

九州大学工学部 正員 井島武士
九州大学工学部 学生員 劉 均 洪
九州大学工学部 正員 松尾隆彦
九州大学工学部 学生員 井上清祐
九州大学工学部 学生員 滝沢正史

1. はしがき

有明海のような小海湾においては吹送距離が著しく制限され、さうに水深が浅いため海底摩擦の影響を受けるため、海洋上で発生する浪より非常に小さくなる。ここでは伊勢湾台風の規模を持つ台風が図-1に示す三つの経路を取る場合、浪が水深の影響を受けずばらどのように発達して行くかを計算し、有明海沿岸に到達する浪を推定しようとするものである。水深条件としては平均水深は天文潮、および高潮偏差を加えたものを用いる（気象庁：有明海高潮の総合調査報告）。なおここでは計算の第一段階として浅海部での屈折および流れの影響は考えていない。

一般に浅海風浪の場合、屈折の影響は小さいものと考えられる。これに対して流れの影響はかなり大きいと考えられる。今後流れの影響についても研究を進めるつもりである。

2. 台風による風速と風向

台風の中心が $O(X_0, Y_0)$ にあり $O(X_0, Y_0)$ の方向に進む所の点 $P(x, y)$ での風速と風向は次の様になる。（気象庁：鹿児島港および八代海高潮の総合調査報告）

$\overline{OP}$ が $\overline{O'O}$ に直角な方向となす角 θ は

$$\theta = 90^\circ + \psi - \varphi \quad (1)$$

$$\varphi = \tan^{-1}(Y_0 - Y_1)/(X_0 - X_1), \quad \psi = \tan^{-1}(y - Y_0)/(x - X_0) \quad (2)$$

すると点 P での風向と $\overline{OP}$ のなす角度 ϕ は

$$\phi = \tan^{-1}(\sqrt{3} + 2N \cos \theta) / (1 - 2N \sin \theta) \quad (3)$$

従って x 軸と風向のなす角度 α は、

$$\alpha = 180^\circ - \phi + \psi \quad (4)$$

一方風速 U は、次式で与えられる。

$$U = C_1 F(r) \sqrt{1 + N^2 - N(\sin \theta - \sqrt{3} \cos \theta)} \quad (5)$$

ここで、 $C_1 = 0.6$ （海面摩擦係数）、 $F(r)$ は台風が停止した時の、海面の摩擦を考えない場合の傾度風速を表わし

$$F(r) = \sqrt{\frac{\Delta P}{f_a} \cdot \frac{1}{r} e^{-\frac{r}{r_0}} + \left(\frac{f}{2} r\right)^2 - \frac{f}{2} r} \quad (6)$$

台風の進行速度を V とすると、 $N = V / F(r_0)$ 、 r は点 O' と P の距離で、 ΔP 及び r_0 は台風の特性値でそれぞれ mb 、 km で与えられる。 f_a は空気の密度で、 f はコリオリの係数で、

$f/2 = \omega \sin \varphi = 7.29 \times 10^{-5} \sin \varphi \text{ rad/sec}$ である。

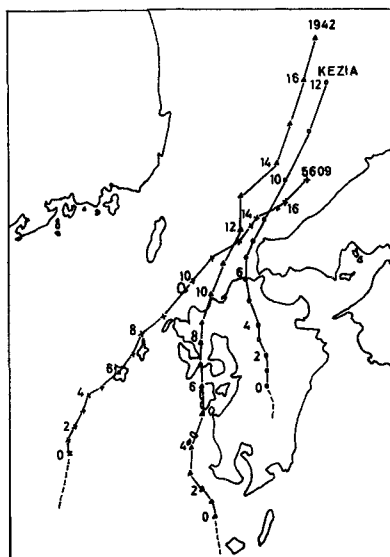
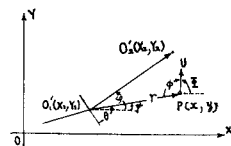


Fig. 1 Typhoon Routes

3. 風速, 風向, 水深と波の関係

浅海波の波高については, Bretschneider が一定水深の場合の図表を与えているので, Wilson の深海波の式(1965年)を用いて, この図表近似させた式を用いることにする。浅海波の周期については, Bretschneider は詳しい資料を与えていないが, 一般に発達した浅海波では周期は波高の平方根に比例すると考えられるので, そのことより式を仮定した。波高 H , 周期 T , 群速度 C , 風速 U , 水深 D , とすると, 次式で表わされる。

$$\frac{gH}{U^2} = \alpha \cdot A \left(1 - \frac{1}{\left\{ 1 + K_1 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/2} \right\}^2} \right) \quad (7)$$

$$A = \tanh K_3 (gD/U^2)^{3/8}, \alpha = 0.30, K_1 = 0.004, K_3 = 0.578$$

$$\frac{gT}{2\pi U} = \beta \cdot B \left(1 - \frac{1}{\left\{ 1 + K_2 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/2} \right\}^5} \right) \quad (8)$$

$$B = \tanh K_4 (gD/U^2)^{3/8}, \beta = 1/37, K_2 = 0.008, K_4 = 0.520$$

$$\frac{C}{U} = \left(\frac{gD}{U^2} \right)^{1/2} (1 - a_1 S - a_2 S^2 - \dots - a_6 S^6) \quad (9)$$

$$S = \left(\frac{gD}{U^2} \right) / \left(\frac{gT}{2\pi U} \right)^2 \text{ で, } 0 < S < \pi \text{ とする。}$$

$$a_1 = 0.4536, a_2 = 0.0931, a_3 = -0.2745$$

$$a_4 = 0.17033, a_5 = -0.04760, a_6 = 0.005067$$

$$M = \left(\frac{C}{U} \right) / \left(\frac{gD}{U^2} \right)^{1/2} \text{ とおくと, } 0 < S < \pi \text{ に対応}$$

$$\text{して } 1 > M > 0.288 \text{ で } S = b_1(1-M) + b_2(1-M)^2 + \dots + b_7(1-M)^7 \text{ で表わされ, } b_1 = 2.464857, b_2 = -7.35305,$$

$$b_3 = 52.74583, b_4 = -162.2, b_5 = 275.83, b_6 = -247.2, b_7 = 101.190476, S \geq \pi \text{ (即ち } M \leq 0.288) \text{ では深海波}$$

となり

$$\frac{gH}{U^2} = \alpha \left(1 - \frac{1}{\left\{ 1 + K_1 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/2} \right\}^2} \right) \quad (10)$$

$$\frac{gT}{2\pi U} = \frac{2C}{U} = \beta \left(1 - \frac{1}{\left\{ 1 + K_2 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/2} \right\}^5} \right) \quad (11)$$

以上の関係を図に示すと図-2(a),(b)のようになる。なお, 波の進行方向は風向と一致して変化してゆくものとして, 波を追蹤してゆく。

4. 波の発達の計算式

波の発達の状態を考えると, 風速と水深に応じて, 次の三つの段階がある。波の発生期には水深に対して波長が小さいので深海波として進行するが, ある程度発達してゆくと, 水深の影響を受け始め浅海波として発達のし方がゆるやかになって進行してゆく。ある程度発達すると, 風から受けるエネルギーより海底摩擦によって失われるエネルギーの方が大きくなって, 減衰する様になる。

① 実 a での値として C_0, H_0, U_0, D_0 が与えられると, $M_0 = (C_0/U_0) / (gD_0/U_0^2)^{1/2}$ より $M_0 > 0.288$ の時は浅海波, $M_0 \leq 0.288$ の時は深海波として計算する。

② $M_0 \leq 0.288$ の場合 (深海波)

実 a より ΔF だけ離れた点 $(a+1)$ での波高, 群速度, 周期は

$$H_{a+1} = H_a \cos(\theta_a - \theta_{a-1}) - \frac{K_1}{\alpha^{1/2}} \cdot \left\{ \alpha - \frac{gH_a \cos(\theta_a - \theta_{a-1})}{U_a^2} \right\}^2 \times \Delta F$$

$$\alpha^{1/2} \cdot \left\{ \alpha - \frac{gH_a \cos(\theta_a - \theta_{a-1})}{U_a^2} \right\}^{1/2} \quad (12)$$

5. 計算結果

紙面の都合上計算結果の一部だけを示す。図-1に示す様な台風の進行経路の関係から、1942年及び5609台風の場合、波は最初頃には有明海西海岸に到達するが、時間の経過と共に北海岸、そしてついには東海岸にぶつかる様になる。キジア台風の場合、全時間を通じて東海岸側にだけ波が到達し、西海岸には全然波は到達しない。図-4は伊勢湾台風がキジア台風の経路を取った時の、6時における有明海岸の波の分布の状態を示す。従って格子点で波が発生した時の時刻はそれぞれの格子点で異なる。図-5は同時刻における水深の状態を示す。図-6は同じ台風経路でのゴール36での潮位の変動を示す。この図からわかる様に時刻6時というのはゴール36で最も水深が大きくなる時である。ゴール33～37までは水深がかなり浅く、波に対する水深が大きい。例えばゴール36の時刻3時では波高0.6m、6時で1.5m、9時で0.6mとなる。その時の波が受ける風速はあまり変わらない。従って水深の影響が著しいことがわかる。一方ゴール39では3時で波高1.7m、6時で2.2m、9時で2.0mである。潮位変動は図-6とあまり変わらないので、このゴールに対しては水深の変動の影響が小さいことがわかる。高原半島の南側の海域は水深が非常に大きいので、こゝで発生した波はほとんど深海波のみで海岸に到達する。

表-1は各台風について代表波に到達する波の中の最大波高及びその時の周期を示す。

	1942 Nen Typhoon				5609 Typhoon				Kezia Typhoon			
	Goal	Height	Period	Time	Height	Period	Time	Height	Period	Time	Height	Period
口ノ津	5	2.4m	5.3 sec	3.0 hr	1.8m	4.4 sec	4.5 hr	—	—	—	—	—
高 原	12	0.8	2.7	6.5	0.9	3.0	1.0	—	—	—	—	—
竹崎島	19	1.9	4.6	5.0	1.3	3.8	2.0	—	—	—	—	—
佐ノ江	27	1.1	3.5	9.5	1.4	4.1	9.5	—	—	—	—	—
大牟田	35	2.2	4.5	9.6	1.8	6.2	9.5	1.5	4.8	5.5	—	—
三 角	53	2.8	5.4	11.5	3.0	5.6	11.5	2.6	5.4	4.0	—	—

Table 1 Maximum Height and Period

以上は計算結果のほんの一部であり、全体については後日詳細に報告するつもりである。

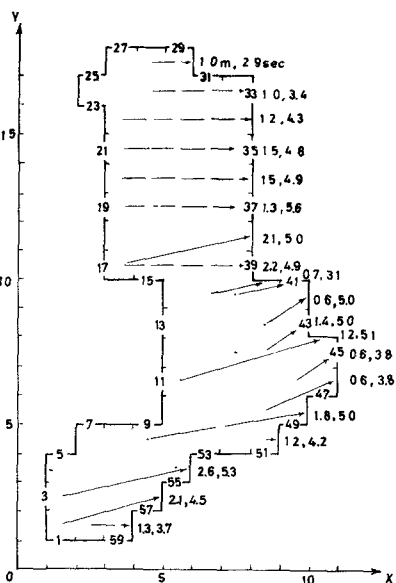


Fig. 4 Wave Distribution (Kezia)

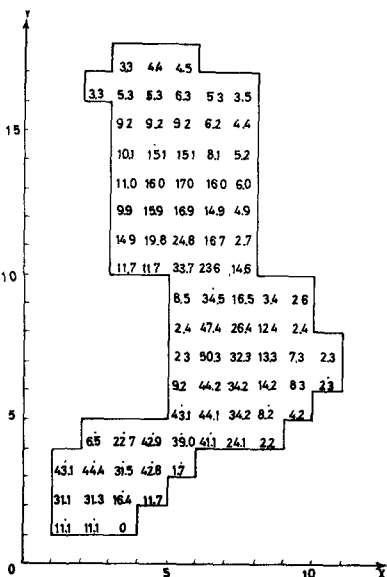


Fig. 5 Water Depth (Kezia)

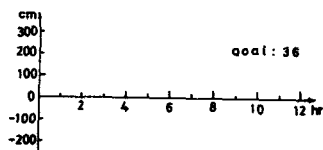


Fig. 6 Tide Variation at goal 36

$$C_{a+1} = C_a + \frac{5}{3} \cdot \frac{\beta}{2} \cdot K_2^3 \frac{\{1 - \frac{2}{\beta} (\frac{C_a}{U_a})\}^{3/2}}{(1 - \{1 - \frac{2}{\beta} (\frac{C_a}{U_a})\}^{1/2})^2} \cdot \frac{\beta}{U_a} \Delta F \quad (13)$$

$$T_{a+1} = (4\pi/g) C_{a+1} \quad (14)$$

式(13)はそれぞれ $C_a/U_a < \beta/2$, $gH_a \cos(\theta_a - \theta_{a-1})/U_a^2 < \alpha$ の条件を満足すべきで、この条件のいずれかが破れるときは打ち切る。

③ $M_0 > 0.288$ の場合(浅海波)

(1) 群速度の計算

$$\text{条件式 } (\frac{gD_a}{U_a^2}/S_a)^{1/2} < \beta \cdot B_a, \quad (B_a = \tanh K_4 (\frac{gD_a}{U_a^2})^{3/8}) \quad (15)$$

が成立する時は、群速度は増加する場合で、点(a+1)における S_{a+1} の値は、

$$S_{a+1} = S_a - \frac{10}{3} \left(\frac{K_2}{B_a} \right)^3 \frac{\{1 - \frac{E_a}{\beta B_a}\}^{3/2}}{\frac{E_a}{\beta B_a} (1 - \{1 - \frac{E_a}{\beta B_a}\}^{1/2})^2} \cdot S_a \cdot \frac{\beta}{U_a} \Delta F \quad (16)$$

$$E_a = (gD_a/U_a^2)^{1/2}$$

点(a+1)での群速度 C_{a+1} は、(9)式により

$$C_{a+1} = U_a \cdot \left(\frac{gD_a}{U_a^2} \right)^{1/2} (1 - a_1 S_{a+1} - a_2 S_{a+1}^2 - \dots - a_6 S_{a+1}^6) \quad (17)$$

条件式(15)が成立しない時は群速度は減少の状態に入り

$$C_{a+1} = C_a + \frac{5}{3} \cdot \frac{\beta}{2} K_2^3 \left\{ \frac{\{1 - \frac{2}{\beta} (\frac{C_a}{U_a})\}^{3/2}}{U_a (1 - \{1 - \frac{2}{\beta} (\frac{C_a}{U_a})\}^{1/2})^2} - \frac{\{1 - \frac{2}{\beta} (\frac{C_a}{U_a})\}^{3/2}}{U_a^2 (1 - \{1 - \frac{2}{\beta} (\frac{C_a}{U_a})\}^{1/2})^2} \right\} \Delta F \quad (18)$$

ここで U_a は次式を満足すべき値である。

$$gD_a/U_a^2 > 0.06 \text{ の場合} \quad C_a/U_a^2 = \frac{\beta}{2} \tanh(K_5 (gD_a/U_a^2)^{1/2}) \quad (K_5 = 0.566) \quad (19)$$

$$gD_a/U_a^2 \leq 0.06 \text{ の場合} \quad C_a/U_a^2 = \frac{\beta}{3} (gD_a/U_a^2)^{2/5} \quad (20)$$

$$T_{a+1} = \frac{2\pi U_a}{g} \left(\frac{gD_a}{U_a^2}/S_{a+1} \right)^{1/2} \quad (21)$$

(2) 波高の計算

$$\text{条件式 } gH_a \cos(\theta_a - \theta_{a-1})/U_a^2 < \alpha \tanh K_3 (\frac{gD_a}{U_a^2})^{3/4} \quad (22)$$

が成立する時は、波高は増加する場合で、点(a+1)の波高 H_{a+1} は

$$H_{a+1} = H_a \cos(\theta_a - \theta_{a-1}) + \frac{(\alpha K_1)^2}{(\alpha A_a)^{3/2}} \frac{(\alpha A_a - \frac{gH_a \cos(\theta_a - \theta_{a-1})}{U_a^2})^2}{(\alpha A_a - \frac{gH_a \cos(\theta_a - \theta_{a-1})}{U_a^2})^{1/2}} \Delta F, \quad A_a = \tanh K_3 (gD_a/U_a^2)^{3/4} \quad (23)$$

条件式(22)が成立しない場合は波高は減少し、この時は

$$H_{a+1} = H_a \cos(\theta_a - \theta_{a-1}) + \frac{K_1^2}{\alpha^{1/2}} \left\{ \frac{(\alpha - \frac{gH_a \cos(\theta_a - \theta_{a-1})}{U_a^2})^2}{\alpha^{1/2} - (\alpha - \frac{gH_a \cos(\theta_a - \theta_{a-1})}{U_a^2})^{1/2}} - \frac{(\alpha - \frac{gH_a \cos(\theta_a - \theta_{a-1})}{U_a^2})^2}{\alpha^{1/2} - (\alpha - \frac{gH_a \cos(\theta_a - \theta_{a-1})}{U_a^2})^{1/2}} \right\} \quad (24)$$

ここで、 U_a は次式を満足する値である。

$$gH_a \cos(\theta_a - \theta_{a-1})/U_a^2 = \alpha \tanh K_3 (\frac{gD_a}{U_a^2})^{3/4} \quad (25)$$

以上の計算において、1 step で進む距離 ΔF の間では風速 U 、水深 D 、群速度 C が一定として行うわけであるが、この仮定の近似度から、 ΔF として次の値を取る。

(i) $C > \lambda/7$ の場合は、 $\Delta F = \lambda$ (ii) $C < \lambda/7$ の場合は、 $\Delta F = C \cdot T$

ここで $\lambda = 1$ 又は 2 km 、 $T = 20$ 分とする。なお計算の便宜上海岸線を図-3に示すようにモデル化し、各格子点からある時間間隔で波が到達するとし、数字で示すゴールまでの波を調べる。

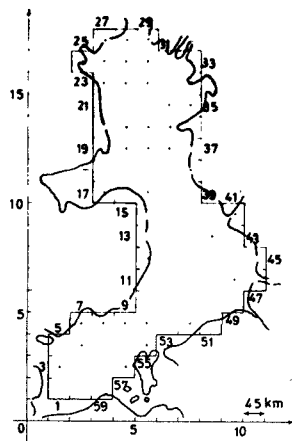


Fig. 3 The Location of Goal Line