

境水道の水位変動に関する模型実験について

京都大学防災研究所 樋 口 明 生

1. 緒 言

大山・出雲特定地域総合開発計画の中核をなす中海干拓工事の第一段階として、外江付近に潮止樋門を設けて境水道より中海に海水が流入するのを阻止し、中海を淡水化する計画がある。この計画が実施されると境水道および中海における水位変動が現状と非常に異なることが予想される。

この問題を解明するために京都大学防災研究所において模型実験をおこなった。実験は境水道付近の模型を製作して、これに種々の周期の水位変動を与えて、現状と外江付近締切り後のこの水道の周波数特性をしらべ、その結果を比較検討した。

この実験は次におこなう本実験に対する予備実験であり、その数値はそのまま信頼することはできないかもしれないが、定性的には信頼に値する興味ある結果が得られ、こういう問題に関して模型実験が非常に有効であることが確認された。

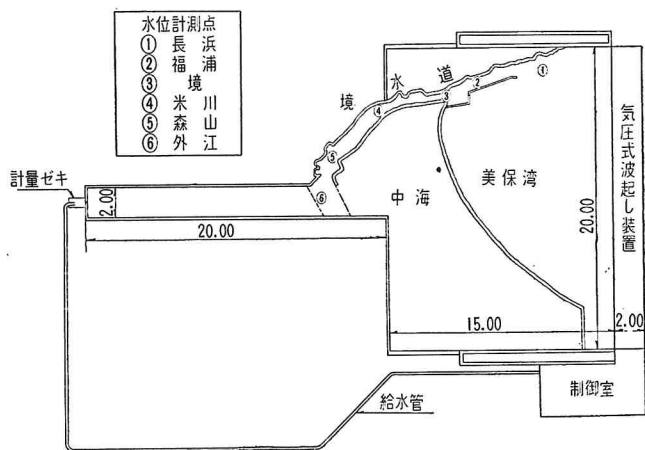
2. 実験施設

実験は宇治川水理実験所の海洋水槽でおこなった。この水槽は図-1に示すような鉄筋コンクリート製で巾 20 m、長さ 15 m、深さ 0.6 m であり、これに巾 2 m、長さ 20 m の水路部分が接続している。ここに水平縮尺 1/500 の模型を製作した。この模型の範囲は図-1 に示すようであるが、既設の施設を利用したつごう上、美保湾の一部、境水道全域および中海の一部をふくむが、中海に相当する部分は変形されており、面積も約 40% になっている(写真-1 参照)。

水路壁は $20 \times 20 \times 40$ cm の建築用コンクリートブロック2段積で、片側防水モルタルこて仕上げとし、森山地点に観測用ガラス窓を設けてある。

模型実験をおこなう際の相似律が確立していないので、これを定めるために鉛直縮尺をいろいろ変化させて摩擦の効果を变え、最適の縮尺を決定して実験をおこなうのにつごうのよいように、水路床には特定の断面形を与えず矩形断面とした。水路床はモルタル塗りブラシ仕上げである。実験の後半はブロックと土によって外江付近(図-1の破線の部分)を締切っておこなった。なお実験施設は屋外にあるので、風の影響を少なくするために水路上におおいをした。

図-1 実験施設および模型平面図



単位: m

写真-1 実験施設および模型



水位変動は気圧式波起し機を用いて与えた。これは 7.5 HP ルーツ ブロワーで空気室内の空気を引いて実験水槽内の水を吸込み、つぎに $\phi 4"$ の空気作動式調整弁を通して外の空気を送り込むと室内の水を吐き出して水槽内に波を起す装置である。この調整弁の操作次第で任意の波形をうることができる。

本水槽には河川用水の循環装置が付属していて、水路部の先端に給水できるようになっている。ここに計量ゼキをすえ、模型水道の粗度を求める実験に使用した。

水位の計測は水路床に埋めてある $\phi 8\text{mm}$ の銅管の先にビニール管を接続し、その他端にメタクリル製の管をつないでサイフォンをつくり、この中に張った 2 本のステンレス線の間の電気抵抗の変化を水位変化に換算してインク書きオシログラフで記録した。計器の詳細については防災研究所創立 5 周年記念論文集 (昭和 31 年 10 月) を参照されたい。

3. 実験内容および計測事項

実験内容は次の 4 つに大別できる。

- (1) 相似律に関する実験
 - (2) 模型の粗度に関する実験
 - (3) 境水道の周波数特性に関する実験Ⅰ——現状の境水道に関するもの——
 - (4) 境水道の周波数特性に関する実験Ⅱ——外江付近締切り後の境水道に関するもの——
- 計測事項は次の 3 つである。

- (1) 水位：観測点 ①長浜、②福浦、③境、④米川、⑤森山、および⑥外江。
- (2) 表面流速：観測点 森山付近 (④～⑤の間)
- (3) 水道の粗度係数：

4. 実験経過・結果および考察

(1) 相似律に関する実験

この実験は前にも述べたように水平縮尺を固定し、鉛直縮尺をいろいろに変化させて摩擦の効果を変え、限られた実験をおこない、この結果と原型資料とを比較検討して最適の縮尺を得ようとするものである。いま水平縮尺を 1/500 とし、鉛直縮尺と水平縮尺の比、すなわちヒズミを 1~16 の間で変えれば、鉛直縮尺、時間縮尺、速度縮尺等は表-1 のようになる。

表-1 ヒズミを変えたときの諸元の値

ヒズミ	鉛直縮尺	水 深	全 振 巾	時間縮尺	周 期	速度縮尺	流 速
原 型		500 cm	40 cm		130分	12 時 25 分	40 cm/sec
1	1/500	1	0.08	1/22.4	5'48"	33'12"	1/22.4
2	1/250	2	0.16	1/31.6	4'07"	23'36"	1/15.8
4	1/125	4	0.32	1/44.7	2'55"	16'40"	1/11.2
6	1/83.4	6	0.48	1/54.7	2'23"	13'38"	1/9.13
8	1/62.5	8	0.64	1/63.3	2'03"	11'46"	1/7.9
16	1/31.25	16	1.24	1/89.4	1'27"	8'20"	1/5.6

鉛直縮尺が 1/500 の場合の実験をおこなうことは技術的に困難であるから省略し、1/250~1/31.25 におけ 5 つの場合について実験をおこなった。ただし、断わっておかねばならないことは、ここでいう鉛直縮尺とは水深に関する縮尺であって、実際の境水道における潮汐および副振動の全振巾は 30~40 cm の程度であるから、水位変動に関しても同一縮尺で実験をおこなおうとすれば、全振巾が数 mm の程度となり測定精度が低下するので、便法として実験は全振巾が常に 1 cm であるような変動についておこなった。

現地の水位記録をくわしく見ると、種々の周期の振動が存在しているが、問題になるのは最高水位であるから、平均水位の高い夏期の資料 (昭和 32 年 7 月) を解析した結果、美保関、境、森山の各検潮所において、130 分の周期をもつ振動が卓越している場合があったので、これと半日潮とをこの実験の基礎資料とした。

結果は図-2 および図-3 に示すが、これは各水位計測点における水位変動の振巾を②福浦におけるそれとの比で表わしたものである。図-2 は半日潮に関するものであり、図-3 は 130 分振動に関するものである。

図-2 によればヒズミ (r) が小さいほど減衰が大きいが認められるが、これはヒズミが小さいほど水深が浅くなるために、水路の摩擦がより大きく影響するためであると考えられる。図中の○印は原型に関するものである。これによれば、半日潮に関してはヒズミが 4 の場合が最適であることが認められる。

次に図-3 によれば、図-2 に見られるようなヒズミの相違による違いは認められず、鉛直縮尺が上記の範囲

内で変化しても減衰状態はほとんど変らないことを示している。

以上のことから、この実験に関してはヒズミが4すなわち鉛直縮尺 1/125 の場合が最適であると認め、以後の実験はすべてこの縮尺でおこなった。

(2) 模型の粗度に関する実験

境水道の模型は前にのべたように、両側面は防水モルタルこて仕上げ、底面はブラシ仕上げである。ここに定常流を流して水面勾配を計り、粗度係数を求めた。

水は 図-1 に示す波起し装置の下部より取り入れ、給水管によって計量ゼキを通して 20 m の水路部上流端に給水し、境水道を通して循環するようになっている。境水道内各水位計測点にポイントゲージを設置して各点の水位を測った。

この実験は定常流であり、水路は水平な矩形断面である。いま簡単にするために各水位計測点間では一様巾であると考え、運動方程式より次式をうる。

$$n^2 = R^{4/3} \left(\frac{A^2}{Q^2} \right) i_w \left[1 - \frac{1}{gh} \cdot \frac{Q^2}{A^2} \right] \dots \dots (1)$$

ここに n : Manning の粗度係数, R : 径深, A : 水路の断面積, Q : 流量, g : 重力の加速度, h : 水深である。

これにより求めた粗度係数の値を 図-4 に示す。縦軸は Manning の粗度係数, 横軸は森山付近 (④~⑤間) の平均流速である。水深は常に 4 cm である。

(1) 式の右辺第 2 項は Froud 数の自乗であり、この実験の範囲内では 1 に比して小さいからこれを無視すれば、(1) 式は

$$n = \frac{R^{2/3}}{u_m} i_w^{1/2} \dots \dots (2)$$

と書くことができる。ここに u_m は平均流速である。[] によって原型と模型との比を表わすことにすれば、水深に比して巾の広い水路を考えると

$$[n] = \frac{[R]^{2/3}}{[u_m]} [i_w]^{1/2} = \frac{H^{2/3}}{X/T} \left(\frac{H}{X} \right)^{1/2} = H^{2/3} X^{-1/2} \dots \dots (3)$$

となる。 X, H, T はそれぞれ水平、鉛直および時間の比 (原型と模型との) である。実験中に見られる流速の時間変化は 10 cm/sec を振巾とする正弦波形であるが、平均流速としてこの正弦波の有効値 (7 cm/sec) を採用すれば (3) 式より $H=130$ が得られ、ヒズミは 3.85 となり、前節で決定したヒズミ 4 の妥当性が裏づけられる。

(3) 境水道の周波数特性に関する実験 I—現状の境水道に関するもの—

先の 2 つの実験の結果、鉛直縮尺を 1/125 に決定したので、この場合に美保湾に種々の周期の正弦振動を与えたならば境水道内における水位変動がどのような様相を示すかを調べる実験をおこなった。

実験は 1~32 分の間で 10 種類の周期についておこなった。与えた振動の全振巾はほぼ 1 cm である。結果は 図-5 のようであるが、これは 図-2 と同様に②福浦を基準とした振巾比で表わしたものである。

これによると 1 分の場合だけは非常に特異な形をしているが、これは後に述べる理論の結果とよく一致している。周期が 2 分より長い振動に関しては、減衰曲線は漸次低下し 6 分くらいから次第に上昇している。これを書きなおしたのが 図-6 であるが、これは与えた振動の周期を横軸に、前図と同様に振巾比を縦軸にとったものである。図内の曲線はそれぞれの地点における振巾比の変化を示している。これによると、③~⑥の各曲線はそれ

図-2 半日潮減衰曲線

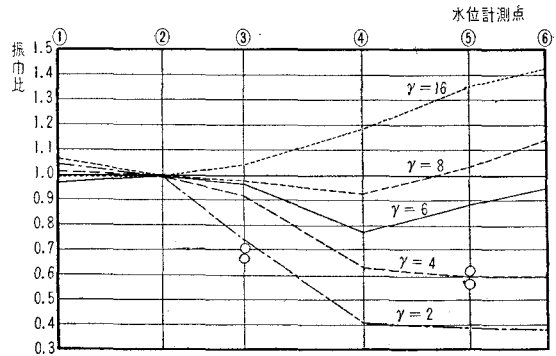


図-3 130分振動減衰曲線

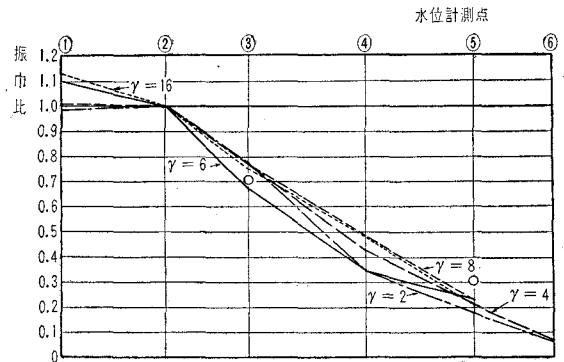


図-4 模型水路の粗度係数

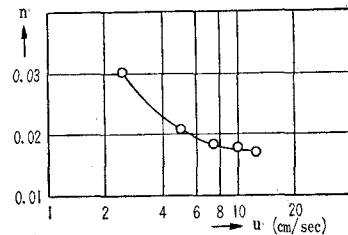


図-5 周期別減衰曲線
(現状, 実験値)

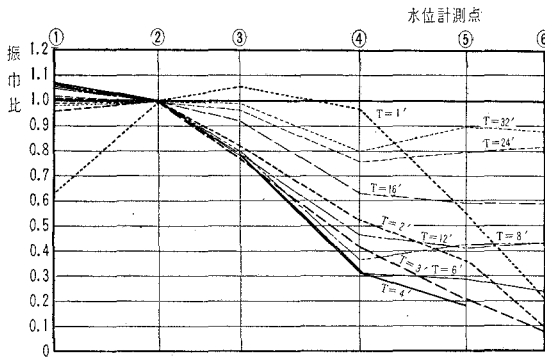
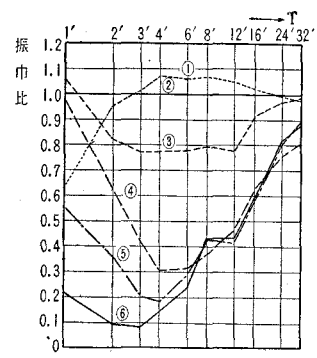


図-6 周波数特性曲線
(現状, 実験値)



それ 4~6 分のあたりで極小値を示している。①の曲線が極大値を示しているのは、②を基準としたために③以下の点と反対側にあることから起る現象であり、③以下の場合と傾向は一致しているわけである。

この極小値の表われる理由を少し調べてみよう。いま矩形断面の様な水路を考え、底は水平とする。摩擦が流速に直線的に比例すると考えると運動方程式および連続式は次のようである。

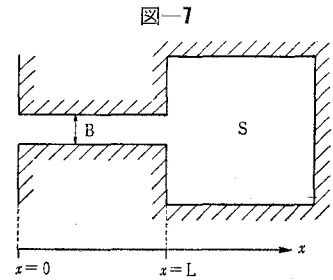
$$\frac{\partial u}{\partial t} + \alpha u + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

ここに α : 摩擦係数, u : 流速, η : 静水面よりの水面の変位, h : 水深である。これを境界条件

$$x=0 \text{ で } \eta = \eta_0 e^{i\omega t}, \quad x=L \text{ で } \frac{d\eta}{dx} = \beta u$$

の下に解くと次のようである。ここで 図-7 のような場合を考え、 $\beta = Bh/S$, B : 水路の巾, S : 遊水池の面積とする。



$$\frac{\eta}{\eta_0} = \frac{(p+iq)(e^{(p+iq)(L-x)} - e^{-(p+iq)(L-x)}) + \frac{\beta}{H}(e^{(p+iq)(L-x)} + e^{(p+iq)(L-x)})}{(p+iq)(e^{(p+iq)L} - e^{-(p+iq)L}) + \frac{\beta}{H}(e^{(p+iq)L} + e^{-(p+iq)L})} e^{i\omega t} \quad (6)$$

ただし、

$$p^2 = \frac{\omega^2}{2c^2} \left\{ \sqrt{1 + \frac{\alpha^2}{\omega^2}} - 1 \right\}, \quad q^2 = \frac{\omega^2}{2c^2} \left\{ \sqrt{1 + \frac{\alpha^2}{\omega^2}} + 1 \right\}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T}, \quad c = \sqrt{gh}$$

であり, T : 周期とする。

(6) 式を有理化し、その振巾を求めると

$$\left(\frac{\eta}{\eta_0} \right)^2 = \frac{(p^2 + q^2) \{ \sinh^2 p(L-x) + \sin^2 q(L-x) \} + \frac{\beta^2}{h^2} \{ \sinh^2 p(L-x) + \cos^2 q(L-x) \}}{(p^2 + q^2) \{ \sinh^2 pL + \sin^2 qL \} + \frac{\beta^2}{h^2} \{ \sinh^2 pL + \cos^2 qL \}} \\ \times \frac{+ \frac{\beta}{h} \{ p \sinh 2p(L-x) - q \sin 2q(L-x) \}}{+ \frac{\beta}{h} \{ p \sinh 2pL - q \sin 2qL \}} \quad (7)$$

となる。

摩擦項が Manning の式で表わされるものとすれば

$$\alpha = \frac{gn^2}{h^{4/3}} u_m$$

と書けるから、実験中に計測した表面流速より平均流速を算定して α を求め、(7) 式の数値計算をおこなった。その結果を図-8 に示す。これは図-6 に対応するものであり、単純化した模型について計算したものであるから数値は完全に一致していないけれども、傾向はよく表わされているといえよう。

もし遊水池が無限に広い ($S \rightarrow \infty$) とすれば $\beta \rightarrow 0$ となるから、(7) 式は

$$\left(\frac{\eta}{\eta_0}\right)^2 = \frac{\sinh^2 p(L-x) + \sinh^2 q(L-x)}{\sinh^2 pL + \sinh^2 qL} \dots\dots\dots (8)$$

となり、 η/η_0 は ω が小さくなると (T が大きくなると) 漸次小さくなり、それぞれの地点に固有の値に漸近するはずである。ところが β に有限の値を与えると 図-8 のようになり極小値が表われてくる。このことから遊水池の面積が有限であるために 図-6 および 図-8 に見られるような極小値が表われると考えられ、この面積が水道の周波数特性におよぼす効果は非常に大きいといえよう。この影響は与えられた振動の周期が長いほど大きく表われる。

つぎに周期 1 分の振動について考えてみよう。いま簡単のために周期が短かいから $\beta \rightarrow 0$ と考え、 α/ω が 1 にくらべて無視できるものとすれば (実際に $\alpha/\omega = 0.11$ はである)。 $p=0$, $q=\omega/c$ であるから、(8) 式は

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \frac{\sin \frac{\omega}{c}(L-x)}{\sin \frac{\omega}{c}L} = \frac{\sin \pi \frac{\tau_0}{T} \left(1 - \frac{x}{L}\right)}{\sin \pi \frac{\tau_0}{T}} \dots\dots\dots (9)$$

となる。ここに τ_0 は水道の固有周期である。(9) 式は $2\tau_0 > T > \tau_0$ のときに $\frac{x}{L} = 1 - \frac{1}{2} \frac{T}{\tau_0}$ の点に極大値が表われることを示している。実際、模型の水道の τ_0 は 48 秒であり T が 60 秒のときはこの場合に相当し、先にのべた 1 分周期の特異な形をよく説明していると考えられる。

以上の実験は技術上の理由により全振巾が約 1 cm の振動についておこなってきたのであるが、これは原型に換算すると 1.25 m の水位変動に相当し、美保湾ないし境水道に起る振動 (半日潮, 130 分振動等) が 30~40 cm の全振巾であることを考えると、過大な振動について実験をおこなったことになる。そこで与える振動の振巾を変えることによって現象がどのように変るか、いいかえればどの程度非線型要素が影響しているかを調べるために次の実験をおこなった。すなわち周期を一定にして振巾を 3 段階に変化させた。結果は 図-9 および 図-10 に示すが、これによると半日潮の場合には振巾が増大するにつれて減衰がいちじるしくなるが、130 分振動では振巾の変化による現象の変化はほとんど認められない。

(4) 境水道の周波数特性に関する実験 II—外江付近締切り後の境水道に関するもの—

境水道を外江付近 (図-1 の破線の地点) で締切り、前節と同様の実験をおこなった。

実験は前回と同様に 1~32 分にわたる 10 種類の振動についておこなった。全振巾はやはり約 1 cm である。結果は 図-11 および 図-12 に示す。

図-11 は 図-5 に相当するものである。これによると、締切り後は 2 分より短周期の振動を除いては水道内で減衰せず逆に増大する場合があることが認められる。

図-12 は 図-6 に対応するものであり、これによると周期が 3 分のときに、④~⑥の地点でそれぞれ極大値をもっており、6 分より長い振動では各曲線とも漸次 1 に近づいていることが認められる。

前節と同様に (7) 式を数値計算して図化したのが 図-13 である。これによると全体の傾向は類似している

図-8 周波数特性曲線
(現状, 理論値)

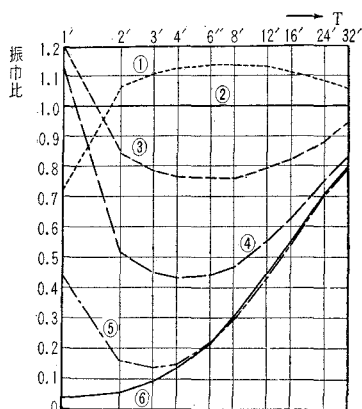


図-9 非線型効果 (現状, 半日潮)

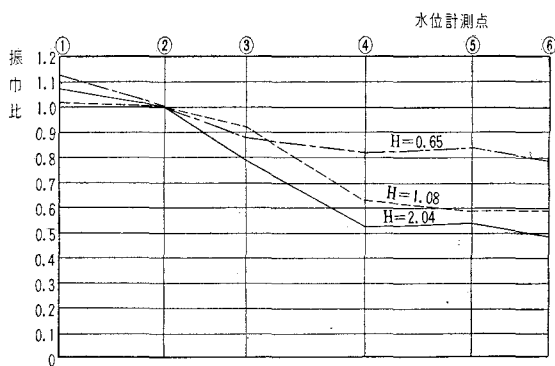


図-10 非線型効果 (現状, 130 分振動)

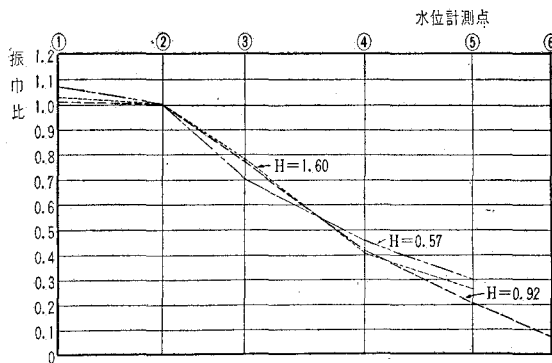


図-11 周期別減衰曲線 (縮切り後, 実験値)

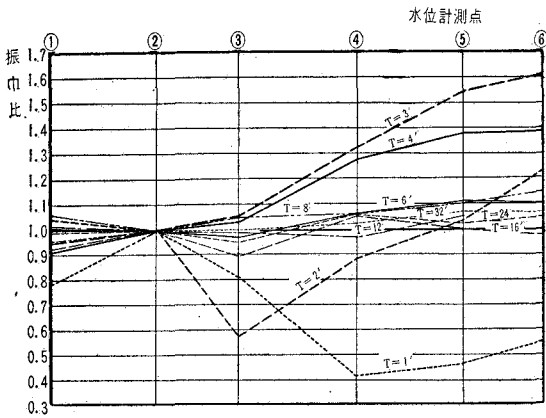
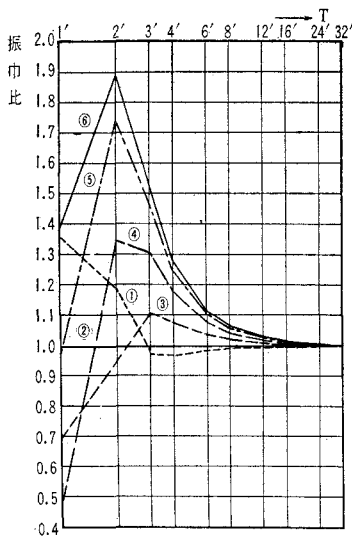


図-13 周波数特性曲線 (縮切り後, 理論値)



が、極大値の表われる周期が異なっている。理論上極大値が2分周期のときに表われるのは、次の簡単な計算によって共振現象であることが明らかである。すなわち(7)式において $\alpha=0$, $\beta \rightarrow \infty$ とおけば

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \frac{\cos \frac{\omega}{c}(L-x)}{\cos \frac{\omega}{c}L} = \frac{\cos \frac{\pi}{2} \frac{\tau_0}{T} \left(1 - \frac{x}{L}\right)}{\cos \frac{\pi}{2} \frac{\tau_0}{T}} \quad \dots \dots \dots (10)$$

となる。ここに τ_0 は水道の固有周期であるが、前節の値とは異なる。(10) 式は $T=\tau_0$ のとき共振す

ることを示しており、この水道の固有周期は理論上114秒であるから、実験をおこなった範囲が振動の中では2分周期のときに共振するはずである。それにもかかわらず3分周期のときに極大値が表われるということは、摩擦あるいはその他の理由により、水道の固有周期がのびたと考えられる。この点に関しては目下研究中である。

つぎに前節と同様に非線型要素に関する実験をおこなった。結果は 図-14 および 図-15 に示す。これによると、半日潮については水道内全区間を通じてほとんど減衰も増大もせず、振巾の変化による現象の相違は認められない。しかしながら130分振動では振巾が小さくなるほど大きくなることを示している。

これらのことを総合的に考察すると、現状の境水道では、半日潮および130分振動はともに中海の貯溜効果等

図-12 周波数特性曲線 (縮切り後, 実験値)

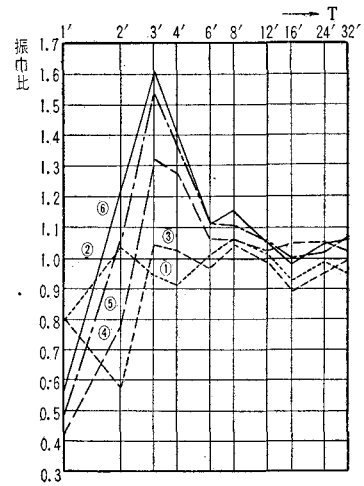


図-14 非線型効果 (縮切り後, 半日潮)

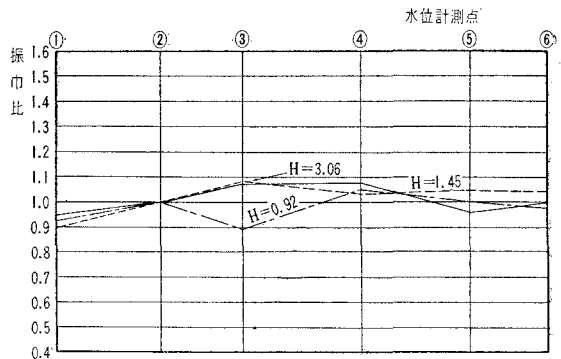
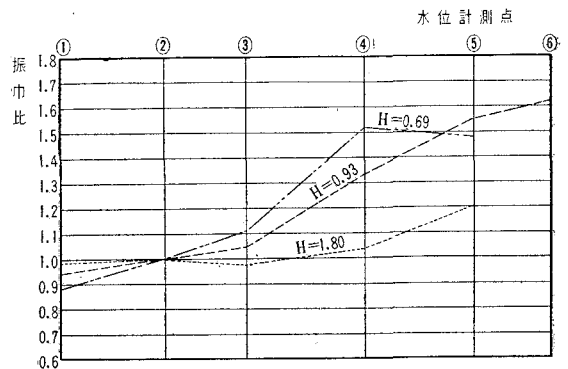


図-15 非線型効果 (縮切り後, 130分振動)



によって減衰しているが、外江付近を締切ると半日潮は現在見られるような減衰はしなくなり、130 分振動は逆に増大することが認められる。すなわち、半日潮に関しては見かけ上振巾が増大したことになり、この上に実際に増大した 130 分振動が重なるから、締切ることによって水位変動はかなり大きくなることが予想される。

5. 結 言

境水道を外江付近で締切ることによって境水道の周波数特性はいちじるしく変化する。

現状では半日潮、130 分振動ともに、奥に行くに従って減衰するが、締切ることによって半日潮は減衰なくなり、130 分振動は逆に増大する。その様相を水道の周波数特性曲線によって示した。

この実験は予備実験であり、定量的には正確なものであるとはいえないかも知れないが、定性的には十分信頼できるものと思われる。定量的な議論を進めるためには、より本格的な実験をおこなう必要がある。

この研究を遂行するにあたって終始適切な御指導を賜った速水頌一郎教授、ならびに足立昭平、国司秀明両助教授に深甚なる謝意を表するとともに、この実験は農林省の委託によっておこなったものであることを付記する。
