

複雑な海底地形上における波浪変形現地観測と解析

鹿島 遼一\*・丸山 康樹\*\*・平口 博丸\*  
鈴木和三郎\*\*\*・田中 典明\*\*\*\*

1. 緒 言

外洋の波浪は、周波数および伝播方向が各々異なる無数の波の重ね合わせから成る不規則な波と一般に解釈される。そのような不規則波浪が海岸線に近づくと、海底地形の影響により屈折、回折、浅水などの変形を受けるが、その変形も規則波に対する結果を線形的に重ね合わせるにより評価される。しかし、現地における不規則波の変形の実体を確認した例はほとんど無く、ましてや規則波ですら問題となるような波浪の集中・発散が生ずる複雑な海域を対象とした検討は皆無と言えよう。

そこで本研究では、そのような複雑な海域を対象として波浪変形現地観測を行い、波浪の変形特性を方向スペクトルのレベルで詳細に検討する。ついで、その観測結果を基にして不規則波の変形計算を行い、実測値と計算値との比較から、現状の波浪変形評価手法の有する問題点について検討する。

2. 現地観測

(1) 観測概要

現地観測は外海に直接面する沿岸域において実施した。対象海域付近の海底地形を 図-1 に示す。当該海域の最も大きな特徴は、沖合 4~5 km の地点を中心として、岸沖方向に長さ約 4 km、沿岸方向に幅約 1 km の帯状の浅瀬が存在することである。浅瀬周辺の平均水深は約 25 m、浅瀬頂部の水深は約 15 m である。この種の浅瀬が存在すると波浪の集中発散が生じ、複雑な波浪場となることが予想される。

使用した計測器は超音波式波高計 5 台、水圧式波高計 8 台および電磁流速計 7 台である。各計測の仕様および使用台数等を 表-1 に示す。

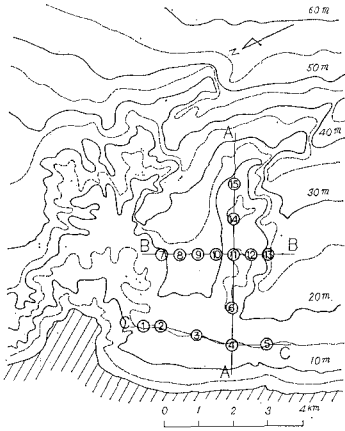


図-1 観測海域の海底地形

表-1 使用計測器

| 計 器 名            | 波 高 計                |                         |                        | 流 速 計                      |                      |
|------------------|----------------------|-------------------------|------------------------|----------------------------|----------------------|
|                  | 超 音 波                | 水 圧 式                   | 水 圧 式                  | 電 磁                        | 電 磁                  |
| 型 式              | SSW-II<br>(超音波パルス方式) | MTW-II<br>(半導体圧力センサー方式) | MTW-6<br>(ストレインゲージ式)   | EMC-I<br>(2軸電磁式)           | MTCM-6S<br>(2軸電磁式)   |
| 測 定 範 囲          | 9.6 m                | 5.1 m<br>(水圧波高値)        | 0~2 kg/cm <sup>2</sup> | -2.54 m/sec<br>+2.54 m/sec | -3 m/sec<br>+3 m/sec |
| 使用台数             | 5                    | 4                       | 4                      | 4                          | 3                    |
| サンプリング<br>モ ー ド  | 10分/2時間              | 10分/2時間                 | 10分/2時間                | 10分/2時間                    | 10分/2時間              |
| サンプリング<br>インターバル | 0.5 秒                | 0.5 秒                   | 0.48 秒                 | 0.5 秒                      | 0.48 秒               |

第1回目の観測では、浅瀬による波浪変形のうち岸沖方向の変化を捕える事を目的として、図-1の AA 断面上に計器を配置する。第2回観測では浅瀬中央部および浅瀬背後での沿岸方向の波浪変形に着し、図-1の BB および CC 断面上に計器を配置する。

各測点ではできる限り波高計と流速計との組み合わせによる方向スペクトルの観測を行い、波浪データは方向スペクトルのレベルに統一するようにする。

(2) データ解析

有義波高・周期はゼロアップクロス法から求める。ただし、水圧データから波高を求める場合には、水圧フィルターおよび  $n$  値を考慮して水面変位のパワースペク

\* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 水理部  
\*\* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 水理部  
\*\*\* 東京電力(株) 建設部 土木調査課  
\*\*\*\* 正会員 東京電力(株) 地中線建設所 土木課

トル  $P_{\eta}(f)$  を再現し、次式により  $H_{1/3}$  を求める。

$$H_{1/3} = 3.92 \left( \int p_{\eta}(f) df \right)^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

方向スペクトルの推定には磯部ら<sup>1)</sup>による EMLM を用いる。この推定法は波高計と流速計の組み合わせのみならず、波高計のリニヤレーにも適用できる。推定された方向スペクトルを周波数方向に積分し、それが最大値を示す方向を波の主波向  $\theta_p$  と定義する。

波浪の方向分布特性を表わすパラメータとして工学的に最も良く用いられるのは方向集中度  $S_{max}$  である。ここでは、主波向を中心とする  $\pm 4\theta$  の区間内に含まれる波浪エネルギーの全波浪エネルギーに対する割合  $R$  から  $S_{max}$  を推定する。Bretschneider-光易型周波数スペクトルと光易型方向関数を有する標準方向スペクトルを仮定し、 $4\theta$ ,  $R$  および  $S_{max}$  の間の関係を数値計算によりあらかじめ求めておく。現地の波浪はこの標準方向スペクトルで表わされると言う保証はないが、これにより得られる  $S_{max}$  は方向集中度の一つの目安となろう。

### 3. 観測結果

#### (1) 岸沖方向の波浪変形

第1回波浪観測は昭和58年12月10日から21日までの11日間に渡り実施した。この時の計測器の配置を表-2に示す。寒冷前線および低気圧の通過に伴う風の影響により、当該地点は11日から12日にかけて時化となった。図-2は観測点 ST-15 における観測期間中の  $H_{1/3}$ ,  $T_{1/3}$  の経時変化である。観測期間中に波高が1m以上となるのはこの時化の時だけである。

11日21時から12日7時までの6回の観測による波高の観測結果を図-3に示す。図の縦

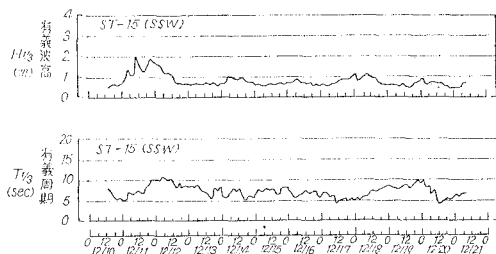


図-2 沖波の経時変化(第1回波浪観測)

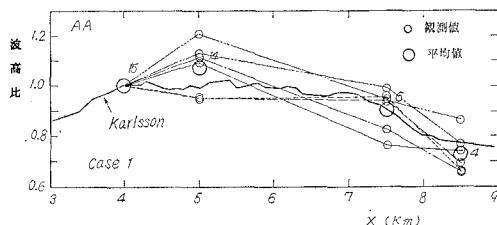


図-3 波高の観測結果(第1回波浪観測)

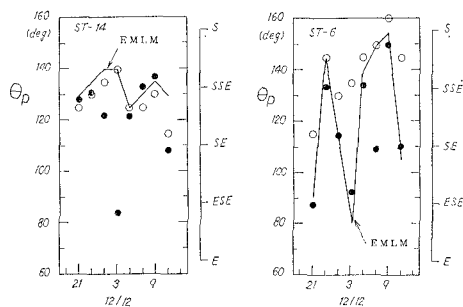


図-4 主波向の推定結果(第1回波浪観測)

軸は ST-15 の波高値で無次元化されており、観測値を小さな白丸で示す。

ST-14 の波高は ST-15 よりも大きく、逆に ST-4 では波高が2~3割低い傾向にある。

EMLM により求めた主波向  $\theta_p$  の1例を図-4の実線で示す。図中の“○”は永田法<sup>2)</sup>による推定値，“●”は流速槽門の長軸方向の値である。ST-14 の  $\theta_p$  は比較的安定した経時変化を示すのに対し、ST-6 の  $\theta_p$  は  $90^\circ \sim 150^\circ$  の範囲内でかなり激しく変化している。各観測点での方向スペクトルに関する検討から、その原因として以下の事が考えられる。ある周波数  $f_i$  の方向スペクトル  $E(f_i, \theta)$  が最大を示す方向を  $\theta_{fi}^*$  とする。ST-14 では  $\theta_{fi}^*$  の値は  $f_i$  によらずほぼ一定の値を取るのに対し、ST-6 では  $f_i$  が低周波数になる程  $\theta_{fi}^*$  の値は  $90^\circ$ 、即ち汀線直角方向へと変化している。これは明らかに屈折の影響によるものと思われるが、その屈折の程度は時間的に不規則に変動している。ST-6 の  $\theta_p$  が  $90^\circ$  近い値を取るのは、低周波側のエネルギーレベルが大きく、しかも屈折が顕著に見られる場合である。

$S_{max}$  の試算例を図-5に示す。波高計のリニヤレーにより推定された  $S_{max}$  は10~20の範囲の値を取る。この  $S_{max}$  の値から当時の波浪は風波であったと言える。

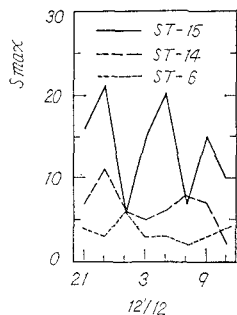


図-5  $S_{max}$  の推定結果(第1回波浪観測)

同図で最も特徴的なのは、海岸線に近い測点ほど  $S_{max}$  の値が小さくなっていることである。

## (2) 沿岸方向の波浪変形

第2回観測は昭和59年3月12日から27日までの16日間に渡って実施した。この時の計測器の配置を表-3に示す。観測期間中の主な気象擾乱は、17~18日および19~21日にかけて当該海域の沖合を通過した2つの低気圧によるものである。特に後者の低気圧は22~23日にかけて北海道の東方海上で980 mb にまで発達したため、これに伴なううねりが長期間続いた。ST-15における観測期間中の波高・周期の経時変化を図-6に示す。

17日7時から17時の風浪、および23日21時から24日7時にかけてのうねりについての波高観測結果を図-7, 8に示す。図の縦軸はST-15の波高値で無次元化されている。各測点での波高変化を比較しても、各々の大小関係は時刻によりかなり変動しており、海域全体に対する定性的な傾向を見出すことは難しい。しかし、測定値の信頼性が高い超音波式波高計(ST-15, 13, 11, 7)の結果にはかなり安定した関係が見られる。例えば23~24日の場合、ST-13の値はST-15の値に比べて常に大きく、逆に

表-3 計測器の配置(第2回波浪観測)

| 測点 ST | 計測器    | 台数 | 備考  |
|-------|--------|----|-----|
| 15    | MTW-6  | 1  | 同 期 |
|       | MTCM   | 1  |     |
|       | SSW-II | 1  |     |
|       | EMC    | 1  |     |
| 13    | SSW-II | 1  | 同 期 |
| 12    | MTW-II | 1  |     |
| 11    | SSW-II | 1  | 同 期 |
| 10    | EMC    | 1  |     |
| 10    | MTW-II | 1  | 同 期 |
| 9     | SSW-II | 1  |     |
| 9     | EMC    | 1  | 同 期 |
| 8     | MTW-II | 1  |     |
| 7     | SSW-II | 1  | 同 期 |
| 7     | EMC    | 1  |     |
| 4     | MTW-6  | 1  | 同 期 |
| 4     | MTCM   | 1  |     |
| 3     | MTW-6  | 1  | 同 期 |
| 2     | MTW-6  | 1  |     |
| 2     | MTCM   | 1  | 同 期 |

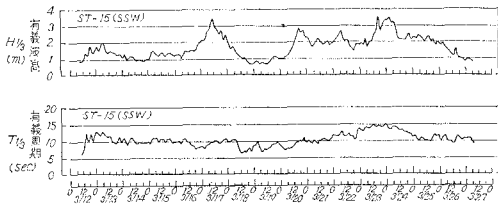


図-6 沖波の経時変化(第2回波浪観測)

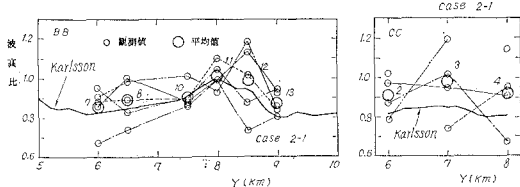


図-7 波高の観測結果(第2回波浪観測)

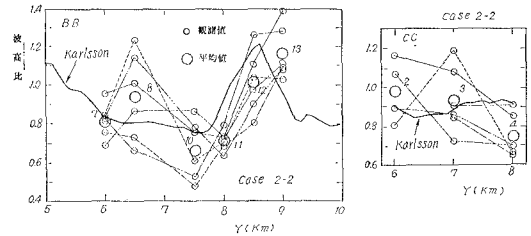


図-8 波高の観測結果(第2回波浪観測)

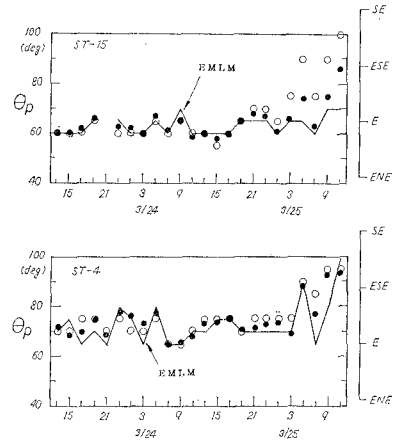


図-9 主波向の推定結果(第2回波浪観測)

ST-7 と 11 の値は常に小さくなっている。

うねり来襲時の主波向  $\theta_p$  の推定結果を図-9に示す。同図によると3種類の方法で推定された  $\theta_p$  はほぼ同程度の値を示し、各々の推定値の差はほぼ  $10^\circ$  以内に収まっている。

23日23時の方向スペクトルの推定結果を図-10に示す。同図の上段の図は方向スペクトル  $E(f, \theta)$  を周波数に関して積分した値  $D(\theta)$  である。また、重ね書きされた下段の図はある周波数  $f_i$  に関する  $E(f_i, \theta)$  である。上記時刻においてST-15では  $H_{1/3}=3.32$  m,  $T_{1/3}=15.2$  s が観測されている。同図の方向スペクトルがかなり鋭い方向分布形状を有することからうねりの来襲が確認される。また、沿岸付近のST-4, 2の場合、方向

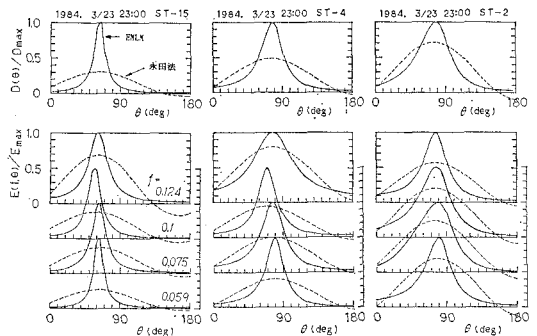


図-10 方向スペクトルの推定結果

スペクトルがピークとなる方向は低周波になる程汀線直角方向へと変化しており、屈折の影響が明瞭に読み取れる。

$S_{max}$  の試算例を図-11に示す。うねり来襲時の23~24日にかけて  $S_{max}$  は

40前後の値となっている。この時の各測点での  $S_{max}$  を比較すると、沿岸部での値は沖合の値よりも小さく、一様勾配斜面上での数値計算結果とは逆の傾向が見られる。同様な傾向は図-5にも見られた。この原因としては複雑な地形による影響が考えられる。

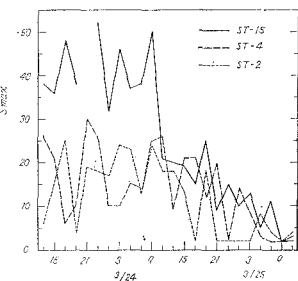


図-11  $S_{max}$  の推定結果 (第2回波浪観測)

#### 4. 波浪の変形計算

##### (1) 不規則波の変形計算

波浪の変形計算法としては数値波動解析法、非定常緩勾配方程式などが提案されているが、いずれも規則波を対象とし、しかも多大な計算時間を必要とする。したがって、不規則波の変形計算を広い海域に渡り実施することは実際問題として難しい。ここでは多成分の屈折計算が容易に行える Karlsson の方法<sup>3)</sup>を用いることにする。ただし、この方法では波浪の集中に伴う回折現象は考慮できない<sup>4)</sup>。

##### (2) 計算条件

Karlsson の方法は波浪場の定常性を仮定している。ゆえに、計算結果と観測結果との比較を行う場合、波浪場が定常状態にある時刻を対象とするのが望ましい。しかし観測結果から明らかに  $H_{1/3}$ ,  $T_{1/3}$ ,  $\theta_p$ ,  $S_{max}$  等の波浪特性は時間的・空間的にかなり変動しており、2時間毎に得られる1回のデータ(10分間)だけを用いて定常な波浪場を決定することに疑問を生じた。そこで、波浪特性が比較的一定している連続した6回の観測値のアンサンブルを取り平均的な波浪場を推定する。観測期間中の主な時化に対してこの平均操作を施すと、ST-15の平均的な波浪諸元は表-4のように与えられる。

表-4 平均的な入射波諸元 (ST-15)

| ケース No.  | 対象期間                       | 記録時間 | $H_{1/3}$ (m) | $T_{1/3}$ (sec) | $\theta_p$ (deg) | $S_{max}$ |
|----------|----------------------------|------|---------------|-----------------|------------------|-----------|
| Case 1   | 12/11 21:00~<br>12/12 7:00 | 10   | 1.55          | 10.2            | 120<br>(SE10°S)  | 14        |
| Case 2-1 | 3/17 7:00~<br>3/17 17:00   | 10   | 2.78          | 9.7             | 110<br>(SE)      | 6         |
| Case 2-2 | 3/23 21:00~<br>3/24 7:00   | 10   | 3.25          | 14.1            | 60<br>(E5°N)     | 42        |
| Case 2-3 | 3/24 13:00~<br>3/24 23:00  | 10   | 2.19          | 12.3            | 65<br>(E)        | 17        |

計算領域は沿岸方向 12 km, 岸沖方向 10 km とする。沖側境界(水深約 55 m)上の方向スペクトルは ST-15 (水深約 20 m) の観測値を参考にして与えた。即ち、ST-15 の観測平均値から周波数スペクトルを推定し、その方向分布関数には表-4 の  $S_{max}$  値を有する光易型とする。

差格子間隔は  $\Delta x = \Delta y = 100$  m, 角度分割数 45 ( $\Delta\theta = 4^\circ$ ), 周波数分割数 10 (エネルギー等分割) とする。

##### (3) 計算結果

Karlsson の方法による計算結果の1例を図-12に示す。同図は入射波向  $60^\circ$  のうねり (Case 2-2) に対する主波向および波高の平面分布図である。同図より浅瀬の南側に波浪が集中し、顕著な波高増大部分が存在するこ

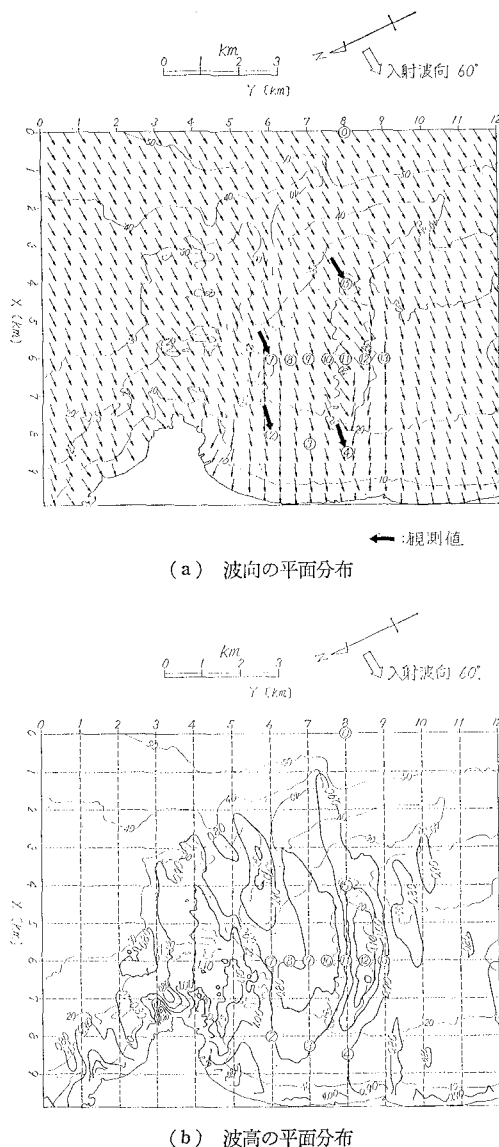


図-12 Karlsson の方法による計算結果

とが分かる。同図には実測された主波向が黒塗りの矢印で示されており、その方向は計算値と良く一致している。

一方、入射波向  $120^\circ$  の風浪 (Case 1) の場合、浅瀬の北側に波浪の集中が見られる。ただし、波高はそれ程増大しない。

図-1 の AA, BB および CC 断面上における波高分布の計算結果が図-3, 7, 8 に実線で示されている。図中の大きな“○”は6回の観測平均値である。風浪の Case 1, Case 2-1 の場合、観測波向は時間的・空間的に不規則に変動しているが、その観測平均値は Karlsson の式による計算結果と比較的良好一致を示す。一方、うねり性の波浪

Case 2-2 の場合、観測値のばらつきがかなり激しいが、観測値と計算値の間には波高分布に関して定性的な相違があると言えよう。計算値では ST-12 に波高の最大値が出現するのに対し、観測値では ST-13 付近に波高分布のピークが見られる。また、観測値では ST-8 にもピークが存在している。屈折・回折が同時に考慮できる計算法を用いた試算によれば、ST-8 付近に小さいピーク値を持つ波高分布が得られることから、ST-8 での波高の増大は回折効果によるものではないかと思われる。

観測値と計算値の方向スペクトルの比較を図-13 に示す。浅瀬背後の ST-4 における計算値は屈折の影響に

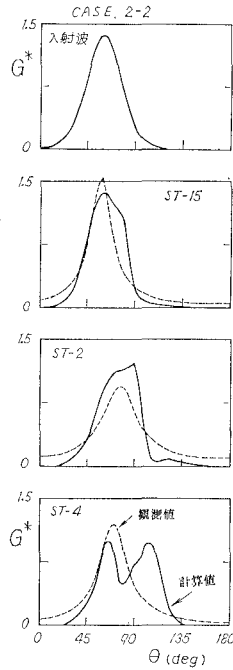


図-13 方向スペクトル

より双峯形となるのに対し、観測値は単峯形である。この程度の双峯形スペクトルならば EMLM で十分に識別できるはずである。したがって、実際の波浪が双峯形であった可能性は非常に小さく、計算法に問題がある。

## 5. 結 語

複雑な地形上での波浪の変形を方向スペクトルのレベルで観測し、データ解析および波の変形計算を通じて以下の事が明らかとなった。i) 現地の方角スペクトルの時間的・空間的な変動は予想以上に激しい。ii) 波向交差に伴う波高の増大率は、風波の場合に沖波波高の約 1.2 倍、うねりの場合には 1.4 倍程度である。iii) 低周波成分ほど屈折率が大きくなることが方向スペクトルのレベルで確認された。iv) 風波性の波浪に対しては、Karlsson の方法による結果は妥当な値を与える。v) しかし、うねり性の波浪の場合、屈折に伴う回折効果が無視し得なくなる。

最後に、本研究の遂行に当たり、数値計算に関しては開発計算センター定森良夫氏の協力を得た。また、現地実測は五洋建株設式会社が担当した。

## 参 考 文 献

- 1) 磯部雅彦・近藤浩右・堀川清司: 方向スペクトルの推定における MLM の拡張, 第 13 回海岸工学講演会論文集, pp. 173~177, 1984.
- 2) Nagata, Y.: Observation of the directional wave properties, Coastal Engineering in Japan, JSCE, Vol. 7, pp. 11~30, 1964.
- 3) Karlsson, T.: Refraction of continuous ocean wave spectra, Waterways Harbors Division, Proc. ASCE, Vol. 95, No. WW4, pp. 437~448, 1969.
- 4) 丸山康樹・平口博丸・鹿島遼一: 不規則波に対する屈折計算法の適用性, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 148~152, 1984.