船用レーダーによる波浪観測と解析—I.

—陸上観測点における実験—

石田廣史*・井上篤次郎*・林 美鶴**・細田龍介***

Wave Observation and Analysis by Marine Radar—I.

—Experiment on the Land Station—

Hiroshi ISHIDA, Tokujirou INOUE, Mitsuru HAYASHI
and Ryusuke HOSODA

Abstract

The wave observation by a marine radar has been made 30 days in total for 3 years from 1991 to 1993 at the west coast of the Awaji Island. In 11-run observations, the wave directions and wavelengths of prevailing waves could be obtained from the data of radar sea clutter.

The wave directions and wavelengths obtained by the 2-dimensional spectral analysis were not different from visually observed wave directions by 7 degrees and estimated wavelengths by 6 m, respectively. The results of the directional 1-dimensional spectral analysis were also reasonably consistent with them of the visual observation and the 2-dimensional spectral analysis.

Although the results of the directional 1-dimensional spectral analysis were less than them of the 2-dimensional spectral analysis in accuracy, the method of the directional 1-dimensional spectral analysis is useful in the automatic selection of the analyzing area for the 2-dimensional spectral analysis in the wave analysis system.

1. はじめに

波浪情報は、船舶が安全且つ経済的な運行を行う上で重要であることは勿論のこと、船舶をはじめとする海上構造物の設計や運用を行う上でも重要且つ必要とされる。現在、波高や周期についての情報を得る手段としては一部の海洋観測機器が開発・運用されているが、波向きや波長についての情報を得る手段としては、まだ目視観測に頼ることが多い。

船用レーダーの受信信号には船舶や陸地等の物標からの反射信号の他に海面反射信号も含まれており、この海面反射信号には有用な波浪情報が含まれていると考えられる。そこでこの海面反射信号から、卓越波の波長や波向きなどの二次元情報を得ようとする基礎研究⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾が以前から行われており、それらを基にした開発や実験研究⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾も行われてきた。

また、船用レーダーからの海面反射信号を高速サンプリングしてスペクトル解析し、リアルタイムで卓越波の波長と波向きの二次元情報を得る波浪観測・解析システムの開発・実用化の研究が行われ、納得のいく精度で波浪解析出来ることも既に報告⁽⁸⁾⁽⁹⁾されている。本報では、前報⁽⁸⁾での1年間4例の観測データに、その後の2年間7例の観測データを加えた3年間11例の観測データを基に、従来行ってきた海面反射信号の二次元スペクトル解析による波浪解析法の精度について更に検討すると共に、新たに方向別一次元スペクトル解析による波浪解析法も試み、両解析法の比較検討も行った。

* 正 会 員 神戸商船大学(〒658 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

** 学生会員 神戸商船大学大学院(〒658 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

*** 正 会 員 大阪府立大学工学部(〒591 大阪府堺市学園町1-1)

また現在、二次元スペクトル解析法では解析領域を手動で選定しているが、方向別一次元スペクトル解析法の導入による波浪解析ソフト内の解析領域選定の自動化の可能性についても考察を行った。

2. 波浪観測システムの概要

波浪観測システムは、兵庫県淡路島西岸の播磨灘に面した神戸商船大学付属海洋実験実習場に設置されている。設置位置は西から北方向にかけて海面が開けており、対岸までの距離は40～50kmである。

波浪観測システムは基本的に、レーダー部(アンテナ, レーダー指示部), データ収録部(高速A/D変換, データ収録装置), コントロール部(パーソナル・コンピューター, 波浪観測用ソフト)及び外部記憶部(外部記憶装置)からなっている。

レーダー(FR8100DA, 古野電気)は一般船用のもので、送信周波数は9.4GHz、送信出力は10kwである。アンテナは平均海面上18mの実験実習場建物の屋上に設置されている。通常の波浪観測時のレーダーについては、レーダー・レンジ1.5mile、パルス幅0.08μs、パルス繰り返し周波数2100Hzに設定している。コントロール部のパーソナル・コンピューターにより、これらレーダーに関する設定や観測領域等、波浪観測の際必要とされる各種項目を設定する。主な設定項目を表1に示す。レーダー海面反射信号はデータ収録装置(DL-100, 古野電気)において、最高120MHzのサンプリング周波数で8ビットA/D変換されメモリー(8MB装備, 16, 24, 32MB装備可能)に収録される。この波浪観測システムについては、既に詳細な報告⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾がなされている。

表1 波浪観測時の各種項目の設定状態

レーダーレンジ	1.5 mile
パルス幅	0.08 μs
パルス繰り返し周波数	2100 Hz
サンプリング周波数	120 MHz
収録開始距離	400 m
収録距離幅	2000 m
収録開始方位	290 度
収録方位幅	140 度

収録開始方位は相対方位で、真方位302度が相対方位の0度である。

3. 波浪解析法

3.1 二次元スペクトル解析法

二次元スペクトル解析法(以下、二次元解析という)では、まず得られた海面反射信号からPPI画像を再生し、再生画像上で解析領域を選定する。この際、波列が明瞭で適切な領域を選定する必要がある⁽⁸⁾。選定領域の極座標系の海面反射信号を、直交座標系の二次元グリッドデータに変換し、二次元スペクトル解析を行って、卓越波の波向きと波長の二次元情報を得る。

今、各グリッドにおける海面反射信号の二次元グリッドデータを $R(j, r)$ とすれば、その二次元スペクトル密度 $S(\bar{l}, \bar{m})$ は、

$$S(\bar{l}, \bar{m}) = MNd^2 |F(\bar{l}, \bar{m})|^2 \quad \dots(1)$$

$$F(\bar{l}, \bar{m}) = \frac{1}{MN} \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{r=0}^{N-1} R(j, r) \exp \left[-2\pi i \left(\frac{j\bar{l}}{M} + \frac{r\bar{m}}{N} \right) \right] \quad \dots(2)$$

$$\bar{l} = 0, 1, 2, \dots, M-1, l = \bar{l}(2\pi/Md)$$

$$\bar{m} = 0, 1, 2, \dots, N-1, m = \bar{m}(2\pi/Nd)$$

と表せる。ここで、 d はグリッド間の距離、 M, N はそれぞれX方向、Y方向のデータ数、 l, m は波数、 $\bar{l}, \bar{m}$ は無次元波数である。

以上より、ゼロ点を中心とした点対称の二次元スペクトルが求められる。スペクトルのピークと中心とを結んだ方向が波向き θ であり、スペクトルがピークとなる時の無次元波数 $\bar{l}_p, \bar{m}_p$ より波長が求められる。すなわち、

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{l}_p}{\bar{m}_p} \right) \quad \dots(3)$$

$$L = \frac{Md}{\sqrt{\bar{l}_p^2 + \bar{m}_p^2}} \quad \dots(4)$$

但し、ここでは正方形の解析領域であるため、 $M=N$ である。この二次元解析については、既に詳細に報告⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾されている。

3.2 方向別一次元スペクトル解析法

方向別一次元スペクトル解析法⁽⁹⁾(以下、一次元解析という)は、海面反射信号を各方位毎にスペクトル解析し、波数(波長)と波向きを求めるもので、基本的には二次元解析と同様である。

今、図1-(a)のように波長 L の規則的で長い峰を持つ波列が、方位 α から伝搬すると考える。ある任意の方向 θ における波長 $L(\theta)$ は、

$$L(\theta) = \frac{L}{|\cos(\theta - \alpha)|} \quad \dots(5)$$

で求められ、波数 k と波長 L との関係 $k=2\pi/L$ と(5)式より、任意の方向 θ における波数 $k(\theta)$ は、

$$k(\theta) = k |\cos(\theta - \alpha)| \quad \dots(6)$$

で与えられる。今、 $\theta=\alpha$ の時、すなわち波向きに θ をとった時、(6)式の $|\cos|$ 曲線が最大値 $k(\alpha)$ をとることになる。

そこで得られた各方位毎のレーダー海面反射信号をフーリエ変換し、スペクトルが最大となる時の波数を各方位毎について求める。そして横軸に方位を取り、縦軸にその方位での波数を取ってプロットし、図1-(b)の様に方位と波数に関して最小二乗法で $|\cos|$ 曲線近似をする。近似された $|\cos|$ 曲線が最大値をとる時の方位 α が波向きとして求められ、その時の波数 $k(\alpha)$ より波長 $L(\alpha)$ が求められる。

但し、図1-(b)からも解るように、方位 $\alpha+180$ 度においても $|\cos|$ 曲線は最大値をとり、波向きが α であるのか $\alpha+180$ 度であるのかは解析上識別できない。しかし本報における観測海域は、真方位232度～012度の140度についての領域であり、一次元解析は真方位262度～002度の100度について行っているため、 $|\cos|$ 曲線が2つの最大値をとることはない。

(a) 波向きと波長

(b) $|\cos|$ 曲線近似

図1 一次元解析法の概略

4. 波浪観測及び解析結果

4.1 波浪観測

観測は1991年から1993年までの約3年間、夏季の台風通過時や冬季の強い寒気団通過時を中心に延べ約30日間行った。その内解析可能であったデータは11例であり、その時の気象・海象状況と解析結果を表2に示す。解析可能であった時の気象・海象状況は、いずれの場合も280～297度の西寄りの風で、風速は7～13m/sであった。但し、風向及び風速はいずれも1時間平均値であり、以後も同様である。この

観測海域では、比較的定常な風が強く吹き続け波浪が発達するような状況の時は、ほとんどがこの様な西寄りの風に限られていた。

波向きを目視観測は、10度単位(2例については5度単位)で行った。波浪周期は、ストップウォッチを用いて30～50波(通常は50波)を計測し、その平均値として求めた。また推定波長 L は波浪周期 T との関係、 $L=1.56T^2$ により求めた。1991年2月22日の観測については波向きや波浪周期の目視観測が行われなかった。波浪周期は、1991年の観測では1秒単位で、1992年以降は0.1秒単位で計測した。目視による波向きは280～290度、推定波長は27～49mであった。

通常の波浪観測では表1に示す通り、観測領域を収録開始距離400m、収録距離幅2000m、収録開始方位290度、収録方位幅140度としている。ただし、収録開始距離はアンテナ位置からの距離で、収録開始方位は相対方位である。真方位302度を相対方位0度としている。

4.2 二次元解析結果

二次元解析の解析領域は、グリッド間隔5mで640m×640mの正方形の領域を取った。解析可能であった11例の二次元解析結果を表2に示す。解析から得られた波向きは274～292度、波長は32～54mであった。これらの値は、目視観測波向きとは7度以内、また推定波長とは6m以内と、比較的良好一致が見られた。

波向きと波長に関する、二次元解析結果と目視観測の差と風速との関係を図2に示す。横軸には風速を取った。縦軸には二次元解析波向き D_2 と目視観測波向き D_v との方位差(D_2-D_v)、及び二次元解析波長 L_2 と推定波長 L_E との差(L_2-L_E)を取った。風速が7～8m/s以下になるとレーダーのPPI画面上で波列が不明瞭になるため、風が弱いときのデータは解析不可能であった。風速が7～8m/s以上で解析可能であった場合についてみると、方位差(D_2-D_v)は7度以内で一致し、平均は-1.3度、標準偏差は5.1度であった。波長差(L_2-L_E)は6m以内で一致し、平均は3.5m、標準偏差は2.9mであった。

本観測海域では、風速が7～8m/s以上になると波浪解析が可能になり、その場合での方位差(D_2-D_v)や波長差(L_2-L_E)は、風速に関わらず前述のような良好一致が見られた。精度については、波向きの目視観測を10度単位(一部は5度単位)で行っていることや、目視観測の波浪周期から波長を推定していること、また二次元解析データのグリッド間隔が5mであることなどを考えると、二次元解析と目視観測との差は測定誤差の範囲であり、二次元解析は十分納得のいく精度で波浪解析が行え、その解析結果として得られる波向きと波長の二次元情報は、信頼のおけるものであると考えられる。

4.3 一次元解析結果

各方位について得られた海面反射信号の強度は、アンテナからの距離が遠くなるにつれて減衰する。そのため一次元解析を行う以前に、海面反射信号から海面反射信号の100m移動平均を減じ、この距離減衰を消去した。

本観測における一次元解析では、どの程度の解析開始距離や解析距離幅が一次元スペクトル解析を行

表2 観測時の気象・海象状況及び解析結果

年 月 / 日 時	風向 (deg)	風速 (m/s)	波 向 き (deg)			波 長 (m)		
			目視	二次元	一次元	推定	二次元	一次元
91 2/22 21	285	9	—	285	291	—	38	38
91 2/23 10	297	12	280	274	297	39*	43	40
91 2/23 12	297	12	280	286	303	39*	44	45
91 9/14 19	294	11	280	286	301	39*	44	46
92 8/ 9 02	296	7	280	287	291	42	41	42
93 2/23 21	285	13	280	286	307	49	54	48
93 2/24 00	290	10	290	289	307	42	48	45
93 2/24 02	295	10	290	286	294	37	36	44
93 9/ 4 08	281	13	285	280	294	34	40	44
93 9/ 4 11	293	10	290	292	301	33	37	48
93 9/ 4 13	280	9	285	278	291	27	32	47

風向及び波向きは真方位。推定波長 L は、 $L=1.56T^2$ (T は目視観測周期)による。

*は、 T を1秒単位で、それ以外は0.1秒単位で計測。

二次元解析及び一次元解析はそれぞれ二次元スペクトル解析及び方向別一次元スペクトル解析による結果を示す。方向別一次元スペクトル解析は、アンテナ位置より700mから640m幅で、5度毎に解析した結果を示す。

図2 二次元解析結果と目視観測の差と風速との関係

横軸の風速は1時間平均。図中の○印は(D_2-D_v)を、×印は(L_2-L_E)を示す。 D_2 は二次元解析波向き、 D_v は目視観測波向き。 L_2 は二次元解析波長、 L_E は推定波長。Meanは差の平均、STDは差の標準偏差。

うのに適切かを検討するため、方位については5度毎に、距離については次の場合について一次元解析を行った。まず解析領域のアンテナ位置からの距離が、どの程度であれば適切なかを調べるために、

解析法(1)：解析距離幅は二次元解析と同様の640m ($1.25\text{m} \times 512$) として、アンテナ位置からの解析開始距離を600m～1000mまで100m毎に解析を行った。

更に、解析領域の幅がどの程度であれば適切なかを調べるために、

解析法(2)：以後に示す解析法(1)の結果からアンテナ位置からの解析開始距離を700mとして、解析距離幅を320m, 640m, 1280m ($1.25\text{m} \times 256, 512, 1024$) として行った。

図3に各種一次元解析結果の例を示す。いずれの図も横軸に波向き、縦軸に波長を取っている。(a)(c)図は解析開始距離を変化させて一次元解析を行った解析法(1)での結果であり、(b)(d)図は解析距離幅を変化させて一次元解析を行った解析法(2)での結果である。

(a)(b)図は1993年2月24日00時のデータを用いて解析した結果である。この時の風速は10m/sで、レーダーのPPI画面上で波列は明瞭であった。二次元解析結果と目視観測との方位差は1度、波長差は6mであった。(a)図より、一次元解析の各解析開始距離での結果と二次元解析結果や目視観測との方位差は18度以内、波長差は6m以内であった。また(b)図より、一次元解析の各解析距離幅での結果と二次元解析結果や目視観測との方位

差は18度以内、波長差は11m以内であった。いずれの一次元解析結果も、二次元解析結果や目視観測と大きく異なることはない。

(c)(d)図は1993年9月14日13時のデータを用いて解析した結果である。この時の風速は9m/sではあるが風が弱まりかけており、レーダーのPPI画面上では波列が不明瞭で判別し難い状況であった。二次元解析結果と目視観測との方位差は7度、波長差は5mであった。(c)図より、一次元解析の各解析開始距離での結果と二次元解析結果や目視観測との方位差は32度以内、波長差は27m以内であった。また(d)図より一次元解析の各解析距離幅での結果と二次元解析結果や目視観測との方位差は28度以内、波長差は25m以内であった。

(a)(b)図での結果と比べると、二次元解析結果と目視観測との差はほとんど変わらないが、一次元解析結果は二次元解析結果や目視観測と大きく異なる。特に波長については、その差が大きい。

そこで波長と波向きに關す

図3 各種一次元解析結果の例

(a)(b)図は1993年2月24日00時(風速10m/s)のデータ、(c)(d)図は1993年9月4日13時(風速9m/s)のデータによる解析結果。図中、●印は目視観測波向き及び推定波長を、■印は二次元解析結果の波向き及び波長を示す。(a)(c)図は、解析距離幅640mで解析開始距離を変化させた一次元解析結果で、図中の各印は一次元解析の解析開始距離を示す。(b)(d)図は、解析開始距離700mで解析距離幅を変化させた一次元解析結果で、図中の各印は一次元解析の解析距離幅を示す。

る、一次元解析と二次元解析の結果の差と風速との関係を図4に示す。(a)図は波向きについての結果、(b)図は波長についての結果である。何れの図も横軸に風速を取った。縦軸には、(a)図では一次元解析波向き D_1 と二次元解析波向き D_2 との方位差 ($D_1 - D_2$) を取り、(b)図では一次元解析波長 L_1 と二次元解析波長 L_2 との差 ($L_1 - L_2$) を取った。二次元解析同様、風速が7~8m/s以下では解析が不可能であった。

波向きの方位差 ($D_1 - D_2$) は、風速9m/sでは6~32度、風速13m/sでは7~22度と、風速の増加に伴い方位差の散らばりは小さくなっているが、方位差自体はあまり変わらない。波長差 ($L_1 - L_2$) は、風速9m/sでは0~22m、風速13m/sでは-6~8mと、風速の増加に伴い波長差の散らばり及び波長差自体とも小さくなっている。このように一次元解析では、風速の増加に伴ってPPI画像上の波列がはっきりし始めることもあり、二次元解析との差の散らばりが小さくなる傾向が見られる。特に波長については波長差 ($L_1 - L_2$) 自体も小さくなる傾向があり、より精度の高い結果が得られるものと考えられる。

図5に、解析を行った11例での一次元解析と二次元解析の結果の比較を示す。横軸は、(a)図では解析開始距離を、また(b)図では解析距離幅を取っている。縦軸には何れの図も、上段図に一次元解析と二次元解析の方位差 ($D_1 - D_2$)、中段図に一次元解析と二次元解析の波長差 ($L_1 - L_2$)、下段図に総合評価の、それぞれの平均値及び標準偏差を取っている。総合評価とは、波向き、波長の個々について得られた平均値や標準偏差を総合的に評価したもので、方位差 ($D_1 - D_2$) を90度で無次元化した値 D_n と、波長差 ($L_1 - L_2$) を二次元解析波長 L_2 で無次元化した値 L_n とを用いて、

$$T = \sqrt{D_n^2 + L_n^2} \quad \dots(7)$$

によって求めた無次元化値 T のことである。

(a)図には解析開始距離を600~1000mと変化した、前述の解析法(1)による結果を示している。上段図の波向きでは、方位差 ($D_1 - D_2$) の平均値は解析開始距離700mの結果が13度と最も小さく、標準偏差は解析開始距離600m, 700mの結果がほぼ同じで6度と小さかった。また中段図の波長では、解析開始距離600m, 700mの結果がいずれも同じで小さく、波長差 ($L_1 - L_2$) の平均値は3m、標準偏差は6mであった。これらの結果から解析開始距離700mの結果が良いと思われるが、さらに下段図の総合評価で見ると、無次元化値 T の平均値では解析開始距離700mの結果が最も小さく、標準偏差では解析開始距離600m, 700mの結果がほとんど同じで小さかった。

また一次元解析と二次元解析の結果を比較したのと同様の方法で、一次元解析結果と目視観測を比較した場合でも、ほとんど同様の傾向が見られた。よって一次元解析で海面反射信号を解析する開始距離としては、本観測においては700mが適当であると考えられる。

次に(b)図は、解析法(1)の結果で適当と考えられたことから、解析開始距離を700mとして解析距離幅を変化させた、前述の解析法(2)による結果を示している。上段図の波向きでは、方位差 ($D_1 - D_2$) の平均値は解析距離幅640mの結果が13度と最も小さく、標準偏差は解析距離幅320m, 640mの結果がほぼ同じで6度と小さかった。また中段図の波長では、波長差 ($L_1 - L_2$) の平均値は解析距離幅320mの結果が

図4 一次元解析と二次元解析の結果の差と風速との関係

横軸の風速は1時間平均。一次元解析は、解析距離幅640mで解析開始距離を変化させた結果で、図中の各印は一次元解析の解析開始距離を示す。(a)図は方位差 ($D_1 - D_2$)、(b)図は波長差 ($L_1 - L_2$)。
 D_1 は一次元解析波向き、 D_2 は二次元解析波向き、 L_1 は一次元解析波長、 L_2 は二次元解析波長。

−0.9m と最も小さく、解析距離幅の増加と共に大きくなった。標準偏差は解析距離幅 320m, 640m, 1280m の全ての結果ともほぼ同じ 6m であった。これらの結果からだけでは、どの解析距離幅が適当かは判断出来ない。そこで下段図の総合評価を見ると、無次元化値 T の平均値は解析距離幅 640m の結果が、また標準偏差は解析距離幅 320m の結果が最も小さくなっている。

また、一次元解析と二次元解析の結果を比較したのと同様の方法で、一次元解析結果と目視観測を比較した場合では、波向き、波長のそれぞれについては同様の傾向が見られたが、総合評価では無次元化値 T の平均値、標準偏差とも解析距離幅 320m の結果が最も小さい値となった。一次元解析結果は不安定な面が多く、単独で使用するのではなく二次元解析の解析領域の選定に導入することを念頭に置いている。よって、これらの結果から何れの解析距離幅が適当であるかを判断する前提として、一次元解析の評価は二次元解析との比較において行われるべきであること、さらに波向きの精度が高いもの

のを選ぶべきであることが考えられる。よって本観測においては、一次元解析で海面反射信号を解析する距離幅としては、二次元解析結果と比較したときに波向きの方位差 ($D_1 - D_2$) の平均値及び標準偏差が何れも最も小さく、しかも二次元解析と同じ幅であることから、640m 幅が適当であると考えられる。

以上のことから本観測における一次元解析は、アンテナ位置より 700m 程度の解析開始距離から 640m 程度の解析距離幅で解析するのが適当で、これはレーダー・ビームの俯角にして 0.8～1.5 程度の範囲にあたる。この場合の一次元解析結果も表 2 に示しており、波向きは 291～307 度、波長は 38～48m であった。またこの場合の一次元解析と二次元解析の方位差 ($D_1 - D_2$) は 23 度以内で一致し、平均は 13 度、標準偏差は 6 度、波長差 ($L_1 - L_2$) は 15m 以内で一致し、平均は 3m、標準偏差は 6m であった。

これら本観測における一次元解析の結果は、解析方位幅が 100 度と制限されていることもあり、二次元解析の結果と比べ精度的には多少劣り不安定な面を持っているため、単独で使用するには必ずしも十分ではない。しかし、二次元解析での解析領域選定を自動化するために一次元解析を導入することを考えた場合、一次元解析はおおよその波向きを検知するには十分な精度を備えており、一次元解析を導入して自動

図5 一次元解析と二次元解析の結果の比較

(a)図は解析距離幅 640m で解析開始距離を変化させ、(b)図は解析開始距離 700m で解析距離幅を変化させた一次元解析の結果。上段図は波向き、中段図は波長の結果を示す。下段図は、波向きの方位差を 90 度で、波長差を二次元解析波長で、それぞれ無次元化した値を用いて総合的に評価したもの。縦軸は、(一次元解析)-(二次元解析)の平均値及び標準偏差で、それぞれ図中の○△□及び●▲■が対応する。

選定した二次元解析での解析領域と、手動で選定した適切な解析領域とが大幅に異なることはないであろう。よって一次元解析は、二次元解析での解析領域の自動選定に利用可能であると考えられる。

5. おわりに

船用レーダーの海面反射信号から卓越波の波向き、波長の二次元情報を得るために、二次元スペクトル解析法及び方向別一次元スペクトル解析法の両方を行い、その精度について検討を行った。

1991年から1993年までの約3年間、延べ約30日間の観測期間中、観測海域で波浪が発達したのは何れも風速が7～8m/s以上の西寄りの風が強い場合で、その内11例が解析可能であった。何れの解析法においても、風速が7～8m/s以下になりレーダーのPPI画面上で波列が不明瞭になると解析が不可能となった。

二次元スペクトル解析法による波向き D_2 と目視観測の波向き D_o とを比較すると、方位差($D_2 - D_o$)は7度以内で一致し、方位差の平均は-1.3度、標準偏差は5.1度であった。また二次元スペクトル解析法による波長 L_2 と推定波長 L_E とを比較すると、波長差($L_2 - L_E$)は6m以内で一致し、波長差の平均は3.5m、標準偏差2.9mであった。これらの結果は非常に良い一致であり、十分納得のいく精度で波浪解析が行えた。

方向別一次元スペクトル解析法は、解析開始距離及び解析距離幅を変化させて解析を行った。その結果と二次元スペクトル解析法による結果を波向きについて比較すると、風速の増加に伴い両解析結果の方位差の散らばりは小さくなる傾向があるが、方位差自体はあまり変わらなかった。また波長について比較すると、風速の増加に伴い両解析結果の波長差の散らばり及び波長差自体とも小さくなる傾向が見られた。また本観測における方向別一次元スペクトル解析法は、アンテナ位置より700m程度の解析開始距離から640m程度の解析距離幅で一次元スペクトル解析するのが適当で、これはレーダービームの俯角にして0.8～1.5度程度の範囲にあたる。

この場合での方向別一次元スペクトル解析法の結果(波向き D_1 、波長 L_1)と二次元スペクトル解析法での結果とを比較すると、両解析結果の方位差($D_1 - D_2$)は23度以内で一致し、方位差の平均は13度、標準偏差は6度であった。また両解析結果の波長差($L_1 - L_2$)は15m以内で一致し、波長差の平均は3m、標準偏差は6mであった。これらの結果から方向別一次元スペクトル解析法は、二次元スペクトル解析法に比べ精度的に劣り不安定な面があるため単独での利用には適していないが、二次元スペクトル解析法の解析領域の自動選定には利用可能であると考えられる。

今後は、方向別一次元スペクトル解析法による解析結果の精度や不安定性について更に検討を加え、二次元スペクトル解析法の自動化を目指すと同時に、実船実験も行う必要がある。

本研究は、平成2, 3, 4年度文部省科学研究費(総合研究(A), 課題番号02302035)の補助によって行われた。

参 考 文 献

- (1) 井上篤次郎：レーダによる波向計測法，(社)日本造船研究協会，第132研究部会，実船搭載用波浪計に関する報告書，93-134，1973
- (2) 井上篤次郎，石田廣史，渡辺四郎：船用レーダによる波浪の観測，神戸商船大学紀要，第2類第23号，29-34，1975
- (3) 井上篤次郎：レーダ映像のホログラフ法による波解析，(財)日本造船振興財団，日本国土海洋総合学術診断，昭和54年度技術報告書—海洋関係—，5-12，1980
- (4) 井上篤次郎，加藤雅司：船用レーダを利用した波浪解析の一方法，日本航海学会論文集，第67号，127-135，1982
- (5) 松野達夫，高山仁，清水紀雄，荻野芳造，古賀真綱：船用レーダによる波浪観測—I，日本航海学会論文集，第69号，107-114，1983
- (6) 井上篤次郎，石田廣史，野崎伸夫，前田智城：船用レーダーによる波浪観測システム，神戸商船大学船貨輸送研究施設研究報告，第5号，1-6，1992

- (7) 石田廣史, 井上篤次郎, 前田智城: 船用レーダーによる波浪観測装置の波浪解析システム概要, 神戸商船大学紀要, 第2類第40号, 1-6, 1992
- (8) 石田廣史, 井上篤次郎, 前田智城, 細田龍介: 船用レーダーによる波浪解析とその海面波シミュレーション画像, 日本航海学会論文集, 第87号, 217-225, 1992
- (9) Hosoda R., T.Inoue, H.Ishida, Y.Kunitake and T.Yamada, : Application of Marine Radar for Real-Time Data Acquisition of Sea Condition around Ships and Marine Structures, TECHNO-OCEAN '92 International Symposium, Proc. vol.2, 693-699, 1992

質 疑 応 答

田口一夫(鹿児島大学): 観測地より 700m から解析距離としたが、その点の水深はいくらか。

林 美鶴: 海図によれば、アンテナ位置からの距離 700m おける水深は約 8m 程度で、解析領域の水深は 8~13m 程度でした。

新井康夫(海技大学校): 得られた結果に大きく影響を及ぼすレーダーの距離分解能(送信パルス幅)と、スペクトラム計算を行った場合のサンプリング間隔はいくらでしたか。また、これらが与える影響についてどの様に考えているか。

林 美鶴: 本観測システムにおいては、送信パルス幅は $0.08\mu\text{s}$ で、距離分解能は 12m です。また本解析におけるデータのサンプリング距離間隔は、方向別一次元スペクトル解析法においては 1.25m、二次元スペクトル解析法においてはグリッド間隔 5m です。本観測における卓越波の波長は、これら距離分解能やサンプリング距離間隔に比べ十分長く、解析に与える影響はないものと考えます。

福地 章(海技大学校): 波浪観測データが同一方向に偏っているが、観測慣れにより客観性が失われることはないか。他方向の場合でも同じ様な解析結果が得られるだろうか。

林 美鶴: 本観測を行った海域では、波浪が解析可能となるところまで十分に発達するような風の条件が西寄りに限られてしまい、何れの気象・海象も似かよった値となりました。しかし、風向・風速は測器により計測しており、また各観測での波向きや波浪周期の目視観測は異なった、しかも複数の観測者によって行われましたので、客観性が失われることはないものと考えます。また他方向の場合でも、同様に解析結果が得られるものと考えます。