

砕波に伴い波表面に形成される微小な凹凸の移動と渦構造に関する研究

STUDY ON "RIPPLE-LIKE TURBULENCE" OF WAVE SURFACES AND VORTEX STRUCTURES DUE TO WAVE BREAKINGS

鷲見 浩一¹・兼藤剛²

Hirokazu SUMI and Tsuyoshi KANEFUJI

¹正会員 博士(工学) 金沢工業大学助教授 建築・環境学部 環境土木工学科
(〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘7-1)

²学生員 金沢工業大学大学院 工学研究科 環境土木工学専攻(同上)

Analysis of air bubble entrainment process in breaking wave is very important in the elucidation of breaking mechanism. Although some experiments have been carried out to investigate the process of air entrainment, this phenomenon still remains many uncertainties. In this study, hydraulic experiments have been performed to measure shapes of wave surfaces and vorticity due to wave breakings. As a result, it has been proven that both "ripple-like turbulent" and non turbulent regions exist together in the front surfaces of breaking waves and air bubbles are found to be entrained through the "ripple-like turbulent region". Finally, the formation of the "ripple-like turbulent region" can be recognized by vortices produced due to wave breakings.

Key Words : wave breaking, ripple-like turbulent region, vortex, air bubble

1. はじめに

砕波による波動エネルギーの放出過程は、非回転運動としての波動場から回転運動を含む場への変換過程であり、砕波帯内に生じた渦は乱れを生成したり、海底砂の浮遊などを引き起こす。砕波帯内の渦構造に関しては、これまでに多くの研究が行われ、日野ら¹⁾と灘岡ら²⁾は波峰前面に形成される水平渦や波頂部の後方に極めて3次元性の強い斜降渦が発生することなどを指摘している。また、水平渦は近年では、砕波帯内の乱流のモデル化において極めて重要となる波内部への気泡混入現象に強く関与すると考えられている。この砕波に伴う気泡混入現象については、著者ら^{3), 4)}が研究を実施しており、気泡混入瞬時の波峰前面の水面に微小な凹凸のある領域(以下に“微小凹凸領域”とする)が形成され、気泡はこの微小凹凸領域から波内部に混入することを確認している。しかし、気泡混入現象に大きく寄与し、ともに波峰前面に形成される微小凹凸領域と水平渦の相互関係については十分に議論がなされておらず、依然として不明な点が多いのが現状である。

そこで本研究では、砕波の気泡混入瞬時に波峰前面に形成される微小凹凸領域の発達過程と水平渦の関係についての知見を得るために、流れの可視化画像処理システムを用いた水理実験を実施して、入射波の伝播に伴う微小凹凸領域の移動と波内部の渦構造を関連づけて考究した。

2. 水理実験の概要と解析方法

本研究では、進行波の砕波時に波峰前面の水表面に形成される微小凹凸領域の移動と拡大の特性を検討する実験Ⅰと微小凹凸領域の近傍での速度場と渦構造を究明する実験Ⅱの2つの可視化実験を行った。実験Ⅰと実験Ⅱともに、図-1に示す金沢工業大学環境土木工学科の片面ガラス張りの2次元造波水槽(長さ10m, 幅0.7m, 高さ1.0m)を用いて、水深 $h=40\text{cm}$ の水平固定床上にアクリル版で製作した勾配 $\tan\beta=1/10$ (長さ4.8m, 高さ0.48m)の一樣斜面を設置して行った。

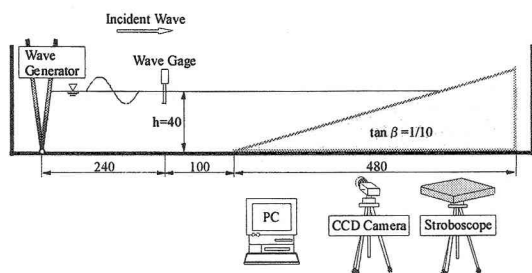


図-1 実験水槽と実験装置(単位: cm)

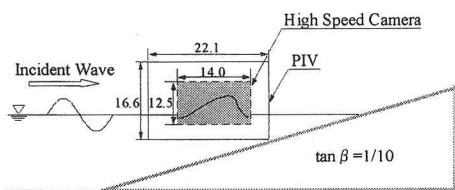


図-2 撮影領域(単位: cm)

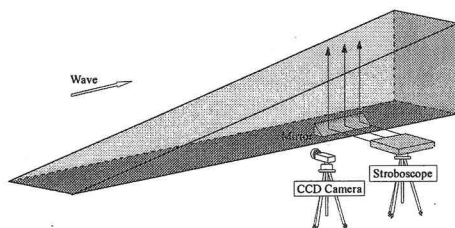


図-3 スリット光の照射方法

(1) 微小な凹凸部の移動に関する実験

実験Ⅰの入射波の砕波による微小な凹凸領域の移動と拡大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(フォトロン製: FASTCAM)を使用した。撮影画像を鮮明にするために、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の容量によって規定され、画像解像度が縦256pixel×横256pixel、撮影速度が4500コマ/sの場合で約0.22s間である。図-2に示すように撮影領域(縦12.5cm×横14.0cm)は海底勾配上の砕波点周辺に設けた。実験波は入射波高 $H_I=6.0$ cm、周期 $T=0.8$ sの規則波とした。砕波形式はSpilling砕波である。

(2) 微小凹凸領域近傍の流速測定の実験

実験Ⅱの微小凹凸領域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 $d_m=50\mu\text{m}$)を注入しするトレーサー法を用い、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た。この画像から流速場を算定するアルゴリズムとして、微小時刻差の2枚の撮影画像から相関関係を用いて粒子同士を対応づけるPIVシステムを採用した。撮影領域(縦16.6cm×横22.1cm)

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1/30sとした。スリット光の照射方法は図-3に示すように水路側方から水平に入射させ、海底勾配の中に設置した鏡により入射角を鉛直方向に変化させ、入射波の進行方向と平行にした。また、撮影画像の解像度は、幅640pixel×高さ480pixelであり、算定する流速ベクトルベクトルの表示間隔は20pixelとした。実験波は、実験Ⅰと同様の $H_I=6.0$ cm、 $T=0.8$ sの規則波とした。

波内部の水平渦度 ω_y の算定は、PIVシステムから得た流速値に式(1)を前進差分で離散化した差分方程式を適用した。

$$\omega_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \quad (1)$$

ここに、 u , w はそれぞれ X , Z 方向の流速である。

3. 微小凹凸領域の移動拡大特性

砕波瞬時の波前面の水表面に形成される微小凹凸領域の生成・移動拡大・変形の特性について検討した。

図-4(a)~(h)は、超高速デジタルビデオカメラより得た進行波の砕波に伴い波峰前面の水面に形成される微小凹凸領域の移動と変形、および微小凹凸領域から波内部へ気泡が混入する一連の過程を示した画像である。

砕波時の波峰前面は、微小凹凸領域と乱れていない水表面から構成されることが同図より判る。さらに、波頂部周辺域で出現した微小凹凸領域は、入射波が伝播するにつれて、波前脚部へ向けて移動拡大している。これらの画像から読みとった微小凹凸領域の移動速度は、約27.6cm/sであり、極めて高速であることが判明した。図-4(a),(b)の $t=390\sim430/4500$ では波が進行するにつれて、波前面が次第に急勾配となり、凹凸部も時間が経過するにつれて徐々に大きくなっている。図-4(c),(d)の $t=440\sim460/4500$ では、凹凸部がさらに拡大し微小凹凸領域の中央付近にくぼみが形成されている。図-4(e),(f)の $t=470\sim510/4500$ では、くぼみが波の進行方向と逆方向に、波内部にくびれ状に発達している。凹凸部は、波頂部から波前面の中央まで拡がり、凹凸の程度は発生時よりも大きいものとなっている。図-4(g),(h)の $t=520\sim570/4500$ では、くびれ状に拡大した凹凸部の内面が接することによって、気泡が波内部に取り込まれていることが判る。微小凹凸領域は波の前脚部まで移動拡大している。

このように微小凹凸領域が生成され、移動拡大し、微小凹凸領域から波の内部に気泡が混入する現象は、僅か約0.04sの間に発生している。

図-5は実験Ⅱによる入射波の進行に伴う微小凹凸領域の移動拡大状況を示している。なお、入射波は

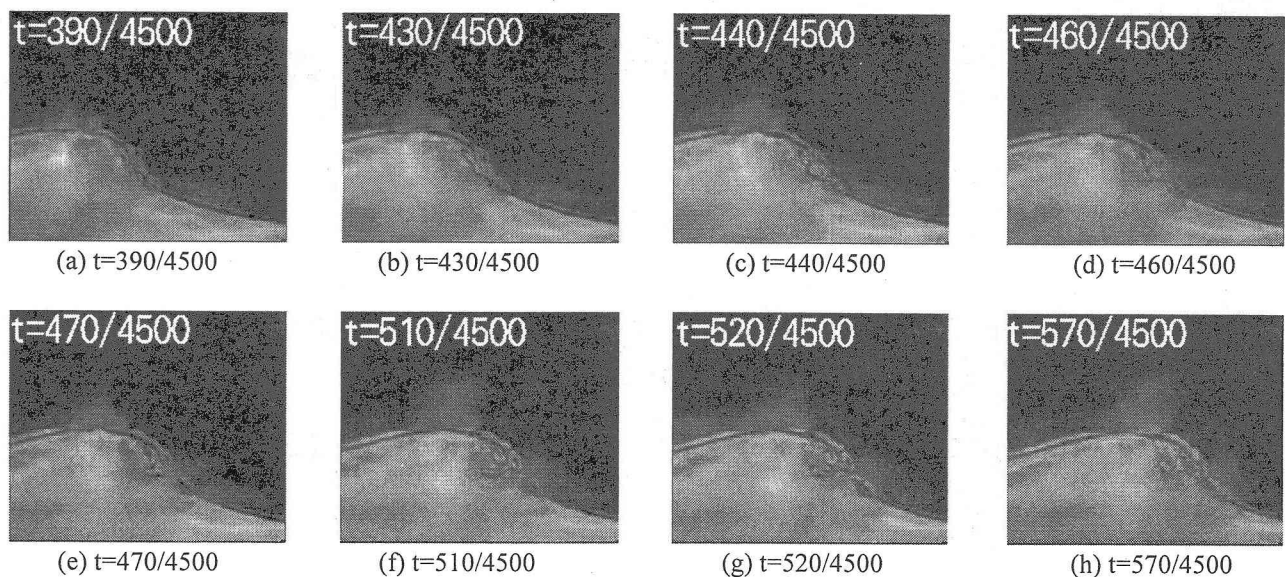


図-4 波峰前面に形成される微小凹凸領域

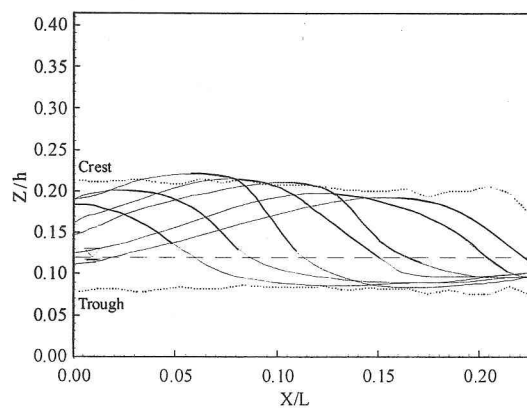


図-5 微小凹凸領域の移動拡大状況

図面の左から右方向に伝播している。図中の曲線は入射波の波面を時間間隔 $\Delta t = 1/30s$ で図示しており、太い線が微小凹凸領域、細い線が乱れのない滑らかな水面である。同図より、波頂部周辺で発生した微小凹凸領域は、図-4においても示したように波の伝播に伴い波脚部へ移動拡大している。微小凹凸領域は、波峰前面でのみ出現し、波峰の後方では発生しない。また、砕波が進行するにつれて、微小凹凸領域は拡大し静水面のレベルに達し、その後も移動拡大し、波谷レベルまで拡がること判る。

4. 微小凹凸領域近傍の波内部の流速場特性

微小凹凸領域の移動拡大の状況と波内部の流速場の関係を検討するために、PIVシステムを使用した可視化水理実験を実施した。その実験結果を以下に示す。図-6(a)～(i)は、砕波に伴う波内部の流速分布を図示したものである。座標軸は撮影範囲の水平方向の長さ X と鉛直方向の長さ Z を波長 L と水深 h でそれぞれ無次元化した X/L 、 Z/h とした。図中の曲線は

波の水表面を示し、実線は微小凹凸領域部分であり、破線は乱れのない滑らかな水面である。各図の表示時間間隔は $1/30s$ とした。なお、入射波は図の左から右方向に伝播している。図-6(a)は、先行波が通過後に計測対象となる波が可視化画像の撮影領域内に到達する直前の流体内部の速度分布を示している。水表面に微小凹凸領域は確認されず、 $X/L = 0.05$ において戻り流れと波の入射に伴う岸向き流れが合流し、鉛直上向きの流れが発生している。図-6(b)は、波頂部が撮影領域の左端($X/L = 0.0$)に達した瞬間の流速ベクトルを図示している。水深方向の流速分布は、 Z/h が大きくなるほど速い流速となる傾向を示している。微小凹凸領域は $0.13 \leq Z/h \leq 0.18$ の範囲に形成されており、この範囲の流速は $Z/h < 0.13$ の速度よりも大きい値となっている。また、図-6(b)より $1/30s$ 後の図-6(c)では、波頂近傍にトレーサ粒子を滞留させることが困難であるために、波頂部近傍の流速は測定することができなかった。しかし、微小凹凸領域下端周辺では、進行方向の斜め上向きの流れの発生が確認できる。また、微小凹凸領域が発生する領域は、 $0.025 \leq X/L \leq 0.08$ 、 $0.13 \leq Z/h \leq 0.20$ となっている。図-6(d)においても、微小凹凸領域近傍の流速は測定できていないが、波内部では反時計回りの半円形速度分布となっていることが判る。微小凹凸領域は、 $0.06 \leq X/L \leq 0.11$ 、 $0.12 \leq Z/h \leq 0.22$ の範囲で確認できる。図-6(e)では砕波がさらに進行し、微小凹凸領域は、 $0.09 \leq X/L \leq 0.15$ 、 $0.11 \leq Z/h \leq 0.21$ の範囲で形成されている。波内部の速度分布は図-6(d)と同様に反時計回りの半円形速度分布となっており、微小凹凸領域の中央から下端域において最大流速が発生している。図-6(f)は、波峰前面の勾配が最も急峻となり、波頂の前後において波形が極めて非対称となり、前述した図の波高と比較して、最も波高が大きくなっている。さらに後述する図-6(g)では波高が減少していることから、同図は砕波点での流速分布を図示したものであるとすることができる。微小

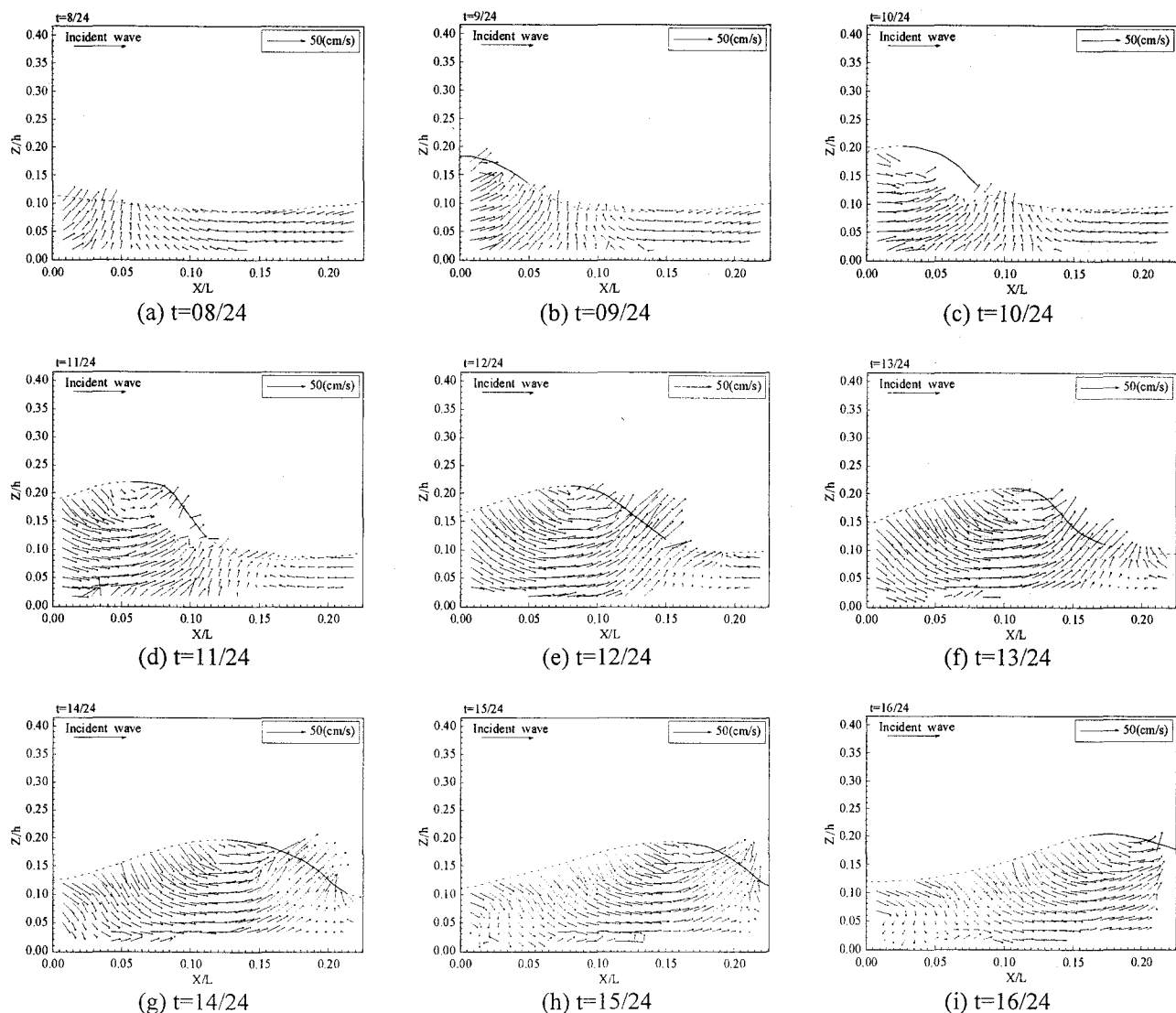


図-6 波内部の速度分布と微小凹凸領域

凹凸領域の出現範囲は、 $0.11 \leq X/L \leq 0.17$ 、 $0.11 \leq Z/h \leq 0.21$ と1/30s前の図-6(d)の微小凹凸領域の大きさと同じである。微小凹凸領域近傍の流速は、波内部において最も大きい値を示している。図-6(g)～(i)は砕波後の波内部の速度分布を示している。この段階において波内部には多量の気泡が混入しており、波面は崩れて波峰前面はbore状となっており、図中の実線部分はこのbore状の領域を示す。これら波峰前面のboreの周辺領域においても微小凹凸領域近傍と同様に流速値は波内部で最大となることが判る。

以上、進行波の砕波による微小凹凸領域の出現範囲と波の内部流速の経時変化について検討した結果、微小凹凸領域の出現範囲は、入射波の伝播状況により変化することが明らかとなった。すなわち、気泡の混入や水塊の跳び出し等で波面が破れるまでは、微小凹凸領域は波頂部から波脚部へかけて移動拡大するが、砕波瞬間にはこの拡大が一定値に収束する。その値は、今回の実験波の場合では、砕波時とその

1/30s前の時刻において、水平方向では $X/L \cong 0.07$ 、鉛直方向では $Z/h \cong 0.1$ であった。

5. 微小凹凸領域近傍域の波内部の渦構造

微小凹凸領域が移動拡大する状況と波峰前面に形成される水平渦との関連を究明するために、PIVシステムにより得た流速と式(1)により、波内部の渦度分布を求めた。その算定結果を以下に示す。

図-7(a)～(i)は、砕波に伴う波内部の渦度分布を示している。各図の表示時間間隔は1/30sであり、図-6(a)～(i)に示した速度ベクトルに対応した同時刻での渦度となっている。なお、図-6と同様に図中の曲線は波の水表面を示し、実線は微小凹凸領域部分、破線は乱れない滑らかな水面である。図-7(a)は、計測対象となる波が可視化画像の撮影範囲内に入射する前の渦度分布を示している。流体内は渦無しであり、非回転流動の状態であることが判る。入射波

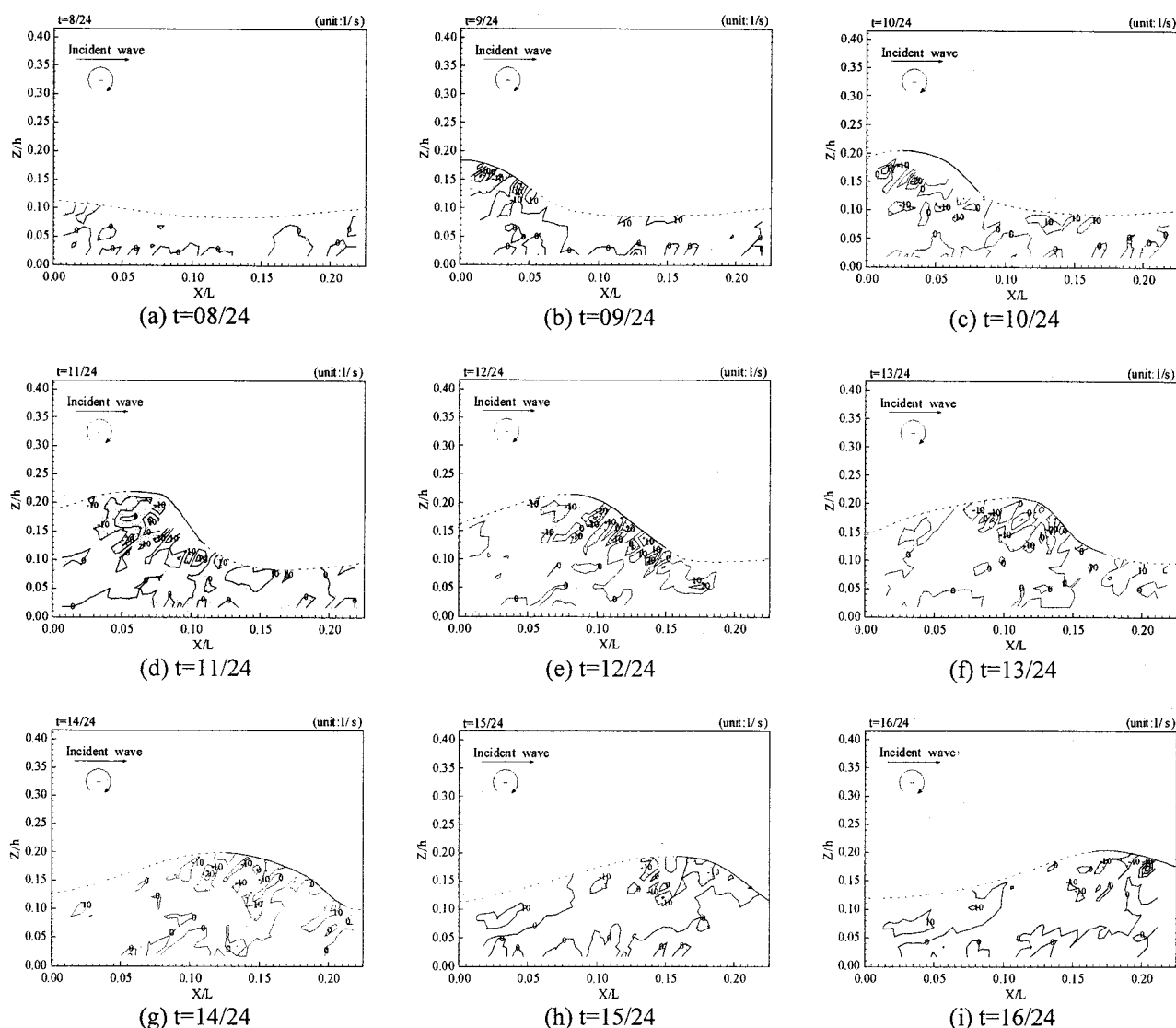


図-7 波内部の渦構造と微小凹凸領域

の波頂部が撮影領域の左端($X/L=0.0$)に達した状態の図-7(b)では、微小凹凸領域下端を境界にして渦の回転方向が異なっているのが判る。すなわち、微小凹凸領域の下端から脚部へかけての $0.11 \leq Z/h \leq 0.13$ の範囲では、反時計回りの渦が発生しているのに対し、微小凹凸領域下端から波頂部へかけての範囲である $0.13 \leq Z/h \leq 0.18$ では、時計回りの渦が出現している。図-7(c)においては、図-6(c)に示したように微小凹凸領域近傍での流速が測定できなかったため、この領域での渦度の議論はできないが、 $0.01 \leq X/L \leq 0.07$ の範囲において時計回りの渦が発生している。図-7(d)では、波頂部後方においても時計回りの渦が存在している。また、微小凹凸領域下端付近では反時計回りの渦の生成が判る。砕波瞬時より1/30s前の図-7(e)では、微小凹凸領域中央付近から前脚部の水面下の $0.04 \leq Z/h \leq 0.14$ の範囲で反時計回りの渦が出現している。この反時計回りの渦が発生していた上端部分の境界から波頂部にかけての $0.14 \leq Z/h \leq 0.21$ の領域では、微小凹凸領域の約2割の渦径をもつ反時

計回りの大規模な渦の発生が確認できる。砕波時の渦度分布を示す図-7(f)では、波峰前面において大規模な渦が確認でき、微小凹凸領域の上端部分よりも波頂部後方では、時計回り渦が存在している。砕波直後の図-7(g)では、1時刻前の図-7(f)で確認できた波頂部後方の渦が遷移して、さらに後方の領域に移流している。また、波峰の前面では、渦が存在する領域と渦なしの領域が混在している。図-7(h)においては、図-7(f)で波頂部後方に移流を確認した渦は、より後方に移動している。図-7(i)では、微小凹凸領域近傍で生成され、波頂部後方に移流した時計回り渦の消滅が確認できる。

以上、入射波の砕波に伴う波内部の渦構造と微小凹凸領域を関連づけて検討した結果、非回転流動場から波峰前面に水平渦の存在する流動場へ移行する一連の過程が明らかとなった。すなわち、進行波が砕波点近傍に伝播する前の戻り流れが生じている状態では、渦は存在せず非回転流動の場であり、入射波がさらに伝播し砕波点に接近すると、波峰前面に

大規模な渦が列状に形成された。この大規模な渦は、微小凹凸領域の上部と下部では回転方向が異なり、微小凹凸領域の中央部から下端部にかけては反時計回りであり、微小凹凸領域中央部から上端部にかけては時計回りとなっていた。さらに、微小凹凸領域中央部から波頂部近傍に出現した時計回りの渦は波の進行に伴って、波頂部後方に移流し消滅した。また、今回の実験結果では、波峰前面の微小凹凸領域近傍において、有意な大きさをもつ渦が形成されていたことから、波動エネルギーが渦により乱れエネルギーへと変換され、その一部が微小凹凸領域の生成に関与していると推察される。

6. 結 論

本研究では、一様斜面上で発生する砕波に伴い波峰前面に形成される微小凹凸領域と波内部の速度場および渦構造とを関連づけて議論した。これらは水深スケール以下の極めて局所的な現象であるが、波内部への気泡混入現象の解明へ向けての初期段階を突破する過程にあつては、考慮しなければならない現象である。

以下に本研究で得られた主要な結論を示す。

- 1) 進行波の砕波時に波峰前面に形成される微小凹凸領域は、波の伝播に伴い波頂部から波脚部へ移動拡大する。この微小凹凸領域は、波峰前面でのみ出現し、波頂部の後方では発生しない。

- 2) 波内部の渦構造は、進行波が砕波点近傍に到達する前の戻り流れが生じている状態では、渦は存在せず非回転流動の場であり、波がさらに伝播し砕波点に接近すると、波峰前面に大規模な渦が列状に形成された。この大規模な渦は、微小凹凸領域の上部と下部では回転方向が異なり、波頂部近傍の渦は波峰の後方へ移流した。

- 3) 今回の実験では、波峰前面に形成される微小凹凸領域近傍域において、大規模な渦が形成されていた。したがって、波動エネルギーが渦により乱れエネルギーへと変換され、その一部が微小凹凸領域の生成に供給されたものと推察することができる。

参考文献

- 1) 日野幹雄，灘岡和夫，小俣篤：砕波帯内の乱れの組織的渦構造と水粒子運動について，第31回海岸工学講演会論文集，pp.1-5, 1984.
- 2) 灘岡和夫，小谷野喜二，日野幹雄：二成分光ファイバー流速計を用いた砕波帯内流速場の特性の解明，第32回海岸工学講演会論文集，pp.1-5, 1985.
- 3) 鷺見浩一，岩田好一郎：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, 2002.
- 4) 鷺見浩一，橋本彰雄，岩田好一郎：一様傾斜面上の砕波に伴う気泡混入特性の実験的研究，海岸工学論文集，第50巻，pp.126-130, 2003.