

# 現地波浪の碎波限界

堀田新太郎\*・磯部雅彦\*\*・泉宮尊司\*\*\*・遠沢真人\*\*\*\*

## 1. はじめに

現地波浪の碎波限界を明らかにすることは、海岸工学における重要な研究課題である。しかし、碎波現象の複雑さや現地観測の困難さなどのため、十分に明らかにされているとは言えない。それ故、規則波に対する理論的、実験的な研究に基づく碎波限界、あるいは不規則波を用いた水槽実験の結果に基づいてそれを若干修正したものを使用しているのが現状である。そこで、本研究においては、碎波帯付近における一連の波浪の現地観測を行ない、碎波限界を明らかにすることを目的とする。

規則波の碎波限界に関しては、合田<sup>1)</sup>が既述の理論的、実験的研究成果をまとめ、碎波指標の算定図表としてとりまとめている。その後もいくつかの碎波指標が提案され、用いられてきた<sup>2),3)</sup>。しかし、規則波に対してさえも実験値が相当ばらつくことを考えれば、最近用いられている碎波指標の間に大きな差はないと言ってよい。

不規則波に対しては、その碎波変形を論ずる際に、規則波の碎波条件が用いられてきた<sup>4)~7)</sup>。しかし、波別解析法によって定義された一波ごとの波の碎波波高は、対応する規則波のそれよりも小さくなることが指摘され<sup>8),9)</sup>、実際に不規則波を用いた室内実験により確認された<sup>9),10)</sup>。この原因の1つに、連続する波の影響が挙げられている<sup>11)</sup>。合田<sup>12)</sup>は、規則波と不規則波の碎波条件の違いを踏まえ、不規則波の碎波に確率的な考え方を導入して、碎波条件に幅を持たせている。これを用いて計算された碎波帯の波高分布は、実測結果とよい一致を示す。しかし、一波ごとの碎波波高が直接的に比較されたわけではない。また、碎波帯の波高分布は、zero-up-cross 法か zero-down-cross 法のいずれを用いるかによって、大きく異なることにも注意を要する<sup>11),13)</sup>。

以上のような研究の現況から、特に碎波帯における最大波高の評価などのためには、現地における個々の波の碎波条件を調べる必要がある。このような試みは、Weisshar・Byrne<sup>14)</sup>が波高水深比を調べたのに見られるのみ

である。

著者らは、数年来、碎波帯近傍における波について一連の現地観測を実施してきた。その観測のなかで、現地波浪の観測法として、同期した何台かの 16 mm メモーションカメラを使用する方法、いわゆる 16 mm カメラシステムを開発・改良し、使用してきた。このシステムの長所は、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、本研究においては、一波ごとの波の碎波、非碎波の判断などを行なって、碎波条件について整理した結果について報告する。

## 2. 現地観測

### (1) 観測場所と観測日

現地観測は、茨城県那珂湊市阿字ヶ浦海岸で実施した。この海岸の平均勾配は 1/50~1/60 程度で、緩勾配海岸である。図-1 には、観測を行なった測線上の海底縦断面地形を示す。海岸の砂の中央粒径は 0.25~0.3 mm 程度で、比較的粒度が揃っている。

この海岸には建設省土木研究所の漂砂観測用棧橋があり、観測に有効に利用できるもので、現地観測地点として選定された。

現地観測は 1980 年 9 月 2 日、1981 年 9 月 8 日、9 日、1982 年 9 月 11 日の 4 回にわたって実施した。以後、これらの観測を EX 800902, EX 810908, EX 810909, EX 820911 と呼ぶことにする。

### (2) 観測方法

8 m のポールを立てた 6 台のソリを一直線に連結し、引き船で海中に引き出しソリを所定の位置に据えた<sup>15)</sup>。いずれの観測においても、ソリは棧橋より南に約 50 m 離れ、棧橋にほぼ平行、汀線にほぼ直角な測線上にあった。ポールを 16 mm メモーションカメラで撮影することにより、水面変動記録を得た。ソリに取り付けられたボールの位置は図-1 に示されている。この方法により、有義碎波波高 2 m の程度以下ならば、観測可能である。なお、EX 820911 では、6 台のソリを測点 1 から 6 までの位置に引き出して約 25 分の観測をした後、順次ソリを岸側に引き戻しながら合計 4 回の観

\* 正会員 工修 東京都立大学助手 工学部土木工学科

\*\* 正会員 工博 横浜国立大学助教授 工学部土木工学科

\*\*\* 正会員 工修 横浜国立大学助手 工学部土木工学科

\*\*\*\* 五洋建設(株)

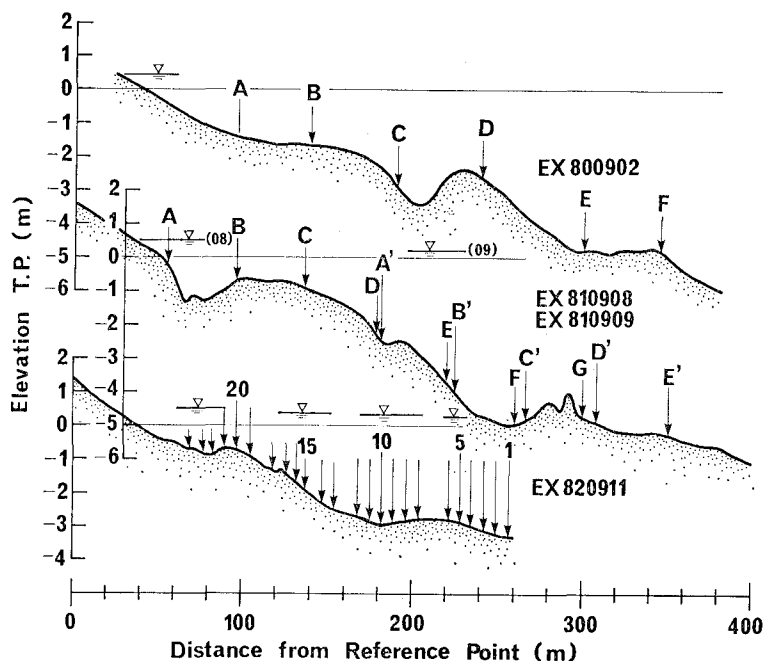


図-1 ビーチプロファイルと観測位置

測をした。このため、記録の同時性はないものの、他に比べて測点間隔を短くすることができた。

撮影時間間隔は 0.2 s であり、有効観測時間は、観測番号順に、約 125 分, 63 分, 150 分, 25 分である。

### 3. 結果および考察

#### (1) データ処理の方法

得られた 16 mm フィルムの読み取りは、フィルムアナライザーとグラフペンデジタイザーを用いて行なった。

波別解析法による波浪解析に際しては、砕波前面の重要性から zero-down-cross 法を用いるものとした。この時、読み取り誤差を勘案して、波高 6 cm 以下の波は、それに先立つ波の一部と見なし、独立した波として取り扱わなかった。

砕波・非砕波などの判別は、別途フィルムを見なおすことにより行なった。データ処理の結果からのフィードバックにより、最終的に判別した事項は、1) 砕波か非砕波か、さらに測点付近で砕波を開始する波か既に砕波を完了した波か、2) 砕波形式、3) 波峰線方向に連続した完全な砕波（完全砕波）かポール付近を通過する部分だけが砕ける 3 次元的砕波（部分砕波）か、の 3 項目である。ここに、部分砕波の場合、波頂部だけが砕け、white cap のように見える。

#### (2) 砕波変形の状況

表-1 には、各測点における水深、有義波高および有義波周期を示す。EX 800902, EX 810908, EX 810909

について、さらに詳しい波の統計諸量は他の文献<sup>16)</sup>に載せられている。

EX 800902 は、うねり性の強い波浪条件で、観測 D 付近で典型的な巻き砕波をしていた。EX 810908 および EX 810909 では、若干風波も含まれるもののうねり性の波で、平均的砕波点が測点 D(A') となる巻き砕波をしていた。EX 820911 では、測点 1~5 でわずかに砕波した後に再成し、測点 13 以後で完全に砕波していた。なお、測点 21 以後のトラフ部でも砕波する波があった。

#### (3) 個々の波の砕波条件

zero-down-cross 法によって定められた個々の波が測点付近で砕波する時の条件を図-2 (a)~(g) に示す。横軸と縦軸は合田<sup>1)</sup>と同様、相対水深  $h_b/L_0$  および波高

水深比  $H_b/h_b$  がとられている。記号の ■ と □ は巻き砕波を表わし、● と ○ は崩れ砕波を表わすが、フィルム解析の結果あまりはっきりしないものも多い。黒く塗

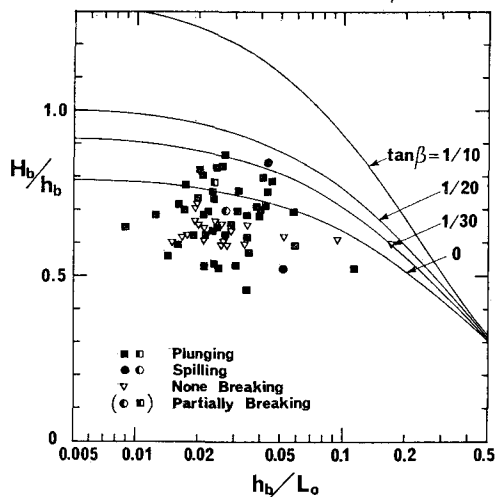
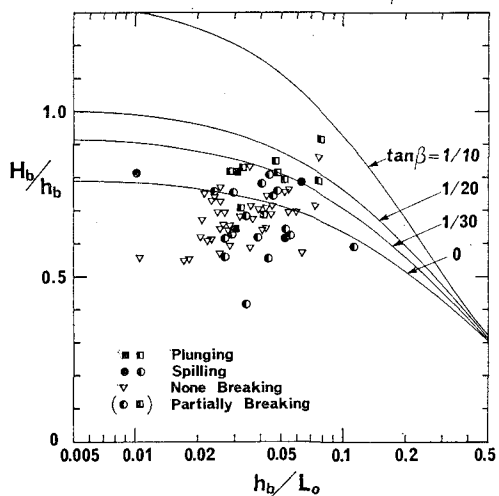
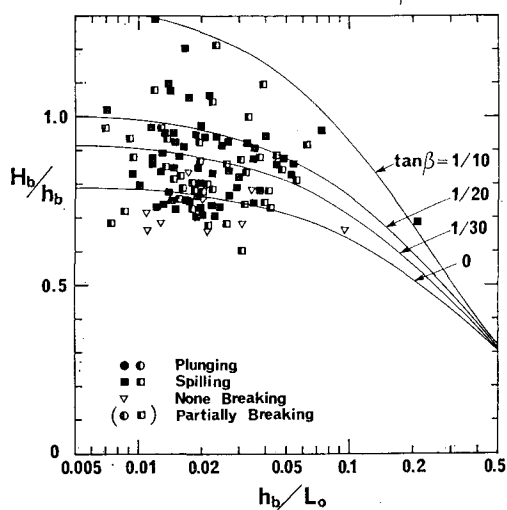
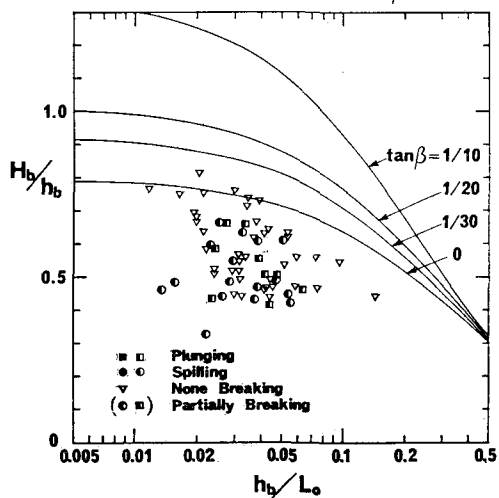
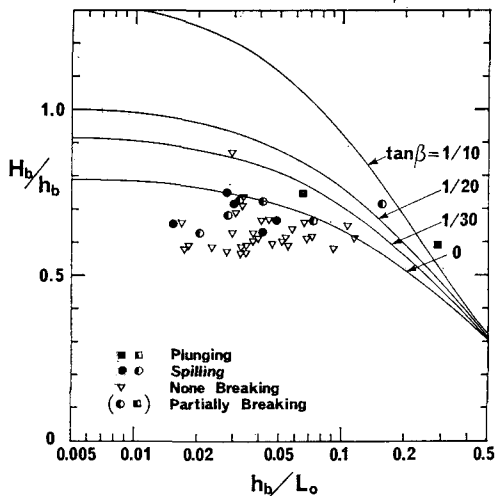
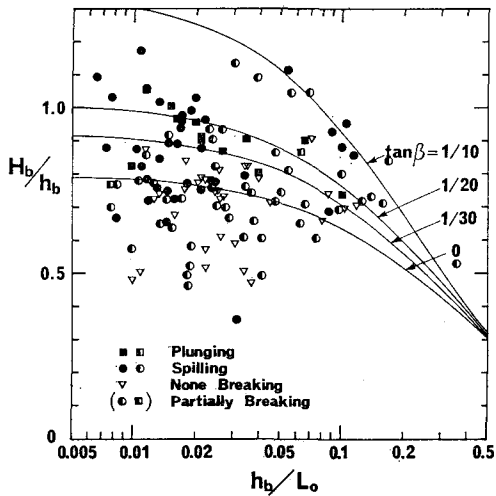
表-1 観測時の有義波高と有義波周期

| EX 800902      |      |      |      |      |      |      |
|----------------|------|------|------|------|------|------|
| St             | A    | B    | C    | D    | E    | F    |
| $h$ (m)        | 1.81 | 1.84 | 3.22 | 2.79 | 4.93 | 5.14 |
| $H_{1/3}$ (cm) | 103  | 119  | 112  | 130  | 110  | 115  |
| $T_{1/3}$ (s)  | 6.9  | 7.2  | 6.8  | 8.3  | 8.7  | 9.0  |

| EX 810908      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|
| St             | A    | B    | C    | D    | E    | F    | G    |
| $h$ (m)        | 0.95 | 1.31 | 1.19 | 1.95 | 3.28 | 4.22 | 4.34 |
| $H_{1/3}$ (cm) | 68   | 79   | 99   | 162  | 150  | 138  | 138  |
| $T_{1/3}$ (s)  | 6.3  | 8.3  | 8.9  | 8.5  | 8.7  | 9.3  | 9.0  |

| EX 810909      |      |      |      |      |      |
|----------------|------|------|------|------|------|
| St             | A'   | B'   | C'   | D'   | E'   |
| $h$ (m)        | 2.28 | 3.52 | 4.73 | 5.08 | 5.45 |
| $H_{1/3}$ (cm) | 181  | 173  | 162  | 167  | 161  |
| $T_{1/3}$ (s)  | 8.2  | 8.2  | 8.6  | 8.9  | 9.3  |

| EX 820911      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| St             | 24   | 20   | 18   | 14   | 12   | 7    | 6    | 1    |
| $h$ (m)        | 0.94 | 1.28 | 1.63 | 2.66 | 3.03 | 3.21 | 3.10 | 3.61 |
| $H_{1/3}$ (cm) | 68   | 105  | 144  | 140  | 122  | 131  | 135  | 122  |
| $T_{1/3}$ (s)  | 9.9  | 8.4  | 7.4  | 6.9  | 6.5  | 6.9  | 7.7  | 4.4  |

(a) EX800902 ST D ( $\tan\beta=1/25$ )(b) EX810908 ST E  
EX810909 ST B' ( $\tan\beta=1/30$ )(c) EX810908 ST D  
EX810909 ST A' ( $\tan\beta=1/60$ )(d) EX820911 ST 1-6 ( $\tan\beta=1/60$ )(e) EX820911 ST 13-14 ( $\tan\beta=1/45$ )(f) EX820911 ST 15-19 ( $\tan\beta=1/25$ )

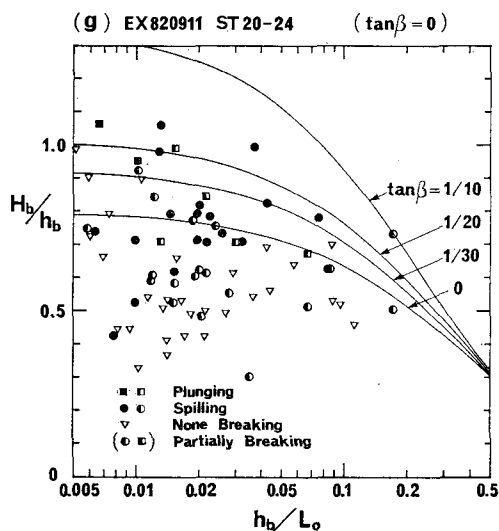


図-2 個々の波の砕波条件

りつづいた方が二次元的な完全砕波で、白抜きの方が三次元的な部分砕波である。比較のため、非砕波のうち波高の大きいものを  $\nabla$  で示してある。図中の実線は、規則波の砕波指標の近似式<sup>12)</sup>を用いた計算値であり、

$$\frac{H_b}{L_0} = A \left[ 1 - \exp \left\{ -1.5 \frac{\pi h_b}{L_0} (1 + 15 \tan^{4/3} \beta) \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表わされる。ここに  $\tan \beta$  は海底勾配、 $A=0.17$  である。右上の ( ) 内に示した  $\tan \beta$  の値は、測点よりも沖側に重点を置いて求めた局所的な海底勾配を示す。

(a) は、典型的な巻き砕波により入射波が砕波し始める地点の解析結果である。非砕波の記号  $\nabla$  は、やや波高の小さな部分にしか現われていないが、実際には高波高でも非砕波と判断してよいような波もあった。(b) および (d) は最も沖側の測点で、部分砕波が多い。この場合、砕波波高は非砕波と比較しても小さくなる。(e) は再び砕波を始める点である。(c)、(f) および (g) は砕波帯内で、特に砕波波高がばらついている。

砕波条件を定量的に整理するためには、海底勾配の影響をとり入れる必要がある。しかし、図-1 に示するような縦断地形における海底勾配のとり方は明らかでない。ある程度ははっきりした値をとり得るのは、測定付近で勾配が一定に近い (a)、(b)、(d)~(f) である。

これらを考慮すると、図から以下のことがわかる。

- 1) 非砕波の波高の上限は、 $\tan \beta=0$  の場合の規則波の砕波限界に近いものが多いが、海底勾配が大きいとそれより大きな波高も見られる (a, b, f)。
- 2) 部分砕波は完全砕波と比較して砕波波高が小さい。特に、(d) では規則波ではあり得ないような小

さな砕波波高となっている。これは砕波が波頂部に限られていることと関係していると考えられる。また、このような砕波状態が見られるかどうかは、風波かうねりか、すなわち波浪のスペクトル形状に関係するのであろう。

- 3) 完全砕波の砕波条件でもばらつきは大きい。また、平均的砕波条件と比較した場合、海底勾配との関係は明らかでないように見える (a, f)。
- 4) (a)、(b)、(d) のように砕波が始まる地点での砕波波高よりも、(c)、(f)、(g) のように砕波帯内での砕波波高の方が相対値で見ると大きい。

以上に基き、まず完全砕波の砕波条件の整理を試みた。十分な数の完全砕波が見られるのは、(a)、(c)、(f)、(g) であるので、これを対象とした。合田<sup>12)</sup>は不規則波の砕波条件として、式 (1) における  $A$  の値の範囲を  $0.12 < A < 0.18$  とした。従って規則波に対する値  $A=0.17$  は、この範囲の上から  $1/6$  のところにある。 $A$  の範囲における値の割合は、必ずしも砕波の波の数の割合と比例関係にあるわけではない。しかし、ここでは便宜的な考え方として、個々の波の砕波条件から  $A=0.17$  として式 (1) における  $\tan \beta$  を計算した場合に、大きなものから数えて  $1/6$  の値  $(\tan \beta)_{1/6}$  を相当

表-2 相当海底勾配

| 現測番号      | 現測地点     | $\tan \beta$ | $(\tan \beta)_{1/6}$ |
|-----------|----------|--------------|----------------------|
| EX 800902 | ST D     | 0.04         | 0.02                 |
| EX 810908 | ST D     | 0.02         | 0.05                 |
| EX 810909 | ST A'    |              |                      |
| EX 820911 | ST 15-19 | 0.04         | 0.06                 |
| EX 820911 | ST 20-24 | 0            | 0.05                 |

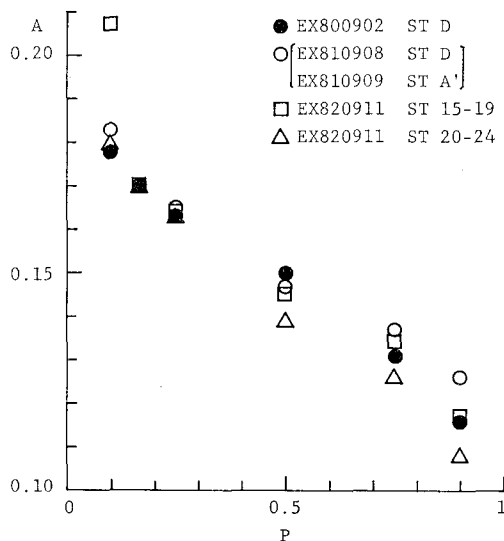


図-3 A の値と累積砕波確率 P との関係

海底勾配とし、表-2 に示した。同時に示した局所的な海底勾配  $\tan \beta$  と比較すると、両者の間に関連はないように見える。ただし、EX 800902 の相当海底勾配が小さいのは、砕波の開始地点であるためであると解釈される。従って局所的な勾配や砕波帯における相対的位置をパラメーターとして、相当海底勾配が決定される可能性はあると思われるが、現在のところデータが少ないため、はっきりしない。なお、EX 820911 ST 15-19 を見ると、勾配が一樣に近ければその値をとってよいと思われる。次に、今決定された相当海底勾配の値を固定した場合に、砕波の数の割合が  $P$  となるような  $A$  の境界値を調べた結果が図-1 である。当然、砕波のうち  $1/6$  が  $A > 0.17$  となるというように読み取れる。この図より、 $0.1 < P < 0.9$ 、すなわち 80% の砕波について、 $0.1 \leq A \leq 0.18$  の間であることがわかる。この意味では、合田<sup>12)</sup> の不規則波の砕波モデルが妥当であると言える。

次に部分砕波については、それが起こる入射波の条件も含めた検討を要するが、現在までに得られているデータでは、はっきりしたことは言えない。しかし、砕波波高は相対的に小さく、より浅い場所で完全な砕波に至るような砕波であるから、完全砕波に比べて重要度は低い。

#### 4. 結 語

現地観測の結果に基いて、個々の波の砕波条件を調べた。その結果は図-2 に示されているが、地形が複雑であるため、統一的な解釈は難しい。しかし、砕波条件のばらつきについては、図-3 のようにある程度定量化することができた。また、代表的な砕波条件については、相当海底勾配によって表わすことにし、それが海底勾配と砕波帯における相対位置によって決定される可能性があることを指摘した。

今後、さらにデータが蓄積されるのを待って、未解決な点を明らかにする必要がある。特に急勾配海岸における砕波条件も調べていく必要がある。

なお、現地観測における棧橋の使用については、建設省土木研究所の橋本宏河川研究室長および宇多高明海岸研究室長の御好意によった。また現地観測は東京大学の堀川清司工学部長を代表者として行なわれたものであり、海岸環境工学研究センターの方々、中央大学、都立大学、横浜国立大学の学生諸君には多くの労力を提供していただいた。ここに記して謝意を表する。

#### 参 考 文 献

- 1) 合田良実：砕波指標の整理について，土木学会論文報告集，第180号，pp. 39~49, 1970.
- 2) 岩田好一朗：斜面上への不規則波のそ上，第18回水工研，pp. B-3-1~B-3-18, 1982.
- 3) 堀川清司編：海岸環境工学——海岸過程の理論・観測・予測法，東京大学出版会，印刷中.
- 4) Collins, J. I.: Probabilities of breaking wave characteristics, Proc. 12th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 399~414, 1970.
- 5) Battjes, J. A.: Set-up due to irregular waves, Proc. 13th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 1993~2004, 1972.
- 6) 郭 金棟・郭 秀吉：風波による砕波の波高減衰と波高の確率分布，第19回海講，pp. 137~142, 1972.
- 7) 水口 優・松田仲次：現地不規則波浪の浅海変形について，第27回海講，pp. 134~138, 1980.
- 8) 井島武士・松尾隆彦：砕波帯の波の研究(2)，第16回海講，pp. 41~45, 1969.
- 9) 岩垣雄一・木村 晃・岸田典史：斜面上における不規則波の砕波に関する研究，第24回海講，pp. 102~106, 1977.
- 10) 植木 享・岩田好一朗・石井敏之：不規則波の砕波変形に関する実験的研究，第27回海講，pp. 143~147, 1980.
- 11) 磯部雅彦・西村仁嗣・柄登志彦：不規則波の砕波変形に関する実験的研究，第27回海講，pp. 139~142, 1980.
- 12) 合田良実：不規則波の砕波指標について，第20回海講，pp. 571~577, 1973.
- 13) 堀田新太郎・水口 優・磯部雅彦：砕波帯内の波の平面分布について，第27回海講，pp. 129~133, 1980.
- 14) Weishar, L. L. and R. J. Byrne: Field study of breaking wave characteristics, Proc. 16th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 487~519, 1978.
- 15) 堀田新太郎：砕波帯近傍における波の波高，周期分布について，第28回海講，pp. 148~152, 1981.
- 16) Hotta, S., M. Mizuguchi and M. Isobe: A Field study of waves in the nearshore zone, Proc. 18th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 38~57, 1982.