

## 女川・雄勝湾口における水位観測

地震研究所 { 相田 勇\*  
                  { 小山 盛雄  
                  { 橋本 道明\*\*

(昭和60年5月15日受理)

### 要 旨

女川・雄勝両湾それぞれの湾奥と湾口に、デジタル潮位計を設置して、1984年11月1日から6日までの臨時水位観測を行った。江の島津波観測所の定常観測記録も含めて、5点のデータのスペクトル解析およびフィルター記録解析を行った。両湾の基本振動周期の近傍で、湾奥水位がシーソーのように相互に増減するとか、水位振幅レベルの増減が相反的であるとかいうような、連成振動を明瞭に示す結果は認められなかった。しかし湾口付近の流速のパワーは、湾軸方向に卓越するが、それと直角方向にも、湾軸方向の4~12%程度存在し、これが両湾の相互振動に寄与しているものと考えられる。

### 1. はじめに

湾水は湾の長さや水深によって決まる周期で振動するが、湾口の条件もそれにかかなりの効果をもつことが認められている (HONDA *et al.*, 1908)。現実の湾は陸棚に口を開いており、陸棚の振動とも連成する。女川湾、雄勝湾では湾内の静振観測から、この付近の陸棚振動の leaky mode と結合した湾水振動を行っていることが認められた (AIDA, 1967; AIDA *et al.*, 1972)。一方湾内の振動では、湾軸方向のみでなく、湾内で枝別れた2小湾での横方向振動が顕著に生じていることが、観測で確かめられている (AIDA, 1974)。

また相模湾に隣接して開口している油壺湾、小網代湾での湾水振動が、連成振動を行っていることが仁科(1930)によって報告され、NAKANO and FUJIMOTO (1983) は、同じ大きさの長方形湾についてその機構を理論、実験の両面から検討を行っている。このように湾水の振動については、湾口付近に種々の問題があるが、女川湾外に立地する江の島津波観測所で観測される水位振動は、陸棚、女川湾、雄勝湾などの影響を受けており、これらの特性を明らかにしておくことは、津波時の振動特性を知る上においても、興味深いことと思われる。

そこで女川・雄勝両湾の湾奥の水位とともに、両湾口部の水位を同時観測し、両湾の湾水振動の相互作用や湾口部の挙動についての調査を行った。

\* 現在(財)地震予知総合研究振興会

\*\* 現在(財)日本気象協会東京本部

## 2. 観測の方法

宮城県女川港の沖約 14 km の江の島に、本所江の島津波観測所があり、常時長周期海面動揺の観測が行われている。そこでこれを基準観測点として、湾口付近の水位観測点を Fig. 1 に示すように、雄勝湾口の羽坂 (HS)、女川湾口の二股島北方 (FT) に設けた。またそれぞれの湾奥雄勝 (OK)、女川 (ON) にも観測点を設けた。これらの臨時観測点に用いた測器は、ANNDERA 社製デジタル潮位計 WLR-5 で、水圧を水晶振動子の周波数変化に変換し、内蔵マグネティックテープにデジタル信号として記録する。データサンプリングは 1 分間隔で、40 秒間の平均水位が求められる。OK、ON は測定範囲  $2 \text{ kg/cm}^2$ 、HS、FT では  $7 \text{ kg/cm}^2$  のものを使用した。

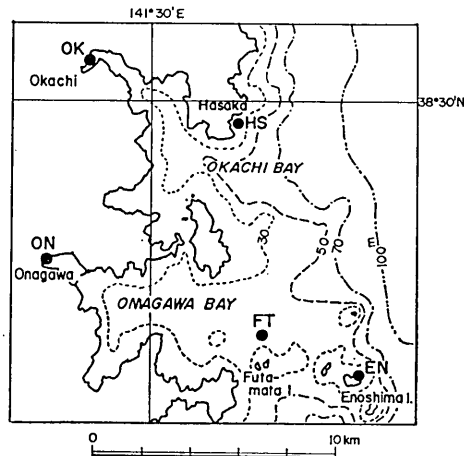


Fig. 1. Map showing the arrangement of measuring instruments.

また江の島津波観測所の測器は、ERI-V 型津波計 (相田他, 1981) で、センサーは前記デジタル潮位計と同種のものを使用しているが、記録方式などは多少相違している。サンプリング間隔は 30 秒である。しかし 5 台の測器のサンプリングが同時刻に行われるように、記録開始時刻をあらかじめ江の島の計器に合わせてある。

計器の設置水深は、OK、ON は約 5 m、HS は約 20 m、FT は約 40 m であり、FT のみは超音波切離し装置を用いて回収を行ったが、他はロープで陸上点または適当なブイに連結しておいて、観測後回収を行った。観測を行った期間は、1984 年 11 月 1 日 09 時 30 分より 11 月 6 日 13 時までであるが、1 日および 6 日はそれぞれ順次に設置回収を行うため、各測器の実際のデータが得られている時間は異っている。ここでは主として 11 月 2 日 0 時より 6 日 0 時までの 4 日間のデータを解析した。

## 3. スペクトル解析

各地点の 11 月 2 日 0 時から 6 日 0 時までの 1 分毎の 5760 個の水位データを、5 分～180

分のバンドパスフィルターを通した上で、2分毎のデータとしてラグ180をとり、2地点毎に、自己相関関数および相互相関関数を計算した上でパワースペクトル、コヒーレンス ( $R^2$ )、位相差 ( $\phi$ ) を求めた。

Fig. 2 (a), (b) は女川湾の内から外にかけての、ON-FT, FT-EN 間に対するものであり、(c), (d) は雄勝湾の内から外にかけての OK-HS, HS-EN 間に対するものである。上

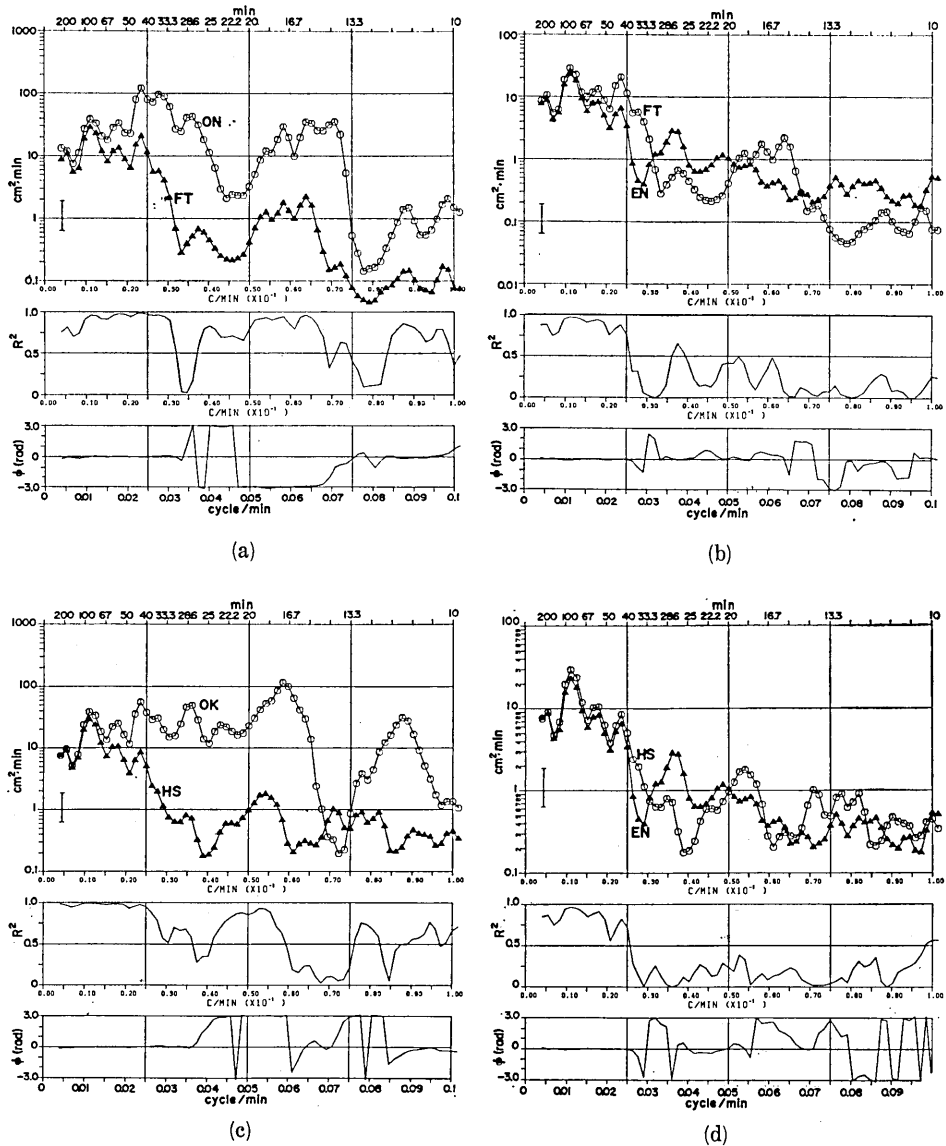


Fig. 2. Power spectra (top), coherence (center) and relative phases (bottom) for the 96-hour recordings at the two stations, (a) ON and FT, (b) FT and EN, (c) OK and HS, and (d) HS and EN.

段はパワースペクトル，中段はコヒーレンス，下段は位相差（スペクトルを▲印で示した地点の進み角）を示す。尚スペクトル図中に示した縦の棒線は，95%信頼限界をあらわしている。

90分程度の周期に，どの地点にもスペクトルのピークが認められるが，振幅は位置によってあまり変わらず，陸棚の基本振動に相当するものである (AIDA, 1967)。また40分程度以上の長周期域では，コヒーレンスは1に近く位相差もほとんど0である。(a), (c) 図に示す湾口と湾奥の関係は，周期40分以下でスペクトル密度に大きな差が出てくるが，位相が逆転する周期近傍を除いて，コヒーレンスは0.8程度以上の高い値を示していて，これらは湾内の振動特性を反映しており，AIDA *et al.* (1972) の観測，解析などですでに明らかにされている。

(b), (d) 図に示す湾口より外海側では，40分程度以下の短周期域では，コヒーレンスは非常に悪くなり，位相差の変化も複雑である。またスペクトルのレベルは，EN に対して HS も FT も大きな差が認められない。

つぎに二つの湾の間の相関を求めてみると，Fig. 3 (a), (b) のように40分以上の長周期帯ではコヒーレンスは1に近く，位相差も0で，全く同期した振動をしていることがわかる。しかしそれより短周期側ではコヒーレンスが0に近くなり位相差も生じてくる。また20~16分位の周期で再びコヒーレンスが高くなり，位相も同相になる。これは湾奥同志の (a) 図と，湾口同志の (b) 図ともほぼ同様な傾向を示している。すなわちスペクトル的にみると，基本振動またはそれに近い周期で，両湾間に逆相の振動が存在することは認められない。

以上のスペクトル解析の結果から，振幅と位相の面をとりまとめてみる。Fig. 4 は左に

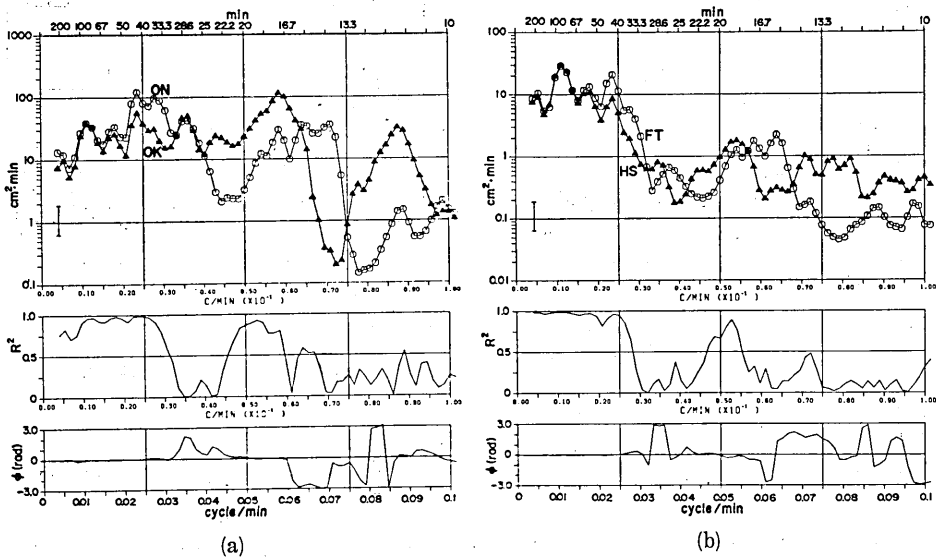


Fig. 3. Power spectra (top), coherence (center) and relative phases (bottom) for the 96-hour recordings at the two stations, (a) ON and OK, and (b) FT and HS.

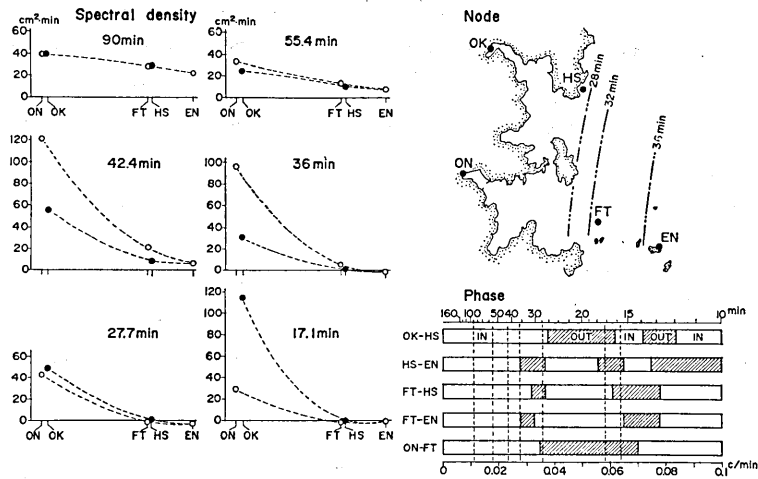


Fig. 4. left; Distribution of each spectral peak density along the major axes of the two bays. lower right; Relative phase relations between two selected stations. upper right; Inferred locations of nodal lines.

各スペクトルがピークを示す周期に関して、スペクトル密度の湾軸方向の分布を示しており、白丸は女川湾、黒丸は雄勝湾を示す。また右下には、Fig. 2, Fig. 3 の  $\phi$  を模式化して、位相が同相であるか、逆相であるかのみを図示してある。点線で示した周期はスペクトル密度分布をとった周期である。周期 90 分、55.4 分では江の島より海岸寄りはずべて同相で、その振幅も比較的差が小さい陸棚全体としての水位振動をしている。周期が 36 分になると、江の島の振動はそれより海岸側の点の振動と逆相になって、大略 Fig. 4 右上の地図上に二重鎖線で示したような節線が生じているものと推定できる。

この節線は周期が短くなるにつれ海岸に近くなり、32 分より短くなると二股 (FT) の内側に入り、羽坂 (HS) との間の位相が  $\pi$  だけ異なることになる。これは 28 分程度までで、それよりさらに短周期になると節線は両湾のそれぞれの内側に入り、HS, FT は同相に振動することになる。周期 18 分から 13 分位の間でも位相が変化するが、その節線を追跡して、振動の様態を明確にするためには、今回よりかなり多くの観測点を必要とする。

#### 4. フィルターによる解析

両湾奥での水位振動の位相関係を波形の面で比較するため、データ時系列にバンドパスフィルターをかけることにする。フィルターはチェビシェフ・フィルター (斎藤, 1978) を用い、両方向にかけて位相差を 0 とした。

Fig. 3(a) の 33~42 分のスペクトルピークと、28 分前後のピークに相当する帯域を対象にして、45~30 分 ( $f_L=0.022$  c/min,  $f_H=0.033$  c/min,  $f_{1/2}=0.040$  c/min) 帯域と、30~25 分 ( $f_L=0.033$  c/min,  $f_H=0.040$  c/min,  $f_{1/2}=0.050$  c/min) 帯域の 2 帯域についてフィルターした結果を、Fig. 5(a), (b) に示す。それぞれ上段は女川 (ON)、下段は雄勝

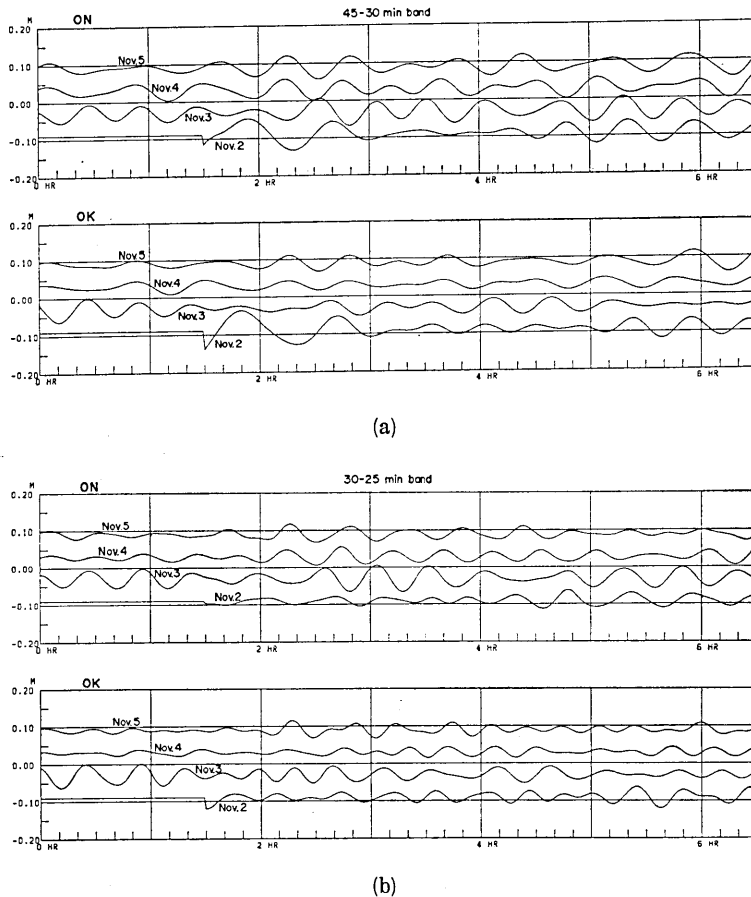


Fig. 5. Band pass filtered records at stations ON and OK. (a) 45-30 min band. (b) 30-25 min band.

(OK) 湾奥の波形で、4本の曲線は11月2日～5日に相当し、0時から6時30分までののみを示した。(a)の45～30分帯域では、ほとんどの波形が、ONとOKでほぼ同相である。また(b)の30～25分帯域でも、ほぼ同相の振動が多いが、やや位相のずれがあったり、また例えば3日の5～6時の波形のように、女川は振幅が大きいのに雄勝は振幅が小さいというような違いが認められるところもある。

このような振幅の消長を全期間について見たものが、Fig. 6(a), (b)である。これはFig. 5(a), (b)のような波形を全期間いわゆる整流を行い、更に60分の移動平均を行って平滑したものである。(a)は45～30分帯域、(b)は30～25分帯域で、それぞれ上段は女川、下段は雄勝であり、横軸の時間軸を縮めてある他、Fig. 5と同じ表現である。

これを見ても大勢としては、女川と雄勝の水位振動の振幅は、大きい時に共に大きく、小さい時は共に小さいことが多いように見える。しかしFig. 5でも指摘したように、女川で大きいにもかかわらず、雄勝は小さい、あるいはその逆といった期間が存在するとも

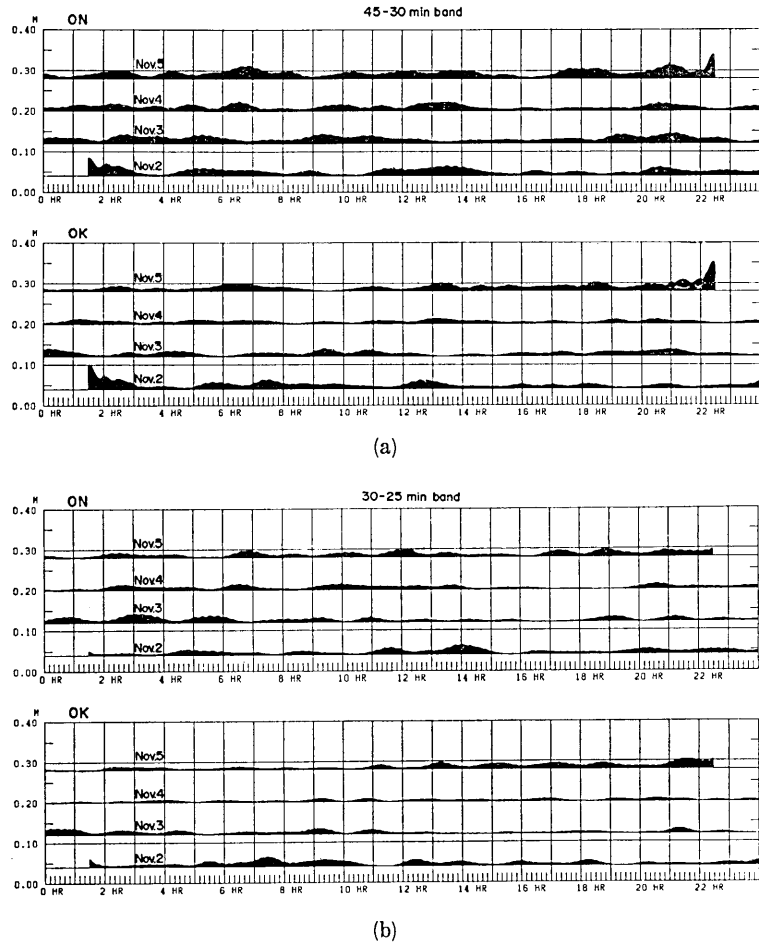


Fig. 6. Time variations of the seiche's amplitude shown by rectifying the filtered records. (a) 45-30 min band. (b) 30-25 min band.

いえる。また 45~30 分帯と 30~25 分帯の振幅の大きさの消長は、両帯域ではほぼ時間的に一致しており、共に大きくなりまた共に小さくなっている。

湾口付近での水位の挙動に注目すると、Fig. 4 に示したように、湾口付近で周期 28 分程度より長い周期では、節は 1 個以下であり、また全体として水面の傾斜はゆるく、ほとんど平面的な変動をしていると考えてもよさそうである。そこで HS, FT, EN のやや細長い三角形の点の観測水位から、これらが 1 つの平面上にあるとして、その平面の傾斜角  $\alpha$  とその方位角を求め、毎分のその値をベクトル表示したものが Fig. 7 である。図は上から 45~36 分帯域 ( $f_L=0.022$  c/min,  $f_H=0.028$  c/min,  $f_{1/2}=0.031$  c/min), 30~25 分帯域 ( $f_L=0.033$  c/min,  $f_H=0.040$  c/min,  $f_{1/2}=0.050$  c/min), 120~72 分帯域 ( $f_L=0.0083$  c/min,  $f_H=0.0139$  c/min,  $f_{1/2}=0.017$  c/min) のフィルター記録から得られた結果で、右上挿入地図の W 方向が縦軸の正方向にとられていて、三角形の平面の傾斜角の大きさを

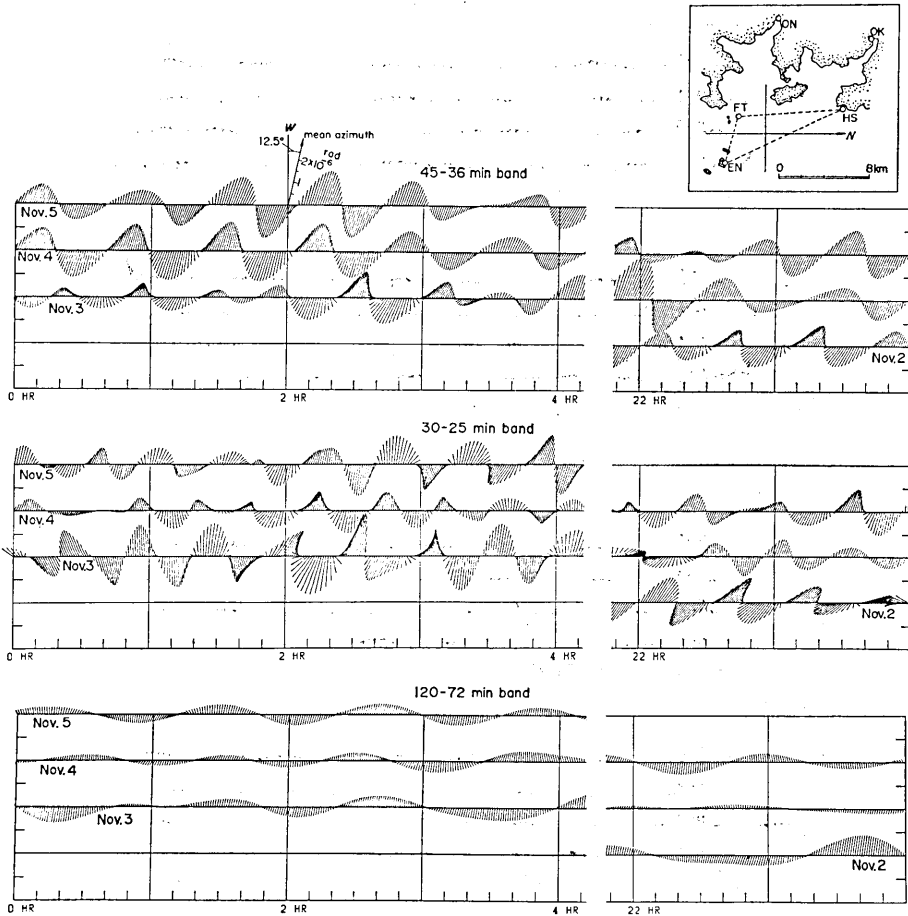


Fig. 7. Filtered slope vectors for selected bands showing the dip angle and the azimuth of inclination of the water surface constructed from the time variation of water levels at HS, FT and EN.

ベクトルの長さにとってある。傾斜の方向は W よりやや北に偏っており、平均して約  $12.5^\circ$  程度ずれている。

これらのベクトルの方向は、回転していくという傾向より、ある方向の傾斜が次第にゆるくなって、ついで逆方向に傾斜していくようになっていて、N-S 方向の成分はかなり小さい。しかし 45~36 分帯と 30~25 分帯とを比較すると、30~25 分帯の方が、傾斜ベクトルが回転する傾向が強く、N-S 成分が多いように見える。

この傾斜ベクトルは、流速に対して位相差があるが、振幅に着目すれば流速に比例する量と考えてよいから、これを  $W12.5^\circ N$  方向の成分（縦方向成分）と、それに直角な  $N12.5^\circ E$  方向の成分（横方向成分）とに分離して、時系列として 45~36 分帯域のみについてカーブを描いてみると Fig. 8 のようになる。かなりきれいな正弦波的な変化をして



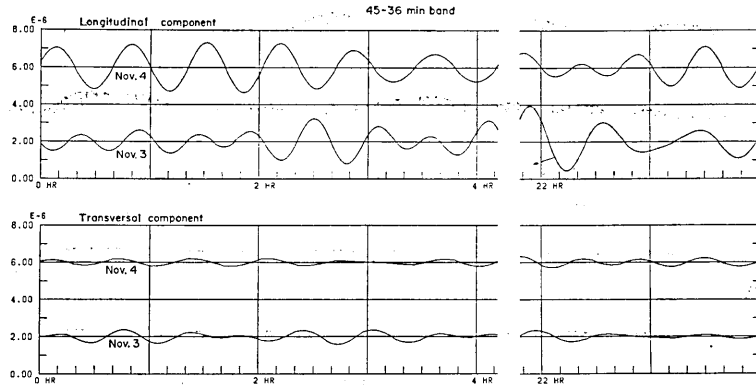


Fig. 8. Longitudinal (W12.5°N) and transversal (N12.5°E) components of the filtered (45-36 min band) slope vector.

いる。このことは湾口水位が平面的な傾斜であらわせるとした仮定が、著しく不自然なものではなかったことをあらわしている。

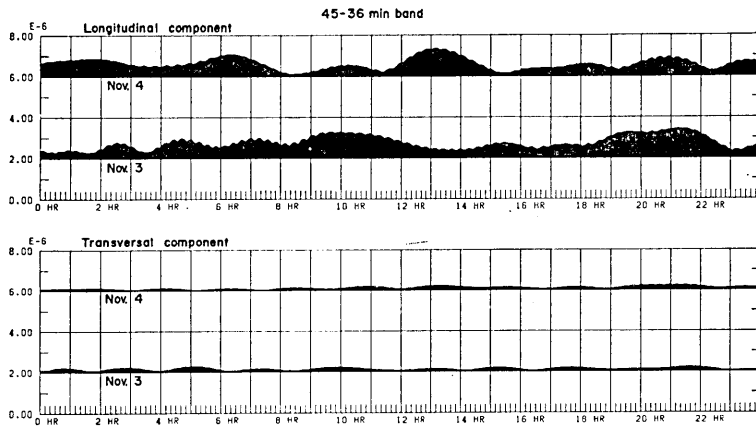
45~36分, 30~25分, 120~72分帯域のそれぞれで、この縦方向成分と横方向成分を整流し、適当に平滑して示すと Fig. 9(a), (b), (c) に示すようになる。いずれも横方向成分が、縦方向成分にくらべてかなり小さいことがわかる。横方向成分と縦方向成分それぞれの2乗の1日間の平均値を求め、それを  $P_y$ ,  $P_x$  であらわすと、11月3日および4日に対して、その比  $P_y/P_x$  が次のようになる。

|           | 11月3日 | 11月4日 |
|-----------|-------|-------|
| 45~36分帯域  | 0.039 | 0.048 |
| 30~25分帯域  | 0.082 | 0.116 |
| 120~72分帯域 | 0.052 | 0.095 |

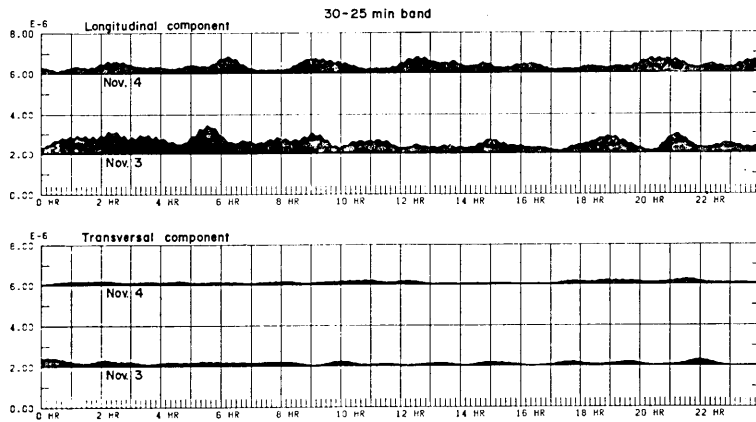
即ち横方向成分のパワーは縦方向成分の4%から12%程度となっている。この横方向成分がすべて両湾の相互作用をあらわしているとはいえないかもしれをいが、少なくとも両湾の振動が相互に寄与していることを示すものと思われる。

### 5. む す び

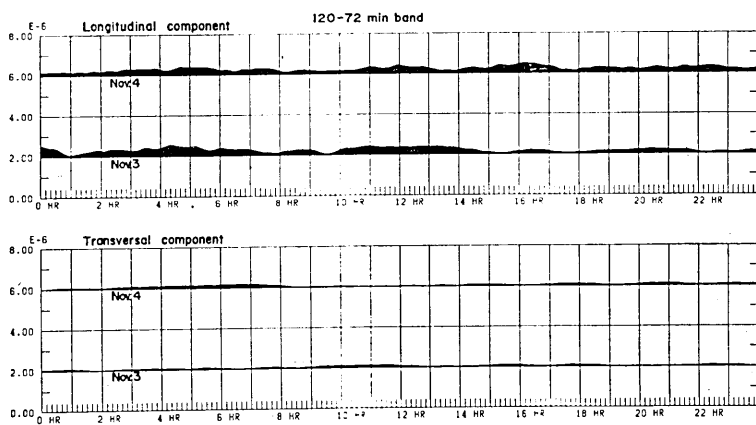
NAKANO and FUJIMOTO (1983) は、同じ大きさの長方形の2湾の連成振動の問題を考察している。その中で2湾の結合係数  $\sigma$  を定義した。ここで一方の湾を閉じた状態で外力を与えて湾水に振動を生じさせておき、閉ざされた方の湾口を突然開放すると、両湾はシーソー的な振動を行い、またやや長い周期で振動の振幅が変化する唸りの現象を生じ、その振幅の増減が両湾で相反的であることを、理論と実験で示している。そして  $\sigma$  はこの唸りの周期から求めることが出来、実験によって  $\sigma$  を求めると、湾の基本振動周期で最も小さく、その周期から外れるに従って大きくなるという結果を得ている。



(a)



(b)



(c)

Fig. 9. Time variations of the amplitudes of the longitudinal and transversal components of the slope vectors. (a) 45-36 min band. (b) 30-25 min band. (c) 120-72 min band.

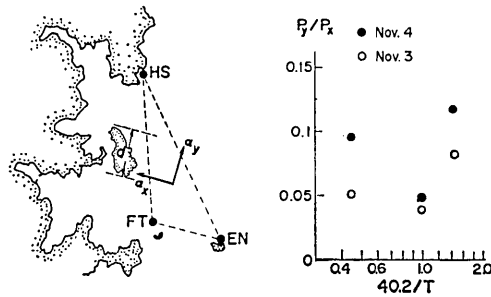


Fig. 10. Ratios of the transversal power  $P_y$  to the longitudinal power  $P_x$  of water volume transports as a function of period.

これに対して今回の観測の結果から女川湾と雄勝湾にシーソーのような振動を生じること、あるいは振動振幅のレベルの消長が両湾で相反するといった現象は、明確には捕えられなかった。しかし湾口付近の流速が、ほぼ湾軸方向に卓越しているけれど、それに直角の方向にもかなりの大きさを持ち、これが両湾の振動に相互に寄与するものとも考えられる。

流速の両方向成分の1日の平均パワー比、前節で述べた  $P_y/P_x$  を、振動周期に対してプロットしてみると Fig. 10 のようになる。ここに周期は基本振動周期を 40.2 分として、それとの比で示してある。図から明らかなように、 $P_y/P_x$  は基本振動周期で最低であり、それより外れた周期では大きくなっている。今回の結果から、両湾口それぞれの流速を求めることは出来ないが、NAKANO and FUJIMOTO の  $\sigma$  と比較することは出来ないが、 $\sigma$  と  $P_y/P_x$  が共に共鳴周期で小さいことは、定性的には同じ意味を持つものと思われる。

今回の観測では、女川湾奥、湾口、雄勝湾奥、湾口、そして江の島の5個所のどの地点においても、パワースペクトルがピークになるのは 90 分、55.4 分、42.4 分の全く等しい周期であり、また相互に同位相であることが注目される。湾が隣合って陸棚に開口しているので、両湾と陸棚の海水は一体の振動系を構成しているから、長周期域では相互に影響し合って振動のモードが決まる筈である。女川湾、雄勝湾のように、その大きさがほぼ似ているような場合には、両湾奥で等しい周期で振動がピークになるような固有周期が出現するものと考えられる。

## 謝 辞

この報告に有益な示唆を与えられた地震研究所梶浦欣二郎教授に謝意を表します。また数値解析にあたっては、東京大学大型計算機センターを利用した。記して謝意を表します。

## 文 献

- AIDA, I., 1967, Water level oscillations on the continental shelf in the vicinity of Miyagi-Enoshima, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, 45, 61-78.  
 AIDA, I., T. HATORI, M. KOYAMA, H. NAGASHIMA and K. KAJIURA, 1972, Long-period waves

- in the vicinity of Onagawa bay (I)—Field measurements in Onagawa and Okachi bays—, *Jour. Oceanogr. Soc. Japan*, **28**, 207-219.
- AIDA, I., 1974, Long-period waves in the vicinity of Onagawa bay (II)—Two-dimensional pattern of bay oscillations—, *Jour. Oceanogr. Soc. Japan*, **30**, 34-41.
- 相田 勇・伊達大喜・坂下至功・小山盛雄, 1981, 津波観測所に設置された新しい長波計測装置 (ER I-V 型津波計), 地震研究所彙報, **56**, 571-585.
- HONDA, K., T. TERADA, Y. YOSHIDA and D. ISHITANI, 1908, Secondary undulations of oceanic tides, *Jour. Coll. Sci., Univ. Tokyo*, **24**.
- NAKANO, M. and N. FUJIMOTO, 1983, Seiches in bays forming a coupled system, *Tsunami—Their Science and Engineering, Terra Sci. Publ. Co., Tokyo*, 339-358.
- 仁科伸彦, 1930, 諸磯・油壺および小網代のセイシュ観測, 地震 I, **2**, 755-768.
- 斎藤正徳, 1978, 漸化式デジタル・フィルターの自動設計, 物理探鉱, **31**, 240-263.

---

*Observations of Water Surface Level in the Vicinity of the  
Mouths of Onagawa and Okachi Bays*

Isamu AIDA, Morio KOYAMA and Michiaki HASHIMOTO  
Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

Simultaneous observations of water surface levels were carried out from Nov. 1, to Nov. 6, 1984 by using 4 digital tide gages installed at the heads and mouths of both Onagawa and Okachi bays in Miyagi-prefecture. Including the routine record at Miyagi-Enoshima tsunami observatory, five data series were analyzed by means of a spectral method and also by a filtering technique to find a mutual interaction, if it exists, between the water oscillations in the neighboring two bays. However, no definite tendency of mutual interaction, such as one becoming weak as the other becomes strong, was recognized.

From the analysis of the slope vector of water surface outside the bays, a power level of water volume transport near the bay mouths was inferred. It is found that this power lies predominantly in the direction of the major axes of the bays, but the power in the direction perpendicular to the major axes amounted to 4 to 12% of the former. This transverse component of the transport power may contribute to the interaction of water body oscillations of the two bays.

---