

東京湾の進入長波に対する振動応答特性

日 野 幹 雄*・日 野 和 子**

1. 序 論

近時大都市の急速な発展にともなって都市の内部および周辺の総合的な開発の必要が呼ばれている。昭和 36 年 11 月産業計画会議は、東京湾の総合開発計画の一部として東京湾の川崎・木更津間に横断堤を築造することを提案した。これは東京湾々奥の低地帯を高潮の被害から守ると同時に京浜の工業地帯と千葉県とを結ぶ産業道路としての一石二鳥の役割をはたすものである。

東京湾横断堤の高潮に対する減衰効果については、すでにいくつかの論文が発表されており、著者らも同様な研究を続けてきた。

一方、横断堤を設置すると付随的にいくつかの問題が発生する。湾内の水循環や外海との水交換の悪化による水質汚濁の可能性もその一つであり、また湾の振動特性が大きく変化する可能性のあることである。後者についてさらに説明すれば、現状の東京湾には周期が約 60 分くらいの固有振動特性があり、高潮などのときに外力と共振してこの振動が重ね合わさって大きな水位上昇を生ずる。ここで、外力というのは、気圧変動とか風の息による海面応力の変動やうねりであって、これらに含まれる変動の周波数成分のうち、湾の固有振動数に近いものが増幅作用をするのである。この種の現象は高潮の他に津波とか外海からの周期の長い波動によっても起りうる。

最近、Miles and Munk¹⁾ によって Harbor Paradox ということがいい出されている。つまり、防波堤を設置してもその結果港の固有振動数が外海からの卓越波の振動数（周期）に近くなれば、港口を狭めても必ずしも港内の波浪が減衰するとはかぎらず、むしろ逆に水面変動が大きくなることもあるというのである。実際には、港口での慣性項、抵抗や海底摩擦力などのためにこう簡単ではなからうが、Ippen・合田²⁾ の室内実験や Wilson³⁾ による Table Bay Harbor (Cape Town) の実測・模型実験の報告は Harbor Paradox 現象の存在を裏づけるものである。

東京湾横断堤の築造によっても、同様に湾の振動特性が大きく変わるであろうし、この際、東京湾における風の息とか津波の卓越周波数（あるいは存在が予想される

周波数域）と固有振動数とが接近することは厳に避けなければならない。近年の観測によれば、外洋の波は非常に広い帯域幅のスペクトルをもっているとされるから、特に津波のような特異な場合でなくても、外海からの入射波のうち低周波数のものと共振しセッシュが発生することもありうる。

これらの研究を実測なり模型実験で行なうことは、観測装置や模型の大きさまた相似律などの問題からかなりの困難がある。しかし、高潮計算でその有用性が実証された高速度の電子計算機を利用して数値解析を行なえば、いくつかの factor の制御の容易さも加わってかなり広範囲の数値実験をすることができる。

この論文では、まず現状の東京湾の振動特性と横断堤を築造した場合のその変化を調べるために、湾口において連続スペクトルをもつ不規則な水位変動を与え、湾内各点での振動スペクトル、進入波と各点との水位変化の相関などを 2 次元化された運動・連続の差分方程式の数値計算から求める。使用した電子計算機は IBM 7090 である。

この研究の結果、次のことがわかった。①東京湾には周期が 60~90 分くらいの卓越した固有振動周期が存在することが理論的にも明らかになった。②見掛けの長波の進行速度は $\sqrt{gh}$ より遅く湾奥に近づくにつれてその傾向が強くなる。③進入波は一見あたかも境界がないかのように湾奥に進入しているが、周期の長い波は湾奥で全反射している。一般に波長の短い波ほど減衰性が大きい。④進入波のうち波長の長いものは、湾口からのエネルギーを湾奥に輸送する働きをし、波長の短い波は湾口から供給される波のエネルギーを逸散する役目をする。非線型項は波長の大きい波のエネルギーを短波長の部分へ移す作用をする。⑤横断堤の築造によって堤内の長周期のセッシュは減少し、堤外ではやや増加するが東京湾の振動特性はそれほど大きく変化しない。

2. 基礎方程式・湾口条件および非線型項の影響

(1) 基礎方程式

運動方程式および連続の方程式は高潮計算の場合と同じであるが、気圧降下の項や風による海面摩擦力の項はなくなる。 x 軸を東向きに、 y 軸を北方にとり、それぞ

*正会員 工博 電力中央研究所

** 三菱原子力工業KK

れの方角への単位幅流量を M, N ; 時間を t , 水位上昇を ζ , 水深を h とすれば, 基礎方程式はつぎのようである。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{M}{(h+\zeta)} \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{N}{(h+\zeta)} \frac{\partial M}{\partial y} = -g(h+\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + fN - \frac{\tau_b^{(x)}}{\rho_w} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{M}{(h+\zeta)} \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{N}{(h+\zeta)} \frac{\partial N}{\partial y} = -g(h+\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} - fM - \frac{\tau_b^{(y)}}{\rho_w} \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\left(\frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y}\right) \dots\dots\dots (3)$$

ここに $f=2\omega \sin \varphi$ = コリオリー パラメーター

ω = 地球の回転角速度

φ = 緯度

$$\vec{\tau}_b = \frac{r_b^2 \rho_w}{(h+\zeta)^2} \mathbf{V} \sqrt{m|\mathbf{V}|^2 + (1-m)} \dots\dots (4)$$

$$\mathbf{V} = \vec{M} + \vec{N}$$

式(4)において, $m=1$ とすれば, 海底摩擦力は2次式となり, $m=0$ とすれば線型となる。係数 $r_b^2 \rho_w$ は $m=1$ の場合, $(r_b^2 \rho_w)_{\text{quad.}} = 2.6 \times 10^{-3}$ が使われる。東京湾内の平均水深を 20 m と考え, また湾内振動の流速を 10 cm/sec のオーダーと考えれば, $m=0$ の場合の係数は $(r_b^2 \rho_w)_{\text{linear}} = (r_b^2 \rho_w)_{\text{quad.}} (h+\zeta) \mathbf{V} \approx 3.7 \times 10^{-3}$ である。

数値計算にあたって, これらの式を差分式に置換する場合には, 計算不安定を生じないよう格子点間隔・時間間隔および差分式型を選ばなければならない⁴⁾。

(2) 港口条件

境界条件として自然海岸線では $M=N=0$ とし, 防潮堤に沿っては $N=0$ とする。

湾口からの進入波は湾内に進入のち海岸線や横断堤で反射され, その一部は湾口にもどってくる。この波は湾口で再び反射され, 新たに進入する波とともに不規則進入波を形成する懸念がある。つまり, 久里浜一金谷での水位の不規則変化のうち進入波として伝播するものはこれから湾内海岸線からの反射を差し引いたものになる。この関係は湾口での不規則水位変化を $\zeta_{\text{rand}}(t)$, 進入波の往復時間を T , 湾奥よりの反射を $\zeta_{0,\text{ref}}(t-T)$, 再反射波を $\zeta_{0,\text{reref}}(t-T)$ ($=\zeta_{0,\text{ref}}(t-T)$ または $-\zeta_{0,\text{ref}}(t-T)$), 新たな進入波を $\zeta_{\text{inc}}(t)$ とすれば,

$\zeta_{\text{rand}}(t) = \zeta_{\text{inc}}(t) + \zeta_{0,\text{ref}}(t-T) + \zeta_{0,\text{reref}}(t-T)$ であり, 湾奥への進入波は

$$\zeta_0(t) = \zeta_{\text{inc}}(t) + \zeta_{0,\text{reref}}(t-T) = \zeta_{\text{rand}}(t) - \zeta_{0,\text{ref}}(t-T)$$

である。したがって, 厳密には模型実験で使用する波消しの作用をするよう数学操作(今, 仮に **mathematical wave filter** と名づける)をして, 湾口での再反射をな

くすることが望ましい。

宇野木⁵⁾らの東京湾の津波の研究によれば, “個々の波はすべて, あたかも境界がないかのように湾奥に向かって進んでおり, はっきりと孤立した形の反射波をみとめることができない。これは波長が比較的長い場合には, 複雑な形をした海岸からの反射や, 水深変化による部分反射などが複雑に干渉合って孤立した形の反射波が生じにくい”といわれる。

それゆえ, この計算では特に **mathematical wave filter** をつけなくとも湾口での再反射は防げると考えられる。この点については, 計算結果の項で再検討を行なう。

(3) 非線型項の影響

運動方程式には慣性項や海底摩擦力などの非線型項が入っているので, これらがどのように現象に影響するかを検討する。実際の現象の **simulation** にはこれらの項をそのままの形で入れておくのが良いのはもちろんであるけれども, 現象を解明するための一段階としては一応式を線型化しておくのが便利である。そのためつぎのような計算を行なった。

非線型項が特に問題となるのは横断堤のある場合であるから, まず開口幅が 1000 m のときの慣性項の効果をみとめる。

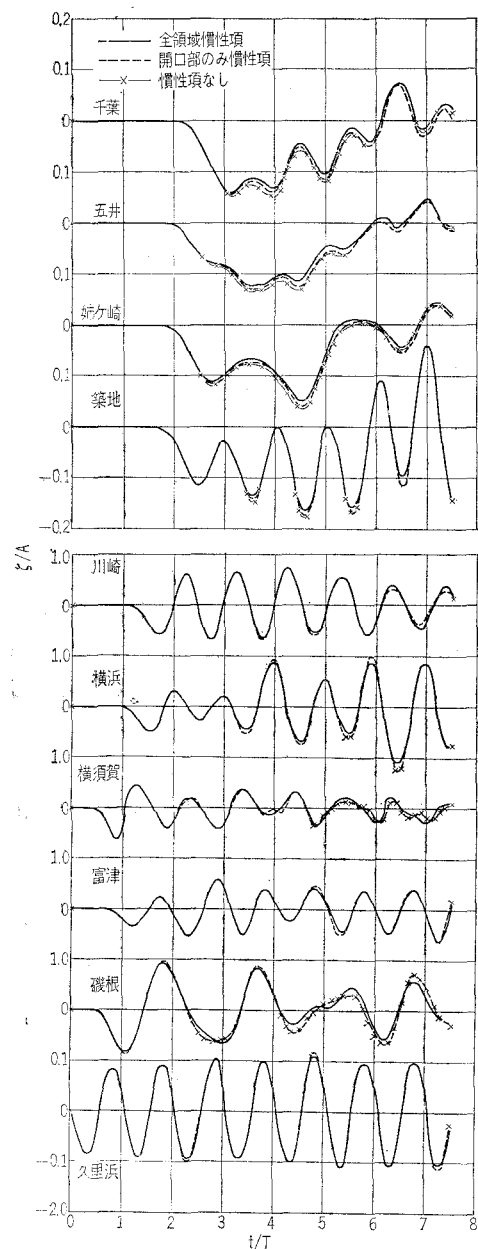
$$\zeta = A \sin(2\pi \frac{t}{T}) \dots\dots\dots (5)$$

$T=32 \text{ min}$, $A=40 \text{ cm}$ の正弦波を湾口で与え, ①慣性項を湾内の全面に入れた場合, ②開口部のみに考えた場合, ③開口部でも慣性項をぬいた(したがって連続式のみの)場合の湾内各点の水位変化を比較した(図-1)。この際, 海底摩擦力は2次式を用いた。この結果, ②と③との違いはほとんどなく, 高潮のような急速な水位・流速の変化のともなわない場合には, 開口部の慣性項が特に影響をもつことはないことが示される。次節に述べるように, われわれの計算では波長の短い波ほどエネルギーが少ないような与え方をしており, 慣性項が重要な意味をもつことはない。また, ①, ②を比較すれば, 慣性項が開口部以外の水深の浅い海岸線近くで影響をもつことがわかる。しかし, 波形をそれほど大きく変化させるものではない。

つぎに, 2次形の海底摩擦力の影響をみるために, 慣性項は開口部のみとし, $A=10, 40, 80 \text{ cm}$ の3種の正弦波について同様な比較を行なった(図-2)。この結果, 海底摩擦力の非線型項は場所によりかなり波形をひずませることがわかる。 A が大きくなるほど, 2次の項がきいてきて相対的な水位変化 ζ/A は小さくなる。しかし, 波形がそれほど大きくひずむわけではなく, ζ/A がある割合で縮少することがわかる。

したがって, 特に波形の極端なひずみを生じなければ, 問題の本質解明の第一歩としては式を線型化するのが良

図-1 非線型項—慣性項の影響



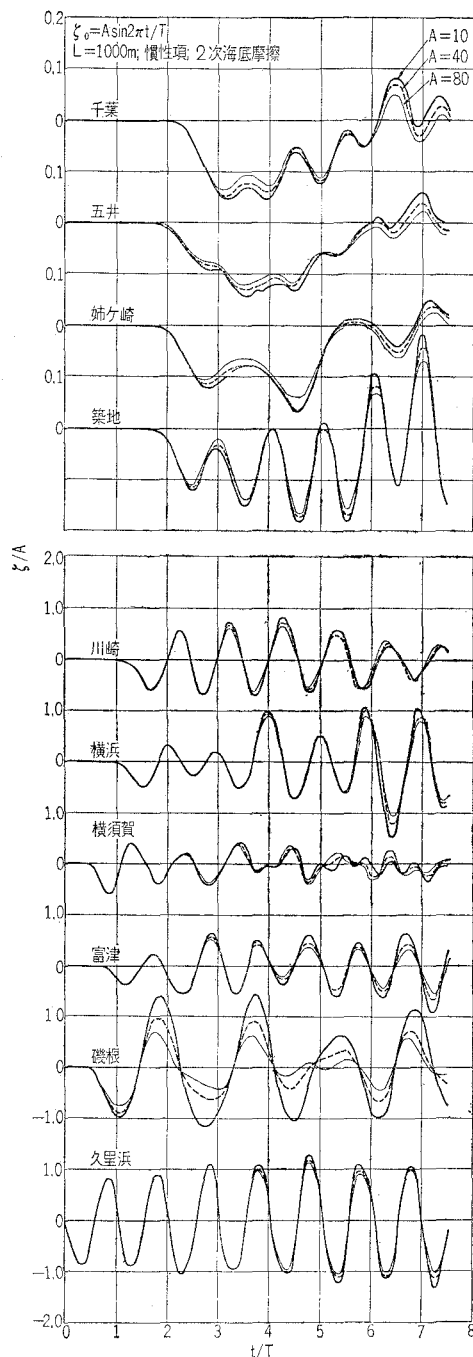
いから、この論文では式(4)で $m=0$ とし、また慣性項は抜いて計算を行なった。計算結果の検討の場合には、図-1, 2 を考慮して非線型項の作用についても論じる。

3. 不規則波の発生法と設計および解析法

(1) 不規則波の発生法

湾口からの進入長波に対する湾内の振動スペクトルを求めるのに湾口水位に種々の周期の正弦波を入れるのが普通の方法である。しかし、運動が定常化するまでに、実際現象として数時間ぐらい経過する必要がある、広い周波数域にわたる振動スペクトルを求めるためには多数

図-2 非線型項—2次海底摩擦力の影響



の周期の波について同一種の計算をくり返さなければならず、いかに高速度の電子計算機といえども計算時間も費用も莫大なものとなる。

そこで、湾口から広い周波数域にわたる不規則進入波を入れてやり、計算資料を不規則変動理論にもとづいて処理すれば、ただ一回の計算で目的が達せられる。

不規則変動の与え方について考えてみる。もし、単位時間内の水位 ζ を不規則階段関数とすると、進入波は確

かに連続スペクトルをもっている。しかし、これではこの変化が急激すぎて水位変化として不自然であるばかりでなく、湾内の波の伝播・反射の計算に不安定を生ずる可能性がある。

この論文では、以下のように乱流理論における乱子仮説をモデル化した乱数列の組み合わせ（これを複合乱数列と呼ぶことにする）から、滑らかに変化する不規則な水位変化を与えることにする⁹⁾。

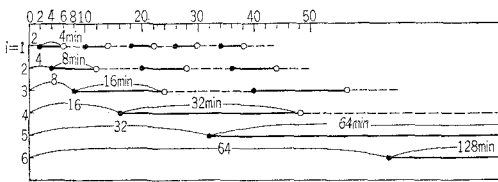
流体の乱流場は、多数の階級の乱子（不規則変動の要素, eddy）から構成されており、各階級の乱子はそれぞれ特有の乱れの強さ、寿命時間、大きさ、周波数を持ち、各乱子間にはエネルギー授受の平衡がとられていると考えられる。われわれの場合、乱流場そのものをシミュレートする必要はないから、計算に便利なようにつぎのようなモデルを考える。

① 不規則変動は6階級の正規乱数列の和である。各乱数列は寿命時間の短いものから第1乱数列・第2乱数列……と名づけ、寿命時間は4分・8分……128分である。

② 各乱数列の平均の大きさは、乱数列の階級の p 乗に比例する。

③ 各乱数列は、電子計算機で順次に作られる擬似乱数 (pseudo-random number) から構成される。これを素乱数列 (elementary random number series) と名づけることにし、その N 番目のものを $R(N)$ と書くことにする。乱数の発生が同一時刻に集中し、そこで急激な変化が生じないように、図-3のように互いに

図-3 乱数列の組み合わせによる広い周波数域にわたる不規則波の発生法



ずらせる。図は乱数列の作り始めの部分を示す。乱数列の作りはじめでは同一の素乱数を用いる所があるから、input data としては最初から t_c 時間分は切り捨てる。

④ したがって、時間 t における複合乱数列は

$$\zeta_0(t) = \sum_{i=1}^6 A_i R_i(N_i) \quad (6)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= \left[2 + \frac{1}{4}(t + t_c - 1) \right] \\ N_2 &= \left[2 + \frac{1}{8}(t + t_c - 1) \right] \\ &\dots\dots\dots \\ N_6 &= \left[2 + \frac{1}{128}(t + t_c - 1) \right] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

([] は整数部を意味する)

$$\frac{A_i}{A_6} = \left(\frac{i}{6} \right)^p \quad (8)$$

である**。

(2) エネルギー増幅率

外海からの入射波スペクトルを $P_1(f)$ とし、この湾のエネルギー増幅率 (Power amplification factor) を $A^2(f)$ とすれば、湾内のある一点の応答振動のスペクトル $P_2(f)$ は

$$P_2(f) = A^2(f) P_1(f) \quad (9)$$

である。

前項に述べた方法で湾口から広いスペクトル幅をもつ不規則入射波を入れて、これに対する湾内各点の水位変動を求める。水位変動のデータのうち初期条件の影響の残る初めの部分（この計算では3時間分）を除いたものを解析して、 $P_1(f)$ および $P_2(f)$ を求めると、式(9)により $A^2(f)$ を決定することができる。

(3) データ処理に関する Tukey の方法

われわれが観測や実験によって得る不規則変動の資料は有限長のものであり、またしばしばある読みとり間隔やある微小時間の平均値として得られたものである。このようなデータを処理する際、記録長の有限なことや読みとり間隔のための種々の誤差を除くのに Blackman and Tukey⁷⁾の方法が用いられる。

この方法にしたがってスペクトル解析の際の分解能と安定度の関係から、あらかじめ必要な計算時間と読みとり間隔を求めておく。

データの読みとり間隔を Δt 、全計算時間を T 、相関を計算する場合の lag time を $m \Delta t$ とすれば、求められるスペクトルは周波数が

$$f_j = \frac{1}{2 \Delta t} \cdot \frac{j}{m} \quad (10)$$

に対するものである $f_F = \frac{1}{2 \Delta t}$ を folding frequency といい、情報として使われる最大周波数は、

$$f_{\max} = \frac{2}{3} f_F = \frac{1}{3 \Delta t} \quad (11)$$

である。また、スペクトルの分解能は

$$W \sim \frac{1}{m \Delta t} \quad (12)$$

である。一方、計算安定度（真のスペクトルと標準偏差との比）と記録時間との間には

$$T = \left(\frac{1}{2} + \frac{200}{(90\% \text{ 範囲の db 幅})^2} + \frac{(\text{観測回数})}{3} \right) / W \quad (13)$$

* むしろ $\frac{A_i}{A_6} = \left(\frac{T_i}{T_6} \right)^p$ としたほうが良い。 T_i は乱子の寿命時間。

** このようにして作られる複合乱数列（乱子モデル）については別に“Digital computer simulation of random phenomena”としてくわしく論じる。

の関係がある。

いま、次節の湾の自由振動の計算から湾の振動周期としては、ほぼ、6分から2時間の範囲を考えればよい。したがって、 $4t=2$ 分である。また、式(13)の db 幅を 5 db (または 3 db) とし、 $m=60$ (または 30) とすれば $T \approx 18$ 時間となる。したがって湾内の運動が定常化するまでの3時間(解析のさいは切り捨てる)を加えて $T=21$ 時間分の計算が必要である。

計算資料から、相関係数やスペクトルを求めるには、まず prewhite し、相関を求め、長期の linear trend を除く。この相関係数を cosine 変換し、結果を hanning し、さきの prewhitening をもとにもどす操作をしてスペクトルが決定される。

$$\xi_t = \xi_t - 0.6 \xi_{t-1}$$

$$C_r' = \frac{1}{n-r} \sum_{t=1}^{n-r} \xi_t \xi_{t+r} - \left(\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \xi_t \right)^2$$

$$C_r = C_r' - \frac{3}{16} \left(1 - \frac{1}{n^2} - \frac{2r}{n^2} - \frac{2r^2}{n^2} \right) (\bar{\xi}^+ - \bar{\xi}^-)^2$$

($\bar{\xi}^+$, $\bar{\xi}^-$ はそれぞれ時系列の前後 1/3 の
平均値)

$$V_r = \left[C_0 + 2 \sum_{q=1}^{m-1} C_q \cos \frac{qr\pi}{m} + C_m \cos r\pi \right] 4t$$

$$\begin{cases} U_0 = \frac{1}{2} (V_0 + V_1) \\ U_r = \frac{1}{4} V_{r-1} + \frac{1}{2} V_r + \frac{1}{4} V_{r+1} \quad (1 \leq r \leq m-1) \\ U_m = \frac{1}{2} (V_{m-1} + V_m) \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_0 = \frac{n}{n-m} \frac{1}{1.36 - 1.20 \cos \frac{2\pi}{6m}} U_0 \\ P_r = \frac{1}{1.36 - 1.20 \cos \frac{2\pi r}{m}} U_r \quad (1 \leq r \leq m-1) \\ P_m = \frac{1}{1.36 - 1.20 \cos \left(1 - \frac{1}{2m} \right) \pi} U_m \end{cases}$$

(P_r は $f = \frac{r}{2m \Delta t}$ に対応するスペクトル)

3. 計算結果および検討

図-4 東京湾水面の自由振動一現状

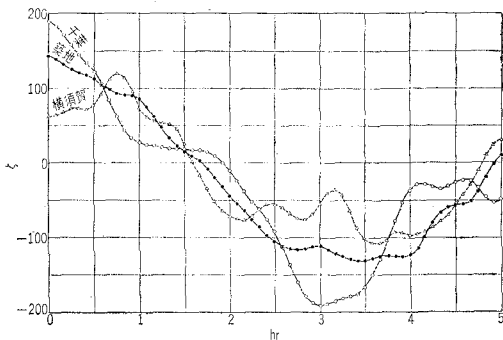
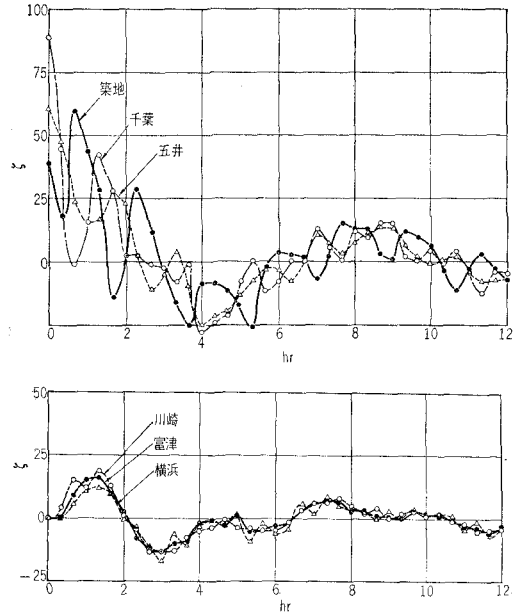


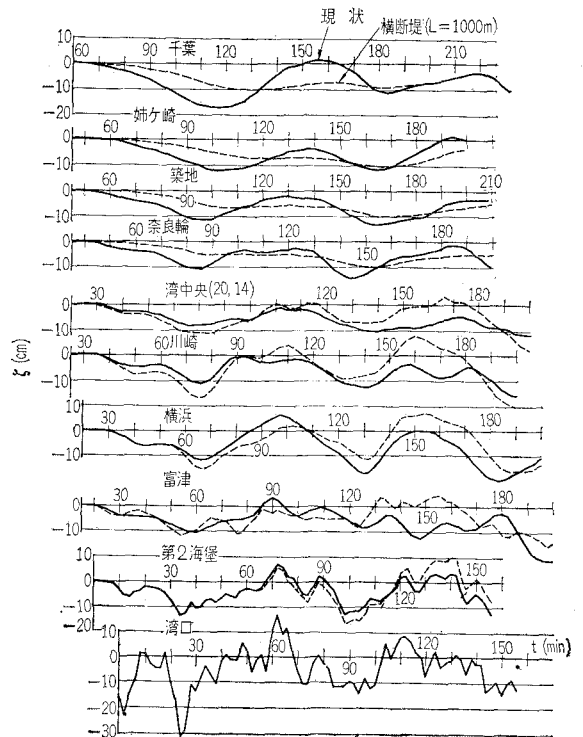
図-5 東京湾水面の自由振動一開口幅
1000 m の横断堤のある場合



(1) 自由振動

まず、東京湾の振動周期としてどのような周波数範囲を考えたらいいか、したがって湾口でどのようなスペクトル幅をもつ不規則波を作ったら良いかを調べる目的で湾口水位を一定とし自由振動をさせた。その一例が 図-

図-6 入射波の伝播と変形一運動の初期



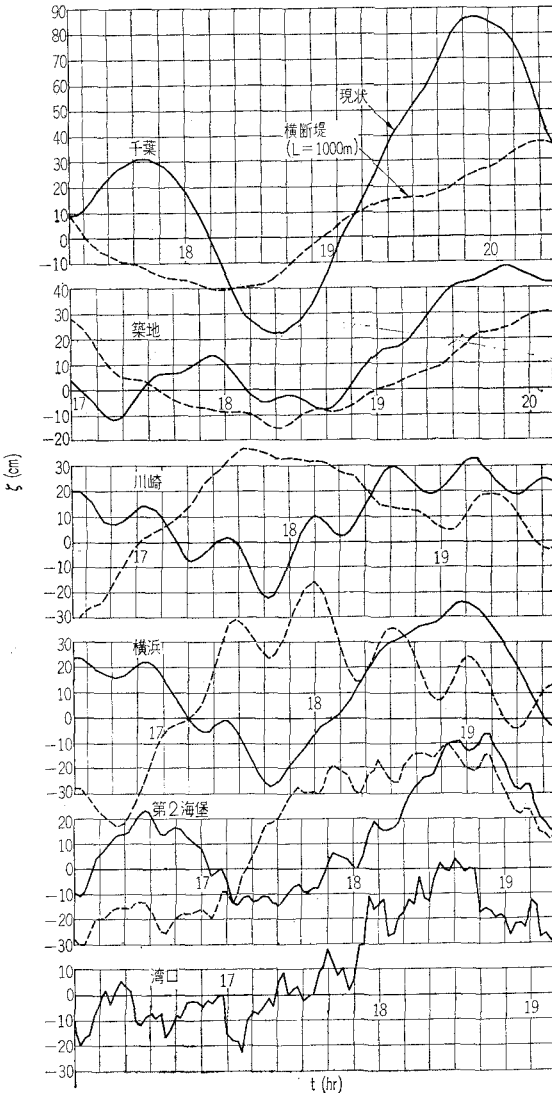
4, 5 である。横断堤のない場合は、北向きに湾口からの距離に比例して直線的に水面をもちあげ湾奥で 2m の状態を初期条件とした。横断堤開口幅が 1000m の場合は、堤の内部のみ同様に傾けて、堤外は水平な状態を初期条件とした。この図-4, 5 から、湾内の水面振動に周期がほぼ 1~2 時間の振動が卓越しているようにみえる。

この結果、湾口の水位変化の乱子モデルとして最大乱子の寿命時間 128 分、最小乱子の寿命時間は 4 分としてすでに 2. にのべたような複合乱数列を作った。

(2) 波の伝播と変形

このようにして湾口で与えた不規則入射波の伝播と変形の様子を示したのが図-6, 7 である。図-6 は静止した湾内に入射波が伝わり始めたはじめの約 3 時間分であり、図-7 は計算の最終部の 3 時間分を示したもので

図-7 入射波の伝播と変形—運動の最終部



ある。

図にみられるように、湾口では波形はかなり不規則で周期の短いものも含まれているが、北上するにつれて周期の短い波のエネルギーが小さくなり波形は滑らかになる。それとともに、湾口ではあまりはっきりしなかった長周期波が明瞭となり、大した変形もせずに北上している。ちょうど宇野木ら⁹⁾が津波について述べたように一見したところは、あたかも境界がないかのように湾奥へ進む波ばかりで、反射波はないようにみえる。

これらの点について以下にくわしく分析しよう。

(3) 波形の時空相関・見掛けの進行速度・湾奥からの反射波

つぎに湾口またはある基準点 (j, k) の水位変動に対する各点 (j', k') の水位変動の時空相関を次式で計算する。

$$Q(j, k; j', k'; q) = \frac{1}{n-q} \sum_{i=1}^{n-q} \zeta_{j,k}^{\tilde{n}} \zeta_{j',k'}^{\tilde{n}+q} - \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \zeta_{j,k}^{\tilde{n}} \right) \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \zeta_{j',k'}^{\tilde{n}} \right) \quad (14)$$

ここに、 $\zeta_{j,k}^{\tilde{n}} = \zeta_{j,k}^n - 0.6 \zeta_{j,k}^{n-1}$ また $\zeta_{j,k}^n$ は (j, k) 点の $n \Delta t$ の ζ の値を表す。もちろん最初の 3 時間を切り捨てた残りの部分についてである。

基準点 (j, k) を湾口にとって進入波の伝播状況を計算したのが図-8 (a), (b), (c) であり、基準点を千葉としたのが図-9 (a), (b) である。

図からわかるように、横浜・川崎などの湾中央より南部では入射波は一度湾奥に進んでそこで反射し、もう一度相関が最大となっている。湾奥では入射波が完全反射し、相関は入射・反射波のその和となっている。

また、相関が最大となる lag time は波の見掛けの進行速度である。図-10 (a), (b) はそれぞれ相関が最大となる lag time の等しい地点、最大相関度の等しい地点を示す等相関時・等相関度曲線である。進入波は湾奥に進むにつれて見掛けの速度が減少し、長波の進行速度 $\sqrt{gh}$ よりはるかに小さくなっている。さらに、図-9 にみるように、各点の水位は正の最大相関を生じた後負の最大相関をとり、2 時間後にはまた正の相関を生じている。このことから千葉では周期がほぼ 2 時間の振動が続いており、これが各点に伝わっているとみられる。

図-11 (a), (b) は開口幅が 1000m の横断堤に対するもので、横断堤のため堤内への波の進入が遅れ、ほぼ同一時刻に相関が最大となること、堤外では四周からの波の反射が中央に集中することが示されている。

(4) 水位変動の R.M.S.

各地点の水位変動の強さを表すために $\sqrt{\bar{\zeta^2}}$ の等値線図(図-12(a), (b))を描いた。この計算の場合には、湾の中央部の横断堤に予定されているあたりが水位変動の

図-8 湾口水位変化に対する各点の水位変化の相関一現状
(a) および開口幅 1000 m の横断堤のある場合 (b)

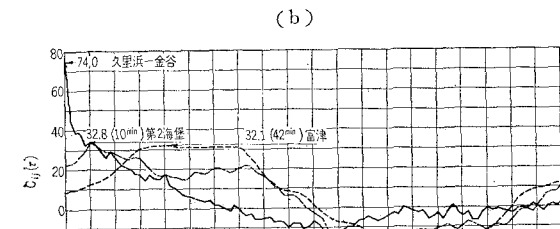
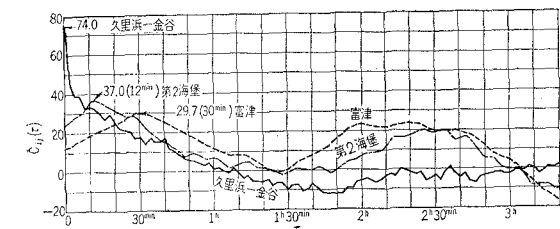
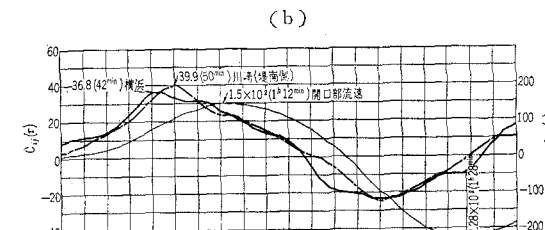
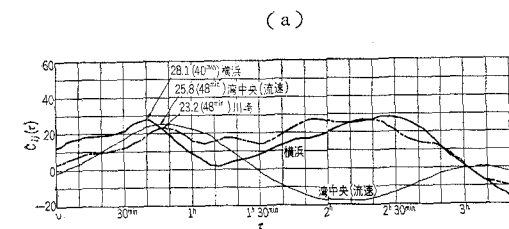
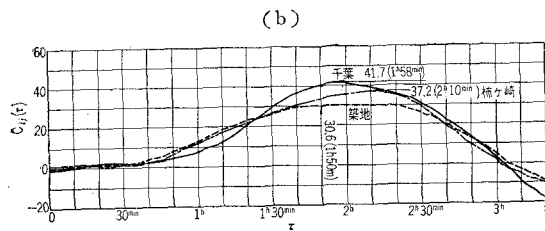
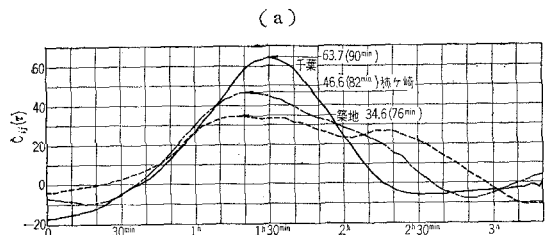


図-9 千葉の水位と他地点との水位変化の相関一現状

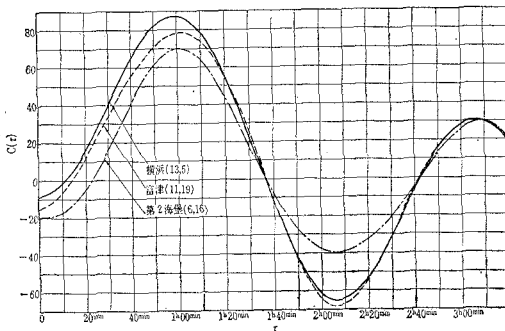
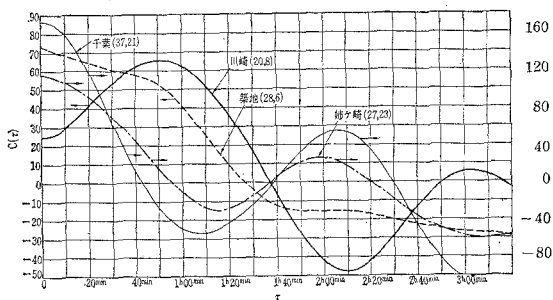


図-10(a) 相関最大の等時刻線図 (横断堤なし)

図-10(b) 相関最大の等値線図 (横断堤なし)

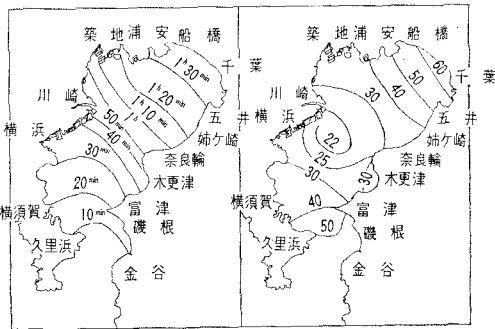


図-11(a) 相関最大の等時刻線図 (横断堤: 開口幅 1000 m)

図-11(b) 相関最大の等値線図 (横断堤: 開口幅 1000 m)

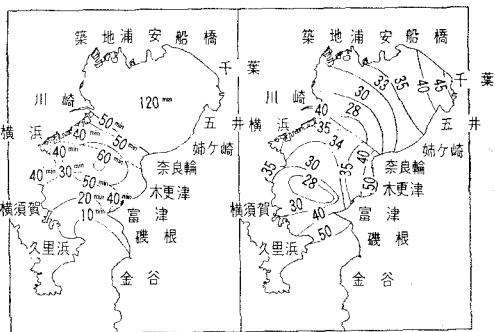
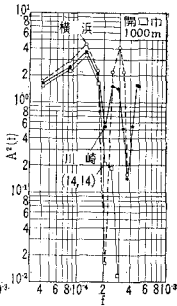
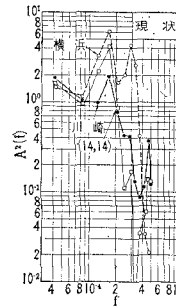
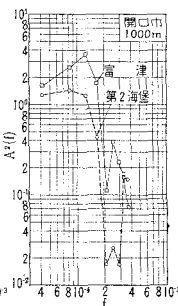
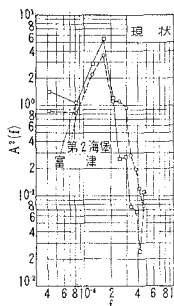
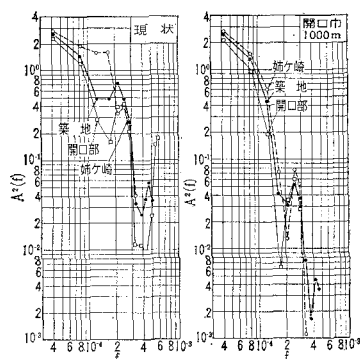


図-15 湾内各点のエネルギー増幅率



$$\zeta_0(t) \zeta_0(t+\tau)$$

$$= (1 - \mu + \mu^2 - \dots) \zeta_{\text{rand}}(t) \zeta_{\text{rand}}(t+\tau)$$

$$= \frac{1}{1 + \mu} \zeta_{\text{rand}}(t) \zeta_{\text{rand}}(t+\tau) \dots (16)$$

であり、真の入射波スペクトル $P_0(f)$ と湾口の不規則変動のスペクトルとの関係は

$$P_0(f) = \frac{1}{1 + \mu} P_1(f) \dots (17)$$

であり、真のエネルギー増幅率は

$$A_0^2(f) = (1 + \mu) A^2(f) \dots (18)$$

となる。しかし、図-15にみるように波長の短い波ほど早く減衰するから、 $A_0^2(f)$ は波長の長い所ほど図の値より大きくなる。

また、ある周波数の所に振動エネルギーの集中があれば、入射波スペクトルのうちこの卓越波の部分の不規則波の真のエネルギーが少なくなるから、これを修正すれば図-18にみるように、スペクトルおよびエネルギー増幅率の極大値は一層強調されることになる。

いずれにしても、図-15から東京湾での長周期のセイシュの存在を証明しうる。また、横断堤を設けると堤外の各点では振動スペクトルや $A^2(f)$ が増す。これは、進入波のエネルギーの逸散領域が縮小されるためと解釈される。堤内では当然 $A^2(f)$ が減少するほか、卓越周期が異なってくる。

また、隅角部では局部的にエネルギー増幅率が大きくなっている。

(6) 水位変動のエネルギーの伝播と逸散

湾口から一定の割合で供給される振動のエネルギーは海底摩擦力で逸散される。図-13, 14, 15から波長の短い波ほど湾奥へ進むにつれてのエネルギーの減衰が大きく、波長の長いものはエネルギーの減衰はない。つまり、波長の長い波は振動のエネルギーを湾奥へ輸送し、波長の短いものはエネルギー逸散の役割をしている。

この過程は乱流場のエネルギー平衡ときわめて良く似ている。乱流場では波長の長い波が平均流から乱れのエ

図-16 エネルギー増幅率の等値線図

($T=60$ min)

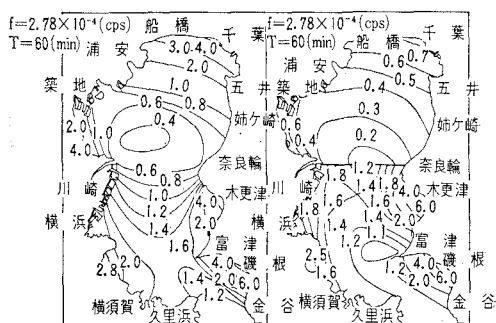
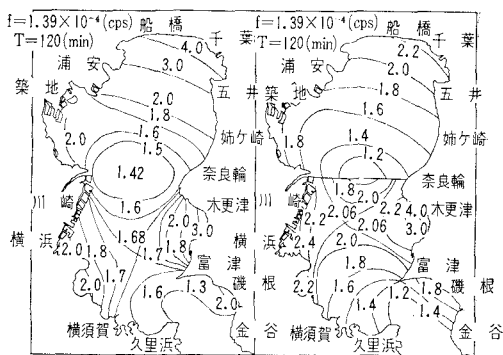


図-17 エネルギー増幅率の等値線図

($T=120$ min)



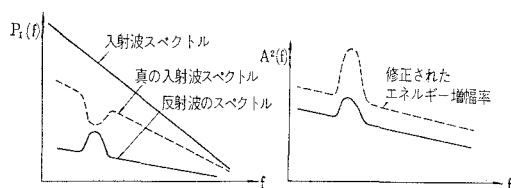
ネルギーを奪い、非線型項のためこのエネルギーが順次波長の短い領域へ輸送され、ついには粘性のために熱エネルギーに逸散する。

われわれの用いた系では、わざと慣性項や2次の抵抗など非線型項は除いてあるが、これらを取り入れることにより波長の長い領域から短い領域へエネルギーの輸送・移行が行なわれるであろうことは、図-1, 2から容易に予測される。つまり、湾口の振幅 A が大きくなって非線型項が効くほど相対的な水位変動 ζ/A が小さくなって、周期の長い波のエネルギーが少なくなることをこれらの

図が示している。

ついでながら、振動スペクトルにおけるエネルギーの極大値は、波浪のエネルギー移行におけるように非線型効果のための選択的なエネルギーの移行ではないことに注意しなくてはならない。しかし、非線型項を入れることにより波長の大きい領域からのエネルギー輸送のため極大値がより大きくなることはありえよう。これは今後検討すべき課題である。

図-18 湾口での反射波の影響と修正されたエネルギー増幅率



4. 結 論

東京湾の進入長波に対する振動特性を数値実験によって研究した。進入波としては乱子モデルによって広い幅にわたる連続スペクトルをもつ自然な不規則変動を湾口水位に与えた。

この結果、湾口からの進入波は一見境界がないかのように湾奥に進行しているように見えるが、波長の長い変動はほとんど湾奥で完全反射していること、波長の短い波ではエネルギーの減衰が激しいことがわかった。また、長波の見掛けの進行速度は $\sqrt{gh}$ よりかなり小さく、湾奥に進むほどこの傾向が著しいことが示された。横断堤を築造する場合は、堤内への波の伝播はほぼ1時間くらい遅れ、また堤内の各点でほぼ同一時刻に湾口水位との相関が最大となる。

波長の長い波は湾口からの振動エネルギーを湾奥へ輸送し、波長の短いものはおもに供給されたエネルギーを逸散する作用をする。慣性項・2次の海底摩擦項は波長の長い所の振動エネルギーを波長の短い領域へ移行する役割をはたすものと思われる。

東京湾では周期が約 60~90 分のセイシュが観測され

るが、この数値実験によってこのような卓越周期が存在することが証明された。すなわち、周期 60~90 分の所およびその harmonics の所のエネルギー増幅率に極大が表われることが確かめられた。高潮時には風の息やうねりと共鳴してこの周期の水位振動が増幅されるものと思われる。横断堤（開口幅 1 000 m）の築造によって特に振動特性が悪化することはない。むしろ堤内での周期 1 時間ほどの振動はいちじるしく減少する。したがって、いわゆる Harbor Paradox の心配はないと思われる。ただ、堤外の長周期の振動レスポンスがやや大きくなり、堤内では卓越周期が変化する。湾内の横浜・築地など隅の地点では局部的に大きな振動応答を生ずる。

この計算では、振動現象の本質を明らかにする第一段階として、海底摩擦項はわざと線型とし、慣性項は省略した。今後、これらの非線型項が振動特性におよぼす影響について定性的に論じたが、今後の研究で数値的な検討をする必要がある。また、湾口条件として直接水位を変化させるより、やはり数学的な操作で湾口に波浪フィルターをつける必要がある。一応直接湾口水位を変化させたための修正についてはのべた。これらの点についてはつぎの機会に発表したい。

参 考 文 献

- 1) Miles, J. and Munk, W.: Harbor paradox, Proc. ASCE Vol. 87, No. WW 3, 111-130 (1961).
- 2) Wilson, B.W.: Discussion of Harbor Paradox, Proc. ASCE, Vol. 88, No. WW 2, 185-194, (1962).
- 3) Ippen, A.T. and Goda, Y.: Wave induced oscillations in harbors: Solution of a rectangular harbor connected to the open sea, MIT Hydrodynamics Laboratory, Report No. 59, (1963).
- 4) 伊藤剛・渡辺二郎・平本和子・日野幹雄: 高潮計算における二,三の問題点について, 第8回水理講演会講演集; および 数値模型による東京湾横断堤の防潮効果に関する研究, 第11回海岸工学講演会講演集, (1964).
- 5) 磯崎一郎・宇野木早苗: 東京湾の潮汐と津波の数値計算の試行, 第10回海岸工学講演会講演集, (1963).
- 6) 日野幹雄: モンテ・カルロ法による乱流現象のシミュレーションへの試み: 第19回土木学会年次講演会前刷集, (1964).
- 7) Blackman, R.B. and Tukey, J.W.: The measurement of power spectra from the point of view of communications engineering, Dover Publications, Inc.