数値解析によるダウンバーストの流れ場の再現と数式モデルの構築

飯	田	有	未	染)	大	輔
後	藤		暁	大	塚	清	敏

Numerical Study and an Empirical Model of Downburst Flow Fields

Yumi	Iida	Daisuke Somekawa
Satoru	Goto	Kiyotoshi Otsuka

Abstract

The wind characteristics of downbursts are quite different from those of turbulent boundary layers. Nonstationarity (e.g., an intense, moving downdraft and a strong divergent outflow near a ground) causes severe damage to buildings and structures. In the present study, we conduct a series of computational fluid dynamics (CFD) simulations of downbursts using a large Eddy simulation (LES) to investigate the characteristics of their peak wind velocities. An empirical model based on the OBV model (Oseguera and Bowles, 1988; Vicroy, 1991) is also proposed in the paper; in the model, the parameters are empirically determined based on the results of the LES of downbursts. It is found that the proposed empirical model yields velocity distributions consistent with those obtained from LESs.

概 要

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。ダウンバーストは風向が突然変化すること,また風速の最大ピーク値が地表面付近で発生することなど, 台風や低気圧による強風とは異なる性質をもつため,一般的な耐風設計で想定されている境界層乱流とは違っ た性状を示す。本研究では,数値解析を行い,詳細なダウンバーストの流れ場を検討し,ダウンバーストのピー ク風速の特性を明らかにした。また,ダウンバーストの風速を予測する既往の数式モデル(OBVモデル)を基に, 数値解析結果より数式モデルのパラメーターを求めることで,ダウンバーストの非定常性を考慮した数式モデ ルを提案した。検討方法がなく未知であったダウンバーストによって建設サイト周辺に生じる風の状況を推定 できるようになった。

1. はじめに

近年ダウンバーストや竜巻などの突風の観測やそれら による被害事例が増加している。高速の旋回上昇気流で ある竜巻に対し、ダウンバーストは強い下降気流がもた らす突風である。2015年6月には、群馬県伊勢崎市におい てダウンバーストが発生し、外装材や太陽光パネルの飛 散, 倉庫の転倒など大きな被害がもたらされた。また, 気象学の分野では突風の発生機構や予測に関する研究が 進んでいるが、突風内部の風の性状や建築物へ及ぼす影 響に関する研究は少ない。これらの突風は発生が局所的 で、ある1つの建築物が被害を受ける確率が低いため、現 行の耐風設計基準には十分には考慮されていない。しか し、発生時には非常に大きな風速が生じるため、実際に は多くの被害が発生している1)。以上の背景より、特に原 子力発電所や災害拠点建築物等の重要施設においては, ダウンバースト等の突風を検討することが望ましいと考 える。そのために、まずは人や構造物に影響を及ぼす地 表面付近における基本的な流れ場の性質を理解すること が重要である。

これまでそうした視点によるダウンバーストに関する 研究は、主に国外においてChay and Letchford²⁾などによ って行われてきているが、その数は少なく、未解明な点 も多い。そのため、筆者らは突風の中でもダウンバース トに着目する。

ダウンバーストについて、これまでも室内における実 験的な研究が行われてきている。飯田らの³⁾の研究では 送風機、シャッター、および送風機の移動装置よりなる 実験装置ダウンバーストシミュレータを作製し、ダウン バーストを再現した。しかし、室内実験では、装置の大 きさの関係で風速測定の位置や数が限られるため詳細な 風速の空間分布の十分な把握が困難であった。また、ダ ウンバーストの流れ場が複雑であるため風速成分ごとの 特性の把握も困難であった。そこで本研究では数値解析 を行って、ダウンバーストのピーク風速の空間分布や風 速成分の特徴を把握することにした。

航空の分野における空港での飛行機の離陸・着陸時の 突風対策への適用を目的として, Oseguera and Bowles⁴⁾ら などによって,観測や実験で得られた経験的定数パラメ ーターでダウンバーストの風速分布を表現する簡易な数 式モデルが提案されている。ダウンバースト気流の数式 モデルはその後もさらに改良が加えられている5,6,7)。 本研究では、そうした既往の数式モデルを基にして、ダ ウンバーストの数値計算の結果を用いてパラメーターを 新たに設定し、任意の点のピーク風速を推定できる数式 モデルを構築する。

2. ダウンバーストとは

ダウンバーストとは、発達した積乱雲内での降水粒子 (雨やひょう)の一部蒸発・昇華・融解などによって生じ る冷たい空気塊の落下・吹き降ろしが地表面に衝突し, 放射状に広がることで発生する突風現象である。米国の 観測記録に基づくダウンバーストの平均的な構造⁸⁾を Fig. 1に示す。また、竜巻や台風との比較をTable 1に示 す。

日本においては、ダウンバーストの発生報告数は竜巻 の発生報告数よりも少ない。また、日本の竜巻の最大強 風レベルは日本版改良藤田スケール JEF3 (風速 67~80m /s) であるのに対し、ダウンバーストは JEF2 (風速 53~6 6m/s)である。塵埃や飛散物の回旋・上昇,あるいはロ ート雲により可視化されやすい竜巻と比較し、ダウンバ ーストの強風域は一般に竜巻よりも平面的に広く分布す るため視認性が低い。また、発生後の被害痕跡もはっき りダウンバーストによるものであると判断できるものが 少ないため、日本において実際のダウンバースト発生数 は正確には把握されていない。

一方で,米国において広範囲で行われた観測プロジェ クト⁹の結果から、ダウンバーストは竜巻よりも発生頻 度が高く,一つのダウンバーストの影響範囲が広いた め,建築物への強風被害の確率は竜巻によるものより大 きいと言われている。これらのことから、ダウンバース トは突風被害低減のために考慮すべき突風現象であると 言える。

2.1 実験によるダウンバーストの再現

実際のダウンバーストは、吹きおろしだけではなく、 積乱雲とともに移動すること,周辺風の変化など,様々 な要因が影響し生じる複雑な現象である。このような複 雑な現象を実験的に再現する場合には、ダウンバースト を特徴づけるいくつかの重要な特性に着目し、再現を行

う必要がある。ダウンバーストは、瞬間的な吹き降ろし (下降噴流)によって発生し、風速のピークが地表面付近 の低い高度で発生する。また、多くの場合親雲となる積 乱雲の移動に伴ってダウンバーストの下降噴流も移動す るため急激に風向が変化する。これらの影響に着目し, 筆者らの既往の研究3)では、送風機、天井板、シャッター 機構に加えて移動機構をもったダウンバーストシミュレ ータを用いた(Photo 1, Fig. 2)。この装置は天地が逆に してあり,送風ファンによるジェットが天井板に衝突す ることで、地表に衝突するダウンバーストの下降噴流を 模擬する仕様となっている。送風機の上に取り付けられ ているシャッターの開放により, 瞬時に発生し下降する ダウンバーストの噴流を再現し,送風機が直線上を移動 できるように移動装置を製作することでダウンバースト の移動を再現した。



- : 吹きおろし風速 (m/s) w
- :ダウンバースト中央からの距離 (m)
- :ダウンバースト中央から最大風速発生地点までの距離 (m) r_{max}
- :ダウンバースト中央から最大風速発生地点までの距離(11 \overline{r}_{max}
- ケースの平均値)(m) V
- : 風速(水平成分) (m/s)
- :最大風速(水平成分) (m/s) V_{max}
- :最大風速(水平成分)(11ケースの平均値) (m/s) $\overline{V}_{\text{max}}$
- Ζ :高度 (m)
- Z_{Vmax} :最大風速発生高度 (m)
- \overline{Z}_{Vmax} :最大風速発生高度(11ケースの平均値)(m)
 - Fig. 1 標準的なダウンバーストの構造(Hjelmfelt⁸⁾) Standard Structure of Downburst Wind Field

Table	1	ダ	ウ	ン	バー	-ス	Ь	•	竜巻	•	台風の比	上較
-------	---	---	---	---	----	----	---	---	----	---	------	----

Comparison between Downburst, Tornado and Typnoon						
	ダウンバースト	竜巻	台風			
被害範囲	数百メートルから 数キロメートル	幅数十〜数百メートルで, 長さ数キロメートル	全国			
最大強風レベル	日本版改良藤田スケール JEF2	日本版改良藤田スケール JEF3	風速 85.3m/s(宮古島)			
(最大瞬間風速)	(風速 53~66m/s)	(風速 67~80m/s)	風速 46.7m/s(東京)			
被害の特徴	円形あるいは楕円形など 面的に被害が生じる	竜巻の経路周辺に被害が生じる	台風の通過範囲に広く 被害が生じる			



従来の研究²⁾では、吹き出し続ける定常的なダウンバ ースト(Fig. 3(a))を対象に平均風速の流れ場について 議論されることが中心であった。しかし、実際のダウン バースト現象は非定常であり、平均風速分布とピーク風 速分布は分布性状が異なると考えられ、定常的な気流で は検討が不十分であると考える。本研究の数値解析では、 瞬間的な噴出をシャッターにより再現した「固定噴流ダ ウンバースト」(Fig. 3(b))、さらに移動の性質を再現し た「移動噴流ダウンバースト」(Fig. 3(c))の二つの非定 常性を有するダウンバースト気流を対象として実験気流 の再現を行う。

2.2 野外観測記録と実験との比較

数値計算について述べる前に,野外観測と筆者らの既 往の研究の室内実験 3の比較について述べておく。 Hjelmfelt⁸⁾がドップラーレーダーによって捉えたダウン バースト中の風速の鉛直プロファイルと,本装置で計測 した各高さの最大風速の鉛直プロファイル(同時性なし) との比較を Fig. 4 に示す。実験は、I 型プローブを用い、 プローブ先端を天井板から 5mm ずつ z 方向(鉛直下向 き)に移動させて測定を行ったものである。また、プロー ブはr軸上の吹出し開始位置からr/D=1離れた点に設置 した。プローブのワイヤは天井板に水平に設置し, x 軸 方向と z 軸方向の風速の合成成分を計測した。同一条件 で合計 10 回の測定を行い、各風速の時系列データから 得られた最大ピーク風速のアンサンブル平均を求めた。 この時、比較に用いた実測値はドップラーレーダーによ る観測値であり、2.5~5分毎に計測された結果(平均値) である。そのため、実験において実スケール 2.5 分に相 当する時間(t=0.375 秒)を用いて、時系列データに移動平 均をかけた。

実験によるダウンバーストは、実測値と同様に釣り鐘 型の風速の鉛直プロファイルを示していることが分かる。 また実験値は概ね実測値の範囲内の値を示している。

3. 数値解析の概要と計算モデルの妥当性検証

3.1 解析条件

オープンソースコードOpenFOAM v1606+を用いて有 限体積法によってEuler座標系で数値解析を行う。なお,







ここでは実現象ではなく、ダウンバースト発生装置を用 いた実験を対象として解析範囲および解析条件を決定し た(Table 2, Fig. 5)。なお、床面はno slipとし、ほとんど 障害物のない地表面と仮定している。本解析では街区等 による地表面粗度の影響は考慮しない。座標軸はダウン バーストの中心にz軸を置いた円筒座標とする(Fig. 5)。 吹出し口の直径はD=0.6mであり、これを長さの基準化 に用いる。また、吹出し口の高さはz/D=1とする。流入風 は, Fig.5に示す吹出し口に, ダウンバーストシミュレー タの吹出し口近傍で測定した風速の時系列データ (Fig.6)を入力する。本解析で対象とする「固定噴流ダウ ンバースト」では、Fig.6で見られる風速の立ち上がりに よって,瞬間的な噴出によるダウンバーストの非定常気 流が再現される。「移動噴流ダウンバースト」では、さ らに流入面が移動することで、瞬間的な噴出を伴いなが ら移動するダウンバーストの非定常気流が再現される。

移動噴流ダウンバーストはr/D = 0で噴出および移動を 開始するものとする。このとき移動噴流ダウンバースト の移動速度比は $V_{tr}/U_{jet} = 0.14$ (移動速度 $V_{tr} = 0.25$ m/s,下降 噴流平均風速 $U_{jet} = 1.75$ m/s)とする。

3.2 解析結果の検証

既往の実験結果と数値解析の結果を比較する。風速に ついては、実験、数値解析ともに、気象庁などの観測記 録の最大瞬間風速の定義にならい、実スケール3秒相当で 移動平均を行う。固定噴流ダウンバーストと移動噴流ダ ウンバーストにおける風速の時系列データと鉛直プロフ ァイルの比較をそれぞれFig. 7およびFig. 8に示す。測定 点はr/D=1、z/D=0.04としとし、風速は最大風速Umaxで 無次元化されている。また、時間は吹出し風速Ujetと吹出 し口の直径Dを用いて、t*=t・Ujet/Dと無次元化を行った。 風速の時系列データの時刻0(s)はシャッターが開いた 時刻である。Fig. 7(b)およびFig. 8(b)に示す風速の鉛 直プロファイルは各高さでの最大瞬間風速値をプロット

計測点から噴流中心(r/D=0)までの距離を []に示す

しており同時性はない。Fig. 7 (a) では、風速の時系列デ ータにおける風速の立ち上がりの傾向は実験と数値解析 との間ででよく一致している。Fig. 8 (a) では、風速の立 ち上がりが数値解析の方がやや遅れているが、風速の上 昇と下降の全体的な時間変動の傾向は相互に類似してい る。風速鉛直プロファイルにおいて、Fig. 7 (b)、Fig. 8 (b) より、最大風速が地表面近傍で発生し、上部で風速が低 下する傾向もよく再現されている。

Analytical Condition					
メッシュ分割	7,104,042				
海公百	時間項 : Euler (クーラン数が0.3以下となるよう				
低力項	Δtを自動調整)				
77 4	対流項:TVDスキーム				
	(Roe DSUPERBEE)				
上部・側面の 境界条件	<i>p</i> : 0, 他 : 勾配ゼロ				
床面の 境界条件	U: 0, 他 : 勾配ゼロ				
解析手法	PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators)				
乱流モデル	Dynamic SGS model with Lagrangian averaging				
最小メッシュ (Δx, Δy, Δz)	(0.004, 0.003, 0.001)				

Table 2 計算条件



Computational Domain







4.1 流れ場の風速の断面分布図

固定噴流ダウンバーストおよび移動噴流ダウンバース トの風速のr-z断面分布図をFig. 9, Fig. 10にそれぞれ示 す。図の(a)~(d)は、無次元時間t*=4.38(数値解析時間 t = 1.5s)からt* = 8.75 (数値解析時間t = 4s)まで, t* = 1.46 毎(数値解析時間t=0.5s毎)の時刻の風速分布を示す。ま た,各図の軸はダウンバースト中心からの距離r/Dを示す。 固定噴流ダウンバーストでは吹出し口中央部から下降気 流が発生し(Fig. 9 (a)),高い風速で地表面に衝突する (Fig.9(b))。その後、地表面に衝突した気流が水平方向 に広がり、気流の進行方向先端の渦が発達する(Fig.9 (d))。移動噴流ダウンバーストについては、固定噴流ダ ウンバーストと同じタイミング(Fig. 10 (a))でr/D=0.5付 近で地表面に到達する。その後,固定噴流ダウンバース トと同様に、地表面に衝突した気流が水平方向に広がっ ている。また、下降噴流直下のよどみ点から、移動方向 前方の気流先端の渦までの距離Ar/Dは、固定噴流ダウン バースト(Fig. 9 (d))の距離と類似している(*Δr/D* = 1.17~1.33程度)。本解析での移動速度においては、ダウン バーストの移動が地表面近傍の流れ場に与える影響は小 さいと考えられる。

4.2 風速成分

ダウンバーストのピーク風速の風向を検討するため風 速成分に着目する。水平成分uおよび鉛直成分wは,r軸方 向とz軸方向の風速成分を示し,風速Uはそれらの合成の 風速値とする。

4.2.1 ピーク風速の鉛直プロファイル 固定噴流ダ ウンバーストの風速U,水平成分uおよび鉛直成分wのピ ーク風速の鉛直のプロファイルをFig. 11およびFig. 12に 示す。Fig. 11はr/D=0, Fig. 12はr/D=1地点における風速 の鉛直プロファイルを示す。左図はピーク風速分布,右 図はピーク風速発生時刻を示す。風速Uと水平成分uにつ いては正のピーク値をのみ示す。ダウンバーストの流れ



Comparison of the Pulsed Moving Jet between the LES and the Experiments

は放射的に拡がるものが主であることより,負の風速(この場合中心へ向かう成分)の絶対値が小さいためである。 一方,鉛直成分wについては,正負どちらの風速において も絶対値が大きいケースが見られたため,正負両方の値 を示している。z方向の流れは,下降流だけではなく,地 面衝突後に上昇流が生じるためである。r/D=0地点では (Fig. 11)風速のピーク値は負の鉛直成分であるw風速の 絶対値とほぼ同じ値を示し,下降気流の風速によって生 じていることがわかる。r/D=1地点(Fig. 12)では,地表 面付近では水平成分uの寄与が大きい。

同様の風速プロファイルについて,移動噴流ダウンバ ーストの r/D = 3 地点の結果を Fig. 13 に示す。ピーク発 生時刻の図には、噴流が観測点の上部を通過する時刻を 点線で示した。下降噴流が上部を通過する前に、水平成 分 u により風速にピーク風速が生じる。また、z/D>0.15 の範囲では、風速のピーク値には、鉛直成分 w の負のピ ーク風速(下降気流によるピーク風速)の影響が大きく表 れている。この傾向は、測定点 r/D = 1,2 でも同様であ った¹⁰。

Fig. 13(a),(b)より,移動噴流ダウンバーストの風速 のピーク値に,水平成分uの影響が大きく表れるのは,地 表面付近z/D<0.05の範囲であることが判る。また,移動 ダウンバーストの水平成分uのピーク値のプロファイル は,z/D<0.1の範囲において,固定噴流ダウンバースト (r/D=1のケース)のプロファイルと類似している。特に, 水平成分uのピーク風速比u/Ujetを検討すると移動噴流ダ ウンバーストではu/Ujet=1.90,固定噴流ダウンバースト (r/D=1のケース)ではu/Ujet=1.93となり,ほぼ同じ値を 示した。移動を伴うケースでも、地表面上のピーク風速 の分布は固定噴流ダウンバーストのものと類似している と考えられ、地表付近のピーク風速においては移動の影 響は小さいと考えられる。一方,高度が高い領域(z/D >0.15)では,水平成分uと負の鉛直成分w(下降気流の風 速)両者の値が大きくなり,移動の影響が大きく表れる。





Fig. 10 移動噴流ダウンバーストの風速の断面分布図

Distribution of the Wind Velocity for the Pulsed Moving Jet (r-z cross-section)







4.2.2 ピーク風速の水平プロファイル 固定噴流 ダウンバーストの風速 Uおよび水平成分 u および鉛直 成分 w のピーク風速値(絶対値が最大となる風速値)の 水平分布を Fig. 14 (a) に示す。z/D = 0.05 地点における 風速の水平分布を示す。r/D > 0.5 の範囲において,風 速 U の値と水平成分 u の値がほぼ一致していることか ら,水平成分 u の影響が大きいと言える。また,r/D = 1 近傍で最大値を示している。r/D < 0.5 の範囲では負の 鉛直成分 w の絶対値が大きな値を示す。

同様に移動噴流ダウンバーストの水平分布をFig. 14 (b)に示す。すべての点で水平成分uのピーク値と風速U のピーク値がほぼ一致している。最も大きい風速は,1< r/D<2の範囲において生じている。ダウンバーストの「瞬 間的な噴出」の影響がこの範囲において表れていると考 えられる。

5. ダウンバーストによる風速分布を表す数式 モデル

5.1 ダウンバーストによる風速分布を表す数式モデ ルの定義

$$u = \frac{\lambda r}{2} \left[e^{-(z/z^*)} \cdot e^{-(z/\varepsilon)} \right] e^{\left[\frac{1 - (r^2/\beta^2)^{\alpha}}{\alpha} \right]}$$
(1)

$$w = -\lambda \left\{ \varepsilon \left[e^{-\left(\frac{Z}{\varepsilon}\right)} - 1 \right] - z^* \left[e^{-\left(\frac{Z}{z^*}\right)} - 1 \right] \right\} \times \left[1 - \left(\frac{r^2}{\beta^2}\right)^{\alpha} \right] e^{\left[\frac{1 - \left(r^2/\beta^2\right)^{\alpha}}{\alpha}\right]}.$$
(2)

 ダウンバースト中心からの水平方向距離

 r, z:
 および高さ(m)

- u,w: 風速の水平成分および鉛直成分(m/s)
- 風速水平成分の最大値の半分の風速が発生する高さ(m)
- ε: 特徴高さ(m)
- *α*, *β*: 形状係数変数
- λ : $\lambda f = \lambda f = \lambda (1/s)$

OBVモデルは、定常的なダウンバーストの平均風速値 を表した式である。解析を通して、地表面付近ではダウ ンバーストの移動の影響が小さいことがわかり、瞬間的 な噴出による非定常性のみを考慮することで地表面付近 のピーク風速を評価できると考えられる。瞬間的な噴出 のみであれば、定常評価式であるOBVモデルのパラメー ターを変更することで適用できる可能性がある。非定常 な固定噴流ダウンバーストのピーク風速を再現するため、 評価パラメーター_z、z*をダウンバーストの中心からの距



Fig. 13 ピーク風速の鉛直分布と発生時刻 移動噴流ダウンバーストの *r/D* = 3 地点の結果 Vertical Profile of Peak Wind Velocities and Time of Occurrence for a Pulsed Moving Jet at *r/D* = 3





離**r**の関数と考え,解析結果を基にしたz(r), z^{*}(r)を同定 する数式モデルを検討する。

Vicroyの方法⁵⁾より,最大水平風速成分が生じる高さ z_m について式(3)が示されている。

$$\frac{z_m}{z^*} = \frac{1}{\left(\frac{z^*}{\varepsilon}\right) - 1} \ln\left(\frac{z^*}{\varepsilon}\right) \tag{3}$$

 $z_m \ge z^*$ を収束計算することで、式(4)より、 ε を推定することができる。

上記のパラメーターより, $c_1 = -z_m / z^* \ge c_2 = -z_m / \varepsilon$ が決まり,式(1) と式(2) は式(4) と式(5)のように表せる。

$$u = \frac{\lambda r}{2} \left[e^{c_1(z/z_m)} \cdot e^{c_2(z/z_m)} \right] e^{\left[\frac{2 - \left(r^2/r_p^2\right)^{\alpha}}{2\alpha} \right]}$$
(4)

$$w = -\lambda \left\{ \frac{z_m}{c_1} \left[e^{c_1(z/z_m)} - 1 \right] - \frac{z_m}{c_2} \left[e^{c_2(z/z_m)} - 1 \right] \right\} \\ \times \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r^2}{r_p^2} \right)^{\alpha} \right] e^{\left[\frac{2 - \left(r^2/r_p^2 \right)^{\alpha}}{2\alpha} \right]}$$
(5)

また風速水平成分の最大値 u_p は式(4)に $z = z_m cr = r_p$ を代入し、式(6)のように表せる。

$$u_p = \frac{\lambda r_p}{2} \left[e^{c_1} \cdot e^{c_2} \right] e^{\left[\frac{1}{2\alpha}\right]} \tag{6}$$

式(4)と式(5)を式(6)で除することで,無次元風速成分*u* 'とw' が式(7),式(8)のように表せる。

$$u' = \frac{r}{r_p} \frac{e^{c_1(z/z_m)} - e^{c_2(z/z_m)}}{e^{c_1} - e^{c_2}} e^{\left[\frac{1 - \left(r^2/r_p^2\right)^{\alpha}}{2\alpha}\right]}$$
(7)

$$w' = -\frac{2}{r_p} \frac{1}{e^{c_1} \cdot e^{c_2}} \left\{ \frac{z_m}{c_1} \left[e^{c_1 \left(\frac{z}{z_m} \right)} - 1 \right] - \frac{z_m}{c_2} \left[e^{c_2 \left(\frac{z}{z_m} \right)} - 1 \right] \right\} \times \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r^2}{r_p^2} \right)^{\alpha} \right] e^{\left[\frac{1 - (r^2/r_p^2)^{\alpha}}{2\alpha} \right]}$$
(8)

以上より、変数r, z, z_m , z^* によって、無次元風速成 分 $u' \ge w'$ の風速分布を表すことができた。次節で、数値 解析の結果より、r/Dを変数とし、 z_m/D , z^*/D および u_p/u_0 の関係を求める。ここで、Dはダウンバースト径、 u_0 は全領域中の最大風速とし、任意に一つの値を決定す るものとする。式(7)と式(8)において、座標(r, z)を指 定することで、任意の点の風速を算出することができる。

5.2 風速分布を表す数式モデルのパラメーター

数式モデルのパラメーター z_m , z^* は数値解析より求める。 z_m は風速水平成分の最大値が発生する高さであり、

 z^* は風速水平成分の最大値の半分の風速が発生する高さ である。また,最大のピーク風速水平成分 u_p は水平距離 r/D地点のピーク風速の鉛直プロファイルの最大値を示す。Fig. 15(a)に<math>r/Dに対する z_m , z^* の変化を表している。

パラメーター z_m , z^* および $u_p \varepsilon r/D$ の関数として表す ため、最小二乗法により式(9)と(10)の回帰式を求めた。 また、Fig. 15(b)はr/Dによる u_p の変化を表しており、近 似式を式(11)に示す。ここで、 u_0 は全範囲の最大値であ る。すなわち、一つの設計風速 u_0 を決定することで、ピ ーク風速のr/Dを変数とした u_p の分布を導くことができ る。これらの式は、下降噴流直下を除いた0.5<r/D<2を対 象とする。

$$z^{*/D} = -0.271 \times (r/D)^{4} + 1.21 \times (r/D)^{3} - 1.62 \times (r/D)^{2}$$
(9)
+ 2.89×(r/D) - 0.81

$$z_m/D = 0.0254 \times (r/D) + 0.0038$$
 (10)

$$u_p / u_0 = 0.93 \times (r/D)^3 - 3.89 \times (r/D)^2 + 4.84 \times (r/D)$$
(11)
- 0.954

5.3 数式モデルの確認と他モデルとの比較

式 (9)~式 (11)より得られた数式モデルを Fig. 16 に 示す。この式の適応範囲は 0.5<r/D<2, 0<z/D<0.3 とする。 Fig. 16 に数式モデル算出に用いた数値計算結果を併記し た。提案の数式モデルが,数値計算の結果を概ね再現し ていることが分かる。また,本数式モデルの構築に使用 した Oseguera⁴⁾, Vicroy ^{5), 6)}と Abd-Elaal⁷⁾によって提案



された数式モデルを併記した。既往の式は定常的な噴流 による気流の平均風速分布を対象に作成された式である。 本提案式は瞬間的な噴出(固定噴流ダウンバースト)によ る流れ場の最大風速を対象としており,既往の式とは対 象とする気流の分布が異なると考えられるが,風速の最 大の水平成分 upが生じる r/D=1 近傍では,どのモデルで も類似の結果を示すことが分かった。これは、ピーク風 速と平均風速の鉛直プロファイルが相似であることを示 している。r/D=0.5 および r/D=2 については、ピーク風速 のプロファイルが,既往の式では数値計算結果と大きく 異なるのに対し,本提案式では良く再現できている。ま た,r/D=1.25 では鉛直成分 w を過小評価しているため留 意が必要である。これは、本提案式が平均風速分布の式 を基として構築されているため、ダウンバーストの非定 常性によって生じた鉛直成分 w のピーク風速について、 完全には再現できないためと考えられる。しかし、風速 U、水平成分 u への影響は小さいため最大のピーク風速 については評価可能である。

本提案式では移動の効果は検討していない。4.2.1 節よ り、 z/D>0.15 において、移動する下降気流の風速の影響 が鉛直成分 w に表れるため、本提案式の適用範囲を z/D<0.15 とする。z/D>0.15 において移動の効果を考慮す る場合、下降気流による鉛直成分 w の絶対値は u₀の絶対 値より小さい値であることが明らかになっているため ¹⁰⁾、鉛直成分 w=-u₀とし、これと本式の水平成分 u に より、風速 Uを概算することができる。



Fig. 16 数値解析結果と数式モデルおよび既往の提案式との比較 Comparison of the Velocity Profiles between Empirical Model, CFD, and the Previous Models Reproduced with Reference to (Vicroy, 1991; Abd-Elaal et al. 2013)

これより,定常評価式において,評価パラメーター z_m , z^* の設定に対し,これらをダウンバースト中心からの距 離rの関数と考え解析結果を基にした $z(r), z^*(r)$ を同定し たところ,非定常性を考慮したダウンバースト気流の風 速を評価できた。

6. まとめ

本研究では、室内実験に対する数値解析を行い、ダウン バーストの流れ場の再現を行った。対象とするダウンバ ーストは、固定噴流ダウンバーストと移動噴流ダウンバ ーストの二つの非定常性を有するダウンバーストとし、 それらの可視化を行い、ダウンバーストの流れ場の詳細 を把握した。また、風速Uと水平成分uおよび鉛直成分w のピーク風速の鉛直のプロファイル、および水平分布を 求め、ピーク風速発生時の流れの応答性状を考察した。 得られた知見を以下に示す。

固定噴流ダウンバースト

- 噴流中心近傍では負の鉛直成分 w によって風速 のピーク値が生じ,他点では水平成分 u によっ てピーク値が生じる
- 風速のピーク値は r/D = 1 近傍で最大値を示す

移動噴流ダウンバースト

- 地表付近の流れ場(z/D < 0.05)に対して移動の影響は小さく,瞬間的な噴出による水平成分 u によってピーク値が生じる
- 高度が高い領域(z/D > 0.15)では、移動の影響により水平成分 u と鉛直成分 w 両者の値が大きい
- 最も大きいスカラー風速のピーク値は、1<r/D<
 2の範囲に生じ、この範囲に「瞬間的な噴出」の 影響が表れている

さらに、ダウンバーストの風速分布を再現する数式モ デルのパラメーターの提案として、固定噴流ダウンバー ストによるピーク風速分布の再現を目標に、定常評価式 (OBVモデル)の評価パラメーターzm、z*をダウンバース ト中心からの距離rの関数と考え、解析結果を基にしたz m(r)、z*(r)を同定した。これより以下が可能となった。

- ダウンバーストの径 D と最大風速 uo を設定により,
 任意の点(r/D, z/D)のピーク風速の算出
- 検討方法がなく未知であったダウンバーストによって建設サイト周辺に生じる風の状況の推定

なお、今後の課題として以下の点が残されている。

- 地表面粗度の影響

- ダウンバースト発生時の周辺風の影響
- 建築物の風荷重の評価法
- 効果的なダウンバーストの耐風対策の提案

謝辞

本検討を進めるにあたって,東北大学(秋田工業高等専 門学校)植松 康教授から様々な示唆をいただきました。 ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 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/, 2018.12.20 閲覧
- Chay, M. T., Letchford, C. W.: 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
- 飯田有未,浅野和則,植松 康:ダウンバーストシ ミュレータの開発,日本建築学会技術報告集, 24(58), pp.941-946,2018
- Oseguera, R., Bowles, R.: A simple, analytic 3dimensional downburst model based on boundary layer stagnation flow, NASA Technical Memorandum, 100632, 1988
- Vicroy, D.: A simple, analytical, axisymmetric microburst model for down-draft estimation, NASA Technical Memorandum, 104053, 1991
- Vicroy, D.: Assessment of Microburst Models for Downdraft Estimation, J. Aircraft, Vol. 29, No. 6, Nov.-Dec. 1992
- Abd-Elaal, E., Mills, J. E., Ma, X.: An analytical model for simulating steady state flows of downburst, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 115, pp. 53-64, 2013
- Hjelmfelt, M. R.: Structure and life cycle of microburst outflows observed in Colorado, Journal of Applied Metrology, Vol. 27, pp. 900-927, 1988
- Fujita, T. T.: DOWNBURSTS: Metrological Features and Wind Field Characteristics, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 36, pp. 75-86, 1990
- 10) 飯田有未:非定常性を考慮したダウンバーストによる建物の風荷重に関する研究,東北大学学位論文, 2019