

2019 年度 風工学研究拠点 共同研究成果報告書

研究分野：分野横断

研究期間：2019 年度

課題番号：

研究課題名（和文）：壁面近傍風圧の計測・予測手法の検討

研究課題名（英文）：Investigation of measurement and prediction method for wall pressure

研究代表者：染川大輔

交付決定額（当該年度）：資金準備型

※ページ数の制限はありません。

※成果等の説明に図表を使用させていただいて構いません。（カラーも可）

※提出して頂いた成果報告書をホームページでの公開を予定しております。

1. 研究の目的

壁面風圧については、構造分野では外装材にかかる荷重の評価に、環境分野では自然換気の際の風圧係数として用いられる。これまで、風洞実験を行うような大規模な建物では気密性の観点から自然換気は用いられず、風洞実験の成果を換気の観点で利用する事は少なかった。しかし、ZEB化のための中間期の自然換気利用、3.11以降に考えられた非常時の換気経路の確保、という観点からオフィスビルの中にも自然換気システムを導入するケースも増えてきている。また、高層建物にダブルスキンを設ける際、省エネルギー（熱負荷削減）の観点からダブルスキン内の高温空気を排出するために換気口を設けようと検討する例もあるが、内外圧差の変化の影響で外装材の荷重評価に大きく影響を及ぼすことが予想される。その他にも、自然換気を誘引するために建物中心にヴォイドを設ける建物も見られるが、強風時には室内外差圧が大きくなる要因となる場合も考えられ、換気への影響とともに集合住宅などではドアの開閉障害を起こす可能性も考えられる。それぞれ対象としている風速レベルは異なるが、自然現象において風速を制御できない中で理想状態以外の条件下においては問題起こる可能性も考えられる。

そこで、建物周りの流れ場の把握とともに、壁面及びその近傍における風圧の取り扱いに関する構造・環境の分野の共通理解を目的とする。その結果は、建物外装部分の設計や換気計画を合理的に進めるための貴重な資料となり得ると考えられる。

2. 研究の方法

ダブルスキンや自然換気利用など、具体的なテーマを対象として環境系・構造系の研究者によるディスカッションを行った。その際にそれぞれの分野で使用する基礎式に基づきどのようなモデル化を行っているかという点に注目を行った。

3. 研究成果

研究会で議論をしてきた、耐風工学・環境工学のそれぞれの分野における内圧の考え方、内外圧差を用いた各種検討方法についてまとめるとともに、両分野での考え方、取り扱い方の共通点や相違点について整理する。

建物に風圧力が作用すると、換気量と室内圧が変化する。環境工学分野では、室内圧ではなく、空気清浄度や室温形成に関係する換気量に注目することが多い（扉の開閉障害などの場合は別）。そして、外部風の乱れに起因する通風気流の乱れは、室内空気の慣性力によって減衰する上、室内空気を排出する効果も小さい。そのため、換気量を計算する際には、数分～1時間程度の時間スケールで外部風圧を平均化し、その間の変動を無視することが一般的である。ただし、外部風の乱れが換気量に全く影響しない訳ではなく、その効果を考慮した換気量計算に関する研究なども存在する。

一方、耐風工学分野では、換気量ではなく、主として建物の外装部材の損壊に関係する室内圧に注目している。外装部材に作用する風外力は、外圧変動と内圧変動の差（差圧）として評

備される。部位によっては、外圧変動から内圧変動を予測し、差圧を求めることもあるが、風洞実験などで室内圧を測定している場合にはこの風外力は時々刻々の圧力変動の時系列波形の差として評価されることが多い。そのため、瞬間的なピーク値を評価する必要がある外圧変動と同様の時間刻みでの評価が内圧変動にも要求されることになる。なお、耐風工学分野では建物内を単一空間として取り扱うことが多く、建設省の告示や建築物荷重指針などでも空間的に同一の内圧係数を用いて検討を行っている。ただし、2室を評価したり、多数室について卓越開口から伝播する内圧変動の予測を行ったりする例も存在する。それ以外に、より正確に風荷重を評価するために建物全体の剛性を考慮に入れて内圧の評価を行っている例もある。一方で、多開口についての検討例はあまり多くはない。これは、強風時に外装部材の破損に伴う被害の進展、すなわち卓越開口の発生に伴う内圧の変化が、検討対象であるためと思われる。

このように、注目している部分や評価時間に違いはあるが、根本にある理論は同じである。そのことは、Etheridgeによる整理を参考にすると分かり易い。Etheridgeは、流れの式を理論的厳密さによって3段階に分類している。以下がそれらの式であるが、理解し易いように、ここではEtheridgeの式を少し変形して示す。

・完全な定常

$$\Delta p = \begin{cases} \operatorname{sgn}_Q \cdot \frac{\rho}{2(\alpha A)^2} Q^2 & \text{(開口)} \\ \operatorname{sgn}_Q \cdot aQ^2 + bQ & \text{(隙間)} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 Δp 、 Q 、 αA は、2つの節点間の圧力差[Pa]、流量[m³/s]、有効開口面積[m²]である（ i, j の添字を省略）。また、 $\operatorname{sgn}Q$ は符号を表し、 Q の正負と一致する。 a 、 b は隙間の形状によって決まる係数（それぞれ[Pa/(m³/s)²]、[Pa/(m³/s)]）である。式(1)では、計算対象となる時間内の Δp 、 Q の変化は無視される。

・疑似定常

$$\Delta p\{t\} = \begin{cases} \operatorname{sgn}_Q \cdot \frac{\rho}{2(\alpha A)^2} Q\{t\}^2 & \text{(開口)} \\ \operatorname{sgn}_Q \cdot aQ\{t\}^2 + bQ\{t\} & \text{(隙間)} \end{cases} \quad (2)$$

式(1)と基本的に同じであるが、 $\Delta p\{t\}$ 、 $Q\{t\}$ は、圧力差と流量が時間変化することを意味しており、瞬時々の定常状態の成立が仮定される。

・疑似定常+慣性力

$$\Delta p\{t\} = \begin{cases} \operatorname{sgn}_Q \cdot \frac{\rho}{2(\alpha A)^2} Q\{t\}^2 + \frac{\rho l_e}{\alpha A} \frac{dQ\{t\}}{dt} & \text{(開口)} \\ \operatorname{sgn}_Q \cdot aQ\{t\}^2 + bQ\{t\} + c \frac{dQ\{t\}}{dt} & \text{(隙間)} \end{cases} \quad (3)$$

式(2)に慣性項が加わったものであり、 l_e 、 c はそれぞれ開口の有効長さ[m]、隙間の形状によって決まる慣性項の係数[Pa/(m³/s²)]である。この慣性項によって、空気の加速・減速と圧力の関係（加速度と力の関係）が考慮される。

他方、流量保存の式については、非圧縮性と圧縮性の2段階に分類される。非圧縮性の式は、以下の式(4)のようになり、圧縮性の場合は次項となる。

$$\sum_j Q_{ij} = 0 \quad (4)$$

・ 圧縮性

$$V_i \frac{d\rho_i\{t\}}{dt} = \sum_j (\rho_x\{t\} Q_{ij}\{t\}) \quad (5)$$

ここで、 V_i と ρ_i は、それぞれ室（節点） i の容積[m³]と空気密度[kg/m³]である。 ρ_x は、流れが室 i から流出する場合は ρ_i 、室 j から流入する場合は ρ_j となる。また、流入・流出の空気密度の違いを無視し、室内空気の断熱変化

($P_i/\rho_i^\gamma = \text{const.}$)を仮定すると、

$$\frac{V_i}{\gamma P_i} \frac{dP_i\{t\}}{dt} = \sum_j Q_{ij}\{t\} \quad (6)$$

となる。 γ は比熱比、 P_i は室内の絶対圧力である。

Etheridge は、上述の式(2)および式(4)~(7)の組み合わせにより、表 1 に示すような 4 つのモデルに分類・整理している。この表から分かるように、環境系で行われる換気回路網計算は、多数室・多開口の建物を対象とした PS モデルと分類できる。一方、構造系で用いられるヘルムホルツ共鳴現象に基づく計算は、単室・単開口を対象とした QT モデルと分類できる。

このような理論の整理は、換気や外装材の損壊だけでなく、それ以外の問題（例えば、高層建築物等で生じる扉の開閉障害等）を議論する際にも役立つはずであり、そのような議論が環境工学、耐風工学の分野の垣根を超えて行われることが重要だと考える。

表 1 Etheridge によるモデルの整理

モデル	必要な風圧データ	流れの式	連続の式
Pseudo-steady (PS モデル)	時間平均 風圧	完全な定常 (式(1))	非圧縮性 (式(4))
Quasi-steady incompressive (QI モデル)	瞬時風圧	疑似定常 (式(2))	非圧縮性 (式(4))
Quasi-steady compressive (QC モデル)	瞬時風圧	疑似定常 (式(2))	圧縮性 (式(6))
Quasi-steady temporal inertia (QT モデル)	瞬時風圧	疑似定常+慣性力 (式(3))	圧縮性 (式(6))

4. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

1. 後藤伴延、染川大輔、栗田剛、田中英之、佐々木澄：耐風工学分野と環境工学分野における建物内外圧の取り扱い、日本風工学会誌 第 45 巻 第 2 号、pp.104-111、2020.4
2. 山本佳嗣、庄司研：実務におけるダブルスキン設計事例と環境工学的視点から見た設計上の留意点、日本風工学会誌 第 45 巻 第 2 号、pp.112-117、2020.4
3. 染川大輔、丹原千里：ダブルスキンに生じる外圧と内圧の特徴、日本風工学会誌 第 45 巻 第 2 号、pp.118-121、2020.4
4. 今野大輔、植松康：PLA を用いた建物内外圧に関する一連の研究、日本風工学会誌 第 45 巻 第 2 号、pp.122-125、2020.4

〔学会発表〕（計 件）

- 1.
- 2.

〔図書〕（計 件）

- 1.
- 2.

〔その他，産業財産権，ホームページ等〕

- 1.
- 2.

5. 研究組織

(1) 研究代表者

染川大輔（大林組・技術研究所・主任研究員）

(2) 研究分担者

1. 松井正宏（東京工芸大学・工学部・教授）
2. 植松康（秋田工業高等専門学校・校長）
3. 後藤伴延（東北大学大学院・工学研究科・准教授）
4. 今野大輔（八戸工業高等専門学校・助教）
5. 佐々木澄（清水建設・技術研究所・主任研究員）
6. 相原知子（大成建設・技術センター・主任研究員）
7. 栗田剛（東急建設・技術研究所・主席研究員）
8. 田中英之（竹中工務店・技術研究所・グループ長）
9. 丹原千里（大林組・技術研究所・研究員）
10. 庄司研（大成建設・技術センター・主任研究員）
11. 山本佳嗣（東京工芸大学・工学部・准教授）

6. 要約(abstract)

研究課題名 **壁面近傍風圧の計測・予測手法の検討**

研究代表者名（所属） 染川大輔（大林組・技術研究所・主任研究員）

内容・図

建物壁面に生じる内外圧の取り扱いについて、環境工学分野と耐風工学分野（構造分野）のそれぞれの視点から、具体的な研究対象について基礎式の比較、モデル化の検討を行った。

Etheridge による整理に従うと、それぞれの分野の基礎式は以下の表のように整理され、評価する時間や建物のモデル化の仕方に違いはあるが、計算方法には基本的には違いがないことを確認した。

こうした比較と考察によって、分野を超えたやり取りが容易となり、議論されていくことが重要である。

表 Etheridge によるモデルの整理

モデル	必要な風圧データ	流れの式	連続の式
Pseudo-steady	時間平均、風圧	完全な定	非圧縮性
Quasi-steady incompressive	瞬時風圧	疑似定常	非圧縮性
Quasi-steady compressive	瞬時風圧	疑似定常	圧縮性
Quasi-steady temporal inertia	瞬時風圧	疑似定常＋慣性力	圧縮性