

一様傾斜面上の碎波に伴う気泡混入特性の実験的研究

鷺見 浩一*・橋本 彰雄**・岩田好一朗***

本研究では、超高速デジタルビデオカメラを使用した水理実験を実施して、一様傾斜面上の碎波に伴う気泡混入現象を波面上に形成されるくびれや微少凹凸乱れ等の形状パラメータと関連づけて考究した。その結果、気泡は波前面の微少凹凸乱れ領域に形成されるくびれが、重力波の進行方向と逆方向に波内部に向かって生じ、くびれの内面が接することによって空気を波内部に閉じこめることが明らかとなった。また、波内部への気泡混入現象は、くびれや微少凹凸乱れ等の形状パラメータによって強く支配され、入射波条件と碎波形式の変化に依存して気泡混入状態が異なることが判明した。

1. はじめに

海の波が碎ける現象は、最大波力を規定するとともに強大な碎波衝撃波力を発生させたり、海底砂を浮遊させ底質を移動させるので、海岸の防災と環境保全に寄与する重要因子である。特に碎波によって気泡が波内部に混入する過程は、碎波による波動エネルギーの逸散機構の解明やそのモデル化、海中への溶存酸素供給等の面において極めて重要である。これまでに、流体内部での気泡挙動に関しては種々の研究が行われ、川崎ら (2002) は水中を上昇する気泡に伴う水中圧力の変動を検討し、角野ら (2001) は傾斜面上で発生する碎波を対象に波内部に混入する気泡径について報告している。また、著者ら (2002) は潜堤上の強制碎波を対象に重力波前面に微少な凹凸部 (微少凹凸乱れ) が形成され、この微少凹凸乱れ領域に発生する表面張力波と推察されるくびれからの気泡連行過程について考察している。しかし、気泡混入瞬時のくびれや微少凹凸乱れ等の重力波に形成される形状パラメータと混入気泡との幾何的特性に関しては議論が充分ではなく、研究の余地が多く残されているのが現状である。

そこで、本研究では一様勾配斜面上で発生する碎波現象を取り挙げ、超高速デジタルビデオカメラを用いた水理実験を行って、気泡混入瞬時の形状パラメータと入射波条件を幾何的に解析し、気泡の波内部への混入特性について考究しようとするものである。

2. 水理実験

実験は図-1 に示す金沢工業大学土木工学科の片面ガラス張り 2 次元造波水槽 (長さ 10 m, 幅 0.7 m, 高さ 1.0) を用いて行った。水深 $h=40$ cm の水平固定床上に勾配 $i=1/10$ (長さ 4.8 m, 高さ 0.48 m) のアクリル板で製作した海底勾配を設置した。碎波瞬時の気泡混入過程の可視化画像撮影には、撮影速度 4500 コマ/s の超高速デ

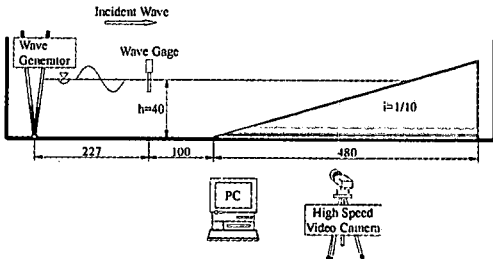


図-1 実験水槽 (単位: cm)

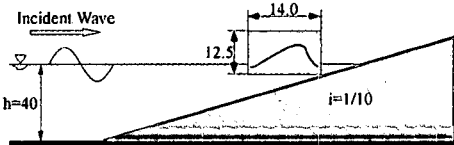


図-2 撮影領域 (単位: cm)

ジタルビデオカメラ (フォトン製: FASTCAM) を使用した。撮影領域 (縦 12.5 cm × 横 14.0 cm) は図-2 に示すように傾斜面上の碎波点に設けた。また、撮影画像をより鮮明にするために撮影領域にはメタルハライドランプを照射した。撮影時間は超高速デジタルビデオカメラが備えるハードディスク容量によって規定され、画像解像度を高く撮影速度を上げるほど短時間となる。画像解像度が縦 × 横 (256 pixel × 256 pixel)、撮影速度が 4500 コマ/s の場合で約 0.22 s となる。実験波は表-1 に

表-1 実験波と碎波形式

波高 H_1 (cm)	周期 T (s)	波形勾配 H_1/L	碎波形式
6.0	0.8	0.061	Spilling
6.0	1.0	0.041	Plunging
6.0	1.2	0.031	Plunging
8.0	0.8	0.081	Spilling
8.0	1.0	0.054	Plunging
8.0	1.2	0.041	Plunging
10.0	0.8	0.101	Spilling
10.0	1.0	0.068	Spilling
10.0	1.2	0.051	Plunging

* 正 会 員 博 (工) 金沢工業大学工学部土木工学科
** 学生会員 金沢工業大学大学院工学研究科環境土木工学専攻
*** フェロー 工 博 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻

示すように9種類の規則波とした。また、水槽のガラス壁面近傍の碎波現象を撮影するため、ガラス壁面が流体に与える影響を極力少なくするために、ガラス面に撥水剤を塗装した。

3. 波内部への気泡混入現象

(1) 微小凹凸乱れからの気泡混入形式

碎波瞬時の気泡混入現象は極めて不安定な状態であり、造波開始時の静水状態・造波板の位置・微小な水深変化等により微妙に変化する。したがって、本論では重力波上に形成されるくびれ・微小凹凸乱れ等の形状パラメータと気泡混入現象との関連を解明するために、前述の9種類の規則波を繰り返し造波した。そして、碎波現象を超高速デジタルビデオカメラにより撮影することで、各入射波について50ケース(合計450ケース)の気泡混入瞬時の画像を得た。

図-3(a)～(d)は進行波が傾斜面上で碎波し、気泡が波内部に混入する一連の過程の画像を示している。同図から、気泡混入瞬時の波面は、微小な凹凸のある領域(微小凹凸乱れ領域)と乱れない領域から成り、気泡は微小凹凸乱れ領域に形成されるくびれから波内部へ混入することが判る。これは、著者ら(2002)が既に明らかにした潜堤上での碎波現象と同じである。くびれは重力波の進行方向と逆方向に波内部に向かって生じ、くびれの内面が接し空気を波内部に閉じこめている。傾斜面上の碎波において単一の気泡が波内部に混入する形式は大別すると4パターンであり、図-4にくびれから混入形式の模式図を示している。Pattern 1～3は、重力波の進行方向に対して気泡がそれぞれ水平方向、斜め上方向、斜め下方向に混入する場合であり、Pattern 4は微小凹凸乱れ下端と乱れていない水表面の境界から気泡が混入する場合である。

(2) 気泡径と混入位置

図-5(a)～(c)はそれぞれ周期 $T=0.8, 1.0, 1.2$ (s)のときの気泡混入位置と気泡径の関係を示している。なお、図中の曲線は、(a)は $H_I/L=0.101$, (b)は $H_I/L=0.068$, (c)は $H_I/L=0.051$ の進行波の波形を $\Delta t=0.005$ s 間隔で図示しており、実線は微小な凹凸のある乱れた水面、点線は乱れない水面である。 X の原点は図-2に示す撮影領域の左下端とした。微小な凹凸のある乱れた領域は、Spilling型碎波では、波の伝播と共に、波頂部から波脚部にかけて移動しながら拡大していることが同図より判る。しかし、Plunging型碎波ではSpilling型碎波のように乱れのある水面と乱れない水面の境界は明確ではない。波内部に混入する気泡の大きさは、各周期に共通して波形勾配が増すと小さくなる傾向を示している。これは、波形勾配が大きくなり、波面が急勾配にな

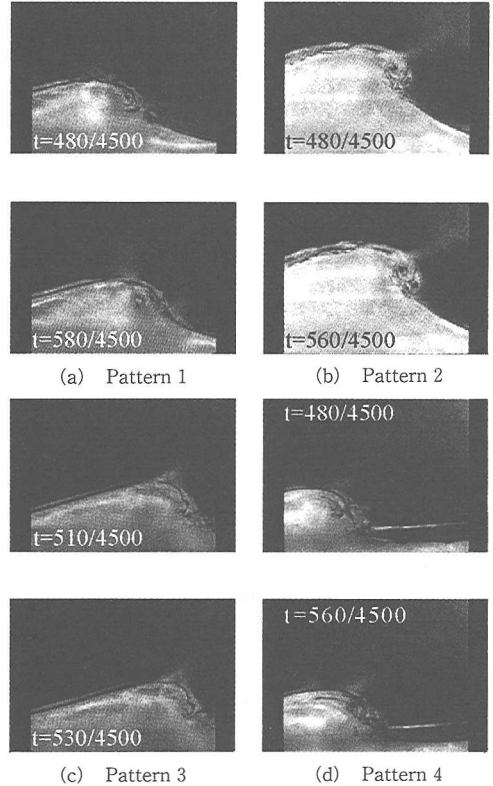


図-3 気泡混入形式

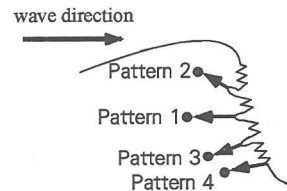
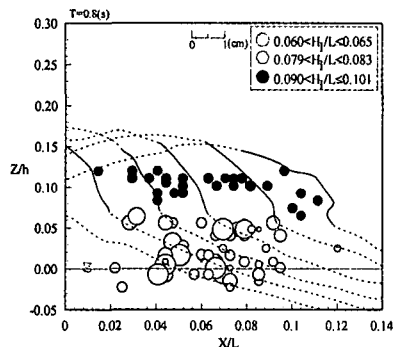
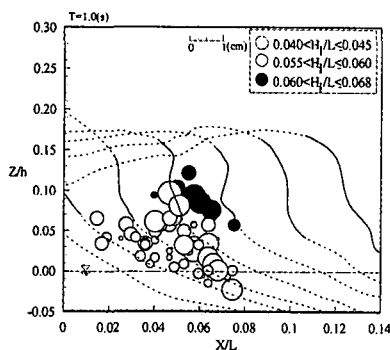
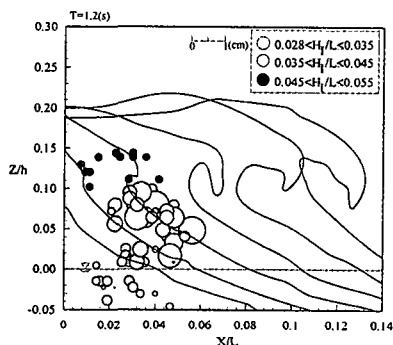


図-4 気泡混入形式の模式図

ると微小凹凸乱れ部近傍の水塊の波前脚部へ向かう速度が増加し、波内部の流体との速度勾配によりせん断力が生じて、気泡径が小さくなるものと推察される。気泡の混入位置は波形勾配と碎波形式に強く支配され、すべての実験波でSpilling型碎波となる $T=0.8$ (s)では、 $0.02 \leq X/L \leq 0.12$ の広範囲で気泡が波内部に混入するのに対し、すべての実験波でPlunging型碎波となる $T=1.2$ (s)では、 $0.01 \leq X/L \leq 0.05$ の範囲でのみ気泡が混入している。また、波形勾配が小さいほど静水面近傍で気泡は水塊内に混入している。

気泡は微小凹凸乱れに形成されるくびれから波内部に取り込まれる。くびれと微小凹凸乱れ等の形に関わるパラメータは、気泡混入現象を支配する重要な要素であると考えられる。したがって、次節では入射波の相違によ

(a) $H_i = 6.0 \sim 10.0$ cm, $T = 0.8$ s(b) $H_i = 6.0 \sim 10.0$ cm, $T = 1.0$ s

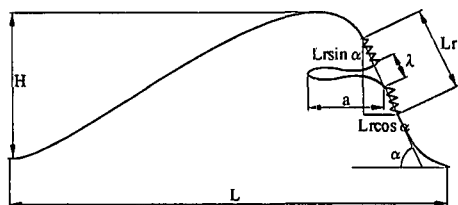
図—5 気泡径と気泡混入位置

る形状パラメータの変化と気泡混入特性を検討する。

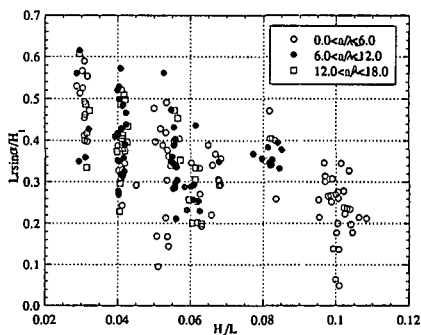
4. 形状パラメータ

図—3に示した超高速デジタルビデオカメラの撮影画像より、気泡は波前面の微小凹凸乱れ領域に形成されるくびれから混入することが判明した。そこで、くびれや微小凹凸乱れ等の形状パラメータと入射波条件の相違が気泡混入現象に与える影響について考究する。

図—6に碎波に伴う気泡混入現象を支配する形状パラメータを図示する。図中の L_r は微小凹凸乱れ領域の長



図—6 形状パラメータの説明



図—7 入射波高に対する微小凹凸乱れ長さ

さ、 a はくびれの水平長さ、 λ はくびれの開口部の長さ、 a は微小凹凸乱れ領域と静水面のなす角、 H と L は気泡混入瞬時の波高と波長である。なお、 L_r 、 a 、 λ のデータはくびれの内面が接した瞬間の値としている。

図—7は、入射波高の変化による気泡混入瞬時の微小凹凸乱れ領域の大きさを検討するために図示した。同図は微小凹凸乱れ領域の鉛直距離を入射波高で無次元化した $L_r \sin \alpha / H_i$ と波形勾配 H_i / L との関係にくびれの水平方向距離 a をくびれの開口部長さで無次元化した a / λ について示している。入射波高に占める L_r の鉛直方向距離 $L_r \sin \alpha / H_i$ は、 H_i / L が大きいほど小さくなる。また、 $0 < a / \lambda \leq 6$ では $0.025 < H_i / L < 0.11$ の広い範囲で微小凹凸乱れ発生が確認できるが、 $12.0 < a / \lambda \leq 18.0$ では $0.025 < H_i / L < 0.065$ の比較的狭い範囲での微小凹凸乱れの形成しか認められない。

図—8は、くびれの水平長さ a を微小凹凸乱れの水平距離 $L_r \cos \alpha$ で無次元化した $a / L_r \cos \alpha$ と H_i / L の関係を $L_r \sin \alpha / H_i$ について示している。波内部へ混入する気泡の大きさに最も影響すると考えられる a は、 H_i / L が 0.25 から 0.11 の間では、 L_r の水平方向距離 $L_r \cos \alpha$ の約 1 割の大きさから 7 倍程度の大きさまでの広い分布を持つ。しかし、入射波高に占める微小凹凸乱れ領域の割合を示す $L_r \sin \alpha / H_i$ に着目すると、 $L_r \sin \alpha / H_i > 0.35$ のときでは、 $0.02 < H_i / L < 0.09$ の範囲内において、 H_i / L の増加に伴って $a / L_r \cos \alpha$ が小さくなることが確認できる。これは図—5で示した H_i / L が大きいほど混入

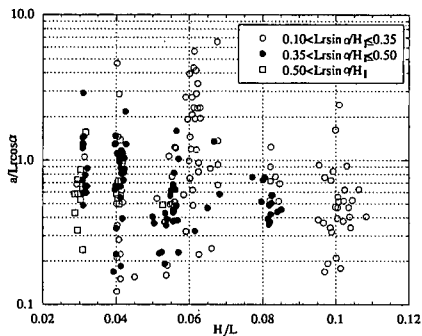


図-8 くびれ水平長と波形勾配

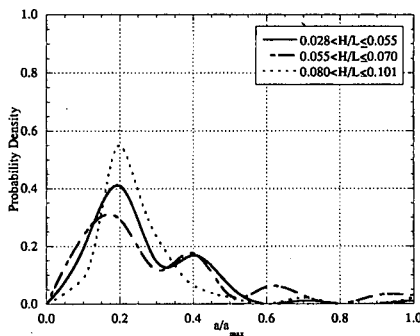


図-10 くびれの確立密度分布

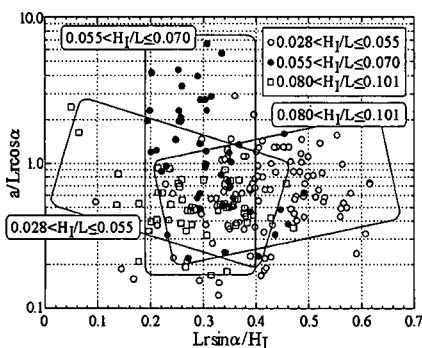


図-9 気泡混入特性

気泡径が小さくなることと強く関係している。すなわち、くびれの内面が接することにより気泡が波内部に連行されるため、くびれの水平距離 a に依存して気泡径は変化する。したがって、 H/L が大きくなり波の前面勾配が峻しくなると微少凹凸乱れ部近傍の水塊の波前脚部へ向かう速度が増し、波内部の流体との速度勾配によりせん断力が生じて、表面張力波と推察されるくびれが波内部に向かって形成され難くなるためであると考えられる。

図-9 は、微少凹凸乱れ領域の拡大が入射波高のどの程度まで達したときに、くびれの内面が接して気泡が波内部に混入するのかを考究するために示した。同図は、くびれの内面が接し気泡が波内部に混入する瞬間の水平距離 a を微少凹凸乱れの水平方向距離 $Lr \cos \alpha$ で無次元化した $a/Lr \cos \alpha$ と微少凹凸乱れの鉛直方向距離 $Lr \sin \alpha$ を入射波高で無次元化した $Lr \sin \alpha / H_L$ の関係を波形勾配 H/L について示したものである。くびれの水平方向距離 a の内面が接触し気泡が波内部に閉じ込められる現象は、 H/L と $Lr \sin \alpha / H_L$ に大きく依存することが、同図より判る。すなわち、 H/L が比較的小さく Plunging 型砕波となる $0.028 < H/L \leq 0.055$ の範囲では $Lr \sin \alpha$ が H_L の約 4 割以下で気泡が波内部に混入している。一方、 H/L が比較的大きく Spilling 型砕波となる

$0.080 < H/L \leq 0.110$ の範囲では、 $Lr \sin \alpha$ が H_L の約 2 割以上で気泡が波内部に連行されている。また、図-5 で示した H/L が大きくなると混入気泡の径が小さくなる傾向と関連づけて検討すると、 H/L が比較的大きい $0.055 < H/L \leq 0.110$ の範囲では、 $Lr \sin \alpha / H_L$ が大きくなると $a/Lr \cos \alpha$ は小さくなっており、波面勾配が急勾配になるとせん断力影響により、表面張力波と考えられるくぼみの水平距離 a は波内部へ形成されにくくなるものと推察される。なお、 $Lr \sin \alpha$ が H_L の 2 割から 4 割のときは、すべての波形勾配で気泡の混入が確認でき a が最大値となることが見出された。

図-10 は可視化水理実験から得られたくぼみの水平距離 a の確率密度の分布を H/L ごとに示している。なお、横軸はくぼみ水平距離の最大値 a_{max} について規準化してある。 a の分布は Plunging 型砕波となる比較的大きい $0.028 < H/L \leq 0.070$ に対して複数のピークを持つが、Spilling 型砕波となる比較的大きい $0.080 < H/L \leq 0.110$ に対し、ワイブル分布形となる。 a は a_{max} の約 0.2 倍の値で発生頻度が最大となった。

重力波上に形成されるくぼみや微少凹凸乱れ等の形状パラメータと入射波条件を関連づけて、一様勾配上の砕波による気泡混入特性を考究した結果、波前面の水面勾配が峻しくなることによって、波頂部近傍の微少凹凸乱れ領域が波前脚部へ移動・拡大し、微少凹凸乱れ近傍の流体と波内部の水塊の間に速度勾配生じることによってせん断力が発生し、このせん断力が表面張力波と推察されるくびれの水平方向距離の大きさに強く影響することが指摘できたと考えられる。

5. 結 論

本研究では超高速デジタルビデオカメラを使用して、一様勾配斜面上で発生する砕波に伴う気泡混入現象を重力波波面に形成される微少凹凸乱れ・くびれ等の形状パラメータと関連づけて検討した。気泡混入機構の解

明は、波動エネルギーの逸散機構を把握する上で最も重要であると考えられる。しかしながら、気泡混入に最も寄与すると考えられる微少凹凸乱れや表面張力波の生成機構については不明な点が多いのが現状である。これらを明らかにするためには、気泡混入瞬時の波内部の詳細な流速場の測定により、気泡混入を助長すると考えられている渦と乱れのエネルギー授受について考察しなければならない。

以下に本研究で得られた主要な結論を示す。

- 1) 気泡混入瞬時の波面は、微少な凹凸のある領域と乱れのない領域から成り、気泡は微少凹凸乱れ領域に形成されるくびれから波内部へ混入する。くびれは重力波の進行方向と逆方向に波内部に向かって生じ、くびれの内面が接し空気を波内部に閉じこめる。
- 2) 混入気泡の大きさと混入位置は波形勾配によって強く支配され、波形勾配が小さいほど気泡径は大きく、静水面近傍で波内部に混入することが判明した。
- 3) 微少凹凸乱れ領域の鉛直方向距離は、波形勾配が大

きいほど小さくなる傾向を示し、くびれの水平距離は、波形勾配に依存して変化する。

- 4) くびれの水平距離は一定値とならず、種々の値をとるが、砕波形式によりその分布特性は変わるようであり、Spilling 型砕波の場合は、ワイブル分布形となる。さらに本実験によれば、最大値の約 0.2 倍の大きさの発生頻度が最も多くなることが明らかとなった。

参 考 文 献

- 角野昇八・山岸達也・日引 俊・関本武史 (2001): ボイドロープを用いた砕波連行気泡特性の解析とそれに基づく気体輸送現象の解析, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 71-75.
- 川崎浩司・山澤洋一・岩田好一朗 (2002): 気泡の生成・連行に伴う水中圧力の時間周波数解析と距離減衰特性, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 111-115.
- 鷺見浩一・岩田好一朗 (2002): 潜堤上の砕波に伴う気泡混入過程と気泡径に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 101-105.