

大船渡湾における津波の計算

建設省土木研究所 細 井 正 延
同 上 王 方 一
同 上 首 藤 伸 夫

1. 概 要

1960年5月24日未明、日本の太平洋海岸は津波の来襲にあい、大きな損害を受けた。従来の近海に震源をもった津波に比して、震源が地球裏に当るチリにあること、周期が大きいこと、平面波として太平洋沿岸に広範囲に襲来したことなどが特徴である。波高・周期の分布および各地方の被害状況は二、三の調査報告にくわしく記載されており^{1), 2), 3), 4), 9-b)} 波高は大体東北・北海道地区では3~5m、関東以西は1~3m程度である。リアス式海岸線をもつ宮城・岩手両県のいわゆる三陸海岸一帯の市町村はほとんど凹凸の激しい海岸線の湾奥に位置し、一般に津波に対して不利な条件を持ち、津波の常襲地として知られている。津波の成因、一般的性質および被害史は多くの文献に示されており^{5), 6)}、三陸海岸に襲った津波に関する調査記録は特にくわしい^{7), 8)}。1933年の津波による三陸海岸の被害状況とチリ津波時のそれとをくらべると各湾では必ずしも一致していない。これはこの2回の津波の周期と各湾の固有振動周期との相互関係によるためと考えられる。チリ津波は前記諸報告によれば検潮儀故障のため最高波高の記録はほとんど得られておらず、その判定は痕跡にたよるほかはない。東京大学地震研究所の宮城県江の島津波計は他の原因による要素を除いた津波だけの波形を記録しているが地形の影響の少ない外海波形および他の地点におけるものとの関係は不明である。従来、津波の湾への浸入状況を推定するために、震源地震変動説から出発し、海底傾斜を考慮して湾口波高を求め、湾内にはGreenの法則を適用し、湾奥の陸岸への遡上高をKaplanの実験式などで求めた例^{9-a)}があり、また湾内の水理計算に関しては、一次元運動方程式の項の一部を省略し、断面変化と境界条件を理想化して解いた理論式もある^{10), 11)}。

實際上、湾内の運動は、外海より湾口までの変形、湾内の変形、陸岸への遡上などが相互に関連しており、外海条件が既知であってもかなり困難な作業で、震源チリよりの追跡などを考えると不可能に近いので、湾口の近辺で既知条件を得ることが望ましい。本文では問題の過程の一部である湾内の水理現象について、細長い型に属する大船渡湾を対象として、Saint-Venantの一次元不定流方程式にもとづく数値計算を行ない、痕跡と比較している。湾口の実測資料がなく、湾奥の遡上機構も容易

にわからないので、境界条件の設定には仮定にたよるを得なかった。計算結果は、チリ津波時の湾内の様相を正しく表現しているとはいえないが、条件の要素の一部が接近しているので、これらの計算結果を通じて、流況の変化の傾向を知ることができる。計算はまず湾奥を浸水なしとして次の二種類の湾口条件を仮定して行なった。

(1) 大船渡湾の当日の天文潮に、江の島(大船渡湾より約65km南方)の津波波形を加えたもの。

(2) 痕跡を外挿して得た湾口の最大波高に一致するように、江の島の津波振巾を一樣な比率で拡大し、それを天文潮に加えたもの。

痕跡水位は外海波形より湾口までの変形および湾奥よりの反射波形の合成であると考えられる。(1)の湾口波高と痕跡水位はかなり異なっており、これで強制される湾内の運動は実際のものとまた異なるものであると考えられるが、(2)の条件にもとづく計算と対比すれば種々の場合の傾向の理解に役立つものと思われる。

また二種類の湾口条件に対して、流水巾を貯留巾の一部として計算し、さらに(1)の条件に対しては、運動方程式の各項の影響をも検討して見た。

これらの計算結果を見ると、湾口での振巾を痕跡水位に一致するように設定した(2)の条件を用いれば、湾内の最大波高の分布は痕跡水位と若干の不一致はあるとはいえ、本質的矛盾を示さないことを知った。これらの不一致は湾奥の遡上浸水および各計算区間の貯留巾と流水巾との関係を合理的に考慮すれば、かなり改善できると考えられる。浸水区域の痕跡水位より湾奥水位・浸水区域貯留量を作成し、陸岸での波の伝播が瞬間に終るものと仮定すれば、三角形・菱形・矩形格子、を併用する差分法^{12-a), 12-b)}と関連させて、湾奥の水位を計算することが可能であるが、遡上地区では地形が複雑で、構造物があり、水深が浅く、また水中に漂流物もあるため、実際にはかなり複雑な流れであると考えられるので、現在、検討中である。本文に示す計算結果はFACOM 128 B型電子計算機によったものである。

2. 大船渡湾の形状とチリ津波時の痕跡

大船渡湾の平面形状は図-1に示すように細長い型に属し、長崎付近と基石岬を結ぶ湾口では巾は約4kmである。それより湾奥まで長さが約9kmで、ほぼ中央部に直角に近く曲っており、湾の南半分は絶壁が多く、

図-1

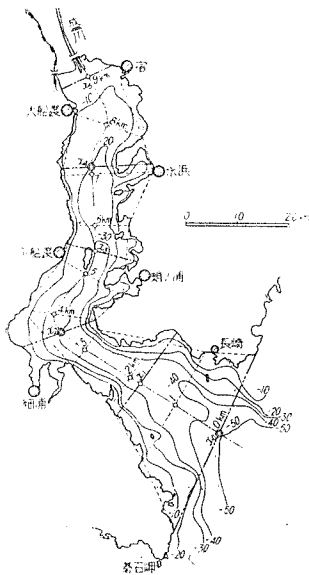


図-2

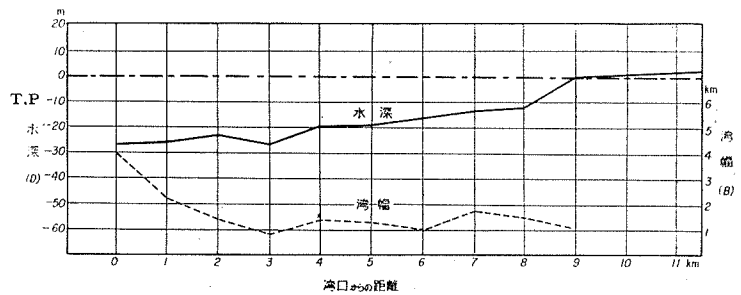


図-3

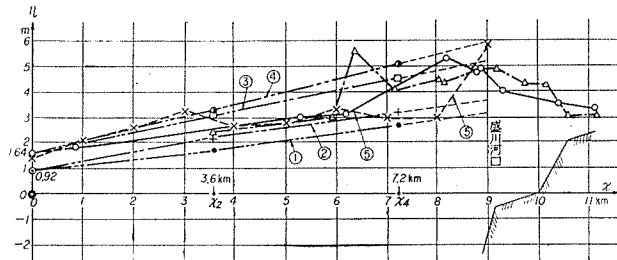


図-4

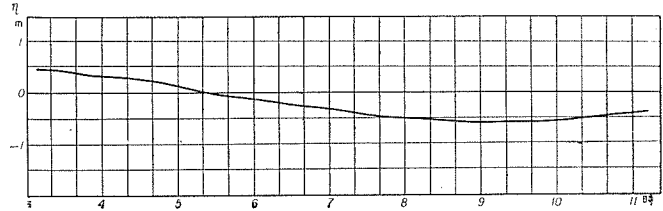
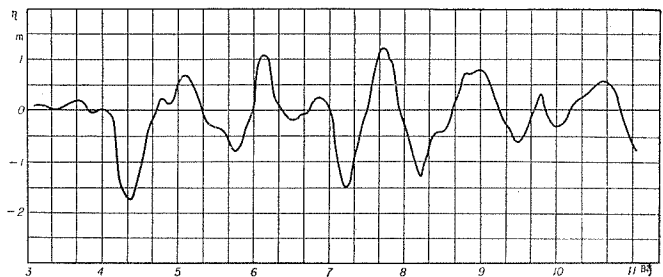


図-5



北半分沿岸は勾配がゆるやかで市町村が点在し、湾奥には盛川が流入している。

0~3 km までは水面巾が 4 km より 1 km に狭まっており、それより奥は東岸に数箇所の袋地帯があるが、平均して大体 1.5 km くらいの一様巾と見て差し支えない。湾軸に沿う 1 km おきの横断面において、それらの断面形状を T.P.±0 の水面巾に等しい矩形に直し、底辺までの距離を D とすると、実水深 $h = \eta - D$ の関係がある。 η は T.P.±0 を基準とする水位、 D は海底が x 軸より低ければ、(−) の符号をとる。各断面における巾と D は 図-2 に示す。

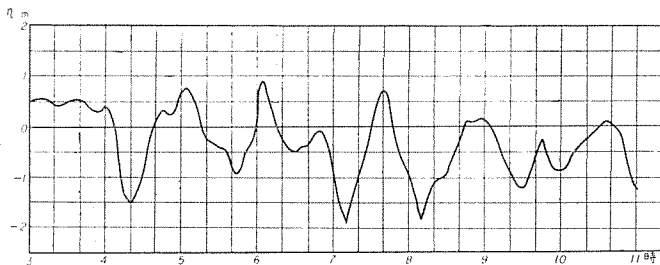
チリ津波時の痕跡水位²⁾を東西岸別に示すと 図-3 の ○-○- と △-△-△- のようである。 $x=6.4$ km 付近で、西岸における水位 5.6 m の点を除けば、東西岸の痕跡の差は最大 80 cm 程度であるが、0~6.4 km の間では 10 cm 程度である。8.6 km 近辺で全湾を通じて最高を示し、それより奥は両岸とも低くなっており、これは、この近辺から遡上し始めたためと考えられる。浸水区域の奥行は湾奥 ($x=9$ km) より約 2 km で、湾奥と浸水区域の最奥部での痕跡差は大体 2 m である。最も湾口に近い痕跡は長崎 ($x=0.8$ km) の 1.8 m であり、1~3.5 km の間には両岸とも記録はない。湾口へ痕跡水位を外挿すると 1.64 m 程度となる。全体としては $x=6.4$ km 付近まではほぼ一様勾配で上昇し、以後、急に増加している。

3. 湾口条件、湾奥条件および初期条件

宮古と鮎川での天文潮の平均を大船渡湾のもの (図-4) とし、江の島での津波波形 (図-5) をそれに加えると 図-6 のようになる。合成波形の最高が 0.92 m 程度になっており、湾口の 1.64 m とは約 0.7 m の差異がある。3 時から 4 時までを見ると若干の変動があるとはいえ、ほぼ一定と見なすことができ、初期条件として $\eta^{(0)} = \text{const}$, $Q^{(0)}_{(x_i)} = 0$ を採用しても差し支えないと考えられる。上記の条件を湾口条件 (1) とする。つぎに湾口痕跡 1.64 m に一致するように、天文潮の上に、江の島の津波波形をある比率 (1.65 倍) で拡大して加えたものを湾口条件 (2) とする。

また湾奥の条件としては浸水のない場合とある場合の 2 つが考えられる。

図-6

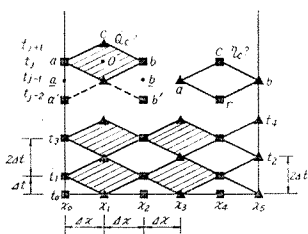


4. 数値計算

本文では湾奥に浸水なしとした場合のみを扱う。

湾長 $L=9\text{ km}$ を 5 つの等区間 ($\Delta x=1800\text{ m}$) にわ

図-7



け、 $x-t$ 平面上に図-7 のような菱形格子を構成し、差分方程式より奇数区分点上の流量、偶数区分点上の水位のみを式で求め、欠けている要素は比例配分で定める方法¹²⁾を用い

る。基本方程式は

$$\text{連続式} \quad \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (I)$$

$$\text{と運動方程式} \quad \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{f}{R} |U| U = 0 \quad \dots\dots\dots (II)$$

を用いるが、差分化に際しては (II) 式を $U=Q/A$ として書きかえたところの

$$\frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Q^2}{A^2} \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{f}{R} \frac{|Q|Q}{A} = 0 \quad \dots\dots\dots (II-B)$$

を用いる。ここに、 η : 基準面よりの水位、 $|Q|$ は流量 Q の絶対値、 R : 径深 (広矩形の場合には水深)、 $f=g/C^2=gn^2R^{-1/3}$, $f/R=gn^2R^{-4/3}$, n : Manning の粗度係数、また座標原点は湾口に取り、湾奥を x の正の方向とする。

x_2, x_1 上の菱形 $\diamond$ に (I) 式を $\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f_b - f_a}{2\Delta x}$, $\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{f_c - f_r}{2\Delta t}$ のように差分化し、また $A=B_m(\eta_m - D_m)$ とすると

$$\eta_c = \eta_r - \Delta Q_{ab} \left(\frac{B_m}{2\tau} \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

を得る。ここに $\tau = \Delta t / 2\Delta x$, $\Delta Q_{ab} = Q_b - Q_a$, 添字 m は $2\Delta x$ 間の平均値を意味する。 x_1, x_3 上の菱形 $\diamond$ に対しては (II-B) 式を前と同様に差分化し、また、 $Q = \frac{1}{2} (Q_r + Q_c)$, $Q^2 = Q_r Q_c$, $|Q|Q = |Q_r|Q_c$ とすると

$$Q_c = \frac{Q_r(1 + \mu_m - \nu_m) - 2g\tau A_m \Delta \eta_{ab}}{1 + 2K_{m,r} - \mu_m + \nu_m - 2\varepsilon_{m,r}} \quad \dots\dots (2)$$

を得る。

ここに

$$K_m = \lambda h_m^{-1/3} |U_{m,r}|,$$

$$U_{m,r} = Q_r / A_m, \quad \lambda = gn^2 \Delta t,$$

$$A_m = B_m h_m, \quad h_m = \bar{\eta}_{ab} - D_m$$

$$\bar{\eta}_{ab} = \frac{1}{2} (\eta_a + \eta_b)$$

$$\mu_m = \Delta \eta_{ro} / h_m$$

$$\Delta \eta_{ro} = \eta_o - \eta_r = \frac{1}{4} (\eta_a + \eta_b - \eta_{a'} - \eta_{b'})$$

(2-K)

$$\nu_m = \tau \Delta Q_{ab} / A_m$$

$$\varepsilon_{m,r} = \tau U_{m,r} (A_b - A_a) / A_m$$

$$\Delta \eta_{ab} = \eta_b - \eta_a$$

(I) 式を差分化して変形すると

$$\nu_m = -\mu_m \quad \dots\dots\dots (3)$$

を得、これを (2) 式に入れると

$$Q_c = \frac{Q_r(1 + 2\mu_m) - 2g\tau A_m \Delta \eta_{ab}}{1 + 2K_{m,r} - 2\mu_m - 2\varepsilon_{m,r}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

になる。これは (I) と (II-B) の連立解にほかならない。

(4) は (I) 式を (II-B) に代入してえられる

$$\frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{2Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{Q^2}{A^2} \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{f}{R} \frac{|Q|Q}{A} = 0 \quad \dots\dots\dots (III)$$

によっても同様に得られる。計算は (I) と (4) とを交互に使用すればよく、初期三角形では

$$\eta_c = \eta_o - \Delta Q_{ab} \left(\frac{B_m}{\tau} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

を用いればよい。必要な初期値は $\eta_o^{(0)}$, $\eta_{x_2}^{(0)}$, $\eta_{x_4}^{(0)}$ と

$Q_1^{(0)}$, $Q_3^{(0)}$ で、 $\eta_{x_i}^{(0)}$ は $\eta_{(x_i)}^{(t_0)}$ の略書である。

Δt の大きさは普通

$$\Delta t < T = \frac{\Delta x}{(U + \sqrt{gh})_{\max}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

で定める¹³⁾。本文の計算では $\Delta x=1800\text{ m}$, $\tau_{\max}=6\text{ m}$, $D_{\max}=-27\text{ m}$, $U_{\max}=1\text{ m/sec}$ として $T=95$ 秒を得たので $\Delta t=90$ 秒, $2\Delta t=180$ 秒を採用した。

このような方式を用いて湾口条件(1)で計算し、 x_2, x_4 における水位の最高値を連ねると図-3の①線のようにあって $x=0\sim 6\text{ km}$ では痕跡より約 60 cm 低く $x=6.4\sim 9\text{ km}$ の間では最大約 2 m の差異を生じている。計算に際しては $n=0.025$ を使い、 $2\Delta x$ 間の平均値 B_m と D_m は 1 km おきの断面での B と D を直線で結んだものの等積平均値すなわち有効値を用いた。

試みに貯留巾の一部しか流れないと考えて、流水巾 $B_m' = \beta B_m$, $B_i' = \beta_i B_i$ として (2), (3) 式を処理すると

(4) 式の代りに次式を得る。

$$Q_c = \frac{Q_r \left(1 + \left[1 + \frac{1}{\beta} \right] \mu_m \right) - 2 g \tau A_m d \eta_{ab} \cdot \beta}{1 + \frac{2}{\beta} K_{mr} - \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \mu_m - \frac{2}{\beta} \varepsilon_{m,r}} \dots (7)$$

となる。ここに B_m' は $2\Delta x$ 間の流水巾の有効値、 B_i' は各区分点の流水巾、 $\varepsilon_{m,r}$ は B_i' 、 B_m を使って計算した ε_{mr} の値である。(1) 式 (7) 式を用い、 $\beta=0.9$ 、 $\beta_i=0.9$ として計算したところ。図-3 の②線を得た。 $\eta_{1,\max}$ は約 0.70 m の増加をみたが、湾奥での痕跡との差はまだ 1 m 以上になっている。つぎに (4) 式において $\varepsilon_{m,r}$ すなわち $\frac{\partial A}{\partial x}$ を省略したところの

$$Q_c' = \frac{Q_r(1+2\mu_m) - 2g\tau A_m d \eta_{ab}}{1+2K_{mr} - 2\mu_m} \dots (4)'$$

$\varepsilon_{m,r}$ と $2\mu_m$ すなわち $\frac{\partial A}{\partial x}$ と $\frac{\partial Q}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial A}{\partial t}$ を省略したところの

$$Q_c''' = \frac{Q_r - 2g\tau A_m d \eta_{ab}}{1+2K_{mr}} \dots (4)'''$$

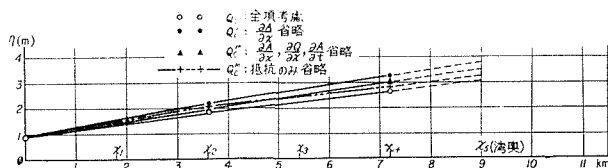
および K_{mr} すなわち抵抗だけを省略したところの

$$Q_c'''' = \frac{Q_r(1+2\mu_m) - 2g\tau A_m d \eta_{ab}}{1-2\mu_m - 2\varepsilon_{m,r}} \dots (4)''''$$

で計算すると 図-8 のようである。(4) 式による計算結果と比較すると、 $\varepsilon_{m,r}$ すなわち $\frac{\partial A}{\partial x}$ の影響は予想外に大きくなっている。これは $x_0=0 \sim x_2=3600$ m 間の巾の激しい変化によるためかもしれない。 $2\mu_m$ すなわち $\frac{\partial A}{\partial t}$ と $\frac{\partial Q}{\partial x}$ の省略は水位を低くする傾向を示し、また K_{mr} すなわち摩擦抵抗の影響が小さいことは、水深が、 $x=8.2$ km までは 10 m 以上にもなっていることから予想されるところである。

つぎに湾口条件 (2) を使って計算すると 図-3 の③の線となり、湾奥では痕跡に近づいているが、 $x=6.4$ km

図-8



近辺では高くでている。この計算による η_2 、 η_1 および Q_1 、 Q_2 の時間的過程を示すと 図-9 (a), (b) のようである。またこの計算過程で、 $x_2 \sim x_4$ 間だけに (4) 式の代りに (7) 式を用い、 $\beta=0.85$ として計算すると 図-3 の④の線になり、湾奥では③の線に比して 0.70 m の水位増加を見、 $x=6$ km では約 0.35 m の増加を見た。図-1 の $x_1 \sim x_2$ の間を見ると西岸に二つの大きな袋地帯があり、 $x=2, 3, 4, 5$ km での巾を直線で結んだ面積できめた $B_{m1,3}$ は小さ過ぎるきらいがあり、袋の面積を加えれば (1) 式の構造を見て $\eta_{2,\max}$ はある程度低

図-9 (a)

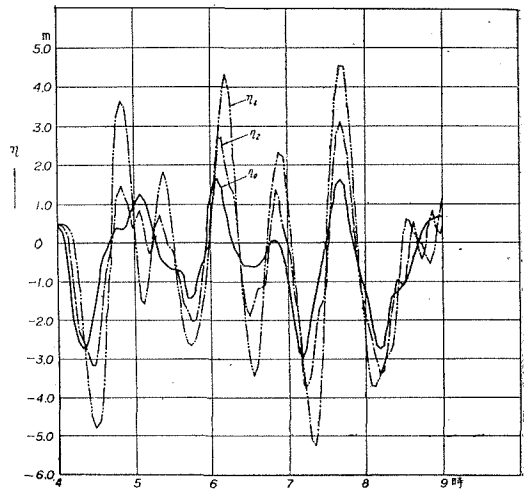
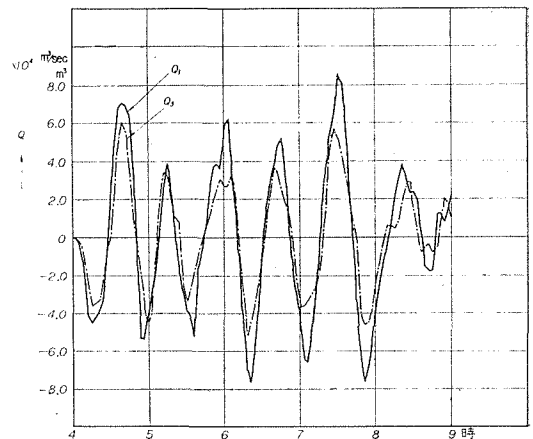


図-9 (b)



くなるものと考えられ、また湾奥の水位は湾奥の陸岸への浸水を考慮すれば、若干低下するものと想像できる。湾口の波高を 1.50 m として 1 km おきに Green の式で計算したものを示すと 図-3 の⑤の線のように、 $x=0 \sim 6$ km までは痕跡との差異は小さいが、それより奥は急に大きくなり、 $x=8$ km で 1.5 m 程度の差異を示し、最後の

1 km で急に上昇している。三陸海岸の幾つかの湾に対して、Green の式によるチリ津波の計算結果と痕跡とを比較して見るとあう湾もあれば、そうでないものもある。

従来の論文報告^{9-a), 14)} においても Green 式の妥当性について検討しているが、津波のくり返しによる湾内の流れの実態の解明が必要であると考える。

5. 結 び

以上、二種類の湾口条件と一種類の湾奥条件を仮定して計算し痕跡水位とくらべた。湾口の痕跡水位と一致す

る湾口条件(2)の場合でも計算値の結果は必ずしも満足とはいえない。その原因として

- 1) 陸岸への遡上および浸水条件を無視している。
- 2) (1) 式を適用する区間でも、(4) 式を適用する区間でも、袋地帯の貯留面積を正確には入れていない。
- 3) 貯留巾に対する流水巾の割合は確定しにくく局部損失も考慮していない。
- 4) 区間 Δx のとり方が若干長すぎ水位・流量が直線変化をなすとの仮定には幾分無理がある。
- 5) 時隔 Δt は伝播速度できめたが、谷から山までの時間内に入る数がやや少なすぎ、ピーク付近での計算値は若干の不安定がありうる。
- 6) 湾奥は静水水深約 5 m を有する $x=8.6$ km の地点におくべきであるが計算時には静水水深 1.5 m 前後を有する 9 km の地点においた。
- 7) 湾の中央と両岸近くの水深の差異にもとづく伝播速度の差異、すなわち流れを二次元的に考慮していない。
- 8) 痕跡の判定自身にも誤差はありうる。
などが考えられる。

一方以上の計算結果によれば(4)式を使う区間で、流水巾を貯留巾より狭くとれば、水位が高く出る傾向を示している。抵抗 K_{mr} の影響が小さく、 $\frac{\partial A}{\partial x}$ が比較的大きく出るのは、水深が湾全体を通じて大きく、 $x_0 \sim x_2$ 間の激しい巾変化によるためと考えられる。また(1)式は計算区間の平均巾を大きく取れば水位は低くなる性状をもっている。

計算結果は以上のような不備な点を持っているが、そ

れらの傾向は今後の計算の計画と問題の性質の解明における程度役立つものと思われる。いろいろの周期に対する大船渡湾内の水理計算についても目下検討中である。

参 考 文 献

- 1) 竹内・福岡・芦田・富永：チリ地震津波による災害を見て、土木技術資料，Vol. 2 (1960)，No. 6，(6月)土木研究所。
- 2) 福岡・細井・吉川・木下・首藤・馬場：チリ地震津波調査報告，土木技術資料，Vol. 2 (1960)，No. 12。
- 3) 岩崎・堀川：チリ地震津波とこれによる三陸地方災害の概要，土木学会誌 Vol. 45 (1960)，No. 8。
- 4) 亀井 勇・建築学会各支部：チリ地震津波災害調査報告，建築雑誌 Vol. 75，(1960) No. 891 (11月)。
- 5) 佐藤清一：津波について，土木研究第一輯，1948年11月，土木研究所。
- 6) 木下武雄：津波について，土木技術資料 Vol. 2 (1960)，No. 6。
- 7) 今村明垣：三陸沿岸における過去の津波について，地震研究所誌報，別冊一号(昭和8年3月3日三陸地方津波に関する論文及報告)，1934年3月。
- 8) 松尾春雄：三陸津波調査報告，土木試験所報告，第24号(1933)。
- 9) 佐々木忍：
 - a) 三陸海岸の津波対策について，第6回(1959)海岸工学講演集，土木学会。
 - b) チリ地震津波について，第7回(1960)海岸工学講演集。
- 10) 本間 仁：長波の変形について，土木学会誌，Vol. 19 (1933)，No. 9。
11. a) 西村・金井：The long wave in a bay of variable section (1)，震研彙報，別冊1号(1934)。
11. b) 西村・高山・金井：湾口における水位変化に伴う湾内海水の運動(その2)，震研彙報，第13号(1935)第1冊(3月)。
- 12) 王 方一：
 - a) 差分法による感潮河川の水理計算，土木技術資料 Vol. 3(1961) No. 7，No. 10。
 - b) 差分法による感潮水流の計算法と不規則河道への適用，土木学会第16回(1961年5月)年次講演概要または土木研究所報告(号数未定)。
- 13) Schnoor, E.: Anwendung des "Differenzenverfahrens" bei der Tidewellenberechnung in den von den Gezeiten beeinflussten Flüssen, Der Bauingenieur, 34 Jg (1959), H. 6。
- 14) 田中・室田・村岡：高潮変形に及ぼす流水断面の効果について，第7回(1960)海岸工学講演集。