

## 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

高橋, 駿介  
九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻 : 修士課程

美並, 浩成  
京都大学大学院工学研究科 : 修士課程

大坪, 和広  
九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻 : 博士後期課程

鶴, 則生  
九州大学大学院人間環境学府

他

<https://doi.org/10.15017/1785464>

---

出版情報 : 都市・建築学研究. 28, pp.41-46, 2015-07-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門  
バージョン :  
権利関係 :



## 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

# An Unsteady Pressure Differential between the Inside and Outside of a Building Caused by Tornado's Suddenly-dropped Atmospheric Pressure

高橋駿介\*, 美並浩成\*\*, 大坪和広\*\*\*, 鶴 則生\*\*\*\*, 前田潤滋\*\*\*\*\*

Shunsuke TAKAHASHI, Kosei MINAMI, Kazuhiro OTSUBO,  
Norio TSURU and Junji MAEDA

When a tornado travels very fast, an unsteady pressure differential between the inside and outside of a building is generated by suddenly-dropped atmospheric pressure due to the tornado. However, there is little information about the characteristics of a force caused by the pressure differential. The authors developed an experimental system which generated a suddenly-dropping pressure around a building model in a calm condition using a gusty wind tunnel. The effects of an opening area of a building wall on the force generated by the pressure differential were studied using the system. We also performed some numerical simulations and compared with the experimental results. It was found that the bigger force of pressure differential was generated in a case of the smaller opening area.

**Keywords:** Tornado, Dropped External Pressure, Internal Pressure Change, Tunnel Test, Numerical Simulation

竜巻, 気圧低下, 内圧変動, 風洞実験, 数値計算

### 1 序

竜巻被害では写真1のような建物の上屋全体が飛散, 転倒する被害が見られることがある。竜巻の通過時に建築物に作用する外力として, 竜巻旋回流の接線風速による風圧力の他に, 短時間での急激な気圧低下による気圧差力があげられる<sup>1)</sup>。図1は実際にアメリカで観測された竜巻通過時の気圧低下の例<sup>2)</sup>であるが, 気密性の高い構造物の内圧はこのような急激な気圧低下に追従できず, 結果として建物内外に大きな圧力差が発生すると考えられる。石崎ら<sup>3)</sup>は建物内外の気圧差力のみで建物の上屋

が飛散する可能性を指摘しており, 竜巻被害の解明には突風風速とともに竜巻による急激な気圧低下を考慮する必要がある。一方で竜巻被害風速の算定に気圧低下を考慮した検討例<sup>4)</sup>は少なく, 特に気圧差力に関する実験的知見は十分には蓄積されていない。急激な気圧低下に関する研究が進められていない背景の一つに, 急激な気圧低下を実験的に発生させることの技術的困難さがあげられる。九州大学の突風風洞装置では, 短時間で立ち上がる突風を生成する際に風洞内に急激な静圧低下が生じる<sup>5)</sup>。本研究ではこれを利用して, 無風下で短時間での急



写真1 竜巻によってべた基礎ごと転倒した住宅 (2012年 つくば市)

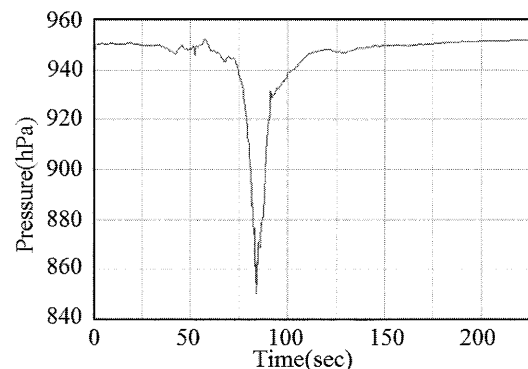


図1 2003年アメリカで観測された竜巻通過時の気圧変化

\* 都市共生デザイン専攻 修士課程  
\*\* 京都大学大学院工学研究科 修士課程  
\*\*\* 都市共生デザイン専攻 博士後期課程

\*\*\*\* 人間環境学府  
\*\*\*\*\* 都市・建築学部門

激な気圧降下を再現する実験システムの構築を検討した。このシステムを用いて、建物模型の開口の大きさをパラメータとし、急激な気圧降下のみを建物模型に作用させた際の模型内圧を計測した。

また、風洞実験結果を実スケールの建物へ適用するには数値計算による検証が不可欠である。数値計算を用いた竜巻の急激な気圧降下の際の内圧の挙動に関する研究としては前述の石崎らの報告があげられ、ここでは開口部の空気の流量に着目した外気圧変化に対する室内圧応答方程式による数値計算を行っているが、その応答方程式で用いられる気密度と竜巻の性質をまとめた無次元係数及びその無次元係数の算出に用いられる建物内の気密度を示す係数に関する知見は十分に蓄積されておらず、汎用性は十分ではない。一方で、Holmes<sup>9)</sup>は Helmholtz の共振現象に基づき、外圧変動に対する内圧変動の関係を開口部の空気塊の運動方程式で示しており、準定常な外圧変化に対する内圧変化の検討<sup>7)</sup>や、定常的な強風下で建物に突然開口が生じた場合の内圧の検討など<sup>8)</sup>に広く用いられている。本報告では実スケールでの急激な外圧降下を受ける建物内圧の挙動の検証に資することを目標として、風洞実験と同様の条件下を想定した空気塊の運動方程式による数値計算を行い、模型内圧の実験値と計算値の比較を行った。

## 2 突風風洞の概要及び突風下での風洞内静圧特性

### 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。圧力は小型デジタル微差圧計(N 計器 GC30)を用いて測定した。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。風洞内静圧、防風箱内圧、模型内圧はそれぞれ図 2 の A, B, C 点で測定した。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 風洞内の静圧

図 3 に風洞内の静圧と、突風の風速及びその加速度の時刻歴波形の一例を示す。無風時から立ち上がる所定の

風速を目標風速とし、目標風速までの立ち上がりに要した時間を立ち上がり時間とし、目標風速 4m/s、立ち上がり時間 0.4 秒のものを示す。突風の加速度は、風速の時刻歴波形に 50Hz のローパスフィルターをかけた後に中心差分法を用いて算出している。風洞内静圧は突風の加速度とほぼ連動して変化していることがわかる。図 4 に後述の検証実験によって得られた突風の加速度の最大値と風洞内静圧降下のピーク値の関係を示す。なおピークが複数みられる場合は、その中で絶対値の大きいものを用いた。突風の加速度の最大値と風洞内静圧降下のピーク値には線形関係が見られる。以上のことから突風加速度を調整することで風洞内静圧を変化させることが可能だとわかる。

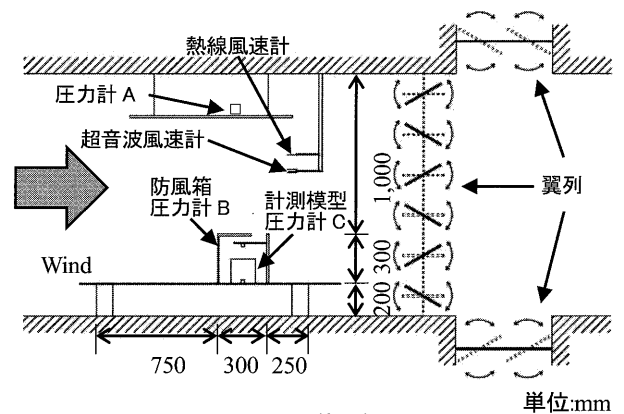


図 2 風洞装置概要

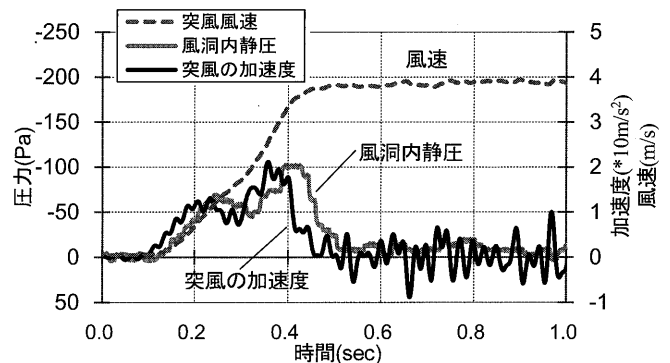


図 3 風洞内の静圧と突風風速、突風加速度の時刻歴波形

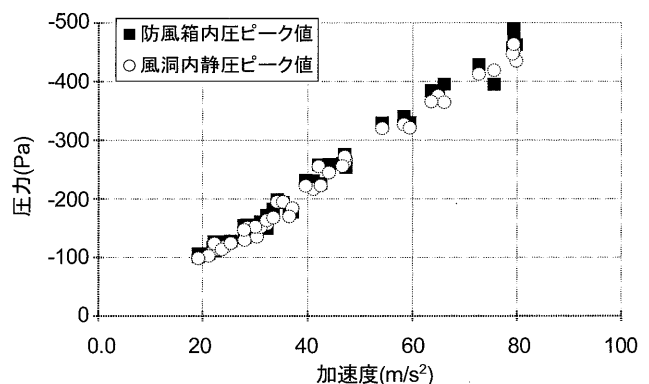


図 4 防風箱内圧ピーク値と風洞内静圧ピーク値と突風加速度の最大値との関係

### 3 急激な気圧降下を再現する実験システムの検証

#### 3.1 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、図2に示すように建物模型に風が直接作用しないように建物模型を被う防風箱を設けた。防風箱は上面の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。防風箱内部への流入風が存在しないことは、防風箱内部に糸を垂らし、突風を生成した際にその変動が無いことで確認した。

#### 3.2 検証実験概要

風洞内静圧の変化が防風箱内へ、すなわち建物模型まわりにどのように伝達するか検証するため、突風を生成させた際のピーク値の比較と風速が定常状態となった際の定常圧力の比較を行った。検証実験での実験パラメータは、目標風速を4~8m/sの1m/s刻みの5ケース、立ち上がり時間を0.2, 0.3, 0.4秒の3ケースとし、それぞれのケースで3回ずつ測定した。

#### 3.3 検証実験結果

図5は、目標風速8m/sで立ち上がり時間を変えて行った風洞内静圧と防風箱内の圧力の時刻歴波形である。図5(a)に示す立ち上がり時間0.2秒の場合には、圧力降下のピークが1回起り、図1のような急激な圧力降下を再現することができた。また立ち上がり時間0.2秒であれば、どの目標風速においても圧力降下のピークは1回であった。図5(b)に示すような立ち上がり時間0.3秒の場合には圧力降下のピークが複数回現れたものもあり、目標風速、試行毎でピークの回数に違いが見られた。図5(c)に示す立ち上がり時間0.4秒の場合には、いずれの目標風速でも圧力降下のピークは複数回見られた。ピークが複数回見られるのは、図3に示すような突風の立ち上がり時、加速度のピークが複数回生じたことに対応している。また図4には各試行で算出した風速の加速度の最大値と風洞内静圧と防風箱内圧のピーク値をまとめているが、ほぼ全てのパラメータで風洞内静圧と防風箱内圧のピーク値はほぼ一致しており、防風箱は風洞内静圧の降下量の大きさには影響を与えていないと言える。

一方で風速が定常状態となった際の防風箱内の圧力は風洞内の静圧よりさらに低下した。これは防風箱の上面に開口を設けた影響であるが<sup>9)</sup>、圧力降下の定性的な変

化に影響を与えるものではない。

以上を考慮すると、竜巻通過時の急激な気圧降下の再現には、立ち上がり時間0.2秒の場合では、竜巻通過時と同様の大きなピークが1度起きるため、竜巻通過時の定性的な気圧変化の再現が可能である。更に防風箱内ではこれを無風環境で再現できることを確認した。

### 4 実験概要

図6に実験に用いた計測模型のモデル図を示す。模型はアクリル製で、屋根面及び床面厚は5mm、壁面厚は20mmで十分な剛性を備えており、圧力変動による模型の変形はほぼ無視できるものである。本計測模型は屋根面を取り替えることで計測模型の開口の大きさを調整できる。壁面と屋根面の間にはゴムチューブを設けて、気密性を確保している。屋根面は開口を設けないもの(直径 $\phi = 0\text{mm}$ )と直径 $\phi = 2, 4, 6\text{mm}$ の卓越開口を中央に有する場合の4ケースとした。卓越開口直径 $\phi$ は住宅の気密性能に関する既往の研究<sup>10)</sup>から、実住宅の単位床面積当たりの隙間の相当開口面積を参考にして決定した。今回のパラメータでは文献<sup>10)</sup>での気密性能グレード0~4程度に対応しており、実スケールでは高气密な木造住宅に相当する。卓越開口の直径、開口率(卓越開口面積/屋根面積)と気密性能グレード、後述する空気塊の有効長さの関係を表1にまとめた。

図7(a)に模型が卓越開口を有さない状態で実際に急激な圧力降下を生じさせた際の時刻歴波形を示しているが、

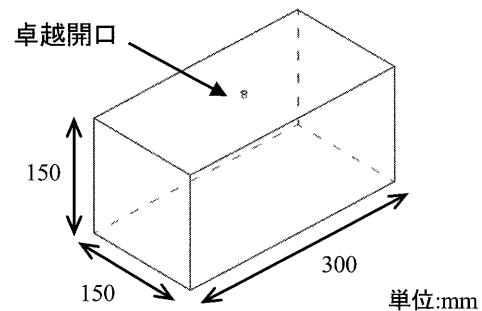


図6 陸屋根模型寸法

表1 卓越開口の直径と開口率、気密性のグレード  
空気塊の有効長さの関係

卓越開口直径	$\phi 0\text{mm}$	$\phi 2\text{mm}$	$\phi 4\text{mm}$	$\phi 6\text{mm}$
開口率	0.00	$6.98 \times 10^{-5}$	$2.79 \times 10^{-4}$	$6.28 \times 10^{-4}$
気密性能グレード <sup>10)</sup>	グレード0	グレード0~1	グレード2	グレード4
空気塊の有効長さ(m)	-	$6.58 \times 10^{-3}$	$8.15 \times 10^{-3}$	$9.73 \times 10^{-3}$

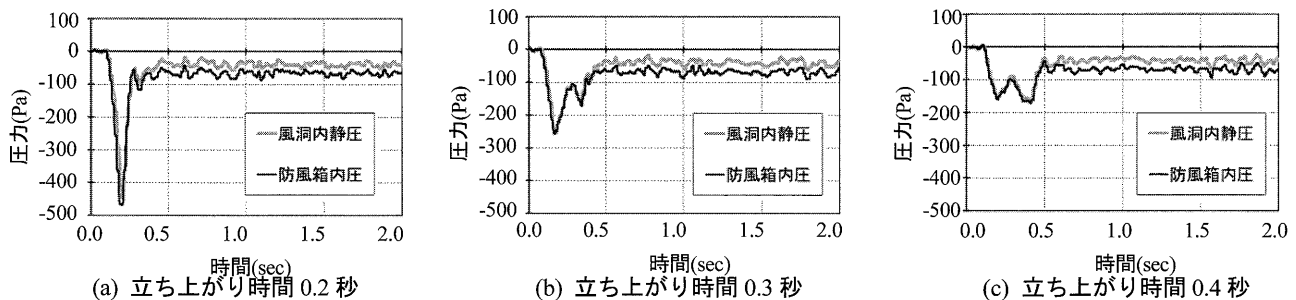


図5 目標風速8m/sでの防風箱内の圧力と風洞内の静圧の時刻歴波形

模型内圧はその影響を受けず、ほぼ0の値を取り続ける。つまり壁面や床面に隙間は殆ど存在しておらず、開口としては卓越開口のみを考慮すれば良い。

本実験では無風下で急激な圧力降下を受ける模型内圧と模型外圧に相当する防風箱内圧を測定した。実験変数を目標風速と模型屋根面の卓越開口直径 $\phi$ として、目標風速を4~10m/sの1m/s刻み7ケースで測定した。また竜巻通過時のような急激な気圧降下の再現のため、3.3節より翼列の回転時間は0.2秒とし、それぞれのケースで3回ずつ測定した。今回の測定パラメータでは、防風箱内圧の最大降下量は250~560Pa程度の範囲である。

### 5 数値計算概要

既往の報告<sup>6~8,11,12</sup>によると、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以下の開口部の空気塊の運動方程式によって表される。

$$\rho A L_e \ddot{x} + \frac{\rho A}{2K^2} |\dot{x}| \dot{x} + \frac{nA^2 P_0}{V_0} x = -(P_e - P_0) A \quad (1)$$

ここで、 $\rho$ は空気密度(=1.2kg/m<sup>3</sup>)、 $A$ は開口面積(=3.14×10<sup>-6</sup>m<sup>2</sup>, 1.26×10<sup>-5</sup>m<sup>2</sup>, 2.83×10<sup>-5</sup>m<sup>2</sup>)、 $L_e$ は空気塊の有効長さ(m)、 $K$ は開口部での圧力損失に関するオリフィス係数(=0.9)、 $n$ はpolytropic指数(=断熱空気の比熱比, 1.4)、 $P_0$ は大気静圧(=1.013×10<sup>5</sup>Pa)、 $V_0$ は容積(=6.75×10<sup>-3</sup>m<sup>3</sup>)、 $P_e$ は外圧(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 $A$ で除した値( $nAP_0x/V_0$ )が内圧(Pa)を表す。計算を行うにあたり、風洞実験条件と既往の報告を参考にして各パラメータを括弧内の値とした。なお、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4章の実験で得られた防風箱内圧の時刻歴データを用いた。空気塊の有効長さ $L_e$ は以下のVickeryの近似式<sup>11</sup>)によって開口面積毎にそれぞれ求めた。

$$L_e = L + 0.89\sqrt{A} \quad (2)$$

ここで、 $L$ は開口部の奥行きであり、屋根面厚(=5×10<sup>-3</sup>m)としている。これらの数式を用い、ルンゲ・クッタ・ギル法により、時間刻み1/1000(sec)で模型内圧を算出した。

### 6 実験結果及び数値計算結果

#### 6.1 時刻歴波形

図7に目標風速8m/sの突風を生成した際の模型内圧、防風箱内圧の時刻歴波形を示す。実験値に着目すると、図7(b)~(d)に示す卓越開口を有する場合には、防風箱内圧の降下に伴って模型内圧の降下が見られた。この降下量は卓越開口が大きくなるのに伴って大きくなり、図7(d) $\phi = 6\text{mm}$ の場合では防風箱内圧とほぼ同じ降下量となる。防風箱内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、防風箱

内圧と同値を取る。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及ぼさない<sup>11)</sup>。これらの傾向はいずれの目標風速においても見られた。

計算値に着目すると、実験値と同様に、防風箱内圧の

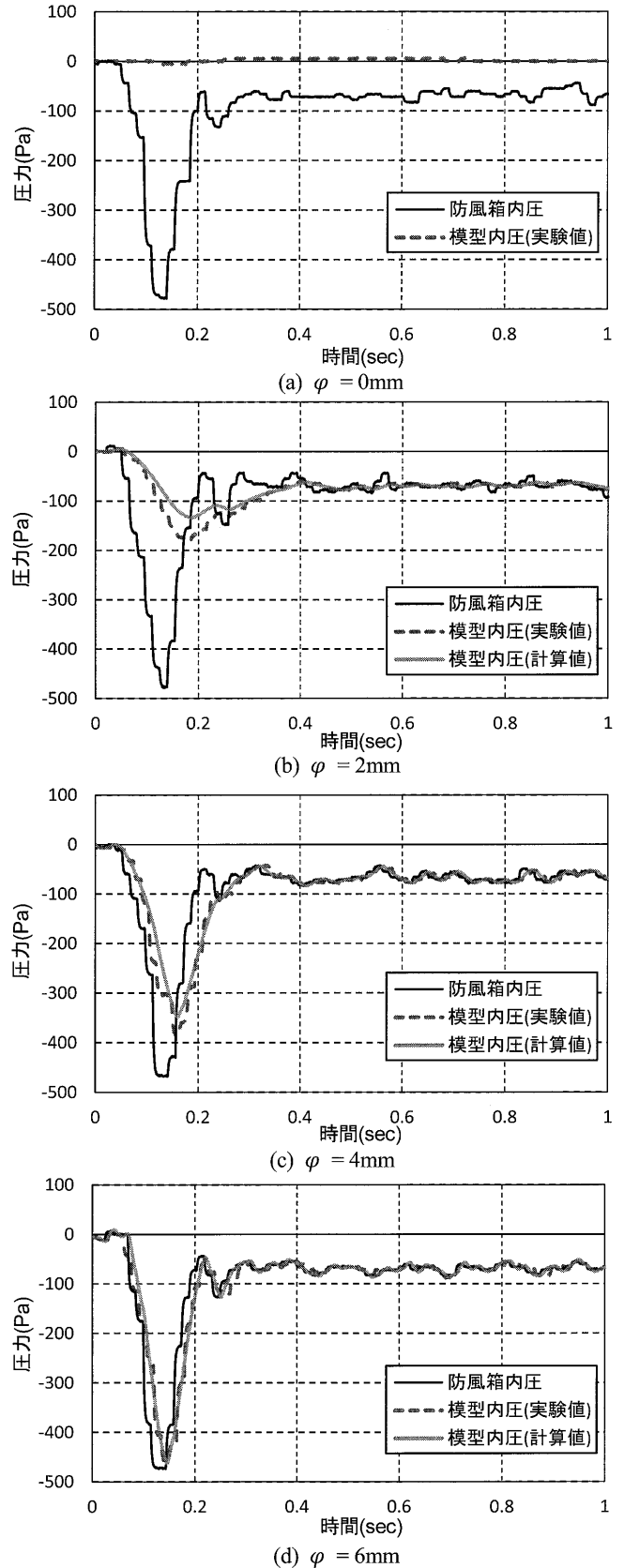


図7 目標風速8m/sでの模型内圧、防風箱内圧の時刻歴波形

短時間での急激な変動に追従して、模型内圧は降下した後定常値へと落ち着く。空気塊の運動方程式を用いることで、このような急激な外気圧の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が、開口の大きさによっては、実験値と計算値のピーク値に差が見られた。

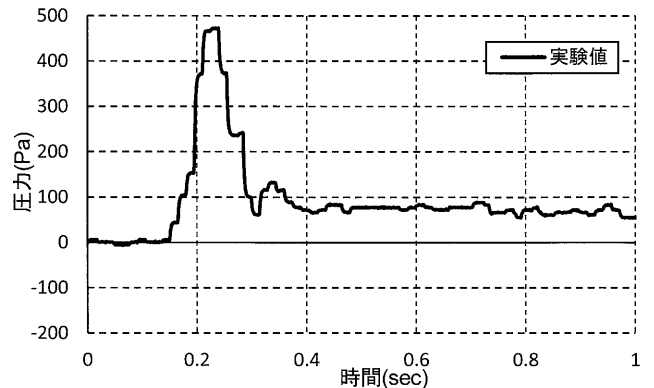
## 6.2 データ整理

防風箱内圧のピーク値に対する模型内圧のピーク値の比を防風箱内圧のピーク値でまとめたものを図8に示す。実験値では防風箱内圧のピーク値に対する模型内圧のピーク値の比は卓越開口の大きさ毎に概ね一定で、卓越開口が大きくなるにつれ大きくなっており、模型内圧のピーク値は建物模型の開口の大きさに強く依存している。このことから、開口の小さな模型ほど大きな気圧差力が作用していることがわかる。計算値は概ね実験値よりも若干値を小さく評価しており、 $\phi = 2\text{mm}$ では、防風箱内圧のピーク値の増大につれ若干の減少傾向を示す。このような差が出た要因としては、実験で用いた模型の作成精度等の実験の精度誤差や、数値計算でオリフィス係数に与えた値が適していなかったこと等が考えられ、特に後者についてはパラメータスタディ等を通じた検証が必要である。

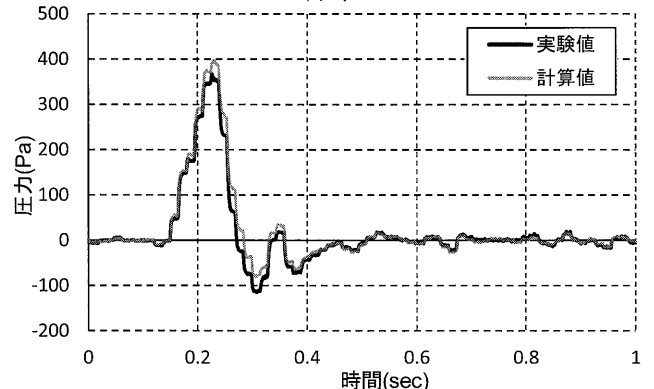
## 6.3 差圧力波形

模型内圧から防風箱内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9に目標風速 8m/s、翼列の開放時間0.2秒の突風を生成した際の差圧力波形を示す。図9(a) $\phi = 0\text{mm}$ の場合では、模型内圧が0の値を取り続けているため、防風箱内圧の力が直接模型に作用しており、定常状態移行後も0の値を取らない。卓越開口を有する場合、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。卓越開口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。 $\phi = 6\text{mm}$ の場合では、目標風速によっては壁面内向きの力の方が卓越

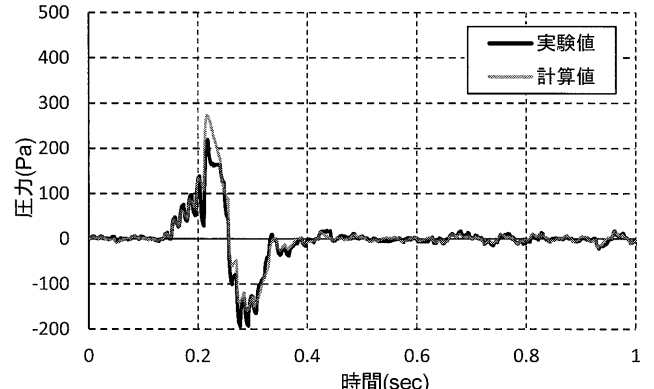
する例も見られた。壁面内向きの力が生じる理由としては、防風箱内圧がピーク値を取るのと、それが伝達して模型内圧がピーク値を取るのに時間差が生じることが考えられる。



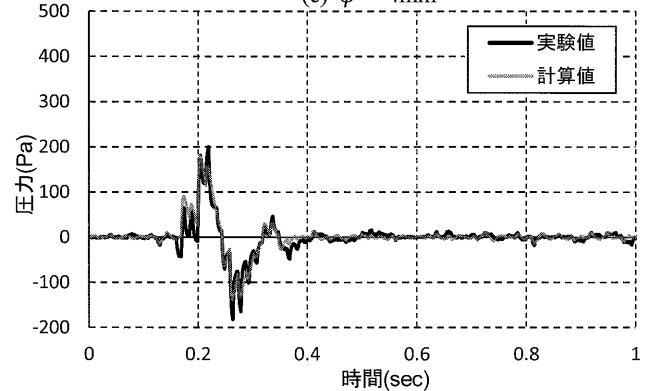
(a)  $\phi = 0\text{mm}$



(b)  $\phi = 2\text{mm}$



(c)  $\phi = 4\text{mm}$



(d)  $\phi = 6\text{mm}$

図9 目標風速 8m/s での差圧力波形

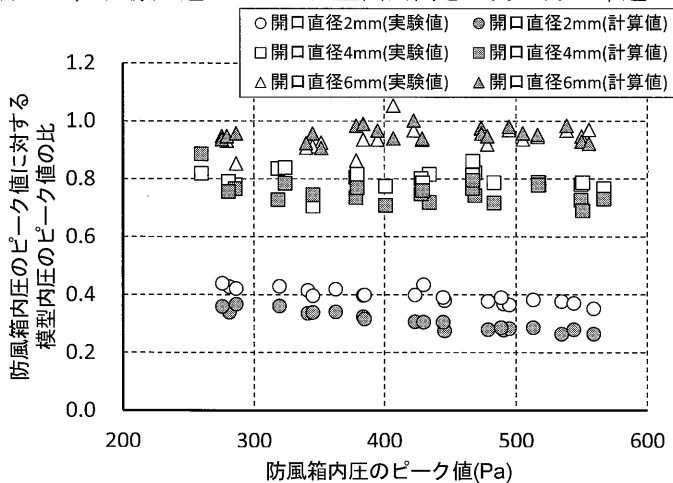


図8 模型内圧と防風箱内圧の最大降下量の比

## 7 まとめ

突風風洞を利用して、竜巻通過時の急激な気圧降下を再現する実験システムの構築を行い、以下の所見を得た。

- (1) 本実験システムによって、突風風洞内とほぼ同じ圧力降下のピーク値を防風箱内の無風環境で再現できた。
- (2) 突風風速の立ち上がり時間によって、防風箱内圧の変化を調整することができ、立ち上がり時間 0.2 秒の場合、竜巻通過時のような短時間の急激な気圧降下を再現することが可能である。

防風箱内の無風下での状態で陸屋根模型に急激な気圧降下を作用させ、模型屋根面の卓越開口の大きさ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。

- (3) 卓越開口が大きくなる程、防風箱内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。これは防風箱内圧の最大降下量によらず、各卓越開口の大きさに概ね一定の割合である。
- (4) 模型内圧から防風箱内圧を差し引いた差圧力波形を見ると、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。卓越開口が小さくなるほど壁面外向きの力が、卓越開口が大きくなると、壁面内向きの力が卓越する。

また風洞実験と同様の条件を想定し、模型外圧に相当する実測の防風箱内圧を用いて、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。

- (5) 空気塊の運動方程式から得られた波形は、実験値と同様に、防風箱内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。一方で、開口の大きさによっては実験値よりも圧力の降下量を小さく評価しており、パラメータスタディ等を通した検討が必要である。

岡田らの準定常変動風圧に関する報告<sup>7)</sup>では、開口部の変動圧伝達特性は、開口面積を容積で除した値で概ね決定づけられることが指摘されている。今後は模型の容積や開口奥行長さ等をパラメータとして着目しながら、各パラメータの無次元化、実スケールでの検証など進めたい。また本実験と数値計算では室内容積が不変な状態を前提にしているが、気圧差力による壁面の変形の影響は重要な課題である。

## 謝辞

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金「竜巻通過時に急変する風速と気圧降下との相乗効果による建物の破損プロセス」(H26 年度基盤研究(B)26282112, 代表：前田潤滋)の助成を受けました。

## 参考文献

- 1) 日本風工学会 風災害研究会：2012 年 5 月 6 日に北

関東で発生した広域突風被害について、日本風工学会誌第 37 巻 3 号, pp.210-222, 平成 24 年 7 月

- 2) Julian J. Lee Timothy M. Samaras and 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
- 3) 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, 昭和 58 年 4 月
- 4) 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
- 5) 竹内崇, 前田潤滋: 立ち上がり時間の短い突風を受ける物体に作用する非定常風圧力, 日本建築学会構造系論文集, 第 79 巻, 第 697 号, pp.357-366, 2014.3
- 6) J.D. Holmes : Mean and fluctuating internal pressures induced by wind, Proceedings of 5th International Conference on Wind Engineering, pp.435-450, 1979.7
- 7) 岡田恒, 茅野紀子: 耐風設計における建築物の室内圧に関する研究 その 2 室内圧のガスト影響係数, 日本風工学会誌第 58 号, pp.43-53, 1994.1
- 8) 染川大輔, 川口彰久, 谷口徹郎, 谷池義人: 内圧のオーバーシュートを考慮した外装材設計用風荷重, 日本建築学会構造系論文集 第 73 巻 第 628 号, pp.867-873, 2008
- 9) 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
- 10) 村上周三, 吉野博: 住宅の気密性能に関する調査研究, 日本建築学会論文報告集第 325 号, pp.104-115, 1983.3
- 11) B.J. Vickery : Gust-Factors for Internal-Pressures in Low Rise Buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 23 pp.259-271, 1986
- 12) Henry Liu and K.H. Rhee : Helmholtz Oscillation in Building Models, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 24, pp.95-115, 1986

(受理：平成27年6月11日)