

港内堆砂現象に関する数値実験

黒岩正光*・野田英明**・高橋正治***

1. はじめに

砂浜海岸に建設された港、特に、漁港のような小規模の港ではその港口部が砕波帯内に位置するため地形が著しく変化し、港口および航路に漂砂による埋没をおこす。この現象も砂浜の侵食問題と同様に大きな社会問題となっている。

鳥取県中部に位置する泊漁港は古くから港内堆砂が問題となっている。黒岩ら(1990, 1991)は、港内堆砂現象を把握するため、同漁港において現地調査を実施した。得られた結果については既に報告した。それによると、港内の海底地盤高は、短期間の急激な波、流れ特性の変化により上昇あるいは低下を繰り返しつつ上昇傾向にあることが明らかとなった。このことは港内堆砂機構を把握するのに重要と考えられるが、一地点のみの情報であり、港内および周辺の堆砂現象を把握するには不十分である。そこで本研究では泊漁港における調査結果をもとに、海底面堆積、侵食時におけるそれぞれについて、種々の波浪条件を用いて波浪場、流れ場および短期間における海浜変形を既往の手法を用いて計算し、港内および周辺の侵食、堆積現象について検討するものである。

2. 泊漁港周辺の自然条件と地形変化

2.1 自然条件

泊漁港は鳥取県の中部に位置し、古くから沿岸漁業の基地として重要な役割を果たしてきた。図-1は1986年10月に行われた泊漁港周辺の深淺測定の結果であり、水深10m以浅の海底勾配はほぼ1/50で、港周辺の水深は4~6mである。底質粒径 $d_{50}=0.2\sim0.3$ mm、汀線付近では $0.25\sim0.5$ mmである。図-2(a)は1986年12月~1987年3月までの冬季における波浪観測記録から得られた有義波波高および周期の出現頻度、図-2(b)は泊漁港で観測された波向の出現回数を示したものである。波高は1~2m、周期は6~8sのものが卓越しており、平均波高および周期はそれぞれ1.7mおよび7.2sである。

る。波向は、NNE~NWの範囲に集中しているのがわかる。

2.2 地形変化

泊漁港は1939年(昭和14年)に北防波堤および西防波堤が完成したが、漂砂対策がなされなかったため1948年には漁港の水面積の2/3が埋没していたことが報告されている(速水, 1950)。現在では港拡張のためさらに西側に防波堤(第2西防波堤)が築造され、新たな地域に堆砂が生じている。著者ら(1990)はその実態を把握するため現地調査(1986年12月~1987年2月)を実施した。調査は電磁流速計(平均水面下4.0m)による流速測定(図-1, No. 1)、光学式砂面計による地盤高測定(図-1, No. 1, 2)および蛍光砂による漂砂調査であった。図-

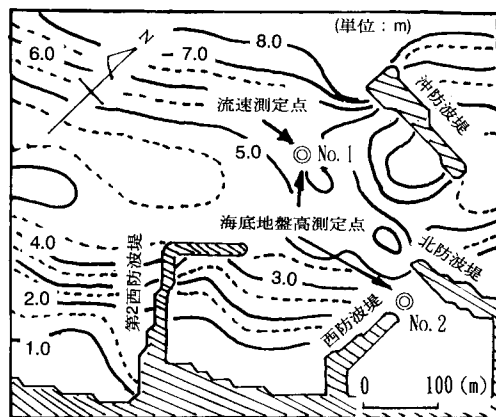
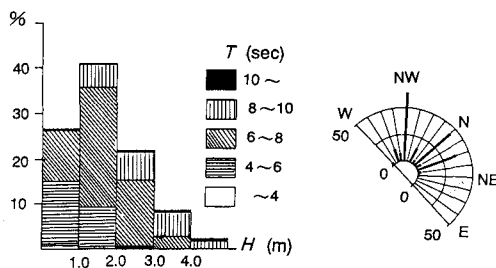


図-1 泊漁港周辺の海底地形



(a) 波高および周期の頻度分布 (b) 波向の頻度分布

図-2 泊漁港周辺の波浪特性

* 正会員 工修 鳥取大学助手工学部土木工学科

** 正会員 工博 鳥取大学教授工学部土木工学科

*** 京都府

3はその現地調査結果の一部であり、波浪特性、海浜流速、流向および海底地盤高の時間的変化を示したものである。また表一1は海底地盤高の変化が激しい期間について堆積および侵食時の特性を詳細に示したものである。表中に示す波高、周期、沿岸流速および流向は侵食、堆積時の平均値である。流向は北からの角度で表し、WからEへ向かう流れを正とした。また水深変化量は正が海底面高上昇を、負が低下を表す。これらから明かなように、沿岸流速が約40 cm/sで、かつ流向がNからNWに変化するとき(12月19日、測点1、2)海底地盤高は低下し、その低下量は約40 cmであり、沿岸流速が同様に40 cm/sで流向がNW～Nに変化するとき同様に低下している。(12月28日、測点1、2)。一方、沿岸流速が5～10 cm/sのとき、海底地盤高は上昇傾向にある。急激な上昇が見られるのは侵食時同様に流向が変化するときである。(12月19日、25日、測点1)。このときの上昇量は約5～20 cm程度である。堆積時における流向は12月19日がNEであるのを除くと、ほとんどの期間、N～NWとなっている。

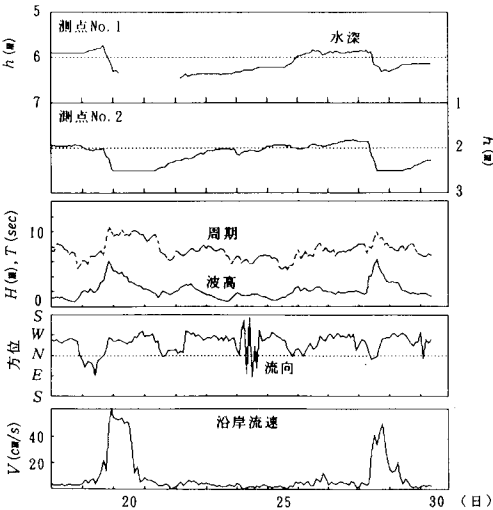


図-3 波浪・沿岸流速・海底地盤高の時間的変化

表一1 侵食・堆積時の波浪特性および沿岸流速

期 間 (月/日/時)	水深変化量(cm)		波高 (m)	周期 (s)	沿岸流速 (cm/s)	流向 (°)
	No. 1	No. 2				
12/19/04-12/19/18	+15.0	+ 5.0	2.4	6.8	9.3	-38
12/19/20-12/20/06	-42.5	-30.0	5.0	9.6	47.2	69
12/22/06-12/22/20	+ 5.0	+15.0	2.6	7.3	5.2	+83
12/26/00-12/26/12	+12.2	+10.0	2.2	6.9	4.3	+24
12/28/10-12/28/20	-42.5	-35.0	4.8	8.8	40.0	25
12/29/04-12/30/10	+12.5	+22.5	2.0	7.4	5.7	68

変化量：+堆積、-侵食

3. 3次元海浜変形の数値計算法

現地レベルの海浜変形を予測するため、比較的簡単で実用性の高い渡辺ら(1984)のモデルが有効であるとされ、このモデルの現地データにもとづく適用性が清水(1989, 1991)らによって定量的に検討されている。本研究では、このモデルを用い漁港周辺の海浜変形計算を試みる。波浪場計算は碎波減衰を考慮した非定常緩勾配方程式を用いる(渡辺・丸山, 1984)。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{n} \frac{\partial n Q_x}{\partial x} + \frac{1}{n} \frac{\partial n Q_y}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + C^2 \frac{\partial \eta}{\partial x} + f_b Q_x = 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + C^2 \frac{\partial \eta}{\partial y} + f_b Q_y = 0 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 f_b は碎波減衰項であり、次式で表され、

$$f_b = 2.5 \tan \beta \sqrt{\frac{g}{h} \left(\frac{\bar{Q}}{Q_r} - 1 \right)} \dots\dots\dots (4)$$

$$\bar{Q} = \sqrt{\bar{Q}_x^2 + \bar{Q}_y^2} \dots\dots\dots (5)$$

$$Q_r = 0.25 \sqrt{gh^3} \dots\dots\dots (6)$$

さらに、 η は水面変動量、 Q_x 、 Q_y は x 、 y 方向の線流量、 C は波速、 C_g は群速度であり、 $n = C_g/C$ 、 $\tan \beta$ は海底勾配である。

海浜流場の算定には次の方程式系を用いる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + F_x \\ - M_x + R_x + g \frac{\partial \bar{\xi}}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + F_y \\ - M_y + R_y + g \frac{\partial \bar{\xi}}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \bar{\xi}}{\partial t} + \frac{\partial U(h + \bar{\xi})}{\partial x} + \frac{\partial V(h + \bar{\xi})}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $\bar{\xi}$ ：平均水位上昇量、 U 、 V はそれぞれ x 、 y 方向の沿岸流の流速、 F_x 、 F_y は底面摩擦項、 M_x 、 M_y は拡散項、 R_x 、 R_y はradiation stress項を表す。なお、摩擦項における摩擦係数は0.01、拡散項の拡散係数はLonguet-Higgins(1970)の仮説を用いた。

地形変化の計算は次式で示される渡辺ら(1984)の局所漂砂量評価式を用いる。

$$q_c = A_c(u_*^2 - u_{*c}^2)u_c/g \dots\dots\dots (10)$$

$$q_w = A_w F_b(u_*^2 - u_{*c}^2)\bar{u}_b/g \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 q_c ：流れによる漂砂量、 q_w ：波による漂砂量、 u_* ：田中(1990)による波、流れ共存場の最大底面摩擦速度、 u_{*c} ：移動限界摩擦速度($u_{*c}^2 = sgD\psi_c$)、 ψ_c 、限界

シールズ数であり細砂のときは0.11, 粗砂のとき0.06である。また, s : 砂の水中比重, g : 重力加速度, D : 粒径, u_c : 平均流速, $\hat{u}_b$: 波の底面軌道流速の振幅, A_c , A_w : 無次元定数, F_D は漂砂の移動方向を示すパラメータであり, 次式で表される。

$$F_D = \tanh\left(\kappa_d \frac{\Pi_c - \Pi}{\Pi}\right) \dots \dots \dots (12)$$

$$\Pi = \hat{u}_b^2 h / sgDL_0 \dots \dots \dots (13)$$

なお, Π_c は Π の限界値であり, κ_d はnull-point近傍における岸沖漂砂量の場所的変化の程度を規定する量で通常は1程度の値がとられる。これら漂砂量を算定する一連の式には地形変化計算においてあらかじめ設定しなければならない未定係数がある。漂砂量係数について, 丸山(1987)は同モデルの現地適用性を検討し $A_c=2.0$, $A_w=0.2$ を得ている。清水ら(1990)によれば, 流れによる漂砂量係数 A_c は1~3の値をとり, 波によるそれ $A_w(=0.1\sim0.3)$ の10倍程度であると報告している。一方, Π の限界値 Π_c は通常1程度(堀川, 1985)であるとされているが, 丸山(1987)によれば, $\Pi_c=9.0$ とされている。本研究では実測の地形変化にあうようにこれらの係数を設定した。すなわち, $A_c=1.0$, $A_w=0.1$, $\Pi_c=10.0$ とした。

計算領域は, 第二西防波堤をほぼ中心に岸沖方向550 m, 沿岸方向に900 mとした。計算はこれらの方程式を差分化し, 計算領域内は正方格子とし, 波浪場計算におけるその間隔は5 m, 流れ場計算では10 m, 地形変化計算では20 mとした。時間間隔は波浪場および流れ場では波浪条件によってそれぞれ変えて計算し, 地形変化計算では現地データをもとに10~14時間とした。また地形変化計算において局所的な凹凸を防ぐため底勾配の効果を考慮した渡辺ら(1984)提案した漂砂の連続式を用いた。境界条件は, 波浪場計算では谷本ら(1975)の任意反射率境界を適宜用い, 流れ場計算では後述するが, 現地測定流速に合うように, 側方開境界において, Longuet-Higgins(1970)の沿岸流速公式による計算流速あるいは任意に20~30 cm/s程度の流速を与えた。地形変化計算は, 波浪場, 流れ場計算領域のひと格子内側の領域に漂砂の連続式を適用し, 開境界および固定境界における水深は次のように計算した。すなわち, 沖側開境界上の水深は, 平均海底勾配から求め, 側方開境界は境界から1つ内側の格子点上の水深を用いた。固定境界(汀線, 構造物)ではその前面の水深から同様に求めた。

4. 港内堆砂に関する数値実験

4.1 流れに関する数値計算例

前述したように, 流れの急激な変化が地形変化にかなりの影響をおよぼすことがわかった。港内および港周辺

の地形変化を詳細に調べるためには, 流れ場を精度よく算定する必要がある。そこで流れ場の計算において現地観測から得られた海底地盤高の時系列データ(測点No. 1)をもとに急激に地形が変化する侵食および堆積時に着目し, それぞれについて計算対象領域外から強制的に流速を与え, 流速測定結果と合うようにした。図-4は堆積時(12月18日, 表-1参照)における沿岸流の計算結果を示したもので, 沖防波堤内の測点No. 1付近では反時計回りの循環流, また西防波堤と第二西防波堤との間に港口に向かう流れが発生しているのがわかる。このときの測点1付近における計算流速は $V=10$ cm/s程度となっており, 図中に示した矢印(●→)は実測値の流向を模式的に表したものである。なお波浪場の計算における波向はNとした。流れ場の計算における境界条件は東側の側方境界に20~30 cm/sの流速を与え, 西側の側方境界から流れを流出させた。一方, 図-5は侵食時(12月19日, 表-1参照)における同様の結果を示したもので, 沖防波堤内では西から東へ向かう流れが発生し, さらに奥の港内へ流入しているのがわかる。第二西防波堤内では時計回りの循環流が発生している。このときの測点1付近における計算流速は, 約 $V=40$ cm/s, であり観測結果とほぼ一致する。波浪場計算における波向はNWとし, 流れ場計算における境界条件は西側境界にLonguet-Higgins(1970)による沿岸流速公式による計算流速を与

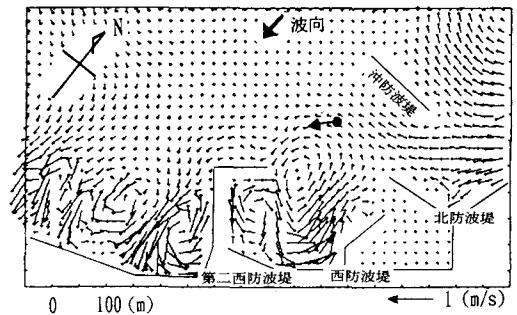


図-4 沿岸流の計算結果(堆積時)

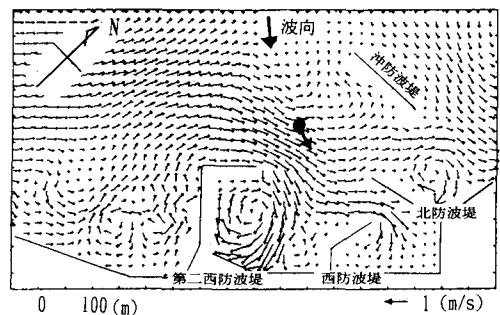


図-5 沿岸流の計算結果(侵食時)

えた。

以上のように侵食および堆積時の状況に応じて計算領域の境界に強制的に流れを与えることにより、流れが再現できることがわかった。

4.2 港内堆砂に関する数値実験

前述したように侵食および堆積時それぞれの場合について港周辺の地形変化を計算し港内堆砂について検討する。本研究では、現地調査結果から代表的な堆積、侵食パターン、すなわち、低波浪時に堆積し、つぎの時化により侵食され、さらに低波浪時に埋め戻しがおこる短期間の海底地形の変化について数値実験を試みた。観測期間中には深浅測量はなされておらず、1986年10月に実施された結果を初期地形(図-1)とし、測定点1, 2において測定された地盤高の変動量と計算結果を比較し港内および周辺の地形変化について検討した。図-6は堆積時(12月19日)における海浜変形計算結果を示したもので、初期地形との差で表されている。図中に示す◎印は前述した流速および海底地盤高測定点を示したもので、また、矢印は計算した流向を模式的に表したものである。このときの海浜流分布は前出の図-4に示すとおりである。この図からわかるように測点No. 1は堆積領域にあり、計算された海底面上昇高さは5~10 cm程度で、また、第2西防波堤内の汀線付近から港口までの広範囲に堆砂領域が見られる。図-7は侵食時(12月19日)における同様の結果を示したものである。海浜流分布は前出

の図-5である。この図からわかるように、測点1付近では若干侵食量は少ないが、第二西防波堤外に広範囲の侵食域が見られる。一方測点2付近では局所的な侵食がみられその海底地盤高低下量は30 cm程度となっており、現地調査結果とほぼ一致する。前述した堆積時(図-6)と比較すると流れの様相の相違から堆積領域の範囲は異なっているが、第二西防波堤と西防波堤との間に堆砂して港内堆砂がおこっている。つぎに、高波浪時から低波浪時に遷移するとき、すなわち堆積期間(12月20~27日; 図-3参照)における地形変化を計算した。波浪条件は、堆積時の平均波高 $H=2.3\text{ m}$ および周期 $T=7.1\text{ sec}$ を用いた。なお波向はNWとした。図-8は高波浪から低波浪に遷移したときの10時間後の地形変化計算結果を示したものである。この図からわかるように測点1および2付近で堆砂がみられ測点1付近では10 cm~15 cmの海底面高の上昇、測点2付近では20 cm程度の上昇がみられ侵食後の埋め戻しが起きている。つぎに初期地形と最終地形との侵食堆積図を示したのが図-9である。この図から明らかなように港口部は時化による局所的な侵食域が残っているものの沖防波堤内および第二西防波堤と港口との間に広範囲にわたる堆積域、一方、第二西防波堤外にはほぼ東西に延びる侵食域がみられる。

最後に現地で実施された蛍光砂による漂砂調査結果と併せて港内堆砂現象について検討する。蛍光砂調査は1986年12月18日から翌年2月8日まで4回(12日, 28

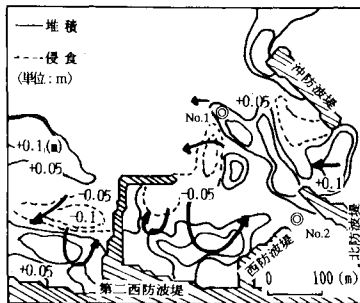


図-6 侵食堆積図(堆積時)

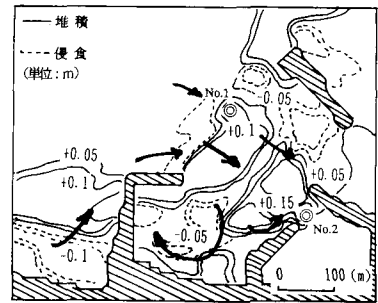


図-8 侵食堆積図(堆積時)

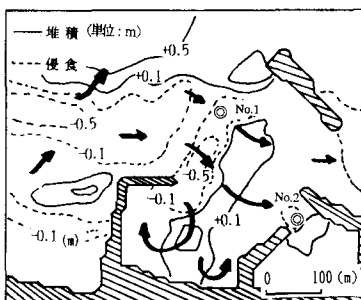


図-7 侵食堆積図(侵食時)

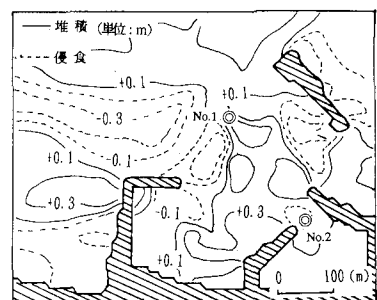


図-9 侵食堆積図

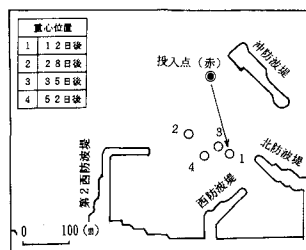


図-10(a) 蛍光砂調査結果 (赤)

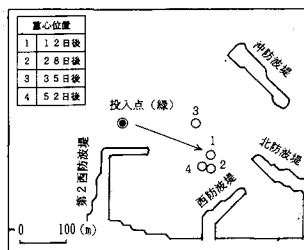


図-10(b) 蛍光砂調査結果 (緑)

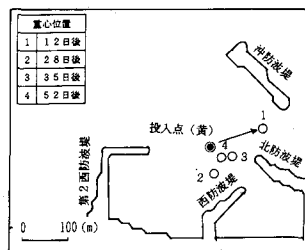


図-10(c) 蛍光砂調査結果 (黄)

日、35日および52日後)実施された。図-10(a)~(c)は蛍光砂調査結果を示したもので、それぞれの図中に示す●は蛍光砂投入点を表し、○はサンプリング時の蛍光砂個数分布の重心位置を示している。沖防波堤背後に投入された赤色蛍光砂(a)の重心位置は12日後北防波堤付近に移動しさらにその後は第二西防波堤との間に停滞しているのがわかる。また第二西防波堤先端に投入された緑色蛍光砂(b)は12日後北防波堤と第二西防波堤との間に移動しその後は赤色蛍光砂同様に停滞している。一方、黄色(c)については他とは異なり、初期には沖防波堤と北防波堤との間に移動したが、その後顕著な重心位置の移動は見られず投入点付近に停滞しているのがわかる。

以上のことを踏まえ、前述した、流れの計算結果と地形変化計算結果から、侵食および堆積時における流れの様相は異なるが沖側あるいは西側から第二西防波堤に沿った沿岸流によって漂砂は堤内に運搬され、沖防波堤および第二西防波堤内発生する循環流により港口付近に堆砂を起こすことがわかった。

5. おわりに

本研究では泊漁港で実施した港内堆砂に関する現地調査結果に基づいて既往の3次元海浜変形手法を用いて港内堆砂現象に関する数値実験を行った。

得られた結果を要約すると次のようである。

1) 侵食および堆積時の状況に応じて計算領域の境界に流れを与えることにより、現地調査結果とほぼ一致し、漁港周辺の流れがよく再現できた。

2) 漁港周辺の地形変化を計算した結果、流れの様相の違いにより侵食したり堆積したりするが、高波浪時には

波と流れの相互作用により漂砂は堤外から港内に運ばれ、循環流の弱まるところに港内堆砂が発生することがわかった。

3) 低波浪時には流れの様相が変化し、侵食域に埋め戻しがおこり、港全体として堆砂が発生することがわかった。

参考文献

- 黒岩正光・林 浩志・野田英明 (1990): 中小漁港の埋没調査, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 419-423.
- 黒岩正光・野田英明 (1991): 中小漁港の埋没機構, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 411-415.
- 清水琢三・野谷 斎・近藤浩右・西 裕司・山本正昭 (1989): 海浜変形予測手法の現地適用性に関する研究, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 404-408.
- 清水琢三・近藤浩右・渡辺 晃 (1990): 局所漂砂量算定式の現地適用性に関する研究, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 274-278.
- 田中 仁 (1990): 波・流れ共存場における底面摩擦係数の陽形式近似, 土木学会論文集, 第417号, pp. 285-288.
- 谷本勝利・小舟浩治 (1975): 数値波動解析法による港内波高分布の計算, 第22回海講論文集, pp. 249-253.
- 速水頌一郎 (1950): 泊港湾の漂砂に関する研究, 鳥取県漂砂対策調査報告祖書, pp. 35-50.
- 堀川清司 (編) (1985): 海岸環境工学, 第3編, pp. 213-301.
- 丸山康樹 (1987): 海底地形変化予測モデルの現地適用性, 電力中央研究所報告, 研究報告: 384041, 35 p.
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉 (1984): 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル, 第31回海講論文集, pp. 406-410.
- 渡辺 晃・丸山康樹 (1984): 屈折・回折・砕波減衰を含む波浪場の数値解析法, 第31回海講論文集, pp. 103-107.
- Longuet-Higgins, M. S. (1970): Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, 1, 2, J. Geophys. Res., Vol. 75, pp. 6778-6801.