

# 砕波帯内長周期波の特性と数値波動モデルの適用性の検討

岡 安 章 夫\*・上野慎一郎\*\*・鈴木 康 之\*\*\*

## 1. はじめに

砕波帯における長周期波の発生・伝播の評価は、漂砂等を予測する上で極めて重要である。砕波帯内で観測される長周期波には、砕波帯外から進行してくるものと波群による砕波点の変動により砕波点付近で形成されるもの、およびそれらが汀線で反射されたものに大別できる。長瀬・水口 (1994, 1995) は波動水槽内ではほぼ定常状態に達した規則波浪場に単一の波群を入射させることにより、砕波点付近で波群による砕波点の移動によると考えられる長周期波の発生を確認した。さらに、単一波群による setup 量の変化が準定常的であると考えて、発生する長周期波の定量的な評価を試みている。しかしながら単一波群によるものでは、例えば流速の長周期成分による浮遊漂砂等を考える際に重要となる波群と長周期波との位相関係を評価することは難しい。著者ら (岡安・松本, 1995) は一般の不規則波浪場で、不規則波による砕波点の変動により発生すると考えられる長周期波について、その大きさと入射する長周期波との位相関係について検討を行った。本研究では、昨年の実験に引き続き斜面勾配を変えて長周期波の測定を行い、長周期波および砕波点の移動より発生したと考えられる長周期波の位相関係をまとめた。

また、不規則波浪場中の長周期の水位変動に関しては、その発生をおおむね波動による運動量フラックスの長周期的な変化、つまり radiation stress の時間変化によるものと考えることができる (例えば、Longuet-Higgins・Stewart, 1962)。砕波点の変動による長周期波の発生についても、Mizuguchi (1995) が論理的にモデル化したように、砕波による運動量フラックスの時空間変化を的確に表現することにより予測可能であると考えられる。そこで本研究ではさらに、波による運動量フラックスの変化による水位変動の応答を直接解くことができる非線形の波動方程式を用いた数値波浪モデルを用いて、砕波帯内における長周期の水位・流速変動のシミュレーション

を試みた。波動方程式としては Boussinesq タイプのものを用い、砕波減衰項は surface roller モデルを用いた Deigaard (1989) と同様な手法を用いた。このモデルを用いて計算した砕波帯内の長周期波の発生および伝播について実測値と比較し、数値モデルの適用性について検討を行った。

## 2. 実験方法

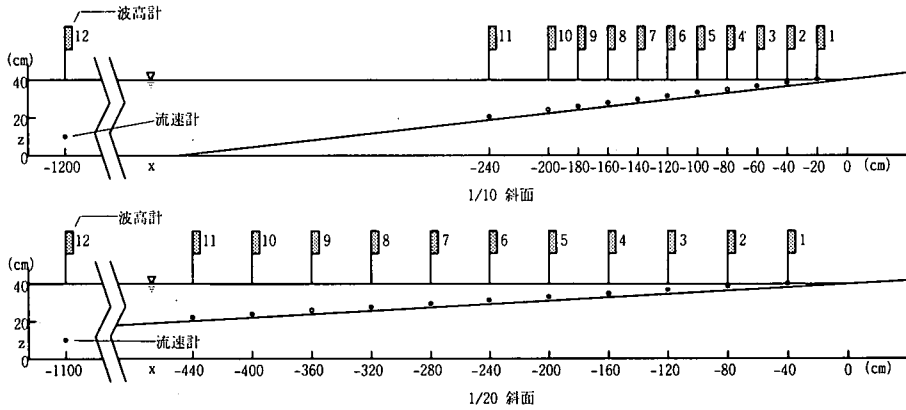
### 2.1 実験装置および実験条件

二次元造波水路に Bretschneider・光易型のスペクトルを有する不規則波を発生させ、水位変動及び底面付近での岸沖流速変動の測定を行った。実験には、長さ 17 m、幅 0.5 m、深さ 0.55 m の二次元波動水槽を用いた。この水槽の一端には反射波を吸収制御できる不規則波造波装置が備えられており、他端に 1/10 および 1/20 一様勾配斜面の二通りの地形を作成し設置した。1/20 一様勾配斜面は法先 1 m が 1/10 勾配となっている。

それぞれの地形において不規則波を入射させ、水位変動と流速変動を記録した。水位変動の記録は容量式波高計により、造波板より 3 m の沖側一様水深部と、砕波点沖側から静水汀線付近までの 11 の測線において行った。流速変動は、これらの測定点の直下において岸沖方向の流速を 1 成分の光ファイバー・レーザ流速計で測定した。測定点の高さは沖の測定点のみ底面から 10 cm で、その他は全て底面から 1 cm の位置で測定した。水槽及び測定点配置の概要をそれぞれの地形について図-1 に示す。図中  $x$  は静水汀線から沖側にとった水平座標で、 $z$  は沖側一様水深部の底面を基準にした鉛直座標である。

実験はそれぞれの地形に対し 3 ケースずつ行った。沖側一様水深部での水深  $h_0$  は全てのケースで 40 cm とした。1/10 地形の場合の砕波点は測線 4～7 の間で、1/20 地形の場合は測線 3～5 の間であった。表-1 に実験条件および入射波の諸元を示す。以後の解析では岡安・松本 (1995) の実験結果も含めて検討を行うので、本研究での実験ケースは case 3-1 から case 4-3 とし、岡安・松本の不規則波の実験も合わせて表-1 に示す。表中  $h_0$  は岡安・松本の実験でのステップ上の水深、 $H_{1/3}$  はゼロダウ

\* 正 会 員 工 博 横浜国立大学助教授 大学院工学研究科人工環境システム学専攻  
 \*\* 五洋建設 (株) 東北支店  
 \*\*\* 学生会員 横浜国立大学大学院 工学研究科



図一 実験装置の概略

表一 実験条件

| case | beach type | $h_i$ (cm) | $h_s$ (cm) | $H_{1/3}$ (cm) | $T_{1/3}$ (s) |
|------|------------|------------|------------|----------------|---------------|
| 1-1  | step       | 31.0       | 6.0        | 5.81           | 1.03          |
| 1-2  |            |            |            | 4.87           | 0.88          |
| 1-5  |            | 29.0       | 4.0        | 5.69           | 1.03          |
| 1-6  |            |            |            | 4.69           | 0.89          |
| 2-1  | 1/30       | 31.0       | —          | 3.98           | 1.01          |
| 2-2  |            |            |            | 3.32           | 0.86          |
| 2-5  |            | 29.0       | —          | 3.91           | 1.01          |
| 2-6  |            |            |            | 3.25           | 0.86          |
| 3-1  | 1/10       | 40.0       | —          | 6.19           | 0.89          |
| 3-2  |            |            |            | 7.92           | 1.03          |
| 3-3  |            |            |            | 9.28           | 1.03          |
| 4-1  | 1/20       | 40.0       | —          | 6.20           | 0.90          |
| 4-2  |            |            |            | 7.88           | 1.03          |
| 4-3  |            |            |            | 9.11           | 1.05          |

ンクロスを用いた波別解析法により求めた沖側一様水深部での有義波高,  $T_{1/3}$  は同じく有義波周期である。

## 2.2 実験方法

測定に際しては, 流速計が 1 台しかないのでそれぞれの実験ケースについて同じ造波信号を測定点の数だけ繰り返し入力して測定を行った。測定の際の造波は常に静水状態から開始し, 造波開始 600 秒で波浪場はほぼ定常に達したとみなし, その後から水面変動および流速変動の記録を行った。

波高計からの信号はサンプリング周波数 20 Hz でデジタルデータレコーダに記録し, 流速計についても不等間隔の時系列データを 20 Hz 相当の等間隔データに変換し記録した。このようにして得られた水位と流速のデータ 300 秒分を以後の解析に用いた。

## 3. 実験結果

### 3.1 入反射波の分離と発生長周期波の抽出

岡安・松本 (1995) と同様, 得られた水位変動と流速変動のデータから数値フィルタにより長周期成分を分離した後, この長周期水位変動と流速変動を水口 (1991) の手法を用いて入射波成分と反射波成分とに分離した。分離した水位・流速の長周期変動は岡安・松本と同様に図化し, 分離結果が良好であることを確認した。

入射波の成分については, まず砕波点直前の測点での入射長周期波を基準とし, この波を長波近似のもとに伝播させたものを「予測長周期波」と呼ぶ。実測値から分離された入射波の成分とこの予測長周期成分との砕波帯内におけるずれは, 砕波により発生した長周期波によるものであると仮定し, これを「発生長周期波」と呼ぶ。

### 3.2 発生長周期波の推算と入射長周期波との比較

発生長周期波の定量的な評価については, case 1-1 ~ case 2-6 を用いて Mizuguchi (1995) のモデルと比較を行った。水口のモデルでは平均砕波点において発生する岸向きの長周期波による水位偏差  $\Delta\eta$  は

$$\Delta\eta = -Ks[x_b(t) - x_{bm}]/2 \quad (1)$$

で与えられる。ここで,  $K$  は定数で砕波波高水深比を 0.8 とすると 0.194 で与えられる。  $s$  は砕波点付近の勾配  $[x_b(t) - x_{bm}]$  は砕波点の変動距離である。砕波点の変動距離を水口 (1994) 同様  $0.8\beta\kappa h_{bm}/s$  で与えると, 式 (1) は

$$\Delta\eta = 0.8K\beta\kappa h_{bm} \quad (2)$$

となる。ここで,  $\beta$  は波高変動率,  $\kappa$  は砕波帯内での波群消滅率であり, ここではそれぞれ 0.5, 1 とした。  $h_{bm}$  は平均砕波水深で, 本研究では近似値として有義波高を 0.7 で除した値を用いた。

以上の条件で, 砕波点の変動により発生する長周期波の予測変動幅を求めた。変動が正弦的であると仮定する

表-2 Mizuguchi (1995) による長周期波の rms 値の  
推算値と実測値の比較

| case | 代表<br>勾配<br>s | 砕波水深<br>の代表値<br>$h_{bm}$ (cm) | 発生波の<br>推算 rms 値<br>$\eta_{c rms}$ (cm) | 発生波の<br>実測 rms 値<br>$\eta_{m rms}$ (cm) |
|------|---------------|-------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1-1  | 1/20          | 8.30                          | 0.227                                   | 0.374                                   |
| 1-2  |               | 6.96                          | 0.191                                   | 0.195                                   |
| 1-5  |               | 8.13                          | 0.223                                   | 0.286                                   |
| 1-6  |               | 6.70                          | 0.183                                   | 0.195                                   |
| 2-1  | 1/30          | 5.69                          | 0.156                                   | 0.174                                   |
| 2-2  |               | 4.74                          | 0.130                                   | 0.141                                   |
| 2-5  |               | 5.59                          | 0.153                                   | 0.178                                   |
| 2-6  |               | 4.64                          | 0.127                                   | 0.137                                   |

と、変動幅と変動の rms 値の比は  $2\sqrt{2}$  であるので、予測変動幅を  $2\sqrt{2}$  で除したものと実測水位変動から得られた発生長周期波の実測 rms 値を比較した。各ケースにおける入力条件と得られた値を表-2 に示す。表では推算値の方が実測データから求められた発生長周期変動よりも若干小さくなっているが、波高変動率を幾分小さく見積もっていると考えられるので、Mizuguchi (1995) によるものはかなり良く実測値を説明できるものと言える。

### 3.3 発生長周期波と入射長周期波の位相差

図-2 は 1/10, 1/20, 1/30 の斜面上での砕波について、実測の入射長周期波の予測入射長周期波に対する位相遅れの岸沖方向変化を示したものである。図中  $\theta$  は予測自由長周期波を基準とした位相遅れであり、位相差はそれぞれの長周期波の 0.1 Hz 付近の成分波の位相差をとっている。横軸は砕波帯幅で無次元化しており、右端が静水汀線である。全てのケースにおいて、位相遅れはほぼ図中波線で示した  $\theta=0.4\pi x/|x_b|$  に近い変化を示している。

また図-3 は推算された発生長周期波の予測入射長周期波に対する位相遅れを示しており、発生波は  $\theta=\pi x/|x_b|$  に近い変化をすることが分かる。Mizuguchi (1995) によれば、発生する長周期波は入射長周期波とほぼ逆の位相を持つ。図-3 において砕波点付近で値がばらついたり、位相差が理論値に比べてかなり小さい値を示している。これは、発生波が相対的に小さい場合や、砕波点の変動領域の内部においては、発生波の分離が完全でなく、位相計算での誤差が大きくなるためと考えられる。汀線付近では発生波の rms 値が入射波とほぼ同程度まで大きくなるので、比較的安定した  $\pi$  に近い位相差が得られるものと考えられる。岡安・松本 (1995) においても、波浪の伝搬が安定しているステップ上においては安定した  $\pi$  近い位相差が得られている。

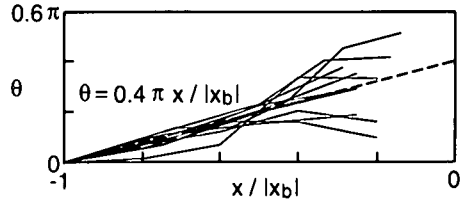


図-2 1/10, 1/20, 1/30 勾配地形での予測入射長周期波と実測長周期波の位相差

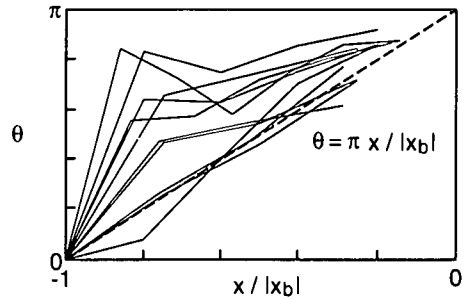


図-3 1/10, 1/20, 1/30 勾配地形での予測入射長周期波と発生長周期波の位相差

## 4. 非線形数値波動モデルによる長周期波の計算

### 4.1 基礎式および砕波減衰のモデル化

沖における不規則波浪による長周期の水位変動に関しては、波動による運動量フラックスの長周期的な変化によりおおよそ予測することが可能である。砕波帯内においても、Mizuguchi (1995) が論理的にモデル化したように、砕波による運動量フラックスの時空間変化を的確に表現することにより数値予測が可能であると考えられる。

Watson ら (1994) は非線形浅海波の方程式を用いた数値モデルで、単一波群により砕波点で発生する長周期波が沖側へ伝播していく様子や run-up の様子を数値計算し実験と比較している。しかし、長周期波の予測にあたってはその位相情報を正確に再現することが重要であるので、一般の不規則波による数値シミュレーションが必要である。そこで本研究ではさらに、波による運動量フラックスの変化による水位変動の応答を直接解くことができる Boussinesq タイプの非線形分散波方程式を用いた数値波浪モデルを用いて、砕波帯内における長周期の水位・流速変動の予測を行った。

本モデルで用いた波動の連続式は

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

であり、運動量基礎方程式は

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q^2}{d} \right) + g d \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{d^3}{3} \frac{\partial^2}{\partial t \partial x} \left( \frac{q}{d} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

である。ここで、 $q$  は線流量、 $d$  は水深、 $g$  は重力加速度、 $\eta$  は水位変動である。

Deigaard (1989) は式 (4) と同様な Boussinesq タイプの運動量方程式に surface roller による運動量フラックスを導入して、砕波による運動量の減衰を数値計算で表現した。surface roller による運動量フラックスは

$$R = \delta \left( c - \frac{q}{d} \right)^2 \left( 1 - \frac{\delta}{d} \right)^{-1} \quad \dots\dots\dots (5)$$

で表され、ここで  $\delta$  は surface roller の局所的な厚さ、 $c$  は波速である。この surface roller の運動量フラックス変化を式 (4) に加えた

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q^2}{d} \right) + g d \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \delta \left( c - \frac{q}{d} \right)^2 \left( 1 - \frac{\delta}{d} \right)^{-1} \right] \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{d^3}{3} \frac{\partial^2}{\partial t \partial x} \left( \frac{q}{d} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

が本モデルで用いた砕波減衰を考慮した非線形分散波動方程式の基礎式である。

砕波、非砕波の判定、surface roller の幾何形状の決定は Deigaard と同じ基準を用いた。式 (4) を用いて斜面上の波動の伝播を計算し、波峰前面の水面勾配が  $20^\circ$  を越えたときに砕波が始まるとし、surface roller の厚さを水面の幾何学的形状より決定する。一度 surface roller の領域が決まると式 (6) を用いて砕波減衰を考慮した波の変形を解く。砕波が進み水面勾配が  $10^\circ$  未満になると波が再生したとみなし砕波項の計算を終了する。

長周期波を評価する場合のこの surface roller モデルの優れた点は、1) 不規則波浪場における波の砕波変形を、砕波点の予測も含めて個々の波に対して行なえるので、波群特性などの影響を数値計算にきちんと反映できること、2) 砕波帯内において無視できない大きさを持つ surface roller の運動量を評価できること、3) 水面の幾何形状から surface roller を決定するので、波の追い越しなど不規則波に特有の現象にも対応できること、などが挙げられる。これにより実際の砕波に近い砕波減衰が表現できるので、砕波帯内における長周期波の挙動についても精度良く評価できるものと期待できる。

また、砕波帯内での長周期波の計算においては汀線境界の扱いが重要となる。固定境界とすると、汀線での長周期波の反射のモードが変わり、砕波帯内での長周期波の位相関係がきちんと評価できない可能性がある。本モデルでは岩崎・真野 (1979) の先端条件を用い、汀線を移動境界とした。これにより長周期の汀線変動については十分評価可能と思われる。

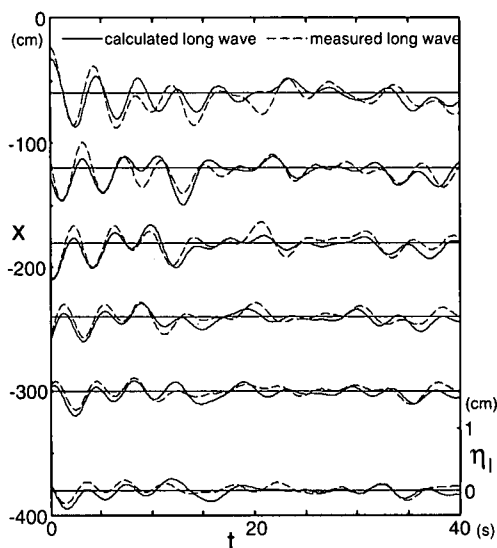


図4 砕波を考慮した非線形分散方程式による砕波帯内長周期波の計算結果と実測値との比較

## 4.2 計算条件および数値計算結果

数値計算は上記のモデルによる、砕波点の移動により発生する長周期波の再現性を検証する目的で、岡安・松本 (1995) による不規則波の実験に対して行った。計算における沖側境界を砕波点のすぐ沖側の測定点とし、その地点で測定された水位変動と流速変動の入射波成分のみを数値計算の沖側入射境界に与えた。

計算における空間格子の間隔は 6 cm、時間格子の間隔は 0.005 秒である。また、初期条件は静水とし、岡安・松本の実験と同条件とするために 600 秒間の初期準備計算の後の計算値について解析を行った。

図4は 1/30 一様勾配上の case 2-1 について数値計算を行い、各測点での長周期水位変動を抽出したものである。汀線に近づくにつれて徐々に差が大きくなっているが、計算値は実測値と良く一致しており、少なくとも原理的には波による運動量フラックスの時空間変化から数値計算によって長周期の変動を予測できることが確認できる。また、入射境界に近い測線で既に実験値と有意な差が見られるが、これは実験による水位変動と流速変動を用いた入射波の分離が完全でなかったためと思われる。

## 4.3 数値計算による砕波帯内長周期波の位相変化

図5は case 2-1 について 3.1 節で行ったのと同様な方法により得た入射長周期波 (岸向きに伝播する成分) と砕波点の移動によると考えられる長周期の発生波について、rms 値の計算値と実測値との比較を行ったものである。図中実線は計算された長周期波の入射方向成分の rms 値、波線は計算された発生波の rms 値、一点鎖線、

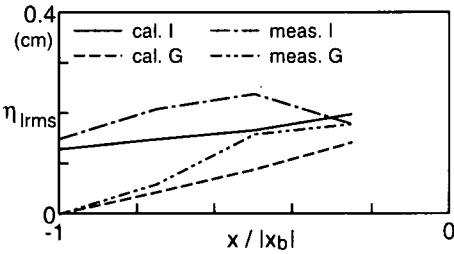


図-5 砕波帯内長周期波の rms 値の計算値と実測値の比較

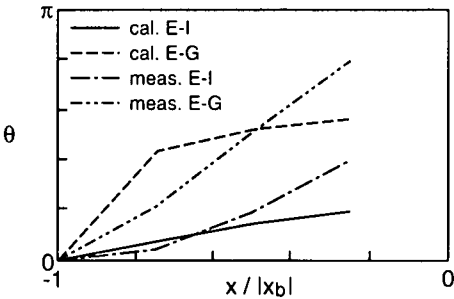


図-6 砕波帯内長周期波の入射長周期波に対する位相差の計算値と実測値の比較

二点鎖線はそれぞれ実測の rms 値である。また、 $x_b$  は平均的な砕波点で横軸は砕波帯幅で無次元化してある。図では実測値が砕波帯中程で計算によるものよりやや大きな値となっているが、汀線付近での一致度はよい。

また、図-6 は case 2-2 における予測長周期波と入射長周期波、予測長周期波と発生長周期波の位相関係を実測値と計算値で比較したものである。図中実線は数値計算結果における入射長周期波の予測長周期波に対する位相遅れ、波線は発生長周期波の予測長周期波に対する位相遅れを示し、一点鎖線、二点鎖線はそれぞれ実測の長周期変動に対するものである。汀線付近で多少の差異があるものの、位相変化についても実用的なレベルの推算が可能であることを示している。

## 5. おわりに

本研究では、岡安・松本 (1995) に引き続き 2 次元波動水槽内で不規則波により砕波帯内で発生する長周期波について測定を行った。得られた水位変動と岸沖方向の

流速変動のデータから発生する長周期波の大きさ、入射してくる長周期波との位相関係についてまとめ、Mizuguchi (1995) との比較も示した。また、surface roller モデルを用いた Boussinesq 型の非線形波動方程式を用いた波浪変形モデルにより、砕波帯内で発生する長周期波の数値計算を行い、以下の結論を得た。

1) 砕波帯内での長周期波は砕波により発生する長周期波の影響で位相遅れが生じ、その大きさは汀線付近で  $0.4\pi$  程度である。また、発生長周期波の位相差は、汀線付近でほぼ  $\pi$  となる。2) 砕波帯内で発生した長周期波は、砕波点の変動による運動量変化により砕波点付近で長周期波が発生するとした Mizuguchi (1995) のモデルで、振幅・位相の双方についてほぼ説明が可能である。3) surface roller による砕波減衰を考慮した Boussinesq 型の波動モデルにより、砕波帯内での長周期波の発生および伝播を定量的に評価することが可能である。

なお、本研究は文部省科学研究費奨励研究 A (No. 08750624, 代表者 岡安章夫) による研究であることを付記する。

## 参考文献

- 岩崎敏夫・真野 明 (1979): オイラー座標系による二次元津波遡上の数値計算, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 70-73.
- 岡安章夫・松本輝紀 (1995): 不規則波による砕波帯内長周期波の発生及び伝播, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 151-155.
- 長瀬 寛・水口 優 (1994): 砕波帯における長周期波の発生に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 91-95.
- 長瀬 寛・水口 優 (1995): 波群性入射波の砕波による長周期波について, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 146-150.
- 水口 優 (1991): 浅海域における入・反射波の分離手法について, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 31-35.
- 水口 優 (1994): 波群性入射波の砕波帯付近に発生する長周期波について, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 96-100.
- Deigaard R. (1989): Mathematical modelling of waves in the surf zone, Prog. Rep. No. 69, Inst. of Hydrodyn. and Hydraulics Eng., Tech. Univ. of Denmark, pp. 47-60.
- Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart (1962): Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to "surf beat", J. Fluid Mech., Vol. 13, pp. 481-504.
- Mizuguchi, M. (1995): A simple analysis of long wave generation by time-varying breakpoint, Coastal Eng. in Japan, Vol. 38, pp. 105-109.
- Watson, G., T. C. D. Barnes and D. H. Peregrine (1994): The generation of low-frequency waves by a single wave group incident on a beach, 24th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 776-790.