

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：82113

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14237

研究課題名（和文）合理的な耐風設計のための地表面付近の設計風速の提案

研究課題名（英文）Design wind speeds near the ground for reasonable wind-resistant design

研究代表者

高館 祐貴（Takadate, Yuki）

国立研究開発法人建築研究所・構造研究グループ・研究員

研究者番号：20848311

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は基規準で一定値とされている高さ Z_b 以下の設計風速やその風速の組織的な構造について風洞実験及び数値流体解析を用いて検討したものである。

本研究で実施した風洞実験及び数値流体解析の範囲において、基規準で与えられている平均風速は安全側の評価であり、地表面付近で基規準の風速よりも増速する範囲は見られなかった。変動風速については、基本的な特性を評価することに加えて、これまでの研究によって得られている平均風速比から乱れ強さやガストファクターを推定する経験式の適用範囲を拡張した。さらに、固有値直交関数展開(POD解析)によって粗度ブロックのある地表面付近の流れ場の組織的構造を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は台風等の強風によってしばしば被害が発生する低層建築物や小規模工作物(低層建築物等)の強風被害を低減するためのものであり、建築基準法で詳細な構造設計が求められていない低層建築物等を強風に対して安全かつ合理的に設計するために、地表面付近の高さ Z_b 以下で安全側に与えられている風荷重を適切に評価すること目的としている。

本研究によって地表面付近の高さ方向の設計風速を低減することができれば、風荷重に対して詳細な構造設計をした場合でも非現実的な設計を求められることはなくなり、適切な設計によって多くの低層建築物等の強風被害の低減に寄与するものとなる。

研究成果の概要（英文）：Design wind speeds near the ground, specifically below a certain height (Z_b), are investigated based on wind tunnel experiments and computational fluid dynamics (CFD).

Regarding mean wind speeds, the wind speeds provided by the building standard law or Japanese specifications were evaluated conservatively compared to the experimental and simulated results. Within the scope of our study, no wind speed amplification was observed below the height of roughness blocks. As for the fluctuating wind speeds, estimation methods for calculating the gust factor and the turbulence intensity based on the mean wind speeds were expanded. Furthermore, the coherent structures of the fluctuating wind speeds near the ground with roughness blocks were detected using proper orthogonal decomposition (POD) analysis.

研究分野：風工学

キーワード：設計風速 地表面付近の風速 平均風速 変動風速 風洞実験 数値流体解析 POD解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

平成12年建設省告示第1454号(以下、「告示1454号」)や日本建築学会の建築物荷重指針・同解説(以下、「荷重指針」)では、図1のように高さ方向に変化する水平方向の設計風速がべき法則によって与えられている。この高さ方向の風速は風荷重の影響が大きくなる超高層建築物を設計するために、多くの実測等に基づいて定められたものである。一方、地表面付近の風速については木々や障害物等の影響で風速性状が複雑になることから地表面粗度区分に応じて高さ Z_b 以下の風速が一定値で与えられている。現行の告示1454号や荷重指針の規定に基づいて低層建築物や小規模工作物(以下、「低層建築物等」)を設計する場合、高さ Z_b 以下の一定値となっている風速を参照することとなるため、 Z_b より高さの低い低層建築物等については地表面までべき法則でモデル化するよりも安全側で風荷重が与えられる。しかし、告示1454号や荷重指針では風速が安全側として与えられているものの、季節風や台風等の強風によって図2のような強風被害がしばしば発生する。これは、建築基準法上では住宅等の低層建築物はいわゆる「四号建築物」として扱われるため、風圧力に対する詳細な構造設計が求められていないことが理由のひとつと考えられる。それに加えて、高さ Z_b 以下での風速を一定値として与えていることが原因で、適切な構造設計を実施した場合に、対象とする低層建築物等について非現実的な設計や工法が求められることもあるため、詳細な耐風設計が実態上困難なことも理由として考えられる。

したがって、地表面付近の風速を適切に評価し、モデル化することができれば、低層建築物等の安全かつ合理的な耐風設計が可能となり、建築基準法上で詳細な耐風設計が求められていない低層建築物等の強風被害を低減することができると考えられる。以上の背景を踏まえて、風洞実験及び数値流体解析を用いて、高さ Z_b 以下の風速の鉛直プロファイルに着目して研究を行った。

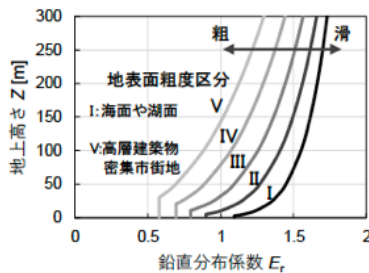


図1 荷重指針の平均風速の鉛直プロファイル



図2 低層建築物の強風被害の例

2. 研究の目的

本研究の目的は建築基準法の告示基準(告示第1454号)や荷重指針で一定値とされている地表面付近の設計風速(水平方向の風速の鉛直分布)を風洞実験及び数値流体解析を用いて提案することである。これまで、上空の風や都市(歩行者空間)の風の性状に関する研究は多く行われているものの、低層建築物等を設計するための地表面付近の風速をターゲットとした研究はほとんどなかった。これは、実測や風洞実験においては周辺の障害物等の影響によって得られた結果の一般化が困難であるだけでなく、空間内の多点の風速の同時測定が困難であったためと考えられる。近年、計算機の性能向上に伴い、LES(Large Eddy Simulation)を用いた数値流体解析によって、物体まわりや市街地の流れを精緻に評価することが可能となっている。数値流体解析では流れの障害物となり得る計測センサーを必要とせず、 x, y, z 方向の3成分の風速の時刻歴を多点同時に取得することができる。さらに、流れの可視化にも有利であるため、従来の実測や風洞実験では測定機器の性能等で測定そのものが困難であった地表面付近や粗度周りの乱流構造を詳細に把握することができると考えられる。以上を踏まえて、まずは風洞実験及び数値流体解析を用いて地表面付近の平均及び変動性状を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究ではまず風洞実験を用いて粗度ブロックを均質に配置した時の地表面付近の風速を測定した。そして、測定機器等の関係で風洞実験で把握することが難しい地表面付近の平均及び変動風速の性状を数値流体解析で検討した。

(1) 風洞実験

風洞実験は(国研)建築研究所のゲッチンゲン型境界層風洞で行った。測定胴の大きさは幅 3.0m ×高さ 2.5m ×奥行き 25m である。一般の市街地において建築物や工作物の配置は様々であるが、本研究では風速と粗度配置の基本的な性状を把握するために、粗度ブロックを一様配置または千鳥配置で均質に並べて平均及び変動風速を測定した。図3に風洞実験における粗度ブロックの配置例を示す。粗度ブロックは1辺 $D=0.05\text{m}$ の立方体であり、粗度ブロックの配置間隔 x は $x/D=1.0\sim 2.5$ まで 0.5 刻みで変化させた。風速の測定高さ z は最も床面に近い高さを 5mm として高さ方向に 25 点測定した。図4は粗度ブロックの配置形状である。粗度ブロックはPoint AからPoint Cの3箇所で測定した。なお、これらの粗度ブロックは風上側から 15 列配置し、Point

A は風上から 10 列目の粗度ブロックの間である。サンプリング周波数は 1000Hz であり、測定した統計量は 5 セットのアンサンプル平均で評価した。

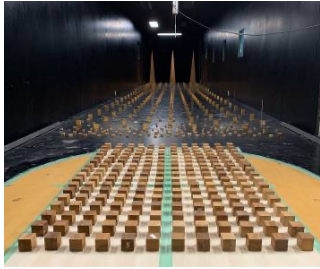


図 3 風洞実験

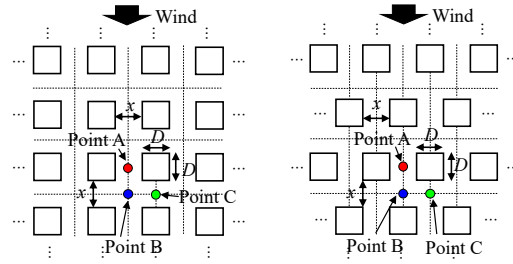
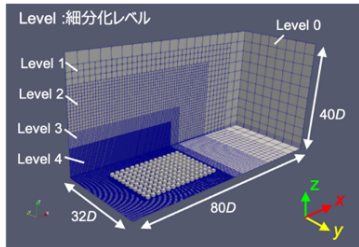


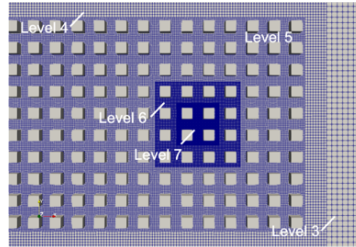
図 4 粗度ブロックの配置形状(左：一様配置，右：千鳥配置)

(2) 数値流体解析

風洞実験では風洞内の風速を離散的に測定することとなるため、空間的に同時性のある風速性状を評価することは困難である。また、熱線風速計を用いた風速測定では逆流成分を測定することができない。そこで、風洞実験の測定結果を補間するために数値流体解析を実施した。図 5 は $x/D=1.0$ での一様配置での解析領域及びメッシュ分割である。数値流体解析の支配方程式は連続式と Navier-Stokes 方程式であり、乱流モデルは LES の WALE モデルとした。総メッシュ数は約 600 万である。流入面からは別途風洞を模擬して生成した流入変動風を流入させた。図 6 に水平方向の風速のサンプリング位置を示す。数値流体解析では風速を多点同時に測定することができるため、水平断面には 69 点、高さ方向には風洞実験と同様に 25 点配置し、合計で 1725 点のサンプリング点を設けた。



(a) 解析領域



(b) 粗度ブロック周辺のメッシュ

図 5 解析領域とメッシュ分割

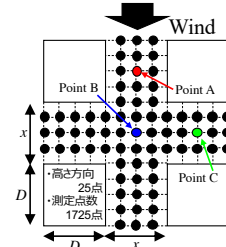


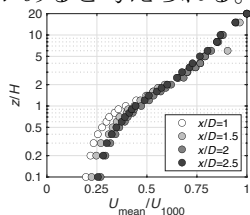
図 6 風速のサンプリング位置(水平方向)

4. 研究成果

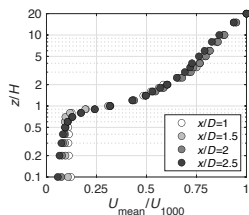
(1) 平均風速性状

図 7 に風洞実験において一様配置としたときの水平風速の鉛直分布を示す。縦軸は測定高さ z を粗度ブロックの高さ H で無次元化している。なお、風洞実験では熱線風速計を用いて測定したことから負の風速成分も含めて風速は絶対値として表されている。Point A では配置間隔 x/D が小さく、測定高さが低くなるほど平均風速が小さくなっている。これは千鳥配置でもほぼ同様であり、粗度の密度が高くなるほど平均風速は小さくなる傾向にある。一方、粗度ブロックの真後の点である Point C では粗度ブロックの高さ H より小さい範囲で平均風速が高さ方向にほぼ一定となっており、粗度ブロックによる遮蔽効果を大きく受けている。

図 8 に数値流体解析において一様配置 ($x/D = 1$) としたときの水平風速の鉛直分布を示す。数値流体解析では風速 3 成分を取得できるため、ここでは u 成分 (x 方向成分) と $\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$ (風速の 2 乗和平方根) の 2 つの結果を示している。数値流体解析で u 成分のみに着目した場合、測定位置によっては逆流成分が支配的である測定点も見られる。図には告示 1454 号や荷重指針のべき指数 $\alpha = 0.20$ および 0.27 の風速分布を点線で示しているが、地表面付近の平均風速は地表面までべき乗則でモデル化した場合よりも平均風速が小さくなっている。したがって、粗度ブロックよりも低いある高さまでの地表面付近の風速はべき指数で近似するよりも小さくなる可能性があると考えられる。

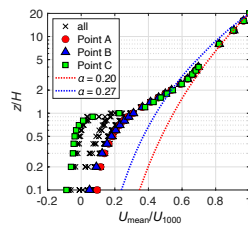


(a) Point A

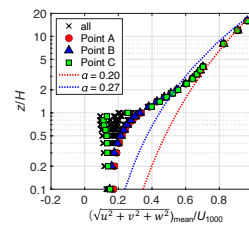


(b) Point C

図 7 一様配置での風速分布(風洞実験)



(a) u 成分



(b) $\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$ 成分

図 8 一様配置での風速分布(数値流体解析)

(2) 変動風速性状

変動風速性状については、粗度ブロック内部の高さ方向の気流の乱れ強さ I_u やガストファクター G_v を整理することに加えて、平均風速比からガストファクター及び気流の乱れ強さをモデル化する方法について検討した。図 9 に平均風速比とガストファクターの関係を示す。ガストファクターは既往の研究で平均風速との対応が示されているが、今回の結果は過去の風洞実験結果に概ね対応している。過去の実測や風洞実験は実市街地で行われたものであるが、今回の研究によって均質な粗度を配置した場合や逆流域に相当するサンプリング点がある場合でもほぼ同様の結果が得られた。

図 10 にガストファクター G_v と気流の乱れ強さ I_u の関係を示す。ガストファクターと気流の乱れ強さの関係式は過去の風洞実験に基づいて提案されている。しかし、この推定式の適用範囲はガストファクターが 3 以内の範囲に限られていた。そこで、今回の研究によって逆流域等のガストファクターが非常に大きくなる範囲も取り込んで実験結果に基づく近似式を提案し、その適用範囲を拡張した。この結果を活用すれば、平均風速比を与えることで気流の乱れ強さを推定することができる。

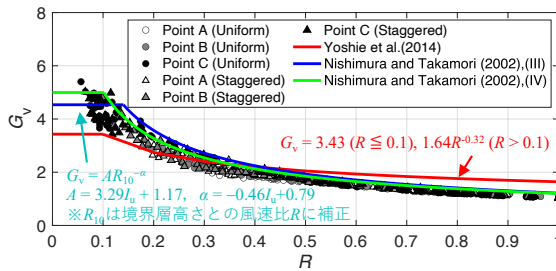


図 9 平均風速比 R とガストファクター G_v

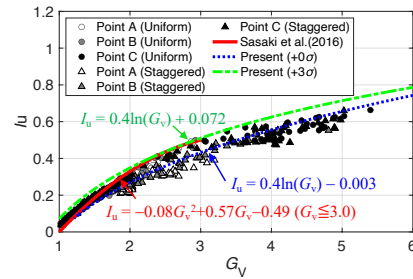
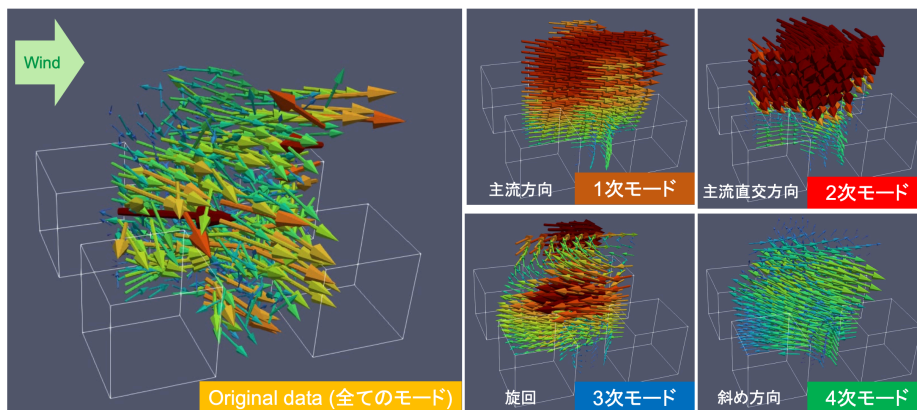


図 10 ガストファクターと気流の乱れ強さ

(3) 変動風速の組織的な構造

粗度内部及びその周辺の風速性状は非常に複雑であるため、その組織的な構造を捉えることは粗度内部の流れ場の基本的な性状を理解するために不可欠と考えられる。本研究では数値流体解析で得られた 1725 点の風速 3 成分のデータを用いて、固有値直交関数展開の手法である POD (Proper Orthogonal Decomposition) 解析によって変動風速の組織的な構造を評価した。図 11 に POD 解析で得られた全モード及び 1 次から 4 次モードの瞬間的な風速ベクトルを示す。1 次モードは主流方向、2 次モードは主流直交方向、3 次モードは旋回方向、4 次モードは斜め方向の固有モードが得られた。これらの寄与率はそれぞれ 23%、9%、6%、6%である。粗度の配置や抽出する測定点によってこれらのモードはやや変わることも考えられるが、粗度ブロック内部で複雑な変動風速性状が見られる範囲であっても低次モードは基本的なモード形状によって表されている。今後の研究においては、こうした組織的な風速性状を踏まえて平均風速及び変動風速について得られた結果の適用範囲をさらに分析し、設計風速と設計用風力係数の両面から低層建築物の合理的な耐風設計手法を提案する。



解析した変動風速の空間分布

POD解析で再合成した変動風速の空間分布

図 11 POD 解析による流れ場の組織的な構造の分析

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 高館 祐貴、喜々津 仁密、奥田 泰雄	4. 巻 27
2. 論文標題 粗度ブロック周りの風速測定及び数値流体解析に基づく地表面付近の風速性状	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 風工学研究論文集	6. 最初と最後の頁 89～98
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14887/windengresearch.27.0_89	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Yuki TAKADATE, Yasuo OKUDA	4. 巻 7
2. 論文標題 Wind Tunnel Study on Wind Speeds near the Ground with Roughness Blocks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Experimental Mechanics	6. 最初と最後の頁 162-167
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11395/aem.7.0_162	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高館祐貴，喜々津仁密，奥田泰雄
2. 発表標題 近年の強風被害を踏まえた建築基準法の告示基準の改正
3. 学会等名 日本風工学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高館祐貴，喜々津仁密，奥田泰雄
2. 発表標題 令和元年房総半島台風の被害調査を踏まえた建築基準法の告示改正
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高館 祐貴、奥田 泰雄、喜々津 仁密
2. 発表標題 風洞実験に基づく粗度ブロックまわりの平均風速と風の乱れの性状
3. 学会等名 日本風工学会年次研究発表会・梗概集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高館 祐貴、奥田 泰雄、喜々津 仁密
2. 発表標題 粗度ブロックによって変化する地表面付近の風速の鉛直分布と低層建築物の風圧係数
3. 学会等名 日本建築学会学術講演梗概集(構造I)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高館 祐貴、喜々津 仁密、奥田 泰雄
2. 発表標題 粗度ブロック周りの風速測定及び数値流体解析に基づく地表面付近の風速性状
3. 学会等名 第27回風工学シンポジウム
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
---------	---------