

電磁流速計による波向観測

—福井県三国港における観測結果より—

永田 豊*・彦坂 繁雄**・松本 信保***

1. まえがき

海岸近くの流れや漂砂は、海岸にうち寄せる波浪の波高および波向によって支配されている。波向分布をふくめた波向の観測は海洋学上重要であるのみならず、海岸工学上も種々の波浪流や漂砂の問題、海岸構造物の設計などに関連して重要である。波の方向スペクトルを測る試みには、ステレオ写真による方法 (Cote et al¹⁾、いくつかの波高計を配列して、それぞれの記録の相関関数から求める方法 (Barber²⁾、浮子の変位および傾きの連続記録をとる方法 (Longuet-Higgins et al³⁾ などがある。われわれが福井県の依頼で三国港で行なったのは、これらとは別に一点における波の軌道運動の水平二成分の測定から波向および波向分布を求めるもので、得られる情報量は浮子の傾きの連続記録から得られるものと同等である。

2. 観測方法、観測経過

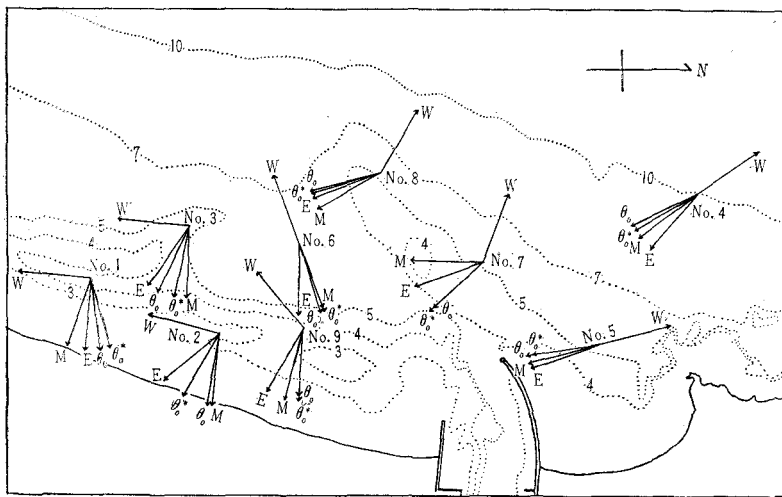
波の軌道運動を測定するのに磁石を用いた電磁流速計³⁾ 2基を用いた。2基の流速計は鉄の台座に互いに直

角にとりつけられ、海底から 20 cm の位置での軌道運動の水平二成分をとるように工夫されている。流速計は予定の位置にアンカーされた船から二本のロープで吊して海底に沈めた。流速計の基準の方向は台座の着底直前の二本のロープの示す方向と考え、船のコンパスで読みとった。ロープおよび導線は十分の余裕をとり、測定中船の動きで台座がひきずられないようにした。観測点の分布を図-1に示す。測点の位置はセクスタントを用いて決定し、観測は各点で約 20 分間行なった。

現地観測は 37 年 11 月 1 日から約 1 週間を予定したが、4 日を中心に 11 月初旬としては大きな嵐があったため、実際の観測は 2 日、7 日、8 日の三日間に行なわれた。図-2 に 2 日、4 日、7 日の天気図を示す。波高が 1m をこすと三国港港口は小さな船の出航ができなくなるので、観測時の波浪条件は表-1 に示すようにかなり静かなもので、荒天時の観測を目的とした波浪計の記録と対比することはできなかった。表-1 の目視波高で 2 日のものは平均的なものを、7 日、8 日のものは十波程度の中で最大をとったものである。また船首方位は流速計の着底時の船首の方向で、流速計の基準方向を与えるとともに、ほぼ風向に一致している。表中の方位は真北を 0° にとり時計回りに測ったものである。

図-1 観測位置および波向、風向

矢印の先の W は風向を、 E は目視波向を、 M は 100 波平均波向を、 θ_0^* は軌道運動の主方向、 θ_0 はスペクトルの最大の周波数に対する主方向を示す。



3. 軌道運動の測定からの波向分布の決定法

(1) 個々の波についての方向を統計する方法

無限小振幅波理論によると、波の形が

$$\eta = a \sin(kx - \omega t) \dots\dots(1)$$

で表わされるとき、波の軌道運動の速度の水平成分は、

$$u = \frac{\sigma \cosh k(h-z)}{\sinh kh} \eta = K(k)\eta \dots\dots(2)$$

で表わされる。ここで h は水深、 z は平均水面からの深さである。すなわち、波の峯幅が十分長い場

合には、軌道運動の速度の大きさは表面の水位上昇に比例し、方向は波の進行方向に一致する。したがって観測

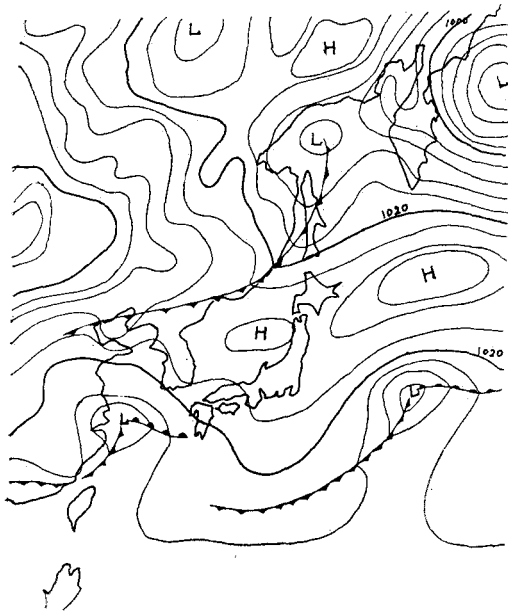
* 正員 東京大学理学部 ** 海上保安庁水路部
*** 第八管区海上保安本部

表-1

No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9
観測月日	月 日	11.2	11.2	11.2	11.7	11.7	11.7	11.8	11.8	11.8
観測開始時刻	時 分	14.14	14.52	15.36	9.12	10.00	14.35	9.50	10.43	11.35
観測終了時刻	時 分	14.30	15.12	15.56	9.32	10.20	14.50	10.10	11.03	11.55
水深	m	4.5	2.3	5.0	10.1	5.7	7.5	5.2	5.9	3.4
船首方位	度	5	15	3	145	165	70	110	120	50
目視波高	cm	20~30	50	30~40	70	80	70	50	40	60
流速振幅(100波平均)	cm/sec	24	57	24	33	46	34	31	32	50
推算波高	cm	34	33	23	26	34	30	21	35	37
目視波向	度	95	140	125	130	160	90	160	160	120
流速方向(100波平均)	度	109	96	92	142	165	69	181	151	105
θ_0^*	度	74	121	102	149	170	70	138	164	94
$\theta_0(\max)$	度	82	100	116	153	171	72	137	166	94
流速方向分散	度	18.0	11.5	16.3	15.0	14.8	15.5	18.9	9.3	7.9
r^*		0.45	0.60	0.49	0.58	0.41	0.36	0.34	0.28	0.20
$r(\max)$		0.31	0.49	0.33	0.43	0.27	0.16	0.25	0.19	0.10
流速周期(100波平均)	sec	5	6	6	8	7	7	7	6	6
$T(\max)$	sec	8	8	8	10	10	9	7	7	7

点を通過する一つ一つの波の振幅が波長にくらべ十分長いというねりの場合は、速度の水平二成分の測定から波向および波高を決定することができる。われわれが三国港で観測を行なった三日間はともに6~7secのうねりが卓越し振幅はかなり長いと考えてよかったので、速度の水平二成分の記録から相対する波形の100波を連続的に選び出し、それぞれの波について振幅と方向を求めて統計した。図-3にNo.3における観測記録の一部を示すが、2つの成分の波形は良い対応関係を示している。タイムマーク13の付近で対応が悪くなっているが、これは波の峯のはしが通過したことを示す。このようにして得

図-2 (a) 11月2日9時天気図



られた100波についての流速の平均振幅の2倍とそれから式(2)を用いて換算された波高、ならびに100波の平均方向とその分散を表-1に示す。また、それぞれの測点における波向分布を図-4に示す。

(2) random Gaussian surface を仮定した統計理論を用いる方法

上に述べたような方法は風浪のように波の振幅が波長にくらべてあまり大きくない場合には適用できないし、波の選び方について個人差を生じる可能性がある。より一般的には流速の二成分のそれぞれの二乗および積の時間的平均 $\overline{u^2}$, $\overline{v^2}$, \overline{uv} から, random Gaussian surface

図-2 (b) 11月4日21時天気図

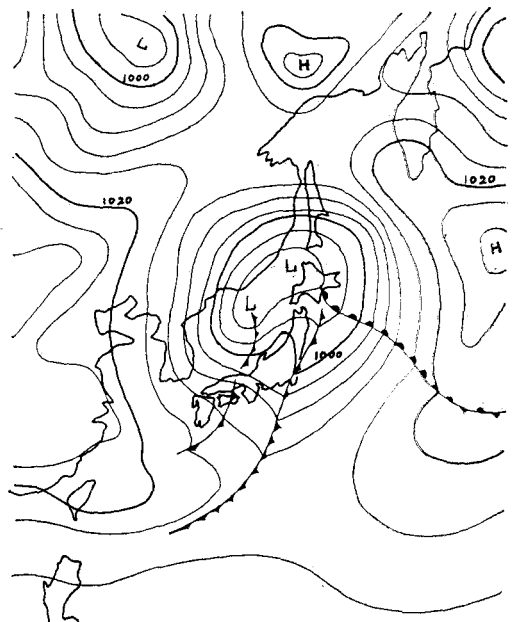


図-2 (c) 11月7日21時天気図

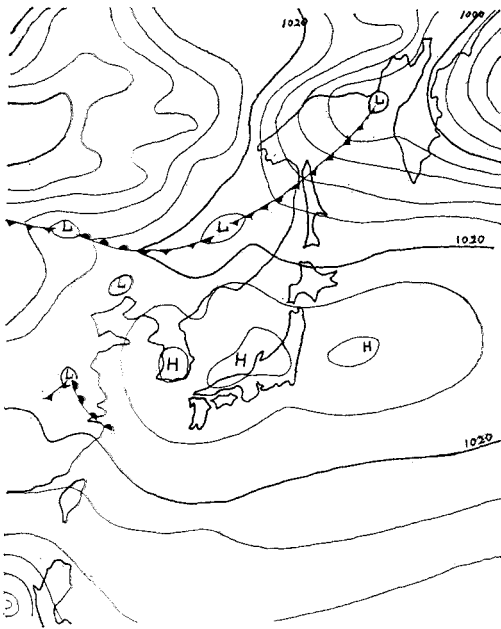


図-3 軌道速度の二成分の記録例 (No. 3)

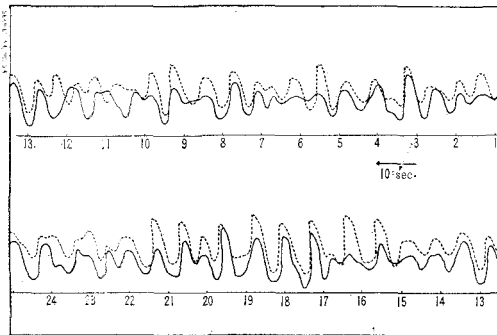
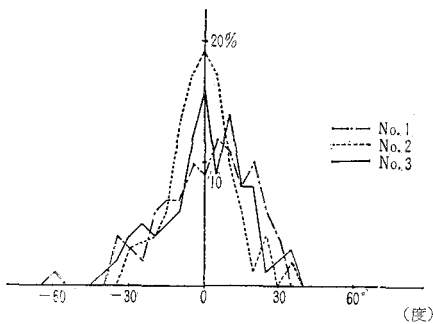


図-4 (a) 11月2日波向分布



を仮定した統計理論⁶⁾を用いて、軌道運動の主方向 θ_0^* および方向の散らばりの指標 γ^* をつぎの式から求めることができる。

$$\tan 2\theta_0^* = \frac{2\overline{uv}}{\overline{u^2} - \overline{v^2}} \dots\dots\dots (3)$$

図-4 (b) 11月7日波高分布

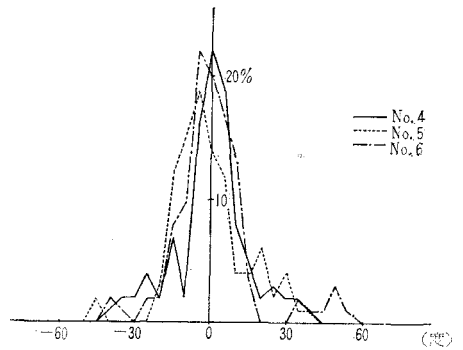
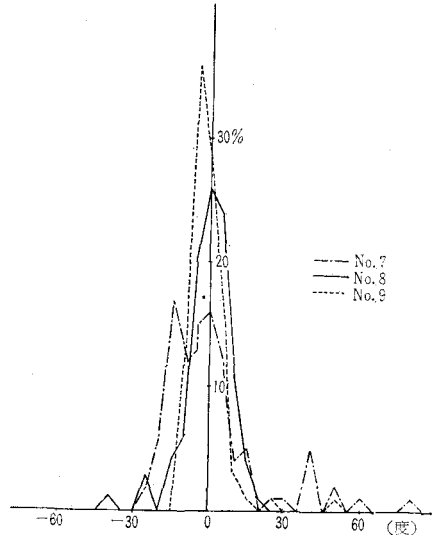


図-4 (c) 11月8日波向分布



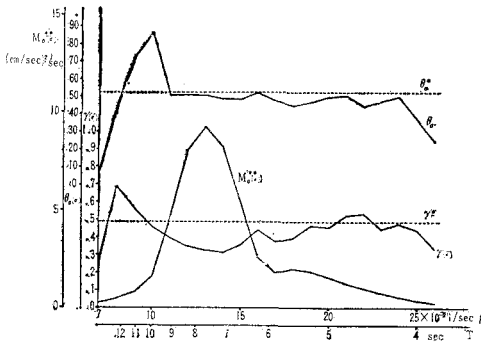
$$\gamma^{*2} = \frac{\overline{u^2 + v^2} - \sqrt{(\overline{u^2} - \overline{v^2})^2 + 4\overline{uv^2}}}{\overline{u^2 + v^2} + \sqrt{(\overline{u^2} - \overline{v^2})^2 + 4\overline{uv^2}}} \dots\dots\dots (4)$$

軌道運動は各成分波について水面の上昇と式(2)で結びついているから、この θ_0^* および γ^{*-1} はそれぞれフィルター $K(k)$ を通して見た平均波向および峯幅の指標 (long crestedness, 峯幅の波長に対する割合) と考えることができる。表-1 に 1 sec 間隔の読み取り値から計算された θ_0^* および γ^* を各測点について示す。

さらに u, v に関する auto-spectrum および cross-spectrum を計算すれば、各周波数成分に式(3), (4)を適用して周波数別の主方向 $\theta_0(\sigma)$ および峯幅の指標 $\gamma(\sigma)$ ($\theta_0(\sigma), \gamma(\sigma)$ については軌道運動に対するものと水面の変位に対するものは等しい) と power-spectrum を求めることができる。また $K(k)$ は周期だけの関数と見なせるから種々の量について流速から表面の性質を出ることができる。図-5 に No. 3 の資料から得られた $\theta(\sigma), \gamma(\sigma)$ および軌道運動の power-spectrum $M_0^{**}(\sigma)$ を示す。また表-1 に $M_0^{**}(\sigma)$ を最大にする周期 $T(\max)$ およびそれに対する主方向 $\theta_0(\max)$, 峯幅の指標 $\gamma(\max)$ を示す。

を示す。

図-5 $M_0^{**}(\sigma)$, $\theta(\sigma)$, $\gamma(\sigma)$
(自由度は約 50)



4. 観測結果

(1) 軌道速度の振幅と波高, 周期

表-1 の目視波高は精度が悪く, 推算波高と細かい比較を行なっても意味はない。2日の目視波高は平均的な値, 7日, 8日のものは最大値に近いものをとったことを考え, また $T(\max)$ と 100 波平均周期をみると $T(\max)$ が一様に大きな値を示し, 波形を選ぶとき, 小さい波を数えすぎたこと, したがって推算波高は小さめの値がでている可能性があることを考えると, 目視波高は推算波高と互いに矛盾のない値を示しているといえる。

(2) 平均波向

表-1 に目視波向をふくめ波向を示す4つの指標を示したが, 図-1 に風向(船首方位)とともに各点で得られたこの4つの方向を矢印で示した。 $\bar{\gamma}$ が大きく分散の大きい2日の観測では, それぞれの方向がかなりの違いを示しており, このようなときは観測時間をもっと長くする必要があると思われる。しかし $\bar{\gamma}$ が比較的小さいときはかなり良い一致を示している。特に θ_0^* と $\theta_0^{*(\max)}$ は非常によく一致し, 平均方向を出すだけの目的なら θ_0^* の計算で十分であろう。また風向(船首方位)が波向と大きく違っている場合, 目視波向は風向側にずれる傾向をもつ。これは表面の小さな風浪の動きにまどわされるためと思われる。

天気図から明らかのように, 観測は低気圧がはるか北東に去って波がかなり静まったときに限られたから, 三日間ともに北東方向からのうねりが卓越した。日が異なっても互いに近い観測点ではほぼ同じ傾向を示すことから, 波向に関するかぎり9つの観測は大体同じ沖波条件で得られたと見て良いようである。図-1 に示された波向きを見ると各点において波向は等深線(昭和37年8月測量)に直角になる傾向を示し, 明らかに屈折の影響が現われている。川口から斜めにのびた砂州の北側の測点と南側の測点では波向がかなり違っており, 砂州上で

波の南向き成分が失なわれたような様子を示す。しかし, これだけの資料ではその原因まで論ずることはできない。また No. 5 の点で予想以上の屈折を示すこと, No. 7 において 100 波の平均方向が他にくらべ大きくずれていることは, つぎに述べる方向分布の形とも関連して, 斜めに突き出た砂州の影響であるかもしれない。

(3) 波向分布

図-4 の波向分布を見ると, それぞれの日に対して分布の形状がほぼ似ており, 100 波程度の資料でもかなり良くそのときの状態を表わしうるのである。また7日の分布形と8日の分布形をくらべると, 嵐の遠ざかるにつれて嵐の領域を見込む角度が減少するため, うねりの方向がそろって分布形がとがってくる傾向が見られる。このことは $\bar{\gamma}^*$, $\bar{\gamma}(\max)$ の値からもはっきり読みとり得る。

No. 8 に対する No. 9 の分布, あるいは No. 4 に対する No. 5, No. 8 に対する No. 9 の $\bar{\gamma}^*$, $\bar{\gamma}(\max)$ の値を見ると, 波が沖から岸に近づくにしたがい, 分布の拡がり小さくなり, $\bar{\gamma}^*$, $\bar{\gamma}(\max)$ の値が小さくなってゆく。これは屈折の影響と考えられ, すべての波が等深線に直角な方向にそろえられてゆくことを示している。No. 1, No. 2, No. 3 についてはこの傾向は認められないが, これらの点は複雑な bar 地形の上にあるためではないかと考えられる。

波向のところで述べた砂州上の点 No. 5, No. 7 においては方向分布が正の側にすそを引く形になりいちじるしいひずみを示す。このひずみの方向は No. 5 の波向の予想以上のかたよりの方向と一致しており, No. 7 での平均方向の, 他にくらべての大きなかたよりの方向にも一致している。さらに砂州を越えた No. 6, No. 9 の点でも若干同じような傾向を示し, No. 6 では正の側に小さなグループをもっている。図-4 の分布形を見るかぎり, 砂州上で峯線方向に進行する波が新たに作られたかのように見える(もちろん波の選び方にも問題があり, また 100 波程度の統計でははっきりしたことはいえず, さらに, このような点での観測を行なう必要がある)。

5. 波向, 波向分布の決定法の比較

最後にここで行なった方法を比較すると, まず目視波向は非常に簡単であるが, 不正確でもあり分布を得ることはできない。個々の波について軌道運動から方向を出し, それから平均波向と波向分布を求める方法は, 波形の選び方に個人差を生じる可能性があり, 理論的な意味づけもむずかしい。しかし, 波向分布にひずみがある場合それを検出しうる可能性があり, また, あとの二つの方法にくらべめんどろな計算の必要がなく計算機の使用なしで一応の結果を出しうる。100 波をとったのは便宜的なもので許すかぎり波数をふやすべきことは当然であ

る。なお単に大体の平均方向のみを必要とする場合は二成分の流速を X-Yレコーダーに入れて直接方向を読みとればよい。

θ_0^* は正確には軌道運動の主方向を示すものであるが、普通のスペクトルをもつ波ではほぼ波向を示すと考えてよい。 γ^* についても同様で、特に周期別の知識を必要としないならばこれで十分であろう。ただ $\theta(\sigma), \gamma(\sigma)$ を求める際おのおのの auto-spectrum, cross-spectrum から白色雑音を差し引いたが、これが θ_0^*, γ^* に影響する可能性があり、 θ_0^*, γ^* までの計算では除くことができない。 $\theta(\sigma), \gamma(\sigma)$ を求める方法は周期別の知識が得られるとともに、表面の性質に直接換算しうる点最もすぐれている。しかし実際の計算にばく大な時間を要する。われわれの場合 1 sec おきの読みとり値を用いたが一組 20 分の観測値を読みとるのに一人一日の時間を十分要し、あとの計算にパロース 205 中型計算機で 1 組約 4 時間を要した。したがって、定期観測などの実用的観測には θ_0^* あるいは 100~200 波の流速の平均方向を用いるのがよいであろう。

今回の観測には手軽な永久磁石を用いた流速計 (P 型) を用いたが、これでは長期にわたる安定した記録を得ることができないので、定期的な観測には励磁コイルを用いた流速計 (E 型)⁹⁾ を用いるべきである。

参 考 文 献

- 1) Cote, L. J. et al. : The directional spectrum of a wind generated sea as determined from data obtained by the Steres Wave Observation Project, Met. Pap. New York Univ. Coll. of Eng. 2, No. 6, 1960.
- 2) Ocean Wave Spectra, Proc. of a Conference, Easton, U. S. A. Nat. Acad. Science. 1963.
- 3) 永田 豊 : 電磁流速計の海浜への応用, 第 6 回海岸工学講演会講演集, 1959.
- 4) 永田 豊 : 波の方向スペクトルの測定—電磁流速計の応用—, 沿岸海洋研究ノート, 2 巻 1 号, 1963.
- 5) Nagata, Y : The electromagnetic current meter, (in preparation).
- 6) Nagata, Y : The statistical properties of orbital wave motions and their application for the measurement of directional wave spectra. (in preparation).