

台風に伴う強風場についての理論解析

A theoretical analysis on the wind field in the typhoon boundary layer

孟 岩*、松井正宏†、日比一喜‡

Yan MENG, Masahiro MATSUI, Kazuki HIBI

1. はじめに 本研究では移動する台風に伴う強風場についての新しいモデルを提案し、その近似解を導出した。更に、この近似解を用いて台風 T9109 と T9119 の観測データ (風速、風向) をシミュレーションし、新しい台風モデルの妥当性を検討した。

2. 台風に伴う強風場の近似解の導出 移動する台風に伴う低気圧の等圧線が台風を中心に対して同心円状に分布していることが観測からよく知られており、この気圧分布を近似するための式としては R.W.Schloemer の実験式 ($p = p_c + \Delta p \times \exp(-\frac{r}{r_m})$) がよく用いられている。ここで、 p_c は台風を中心気圧、 Δp は台風の周囲の気圧と台風中心気圧のとの差を表している。 r_m は旋衡風速が最大となる半径である。

一方、台風に伴う強風場を支配する運動方程式は、強風時の大気境界層が中立にあると仮定し、次のようになる。

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - f \vec{k} \times \vec{v} + \vec{F} \quad (1)$$

ここで、 ρ は空気の密度、 f は Coriolis parameter、 \vec{F} は粘性項で、鉛直方向の渦粘性のみを考慮する。また、台風スケールの運動では、鉛直移流項を他の移流項に比べて小さく、静水圧近似が成り立っていると考える。式(1)を解析的に解くため、本研究では次のように考えた。1) 台風に伴う風速 \vec{v} は、粘性を無視した自由大気中の風速 \vec{v}_g (FFW: Friction Free Wind) と地表面の粘性によって作られた成分 \vec{v}' との和で表すことができる。2) FFW \vec{v}_g のパターンは保存されたままに台風の進行速度 \vec{c} で移動する、従って、 $\frac{\partial \vec{v}_g}{\partial t} = -\vec{c} \cdot \nabla \vec{v}_g$ となる。3) 粘性による成分 \vec{v}' については準定常仮定が適用でき、すなわち、 $\frac{\partial \vec{v}'}{\partial t} = 0$ とする。これらの考え方にに基づき、運動方程式(1)を次のような二つの式に分ける。

$$(\vec{v}_g - \vec{c}) \cdot \nabla \vec{v}_g = -\frac{1}{\rho} \nabla p - f \vec{k} \times \vec{v}_g \quad (2)$$

$$\vec{v}' \cdot \nabla \vec{v}' + \vec{v}' \cdot \nabla \vec{v}_g + \vec{v}_g \cdot \nabla \vec{v}' = -f \vec{k} \times \vec{v}' + \vec{F} \quad (3)$$

式(3)についての境界条件としては、次のように考える。上空では

$$\vec{v}' |_{z' \rightarrow \infty} = 0 \quad (4)$$

を与え、地表では drag force と地表面でのせん断力とバランスする条件を用いる。

$$\rho k_z \frac{\partial \vec{v}'}{\partial z} |_{z'=0} = \rho C_d |\vec{v}_0| \cdot \vec{v}_0 \quad (5)$$

ここで、 \vec{v}_0 は地表での風速を表し、 k_z は鉛直拡散係数、 C_d は抵抗係数である。また、地表面近傍では対数分布が成り立つとすると、 C_d と粗度長 z_0 との関係が得られる

$$C_d = \kappa^2 / [\ln((z_1 + h - d)/z_0)]^2 \quad (6)$$

ここで、 κ は Karman 定数、 $d (= 0.75h)$ は零面変位、 h は粗度要素の平均高さ、粗度長 z_0 との関係は Lettau の式 ($h = 5.6 z_0^{0.86}$) を用いて表した。 z_1 は 10m とし、また、 $z' = 0$ の高さは $h + 10$ にある。

移動する台風に伴う気圧場が台風を中心に対して軸対称であるため、円柱座標系を用いるのが便利である。運動方程式(2)は次のようになる。

$$(v_{rg} - c_r) \frac{\partial v_{rg}}{\partial r} + \frac{(v_{\theta g} - c_{\theta})}{r} \frac{\partial v_{rg}}{\partial \theta} - \frac{v_{\theta g}^2}{r} + \frac{v_{\theta g} c_{\theta}}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + f v_{\theta g} \quad (7)$$

$$(v_{rg} - c_r) \frac{\partial v_{\theta g}}{\partial r} + \frac{(v_{\theta g} - c_{\theta})}{r} \frac{\partial v_{\theta g}}{\partial \theta} + \frac{v_{\theta g} v_{rg}}{r} - \frac{v_{rg} c_{\theta}}{r} = -f v_{rg} \quad (8)$$

ここで、 $(v_{rg}, v_{\theta g})$ は (r, θ) の座標に対する速度成分である。また、 c_r, c_{θ} は台風の移動速度の (r, θ) 方向の分速度で、 $c_r = c \cos(\theta - \alpha)$ 、 $c_{\theta} = -c \sin(\theta - \alpha)$ である。 α は移動方向と座標軸 r ($\theta = 0$) との間の反時計回りを正にとる角度である。

式(7)の左辺の第1と第2の移流項を無視すると、自由大気中の風速 FFW $v_{\theta g}$ は次のようになる。

$$v_{\theta g} = \frac{c_{\theta} - fr}{2} + \sqrt{\left(\frac{c_{\theta} - fr}{2}\right)^2 + \frac{r}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}} \quad (9)$$

この式は Blaton の公式により求められた傾度風速の式と同じ形で、気圧場の移動の補正を行うことの物理的な意味は本研究に用いた2番目の仮定で説明される。また、軸方向の分速度 v_{rg} は連続式からもとめられ、次のようになる。

$$v_{rg} = -\frac{1}{r} \int_0^r \frac{\partial v_{\theta g}}{\partial \theta} dr \quad (10)$$

最後に、 \vec{v}' の高さ方向の分布を求める為に、(3)式の中の2次以上の微量を無視すると、運動方程式は線形化され解析的に解くことができる。最終的な解は次のようになる。

$$v_{\theta} = v_{\theta g} + e^{-\lambda z'} [F_1 \cos(\lambda z') + F_2 \sin(\lambda z')] \quad (11)$$

$$v_r = v_{rg} - \xi e^{-\lambda z'} [F_2 \cos(\lambda z') - F_1 \sin(\lambda z')] \quad (12)$$

ここで、 $\xi = \frac{k}{s}$ 、 $\lambda = \left(\frac{sk}{2k_z}\right)^{1/2}$ 、 $s = \left(\frac{\partial v_{\theta g}}{\partial r} + \frac{v_{\theta g}}{r} + f\right)^{1/2}$

$$k = (2\frac{v_{\theta g}}{r} + f)^{1/2} \quad \chi = \frac{C_d}{k_z} |v_0| = \frac{C_d}{k_z} \sqrt{v_{\theta 0}^2 + v_{r0}^2}$$

$$F_1 = -\frac{\chi(\chi + \lambda)v_{\theta g} - \chi\lambda v_{rg}/\xi}{[\lambda^2 + (\chi + \lambda)^2]} \quad F_2 = \frac{\chi\lambda v_{\theta g} + \chi(\chi + \lambda)v_{rg}/\xi}{[\lambda^2 + (\chi + \lambda)^2]}$$

また、 $v_{\theta 0}, v_{r0}$ は地表での風速を表しており、 χ の式に含まれているため、繰り返し計算法により v_{θ}, v_r を求める必要がある。 $v_{\theta 0}, v_{r0}$ の初期値は FFW 風速 $v_{\theta g}, v_{rg}$ を用い、繰り返し回数 n は 50 とした。

*清水建設(株)技術研究所 研究員

†清水建設(株)技術研究所 研究員

‡清水建設(株)技術研究所 主任研究員

3. 台風 T9109 と T9119 のシミュレーション

近似解の有効性を確かめるために、1991年 Huis Ten Bosch での台風観測データをシミュレーションすることにした。図1は観測された台風の進路を示す。台風 T9109 と T9119 に関するパラメタは表1にまとめた。 r_m 以外のものはすべて気象庁が発表したデータで、 r_m については Schloemer の実験式を用いて最小自乗法で求めた。図2と図3はそれぞれ、台風 T9109 と T9119 の観測記録を近似解と比較したもので、図中の点線と破線は値の異なる粗度長 z_0 を用いて計算した結果である。風向(図2(b)、図3(b))については両ケースとも z_0 への依存性が小さいのに対して、風速(図2(a)、図3(a))のそれはかなり大きい。台風 T9109 の場合は、12時を境にし、 $z_0 = 0.3m$ と $z_0 = 1.5m$ の計算曲線が観測データによく一致することが分かる。また、台風 T9119 の場合、 $z_0 = 4m$ を用いた計算値はほとんどの時間において観測値と一致したにもかかわらず、15:40 から 16:20 の間の観測データは $z_0 = 0.3m$ の計算結果によく一致する。また、図2(b)、図3(b) から分かるように、この二つのケースについて、風速の急変はすべて風向 90度から 180度の間に起きている。図4は観測点周辺の地形を示しており、観測点は南東を大村湾に面し、その他三方は丘陵に囲まれている。すなわち、観測地点の南東側の粗度が小さく、その他の三方は大きい。また、北東側と北西側の丘の高さはそれぞれ 100m、200m となっており、この二つ方向における粗度長は比較的大きい値 ($z_0 = 4m$) をとることも説明される。本研究では地形効果を地表粗度に見なし、二つの効果の一つのパラメタ z_0 で表した。粗度長の従来の定義を拡大した意味で、ここでの z_0 を相当粗度長と呼ぶことにした。そして、すべての風向における z_0 を同定すれば、地形効果を考慮した台風シミュレーションが可能になる。図5は観測データから同定した z_0 の風向別分布を示し、その大きさは周囲の地形と深く関係していることがわかる。図6は、同定した z_0 を用いて、台風 T9109 と T9119 を再度計算したもので、両方とも観測データとよく一致している。図7は本モデルによる計算値と観測値を比較したもので、風速及び風向の相関係数はそれぞれ 0.85, 0.90 となり、本モデルの有効性が確かめられた。

4. まとめ 移動する台風に伴う強風場についての理論解析を行い、台風に伴う強風場の近似解を導出した。近似解を用いた台風 T9109 と T9119 のシミュレーション結果(風速と風向)は観測データとよく一致し、新しい台風モデルの有効性が確かめられた。また、本研究では相当粗度長 z_0 という概念を導入し、風向別相当粗度長を同定することにより、地形効果を考慮できる台風シミュレーションを可能にした。

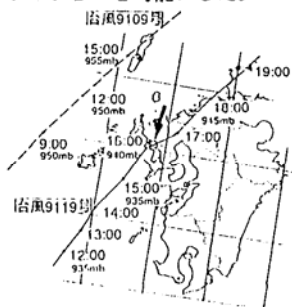


Fig. 1 The traces of Typhoon T9109 and T9119.

name	date (J.S.T)	time (deg)	lat (deg)	long (deg)	alpha (deg)	C (m/s)	PC (mb)	AP (mb)	R _m (km)		
T9109	91.07.29	9	33.0	128.0	54.56	7.58	950.0	63.0	83.45		
		10	33.2	128.2	55.43	7.50	950.0	63.0	79.11		
		11	33.4	128.3	55.49	7.49	950.0	63.0	78.79		
		12	31.6	128.5	54.43	8.16	950.0	63.0	79.33		
		13	33.8	128.7	54.80	8.88	951.7	61.3	82.60		
		14	34.1	129.0	54.87	8.81	951.3	59.1	81.70		
		15	34.3	129.1	52.25	9.77	955.0	59.0	89.95		
		16	34.6	129.4	50.60	10.60	954.7	56.3	77.25		
		T9119	91.09.27	12	31.2	125.4	60.53	15.24	935.0	78.0	75.12
				13	31.6	125.7	59.66	15.54	935.0	78.0	77.97
14	32.1			129.0	59.78	15.54	935.0	78.0	77.20		
15	32.5			129.3	51.12	14.49	935.0	78.0	77.96		
16	32.8			129.3	50.09	17.13	940.0	73.0	85.43		
17	33.4			130.2	53.77	20.55	942.5	70.5	88.65		
18	33.9			130.6	52.06	21.17	945.0	69.0	89.53		
19	34.4			131.2	49.10	21.90	945.0	69.0	87.33		

Table 1 Summary of Typhoon parameters used in the T9109 and T9119 simulations.

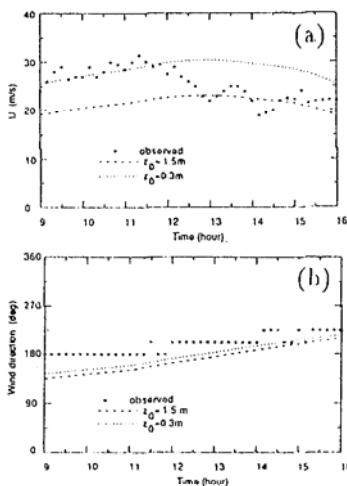


Fig. 2 Hourly variation of the computed and observed wind velocity and wind direction for T9109; short dashed line ($z_0 = 1.5m$); dotted line ($z_0 = 0.3m$); filled square, observed data.

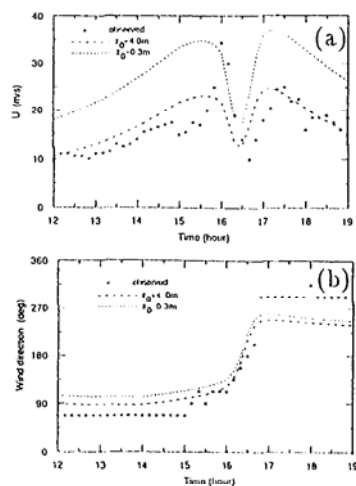


Fig. 3 Hourly variation of the computed and observed wind velocity and wind direction for T9119; short dashed line ($z_0 = 4m$); dotted line ($z_0 = 0.3m$); filled square, observed data.

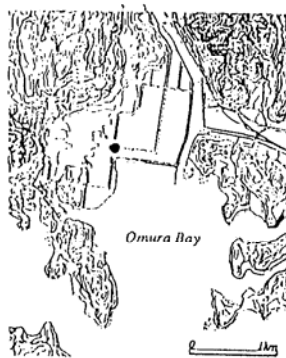


Fig. 4 Topograph in the Huis Ten Bosch area.

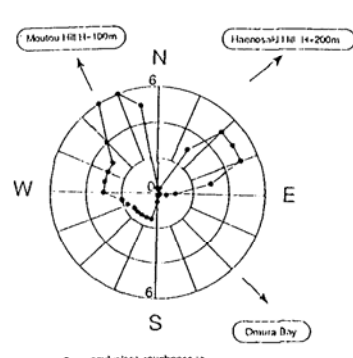


Fig. 5 Polar diagram of equivalent roughness z_0 at the Huis Ten Bosch.

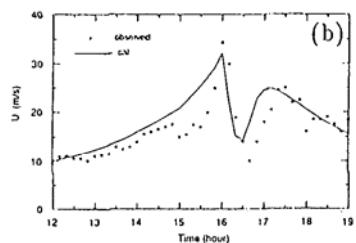
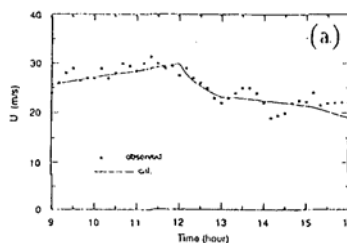


Fig. 6 Hourly variation of the computed by using calibrated equivalent roughness z_0 and observed wind velocity for (a) T9109 and (b) T9119; solid line, computed; filled square, observed.

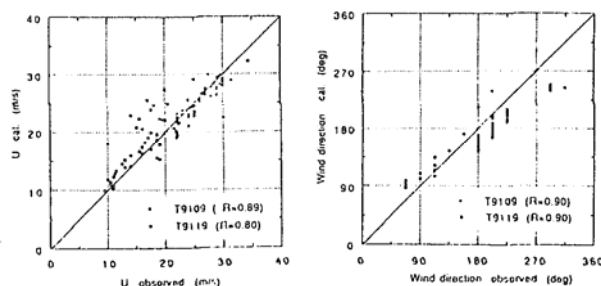


Fig. 7 Comparison of wind velocities and directions computed by using present model and observed data.