

波浪スペクトルにもとづく大潟海岸 の波向の推算について

柿 沼 忠 男・石 田 昭

ON ESTIMATION OF DIRECTIONS OF WAVES OFF THE ŌGATA COAST BASED ON WAVE SPECTRA

By *Tadao KAKINUMA* and *Akira ISHIDA*

Synopsis

Ten-minute simultaneous wave records have been made in shallow water off the Ōgata coast by three wave gauges set at depths of 6~7 m in a triangle, whose sides are 14.0 m, 32.0 m, and 27.7 m, respectively. These data have been digitized at 1-sec intervals and analyzed to extract power spectra and cross spectra. The directions of predominant waves are estimated based on the phase angles. These wave directions agree with the wind directions estimated from the weather maps. In addition, the directional resolving power of the actual array is checked and compared with two modified arrays.

1. 緒 言

海岸構造物を設計するためには、外力としての設計波を決定する必要がある。沖波としては、天気図や風の記録などを用いて予知することもできるが、通常、海岸構造物を設置するような比較的浅いところの海岸波浪の特性については不明な点が多く、たいていの場合、1台の波高計を設置することによって、波浪記録を得て、その海岸における波高と周期に関する基礎的資料としている。しかし、そうした観測地点での波浪資料は、多かれ少なかれ、屈折、反射などの影響を含んだものであり、そうした影響を調べなければ、正確な資料を得ることはできない。すなわち、屈折効果がある場合には、波高計の設置位置が、来襲波の収束するところであれば、沖波より高い波が記録されることになるし、逆に発散するところに設けてあれば、沖波より低い波高が記録されることになる。また、反射の影響がある場合には、設置位置が、重複波の腹や節とどれだけ離れた地点にあるのかによって異なった値の波高が記録されることになる。こうしたことから、波高や周期のほか、どうしても波向を知ることが必要になってくる。また、波の卓越方向を見出すことによって、漂砂の方向を推定することも可能であり、防波堤に作用する波圧や港への波の侵入状況を推定することもできるが、1台の波高計だけでは、波向を観測することはできない。

従来、波向の観測には、最も一般的で簡単に用いられる海面上の高さ 10~30 m 以上の高所に据えたトランシットによる方法¹⁾、2台の飛行機をとばして、海面を同時に写真撮影する実体写真法^{2),3)}、小名浜港と秋田港で用いられたことがあるレーリ-盤式波向計⁴⁾、金沢港と鹿島港⁴⁾で用いられているストレンジ型波向計、運輸省が考案し⁵⁾、金沢港、秋田港、鹿島港で使用されているミリ波レーダによる方法^{6),7)}、電磁流速計2基をたがい直角にとりつけ、海底に設置して水粒子の軌道運動の水平2成分をとるように工夫した方法⁸⁾、2点以上の地点に波高計を配置して、それぞれの水位の連続記録を用いる方法⁹⁻¹⁸⁾、1個のブイの上下運動と傾斜の連続記録を用いる方法¹⁹⁾、などがある。

この論文は、京都大学防災研究所で新潟県大潟海岸にある帝国石油KKの長大栈橋（汀線からの海上部分の長さ 250 m、栈橋先端の水深 6~7 m）に設置した6台のリレーを採用した階段抵抗式波高計²⁰⁾のうち、栈橋先端付近の三角形配列をした3台の波高計によって得られた波浪記録からパワースペクトル、クロススペクトルを求め、過程は線型であると想定して波の卓越方向を推算し、天気図からその妥当性を検討すると同時に、方向スペクトルの精度を示す分解能について調べたものである。

2. 波浪の資料とその解析

(1) 大潟海岸と波高計配列

観測の対象とした大潟海岸は、北緯 37°13′、東経 138°19′ に位置し、等深線は、かなり深いところまで、海岸線とほぼ平行に走っている。この海岸には、第一人工島といわれる栈橋があって、その先端付近に、三角形配列をした3台の波高計が設置されている。Fig. 1 は、そうした波高計の配置を栈橋の鋼管杭およびストープとともに示したものである。波高計 No. W-1~2, 2~3, 3~1 の間隔は、それぞれ、14.0 m, 32.0 m, 27.7 m で、W-2~3 は、丁度南北の方向になっている。

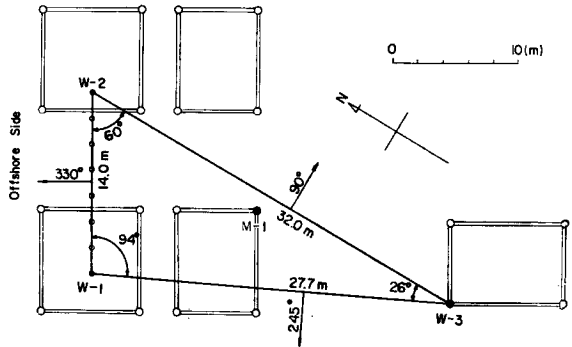


Fig. 1 Array of wave gauges.

(2) 波浪資料

W-1, 2, 3 で得られた波浪記録から、比較的大きい波、小さい波、風波、あるいはうねりと思われるものを取り出して解析しようとしたが、Table 1

Table 1 Wave data and conditions.

Data No. () Station No.	Date and time	Significant wave		Spectral peak				Wind at Naoetsu	
		Height (m)	Period (sec)	Energy density (cm ² sec)	Frequency (sec ⁻¹)	Energy density (cm ² sec)	Frequency (sec ⁻¹)	Speed (m/sec)	Direction
O-1 (1) (2) (3)	24th Nov., '66 1600-1610	0.69	5.3	3.72 × 10 ³	0.200			2.4	S S W
		0.71	5.3	5.14 × 10 ³	0.200				
		0.80	5.1	4.46 × 10 ³	0.187				
O-2 (1) (2) (3)	1st Dec., '66 1800-1810	3.80	9.7	1.60 × 10 ⁵	0.087	3.88 × 10 ⁴	0.187	11.3	N W
		3.52	10.4	1.22 × 10 ⁵	0.087	3.00 × 10 ⁴	0.187		
		3.19	9.5	1.29 × 10 ⁵	0.087	3.30 × 10 ⁴	0.187		
O-7 (1) (2) (3)	10th Dec., '66 1800-1810	0.94	3.7	4.30 × 10 ³	0.138	5.00 × 10 ³	0.213	6.7	S W
		0.97	4.5	4.47 × 10 ³	0.138	3.70 × 10 ³	0.213		
		1.01	3.7	4.10 × 10 ³	0.138	5.50 × 10 ³	0.213		
O-9 (1) (2) (3)	15th Dec., '66 300-310	2.36	7.4	4.07 × 10 ⁴	0.087	1.96 × 10 ⁴	0.175	11.3	W N W
		2.38	7.0	4.67 × 10 ⁴	0.087	1.90 × 10 ⁴	0.200		
		1.94	7.0	3.08 × 10 ⁴	0.087	1.77 × 10 ⁴	0.175		
O-39 (1) (2) (3)	1st Jan., '67 000-010	0.57	7.2	2.71 × 10 ³	0.125	1.15 × 10 ³	0.175	5.0	S S W
		0.81	7.0	3.84 × 10 ³	0.125	2.29 × 10 ³	0.175		
		0.75	6.6	2.89 × 10 ³	0.125	2.41 × 10 ³	0.175		
O-40 (1) (2) (3)	1st Jan., '67 1000-1010	0.32	6.6	1.24 × 10 ³	0.150			2.3	S S E
		0.37	6.0	1.59 × 10 ³	0.150				
		0.31	6.8	0.64 × 10 ³	0.150				

は、この解析に用いた波浪資料と諸条件を示したもので、有義波とともに、パワースペクトルのピークにおけるエネルギーの密度と周波数、および観測地点から約 10 km 離れた直江津港における風の資料が記してある。

(3) 波浪資料のスペクトル解析

スペクトル解析は、10分間の波浪記録をデジタル・トレサ OT-50 によって 1 sec ごとに読みとり、lag 40, 自由度ほぼ 30 とし、Blackman-Tukey の方法によって、京都大学のデジタル計算機 KDC-II を用いて行なった。

a) **パワースペクトル** Fig. 2 は、観測地点 W-1, 2, 3 でのパワースペクトルを示す。Fig. 2 をみると、O-39(1) の 0.17 sec^{-1} 付近と O-40(3) のピーク付近を除けば、同一時刻における各観測地点でのパワースペクトルは比較的よく似ていることがわかる。また、O-1 と 40 はピークが1つ、O-2, 7, 9, 39 はピークが2つあるとみなしてもよく、しかも、O-2 と 7 が、2つのピークは顕著であるのに比較して、O-9 と 39 は、高周波側のピークが顕著でない。こうした2つのピークが、2つの異なった風域から発生してきた別々の波であるのか、また、Tick が示唆しているような非線型効果^{21), 22)}によってピーク周波数のほぼ 2 倍の周波数のところに生ずるようなものなのか、など判然としないものがある。

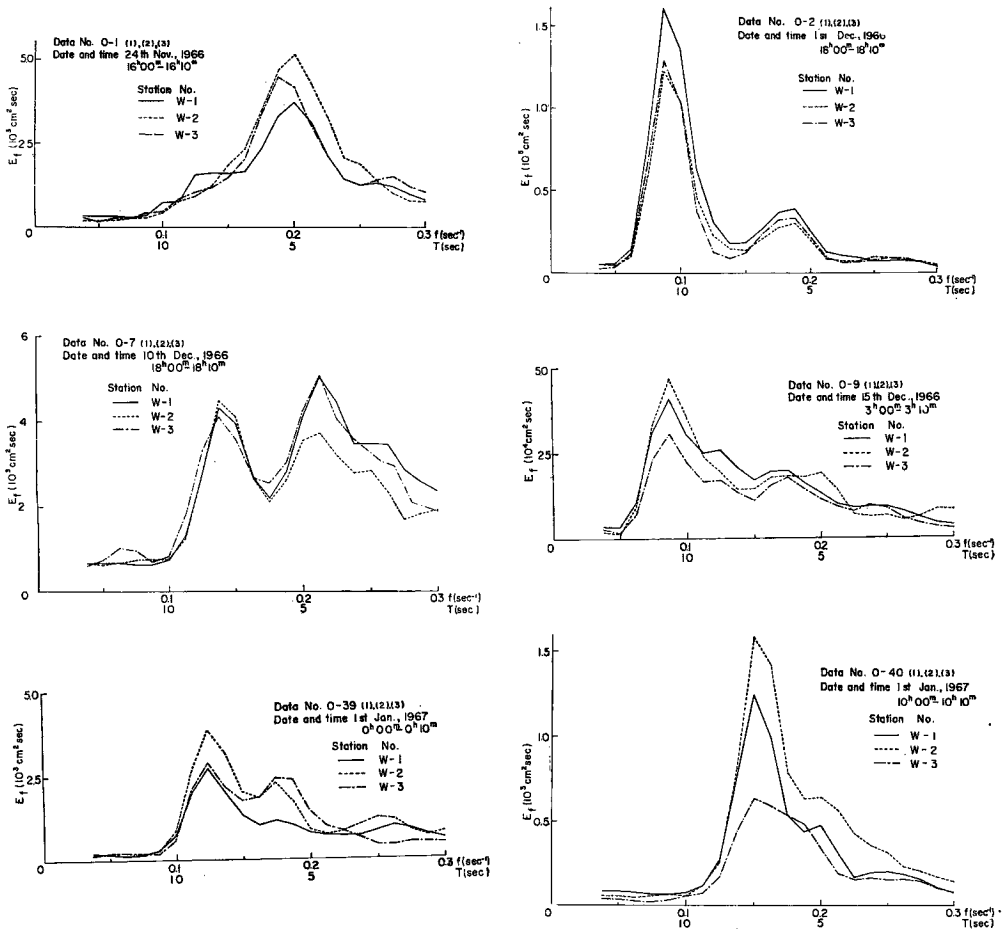
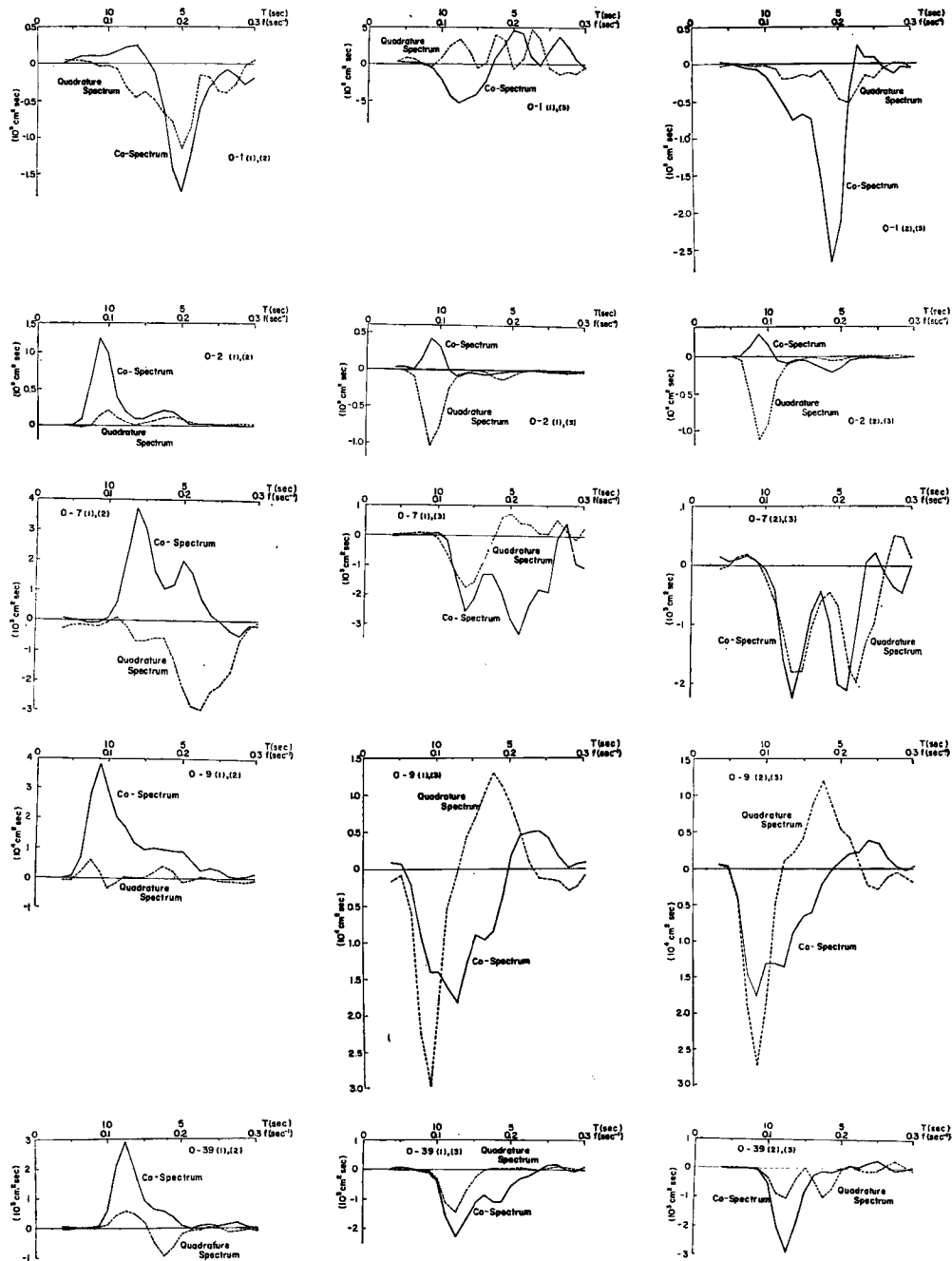


Fig. 2 Power spectra.

b) クロススペクトル Fig. 3 は、観測地点 W-1, 2, W-1, 3, W-2, 3 での波浪記録から得たクロススペクトルすなわち、co-spectra と quadrature-spectraを示す。Fig. 4 は、そうしたクロススペクトルと Fig. 2 で示したパワースペクトルから求めた coherency spectra と phase spectraを示したものである。



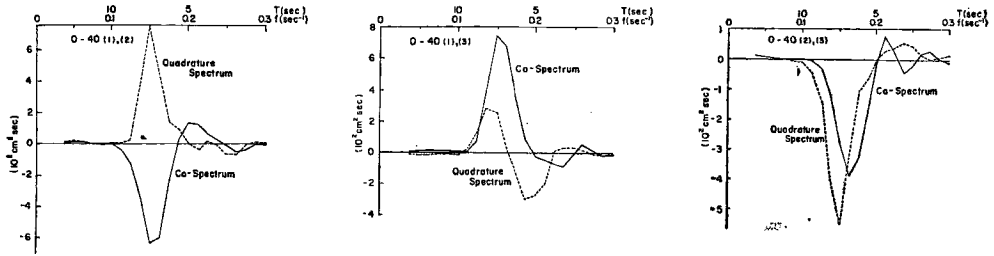
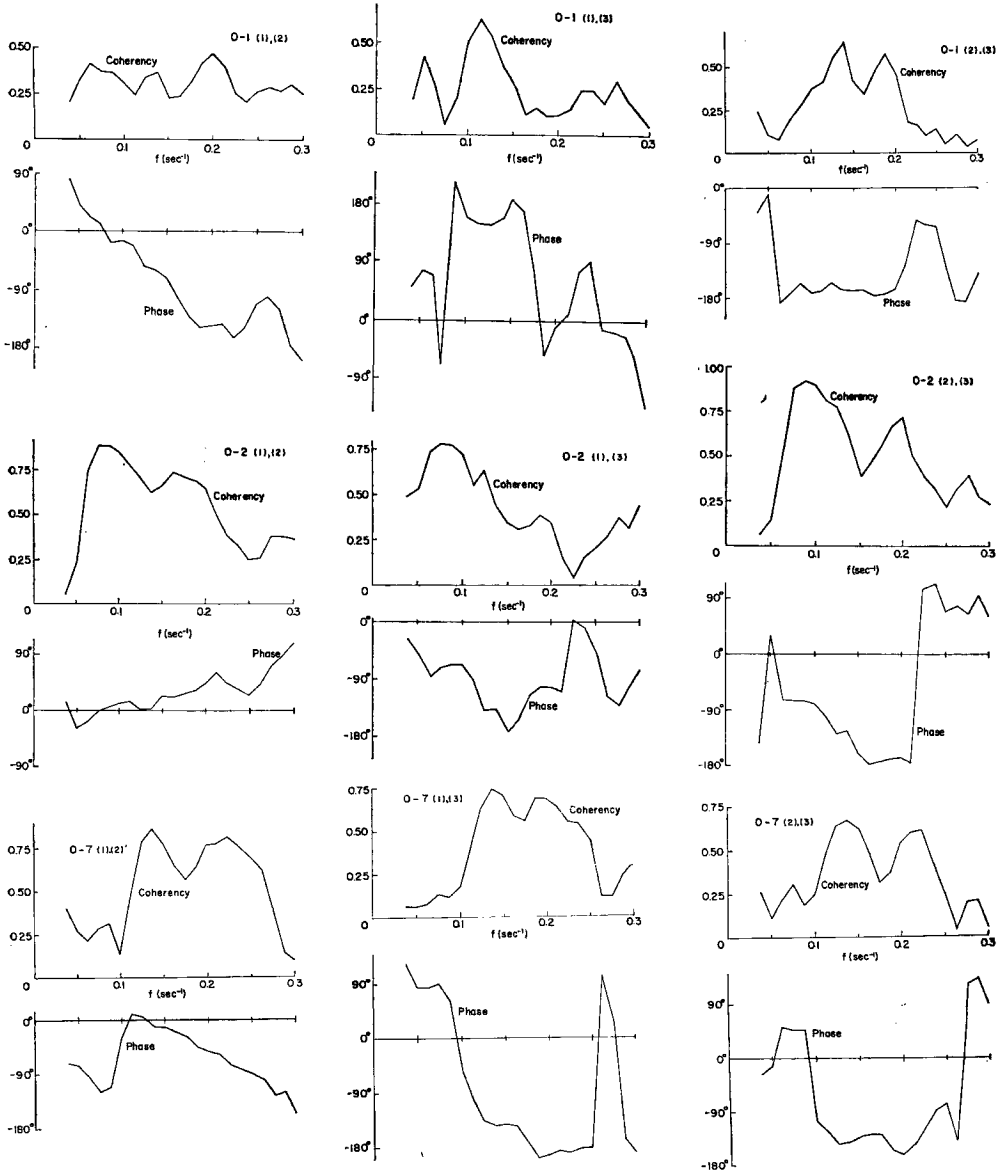


Fig. 3 Cross spectra.



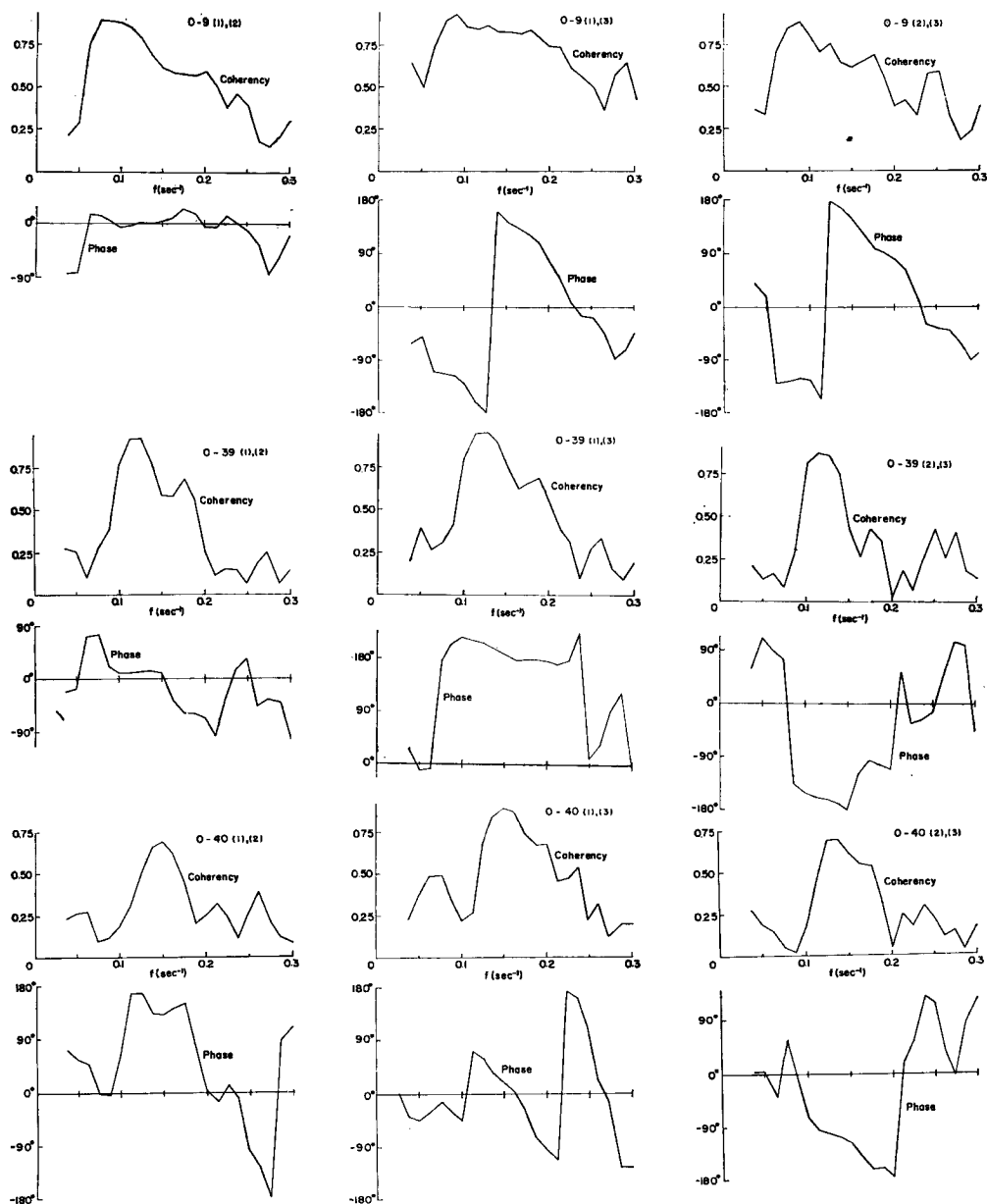


Fig. 4 Coherencies and phases.

3. 大瀨海岸における波向の推算例

(1) 推算方法

波の峯線が $W-i$, $W-j$ ($i, j=1, 2, 3$) を結ぶ直線となす角 θ_{ij} は、次式によって与えられる。

$$\theta_{ij} = \sin^{-1} \left(\frac{\phi_{ij} + 2n\pi}{2\pi} \cdot \frac{L}{D_{ij}} \right), \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (1)$$

ここに、 ϕ_{ij} ：解析しようとする成分波の $W-i, j$ 間の位相差、 L ：解析しようとする成分波の波長、 D_{ij} ： $W-i, j$ 間の距離である。

(1) 式からわかるように、 $(\phi_{ij} + 2n\pi/2\pi) \cdot (L/D_{ij})$ の1つの値に対して θ_{ij} の値は2つ定まって、波高計を結ぶ直線のどちら側から波が来ているのかわからないことになり、また、 L/D_{ij} が小さい場合には、 $|\phi_{ij} + 2n\pi/2\pi) \cdot (L/D_{ij})| \leq 1$ とするような n の値はいくつか存在して、 θ_{ij} の値はいくつも求められることになる。こうしたことから、2台の波高計配列の場合には、気象条件を考慮することによって波向を推定しているのが普通である。

この解析では、 $W-1, 2, W-2, 3, W-1, 3$ の3組の位相差から、 $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ の種々の値を求め、そうした $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ の値の差異が最も少ないものをもって、波の卓越方向とした。

なお、解析はパワースペクトルがピークをもつ周波数 (Table 2) に対応する成分波について行なった。

(2) 推算結果

Table 2 は、推算して得た波の向きを、coherency, 位相差とともに示したものであり、Fig. 5 は2台の波高計の組合わせによって得た波の向きを示したものである。Table 2 中、O-9(1), (3) と O-40 (1), (2) とに推算結果が示してないが、これは、(1) 式の右辺にある $(\phi_{ij} + 2n\pi/2\pi) \cdot (L/D_{ij})$ の絶対値を1より小さくするよ

Table 2 Estimated directions of waves off Ōgata coast.

Data No. () Station No.	Frequ-ency	Coher-ency	Phase	Wave direction			Frequ-ency	Coher-ency	Phase	Wave direction		
				Degree from North	Mean Compass direction	Deviation, $\Delta\theta$ (degree)				Degree from North	Mean Compass direction	Deviation, $\Delta\theta$ (degree)
O-1 (1), (2), (3)	0.200	0.474 0.118 0.474	-2.56 -0.11 -2.92	250	WSW	6	0.187	0.682 0.381 0.668	0.57 -1.79 -2.91	344	NW	+34 -34 0
				246		276				310		
				235		310				291		
O-2 (1), (2), (3)	0.087	0.882 0.770 0.920	0.11 -1.18 -1.30	337	NW	+30	0.213	0.774 0.635 0.597	-1.01 3.02 -2.46	310	WNW	+17 -14 -2
				280		297				291		
				304		312				291		
O-7 (1), (2), (3)	0.138	0.861 0.738 0.666	-0.18 -2.55 -2.48	325	NW	+14	0.175	0.579 0.838 0.686	0.42 2.15 1.74	341	NNW	1 -6 5
				297		311				337		
				312		311				337		
O-9 (1), (2), (3)	0.087	0.892 0.929 0.858	0.07 -2.02 -2.14	13	N	+2	0.175	0.678 0.655 0.426	-1.01 3.12 -1.66	302	WNW	8 3 5
				9		342				289		
				330		342				289		
O-39 (1), (2), (3)	0.125	0.920 0.949 0.909	0.20 -2.59 -2.80	338	NNW	-4	0.150	0.689 0.882 0.608	2.28 0.33 -2.04	302	E NE	-5 5
				357		65				60		
				330		65				60		
O-40 (1), (2), (3)	0.150	0.689 0.882 0.608	2.28 0.33 -2.04	70	E NE	-5	0.150	0.689 0.882 0.608	2.28 0.33 -2.04	70	E NE	-5 5
				60		65				60		
				60		65				60		

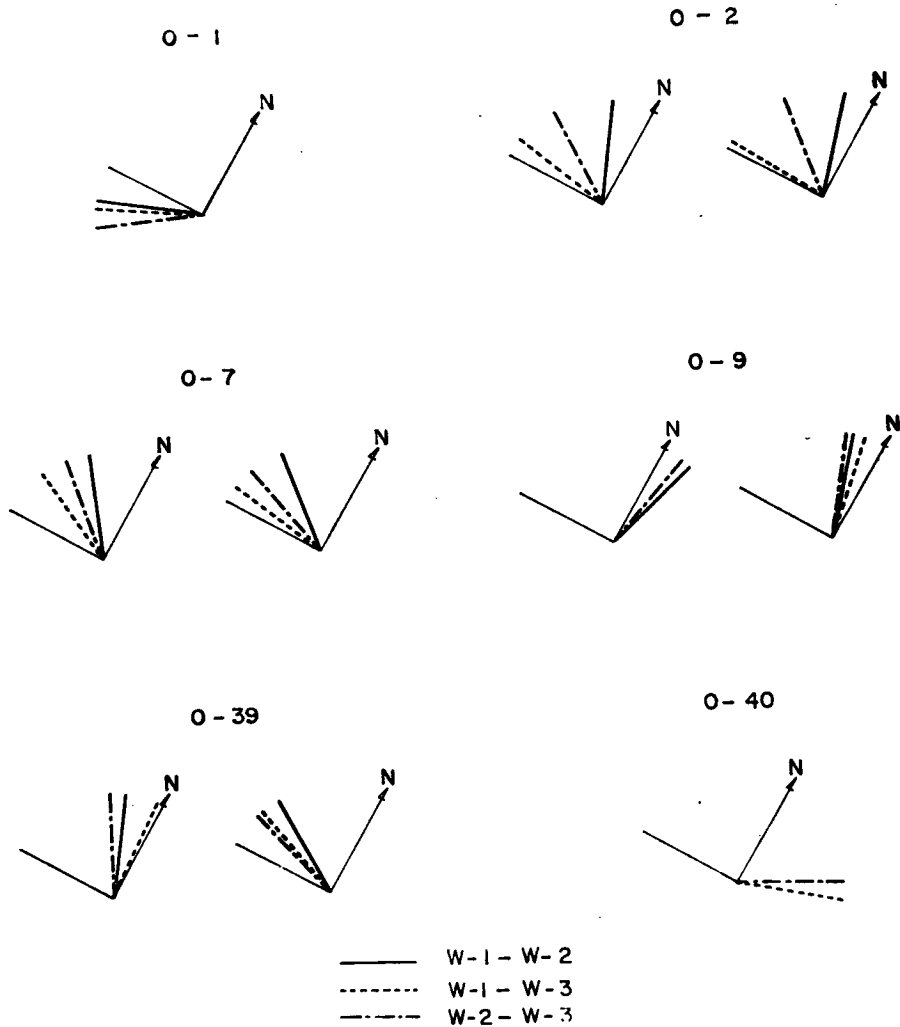


Fig. 5 Estimated directions of waves off Ōgata coast.

うな n の値が得られず、解析不可能になったためである。

また、Table 2 には、求めた 3 つあるいは 2 つの波の向きそれぞれの平均値からの偏差 $\Delta\theta$ も示してあるが、Fig. 6 は、そうした $\Delta\theta$ の絶対値の頻度分布を示したものである。Fig. 6 をみると、 $|\Delta\theta|$ の値は、すべて 35° 以内に入り、全頻度 28 個の $2/3$ すなわち 18 個までは 10° 以内に入っていることがわかる。普通、波浪予知を行なう場合、風域として、風向が $\pm 30^\circ$ の範囲内を一樣な風向として決定しているが、ここで求めた $\pm 10^\circ$ という値はかなり精度のよいものと思われる。

なお、 $|\Delta\theta|$ が 25° 以上のものは、有義波高 3.80 m、有義波周期 9.7 sec といった比較的大きな波である O-2 の場合にのみ生じたものであるが、どのような理由によって生じたのかはわからない。

Fig. 7 (a)~(f) は、推算して得た平均波向 (Table 2) と天気図より求めた観測時前後の海上風向との比較を示す。図中には、風速も示してあるが、海上風は、北緯 40° に対する海上風と傾度風との間の経験的な関係、すなわち、海上風の傾度風に対する風向偏角は 17° 、風速比は 0.67¹⁾、を適用して求めた。

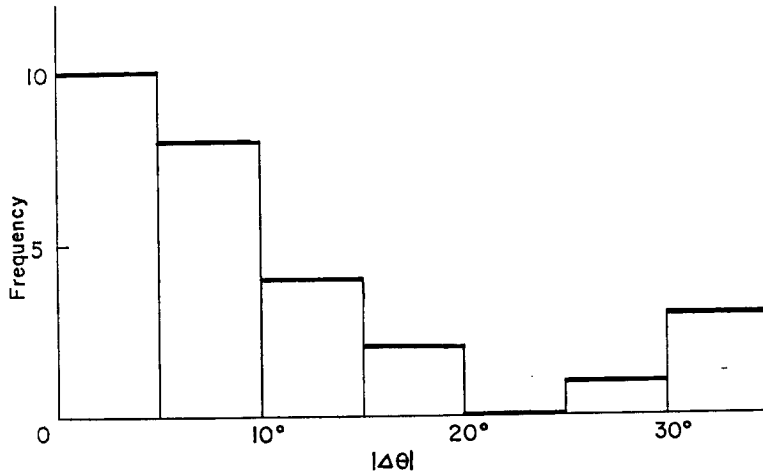
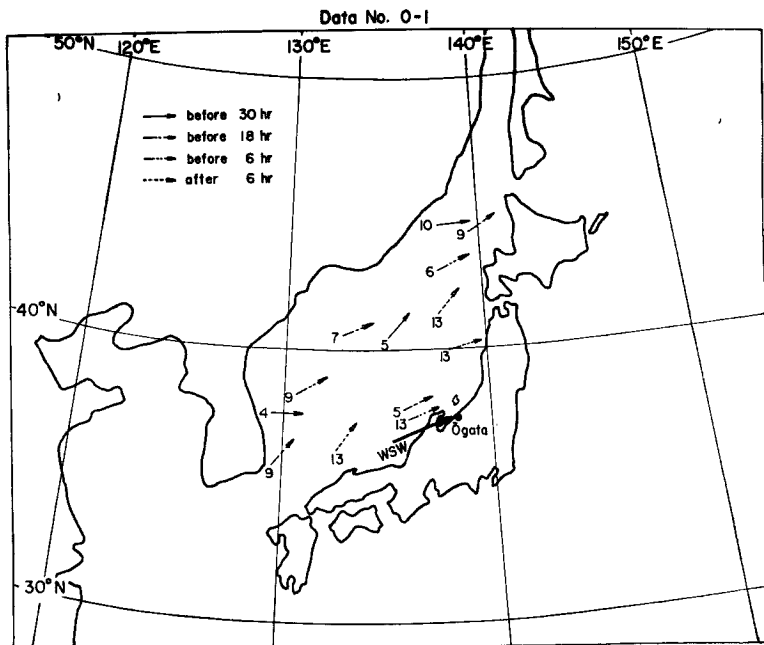
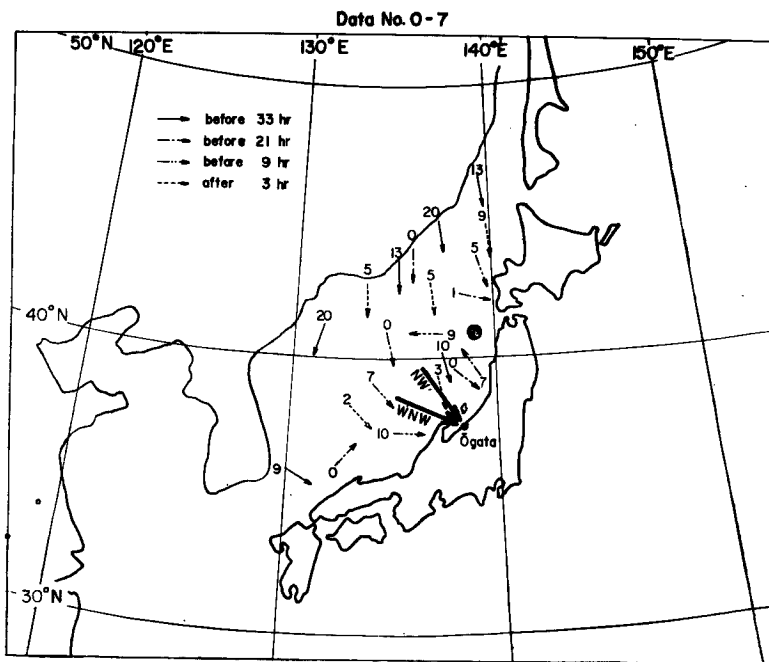
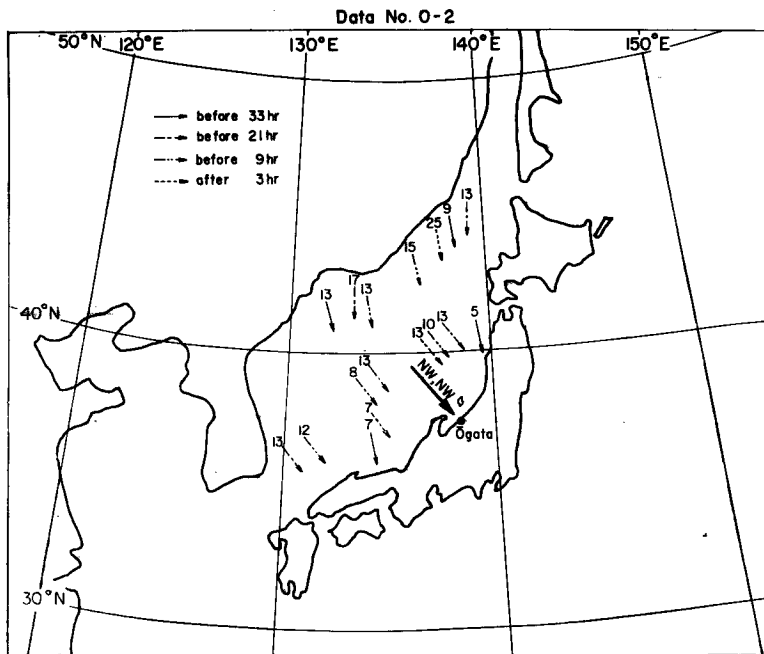


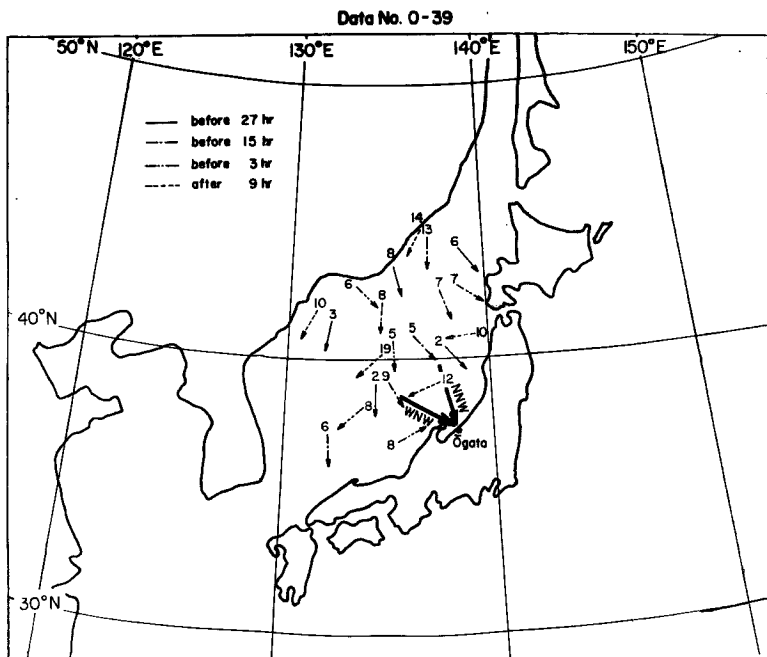
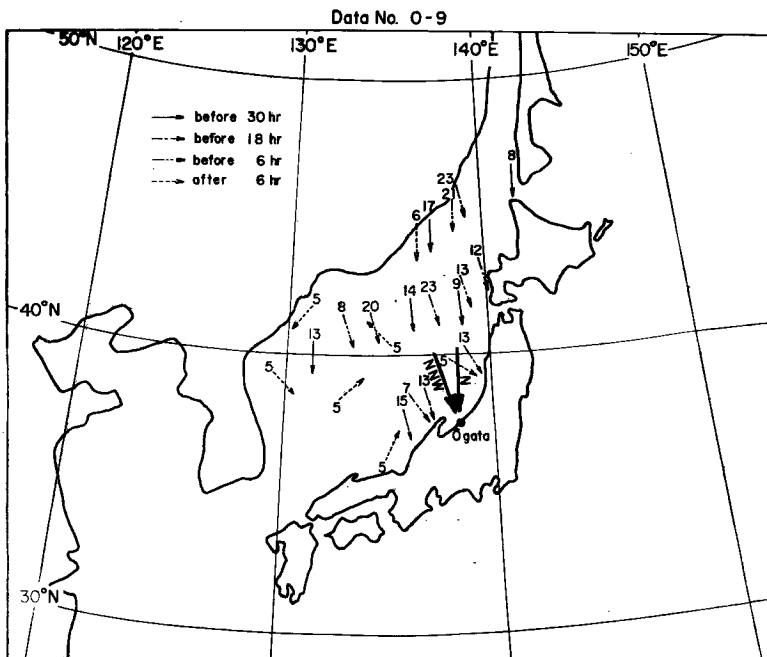
Fig. 6 Frequency distribution of $|\Delta\theta|$.

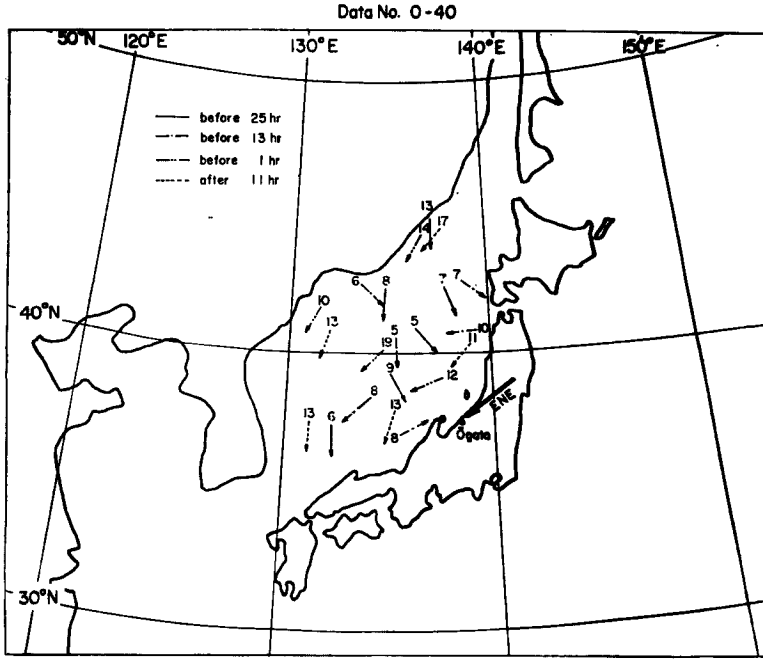
Fig. 7 をみると、海上風は、極東天気図 (II) にもとづいた 12 時間ごとの値であるが、推定して得た平均波向と観測時の波浪をひきおこしたと思われる海上風の風向とは、きわめてよく一致していることがわかる。すなわち、Fig. 7 (a) においては、観測時の 18 および 6 時間前の能登半島付近の海上風の風向は WSW で、平均波向と一致し、そうした方向に対して、SMB 法から判定すれば、Table 1 に示した有義波高、有義波周期は得られる可能性があり、また、波向の偏差 $\Delta\theta$ が大きかった O-2 に対する Fig. 7 (b) においても、平均波向は、風向と完全に一致し、さらに、2 つのピークの波向が異なった O-9 に対する Fig. 7 (d) においては、海上風の風向の N から NNW への時間的変化が、パワースペクトルの低



(a)







(f)

Fig. 7 Comparison of estimated wave directions with estimated wind directions.

周波側と高周波側のピークの波向、それぞれ、NとNNW、と一致している、などである。しかし、O-2において、低周波側のピークと同一の波向を示した高周波側のピークがどうした原因で生じているのか、水深6~7mといった浅いところでの波高をいかにして推算するのか、など問題が残っており、こうした諸問題を、天気図を用いて解明するためには、さらに詳しい時間間隔の天気図を用いたり、浅海での海岸波浪予知法を確立したりしていかなければならない。

Fig. 8 (a), (b) は、O-7の2つのピークの周波数に対して、方向スペクトルの値をそれぞれ、10°ごとに求めて曲線で結んだものを前述の波の卓越方向(図中の矢印)とともに示したものである。ここで求めた方向スペクトルは、後述するように、精度が非常に悪く、たとえば、Fig. 8 (a)におけるS方向でのピ

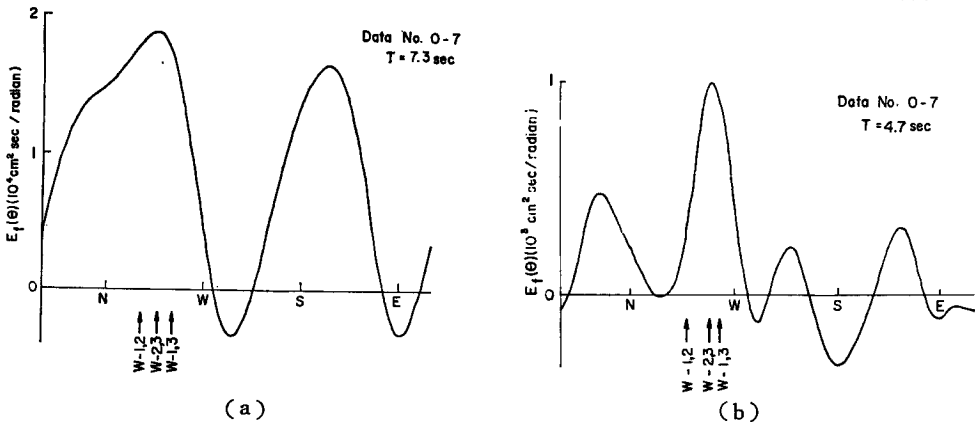


Fig. 8 Directional spectra.

ークや、N 方向の歪みは無意味なものであるが、Fig. 8 (a), (b) をみると、方向スペクトルのピークと卓越方向とは比較的良好に一致していることがわかる。

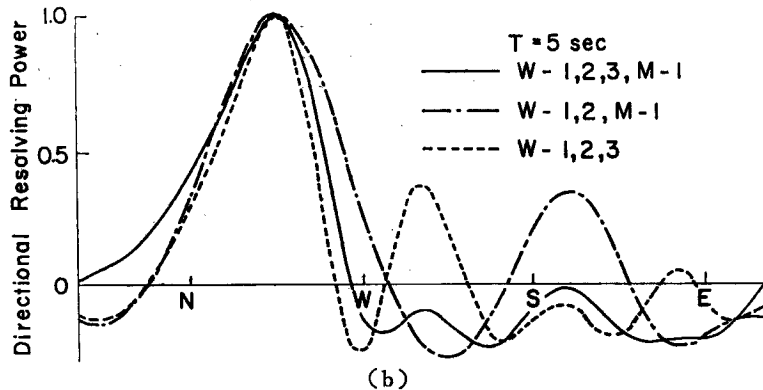
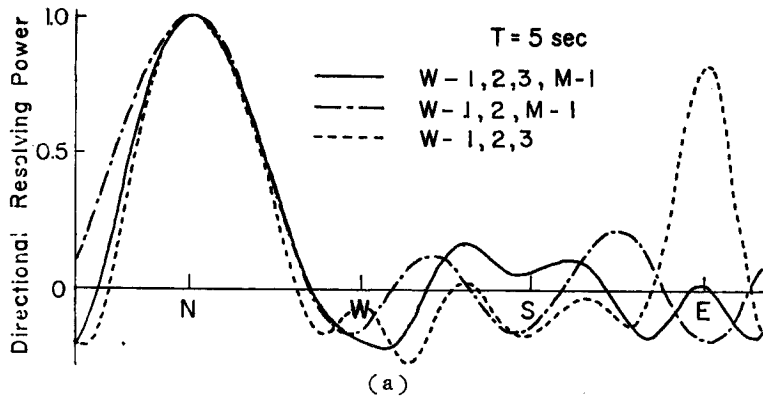
4. 大潟海岸における波高計配列の方向分解能

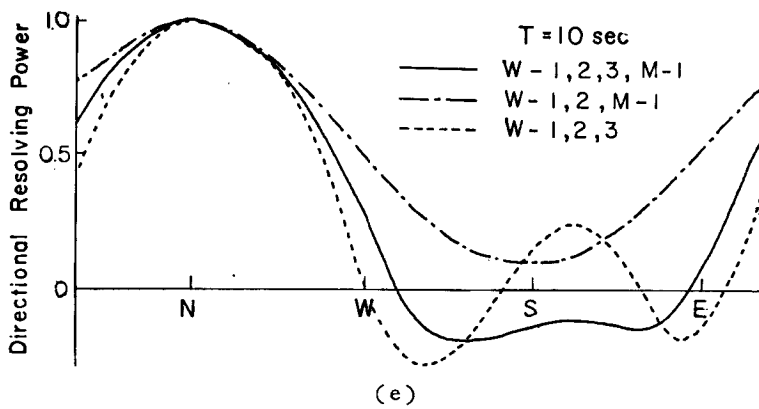
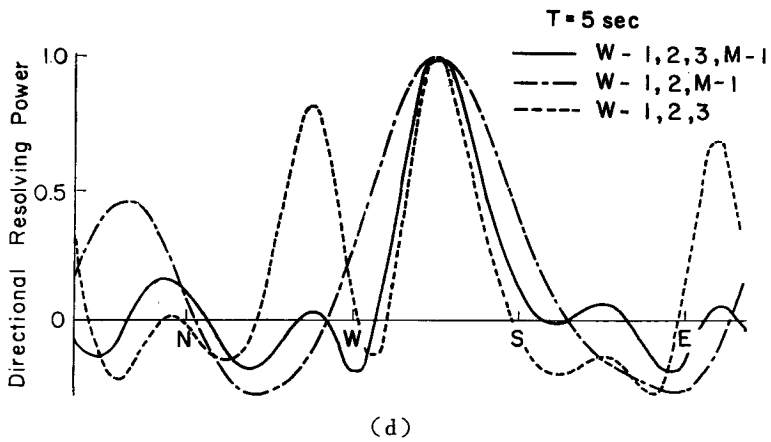
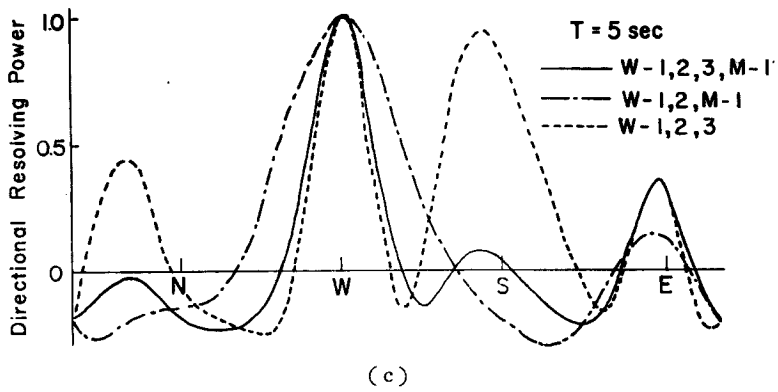
波高計配列の方向分解能については、Barber¹²⁾ が、三角形配列については、間隔が来襲波の波長の 1/2 程度が最もよく、また 3 点（正三角形配列）のほかにもう一点中心に波高計をおくと精度がさらによくなることを示唆し、Mobarek¹⁴⁾ は、そのことを風洞水槽での風波についての実験で確かめている。

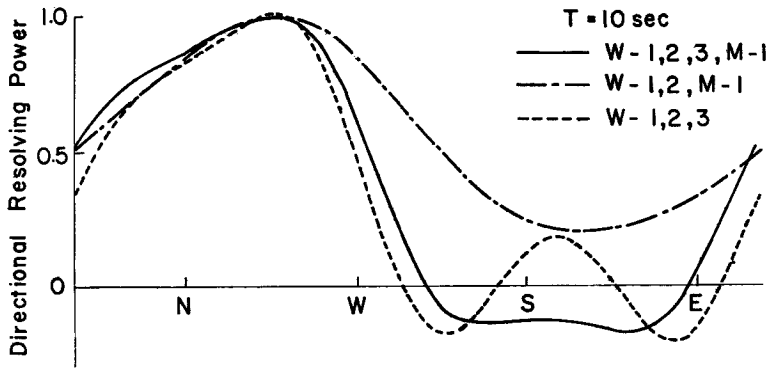
Fig. 9 (a)~(h) は、大潟海岸に現在設置してある波高計番号 W-1, 2, 3 (配列番号 I)、W-3 を M-1 (Fig. 1) に移動して W-1, 2, M-1 としたもの (配列番号 II)、および M-1 を付加して W-1, 2, 3, M-1 としたもの (配列番号 III) の方向分解能を来襲波の周期：5, 10 sec, 波向：N, NW, W, SW の場合に対して算定したものである。

周期 5 sec の波に対しては、Fig. 9 (a) (波向：N) を見ると配列番号 I で E 方向にでている無意味なピークが II と III の両者においては消え去り、かつ II と III とでは、大差がなく、Fig. 9 (b) (波向：NW) を見ると、III が他に較べて非常によく、II は、I にある SW 付近のピークが SE 付近に移行して波向 NW から離れ、Fig. 9 (c) (波向：W) をみると、II, III において、I にある S 方向の大きなピークが NE 付近のピークとともに消え去り、Fig. 9 (d) (波向：SW) をみると、III が他に較べて非常によいが、II においても、I で現われている無意味な 2 つのピークが 1 つになっていることがわかる。

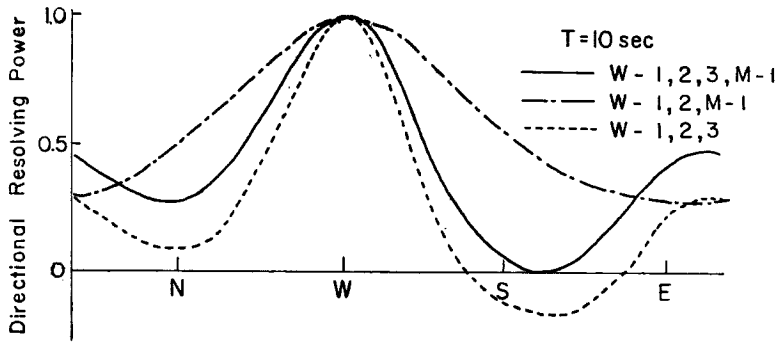
周期 10 sec の波に対しては、Fig. 9 (e)~(h) をみると、II は主方向付近の分解能は悪くなるが、I にあった無意味なピークは消え去り、III は比較的良好な分解能を示すことがわかるが、Fig. 9 (g) をみると、



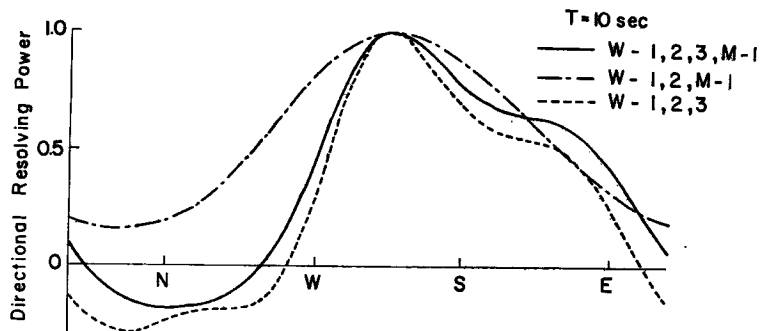




(f)



(g)



(h)

Fig. 9 Comparison between directional resolving powers of three arrays (N, NW, W, SW).

W方向の波については、E付近にピークが残ったままである。

以上のことから、現在の波高計配列のままでは、冬期季節風による波浪の卓越周期が5~13 sec程度であることを考慮すると、具合が悪く、少なくとも、波高計W-3をM-1の位置に変更して、W-1, 2, M-1といったIIの配列で解析を行なった方がよいと思われる。

5. 結 語

以上、著者らは、京都大学防災研究所大渦波浪観測所の三角形配列した3台の波高計によって得られた波浪記録から、電子計算機KDC-IIを用いて、3点での波の位相差を求めて、波の卓越方向を推算し、天気図による海上風の風向および方向スペクトルのピークに対応する方向との比較的良好一致をみた。また、現在の波高計配列では、無意味な方向にピークがでて方向分解能が悪く、波高計配列の形を変更した方がよいことを見いだした。

今後は、3台の波高計による波浪記録をもっと簡単な方法で処理して波の卓越方向を求めると同時に、精度のよい方向スペクトルを求めて、海岸波浪の特性について調べていきたいと思っている。

最後に、この研究をすすめるにあたり、終始御激励、御指導を賜った岩垣雄一教授に深く感謝の意を表するとともに、大学院学生門司剛至氏および防災研究所の人見哲夫技官には資料の整理や計算に大いに助力をいただいた。また、京都大学の電子計算機KDC-IIの使用に際しては、防災研究所の光田寧助教授、大学院学生米谷敏彦氏に非常に御世話になった。ここに心から感謝の意を表する次第である。なお、この研究は文部省特定研究費による研究の一部であることを付記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 井島武士：海岸・港湾測量，昭39.4，305 pp.
- 2) Cote, L. J., J. O. Davis, W. Marks, R. J. Mcgough, E. H. Mehr, W. J. Pierson, Jr., J. F. Popek, G. Stephenson, and R. C. Vetter: The Directional Spectrum of a Wind Generated Sea as Determined from Data Obtained by the Stereo Wave Observation Project, Meteorol. Papers, N. Y. U., Coll. Eng., Vol. 2, No. 6, 1960, 88 pp.
- 3) Uberoi, M. S.: Directional Spectrum of Wind-Generated Ocean Waves, Jour. Fluid Mech., Vol. 19, Part 3, 1964, pp. 452—464.
- 4) 高橋智晴・鈴木禮実・佐々木 弘：鹿島港における波浪観測について，第13回海岸工学講演会講演集，昭41.12，pp. 62—70.
- 5) 井島武士・高橋智晴・佐々木 弘：波向観測等におけるレーダの応用，第11回海岸工学講演会講演集，昭39.11，pp. 81—88.
- 6) 板尾純一・木戸 武・山田五郎：日本海沿岸の波について（第1報）——中部沿岸における波の統計的分布——，第13回海岸工学講演会講演集，昭41.12，pp. 50—56.
- 7) 板尾純一・木戸 武・井島武士・松尾隆彦・石川敏雄：日本海沿岸の波について（第2報）——金沢海岸のレーダー観測による波向分布——，第14回海岸工学講演会講演集，昭42.10，pp. 60—67.
- 8) 永田 豊・彦坂繁雄・松本信保：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——，第10回海岸工学講演会講演集，昭38.10，pp. 37—41.
- 9) Barber, N. F.: Finding the Direction of Travel of Sea Waves, Nature, Vol. 174, 1954, pp. 1048—1050.
- 10) Barber, N. F. and D. Doyle: A Method of Recording the Direction of Travel of Ocean Swell, Deep-Sea Res., Vol. 3, 1955—56, pp. 206—213.
- 11) Munk, W. H., G. R. Miller, F. E. Snodgrass, and N. F. Barber: Directional Recording of Swell from Distant Storms, Phil. Trans. Roy. Soc. A, Vol. 255, 1963, pp. 505—584.

- 12) Barber, N.F.: The Directional Resolving Power of an Array of Wave Detectors, Proc. Conf. Ocean Wave Spectra, 1963, pp.137—150.
- 13) 川島利兵衛：海洋波中の漁船の横揺れ応答函数の統計的推定について，第2報，日本航海学会誌 No.32, 昭39, pp.49—55.
- 14) Mobarek, I. El-Sayed: Directional Spectra of Laboratory Wind Waves, Proc. A.S.C. E., Vol.91, No. WW 3, 1965, pp.91—116.
- 15) 堀口孝男：波の方向分析に関する試法，第12回海岸工学講演会講演集，昭40.11, pp.64—68.
- 16) 高橋龍太郎・相田 勇・永田 豊：海底設置用長波計による大船渡湾の静振観測結果について，日本海洋学会誌，第22巻第1号，昭41.2, pp.7—16.
- 17) 川島利兵衛：海岸付近の波高及び波向の遠隔測定装置について，沿岸海洋研究ノート，第5巻第1号，昭41.6, pp.1—9.
- 18) 井島武士・木内政鋭・関口雅臣：波高計を利用した波向観測，第13回海岸工学講演会講演集，昭41.12, pp.30—35.
- 19) Longuet-Higgins, M.S., D.E. Cartwright, and N.D. Smith: Observation of the Directional Spectrum of Sea Waves Using the Motion of a Floating Buoy, Proc. Conf. Ocean Wave Spectra, 1963, pp.111—136.
- 20) 岩垣雄一・樋口明生・野田英明・柿沼忠男：大瀧波浪観測所における観測施設と二，三の観測例，京大防災研究所年報，第10号B，昭42.3, pp.237—250.
- 21) Tick, L.J.: A Non-Linear Random Model of Gravity Waves I, Jour. Math. Mech., Vol.8, No.5, 1959, pp.643—651.
- 22) Pierson, W.J., Jr.: A Note on the Growth of the Spectrum of Wind-Generated Gravity Waves as Determined by Non-Linear Considerations, Jour. Geophys. Res., Vol.64. No. 8, 1959, pp.1007—1011.