

三陸沖の断層地震による大津波の追算

岩崎 敏夫*・真野 明**

1. 序 論

巨大地震に伴う津波がいかなるものかを数値実験によって明らかにしようと試みてきたが、昨年度までは陸側境界より1~2ステップ(1ステップ=10km)、沖側で出力したので、湾岸に設置された潮位計記録や、陸上痕跡高と直接比較することができなかった¹⁾。防災上重要となる沿岸や港湾などを計算領域に入れる場合には、海岸線や等深線の様相を表現する細かい格子間隔が必要であるが、津波の波源域や、その伝播、反射などは、三陸沖津波を考える場合には北海道南岸より東北地方太平洋岸全域を入れねばならず、電算機の記憶容量、および計算時間上、そのように細かい格子間隔を組むことはできない。

この問題を解決するには波源域より沿岸海域までを粗い格子間隔で組んで、これを外海領域と名づけ、問題とする地点の沖合だけに次第に格子間隔を細かくした中間領域を必要に応じて2段以上数段にわたって接続させ、最後に沿岸や港湾を表現できるだけの格子間隔を有する沿岸領域を接続させるという方法が考えられる。

この計算の場合には、上のようにして構成された全空間領域にわたって、時間的には一度に計算を行ってしまうのであるが、これとは別に対象とする地域をとりかこむ比較的狭い範囲の計算領域を構成しておき、その境界入力を、上述の粗い格子間隔による外海領域の計算出力によって与えることができれば、港湾工事計画段階での法線変更の効果や、数多くの地点の湾や海岸等に対する津波の影響を調べるのに、いちいち外海領域の計算を行わずにすむという利点が考えられる。

本研究は以上のようにして行った計算の結果と実際の津波記録とを比較することによって、計算法の妥当性を検討するとともに、津波の特性に関する知見を得ようとしたものである。

2. 計算領域

図-1は外海領域で格子距離間隔 $\Delta S=10$ km である。

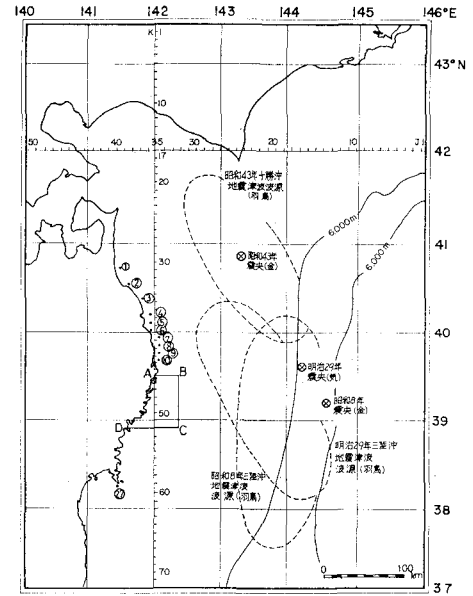


図-1 外海領域

(出力点: ①四川目, ②八戸, ③八木, ④久慈, ⑤野田, ⑥青代, ⑦羅賀, ⑧小木, ⑨田老, ⑩宮古, ⑪鮎川)

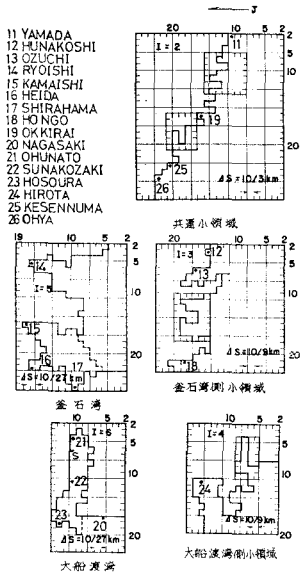
最終的な沿岸領域として釜石湾と大船渡湾をえらび、図-2に示すように $\Delta S=10/3$ km の共通小領域、 $\Delta S=10/9$ km の釜石湾側小領域および大船渡湾側小領域、さらに $\Delta S=10/27$ km の釜石湾領域および大船渡湾領域の、それぞれ3段の接続を行った。また格子時間間隔は差分の安定条件より $\Delta T=8$ 秒とした。

数値解析においては従来外海領域に対しても慣性項を省略しなかったが、結果にまったく影響がないので、外海領域においては慣性項と摩擦項とを無視した。その代わりにコリオリ力は外海域において無視できない大きさとなるのでこれを考慮した。中間および沿岸領域では慣性項、摩擦項を考慮した。沿岸領域における慣性項、摩擦項の影響は別の論文で検討してあるが、本研究では一応考慮に入れてある²⁾。

次に従来差分法として採用していた Staggered scheme は領域接続において非常にやっかいなプログラムを必要とするので Leap frog scheme に変更した。これによって、格子距離間隔は実質上従来の半分に縮まった。

* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

** 学生会員 工修 東北大学大学院 工学研究科

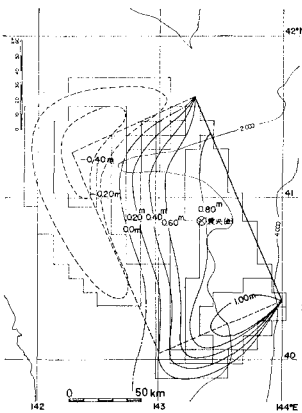


図一2 沿岸領域

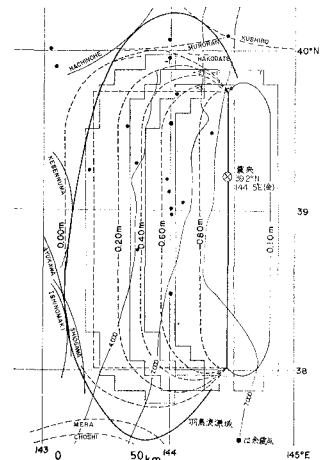
津波防波堤の開口部の条件は、伊藤・谷本・木原⁴⁾の用いた流速の2乗に比例した損失項を加える方法にした。その他の条件は従来と同様である。

3. 波源域

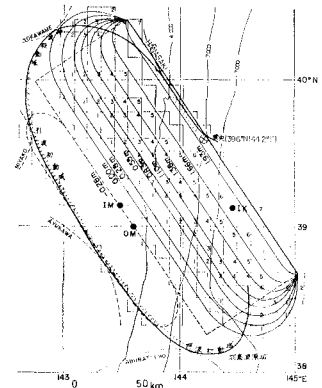
地震津波は前回と同じく1968年十勝沖地震津波、1933年三陸大津波および1896年三陸大津波の3ケースとし、最も確からしい情報として前回報告した断層モデルを用いることとした。図一3, 4, 5は採用した波源域モデルで、1968年のものについては前報と同じであるが、1933年のものは羽鳥⁵⁾が波源域を半分修正した点や、後述する湾内痕跡高との比較から前報の半分のくい違い量 $D=1.65$ mとした。1896年のものについては今回は羽鳥の求めた波源域⁶⁾に調和するようにした。図中、IM, OM, IKはおのおの今村、大森、伊木の求めた震



図一3 1968年十勝沖地震津波波源域モデル



図一4 1933年三陸大津波波源域モデル



図一5 1896年三陸大津波波源域モデル

央であり、それらは広く分散しているが、それらをすべて断面面の中に入れて $L=230$ km, $W=80$ km, $\delta=30^\circ$ の低角逆断層モデルが求められる。津波記録の方から逆断層型が推定され⁵⁾、また金森は100秒程度の時定数をもつクリーブ状の断層破壊による発震機構を推定している⁶⁾、変動は震央の分散を考慮し等高線の低い所から高い所へ伝播するモデルとし隆起時間を112秒とした。

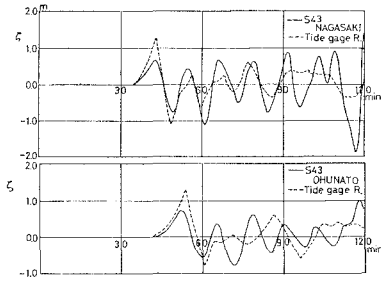
表一1に各波源域モデルの発震日時、震央、マグニチュードおよび断層パラメーターを表示した。

4. 驗潮記録または目視観測との比較

図一6は1968年(昭和43年)十勝沖地震津波の際の大船渡湾口長崎および湾奥大船渡における驗潮記録と計算結果との比較である。 $t=0$ は発震時刻に一致させてあり、驗潮記録より天文潮を除いてある。これによると、津波の出現時刻、ピークの発生時刻ともよく一致しており長崎においては13分程度の周期も良く再現されている。従来の計算結果では沿岸沖合において周期70分ほ

表一 波源域モデル・パラメーター

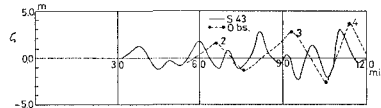
名称	1968年十勝沖地震津波	1933年三陸大津波	1896年三陸大津波
発震日時	5月16日 9時49分	3月3日 2時31分	6月15日 19時33分
震央	[40.8°N 143.2°E	[39.2°N 144.5°E	[39.6°N 144.2°E (気象庁)
マグニチュード	[M=7.9 m=2	[M=8.3 m=3	[M=7.6 m=3
L (断層面長さ)	150 km	185 km	230 km
W (断層面幅)	100 "	100 "	80 "
D (くい違い量)	4.10 m	1.65 m	3.65 m
δ (傾斜角)	20°	45°	30°
φ (転位角)	336°	0°	332°
λ (すべり角)		90°	90°
v (破壊速度)	3.5 km/s	3.5 km/s	
τ (地盤上昇時間)	20 sec	16 sec	112 sec
V _T (全排水量)	1.4×10 ¹⁰ m ³	2.1×10 ¹⁰ m ³	3.1×10 ¹⁰ m ³
断層型	低角逆断層	正断層	低角逆断層



図一六 十勝沖地震津波験潮記録との比較
—大船渡湾—

どのはなはだ緩慢な振動が得られたのみであったことを想起すると、沿岸各地における津波の周期というのは、海岸線の屈曲に伴う反射波によってもたらされたものではないかと推察される。

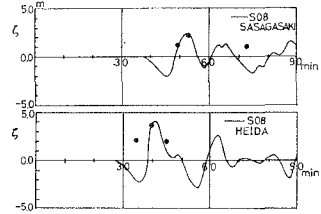
図一七は同じ津波の際の釜石での目視観測と比較したものであるが、4波目まで増幅を続けておりその傾向は非常に良く一致している。



図一七 十勝沖地震津波目視観測記録との比較—釜石—

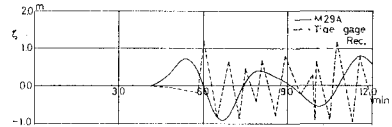
図一八は1933年三陸大津波における大船渡湾釜ヶ崎と釜石湾平田における計算結果を示したものであるが、図中目視観測は震研彙報別冊1より抽出したものである。すなわちいずれも目視観測の第2波と、計算値の第1波とがよく一致し、周期5分程度の先導波があったらしいことがうかがえる。

1896年三陸大津波の験潮記録はほとんどない。やむ



図一八 1933年三陸大津波目視観測記録との比較—笹ヶ崎・平田—

を得ず、鮎川の験潮儀記録と対比することにする。図一九に示すように鮎川験潮儀は鮎川港内にあり、7.5分程度の振動が目立っている。他方計算値は鮎川(図一、27)であって、外海領域に属しており、周期30分程度の緩慢な変動となっている。



図一九 1896年三陸大津波験潮記録との比較—鮎川—

5. 痕跡高との比較

前報と同様に今回も計算結果より最大偏差値を求め、これをζ_m(単位m)とし、観測痕跡高よりうる最大偏差ζ_bと対比することにする。ζ_bの基準について十勝沖地震津波では最高波の出現時刻がかなり良く記録に残っているため、天文潮をとり、1933年三陸津波や1896年三陸大津波では平均水面を基準とした松尾の値⁷⁾を用いた。

表一にその結果を示す。表中ΔSは出力点の所属する領域の格子間隔、h₀は出力点水深、k₀はζ_b/ζ_mであり、またTは最高水位の現われている波のゼロ・アップ・クロス法による周期(単位分)である。

さらにζ_mとζ_bを図一十に示した。これらの資料より釜石湾・大船渡湾程度の分割ならまずまず実情を表わすが、それより粗い格子間隔では地形の複雑さを現わし得ていない。特に宮古から北の北部三陸での出力では前報と同様k₀が10倍程度と大きくなっており、これは出力点(海岸線から5km沖)と海岸線の間の波高の増幅、差分による離散化の影響、さらには陸上遡上の影響などによるものと考えられ今後の検討課題としたい。

6. 大船渡湾内振動特性

大船渡湾では1968年十勝沖地震津波を契機に防波堤の効果に関する多くの研究が行われてきている⁴⁾。ここでは1896年三陸大津波(明治29年)をとりあげ振動特性、防波堤の効果について、湾口(長崎)と湾奥(大船渡)での波形のフーリエ解析により考察を行う。フー

表-2 波高分布

No.	地名	ΔS (km)	h ₀ (m)	1968年十勝沖地震津波				1933年三陸大津波				1896年三陸大津波			
				ζ _m	ζ _b	k ₀	T	ζ _m	ζ _b	k ₀	T	ζ _m	ζ _b	k ₀	T
①	四川	10	69	0.76	3.6	4.0	38	0.35	2.8	11.1	30	0.86			60
②	八戸	"	64	0.78	3.1	4.0	27	0.31	2.9	9.1	41	0.93			49
③	八木	"	94	0.70	2.9	4.2	31	0.35	3.5	10.0	24	0.86	10.5	12.5	43
④	久慈	"	118	0.87	4.5	5.3	20	0.40	3.7	9.1	20	0.72	11.0	14.2	32
⑤	野田	"	108	0.69	5.3	7.7	20	0.43	5.5	11.1	36	0.68	10.5	14.2	45
⑥	善田	"	104	0.64	2.8	4.3	34	0.57	7.5	12.5	41	0.81			42
⑦	羅賀	"	166	0.90	2.5	2.8	20	0.54	8.4	16.7	22	0.86	10.0	10.0	32
⑧	小本	"	140	1.06	2.2	2.1	21	0.56	3.8	6.7	30	1.01			32
⑨	小田	"	172	1.02	2.0	2.0	20	0.48	4.0	8.3	36	1.07			34
⑩	宮古	"	190	1.43	2.0	1.4	21	0.50	8.3	16.7	38	1.20	9.0	7.7	34
⑪	山田	10/3	20	1.73	2.4	1.4	24	1.83	3.2	1.8	16	2.51			22
⑫	船越	10/9	20	2.17	3.8	1.8	13	2.75	5.3	1.9	10	3.87			12
⑬	大槌	"	33	1.57	3.1	2.0	25	1.79	3.1	1.7	13	2.91	4.2	1.4	33
⑭	両石	10/27	15	4.30	4.9	1.1	15	6.70	10.2	1.5	11	7.05	11.7	1.7	11
⑮	釜石	"	15	2.91	3.5	1.2	19	4.49	3.3	0.7	19	4.35	6.0	1.4	20
⑯	平田	"	15	2.57	3.9	1.5	12	4.04	3.4	0.8	21	5.16	6.6	1.3	19
⑰	白浜	"	15	2.18	2.6	1.2	16	4.12	3.2	0.8	15	3.20			15
⑱	本郷	10/9	35	1.67	3.4	2.0	16	3.01	11.9	4.0	10	3.11	15.3	3.8	9
⑲	越喜来	10/3	20	1.28	2.5	2.0	14	2.67	11.1	4.2	25	3.32	11.3	3.4	22
⑳	長崎	10/27	19	0.86	1.1	1.3	15	2.96	6.8	2.3	13	2.96			19
㉑	大船渡	"	15	0.73	1.2	1.6	18	4.55	3.4	0.8	13	5.54	5.8	1.0	16
㉒	砂子崎	"	15	0.40	1.3	3.2	18	1.90	3.0	1.6	9	2.82			8
㉓	細浦	"	15	0.75	1.4	1.9	18	6.40	6.2	1.0	8	4.84	6.6	1.4	13
㉔	広田	10/9	10	0.88	2.0	2.3	28	1.84	4.6	2.5	31	3.77	4.6	1.2	33
㉕	気仙沼	10/3	30	0.56	1.1	2.0	11	2.41	4.3	1.8	13	3.52	6.2	1.7	16
㉖	大谷	10/3	20	1.37	1.5	1.1	15	2.75	4.8	1.8	14	5.51	6.8	1.2	16

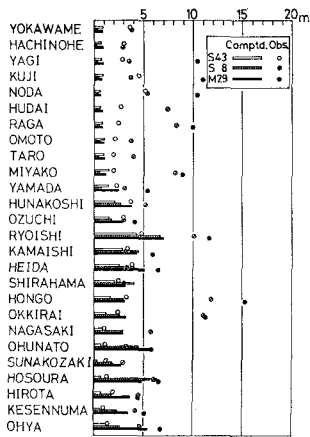


図-10 波高分布

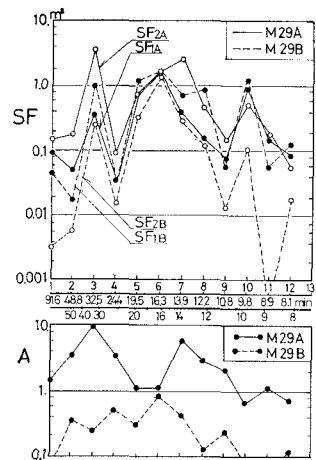


図-11 大船渡湾振動特性

リエ・パワースペクトル SF を分解成分波の余弦・正弦係数の2乗和によって定義し、湾口、湾奥に対して1,2防波堤の有、有に対してA, Bの添字をつける。またパワー増幅度 A を次式により定義する。

$$A = SF_2/SF_1 \dots\dots\dots(1)$$

記録長91.6分の出力結果を分解したものを図-11に示す。防波堤の無い場合 A は32.5分と13.9分にピークを持っているが、前者は湾口を振動の節、湾奥を振動の腹とする共振周期であり、後者は湾奥と細浦付近を腹

とし中間を節とするような振動である。 A の値は周期32.5分の方が大きい、表-2の最高水位分布を見ると、1896年、1933年三陸大津波とも大船渡と細浦の中間の砂子崎で明確な節をもっており周期13.9分の振動の方が卓越していることがわかる。次に防波堤を設けると A はいずれも1以下になり、特に32.5分での低下は著しく、13.9分のピークは16.3分に移る。これは湾奥と防波堤を腹とする振動であると考えられる。

7. 沿岸計算分離方法の検討

4., 5. で述べてきたように波源域を含む外海領域から格子間隔を順次細かくしていき沿岸領域までを同時に計算する方法は非常に有効なことがわかったが、この計算は大規模なものであるので外海計算と沿岸計算を分離して行えば、1つの津波に対する多くの沿岸での影響といったことを調べるのに有用であり、これを次の方法で行った。

最初に沿岸領域を接続しない外海計算を行い、沿岸計算の場合の入力地点となる仮想入力境界上で非線型長波の進行波の特性値 $u+2c$ を出力しておく。次に沿岸計算を行う場合には、この境界上での逆行波の特性値 $u-2c+m \cdot t$ を前時間ステップより求めこれと上述の出力値より連立させて新たに境界上の流速 u' を求め、それを使って境界内部を計算していく方法である。沿岸領域として釜石湾に防波堤を設置した場合を対象に、仮想入力境界 ABCD (図-1) を設け、1896年三陸大津波の外海計算、沿岸計算を同時に行ったケース (M29A) と、上述の分離して行ったケース (M29C-2) の釜石・両石での波形を比較してこの方法の妥当性を検討する (図-12)。釜石・両石とも最初の30分程度は非常に良く一致しており、その後は波高は多少異なってくるが位

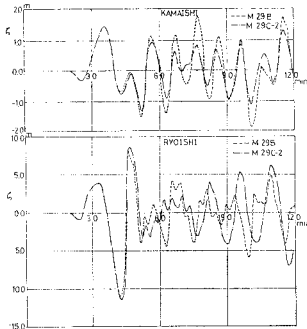


図-12 沿岸計算分離方法の波形比較

相関係は保たれているようである。これは津波が湾奥とこの仮想入力境界を往復する時間が約30分であり、最初湾奥に到達した波がこの仮想入力境界にもどってからの影響が現われているものと考えられる。

8. 結 語

断層モデルを波源に設定した場合の変位量が過少であるという昨年の所論に対し、沿岸地形をよく表現できる程度の細かさまで格子間隔を小さくした領域を接続することによって実測結果によく調和する計算結果がえられた。また仮想入力境界を設定して計算を分割する方法もある程度実用性を有することが判明した。

最後に、本研究に対して運輸省第二港湾建設局より多大の御援助、御指導を得た。また本計算には東北大学 NEAC 2200 モデル 700, 東京大学 HITAC 8700/8800, およびセンチュリーリサーチセンタ (株) CDC 6600 コンピューターシステムを用いた。また本研究は昭和50年度文部省科学研究費自然災害特別研究 (1)「三陸大津波来襲時の被害予測」に費用の一部を負った。ここに記して厚く謝意を表する。

参 考 文 献

- 7) 岩崎敏夫・真野 明・滝森 勉: 三陸沖における巨大地震に伴う津波の数値モデル, 第22回海岸工学講演会論文集, 1975.
- 2) 岩崎敏夫・楊 沢民: 三陸大津波の数値実験, 第21回海岸工学講演会論文集, 1974.
- 3) 岩崎敏夫・真野 明・前原隆生: 釜石湾・両石両湾を含む水域における津波の挙動に関する研究, 第23回海岸工学講演会論文集, 1976.
- 4) 伊藤喜行・谷本勝利・木原 力: 長周期波に対する防波堤の効果に関する計算 (第4報), 港湾技術研究所報告, 第7巻, 第4号, 1968.
- 5) 羽鳥徳太郎: 東北日本太平洋側における津波の波源, 地震第2集27巻, 1974.
- 6) Kanamori, H.: Mechanism of Tsunami Earthquakes, Phys. Earth Planet. Interiors, Vol. 6, 1972.
- 7) 松尾春雄: 三陸津波調査報告, 土木試験所報告, Vol. 4, No. 24, 1933.