

# 有明海の水利模型実験について (2)

## 潮せきの伝播と締切進行にともなう内潮位変動の検討

高田 雄之\*・戸原 義男\*\*

### 1. 相似比

有明海の潮せき現象は、早崎瀬戸を通じて外海の潮せきに支配されている。また湾内定常流は弱く、コリオリの量も無視してよいと考えられる。したがって湾軸にそって伝播する潮せき(長波)の運動方程式は

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - g \frac{U|U|}{C_f^2 R} \dots\dots(1)$$

$U$ : 平均流速,  $H$ : 水路底からの水深,  $C_f$ : Chézyの係数,  $R$ : 動水深

で表わされる。式(1)から相似比を求めると、Froudeの相似比が求まり、原型と模型との間につきの関係がえられる。

$$T_r = L_r D_r^{-1/2}, C_{fr} = L_r^{1/2} D_r^{-3/2}$$

実験室の空間(10 m×10 m)と有明海の大きさ、および外海の必要な収容部分の大きさを加味して、水平縮尺を8000、計測、特に波高計の測定精度を考慮して垂直縮尺を250に決めた。したがって物理量の相似比は、それぞれ、 $U_r = 15.8$ ,  $T_r = 507$ ,  $C_{fr} = 5.66$ , 水面積  $a = 6.4 \times 10^7$ , 流水断面積  $A = 2.0 \times 10^6$  となる。

### 2. 有明海の地形

有明海模型 図-1 を湾軸にそって40等分(等分間隔約25 cm)し湾奥、住之江を  $i=0$  とし湾口、口之津を  $i=40$  とすれば、ほぼ三池で  $i=10$ , 島原で  $i=20$ , 三角で  $i=30$  となる。各等分線について平均水面における流水断面積, 水面幅, 平均水深を測量すると 図-2 に示すような分布となる。

口之津から三角までは流水断面積, 水面積, 平均水深ともに不規則な変化をしており、三角から住之江までは平均水深がほぼ直線的に、すなわち  $h = h_0/L \cdot x$  の形で変化している。また島原から住之江までは、流水断面積が直線的に変化している。さらに水面幅については三角から住之江までは、流水断面積, 平均水深に比較して変化率が小さいことがわかる。

### 3. 有明海模型の自然周期

有明海模型の自由振動についてしらべてみるため、外

図-1 有明海模型平面図

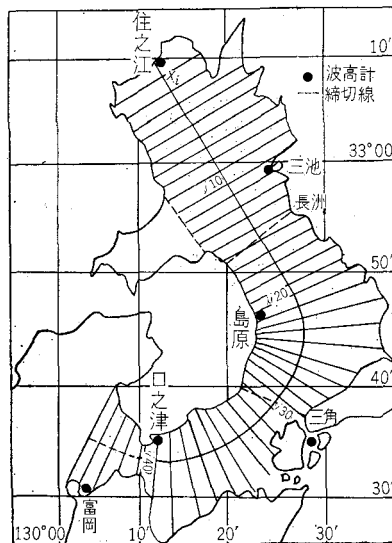
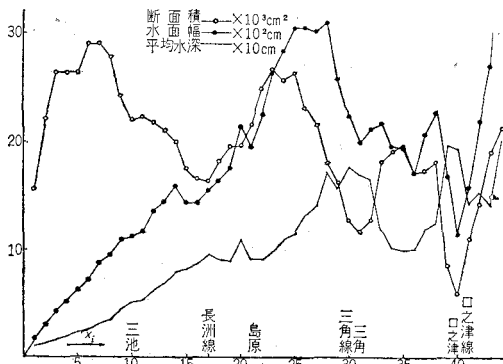


図-2 地形特性図



海にきわめて長い周期の長方形波を発生させ、有明海内部における減衰振動を記録すると、図-3のような減衰記録がえられた。この場合、外海にはサンフレックスパッキング等の抵抗体を入れて有明海内部と共振しないようにしている。減衰振動の相つぐ減衰比が

$$v = \frac{|y_1|}{|y_2|} = \frac{|y_2|}{|y_3|} = \dots = \frac{|y_{i-1}|}{|y_i|} \dots\dots(2)$$

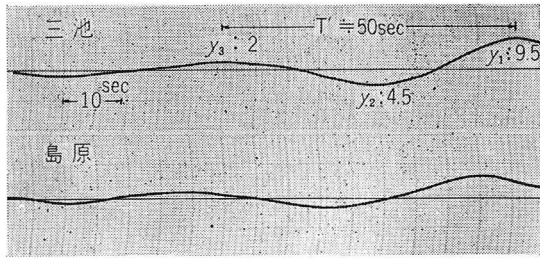
で表わされるときは

$$\Delta = \log_{10} v \dots\dots(3)$$

\* 正員 農博 九州大学教授 農学部

\*\* 正員 農博 九州大学助手 農学部

図-3 減衰振動の記録



を計算し、減衰振動の周期  $T'$  を求め、

$$T = \frac{T'}{\sqrt{1 - 0.5372/\lambda}} \dots\dots\dots(4)$$

から自然周期を計算することができる。図-3 から  $T' = 50 \text{ sec}$ ,  $y_1 = 9.5$ ,  $y_2 = 4.5$ ,  $y_3 = 2, \dots\dots$ , を読みとり

$$v = \frac{9.5}{4.5} \times \frac{4.5}{2} = 2.2 \quad \lambda = \log_{10} v = 0.34$$

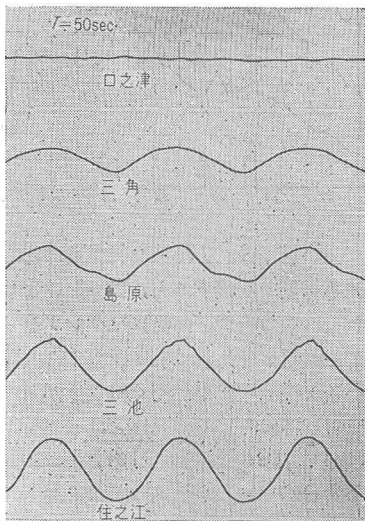
したがって、 $1 \gg 0.5372/\lambda^2 = 0.062$ ,  $T = T' = 50 \text{ sec}$ , すなわち、有明海模型におけるおもな自然周期は 50 sec と考えられる。つぎに、外海に周期 40~130 sec の正弦波を与えて有明海を強制振動させてみると、周期 50 sec を与えたとき図-4 にみられるごとく口之津に Nodal-line ができ湾の副振動の自然周期と強制振動の周期が一致した現象をよく表わしている。自由振動の式

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dx} \left\{ b(x)h(x) \frac{dX_s}{dx} \right\} + \frac{4\pi^2}{gT_s^2} b(x)X_s = 0 \end{aligned} \right\} \dots(5)$$

$$H = \frac{1}{b(x)} \frac{\partial}{\partial x} [b(x)h(x)\xi]$$

$b$ : 水面幅,  $h$ : 水深,  $T_s$ : 周期,  $H$ : 水位上昇量,  $\xi$ : 水の変位, 式 (5) から  $X_s$  に関して,  
 $x=0$  で  $X_s=0$  (湾口では水位の上昇はない)  
 $x=L$  で  $dX_s/dx=0$  (湾奥では水の水平運動はない)

図-4 周期 50 sec 強制振動記録



なる境界条件を与えて計算する。いま湾奥、住之江で振幅が 1 として出発し湾口、口之津で振幅が 0 となるような周期を求めるため、式 (5) に  $T=50 \text{ sec}$  を仮定して与え図-1 に示す湾軸にそって計算すると計算結果および実験値は、Nodal-line の位置および振幅比ともほぼ一致している。模型縮尺から考えて、有明海の湾の副振動周期は 7 時間と推定できる。また実験結果から減衰比が大きいので自由振動は短時間に減衰するものと考えられる。

4. 潮せき(長波)の伝播

有明海の湾の軸方向にそって伝播する潮せきの運動および連続の式は次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - g \frac{U|U|}{C_f^2 R} \\ \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(UA)}{\partial x} = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(6)$$

いま  $U \frac{\partial U}{\partial x}$  がほかの項と比較して無視できるような運動については、式 (6) は

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - g \frac{U|U|}{C_f^2 R} \dots\dots\dots(7)$$

となる。静止の位置からの横距  $\xi$  を、 $\xi = \int U dt$  と定義し、式 (7) を変形すれば

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = g \frac{\partial H}{\partial x} - g \frac{U|U|}{C_f^2 R} \dots\dots\dots(8)$$

となる。また式 (6) の連続の式に

$$A(x,t) = b(x) \{ h(x) + H(x,t) \}, \text{ および } \xi = \int U dt,$$

をそれぞれ代入して変形すれば、

$$H = -\frac{1}{b} \frac{\partial}{\partial x} (hb\xi) \dots\dots\dots(9)$$

の関係がえられる。簡単にするため摩擦を考えないことにすれば、式 (8) は

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = -g \frac{\partial H}{\partial x} \dots\dots\dots(10)$$

で表わされ、式 (9)、式 (10) から  $\xi$  を消去すれば

$$\frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = \frac{g}{b} \frac{\partial}{\partial x} \left( hb \frac{\partial H}{\partial x} \right) \dots\dots\dots(11)$$

運動が Simple Harmonic Motion の場合は  $H \propto \cos(\sigma t + \epsilon)$  と考えて、式 (11) に代入すれば、

$$\frac{g}{b} \frac{\partial}{\partial x} \left( hb \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \sigma^2 H = 0 \dots\dots\dots(12)$$

をうる。いま、三角から住之江までは、水深の変化の割合 ( $h/h_0$ ) に対して水面幅の変化の割合 ( $b/b_0$ ) が小さいとして、図-2 から水面幅一定、水深が近似的に、 $h = h_0/L \cdot x$  の関係で変化しているものと仮定すれば、式 (12) はつぎのように変形できる。

$$g \left( \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial H}{\partial x} + h \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \right) + \sigma^2 H = 0 \dots\dots\dots(13)$$

$h=h_0/L \cdot x$ , および  $K=L\sigma^2/g h_0$ , なる関係を代入すれば

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{K}{x} H = 0 \quad \dots\dots(14)$$

式 (14) の解は

$$H = \text{const} [J_0(2K^{1/2}x^{1/2}) \cos \sigma t + Y_0(2K^{1/2}x^{1/2}) \sin \sigma t] \quad \dots\dots(15)$$

$H$  は  $x=0$  においても有限な値であるから,  $x=L$  にて

$$H = H_0 \cos \sigma t \quad \dots\dots(16)$$

とおけば, 式 (15) は,

$$H = H_0 \frac{J_0(2K^{1/2}x^{1/2})}{J_0(2K^{1/2}L^{1/2})} \cos \sigma t \quad \dots\dots(17)$$

をうる。また, 式 (15) において,  $x$  の大きい値に対しては Bessel 関数の漸近級数を使用できる。

$$\left. \begin{aligned} J_0(2K^{1/2}x^{1/2}) &= \sqrt{\frac{1}{\pi\sqrt{Kx}}} \cos\left(2\sqrt{Kx} - \frac{\pi}{4}\right) \\ Y_0(2K^{1/2}x^{1/2}) &= \sqrt{\frac{1}{\pi\sqrt{Kx}}} \sin\left(2\sqrt{Kx} - \frac{\pi}{4}\right) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(18)$$

式 (18) を式 (15) に代入して

$$H = \text{const} \frac{1}{4\sqrt{x}} \cos(\sigma t \pm 2\sqrt{Kx}) \quad \dots\dots(19)$$

また,  $h=h_0/L \cdot x$  なる関係から

$$\frac{H}{H_0} \propto \sqrt[4]{\frac{h_0}{h}} \quad \dots\dots(20)$$

をうる。以上で, 三角から住之江にいたる各地の潮せきの振幅は, 式 (17) で求めることができる。また  $x$  の大きい地点, すなわち水深の深い所, 三角, 島原付近では水深の変化の  $1/4$  乗に比例して潮せきの振幅が変化することが式 (20) から推定される。

断面の変化が不規則な所は, 式 (12) を数値積分するため 図-1 に示すように湾軸を等間隔にわけ, 流水断面積を  $A(x)=b(x)h(x)$  とし, 各断面間の距離  $\Delta x$  を利用し近似的に,

$$\left. \begin{aligned} \frac{A_i H'_i - A_{i-1} H'_{i-1}}{\Delta x} &= -\frac{\sigma^2}{g} b_i H_{i-1/2} \\ \frac{dH_i}{dx} &= H'_i = \frac{H_{i+1/2} - H_{i-1/2}}{\Delta x} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(21)$$

$H_{i-1/2}$  は  $i$  番目と  $i-1$  番目の区間における  $H$  の値と考える。つぎに  $i$  と  $i-1$  番目の断面間の水面積  $a_{i-1/2}$  は

$$b_i(x) \Delta x = a(x)_{i-1/2} \quad \dots\dots(22)$$

とおけるから, 式 (21), (22) を用いて  $i=1$  から  $i=n$  まで順次計算してゆく。

最初に式 (17) を用いて周期 40~100 sec の長波について三角, 島原, 三池, 住之江各地の振幅を計算し, 実験値とを比較し 図-5 に示す。模型縮尺から  $M_2$  潮の周期は 90 sec に相当するので, 周期 90 sec の値が有明海の潮せきの伝播を表わしている。

つぎに数値積分した値と実験値との比較を 図-6 に示

図-5 計算値(式(17))と実験値の比較

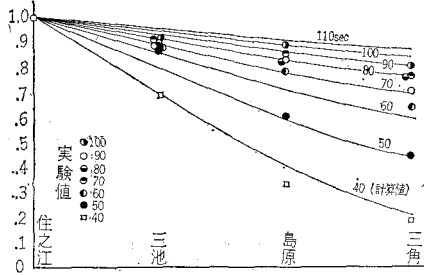
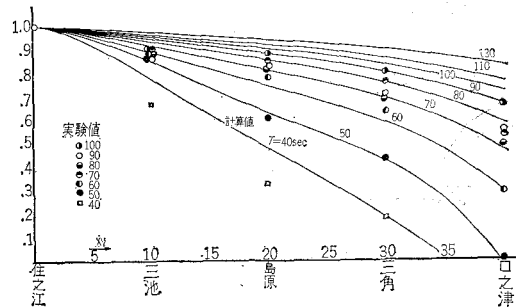


図-6 計算値(式(21))と実験値との比較



す。また大潮差 ( $M_2+S_2$ ) および  $M_2$  潮の調和常数値を模型値に換算し, 計算値, 実験値と比較すると表-1のごとくなる。表から潮せきの実況と実験結果はほぼ一致

表-1 計算値, 実験値と原型潮せきの比較

		住之江	三池	島原	三角	口之津
数値積分	振幅比	1.0000	0.9535	0.8857	0.8093	0.6650
	ベッセル解	1.000	0.934	0.864	0.812	
実験値	大潮差記録値	19.8mm	180	16.0	14.0	11.0
	振幅比	1.00	0.91	0.81	0.71	0.55
大潮差	$(M_2+S_2) \times 2$	494cm	456	406	354	290
	模型換算 $1/250$	19.6mm	18.2	16.2	14.1	11.6
	振幅比	1.00	0.92	0.82	0.72	0.59
調和常数 $M_2$	$M_2$	172cm	159	147	125	104
	振幅比	1.00	0.92	0.85	0.73	0.60

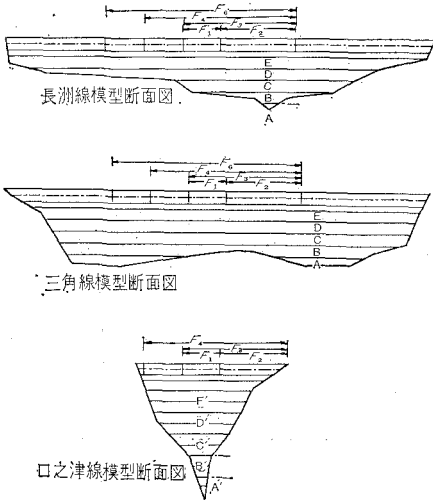
しているといえる。これに比較して計算値と実験値は少し差が大きいようである。これについて少し考察してみると, 以上までの計算はすべて摩擦を考えていない。したがって計算値の振幅比は実験値より小さくならなければならない。しかし結果は逆に計算値の方が大きい。このことから摩擦を無視したためではなく, 波長に比較して地形の変化が大きいこと, さらに湾軸が直線ではなく三角付近で, ほぼ直角に曲っており, かつ流水断面の形の変化が大きいこと, いわゆる部分反射をおこしているのではないかと考えられる。このことは波形記録の正弦波がかなりひずんでいることから推定できる。

5. 締切施工過程における内外潮位の変動

有明海の締切が施工される場合、施工過程においては締切線の流水断面がしだいに小さくなり湾奥の潮差が小さくなるのが考えられる。

図-1 に示すごとく長洲線、三角線および口之津線と3つの締切線を考え流水断面の変化による振幅の変化を実験で求める。締切模型堤防は 図-7 に示すごとく、長

図-7 締切模型堤防



洲線、三角線では堤防形を A~F<sub>1</sub> の10段階にわけそれぞれの形の堤防を締切線の位置にあらかじめ作っておいた真鍮製の溝にゴムパッキンをはってはめこむようにした。実験順序は現況より始め、-20cmまで埋めた場合(堤防天端が-20cm)をA、-16cmまで埋めた場合をBとし、4cm間隔でC, D, Eと埋めてゆき、-2cmまで全線一様に埋めた場合をF'とする。F'からは兩岸からまきだしてゆき流水断面の幅が75cm、水深2cmの場合をF<sub>2</sub>。(原型では幅が6kmに相当する、Fの添字は原型に換算したときの幅をkm単位で表わしたものと)し以下F<sub>1</sub>まで順次締切ってゆく。口之津線の場合は水深が相当深いので-40cmまで埋めた場合をA、以下8cm間隔に区切っている。堤防材料は厚さ5mmのプラスチック板を3枚張り合わせたものを使用した。堤防埋込みの場合の標高誤差は±1mm、堤防の寸法誤差は、±0.5mm以下に仕上げた。

潮せきの基準は富岡とし富岡に設置した波高計から制御器にフィードバックしているが潮位の制御は完全には行なわれないので締切りの進行とともに外海の潮せきが大きくなる傾向がある。したがって各実験の条件を同一にするため、各測点の値に修正係数  $\bar{H}_T/H_T$  を乗じた。ここで  $H_T$  は任意の堤防条件における富岡の振幅値、 $\bar{H}_T$  は富岡の振幅平均値である。

図-8 長洲線締切りにおける各地の振幅

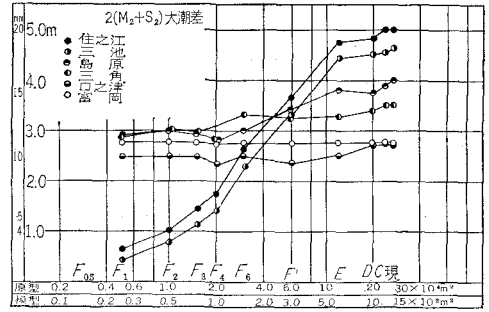


図-9 三角線締切りにおける各地の振幅

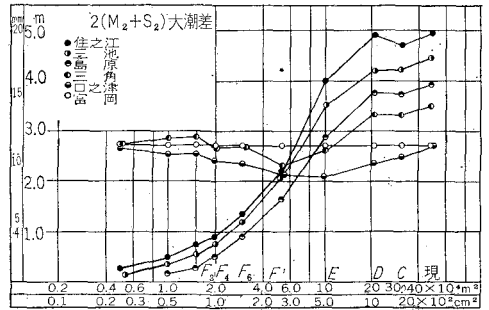
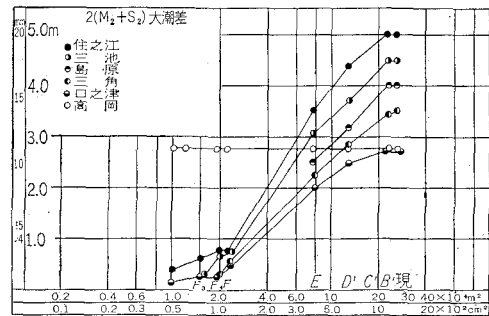
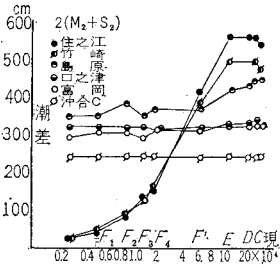


図-10 口之津線締切りにおける各地の振幅



実験結果を 図-8, 9, 10 に示す。この実験については長崎海洋気象台でも縮尺 40000 の模型で実験が行なわれている。締切線の位置等が多少違うので全部を比較することはできないが長洲線については締切線が一致するので比較のため 図-11 に示した。これは 図-8 に相当するものである。ただし 図-11 は基準潮位を沖合のC点にとってあり著者らの実験と基準潮が違いますが、図-11 においても、富岡の振幅はあまり変化していないので基準点の違いは問題ないと思われる。図-8 と 図-11 の結果はほとんど一致していることから潮せきの振幅だけを考えると、かなり大きい縮尺の模型で実験を行っても信頼できる結果がえられうると考えられる。実験結果を総合すると、大体つぎのことがいえるようである。締切初期においては湾内の振幅は現況とほとんどかわらない。たとえば長洲線では E まで、三角線、口之津線で

図-11 長崎海洋気象台  
施設による結果



は  $D$  まで縮切っても振幅はほとんど変わらない。3つの縮切線について比較すると同一流水断面積については湾内水面積が大きいほど湾内の振幅は小さくなり、また潮せきの振幅が大きいほど縮切線内外の振幅比は大きくなる。縮切がかなり進んで湾内の振幅が小さくなっても湾内にはかなりの水面勾配があり、湾奥ほど振幅が大きくなる。

### 6. むすび

以上、今回は模型実験の結果を主として報告し、つぎの点を明らかにした。

- (1) 湾内の減衰は非常に大きい。
- (2) 有明海の副振動のおもな周期は7時間程度であり、口之津付近に Nodal-line をもつ。
- (3) 有明海の潮せきは地形の影響で湾奥の振幅が大きくなる。このことについて現況潮せきと実験結果はよく一致する。
- (4) 縮切過程においても、湾内の振幅は現況潮せきと同じく湾奥にいたるほど振幅が大きくなる。
- (5) 実験は水平 8000、垂直 250 の縮尺比の模型で行なったものであり、とくに縮切口の水利については micro の立場からさらに検討したい。

### 参考文献

- 1) 萩原尊礼：振動測定，宝文館，昭和26年。
- 2) J. J. Dronkers: Tidal computations in coastal areas, Proc. of A. S. C. E. Vol. 85, No. WW1.
- 3) Paul Perroud: The propagation of tidal waves into channels of gradually varying cross-section, B. E. B. Tech. Memo. No. 112.
- 4) 九州大学農学部干拓工学教室・長崎海洋気象台・熊本農地事務局：有明海域総合開発計画模型実験報告書(補) 昭和36年3月。
- 5) 黒田静夫・石綿知治：防災工学，山海堂，昭和35年。