

沿岸漂砂量の岸沖分布と漂砂量係数

清水 琢三*・山田 晶子*・渡辺 晃**

1. ま え が き

最近、汀線変化モデルと3次元海浜変形モデルを組み合わせるにより汀線変化を含む平面地形変化を計算する実用的な数値モデルが提案され、実験データならびに現地データに基づき適用性が確認されている(清水ら, 1994, 1995)。このモデルでは、汀線変化の計算に当たり、波浪・海浜流場の計算結果に基づき各岸沖方向測線毎に汀線平行方向の局所漂砂量を砕波点から遡上点まで積分して沿岸漂砂量の総量を評価し、沿岸方向の漂砂の連続式から汀線変化を計算している。したがって、従来の汀線変化モデルでよく用いられるCERC公式による全沿岸漂砂量と局所漂砂量算定式を積分して得られる全沿岸漂砂量の整合性を確認しておく必要がある。これまでもWatanabe (1992)、Dibajnia・渡辺 (1994) が同様の検討を行っているが、CERC公式の漂砂量係数 $K = 0.77$ (Komar・Inman, 1970) に比べて $0.05 \sim 0.2$ と小さい係数しか得られていない。また、漂砂量係数 K の大きさとそれに及ぼす底質粒径、海底勾配などの影響については、現地データの精度もあって、必ずしも定説が確立されていないのが現状である(例えば、Dean, 1982; Deigarrrdら, 1986; Komar, 1988; Kamphuis, 1990; Bodge・Kraus, 1991; Schoonees・Theron, 1944)。

本研究では、まずシートフロー漂砂における底質粒径の効果を考慮できるように渡辺ら (1984) の局所漂砂量算定式を見直した上で、現実的な種々の波浪条件、底質粒径、海底勾配に対して局所漂砂量を積分して評価した沿岸漂砂量とCERC公式による結果を比較することにより、CERC公式の漂砂量係数 K の大きさと係数 K の底質粒径、海底勾配に対する依存性について考察した。さらに、沿岸漂砂量の岸沖分布についても、波浪の年間出現頻度を考慮して検討した。

2. 局所漂砂量算定式の再検討

2.1 渡辺モデルの概要

外洋に面した砂浜海岸では、有義波高 0.5 m 程度の波

浪に対しても砕波点付近より岸側ではシールズ数が 0.5 を越え、シートフロー状の激しい砂移動を生じていることが知られている(清水ら, 1990)。したがって、現地海岸の沿岸漂砂量の算定には、シートフロー漂砂に適用可能な局所漂砂量算定式を用いる必要がある。

近年、例えば Dibajnia・Watanabe (1992) のように底面軌道流速の非対称性や平均流を考慮したシートフロー漂砂に適用可能な漂砂量モデルが提案され、大型造波水路実験や現地海岸の縦断地形変化に対してモデルの適用性が検証されている(例えば、Dibajniaら, 1993)。一方、3次元海浜変形モデルの適用に際しては、簡便で、しかも実用的なモデルであることが要求され、これまでのところ渡辺ら (1984) のモデル(以下、渡辺モデル)がよく用いられている。渡辺モデルは、元々は実験室の規則波による縦断地形変化の実験結果に基づき導かれた波によるネットの漂砂量モデル(渡辺, 1981)をベースとしており、必ずしもシートフロー漂砂を対象として提案されたわけではないが、その後、現地スケールの実験や数多くの現地に適用され、妥当性が検証されている。

渡辺ら (1984) の局所漂砂量算定式は、パワーモデルの概念に基づき、次式で表される。

$$q_c = A_c(u_{*m}^2 - u_{*c}^2)u_c/g \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

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

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_{*m} : 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 ($u_{*c}^2 = \phi_c \cdot s' \cdot gD$)、 ϕ_c : 限界シールズ数、 s' : 水中比重、 g : 重力加速度、 D : 粒径、 u_c : 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。移動限界シールズ数は、細砂のとき 0.11 、粗砂のとき 0.06 とした。また、 F_D は漂砂の移動方向を示すパラメータで、岸向きするとき $+1$ 、沖向きするとき -1 をとるが、次式で連続的に滑らかに変化させた。

$$F_D = 1 - [1 + \tanh\{\alpha(\phi_m - \phi_{c1})\}] \times [1 + \tanh\{\alpha(\phi_m - \phi_{c2})\}]/2 \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

ここに、 ϕ_m は最大シールズ数、 ϕ_{c1} は掃流から浮遊への遷移限界、 ϕ_{c2} は浮遊からシートフローへの遷移限界を示し、既往の研究成果に基づきそれぞれ $0.2, 0.5$ と設定した。また α は定数で本研究では 20 とした。

* 正会員 工修 五洋建設(株)技術研究所 海岸海洋グループ

** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

底面剪断応力は、田中・Thu (1993) の波・流れ共存場の摩擦則の陽形式近似を用いて評価するが、Ahamed・田中 (1993) によれば、全ての flow regime に適用可能な近似式は、既往の波・流れ交差場の最大底面剪断応力を過小評価することがわかっている。また、今回対象とする沿岸漂砂が卓越する砕波帯内は粗面乱流と考えられるので、粗面乱流の摩擦則の陽形式近似のみを用いた。

式 (2) の A_w は、次式で示す渡辺 (1981) の波による漂砂量係数 B_w と等価な関係がある。

$$\phi = B_w(\psi_m - \psi_c)\psi_m^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

$$\phi = (1 - \lambda)q_w/w_0D \dots\dots\dots (5)$$

$$\psi_m = u_{*m}^2/s'gD \dots\dots\dots (6)$$

であり、 B_w は無次元定数、 ψ_m は最大シールズ数、 ψ_c は限界シールズ数、 λ は空隙率、 w_0 は沈降速度である。

そこで、漂砂量係数 B_w は A_w に比べて一般的な定数と考えられるので、式 (7) で各地点毎に A_w を求め、その定数倍として A_c を評価する。

$$A_w/B_w = w_0\sqrt{0.5f_w}/\{(1-\lambda)s'\sqrt{s'gD}\} \dots\dots\dots (7)$$

$$A_c = \beta A_w \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 f_w : 摩擦係数、 β : 定数である。

2.2 渡辺モデルの再検討

図-1 は、非対称振動流に平均流を加えた Dibajnia・Watanabe (1992) のシートフロー漂砂の実験データ (粒径 0.2 mm のみ) に対して渡辺モデルを適用した結果を示している。シールズ数は波峰流速で評価した。実験結果によれば、周期が 2 s 以下の短い場合にネットの移動方向が逆転する場合があるが、現地の波浪条件では現実的ではない。図-1 から、周期 2 s を除けば、多少ばらつきはあるものの、周期 3, 4 s に対しては B_w を 4 とすれば概略評価できることがわかる。

表-1 は、渡辺モデルの現地スケールの実験結果あるいは現地への適用事例とその際得られた漂砂量係数 B_w を一覧表で示している。その結果によれば、底質粒径 0.16~0.2 mm の細砂に対しては B_w は 4 程度の値をとることが多く (清水ら, 1991, 1993; Dibajnia ら, 1993)、粒径 0.25~0.35 mm とやや大きくなる B_w は 2.0~2.5 と小さくなる傾向が認められる (清水ら, 1990, 1992)。大型造波水路実験の結果でも、シールズ数が 1 以上の大きいところに着目すると、粒径 0.47 mm の結果が 0.27 mm の結果に比べて係数が小さくなる傾向がみられ、 B_w は 1 程度である (清水ら, 1985)。そこで、漂砂量係数 B_w に粒径の影響を反映させることを試みた。

沢本・山下 (1985) は、シートフロー状態の半周期漂砂量 ϕ が、粒径、比重に関係なく、次式で統一的に表されることを示している。

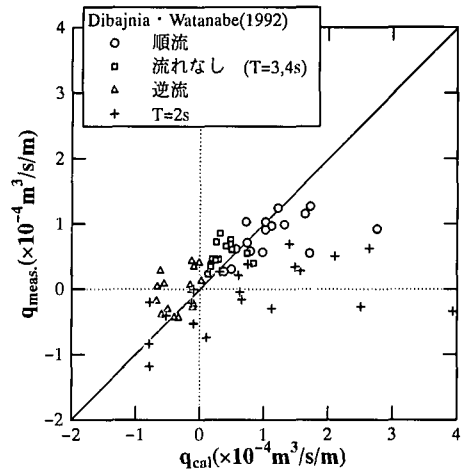


図-1 渡辺モデルのシートフロー漂砂への適用性
—Dibajnia・Watanabe (1992) の実験値との比較—

$$\phi = 2.2 \left(\frac{u_{*m}}{w_0} \right)^3 = 2.2 \left(\frac{w_0}{\sqrt{s'gD}} \right)^{-3} \psi_m^{1.5} \dots\dots\dots (9)$$

シートフローが卓越する条件では $(\psi_m - \psi_c) \approx \psi_m$ と近似できるので、式 (4) と式 (9) はいずれもシールズ数の 1.5 乗に比例することを示している。式 (4) はネットの漂砂量式であり、式 (9) と等値できないが、両者を比較すると、次式の関係が得られる。

$$B_w \left(\frac{w_0}{\sqrt{s'gD}} \right)^3 = \text{const.} \dots\dots\dots (10)$$

底質粒径 0.2 mm のとき $B_w = 4$ を仮定し、砂と海水の比重をそれぞれ 2.65 および 1.03、重力加速度を 9.8 とすると、次式に書き改められる。

$$B_w = 19.55(\sqrt{D}/w_0)^3 \dots\dots\dots (11)$$

したがって、 B_w は、粒径 0.25 mm のとき 2.5、0.5 mm のとき 1.0、1.0 mm のとき 0.7 となる。

また、流れによる漂砂量係数 A_c は、3 次元海浜変形モデルの現地適用結果 (清水ら, 1992, 1993, 1994, 1995) ならびに外力勾配と地形変化に関する現地調査結果 (清水ら, 1993)、さらには図-1 のシートフローの実験結果からも、 A_c を A_w の 10 倍とすることはほぼ妥当である

表-1 渡辺モデルの適用例と漂砂量係数 B_w

	B*	A _c /A _w	粒径(mm)	検証データ
清水(臨)ら(1985)	3~5	—	0.27	大型造波水路実験(規則波)
	1	—	0.47	同 上 *
清水ら(1990)	2.5	—	0.25	港口地盤土質
清水ら(1991)	3~5	—	0.20	港内地盤土質(約1年×2回)
清水ら(1992)	2.0	10	0.35	港口地盤土質(1年間)×2
清水ら(1993)	4.0	10	0.16	港口地盤土質(6年間)×2
	4.0	10	0.18	外力勾配調査(約1ヶ月)
Dibajniaら(1993)	4.0	10	0.18	自然海岸の地形変化(2週間)×2
清水ら(1994)	4.0	10	0.20	堤防周辺の地盤(約9ヶ月)×2
清水ら(1995)	0.5 or 4.0	10	0.20	人工島背後の地盤(4年間)×2 (係数は沿岸地盤による違い)
清水ら(1996)	4.0	10	0.20	Dibajnia・Watanabe(1992)の実験

*1: シールズ数が1以上のところではB*は1程度。
*2: 海浜変形モデルによる再現計算結果。

と考えられる。

3. 総沿岸漂砂量と岸沖分布の検討

3.1 沿岸漂砂量の計算条件

外洋に面した一様海底勾配の海岸を想定し、現実的な外力および海浜の条件を設定した。波浪条件は太平洋北部の波浪観測記録(NOWPHAS; 永井ら, 1993)を参考に、有義波高・周期として $1\text{ m}\cdot 8\text{ s}$, $2\text{ m}\cdot 10\text{ s}$, $4\text{ m}\cdot 14\text{ s}$ の3種類、海底勾配は $1/20$, $1/50$, $1/100$ の3種類および底質粒径は 0.2 , 0.5 , 1.0 mm の3種類、合計27ケースとした。なお、波向は水深 20 m 地点で 15° の斜め入射とした。また、戻り流れと波による漂砂が沿岸漂砂に及ぼす影響についても検討した。

3.2 沿岸漂砂量算定式

CERC公式は以下で与えられる。

$$Q_i = \frac{K(E \cdot C_g)_b}{(\rho_s - \rho)g(1 - \lambda)} \sin \alpha_b \cdot \cos \alpha_b \cdots \cdots (12)$$

ここに、 Q_i : 沿岸漂砂量(m^3/s)、 ρ_s, ρ : 砂および海水の密度、 λ : 空隙率、 $E(= \rho g H_{rms}^2/8)$: 波エネルギー、 H_{rms} : エネルギー平均波高で、レーリー分布を仮定して有義波高の $1/\sqrt{2}$ とした。また C_g : 群速度、 α_b : 汀線に対する碎波角、添え字 b は碎波点での値を意味する。無次元定数 K は、Komar・Inman (1970) による 0.77 が一般的である。

3.3 局所漂砂量算定式による沿岸漂砂量の算定法

波浪場の計算には、エネルギー方程式を用いて浅水変形を計算し、合田(1975)の碎波変形モデルを用いて碎波による波高変化を計算した。また、汀線付近でwave-setupならびに遡上を考慮した。なお、遡上高はハントの式により最大波に対して評価した。

海浜流場の計算では、田中・Thu (1993) の陽形式の摩擦則を用いて平均流方向の平均剪断応力を評価し、摩擦項を場所的に変化させた。この方法は、実験室、現地を問わず、精度の高い沿岸流場が計算できることがわっている(清水ら, 1995)。また、水平拡散項はLonguet-Higgins (1970) の評価法を用い、 N を 0.01 とした。

また、碎波による戻り流れは佐藤ら(1987)と同様の評価法を用い、波の進行方向と逆方向に与えた。なお、戻り流れの係数は、Dibajniaら(1993)と同様、surf similarityパラメタによって変化させた。

局所漂砂量は、渡辺モデルを用いて、各地点毎に漂砂量係数を以下のように設定した。まず、式(11)から漂砂量係数 B_w を求め、式(7)より A_w を算出する。 A_c は式(8)より A_w を10倍して求めた。

全沿岸漂砂量は、波浪場と沿岸流場の計算結果を基に、各地点の局所漂砂量を計算領域の沖端から波の遡上点まで積分して評価した。また、戻り流れと波による漂砂を

考慮する際には、戻り流れは沿岸流とベクトル合成して式(1)より、波による漂砂は式(2)で評価した。

4. 検討結果および考察

4.1 沿岸流と沿岸漂砂量の岸沖分布

図-2は、底質粒径の違いによる沿岸流速分布の比較の一例を示している。計算条件は有義波高 2 m 、海底勾配 $1/50$ 、粒径 0.2 mm と 1.0 mm のケースである。粒径が大きくなると摩擦係数が大きくなり、沿岸流速のピークが若干小さくなるが、実用的には大きな差異はない。

図-3は、沿岸流のみの場合と戻り流れを考慮した場合の沿岸漂砂量の岸沖分布の計算例を示している。戻り流れを考慮すると、沿岸方向の流れの向きが異なるため、戻り流れの速いところでは沿岸漂砂量が減少するが、沿岸流のみの場合に比べて合成流速が速くなるので底面剪断応力が増加し、全沿岸漂砂量としては増加している。

4.2 総沿岸漂砂量の比較

局所漂砂量を積分して評価した全沿岸漂砂量 Q_i (m^3/s)と $K=1$ とした場合のCERC公式による全沿岸漂砂量 Q_c を比較し、漂砂量係数 K について検討した。図-4(a), (b)は、沿岸流のみの場合と戻り流れを考慮した場合の計算結果を示している。

沿岸流のみの場合は $K=0.2\sim 0.6$ で、粒径 0.2 mm の結果が最も大きく、波高が大きいほうが係数は小さくなる傾向を示す。一方、戻り流れを考慮した場合には、 $K=0.2\sim 1.0$ であり、特に粒径 0.2 mm のケースではCERC公式の係数 0.77 とほぼ同程度の結果が得られた。平均的には、Schoonees・Theron (1994) が既往の現地データを再整理して得た係数 0.4 と同程度である。

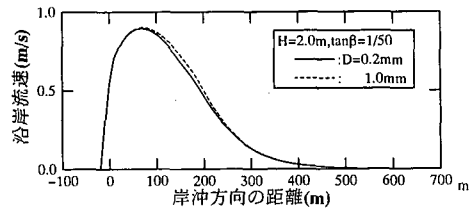


図-2 沿岸流速に及ぼす底質粒径の影響

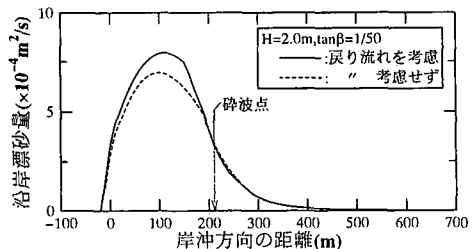


図-3 沿岸漂砂量の岸沖分布に及ぼす戻り流れの影響

本研究では、Watanabe (1992)やDibajnia・渡辺(1994)が同様の検討で得た $K=0.05\sim0.2$ に比べると既往の現地データやCERC公式に近い結果が得られた。その理由としては、沿岸流の計算で波流れ共存場の摩擦則から摩擦項を直接評価し、沿岸流速の現地再現性を向上させたことが考えられる。また今回の検討では、戻り流れを考慮した方がCERC公式の係数に近い結果が得られたが、これはCERC公式の基礎となる現地データには当然戻り流れと波による漂砂の影響も含まれているからである。

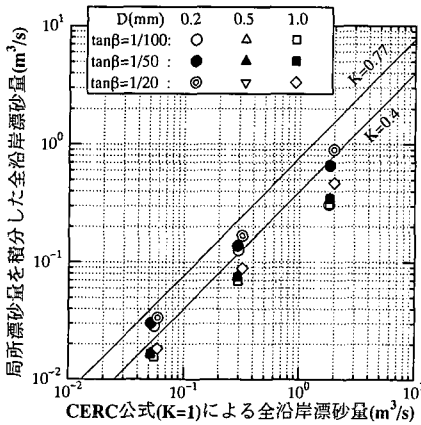
4.3 底質粒径、海底勾配などの影響

CERC公式の漂砂量係数 K は、底質粒径に依存し、粒径が大きくなると小さくなる傾向を示すことが知られている(例えば、Dean, 1982)。Komar (1988)は現地データを再吟味した結果として、粒径 $0.18\sim0.6\text{ mm}$ の範囲では平均的には $K=0.77$ であり、粒径に対する依存性は既存の現地データから判断する限り認められないと述べている。最近、Valleら(1993)は過去の地形変化から粒径 $0.4\sim1.7\text{ mm}$ の現地海岸における係数 K を評価し、

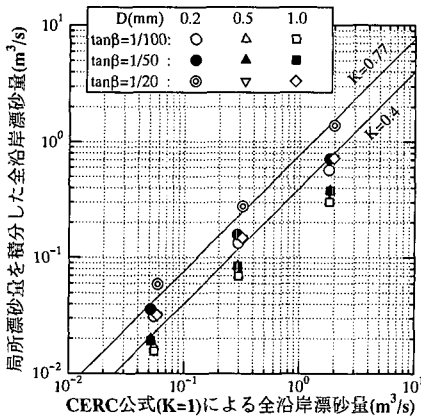
Deanら(1982)と同様の粒径依存性を得ている。

図-5は、海底勾配 $1/20$ と $1/50$ について、修正した渡辺モデルを用いて粒径依存性を調べた結果である。全体的には、粒径が大きくなると K は小さくなる傾向を示すが、粒径 0.5 mm 以上では波高と海底勾配に応じてほぼ一定値に落ち着く。過去の現地データは主としてトレーサーによるものであり、波高はせいぜい 1 m 程度のときのデータと考えられるが、粒径 $0.2\sim0.5\text{ mm}$ の範囲では、 K は海底勾配 $1/20$ のとき $0.6\sim1.0$ 、 $1/50$ のとき $0.4\sim0.7$ であり、既往の現地データも概ねこの範囲に含まれている。

図-6は、有義波高 2 m の場合の海底勾配に対する依存性を示している。沿岸流のみを考慮した場合には海底勾配にあまり依存しないが、戻り流れを考慮した場合にはKamphuisら(1990)と同様、海底勾配が急峻になるにしたがって係数 K が大きくなる傾向が認められる。このことから戻り流れが沿岸漂砂に大きな影響を及ぼしていることがわかる。



(a) 戻り流れを考慮せず



(b) 戻り流れを考慮

図-4 局所漂砂量の積分値とCERC公式($K=1$)との比較

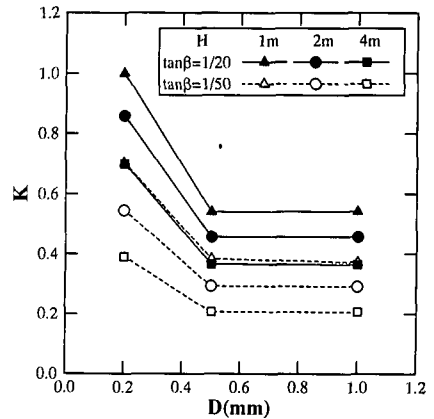


図-5 漂砂量係数 K に及ぼす中央粒径の影響

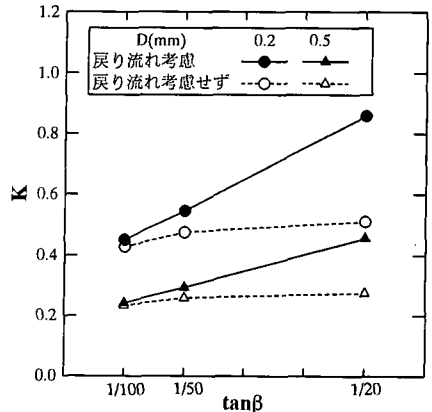
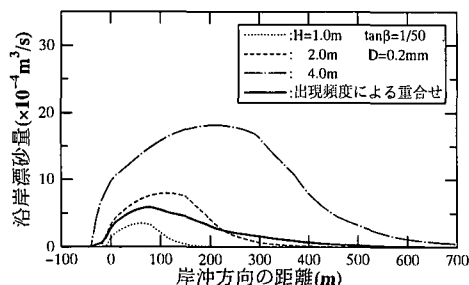


図-6 漂砂量係数 K に及ぼす中央粒径の影響
(有義波高 2 m)



図一七 年間の波浪出現頻度を考慮した沿岸漂砂量の岸沖方向分布計算例

4.4 波浪の出現頻度を考慮した沿岸漂砂量分布

波高の年間出現頻度を考慮して年間の沿岸漂砂量の岸沖分布を求めた一例を図一七に示す。波高が大きいときは遡上域も広く、汀線付近でもかなり多くの沿岸漂砂量が存在する。しかしながら、年間総計で見ると汀線付近にピークは現れないが、水深1.5~2.0mのごく浅いところに沿岸漂砂量のピークが現れることがわかった。

5. あとがき

本研究では、種々の波浪、底質、海底勾配の条件に対して、波浪・海浜流場の計算結果に基づく局所漂砂量を積分して沿岸漂砂量を評価し、CERC公式との比較を通して、沿岸漂砂量に及ぼす波浪、底質、海底勾配など入力条件の影響について検討した。その結果、戻り流れと波による漂砂を考慮することによりCERC公式の漂砂量係数0.77に近い結果が得られた。また、係数 K に対する底質粒径や海底勾配の依存性についても、既往の現地データと矛盾することなく、粒径に反比例し、海底勾配に比例する傾向が認められた。このことからモデルの妥当性が検証されたと考えている。しかしながら、数値計算結果は、波浪、海浜流および底面剪断応力などの外力場の評価法ならびに漂砂量算定式によって大きく異なる結果が得られるので、今後ともモデルの各ステップで詳細な現地検証が必要である。

参考文献

合田良實 (1975): 浅海域における波浪の碎波変形, 港研報告, 第14巻, 第3号, pp. 59-106.
 沢本正樹・山下俊彦 (1985): 波による半周期漂砂量, 土木学会論文集, 第363号/II-4, pp. 195-204.
 清水隆夫・斉藤昭三・丸山康樹・長谷川寛・鹿島遼一 (1985): 大型造波水路実験による岸沖漂砂量分布形のモデル化, 電研報告, No. 384028, 60 p.
 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 (1992): 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・水流正人・窪 泰浩・嶋田昌義・山田富朗 (1993): 取水港湾港口部の長期的な地形変化の再現, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 496-500.
 清水琢三・熊谷隆宏・三村信男・渡辺 晃 (1994): 汀線変化を考慮した3次元海浜変形長期予測モデル, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 406-410.
 清水琢三・山田晶子・内山一郎・渡辺 晃 (1995): 汀線変化を考慮した3次元海浜変形モデルの現地適用性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 606-610.
 田中 仁・A. Thu (1993): 全ての flow regime に適用可能な波・流れ共存場抵抗則, 土木学会論文集, 第467巻/II-23, pp. 93-102.
 永井紀彦・菅原一晃・橋本典明・浅井 正 (1993): 全国港湾海洋波浪観測20か年統計, 港研資料, No. 744, 304 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・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.
 Ahmad Sana・田中 仁 (1994): 交差する波と流れによる底面剪断力に関する研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 416-420.
 Dibajnia, M.・清水琢三・渡辺 晃 (1993): 現地海岸における縦断地形変化の再現, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 406-410.
 Dibajnia, M.・渡辺 晃 (1994): シートフロー漂砂量式の波・流れ交差場への拡張と沿岸漂砂量の検討, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 366-370.
 Bodge, K. R. and N. C. Kraus (1991): Critical examination of longshore transport rate magnitude, Proc. Coastal Sediments' 91, pp. 139-155.
 Dean, R. G., E. P. Berek, C. G. Gable and J. Seymour (1982): Longshore transport determined by an efficient trap, Proc. 18th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 954-968.
 Deigaard, R., Fredsose, J. and I. B. Hedegaard (1986): Mathematical model for littoral drift, J. Waterway, Port, Coast. and Oc. Engg., Vol. 112, No. 3, pp. 351-369.
 Dibajnia, M. and A. Watanabe (1992): Sheet flow under non-linear waves and currents, Proc. 23rd Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 2015-2028.
 Kamphuis, J. W. (1990): Littoral transport rate, Proc. 22nd Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 2402-2415.
 Komar, P. D. and D. L. Inman (1970): Longshore sand transport on beaches, J. Geophys. Res., Vol. 75, No. 30, pp. 5914-5927.
 Komar, P. D. (1988): Environmental controls on littoral sand transport, Proc. 21st Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 1238-1252.
 Longuet-Higgins, M. S. (1970): Longshore currents generated by obliquely incident wave, J. Geophys. Res., Vol. 75, No. 33, pp. 6778-6789.
 Shoonenes, J. S. and A. K. Theron (1994): Accuracy and applicability of the SPM longshore transport formula, Proc. 24th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 2595-2609.
 Valle, R. D., P. Medina and M. A. Losada (1993): Dependence of coefficient K on grain size, J. Waterway, Port, Coast. and Oc. Engg., Vol. 119, No. 5, pp. 568-574.
 Watanabe, A. (1992): Total rate and distribution of longshore sand transport, Proc. 23rd Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 2528-2541.