

# 潮汐波およびその他の外乱に対する 浦の内湾の応答特性について

伴 道一<sup>1</sup>・岸田高幸<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>農学部海洋環境工学研究室・<sup>2</sup>㈱三洋テクノマリン)

## A Study on the Dynamical Response of Uranouchi Bay to Tidal Waves and Other External Disturbances

Michikazu BAN and Takayuki KISHIDA

<sup>1</sup>Laboratory of Maritime Environmental Engineering, Faculty of Agriculture,

<sup>2</sup>SANYO TECHNO MARINE Inc.

**Abstract** : The dynamical response of Uranouchi Bay to the astronomical tidal wave and to the other external disturbances such as short period incident waves and wind drags are investigated by field measurements and by numerical experiments. In order to clarify the tidal characteristics within the bay, the harmonic analyses were carried out on the observed data and the tidal constants of principal tidal constituents were determined. Although the amplitudes were almost the same as those at Kochi Port, the phase lags are somewhat larger than those. The  $M_2$  constituent, which is the most prevailing one, is delayed about thirty minutes compared with the adjacent sea.

On the other hand, the short period waves excited by other disturbances were remarkable in all observations. The first mode oscillation, which has its node of surface fluctuation at an open mouth, will become most significant in bays and ports. In Uranouchi Bay, however, the second mode oscillation has a larger amplitude than that of the first mode. It was observed both in highly and negligibly stratified seasons. The wave period and the vertical range was about 35 minutes and 5 cm respectively. In addition to these principal waves, several ones generated locally and temporally were distinguished by spectral analyses and numerical computations.

**Key word** : Harmonic analysis, Tidal oscillation, Resonance, Finite element method.

### I. ま え が き

浦の内湾は、東西に細長く、入り組んだ枝湾を多く持つ複雑な地形の湾である。湾口部が狭く、水深も湾内に比べて浅く、砂州が発達していることから閉鎖性が強く、湾外との海水交換がされにくい。湾内では、ハマチ養殖が盛んで給餌による有機物の負荷量が多く、汚濁の原因物質は湾内に蓄積される傾向にある。最近では、この有機物負荷が原因となって底層部の貧酸素化、赤潮の発生、そして魚類のへい死が大きな問題となっている。現状を改善するための方策が具体的に検討されているが、その際には、湾の流動環境について正確に把握することが重要である。

一般に、湾内の物質の対流・分散機構や密度流などの内部機構は湾外からの外力に対する湾内水

の応答特性に支配されていると考えられる。これまで、湾内の流動環境を考える際には、潮汐については地理的に近いことから高知港<sup>1)</sup>、あるいは桂浜<sup>2,3)</sup>での既知の潮汐が用いられている。また湾内に発生している短周期の水位変動も、その存在は知られているが、詳しい観測・分析は行われていないようである。

そこで、本研究では浦の内湾において湾内潮位の連続観測を実施し、潮位データの調和分解を行い、湾内の潮汐成分について検討する。さらに、潮汐波より短周期の湾固有の振動性について、観測データの解析から調べる。その結果をもとに、数値実験で湾内水に強制振動と自由振動を発生させて、湾内に発生し得る短周期波の振動モードを調べる。

## II. 潮汐波に対する応答特性

外洋から入射する潮汐波が浦の内湾の中でどのように変化するかを調べるために、湾内で潮位観測を行い、これをもとに主要分潮成分の調和定数を求め、これらを湾外の値(今回は高知港での調和定数)と比較することによって、潮汐波に対する湾の応答特性を検討することにする。そこでまず潮汐の調和分解について簡単に述べる。

### 1. 調和分解法

潮位  $\eta(t)$  は、角速度が  $\omega_r$  ( $r=1, 2, \dots, n$ ) の  $n$  個の分潮の和として、次式のように表現される。

$$\eta(t) = \sum_{r=1}^n f_r H_r \cos(V_{or} + u_r + \omega_r t + \kappa_r) \quad (1)$$

ここで、 $H_r$  は分潮の振幅、 $\kappa_r$  は分潮の遅角、 $\omega_r$  は分潮の角速度、 $t$  は時間である。 $f_r$ 、 $V_{or}$ 、 $u_r$  は検潮所の経度と観測開始時刻が決まれば一義的に決まる量であり、角速度は各分潮に固有な値である。残る振幅と遅角を各分潮に対して求めることを調和分解という。

潮位の調和分解には Darwin 法、T.I. 法、最小自乗法などの種々の方法があるが、本研究では最小自乗法による方法<sup>4,5)</sup>を用いた。まず、(1)式は正弦関数と余関数の線形結合として、

$$\eta(t) = a_0 \cos(\omega_0 t) + a_1 \cos(\omega_1 t) + \dots + a_n \cos(\omega_n t) + b_0 \sin(\omega_0 t) + b_1 \sin(\omega_1 t) + \dots + b_n \sin(\omega_n t) \quad (2)$$

と書き表せる<sup>6)</sup>。ただし  $\omega_0 = 0$  であり、右辺第1項は基本水準面から平均海面までの高さを表す。実測値と計算値との残差の2乗の観測全期間にわたる総和を  $E$  とすると、

$$E = \sum_{i=1}^N \left[ \eta_i - \sum_{r=0}^n \{ a_r \cos(\omega_r t_i) + b_r \sin(\omega_r t_i) \} \right]^2 \quad (3)$$

と表わせる。ここで、 $N$  は潮位データの総数である。よって正規方程式は、

$$\frac{\partial E}{\partial a_m} = \sum_{i=1}^N \left[ \left\{ \eta_i - \sum_{r=0}^N \{ a_r \cos(\omega_r t_i) + b_r \sin(\omega_r t_i) \} \right\} \cos(\omega_m t_i) \right] = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial E}{\partial b_m} = \sum_{i=1}^N \left[ \left\{ \eta_i - \sum_{r=0}^N \{ a_r \cos(\omega_r t_i) + b_r \sin(\omega_r t_i) \} \right\} \sin(\omega_m t_i) \right] = 0 \quad (5)$$

となる。これらを行列表形に書き直すと(6)式のようになる。

$$\begin{pmatrix} CC_{00} & CC_{01} & \cdots & CC_{0n} & SC_{01} & \cdots & SC_{0n} \\ CC_{10} & CC_{11} & \cdots & CC_{1n} & SC_{11} & \cdots & SC_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ CC_{n0} & CC_{n1} & \cdots & CC_{nn} & SC_{n1} & \cdots & SC_{nn} \\ CS_{10} & CS_{11} & \cdots & CS_{1n} & SS_{11} & \cdots & SS_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ CS_{n0} & CS_{n1} & \cdots & CS_{nn} & SS_{n1} & \cdots & SS_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \\ b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \eta C_0 \\ \eta C_1 \\ \vdots \\ \eta C_n \\ \eta S_1 \\ \vdots \\ \eta S_n \end{pmatrix} \quad (6)$$

ただし,

$$\eta C_m = \sum_{i=1}^N \{ \eta_i \cos(\omega_m t_i) \} \quad (m = 0 \sim n)$$

$$\eta S_m = \sum_{i=1}^N \{ \eta_i \sin(\omega_m t_i) \} \quad (m = 1 \sim n)$$

$$CC_{lm} = \sum_{i=1}^N \{ \cos(\omega_l t_i) \cos(\omega_m t_i) \} \quad (l, m = 0 \sim n)$$

$$SS_{lm} = \sum_{i=1}^N \{ \sin(\omega_l t_i) \cos(\omega_m t_i) \} \quad (l, m = 1 \sim n)$$

$$SC_{lm} = \sum_{i=1}^N \{ \sin(\omega_l t_i) \cos(\omega_m t_i) \} \quad (l = 1 \sim n, m = 0 \sim n)$$

$$CS_{lm} = \sum_{i=1}^N \{ \cos(\omega_l t_i) \sin(\omega_m t_i) \} \quad (l = 0 \sim n, m = 1 \sim n)$$

である。よって、(6)式の  $2n+1$  元の連立次方程式を解くことにより、 $a_0 \sim a_n$  と  $b_1 \sim b_n$  を求めることができる。第  $r$  分潮の振幅および遅角は  $a_r, b_r$  を用いて

$$R_r = \sqrt{a_r^2 + b_r^2} \quad (7)$$

$$\zeta_r = \tan^{-1} \left( \frac{b_r}{a_r} \right) \quad (8)$$

と表せる。さらに、(1)式の  $f_r$  と  $V_{0r} + u_r$  観測開始時間と観測場所の経度から求めれば、それぞれの分潮の調和定数を次式により求めることができる。

$$H_r = \frac{R_r}{f_r} \quad (9)$$

$$\kappa_r = V_{0r} + u_r + \zeta_r \quad (10)$$

## 2. 潮位観測

潮位観測を行った場所を Fig. 1 に示す。14日間の連続観測を計4回行った。このうち3回は須崎市浦の内灰方の高知県水産試験場で1991年7月24日～8月9日、8月9日～8月24日、10月25日～11月9日に、残る1回は同光松で11月28日～12月12日に行った。観測には水圧計（豊田工機社製TD4001）とEP-ROM記録装置（コーナシステム社製KADEC-UV）を使用し、後のデータ処理はパーソナルコンピュータ（日本電気社製PC9801n）で行った。

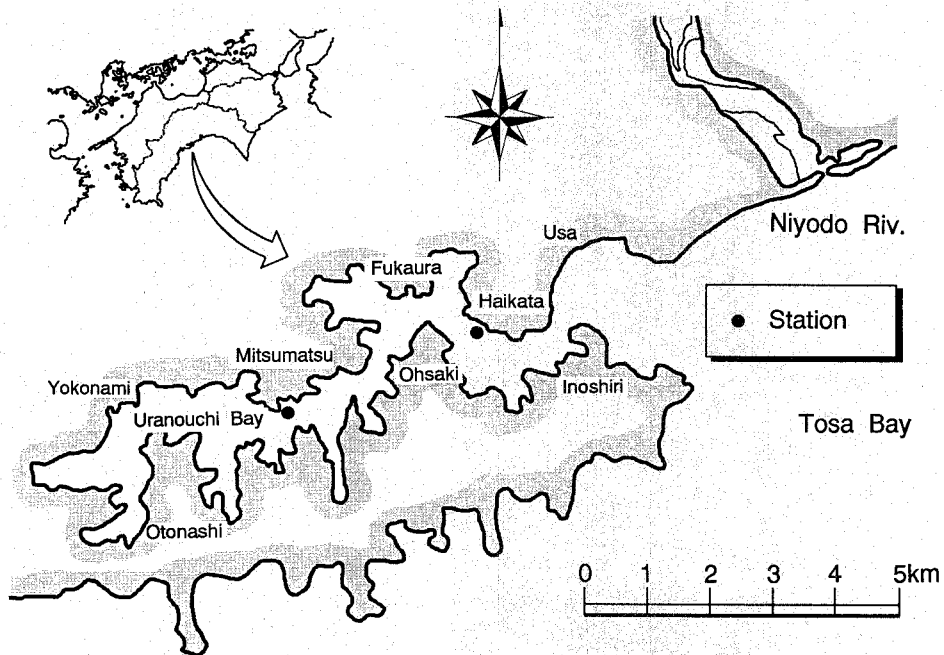


Fig. 1 Observation stations for tidal elevation.

3. 湾内潮汐波の調和分解

主要8分潮と呼ばれる8つの分潮成分について分解した結果を以下に示す。Fig. 2はこれらの振幅を湾外の値<sup>1)</sup>と比較したものである。この図から湾内に入射した潮汐波の大きさはほとんど変化しないことが分かる。しかし、 $M_4$ や $M_{S4}$ のような振幅が小さく周期の短い分潮ほど増幅され、湾内振幅の方が湾外のそれより大きくなる傾向がある。

次にもう一つの調和定数である遅角を比較した結果を Table 1 に示す。表では湾内波が湾外よりどれだけ遅れているかを角度と時間(分)で表している。観測ごとのバラツキは振幅よりも大きい。湾内では振幅の大きい $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ の波はいずれも湾外より遅れ、最も主要な $M_2$ 分潮でも約30分遅れていることが分かる。

今回の一連の観測結果から得られた湾内非調和定数を Table 2 にまとめておく。

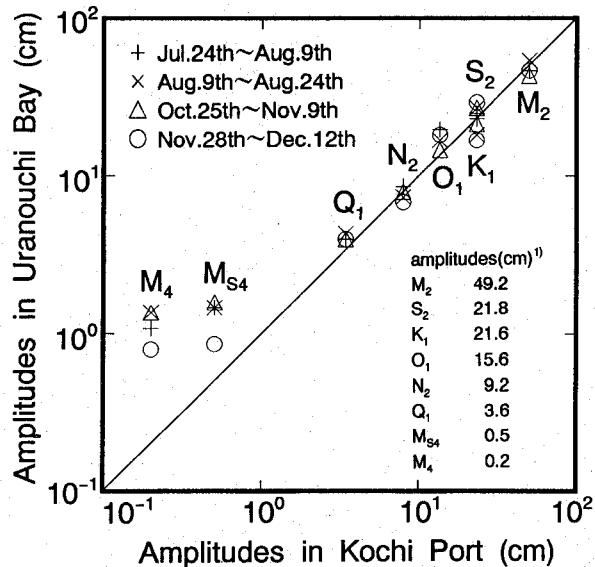


Fig. 2 Comparison of calculated amplitudes of the principal eight tidal constituents in Uranouchi Bay against those at Kochi Port<sup>1)</sup>.

Table 1 Comparison of calculated phase lags of the principal four tidal constituents in Uranouchi Bay against those at Kochi Port<sup>1)</sup>

constituent	Uranouchi Bay (degree)	Kochi Port <sup>1)</sup> (degree)	difference		
			(degree)	(minut)	
$M_2$	I	185.3	10.6	22	
	II	191.1	16.4	34	
	III	216.4	174.7	41.7	86
	IV	189.5	14.8	31	
$S_2$	I	206.1	6.7	13	
	II	221.6	22.2	44	
	III	220.2	199.4	20.8	42
	IV	208.5	9.1	18	
$K_1$	I	198.9	8.4	34	
	II	212.8	21.7	87	
	III	194.3	190.5	3.8	15
	IV	194.0	3.5	14	
$O_1$	I	188.2	20.4	88	
	II	175.0	7.2	31	
	III	189.5	21.7	93	
	IV	187.5	19.7	85	

I:7/25~8/9 II:8/9~8/24 III:10/25~11/9 IV:11/28~12/12

Table 2 Observed non-harmonic tidal constants in Uranouchi Bay

Mean tidal range (spring)	$2(H_m+H_s)$	143.1 cm
Mean tidal range (neap)	$2(H_m-H_s)$	55.7 cm
Averaged tidal range	$2H_m$	99.4 cm
High water interval	$\kappa_m/28.98$	6.51 hour
High water elevation (spring)	$2(H_m+H_s)+H_k+H_o$	183.7 cm
High water elevation (neap)	$2H_m+H_k+H_o$	140.0 cm

$\kappa_m$  is the phase lag of the  $M_2$  constituent, and  $H_m$ ,  $H_s$ ,  $H_k$ ,  $H_o$  are the amplitudes of the  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  constituents respectively.

### Ⅲ. 短周期の応答特性

#### 1. 湾内の定常振動

本章では潮汐周期よりさらに短い周期の変動成分について述べる。前章で得られた8分潮の調和定数をもとに、観測されたデータから潮汐成分を取り除くと、Fig. 3 に示す波形が得られる。上段は8月5日0時～6時、下段は8月17日10時～16時のものである。このように、周期が約30分で振幅が約2.5cmの定常波が発生している。他の観測期間でも、また第4回目の湾中央部での観測においても同様の結果が得られた。

そこでまず潮位変化のパワースペクトルを計算し、成分波のエネルギー分布を求めた結果をFig. 4 に示す。スペクトル推定にはMEM法<sup>7)</sup>を使用した。場所、観測時によらず得られたスペクトルは酷似しており、複数個の定常卓越波の存在が確認できる。前述の卓越波は周期35分のピークに対応していると思われる。その他に周期約90分の振動、そして湾口に近い灰方では18分、湾中央の光松では24分の振動が顕著である。

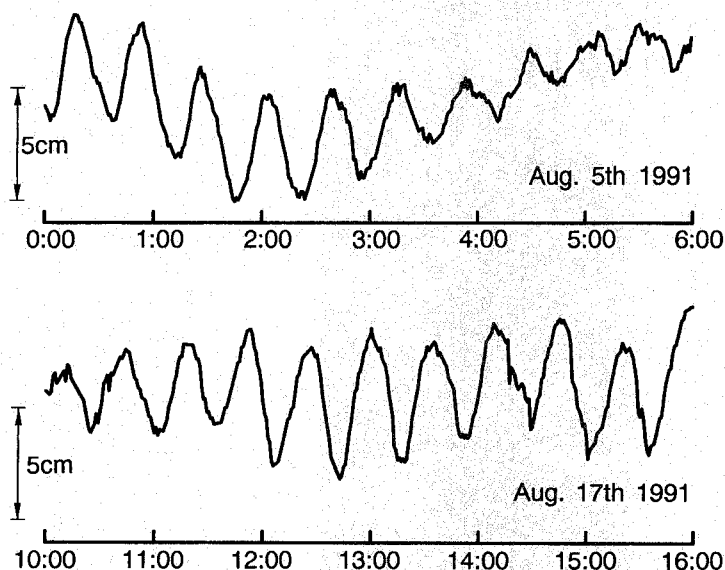


Fig. 3 Short period fluctuations of sea water level involved in observed data; the principal tidal constituents are already excluded.

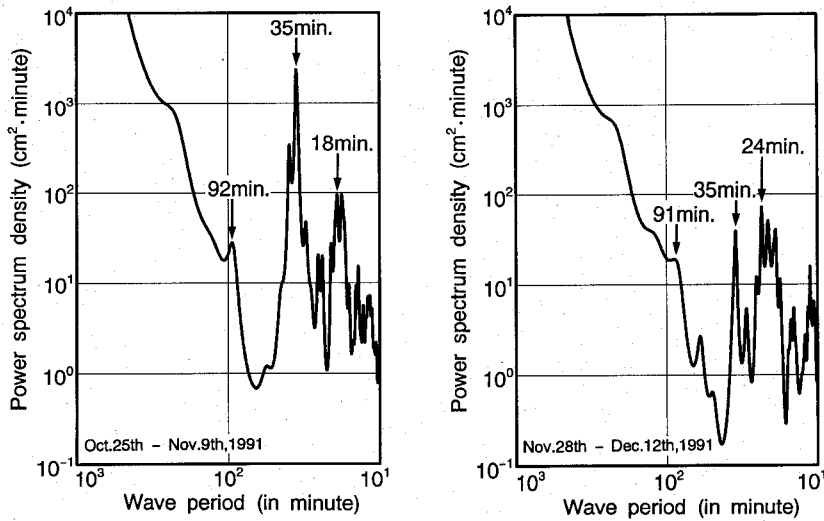


Fig. 4 Power spectra of observed water elevation. Left one is estimated from the data from Oct. 25th until Nov. 9 th, and another one is from Nov. 28th until Dec. 12th in 1991.

## 2. 数値実験による短周期振動の解析

前節で述べた定常振動の振動モードを数値実験<sup>8)</sup>によって調べる。解析には平面二次元浅水波方程式を基礎方程式とする有限要素法<sup>9)</sup>を用い、種々の条件下で湾内に発生し得る定常振動を再現させる。三角形要素による領域分割を Fig. 5 に示す。要素総数は506個、節点総数は788個である。

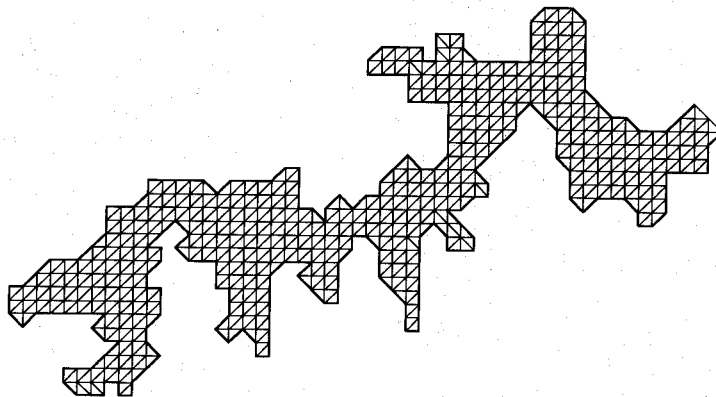


Fig. 5 Finite element space discretization for tidal current computations.

基礎方程式は以下の運動方程式と連続式からなる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v + g \frac{\partial \eta}{\partial x} - K \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{g u \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 (H + \eta)} - \frac{r^2 \rho_a u_o \sqrt{u_o^2 + v_o^2}}{H + \eta} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u + g \frac{\partial \eta}{\partial y} - K \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{g v \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 (H + \eta)} - \frac{r^2 \rho_a v_o \sqrt{u_o^2 + v_o^2}}{H + \eta} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \{ (H + \eta) u \} + \frac{\partial}{\partial y} \{ (H + \eta) v \} = 0 \quad (14)$$

ここで、 $u$  流速の東西成分（東向き正）、 $v$  は流速の南北成分（北向き正）、 $\eta$  は平均水面からの水面偏差、 $H$  は平均水面以下の水深、 $g$  は重力加速度、 $K$  は渦動粘性係数、 $C$  はチェジの摩擦定数、 $r$  は風による摩擦抵抗係数、 $u_o$  は風速の東西成分（東向き正）、 $v_o$  は風速の南北成分（北向き正）、 $\rho_a$  は空気の密度、そして  $f$  は次式で示されるコリオリパラメータ

$$f = 2 \omega \sin \phi$$

$$\omega = 7.27 \times 10^{-5} \text{ rad/sec} \quad (14)$$

である。ここで  $\phi$ 、 $\omega$  はそれぞれ経度と地球の自転の角速度である。また、境界条件は潮位（湾口）境界が(15)式、流速（陸岸）境界が(16)式の形で与えられる。

$$\eta(t) = \hat{\eta}(t) \quad (15)$$

$$V_n = 0 \quad (16)$$

である。ただし、 $\hat{\eta}(t)$  は既知の水位変動を、 $V_n$  は陸岸における法線方向の流速成分である。時間積分には選択集中化法を用いる2段階陽的スキーム<sup>10)</sup>を採用し、時間増分は6秒、集中化係数は0.8を用いた。

### 3. 強制振動モードの数値実験

潮位観測値に周期35分の定常振動が存在することが明らかとなったが、この振動のモードを調べるために、湾口から種々の周期の波を入射させ、これによって湾内に生じる強制振動<sup>11,12)</sup>の振幅を数値実験によって検討する。

湾口で振幅10cmの周期の異なる正弦波を与えて、定常な振動が形成されるまで計算を続ける。この時の湾奥部3点での振幅を入射波の振幅で無次元化したものを、入射波の周期に対してプロット



したものが Fig. 6 である。用いた時間積分スキームが散逸性を有しているために増幅率は1以下になっているが、周期33~35分の時に湾奥での増幅率が大きくなるのが分かる。これは観測値中の卓越周期と同一であり、湾の固有振動周期の一つであると思われる。

Fig. 7 は強制振動周期が35分のときの、湾全体での振幅増幅率の分布を示したものである。湾口から奥に向かうにつれて単調減少し、湾中央部では湾口振幅の1/5と以下となる。しかし湾の最奥部では再び振幅は増大する。この波形を模式的に表わすと、図中の模式図のような単節の第2モードの波であると思われる。

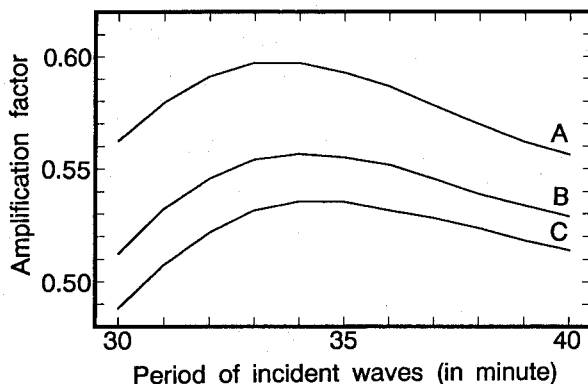
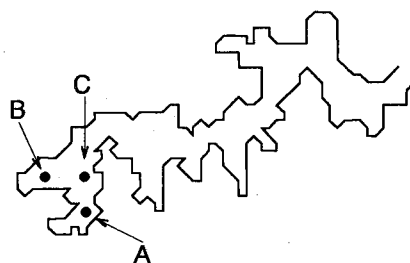


Fig. 6 Computed surface response at the head of Uranouchi Bay against the several forced oscillations.

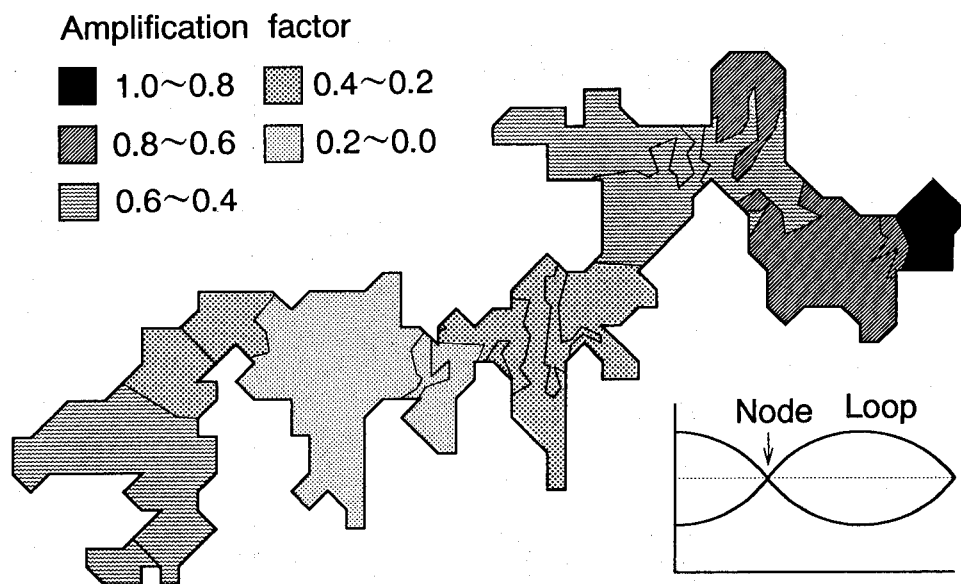


Fig. 7 Computed surface response in Uranouchi Bay against the forced oscillation of 35 minutes wave period.

#### 4. 自由振動モードの数値実験

湾口での  $\eta$  を一定に保ったまま、水面に風によるせん断力を作用させ、湾内に定常な吹送流を発生させる。一定の wind-setup が形成された後に水面せん断力を解消し、水面勾配が消滅するまでの過渡的過程における自由振動解から、湾全体そして湾内の局所的な固有振動を検討する。あらかじめ選定しておいた代表点にて水面変化  $\eta$  を記録しておき、これのパワースペクトルを計算することで、湾内各所での卓越振動周期を求めることができる。

Fig. 8 のそのパワースペクトルを示す。湾口近傍の点を除き、湾全体に周期114分の波が発生している。明らかに湾口で節となり、湾内には節のできないモードであることが分かる。観測値に見られた卓越波（周期90分）と比較して周期は僅かに異なるが、前出の35分周期の約3倍となり、この数値実験で得られた波と観測で得られた波とは同じモードであろうと思われる。

Fig. 8 では湾軸に沿った7点でのパワースペクトルを湾口から順に湾奥へと並べて描いているが、スペクトルピークが現れる周期が、場所によって大きく異なることが理解できる。湾口・湾中央・湾奥と大きく分けると、114分のピークの右側に湾口部では28分、湾中央部では22分、湾奥部では30分のところにピークが現れている。そしてさらに1分前後の短周期の固有振動が局所的に発生する可能性を伺わせる。これらは枝湾単位でも固有の振動が発生し得ることを意味している。

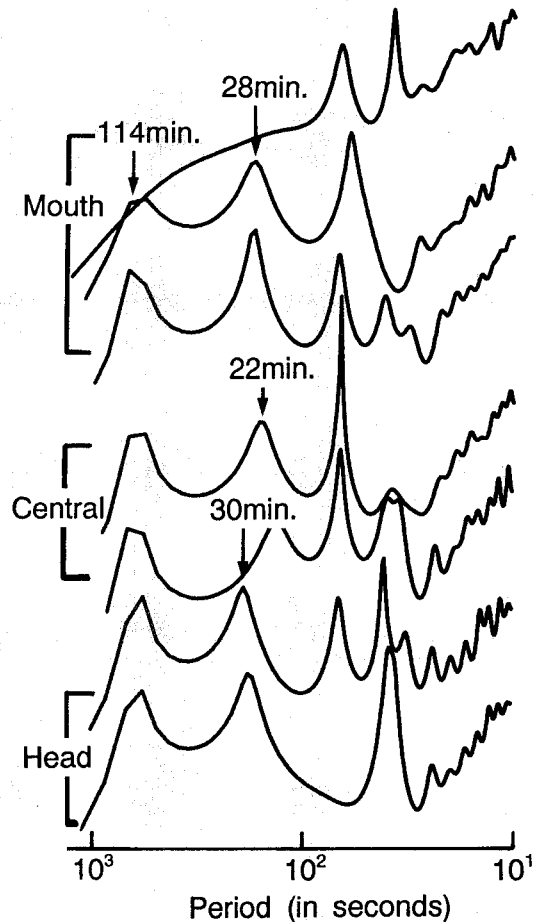


Fig. 8 Spectral peaks in surface elevations computed under free oscillation conditions.

#### IV. あとがき

本研究では浦の内湾固有の物理特性として、湾内の流動環境を決定する最も重要な湾内水の振動に注目し、湾外から入射する潮汐波に対する応答特性と、やはり湾外から作用するより短周期の外力に対する応答特性を、観測と数値実験という2つの手段で詳細に検討した。

湾の規模が小さいこともあって、湾内の潮汐波は湾外のそれとほぼ同じであるが、湾口部が浅く狭いために湾外よりやや位相が遅れていることが明らかになった。短周期の水位変動は、単一波ではなく複数の波が混在する重複波であることがわかった。湾に固有振動が生じるときには、第1モードの成分が最も発生することが多いが<sup>13,14)</sup>、浦の内湾では第2モードの成分が最も卓越している。

この成分によるの水面の上下動は約5cmであり、波浪や潮汐波に比べてかなり小さいが、恒常的に発生し、これによって湾の水が全層にわたって往復運動をしていることを考慮すると、波のもつエネルギーは甚大であり、これが湾の流動・水質環境の形成に果たす役割は大きいと推察される。

浦の内湾では夏の成層期に底部に形成された貧酸素水塊が突発的に水面近くまで上昇し、生け簀で養殖されているハマチが酸素欠乏でへい死するという被害が毎年のように生じている。観測によると、湾外の高塩分・低水温の海水が密度流となって湾深部へ浸入することがこの現象のトリガーとなっているようであるが、この現象の具体的なメカニズムは依然として明らかでない。内部波が局所的に励起され、碎波している可能性も考えられる。今後は、本研究で明らかにすることができた湾全体の、そして枝湾スケールの局所的は固有振動が、夏季成層期の内部波の発生・碎波そして鉛直混合にどのように関わっているかを明らかにすることが肝要である。

### 引用文献

- 1) 海上保安庁水路部, 日本沿岸潮汐調和定数表, 書誌第742号, 113 (1983).
- 2) 海上保安庁水路部, 平成3年潮汐表, 第1巻, 書誌第781号, 121-123 (1991).
- 3) MIYAZAKI, M., KURONUMA, S. and INOUE, T. : Tidal Constants along the Coast of Japan, *The Oceanographical Magazine*, **19** (1), 13-55 (1967).
- 4) 彦坂繁雄・赤木 登・矢野雄幸: 最小自乗法による潮汐調和分解とその精度について, 海上保安庁水路部研究報告, 第1号, 27-31 (1966).
- 5) 村上和男: 最小自乗法による潮汐・潮流の調和分解とその精度, 運輸省港湾枝研資料, 第369号, 1-38 (1981).
- 6) 土木学会: 水理公式集, 昭和60年版, p.556-558, 東京 (1985).
- 7) 日野幹雄: スペクトル解析, p.210-225, 朝倉書店, 東京 (1977).
- 8) GRUBERT, J.P. : Numerical Computations of Two-Dimensional Flows, *Journal of Waterway, Harbors and Coastal Engineering Division*, ASCE, **102**, No.WW 1, 1-12 (1976).
- 9) 伴 道一: 内湾に形成される潮汐残差流について, 平成3年度農業土木学会講演会講演旨集, 276-277 (1991).
- 10) KAWAHARA, M., HIRANO, H., TSUBOTA, K. and INAGAKI, K. : Selective Lumping Finite Element Method For Shallow Water Flow, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, **2**, 89-112 (1982).
- 11) LEE, J.J. : Wave-induced oscillations in harbours of arbitrary geometry, *Journal of Fluid Mechanics*, **45**, part 2, 375-394 (1971).
- 12) LEE, J.J. and RAICHLIN, F. : Oscillation in Harbours with Connected Basins, *Journal of Waterway, Harbors and Coastal Engineering Division*, ASCE, **98**, No.WW 3, 311-332 (1972).
- 13) 合田良実: 長方形および扇形の港の副振動について—フーリエ交換を用いた一解法—, 第10回海岸工学講演会講演集, 53-58 (1963).
- 14) HWANG, L. and TOCK, E.O. : On the oscillation of harbours of arbitrary shape, *Journal of Fluid Mechanics*, **42**, Part 3, 447-464 (1970).
- 15) MILES, J.W. : Resonant response of harbours: an equivalent-circuit analysis, *Journal of Fluid Mechanics*, **46**, part 2, 241-265 (1971).

(平成4年9月30日受理)

(平成4年12月28日発行)

