

現地波浪の碎波条件について

水 口 優*・堀田新太郎**・中村孝志***・川崎隆之****

1. はじめに

現地波浪の碎波条件を明らかにすることは、海岸工学における重要な課題の一つである。しかし、碎波現象の複雑さや現地観測の困難さのために、現地波浪の碎波条件についてはほとんどわかっていない。それ故、不規則波の碎波条件としては規則波に対する理論的、実験的研究に基づく碎波条件、あるいはそれを不規則波を用いた室内実験の結果に基づいて修正したものを用いているのが実状である¹⁾。著者らは、ここ数年にわたって碎波帯近傍における波浪の現地観測を実施してきた。その中で、同期した何台かの 16 mm メモーションカメラを用いて波浪を観測する方法を開発、使用してきた。このシステムの長所の一つは、波形が映像として記録されるので、必要ならば波浪状況を再現できることである。この特徴を生かし、碎波点付近の波浪状況を再現し、現地波浪の碎波条件について検討した。その結果の一部は既に報告した²⁾。そこで得られた結果を要約すれば、波別解析法 (zero-down crossing 法) で定義した個々の波は対応する規則波よりも碎波し易い傾向 (碎波限界を波高水深比で表せば他の条件が同じならば、より小さな波高水深比で碎波する) があること、およびデータのバラつきは規則波におけるよりも大きいことである。また碎波した波よりも大きい波高の碎波しない波が存在した。その後、不規則波の碎波に関する研究はいくつか報告されているが上記の傾向はそいづれもが指摘するところである^{3,4)}。

今回、異なる地点での現地観測データを追加すると共に、既往のデータを再検討したところ、水深の異なる地点での結果を比較すれば、水深の大きいほど小さい波高水深比で碎波していることが判明した。一方、不規則波の碎波が波の重ねあわせによっても起きることを考えると、平均的には浅海域と見なせる地点でも碎波限界には、波形勾配の影響があってもよいと考えられる。その様な観点から現地波浪の碎波限界を再整理してみた。従

表-1 観測地点とその特性

観 測 名	水深 (cm)	測定時間 (分)	定義され た波の数 (個)	砕波してい る波の数 (個)	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)	
EX 800902-1 (D)	279	125	1 118	47	130	8.3	
EX 800902-2 (B)	196	113	1 030	174	112	7.4	
EX 820109-1 (24)	74	10.3	114	8	49	7.6	
	(25)	89	10.3	5	48	7.6	
	(26)	127	10.3	2	56	7.5	
EX 820109-2 (24)	74	13	157	9	54	7.4	
	(25)	88	13	6	55	7.0	
	(26)	125	13	166	2	57	7.1
EX 830728	(17)	36	13	227	27	59	4.0
	(18)	49	13	228	47	58	4.0
	(19)	70	13	213	76	67	4.1
	(20)	98	13	212	41	57	4.1
	(22)	146	13	212	1	51	4.2

来より多少ともまとまりのよい結果が得られたので報告する。

2. 現 地 観 測

三つの異なった海岸での観測を紹介する。それらは茨城県阿字ヶ浦海岸にて 1980 年 9 月 2 日に、静岡県浜松市米津浜海岸にて 1982 年 1 月 9 日に、新潟県大潟町大潟海岸にて 1983 年 7 月 28 日に観測したものである。以後、これらの観測を EX 800902, EX 820109, EX 830728 と呼ぶことにする。図-1 に観測時のプロフィールと測点を示す。阿字ヶ浦海岸は平均勾配 1/50~1/60 の緩勾配海岸である。米津浜海岸は前浜勾配 1/10、水深約 1 m より沖合いで約 1/30 程度の勾配の海岸である。大潟海岸は前浜で 1/8 そのすぐ沖側で 1/4 そして水深約 2 m より沖合いは 1/50 程度の勾配の海岸である。観測方法は以下の通りである。EX 800902 では、8 m のポールを立てた 6 台のソリを約 50~60 m の間隔で連結し、汀線にはほぼ直角に一直線上に位置するように船で海中に引き出し所定の場所に据えた。測線は建設省の漂砂観測用棧橋にはほぼ平行で、それより南側に約 50 m 離れていた。棧橋上より 16 mm カメラシステムを用いて標識ボールを撮影した。午前と午後の 2 回観測した。以後、観測番号に -1, -2 をつけて区別する。なお、-1 のデータは既

* 正会員 工博 中央大学助教授 理工学部土木工学科

** 正会員 工博 日本大学助教授 短期大学部建設科

*** 中央大学学生 (現 国際航業 KK)

**** 中央大学学生 (現 トーヨー KK)

に使用されたものである²⁾。米津浜の EX 820109 では汀線に直角に測線を設け、標識ポールを打設した。ポールは汀線付近に設けた高さ約 2 m の足場用櫓の上から撮影した。この場合も短い時間をおいて 2 回観測した。その一回めのもの (−1) は別の目的で既使用し、発表されている³⁾。EX 830728 は EX 820109 と同様の方法でデータを取得した。有効観測時間は表一に示してある。

データ処理の方法については文献 2) を参照されたい。

8. データの解析と整理

各測定点の特性を表一にまとめて示す。個々の波の定義は、0 点幅 3 cm を持たせた zero-down crossing 法によった。第一次碎波のみを対象とすべく解析地点を選んだが、大湊海岸はかなり急勾配で、碎波即遡上となっていたケースである。夏の日本海の波の特徴である。

以下、議論を方向性のないいわゆる一次元の不規則波にかぎって考えるものとする。対象としている波は、現地の波であるが、うねり性の波で海岸近くで碎波するものは波峰線方向にかなりの部分が同時に碎けるものが多

い。今回整理したものの中では明らかに三次元性を示すものは一割弱であった。さて、規則波の碎波条件の表し方には大きく分けて二つある。一つは局所的な条件のみで、具体的には碎波点での水深、 d_b 、波高、 H_b 、周期、 T_b 、(または波長、 L_b) の間の関係を定めるものであり、他の一つは沖波の条件と碎波点での値との関係を定めるものである。不規則波の場合は、何等かの方法で定義される個々の波の碎波条件を論じることになる。(ただし、平均的にみて、代表的な碎波条件として統計的な代表波の諸量を用いて表すこともできよう。) この時、後者の表現は無意味になる。と言うのは、波はごく浅いところを除き、成分波の重ね合わせと見なせ、かつその成分波は分散性を持つために、ある地点での波形に対して定義される個々の波は、進行とともに変化するからである。

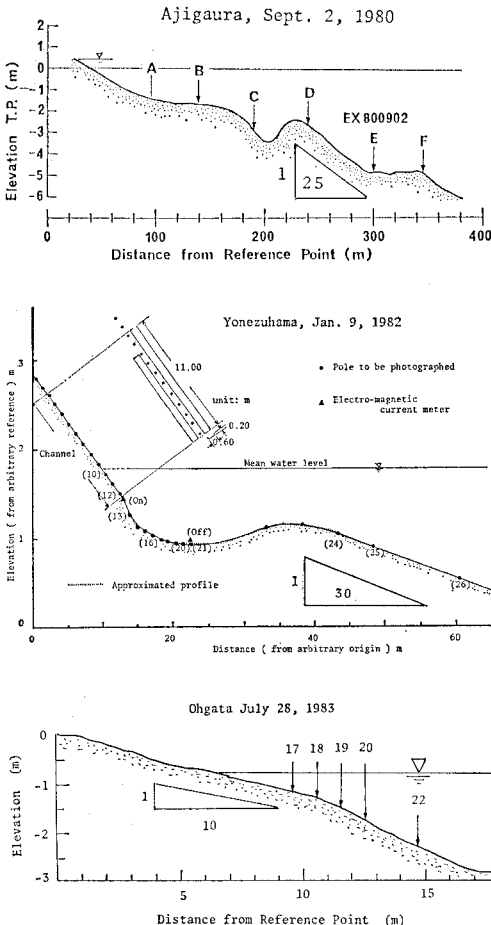
不規則波中の個々の波の局所的な碎波条件は、第一次近似としては、波別解析法で定まる波高と周期及びそこでの水深をパラメータとして規則波の結果と比較すると云うかたちで論じることになる。細かくは単に波高と周期だけではなく、具体的な波形、さらには前後の波の影響などを考慮する必要がある⁶⁾。図一 2 (a)~(d) は、合田 (1970)⁷⁾ が規則波の碎波条件を整理した際に用い、その後広く用いられている沖波波長で無次元化した水深 (または見方によれば周期の二乗を無次元化したもの) d/L_0 を横軸に、波高水深比 H/d を縦軸に取って、データを整理したものである。阿字ヶ浦の 2 地点は、午前と午後で入射波条件がやや異なり、観測データも多いので各点毎にプロットし、米津浜と大湊海岸については全ての地点のデータを記号を変えてプロットしてある。図中で単なるドットは非碎波 (碎波前も碎波後も含む) の波であり、それ以外のシンボルで表されているのが、そのポールの前後約 20 cm 以内で碎波したものである。プロットされている点の総数については表一を参照されたい。図一 3 は、規則波の碎波指標の中から代表的なものを二つ取り上げて 図一 1 と同じパラメータ上でプロットしたものである。一つは図中の実線で表される合田 (1973)⁸⁾ の碎波条件である。

$$H_b/L_{0b} = A[1 - \exp \{1 - 1.5\pi d_b/L_{0b}(1 + 15s^{4/3})\}] \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで $L_{0b} = (gT_b^2)/2\pi$ 、 s は一様斜面の勾配、 A は定数で規則波にたいしては 0.17 という値が提唱されている。図中の破線は、二つめの Miche の条件式である。

$$H_b/L_b = 0.142 \tanh(2\pi d_b/L_b) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 L_b は局所的な波長である。図一 2 と 図一 3 を比べてみると、従来指摘されているように、不規則波の方が規則波に比べて小さい波高水深比で碎け、(大湊のデータ EX 830728 を除き) その上限が $s=0$ の場合の合田式または Miche 式近辺にきていることがわかる。しかし



図一 観測場所の断面地形と測定点

ながらデータのバラツキはかなりひどく平均値の5割程度もあり、不規則波だからバラつくのは当然と言うには大きすぎるようである。バラツキの原因であるが、木村・瀬山(1986)³⁾は個々の波の水深の定義に問題があるとし

て、水深を波高の中分面までの深さとするることによってまとまりがよくなることを示している。これは、波高の大きいものは水深も大きく取ることによって縦軸の幅を

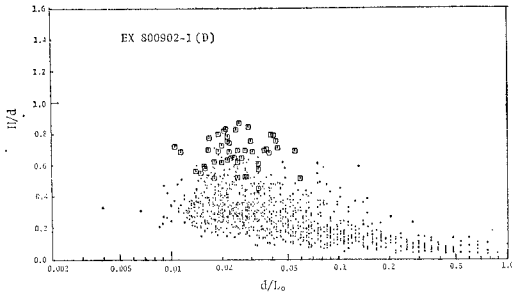


図-2 (a) 相対水深と波高水深比

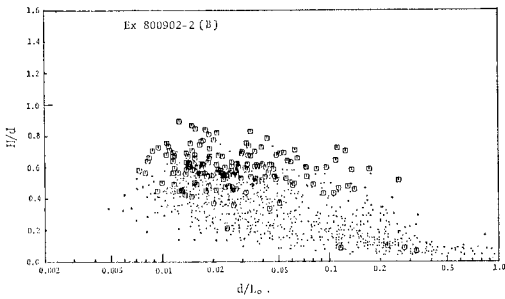


図-2 (b) 相対水深と波高水深比

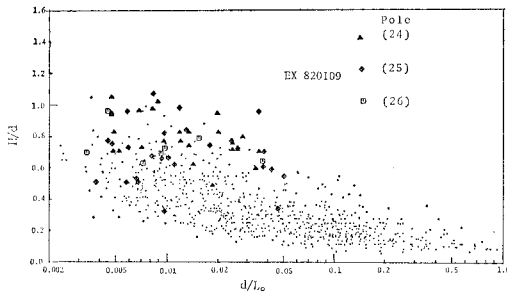


図-2 (c) 相対水深と波高水深比

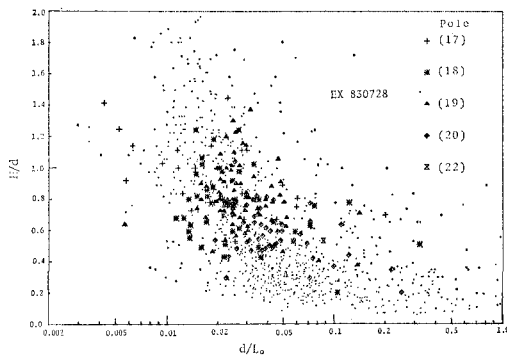


図-2 (d) 相対水深と波高水深比

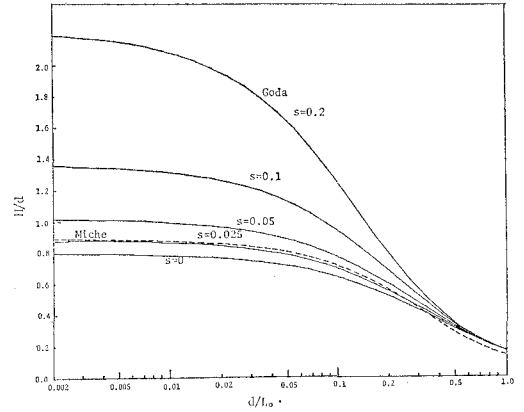


図-3 規則波の碎波条件(相対水深-波高水深比)

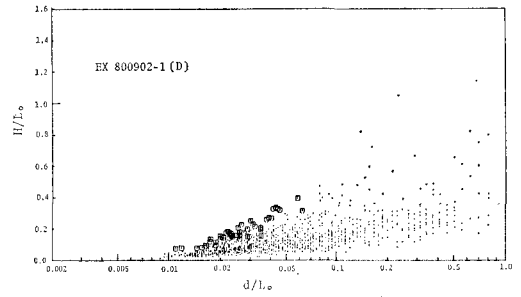


図-4 (a) 相対水深と波形勾配

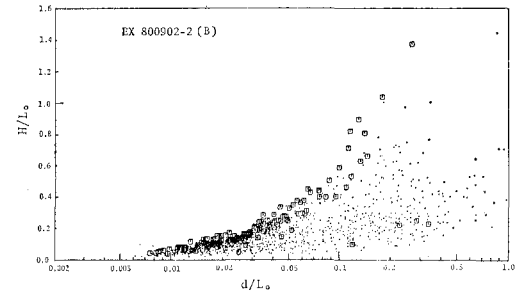


図-4 (b) 相対水深と波形勾配

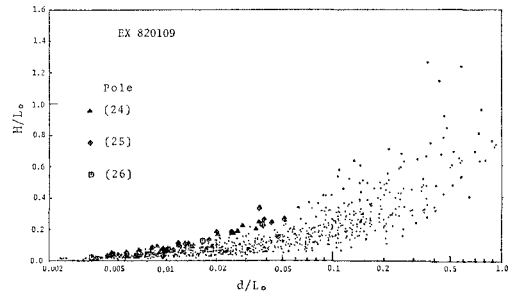


図-4 (c) 相対水深と波形勾配

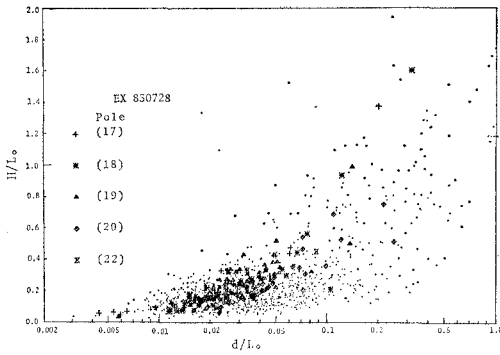


図-4 (d) 相対水深と波形勾配

狭くしていることにもなり，便宜的な処置という感拭えない．図-2 を丁寧にみると，碎波しているものは楕円状の範囲に分布していると見ることができよう．そしてその長軸は水平軸に平行ではなく ($H_b/d_b \neq \text{const.}$) ややや右下がりである．特に，横軸 d/L_0 に関して分布幅の広い図-2 (b), (d) にその傾向がみられる．この結果から，碎波条件に周期（波長）の影響が入っていることが推論されよう．なお，Izumiyama・Isobe (1986)⁹⁾ は規則波の非一様勾配斜面での碎波条件について調べて，相当勾配として碎波点と碎波点から沖側に碎波水深の5倍の地点との平均勾配を用いることにより合田式が適用可能なことを報告している．現地の海岸は通常沖側の勾配が緩く，そう言う意味で水深の地点は相当勾配が小さく，小さな波高水深比で碎波する傾向を持つものと考えられる．その定量的な効果については沖側の地形データがなく細かい議論はできないが，大湊海岸での EX 830728 を除いて大きくないと考えられる．またデータのまとまりぐあいと云う点からは楕円の長軸方向となるパラメータを座標軸にとるのがよい．そこで一つの試みとして，縦軸にも周期の影響を導入し，合田 (1) 式で用いられている沖波波長を用い波形勾配 H/L_0 と相対水深 d/L_0 で整理したものが図-4 (a)~(d) である．図-5 は同じパラメータを用いて，(1), (2) 式をプロットしたものである．さて，得られた結果は，確かにデータのまとまりはよくなったように見えるが，これは横軸にも周期の影響の入ったことによる部分もあるが，データのバラツキが大きい側 (d/L_0 が小さい側) で波高を無次元化する際に，値の小さい水深ではなく大きい値の沖波波長を用いたことによることにも注意すべきである．図-5 の既往の規則波の碎波条件式も浅いところでは，値そのものが小さく，かたまっている．この整理方法でも，大湊のデータ (EX 930728) を除き碎波する波は緩勾配の場合の合田式または Miche の式を上限としている．さらに特徴的なのは，図-2 で見る以上に明らかに碎波するものとそうでないものの分布の状況がよくでていて，非碎波の波の上側の限界として碎波する波が存在していること

である．大湊海岸は前浜勾配が非常に急なためか碎波条件に勾配の影響が現れて他のケースよりも大きな波形勾配で碎波している．また碎波後の波でちょうどそこで碎波するものよりも波高の高いもの（でかつ波形勾配も大きいもの）がかなりの数あってこれも碎波前後の変形が激しいことや反射率が大きいことなどの急勾配海岸の特殊性が現われていたものと考えられる．

この他，データを整理する上で考えられるパラメータとしては，沖波波長のかわりに局所的な波長 L を用いた局所的な波形勾配及び相対水深が考えられる．しかし，

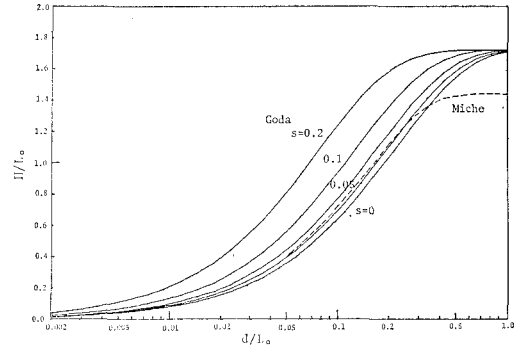


図-5 規則波の碎波条件（相対水深-波形勾配）

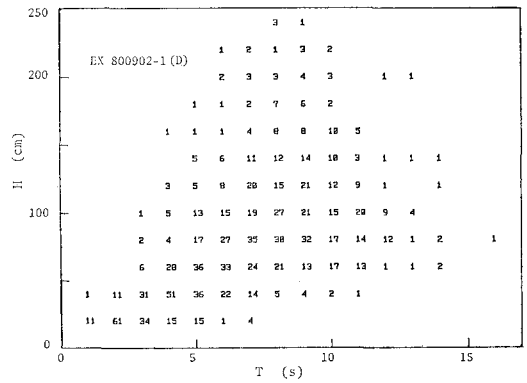


図-6 波高と周期の結合確率分布

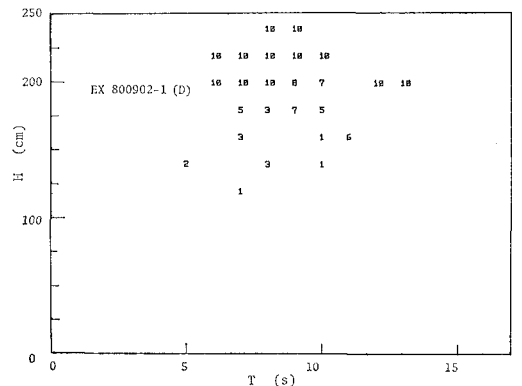


図-7 結合確率分布の上でみた碎波率

その波長を測定された周期を用いて微小振幅波理論より算定する限り、図-4の結果を縦軸、横軸共に値の小さい領域での分布状況をそれぞれの軸方向に歪ませるだけで、結果としてはほとんど変わらない。そこで見方を変え、以上の整理方法は、ある点でのデータについて言えば、個々の波の波高と周期の結合確率分布の上で碎波を輪じていることになる。図-6, 7, 8, 9は長時間記録のある阿字ヶ浦の2地点でのデータの波高と周期の結合確率分布とその上での碎波率を求めてみたものである。図-6のEX 800902-1(D)は波群全体としてみたときの碎波開始地点であり、結合確率分布は碎波帯外の波として標準的な三日月型の分布をしている。図-7は其中で碎波しているものの割合(碎波率)を十分率でプロットしたものである。このケースでは、図-2(a)と対応して碎波条件はほぼ波高のみで定まっていることが分かる。なお、周辺分布である波高分布からみた碎波しているものの分布については既に報告されている²⁾。

図-8, 9はEX 800902-2(B)の結果であるが、結合確率

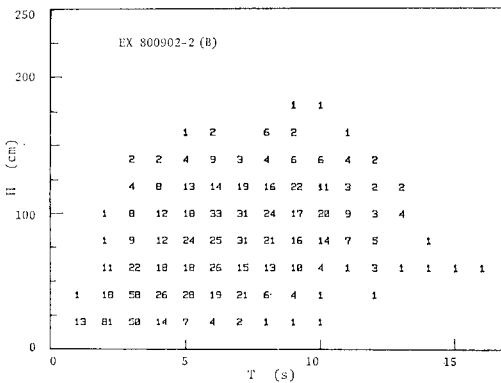


図-8 波高と周期の結合確率分布

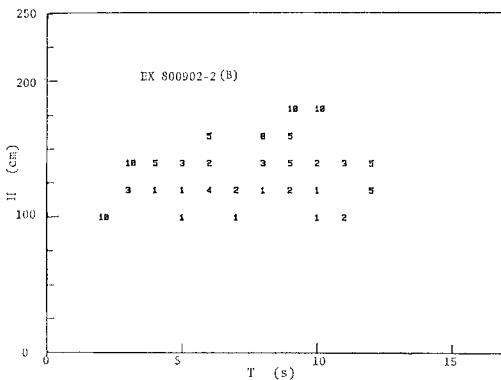


図-9 結合確率分布の上でみた碎波率

分布はもはや三日月型ではなく、波高の大きい側がカットされかつ波高・周期共に小さい波が増えるという碎波帯内の地点としての特徴がよくでている。碎波率の分布状況からみて、碎波条件としてやや周期にもよる傾向がみられるデータ数の少ないこともあり確定的なことは言えない。

4. 終わりに

現地観測のデータを用いて不規則波中の個々の波の碎波について調べてみた。観測条件が限られたものであること、データ数がそれほど多くないことなどの問題はあがあるが、現地波浪の碎波特性として、個々の波の碎波には浅海域といえども波形勾配が重要でありそうなことなどその特性の一端は明らかにできたものと思っている。今後さらに観測データを増やし、定量的な議論が必要である。

現地観測は、阿字ヶ浦では建設省土木研究所海岸研究室、大潟では京都大学防災研究所大潟観測所の関係者の方々の好意のもとに行われたものである。記して謝意を表します。東京大学工学部土木工学科の磯部雅彦助教授には、現地観測での付き合いばかりでなく、有益な議論の相手ともなってもらった。また論文作成にあたっては中央大学技術員の渡部武士氏、現地観測に多くの学生諸君の助力を得た。感謝します。

参考文献

- 1) 岩田好一朗: 斜面上の不規則波の遡上, 水工学シリーズ, 土木学会, 82-B-3, 1982.
- 2) 堀田新太郎・磯部雅彦・泉宮尊司・猿沢真人: 現地波浪の碎波限界, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 44~48, 1984.
- 3) 木村 晃・瀬山 明: 斜面上の不規則波の碎波限界について, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 174~178, 1986.
- 4) 岩田好一朗・片岡純久・水谷法美: 2成分波の碎波限界に関する研究, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 46~49, 1985.
- 5) 水口 優・刈部好伸・堀田新太郎: 現地海浜における遡上波について, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 109~113, 1983.
- 6) 磯部雅彦・西村仁嗣・柄登志彦: 不規則波の碎波変形に関する実験的研究, 第27回海岸工学講演会論文集, 139~142, 1980.
- 7) 合田良実: 碎波指標の整理について, 土木学会論文報告集, 180号, 39~49, 1970.
- 8) 合田良実: 不規則波の碎波指標について, 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 571~577, 1972.
- 9) Izumiya, T. and M. Isobe: Breaking criterion on non-uniformly sloping beach, Proc. 20th ICCE, pp. 318~327, 1986.