ドップラーソーダによる台風時の上空風観測

—平均風速の鉛直分布—

THE OBSERVATION OF TYPHOON WINDS BY DOPPLER SODAR

—Features of mean wind profile—

後藤 暁*, 天野輝久**, 大熊武司***, 川口彰久****

*Satoru GOTO, Teruhisa AMANO, Takeshi OHKUMA
and Akihisa KAWAGUCHI*

The wind structure in lower atmosphere associated with the wind resistant design of high-rise buildings has been investigated by Doppler sodar in Okinawa since 1994. The measurements are carried out in thirteen typhoons, among which four typhoons are selected to discuss mean wind profiles. The results of the observation show that the wind profile consists of two layers; the lower one to fit power law and the upper one with the constant velocity. The velocities in the upper layer coincide with the observed data by rawin sonde, and also with the theoretically estimated gradient wind. Furthermore, the bottom of the upper layer locates at comparatively lower altitude than the empirically known gradient height. It is emphasized that the layer of constant velocity equivalent to gradient wind possibly descends in extraordinary case to a height less than 100 meters in typhoon winds.

Keywords : Doppler sodar, Wind observation in lower atmosphere, Typhoon, Mean wind profile,

Gradient wind, Gradient height

ドップラーソーダ、上空風観測、台風、平均風速の鉛直分布、傾度風、傾度風高さ

1. 序論

建築物の超高層化に伴い、地上数百m上空に及ぶ強風の特性の合理的評価が重要になってきている。現在の「建築物荷重指針・同解説」¹⁾ (以後、学会指針と呼ぶ) で定められている設計風速等の諸規定は高度200~300m以下における既往の観測から評価されたものであり、超々高層建築物等で問題となるような更に上空の風速や乱れ強さなどについては必ずしも十分な資料はない。

気象庁では全国18カ所でレーウィンゾンデによる高層気象観測を通常1日2回行っている²⁾。しかし、気象予測を本来の目的とする観測であるため、対象とする領域のスケールが建築物に比べて非常に大きく、高度1kmまでの範囲では数高度のデータに限られている。更に、レーウィンゾンデは風の流れに乗って移動するので風の乱れに対するデータも得られない。この他、独立鉄塔や建物屋上での風観測も行われており、3杯型風速計、プロベラ型風速計、超音波風速計等が使用されている。これらの計器は時間について高い分解能を有し風の乱れについての検討も可能であるが、設置している1点ないし数点の観測値しか得られないので、地上数百mまでの風速の鉛直分布性状を分析するには不十分である。

そこで近年、電波や音波を利用したリモートセンシングによる観測が行われるようになってきた。地上10kmを越える高高度につい

ては気象レーダーやウインドプロファイラーによる観測が行われている³⁾。林田他⁴⁾、菊池他⁵⁾は大気境界層レーダーにより300~3000mまでの観測を行っている。一方、地上数十m~500m程度まではドップラーソーダを用いた観測が各国で行われており^{6) 7)}、風速の平均成分だけでなく鉛直成分の標準偏差についても良好な観測値が得られている⁸⁾。高倉他⁹⁾は日本海の沿岸部と内陸の市街地で計測を行い、季節風時の鉛直分布について検討している。鄭他¹⁰⁾は日最大風速8m/sec以上の強風データに対し、平均風速の鉛直分布のべき指数について解析している。また、須田他¹¹⁾は2台のドップラーソーダで地表面粗度の異なる2地点で同時観測を行い、風速の違いによる鉛直分布の変化について検討している。

しかしながら、台風時に関しては効果的に観測された例は少ない。日比他¹²⁾は潮岬での約2時間半の観測結果を報告し、神田他¹³⁾、内藤他¹⁴⁾は東京都内で4台のドップラーソーダによる同時観測を実施し、強風域が下層に移動しながら流れる場合があることを示唆しているものの、十分に実測結果が蓄積されたとは言えない。

台風時の強風構造について、Choi¹⁵⁾はレーウィンゾンデの観測値から、台風時の傾度風高さが季節風時の半分程度になることを示しているが、地上1kmまでの観測高度数は3点しか無いため、更に

本論文の一部は文献17)~22)において発表済みである。

* 大林組技術研究所 研究員・工修

** 琉球大学工学部環境建設工学科 教授・博士(工学)

*** 神奈川大学工学部建築学科 教授・工博

**** 大林組技術研究所 主任研究員・工修

Research Engineer, Technical Research Institute, Obayashi Co. Ltd., M. Eng.
Prof., Dept. of Civil Engineering and Architecture, Faculty of Engineering, Univ. of the Ryukyus, Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Faculty of Engineering, Kanagawa Univ., Dr. Eng.
Senior Research Engineer, Technical Research Institute, Obayashi Co. Ltd., M. Eng.

詳細な観測が必要であると思われる。また、孟他¹⁶⁾は大気境界層の数値モデルを構築して検討を行い、台風中心に近づくにつれ傾度風高さが低くなり、速度勾配が大きくなる傾向があるとしているが、実測との比較は行われていない。従って、耐風設計を対象とした台風時の平均風速の鉛直分布特性に関して明解な知見を得るまでには至らず、検討課題となっているのが現状である。

そこで著者らは、台風の通過頻度の高い沖縄において、1994年9月よりドップラーソーダを設置して、台風時の上空風の観測を行ってきた^{17)~22)}。本研究では、それらの観測結果並びに沖縄気象台でのレーウィンゾンデによる観測結果をもとに、台風時における10分平均風速の鉛直分布特性を明らかにする。

2. 観測方法

観測は沖縄県中頭郡西原町にある琉球大学工学部野外実験場（北緯26° 15'、東経127° 46'）にドップラーソーダ（AR-410、（株）カイジョー）を設置して行った。また、比較のために約100m離れた工学部棟屋上（地上40m）に超音波風速計（TR-61B、（株）カイジョー）を設置した。設置地点の海拔は約124mであり、周囲には2～5階建の建物が散在している。南東側は1、2km先から急激に標高が下がり、畑、住宅、工業用地となっていて数kmで海に達する。北西側はなだらかに標高が下がって数kmで海に面している。また、北東、南西側は標高差はあまりないが、観測地周辺は地面の凹凸がやや大きい。周辺状況は学会指針における地表面粗度区分Ⅲに該当すると思われる。設置位置を図-1に、設置状況を写真-1に示す。

図-1 観測地点

写真-1 ドップラーソーダの設置状況

ドップラーソーダは送信音響パルスの後方散乱信号が、各高さにおける空気塊（ビーム幅9degの円錐体の鉛直方向厚さ $C\tau/2$ （ C ：音速、 τ ：パルス長さ）の部分）の速度成分に対応した周波数だけドップラーシフトを受けることを原理としている。それぞれの高さからの反射音を受信し、FFT処理によって検出したスペクトルピークの偏移からアンテナ軸方向の速度成分を計算する。

観測に使用したドップラーソーダはトリモノスタティック方式で、天頂角を20degにセットした水平方向成分計測用2台と天頂角0degの鉛直成分測定用1台の計3台の送受波器からパルスを10秒間隔で順次発信し、30秒毎の各風速成分を計測した。各高度とも10分間で計20個のデータの内、スペクトルピークとバックグラウンドノイズ（発信周波数2400Hzの±10%の周波数帯の全パワー）の S/N 比が10dbより大きいものを有効データとし、全データに対する有効データの比（データ取得率）が3成分とも20%以上であったデータを10分間平均値として収録した。なお、データ取得率の下限を30%とする例¹¹⁾もあるが、とりわけ特異な風速値は認められなかったもので、ここではメーカー仕様に従い20%とした。送信パワーを900Wとし、高度150mより下層についてはパルス長さ60msec（空気塊の厚さ約10m）、上層については300msec（同約50m）の混合パルス方式を採用した。

3. 観測結果と考察

3.1 台風の概要

観測は1994年9月から行われており、1997年10月現在、13個の台風（94年：2個、95年：2個、96年：4個、97年：5個）について観測を行うことができた。本論文では沖縄本島の500km以内に接近した4個の台風（9426号、9503号、9612号、9621号）について解析を行った。各台風の経路図を図-2に、気象庁発表のデータ²³⁾に基づく台風の概要を表-1に示す。また、図-3に台風9612号が沖縄本島を通過したときの雨量レーダー画像を示す。

図-2 台風経路図（○印は09:00の位置を示す）

表－1 各台風の概要（最大瞬間風速は超音波風速計（地上40m）の観測値）

台風	観測日	最大瞬間風速 (m/sec)	中心気圧 (hpa)	中心付近での最大風速 (m/sec)	暴風半径 (km)	台風の大きさ	沖縄本島からの距離
9 4 2 6	94/9/27～9/28	2 9 . 7	9 3 5	4 5	2 2 0	大型	東側約500km
9 5 0 3	95/7/20～7/22	3 7 . 9	9 6 0	3 0	9 0	中型	西側約100km
9 6 1 2	96/8/12～8/13	5 2 . 6	9 6 0	3 5	1 9 0	中型	沖縄本島を通過
9 6 2 1	96/9/28～10/1	4 0 . 9	9 5 5	4 0	1 9 0	中型	本島北方海上を通過

図－3 雨量レーダー画像
(沖縄気象台提供、台風9612号、96/08/12 18:52)

3.2 超音波風速計との比較

図－4及び図－5に地上40mにおける10分間平均風速、風向、降雨強度の経時変化を示す。図中には超音波風速計の観測値も併せて示してある。降雨強度は約10km離れた沖縄気象台での記録²⁴⁾（但し、9621号時は観測地点における記録）である。9426号時（図－4(a)）は降雨は全く観測されなかった。各台風とも降雨が強い時にドップラーソーダの観測値が乱れる傾向があるが、降雨が少ない時刻ではドップラーソーダと超音波風速計の相関は良い。

降雨による計測精度の劣化状況を確認するために、図－6に台風9503号時のエコー強度のファクシミリ記録を示す。図－4(b)の経時変化と対応させて見ると、5～10mm/hour程度の降雨のあった95/7/22 12:00頃までは高高度までエコーが強くなっている。これは雨滴によって反射された音波を捕らえているためであり、速度場に対応した正確な後方散乱信号が得られず、ドップラーソーダの観測値の信頼性は低下する。また、周辺建物等の影響を受けると帯状

(a) 台風9426号

(b) 台風9503号

図－4 風速、風向、降雨強度の経時変化

(a) 台風9612号

(b) 台風9621号

図-5 風速、風向、降雨強度の経時変化

図-6 ファクシミリ記録
(台風9503号、95/7/22)

の横縞が現れる¹³⁾が、ここではそのような状況は見られず、計測環境は極めて良好であった。

3.3 平均風速の鉛直分布

図-7に10分間平均風速の鉛直分布の例をそれぞれの台風について示す。これらの時間帯においてはすべて降雨はなかった。図中の○印は沖縄気象台で計測された同時刻のレーウィンゾンデの記録²⁾(1分平均値、上昇速度:約500m/min)である。また、図中の

表-2 台風パラメータ

	ΔP (hpa)	r_m (km)	Z_0 (m)
台風9426号	7.8	8.6	6.7
台風9503号	5.3	6.1	7.1
台風9612号	5.3	12.1	6.2
台風9621号	5.8	8.7	6.1

ΔP : 中心気圧低下量、 r_m : 最大旋衡風半径、 Z_0 : 粗度長

破線(縦線)は藤井他²⁵⁾による台風モデルから計算した傾度風速であり、点線(横線)は孟他¹⁶⁾の提案式から求めた傾度風高さである。台風パラメータの算定に当たっては、台風の中心位置を気象庁発表の3時間毎のデータ²³⁾を線形補間して求めた。各台風の最大旋衡風速半径は、気象台における気圧の観測記録²⁴⁾を最小二乗法によりSchloemerの気圧分布式に近似させて定めた。表-2に計算に用いた台風パラメータを示す。

図-7から分かるように、ドップラーソーダで観測できた最高高さは、台風9503号では700mと特になくなっているが、一般的には500m程度である。平均風速の鉛直分布は、地面からある特定の高さまでは高度の増加とともに風速が増加する下層部と、風速がほぼ一定の上層部とからなっている。このうち下層部は、 U_z (m/sec)を高さ Z (m)での風速、 U_G (m/sec)を速度が一定となる高さ Z_G (m)での

図-7 平均風速の鉛直分布

風速、 α をべき指数として、

$$U_z = U_G(Z/Z_G)^\alpha \quad (1)$$

で示されるべき指数分布に概ね適合している。

一方、上層部の風速は各台風とも、レーウィンゾンデによって観測された高さ7~8kmまで続くほぼ一定の風速値と良い一致を示している。また、台風9612号時を除いて、台風モデルにより求めた傾度風速とも極めて良く一致している。9612号での差違は、図-3に示すようにこの台風の眼が異常に大きかった（直径約120km）ことと、図示した時間帯が眼の壁雲付近であったために、擾乱が激しく台風モデルが実現象を十分に捕らえていないためと考えられる。

更に、風速が一定となる高さは、台風9426号では100m程度、9503号では数百m、9612号と9621号では200m程度である。これらの高さは孟他の提案式による傾度風高さとは一致せず、それよりかなり低くなっている。9503号時のように、学会指針の地表面粗度区分Ⅲの「上空風高度」である450mとほぼ同程度の場合もあるが、その他の台風のようにかなり低い場合もある。このように台風時の強風では傾度風と同じ勢力を有する強風域が、場合によってはかなりの低高度まで降りてくると考えなければならない。

3.4 Z_G の分布特性

平均風速の鉛直分布において、前節で示したように、風速が一定となる強風域がかなりの低高度まで降りてくる現象が認められた。風速が一定となる高さ Z_G は、それ以上の高さにおける風速値が傾度風速とほぼ一致しているという意味で、「傾度風高さ」と呼ぶことも可能と思われるが、後述するように広範囲の高度に分布し激しく経時変化することから、現象のメカニズムが不明な現段階では、そのまま「風速が一定となる高さ」と呼称する。

さて、 Z_G の経時変化や高度分布について、表-1に示した4つ

の台風の全観測データに基づいて検討を行った。なお、降雨によるデータの劣化の影響を避けるために、降雨強度0.5mm/hour以下の時間帯に関してのみ解析を行った。データの総数は台風9426号、9503号、9612号、9621号でそれぞれ97個、37個、51個、215個である。

10分間平均風速の鉛直分布の経時変化の例として、台風9426号時（94/9/27 14:00~16:00）を図-8に、台風9621号時（96/9/29 20:00~22:00）を図-9に示す。図中の点線は平均風速の鉛直分布を、(1)式のべき法則が適用できる下層部と風速一定の上層部とに分割し、最小二乗法で近似した時の適合直線である。なお、べき法則の適用に難があるものは検討から除外し、観測された範囲内で風速が一定となる高さが決定できないものは下層部のみ近似した。

図-8に示した9426号の場合、鉛直分布は時間帯によりかなりの違いが見られる。 Z_G は全体的に低く約70mから250mの範囲で変化している。図-9の9621号では最後の30分間のように、 Z_G が450~500m以上である場合もあるが、それらを除けば100m程度まで下がってくる場合が数回認められる。一般に、 Z_G が下がる場合、すなわち上空の強風域が下層に降りてくる場合、 Z_G はある時間で急激に降下し、その後数十分かけて徐々に上がっていく傾向が見られる。

次に、 Z_G の頻度分布を図-10に示す。観測可能な高度が500m程度までであったために450mまでの範囲での分布となっているが、 Z_G の平均値は170mであり標準偏差は81mとかなり大きい。100m~150mでの頻度がもっとも多く、50m~200mで全体の70%を占めている。図-11に Z_G とその高さにおける風速 U_G との関係を各台風毎に示す。台風による違いや風速の絶対値による差違は特に認められない。 Z_G と U_G の風向 θ_G との関係を図-12に示す。風向範囲としては南~西と西~北の2方向に大別されるが、 Z_G はやはり広範囲に広がっている。西風の場合に Z_G が低いとも読みとれるが、データが少なくはっきりとは断定できない。

最後に、図-13にべき指数 α と Z_G の関係を、学会指針の各地

図－8 10分間平均風速鉛直分布の経時変化（台風9426号）

図－9 10分間平均風速鉛直分布の経時変化（台風9621号）

図-10 Z_G の頻度分布 図-12 Z_G と θ_G の関係 図-11 Z_G と U_G の関係 図-13 Z_G と α の関係

表面粗度区分のべき指数及び上空風高度とともに示す。べき指数は学会指針のそれに比べて値の大きな範囲で分布している。すなわち、 Z_G が200m以上では地表面粗度区分Ⅲでの値である0.2より大きい0.35付近で分布している。そして Z_G が低くなるに従い分布の散らばりが大きくなり、 Z_G が100mより低くなると1.0を越える場合も見られる。

以上述べたように、風速の大小や風向によらず、 Z_G は地上数十mから数百mまで分布しており、また、べき指数は学会指針に比べてかなり大きい。鉛直分布形状を決定する要素として、地表面粗度によって生じる摩擦の影響だけでなく、台風内部での潜熱放出によって引き起こされる上下混合の影響が考えられる²⁶⁾が、現段階ではこのような分布形の生じるメカニズムを明らかにするのは難しい。

4. 結論

台風の通過頻度の高い沖縄本島の中南部に位置する琉球大学キャンパス内において、ドップラーソーダを用いた台風時の上空風観測を行った。過去4年間に500km以内を通過した4個の台風の観測結果を解析し、10分間平均風速の鉛直分布を検討した結果、以下のようなことが分かった。

- ①平均風速の鉛直分布は、地上からある特定の高さまでは高さの増加とともに風速が増加する下層部と風速がほぼ一定の上層部とからなる。
- ②下層部の鉛直分布はべき指数分布を用いて近似することが出来

る。但し、べき指数の値は学会指針に比べてかなり大きい。

- ③上層部で観測されたほぼ一定の風速値が、レーウィンゾンデによる高層気象観測結果及び台風モデルによる傾度風速と良好な一致を示したことから、この層は傾度風と同じ勢力を有する風速域と考えて良い。

- ④風速が一定となる高さは、学会指針における上空風高度に近い場合もあるが、それ以下の広範囲に分布することが多く、極端な場合には100m程度以下まで下がってくる。

以上、台風時では季節風時と異なり、傾度風と同程度の強風域が地表面付近まで降りてくる現象の存在を確認しその性状を明らかにした。今後、現象の発生メカニズムや台風中心からの距離との関係などについて解明する必要がある。

謝辞

本研究における風観測を遂行するに当たり、琉球大学工学部助手福島弘志氏に多大なるご協力を頂いた。ここに深く感謝する。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説、pp. 261、1993
- 2) 気象庁：高層気象観測データ、1994～1996
- 3) J. H. Golden: The Coming Deluge of Wind Data for Wind Engineers, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 36, pp. 119-130, 1990

- 4) 林田英俊、深尾昌一郎、坂井武久、葦崎浩、又木義浩、大竹和夫：大気境界層レーダーによる風の観測、日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1 構造 I)、pp. 125-126、1994
- 5) 菊池雅之、又木義浩、林田英俊：大気境界層レーダーによる台風観測(台風9617号の観測結果)、日本風工学会誌、第71号、pp. 17-18、1997
- 6) S. Vogt and P. Thomas : SODAR - A Useful Remote Sounder to Measure Wind and Turbulence, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 54/55, pp. 163-172, 1995
- 7) Chris Yau and S. C. Kot : Prediction of Turbulence Intensities in a Complex Terrain Using Consensus Winds, Abstract of The Fourth Asia-Pasific Symposium on Wind Engineering, pp. 215-218, 1997
- 8) 伊藤芳樹、永沼剛、小玉亮、花房龍男、佐藤純次、小林隆久、竹内清秀、鈴木富則：ドップラーソーダによる風の観測、日本風工学会誌、第67号、pp. 33-38、1996
- 9) 高倉秀一、赤林伸一、須山喜美：音波を利用した市街地上空の風の実測 沿岸部(新潟市)及び内陸部(新津市)の市街地における鉛直プロファイルの測定結果、日本風工学会誌、第62号、pp. 35-44、1995
- 1 0) 鄭永培、神田順、日比一喜：音波を利用した風の観測-郊外地と市街地における風の観測-、日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1 構造 I)、pp. 1047-1048、1993
- 1 1) 須田健一、佐々木淳、藤井邦夫、小林康之、上江洲清、田村幸雄：ドップラーソーダを用いた地表付近の平均風速の鉛直分布に関する研究、第14回 風工学シンポジウム論文集、pp. 7-12、1996
- 1 2) 日比一喜、神田順、桂順治：ドップラーソーダによる台風時の風速鉛直分布の実測、日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1 構造 I)、pp. 121-122、1994
- 1 3) 神田順、小林文明、伊藤雅保、高倉秀一：複数ドップラーソーダによる大都市上空の強風観測(その1) 全体計画と観測された風速の特徴、第14回風工学シンポジウム論文集、pp. 19-24、1996
- 1 4) 内藤玄一、鄭永培、伊藤芳樹、後藤暁、日比一喜：複数ドップラーソーダによる大都市上空の強風観測(その2) 平均風速、乱れの時空間分布、第14回風工学シンポジウム論文集、pp. 25-30、1996
- 1 5) E. C. C. Choi : Gradient Height and Velocity Profile during Typhoons, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 13, pp. 31-41, 1983
- 1 6) 孟岩、松井政宏、日比一喜：中立時の大気境界層における強風の鉛直分布特性(その2 台風時の強風)、日本風工学会誌、第66号、pp. 3-14、1996
- 1 7) 天野輝久、大熊武司、川口彰久、山本博志、後藤暁：ドップラーソーダによる沖縄における台風時の風観測(その1 ドップラーソーダと超音波風速計の比較)、日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1 構造 I)、pp. 135-136、1995
- 1 8) 山本博志、天野輝久、大熊武司、川口彰久、後藤暁：ドップラーソーダによる沖縄における台風時の風観測(その2 平均風速と乱れ強さの鉛直分布)、日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1 構造 I)、pp. 137-138、1995
- 1 9) 天野輝久、大熊武司、川口彰久、後藤暁：ドップラーソーダによる沖縄における台風時の風観測(その3 台風9503号と9514号の観測結果)、日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1 構造 I)、pp. 107-108、1996
- 2 0) 山本博志、天野輝久、大熊武司、川口彰久、後藤暁：沖縄における台風時の風観測(変動特性の検討)、日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1 構造 I)、pp. 109-110、1996
- 2 1) 福島弘志、天野輝久、大熊武司、川口彰久、山本博志、後藤暁：ドップラーソーダによる沖縄における台風時の風観測(その4 台風9612の観測結果)、日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1 構造 I)、pp. 151-152、1997
- 2 2) 後藤暁、天野輝久、福島弘志、大熊武司、川口彰久、山本博志：ドップラーソーダによる沖縄における台風時の風観測(その5 k値に関する検討)、日本建築学会大会学術講演梗概集(B-1 構造 I)、pp. 153-154、1997
- 2 3) 気象庁：気象要覧、1994~1996
- 2 4) 気象庁：地上気象観測データ、1994~1996
- 2 5) 藤井健、光田寧：台風の確率モデルによる強風のシミュレーション、日本風工学会誌、第28号、pp. 1-12、1986
- 2 6) 時岡達志、山岬正紀・佐藤信夫著：気象の数値シミュレーション、東京大学出版会、pp. 197-210、1993

(1997年11月10日原稿受理、1998年2月3日採用決定)