

ミッション：強風災害の軽減

教授 西嶋 一欽

はじめに

我が国では台風によって年あたり平均約 3,000 億円程度の被害が発生している^[1]などに基づいて算定。世界に目を向けると、風水害は最も深刻な災害の一つであり、特に開発途上国では台風襲来によって地域の大半の建物が損壊するような被害も発生している。西嶋研究室では、幾分かの寄り道をしながら、強風災害の軽減をミッションとして、「実測」、「実験」、「リスク評価」、「実装」を軸に研究を行っている。

実測

建築物の強風被害予測の観点からは地表面付近の風速場の理解は不可欠であるが、現状技術的・費用的な観点から風速を稠密に計測することは困難であり、風速観測点数は極めて限られている。当研究室ではこの状況を打破するために、新たな原理に基づいた風速計測技術を開発に取り組んでいる。例えば、風の中に置かれた柱状物体周りに発生する渦に伴って発生する音に基づいて風速を推定する方法、有風下での雨滴の軌跡から雨滴に作用する風力を逆算しそこから風速を推定する方法^[2]、ヘリウムを充填したバルーンに数センチメートルの精度で測位できる機材を搭載しバルーンの軌跡から風速を推定する方法（図 1）^[3]などの開発に取り組んでいる。

建築物に作用する風圧の実測技術の開発にも取り組んでいる。従来の風圧実測には二つの場所の圧力の差を計測できる差圧センサが用いられているが、差圧センサを用いた方法では基準となる圧力を測定するためにチューブを建築物内外に取りまわす必要があるなど設置に要する労力が大きいことが欠点で

あった。そこで、当研究室では上記の欠点を克服するために、基準となる圧力を導圧するためのチューブの取り回しが不要な絶対圧センサを用いた風圧計測システムを開発した。そして、開発した風圧計測システムを用いれば、台風に先回りしてオンデマンドに風圧計測できることを示した^[4]。また、外皮に圧力センサを取り付けることが困難な超高層建築物などを念頭に、複層ガラスに作用する風圧とひずみの関係に着目した風圧実測手法の開発にも取り組んでいる。

実験

境界層風洞（図 2）を用いた実験的研究を展開している。例えば、隣棟建物間の距離などの周辺環境が低層建築物の屋根面に作用する風圧力に与える影響に関する研究^[5]や、日本で見られる一般的な建築物のみならず、東南アジアなどの熱帯地域で見られる高床式建築物などの形状が特徴的な建築物の空気力学的特性を明らかにする研究^[6, 7]などを進めてきた。また、点群データに基づいて実市街地模型を製作する手法^[8]、風圧計測風洞実験に用いる建物模型を導圧チューブ一体で 3D プリンタを用いて出力する手法^[9]の開発など、風洞実験の効率化に関する取り組んでいる。

最近では、ゲリラ豪雨や線状対流系豪雨*の制御に資する研究にも取り組んでいる。特に、ゲリラ豪雨についてはその発生・発達には都市内の気流が関与していると考えられていることから、境界層風洞内に都市の一部を縮尺模型として再現し、気流制御デバイスや熱制御デバイスによって都市の気流を変化させることで、ゲリラ豪雨に発生・成長を抑制する可能性について実験的研究を進めている。



図 1 桜島での実験風景



図 2 境界層風洞

* 列状に並んだ対流性の雨雲群が世代交代をしながら組織化した降水システムを形成することに伴い、長時間にわたって降雨が継続することによって生じる豪雨

リスク評価

強風リスクの評価に関連する研究として、統計的手法による台風シミュレーションを用いた確率論的ハザード評価に関する研究^[10]、強風による住宅の被害発生過程を明示的にモデル化した脆弱性評価に関する研究^[11]、気候変動による影響評価に関する研究^[12]を行ってきた。2020年からは国内外損害保険業界15社と共同で、国内の建築物の強風リスクに対する分析手法を高度化する研究を実施している（強風リスク分析コンソーシアム）。また、風圧による被害のみならず、飛散物による強風被害予測に資する飛散物の空気力学的特性の解明に関する研究も行っている。

国外の強風被害に関して、2013年にフィリピンを襲った台風 Haiyan に対して強風被害調査を実施、その後現地の研究者らと共同研究を行い、信頼性工学・風工学の観点から現地のノンエンジニアド住宅（工学的な知見に基づかず、住民自身あるいは非専門家によって建設された住宅）の耐風性能を定量的に評価するとともに、建築計画的な観点から地元の住民に受け入れられる耐風性能が高い住宅を提案した。また、開発途上国に多く見られるノンエンジニアド住宅の耐風性能を信頼性工学の知見を用いて、その耐風性能を定量的に評価し効果的な被害低減策の意思決定に用いるという手法^[13]を提案するなど、開発途上国の強風被害の軽減に資する研究を展開している。

実装

開発途上国で強風被害の軽減に資する実装プロジェクトを主導・支援してきた。特に、2015年サイクロン Pam によって甚大な被害を受けた南太平洋に位置するバヌアツ共和国タンナ島では、調査によって明らかになった耐風性能が高いユニークな形状を有した伝統建築物（ニマラタン）の存在一ただし、外来文化の導入により減少しつつある一がきっかけで、JICA 草の根協力事業「タンナ島における在来建設技術の高度化支援」を実施した。この事業では、科学的・工学的手法を用いて在来建設技術の性能を評価するとともに、建築計画系の研究者らの協力を得つつ現地の住民らと共同で、現在の伝統建築物が有する問題点を把握・解決し、伝統建築物ニマラタンを高度化することで、その発展的継承を模索した（図3）。

まとめ

このように、当研究室では、風の性質、被害発生メカニズムの解明、リスク評価、さらに意思決定支援までの一連の研究ならびに研究成果に基づく実践的活動を行っている。研究室配属の学生は、これらの一連の活動に直接的・間接的に資する研究を担っている。次頁以降では、6名の研究室メンバー（研究員1名、学生5名）に自らの研究について、自らの言葉で語ってもらった。



図3 高度化ニマラタンの建設現場

参考文献

- [1] Munich Re, NatCatSERVICE
- [2] 三宅克典, 栗田剛, 西嶋一欽, PTV 技術を用いた有風下での雨滴追跡による風速推定とばらつきの要因分析, 風工学研究論文集, 27 巻, pp. 217-226, 2022.
- [3] 西嶋一欽, 大風翼, 中嶋唯貴, RTK-GNSS 搭載バルーンの飛行経路に基づく風速観測の基礎的検討, 京都大学防災研究所研究発表講演会梗概, B301, 2p., 2021.
- [4] 西嶋一欽, 米田格, 清水勝, 2021 年台風 16 号通過時の低層建築物屋根への作用圧力と周辺風速の同時計測, 風工学研究論文集, 27 巻, pp. 99-108, 2022.
- [5] 美並造成, 西嶋一欽, 丸山敬, 西村宏昭, 隣接建物の影響を考慮した建物群の風荷重評価手法, 日本風工学論文集, 第 44 巻, 第 4 号, pp. 81-89, 2019.
- [6] 岸田夏葵, 西嶋一欽ら, 形状に着目したバヌアツ共和国タンナ島における伝統的サイクロンシェルターの空気力学特性, 第 24 回風工学シンポジウム論文集, p.211-216, 2016.
- [7] Okuda, H., Nishijima, K., Espina, M.A., Study on aerodynamic characteristics of vernacular house with elevated floor - wind force, pressure and speed, Proceedings of the 15th International Conference on Wind Engineering, 2019.
- [8] 西嶋一欽, 鴨下諒一, 点群データに基づいて作成した実市街地模型を用いた強風被害分析のための風圧測定実験, 2021 年度日本風工学会年次研究発表会梗概, 2p., 2021.
- [9] 西嶋一欽, 武市俊太郎, 3D プリントを用いて模型と一体的に出力した導圧管の動的圧力伝達特性への影響, 日本風工学会年次研究発表会・梗概集, 2p., 2022.
- [10] Zhang, S., Nishijima, K., Statistics-based investigation on typhoon transition modeling, Proceedings of the Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA7), pp.364-373, 2012.
- [11] Zhang, S., Nishijima, K., et al., Reliability-based modeling of typhoon induced wind vulnerability for residential buildings in Japan, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 124, pp.68-81, 2014.
- [12] Nishijima, K., et al., A preliminary impact assessment of typhoon wind risk of residential buildings in Japan under future climate change, Hydrological Research Letters, 6, pp.23-28, 2012.
- [13] Nishijima, K., Housing Resilience to Wind-Induced Damage in Developing Countries, Climate Adaptation Engineering (Emilio Bastidas-Arteaga and Mark G. Stewart (ed.), Butterworth-Heinemann, 2019.

Fourier Neural Operator を用いた建築物周りの風速場の非定常予測

特定研究員 李 榮茂

はじめに

建築物の強風リスク評価および気象制御の目的のために、風工学分野では建築物周りの風速場や建築物表面に作用する風圧の予測に関する研究が行われている。従来は風洞実験を用いて予測されていたが、近年では数値流体力学シミュレーションを用いた予測も行われている。しかし、建築物周りの流れ場を高精度に予測するためには、解析領域における緻密な計算格子が必要であり、計算コストが高い。また、三次元空間における複雑な乱流構造の瞬時解を求めるには、シミュレーション全体にわたって時間刻みごとの流れ場を逐次計算する必要がある。そのため、偏微分方程式を解く計算のコストを減らすことが求められる。

近年、データ駆動型手法を用いた偏微分方程式の解の予測に関する研究が増加している。その一つである Fourier Neural Operator (FNO) は、フーリエ変換を活用して空間データ（例えば、流体力学の速度場）を効率的に処理するモデルである。FNO は、入力データをフーリエ空間（周波数領域）に変換することで、物理現象全体の特性を効果的に把握することが可能である。従来の畳み込みニューラルネットワークなどが局所的な情報の学習を主としているのに対し、FNO はフーリエ空間でデータ全体の中低周波数の特徴を学習し、広範囲にわたる空間的相関を捉えることができる点が特徴である。特に、偏微分方程式に基づくシミュレーションや物理的制約を伴うデータ駆動型モデリングにおいて、その適用可能性が示されている。

そこで、本研究は数値流体力学シミュレーションのコストを大幅に削減し、空間解像度が高い建築物周りの風速場の進展の予測を実現することを目指す。データの用意には、Large-Eddy Simulation (LES) を用いて非定常な風速場データを生成した。LES は数値流体力学解析における乱流モデルの一つであり、Sub-Grid Scale より大きな渦を直接計算し、Sub-Grid Scale より小さな渦のみをモデル化する手法である。この方法により、時々刻々と変化する精緻な乱流構造を再現することが可能となる。また、研究方法として、FNO を用いて、単体建築物周辺気流の LES 解析結果に基づく未来の風速分布予測の効率的なモデルを構築する（図 1）。未来の時刻における風速分布の長

期ステップ予測では、FNO は高周波数特性を持つ一部の小さな乱流スケールを省略する一方で、大きな乱流スケールの正確性を維持する傾向がある。そのため、訓練済みの FNO に複数の時刻における風速分布を入力することで、未来の風速分布を高速かつ高精度に予測できると期待される。

単体建物周りおよび後流の予測可能性

図 2 に示すように、1:1:2 単体建物周辺流れに関する解析ケースは、風工学研究において標準的なケースとして広く活用されている。建物高さを H として、解析領域は $13.0H(x) \times 6.0H(y) \times 5.0H(z)$ と設定し、建物風下側から $3.0H$ 風上の位置に流入境界面を設けた。建物の実スケールは $50\text{ m} \times 50\text{ m} \times 100\text{ m}$ とし、そのモデルスケールは $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ と設定した。したがって、建物モデルの幾何学的スケールは 1:500 である。流入風速は 5.3 m/s とし、その鉛直プロファイル*は図 3(a) に示している。また、図 3(a) および (b) に示すように、LES 解析結果は風洞実験のデータで検証され、入り口および建物周辺の平均風速の鉛直プロファイルが風洞実験のデータと良好に一致している。

実行可能性研究^[2]では、過去 10 タイムステップの風速分布から未来の 1 タイムステップの風速分布を予測し（図 1）、このプロセスを 10 回繰り返す形式で三次元 LES 解析の予測モデルを構築した。予測モデルについては、FNO の優位性を検証するため、従来の Deep Neural Network (DNN) との予測結果を比較した。FNO では空間三次元に対して 18 個のフーリエモードを使用した。また、FNO のフーリエ層は 1 層、DNN の隠れ層の数は 4 層に設定した。モデルの訓練には 30 秒間のデータを使用し、予測にはその後の 1 秒間のデータを使用した。予測結果に関しては、連続する 10 タイムステップにわたる瞬時風速を予測するタスクにおいて（図 4）、FNO は DNN に比べて約半分の予測ばらつきを示し、特に第 10 タイムステップで流れ場の動きをより正確に予測することが確認された。この結果は、FNO が DNN よりも安定した予測を実現し、長時間にわたる予測において高い信頼性を発揮することを示している。

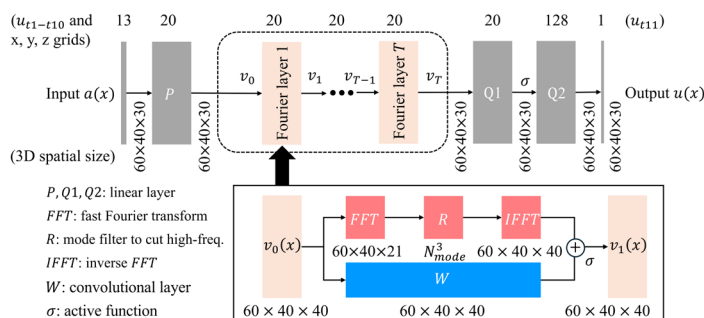


図 1. FNO を用いた未来の時刻の風速分布の予測手法 ([1] をもとに加筆・修正)

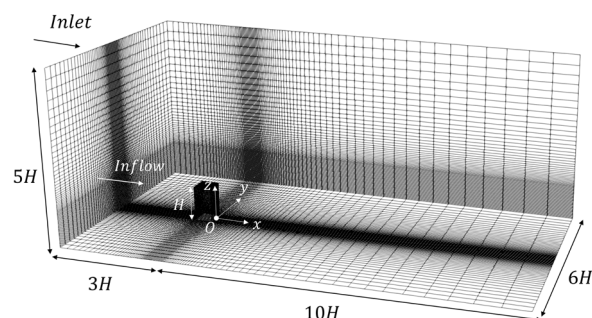


図 2. 単体建物周辺の三次元流れ場に対する LES 解析ケース ([2] より)

* 風の鉛直プロファイルとは、地表付近で地表面の摩擦の影響を受け、乱流を伴いながら風速が上空よりも減少する鉛直分布を指す。これは、平均風速や乱流強度が高さによってどのように変化するかを示すものである。

参考文献

- [1] Z. Li et al., "Fourier Neural Operator for Parametric Partial Differential Equations," ICLR 2021 - 9th Int. Conf. Learn. Represent., no. 2016, pp. 1–16, 2021.
- [2] R. Li and K. Nishijima, "Unsteady Velocity field Prediction around a building using Fourier Neural Operator," 第28回風工学シンポジウム講演梗概集, 2024.

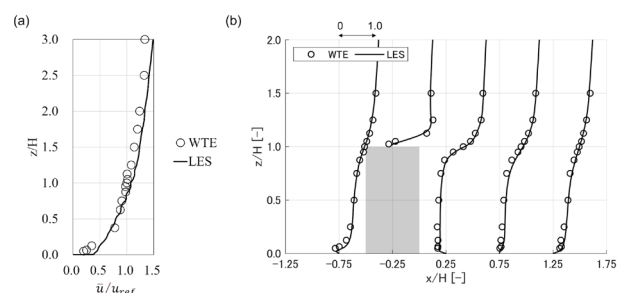


図3. 鉛直断面 ($y = 0$) における入り口および建物周辺の平均風速の鉛直プロファイル

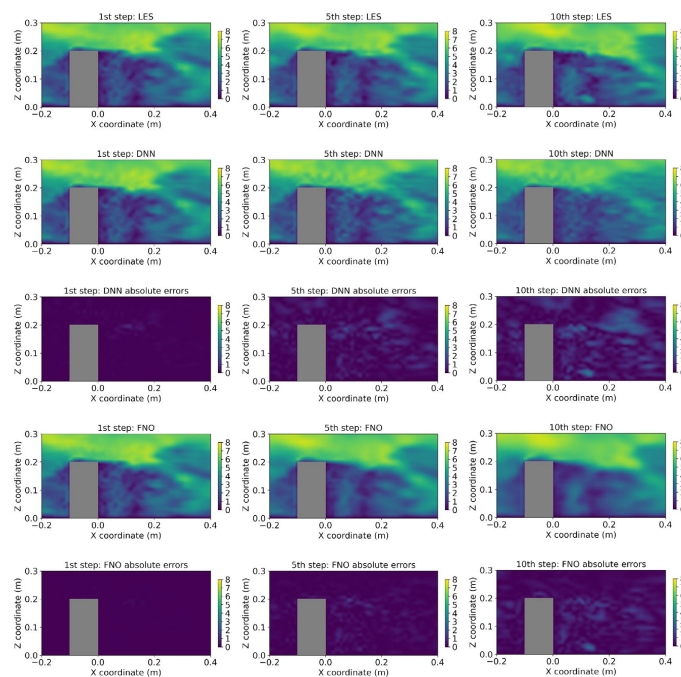


図4. 三次元の流れ場の鉛直断面 ($y = 0$) における、一連のタイムステップ (第1ステップ、第5ステップ、第10ステップ) での瞬時風速 (m/s) の予測結果および絶対誤差 ([2] より)

噴石模型の落下実験による動的空力特性の解明

博士後期課程 劉 美智

はじめに

2014年9月に発生した御嶽山の噴火の際には63名もの死者と行方不明者を出す結果となり、被害者の多くは飛来した火山礫や火山岩塊による損傷死であった^[1]。この噴火で見られるように、火山からの噴石は甚大な人的被害を引き起こす場合がある。被害を減少させるためには、噴石の飛散範囲や落下速度を正確に知る必要があるが、現状、噴石の飛散性状を精度よく予測できているかは分からない。たとえば「火山防災マップ作成指針」^[2]では噴石の軌道を計算する際に噴石の形状が球形であると仮定し、どの方向から空気を受けても同じ大きさの空気抵抗を受けるものとして扱っており、「火山噴火予知連絡会火山活動評価検討会報告書」^[3]では噴石の空気抵抗を考慮しないで飛散性状を計算している。噴石の飛散性状を精度よく予測するためには、いまだ不明な部分が多い噴石の空力特性^{*1}を明らかにする必要があるが、これまでの研究では、風洞内に固定された噴石模型を用いて静的空力特性を測定することがほとん

どであった。しかし実際の飛散物に作用する空気力は時々刻々と動的に変化するため、動的空力特性の測定が必要である。

*1) ここで噴石の「空力特性」とは噴石が様々な方向からの空気に対して受ける力のことを指す。

桜島での噴石模型落下実験

本研究では噴石の動的空力特性を明らかにするために噴石模型の落下実験を行った。図1に実験に使用した三種類の模型(噴石の代表的な形を模した模型A、模型B、球形の模型C)を示す。ただし模型Aは表面が粗くあまり鋭角がないものとし、模型Bは鋭角があるものとした。模型には本研究室で開発した自立型計測装置を内蔵し(図2)、内部に搭載されている六軸センサー(三成分加速度センサーおよび三成分角速度センサー)によって落下時の加速度・角速度を計測できるようになっている。

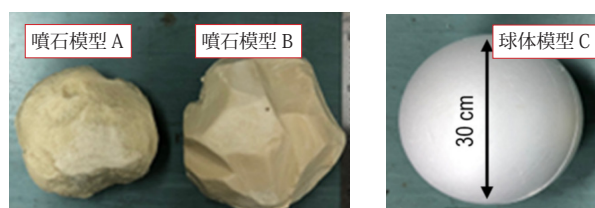


図1. 落下実験に使用した模型 ([4] より転載・一部変更)

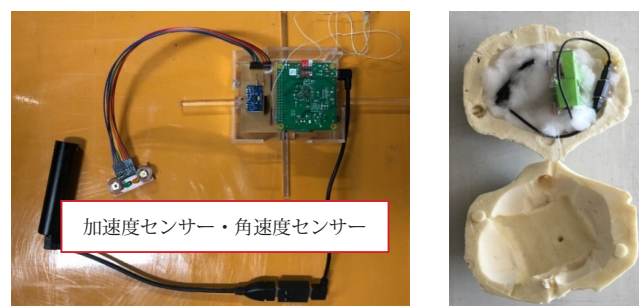


図2. 自立型計測装置 (左) と装置を模型内に設置した様子 (右) ([4] より転載・一部変更)

上記の模型を桜島の麓 (図 3) にてドローンで上空 150m ま
で持ち上げ落下させた (図 4)。加速度・角速度の計測と同時に
地上に設置した三台のカメラで落下の様子も撮影した。

六軸センサーから出力されたデータの有効性を検証するため
に、六軸センサーから得られる落下軌跡と動画解析から得られ
る軌跡を比較した。例として模型 A を落下させたときの軌跡
を図 5 に示す。黒線は加速度センサーで計測された加速度を
積分した得られた軌跡であり、赤線は三台のカメラで撮影され
た映像の動画解析から得られた軌跡である。両者を比較すると
落下軌跡の誤差は 3m 以内であり、六軸センサーのデータの有
効性が示された。

噴石模型の抗力係数

噴石模型の動的空力特性のうち、ここでは流体の流れの性質
を表すレイノルズ数 Re によって変化する抗力係数 C_d に着目す
る。抗力係数は式 (1) で定義され、 F は風力、 ρ は空気密度、
 u は相対風速、 A は見付面積を表す。抗力係数が大きいと噴石
模型が受けている力が大きく、抗力係数が小さいと噴石模型
が受けている力が小さいことを示す。式 (1) の右辺の分子 F は
模型質量 m と絶対座標系における加速度から計算した。また、
分母の相対風速 u はドップラーライダー *2 で測定した周囲の
風速から、加速度センサーの加速度を積分して得られる模型の
速度を引いて求めた。

*2) ドップラーライダー：レーザー光を大気中に照射して、大気中の微粒
子からの散乱光を受信することで、風速や風向きを計測する装置である。

$$C_d = \frac{|F|}{\frac{1}{2} \rho u^2 A} \quad (1)$$

実験から得られたレイノルズ数と抗力係数の関係を図 6 に
示す。レイノルズ数が小さいときには模型の形状によって抗力
係数がばらついているが、レイノルズ数が大きくなるにつれ
($Re \geq 2 \times 10^5$)、どの模型も抗力係数は小さくなり徐々に一
定の値になる傾向がみられた。このとき噴石模型 A、B どちら
も平均的に 0.4 に近い値になるのに対し、球体の模型 C では
抗力係数がおおよそ 0.3 となったため、噴石のように凹凸のある
形状では球体に比べ抗力係数が大きくなることが分かった。将
来的には今回得られた抗力係数をモデル化し、数値シミュレー
ションに利用することで、噴石の飛散分布や衝突速度をより精
度高く予測することが期待される。

参考文献

- [1] 及川輝樹, 山岡耕春, 吉本充宏, 中田節也, 竹下欣宏, 前野深, 石塚吉浩, 小森次郎, 嶋野岳人, 中野俊, 御嶽山 2014 年噴火, 火山, 第 60 巻, 第 3 号, pp.411-415, 2015
- [2] 内閣府防災担当, 消防庁, 国土交通省水管理, 国土保全局砂防部, 気象庁, 火山防災マップ作成指針, 2013
- [3] 気象庁, 火山噴火予知連絡会 火山活動評価検討会 報告書, 2014
- [4] Meizhi Liu, Takashi Maruyama, Kansuke Sasaki, Minoru Inoue, Masato Iguchi, Eisuke Fujita, Measurement of Aerodynamic Characteristics Using Cinder Models through Free Fall Experiment, Atmosphere, 2021



図 3. 実験実施領域 (桜島) ([4] より転載・一部変更)



図 4. ドローンで模型を釣り上げている様子 ([4] より転載・一部変更)

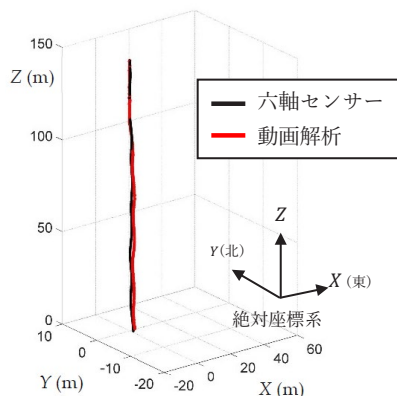


図 5. 六軸センサーで得られた落下軌跡と動画解析で得られた落下軌跡の比較：噴石模型 A ([4] より転載・一部変更)

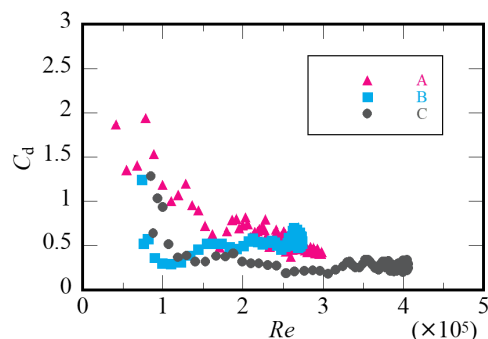


図 6. レイノルズ数による抗力係数の変化
噴石模型 A、B の抗力係数は球形模型 C の抗力係数に比べて大きい。 ([4] より転載・一部変更)

強風時の飛散物による被害過程のモデル化

博士後期課程 文 礼 志

はじめに

強風、特に台風によって飛ばされる飛散物は、建築物に大きな損害を与える。高速で移動する飛散物は建物の外壁を突き抜け、人命や財産を脅かす可能性がある。飛散物の貫通は建物内部の圧力の上昇も引き起こし、屋根、側壁、風下側の壁にかか

る風荷重が増大する。その結果、建物の部材が破損する可能性が大きくなり、破損した部材がさらに飛散物となる。これは飛散物衝突被害の連鎖として知られている。強風時の被害を低減するためには、強風中の飛散物の飛散性状、特にその飛散軌跡と飛散速度を把握することが不可欠である。台風時の飛散物の種類は様々であるが、本研究では特に飛散の多い瓦などの屋根

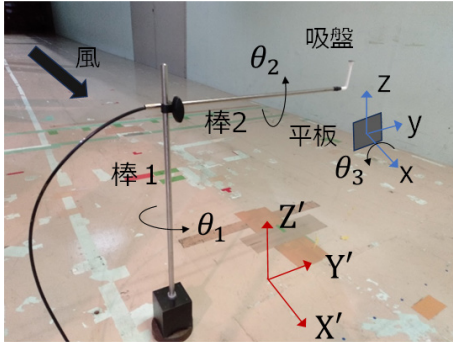


図1. 正方形平板の飛散実験に用いた装置。(x,y,z)は平板とともに移動する物体座標系、(X',Y',Z')はグローバル座標系を表す。x,y,zの向きと、X',Y',Z'の向きが一致するように平板を吸盤に固定してから $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ を変化させ平板の初期姿勢を制御した。

葎き材に着目し、その飛散性状を解明する。瓦は通常、平板型飛散物に分類されるため、正方形平板の飛散実験を実施し平板の飛散の軌跡を解析することで、平板の空気力学的特性をモデル化する^[1]。

正方形平板の飛散実験

図1に飛散実験に用いた装置を示す。まず、2台のデジタルカメラを使用して、2つの異なる方向から平板の飛散軌跡を撮影した。次に、撮影した動画を対象に動作解析ソフトウェアを使用して、飛散する平板の位置、姿勢、速度、角速度の時刻歴を推定した。

本実験では、大きさが60 mm × 60 mm、厚さが3 mm、質量が6.6 gの正方形平板を使用して、風洞で風速8 m/sの様な風を当てて飛散させた。平板の初期姿勢が飛散性状に及ぼす影響を考察するために、図1に示す装置を用いて平板の初期姿勢を変え複数の飛散実験を行なった。平板の初期姿勢は棒1、棒2の回転および吸盤上での平板の回転によって制御する。パラメータは棒1の回転角 $\theta_1 = (0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 75^\circ)$ 、棒2の回転角 $\theta_2 = (0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 75^\circ)$ 、吸盤上の平板の回転角 $\theta_3 = (0^\circ, 30^\circ)$ の組み合わせとし、計32(=4 × 4 × 2)ケースの実験を実施した。

平板の空気力学的特性

風の中を飛散する平板は風力を受ける。平板が回転しないときに受ける風力は並進風力と呼ばれる。平板が回転すると並進風力のほかに回転風力が生じる。実験結果を解析する前に、既往研究の結果^[2]に基づいて、平板の回転風力に関する以下の仮説を提案する(図2)。

仮説1：回転風力 F_n の大きさは角速度が増加するにつれて増加し、他のパラメータは力 F_n の大きさに大きな影響を与えない。

仮説2： F_n の方向(e_n で表される)は次の式で計算される。

$$e_n = e_U \times e_\omega \quad (1)$$

e_U : 相対風速ベクトル(風速ベクトルと平板の(並進)速度ベクトルの差)の方向

e_ω : 平板の角速度の方向

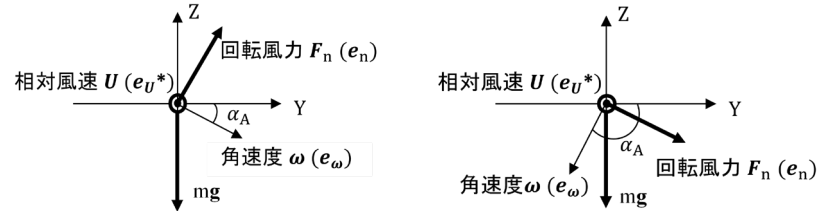
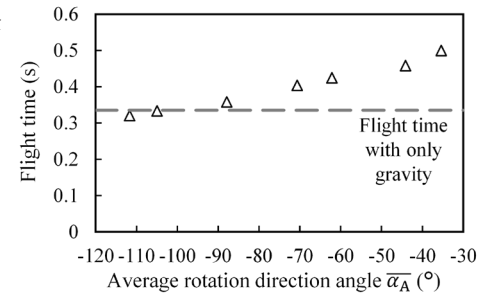


図2. 飛散する平板に作用する風力と角速度の向き(左： $\alpha_A = 30^\circ$ 、右： $\alpha_A = 120^\circ$)*

* 実験では、平板の速度は風速ベクトルに比べて小さく、相対風速ベクトルは風速ベクトルとほとんど変わらないため、近似的に e_U の向きが風向すなわちX方向(紙面直交方向)と一致すると近似した。([1]より転載、一部変更)

図3. 回転方向角 α_A の平均値(全体の飛散過程の時間平均値)と平板の飛散時間([1]より転載)



上記の仮説に基づいて、角速度が図2に示す向きとなる2つの平板の状態を考える($\alpha_A = -30^\circ, \alpha_A = -120^\circ$ の二種類)。図の中に、XYZ座標系は平板と共に並進運動するが、回転しないため、並進座標系と呼ばれる。座標系の原点は平板の中心であり、方向はグローバル座標系と一致する。

これら2つの平板の飛散時間について考える。それぞれの平板の角速度 ω の大きさは等しく、方向は異なるものとする。仮説1より、角速度の大きさが同じであれば、2つの平板に作用する力 F_n の大きさは同じである。また、仮説2によると回転方向角度 α_A が 0° に近づくにつれて F_n のZ成分が増加し重力に抵抗するため(図2)、平板はよりゆっくりと落下し、飛散時間は長くなる。

上記の推論を検証するために、平板の角速度がほぼ同じであり、回転方向角度 α_A が異なる実験ケースを抽出し飛散時間を比較する。その結果を図3に示す。 α_A が 0 に近づくにつれ飛散時間は長くなっており、推論を裏付ける結果となった。

結論と今後の展望

本研究では正方形平板の飛散実験を行い、平板の回転風力に関する仮説を立てた。第一の仮説は回転風力 F_n の大きさは角速度が増加するにつれて増加するというものであり、第二の仮説は、 F_n の方向が相対風速の方向と角速度の方向で決定されるというものである。これらの仮説に基づいた平板の飛散時間に関する推論を実験によって検証し、仮説の妥当性を間接的に示した。今後、これらの仮説を利用し、既往研究の結果と整合して、正方形平板の飛散運動の空力モデルを提案する。

参考文献

- [1] Wen, L., Nishijima, K., Investigation of aerodynamic effects of rotation on 6-DOF motion of flat square plate based on free flight experiments, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 245, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2023.105629>.
- [2] Tachikawa, M., Fukuyama, M., Trajectories and velocities of typhoon-generated missiles. Part 1 Aerodynamic Characteristics of Flat Plates and Equations of Motion. Transactions of AIJ, 302, 1-11, 1981.

棟(むね)瓦(がわら)のある和瓦屋根に設置した太陽光発電パネルに働く風力

博士後期課程 村上 剛

はじめに

脱炭素社会実現に向けて太陽光発電パネルを住宅屋根に設置した太陽光発電システムの導入が推進されている。パネルを屋根に設置するための架台の設計において、パネルに働く風力は JIS C8955^[1] (以下架台 JIS と呼ぶ) によって算出方法が定められている。住宅の屋根葺(やねふき)材には、和瓦や金属・スレートなどが一般的に用いられているが、架台 JIS において屋根葺材の種別は考慮されていない。さらに和瓦屋根に注目すると、和瓦屋根に設置したパネルまわりの風力に関する設計情報はほとんどない。そこで本研究では棟(むね)瓦(がわら)を有する和瓦屋根を再現した住宅模型および金属・スレート屋根を模した住宅模型を用いた風洞実験を実施し^[2]、両者の風力係数の分布を比較することにより棟瓦の有無がパネルに働く風力に与える影響を検討した。

風洞実験

実験には図 1 に示す切妻屋根を有する二種類の住宅模型を使用した。模型 A では棟瓦を有する和瓦屋根を再現し、模型 B では金属・スレート屋根を想定した平坦屋根を模している。また、模型の屋根勾配はいずれも和瓦切妻屋根で標準的な傾き

4.5 寸(傾斜角 24.2 度)としている。風洞気流としては乱流格子を用いた地表面粗度区分 II 相当^{*1}の気流を作成し、パネル上下面に作用する風圧を測定した。ただし、パネル下面に作用する風圧は屋根上面に作用する風圧と等しいものとして、屋根上面の圧力測定点で測定した風圧で代用している。解析では、はじめに、パネル上下面で測定された風圧を屋根平均高さにおける平均速度圧で基準化し風圧係数を求めた。パネルに働く風力はパネル上下面に働く風圧の差に相当するため、次にパネル上下面の風圧係数の差分を取ることで風力係数を算出した。

実験結果

パネル上下面の風圧係数およびパネルの風力係数の分布を図 2 に示す。図 2 に記している格子は太陽光パネルの構成単位であるモジュールごとに分割されており、圧力測定面には 20(=4×5) 枚のモジュールが並んでいる。図 2 の赤枠で囲まれた棟中央付近のモジュール R4 に着目し、和瓦屋根の同モジュールに働く風力が平坦屋根のそれよりも強くなる時刻の各係数の分布を取り出している。そのときの風向角は、図 2 に示すように、けらば方向より少しずれ、棟を乗り越えるように風が吹く $\theta = 105^\circ$ の角度である。

図 2 よりパネル上下面の風圧係数分布は屋根葺材の形状に

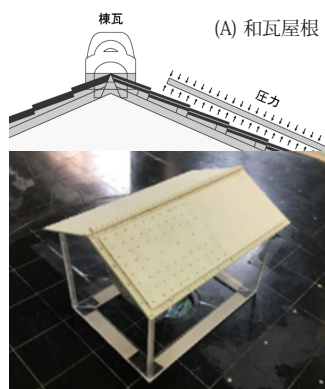


図 1. 風洞実験模型の屋根形状(上)と模型写真(下)
縮尺 1/30: 屋根勾配 24.2 度 ([2] より転載・一部変更)

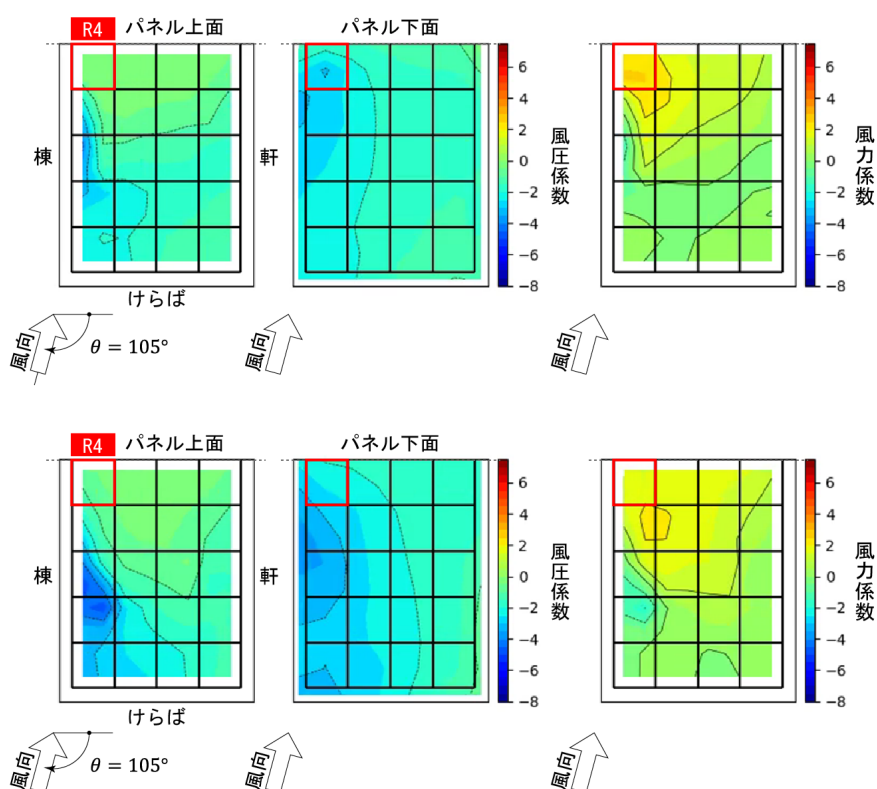


図 2. モジュール R4 に強い風力が作用する瞬間の風圧係数および風力係数の分布 (風向角 105°)
([2] より転載・一部変更)

関わらず似たような分布を示しており、(A) 和瓦屋根・(B) 平坦屋根ともに棟付近で上下面の風圧が最も低くなっている。棟付近のモジュール上下面に作用する負圧を比較すると、和瓦屋根よりも平坦屋根の方が負圧が強くなる傾向にある。しかしモジュール R4 付近ではその傾向が逆転し、平坦屋根よりも和瓦屋根の方がより大きい負圧が働くため、モジュール R4 付近の風力係数は平坦屋根よりも和瓦屋根の方が大きくなっている。以上のことから、風向角によっては棟瓦のある和瓦屋根の棟中央付近のモジュール R4 の風力係数が棟瓦のない平坦屋根よりも大きくなり、棟中央付近のモジュールに強い風力が生じることが分かった。

モジュールを設置する架台強度の最適設計に向けて

屋根にモジュールを設置する架台の強度は、架台 JIS を用いる場合、全風向角において最も強い風力が、すべてのモジュールに働くものとして設計する。また、架台 JIS を用いて強度を算定した架台は、屋根葺材の種類に関わらず安全であることが

確認されている。そのため、屋根葺材の種類によってはパネルに作用する風力が低減され、架台 JIS で算定した強度が過大評価になる可能性がある。現に、ここでは紹介していない実験結果において、平坦屋根の方が和瓦屋根よりも強い風力が働く風向角がある。架台やモジュール設置工事の低コスト化を図り、太陽光パネルの設置を促進するという観点から、屋根葺材の種類などを考慮した架台の最適設計が求められている。今後さらに多様な形状、大きさを持つ屋根にモジュールを設置するには、モジュールまわりの流れをシミュレーションし、モジュールに働く風力の発生メカニズムを把握することが課題となる。

注釈

*1) 「地表面粗度区分」は地形・地物による地表面の粗さに基づく地域の区分 (I-V) を表し、粗い (V に近い) ほど都市化が進んでいる。

ここで登場した「地表面粗度区分 II」は田園地帯や草原のような障害物が散在するような地域を指す。

参考文献

- [1] JIS C8955, 太陽電池アレイ用支持物の設計用荷重算出方法, 2017
[2] 村上剛, 丸山敬, 和瓦葺切妻屋根上に設置した太陽光発電パネルに働く風力, 日本建築学会構造系論文集, 第 89 巻, 第 815 号, pp.1-9, 2024.

弦の渦励振を利用した風速計の開発

修士課程 吉川 峻平

はじめに

建築物の耐風設計や都市の風環境制御の観点から都市空間内の風況予測を行うことは重要である。風況予測には、現在、風洞実験や数値流体解析といった手法が活用されているが、これらの結果の妥当性を検証するにあたって都市空間スケールで観測された風速場のデータが必要である。しかしながら既存の風速計は高価であり設置にも労力を要することから、このような都市空間内の稠密な風速場計測には適さない。そこで本研究では、弦の渦励振による振動音を利用した風速計を開発することで、都市空間内における風速の多点計測に貢献することを目的としている。この風速計は弦・弦を固定するフレーム・マイクロフォンのみで構成されるため、廉価で製作することができ、設置も容易になることが期待される。また計測原理が単純であり簡単に製作できるため、弦とスマートフォン (マイクロフォン) を用意すれば *1、精度こそ高くないものの、誰でも街中で風速を測ることが可能である。

*1) スマートフォン向けの音響解析用アプリとして、たとえば「オーディオ／スペクトルアナライザ」^[1] を利用すれば、皆さんも風速を計測することができます。



図 1. カルマン渦列が放出されるイメージ

風速計の計測原理

本手法ではフレームに張られた弦を屋外に設置し、風が吹いたときに発生する弦の振動音をマイクロフォンで録音することで、振動音の周波数から風速を推定する。この弦の振動はいわゆる渦励振と呼ばれるもので、流れの中に置かれた弦などの柱状物体が、図 1 に示すような渦 (カルマン (Kármán) 渦列という) の放出によって加振され、主流と直交する方向に振動する現象のことを指す。実際に一樣な流れの中に弦を固定すると、この渦励振による弦の振動音がかなりはっきりと聞こえる。

ところで、この渦励振の原因となるカルマン渦列の放出周波数 f には式 (1) に示す関係式が成り立つ (図 1)。左辺の St はストローハル (Strouhal) 数と呼ばれる無次元量であり、渦放出周波数 f 、物体直交方向の風速 U 、物体の断面径 D という三変数から構成される。物体の断面形状が円形かつ、レイノルズ (Reynolds) 数 *2 が特定の範囲 ($500 \leq Re \leq 200,000$) にあるときにはストローハル数が約 0.2 になることが知られているため^[2]、周波数 f と直径 D が分かれば風速 U を推定することができる (*3 ($U = fD/St \approx fD/0.2$)). 実際の計測では、直径 D はあらかじめ分かっており、周波数 f は振動音のピーク周波数から得られるので、風速 U を推定することができる。

*2) 流体の粘性力と慣性力の比を表す無次元量

*3) ストローハル数は厳密にはレイノルズ数に応じて変化するため計測時の気温や圧力の影響を考慮する必要がある。後に示す結果もこのようなレイノルズ数依存性を反映したものとなっている。

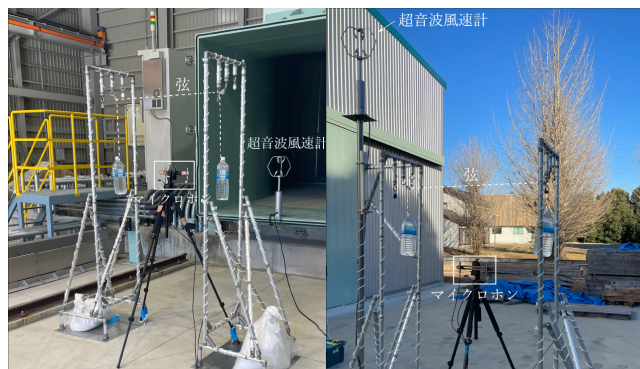


写真1. 風洞実験（左）と屋外実験（右）の様子^[3]に加筆
超音波風速計によって弦に直交する風速成分を計測

検証実験

先述の説明した計測原理で風速を測ることができるかどうか確かめた実験を紹介する^[3]。この実験には写真1に示す直径0.37mmの円形断面を持つ弦を張った架台を使用した。この架台を風洞装置吹出口に設置し、弦に直交する一様な流れを当てた場合（風洞実験）、架台を屋外に設置し自然風をあてた場合（屋外実験）の計2パターンについて、弦の振動音を録音する実験を実施した（写真1）。

各パターンにおけるスペクトログラム（時間・周波数領域の音を可視化したもの）と風速値の時刻歴波形をそれぞれ図2-1、図2-2に示す。スペクトログラムを読むと、縞模様のように周波数のピークが離散的かつ等間隔で現れているが、これは弦の固有振動数に対応する音であると考えられる。また、風速の時刻歴波形に加筆されている赤色の直線は、それぞれの時間帯のピーク周波数から推定される風速値を表しており、風洞実験（図2-1）では風速の変化を捕捉できていることが分かる。また、屋外実験（図2-2）では風洞実験に比べ精度は劣るものの、平均的な風速を推定できている。本実験の結果より振動音の周波数から風速を推定する手法の実現可能性が示された。

提案する風速計の実用化に向けて

本記事では弦と風向が直交する場合の風速推定の可能性を検証した実験を紹介した。本研究ではさらに、弦に対して斜めに風が吹く場合であっても、風速の弦直交成分に対応したピーク

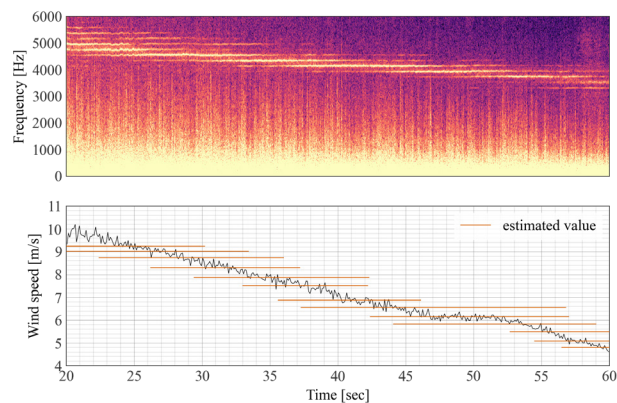


図2-1. スペクトログラム（上）と風速の時刻歴波形（下）：風洞実験^[3]を編集

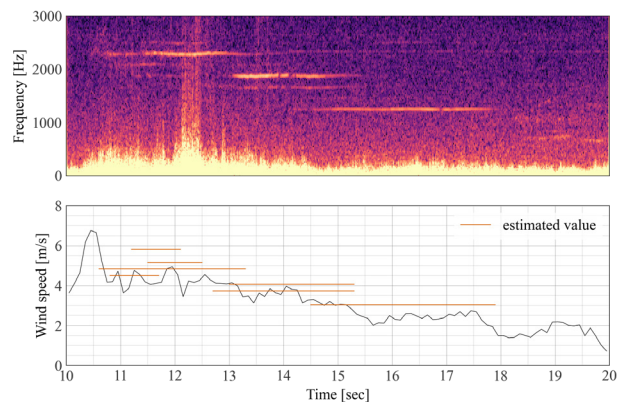


図2-2. スペクトログラム（上）と風速の時刻歴波形（下）：屋外実験^[3]を編集

周波数が現れることを実験で確認している^[4]。そのため複数の弦を使用すれば、各方向の風速成分が分かるので風向角の特定も可能であると考えている。今後は風速三成分を測ることができる風速計の構造を考えることが課題となる。

参考文献

- [1] Loop-Sessions.LLC. "Works - Loop-Sessions オーディオ／スペクトルアナライザ". <https://www.loopsessions.co.jp/jp/work/>, (参照 2024-07-31).
- [2] 鈴木康方, 関谷直樹, 彭國義, 松島均, 沖田浩平. 流体力学, コロナ社, 2018, 147p., (機械系コアテキストシリーズ, C-2), ISBN978-4-339-04535-2.
- [3] 吉川峻平, 高野靖, 大風翼, 西嶋一欽. 空力音の音源同定と周波数特性に基づく街中の風速推定. 日本建築学会学術講演梗概集. 2024.
- [4] 吉川峻平, 大風翼, 高野靖, 西嶋一欽. カルマン渦列による弦の振動に伴う発生音を利用した風速計の開発—風向と推定風速の関係に関する検討—. 風工学研究論文集. 2024, No.28.

複層ガラスのひずみに基づく風圧実測手法の開発

修士課程 奥川 凜太郎

はじめに

台風や竜巻などの強風災害に対する既存の建築物の余力を適切に評価するためには、建築物に作用する風荷重を過大あるいは過小評価することなく精確に評価する必要がある。建築物の風荷重は一般的に風洞実験や数値シミュレーションの結果を参考に評価され、その妥当性は実際の建築物で行う風圧実測に

よって検証できる。しかしながら、既存の風圧実測手法では、外気の圧力を導圧するため、建築物の外壁に穴を開けなければならない。そこで本研究^[1]では、圧力センサに依らない簡易な風圧実測手法を開発する。この手法によれば、高層建築物の外皮に用いられる複層ガラスに生じるひずみの変化を計測することで、建築物に作用する風圧を推定することができる。

複層ガラスのひずみと風圧の関係

図1に、風圧の作用により建築物の外皮を構成する複層ガラスが変形する様子を図示した。本研究では2枚のガラスの間に空気が封入された複層ガラスを想定している。図2に、複層ガラスに作用する圧力と封入空気に関わるパラメータを図示した。図1に示したように、風圧が作用すると複層ガラスはたわみ、表面にはひずみが生じる。このひずみの変化を計測することで、作用する風圧を推定するというのが本研究で開発する手法の原理である。しかしながら、複層ガラス表面のひずみの変化は、風圧の他に、図2に示した大気圧、室内圧、封入空気の温度変化に伴う体積変化によっても引き起こされる。

封入空気の温度変化に伴う体積変化を考慮するために、封入空気を理想気体と仮定し、理想気体の状態方程式から、 PV/T が一定になるという条件を用いた。また、2枚のガラスをそれぞれ1枚の平板とみなし、圧力を受けたガラスのたわみを、等分布荷重を受けた平板のたわみとしてモデル化した。その結果、複層ガラスを構成する2枚のガラスのうち、室内側のガラスの室内側表面の中心に生じる曲げひずみ ε_x は、以下のよう複数のパラメータの関数として表せる。

$$\varepsilon_x = f(P_1, P_2, P_w, T) \quad (1)$$

風圧実測手法の実装

式(1)の関係を用いて風圧 P_w の値を推定するためには、 $P_1, P_2, T, \varepsilon_x$ の値を計測する必要がある。 P_1, P_2 の値は絶対圧計を用いて計測するが、建物の外に絶対圧計を設置することが難しいため、大気圧 P_1 の値については建築物の屋上または1階で計測した大気圧を高さ補正した値を用いる。また、2枚のガラスの間にセンサを設置できないため、 T は室内側ガラスの室内側表面の温度と等しいものと仮定して温度計を貼り付けて計測する。曲げひずみ ε_x は直接計測することができないため、ひずみゲージ*1を貼り付けて ε_x の基準となる状態での値 ε_{xr} か

らの変化量 $\Delta\varepsilon_x$ を計測する*2。ただし基準となる状態は、ガラスに風圧が作用していない無風時とする。式(1)より $\Delta\varepsilon_x$ は以下の式で表せる。

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_x &= \varepsilon_x - \varepsilon_{xr} \\ &= f(P_1, P_2, P_w, T) - f(P_{1r}, P_{2r}, P_w = 0, T_r) \quad (2) \end{aligned}$$

P_{1r}, P_{2r}, T_r は基準となる状態での P_1, P_2, T の値である。計測した $P_1, P_2, T, P_{1r}, P_{2r}, T_r, \Delta\varepsilon_x$ の値を、式(2)を P_w について解いた式に代入することで風圧 P_w を推定する。

*1) ひずみゲージは抵抗体の抵抗値が伸縮によって変化する現象を利用したひずみ計測用のセンサ。詳細は、例えば参考文献[2]をご参照ください。

*2) ひずみゲージで計測するのは、実際には軸ひずみと曲げひずみの和の変化量であるが、別途行なった検討の結果、曲げひずみの大きさにくらべ軸ひずみの大きさが十分に小さいことを確認したため、ひずみゲージで計測したひずみの変化量を近似的に曲げひずみの変化量と扱うこととした。

小型圧力箱を用いた実験による風圧実測手法の検証

図3に実験に用いた圧力可変装置と小型圧力箱の写真を示す。小型圧力箱の上部の穴に複層ガラス試験体を固定し、小型圧力箱の中にチューブでつながれた圧力可変装置から空気を送り込むことで、圧力箱の中から複層ガラスに風圧 P_w を模した圧力を作用させる。圧力箱内部が実際の外気側、外部が実際の室内側に対応している。なお実験環境では、圧力可変装置を動作させていないときには、圧力箱内外の気圧は等しいと仮定した($P_1 = P_2$)。そのため、 P_2 に相当する圧力箱外部の気圧の計測値を P_1, P_2 の計測値と扱った。また、検証用に風圧 P_w に相当する圧力箱内外の圧力差を差圧計で計測した。図4に推定した P_w および検証用の P_w の時刻歴を示す。作用させた P_w の範囲が ± 1200 Paであるのに対して、推定した P_w の値と検証用の P_w の値の差は約50 Paであったため、 P_w が推定できたとみなした。実用化に向けて課題は残るものの、本研究で開発した風圧実測手法の妥当性は確認することができた。

参考文献

- [1] 奥川凜太郎, 伊藤靖晃, 西嶋一欽, 建築物外皮を構成する複層ガラスのひずみに基づく風圧実測手法の提案, 20060, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2024
- [2] 株式会社東京測器研究所, "ひずみゲージとは", (URL) https://tml.jp/knowledge/strain_gauge/about.html, 2024/11/29 閲覧

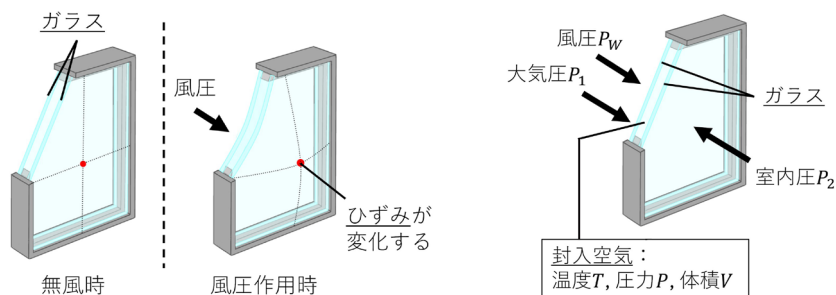


図1. 無風時(左)と風圧作用時(右)の複層ガラスの断面透視図

図2. 複層ガラスに作用する圧力と封入空気の状態に関するパラメータ

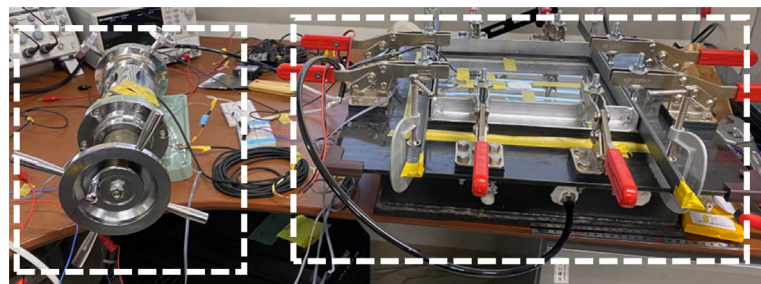


図3. 圧力可変装置(左)および小型圧力箱(右) ([1]より転載・一部変更)

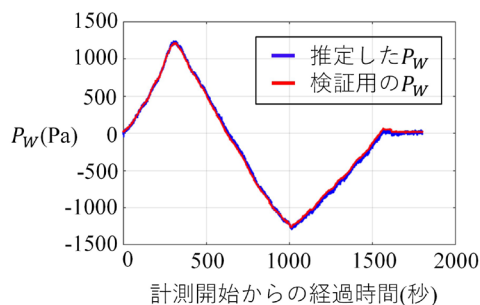


図4. 推定した P_w と検証用の P_w の時刻歴 ([1]より転載・一部変更)