

港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 682 Sept. 1990

河口部での波の変形に関する二次元実験

鶴谷 広 一
惟住 智 昭
佐々木 豊 喜

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	3
2. 実験装置および実験方法	3
2.1 実験装置と模型床	3
2.2 実験ケースおよび実験方法	4
2.3 解析方法	8
3. 実験結果	8
3.1 波形の時系列変化	8
3.2 波のスペクトル	10
3.3 有義波周期の変化	13
3.4 有義波高の変化	16
3.5 波の非線形性	20
4. 結 論	21
参考文献	21

Two-Dimensional Experiments on the Wave Deformation due to Currents near a River Mouth

Hiroichi TSURUYA*
Tomoaki KOREZUMI**
Toyoki SASAKI**

Synopsis

Deformation of irregular waves due to river flooding and shoaling is examined experimentally. In designing port facilities in an estuarine area, not only wave shoaling but also interactions between surface waves and a river current must be considered. The present paper describes the two-dimensional experiments to investigate the wave deformation which propagates in a sloping beach with adverse current conditions.

To investigate the influence of river currents on waves in Tottori Port area, beach profile in front of Sendai river is reproduced with the model scale 1/150. Two types of irregular waves are used for the experiment together with some regular waves for comparison.

Waves are measured at eight stations with resistance wave gauges from the deep water area to the river mouth.

Deformations of wave heights and spectra including shoaling and breaking together with interactions with currents due to river flooding are investigated.

The results are summarized as follows:

- (1) Influence of currents on wave heights must be considered from the offshore to the breaking point.
- (2) Modified Goda's formula for the wave breaking is presented for the prediction of wave heights in adverse currents.

Key Words: Wave Shoaling, Wave Breaking, Wave-Current Interaction, Wave Spectrum.

* Chief of Hydrodynamics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

** Member of Hydrodynamics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

河口部での波の変形に関する二次元実験

鶴谷 広一*
惟住 智昭**
佐々木 豊喜**

要 旨

河口部のように波と流れが共存する場での、流れをさかのぼる波の変形について水理模型実験を行った。実験水路は水循環装置付大型風洞水路（長さ58.5 m、幅1.5 m、高さ1.3 m）を用いた。模型は、鳥取港の千代川前面の現地水深で78 mより河口部までを耐水ベニヤ板で水路内に再現した。模型の縮尺は、鉛直、水平とも歪みなしの1/150である。測定は、抵抗線式波高計を用いて、一様水深部から河口部まで8点の測定点で測定し、水位の時系列変化、波のスペクトルの変化、そして有義波周期と有義波高について検討した。

実験で得られた結果は次の通りである。

- 1) 沖から砕波点までは、波の浅水変形は逆流によって影響を受け、逆流が速いほど波高は大きくなるが、砕波後は流れの有無にかかわらず、波高の変化の傾向は同じである。
- 2) 逆流のある場合、合田の波高の略算式で砕波条件を修正したものが、実験結果をよく説明する。

キーワード：浅水変形、砕波、流れと波の相互作用、波のスペクトル

1. まえがき

波が深海域から浅海域へ伝播してくると、しだいに水底の影響を受けるようになり、波長および波速は減少して、波高は大きくなる。そして、波高がある高さに達するとそれ以上大きくなれずに砕波する。また、流れのない場所から流れのある場所、特に波の進行方向に対して逆方向の流れ（逆流）の中へ波が伝播していく場合にも波長は減少し、波高は大きくなる。この時には、流速が波の群速度より大きくなると波は流れをさかのぼることができない¹⁾。実際の海域では、これらの現象が同時に発生する場合が普通で、特に河口部付近では河川からの流れと海洋からの波の相互作用で、他の海域では見られない複雑な現象を引き起こすことがある。例えば河口閉塞の問題では、流れによる波の変形を知ることが、河口部付近の漂砂現象の解明のための重要な要素である。また、河口部に防波堤を建設する場合は、河川からの流れの影響によって波が変化するかどうかを考慮する必要がある。流れによる波の変形の研究では、海底勾配が一般的な斜面についての報告はいくつか見られるが、実海域

では沖から岸に向かうにしたがって海底勾配は変化している場合が多い。実際の海岸を対象とする場合には、海底勾配が変化する場での流れによる波の変形についても検討しておく必要がある。本研究では実海域を検討対象と考え、海底勾配が変化する場合の逆流中の波の変形について、特に洪水時の場合も想定して比較的大きな流れを用いて実験を行ったものである。

河口部では淡水と塩水が接する場所なので、二層流の扱いをしなければならないことも多い。例えば上層で沖向き、下層で岸向きのような剪断流の場合には、流速分布を考慮した波との相互干渉を考えなければならない。しかし、われわれが検討を必要とするのは波高が増大する逆流の状態なので、鉛直方向には沖向きの流れのみを考えれば十分である。したがって、ここでは密度差を考えず、一方向流としての逆流と波との相互干渉を考えている。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置と模型床

実験には港湾技術研究所の水循環装置付大型風洞水路

* 海洋水理部 水理研究室長

** 海洋水理部 水理研究室

(長さ58.5m, 幅1.5m, 高さ1.3m)を使用した。水路の平面図を図-1に示す。この水路はバルブを操作することによって流れの向きを自由に変えることができる。水を循環させるためのポンプは、 $\phi 500$ mmの斜流渦巻ポンプで、流量は最大 $35\text{ m}^3/\text{min}$ から最小 $6\text{ m}^3/\text{min}$ の範囲で調整可能である。このポンプを駆動するモーターは、45 kWのVSモーターで、リモートコントロールによりカップリングを介して、静止から最大555 rpmまで回転数を連続的に制御できるようになっている。今回の実験では、流量が小さいのでモーターの回転数を一定にしておき、バルブの開閉によって流量の調整を行った。後述する図-2の河口の一樣水深部(水深3cm)の水路中央で、水深が1.5 cmの位置の流速をレーザー・ドップラー流速計(LDA: Laser-Doppler Anemometry)を使って測定し、その1分間の平均流速が設定した値の $\pm 1\text{ mm/s}$ 以内になるように調整し、流れの再現性に努め

た。波高の測定には $\phi 0.1\text{ mm}$ の白金線2本を2 mm 間隔で張った抵抗線式センサーを用いた。波は特に断らない限り、全て水路の中央で測定されたものである。

模型床は、鳥取港第二防波堤前面の地形をモデルとした耐水ベニヤ製で、その形状を図-2に示す。縮尺は鉛直、水平とも歪みなしの1/150である。模型上部には、波高計検定用の穴(5×15 cm)が波高計設置部に開けてある。この穴は検定後、波高計の軸及び白金線センサーの為の穴(それぞれ1.5×1.5 cm)を残して閉じることができる。なお、耐水ベニヤは塗装していない。

また、水路終端部にはステンレス屑の斜面よりなる消波装置を設け、波の反射を抑えている。

2.2 実験ケースおよび実験方法

実験ケースは表-1に示した32ケースである。その32ケースについて、模型上で水深が変化する場合の波の變形を調べた。流速のケースは、流れなし、 $U = -15$,

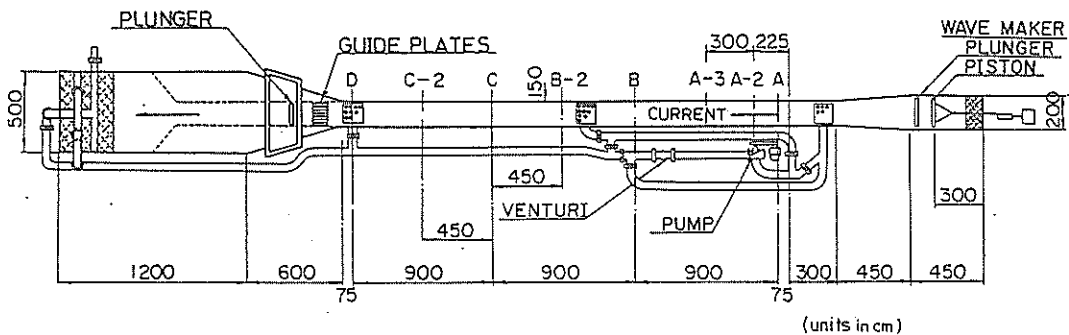


図-1 水路平面図

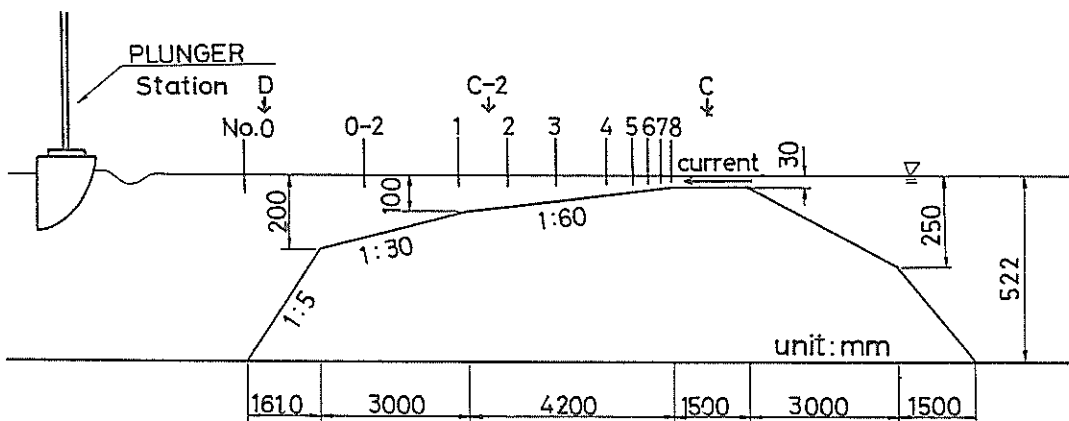


図-2 模型床側面図

表-1 実験ケース

ケース名	周期 (s)	有義波高 (cm)	流速 (cm/s)	備考
CASE 1	1.14	5.17	0	不規則波 1
CASE 2			-15	
CASE 3			-25	
CASE 4			-40	
CASE 5	1.347	8.09	0	不規則波 2
CASE 6			-15	
CASE 7			-25	
CASE 8			-40	
CASE 9	1.25 (0.8Hz)	2.33	0	規則波 1
CASE 10			-15	
CASE 11			-25	
CASE 12			-40	
CASE 13		2.62	0	規則波 2
CASE 14			-15	
CASE 15			-25	
CASE 16			-40	
CASE 17	1.0	3.28	0	規則波 3
CASE 18			-15	
CASE 19			-25	
CASE 20			-40	
CASE 21		5.13	0	規則波 4
CASE 22			-15	
CASE 23			-25	
CASE 24			-40	
CASE 25	0.833 (1.2Hz)	4.30	0	規則波 5
CASE 26			-15	
CASE 27			-25	
CASE 28			-40	
CASE 29		6.09	0	規則波 6
CASE 30			-15	
CASE 31			-25	
CASE 32			-40	

-25, -40 cm/s で、現地での流速に換算すると、それぞれ $U = 0, -1.84, -3.06, -4.90$ m/s に対応する。流速値を負で表すのは、波の進行方向と逆向きの流れであるためである。

規則波は周波数シンセサイザでアナログ信号を発生させ、直接造波機の制御盤に入力して造波した。不規則波の場合はパソコン (TEAC PS-9000 MODEL 310M) を使って所定のスペクトルを持つ不規則波形を正弦波の重ね合わせ法で計算し、インテリジェント D/A コンバーターユニット (TEAC PS-9353) でアナログ信号に変換した。この信号は一旦アナログデータレコーダ (TEAC R-61) に記録し、規則波と同様にその出力を造波機の制御盤に入力して造波機を駆動した。

不規則波のスペクトルは、次の式(1)で示される Bretschneider・光易型を目標とした。

$$S(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-5} \exp[-1.03 (T_{1/3} f)^{-4}] \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 $S(f)$ は周波数 f のスペクトル密度、 $H_{1/3}, T_{1/3}$ はそれぞれ有義波高、有義波周期である。

鳥取港の設計波に対応する有義波高は 8.0 m、有義波周期は 14.0 s である。また、比較のために他の波の条件についても検討するため、上川口港の波の条件についても実験を行った。上川口港に対しては、有義波高と有義波周期はそれぞれ 12.5 m と 16.5 s である。これらの条件をフルードの相似則にあてはめて求めた $H_{1/3}$ と $T_{1/3}$ は、それぞれ 5.3 cm、1.14 s と 8.3 cm、1.347 s になる。以後、鳥取港に対応する波を不規則波 1、上川口港のそれを不規則波 2 とする。地形は鳥取港に対応するものであり、不規則波 2 の今回の実験結果は直接上川口港に適用できるものではない。2 種類の異なる条件の波を用いて実験を行ったと解釈するべきである。図-3(a)(b) は、それぞれ図-2 の測点 No. 0 で測定した不規則波 1 と不規則波 2 の波のスペクトルである。図-3(a) は、水路中央及び中央より幅方向左右 50 cm の位置で測定されたスペクトルを示したものである。比較のために、式(1)の Bretschneider・光易型スペクトルを点線で示す。

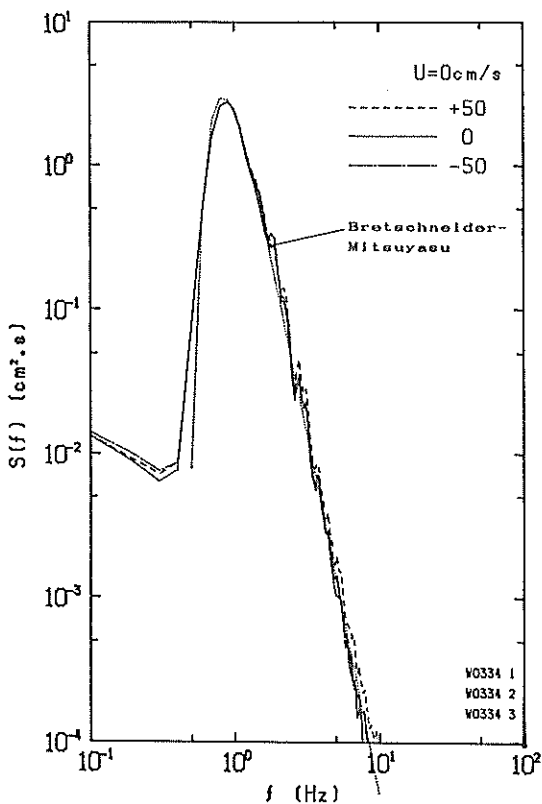


図-3(a) 造波スペクトル (不規則波 1)

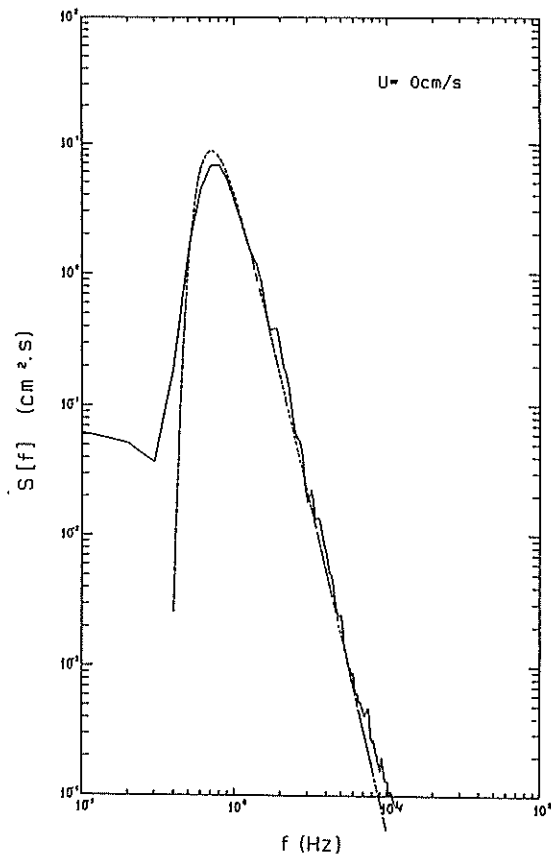


図-3(b) 造波スペクトル (不規則波 2)

これによれば、実験水路で造波された波はBretschneider・光易型によく一致している。図-4は不規則波1について、各測点の有義波高の幅方向分布を示したものである。図の上段が $U = -15$ cm/s, 下段が流れなしのケースである。幅方向で波高はほぼ一様となっている。

図-5は $U = -25$ cm/sの流速についての流速分布を示したもので、測点は各斜面 ($\tan \theta = 1/30, 1/60, 0$) の中央位置である。図中の白丸が実測した流速であり、実線は次式で表される1/7乗則である。

$$U_d(z) = u_0 \left(\frac{z+d}{d} \right)^{-7} \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 z 軸は底面をゼロとして鉛直上向きを正にとり、 $U_d(z)$ は高さ z での流速、 u_0 は水面での流速、 d は水深である。水深3cmの地点(河口部)を除き、式(2)と実測値はよく合っている。水深3cmで両者があまり合っていないのは、模型上端部の長さが十分でないために流れの助走距離が足らず、境界層の発達が十分でなかったためである。

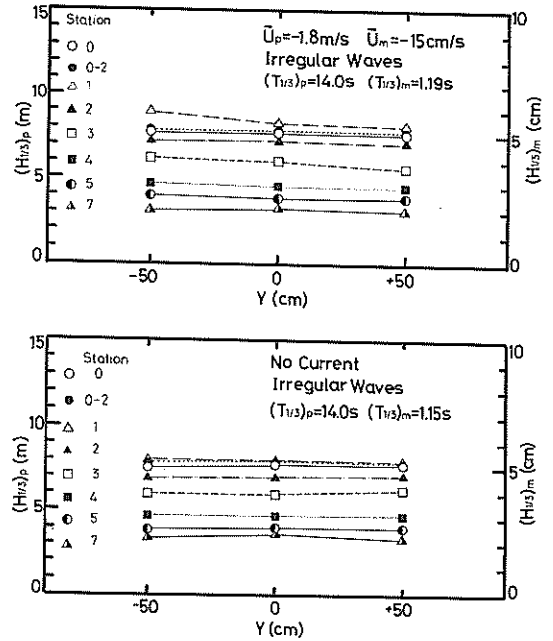


図-4 幅方向の有義波高の変化

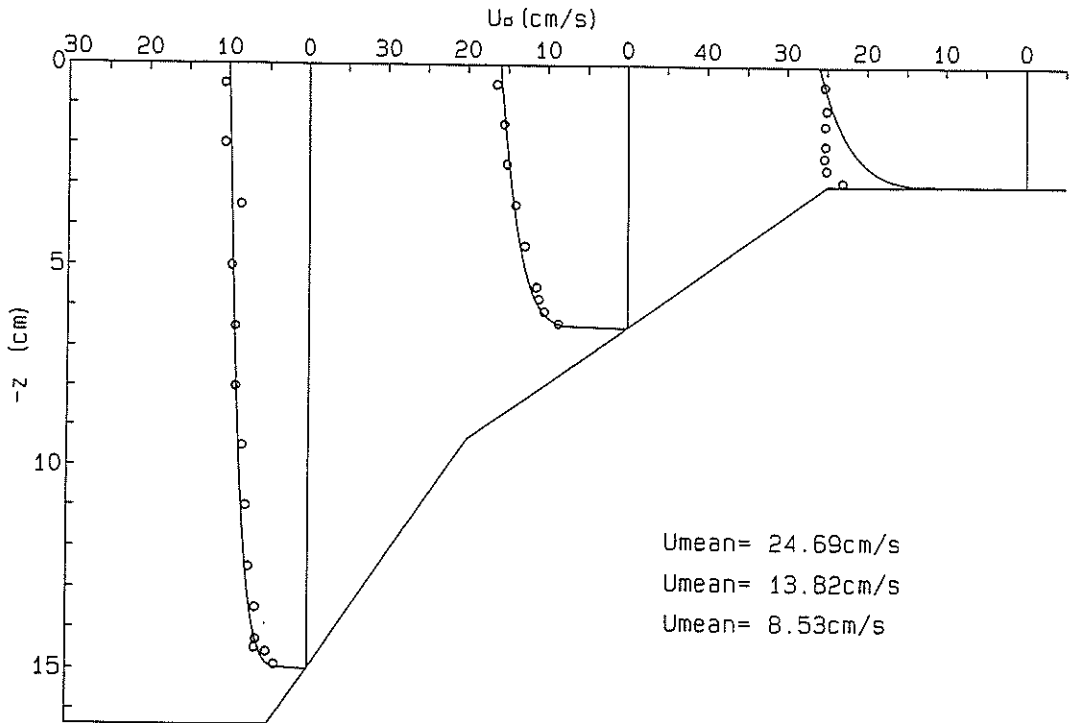


図-5 断面流速分布 ($U = -25$ cm/s)

2.3 解析方法

波高計で測定されたアナログ信号は、直接デジタルデータレコーダ (TEAC DR-F 1) でAD変換してフロッピーディスクに記録し、大型電算機 (ACOS-1000/10) または、パソコン (NEC PC-9801, TEAC PS-9000) であとの計算処理を行った。AD変換時のサンプリング間隔は $\Delta t = 1/25.6$ 秒, 集録データ個数は $N = 4096$ 個とした。個々の波を求めるため

にはゼロ・ダウクロス法, 波のスペクトルを求めるためにはFFT法を用いた。

3. 実験結果

3.1 波形の時系列変化

図-6(a)(b)は不規則波1について, 波形の時間変化を各測点ごとに表したものである。図-6(a)は流れなし, 図-6(b)は $U = -40$ cm/s のケースである。図の

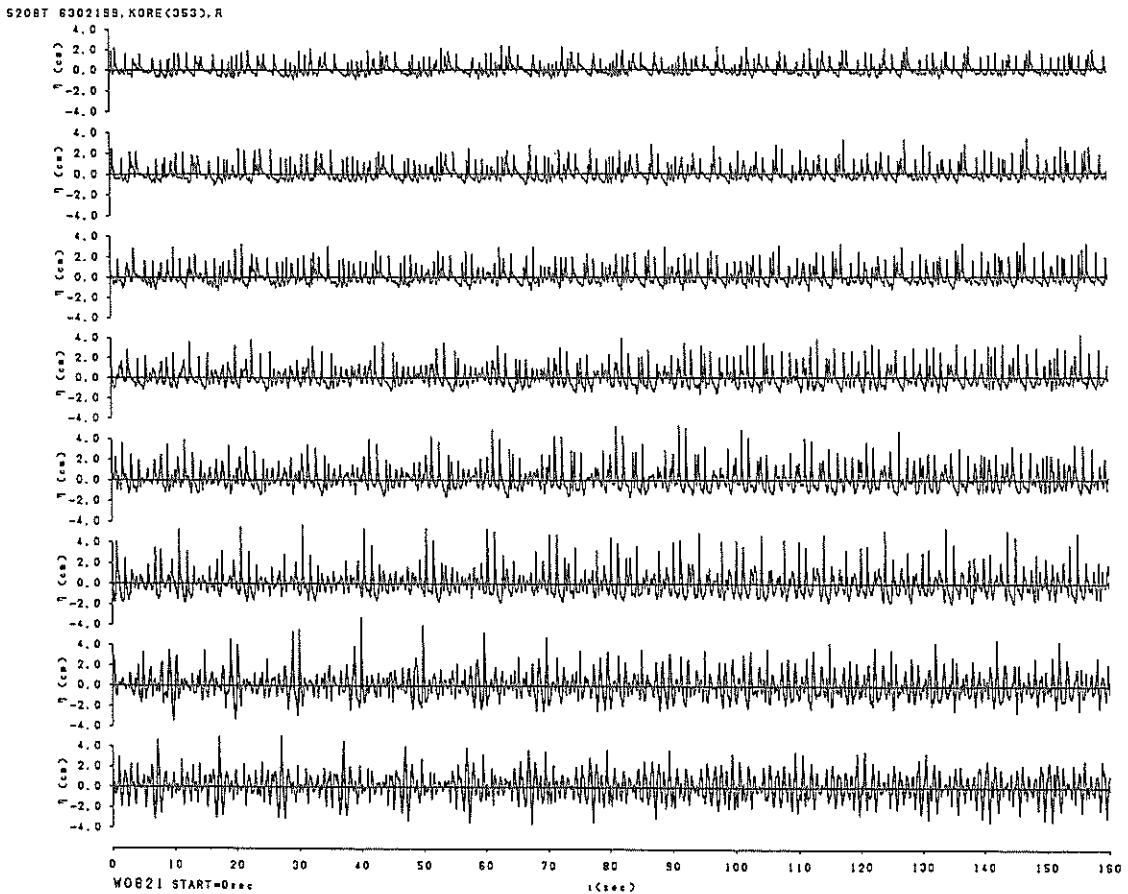


図-6(a) 水位の時系列変化 (不規則波1, 流れなし)

下から上に向かってそれぞれ図-2の測点No. 0から測点No. 7に対応している。図によれば、水深が浅くなるにしたがって波の形状が平均水面より上で尖り、下で平らになっていて、浅水変形の特徴がよく現れている。図-6(b)では流れの影響により波高が図-6(a)よりも増大していることがわかる。また、図-6(b)では砕波後に波の周期が長くなっている。これは、流れのために周期の短い波は流れをさかのぼって進行できず、周期の長い波だけが残ったためであると考えられる。この

図では160秒分の波を描いているため、個々の波の詳細な形状を見ることができない。そこで、図-6(a)のうち、20秒間の波形だけを描いたのが図-7である。図中の実線は特定の波に注目して、その伝播を微小振幅波理論で追跡したものである。波速を求める時の水深 h は各測点間の平均を用いた。個々の波の伝播は微小振幅波では追跡できるが、浅いところでは非線形性と砕波のために微小振幅波理論ではだんだんと合わなくなっている。

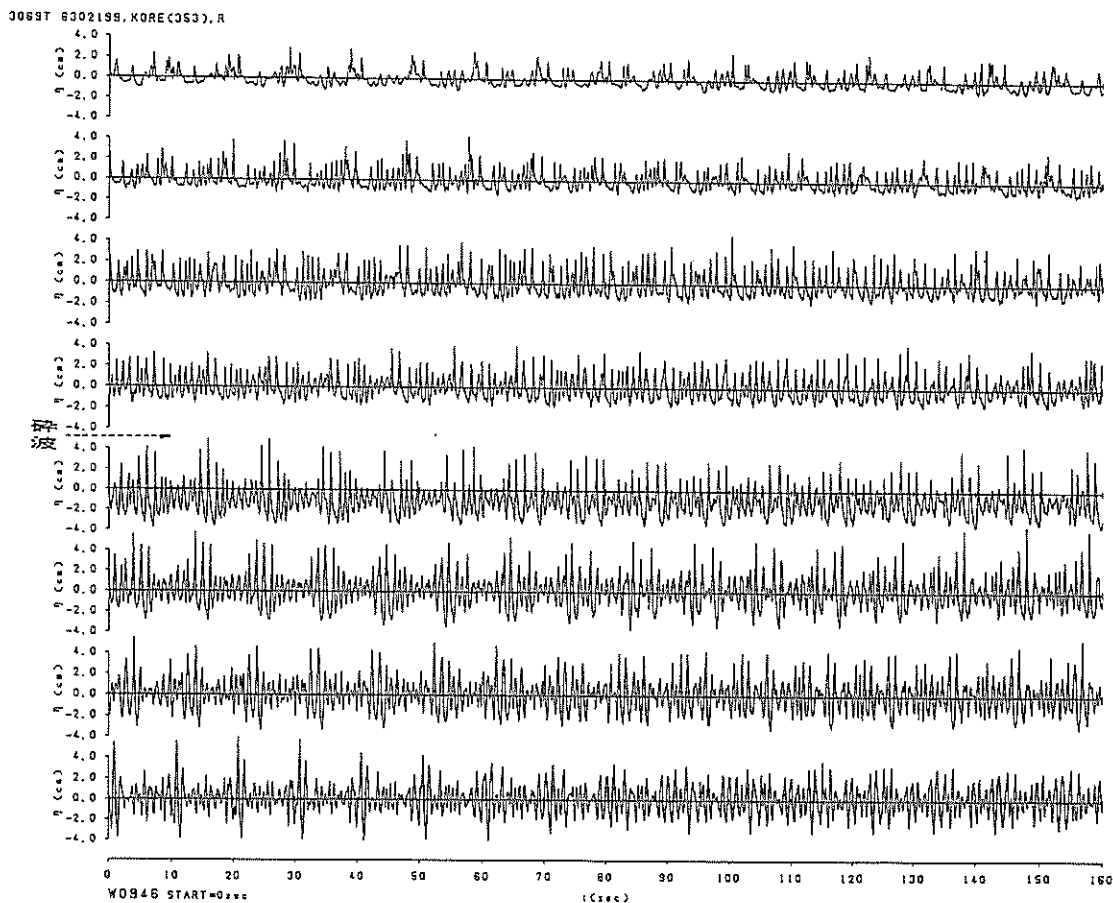


図-6(b) 水位の時系列変化 (不規則波1, $U = -40$ cm/s)

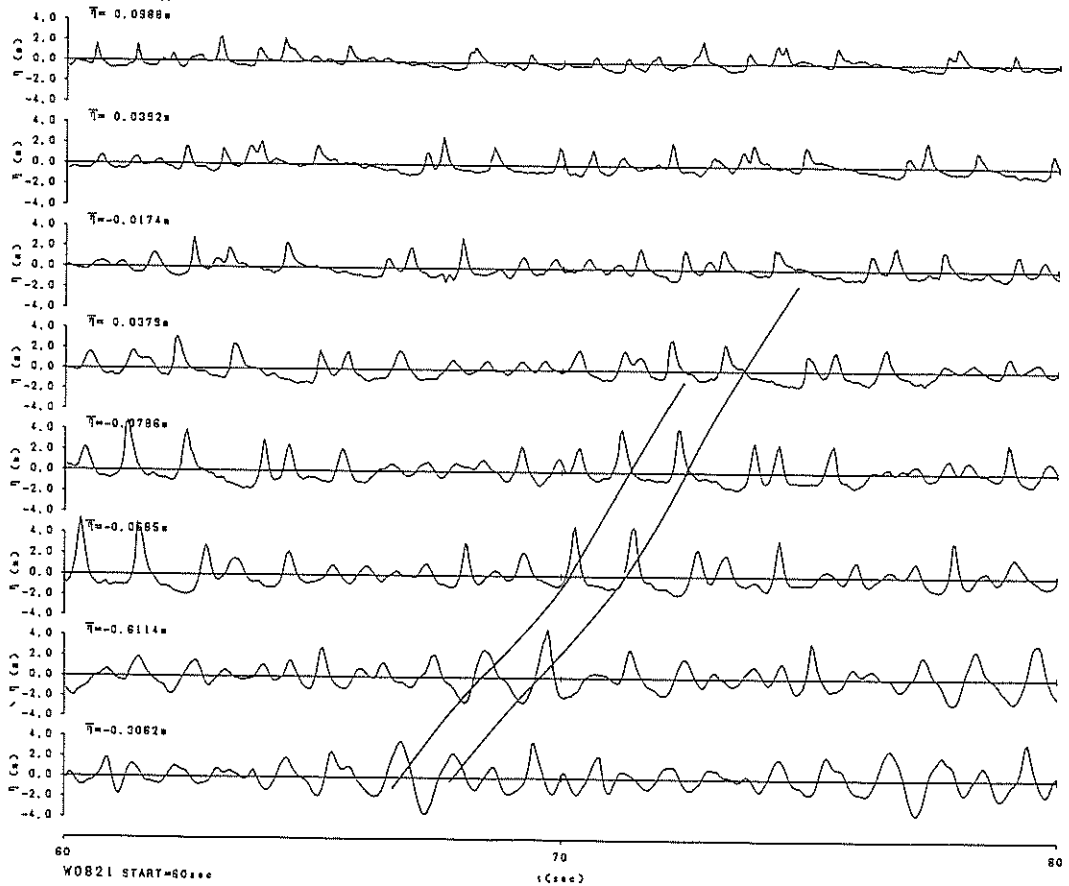


図-7 水位の時系列変化と波速（不規則波1，流れなし）

3.2 波のスペクトル

沖側での波のスペクトルは既に図-3で示し、Bretschneider・光型型スペクトルとよく一致することが確かめられた。ここではNo.0の測点からNo.7までのスペクトルの変化を調べる。図-8(a)~(c)は不規則波1のケースでそれぞれ流れなし、 $U = -25 \text{ cm/s}$ 、そして $U = -40 \text{ cm/s}$ に対応する。図-8(c)のケースのみ測点No.0-2とNo.1の間に測点No.0-3を設けたので、図-8(a)(b)と線種が対応していない。図-8(a)では、水深が浅くなるにしたがって、スペクトルのピーク値が次第に小さくなっている。ただし、ピーク周波数はほとんど変化していない。図-8(b)では、スペクトル変形の全体的な傾向は図-8(a)と似ているけれども、No.0-2でのピーク値がNo.0のピーク値を上回っている。さらに、No.0-2とNo.1のピーク値の大きさの差が図-8(a)と比較して大きい。これは、測点No.0とNo.0-2の間で流れの影響により、流れなしと比べて波高が増大してNo.0-2とNo.1の間で碎波

が生じ、波高が急激に小さくなっていることを示している。図-8(c)になると、No.3からは強い流れの影響で卓越波がはっきりしなくなり、スペクトルのピーク周波数が判定しにくくなっている。そのほかに注目すべき点としては、流れが速くなるほどピーク周波数の値が波の伝播とともに高周波数側にずれてきていることがあげられる。図-8(b)では一度低周波数側にずれて、そのあとで高周波数側にずれているのがわかる。

図-9(a)~(c)は不規則波2のケースである。全体の傾向としては図-8の不規則波1のケースと似ているけれども、どの流速のケースでも浅いところのスペクトルのピーク値が、一番沖側の測点No.0のスペクトルのピーク値を越えることはない。これは、大きな波は測点No.0の直後くらいから碎波し始めており、実験範囲内で浅水変形や流れによる波高の増大が生じなかったためである。

また、図-8と異なりピーク周波数が高周波数側にずれないで、水深が浅くなるにしたがって低周波数側にずれてきている。2つのケースを比べてみると、不規則波

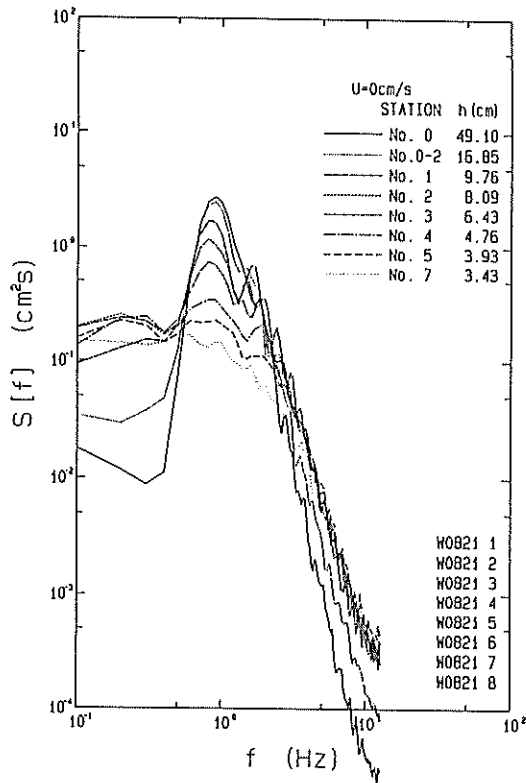


図-8(a) 波のスペクトル (不規則波1, 流れなし)

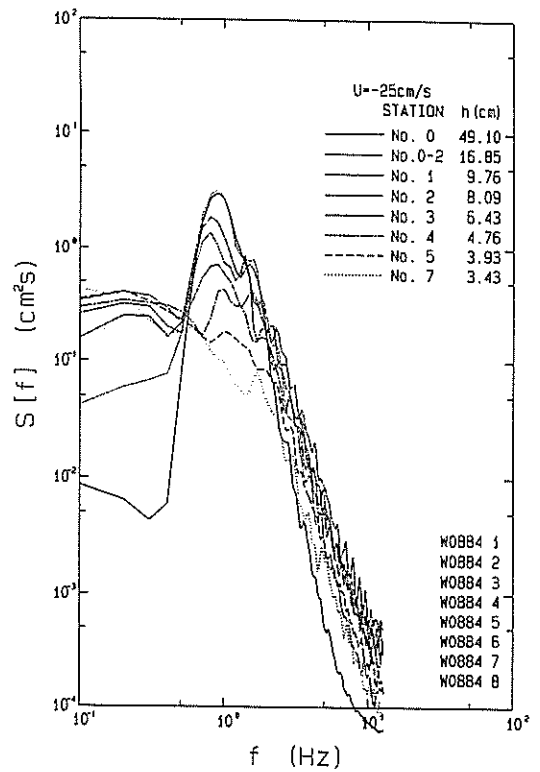


図-8(b) 波のスペクトル (不規則波1, $U = -25$ cm/s)

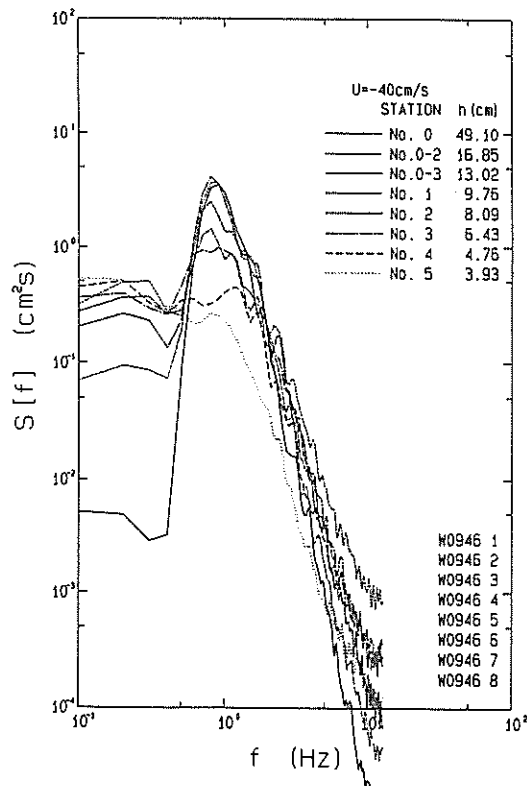


図-8(c) 波のスペクトル (不規則波1, $U = -40$ cm/s)

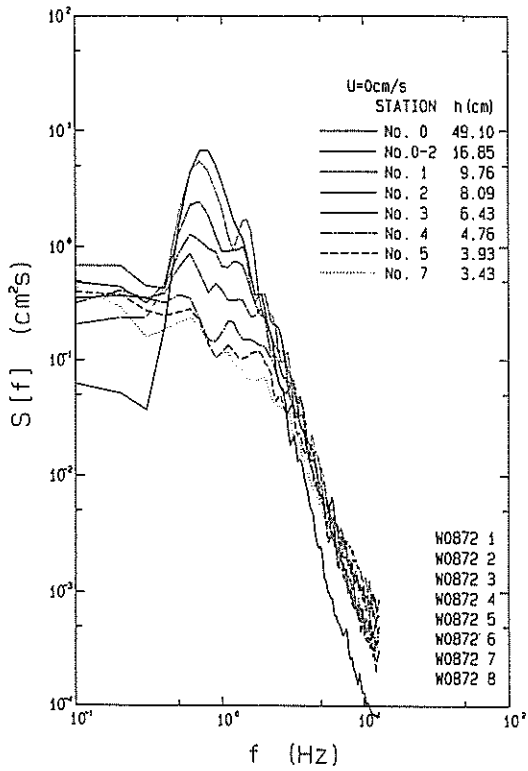


図-9(a) 波のスペクトル (不規則波 2, 流れなし)

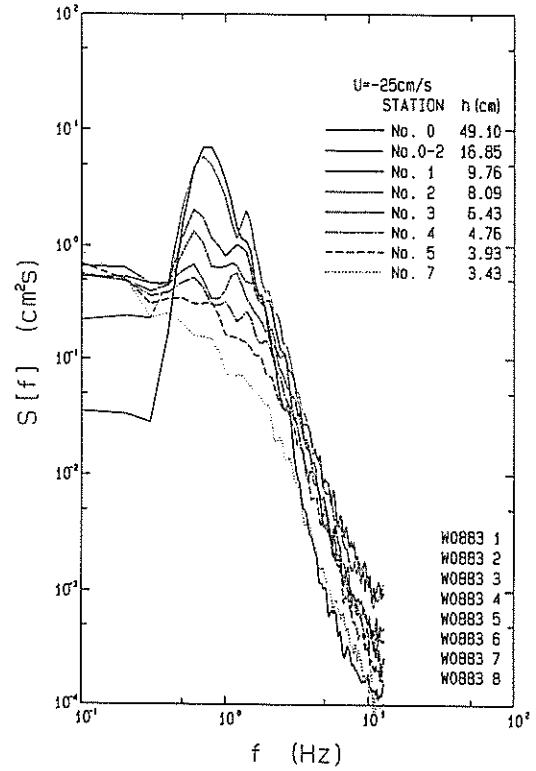


図-9(b) 波のスペクトル (不規則波 2, $U = -25$ cm/s)

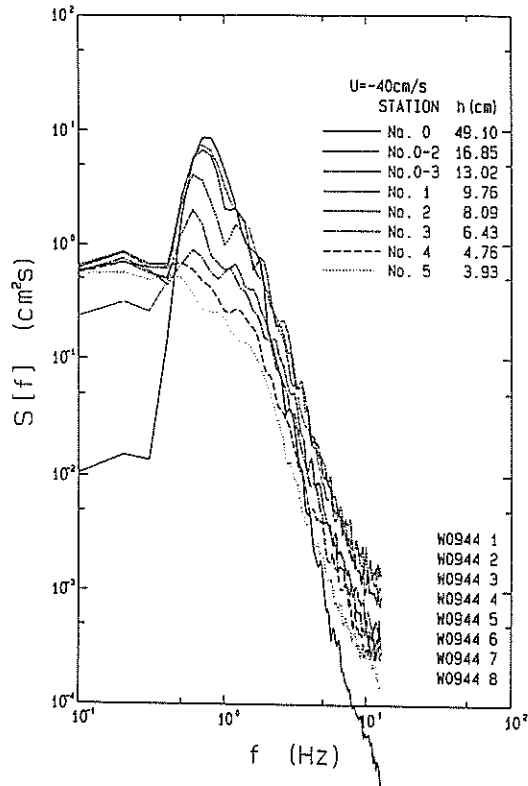


図-9(c) 波のスペクトル (不規則波 2, $U = -40$ cm/s)

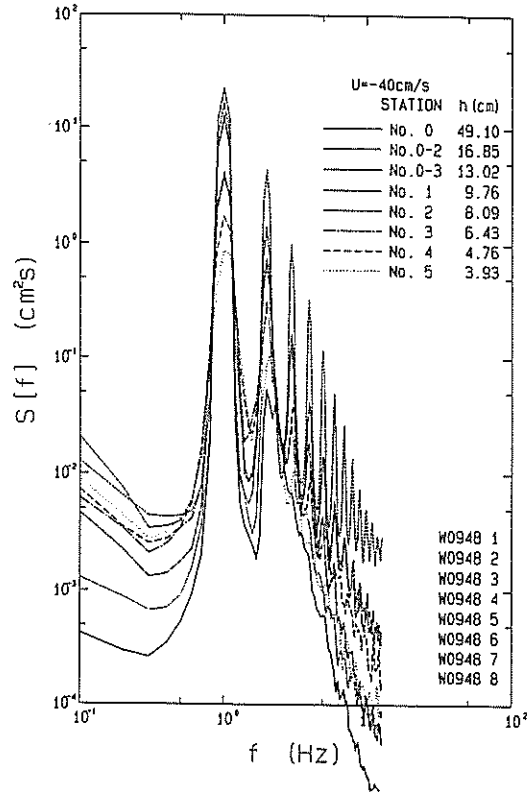


図-10 波のスペクトル (規則波4, $U = -40$ cm/s)

2の方が不規則波1よりも設定した有義波周期が長く、波高も大きい。周期が長い波の方が、水深の深いところから浅水変化の影響を受ける。しかし、同じ流れに対しては、周期の長い波の方が流れの影響を受けにくい。浅水変形も流れもある場で、波高が変形する要因が、波の周期に依存し、浅水変形と流れとどちらにより強く支配されるかの違いが図-8と図-9の変化の差になったのではないと思われる。

図-10は規則波のケースである。沖側のNo.0ではピーク周波数の高周波成分は小さく、ほぼ正弦波と考えてよいが、浅くなってくると波の非線形性の影響で、卓越波の高調波成分がかなり大きくなっている。

3.3 有義波周期の変化

図-11(a)(b)は各測点の有義波周期を、測点No.0の有義波周期で無次元化したものを各流れの条件別に示したものである。図-11(a)は規則波1、図-11(b)は不規則波1である。規則波1の場合は水深と流速が変化してもほとんど周期は変化しない。一方、不規則波1の場合は、流れのない場合の周期は水深に関係なくほぼ一定であるが、流れのある場合には水深の浅いところで

周期が大きくなっている。特に流速が大きくなるほどこの傾向が顕著である。これは、逆流の影響で小さい周期の波は流れをさかのぼることができずに消滅してしまい、結果として大きな周期の波しか存在できなくなるためである。

図-12(a)(b)は、流速分布を一樣として流れによる波長の変化を水深ごとに計算で求めたものである。図-12(a)は規則波1、図-12(b)は不規則波1である。一樣流速 U による波長の変化は次式で表される^{2),3)}。

$$\left(\frac{L}{L_0} - \frac{U}{c_0}\right)^2 \tanh \frac{2\pi h}{L_0} = \frac{L}{L_0} \cdot \tanh \frac{2\pi h}{L} \dots\dots(3)$$

ここに、 L_0 、 c_0 は流れのない場所での波長と波速、 L は流速 U の流れの中での波長、 h は水深である。

式(3)と後述の式(5)で用いる流速 U は、水深3cmの地点で測定した流速から単位幅流量に換算し、計算地点の水深で割ることによって求めた。水路長さ方向の水深変化による流速の変化を示したのが図-13である。

河口部では流れの影響が波長の変化にもかなり影響を与えるのがわかる。

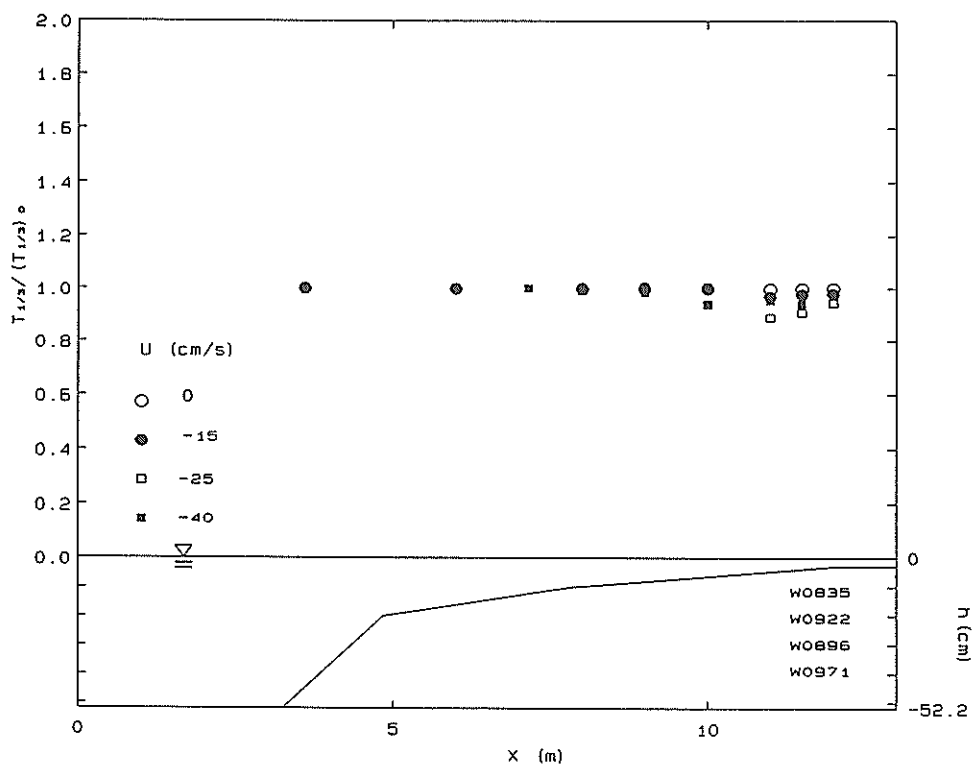


図-11(a) 有義波周期の変化 (規則波 1)

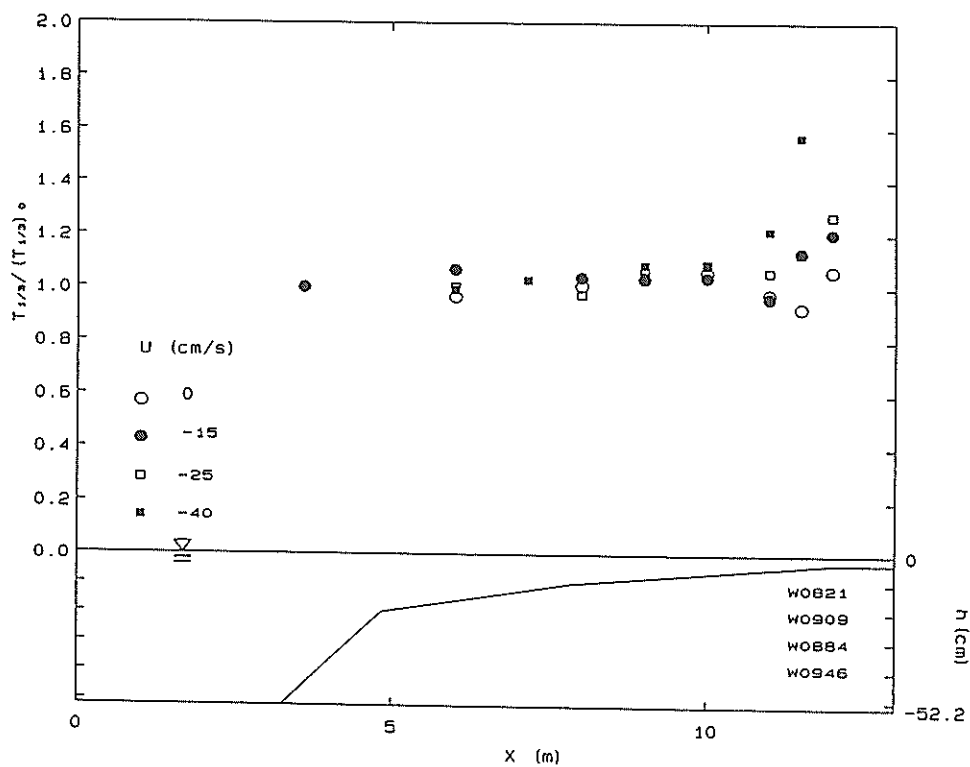


図-11(b) 有義波周期の変化 (不規則波 1)

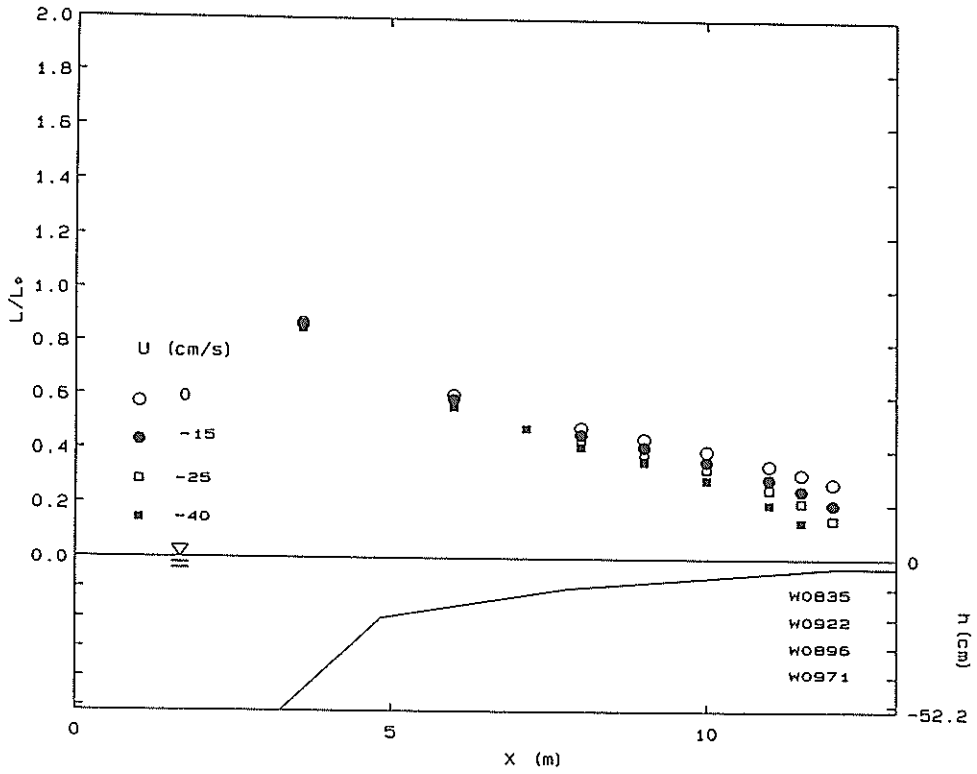


図-12(a) 波長の変化 (規則波 1)

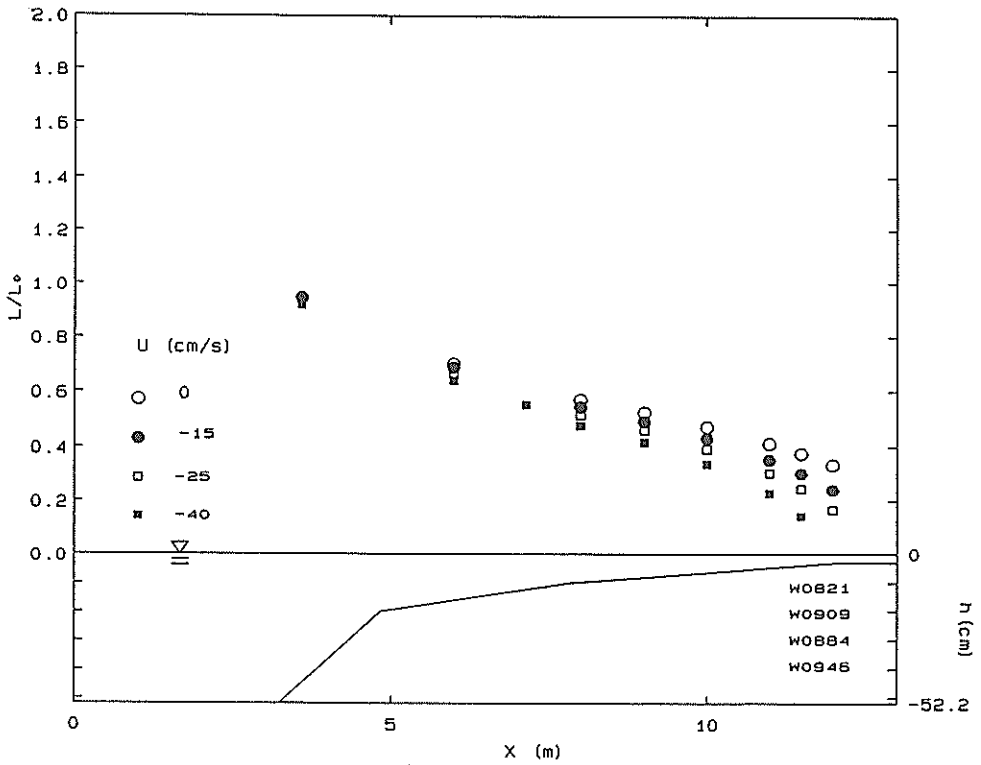


図-12(b) 波長の変化 (不規則波 1)

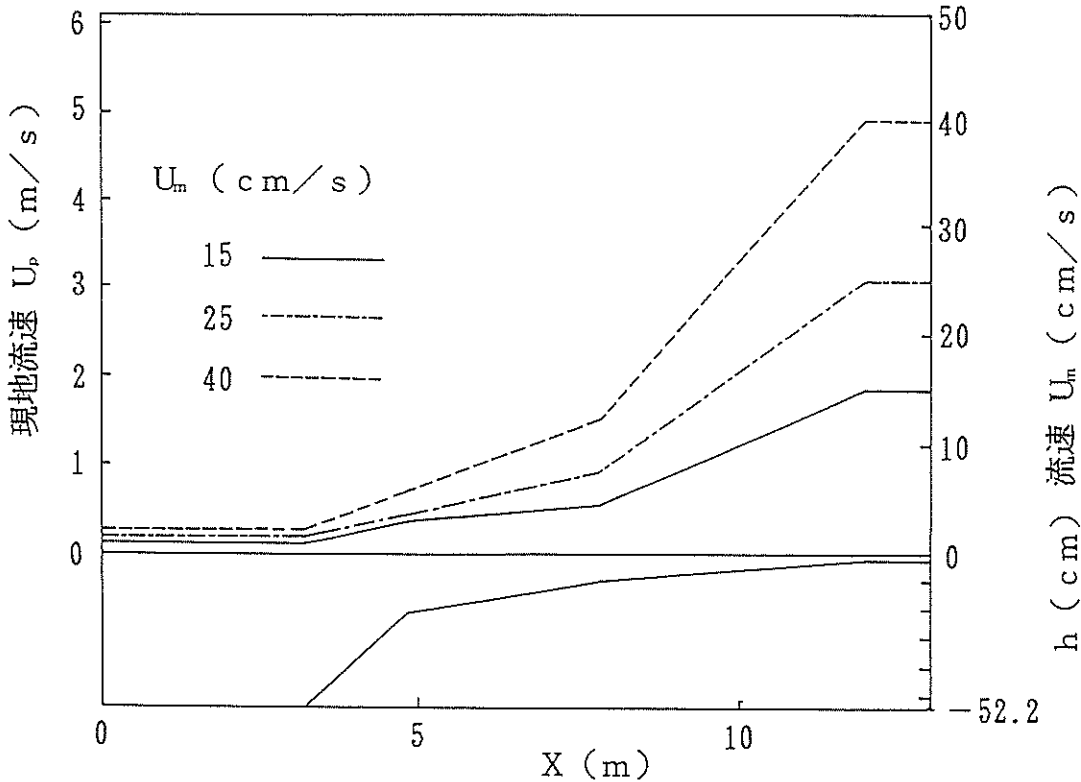


図-13 断面変化による流速の変化

3.4 有義波高の変化

測定された各測点の水位変動記録にゼロ・ダウンクロス法を適用して波の統計解析を行い、測点ごとの有義波高の変化を海底地形と共に示したのが図-14 (a) (b) である。図-14 (a) は規則波1、図-14 (b) は不規則波1である。ただし、各測点の有義波高は換算沖波波高 H'_0 で無次元化している。規則波についても便宜上有義波を用いているが、有義波高と平均波高ではほとんど違いないことを確かめている。

換算沖波波高は、微小振幅波理論から得られる次式を使って求められる⁴⁾。

$$K_s = \frac{H}{H'_0} = [\tanh kh + kh(1 - \tanh^2 kh)]^{-1/2} \dots (4)$$

ここに、 K_s は浅水係数、 H は水深 h での波高、 H'_0 は換算沖波波高、 k は波数である。

図-14 の下側は地形の変化を表している。図-14 (a) と図-14 (b) では波高の変化の傾向がかなり違っている。これは、表-1 でわかるとおり、沖側の波高が不規則波1の方が規則波1のそれより2倍以上大きいためである。図-14 (a) の規則波1の場合には、沖側の波高が小さいためかなり浅いところまで浅水変形による波

高の増大がある。しかも、浅いところでは流速が速いため、流れによる波高の違いも大きい。一方、図-14 (b) では波高が図-14 (a) の2倍以上あり、かなり沖の方で碎波していて、しかも、碎波後の変形には流れによる差がほとんど認められない。これは、碎波とそれ以後の波の変形は非線形性が強く、相対的に流れの影響が小さくなるからであると思われる。

以上より、流れがあるところでの浅水変形は、碎波に至るまでは流れを考慮し、碎波以後は流れを無視しても、それほど大きな誤差がでないことが期待される。

現在のところ、流れのある場合の碎波条件と、碎波変形については詳しいことがわかっていないので、碎波後は流れの有無にかかわらず、便宜的に合田の波高の略算式⁵⁾を用いるものとする。

浅水変形は、塚ら⁶⁾による流れを考慮した式(5)を用いて計算し、碎波の判定と、それ以後の波高の計算を流れなしの合田の略算式を使って求めたのが図-14 (a) と図-14 (b) の太い実線である。

$$\frac{H}{H'_0} = \left[\frac{1 + k^*U^*}{(1/k^* + U^*)(1 + 2k^*h^* \operatorname{cosech}(2k^*h^*)) - 2U^*} \right]^{1/2} \dots (5)$$

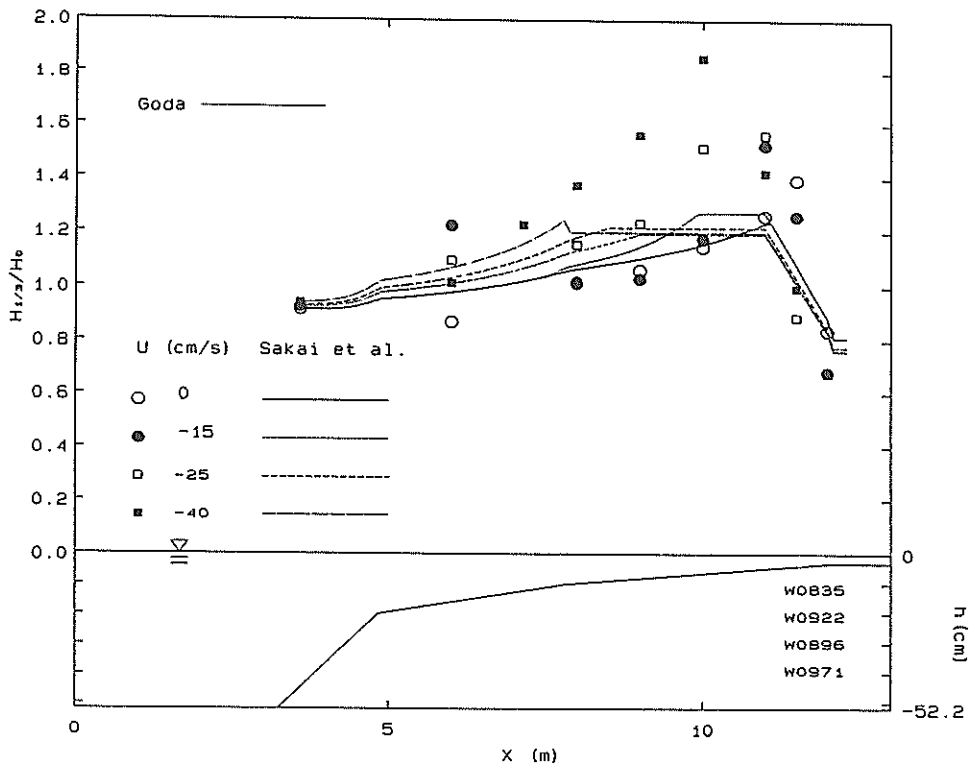


図-14(a) 有義波高の変化(規則波1)

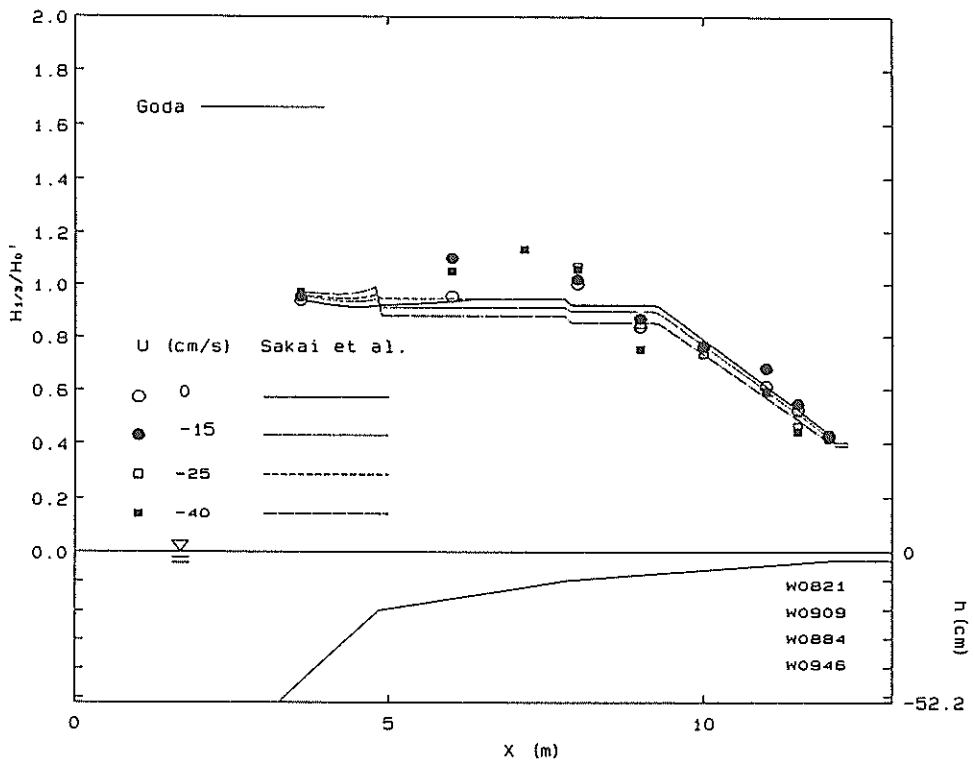


図-14(b) 有義波高の変化(不規則波1)

ここで、 $\omega = 2\pi/T$ であり、 U^* 、 k^* 、 h^* は次式で与えられる無次元数である。

$$U^* = U/c_0 = U\omega/g, \quad h^* = h\omega^2/g, \quad k^* = kg/\omega^2 \quad \dots(6)$$

ここに、 U は逆流の流速、 T は波の周期、 g は重力の加速度である。

細い実線は流れなしのケースに対応する合田の略算式で、この場合の浅水変形は首藤の有限振幅波の理論⁷⁾から求めたものである。

図-15は、実測した砕波点の波高水深比と水深と沖波の波長の比との関係を示したものである。図中の実線は水底勾配が1/50以下のときの砕波限界波高⁹⁾を示したものである。この砕波条件を用いたのは、今回の実験ではほとんどの波が水底勾配が1/60の斜面上で砕波していたからである。実測値は若干小さめであるが傾向はよく似ている。ここで、合田の略算式では、砕波の判定を $h/L_0 < 0.2$ としているが、今回の実験では $h/L_0 = 0.2$ よりも水深が浅くなってから砕波している。また、流速や周期によって砕波水深 h_b/L_0 は変化するが、今回の実験では H_b/h_b はほぼ一定の値($H_b/h_b = 0.577$)であった。そこで、合田の略算式の中の砕波の判定の部分 $H_b/h_b \geq 0.577$ とし、図-14(a)(b)と同じ波について合田の砕波変形式の中で、波高が一定で与えられる項を除いた次式を用いて計算した結果を図-16(a)(b)に示す。

$$H_{1/3} = K_s H'_0 \quad : H_b/h_b < 0.577$$

$$= \min \{ (\beta_0 H'_0 + \beta_1 h), K_s H'_0 \} : H_b/h_b \geq 0.577 \quad \dots(7)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} \beta_0 &= 0.028 (H'_0/L_0)^{-0.38} \exp(20 \tan^{1.5} \theta) \\ \beta_1 &= 0.52 \exp(4.2 \tan \theta) \end{aligned} \right\} \quad \dots(8)$$

ここで、 θ は模型底面が水平面となす角で、 $\tan \theta$ が底面勾配を表す。ここでは模型底面が複合断面なので、 θ としてはその地点での底面勾配をそのまま与えている。

図-16(a)(b)とも図-14(a)(b)より実測値に近い値を示しているので、ここで提案した方法の方が波高の変化の過程をよく表していると言える。沖波の水深を無限に深いとすると、どの流速の場合も沖波の位置では $U = 0$ であるから、ある周期に対する沖波波長 L_0 はどの流れの場合も同じになってしまう。このことから、流れのある場合に沖波の波長をパラメーターとして用いるのには疑問がある。同様の理由で式(8)内の L_0 も今後再考の必要があろう。

砕波限界式は堺ら⁹⁾による合田の砕波限界式を逆流が存在する場合にも拡張した次式を用いて計算した。

$$\frac{H_b}{L_0} = A [1 - \exp\{-1.5 \frac{\pi h}{L_0} (1 + 15 \tan^2 \theta)\}] \times C_1(\epsilon_d) \quad \dots(9)$$

$$\epsilon_d = \frac{q^*}{H_b/L_0} \sqrt[4]{S} \quad \dots(10)$$

$$C_1(\epsilon_d) = \begin{cases} 1.13 - 260 \epsilon_d & \epsilon_d \geq 0.0005 \\ 1.0 & \epsilon_d < 0.0005 \end{cases} \quad \dots(11)$$

ここに、 q^* は無次元単位幅流量($=q/g^2 T^3$)、 q は単位幅流量、 S は水底勾配である。

図-17は式(9)による計算値と実測値とを比較したものである。 $A = 0.15$ とすると両者は比較的良く合う。堺らは $A = 0.17$ としているが、この違いは砕波帯の中の波高を測定した位置の違いであると思われる。つまり著者らは砕波帯のほぼ中間位置で測定したのに対し、堺らは波が砕波し始める砕波帯の先端部で測定したのではないと思われる。

また、堺ら¹⁰⁾は、 q^* をパラメーターとして $(H/L)_b =$

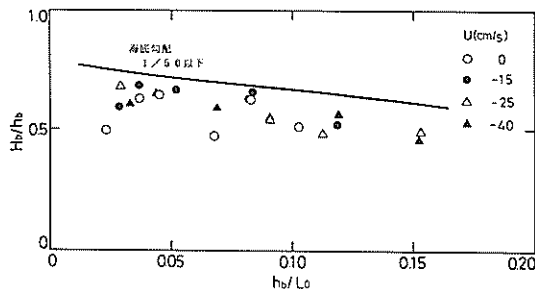


図-15 H_b/h_b と h_b/L_0 の関係

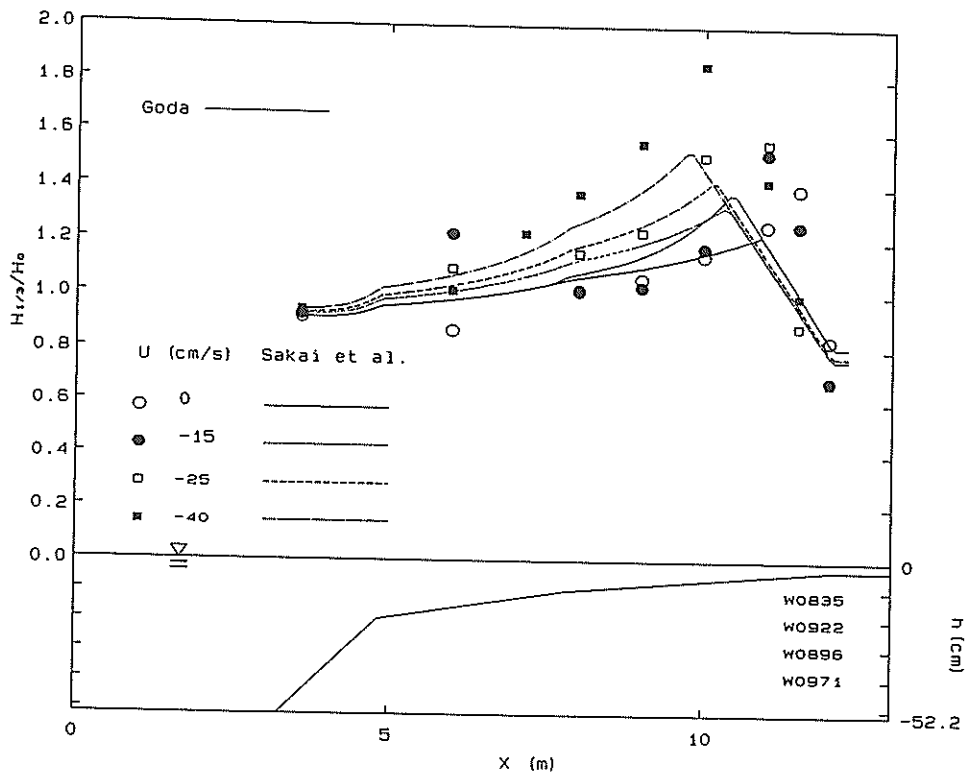


図-16 (a) 有義波高の変化 (規則波 1)

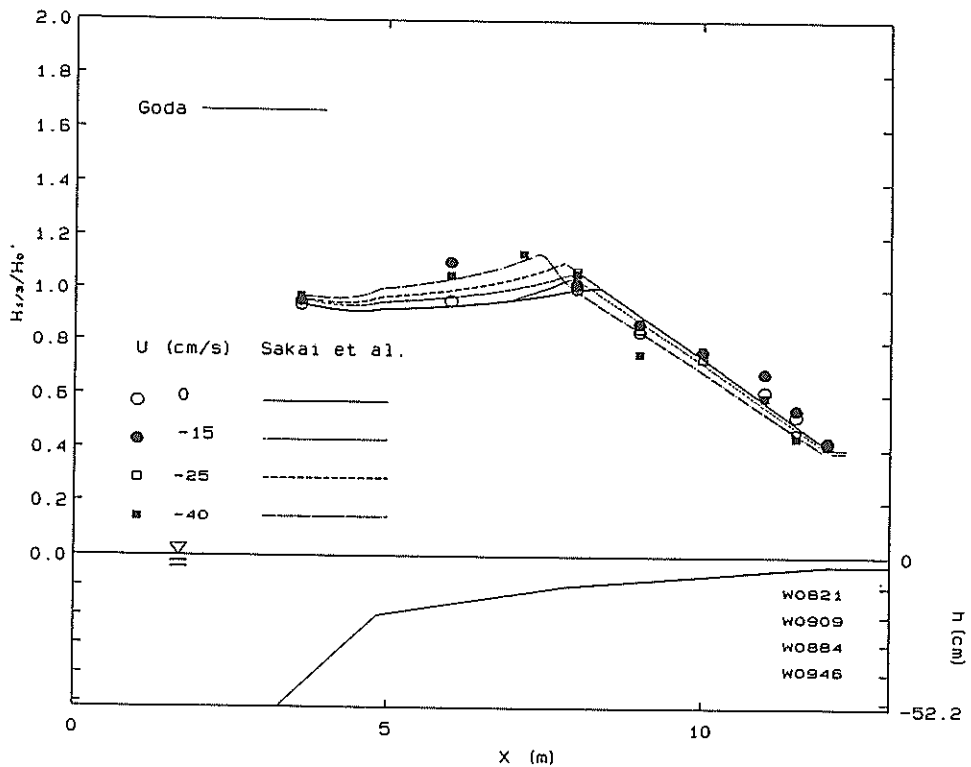


図-16 (b) 有義波高の変化 (不規則波 1)

$\alpha \tanh(2\pi h/L)_b$ で表される砕波限界式の α を求めることができることを示したが、図-18は今回の実験での q^* と α との関係を示したものである。図-19は上述の $(H/L)_b$ と $\tanh(2\pi h/L)_b$ との関係を示したものである。図中の実線は、図-18での α の平均値を示し、破線はMicheの式の $\alpha = 0.142$ を示している。Micheの値は実測値より大きめを示すが、これは前述の通り今回の実験では破波波高の測定位置が砕波帯のほぼ中間であるため波高は砕波限界波高より幾分小さくなっていると考えられる。

3.5 波の非線形性

波が浅海域へ侵入してくるにつれ海底面や逆流の影響により水位の度数分布が正規分布から歪んでくる。この分布形の歪を表す指標として、一般には次のひずみ度と尖鋭度がよく使われる¹¹⁾。

ひずみ度 (skewness) :

$$\sqrt{\beta_1} = \frac{1}{\eta_{rms}^3} \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\eta_i - \bar{\eta})^3 \quad \dots\dots(12)$$

尖鋭度 (kurtosis) :

$$\beta_2 = \frac{1}{\eta_{rms}^4} \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\eta_i - \bar{\eta})^4$$

正規分布の場合は $\sqrt{\beta_1} = 0$, $\beta_2 = 3.0$ の値をとる。

図-20は不規則波1のケースである。測点No.0 (図中の右端のデータ) ではひずみ度、尖鋭度もほぼ正規分布に近いことがわかる。水深が浅くなるにしたがって両者とも大きくなっていくが、流れが大きいくほど正規分布からのずれは流れのない場合と比べて小さくなっている。図中の一点鎖線は砕波位置を示している。ひずみ度は砕波後、値が急に大きくなっているのがわかる。また、尖鋭度は砕波点でいちばん大きくなっている。

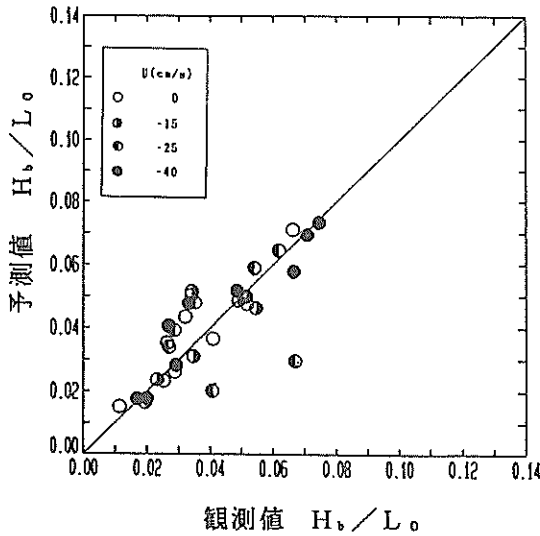


図-17 砕波限界に関する実験値と理論値の比較

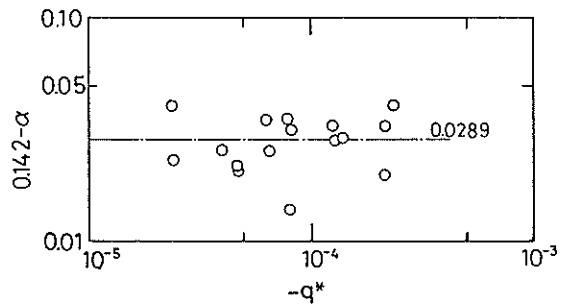


図-18 q^* と α の関係

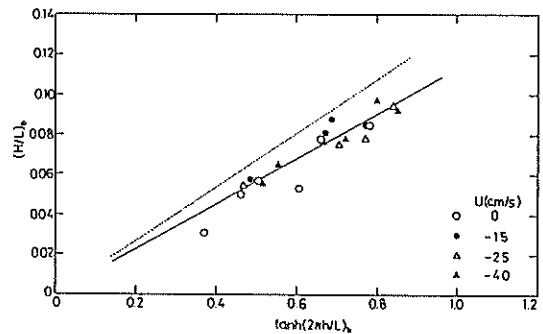


図-19 $(H/L)_b$ と $\tanh(2\pi h/L)_b$ の関係

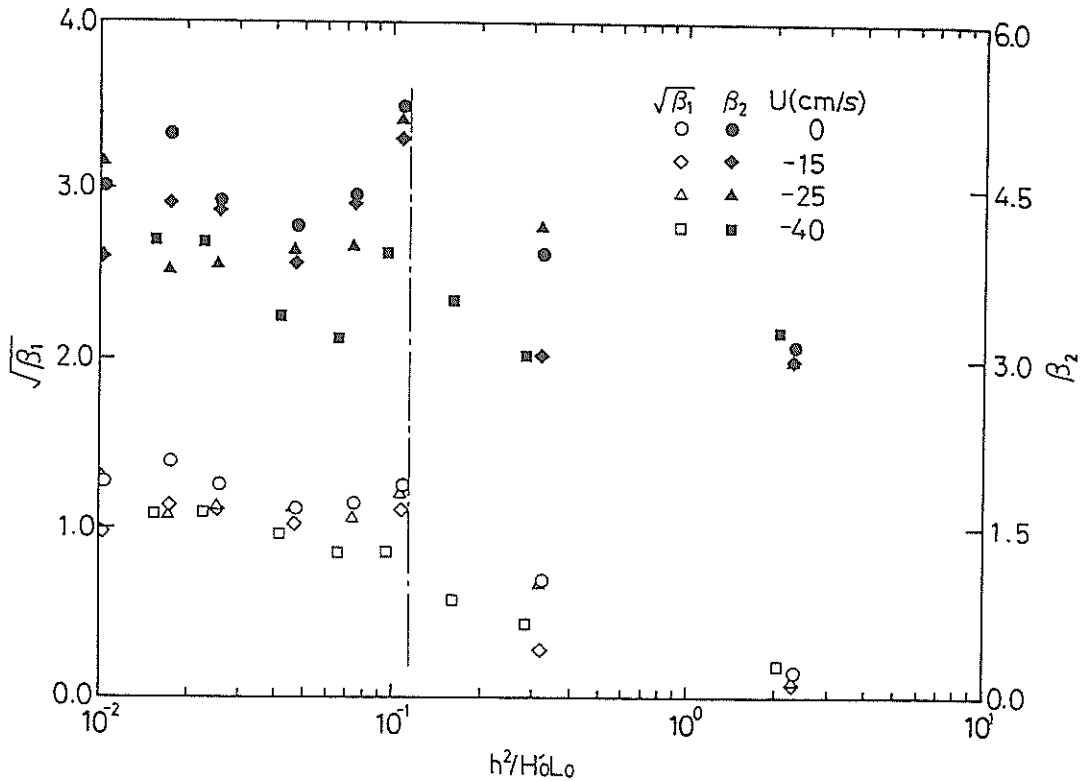


図-20 ひずみ度と尖鋭度

4. 結 論

本論文で得た結論は以下の通りである。

- 1) 規則波の場合は流れの有無にかかわらず有義波周期は一定であるが、不規則波の場合では逆流がある場合には、特に河口付近で有義波周期が大きくなる。
- 2) 波の浅水変形は流れによって影響を受け、逆流が速いほど波高は大きくなるが、砕波後の波高減少部では流れの有無にかかわらず波高の変化の傾向は同じである。今回用いた不規則波の場合には、砕波による変形が支配的で、流れによる波高増大は顕著には見られなかった。ただし、入射波高がもっと小さい場合には、規則波と同じように砕波するまでは、流れの影響で波は大きくなる。
- 3) 合田の略算式を流れのある場合に拡張して使う場合、砕波の判定は、 $H_0/h_0 \geq 0.577$ とすると実験値をうまく説明できる。 (1990年6月30日受付)

謝 辞

本研究は、運輸省第三港建設局の依頼により実施したものである。また、実験の実施とデータ整理には、水理研究室の渡邊 弘技官の協力を得た。

以上の関係諸氏に対し、深甚なる謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 石原藤次郎編：水工水理学，丸善，1972，pp.494～500。
- 2) 加藤 始：流れの中の波の性質について，昭和51年度港湾技術研究所講演会講演集，1976，72p。
- 3) 榎木 亨：河口閉そく機構に関する基礎的研究（第1報），第12回海岸工学講演会講演集，1965，pp.162～167。
- 4) 合田良実：浅海域における波浪の砕波変形，港湾技術研究所報告第14巻第3号，1975，pp.59～106。
- 5) 合田良実：港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会，1977，237p。
- 6) 堺 茂樹・太田和彦・大場宏樹・栗林俊展・佐伯浩：逆流上の不規則波の浅水変形に関する研究，第32回海岸工学講演会論文集，1985，pp.224～228。
- 7) 首藤伸夫：非線型長波の変形—水路幅，水深の変化する場合—，第21回海岸工学講演会論文集，1974，pp.57～63。
- 8) 前出文献5)
- 9) 堺 茂樹・小林信久・小池 勲：逆流が存在する斜面上での砕波限界—合田の砕波限界式の拡張—，第36回海岸工学講演会論文集，1989，pp.56～59。
- 10) 堺 茂樹・佐伯 浩・尾崎 晃：一様流を伴う有限振幅波理論の適用性，第30回海岸工学講演会論文集，1983，pp.64～68。
- 11) 前出文献5)

港湾技研資料 No.682

1990・9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 新宿総合印刷センター協業組合

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.