論文

ダウンバーストによる建築物の風荷重に関する研究 A Study of Downburst-induced Wind Loading on Buildings

飯田有未^{*1} 植松 康^{*2} ガヴァンスキ江梨^{*3}
Yumi IIDA, Yasushi UEMATSU, Eri GAVANSKI

SUMMARY

Downburst produces strong winds near ground and causes severe damage to buildings and people. However, few studies have focused on the downburst flow field and downburst-induced loads on buildings. Thus, the present study attempts to understand the characteristics of downburst and its effects on buildings, based on experiment and numerical simulation. An experimental facility generating a pulsed wall jet has been developed. Large eddy simulation (LES) has also been conducted. First, the unsteady downburst flow field was simulated and compared with the experimental results to validate the Computational Fluid Dynamics (CFD) modeling. Then, a simulation of non-isothermal flow was conducted to understand the characteristics of practical downbursts. Based on the results of experiment and CFD simulation, the characteristics of downburst-induced wind loading on a square building were investigated. Finally, a discussion was made of the evaluation of the design wind loads for downbursts.

key words: downburst, pulsed wall jet simulation, wind force coefficient, CFD, LES

1. はじめに

近年、日本において竜巻やダウンバーストなどの突風災害がしばしば発生し、人的・物的被害を引き起こしている。気象学分野においては、これら竜巻等突風の発生予測に関する研究は進んでいるものの、竜巻やダウンバースト内の風の特性や構造物に作用する風荷重に関する

研究は少ない。実際、これらの突風は多くの被害を引き起こしているが、発生が局所的で、ある一つの建物が被害を受ける確率が非常に低いということもあり、現行の耐風設計では突風による風荷重は一般には考慮されていない。

そのような状況より、被害を低減するためには、突風

*1 (株)大林組技術研究所 環境技術研究部

Environmental Engineering Department, Technical Research Institute of Obayashi Corporation

*2 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 教授

Professor, Department of Architecture and Building Science, Graduate School of Engineering, Tohoku University

*3 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 助教

Assistant Professor, Department of Architecture and Building Science, Graduate School of Engineering, Tohoku University

(原稿受理年月日：2014年4月25日，採用決定年月日：2015年2月23日)

による地表面付近の風の性状および建築物への影響を把握し、耐風設計に取り入れることが重要である。本研究では、これら突風のうち、我が国ではほとんど研究が行われていないダウンバーストに注目する。

ダウンバースト(図1、以下DB)とは、積乱雲内にある雹などの降水粒子が上昇気流に打ち勝って狭い範囲に集中して下降する事により、それに引きずられた周囲の気流が地表面に衝突し発生する突風を指す。シカゴ大学の Fujita¹⁾が、1975年6月24日にニューヨーク、ケネディ空港で航空機が墜落した原因が積乱雲からの強い下降流であるということを発見し、それ以来 DB は広く注目されるようになった。DB は風向が突然変化すること、また、風速のピークが地表面付近で発生する(Hjelmfelt²⁾の実測において、地上80m地点(平均)でピークが発生)ことなど、台風や低気圧による強風とは異なる性質をもつ。そのため建物に作用する風荷重も、一般的な耐風設計で想定されている境界層乱流によるものとは異なると考えられる。そこで本研究では、DB 内の風速分布やDB 内に置かれた構造物に作用する風圧・風力の特性を把握し、境界層乱流とDB の性質および建築物への影響の違いを明確にすることで、突風を考慮した耐風設計法を提案するための基礎資料を提供することを目的とする。そのために、まずDB シミュレーターを製作し、それを用いた実験と数値流体計算(CFD)により、建築物に作用する風圧、風力を把握する。

2. ダウンバーストシミュレーターの製作とそれを用いた実験

2.1 既往の実験的研究の概要

DB に対する実験的研究は Fujita³⁾から始まり、2002 年にはChay and Letchford⁴⁾により吹出し口の直径 $D=0.51\text{m}$ の大型の噴流装置が用いられ、定常DB の風速の鉛直プロファイルとキューブに作用する風圧が明らかにされた。さらに、同実験装置を用いて、Chay and Letchford⁵⁾は噴流装置を動かすことでDB の移動する性質を再現し、またMason ら⁶⁾はシャッター型の吹き出しを取り付け流れの可視化を行った。この装置をきっかけにSengupta ら⁷⁾やMcConvill ら⁸⁾、Zhang ら⁹⁾は噴流装置を用いてDB のより詳細な特徴を捉えるため実験的研究を行なった。

我が国においては、佐々ら¹⁰⁾は水槽実験により、長田ら¹¹⁾は高密度流体の重力落下により、DB を再現し可視化を行った。しかし、建築物への影響の研究は行われていない。

そこで本研究では、それらの流れを踏まえ、東北大学

工学研究科都市・建築学専攻において日本で最大規模のDB シミュレーターの製作を行った。このとき、

- ・ 噴流と噴流衝突面の高さの関係の把握すること。
- ・ 噴流の強さの影響を把握すること。
- ・ 定常DB と非定常DB の差を把握する事。
- ・ 建物モデルの風荷重を検討すること。

を考慮して装置を製作した。

図1 ダウンバーストの概念図

Fig. 1 Schematic illustration of downburst

2.2 ダウンバーストシミュレーターの概要

図2、図3はDB を再現する噴流装置である。天地を逆にし、ファンによるジェットが天井板に衝突することで、地表に衝突するDB の下降噴流を模擬する。天井板は $2\text{m}\times 4\text{m}$ の集成材を用い、高さは0.65m から1.25m まで50mm ピッチで変えることができる。また噴流を発生させるファンはインバータの制御周波数を0~60Hz まで1Hz ずつ変えることができる。

この送風機の上に取り付けられているシャッター(図4)は、瞬時に発生し下降するDB の噴流を再現するための装置である。これはカメラのシャッターの原理を用いて設計した。完全に開くまでの時間(シャッタースピード)は5段階に変化させることができるが、本実験では最速の0.28秒を用いる。

図2 DB シミュレーター

Fig. 2 Downburst simulator

図3 DBシミュレーターの平面・立面図
Fig. 3 Schematic illustration of the DB simulator

図4 吹き出し口のシャッター
Fig. 4 A shutter for generating unsteady gust winds

2.3 実験概要

実験に際して、ファンから風が吹き続ける噴流を「定常DB」、シャッターを用いた瞬間的な噴流を「非定常DB」と呼ぶ。また無次元化に用いる長さの基準値としてはファンの直径 $D=0.6\text{m}$ を用いる。

はじめに、定常・非定常状態における地表面付近の風速分布を風速計を用いて計測した。定常DBの実験においては、天井板中心を $x/D=0$ とし、外方向へ $x/D=0$ から1.42の範囲に計27個のサーミスタ風速計のセンサーを設置し、それらを上下に移動させて測定することで、各位置における風速の鉛直プロファイルを求めた(図5)。ここで、サーミスタ風速計で計測される風速は支柱方向を除いた全方向の風速のスカラ量である。また、このサーミスタ風速計の先端は十分細くブロック効果は大きくないと考えられる。このときサンプリング周波数は2Hz、計測時間は30秒とした。非定常DB実験に関しては、定常DB実験と同じ位置に熱線風速計のセンサー(I型プローブ)を設置し、測定部を3章で示す建物模型の軒

高($h/D=0.03$)に設置し、風速の時間変化を測定した。この場合、 (x, z) 面内の風速のスカラ量が測定されることになる。サンプリング周波数は500Hz、計測時間は60秒である。同一条件下で10回ずつ測定を行った。

図5 サーミスタ風速計のセンサーの設置状況
Fig. 5 Arrangement of the sensors of the anemometer

2.4 結果と考察

得られた地表面上の定常DBの風速プロファイルを図6に示す。実験で再現したDBの幾何学的縮尺率は1:2000と仮定している。ここで、幾何学的縮尺率はHjelmfelt²⁾の観測記録よりDBの平均吹き出し径が1500mであること、また日本におけるDBの突風被害の記録(気象庁データベース(1975~2013年)¹²⁾の被害幅の記録の平均値が1000m程度であったことより、実験装置の吹き出し口の直径 $D=0.6\text{m}$ 、また次章で用いる建物モデルのスケール(4cm×4cm×2cm)との整合性を考慮し1:2000を仮定した。縦軸は実スケールの高さを表し、横軸は最大風速 $U_{\max}$ で無次元化している。異なる記号は測定点の違いを示し、比較のため図中に建築基準法による境界層乱流(ABL:地表面粗度区分Ⅲ)のプロファイルを載せた($U_{\max}$ は $Z_G=450\text{m}$ における U_G を用いた)。この図よりDBに関しては $x/D \approx 1$ で最大風速を記録し、風速のプロファイルの形状は境界層乱流とは大きく異なっていることが分かる。

図6 風速の鉛直プロファイル
Fig. 6 Vertical profile of wind velocity

図7は、図6のプロファイルと Hjelmhelt²⁾ のドップラーレーザによる DB の記録(破線)との比較である。縦軸は最大風速発生高さ Z_{max} で無次元化した地上高さ、横軸は最大風速で無次元化した速度を示す。 $x/D=0.83\sim1.42$ の実験値が、実測の最大風速発生時のプロファイルの最大、最小の範囲に収まっている。これより、本装置が実測の最大風速発生時の風速分布を概ね再現できていることが確認できる。

図7 風速プロファイルに関する実測との比較

Fig. 7 Comparison for normalized velocity profile between experiment and full-scale measurement

図8は $x/D=1$ 、高さ $h/D=0.03$ 地点の非定常 DB の風速の時刻歴を示す。実線は10回の計測値の平均を、破線は Fujita ら¹⁾の実測で観測された最大風速 67m/s を記録した DB での時刻歴を示している(米国の the Andrew air force base の滑走路で計測された記録)。縦軸・横軸ともに DB の下降速度(流入風速・噴出口から 100mm 離れた地点の中央部の風速) V_j と DB の径 D で無次元化を行っている。これより、実測値と実験値でピークの波とその前後の波の形状に似た傾向がみられ、実験装置で再現する非定常 DB は実際の DB の傾向をよく捉えているといえる。その他の測定点については表1に示す点で計測を行った。どの箇所においても明確なピークが現れ、その後定常状態に移り変わった。ここで留意すべき点は、定常状態における平均風速が小さい観測点(例えば、 $x/D=0.3$)において、平均風速に対して大きなピーク値が測定されていることである。

表1 非定常実験における平均およびピーク風速値

Table 1 Mean and peak velocities

x/D	0	0.3	0.7	1	1.3
最大ピーク(m/s)	2.72	6.12	6.63	8.47	8.01
平均値(m/s)	0.52	1.19	2.94	4.74	4.83
ピーク値/平均値	5.21	5.16	2.26	1.79	1.66

図8 風速の時刻歴(実測との比較)

Fig. 8 Comparison for time history of wind velocity between experiment and full-scale measurement

本章では、流入風速(ファンのインバータの制御周波数)および天井板の設置位置が、最大風速発生地点周辺のプロファイルに及ぼす影響を検討した。図9および図10に流入風速とプロファイルの関係を示した。無次元化は壁噴流実験の無次元化方法として一般的な方法より、McConvill ら⁸⁾と Lin¹³⁾と同様の方法で、最大風速 U_{max} と最大風速の半分の風速が発生する高さ $Z_{max/2}$ を用いた。これよりファンの制御周波数 30Hz~50Hz の範囲では、流入風速の違いによる影響はほぼ見られないことが分かった。これと同様に図11において天井板から流入口までの距離(距離 d)の影響を検討したとき、距離 d が $d/D=1.08\sim1.83$ の場合においては、天井板高さの影響はみられなかった。一方、図12は、同じ流入風速と距離 d を用い、DB 中心と測定箇所の水平距離($x/D=1\sim1.42$)のみを変えた場合のプロファイルを示しており、プロファイルに差が見られた。これらより、プロファイルが釣鐘型を示す範囲ではプロファイルは DB 中心と測定箇所の位置関係にのみ依存することが分かった。またシャッタースピードの影響についても検討し、開くスピードが0.5秒以上の場合、ピークが曖昧になるため以降の解析では0.5秒以下のものを用いることとした。

図9 ファンの制御周波数が風速のプロファイルに及ぼす影響

Fig. 9 Influence of rotation frequency of fan on velocity profiles

図 10 ファンの制御周波数が無次元化風速のプロファイルに及ぼす影響

Fig. 10 Influence of rotation frequency of the fan on the profile of normalized wind velocity

図 11 天井板の設置高さが風速の無次元化プロファイルに及ぼす影響

Fig. 11 Influence of height of the inlet on the profile of the normalized wind velocity

図 12 DB 中心と測定位置の水平距離が風速の無次元化プロファイルに及ぼす影響

Fig. 12 Influence of the distance between the center of inlet and the measuring point on the profiles of the normalized wind velocity

3. ダウンバーストシミュレーターによる建物に作用する風圧の測定

3.1 実験概要

図 13 に示す建物モデルに対し、前章で製作した DB シミュレーターによる気流を作用させて風圧測定を行った。

模型寸法は $4\text{cm} \times 4\text{cm} \times 2\text{cm}$ (実スケール $80\text{m} \times 80\text{m} \times 40\text{m}$) であり、風圧測定点は 44 点設けた(屋根面 16 点、側面 28 点)。これを天井板中央から $x/D=0, 0.33, 0.66, 1, 1.33$ の位置に設置した。風向 θ は、一壁面に正対する風向を 0° とし、 $\theta=0^\circ$ と 45° の 2 種類とした。前章と同様、定常 DB と非定常 DB に対し、ファンの制御周波数 30Hz (中心部の流速 4.02m/s) とし、サンプリング周波数 500Hz で 60 秒間計測した。

図 13 実験模型

Fig. 13 Building model used for experiment

本章では風圧係数の基準化のため、 $x/D=1$ 地点の軒高の定常状態における 30 秒平均風速による速度圧と、風の影響のない点での大気圧を基準静圧として用いた。 x, y, z 方向の風力 (F_x, F_y, F_z) は外圧を積分することで求め、軒高の速度圧と見付面積を用いて無次元化し、風力係数 (C_{Fx}, C_{Fy}, C_{Fz}) として表した (図 14 参照)。

図 14 風力係数の定義

Fig. 14 Definition of wind force coefficients

3.2 結果と考察

ここでは風向 0° のケースに着目する。 $x/D=1$ 地点の時刻歴 (図 15) より、風力係数ははじめにピークがありその後定常状態に移ることが分かる。定常状態においても模型に周期的な風力が作用しており、この地点にある建物の屋根部と風上面には大きな負圧と小さな負圧が繰り返し発生すると考えられる。ピーク値と定常 DB に対する平均値を比較するため、図 16 に各測定位置 x における定常 DB および非定常 DB 下の建物の風力係数を示す。ここで風向 0° のとき、 C_{Fy} の大きさは小さいため C_{Fx}, C_{Fz}

のみを示した。また、図中の三角は 10 回の実験結果の最大値と最小値を示す。 C_{Fx} は常に正の値を示し、ピーク時には非定常値が定常値の 3 倍近い値を示す。一方、 C_{Fz} では $x/D=0.33, 0.37$ において定常 DB と非定常 DB による力の向きが逆になり、定常と非定常で大きな差が見られる。しかし、 $x/D=1$ 以降では常に正の風力(上向き)が建物に作用する。また両図から概ね $x/D=1$ の位置でピーク風力係数が最も大きくなることが読み取れる。これらの位置で、定常 DB と非定常 DB による風圧分布の差をみるため、軒付近の屋根面の一つの測定点(最大負圧が作用する点)の最大ピーク値発生時刻における風圧分布を求めた(条件付きサンプリング)。 x 軸に沿った模型中心断面内の外圧係数分布を図 17 に示す。ここでは特に風力係数 C_{Fz} について定常 DB と非定常 DB の差が見られた $x/D=0.33, 1$ の 2 ケースに注目した。

図 17 より、 $x/D=0.33$ では屋根の風上側に瞬時に負圧が作用し、その後正圧が作用している。 $x/D=1$ では風下側屋根面および後方にも大きな負圧が全体的にかかっている。これらは DB 気流による建物への影響の大きな特徴である。

図 15 風力係数の時刻歴

Fig. 15 Time history of wind force coefficients

図 16 風力係数の建物位置による変化

Fig. 16 Variation of wind force coefficients with location

図 17 断面内の外圧係数分布
(断面左側の壁が風上壁面)

Fig. 17 Instantaneous distribution of wind pressure coefficient on the central cross section

4. 数値解析

DB 内の流れ場をより詳細に把握するため、二種類の CFD 解析を行った。まず、実験を模擬した解析(解析 A)を行い、基本的な解析モデルの検証を行った。次に、DB は冷えた空気塊の落下による現象であり、この現象は実験での再現が困難なことから、温度変化を流入条件とした非等温条件での数値解析(解析 B)も行った。

4.1 解析条件

解析にはオープンソースコード OpenFoam2.1.0¹⁴⁾を用いた。解析 A,B ともに LES, ダイナミック SGS モデルを用いた。解析 B においては Navier-Stokes の式にブジネスク近似による浮力項を加えた式およびエネルギー保存式を用いた。解析領域、解析条件を図 18, 図 19 と表 2 に示す。流入条件は、解析 A において妥当な計算時間で計算を安定させ、クーラン数を 1 以下とするため、実験(定常 DB)における平均風速の 1/3 の風速による風速分布を用いた。また解析 B においては Anderson ら¹⁵⁾によって提案、改良された流入条件(cooling source)をエネルギー保存式に加えたもの(式(1)~(3))を用いた。図 19 に cooling source の温度分布を示す。図中○で囲んだ部分は低温部を示している。

$$Q(t, x, y, z) = \begin{cases} g(t) \cos^2 \pi R & \text{for } R < \frac{1}{2} \\ 0 & \text{for } R > \frac{1}{2} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{ここで, } R^2 = \left(\frac{x-x_0}{h_x} \right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{h_y} \right)^2 + \left(\frac{z-z_0}{h_z} \right)^2 \quad (2)$$

$$\begin{cases} g(t) = -A \sin^2(\pi t / 2\tau) & 0 < t < 120 \\ g(t) = -A & 120 < t < 540 \\ g(t) = -A \sin^2(\pi(540-t) / 2\tau) & 540 < t \end{cases} \quad (3)$$

$Q(t, x, y, z)$: cooling source

x_0, y_0, z_0 : cooling source の座標上の中心位置

ここで, $x_0=0_m, y_0=0_m, z_0=2000_m$

R : cooling source の中央からの無次元化距離

h_x, h_y, h_z : cooling source の x, y, z 方向の長さ

ここで, $h_x=1200_m, h_y=1200_m, h_z=1800_m$

$g(t)$: 下降噴流強さの時間変化を示すパラメーター

t : 経過時間 (s)

A : 下降噴流の強さを示すパラメーター ($A=0.8$)

表 2 解析条件

Table 2 Analytical condition

	解析 A	解析 B
解析領域	6m×6m×1m	8.8km×8.8km×4.4km
メッシュ分割	5,147,177	4,795,520
モデル寸法	2cm×2cm×4cm	40m×40m×80m
微分項スキーム	発散項:	混合型 2 次精度中心差分
	勾配項:	2 次精度中心差分
	拡散項:	2 次精度中心差分
流入境界	実験値風速分布 (1/3 風速)	$Q(x, y, z)$ 式(1)(2)(3)
上空・側面	$p:0$ その他: 勾配 0	$p:0$ 熱拡散率: 計算値 その他: 勾配 0
地表面・モデル壁面	$U, k:0$ その他: 勾配 0	U, k , 乱流熱拡散係数 0 その他: 勾配 0
解析アルゴリズム	PISO 法

図 18 解析領域 (解析 A)

Fig. 18 Analysis domain (Analysis A)

図 19 流入条件 (解析 B)

Fig. 19 Analysis domain (Analysis B)

4. 2 結果と考察

図 20 は図 8 と同様の方法で無次元化した風速の時刻歴を示し, 図 21 は最大風速 U_{max} と最大風速の半分の風速が発生する高さ $Z_{max/2}$ を用いて無次元化したプロファイルを示す。図 20, 図 21 には DB 実験の結果と解析 A の結果が示されている。図 20 の時刻歴では立ち上がりからピークが発生するまでの時間とピーク値がほぼ一致している。このような傾向は $x/D=1$ だけでなく 1.33 においても見られた。図 21 の風速のプロファイルを見ると, $x/D=1, 1.33$ における数値解析 A の定常状態の 1 秒平均の風速プロファイルは実験の平均風速プロファイルとよく一致している。これらより, 数値解析により $x/D=1$ 近傍の実験値の風速場が再現できたといえる。

図 20 時刻歴 (解析 A)

Fig. 20 Time history of wind velocity (Analysis A)

図 21 風速プロファイル

Fig. 21 Vertical profile of wind velocity (Analysis A)

解析 B について $x/D=1$ ($D=800m$) のピーク値が発生した場合の鉛直プロファイル(図 22: 図 7 と同様の実大 DB との比較)は, ピーク発生時刻の 3 秒間の平均風速プロファイルが実測のプロファイルの最大・最小値の範囲に収まっている。図 23 は図 8 と同じ方法で無次元化した時刻歴である。ここで無次元化に用いた下降速度 V_j は cooling source の真下, 高度 1km 地点の DB 中心の風速 23m/s(計

算結果の数値)を用いた。直径 D は下降噴流の風速分布より DB 中心から水平距離300~400mで風速 1m/s 以下となることより、DB の直径として $D=800\text{m}$ と定義した。この時刻歴においてピーク値と減衰の傾向が解析 B ではよく再現されていることが分かる。これらより、非等温解析においても DB の最大風速の性質が再現できているといえる。

図 22 実測との比較 (解析 B)

Fig. 22 Comparison for wind velocity profile between experiment and full-scale measurement

図 23 時刻歴 (解析 B)

Fig. 23 Comparison for time history of wind velocity between experiment and full-scale measurement (Analysis B)

$x/D=1$ 地点に建物モデルを設置した場合の、ピーク発生時刻における風圧分布を比較する。基準化には軒高の最大ピーク速度圧を用いる(時刻歴は実スケール 3 秒平均)。実験値(図 24)と解析 A (図 25(a))を比較すると、風上壁面と側面の風圧係数は近い値を示したが、屋根面において風下側に向かい風圧係数が小さくなる傾向は捉えられているものの、屋根面風上側の最大負圧が再現されていない。これは接近流の乱れが小さいためであり、解析 A の流入条件として平均風速分布を用いたことで、実

験におけるシャッターを用いた非定常な流入風速によって発生する乱れが再現できていないためと考えられる。解析 B においては、流入風速は時間的に変化する、乱れが大きくなるため、図 25 (b)に示すように屋根面風上側に大きな負圧が作用しており、実験値と屋根面の風上側の傾向は等しい。その他の壁面の風圧分布は、実験および解析 A と異なる傾向を示しており、これは非等温状態における建物周りの流れ場が定常的な噴流とは異なることを示唆している。

図 26 は建物周りの風速分布を示す。赤色は分布中の最大風速を、青色は風速 0 を示す。この図より解析 A では建物上空に広く強風域が分布し、屋根面には流れの剥離によって渦ができていたことが分かる。解析 B においては強風域が地表面に近い部分にとどまり地表面からせり上がるように強風域が分布している。

図 24 風圧分布 実験値

Fig. 24 Distribution of wind pressure coefficient obtained from experiment

(a)解析 A

(b)解析 B

図 25 風圧分布 数値計算結果

Fig. 25 Distribution of wind pressure coefficient obtained from CFD

図 26 建物まわりの流れ場

Fig. 26 Flow field around the building

5. 境界層乱流との比較

5.1 風洞実験概要

本章では風洞実験により、境界層乱流中で建築物に作用する風力を測定し、DB による風力との違いを把握する。風洞実験は、東北大学工学研究科都市・建築学専攻のエッフェル型境界層風洞で行った。実験気流は、ベキ指数 $\alpha \approx 0.21$ の境界層乱流 (以下 ABL) である。実験模型は 3 章と同様のものを用い、風向 0° と 45° に対し測定を行った。

5.2 風圧係数の定義

一般に風洞実験において風圧係数を定義するとき、軒高の平均速度圧と同位置の静圧が用いられる。しかし、DB のような突風の場合、そのような定義では、DB 一連の現象を適切に評価できないため、適した基準化を行う必要がある。

そこで本研究では式(4)のように風圧係数を定義する。これは、米国の設計基準(ASCE7¹⁶⁾)に代表されるように、最大瞬間風速 (3 秒平均風速) が突風による風力の評価に適しているためである。よって、これによって算定される瞬間速度圧を用い基準を行うこととする。

$$C_p^* = \frac{p - p_{s0}}{q_{H,x/D=1}} \quad (4)$$

ここで、 p は測定点圧力、 p_{s0} は室内大気圧、 $q_{H,x/D=1}$ は軒高 H における 3 秒間平均速度圧 (3 秒ガストに基づく速度圧) である。

5.3 風洞実験との比較

ABL と DB 実験から得られた結果を比較する。図 27

は、風洞実験 (ABL) および DB 実験より得られた模型設置位置 $x/D=0 \sim 1.33$ における風力係数を比較したものである。上段 (a) は定常状態の平均値、下段 (b) はピーク値を示す。ここで ABL のピーク値は米国の設計基準 ASCE のダーストカーブ¹⁷⁾を用い、平均速度圧から 3 秒平均の最大瞬間速度圧に変換し、基準化を行なった値である。上段 (a) の定常状態において、 $x/D=0 \sim 0.66$ までは建物に対し下向きに大きな力 (大きな負の C_{Fz}) がかかる点において ABL の結果と大きく異なっている。 $x/D=1$ 以降では風上壁面では正圧、屋根面には負圧が作用することは ABL と同じであるが、DB による C_{Fz} は ABL の 1/2 程度である。ピーク値の比較においては、 $x/D=1$ 以降では ABL よりも風上面、屋根面両方で大きな値を示す。また $x/D=0.33, 0.66$ においては、定常 DB では風上面 C_{Fx} が小さな値を示すが、ピーク時には ABL の結果と同等の値となっている。このようにピーク時 DB の風力係数は、壁面もしくは屋根面に ABL の値と同等かそれよりも大きな値を示すことが分かった。

図 27 風洞実験と DB 実験の風力係数 (風向 0°)

Fig. 27 Comparison for wind force coefficients between

ABL and DB

6. まとめ

製作した DB シミュレーターを用いて実験を行い、DB による建築物の風荷重を検討した。また実験を模擬した数値解析および、非等温の数値解析を行なった。

DB に対する耐風設計法の提案が今後の課題であるが、耐風設計を行う上で注意すべき点を、本研究の結果を踏まえ挙げる。

まず、DB によって ABL より大きな力が建物に作用する点が挙げられる。DB の最大風速は $x/D \approx 1$ で起こり、このときの風力係数は ABL での結果と類似した傾向を示し、風力係数の値は ABL の値の 1.3 倍程度になる。 x/D が 1 以下のときには、下向きの大きな圧力が作用するので、自重や雪荷重との組み合わせを考えると注意が必要であり、これにより最大荷重発生点が $x/D \approx 1$ から変わる場合があるため注意する必要がある。また外装材へのピーク風圧分布を検討した際、境界層乱流時よりも広い範囲でピークが発生し、かつ図 15 にあるように周期的に繰り返し発生するため、この点を今後考慮する必要がある。

今後の課題は、上記の結果に加え、可視化による DB の下降流・水平流・上昇流の把握や DB の移動の性質を考慮した実験、非等温解析の改良を行い、それらの結果を用い耐風設計法を提案することである。

謝辞

本研究の一部は、平成22・23年度科学研究費補助金・挑戦的萌芽研究「ダウンバーストシミュレータの製作と風荷重評価の試み」(研究代表者・植松 康)の補助を受けて行われたものである。また本論文は、2013年度日本風工学会優秀修士論文賞を受賞したものである。

参考文献

- 1) Fujita T. Theodore, “Downburst: Microburst and Macroburst”, University of Chicago Press, IL, 122pp, (1985)
- 2) Hjelmfelt R. Mark, “Structure and Life Cycle of Microburst Outflows Observed in Colorado”, Journal of Applied Meteorology, Vol. 49, pp. 900-927, (1988)
- 3) Fujita T. Theodore, “DOWNBURSTS: Meteorological Features and Wind Field Characteristics”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 36, pp. 75-86, (1990)
- 4) M. T. Chay, C. W. Letchford, “Pressure distributions on a cube in a simulated thunderstorm downburst-Part A: stationary downburst observations”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 90, pp. 711-732, (2002)
- 5) C. W. Letchford, M. T. Chay, “Pressure distributions on a cube in a simulated thunderstorm downburst. Part B: moving downburst observations”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 90, pp. 733-753, (2002)
- 6) M. S. Mason, C. W. Letchford, D. L. James, “Pulsed wall jet simulation of a stationary thunderstorm downburst, Part A: Physical structure and flow field characterization”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 90, pp. 711-732, (2002)
- 7) Anindya Sengupta, Partha P. Sarkar, “Experimental measurement and numerical simulation of an impinging jet with application to thunderstorm microburst winds”, Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 96, pp. 345-365, (2008)
- 8) McConvill A. C., “The physical simulation of thunderstorm downbursts using an impinging jet”, Wind and Structures, Vol. 12, No. 2, pp. 133-149, (2009)
- 9) Yan Zhang, Partha P. Sarkar, Hui Hu, “Comparison of Microburst-wind Loads on Structures including Scale Effects”, The 12th Americas Conference on Wind Engineering (12ACWE), June 16-20, (2013)
- 10) 佐々 浩司, 郷原 建, 木村 安志, 「マイクロバーストの模擬実験」, 第18回風工学シンポジウム論文集, pp. 229-234, (2004)
- 11) 長田 泰一, 井出 和人, 小尾 晋之介, 益田 重明, 「地面に衝突する鉛直重力流の統計的性質」, ながれ 24, pp. 67-79, (2005)
- 12) 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/>, (2015. 2)
- 13) William E. Lin, “Validation of a novel downdraft outflow simulator: a slot jet wind tunnel”, The University of Western Ontario, (2010)
- 14) OpenFOAM, <http://www.openfoam.org/index.php>, (2015. 2)
- 15) Anderson R., Orf L. J. G. and Straka M. J., “A 3-D Model System for Simulating Thunderstorm Microburst Outflows”, Meteorol. Atmos. Phys., Vol. 49, pp. 125-131, (1992)
- 16) ASCE7, “Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures : SEI/ASCE 7-05 (Asce Standard No. 7-05)”, American Society of Civil Engineer, (2006)
- 17) ASCE7, “Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures: ASCE Standards ASCE/SEI 7-10”, American Society of Civil Engineers, p509, (2013)