

津波の河川遡上に関する数値計算の実際

岩 崎 敏 夫*・阿 部 至 雄**・橋 本 潔***

1. はじめに

河川を遡る津波の数値計算は、かつて浜田らによって未知の従属変数を波速と流速に変えて行うことが提案されたのであるが¹⁾、発散を防ぐためにこれらの時間的変化を境界条件において、また場所的变化を初期条件において十分小さく設定するという特殊な考慮が払われている。水深が浅い場合には計算開始後ただちに波速が負の値になることは堀口も指摘しているし²⁾、著者もたびたび同様の経験で苦しんだ。この方法は従属変数が水深、流速より波速、流速に変わってはいるが分割区間は碇盤目なので通常の潮汐計算と原理的には変わらない。

他方河川を遡る潮汐であれば有限階差近似式の数値計算で十分安定な結果を得ることは、従来良く知られている。実際の河川津波の場合には潮汐が存在している場において津波が来るのであるから、このシステムで津波を計算することができれば好都合であるけれども、湾内計算の場合と異なって河川津波においては発散してしまう。

これに代る方法は陸上遡上に用いられる特性曲線法を利用した計算であろう。従来の研究例では Amein³⁾、LeMéhauté⁴⁾、岩崎・富堅⁵⁾らがあげられるが、河川を遡る津波の場合には特性曲線法を用いて潮汐をあらかじめ計算しておき、これに津波を入れねばならない。その他に考えねばならないのは河川流量も上流側より入れておく必要があることである。これらは従来試みられた例を聞かないし、実測との対比を行って計算に伴う問題点の有無や実用性を確かめておくことが、河川津波の特性を今後検討して行く場合に大切と考えられる。

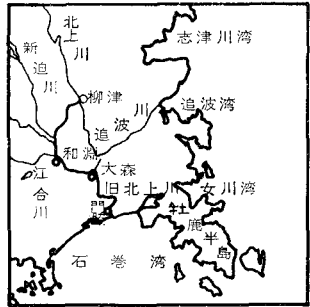
本論文は潮汐と河川流とがある不斉一断面で、かつ河床勾配や摩擦勾配をもつ河川における津波の計算を、特性曲線法を用いて行うことによって実際の津波の研究に役立たせる目的で行ったもので、以下に計算の実際とこれによって得られた河川津波に関する知見を報告する。

2. 対象河川区域と水理条件

図一1 は旧北上川下流の略図である。図のように旧北上川は柳津地先で新北上川とわかれ、途中右岸側に迫川、江合川を合せて

石巻市内を通過して石巻湾に注ぐ。河口は石巻港の防波堤によって終わっている。石巻湾は南面し、三陸沖とは牡鹿半島によって境されているために三陸大津波の波源域には直面していない。したがって、

昭和8年三陸大津波の際に石巻で、平常潮位よりの最大浸水高は1.0mであり、これより波源の遠い明治29年三陸大津波や昭和43年十勝沖地震津波に際しては1m未満であった。昭和35年チリ地震津波では波頭線が子午線にほぼ平行であったために、最大浸水時は1.7m (K.P. 3.073 m) を記録した(表一1)。このときの石巻市



図一1 旧北上川位置図

表一1 石巻における津波の記録⁶⁾

津 波 名	津波浸水高* (m)
明治29年三陸大津波	0.6
昭和8年三陸大津波	1.0
昭和35年チリ地震津波	1.7

* 襲来当時の海水面を基準とする

の浸水図を図一2 に示す。図中2重ハッチの区域が床上浸水区域、1重ハッチの区域が床下浸水区域であり、また数字は陸上浸水高である。

旧北上川には門脇(河口より上流約1.2km)、大森(同約13.3km)、和淵(同約22.1km)の3地点に量水標があり、チリ地震津波のほかに昭和27年11月の小さい津波が記録されている。そこで和淵および門脇を上流端および下流端の境界にとり、大森において計算結果と実際記録とを比較して検証するという方法を用いて、河川津波の計算を行うこととした。

* 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
 *** 学生会員 東北大学大学院 工学研究科

表—2 に解析対象津波と水理条件を示した。ここに * は有次元水理量である。平均海面 SWL* は門脇における津波侵入直前の潮汐 2 波の平均潮位面にとった。下流側水深 h^* は門脇における平均海面よりの深さ、上流側水深 h_r^* は平均河床勾配 S を 1/5 000 としたときの和淵における実測水位から与えた。また、河幅は昭和 47 年測量の横断面図から HWL と MLWL の平均値を最小自乗法と算術移動平均法によってそれぞれ近似し用いた。なお、門脇、大森および和淵における実測水位記録は図—6 に示した。

3. 計 算 方 法

河川を 1 次元水路とし、周知の特性曲線式として次式を用いる。

$$dx/dt = u \pm c \dots\dots\dots (1)$$

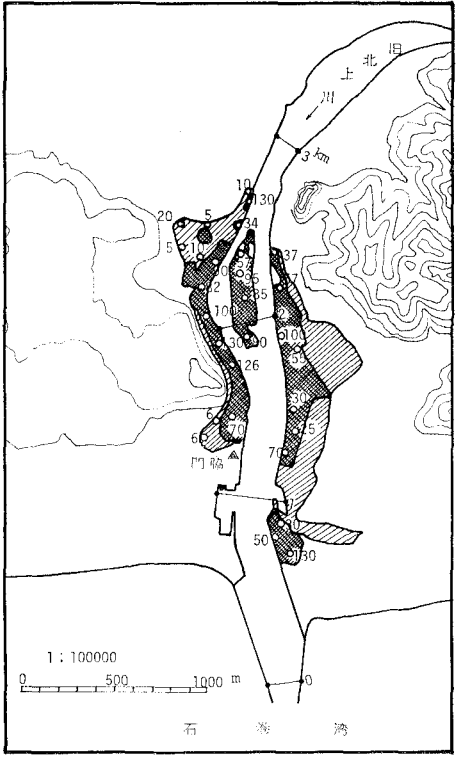
上で、

$$u = \pm 2c - G_{\pm} t = \text{const.} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

$$G_{\pm} = \frac{dh}{dx} - f \frac{u|u|}{c^2} \mp cu \frac{1}{B^*} \frac{dB^*}{dx} \mp \frac{q^*}{c_0^* c B^*} \dots\dots\dots (3)$$

ここに * は有次元水理量、 B^* は河道幅、 q^* は河道単位長あたりの横流出量、 f は摩擦係数で、 $f = n^{*2} g^* / (h^* + \zeta^*)^{1/3}$ 、 n^* は Manning の粗度係数、 g^* は重力の加速度、

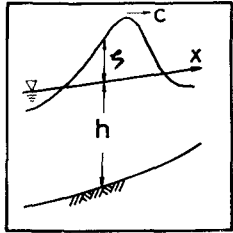


図—2 石巻市浸水地域図
(チリ地震津波：浸水高単位 cm)

表—2 解析対象津波および水理条件

	下流側 水深 h_0^* (m)	波 速 $c_0^* = \sqrt{g^* h_0^*}$ (m/sec)	時 間 $t_0^* = h_0^* / c_0^*$ (sec)	平均海面 SWL* (K.P.) (m)	粗度係数 n^* ($\text{m}^{-1/3}$ sec)	摩擦係数 f	河床勾配 S	区間距離 Δx	河川流量 Q^* (m^3/sec)	横流出量 q^* (m^2/sec)	上流側 水深 h_r^* (m)
昭和27年11月津波	6.11	7.74	0.790	1.11	0.035	6.50×10^{-3}	1/5 000	100	100	0	2.68
昭和35年チリ地震 津波	6.28	7.84	0.801	1.28	0.035	6.51×10^{-3}	1/5 000	100	100	0	2.51

h^* は潮汐あるいは津波を侵入せしめない河川の固有流量のみの背水曲線の深さ、 ζ^* はその曲線よりの津波の偏差である (図—3)。また無次元量は、 $x = x^* / l_0^*$ 、 $h = h^* / h_0^*$ 、 $\zeta = \zeta^* / h_0^*$ 、 $u = u^* / c_0^*$ 、 $t = t^* / t_0^*$ 、 $c = c^* / c_0^* = \sqrt{h + \zeta}$ ($c^* = \sqrt{g^* (h^* + \zeta^*)}$) で、ここに、 h_0^* 、 l_0^* 、 c_0^* ($= \sqrt{g^* h_0^*}$)、 t_0^* ($= h_0^* / c_0^*$) はそれぞれ水深、 x^* 方向、波速および時間の基準値でありかつここでは $l_0^* = h_0^*$ とした。



図—3 記号説明図

式 (1)~(3) は有限振幅波の基本式であり、段波を生じたり、砕けたりするようなところでは波頂曲率の効果を一応は検討せねばならないところであるが、境界条件として用いる記録は潮位記録であって 30 分読みであり、波形の

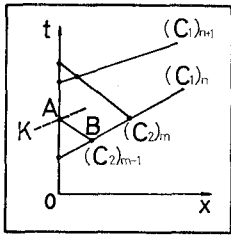
細かい変化はよみとれていないことと、また長波の変形に関する 首藤⁹⁾や富樫¹⁰⁾の実験においても知れるように、波頂曲率の効果でソリトン分裂のような現象が現われるのは先端付近であり、最高水位の現われる付近ではこの効果は小さくて無視できると考えられるために、津波による浸水の状況を把握する上からは波頂曲率項は無視できるものとする。

式 (1)~(3) の計算の大綱は、LeMéhauté の方法に準拠しており^{4), 10)}、また段波が発生したときもそれにのらった。

(1) 下流側境界条件

$x=0$ を一番下流側の断面とし、計算は x の正の領域について行う。さきに述べたようにここでは潮位計の記録をあたえる。したがって

$$c = \sqrt{h + \zeta} \dots\dots\dots (4)$$



図—4 下流側境界条件

図—4 のように $x=0$ では上流へ遡る波素 C_1 と下流へ下る波素 C_2 の交点として水位と流速が決定されるはずである。いま、点Aと点Bとでは負の特性線にそって

$$u_A - 2c_A = u_B - 2c_B + (G-)_{A,B}(t_A - t_B) \equiv F_1 \quad (5)$$

また、点Aと沖側の点Kとでは正の特性線にそって

$$u_A + 2c_A = u_K + 2c_K - (G+)_{A,K}(t_K - t_A) \equiv F_2 \quad (6)$$

F_1 と F_2 が既知なら

$$u_A = (F_1 + F_2)/2, \quad c_A = (F_2 - F_1)/4 \quad (7)$$

したがって、点Bにおいて F_1 が既知であり、かつ式(4)より求めた c が式(7)の c_A であるとすれば、式(7)から、 $F_2 = 4c_A + F_1$ であるので

$$u_A = F_1 + 2c_A \quad (8)$$

として流速を得ることができる。たとえば、 $(G-)_{A,B} \equiv 0$ のとき波素 C_2 がなければ、 $F_1 \equiv -2\sqrt{h}$ とおけるから式(8)より、

$$u_A = 2(c_A - \sqrt{h}) \quad (9)$$

河川流がある場合には河川流による流速を $-u_R$ とすると、 $F_1 \equiv -u_R - 2\sqrt{h}$ とおくことにより、式(8)から

$$u_A = -u_R + 2(c_A - \sqrt{h}) \quad (10)$$

したがって流れを式(9)に線型的に重ね合わせればよい。実際上、下流側境界に入射する波素は流下する波素の影響を受けていないとした。また、下流側境界上での時間ステップ間隔 ΔT は、 $\Delta T = (\beta/c_{\max})\Delta x$ とした。ここに $\beta=2$ 、 $c_{\max} = \sqrt{1 + \zeta_{\max}^*/h_0^*}$ である。

(2) 上流側境界条件

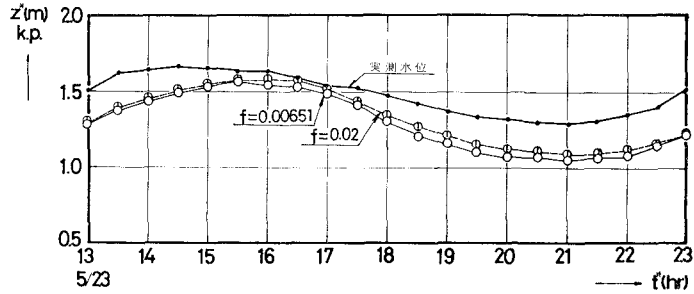
上流側断面を r とすれば、上と同様にして今度は F_2 が既知だから、 $c_r = \sqrt{h_r + \zeta_r}$ としておいて、 $F_1 = F_2 - 4c_r$ 、したがって、

$$u_r = (2F_2 - 4c_r)/2 = F_2 - 2c_r \quad (11)$$

下流端と同様に、上流端を通して流下する波素はないから河川流速 $-u_R$ を考慮すると、 $F_2 = -u_R + 2\sqrt{h}$ であり、したがって、

$$u_r = -u_R - 2(c_r - \sqrt{h}) \quad (12)$$

これは上流端の水位記録を利用する場合である。もし、流量が与えてある場合には、上流端で

図—5 摩擦項の影響 ($Q^*=0$, $dB^*/dx \neq 0$)

$$u_r c_r^2 = Q^*/c_0^* B^* h_0^* \quad (13)$$

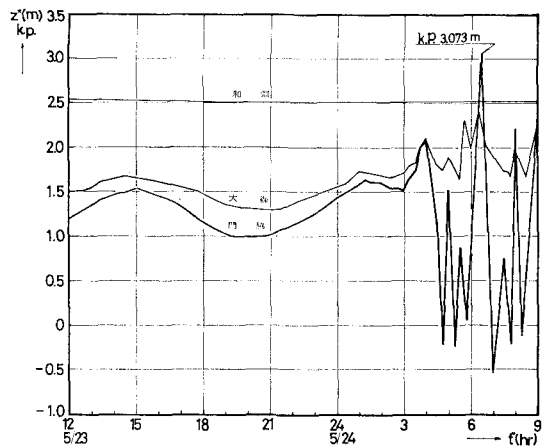
であるから、これと正の特性式

$$u_r + 2c_r = u_p + 2c_p + (G+)_{r,p}(t_r - t_p) \quad (14)$$

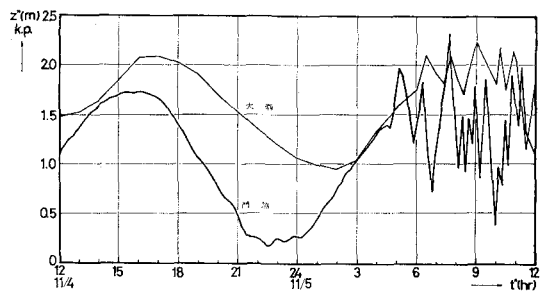
とを連立にとけばよい。また、砕波や段波が上流端に達した場合の方法もおのずから明らかである。

4. 計算結果

図—5 にチリ地震津波侵入直前の潮汐波を用い、水量を種々変えて検討した結果の一例を示した。 $f=0.00651$ は $n^*=0.035$ に対する門脇での値で、 $f=0.02$ は津波先端での LeMéhauté⁴⁾ や岩崎・富樫⁵⁾ らの水量量から与えた。図によれば、摩擦項の影響は小さい。



(a) チリ地震津波



(b) 昭和27年11月津波

図—6 門脇、大森および和湊における実測水位

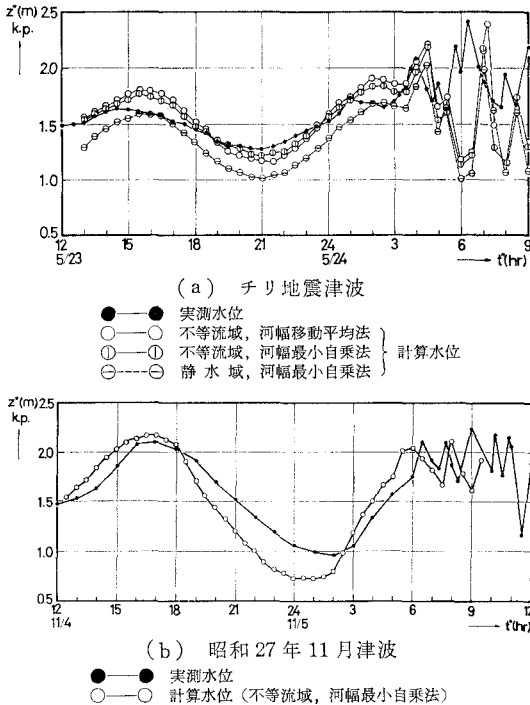


図-7 大森における計算水位と実測水位との比較

次に、図-6 に昭和27年11月津波およびチリ地震津波時の門脇、大森および和瀨における実測水位記録を示した。これらの記録を用いて解析した結果が図-7 である。ここに、 z^* は北上川の基準面 (K.P.) からの水位である。チリ地震津波の結果によれば、潮汐が生じている場に津波を侵入せしむ計算においては、河川流の有無による差異は主に潮汐において生じるが、河道幅の与え

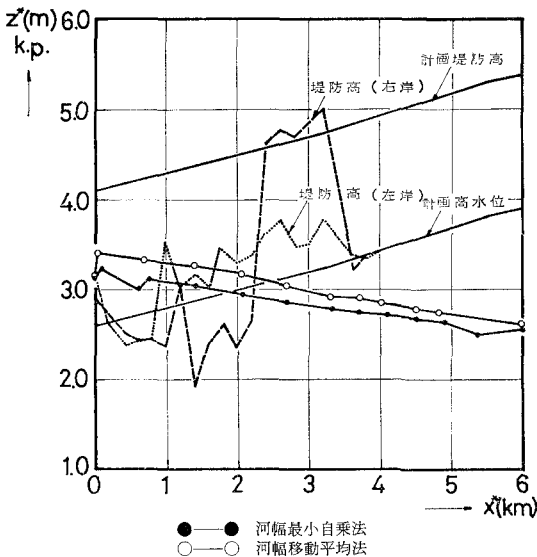


図-8 河道内最高水位 (チリ地震津波)

方による差異は少ない。次に、大森は門脇より20~30分の位相遅れがあるはずであるが、図-6(a)の実測水位においてそれが現われていない。これは最小誤取り時間間隔が高々30分であったためである。図-7(a)の計算結果では位相の再現において必ずしも十分ではないが、この点を考慮すれば一応首肯しうる。また、計算水位では第3波の再現をみていないが、門脇の入力波形との対応関係が記録上でついていないので、計算の誤差ではないと考える。なお、計算上では碎波が大森上流3.3km地点の平均海面付近で生じた。

図-7(b)に示した昭和27年11月津波の結果では、位相に関してはずれがあるが、水位の再現は良い。なおこの津波計算では碎波は生じていない。

次に、河道内各断面における最高水位をプロット示したのが図-8である。図によれば、旧北上川右岸では門脇から約2.2km(河口から約3.4km)、また左岸では約1.2km(同約2.4km)にわたって津波が越流したことになる。先に図-2に示した亀井によるチリ地震津波

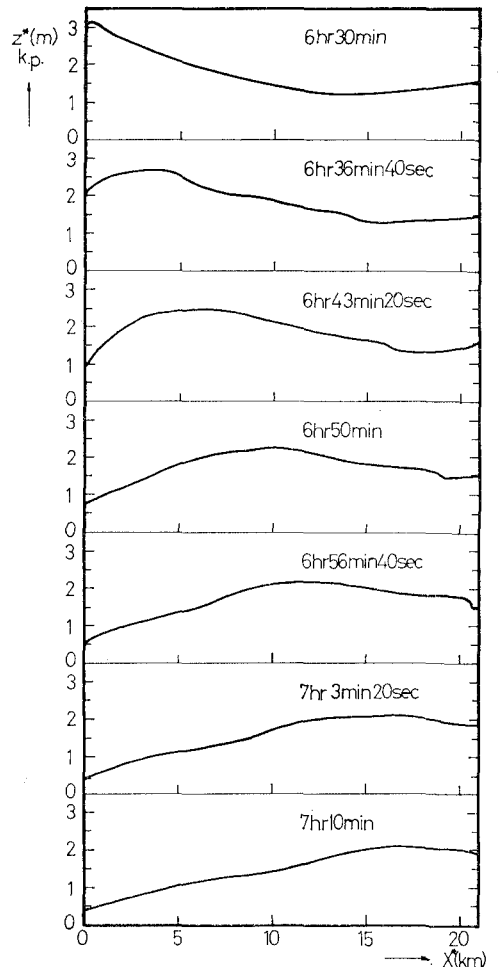
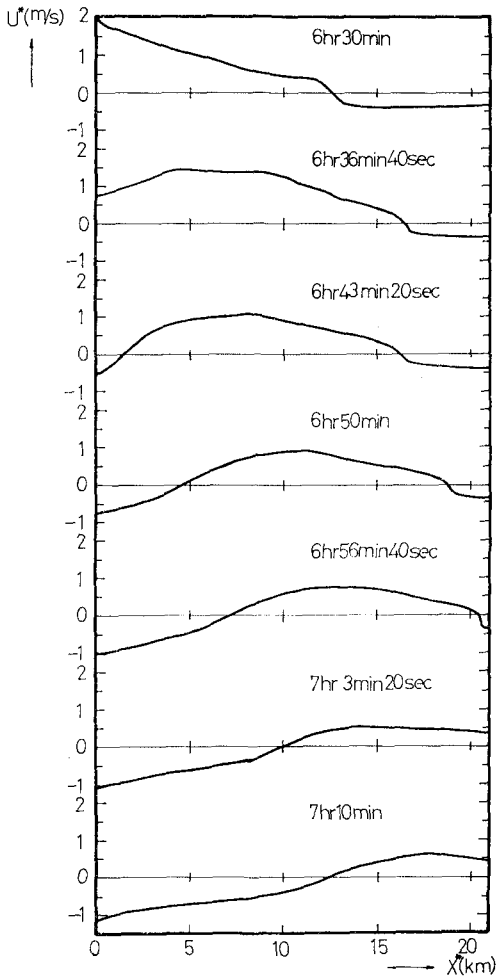


図-9 最高波付近の空間波形 (チリ地震津波)



図—10 最高波付近の流速の変化（チリ地震津波）

当時の浸水図によれば、右岸において河口から約 2.7 km, 左岸で約 2.4 km にわたって浸水しており、計算結果をよく実証している。

5. 河川を遡る津波の 2, 3 の性質

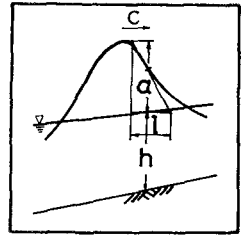
(1) 最高波付近の波形および流速の変化

図—9 は、入力波の最高波付近（チリ地震津波のピー

ク値、門脇で K.P. 3.073 m, 5 月 24 日 6 時 30 分頃）の波形が遡上とともにどのように変形してゆくかを示したものである。また、図—10 に同じく最高波付近の流速の変化を示した。これらの図から、各時刻における波高と流速の最大の生ずる地点は必ずしも一致しないが、波高、流速とも遡上 10 数分後の間に急に小さくなっており、河川に侵入した津波はたちまちに減衰することがわかる。

(2) 波の変形パラメーター

波の変形に関与する要素のうち、非線形性パラメーター（振幅分散: a/h ）、長波のパラメーター（周波数分散: $(h/l)^2$ ）、アーセルパラメーター（ $U=(a/h)/(h/l)^2$ ）、水深変化 h_x ($\equiv \partial h / \partial x$) の寄与のパラメーター（ $h_x l / h$ ）、および幅幅変化 B_x ($\equiv \partial B / \partial x$) の寄与のパラメーター（ $B_x l / h$ ）について、上述の空間波形をもとにして調べた。ここに、記号の定義は図—11 に示した。また、 l は Ham-mack⁽¹⁾ の定義した $l=a/(\partial \zeta / \partial x)_{\max}$ によった。



図—11 記号の定義

表—3 は、チリ地震津波に

対する結果を示したものである。この表から $a/h \approx 10^{-1}$, $(h/l)^2 \approx 10^{-6} \sim 10^{-7}$, $U \approx 10^5$, $h_x l / h \approx 10^{-1}$, $B_x l / B \approx 10^{-1}$ である。一方、著者らの一人が馬淵川に侵入する津波の計算を十勝沖地震津波を対象として、河口上流 2.6 km までの間での波の変形について調べたことがあるが、その結果は $a/h \approx 10^{-1} \sim 10^0$, $(h/l)^2 \approx 10^{-5} \sim 10^{-6}$, $U \approx 10^5 \sim 10^6$ であったので、大略のオーダーはこの付近と考えてよい。また、遡上に伴う各パラメーターの変化は漸変する程度である。したがって、旧北上川における今回の結果によれば、河川を遡る津波の変形には地形変化と振幅分散の効果が寄与するが、周波数分散の効果はほとんど関与していないといえるし、さらに振幅分散の影響も高々 $a/h \approx 10^{-1}$ 程度であるのでそれほど顕著ではないといえる。

表—3 波の変形を表わすパラメーター（チリ地震津波）

Step	t	x	h	B	l	a	a'	$a/h \times 10^{-1}$	$(h/l)^2 \times 10^{-6}$	$U \times 10^5$	$(h_x/h)l \times 10^{-1}$	$(B_x/B)l \times 10^{-1}$
	h min sec	km	m	m	km	m	m					
1	6 30 00	1.10	6.08	218.0	4.15	1.90	1.90	3.13	2.16	1.45	1.23	1.90
2	6 36 40	6.25	5.16	269.0	5.75	1.26	1.75	2.44	0.81	3.03	2.01	2.14
3	6 43 20	8.90	4.68	296.0	6.55	0.98	1.71	2.09	0.51	4.09	2.52	2.21
4	6 50 00	12.30	4.06	330.0	6.20	0.72	1.68	1.77	0.43	4.13	2.75	1.88
5	6 56 40	16.00	3.40	367.0	6.20	0.57	1.67	1.68	0.30	5.60	3.29	1.69
6	7 03 20	19.40	2.78	401.0	4.40	0.45	1.68	1.62	0.40	4.06	2.86	1.10
7	7 10 00	20.30	2.62	410.0	5.60	0.43	1.69	1.64	0.22	7.49	3.86	1.36

a' : Green の法則よりの推算波高

6. おわりに

津波が河川を遡る際の計算を水深と河幅が変化する1次元問題とし、波形勾配のきつくない実在津波について解析を進めた結果、河道内貯留効果とか流水断面積の水深による変化の影響など研究すべき余地は残されたが、津波の河道内挙動と安定解をうることに關して一応の成果を示すことができた。最後に、本研究を進めるに際し建設省東北地建北上川下流工事事務所より多大の御支援、御指導をいただいた。また本計算には東北工業大学TOSBAC 3400を用いた。ここに記して厚く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 浜田徳一ほか：水路に侵入する津波の計算—高知港の場合—，第8回海岸工学講演会講演集，pp. 30-35, 1961.
- 2) 堀口孝男ほか：湾および河川網に侵入する津波の計算，第12回海岸工学講演会講演集，pp. 14-18, 1965.
- 3) Amein, M.: Long waves on a sloping beach and wave forces on a pier deck, US-Japan Seminars on Tsunami Run-up, Vol. I, 1965.
- 4) Le Méhauté, B. et al.: On the wave run-up of solitary waves, *ibid* 3), 1965.
- 5) 岩崎敏夫・富樫宏由：遡上津波先端の境界条件と計算法，第16回海岸工学講演会講演集，pp. 359-364, 1969.
- 6) 佐々木 忍：チリ地震津波について，第7回海岸工学講演会講演集，pp. 275-288, 1960.
- 7) 亀井 勇：市街地の湛水分布と建物の被害，チリ地震津波報告書，宮城県，pp. 15-23, 1961.
- 8) 首藤伸夫：長波について—水平床上での長波の変形—，土木研究所報告，第123号，pp. 1-7, 1964.
- 9) 岩崎敏夫・富樫宏由・佐藤栄司：津波の汀線における水理特性と陸上遡上，第17回海岸工学講演会論文集，pp. 427-433, 1970.
- 10) Le Méhauté, B.: On surge on a dry bed and wave run-up, *ibid* 3), 1965.
- 11) Hammack, J. L.: A note on tsunami; their generation and propagation in an ocean of uniform depth, *Jour. Fluid Mech.*, Vol. 60, Part 4, pp. 769-799, 1973.