

17, 19号 ('91) 台風による波浪の推算

池田 豊治*・加藤 治・梅野 恵美**

(生産情報科学講座)

平成5年12月20日受理

Estimation of Ocean Waves with No.17 and No.19 ('91) Tyhoons.

Toyoji IKEDA, Osamu KATO and Emi UMENO

(Laboratory of Agricultural Water Supply and Management)

Received December 20, 1993

Summary

The reclamation dike and the structure along the coast in Ariake Sea have been designed using the estimated ocean wave data by Isewan Typhon, until now.

But in Sept. 1991, No.17 and No.19 typhoons have larger scale than it.

In this paper, the ocean wave value at the No.17 typhoon was estimated by Izima's formular, and its value was almost consistent with the observed data of the Ariake Sea in the observed system of Saga university. And the value at the No.19 typhoon was estimated.

緒 言

従来、有明海沿岸域において干拓堤防をはじめとする各種構造物の設計において使用される波浪の推算には、我が国における既往最大台風である昭和34年9月伊勢湾を襲った伊勢湾台風のデータが用いられてきた。しかし、1991年9月にこの伊勢湾台風を越える規模の17号（以下T9117と記す）および19号（以下T9119と記す）台風が有明海沿岸域に來襲したことにより、波浪の推算の再検討が必要になると思われる。

本研究は、Wilsonによる深海波の推算式¹⁾と Bretschneiderによる浅海波の場合²⁾の両方に共通するように井島が組み立てた推算式³⁾⁴⁾に基づきT9117による波浪の推算を行い、その結果を佐賀大学が設置している海象観測塔の実測結果と比較検討した。T9119においては勢力が大きすぎて波浪の実測が不可能であったため、T9119による波浪の推算を行うことも研究の目的の一つとした。

*鹿児島大学大学院連合農学研究科

**豊玉町役場

気象概況

1. 17号台風の気象概況

1991年9月10日9時、マリアナ諸島近海で発生した弱い熱帯低気圧は11日15時に沖の鳥島付近で台風第17号となった。台風は発達しながら北西に進み、13日9時には沖縄付近で中心気圧955hpa、中心付近の最大風速40m/sに達し、中型で強い勢力となった。その後台風は強い勢力を保ったまま東シナ海を北上し、14日5時30分頃長崎市付近に上陸した。上陸時の中心気圧は965hpa、中心付近の最大風速は35m/sであった。台風は佐賀市、北九州市、山陰、北陸を経て14日21時に山形県米沢市付近で熱帯低気圧に変わった。

この台風と前線の活動で九州各県と山口県で暴風と大雨による大きな災害が発生した。この台風の経路図を図-1に、台風的位置関係を表-1に示す。

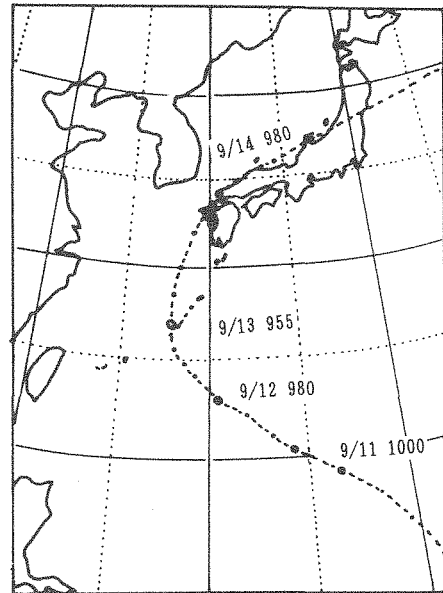


図-1 台風の移動状況 (T9117)

2. 19号台風の気象概況

1991年9月13日9時にマーシャル諸島の東海上で発生した弱い熱帯低気圧は西に進みながら発達し、16日9時には台風第19号になった。台風は北西に進みながら発達し23日15時にはフィリピンの東海上で中心気圧925hpa、中心付近の最大風速50m/sに達し、大型で非常に強い勢力になった。26日に宮古島の東海上を北上し、27日16時過ぎに非常に強い勢力を保ちながら佐世保市の南に上陸した。上陸時の中心気圧940hpa、中心付近の最大風速50m/sであった。台風は伊万里市、北九州市付近、山口県を経て加速しながら日本海に抜け、28日8時前に北海道の渡島半島に再上陸、28日15時には千島近海で温帯低気圧に変わった。この台風の暴風と大雨により、九州、山口で大きな災害が発生し、家屋・重要文化財・山林の倒木・塩害および停電等の被害が出た。

この台風経路図を図-2に、位置の経時変化を表-2に示す。

表-1 T9117位置表と移動状況

日 時	中心位置		移動状況				移動距離 (km)	進行速度 (km/hr)
	北緯	東経	緯度	経度	緯度	経度		
13 21	30.0	128.3						
14 0	30.9	128.7	0.9°	99	0.5°	46.5	109.4	36.5
3	31.9	129.1	1.0	110	0.4	37.2	116.1	38.7
5	32.7	129.7	0.8	88	0.6	55.8	104.2	52.1
6	33.1	130.1	0.4	44	0.4	37.2	57.6	57.6
9	34.1	130.7	1.0	110	0.6	55.8	123.3	41.1
12	35.1	132.6	1.0	110	1.9	176.7	208.1	69.4

13日21時から14日9時の間の台風進行速度は平均45km/hrである。

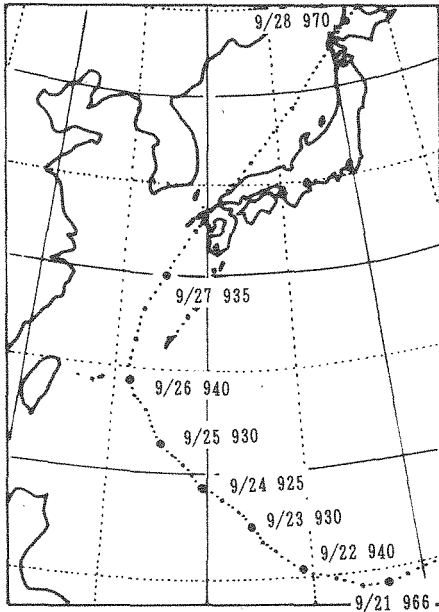


図-2 台風の移動状況 (T9119)

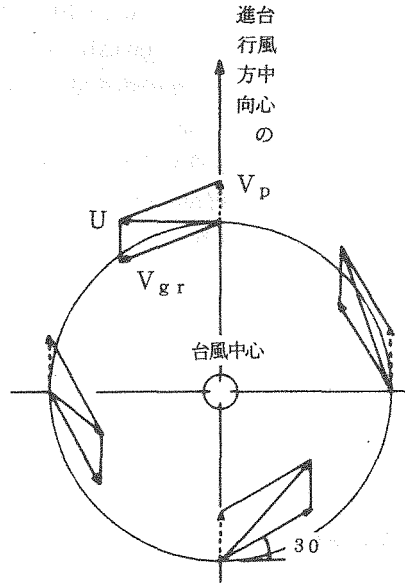


図-3 台風域内の風の成分

表-2 T9117位置表と移動状況

日 時	中心位置		移動状況				移動距離 (km)	進行速度 (km/hr)
	北緯	東経	緯度	経度	緯度	経度		
27 9	29.9	127.6	0.3°	143	0.8°	74.4	161.2	53.7
12	31.2	128.4	1.3	143	0.9	83.7	165.7	55.2
15	32.5	129.3	1.4	154	1.3	120.9	195.8	65.3
18	33.9	130.6	1.6	176	1.7	158.1	235.6	78.5
21	35.5	132.3						

27日9時から21時の間の台風進行速度は平均63km/hrである。

波浪の推算

1. 風の推算

台風域内の風は図-3に示すように、傾度風速 (V_{gr}) と台風の進行に伴う場の風 (V_p) のベクトル和として考える。

2. 傾度風

気圧傾度による風は、気圧分布から求めた傾度風に補正係数を乗じたものとし、次式⁵⁾により求める。

$$V_{gr} = K \{ \sqrt{[R \cdot G / \rho + (\omega \cdot R \cdot \sin \phi)^2]} - \omega \cdot R \cdot \sin \phi \} \times 10^{-2} \quad \text{----- (1)}$$

但し、 V_{gr} ：傾度風速 (m/s)

- R : 等圧線の曲率半径(cm)
- ρ : 空気の密度 = $1.1 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$
- G : 気圧傾度 = $1000\Delta b / \ell \text{ (g/cm}^2/\text{s}^2)$
- ω : 地球の自転の角速度 $7.29 \times 10^{-5} \text{ (s}^{-1})$
- ϕ : 緯度 (33°)
- Δb : 等圧線間の気圧差(hpa)
- ℓ : 等圧線間隔(cm)
- K : 補正係数 (表—3 参照)

表—3 緯度と係数 α , K との関係

緯度	0°	5	10	20	30	40	50	60
α	45°	30	24	20	18	17	15	15
K	0.0	0.36	0.51	0.60	0.64	0.67	0.70	0.71

3. 台風の進行に伴う場の風

既往の台風について調査された結果では、台風の進行に伴う場の風 (V_p) は

- (1) 台風の進行速度に比例する,
- (2) 台風からの中心からの距離によって,

指数関数的に小さくなる,

等の事実が確認されている。

台風に進行に伴う場の風 (V_p) は次式により求める。

$$V_p = V_s \cdot \alpha_0 \cdot e^{-r/\beta} \quad \text{----- (2)}$$

ここに, V_s : 台風中心の進行速度(m/s)

α_0, β : 台風によって決まる係数

$$\alpha_0 = 4/7, \beta = 500/\pi$$

r : 台風中心からの距離(km)

台風域内の気圧分布は、台風中心に対して対称であると仮定して藤田の式⁹⁾を用いると

$$P = P_\infty - \frac{a}{\sqrt{1+(r/r_0)}} \quad \text{----- (3)}$$

ここに, P : 台風域内の気圧(hpa)

P_∞ : 台風域外の気圧(hpa)

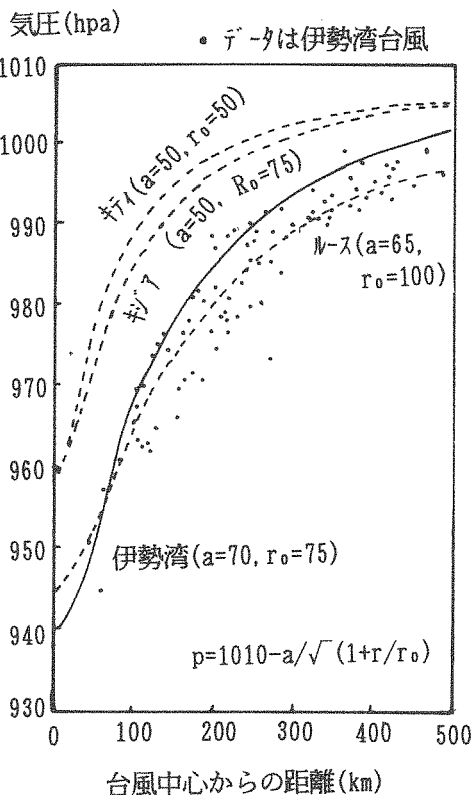
r : 台風からの距離(km)

a : 台風中心示度の降下量(hpa)

r_0 : 台風によって定まる係数

となる。

気圧傾度 G は (3) 式より,



図—4 既往台風の気圧分布

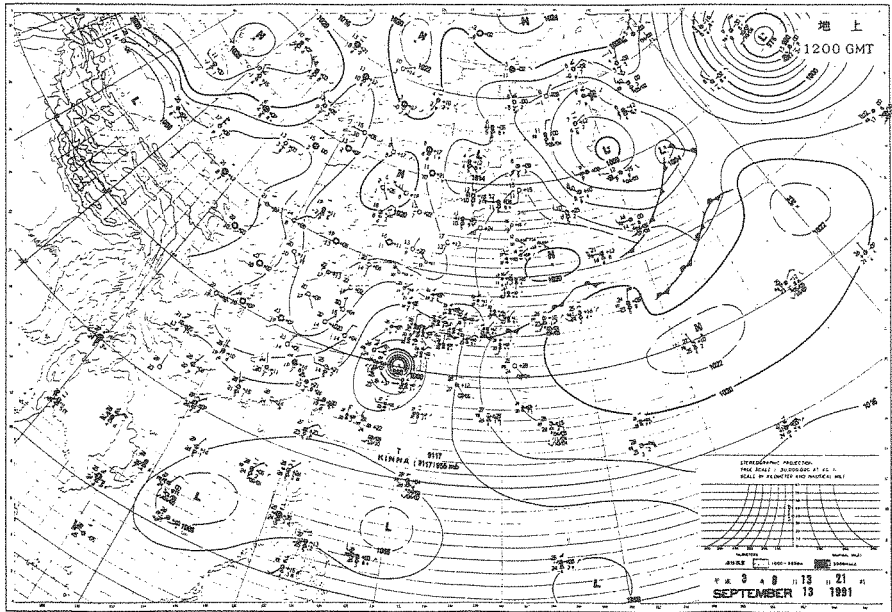


図-5 T9117接近時の天気図

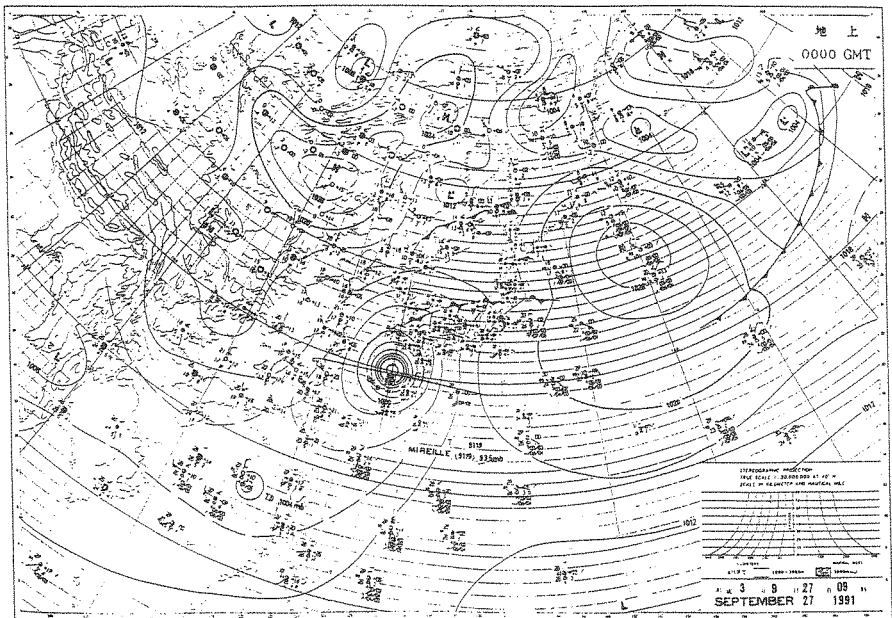


図-6 T9119接近時の天気図

$$G = \frac{\partial P}{\partial r} = \frac{a \cdot r}{r_0^2} \left(1 + \left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right)^{-3/2} \quad \text{----- (4)}$$

伊勢湾台風の場合、 $P=1013\text{hpa}$ 、
 $a=70\text{hpa}$ 、 $r_0=75\text{km}$ である(図-4参照)。

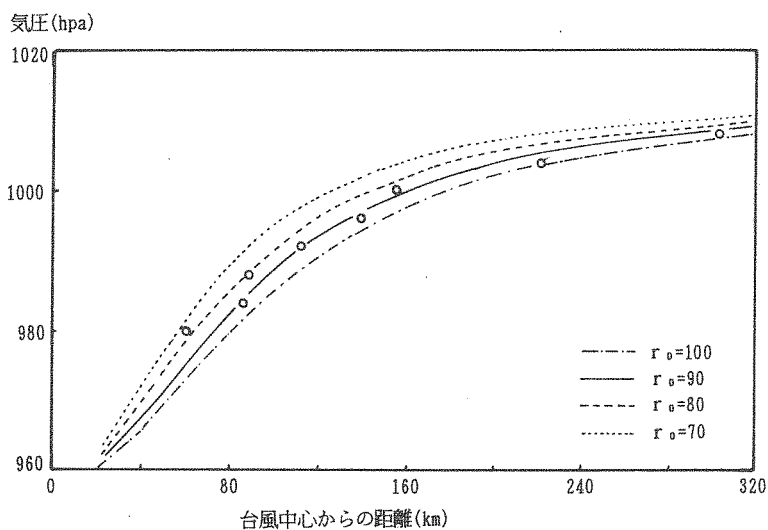


図-7 T9117の気圧分布 (91/09/13 21:00)

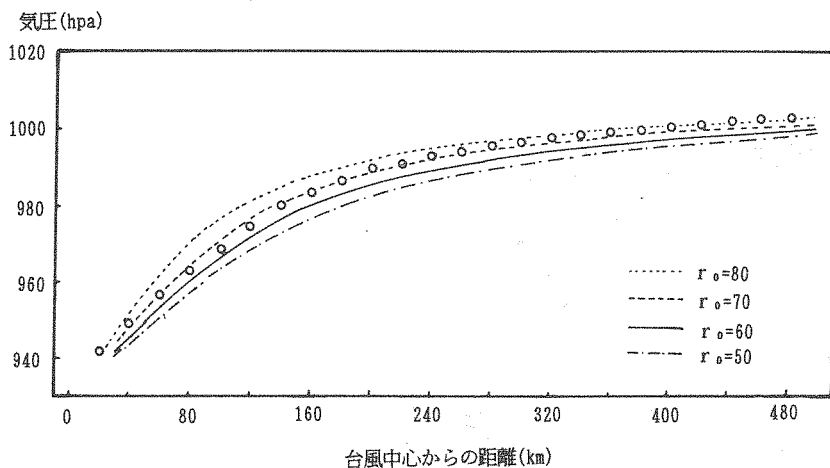


図-8 T9119の気圧分布 (91/09/27 9:00)

T9117およびT9119が接近した時刻における天気図を用いて気圧分布を求め図に示す。天気図は九州に接近した9月13日21時(図-5)と9月27日9時(図-6)の資料を用いた。その結果、係数 a は、

$$\text{T9117} : a = 1013 - 955 = 58 \approx 55 \text{ hpa}$$

$$\text{T9119} : a = 1013 - 935 = 78 \approx 75 \text{ hpa}$$

とする。また、 r_0 を変化させた場合の曲線を求めると図-7と図-8を得る。その結果、台風の気圧分布とほぼ一致する値 $r_0 = 80 \text{ km}$ (T9117), 60 km (T9119)を用いる。

4. 台風中心の進行速度

台風中心位置の移動状況を基に台風の進行速度を求めた結果を、表-1, 2に示す。なおこの表では、海図を基に緯度 1° の距離を 110 km として算定した。

9月13日21時から14日9時の間の台風進行速度は平均45km/hrである。
 9月27日9時から21時の間の台風の進行速度は平均63km/hrである。

波 浪 解 析

有明海のような内湾においてはフェッチ（吹送距離）が小さい。また、水深も比較的浅く波浪の推算には水深の影響を考慮しなければならない。水深が比較的浅い海を風の影響を受けて波が進行する場合、次の3つの状態が考えられる。

まず、発達初期の段階においては、水深に比べて波長が小さいため深海波として波は進行し、次に海底摩擦の影響を受け始め、ついには海底摩擦によるエネルギー損失が風から受けるエネルギーより大きくなり減衰を始める。

ここでは、深海波と浅海波の両方に共通する井島の式³⁾を用いて波浪を推算する。

1. 設計高潮位

海岸堤防などの提頂標高の設計基準となる設計高潮位は、海岸保全施設築造基準によれば「原則として既往の最高潮位とするか、または朔望平均満潮位に既往の最大偏差を加えた高さとする」と述べられている。

調査対象地区の海岸保全事業で採用されている海象条件を表-4に示す。

設計高潮位としては既往最高潮位が採用されているため、ここでは設計高潮位=4.35mを用いる。

表-4 各地の既往の各種潮位

	福富地区	久保田地区	大和地区
既往最高潮位 (HHWL)	4.35m	4.35m	3.60m
朔望平均高潮位 (HWL)	2.67	2.70	2.77
上下弦平均高潮位 (LHWL)	1.60	1.60	1.47
平均潮位 (MSL)	0.47	0.47	0.32
上下弦平均干潮位 (HLWL)	-0.59	-0.59	-0.81
朔望平均干潮位 (LWL)	-1.89	-1.89	-2.45
既往最低潮位 (LLWL)	-3.51	-3.51	-3.05
潮位観測所	住ノ江		三池港務所

2. 波浪の計算式

1) 波高 (H) と風速 (U), 水深の関係

$$\frac{gH}{U^2} = \alpha A \left[1 - \frac{1}{\left\{ 1 + \frac{K_1 (gF)}{H U^2} \right\}^{1/2}} \right] \quad (5)$$

ここで、 $A = \tanh\{K_3 \cdot (gH/U^2)^{3/4}\}$

F: 吹送距離

g: 重力の加速度

$\alpha = 0.30$

$K_1 = 0.004$

$$K_3=0.574$$

gH/U_2 が小さくなると、次式に近づく。

$$gH/U^2=0.0024 \cdot (gF/U^2)^{1/2} \quad \text{----- (6)}$$

2) 周期 (T) と風速, 水深の関係

$$\frac{gT}{U^2}=\beta B\left[1-\frac{1}{\left\{1+\frac{K_2}{B}\left(\frac{gF}{U^2}\right)^{1/3}\right\}^5}\right] \quad \text{----- (7)}$$

ここに, $B=\tanh\{K_4 \cdot (gD/U^2)^{3/8}\}$

$$\beta=1.37$$

$$K_2=0.008$$

$$K_4=0.520$$

gF/U^2 が小さくなると、次式に近づく。

$$gT/2\pi U=2 \cdot 0.00274(gF/U^2)^{1/3} \quad \text{----- (8)}$$

3) 群速度 (C) と風速, 水深の関係

$$\frac{C}{U}=\left(\frac{gD}{U^2}\right)^{1/2}(1-a_1s-a_2s^2-\dots-a_6s^6) \quad \text{----- (9)}$$

ここに, $s=(gD/U^2)/(gT/2\pi U)$ で $0 < s < \pi$ とする。

$$a_1=0.4536 \quad a_2=0.00931$$

$$a_3=-0.2745 \quad a_4=0.17033$$

$$a_5=-0.0476 \quad a_6=0.005067$$

また,

$$M=(C/U)/(gD/U^2)^{1/2} \quad \text{----- (10)}$$

とおくと, $0 < s < \pi$ に対して, $1 > M > 0.288$ となり

$$s=b_1(1-M)+b_2(1-M)^2+\dots+b_7(1-M)^7 \quad \text{----- (11)}$$

で表され,

$$b_1=2.464857 \quad b_2=-7.35305$$

$$b_3=52.74583 \quad b_4=-162.2$$

$$b_5=275.83 \quad b_6=-247.2$$

$$b_7=101.190476$$

以上の関係式は, $s \geq \pi$ (即ち, $M \leq 0.288$) では深海波となり次の関係に従うものとする。

$$\frac{gH}{U^2}=\alpha\left[1-\frac{1}{\left\{1+K_1(gF/U^2)^{1/2}\right\}^2}\right] \quad \text{----- (12)}$$

$$\frac{gT}{2\pi U}=\beta\left[1-\frac{1}{\left\{1-K_2(gF/U^2)^{1/3}\right\}^5}\right] \quad \text{----- (13)}$$

なお, $M > 1$ の場合, (10)式より $C > \sqrt{gD}$ となり碎波条件に達したものと考えられる。一方, 波の進行方向はその場所の風向と一致する。

3. 座標系, 水深の与え方

有明海を図-9に示すような座標系を設ける (原点は北緯32°34'00", 北緯130°04'30")。

Y軸を北方向と平行にとっている。格子間隔は $\lambda=2.0\text{km}$ としている。

また各格子における海底標高は図-10のようになる。水深は, 格子点上で次のような方法で求める。

今考える点の位置を (x, y), その時刻を t とすると, 格子間隔は λ であるから

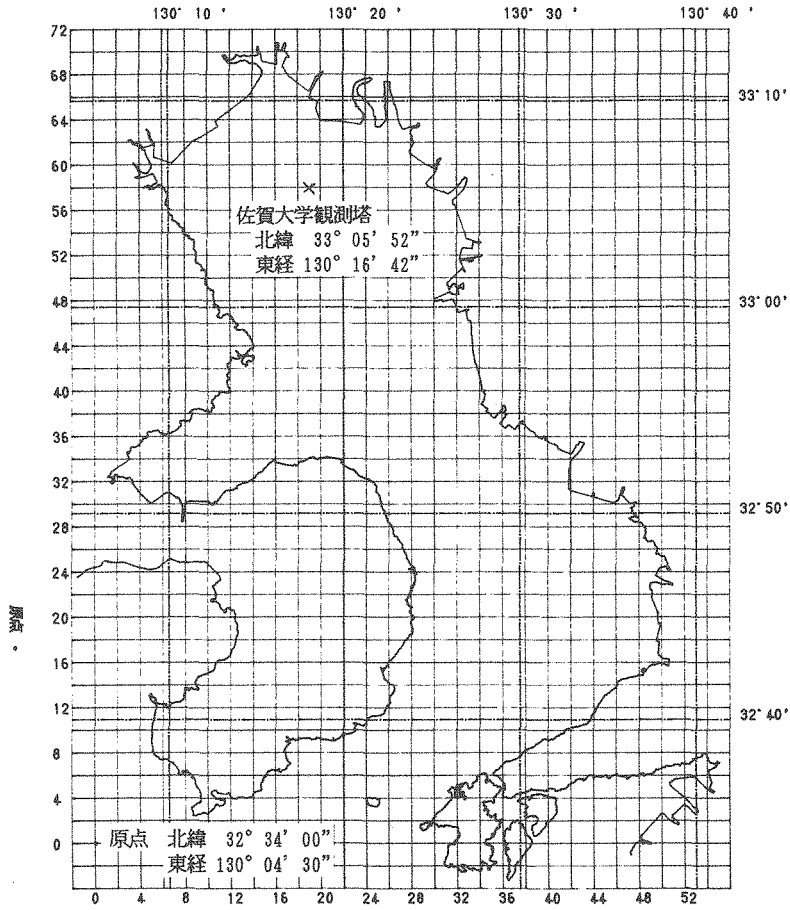


図-9 計算メッシュ

$$m \leq x/\lambda \leq m+1, n \leq y/\lambda, k \leq t/\tau \leq k+1$$

ここに、 m, n, k は整数値であり、 τ は時間間隔を表す。すなわち点 (x, y) は格子点 $(m, n), (m+1, n), (m, n+1), (m+1, n+1)$ の間にある。この4つの格子点での $k \times \tau$ および $(k+1) \times \tau$ 時刻での水深を用いることにより、それぞれの時刻における点 (x, y) の水深を求める。

この平均計算の場合、距離に反比例する荷重平均を考えると、 $k \times \tau$ 時刻の点 (x, y) の水深は、

$$h(x,y,k) = \frac{\frac{h(m,n,k)}{\gamma_{m,n}} + \frac{h(m+1,n,k)}{\gamma_{m+1,n}} + \frac{h(m,n+1,k)}{\gamma_{m,n+1}} + \frac{h(m+1,n+1,k)}{\gamma_{m+1,n+1}}}{\frac{1}{\gamma_{m,n}} + \frac{1}{\gamma_{m+1,n}} + \frac{1}{\gamma_{m,n+1}} + \frac{1}{\gamma_{m+1,n+1}}} \quad (14)$$

$$\text{ここに、} \gamma_{i,j} = \sqrt{((x-i \times \lambda)^2 + (y-j \times \lambda)^2)}$$

$$i = m, m+1, j = n, n+1$$

$\gamma_{i,j}$: 点 (x, y) から格子点 (i, j) 迄の距離。

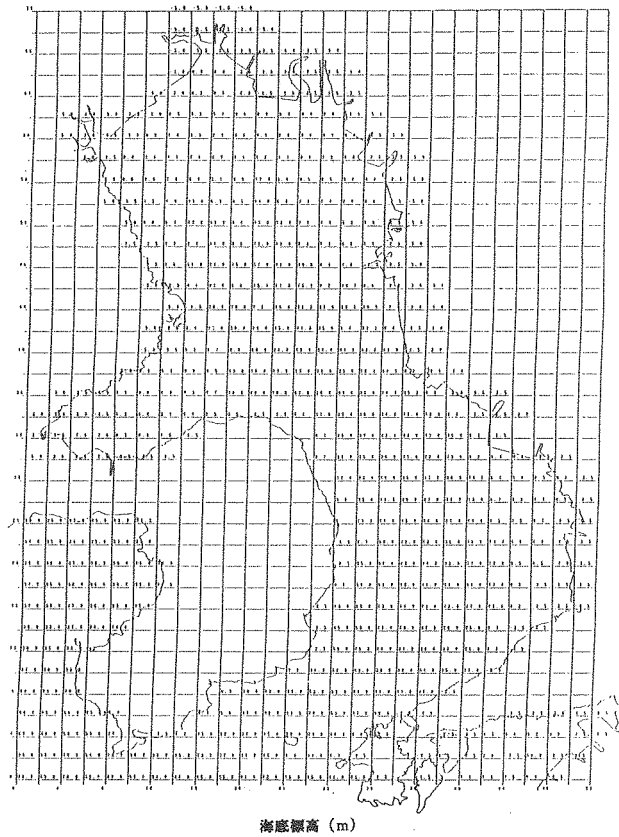


図-10 座標点における海底標高

$h(m, n, k)$: 格子点 (m, n) 上の $k\tau$ 時刻での水深。

次に $(k+1)\tau$ 時刻での点 (x, y) の水深は、式 () 中の k の代わりに $(k+1)$ を代入した値を取ればよい。次に時刻 t での点 (x, y) の水深は

$$h = \frac{\{(k+1)\tau - t\}h(x, y, k) + \{t - k\tau\}h(x, y, k+1)}{\tau} \quad \text{----- (15)}$$

となる。

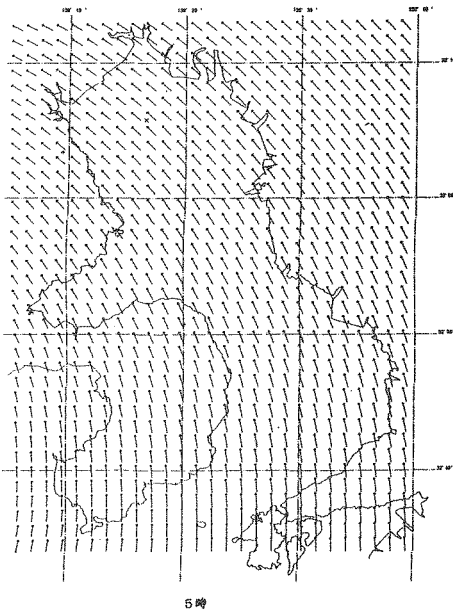
表-5 T9117における中心位置の座標

日 時	中 心 位 置		座 標 系 の 台 風 位 置				備 考
	北 緯	東 経	X 軸		Y 軸		
13 21	30.0°	128.3°	-1.775°	-165.1	-2.567	-282.4	69.4° 71.3 57.6 49.8 63.1 31.9
14 0	30.9	128.7	-1.375	-127.9 ^{km}	-1.667	-183.4 ^{km}	
3	31.9	129.1	-0.975	-90.7	-0.667	-73.4	
5	32.7	129.7	-0.375	-34.9	0.133	14.6	
6	33.1	130.1	0.025	2.3	0.533	58.6	
9	34.1	130.7	0.625	58.1	1.533	168.6	
12	35.1	132.6	2.525	243.8	2.533	278.6	

表一六 T9117における中心位置の座標

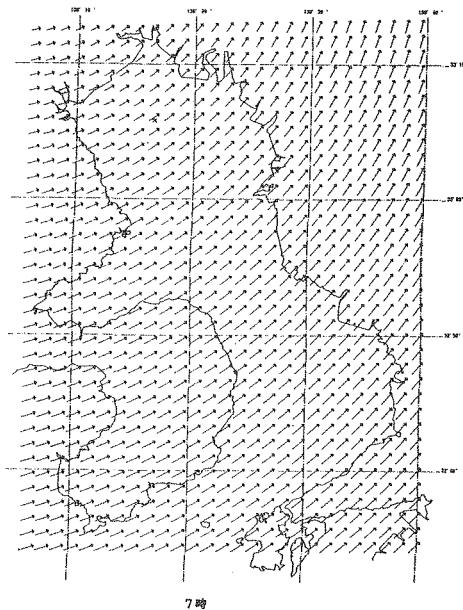
日時	中心位置		座標系の台風位置				備考
	北緯	東経	X 軸		Y 軸		
27 12	31.2°	128.4°	-1.675°	-155.8 _{km}	-1.367°	-150.4 _{km}	59.7°
15	32.5	129.3	-0.775	-72.1	-0.067	-7.3	51.8
18	33.9	130.6	0.525	48.8	1.333	146.6	48.1
21	35.5	132.3	2.225	206.9	2.933	322.6	

17号台風 (91/9/14)



図一11 (1)T9117の風速分布推算値 (5時)

17号台風 (91/9/14)



図一11 (2)T9117の風速分布推算値 (7時)

4. 台風の進行経過

波浪推算を行う座標系は、Y軸を北にX軸を東にとり原点を北緯32°34'00″，東経130°04'30″としている。T9117とT9119の中心位置の移動状況をこの座標系を用いて表すとそれぞれ表一5，6のようになる。

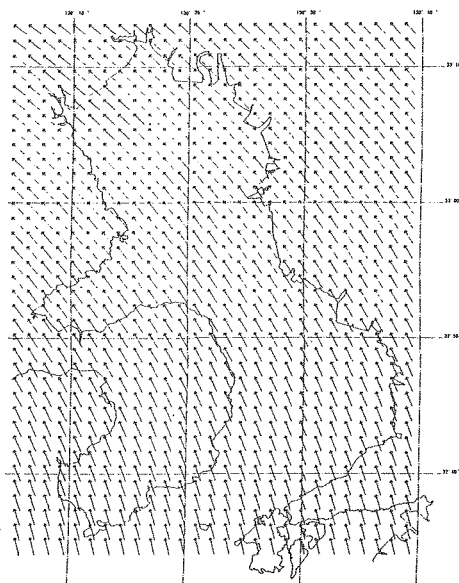
5. 風向・風速計算結果

T9117及びT9119の進行に伴う有明海沿岸域の風向・風速分布の経時変化を図一11および図一12に示す。

6. 波浪の推算

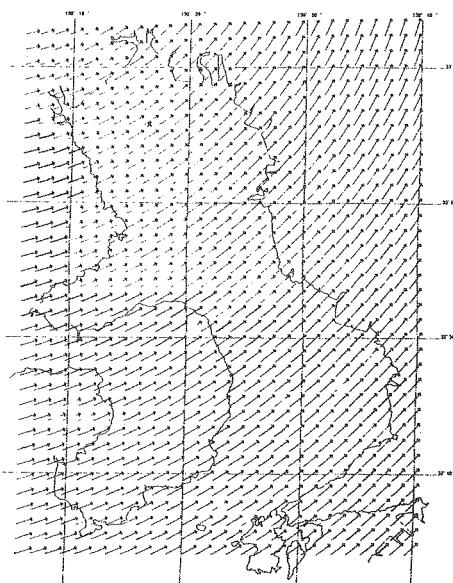
T9117においては、台風が原点に最接近する3時間前の午前2時にメッシュ上の点(44, 12)を出発する波のついて追跡をした。その場合の波の進行経路を図一13に示す。佐賀大学が設置している有明海海象観測装置によって得られたT9117でのデータを表一7に示す。得られた推算データは波の進行経路上の値である。従ってこの両者のデータを比較することはあまり意味が

19号台風 (91/9/27)



15時

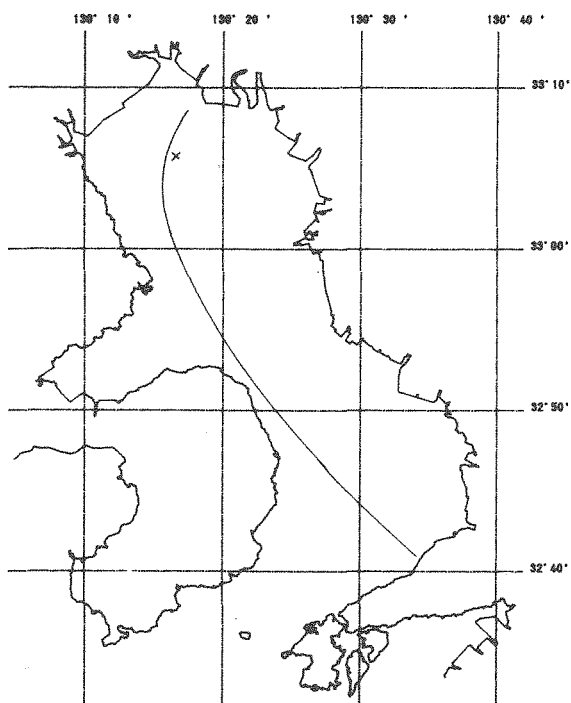
19号台風 (91/9/27)



17時

図-12 (1) T9117の風速分布推算値 (15時)

図-12 (2) T9117の風速分布推算値 (17時)

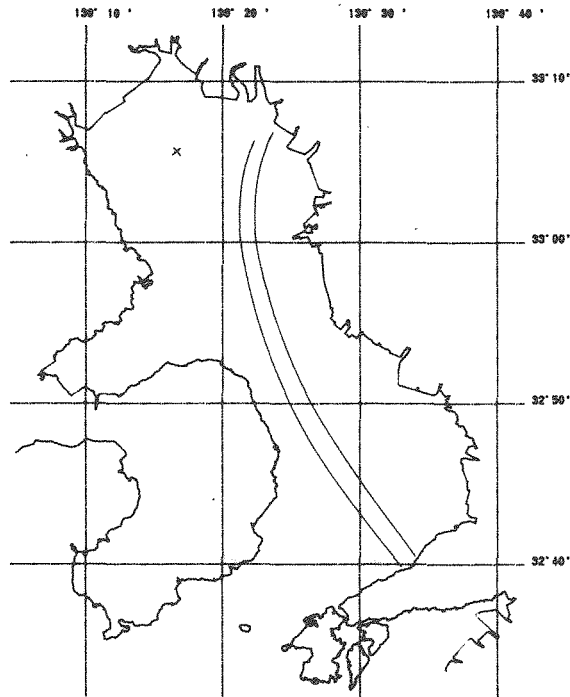


T9117 (91/9/14)

図-13 T9117の波の進行経路

表一七 佐賀大学観測塔におけるT9117の観測結果
台風17号による有明海の波浪状況 (1991年9月)

時刻	気圧 (hPa)	気温 (°C)	風向 (deg.)	風速 (m/s)	潮位 (m)	最大 波高 (m)	有義 波高 (m)	平均 波高 (m)
13/								
21	1005.7	24.6	31	6.6	0.75	0.48	0.30	0.19
22	1005.4	24.4	28	6.3	1.57	0.62	0.36	0.22
23	1005.0	23.9	28	8.4	2.08	0.79	0.40	0.25
24	1003.4	24.2	31	8.8	2.12	0.66	0.45	0.28
14/								
1	1002.0	24.4	31	10.3	1.64	0.76	0.50	0.31
2	999.9	24.3	34	12.1	0.80	1.21	0.73	0.47
3	997.5	23.4	36	13.4	-0.16	1.00	0.69	0.44
4	992.6	22.9	39	17.6	-1.02	1.21	0.98	0.71
5	986.3	23.0	59	20.2	-1.45	1.70	1.20	0.77
6	974.0	24.2	134	33.8	-0.94	3.47	2.36	1.46
7	975.0	25.9	227	21.1	0.04	2.05	1.20	0.74
8	987.0	24.5	277	18.6	0.03	1.66	0.97	0.60
9	995.5	25.1	291	12.6	0.54	1.43	0.87	0.54



T9119 (91/9/27)

図一四 T9117の波の進行経路

ない。そこで観測装置設置地点に波が接近するときの値を比較する。その結果を表一八に示す。両者は比較的よくあっており、本手法が有明海の波浪推算式として妥当であることが示された。

表一 8 佐賀大学観測塔地点におけるT9117による波浪の推算値と実測値の比較
17号台風計算結果

日 時	波 高 (m)	
	実測データ	推算データ
14 2	0.73	0.64
3	0.69	1.41
4	0.98	2.40
5	1.20	2.44
6	2.36	2.54
7	1.20	0.97

表一 9 佐賀大学観測塔地点におけるT9117による波浪の推算値
19号台風計算結果

日 時	波 高 (m)
27 13	0.61
14	1.42
15	2.64
16	3.67
17	1.44

この手法を用いて T9119における波の進行経路は図一14で示され、佐賀大学観測塔地点の波浪を推算値は表一 9となる。

残念ながら T9119における実測データはあまりにも強風であったため、受信側が停電してしまい推算値との比較は出来なかったが T9117の規模との比較から表一 9 は妥当な値と考えられる。

ま と め

佐賀地方では観測史上最大と言われる台風が1991年9月に2個も来襲した。これらの台風における波浪の推算と実測データの比較を行い推算手法の妥当性を検証した。

その結果 T9117については実測データと推算値がよくあっていることが確かめられたが T9119ではあまりにも大きな台風であったために欠測となり実測値と推算値の比較が出来なかった。今後さらに多くのデータを用いて推算手法の妥当性を検証し、水深変化に伴う推算式の確立を目指したい。

謝 辞

本研究をまとめるにあたり、貴重なデータを提供して下さいった本学藤本昌宜教授に感謝を申し上げます。

参 考 文 献

1. 例えば土木学会編(1985), 水理公式集, 土木学会, p.487
2. Bretschneider, C.L. (1959), Revisions in wave forecasting, deep and shallow water. Proc. 6th Conf. on Coastal Eng. p.30-67
3. 井島武士, 湯 麟武(1965), 浅海風波の数値計算, 第12回海講, p.69-75
4. 井島武士(1968), 波浪の数値予報, 水工学に関する夏期研修会講義集, p.1-30
5. 農林省農地局(1966), 土地改良事業計画設計基準「海面干拓」, 農林省農地局, p.41
6. 例えば土木学会編(1985), 水理公式集, 土木学会, p.41

摘 要

従来、有明海沿岸域において干拓堤防をはじめとする各種構造物の設計において使用される波浪の推算には、伊勢湾台風のデータが用いられてきた。しかし、1991年9月にこの伊勢湾台風を越える規模の17, 19号台風が有明海沿岸域に來襲した。

本研究は17号台風による井島の波浪推算手法による値と本学に設置している海象観測装置による実測値とを比較しその推算手法の妥当性を示すと共に19号台風における波浪の推算をおこなった。