

複合型碎波の発見とその発生条件

安田孝志*・陸田秀実**・水谷夏樹***
大屋敦嗣***・多田彰秀****

1. 緒 言

碎波は、極めて日常的でしかも重要な現象でありながら、解明が大きく遅れている現象の代表例である。碎波形式について見ても、一様傾斜海浜上で観察される波形を基に現象論的に分類された碎波形式 (Galvin, 1968) の枠内ですべて捉えられ、こうした碎波形式の違いを生み出す運動学が何ら解明されないまま、入射波高と斜面勾配の関係のみで碎波形式が分類されている。このため、任意の底面形状による碎波に対して何ら言及できず、新しい碎波の可能性も検討されないままとなっている。

最近のスーパーコンピュータの進歩により、任意の底面形状の下でのジェットの出っ込み直前までの碎波の計算が可能となり、碎波の運動諸量の解明が進んで来た。これによって、崩れ波型や巻き波型碎波の碎波形式の差異は波頂部からのジェットの規模のみによっていることが明らかとなって来た。こうしたジェットの規模は、衝撃圧や碎波後の拡散などを直接支配し、工学的にも極めて重要である。このため、碎波の波浪制御への積極的活用や構造物の耐波安定性の向上をさらに進めていくには、従来型碎波をはるかに超える強大なジェットを伴う新しい碎波の可能性についても検討する必要がある。

そこで本研究では、種々のリーフ上での碎波特性を調べ、リーフ先端のステップを上下2段にしたダブルリーフ上で従来の碎波形式の分類では捉えられない強大なジェットを伴う碎波が生じることを数値計算によって示す。ついで、この碎波が実流体においても全く同様に生じることを水理実験結果との比較によって実証するとともに、数値解の精度検証を行い、その結果を基に、この新しい碎波の特性および発生条件を明らかにする。

2. シングルリーフ上の碎波波形とジェットサイズの変化

2.1 計算手法の概略

ここで用いる BIM (境界積分法) による計算手法の精

- * 正 会 員 工 博 岐阜大学教授 工学部土木工学科
- ** 正 会 員 工 修 岐阜大学助手 工学部土木工学科
- *** 学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科
- **** 正 会 員 工 修 西松建設(株)技術研究所 技術部海洋技術課

度については、既に検証がなされている (Yasuda *et al.*, 1993)。

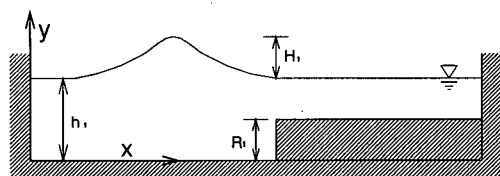
用いる底面形状としては、最も単純でパラメータの少ない図-1のシングルリーフおよびダブルリーフとした。計算では、シングルリーフの相対天端高 R_1/h_1 を 0.25~0.90 に変化させた。また、ダブルリーフでは上段天端高 R_1/h_1 を 0.8 に固定し、下段天端高 R_2/h_1 を 0.3~0.5、ステップ間隔 X_1/h_1 を 0.0~23.0 にそれぞれ変化させ、これらのリーフに入射波高 $H_1/h_1=0.4, 0.5$ および 0.6 の定常孤立波を入射させた。

数値計算は、エネルギー保存則に対する誤差が 1% 未満の条件下でジェットの落下限界 (波峯前面の最大傾斜角が 180°, すなわちジェット下面が水平となる瞬間) に達するまで行なった。

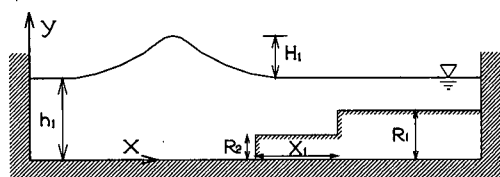
2.2 碎波波形とリーフ天端高の関係

1 段ステップのシングルリーフによって一様斜面上と同一の波形を持つ碎波が生じることが既に明らかにされている (安田・榊原, 1992)。したがって、一様斜面の場合と同様、リーフ天端高を高くするにつれて碎波形式が崩れ波型から巻き寄せ波型に変化する。

図-2 はここで検討した波形の代表例を示したものであり、(a)の碎波は波頂部からジェットを放出しており、



(a) シングルリーフ



(b) ダブルリーフ

図-1 リーフ諸元と記号

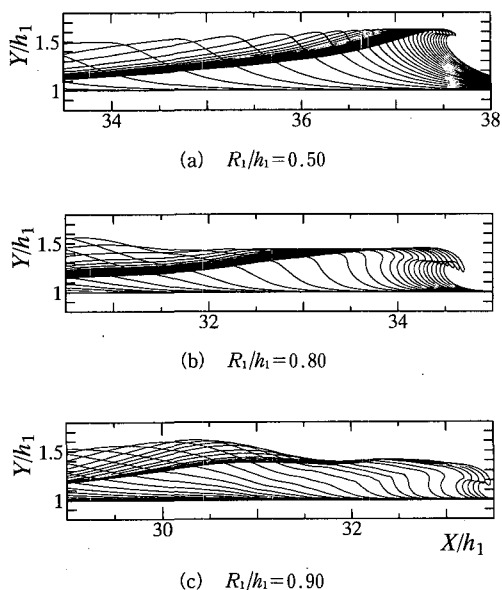


図-2 入射波高 $H_1/h_1 = 0.5$ の孤立波のシングルリーフ上での波形変化とリーフ天端高の関係

巻き波型碎波に相当している。これに対し、(b) の碎波は最終的に波頂部からジェットを放出している点では巻き波型であるが、ジェットを放出する波峰が元の波峰(主波峰)ではなく、これに取って替わった2次波峰という点で若干異なっている。これは、Cookerら(1990)が言う‘crest-crest exchange’に相当するものと考えられるが、通常の巻き波型碎波に比べてジェットの規模が大きくなる点に特色がある。さらに(c)では、ジェットの放出が波頂部からではなく波峰前方の下半面から生じており、この点で典型的な巻き寄せ波型碎波と見なすことができる。この場合は、主波峰前方からの2次波峰が主波峰に取って替わる前にジェットを放出しており、この点で(b)の碎波と明らかに異なっている。したがって、(a)および(c)の碎波をそれぞれ巻き波型および巻き寄せ波型とすれば、(b)の碎波はこれらの中間型と言える。

このように、シングルリーフ上においても種々の碎波が生じるが、いずれも従来型碎波の範囲内に収まっている。

このため、入射波高 $H_1/h_1 = 0.5$ の孤立波が $R_1/h_1 = 0.25 \sim 0.90$ のリーフに入射したときの碎波限界(波峰全面が鉛直に突立つ瞬間)および上述のジェット落下限界時の波形を図-3に示し、リーフ天端高との関係について検討する。これから、リーフ天端高 R_1/h_1 が増すに従って波頂高は逆に低下し、これに伴って碎波限界時の鉛直面の高さ(ジェット放出点)も低下することがわかる。ただし、波頂高は R_1/h_1 が0.85前後に達するまでは低下を続けるが、天端高がこれよりも高くなると逆転傾向を

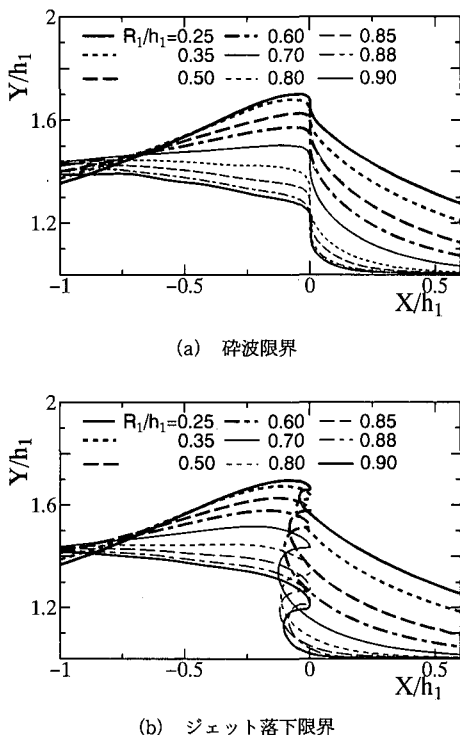


図-3 碎波限界およびジェット落下限界時の波形の比較;
 $H_1/h_1 = 0.5$, $R_1/h_1 = 0.25 \sim 0.90$

示し、むしろ増大するようになる。これは、上述の図-2(c)の波形からもわかるように、2次波峰が発達して主波峰に取って替わる前に2次波峰からジェットが放出され、主波峰の波頂がそのまま残って波頂高を与えることによるものであり、碎波形式が巻き寄せ波型に遷移することに対応している。ジェット落下限界時の波形について見ると、ジェット放出点が低下するに従ってジェットの規模も増大するが、それも波頂高と同様、 R_1/h_1 が0.85を超えるまでであり、0.85を超えるとジェット長が短くなり、ジェットの規模も縮小している。

こうしたジェットの規模と入射波高およびリーフ天端高との関係を明らかにするため、図-4に示すようにジェット落下限界時の波形に対してジェットの長さ γ および高さ η_j を定義し、これを基にジェットサイズ指標 $\beta_0 = \gamma \eta_j / H^2$ の定義を行い、これとリーフ天端高 R_1/h_1 の関係を入射波高ごとに調べた。図-5はその結果であり、それぞれの入射波高の下でジェットサイズ β_0 が極大値が生じ、 $H_1/h_1 = 0.5$ の場合の β_0 が最大値を与えることがわかる。これは、シングルリーフの下では入射波高やリーフ天端高をいかに与えても生じる碎波のジェットサイズには上限値 $\beta_0 \approx 0.05$ が存在し、これを超えるジェットは生じないことを示している。

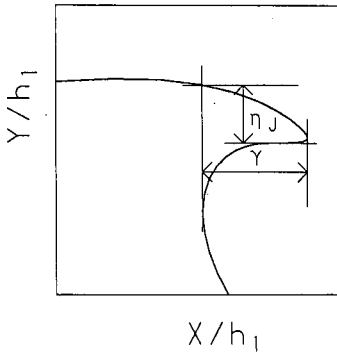


図-4 ジェット落下限界時のジェットの長さ γ と高さ η の定義

3. ダブルリーフ上での複合型砕波の発生とその検証

3.1 複合型砕波の波形とジェット

前述の図-1(b) に示したダブルリーフに孤立波を入射させ、このときの砕波波形を比較検討した。その結果、代表例として図-6 に示すような波形変化を伴う砕波が生じることが見い出された。この砕波は、主波峰前面の2次波峰が発達し、それが主波峰に取って替わるのではなく、急峻化した主波峰と複合することによって生じることがわかる。その特徴は、冠を戴いたような複合波峰部の形状とそこからの強大なジェットの放出にあり、このような主波峰と2次波峰の複合によるジェットの著しい発達にこの砕波の本質があるとの観点から、この砕波を‘複合型砕波’と命名することにした。

この砕波の砕波限界およびジェット落下限界時の波形的特徴を明らかにするため、同一の入射波 ($H_1/h_1=0.5$) を上段リーフと同一の高さのシングルリーフ ($R_1/h_1=0.8$) に入射させた場合の波形との比較を図-7 に示す。これから、複合型砕波を特徴づける砕波限界時の戴冠波形にその特徴がよく現れていることがわかる。また、こ

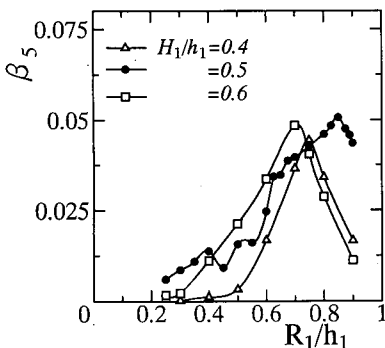


図-5 ジェットサイズ指標 β_5 と入射波高 H_1/h_1 およびリーフ前端高 R_1/h_1 の関係

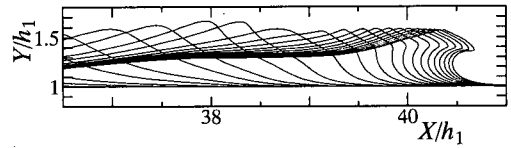


図-6 ダブルリーフ上での複合型砕波の波形変化の代表例: $H_1/h_1=0.5$, $R_1/h_1=0.8$, $R_2/h_1=0.4$, $X_1/h_1=6.5$

のときの巻き波型砕波のジェットサイズは、上述の図-5 からわかるようにシングルリーフ上で生じるジェットのほぼ上限に近いものではあるが、複合型砕波のジェットサイズはこれを大きく上回っている。これらから、リーフの先端を $X_1/h_1=6.5$ の間隔の2段階ステップとすることのみによって、砕波形式を複合型砕波に変化させ、強大なジェットを発生させることが可能となることがわかる。

3.2 水理実験による検証

複合型砕波は数値シミュレーションによって発見されたものであるため、それが実流体でも生じることを実証する必要がある。そこで、西松建設(株)技術研究所の片面ガラス張り2次元波浪水槽 ($1\text{ m} \times 2\text{ m} \times 65\text{ m}$) を用いて実験を行い、併せて数値解の精度検証を試みた。水槽内に鋼製ダブルリーフ模型 ($R_1=26.0\text{ cm}$, $R_2=13.0\text{ cm}$ および $X_1=250.0\text{ cm}$) および16台の波高計を図-8 に示すように設置し、水深 h_1 を 31.0 cm に保って波高 $H_1=13.0\text{ cm}$ の定常孤立波を発生させた。砕波限界前後の空間波形は高速ビデオ (Nac 製, 200 コマ/秒) によって録画し、画像解析を行った。

写真-1 は、このときの砕波限界直後の波形を示したものであり、その特徴的な戴冠型波形から数値計算通りの複合型砕波の発生が確認できる。

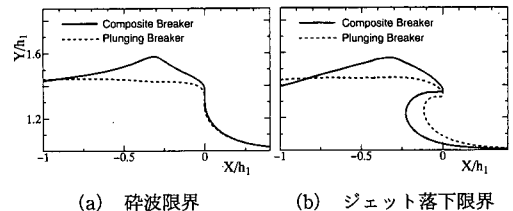


図-7 同一の入射波 ($H_1/h_1=0.5$) を同一の高さのシングル ($R_1/h_1=0.8$) およびダブルリーフ ($R_1/h_1=0.8$, $R_2/h_1=0.4$, $X_1/h_1=6.5$) に入射させたときの波形比較

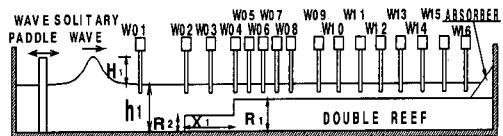


図-8 ダブルリーフ模型を設置した水槽の概略と波高計の位置

図-9は、画像解析によって得られたこのときの複合型碎波の碎波限界およびジェット落下限界時の空間波形と同一条件下の数値計算による波形との比較を示したものである。複合型碎波を特徴づけている急峻な戴冠状波峯と強大なジェットを含めて両者はほぼ完全に一致しており、この結果は数値計算によって発見された複合型碎波が実流体でもその通りに発生することを実証しているだけでなく、数値解の精度も極めて良好であることを併せて示している。

図-10は、このときの4測点での波高計による実測時間波形を数値計算による波形と比較したものである。碎波限界点(W07)を含めて両者はほぼ一致しており、これから数値解の精度は十分に高いことが確認できる。

4. 複合型碎波の定義と発生条件

複合型碎波は主波峯と2次波峯の複合によって強大なジェットを生成する点に特色があり、碎波限界時の戴冠波峯やジェット落下限界時のジェットサイズによって特徴づけられる。したがって、その定義もこれらの点に着目して行われるべきであるが、ここでは簡単のため、上

述のジェットサイズ指標 β_0 を用いて定義を行う。

前述したように、シングルリーフによって生じる従来型碎波では入射波高 H_1/h_1 に応じて β_0 の値に上限が存在し、リーフの天端高 R_1/h_1 をいかに高くしてもこれを超える碎波は発生しない。そこで、ここではこの上限を超える碎波を複合型碎波と定義し、上段リーフの相対天端高を $R_1/h_1=0.8$ としたダブルリーフに入射する孤立波について発生条件の検討を行う。

ジェットサイズは、同一の H_1/h_1 および R_1/h_1 の下であっても R_2/h_1 や X_1/h_1 に応じて変化する。特に、 X_1/h_1 によって大きく変化するため、 $H_1/h_1=0.5$, $R_1/h_1=0.8$, $R_2/h_1=0.4$ の下で X_1/h_1 を 0.0 から 7.3 まで変化させたときの碎波限界およびジェット落下限界時の波形比較を行う(図-11)。 $X_1/h_1=0.0$ はステップが1段のシングルリーフを意味し、 $X_1/h_1>0.0$ ではステップが2段のダブルリーフとなる。これから、 X_1/h_1 の大きさに関係なくダブルリーフ上ではジェット背面の峯高がシングルリーフのものを上回る戴冠波形となり、これに伴ってジェットサイズも増大する。この傾向は $X_1/h_1 \geq 6$ において特に顕著となるが、 X_1/h_1 が 7.3 程度まで増大すると、2次波峯との複合なしに主波峯から直接ジェットが放出されるようになり、ジェットサイズは大幅に縮小し、碎波波形も崩れ波型碎波に類似したものになる。ただし、水理実験時の観察によれば、主波峯からジェットが放出されても波峯前面からの2次波峯の発達がそのまま続き、最終的にはこれと複合してやはり強大なジェットが生成されるが、主波峯の碎波後に生じる点で碎波後の波形変化と扱われるため、ここではこれを除外して検討する。

ダブルリーフ上での碎波波形やジェットの規模はステップ間隔 X_1/h_1 に応じて変化するため、 R_2/h_1 を 0.3~0.6 と変化させたときのジェットサイズ指標 β_0 と X_1/h_1 の関係について検討する。図-12はその結果を示したものであり、 X_1/h_1 や R_2/h_1 の値に関係なくいずれの場合の β_0 も $R_1/h_1=0.8$ のシングルリーフの場合の極大値 0.05 を上回っており、ダブルリーフによって複合型碎波が常に生成されるといってよい。ただし、複合型碎波を発生させる目的がその巨大なジェットの生成にあるとすれば、ステップ間隔および下段リーフ天端高の最適化

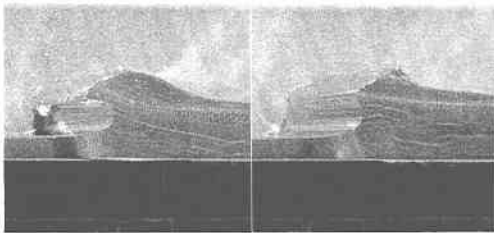


写真-1 碎波限界直後の複合型碎波の水槽内での波形

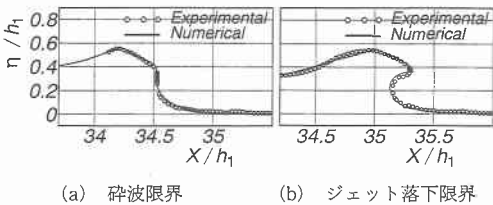


図-9 複合型碎波の空間波形に関する数値解と実験による画像解析結果との比較

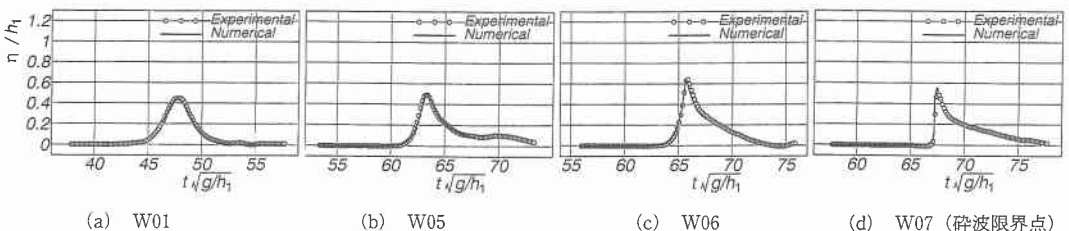
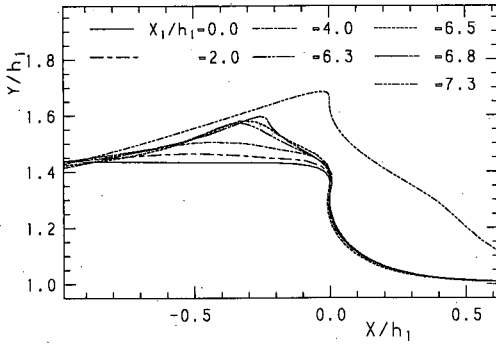
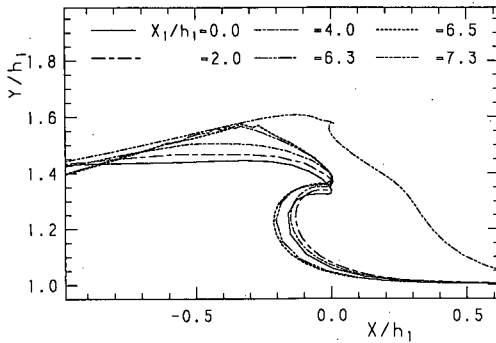


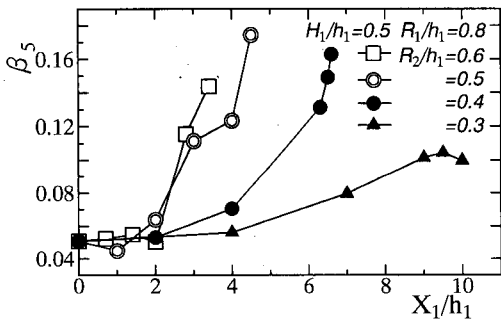
図-10 複合型碎波に至る過程での各測点における実測時間波形と数値解による波形の比較



(a) 碎波限界

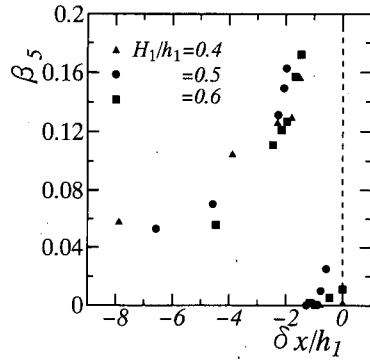


(b) ジェット落下限界

図-11 碎波およびジェット落下限界時の波形とステップ間隔 X_1/h_1 の関係図-12 入射波高 $H_1/h_1=0.5$ の場合のジェットサイズ指標 β_5 とステップ間隔 X_1/h_1 および下段リーフ天端高 R_2/h_1 の関係

が必要となる。 $R_1/h_1=0.8$ の場合について見れば、 $X_1/h_1 \approx 4.5$ および $R_2/h_1=0.4 \sim 0.5$ の場合に従来型碎波による最大規模のジェットの3倍近いジェットを伴う複合型碎波が生じることがわかる。

このようなステップ間隔 X_1/h_1 の最適化は、下段リーフによる碎波点位置と関わっており、この碎波点より少し手前に下段リーフを設置した場合にジェットサイズが最大となる。図-13は、このことを明らかにするため、下段リーフによる碎波点から上段リーフステップ位置ま

図-13 下段リーフのみの場合の入射波の碎波点からの上段ステップ位置 $\delta x/h_1$ とジェットサイズ指標 β_5 の関係

での距離 δx (負符号は上段リーフのステップが碎波点より手前、すなわち沖側にあることを意味する。)とジェットサイズ指標 β_5 の関係を $H_1/h_1=0.4, 0.5$ および 0.6 の入射波高に対してそれぞれ示したものである。これから、碎波点より $2h_1$ 程度手前に設置された場合に最大規模のジェットを伴う複合型碎波が生じることがわかる。

5. 結 語

2段ステップを持つダブルリーフによって主波峰と2次波峰が複合した戴冠状波峰と強大なジェットを伴う碎波が発生することを示し、これを複合型碎波と命名するとともにその発生を水理実験によって実証した。複合型碎波の特徴は、従来型碎波の最大3倍近い規模のジェットを生成する点にあることに着目し、従来型碎波によるジェットサイズの上限 $\beta_5 \approx 0.05$ を超える碎波を複合型碎波と定義した。さらに、その発生条件について検討を行い、 $R_2/h_1 \geq 0.2$ の下段リーフ上で碎波する孤立波を入射させた場合、その碎波点より $|\delta x/h_1| \approx 2$ の範囲内に $R_1/h_1 \geq 0.5$ の上段リーフを設置すれば複合型碎波が生じることを見出した。

参 考 文 献

- 安田孝志・楠原幸雄 (1992): ステップによる孤立波の碎波形式の定量的評価と支配法則について, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 51-55.
- Cooker, M. J., D. H. Peregrine, C. Vidal and J. W. Dold (1990): The interaction between a solitary wave and a submerged semicircular cylinder, J. Fluid. Mech., Vol. 125, pp. 1-22.
- Galvin, C. J. (1968): Breaker type classification on three laboratory beaches, J. Geophys. Res., Vol. 73, No. 12, pp. 3651-3659.
- Yasuda, T., M. Hara, H. Mutsuda and A. Tada (1993): Internal velocity field at incipient breaking of a solitary wave over a submerged dike, Proc. 15BEM, Worcester, pp. 179-192.