

名古屋港の水位変動の特性について(続)

樋 口 明 生

ON THE CHARACTERISTIC OF THE OSCILLATION OF WATER LEVEL IN NAGOYA HARBOR (CONTINUED)

by Dr. Sci. Haruo HIGUCHI

Synopsis

For researching the frequency response of the oscillation of water level in a harbor, a series of hydraulic experiments were carried out in two models of Nagoya Harbor, which were used for model experiments on the tidal current. One is small, the horizontal scale is 1/2000, and the vertical one is 1/667, and the other is large, 1/700 and 1/500 respectively.

Through the model experiments it was clarified that:

- 1) The shorter the period of incident waves is, the narrower the width of opening of the breakwater is, the larger the water surface area in the harbor is, and the shallower the water is, the more the reduction of amplitude and the increase of phase lag are remarkable in the harbor.
- 2) The period of natural oscillation in the model is as long as about 1.5 times of theoretical value, which is calculated by assuming long waves.
- 3) Experimental values of response factor and phase lag coincide qualitatively with the theoretical values derived by Robert W. Love with a simplified model.

1. まえがき

伊勢湾台風に伴った高潮による被害をふたたび繰り返さないために、現在名古屋港に大規模の高潮防波堤を建設中であるが、これが完成すれば付近の潮流は当然変化すると予想され、その模様を調べるためにここ数年来模型実験を行ってきた¹⁾²⁾。

ところで、この場合のように港湾が比較的せまい開口部をもった防波堤で囲まれる場合には、潮流のみでなく水位変動の様相もかなり変化すると思われるので、前記の潮流実験に使用した模型を用いて防波堤が完成した場合の水位変動の特性を調べた。潮流実験には予備実験用として小型模型を、また本実験用として大型模型を用いたのであるが、この研究にも両者を用いた。このうち、小型模型に関するものは一部報告したが³⁾、大型模型との比較のために概要を再録する。

2. 相似性について

水理模型実験においてもっとも重要なことは原型と模型との間に力学的相似性が成り立つことであるが、この研究においては相似性について十分考慮されていない。その理由は以下のようなものである。われわれが前記の潮流実験のとき適用した相似則には、与える水位変動の周期が一つの条件になっているが、使用した模型は半日潮を対象にして相似性を考慮したものであるから、他の周期については厳密な意味の相似性が保たれているとは限らない。また、港口の条件については、流量係数が支配的なものと考えられるが、原型の流量係数がわからないので、くわしい議論ができない。

したがって、以下にのべる事柄は厳密な意味の模型実験とはいえないが、前に適用した相似則が周期の違いによって急激に変わるとも考えられないから、定性的には原型の現象を表わすものと考えてよいであろう。この点に関しては、今後周期の違いによる摩擦係数の変化を明らかにすれば定量的にも信頼できる結果を導びくことができよう。また、流量係数については、各種の縮尺の港口模型についてこれを求める実験を実施中であるから、その結果ができれば、ある程度原型の値が推定できるであろう。したがって、この点についても定量的なところまで議論できるようになると期待される。

3. 実験装置

実験には長さ11m、幅5mの小型模型¹⁾と、長さ33m、幅25mの大型模型²⁾を使用した。

小型模型は Fig. 1 に示すようである。水平縮尺は1/2000、鉛直縮尺は1/667の防水モルタル製で一端

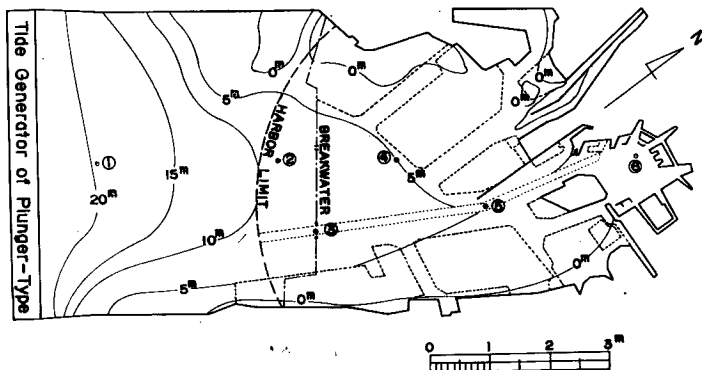


Fig. 1 Small model of Nagoya Harbor
(Horizontal scale: 1/2000, Vertical scale: 1/667)

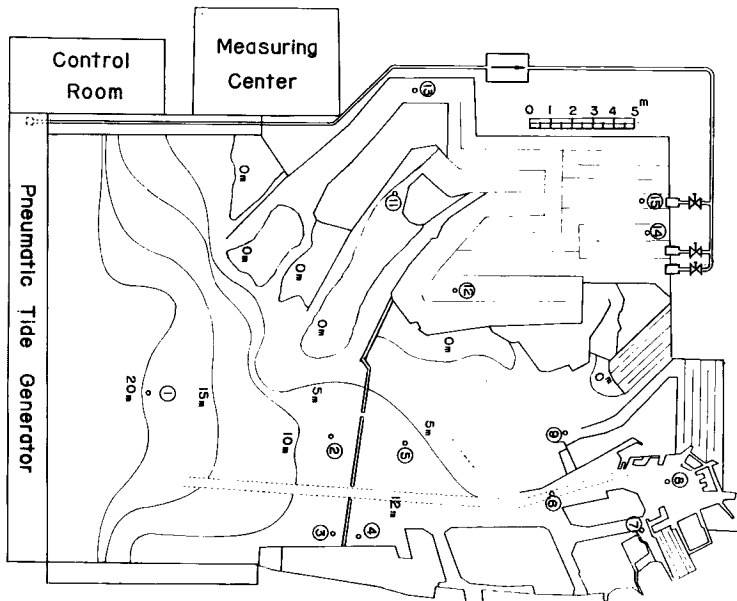


Fig. 2 Large model of Nagoya Harbor
(Horizontal scale: 1/700, Vertical scale: 1/500)

にフランジャー式の起潮機が付属している。図中丸印で囲まれた数字は水位計測点を示す。中央部の鎖線は防波堤の法線であり、⑨の処が港口である。港口は鉄板製で直立壁長方形断面である。防波堤には主口と副口の二つの港口が計画されているが、ここでは副口を締め切った場合、すなわち主口だけが開いている場合のみを取り扱った。港内の点線で囲まれた四角い区域は埋立て地を表わしており、実験ではこれが未完成の場合 (Case B) と完成した場合 (Case D) とを取り扱った。

大型模型は **Fig. 2** に示すようである。水平縮尺は 1/700, 鉛直縮尺は 1/500 で同じく防水モルタル製で、気圧式起潮機が付属している。中央部に防波堤が示されているが、この場合の港口は木製で、実物を前記の縮尺で縮めたもので、主、副二つの港口が開いている場合を取り扱っている (Case C)。

水位は、図に示された水位計測点のうち、数点のものを電気抵抗式水位計で測った。

4. 実験内容

前述の模型に、各種の周期の正弦波を起潮機で与え、港内と港外の水位を比較した。すなわち、**Table 1** に示すように、小型模型においては、Case B について 3 種類の港口幅、3 種類の平均水深の場合に、1.8~16 min の間の 9~10 種類の周期をもち波高がほぼ一定 (4 min) の正弦波を与えた。また港内水面積の影

Table 1 Condition of experiment.

Run	Model	Geographical configuration	Surface area* $S(\text{m}^2)$	Opening width $b(\text{cm})$	Water depth $d(\text{cm})$	Period $T(\text{min})$	Wave height $H(\text{cm})$
B-9	Small	Case B	21.25	9	1.56	1.8~16	about 0.4
B-18		Case B	21.25	18	2.01		
B-36		Case B	21.25	36	2.61		
D-36		Case D	11.18	18			
C-50	Large	Case C	145.23	50 + 7	2.88	1~24	0.2~0.8
C-71		Case C	145.23	71 + 43			

*Surface area is that inside of the breakwater.

響を見るために、Case D についても調べたが、この場合は港口幅は 1 種類である。

大型模型においては、地形、水深とも一種類、港口幅は 2 種類の場合に、平均 3 種類の波高について調べた。それぞれの場合の港内水面積および港口断面積を **Table 1** および **2** に示す。

Table 2 Cross sectional area of opening of breakwater, $A(\text{cm}^2)$

a) Small model				b) Large model	
Opening width $b(\text{cm})$	Water depth $d(\text{cm})$			Opening width $d(\text{cm})$	Cross sectional area $A(\text{cm}^2)$
	1.56	2.01	2.61	Main + Sub.	
9	16.8	20.9	26.2	50 + 7	197
18	33.8	42.0	52.9	71 + 43	318
36	54.0	67.0	84.5		

5. 実験結果

(1) 小型模型について

1) 周期特性

Case B の模型において、3 種類の港口幅について、1.8~16 min の周期の正弦波をくり返し与え、港内

における減衰の状態を調べた。減衰の状態は与える水位変動の振幅により異なるので、全振幅はできるだけ一定（約4mm）にしたが、 $b=18\text{cm}$ の場合だけはこの制御がよくできなかった。

同じ港内でも⑥と⑥'とは多少振幅が異なり、⑥の方が若干大きい傾向があるが、港内の代表点として⑥を選び、港外の代表点①との全振幅の比 H_0/H_1 が周期によってどのように変化するかを調べた。これを図示すると **Fig. 3** のようになる。図中3種類の点は港口での水深の相違を示す。

この図によれば、一般に周期が短いほど減衰しやすいが、周期が長くなれば減衰しにくくなり、その比は1に近づくことがわかる。水深については、小さいほど減衰がいちじるしく、港口幅についても同様のことがいえる。一般に、このような現象には、港内水面積と港口断面積の比が重要な因子と考えられるが、水深および港口幅の影響が、たんに港口断面積の変化として作用するだけではないようである。

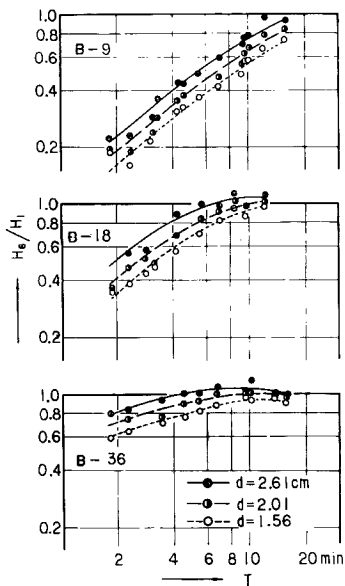


Fig. 3 Frequency response for three widths of opening and three water depths in small model of Case B

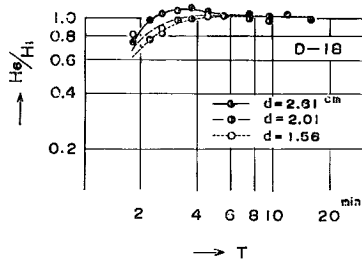


Fig. 4 Frequency response for three water depths in small model of Case D

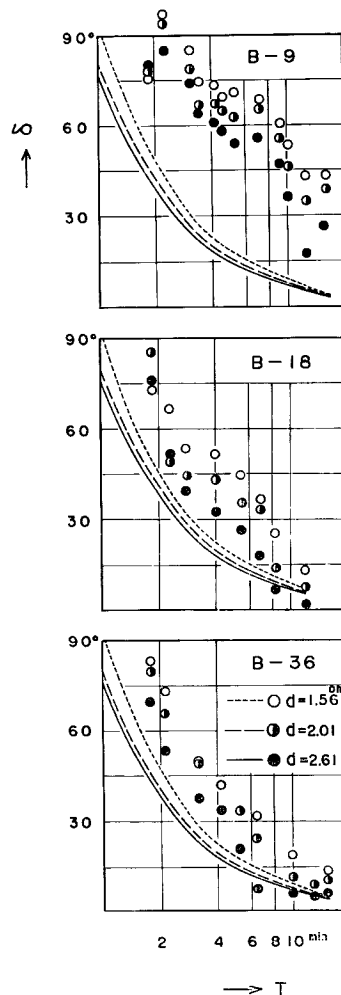


Fig. 5 Phase lag between opening of breakwater and head of harbor in small model of Case B

水面積の影響を見るために、Case D の模型について、同様の実験をおこなった結果を、**Fig. 4** に示す。これによると、 $T = 3 \text{ min}$ より長い場合はほとんど減衰せず、水深による変化もほとんど見られない。この場合は1種類の港口幅についてのみ調べた。

港内の位相の遅れについて、前と同様に⑥を代表点とし、港外との位相差を調べた。ほとんどの場合、山の遅れより谷の遅れの方が大きく、波の変形がみられ、この差は周期が短いほど、また水深が小さいほど大きくなる傾向がある。波の形がくずれから、山あるいは谷の位置が確定しにく、そのため位相の読み取り精度は悪く、数値の信頼度は振幅の場合よりかなり低い。山と谷の遅れの平均値を **Fig. 5** に示す。これは港外において水位は長波の波速で伝わると考え、①から⑥までの所要時間から、①から港口までの分をさしひいたもの、すなわち港口から⑥までの間の位相差である。図中の曲線は港口から⑥まで長波の波速で伝わるとしたときの理論値である。この図によると、一般に実験値は理論値よりも大きく、周期が短いと位相差は大きく、周期が長くなると小さくなる。また、水深が小さいほど位相差は大きく、港口幅についても同様である。したがって、**Fig. 3** と比較すれば、減衰がいちじるしい場合ほど位相差が大きいといえる。

Case D については、**Fig. 6** に示すようである。これによると、Case B より位相差は小さく、理論値に近いことがわかる。

2) 非線型効果

前述のように、港内における減衰の状態は与える水位変動の周期が等しくても振幅によって変わるいわゆる非線型効果が現われることがわかった。その様子を図に示すと **Fig. 7** のようである。これは Case B に関するもので、図の横軸は与えた水位変動の全振幅 H_1 、縦軸は振幅比である。図の左側は $T = 3.15 \text{ min}$ 、右側は $T = 9.45 \text{ min}$ の場合である。この図によると、周期が短い場合、また、港口幅の小さい場合の方が非線型効果が大きく現われることがわかる。

Case D の場合は **Fig. 8** に示すようであるが、前の図にくらべてこの効果は小さい。

位相差については **Fig. 9** に示すようである。B-18 の場合には、 $T = 3.15 \text{ min}$ では振幅が大きいほど位相差は小さくなるが、その他の場合には振幅が大きいほど位相差も大きくなる傾向がみられる。

(2) 大型模型について

1) 周期特性

Case C の模型において、2種類の港口幅

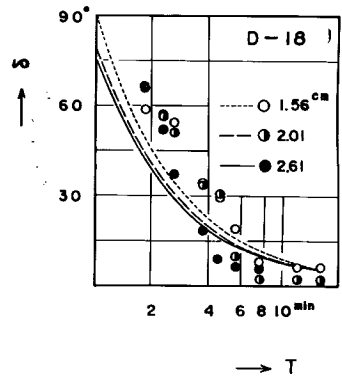


Fig. 6 Phase lag between opening of breakwater and head of harbor in small model of Case D

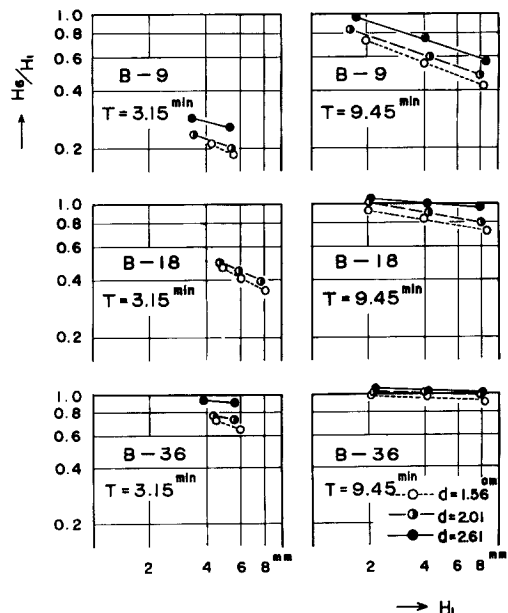


Fig. 7 Non-linear effect on the amplitude ratio in small model of Case B

について、1～24 min の周期、2～8 mm の間の3種類の全振幅の正弦波をくり返し与え、港内における減衰の状態を調べた。

港口近くの点②を基準にして、①、⑥、および⑧における振幅比を Fig. 10 に示す。

振幅比は、3種類の波高に関する実験値から全振幅 $H_2 = 0.52$ cm の場合を内挿で得た値である。この図によれば、①については、周期の短い場合にはかなり1より小さい。すなわち、①から②にける間に波高が大きくなる

ことがわかる。その程度は Green の定理により得られる値よりかなり大きい。⑥については周期が3 min の点で極小が見られるが、これについては後に考察する。⑧では周期が長いところではあまり減衰しないが、周期が短くなると減衰がいちじるしくなる。港口幅の違いに関しては小型模型の場合と同様に、せまい場合の方が減衰がいちじるしい。水深に関しては1種類の実験しかないので、その影響はわからない。

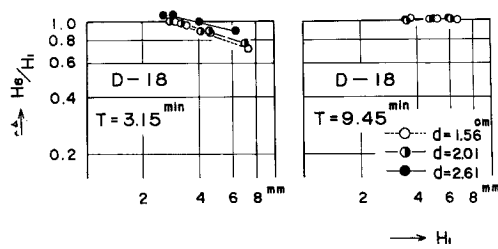


Fig. 8 Non-linear effect on the amplitude ratio in small model of Case D

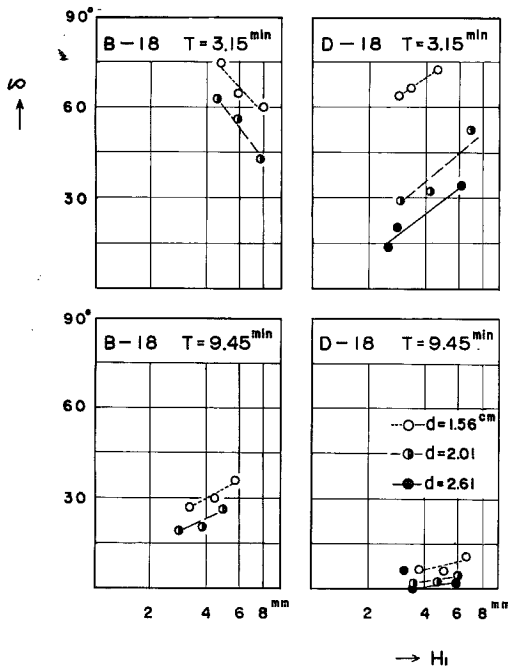


Fig. 9 Non-linear effect on the phase lag in small model

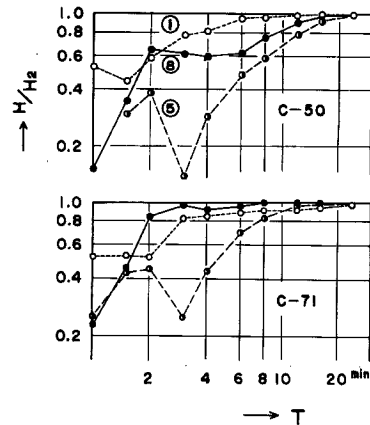


Fig. 10 Frequency response in large model

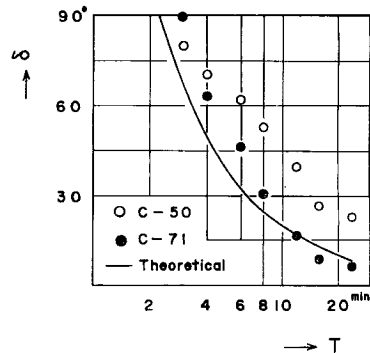


Fig. 11 Phase lag between opening of breakwater and head of harbor in large model

位相差は、小型模型の場合と同様に、山は小さく、谷は大きい、この差は周期が短い方が大きく現われる。山と谷との平均値を **Fig. 11** に示す。ここでも縦軸は **Fig. 5** と同様に港口から⑧までの位相の遅れを示している。曲線は長波の波速で伝わるとしたときの理論値である。この図によれば、**Fig. 5** と同様に、実験値は一般に理論値より大きく、周期が短くなれば位相差は大きくなり、3 min 位で 90° に近くなることがわかる。また、港口幅が広い場合 (C-17) には位相差が小さくなり、理論値に近づく。

2) 非線型効果

大型模型においても、小型模型の場合と同様に与えた水位変動の振幅によって振幅比は異なる。実験は 2 ~ 8 mm の間の 3 種類的全振幅の正弦波についておこなったのであるが、内挿、外挿により、2.5, 5.2, および 10.0 mm の場合の②と③との振幅比を示すと **Fig. 12** のようである。この図によると、周期の長い場合はこの効果は小さいが、短くなると漸次大きく現われ、3 min の点でもっとも大きくなる（よくふくらんでいる）ことがわかる。

位相についても同様に図示すると、**Fig. 13** のようである。一般に振幅が大きい方が、位相差も大きい

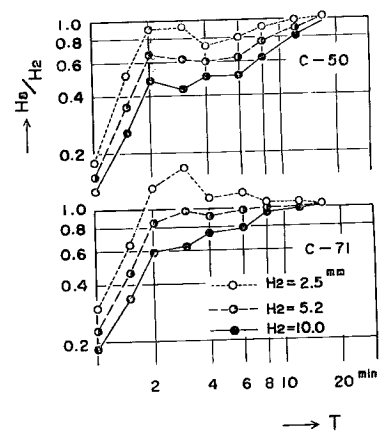


Fig. 12 Non-linear effect on amplitude ratio in large model

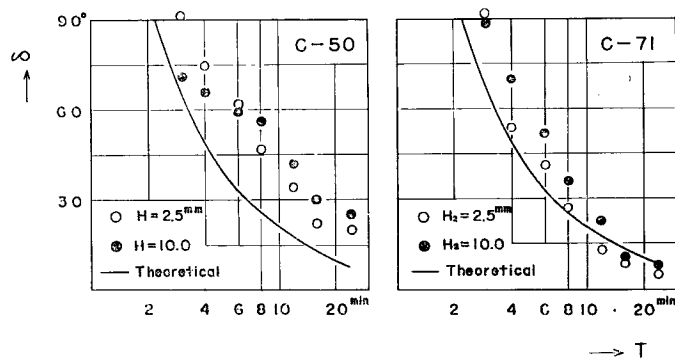


Fig. 13 Non-linear effect on phase lag in large model.

が、C-50で 6 min より短い場合にはこれが逆転し、振幅が大きい方が位相差が小さくなっている。この傾向は、**Fig. 9** 中の B-18, $T=3.15$ min の場合と類似している。

6. 考 察

(1) 固有周期

大型模型における周期特性を表わす **Fig. 10** において、港内にあって港口に近い点⑥における振幅比が、 $T=3$ min で極小になっているが、これはこの周期が港の固有周期に近く、港口が湾振動の節に近いことを示すと考えられる。このことは **Fig. 11** において、 $T=3$ min のところで位相差が 90° に近いことからもうなづける。

湾振動の周期 T_0 は、水深が一定の長方形の湾で摩擦を無視すれば、 L を湾の長さ、 d を水深、 g を重力加速度として $T_0 = 4L/\sqrt{gd}$ で表わされるが、この場合は $L=17$ m, $d=2.88$ cm であるから $T_0=128$ sec となる。実験値は理論値の約 1.4 倍である。この違いは、摩擦や地形の影響と考えられる。

大型模型における周期 3 min は、小型模型の 1.2 min に相当し、小型模型の場合にはこのような固有周期は実験の範囲に含まれていない。小型模型の固有周期を求めるために、港口を締め切り、模型の一端に水を入れ振動させたところ、**Table-3** のような結果を得た。この場合、実験値と理論値との比の平均値は 1.76

Table 3 Period of tank oscillation in small model

Water depth $d(\text{cm})$	Theoretical period $T_0(\text{sec})$	Experimental period $T_0'(\text{sec})$	Ratio of periods T_0'/T_0
1.56	30	55	1.83
2.01	27	48	1.78
2.61	24	40	1.66

$$L=600\text{cm}, \quad T_0=2L/\sqrt{gd}$$

になるが、この表によれば水深が浅いほど比が大きく現われている。このことは、**Fig. 5** において、水深が浅いほど位相差が大きくなり、理論値から離れる傾向があることと対応すると考えられる。これは、水深の違いによる摩擦の効果の違いを表わすものではないであろうか。この場合の水深は、もちろん一様ではないが、それにもかかわらず計算には最大水深を採用したので、理論値を小さく見積りすぎている傾向がある。このことを考慮すると、この比は 1.4~1.6 の範囲にあると考えるのがよさそうである。大型模型についても同様のことがいえるが、この場合は、実験値として採用した値が、小型の場合ほど正確でないからくわしい数値はわからない。

一方、前におこった境水道の実験⁴⁾によると、大型模型の場合と同様な方法により、この比が 1.5 であることが知られている。これらのことから、この規模の水槽では、固有周期に関する実験値と理論値の比は 1.5 前後であるといえそうであるが、その原因については、摩擦のためであろうということが推察できるだけで、詳しいことは今後の研究にまたねばならない。

(2) 非線型効果

港内と港外との振幅比が、与える水位変動の振幅によって異なる、いわゆる非線型効果があるのは、主として港口における境界条件の非線型性と摩擦の効果に起因すると考えられる。この効果は、**Fig. 12** によると $T=3 \text{ min}$ でもっとも大きく現われている。この周期はちょうど港の固有周期に相当するわけで、いわゆる共振点付近でこの効果をもっとも大きく現われるといえよう。このことについては、前述の境水道の実験で明らかにされた事実とよく一致している。

位相差については、**Fig. 9** の B-18、 $T=3.15 \text{ min}$ および **Fig. 13** の C-50 の 6 min より短周期で見られたような、振幅が大きくなると位相差が小さくなるということは興味をひく問題である。

(3) 理論との比較

長方形断面の水深一様な湾を、長方形の開口部をもつ防波堤で締め切り、港外に周期の長い正弦的な水位変動を与えた場合の港内の水位について、Robert W. Love が理論的な解析をおこなっている⁵⁾。これは、摩擦を無視し、港口の条件として

$$Q = \pm CA\sqrt{2g[\zeta - \eta_0]}$$

を用いたものである。ここに、 Q は流量、 C は港口の流量係数、 A は港口の断面積、 ζ は港外の水位、 η_0 は港口のすぐ内側の水位である。この場合の解としてつぎの式を得ている。

$$\eta = H \cos k(L-x) \cos(\omega t - \delta)$$

$$\text{ここに、} H = H_0 \frac{\cos \delta}{\cos kL}, \quad \sin \delta = \frac{1 \pm \sqrt{1 + 4B^2}}{2B}, \quad B = \frac{4}{3\pi} \frac{H_0 \omega^2}{g} \left(\frac{S}{CA} \right)^2 \left(\frac{\tan kL}{kL} \right)^2,$$

$$k = \frac{\omega}{\sqrt{gh}}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T},$$

であり, η は港内の水位, H_0 は港外の振幅, H は港内の振幅, δ は位相遅れ, S は港内水面積, L は港口から港奥までの長さである。

S および A として **Table 1** および **2** の値を用い, $C=0.6$ として実験値を整理し図に表わすと, **Fig.**

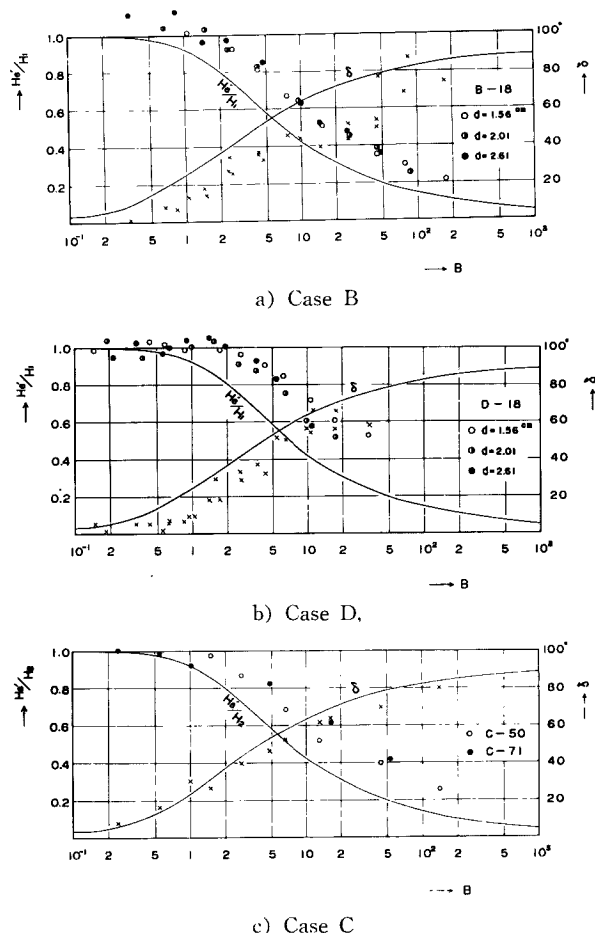


Fig. 14 Relation of response factor and phase lag against bay parameter.

14 のようである。横軸はパラメーター $2B$ であり, 縦軸は港の奥の振幅に $\cos kL$ を乗じたもの, すなわち $H' = H \cos kL$ と港外の振幅 H との比, または位相差 δ に関する実験値, 曲線は Love が計算した理論値を表わす。

Fig. 14(a) は小型模型の B-18, **Fig. 14(b)** は D-18 の場合, **Fig. 14(c)** は大型模型に関するものである。

この図によれば, 一般に傾向はよく一致するが数値はかならずしも一致しない。とくに小型模型においてはそうである。この理由は明らかではないが, 理論を導くときのモデルと実験に使用した模型との形の違い, 流量係数の見積り方, および摩擦などに起因すると考えられる。このうち模型の形に関しては, 平面的な形もさることながら, 海底地形も一様ではない。にもかかわらず計算には最大水深を使用しているから,

そのために差が出るはずである。しかしながら、これはパラメーターを小さく見積ることになり不一致の説明にはならない。またこれによる点の移動はあまり大きくない。流量係数は、計算では0.6としたが、これは同一の模型防波堤の港口で、定常流について求めた実験値から割り出したものであるから、これでよいと思われるが、かりに $C=1.0$ とすると、実験値は図の左へ0.36移動し、理論値とよく一致する。摩擦については、理論では考慮されていないにもかかわらず、振幅は実験値の方が大きく、また位相差は小さく出ている。一方、Loveがおこなった Narragansett Bay Model の実験値との比較は、良好な結果を得ており、梶浦は同様な考えで様な長方形断面をもつ水路が、防波堤位置において連結されている場合を取り扱い、有明海の潮汐模型実験結果と比較しているが、これもよい一致を得ている⁹⁾。にもかかわらず、ここでは良好な一致が得られないのは、何か特別な理由があるのかもしれない。この点については今後ももう少し調べてみたい。

7. あとがき

名古屋港の潮流実験に使った大小二つの模型によって、防波堤が完成した場合の港内の水位変動について実験した。その結果つぎのことが明らかになった。

- 1) 与える振動の周期が短いほど港内における減衰がいちじるしく、港外との位相差も大きい。
- 2) 水深が浅いほど、また、港口幅がせまいほど減衰がいちじるしく、位相差も大きい。
- 3) 与える振動の振幅により減衰の仕方は異なり、振幅が大きいほど減衰がいちじるしい。
- 4) 港内における位相遅れも振幅により異なるが、周期や地形によって大小関係は一定しない。
- 5) 固有振動の周期は、長波の波速から計算されたものの1.4～1.6倍である。

最後に、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岩垣雄一教授、実験を一部担当した技研興業KKの吉田幸三氏、ならびに実験に協力していただいた北川吉男、平賀太郎の両氏に深甚なる謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 樋口明生、吉田幸三：名古屋港付近の潮流に関する水理模型実験について（1）、京大防災研究所年報、第5号A、昭37. 3、pp. 323～331.
- 2) 樋口明生、吉田幸三：名古屋港付近の潮流に関する水理模型実験について（2）、京大防災研究所年報、第6号、昭37. 7、pp. 346～364.
- 3) 樋口明生、吉田幸三：名古屋港の水位変動の特性について、第9回海岸工学講演会講演集、昭37. 10、pp. 34～37.
- 4) 樋口明生：境水道の水位変動に関する水理模型実験（1）、京大防災研究所年報、第3号、昭34. 12、pp. 54～64
- 5) Love, Robert W. : Tidal response of a bay with a constricted opening to the sea, Thesis for M.S., A and M College of Texas, Dept. of Oceanogr., 1959, pp. 1～66.
- 6) 梶浦欣二郎：湾水振動におよぼす防波堤の効果、地震研究所集報、第41号、1963、pp. 403～418.