

潜堤上碎波の分類と内部特性に関する研究

Classification and Internal Characteristics of a Wave Breaking over Submerged Breakwater

松本健作*・滝川 清**・山田文彦***・嶋津秀一****

Kensaku MATSUMOTO, Kiyoshi TAKIKAWA, Fumihiko YAMADA, Syuichi SHIMAZU

* 正会員 工修 群馬大学助手 工学部 建設工学科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

** 正会員 工博 熊本大学教授 工学部 環境システム工学科 (〒860-8555 熊本県熊本市黒髪 2-39-1)

*** 正会員 工修 熊本大学助手 工学部 環境システム工学科 (〒860-8555 熊本県熊本市黒髪 2-39-1)

**** 学生会員 熊本大学大学院 自然科学研究科 (〒860-8555 熊本県熊本市黒髪 2-39-1)

The internal characteristics of a wave breaking depend on their breaker type. However, breaker types on various conditions are not known as well as those on a uniform slope. This paper shows unique breaker types of a wave breaking over a submerged breakwater and their internal characteristics. Results of experiments using Flow Visualization System, and numerical analysis using SMAC method show various different characteristics from those of a wave breaking on a uniform slope. Especially, one of unique breaker types over a submerged breakwater with a violent receding return flow causes large turbulent region in front of a submerged breakwater.

Key Words : Wave Breaking, Unique Breaker Types, Flow Visualization, SMAC method,

1. 概説

砕波は、その形態ごとに水塊の突入状況、その規模、周囲の流況等が大きく異なるため、その内部特性は碎波形態に強く依存する。碎波形態としては、一様勾配斜面上砕波における3種類の形態が知られており、それぞれの内部特性に関する多くの報告が為されている。しかし、その他の条件下における砕波に関しては、依然不明な点を多く残している。一方で、砕波を起こすと波は水塊の突入に伴う連行気泡や激しい乱れを生成し、大きなエネルギー逸散を起こすため、沿岸構造物によって強制的に砕波させることで波のエネルギーを減衰させ、人間の生活空間である沿岸域を静穏化すること目的とした潜堤等の各種消波構造物が設置されている。このように一様勾配斜面上砕波以外の、構造物による砕波は沿岸域において日常的にみられる現象であるが、上述のように、その形態、及び内部特性に関しては十分な議論が為されていない。これは、砕波という現象が、多量の気泡を巻き込む乱れの激しい現象であり、波から流れへの遷移過程において発生する不安定な現象であるため、比較的取り扱いの容易な一様勾配斜面上砕波に限定しても、理論的にも実験的にもその取り扱いが非常に困難であることによる。近年のコンピューターや実験装置の発達に伴い、ようやくそ

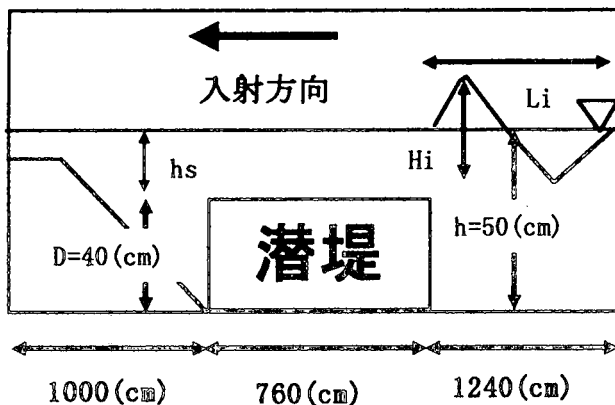
の内部特性に関する研究が行われるようになってきた^{1) 2)}。著者ら^{3) 4) 5)}もこれまでの研究で、潜堤上砕波特有の碎波形態、及びその内部特性について報告を行っている。本研究は、さらに多くの観測結果をもとに、それら潜堤上砕波形態の分類を行い、潜堤上砕波特有の碎波形態に関する、可視化実験による画像解析、及びSMAC⁶⁾法を用いた数値解析によって内部特性の解明を行うものである。

2. 潜堤上砕波の形態

2. 1 実験条件

(1) 実験装置

図-1に実験装置を示す。実験は、熊本大学の長さ30(m)、幅50(cm)、深さ80(cm)、片面ガラス張り2次元造波水槽を用いた。水槽内には、長さ760(cm)の木製の不透過性矩形潜堤を設置した。水槽の一端のピストン式造波装置によって、周期、波高を調節し造波を行い、他端に設置した1/20勾配の斜面と消波ネットによって反射波の影響を消してある。代表的な形態と考えられるものについてはデジタルビデオカメラを用いて撮影を行い、その碎波変形過程の特徴を考察した。尚、以後の変数の定義は図-1中の各変数配置に従うものとする。



D : 堤高、h : 水深、Hi : 入射波高、Li : 入射波長、
Hs : 天端上水深

(2) 実験ケース

水槽内に様々な波高、周期、 H_i 水深で波を入射させ、碎波形態の観察を行なった。堤高を 40 (cm) に固定し、55, 50, 45 (cm) の3通りの水深に対して、59 ケースの波を入射させ、計 177 ケースについて観察を行った。

2. 2 結果及び考察

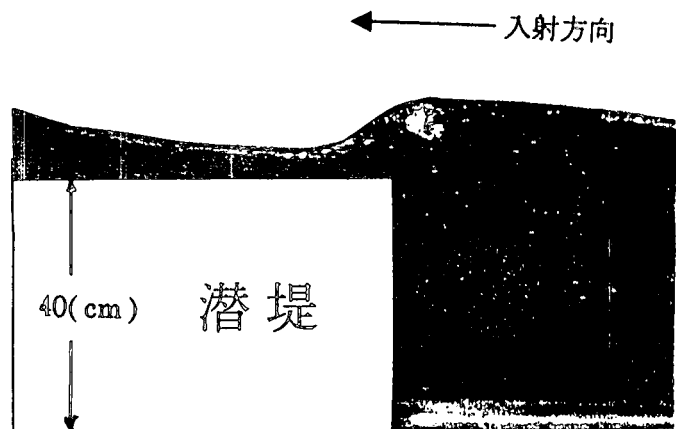
(1) 潜堤上碎波形態の観察

現在までに、一様勾配斜面上碎波以外の条件下における特殊な碎波形態の報告例として、服部⁷⁾らによる幅広潜堤での2段碎波や跳水性碎波、及び安田⁸⁾らによるダブルリーフ上での複合型碎波について報告が為されている。本研究では実験条件が異なるため、これらの碎波形態は含めていないが、2段碎波に関しては著者らの従来までの研究でも同様のものと思われる碎波形態が観測されている。以下に主な碎波形態の観察結果を示し考察を行う。

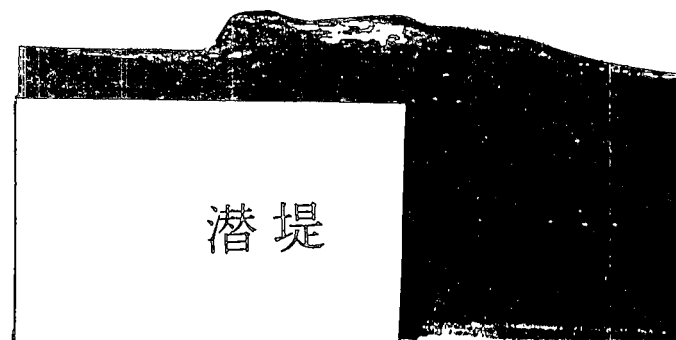
図—2、図—3、図—4にビデオ画像を示す。それぞれ (a), (b), (c) の順に時間経過し、ほぼ1周期分を表す。

図—2は、潜堤上巻き波碎波のビデオ画像である。入射波は潜堤上で徐々に前傾化した後、ほぼ垂直に切り立った波峰から水塊が突入する (図—2—(c))。一様勾配斜面上で見られる巻き波碎波と似通った挙動をとるが、相違点は潜堤上での戻り流れが水表面を攪乱し (図—2—(a))、その後波峰の後方まで伝播している (図—2—(b)) 点である。

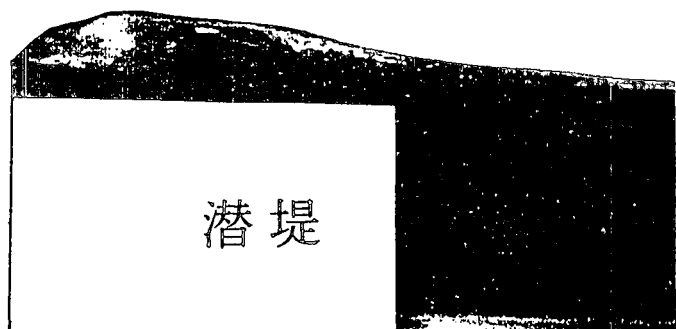
図—3は2段型碎波のビデオ画像である。入射波は、潜堤上巻き波碎波のように潜堤上で徐々に変形し前傾化から水塊を突入させるのではなく、潜堤角付近で戻り流れと衝突を起こし水塊を飛び出させる。水塊の突入形態は一様勾配斜面上碎波における巻き波碎波と似通ったものであるが、このとき、ほぼ同規模の水塊の突入が、ほぼ同時刻に発生する (図—3—(c))。



(a)

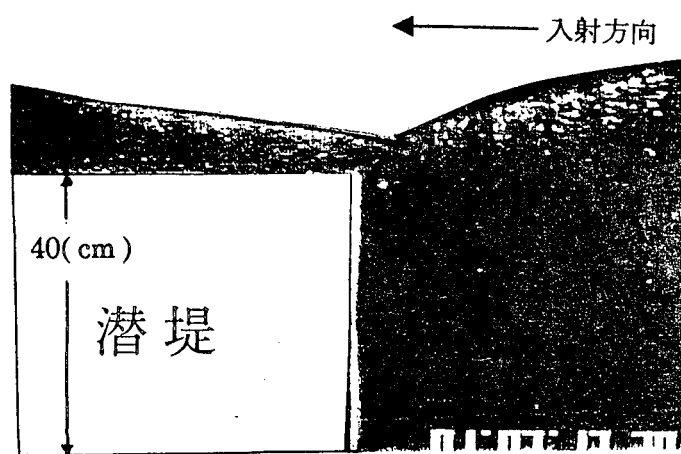


(b)



(c)

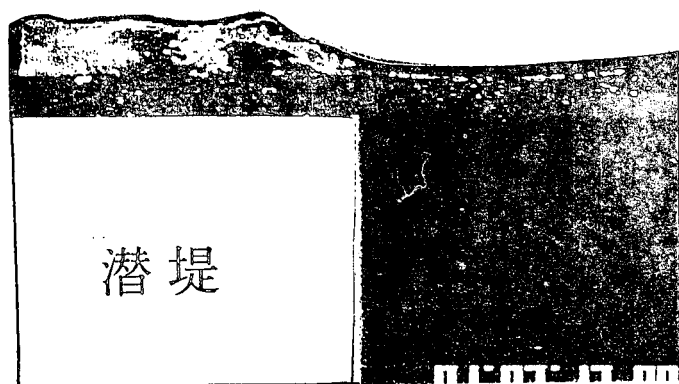
図—2 潜堤上巻き波碎波



(a)

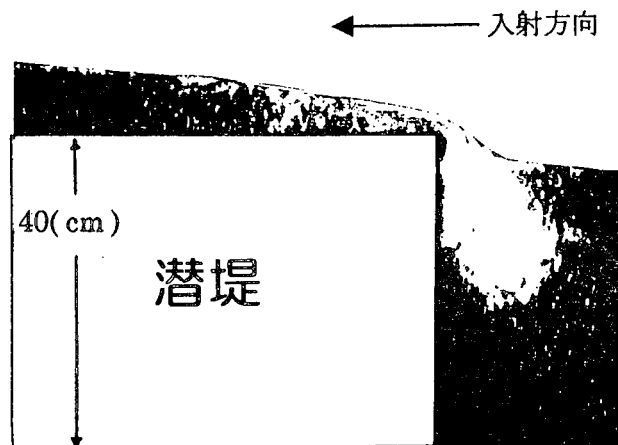


(b)



(c)

图一3 2段型碎波



(a)



(b)



(c)

图一4 落ち込み型碎波

この様子をビデオ画像で観察すると、後続波によって押し戻された潜堤上の戻り流れが巻き上げられたことによるものと、後続波自体から飛び出したものの、2つの水塊の突入であることがわかる。しかし、現象がかなり不安定であるため、明確な2段碎波の発生条件を規定することが難しく、今回は上述の潜堤上巻き波碎波の特異な例として捉えており、2段型碎波単独での分類は行っていない。

図-4は、本研究において落ち込み型碎波と呼んでいる碎波形態である。波高が天端上水深と同程度になるあたりから発生するようになる。潜堤上での戻り流れが、後続波が潜堤に差し掛かる前に潜堤前面に沿って角から落ち込む。この際に潜堤前面角付近に、多量の連行気泡を伴った大規模な乱流場が形成される(図-4-(a))。本研究で用いたような矩形の構造物の場合、角において強力な剥離が発生し、音を伴った激しい現象となる。その後、潜堤にさしかかった後続波は、まず潜堤前面の大規模乱流場に衝突し、多量の気泡を含んだ乱流場を取り込み潜堤上に持ち上げる。このため後続波自体からの水塊の飛び出しが行われる以前に、波峰前面に既に多量の気泡を含んだ状態となっている(図-4-(b))。また、碎波水深に満たない天端上水深域に急激に進行するため、他の碎波形態で見られたように徐々に変形し碎波に至るといった形態とは異なり、天端上に波の上部が投げ出されるように飛び出す。水塊の突入形態は、既に多量の気泡を含んでいる波峰前面の乱流場がそのまま飛び出すため、水塊の飛び出し時点からBore状の水塊が進行するような形態をとる(図-4-(c))。このため戻り流れの落ち込みによるものと、潜堤上で発生する水塊の突入によるものの、2つの多量の気泡を含んだ大規模乱流場を形成する。

(2) 潜堤上碎波形態の分類

上述の潜堤上巻き波碎波、落ち込み型碎波、の他に、潜堤上崩れ波碎波(潜堤上巻き波碎波と同様の、戻り流れのよる水表面の攪乱が見られ、水塊突入状況が一樣勾配斜面上で見られる崩れ波碎波と似通った挙動をとるもの)、弱落ち込み型碎波(落ち込み型碎波と同様の、戻り流れの潜堤角からの落ち込みが見られ、その規模が小さく形成される乱流場が水表面付近に限定されているもの)に非碎波を加えた。計5形態について分類を行った。

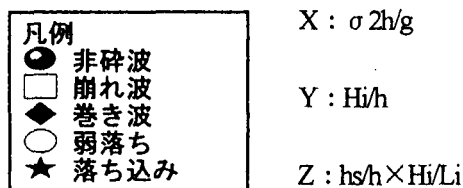
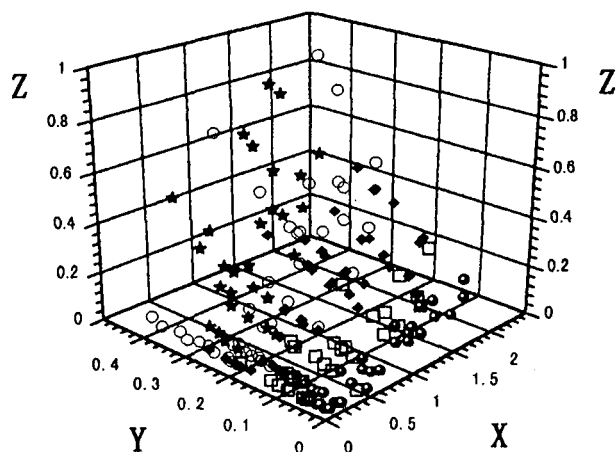
筆者らは現在までに、 H/h (波高と天端上水深による無次元パラメーター)、及び σ^2/g (周期の無次元パラメーター)の、2つを用いた分類を行っているが、水深の変化に伴って傾向が変わることから、従来の方法では潜堤上碎波形態の分類を規定しきれていないと考え、本研究では主な支配要因と考えられる、入射波高(H)、入射波長(L)、水深(h)、潜堤長(B)、潜

堤高(D)、重力加速度(g)、及び周期(T)から、次元解析を行い選り出した無次元パラメーターの値の主成分分析を行って特に支配的と考えられる無次元パラメーターを選り出すことにした。第1、第2主成分がそれぞれ H/h (波高パラメーター)、 σ^2/g (周期パラメーター)、であったが、これには潜堤の高さを表すパラメーターが含まれていないため、第3主成分 h/h_s (天端上水深パラメーター)までを考慮し、3つの無次元パラメーターを用いて分類を行うことを試みた。この際、第3主成分である h/h_s については、堤高を固定し、水深を3通りにしか変化させていないため、 h/h_s としては3通りの値しか取り得ない。ここでは、各碎波形態の分布を定式化するため、水深方向の分布にも幅を持たせるために、波形勾配を乗した $h/h_s \times H/L$ の形で用いることとした。

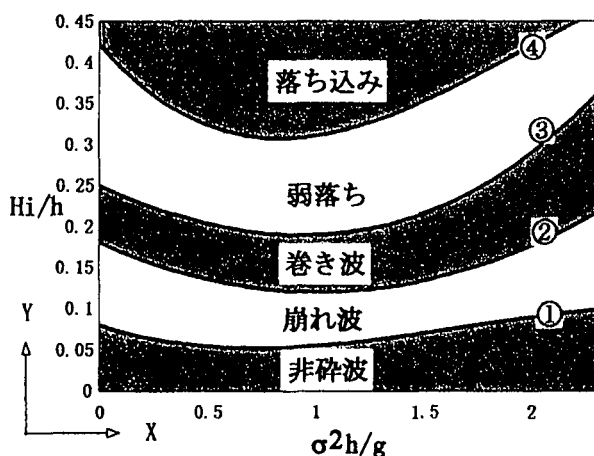
図-5に分類結果を示す。 X 、 Y 、 Z 軸をそれぞれ H/h 、 σ^2/g 、 $h/h_s \times H/L$ をとする。ほとんどの形態が、周期的には、ほぼ全域にわたって分布している。非碎波及び潜堤上崩れ波碎波は、波形勾配が比較的小さく、また天端上水深もある程度以上の場合(Z 軸の値で非碎波は約0.1以下、潜堤上崩れ波碎波は約0.2以下)に限定されて分布している。潜堤上巻き波碎波、弱落ち込み型碎波、及び落ち込み型碎波は比較的広範囲に分布しており、それらの境界は不明瞭になっている。特に潜堤上巻き波碎波と弱落ち込み型碎波は混在しており明瞭な境界が見えにくい。弱落ち込み型碎波の方が Y 軸、 Z 軸方向にやや上に分布している様子が伺える。弱落ち込み型碎波、及び落ち込み型碎波に関しては、その分布が周期に左右されている。長周期($X > 0.3$)や、短周期($X < 2$)では落ち込み型碎波は見られず、弱落ち込み型碎波になっている。落ち込み型碎波の発生条件は、同一の波高、天端上水深においても、 $0.3 < X < 1$ あたりにおいて最適な周期条件が存在する傾向が見て取れる。

次に、各形態の存在領域の定式化を行った。3次元的に領域を規定すると、複数の曲面近似の共有部分による複雑な式となるため、本研究では $X-Y$ 、及び $X-Z$ 平面への投影図に対して多項式近似を行い、両図の共有領域を各形態の存在領域と定義することとした。

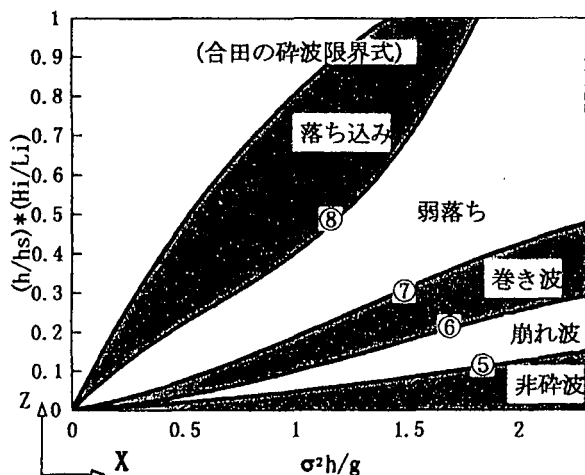
図-6、図-7にそれぞれ $X-Y$ 、 $X-Z$ 平面への投影図を示す。図-6中の①~④、及び図-7中の⑤~⑧の曲線は、各形態間の境界付近のデータを3次多項式で近似したものであり、曲線①~④が式(1)、曲線⑤~⑧が式(2)、また、図-7中の合田の碎波限界式が式(3)である。式(1)、式(2)中の各係数を表-1に示す。尚、図-7中の合田の碎波限界式は、今回の測定中で最も水深の浅い水深45(cm)のものである。多項式近似に3次のものを用いたのは、各分布形状を比較的良好に再現できていると思われたためである。



図—5 潜堤上砕波形態の分類



図—6 X—Y 投影図



図—7 X—Z 投影図

以下に図—6、図—7中の近似式を示す。

$$Y = a_1 + a_2 X + a_3 X^2 + a_4 X^3 \quad (1)$$

$$Z = b_1 + b_2 X + b_3 X^2 + b_4 X \quad (2)$$

$$Z = -1.53 \exp^{0.75X} + 1.53 \quad (3)$$

ここで、 $X = \sigma^2 h/g$ 、 $Y = H_i/h$ 、 $Z = h/h_s \times H_i/L_i$

表—1 近似多項式の各係数

	a_1	a_2	a_3	A_4
曲線 ①	0.080	-0.085	0.075	-0.015
曲線 ②	0.180	-0.120	0.060	-0.0005
曲線 ③	0.250	-0.120	0.050	0.010
曲線 ④	0.420	-0.300	0.230	-0.040
	b_1	b_2	B_3	B_4
曲線 ⑤	0.000	0.030	0.020	-0.002
曲線 ⑥	0.000	0.030	0.090	-0.021
曲線 ⑦	0.000	0.100	0.120	-0.032
曲線 ⑧	0.000	0.580	-0.380	0.200

各砕波形態の存在範囲は、図—6より、

- 0 < 非砕波 < ①
- ① < 潜堤上崩れ波砕波 < ②
- ② < 潜堤上巻き波砕波 < ③
- ③ < 弱落ち込み型砕波 < ④
- ④ < 落ち込み型砕波

また図—7より、

- 0 < 非砕波 < ⑤
- ⑤ < 潜堤上崩れ波砕波 < ⑥
- ⑥ < 潜堤上巻き波砕波 < ⑦
- ⑦ < 弱落ち込み型砕波 < ⑧
- ⑧ < 落ち込み型砕波 < 合田の砕波限界式

である。

本研究では各砕波形態の存在範囲は、図—6、図—7の両図の共有する領域を存在領域としたが、上述のように各形態は混在して分布しているため境界付近は遷移領域であると考えられる。

3. 潜堤上砕波の内部特性

3. 1 可視化実験による内部特性の解明

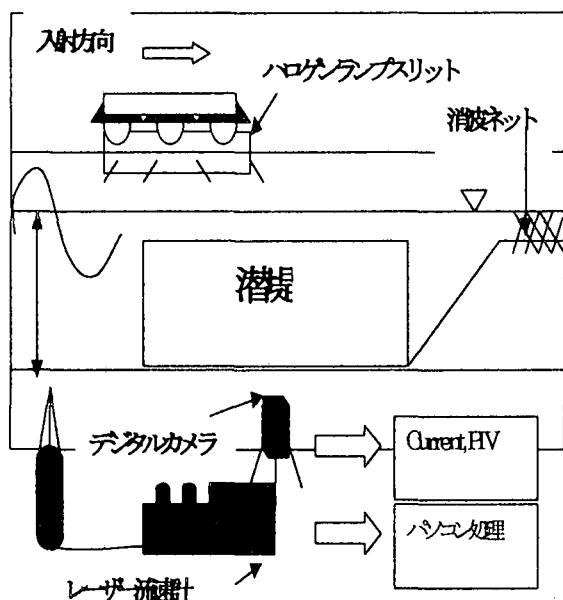
(1) 実験条件

潜堤上砕波の内部特性の解明を行うため、可視化実験による流況解析を行った。本研究では、最も激しい挙動を見せた落ち込み型砕波についての解析例を示す。実験条件は表—2に、実験装置を図—8に示す。

表一2 画像解析の実験ケース (落ち込み型碎波)

T(sec)	Hi(cm)	h(cm)	D(cm)	形態
1.43	24.5	50.0	40.0	落ち込み型碎波

T:周期、Hi:入射波高、h:水深、D:堤高



図一8 実験装置

落ち込み型碎波は多量の連行気泡を伴う碎波形態であるのでトレーサー粒子追跡による方法がとりにくいため、実験にはカノマックス社製の Current, PIV (Particle Image Velocimetry) を用いた。実験は、夜間照明を落とした状態でハロゲンランプのスリット光を照射してビデオ撮影を行った。流速は 1/30 間隔の 2 枚の録画面像を用いた輝度の濃度相関法によって測定した。次に、得られた流速場の精度の検証を行った。解析画面内での発散量の分布を調べると最大で 60(1/s)程度の値がみられ、PIV による解析結果そのままでは連続条件を満たしていないことが解る。

本研究に用いた PIV 解析では、連続条件を満たすような制約が与えられていないため、発散量は基本的には 0 にはならない。解析の際には、流況を判断し、明らかにおかしいと思われる流速ベクトルを人為的に消去してゆくことで精度を上げることは可能だが、激しい乱流場に対しては人為的な判断には限界があり、また、内部諸量の算出の際に直行メッシュ上の値に補完計算する際にも誤差が蓄積されることが考えられる。

また一方で、現実にはスリット照射断面の外部とのやり取りや、気泡混入の影響等あり、連続条件を課すことによってかえって現象を歪曲する恐れもある。

ここで、表一2 に示す非碎波の条件下における、レーザー流速計による測定結果と Mass-Consistent

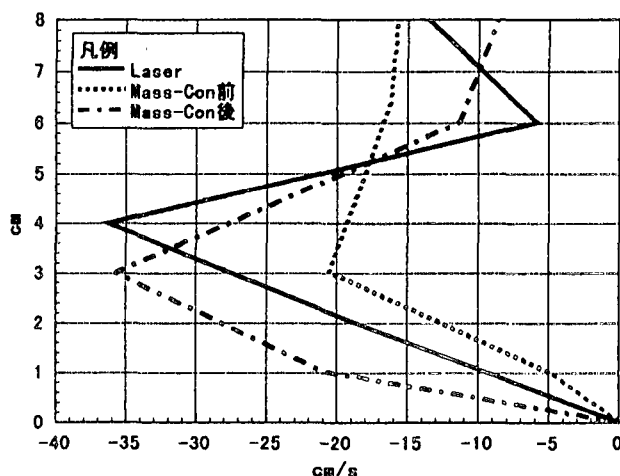
Model の適用前後の画像解析結果との、水平流速の鉛直分布の比較を図一8に示す。尚、レーザー流速計による測定と画像解析用の撮影は連動させて行っていないため、位相は目視によってほぼ同位相と判断されるものを用いており、図一8は潜堤角水位がほぼ最低となり、引き波時の冲向きの流れが発生している位相のものである。測定は潜堤角真上の天端上水深に対して行ったもので、縦軸には天端高を基準として鉛直上向きにとった距離、横軸には水平流速を示してある。非碎波のケースでの検討を行ったのは、比較的穏やかで、気泡の混入もなく、流況の3次元性や流体の圧縮性による影響が比較的少ないものと思われるため、画像解析自体による誤差の影響を見やすいと考えたためである。図一8をみると、Mass-Consistent Model の適用によって、レーザー流速計の測定結果に近づく傾向が見られ、Mass-Consistent Model の適用が画像解析自体の誤差を修正し、精度を向上させるのに有効であることがわかる。尚、Mass-Consistent Model 適用後、画像内の発散量は 10^{-11} のオーダーにまで抑えられている。

表一3 画像解析の精度検証実験ケース (非碎波)

T(sec)	Hi(cm)	h(cm)	D(cm)	形態
1.43	4.04	50.0	40.0	非碎波

T:周期、Hi:入射波高、h:水深、D:堤高

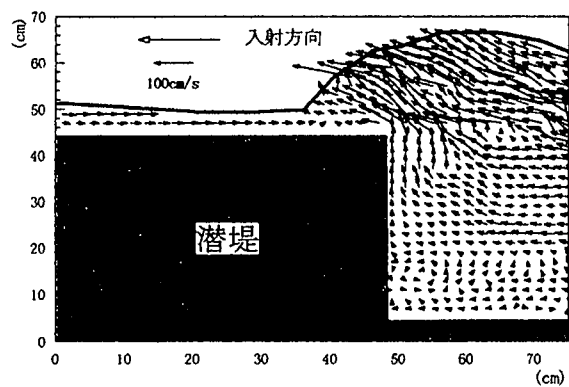
しかしながら、多量の気泡を含み激しい乱れを伴う現象に対しては、レーザー流速計による測定にも限界があり、厳密な議論が依然として困難であるため、本研究における落ち込み型碎波への Mass-Consistent Model の適用の妥当性には課題があり、今後の課題であると考えられる。



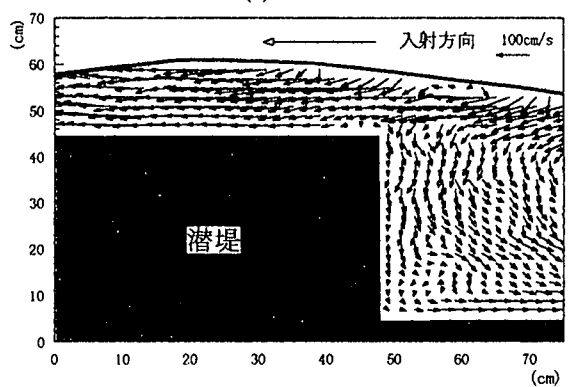
図一9 水平流速の鉛直分布の比較

(2) 実験結果及び考察

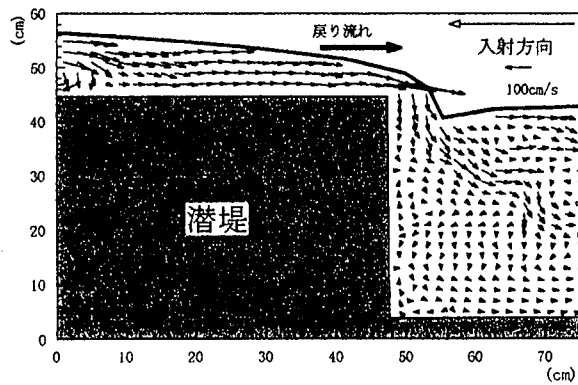
以下に画像解析結果を示す。図-10(a), (b), (c), (d) は落ち込み型碎波の流速分布を約 1/4 秒間隔で出力した



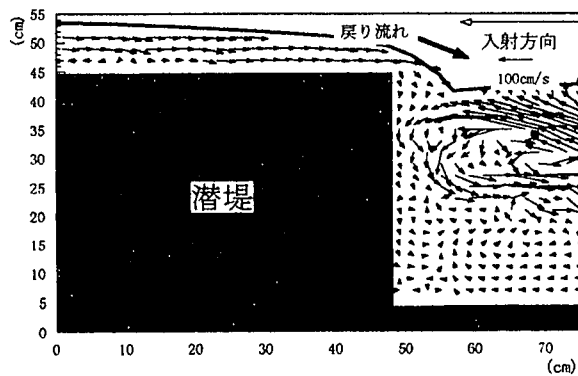
(a) $t = 1/4T$



(b) $t = 2/4T$



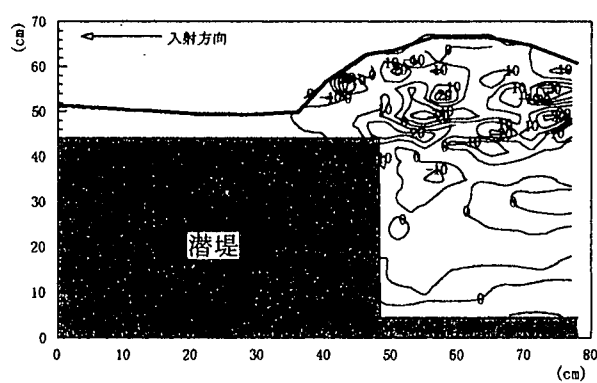
(c) $t = 3/4T$



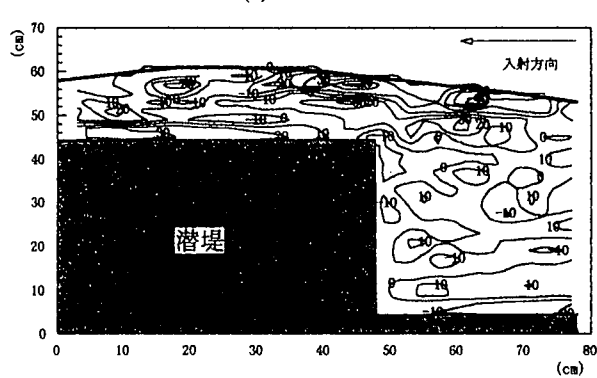
(d) $t = 4/4T$

図-10 落ち込み型碎波の画像解析結果 (流速分布)

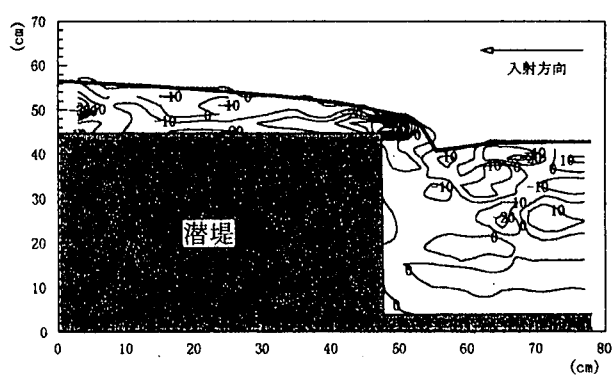
もの、また、図-11(a), (b), (c), (d) は図-10における各時刻における渦度分布を表したもので、半時計回りに正方向をとってある。



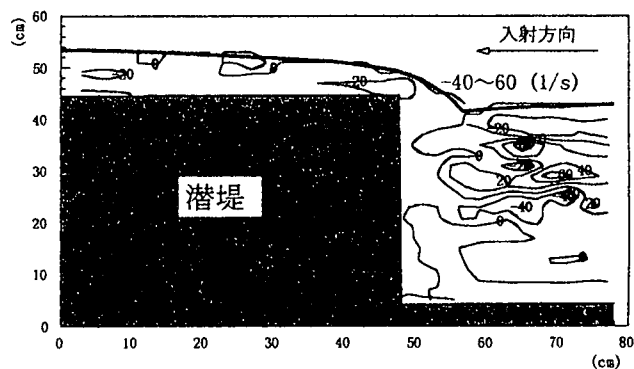
(a) $t = 1/4T$



(b) $t = 2/4T$



(c) $t = 3/4T$



(d) $t = 4/4T$

図-11 落ち込み型碎波の画像解析結果 (渦度分布)

図一10の(a)は、潜堤角において水位がほぼ最大となる位相のものであるが、潜堤前面の上部周辺で上昇流が発生しているのが見て取れる。その後、(b)で潜堤角で増大した波峰から水塊が潜堤上に飛び出す。(c)では、引き波時に潜堤上の戻り流れが潜堤角から激しく落ち込んでいる。(d)では、潜堤前面における、戻り流れの落ち込みによって潜堤前面に大規模な乱流場が形成されている様子が再現されている。

図一11の渦度を見てみると、(a)では潜堤角において20(1/s)程、その後の水塊突入時の(b)では潜堤上部に40(1/s)程と、戻り流れが氷表面を沖方向に伝播する際に生じさせるものと思われる氷表面付近の-30(1/s)程の渦度が見られる。(c)においては戻り流れが潜堤前面に激しく落ち込む際に-70(1/s)の最大渦度が見られ、(d)においては大規模乱流場の形成されている付近で-40～60(1/s)といった正負の渦度の混在領域が見られる。

3. 2 潜堤上碎波の数値解析

(1) 計算条件

上述の、画像解析に用いたものと同一の条件での落ち込み型碎波に関して、2次元非圧縮性粘性流体として数値解析を行った。計算条件を表一4に示す。数値解析にはSMAC法を用い、基礎方程式は式(1)の連続の式と、式(2),(3)のNavier-Stokesの方程式を用いた。N-S方程式中の移流項の差分化には2次精度の風上差分を用いており、今回の計算では乱流モデルは組み込んでいない。

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g \quad (6)$$

ここで、 u は水平流速成分、 v は鉛直流速成分、 ρ は密度、 g は重力加速度、 ν は動粘性係数である。

計算領域はX、Y方向に1600(cm)、200(cm)とり、2(cm)×1(cm)の長方形メッシュをそれぞれ水平方向に800分割、鉛直方向に200分割し、潜堤沖方向に3波長、潜堤岸方向に1波長分の領域を確保して行った。初期条件及び境界条件には滝川¹⁰⁾の有限要素法による計算結果を用いている。計算時間間隔は1/1000(秒)で行った。

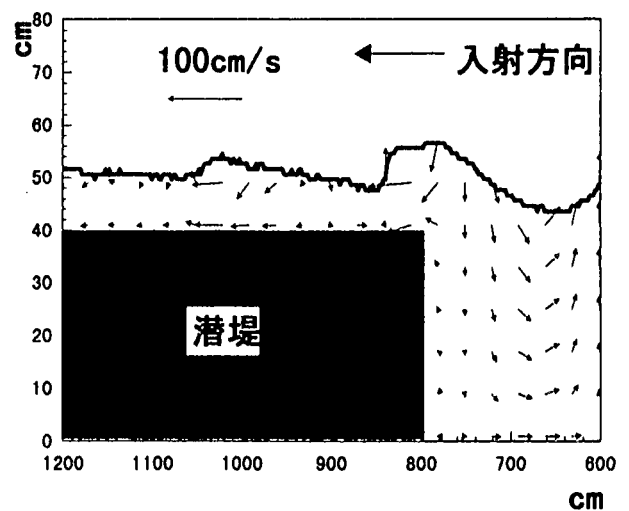
表一4 計算条件(落ち込み型碎波)

T(sec)	Hi(cm)	h(cm)	D(cm)	形態
1.43	24.5	50.0	40.0	落ち込み型碎波

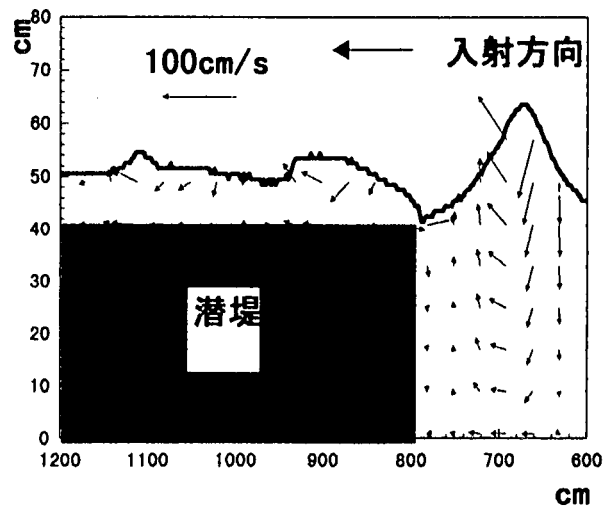
T:周期、Hi:入射波高、h:水深、D:堤高

(2) 計算結果及び考察

図一12(a)、(b)は落ち込み型碎波の数値解析結果の流速分布で、それぞれ、(a)が潜堤上での水塊突入時、(b)が引き波時における戻り流れの潜堤角からの落ち込み時の位相のものである。また、図一13(a)、(b)は、図一12の(a)、(b)にそれぞれ対応した渦度の分布である。

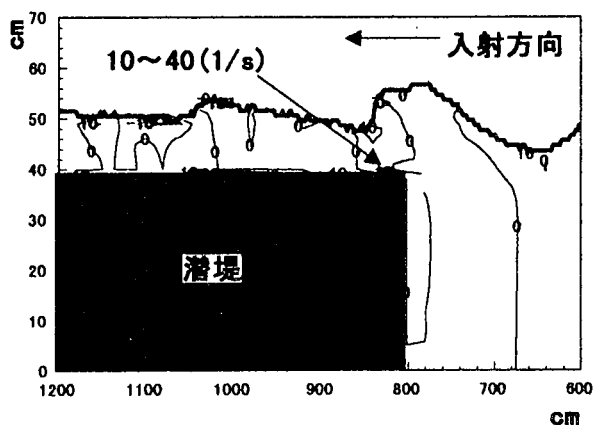


(a) $t=5.0T$

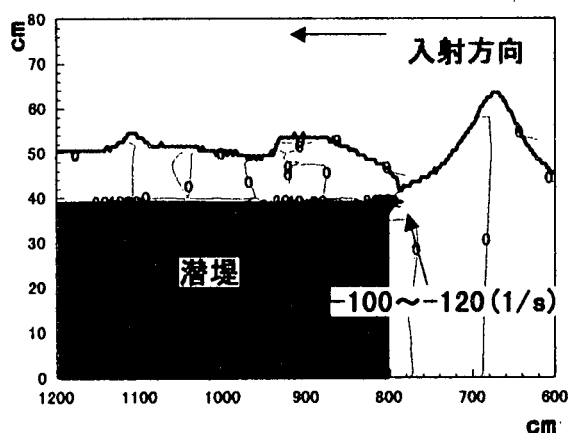


(b) $t=5.5T$

図一12 落ち込み型碎波の計算結果(流速分布)



(a) $t = 5.0T$



(b) $t = 5.5T$

図-13 落ち込み型碎波の計算結果 (渦度分布)

図-12の(a)で、潜堤角で盛り上がった波峰から水塊が飛び出しており、図-13の(a)を見ると、潜堤上辺で $10 \sim 40 (1/s)$ といった大小の渦度の混在が見られる。図-11(b)の、ほぼ同位相での実験結果を見ると同様に $40 (1/s)$ 前後の値が見られ、オーダー的にはまずまずの精度を有することが見て取れる。その後、図-12(b)は、引き波時の潜堤上の戻り流れの落ち込みと、それによって形成される潜堤前面で大規模乱流場が形成される位相である。潜堤角で極端に天端上水深の浅くなり、この際に、図-13(b)では $-100 \sim -120 (1/s)$ 比較的大きな渦度が潜堤角において見られる。図-11(d)では $-70 \sim -20 (1/s)$ であり、計算値の方が大きな値を示している。また、計算結果には、潜堤前面での流況の攪乱が再現されていない。これは、N-S方程式の直接シミュレーションによる計算であるため、レイノルズ応力の影響が考慮されていないこと、また、戻り流れの落ち込みの際に多量に連行され、大規模乱流場形成の大きな要因の1つ

となっている気泡の影響が考慮されていない、といった理由によるものと考えられる。しかし、落ち込み型碎波のような現象のより詳細な解明には、これらの点を考慮することは不可欠であり、今後、乱流モデル、混相モデル等の適用が必要であると思われる。

4. 結論

以下に本研究で得られた主要な結論を示す。

- ① 潜堤上碎波では、一様勾配斜面上碎波では見られない種々の特有の碎波形態が存在し、その碎波形態を、3つの無次元パラメーターを用いて分類及び存在領域を大まかに示すことができた。
- ② Current, PIVによる画像解析結果は連続条件を満たしておらず、ShermanのMass-Consistent Modelによる補正の発散量を抑えることによって、非碎波のケースに関しては、レーザー流速計の測定結果に近づくことが確認できた。これによって、その他のケースに対する適用においても一応の有効性があることは示せたが、気泡混入領域、及び流況の3次元性の影響が強いケースについては今後の課題である。
- ③ 落ち込み型碎波の画像解析結果から、戻り流れの潜堤角からの落ち込みによって、潜堤前面で大規模な乱流場が形成される様子を再現することができた。またこの際、局所的な大きな渦度の分布が見られた。
- ④ SMAC法を用いたN-S方程式の直接シミュレーションを行った結果、潜堤周辺での壁面粘性による渦を良好に再現できた。今後は乱流場や気泡の影響を考慮したモデルの適用が必要である。

参考文献

- 1) Sakai, T., Mizutani, T., Tanaka, H., and Tada, Y.: Vortex formation in plunging breaker: Proc. 20th Int. Coastal Eng. Conf., Taipei, ASCE, Vol 1, pp. 711-723, 1986.
- 2) 滝川 清、山田文彦、有元光久、田淵幹修: 斜面上碎波変形過程の内部特性とその数値解析、海岸工学論文集、第38巻、pp. 61-65, 1991.
- 3) 滝川 清、山田文彦、松本健作: 潜堤上碎波変形の内部特性とその数値解析、海岸工学論文集、第42巻、pp. 66-70, 1995.
- 4) Takikawa, K., Yamada, F., and Matsumoto, K.: Internal Characteristics of Breaking Wave over Submerged Breakwater, International Society of Offshore and Polar Engineers, Honolulu, pp. 192-199, 1997.

- 5) Takikawa, K., Matsumoto, K., and Yamada, F. : Numerical analysis of wave breaking over submerged breakwaters, The 7th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, Seoul, pp.1605-1610, 1997.
- 6) Amsden, A.A. and Harlow, F.H. : The SMAC method: a numerical technique for calculating incompressible fluid flows, Los Alamos Scientific Lab., N.Mex(USA), LA-4370, 1970.
- 7) 片野明良、村上信一郎、服部昌太郎 : 幅広潜堤の消波特性の表示システム、海岸工学論文集、第 39 巻、pp.61-65, 1992.
- 8) 安田孝志、陸田秀実、水谷夏樹、大屋敦嗣、多田彰秀 : 複合型砕波の発見とその発生条件、海岸工学論文集、第 42 巻、pp.51-55, 1995
- 9) Sherman, C.A. : A Mass-Consistent Model for Wind Fields over Complex Terrain, J.Appl.Meteor., Vol.17, pp.312-319, 1970.
- 10) 滝川 清 : 有限要素法による斜面上の波の砕波変形と内部機構の解析、海岸工学論文集、第 30 巻、pp.20-24, 1983.
- 11) 合田良実 : 不規則波の砕波指標について、海岸工学論文集、第 20 巻、pp.571-577, 1973.
- 12) 合田良実、鈴木康正、岸良安治、菊地 治 : 不規則波実験における入・反射波の分離推定法、運輸省港湾技術研究所資料、No.248, pp.1-24, 1976.
- 13) 石川裕彦 : 変分法を応用した 3 次元風速場計算コード (WIND 04) 、JAERI-M-83-113 (日本原子力発電所 pp.31), 1983.
- 14) 酒井哲郎、田中秀明 : 斜面上の砕波における水塊の突っ込みと渦の挙動、海岸工学論文集、第 32 巻、pp.70-74, 1985.
- 15) 岩田好一郎、富田孝史、石井弘行 : 砕波後の波の位置と運動エネルギーの低減過程、海岸工学論文集、第 37 巻、pp.46-50, 1990.
- 16) 安田孝志、原 正典、榊原幸雄 : 水深変化による砕波の支配パラメタと砕波形式について、海岸工学論文集、第 37 巻、pp.61-65, 1990.

(1998 年 4 月 24 日)