

湾奥に位置する河川での津波の遡上に関する数値解析

岩崎敏夫*・阿部至雄**・橋本 潔***

1. はじめに

河川を遡上する津波の水理学的特性を把握するために、著者らはすでに旧北上川を対象にした津波の遡上計算を特性曲線を用いて行い、河川内では津波は非線形性が強く、地形変化や底面摩擦の影響を強く受けるなど、大河川における津波の挙動を明らかにしてきた^{1),2)}。

本解析方法は、水底の摩擦力と水面幅の変化および河川堤防からの津波の越流をも考慮した非線形の浅水理論にもとづいており、また、津波の砕波や段波のような急激な変化の現象をも表現するという大きな利点を持っている。しかし、これまでは河川内での津波の挙動のみの把握にとどまっており、津波を外海から湾、そして河川へと一連のものとして捉えてはいない。他方、岩崎・真野は津波の波源として断層モデルを考え、巨大地震に伴う津波を外海から湾奥までの追算を行うことにより、湾内での津波の性質を明らかにしてきた³⁾。

そこで、本研究においては、この差分法による津波の湾内2次元計算と特性曲線法による津波の河川1次元遡上計算を河口で透過の条件を加えることにより接続し、湾および河川を通じての津波の変形や流動などについて研究をおこなった。対象とした湾および河川は、三陸沿岸岩手県の大槌湾とその湾奥に位置する大槌川である。大槌川は旧北上川より規模の小さい中小河川で、明治29年と昭和8年の三陸沖地震津波によってこの一帯はかなり被害を受けた。対象津波はこの2つの津波のほかに昭和43年十勝沖地震津波とした。以下に、各津波の変形と流動、河川内での津波の砕波形態、最高水位、フルード数および波圧などに関して得られた知見を報告する。

2. 計算条件

図-1は計算領域である。湾内津波の計算は、まず外海に設定した仮想入力境界上で、既に岩崎・真野³⁾によって求められている波高と流速を与え、ついで表-1に示したように格子間隔を外海から湾内へと小さくしてゆき、湾奥付近で河口幅程度に細分し、大槌川の河口（計

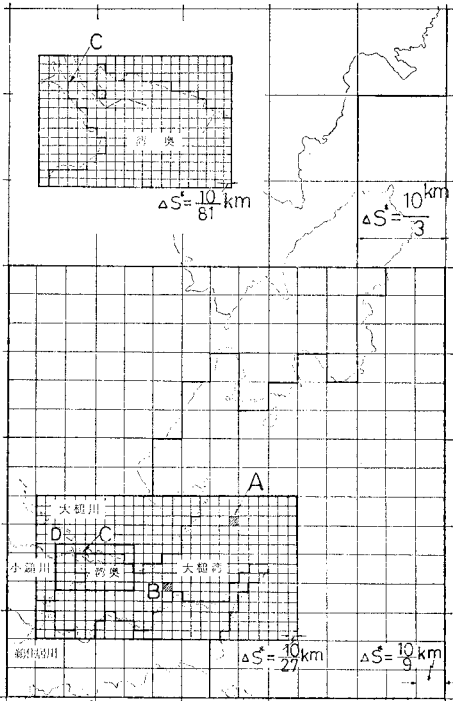


図-1 計算領域 (A: 湾口, B: 湾内, C: 河口 (接続部), D: 河川内)

表-1 湾内計算における格子間隔

I	空間格子間隔 ΔS^* (km)	時間格子間隔 Δt^* (sec)	最大水深 h^*_{max} (m)	備 考
1	10/ 3	12	1 071	共通小領域
2	10/ 9	12	167	大槌湾側小領域
3	10/27	4	118	大槌湾
4	10/81	4	42	大槌湾湾奥

算上の河口で、実際の河口より315 m湾側の地点)で、津波の河川遡上計算に接続させた。接続法は、湾側より河口に非線形長波の特性曲線を出し、透過の条件として河口で有限振幅長波の進行波としての流速の式を用いることにした。これより河口における流速と波速が得られ、文献1)に示した方法により津波の河川遡上計算を行なった。なお、河口では河川流速を線形的に加えている。また、大槌川は小槌川とともに河口で湾に注いでいるの

* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科
** 正会員 工博 東北工業大学助教授 工学部土木工学科
*** 正会員 工修 宮城県石巻土木事務所

表-2 河川遡上計算における水理条件

注1) 津波名	平均海面	下流端	波速	時間	上流端	河床勾配	粗度係数	河川固有	時間ステップ		距離ステップ		解析区間	
	SWL*	河口水深	$c_0^* = \sqrt{g^* h_0^*}$	$t_0^* = h_0^* / c_0^*$	h_{r^*}				流量 Q^*	ΔT^* (sec)	ΔT	ΔX^* (m)		ΔX
	T.P. (m)	h_0^* (m)	(m/sec)	(sec)	(m)									
S 43	0.2	4.0	6.26	0.639	0.71	1/474	0.035	29	24	37.6	82.6	20.7	3.315	
S 08	0.2	4.0	6.26	0.639	0.71	1/474	0.035	29	24	37.6	88.9	22.2	3.315	
M 29	0.2	6.0 ^{注2)}	7.67	0.782	1.31	1/474	0.035	29	24	30.7	105.8	17.6	3.315	

注 1) S 43: 昭和 43 年十勝沖地震津波, S 08: 昭和 8 年三陸沖地震津波, M 29: 明治 29 年三陸沖地震津波

注 2) 湾内計算で水底の露出を防ぐために現況より 2.0 m 深くしている。

で、小鉾川への津波の透過も考慮することにした。

表-2 は津波の河川遡上計算の際の水理条件である。平均海面は津波襲来時のそれと同じにとった。河川固有流量はマンニングの式より求めた低水位に対応するものであるが、実際より大きめの値を与えることになった。越流量はデマルキの式で与え、越流係数は中川の実験結果を用いた⁴⁾。その他の条件は旧北上川の場合と同様に与えた²⁾。なお、大槌川と旧北上川とで特に異なる水理量は河床勾配で、前者の方が 1 桁大きい。

3. 湾および河川を遡上する津波

(1) 津波の時間波形

図-2 は対象津波の河口での時間波形で、図-3 はその波形のスペクトルである。図中、 N はデータ数、 m はフィルター項数である。

昭和 43 年十勝沖地震津波当時の記録⁵⁾ によれば、津波の初動は押しであり、小鉾川河口では第 3 波が最大で、

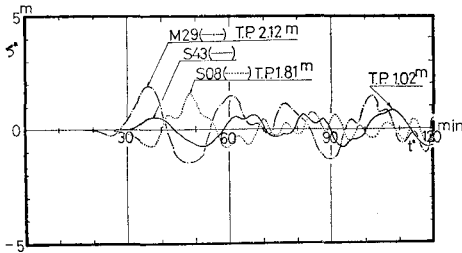


図-2 対象津波の河口における波形

また、宮古と越喜来での周期は 23 分である。計算波形では第 4 波が最大 (T.P. 1.02 m) であるが、第 3 波と大差なく、初動は押しであり、また、卓越周期が 26 分前後であるので、これらの点は記録との対応がつく。昭和 8 年三陸沖地震津波の計算波形の初動は引きであり、最高波は第 1 波 (T.P. 1.81 m) であるが、その前面に小さな山があり、その後には短周期の波高の小さ

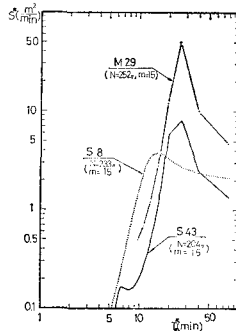


図-3 対象津波のパワースペクトル (MEM 法)

な波が続く。また卓越周期は 15 分前後である。当時の記録⁶⁾によれば、大槌湾での初動は引きで、第 2 波が最大、また第 1 波と第 2 波の襲来の間隔は 10 分、第 2 波と第 3 波のそれは約 30 分、その後は 10 分内外の間隔で次々に襲来したとのことであるので、計算結果の記録との対応がほぼつくといえる。明治 29 年三陸沖地震津波当時の記録⁷⁾によれば、大槌湾での津波の初動は引きで始まったようである。計算結果は初動が弱い引きで始まっており、最大は第 1 波 (T.P. 2.12 m) で、卓越周期は 26 分前後であった。

表-3 大槌における津波の高さ

津波名	津波の高さ	T.P. (m)
M 29	2.97 ⁷⁾	(4.48 ⁷⁾)
S 08	4.16 ⁶⁾	(3.68 ⁶⁾)
S 43	2.25 ⁵⁾	

表-3 に示した大槌湾での津波の痕跡高と比較して、河口での計算波高は低くでているが、後述するように、河道内の最高水位が痕跡高にほぼ対応し、津波の周期などについては上述したとおりであるので、全体的にみてほぼ妥当な計算結果を得たといえる。

次に、図-4 に湾口から河川内へ至る津波の時間波形

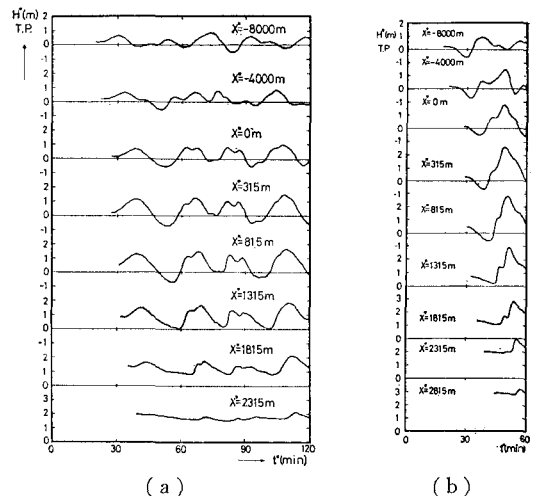
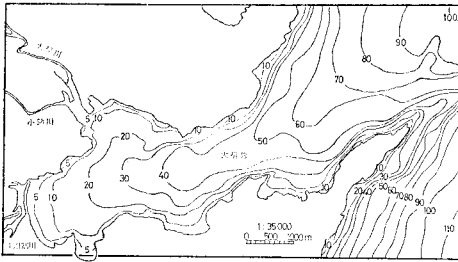


図-4 津波の時間波形
(a) 昭和 43 年十勝沖地震津波 (b) 昭和 8 年三陸沖地震津波

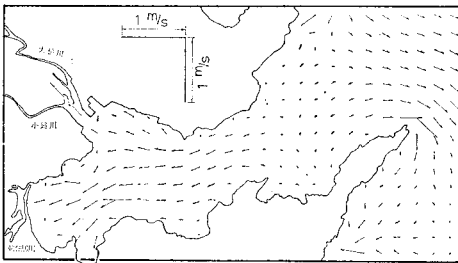
の一例を昭和 43 年および昭和 8 年の各地震津波の場合について示した。 $x^* = -8\,000\text{ m}$ は大槌湾の湾口、 $x^* = 0\text{ m}$ は計算上の河口（湾と河川の接続部）、 $x^* = 315\text{ m}$ は実際の河口である。湾口に侵入した津波は湾幅が狭くなる $x^* = -4\,000\text{ m}$ 地点で波形が変化し、第 2 波以降周期が短くなる。この傾向は各対象津波に共通してみられた。とくに、昭和 43 年十勝沖地震津波では第 2 波、第 3 波は双峰性を示すようになり、湾口では第 3 波が最高波であったが河口では第 4 波が最高を示す。河口に侵入した後、 $x^* = 315\text{ m}$ では波高は各波とも増幅するが、河をさらに遡るにつれ波高は徐々に減少する。昭和 43 年、昭和 8 年および明治 29 年の各津波の最高波の所で、各々約 0.4 m、0.8 m および 1.0 m の増幅を示した。

(2) 津波の湾内流動

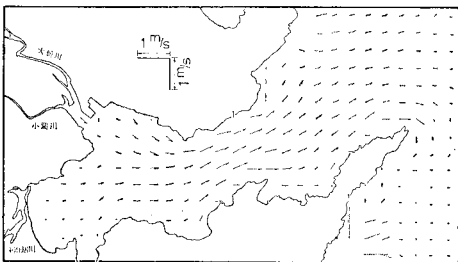
図—5 は大槌湾の等深線図で、図—6 および 図—7 は昭和 43 年および昭和 8 年の各津波襲来時の湾内の流動状況を流速ベクトルでもって示したものである。図—6 は、経過時間 $t^* = 36$ 分の河口付近に第 1 波の峰が達し、湾口付近がほぼ平均海面のちょうど初動押し



図—5 大槌湾における等深線図（単位 m）



図—6 湾内の流動状況（昭和 43 年十勝沖地震津波、経過時間 $t^* = 36$ 分）



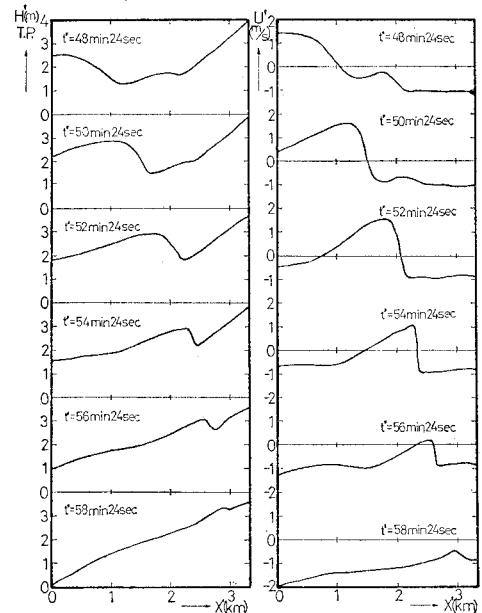
図—7 湾内の流動状況（昭和 8 年三陸沖地震津波、経過時間 $t^* = 30$ 分）

が湾に入った状態の流動状況である。大槌湾に侵入した津波は湾のみおすじに沿って進み、湾奥で 2 方向へ分岐し流動する。図—7 は $t^* = 30$ 分、初動が引きで始まる津波の谷が湾口付近にあり、津波の先端がほぼ河口に達したときの流動状況である。湾中央から沖に向う引き波による流動が特徴的である。

(3) 河川津波の空間波形

図—8 に昭和 8 年三陸沖地震津波の最高波付近の空間波形と流速の変化を示した。 $t^* = 48$ 分 24 秒は最高波が河口 $x^* = 0$ に到達した時刻である。最高波のまをを小さな波が遡上しているが、この小さな波はその前面から砕け、 $t^* = 52$ 分 24 秒では消えてしまう。この砕波は波峰から崩れるのではなく、先端で生じ、さらに先端付近から波の峰、谷の両方向へ砕けながら水面をはい上ってゆく、いわゆる砕け寄せ波的な砕波形態である。これは最高波の前面が遡上に伴い非線形効果により波高を増幅し前傾してゆく一方、先端付近では沖向きの河川流の影響を受けるためである。また、上流にゆくにつれて水底の摩擦効果や砕波によるエネルギー損失により波高は減衰し、上流 3 km 付近で波高はゼロ、流速は河川流速にほぼ等しくなる。最大の遡上高は T.P. 3.28 m であった。最大遡上距離は旧北上川では約 20 km であったのに対し¹⁾、大槌川では高々 2~3 km であり、河床勾配の違いによる影響が顕著に現われている。

流速の変化をみると、最高波の前の小さな波が砕波し消滅した後の最高波前面での流速の変化が極めて大きい。また、上流にゆくにつれて波峰の後面に大きな負の



図—8 空間波形〈左〉および流速の変化〈右〉（昭和 8 年三陸沖地震津波）

流れの領域が生じる。このような波形の変化や砕波形態などは、波の特性や水理条件によって程度の差はあるが、各対象津波に共通の性質であった。

(4) 河川津波のその他の性質

図-9 に河道内の最高水位を示した。最高水位は河口付近で上昇するが、その後減少することなくほぼ一定となる。計算結果は前に示した表-3の大槌での津波当時の痕跡高より若干低いようであるがほぼ再現している。また、現況の右岸堤防は津波の越流に対して十分な高さであるが、左岸堤防は若干低いようである。

図-10 は河道内の最大流速である。最大流速は最高水位とは逆に河口付近で急に減少した後ほぼ一定となり、上流付近でまた急に減少する。昭和8年三陸沖地震津

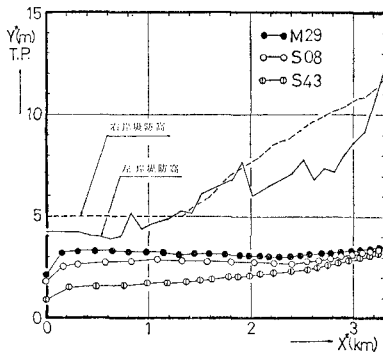


図-9 河道内における最高水位

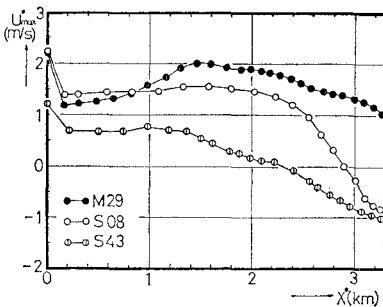


図-10 河道内における最大流速

波について最高波のフルード数を調べてみると、図-11 に示したように、最大で0.3~0.4であり、陸上遡上の津波先端でみられるような射流状態ではない。また、最高波の波圧を Cross⁹⁾ が提示している算定式で求め、図-12 に示した。昭和8年三陸沖地震津波の場合、動水圧は静水圧の高々20%程度であり、津波の全

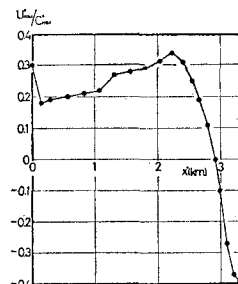


図-11 河道内におけるフルード数(昭和8年三陸沖地震津波)

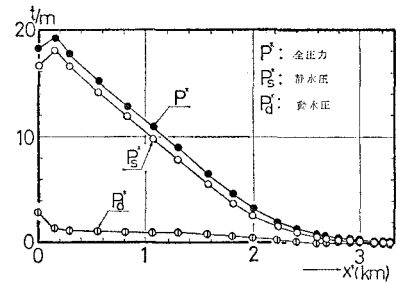


図-12 河道内における波圧(昭和8年三陸沖地震津波)

圧力は静水圧の1~1.2倍で予測できるという結果が得られた。

4. おわりに

大槌湾の湾奥に位置する中小河川の大槌川を対象にし、津波を外海から湾、湾から河川へと一連の現象として把握することを試みた。その結果、津波の湾内計算と河川遡上計算の接続を可能にし、津波の流動、変形、砕波形態などを明らかにし、最高水位や波圧など津波災害対策に必要な情報も示すことができた。

津波の性質について、さらに非定常スペクトルなどにより検討することと、津波先端の挙動と水底露出との関係を検討し、境界(汀線)条件に適用してゆくことが次の課題である。

最後に、本研究を進めるに際し岩手県土木部河川課より資料の提供などの御協力を得た。また、計算、整理などにあたり元東北大学工学部学生 越後信也君の熱心な助力を得た。また、計算には東北大学大型計算センター ACOS 6, 東北工業大学計算センター TOSBAC 3400 を利用した。ここに記して厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岩崎敏夫・阿部至雄・橋本 潔: 津波の河川遡上に関する数値計算の実験, 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 437~442, 1976.
- 2) 岩崎敏夫・阿部至雄・橋本 潔: 河川津波の特性に関する研究, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 74~77, 1977.
- 3) 岩崎敏夫・真野 明: 三陸沖の断層地震による大津波の追算, 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 443~447, 1976.
- 4) 土木学会編: 水理公式集, p. 616, 1971.
- 5) 梶浦欣二郎・羽鳥徳太郎・相田 勇・小山盛雄: 1968年十勝沖地震にともなう津波の調査, 東京大学地震研究所彙報, 46巻, pp. 1369~1396, 1968.
- 6) 国富信一: 三陸沖強震及び津波に就て, 驗震時報, pp. 111~153, 1933.
- 7) 伊木常誠: 三陸地方津波実況取調報告, 震災予防調査会報告, 第11号, pp. 5~34, 1897.
- 8) 松尾春雄: 三陸津波調査報告, 建設省土木研究所報告, Vol. 24, p. 30, 1933.
- 9) R. H. Cross: Tsunami surge forces, Jour. of the Waterways and Harbors Division, Proc. of A.S.C.E., pp. 201~231, 1967.