

波高計を利用した波向観測

井 島 武 士*・木 内 政 鋭**・関 口 雅 臣***

1. はしがき

海岸における波向の観測には、トランシット、ミリ波レーダー、その他各種の器械器具を用いた方法がとられている。

われわれは、このたびケーブル式波高計を利用して波向観測を試みた。またこれと併行してトランシット目視によるデータも得たので両方の結果をよく調べ、二、三の検討を加えた。

その結果のとりまとめをおえたのでここに報告する次第である。

2. 地形概要

調査地点は、宮城県仙台海岸であって、その概要は 図-1 (a), (b), (c) のとおりである。

図-1 (c) の飛ヶ崎でトランシット目視観測を、同じく蒲生で波高計による観測を行った。

3. 自然条件一般

当海岸の主たる自然条件はつぎのとおりである。

(1) 風

蒲生地先のデータによると、風速 5 m/sec, 10 m/sec 以上の方向別発生頻度は 図-2 のとおりである。

(2) 波 (波高, 周期)

蒲生地先のデータによると来襲した波の波高, 周期 (有義波について) の発生未超過確率は 図-3, 4 のとお

りである。

(3) 海底状況

海底の深浅状況はおおよそ 図-1 (c) のとおりで、局部的地形変化が少ない。

4. 波向の観測

この波向調査は、仙台新港 (仮称) 建設計画策定のために行なわれた各種自然条件調査の一環としてなされたものである。

その目的に沿うよう、トランシットで1日2回の観測

図-1 (a)

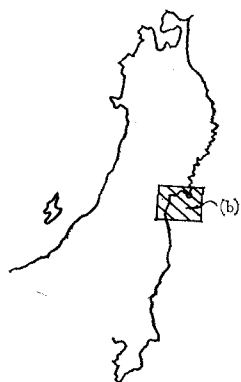


図-1 (b)

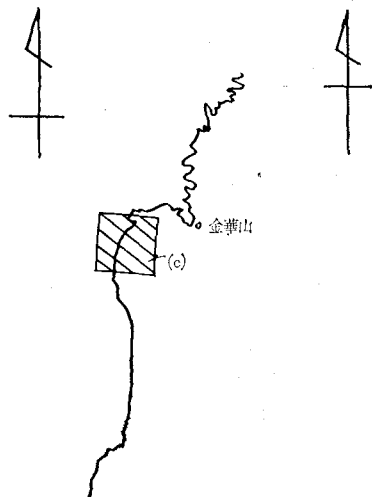
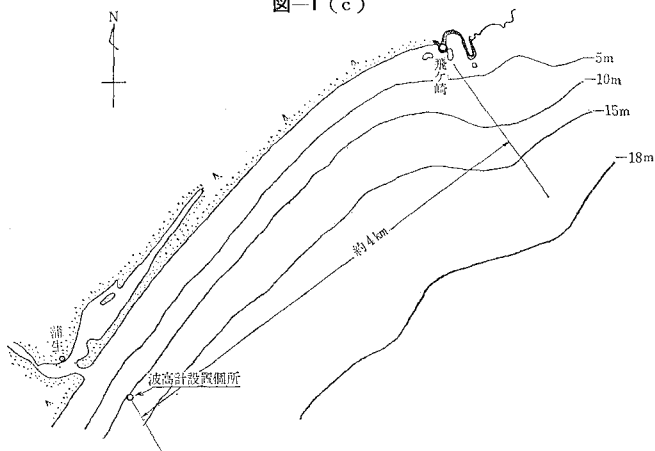


図-1 (c)



* 正会員 工博 九州大学教授 工学部水土木科

** 正会員 宮城県港湾課長

*** 正会員 運輸省第二港湾建設局塩釜港工事事務所次長

図-2

太線は 5 m/sec 以上
細線は 10 m/sec 以上

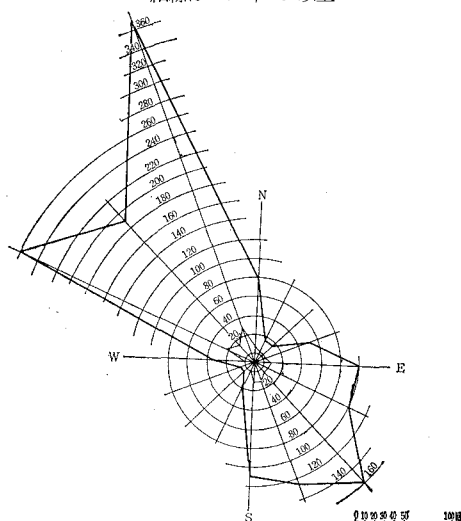


図-3

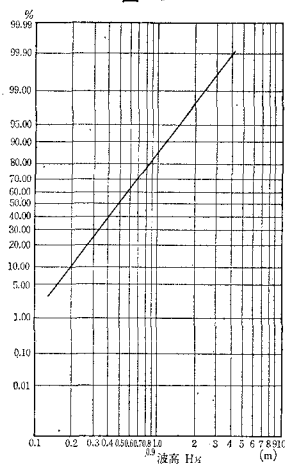


図-4

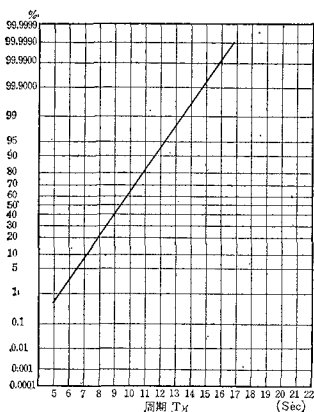


図-5

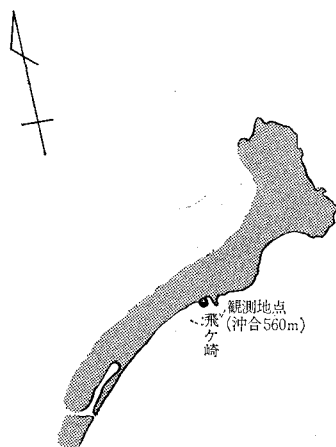
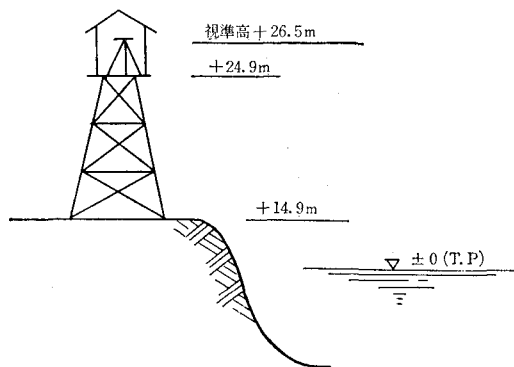


図-6



以下本文においては当海岸の波向特性そのものより、トランシット観測と、波高計観測との相関に重点を置いてのべることにする。

(1) トランシットによる目視観測

a) 観測位置：(図-1 (a), 図-5, 6)

ここで、 $H/E \div 20$ 伏角 $2^\circ 50'$ 距離 560 m

b) 観測時間：午前 10 時～午後 3 時、10 分ずつ

c) 観測期間：昭和 39 年 2 月より、現在に至る。

d) 観測者：宮城県仙塩開発建設事務所

(2) 波高計による観測

a) 概略：3 台の波高計を図-7 のように配置し、1 つの波峯が各点を通過する時刻のずれを求めると、その値と波速とから波向が求められることになる。

b) 観測位置：図-1, 図-7 のとおり。

c) 観測時間：午前 10 時、午後 4 時。

d) 観測期間：昭和 39 年 4 月より現在に至る。

e) 観測者：宮城県仙塩開発建設事務所

f) 考え方：

① 仮定：

(i) 浅海部では波形の同一性が保持される。

(ii) 波速は波峯上の各点で同一である。

を行なったのにあわせ、波高計を利用する方法を試みた。

図-7

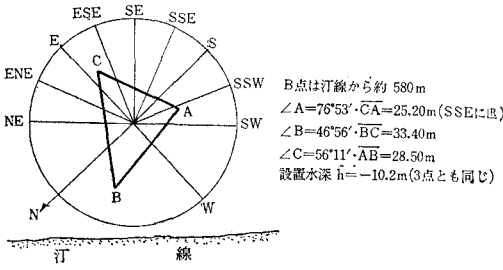


図-8

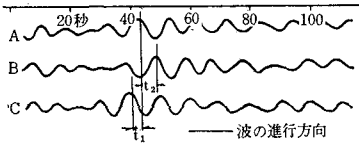
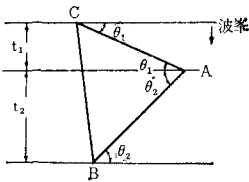


図-9



(iii) 水深は各点で同一である。

② 解析：3 台の波高計の記録を同時に一つの記録紙上に記録させその一例として 図-8 のようなものが得られたとする。

この記録において特定の波に着目する。

図-8, 9 から

$$\overline{CA} \sin \theta_1 = ct_1$$

$$\overline{AB} \sin \theta_2 = ct_2$$

ここで、 c は波速で一定とする。

$$\therefore (\overline{CA}/\overline{AB}) \cdot \sin \theta_1 / \sin (\angle A - \theta_1) = t_1/t_2$$

$\overline{CA}/\overline{AB}$ および t_1/t_2 は既知だから、 θ_1 が求まる。

本海岸では $\overline{CA}$ を方位 SSE に直角に設置したから θ_1 がわかると波峰の向き、波向がわかる。

さて波峰は、A, B, C の 3 点を C—A—B の順で通過する時と、A—C—B の順で通過する時とある、それぞれの場合について θ_1 の算定式は下のとおりとなる。

○ C—A—B の順で通過した時

$$\left. \begin{aligned} t_1/t_2 &= a \\ \overline{CA}/\overline{AB} &= b \end{aligned} \right\} \text{とする。ただし } \theta_1 < 90^\circ$$
$$\angle A = \alpha$$

$$\sin \theta_1 = a \cdot \sin(\alpha - \theta_1) \cdot \frac{1}{b}$$
$$= (a \sin \alpha \cos \theta_1 - a \cos \alpha \sin \theta_1) \cdot \frac{1}{b}$$
$$\therefore b \sin \theta_1 = a \sin \alpha \cos \theta_1 - a \cos \alpha \sin \theta_1$$
$$= a \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \theta_1} - a \cos \alpha \sin \theta_1$$
$$\therefore b \sin \theta_1 + a \cos \alpha \cdot \sin \theta_1 = a \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \theta_1}$$

$$\sin \theta_1 (b + a \cos \alpha) = a \sin \alpha \sqrt{1 - \sin^2 \theta_1}$$
$$\therefore \sin^2 \theta_1 (b + a \cos \alpha)^2 = a^2 \sin^2 \alpha (1 - \sin^2 \theta_1)$$
$$= a^2 \sin^2 \alpha - a^2 \sin^2 \alpha \sin^2 \theta_1$$
$$\therefore \sin^2 \theta_1 \{ (b + a \cos \alpha)^2 + a^2 \sin^2 \alpha \} = a^2 \sin^2 \alpha$$
$$\sin^2 \theta_1 = a^2 \sin^2 \alpha / \{ (b + a \cos \alpha)^2 + a^2 \sin^2 \alpha \}$$

上式に a, b を代入し

$$\sin^2 \theta_1 = \frac{(t_1/t_2)^2 \sin^2 \alpha}{(\overline{CA}/\overline{AB})^2 + 2 \cdot t_1/t_2 \cdot \overline{CA}/\overline{AB} \cdot \cos \alpha + (t_1/t_2)^2}$$

○ A—C—B の順で通過した時

同様にして

$$\sin^2 \theta_1 = \frac{(t_1/t_2)^2 \sin^2 \beta}{(\overline{AC}/\overline{CB})^2 + 2 \cdot t_1/t_2 \cdot \overline{AC}/\overline{CB} \cdot \cos \beta + (t_1/t_2)^2}$$

ここで、 $\angle C = \beta$ とする。

③ 計算： t_1/t_2 および θ_1 をあらかじめ計算して図表を作っておく。本海岸では $\overline{AC}$ が SSE に直交するように設置してあるから、図-9 のように θ_1 の値を求めれば波の向きがわかる。

$t_1/t_2, \theta_1$ の計算図表の形式を参考までに示すとつぎのようになる。

表-1 t_1/t_2 の計算表

t_1	0.1	0.2		2.0
t_2				
0.1	1.00	2.00		
0.2	0.50	1.00		
...				
9.0				

表-2 $t_1/t_2 - \theta_1$ の計算表

(C—A—B の順で通過した時) (A—C—B の順で通過した時)

t_1/t_2	θ_1	t_1/t_2	θ
0.01	0, 1	0.01	0, 1
0.02		0.02	
...		...	
1.50		1.50	

以上のようにして 20 分間のうち 3 波について波向を求め平均をもってその時刻の波向とした。

5. 観測結果およびその検討

(1) 本海岸の波向特性

昭和 40 年 4 月～41 年 1 月のデータをまとめると表-3 のとおりとなる。

表-3 波向出現率一覧表

	トランシット		波 高 計	
	10 時	15 時	10 時	16 時
ESE	0 %	0 %	0.3 %	0.3 %
SE	8.4	8.1	14.0	13.0
SSE	87.6	88.6	56.3	57.9
S	4.0	3.3	29.4	28.8
合 計	100	100	100	100

この結果を仙台新港の港口形状を決める実験およびその結論において引用した。すなわち、本港の静穏度にもっとも悪影響をおよぼす、E および ESE 方向の波について、E 方向は考慮する必要がなく、ESE 方向については、その発生率が小さいから、擾乱日数を求めても、大きな日数にならないことから実験条件からはずして議論をすすめることが可能となった。また防波堤断面の設計波はまだ決定していないが、これにも十分活用する予定である。

(2) 波高計によるデータの読取法の吟味

波高計は、2時間おきに 20 分間ずつのデータを得ているが、すべての波について波向きの計算を行なうのは、はなざつで実際的ではない。したがってそのうちの何波かを選んで読み取る方法をとりたい。

試みに昭和 40 年 8 月 21 日 12 時から 20 分間のデータについてすべての波を読み取ると下のようになった（読み取り可能数 73 波）。

表—4 40 年 8 月 21 時 12 時の波向分布
(波向は北からの偏角時計回り)

波 向	157°～160°	160°～165°	165°～	合 計
す べ て の 波	44 波	15 波	14 波	73 波
波高の大きいものから 1/3	14	5	5	24

これから見ると、i) 波向の最頻値より北に偏するものが全くない、ii) パラツキが小さく、かつ波数も少ない、iii) 波高の大小にかかわらず、波向分散のパターンが同じである、等の諸点が特徴的である。しかしこの分析は、ただ 1 回の 20 分のみなので、今後さらに分析を行ないたいと思っている。なお波向が複合している時に、波形記録（圧力波形）のどれを波峯と考え、それがとなりの波高計の記録のどれになるかという判定も、基本的な問題であるからこれも今後さらに検討しなければならない。

以上の結果から、この調査では、20 分間で 3 波を任意に選び平均値をとることとして作業をすすめた。

(3) 観測波向と推算波向

昭和 40 年 8 月の台風 17 号について仙台湾における波向を観測値と推算値との比較で考えてみる。

当日の気象の概略は図—10, 11 に示した。

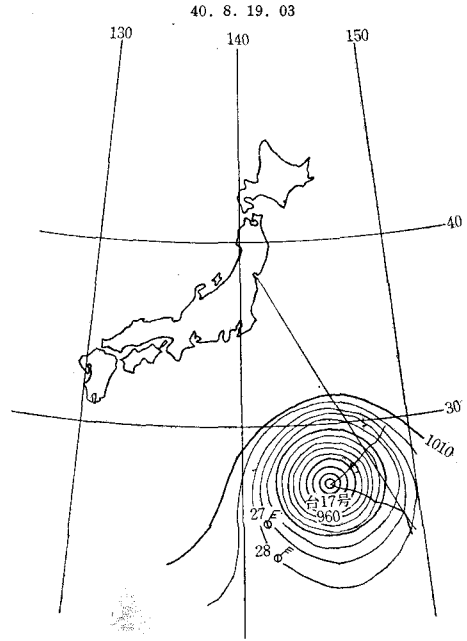
天気図による波向の推算はつぎの手続きによった。

a) 風域内で発生した波は、風域外に出て他の力を受けずそのまま減衰しつつ該当海岸に達する。

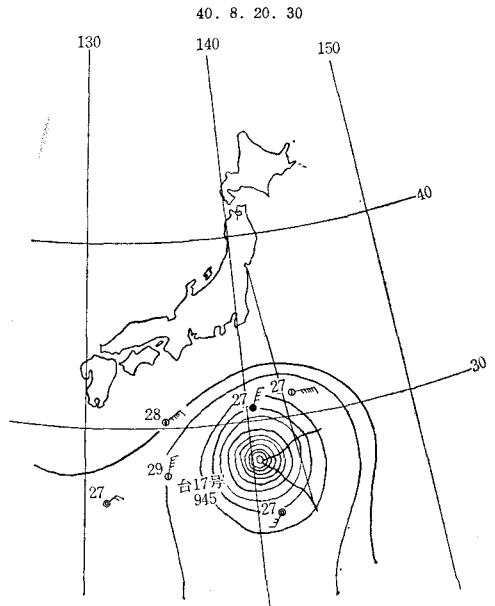
b) 風域内について、傾度風から求めた海上風を、天気図上の風速から修正し、その風速と、風域内の吹送距離より、S.M.B. 法で風域終端の発生波の H_F , T_F を求める。

c) 風域外に出た波は、Bretschneider の方法で求めて、到着地の H_D , T_D を求める。

図—10



図—11



d) 到着地までの所要時間 (t_D) を求める。

$$t_D = \frac{D}{g \cdot T_D / 4\pi} \quad (D: \text{減衰距離})$$

計算の結果は表—5 のとおりである。

表—5

天気図の日時 (年月日時)	t_D (時間)	到着時刻	推 算 値		
			波 向 (°)	波高 (1/3) (m)	周期 (1/3) (sec)
40.8.19.03	21	40.8.20.00	149	1.95	13.2
40.8.20.03	28	40.8.21.07	170	1.31	11.7

(波向は北からの偏角)

表-6

	昭和40年8月20日00時			昭和40年8月21日07時		
	波向	波高(1/3) (m)	周期(1/3) (sec)	波向	波高(1/3) (m)	周期(1/3) (sec)
推算値	149°	1.95	13.2	170°	1.37	11.7
トランシット	(155°)	—	—	(142°50')	—	—
波向計	157°	1.19	13.4	162°	1.21	10.0

(上表中()は20日10時, 21日10時の時の値である)

この到着時刻における, 現地実測値を表-5の値とくらべてみると表-6のとおりとなる。

(4) トランシットと波高計の記録の比較

波高計による方法が果たして有用性があるかないか, 一応もっとも原始的ではあるが確かな方法であるトランシット観測と比較して, その有用性を吟味したい。

この海岸では, 両測定法が同一地点で行なわれなかったため, データを単にくらべることはできないが, とりあえず午後10時の観測値をくらべることにする。

データは40年4月1日~41年1月31日のものとした。

測定値は真北からの角度で整理して, 両測定値の差をとった。

トランシットの値を θ_1 , 波高計の値を θ_2 , として $\theta_1 - \theta_2 = \Delta\theta$ とする。

整理の結果つぎのとおりとなった。

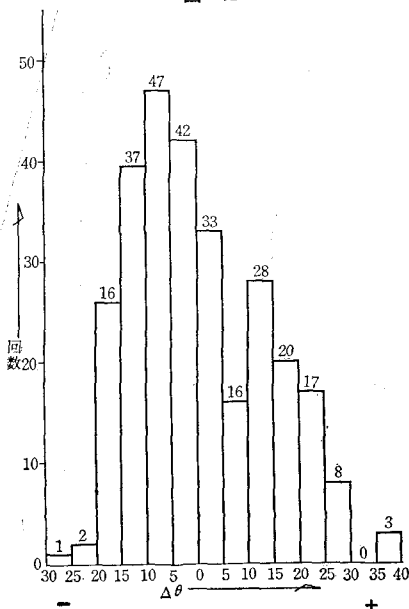
$\Delta\theta > 0$ は 76 回 $\Delta\theta < 0$ は 194 回

$|\Delta\theta| = 15^\circ 05'$ $\Delta\theta = -8^\circ 40'$

$\Delta\theta$ の分布は図-12のとおり。波高計による観測の欠測率は6.2%, トランシットによる観測の欠測率は6.0%であった。

このように両観測値の差が生ずるのは主につぎのような理由によるものと考えられる。

図-12



○ 観測地点がちがうので, 屈折の効果がちがうため

○ 観測法にともなう誤差の大きさがちがうため

○ 波向が単一でない時も, 記録としては一方向のものとしてしまうため

○ エラーか故障があったため

以下において, これら4つの事項について検討し, 先に記したトランシットと波高計の記録の差を分析してみた。

その結果は下に述べるとおり, 差の発生について十分な理由をつかみえなかった。

トランシット法が必ずしも正しいものとはいえないが, 波高計の値とのずれは決して小さくないから, 今後この観測法の成果を確かめるため, ミリ波レーダーの設置してある海岸で check が必要と思われる。

a) 観測地点の違いと屈折効果 沖波波向 ESE, SE, SSE, の3つにつき屈折図を画いて, 沖波が, 蒲生と飛ヶ崎にそれぞれ到着した時どのくらい波向がずれるかを求めてみた。

波の周期として 8 sec をとった。

ずれの大きさをまとめると

表-7

表-7 のとおりとなる。この表のとおり, $\Delta\theta$ はいずれも+の値で, しかも θ_1, θ_2 が大きくなる(波向が南に寄る)ほど大きくなる。このことは先の図-12の結果とは符合しない。

沖波の方向	$\theta_1 - \theta_2 = \Delta\theta$
ESE	+ 8°
SE	+ 11°30'
SSE	+ 13°30'

つぎにすべての波について, 蒲生と飛ヶ崎の波向のちがいが, 屈折のみに原因すると仮定すれば, それら波向のずれの平均値はどのくらいになるかを調べてみた。

全波を1波1波求めるのはむりなので, 波向は ESE, SE, SSE の3方向にすべてが含まれるとし周期は 8 sec と仮定した(8 sec の末超過確率は 20%なので, これで算定しておけば, ずれは小さめの値を与えることとなるのでこれを選んだ)。

この計算の結果ずれの平均は $12^\circ 40'$ となった。先の図-12で $\Delta\theta$ の平均が $-8^\circ 40'$ だから, もし両地点の波向が屈折の効果のみによって異なるなら, トランシットと波高計のデータは, その他の何らかの理由により, 平均して,

$12^\circ 40' - (-8^\circ 40') = 21^\circ 20'$ だけ差をもつことになる。

b) 観測法に固有の測定誤差について トランシット観測は本地区で $n=20$ (n は, 視準の水平距離と高さの比)である。この値は, 現地実測例としてあまりわるい方ではない。

$n=20$ の時, 視準する時 0.5° の誤差があると, 実際の波向で 10° 近い誤差になることがある。

一方波高計による観測によると, 前述のこの方法にと

もなう仮定の適合性が十分として、 t_1/t_2 に 0.1~0.2 の誤差は起こりうる。この差は波向にして $3^\circ\sim 6^\circ$ となる。

したがって、一般的に生じうる誤差の大きさはトランシットの方がやや大きめといえる。これらの誤差は常識的には正規分布の形で発生するものと思われるから、前にのべた両測定値の差を、ここで説明することはできない。

c) 波向が単一な時の記録 波向が両測定法により差があり、その差が波の複合性の処理いかんによって生ずるものならば、逆にいえば、波峯の整ったうねり時のデータは両者近い値が出ているということになる。以下 40 年において波形記録の整った時のデータを拾って見たが、その結果からいうと両データの近似性はやや良くなっている(表-8)。

表-8

	年 月 日 時 40. 8. 20. 10		40. 9. 2. 10		40. 10. 5. 10	
	トランシット	波高計	トランシット	波高計	トランシット	波高計
波 向	155°40'	159°25'	152°05'	139°55'	148°50'	149°20'
波 高 1/3	—	1.67m	—	1.96m	—	3.05m
周 期 1/3	—	11.9 sec	—	11.0 sec	—	13.7 sec

この問題はこれだけでは掘り下げ方が不足なのはいうまでもない。5.(2)の波向の分布の問題もあわせて、今後データの分析を細くすすめたい。

d) エラーまたは故障について 器機の点検の結果、異常はなかった。

以上 a), b), c), d) で検討したが、両測定値の差がどうして生じたか、説明ができなかった。

(5) そ の 他

圧力波形(波形)が A, B, C の 3 点でどのくらい似ているかをのべておく。

A, C の 2 点ではほとんど変わらず、明瞭に波峯の追

跡ができた。

B になるとこの間の距離がわずか 30 m 程度であるにかかわらず、かなり形が変わっていたようである。本海岸では、もう少し深い所に設置すべきであったかも知れない。

6. ま と め

今までのべたことをまとめるとつぎのとおりとなる。

(1) 波高計を利用した観測値とトランシットの観測値の差は平均 $8^\circ 40'$ で、地形を考慮すると、差は 20° 余りになる。

(2) 両測定値の波向発生分布はよく似ているので、実際データとして有用である。

(3) 波向の複合性について、単位時間のデータについて全波の読取りを行ない検討する余地がある。

(4) 台風時について、推算値と波高計による値とはかなり良く合致する。

(5) 波形の整っている時刻で、波高計による値とトランシットの値とはかなりよく合う。

(6) 波高計を用いる方法は、

- i) 読み取りが容易
- ii) 記録があとにのこる
- iii) 自記式である
- iv) 機械の安定性が良い

などの長所が考えられる。

7. あとがき

本報告は、この種の波向測定初めての報告である。今後さらに検討を行なわねばならない点が多い。

なお、これらの観測は、宮城県仙塩開発建設事務所によって遂行されたものである。

雨や風にまけず、ねばりづよくデータの積み重ねに努力された観測員の方々に深く感謝する次第である。