

取水港湾港口部の長期的な地形変化の再現

清水 琢三*・水流 正人**・嶋田 昌義***
窪 泰浩***・山田 富朗****

1. ま え が き

砂浜海岸に建設された発電所港湾は、防波堤の建設途上にあつては防波堤周辺の堆積に、また港湾完成後には高波浪時の海浜流に加え、取水流が存在するため波高減衰の顕著な港口付近で堆積を生じる場合が多い。深層取水を目的とした港湾では、航路水深のみならず、温度躍層を乱さないように取水断面を確保する必要があり、維持浚渫の少ない港湾レイアウト計画や維持浚渫計画を適切に立案するためには、このような取水流と海浜流による港口周辺の堆積を精度よく予測することが重要である。

東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所専用港湾は昭和61年10月にほぼ現在の外郭形状が完成したが、港口水深が8～12mと比較的深く、しかも港口での取水流速が小さかったにもかかわらず、冬期の高波浪時に発達する海浜流と取水流により港口付近で顕著な堆積が生じている。このような比較的水深が深いところでの長期的な地形変化の予測には、3次元海浜変形モデルが有効であり、近年、長期的な海浜変形に対しても現地適用性が確認されつつある(清水ら, 1992a)。しかしながら、これまではせいぜい1年程度の地形変化に対してしか適用されておらず、5年以上に及ぶ海浜変形に対する適用例は報告されていない。

そこで本研究では、まず冬期に港湾内外で実施した現地観測データを用いて、波浪、流況、地形変化の各計算ステップ毎にモデルの現地適用性を検証した上で、港湾完成後6年間の地形変化の再現を試みた。

2. 3次元海浜変形モデルの現地検証

2.1 現地調査の概要

現地調査は、1991年12月～1992年3月の4カ月にわたり、定点における波浪、流況、地形変化の計測、深淺測量、蛍光砂調査、トラップ調査等、総合的に実施した

が、ここでは、モデルの現地検証データとして用いた1月後半から2月後半にかけての波、流れ、地形変化に関する集中現地調査の概要について述べる。

図-1に示すように、港外から港内にかけての9地点(P1～P9)には水圧センサー付き電磁流速計を、また港口から港内の測点(P3～P9)には光電式砂面計も併せて設置した。また港口部港内側のP5地点では、局所漂砂量算定式および地形変化計算法の現地適用性を検討するため、20mメッシュの格子上の9地点の四隅および中央の5地点に水圧センサー付き電磁流速計と砂面計を、他の4地点には砂面計のみを設置し、外力勾配調査を行った。同様の調査は丸山ら(1987)によっても既に試みられている。なお、データは、P1～P4は2時間毎20分間、P5は1時間毎20分間、P6～P9は2時間毎10分間、いずれもサンプリング間隔0.5sで取得した。また、入射波の波高、周期、波向としては水深15m地点での定時波浪観測記録を用いた。調査期間中には3m以上の高波浪が4回来襲し、最大有義波は2月16日の4.47m、8.0sであった。

観測データは、入射波条件により波高4段階(1.5m未満、1.5～2.5m、2.5～3.5m、3.5m以上)、波向3方向(W以南、WNW、NW以北)の合計12ケースに分類し、地点別に有義波高、有義波周期、主波向、平均流の流速

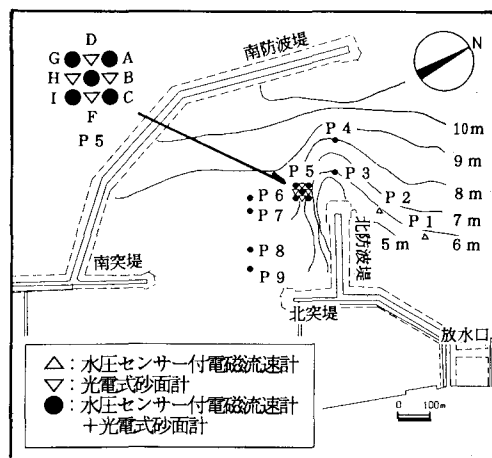


図-1 調査地点位置図

* 正会員 工修 五洋建設(株) 土木設計部
** 正会員 五洋建設(株) 土木設計部
*** 正会員 東京電力(株) 原子力研究所耐震研究室
**** 正会員 東京電力(株) 原子力建設部
***** 正会員 東電設計(株) 原子力土木部

の絶対値ならびに流向の平均値を求め、検証データとした。検証計算は、各分類の平均有義波高、平均有義波周期、主波向の平均値を入射波条件として実施した。なお、計算範囲は水深約23m以浅の2.4km×2.4kmで、格子間隔は20mである。

2.2 波浪場計算法の現地検証

地形変化が顕著な港口周辺の波浪場を精度よく評価するためには、多方向不規則波の回折と屈折ならびに碎波変形を同時に取り扱える手法を用いる必要がある。本研究では、磯部(1986)の波向線座標を用いた緩勾配方程式の放物型近似による方法ならびにエネルギー平衡方程式に碎波減衰を考慮した方法を用いて検討した。これらの方法は浅瀬を含む複雑な海底地形に対しても現地適用性が確認されている(清水ら, 1992b)。前者は回折・屈折を同時に考慮できるが、回折計算精度を上げるため波向線座標を用いており、港内と港外の港口より岸側を同時に計算することはできない。後者は回折を厳密に取り扱うことはできないので防波堤の直背後や二重回折領域などでは過小評価するという欠点があるが、現地多方向不規則波浪場では方向分散性により回折が疑似的に表せることや方向スペクトルの変形を直接取り扱うことができるため、広範囲の計算が比較的短時間に行えるなどの利

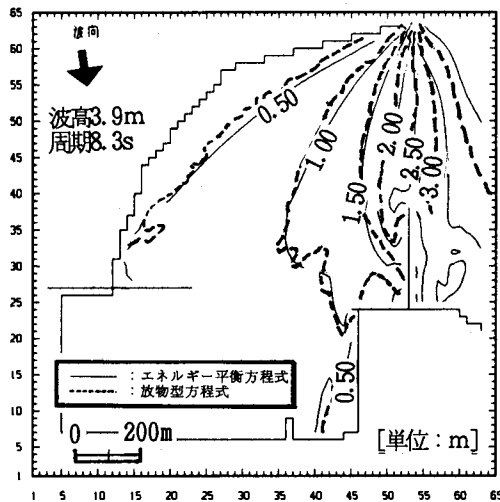


図-2 波高分布の計算例 ($H_{1/3}=3.9\text{m}$)

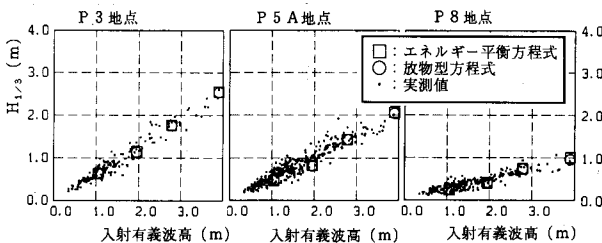


図-3 代表地点の波高と入射波高の関係

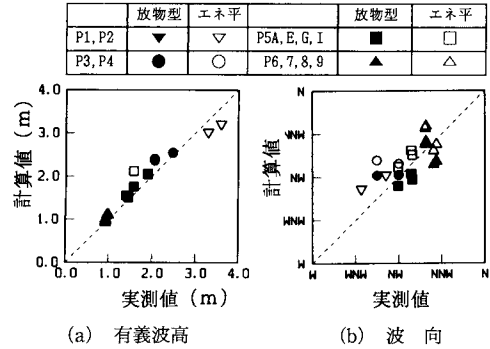


図-4 波高と波向の実測値と計算値の比較

点がある。

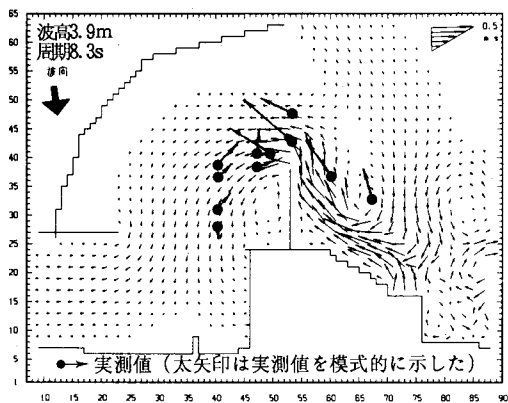
図-2は、入射有義波高3.9m、有義波周期8.3s、波向WNW、 $S_{\max}=75$ に対する波高分布について、2つの手法を比較した結果を示している。エネルギー平衡方程式と放物型方程式による結果は非常によく一致している。図-3は港口部の舌状張り出し地形のほぼ中央に位置するP3、その港内側に位置するP5-Aならびに港内トレンチ部のP8における有義波高と入射波との関係を実測値とともに示した結果である。いずれの地点も回折と屈折が同時に生じる場所であるが、計算法による差異はほとんどなく、実測値ともきわめて良好に一致している。さらに、入射波高3.9mの場合の全測点における波高と波向の実測値と2つの方法による計算値の比較を図-4に示す。放物型方程式による結果の方が波高、波向ともに実測値との対応はややよいが、エネルギー平衡方程式による結果も実用的には十分な精度を持つことがわかる。また、いずれの方法も反射は考慮されていないが実測値との対応がよく、港口付近では反射の影響は無視できるものと判断される。

以上の検討結果を踏まえ、長期的な地形変化予測を行うためには波浪、海浜流、地形変化の各ステップの計算を繰り返す必要があるので、計算時間の短縮という観点からエネルギー平衡方程式による方法を採用した。

2.3 海浜流場計算法の現地検証

海浜流場の計算に当たっては、radiation stressをエネルギー平均波高と有義波周期、主波向から進行波として評価し、その空間勾配を起因力として断面平均流速を計算した。水平拡散項はLonguet-Higgins(1970)の渦動粘性係数表示がよく用いられ、乱れの代表スケールとして自然海岸では汀線からの離岸距離を採るのが一般的である。しかしながら、防波堤近傍や港内では構造物によって乱れのスケールが規定されるため、離岸距離としては構造物からの距離をとる方が妥当であると思われる。

図-5は、渦動粘性係数として構造物からの距

図-5 海浜流況場の計算例 ($H_{1/3}=3.9\text{ m}$)

離と汀線からの距離の短い方を代表長さとし、また碎波点より沖側では構造物の有無に関わらず一定値を与えた場合の海浜流場の計算例を示している。入射波条件は有義波高 3.9 m, 波向 WNW である。図中には実測の流況も模式的に示されている。なお、取放水についてもカーテンウォールおよび放水口で境界条件として考慮した。

北防波堤に沿って港口へ向かう流れが再現されており、また構造物の影響を無視して汀線からの距離で渦動粘性係数を評価した場合には計算されない北防波堤の港内側での反時計廻りの循環流が計算されている。しかしながら、観測結果によれば取水流れが存在するにもかかわらず、港内の P6~P9 地点では沖向きの流れが発生している点が大なる相違である。このような流れは有義波高が 3 m 程度以上になると生じる。

図-6 は、波向 WNW のときの代表地点の流速値と入射波高の関係について実測値と比較した結果である。港口部の P3, P5-A では波高の増大とともに流速が速くなるという実測値の傾向が定量的にも精度よく再現されている。また、図-7 は有義波高 3.9 m, 波向 WNW のときの全測点における流速値と流向の実測値と計算値の比較を示している。防波堤からの距離を考慮して渦動粘性係数を評価した場合の方が高波浪時の再現性が高く、港外および港口の P1~P4 および P5-A, E 地点では流速・流向ともに実測値と計算値の対応は概ね良好であ

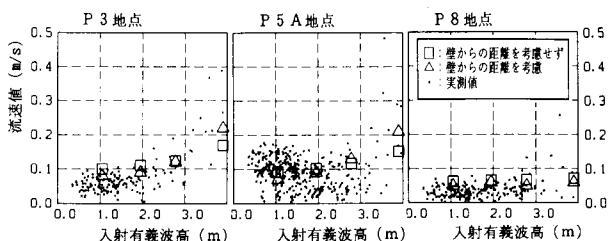


図-6 代表地点の流速値と入射波高の関係

	P1, P2	P3, P4	P5A, E, G, I	P6, 7, 8, 9
壁からの距離考慮せず	▽	○	□	△
壁からの距離考慮	▼	●	■	▲

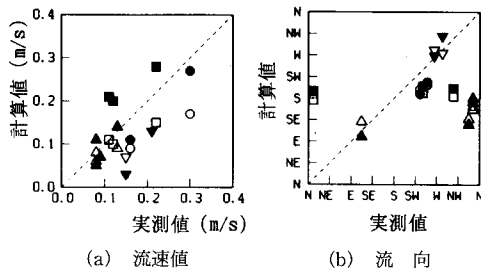


図-7 平均流速の実測値と計算値の比較

る。しかしながら、上述のように沖向き流れが観測された港内の P6~P9 地点および北防波堤背後の渦発生域に当たる P5-G, I 地点では流向の再現性がよくなかった。港内で発生した沖向き流れのメカニズムを明らかにすること、構造物近傍や港内での渦動粘性係数の適切な設定法を確立することが今後の課題である。

2.4 地形変化計算法の現地検証

P5 地点で実施した外力勾配調査の結果に基づき、局所漂砂量算定式および地形変化計算法の現地適用性を検討した。40 m 四方の領域を計算格子に見立て、四隅の P5-A, C, G, I 地点の実測の波高、流速記録から局所漂砂量フラックスを評価し、漂砂の連続式から格子内の地形変化を計算した。その結果を実測の海底面変化と比較した。なお、残念ながら P5-C 地点の水圧センサー付き電磁流速計が欠測したため、波浪場と海浜流場の計算結果を参考に P5-A あるいは P5-I の記録から補完した。また、砂面計の記録は 9 地点ともほぼ同一の地盤高変化を示したので、それらの平均値を格子内の地盤高変化とみなした。

まず渡辺ら (1984) の局所漂砂量算定式 (以下、渡辺モデル) について検討した。清水ら (1992 a) と同様、波による漂砂量係数 A_w は渡辺 (1981) の波による漂砂量係数 B_w の関係から各地点毎に変化させた。既往の研究結果を参考に現地スケールに対する値として B_w を 4 とし、流れによる漂砂量係数 A_c は A_w の 10 倍に設定した (清水ら, 1990)。また、波による漂砂の方向をシールズ数が 0.2~0.5 のときは浮遊移動による沖向き、それ以外のときは掃流およびシートフローによる岸向きと仮定した。浮遊移動からシートフローへの遷移条件として佐藤ら (1987) の砂漕消滅限界式による検討も行ったが、0.5 で一定とした場合と大差なかった。なお、底質の中央粒径は現地調査結果に基づき 0.16 mm と設定した。

図-8 は、外力条件から計算した波および流れ

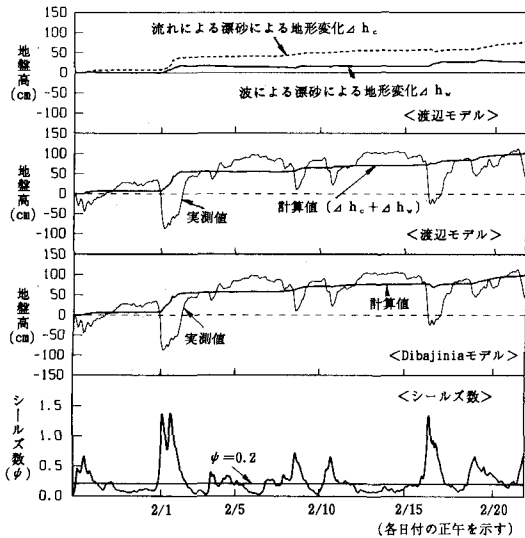


図-8 P5地点の地盤高変化の実測値と計算値の比較

による地形変化ならびに両者の和としての地盤高変化の計算値と実測値の比較を示している。実測の地盤高変化では波高増大期に冲向き漂砂が生じるような外力条件(シールズ数が0.2程度以上)になると急激な侵食を生じたが、計算ではほとんど変化していない。しかしながら、一時化後の堆積量としては概ね一致し、長期的な地形変化の現地再現性は良好であると判断される。砂面計による実測値のこのような急激な侵食は浮遊移動による冲向き漂砂に起因するのではなく、浮遊移動条件になって砂が舞い上がり易くなって局所洗掘が生じたものと推定される。また、流れによる漂砂に起因する地形変化は比較的単調な堆積傾向を示すが、波による漂砂に起因する地形変化は高波浪時に一旦堆積した後、非常に緩やかな変化ではあるが侵食傾向を示しており、地形変化に対する寄与としては流れによる漂砂が卓越していることがわかる。

さらに底面流速波形の非対称性と定常流を考慮し、シートフローの砂移動を精度よく算定できるDibajniaモデル(Dibajnia・Watanabe, 1992)を波・流れが任意の角度で交差する場合にも適用できるよう拡張して、同様の検討を行った。その結果は図-8に併せて示されているが、渡辺モデルによる結果とほぼ一致する。このことから渡辺モデルは簡便なモデルであるが、現地適用性が高いと判断される。

3. 長期的な地形変化の再現

3.1 検証期間と計算条件

毎年2回、4月と10月に実施されている深浅測量結果を検証データとして、昭和61年4月から平成4年4月ま

での港湾完成後6年間の港口周辺の地形変化の再現計算を試みた。地形変化の計算には、港口部の堆積に寄与すると考えられる2m以上の高波浪を対象に、その年間の波エネルギーが同一になるようにモデル時系列波浪を設定した。波高4段階、2つの時化で代表させたモデル時系列波浪を用いて、波浪、海浜流、地形変化の計算を各年14ステップ、合計84ステップ繰り返し、実測の地形変化と比較した。2.4の検討の結果、波による漂砂に起因する地形変化が長期的な港口部の地形変化に及ぼす影響が比較的小さいことがわかったので、流れによる漂砂のみを考慮して計算した。なお、漂砂量係数 A_c は B_w を4とし、 A_w の10倍として場所的に変化させた。

各ステップで波浪・海浜流場は定常であると仮定しているが、地形変化の計算のみ1ステップ間をさらに10等分し、水深変化を漂砂量フラックスの評価に反映させながら地形変化の計算を繰り返した。このような工夫をすることにより、局所的な堆積を防ぎ、徐々に地形変化を進行させることができるため、1ステップの継続時間をより長く設定することが可能となり、計算時間を短縮できた。また、今回採用した程度の粗い波浪のモデル化では放水口前面を含む浅海域では凹凸の激しい地形変化が計算されるため、そのまま6年間の計算を続けると陸化するところが現れ、港口の地形変化の計算結果にも悪影響を及ぼすため、港外の水深4m以浅は初期地形に戻して計算を続けた。

3.2 再現計算結果

取水量が少なかった最初の4年間(1986年4月～1990年4月)と取水量が3倍に増加した後半の2年間(1990年4月～1992年4月)に分けて、等深線変化ならびに侵食堆積分布の計算値と実測値の比較を図-9および10に示す。港口付近の堆積状況ならびに南防波堤先端付近で侵食が生じるなど実測の地形変化が概ね再現されており、港口部の堆積位置が後半の2年間で港内側へと張り出す様子も再現されている。

図-11は港口部の堆積域を5領域に分け、各領域の平均水深変化の計算結果を実測値とともに示した結果である。港口部の港外側の領域Cでは6年間で2m程度浅くなっており、しかも最初の3年間は年間約0.4mの速度で堆積が進行したが、後半は取水量が増加したにもかかわらず堆積速度が遅くなり、港外側の地形が平衡状態へと移行しつつあることがわかる。また、港内側の領域Dでは隣接する港外の領域Cの堆積がある程度進行し、取水量が増加した1991年4月以降堆積速度が増加している。計算結果は領域Dで最初の4年間に0.5m程度過大評価しているものの、領域Cの堆積が進んでから領域Dの堆積速度が増加するなど実測の地形変化の傾向をよく再現している。取水量の増加後堆積が始まった北防波堤

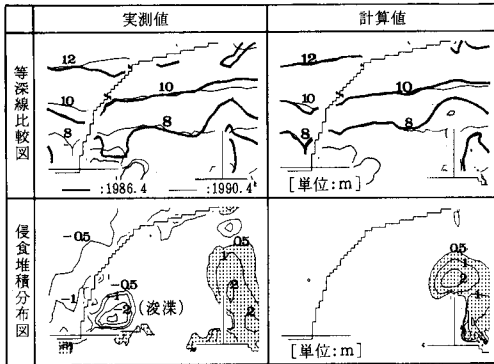


図-9 地形変化の再現結果 (1) (1986.4~1990.4)

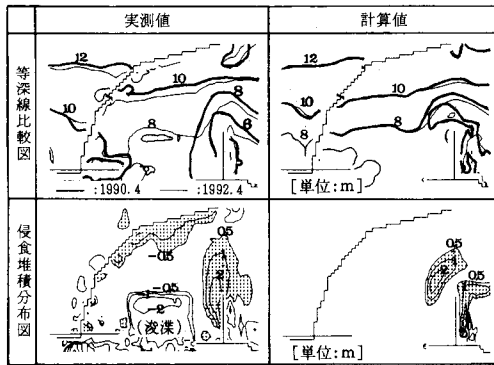


図-10 地形変化の再現結果 (2) (1990.4~1992.4)

の背後域の領域Eや、水深変化の小さい港口部沖側の領域A、Bの水深変化も概ね良好に再現されている。また、港口部全体でみると実測値と計算値の対応は良好である。堆積速度は、1990年4月までが約0.15 m/年、それ以降は取水量の増加に伴い約0.24 m/年となっている。

4. あとがき

本研究では、まず3次元海浜変形モデルの波浪場、海浜流場ならびに地形変化の各計算モデルの現地適用性を現地観測結果に基づき定量的に検討した。現在の所、高波浪時の漂砂量の直接測定は困難であるが、外力勾配調査により渡辺モデルならびにDibajniaモデルの現地適用性が確認された。このように外力勾配調査は漂砂量算定式の現地検証を行う際の有益な検証データを得ることができるので、今後、さらにデータを蓄積することが望まれる。また、構造物近傍や港内での海浜流・取水流況場の計算が最も現地再現性が難しく、渦動粘性係数の設定の仕方により結果が大きく異なるので、適切な設定法について今後検討する必要がある。さらに、高波浪時に港内の底層付近で沖向きの流れが観測されたが、その

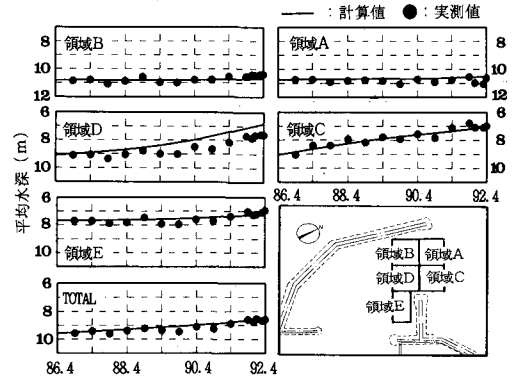


図-11 港口部代表領域の平均水深変化

メカニズムの解明も今後の課題である。

さらに、3次元海浜変形モデルはこれまでせいぜい1年程度の地形変化に対してしか適用されていなかったが、本研究では6年間という長期の地形変化の再現を試み、定量的にも良好な結果が得られた。今後は、砕波帯内の波による漂砂と戻り流れによる沖向き漂砂に起因する短期的な縦断地形変化も含めて長期的な地形変化の再現性を高めることが課題である。

参考文献

- 磯部雅彦 (1986): 放物型方程式を用いた不規則波の屈折・回折・砕波変形の計算法, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 134-138.
- 佐藤順司・杉浦志樹・渡辺 晃 (1987): 不規則振動流における砂移動機構と砂達の消滅限界, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 246-250.
- 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.
- 清水琢三・水流正人・渡辺 晃 (1992a): 3次元海浜変形モデルによる長期的な地形変化予測, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 416-420.
- 清水琢三・鶴飼亮行・原 基久・磯部雅彦 (1992b): 多方向不規則波の屈折・回折・砕波変形計算法の現地適用性, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 181-185.
- 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: U 87012, 35 p.
- 渡辺 晃 (1981): 海浜流と海浜変形の数値シミュレーション, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 285-289.
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・柳山 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回海岸工学講演会論文集, pp. 406-410.
- Dibajnia, M. and A. Watanabe (1992): Sheet flow under nonlinear waves and currents, Proc. 23rd Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 2015-2028.
- Longuet-Higgins, M. S. (1970): Longshore currents generated by obliquely incident wave, J. Geophys. Res., Vol. 75, No. 33, pp. 6778-6789.