

長周期波算定モデルと砕波帯内長周期波の統計的性質

Modeling and Statistical Properties of Long Period Waves in the Nearshore Zone

関 克己¹・野田祐貴²・猪澤 悠³・木村貴之⁴・水口 優⁵

Katsumi SEKI, Yuki Noda, Yu IZAWA, Takayuki KIMURA and Masaru MIZUGUCHI

Long period waves are sometimes significantly large and cannot be neglected even for engineering purposes in the nearshore zone. The growth of amplitude of long waves and phase shift between short wave envelope and incoming long waves on sloping bottom have been studied but not clearly understood. We present a theoretical model for the long wave evolution on the basis of the linear long wave equation with forced term and the model of breakpoint forced long waves. The present model shows good agreement with experiment results of random wave field. Then this model was applied to field observation data, and we show that the amplitude of long waves inner surf zone could express with squared of significant wave height.

1. はじめに

浅海域から砕波帯内, および遡上域において周期数十秒から数分のオーダの長周期波の存在が工学上問題となることが既往の研究により明らかになってきている。代表的なものでは, 波の打ち上げ高や越波に関しては平石ら(1998), 漂砂現象に対しては内野ら(2004)などがある。

浅海域に存在する長周期波は, 短周期波(風波)の波群(包絡波)に拘束される拘束長周期波と, 自身の分散関係式による波速により伝播する自由長周期波とが混在している。観測される長周期波は両者の和となるが, 両者の波速が異なるために拘束長周期波と自由長周期波とを統一的に取り扱った研究は少ない。しかし波の打ち上げ高や越波などを取り扱う場合には, 短周期波と長周期波との重なり方, つまり短周期波(包絡波)と長周期波との位相関係が重要である。そのため長周期波を時系列として予測することが望まれる。

包絡波と長周期波の位相関係に着目した研究として Janssen ら(2003)や Battjes ら(2004)の研究がある。この研究では, 包絡波2乗関数と長周期波の位相関係について検討しており, 波の進行とともに, 長周期波と包絡波の位相関係がずれてくることを実験的に明らかにしている。また, 強制項付波動方程式を用いることにより, 砕波帯直前までの長周期波を評価できるモデルを提案している。しかし, このモデルでは包絡波と長周期波の位相差に関しては実測値を入力するものであり, 位相関係も含めて予測できるモデルにはなっていない。

本研究では, 拘束長周期波と自由長周期波の両者を統

一的に取り扱い可能な長周期波算定モデルである関・水口(2008)のモデルに, 砕波に伴い発生する自由長周期波のモデルを組み込むことにより, 浅海域から砕波帯内に適用可能な長周期波算定モデルを作成する。また, 作成したモデルを用いて, 現地砕波帯内における長周期波の振幅の統計的性質について検討する。

2. 長周期波算定モデル

本研究では, 砕波帯外の長周期波算定モデルとしては関・水口(2008)によるモデルを用いる。このモデルは一樣勾配斜面をステップ地形近似(図-1参照)することにより, 岸向き長周期波 η_{li} の時系列算定式を, 斜面上での拘束長周期波 η_{b2} , 拘束長周期波の変形に伴う発生自由長周期波 η_{fi2} , および入射自由長周期波 η_{fi} の和として表現する。

$$\eta_h(x, t) = \eta_{b2}(\theta_g) + \eta_{fi2}(\theta_{gl}) + \eta_{fi}(\theta_L) \quad (1)$$

ここで各成分の振幅および位相 θ は一樣勾配斜面をステップ地形近似することにより以下ようになる。なお, 入射自由長周期波に関してはGreen則による浅水変形,

$$\eta_{b2} = -T_{fLHS,2} A_2^2 \quad (2)$$

$$\eta_{fi2} = \frac{1}{C_{L1} + C_{L2}} [(C_{L1} + C_{g1}) \eta_{b1} - (C_{L1} + C_{g2}) \eta_{b2}] \quad (3)$$

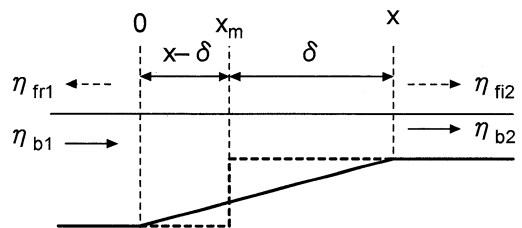


図-1 ステップ地形近似概要図

- | | | |
|---------|------|---------------------|
| 1 正 会 員 | 博(工) | (独法)港湾空港技術研究所 特別研究員 |
| 2 | 修(工) | 名古屋市役所 |
| 3 | | 中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻 |
| 4 | | 本市役所 |
| 5 正 会 員 | 工博 | 中央大学理工学部土木工学科 教授 |

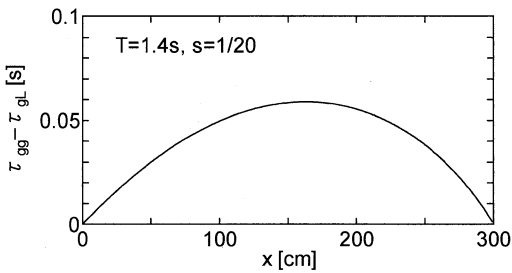


図-2 関・水口 (2008) による位相差

$$\theta_g = \left(\frac{x - \delta}{C_{g,1}} + \frac{\delta}{C_{g,2}} \right) - t \quad (4)$$

$$\theta_{gl} = \left(\frac{x - \delta}{C_{g,1}} + \frac{\delta}{C_{L,2}} \right) - t \quad (5)$$

および長波の波速で伝播するとして取り扱う。

ここで、下付き添字1,2はそれぞれステップ地形の沖側および岸側での値を示し、 $T_{f,LHS}$ はLonguet-Higgins and Stewart (1962)による拘束長周期波理論解における包絡波2乗と拘束長周期波の伝達関数を、 A は包絡波を示す。なお、位相を示す式(4)・(5)に含まれる δ は、図中にあるようにステップ地形近似における水深不連続地点の位置を示しており、 C_g 、 C_L はそれぞれ群速度および長波の波速を示している。

つまり、ある地点における岸向き長周期波は、局所水深による拘束長周期波と拘束長周期波の斜面上の変形に伴う発生自由長周期波、さらに斜面への入射自由長周期波の和として表され、位相差はステップ地形の水深不連続地点を適切に設定することにより考慮する。

(1) 位相差算定法の改良

関・水口(2008)では位相差を考慮する際、長波の波速を基準に、斜面とステップ地形とで波の到達時間が一致するように、水深不連続地点を決定していた。しかし、この方法では図-2に示すように位相差が距離に対して極値を持つ関数となり、単調増加とはならない。ここでは τ_{gg} 群速度による到達時間、 τ_{gl} はステップ沖側では群速度、ステップ上では長波の波速で伝播した場合の到達時間を示す。

本研究では、各成分の位相を以下のように算定する。

- 1) 算定地点までの群速度および長波の波速による到達時間の差を一樣勾配斜面で算定する。
- 2) ステップ地形において1)で算定した到達時間差が再現されるような水深不連続地点を設定する。

これにより図-3のように位相差が単調増加関数として表現できる。

(2) モデル概要

上記のモデルに、砕波点の変動に伴う発生自由長周期

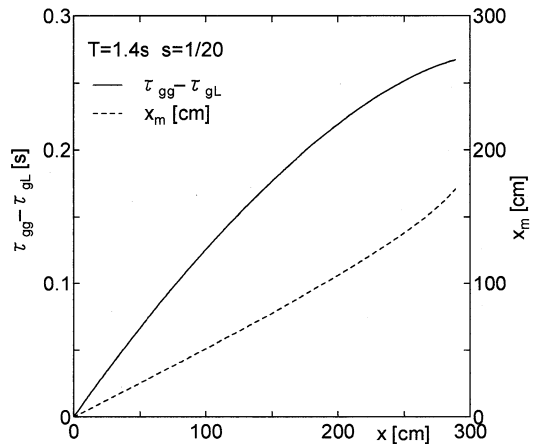


図-3 本モデルによる位相差および水深不連続地点

波の算定モデルを組み込むことにより、砕波帯内の長周期波予測モデルを構築する。

砕波点の変動に伴う発生自由長周期波は関ら(2006)のモデルを用いる。このモデルでは、岸向きの発生自由長周期波 $\eta_{BFLW,i}$ は砕波点直前の包絡波形と線形の関係であり、式(6)のように示される。

$$\begin{aligned} \eta_{BFLW,i} &= T_{BFLW} a(t) \\ T_{BFLW} &= 2/(\gamma + 8/3\gamma) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 T_{BFLW} は包絡波形と砕波に伴い発生する岸向き長周期波との伝達関数、 γ は砕波点付近での波高水深比(0.7とする)である。

つまり、砕波帯内において長周期波を算定する場合は式(1)に式(6)を加えたものとなる。なお発生自由長周期波の位相は、群速度により伝播する包絡波形の位相(拘束長周期波と同位相)としている。

具体的な算定方法は以下に示すような流れになる。

- 1) 入力条件は斜面先端における包絡波形および岸向き長周期波の時系列である。
- 2) 代表波高・代表周期から平均砕波点を設定する。
- 3) 砕波帯外で算定する場合は式(1)を用いる。
- 4) 砕波帯内で算定する場合、設定した砕波点において式(1)(砕波点に入射する成分)および式(6)(砕波点で発生する成分)を用いて岸向き長周期波を算定し、それ以降は自由長周期波として取り扱う。

なお、本モデルにおいては包絡波の変形に関しては線形を仮定しており、波群変調などは想定していない。

3. 物理実験データのとの比較

本研究で提案する長周期波算定モデルについて実験結果との比較を行う。不規則波を用いた断面実験データを用いて、モデルの精度検証を行った。

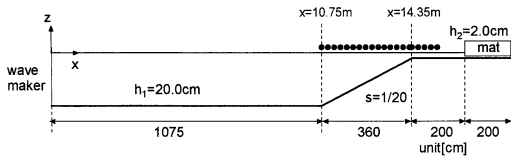


図-4 実験水槽概要図

(1) 実験概要

実験概要は、関ら(2006)に詳しいが、図-4に示すように、遡上の影響を除くため、1/20勾配の斜面の後に一様水深部を設けて実験を行った。岸側境界に消波マットを設置することにより、短周期波成分の反射を防いでいる。また造波機は吸収制御機能を有しており、長周期波の造波板からの再反射を防いでいる。なお、座標原点は造波板原点とし、岸向きを正とする。

造波信号はBretschneider・光易型の標準スペクトルを用いて作成し、その際の有義波高は3.0cm、有義周期1.0sである。なお造波時間に関しては、長周期波の統計処理を行うことを考慮して1200 s (カットオフ周波数0.40 Hz

の波に対して400波程度)の造波を行った。

実験データは、水面変動を分圧式波高計(正豊工学製)、水平流速を電磁流速計(東京計測製)で計測し、AD変換ボードを実装したパソコンによりサンプリング周波数50Hzで収録した。

取得した水面変動データに対して、数値ローパスフィルターを施すことにより長周期成分を抽出する。また長周期オーダーの水面変動と水平流速データに水口(1991)による非線形長波理論に基づく入反射波分離法(NL法)を施し、岸向き・沖向き長周期波を算定する。

(2) 実験データとの比較

図-5に碎波帯外の代表地点として $x=11.75\text{m}$, 12.75m 、碎波帯内の代表地点として $x=13.75\text{m}$, 14.35m の計4地点において、岸向き長周期波に関する実験データとモデル算定結果の比較を示す。なお、 $x=10.50\text{m}$ は一様水深部であり、モデルにおける入力時系列である。碎波帯外においては、モデルは実験結果と良く一致しており、碎波帯内においても、振幅・周期ともに実験結果を良く再現していることが分かる。

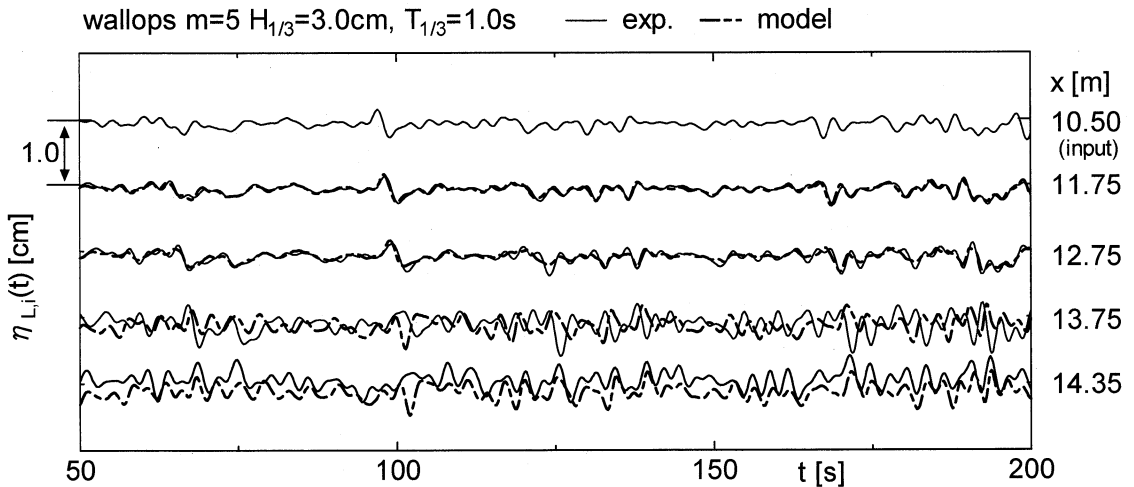


図-5 岸向き長周期波の実験データとモデル計算結果の比較

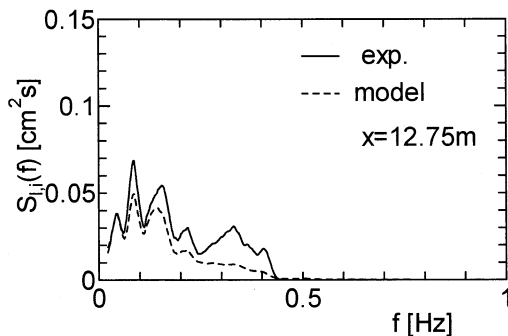
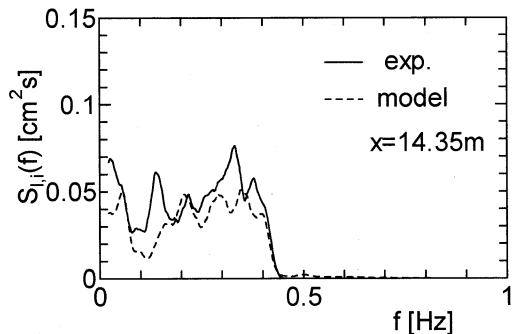
図-6(a) 碎波帯外($x=12.75\text{m}$)での実験結果とモデルの岸向き長周期波パワースペクトルの比較図-6(b) 碎波帯内($x=14.35\text{m}$)での実験結果とモデルの岸向き長周期波パワースペクトルの比較

図-6には岸向き長周期波のパワースペクトルでの比較を示す。図-6(a)は砕波帯外の $x=12.75\text{m}$ 、(b)は砕波帯内の $x=14.35\text{m}$ 地点でのデータである。砕波帯外での $f>0.3\text{Hz}$ の領域で、実験データに比べてモデルによる算定結果は過小評価しているものの、砕波帯内外どちらの地点においてもエネルギー(面積)だけでなく、スペクトル形状も良く再現できていることが分かる。

4. 現地観測データに基づく砕波帯内長周期波の統計量について

本章では、提案するモデルに関して現地適用性について検討するとともに、現地砕波帯内の長周期波の統計的性質について考察する。

(1) 現地観測概要

現地観測は(独法)港湾空港技術研究所波崎観測用栈橋に空中発射型超音波式波高計を設置して行った。データサンプリングは 5Hz で行い、2時間のデータを1つのセットとして解析している。図-7に波高計設置位置および代表的な海底地形(2007年4月10日)を示すが、栈橋先端・栈橋中央部付近および砕波帯内それぞれの地点で、波高計4台をセットとして、観測された長周期波データを波高計群による入・反射波分離手法を用い、岸向きと沖向きに分離している(関・水口, 2004)。

解析するデータは、2006年4月10日から2007年5月7日の中で、栈橋先端が砕波帯外になるように、潮位が高くまた波高があまり大きくない時間帯のデータを選んで使用する。表-1に使用したデータの詳細を示す。

(2) 統計的性質

砕波帯内の岸向き長周期波は、本モデルにおいては、拘束長周期波に起因する包絡波の2乗に比例する成分と、包絡波に比例する砕波点の変動に伴う発生自由長周期波および入射自由長周期波との和で表されることになる。そこで第一次近似として入射自由長周期波、位相差を無視すると以下の式になる。

$$\eta_{li} = -T_{f,bf} A^2 + T_{BFLW} A \quad (7)$$

ここでは $T_{f,bf}$ 拘束長周期波とその変形に伴う発生自由長周期波に関する伝達関数であり、関・水口(2008)にあるように式(8)、(9)を用いることにより算定可能である。

$$T_{f,bf} = \frac{C_{L,1}(1-T_{f,21}) + C_{g,2} - C_{g,1}T_{f,21}}{C_{f,1} + C_{L,2}} \quad (8)$$

$$T_{f,21} = \frac{T_{f,LHS,2} K_s^2}{T_{f,LHS,1}} \quad (9)$$

つまり、包絡波(風波)の波高の2次関数として表現

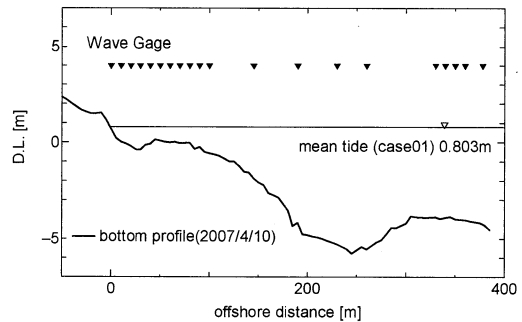


図-7 現地観測概要

表-1 現地観測解析データ概要

case	data		M.W.L.[m]	H _{1/3} [m]	f _p [Hz]
1	2007/4/10	1:28~3:28	0.803	1.188	0.108
2	2007/4/10	3:28~5:28	0.928	1.156	0.126
3	2007/4/11	1:28~3:28	0.819	1.18	0.116
4	2007/4/11	3:28~5:28	0.869	1.368	0.107
5	2007/4/15	13:28~15:28	1.021	1.452	0.118
6	2007/4/15	15:28~17:28	0.855	1.184	0.109
7	2007/4/19	17:28~19:28	1.049	1.144	0.104
8	2007/4/19	19:28~21:28	0.811	2.352	0.08
9	2007/4/20	1:28~3:28	0.926	2.412	0.076
10	2007/4/24	7:28~9:28	0.871	2.232	0.079
11	2007/5/7	1:36~3:36	0.938	1.672	0.113

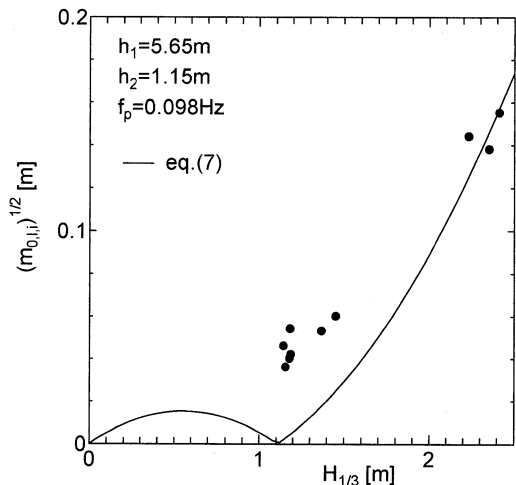


図-8 有義波高と砕波帯内岸向き長周期波の代表波高の関係

できることになる。表-1に示した現地観測データと式(7)の計算結果との比較を図-8に示す。横軸は風波成分の0次モーメントから算定した有義波高であり、縦軸は砕波帯内の岸向き長周期波の0次モーメントの平方根(以下、砕波帯内岸向き長周期波の代表波高と記す)である。なお式(7)を記入する際には、包絡波の波高と有義波高とに2倍の関係を想定している。

図から分かるように、現地観測結果は2次関数としての挙動を示しており、またモデルを用いることにより砕波帯内の長周期波のエネルギーが評価できている。

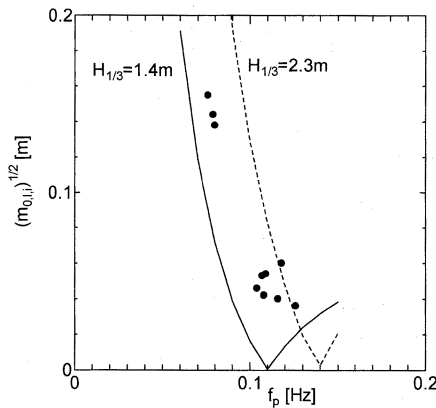


図-9 風波のピーク周波数と砕波帯内岸向き長周期波の代表波高の関係

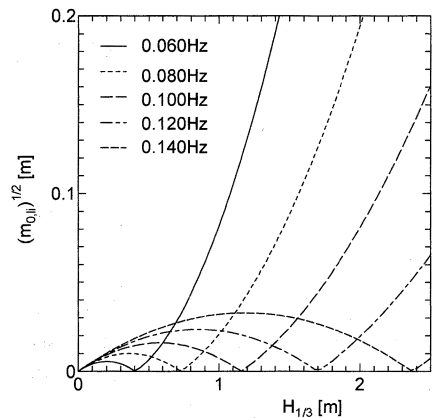


図-10 風波のピーク周波数の違いによる砕波帯内岸向き長周期波の代表波高の変化

図-9は風波成分の周期の影響を検討するために、横軸にパワースペクトルから得られたピーク周波数と砕波帯内岸向き長周期波の代表波高との関係を示す。

現地観測データでは、ピーク周波数の増大に伴い砕波帯内の岸向き長周期波は低下する傾向があり、その傾向をモデルでも表現できている。これは風波成分の周期が短くなると相対水深が小さくなり、拘束長周期波の影響(包絡波の2乗の係数)が小さくなることに対応すると考えられる。

図-10に風波のピーク周波数を変えた時の式(7)の変化の様子を示すが、ピーク周波数が小さいほど2次の係数が卓越している様子が分かる。

3. おわりに

本研究で提案するモデルは、斜面上での拘束長周期波の変形、およびその変形に伴い発生する自由長周期波を位相差も含めてモデル化したものであり、さらに砕波点の変動に伴う発生自由長周期波を組み込むことにより、浅海域から砕波帯内での岸向き長周期波を時系列として予測可能なモデルである。算定された結果は実験データを良く再現している。

さらに、提案したモデルを用いて現地観測データにおける砕波帯内の岸向き長周期波の統計的性質について検討を行った。その結果、砕波帯内の長周期波は有義波高の2次関数として評価可能であり、また風波成分の周期が長いほど大きくなることを明らかにした。

今後の課題としては、現地観測データを追加しての更なる詳細な検討、および沖向き長周期波(長周期波の汀線での反射)の影響を取り込むことである。

謝辞：本研究で用いている現地観測データの取得にあたっては、柳嶋慎一様を初めとして(独法)港湾空港技術研究所沿岸土砂管理研究チームの皆様にも多大なるご尽力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 内野敬太, 山口隼人, 関克己, 水口優(2004): 大規模侵食における汀線近傍の漂砂量・地形変化・波浪特性, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.446-450.
- 関克己・水口優(2004): 自然海浜における長周期波の重複波構造と反射特性, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.131-135.
- 関克己・長井良樹・野田祐貴・水口優(2006): 不規則波の砕波に伴う発生自由長周期波と包絡波の関係について, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.171-175.
- 関克己・水口優(2008): 一様勾配斜面での波群性入射波に起因する長周期波の挙動, 土木学会論文集B, Vol.64, No. 1, pp.62-70.
- 平石哲也, 末松忠敬, 楠瀬洋, 島元民男, 鈴木善光, 柏原弘, 殿最浩司(1998): 緩傾斜護岸の波の打ち上げ高および越波に及ぼす長周期波の影響に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.671-675.
- 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.
- Battjes, J. A., H. J. Bakkenes, T. T. Janssen and A. R. van Dongeren (2004): Shoaling of subharmonic gravity waves, Jour. Geophysical Res., Vol. 109, C02009, doi:10.1029/2003JC001863.
- Janssen, T. T., J. A. Battjes and A. R. van Dongeren(2003): Long waves induced by short-wave groups over a sloping bottom, Jour. Geophysical Res., Vol.108, No. C8, doi:10.1029/2002JC001515.
- Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart(1962): Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to surf beat, Jour. Fluid Mech., Vol.13, pp.481-504.