

気仙沼湾の津波の模型実験について

東北大学 教授 工学部 工学博士 岩 崎 敏 夫
東北大学 助教授 同 理学博士 三 浦 晃

1. 緒 言

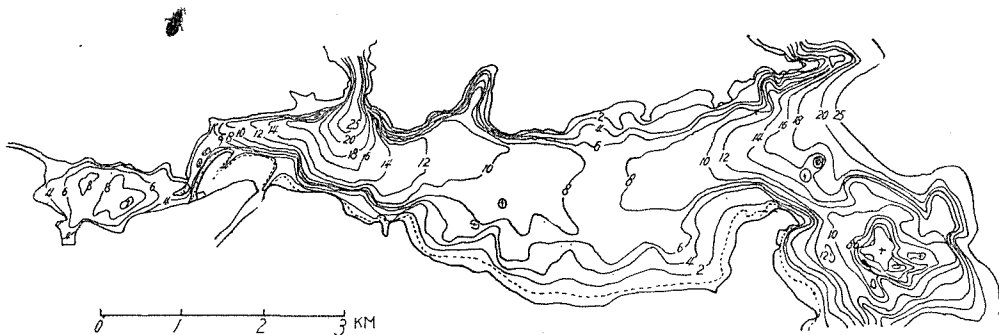
東北地方の三陸沿岸はその地勢上古来しばしば大津波に襲われている。昭和 35 年 5 月 24 日早朝にはチリ地震津波によって多大の被害を受けた。わが国における津波の研究は昭和 8 年の三陸津波以来若干行なわれてきたが、これらの研究は日本近海に発生する近地津波に関するものであり、チリ津波のような遠地津波に関するものは非常にすくない。特に遠地津波による土木施設の効果に関する研究はほとんど無いといっても過言ではない。本論文はチリ地震津波以来気仙沼湾、特にその奥部にある気仙沼港一帯に関する津波の災害対策が緊急に要請せられている現状にかんがみ気仙沼湾の津波の模型実験を行ない、津波災害の対策立案の基礎資料の一部を得んとするもので、特に防波堤による波高減殺の効果について実験を行なったものである。

2. 実験方法

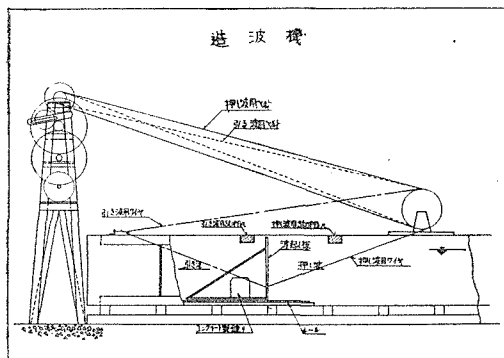
模型実験を行なう場合つねに相似法則が問題になる。

重力と粘性の効果をともに考えるならば一般には相似法則を満足させることは不可能である。分子粘性係数は海水と実験の水との両方ともほぼ同じ値をとるが、津波のような場合には渦動粘性は分子粘性に比較して非常に大きな値となる。海水に対する渦動粘性係数は模型の水に対する渦動粘性係数よりもかなり大きくなるので、重力と粘性の効果をともに考えても近似的に相似法則を満足させることができる¹⁾。このような理由によって、気仙沼湾の模型の縮率として水平方向には 1/3 000、垂直方向には 1/100 を採用することにした。その結果として時間縮率は 1/300 となった。実験に使用せる水槽は長さ 6.5 m、巾 1.2 m、深さ 0.4 m の木製の水槽であり、気仙沼湾の模型はこの水槽の中に水平方向 1/3 000、鉛直方向 1/100 の割合で縮少しコンクリートで作った。模型製作にあたり使用した海図は海上保安庁水路部発行の第 56 号気仙沼湾至大般渡港（縮尺 1/35 000）であり、陸図は地理調査所発行の気仙沼（縮尺 1/50 000）である。気仙沼港付近は別に行なわれた水路部の調査図によって津波

図—1 気仙沼湾の等深線（単位 m）



図—2



前の水深に補正した。図—1 に気仙沼湾の等深線が示されており水深は干潮面を基準にとっている。

実験は平均海面まで水を入れて行なった。干潮面と平均海面との差は 0.9 m である。波は水槽中気仙沼湾の模型の反対側に、鉛直におかれた厚い木板を水槽の縦方向に動かして起こした。使用せる造波機の概要は 図—2 に示してあり、詳細は 写真—1 に示してある。押波板の場合にはこの造波板を前方に、引波板の場合には後方に 1 回動かすことによって波を作った。造波板の移動速度、移動距離を変えることによって種々の周期およびいろいろの振巾の長波を作ることができる。実際に使用せる長

写真-1 造波機

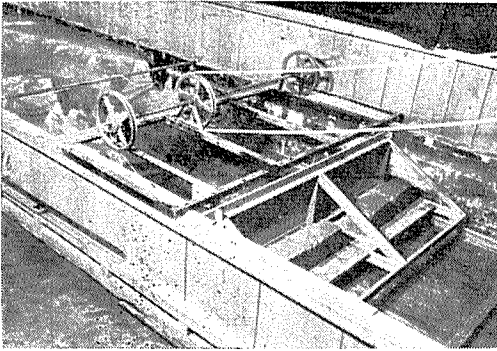
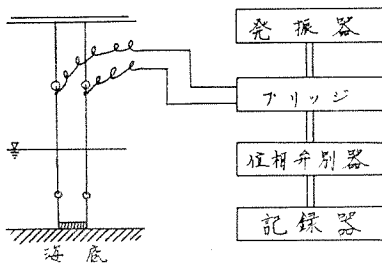
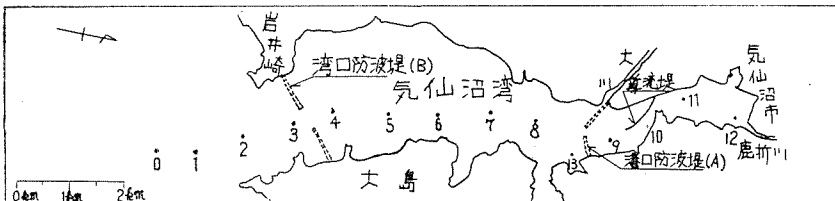


図-3 波高計



波の振巾はチリ地震津波の場合の実際の振巾を基準にして定めた。この造波機によって作られた単一の押波、引波が湾内に入ってきた時、湾内の水位は目測による水位計および電気抵抗型波高計⁽²⁾によって観測された。図-3は使用した電気抵抗型波高計の概要である。また湾内の水粒子の水平方向の移動を知るために、水面に10×10 mmの微小紙片を浮遊させ上方に設置した35 mmカメラで紙片の運動を連続的にストロボを使用して撮影した。津波に対する防波堤の効果を知るために、プラスチックで作った模型の防波堤が使用された。これらの模型の防波堤は図-4に示すように気仙沼湾口と気仙沼港

図-4 防波堤および波高計の位置
(図中数字は測定点の番号を示す)



口付近にもうけられた。さらに防波堤の開口巾の影響を知るために開口巾の異なったものが、いくつか使用された。波高計は湾の中央部に縦方向に設置された。その場所は図-4に示してある。

3. 測定結果

周期約60分までのいろいろの津波についての実験を

図-5 湾口での波高変化

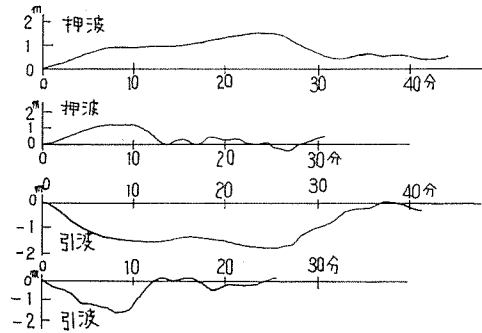
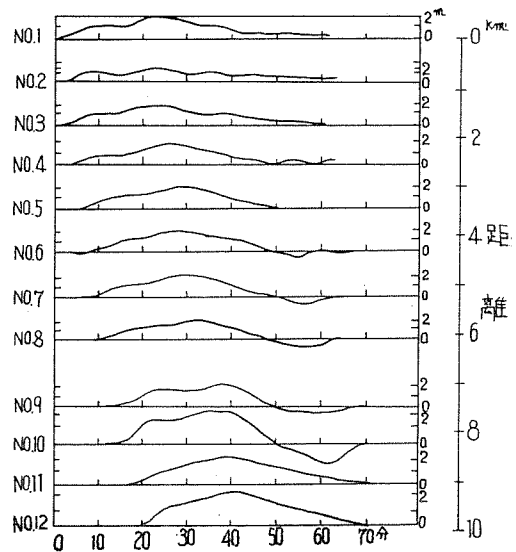


図-6 押波の場合の各測定点における波高の変化 (周期52分)

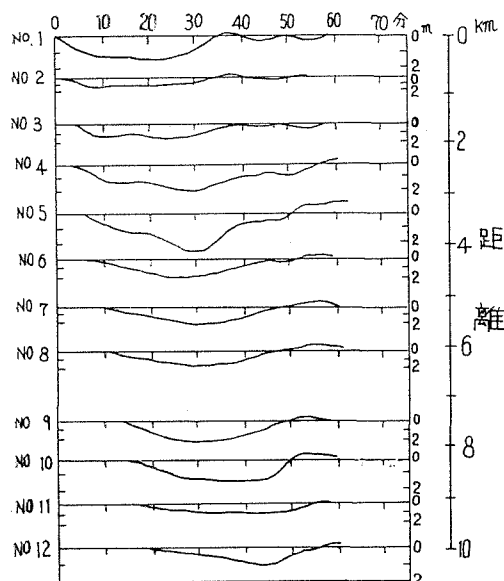


行なった。実験に使用した波の二、三の例は図-5に示してある。これらは湾の入口の中央部で測定したもので

あり、縦軸には振巾をとり横軸には時間をとってある。それぞれの値は実際の場合になおしてある。すなわち実験によって得られた測定値に振巾に関しては100倍、時間については300倍してある。以

後特に断わらぬ限りすべての値は実際の湾に換算したものをを用いることにする。各測定点における水面の昇降の時間的变化を図-6, 7に示す。図-6は押波、図-7は引波についての記録であり、これらは周期52分、63分の場合である。各図の左側には測定地点の番号が記入されており、各測定地点の記録の原点間の距離は測定点間の距離に比例してとってある。図において縦軸は波の振

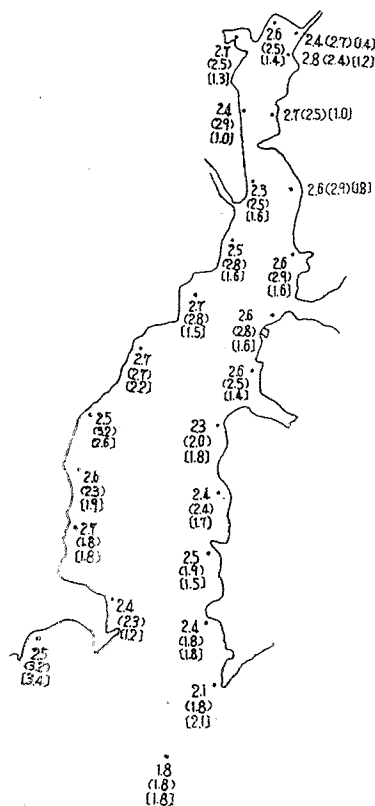
図一 引波の場合の各測定点における波高の変化 (周期 63 分)



市であり、横軸は時間であり、測定点 No. 1 で波によって水が動き始めた時を基準にとっている。同じような記

図一 湾周辺の最大波高

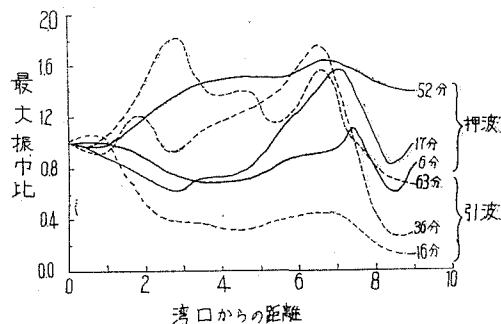
カッコのない数字は周期 85 分のもの、() 中の数字は周期 30 分のもの、[] 中の数字は周期 8 分のもの、単位は m



録が、いろいろの周期の波について、また開口巾のいろいろの防波堤を湾内に設けた場合について得られた。これらの記録からの結果を次に述べる。

(a) 各測定点における最高波高 波高計によって得られた記録から、各測定点における最大振巾値を読みとった。このようにして読みとった値と湾口での値との比を計算し図示したのが 図一 である。図から湾内に浸

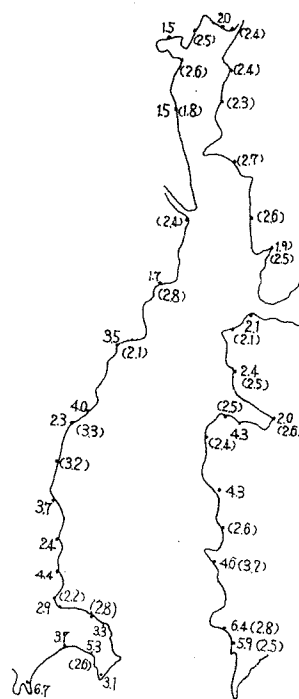
図一 湾口からの距離と最大波高との関係



入してきた津波の最大波高が湾形の変化によってどのように変化するかがわかる。図一 で押波のさいは各測定点における最大波高値とその波の湾口での最大波高値との比を縦軸にとり、引波のときは各測定点における波の谷の深さとその波の湾口での谷の深さととの比を縦軸にと

図一 昭和 8 年、昭和 35 年の津波のときの最大波高

カッコのない数字は昭和 8 年津波、カッコ内の数字は昭和 35 年の津波のもの、単位は m



ってある。これらの曲線から周期が長い波では湾奥に行くにつれて、最大振巾が増大し、周期が短い波では逆に湾奥にゆくにしたがって振巾が小さくなってゆくことがわかる。さらに外洋での波高を一定にして周期を変化させた場合、湾の周辺地域での最大波高を測定した結果は 図一 のごとくになった。図一 は昭和 8 年、昭和 35 年の津波のさいの最大波高の実測値を示したものである。図一、10 を比較してみると、前述したように長周期の波の最大波高は湾奥にゆくにつれて大きくなってお

り、周期の短い波は逆に湾奥にゆくにつれて減少していることがわかったとともに実験値と実測値とはよい一致を示していることがわかる。長波の水路断面面積漸変による変形については有名な Green の法則があるが、われわれの実験結果につき Green の法則が成立するかどうかを計算してみたが成立しないようである。

(b) 津波の伝播速度 津波の伝播速度 c は普通 $c = \sqrt{gh}$ で与えられている。ここに h は海の深さであり、 g は重力の加速度である。各測定点における波高記録から津波の伝播速度を求めてみると表-1のごとくになった。表中 c_1 は波によって水が動き始めた時刻か

表-1 津波の伝播速度

	押 波			引 波		
周 期	52	17	6	63	36	16
c_1 (m/sec)	10.6	10.6	10.6	10.2	10.3	10.3
c_2 (m/sec)	9.1	9.4	9.6	6.5	6.8	7.5

ら求めた伝播速度であり、 c_2 は波の最大波高の時刻から求めたものである。表からすぐに波の伝播速度は周期に無関係であることがわかる。また c_2 の値が c_1 の値にくらべて小さいこともわかる。押波の伝播速度が引波の伝播速度に比較して大きいのは押波の場合は平均水深が増大し、引波の場合は平均水深が減少するためであろう。図-1 の等深線より湾の測線にそっての平均水深を計算すると 9.0 m となる。この値を使用して c の値を $\sqrt{gh}$ から求めてみると 9.4 m/sec となる。この値は押波の最大波高の伝播速度の値とよい一致を示す。

(c) 防波堤による津波の波高減少 防波堤は図-4 に示したように湾口と港口に設置された。先に報告^{1),2)} したように港口防波堤は津波に対して有効でないことが明らかであるので、今回は湾口防波堤の場合についてのみ述べることにした。防波堤を設置した場合の波高計の記録から湾軸にそっての同時波高曲線を作った。図-11, 12 はその一例である。図-11 は周期 52 分の押波の場合であり図-12 は周期 63 分の引波の場合である。各図において横軸は湾奥からの湾口への距離をとってあり、縦軸は波高を取ってある。左側の時刻は測点 No. 1 において波によって水が動き始めた時を基準にとってある。次に波高計の記録から各測定点における最大振巾値を読みとった。このようにして読みとった値から、 h_i'/h_i の比を計算した。ここに h_i は防波堤が無い時の測定地点 i における最大

振巾値であり、 h_i' は同じ測定点で防波堤のある場合の最大振巾値である。その結果は図-13, 14 のごとくになった。図-13 は周期の異なるいろいろの波に対する防波堤効果を湾の入口からの距離によってどのように変化するかを示したものであり、このときの防波堤の開口巾は 180 m である。図-14 は防波堤の開口巾をいろいろに変化させた場合の防波堤効果を示したものである。ここに b は防波堤の開口面積比を示す。これらによって湾口防波堤は津波の波高を減少させるに有効であることがわかる。さらに防波堤の効果は防波堤の開口面積の減少とともに増大していくことがわかるし、防波堤の設置によって波形の変化がほとんど無いこともわかる。

つぎに水粒子の水平方向の移動をストロボを使用して撮影した写真から、水粒子の水平方向の移動図を作った。写真-2 は撮影したフィルムの 1 コマである。水粒子の移動図から気仙沼湾の副振動の節と腹との位置を決定した。その結果は図-15 に示した。また防波堤を設置した場合の移動図の一例を図-16 に示す。図-16 で (a) は防波堤の無い場合、(b) は開口巾 360 m の防波堤を湾口に設置した場合、(c) は開口巾 180 m の防波堤を設置した場合である。これらの図から防波堤によって湾内の水粒子の水平方向の移動が減少することが明らかにわかる。同様な関係はいろいろの周期、押波、引

図-11 湾軸にそっての押波の波型の変化

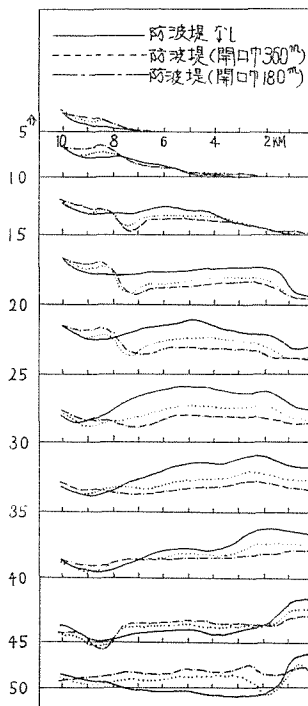


図-12 湾軸にそっての引波の波型の変化

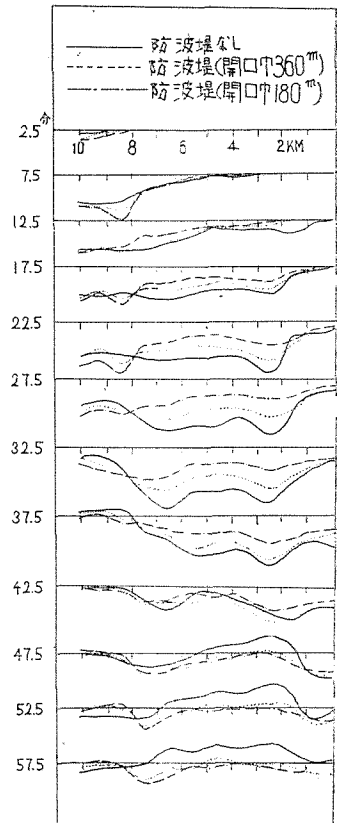


図-13 津波の周期と防波堤効果との関係

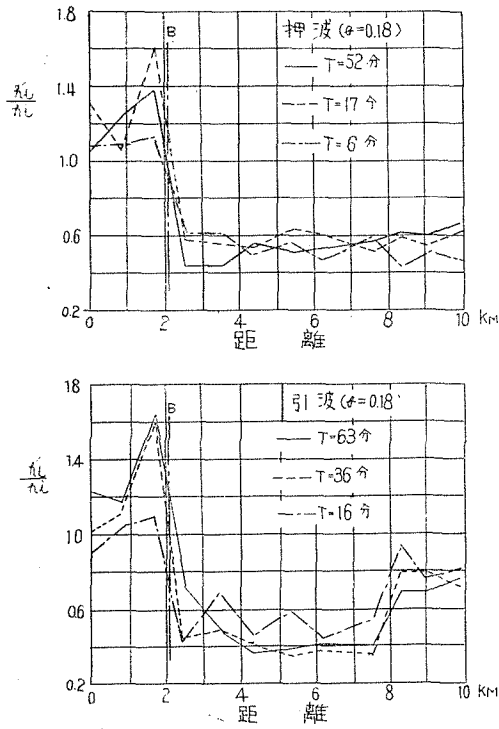


図-14 防波堤の開口面積と防波堤効果との関係

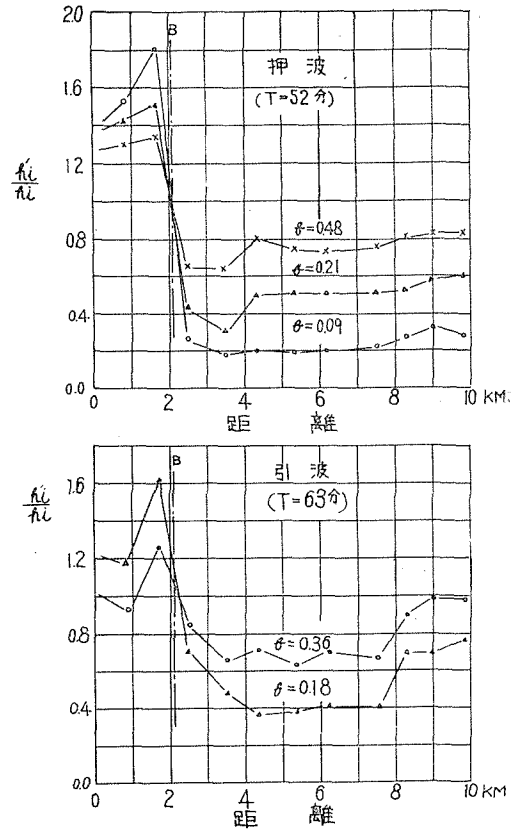


写真-2

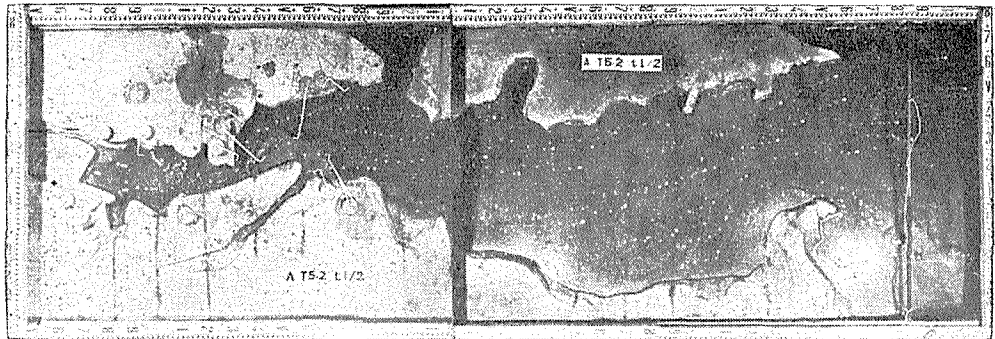


図-16 水粒子の水平移動
(周期52分の押波)

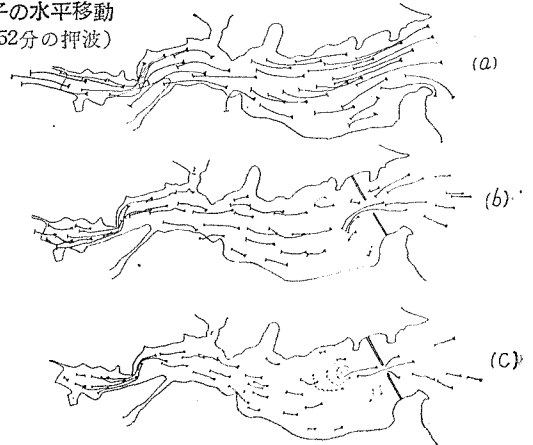
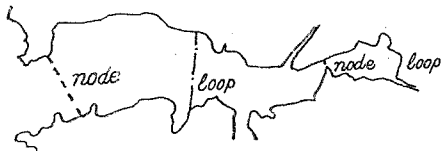


図-15



波の場合でも同じである。また防波堤がある場合と無い場合との水平移動距離の比は近似的に波高の比に等しくなるから、これらの図を比較することにより防波堤の効果を吟味することができる。

4. 結 言

いろいろな周期の単一波の押波、引波の模型実験の結果から次の点が明らかになった。

(a) 気仙沼湾のような奥行の深い湾では湾内の最大波高は周期の短い津波に対しては、湾奥にいくにつれて減少し、周期の長い津波に対しては逆に、湾奥にゆくにつれて最大波高は増大する。

(b) 津波の伝播速度は従来一般に使用されている $c = \sqrt{gh}$ の式より求めた値を使用することは近似的に妥当である。

(c) 湾の節に設置した湾口防波堤はいろいろの期間の津波に対して波高減殺に有効であり、防波堤の効果は防波堤の開口面積の減少とともに増大する。

以上の結果は単一波の実験の場合であり、実際の津波は周期的な波であるから、この結果を定量的に利用して津波に対する防波堤効果を評価することには問題があるが、少なくとも定性的には本論文の結論は正しいものと思われる。この点に関しては今後さらに研究を進めたいと思っている。

参 考 文 献

- 1) Iwasaki, T., Miura, A. and Terada, S.; On the effect of the breakwater in case of Tsunami, Part 1. Technology Reports, Tohoku Univ. Vol. 25, p. 123 (1961)
- 2) 岩崎敏夫・斎藤 晃; 波高計に関する二、三の研究, 第6回水理研究会講演概要 p. 45.
- 3) 岩崎敏夫・三浦 晃・寺田章次; 津波に対する防波堤の効果について(第1報) 第16回土木学会年次学術講演会, 昭和36年5月