

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——

板尾純一*・木戸 武**・井島 武士***

松尾隆彦****・石川敏雄*****

1. はし が き

海岸における波の諸元のうち波高、周期等は種々の観測装置によって解析されるようになったが波向の分布については信頼性のあるデータがほとんどないのが現状である。そこで運輸省第一港湾建設局では、金沢港および秋田港に波向の分布を測定するためにミリ波レーダーを設置し、おのおの昭和39年12月、41年10月より継続的に観測を行なっている。

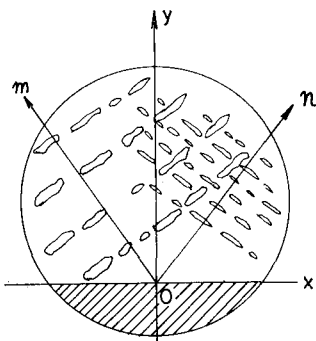
レーダー写真は海岸から2~3kmの半径の海域に存在する波の峯の部分の連続的に撮影したもので、この写真より波の主要方向を測定するのが主な目的であるが、レーダー写真に写された波峯線の間隔が波の周期 T すなわち波長 L に関係していることより波の周期についても同時に測定できるのである。

波の方向については従来、このレーダー写真に9点を設け各点に200×400mの長方形領域を考えて、この長方形の中の波の方向を分度器で測ってその地点の波向としていた。ここでは金沢海岸のレーダー写真について光の回折によって波の方向分布を求め、あわせて周期の測定法と測定結果の一部を示すものである。

2. 光の回折による波峯分布測定の方法

図-1は金沢海岸のレーダー写真映像の説明図である。レーダー位置は点OでOY方向を向いている(OY方向は金沢ではNW方向である)。OXは海岸線である。レーダー写真には波峯は黒い斑点として映り、これをさらにガラス乾板に焼

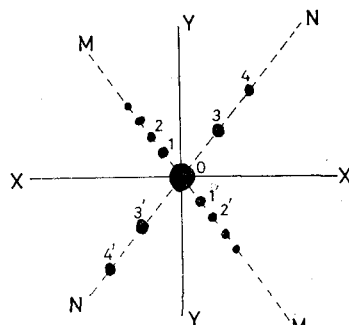
図-1 レーダー写真映像の説明図



きつけると波峯は白く残りその他は黒くなる。したがって図-1のように卓越波(1次波)の波峯は大きい細長い長方形が並んで見え、2次波は小さい長方形が同様に見える。

卓越波の方向がO_m方向であれば波峯の一つ一つは

図-2 回折像モデル図



スリットの役目をし、この映像を通して単一波長の光を投影すると回折干渉してその結果得られる像は図-2のようにMOMの線上に1,2および1',2'のような黒い点が現われ、MOMの方向は

O_m方向(すなわち卓越波の平均方向)に一致し距離O1(またはO1')は平均波長に反比例する。つぎに2次波はO_n方向に垂直に波峯が並んでいる時は、回折像ではO_nと平行なNONの線上に点3,4(または3',4')に黒い点を生ずる。そしてO3(またはO3')の距離は2次波の波長に反比例する。卓越波の方が波長が大きければ $\overline{O3} > \overline{O1}$ である。こうして回折像の上の点1,1'または3,3'点の方向を測定すればそれはおのおの卓越波および2次波の平均方向を示すこととなり、また $\overline{O1}$ または $\overline{O3}$ を測定すれば平均波長が得られる。

ここでいう平均方向あるいは平均波長の意味は、考える海岸の波が水深変化の影響をうけた波であるため、その性質は時間的には定常な確率過程として考えられるが、海面上の各点では場所的には均一な性質を持つものでないため、ある広さの範囲では統計的な平均を求めることができず、必ず深さの変化を含んだ平均を示すということである。したがって実際には、レーダー写真のある広さをもった海域に分けて回折像を求めるため、得られた波向または波長は地形効果を含んだ平均波向または平均波長となる。

回折像の明るさはスリットの面積に比例するから、O_m方向の波峯がレーダー像に多く現われているときは点1,2の明るさは点3,4の明るさよりも強い。した

* 正会員 運輸省第一港湾建設局技術次長

** 正会員 運輸省第一港湾建設局調査設計事務所長

*** 正会員 九州大学工学部教授

**** 正会員 九州大学工学部助手

***** 正会員 九州大学工学部大学院学生

がって回折像の明るさを見ることによってどの方向の波が多く現われているか、すなわちいずれの方向の波が卓越波であるかが判別できる。こうして回折像（図-2）から卓越波、2次波の方向と平均的な波長がわかる。

ここで問題になるのは、図-2でスリットの中でOm方向（またはOn）に直角に並んだ回折線はその方向のスリットの相互間だけで回折干渉すると考えた結果であるが、Om方向のスリットとOn方向のスリットが干渉することも考えなければならない。そこでこの点を調べるため、海岸線に対して対称な2方向からの波による波峯線分布をモデル的に描き、これをフィルムに撮り、乾板に焼き付けたものを回折干渉させてみた。図-3(a)は後述する計算法によって $T=12$ 秒で、OY方向（海岸線に垂直）に対称に 20° の沖波（深海波）方向をもった図である。このモデル図を回折干渉させた結果が図-3(b), (c)でそれぞれ岸波帯（図-3(b)）、沖波帯（図-3(c)）の回折像である。これによると左右からきた波は明確に分離しており、はじめに考えたように左右の波が相互に回折干渉をしている形跡はない。しかしながらこのモデル図は波峯線が完全に連続であるので実際の写真とは少し異なるところがあるが実用上に問題はないと考えられる。むしろ問題となるのは、図-3のように波峯線が長方形ではなく円形に近く、かつ進行方向への並び方も波峯方向への並び方も同程度に不規則であるときで、回折像は一方向に並ぶことなく図-4のようになる。この場合、OMの主方向もONの2次方向も明確でなく

なる。しかし海岸線付近の波では多くの場合このような現象は現われることがないので方向は明確に認められる。

つぎに最も本質的な問題は、前にも少し述べたように海岸線の波が水深の影響を受けて波長が場所的に変わりまた屈折により進行方向が変わることである。このためレーダー像全体についての回折

像はその海面全体での平均的な波長および方向を示すだけとなり、物理的な意味はあまりなくなる。このためレーダーに映る海面の海岸線に平行な線で区分し各区間について回折像を作り波の方向を検出することが必要である。この区間はできるだけ小さい方がよいがあまり小さいと測定上困難となり、またできるだけ多くの波峯線の平均方向をとるという最初の目的から次第にはずれてくることになるので、レーダー写真の撮影範囲により半径2 kmの場合は海岸から1000 mまで（水深10 mまで）を岸波地帯、1000 m以遠を沖波地帯とし、また半径

図-4 不規則な波向の場合の回折像図

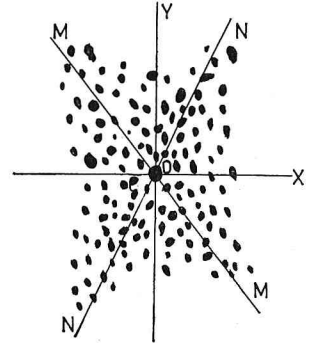
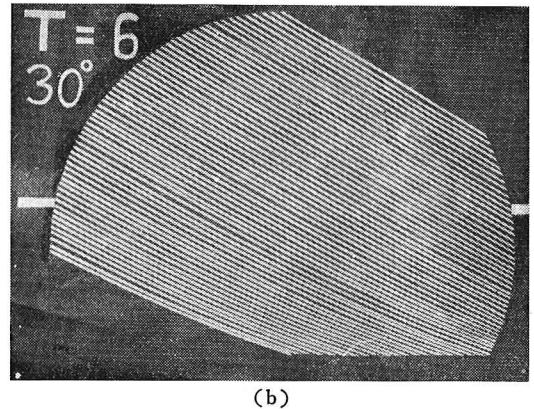


図-5 $T=6$ 秒および 12 秒、 $\theta_0=30^\circ$ の時の波峯線分布図 (a)



(b)

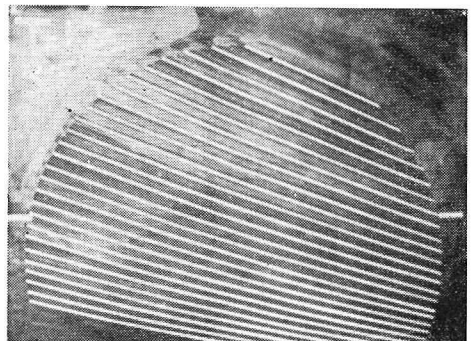
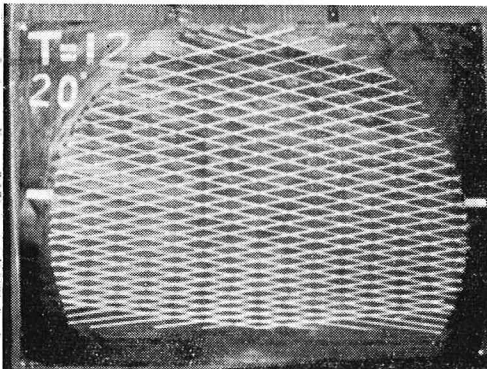


図-3 2方向から入射した波の波峯線分布図および回折像 (a)



(b) 岸波領域

(c) 沖波領域

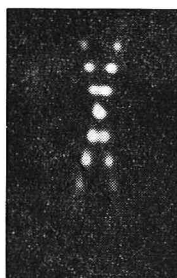
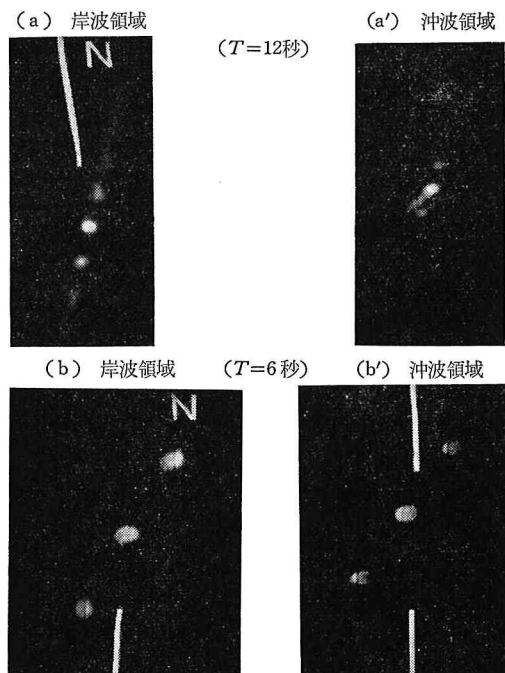


図-6 $T=6$ 秒および 12 秒, $\theta_0=30^\circ$ のときの回折像

3 km の場合は海岸から 1000~2000 m の間を岸波地帯とし、2000 m 以遠を沖波地帯として区分し、両地帯について平均を求めることとした。

つぎに波の屈折によって回折像で示される波の方向がぼけてこないかという点がある。この点を明確にしないと方向測定の精度が悪くなるのでつぎのような方法で確かめた。すなわち $T=6$ 秒, $T=12$ 秒の波が沖波の角度 30° (すなわち金沢海岸においては NW 方向より N の方へ 30°) で進行してきた時の波峯線分布を計算によって求めて、これを図化しさらに回折干渉させたものが図-5, 6 に示すものである。図-5(a) は $T=12$ 秒の波峯線分布図、図-5(b) は $T=6$ 秒の波峯線分布図で図-6 は回折像である。図-6 (a) は $T=12$ 秒の岸波地帯、(a') は同沖波地帯、(b) は $T=6$ 秒の岸波地帯、(b') は同沖波地帯である。

この結果を見ると、角度をもって進行してきた波の屈折による回折像の乱れはほとんどないことがわかる。このことによって、屈折によって回折像の測角に影響を与えることはほとんどないと考えてよい。

3. 測定方法と順序

(1) ガラス乾板のスリット像の作成

レーダー写真は 36 mm 白黒フィルムを用いてレーダー映像面を撮影している。したがって波峯は黒く映っている。しかしこのフィルムをそのままスリットとして用いるとフィルムの性質によって回折像はほとんど得られない。そこでこのフィルムをガラス乾板 (フジ A-1) に

焼き付けると白黒反転して波峯は白くなる。これを用いると回折像が明確に得られることがわかった。そこでレーダー写真はすべて一度ガラス乾板に焼き付けたものを用いることとした。なおレーダー写真は毎日午前 10 時および午後 4 時の 2 回、定期的に撮影されている。各回の測定時間は 25 分で、5 分間隔で 3 枚ずつ計 15 枚の撮影を行なっている。この 15 枚の中から良好な写真 5 枚を選んでガラス乾板に焼き付けた。半径 3000 m のレーダー写真は 2 万分の一に、半径 2000 m の場合は 1 万 2 千分の一にそれぞれ縮尺してある。

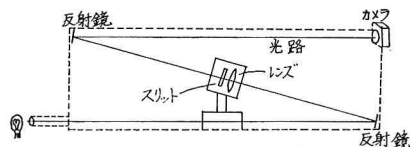
(2) 回折計

回折計としては図-7 に示すような直射型と図-8 に示すような反射型の 2 種類を用いた。図-7 の直射型の回折計はレンズの焦点距離が 1.0 m なので、光源からレンズまでとレンズからカメラのフィルムまでの距離はおおの 2.0 m で全長は 4.0 m である。光源にはナトリウム スペクトル光源用ランプを用い、光源用ピンホールは直径約 0.6 mm とした。こうして光源から単一波長の光を与え、レンズの前にガラス乾板を置くことによって光は回折干渉されてフィルム面上にピンホールと回折像とが像を結ぶこととなる。図-8 の反射型の回折計は回折像の分解能を上げるためにレンズの焦点距離を 1.5 m にしている。そのため全長が 6.0 m になるのでこれを短くする目的で反射鏡を用いて光を反射させている。機能そのものは直射型と同じである。測定にあたっては、露出時間をレーダー映像によって調節して回折像を作らねばならないが大体 60~90 sec くらいでよい。またフィルムは白黒のコントラストを強調させるため、X-ray フィルムを使用した。

図-7 直射型回折計



図-8 反射型回折計



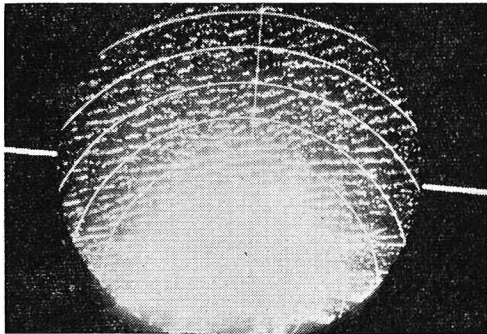
フィルム撮影された回折像は 8 倍に拡大し、測定値は全部この拡大された値を使用する。方向測定のため印画紙にはあらかじめ NW 方向が入れてあるのでこの規準線との角度を測定しこれを N 方向から右回りの角度に直して記録することとした。

図-9, 10 は例としてレーダーによる波の映像とそれに対応する沖波 (左) と岸波 (右) の回折像を示している。図-9 は昭和 40 年 2 月 24 日午後、図-10 は 25 日

午前のものである。レーダーの方位線は NW に設定してあり、またレーダー位置を中心とする同心円はレーダーからの距離を示すレンジマークである。

以上が回折法による波の方向の測定の手続きであるが、従来（海面に 9 点を設けて測定する方法）で測定するときにはレーダー像を拡大して直接読むこととなる。

図—9 昭和 40 年 2 月 24 日 16 時のレーダー映像およびその回折像



岸波領域

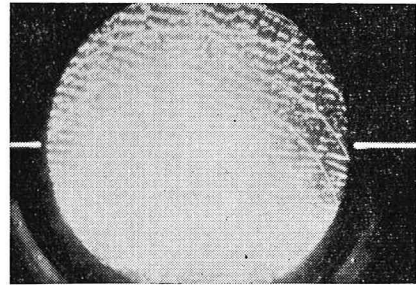
沖波領域



4. 測定結果

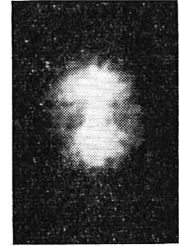
金沢港におけるレーダーによる波向の測定は、昭和 39 年 12 月 28 日より昭和 41 年 3 月末日までの分を行なった。その結果を年間集計して季節別に波向別の頻度を回数で示したのが図—11 である。図—11 は沖波領域と岸波領域についてそれぞれ季節別に波向別の頻度を示して

図—10 昭和 40 年 2 月 25 日 10 時のレーダー映像およびその回折像

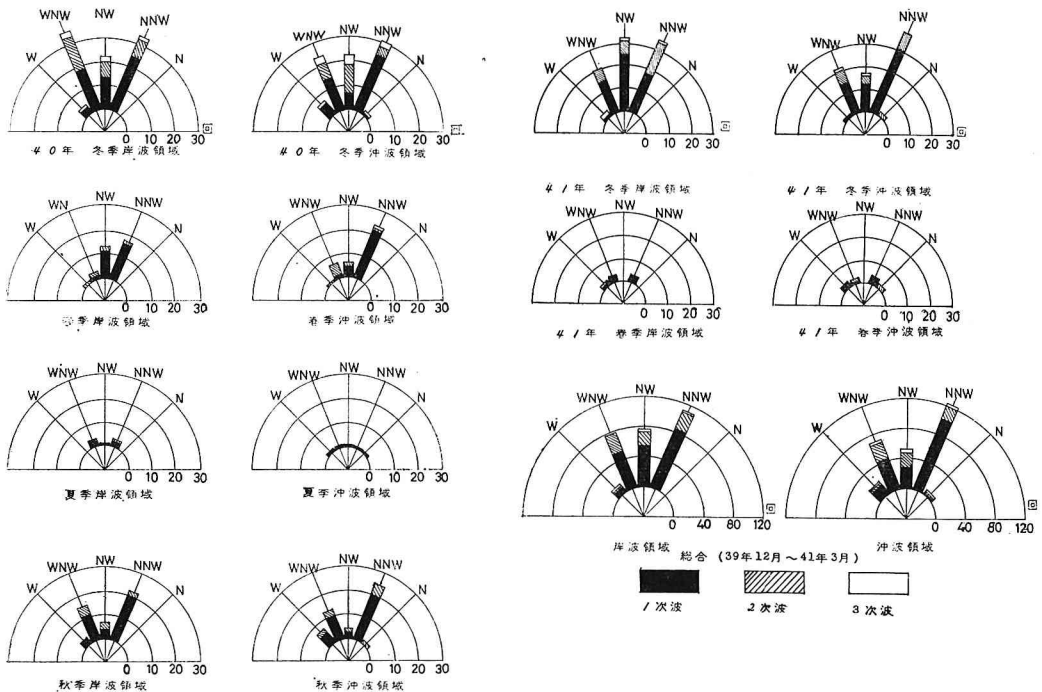


岸波領域

沖波領域



図—11 季節別波向分布図



いる。ここで季節別とは冬季は12月, 1月, 2月, 春季は3月, 4月, 5月, 夏季は6月, 7月, 8月, 秋季は9月, 10月, 11月である。したがって日本海においては当然冬季の方が頻度は多い。図表中40年冬季には39年12月分のみ, また41年春季は41年3月分だけしか入っていない。図中の黒い部分は卓越波向, 斜線は2次波向, 白い部分は3次波向を示している。

結果を季節別にみても冬季を除いては大体NWからNの範囲の波向が多く, ついでWNW方向である。冬季にはNNW方向が一番多く, ついでWNW方向, NW方向となっている。これは一般に想像されていた卓越方向(W寄り)とは反対の結果となっている。しかしながらこのデータは波高の大きさには無関係に集計整理したものである。

つぎに一次波向(卓越波高)について波向別, 波高別の頻度分布を季節別にまとめたのが図-12である。この図から冬季においてもNNWから波高の大きな波が来ていることがわかる。図-11, 12について岸波と沖波の波向別頻度分布をみると屈折による角度の変化がよく現われている。たとえば40年春季では沖波の主方向NNWが岸波では主方向は変わらないにしてもその頻度が減少しその代わりNW方向の頻度が増えている。

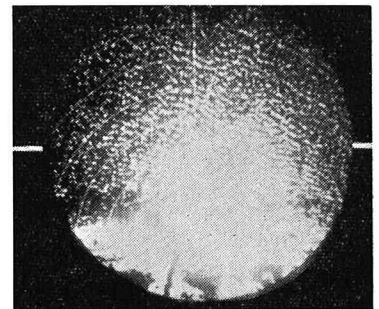
以上頻度を中心に測定結果を述べたが測定値を詳細に検討してみると回折法でなければ説明のつかない点がいくつかある。すなわち回折法では従来の方法にくらべていくつかの特徴があるが, その一つに2次波向の測定可能ということがある。このことと風速, 風向との関係の

うち特にはっきりしたものについて例をあげてその結果を述べると,

(i) 風速が小さくて主方向が風向と一致して現われているとき同時に現われる2次波は風向に関係しない(40年2月17日16時)。(図-13)

(ii) 風速が10 m/sec以上の時で風向と主方向が異なる時, 風向に大体一致して2次波が出る(40年1

図-13 昭和40年2月17日16時のレーダー映像およびその回折像
波高 2.36 m 風速 6.9 m/sec 風向 NNE



岸波領域

沖波領域

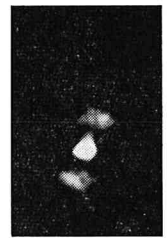
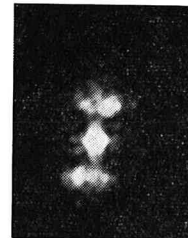
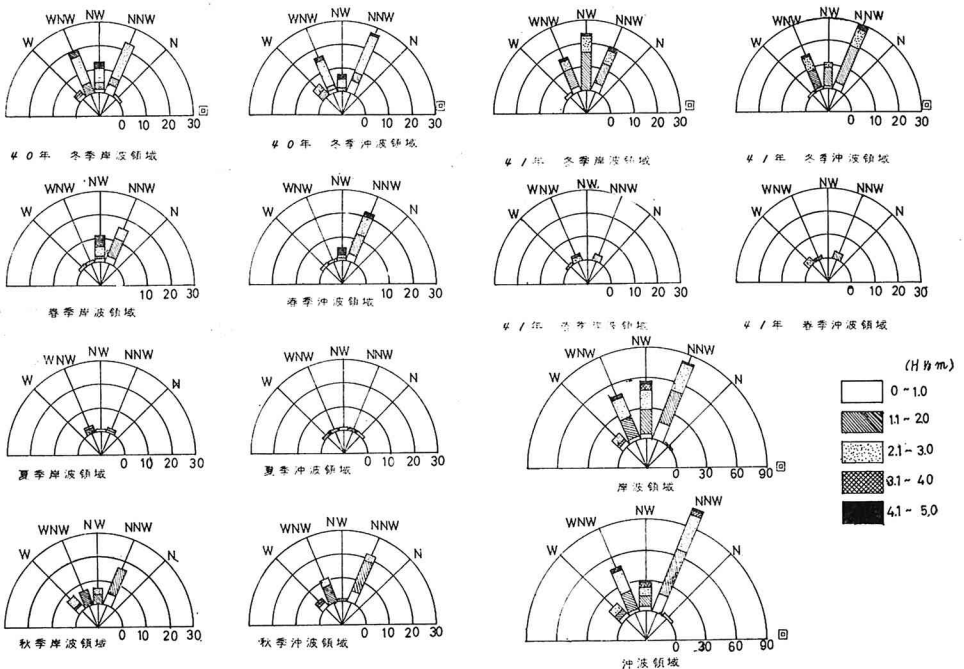
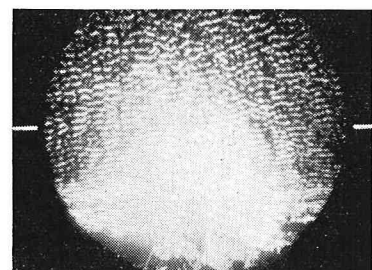


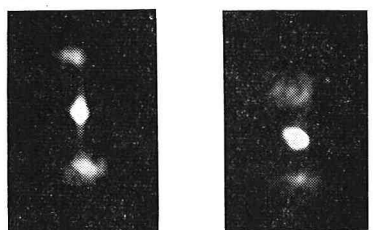
図-12 季節別波高別波向分布図



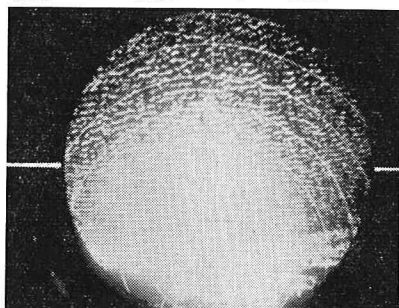
図—14 昭和40年1月2日10時のレーダー
映像およびその回折像
波高 2.38 m 風速 9.7 m/sec 風向 NNW



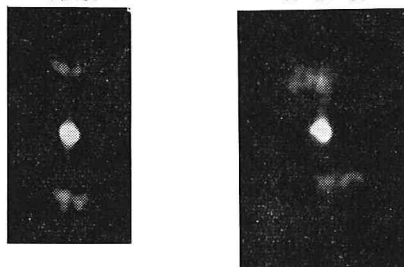
岸波領域 沖波領域



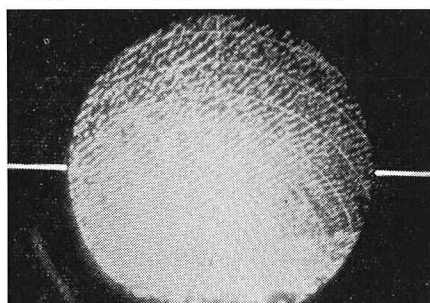
図—15 昭和40年1月1日16時のレーダー
映像およびその回折像
波高 2.60 m 風速 10.5 m/sec 風向 WNW



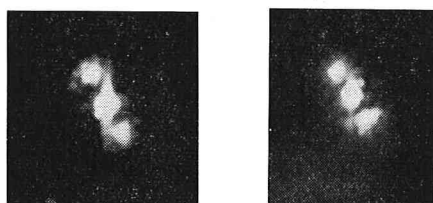
岸波領域 沖波領域



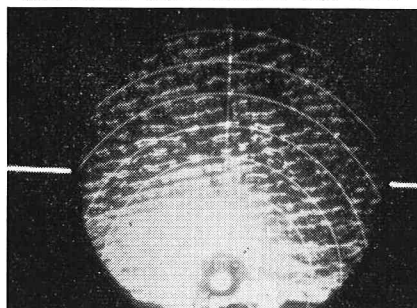
図—16 昭和40年3月19日16時のレーダー
映像およびその回折像
波高 2.17 m 風速 8.0 m/sec 風向 NNW



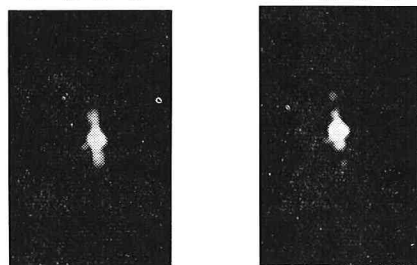
岸波領域 沖波領域



図—17 昭和40年2月2日16時のレーダー
映像およびその回折像
波高 3.25 m 風速 19.9 m/sec 風向 WNW



岸波領域 沖波領域



月2日10時, 40年1月1日16時)。(図—14, 15)

(iii) 風速が 10 m/sec 以下の時, 波高が大きい2次波は現われない (40年3月19日16時)。(図—16)

(iv) 風速が 20 m/sec に達するような時, 主方向は風向と一致しこのとき2次波は出ない (40年2月2日16時)。(図—17)

5. 光の回折による周期測定

波向測定法の時にも述べたように, 回折像から平均波

向とともに平均波長が求められることがわかった。そこでこの波長を利用して周期を測定することを試みた。

すなわち, 回折像間隔 (2λ) は波長 (L) と反比例するのでこの 2λ と L との関係をグラフ化すれば回折像間隔から波長が求められる。一方, 計算により水深の影響のある場合の波長 (L) と周期 (T) との関係から一定周期 T に対する波峰線分布が計算できる。この計算結果を用いると種々の周期 T と方向 θ に対してその回折

像が作られるから、回折像を求めれば回折像間隔 (2λ) と T との関係が求められ、波向観測で使った回折像における 2λ を測定すれば T が求まるわけである。実際には波峯線は一連の波ではなく、Random に切れているので厳密にはその影響を考えて計算しなければならないが、近似的にはこの方法で十分であるので波峯線は一連の波であるとして計算を行なった。

(1) 測定方法

電子計算機で計算された波峯線の分布を使って回折像間隔 (2λ) と T との関係を求めるために周期 T を 6, 8, 10, 12 秒, 沖波の入射角度 θ_0 (NW 方向より N への

図-18 $T=10$ 秒, $\theta_0=20^\circ$ の波峯線分布図

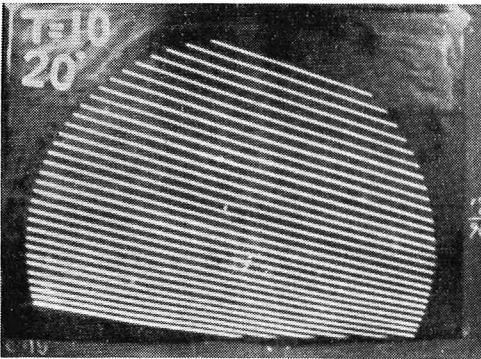


図-19 $T=10$ 秒, $\theta_0=20^\circ$ の回折像
(a) 岸波領域 (b) 沖波領域

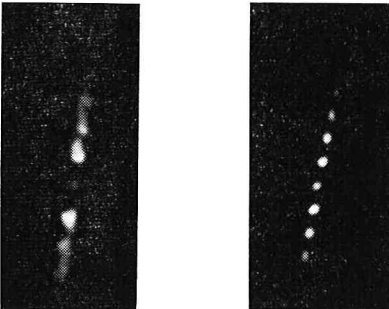


図-20 周期と回折像間隔の関係

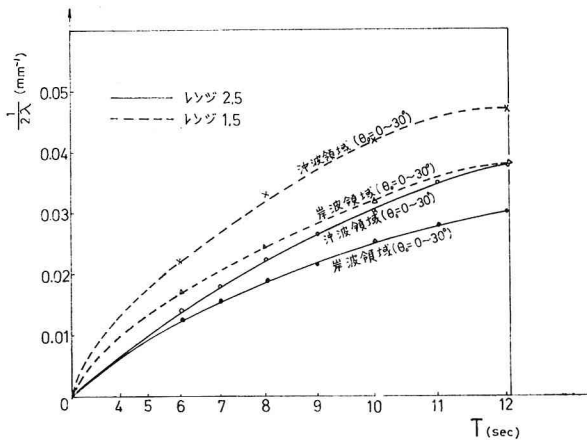
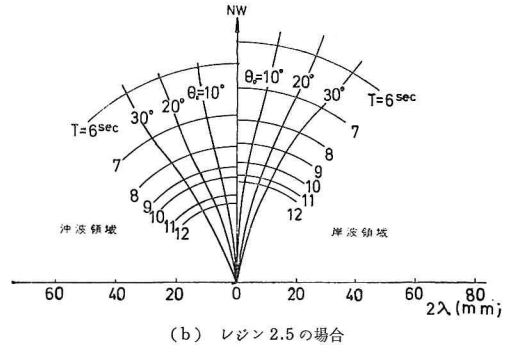
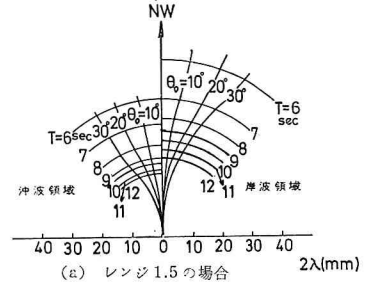


図-21 回折像の位置と深海波向および周期の関係



角度) を 0, 10, 20, 30° として T と θ_0 とを組み合わせて、周期と入射角による波峯線の分布を求めた。この波峯線に沿ってクレストの幅をすべて一定として作ったものが図-18 である。図は周期 10 秒, 入射角 20° の例である。この図から回折像を求めると 図-19 のようになる。(a) は岸波領域, (b) は沖波領域である。ただしレーダー写真の撮影範囲はレンジにより 2 種類あるので、半径 2 km の撮影範囲 (レンジ 1.5) では 500 m までを砕波帯として除き、岸波領域を 500~1000 m, 沖波領域を 1000 m 以上とし、半径 3 km の撮影範囲 (レンジ 2.5) では岸波領域を 1000~2000 m, 沖波領域を 2000 m 以上とした。このような回折像において、深海波向のおおの ($\theta_0=0, 10, 20, 30^\circ$) について、周期 T (6, 8, 10, 12 秒) に対する第 1 次の回折像の間隔 2λ を測定し (λ はピンホールの位置から第 1 次回折像までの距離) その関係を示すと 図-20 のようである。この関係は、 θ_0 について異なるものとなるはずであるが現在の場合にはその相違は測定誤差の範囲内にある。つぎに与えられた深海波向 θ_0 に対して沖波および岸波領域における波向 θ は波の屈折の影響により θ_0 と異なる値を示すこととなるが、この関係を上記のおおの場合について回折像の位置から θ を測定して、その変化を示すと 図-21 のようになる。周期の短い波については θ は θ_0 とあまり相違がなく、周期が長くなると θ は θ_0 にくらべて小さくなる。そして 図-20 で示したように 2λ と T の関係はほぼ θ_0 に関係がないから、図-21 においてはピンホールの位置 O から NW 方向を $\theta_0=0$ とし動径の長さを各周期に対応

表—1 回折法と実測との月間平均周期

年月日	回折法による 測定値			水圧式波 高計によ る測定値	差	回折法による 全体測定値		
	岸波 領域	沖波 領域	平均			岸波 領域	沖波 領域	平均
S39.12	7.6	6.8	7.2	8.0	-0.8	7.7	7.2	7.5
S40.1	8.9	9.0	9.0	8.4	+0.6	8.9	9.5	9.2
2	9.2	9.3	9.3	8.6	+0.7	8.7	8.6	8.7
3	9.3	9.2	9.3	8.7	+0.6	9.2	8.9	9.0
4	8.8	8.9	8.9	8.1	+0.8	8.6	8.4	8.5
7	6.6	6.7	6.7	6.7	±0	6.6	6.8	6.7
8	6.9	7.4	7.2	6.3	+0.9	6.6	6.8	6.7
9						8.0	8.2	8.1
10	7.9	7.8	7.9	7.9	±0	7.9	7.8	7.8
11	8.2	8.0	8.1	7.8	+0.3	8.2	8.1	8.1
12	9.5	9.7	9.6	9.4	+0.2	9.6	9.2	9.4
S41.1	9.0	9.8	9.4	8.9	+0.5	9.1	9.5	9.3
2	9.3	9.1	9.2	8.7	+0.5	9.3	9.3	9.3
3	8.8	9.0	8.9	8.3	+0.6	8.9	9.1	9.0

する 2λ にとり、おのおのの周期に対する回折像の θ に対応する θ_0 を示すことができる。

こうしてレンジ 2.5 および 1.5 に対する岸波領域と沖波領域における回折像の位置により、その領域の平均の波に対する深海波向 θ_0 と周期をただちに読み取ることができる。

（2）測定結果

このようにして測定した結果が表—1 で、金沢港において昭和 39 年 12 月より昭和 41 年 3 月まで観測された分について、水圧式波高計で実測された周期 ($T_{1/3}$) の月間平均と回折法で測定された周期の月間平均とを比較

し、その差の平均を求めている。ここで回折法と実測との観測回数が異なっているため、その差の平均は回折法と実測とが対応する回数についてだけ計算している。この結果を見ると回折法で測られた周期の方が実測よりもやや大きく出ているが、その最大値は 0.9 秒で、全体ではほぼ 0.6 秒の差となっている。この差は T が大きくなるにつれてその読み取り誤差で周期が変わることから生じたものと思われる。また日本海の波の周期は比較的短いものが多いので、その点を考えあわせるとこの測定方法でも有効であることがわかる。

6. む す び

この解析は昨年報告した日本海沿岸の波の性質に関する研究の継続として行なったもので金沢海岸の波向について解析を終った部分についてとりあえず報告するものである。引続き秋田、新潟についても解析を行ない波向の実験的な分布を調べ、さらにレーダー映像の連続撮影記録を利用して浅海部における波向の確率分布を求めて、2次元スペクトルを求める作業を行っており、また並行して日本海沿岸全般を含む電子計算機による波浪分布の算出を行なっている。これらについてはつぎの機会に発表する予定である。

この解析については、レーダー観測にあたって資料の提供を戴いた七尾港工事事務所金沢工場の担当者各位に深甚の謝意を表するものである。