

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：12701

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2023

課題番号：20K22444

研究課題名（和文）市街地リスク評価に資する極端気象場の不確実性定量化と建物被災モデルの高度化

研究課題名（英文）Uncertainty Quantification of Extreme Weather Fields and Development of an Advanced Building Damage Model for Urban Risk Assessment

研究代表者

川口 真晴（Kawaguchi, Masaharu）

横浜国立大学・大学院環境情報研究院・非常勤教員

研究者番号：70884609

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,400,000円

研究成果の概要（和文）：台風の気象擾乱構造の不確実性および竜巻経路の不確実性を表現したアンサンブルに対して、気象モデルと工学ラージエディシミュレーションのハイブリッド解析を実施し、気象場と市街地の流れ場のアンサンブルビッグデータを作成した。台風については、特に極端な強風発生時の境界層の気流構造特徴を明らかにし、気象擾乱により市街地での風速変動がより強化されている可能性が統計的に高いことを示した。また最大瞬間風速の不確実性に関する評価を行った。竜巻については実市街地での最大瞬間風速の空間分布に関する不確実性を分析した。被害推定モデルの高度化に向けて大自由度解析内で建物変形や挙動を表現する連成プログラムの開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題では、大気乱流を適切に取り扱った解析手法により、顕著台風の境界層が詳細に解像され、構造的な特徴が示された。また、これまで工学的な見地からは十分に明らかにされていなかった地表近傍での強風発生に対する気象擾乱の影響について評価が実施され、強風発生の不確実性に対する定性的・定量的な知見が得られた。これらの結果は、将来的な耐風設計の改良を行う際の基礎的な資料となることが期待される。さらに市街地の強風被害のリスク推定や減災手法の検討においても活用できるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Hybrid analyses of meteorological modeling and engineering large-eddy simulations were performed on ensembles representing uncertainties in the flow structures of meteorological disturbances for a typhoon and the paths for a tornado, and ensemble big data of meteorological fields and flow fields in the urban area were generated. For the typhoon case, features of the flow structure in the extreme weather events were clarified. It is shown that meteorological disturbances are statistically likely to enhance wind speed fluctuations in urban areas. The uncertainty of the maximum instantaneous wind speed was also evaluated. For tornadoes, the uncertainty of the spatial distribution of maximum instantaneous wind speeds in actual urban areas was analyzed. A coupled program was developed to represent building deformation and vibrating behavior within a large-degree-of-freedom analysis to improve damage estimation models.

研究分野：風工学

キーワード：都市防災 不確実性 アンサンブル解析 乱流 LES 台風 竜巻 連成解析

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、顕著な台風や竜巻など極端気象により都市・住宅地において大規模な被害をもたらす事例が顕在化しており、極端気象に対して市街地の安全性を確保する建築基準・指針の妥当性の検証、竜巻などの突風現象の特殊な空気力に対する合理的な設計指針の策定が喫緊の課題となっている。

現状、建築物の強風に対する安全性の評価は、風洞実験や数値流体解析により定常な境界層乱流内での風圧を評価することにより行われている。気象モデルの情報を工学的モデルで活用した解析は、台風を対象とした Takemi ら (2019) や Huang ら (2018) などの例がわずかにあるが、気象現象に基づく気流構造と市街地の流れとの相互作用の直接的な再現については実現されておらず、極端気象場の構造に起因する強風特性や現象の不確実性、市街地での非定常な風速・風圧変動発生への効果はまだ十分に明らかになっていない。市街地の安全を確保する上で重要となる建築基準・指針の極端気象に対する妥当性を評価するため、また突風に対する合理的な設計基準を策定するためには、気象場や市街地の持つ強風や風圧被害の不確実性を評価する必要がある。さらに実市街地における強風や風圧の実態に関する詳細な情報の蓄積が必要である。

2. 研究の目的

極端気象場および市街地の流れ場の相互作用の確率的性質が建物周りの風速場や圧力場に与える不確実性についてアンサンブル解析により評価し、市街地・建物の強風リスクの推定を行う。また市街地に現れる強風の不確実性がどのような性質を持つかを明らかにする。さらに、より詳細な被災推定手法を実現するため、空気力に基づいた建物側の変形や振動挙動を再現する方法により被災モデルの高度化を行う。

3. 研究の方法

研究背景において述べた課題について、下記の方法に基づいて研究を実施した。

(1) 気象擾乱のもつ不確実性を表現する気象場のアンサンブルデータの構築

初めに、今回検討対象とする気象擾乱に基づく不確実性を定義し、それを表現する解析用アンサンブルデータの構築を行った。顕著な強風をもたらす気象現象のうち台風については、気象モデル解析による顕著台風の大規模アンサンブルデータセットを用いて、対象市街地で特に極端な強風となる極端事象メンバー群、ランダムサンプリングによるメンバー群、実経路の再現性の高いメンバー群を抽出し、気象場の気流特性の異なる小アンサンブルを作成した。竜巻については、地表近傍での経路の不確実性を評価することとし、同一の気象擾乱構造に対してわずかな位置ずれを与えたデータを複数用意した。

(2) 市街地におけるピーク風速・風圧の不確実性の評価

気象擾乱構造を再現した市街地の流体解析は、研究代表者らが開発した「気象モデル・工学 LES ハイブリッド解析手法」の枠組みを用いて実施した。この手法では、気象モデルにより大気境界層の物理過程を考慮してマイクロスケールまでのダウンスケールを行い、得られた気象擾乱の構造に対して、速度場と温度場の高波数変動成分の再生成を行い、市街地の解析に用いる気象擾乱の初期条件と流入条件を作成する。その後、市街地領域について建物や地形など実際の都市地表面の形態的特性を再現した上で、アンサンブルによる大規模並列計算 LES 解析を実施する。これによりそれぞれのスケールにおいて重要な物理現象を再現したマルチスケールの解析が可能となる。必要に応じて局所的に解像度を向上させるためオフラインスティングも実施した。格子解像度については、台風の風速に関する分析に対しては 1.5m から 3m、風圧に関する分析に対しては 0.9m とし、竜巻の解析では 0.6m を確保した。解析の対象市街地としては、台風のケースには東京都心の渋谷および大手町周辺を、竜巻のケースにはつくば市内の住宅地を選択した。

(3) 大自由度流体解析プログラムへの流体構造連成コードの実装

より精密な被災推定の手法として、空気力に基づいた建物側の変形や振動挙動を再現する被災モデルを作成するために、建物を多質点として表現する流体構造連成コードを、固体領域を埋め込み境界法により表現する上記の大規模並列計算 LES プログラムに対して導入した。

4. 研究成果

(1) 台風の気象擾乱構造について

顕著台風の大規模アンサンブルデータセットより抽出した、極端事象メンバー群、ランダムサンプリングメンバー群、実経路の再現性の高いメンバー群について、高波数再生成手法を適用した。その結果、境界層内のコヒーレントなロール渦とそれに基づいた微細な渦構造が明瞭に再現された。メンバー群間の比較から、台風中心からの距離の差異等に基づいて、鉛直シアにより境界層内に形成される渦の高さと、極大風速の発生する高さの違いがあることが観察された。メンバー群ごとに鉛直プロファイルを確認した結果、極端事象ケースと実経再現ケースでは境界層のロール渦構造により、高度 500m 付近で極大ピークの形成が見られた。前者では特にピークが顕著でシアも大きい一方、後者はシアがやや小さくピークの影響がより地表に近い範囲にも及ぶことが明らかになった。ランダムサンプリングケースでは、高度とともに風速が上昇する概形を取るメンバーの割合が増加した。

また、極端事象メンバー群に対しては、台風中心からの距離の違いに着目して、微細な渦生成について確認した。最大風速半径付近においては流れにほぼ平行な縦渦が微細な構造として生成されるのに対し、最大風速半径の内側では、幅広な強風帯の中で、流れに対して直交する横渦による微細な風速変動が顕著になる傾向が見られた。

(2) 台風時の市街地に形成される風速・風圧の不確実性の評価

実経路の再現性の高いメンバー群について、大手町を対象とするアンサンブル解析を実施しシミュレーションの結果の 10 分平均風速値、最大瞬間風速値、ガストファクター、平均風向、風向変動等は妥当な範囲の分布を持つこと、東京管区気象台の観測地点での観測値と比較的よく対応していることを確認した。

高層密集市街地の渋谷を対象とするアンサンブル解析を極端事象ケースとランダムサンプリングケースについて実施した。2 ケースの比較から極端事象ケースにおいては気象擾乱の効果により、市街地における風速変動がより強化されている可能性が統計的に高いことが示され、より大きなガストファクターのばらつきが確認された。

極端事象ケースについて、小アンサンブル 10 ケース内における最大瞬間風速の不確実性についての評価を行った。各水平面高さでの統計値に基づいて顕著な強風分布に関する特性を明らかにした。市街地内では、地上 25m から 50m 付近の中高層建物の屋根高さ付近の高さにおいてケース間でのばらつきが特に大きくなり、10 メンバーの中位値 (50th percentile) に対して、最大値が 25%以上上昇する地点が市街地の広範囲で確認された。40%以上の上昇も局所的には見られ、外装材等への顕著な風荷重が発生する可能性を示唆した。

オフラインネスティング用コードの作成を行い、解像度約 90cm の細密格子を用いて市街地内の対象建物に対する風圧力分布を実施した。高層建物表面での風圧分布が適切に再現され、瞬発的な負圧の発生を確認した。アンサンブル解析を実施し負圧分布のばらつきについて評価を行った。負圧ピークが大きくなる場合の流れ場の特性を示し、密集街区特有のピーク負圧の発生メカニズムについて明らかにした。

(3) 竜巻の経路不確実性の評価

竜巻直径に比べて小さな位置の不確実性を与えた計算をアンサンブルで行い、竜巻経路周辺での最大瞬間風速分布の不確実性を評価した。竜巻経路のごく近傍において高風速の発生確率は一様に高かったが、経路からやや離れた場所においては、顕著な強風が多くのメンバーで発生する場所とばらつきが大きい場所の発生が確認された。

(4) 大自由度流体解析プログラムへの流体構造連成コードの実装

初めに連成コードの実装の前段階として、固体領域を埋め込み境界法により表現する上記の大規模並列計算 LES プログラムに対して事前に規定したモード形状 (梁 1 次曲げモードとロッキングモード) による強制振動を与えるコードを導入し、建物振幅や流入風の無次元風速の変化に対して既往文献と妥当な対応を示すことを確認した。

次に、上記のコードを改良し、建物を多質点として表現した上でモード解析手法と組み合わせることにより、空気力に基づいた建物側の変形や振動挙動を再現する流体構造連成コードの実装を行った。基礎的な検証として、定常乱流境界層中での自由振動角柱の解析を実施した。今後、台風の気象擾乱流入風を用いた解析や周辺市街地や細密な建物形状を再現した大自由度での解析に適用可能であることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Masaharu Kawaguchi, Tetsuro Tamura
2. 発表標題 Predicting wind damage in a city during a typhoon: A meteorological model/LES approach
3. 学会等名 76th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masaharu Kawaguchi, Tetsuro Tamura
2. 発表標題 LES-based generation of time sequential data of instantaneous urban wind in typhoon -comparison with observational data
3. 学会等名 12th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川口真晴, 田村哲郎
2. 発表標題 台風下の高層建築物に作用するピーク風圧のLES 解析
3. 学会等名 2022年度日本建築学会大会 (北海道)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masaharu Kawaguchi, Tetsuro Tamura, Wataru Mashiko
2. 発表標題 Application of Hybrid Meteorological Model/Engineering LES Analysis to Very Strong Typhoon Jebi 2018
3. 学会等名 13th International ERCOFTAC Symposium on Engineering, Turbulence, Modelling and Measurements (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川口真晴, 田村哲郎
2. 発表標題 台風構造を再現した都市LES解析に基づく建築物の風圧推定
3. 学会等名 流体力学会年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川口真晴, 田村哲郎
2. 発表標題 台風下の実市街地における強風・風圧のピーク特性に関するLES解析
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川口真晴, 田村哲郎
2. 発表標題 2018 年台風 21 号時の大阪市中心部を再現したピーク風圧に関する解析
3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会(関東)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川口真晴, 田村哲郎, 益子涉
2. 発表標題 気象擾乱構造を再現したLESによる顕著な台風時の実都市の強風評価
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tetsuro Tamura, Masaharu Kawaguchi
2. 発表標題 Ensemble LES analysis of gust occurrence in an urban area during Typhoon Hagibis
3. 学会等名 9th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 川口真晴、田村哲郎
2. 発表標題 直交格子系LESを用いた強制振動する角柱の非定常風圧解析：振動モード形状の影
3. 学会等名 2023年度日本建築学会大会（近畿）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masaharu Kawaguchi, Tetsuro Tamura
2. 発表標題 LES analysis of ventilation performance and wind gust occurrence for strategic urban transformation
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics & 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (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
---------	---------