

静岡県戸田湾のセイシュの観測

東京大学地震研究所	多田卓
東京大学理学部	塚本雅仁
東京大学海洋研究所	{ 上野義和 川島正行
東京大学地震研究所	都司嘉宣
日本電気(株)中央研究所	江川尚志
東京大学理学部	山崎康宏

(平成3年4月1日受理)

要 旨

8ビットのMSXパソコンと超音波式距離計とを組み合わせた水位観測システムを製作し、これを用いて静岡県戸田湾内の3地点において水位同時観測を行った。得られた水位データのスペクトル解析を行った結果、全地点で周期7.6分、2.0分、1.3分の顕著なスペクトル・ピークが認められた。LOOMIS (1975)の方法に従って戸田湾の固有振動モードを数値的に計算し、観測データと比較した結果、観測された7.6分および2.0分周期の振動は、コヒーレンスおよび位相差から判断して、それぞれ戸田湾の第1、第3固有振動モードであると判定された。理論的に存在が期待される周期2.5分の第2モードは検出されなかった。また観測された周期1.3分の振動を理論と対応づけるところまでには至らなかった。

1. はじめに

セイシュ (seiche) は静振とも訳され、湖沼や港湾に起こる定常的な水の振動現象を指している語である。例えば津波や高潮などの長周期波が条件により湾奥で10mを越す大振幅になることがあるのは、外洋から伝播してきた長周期波と湾との共鳴条件が満たされたためにセイシュが励起されたものと解釈することができる。津波のないときにも、湖沼や港湾の水が振動する現象が世界各地で古くから知られており、その多くは低気圧や前線などに伴う小規模な気圧変動、あるいは風が水面に及ぼす応力が原因であると言われている。セイシュの成因に関しては、古典的にはDEFANT (1961; pp. 219-244) に詳しく述べられている。

津波によって励起されたセイシュが陸上に与える被害についてはここで改めて述べるまでもないが、津波のないときのセイシュでも時には2~3mの振幅に達するものが知られており、港湾内の船舶に被害が生じることがある。このようにセイシュは現象自体に科学的興味があると同時に、実用的な防災上の見地からもきわめて重要な意義をもつ現象であるため、これまでに数えきれないほど多くの研究がセイシュに関してなされてきた。

セイシュの観測は東京大学理学部地球物理学科の4年生を対象とした「演習」のテーマの1つとしてすでに3年間継続して行われてきており、3年目となった本研究は、過去2年間の研究の成果をふまえた上で行われた(江川ほか, 1989; 山崎ほか, 1989)。われわれは8ビットのMSXパソコンおよび超音波距離計を組み合わせた水位観測システムを製作し、静岡県戸田湾において3地点水位同時観測を行い、約20時間におよぶ水位データを得た。得られた結果はFFT法によって周波数解析され、スペクトル・ピーク、地点相互間のコヒーレンスおよび位相差が求められた。

一方、LOOMIS (1975)の方法により戸田湾の固有振動モードを数値的に求めた。その際、湾口補正として計算領域を湾口より外海側へ向かって若干広げる必要のあることが確認された。さらに、観測によって得られたスペクトル・ピークと、理論的に期待される固有振動モードとの対応づけを行った。その際、観測で得られた振動周期が理論周期と近い値であることを確認するとともに、異なった地点間のコヒーレンスおよび位相差が理論解の振動パターンと矛盾しないことを確かめた。

この湾は直径約1kmと規模が比較的小さいために少人数でも多点同時観測を行いやすい。また、湾口が比較的小さいので固有振動が発達しやすく、理論との照合が容易である。戸田湾は1854年12月23日(安政元年11月4日)の安政東海地震(M 8.4)のときに最高5.1mの津波に襲われて死者30名の被害を出しており(都司・斎藤, 1985)、本研究は東海地方の津波対策のための一つの資料を提供することになるであろう。

2. MSX パソコン制御超音波式水位計

2.1. 装置概説

われわれが水位計として採用した超音波式水位計は、超音波信号が反射されて戻ってくるまでの時間をもとに、対象物までの距離を測定するものである。水位計を制御するために8ビットのMSXパソコンを用いたのは、MSXパソコンが小型で持ち運びしやすく、低価格であり、しかも水位計の自動制御のために必要十分と思われる機能を備えていると考えたからである。

Fig. 1にMSXパソコン制御超音波式水位計のシステム構成図を示す。設計にあたっては、天良・矢野(1987)を参考にした。およその作動原理は以下のとおりである。

8ビットMSXパソコンからインターフェイスおよびポートコネクタを通してパルス信号が送られる。送られてきたパルス信号に応じて、水位計(supersonic water level gauge)の発信器から超音波パルスの信号が海面に向けて発射される。海面で反射した超音波パルスは、水位計の受感部で受信され、往復に要した時間から海面までの距離が測定される。距離のデータはMSXパソコンに戻され、フロッピーディスクに記録される。正常に記録がとれているかの確認・監視(monitors)用として、MSXパソコンに市販のテレビを接続した。

本システムの特徴の一つとして、MSXパソコン、インターフェイス部およびポートコネクタを一体と見たとき、これらがデジタル信号を汎用的に受け付けられるように製作した点あげられる。従って、Fig. 1には超音波式水位計を取り付けた場合を示してある

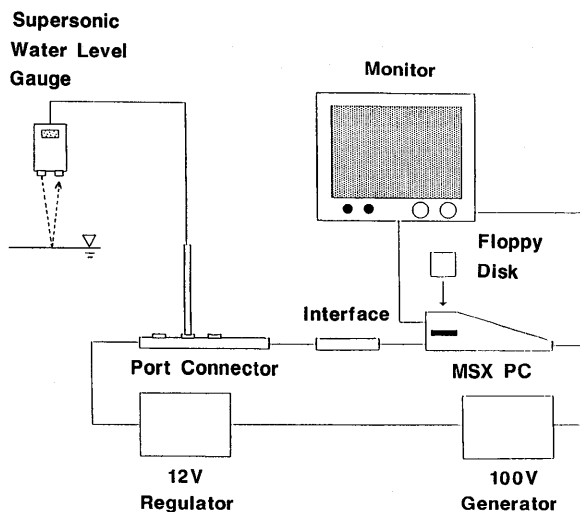


Fig. 1. A total overview of the sea level observation system.

が、例えばデジタル信号化した温度計や風向風速計をポートコネクタに取り付けることもできる。本システムのポートコネクタは、同時に複数個の信号を受信・記録することも可能である。われわれの製作した装置では、4チャンネルの同時受信ができるようにし、水位・気温・風向風速の観測記録を並行して行った。

本システムは100V電源（商用電源またはガソリン発電機）により作動する。本システムの全体像はFig. 2の写真に示したとおりであり、海岸での本システムの設置および撤収は、2~3人でも20~30分のあいだに行うことができる。

なお、ここでポートコネクタと呼んだもの（2.2節に説明する）は、書物によってはPESB (Physics Education Standard Bus), または単に「バス」とも呼ばれている。

2.2. インターフェイス部及びポートコネクタ

インターフェイス部 (Fig. 3) の主な機能は、ポートコネクタに接続した測器とパソコンとのデジタル・データの受け渡しとその制御、データの受渡しをするポートの選択をするためのアドレスのデコード、パソコン側から来る4MHzのクロックを1MHzに分周することなどである。

ポートコネクタ (Fig. 4) は、インターフェイス部からの信号線と5VとGND, 12V電源からの+12V, -12Vと測器とを、定められた寸法のコネクタを用いて定められた配線順序で接続するためのものである。

2.3. 超音波式水位計

超音波式水位計の設計にあたっては、秋月電子通商の「超音波デジタル距離計キット」を参考にした。この回路はデジタル信号を扱うデジタル部 (Fig. 5) と、主にアナログ的な信号を扱うアナログ部 (Fig. 6) とに分かれていて、長さ約2mのケーブルで互いに結ばれている。以下デジタル部の動作を時間を追って説明する。

距離測定にかかわる電子回路のタイミング・チャートは、Fig. 7に示したようになる。

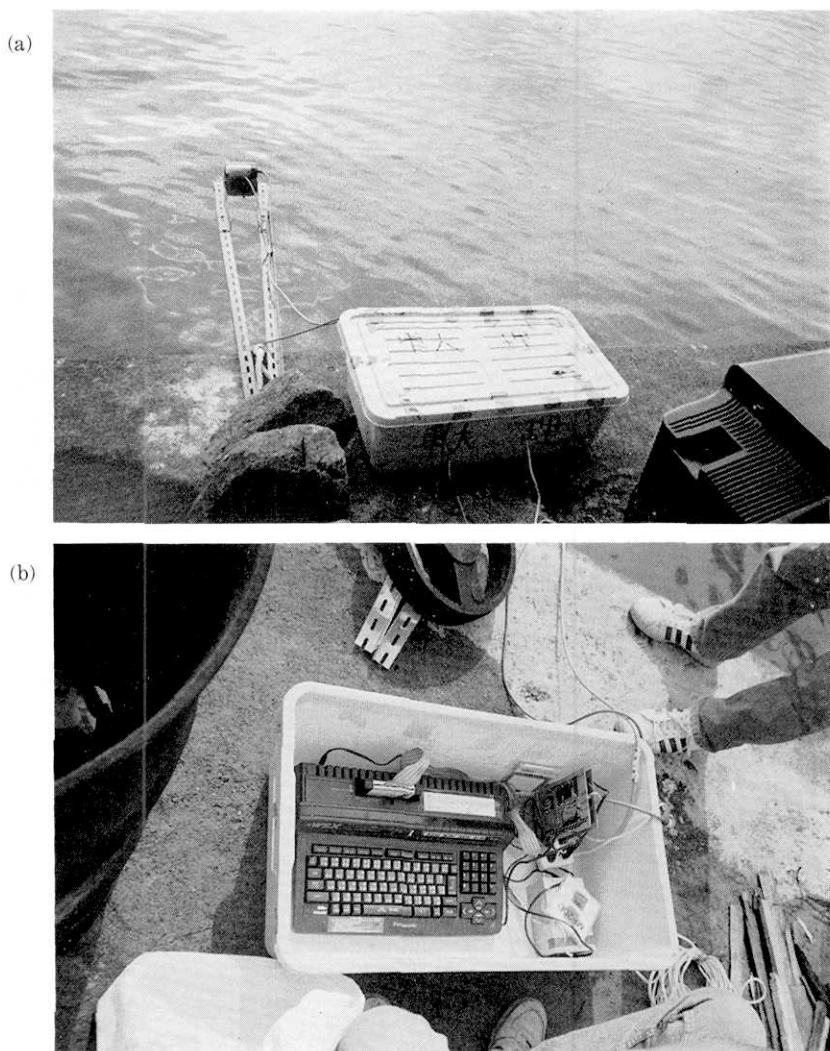


Fig. 2. Photographs of the sea level gauge used in the observations at Heda Bay. (a), the total overview. The apparatus stretching out over the sea is the supersonic-type water level gauge. The MSX personal computer is kept in the container; (b), the inside of the container.

すなわち、MSX パソコンを BASIC 言語で動作させることにより、1 秒に 1 回の割合で (1) のような「スタート・パルス」を発生する。このスタート・パルスをゲートとして用いることにより、時間の計測を開始し、(2) のような 40 kHz の超音波信号が 1 秒に 1 回の割合で、ごく短時間ずつ発信される。超音波受信用のセンサは (3) のような信号を感知する。ここで図中の (a) は送信部から受信部へ直接やってきた直達波であり、(b) が海面からの反射波に相当する。(5) に示すようなコンパレータ・キャンセル信号を用いて送信部から受信部への直達波を排除し、また一定のレベルに達しない弱い信号も排除することによって

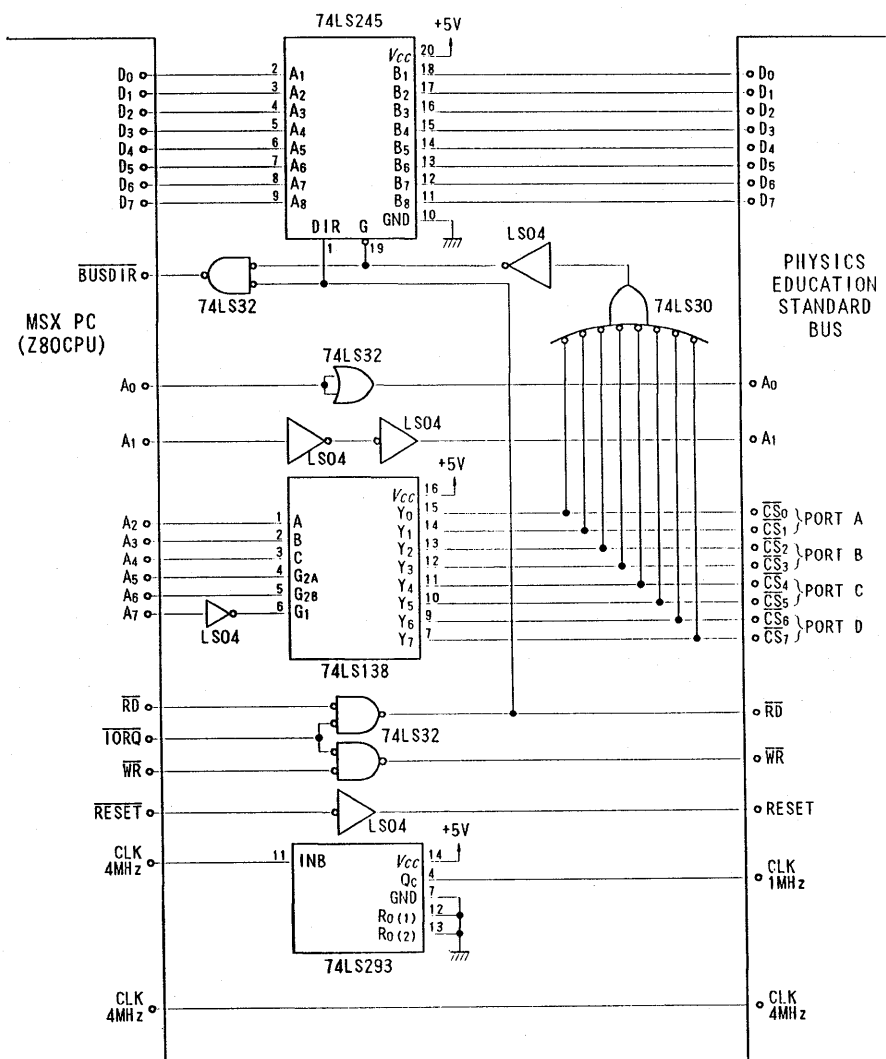


Fig. 3. The electronic circuit of the "interface" (see Fig. 1).

(4)、最終的に (6) のような「受信信号」が得られる。受信信号を得た段階で時間の計測を終了し、パソコン側に計測終了を知らせる。計測終了を知らされたパソコンはデータをRAM上に記録する。スタート・パルスが発生してから受信信号が感知されるまでの時間(7)が対象物までの距離に相当するのであるが、この時間は、(8)のような1MHzクロック・パルスのカウント数という形で測定・記録される(9)。測定されたデータは1時間に1回の割で、まとめてフロッピーディスク(3.5インチ)に書き出される。われわれの装置ではこの書き出しに約1分を要し、その間計測の中断を生じた。

データは本来2バイト正整数であるが、これをASCIIコードのテキスト・データの形ではなく、その数字をキャラクター・コードの形に変換・圧縮して収録したため、水位の

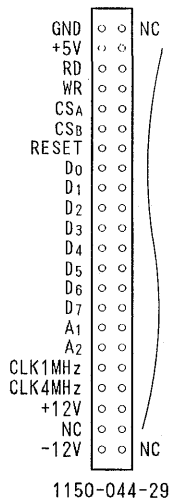


Fig. 4. The terminal allocation map of the "port connector" (see Fig. 1).

全てアナログ信号を発するので、A/D コンバータ (工業規格 ADC0809) を用いてデジタル信号に変換したあとでポートコネクタにつないである。この A/D コンバータは最高 8 つまでの異なるアナログ信号を処理できるので、温度センサ、風速計、風向計の 3 つを 1 つのボードで処理した。

3. 野外觀測

1990 年 9 月 16 日から 17 日にかけて、静岡県伊豆半島西岸の戸田湾において、前述の MSX 制御超音波式水位計を用いた 3 地点水位同時観測を行った。戸田湾の地勢および 3 つの観測地点の位置を Fig. 8 に示す。観測を行った第 1 地点は東京大学戸田寮前の突堤の南側、第 2 地点は戸田港に近い戸田みやげセンターの裏の護岸面、第 3 地点は戸田造船 (株) の造船所の敷地内護岸上である。これら 3 地点の岸壁はいずれも、ほぼ垂直に近いコンクリートの壁面であった。第 2 地点、第 3 地点では 100 V 商用電源の供給を受け、第 1 地点では 300 W の発電機を用いた。観測を行った 9 月 16 日 21 時の地上気圧配置は Fig. 9 に示すとおりであり、南海上の台風 19 号から伝わってくる長波によりセイシュが励起されやすくなっていることが期待されていた。

われわれは水位のほかにもさらに、第 1 地点において風向風速を、また各地点で音速の温度較正のために気温を、それぞれ測定した。しかし残念ながら温度センサに直射日光が当たったり、また温度センサのインターフェイス自体に故障があったりしたため、気温データの採取はうまくゆかなかった。従って、今回の水位データには大気温度較正を行っていない。しかし温度変化の時間スケールは数時間程度であるため、周期数分程度の振動を解析するためには温度変化の影響は十分無視することができる。

観測データの記録にあたっては、毎正時ごとに直前 1 時間分のデータが 1 つのファイルとしてフロッピーディスクに書き込まれた。採取された生のデータのうち、ハードウェア

データだけであれば、原理的には 4 日に 1 回程度フロッピーディスク (2 DD タイプ、容量 640 KB) を交換するだけで水位の連続観測を行うことが可能である。ただしわれわれの観測では、計測状況の監視のために 1 日に 2~3 度の割合でフロッピーディスクを交換した。細かい凹凸のある海面までの距離を測定する場合、どの場所までの距離が測定されているのかがわからないという問題点はあるが、原理的には 1 mm 程度の精度で水位データを採取することができる。

2.4. 温度計、風速計、風向計

温度センサ、風速計、風向計は

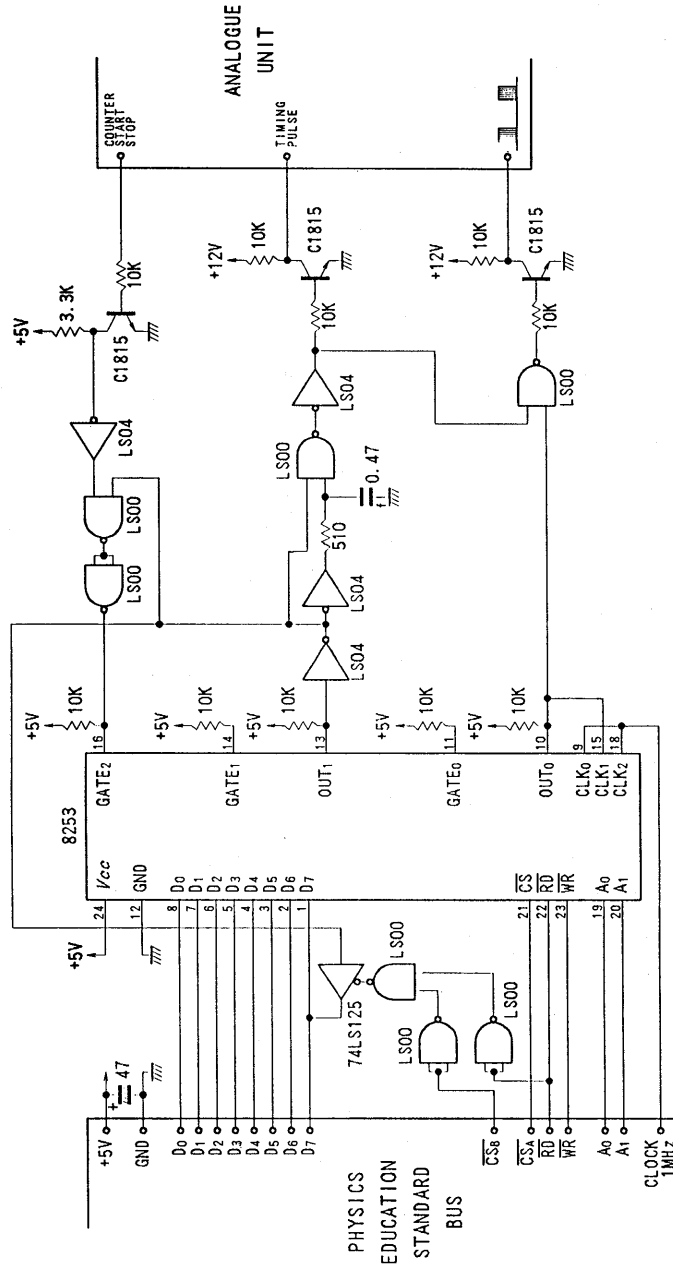


Fig. 5. The electronic circuit of the digital part of the supersonic water level gauge (see Fig. 1).

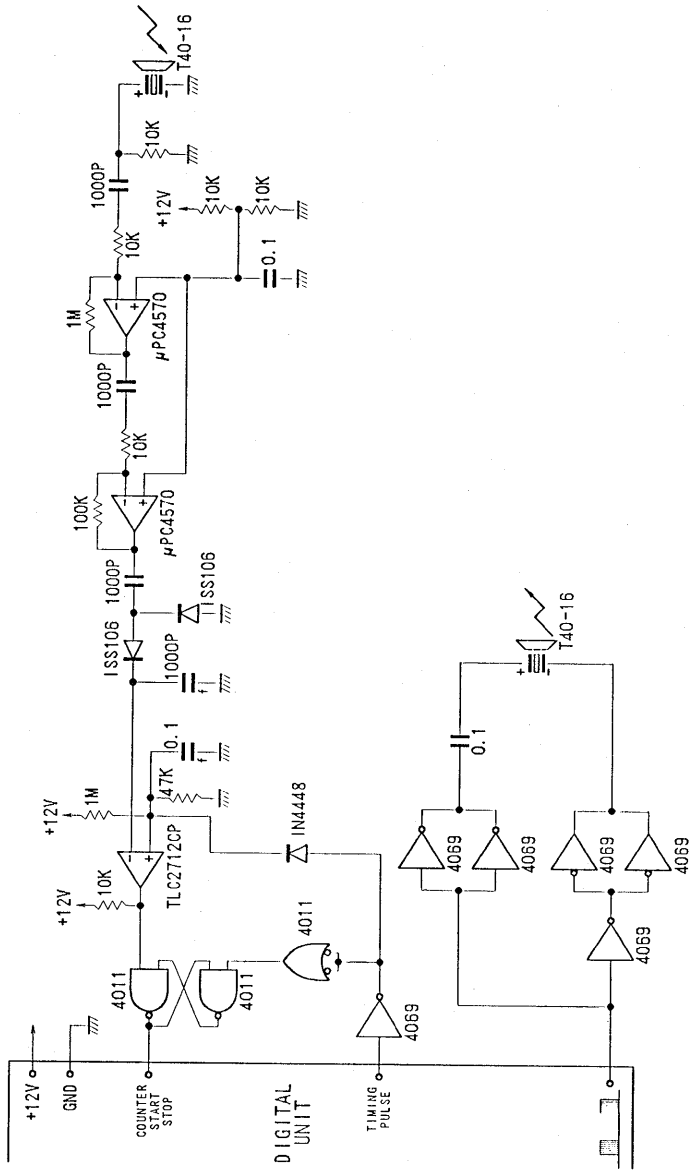


Fig. 6. The electronic circuit of the analog part of the supersonic water level gauge (see Fig. 1)

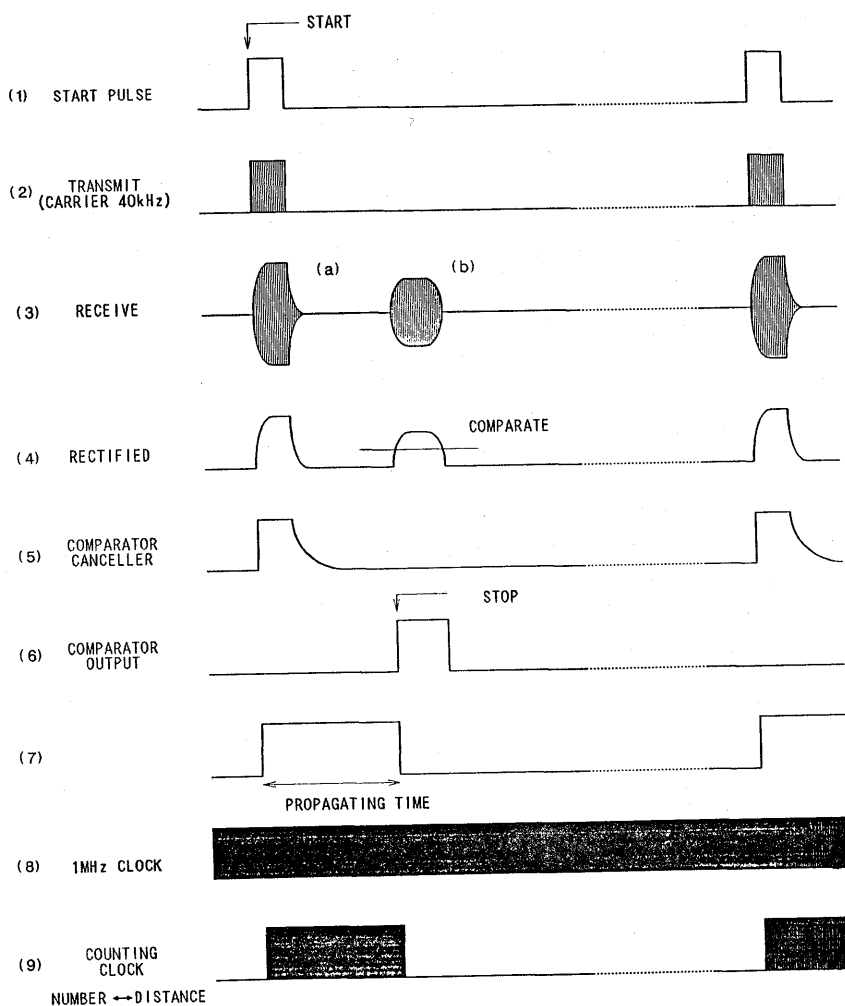


Fig. 7. The timing chart of the electronic circuit of the supersonic water level gauge.

に原因があると思われるスパイク状の異常データは除去した (Fig. 10). この水位計の測定可能範囲は、水位計からの距離がおおよそ 30 cm 以上 3 m 以下であるが、水位が上がりすぎて水位計の測定可能範囲をはみ出せたり、逆に水位が下がりすぎて水位計が海面ではなく岸壁からの反射波を読んでしまったことにより、正しく海面水位が測定できなかった時間帯がある。水位の上がりすぎ・下がりすぎや機器の故障(第2地点)により、海面までの距離が正しく測られなかったデータをすべて排除した結果、Fig. 11 に太線で示した時間帯のデータのみが解析対象になり得ると判断した。本論文においてはこのうち、16日 19~20時の地点2および3データと、16日 21~22時の地点1および2のデータと、あわせて4つのファイルのデータを解析した結果を紹介する。

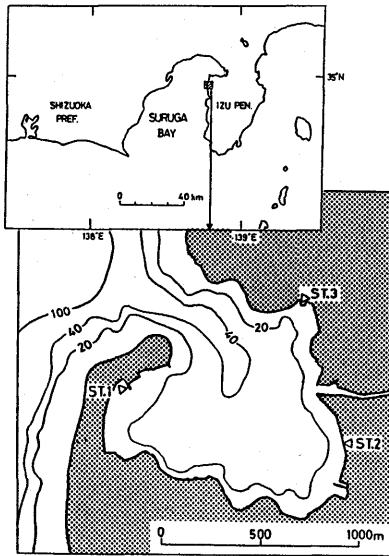


Fig. 8. A map showing the position and bathymetry of Heda Bay, Shizuoka Prefecture.

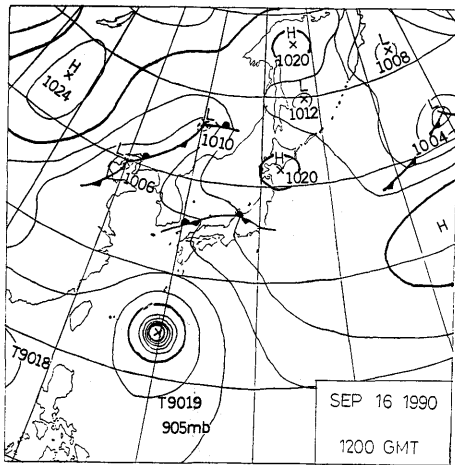


Fig. 9. The weather chart at 21 h 00 m, Sep. 16, 1990. There is a very powerful typhoon to the south of Japan.

点相互間のコヒーレンスの値も高くなっている。7.6分および1.3分のモードは全地点同位相、2.0分のモードは地点2のみ逆位相となっていることがわかる。

4. 理論計算

湖沼や港湾 (basin) のセイシュ振動の周期とモードを計算することは、セイシュ研究に

これら4つのファイルのデータに対し、上述の原因による異常データ除去のために次のような操作を行った。

(1) 超音波式水位計から海面までの距離が10 cmに満たないか、あるいは5 mを上回るデータは除き、その直前のデータで置き換えた。

(2) データは1秒間隔でとられている。30個(30秒間)のデータの移動平均をとったが、その際、おのおの30個のデータの中で(平均±標準偏差)の範囲に入らない値は除いた。

(3) 主として潮汐に起因する潮位変動成分を最小自乗法によって2次回帰曲線にあてはめ、移動平均のデータからそれを減算して除去した。

以上の手続きにより調整・平滑化したデータを用いて、ファイルごとにFFT法によってパワー・スペクトルを求め、あわせて同日同時刻の異なる2地点間のコヒーレンスおよび位相差を計算した。計算にあたっては、日野(1977)のプログラムを参考にし、スペクトルの平滑化を行った。計算の結果をFigs. 12~14に示す。

図より明らかのように、全地点で周期7.6分、2.0分、1.3分の位置に顕著なスペクトル・ピークが認められ、これらの位置では地

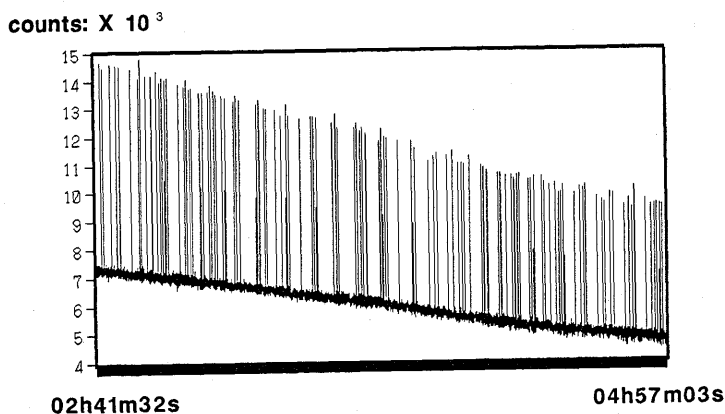


Fig. 10. An example of the raw sea level data with spike-shaped anomalies: a data set obtained at St. 3 on Aug. 8, 1990, on another excursion to Heda Bay. The ordinate and abscissa correspond to sea level and time, respectively.

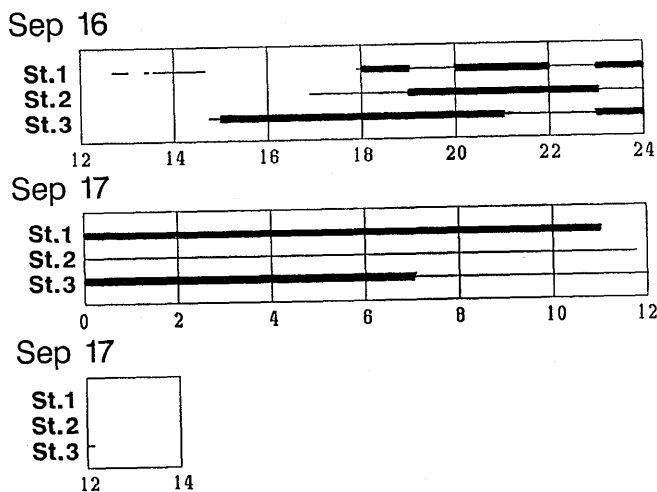


Fig. 11. A diagram showing the time period during which observations were carried out. Thick lines correspond to data fit for analysis, and thin lines to anomalous data unfit for analysis.

おいてつねに最大のテーマの一つであった。今世紀初頭以来、任意の形状および水深分布をもつ basin のセイシュすなわち水面の固有振動を求めるさまざまな数値計算法が、主として1次元モデルを中心に数多くの研究者たちによって発展せられ、多くの basin において理論と観測との間にすぐれた一致を見るに至ったが、その間の事情は DEFANT (1961; pp. 142-244) に詳しい。しかしこれらの方法は計算に多大な労力を要するばかりでなく、basin 内の水の2次元的な挙動を説明することが難しいという共通の弱点を持っていた。電子計算機の発達に伴って、1960年代後半からは2次元モデルを用いたさまざまな数値

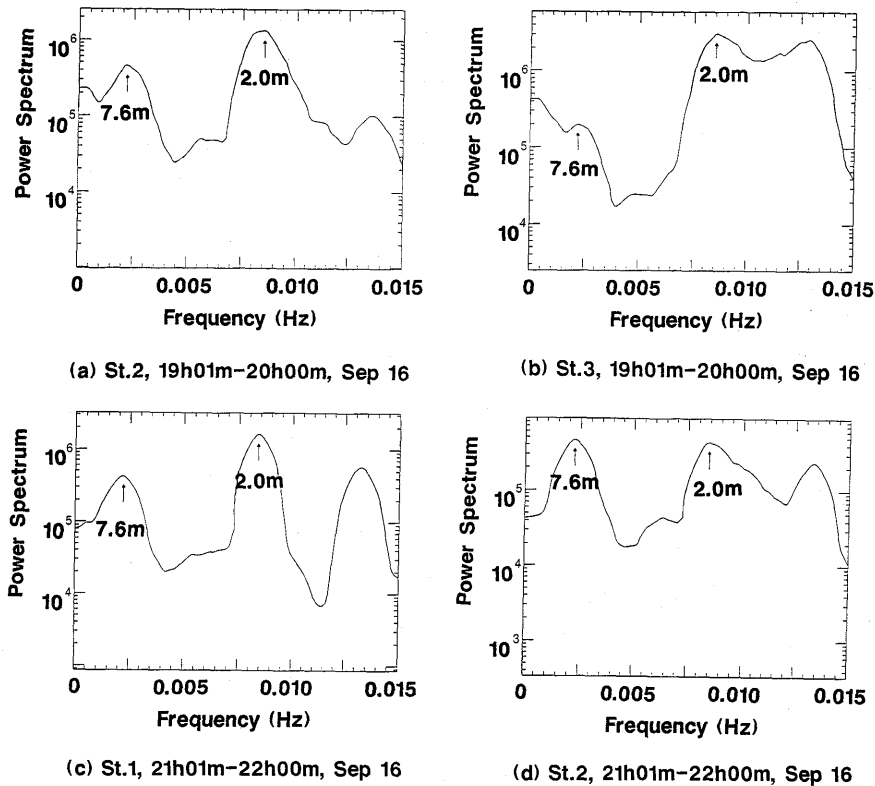


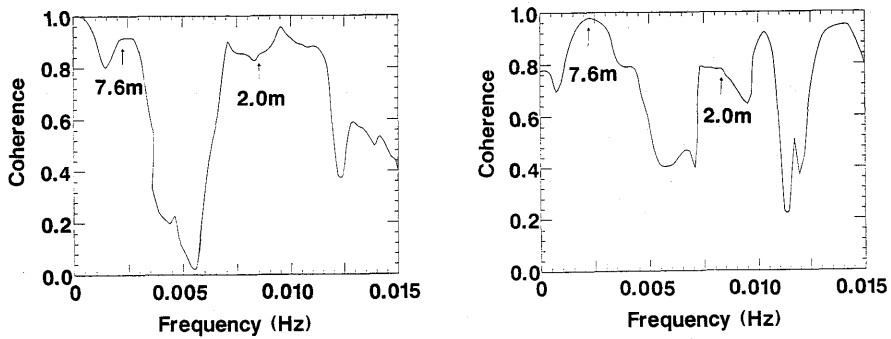
Fig. 12. Power spectra obtained. (a), at St. 2 for the period 19 h 01 m-20 h 00 m, Sep. 16, 1990; (b), St. 3, 19 h 01 m-20 h 00 m, Sep. 16; (c), St. 1, 21 h 01 m-22 h 00 m, Sep. 16; (d), St. 2, 21 h 01 m-22 h 00 m, Sep. 16.

計算法が試みられるようになった。一方で同じ頃から、観測された潮位記録に対してスペクトル解析を行う手法も確立されて、それまでは主として潮位記録からの直接の読み取りに頼っていた振動周期の決定を、数学的により厳密に行うことが可能になった。60年代末を中心に提唱されたさまざまな数値計算法については、WILSON (1972) に詳しい。

1970年代に入り、basinのセイシュの数値計算法は急速に発展した。自然に存在するbasinのセイシュの計算においては多くの場合、粘性およびその他の非線形項を無視した方程式系を考慮すればよい(DEFANT, 1961; pp. 151-160)。地球自転を考慮した線形の浅水波の方程式はLaplaceの潮汐方程式(tidal equations)と呼ばれ、次のように書き表される。

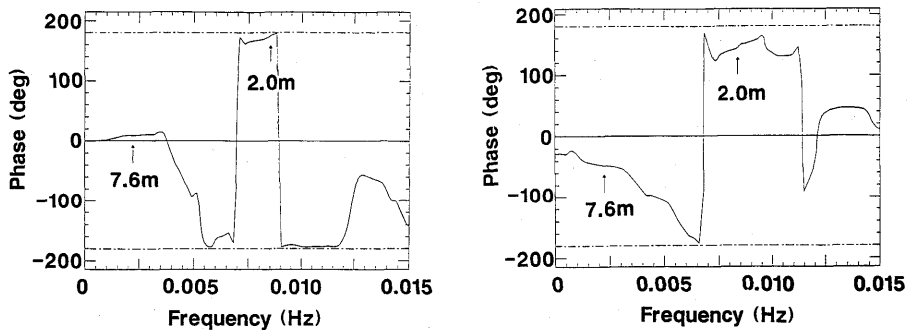
$$\frac{\partial \mathbf{a}}{\partial t} = \mathcal{L} \mathbf{a}, \quad \mathbf{a} \equiv \begin{pmatrix} v \\ \zeta \end{pmatrix}, \quad \mathcal{L} \equiv \begin{pmatrix} -f \times & -g \nabla \\ -\nabla \cdot h & 0 \end{pmatrix}, \quad \nabla \equiv \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right) \quad (1)$$

ここで v は流体粒子の水平速度、 ζ は水面の変位、 f は Coriolis パラメータ、 h は水深、 g は重力加速度である。運動の時間スケールが Coriolis の慣性周期



(a) Sts.2 and 3, 19h01m-20h00m, Sep 16 (b) Sts.1 and 2, 21h01m-22h00m, Sep 16

Fig. 13. The coherence diagrams. (a), between Sts. 2 and 3 for the period 19 h 01 m-20 h 00 m, Sep. 16; (b), Sts. 1 and 2, 21 h 01 m-22 h 00 m, Sep. 16.



(a) Sts.2 and 3, 19h01m-20h00m, Sep 16 (b) Sts.1 and 2, 21h01m-22h00m, Sep 16

Fig. 14. The phase delay diagrams. (a), between Sts. 2 and 3 for the period 19 h 01 m-20 h 00 m, Sep. 16; (b), Sts. 1 and 2, 21 h 01 m-22 h 00 m, Sep. 16.

$$\frac{2\pi}{f} = \frac{12 \text{ [hours]}}{\sin \phi}$$

より十分小さいときには、地球の回転効果を見捨て $f=0$ とおくことができる。1970年代以降に提案されたセイシュの数値計算法は、回転効果を考慮に入れるか否かで大きく2つに分けられ、その上で方程式(1)を扱うにあたり

- (1) 浅水波の式(1)を解析的あるいは数値的に直接解いて basin の応答を求める
- (2) 演算子 \mathcal{L} の固有値問題を有限差分法によって解く
- (3) 演算子 \mathcal{L} の固有値問題を有限要素法によって解く

という3つのアプローチのいずれを用いるかによって、全部で6つのカテゴリーに分類することができる。

われわれが研究対象としている戸田湾の固有振動の周期は数分のオーダーであるので、地球の回転効果は見捨てることができる。われわれは戸田湾の固有振動を求めるにあつ

て, LOOMIS (1975) に従い, 回転効果を無視した演算子 \mathcal{L} の固有値問題を有限差分法によって解く方法をとった. その詳細を以下に示す.

地球の回転効果が無視できるときには, Laplace の潮汐方程式 (1) から v の 2 成分を消去し, ζ が $\exp(i\omega t)$ に比例すると仮定すると, 次の式が得られる.

$$\zeta = \frac{g}{\omega^2} \nabla \cdot (h \nabla \zeta) \quad (2)$$

方程式 (2) は, 右辺の演算子 $(g/\omega^2) \nabla \cdot (h \nabla)$ に対する固有値問題である. 固有値に対応する ω の値が basin の固有振動の角振動数を, 固有ベクトルに対応する水位 ζ の水平分布が固有振動のモードを表している. 方程式 (2) を間隔 l の正方形格子によって差分化すれば

$$\begin{aligned} \frac{l^2}{g} \omega^2 \zeta_{i,j} = & \frac{h_{i+1,j} + h_{i,j}}{2} \zeta_{i+1,j} + \frac{h_{i-1,j} + h_{i,j}}{2} \zeta_{i-1,j} \\ & + \frac{h_{i,j} + h_{i,j+1}}{2} \zeta_{i,j+1} + \frac{h_{i,j} + h_{i,j-1}}{2} \zeta_{i,j-1} \\ & - \left(2h_{i,j} + \frac{h_{i+1,j} + h_{i-1,j} + h_{i,j+1} + h_{i,j-1}}{2} \right) \zeta_{i,j} \end{aligned} \quad (3)$$

となる. すなわち $\zeta_{i,j}$ は自分自身と, 隣接する東西南北 4 つの格子, あわせて 5 つの格子成分のあいだの線形関係で表されることになる. ここで計算領域内にあるすべての格子点 (i, j) に一元的に通し番号 $1, 2, \dots, N$ をつければ, 式 (3) は

$$\frac{l^2}{g} \omega^2 \zeta_k = \sum_l H_{k,l} \zeta_l \quad (k=1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

という形に書き表すことができる. ここで $H_{k,l}$ は $N \times N$ 実対称行列 \mathbf{H} の (k, l) 成分であり, \mathbf{H} はどの行・どの列をとっても線形関係にある 5 個の要素以外はすべて 0 であるような疎行列になっている. こうして basin の固有振動の周期とモードを求める問題は, 式 (4) の $(l^2/g)\omega^2$ を固有値とする実対称行列 \mathbf{H} の固有値問題に帰着される.

方程式 (4) を解くためには, 計算領域の境界において適当な境界条件を与える必要がある. 岸における境界条件は, 完全反射を仮定するならば

$$\frac{\partial \zeta}{\partial n} = 0 \quad (5)$$

となる. ここで左辺は岸に対する法線方向に沿った微分を表す. もしも式 (3) において格子点 (i, j) が岸に隣接しており, $(i+1, j)$ が陸上すなわち計算領域外にあるならば, 仮想的に $\zeta_{i,j} = \zeta_{i+1,j}$ とおき, 式 (3) を次のような形に書き換えることによって, 条件 (5) は自動的に満足される.

$$\begin{aligned} \frac{l^2}{g} \omega^2 \zeta_{i,j} = & \frac{h_{i-1,j} + h_{i,j}}{2} \zeta_{i-1,j} \\ & + \frac{h_{i,j} + h_{i,j+1}}{2} \zeta_{i,j+1} + \frac{h_{i,j} + h_{i,j-1}}{2} \zeta_{i,j-1} \\ & - \left(\frac{3}{2} h_{i,j} + \frac{h_{i-1,j} + h_{i,j+1} + h_{i,j-1}}{2} \right) \zeta_{i,j}. \end{aligned} \quad (6)$$

これはまた、式 (3) において岸をはさむ反対称条件 $h_{i,j} = -h_{i+1,j}$ を課したことと同値である。

もしも対象としている basin が閉じた湖沼であるならば、境界条件に関しては以上の考察だけで十分であるが、開いた basin すなわち港湾の場合には事情はやや複雑である。港湾内部の水の振動は、つねに外海の振動と結びついた形でしかありえないため、厳密な意味では、開いた港湾に固有振動なるものは存在しない。われわれが通常港湾の固有振動と呼んでいるものは、より広い領域の振動が港湾に捕捉された状態を近似的に指しているに過ぎないのである。もっとも戸田湾の場合のように、湾口が比較的狭くなっている場合には、港湾内外の水の振動は互いに独立性が高くなっているため、港湾の固有振動と呼んでも事実上差し支えないような水の振動モードが存在する。このような「固有」振動を求める方法としては、次の2つが考えられる。

(1) 港湾のスケールより十分大きな領域の固有振動を求め、その中からその港湾に捕捉されたモードを選び出す。

(2) 計算領域を港湾およびそれにつながる外海のごく一部に限定し、外海側の計算領域境界に適当な境界条件を課して固有振動を求める。

このうち (1) のアプローチは多大な計算上の労力を要し、また実際問題としても (2) のアプローチによって実用上十分な精度の計算が可能であるため、現実にはほとんどの場合 (2) のアプローチが採用されている。

(2) のアプローチをとる場合、湾口に適当な入射波形を与えたり、あるいは湾内の任意の点に δ 関数型の擾乱を与えて湾の応答を調べるといった原始的な方法もあるが、多くの場合は湾口付近の適当な位置に節線 (nodal line) をひいて境界条件

$$\zeta = 0 \quad (7)$$

を与えるという方法がとられる。この場合、節線は地図上の湾口の位置よりもやや外側にとる必要がある。すなわち、計算領域を湾口よりやや外海側まで広げ、その外海側の境界において境界条件 (7) を課するのである。いわゆる開口端補正 (open end correction) に相当する。われわれは、戸田湾の湾口付近のいくつかの位置に節線を仮定し、それぞれの節線に対して固有振動の計算を行った。その結果、地図上の湾口の位置に節線をとった場合には計算上の固有振動第1モードの周期が5分台前半となり、観測された卓越振動周期7.6分 (のちに述べるように、これは第1モードである) よりもだいぶ小さくなってしまったことがわかった。理論振動周期を観測された振動周期に近づけるために、われわれは Fig. 15 に示すような計算領域を設定した。

外海側の境界条件の具体的な与え方は以下のとおりである。固定端条件 (7) を有限差分法に反映させるにあたって、人為的に与えた節線より外側には深さ無限の海があって、そこでは波の伝播が全く起こらないと仮定し、それに対応して計算領域外の水深を非常に大きな値 D_0 に等しくとる。すなわち、もしも式 (3) において格子点 (i, j) が外海側の境界に隣接しており、 $(i+1, j)$ が計算領域外にあるならば、

$$h_{i+1,j} = D_0 \quad (8)$$

とおく、われわれは D_0 の値として 30000 m をとった。

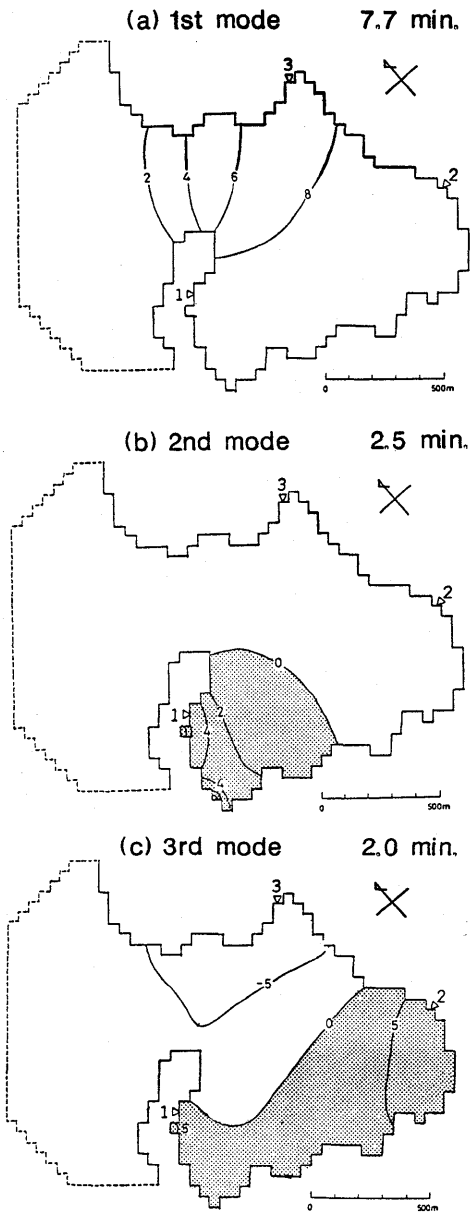


Fig. 15. (a)-(c): The theoretically expected eigenoscillation periods and modes of Heda Bay. The triangles denote the 3 stations, and the relative amplitudes are shown in co-range lines. The solid contours correspond to the shorelines, and the broken contours to the artificial outer-sea boundaries where the boundary condition $\eta=0$ was imposed. The shaded regions show areas with the inverse polarity of the sea level displacement.

なお LOOMIS (1975) は外海側の境界において反対称条件

$$\zeta_{i+1,j} = -\zeta_{i,j} \quad (9)$$

を用いているが、これは境界の反対側に basin の鏡像をおくことと、第 0 近似として同値である。われわれは、LOOMIS (1975) とわれわれのとった 2 種類の外海側境界条件のもとに戸田湾の固有振動の計算を行ったが、2 つの場合で固有振動周期の差は第 1~第 6 モードに対しいずれも 0.02 分以下であり、境界条件のとり方のちがいは計算結果に事実上ほとんど影響しないことがわかった。

以上の方法に基づいて求めた戸田湾の理論固有振動の周期とモードを、周期の長いほうから順に 3 つまで、Fig. 15 (a~c) に示す。計算領域内の格子要素の数は 896 個であった。第 1 モードは周期 7.6 分で全湾内同位相、第 2 モードは周期 2.5 分で東西逆位相、第 3 モードは周期 2.0 分で南北逆位相である。

われわれは計算格子や計算領域のとり方をさまざまに変えて固有振動の計算を繰り返し行ったが、第 4 モード以降は計算格子や計算領域のとり方によって振動パターンおよび周期の値がはなはだしく左右され、計算結果に一貫性を認めることができなかつたため、本研究では第 4 モード以降についての計算結果を考察の対象としなかつた。

5. 観測データと理論計算結果との比較

第 3 節に述べたように、3 つの地点すべてにおいて周期 7.6 分、2.0 分、1.3 分の位置に顕著なスペクトル・ピークが検出された。これらの位置では地点相互間のコヒーレンスの値も高くなっているため、これら 3 つのピークは戸田湾全体の固有振動に対応していると考えられる。7.6 分、1.3 分のモードは全地点同位相、2.0 分のモードは地点 2 のみ逆位相であった。

周期 7.6 分の振動は周期の値および 3 地点とも同位相であることから判断して、戸田湾の第 1 固有振動モードであると判定される。逆にこの第 1 モードの周期の値は、理論計算における計算領域の湾口側境界の位置を設定する際に大きな参考データとなった。すなわち、第 4 節にも述べたように、さまざまな位置に湾口側境界を仮定してそのつど理論計算を試み、理論上の第 1 モードの周期が実測値 7.6 分に近くなるように湾口側境界の位置を設定したのである。

周期 2.0 分の振動は、周期の値と以下のような位相に関する考察とから、戸田湾の第 3 モードであると推察される。すなわち、観測された振動は第 2 地点のみ逆位相であったが、理論的に求められた第 3 モードでは第 3 地点のみ逆位相となっている。しかし、理論的に求められた振動パターンにおいて第 1 地点が振動の節線のすぐ近くにあり、また第 1 地点付近では水深がかなり浅くなっていることを考えると、第 1 地点付近は計算格子のとり方による誤差が最も現れやすい領域であると推察される。そこで、第 1 地点のデータを仮にさしあたって考慮しないことにすれば、第 2 地点と第 3 地点とが互いに逆位相になっているという点で観測データと第 3 モードの理論計算結果との間に矛盾がない。

一方、理論上の第 2 モードでは第 2 地点と第 3 地点は明らかに同位相となっており、観測された周期 2.0 分の振動が第 2 モードに対応するとは考えられない。また、ここには示さなかつた理論上の第 4 モード以降のうち、ごく限られた水深の浅い領域に捕捉されてい

て物理的にはほとんど起こり得ないと思われるモードを除くと、計算格子や計算領域のとり方によらず周期はいずれも 1.6 分以下となっており、観測された周期 2.0 分の振動が第 4 モード以降に対応するとも考えられない。

以上のような理由で、観測された周期 2.0 分の振動は、戸田湾の第 3 固有振動モードであると判定される。

理論的に存在が期待される周期 2.5 分の第 2 固有振動モードは全く検出されなかった。第 2 モードでは Fig. 15 (b) からわかるように、節線が湾口に対してほぼ垂直に近い形となっている。つまり第 2 モードでは湾口付近で水位変化も流速も 0 に近く、外洋からの海水流入によって励起されにくいパターンであることが推測される。

また、観測された周期 1.3 分の振動を理論と対応づけることも試みたが、計算格子や計算領域のとり方によって理論第 4 モード以降の周期やパターンがはなはだしく左右され、理論計算の結果の中から周期が 1.3 分前後で全地点同位相の一貫した振動モードを選び出すことは、残念ながらできなかった。

6. まとめと展望

われわれは、戸田湾で採取した水位データから 3 つの卓越する振動周期を求め、そのうち周期 7.6 分のものを戸田湾の第 1 固有振動モードと、また周期 2.0 分のものを第 3 モードと対応づけることができた。理論的に存在が期待される周期 2.5 分の第 2 モードは検出されず、また観測された周期 1.3 分の振動を理論と対応づけるまでには至らなかった。

われわれが製作した超音波式水位計は、部品相互の互換性およびさまざまな観測機器に対応できる汎用性の点ですぐれたものであったが、以下に挙げるようないくつかの難点もあった。例えば、

- (1) すでに述べたように、発信される超音波信号の指向性が弱いため、細かい凹凸のある海面のどこを測定対象としているのかがはっきりしない。
- (2) 場所によっては本システムの設置自体が困難である。
- (3) われわれの観測システムでは測定可能範囲がおよそ 30 cm~3 m と狭いため、満潮時や干潮時には観測できないことがある。また水位計が岸壁など異物からの反射波に反応してしまうこともある。

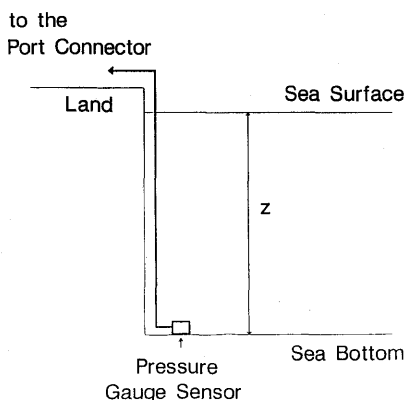


Fig. 16. A schematic figure showing the principle of the pressure-type sea level gauge.

なお厳密には、大気中の音速は気温に依存するので、気温の変化によって距離データに誤差を生ずることになるが、誤差は通常量的にも小さいものであり、特に気温の変化の時間スケール（数時間程度）より十分短い時間スケールの振動を考察する際には、気温変化の効果を全く無視しても差し支え

ない。

超音波式に代わりうる観測システムの一つに、圧力式水位計 (Fig. 16) がある。圧力式水位計とは、海底に圧力センサを設置し、測定される水圧の値をもとに水位変化を測定するという原理に基づいたものである。圧力式水位計を用いれば、上記 (1), (3) の難点は克服されるが、上記 (2) の問題に関しては、センサとリード線の一部を水中に固定しなくてはならないという難点がある。また海水の密度が水温と塩分濃度の双方に影響され、センサの特性も水温に依存するという点が、圧力式水位計の大きな欠点の一つである。

われわれが行った研究をさらに進めて、風によるセイシュの励起の問題を考察するのも興味のあるところである。

最後に、セイシュと津波との関連についてもひとこと言及しておきたい。羽鳥 (1977)、都司・斎藤 (1985) は戸田村を襲った安政東海地震 (1854) の津波の高さについて述べており、それらによると津波は湾奥の南岸でもっとも高く、その場所にあたる佐藤寛氏宅のところで 5.1 m に達した。この付近はちょうど基本振動 (第 1 モード) の振幅が最大となる位置にあっている。一般に津波が内湾に入射するとき、その基本振動の振幅がピークとなる位置で最も高い津波浸水値が現れることは、TSUJI *et al.* (1990) においても三重県尾鷲市賀田湾の例について指摘されている。この研究と同様の手法で、全国各地の内湾の基本振動の実測と、基本固有振動の数値解の解析が進めば、津波のときどの場所がもっとも高く浸水するかの予測が可能となり、津波対策に有効な助言を与えうるようになるであろう。

謝 辞

本研究に関して、いつも貴重な助言をお与え下さった東京大学理学部地球物理学科の永田 豊教授、ゲラー・ロバート助教授、1989 年中に戸田湾などいくつかの湖沼・港湾で行われたセイシュ測定研究の資料を利用して下さった吉田尚史、加藤孝志、伊賀啓太、柳本大吾、松島 稔、渡辺正和の各氏、電子工作に際してご助言いただいた灘井章嗣氏、以上の方々にお礼を申し上げます。観測の際には東京大学戸田寮、戸田みやげセンター、戸田造船株式会社にお世話になり、また、超音波距離計に関しては秋月電子通商の回路図を参考にさせていただきました。

文 献

- DEFANT, A., 1961, *Physical oceanography*, vol. 2, Pergamon Press, 598 pp.
- 江川尚志・山崎康宏・吉田尚史・都司嘉宣・加藤孝志・伊賀啓太, 1989, 容量式水位検潮器による静岡県戸田湾の固有振動の観測, 1989 年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, 250.
- 羽鳥徳太郎, 1977, 静岡県沿岸における宝永・安政東海地震の津波調査, 地震研究所彙報, 52, 407-439.
- 日野幹雄, 1977, スペクトル解析, 朝倉書店, 300 pp.
- LOOMIS, H. G., 1975, Normal modes of oscillation of Honokohau Harbor, Hawaii, *Hawaii Inst. Geophys. Rep.*, HIG-75-20, 20 pp.
- 天良和男・矢野越夫, 1987, 図解マイコン はじめてのパソコン計測・制御, 東京電機大学出版局, 224 pp.
- 都司嘉宣・斎藤弘士, 1985, 地元資料でみる沼津市、戸田村の津波の歴史, 月刊地球, 7, 192-203.
- TSUJI, Y., T. YANUMA and S. I. IWASAKI, 1990, Height of historical tsunamis on the coast

of Kata Bay in Owase City and its proper oscillations, *Proc. Pacific Cong. Marine Sci. Technol. (PACON) 90*, 128-134.

WILSON, B. W., 1972, Seiches, *Advan. Hydrosci.*, 8, 1-94.

山崎康宏・都司嘉宣・柳本大吾・松島 稔・渡辺正和, 1989, MSX パソコンによる超音波式水位計の製作. 1989 年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, 91-92.

Observation of Seiches in Heda Bay, Shizuoka Prefecture

Taku TADA

Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Masahito TSUKAMOTO

Faculty of Science, University of Tokyo

Yoshikazu UENO and Masayuki KAWASHIMA

Ocean Research Institute, University of Tokyo

Yoshinobu TSUJI

Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Takashi EGAWA

Central Research Laboratories, NEC Corporation

Yasuhiro YAMAZAKI

Faculty of Science, University of Tokyo

We newly manufactured a sea level observation system by combining an 8-bit MSX personal computer with a supersonic-type water level gauge, and with the help of this system we carried out simultaneous sea level observations at 3 stations on the coast of Heda Bay, Shizuoka Prefecture. Spectral analyses of the obtained sea level data have indicated predominant spectral peaks at periods of 7.6, 2.0, and 1.3 minutes at the 3 stations. We numerically calculated the modes of the proper oscillations of Heda Bay by the method of LOOMIS (1975), and comparison of the observed data with the numerical results has led us to the conclusion that the observed oscillations with the periods of 7.6 and 2.0 minutes correspond to the 1st and 3rd modes of Heda Bay, respectively, judging from the results of cross-spectral analyses. We did not detect the theoretically expected 2nd mode with a period of 2.5 minutes. We could not identify the observed oscillation of 1.3 minutes with any of the theoretically expected modes.