

ウィンドプロファイラを用いた台風の観測

OBSERVATIONS OF STRONG WINDS FROM THE SUPER TYPHOON(T9713)
BY DOPPLER BOUNDARY LAYER RADAR北村 康司¹⁾・孟 岩²⁾・増田 悦久³⁾・津嘉山 正光⁴⁾・仲座 栄三⁵⁾Yasushi Kitamura¹⁾ Yan Meng²⁾ Yoshihisa Masuda³⁾ Seiko Tukayama⁴⁾ Eizo Nakaza⁵⁾

ABSTRACT

Many empirical models for estimation of typhoon wind have been proposed. The verifications of them, however, are not enough. Because there is a lack of detailed data of strong winds from the typhoons in its peak period.

A super typhoon(T9713) was nearing and passing over the Okinawa Islands in Japan, during Aug. 15 to 20 in 1997. The typhoon had very interesting distribution of atmospheric pressure and strong wind in the space. During its peak, the authors succeeded in measuring of the wind from the typhoon by a Boundary Layer Raider(so called a Wind Profiler).

A semi-theoretical model for the vertical distribution of wind in a typhoon, proposed by Meng et. al. (1996), has been examined by the observed data. The estimated values of wind speed and wind direction from Meng's models showed good agreement with the observed data.

Key Word: typhoon, pressure, Wind, Wind Profiler

1. はじめに

最近, 超高層建築物や長大な橋梁などが建設されるにいたり, 高層までの精度の高い風速分布の予測が求められると同時に, 500年を超えるような再現期間の風速が要求されるようになってきた。また, 波浪予報や大気中塩分濃度あるいは大気の水蒸気量の予測には, 広い空間にわたる高精度の地上風予測の確立が急がれている。

台風に伴う強風の鉛直分布に対する理論や予測式は数多く提案されている。中でも孟ら(1996)の理論は, 流体運動の基礎式である Navier-Stokes の方程式から出発していながら, 極めて利用しやすい形のものとなっている。これまで数多く提案され, さらに実用に供されてきた経験式などは, 観測データ不足などから十分な検証が行なわれていない。特に, 台風最盛期における高層観測データは少なく, 精度良い観測データの蓄積と既存の経験式などの検証が急務とされている。

本研究では, 低層大気観測用レーダ(ウィンドプロファイラ)を用いて最盛期の台風時の風の観測を行い, 台風に伴う強風の鉛直分布に関するデータを得るとともに, そのデータを用いて既存の強風に対する算定式を検証することを主たる目的としている。

1), 3) 郵政省総合通信研究所沖縄電波観測所 研修生, 所長 沖縄県中城村久場台城原 829-3

2) 清水建設(株) 技術研究所 研究員 工博 東京都江東区越中島3丁目4番17号

4), 5) 琉球大学工学部環境建設工学科 教授, 助教授 沖縄県中頭郡西原町1番地

2. 観測概要

2.1 観測地点

観測位置を図-1に示す。観測点 St.1は、沖縄本島中城村内の郵政省総合通信研究所沖縄電波観測所に位置する。この位置は沖縄本島を横断する断面で見ると、ほぼ最高峰にある。低層大気観測用レーダ(ウィンドプロファイラ)およびソーダを用いた高層観測は全てこの場所で行なった。St.2は、那覇気象台の位置である。地表風、気圧およびゾンデの観測データとしてはこの那覇気象台で観測されたものを用いた。

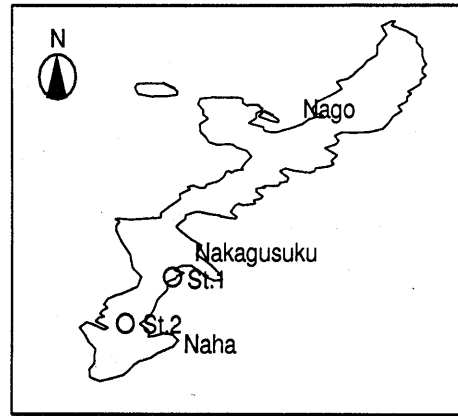


図-1 観測位置

2.2 観測機器

観測に用いた沖縄電波観測所が所有するウィンドプロファイラの概観を写真-1に示す。このウィンドプロファイラの主な仕様を表-1に記す(増田, 1992)⁽¹⁾。ウィンドプロファイラは観測中、最低高度 150 m、距離分解能を 150 m とし、時間分解能 5 分に設定した。

ソーダの概観を写真-2に示す(REMTECH 製 PA-2型ドップラーソーダ)。ソーダによる観測は、最低高度 40m、最大観測高度約 400m、サンプリングタイム 10 s、距離分解能 20m の条

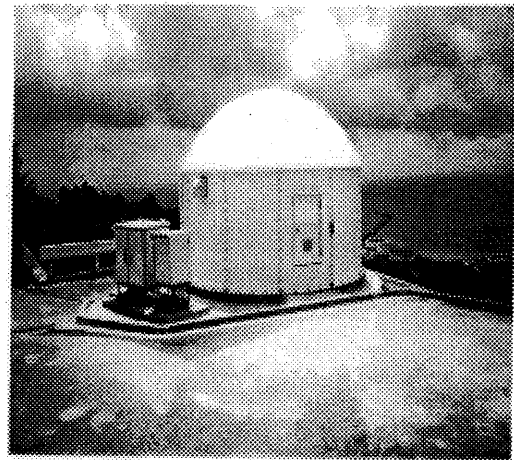


写真-1 ウィンドプロファイラの概観

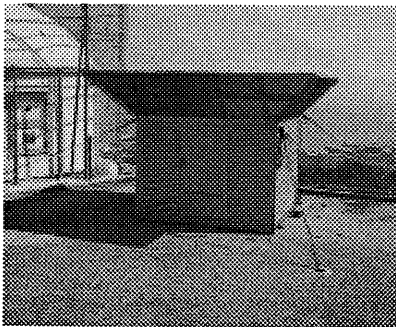


写真-2 ソーダの概観

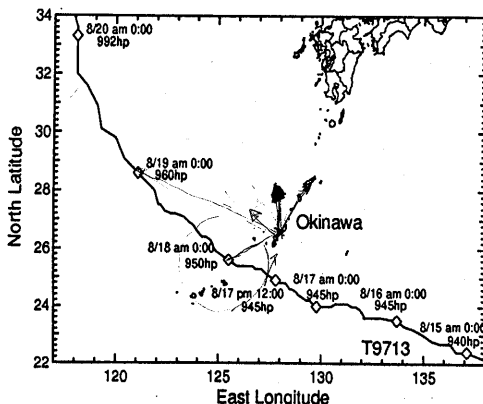


図-2 台風 9713 号の経路

件の下で行った。

表-1 ウィンドプロファイラの主な仕様	
電波周波数: 1.3275GHz	送信ピーク電力: 1KW
最大平均電力: 50W	利得: 33.5dbi
アンテナ: パラボラアンテナ ビーム幅: 4°	
ビーム走査: 北, 東, 鉛直	
最大観測高度, 3Km 以上	
距離分解能: 75 m, 150 m, 300 m	
パルス繰り返し: 40 ~ 100 μs 可変	

2.3 観測期間

観測は台風 9713 号が沖縄地方に接近した 1997 年 8 月 15 日～8 月 20 日に行った。ただしウィンドプロファイラによる高層観測は台風の影響による停電のため 15 日深夜までとなった。

図-2に台風 9713 号のコースを示す。台風 9713 号は超大型で非常に強い台風であり、またそのコースは直線的であり、沖縄本島の南海上を通過する際には進行速度および中心気圧ともほぼ定

常状態であった。台風9713号が沖縄本島最接近時には、那覇で最大瞬間風速51.4m/sを記録した(1997年8月17日17時)。

写真-4に台風9713号のひまわり画像を示す(16日)。この写真に示すように、台風9713号の目は非常に大きく、図の外側の雲の環とは別に、目の内側にはドーナツ状の雲がみられた。

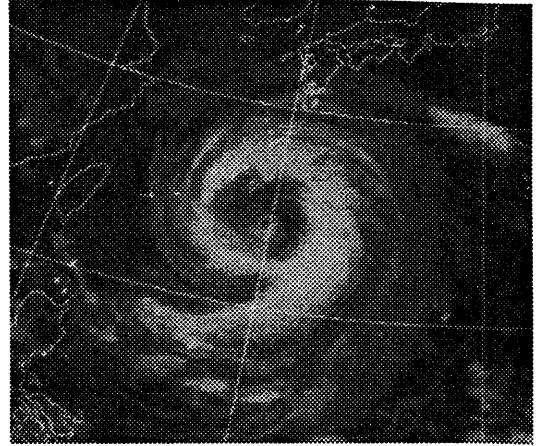


写真-4 ひまわり画像(1997年8月16日)

3. 理論

台風内の気圧場と傾度風との関係は、円筒座標系表示のNavier-Stokesの運動方程式より適当な仮定のもとに式(1),(2)で与えられる(孟ら, 1993)⁽²⁾。

$$v_{\theta} = \frac{c_{\theta} - fr}{2} + \sqrt{\left(\frac{c_{\theta} - fr}{2}\right)^2 + \frac{r}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}} \quad (1)$$

$$v_{r} = 0 \quad (2)$$

ここに、 v_{θ} は自由大気中の風速であり、 ρ は大気密度、 f はコリオリ因子であり、 r は台風中心からの距離であり、 c_{θ} は台風の移動速度の θ 方向の成分である。(2)式における v_{r} は軸方向の分速度である。座標系の取り方を図-3に示す。

台風に伴う気圧の平面分布は、観測データなどから次式のような形で与えられるのが一般的である(Holland, 1980) $\Delta p \propto \exp\left[-\left(\frac{r}{r_m}\right)^B\right]$

$$(3)$$

ここで、 p_c は台風の中心気圧、 Δp は台風の周囲の気圧と台風中心気圧との差を表し、 r_m は旋衡風速が最大となる半径である。この式は $B=1$ のときSchloemer⁽⁷⁾の実験式となり、現在よく用いられている。

大気境界層内の風速分布は、式(1),(2)から求まる傾度風を基にNavier-Stokesの方程式から理論的に求められる。この時、問題となるのが乱流拡散係数の与え方であるが、孟ら^{(3),(4)}はMellor and Yamada(1974)⁽⁵⁾の乱流拡散クロージャーモデルを用いている。彼らの数値計算によって提案された境界層内の風速と風向の分布は式(4),(5)で与えられる

$$\frac{U(z)}{U_s} = \left(\frac{z}{z_s}\right)^{\alpha_u} \quad (4)$$

$$\gamma(z) = \gamma_s(1.0 - 0.4z/z_s)^{1.1} \quad (4)$$

$$z_s = 0.06 \frac{U_s}{f_s} (\log R_{00})^{-1.45} \quad (5)$$

$$\gamma_s = (69 + 100\xi)(\log R_{00})^{-1.13} \quad (6)$$

$$\alpha_u = 0.27 + 0.09 \log z_0 + 0.018 (\log z_0)^2 \quad (7)$$

$$+ 0.0016 (\log z_0)^3 \quad (8)$$

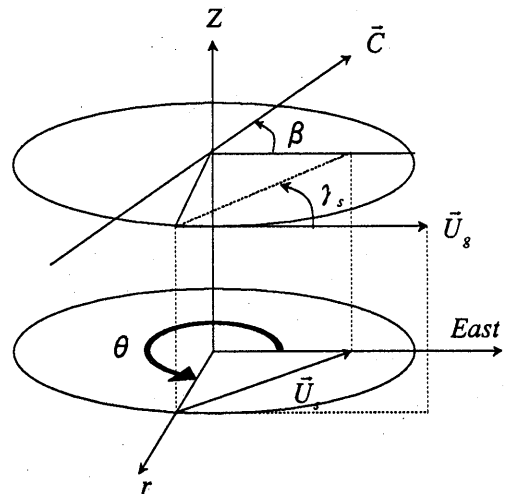


図-3 座標軸の定義

ここで、 Z は地表面からの距離、 $U(z)$ は風速、 $\gamma(z)$ は風向、 z_s は傾度風高さ、 α_u は平均風速のベ

き指数, $v_{\theta g_0}$ は地表面粗度であり, γ_s は地表風の角度である. また $\frac{d}{dr} + f$ (9)

$$f_\lambda = \left(\frac{dv_{\theta g}}{dr} + \frac{v_{\theta g}}{r} + f \right)^{1/2} \left(2 \frac{v_{\theta g}}{r} + f \right)^{1/2} \quad (10)$$

ここで f_λ は渦度の次元をもつパラメータで, ξ は渦度の次元をもつ物理量の比からなる無次元パラメータ, $R_{oi} (= U_s / f_\lambda z_0)$ はロスビー数である.

4. ウィンドプロファイラを用いたリモート観測データと直接観測データとの比較

高層大気の直接的な観測は非常に難しく, 特に台風時など強風時の観測は殆ど行われていない. 気象台では, 通常観測の一環としてゾンデを用いた高層大気の観測を実施している. ここでは, 気象台のゾンデによるデータとウィンドプロファイラによるデータとの比較を通してリモート観測装置の特性を把握する.

図-4および5に, ゾンデによる観測データ(実線)とウィンドプロファイラによるデータ(○印)との比較を示す. ウィンドプロファイラのデータが10分間の平均であることを考慮すれば, 高度2000 m以下においては風速・風向ともに比較的一致していると言える.

図-6に, ソーダによるデータ(●印)とウィンドプロファイラによるデータ(○印)との比較を示す. 観測で用いたソーダは, 気象庁の高層観測タワーのデータで約200 m程度まで信頼できることが確認されている. ソーダのデータとウィンドプロファイラのデータとは高度約150 mの位置で接続するような形となっている. ソーダのデータは高度約300 mで, ウィンドプロファイラのデータから大きく

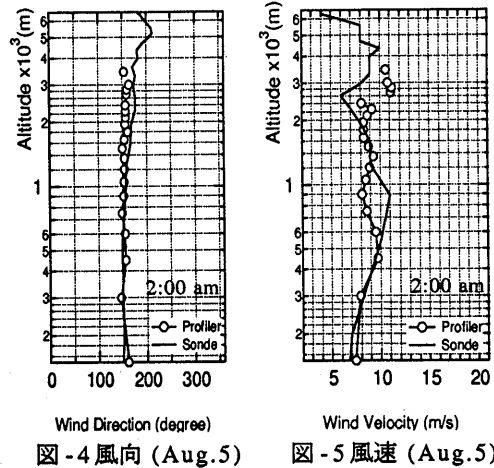


図-4 風向 (Aug.5) 図-5 風速 (Aug.5)

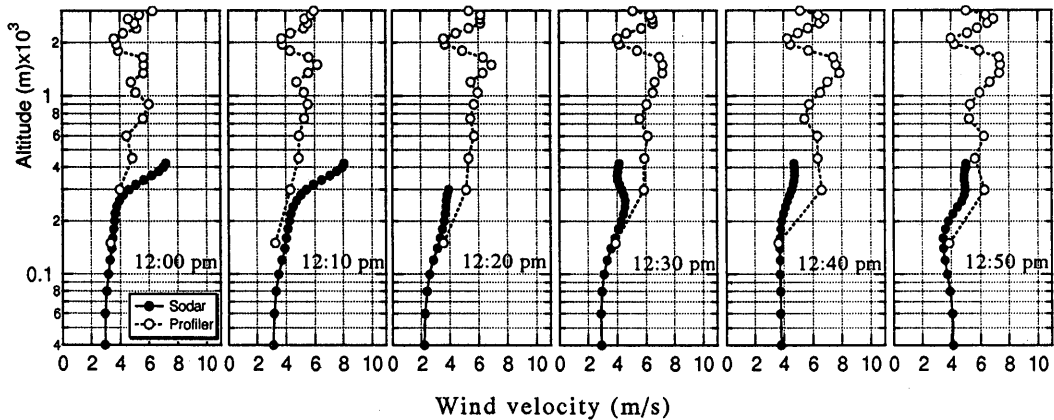


図-6 ウィンドプロファイラとソーダによるデータとの比較 (Aug. 4)

離れるようになっており, 本観測で用いたソーダの観測限界がこの高度あたりにあることが分かる.

5. 観測データによる大気境界層内の風速分布算定式の検証

5.1 鉛直分布式の検証

図-2に示したように, 台風コースは接近から通過まで直線的であり, かつその勢力はほぼ一定値を保った. すなわち, 台風の位置の移動を除いて定常的なものであった. この条件は, 例えば上述の孟らの理論解析の際に導入した物理的な仮定をほとんど満足するものであり, その意味において得られたデータは, 既存の風速分布算定式を検証するには貴重なものとなった.

図-7に, (4)式による風速分布の計算値(実線)と観測値(○印)との比較を示す. また破線で傾度風 U_s 値を示した. 計算値のプロットは傾度風高さまでとした. 風速分布の観測値と計算値とはいずれも良く一致している. また, 傾度風高さおよび傾度風もほぼ一致していると言える.

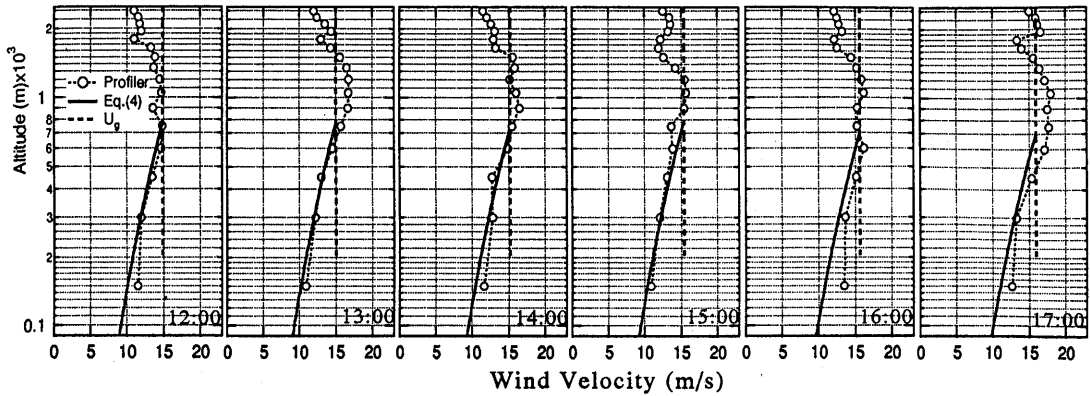


図-7 観測値と計算値との比較 Aug. 15

5.2. 地上風の空間分布に関する検討

地上風の検討は那覇气象台のデータを用いた。那覇气象台における地上風の観測高さは47.5 mであったため、地上風の定義高度は47.5 mとした。また地表面粗度 z_0 は那覇气象台周辺の地理的状況から1.0mと仮定した。

孟ら(1996)の理論展開に従えば、気圧分布をSchloemerの式あるいはHollandの式を適用して気圧の空間勾配を求め、それより台風に伴う傾度風が求まる。この値を基に、地表風は式(4)～(5)より求まることになる。しかし、気圧の分布式に含まれている最大旋衝風速半径などの経験パラメータを那覇气象台の観測データから最小二乗法により同定した式(3)のBの値は0.78～1.46の範囲で変化した。

図-8および9に、気圧の空間分布に対する観測値(那覇气象台)と計算値との比較を示す。全体的にはHollandの式を用いた場合においては台風接近時および最接近時いずれにおいても観測値と計算値は良く一致している。しかし、最接近時にはSchloemerの式から求めた計算値は観測値を再現できず特に気圧勾配を過小評価している。

図-10および11に、地上風の風速と風向について観測値と計算値との比較を示す。気圧分布式としてSchloemer式を適用した場合は最接近時において観測値を低めに予測している。その理由としては、最接近時の気圧場(図-9)をSchloemerの式では再現できないところにある。Hollandの式を適用した場合には、接近、最接近時のいずれにおいてもよく一致している。このような最盛期の台風においてはHollandの式を使うのが妥当であると言える。

風向については、台風接近時に非常に観測値と計算値との対応が良く、通過後一致度が悪くなって

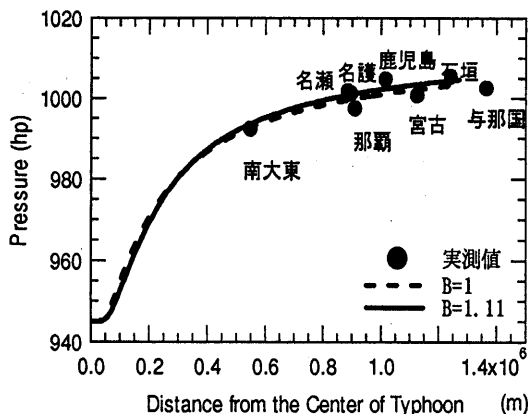


図-8 気圧の観測値と計算値との比較 (Aug. 15 12:00)

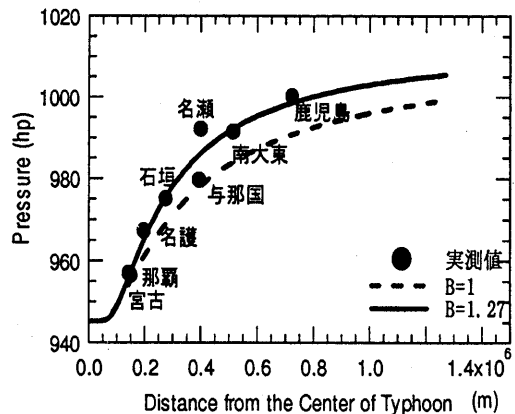


図-9 気圧の観測値と計算値との比較 (Aug. 17 18:00)

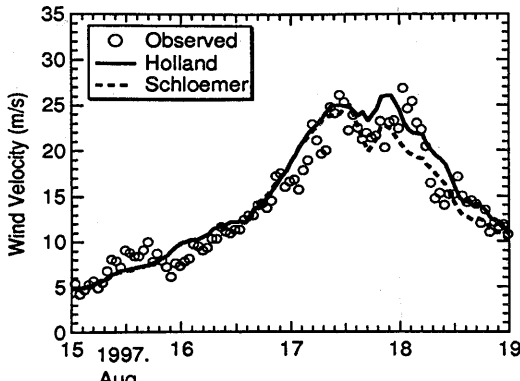


図-10 風速の観測値と計算値との比較

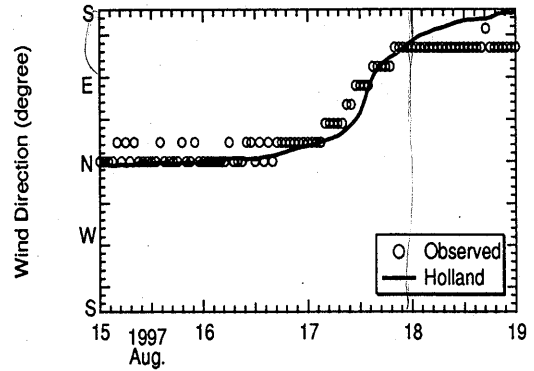


図-11 風向の観測値と計算値との比較

いる。この理由は現時点では明らかでない。

6. 結論

本研究では、ウィンドプロファイラを用いた観測データおよび気象台の地上風データを用いて、台風に伴う強風の鉛直分布を含む空間分布を調べた。超大型の台風でしかも最盛期のデータを立体的に捉えた例はあまり無く、その意味において得られたデータは貴重なデータといえる。このデータ解析から以下の成果を得た。

- (1) 台風9713号は、超大型の台風であり、しかもその気圧分布は“なべ底型”を呈し極めて希なものであった。さらに観測期間中は台風の最盛期にあたり、台風中心気圧や進行方向は長時間にわたりほぼ一定であった。そのため、台風は準定常とみなせ、得られたデータは既存の理論などを検証するに極めて貴重なものとなった。
- (2) 台風に伴う風の鉛直分布や地表風の予測式として孟らの提案式を取り上げ、その検証を行った。鉛直分布に対する計算値は観測値と良く一致した。また、地上風に対する計算値は台風の接近から通過にかけて観測値と良く一致する。風向に関しては、台風接近時に計算値と良く一致するものの、台風通過後観測値と合わなくなる傾向を示した。
- (3) ウィンドプロファイラの精度に関しては、ソーダやゾンデのデータとの比較で検討を行った。今後、詳細な観測データを蓄積するとともに、理論計算精度の向上とウィンドプロファイラの機能および精度の改良を行う予定である。

本研究の遂行にあたり、琉球大学 宇座 俊吉(技官)、電波観測所 足立 樹泰(研究官)のご協力を得た。また、本研究の一部には、文部省科学研究費(代表: 仲座 栄三、課題番号: 09450189)の援助を受けた。ここに記し、感謝の意を表します。

7. 参考文献

- 1) 増田悦久, 岡本謙一, 中村健治, 井原俊夫, 大西勉 : 低層大気観測用レーダの開発, 日本リモートセンシング学会誌 Vol.12, No.1, 1992, pp43-56.
- 2) 孟岩, 松井正宏, 日比一喜 : 台風に伴う強風場を求めるための解析モデルの提案, 日本風工学会誌 第57号, 1993, pp1-14.
- 3) 孟岩, 松井正宏, 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1 非台風時の強風, 日本風工学会誌 第65号, 1995, pp1-15.
- 4) 孟岩, 松井正宏, 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, 1996, pp3-14.
- 5) G.L.Mellor and Yamada: A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layer, *J.Atmos. Sci.*, Vol.31, 1974, pp.1791-1804.
- 6) Holland, G.J.: An analytic model of the wind and pressure profiles in Hurricanes. *Monthly Weather Review*, Vol.108, No.8, August 1980, pp.1212-1218.
- 7) Schloemer, R.W.: Analysis and synthesis of Hurricane wind patterns over Okeechobee, Florida. *Hydrometeorological Report*, No.31, 1954, 49pp.