

超高層建築物の耐風設計に関する研究（その1）

— 強風時の風速の鉛直分布特性 —

後 藤 暁 川 口 彰 久

Wind-resistant Design for High-rise Buildings (Part 1)

— Vertical Distribution of Strong Wind in Typhoons Captured by Doppler Sodar —

Satoru Goto Akihisa Kawaguchi

Abstract

Wind structure in the lower atmosphere is studied observationally by using Doppler sodar. Observations have been carried out in Okinawa since 1994, focusing on the vertical profiles of the mean wind speed under strong wind conditions and comparing the differences of characteristics of wind structures between typhoon and non-typhoon conditions. It is found that the lower atmosphere tends to have a two-layered structure on typhoon days, where the layer with nearly constant wind speed is embedded in the other layer and has a vertical distribution of wind speed that is represented well by power laws. In the layer of nearly constant wind speed, the mean wind speed observed by the Doppler sodar corresponds well with that observed by rawin sonde. At the same time, it shows a good correspondence with the gradient wind speed derived from a theoretical typhoon model. Vertical profiles of mean wind speed under strong, but non-typhoon conditions, have similar profiles to those of the AIJ recommendation, while the lower boundary of the constant velocity layer often has an altitude of less than one hundred meters under typhoon conditions, which is significantly lower than the empirically known gradient height. Application of the results of this study to wind-resistant design of high-rise buildings is also discussed.

概 要

近年、超々高層建物に対応する上空での強風の特性を合理的に評価する試みとして、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注目されている。なかでも、現在の超高層建築物の高さに対応する地上500m程度までの高度については、音波を利用したリモートセンシング装置であるドップラーソーダを用いた観測が各地で行われている。しかし、季節風については良好な観測データが示されているものの、台風時には、襲来数が少ないため、有効な観測データが十分に蓄積されているとはいえない。そこで筆者らは、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による強風時の上空風の観測を開始した。本論では、台風時と非台風時の強風の観測データに基づいて、両者の強風時の10分間平均風速の鉛直分布形状を比較し、その差異について考察した。その結果風速の鉛直分布は、台風時、非台風時ともにべき指数分布を用いて近似することが出来る下層部と、風速がほぼ一定となる上層部とから構成されること、および、台風時には風速が一定となる高さが非台風時の約半分程度となることが分かった。また、台風時には風速が一定となる高さが100m以下になる場合も数多く見られた。このことは、既往の研究を参照すると、新しい知見であることが分かった。

1. はじめに

建築物の超高層化、超々高層化に伴い、風に起因する荷重や建物振動の問題が重要になり、それに伴って設計風速の合理的な評価法の確立が望まれている。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、さらに

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。また、それらの評価は、長くても60～70年程度の観測データに基づいているため、構造評定用に用いられる再現期間100年(レベル1)、500年(レベル2)の設計風速については過大評価ではないかという指摘もある。一方、我が国での強風は台風によるものがほとんどであるが、襲来数が少ないことや、気象予測を本来の目的とする気象官署の観測結果では台風による短時間内の気

象変化に対応できないこと等の理由から、強風時の風の空間分布や乱れの特徴の把握は不十分である。その補完手法として、過去の上陸台風の性質を確率分布によりモデル化し、仮想台風を発生させるシミュレーション手法²⁾が注目されている。その際、台風域内での強風構造のモデル化が重要となるが、孟他³⁾は大気境界層の数値モデルを構築して検討を行っており、台風の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ことを示している。しかしながら、従来から用いられてきた観測機器では風速の鉛直分布を容易に観測できるものが少なく、実現象とモデルとの十分な比較は行われていない。Choi⁴⁾はレーウィンゾンドの観測値から、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、装置の機能上地上1kmまでは数高度でしかデータを収録できなかった。

近年、風速の鉛直分布をとらえる観測手法として、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。特に、地上数十m~500m程度までは音波を用いたリモートセンシング装置であるドップラーソダを用いた観測が各国でも行われており⁵⁾⁶⁾、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までも良好な観測値が報告されている⁷⁾。しかしながら、季節風に関しては各所で観測が行われ^{例えば8)9)}、ある程度の知見も得られているが、台風時に関しては効果的に観測された例はまだ少ない。日比他¹⁰⁾が潮岬での約2時間半の台風観測の結果を報告し、また、神田他¹¹⁾、内藤他¹²⁾は東京都内で4台のドップラーソ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が、十分に実測結果が蓄積されたとは言いがたい。したがって、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ついては、明解な知見を得るまでには至っておらず、検討課題となっているのが現状である。

このような現状認識のもとで、著者らは、合理的な風荷重が評価できる高精度な設計風の予測法を確立することを目的として、強風時、特に台風時の鉛直分布特性について知見を得るために、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ダを設置し、台風時および低気圧通過時などの非台風時強風の上空風の観測を行ってきた¹³⁾。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ドの観測結果¹⁴⁾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した。

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。

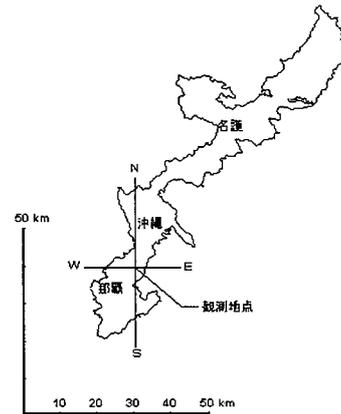


Fig. 1 観測位置
Site of Observation



Photo 1 ドップラーソダ
Doppler Sodar

設置地点の海拔は約124mである。周囲には2~5階建の建物が散在している。設置地点の南東側は1~2km離れたところから急激に標高が下がり、畑、住宅、工業用地となり数kmで海岸に達する。北西側はなだらかに標高が下がっており数kmで海岸に達している。また、北東、南西側は設置地点との標高差はあまりないが、観測地周辺で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。観測位置をFig.1に、設置状況をPhoto1に示す。

ドップラーソ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9°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測定用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測定した。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

Table 1 各台風の概要
Outline of Observed Typhoons

台風	観測日	最大風速 (m/sec)	中心気圧 (hPa)	中心付近の最大風速 (m/sec)	暴風半径 (km)	台風の大きさ	沖縄本島からの距離	観測ケース数
9426	94/9/27 ~9/28	16.3	935	45	220	大型	東側約500km	97
9503	95/7/20 ~7/22	19.4	960	30	90	中型	西側約100km	37
9612	96/8/12 ~8/13	27.0	960	35	190	中型	沖縄本島を通過	38
9621	96/9/28 ~10/1	20.3	955	40	190	中型	本島北方海上を通過	216

(最大風速は超音波風速計(地上40m)の10分間平均値)

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⁹⁾もあるが、とりわけ特異な風速値は認められなかったため、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 観測事例の概要

観測は1994年9月から行われており、1999年3月現在で、14個の台風(94年:2個, 95年:2個, 96年:4個, 97年:5個, 98年:1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Fig. 2に、気象庁発表のデータ¹⁵⁾に基づく台風の概要をTable 1に示す。

一方、非台風時の観測データは、97年7月7日14:10~17:30(20ケース)、97年11月25日13:50~17:00(20ケース)、98年1月24日13:40~17:00(21ケース)の計61ケースの観測ができた。なお、各観測とも1ケースの評価時間は10分間である。また、降雨が多い時間帯ではドップラーソーダの観測値が乱れる¹³⁾ため、降雨強度が0.5mm/h以下の場合についてのみ解析を行った。

3.2 台風モデル

台風時の風速のモデルは藤井他²⁾の方法に従った。すなわち、(1)式で示す傾度風平衡式、(2)式のBlatonの公式、および(3)式のSchloemerの気圧分布式を連立させて傾度風速 U_{GR} を計算した。

$$U_{GR}^2 / r_l + f \cdot U_{GR} = (1/\rho) \cdot (\partial p / \partial r) \dots\dots (1)$$

$$1/r_l = (1/r) \cdot \{1 + (C/U_{GR}) \sin \alpha\} \dots (2)$$

$$p = p_c + \Delta p \cdot \exp(-r_m/r) \dots\dots\dots (3)$$

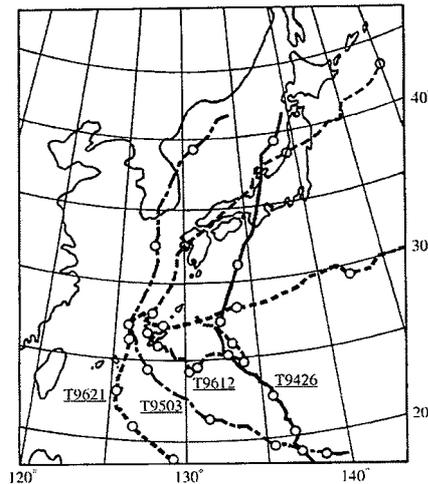


Fig. 2 台風経路図
Course of Typhoons

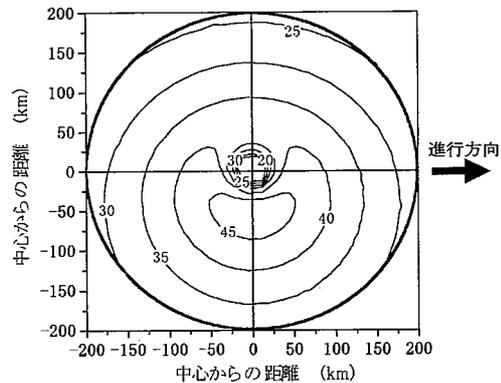


Fig. 3 傾度風速の分布
Horizontal Distribution of Gradient Wind

ここで、 r_l は空気塊の曲率半径であり、(2)式で示される。 f はコリオリパラメータ、 ρ は空気密度、 r は台風中心から風を推算する場所までの距離、 C は台風の進行速度、 α は台風中心から風を推算する場所へ向く速度ベクトルが気圧場の進行方向となす角度、 p は推算位置での海面気圧、 p_c は台風の中心気圧、 Δp は中心気圧低下量(本論では $1013 - p_c$ とした)、 r_m は台風域内で旋衡風速が最大となる r の値である。Fig. 3 に傾度風速の平面分

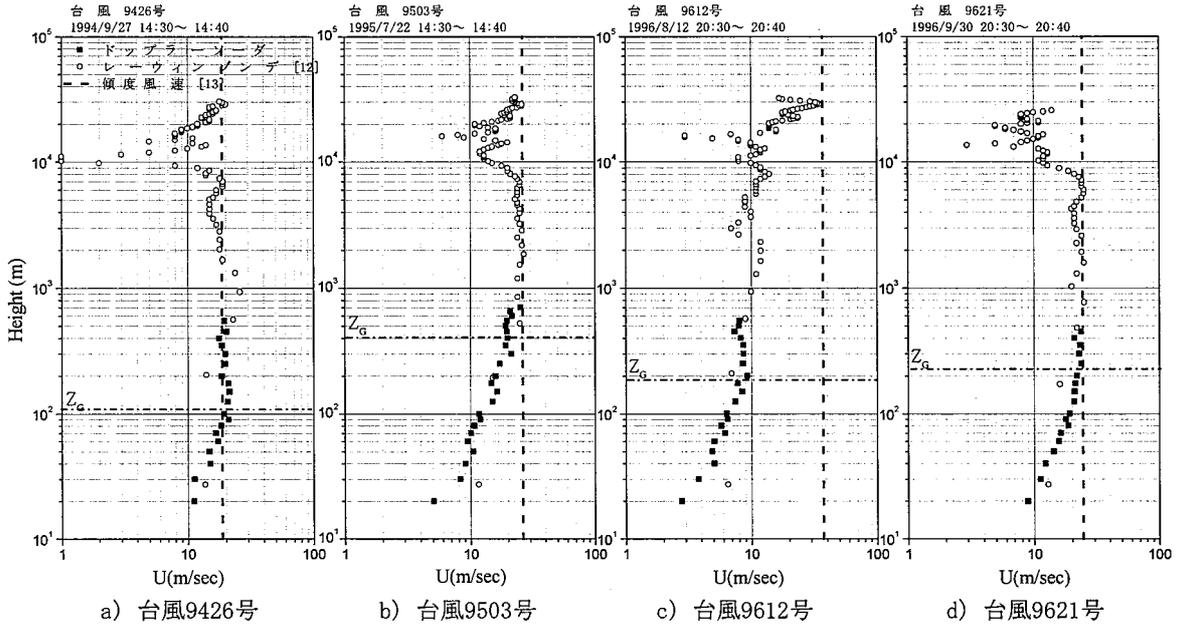


Fig. 4 風速の鉛直分布
Wind Profile in Typhoon

布の一例を示す。

3.3 平均風速の鉛直分布

Fig. 4 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¹⁴⁾ (1分平均値, 上昇速度: 約500m/min) である。また、図中の一点鎖線(横線)はドップラーソーダのデータから最小二乗法により求めた風速が一定となる高さであり、破線(縦線)は、前節で仮定した台風モデルから計算した傾度風速である。

台風の位置, 中心気圧, 移動速度, 方向など計算に用いたパラメータは, 気象庁発表の3時間毎のデータ¹⁵⁾から推定した。また, 各台風の r_m は, 気象台における気圧の観測記録¹⁶⁾を最小二乗法により(3)式の気圧分布式に近似させて定めた。 Δp , r_m の値をTable 2 に示す。

Fig. 4 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と特に高くなっているが, 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)での風速, α をべき指数として,

$$U_z = U_G (Z/Z_G)^\alpha \dots\dots\dots (4)$$

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

Table 2 計算パラメータ
Parameter of Calculation

	Δp (hPa)	r_m (km)
台風9426号	7 8	8 6
台風9503号	5 3	6 1
台風9612号	5 3	1 2 1
台風9621号	5 8	8 7

て, 台風モデルにより求めた傾度風速とも良く一致している。9612号での差違は, 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, 擾乱が激しく仮定している台風モデルが実現象を十分にとらえていないためと考えられる。

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。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。

3.4 Z_G の分布特性

前節で示したように, 風速が一定となる高度が非常に低い場合が認められた。そこで, (4)式において鉛直分布形状を決定するパラメータである α や Z_G の分布について, Table 1 で示す台風時の全観測データに基づいて検討を行った。同様に非台風時の全ての観測データについても検討を行い, 台風時との比較を行った。

各々の10分間平均風速の鉛直分布を最小二乗法で近似して α , Z_G を求めた。なお, べき法則の適用が可能なものについて近似を行い, 風速が一定となる高さが観測高度より高く, 観測された範囲内では決定できないものは下層部のべき指数のみ近似した。

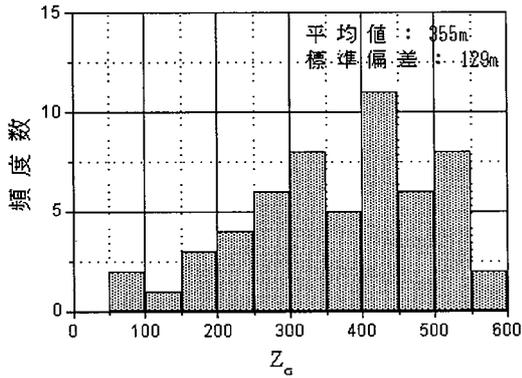


Fig. 5 Z_G の頻度分布 (非台風時)
Frequency of Z_G (Non-Typhoon)

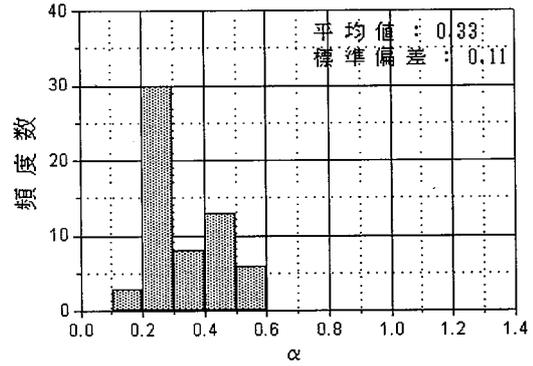


Fig. 7 α の頻度分布 (非台風時)
Frequency of α (Non-Typhoon)

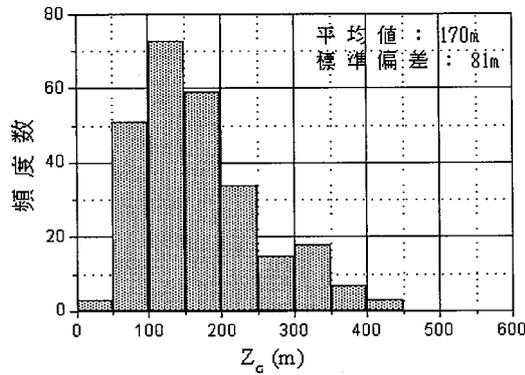


Fig. 6 Z_G の頻度分布 (台風時)
Frequency of Z_G (Typhoon)

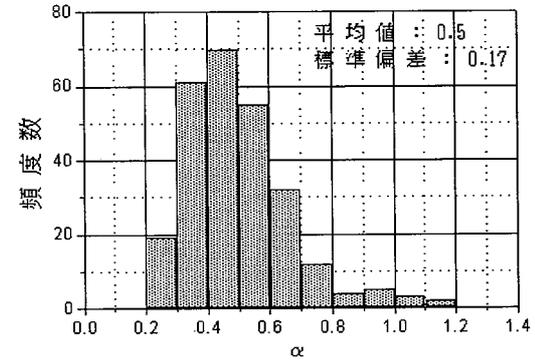


Fig. 8 α の頻度分布 (台風時)
Frequency of α (Typhoon)

全データのうち、台風時には約70%、非台風時には約95%のケースに対して近似が可能であった。

非台風時の Z_G の頻度分布をFig. 5に、台風時のそれはFig. 6に示す。非台風時には Z_G は全体的に広い分布になっており、 Z_G が100m以下まで降りてくる場合が見られる。平均値は355mであり、 $Z_G=400m\sim 450m$ での頻度が最も高い。台風時の平均値は170mであり、100m~150mでの頻度が最も高く、50mから200mの間で全体の70%を占めている。平均値で比較すると、台風時の風速が一定となる高さが非台風時の約半分程度になっていることが分かる。標準偏差はそれぞれ129m、81mであり、台風時より非台風時のほうがばらつきが大きい。

Fig. 7, Fig. 8にべき指数 α の頻度分布を示す。Fig. 7に示すように、非台風時では平均値は0.33、標準偏差は0.11である。全体の約50%が $\alpha=0.2\sim 0.3$ の範囲内にあり、集中した分布形となっている。また、建築学会指針で示されるべき指数とはほぼ合致した値になっている。一方、Fig. 8に示す台風時には α の平均値は0.5、標準偏差は0.17であり、非台風時に比べてべき指数の値が大きい。 α は0.2から大きい場合1.0を越える場合も3ケース認められたが、 $\alpha=0.4\sim 0.5$ の範囲を中心に全体の約7割が0.3~0.6の中で広く分布している。この結果は、非台風時のべき指数が地表面粗度によって生じる摩擦の影響でほぼ決定されるのに比べ、台風時でのそれは内部での潜

熱放出によって引き起こされる上下混合に大きく影響されている可能性があることを示している。しかし、これまでの観測データだけではこのような分布形が生じるメカニズムを明らかにするのは難しく、さらに観測データを収集しながら詳細に調査する必要があると思われる。

4. おわりに

台風時の強風構造の把握を目的として、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、ドップラーソナー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個の台風および非台風時の観測データを10分間平均風速の鉛直分布に着目して検討を行った。その結果、以下のようなことが分かった。

- 1) 平均風速の鉛直分布は、べき指数分布を用いて近似することが出来る下層部と、風速がほぼ一定の上層部とからなる。
- 2) 非台風時、台風時とも風速が一定となる高さ Z_G が非常に低くなる場合がある。特に台風時には Z_G が100mより低くなる場合がよく見られる。
- 3) 平均値で比較すると、非台風時の Z_G が建築学会指針で示される値と同程度であるのに対し、台風時では Z_G はその約半分程度となる。
- 4) 台風時は非台風時に比べてべき指数 α の値が大きい。

非台風時のべき指数が地表面粗度によって生じる摩擦の影響でほぼ決定されるのに比べ、台風時には台風内部の上下混合の影響も考えられる。

本論から得られた知見は、Fig. 9 に示すように、学会指針を適用して上空の風速を予測した場合に比べ、高高度での風速を低減できる可能性を示唆するものである。さらに設計風速を精度良く予測するためには風速の平均成分だけでなく、変動成分についても検討を行っていき、台風時の強風特性について解明する必要がある。また、他地域においても強風観測を行い、さらに知見を深めていくことが今後の検討課題と思われる。

謝辞

本研究を遂行するに当たり、琉球大学工学部天野輝久教授、福島弘志助手、神奈川大学工学部大熊武司教授に多大なるご指導・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) 藤井健，光田寧：台風の高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
- 3) 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
- 4) E. C. C Choi：Gradient Height and Velocity Profile during Typhoons, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 13, pp. 31-41, 1983
- 5) 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
- 6) Chris Yau and S. C. Kot：Prediction of Turbulence Intensities in a Complex Terrain Using Consensus Winds, Abstract of The Fourth Asia-Pacific Symposium on Wind Engineering, pp. 215-218, 1997
- 7) 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
- 8) 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

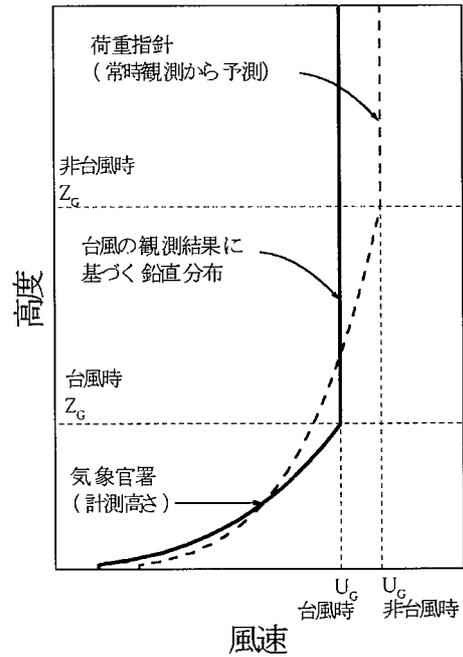


Fig. 9 観測結果から予想される鉛直分布の概念図
Wind Profile Expected by Observations

- (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
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 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
- 13) 後藤暁，天野輝久，大熊武司，川口彰久：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—，日本建築学会構造系論文集，第509号，pp. 41-48, 1998
- 14) 気象庁：高層気象観測データ，1994~1996
- 15) 気象庁：気象要覧，1994~1996
- 16) 気象庁：地上気象観測データ，1994~1996