

# 潜堤上の碎波に伴う気泡混入過程と気泡径に関する実験的研究

鷲 見 浩 一\*・岩 田 好一朗\*\*

碎波に伴う気泡連行過程は、碎波機構の解明において極めて重要である。気泡混入過程に関しては幾つかの研究が行われ波峰前面に微小な凹凸部が形成され、この凹凸波面部からの気泡混入形式が報告されている。しかし、気泡混入特性に関する系統立った研究はなく、不明な点が多い。本研究では潜堤上での碎波を対象として可視化実験を行い、波内部に混入する気泡位置と気泡径について考究した。その結果、波前面は“微小な凹凸のある乱れた領域”と“凹凸のない領域”から形成され、気泡は“乱れた領域”から混入することが明らかとなった。“乱れた領域”の発達に伴い、混入形式は変化し、さらに気泡径は混入形式によって変ることなどが認められた。

## 1. はじめに

波が海岸構造物により強制的に碎かされる現象は、沖合から伝播した波のエネルギーを逸散させ、減衰した透過波を構造物背後域へ伝播させるため、波浪の静穏化へ寄与する最も重要な因子である。特に碎波によって気泡が波内部に混入する過程は、碎波機構の解明や海域への多量の酸素の供給などの面において極めて重要である。これまでに、流体への気泡連行過程については幾つかの研究が行われている。それは、主に、静水に水塊を自由落下させ流体内部への気泡連行特性に関する研究と進行波の強制碎波に伴う波内部への気泡混入過程についての研究である。前者については、青木・Houque (2001) らが連行気泡とエネルギー逸散率について検討し、渡部ら (2001) は碎波ジェット着水時の生成気泡の物理特性について議論している。また、後者に関しては、水谷・安田 (2000) が碎波直前に重力波の波峰前面に形成される“微小な凹凸”の変位による碎波過程を報告し、著者 (2001) らは、波峰前面の“微小凹凸乱れ”領域からの気泡混入形式とその過程について考究している。しかし、進行波の強制碎波に伴う気泡混入機構や波の伝播による“微小凹凸乱れ”の変化等の気泡混入特性に関する研究は充分とは言えず、依然として不明な点が山積しているのが現状である。

本研究は、潜堤上で発生する碎波現象を対象に、超高速デジタルビデオカメラを用いた水理実験を実施し、気泡混入形式と気泡径の関係を波峰前面に形成される“微小凹凸乱れ”の遷移と関連づけて検討する。さらに、粒子法 (PIV 法) による可視化実験により“微小凹凸乱れ”と波内部の流速場の特性について考究する。

## 2. 実験装置の概要と実験条件

本研究では、進行波の碎波に伴う気泡混入過程と気泡混入量を検討する実験 I と波峰前面に形成される“微小

凹凸乱れ”近傍での速度場を考究する実験 II の 2 つの可視化実験を行った。実験 I, 実験 II ともに、図-1 に示す金沢工業大学土木工学科の両面ガラス張り 2 次元造波水槽 (長さ 10 m, 幅 0.7 m, 高さ 1.0 m) を用いて、水深  $h=40$  cm の水平固定床の上にアクリル製の不透過矩形型潜堤 (堤幅  $B=80$  cm, 堤高  $D=32$  cm) を設置して行った。

### 2.1 気泡混入形式と気泡径計測の実験

実験 I の碎波瞬時の気泡連行過程の可視化画像の撮影には、撮影速度 1/4500 コマ/s の超高速デジタルビデオカメラ (フォトリオン製: FASTCAM) を使用した。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、画像解像度が縦 256 pixel×横 256 pixel, 撮影速度が 4500 コマ/s の場合で約 0.22 s 間である。撮影領域 (縦 5 cm×横

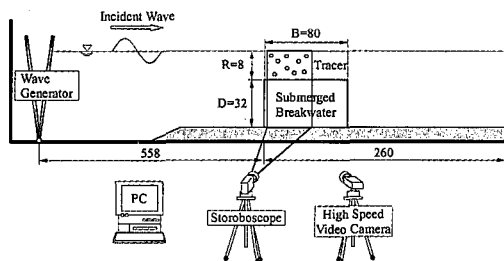


図-1 実験水槽概用 (単位: cm)

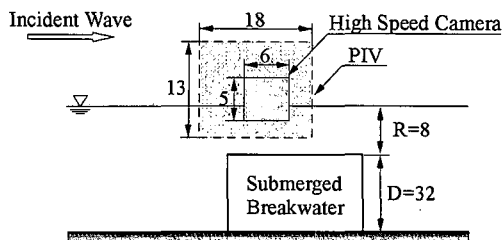


図-2 撮映領域 (単位: cm)

\* 正 会 員 博 (工) 金沢工業大学講師 工学部土木工学科  
\*\* フェロー 工 博 名古屋大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻

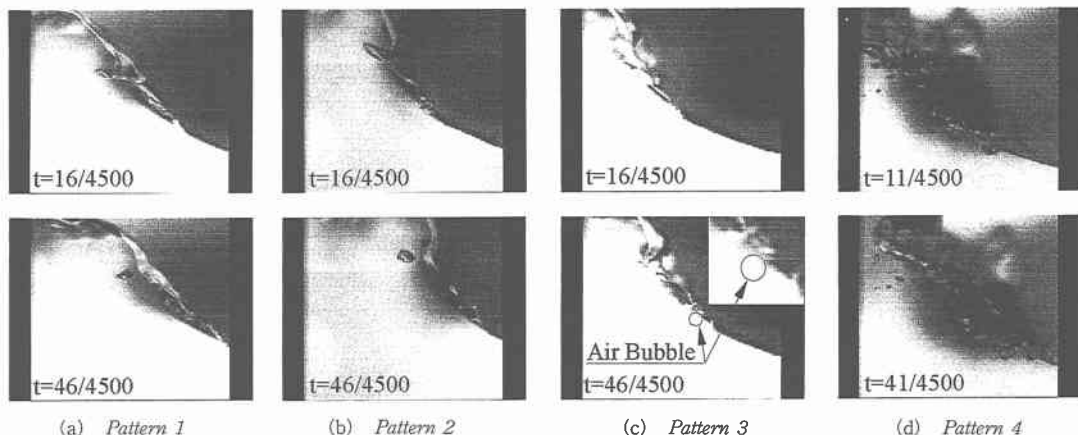


図-3 気泡混入瞬時の撮映画像

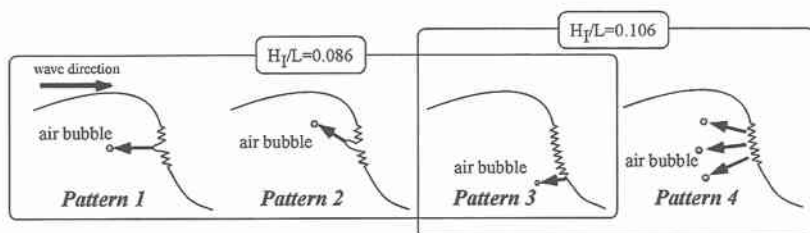


図-4 波形勾配の相違による気泡混入形式

6 cm)は、図-2に示すように、潜堤天端上の碎波点に設けた。実験波は周期を  $T=0.8$  sとし、入射波高を  $H_I=8.5, 10.5$  cm ( $H_I/L=0.086, 0.106$ ) の2種類の規則波とした。この場合の碎波形式はそれぞれS-P型碎波とPlunging型碎波になる。なお、S-P型碎波とは、Spilling型碎波とPlunging型碎波の中間の性質を持つ碎波形式である。

## 2.2 微小凹凸乱れ近傍の流速測定の実験

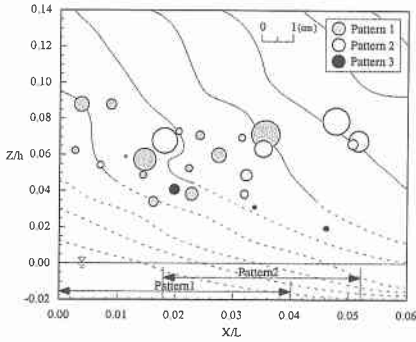
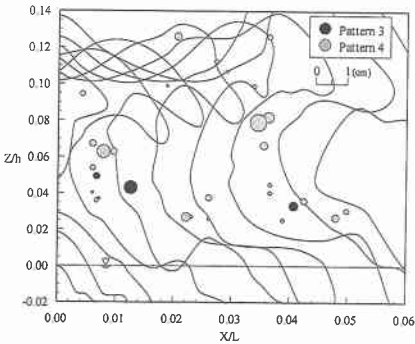
実験IIの“微小凹凸乱れ”近傍の波内部の流速場の測定には、水中に粒子(ナイロン12, 中央粒径  $d_m=50$   $\mu$ m)を注入し、水路側方の高速カメラ(ソニー製: WB CCD)により可視化画像を撮影し、流速場を算定するPIVシステムを用いた。撮影領域(縦13 cm×横18 cm)を図-2に示す。タイミングコントローラにより撮影時間とストロボスコープ(日進電子工業製: Short Arc Storo)の照射間隔を同期制御し、撮影時間間隔は1/30 sとした。なお、撮影画像の解像度は、幅640 pixel×高さ480 pixelであり、算定する流速ベクトルの表示間隔は20 pixelとした。実験波は、入射波高  $H_I=6.0$  cm, 周期  $T=0.8$  sの規則波であり、碎波形式はS-P型碎波となる。

## 3. 碎波に伴う気泡混入

### 3.1 波形勾配の相違による気泡混入特性

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、微小な水深変化により微妙に変化する。したがって、本実験では、波形勾配の相違が波内部に混入する気泡位置と気泡径に及ぼす影響について検討するために、前述の2種類の規則波を繰り返し造波させ、合計60ケースの気泡混入画像を得た。

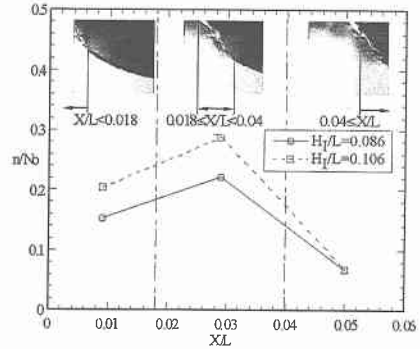
図-3(a)~(e)は波内部への気泡混入の過程を示しており、図-4は波峰前面に形成される水面の“微小凹凸乱れ”領域から、波内部に取り込まれる気泡混入形式の模式図を示している。図-3(a)~(c)は波形勾配が  $H_I/L=0.086$  の場合、図-3(e)は  $H_I/L=0.106$  の場合の画像である。気泡の混入形式は大別すると4パターンとなり、Pattern 1と2は波の進行方向に対して気泡がそれぞれ水平方向と斜め上方向に混入する形式、Pattern 3は“微小凹凸乱れ”の下端境界から気泡が混入する形式、Pattern 4は“微小凹凸乱れ”から同時に多数の気泡が方向を問わず混入する形式である。Pattern 1, 2, 3, 4の発生する割合はそれぞれ、20, 18, 22, 40%であった。なお、 $H_I/L=0.086$  ではPattern 1, 2, 3が発生し、 $H_I/L=0.106$


 (a)  $H_1/L=0.086$ 

 (b)  $H_1/L=0.106$ 

図一五 気泡混入位置と気泡径

では *Pattern 3, 4* の混入形式が確認できた。また、*Pattern 1, 2, 3* においても水表面の破れにより単一の気泡が水塊内に混入し、その後、*Pattern 4* のように“微小凹凸乱れ”部の拡大に伴って波内部に多量の気泡が連行される場合も確認された。なお、著者ら (2001) は波の進行方向に対して鉛直下向きに混入する気泡を確認している。このような水表面を破り、最初に流体内に取り込まれる気泡混入パターンの相違は、“微小凹凸乱れ”近傍での流速場の差違によるところが大きいと考えられる。図一3 (a)～(e) からいずれの混入形式になろうとも、気泡は“微小凹凸乱れ”から混入しており、碎波直前の波峰前面には、微小な凹凸がある“乱れた領域”と微小な凹凸のない“乱れていない領域”が存在することが明らかとなった。そして、この“微小凹凸乱れ”は波の伝播に伴って、波頂部から波前面脚部へ拡大しながら遷移している。したがって、波内部への気泡混入現象に“微小凹凸乱れ”の存在範囲は強く寄与していると考えられる。そこで、気泡混入形式と気泡径の関係を、波の進行に伴う“微小凹凸乱れ”の移動と拡大に関連付けて考究する。

図一5(a), (b) はそれぞれ  $H_1/L=0.086, 0.106$  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、図中の曲線は進行波の波形を (a) は  $\Delta t=0.015$  s, (b) は



図一六 気泡混入数

$\Delta t=0.0074$  s の時間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。

図一5(a) から、S-P 型碎波では、“微小凹凸乱れ”は波の伝播と共に、波頂部から脚部にかけて移動・拡大しており、気泡混入形式は“微小凹凸乱れ”の進行距離に大きく影響されることが判明した。  $0 < X/L \leq 0.04$  の範囲では *Pattern 1* が発生しやすく、  $0.018 < X/L \leq 0.052$  の範囲では *Pattern 2* が発生しやすい傾向を示している。

一方、Plunging 型碎波となる図一5(b) では、Plunging jet 着水以前に、気泡混入が確認でき、S-P 型碎波のように“乱れた水面”と“乱れない水面”の境界は明確ではない。  $0 < X/L \leq 0.05$  の広い範囲で *Pattern 3, 4* が共に発生しており、“微小凹凸乱れ”の移動に伴う混入形式の相違は顕著でない。また、*Pattern 3* は他の混入形式と比較して鉛直方向に  $z/h < 0.05$  の比較的静水面に近い領域で発生している。このように、碎波に伴う気泡混入形式は波形勾配により異なり、気泡径は気泡混入形式と碎波形式に支配され、*Pattern 1, 2, 4* では気泡径が約 0.4～1 cm と比較的大きいが、*Pattern 3* では 0.4 cm 以下と比較的小さくなる。また、S-P 型碎波 ( $H_1/L=0.086$ ) と Plunging 型碎波 ( $H_1/L=0.106$ ) の気泡径では、Plunging 型碎波の気泡径が比較的小さい。これは、波形勾配が大きくなり、波面が急勾配になると“微小凹凸乱れ”部近傍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、気泡径が小さくなるものと推察される。

図一6 は、“微小凹凸乱れ”下端が波頂部近傍にある場合 ( $0 < X/L \leq 0.018$ )、“微小凹凸乱れ”下端が波前面中央まで拡大する場合 ( $0.018 < X/L \leq 0.04$ ) と“微小凹凸乱れ”下端が波前脚部まで到達する場合 ( $0.04 < X/L$ ) の気泡混入数を波形勾配について示したものである。なお、縦軸の  $N_b$  は全領域 ( $0 < X/L \leq 0.06$ ) での混入気泡の総数であり、 $n$  は前述の 3 つの領域における、それぞれの気泡混入数である。

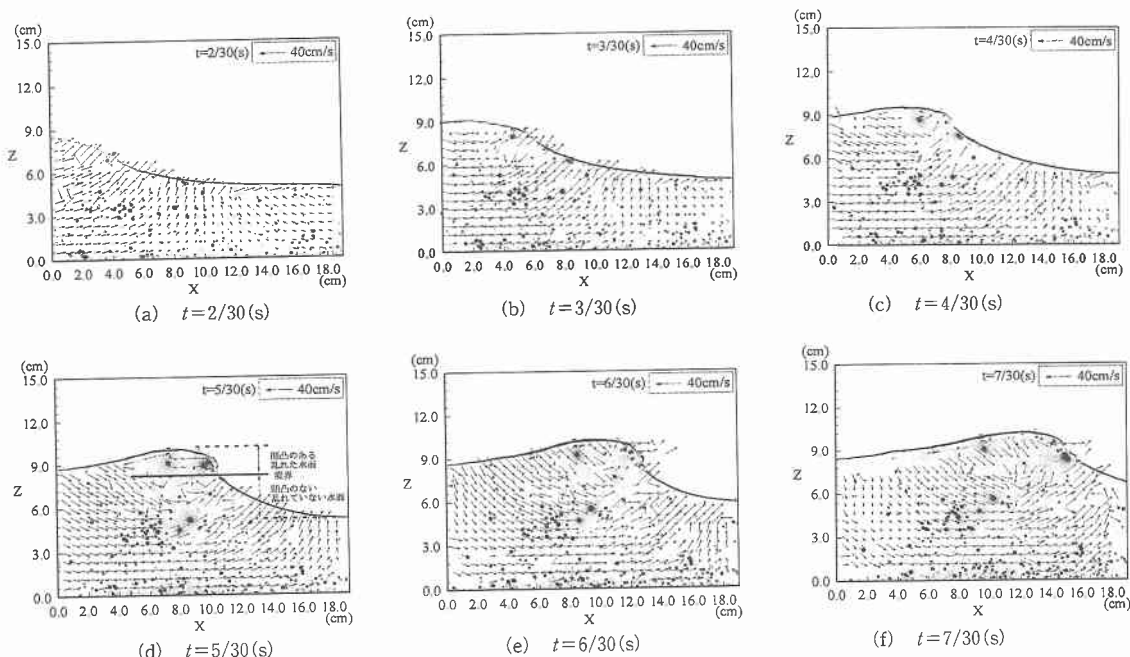


図-7 進行波の内部流速場と微小凹凸乱れ

気泡は、波形勾配が大きく、 $0.018 < X/L \leq 0.04$  の領域で多くなることが見いだされた。この領域は図-5(a)で Pattern 1, 2 が共に発生する領域であり、気泡混入数は波の伝播に伴う“微小凹凸乱れ”の移動に依存して変化することが判明した。このように、“微小凹凸乱れ”は気泡混入形式・気泡径・混入数を支配する重要なパラメータとなっている。したがって、次節では“微小凹凸乱れ”の遷移に伴う波内部の流速場特性について考究する。

### 3.2 進行波の内部流速と微小凹凸乱れ

図-3 に示した気泡混入瞬時の撮影画像の解析より、気泡は“微小凹凸乱れ”領域から波内部に取り込まれることが判明した。そこで、“微小凹凸乱れ”の移動・拡大に伴う進行波の内部流速を検討する。

図-7 は重力波が潜堤天端上へ伝播し、波峰前面の波頂部近傍に“微小凹凸乱れ”が生成され、波前脚部へと遷移する一連の過程を示した画像と PIV 法による波内部の流速ベクトルを併せて図示している。なお、時間間隔  $\Delta t = 1/30$  s ごとに表示してあり、波の進行方向は図面の左から右方向である。

図-7(a), (b) では、重力波前面の水面勾配は緩やかであり、水表面に“微小凹凸乱れ”は生成されていない。図-7(a)の  $0 < X \leq 8$  cm,  $5 < Z \leq 9$  cm の波頂部から波前脚部にかけての範囲では、波峰と前脚部の中間域へ向かう強い上昇流が発生し、 $X > 12$  cm では戻り流れが確認できる。 $X = 10$  cm 付近では、重力波の伝播に伴う進行方向の流れと戻り流れの衝突より、鉛直上向き流れが発生

している。

図-7(c), (d) では、波峰前面の水面勾配が峻しくなり、図-7(c) では波頂部近傍に“微小凹凸乱れ”が生成され、1/30 s 後の図-7(d) では“微小凹凸乱れ”の下端部が下方に伝播し、凹凸面の拡大が確認できる。また、波内部の流速場の特性は“微小凹凸乱れ”下端を境界として異なる。すなわち、境界上部近傍ではほぼ水平方向の流れが卓越するが、境界下方での水粒子の速度場は右上方へ向かう分布となり、水平方向の流れと比較して大きな流速となっている。また、“微小凹凸乱れ”下端では、水平方向の流れと反時計回りの流れが合流しており、水粒子の衝突による運動エネルギー変化の一部が“微小凹凸乱れ”生成に変換されたと推察される。

Longuet-Higgins (1995) は理論解析より、重力波の波形変化に伴って波峰前面に尖鋭な不連続性を生み出し、非常に局所的な表面張力波を発生させるとしている。ここで表現される不連続性というのは、本研究で確認された“微小凹凸乱れ”であると考えられる。さらに、表面張力波の発生は、表面張力波自身により発生する渦度によって促進されるとしている。したがって、“微小凹凸乱れ”近傍の波内部では渦の存在が推測される。また、水粒子の衝突により“微小凹凸乱れ”下端では力学的エネルギーが保存されず、一部のエネルギーが渦との授受を行い、渦の干渉により表面張力波が形成され、“微小凹凸乱れ”を発達させると考えられる。

図-7(e), (f) では“微小凹凸乱れ”が、波前脚部方向

へさらに拡大している。流速ベクトルは“微小凹凸乱れ”下端より下方では、反時計回りの半円形となっている。

PIV 法により判明した潜堤上の碎波による“微小凹凸乱れ”の移動・拡大に伴う波内部の流速場特性は、水深の急激な変化によって、波前面の水面勾配が峻しくなると同時に、波頂部近傍に“微小凹凸乱れ”が形成される。この“微小凹凸乱れ”領域は重力波の伝播に伴い、波前脚部方向へ移動拡大する。波内部の流速ベクトルは、“微小凹凸乱れ”の下端を境界として、境界近傍ではほぼ水平な流れとなり、境界下方では反時計回りの半円形となる。なお、“微小凹凸乱れ”は波峰前面に形成される表面張力波であると推測される。

#### 4. 結 論

本研究では超高速ビデオカメラと PIV システムを使用して、碎波に伴う混入気泡の特性および“微小凹凸乱れ”と波内部の流速場の相互関係を検討した。気泡混入機構の解明は、碎波機構、エネルギー逸散機構を把握する上で非常に重要である。しかしながら、気泡混入に最も寄与すると考えられる“微小凹凸乱れ”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、表面張力波が波峰前面に形成される機構の解明をしなければならない。

本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

1) 碎波直前の波峰前面は、微小な凹凸が存在する“微小凹凸乱れ”領域と微小な凹凸が存在しない“乱れていない”領域で形成される。そして、気泡の波内部への混入は、波面が凹凸となる乱れた領域で発生する。この“微小凹凸乱れ”は波の伝播に伴い波頂部から波脚部へ拡大しながら移動する。

2) 気泡混入形式は大別すると 4 パターンであり、波の進行方向に対して気泡がそれぞれ水平方向と斜め上方向に混入する形式、“微小凹凸乱れ”の下端境界から気泡が混入する形式、“微小凹凸乱れ”から同時に多数の気泡が方向を問わず混入する形式であった。

3) 波の進行に伴う“微小凹凸乱れ”の発達は、気泡混入パターン、気泡径、気泡混入数を大きく支配している。この“微小凹凸乱れ”の下端境界より下方では反時計回りの半円型の流速分布となるが、境界付近ではほぼ水平方向の流れとなることが判明した。

謝辞：最後に実験を実施するにあたり、当時、金沢工業大学 4 年生の大畑聡一郎君、竹澤雄一君、寺越友一君、兵永真介君には多大なるご助力をいただいた。ここに記して謝意を表します。また、本研究は科学研究費（若手研究(B)、研究代表者 鷺見浩一）、（基盤研究(B)(1)、研究代表者 岩田好一朗）により行われたことを付記する。

#### 参 考 文 献

- 青木伸一・Ashabul Hoque (2001): プランジングジェットによる気泡運送とそのエネルギー的評価, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 51-55.
- 鷺見浩一・渋谷貴志・細井寛昭・岩田好一朗 (2001): 矩形型潜堤上の碎波に伴う気泡混入過程に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 106-110.
- 水谷夏樹・安田孝志 (2000): リーフ上の孤立波の微小碎波と崩れ波型碎波への遷移過程, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 151-155.
- 渡部靖憲・大塚淳一・佐伯 浩 (2001): 非定常ジェット着水時に発生する気泡の物理特性, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 56-60.
- Longuet-Higgins (1995): Parasitic capillary wave: a direct calculation, J. Fluid Mech. 301, pp. 79-107.