

# 数値シミュレーションによる竜巻状旋回気流がもたらす風力の評価

片岡 浩人

## Numerical Assessment of Wind Forces Induced by Tornado-Like Swirling Flows

Hiroto Kataoka

### Abstract

The strong winds associated with tornados have been modeled as translating swirling flows in the wind engineering community. These tornado-like swirling flows can be reproduced using an open or closed type of experimental apparatus. In most cases, the computational simulations of these flows have been performed under closed-type boundary conditions. However, to reproduce a broader range of flow conditions, the open type of simulator is supposed to be more advantageous than the closed one. In this report, a tornado-like swirling flow with translation motion is reproduced by numerically simulating the open-type experimental apparatus. The wind pressure and force coefficient distributions are predicted for a low-rise large-scale building. The solution accuracy is also verified by comparing the results with the experimental results in the literature, showing that the approach presented here can be used to reproduce the wind load associated with tornado-like swirling flows.

### 概要

スーパーセル型の竜巻に伴う強風は、風工学の分野では移動する旋回気流としてモデル化されてきた。この竜巻状の旋回気流を取り扱った既往の実験装置には閉鎖型と開放型がある。数値流体計算では多くの場合、閉鎖型の装置を対象としている。また、装置内で建物を移動させる事で旋回流の移動を再現した例もある。しかし、移動する竜巻状旋回気流が大規模な構造物に与える影響など、より広範囲な条件を再現するには、開放型の装置を模擬するのが有利と考える。本報告では、開放型の実験装置を模擬した数値流体計算によって求めた、移動する竜巻状旋回気流によって、大規模構造物の屋根・壁面に生じる風圧分布および風力の予測を行った。また既往の実験結果との比較により解析精度の検証を行った結果、本計算は移動する竜巻状旋回気流に伴う突風荷重の再現が可能であることが確認された。

## 1. はじめに

日本では、近年になり竜巻発生に伴う被害が多く報告されるようになった<sup>1)</sup>。主な被害事例だけでも2006年9月17日宮崎県延岡市<sup>2)</sup>、2006年11月7日北海道佐呂間町<sup>2)</sup>、2012年5月6日茨城県つくば市<sup>3)</sup>、2013年9月2日埼玉県越谷市<sup>4)</sup>などが挙げられる。また気象庁竜巻等の突風データベースによると、1年当たり約26件（2007年～2013年、海上竜巻を除く）が記録されている<sup>1)</sup>。

竜巻による強風は、台風や発達した低気圧が接近した時と比べると非常に局地的に発生し、かつ発生時間が短い。そのため通常の気象観測網で捉える事は難しく、また個々の建物レベルでみると竜巻に遭遇する確率が極めて小さいことから、一般的な建物に対する具体的な風荷重評価の道筋がつけられていない。しかし瞬間的には台風等よりも強風が作用する事から、特に原子力発電所などの重要施設における対応が望まれる。

毎年の様に竜巻による甚大な被害が発生する米国では、原子力発電所を対象とした設計ガイドライン<sup>5)</sup>が作成されている。同ガイドラインでは米国内を3つの領域に分割し、領域毎に年超過確率が $10^{-7}$ に相当する規模の竜巻を設計竜巻と定めている。また荷重については、1)強風に

に伴う風力、2)旋回流中心部の静圧低下、3)飛散物による衝撃力の3つを評価する。日本においても同様のガイド<sup>6, 7)</sup>が作成され、年超過確率が $10^{-5}$ を下回らない風速を基準竜巻とし、同風速に対して周辺地形による増幅を考慮した値を設計風速として用いる事と定められている。荷重については米国と同様に風力、静圧低下、飛散物による衝撃力を考慮する。

日本のガイド<sup>6, 7)</sup>では風力の評価方法として、最大瞬間風速（最大竜巻風速）で速度圧を求め、風力係数には通常の強風時に用いる平均風力係数を採用し、気流の乱れや建物の動特性を考慮したガスト影響係数には1を用いて評価する、と定めている。しかし竜巻のような短い時間での風向変化を伴う非定常な流れ場に対して平均風力係数の値を用いる事には矛盾がある。また風速が急変する際の風力のオーバーシュート現象が報告<sup>8)</sup>されており、竜巻に対応した風力係数の評価方法が望まれる。

そこで、竜巻現象を移動する旋回気流としてモデル化し、同気流を数値流体計算で再現する事で、建物に作用する風力を評価する方法の構築を試みた。本報告では、はじめに竜巻のモデル化について既往の研究をもとに考察を行う。次に解析の概要を述べるとともに、大規模建築物を対象としたピーク風圧を評価した事例を示す。そ

して戸建住宅を対象とした解析結果と既往の実験結果とを比較し、解析手法の検証を行う。

## 2. 竜巻のモデル化

### 2.1 スーパーセル型竜巻の概要

竜巻はその発生メカニズムに応じて、発達した積乱雲の中に存在する直径10km程度のメソサイクロンに伴い形成されるスーパーセル型と、それ以外の非スーパーセル型に分類される<sup>9)</sup>。より大きな被害をもたらすのはスーパーセル型とされている。

Fig. 1にスーパーセル型竜巻の模式図を示す。スーパーセルと呼ばれる積乱雲は水平方向に数10km、高さ方向に20km程度の規模で、暖気の上昇、降雨、冷気の吹下ろし、暖気と吹下ろした冷気との間のガストフロントの形成、積乱雲中心部のメソサイクロンの存在といった、複数の構成要素が含まれる。その中で竜巻は、高々水平方向に100m程度の規模の現象に過ぎない。

スーパーセル型の竜巻を対象として、数値気象モデルによる再現を試みた事例が報告されている<sup>10, 13)</sup>

高解像度の計算により、メソサイクロンやガストフロントといった構成要素を再現できるようになったが、地上付近の竜巻の再現までには至っていない。

一方で、竜巻のような旋回気流によって短時間で風向・風速が大きく変化し、かつ静圧の低下が伴うような状況において、建物にどのような風力が加わるかを検討する場合には、スーパーセルの個々の構成要素の再現は必ずしも重要でない。地上付近の渦運動の再現で充分である。すなわち検討対象が何であるかによって、実験や数値計算で再現すべき現象も変わってくる。

このような考えに従って、いくつかの再現方法（トルネードシミュレータ）が提案されている。

### 2.2 実験（トルネードシミュレータ）

竜巻を対象とした実験装置のうち最も単純なものは、鉛直方向に中心軸を持つ竜巻状の旋回気流だけの再現を目的としたものである。1970年代にWard<sup>12)</sup>や、Churchら<sup>13)</sup>によって提案された装置は、頂部に吸引ファンを設置し、その下に積乱雲内部の上昇気流を模擬した円筒形状の対流域（convective region）と、積乱雲直下の地上付近を模擬した収束層（confluence region）を設ける。収束層の外周からの気流流入に対してスクリーンの回転やガイドベーン（気流の向きを変える案内羽）によって接線方向の運動量を与え、装置中心部に気流が収束する事で竜巻状の旋回気流を再現する。国内の同様の実験装置の主なものに、松井ら<sup>14, 15)</sup>、野田ら<sup>16)</sup>の実験装置がある。これらの実験装置では実験パラメータ（ファン吸込み風量、収束層高さ、周方向速度成分）を変える事で、竜巻状の旋回気流の形成に与える影響が検討できる。ただし、再現される旋回気流は閉鎖型の実験装置の中心部に限定され、竜巻の接近に伴って生じる風向・風速や静圧の変化が建

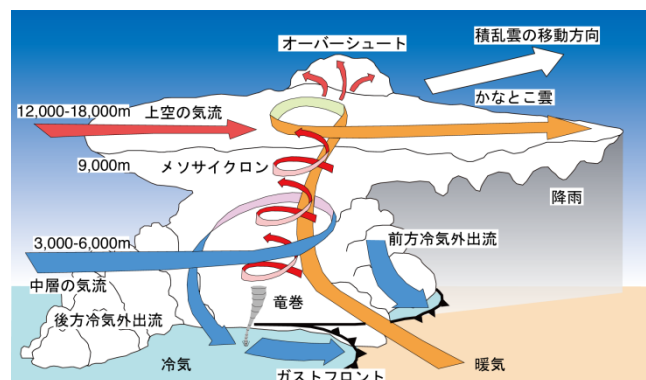


Fig. 1 スーパーセル型竜巻の模式図  
Schematic Diagram of a Super-Cell Type Tornado  
([https://en.wikipedia.org/wiki/Rear\\_flank\\_downdraft](https://en.wikipedia.org/wiki/Rear_flank_downdraft)を元に作図)

物に与える影響を再現する事はできない。

そこで、渦の移動を再現した実験装置がHaanら<sup>17)</sup>、喜々津ら<sup>18, 19)</sup>、松井ら<sup>15)</sup>によって提案されている。このうち本論文で解析のターゲットとする喜々津らの実験装置の外観をPhoto 1に示す。実験装置中心部から吸い上げた気流を装置の外周部に沿って吹下ろし、その際に接線方向運動量をガイドベーンによって加える。これらから構成される竜巻状旋回気流発生装置を床面から浮かせ、水平方向に移動させる事で、旋回気流の発生と移動を再現している。また渦の周りが開放空間であり、大きな障害物による影響が再現可能である。

一方、積乱雲からの冷気をドライアイスミストでモデル化し、熱的要因を加えた実験による検討が佐々ら<sup>20)</sup>によって行われている。これらの実験では建物スケールの現象を対象としたものではなく、地形によってもたらされる水平断面内の速度勾配（水平シア）が竜巻の生成にどのような影響を与えるかについての検討に適しているものと考えられる。

松井ら<sup>21)</sup>は竜巻状の旋回気流に関する既往の実験装置についてとりまとめた。その中で、建物模型と渦の相対位置関係、渦の大きさと建物の大きさとの関係など、耐風設計で一般的に行われている境界層乱流を対象とした風洞実験にはない実験パラメータが、竜巻独自の課題としてあげている。



Photo 1 喜々津ら<sup>18, 19)</sup>による開放型の実験装置  
Open Type Tornado Simulator by Kikitsu et al.

### 2.3 数値流体計算

数値流体計算においても同様に、解析対象として取り込む現象に応じていくつかの方法が提案されている。このうち最も多くの研究者が扱っているのが閉鎖型のモデルである<sup>22)~26)</sup>。

丸山<sup>22), 23)</sup>は対流域を円筒形とする一方で、収束層の平面形状を正方形とし、各側面の一部のみを開放する事で流入境界における接線方向運動量与えている。石原<sup>24)</sup>およびフックら<sup>25), 26)</sup>は、松井らの閉鎖型の実験装置<sup>14)</sup>を模擬した解析を行っている。このうちフックら<sup>26)</sup>は、収束層内に設置した建物モデル周囲の計算格子にスライディングメッシュを適用し、建物を渦に向かって移動させて、移動する渦の影響を再現している。また野田<sup>27)</sup>は、丸山と同様に収束層の平面形状を正方形とし、水平シアのある流入気流を境界条件として与えて、水平シア強度と生成される旋回流の関係について調べている。

一方開放型のモデルを対象とした解析は閉鎖型の解析と比べると例に限られるが報告されている<sup>28~30)</sup>。

Kuai<sup>28)</sup>は、Haan<sup>17)</sup>の実験モデルを対象とした解析を行っている。ただし計算領域を円筒形状に設定し、領域下部からの流入気流を実験結果から与えているので、形の上では閉鎖型の解析とみなせる。片岡<sup>29), 30)</sup>は、喜々津<sup>18), 19)</sup>の実験装置を模擬した解析モデルにより、地形が竜巻状旋回気流に与える影響を求めている。開放型のモデルを採用し、収束層内に大規模な地形がある状態で、竜巻状の旋回流の移動を実現している。

数値流体計算では実験と比べて熱的要因のモデル化が容易である。佐久間<sup>31), 32)</sup>の計算は大気不安定性、後方冷氣外流出や前線を挟んで異なる風況の再現といったスーパーセルの構成要因を取り込み、より気象現象に近いモデル化により竜巻状旋回流の再現を試みている。その結果、後方冷氣外流出の存在が竜巻の生成に重要な役割を果たしているとまとめている。

このように竜巻を対象とした実験、数値流体計算ともに再現する現象の範囲に応じて、異なる手法が提案されているが、ここでは建物に作用する風力を評価する事が主眼であることから、気象的要素までは含めないで竜巻状の旋回気流の再現を目指すこととする。また、建物への影響評価の観点から、竜巻の接近に伴う静圧変化が室内圧に与える影響が無視できない事、ならびに静圧変化を捉えるには建物から十分に離れた位置から竜巻状の旋回流を接近させる必要がある事から、これらに対応している喜々津<sup>18), 19)</sup>の開放型の実験装置を対象とした片岡<sup>29), 30)</sup>のモデルを用いることとする。

## 3. 解析モデルと数値計算手法

### 3.1 竜巻状旋回気流の発生装置

Fig. 2に喜々津らの装置を模擬した竜巻状旋回気流の発生装置の概要を、Table 1に同機構の形状ならびに風速条件を示す。頂部から速度 $Wc$ で流出し、その外側に同心

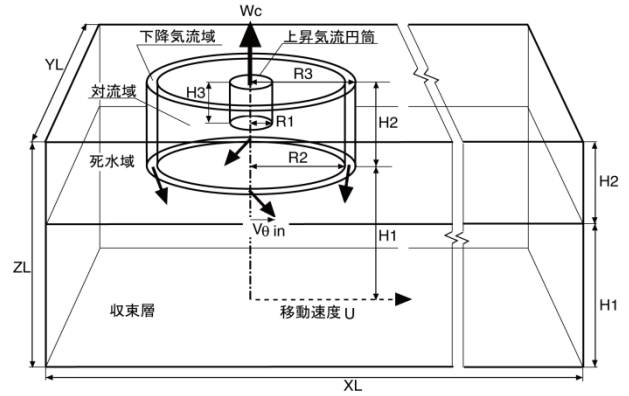


Fig. 2 竜巻状旋回気流の発生装置  
Numerical Model for Tornado-Like Swirling Flow Generator

Table 1 旋回気流の発生装置のパラメータ  
Parameters for Tornado-Like Swirling Flow Generator

形状						速度	
R1	R2	R3	H1	H2	H3	$V\theta_{in}$	$Wc$
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[m/s]
250	620	740	730	80	60	12	40

円状に配置した吹出し口から旋回成分 $V\theta_{in}$ を伴った下降気流を供給する。竜巻状旋回気流が十分に発達した後、移動速度 $U$ で機構全体を水平方向にスライドさせる。

### 3.2 基礎式と離散化手法

対象となる気流を非圧縮性等温流れ場と仮定し、以下の擬似圧縮性法に基づく基礎式<sup>33)</sup>を用いる。

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial \tau} + \beta \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \tau} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\nu + \nu_{SGS}) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right\} + F_i \quad (2)$$

ただし $x_i$ は空間座標 $(x, y, z)$ 、 $u_i$ は $x_i$ 方向の速度成分 $(u, v, w)$ 、 $\rho$ は空気密度、 $p$ は圧力、 $\beta$ は擬似圧縮パラメータ $(=10,000)$ 、 $t$ は物理時間、 $\tau$ は擬似時間、 $\nu$ は分子運動量拡散係数、 $\nu_{SGS}$ はサブグリッドスケールの運動量拡散係数、 $F_i$ は外力項。また $\bar{\phi}$ は変数 $\phi$ の格子幅で平均化を示す。

連続の式(1)と、各座標軸方向の運動方程式(2)の2組の方程式から、速度成分 $(u, v, w)$ と圧力 $p$ の空間分布を求める。また格子サイズ以下の乱れの影響を $\nu_{SGS}$ でモデル化し、格子サイズ以上の変動成分を直接解くLES (Large Eddy Simulation) を実施する。

基礎式は直交格子上で有限体積法に基づいて離散化を行う。対流項は三次精度風上差分、その他の空間微分は二次精度の中心差分を用いた。対流項の数値粘性でSGSモデルの代用とする陰的LESである。

解析は擬似圧縮性法のアルゴリズム<sup>33)</sup>に従う。まず各式を擬似時間 $\tau$ 方向に一次精度陰解法で解く。その際、各擬似時間ステップの収束計算にはヤコビ法を用いた。擬似時間微分項が十分に小さくなり、解が擬似時間方向に

定常に達した時、圧力の時間微分項が消滅して連続の式が満たされることとなる。そして次の物理時間ステップに進む。物理時間微分項は二次精度で離散化した。

### 3.3 境界条件

地表面及び建物表面には、速度0のno-slip条件を課す。計算領域の側壁面では圧力を固定し、速度に関しては自由流出入とする。ただし、外部境界に接する要素からその内側5列目までの要素に次式の外力項を加え、数値解の振動に伴う境界からの不自然な流入流出を抑制する。

$$F_i = -C_{\beta_i} \bar{u}_i \sqrt{\bar{u}_j^2} \quad C_{\beta_i} = 1.5 \quad (3)$$

ただし $C_{\beta_i}$ は抗力係数。

竜巻状旋回気流発生装置内部の速度は、解強制置換法<sup>34)</sup>により与える。また雲の中に相当する死水域内の速度は、発生装置の移動速度 $U$ に等しいとした。

## 4. 大規模建築物を対象とした検討

### 4.1 計算領域

対象となる建物形状は、竜巻状旋回気流の進行方向に対する見付幅100m×進行方向の奥行150m×高さ50mの直方体状とする。

Fig. 3に計算領域を示す。大きさは長さ4.4km×幅2km×高さ810mとした。計算領域は4段階の重合格子で離散化し、各グリッド間は二方向のネスティング<sup>35)</sup>を行う。各グリッドの格子解像度をTable 2に示す。いずれのGridも水平方向は等間隔直交格子、鉛直方向は不等間隔格子とした。Grid 1から3は領域の高さならびに高さ方向の格子分割を共通とし、建物近傍のGrid 4だけ領域高さを低くした上で格子解像度を高めた。

### 4.2 旋回気流の初期条件

長辺方向端部から1kmの位置を竜巻状旋回気流の中心の初期位置とし、775秒間で初期流れ場を発達させる。計算の時間刻み幅は $\Delta t=0.02$ 秒とした。その後、160秒間、移動速度 $U=15$ m/sで2.4kmの距離を移動させる。静止状態で発達した時の地表面付近における旋回気流の性状（時間平均値）をTable 3に示す。なお今回用いた発生装置で形成される旋回気流を時間平均した場合、ランキン渦と良く対応する事は既往の研究<sup>36)</sup>で確認している。

### 4.3 移動中の性状（建物がない場合）

Fig. 4に建物がない場合の渦の移動状況を示す。水平面は地上2.5m高さにおけるスカラー風速の瞬時値のコンターを示す。等値面はTable 3の最大旋回風速で求めた速度圧 $q_c (=0.5\rho V_{\theta\max}^2)$ に相当する等圧面（6,000Pa）で、渦の周りを旋回する風速の最大値（最大旋回風速）が発生する位置、すなわち渦コアに相当する。

Fig. 4によると発生装置の移動とともに渦が移動するが、地表近くになるほど発生装置からやや遅れて追従し

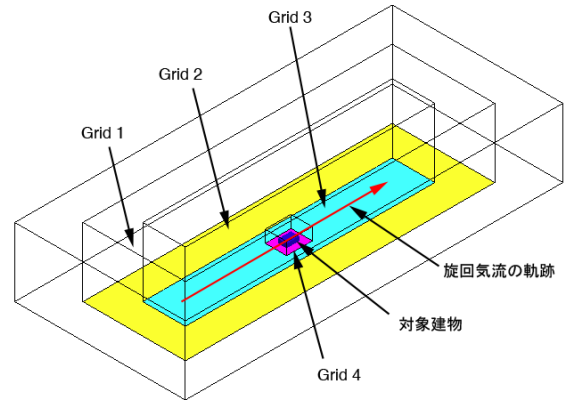


Fig. 3 計算領域の分割図 (大規模建築物)  
Decomposition of Computational Domain

Table 2 計算格子分解能 (大規模建築物)

Grid Resolutions			
Grid	領域の大きさ 長さ×幅×高さ	水平格子 解像度	鉛直格子 解像度
1	4.4km×2.0km×810m	20m	5~20m (62)
2	3.6km×1.2km×810m	10m	5~20m (62)
3	2.9km×500m×810m	5m	5~20m (62)
4	300m×250m×150m	1m	1~10m (52)

鉛直格子解像度の()内は格子分割数

Table 3 静止状態における竜巻状旋回気流の諸元  
Specs of Tornado-Like Swirling Flow at Stational State

最大旋回風速 $V_{\theta\max}$	最大旋回風速半径 $R_m$
約100m/s	約30m

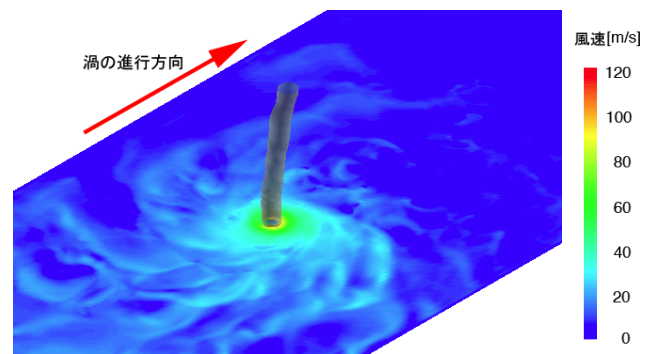


Fig. 4 移動中の渦の可視化 (建物なし)  
Visualized Image of Translating Vortex (Without a Building)

ており、渦の進行方向への傾きが見られる。また地表付近では渦の後方で風速の高い領域が広がる。

Fig. 5に竜巻状旋回気流の経路の地上2.5m高さにおける瞬間風速の最大値（ $\Delta t=0.02$ 秒の計算における瞬時値の最大）の分布を示す。旋回気流の移動に伴って、渦中心に対して進行方向右側で風速が高くなる。渦の軌跡は直線状ではなく、蛇行するのがわかる。また赤色で示す100m/sを越えるピーク値は、円環が移動するサイクロイ

ダルなパターンを示している。これは、しばしば耕作地を竜巻が通過した際に見られる痕跡<sup>37)</sup>に相当し、本計算によって実竜巻に近い流れ場が再現されているものと考ええる。なお藤田は竜巻の親渦の周りに随伴する複数の吸引渦が発生し、親渦の周りを回転しながら移動する事でこのような痕跡が残ると説明している<sup>37)</sup>。しかし本計算ではそのような随伴する渦は見られないので、サイクロイダルな痕跡の形成には必ずしも随伴する吸引渦が必要ない事が示された。

4.4 移動中の性状（建物がある場合）

Table 4に建物がある場合の計算条件を示す。Case 1から3では旋回気流と建物の相対位置の影響、Case 4から7では卓越開口の影響を調べる。なお壁面の開口率は喜々津ら<sup>19)</sup>の実験条件に倣った。なお、渦の経路は蛇行するので、設定したコースとは必ずしも一致しない。

Fig. 6にCase1における渦コアと建物表面の風圧分布の変化を示す。建物が渦に到達すると、正面右側(1-a)で正圧が生じる一方で、進行方向右側の軒上(1-b)で絶対値が大きい負圧が生じる。屋根に乗り上げた後に右側に偏って移動する。これは渦の進行方向右前方で気流が建物によって妨げられるのに対して、左後方では建物の影響がなく、渦が右側に流される事が原因と考える。また右側の軒上では気流が軒を越える際に、局部負圧(3-c)が生じる。建物端部に到達すると側面軒上(4-d, e)で激しい負圧が生じる。その後、右側軒先(5-f, 6-h)や左側軒上(6-g)で円錐渦による負圧を生じさせながら遠ざかって行く。

図示は省略するが、建物の左側壁に沿って侵入コースを設定したCase 2では、渦が建物の屋根に乗り上げ、設定した侵入コースから外れた経路をたどる。

4.5 風圧・風力係数分布

ここでは、屋根および壁面における外装材用風荷重の評価を想定し、ピーク風圧・風力の評価を行った。ここでは便宜上平均化時間を1秒に設定し、サンプリング間隔0.2秒×5個、アンサンプル回数1回で評価したピーク風圧（外圧）係数ならびに風力（外圧・内圧間の差圧）係数分布を Fig. 7～10 に示す。代表速度圧は静止時の最大旋

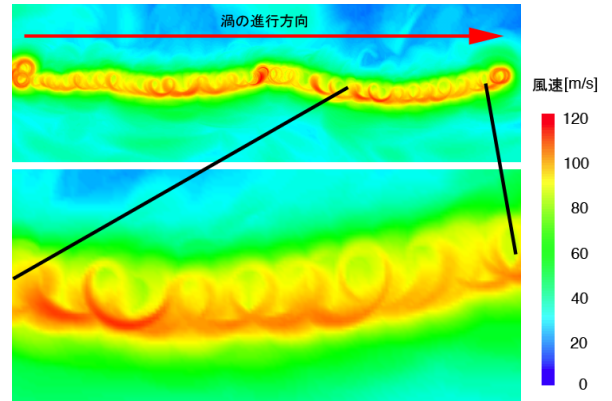


Fig. 5 最大瞬間風速の水平分布  
Horizontal Distribution of Peak Velocity Magnitude

Table 4 計算ケース（大規模建築物）  
Computed Cases

	侵入コースの設定	開口条件（開口率%）
Case 1	建物中心を横断	開口無し
Case 2	建物中心から50m左側	開口無し
Case 3	建物中心から100m左側	開口無し
Case 4	建物中心を横断	右側壁：3.7 その他側壁：0.16
Case 5	建物中心を横断	左側壁：3.7 その他側壁：0.16
Case 6	建物中心を横断	正面側壁：3.7 その他側壁：0.16
Case 7	建物中心を横断	背面側壁：3.7 その他側壁：0.16

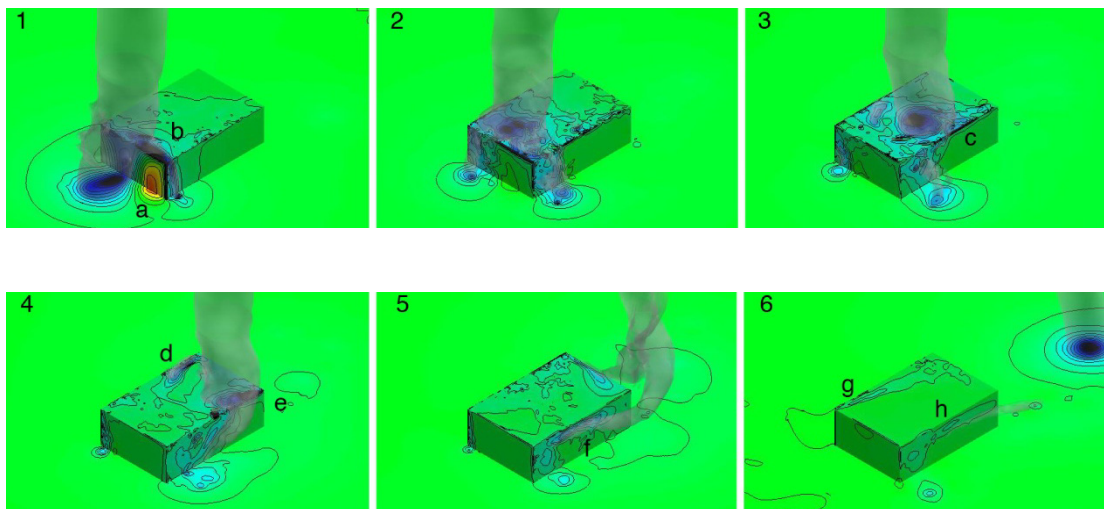


Fig. 6 等圧面と表面風圧の時間変化（Case 1）  
Time-evolution of Iso-Pressure Surface and Wall-Surface Pressure Distributions (Case 1)

回風速を基準に6,000Paとした。建物中心に沿って侵入コースを設定したCase 1では、屋根端部付近で-3.0を下回る最小ピーク風圧が生じる。またFig. 6に示した様に屋根の上を渦が斜めに横切る事で、経路に沿って強い最小

ピーク風圧が現れる。一方正面の側壁右側では、旋回気流の衝突に伴って、最大ピーク風圧が生じる。

横に50mずれたCase 2では、渦が屋根の上に乗り上げるのでCase 1と似たような分布となるが、絶対値が減少

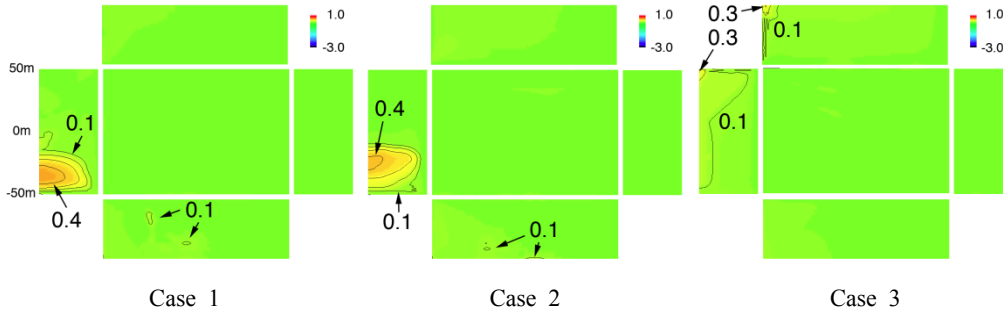


Fig. 7 最大ピーク風圧（外圧）係数の分布  
Maximum Peak Pressure Coefficient Distributions

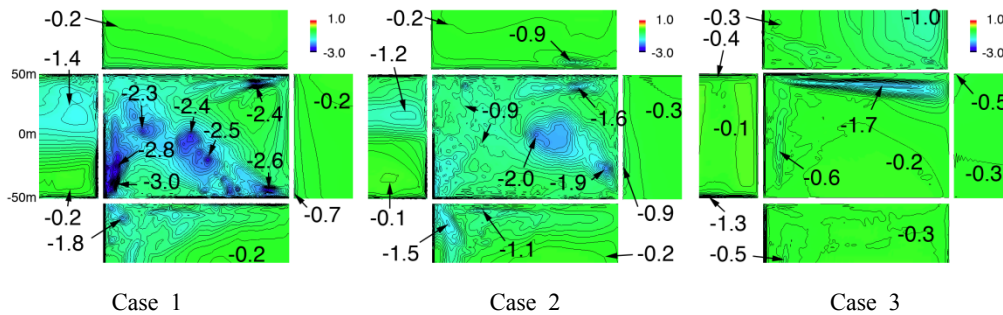


Fig. 8 最小ピーク風圧（外圧）係数の分布  
Minimum Peak Pressure Coefficient Distributions

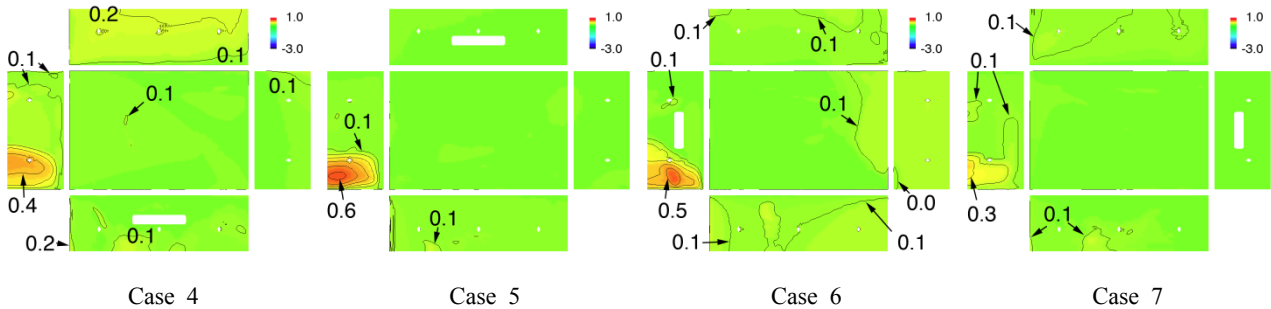


Fig. 9 最大ピーク風力係数の分布  
Maximum Peak Pressure-Difference Coefficient Distributions

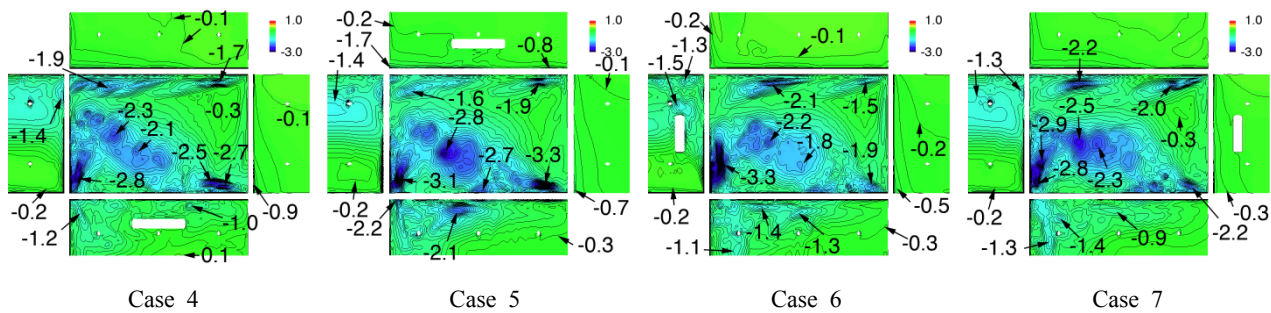


Fig. 10 最小ピーク風力係数の分布  
Minimum Peak Pressure-Difference Coefficient Distributions

する。さらに横にずれたコースをとるCase 3では渦は屋根の上には乗り上げず、最小ピーク風圧係数は渦に近い左側の屋根端部で-1.7程度となる。

なお、建築学会荷重指針<sup>38)</sup>に従うと、長方形屋根のピーク外圧係数はコーナー部で-3.75 (部材面積>5m<sup>2</sup>)となる。一方、本計算中で最も負圧が発達したCase 1では-3.0である。境界層乱流を対象とした指針とは、流入気流条件が異なるものの、負のピーク外圧係数ほぼ同程度の値となった。

右側壁に卓越開口があるCase 4では、内圧の形成により左側壁で最大ピーク風力が増加し、屋根の正面端部付近で負のピーク風力の絶対値が低下する傾向が見られる。反対に卓越開口が左側にあるCase 5では、正面側壁の最大ピーク風力と屋根後方右側の最小ピーク風力の絶対値が増加する。

正面に開口があるCase 6では、正面右側の最大ピーク風力と、屋根正面端部の最小ピーク風力の絶対値の増加が認められる。反対に卓越開口が背面にあるCase 7では、Case 6に比べて屋根前方端部での最小ピーク風力の絶対値が減少し、屋根後方端部の最小ピーク風力の絶対値が増加する。

なお、全般的に卓越開口による風圧の変化は小さい。これは大規模建築物を想定したために、室内空間の体積当たりの開口面積が、喜々津<sup>19)</sup>が実験を行った戸建住宅と比べて1/10しかないためである。

大規模建築物を対象とした解析を行い、屋根および壁面における外装材用風荷重の評価を行った。竜巻状の旋回気流は、建物がない場合でも進行コースが安定しない。そのため建物と渦の相対位置関係を実験パラメータとする場合には、一つのコース設定に対して複数回の試行が必要である。結果として松井<sup>21)</sup>が指摘したように、膨大な試行回数が求められることとなる。ただし今回の検討例では、建物中心部を通るコースが最も絶対値が大きいピーク風圧をもたらす結果となったことから、少なくとも建物を中心とした複数の侵入コース (例えば20°ピッチで18ケース) での検討が必要であると考えられる。

### 5. 小規模建築物を対象とした全体風力の検討

建物の形状を見付幅10m×進行方向の奥行15m×高さ5mの直方体状とする。Fig. 11 に計算領域の全体図を、Table 5に計算領域の大きさと格子解像度を、Table 6に計算ケースをそれぞれ示す。

竜巻状旋回気流の発生装置ならびに初期条件はTable 1およびTable 3と同じとする。長辺方向端部から1kmの位置を竜巻状旋回気流の中心の初期位置とし、 $t=0\sim 690$ 秒まではGrid 1~4を用いて時間刻み幅  $\Delta t=0.02$ 秒で初期流れ場を発生させる。次に $t=690\sim 702$ 秒の間、Grid 1~5を用いて時間刻み  $\Delta t=0.001$ 秒で解析を行う。その後の36秒間、移動速度 $U=10$ m/sで360mの距離を、旋回気流発生装置を移動させる。

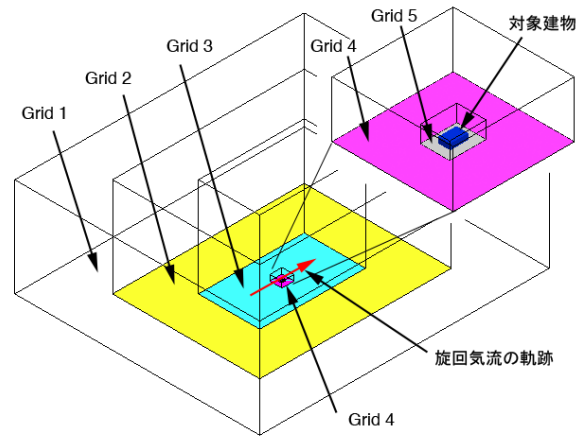


Fig. 11 計算領域の分割図 (小規模建築物)  
Decomposition of Computational Domain

Table 5 計算格子分解能 (小規模建築物)

Grid Resolutions			
Grid	領域の大きさ 長さ×幅×高さ	水平格子 解像度	鉛直格子 解像度
1	2.36km×2.0km×810m	20m	0.2~20m (78)
2	1.56km×1.2km×810m	10m	0.2~20m (78)
3	860m×500m×810m	5m	0.2~20m (78)
4	100m×100m×50m	1m	0.2~8m (47)
5	30m×24m×15m	0.1m	0.2~2m (48)

鉛直格子解像度の()内は格子分割数

Table 6 計算ケース (小規模建築物)

Computed Cases		
	侵入コースの設定	開口条件 (開口率%)
Case 8	建物中心を横断	0.16
Case 9	建物中心を横断	右側壁: 3.7 その他側壁: 0.16
Case 10	建物中心を横断	左側壁: 3.7 その他側壁: 0.16

Fig. 12に屋根全体に作用する風力の時刻歴を示す。図の横軸は、建物の中心位置から竜巻発生装置中心までの距離 $x_s$  (建物中心から手前が負、後側が正)を、Table 3で示した最大旋回風速半径  $R_m$ で無次元化した値である。

屋根全体に作用する外圧係数 $C_{pe}$ は、竜巻状の旋回気流の接近ともなつて絶対値が増加する。最大旋回風速半径が屋根の上にかかるタイミングで一度ピーク値に達した後、屋根全体が渦コアの中に取り込まれる事で絶対値が一度低下する。再び渦コアの外に出て絶対値が増加したのちに徐々に低下する。なお、竜巻状旋回気流発生装置から遅れて渦の中心が建物中を通過しており、両者の距離は $x_s/R_m=1.5$  (約45m)、すなわち約4.5秒遅れで渦が到達している。内圧は、隙間だけの場合には十分に発達せず、その結果Case 8の屋根全体に作用する風力係数 $CF_z$ は、外圧の絶対値とあまり差が生じない。一方、進行方向右側壁に卓越開口があるCase 9では、旋回気流が

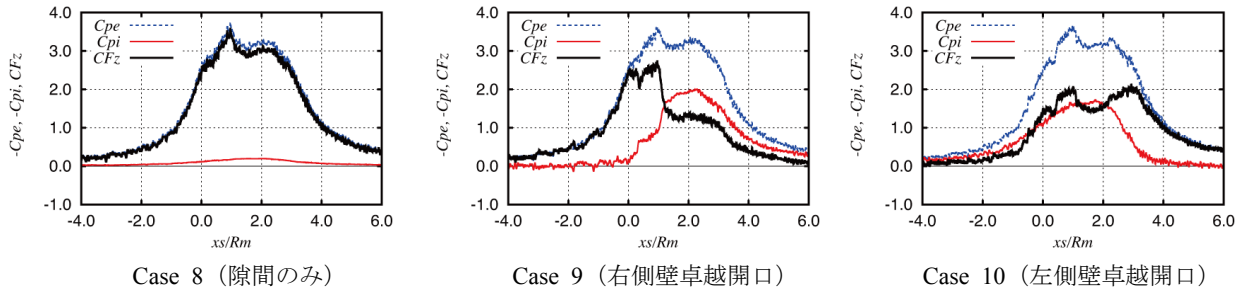


Fig. 12 屋根に作用する風力係数の時刻歴 (小規模建築物)  
Time-histories of Wind Force Coefficients Acting on Roof

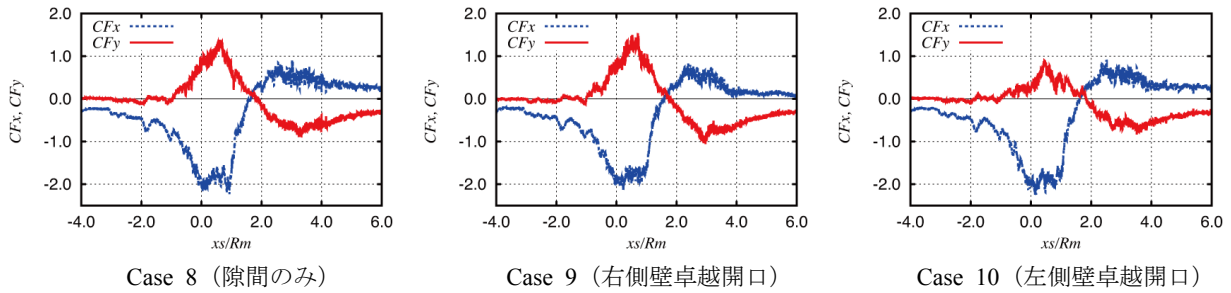


Fig. 13 水平方向風力係数の時刻歴 (小規模建築物)  
Time-histories of Wind Force Coefficients Acting on Horizontal Axes

通り過ぎてから内圧の絶対値が増加し、その結果風力係数 $CF_z$ は渦の通過後に一気に減少する。逆に進行方向左側壁に卓越開口がある場合には、内圧が旋回気流の接近とともに発達し始めるので、接近中の風力係数 $CF_z$ は小さく、むしろ通り過ぎてからの方が大きな値を維持する。

Fig. 13に水平方向の風力係数 $CF_x$ 、 $CF_y$ の時刻歴を示す。いずれのケースでも屋根の風力係数 $CF_z$ に比べて水平方向に作用する風力は小さく、また竜巻状旋回気流の進行方向に作用する風力係数 $CF_x$ の方が、進行直交方向の風力係数 $CF_y$ よりも絶対値が大きい。進行方向の $CF_x$ は、渦の接近中の方が絶対値の大きな値をとるのに対して、直交方向 $CF_y$ は接近中と遠ざかる時でほぼ同程度の絶対値となる。卓越開口が進行方向左側壁にある場合には、内圧の発達が風力を低下させる方向に作用する。

ここで戸建住宅を対象とした喜々津ら<sup>19)</sup>の実験結果との比較を行う。実験で想定した建物規模は見付幅24.4m×進行方向の奥行38.1m×高さ12.2mで、計算対象となる建物と相似ではあるが、規模は実験の方が大きい。実験結果のうち、右側壁に卓越開口がある場合の屋根に作用する風力係数の時刻歴をFig. 14に示す。実験では計算に比べて外圧係数の値が小さいものの、内圧の発達に伴って風力係数 $CF_z$ が一気に低下し、一旦値が横ばいとなった後、再び低下するといった一連の傾向は対応している。以上のことから、本解析手法の妥当性が確認できる。

## 6. まとめ

竜巻を対象とした既往の実験装置ならびに数値解析手

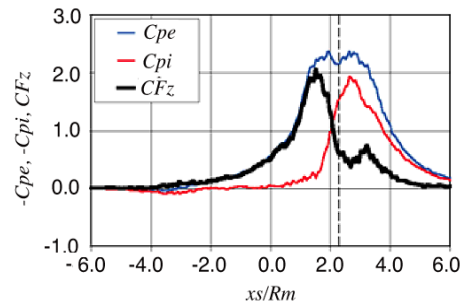


Fig. 14 喜々津ら<sup>19)</sup>による実験結果 (右側壁卓越開口)  
Experimental Results by Kikitsu et. al

法について調べたのち、スーパーセル型の竜巻を模擬した開放型の竜巻状旋回気流の発生装置を数値シミュレーションで再現した。同機構により得られた旋回気流により、建物に作用する風圧・風力の評価を行った。本論文により得られた知見を以下にまとめて示す。

- 1) スーパーセル型の竜巻を対象とした開放型の実験装置を数値シミュレーションで再現し、移動する竜巻状の旋回流の生成を行った。地表面付近でのピーク風速の分布が、竜巻が通過した際に見られる痕跡に酷似する事が示された。
- 2) 大規模建築物を対象として、竜巻状旋回気流がもたらすピーク風圧・風力の評価を平均化時間1秒で行った。竜巻状の渦が建物の中央を横切る時に最小ピーク風圧の絶対値が最も大きく、最大旋回風速に基づく速度圧を基準圧に用いた場合、屋根のコーナー部で絶対値が3を越える値となる。この値



は、部材面積が5m<sup>2</sup>以上の外装材に対する荷重指針の値とほぼ同等の値である。

- 3) 小規模建築物を対象に全体風力の検討を行った。卓越開口の存在によって内圧が発達し、かつ開口の位置により内圧の発達具合が異なる事、それに伴って屋根に加わる風力の時刻歴が変化する事などが示された。
- 4) 小規模建築物を対象とした計算結果を既往の実験結果と比較したところ、内圧の発達や、屋根に作用する風力の時刻歴変化が同様の傾向が見られた。このことより、本計算手法の妥当性が検証された。
- 5) 建物の形状が単純で、かつ規模が渦のスケールよりも大きい場合には、建物の中心を横切る複数のケースで風圧・風力の検討を行えば、飛散物による衝撃以外の竜巻に伴う突風荷重の評価が可能である。

## 謝辞

実験装置の見学に応じてくれるとともに解析条件等についての助言を頂いた、国立研究開発法人建築研究所の喜々津仁密博士に、末筆ながら深謝致します。

## 参考文献

- 1) 気象庁：竜巻等の突風データベース、<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html>, 2015.6閲覧
- 2) 日本風工学会風災害研究会：2006年台風13号および同年11月7日に北海道佐呂間町で発生した竜巻による強風災害に関する調査報告書, 2007.10
- 3) 気象庁：平成26年の竜巻等突風の発生状況について、竜巻等突風の強さの評定に関する検討会（第4回）資料, 2015.3
- 4) 日本風工学会風災害研究会：2012年5月6日に北関東地方で発生した広域突風災害について、日本風工学会誌, No. 132, pp. 210-222, 2012.7
- 5) Office of Nuclear Regulatory Research：Regulatory Guide 1.76 “Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants”, 2007.3
- 6) 原子力規制委員会：原子力発電所の竜巻影響評価ガイド, 2013.6
- 7) 独立行政法人原子力安全基盤機構：原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説, 2013.10
- 8) 竹内崇, 前田潤滋, 川下寛正: 車輻形状物体に作用する風力に及ぼす突風の立ち上がり時間の影響, 第20回日本風工学シンポジウム論文集, pp. 331-336, 2008.12
- 9) 小林文明：竜巻 メカニズム・被害・身の守り方, 成山堂書店, pp. 31-42, 2014.8
- 10) 気象庁気象研究所：佐呂間町で発生した竜巻をもたらしした積乱雲の再現実験（雲解像モデルによる）においてスーパーセルを確認, 報道発表資料, 2006.11
- 11) 瀬古弘, 斉藤和雄, 国井勝, 露木義, 三好建正：LETKFネストシステムを用いた2012年5月6日のつくばの竜巻のアンサンブル予報実験, 日本気象学会大会講演予稿集, p. 413, 2013.4
- 12) Ward, N. B.：The Exploration of Features of Tornado Dynamics Using a Laboratory Model, Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 29, pp. 1194-1204, 1972.9
- 13) Church, C. R., Snow, J. T., Baker, G. L. and Agee, M.：Characteristics of Tornado-Like Vortices as a Function of Swirl Ratio: A Laboratory Investigation, Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 36, pp. 1755-1776, 1979.9
- 14) 松井正宏, 田村幸雄：竜巻状流れ場に対するスワール比、粗度の影響に関する室内実験, 第19回風工学シンポジウム論文集, pp. 7-12, 2006.12
- 15) 松井正宏, 田村幸雄, 吉田昭仁: 竜巻状旋回流中におかれた立方体に作用する風圧力と移動効果による旋回流形成の影響に関する実験的研究, 第20回日本風工学シンポジウム論文集, pp. 54-59, 2008.12
- 16) 野田稔, 長尾文明, 山下翔平: スワール比が竜巻状流れ場に及ぼす影響, 第21回日本風工学シンポジウム論文集, pp. 137-142, 2010.12
- 17) Haan, F. L., Sarkar, P. P. and Agee, M.：Design, Construction and Performance of A Large Tornado Simulator for Wind Engineering Applications, Engineering Structures Vol. 30, pp. 1146-1159, 2008.4
- 18) 喜々津仁密, Sarkar, P. P, Haan, F. L.：竜巻状気流発生装置を活用した低層建築物に作用する風力特性に関する基礎的研究, 第21回日本風工学シンポジウム論文集, pp. 149-154, 2010.12
- 19) 喜々津仁密, 奥田泰雄, 河井宏允, 神田順: 竜巻通過時に低層建築物に作用する風力特性に関する実験的研究, 第22回日本風工学シンポジウム論文集, pp. 209-214, 2012.12
- 20) 佐々浩司, 鈴木修, 小林文明: 竜巻の発生環境とメカニズム, 日本風工学会誌, No. 131, pp. 108-117, 2012.4
- 21) 松井正宏, 喜々津仁密, 野田稔, 佐々浩司: 竜巻による構造物の風圧力, 実験手法と課題, 日本風工学会誌, No. 131, pp. 118-123, 2012.4
- 22) 丸山敬: 数値的に生成された竜巻状の渦の性質, 京都大学防災研究所年報, No. 53 B, pp. 383-390, 2010.6
- 23) 丸山敬: 数値トルネードシミュレータの特性, 第23回数値流体力学シンポジウム, G1-4, 2010.12
- 24) 石原孟, 福玉翔, 徳山佳央: 数値流体計算による竜巻状渦内の三次元流れ場及びその形成メカニズムの解明, 第21回日本風工学シンポジウム論文集, pp. 143-148, 2010.12
- 25) ファム バン フック, 野津剛, 野澤剛二郎, 菊池浩利: LESによる竜巻状旋回気流に関する研究, 第23

- 回数値流体力学シンポジウム, G1-3, 2010.12
- 26) ファム・バン・フック, 野津剛, 野澤剛二郎, 菊池浩利: 竜巻状旋回気流の移動効果による立方体に作用する風圧力の変化, 第21回日本風工学シンポジウム論文集, pp. 155-160, 2010.12
- 27) 野田稔, 八谷実, 西村公成, 長尾文明: 竜巻状流れ場の生成と漏斗雲による可視化に関する研究 水平シアによる竜巻状流れの生成, 日本風工学会誌, No. 143, pp. 145-146, 2015.4
- 28) Kuai, L., Haan, F. L., Gallus, W. A. and Sarkar, P. P.: CFD Simulations of the Flow Field of A Laboratory-Simulated Tornado for Parameter Sensitivity Studies and Comparison with Field Measurements, Wind Structures, Vol. 11, No. 2, pp. 75-96, 2008.3
- 29) 片岡浩人: 数値流体計算による竜巻状旋回気流に与える地形影響の評価 その1 単純地形条件下で移動する渦の再現, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造I, pp. 115-116, 2012.9
- 30) 片岡浩人, 足立高雄, 吉田伸一, 橋本尚之: 数値流体計算による狭隘地形が竜巻状旋回気流に与える影響の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造I, pp. 105-106, 2013.8
- 31) 佐久間悠人, 田村哲郎: 浮力場における鉛直渦に基づく突風作用に関するDNS解析, 第23回日本風工学シンポジウム論文集, pp. 439-444, 2014.12
- 32) 佐久間悠人, 田村哲郎: 竜巻状渦の生成機構に関する数値解析的研究, 日本風工学会誌, No. 143, pp. 149-150, 2015.4
- 33) 片岡浩人, 水野稔: 擬似圧縮性法による物体周りの剥離流れの数値解析, 日本建築学会計画系論文集, No. 504, pp. 63-70, 1998.2
- 34) 諏訪好英, 藤井修二, 湯浅和博, 佐野仁美: 重合格子法を用いた建築物周辺気流の数値解析, 日本建築学会計画系論文集, No. 488, pp. 43-52, 1996.10
- 35) 片岡浩人, 木梨智子, 川口彰久: 風環境シミュレータ「Zephyrus (ゼフィルス)」の開発, 大林組技術研究所報, No. 64, pp. 49-54, 2002.1
- 36) 片岡浩人: 数値流体計算による竜巻状旋回気流に与える地形影響の評価 その1 単純地形条件下で移動する渦の再現, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp. 115-116, 2012.9
- 37) Forbes, G. S. and Bluestein, H. B.: Tornadoes, Tornadic Thunderstorms, and Photogrammetry: A Review of the Contributions by T. T. Fujita, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 82, No. 1, pp. 73-95, 2001.1
- 38) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 丸善, 2015.2