

日本海中部地震における津波の流体力について

岩崎敏夫^{****}・真野 明^{***}・永富政司^{**}・苫米地鏡^{*}

1. はじめに

1983年5月26日におこった日本海中部地震での津波の特徴は、男鹿半島からのビデオに見られたような周期十数秒という短く切りたった波（孤立波）が重なった形態で沿岸部に進入してきたことである。また、津波による被害では能代港で4,000トンのケーソンが移動、転倒し、また峰浜村で、4トンの消波ブロックが流されて、70~135mの範囲に散乱した。これらの津波時の観測は今までにまったく指摘されなかった事実であり、その現象が示す津波の動特性を明らかにすることは防災対策上極めて重要である。本研究は、その第一歩として東北大学に既設の孤立性分散波実験水路により現象の再現を行ない、物理特性を求めようとしたものである。

2. 実験装置と実験方法

図-1に示すように全長100m、幅1m、高さ0.5mのモルタル製の屋外2次元水路に峰浜村を参考として海底及び浜勾配を設定した。駆動部つき造波板をある設定した速度で一定距離移動させ孤立性段波を発生させた。実験は、造波板の速度を5段階に、移動距離を何種類かに変えておこなった。波高の測定には主に抵抗線式波高計を、汀線付近から陸上部にかけては容量式波高計を使用した。ま

た測定は水路端から12mの低水路部と45°の斜面を上がった高水路部（ $X=23\text{m}$ ）と1/75の斜面のり先部（ $X=34\text{m}$ ）から汀線（ $X=49\text{m}$ ）にかけて1m間隔でおこなった。流速測定には、径10mmのプロペラ式流速計を使用した。

図-1に記号の説明を、表-1に実験諸元を示す。 H_0 、 L_0 はそれぞれ低水路部での静水位上の最大高さ、および同地点での波長である。造波条件を設定して造波した後、再び水面が静止してから1ケースあたり同じ実験条件で8回実験を繰り返した。この場合1回ごとの波の再現性は、のり先部での波形、及び砕波点の一致を確認しているが非常に良好であった。なお表-1中の砕波波高 H_b は分散第1波目のものだけを載せた。初期波形によっては分散第2波、第3波でも砕波する場合があるがここでは省略した。

3. 斜面上での伝播

水平床上を伝播する段波は波頂曲率と非線形性の効果により分裂し、最終的にいくつかの安定した孤立波の連なりになることがわかっている^{1),2)}。

図-2に時間波形の各点での変化を示す。孤立性段波は45°の斜面を通り過ぎた後、13.5mの長さの水平部を伝播し、その間に各分散波の波高が増幅してゆく。本実験では、ほとんどの初期波形について岩崎・鈴木らが示したソリトン分裂が完了する水平スケールであるえり分け距離³⁾よりも水平床部の長さが短かく、分散第3波目までしか波峰ははっきり表われない。

**** 東北大学教授，工学部

*** 東北大学講師，工学部

** 東北大学大学院学生

* 東北大学学生

$H = 2.6 \sim 7.5 \text{ cm}$
 $L = 8.5 \sim 38.5 \text{ m}$
 $T = 3.1 \sim 14.4 \text{ sec}$

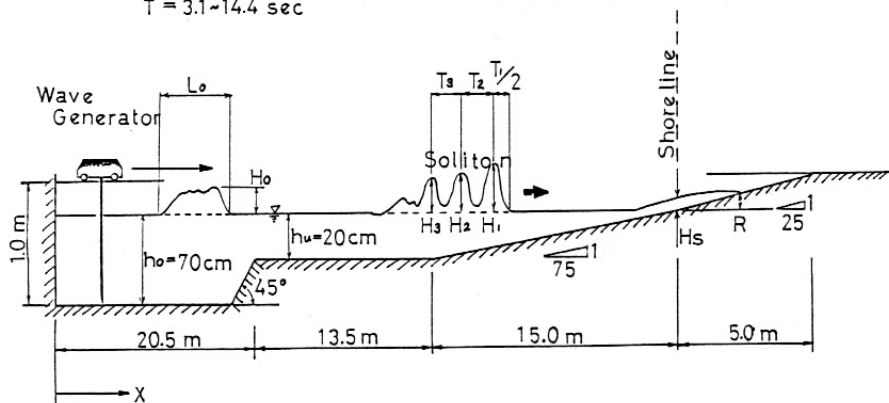


図 - 1. 実験装置

表 - 1. 実験諸元

CASE	H_0 cm	L_0 m	T_0 sec	H_1 cm	T_1 sec	H_2 cm	T_2 sec	H_3 cm	T_3 sec	H_b cm	h_b cm	H_s cm	R cm
A - 1	2.9	38.5	14.4	4.1	1.3	2.5	1.5	2.9	1.0	7.2	7.3	4.1	8.5
B - 1	3.5	9.8	3.7	6.3	1.0	3.2	1.0	-	-	9.5	8.8	3.3	4.8
B - 2	3.8	12.7	4.7	6.6	1.0	3.6	1.0	3.7	1.0	9.8	8.8	4.6	9.1
B - 3	3.8	17.9	6.6	6.5	1.0	3.6	1.0	4.2	1.2	10.0	9.6	5.3	9.7
B - 4	4.0	30.5	11.3	6.2	1.0	3.6	1.2	3.9	1.2	10.7	8.8	5.1	10.0
C - 1	4.4	8.6	3.2	7.9	0.9	3.9	1.1	-	-	11.9	10.7	4.0	7.3
C - 2	4.8	11.8	4.4	8.5	0.9	4.8	1.1	4.0	0.9	12.2	11.5	6.1	8.9
C - 3	4.8	15.2	5.6	8.7	0.9	5.0	1.2	5.4	0.9	11.7	12.0	5.0	10.8
C - 4	4.7	25.5	9.4	9.0	0.9	5.0	1.0	5.2	0.9	12.5	11.7	8.6	10.9
D - 1	5.6	8.8	3.2	10.9	0.8	5.5	1.1	-	-	11.2	13.5	4.7	8.2
D - 2	6.0	9.7	3.6	11.1	0.7	6.1	1.0	3.6	1.0	13.0	13.6	6.0	9.5
D - 3	6.1	13.6	5.0	11.2	0.7	6.6	1.0	6.4	0.9	12.3	13.5	6.5	12.8
D - 4	5.9	21.9	8.0	11.3	0.7	6.7	0.9	6.8	0.9	12.6	13.6	9.3	13.2
E - 1	6.8	8.5	3.0	13.5	1.0	7.7	1.0	3.4	1.1	15.8	13.9	3.2	8.8

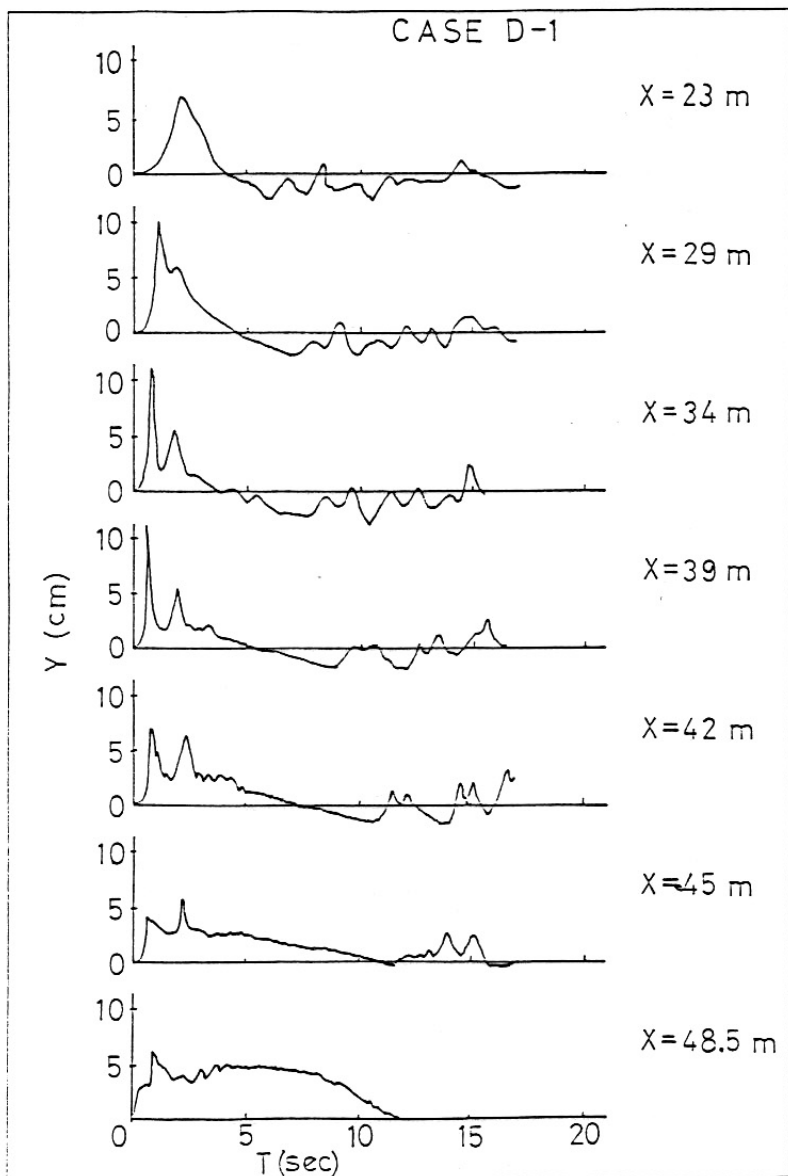


図-2-1. 各点での時間波形

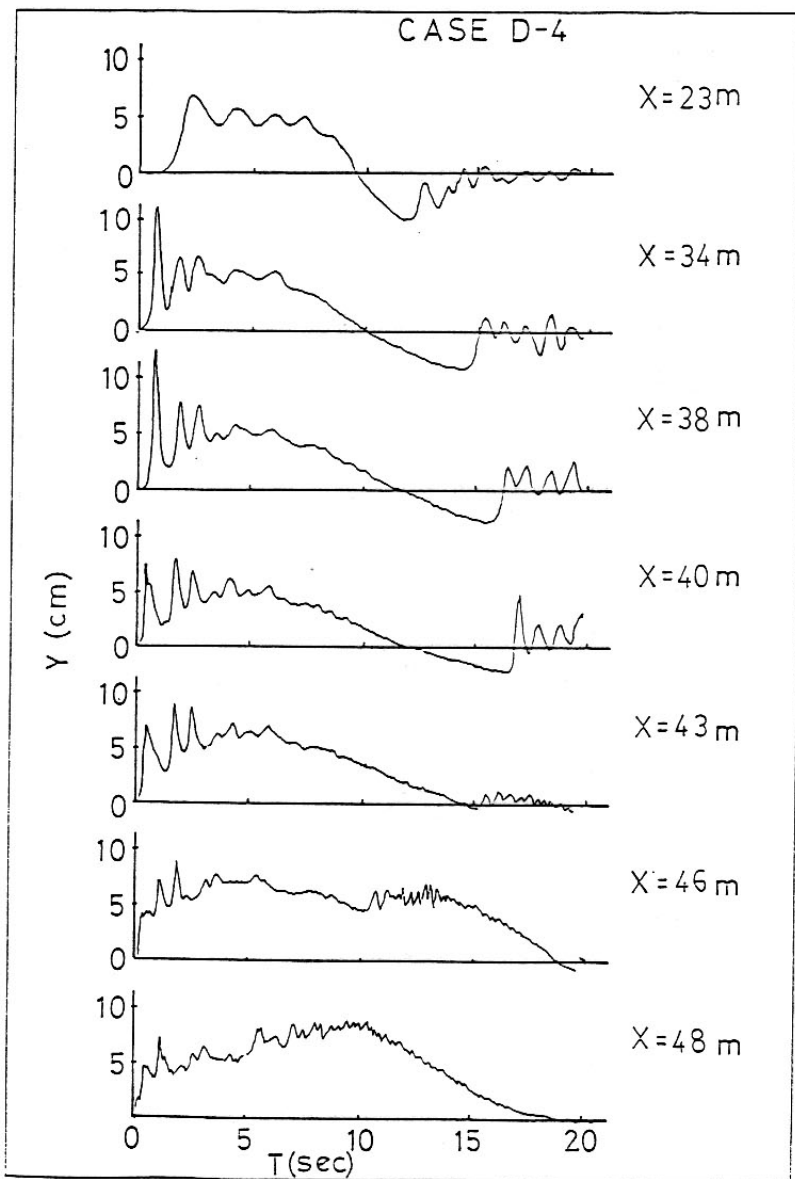


図-2-2. 各点での時間波形

図-3に斜面のり先での波形と孤立波の理論波形を比較した。すなわち前面側は良く一致している。

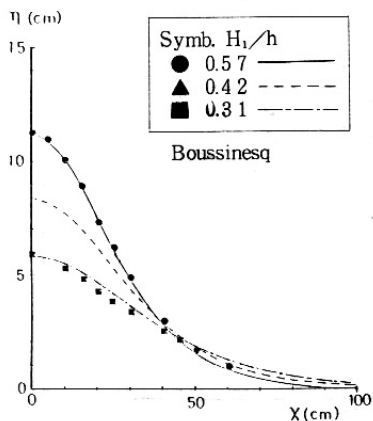


図-3 斜面のり先での波形と孤立波々形の比較

図-4には分散第1波の砕波するまでの波高変化を、示している。孤立波の波形に近いため、砕波波高水深比 H_b/h_b は Street and Camfield の実験式で $S = 1/75$ とし

たときの1.08にはほぼ等しい。砕波形式はいずれも Spilling 型であるが、波頂部に弱い巻き込みが見られる。

流速については CASE D-4 だけについて砕波直前の水深 14.7 cm より汀線に至るまで間隔 1 m ごとに、また深さ方向に 3~9 点で計測を行った。分散第3波までの波峰直下での水平水粒子速度の鉛直分布を図-5, 6, 7に示す。静水位より上の波頂付近はプロペラ式流速計の応答が悪く、測定が困難であるため測点数が少なくなっている。分散第1波目については、砕波による流れへの移行が静水面より上が顕著であり、静水面以下にはそれほど影響がないようである。そして、砕波による急激なエネルギー逸散のため汀線前において流速が小さくなっている。一方、分散第2波については、第1波の砕波による乱れが残っているためと思われるが波高増加は第1波ほど急激ではなく、また見掛け上、砕波後の第1波の残した体積分だけ第2波砕波前の水深が大きくなっていて、そのために波高水深比の同じ点が第1波より岸に近づいてくる。第1波の挙動と異なる点は、速度分布も水底から波頂付近までそれほど変化がなく、

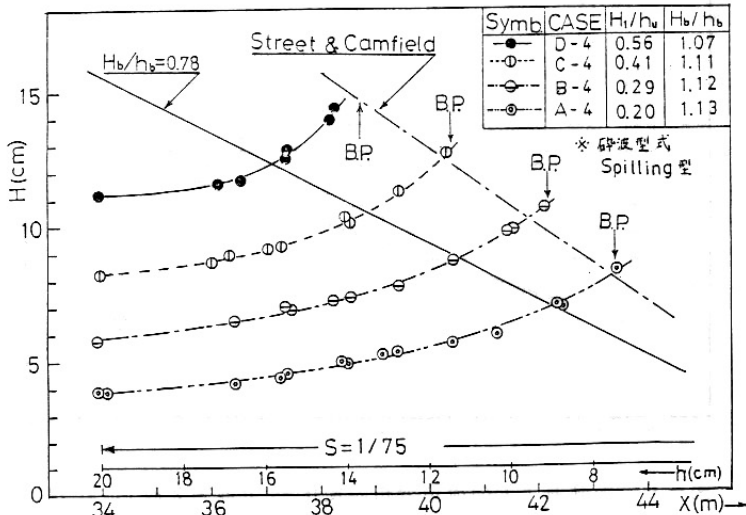


図-4 分散第1波の波高変化

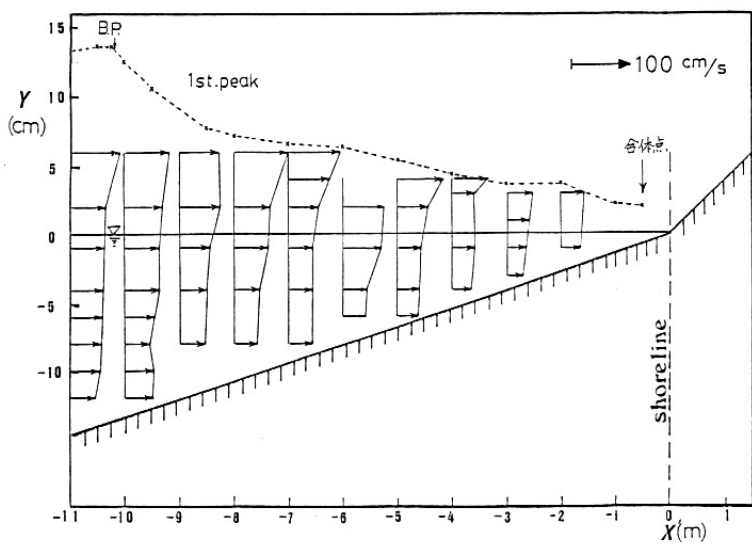


図-5. 波峰直下での流速分布の変化 —分散第1波—

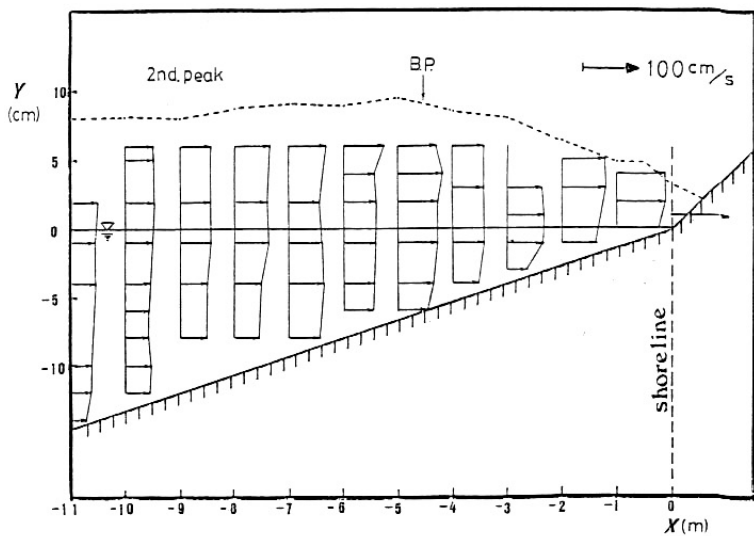


図-6. 波峰直下での流速分布の変化 —分散第2波—

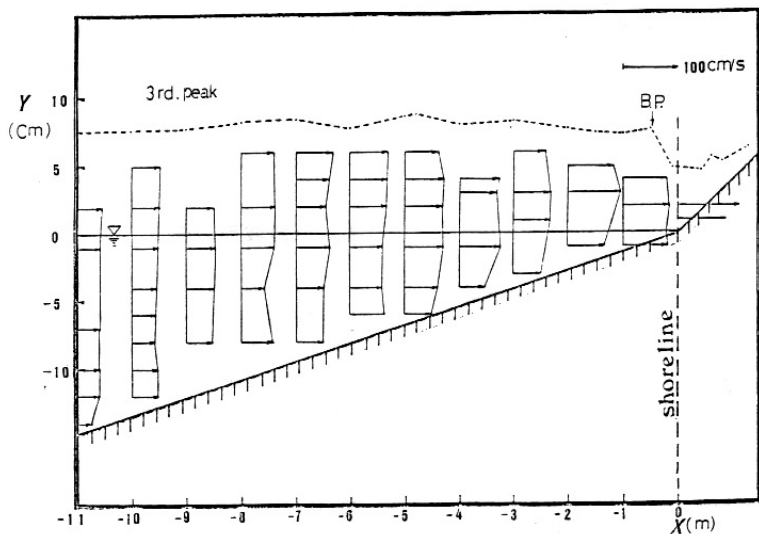


図-7. 波峰直下での流速分布の変化 — 分散第3波 —

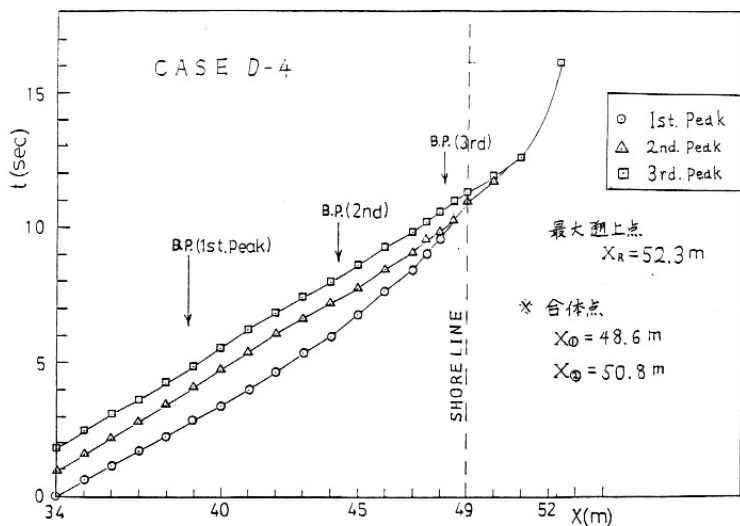


図-8. 分散波峰の軌跡

第1波に較べて碎波後の波高減衰は著るしくなく、したがってエネルギー逸散が少ない。その結果、汀線では流速が著しく大きい。第3波についても同様な傾向であって、碎波点はさらに岸に近づきほとんど汀線附近にくる。このことは防災上極めて重要な事実である。

図-8にのり先部から汀線に至るまでの波峰の軌跡を時空平面に表わした。第1波目では碎波して最初は波速はまだ落ちないが、連行気泡が放出され乱れが消散すると、波速は急激に減少する。これに対して、第2波、第3波ではのり先での波速を保ったまま汀線まで進行し、第1波に追いつく。(以下、この追いつく位置を合体点と呼ぶ)

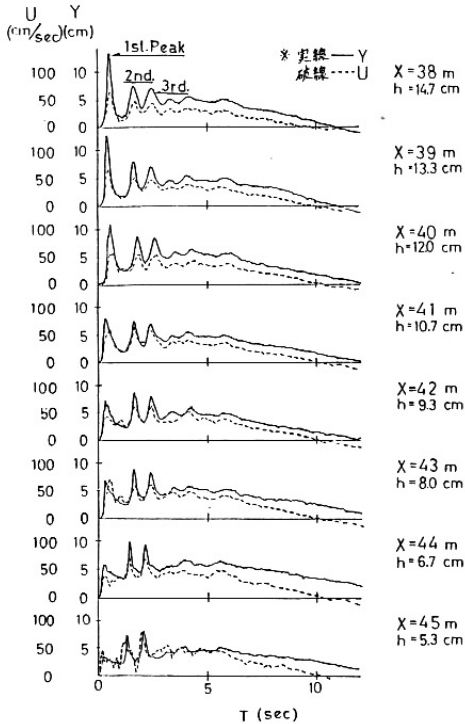


図-9. 汀線までの波形と流速の経時変化

図-9に斜面のり先より汀線前までの波形と流速の経時変化を示す。便宜上先端の通過した時間を $T=0$ にあわせてある。第2波が第1波に追いついた合体点 ($X=48.5$ m)の直後の位置 ($X=48.8$ m)で流速が急激に増加するのがわかる。

4. 分散波列の遇上

図-10は図-9の続きで、汀線前後より遇上までの経時変化を示す。分散波相互での干渉によって先端部で流速が急増し、瞬間的に波形勾配も大きくなる。また、第3波は先行する流れを波形を維持したまま追いつき、

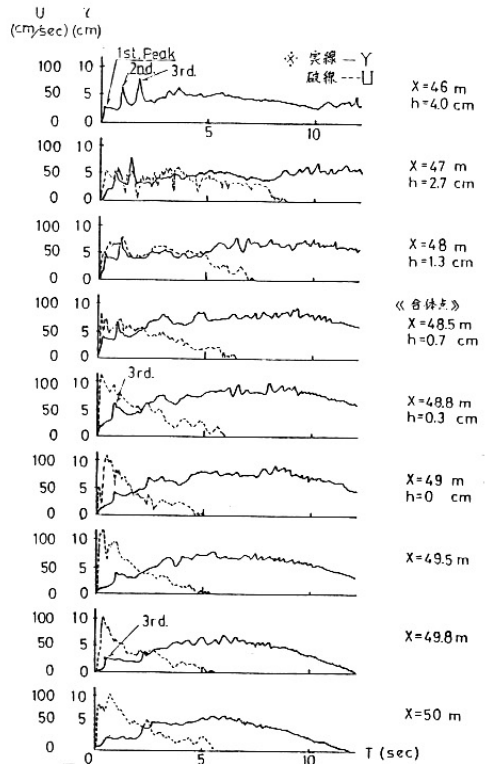


図-10. 碎波点 ($x=38.8$ m)直前より遇上までの波形と流速の経時変化

結局第2波の先端に追いつく。最大遡上点はおおむね分散第3波目に生じている。このような形態での遡上高さを表現するためには、少なくとも第3波目までを含めた沖波のパラメータを選ぶ必要がある。ここでは一つの試みとして図-11にKaplanと同様なやり方で実験データをプロットした。 H_0/L_0 に適用限界があるが、実験値はKaplanの実験曲線のように右下がりの直線上に群がっており、勾配もKaplanのそれに近い。また、図-12に第3波目以降を含めた汀線での最大波高 $H_{s,max}$ と遡上高さ R の関係を示すとほぼ $R = 2 H_{s,max}$ となり、上記のようなパラメータによるまとめ方の妥当性を裏づけているように思われる。

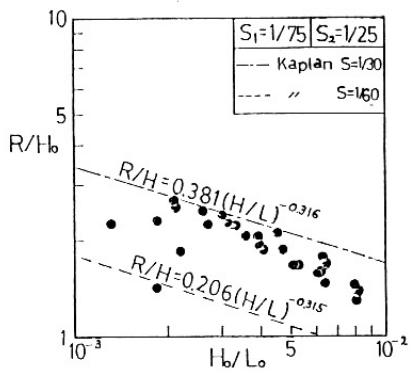


図-11. 無次元遡上高さ R/H_0 と沖波孤立性段波特性値 H_0/L_0

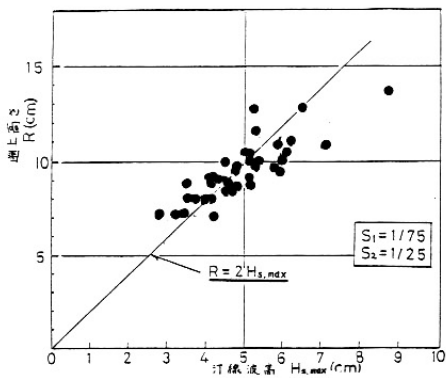


図-12. 遡上高さ R と汀線最大波高 $H_{s,max}$

5. テトラポッドの分散波群による移動状況

1/100の模型縮尺を想定して重さ16gと32gのテトラ(現地換算16ton, 32ton)を使用して汀線付近での移動状況を調べた。

表-2.

重さ (g)	容積 (cm ³)	高さ (cm)	投影面積 (cm ²)
16	6.3	2.8	4.8
32	12.5	3.6	7.5

表-2に実験に使用したテトラの諸元を示す。最初はテトラを組まずに実験条件をケースD-4に統一して、設置位置を変えその移動範囲と分散第3波目までのそれぞれの波峰直下の波高と流速の変化の関係を図-13に示した。図中にテトラの飛散範囲を矢印で示す。

移動の状況は第1波の通過する流速では、やや滑動する程度で、顕著な移動は第2波が通過する時に起こる。さらに第3波が通過する際には水位もテトラの高さより大きくなっており、完全に浮遊した状態で流されていくのが観察された。これは分散第3波目までが発達している場合の状況であり、ソリトン分裂の成長の度合いによって大きく移動状況が変化する。図-14に汀線における最大速度水頭と最大波高との積とテトラ一つの移動距離を示した。

次にテトラを組み合わせた護岸堤(下層4列, 上層乱積み)の2層積み, 総数300個)を汀線に設置し、造波条件を変えて行った実験結果を図-15~図-18にまとめた。被害率 Y の定義は(移動個数÷総数)である。

$$Y = 2.04 D - 1.44 \dots\dots (1)$$

$$Y = 2.63 \sigma + 1.06 \dots\dots (2)$$

ここに D 平均移動距離, cm,

σ 標準偏差, cm,

なお護岸堤の上層と下層によるテトラの被害率, 平均移動距離の違いはあまりなかった。

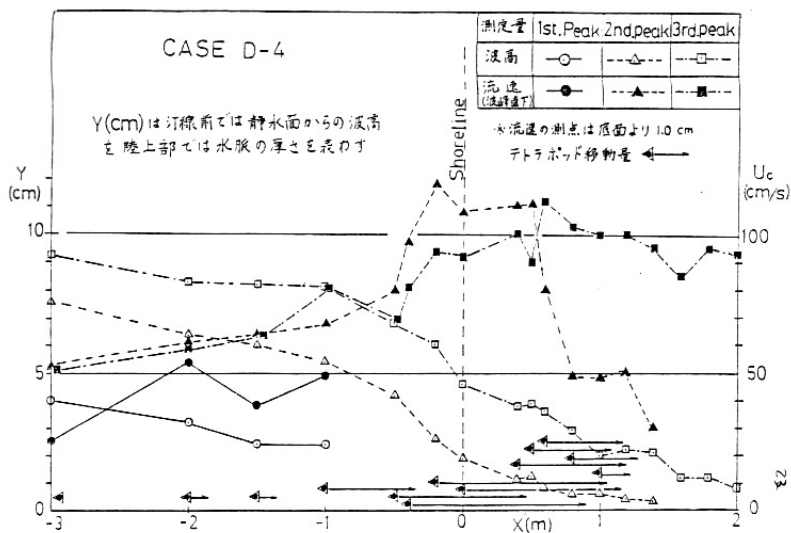


図-13. 分散第3波目までの波峰直下の波高と流速の変化およびテトラの飛散範囲

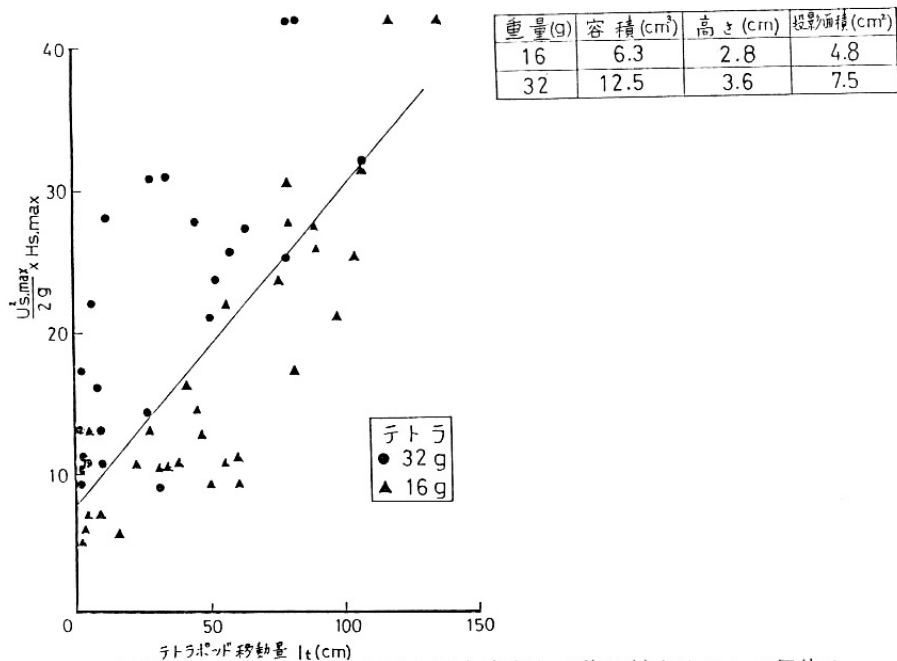


図-14. 汀線における最大速度水頭と最大波高との積に対するテトラ個体の移動距離の関係

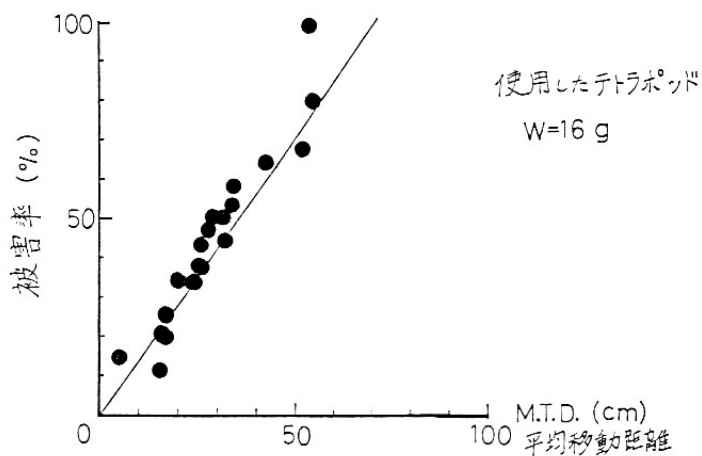


図-15. 被害率Yと平均移動距離Dとの関係

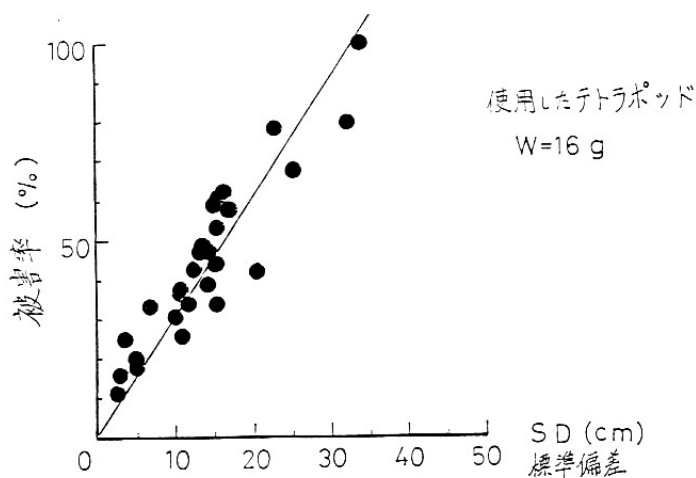


図-16. 被害率Yと飛散距離の標準偏差 σ

また図-17~18から $U_{s,max}$ (汀線最大流速) と $H_{s,max}$ との積や $(U_{s,max})^2/2g$ と $H_{s,max}$ との積ともかなり相関があることがわかる。しかし、設置位置が合体点の前か後かで散乱する状況が異なっており、合体点での水理特性を明らかにする必要がある。

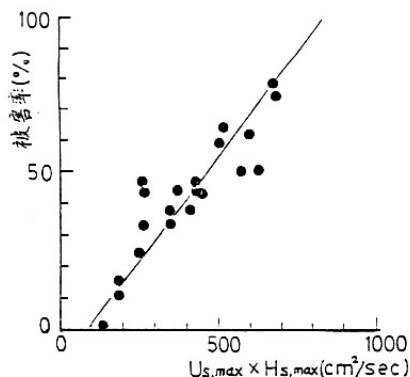


図-17. 被害率 Y と積 $(U_{s,max}) \times (H_{s,max})$ との関係

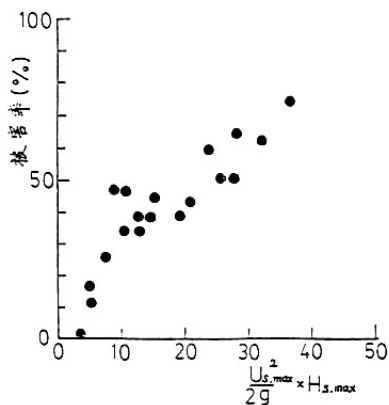


図-18. 被害率 Y と積 $(U_{s,max})^2/2g * H_{s,max}$

6. ケーソンの移動

実験条件をケース D-4 とし、寸法 $11 \times 20 \times 11$ cm のコンクリートブロック (比重 2.3 付近) を水路幅 1 m に 5 個並べ、また天端高さを一定 ($hc = 5$ cm) に保つように砕石でマウンドを作り、分散波列によるブロックの移動状況を観察した。第 1 波の砕波直後の波高が天端高の 2 倍以上ある場合、第 1 波目で滑動あるいは転倒する。ブロックを岸側に設置するにつれ、第 1 波のみによる滑動量は減少し、第 2 波、第 3 波によって大きく移動する傾向がある。図-19 に実線でブロック前面、一点鎖線で堤体がない場合、破線で堤体の背面での水位変動を示している。この実験ではブロックの滑動は静圧差によるところが大きいようだが、さらに天端高さをかえたり、後続波の波高をかえての実験が必要である。

7. 結び

分散波列の斜面上の伝播と遡上の特性は第 1 波と第 2 波以降の挙動の違いにより変化し、流体力や遡上高さを把握する場合の特性量に第 3 波を含むようなものを考える必要があることを実験より明らかにした。今後はソリトンの分裂や海底勾配の違いにより上記の特性がどのようにかわるかを調べるのが課題といえる。

最後に本研究を進めるにあたり東北大学工学部技官佐藤弘、佐藤栄司の二氏および内地留学生中村武弘氏 (長崎大助手) に調査、実験の全般について援助をうけた。また、本研究は文部省特別経費「日本海中部地震による津波の特性に関する模擬実験」によって行なったものである。ここに記して厚く感謝の意を表す。

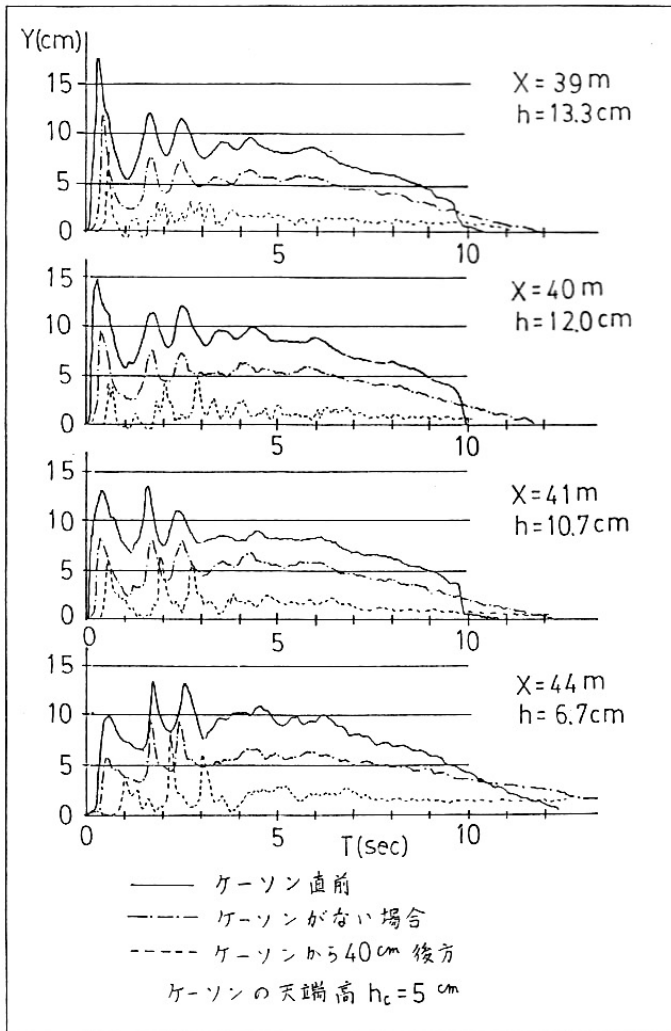


図-19. ブロック前後及びブロック位置における水位の経時変化

参 考 文 献

- 1) 岩崎敏夫・真野 明・小杉達郎：“孤立性段波のソリトン分裂に関する研究”土木学会第22回海岸工学講演会論文集(1975) pp. 47~51.
- 2) 岩崎敏夫・鈴木義和：“孤立性段波より
のソリトンの変形と砕波に関する研究”土木学会第24回海岸工学講演会論文集(1977) pp. 45~49.
- 3) 岩崎敏夫・首藤伸夫・鈴木義和・栗田悟：“孤立性段波のえりわけ距離に関する研究”土木学会第25回海岸工学講演会論文集(1978) pp. 132~136.