

高潮の共振と湾入部における変形についての実験的研究

室 田 明*・島 田 壮 八 郎**

1. ま え が き

高潮に関する理論的研究と数値解析については多くの研究成果が発表され、それらが高潮の防災工学に貢献したところはきわめて大きい。しかしその理論上の、あるいは数値計算の結果を実証的に判定するには高潮現象の人為的な再現性が不可能であるために帰納的な立場に立つ検証によらざるをえない。たとえば数値計算の結果を観測潮位記録に合わせるべく各種の抵抗則あるいは境界条件を試行的に訂正仮設して、しかるべき数値モデルが構成されるのであるが、物理現象の十分な理解によらない場合はいかに精緻な数値実験といえどもその普遍性に若干の疑念を残さざるをえない。一方、防潮のための水工構造物の設計にあたって水理模型実験を行なう場合、長周期波発生用の造波機によっていわゆる高潮波形を再現し所要の実験を行なうのが現行の方法であるが、いうまでもなく、高潮は大規模の気象擾乱からはげしいエネルギーの移行をうける強制振動としての波動現象であるから単純な造波機によって発生させられた自由長波による上のような実験はやはりこの意味で便宜的なものといわざるをえない。移動する風場、すなわちモデル台風による高潮を実験的に研究するため、筆者らは昭和 38 年度機関研究費によっていわゆる高潮発生装置を試作し、以後予備・調整運転をくり返し最近ようやく本格的な実験過程に入った。

装置の概略と性能、および発生しうる気象状態については第 11 回海岸工学講演会¹⁾において発表し、つづいて open sea での高潮発達過程²⁾および風から海面へのエネルギー移行に関連する表面擾乱波の特性³⁾についてその詳細を発表してきた。吹送距離が極端に短いために wind draft が十分に効かないという欠点を除いて擾乱波の統計的特性等はほぼ満足すべきものであった。

こうした予備実験の後に、浅海での高潮波動の共振、あるいは湾入部の高潮変形についての実験を行ない、とくに前者について興味のある成果をえたのでここに報告する。なお湾入部での局所変形については事柄がきわめて複雑であり、実験方法もむずかしくいまだ満足しうる程度の実験資料も集積していないので今回はその概要の

みをのべ、改めて解析法とともに一括報告したいと考えている。

2. 高潮の共振現象とその問題点

海底摩擦や偏向力のような二次的要因を無視し、しかも気象擾乱が x 方向(台風進行方向)のみの一次元的拡がりをもつものとしその気象擾乱関数をつぎのようにおく。

$$F(x-Vt) = \frac{1}{\rho} \left(hP_s - \int_x \tau_s \cdot dx \right) \dots \dots \dots (2.1)$$

ただし、 V : 台風中心の進行速度、 h : 静水深

P_s : 水表面における大気圧

τ_s : 水表面に作用する風のせん断力

ρ : 海水密度

このとき高潮の基礎方程式はつぎのようになる。

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - C_0^2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \dots \dots \dots (2.2)$$

ただし、 η : 静水面からの水位変動量、 $C_0^2 = gh$ 。

岸からの反射のない open sea での解は、

$$\eta = \frac{1}{2(C_0^2 - V^2)} \left\{ \left(1 - \frac{V}{C_0} \right) F(x + C_0 t) + \left(1 + \frac{V}{C_0} \right) F(x - C_0 t) - 2F(x - Vt) \right\} \dots \dots \dots (2.3)$$

式(2.3)によれば台風中心の進行速度 V と長波伝播速度 C_0 が等しいときに共振することになる。

$V \approx C_0$ の場合は図-1の数値計算に見られるように台風中心が適当な時間の後に長波主体から先行または後退するので式(2.2)の右辺が消えいわゆる自由長波になるのであるが、 $V = C_0$ の場合は波動主体の上に常に擾乱が乗って移行し、たえず海面にエネルギーの供給が行なわれるので波高がいちじるしく増幅されるのである。

以上はもちろんきわめて粗い基本式からの結果であってさらに精密にたとえば海底摩擦を考慮すれば、少なくとも波高は無限度にはならないが、それでも $V = C_0$ で疑似共振状態に入ることには変わりはない⁴⁾。

open sea での議論はともかくとして、工学上重要な沿岸での問題に限って、はたして上のような共振状態が期待できるかどうかについて大いに疑義がある。とくに湾入部のように部分的に閉塞された水域において通常の場合は擾乱の平面的拡がりとは湾の大きさよりはるかに大

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部

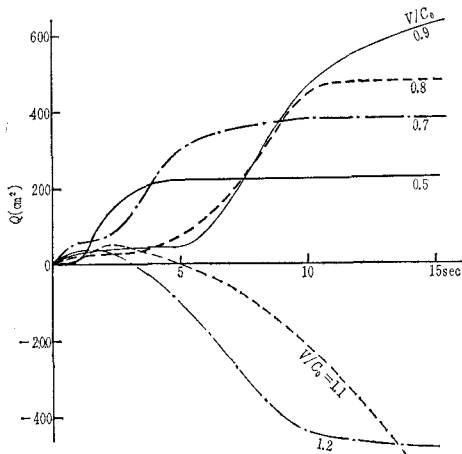
** 学生会員 大阪大学大学院 工学研究科

図-1 高潮発生過程の数値計算

$$Q(t) = \int_{-L/2}^{L/2} \eta \cdot dx$$

η : 水位上昇量 (cm)

L : 台風内域に相当する観測板の直径 (cm)



きいのでとうていこうした形式の共振状態は現われないという意見もある。

これらの諸点についての実験点検証を以下にのべる。

3. 実験装置および方法

以下に示すすべての実験結果は静水深 $h=20$ cm, 軸流送風機の風量 (したがって気圧低下量および風速) 一定の条件のもとで行ない, その擾乱中心の進行速度 V については,

$$0.146 \leq V/C_0 \leq 1.2$$

の範囲に変化せしめた。

図-2 水槽平面図と定点波高計の位置 (単位: m)

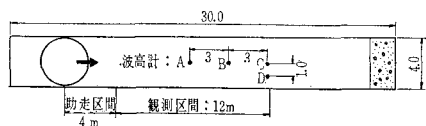


図-2 の装置停止位置で停止状態のまま送風機を始動し, ほぼ 5 秒後に模型高潮主体部である平均水位上昇が十分熟成し定常状態に達するので, それから装置を所定速度で進行させる。

定点観測のための 4 個の波高計の設置位置を図-2 に示し, 装置観測板に固定し模型台風とともに移動する移動波高計の配置を図-3 に示す。

波形オシログラムから短周期表面擾乱波を消去し平均水位上昇量を表示するため, ブラシ時間 0.5 sec とする移動平均法によって資料を整理した。

4. 実験結果とその検討

移動波高計によって記録した高潮発達の状況の一例を図-3 に, 定点波高計による観測波形を図-4 に示す。

図-3 移動波高計による観測波形

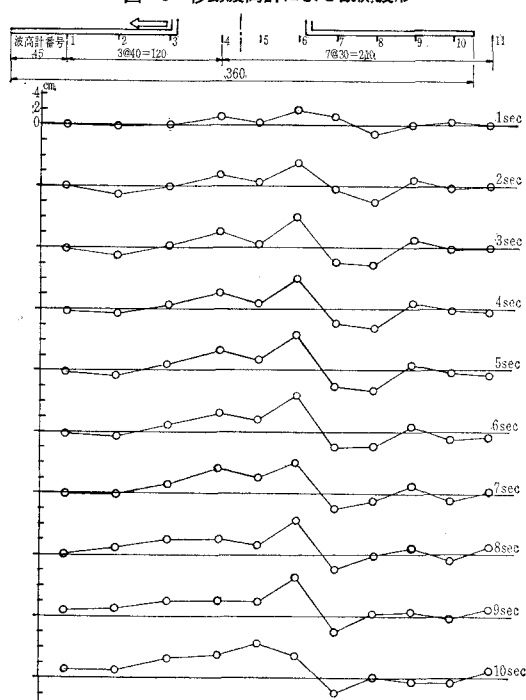
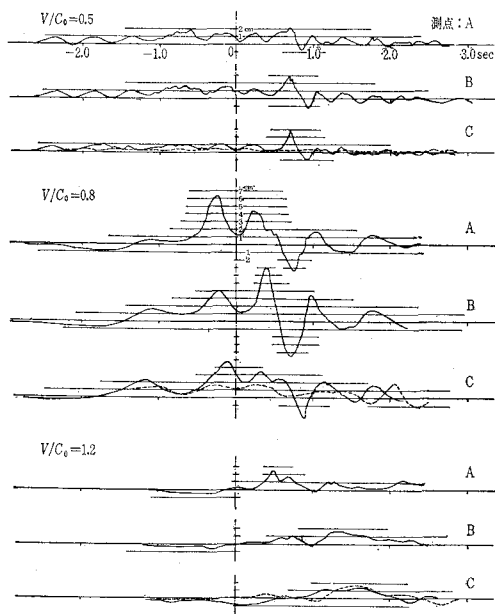
図-4 定点波高計による観測波形
(図中点線は波高計 D によるものを示す)

図-3 によれば, 始動後 2~3 秒にして水位上昇部が熟成状態に達し, 図の場合は $V/C_0=0.8$ であるから台風中心から先行する forerunner が漸次発達しつつあるのが認められる。図に見られるごとく平均水位上昇による波形はかなり整正なものであるが, それでもたとえば波高 $\eta_{\max}$ のみで built-up の様相等を議論するのは適当でない。それで水位変動量の平均的な量としてつぎのよ

うなものを考える。

$$E(t) = \int_{-L/2}^{L/2} \eta^2(x, t) dx, \text{ または,}$$

$$E(x) = \int_{-T/2}^{T/2} \eta^2(x, t) dt$$

$$Q(t) = \int_{-L/2}^{L/2} \eta(x, t) dx, \text{ または,}$$

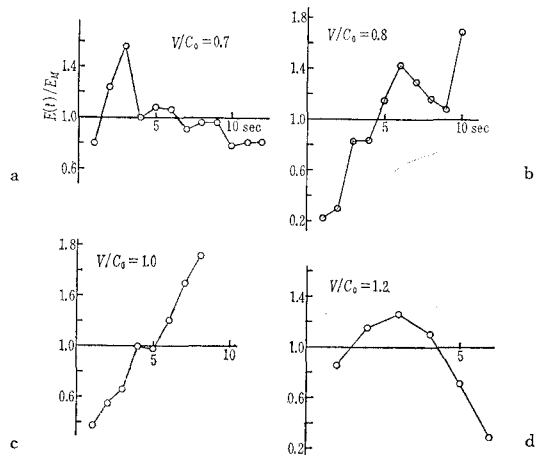
$$Q(x) = \int_{-T/2}^{T/2} \eta(x, t) dt$$

ただし, L : 台風域内に相当する観測板の直径

$T=L/V$ とし, x および t の積分原点は
台風中心に相当する軸流送風機中心位置
とする。

種々の V/C_0 につき, 図-3 のような生長過程の記録を整理し, 実験継続時間内の $E(t)$ の時間平均を E_M として, $E(t)/E_M$ によって生長過程を図示すれば, 図-5 のごとくである。 $V/C_0=0.8 \sim 1.0$ の場合は台風域内で高潮が急速に built-up されるが, $V/C_0 > 1.0$ の場合は同図 d のごとく, 台風中心が波動主体部から先行するため台風域内の水位上昇は急掛り減少する。なおこの実験結果は図-1 の数値計算結果と定性的にその傾向がかなりよく一致している。

図-5 高潮の発達過程の実験結果



つぎに定点波高計による記録, 図-4 を見れば一見して $V/C_0=0.8$ の場合最も強い水位上昇がもたらされることが認められる(図中に測点 C, D とあるのは図-2 に示すごとく台風進行方向に直交する同一横断線上に設けた波高計位置を示し, 波形の二次元的形状を check するために設けたもので図に見られるごとく変動量の大きさは台風中心の進行線上にある C の方が大きいのはもちろんであるが, 両者の位相はほとんど完全に一致している)。

ほぼ $V/C_0 < 0.7$ の場合に forerunner の発達が明瞭であるが, $V/C_0 > 0.8$ の場合は解析結果の示すごとくかなり顕著な depression が先行する。surge 主体については, V/C_0 が大きくなるほど分散性が減少し主体部

波形は整正となるが, とくに $V/C_0=0.8$ の場合について台風中心部で大きな水面凹部が現われることはこの装置固有の機構によるものである。surge 主体に続いていわゆる resurgence に相当する周期変動が記録されているがこれは正確な意味での resurgence ではなく装置進行にともなう ship waves である。

さて, V/C_0 によって built-up の程度がどのように変化するかを見るため, 前述の平均量, E あるいは Q によってこのことを調べてみる。

まず定点波高計の記録により平均水位変動量 $Q(x)$ を求め V/C_0 との関係を示したのが 図-6 であり, 他方, 移動波高計による波形から Q_M, Q_{max} を, あるいは E_M, E_{max} を求めおの V/C_0 との関係を示したのが 図-7, 図-8 である。ただし添字 M は実験時間内の全資料の算術平均を, 添字 max は同じく全資料中の最大値を示す。

以上のいずれの整理においても, きわめて明瞭に $V/C_0=0.8$ で共振状態に入っていることが認められ, 近似理論の予想した $V/C_0=1.0$ といった共振条件は本実験では全く認められなかった。

進行性波動と気象擾乱からのエネルギー移行との間の複雑な相互干渉が介在するので, $V/C_0=0.8$ といった臨界値について正確な解釈はできないが, 少なくとも実験的にこうした値が明瞭に把握できたことはきわめて意義

図-6 V/C_0 による高潮の built-up (定点波高計による)

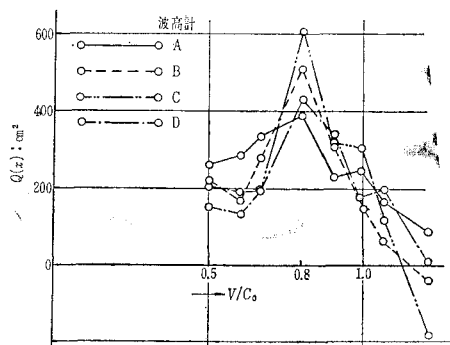


図-7 V/C_0 による高潮の built-up (移動波高計による)

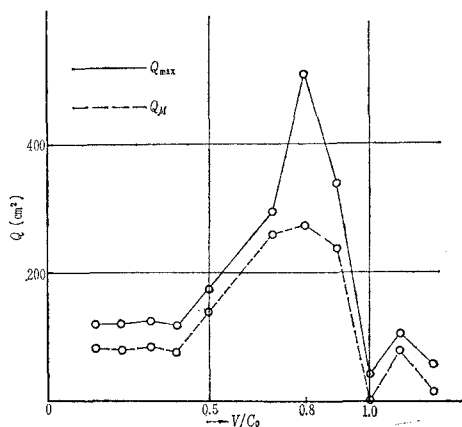
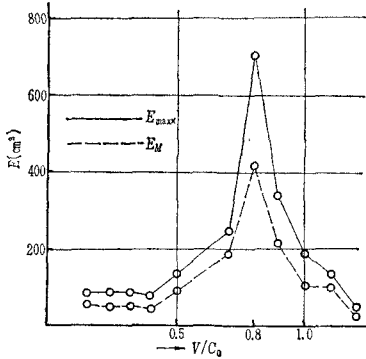


図-8 V/C_0 による高潮の built-up
(移動波高計による)



あることを考える。

5. 湾入部における変形：その実験装置と方法

V 字形湾入部において、その湾軸に沿って台風中心が外洋から湾奥に向かって進行する場合の高潮変形について実験を行なう。湾口幅および湾の長さは表-1 に示すとおりであり、とくに湾長については台風内域に相当する観測板の直径の 1.0~2.0 倍の間で設計し、湾奥で正しく頂点を作ることはその付近でいちじるしい特異性が現われることを惧れて 図-9 のごとく最奥部の幅を 40 cm とするとき台形とする。湾側壁は静水面以下を鉛直壁とし、その上部については同じく 図-9 に示すように勾配 1/10 の斜面とする。これは装置全体が十分湾奥に侵入した場合でも、側壁によって陸側からの吹送風がしゃ断されることを防ぐために設けたもので高潮潮位が高い場合はこの斜面をこえて overtopping することもありうる。

湾軸に沿って 7 個の波高計を設ける。その位置は高潮増幅の程度がまず Green の法則にしたがうものとし、 η/η_0 (η : 各位置での高潮波高, η_0 : 湾口での高潮波高) が等間隔になるごとく、

図-9 湾形模型平面図

表-1

model	A	B	C
l'	400	600	800
l	360	540	720
1/b ₀	1	1.5	2

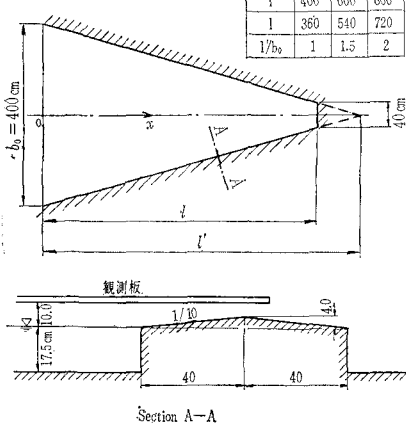


図-10 湾内波高計の位置
(図中文字は波高計番号を示す)

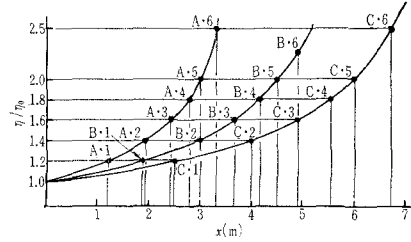


図-10 に示す配列で設置する。なお湾口の波高計 (No. 0) を除き奇数番号、偶数番号の波高計群を 1 セットとし同一条件の元で各セットの測点群について計 2 回の実験を行なった。

6. 湾入部における変形：その実験結果と考察

観測波形の一例を 図-11, 12 に示す。図-12 は奥行き の最も浅い A 型モデルの $V/C_0=1.2$ の場合を、図-13 は奥行き の最も深い C 型モデルの $V/C_0=0.8$ の場合の波形を示す。いずれの観測波形においても surge 主体部に先行して強い depression が現われること、および湾奥に向って顕著な水位上昇が行なわれるが、同時に分散性波動が single hump 状の surge に移行する傾向は共通している。

湾奥に向って高潮波高がどのように増幅されるかを調

図-11 湾入部における高潮の変形 ($V/C_0=1.2$, model : A)

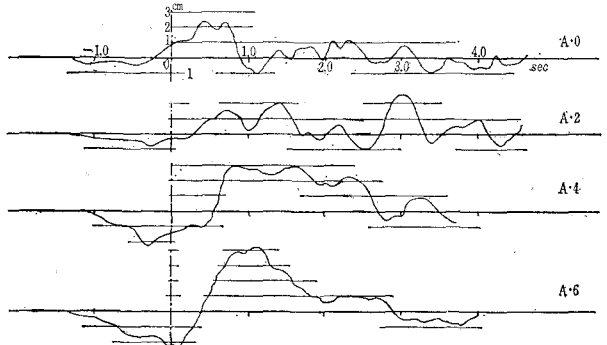


図-12 湾入部における高潮の変形 ($V/C_0=0.8$, model : C)

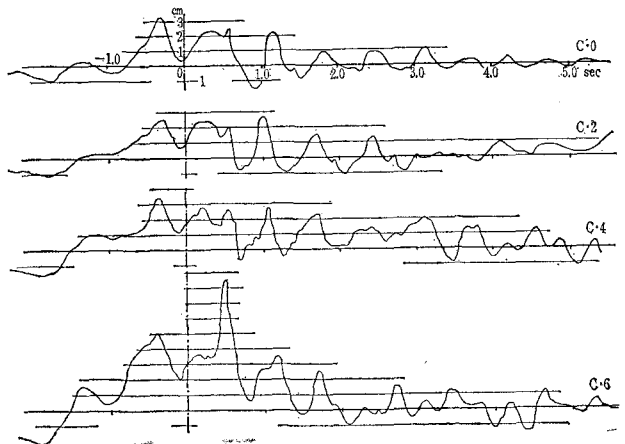
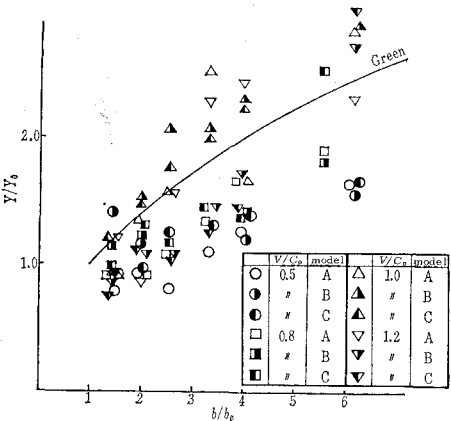


図-13 湾幅の変化による高潮波の増幅



べるには、波形が不規則であるのでつぎのような水位上昇の積分量で検討することにする。すなわち、

$$Y(x)=\int_{-T/2}^{T/2} |\eta(x,t)|dt, \quad T=L/V_0$$

ただし、 $V/C_0 \geq 1.0$ の場合は、積分原点 $t=0$ は高潮

波形の crest とする。
湾口における Y を Y_0 とし、縦軸に Y/Y_0 を、横軸に b_0/b をとって実験値を整理すれば図-13 のごとくである。図中に Green の関係 $Y/Y_0=(b_0/b)^{1/2}$ を同時に示す。

これによれば、まず $V/C_0=1.0$ の場合に限って Green で予想されるより強い増幅が行なわれ $V/C_0=0.5$ が増幅の程度が最も小さい。また、湾の奥行きが深いか浅いかといった湾形による差異は現在のところほとんど認められない。

参 考 文 献

- 1) 室田 明・村岡浩爾・岡田 耕：高潮発生装置の試作とその予備実験，第 11 回海岸工学講演会講演集，昭 39.
- 2) 室田 明・村岡浩爾・岡田 耕：高潮発生機構に関する実験的研究，第 20 回年次学術講演会，昭 40.
- 3) 室田 明・村岡浩爾・島田壮八郎：高潮発生装置による発生波の特性について，関西支部年次学術講演会，昭 40.
- 4) Miyazaki, M. : A theory of storm surge, 中央気象台彙報，第 27 巻，昭 31.