

PIVによる人工リーフ上碎波時の 速度ベクトル場に関する実験的研究

MEASUREMENT OF VELOCITY FIELD IN BREAKING WAVES ON AN ARTIFICIAL REEF BY PIV

石田 啓¹・斎藤武久²・大平英継³

Hajime ISHIDA, Takehisa SAITOH and Hidetsugu OHIRA

¹正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野2-40-20)

²正会員 工修 金沢大学助手 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野2-40-20)

³ 金沢大学大学院自然科学研究科博士前期課程 (〒920-8667 金沢市小立野2-40-20)

In the first place, the breaker type on an artificial reef is classified by using high speed video camera. Next, velocity vector fields for each breaker type is measured by using PIV, and the characteristics of internal velocity fields are clarified for each one.

In the typical case that the slope gradient is 1:3, the breaker type changes from spilling breaker to other breaker types regardless of h/L , as H/h increases. Especially in the range of $H/h > 0.25$, the breaker type changes from plunging breaker to the plunging-surfing under the same H/h , as h/L decreases. And moreover, the maximum offshore velocity on the crown at the backrush is closely connected with the transition of the breaker type.

Key Words : PIV, high speed video camera, artificial reef, breaking wave, velocity field

1. 緒 論

人工リーフは海岸保全機能に景観への配慮も加えた優れた波浪制御構造物であり, 近年, 全国的にその施工件数は増加している. 人工リーフによる波浪制御の特徴は, リーフ天端および法面上での強制碎波による波浪エネルギーの減衰により, 背後海域への高波浪の来襲を出来るだけ小さくすることにある. このため, 強制碎波時および碎波後の波浪変形過程を明らかにすることが極めて重要である. しかし, 人工リーフ上における碎波形態は, 一様斜面上での碎波形態とは異なった特徴を有するにもかかわらず, その複雑さから, 入射波および人工リーフ形状と碎波形態との関係を明らかにする試み^{1), 2), 3)}がその緒についたばかりで, 人工リーフ上碎波時における碎波点周辺およびリーフ周辺流体場の内部構造には, 不明な点が多く残されている.

一般に, 碎波時および碎波後の波浪変形過程の解明には, 流体場の内部構造の把握が必要不可欠であり, このため, 速度ベクトル場の計測が必須となる. しかし, 電磁流速計あるいはレーザードップラー流速計といった定点計測型の流速計を用いる場合, 計測点が膨大となることなどから, これまで, 碎波帯における速度ベクトル場の計測は非常に困難とされ

てきた. これに対して, 近年, PIV(Particle Image Velocimetry)に代表される, 画像データを用いた速度ベクトル場の計測法が開発され⁴⁾, 有効な速度ベクトル場の計測手法として提供されてきている⁵⁾. これに伴ない, PIVを用いて, 様々な碎波形態に対する碎波帯での速度ベクトル場の計測が, 積極的に行われている^{6), 7), 8), 9)}. しかし, 人工リーフ上での碎波形態を体系化し, 各碎波形態の内部流速場の特性を明らかにするには至っていない.

本研究では, はじめに, 高速度ビデオカメラを用いて, 人工リーフ上における碎波形態を詳細に分類する. 次に, PIVを用いて, 各碎波形態での碎波点周辺およびリーフ周辺の断面2次元速度ベクトル場を計測し, 速度ベクトル場および渦度場の時間変化から各碎波形態の内部流速場の特性を明らかにする.

2. 実験装置および実験方法

図-1に実験装置の概要を示す. 実験には長さ14m, 幅80cm, 高さ1mの両端に吸収式造波装置を有する2次元造波水槽を用いた. 人工リーフの模型は骨格のみ鋼製からなるアクリル製とし, 水槽底部に設けた50cm×50cmの観測窓および人工リーフの天端部と法面部を通して流体場にレーザーシートの照射が可能

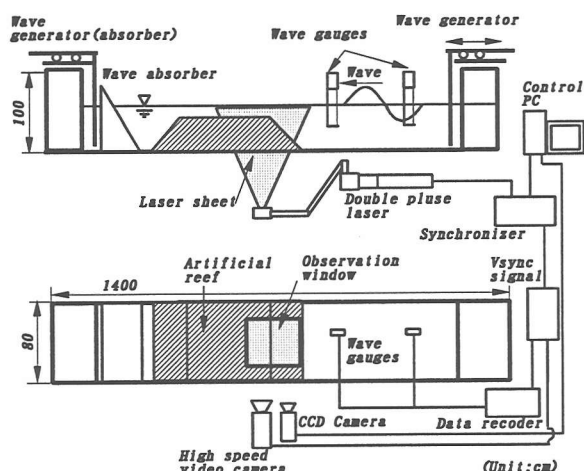


図-1 実験装置

となるようにした。なお、人工リーフの模型には、法面勾配が1:3で堤体高が20cmおよび法面勾配が2:1で堤体高が30cm、天端幅がともに1mの2種類を用いた。入射波は、波高 H が2.0cm~10.0cm、周期 T が1.0s~2.0sの規則波を用い、水深を変化させることによって天端水深を変化させ、合計200ケースについて実験を行った。碎波形態の分類には、撮影速度1125コマ/sで撮影した高速度ビデオカメラ(KODAK社製、最高40500コマ/s)の画像を用い、さらに、速度ベクトル場の計測には、PIV(TSI/Aerometrics社製)システムを用いた。本研究で用いたPIVシステムの主構成は、12mj $\times$ 2のダブルパルスYAGレーザー、1008 $\times$ 1018画素のCCDカメラおよびタイミング制御装置である(図-1参照)。計測の際、ダブルパルスレーザーシート先の先発および後発の照射時間の遅れを2msとし、それぞれのレーザーシートの照射に合わせて2枚の画像データをCCDカメラで撮影し、これらの画像データの輝度に関する相互相関から速度ベクトルの空間分布を算定した。計測時間は、レーザーの発光間隔を7.5Hzとした約2秒間で、画像データは、一つの実験ケースにつき、16組32枚を取得した。トレーサーには中央粒径が $86\mu\text{m}$ で比重1.02のナイロン粒子を用いたが、レーザーパワーが大きくなり、かつCCDカメラの解像度が高いことから、撮影範囲を最大40cm $\times$ 40cm程度としても良好な画像データが獲得できた。ただし、この撮影範囲では、碎波帯全体を一度に撮影することはできないため、撮影範囲を人工リーフ法面部および法面上部を含む天端部の2箇所に分けて計測を行った。

3. 実験結果および考察

(1) 碎波形態の分類

本研究で確認された人工リーフ上の代表的な碎波形態の例を写真-1から写真-5に示す。

写真-1では、波峰部の法肩への接近に伴って、波峰部が対称性を失い、さらに、波頂部前面に水面の盛り上がりが生じ、この盛り上がり頂部が崩れ、崩れ波碎波に至っている。続いて、波頂部が天端に

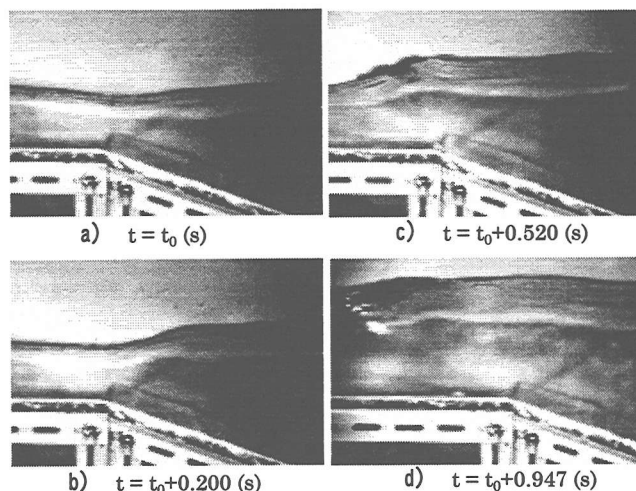


写真-1 崩れ-寄せ波碎波

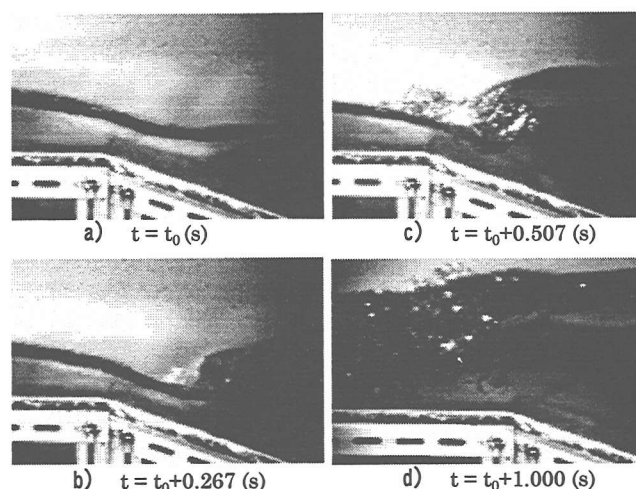


写真-2 巻き-寄せ波碎波

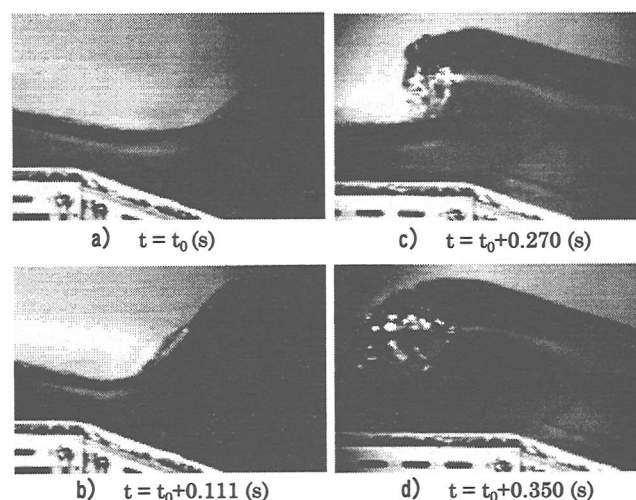


写真-3 巻き波碎波

乗り上げ、碎波部を巻き込んで天端上を伝播していることが分かる。このような、波頂部前面の崩れ波碎波に続き、波頂部が天端上に乗り上げる碎波形態を本研究では、崩れ-寄せ波碎波と呼ぶ。写真-2に、巻き-寄せ波碎波の例を示す。この場合、波峰部の法肩への接近に伴ない、頂部前面が巻き波碎波に至り、続いて波頂部が天端に乗り上げていることが分

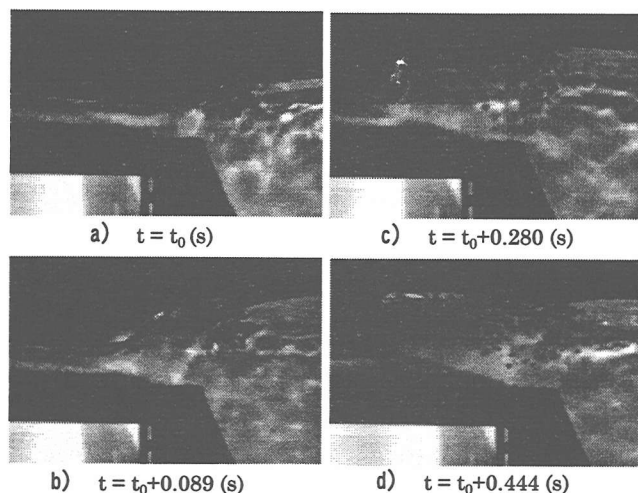
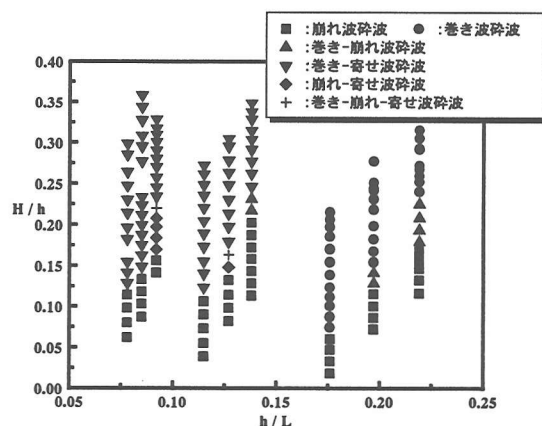
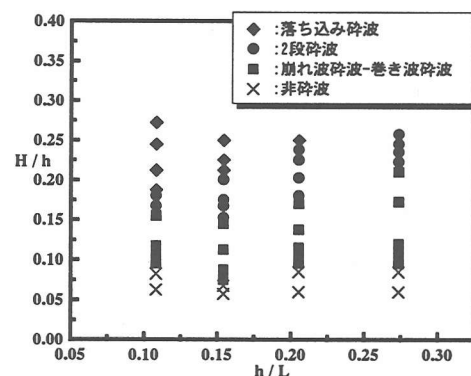


写真-4 2段砕波



(a) 法面勾配 1:3



(b) 法面勾配 2:1

図-2 砕波形態の分類 $H/h-h/L$

において、法面勾配1:3の巻き-崩れ波砕波は、巻き波砕波時に特徴的な波頂部からのジェット放出はあるものの、その規模が小さく、ジェットが波峰部斜面上を進行方向に崩れていく砕波形態を示す。また、巻き-崩れ-寄せ波砕波は、波頂部前面において、巻き-崩れ波砕波が生じた後に、波頂部が天端上に乗りに上げていく砕波形態を示す。ところで、法面勾配2:1の場合には、崩れ波砕波、巻き波砕波、巻き-崩れ波砕波などの明確な分類ができなかったため、この領域を崩れ波砕波-巻き波砕波領域として分類している。なお、この他にも多くの砕波形態が考えられるが、本研究では、特に砕波時における波峰部の変形過程に着目し、砕波形態の分類を行なった。図より、法面勾配が1:3の場合、 h/L に関わらず、 H/h の増加とともに、砕波形態は崩れ波砕波から種々の砕波形態へ遷移していくことが分かる。特に、 $H/h > 0.25$ の範囲では H/h が同一な場合、 h/L の減少とともに、砕波形態が巻き波砕波から巻き-寄せ波砕波に遷移している。法面勾配が2:1の場合、 $H/h > 0.2$ の範囲で、 h/L の減少とともに、砕波形態が落ち込み砕波から2段砕波へと遷移していることが分かる。

施工例に多く見られる法面勾配1:3の場合に着目し、 H/h および天端水深 R と入射波高との比 R/H を用いて、砕波形態を整理した結果を図-3に示す。 $R/H > 2.0$ の範囲で、崩れ波砕波が生じ、 $R/H < 1.0$ かつ $H/h > 0.3$ の範囲で巻き-寄せ波砕波が生じていることが分かる。なお、本研究で対象とした実験条件は、

かる。なお、写真-3に、巻き波砕波の例を示すが、波頂部前面で砕波には至らず、波頂部から、冲向き方向にジェットが放出されている。この場合、一樣斜面上での巻き波砕波と同様な砕波過程を示しており、明らかに、巻き-寄せ波砕波と巻き波砕波では砕波形態が異なることがわかる。以上は法面勾配が1:3の場合に確認された砕波形態の一例である。

写真-4に、2段砕波の例を示す。波峰部の法肩への接近に伴ない、波頂前面部が砕波し、続いて、天端上に乗りに上げた波頂部が砕波に至っている。この時、水表面付近では、それぞれの砕波に伴う2つの気泡塊が確認できる。写真-5に、落ち込み砕波の例を示す。引き波時に、水表面が法肩部から法面部へ大きく落ち込み、流体中に大量の気泡を含んでいる。さらに、波峰部の法肩への接近に伴ない、法面上にボアーが形成され、このボアーが天端上に乗りに上げ、天端上を伝播していくことが分かる。なお、2段砕波および落ち込み砕波は、リーフ法面勾配が2:1の場合に確認された砕波形態の一例である。

次に、高速度ビデオカメラの映像で確認された砕波形態を、入射波条件により分類する。

図-2に、波高水深比 H/h および相対水深 h/L を用いて砕波形態を整理した結果を示す。ただし、図中に

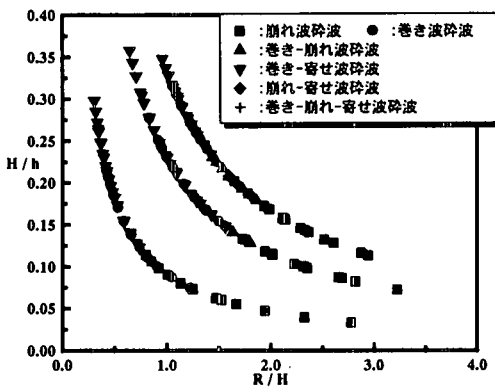


図-3 砕波形態の分類 ($H/h-R/H$, 法面勾配 1:3)

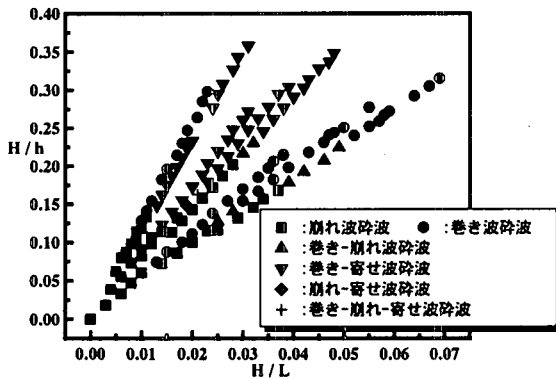


図-4 砕波形態の分類 ($H/h-h/L$, 法面勾配 1:3)

宇多ら¹⁰⁾に比べ、 $H/h < 0.4$ と狭い範囲であるために、宇多らの実験結果との比較は困難であるが、 R/H が大きな場合に、天端上で崩れ波砕波が生じる傾向は同様であった。

図-4に、 H/h および波形勾配 h/L を用いて、砕波形態を整理した結果を示す。 H/h および h/L が小さい場合、崩れ波砕波が生じるものの、その他の範囲において、砕波形態を明確に分類することは困難であった。このことは、強制砕波を伴う人工リーフの場合、通常、一様斜面上の砕波形態の分類に用いられる h/L を用いて、砕波形態を分類することが困難であることを示している。ただし、図-2より、 H/h が大きな領域で同一な H/h に着目した時、 h/L の減少とともに、法面勾配が1:3の場合には、巻き波砕波から巻き-寄せ波砕波、法面勾配が2:1の場合には、落ち込み砕波から2段砕波への砕波形態の遷移が明らかになったことは注目すべきことである。

(2) 砕波形態別の速度ベクトル場および渦度場の時間変化

PIV計測から得られた、速度ベクトル場および渦度場の時間変化を砕波形態別に示し、それぞれの内部流速場の特性を明らかにする。ただし、ここでは、波高水深比 H/h がほぼ同一で、相対水深 h/L が異なる2つの砕波形態に着目する。砕波形態は、法面勾配が1:3の場合には、 $H/h=0.27$ かつ $h/L=0.219$ の巻き波砕波および $H/h=0.28$ かつ $h/L=0.092$ の巻き-寄せ波砕波、法面勾配が2:1の場合には、 $H/h=0.18$ かつ

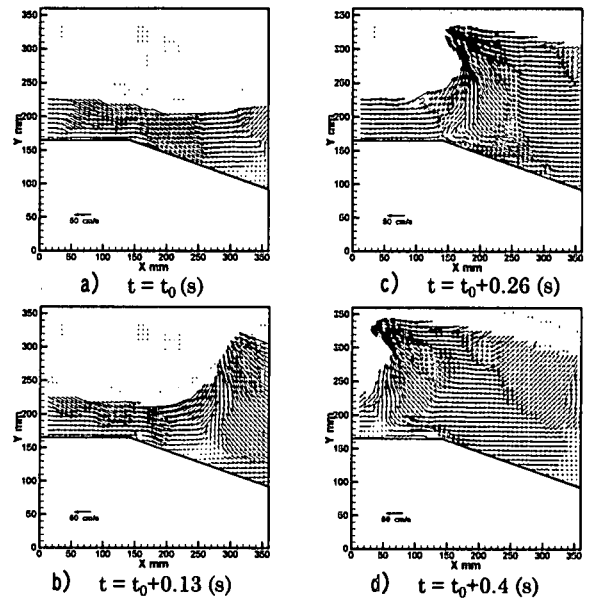


図-5 巻き波砕波 ($H/h=0.27, h/L=0.219$)

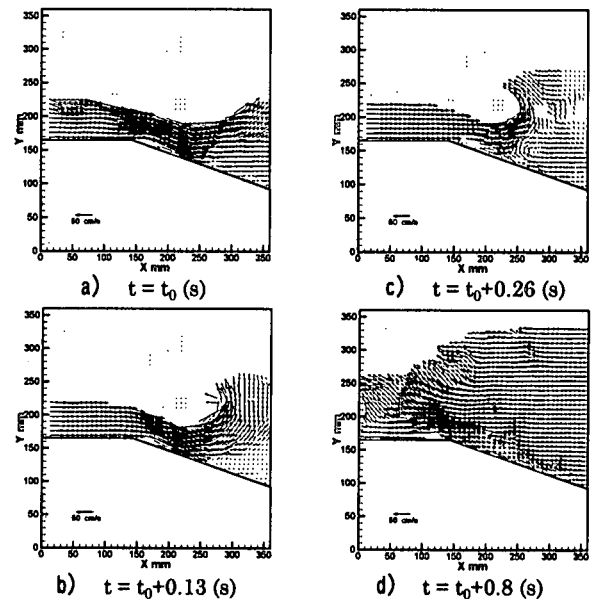


図-6 巻き-寄せ波砕波 ($H/h=0.28, h/L=0.092$)

$h/L=0.178$ の2段砕波および $H/h=0.19$ かつ $h/L=0.116$ の落ち込み砕波を取り上げる。

図-5および図-6に、それぞれ巻き波砕波および巻き-寄せ波砕波時の速度ベクトル場の時間変化を示す。巻き波砕波および巻き-寄せ波砕波の場合ともに、リーフ法面部における波の浅水変形に伴ない、波頂部前面は、鉛直上向き流速の卓越した波谷の位相から波峰の位相への変換点より鉛直に切り立ちだしている。巻き波砕波の場合、急峻化した水面は波頂部へ達し、波頂部から冲向きの強い水平方向流速を伴ったジェットが放出されて砕波に至っている。これに対して、巻き-寄せ波砕波の場合、急峻化した水面は波頂部までは到達せず、波頂部前面で水面の盛り上がり部を形成するに留まっている。その後、この盛り上がりの頂部から、ジェットが放出され巻き波砕波に至り、さらに、冲向き水平方向流速を伴った波頂部が、リーフ天端上へ乗り上げているこ

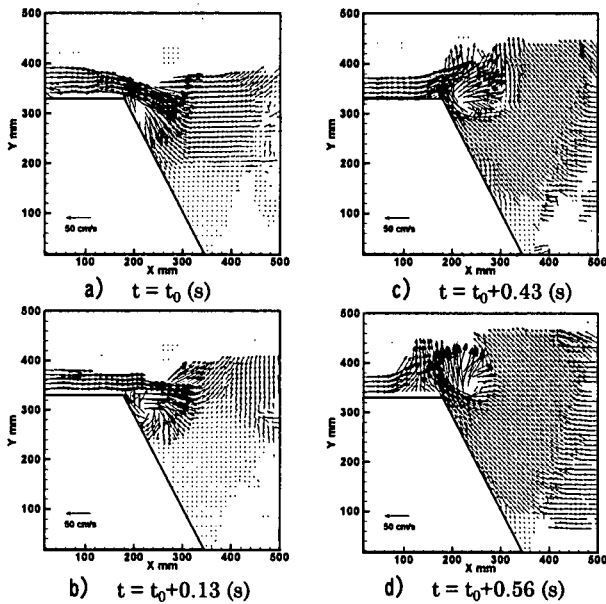


図-7 2段砕波 ($H/h=0.18, h/L=0.178$)

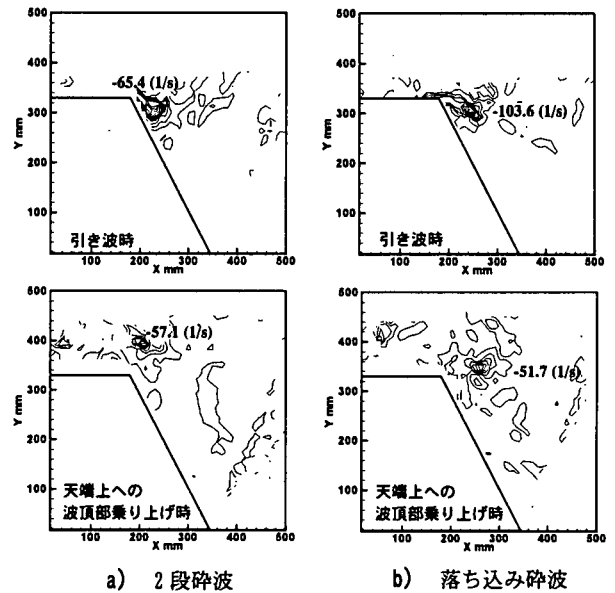


図-9 渦度の時間変化

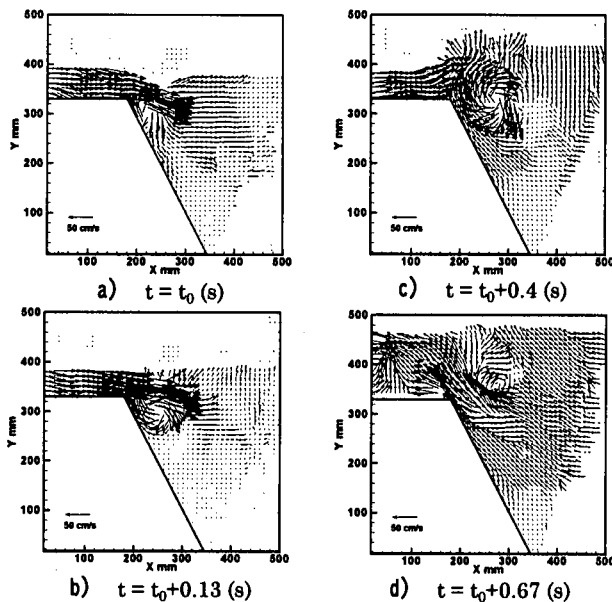


図-8 落ち込み砕波 ($H/h=0.19, h/L=0.116$)

とが分かる。

ところで、巻き波砕波および巻き-寄せ波砕波ともに、 $t=t_0$ の引き波時に、天端上で強い冲向きの流速が生じていることが分かる。リーフ法肩部から1cm沖側の天端上流速の有義速度を冲向き流速と定義すると、引き波時の最大冲向き流速は、巻き-寄せ波砕波の場合、巻き波砕波時の1.4倍に達する大きな値であった。また、巻き-寄せ波砕波時の最大冲向き流速は、リーフ法面上で計測された最大の岸向き流速の1.5倍を超える大きな値となっていた。

図-7および図-8に、それぞれ2段砕波および落ち込み砕波時の速度ベクトル場の時間変化を示す。2段砕波および落ち込み砕波の場合ともに、引き波時に法肩部から剥離渦が生じ、この渦は法面上で成長していることが分かる。このような、法肩部からの剥離渦の発生は、法面勾配1:3の場合には見られない、法面勾配2:1の場合に特徴的な現象であった。

さらに、2段砕波の場合、波峰部の法肩への接近に伴って、波頂部前面が剥離渦と混合して砕波に至り、その後、波頂部が天端上に乗り上げて砕波に至っている。なお、落ち込み砕波の場合、2段砕波時に比べ剥離渦の径および周辺流速が大きく、また、引き波時の最大冲向き流速は、2段砕波時の1.3倍に達する値となっていた。

図-9に、図-7および図-8で計測された2段砕波および落ち込み砕波時の渦度図を示す。図より、引き波時における渦度の最大値は、落ち込み砕波の場合、2段砕波時の1.5倍を超える大きな値であることが分かる。このような渦度の違いは、天端上で誘起される冲向き流速の違いに起因するものと考えられる。

(3) 人工リーフ天端上流速と砕波形態との関係

ここまで、砕波形態の分類および内部流速場の特性から、法面勾配が1:3の場合、 $H/h > 0.25$ の範囲で H/h が同一な場合、 h/L の減少とともに、砕波形態は巻き波砕波から巻き-寄せ波砕波へ遷移し、この際、リーフ天端上の冲向き流速が増加することが明らかになっている。ここでは、法面勾配が1:3の場合に着目し、リーフ天端上の冲向き流速と砕波形態の遷移との関係について、さらに検討を加える。

図-10に、 $H/h \approx 0.27$ および0.21別に、 h/L の変化に伴う、リーフ天端上の最大冲向き流速 u の変化を示す。 $H/h \approx 0.27$ の場合、多少のばらつきはあるものの、 h/L の減少とともに、最大冲向き流速 u の値が増加している。なお、この場合、 h/L の減少に伴ない砕波形態は巻き波砕波から巻き-寄せ波砕波へ遷移するが、最大冲向き流速 u の値は、巻き-寄せ波砕波の場合、常に巻き波砕波時の値を上回っていることが分かる。

図-11に、 h/L の変化に伴う、 u/U の変化を示す。なお、 u/U は、最大冲向き流速 u を線形理論による入射波の最大水粒子速度 U で割った無次元量速度を表す。図より、 $H/h \approx 0.27$ の場合、多少のばらつき

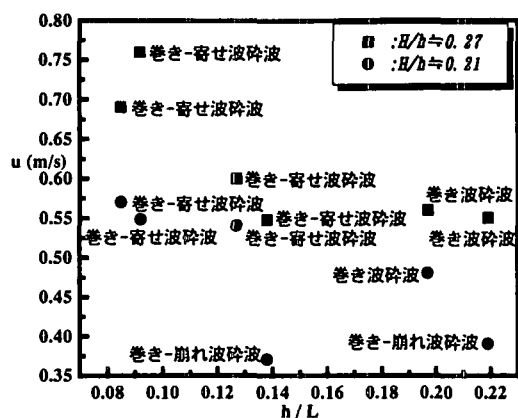


図-10 リーフ天端上冲向き最大流速の変化
法面勾配 1:3

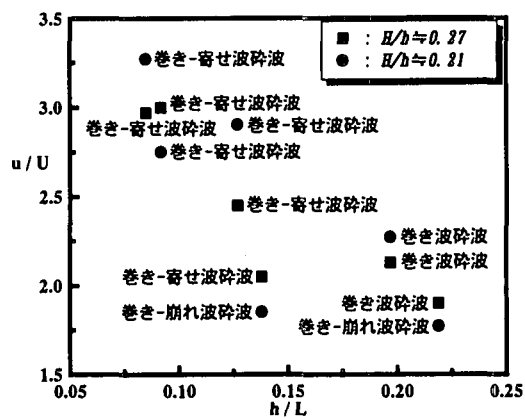


図-11 リーフ天端上冲向き最大流速と線形理論による
最大水粒子速度との比 法面勾配 1:3

はあるものの、 h/L の減少とともに、 u/U は増加している。さらに、 $u/U > 2.5$ の範囲で巻き-寄せ波砕波が生じていることが分かる。以上の結果は、 h/L の減少とともに、リーフ天端上の冲向き流速が増加し、 u/U の違いによって、波頂部前面で砕波が誘起され、巻き波砕波から巻き-寄せ波砕波への遷移が生じることを示唆するものと考えられる。

4. 結 論

人工リーフ上での砕波形態を、高速度ビデオカメラを用いて詳細に分類し、さらに、各砕波形態に対する砕波点周辺およびリーフ周辺の速度ベクトル場を、PIVを用いて計測することにより、本研究の実験範囲において、以下のことが明らかになった。

法面勾配が1:3の場合；1) h/L に関わらず、 H/h の増加とともに、砕波形態は崩れ波砕波から種々の砕波形態へ遷移する。2) $H/h > 0.25$ の範囲では H/h が同一な場合、 h/L の減少とともに、砕波形態が巻き波砕波から巻き-寄せ波砕波へと遷移する。3) H/h が同一な場合の巻き波砕波から巻き-寄せ波砕波への遷移では、リーフ天端上の最大冲向き流速が増加する。この際、線形理論による入射波の最大水粒子速度と最大冲向き流速との比が、巻き波砕波から巻き-寄せ波砕波への遷移に関係しているものと考えられる。

法面勾配が2:1の場合；1) $H/h > 0.20$ の範囲では、 h/L の減少にともなって、砕波形態が2段砕波から落ち込み砕波へと遷移する。2) 2段砕波および落ち込み砕波時には、リーフ法肩部から法面上へ剥離渦が形成される。3) 2段砕波から落ち込み波砕波への遷移には、 h/L の変化により、リーフ天端上の最大冲向き流速の増加に伴う剥離渦の規模の違いが関係しているものと考えられる。

謝辞：本研究を進めるにあたって、助力を惜しまなかった、米蔵俊之君（鴻池組）、森井靖博君（金沢大学大学院）、河合勇人君（真柄建設）および実験

装置作成に当たりご協力頂いた金沢大学工作センター職員諸氏に謝意を表する。

参考文献

- 1) 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. 646 - 650, 1992.
- 2) 滝川 清, 山田文彦, 松本健作：潜堤上砕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.
- 3) 安田孝志, 陸田秀実, 小笠原敏記, 多田彰秀：リーフ上のクノイド波の砕波特性, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 56 - 60, 1997.
- 4) Adrian, R.J. : Particle image techniques for experimental fluid mechanics, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.23, pp.261 - 304, 1991.
- 5) Greated, C.A., Skyner, D.J. and Bruce, T. : Particle Image Velocimetry (PIV) in the Coastal Engineering Laboratory, *Proc. of 23th Int. Conf. Coastal Engineering*, pp.212 - 225, 1992.
- 6) Chang, K.A. and Liu, P.L.-F. : Measurement of breaking waves using particle image velocimetry, *Proc. of 25th Int. Conf. Coastal Engineering*, pp.527 - 535, 1996.
- 7) Skyner, D. : A Comparison of numerical predictions and experimental measurements of the internal kinematics of a deep-water plunging wave, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.315, pp.51 - 64, 1996.
- 8) Petti, M., Quinn, P.A., Liberatore, G. and Easson, J. : Wave Velocity Measurements over a Submerged Breaker, *Proc. of 24th Int. Conf. Coastal Engineering*, pp.525 - 539, 1994.
- 9) Dabiri, D. and Gharib, M. : Experiment investigation of the vorticity generation within a spilling water wave, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.330, pp.113 - 139, 1997.
- 10) 宇多高明, 小俣 篤, 横山揚久：人工リーフの機能と設計法, 土木研究所資料, 第2696号, pp. 38 - 62, 1988.

(1999. 4. 19受付)