

# 周辺気圧の降下速度が及ぼす建物内外の非定常な気圧差力に関する研究

高橋 駿介

## 1. 序

竜巻通過時には、竜巻旋回流による風圧力と短時間での急激な気圧降下<sup>1)</sup>による気圧差力が外力として建築物に作用する<sup>2,3)</sup>。高気密な構造物の内圧は急変する外圧に追従できず、結果として大きな気圧差力が作用し、竜巻被害に影響を与えると考えられているが、急変する気圧降下の室内への伝達特性に関する実験や数値計算例は少なく、その詳細は十分には解明されていない。実験の検討が進んでいない背景には、急激な気圧降下を再現することの技術的難しさがあげられる。数値計算を用いた内圧の挙動に関する研究としては、開口部の空気の流出入量に着目した石崎ら<sup>4)</sup>の報告が挙げられ、気圧差力のみで建物上屋が飛散する可能性を指摘しているが、実験的知見の蓄積は少ない。また、開口部の空気塊の振動に着目した Holmes ら<sup>5)</sup>のものがあげられるが、準定常な外圧変化を対象としており、急激な気圧降下を対象とした検証はなされていない。

著者らはこれまでに、九州大学の突風風洞装置で突風を生成した際に生じる風洞内の静圧降下(図1)を利用し、無風下で急激な気圧降下のみを模型に作用させる実験システムを構築し、急激な外圧降下時の模型内圧変動に開口面積が及ぼす影響を明らかにした<sup>6)</sup>。しかし、模型容積や開口率(開口面積/容積)が及ぼす影響は検討できていない。そこで本論は、この実験システムを用い、模型の容積及び開口率をパラメータとして加え、無風環境下で急激な気圧降下を作用させた際の建物模型の内部に伝達する気圧変化と気圧差力を検討した。また、実スケール建物内圧の挙動の検証に資することを目標とし、風洞実験と同様の条件下を想定して、石崎ら<sup>4)</sup>と Holmes ら<sup>5)</sup>2つの数値計算式によって模型内圧を算出し、実験値との比較を通してその精度を検証した。

## 2. 実験概要

### 2.1 風洞概要

実験は九州大学大学院人間環境学研究院のエッフェル型吸込式風洞を用いて行った。風洞断面内での各計測機器の配置状況を図2に示す。計測部断面寸法は1.5m×1.5m、計測部全長は3mである。本風洞は、脈動流生成装置の翼列駆動を利用することで、ステップ関

数的な突風を生成するもので、脈動流生成装置の翼列を閉じることで風洞内を無風状態にし、翼列を瞬時に開放することで最短0.2秒の立ち上がりを持つ突風を生成することが可能である。また本風洞は吸い込み式であるので、翼列を閉鎖した状態での吸引部の圧力低下の影響を回避するために吸引部の天井と床面に翼列を配置して、突風制御の翼列開閉と反転同期させている。圧力は微差圧トランスミッタ(N計器 KL17)を用いて測定した。防風箱内圧(以下、模型外圧)、模型内圧をそれぞれ図2のA、Bで測定した。なお圧力を計測する際、突風時に発生する風洞内の静圧変動の影響を受けない風洞外を基準圧とした。計測位置における風洞内の風速は熱線風速計と超音波風速計を併用して測定した。測定のサンプリング周波数は圧力、風速ともに1000Hzである。

### 2.2 防風箱概要

本実験システムでは無風下の状況を作成するため、建物模型に風が直接作用しないように建物模型を被う

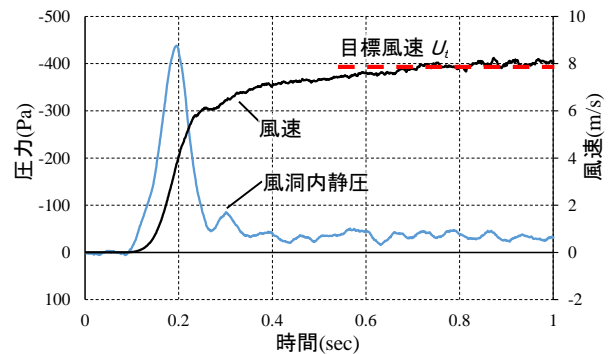


図1 突風生成と風洞内静圧降下

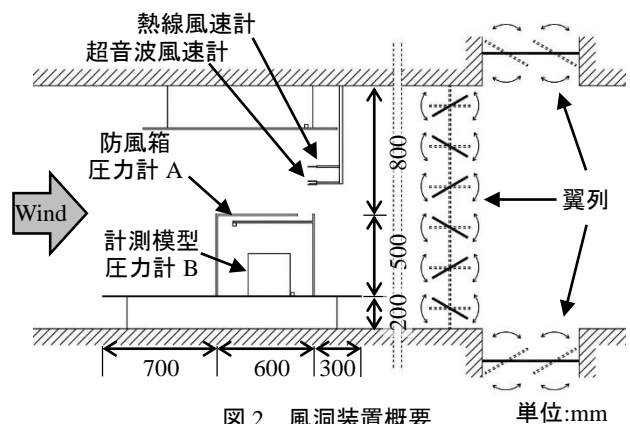


図2 風洞装置概要

単位:mm

防風箱を設けた(図3). 防風箱は風洞内の圧力を伝達するため, 上面後部に開口を設けているが, 内部への風が流入しないような構造を目指した. このことは, 防風箱内の圧力勾配が生じないことから確認した.

### 2. 3 建物模型概要

本実験では容積の異なる3種類の建物模型を用いた. 模型名称を容積が大きいものから順に模型L, 模型M, 模型Sとし, 模型容積はそれぞれ24.6, 13.8, 6.14( $\times 10^{-3} \text{ m}^3$ )である. 模型はいずれも陸屋根模型で, 厚さ10mmの透明アクリル板で作られている. 模型は十分な剛性を備えているもので, 圧力変動による模型の変形はないものとした. 各模型寸法等を表1に, また模型の一例として模型Mの概要図を図4に示す. 模型上部には開口を設けており, そこに直径36mmの円形のアクリル板を付け替えられるようになっている. 円形アクリル板中央に卓越開口を設けており, 円形アクリル板を取り替えることで模型の開口直径を調整することができる. 本論では開口率を(開口面積 $[\text{mm}^2]$ /模型容積 $[\times 10^{-3} \text{ m}^3]$ )と定義した. 表1に示すよう, 模型容積が異なっても開口率が等しくなるように卓越開口直径を定め, 開口率がそれぞれ0.51, 2.05, 4.60の3通りとなるように開口直径を定めた.

### 2. 4 計測パラメータ

本報告での実験変数を, 上述の開口直径と模型容積, 目標風速を $U_t$ として4~10m/sで1m/s刻みの7通りとした. また, 竜巻通過時の急激な外圧降下の再現のために翼列開放時間 $t_r$ を0.2秒とし<sup>9)</sup>, 各条件で3回ずつ測定した. ここでの目標風速とは突風が立ち上がった後の平均風速である. なお, 今回の測定パラメータでは, 模型外圧の最大降下量は250~560Pa程度の範囲であり, その降下量は目標風速 $U_t$ により調整できる.

### 3. 数値計算概要

#### 3. 1 空気の流出入量に着目した内圧応答式

石崎ら<sup>4)</sup>は単位時間当たりの空気の流出入量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$ に着目し, ボイルの法則と $Q = vS$  (ここで $v(\text{m/s})$ は開口部での空気の流速,  $S(\text{m}^2)$ は開口面積)から, 外気圧変化に対する室内圧応答方程式を次式で表している.

$$\frac{dP_i}{dt} = -\frac{aS}{\mu V} P_i(P_i - P_e) \quad (1)$$

ここで $P_i$ は建物内圧(Pa),  $P_e$ は建物外気圧(Pa),  $a$ は空気の流出入に関する係数(m),  $\mu$ は空気の粘性係数(Pa $\cdot$ s),  $V$ は建物容積( $\text{m}^3$ )である. 石崎らは開口部での流れ場をポアズイユ流と仮定し, 次式を用いて流速を算出している.

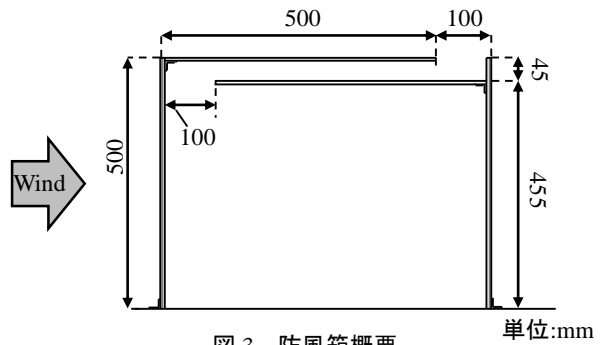


図3 防風箱概要

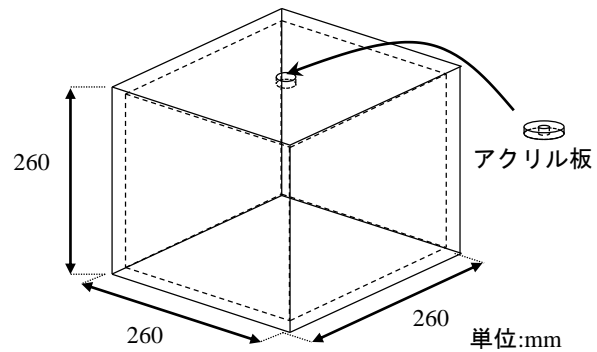


図4 建物模型概要(模型M)

表1 建物模型寸法と開口直径

	各辺の内寸(mm)			模型容積( $\times 10^{-3} \text{ m}^3$ )	卓越開口直径(mm)		
	長辺	短辺	高さ				
模型L	320	320	240	24.6	4	8	12
模型M	240	240	240	13.8	3	6	9
模型S	160	160	240	6.1	2	4	6
開口率(開口面積 $[\text{mm}^2]$ /模型容積 $[\times 10^{-3} \text{ m}^3]$ )					0.51	2.05	4.60

$$v = \frac{a}{\mu} (P_i - P_e) \quad (2)$$

ポアズイユ流は管径が一定の円管を流れる粘性流体の定常層流解であり, 管径に対し管長が十分に長い場合に適用できる. 実験で用いた模型の開口はこの条件を満たしているとは言えず, また流出入に関する係数 $a$ についても十分な検証がなされていないことから, 本論ではベルヌーイの定理から流速を求めることとした. 建物外気圧を $P_e$ , 空気密度を $\rho(=1.2\text{kg}/\text{m}^3)$ とすると, 開口部の空気の流速 $v$ は以下のように表現できる.

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} = \sqrt{\frac{2}{\rho}} \times |P_i - P_e|^{0.5} \times \text{sign}(P_i - P_e) \quad (3)$$

流速の算出に(3)式を用いた場合, 外圧変化を受ける建物内圧応答式(1)は以下の式に改められる.

$$\frac{dP_i}{dt} = -\frac{2SP_i}{\rho V} \times |P_i - P_e|^{0.5} \times \text{sign}(P_i - P_e) \quad (4)$$

#### 3. 2 振動する空気塊の運動方程式

開口以外の小さな隙間の影響を無視できる場合, Helmholtzの共振現象に基づいて, 外圧変動と内圧変動の関係は開口部の空気塊の運動方程式として, (5)式によって表される<sup>5,7など</sup>.

$$\rho S L_e \ddot{x} + \frac{\rho S}{2K^2} |\dot{x}| \dot{x} + \frac{nS^2 P_0}{V} x = (P_e - P_0) S \quad (5)$$

ここで、 $L_e$ は空気塊の有効長さ(m)、 $K$ はオリフィス係数(=0.9)、 $n$ は断熱空気 polytropic 指数(=1.4)、 $P_0$ は大気静圧(=1.013×10<sup>5</sup>Pa)である。 $x$ は開口部の空気塊の変位(m)であり、左辺第3項を $S$ で除した値( $nSP_0x/V$ )が内圧 $P_i$ (Pa)を表す。各係数の値は、風洞実験条件と既往の研究を参考にして括弧内の値とした。空気塊の有効長さ $L_e$ は以下の Vickery の近似式<sup>7)</sup>によって開口面積毎にそれぞれ求めた。

$$L_e = L + 0.89\sqrt{S} \quad (6)$$

ここで $L$ は開口部の奥行き(m)であり、屋根面厚(=1.0×10<sup>-2</sup>m)を用いた。

風洞実験で計測した圧力は風洞外を基準圧とした差圧力であるため、 $(P_e - P_0) = P_e'$ として、 $P_e'$ に風洞実験で得られた模型外圧の時刻歴データを用い、 $(P_i - P_0) = P_i'$ として模型内圧 $P_i'$ を算出する。開口面積 $S$ と容積 $V$ に実験条件値を与え、(4)式では時間刻み 1/1000(sec)で逐次変化量を算出し足し合わせることで、(5)式ではレンゲ・クッタ・ギル法によって模型内圧を算出した。

#### 4. 実験及び数値計算結果

##### 4.1 模型内外圧の時刻歴波形

再現結果の一例として、図5に模型外圧最大降下量 480Pa 程度(目標風速 8m/s)、開口率 0.51(×10<sup>-3</sup>m<sup>2</sup>)での各容積の模型内外圧の時刻歴波形を示す。実験値に着目すると、模型外圧の降下に伴う模型内圧の降下が見られた。模型外圧が急激な降下から定常状態へと移行すると、模型内圧もそれに伴って定常状態となり、模型

外圧と同値を取る。開口は急激な変動の伝達には影響を与えるが、定常時の微細な変動には影響を与えない<sup>8)</sup>。これらの傾向はいずれのパラメータでも見られた。また、図5では開口率を統一し、模型容積と開口直径を変化させているが、模型内圧はほぼ同様の値を取っており、開口率によって模型内圧が定量的に把握できることが示唆される。

計算値は実験値と同様に、模型外圧の短時間での急激な変動に追従し、定常状態へと移行する。いずれの条件でも計算値は実験値を精度良く再現しており、空気の流出入量による内圧応答方程式と空気塊の運動方程式の両方で、急激な外気圧降下を受ける内圧変動の再現が可能であることがわかる。ただし、条件によっては、実験値と計算値のピーク値に若干の差が見られた。

##### 4.2 外圧降下量と内圧降下量の関係

全てのパラメータを系統立てて整理するため、各容積での模型外圧降下量と模型内圧降下量をまとめたものを図6に示す。実験値では、内圧降下量は各容積、開口面積によって外圧降下量と線形関係にある。また、開口面積と容積が異なっても開口率が等しければ、同じ外圧降下量に対してほぼ同程度の内圧降下量を取ることが確認できる。

数値計算結果はいずれのパラメータでも精度よく実験値を再現しているが、空気塊による計算値は概ね実験値よりも模型内圧を若干大きく評価している。この要因として、開口部での圧力損失に関するオリフィス係数に与えた値が適していなかったことが考えられる。オリフィス係数は開口形状やレイノルズ数の影響を受

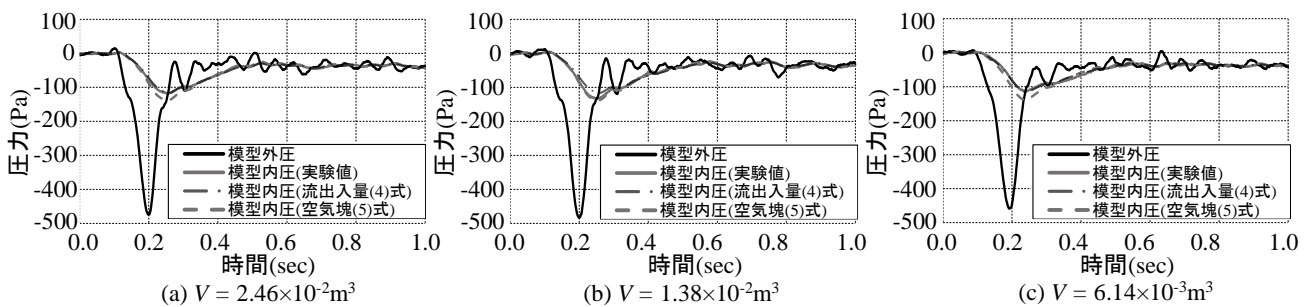


図5 開口率0.51、模型外圧降下量約480Paでの模型内圧(実験値、計算値)と模型外圧の時刻歴波形

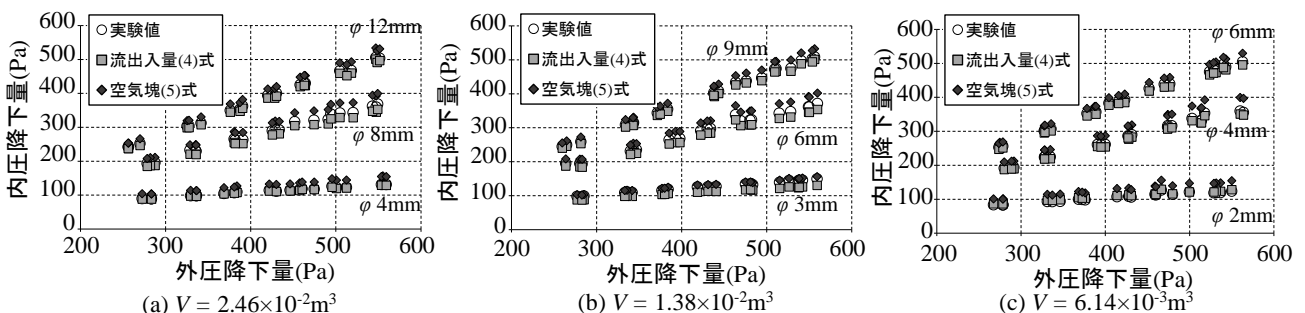


図6 模型容積毎の模型内外圧最大降下量の関係

けるため幾つかの実験式が考えられており、実スケールでの適用には今後も検討が必要と考える。

#### 4. 3 差圧力波形

模型内圧から模型外圧を差し引いたものを模型壁面に作用する差圧力とする。壁面外向きを正としており、この値に壁面面積を乗じたものが実際に模型壁面に作用する力(気圧差力)となる。図7に模型外圧最大降下量480Pa程度(目標風速8m/s)、模型M、各開口率での差圧力波形の実験値を示す。急激な壁面外向きの力が作用した直後に、壁面内向きの力が生じ、その後急速に定常状態へと落ち着く。開口率が大きくなるに伴い、壁面外向きの力は小さくなり、壁面内向きの力が大きくなる。開口率4.60の場合では、壁面内向きの力の方が卓越する例も見られた。壁面内向きの力が生じる理由としては、模型外圧がピーク値を取ると、それが伝達して模型内圧がピーク値を取るのに時間差が生じることがあげられる。

#### 5. まとめ

防風箱内の無風環境下で模型に急激な気圧降下のみを作用させ、模型の開口面積、容積、開口率を変えながら模型内圧の測定を行ったところ、以下の所見を得た。

1. 模型内圧波形は模型外圧の急激な気圧降下に伴って降下し、外圧が定常状態へ移行する間で変わった際に最大降下量を取り、その後定常状態へと移行する。開口率が大きくなる程、模型外圧の急激な降下に伴う模型内圧の最大降下量は大きくなる。
2. 内圧降下量は模型の開口率に大きく影響を受け、開口面積や容積が異なっても開口率が等しければ、同様の内圧変動が観測される。開口率が大きい程、内圧降下量は大きくなることを確認した。
3. 模型内圧から模型外圧を差し引いた差圧力波形は、急激な壁面外向きの力が発生した直後に壁面内向きの力が生じ、定常状態へと落ち着く。開口率が小さくなるほど壁面外向きの力がより卓越する。また、開口率が大きくなると壁面外向きの力は減少し、壁面内向きの力が大きくなる。

また、風洞実験と同様の条件を想定し、風洞実験で得

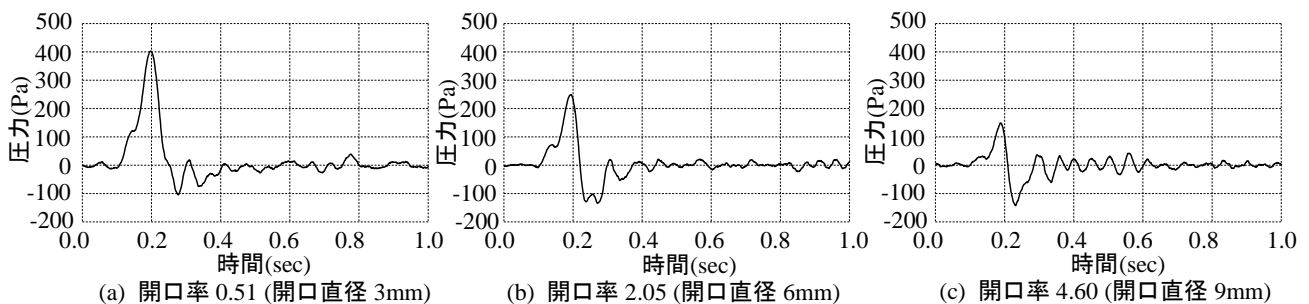


図7  $V = 2.46 \times 10^{-2} \text{m}^3$ 、模型外圧降下量約480Paでの模型内外の差圧力の時刻歴波形

られた模型外圧波形を用いて、2種類の数値計算によって模型内圧を算出した。実験値と比較を行うことで、以下の所見を得た。

4. 空気の流出入量に着目した内圧応答式を、既往研究<sup>4)</sup>のポアズイユ流という仮定を用いず、ベルヌーイの定理を用いて(4)式と改めた。その結果得られた模型内圧波形は、模型外圧の急激な降下から定常状態へ移行する変動に追随するという実験値と同様の傾向を示し、非常に精度の高い結果が得られた。
5. 空気塊の運動方程式(5)式から得られた模型内圧波形も同様に、模型外圧の急激な降下から定常状態へ移行する変動に追随する傾向を示したが、実験条件によっては実験値よりも内圧降下量を大きく評価しているものが見られた。

#### 参考文献

- 1) Julian J. Lee, Timothy M. Samaras, Carl R. Young : PRESSURE MEASUREMENTS AT THE GROUND IN AN F-4 TORNADO, 15.3, 22nd Conference on Severe Local Storms, American Meteorological Society, October 2004
- 2) 奥田泰雄, 深井敦夫, 榎本敬大, 壁谷澤寿一, 喜々津仁密, 石井儀光, 中井貴文, 荒木康弘, 永井渉: 基礎ごと転倒した2階建て木造建築物の転倒開始風速に関する考察, 平成24年度文部科学省科学研究費補助金特別研究促進費24900001代表: 前田潤滋, 平成24年5月6日に北関東で発生した竜巻の発生メカニズムと被害実態の総合調査, pp.180-185, 2013
- 3) 高瀬賢佑, 前田潤滋, 大坪和広: 被害風速に及ぼす移動速度が速い竜巻通過時の急激な気圧降下の影響, 第23回風工学シンポジウム論文集, pp.157-162, 2014.12
- 4) 石崎潑雄, 林泰一, 谷池義人: 急激な気圧変化に対する室内圧の応答, 京都大学防災研究所年報 第26号B-1, pp.1-7, 1983.4
- 5) J.D. Holmes : Mean and fluctuating internal pressures induced by wind, Proceedings of 5th International Conference on Wind Engineering, pp.435-450, 1979.7
- 6) 高橋駿介, 美並浩成, 大坪和広, 鶴則生, 前田潤滋: 竜巻による急激な気圧低下が及ぼす建物室内外の非定常な気圧差力, 都市・建築学研究 九州大学人間環境学研究院紀要, 第28号, pp.41-46, 2015.7
- 7) B.J. Vickery : Gust-Factors for Internal-Pressures in Low Rise Buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 23 pp.259-271, 1986
- 8) 茅野紀子, 岡田恒: 耐風設計における建築物の室内圧に関する研究 その1 平均室内圧係数, 日本風工学会誌第56号, pp.11-21, 1993.7