

荒天時のバーム地形の侵食

—長周期波に注目した現地観測—

加藤 一正*・柳 嶋 慎一**・栗山 善昭***・磯上 知良**

1. はじめに

沖から来襲する風波は、砕波帯内では水深オーダーの波高以上にはならない。時化時に沖の波高が増大しても、砕波地点が沖に移動するだけで、水深の浅い汀線付近の波高は小さいままである。しかし、荒天時に海浜が侵食を受けるのは何故か？ この疑問を解くために、荒天時に波高が大きくなりしかも汀線で波高が最大となる長周期波の存在が注目されている (Bowen and Huntley, 1964; 加藤, 1987)。だが、長周期波との関連で前浜侵食を観測した事例は少なく、いまだこの説明は仮説の感がある。

本調査は、現地海岸で前浜のバーム地形が荒天時に侵食を受けるときの事例を長周期波との関連で収集することを第一目的に実施したものであり、二次的には荒天時の急激な前浜侵食予測モデル開発の発想を得ることを目的としている。

2. 現地観測

現地観測は、図-1 に示す茨城県鹿島灘に面する海岸にある波崎海洋研究施設 (以下、HORF) で実施した。高波浪の来襲は頻度が多くなく、またタイミングを見計らって観測することがなかなか難しいので、観測は常駐体制で毎日実施している定常観測項目の一部に組み入れた。

本研究に関連して実施した観測は、

- ① 日曜・祭日を除く 1 日 1 回の観測栈橋に沿う海浜断面測量、
- ② 汀線近くの平均海底レベル D.L.+30 cm (=M.W.L.-39 cm, 図-2) に設置した空中発射型超音波波高計 (U.S.W.) による水位変動測定、
- ③ 設置海底レベル D.L.-23.4 m における超音波式波高計による偶数正時はさむ 20 分間の沖波観測 (図-1) である。これ以外に、②と同じ地点の海底面上に電磁流速計を設置して水平 2 成分流速を測定することを試みた

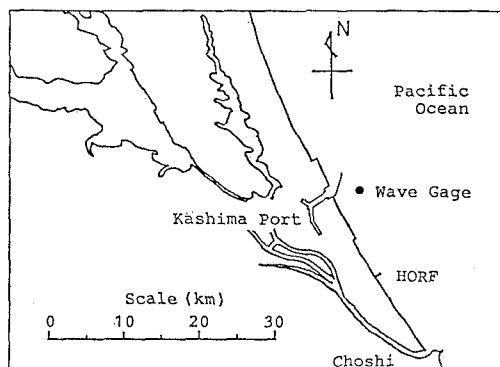


図-1 観測地点 (波崎海洋研究施設)

が、海底レベル変化のために流速計が砂中に埋もれたり、浮遊物がからんだりして長期間の安定したデータ収集は出来なかった。

汀線近くの水位変動測定は、毎正時はさむ約 20 分間に 0.3 s のサンプリング間隔で実施し (データ数 4096)、測定終了直後に波の統計計算、スペクトル解析等を行った。入射波の波高 H_s と長周期波の波高 H_L は、スペクトル解析の結果得られた周波数スペクトル $S(f)$ を用いて、それぞれ次式によって求めた。

$$H_s = a \cdot \left[\int_{f_c}^{\infty} S(f) df \right]^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

$$H_L = a \cdot \left[\int_0^{f_c} S(f) df \right]^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 f は周波数、 f_c は 0.033 Hz (=30 s) であり、

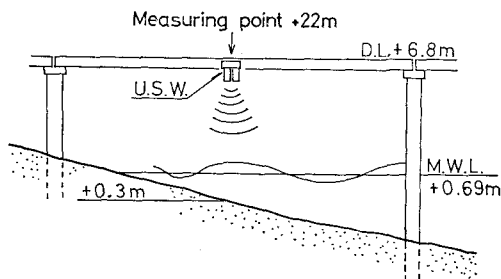


図-2 波高計による水位変動測定

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所水工部漂砂研究室長
 ** 運輸省港湾技術研究所水工部漂砂研究室
 *** 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部漂砂研究室

係数 a の値は 4.0 とした。なお、これらのデータ取り込み、解析はミニコンで自動処理するシステムにしてある。

ここでは 1987 年 9 月 1 日～1988 年 11 月 22 日の間に得られたデータのうち、沖波波浪観測と対応する偶数正時のものを解析対象とした。

3. バーム地形侵食の事例

断面測定の結果をもとに前浜部のバーム地形が侵食を受けた事例を調べた結果、汀線付近の水位変動測定が欠測になっていたときを除き、28 ケースが抽出できた。そのうち、バーム侵食に長周期波が関与していることを具体的に示すため、入射波の極大波高発生時刻と長周期波の波高が大きくなる時刻がずれている 2 例を以下に示す。

3.1 台風第 8713 号に伴うバーム侵食

図-3 は、1987 年 9 月に台風第 8713 号が来襲した前後の沖波有義波高・周期の経時変化を上段に、汀線付近の入射波の波高と長周期波の波高を下段に示した（9 月 15 日は欠測）ものである。沖波有義波高は 9 月 11 日より大きくなり始め、9 月 14 日には 3 m を越えるものの、その後 9 月 16 日までわずかに小さくなる。9 月 16 日正午ころより、沖波有義波高が急激に増大し 9 月 17 日 16 時に極大波高 5.98 m になり、その後は 9 月 21 日まで徐々に減衰する。有義波周期は、うねりが入射していた 9 月 14 日～15 日に 12～13 s であり 9 月 17 日以降は 10 s 前後である。

図-4 は、同期間の前浜断面である。9 月 12 日の断面では、H.W.L. より高いレベルのところにバームが形成されている。このバーム地形は 9 月 14 日の断面には認められず、9 月 12 日～14 日の間に侵食を受けたことになる（13 日が、日曜日であったため、断面測定を実施していない）。この時間帯を、図-3 の沖波有義波高の経時変化に重ねて白抜き矢印で示した。侵食は、沖波有義波高が極大になる 9 月 17 日以前のうねりが来襲している時に生じたことが分かる。

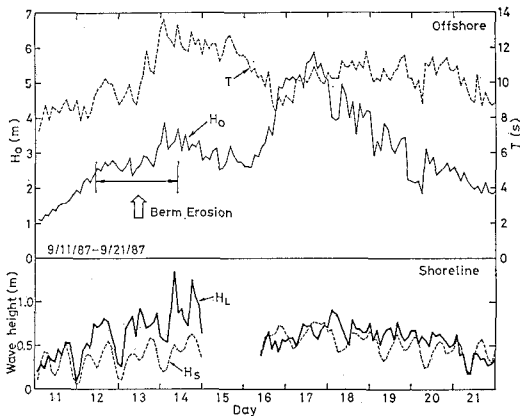


図-3 台風第 8713 号時の波浪状況

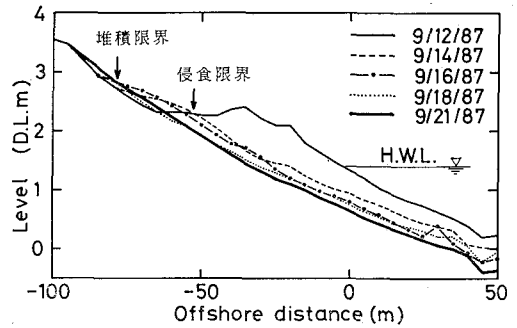


図-4 台風 8713 号時のバーム侵食

バーム侵食後の 9 月 14 日と 16 日の断面では、バームが形成されていたところよりさらに高いレベルに堆積が生じている。バーム地形が侵食を受けるときに、より高いレベルで堆積が生じるというパラドックスは、すでに Bascom (1954) も指摘している。

図-3 の下段に示した汀線付近の入射波の波高 H_s は、潮位変化に対応して変化しつつ、9 月 17 日まで徐々に増加し、その後減衰する。沖波波高の増大とともに汀線付近の水位上昇が生じた（柳嶋ら、1989）ことを考慮に入れると、 H_s の変化は測定点の水深の変化に比例して生じているようである。バーム侵食のあった 9 月 12 日～14 日の間の H_s は満潮時に約 50 cm であり、バーム侵食以前である 9 月 11 日の波高とほとんど同じである。

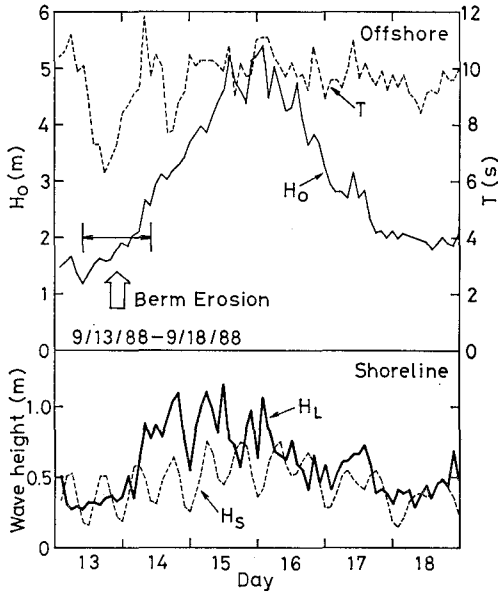
これに対して、汀線付近の長周期波の波高 H_L の変化は、9 月 12 日～14 日の満潮時に 1 m 近くになり、14 日の断面測定直前にはこの期間中の極大波高 1.3 m に達する。そして、沖波有義波高が極大になる 9 月 17 日は小さく 60～70 cm である。すなわち、バーム地形が侵食を受けた日と長周期波の波高が増大する日が一致している。

3.2 台風第 8818 号に伴うバーム侵食

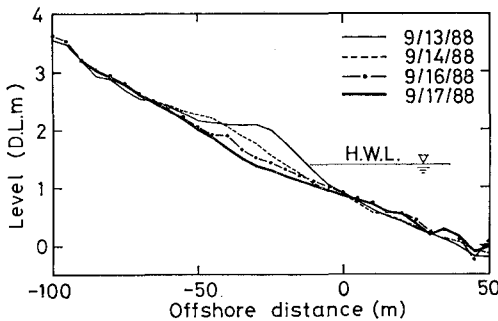
図-5 は、1988 年 9 月に台風第 8818 号が来襲した前後の沖波有義波高・周期と、汀線付近の入射波の波高、長周期波の波高である。沖波波高は 9 月 14 日より大きくなり始め、9 月 16 日 2 時に極大波高 5.41 m に達する。周期は、9 月 13 日の 6 s から急激に長くなり 14 日 8 時に 11.9 s になる。その後周期は一時的に短くなるものの、15 日以降はほぼ 10 s 前後で変化する。

図-6 は、同期間の前浜断面である。9 月 13 日に存在したバーム地形は、9 月 14 日になると侵食を受けてその地形の特徴は残っていない。この時間帯を、図-5 の沖波有義波高の経時変化に重ねて白抜き矢印で示した。バームの侵食は、沖波有義波高の極大になる以前のまだ沖波有義波高が 2 m 程度のときに生じた。この例でも、バーム地形侵食後の 14 日に高いレベルで堆積が生じている。

汀線付近の入射波の波高 H_s (図-5) は、バーム侵食



図—5 台風第8818号時の波浪状況



図—6 台風第8818号時のバーム侵食

のあった9月13日～14日の間に、せいぜい50 cm程度(満潮時)である。一方、汀線付近の長周期波の波高 H_L は、バーム地形が侵食を受けた9月14日に急激に増大する。波高約1 mの状態が9月16日2時まで続いた後に徐々に減衰し、9月18日には30 cm程度になる。

以上、2つの事例の特徴は次のとおりである。

- ①バーム侵食が生じたのは、沖波極大有義波の発生時刻ではなく、それより2日～4日前である。
- ②バーム侵食直後には、それより高いレベルでわずかながら堆積が生じている。
- ③バーム侵食時の汀線付近の入射波の波高は、50 cm程度である。
- ④汀線付近の長周期波の波高は、バーム侵食時に急激に増大して、1 mあるいはそれ以上になる。

なお、他のバーム侵食例では、沖波有義波高が極大になるときと汀線付近の長周期波の波高が極大になるとき

およびバーム侵食が生じる時がほぼ一致していたので、①の特徴は認められなかった。また、②の堆積は他の26ケース中21ケースに認められた。

4. 汀線付近の長周期波の波高

バーム地形の侵食に直接影響を及ぼすのは、沖合いの波浪ではなく直前面の波であると考えられるので、汀線付近の波について調べる。図—3, 5に示したように、汀線付近で測定された波(特に H_S)は、測定点の水深の影響を強く受けるので、測定時の実水深が0.95～1.05 mになっていたものを抽出した。このデータには、バームの侵食がなかった高波浪時も含めた(例え高波浪が来襲しても、直前にバームが形成されていないとバームの侵食は生じない)。

図—7は、抽出したデータについて、汀線付近の H_S と長周期波の波高 H_L を沖波有義波高に対してプロットしたものである。沖波有義波高が大きくなるにつれて、 H_S は40 cmからわずかに増加し $H_0 \geq 4.0$ mでは60 cm程度で頭打ちになる。このように、入射波高は汀線付近で水深に規定される波高以上にならない。一方、長周期波の波高 H_L は $H_0 \leq 1.0$ mで10～20 cm程度であるが、沖波有義波高が大きくなるにつれて増大し60 cm以上になる。

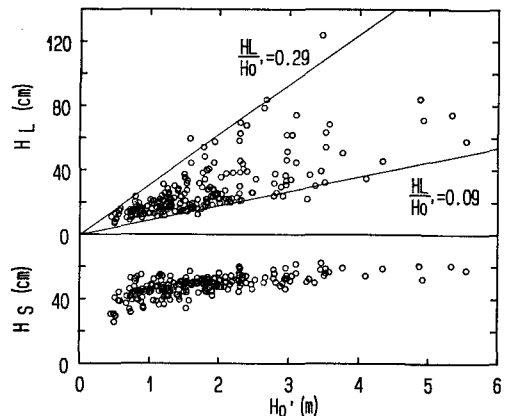
合田(1975)は、現地観測の結果から次式のような関係式を提案している。

$$\frac{\zeta_{rms}}{(\eta_{rms})_0} = \frac{A}{\left[\frac{H_0'}{L_0} \cdot \left(1 + \frac{h}{H_0'} \right) \right]^{1/2}} \quad \dots\dots (3)$$

ここに、 ζ_{rms} と $(\eta_{rms})_0$ はそれぞれサーフビートの波形と沖波波形の2乗平均の平方根、 h は水深、 A は係数(=0.04)、 H_0' は換算沖波有義波高である。

式(3)の左辺を

$$\frac{\zeta_{rms}}{(\eta_{rms})_0} = \frac{H_L}{H_0'} \quad \dots\dots (4)$$



図—7 H_S , H_L と沖波有義波高の関係

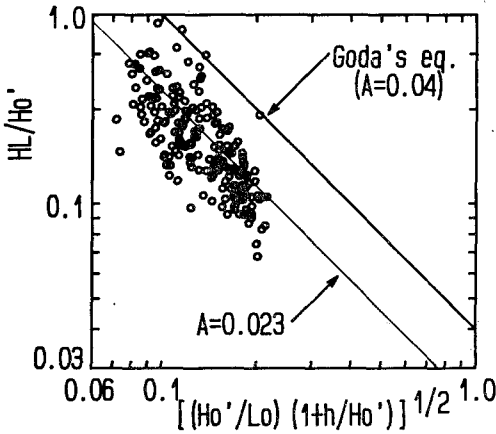


図-8 長周期波の波高と合田(1975)の式の比較

激な増大は、合田の式で係数を定数にしたのでは説明できないことになる。9月14日～15日に波高が増大することの可能性として、Symonds and Bowen(1984)が理論的に示した、長周期波の海底地形との共振が考えられる。彼らは、碎波点が波の連なりの繰返し周期で岸沖方向に変動することを考慮した碎波帯内の長周期波の発生理論をもとに、沿岸砂州の位置に反射定常波の腹がくると共振が生じ波高が大きくなることを示した。この可能性を確認するためには、汀線付近で観測された長周期波について周期を調べ、複雑な断面上の波形を計算することが必要になる。しかし、時化時に汀線付近の周期が約80～120s になっていたことを浜への波の遡上で確認している(目視)ものの、正確な周期は解析していないので、現時点では検討できない。

5. バーム地形の侵食限界レベル

第3章において、バーム地形の侵食が汀線付近の長周期波の波高の増大と関連することを述べた。そこで、バーム地形の侵食限界レベル(図-3 参照)を、長周期波との関連で調べる。侵食限界レベルは、浜への波の遡上と関係していると推察される。すなわち、概念的には、

$$\text{侵食限界レベル} = \text{水位} + f(\text{長周期波の遡上}) \cdots (5)$$

となる。以下に、式(5)の右边を現地データで評価し、28事例の侵食限界レベルと比較する。なお、式(5)の計算に用いたデータは、バーム侵食が生じた以前一日間の2時間毎の観測値のうち、水位と長周期波の波高の和が最大になる時のものである。

式(5)の右边各項の計算方法は以下のとおりである。

5.1 水 位

汀線付近(汀線より少し沖側)で20分間測定した水位変動のデータの平均値を計算して、水位を求めた。wave set-up 量は岸方向に増加するので、汀線位置の水位はさらに高くなる。柳嶋ら(1989)によると、対象海岸の汀線付近の wave set-up 量は水深が浅くなると水深変化量の9%ほど増加するので、汀線の水位 $(\bar{\eta})_0$ を次式で計算する。

$$(\bar{\eta})_0 = \bar{\eta} + 0.09 \times h \cdots (6)$$

ここで、 $\bar{\eta}$ と h はそれぞれ水位変動測定点の水位(実測値)と実水深である。

5.2 長周期波の遡上高さ

長周期波の遡上高さも、データを用いて推定することにする。まず、汀線付近で測定した長周期波の波高をもとに、合田のパラメータの水深補正を参考にして、汀線での長周期波の波高を次式で計算する。

$$(H_L)_0 = (H_L)_h \cdot \sqrt{(1+h/H_0)} \cdots (7)$$

ここに、 $(H_L)_0$ は汀線での長周期波の波高、 $(H_L)_h$ は測

でおきかえ、右边分母のパラメータを用いて図-7 に示した長周期波の波高データを再整理した結果が、図-8 である。図-8 によると、合田の式に一致するデータもあるが、大多数のデータはそれより下側にプロットされている。沖波波高の大きいときの観測値が、このように合田の推定値より小さくなることは、高山ら(1988)が報告している。しかし、合田の式を図中細線で示したように下方に平行移動すれば、おおむねデータに一致する結果が得られる。この細線は式(3)の係数を $A=0.023$ としたことに相当する。

図-9 は、台風第8818号・に汀線付近で観測された長周期波の波高と、沖波諸元から推定した長周期波の波高を比較したものである。推定では、式(3)と(4)に換算沖波波高、沖波波長、測定点の実水深を代入して計算した。係数 $A=0.023$ としたときの推定値は、9月13日および16日以降の実測波高とよく一致する。しかし、14日～15日の推定値は実測波高の約半分ほどである。9月14日～15日に限って表示した係数 $A=0.04$ の場合の推定波高は、実測波高とおおむね一致する。ただし、それ以外の期間については2倍程度過大評価になる。

結局、バーム侵食が生じたときの長周期波の波高の急

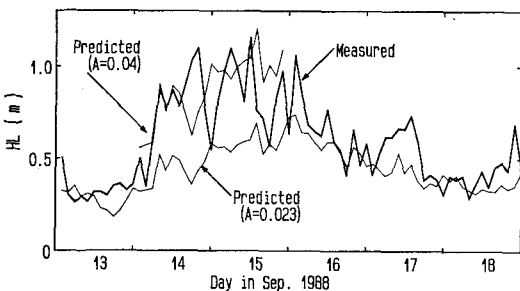


図-9 長周期波の実測波高と推定波高の比較

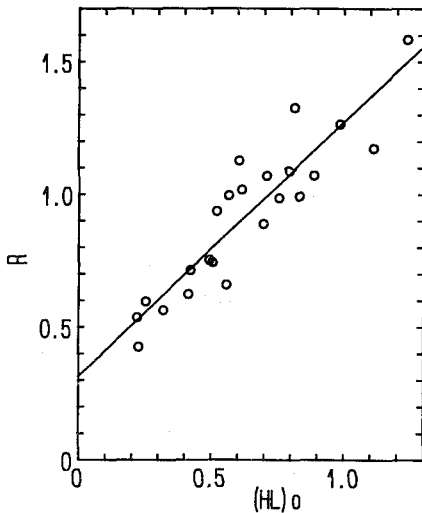


図-10 汀線での長周期波の波高と遡上高さの比較

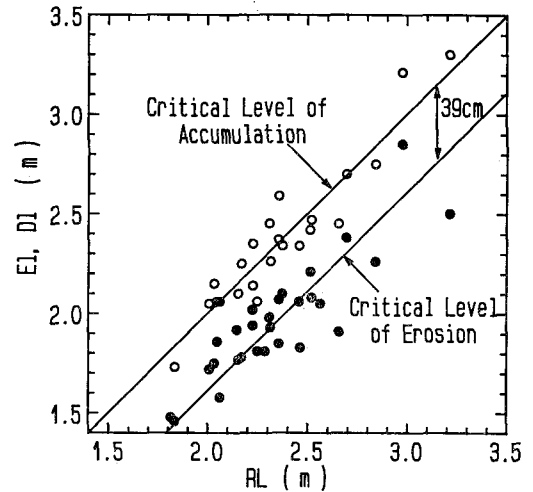


図-11 長周期波の遡上レベルと堆積・侵食限界レベル

定点での長周期波の波高である。そして、堆積限界レベル D_L (図-3 参照) を長周期波が遡上したレベルに等しいとみなすと、遡上高さ R は次式で表される。

$$R = D_L - (\bar{\eta})_0 \quad (8)$$

図-10 は、堆積の生じたケースについて、 R と $(H_L)_0$ の関係をプロットしたものである。図中の直線は、データを最小自乗法で直線近似した次式である。

$$R = 0.96 \cdot (H_L)_0 + 0.31 \text{ (m)} \quad (9)$$

この結果は、遡上高さが長周期波の汀線における波高に定数を加えたものとなっている。定数項は、入射波 (H_S) の遡上によるものではないかと考えられる。結局、最大遡上レベル R_L は式 (6), (7), (9) より、次式となる。

$$R_L = (\bar{\eta})_0 + 0.96 \cdot (H_L)_0 + 0.31 \text{ (m)} \quad (10)$$

図-11 は、実測データをもとに式 (10) で計算した R_L と堆積限界レベル (○印)、バームの侵食限界レベル (●印) を比較したものである。実測された堆積限界レベルは R_L とよく一致し、侵食限界レベルはややデータのバラつきがあるものの $R_L - 0.39 \text{ m}$ の直線と一致する。

6. おわりに

HORF において、前浜のバーム地形が侵食を受けた事例を28ケース抽出し、長周期波の波高との関係を検討した。主要な結論は以下のとおりである。

- ① バーム地形が侵食を受けたときには、汀線付近の長周期波の波高が大きい。
- ② 沖波有義波高が極大になる以前に長周期波の波高が大きくなるときは、後者に対応してバーム侵食が生じる。
- ③ バーム侵食時にそれより高レベルで堆積が生じる。
- ④ 汀線位置の長周期波の波高と浜への遡上高さには、式

(10) の関係がある。

- ⑤ バームの侵食限界レベルの概略は、長周期波の最大遡上レベルより約 39 cm 低いレベルである。

なお、長周期波は浅海域で岸沖方向に standing mode になっている可能性が高く、したがって波形データには測定点で節になるような特定周波数の長周期波が現れない。しかし、汀線位置では全ての周波数の長周期波が腹となるので汀線位置の長周期波高を精度よく評価するためには、水面変動と同じ測点で流速を測定する必要がある(今回試みたが十分なデータが取れなかった)。また今回解析しなかった長周期波の周期を測定することも必要である。これらについては今後検討する予定である。

最後に、沖波データの使用では鹿島港工事事務所と当所海象調査研究室の協力を得たことを記し謝意を表す。

参考文献

- 加藤一正 (1987): 漂砂、沿岸地形と長周期波の関連, 昭和62年度港研講演会講演集, pp. 1~70.
- 合田良実 (1975): 浅海域における波浪の碎波変形, 港研報告, Vol. 14, No. 3, pp. 59~106.
- 高山知司・平石哲也・高山 優 (1988): 多方向不規則波の斜面上における碎波特性, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 182~186.
- 柳嶋慎一・加藤一正・磯上知良・村上裕幸 (1989): 波による汀線付近の水位上昇量に関する現地調査—水位上昇を生じる二次的要因—, 第36回海岸工学論文集.
- Bascom, W. H. (1954): Characteristics of natural beach, Proc. 4th ICCE, pp. 163~180.
- Bowen, A. J. and D. A. Huntley (1984): Waves, long waves and nearshore morphology, Marine Geology, 60, pp. 1~3.
- Symonds, G. and A. J. Bowen (1984): Interaction of nearshore bars with incoming wave groups, J. G. R., Vol. 89, No. 62, pp. 1953~1959.