

土 木 研 究 所 資 料

斜面上を進行する非線形長波の2次元 変形に関する実験報告書

昭和63年4月

建設省土木研究所
河川部海岸研究室

Copyright © (1988) by P.W.R.I.

All right reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

斜面上を進行する非線形長波の2次元 変形に関する実験報告書

海岸研究室 室長 宇多高明
研究員 小俣 篤
横山 揚久

要 旨

1/100勾配を有する一様斜面上を進行する波状段波を対象とし、その先端部第一波に着目してMach stem, edge boreの挙動、および河道内に波状段波が進入する際の変形を実験的に明らかにした。Mach stemに関しては、波高分布やMach stemの広がりについて従来の水平床上の理論や実験と定性的には同じ傾向が得られた。但し、定量的比較に無理がある。edge boreに関しては、波の進行方向に対する斜面の傾き角、斜面勾配、波条件毎にedge boreの形態を整理できた。また、斜面勾配が $\tan \beta = 1/20$ 以下に緩いとedge boreは形成されないことを示した。河道進入時の波の変形に関しては、段波先端部での混合が激しい場合に、河道内で波高の一様化が急速に進行し、波峰は横断方向に直線状に変化することがわかった。一方、混合が弱い場合には、河道側岸部の波高が高い領域(Mach stem)は比較的ゆっくりと河道中央へ広がった。

キーワード：津波、非線形長波、水理模型実験、波状段波、Edge bore, Mach stem, 河道進入

目 次

1. はじめに	1
2. 研究の背景	2
3. 研究の目的	5
4. 実験施設	6
5. 実験に用いた非線形長波の特性	8
6. Mach stemに関する実験	18
6.1 実験の目的	18
6.2 実験方法	19
6.3 実験結果	20
6.4 結 論	41
7. Edge boreに関する実験	42
7.1 実験の目的	42
7.2 実験方法	44
7.3 実験結果	44
7.4 結 論	61
8. 波状段波の河道侵入に関する実験	62
8.1 実験の目的	62
8.2 実験方法	62
8.3 実験結果	67
8.4 結 論	83
9. ま と め	84
参考文献	85
付 図	87

1. は じ め に

津波災害を考える上で、浅海での津波の挙動を明らかにすることは重要な課題である。最近では計算機の進歩に伴って、津波の非線形効果を含んだ数値計算が精度良く行われるようになり実用にも供されている。しかし、非線形長波の反射、回折、屈折などの現象に関してはまだ不明な点が多い。海岸に向かって進行する津波は、海岸線付近の海底地形や入射角の条件によっては通常の反射・屈折現象とは異なる挙動を示す。海岸線が崖のような鉛直境界になっている場合、津波の進行方向と海岸線の成す角が小さいと、海岸線に直角な波峰を持った波 (Mach stem) が形成される場合がある。また、傾斜海岸においても津波が海岸線に平行に近い角度をもって進行する場合には、汀線際で波高が高くなる edge bore が形成される。Mach stem や edge bore については多くの研究が行われているが、理論的取り扱いが複雑なこと、実験が難しいこと等が研究の障害となっている。本研究では、起潮装置と平面水槽を用いて、境界が鉛直の時に生じる Mach stem と傾斜させた時に生じる edge bore に関する実験を行い、詳細な測定によりその挙動を明らかにする。さらに、津波が河口部より河道へ進入する際、および河道内を遡行する際の波の変形を実験的に明らかにする。

2. 研究の背景

1983年の日本海中部地震により発生した日本海中部地震津波は、日本海東北沿岸を襲い多大の被害をもたらした。この津波にはいくつかの特徴的な津波波形が観察された。海岸に來襲した津波は、遠浅の海岸を進行し変形した結果、段波の先端にクノイド波状の短周期波を伴った波状段波 (undular bore) となった¹⁾。また、秋田沿岸では弓形の海岸線の数ヶ所で edge bore が目撃されている²⁾。写真－2.1～2.4 は海岸線に沿って進行する津波の連続写真を示す。写真には男鹿半島方面から北へ向かって進行する bore が写されており、汀線際で波高が高く波峰線が海岸線に対し直角に近い角度をなしていることから、edge bore が形成されていると考えられる。また、写真－2.5 は米代川南の中島貯木場で撮影された津波遡上の状況である。先端部に短周期の波を有する波状段波が認められる。また、米代川本川では、河道の横断方向に直線的な波峰を有した波状段波が進行していく状況が観察された³⁾。本研究では、海岸線近傍における津波の2次元変形を対象として実験的検討を行う。



写真－2.1 津波の進行状況（その1）



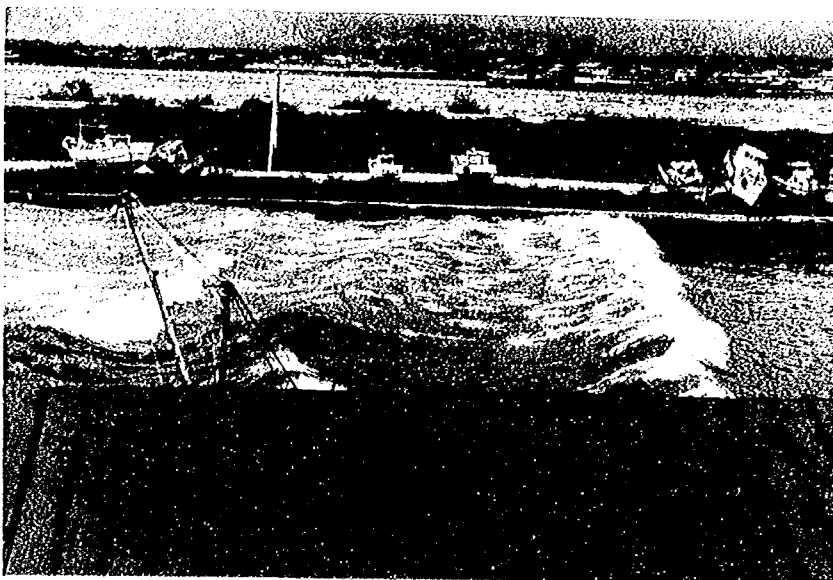
写真－2.2 津波の進行状況（その2）



写真－2.3 津波の進行状況（その3）



写真－2.4 津波の進行状況（その4）



写真－2.5 河川を遡上する波状段波

Mach stemはgas dynamicsにおけるshock waveの研究で見出された³⁾。表面波においてはPerroud⁴⁾やChen⁵⁾の先駆的な実験がWiegel⁶⁾によって紹介されている。その後、Milesは、KdV方程式を用いて斜めに入射する2つの孤立波の相互干渉を理論的に取り扱い、境界壁面でのMach stemの波高や発生限界を求めた^{7), 8)}。Milesの理論では入射角と波高水深比を変数としたとき、境界壁でのMach stemの波高は極値を持ち、その値は入射波の波高の4倍になる。MelvilleはMilesの理論を検証するため実験を行い、Milesの理論のような極値は見られないことを示した⁹⁾。また、YueらはStokes波の屈折・回折の解析に放物型近似を用いてMach stemの数値計算を行っている¹⁰⁾。

Edge boreの存在はよく知られているが、現象が複雑であり実験も難しいことから研究事例は余り多くない。実験的研究としては、Chenによるedge boreの形態や発生条件に関する研究⁶⁾およびそれに続くDavidらの研究¹¹⁾などを挙げることができる。Chenの研究によりedge boreの形態が明らかにされている。

河口部より河道へ津波が進入する際の変形は、河口部での回折、河道内での反射、回折などの複雑な現象が混在している。そのため、防災上重要な課題であるにもかかわらず、ほとんど研究されていないのが現状である。

3. 研究の目的

非線形長波の反射、屈折および回折に関する既往の理論的な研究は、孤立波やStokes波を対象とした水平床の条件下での研究が主である。しかし、実際に海岸に来襲する津波は、砕波段波(breaking bore)や段波の先端に短周期波を伴った波状段波である場合が多い。そこで、波状段波の反射、屈折、回折現象を明らかにすることを目的に実験を行った。さらに、海底地形は、波の進行方向に傾斜させた海浜を対象にした。具体的には、津波の進行方向に1/100の勾配を持つ海底条件のもとで、以下に示す3つの水理模型実験を行った。

① Mach stemに関する実験(実験Ⅰ)

波の進行方向に対して θ の角度を有する鉛直境界壁を設け、Mach stemの発生条件およびその挙動を調べる。

② Edge boreに関する実験(実験Ⅱ)

波の進行方向に対して θ 傾いた傾斜境界面でのedge boreの発生条件、挙動を調べる。

③ 波状段波の河道侵入に関する実験(実験Ⅲ)

海岸および河道側岸を鉛直壁として河口部の模型を設ける。河口への導入部の海岸線形状を変え、河口部での波の変形や河道を進行する際の波の変形を調べる。

4. 実験施設

実験に用いた水槽は建設省土木研究所海洋沿岸実験施設内の津波実験水槽である。津波実験水槽は図-4.1に示すように、長さ約30m、幅30m、床勾配1/100のモルタル製の固定床平面水槽と、30m×3m×3mの空気室を持つ起潮装置から成る。実験においては、5cm程度の波高が得られるように、平面水槽の中央部を15mに仕切り水路として使用した。水平方向の座標系 x 、 y は水路の隅(O点)を原点として、水路沖方向に x 、横断方向に y を定めた。各実験での水位は水路の岸側末端($x=0$)を汀線として、起潮装置前面の水路端水深を29.85cmに設定した。

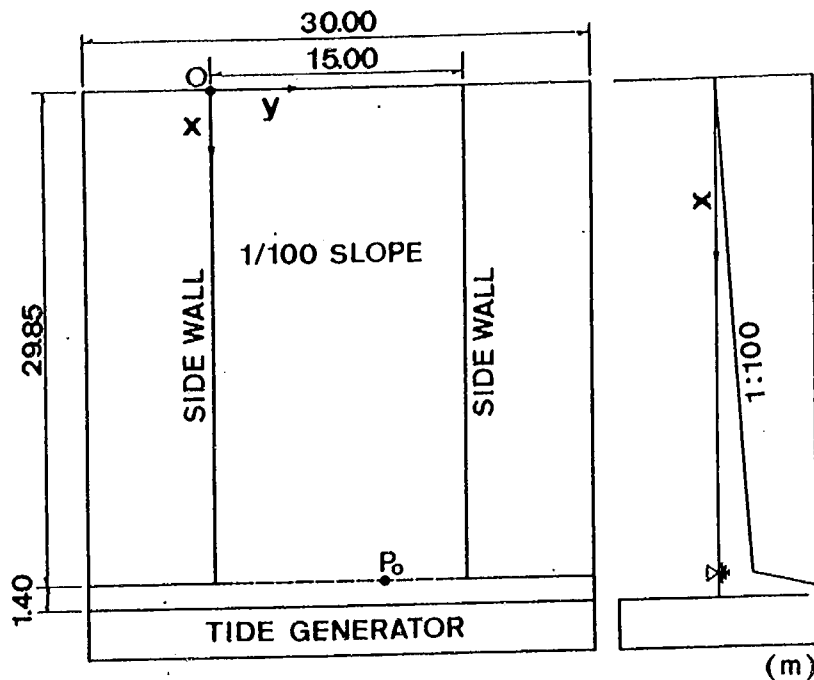


図-4.1 津波実験水槽

起潮装置はニューマチックタイプである(写真-4.1)。超低周波発信器の制御により送風機を駆動し、起潮装置空気室内の空気圧を増減させて孤立波を発生させた。超低周波発信器からの出力信号は図-4.2に示すようなパルス波である。このパルス波の初期設定圧(P_i)、振幅(H_p)、および周期(T_p)を設定することにより波の条件を与えた。計器盤を写真-4.2に示す。実験においては P_i を -400mmAq に固定し、 H_p と T_p を変化させて波の条件を設定した。ここに mmAq は水柱圧単位である。

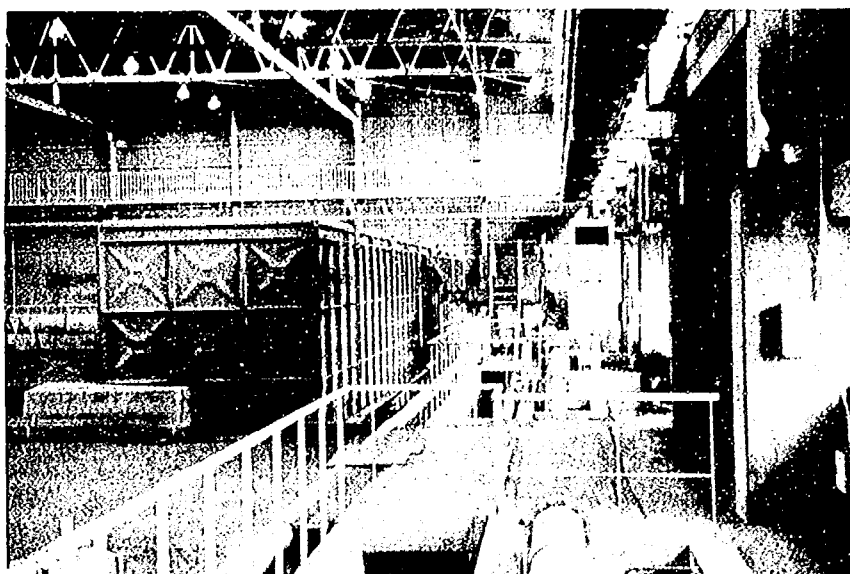


写真 - 4.1 起潮装置全景

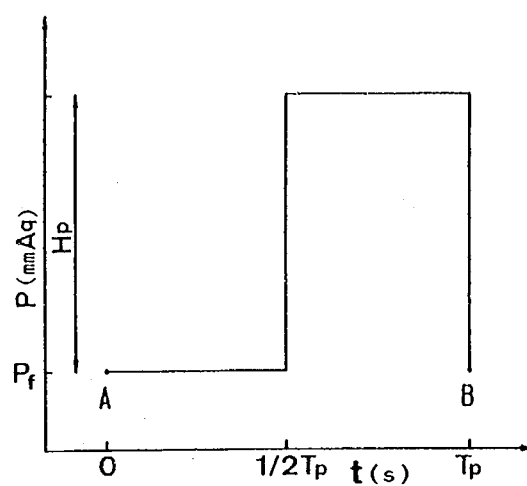


図 - 4.2 入力造波信号

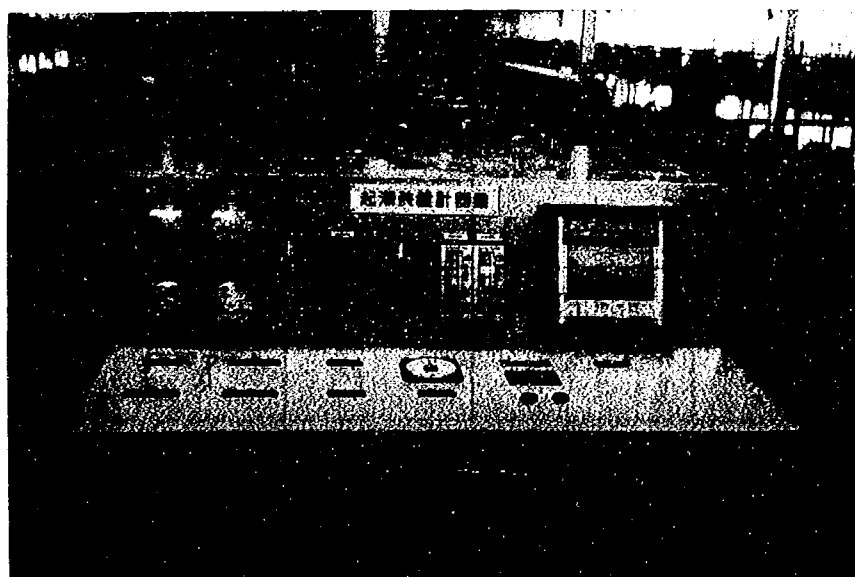


写真 - 4.2 起潮装置計器盤

5. 実験に用いた非線形長波の特性

実験に用いた波の設定条件を表-5.1に示す。実験Ⅰでは同表のa～dの波条件を用いた。実験Ⅱではb, c, 実験Ⅲではe, fの波条件を用いた。これらの条件を用いて発生させた孤立波の起潮装置前面(図-4.1, P.)での時間波形(η)を図-5.1に示す。a～fの波条件に関し、静水面から最高水位までの高さを H_1 として表-5.1に示した。 H_p が同一の場合、 T_p が長いほど H_1 は大きくなる。また、図-5.1の各波形に見られる2つ目のピークは反射波を表わしている。発生した孤立波は、1/100勾配斜面を進行するにつれ段波へと変形し、段波の先端に短周期波が形成されて波状段波になる。本報では波状段波の各特性値として、図-5.2に示す4つのパラメータ(h_s , H_1 , H_0 , h)を選んだ。 H_1 は波状段波の各特性値として、図-5.2に示す4つのパラメータ(h_s , H_1 , H_0 , h)を選んだ。 H_1 は段波先端部の分裂第一波の波高、 H_0 は分裂波の生じていない段波部の波高である。

実験に用いた6ケースの波条件について、進行に伴う浅水変形の例を以下に示す。ここに示す結果は、波の進行方向と小さな角度を持って交差する境界壁の影響が最も小さい測線で測定された結果であり、一次元変形の特性を表わすと考えて良い。測定結果は沖から岸向きの順に示す。図-5.3はaの波条件での測定結果である。横軸は起潮装置前面P.での水位が上昇を開始する時刻を基準とした時間、縦軸は静水位基準の水位である。段波として進行してきた波は $x = 8.8$ m地点で先端が2波に分裂し、波状段波となった。その波形を見ると、 $x = 10.8$ m地点より $x = 6.1$ m地点までの区間では先端の分裂波の波高が増加している。 $x = 5.8$ mでは $H_1 = 5.7$ cmとなり、 $x = 6.1$ m地点の $H_1 = 5.8$ cmと比較すると H_1 が低下している。これは碎波によって波高低下が生じたものである。しかし、段波部の波高 H_0 は $x = 10.8$ mで約3.5 cm、 $x = 6.1$ mで約3.6 cmとあまり変化していない。図-5.4～5.6に示す波条件b, c, dのケースの結果も、波の分裂位置や段波部の形状が異なる他は、基本的にはaと同様の変化を示す。

表-5.1 波の設定条件

CASE	H_p (mmAq)	T_p (sec)	H (cm)
a	6 0 0	1 6	2. 8
b	1 4 0 0	8	2. 7
c	1 4 0 0	1 2	3. 9
d	1 4 0 0	1 6	4. 7
e	1 4 0 0	4	0. 8
f	1 4 0 0	7. 5	2. 6

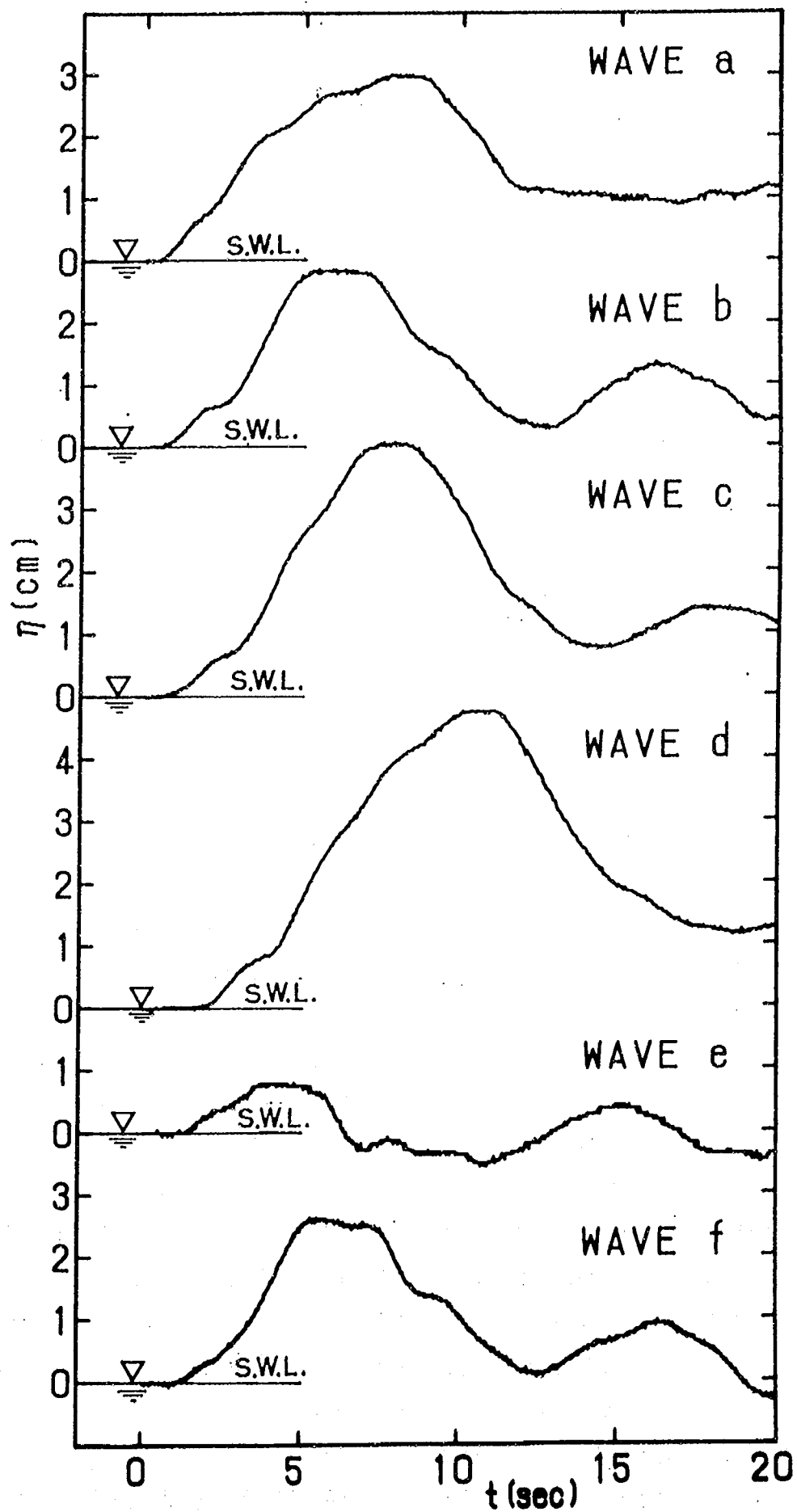


図-5.1 起潮装置前面 (P.) の水位時間波形

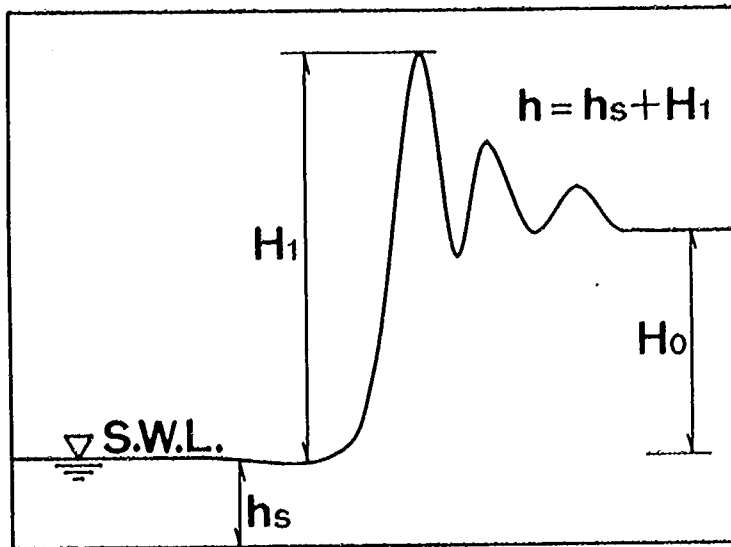


図-5.2 実験波のパラメータ

波条件 e での実験結果を図-5.7に示す。この波条件では、各測点とも段波部の波高 H_0 は約1cmと小さい。e, fの波条件は実験Ⅲに用いたが、この実験では $0 \leq x \leq 8$ mを水平床としてある。 $x = 7.55$ m付近より先端部第一波の波高が増加し、水平床上で波状段波というより孤立波に近い形状に変化した。 $x = 3$ mでは先端部第一波が段波から分離した1つの波になっていることがわかる。図-5.8に示すfの波条件では、前述したa~dの波条件と同様の変形を示す。この条件は波条件bにはほぼ等しい。先端部第一波は $x = 7.05 \sim 6.00$ mの間で砕波し、水平床の範囲($0 \leq x \leq 8$ m)の $x = 5.00 \sim 3.00$ mで再び波高が増加している。

次に、実験に用いた波の砕波特性を水位測定の結果を用いて整理した。Chesterはポアズイユ流れの場で粘性を考慮した弱い段波の解を求め、先端部における短周期波の存在領域を示した¹²⁾。Johnsonは減衰項を含んだKdV方程式により、 H_1 は先端から無限遠位置での段波波高 H_0 の1.5倍より小さいという理論解を示した¹³⁾。ここでは、波の進行方向に並んだ2つの測点において、波の進行後に H_1 が減少したときを砕波と定義した。そして、減少直前の H_1 を砕波波高とし、分裂波の砕波限界を検討した。 H_0 は図-5.2に定義した値を用いた。斜面上を進行する波状段波を扱っているため、 H_0 の取り方には若干の問題はあるが、緩勾配なので現象の本質を議論する上での影響は小さいと考えられる。砕波直前の H_1 と H_0 の比 H_1/H_0 を H_0/h_s で整理して図-5.9に示す。同図には H_1/H_0 ごとに代表的な測定波形も併せて示した。 H_1/H_0 と H_0/h_s は良い対応関係を示し、 $H_1/H_0 > 1.5$ にもデータが多いことがわかる。波形例によると $H_1/H_0 > 4$ では H_0 の値が小さく波状段波の波形としたいデータもみられる。これらはeの波条件の測定結果である。しかし、典型的な波状段波の波形を示す波形例④、⑤のデータも $2 < H_1/H_0 < 3$ の範囲にある。このように、斜面上を進行する波状段波においては、 $H_1/H_0 > 1.5$ でも非砕波の条件が存在することがわかる。図にはデータの示す関係を良く近似する $H_1/h_s = 1.0$ を実線で示した。このことから、本実験における砕波限界は局所的な水深を基準とした孤立波の砕波限界に近いことがわかる。

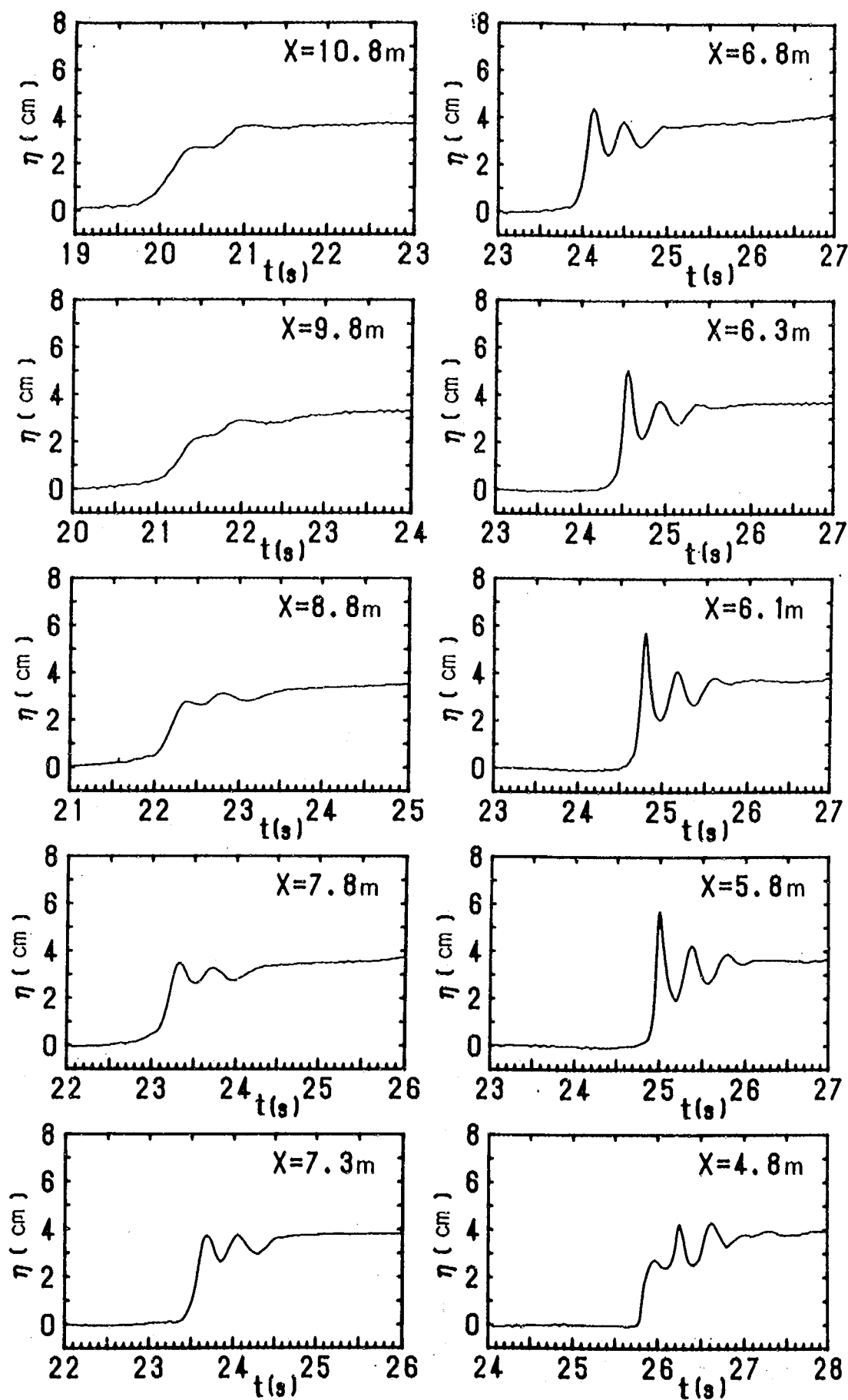


図-5.3 実験波の浅水変形 (波条件 a)

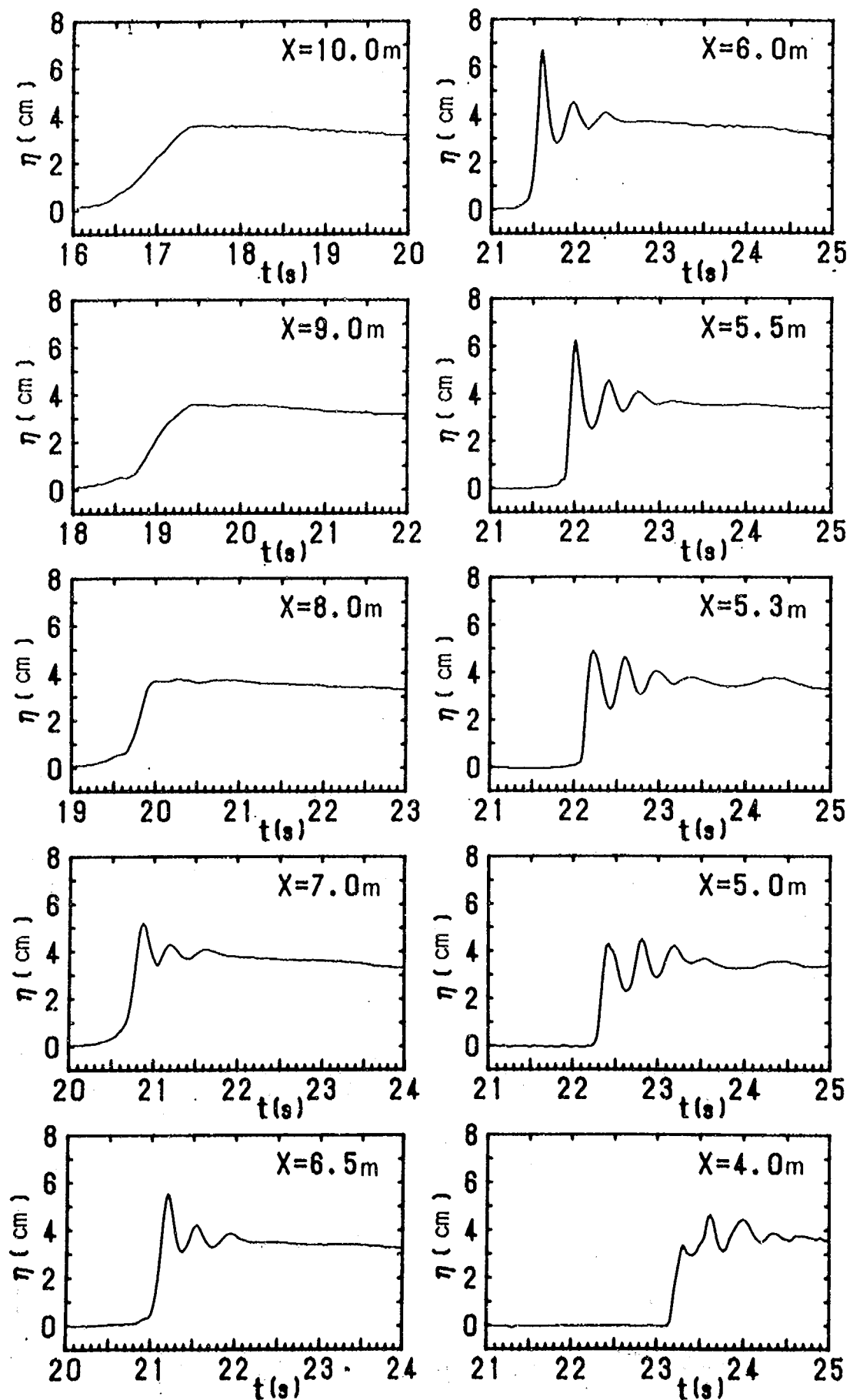


図-5.4 実験波の浅水変形 (波条件b)

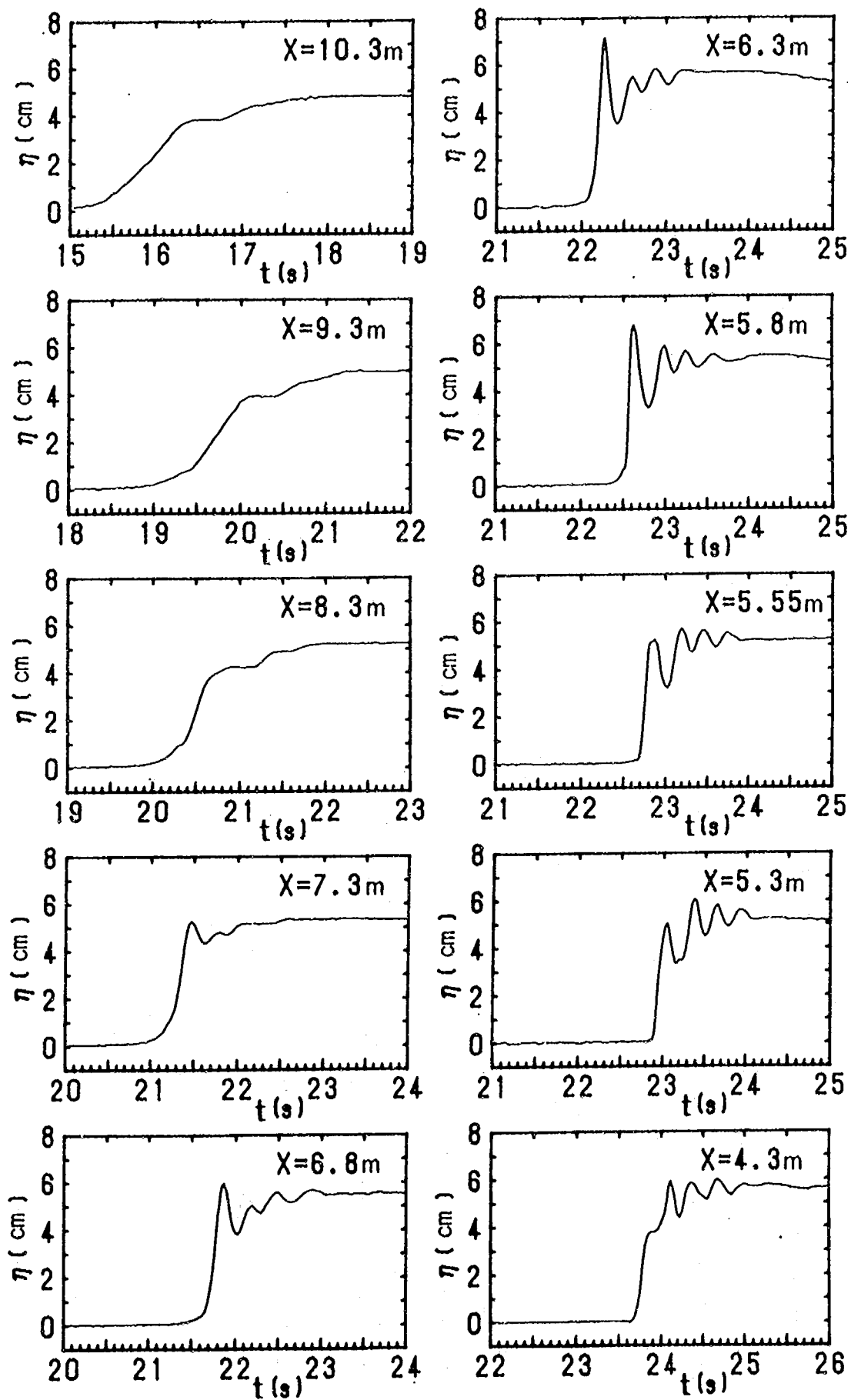


図-5.5 実験波の浅水変形 (波条件c)

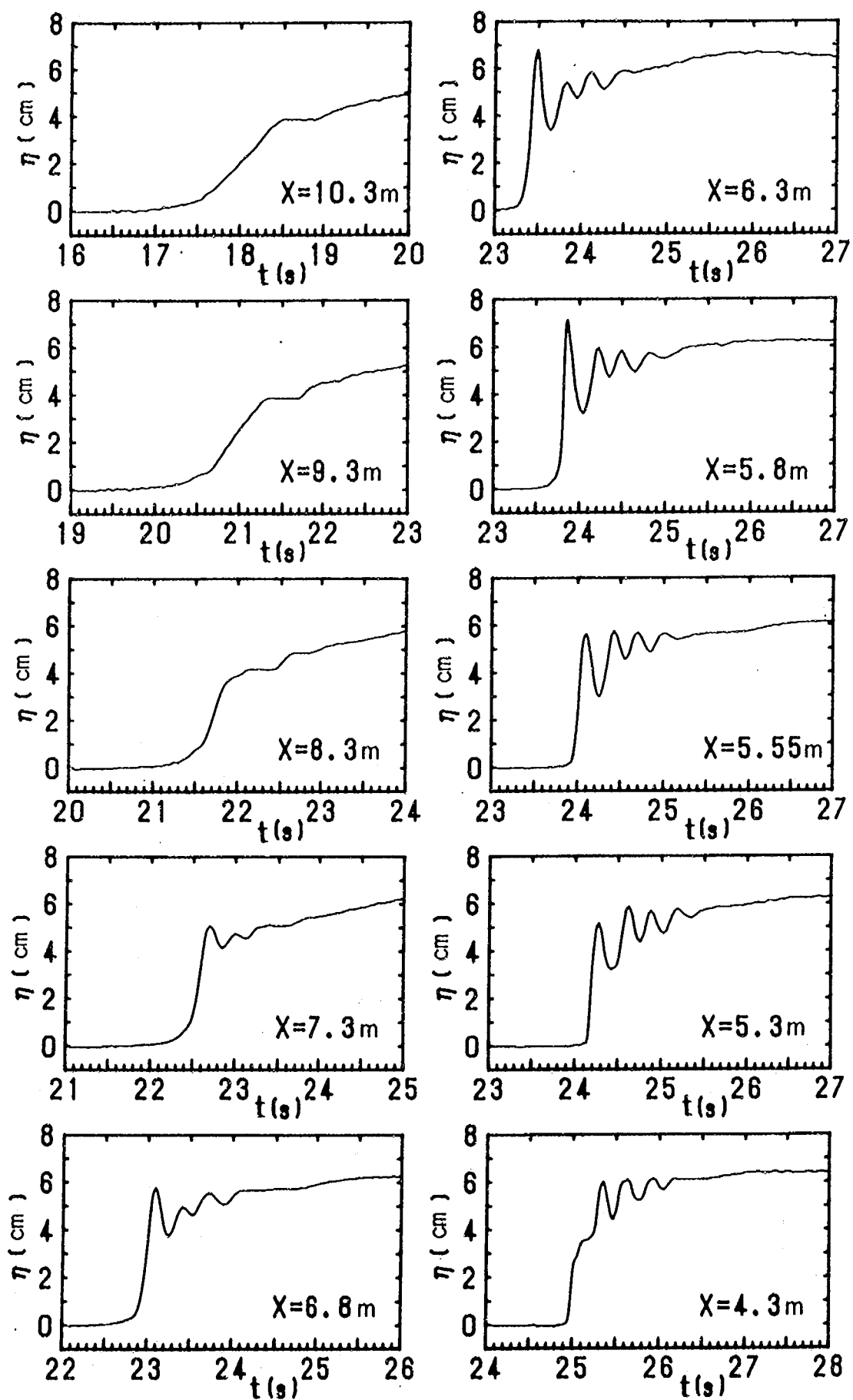


図-5.6 実験波の浅水変形 (波条件d)

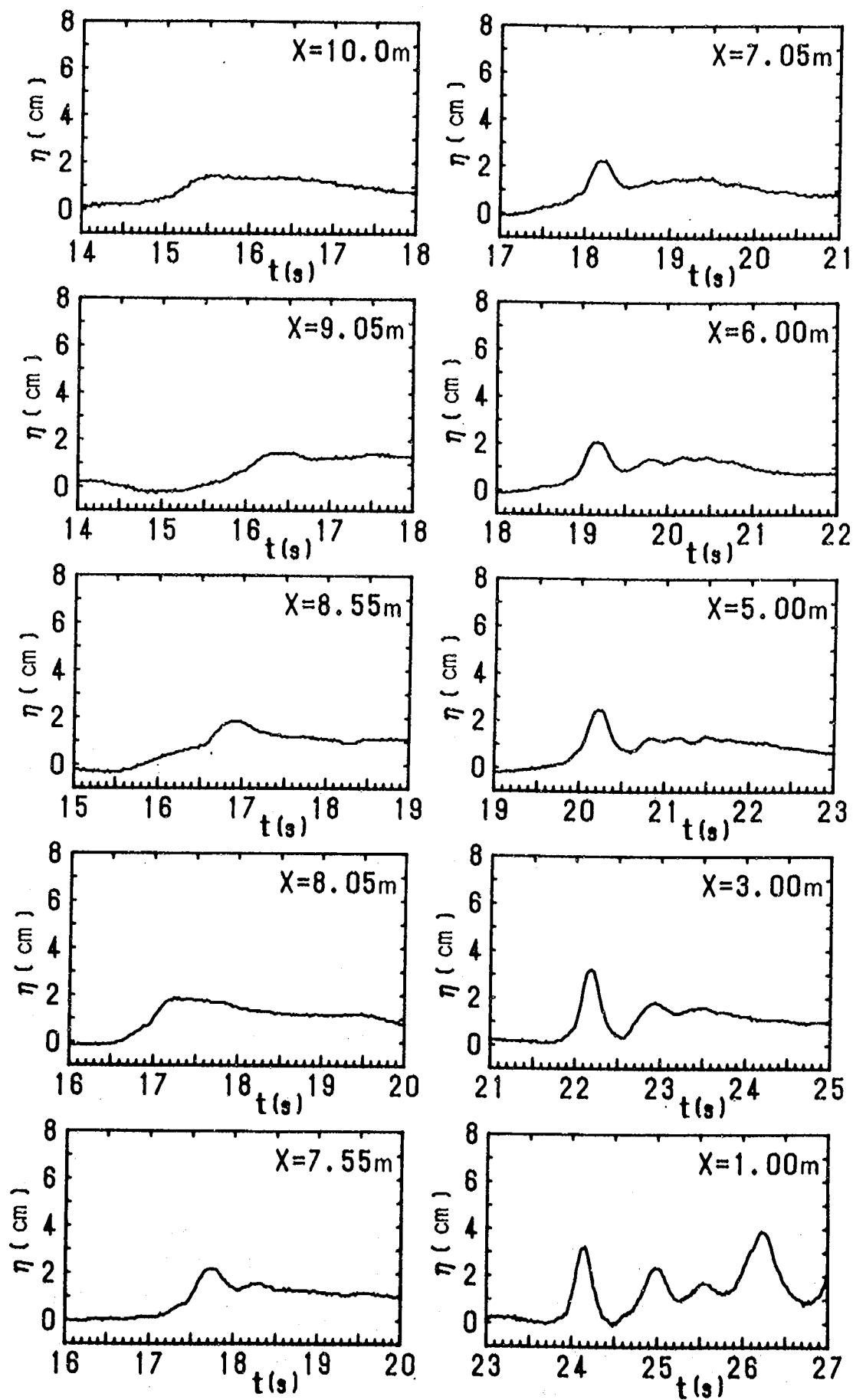


図-5.7 実験波の浅水変形 (波条件e)

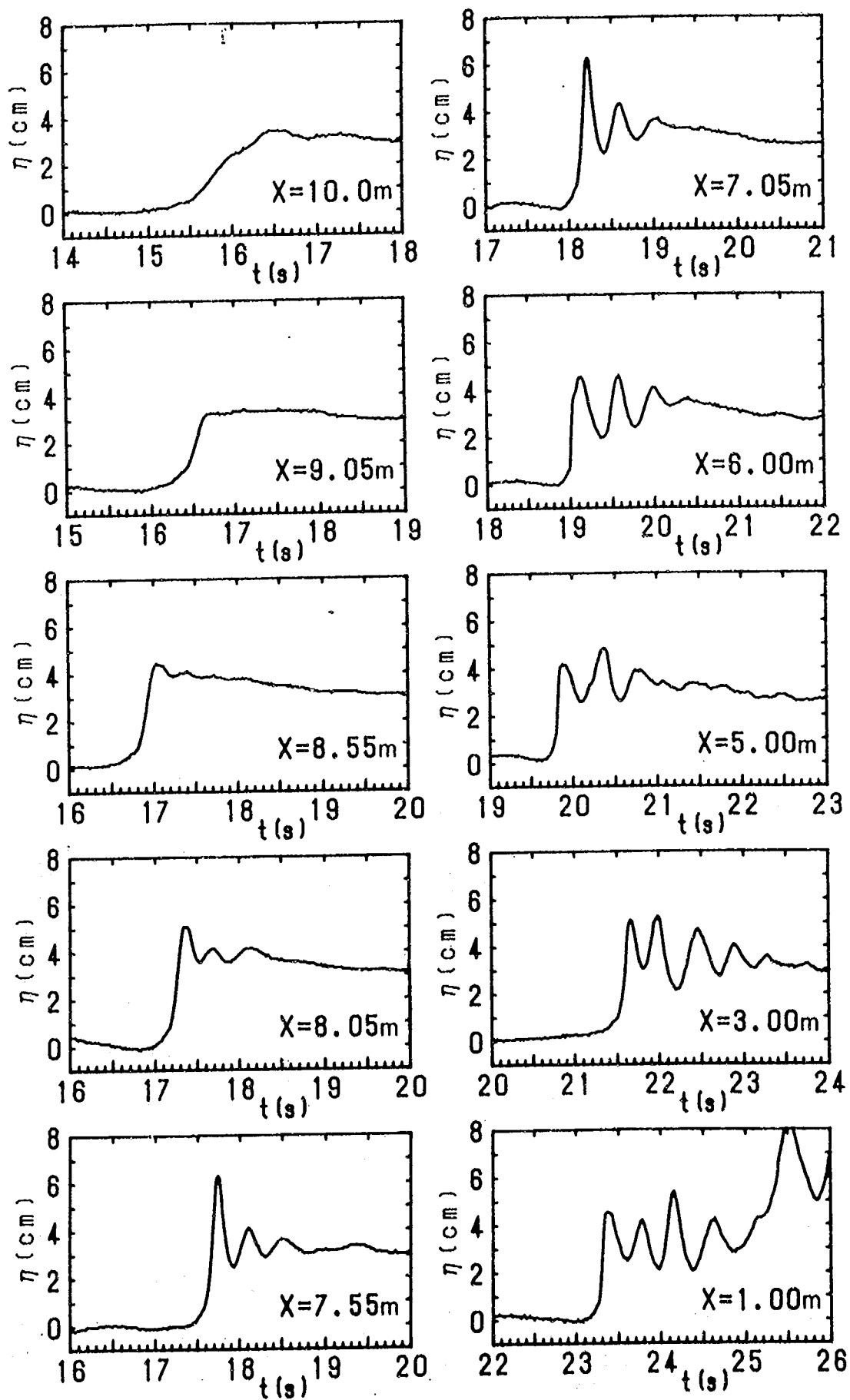


図-5.8 実験波の浅水変形 (波条件 f)

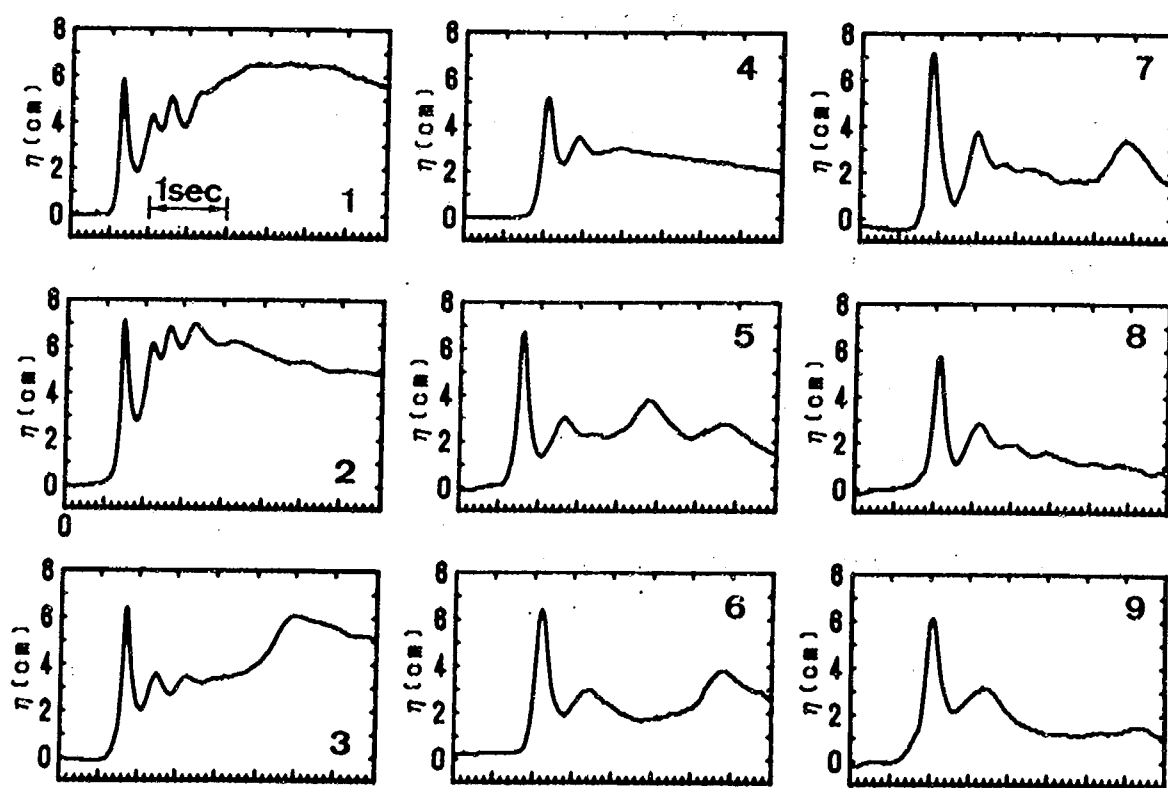
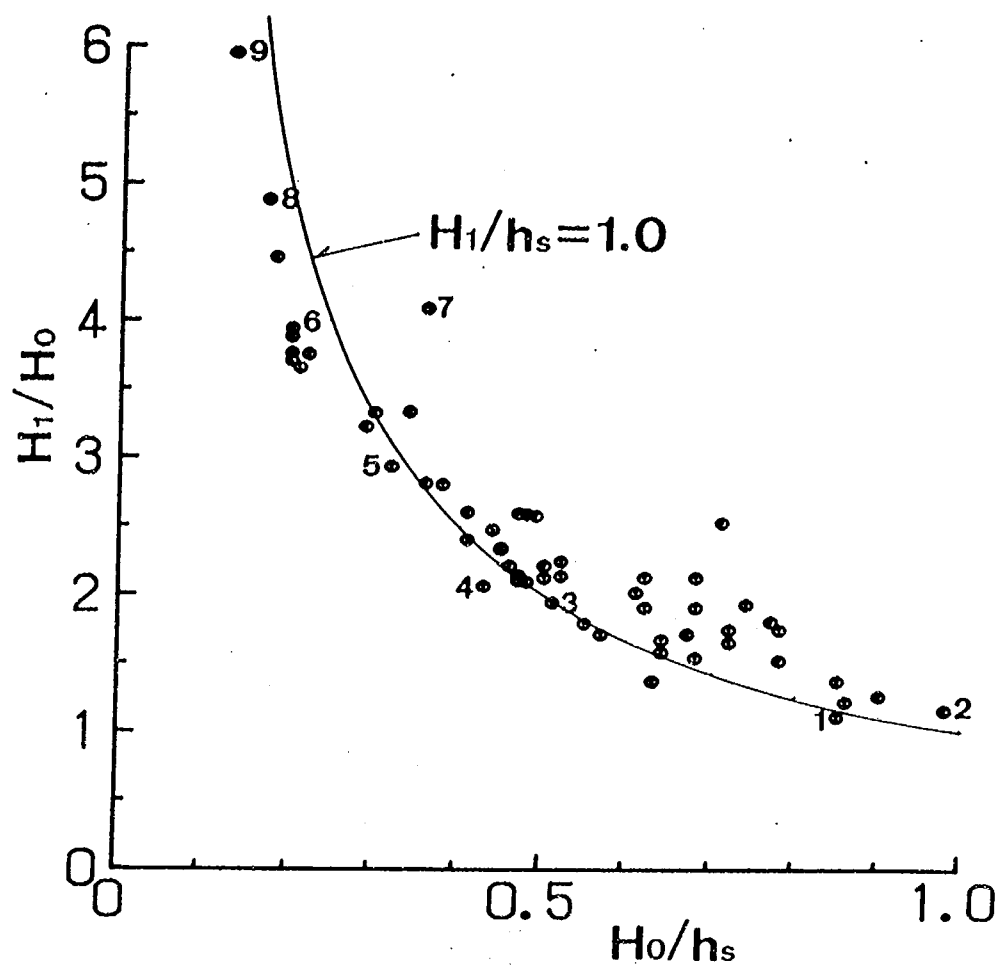


図-5.9 H_1/H_0 と H_0/h_s の関係

6. Mach stemに関する実験

6.1 実験の目的

Mach stem は鉛直境界壁に孤立波が斜めに入射する場合に境界壁近くで形成され、主としてその非線形の反射・回折現象が研究されてきた。Perroud は、孤立波の進行方向と直立壁の法線とが 45° より小さい角度をなす場合に、壁面と垂直な波峰を有する Mach stem が形成されることを示した⁴⁾。このような Mach stem の発生状況を図-6.1 に示す⁵⁾。 θ は波の進行方向と鉛直壁のなす角、 ψ_* は Mach stem 領域の広がり角である。Miles は水平床上の孤立波に対する Mach reflection の理論解を示した⁶⁾。

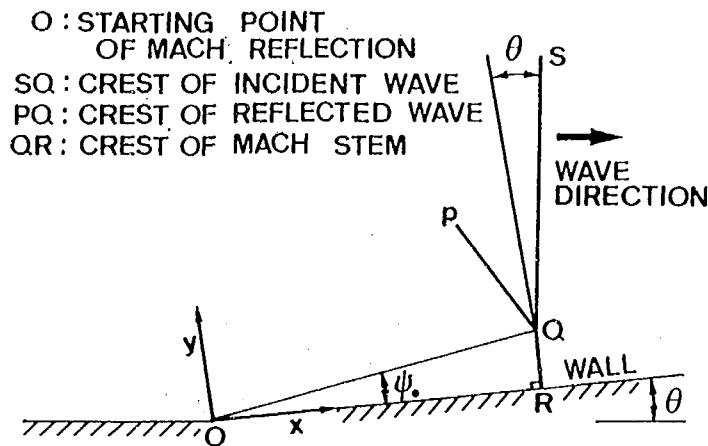


図-6.1 Mach stemの発生状況

Miles の理論によると鉛直壁に沿う波高分布は次式で表わされる。

$$\frac{\alpha_w}{\alpha_i} = \begin{cases} 4(1 + (1 - k^2)^{1/2})^{-1} & (\theta^2 > 3\alpha) \\ (1 + k)^2 & (\theta^2 < 3\alpha) \end{cases} \quad (6.1)$$

ここに、

α_w : 鉛直壁に沿う波高 H_w と水深 h の比 (H_w/h)

α_i : 入射波高 H_i と水深 h の比 (H_i/h)

$$k = \theta / (3\alpha_i)^{1/2}$$

また、Mach stem 領域の広がり角 ψ_* は次式で表わされる。

$$\psi_* = (1/3\alpha_i)^{1/2}(1 - k) \quad (6.2)$$

Mach stem が発生するための境界壁の傾き角 θ は次式を満足する。

$$0 \leq \theta \leq (3\alpha_i)^{1/2} \quad (6.3)$$

Melvilleは実験より ψ_* およびMach stemの発生条件についてはほぼ同様の結果を得た⁹⁾。Melvilleの実験結果をもとにして得られた α_w/α_i と κ の関係を図-6.2に示す。Melvilleの実験結果では、Milesの理論解に示されたような α_w/α_i の極大値は存在しない。

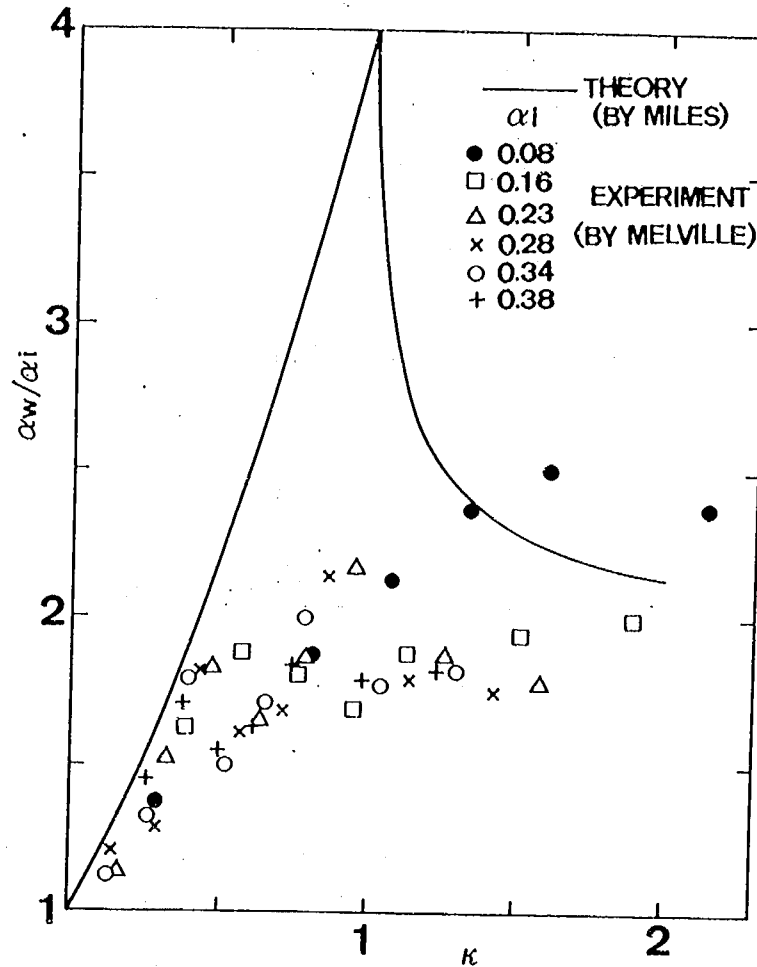


図-6.2 α_w/α_i と κ の関係

本研究は、一様斜面上を進行する波状段波を対象にしてMelvilleと同様の実験を行い、Mach stemの挙動を明らかにすることを目的とする。実験は1/100勾配の水路床上に、波の進行方向と θ なる角度を持って交差する鉛直壁を設け、そこで生じる反射による波の変形を調べた。実験では、波の進行方向に対する鉛直壁の交差角を変えた時のMach stemの発生状況、発達形態の相違を明らかにする。また、従来水平床上での孤立波を対象にした理論や実験結果と、斜面上での波状段波の場合の実験結果との違いを示す。

6.2 実験方法

実験は、 $x = 19.85$ mの地点から波の進行方向に対して θ の角度を有する鉛直壁を設置して行った(図-6.3参照)。 θ は $10^\circ \sim 45^\circ$ の間で5通り変化させ、a~dの波条件を用いて20ケースの実験を行った。鉛直壁はラワン合板製であり、越波しないよう十分な高さとした。鉛直壁と水路床および側

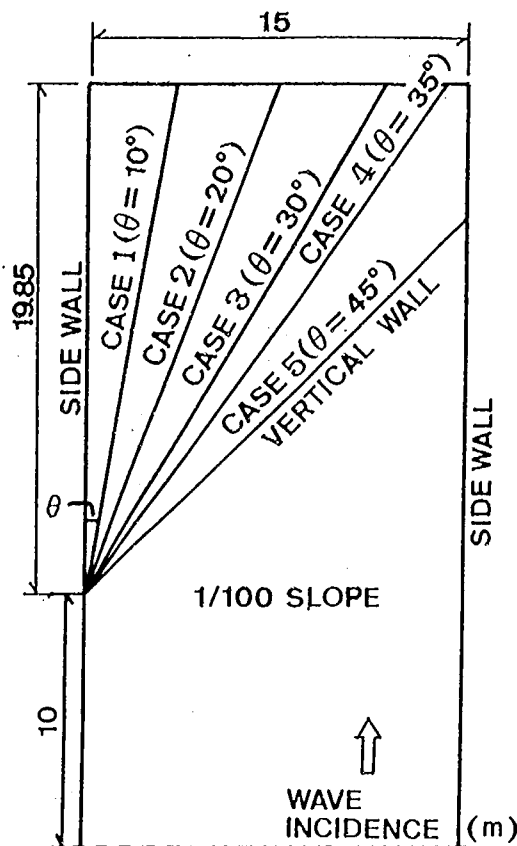


図-6.3 模型条件 (実験I)

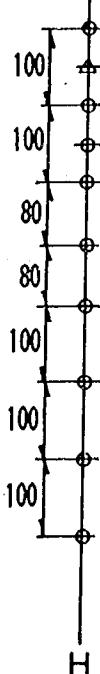
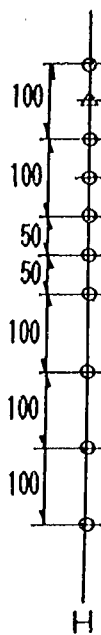
壁の間には防水処理を施した。

鉛直壁近くでの波の変形を調べるため、鉛直壁と平行に7測線、水路横断方向に5測線の測点格子を設定し、各格子点で水位時間波形を測定した。また、鉛直壁の影響を受けない地点での波の変形を調べるため、鉛直壁と向かい合う水路側壁に沿って測線を設定した。各ケースの測点を図-6.4に示す。以後、各測点は測線の交点座標として5B、4C等のように呼ぶ。水位時間波形の測定には容量式波高計を用いた。また、各ケースともビデオ撮影を行いMach stemの発生状況を記録した。

6.3 実験結果

6.3.1 水位時間波形の空間変化

鉛直壁に沿った測線A～Gおよび反対側の水路側壁に沿う測線H上の各測点における水位時間波形の例を図-6.5に示す。これは、 $\theta = 30^\circ$ 、波条件bの条件下でMach stemの発生が顕著であった場合の波形例である。このケースでは、鉛直壁に垂直な波峰を有するMach stemがビデオ映像にはっきりと撮影された。鉛直壁に沿った測線Aでは測点6Aから段波先端部に分裂波が生じ、測点3Aに至って碎波により先端部第一波の波高が減少した。AからHへと鉛直壁から離れるにしたがい、分裂が始まる測点は6A、5B、5C、4D、4E、4F、2G、2Hと岸方向に移動している。測線Hでは、分裂波の発生地点は測線Aに比べ岸側に3.6mずれている。また、測線AとHでは分裂開始時の H_1 は、前者で5.9cm、後方で3.0cmとかなり異なる。このように、Mach stemの発生する鉛直壁周辺と、その影響



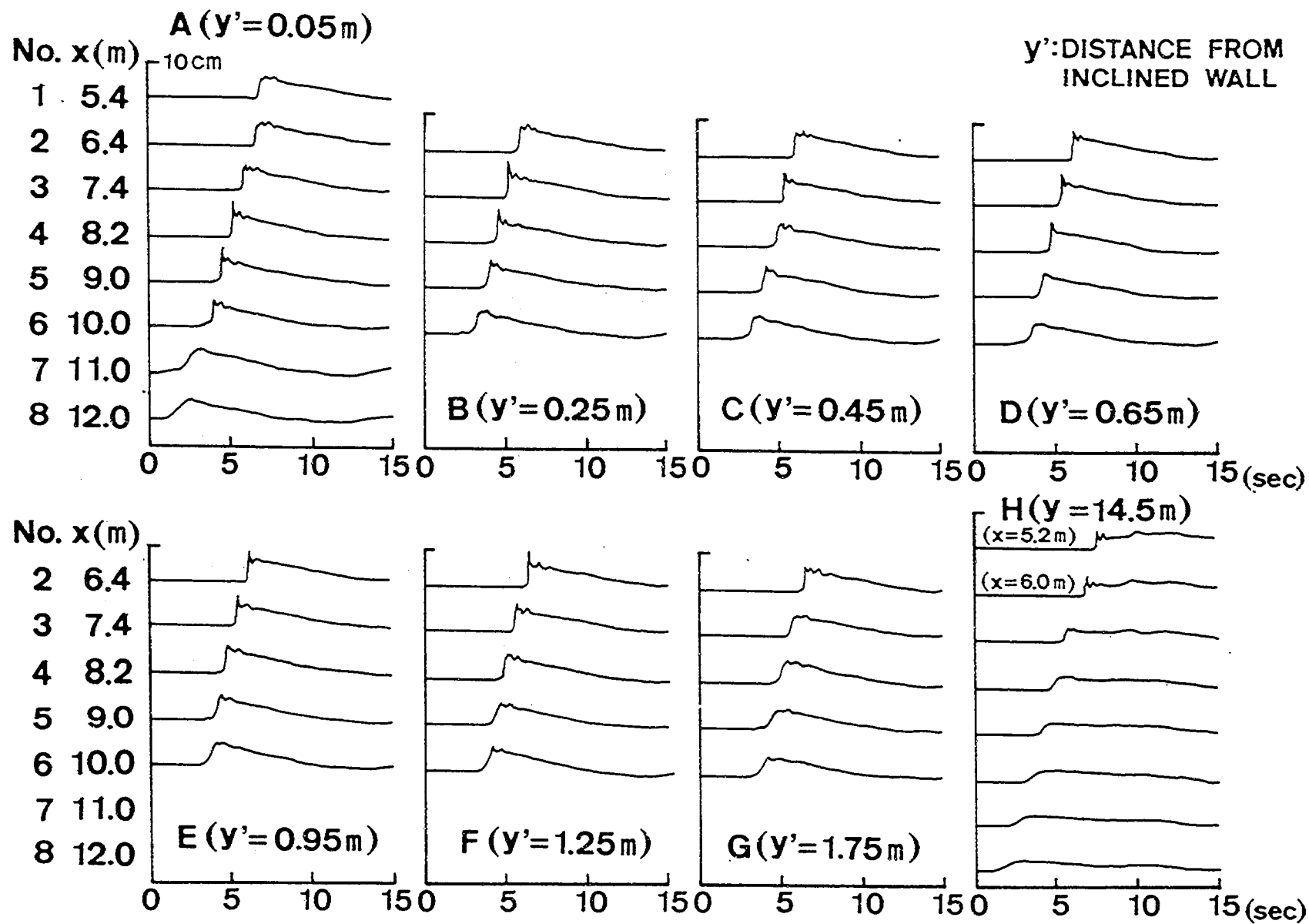


図 - 6.5 測線毎の水位時間波形

の無い地点では波の変形状況がかなり異なる。境界壁からの反射波が浅水変形に影響し、複雑な変形が生じたことがわかる。

次に、波条件をbとしたときの水位時間波形の特徴を θ ごとに述べる。ここには測線A, G, H上の各測点、および先端部第一波が砕波する直前の横断方向測線上の測点の波形をとりあげた。入射角 $\theta = 10^\circ$ のケースの測定結果を図-6.6に示す。測点AとHにおける波状段波の進行状況はほぼ同様である。測線4に沿う横断方向の波形にもあまり変化はない。ただし、相互の波高を比較すると、測点4Aの $H_1 = 7.4$ cmに対し測点4Hでは $H_1 = 5.5$ cmとなっており、4Aの H_1 の方が約3割大きくなっている。測線Aでは砕波による波高低下が測点3Aと4Aの間で生じているが、測線Hでは測点2Hと3Hの間で生じており、測線Aの方が早く砕波している。ビデオ撮影によるとこのケースではMach stemの形成がみられる。

図-6.7は $\theta = 20^\circ$ のケースの結果を示す。測線AとHで波の変形の差が顕著となっている。また測線4上の横断方向の波形変化をみると、4A~4Fの波形は類似しており、4G, 4Hと比べ4A~4Fでは先端部第一波の波高 H_1 が著しく高い。また、どの図にも鉛直壁からの反射波がはっきりと見られない。ビデオ撮影によると、このケースでもMach stemの形成が見られることから、測点4A~4Fの先端部第一波の波峰はMach stemであると考えられる。写真-6.1, 6.2に $\theta = 20^\circ$ 、波条件aのケースで鉛直上方から壁近くの波峰をとらえたビデオ画像を示す。境界壁に垂直なMach stemが見られる。写真-6.1がMach stemの砕波直前、写真-6.2が砕波直後の状況である。

$\theta = 30^\circ$ のケース(図-6.8)では、測線A, G, H上での波形変化が異なる。横断方向の測線3上で見ると、分裂波の数は測線Aで3波なのに対し、測線Hでは2波と少ない。この理由は次のようである。測線A上の波形変化を見ると、 H_1 の増加が著しく、分裂波の発達は測線Hに比べかなり早い。その結果、測線Hで2波の分裂波が生じる間に測線Aでは3波の分裂波が生じ、各分裂波の波峰線は図-6.9(a)に模式的に示すようになったのである。すなわち、鉛直壁に沿う測線A付近では3つの波峰線が見られるのに対し、鉛直壁から離れると分裂波の数は2つになる。測点3E, 3Fには第一波と第二波の重なる様子が表われている。

$\theta = 35^\circ$ のケース(図-6.10)では、測線AとHでの波形変化は著しく異なる。例えば測点4Hでは段波先端部の波高が3~6 cmなのに対し4Aではその値が9.2 cmになっている。また、横断方向の測線3上の3A, 3Cに著しく波高の高い分裂第一波が見られる。一方、3Fと3Gには段波の先端部に水位4 cm程度の突出部が見られる。また、測点2Gには先端部の波高4.6 cmの波峰の次に波高6.3 cmの波峰が見られる。測線Hの進行波の波形から判断する限り、測点2Gに見られる波高7.3 cmの2波目の波峰が形成されたとは考えられず、この波峰は反射第一波の波峰と考えられる。このことより測点3Gの波高7.1 cmの波峰も反射第一波の波峰であり、波形先端部の突出が入射波による水位の上昇を示すと考えられる。測点3Fでは壁面に近いため入射波と反射波の位相が近づいている。このように測線3上では3Eより壁から離れるにつれ入射波と反射波が分離したと考えられる。この状況の波峰線形状を模式的に図-6.9(b)に示した。測点1Hには入射波と反射波が分離した波形が見られる。これに対して $\theta = 45^\circ$ のケース(図-6.11)では、測線Aを除いて反射波と進行波とを区別して見ることができる。図中に反射第一波の波峰を矢印で示した。このケースでは、測線3上の一連の波形に見られるように、

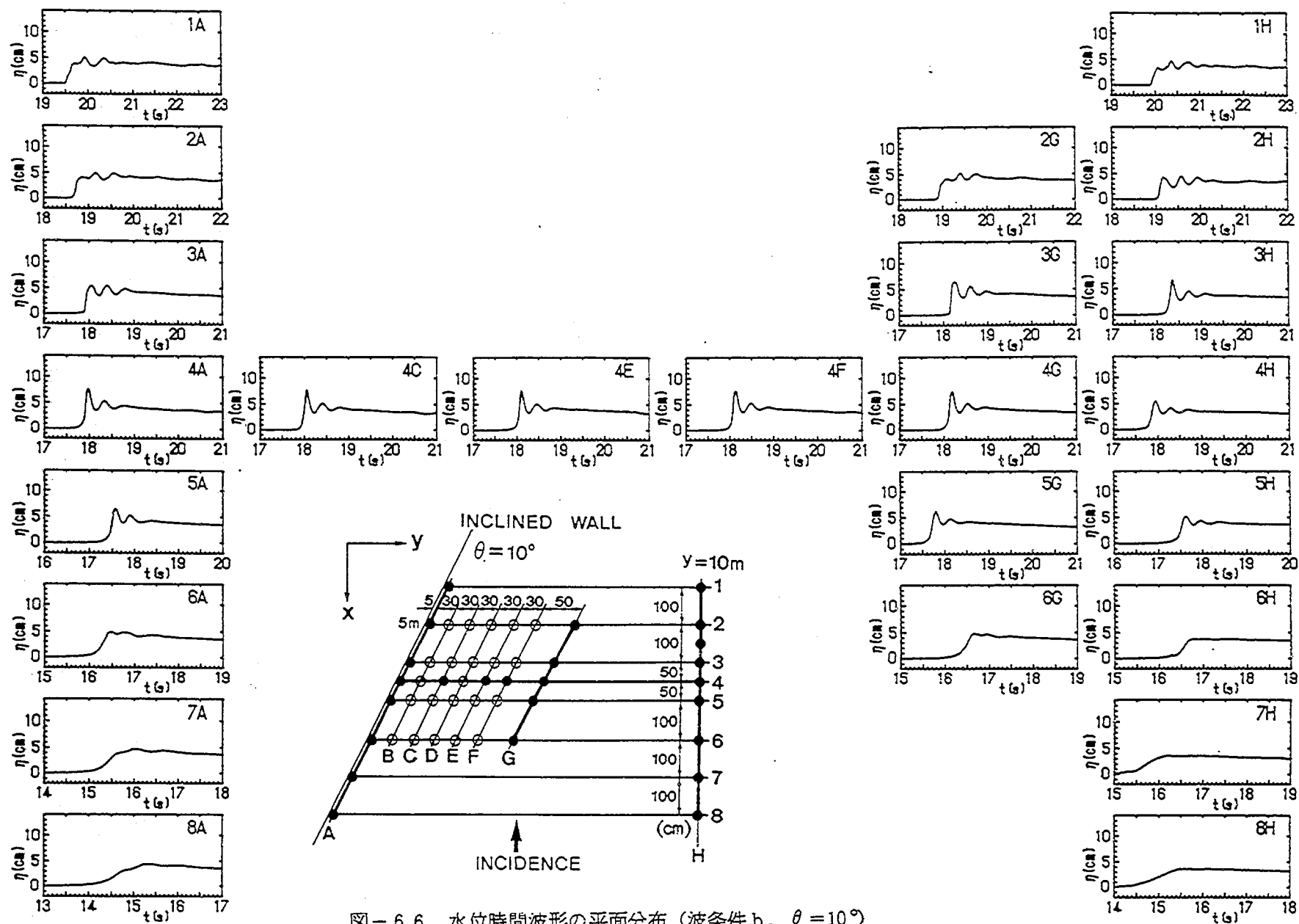


図-6.6 水位時間波形の平面分布 (波条件 b, $\theta = 10^\circ$)

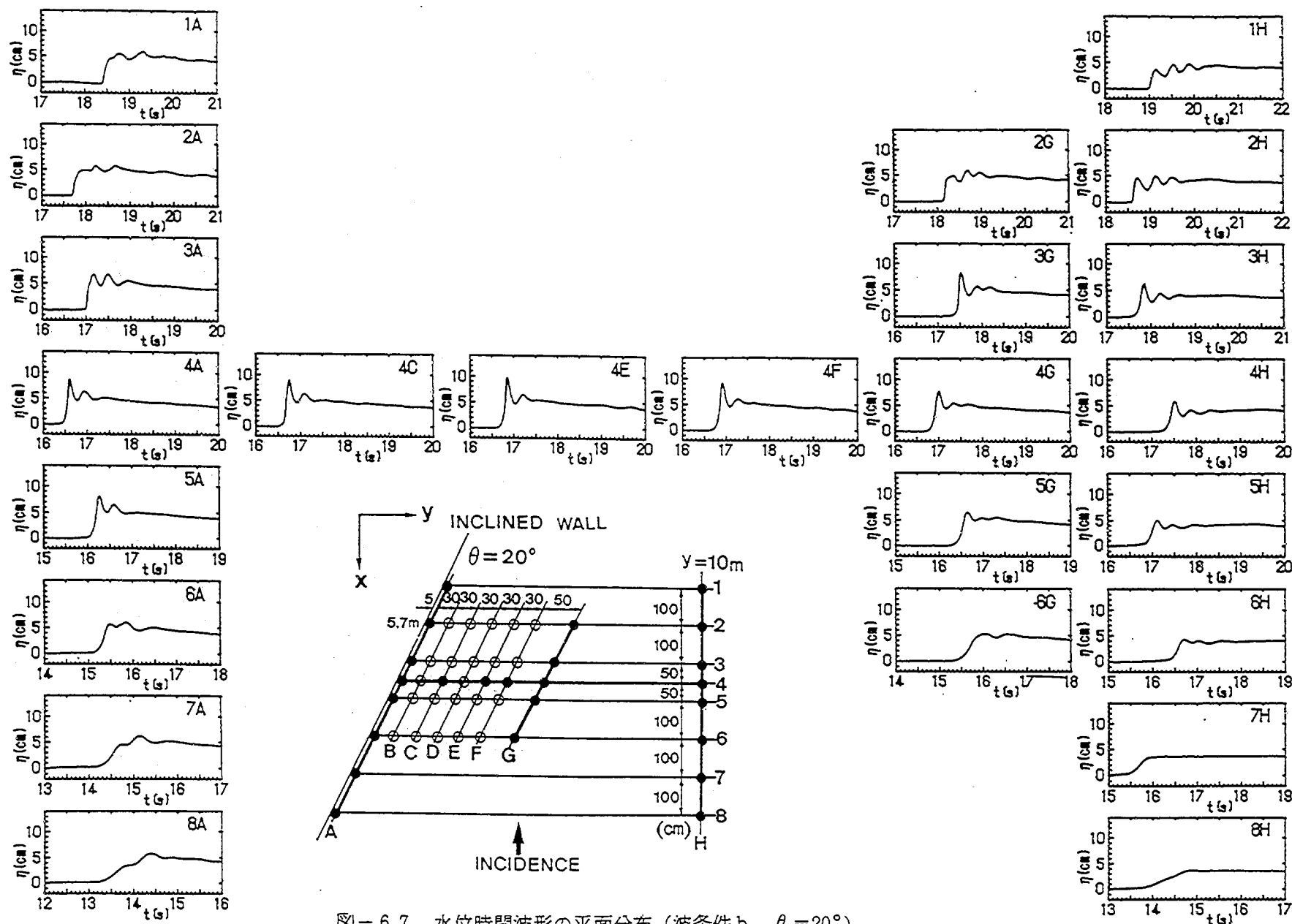


図-6.7 水位時間波形の平面分布 (波条件b, $\theta = 20^\circ$)

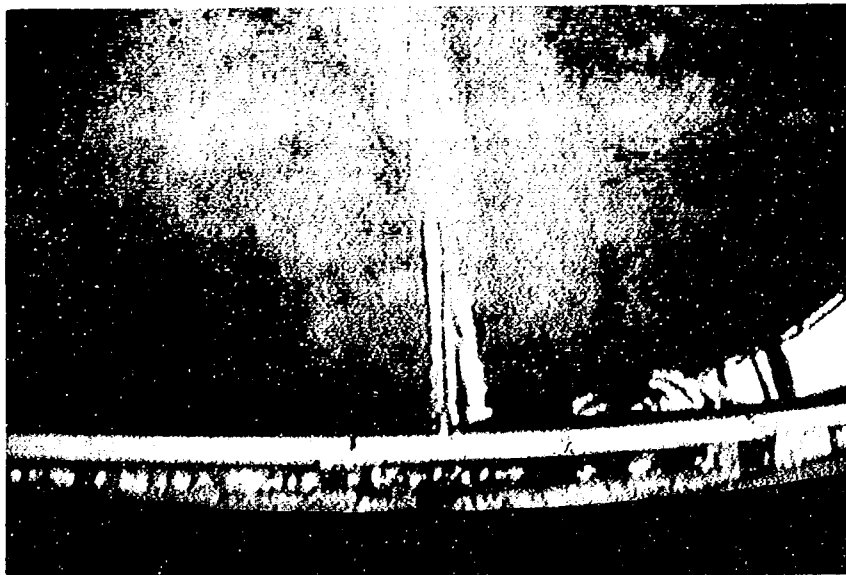


写真-6.1 Mach stemの形成 (その1)

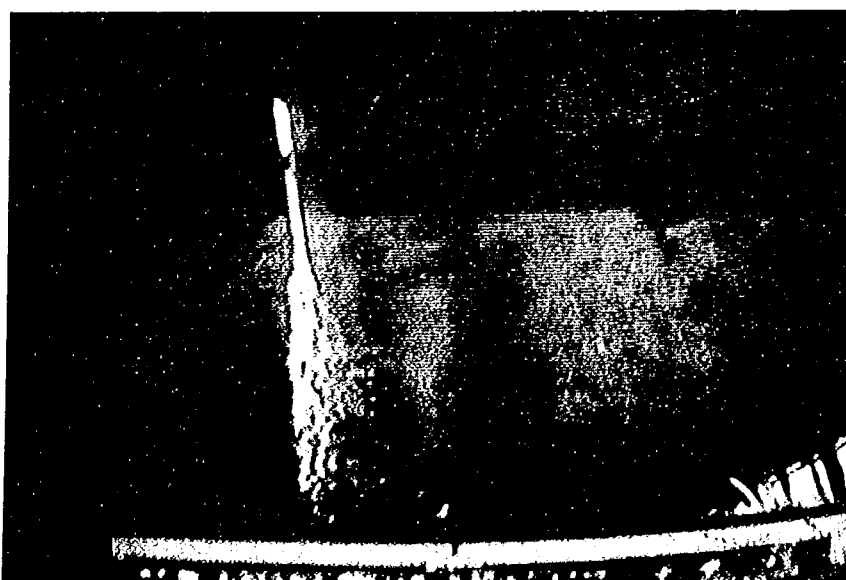


写真-6.2 Mach stemの形成 (その2)

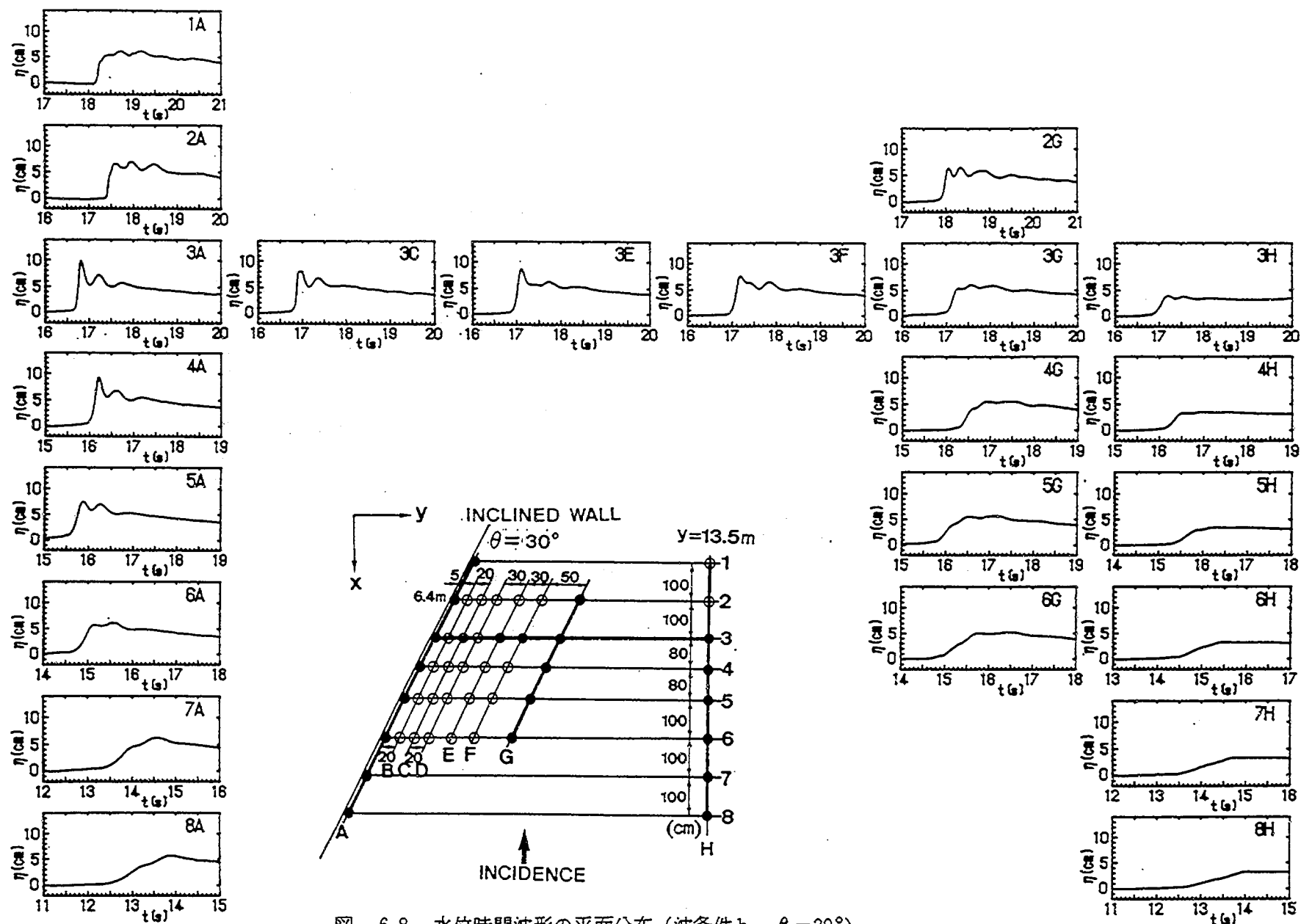


図-6.8 水位時間波形の平面分布 (波条件b, $\theta = 30^\circ$)

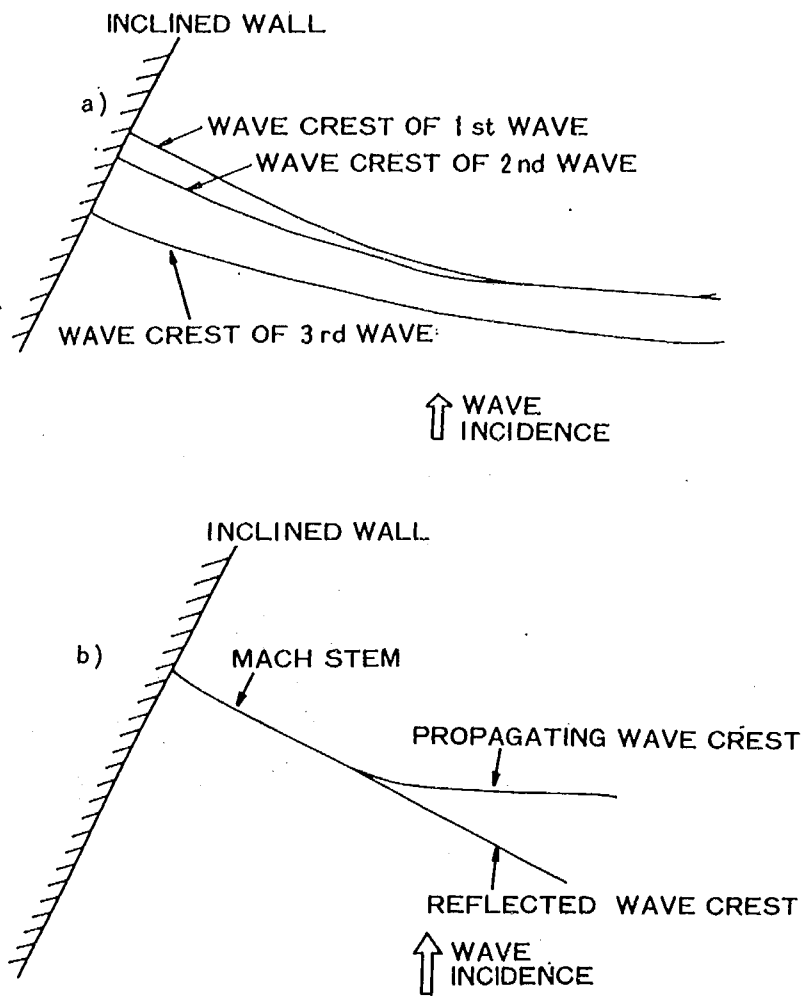


図-6.9 波峰線形状の模式図

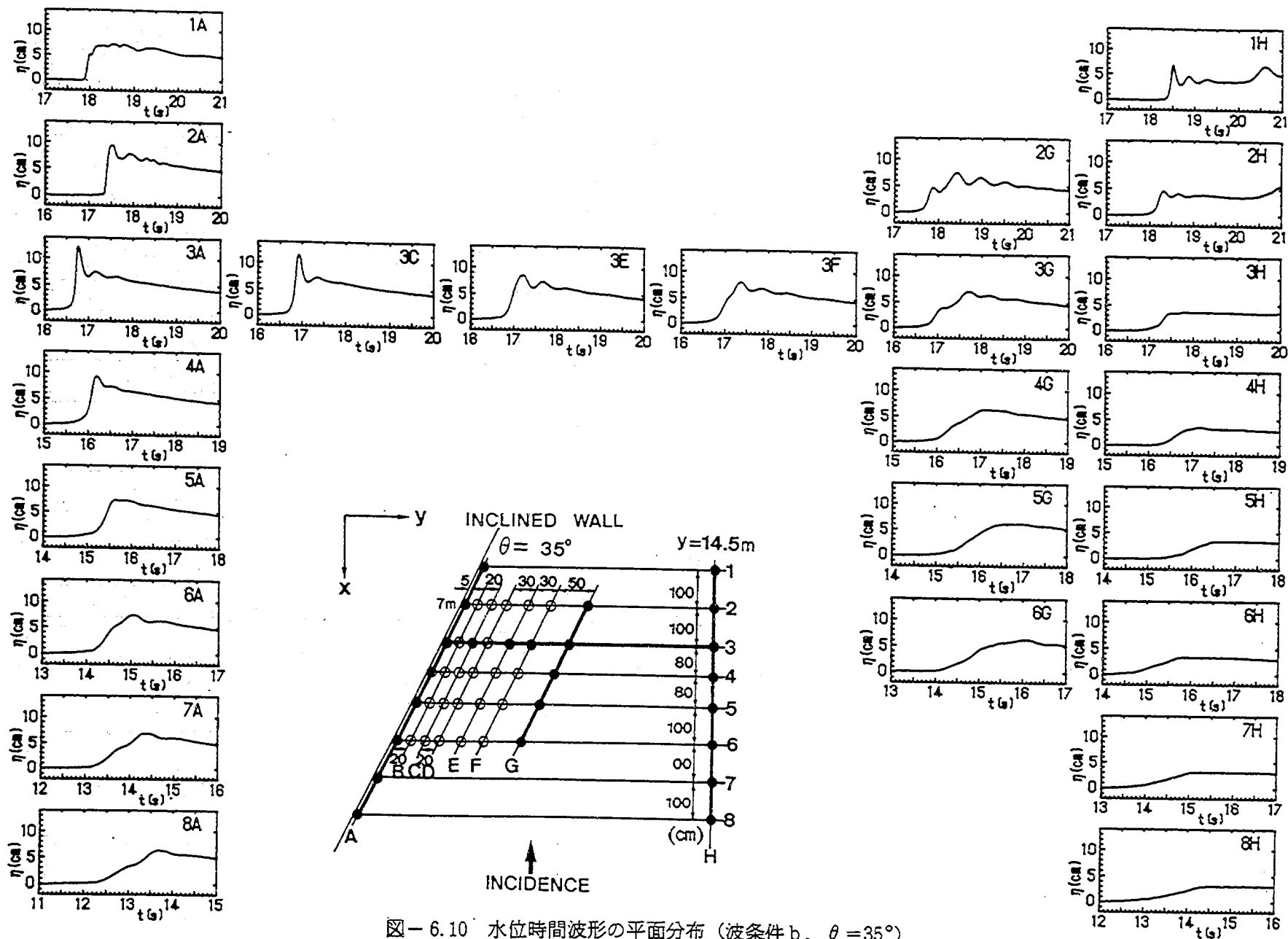


図-6.10 水位時間波形の平面分布 (波条件b, $\theta = 35^\circ$)

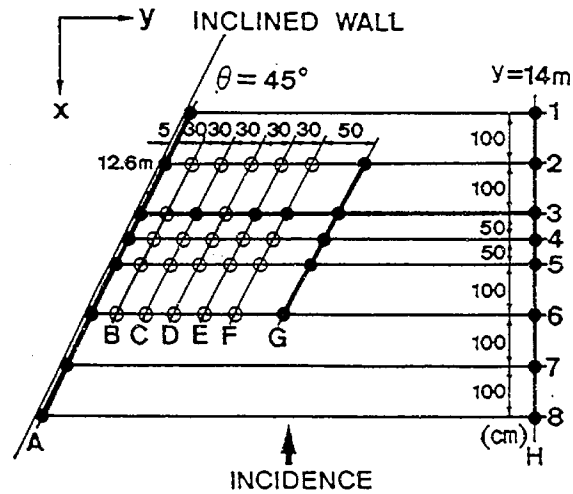


図-6.11 水位時間波形の平面分布 (波条件b, $\theta = 45^\circ$)

H_1 は測点3 Gで $H_1 = 4.2$ cmに対し測点3 Cで $H_1 = 4.9$ cmとあまり変化していない。波形変化より見ると、入射波と反射波は分離していることが明らかであり、 $\theta = 45^\circ$ ではMach stemが生じていないことがわかる。

次に、 H_1 の水路横断方向分布を図-6.12～図-6.16に示す。図の横軸は鉛直境界壁面を基準とする水路横断方向距離 y' である。波高分布は横断方向測線2～6（図-6.4参照）の各々について示した。分裂の生じていないデータについては欠測として扱った。 $\theta = 10^\circ$ の場合（図-6.12）の波高分布は横断方向にほぼ一様であるが、境界壁近傍では測線4から3、測線3から2へと波高が低下している。一方、境界壁の影響が小さいと考えられる $y' > 6$ mの範囲では、測線6より測線3まで波高が増加している。境界壁付近と沖合とで波高変化に差が生ずるのは、壁付近で波高の増加が早く、砕波位置が y' により異なるためである。 $\theta = 20^\circ$ （図-6.13）、 $\theta = 30^\circ$ （図-6.14）のケースでは $\theta = 10^\circ$ の場合に比べて境界壁付近の波高の増加が顕著である。これは、前述したように時間波形に反射波が見られず、入射波と反射波が重なりMach stemが形成されたことに起因する。 $\theta = 35^\circ$ （図-6.15）では波高の高い部分が $y' < 2$ mに限られている。このケースではMach stemの波峰から入射波と反射波の波峰が分離しており（図-6.9（b）参照）、 $y' > 2$ mでの波高は進行波のみの波高を示すと考えられる。そのため、 H_1 の大きな範囲が限定されたと考えられる。 $\theta = 45^\circ$ （図-6.16）では、波高の高い領域が境界壁近傍に限られている。このケースでは水路横断方向に進行する反射波が明瞭に見られ（図-6.11参照）、ビデオ映像でもMach stemの形成は見られなかった。

各ケースの境界壁に沿う測線Aでの H_1 の変化を図-6.17に示す。各ケース共波の進行と共に H_1 が増加し、砕波後低下する傾向は同じである。しかし、反射波峰が見られるようになる $\theta = 35^\circ$ 、およびMach stemが形成されない $\theta = 45^\circ$ の場合では砕波直前の波高増加が急激である。このようにMach stemが形成される場合とされない場合とでは、境界壁付近の波の変形に差があることがわかる。

Milesは鉛直境界壁に沿う波高変化を予測する理論式（6.1）を導き⁶⁾、Melvilleが実験によって検証を行った⁷⁾。図-6.2に示したようにMelvilleの実験の結果、式（6.1）より求まる境界壁位置での波高の無次元パラメータ（ α_w/α_i ）に極大値は生じなかった。本実験では浅水変形が生じるため、Milesらが用いたパラメータをそのままの形で用いることはできない。そこで、ここでは境界壁に沿う測線A上での H_1 の最大値 H_{1w} と、同じ横断測線上の測線Hでの H_1 を入射波高とした H_{1i} との比 H_{1w}/H_{1i} をパラメータに直立壁の傾き角 θ との関係を示す（図-6.18）。同じ横断測線上での比較なので水深 h は等しい。そこで、Milesらと同様に波高水深比 α （ $=H/h$ ）で表示することとして、 α_w/α_i （ $=H_{1w}/H_{1i}$ ）を縦軸とした。波条件による差は見られないが、Melvilleの実験と同じく $\theta = 30^\circ \sim 35^\circ$ で α_w/α_i は一定になる傾向を示す。ただし、Melvilleの実験では α_w/α_i が一定になる値がほぼ2であるのに対し、この実験では3～3.5になっている。これは、本実験が浅水変形を伴った波状段波を対象にしているためと考えられる。

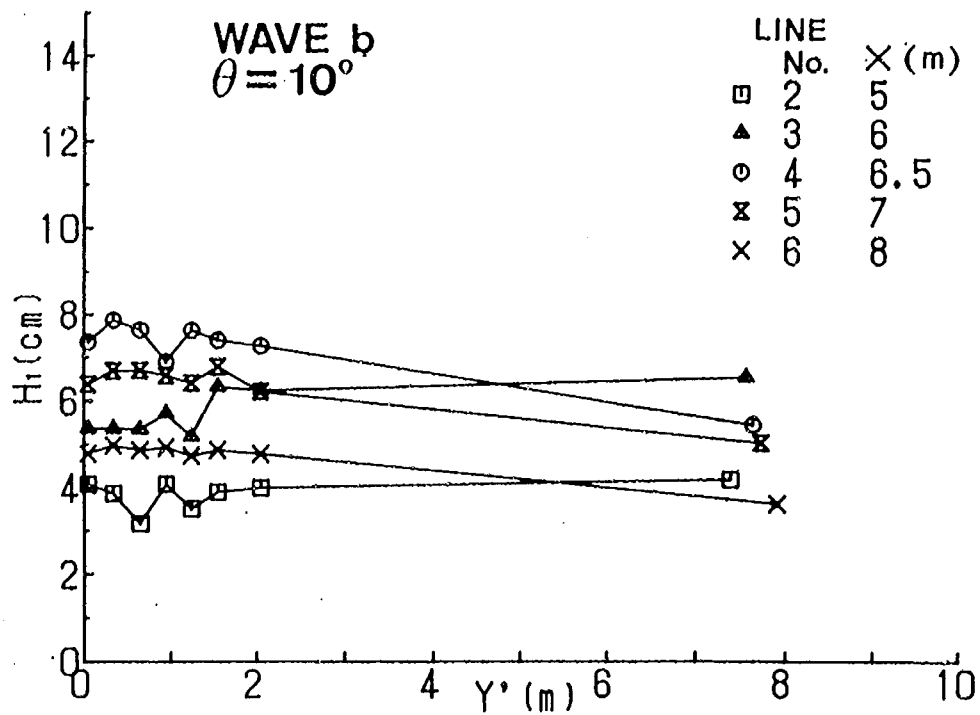


図-6.12 H_1 の水路横断分布 (波条件 b, $\theta = 10^\circ$)

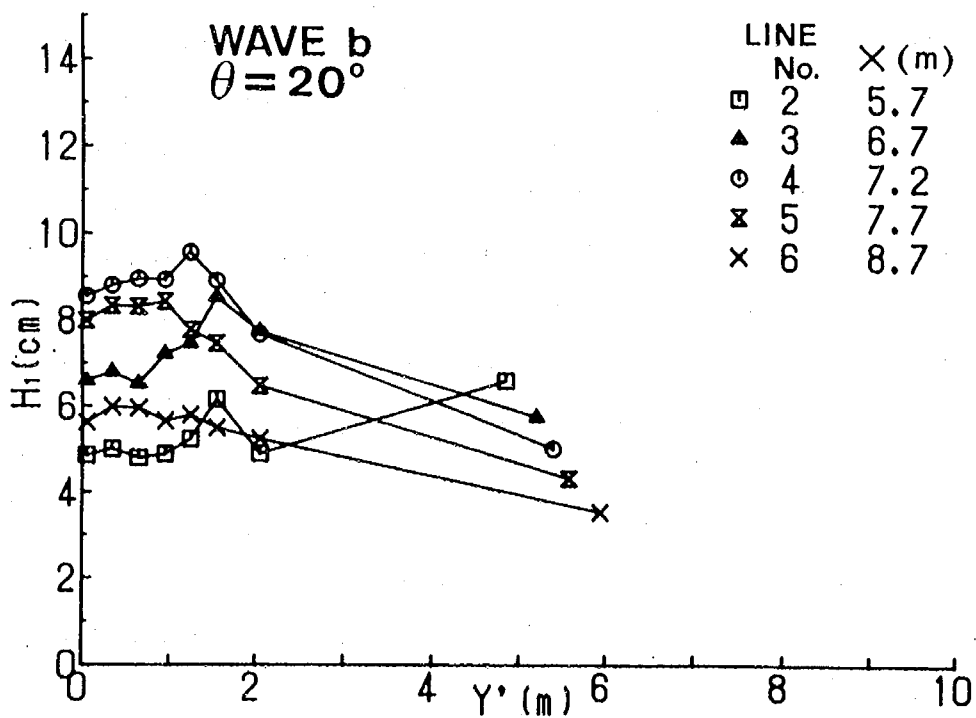


図-6.13 H_1 の水路横断分布 (波条件 b, $\theta = 20^\circ$)

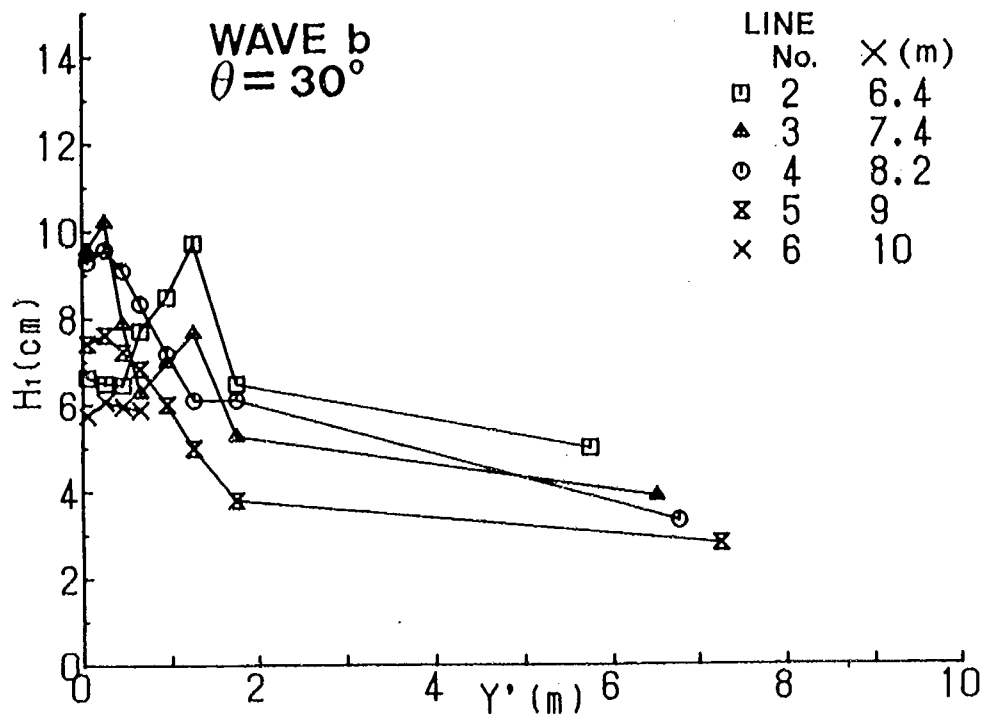


図-6.14 H_1 の水路横断分布 (波条件 b, $\theta = 30^\circ$)

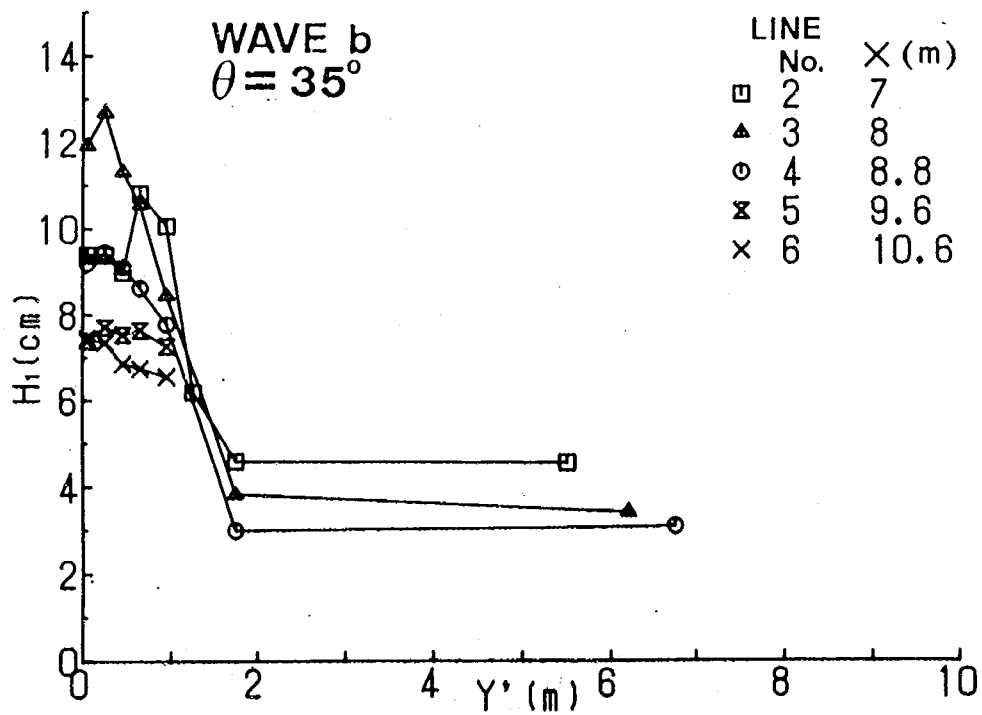


図-6.15 H_1 の水路横断分布 (波条件 b, $\theta = 35^\circ$)

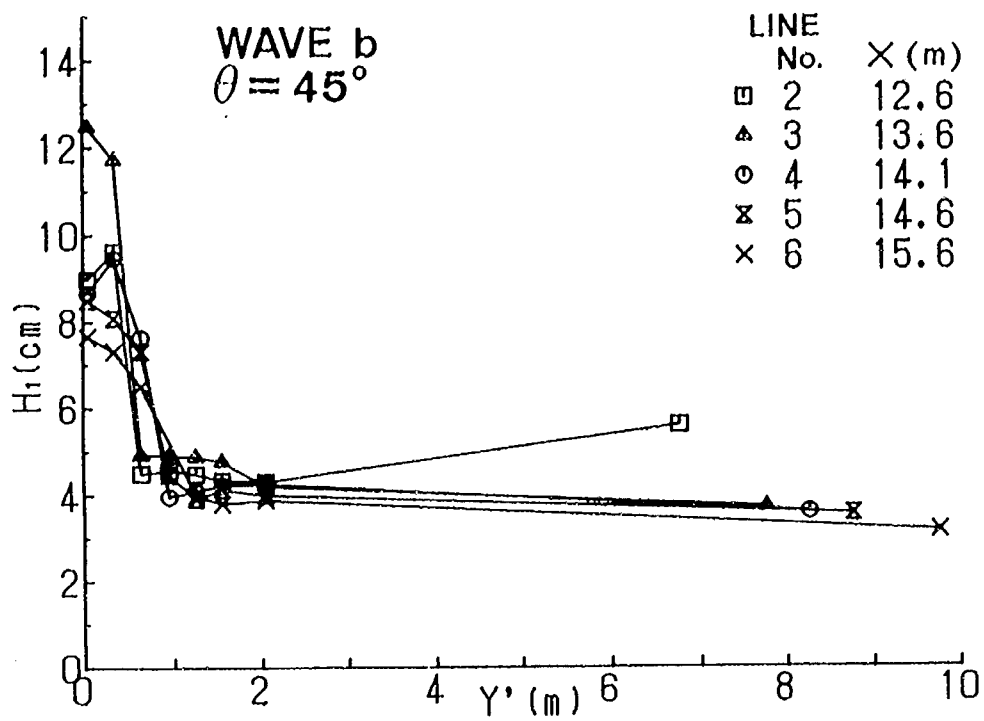


図-6.16 H_1 の水路横断分布 (波条件 b, $\theta = 45^\circ$)

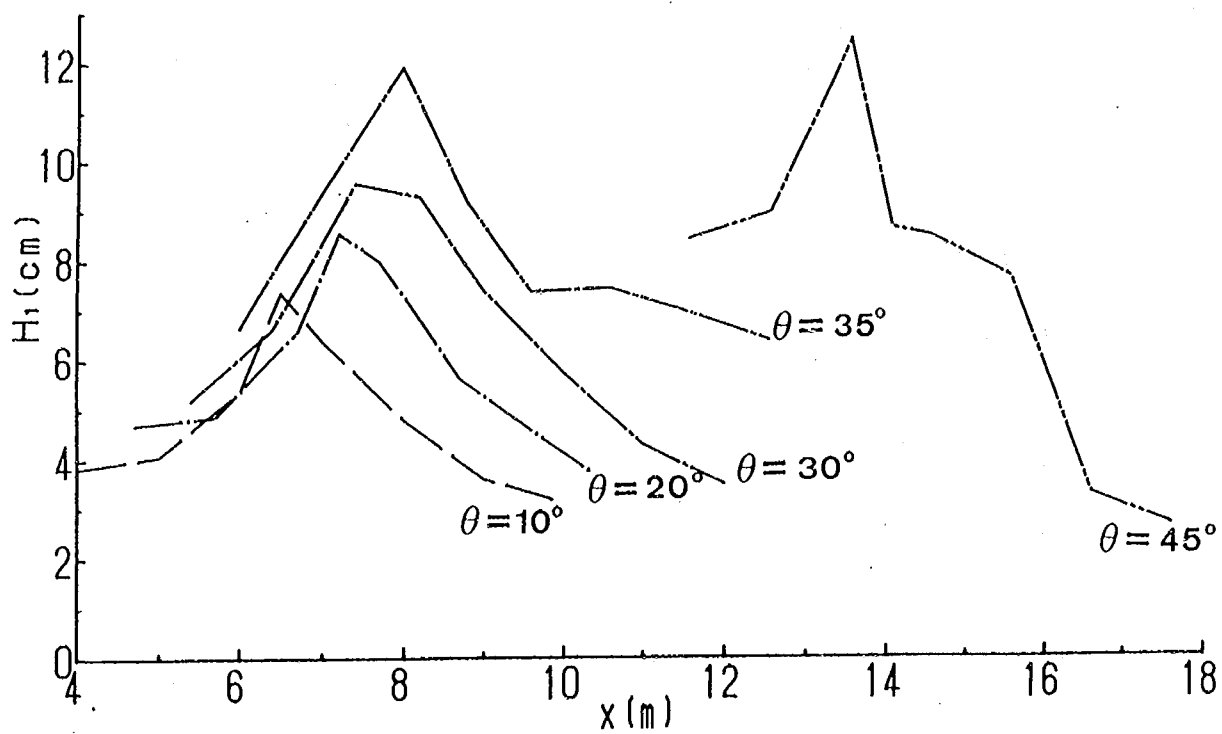


図-6.17 境界壁沿いの H_1 の変化 (波条件 b)

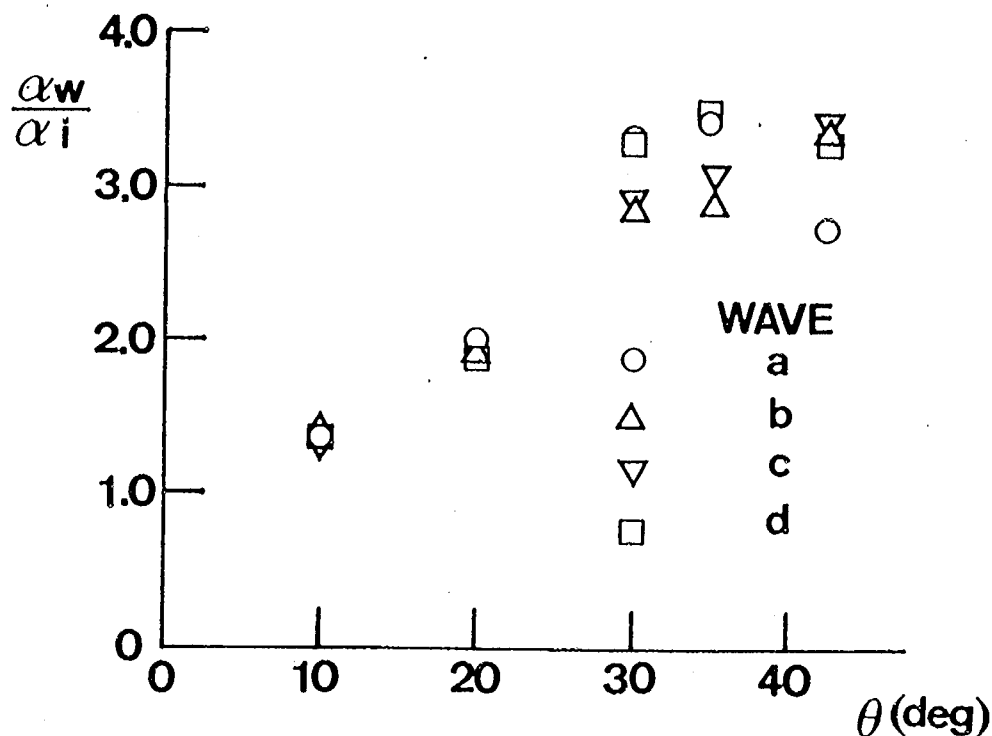


図-6.18 α_w/α_i と θ の関係

6.3.2 波峰線形状の変化

波状段波先端部第一波の波峰線形状の変化を以下に示す。波条件による違いは顕著に表われなかったため、これらの図は代表的波条件としてaを選んで示した。図-6.6～6.8および図-6.10～6.11に示すように、同じ横断測線上でも先端に分裂波がある波形と無い波形が共存するために、波峰位置の定義が問題となる。ここでは各測線の時間波形において、段波先端部に分裂波がある場合にはその頂点位置の時刻を、無い場合でも段波前面の屈曲点が明瞭な場合にはその点の時刻を求め、波峰位置の到達時刻とした。波峰位置が求まらない場合には欠測と扱った。図中の○印が測点を示す。分裂波の生じていない測点を図中「？」で、また、碎波後の段波が通過した測点を黒塗りで示した。なお、測定は全測点同時にではなく、5回程度に分けて行った。実験の再現性は良く、各回の波峰の到達時刻を合わせる際の誤差は平均して±0.1秒程度である。波峰線図は壁に沿った測線Aの測点での波峰到達時刻を基準として、各測点での到達時刻を一時内挿することにより求めた。

Mach stemは境界壁に垂直な波峰を形成する。 $\theta = 10^\circ$ のケース(図-6.19)では、境界壁近くで波峰線が進行方向に突出し境界壁とほぼ垂直になっており、弱いながらMach stemの形成がみられる。境界壁と波峰線がなす角度は約 90° である。境界壁から離れ y が大きくなるにしたがい、波峰線は徐々に横断方向に平行になる。 $\theta = 20^\circ$ のケース(図-6.20)では、境界壁近くでの波峰の突出が $\theta = 10^\circ$ に比べ明瞭になる。この図でも境界壁と波峰線のなす角度は約 90° である。波条件の違いにより入射波高が大きいケースでは碎波位置が沖にずれるものの、波峰線のパターンは各ケースで大きな差はなかつ

た。 $\theta = 30^\circ$ のケース（図-6.21）になると、境界壁に垂直な波峰線と水路横断方向に平行な波峰線との境界がさらに明瞭となり、Mach stemの波峰の形成が明らかである。その一方で、境界壁に垂直な波峰を有するMach stemの領域は、 $\theta = 20^\circ$ に比べ狭くなっていることがわかる。また、入射波高が大きいケースほど「？」の測点数が多かった。これは、境界壁付近での分裂および砕波変形が急速になり（図-6.8参照）、境界壁付近と境界壁の影響が小さい領域とで波の変形に大きな差を生じたため、分裂波の生じる測点が境界壁付近に限られてきたことによる。この傾向は $\theta = 35^\circ$ のケース（図-6.22）ではさらに顕著となる。この図では冲向きに凸形をした波峰線が描かれている。これは、波の変形速度が境界壁からの距離により異なるため、波峰の識別が困難になったことによる。図-6.10に示したように、 $\theta = 35^\circ$ の場合ではMach stemの波峰から進行波と反射波に分離する部分で図-6.23に模式的に示す波形となる。この場合、先端部での突出（図中の矢印部分）は入射波峰の一部を表わし、先端部第一波の波峰は主に反射波峰を表わすと考えられる。そのため、先端部第一波の波峰位置は入射波のみの波峰位置よりも明らかに位相が遅れていると考えられる。そのため、冲向きに凸形の波峰線となった。 $\theta = 45^\circ$ の場合（図-6.24）でも、一部冲向きに凸形の波峰線が見られるが、ほぼ横断方向に直線的な波峰線形状になっている。 $\theta = 45^\circ$ の場合では反射波の波峰も明瞭なので、反射第一波の波峰線を同様の方法で図-6.25に示した。波峰線は岸沖方向にはほぼ直線的であり、 $\theta = 45^\circ$ の境界壁によりMach stemが形成されない通常の反射が生じたことがわかる。

次に、Mach stemの領域の広がりについて検討する。Milesは水平床での孤立波に対するMach stem領域の広がり角 ψ_* （図-6.1参照）を理論的に求め、式（6.2）を示した。Melvilleの実験結果も定量的にはやや異なるが、定性的にはこの理論式と適合している⁹⁾。横軸に鉛直壁の傾き角度 θ 、縦軸に ψ_* をとって整理した結果が図-6.26である。ただし、図-6.19～6.22および図-6.24に示した波峰線図からは直接 ψ_* を求めることができない。そこで、以下では次のようにして ψ_* を求めた。まず、Mach stemの出発点を、波の進行方向と小さな角度を持って交差する鉛直境界壁の沖端とする。次に、Mach stemと水路横断方向に平行な入射波の波峰線の境界点（波峰線の屈曲点）が明瞭な砕波直前の波峰線を用い、その境界点と境界壁の沖端、すなわちMach stemの出発点を結んだ直線がMach stemの広がりを表わすとする（図-6.1参照）。そして、その直線と鉛直境界壁とがなす角を ψ_* とした。図より、 θ が大きくなるほど ψ_* は直線的に減少し、 θ に関して式（6.2）と同じ傾向を示すことがわかる。入射波高が ψ_* に与える効果は明瞭ではない。これは、浅水変形が同時に生じていること、Mach stemの変形が段波部の変形の影響を受けることによると考えられる。さらに、 ψ_* の定義法にも一部問題があろう。実験は斜面上を進行する波状段波を対象としており、理論式をそのまま適用できない。しかし、定性的意味において実験結果は式（6.2）と同様の傾向を示すことがわかった。

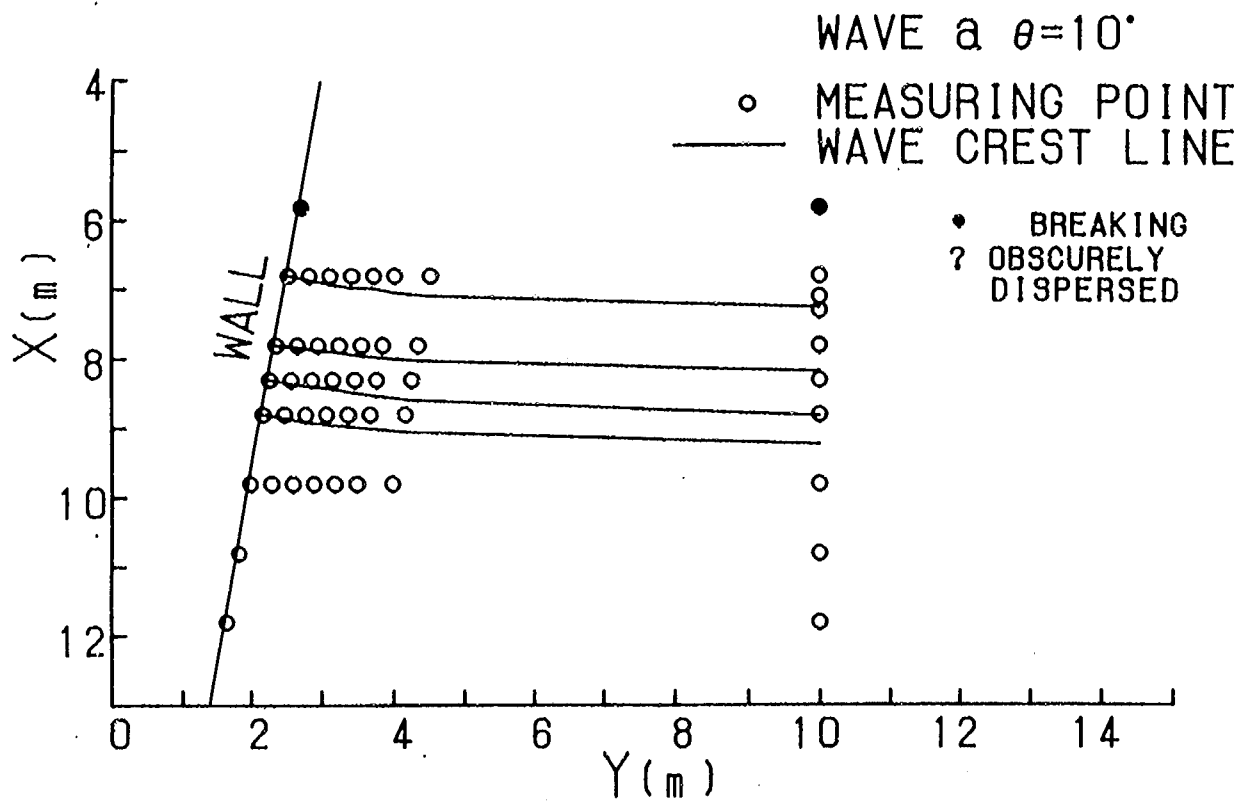


図-6.19 先端部第一波の波峰線形状 (波条件 α , $\theta=10^\circ$)

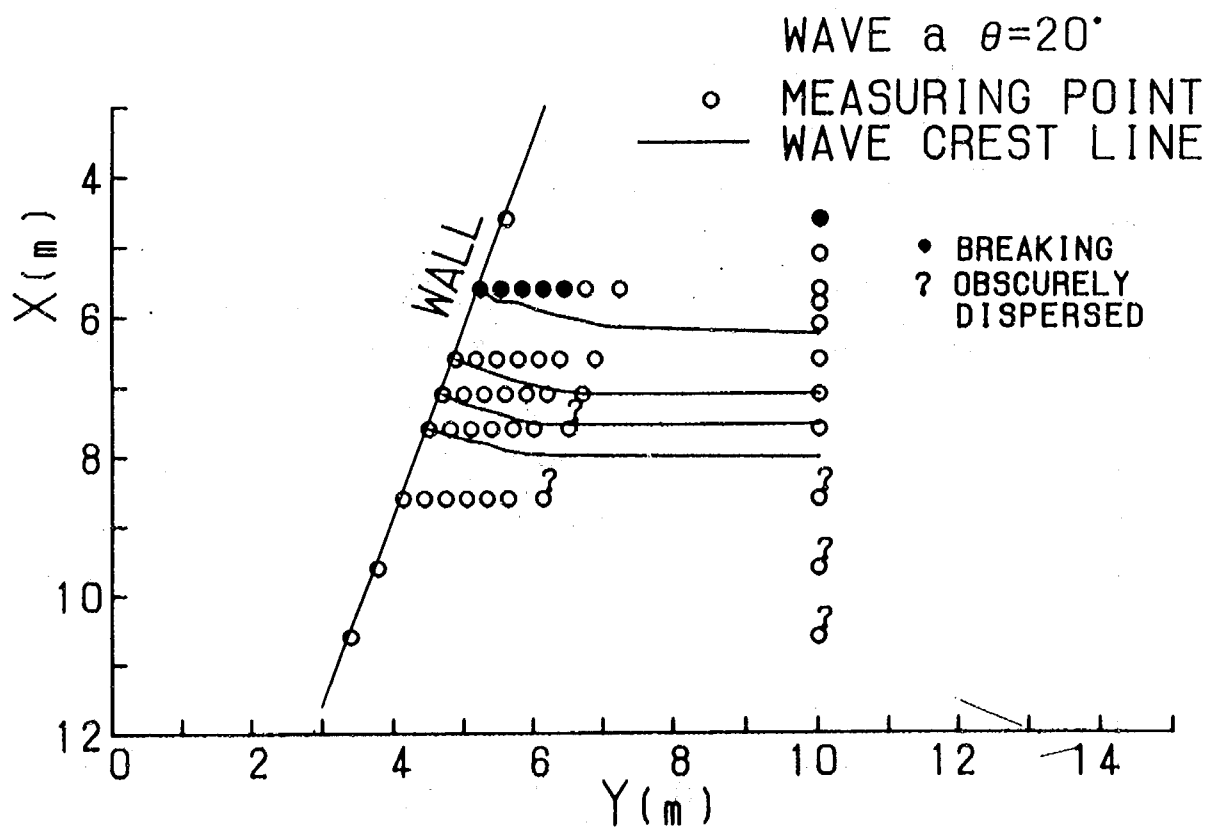


図-6.20 先端部第一波の波峰線形状 (波条件 α , $\theta=20^\circ$)

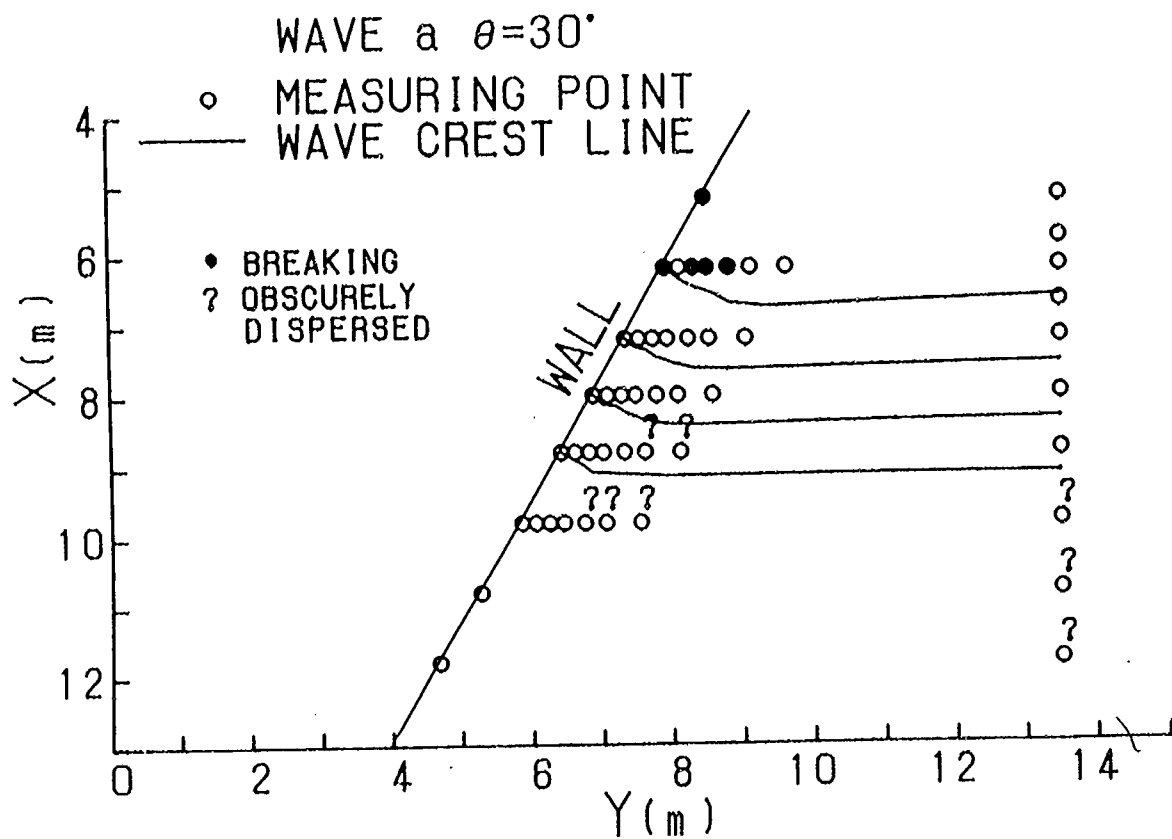


図-6.21 先端部第一波の波峰線形状 (波条件 a, $\theta = 30^\circ$)

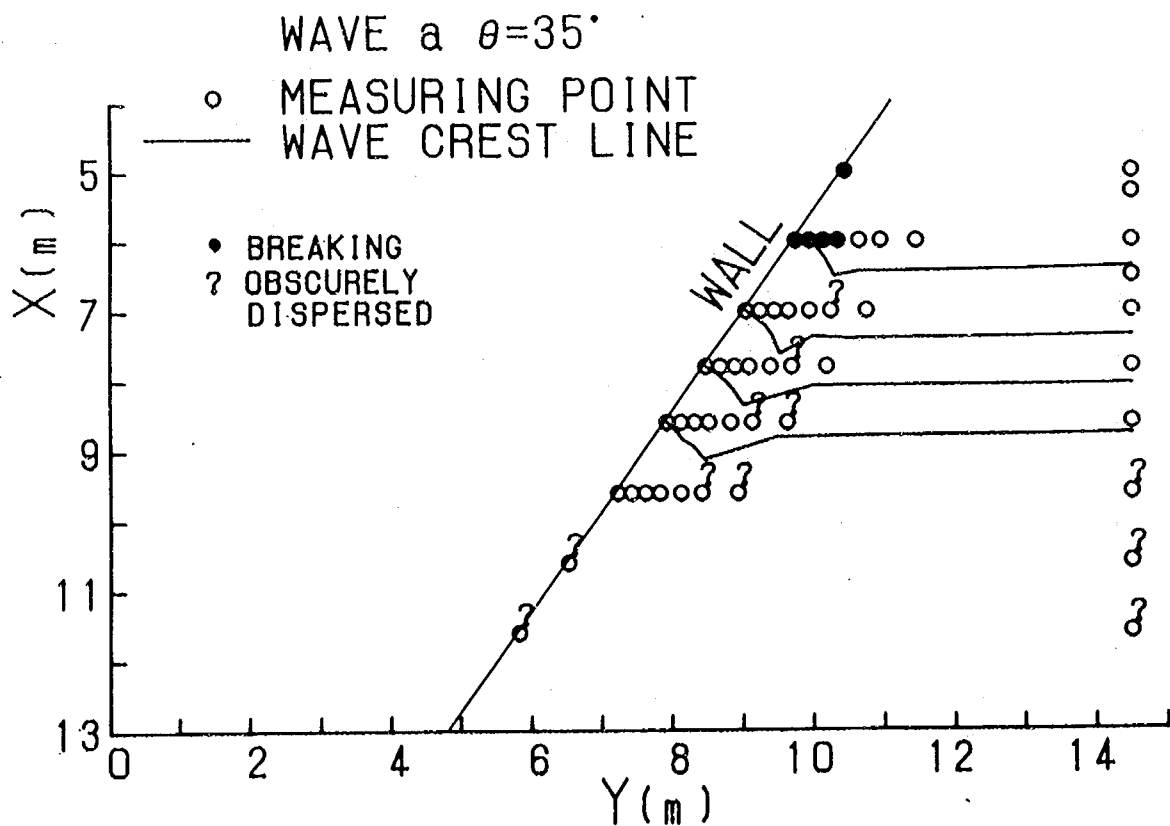


図-6.22 先端部第一波の波峰線形状 (波条件 a, $\theta = 35^\circ$)

COEXISTENCE OF PROPAGATING
AND REFLECTED WAVE

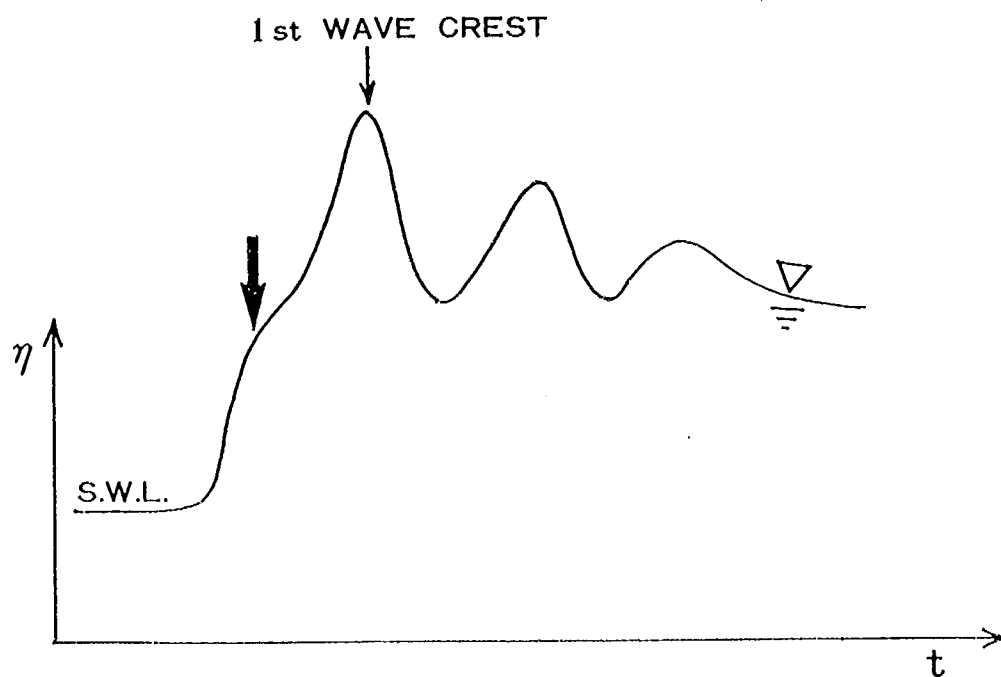


図- 6.23 入射波と反射波が分離する部分の波形模式図

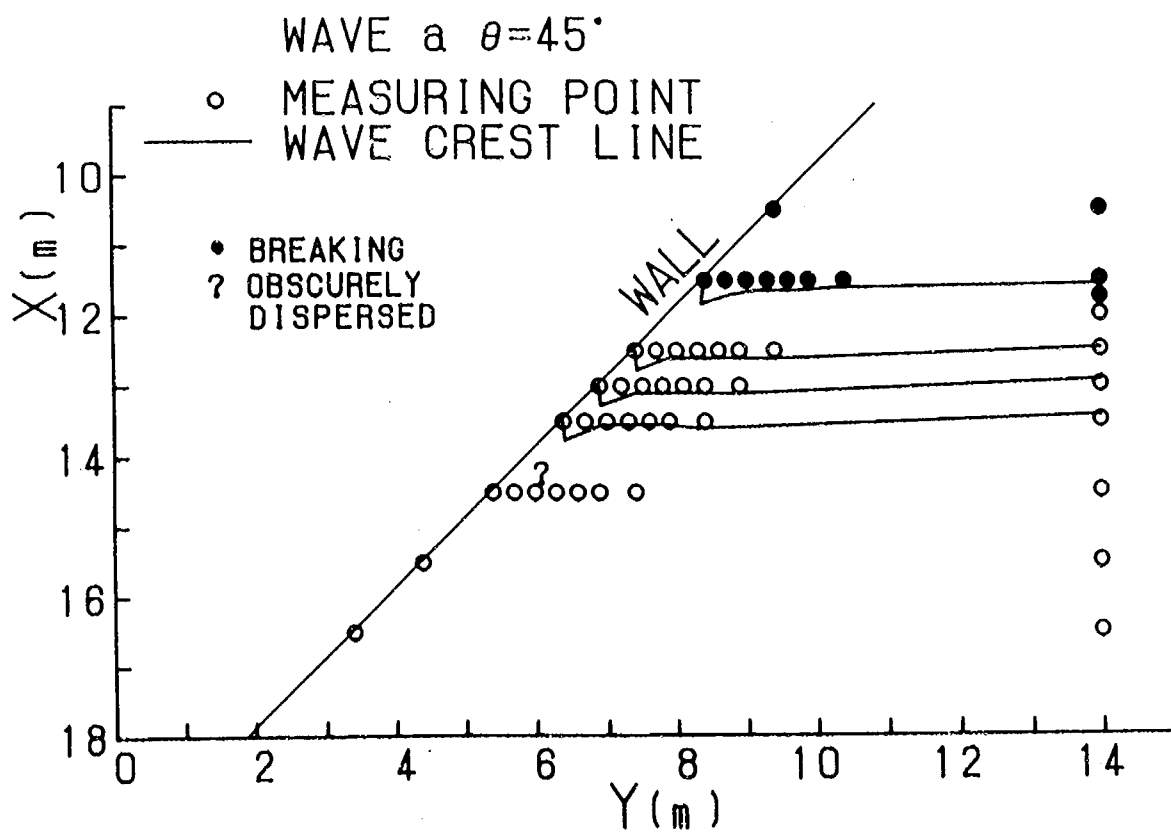


図- 6.24 先端部第一波の波峰線形状 (波条件 a, $\theta = 45^\circ$)

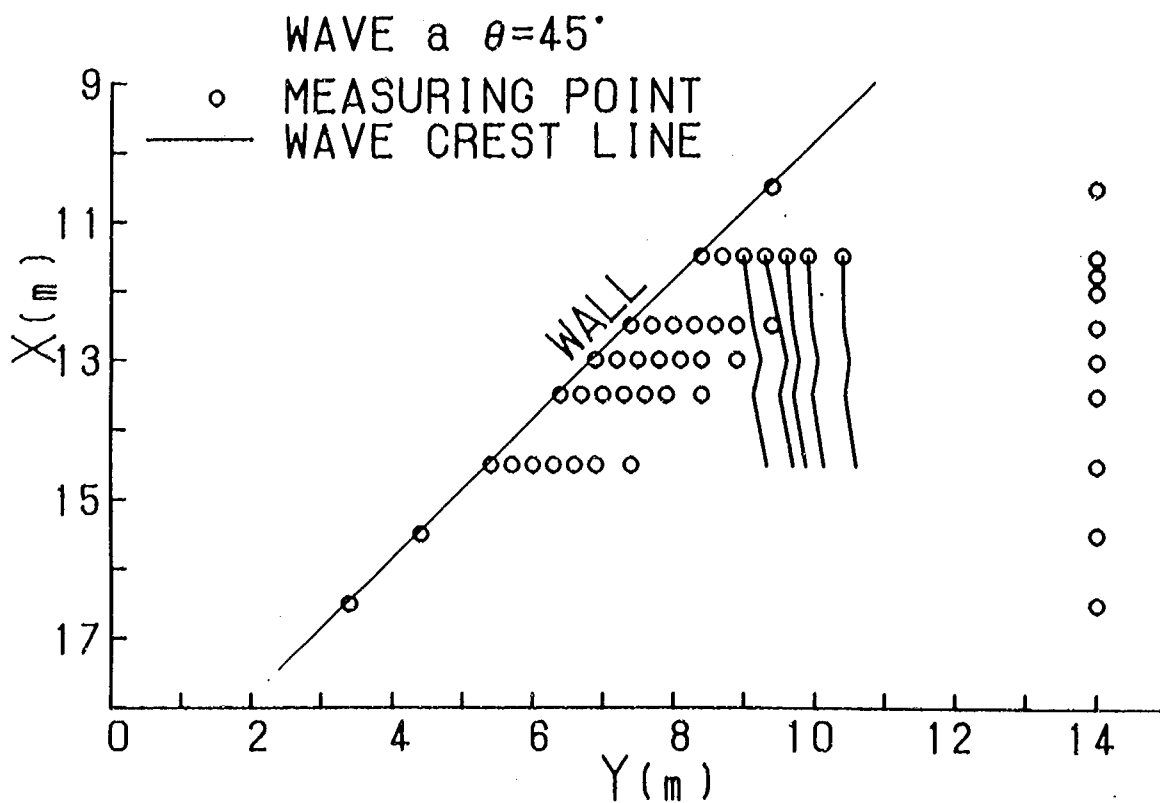


図-6.25 反射波の波峰線形状 (波条件 a, $\theta=45^\circ$)

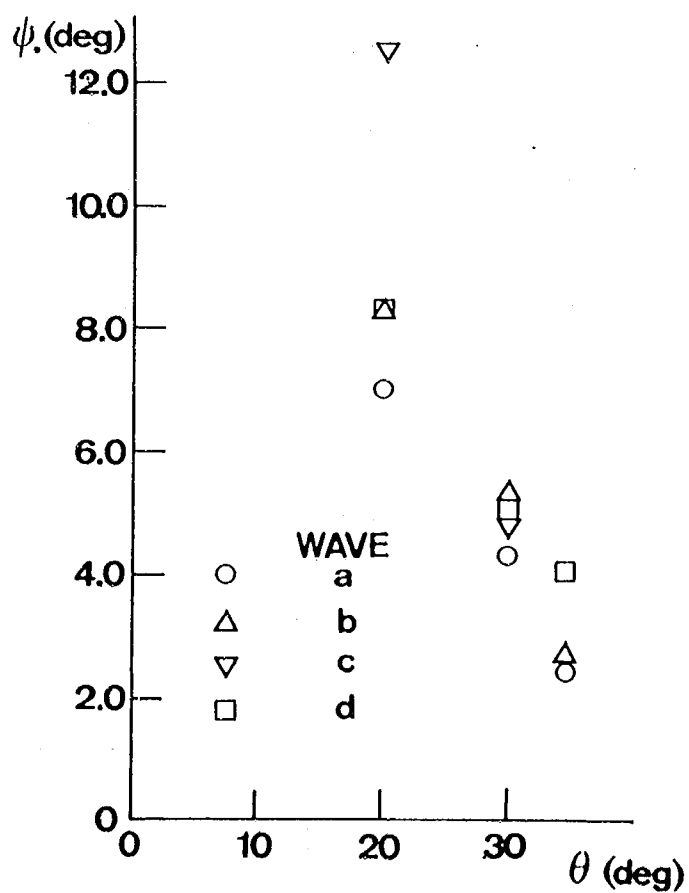


図-6.26 ψ_* と θ の関係

6.4 結 論

1 / 100 勾配一様斜面上を進行する波状段波を対象にして、その先端部第一波に着目して Mach stem の挙動を明らかにするための実験を行った。実験によって得られた主な結論をまとめると以下のである。

- ① Mach stem は $\theta \leq 35^\circ$ のケースで形成された。 $\theta = 35^\circ$ のケースでは Mach stem の波峰から分離する入射波と反射波の波峰が見られた。このケースでは、波高の大きな範囲が境界壁付近に限定された。 $\theta = 45^\circ$ のケースでは水路横断方向に進行する反射波が明瞭に見られ、Mach stem は形成されなかった。
- ② 本実験での Mach stem の形成は浅水変形を伴うため、水路横断方向測線上で、先端に分裂波を有する波形と分裂波の無い波形が共存するなど、2 次元的に複雑な変形を示した。
- ③ Mach stem から入射波と反射波とに分離する波峰が見られた $\theta = 35^\circ$ のケース、および Mach stem が形成されなかった $\theta = 45^\circ$ のケースの境界壁に沿う波高変化によると、砕波直前の波高増加が $\theta \leq 30^\circ$ のケースに比べ $\theta = 35^\circ$ 、 45° の場合は急激であった。
- ④ 水平床上での孤立波を対象とした Miles の理論式 (6.1) と実験結果を比較した。実験では浅水変形が生じるため、Miles が用いたパラメータをそのままの形で用いることはできない。そこで、境界壁に沿う測線 A 上の各測点で得られた H_1 の最大値 H_{1w} と、同じ横断測線上で境界壁から最も離れた測線 H での H_1 を入射波高とした H_{1i} との比 H_{1w}/H_{1i} ($= \alpha_w/\alpha_i$) をパラメータとした。波条件による差は見られなかったが、Melville の実験と同じく $\theta = 30^\circ \sim 35^\circ$ で α_w/α_i は一定になる傾向を示し、Miles の理論式で求まる極大値は生じなかった。ただし、Melville の実験では α_w/α_i が一定になる値はほぼ 2 であるのに対し、本実験での値は 3 ~ 3.5 であった。
- ⑤ 水平床上での孤立波を対象とした Mach stem 領域の広がり角 ψ_* に関する Miles の理論式 (6.2) と実験結果を比較した。実験では、波の進行方向とある小さな角度を持って交差する境界壁の沖端 (Mach stem の出発点) より、砕波直前の波峰線における Mach stem と入射波の波峰の境界点 (波峰線の屈曲点) の間を結び、その直線と境界壁がなす角を ψ_* とした。実験結果は定性的に式 (6.2) と同様の傾向を示し、 ψ_* は θ が大きくなるほど直線的に減少し、 θ に関して式 (6.2) と同じ傾向を示した。入射波高が ψ_* に与える影響は明瞭でなかった。

7. Edge boreに関する実験

7.1 実験の目的

Chen⁹⁾は図-7.1に示すように、波の進行方向とある小さな角度を持って交差する斜面を設置し、その交差角 θ と斜面の勾配 β を変えて波の伝播状況を調べた。その結果、edge boreは θ と β により次の3つの形態に分類された(図-7.2)。

- ① Edge bore先端部に渦を形成し進行する形態
- ② Edge bore先端部に渦を形成せず、先端が激しく混合して進行する形態
- ③ Edge bore先端部に渦を形成せず、あまり混合もせず進行する形態

さらに、Chenは θ と β をパラメータとして壁面での砕波、非砕波の区分を示すとともに、edge boreの背後には幾筋もの小さな波列(以下rippleと呼ぶ)が形成されることを示した(図-7.1参照)。

本研究の実験目的は、一様斜面上を進行する波状段波により発生するedge boreの挙動を明らかにすることにある。Chenは $\beta \geq 20^\circ$ ($\tan \beta > 1/3$)と急勾配な壁面を対象にした実験を行った。ここでは砂浜海岸を考慮して緩勾配の斜面も実験対象に加え、 $1/30 \leq \tan \beta \leq 1/5$ の範囲で実験を行った。また、edge boreが形成されず通常の屈折が生じるようになる $\tan \beta$ の限界についても検討した。実験では、水位時間波形や波先端を連ねた波先線の変形を平面的に把握するため、1ケース当たり100点程度の測点を配置した。また、ビデオによりedge boreの形成状況を撮影した。

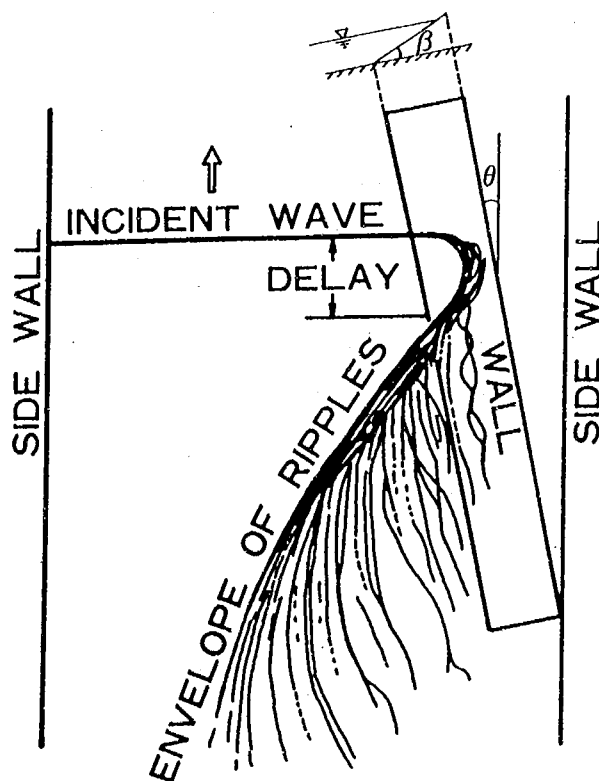
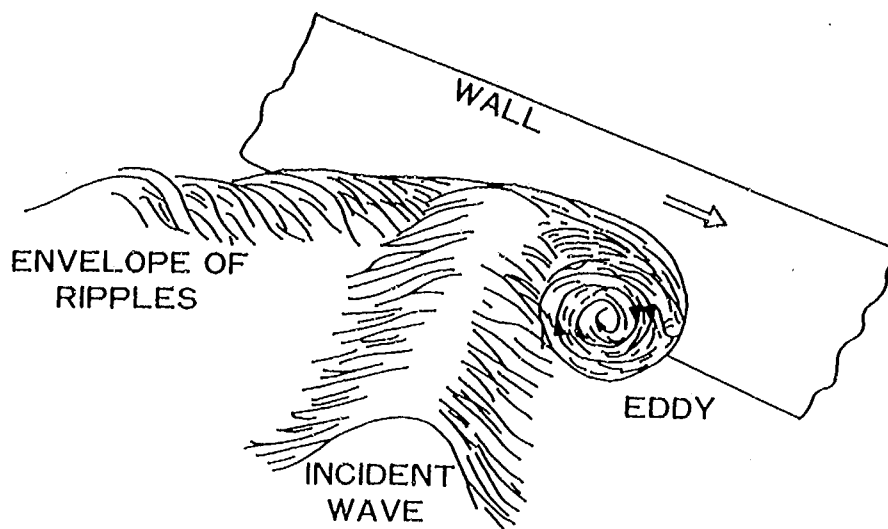
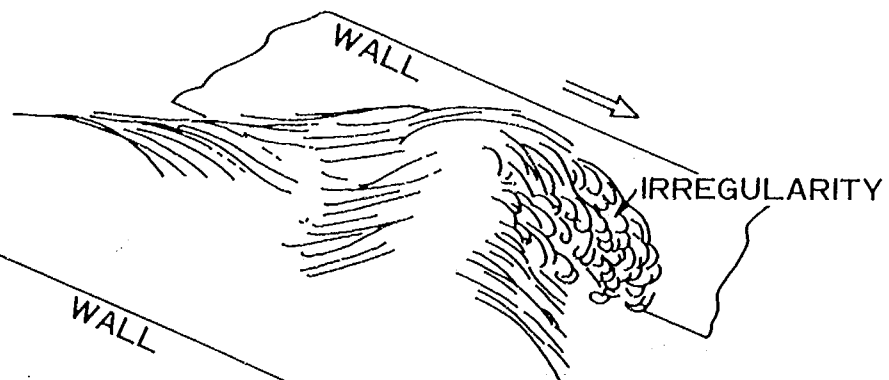


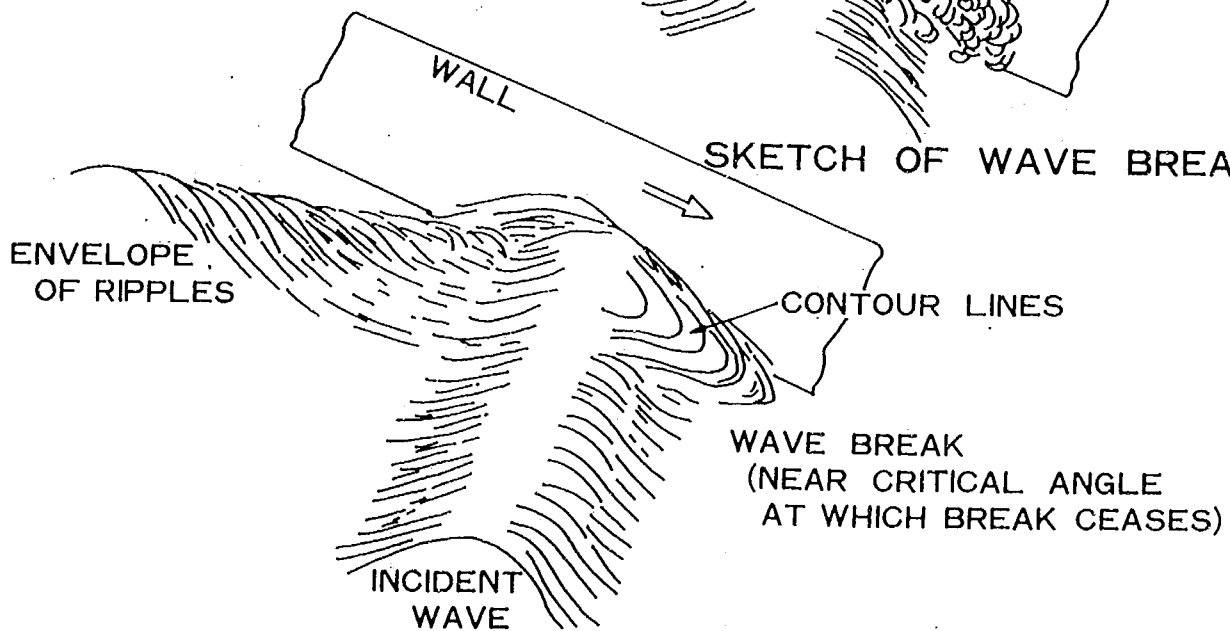
図-7.1 Chenによる実験状況(BEB, 1961)



SKETCH OF BREAK WITH EDDY



SKETCH OF WAVE BREAK



SKETCH OF BREAK WITHOUT EDDY

図-7.2 Chenによる edge bore の形態

7.2 実験方法

実験は、津波水槽内にラワン合板を用いて波の進行方向に対する交差角 θ ，水平となす角 β の斜面を設置して行った。斜面模型は θ を 20° と 30° の2ケース， $\tan \beta$ を $1/5$ ， $1/10$ ， $1/20$ ， $1/30$ の4ケース変え，それらを組み合わせて合計で7ケース設定した（表－7.1）。図－7.3に斜面の設置状況を示す。図中破線で示す汀線位置が斜面の法尻と平行でないのは，水路床が $1/100$ 勾配を持つためである。静水深 h_s は全模型共 $x = 0$ m で $h_s = 0$ とした。起潮装置前面の水路沖端での水位は 29.85 cm である。

実験は b，c 2 ケースの波条件を用いて14ケース行った。測点配置の一例（模型 Case. 1，波条件b）を図－7.4に示す。水位波形の測定は，図に示すように1ケース当たり約100点の測点を格子状に配置して行った。さらに入射波の波形変化を知るため，斜面と向かい合う水路側壁沿いに測点を設定した。測定には容量式波高計を用いた。また，波の進行状況をビデオにより撮影した。

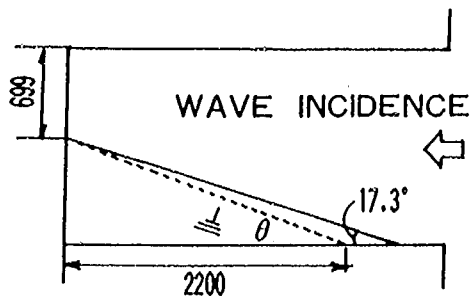
7.3 実験結果

7.3.1 水位時間波形の空間変化

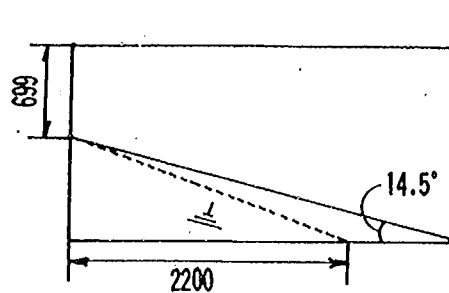
水位時間波形の測定例を図－7.5～7.8に示す。これらは $\theta = 30^\circ$ ，波条件cの下で壁面の勾配 $\tan \beta$ のみを $1/5$ から $1/30$ の間で変化させたケースの結果である。各図では基準座標系における横断方向距離 y ，および汀線からの横断方向距離 y' により測定位置を示した。図には，汀線に平行な測線を3測線（汀線上およびその陸側と沖側の測線）と水路側壁に沿う測線（ $y = 14.0$ m）の計4測線上での測定結果を示した。 $\tan \beta = 1/5$ のケース（図－7.5）では，汀線と重なる測線（ $y' = 0$ ）上での最高水位が $x = 5.0$ m で生じている。その値は 10.0 cm で， $y = 14.0$ m 測線上の $x = 5.0$ m 地点の最高水位

表－7.1 模型条件（実験Ⅱ）

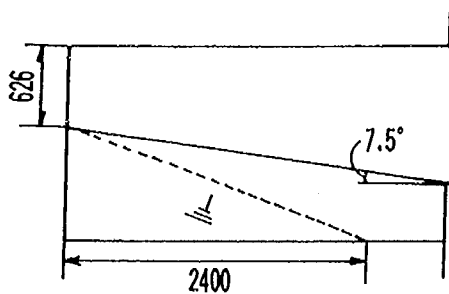
MODEL CASE	$\tan \beta$	$\theta (^\circ)$
1	$1/5$	20
2	$1/10$	20
3	$1/20$	20
4	$1/5$	30
5	$1/10$	30
6	$1/20$	30
7	$1/30$	30



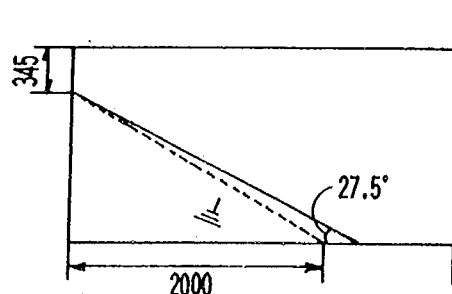
CASE 1
 $\theta=20^\circ$ $\tan \beta=1/5$



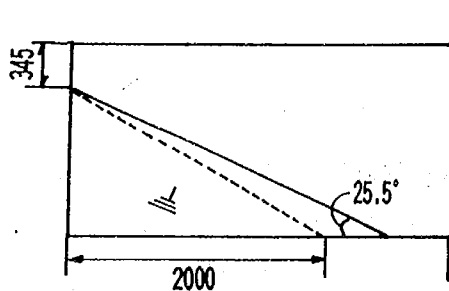
CASE 2
 $\theta=20^\circ$ $\tan \beta=1/10$



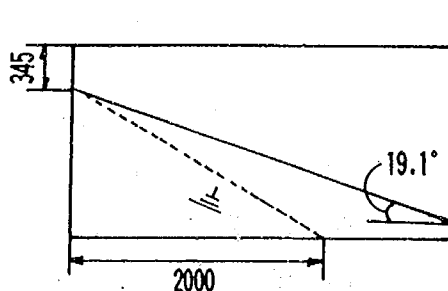
CASE 3
 $\theta=20^\circ$ $\tan \beta=1/20$



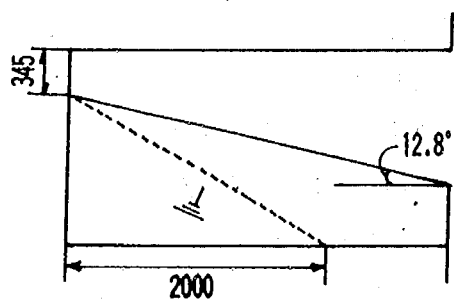
CASE 4
 $\theta=30^\circ$ $\tan \beta=1/5$



CASE 5
 $\theta=30^\circ$ $\tan \beta=1/10$



CASE 6
 $\theta=30^\circ$ $\tan \beta=1/20$



CASE 7
 $\theta=30^\circ$ $\tan \beta=1/30$

----- SHORELINE
 UNIT: cm

図-7.3 模型設置状況

・ MEASURING POINT

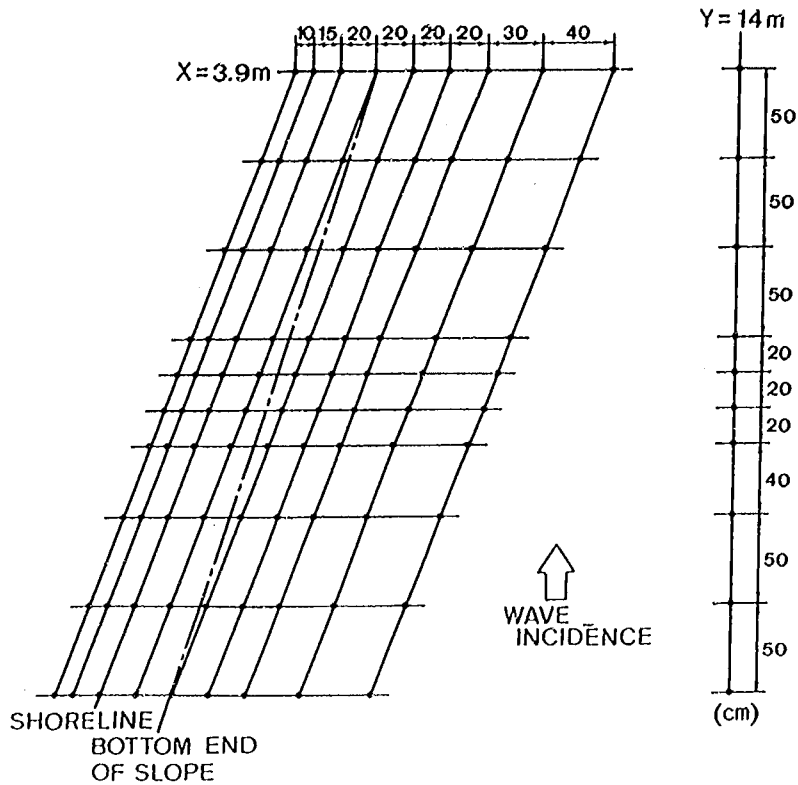


図-7.4 測点配置

より約2倍大きい。汀線上、波の進行方向への波形変化を調べるために、 $x = 8.8 \text{ m} \sim 5.0 \text{ m}$ の間で、反射波と考えられる波峰に矢印をつけて示した。入射波に反射波が追いつき、 $x = 4.6 \text{ m}$ では両者が重なったことがわかる。その後、 $x = 4.2 \text{ m}$ と 3.0 m の間では先端部に高さ $2 \sim 4 \text{ cm}$ の小さな波峰が見られる。これは、Chenの模式図(図-7.2)に示されるように、陸側斜面上で突出した波先部の水流が汀線方向に回り込んだことにより形成されたと考えられる。 $\theta = 20^\circ$ 、波条件cの場合の回り込み流れの状況を写真-7.1に示す。これは水路上方より撮影したものである。さらに、汀線上、 $x = 4.2 \text{ m}$ での小さな波峰の形成に対応して、陸上の $y' = -0.4 \text{ m}$ 線上では沖合より $x = 4.6 \text{ m}$ まで上昇していた最高水位が、 $x = 4.2 \text{ m}$ において低下している。これは、陸上での波高が増加したことにより波速が増し、その結果陸上の波峰が進行方向に突出して、斜面を下る下降流、すなわち回り込み流れが発生するというパターンに対応すると考えられる。下降流が発生したため、陸上での波高が低下したと考えられる。 $\tan \beta = 1/5$ 、 $\theta = 20^\circ$ でも edge bore 形成状況はほとんど同じであった。写真-7.2, 7.3には $\theta = 20^\circ$ 、波条件bの場合での edge bore の状況を示す。写真-7.2は回り込み流れ発生直後、7.3はその後 edge bore が成長した状況を示している。

$\tan \beta = 1/10$ のケース(図-7.6)では、 $y = 14.0 \text{ m}$ 測線上での段波の波高 H は波の進行に伴い 3 cm から 5 cm へと増加している。一方、汀線上($y' = 0 \text{ m}$)の全測点では、時間波形の後半に $8 \sim 9 \text{ cm}$ の水位上昇が見られる。 $y = 14.0 \text{ m}$ 測線上の段波の H が $3 \sim 5 \text{ cm}$ であることから、この水位上昇は $1/10$ 勾配斜面からの反射波と考えられる。さらに、 $y' = 1.4 \text{ m}$ 、 $x = 4.0 \text{ m}$ の測点で $t = 21.4 \text{ s}$ に見

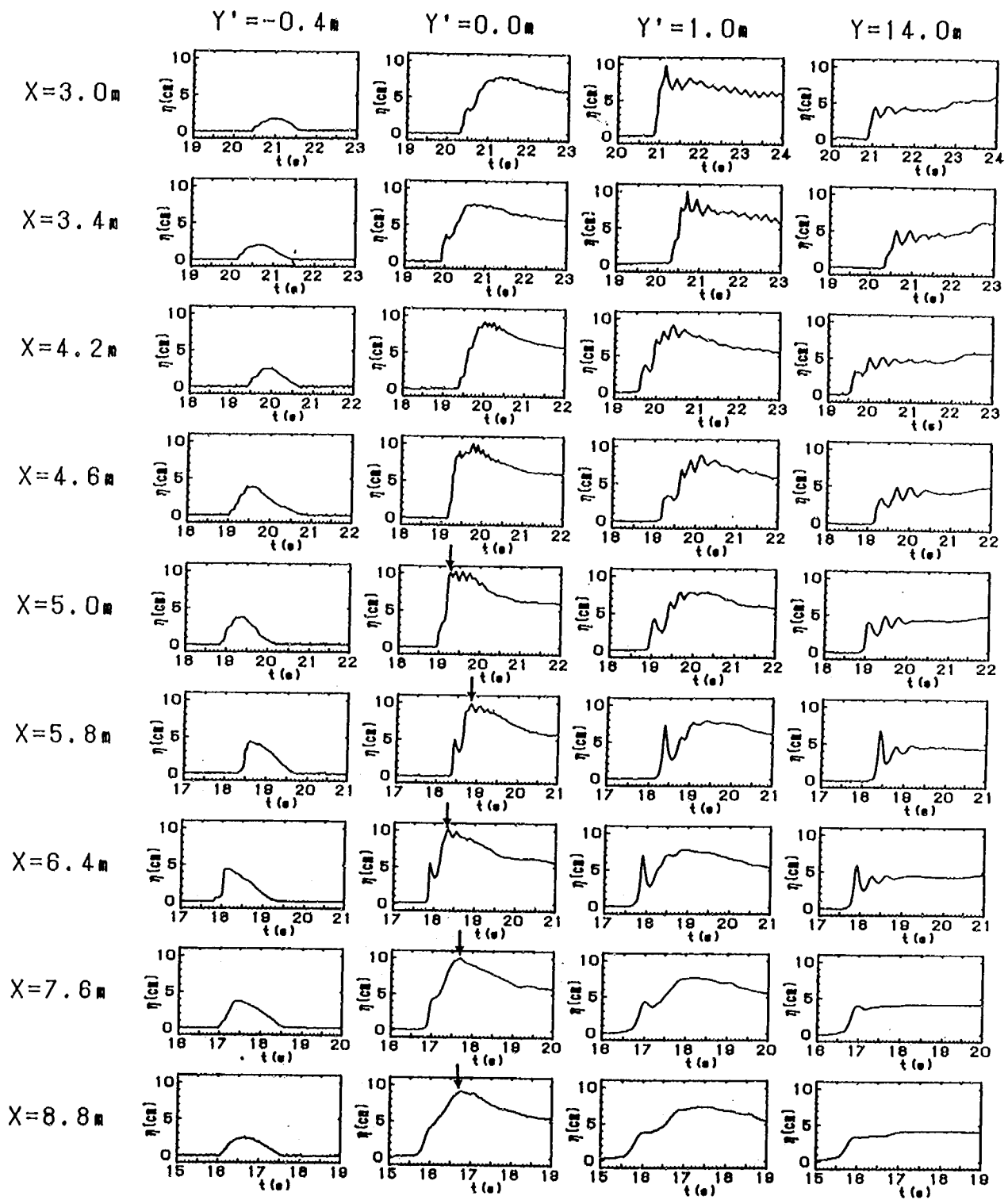


図-7.5 水位時間波形の平面分布 (波条件 c , $\theta = 30^\circ$, $\tan \beta = 1/5$)

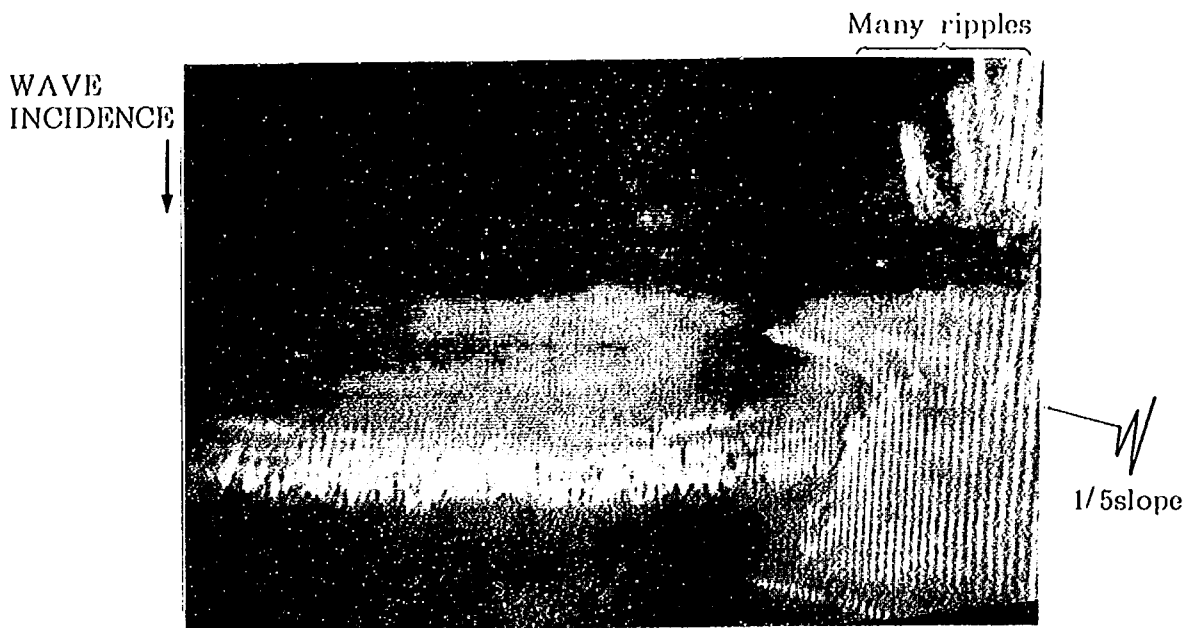


写真 - 7.1 水路上方より見た edge bore の状況 (波条件 c, $\theta = 20^\circ$, $\tan \beta = 1/5$)

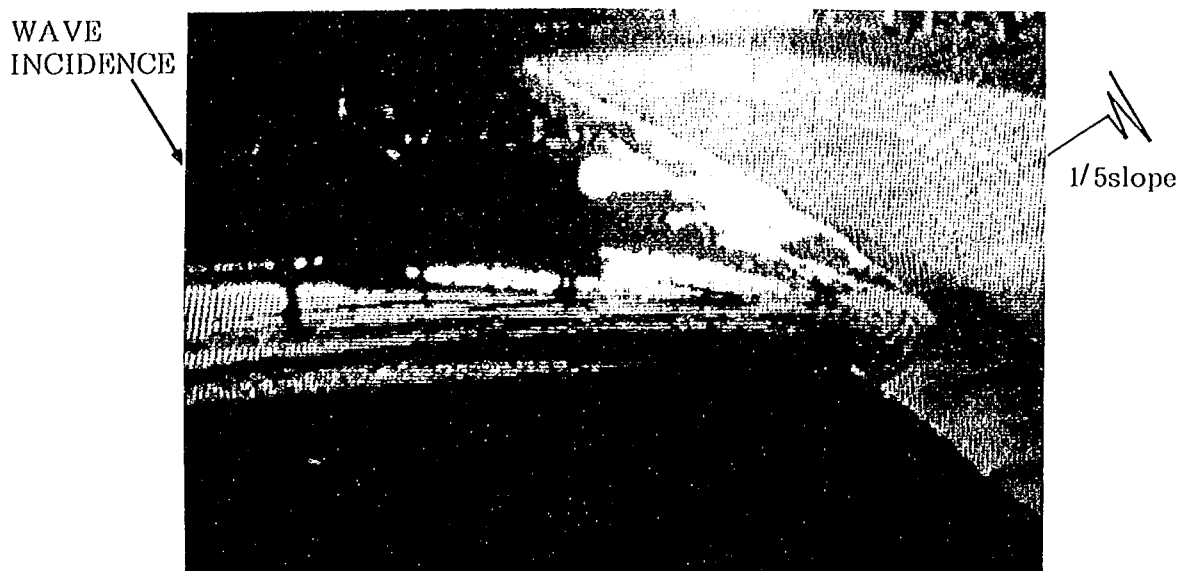


写真 - 7.2 Edge bore の状況 (その 1) (波条件 b, $\theta = 20^\circ$, $\tan \beta = 1/5$)

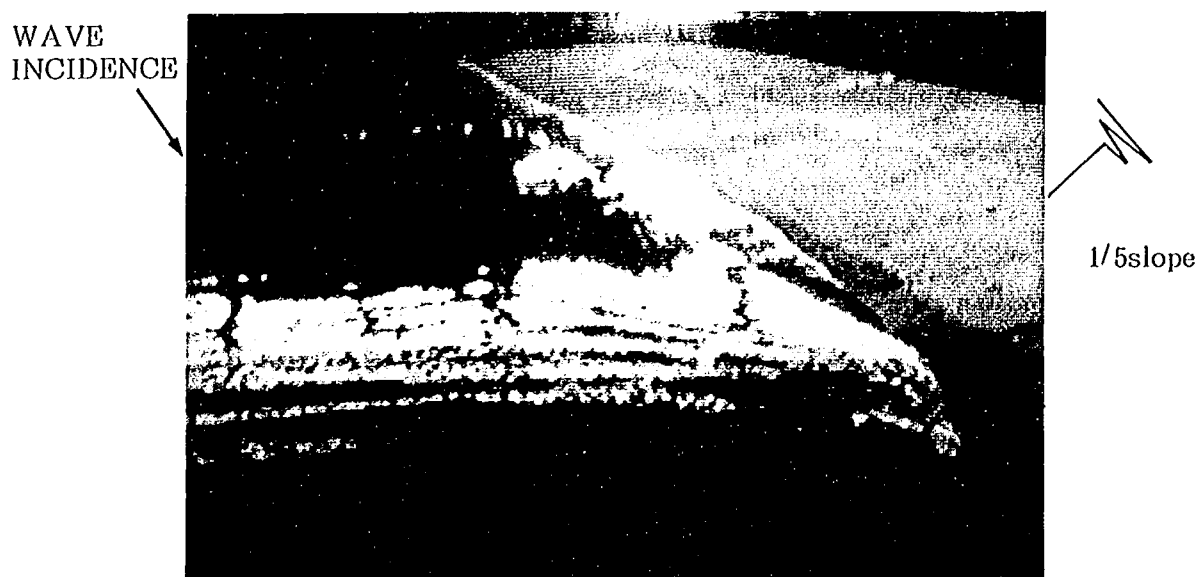


写真 - 7.3 Edge bore の状況 (その 2) (波条件 b, $\theta = 20^\circ$, $\tan \beta = 1/5$)

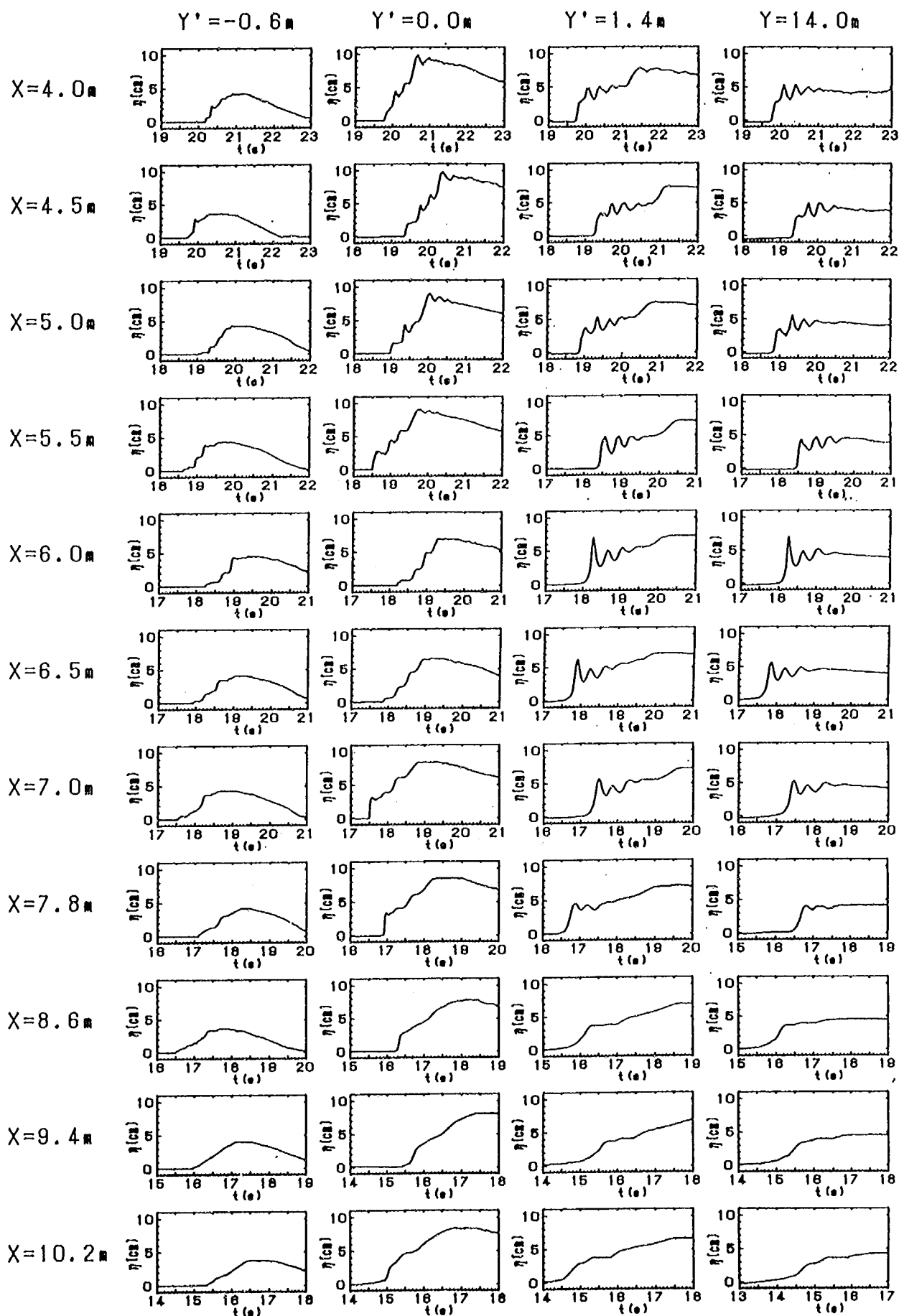


図-7.6 水位時間波形の平面分布 (波条件 c , $\theta = 30^\circ$, $\tan \beta = 1/10$)

られる波峰も反射波と考えられる。汀線上の波形は、 $y' = 1.4$ m測線上で同じ x の値を有する地点の波形と比較してかなり異なる。これに対し、波形の先端部形状は同じ x の値を有する地点の $y' = 1.4$ m測線上と $y = 14.0$ m測線上とはほとんど変わらない。 $y' = 1.4$ m測線上では入射波と反射波が分離していることがわかる。このケースでもビデオ映像によると edge boreの発生が見られた(写真-7.4参照)。

以上のことより、edge boreの形成による2次元的な波の変形は汀線付近より陸側で生じ、それより沖側では入射波と反射波が分離して進行していると考えられる。汀線上では、 $x \leq 7.0$ mの範囲の測点における波形先端部にいくつもの段が見られる。最初に結果を示した1/5勾配斜面の場合(図-7.5参照)に比較して1/10勾配斜面では屈折波の遡上が生じ易いため、反射波と遡上波とが重合して段が形成されたと考えられる。汀線上の $x = 7.0$ mでは水位約3 cmの先端部第一波と反射波と考えられる水位8.2 cmの段波先端との位相差は約1.3秒であるが、 $x = 4$ mでの位相差は約0.9秒に縮まっている。陸上の $y' = -0.6$ m測線上でも、 $5.0 \text{ m} \leq x \leq 7.8 \text{ m}$ の範囲には階段状の波形が見られ、波の進行とともにそれらが重なっていく変化がみられる。以上のように、汀線付近より陸側では、反射波が入射波に追いつき、波の先端水位を上昇させることがわかる。このケースのビデオ映像の連続写真を写真-7.5～7.8に示す。写真-7.5には汀線より陸側に3つの段が見られるが、写真-7.6ではほぼ1つに重なり、edge boreが形成された。さらに、写真-7.7では渦を伴う回り込み流れが生じていることがわかる。写真-7.8では回り込み流れが大きく発達している。以上のような波の変形により、汀線付近に edge boreが形成されると考えられる。

図-7.7, 7.8に示す $\tan \beta = 1/20$, $1/30$ の場合では、汀線上およびその沖の各測点での波形には反射波による水位の上昇はあまり見られない。写真-7.9に $\tan \beta = 1/30$ のケースにおける波の遡上状況を示す。このように、緩勾配のケースのビデオ映像には edge boreの形成は見られず、斜面上を波が遡上した。これらの緩勾配のケースでは碎波および斜面遡上に伴うエネルギー減衰により、あまり反射が生じなかったと考えられる。 $\tan \beta = 1/20$ の場合では、汀線上の各測点において時間波形の後半に反射によると考えられる緩やかな水位上昇が見られる。一方、 $\tan \beta = 1/30$ の場合では汀線上の各測点共に、そのような水位上昇もほとんど見られない。



写真-7.4 Edge bore の状況 (波条件 c , $\theta = 30^\circ$, $\tan \beta = 1/10$)

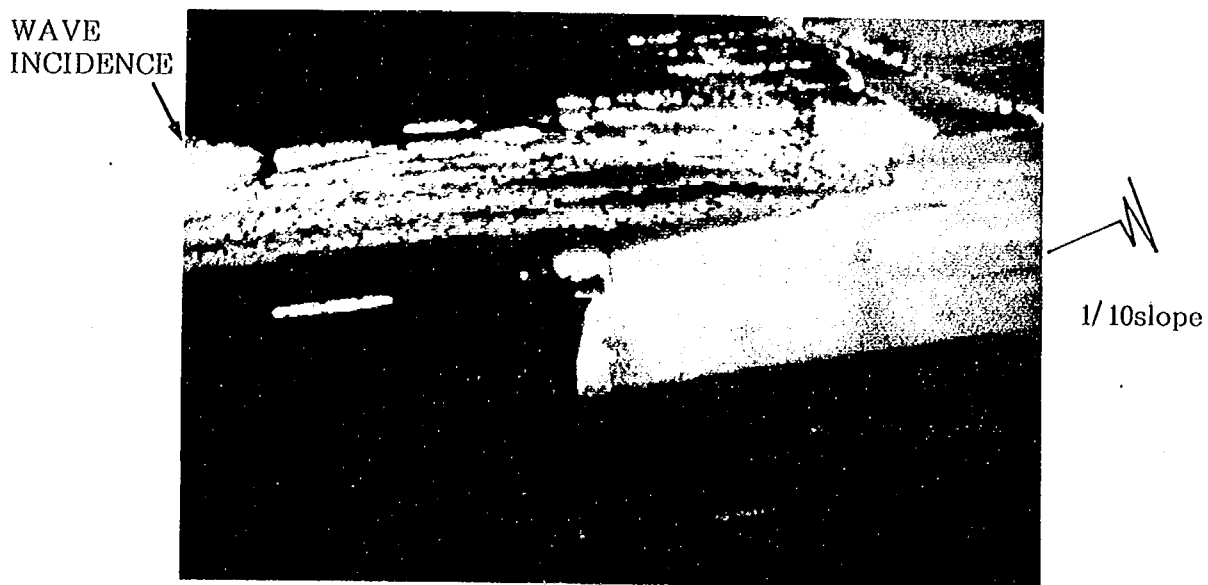


写真-7.5 Edge bore の発達状況 (その1) (波条件 c , $\theta = 30^\circ$, $\tan \beta = 1/10$)



写真 - 7.6 Edge bore の発達状況 (その 2) (波条件 c , $\theta = 30^\circ$, $\tan \beta = 1/10$)



写真 - 7.7 Edge bore の発達状況 (その 3) (波条件 c , $\theta = 30^\circ$, $\tan \beta = 1/10$)



写真 - 7.8 Edge bore の発達状況 (その 4) (波条件 c , $\theta = 30^\circ$, $\tan \beta = 1/10$)

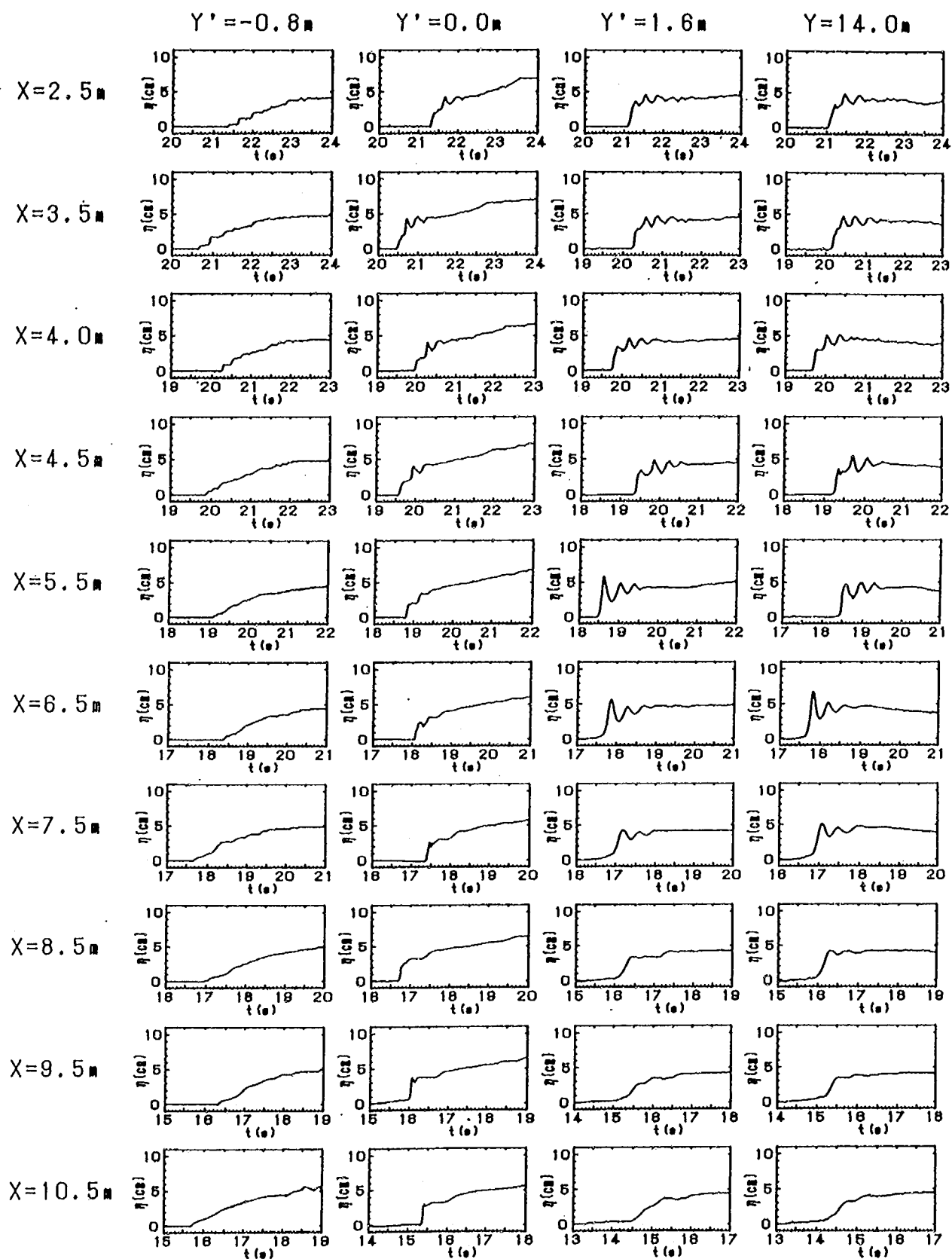


図-7.7 水位時間波形の平面分布 (波条件 c , $\theta = 30^\circ$, $\tan \beta = 1/20$)

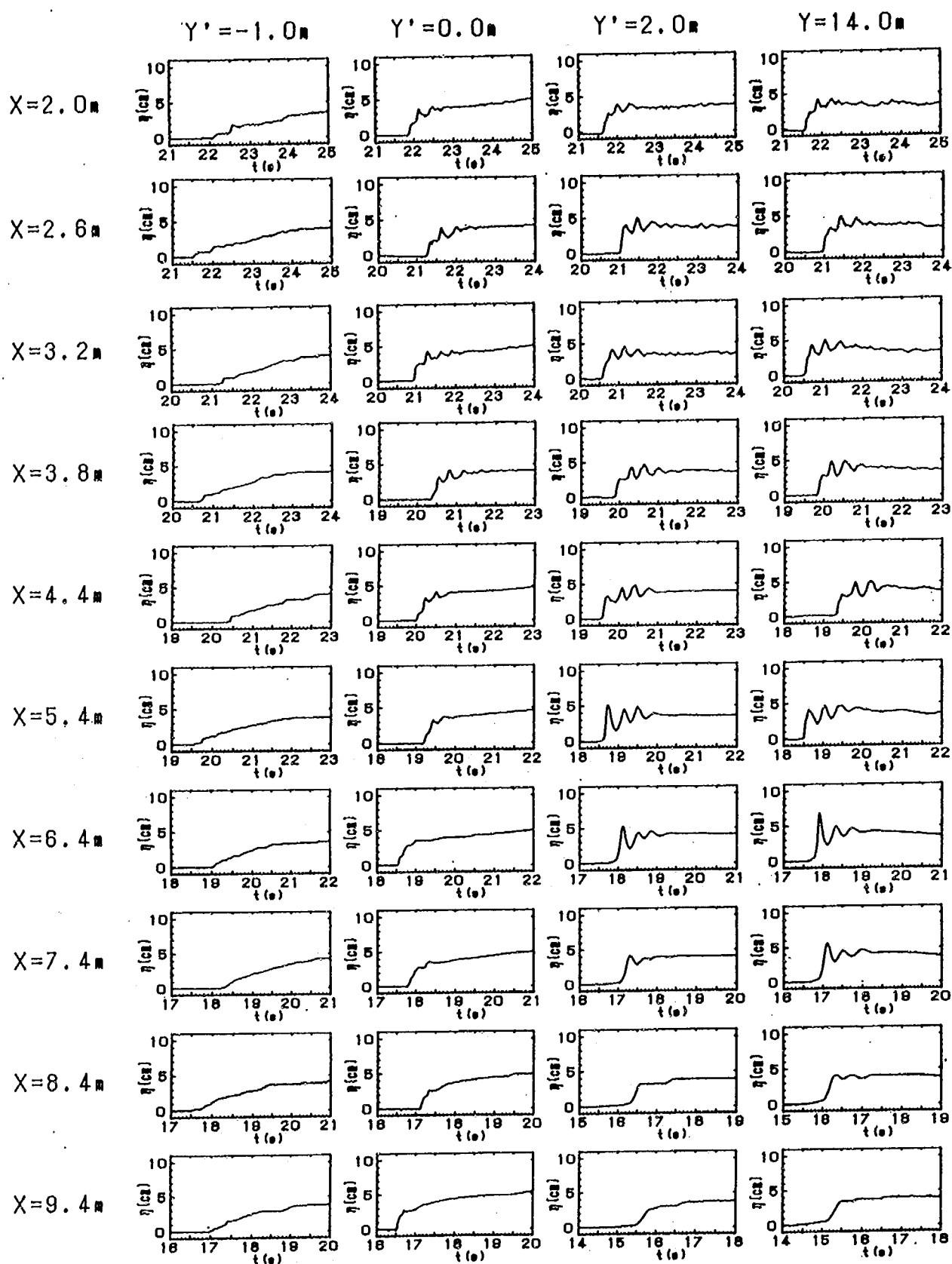
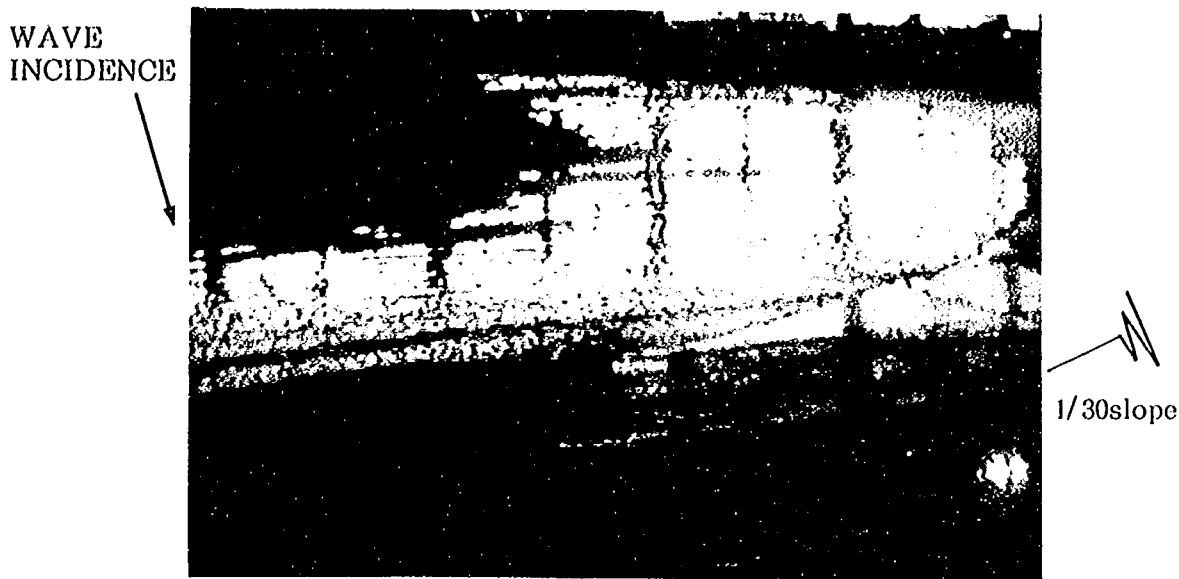


図-7.8 水位時間波形の平面分布 (波条件 c , $\theta = 30^\circ$, $\tan \beta = 1/30$)



写真－7.9 1/30 勾配斜面上を波が遡上する状況（波条件 c, $\theta = 30^\circ$ ）

7.3.2 波先線の変化

全測点への波先の到達時刻を求め、最も陸側の各測点に波が到達した時刻を基準として波先線を描いた。 $\theta = 30^\circ$ 、波条件 c, $\tan \beta = 1/5$ のケースの結果を図－7.9 に示す。 $x \leq 6$ m の範囲で汀線と鋭角に交わっていた汀線付近の波先線が、波の進行に伴い汀線から離れた沖側の波峰線とほぼ平行になるように前進した。さらに、 $x = 4.5$ m 付近に達すると、汀線付近の波先線は壁面から離れた地点に比べ進行方向に突出したことがわかる。汀線付近の波高の増加（図－7.5 参照）、およびそれに伴う波速の増加によってこのような波先の突出が生じたと考えられる。この波先の突出が edge bore の形成に対応すると考えられる。このときの edge bore は、図－7.2 に示した 3 種のタイプのうち渦を伴うタイプである。また、Chen が観察した edge bore 背後の ripple（図－7.1 参照）は、このケースのビデオ撮影の結果にははっきりと見られなかった。波条件 b の場合では、波先の突出量はこのケースほど大きくないが、ほぼ同様の結果が得られている。同じ $\tan \beta = 1/5$ で $\theta = 20^\circ$ 、波条件 c のケースでは、渦の発生は明瞭ではないが ripple は顕著に見られた（写真－7.1 参照）。このケースの edge bore の模式図を図－7.10 に示す。図に示すように斜面陸上で波先が鋭く突出し、遡上線に並ぶように ripple の波峰線が観察された。写真－7.10 は段波先端部の状況を示す。先端部第一波が砕波し、その後に第二波、第三波が見られる。1/5 斜面上には波先の突出が明瞭であり、突出部分から波の後へ向かういくつかの ripple の波峰が見られる。

$\theta = 30^\circ$ 、 $\tan \beta = 1/10$ 、波条件 c のケース（図－7.11）では、汀線付近での波先の突出は生じていない。 $x \leq 5$ m の範囲では汀線付近の波先線が汀線から離れた地点の波先線とほぼ平行となっている。ビデオによると、この後波先が突出し、edge bore が形成された。渦は形成されたが、ripple は見られなかった。このケースの edge bore の模式図を図－7.12 に示す。波先の突出量は $\tan \beta = 1/5$ の場合に比べ大きくないが、横断方向の幅は広くなった。また、分裂波の波峰が edge bore に集まる状況がよく観察された。斜面勾配 1/10、波条件 c の条件で $\theta = 20^\circ$ のケースの波先線図を図－7.13 に示す。

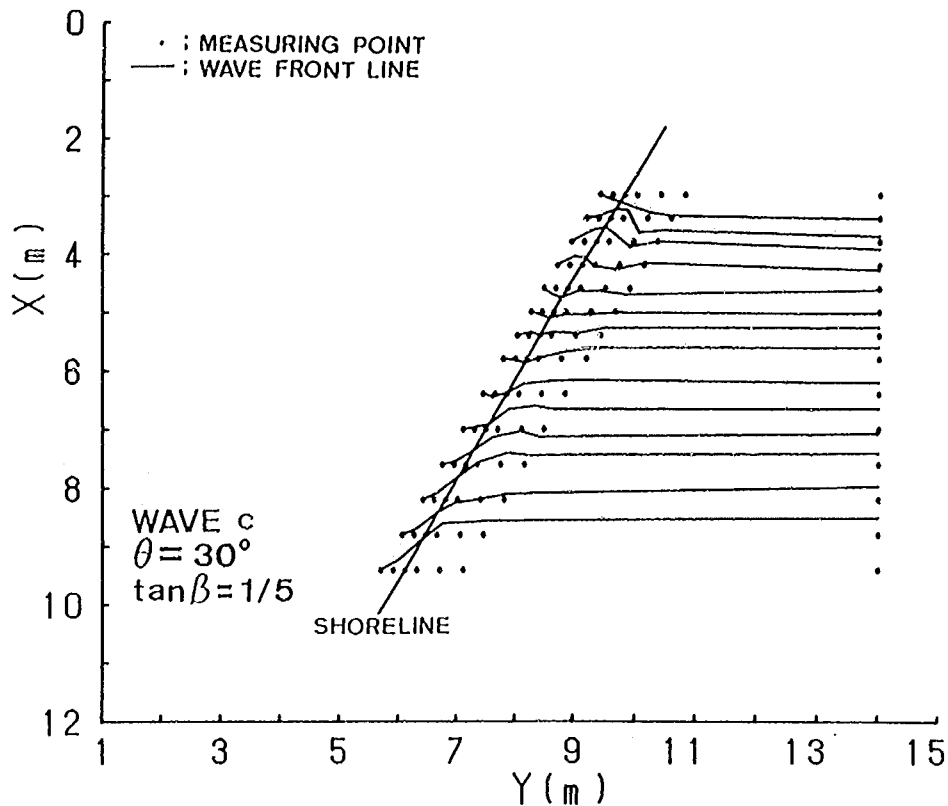


図-7.9 波先線の変化（波条件c, $\theta = 30^\circ$, $\tan \beta = 1/5$ ）

$x = 3.2$ mより汀線付近の波先の突出がみられる。このケースではedge boreは形成されたが、渦の形成は明瞭でない。以上のように1/10勾配斜面の場合では、波が1/100勾配の水路床上を水深2~3cmの領域まで進行しないとedge boreは形成されなかった。

$\theta = 30^\circ$ 、波条件c, $\tan \beta = 1/20$ および1/30の場合の波先線図を各々図-7.14, 7.15に示す。両ケース共斜面上の波先線は通常の屈折パターンを示し、これらの場合ではedge boreは形成されないことがわかる。

$\theta = 20^\circ$ の場合も $\theta = 30^\circ$ の場合とほとんど同じ傾向を示した。 $\theta = 20^\circ$ の場合では斜面への入射角度が小さいために遡上高が小さい。そのため、 $\tan \beta = 1/10$ の場合の図-7.11 ($\theta = 30^\circ$)と図-7.13 ($\theta = 20^\circ$)を比べると、 $\theta = 30^\circ$ の場合の方が波先線の遡上先端はより屈折した形状となっている。最後にedge boreの発生状況を表-7.2にまとめて記す。 $\theta = 20^\circ$ と 30° では、両者とも1/20より緩勾配でedge boreは形成されなくなった。渦の発生は $\theta = 30^\circ$ の方が顕著であるが、rippleは $\theta = 20^\circ$ の方がよく見られた。

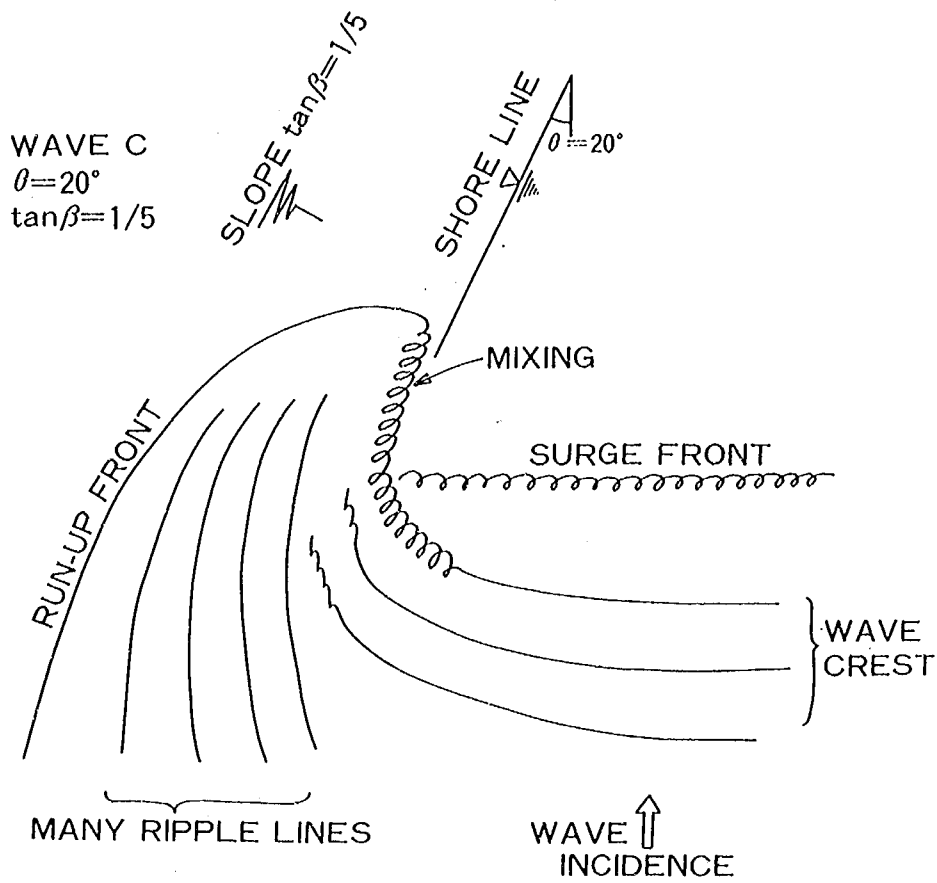


図-7.10 Edge bore の模式図 (波条件 c, $\theta = 20^\circ$, $\tan \beta = 1/5$)

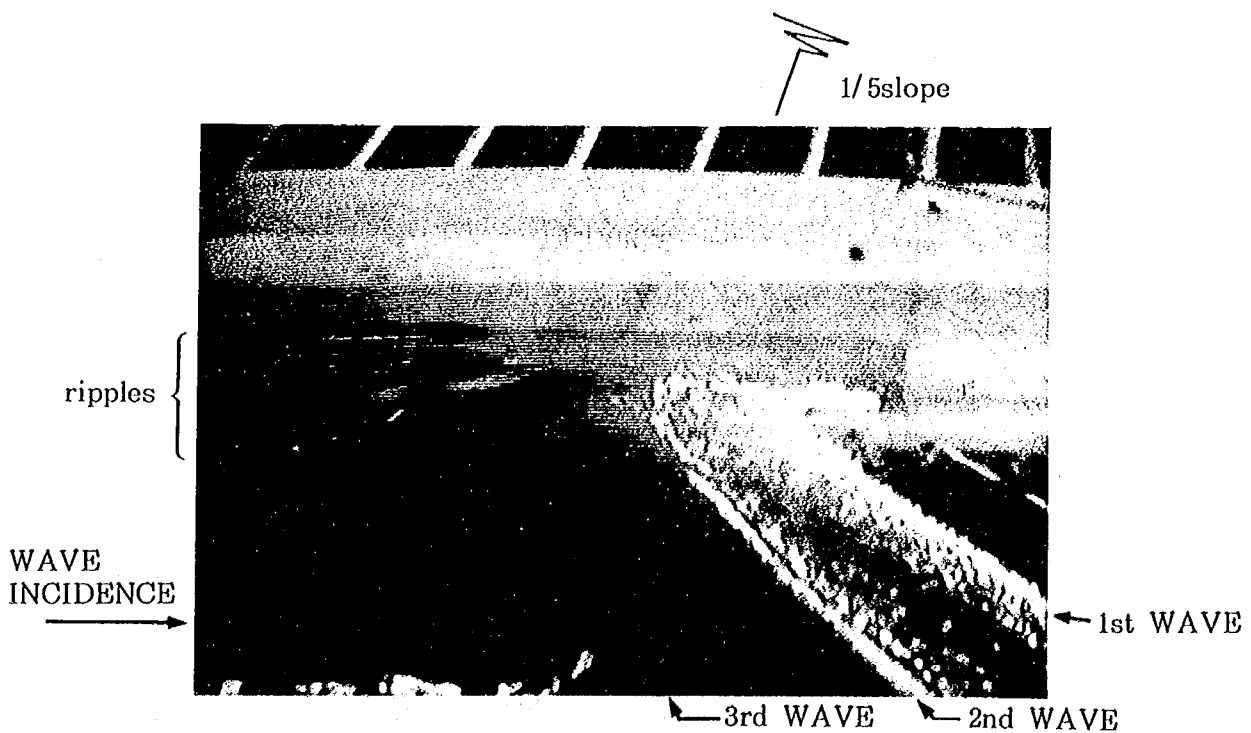


写真-7.10 Edge bore の伝播状況 (波条件 c, $\theta = 20^\circ$, $\tan \beta = 1/5$)

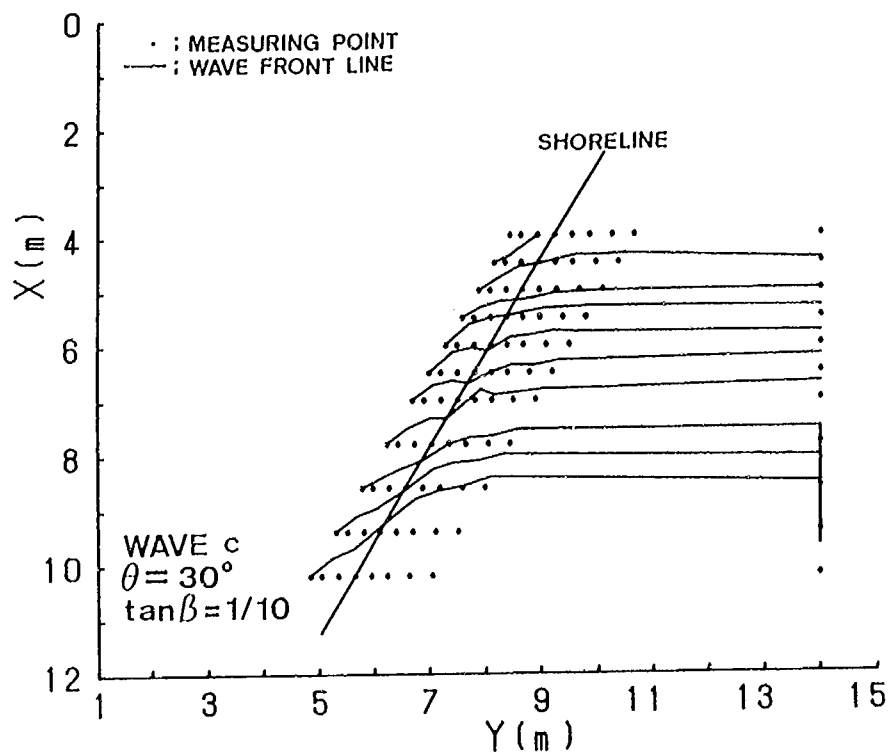


図 - 7.11 波先線の変化 (波条件 c , $\theta = 30^\circ$, $\tan \beta = 1/10$)

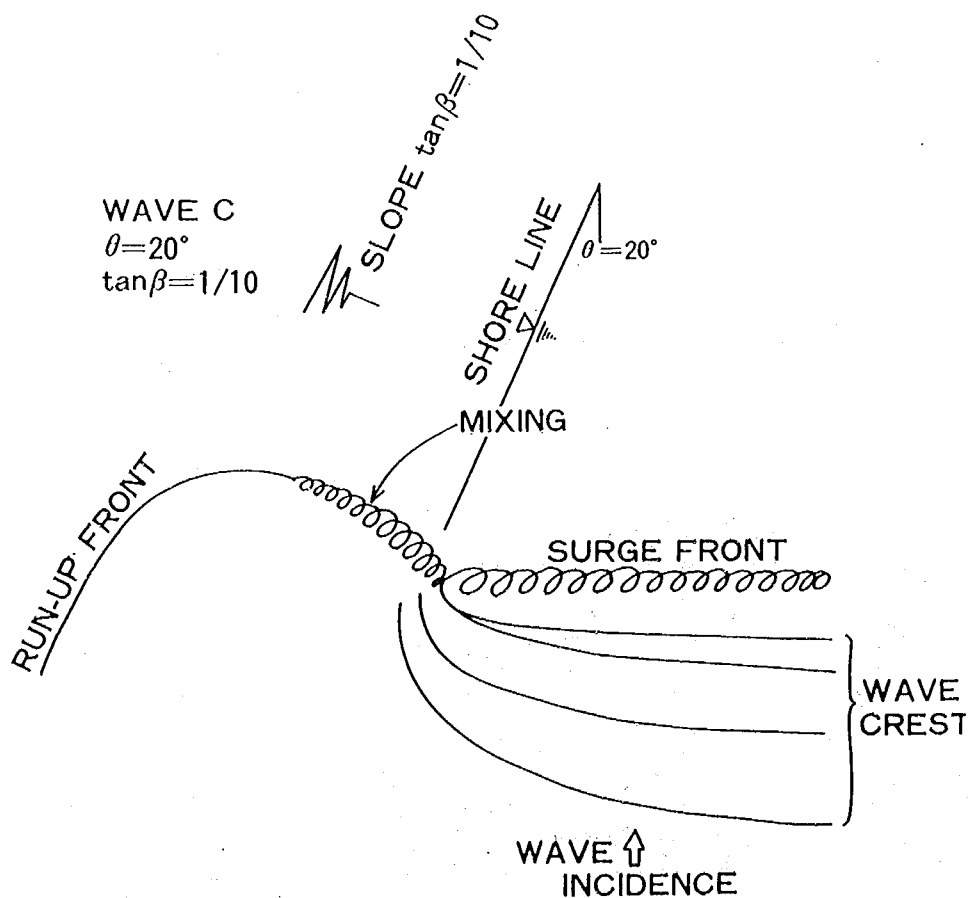


図 - 7.12 Edge bore の模式図 (波条件 c , $\theta = 30^\circ$, $\tan \beta = 1/10$)

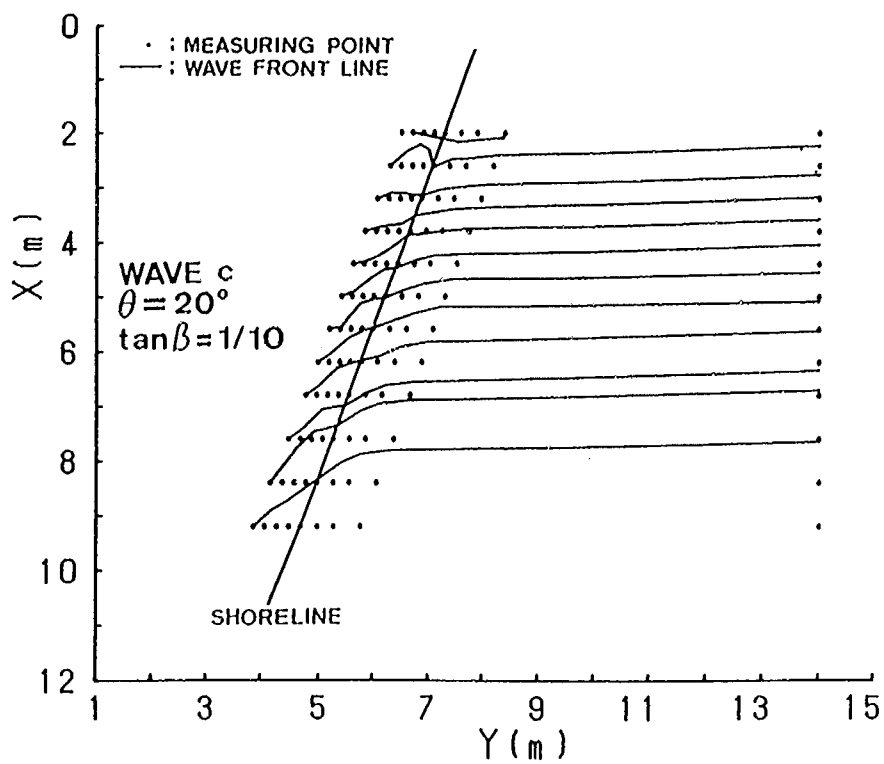


図-7.13 波先線の変化 (波条件 c, $\theta = 20^\circ$, $\tan \beta = 1/10$)

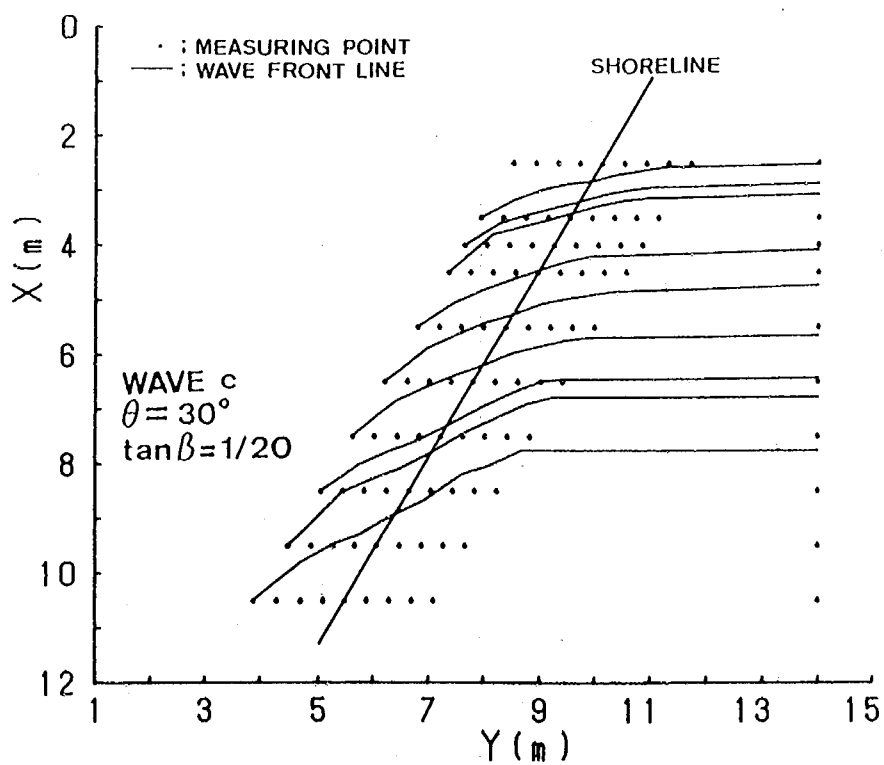


図-7.14 波先線の変化 (波条件 c, $\theta = 30^\circ$, $\tan \beta = 1/20$)

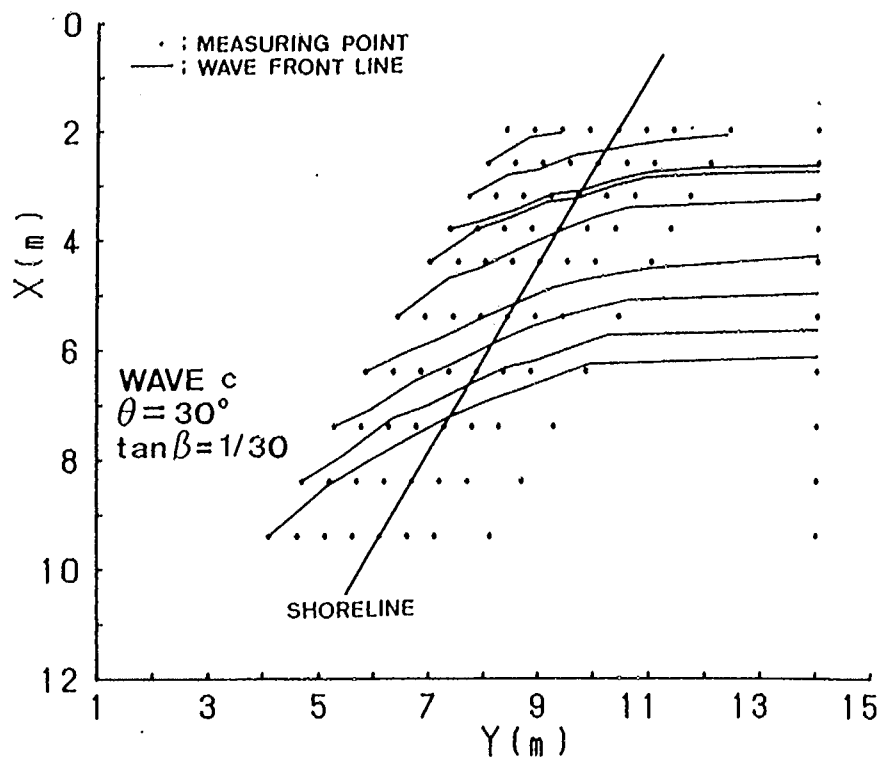


図-7.15 波先線の変化 (波条件 c, $\theta = 30^\circ$, $\tan \beta = 1/30$)

表-7.2 Edge bore の発生状況

θ	$\tan \beta$	WAVE	EDGE BORE	EDDY	RIPPLE
20°	$1/5$	b	○	△	○
		c	○	○	○
	$1/10$	b	○	×	×
		c	○	△	×
	$1/20$	b	×		
		c	×		
30°	$1/5$	b	○	○	△
		c	○	○	△
	$1/10$	b	○	△	×
		c	○	○	×
	$1/20$	b	×		
		c	×		
	$1/30$	b	×		
		c	×		

○ remarkable
 △ obscure
 × nil

7.4 結 論

1/100 勾配一様斜面上を進行する波状段波を対象として、edge boreの挙動を明らかにするための実験を行った。実験は波の進行方向にある角度を持って交差し、その勾配が $1/30 \leq \tan \beta \leq 1/5$ を満足する斜面を設置して行った。主な結論を以下に記す。

- ① Edge boreは $\tan \beta = 1/5$ 、 $1/10$ の条件で発生し、 $\tan \beta = 1/20$ 、 $1/30$ の条件では発生しなかった。
- ② $\tan \beta = 1/5$ のケースでは、Chenの示した渦を有するedge boreが形成された。渦を伴うedge boreの形成は、陸上での波高の増加により波速が増加するため陸上の波先が突出し、その結果斜面を下る下降流、すなわち回り込み流れ（渦）が発生するというパターンを持つと考えられる。
- ③ $\tan \beta = 1/10$ のケースでは、汀線より沖で入射波と反射波が分離した水位時間波形が測定された。このケースでは、edge boreの形成による2次元的な波の変形は汀線付近より陸側で生じていると考えられる。
- ④ $\tan \beta = 1/20$ 、 $1/30$ のケースでは、汀線上およびその沖の各測点の波形に反射による水位の上昇はあまり見られなかった。これらの緩勾配のケースでは、砕波および斜面遡上に伴うエネルギー減衰により、あまり反射が生じず、斜面上で通常の屈折、遡上が生じたと考えられる。特に $\tan \beta = 1/30$ の場合では、各測点の水位時間波形に反射による水位上昇はほとんど見られなかった。
- ⑤ Chenが観察したedge bore背後のrippleは、 $\tan \beta = 1/5$ 、 $\theta = 30^\circ$ のケースにははっきりと見られなかった。 $\tan \beta = 1/5$ 、 $\theta = 20^\circ$ のケースでは、渦の発生は明瞭でないがrippleが顕著に見られた。
- ⑥ $\theta = 20^\circ$ と $\theta = 30^\circ$ の条件で、斜面上の波の変形はほとんど同じ傾向を示した。渦の発生は $\theta = 30^\circ$ の方が顕著であった。一方、rippleは $\theta = 20^\circ$ の方が良く見られた。

8 波状段波の河道侵入に関する実験

8.1 実験の目的

河川に侵入する津波の変形を明らかにすることは、河川堤防からの越流を防ぎ、河岸係留船や河川構造物の安全を確保する上で重要な課題である。海岸で形成されたMach stemやedge boreがV字形の湾の奥に位置する河口を経由して河道に侵入する場合には、河道側岸部で波高が高くなることも考えられる。このようにMach stemやedge boreが河道に進入し、変形する過程については、これまでほとんど検討されていない。さらに、Mach stemやedge boreが河道を遡行する際にどのように変形するかについても不明な点が多い。ここでは、河口周辺の海岸線を直線の鉛直境界壁とし、境界壁に沿って変形した波が河道へ進入し、河川を遡行する際に生じる波の変形を実験的に明らかにする。実験では、波の入射方向に対する境界壁の角度を変え模型条件を設定した。水位変化の測定にあたっては、特に河口の隅角部に細かく測点を配置し、1ケース当り約100点で水位時間波形の測定を行った。

8.2 実験方法

実験は、津波水槽内に鉛直壁を持った河道側岸を設け、奥行き8 mの河道を造り、河口に続く直立境界壁の傾き角 θ と河道幅Bを変えて行った（図-8.1参照）。鉛直壁はラワン合板で製作した。模型条件は、Bを2, 4, 8 mと3ケース変え、また θ を30°, 45°, 90°と3ケース変え、合計で9ケースとした（表-8.1）。また、河道部を水平にするため水路床を水平に改造した。静水深は河道部で8 cm、起潮装置前面で29.85 cmと設定した。

実験はe, f, 2ケースの波条件を用いて18ケース行った。波条件eは波状段波より孤立波に近い波条件である（図-5.7参照）また、波条件fは典型的な波状段波の条件である。実験では図-8.2~8.4に示す測点で、水位時間波形の測定を行った。また、ビデオにより波の変形状況を撮影した。

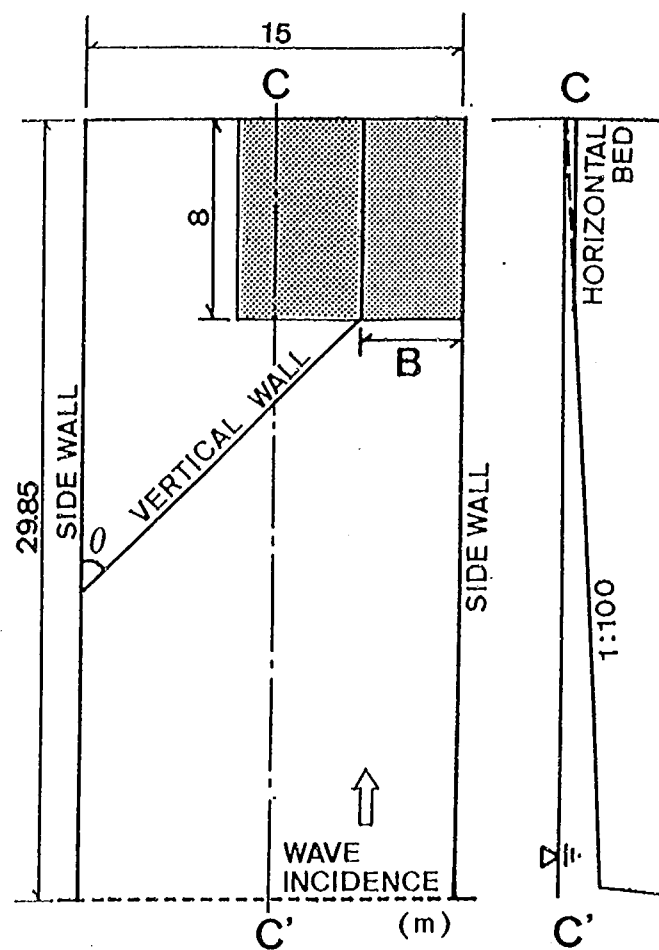


図 - 8.1 模型設置状況

表 - 8.1 模型条件 (実験Ⅲ)

CASE	B (m)	θ (°)
1-1	2	30
1-2	2	45
1-3	2	90
2-1	4	30
2-2	4	45
2-3	4	90
3-1	8	30
3-2	8	45
3-3	8	90

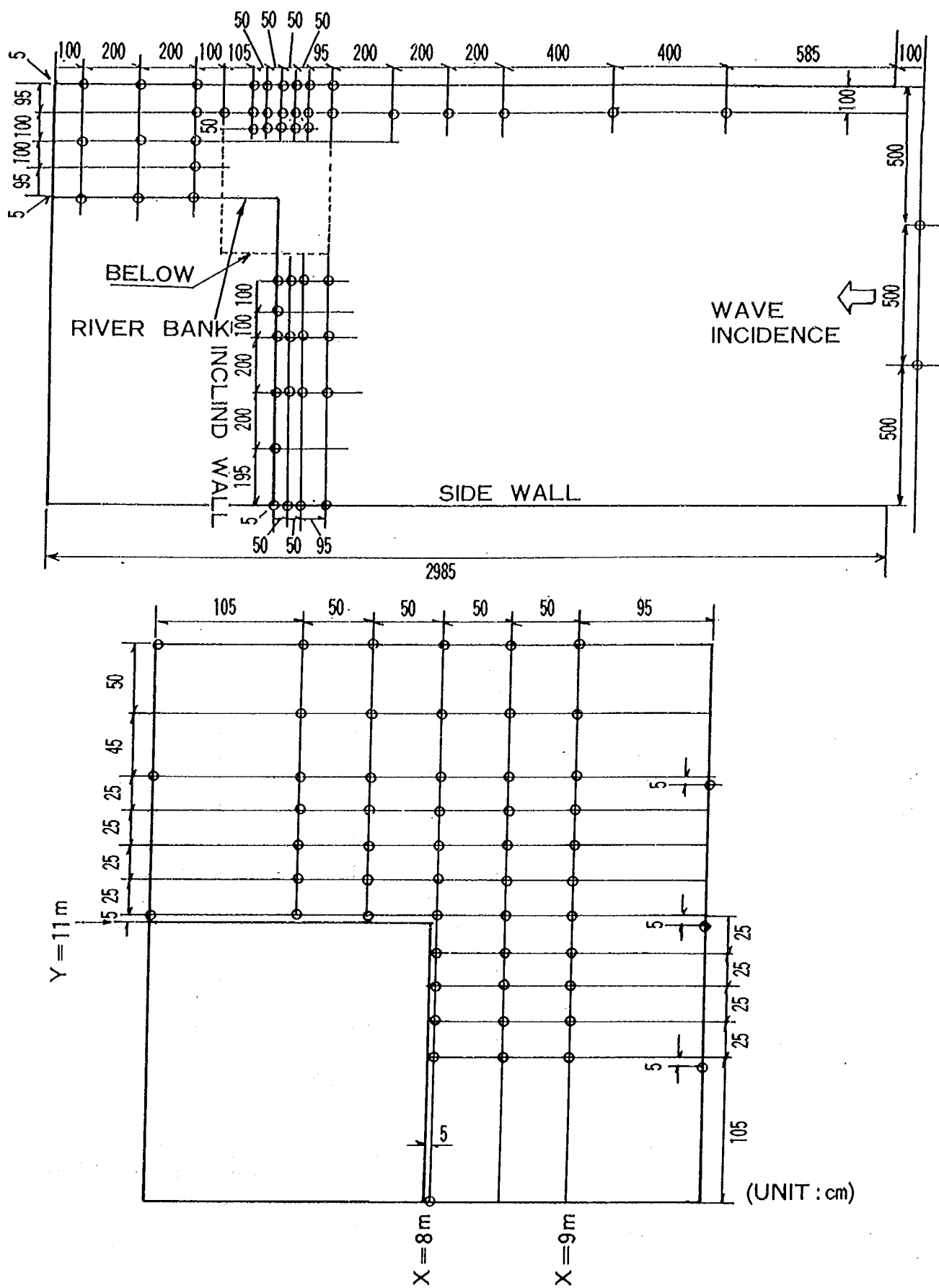


図-3.4 測点配置の一例 (CASE 2-3)

8.3 実験結果

8.3.1 水位時間波形の空間変化

$B = 4 \text{ m}$, 波条件 f のケースについて, θ を変えた場合の河口隅角部近傍における水位時間波形について以下に論ずる。 $\theta = 30^\circ$ のケースの測定結果を図-8.5 に示す。 $\theta = 30^\circ$ の条件では実験 I で示したように Mach stem の発生が見られた。 $x = 9.0 \text{ m}$ の測線上では, $10.42 \text{ m} \leq y \leq 11.55 \text{ m}$ の範囲で $y \geq 12.05 \text{ m}$ の範囲に比べ H_1 が高い。また $10.42 \text{ m} \leq x \leq 11.55 \text{ m}$ の範囲の波形には反射波の波峰も見られないことから, この範囲の先端部第一波は Mach stem と考えられる。Mach stem の形成状況を写真-8.1 に示す。壁近傍の測点 (9.0 m , 10.42 m) と測点 (8.5 m , 10.71 m) の波形を比較すると, 後者では H_1 が低下している。これは, Mach stem が砕波したことを表わしている。一方, $y = 13 \text{ m}$ 測線上では $x = 7.5 \text{ m}$ と 8.0 m の間に砕波点があり, 砕波位置が横断方向にかなり異なることがわかる。 $x = 8.0 \text{ m}$ 測線上では各測点の H_1 の差が大きいのにに対し, $x = 7.0 \text{ m}$ 測線上では各測点の H_1 はほぼ等しくなっていることから, 横断方向の波高分布が急速に一様化したことがわかる。砕波後の段波の状況を写真-8.2 に示す。写真に見られるように, 河道進入後, 段波先端部の混合域は横断方向に急速に広がった。

$\theta = 45^\circ$ のケースの結果を図-8.6 に示す。実験 I では, $\theta = 45^\circ$ の場合に Mach stem は形成されずに通常の反射が生じた。河口到達直前の段波先端部の波峰を写真-8.3 に示す。横断方向と平行な入射波峰と, その波峰にほぼ直交する反射波峰が明瞭に見られる。図-8.6 には, 反射第一波と判断される波峰を細い矢印で示した。 $x \leq 8 \text{ m}$ の河道内に位置する測点の波形を見ると, ほとんどの波形に反射波があり 45° に傾いた境界壁からの反射波が河道内に回折したことがわかる。また, $x = 7.5 \text{ m}$ と 8.0 m 測線上では, $y = 11 \text{ m}$ に位置する側岸に近い測点ほど入射波と反射波の位相差が小さくなる。波形に太い矢印を付けて示した波峰は, 傾いた境界壁から反射した波の回折波が入射波に追いつき重なって形成されたと考えられる。すなわち, 河道内を波が進行するのに伴い, $y = 11 \text{ m}$ にある河道側壁に近い測点より順に回折波が入射波に追いつき波高を増し, その後砕波している。写真-8.4 は河道内での先端部第一波波峰の進行状況を示す。側岸近くでは砕波しており, 砕波している波峰より反射波峰が沖に向かって延びている。この反射波峰が河道横断方向 (写真下側) へ進行しつつ, 入射波峰と重なったと考えられる。

図-8.6 において, $x = 9.0 \text{ m}$ 測線上を横断方向に見ると, $y = 14.95 \text{ m}$ では分裂波がなく段波部の波高 H_0 が約 4 cm なのに対して, $y = 10.05 \text{ m}$ では $H_1 = 11.6 \text{ cm}$ であった。一方, $x = 7.0 \text{ m}$ 測線上では, $y = 14.95 \text{ m}$ の $H_1 = 6.3 \text{ cm}$ に対して $y = 11.05 \text{ m}$ で $H_1 = 5.9 \text{ cm}$ である。このように河道内では横断方向波高分布の一様化が進行したことがわかる。 $\theta = 90^\circ$ のケースの結果 (図-8.7) にも, 反射第一波と判断される波峰に矢印を記した。このケースでは段波先端部の波形は $x = 8.05 \text{ m}$, $y \leq 11.05 \text{ m}$ の測点を除くと横断方向にはほとんど変化していないため, 入射波と反射波の区別が明瞭である。 $x = 8 \text{ m}$ 線上にある水路横断方向の鉛直壁から河道内に反射波が回折しているが, その影響は非常に小さい。 $x \leq 7.55 \text{ m}$ の範囲の河道内では横断方向にほぼ等しい波形を有する波が進行していることがわかる。

次に $\theta = 30^\circ$ の場合について, 鉛直境界壁およびそれに続く河道側岸に沿う測線上と横断方向測線上

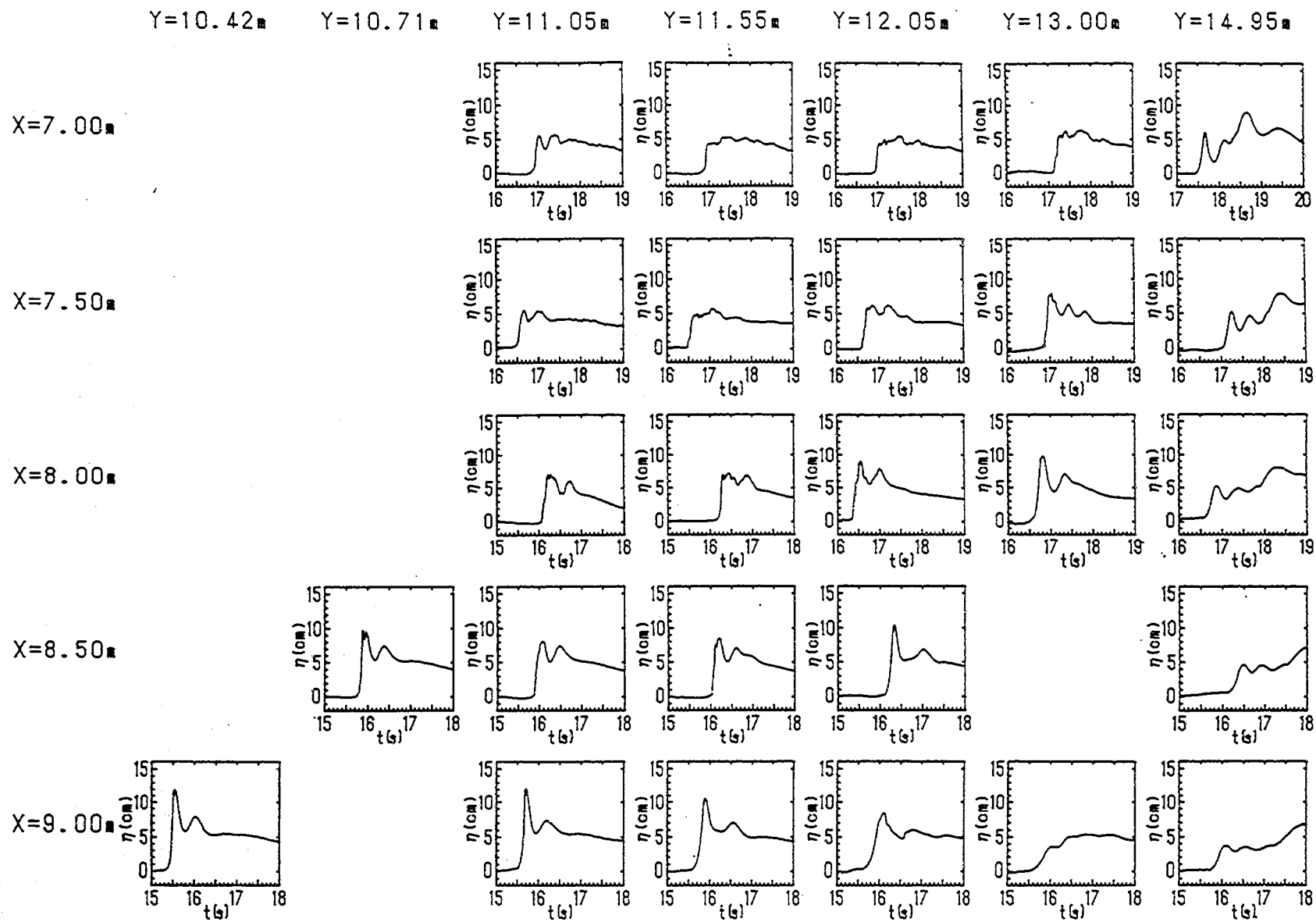
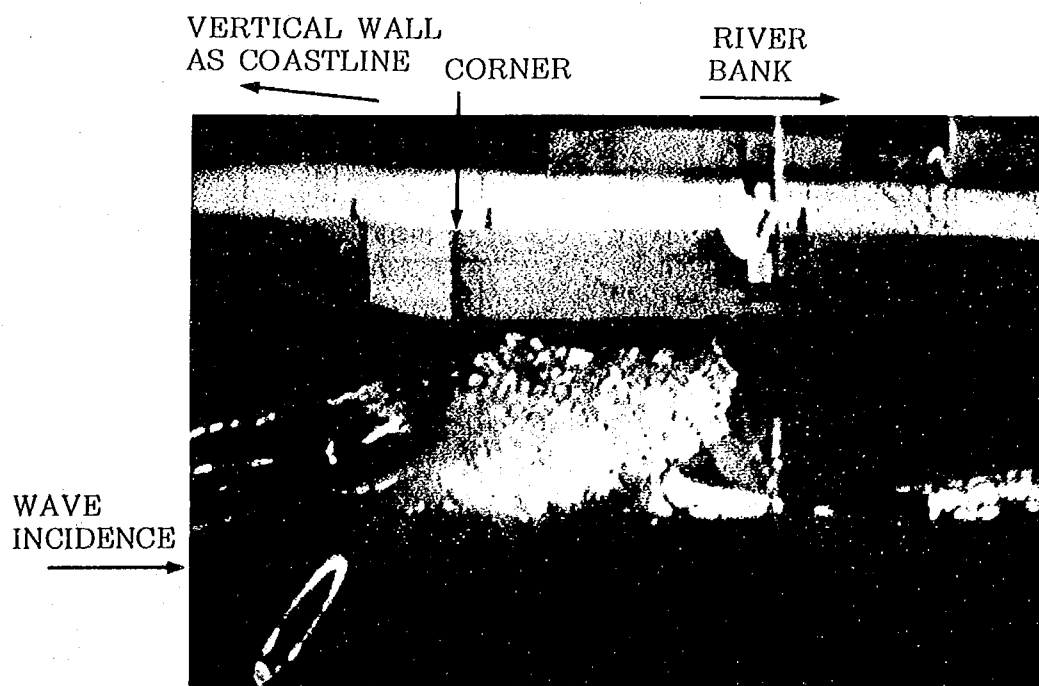


図-8.5 水位時間変化の平面分布 (波条件f, $B=4\text{m}$, $\theta=30^\circ$)



写真－8.1 Mach stemの形成状況



写真－8.2 河道進入直後の砕波した段波（波条件 f , $B = 4 \text{ m}$, $\theta = 30^\circ$ ）

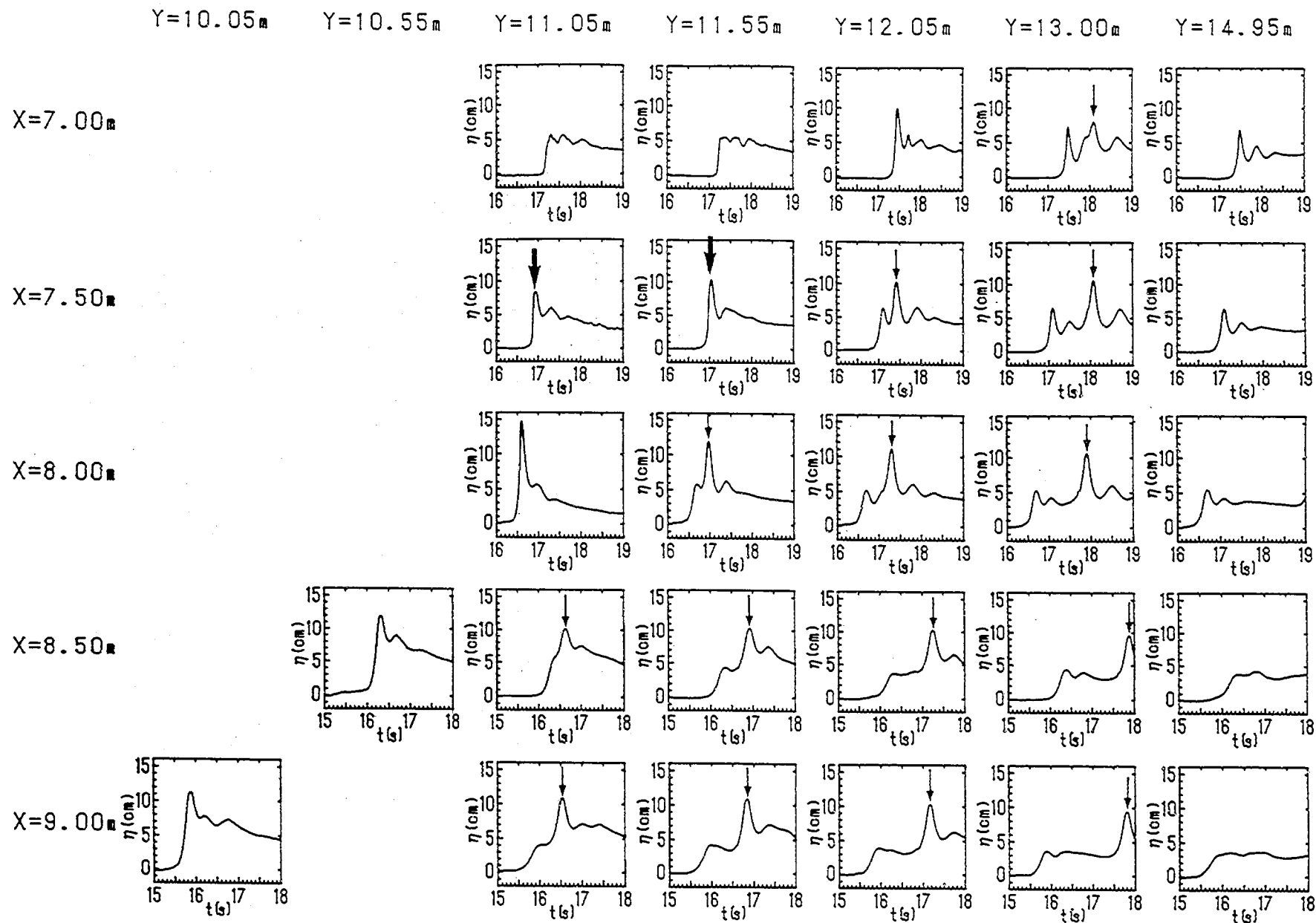
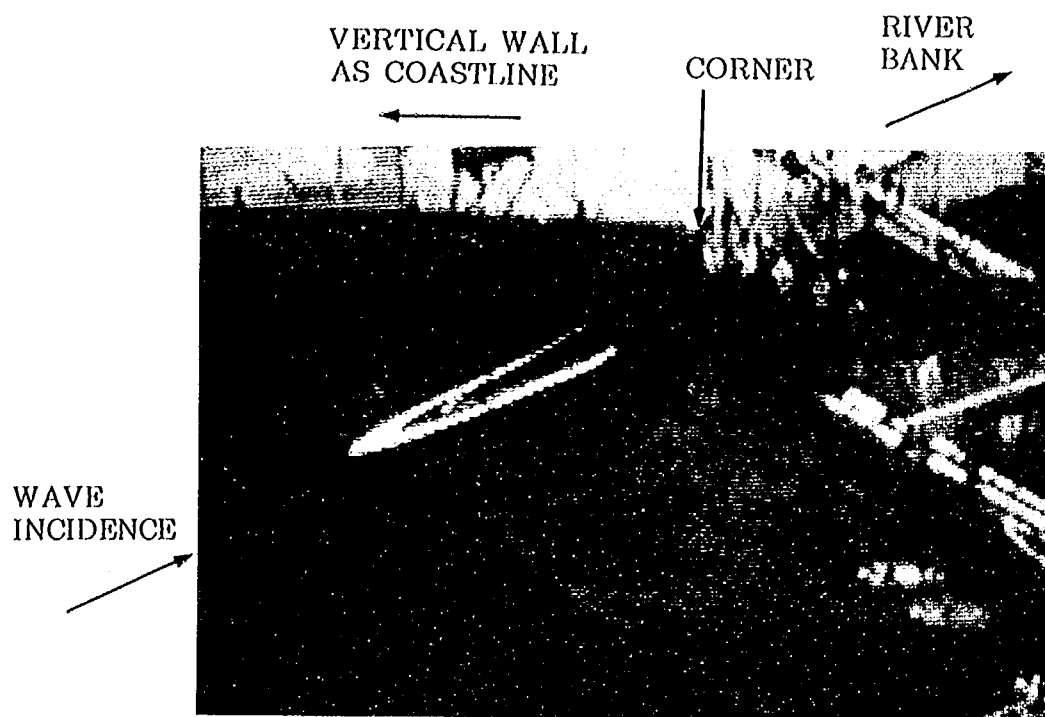
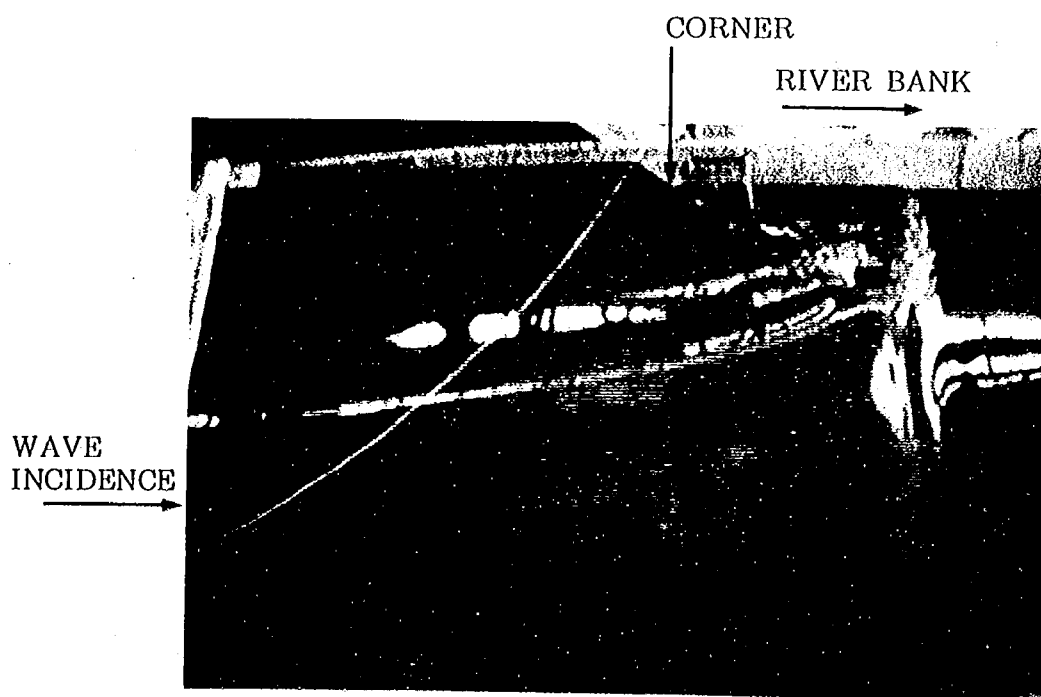


図-8.6 水位時間変化の平面分布 (波条件 f, B=4m, $\theta=45^\circ$)



写真－8.3 河口到達直前の段波先端部の入射波と反射波峰（波条件 f , $B = 4 \text{ m}$, $\theta = 45^\circ$ ）



写真－8.4 河道内の入射波峰と反射波峰の進行状況（波条件 f , $B = 4 \text{ m}$, $\theta = 45^\circ$ ）

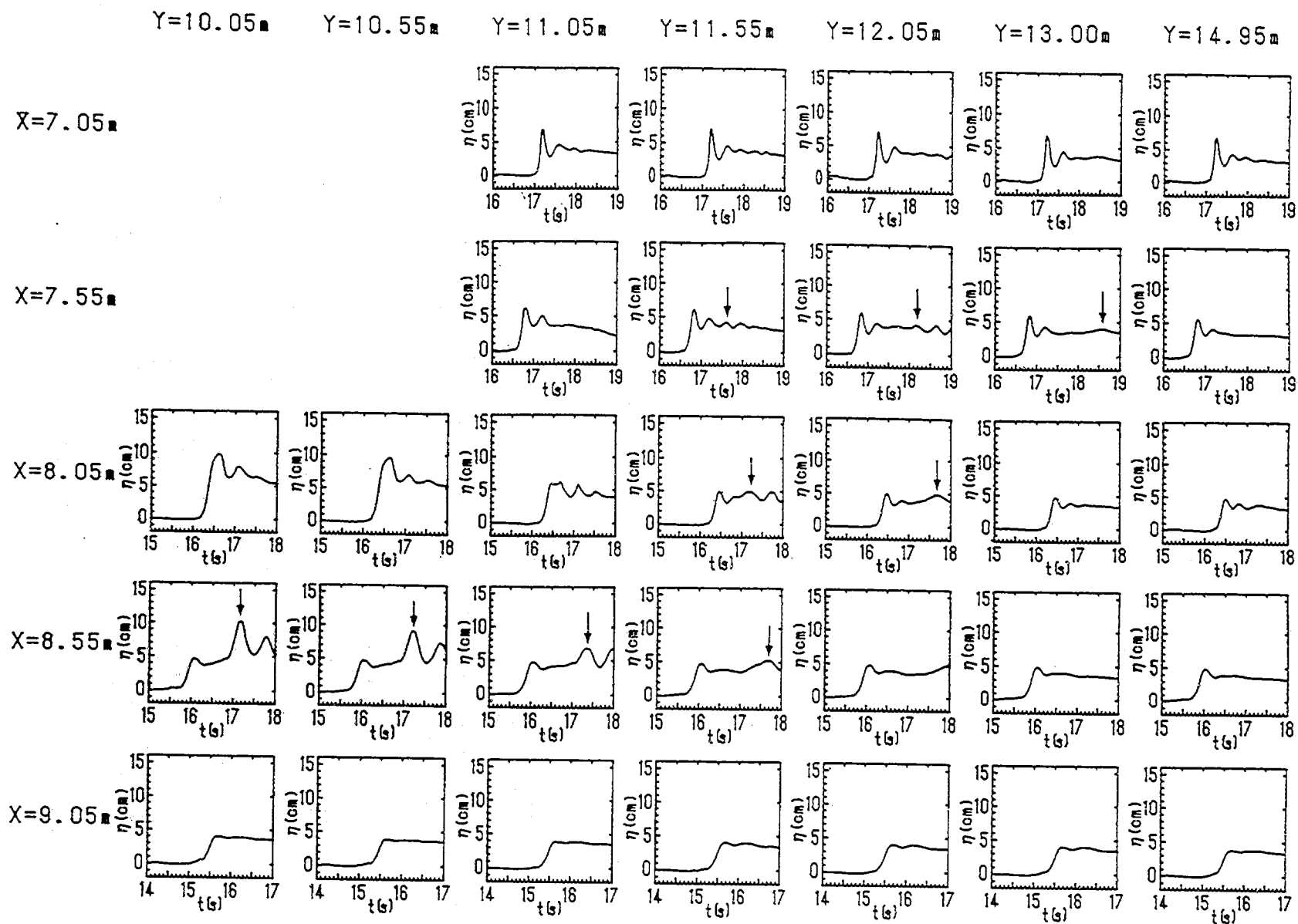


図-8.7 水位時間変化の平面分布 (波条件 f , $B = 4 \text{ m}$, $\theta = 90^\circ$)

の H_1 の分布を調べた。図-8.8は $B=2\text{ m}$ 、波条件eにおける H_1 の分布である。上段が壁に沿う分布、下段が横断方向の分布を示す。 H_1 の横断方向分布は河口を横断する測線、およびその沖側約1 m、岸側（河道内）約1, 2 mに位置する合計4本の測線について示した。壁沿いでは、原因は不明であるが $x=14\text{ m}$ より12 mの間で H_1 は減少している。その後、 $x=10\text{ m}$ まで H_1 は急激に増し、河道内では増減を繰り返している。 $7.5\text{ m} \leq x \leq 8\text{ m}$ 区間での波高減少は砕波によるものであり、その後の増減は対岸（ $y=15\text{ m}$ ）からの反射波によると考えられる。横断方向の波高分布では、河道内の波高分布のピークは波の進行とともに y の大きい方に移っている。すなわち、河口から上流側に1.2 m離れた $x=7.2\text{ m}$ の測線上では、 $y=13.9\text{ m}$ 付近で波高が最大となるのに対し、 $x=6\text{ m}$ では対岸（ $y=15\text{ m}$ ）で波高が最大値を示す。

$B=2\text{ m}$ で波条件fのケースにおける H_1 の分布（図-8.9）では、河口進入直前（ $8\text{ m} \leq x \leq 9.5\text{ m}$ ）で砕波により H_1 が急激に減少した。横断方向の波高分布を見ると、 $x=8.8\text{ m}$ 測線上では、砕波のため $12.5\text{ m} \leq y \leq 13.3\text{ m}$ の範囲の H_1 は $y=13.8\text{ m}$ 付近の H_1 より小さい。河道進入時（ $x=8\text{ m}$ ）の H_1 のピークは $y=14.5\text{ m}$ にあり、その後 $x=6\text{ m}$ では対岸（ $y=15\text{ m}$ ）近くで H_1 が大きくなっている。

$B=4\text{ m}$ 、波条件e、fのケースの H_1 の分布を図-8.10と図-8.11に示す。壁に沿う波高分布によると、波条件eでは $x=8\text{ m}$ の河口付近で、波条件fでは河口沖1 m（ $x=9\text{ m}$ ）付近で砕波が生じたことがわかる。波条件eのケースの横断方向波高分布によると、河道内の $x=7\text{ m}$ でも河道側岸（ $y=11\text{ m}$ ）近くで依然波高が高い。測点（ x, y ）=（6 m, 11 m）の波高は、測点（8 m, 11 m）の値の約1/2まで低下したが、 $x=6\text{ m}$ 測線上の $y \leq 13\text{ m}$ の河道中央より側岸寄りでは依然として波高が高い。入射波高の低いこのケースでは側岸部の波高の高い領域（Mach stem）が、比較的緩い速度で河道中央へ広がったことがわかる。一方、波条件fのケース（図-8.11）の横断方向波高分布によると、 $x=9\text{ m}$ から $x=8\text{ m}$ の間で壁近くの H_1 が急激に小さくなった。そして、 $x=6\text{ m}$ ではほぼ一様な波高分布になっており、波高分布の一様化が急速に生じた。入射波高の高いこのケースでは砕波による段波先端部での混合が激しいため、波高分布の一様化が横断方向へ急速に進んだと考えられる。

$B=8\text{ m}$ 、波条件eとfのケースの H_1 の分布を図-8.12、8.13に示す。これらの結果は $B=4\text{ m}$ の場合（図-8.10、8.11）の波高分布とほぼ同じ傾向を示し、横断方向波高分布の変化過程が明らかである。すなわち、波条件eのケース（図-8.12）では、波の進行に伴い横断方向の波高分布のピーク位置が河道中央（ y の大きい方）へ移動している。しかし、波の進行に伴うその変化は比較的緩やかであり、河道側壁（ $y=7\text{ m}$ ）近くで H_1 が大きい期間が長いことがわかる。一方、波条件fのケース（図-8.13）では、横断方向の波高分布を見ると壁近くの H_1 が急速に低下し、 $x=6\text{ m}$ では横断方向にほぼ一様な H_1 の分布になっている。

以上のように、河道幅の広い $B=4, 8\text{ m}$ のケースでは、波条件により河道内における波の変形状況が異なる。入射波高の低い波条件eの場合では、壁近くの波高が高い領域（Mach stem）がそのピーク波高を低下させつつ徐々に河道横断方向へ広がった。一方、入射波高が高く砕波による段波先端部での混合が激しい波条件fの場合では、河道横断方向の波高の一様化が急速に進行した。

次に、 $B=4\text{ m}$ で $\theta=45^\circ, 90^\circ$ の場合の壁沿いおよび横断方向の H_1 の分布について考察する。ただし、 $\theta=90^\circ$ の場合の壁に沿う H_1 の分布は、河道側壁沿いおよびその延長上の $y=11.05\text{ m}$ 測線上での

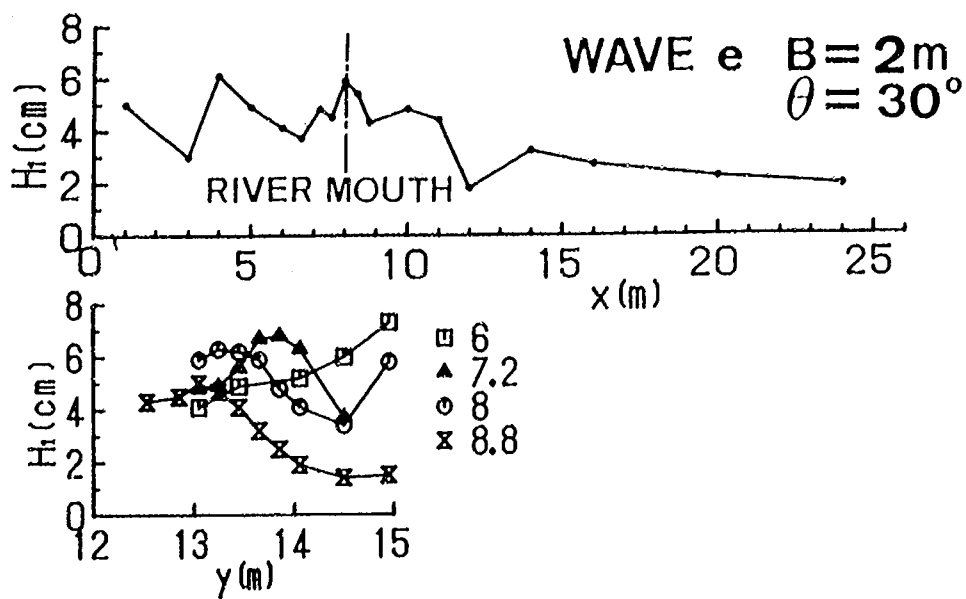


図-8.8 H_1 の縦横断分布 (波条件 e, $B=2\text{m}$, $\theta=30^\circ$)

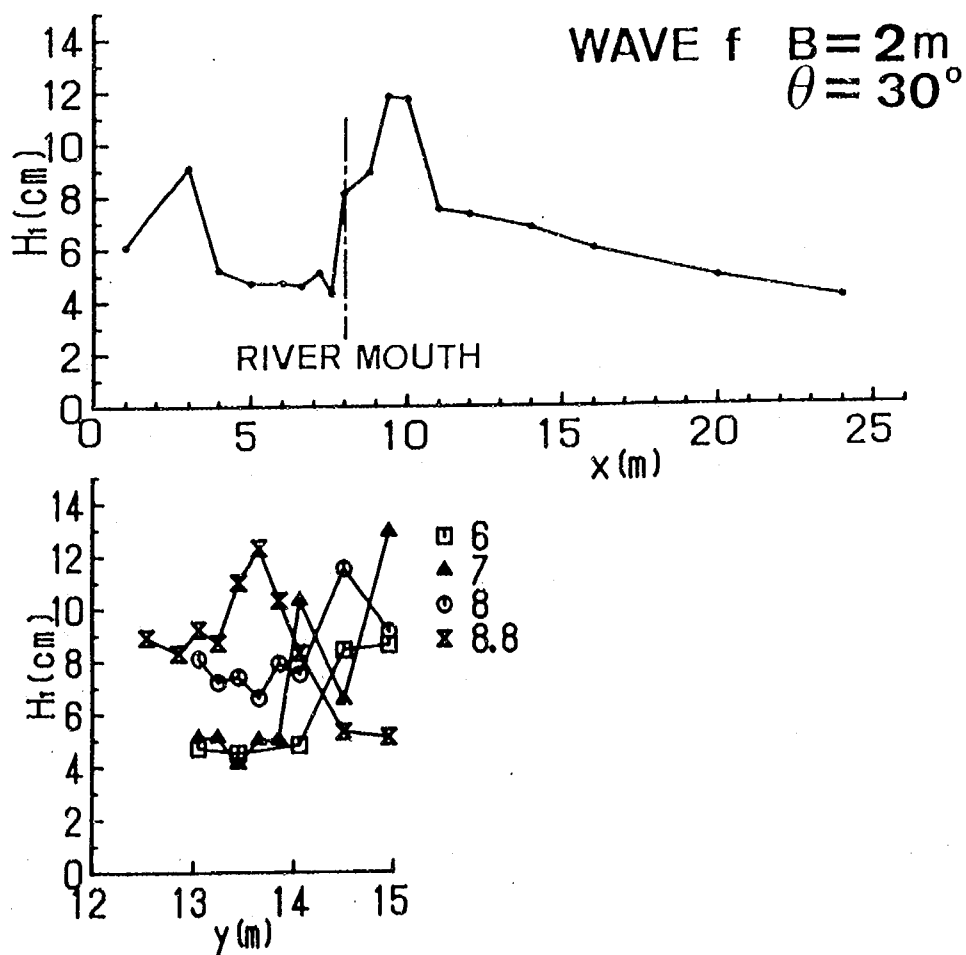


図-8.9 H_1 の縦横断分布 (波条件 f, $B=2\text{m}$, $\theta=30^\circ$)

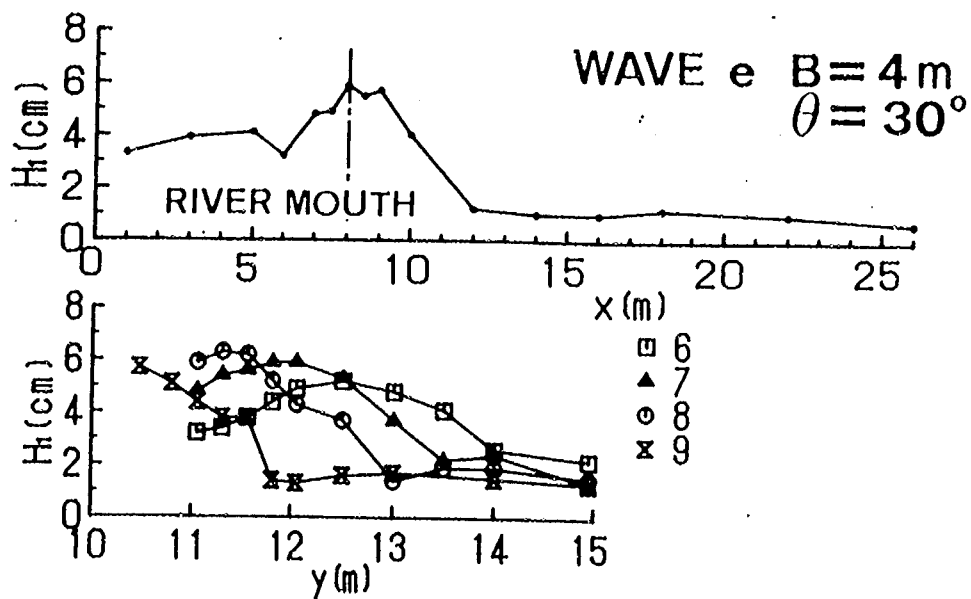


図-8.10 H_1 の縦横断分布 (波条件e, $B=4\text{ m}$, $\theta=30^\circ$)

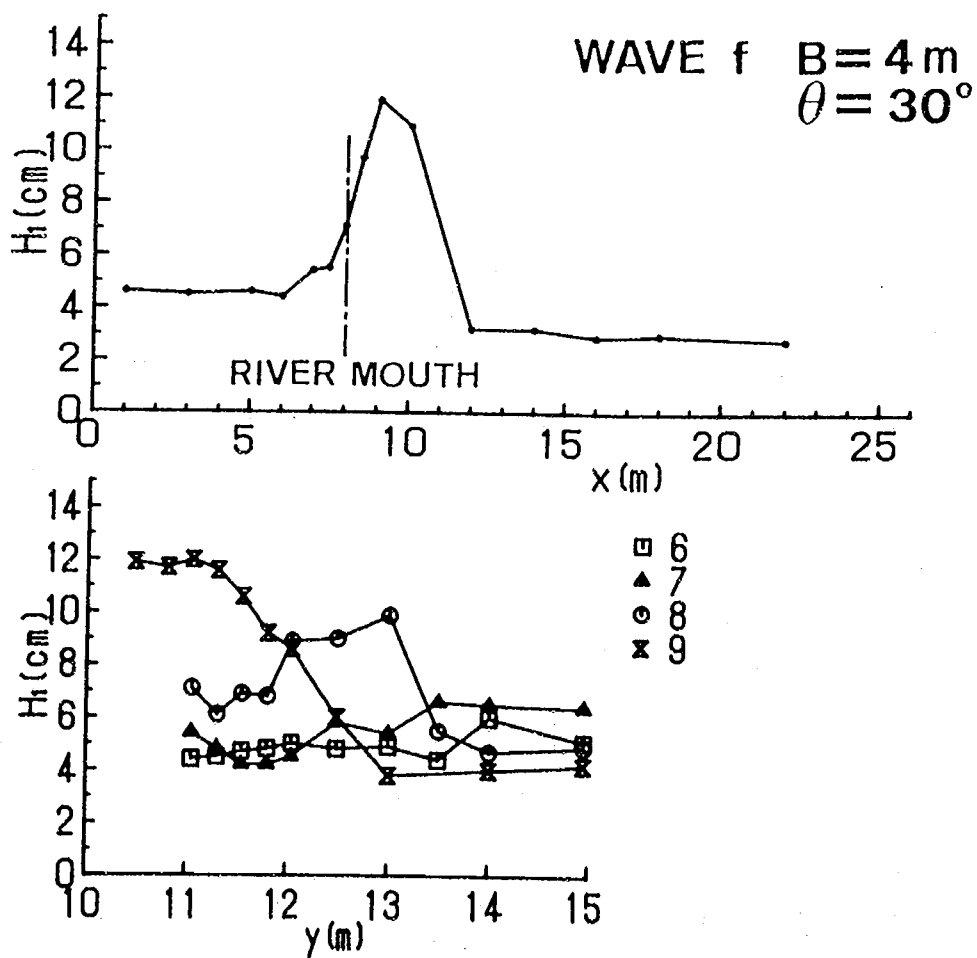


図-8.11 H_1 の縦横断分布 (波条件f, $B=4\text{ m}$, $\theta=30^\circ$)

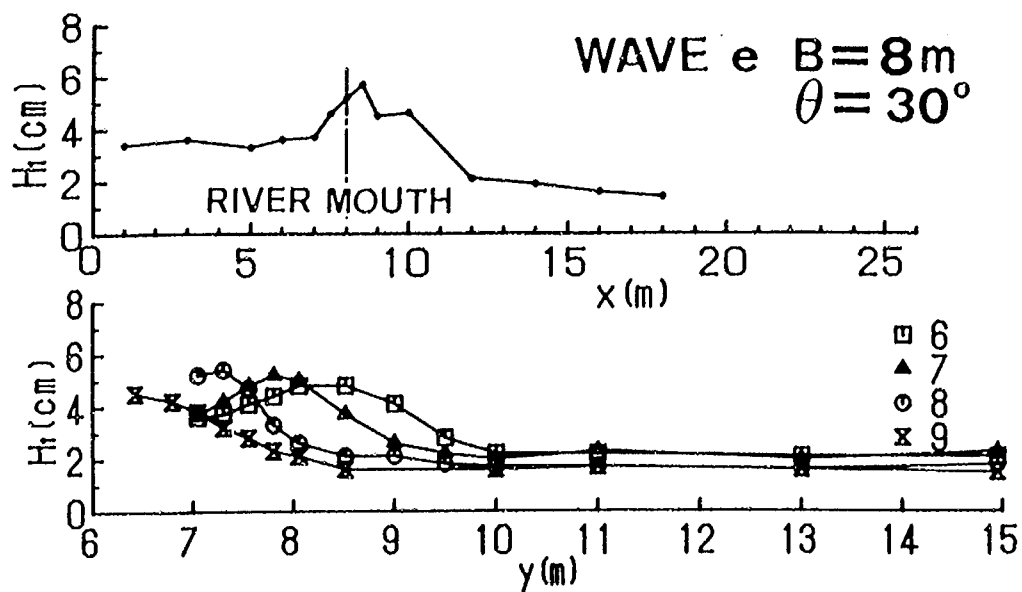


図-8.12 H_1 の縦横断分布 (波条件e, $B=8\text{m}$, $\theta=30^\circ$)

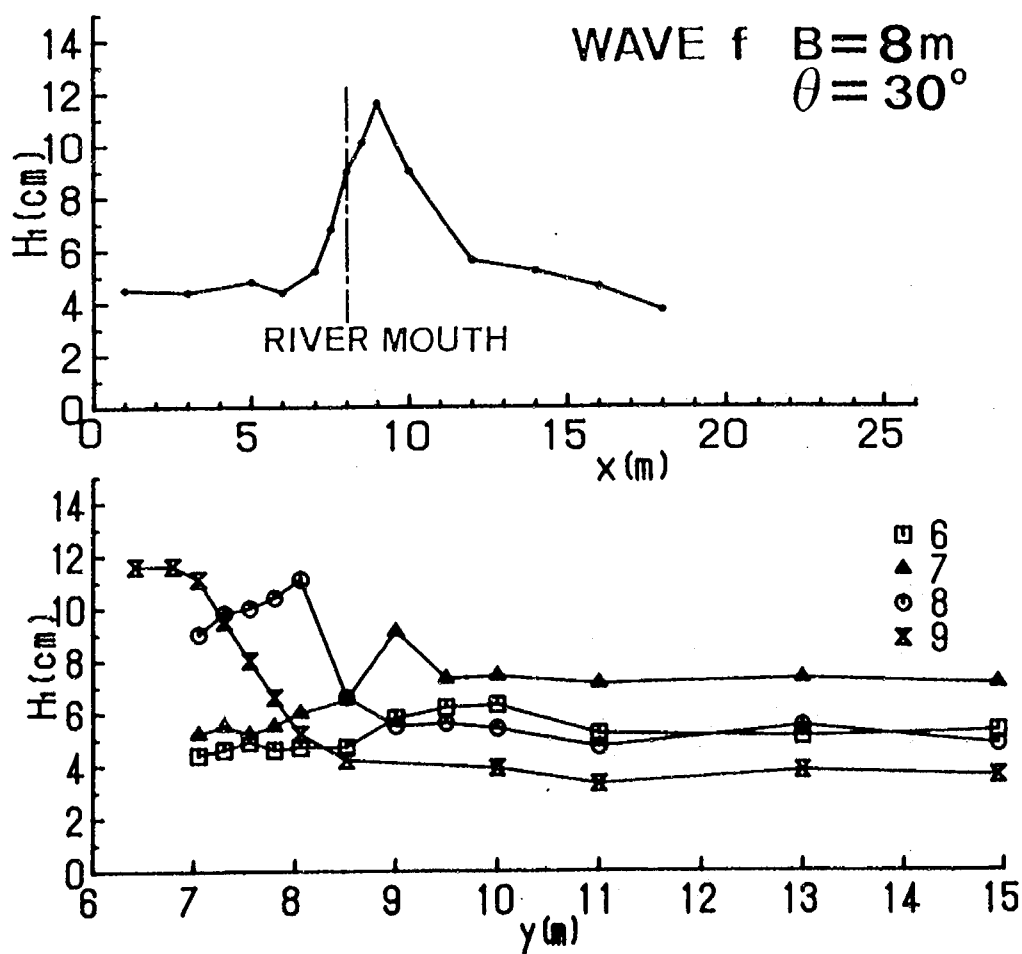


図-8.13 H_1 の縦横断分布 (波条件f, $B=8\text{m}$, $\theta=30^\circ$)

分布を示す。 $\theta = 45^\circ$ 、波条件eのケース（図－8.14）では、壁に沿う H_1 の変化はあまり大きくない。 H_1 は河口より約0.5 m沖（ $x = 8.5$ m）で砕波して低くなった後、 $x < 8$ mの水平床上ではほぼ一定である。横断方向の波高分布も一様に近い形状を持ち、河道側壁（ $y = 11$ m）近くでやや H_1 が大きいのみである。波条件fのケース（図－8.15）の壁に沿う H_1 の分布を見ると、河口（ $x = 8$ m）まで H_1 は急激に増加し、砕波により急激に低下した後、 $x < 6.5$ mではほぼ一定となった。横断方向分布によると、測点（8 m, 11 m）と点（9 m, 10 m）に明らかなように境界壁近傍のみ局所的に H_1 が大きい、河道内に位置する $x = 7$ mと6 m測線上ではほぼ一様な分布になっている。 $\theta = 90^\circ$ のケース（図－8.16, 8.17）の壁に沿う H_1 の分布を見ると、両波条件ともに河口（ $x = 8$ m）周辺を除いて河道内の H_1 の変化は小さい。横断方向の H_1 の分布も、 $x = 8.05$ mにおいて反射により $y \leq 11$ mの範囲で H_1 の増加がみられる他は一様な分布になっている。

8.3.2 波先線の変化

河道内での波高の一様化にみられるような波の場の横断方向変化を、波先線の変形の面より検討する。波先線の描き方は実験Ⅱと同様である。以下ではBが4 mと一定の場合について述べる。 $\theta = 30^\circ$ のケースでは壁沿いにMach stemが形成された。図－8.18と図－8.19を見ると、波条件e, fともに河口部（ $x = 8$ m）付近で波の進行方向に 30° 傾いた境界壁近くの波先の突出した部分（Mach stem）が河道内へ広がっていく状況がみられる（両図 $y = 11 \sim 13$ mの範囲）。砕波に伴う波先端部での混合が激しい波条件fのケースでは、波条件eのケースに比べ $7 \leq x \leq 8$ mの範囲で壁（ $y = 11$ m）近くの波先の突出量が大きい。しかし、 $x = 8$ mから $x = 1$ mにかけて壁近くの波先線の突出部分が急速に広がり、横断方向に直線状の波先を示すようになった（図－8.19）。このことから、段波先端部の混合が激しい波条件fの場合に横断方向の波の一様化が早く進行することがわかる。 $\theta = 45^\circ$ のケース（図－8.20と図－8.21）では、波条件e, fともに壁面近くの波先線は河口（ $x = 8$ m）付近においてあまり突出していない。ただし、波条件fのケースでは、 $x = 2 \sim 5$ mの範囲で河道側岸（ $y = 11$ m）に近いほど波先は進行方向に突出している。これは、 45° に傾いた境界壁からの回折波が入射波に追いついて先端部の波高が増し、そのため波速が増加したことによると考えられる（図－8.6参照）。このように、 $\theta = 45^\circ$ の場合では波の進行方向に傾いた境界壁から反射した波が河道内に回折し、波の進行に影響することがわかった。

$\theta = 90^\circ$ のケース（図－8.22と図－8.23）では、波条件e, fともに河道内を横断方向にほぼ平行に波先線が進行している。 $\theta = 90^\circ$ の場合、河口部での波の変形の影響は河道内にほとんど及ばず、河道内を一次的に波が進行することがわかる。

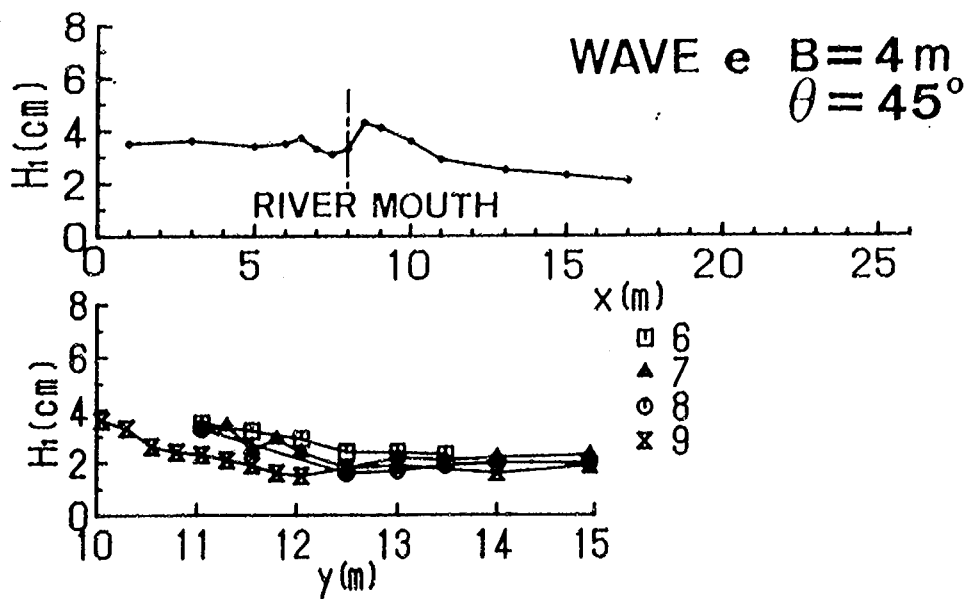


図-8.14 H_1 の縦横断分布 (波条件e, $B=4\text{ m}$, $\theta=45^\circ$)

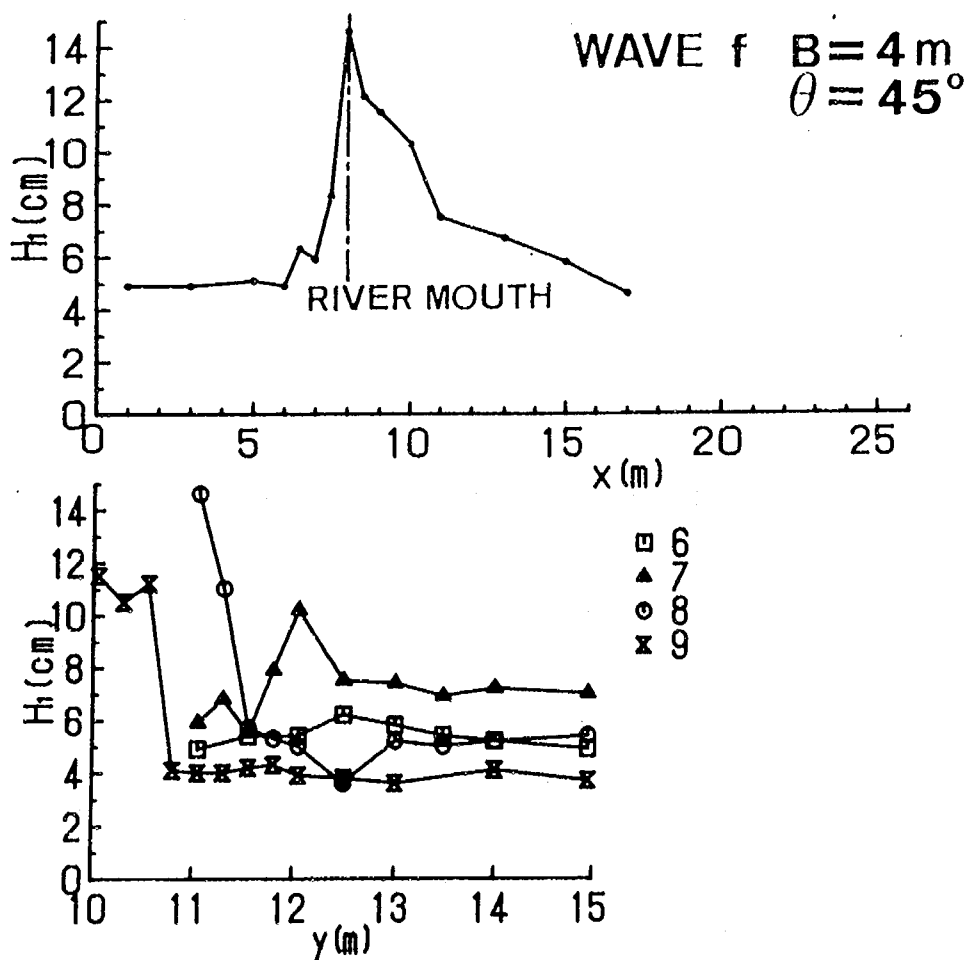


図-8.15 H_1 の縦横断分布 (波条件f, $B=4\text{ m}$, $\theta=45^\circ$)

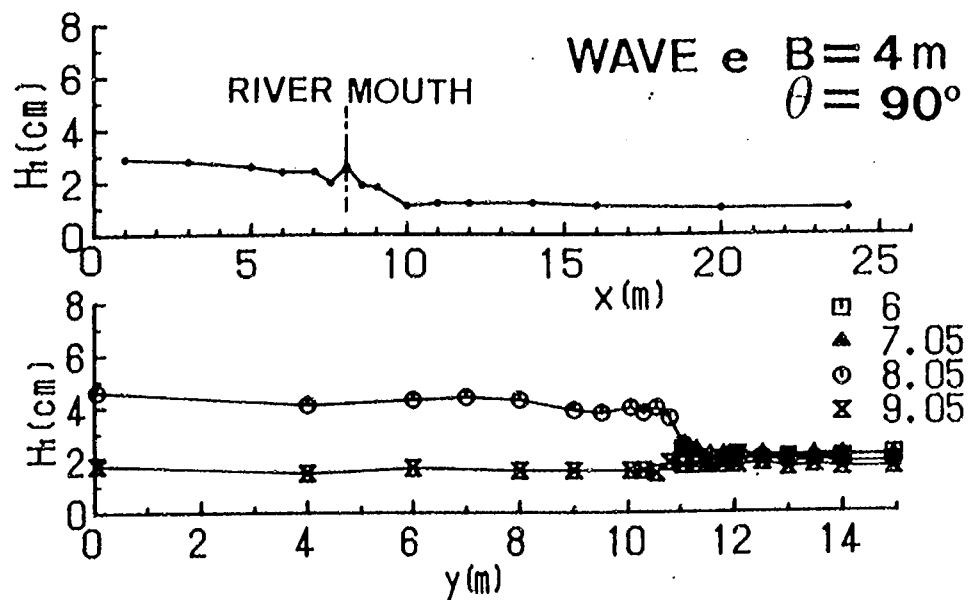


図-8.16 H_1 の縦横断分布 (波条件e, $B=4\text{ m}$, $\theta=90^\circ$)

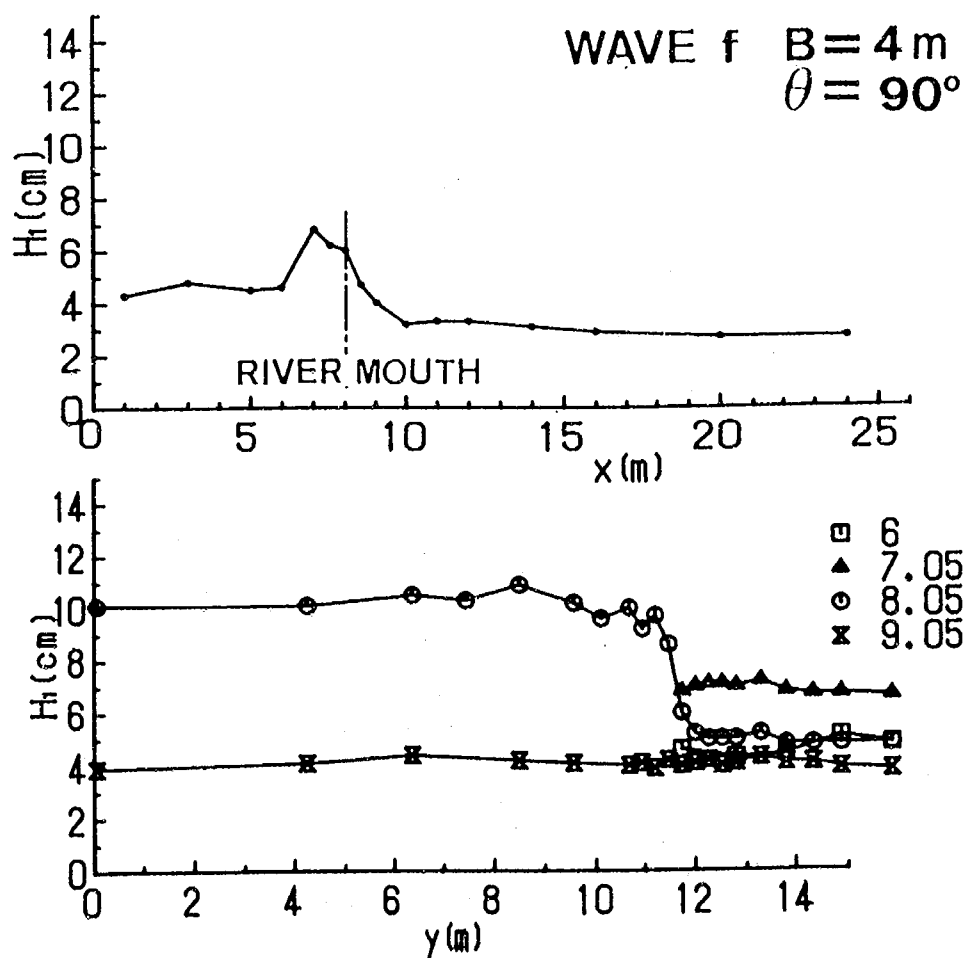


図-8.17 H_1 の縦横断分布 (波条件f, $B=4\text{ m}$, $\theta=90^\circ$)

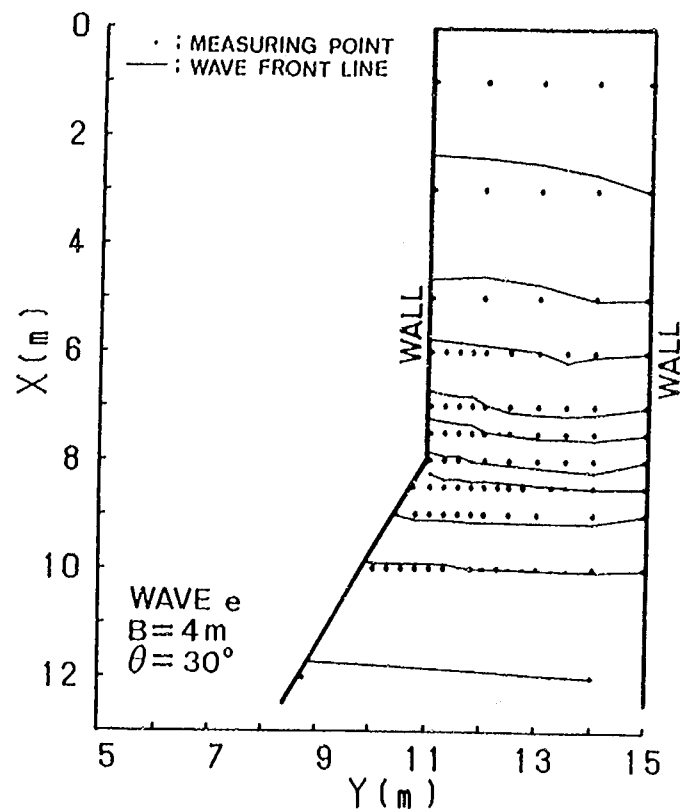


図-8.18 波先線の変化 (波条件 e, $B = 4\text{ m}$, $\theta = 30^\circ$)

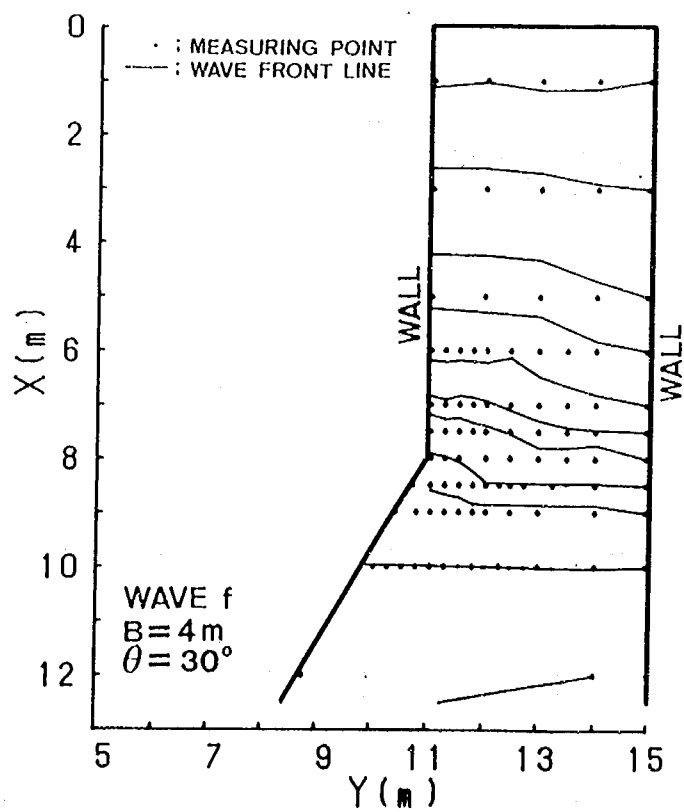


図-8.19 波先線の変化 (波条件 f, $B = 4\text{ m}$, $\theta = 30^\circ$)

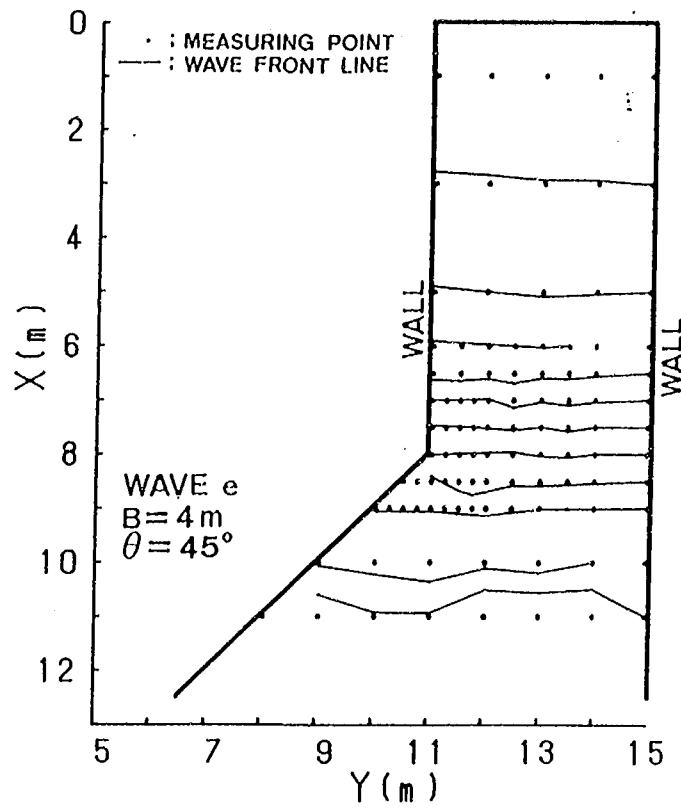


図-8.20 波先線の変化 (波条件e, $B = 4\text{ m}$, $\theta = 45^\circ$)

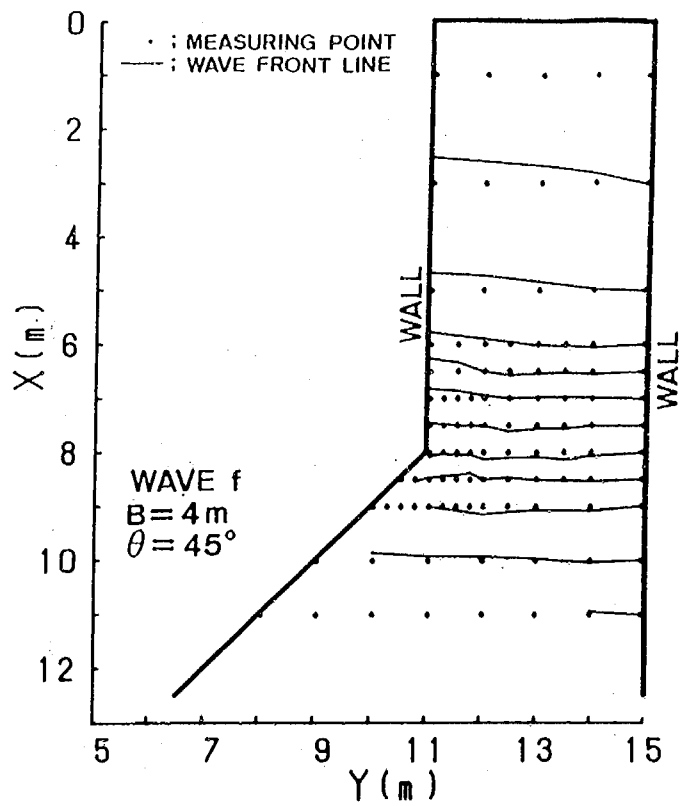


図-8.21 波先線の変化 (波条件f, $B = 4\text{ m}$, $\theta = 45^\circ$)

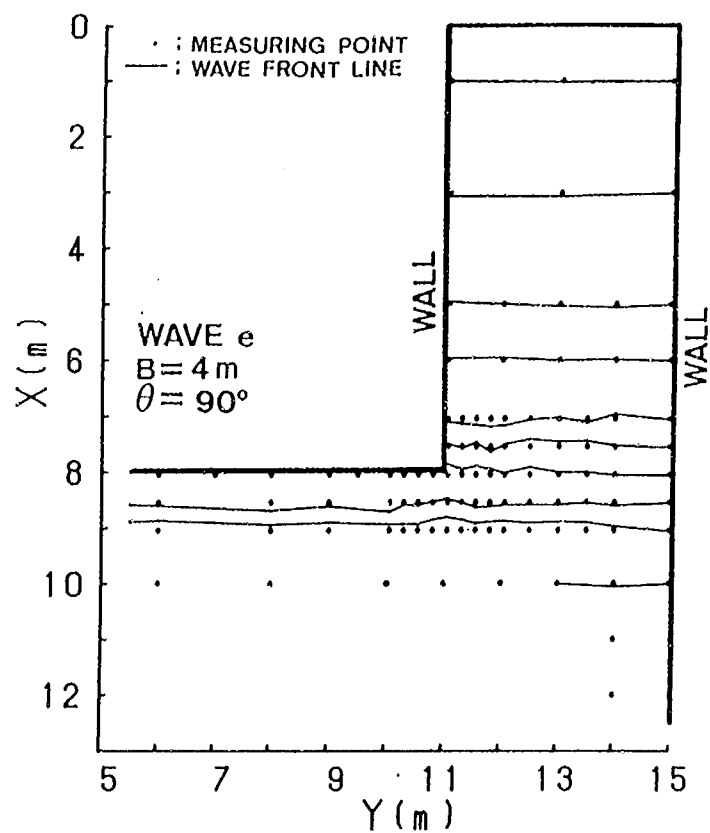


図-8.22 波先線の変化 (波条件 e, $B = 4\text{ m}$, $\theta = 90^\circ$)

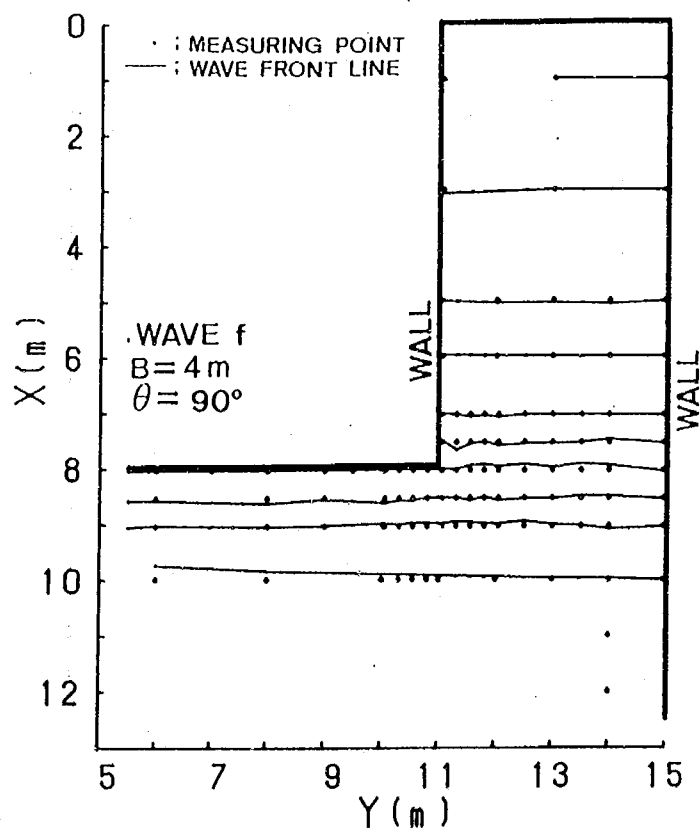


図-8.23 波先線の変化 (波条件 f, $B = 4\text{ m}$, $\theta = 90^\circ$)

8.4 結 論

1 / 100 勾配の一様斜面上を進行する波状段波が、海岸で変形した後、河道へ進入して河川を遡行する際の変形を実験的に明らかにした。実験によって得られた主な結論を以下に記す。

① 河道幅 $B = 2 \text{ m}$ のケースでは、河道に進入した波が河道両側岸で反射を繰り返し、横断方向に一様化した。河道幅 $B = 4, 8 \text{ m}$ のケースでは、波条件により河道内での波の変形状況が異なった。入射波高の低い波条件 e では、河道側岸部の波高が高い領域 (Mach stem) が河道横断方向へそのピーク波高を低下させつつ徐々に広がった。一方、入射波高が高く、砕波による段波先端部での混合が激しい波条件 f では、河道横断方向に波高の一様化が急速に進行した。

② $\theta = 30^\circ$ のケースでは、段波先端部の混合が激しい波条件 f の場合に横断方向の波の一様化が早く進行した。また、 $\theta = 45^\circ$ のケースでは傾いた境界壁から反射した波が河道内に回折し、波の進行に影響することがわかった。 $\theta = 90^\circ$ のケースでは、河口部での波の変形の影響は河道内にほとんど及ばず、河道内を一次元的に波が進行することがわかった。

9. ま と め

1 / 100 勾配を有する一様斜面上を進行する波状段波を対象として、その先端部第一波に着目して Mach stem, edge bore の挙動、および河道内に波状段波が進入する際の変形を実験的に明らかにした。Mach stem に関しては、波高分布や Mach stem の広がりについて Melville が行った実験と定性的には同じ傾向が得られた。水平床上の孤立波を対象とした Miles の理論や Melville の実験とは定量的比較に無理があり、別の理論的枠組が必要である。

Edge bore については、1 / 100 勾配斜面上を進行する波状段波に関して、波の進行方向に対する斜面の傾き角、斜面勾配、波条件ごとに Chen が示した edge bore の形態を整理できた。また、斜面勾配が $\tan \beta = 1 / 20$ 以下に緩いと edge bore は形成されないことを示した。今後実験データより edge bore の形成機構をさらに検討する必要がある。

河道進入時の波の変形に関しては、海岸線の傾き角、波条件の違いによる河道内での波の変形の相違を示した。段波先端部での混合が激しい場合には、河道内で波高の一様化が急速に進行し、波峰は横断方向に直線状に変化することがわかった。一方、混合が弱い場合には、河道側岸部の波高が高い領域 (Mach stem) は比較的ゆっくりと徐々に河道中央へ広がった。

謝 辞

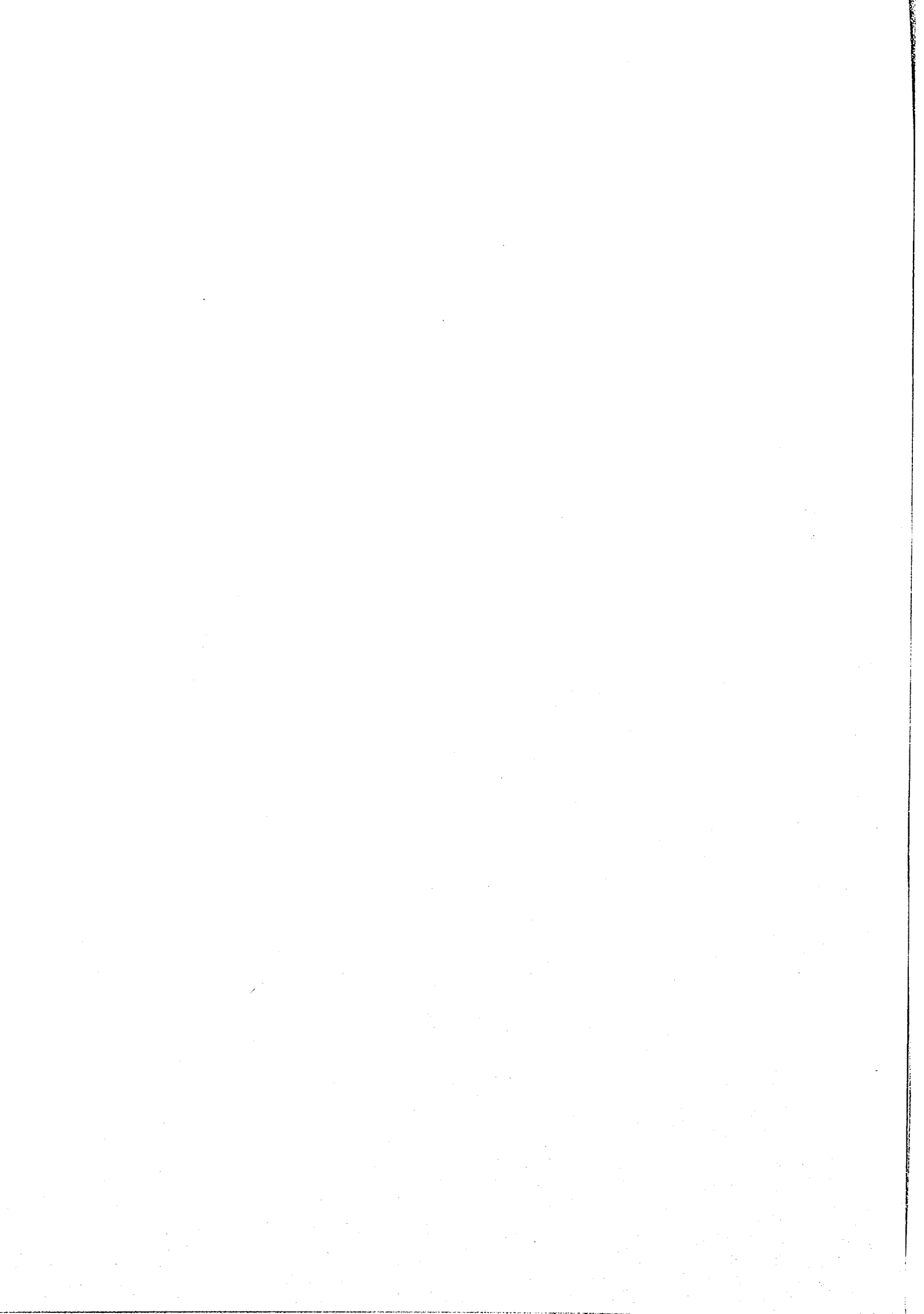
実験の計画およびデータの整理に当たっては梶浦欣二郎東京大学地震研究所名誉教授、都司嘉宣東京大学地震研究所助教授の御指導を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

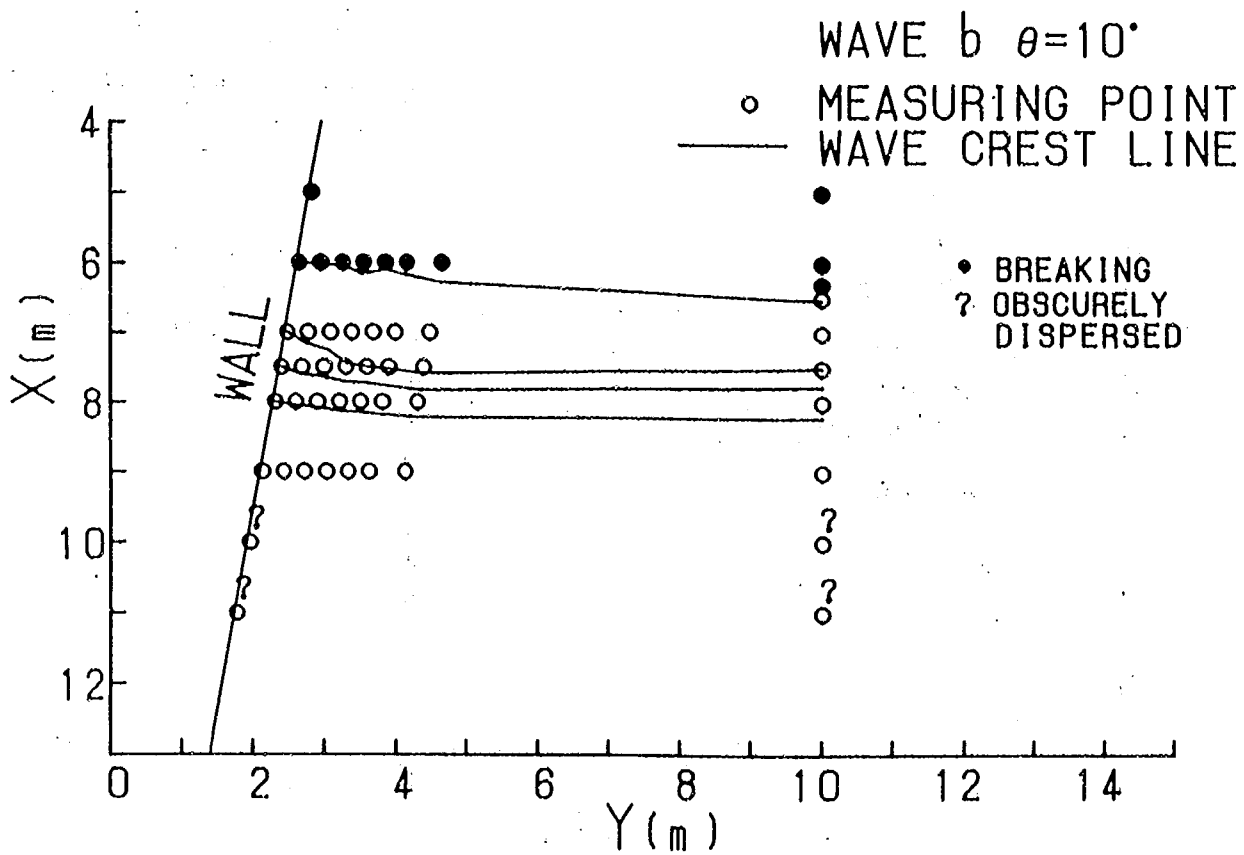
- 1) Shuto, N. : The Nihonkai-Chubu Earthquake Tsunami on the North Akita Coast, Coastal Eng. in Japan, Vol. 28, pp.255 - 264, 1985.
- 2) Shuto, N. : The Nihonkai-Chubu Earthquake Tsunami on the North Akita Coast, No 1 Report, Tsunami Disaster Prevention Lab., Tohoku Univ., pp.12 - 26, 1984 (in Japanese).
- 3) Whitham, G. B. : Linear and Nonlinear Waves, Wiley- Interscience. Pub., 636 p., 1974.
- 4) Perroud, P. H. : The Solitary Wave Reflection along a Straight Vertical Wall at Oblique Incidence, Ph. D. Thesis, Univ. California, Berkley, 1957.
- 5) Chen, T. C. : Experimental study on the Solitary Wave Reflection along a Straight Sloped Wall at Oblique Angle of Incidence, B. E. B. Tech. Memo., No 124, 1961.
- 6) Wiegel, R. L. : Oceanographical Engineering, Prentice- Hall, 532 p., 1964.
- 7) Miles, J. W. : Obliquely Interacting Solitary Waves, Jour. Fluid Mech., Vol. 79, pp.157 - 169, 1977.
- 8) Miles, J. W. : Resonantly Interacting Solitary Waves, Jour. Fluid Mech., Vol. 79, pp.171 - 179, 1977.
- 9) Melville, W. K. : On the Mach Reflection of a Solitary Wave, Jour. Fluid Mech., Vol. 98, pp.285 - 297, 1980.
- 10) Yue, D. K. P., and C. C. Mei : Foreward Diffraction of Stokes Wave by a Thin Wedge, Jour. Fluid Mech., Vol. 99, pp.33 - 52, 1980.
- 11) Divoky, D., and J. Lane : Final Report Edge Bore, Tetra Tech. Report TT-P-228 -73-1, Tetra Tech. Inc., California, 1973.
- 12) Chester, W. : A Model of the Undular Bore on a Viscous Fluid, Jour. Fluid Mech., Vol. 24, pp.367 - 377, 1966.
- 13) Johnson, R. S. : A Non-linear Equation Incorporating Damping and Dispersion, Jour. Fluid Mech., Vol. 42, pp.49 - 60, 1970.

付 図

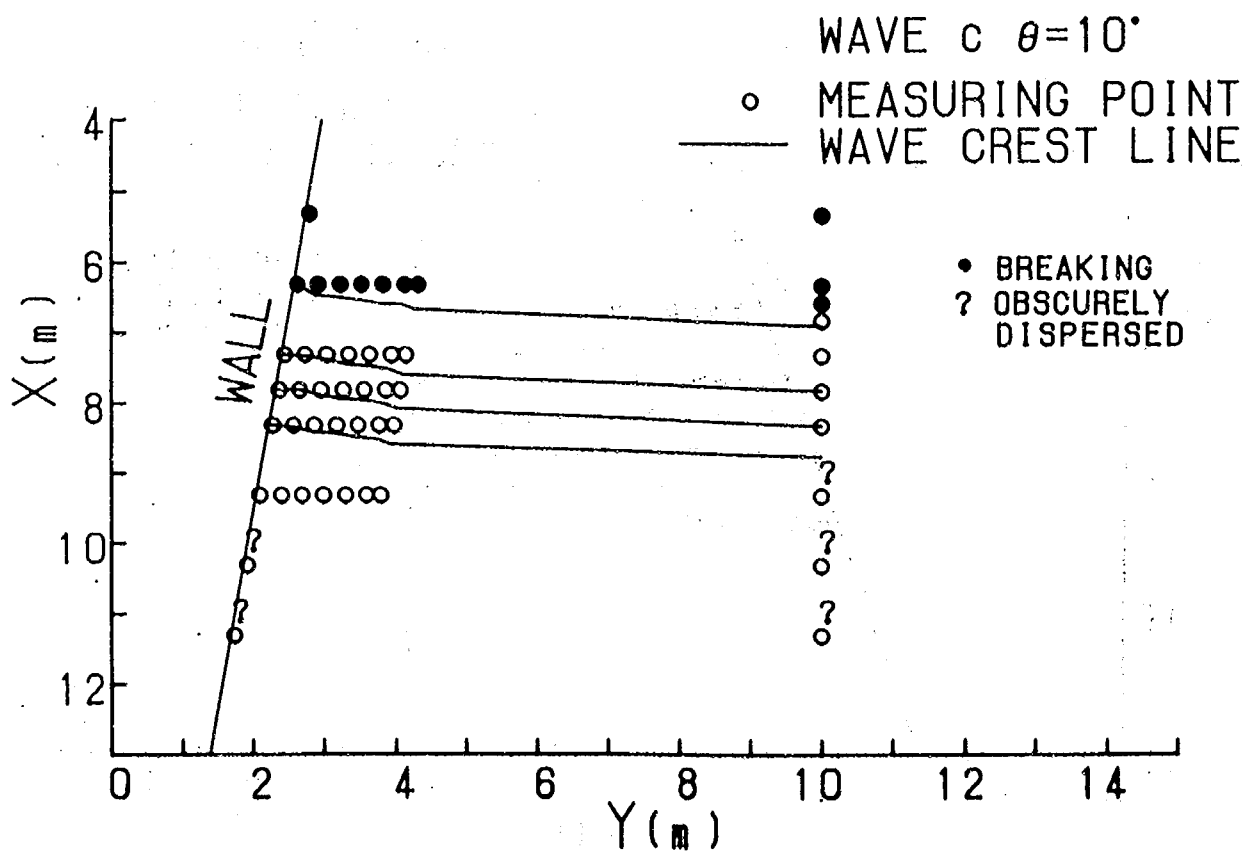
- (1)実験Ⅰ 波峰線図
- (2)実験Ⅱ 測点配置図
- (3)実験Ⅱ 波先線図



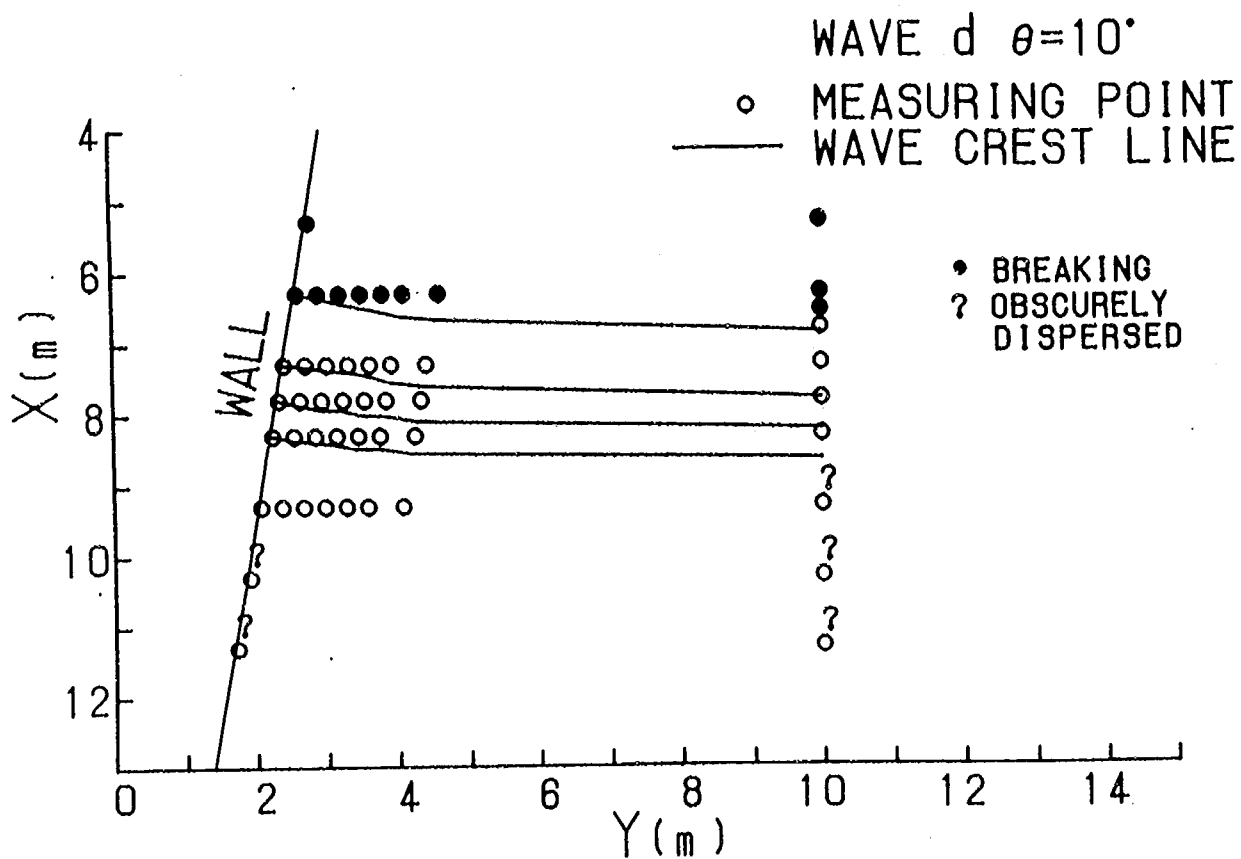
(1)実験Ⅰ 波峰線図



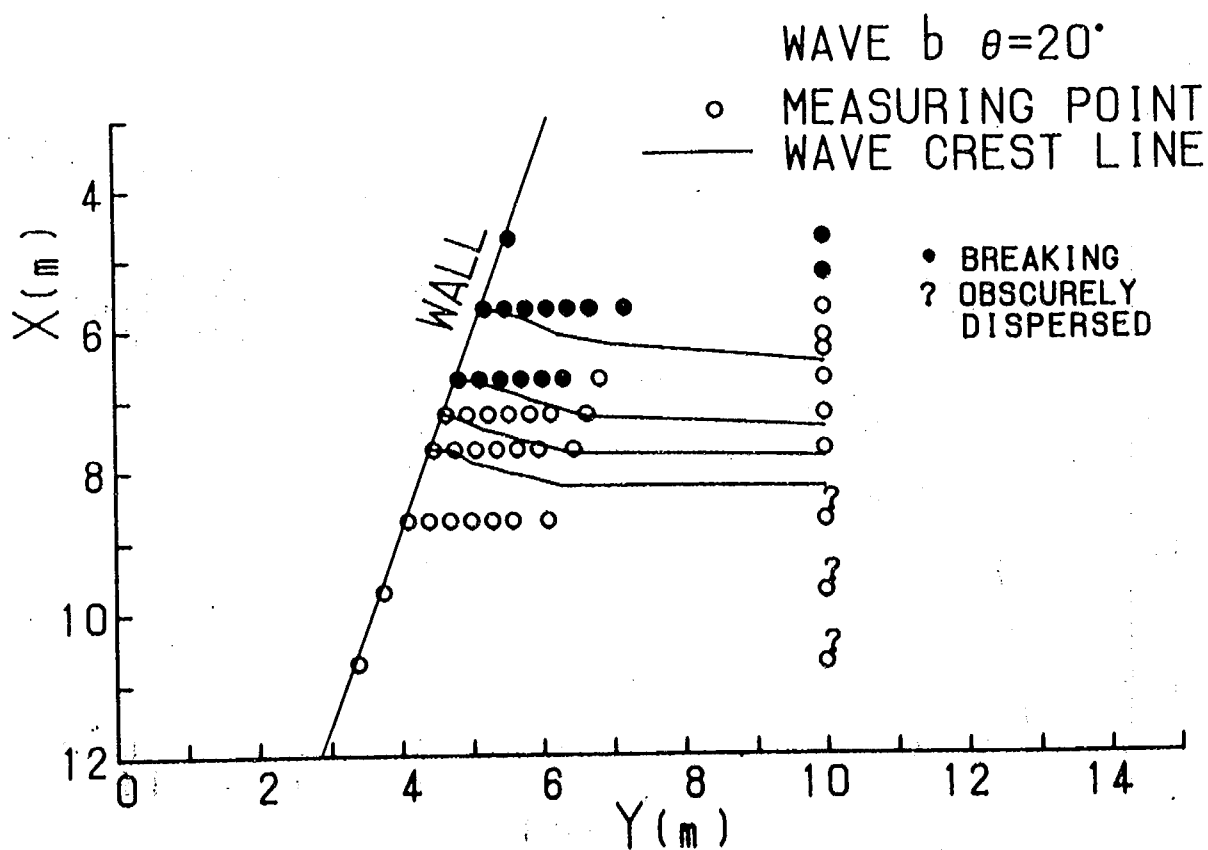
付図 I - 1



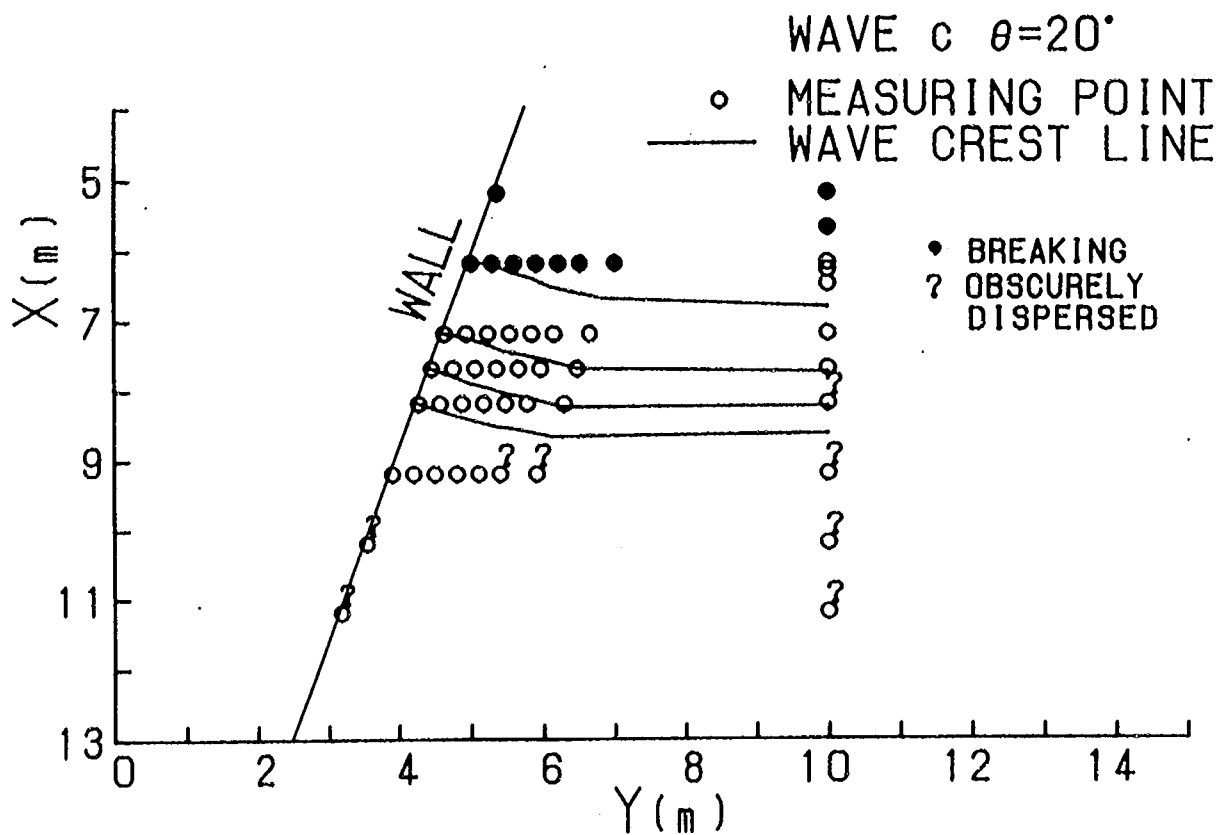
付図 I - 2



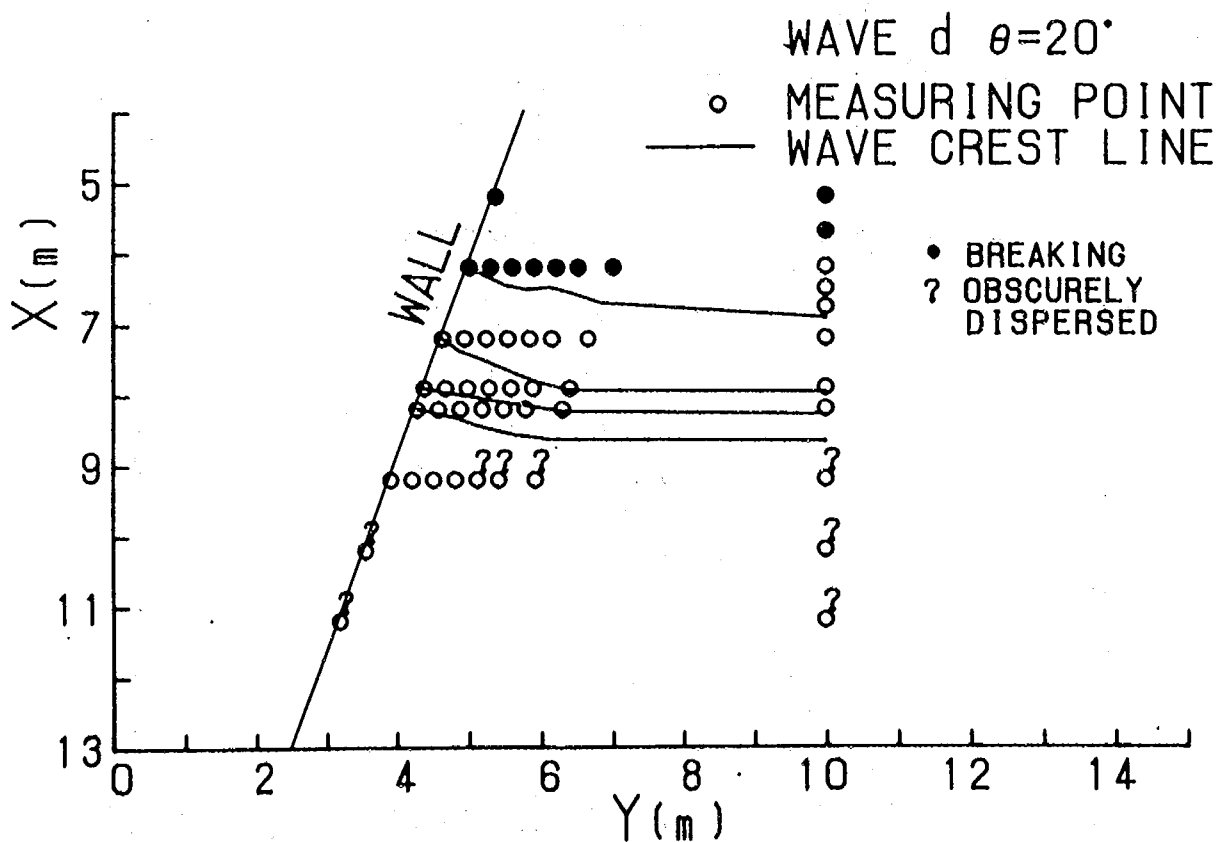
付図 I - 3



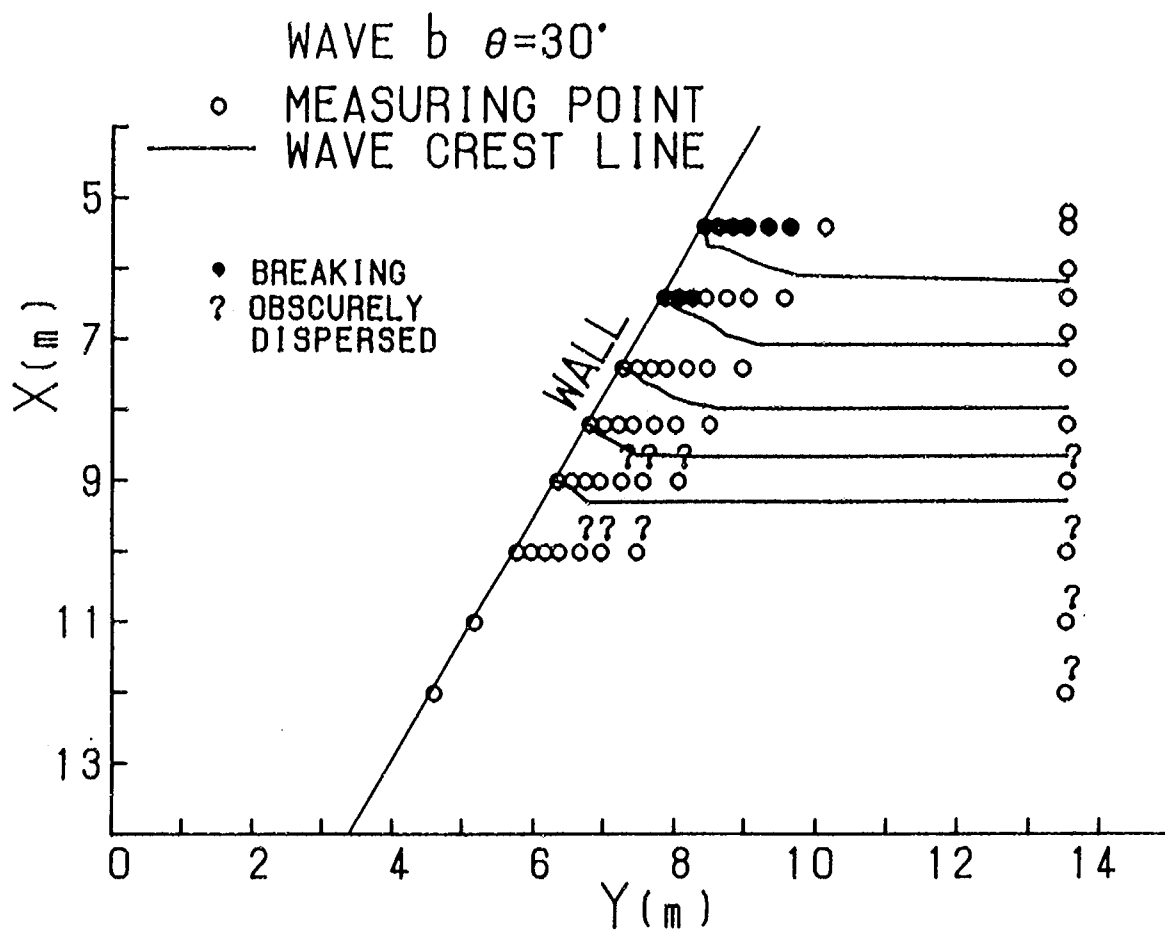
付図 I - 4



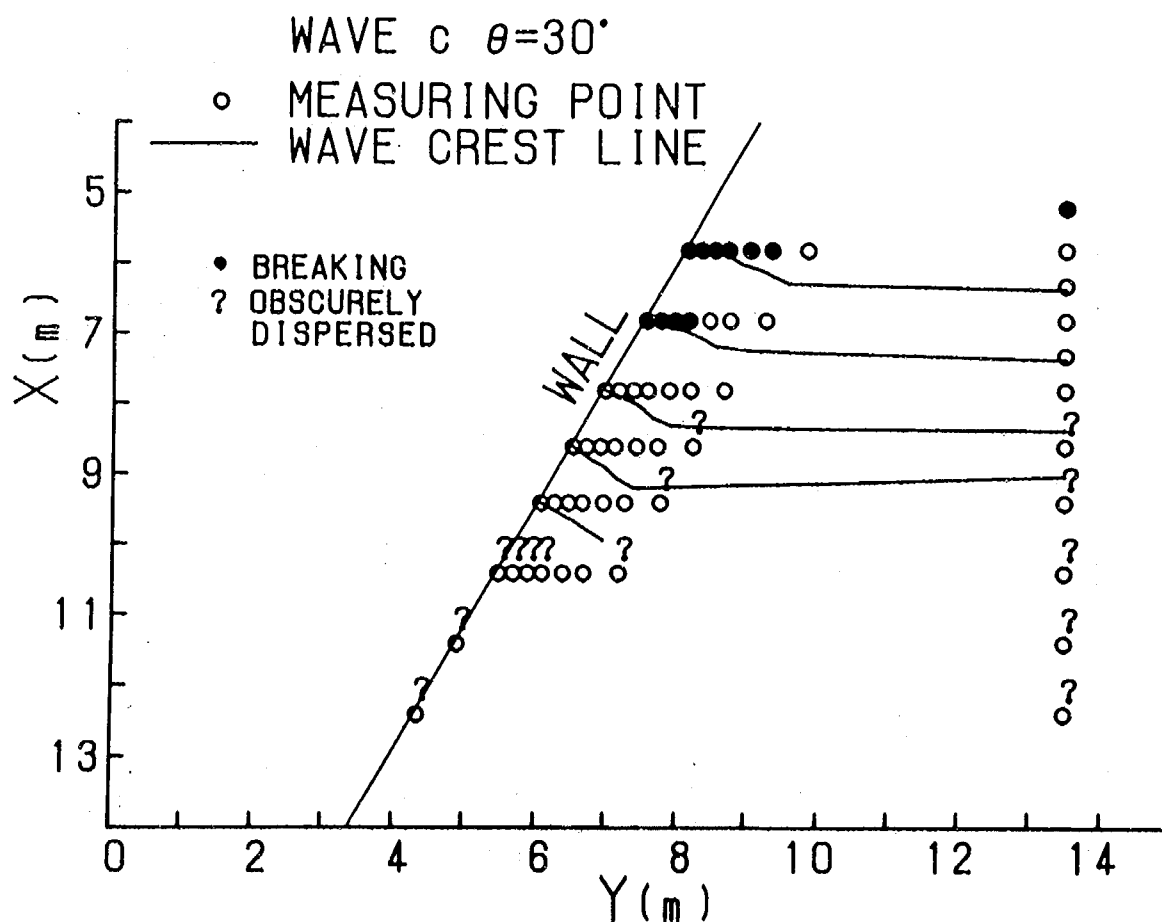
付図 I - 5



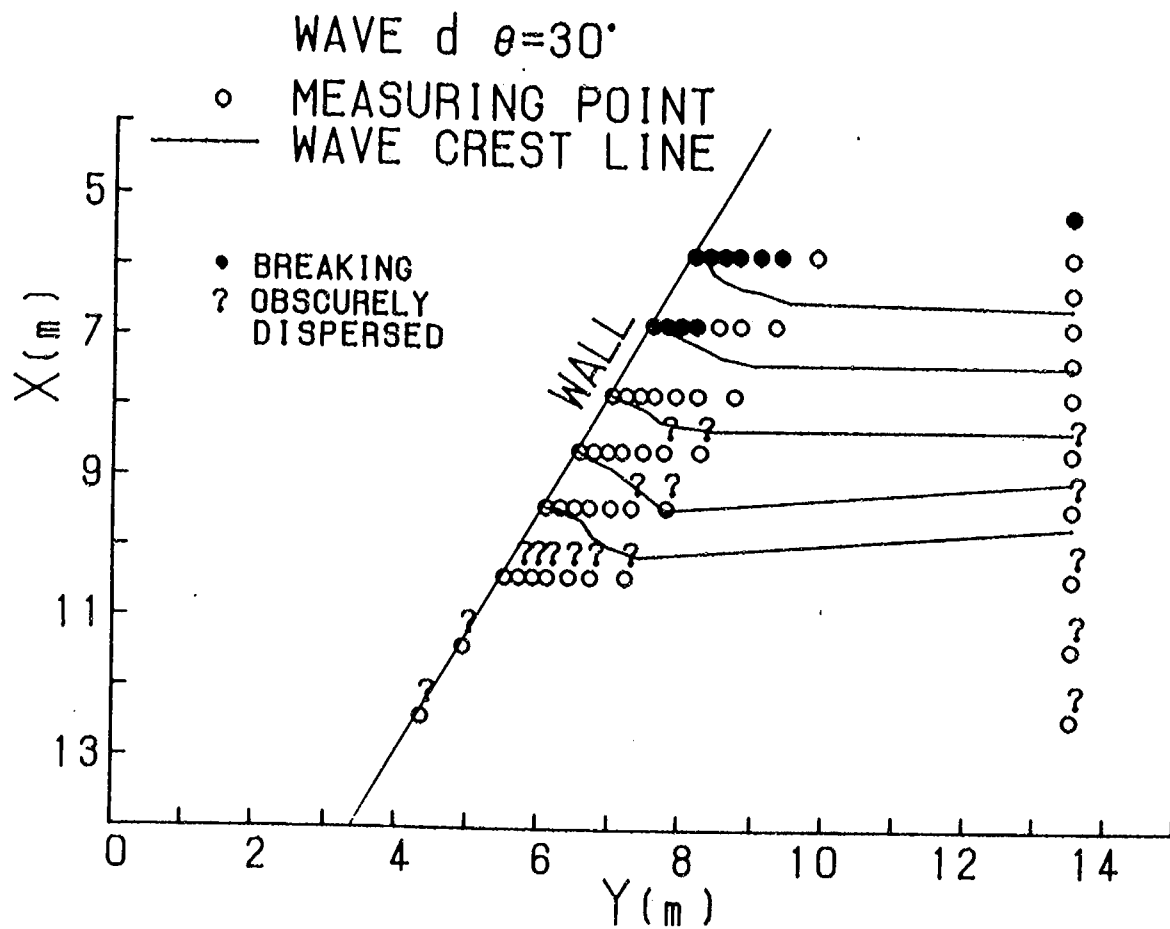
付図 I - 6



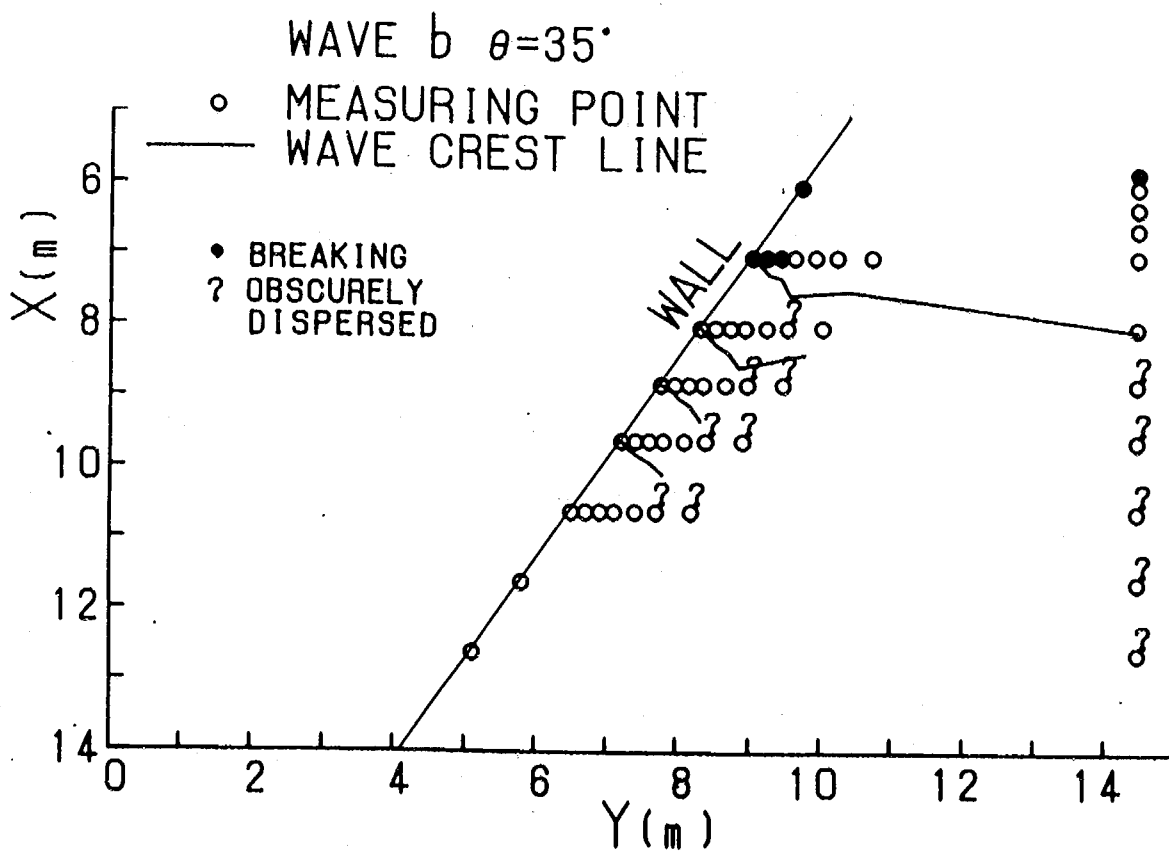
付図 I - 7



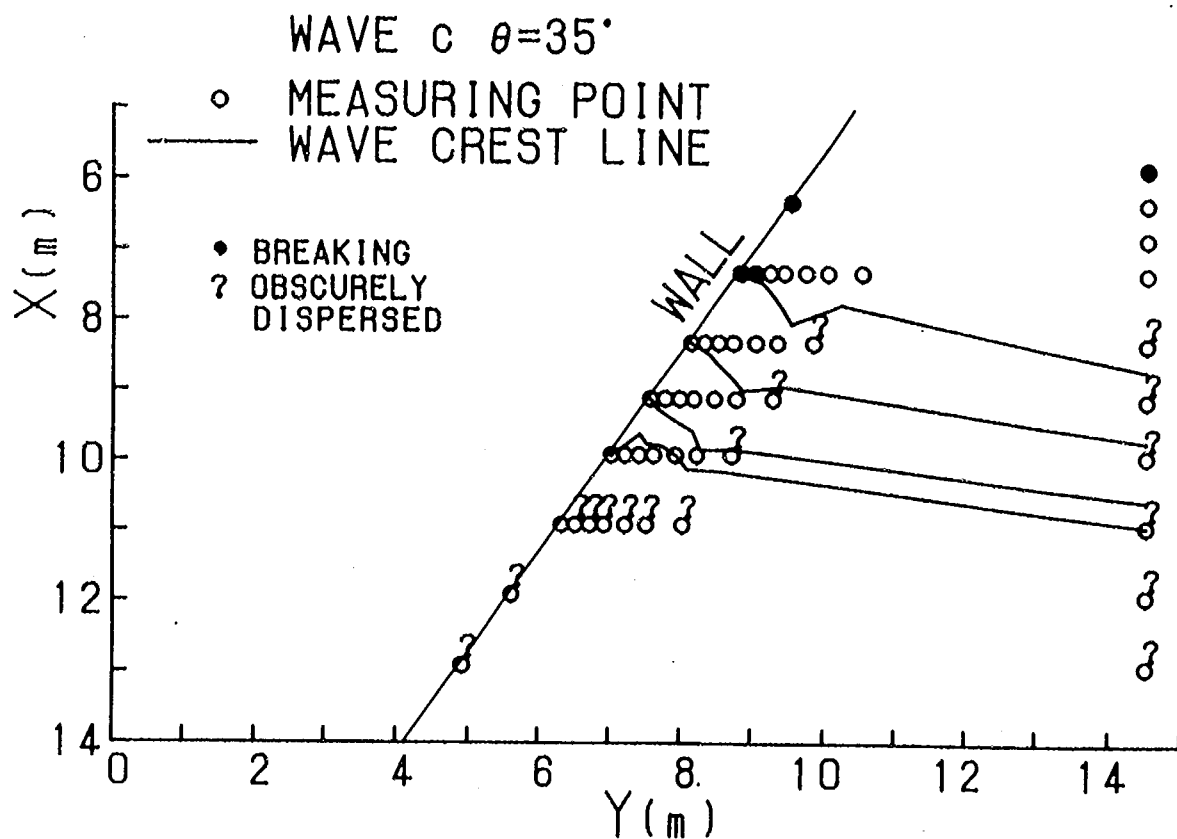
付図 I - 8



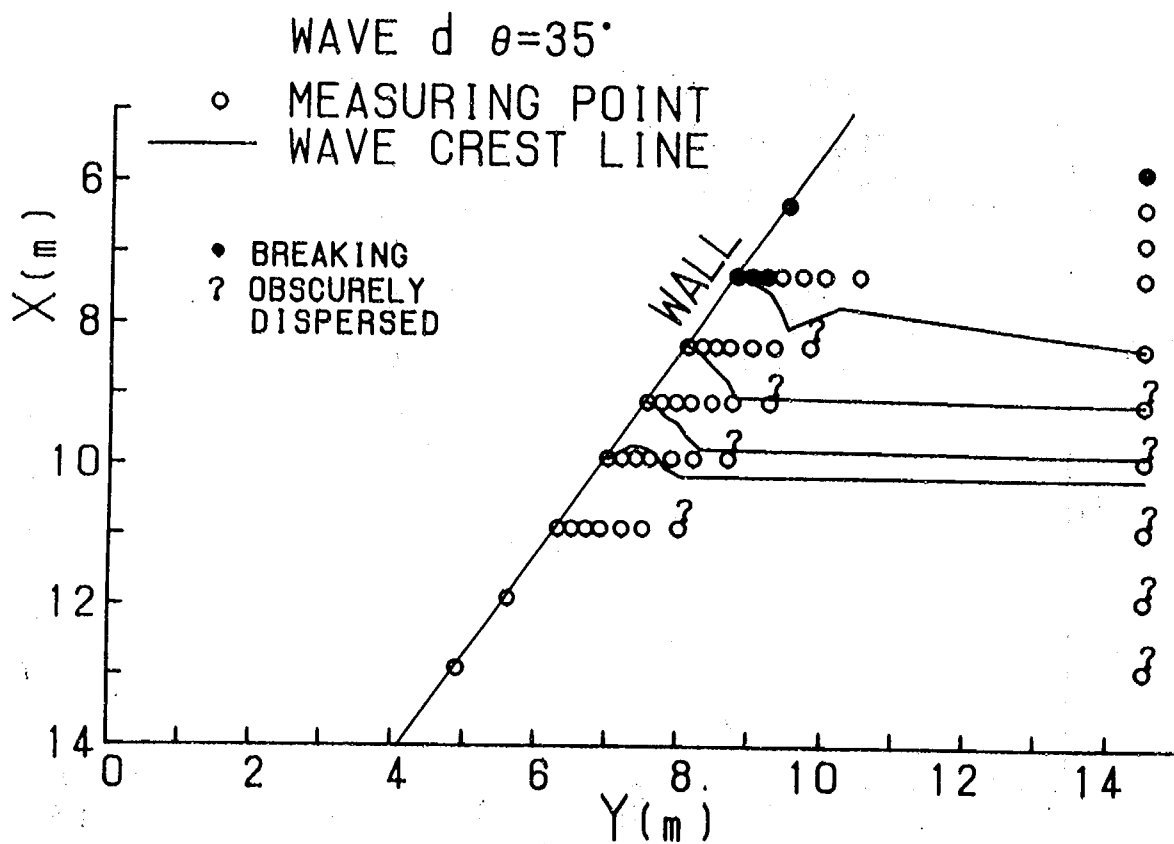
付図 I - 9



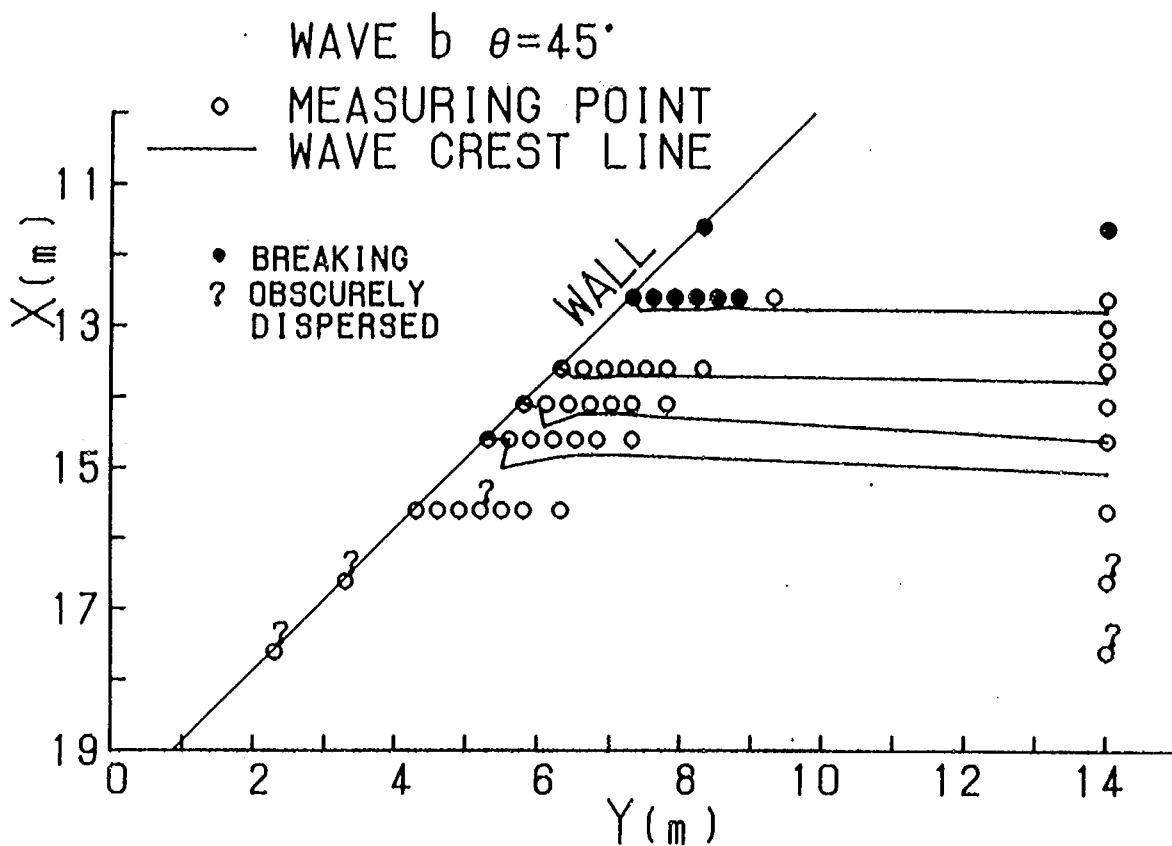
付図 I - 10



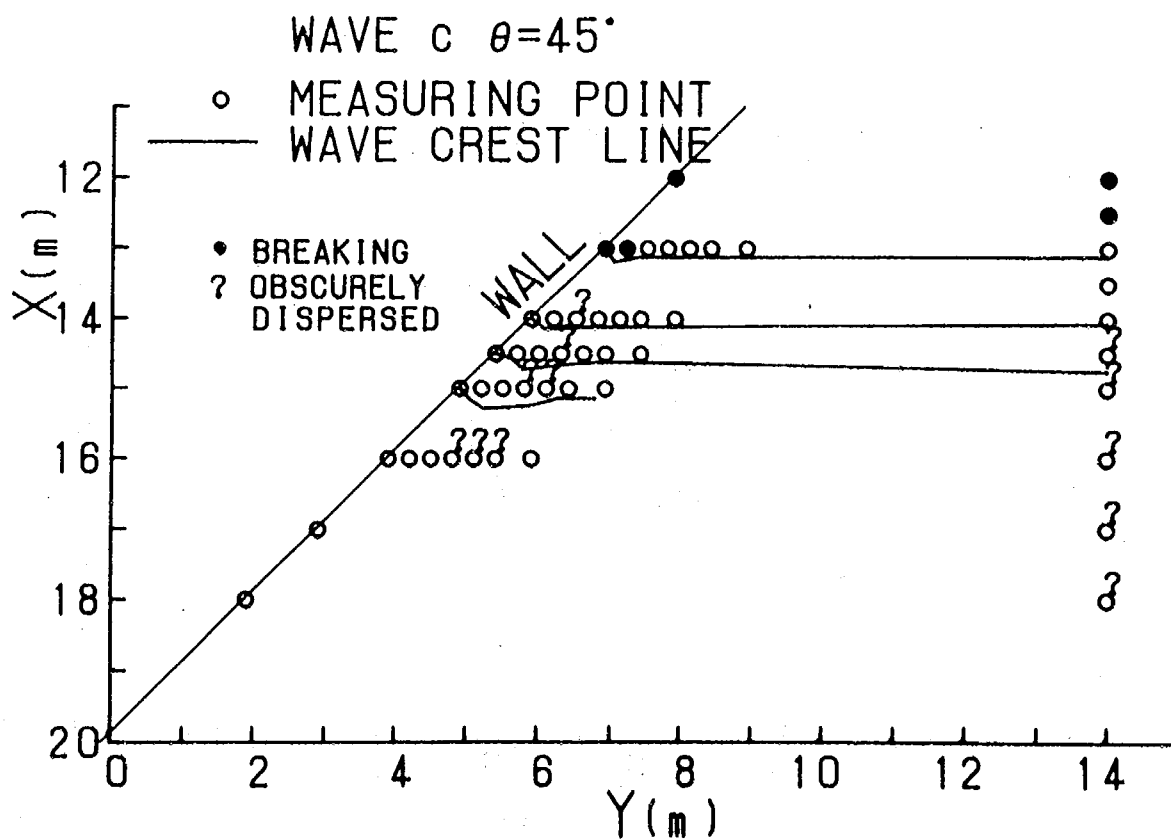
付図 I - 11



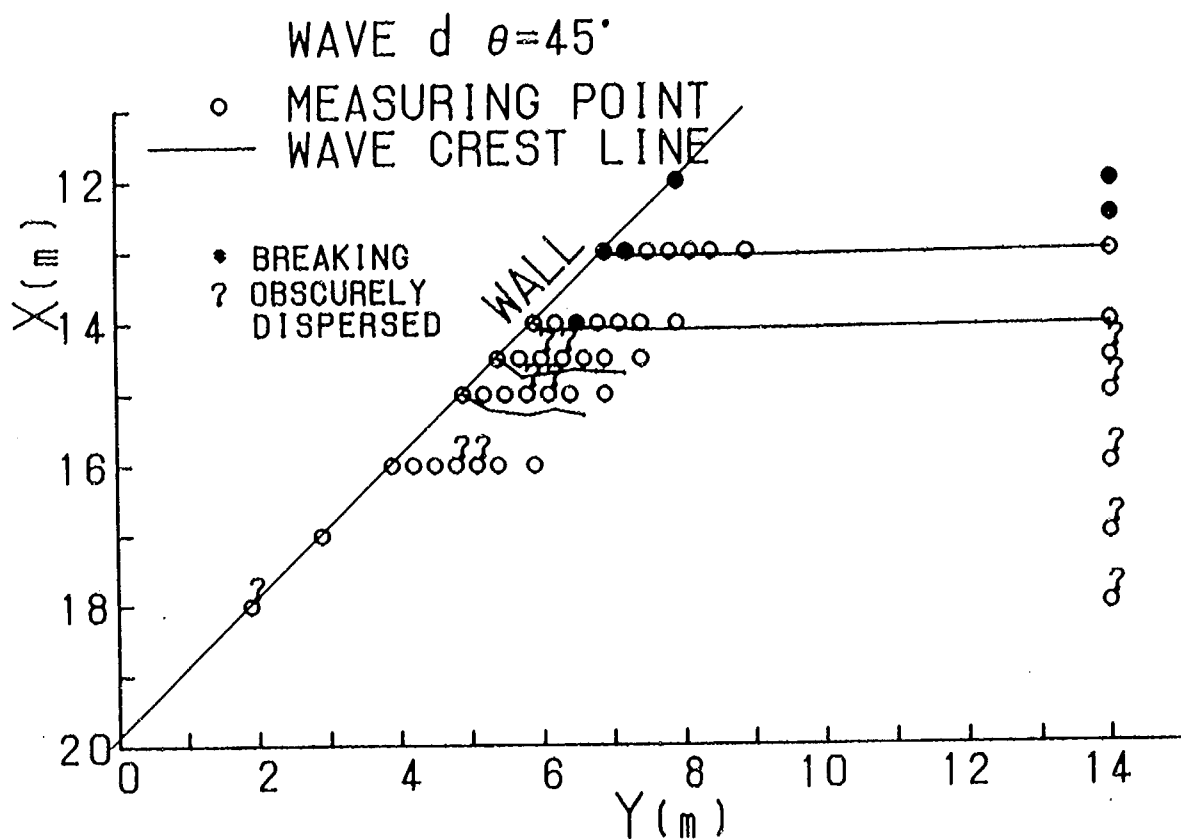
付図 I - 12



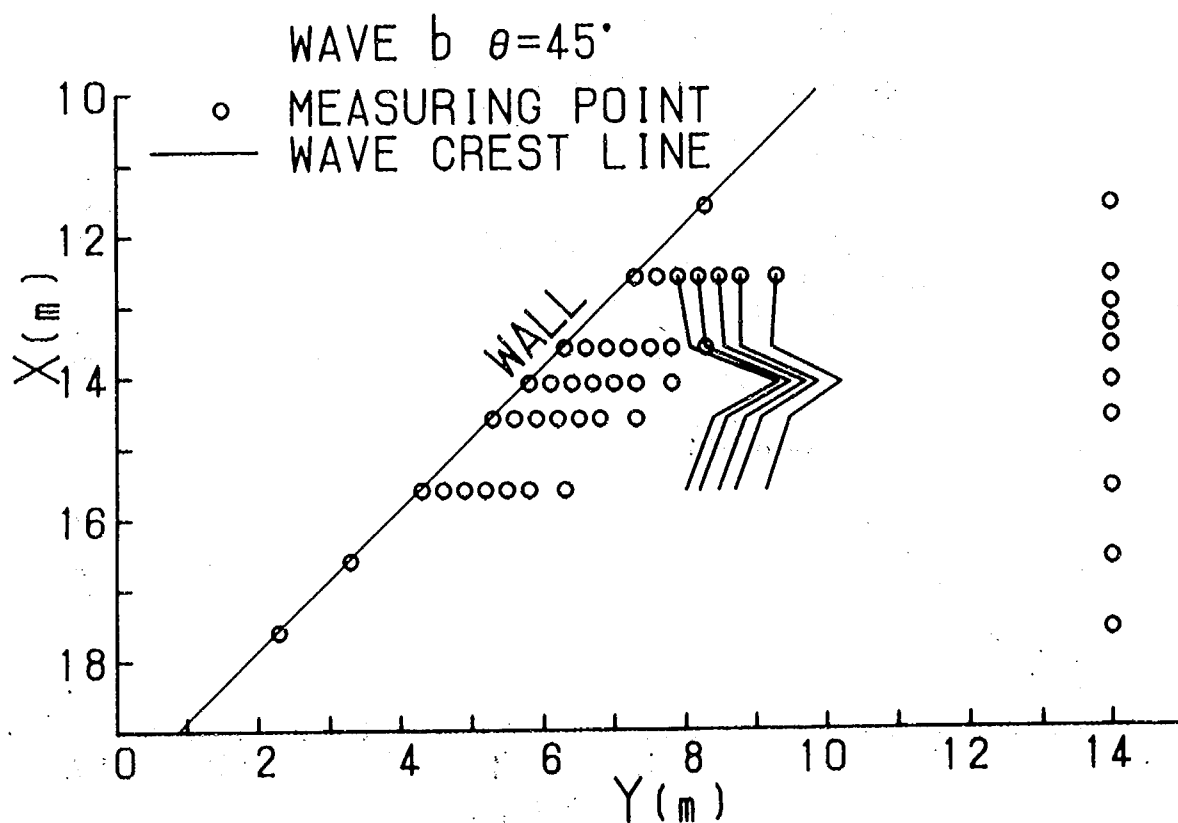
付図 I - 13



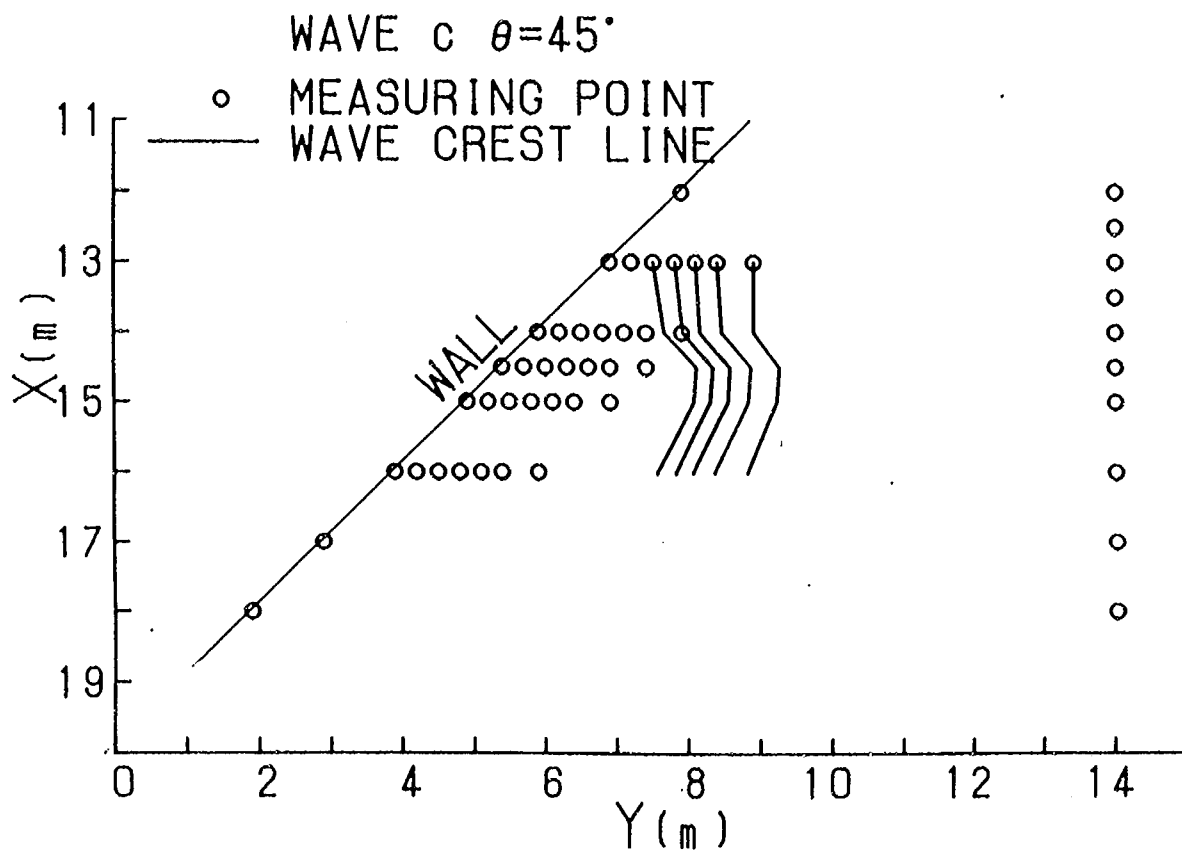
付図 I - 14



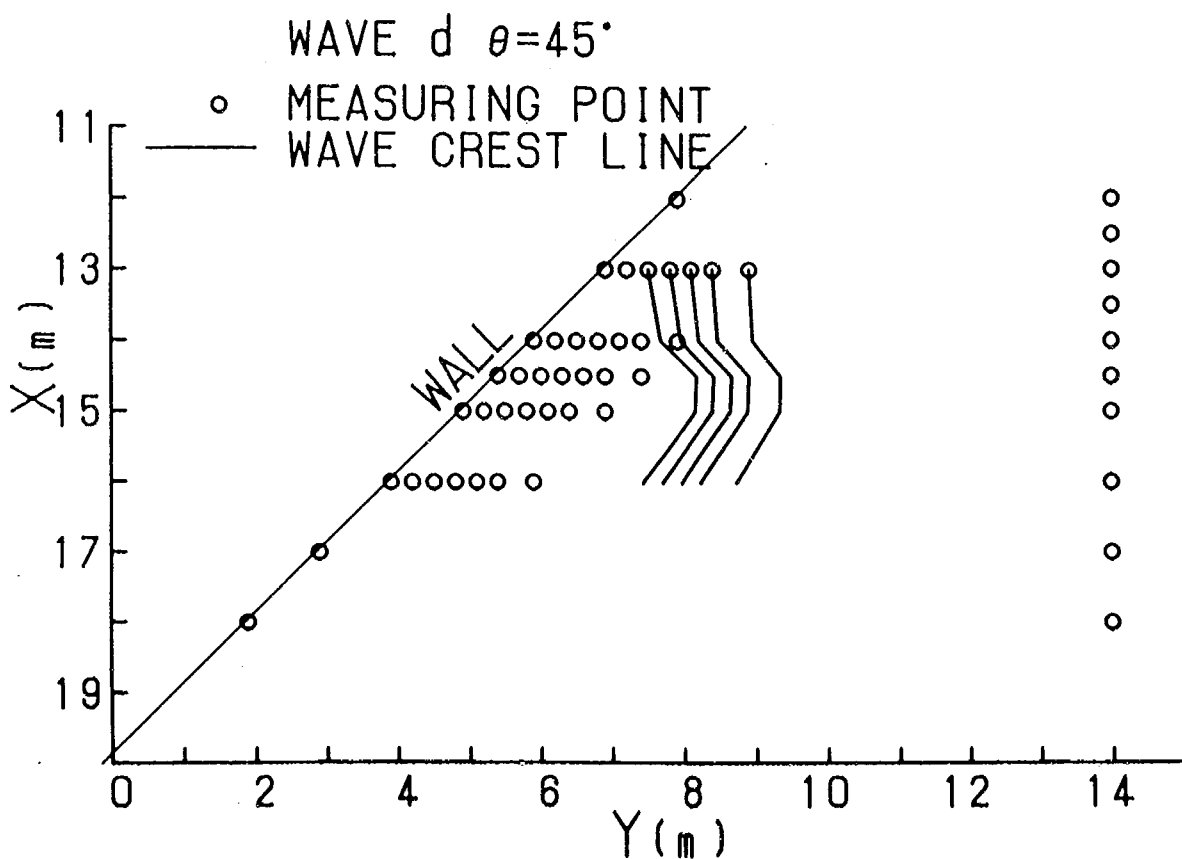
付図 I - 15



付図 I - 16 (反射波)



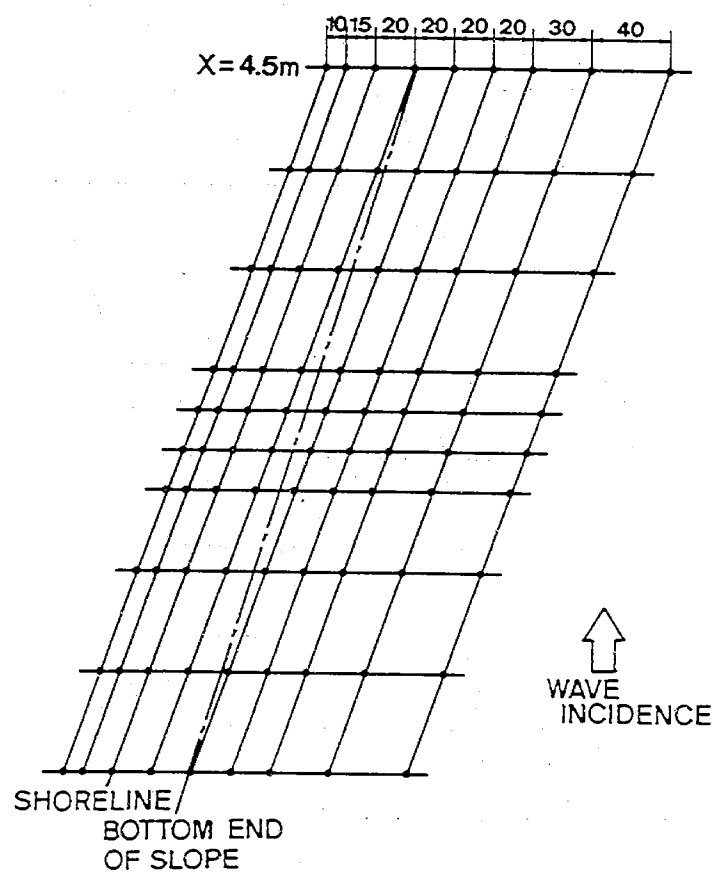
付図 I-17 (反射波)



付図 I-18 (反射波)

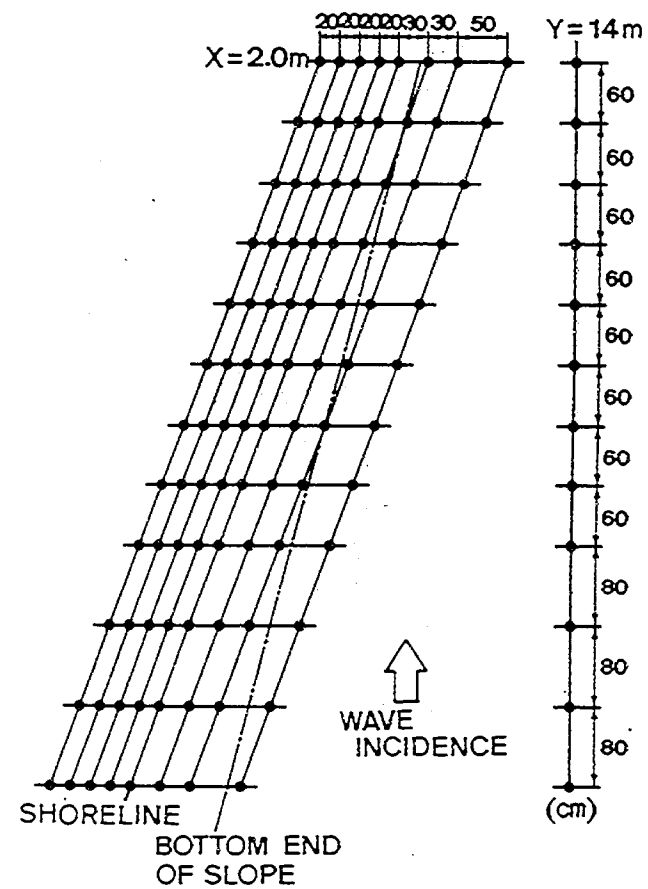
(2)実験Ⅱ 測点配置図

• MEASURING POINT



付図 II - 1

• MEASURING POINT



付図 II - 2

• MEASURING POINT

X=3.0m

Y=14m

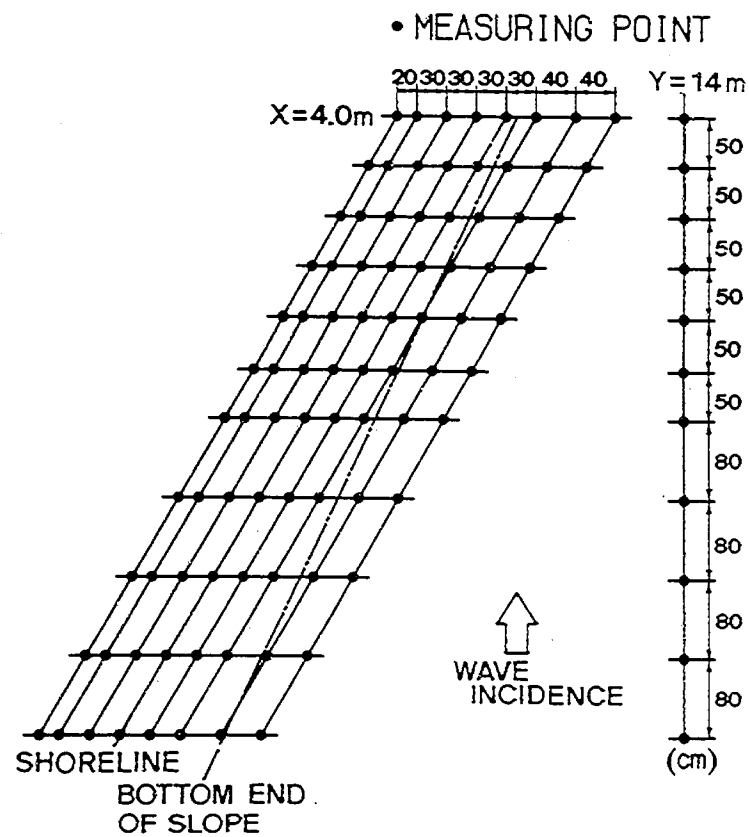
SHORELINE

BOTTOM END OF SLOPE

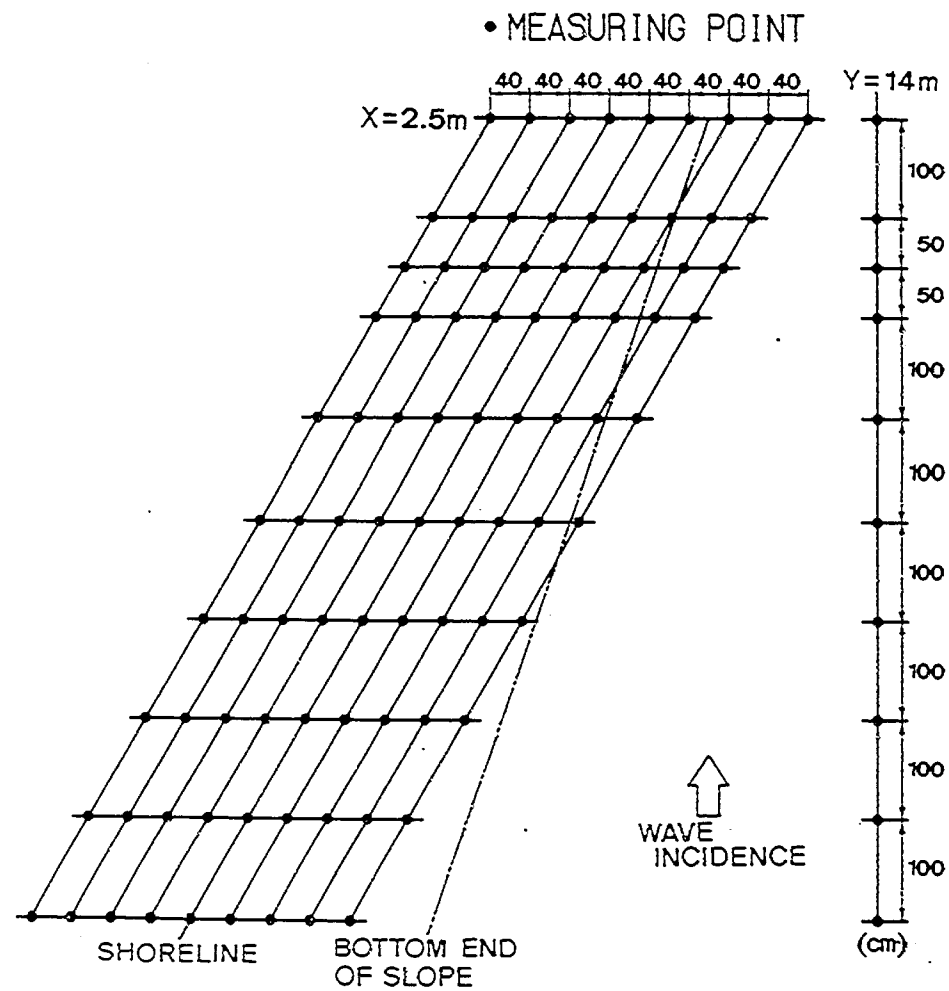
WAVE INCIDENCE

(cm)

付図 II-4



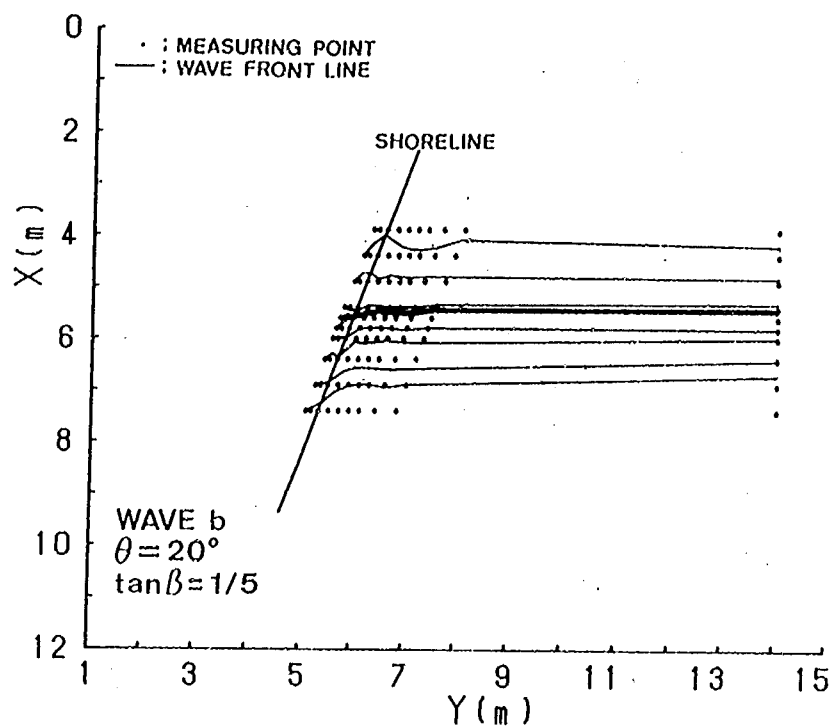
付図 II - 5



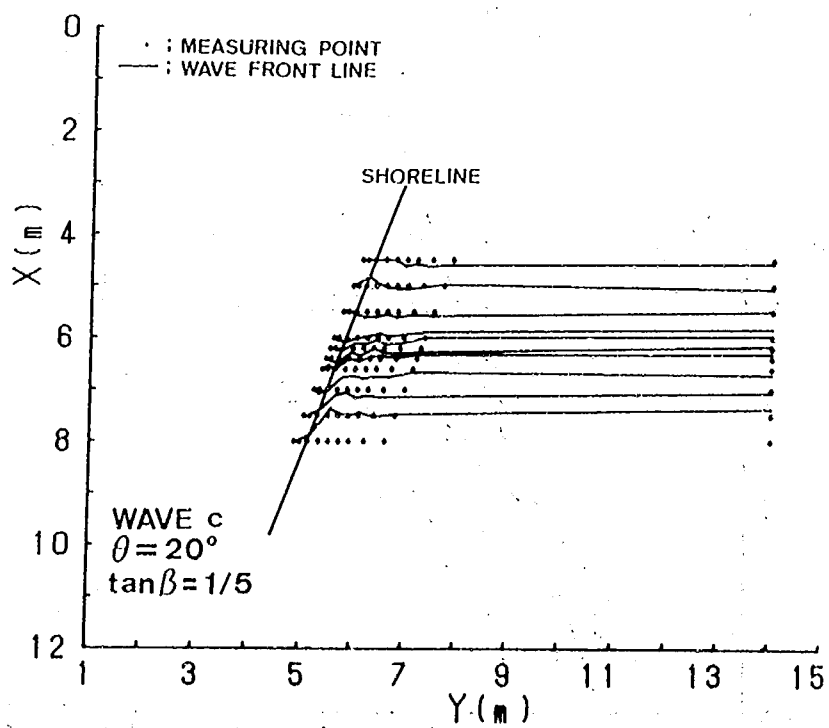
付図 II - 6

付図 II-7

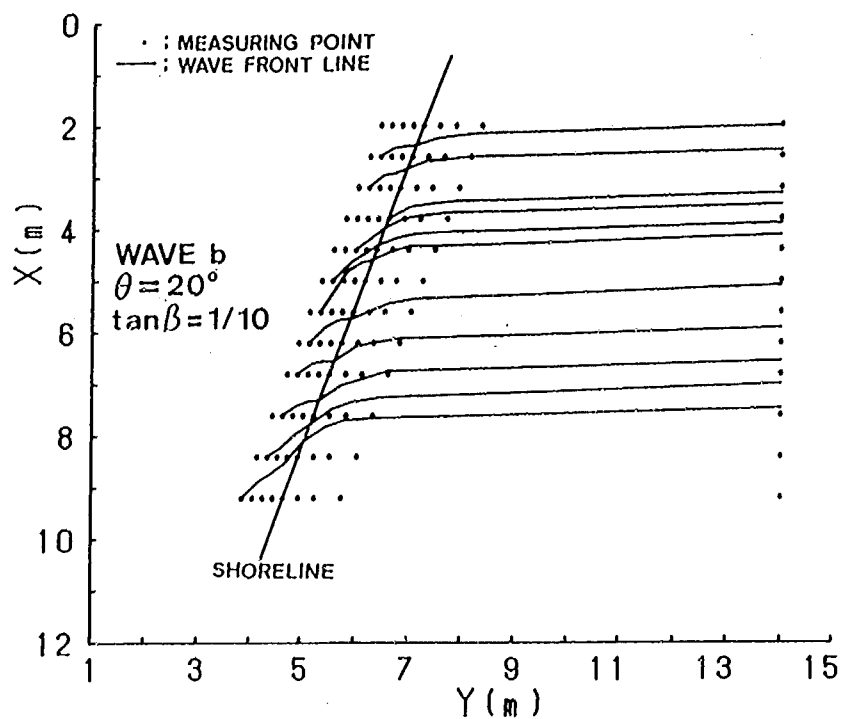
(3)実験Ⅱ 波先線図



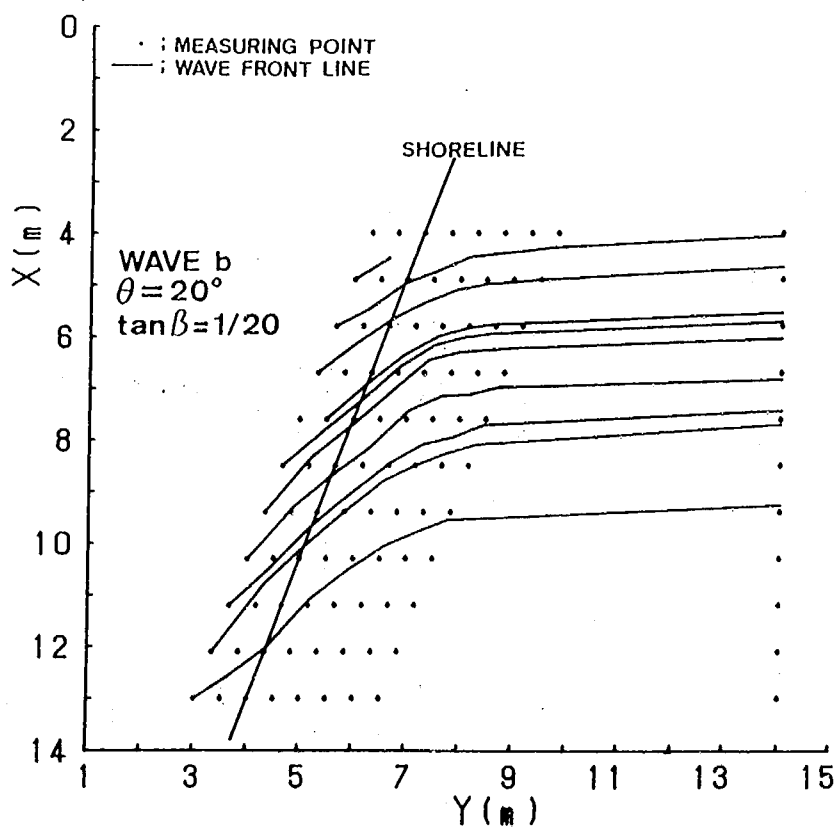
付図 Ⅲ - 1



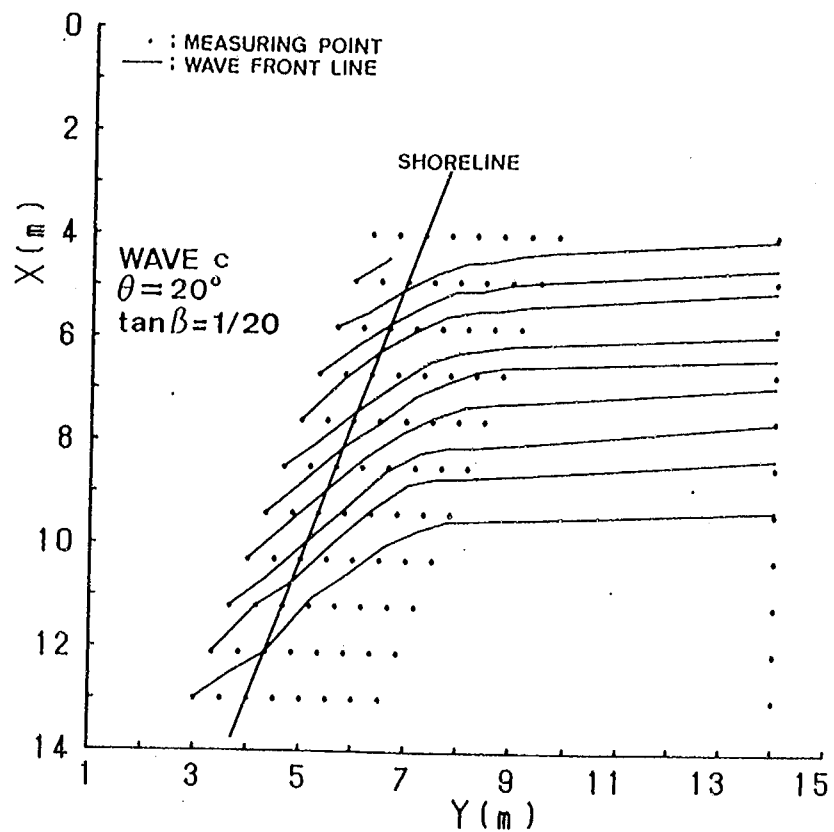
付図 Ⅲ - 2



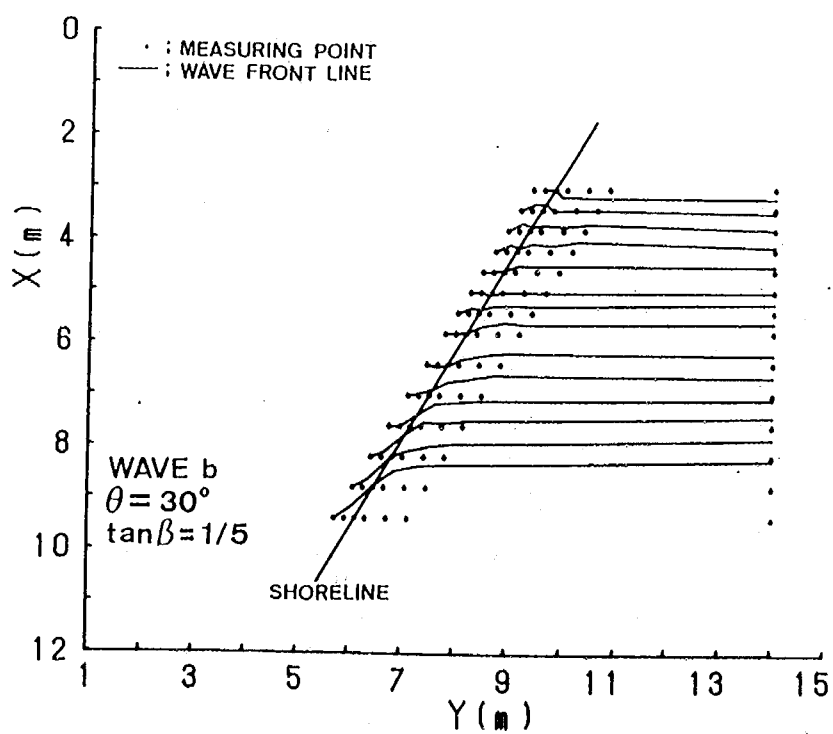
付図 Ⅲ - 3



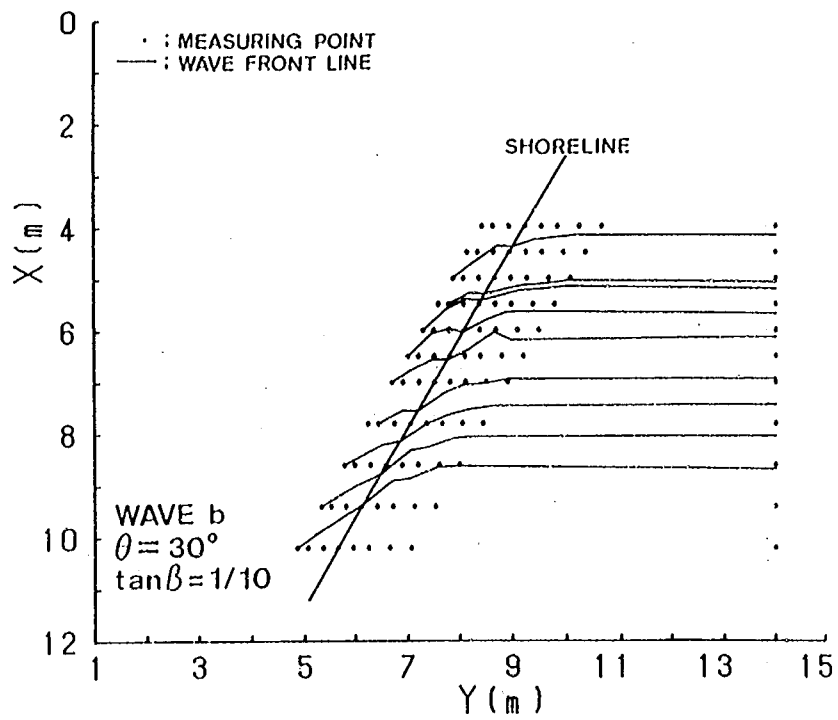
付図 Ⅲ - 4



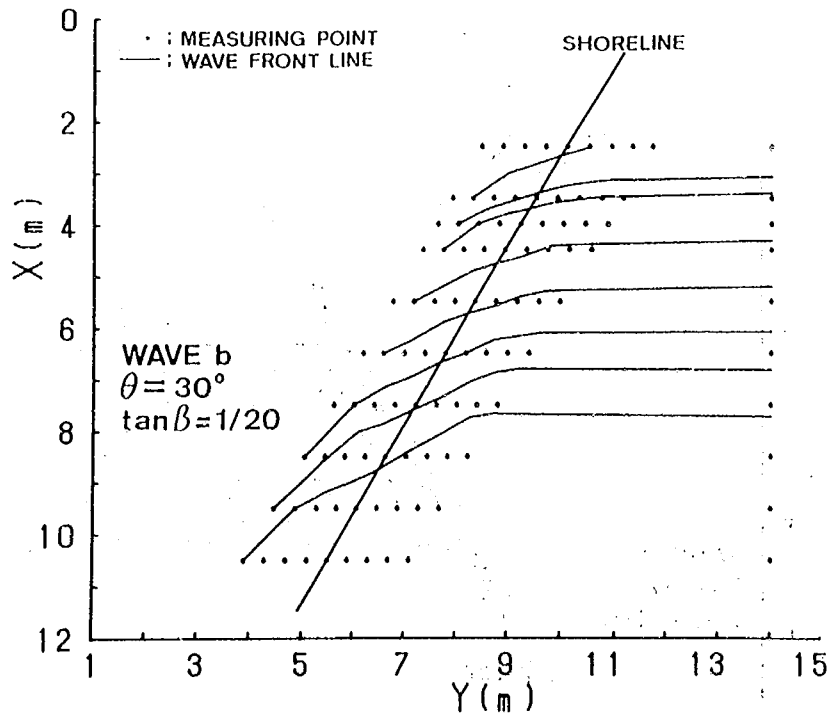
付図 III - 5



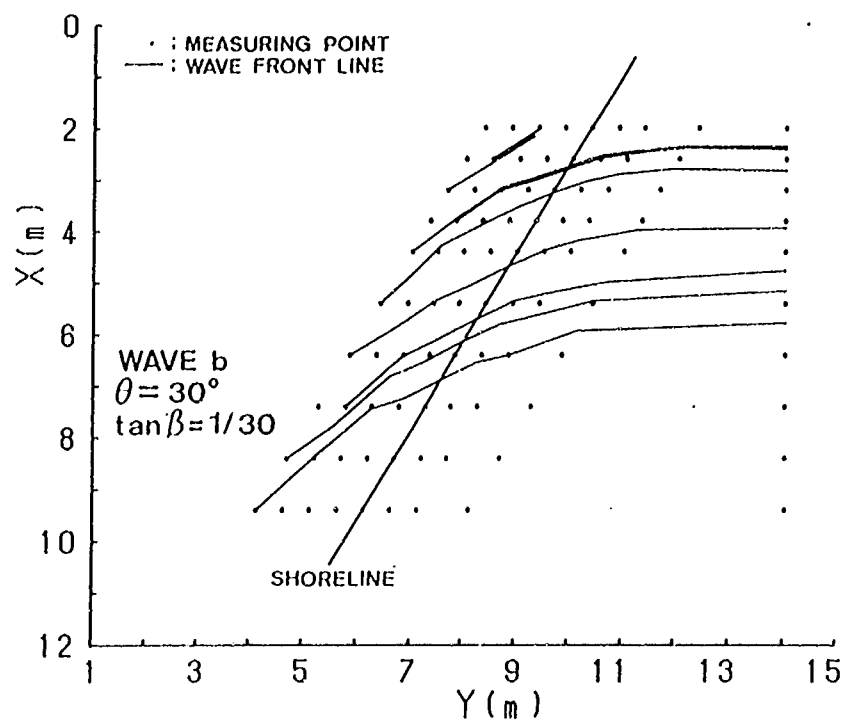
付図 III - 6



付図 III - 7



付図 III - 8



付図 III - 9

斜面上を進行する非線形長波の2次元
変形に関する実験報告書

ISSN 0386-5878
土木研究所資料2627号
昭和63年4月(1988)
海岸研究室 宇多高明
小俣 篤
横山揚久

要 旨

1/100勾配を有する一様斜面上を進行する波状段波を対象とし、その先端部第一波に着目してMach stem, edge boreの挙動、および河道内に波状段波が進入する際の変形を実験的に明らかにした。Mach stemに関しては、波高分布やMach stemの広がりについて従来の水平床上の理論や実験と定性的には同じ傾向が得られた。但し、定量的比較に無理がある。edge boreに関しては、波の進行方向に対する斜面の傾き角、斜面勾配、波条件毎にedge boreの形態を整理できた。また、斜面勾配が $\tan\theta = 1/20$ 以下に緩いとedge boreは形成されないことを示した。河道進入時の波の変形に関しては、段波先端部での混合が激しい場合に、河道内で波高の一様化が急速に進行し、波峰は横断方向に直線上に変化することがわかった。一方、混合が弱い場合には、河道側岸部の波高が高い領域(Mach stem)は比較的ゆっくりと河道中央へ広がった。

キーワード：津波、非線形長波、水理模型実験、波状段波、Edge bore, Mach stem, 河道進入

郵便はがき

四十円切手
をはって下さい。

305-□□

建設省土木研究所

海岸研究室 行

茨城県つくば市大字旭一番地

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第2627号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名

印