

3次元海浜変形モデルによる長期的な地形変化予測

清水琢三*・水流正人**・渡辺 晃***

1. まえがき

3次元海浜変形モデルは、比較的短期間の平面的な地形変化予測手法として位置づけられてきたが、高波浪時の地形変化や砂移動に関するデータの取得が難しいこともあって現地における砕波帯内の波による漂砂の一般的な定式化が難しく、未だ現地に適用可能なモデルは確立されていない。これに対して、港湾や漁港などの海岸構造物周辺の長期的な地形変化に対しては、高波浪時に顕著に発達する海浜流による砂移動が支配的となる場合が多い。したがって、海浜流による砂移動のみを考慮した3次元海浜変形モデルは、これまで長期予測モデルとして実用的に用いられてきた汀線変化モデルでは予測できなかった港口航路のような水深の深い地点の地形変化が計算できるため、汀線変化モデルを平面的に拡張した長期海浜変形予測モデルとして位置づけることができる。

著者らは、これまでこのような考え方に立って3次元海浜変形予測モデルの現地適用性を検討してきた。その結果、波浪・海浜流場のみならず、1年程度の長期的な地形変化についてもモデルの適用性がある程度定量的に確認されつつある(清水ら, 1989; 清水ら, 1991)。しかしながら、砕波帯内においては、海浜流場の計算では考慮されない戻り流れが発達し、高波浪時には戻り流れによる沖向き漂砂が支配的となることが知られているが、現地における戻り流れとそれが長期的な地形変化に及ぼす影響については検討されていない。

本研究では、防波堤背後に形成される海浜循環流に起因する片トンボロ状の堆積現象が顕著にみられる現地海岸を対象に、長期海浜変形モデルとしての現地適用性を定量的に検討した。さらに、現地観測データに基づき、高波浪時の戻り流れを定量的に評価するとともに、戻り流れと波による漂砂を考慮したモデルの現地適用性についても検討した。

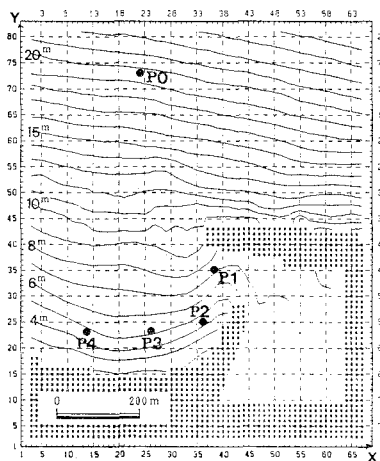


図-1 検討対象の海底地形と現地調査地点

2. 波浪・海浜流場の現地検証

2.1 現地調査の概要

検討対象地点は、図-1に示すように、ほぼ汀線に平行な等深線を有する海底勾配約 1/30 の砂浜海岸であり、その一端に港が位置する。水深 10m 以浅の底質は中央粒径約 0.35 mm の細砂である。現地調査は、高波浪時の砕波帯内の波浪・流況場の現地検証データの取得を目的として、水深約 5m の 4 地点 (P1~P4) で電磁流速計による波向と流向・流速の観測を実施した。P2 と P4 では水圧センサーによる波高観測も併せて行った。また、水深 20m 地点 (PO) では、超音波波高計と水圧センサー付きの電磁流速計による入射波浪観測を実施した。計測は約 1 カ月間、2 時間毎に 10 分間、サンプリング間隔 0.5 秒で行った。観測期間中に有義波高 3m 以上の時化が 2 回来襲し、最大有義波は 4.2m, 9.6 秒であった。

観測データは、入射波条件により波高 3 段階 (2m 以下, 2~3m, 3m 以上)、汀線直角方向を境として波向 2 方向の合計 6 段階に分類し、地点別に有義波高、有義波周期、主波向、平均流の流速の絶対値ならびに流向の

* 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 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

平均値を求め、検証データとした。また、検証計算は、各分類の平均有義波高、平均有義波周期、主波向を入射波浪条件として計6ケース実施した。

2.2 波浪場の検証

波浪場の計算には、防波堤遮蔽域の波浪場を精度よく評価するため、磯部（1986）の多方向不規則波の屈折・回折・碎波変形計算法である緩勾配方程式の放物型近似による方法を用いた。磯部（1986）は、不規則波の碎波流速波速比として規則波の0.8倍を与えているが、清水ら（1992）と同様、実測値との比較から0.7倍として碎波減衰項を評価した。なお、計算は周波数5、波向15分間で12.5mメッシュの格子間隔で実施した。

図-2は、有義波高と主波向の実測値と計算値の比較結果である。防波堤による回折の影響を受けるP2ならびに高波浪時に碎波の影響を受けるP4ともに、沖波3m以上の高波浪時も含めて波高の計算値と実測値は極めて良好に一致している。また、主波向についてもよい対応を示している。

2.3 戻り流れの評価

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、その空間勾配を起動力とする断面平均流速を計算した。後述するように、海浜流の計算では、防波堤背後の循環流など特徴的な流況は概ね再現できたが、防波堤による回折の影響を受けない海浜部では実測値との対応があまりよくなかった。これは戻り流れの影響と考えられ、流速計センサーが設置された底面上約0.7mの下層では、碎波帯内に入ると沖向きの流れが観測された。

本研究では、戻り流れは、波による質量束流を補償する沖向き流れ U_w と底面層流境界層外縁でのオイラー的な質量輸送速度 U_e ならびに碎波に起因する戻り流れ U_b の和として評価した。佐藤ら（1987）にならい、 U_w 、 U_e は線形理論により、碎波による戻り流れ U_b は次式で評価した。

$$U_b = -A \frac{H^2}{d \cdot T} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 H : 波高、 d : 水深、 T : 周期、 A : 無次元定数であり、碎波した波だけが戻り流れに寄与すると考え

て、 H^2 すなわち碎波した波のエネルギー E_b の評価を試みた。まず、碎波減衰項を無視して波浪場を計算し、各地点で碎波しなかった場合のエネルギー平均波高 H_{rms} を求めた。次に、各地点の碎波限界波高 H_b を合田の規則波に対する近似式を用いて評価し、波高分布としてレーリー分布を仮定すると、碎波しなかった場合に対するエネルギー損失の累積値は次式で便宜的に評価できる。

$$\frac{E_b}{\rho g/8} = \int_{x_b}^{\infty} H^2 p(\xi) d\xi = H_{rms}^2 (1 + x_b^2) \exp(-x_b^2) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $x_b = H_b/H_{rms}$ である。ただし、 E_b は碎波減衰を考慮した場合のエネルギーよりも大きくならないと仮定した。

高波浪時に碎波の影響を受けるP3とP4の平均流の観測結果に基づき、式(1)の係数 A の評価を試みた。Svendsen and Lorenz (1989)を参考に、砂移動にとって重要な底層付近の平均流は、波の進行方向と逆方向の戻り流れと海浜流の単純なベクトル和で表されるものと仮定し、海浜流の計算ベクトルとのベクトル和が平均流の実測ベクトルに一致するように主波向方向の戻り流れの大きさを求め、戻り流れの実測値とした。

図-3は、式(1)の関係式の適合性を調べた結果であるが、合田の碎波限界式の係数を0.14とすることにより概ね良好に評価できることがわかった。また、係数 A は4.0~7.0であり、平均的には佐藤ら（1987）によって用いられている係数値5.6と一致した。そこで以後の検討では係数 A を5.6とした。

図-4は、P4地点と同じ測線の有義波高、碎波によって失われたエネルギー E_b ならびに戻り流れの岸沖方向分布の計算例を示している。戻り流れが碎波帯内でピークをとる様子が再現されており、一点ではあるが実測値との対応は良好である。

2.4 流況場の現地検証

図-5は、(a) 海浜流、(b) 戻り流れ、ならびに(c) それらのベクトル和として評価した流況場の計算結果の一例である。また、図-6は、平均流の流速なら

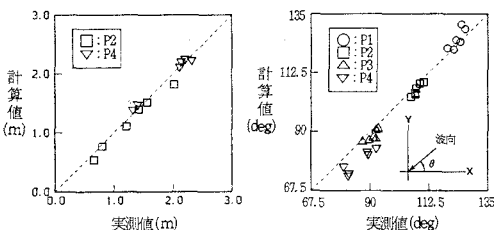


図-2 波高と波向の実測値と計算値の比較

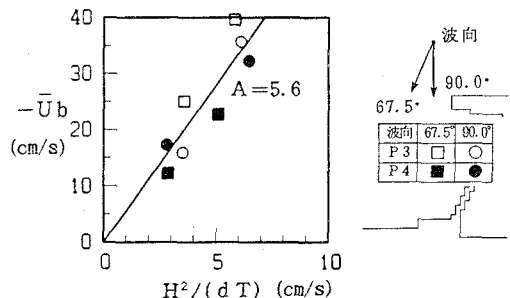


図-3 碎波による戻り流れ

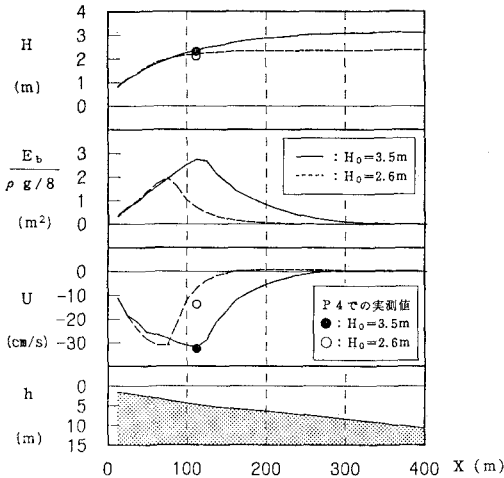


図-4 戻り流れの岸沖方向分布の計算例

びに流向の実測値と計算値の比較を示したものである。図中、白抜ききのシンボルは海浜流のみの場合を、黒塗りのシンボルは戻り流れと海浜流をベクトルの的に合成した場合を示している。

循環流の発達する回折領域の P1 および P2 では、戻り流れの影響は小さく、海浜流のみの計算でも概ね再現できるが、戻り流れを考慮することにより、流向・流速ともに推定精度が著しく改善されることがわかる。

3. 長期的な地形変化の再現

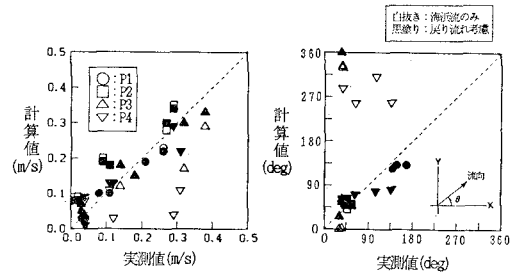
3.1 局所漂砂量算定式

地形変化の計算には、次式で表される渡辺ら (1984) の局所漂砂量フラックス評価式を用いた。

$$q_c = A_c(u_*^2 - u_{*c}^2)u_o/g \quad (3)$$

$$q_w = A_w F_D(u_*^2 - u_{*c}^2)u_b/g \quad (4)$$

ここに、 q_c : 流れによる漂砂量フラックス、 q_w : 波による漂砂量フラックス、 u_* : 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 ($u_{*c}^2 = \phi_c \cdot s' g D$)、 ϕ_c : 限界シルズ数、 s' : 水中比重、 g : 重力加速度、 D : 粒径、 u_o : 平均流速、 u_b : 波の底面軌道流速振幅、 A_c 、 A_w : 無次元定数である。また、 F_D は漂砂の移動方向を



(a) 流速値 (b) 流向
図-6 平均流速の実測値と計算値の比較

示すパラメータで、岸向きするとき +1, 沖向きするとき -1 をとる。底面剪断応力は、田中・首藤 (1980) の波・流れ共存場の摩擦則を用いて評価した。限界シルズ数としては、渡辺 (1979) に従い、細砂のとき 0.11, 粗砂のとき 0.06 を用いた。

清水ら (1990) によれば、漂砂量係数 A_c は 1~3 の値をとり、波による漂砂量係数 A_w の 10 倍程度であることが知られている。また、 A_w は普遍的な漂砂量係数と考えられる渡辺 (1981) の波による漂砂量係数 B_w と式 (5) の関係があるので、本研究では B_w より各地点毎に A_w を求め、その定数倍として A_c を評価した。 B_w は、現地スケールに対しては 3 程度の値をとることが知られているが、本研究では実測の地形変化に合うように B_w ならびに β を同定した。

$$A_w/B_w = w_0 \sqrt{0.5 f_w} / \{(1-\lambda)s' \sqrt{s' g D}\} \quad (5)$$

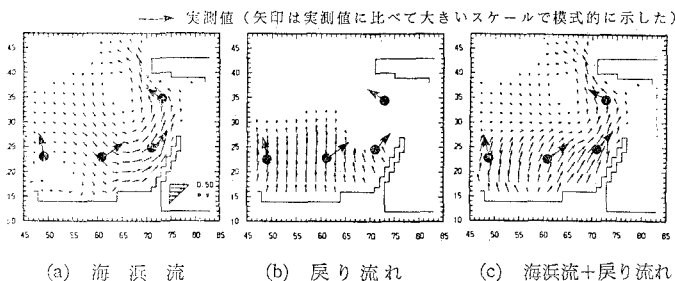
$$A_c = \beta A_w \quad (6)$$

ここに、 w_0 : 沈降速度、 f_w : 摩擦係数、 λ : 空隙率、 s' : 水中比重、 g : 重力加速度、 D : 粒径、 β : 定数である。

3.2 海浜流による漂砂のみを考慮した検討

1 年間の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、図-7 に示す 4 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 20 ステップ繰り返し、実測の地形変化と比較した。

海浜流のみによる漂砂を考慮して 1 年間の地形変化をシミュレートした結果を等深線比較図と侵食堆積分布図の形で実測値とともに図-8 に示す。また、各時化毎の地形変化の経過を図-9 に示す。地形変化の計算に当たって、渡辺ら (1984) は海底勾配の効果を考慮して局所的に極端な凹凸が生じることがないように局所漂砂量を評価しているが、ここでは各ステップの計算後の地形を空間的に平滑化することに対処した。なお、

図-5 海浜流と戻り流れの計算例 ($H_1/s=3.5$ m)

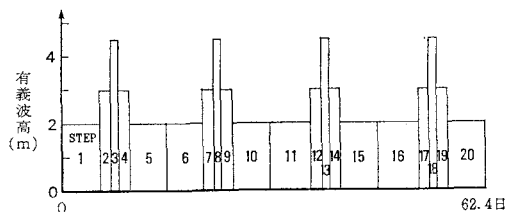
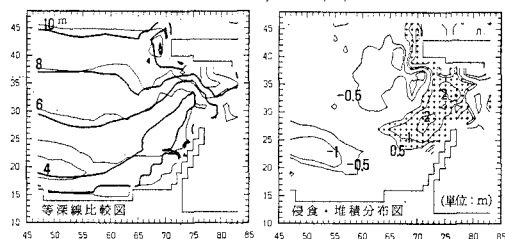
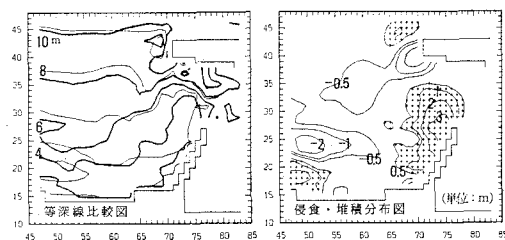


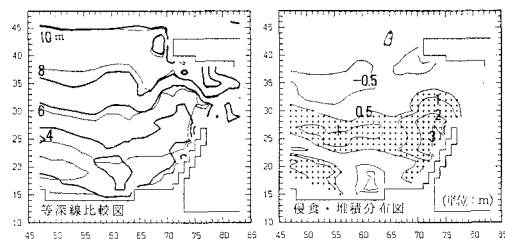
図-7 検討に用いたモデル時系列波浪



(a) 実測値

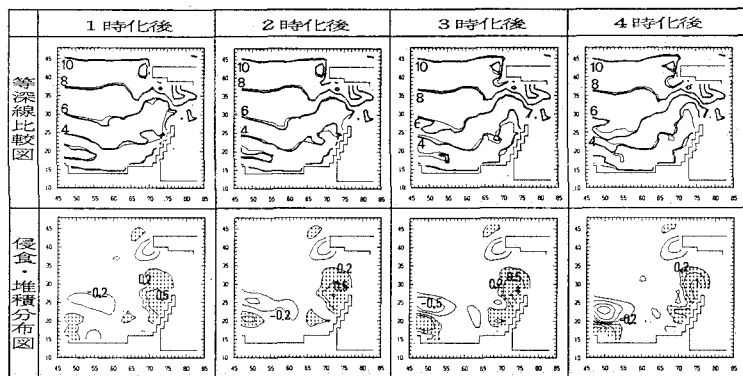


(b) 海浜流による漂砂のみを考慮した場合



(c) 戻り流れと波による漂砂を考慮した場合

図-8 1年後の地形変化の実測値と計算結果の比較 (等深線比較図の細線は初期地形, 太線は最終地形を示す)



(等深線比較図の細線は初期地形, 太線は最終地形を示す)

図-9 一時化毎の地形変化 (海浜流による漂砂のみ)

漂砂量係数としては, $B_w=2.0$, $\beta=10$ が最も実測値との対応がよかった。

主防波堤背後の遮蔽域で高波浪時に発達する港口へ向かう海浜循環流により舌状の堆積地形が副防波堤に沿って港口へ張り出す様子が再現されている。港口部の堆積量も概ね再現されているが、実測に比べて舌状堆積地形の幅がやや広く、副防波堤付近で最も堆積量が多くなっている点が実測値と異なる。また、循環流の発生域に当たる水深 4~5m 付近では港口へ堆積する漂砂の供給源となって 0.5m 以上の侵食域が広がる様子や、海浜流況が港口から沖へ抜けることによって生じる主防波堤先端付近の侵食の様子も概ね再現されている。

3.3 戻り流れと波による漂砂を考慮した検討

柴山ら (1989) は、戻り流れによる漂砂も海浜流による漂砂と同様、流れによる漂砂として評価できることを実験的に明らかにしており、本研究でも海浜流と戻り流れをベクトル合成して得られる流況場に対して、式 (3) を用いて合成された流れによる漂砂量を評価した。一方、高波浪時の現地における岸沖方向の縦断地形変化は、主としてシートフロー状態の波による岸向き漂砂と戻り流れによる漂砂のバランスで決まるが (Watanabe et al., 1991), 図-8 (a) に示した実測の地形変化をみても、海浜循環流による漂砂のみでは説明できるような地形変化しか示しておらず、長期的な海浜変形には戻り流れと波による岸沖方向の漂砂はほぼキャンセルされることがわかる。したがって、戻り流れによる漂砂を流れによる漂砂として考慮する場合には、波による漂砂も同時に考慮して、両者を年間でバランスさせる必要がある。

そこで本研究では、海浜流ならびに戻り流れによる漂砂と波による漂砂を同時に考慮して 1 年間の地形変化の再現を試みた。波による局所漂砂量算定式としては、式 (4) で表される渡辺ら (1984) の式を用い、シールズ数が 0.2~0.5 のとき浮遊移動による沖向き漂砂が生じると考えて移動方向を示すパラメータ F_D を -1 としたが、

顕著な堆積を生じる港口付近はいずれの波浪条件に対しても全体的にシートフローの発生領域であった。

図-8 (c) には、図-8 (b) の海浜流による漂砂のみを考慮した場合と同一期間の地形変化の計算結果を示したものである。今回の検討範囲では、漂砂量係数は $B_w=1.25$, $\beta=10$ が実測値との対応がよかった。港口付近の堆積については、海浜流による漂砂のみを考慮した場

合と同様、ある程度再現できたが、防波堤の遮蔽の影響を受けない海浜部では波による漂砂と戻り流れによる漂砂がバランスせず、実測値との対応はよくなかった。

図一10に示すように各ステップの地形変化を詳細にみると、波高減衰期には岸側の侵食域が埋め戻され、徐々に堆積域が岸側に移動する傾向が計算されている。しかしながら、各ステップの繰り返し時間間隔や波高段階区分など、モデル時系列波浪の設定が粗かったこともあって、今回の計算では海浜部の海浜縦断地形変化が実測値のようにバランスしなかったものと考えられる。また、現地のようにシートフロー状態が卓越する場での漂砂量には非線形性の影響が強く、その影響を考慮した定式化が必要であり(例えば、Dibajnia・渡辺, 1991)、今後、漂砂量係数に波の非線形性の効果を取り込む必要がある。

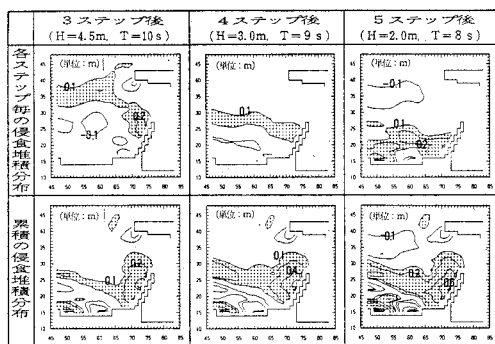
図一11は、海浜流による漂砂のみを考慮した場合もあわせて、港口部の領域別水深変化量の計算値と実測値を比較したものである。港口部の堆積量は、ばらつきはあるものの、いずれのケースも平均的にみれば定量的にもある程度一致していると判断される。

4. あとがき

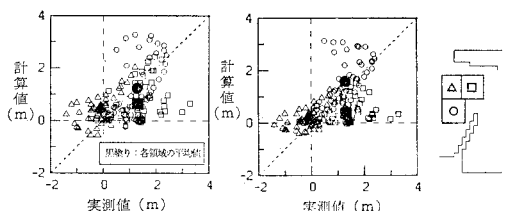
海浜流による砂移動のみを考慮した長期3次元海浜変形モデルの現地適用性を定量的に検証した。さらに、戻り流れと波による岸沖方向の漂砂も考慮したモデルの検討も行った。戻り流れを含む流況場は簡便な戻り流れの評価モデルにより再現できたが、現段階では海浜流による漂砂のみを取り扱ったモデルよりも再現性を高めることはできなかった。しかしながら、3次元海浜変形モデルの一般化に向け、有益な結果が得られたものと考えられる。今後の課題は、シートフロー状態を包括する汎用的な波による漂砂量算定式とモデル時系列波浪の適切な設定法を確立することである。また、長期間計算を進めると水深の浅いところで凹凸の激しい地形変化が計算されることがあり、汀線付近の取り扱いも残された重要な課題の一つである。

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.
- 佐藤慎司・福沢方哉・堀川清司(1987): 斜面上における不規則波の砕波変形と底面流速に関する実験的研究, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 36-40.
- 柴山知也・浅田英幸・天明敏行・佐藤慎司(1989): 波と流れが任意角度で斜交する場での漂砂量, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 304-308.



図一10 戻り流れと波による漂砂を考慮した場合の波高段階別の地形変化の計算例



(a) 海浜流のみ (b) 戻り流れを考慮 (c) 領域区分

図一11 港口部の水深変化の実測値と計算値の比較

- 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.
- 清水琢三・野谷 斎・坂野雅人・水流正人・杉本雅一・長野章(1991): 富岡漁港建設途上における港口および港内埋没, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 406-410.
- 清水琢三・鶴飼亮行・原 基久・磯部雅彦(1992): 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.
- 田中 仁・首藤伸夫(1980): 波・流れ共存時の底面摩擦に関する実験, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 163-167.
- 渡辺 晃(1979): 振動流境界層と海浜過程, 水工学に関する夏期研修会講義集, pp. B-3-1-B-3-13.
- 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・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回海岸工学講演会論文集, pp. 406-410.
- Dibajnia, M.・渡辺 晃(1991): 非対称振動流によるシートフローの発生と漂砂量, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 236-240.
- Svendsen, I. A. and R. S. Lorenz(1989): Velocities in combined undertow and longshore currents, Coastal Eng., Vol. 13, pp. 55-79.
- Watanabe, A., T. Shimizu and K. Kondo(1991): Field application of a numerical model of beach topography change, Proc. of Coastal Sediments '91, pp. 1814-1828.