直方向風速は単調減少しており、一次直線からの乖離も大きくなっていることがわかった。特に、この乖離は稀に発生する超過風速になるほど顕著であり、同じ平均風速においても異なる超過風速を示していることが確認された。

このことから、平均風速と標準偏差を考慮した超過風速の予測について検討を行った。各点の平均風速と標準偏差を元にピークファクターに準じた各成分風速、スカラー風速の規格化超過変数を求め、標準正規分布との比較を行った。結果、元となる確率密度分布の分布特性や対象とする信頼区間によって、整合性は異なるものの、超過確率 10% から 90%、(区間 $\pm 1.64 \sigma$ 以内) 全ての測定点について正規分布より求めた P_F の誤差が $\pm 10\%$ 以内になっており、よく一致していることが分かった。最後に標準正規分布と各測定点における平均風速、標準偏差を用いて、超過風速の予測を行い、実測値との比較を行った。その結果、強風域における予測については、各成分風速、標準正規分布ともに $\pm 10\%$ の精度で予測可能であることが示された。

参考文献

- [1] 義江龍一郎, 田中英之, 白澤多一, & 小林剛. (2008). 高層密集市街地における建物群の形態が歩行者レベルの風速・気温分布に与える影響. 日本建築学会環境系論文集, 73(627), 661-667.
- [2] Abd Razak, A., Hagishima, A., Ikegaya, N., & Tanimoto, J. (2013). Analysis of airflow over building arrays for assessment of urban wind environment. *Building and Environment*, 59, 56-65.
- [3] Ikeda, Y., Hagishima, A., Ikegaya, N., Tanimoto, J., Razak, A.A., 2015. Estimation of wind speed in urban pedestrian spaces on the basis of large-eddy simulation. *J. Environ. Eng.* 80 (709), 259–267.
- [4] Ahmad, N.H., Inagaki, A., Kanda, M., Onodera, N., Aoki, T., 2017. Large-Eddy Simulation of the Gust Index in an Urban Area Using the Lattice Boltzmann Method. *Bound.-Layer Meteorol.* 163(3), 447–467.
- [5] Ikegaya, N., et al.: Evaluation of rare velocity at a pedestrian level due to turbulence in a neutrally stable shear flow over simplified urban arrays, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 171, pp. 137–147, 2017.
- [6] Okaze, T., Kikumoto, H., Ono, H., Imano, M., Hasama, T., Kishida, T., Nakao, K., Ikegaya, N., Tabata, Y., Tominaga, Y., “Large-Eddy Simulations of flow around a high-rise building: validation and sensitivity analysis on turbulent statistics”, EACWE2017
- [7] OpenCFD Ltd., “OpenFOAM Foundation Training”, 2013.
- [8] Versteeg, H.K., Malalasekera, W., 1995. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, first ed. Pearson, London.
- [9] 小野他: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp797-798, 2016

第 5 章 単体角柱周辺流れにおける歩行者高さ風速に対する統計モデル 適用に関する研究

5.1 諸言

歩行者高さでの風環境評価は都市換気と突風評価に分類される。強風は突風に代表される身体的影響を及ぼすのに対して、弱風は通風不良や汚染物質の滞留を引き起こす。前者は強い平均風速領域が温熱感や汚染物質の滞留に対して効果を発揮する。

従来は歩行者高さの平均風速や経験的なパラメーターを基に突風の強さを推定する手法が数多く用いられてきた⁽¹⁾⁽²⁾。一方で、乱流の間欠的・局所的な性質を考えると、歩行者高さにおける風環境評価においては平均風速よりも瞬間的な風速の方が良い評価指標となる。

この観点に基づいて、近年、風速の空間・時間的な変動を考慮した確率密度関数を基に理想化されたケースの歩行者レベルでの低頻度発生風速を解析する研究が数多く行われている⁽³⁾⁽⁴⁾。

このような時間的・空間的な変動を考慮した風速の確率密度関数を取得するうえでは、膨大な時系列データ必要となり、実際の都市空間を対象として低頻度発生強風を評価することは困難である。データ量を軽減するための取り組みも行われており、データ量を10分の1に圧縮する等の成果が得られているが、さらに少ないデータ量を使用した低頻度発生強風の予測が求められている。

このことから、低次の統計量を用いて低頻度発生強風を推定する手法が開発されており、例えば Wang et al. (2022)⁽⁵⁾は Okaze et al. (2017)⁽⁶⁾による 1:1:2 単体角柱周りを対象とした LES によるデータを再解析して、平均値と標準偏差を用いた 2W 法よりも平均値、標準偏差、ひずみ度を加えた 3W 法の方が低頻度発生強風をより良い精度で推定できると示している。このことから、より高次の統計量を使用することで、より高い精度の高い結果が得られることが期待できる。このモデルは統計量を用いて低頻度風速を予測できる点で、予測にかかるデータや処理の負荷を改善させるものである。一方で、ワイブル分布の性質上、分布の形状を決定するためのパラメーターが 2,3 個になるため、測定精度の向上には限界があると考えられる。

一方で、Gram-Charlier series (GCS)⁽⁷⁾に基づく GCS 法はガウス分布を高次統計に依存する項で修正することにより、与えられた統計量を満たす確率密度分布を記述できる。これは、任意の点における風速の確率密度分布を与えられた統計量を基に正確に計算できることを示し、このことは高次の統計量を使用することでより正確な低頻度発生強風の予測が行えることを示唆している。これは GSC 法を利用する利点である一方、2W 法・3W 法と比べて高次の統計量を用いることにより、モデル式の実用性の観点では劣る。

このような背景を受けて本研究では歩行者高さにおける低頻度発生強風の予測に対するより良い手法の評価を目的として、Okaze et al. (2017)⁽⁶⁾による 1:1:2 単体角柱周りを対象とした LES の結果を再解析することで、GCS 法による結果と 2W 法・3W 法の比較を行う。

5.2 予測手法について

本節では低頻度発生強風の予測手法として、2W・3W 及び GCS 法について説明する。

5.2.1 2W 法・3W 法

2W・3W 法はそれぞれ 2 パラメーター・3 パラメーターのワイブル分布⁽⁸⁾に基いており、それぞれ以下の式で表される。

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{x}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad (5-1)$$

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\zeta}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{x-\zeta}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad (5-2)$$

ここで α はスケールパラメーター、 $\beta > 0$ は形状パラメーター、 ζ は位置パラメーターを示す。2W は位置パラメーター $\zeta = 0$ となる時の特殊な場合である。尚、2W 法または 3W 法を用いた低頻度発生強風の推定では、それぞれのパラメーター (α, β, ζ) について、2W 法ではそれぞれ平均風速、風速の標準偏差、3W 法ではそれぞれ平均風速、風速の標準偏差、風速の歪度を用いるため、使用するパラメーターの推定は不要である。

5.2.2 GCS 法

GCS 法を用いた風速の確率密度分布は(5-3)式で推定される。ここで、 $G(x)$ はガウス分布の確率密度分布(5-4)、 $R_i(x)$ は修正項であり、2 次～ i 次までの統計量を基に計算される。例えば、 $i = 2$ の場合、 $R_2(x) = f_2$ となり、 $p_i(x)$ はガウス分布となる。 $R_3(x) = f_2 + f_3$ となり、 $R_4(x)$ 、 $R_5(x)$ 、 $R_6(x)$ は同様のルールで計算される。その際の f_2, f_3, f_4, f_5, f_6 は以下の(5-6)～(5-10)の式で計算される。

$$p_i(x) = G(x)R_i(x) \quad i = 2, 3, 4, 5, 6, \dots \quad (5-3)$$

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left(- \frac{x^2}{2} \right) \quad (5-4)$$

$$R_i(x) = f_2 + f_3 + \dots + f_i \quad i = 2, 3, 4, 5, 6, \dots \quad (5-5)$$

$$f_2 = 1 \quad (5-6)$$

$$f_3 = \frac{s_k}{6} (x^3 - 3x) \quad (5-7)$$

$$f_4 = \frac{k_t - 3}{24} (x^4 - 6x^2 + 3) \quad (5-8)$$

$$f_5 = \frac{1}{12} \left(\frac{m_5}{10} - s_k \right) (x^5 - 10x^3 + 15x) \quad (5-9)$$

$$f_6 = \frac{1}{720} (m_6 - 15k_t + 30) (x^6 - 15x^4 + 45x^2 - 15) \quad (5-10)$$

ここで、 $x = (s - \langle s \rangle) / \sigma_s$ は規格化変数を表し、 $\langle s \rangle$, σ_s , s_k , k_t はそれぞれ平均値, 標準偏差, 歪度, 尖度を表している. m_5 , m_6 について, それぞれ $m_5 = \langle s^5 \rangle$, $m_6 = \langle s^6 \rangle$ の 5 次, 6 次のモーメント量を表す. s はスカラー風速であり, 各成分風速の 2 乗和の平方根を表している. 本章では各成分風速の代わりにスカラー風速を用いて解析を行った, 尚, $R_i(x)$ の修正項の確率密度分布が与えられた統計量を満たすものであり, $\int_{-\infty}^{\infty} p(x) x^i dx$ が i 次統計量となるためには式(5-5)~(5-10)を満たす必要があると考えられる.

5.3 解析条件

本節では, Okaze et al.(2017)⁽⁶⁾による 1:1:2 単体角柱周りを対象とした LES の解析条件について述べる. 尚, 基礎的モデルにおける計算条件や解析対象モデルについては 4.2 節, 4.3 節, 4.4 節を参照されたい. 数値計算領域は図 5-1(a)に示す通りであり, 測定点は図 5-1(b)は歩行者高さにおける測定点を表す. 尚, 本章では歩行者高さを $z/H = 1/16$ ($H = 0.2$ m, H は模型高さ) とし, 模型周辺の 80 点を測定点として使用した.

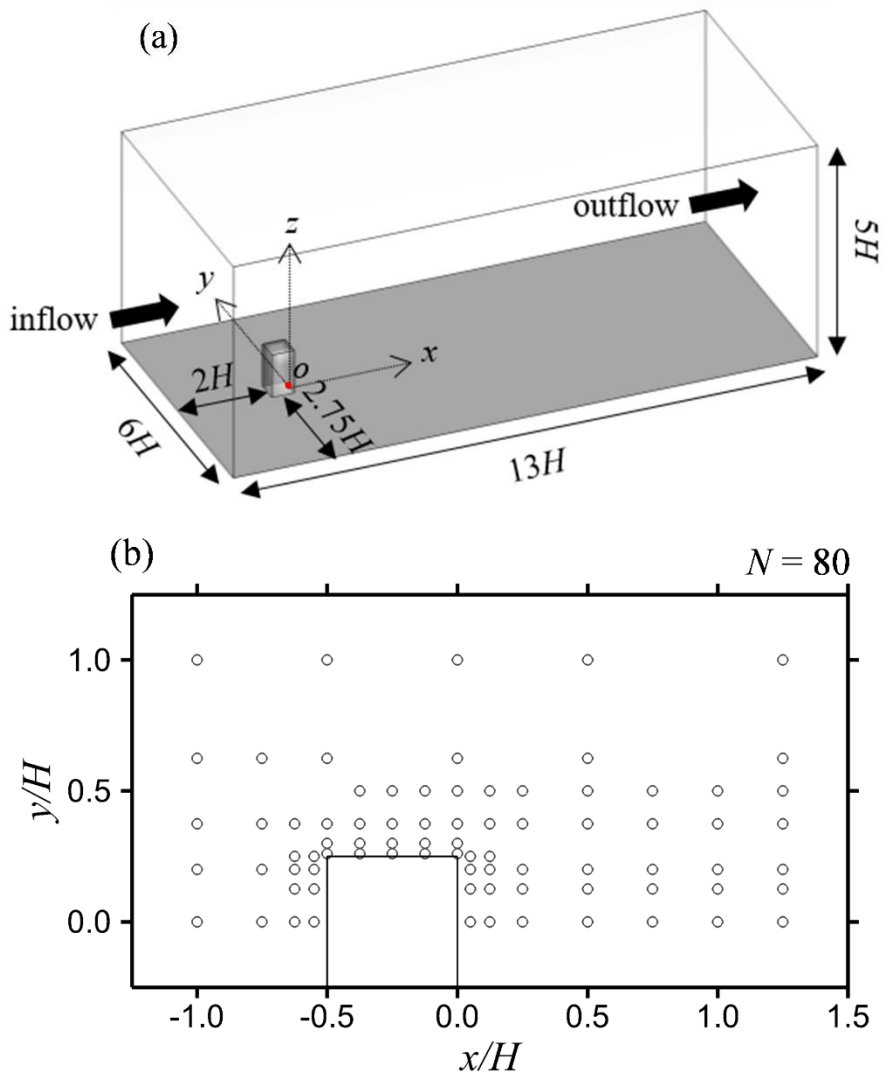


図 5-1 (a)解析領域 (b)測定点 (水平断面 $z = 0.0625h$)

5.4 風速確率密度分布

図 5-2 に建物側面の剥離域における複数の測定点でのスカラー風速の確率密度分布を示す。横軸は流入境界における建物高さ H における平均風速 $\langle u_H \rangle$ で無次元化されている。図 5-2 (a,d,g) は 2W, 3W 法によってモデル化された確率密度分布であり、図 5-2 (b,e,h) は 2 次から 6 次まで GCS 法によってモデル化されている。図 5-2(c,f,i) はそれぞれのオーダーにおける修正項 $R_i(x)$ とガウス分布との積 Gf_i を示している。図を見ると、P1, P2 においては 2W, 3W 法が GCS 法と比べて乖離があることが確認できる。P1, P2 において GCS 法は 2W 法, 3W 法と比べて精度良くモデル化されており、特に P2 においては GCS 法のモデル次数の増加に伴って精度が向上していることが確認できる。このことは GCS 法において、モデル次数の増加によって精度向上する可能性があることを示している。P3 では 2W, 3W 法, GCS 法ともに元の風速の確率密度分布から乖離している。P3 では風速分布が 2 峰性の特徴を有しており、P1, P2 の様な 1 峰性の分布に比べて 2 峰性の風速分布の予測精度はいずれも落ちることが確認されており、このことは建物付近の流れの性状によっては 2W・3W 法, GCS 法ともに予測精度が落ちることがあるということを示唆している。また、GCS 法において、より高次の項の予測モデルを使用したとしてもうまく予測できておらず、2 峰性の風速分布の予測にあたっては別のモデルの検討することが適切であると考えられる。

図 5-2 (c,f,i) には GCS 法の各次数における修正項 $R_i(x)$ とガウス分布との積 Gf_i が示されている。GCS 法がガウス分布を元に i 次までの統計量を用いた修正項の重ね合わせによって分布がモデル化されていることを考慮すると、各次数の修正項の分布を把握することはガウス分布に対してどれほどのスケールで作用しているか理解し、より高次の修正項の妥当性を検証するうえで重要であると考えられる。P1~P3 の測定点における各修正項 Gf_i を確認すると、いずれも実際の風速確率密度分布とガウス分布の間の形状の差異を埋めるように各修正項の曲線が描かれていることが分かる。また、各修正項の大きさはいずれも元のガウス分布に対して 1/10 以下の変動に収まっていることが確認できる。これは各修正項が元のガウス分布に対して大きく分布を変化させうるほど支配的な値を有していないことを意味しており、これは P3 における 2 峰性分布の様に元のガウス分布から形状が大きく異なる場合には GCS 法の予測精度が落ちることを示唆していると言える。

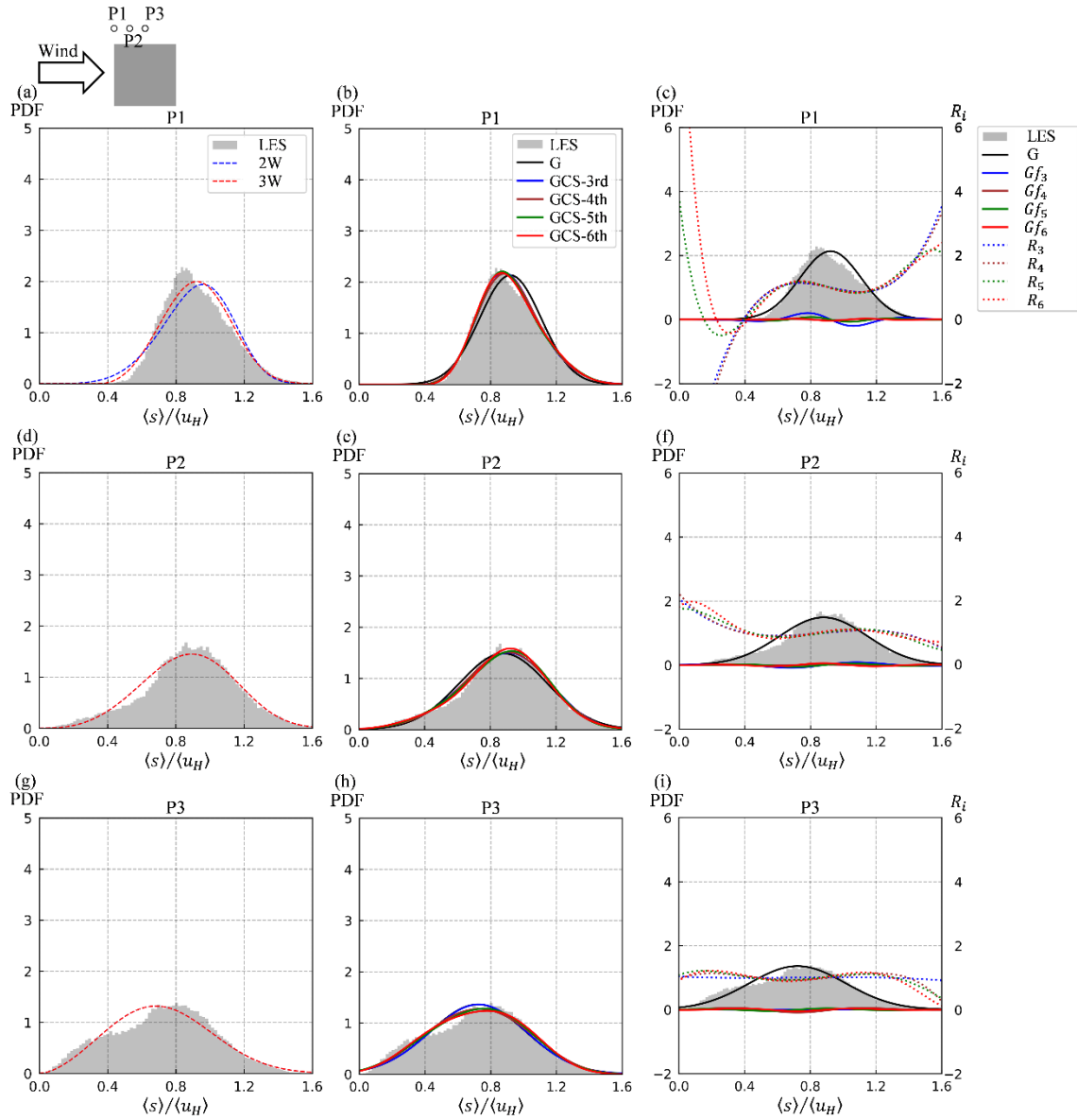


図 5-2 建物横の剥離域における風速の確率密度分布

(a,d,g) 2W, 3W 法によってモデル化された確率密度分布

(b,e,h) GCS 法 (2 次～6 次) によってモデル化された確率密度分布

(e,f,i) 各次数の修正項 R_i とガウス分布との積 GR_i

次に、図 5-3 には建物背面の後流域における確率密度分布と 2W 法・3W 法、GCS 法における予測モデルを示す。尚、測定点は図 5-3 の左上に示すように P4～P6 までの 3 点である。図 5-3(a,d,g)は 2W・3W における予測モデル分布を、図 5-3(b,e,h)は GCS 法における 6 次の項までの予測モデル分布を示している。また、図 5-3(c,f,i)は GCS 法の各次数の修正項 $R_i(x)$ とガウス分布との積 Gf_i (図中点線) が示されている。図 5-3(a,d,g)の 2W 法, 3W 法に注目すると建物背面の後流域においてはいずれの測定点においても精度よく予測できていることが確認できた。また、図 5-3(e,h)における GCS 法も同様に精度よく予測できているが一方で、P4 における図 5-3(b)では、元の風速分布と比べて $\langle s \rangle / \langle u_H \rangle = 0.2$ においてピーク値を予測しきれておらず、 $\langle s \rangle / \langle u_H \rangle = 0.5$ 付近において分布が振動していることが確認でき、2W 法・3W 法と比べて元の風速分布との不一致が見られる。この不一致は図 5-3(c)を見ると修正項 $R_i(x)$ とガウス分布との積 Gf_i について 5 次, 6 次の高次の項が過大評価かつ振動していることが考えられる。与えられた高次の統計量を満たすためにガウス分布の修正が行われるため、高次の項における 2 次ピークは結果として現実にはそぐわない風速分布を表現することになる。

全体を通して、P4 から P6 までは、2W 法, 3W 法, GCS 法のいずれも高い精度で風速データを予測したが、P4 における GCS 法による分布の不一致は、特定の位置での予測モデルの妥当性を確認する必要性を示唆している。

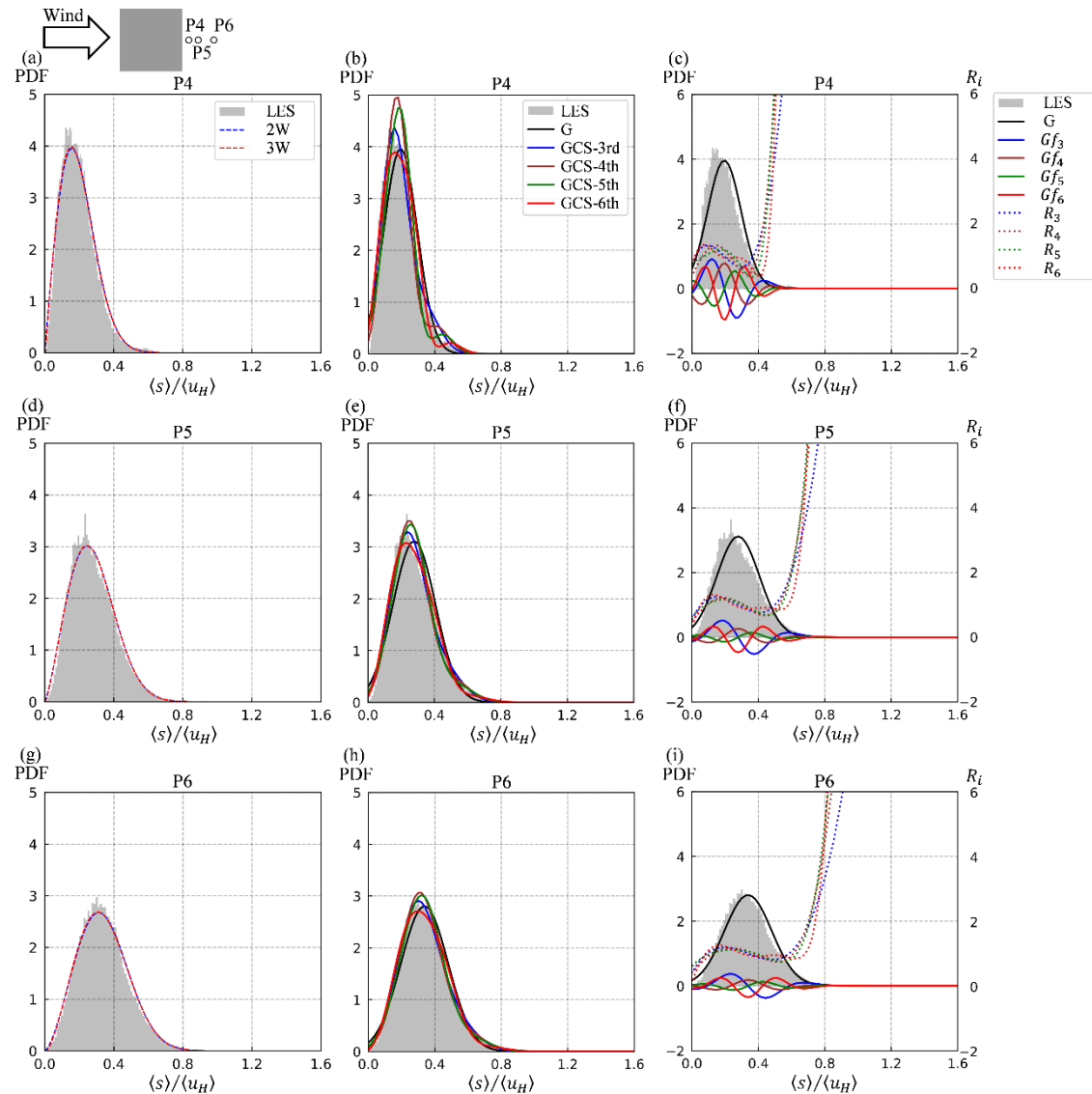


図 5-3 建物背面の後流域における風速の確率密度分布

(a,d,g) 2W, 3W 法によってモデル化された確率密度分布

(b,e,h) GCS 法 (2 次～6 次) によってモデル化された確率密度分布

(c,f,i) 各次数の修正項 R_i とガウス分布との積 GR_i

5.5 2W・3W 法, GCS 法それぞれの低頻度発生強風の予測精度

本節では, 2W・3W 法, GCS 法それぞれによって導かれた各超過風速と実測値を比較することで, 各モデルの低頻度発生風速の予測精度について検討する. 図 5-4 に LES による数値解析結果から直接導出した $q = 0.1\%$, 1% , 10% , 90% , 99% , 99.9% の低頻度発生風速 (縦軸) と 2W 法: 図 5-4(a)・3W 法: 図 5-4(b), 2 次 GCS 法: 図 5-4(c), 3 次 GCS 法: 図 5-4(d) それぞれの手法により導出した低頻度派生風速 (横軸) の比較図を示す. これらのモデルはそれぞれ 2W 法・2 次 GCS 法では平均風速, 標準偏差を 3W 法・3 次 GCS 法では平均風速, 標準偏差, 歪度と同じ統計量を使用しているが, モデル

決定の際のアプローチが異なるものである。結果を確認すると、2W 法、3W 法ともにそれぞれ 2 次、3 次の GCS 法よりも精度よく低頻度発生風速を予測できていることが分かる。このことは同じ統計量を使用していたとしても手法によって予測精度に差異が生まれることを示している。

具体的には 2W 法と 2 次 GCS 法を比較すると、2 次 GCS 法は予測誤差が 20%以上外れたプロットが存在していることに対して、2W 法はおおむね 20%以内の予測誤差に収まっている。また、3W 法と 3 次 GCS 法についてはいずれも予測精度 10%以内であるが、3 次 GCS 法には 10%を外れたプロットの存在も確認できる。これは、2W・3W 法と GCS 法のそれぞれが元としている確率密度分布と予測対象であるスカラー風速の分布性状との間の類似性に起因すると考えられる。スカラー風速の分布形状は裾野が広がるような形状となっており、これは 2W・3W 法が元としているワイブル分布の特性と一致する。一方で GCS 法は正規分布を基とする左右対称形状の分布を基としており、平均風速、標準偏差、歪度を用いて低頻度発生強風を予測する場合、2W・3W 法の方が精度よく予測できることがわかった。

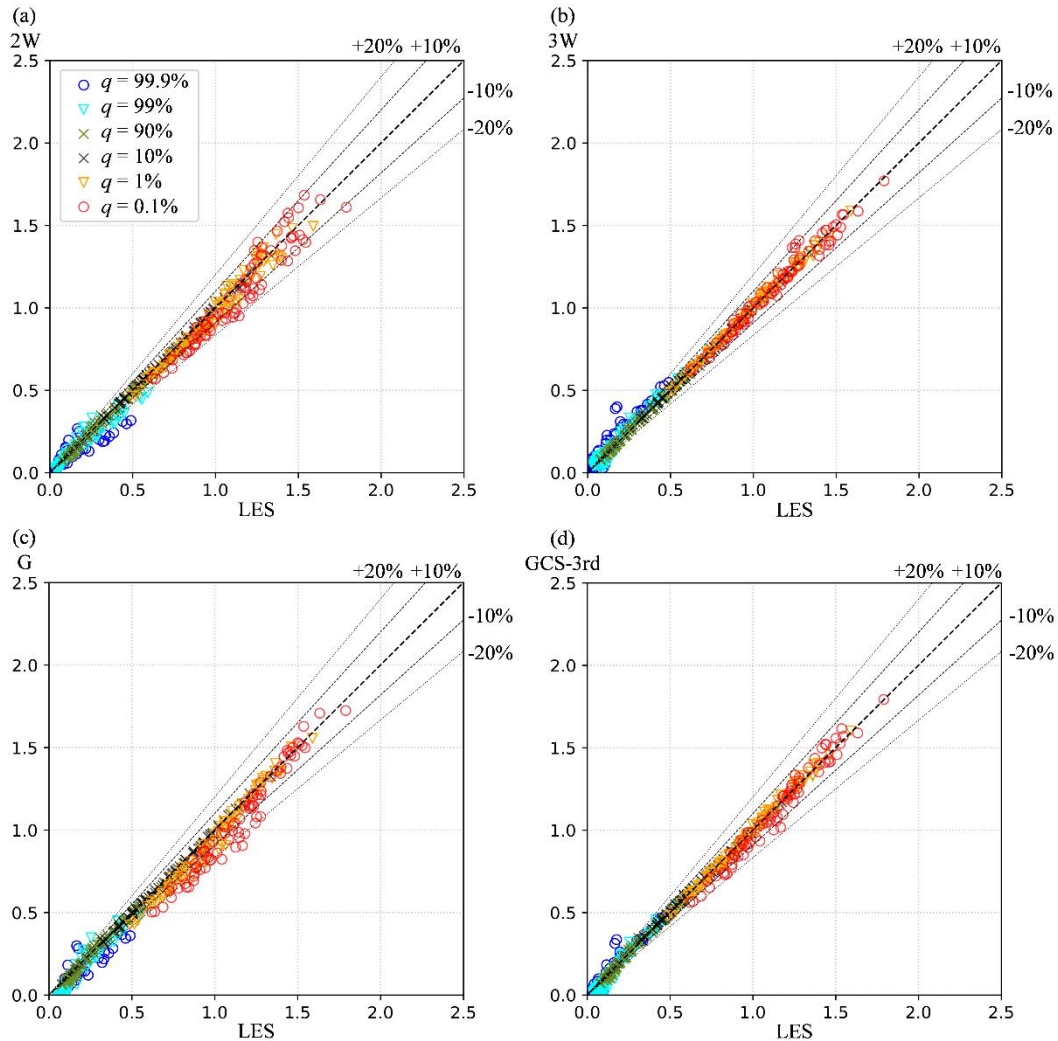


図 5-4 歩行者高さにおける 0.1%, 1%, 10%, 90%, 99%, 99.9%超過風速と
(a) 2W 法, (b) 3W 法, (c) GCS2 次 (ガウス分布), (d) GCS3 次
によって予測された超過風速の精度比較

続いて, 図 5-5 は LES による数値解析結果から直接導出した $q=0.1\%$, 1% , 10% , 90% , 99% , 99.9% の低頻度発生風速 (縦軸) と 4 次 GCS 法: 図 5-5(a)・5 次 GCS 法: 図 5-45b), 6 次 GCS 法: 図 5-5(c)とそれぞれの手法により導出した低頻度派生風速 (横軸) の比較図を示す. 図 5-4 の 2 次, 3 次の GCS 法からさらに高次の統計量を使用して予測しており, 4 次, 5 次, 6 次と高次の統計量を使用するにつれて, 予測精度が向上しており, 6 次の GCS 法では予測精度は 5%未満となっている. 高次の統計量を用いることによる低頻度発生強風の予測精度の向上は, より高次の統計量を用いた予測モデルの発展の可能性を示唆している.

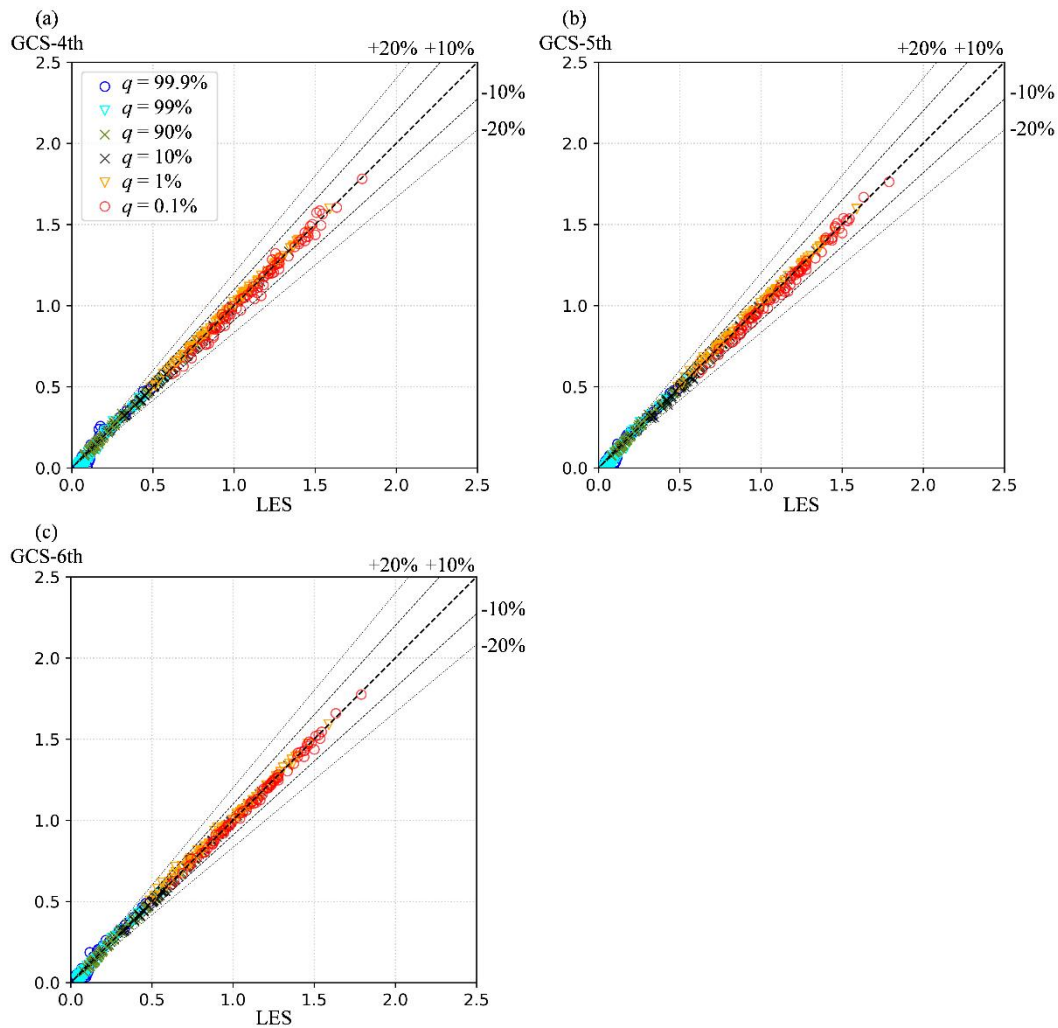


図 5-5 歩行者高さにおける 0.1%, 1%, 10%, 90%, 99%, 99.9%超過風速と
(a) GCS4 次, (b) GCS5 次, (c) GCS6 次による超過風速の予測値との精度比較

低頻度発生強風の各手法の予測精度を定量的に比較するために、二乗平均平方根誤差 (RMSE) による評価を行った結果を図 5-6 に示す。二乗平均平方根誤差 (RMSE) は以下の式 (5-11) で定義される。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \left((s_q)_E - (s_q)_{LES} \right)^2 / \langle u_H \rangle} \quad (5-11)$$

ここで、 $N=80$ はプローブ点の総数 (図 5-1 (b) 参照)、 $(s_q)_E$ は各手法による推定低周波風速、 $(s_q)_{LES}$ は LES 時系列データから算出した低周波風速である。

図 5-6 において、発生風速が低いほど、すべての手法の RMSE が大きくなることわ

かり、このことは図 5-4、図 5-5 の散布図による考察と一致する。

また、すべての GCS 法において、 $q=99.9\%$ での RMSE が比較的大きくなっている。これはガウス分布が負の無限大からの分布であるためである。一方で、2W 法と 3W 法はそれぞれ 0 とくが下限値となっているため、2W 法と 3W 法の $q=99.9\%$ における RMSE の値は主に低頻度発生強風の推定の不確実性に起因していることがわかる。

6 次の GCS 法では、 $q=99.9\%$ における RMSE が GCS-5 法よりも大きくなっているが、これは式 (5-3) の拡張項 $Gf_6(x)$ の不確かさに起因すると考えられる。 $Gf_6(x)$ は偶数関数であり、確率密度分布の左右の裾野を対称的に変化させる方向に機能する。さらに、すべての超過確率において、G 法の RMSE は、左右対称形の正規分布による予測となるため、歪んだ確率密度分布のモデル化には限界があり、他の手法と比較すると最も大きくなっている。 $q=99\%$ から 0.1% において、6 次の GCS 法の RMSE は 0.02 以下を維持しているが、他の手法はいくつかの超過確率において 0.02 を超える RMSE を持つことが確認された。このことから、GCS-6th 法を本研究で最も精度の高い方法と見なすことは妥当であると言える。

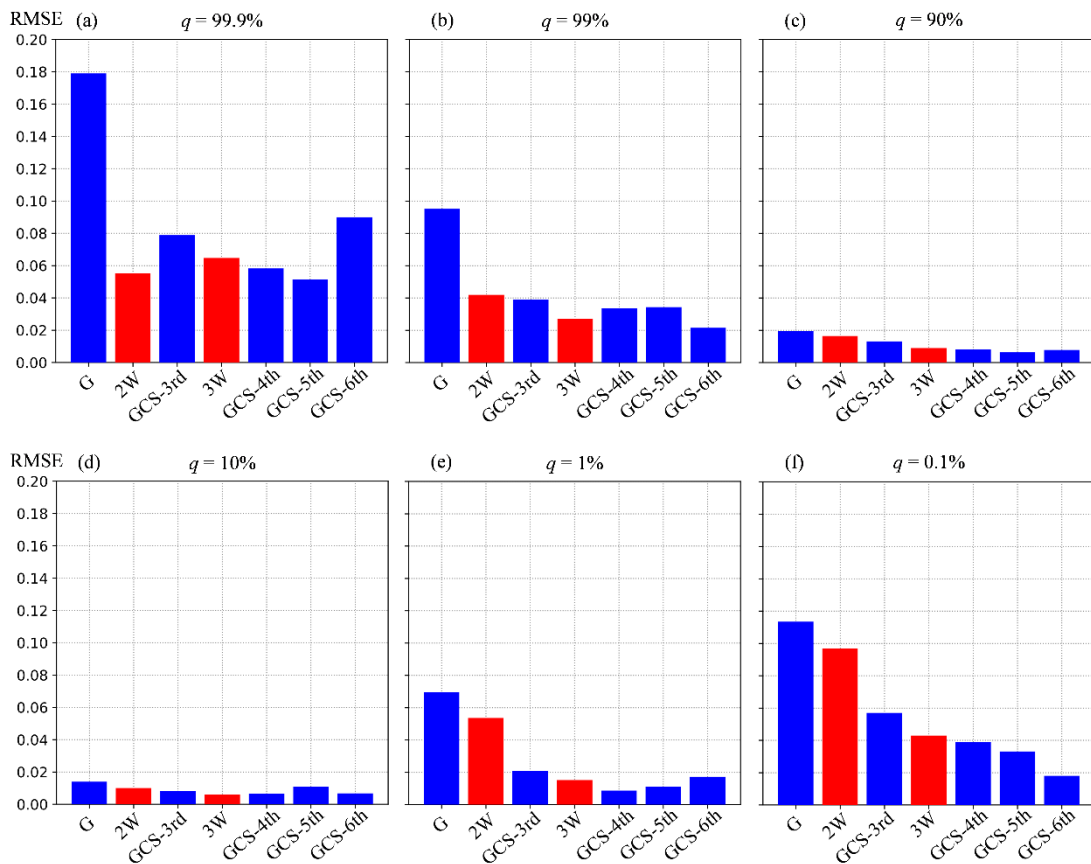


図 5-6 各種手法における低頻度発生強風の予測精度の RMSE

(a) $q=99.9\%$, (b) $q=99\%$, (c) $q=90\%$, (d) $q=10\%$, (e) $q=1\%$, (f) $q=0.1\%$.

5.6 結言

本研究では歩行者高さにおける低頻度発生強風の予測に対するより良い手法の評価を目的として、Okaze et al. (2017)⁽⁶⁾による 1:1:2 単体角柱周りを対象とした LES の結果を再解析することで、GCS 法による結果と 2W 法・3W 法の比較を行った。

はじめに建物側面の剥離域、建物背面の後流域の各測定点におけるスカラー風速の確率密度分布を 2W 法・3W 法、2 次～6 次 GCS 法を基に算出した確率密度分布と比較を行うことで、各予測手法の再現性と、より高次の統計量を用いて予測することによる精度への影響を検討した。その結果、ワイブル法・GCS 法共に 2 峰性の分布を有する測定点では予測精度が 1 峰性分布を有する測定点に比べて測定精度が落ちることが確認された。一方で、1 峰性を有するそのほかの測定点ではワイブル法・GCS 法共に元の確率密度分布とよく一致していた。加えて、いずれもより高次の統計量を用いることで予測精度が向上することが確認された。また、GCS 法では 1 峰性の分布においても、分布がそぐわない測定箇所も存在することが確認された。これは各測定点における予測精度の検証を行うことの重要性を示唆していると言える。

次に、2W 法・3W 法、2 次～6 次 GCS 法を用いて推定した低頻度発生強風の予測精度の比較を行った。その結果、2W 法・3W 法が 2 次、3 次の GCS 法による予測値に比べて予測精度が高く、同じ統計量を用いたとしても手法の違いによって予測精度に差が出ることが分かった。これは、スカラー風速の確率密度分布が強風域にすそ野が広がるような分布性状を有しており、2W 法・3W 法が基とするワイブル分布と分布性状が類似していることが要因と考えられる。

最後に、各予測手法による予測精度を定量的に調べることを目的として、二乗平均平方根誤差 (RMSE) による評価を行った。その結果、より高次の統計量を用いて予測を行うことで予測精度が向上すること、本研究では 6 次の GCS 法が最も予測精度の高い手法であることが明らかになった。

参考文献

- [1] S. Murakami, Y. Iwasa, Y. Morikawa, Study on acceptable criteria for assessing wind environment at ground level based on residents' diaries, J. Wind Eng. Ind. Aerod. 24 (1986).
- [2] E. Willemsen, J.A. Wisse, Design for wind comfort in The Netherlands: procedures, criteria and open research issues, J. Wind Eng. Ind. Aerod. 95 (2007) 1541–1550.
- [3] Ikegaya, N., et al.: Evaluation of rare velocity at a pedestrian level due to turbulence in a neutrally stable shear flow over simplified urban arrays, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., vol. 171, pp. 137–147, 2017.

- [4] Ikegaya, N., Kawaminami, T., Okaze, T., & Hagishima, A. (2020). Evaluation of exceeding wind speed at a pedestrian level around a 1: 1: 2 isolated block model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 201, 104193.
- [5] Wang, W., & Okaze, T. (2022). Statistical analysis of low-occurrence strong wind speeds at the pedestrian level around a simplified building based on the Weibull distribution. *Building and Environment*, 209, 108644.
- [6] Okaze, T., Kikumoto, H., Ono, H., Imano, M., Hasama, T., Kishida, T., Nakao, K., Ikegaya, N., Tabata, Y., Tominaga, Y., “Large-Eddy Simulations of flow around a high-rise building: validation and sensitivity analysis on turbulent statistics”, EACWE2017
- [7] Hald, A. (2000). The early history of the cumulants and the Gram - Charlier series. *International Statistical Review*, 68(2), 137-153.
- [8] Weibull, W.: A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, *J. Appl. Mech.*, vol. Vol. 18, pp. 293–297, 1951.

第 6 章 結論

本論では、歩行者高さにおける突風現象や温熱感に代表されるスカラー濃度分布の統計的性質と都市幾何形状の関係性を明らかにし、稀に発生する強風や弱風を推定することを目的に、一連の **Large-eddy simulation** に取り組んだ。単純化された都市配列を対象に、非定常な都市気流及びスカラー濃度場の LES を実施した例から、単体建物周辺気流を対象とした LES の結果を再解析することで、建物周囲の複数の地点を対象として歩行者高さにおける速度の確率分布性状の分布特性を調査した例まで、複数の条件における歩行者高さの風速の確率特性を調べることで、歩行者空間風速に対する確率的分析及び予測手法の確率に向けた研究を実施した。また、統計モデルの一例として、GCS 法とワイブル法を適用する具体例を示し、それぞれの予測精度の比較により統計モデルの妥当性検証を行った。以下に各章の要約と結論を示す。

第2章 屋外風環境に関する先行研究と現状

本節では3章・4章・5章にて論じる研究内容の位置づけを明らかにすることを目的として、都市風環境に関する既往研究をもとに動向・成果のレビューを行った。レビューの結果、本研究にて取り組む課題を3つ選定した。

- 都市空間内の歩行者高さにおける突風現象について、幾何的特性との関係を調べた研究は多くはなく、特に、平均風速評価において考慮されている高さ変動の影響については十分に議論されていない。また、時間的空間的な変動を含む流れ場において、スカラー濃度場の分布と流れ場との関係性について検討されていない。
- 都市空間内の歩行者高さを対象とした平均風速および瞬時風速を都市幾何形状によって整理することが行われているが、これは街区全体を対象に代表的な平均風速および強風を評価するというものである。しかし、実際に問題となるビル風のような突風現象は、建物との相対的な位置によって発生頻度は大きく異なると考えられるため、建物からの相対的な位置における突風の発生確率の評価を行うことが肝要であるが、その研究報告は多くなく、更なる知見の蓄積が必要であると言える。
- 低頻度発生強風の推定について、計算負荷の観点から、より低次の統計量を用いた統計モデルによる予測が求められている。予測手法として GCS 法とワイブル法がよく用いられているが、それぞれの手法における予測精度の差や、より高次の統計量を用いることによる精度の向上について系統的にまとめることが重要である。

第3章 単純都市全域を対象とした歩行者高さ風速とスカラー濃度の確率性状に関する研究

本章では、都市空間の風環境評価の観点から、都市配列要素の一つである建物高さ分

布が都市歩行者高さにおけるビル風や稀に発生する高濃度スカラー分布のような時間的、空間的に変動を含む事象に及ぼす影響に着目し、非定常な気流場の幾何的依存特性や都市内平均風速との関係性を調査した。

本章の流れ場は低圧力勾配で駆動しており、計算領域の水平方向の境界条件に周期境界条件を適用しているため、粗度による乱れが十分に発達するまで助走時間が必要となる。助走時間の長さについては、無次元圧力勾配の時間変動の観察に加えて、本章の研究ではスカラー濃度分布も考慮していることを踏まえ、スカラー濃度が上端部に到達する間にかかる時間を算出した。その結果、 $1350T$ 以上のデータであれば乱れが十分に発達し数値計算上有意な結果が得られる事が明らかになった。また、統計上有意な解析対象時間を調べるために、異なる平均化時間における主流方向風速の気流場、主流方向風速、Reynolds stress, RMS 速度, Dispersive stress の鉛直プロファイルを観察し、その結果、キャノピー層内では $270T$ 、上空においては $1350T$ の解析時間が必要である事が明らかになった。また、既往研究結果と LES の結果を比較し、本章の数値計算結果についてはキャノピー内 ($0 \leq z/L \leq 1$) では、数値計算結果を十分に再現できているとして、解析を行う事にした。

また、本章では風速及びスカラー濃度の確率密度分布を基に、いずれも誤差が 3%以下と十分に小さくなる 4000s を解析時間として決定した。

上述の解析条件を基に、初めに都市空間内の時間平均速度分布・スカラー濃度分布を対象に高さ分布の影響を調べた。その結果、高さ分布の導入によって都市空間内の平均風速は増加し、一方でスカラー濃度は減少することを示した。また、非定常のスカラー濃度分布について、高さ分布の導入によって、瞬間的な高スカラー濃度が減少しており、このことは発生頻度の低い高スカラー濃度に曝される危険性が都市空間内平均風速増加によって低減できることを示唆している。

一方で、非定常な速度分布に注目すると、高さ分布の導入による平均風速の増加に伴って瞬間的な強風の発生頻度も増加している。このことから高さ分布の導入によって都市空間内平均風速が増加し、風通しやスカラー滞留による居住者快適性が改善される一方で、強風の発生頻度は向上し、突風による歩行者転倒リスクは上昇することが明らかになった。

第4章 単体角柱周辺流れにおける歩行者高さ風速の確率性状に関する研究

本章では都市空間内、歩行者高さにおける突風現象について、その大きさと発生確率の空間的偏在性を調べるためことを目的として、Okaze et al. (2017) による 1:1:2 単体角柱周りを対象とした LES の結果を再解析し、建物周囲の複数の測定点における速度の確率密度分布特性を調査した。

使用するデータの再現性については検証用風洞実験データを使用して、鉛直、水平方向風速のコンタマップと各成分風速、乱流エネルギーの鉛直、水平プロファイルを基に確認を行い、風洞実験結果をよく再現できているとして解析を行った。

初めに、歩行者高さ水平面内、各測定点における各成分風速、スカラー風速の確率密

度分布を元に、空間的な分布特性を検討した。その結果、建物側面における弱風域と強風域の境界にあたる位置では確率密度分布が二峰性の分布を有しており、これは瞬間的には建物壁面の逆流域の発達によって低風速が支配的になる一方で逆流渦が小さくなると強風が支配的になることで引き起こされていると考えられる。この様な測定点においては弱風域側の分布によって平均風速は小さくなる傾向にあるが、一方で強風域の存在によって瞬間的には突風現象が引き起こされている。このことは風環境評価において、平均風速だけでなく瞬間的な気流分布を考慮することの重要性を示唆していると言える。

次に、各速度成分の確率分布を基に、超過確率及び超過風速を算出し、超過風速の予測方法について考察を行った。その結果、平均風速の増加に伴い主流方向風速、スパン方向風速、スカラー風速の超過風速は単調増加し、鉛直方向風速は単調減少しており、一次直線からの乖離も大きくなっていることがわかった。特に、稀に発生する超過風速になるほどこの傾向は顕著あり、同じ平均風速においても異なる超過風速を示していることが確認された。これは同じ平均風速においても標準偏差が異なることによって風速の隔離密度分布性状に差が生まれていると考えられ、平均風速と標準偏差を考慮した超過風速の予測について検討を行った。各点の平均風速と標準偏差を元に各成分風速、スカラー風速の規格化超過変数を求め、標準正規分布との比較を行った。その結果、超過確率 10%から 90%の全ての測定点において、正規分布より求めた P_F の誤差が $\pm 10\%$ 以内であることが確認された。さらに、標準正規分布と各測定点における平均風速、標準偏差を用いて過風速の予測を行い実測値との比較を行った結果、強風域における予測については、各成分風速、標準正規分布ともに $\pm 10\%$ の精度で予測可能であることが示された。

第5章 単体角柱周辺流れにおける歩行者高さ風速に関する統計モデル適用に関する研究

本章では、歩行者高さにおける低頻度発生強風の予測について、実用性の観点からワイブル法、GCS法の異なるモデル式、より高次の統計量を用いることによる予測精度への影響について、Okaze et al. (2017)による1:1:2単体角柱周りを対象としたLESの結果を再解析することで調査した。

はじめに、建物側面の剥離域、建物背面の後流域の各測定点におけるスカラー風速の確率密度分布について、各予測手法の再現性と、より高次の統計量を用いて予測することによる精度への影響を調べた。その結果、ワイブル法・GCS法共に二峰性の分布を有する測定点では測定精度が低くなる一方で、一峰性を有するそのほかの測定点ではワイブル法・GCS法共に元の確率密度分布とよく一致しており、いずれもより高次の統計量を用いることで予測精度が向上することが確認された。

次に、2W法・3W法、2次~6次GCS法を用いて推定した低頻度発生強風の予測精度の比較を行った。その結果、2W法・3W法が2次、3次のGCS法による予測値に比べて予測精度が高く、同じ統計量を用いたとしても手法の違いによって予測精度に差が出

ることが分かった．これは，スカラー風速の確率密度分布が強風域にすそ野が広がるような分布性状を有しており，2W 法・3W 法が基とするワイブル分布と分布性状が類似していることが要因と考えられる．

最後に，各予測手法による予測精度を定量的に調べることを目的として，二乗平均平方根誤差 (RMSE) による評価を行った．その結果，より高次の統計量を用いて予測を行うことで予測精度が向上すること，本研究では 6 次の GCS 法が最も予測精度の高い手法であることが明らかになった．

謝辞

本論文を執筆するにあたり、多くの方々よりご指導・ご協力を頂きました。

指導教官である谷本潤先生，萩島理先生，池谷直樹先生にはいつも本質的な助言を頂きました。

秘書の吉鶴さんには日々の生活環境を整えて頂いただけでなく，様々な場面で手続きをお助け頂きました。

この他の研究室の皆様にも学術的な意見交換や生活面で大変お世話になりました。

また，本研究は，日本建築学会屋外空気環境小委員会・検証用ベンチマーク実施 WG の活動結果として得られた数値解析結果を利用したものであります。

ここに深謝の意を表します。

最後に，修了まで精神的に支えて下さった両親・家族に感謝の意を表し，本論文の結びと致します。

令和6年1月7日

川南 太志