相模湾内の津波の特性(I)

藤繩幸雄*·渡部 勲**·大池高保***

国立防災科学技術センター平塚支所

Some Properties of Tsunamis in the Sagami Bay

By

Yukio Fujinawa, Isao Watabe and Takayasu Ooike

Hiratsuka Branch, National Research Center for Disaster Prevention No.9-2, Nijigahama, Hiratsuka, Kanagawa-ken 254

Abstract

Long ocean waves (tsunamis) were observed at several places in the coast of the Sagami Bay. Long ocean waves and tide level were recorded at every minute on a compact cassette magnetic tape. Analysis of the data revealed the following points.

1) Maximum wave height H_{max} of the long ocean wave exceeds 2 cm in the Sagami Bay.

2) Evolution of the magnitude of the maximum wave height at three places is the same in the gross, but some different points exists in detail.

3) Relation between the maximum wave height H_{max} and rms mean wave height σ is approximately described as $H_{max} = 12\sigma$.

4) Scatter of points in the simultaneous plots of the long wave height at three places in the Sagami Bay is reduced when plotted in terms of rms wave height σ in comparison with that in terms of the maximum wave height.

5) Background spectrum of long ocean wave at Misaki contains fifteen peaks A, MI₁, MI₂,, MI₁₄. Three dominant components are mode A (eigenmode of the Sagami Bay) and local peaks MI₁, MI₂.

6) Some components happened to remarkably develope due to dynamical processes in the surf-zone.

7) Background spectra of long ocean wave at Manazuru contains eleven peaks, among which mode A and local mode MA_5 , MA_6 are dominant. The most dominant component MA_5 has very short period.

8) Background spectra of long ocean wave at Itō contains 19 peaks, among which mode A, I_2 (4 CPH) and I_3 (5 CPH) are dominant.

9) Ratio of spectral densities P(MA) at Manazuru and P(I) at Itō are grouped into four types.

10) Background spectra has some uniqueness, but the uniquees is more or less lost owing to the existence of the long wave driven by the local force.

11) Amplitudes of mode A at three places in the Sagami Bay are essentially the same. However, mode A developes exceedingly sometimes at Misaki as compared

^{*} 沿岸防災第1研究室

^{**} 沿岸防災第2研究室

^{***} 株式会社鶴見精機

to that at $It\bar{o}$ and Manazuru. Phase at $It\bar{o}$ leads about 1.6 minutes as compared with those at Manazuru and Misaki.

12) Energy of mode A changed by 1 place during a month, but those of local dominant components changed by more than 2 places.

13) Coherence at the frequency of local dominant peaks are nearly zero; this could be explained by large amplification rate of the mode and the existence of the long wave of the local origin.

14) Coherence of mode A at three places are very high.

15) A motion with scale intermediate between that of mode A and the local dominant components are suggested to exist.

16) Mode I_{18} (period 2.4 minutes) is thought to be secondary wave of the dominant component I_3 (period 12.5 minutes) with amplitude of some 6%.

17) Very long wave with period about 4 days was detected. Phase at Manazuru lags by about an hour as compared with that at Itō, which means the phase velocity of 5.5 m/s.

18) Long ocean wave of period of tsunami seems to be generated when meteorological disturbances pass through the region near the Pacific coast of Japan.

1. まえがき

我が国における自然災害は、多岐にわたっており、台風、高潮、地すべり、地震・津波な どによって、年々多大な被害をこうむっている。ここで問題とする津波災害は、近年あまり 起きていないが、我が国の歴史上記録に残っているものだけで、1973年までに大小とりまぜ て 135 個にのぼっている(つじ、私信). 津波の発生を統計的に調べた結果によると、ここ 350 年間だけでも、津波マグニチュード m=1 のもの(波高が 2 m 前後で浸水家屋が発生 し始める)が 24 回、m=2 のもの(波高が 4 m から 6 m までで、家屋浸水・船舶流失・ 人的損失の出る)で 12 回、m=3 のもの(波高が 10 m から 20 m で、沿岸 400 km にわ たって大きな被害が発生する)が 10 回、m=4 のもの(波高が 20 m 以上で、沿岸 500 km 以上にわたって大きな被害が出るもの)が 3 回も発生している。すなわち、津波マグニチュ ードが 2 以上のかなり大きな津波が、10 数年に 1 回の割り合いで、津波マグニチュード 3 以 上という大津波は、30 年に 1 回程度起きていることがわかる。

ここ 100 年間に発生したマグニチュード7以上の地震を,理科年表から抜き出してみると, 津波による被害が甚大であった地震が4回あり,地震による死者が,118,324人に対して, 津波による死者が 32,458人と,地震を原因とする死者数のうちの2割強が津波によるもの であることがわかる.津波災害対策に十分意を尽くす必要のあることがわかる.

津波の災害を軽減ないし,防除するには,各種の施策が取られなければならない.その施 策を効果的なものにするには,津波災害を災害一般の特殊なものとして補え,科学的な見地 からその災害構造を調べていくと共に,津波災害特有の諸相をも明らかにする必要がある. 災害の構造を捕える見方が種々あるようであるが,佐藤ら(1971)の災害構造論が,十分現 在の災害に関する知識を総括しているように思われる.彼らの図式で津波災害を見て行くと, 災害の素因たる自然の力は,いうまでもなく津波であり,津波によって実際に被害を発生せ

相模湾内の津波の特性(I)-藤繩・渡部・大池

しむる要因が必須要因であって、海岸堤防の低さ、排水防備などの堤防の構造の不備がそれ に当たり、自然力を幾層倍にも大きくする要因たる拡大要因としては、船舶や木材の流出に よる破壊力の増加、避難体制を含めた緊急災害対策の不備などが挙げられよう.これらの要 因のうち相手が自然力である津波そのものは除去できない.したがって、必須要因と拡大要 因を除くことが災害対策ということになる.津波に対するいかなる施策が取られるにしろ、 素因の大きさ、すなわち津波の波高や周期・流速などを定量的にできるだけ精度よく推定す ることが第一に必要なことである.

Preisendorfer (1971) も言うように、津波が発生してから沿岸を襲うまでに、主に、次の 五つの物理的な相がある。

- (1) 発生 (Generation and uniform propagation),
- (2) 反射屈折 (Scattering and diffraction),
- (3) 捕捉, 放射 (Guiding, Trapping and Radiation),
- (4) 共鳴 (Oscillations and Resonances),
- (5) 遡上 (Shoaling, Breaking and Runup).

これ等の各相の主要なメカニズムを明らかにして始めて、精度のよい津波の予測方法が確立 されることになる.

この論文では、主として、上述の第(3)、(4)の相を対象とし長周期波の湾内における挙動 について、論じることにする.沖合いでの小さな津波が、沿岸にやってきて、急に大きくな る問題を扱うわけである.この問題を論じたもので日につくものに、Longuet-Higgins(1967)、 Miles and Munk (1961), Lee (1971), Snodgress *et al.* (1962), Munk *et al.* (1964), Olsen and Hwang (1971), Aida (1967) がある.前の三つが、主に解析によるものであり、後の四 つがフィールドにおける長周期波の測定結果を扱ったものである.

Longuet-Higgins (1967) は、島のまわりに長周期波動が捕捉されることを解析的に導き、Munk and Miles (1961)、Lee (1971)、Ippen and Goda (1963) は、半ば開いた港湾における振動を扱い、防波堤を作ることによってかえって波が大きくなり得る現象 (Harbour Paradox) を定量的に調べている.

異なる津波に対しても、ある特定の地点の津波のスペクトルが大変よく似ていること、同 一の津波に対しては、地点が違うと、スペクトルが全く違うことが知られている、津波とい う現象が単に風浪やうねりのように沖合いから入射してきて'そのまま'岸に打上げるもの と違って、入射津波が一定の地域の水系にショックを与え、振動を励起しているというモデ ルに近いことがうかがわれる.

津波(長周期波)のフィールドにおける測定は、大変に少なく、実際に各地域に津波の予 測をするときに必要な、どのようなモードが、どの程度大きくなるのか、そしてその選択は 何によっているのかということは、あまりよくわかっていないのが現状である.

国立防災科学技術センター研究報告 第19号 1978年3月

ここでは、相模湾内での長周期波の観測の簡単な解析の結果を述べ、各地域のスペクトルの構造、各成分の推移、各地点間の相違などを中心として述べることにする.

昭和 50 年度から3ケ年計画で、相模湾における長周期波動について総合研究が組まれ、 当センターは浅海域における長周期波の変形過程を中心として研究を進めている。相模湾内 の数ケ所の地点で相当に長期間連続して長周期波の測定が可能となったので、そのデータの 解析を行って、これ等の問題の解決に一定の前進を与えるよう試みたものであるが、解答が 出たという段階ではなく、1 次解析の結果という性格が強いことをおことわりしておく.

2. 長周期波の測定

- (1) 長周期波計
- 1) 構 成

図1に長周期波計のブロックダイヤグラムを示す.長周期波計は、水中発信器・変換制御 部・カセットデーターレコーダー部に依って構成されている.水中発信器内では、水圧セン サーによって水位変動を検出し、所定の電流信号に変換する.変換制御部では、電流信号を、 直流電圧信号に変換し、フィルターを通って、レベル調整の後、A/D 変換され、ディジタ ル信号となる.制御部のタイマーにより、1分ごとに潮位・長周期波の信号が、地点番号・



図 1 長周期波計のブロックダイヤグラム・水中発信部、変換部、記録部から成る. Fig. 1 Blockdiagram of long ocean wave meter. It is consisted of the sensor in the water, transducer and recording unit.

-120 -

相模湾内の津波の特性(I) 一藤繩・渡部・大池

-121-

時刻と共にカセットテープに 記録されるようになっている. 写真1の左に見えるのは,長 周期波計の水中発信部であり, 全長 437 mm, 直径 140 mm の大きさである. 写真1の右 に見えるのは,変換制御部・ カセットデーターレコーダー 部の前面を示している. 上半 分の左が時刻表示であり,右 半分にカセットレコーダーが あり,下半分の左側にモニタ ー表示部がある. 2) 性 能 長周期波計の有している性能は, イ. 測定範囲 3 m 潮 位 長周期波 50 cm 度 口. 精 潮 位. $\pm 1 \text{ cm}$ $\pm 0.5 \,\mathrm{m}$ 長周期波 ハ. 周囲温度 10~30°C 水中発信部 陸上部 $-5 \sim 40^{\circ} C$ 二. 沪波器特性 1分 潮 位 1分~100 分 長周期波 ホ.水位センサー (ストレーンゲージ型) 0~10 PISG 測 定 範 囲 20 PISG 絶対最大水圧 ブリッジ抵抗 350 Ω ヘ. サンプリング間隔 1分 ト. データレコーダー記録間隔 2分 1秒/1日以内 チ. タイマー精度



写真 1 津 波 計 Photo 1 Units of tsunami meter.

表 1 長周期波計の設置点の平均水面 から(A)と干潮面から(B)の距離 Table 1 Values of A and B of the setting position of the tsunamis recorder at six places.

	三崎	江の島	平塚・早川・真鶴・伊東
	(m)		
A	1.5	3	3.5
В	0.5	2	2.5

リ. 使用電源

AC 100 V 50, 60 Hz

- 約 30 W
- ヌ.データレコーダー性能
 記録密度 800 BPI
 変調方式 位相変調
 テープ速度 0.25 IPS
 使用テープ C-120

となっている.

続いて各部の動作原理を述べよう.

3) 動作原理

水中発信器

水位変動(水圧変化)に依って変化するセンサーブリッジの不平衡を電流値の変化に変換 する:

出力電流 I と水位の関係は次式のように表わされる.

 $I=3 \times \{D - (B - 0.5)\}(mA)$

ここにDは,瞬間水位であり,Bは干潮位から測ったセンサーの水深である (図 2). 実際のセンサーの没置水深は,表1に示す通りである.

変換制御部

変換制御部は,信号処理部と制御タイマー部よりなっている.

(i) 信号処理部

信号処理部のブロック・ダイヤグラムを図3に示す.水中発信部からの電流信号は、I/Vコンバーターによって、直流電圧信号に変換された後、バイアス電圧を加えてレベル調整さ れる.この信号は、モニター信号 V_1 として表示されると共に、カットオフ周期1分の低域 沪波器を通り、風浪などの高周波成分が除去される. Low Pass Filter (L. P. F)の出力は、 レベル調整されて、A/D コンバーターに入り、バイナリー12 ビットのデジタル信号に変換 される. A/D 変換は、1分毎にくる A/D コマンド信号によって制御されている.モニタ



 図 2 長周期波計の設置水深、平均水面から Am, 干潮面から Bm のところに設置した。

Fig. 2 Position of the sensor of the long wave meter in the water. It is set Ameter from the mean water level and Bmeter from the lowest water level. Values of A and B at each place is shown in table 1.



- 図 3 信号処理系統図.水中発信器からの信号が、バイナリー 12 ビットの長周期波データ、潮位データとなる.
- Fig. 3 Blockdiagram for signal transmitting circuit. Signals from the sensor in the water is transformed to tide and long wave data in the form of 12 bit binary. Cut-off periods for low pass filter and high pass filter are 1 minutes and 100 minutes, respectively.

ー信号 V_2 は、A/D コンバーターに入る潮位信号と同じものである. L. P. F からの出力は、 一方、カットオフ周期 100 分の高域河波器 (H. P. F) に入り、潮位成分が除去され、長周期 波成分のみとなる. H. P. F の出力は、バイアスを加えられ、レベル調整され、A/D コンバ ーターに入り、バイナリー12 ビットのデジタル信号に変換される. A/D 変換は、1 分ごと に行われる. A/D コンバーターに入る '長周期波信号'と同じものが、モニター信号 V_3 と して表示される. H. P. F のコントロール信号は、フィルターの抵抗定数を等価的に 100 倍 にするスイッチング回路の制御信号である.



- 図 4 制御タイマー部系統図.水晶 発信器からの信号を元に、デー タレコーダー駆動信号、時刻信 号を作成する.
- Fig. 4 Blockdiagram for timer signal. Original pulse from the quarz oscillator is transformed to the driving signal and time signal for data recording unit.
 - (ii) 制御タイマー部

制御タイマー部のブロック図を図

4に示す.

- 制御タイマー部は次の機能を持っている.
 - T. 正確な1分及び10分の時刻 信号を作る.
 - ロ. 信号処理部の H. P. F コント
 ロール用信号を作る.
 - アータレコーダ部のコントロ ール信号を作る。

水晶発振器の出力 1.6384 MHz

を原信号とし、カウントダウンし、 1分の信号が作られる.この過程の

1/10 秒, 1 秒の桁上げ信号 (デューティサイクル 1/10) の論理演算 AND をとることによって、デューティ 1/10 の H. P. F コントロール信号を作っている. 1 分信号あるいは外部からの押釦スイッチによる時刻セット信号のいずれかによって、パルスを発生させる. このパルスは、データレコーダ部を1分ごとに始動させるスタート信号となっている. このパルスは、一方、10 進カウンターに入り、ドライバーを経て、パネル面上に1分桁の表示を行う. カウンターの内容は、同時に BCD 出力 (×1分桁)として、データレコーダーへ送られる.

データレコーダー部は、偶数分時のデータは記憶し、奇数分時に2回分のデータを、カセットテープに記録する.したがって、データレコーダーの始動は、1分ごとのスタート信号とは別に、2分に1回出る記録スタート信号によって行われる.

記録スタート信号は、1分ごとのスタート信号・1分レベル信号(分毎にレベルが上下する)・データレコーダ部よりのタイマーシフトクロックの三つの信号の組合せによって構成され、偶数分時でタイマーシフトクロックが消えた時に出るようになっている.

(iii) カセットデータレコーダー部

- 図 5 カセットデータレコーダ部 系統図.地点番号・時刻・潮 位・長周期波データをカセッ トテープに記録する.
- Fig. 5 Blockdiagram for cassette data recording unit of the long ocean wave meter. The unit records the position number, time, tidal data and long ocean wave data.



図 6 カセット MT の書き込き フォーマット、16ビット分の IBG (inter block gap)の間 に2分間分のデータが書き込 まれている。

Fig. 6 Writing format of the cassette magnetic tape. Two minutes data are recorded between two Inter-Block Gap(IBG)of length 12 bits.

リーダーテーブ イニシャルキャップ DATA IB6 DATA IB6 / IB6 DATA IB6 DATA IB6 J- - - - ブ

ブロック・	テープフォーマ	マット								E (1)
	プリアン	 J'IV	地 兵 番 号 X 10000	地 点 番号 X 1000	地奌番号 X 100	地兵番号 X 10	地 兵 番 号 X 1	日付 X100	日 行 X10	日 1寸 X 1
IBG	0101	0101	2 ³ 2 ² 2 ¹ 2 ⁰	2 ³ 2 ² 2 ¹ 2 ⁰	2 ³ 2 ² 2 ¹ 2 ⁰	2 ³ 2 ² 2 ¹ 2 ⁹	2 ³ 2 ² 2 ¹ 2 ⁰	2 ³ 2 ² 2 ¹ 2 ⁰	2 ³ 2 ² 2 ¹ 2 ⁰	2 ³ 2 ² 2 ¹ 2 ⁹
IBG: 16 BIT	時 x 10	8時 X 1	分 X 10	分 X1	湖	1	位	長	周 期	波
(0.02 INCH)	2 ³ 2 ² 2' 2 ⁰	2 ³ 2 ² 2' 2 ^e	2 ³ 2 ² 2 ['] 2 [°]	2 ³ 2 ² 2 ¹ 2 ⁰	2" 2" 2" 2" 2 ⁸	2' 2 [€] 2 ⁵ 2 ⁴	2 ³ 2 ² 2 ¹ 2 ⁰	2"2'02°28	27 25 25 24	$2^{3} 2^{2} 2^{1} 2^{0}$
	L								地夹番号	地奌番旁
	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1 1 1 1	1101	2 ³ 2 ² 2 ¹ 2 ⁹	2 ³ 2 ² 2 ¹ 2 ^c
	地奌番号 × 100	地奌番号 X 10	地 桌 番 号 X 1	日付 X100	日付 X10	日付 X1	時 X 10	時 X1	分 X 10	分 XI
	2 ³ 2 ² 2 ¹ 2 ⁰	2 ³ 2 ² 2 ¹ 2 ⁰	2 ³ 2 ² 2 ¹ 2 ⁰	2 ³ 2 ² 2 ¹ 2 ⁰	2 ³ 2 ² 2 ¹ 2 ⁰	2 ³ 2 ² 2 ¹ 2 ⁰	2 ³ 2 ² 2 ¹ 2 ⁰	2 ³ 2 ² 2 ¹ 2 ⁰	2 ³ 2 ² 2 ¹ 2 ⁰	2 ³ 2 ² 2 ¹ 2 ³
	南川		位	長	(百) 其別	波				
	2 ¹¹ 2 ¹⁰ 2 ⁹ 2 ⁸	2" 26 2524	2 ³ 2 ² 2 ¹ 2 ⁰	2 ^m 2 ¹⁰ 2 ⁹ 2 ⁹	2726 2524	2 ³ 2 ² 2 ¹ 2 ⁵	1 1 1 1	1111	1111	1111
					ポストフ	マンブル				
	1 1 1 1	1 1 1 1	1111	1101	0101	0101	IBG			

カセットデータレコーダー部のブロック 図を図5に示す. AMDS-10 基板に入っ てくる 10 分パルスの計数値は、時刻値と して表示される一方, 地点番号と共に 44 ビットの並列一直列変換レジスタに入る. 主基板 AMDS-20 において、1 分析・潮位 データ・長周期波データは,60ビット並列 一直列レジスターに入る. 時刻・地点番号 及びデータは、セレクターによって順々に 104 ビットバッファメモリーに入る. 104 ビットバッファメモリーには、1分前のデ ータがすでに入っているので, 合計すると (44+60+104=208) ビットのデータが、 バッファメモリーから出て,次のセレクタ ーによってプリアンブル,ポストアンブル を加えて位相変調回路に入ることになる。



図 7 長周期波計の設置場所.相模湾の周辺の 6 カ所に設置した.





図 8 長周期波計を設置した海域に等深線を入れたもの. Fig. 8 Bottom topography around the places where tsunamis recorder were set.



図 9 カセットMTに書き込まれたデータの前処理ルーチン. Fig. 9 Flowchart to remove various noises in the tsunamis data.

次のセレクターによって IBG 信号が加わって, ライトアンプを経て, ライトヘッドによっ てカセットテープに書込まれる.

コントロール回路を駆動するクロック信号は、2種類あって、CR 発振器からのものと、 デッキのキャプスタン軸にギアで結合しているディスクからのクロック信号とがある。テー プを走行させないで、バッファメモリーにデータをためる場合には、前者を使い、テープを 走行させてデータを記録する場合には、後者を使う、どちらのクロックを使うかは、記録ス タート信号(レベル信号)によって、決定される。

テープに書き込まれている内容は図6のようになっている.

(2) 長周期波計の設置

相模湾の沿岸の6ヵ所に長周期波計を設置した.東の方から順に,三崎・江の島・平塚・ 早川・真鶴・伊東の6個所である(図7).いろいろな事情から,長周期波計を,砕波帯の内 側の,設置に都合のよい場所に,取り付けることになった.

三崎では、神奈川県水産試験場内の岸壁に取り付けた.江の島では、江の島のヨットハー バー内の角の溜南港管理事務所所属の検潮儀のかたわらに設置した.平塚では、既設の波浪 等観測塔の海象測定用のスライドチャンネルに取り付け、計測制御部は、塔の中に置いた. 早川では、小田原港の入口の岸壁に取り付け、ケーブルを延ばして、小田原市魚市場の一角 にある神奈川県西部魚港事務所内に記録部を置いている. 真鶴では、真鶴漁港内の魚市場前 面の岸壁にセンサーを取り付け、漁協事務所内に記録部を置いている. 伊東では、気象庁の 観測塔のH鋼を使って水圧測定センサーを取り付け、塔内に記録制御部を置いている. 各設 置点を含む海底地形図を示したのが図8である.

3. データ処理

各地点の長周期波計から得 られるデータは、1個月に1 回カセットの磁気テープとし て回収される.この間に、停 電、テープからまり等のハー ド上のトラブルの他、コント ロールコードなどの欠落など が起こり、カセットのデータ を直ちに満足なデータとして 処理に入ることはできない. そのため、データの前処理が 必要となる.それらの手順を 以下に述べる(図9参照).

 カセット・磁気テープ を読みとり,電子計算機用磁 気テープに書き込む(プログ ラム CMT 800).

 2) 生データのプリント
 (LGWLP, LGWVDC) カ セット取換時の表示時刻の誤
 差およびプリントされたデー タから判断し,停電・その他
 のトラブルによる時間のズレ
 を補正し、1日毎のデータを
 得る.そのデータは、次に述
 べる処理を効率的に行うため
 磁気ディスクのワーキングフ ァイルに格納する.

時間補正されたデータ
 を XY プロッターに出力する
 (LNGWXY).

ディジタルデータからデー



0 1 2 3 4 5 8 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 0

- 図 11 ヒゲそりプログラムによってスパイク状のノイズを 除去した結果. この処理で抜き切れないノイズがまだ 残っている.
- Fig. 11 Results which shows effect of the noise removing routine. Spike type noises were dropped out.



Fig. 12 Result which shows effect of the program REP-MNL. Wide noise was removed by manual and replaced by use of the Lagrange's method of interporation.

$$\Delta x_i = x_{i+1} - x_i, \quad i = 1, \dots N - 1$$

の標準偏差を の」とする,

$$\sigma_{\mathsf{J}}^2 = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^{N-1} (\varDelta x_i)^2 \right)$$

増分 Δx_i の大きさが σ_a の h 倍のときヒゲと判断するのである,

 $|\Delta x_i| > h\sigma_{\Delta}$

我々が用いた h の値は, 10~20 である.

ヒゲソリのプラグラムの効果の例を示しているのが図 11 である. スパイク状のノイズが 除去されていることがわかる.

5) ヒゲソリを行っても抜けないヒゲがあるため,それらのデータは強制的に値を削除してしまう (REPMNL). この処理の効果の例を示しているのが図 12 である.

6) ついで,データの補間操作を行い,欠測デークの空白をうめる.項数三つのラグラン ジュ補間公式によった (LNGINS).

7) 再度,図形化を行い,データの良否を確認し,異常がなければ後処理を行うために, ワーキンゲ・ファイル上のデータを磁気テープに転送する (LNGMT).

以上が生データから実際に処理できるデータにするまでの過程である. これらのステップ 一つ一つが、人間との対話を必要とし、完全に自動的に行うことが大変に困難である.

 時間補正処理のみのデ ータを図形化したものには、 しばしば不自然なデータ(こ れをヒゲという)が見受けら れることがあり、データのヒ ゲソリを行う(HSORI).デ ータの時系列を

 $x_i(i=1, 2, \cdots N)$

とし、増分 Δx_i



- 図 13 長周期波の記録の例. 1976年11月20,21日の三 崎におけるもので,21日に は,最大20cmもの長周期 波が発生した.
- Fig. 13 Long ocean wave records at Misaki on November 20, 21, 1967. Large long wave as high as 20 cm were recorded.

4. 長周期波記録

図 13~15 は代表的な長周期波の記録の例である.図13 が三崎のもの,図14 が真鶴のも の,図15 が伊東のもので,1976年の11月の20日と21日のものである.上段が長周期波で あり,下段が潮位である.潮位データに見える小さい周期10分程度の長周期波が,上段で そのまま拡大された状態で記録されていることがわかる.三崎のデータ(図13)についてみ ると,11日20日の午前中の '静かな'状態から,夜半には次第に活発な振動状態が出現し, 次の日の21日は,大変大きな長周期波,波高にして20 cm以上のものが記録されている. 小さな津波というところである.図14の真鶴のデータを見て,第一に注目されるのは,長 周期波の活動状態の推移は三崎のものと対応するが,周期が三崎のものに比べると大変に小 さいことである.津波のスペクトルが,実は波(外洋からの入射波)のスペクトルでなく, 測定点の静振(セイシュ)のスペクトルと言われるゆえんである.長周期波のスペクトル構造 については,後に詳しく論じる.真鶴の長周期波が,三崎のものに比べて,大きくなってい

-130 -

- 図 14 長周期波の記録の例. 1976年の11月20,21日の真 鶴におけるもの.三崎におけ るものより周期が短い.
- Fig. 14 Long ocean wave records at Manazuru on November 20, 21, 1967. Dominant components at Manazuru has shorter periods than that at Misaki.



るのは、測定器のゲインのせいであって、絶対的な大きさは、潮位と比較してわかるとうり、 あまり違わないのである.伊東の長周期波の活動状態も、三崎・真鶴のそれと対応しており、 卓越する周期は、三崎のそれに近い.

5. 長周期波の各地の波高

図 16 は,長周期波の1日間の最大波高 H_{max} の推移を示したものである。11 月 20 日から 25 日までの期間が活動期であり,残りの期間は,おしなべておだやかな状態であったことがわかる。このグラフから,長周期波の大きさには下限が存在することが推測される。最大波高 H_{max} で,

$H_{max} \gtrsim 2 \text{ cm}$

(1)

となっている. すなわち, 1日間の統計では, 'background noise' のレベルが 2 cm 程度ということになる.

Snodgrass et al. (1962)の California 沖における測定結果によると, rms の波高で 0.6



- 図 15 伊東における長周期波の 記録の例. 1876年11月20, 21日のもの、三崎や真鶴に 比べて、大きくなり方が小さい。
- Fig. 15 Examples of long ocean wave records at Itō. Growth rate at Itō is seen to be smaller than those at Misaki and Manazuru.
- 図 16 3地点における長周期波の日最大波高 Hmaxの変化図. 11月21日から24日の4日間が最も活発な時期である.相模湾では、Hmaxは2cmより大きい.各地の推移は大局的には似ているが、細部には相異がある.
- Fig. 16 Evolution of the long ocean waves height H_{max} at three places in the Bay of Sagami. The wave developed during four days from 21 to 24, Nov. H_{max} is larger than 2 cm in the Sagami Bay. Evolutions at three places are the same in gross, but there are many different points in detail.





図 17 伊東における長周期波の大きさ Hmax⁽¹⁾
 と、三崎・真鶴の大きさ Hmax^(MI), Hmax
 ^(MA)との関係、点のバラツキが大変大きい.

Fig. 17 Relations between the long ocean wave height $H_{max}^{(I)}$ at Itō and those at Manazuru $H_{max}^{(MA)}$ and Misaki $H_{max}^{(MI)}$. Scatter of points is large.



図 18 長周期波の真鶴と三崎における大きさ $H_{max}^{(MA)}, H_{max}^{(M1)}$ との関係.かなり相 関が高い.

Fig. 18 Simultaneous plots of the long ocean wave height $H_{max}^{(MI)}$ at Misaki and that $H_{max}^{(MA)}$ at Manazuru. Correlation is considerably high.

cm が得られている. 最大波高 H_{max} と平均波高の比が3倍程度と考えら れるので,彼等の結果は 1.8 cm と なり, 湾内でも外洋に面した海域に おいてもあまり違わない大きさとい うことになる. この数値の意味する ところは何なのであろうか.長周期 波の生成の元になっている気象・海 象活動の長期・広域にわたる活動の 平均的な指標がこの 2 cm なのであ ろうか. 言うなれば、海洋の基底エ ネルギーなのではなかろうか. この 基底エネルギー E₀を決めているの は、たとえば、図2にみるように、 長周期波が異常に大きくなるのが間 けつ的であるから,その周期と,減 衰の時間スケールということになろ う. たとえば、太平洋全体に存在す る低気圧の数と,単位嵐から放射さ れる長周期波のエネルギー,太平洋 の大きさと,複雑な反射を主な原因 とする長周期波の減衰の時間スケー ル、以上の四つの量から決まってい るのではなかろうか. この問題は, 大変興味深い. それはいづれ別の機 会に検討することにしよう.

全体としての時間変化の仕方は, 三崎と真鶴のものがよい対応を示し ており,伊東のものは,大きく変化 せず,活動期の 20~25 日間の大き さは,最も静かな時の 10 日の 2.8 cm に対して, 9.8 cm でありその 比は,3.5 倍に過ぎない.一方,三 崎の場合には,その比は,7.8 倍に

国立防災科学技術センター研究報告 第19号 1978年3月



- 図 19 長周期波の最大波高 H_{max} と rms 波高 σ との関係. 二つの量の間には 近似的に $H_{max}=12\sigma$ の関係がある. 三崎の一カ月間のデータを用いたもの である.
- Fig. 19 Relation between the maximum wave height H_{max} during a day and rms mean wave height σ . The graph is consisted of data of about a month at Misaki. The two quantities are approximately related as $H_{max} = 12\sigma$.



図 20 rms 波高 σ を指標として各地の長周期波の大きさの1カ月間の変化を 示したもの. 最大波高を指標にしたものより, 各地の推移の仕方の相関が 高く表われる.

Fig. 20 Evolution of the magnitudes of the long ocean wave at three places in the Sagami Bay in terms of the rms wave height σ . Correlation in evolution between the places is increased in comparison with that in terms of maximum wave height (Fig. 16).



図 21 rms 波高 σ を指標として, 真鶴と三崎 の長周期波の大きさの関係を調べたもの. Fig. 21 Relation of the rms wave height σ at Misaki and that at Manazuru. Scatter of points is reduced in comparison with that in terms of maximum wave height.

もなっており, 真鶴では, 6.4 倍と なっている. すなわち, 活動の推移 は全体として, 相模湾の各地で同じ であるが, 細かく見ると異なる点が あることがわかる. 次いでどの程度 の相違があるかを調べて見よう.

図 17 は、伊東の最大波高 $H_{max}^{(I)}$ と真鶴、三崎における最大波高 $H_{max}^{(MA)}$, $H_{max}^{(MI)}$ との関係を示 したものである。全体としては、各 地点の波高の日変化に対応が見なれ るものの、点のバラツキが非常に大 きく、三崎と伊東の関係にしろ、真 鶴と伊東の関係にしろ、とても一義 的な関係があるとは言えない。外洋 からの入射条件が同一の場合には、

線型近似が成り立っている限り,波

高の大きさには線形の関係が成り立っているはずである.このようにばらつく理由として考 えられるのは、一つには、湾口における入射長周期波の特性、たとえば、入射角の違いによ るチャンネル分配率の変化というようなことが考えられる.しかし、陸棚に入射する長周期 波の侵入角に、棚上の各点の水位のスペクトルがあまり左右されないという計算結果(Snodgrass *et al.*, 1962) もあり、実際の状況、特に湾の形を考慮した応答問題を解いてみないと、 はっきりしたことが言えない.

図 18 は、図 17 においてかなり対応関係がはっきり表われている、真鶴の日最大波高 $H_{max}^{(MA)}$ と三崎の日最大波高 $H_{max}^{(MI)}$ との関係を見たものである。図 17 で示した伊東 を規準にした場合より、 $H_{max}^{(MA)}$ と $H_{max}^{(MI)}$ の方が相関度が高いことがわかる。それに しても、バラツキの程度が大きい。これを今はわからないが、幾つかの指標に基づいてより 細く分類すると、点のバラツキがぐっと少なくなると考えられる。そのためには、一つには 入射条件によって分類することが考えられる。我々の測定においては、湾の口における測定 が全くなされていないので、沿岸部における測定結果を解析して、それ等の特徴から分類す る以外にない。分類分けする指標を求めることもこの研究の大きな目的の一つであるが、こ の図における点のバラツキが何故に生じたかは、ここでは論じることができない。ここでの 結論は、一つの湾内においても長周期波の振舞は、あまり単純なものではない、ということ である。



- 図 22 三崎における長周期波のパワースペクトル密度の分布. 図中の記号 1,2, 3,4 はそれぞれ 11月 5,6,7,8 日のスペクトル分布に対応する. 三崎のスペ クトルは, A, M₁,..., MI₁₄ の合計 15 個のピークで特徴づけられ, 特に A, MI₁, MI₂ が卓越している.
- Fig. 22 Energy spectral density distribution of the long ocean wave at Misaki. Symbol 1, 2, 3, 4 correspond to spectrum on November 5, 6, 7, 8. The spectrum is characterized by fifteen peaks A, MI₁, MI₂,, MI₁₄, among which three components A, MI₁, MI₂ are dominant almost every day.

先に長周期波の1日の代表的な大きさとして最大波高を使って、各地の長周期の大きさに ついて論じたのであるが、最大波高には、相対的に大きな統計誤差が入り込むことが考えら れる.そこで、長周期波の変動(Variance)を使って調べてみよう.今、変動の平方根(標 準偏差)をσとする、

$\sigma = \sqrt{Variance}$

図 19 は、三崎におけるデータに対する、 σ と最大波高 H_{max} との関係を調べたものである。かなり点がばらついて、両者の平均的な関係

$H_{max} = 12\sigma$

(2)

から、5割程度のずれをもつ点もあることがわかる.この関係を使うと相模湾内の規準エネ ルギーが、波高換算で0.17 cm となり、Califorinia 沖のそれの1/3 ということになる.

図 20 は、三つの地点における平均波高 σ の日変化を示している。最大波高の図と大局的には同じである。しかし、11月 24、26 日に三崎で最大波高が異常に大きかったものが、 σ

相模湾内の津波の特性(I)-藤繩・渡部・大池

表示では、かなり小さめとなっており、他の地点の推移に近づいている.また、真鶴が21日 から24日の長周期波の活動期に1日早く入っているようにみえたものが、の表示でみると、 真鶴も他の地点と同様に21日から入っていることが判明する.

図 21 に、三崎における '平均波高' $\sigma^{(MI)}$ と真鶴におけるそれ $\sigma^{(MA)}$ との関係を示す. 最大波高の図と見比べてみると、 σ 表示の方が確かに点のバラツキの程度が小さい. それで も両者の平均的な関係

$\sigma^{(MA)} = 0.9\sigma^{(MI)}$

(3)

から、相当に測点がずれている.これは、充に述べたように湾口における入射条件の違いに 伴う各地点の卓越モードの増幅率の相違、地域的な外力に伴う長周期波の発生(たとえば、 サーフビートなど)のためと考えられる.いずれにしろ、点のバラツキの一部が統計上のも のであることが判明した.

6. エネルギー・スペクトル分布

図 22 は、三崎における長周期波の周波数スペクトル密度分布 P^(MD)(f) を示したもので ある. 統計をとった期間は、1日である. 記号の 1,2,3,4 がそれぞれ 1976 年の11月5日, 6,7,8 日のスペクトルに対応している. このスペクトルの分布の特徴は、



図 23 11月14日のスペクトルは、特異であり、通常の卓越成分が小さく、MI4の成分が主要ピークの一つになっている. これは、波浪の沿岸における砕波に伴って発達したサーフビートのためと考えられる.

Fig. 23 The long ocean wave spectrum at Misaki on November, 14 is very much peculiar. The two dominant peaks MI₁, MI₂ are negligibly small compared with the mode MI₃. The mode MI₃ is considered to have developed greatly due to the driving effect relevant to the wind-wave decay at the surf-zone.



- 図 24 11月14日における長周 期波のアナログ記録、午前10 時頃から,周期2~3分のサ ーフビートが発達し始めて いる。
- Fig. 24 Analog records of long ocean wave recorder on November, 14 at Misaki. Rather 'short' waves with periods about 2 minutes started to develope at about 10 o'clock.









(1) 周期が1時間半程度のところに常にピークが存在する(この成分は,後に他地点の長 周期波と比べて,湾の固有振動で,かつ定在波であることが推定される).この領域のスペ クトルの形は,何時も同じでなく,若干の変化を示す.エネルギーも4日間の間で,3倍程 度変化する.長周期波計のカットオフ周波数が1分と100分であるので,この領域における 実際のスペクトル密度は,この図に示したものの2倍程度の大きさであり,次に述べる三崎

相模湾内の津波の特性(I)一藤繩・渡部・大池



図 26 高周波域の成分 MIn, MIn が主要モード MIn, MIn と連動して変化する ことを示唆している.





図 27 真鶴における長周期波のパワースペクトル分布. 11 月5日から8日までの4日間のもの. 周期1時間半程度のところにあるAモードと MA5, MA6 が真鶴のスペクトルを規定する3大成分である. 主要ピーク MA5 の周期が 4分と短いことが特徴である.

Fig. 27 Energy spectral density function at Manazuru during four days. Three dominant components are A mode with period about an hour and MA₅, MA₆. Most dominant peak MA₅ has short period of about four minutes.

国立防災科学技術センター研究報告 第19号 1978年3月

の主要ピークのエネルギーの半分程度(11月5,6日)から,同じ位(11月7,8日)になるこ とがわかる.この低周波側の振動に関して,究明すべき事柄は,(a)エネルギーの変遷の原 因をさぐること,その際,主要ピークの変遷との相関の存在に注目すること,(b)スペクト ル分布の形状の変化が何によっているのか,などである.この振動成分をAとする.

(2) 周期が 5 CPH 近辺に、卓越したピークが存在し、これが三崎の振動を主に特徴づけている.この振動も、成分Aと同じく、エネルギーで数倍の変化をし、スペクトル分布の形が若干変化する.この振動成分、MI₁ とする.

(3) 周期が 6 CPH 近辺に今一つのピークが存在する. これを MI_2 ということにする. 主要ピーク MI_1 との関係が特に注目を引く. 11 月 6 日には, 第2の主要ピークとして, その存在が明瞭であるが, 11 月 8 日には, MI_1 と比べて相対的にかなり小さくなって, 小さな丘にすぎなくなっている.

(4) MI₂ より高域周激数にも,エネルギーが A, MI₁, MI₂ 成分のそれより,ほぼ1桁小 さいが,幾つかのピークが存在する.日によってその位置がやや変っているがかなり安定し ており,それ等のピークを見分けるのは難しいことではない.しかし, MI₄ では3日間は見 分けることができるが,明確でない日(11月7日)もある.11月8日の高周波数域における エネルギーレベルが高いのは,午前中三崎で風が吹きサーフ・ビートが発生したためと思わ れる.

以上である.



三崎の振動状態を決定するのは、ほとんど振動モード A、MI1、MI2 の三つであり、より

図 28 真鶴のスペクトルにおいては、高周波数域で急落するものより、平坦なものの方が出現し易い。

Fig. 28 Spectra at higher frequency range at Manazuru ars divided into two types. One is flat, and the other drops sharply.

相模湾内の津波の特性(I)-藤縄・渡部・大池

高域の周波数の成分のエネルギーは、それ等のエネルギーに比べてオーダーが違う.ただ、 11月8日のように波浪の砕波に伴って発生する長周波数(サーフ・ビート)が存在する場合 には、高域の周波数のエネルギーレベルが1オーダー上るが、それでも主要3振動に比べる と1オーダー以上小さい.

更に日を追ってスペクトルの分布を調べてみると、11月13日まではほとんど似た傾向を 示すのに、11月14日のスペクトルは、これまでのものと大分様子が違っている(図 23). 異なる点は、主要ピークたる MI₁モードが存在するものの、Aモード、あるいは MI₈のモ ードの方がずっと大きい、このときの長周波数の記録を示したのが図 24 である。これをみ ると、この日の海の状態は、波浪又はうねりが大きく、サーフ・ビートが発達し、周期4分 の MI₈の振動モードが、強く励起されたことがわかる。このことは、サーフ・ビートを主 として岸に trap されている edge 波として説明した著者(藤繩ら、1977)の推測を裏付け る今一つの証拠となるものである。MI₈モードそのものは、他の13日、15、16日の3日間 のスペクトルにも見受けられるが、エネルギーが大変小さい、しかるに、14日には、海の短



- 図 29 伊東における長周期波のパワースペクトル分布. 11月5日から8日までの4日間のもの. 伊東のスペクトルは、A、II、…IIsの19個のピークで特徴づけられるが、主要3成分は、A、I2、I3である. 伊東のスペクトルの日変化が小さいことがわかる.
- Fig. 29 Energy spectral density function at Itō during four days from November, 5 to 8 1976. The spectrum is characterrized by nineteen peaks A, I₁, I₂, ..., I₁₈. Modes A, I₂, I₃ are dominant among them. Spectra at Itō shows high similarity.

周期振動(波浪)の活発化と共に(図 24),成分 MI₃ が,共鳴機巧によって強く励起された ものに違いない.しかし,周期の大変大きいAモードも随分発しており,なぜこう大きくな ったかは知りたいところである.

図 25 に示したものが 11 月 17 日から 20 日までのスペクトルの分布である. この期間の 特徴的な事柄は, 11 月 18 日における $MI_2 = - F が 随分大きいことである. <math>MI_1 = -F の$ 半分程度のエネルギーを有している. この日には更に, 24 CPH 近辺の MI_{12} , MI_{13} に相当 すると思われる成分も随分発達したことがわかる. この二つの特徴は, 次の図 26 の 11 月 21 日, 22 日にも表われている. channel MI_2 が channel MI_{12} , MI_{13} と似た分配率 (入射条件 に対して)を持っていることを示唆している.

図 27 に示したのが、真鶴における長周期波のスペクトル密度分布のうちの 11 月 5 日から 11 月 8 日までの 4 日間のものである。周期が 1 時間半程度付近に、卓越したピークがいつも 存在する。Aモードのスペクトルの形に変化があること、期間中大きさが、 2 倍程度変って いる点は、三崎における場合と同じである。このAモードに関して議論すべき事柄として、 さらに地域ごとの変化の間の相関を見ることがある。また、三崎のスペクトル構造の中に明 記しなかったが、たまたま存在する 3 CPH 近辺のピークと MA₁ 又は MA₂ との関係を調 べることも必要である。今一つ目につくのは、11 月 6 日以外のスペクトルの分布が 21 CPH 以上において急激に落ち込むのに、11 月 6 日のスペクトルの分布が平坦かあるいは逆にしり 上りの形をとることである。



図 30 伊東における長周期波のパワースペクトル分布. 18日(記号2で示した) のスペクトルでは、Is のエネルギーがAのそれより大きい.

Fig. 30 Spectrum (symbol 2 in the figure) of long ocean wave at $lt\bar{o}$ in which energy of mode I₃ surpasses that of A mode.



図 31 伊東におけるパワースペクトル分布.23日(記号3で示した)のスペクト ルでは、IaのエネルギーがAのそれより小さい.

Fig. 31 Spectrum (symbol 3 in the figure) of long ocean wave at Ito in which energy of mode I $_3$ is smaller than that of A mode.

図 28 を見ると、今度は逆に、しり上り傾向のものが多数を占め、急落するものが 11 月 9 日のもののみになっている。残りの分布を調べてみると、以後全く、高周波数域で急落する タイプのものは現われてはいない。

真鶴の長周期波のスペクトル分布で最も特徴的なことは、主要振動 MA₅の周期が小さい ($T \div 4 \ \beta$) ということである。三崎などの主要振動の半分の周期である。 真鶴にも三崎の 主要ピークの振動 MI₁ と同じ程度の周波数をもつものとして振動 MA₃ が存在する。これ 等の振動が Munk *et al*.(1957) のいうように岸に trap されている成分であるとすると、 MA₃ を MA₅ より大きくするのは如何なる機巧によるのであろうか。 直線状の海岸の場合 には、どのモードのどの周波数の成分が選択されるという理由がないが、湾状に水域がかこ まれている場合には、その形状の大きさで決まる卓越モードが存在するであろう。このこと を、Miles and Munk (1961)の理論等を土台にして検討する必要がある。

真鶴のスペクトルにおいて今一つ注目されることは、固有振動Aが卓越振動 MAs の2倍 程度に大きいことが大半であるということである. 三崎の場合には、A振動が卓越振動 MI₁ より大きくなるのがサーフ・ビートが卓越した日の1日しかないのに、真鶴の場合には、卓 越モード MAs が固有振動Aよりはるかに大きなエネルギーレベルになるのがむしろ普通で ある点が著しい特徴である. これは、長周期波の記録を一目しても感じられる特徴であり、 大きな振動の上に小さい振動 (MAs) が重じょうされているのがはっきり読み取れる. 特定 のモードが、顕著になる日がある. たとえば、11月8日には MAs がはっきりピークとし



つの型に分けられる. Fig. 29 Patient

Fig. 32 Ratio of energy spectral densities $P(f)^{(MA)}$ and $P(f)^{(I)}$. Pattern of distribution of ratio $P(f)^{(MA)}/P(f)^{(1)}$ is grouped into four types.

て確認でき、11月12日には、MA4 がはっきりしている.成分ごとの消長を、相模湾内の幾 つかの地点で調べることによって、入射周期波の入射状況を規定することが可能であろう. しかし、これも推定であって、外洋の津波を実際に測定することがでれば、このような間接的 で任意性の残る議論を行う必要がなくなろう.それは将来のこととして、当面"間接的"な議 論を積み重ねて行かざるを得ない.真鶴の長周期波が最大となる11月21日のスペクトルを 調べてみると(図 28)、MA1、MAs と MA6 が主に発達して、Aを始めとして他のモード が余り発達していないことがわかる.ただ全体のエネルギーへの寄与が小さいものの MAs、 MA9、MA10の振動が、1桁程度大きくなってはいるが、これ等の事柄を更に解析すること によって、この月の最も活動が活発だった時期が、外洋のいかなる活動状況に対応するもの であるかを明らかにすることができよう.

図 29 に示したのが伊東における長周期波のスペクトルの分布である.今までもそうであ るが,簡単のために、1日間における長周期波の定常性を仮定している.我々の議論が、そ の仮定の有効性の範囲に限るべきことは言うまでもない.更に、詳細な議論を行うときには、
 Table 2
 Appearence
 days
 for
 four

 groups of the patterns of spectral
 density
 ratio
 at
 Manazuru
 and

 Misaki.
 Misaki.
 Misaki.
 Misaki.
 Misaki.
 Misaki.

表 3	入射長周期波が浅海域で多くのチ
4	・ンネルにエネルギーを分配する.

Table 3 Incident long wave distributesenergy to many modes.

CH 1…入射平面波・反射平面波
CH 2…湾水固有振動
CH 3…エッジ波
CH 4···· ?
CH 5… ?

Group			Da	у		
1	8	21				
2	10	11	16	18	20	23
3	5	17				
4	12	13	15	19	22	

定常の仮定が成り立つ区間で統計を取るとか、別の統計計算の手法(MEM 法など)を採用 すべきであろう。

伊東のスペクトルで特徴的なことは、スペクトルの形がかなりな程度に合同であるという 点がある. 個々には、相異が見られるが、今まで調べてきた三崎・真鶴のスペクトルと比べ ると、日々の変化が随分少ない. このようなスペクトルのより高い安定性は、何を意味して いるのであろうか. より外洋に近いためであろうか、あるいは、外洋から見たとき測定点が 潮吹岬の影になっているためであろうか. 地点によるスペクトルの安定度の違いを論ずるこ とも今後の課題である.

今一つ日立った特徴は、'非常に'高い周波数(25 CPH)の振動 I₁₈ が常に明確なピーク として存在し、しかも周囲のものよりエネルギーが格段に大きい. この I₁₈ モードは、伊東 の主要振動 I₃ と対応しながら、そのエネルギーを増減させている. このことは、11 月 5 日 から、8 日までの期間に限らず、11 月 23 日までの全観測期間について、言えることである. 定量的な議論は節を改めて行う.

A振動と主要振動 I_3 との相互の関係は、真鶴・三崎の場合と概略同じく、エネルギーの 比が 1/2 から 2 倍であるが、11 月 18 日には 1/5 と極端に主要振動 I_8 が大きくなっている. 図16 にみるごとく、18 日と 21 日の伊東における最大波高が同じである. 図 30 と図 31 を見 比べるとわかるように I_8 とAの大きさの関係が 18 日と 23 日とでは反転している. ここで も各振動成分の消長に関する全相模湾スケールで議論の必要性が示されている.

7. スペクトル密度の比

図 32 は、伊東と真鶴の長周期波のパワースペクトル密度の比 rмA/I,

$r_{MA/I} = P^{(MA)}(f) / P^{(I)}(f)$

を示したものである.大局的な構造は、 8 CPH 近辺のおち込みと、17 CPH 近辺における 大きなピークの存在で、特徴づけられる. これは、パワースペクトル密度の分布 $P^{(MA)}(f)$ 、 $P^{(1)}(f)$ の構造からきている. すなわち、伊東のスペクトルが 8 CPH 近辺に卓越ピークを もっており、 真鶴のスペクトルには、伊東の場合よりずっと大きな周波数 17 CPH 近辺に

表 2 真鶴と三崎のパワースペクトルの 比の分布の4つの型の出現日.



図 33 ピークの値を1に正規化した3日間の真鶴のスペクトル分布 P'(f). 高い 相似性を示している.





- 図 34 図 33 と同じ 3 日間の伊東における正規化したスペクトルの分布 P'(f). 真鶴のものに比べて相似性が低い. 局所的な駆動力によって発生した長周期 波のためかも知れない.
- Fig. 34 Normalized spectra P'(f) at $It\bar{o}$ for the same three days as those in figure 33. Low degree of similarity among the three spectra is evident, which suggests the existence of long ocean waves of some local origin.

卓越ピークを持っているからである. さらに細かく見ると, この比 *P*(MA)/*P*^(I) のスペクト ル構造は,幾つか(四つ)に大きく分類することができることがわかる. その代表的な分布を 示しているのが, この図なのである. すなわち,



図 35 図 33 と同じ 3 日間の三崎における正規化したスペクトルの分布 P'(f). 真鶴のものほどでないが、伊東におけるものより高い相似性がうかがわれる。 高周波域での大きなエネルギーは、サーフ・ビートのためであろう.

Fig. 35 Normalized spectra P'(f) at Misaki for the same three days as those in figure 33. Degree of similarity is intermediate between that of spectrum at Manazuru and that at Itō. Extremely large energy at higher frequency range is seemed to be due to the development of the surfbeats.

(1) 低周波域 (*f*~1 CPH) 近辺の湾の固有振動に対応すると思われる振動モードAが, 真 鶴において異常に大きくて, 伊東におけるものの数倍になっているもの(□).

(2) 真鶴における卓越ピークの伊東における長周期波に対する比が,通常の 10 倍のもの に対して,大変に大きく 100 倍近いもの(×).

(3) 真鶴における高周波 ($f \gtrsim 17$ CPH) 側のスペクトル密度 P^(MA)(f) は、伊東のもの $P^{(1)}(f)$ より通常数倍大きいものであるのに、 異常に小さくて1以下となるもの(Δ).

(4) 全体としての'平均的'な分布を示すもの、すなわち、低周波域 ($f \sim 1$ CPH) の湾全体の固有振動と思われる振動モードAの大きさが、伊東と真鶴でだいたい等しく、 ($P^{(MA)}/P^{(I)}\approx 1.0$)、伊東のスペクトルの卓越周期 ($f \Rightarrow 5$ CPH) における鋭い落ち込み ($r_{MA/I} \Rightarrow 0.01$)、 真鶴の卓越周期 ($f \Rightarrow 10$ CPH) 付近における大きなピーク ($r_{MA/I} \Rightarrow 100$) そして $f \ge 12$ CPH 域における数倍の値というもの(\odot).

の四つである. 11 月中のスペクトルを, この四つの群に分類してみると, 表2のようにな る.入っていない日は, はっきり分類のできないものである. これを見ると, 群2の真鶴に おける卓越ピークが 100 のオーダーのタイプが最も出現回数が多く, ノーマルなものと言え よう.そして, 真鶴のものが高域で伊東のより小さい群 (3) のものとか, 湾の固有振動が両 地点で数倍も違う (1) のタイプは大変にまれなものであることがわかる.

ここで問題になるのは、Power の比 rMA/I がどういう理由で日々異なり、 そしてその異

-147-



- 図 36 真鶴と三崎におけるAモード のスペクトル密度 $P(A)^{(1)}$, $P(A)^{(MI)}$ の関係.最大波高 H_{max} やrms波高 σ を用いたも のより、相関が高い.二つの量 の間には、近似的に $P(A)^{(1)}/$ $P(A)^{(MA)=0.93}$ の関係がある.
- Fig. 36 Simultaneous plots of energy densities of A mode $P(A)^{(MA)}$, $P(A)^{(I)}$ at Itō and Manazuru, respectively. Correlation between magnitudes of A mode is larger than that between magnitudes in terms of such as H_{max} or rms wave height σ . Data shows an approximate relation $P(A)^{(I)}/P(A)^{(MA)} \approx 0.93$.
- 図 37 三崎と真鶴におけるAモード のスペクトル密度 $P(A)^{(MI)}$, $P(A)^{(MA)}$ の関係.二つの量の 間には、近似的に $P(A)^{(MI)}/$ $P(A)^{(MA) = 0.93}$ の関係がある. ただ、11月14日と26日の2日 間は、三崎のAモードが異常に 大きくなっている.
 - Fig. 37 Simultaneous plots of energy densities of A mode $P(A)^{(MI)}$, $P(A)^{(MA)}$ at Misaki and Manazuru, respectively. Two quantities are approximately related as $P(A)^{(MI)}/P(A)^{(MA)} = 0.93$. However A mode at Misaki exceedingly developed on the two days shown in the figure.

相模湾内の津波の特性 (I) 一藤繩・渡部・大池

なり方がいかなる状況の変化に対応しているかということである.

外洋からの入射波があって、それが相模湾に入射してきたとき、波として進行する部分と、 湾内の水を全体として振動せしめる部分と、更に岸にトラップされる mode であるエッヂ 波等にエネルギーが分配されると考えられる (表3参照).

今, channel i, J 地点のスペクトル密度分布を $P_i^{(J)}(f)$ とする. 単純に外洋から入射し てくる長周期波を平面波を考えたわけであるが,海洋には,種々の波が存在する. 慣性波や, 陸棚波さらにそれ等のバロトロピックなもの,バロクリニックなものが存在するであろう. 入射波のモードごとに,生成する湾内の振動モードを考えなければならないであろう. すな わち,入射波が a のモードのときの $P_i^{(J)}(f)$, すなわち, $aP_i^{(J)}$ を考える必要がある. 外洋 における a モードのスペクトル密度を aP_0 とするとき, 我々の第1の関心事は, aP_0 と $aP_i^{(J)}$ の比すなわち増幅率 (分配率) $aA_i^{(J)}$ であろう.

 $aA_{i}^{(J)} = aP_{i}^{(J)}/aP_{0}$

(4)

aA_i^(J) は、実際には、外洋におけるαモードの波の波長ばかりでなく、入射方向、更には 位相にも関係して、非線型問題をも考えなければならない可能性もある. しかし、それでは、 問題が複雑になりすぎるので、当分は線型で扱える範囲に話を限ることにする.

上に伊東と真鶴で測定された長周期波についてのデータを用いて、モードに分解しない形 での分配率を議論して、幾つかの代表的なスペクトル構造を持つことを示した.オーソドッ クスに進めるならば、長周期波のスペクトル構造を知った後は、それらの各成分のモードを



図 38 真鶴における 11 月 14 日のスペクトル(記号2で示した)は、他の日に比 べて特異なものである。

Fig. 38 The spectrum at Manazuru on November, 14 (symbol 2 in the figure) is peculiar among spectra at Manazuru. High frequency parts contain relatively large energy.



- 図 39 伊東における11月14日のスペクトル(記号2で示した)も、やはり、特 異である.この日には、三崎でAモードが異常に大きくなるなど、外洋の状 態が普通とかなり異っていたものと思われる.
- Fig. 39 The spectrum at Itō on November, 14 is also peculiar. It is suggested that the activity of the long ocean wave is peculiar in the deep ocean. The spectrum is shown by the symbol 2 in the figure.



- 図 40 三崎における3主要モードの エネルギー密度の変遷. Aモード のエネルギーが期間中1オーダー しか変化しないのに、MII, MI2は 2オーダーもの変化を示す. 三つ の主要モードがおのおのかなり独 自に消長していることが認められ る.
- Fig. 40 Evolution of energy densities of three dominant components A, MI₁, MI₂ at Misaki. Energy of A mode changed only 1 order compared with changes of 2 orders in modes MI₁, MI₂.

同定し、各モードに対する分配率の計算を行うべきであろう. そのためには、Munk et al. (1964)が行ったような時空間測定がされなければならない. そのような測定は、将来行うし

相模湾内の津波の特性(I)ー藤繩・渡部・大池

かないので、ここでは、モードが周波数によって区分できるものとして議論を進めよう.そ うすると rmA/I が四つの代表的な group に分かれたのは、入射波浪の条件、主として線型 に話を限るならば、入射方向が異なっているためかも知れない.しかし、先に述べたように、 陸棚上の長周期波のスペクトルが、外洋から入射する長周期波の入射角にあまり影響を受け ないとすると、このような単純な図式では、上に述べた測定結果が説明されないことになる.

長周期波の background のスペクトルが、単に外洋から入射してくる波のスペクトルにの みによって決まらないことを明確に示しているのが図 33, 34, 35 である.図 33 は、真鶴に おけるスペクトルであって、ピークの値を一致するようにして描いた 3 日間のものである. 図からわかるように、3 日間のスペクトルは非常に高い相似性を示している.対応する 3 日 間の伊東と三崎におけるスペクトルを描いたのが、図 34 と図 35 である.三崎のものを見る と、低周波域の MI₂ のモードまでは、かなりよく合っており、11 月 9 日以外の 2 日間のも のは、全周波数域でよい一致を見ている.11 月 9 日のものには、高周波域で、1 オーダー程 度のスペクトル密度の違いがある.このことから、background スペクトルは、外洋からの 入射波によって励起されるものと、local な風や沿岸過程によって励起されるものの重ね合 わせから成っていることが、推測される.伊東の 3 日間のスペクトルでは、11 月 5 日のもの が、高域で相対的に大きなエネルギーを示しており、サーフ・ビートが発生したためと思わ れる.しかしながら、低周波域ではかなり相似性の高いスペクトル構造となっており、湾口 条件を一定にしたときの沿岸各地のスペクトル構造の大局的な一意性は、認めてよいと思わ れる.

次に各モードの振幅の推移について調べてみよう. 図 36 は、Aモードのスペクトル密度 の真鶴におけるもの P(A)^(MA) と、伊東におけるもの P(A)^(I) との関係を示したものである. 図 16 の日最大波高の関係のグラフに比べて、データのばらつきが極端に少なくなっている. 二つのスペクトル密度の大きさの間には、

 $P(\mathbf{A})^{(\mathbf{MA})}/P(\mathbf{A})^{(\mathbf{I})} \Rightarrow 0.93$ (5) の関係がある. これは, $\mathbf{A} = -$ ドの振幅 $a(\mathbf{A})$ で表わすと,

$a(A)^{(I)}/a(A)^{(MA)} = 0.96$

(6)

となり、Aモードは、伊東と真鶴でほとんど同じ振幅をもっていることがわかる. 図 37 は、 同じくAモードのスペクトル密度の関係であるが、今度は、真鶴のもの P(A)^(MA) と三崎に おけるもの P(A)^(MI) との関係を示したものである. この場合も、スペクトル比で表わすと、

 $P(\mathbf{A})^{(\mathrm{MI})}/P(\mathbf{A})^{(\mathrm{MA})} \doteq 0.93$

(7)

であり, 振幅比では,

 $a(A)^{(M1)}/P(A)^{(MA)} \doteq 0.96$

(8)

と、やはり、三崎と真鶴で、ほとんど同じ振幅であることがわかる。二つの関係から、 *a*(A)^(MI)/*a*(A)^(I)≒1.00
(9)



FREQUECY

(CPH)

- 図 41 伊東と真鶴における長周期波 のクロス・スペクトル解析の結果. Aモードのコヒーレンス r² が大 変大きく,位相差 ø はゼロに近い.各地域の主要モードのコヒー レンス r² は大変小さく,ゼロと 見てよい.
- Fig. 41 Results of cross-spectral analysis of long ocean wave data at Itō and Manazuru. Coherence γ^2 of A mode is very large. But coherence at the local dominant peaks are nearly zero.

- 図 42 真鶴と早川における長周期波 のクロス・スペクトル解析の結果. Aモードのコヒーレンスが大きく、 地域卓越モードのコヒーレンスが 小さい. Aモードのスケールより 小さいが地域卓越モードのそれより 大きい水系の運動が存在するようである.
- Fig. 42 Results of cross-spectral analysis of long ocean wave data at Manazuru and Hayakawa.

Coherence γ^2 of A mode is very large, but coherence at the local dominant peaks are nearly zero. It is suggested that an water motion exists with scale smaller than that of A mode but larger than that of the local dominant mode.

相模湾内の津波の特性(I)-藤縄・渡部・大池

となる. Aモードが湾全体の振動に対応していることを裏付ける今一つの証拠となっている. ただ,理解に苦しむ日が2日間ある. それは, 11月14日と11月26日である. いづれの 日にも三崎でのAモードが,大変大きく,大部分の測定点が関係(7)をほぼ満しているのに 対して,エネルギーで 2.5 倍,波高で 1.6 倍も大きく出ている. 真鶴,伊東では図 36 を 見てもわかるように,このような極端なずれはない. 14日のスペクトルは,先にも述べたよ うに,三崎のスペクトルとして大変異常なものであって,通常の卓越モードに代って,ずっ と高周波の成分がサーフ・ビートとして発生し,従来の型にないスペクトルを見せたもので あった. このようなときのAモードの異常発達である. 伊東・真鶴のスペクトルを見ても (図 38,図 39) 14日のスペクトルの型は,4日間だけの中であるが,一見して異なっている ことがわかる. 高周波域の相違は,波浪の砕波の過程に伴う沿岸力学過程のせいと考えられ たのである. Aモードの特異な振舞いは,外洋からの入射波の湾口における条件の違いのせ いかも知れない.

図 40 は、三崎における三つの卓越成分 A, MI₁, MI₂ のスペクトル密度 P(A, MA), $P(MI_1)$, $P(MI_2)$ の推移を示している. この図から、少なくとも対象となった1カ月間で、 Aモードのエネルギーが1オーダーの変化幅を示しているのに対して、主要モードである MI₁ は、2オーダーもの変動を示しており、又、次の主要モード MI₂ も同じく2オーダー の変動を示していることがわかる. そして 21 日から 26 日までのこの期間では、前後の時期 に比べて、大きくなっているが、全体のエネルギーに占める率は小さい. ただ 11 月 11 日か ら 15 日までは、Aモードが三崎の長周期波振幅の最も大きな構成要素となっていることは、 注目に値する. なお、この図ではAモードのスペクトル密度に対するフィルター特性補正は 施していない.

8. 他地点との相関

第5節で、平均的な波の大きさが、各地点でどのように相関を持っているかを見て、その



- 図 43 地点 1,地点 2 におけるスペクトル分布の構造のモデル、地点 1 の卓越モ ード ωω が地点 2 とほとんど相関を存しないのは、モード ωω の大きな増幅 率と、局所的な駆動力による長周期波の存在のためであると考えられる.
- Fig. 43 Model of structure of energy spectral distribution at places 1, 2. Low coherency at a local dominant peak would be caused by large amplification factor of the mode and the existence of the long ocean wave of local origin such as surf-beats.



バラッキの大変に大きいことを見て来た. スペクトルの解析の結果から,各地点ごとに,特 徴的なスペクトル構造を持っていることが明らかになった. これらのことから,各地点間の 長周期波の周波数別の相関も,相当に小さいものであることが予想される. 図 41 に示した のが,伊東と真鶴の長周期波のクロス・スペクトル分解の結果である. エネルギースペクト ルの分布は,前述したと同じ特徴を示しているので,ここでは触れない. コーヒーレンスの

-154-







分布 $\gamma^{2}(f)$ において,特徴的なことは,振動モー ドAにおいてコーヒーレンスが.大変に大きく, 0.8 以上であることである.そして位相の差 ϕ は, ほぼ0である.伊東の主要振動モード I₈ 近辺で, $\gamma^{2}(f)$ が小さなピークを持っており,6CPH 近く と,真鶴の主要ピーク MA₅ の近辺にも, $\gamma^{2}(f)$ に 小さいながら,ピークが存在する.しかしその値 は,大変小さく,誤差の範囲で $\gamma^{2}=0$ としてよい であろう.状況が似ている他の日についての平均 化を行ってみるとこの微小なるピークが有意義な ものかどうか判定できよう.

図 42 は、真鶴と早川との長周期波のクロス・ スペクトル分解の結果を示したものである。早川 のパワースペクトルが、ここで初めてできたが、 早川のA振動以外の主要振動が真鶴におけるもの より、更に周期が短いのが気に付く、コーヒーレ ンス $\gamma^{2}(f)$ を見ると,先の図の伊東と真鶴の場合と同じく,A振動モードの相関が大変に良い ($\gamma^{2} \Rightarrow 0.7$),そして位相の差が、0.25 rad. 位存在する. 時間になおすと3分程度である. 伊東と真鶴ではほとんど位相の差がないので伊豆の東岸を北上したというのは考えられない. これはどういう振動なのであろうか. 位相の差を今少し多くの例で当ること、平塚・三崎・ 江の島等のデータも使える時期を選んで検討する必要があろう. Aモードの位相の差につい ては、次節でより詳しく論じよう.

この図から今一つ目につくのは,図 41 の場合と違って,周期 20 分程度のところに, coherence の明らかな山があることである.パワースペクトルの分布にも両者に共通して小 さなピークが存在する.これから推察するに,この振動は,少なくとも真鶴と早川を含むよ うなかなり大きな水の運動になっているが,しかし,図 41 を見てわかるように,真鶴と伊 東のクロス・スペクトル解析の結果では見受けられなかった.すなわち,真鶴と伊東を含む 位の大きさはないと言えよう.位相の差が1分程度あるが,A振動の場合と逆センスの位相 関係になっている.この振動は何なのか? それを見出す手だては何か?

さて,入力Fとして,一つの調和振動型の外力とする,

$$F = b\cos(\gamma t + \delta)$$

(10)

最も簡単な振動モデルでは、固有振動を行う系が、速度 * に比例する摩擦力 λ* でエネルギ ーを散逸しているとする、運動方程式は、

 $\ddot{x} + \lambda \dot{x} + \omega_0^2 x = b \cos{(\gamma t + \delta)}$

(11)

このときには、振動は強制項と固有振動項に分かれるが、固有振動項は、十分時間がたつ と減衰し、以後、強制項のみが残る.強制振動の周波数7が固有振動数 ω に等しいときが 共鳴であり、振幅が大変大きくなり得る.しかし、このようなモデルで、我々が測定した長



- 図 46 伊東における卓越モード Ia と高周波数域の Ins のエネルギー 密度 P(Ia), P(Ins) との関係、非 常に密接な関係にあることがわか り、モード Ins が Is の2次波で あることが示唆される。波高で換 算すると、約6%の大きさの2次 波が発生していることになる。
- Fig. 46 Energy density $P(I_{18})$ of mode I_{18} versus that $P(I_3)$ of the dominant mode I_3 at Itō. Close relation between the two modes suggests that the mode I_{18} is the secondary wave caused by the primary I_3 .



図 47 1次波 I₃ と2次波 I₁₈ と の模式的な関係.

Fig. 47 A conceptual relation between the primary wave I₃ and the secondary I₁₈. Amplitude of the secondary is some 6% of that of the primary.

周期波の挙動を説明するわけにはいかない.というのは、個々の地点で共鳴条件が違っても、 ただ、振幅が小さくなるのみで、やはり外力の振動とコーヒーレントに動き、各地点の水位 変化の時系列には、相関があるはずである.このことは、系を少し複雑にして、非線型効果 を入れてみても本質的に変らない.というのは、非線形効果を入れても、共鳴の性格が変わ ったり、別のタイプの共鳴が起きるのみだからである.

三崎における卓越周期と真鶴における卓越周期が大きく違っていた. これを模式的に描け ば図 43 のようになろう. $\omega = \omega_0$ において二つの地点の長周期波にほとんど相関がないのは, 三崎における MI₁ の水位変動 $\eta^{(MI)}$ が,

$$\eta^{(MI)} = \eta_{I}^{(MI)} + \eta_{L}^{(MI)}$$

(12)

のように、二つに分解され、この前者 $\eta^{(M1)}$ が入射波(例えば先ほどの $\cos(\gamma t + \delta)$ で表わ したもの)に励起されたものであって、 $\eta_{L}^{(M1)}$ は、地域的な風とか、波によるサーフ・ビー トのために励起されたためであろう.成分 $\eta^{(M1)}(\omega_0)$ は、天気静穏のときにも、卓越してい るのであるから、入射長波のためと考えてよく、大きさは、 $\eta_{L}^{(M1)}(\omega_0)$ より圧倒的に大きい のであろう.

$$|\gamma_{\mathrm{I}}^{(\mathrm{MI})}(\boldsymbol{\omega}_{0})| \gg |\gamma_{\mathrm{L}}^{(\mathrm{MI})}(\boldsymbol{\omega}_{0})| \tag{13}$$

これに対して, 真鶴においては, ω₀ の波が三崎においての波 η^(MI)(ω₀) と相関を持たないの であるから.

 $|\eta_1^{(\mathrm{MA})}(\omega_0)| \ll |\eta_1^{(\mathrm{MA})}(\omega_0)| \tag{14}$

ということになる. 増幅率が 10 倍~1000 倍になりうるという測定結果も報告されているか ら (Olsen and Hwang, 1971), このようなことが起こりうるかも知れない.

図 44 は、Aモードに対する三つの地点の位相の差を示している. 三崎と真鶴の位相の差 ϕ (MI, MA) は、ほぼ 0 であり、真鶴と伊東の差 ϕ (MA, I) および三崎と伊東の差 ϕ (MI, I) は、負の値をもっていることがわかる. ここにプロットしたものは、コーヒーレンス γ^2 が、

			5	表 Fable t	:4 e4 ore:	潮沙 Nu mov	/成分 merie e tid	を抜 cal fi al cc	さま lter ompo	るの of I onent	に用 Dood :s.	son :	蛪値 and	ער לי War	ルタ burg	—. use	đ			
i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Wi	0	$\frac{2}{30}$	$\frac{1}{30}$	$\frac{1}{30}$	$\frac{2}{30}$	0	$\frac{1}{30}$	$\frac{1}{30}$	0	$\frac{2}{30}$	0	$\frac{1}{30}$	$\frac{1}{30}$	0	$\frac{1}{30}$	0	0	$\frac{1}{30}$	0	$\frac{1}{30}$



図 48 湖位データから湖汐成分を抜いた結果. 周期4日程度の長い波動が見分け られる.



0.6 以上のものであるが、各組合せに対して γ^2 が 0.9 以上のものにわたって平均をとって みると、

$\varphi(MI, MA) = 0.022 \pm 0.019 (rad.)$ (15)	$\phi(MI,$	11, MA)= 0.022 ± 0.01	9 (rad.)	(15a
---	------------	-------------------------	----------	------

$(MA, I) = -0.110 \pm 0.027$	7 (rad.)	(15b))
------------------------------	----------	-------	---

 $\phi(MI, I) = -0.111 \pm 0.031 \text{ (rad.)}$ (15c)

となる. ここに変動幅は、95% の信頼限界である. 我々の処理では、自由度 (degree of freedom) df が

$$df = 2\left(\frac{N}{L} - \frac{1}{4}\right)$$

で表わされる (Kinsman, 1965) ことから, *df* ≓28 となる. ここに, N はデータの個数であ り, L は最大ラグ数である. しかし, 上に求めた位相の値は, ほぼ 10 個のシリーズにわた る平均であるので, 実質的には, この 10 倍の 280 程度の自由度と考えてよいであろう. 各地のコーヒーレンス γ² の値は, それぞれ, 平均的に,

 $\gamma^2(MI, MA) = 0.96, \gamma^2(MA, I) = 0.94, \gamma^2(MI, I) = 0.92$

となっており、これらの値に対する求められた位相差 φ の 95% 信頼限界を、Munk et al (1957) の Fig. 4 から読みとると、上記の値が得られる (自由度 28 に対する位相差の 95% 信頼限界の値を示したのが図 45 である).

周期が 90 分程度であるので、伊東に対する真鶴・三崎の位相差は約 1.6 分の遅れとなっ

$$-157-$$

ている.

9. 2次振動

図 46 は、伊東における長周期波のモ ード I₈ のエネルギー密度 $P(I_8)$ と、モ ード I₁₈ のエネルギー密度 $P(I_{18})$ との関 係を示すものである. 高い周波数の成分 I₁₈ の大きさが、伊東での卓越振動 I₈ の 大きさに、きれいに追随していることが わかる. 両者の比は、

 $P(I_{18})/P(I_8)=3.8\times10^{-3}$ (16) である.波高aの比に直すと,

 $a(I_{18})/a(I_{3})=0.061$ (17) となる. すなわち,卓越周期の約 6%の 振幅をもって,2次波動が発生している ことになる. I_{3} の周期が 12.5 分で, I_{18} の周期が 2.4 分であるから,二つの関係 を模式的に描けば図 47 のよう になる.

何らかの非線形の機構が働い て、2次波が発生しているので あろうが、我々は、まだ卓越波 が、いかなるモードの波なのか を決定できていないので、非線 形干渉の実態が何であるかを論 じることはできない.

我々は、伊東において、主要 振動によって発生させられる2 次波の存在を明らかにしたので あるが、 $I_3 \ge I_{18}$ の組合せ以外 のもの、あるいは他の地点でも



図 49 長波の3地点におけるクロス・スペクト ル解析の結果. コヒーレンスは非常に大きい. Fig. 49 Results of cross-spectral analysis of very long wave as shown in figure 48. Coherence is very large.



図 50 真鶴と伊東との相互相関関数. 真鶴のものが1時間程 度伊東のものより遅れている. 位相速度は約5.5 m であ る.



似たようなことが予想される.このことをより系統的に調べるには,bi-spectrum を計算し て調べるのも一法であろう.あるいは,十数個ものスペクトルの山がいつも同定できること から,ある主要波とそれの反射波があって, それが重なって形成されるスペクトル(echospectrum) についても調べてみる必要がある.

10. '極長周期波'

ここで潮汐周期よりも長い振動について調べよう. そのために潮位 $\{y(t_i)\}$ の時系列から 半日周潮や日周潮を抜かなくてはならない. その手法は幾つかあるが, ここでは Doodson and Warburgの方法 (Groves, 1955) を採用することにする. それは, 潮位データ $y(t_i)$ に (2N+1) 個の加重平均を施すものである.



- 図 51(i) 相模湾内で長周期波が活発になる ときの天気図. 11月11日のもの. 相模 湾の沖近くを低気圧が通過している.
- Fig. 51(i) The weather chart on November 14. The long wave with period of tsunamis developed on the day.



図 51(11) 図 51(1) と同じ、11 月 18 日のも の.





Fig. 51(ii) The same as figure 51(i) except the date 18.



図 51(iv) 図 51(i) と同じ、11 月 21 日のもの。

Fig. 51(iv) The same as figure 51(i) except the date 22.

$$Y(t) = \sum_{t=-N}^{N} w_i y(t-t_i) \qquad w_i = +w_{-i}$$
(18)

ここに、{wi} は数値フィルターであり、彼等の処法では、39 時間の加重平均である.数値 フィルターの値は、表4に示す通りである.

図 48 が、1976 年 11 月 5 日から 12 月 5 日までの約 1 個月間の潮位データに対して、上記 のフィルターを施して、潮汐を抜いた結果である。実に見事に潮位が抜けている。この図を 見て気がつくことは、かなり大きな超長周期振動が存在して、その大きさが最大 20 cm 程度 となっていることである。相模湾内の 3 点の変化の仕方には、大変良い相関が認められ、周



図 51(V) 図 51(1) と同じ, 11月 22日のも の.

Fig. 51(v) The same as figure 51(i) except the date 23.



図 51(vi) 図 51(i) と同じ、11月23日のもの。

Fig. 51(vi) The same as figure 51(i) except the date 24.

期としては,約3.5日間である(相模湾で は4日ないし9日の周期を有する波が存在 することが知られている*).いったいこの 波の正体は何なのであろうか.相模湾外の 関東沿岸域では,この時期どうなっていた のであろうか.三崎の振動が真鶴・伊東の ものに比べて1日弱早いようである.特に 最初と,3番目の峰でははっきり離れてい る.三崎と真鶴の距離は,せいぜい50km であるから,こんなに長い波が伝播してい ったのであろうか.陸棚に trap されて進 行する波動に shelf wave がある.かつて, Isozaki (1972)が日本の南岸の異常潮位に



^{*} 平 啓介(私信)

相模湾内の津波の特性(I)-藤縄・渡部・大池

ついて論じた際、ゆっくり西進する潮位の上昇を見つけその速さが、 3~6 m/s と報じてい る. 相互相関をとってみると、実際には(定常の仮定が必ずしも成り立っているとは思えな いが)位相差は6時間であって、位相速度としては、1.9 m/s となり、Isozakiの結果と大 きな違いがない. 個々に波の crest を調べてみると(図 48)極端な場合には、1日程度の位 相のずれがあるのに、ある場合には、ほとんど差がないというようなことにもなっている.

図 49 に示したのが cross-spectrun の解析の結果である. スペクトルの形は非常に鋭く 極低周波数域に集中している. 定常性が保証されるならば1個月のデータの代りに1年程度 に統計処理の期間を延ばせばよい. しかし, この種の振動が何であって, その起源が何であ り, その時間的出現率が判明しない. 現時点で, いたずらに統計期間を長くすることは得策 ではない. MEM などを使ってより短期間のデータで論じる必要があろう. エネルギーがか なりあって, コヒーレンス γ^2 が十分大きい周波数域において位相がかなり系統的に負とな っているのは, 生の記録を見て検知された事柄の再確認である. phase の信頼限界が, この 場合のデータ数が 680, Lag 数が 100 であるので自由度が 13 である. コヒーレンス γ^2 が 約 0.8 だから 95% 信頼限界は, 0.35 rad. となり,

 $\phi(MI, MA) = -0.35 \pm 0.35$ rad.

(19)

となって、真鶴のものが、遅れている可能性が高い.

図 50 が真鶴と伊東との相互相関関数を示したものである。相関が最も大きい位置を推測 すると t≒1 時間程度となる。伊東と真鶴の経度がほとんど違っていないが相模湾の伊豆半 島東岸沿いに南下したとすると、距離が約 20 km であるので"伝播"速度が 5.5 m/s とな って、shelf wave の伝播としても説明がつきそうである。しかし、真鶴・三崎間の"位相 速度"1.9 m/s と大きく異なり、波動の伝播とは断じ難い。

図 49 には、伊東と真鶴の超長周期波のクロス・スペトルの解析の結果ものせてある. パ ワースペクトルは、予想されるようにほとんど同じである. 大変低い周波数域に偏っている のは、測定期間の関係で致し方ない. コヒーレンス γ^2 の分布を見ると、非常に高く 0.9 近 くの値をとっている. 位相のずれ ϕ は、0.005~0.01 CPH で伊東の方が早いのであるが、そ れより高周波数域では負となっている. このような水の運動の本性は何であろうか. Isozaki (1969) が示唆したように continental shelf wave なのか. あるいはそれに伴う相模湾の副 次的な振動なのであろうか. その発生がいかなるメカニズムによっているのであろうか.

いろいろな疑問がつきないが、順次解明してゆく必要がある.

11. 長周期波の発生

我々の対象とする長周期波がいかなる機構によって外洋で発生しているかは、いまのところ明確になっていない.また、浅い海域における測定がほとんどなので、外洋における長周 期波がいかなるスペクトル構造を有しており、長周期波の活動が激しくなると、どのような成 分が外洋で大きくなるかついても確たる解答が得られていない. Olsen and Hwang (1971) は、ハワイの Kona 沖の水深 523 m と 165 m の地点で長周期波を測定した. その周波数 スペクトルを見ると、二つの地点におけるスペクトルは非常によく似かよっている. 細かい 相違はあるものの、全体としては、形状、大きさともよい一致を示している. そして、スペ クトル分布は、三つの特徴的な領域に区分される.

- イ) 周期 20 分以上の f⁻³ 領域 p(f)∞f⁻³
- ロ) 周期 20 分から5分までの一定領域 p(f)=const.
- ハ)周期5分以下の f^{-5} 領域 $p(f) \propto f^{-5}$

このような外洋のスペクトルが浅海域や湾などに入射してきて変形するわけである.いま 少し外洋における測定がなされないと, Olsen and Hwang のスペクトルが純粋な外洋スペ クトルとは断じがたい.

さて、相模湾の1976年11月中の長周期波活動の概様を示す図を見ると、前後の日に比べ て、かなり活発な日が何日かあることがわかる。それは、11月7日、11日、14日、18日、21 日、22日、23日、24日、である。この7日間の日本周辺の天気図を示したのが図 51(i)~(vii) である。これを見ると、長周期波が活発になるのは、たいてい、関東南岸の本土に近い海を 低気圧が通過しているときであるように思われる。このような低気圧のみが、長周期波の発 生源であるというのではないが、少なくともその一つとなっていると思われる。増幅度を数 値計算などで推定できれば、これら気象じょう乱の中にどのような長周期波動が発生してい るかを知ることができよう。そして外洋における長周期波測定がなされれば、津波が浅海城 でどのように増幅されるかについてよりはっきりとした解答を与えることができよう。

12. 議 論

上で三つの地域における津波(長周期波)のスペクトルが,個々に特徴をもっていること をみてきた.このスペクトル,あるいは,水位変動の時系列を再現するのに必要なことは, 三崎ならばその卓越モード A, MI₁, MI₂ が何であるかを同定することである.そうするこ とによって,計算の手順が格段に簡単になる.スペクトルの再現という観点から注目される のは,Olsen and Hwang (1971)の結果である.彼等の半ば解析的・半ば数値計算的手法に よる長周期波の変形に関する計算の結果をみると,湾の奥における長周期波のスペクトルが, 大変よく実測されたスペクトルに似ている.計算によって,各成分ごとの長周期波に対して 深い場所における波高に対する増幅率を求め,深い海域(水深 160 m)でのスペクトルに乗 じ,浅海における測定スペクトルと比較したものである.彼等の結果は、少なくとも外海に 面している湾内の長波の入射に伴う振動の全体的な特徴を、捕えているように思われる.し かし、ここで幾つかの点で問題点がないわけではない.第一に、スペクトルの全体的な形は 再現されているものの、大きさが波高で2倍程度計算結果が小さく出ていることがある.津

-162 -

相模湾内の津波の特性(I)-藤縄・渡部・大池

波の減衰メカニズムを入れていなくてこの状態であるから、実際には、さらに計算値と実測 値とのずれが大きいことになる. また、彼等も述べているように、edge wave のモードや shelf resonance の効果が入っていない. 第二には、彼等の対象とした Hawaii の Keauhou 湾内の5点での長周期波のスペクトルを見ると、大きさが個々に変化しているものの、スペ クトルの形は、大変よく似ている. しかるに、相模湾の場合には、スペクトル自体が大きな 違いを見せていた. 幾つかのモードの内のAモードのみは、各地で共通に認められ同じよう な振舞いをしている. Keauhou 湾では、このAモードに対応する振動が卓越しているようで ある. しかし、相模湾においても、Olsen and Hwang(1971) 流の数値計算は、やはりやっ てみる価値はある. 多分、各地の主要モード (三崎の MI₄, MI₂, 真鶴の MA₅, 伊東の I₂, I₈) を別の観点から取り入れることをしないと、スペクトル自体も再現できないのではなかろう か. いづれにしても、彼等の仕事は、フィールド観測も大がかりなものであるし、数値計算 も巧妙であるし、注目に値する.

カリフォルニア沖における Munk et al (1964) の測定によると,今回我々が測定の対象 にしたような長周期波動が,主として,岸にトラップされている波(edge 波)であることを, 時・空間にわたる測定から,結論している. 彼等の場合には,直線的な形状の長く続いてい る海岸でのものであって,分散関係が計算と測定で非常によい一致を見ている. 我々の対象 とした相模湾では,狭い地域ごとに,トラップされた mode が励起され,それに湾全体を ゆり動かす振動(Aモード)が重ね合わさっているのであろう.今回は,単に沿岸各地のス ペクトルの特徴を主に述べたが,主要モードの同定,数値計算による検討などは,続いて行 うことにする.

13. 結 論

津波の浅海域・湾内における変形過程の解明を目的として、相模湾内の数カ所の地点で周 期1分から100分の長周期波動の観測を行った.データの1部の解析の結果次のような事柄 が明らかになった.

1) 湾内の各地点の長周期波の活動状態は、大局的には似ているが細部になると相異がある。

湾内の長周期波の大きさには下限があって、最大波高で約2cm, rms 波高で 0.17 cm
 である.これは、California 沖における値の約 1/3 である.

3) 長周期波の最大波高 H_{max} と rms 波高 σ との間には、 $H_{max} = 12\sigma$ の関係がある.

 各地点の長周期波の大きさの関係は、最大波高 H_{max} を用いるよりも rms 波高σ を 用いた方が緊密になる。

5) 三崎の津波のスペクトルは,15個の明確なピークを有しているが,通常の場合A(周期1時間半),MI₁(5 CPH), MI₂(6 CPH)の三つが卓越する. 波浪の砕波に伴って極端に大

国立防災科学技術センター研究報告 第19号 1978年3月

きくなる成分もある.

6) 真鶴の長周期波のスペクトルは, 11 個のピークを有しているが, 通常 A, MA₅(9 CPH), MA₆(10 CPH)の三つが卓越する. 高周波数域でエネルギー・レベルが急落するもの とそうでないものがある.

7) 伊東の長周期波のスペクトルは、19個のピークで特徴づけられるが、主要な成分は A、I₂(4 CPH), I₃(5 CPH) の三つである.伊東のスペクトルの日変化は大変小さい.

8) 真鶴と伊東における長周期波のスペクトルの比は、ほぼ四つの群に分かれる.入射条 件の違いによるのかも知れないが、入射角によって増幅率があまり違わないという報告もあ り、今後検討すべき事柄である.

9) background のスペクトルは、一定の同一性を有するが、局地的な駆動力による成分 がかなり大きい.

10) 相模湾全体の振動の成分であるAモードの振幅は、各地でほとんど同じである.しかし、時たま、三崎で異常に大きくなることがある.伊東では、真鶴・三崎に比べて約1.6分ほど早い.

11) 三つの卓越成分のうち, Aモードのエネルギーが1カ月間に1桁しか変動しないのに, 地域卓越成分 I₂, MI₁, MA₅ などのものは2桁以上変動する.

12)地域卓越成分間の相関は、ほとんどがゼロに等しく、これは局地的な原因による長周 期波の発生と地域卓越成分の大きな増幅率によって説明される.

13) Aモードの各地における相関は著しく高い.

14) Aモードよりは小さいが伊東と真鶴を含むようなスケールの水系の運動が,存在する.

15) 伊東のスペクトルにおいて高周波数域の I₁₈(周期 2.4 分)の成分は,主要成分 I₈(12.5
 分)の振幅の大きさが約 6% の2次波と考えられる.

16)周期が4日程度の大変長い長周期波が測定された. 真鶴では,伊東に比べて遅れ,位 相速度は,約 5.5 m/s であり,陸棚波かも知れない.

17)太平洋岸の本土に近い所を低気圧などの気象じょう乱が通過すると長周期波が発生す るようである。

謝 辞

長周期波計の設置を快よく認めて下さった神奈川県水産試験所, 湘南海岸整備事務所, 西 部魚港事務所,小田原土木事務所,小田原市水産課, 真鶴漁業協同組合,気象研究所,神奈 川県水産試験場相模湾支所の皆様に深く感謝を申し上げます.

東京大学理学部助教授永田豊氏,東京大学海洋研究所助手平啓介氏,東京大学地震研究所 所長梶浦欣二郎氏から貴重な示唆を受けました.深く感謝申し上げます.

参考文献

- 1) Aida, I. (1967): Water level oscillations on the continental shelf in the vicinity of Miyagi-Enoshima. Bull. Earthquake Inst., 45, 61.
- 2) 藤繩幸雄、岡田憲司, 渡部勲 (1977): 波浪に伴う長周期波 (サーフ・ビート)の特性 (II). 国立防 災科学技術センター研究報告, 17, 105.
- Groves, G. W. (1955): Numerical filters for discrimination against tidal periodicities. Trans. Ameri. Geophysi. Uni., 36, 1073.
- Isozaki, I. (1969): An investigation on the variation of sea level due to meteorogical disturbances on the coast of Japanese islands (III). J. Oceanogr. Soc. Japan, 25, 91.
- Isozaki, I. (1972): Unusually high mean sea level in September 1971 along the south coast of Japan (1). Papers in Meteor. and Geophysi., 23, 243.
- 6) Ippen, A. T. and Y. Goda (1963): Wave-induced oscillations in harbors; the solution for a rectangular harbor connected to the open sea. *Hydrodynamics Lab.*, MIT, TR No. 59.
- 7) Kinsman, B. (1965): Wind Waves; their Generation and Propagation on the Ocean Surface. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, Inc.
- Longuet-Higgins, M. S. (1967): On the trapping of wave energy round islands. J. Fluid Mech., 29, 781.
- 9) Lee, J. (1971): Wave-induced oscillations in harbours of arbitrary geometry. J. Fluid Mech., 45, 375.
- Miles, J. and W. H. Munk (1961): Harbor paradox. J. Waterways and Harbors Div. Proc., Ameri. Soc. Civ. Eng., 87, 111.
- Munk, W. H., F. E. Snodgrass and M. J. Tucker (1957): Spectra of low-frequency ocean waves. Bull. of Scripps Inst. of Oceanogr., Univ. California, 7, 283.
- 12) Munk, W. H., F. E. Snodgrass and F. Gilbert (1964): Long waves on the continental shelf: an experiment to separate trapped and leaky modes. J. Fluid Mech., 20, 529.
- Olsen, K. and L. Hwang (1971): Oscillations in a bay of arbitrary shape and variable depth. J. Geophysi., Res., 76, 5048.
- Preisendorfer, R. W. (1971): Recent tsunami theory. Hawaii Inst. of Geophysi. NOAA-JTR E-60.
- 15) 佐藤武夫, 奥田穰, 高橋裕 (1971): 災害論, 勁草書房.
- 16) Snodgrass, F. E., W. H. Munk and G. R. Miller (1962): Long-period waves over California's Continental Borderland. Part 1. Background spectra. J. Mar. Res., 20, 3.

(1977年12月19日原稿受理)