

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：12611

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14869

研究課題名（和文）極端気象における都市境界層の乱流構造とピーク風速の不確定性を考慮した突風被災推定

研究課題名（英文）Disaster estimation of wind gust considering turbulence structure and uncertainty of peak wind velocity in urban boundary layer for extreme weather event

研究代表者

河合 英徳（Kawai, Hidenori）

お茶の水女子大学・基幹研究院・准教授

研究者番号：00735376

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：気象モデルによって得られた気象場に基づき、市街地の広域数値流体解析を実施し、都市キャノピー内外のピーク風速と建築物の風圧力推定のための流入条件を整備し、そのばらつきを明らかにした。さらに粗度の不均一性が異なる複数のブロック群のケースを対象としたピーク風速の推定を実施し、都市キャノピー内外の乱流構造の特徴に着目しながら都市キャノピー内外のピーク風速の発生要因を明らかにするとともに、複数の流入条件に基づく三次元角柱解析から流入条件の不確定性が三次元角柱の風圧力分布に及ぼす影響を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題では「空間フィルタリング・リスケーリング手法」により気象モデルと工学LESモデルの接続を試みることにより、それぞれの分野で示された乱流構造の横断的な理解を試みると同時にピーク風速と乱流構造の特徴の関係を示したといえる。また、本研究で得られた風圧力のばらつきについては、多項式カオス展開などの不確定性定量化（UQ）手法を適用することで外装材の風圧力のばらつきの要因を明らかにし、将来的には設計値の理論的・客観的な根拠を示す資料として提示されることが期待される。

研究成果の概要（英文）：Based on the meteorological field obtained by the meteorological model, numerical simulation of broad urban area was carried out to make inflow conditions for estimating peak wind speeds inside and outside the urban canopy and wind pressure on buildings, and to clarify the variability of these conditions. Then, peak wind speed estimation was also carried out for several block group cases with heterogeneous roughness condition to clarify the factors causing peak wind speeds inside and outside the urban canopy, focusing on the characteristics of the turbulent structure inside and outside the urban canopy. Next, the effect of uncertainties in inflow conditions on the wind pressure distribution in three-dimensional square cylinder was also shown from analysis cases of three-dimensional square cylinder based on multiple inflow condition.

研究分野：風工学

キーワード：極端気象 数値流体解析 ピーク風速 気象モデル

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

建築耐風設計では日本建築学会の建築物荷重指針で設計風速の鉛直分布は大気安定度が中立の乱流境界層を仮定したべき乗則に基づいて与えられ、実気象場を想定した風速分布となっていない。しかしながら、高さ 100m 程度までの接地層領域においては不均一な粗度要素による乱れが大きいことから一様のプロファイルが考慮され、その根拠は明確ではない。一方で、近年 2018 年の台風 21 号のように都市部に大型台風が襲来する事例が近年頻発しており、不均一な粗度条件に伴う乱れによって外装材の被災が懸念される。よって、外装材の設計などの視点からも都市キャノピー内外の領域におけるピーク風速の推定が重要となっている。

都市キャノピー内外のピーク風速は都市境界層内の乱流構造によって瞬発的にもたらされることから、乱流構造の解明と乱流構造がピーク風速に及ぼす影響が示されることは重要である。また、ピーク風速の発生は非定常な風速の変動の中に断続的に表れる現象であることから、計算条件や入力した都市モデルの不確定性の影響を大きく受ける。よってこれらピーク風速や都市キャノピー内にある建築物の外装材の風圧力に関するばらつきの評価が課題である。

### 2. 研究の目的

市街地の広域数値流体解析によって得られた乱流構造の特徴に着目しながら都市キャノピー内外のピーク風速の発生要因を明らかにするとともに、建築物の外装材の風圧力のばらつきについて不確実性の定量化手法を適用し、ピーク風速発生の不確定性を考慮した外装材の風圧力の被災推定を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) ピーク風速推定のための極端気象時の流入条件の作成

台風などの強風時における気象場は既往研究において WRF, WRF-LES のような気象モデルによって台風の経路や上空の風速が推定されている。一方で建築物に作用する非定常な風圧力を予測するためには建築物の空間形状を解像したうえで、非定常な乱流特性を再現可能な LES (Large Eddy Simulation) を実施することが不可欠であるが、気象モデルの解を LES の境界条件として用いるためには高周波な変動成分が不足している。

本課題では台風のような強風現象を対象として、WRF-LES により台風通過時の風速の鉛直プロファイルを再現し、その特性を分類し、べき指数、大気安定度、乱れの強さなどの地表近傍の乱流特性のばらつきを整理する。さらに、研究代表者らが提案した「空間フィルタリング・リスケーリング手法」を用いて WRF-LES によって得られた気象場に高周波変動成分を付加し、台風時の都市境界層について LES を解くための流入条件データベースを作成する。

#### (2) 都市キャノピー内外の乱流構造を踏まえた乱流構造の分類

台風が市街地に襲来した際、顕著な被害が発生する外装材の評価においては、設計対象の建築物が立地する市街地の乱流場中でのピーク風速の挙動を把握することが重要であると考えられる。研究代表者らはすでに上空の高速な流体塊が下降することによって都市キャノピー上部においてピーク風速が発生することを明らかにしており、ピーク風速の発生が不均一な粗度を有する都市境界層内の乱流構造に起因することが示唆されている。このような乱流構造については低速流体塊に基づく組織構造 (Cocea ら, 2006) など都市の粗度条件に基づく構造や台風時に上空で発生するロール構造の存在 (Ito ら, 2017) が知られている。よって、本課題では (1) において作成された時空間の流入条件データベースにより気象場の変動を含んだ境界条件の LES を中低層市街地、高層建築物群を含む市街地を対象として実施し、強風時における乱流構造の分類を行う。

#### (3) 都市キャノピー内外のピーク風速の特性と建築物の風圧力への影響

先に示したようにピーク風速は非定常な風速の変動の中の断続的な現象として位置づけられることから、その値にはばらつきがあると考えられる。既往研究などではピーク風速は流入風の乱流特性や地表面の粗度パラメータによりばらつきが示されている。

本課題では台風などの強風現象を対象として、複数の流入条件や粗度条件に基づく市街地の大規模 LES を実施する。ピーク風速の発生に関するばらつきを示したうえで、市街地内の建築物の表面圧力分布を明らかにし、流入風の乱流特性や粗度条件などの不確定性を考慮した風圧係数分布のばらつきを明らかにする。

## 4. 研究成果

### (1) 極端気象時の流入条件の作成

気象モデル WRF-LES の解析結果に基づき、平均風速や乱れの強さの鉛直プロファイルな地表近傍の乱流特性のばらつきを整理した。また、WRF-LES の結果についてスペクトル解析などを用いて風速の変動性状について確認した結果、台風などの強風時において、建築物に作用する非定常な風圧力を予測するために高周波な変動成分が不足していることを確認した。以上の結果を踏まえ、空間フィルタリング・リスケーリング手法を用いて WRF-LES によって得られた気象場に高周波変動成分を付加し、強風時の都市境界層内の風速について十分な変動が得られることを確認した。

### (2) 気象擾乱を含む流入条件に基づく都市広域の数値流体解析

メソ気象モデル WRF-LES と空間フィルタリング・リスケーリング手法による気象擾乱を含む流入条件に基づいて、数 km の都市域を対象とした広域数値流体解析を実施し、その乱流特性を吟味した。解析対象については過去に都市域に接近し、強風被害をもたらした気象条件を複数選定し、解析領域内における吹走過程や都市境界層内の乱流の変動特性を分析した。都市境界層内の乱流の変動特性の分析に当たっては、従来の風工学で用いられる乱流境界層に基づく流入条件の広域数値流体解析も実施した。

その結果、気象擾乱を含む流入条件では、都市キャノピー上空に数百メートルスケールの変動を含む気象場の変動が広域解析にも接続され、乱流境界層を流入条件としたケースと比較して、高さ数十 m 程度の都市キャノピー上部から高さ 500m 以上の都市境界層上部まで上下の変動が大きくなることが確認されたが、台風の接近時における流入条件では、コリオリ力と遠心力が空気塊に作用することから通常の境界層と比較して鉛直方向の風向の分布が大きくなる点が課題となった。

そこで鉛直方向に風向の分布のある気象場に対応するために、複数の面の風速の時空間データベースを作成し、建物・地形を解像した市街地の LES に接続した。その結果、台風下での風向の分布を有する気象場に対して風向の分布や変動に対応した市街地の流入変動風のデータベースの作成が可能となった。さらに、都市境界層内の流速の時系列変動特性について吟味したところ、スペクトル解析より、従来の乱流境界層の流入条件と比較して鉛直方向、スパン（主流方向に直交）方向において、低周波の風速変動成分のエネルギーが大きくなることを確認した。

### (3) 粗度の不均一性が異なる複数のブロック群のケースを対象としたピーク風速の推定

都市キャノピーを再現した市街地モデルの基礎的な検討として、粗度の不均一性が異なる複数のブロック群のケースについて、乱流境界層に基づく流入条件による LES を実施した。解析結果は風洞実験結果との比較による検証を行い、乱流解析手法の精度を確認した。解析により得られた乱流場については、建物群上部に発生する組織構造の分類を行ったうえで、組織構造がピーク風速の分布特性と発生過程に及ぼす影響を示した。その結果、粗度ブロック群の直上には既往文献と同様に建物群のスケールと対応した低速流体塊に伴う組織構造が確認され、この組織構造に付随して風速の変動値が大きくなることが示された。一方で、粗面境界層の上部では境界層厚スケールのロール状の構造が確認された。さらに、粗度が不均一であり、都市キャノピー内外の鉛直方向の風速変動が大きい解析ケースにおいてピーク風速の発生過程を分析した結果、粗面境界層の上部にあるロール状の構造と建物群直上の高風速の領域が一体になることによって、速度の大きな流体塊を形成し、強いピーク風速を形成することが示唆された。

### (4) 流入条件の不確実性が三次元角柱の風圧力分布に及ぼす影響の分析

流入条件の不確実性の影響に関する基礎的な検討として、サンプルや境界層厚、乱流強度の異なる流入変動風を複数作成し、複数の流入条件に基づく三次元角柱解析を実施した。特に、粗度条件が同一となる複数サンプルの流入条件の解析では、乱れの強さのばらつきは小さいものの、側面のピーク風圧係数のばらつきは隅角部からの剥離せん断層の影響を強く受けており、風上面や背面の風圧係数のばらつきと比較して相対的に大きいことが示された。今後、アプローチフローの乱流構造や剥離せん断層の挙動等、ばらつきを発生させる要因についてさらなる吟味が必要である。なお、本研究で得られた風圧力のばらつきについては、多項式カオス（Polynomial Chaos）展開などの不確実性定量化（UQ）手法を適用することで外装材の風圧力のばらつきの要因を明らかにし、将来的には設計値の理論的・客観的な根拠を示す資料として提示する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

|   |                   |
|---|-------------------|
| 1. 著者名<br>河合英徳, 田村哲郎                                      | 4. 巻<br>26        |
| 2. 論文標題<br>不均一な粗度条件を持つ都市キャノピーの上空に形成される組織構造がピーク風速の発生に及ぼす影響 | 5. 発行年<br>2020年   |
| 3. 雑誌名<br>風工学研究論文集  | 6. 最初と最後の頁<br>J25 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし                            | 査読の有無<br>有        |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難                    | 国際共著<br>-         |

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|