

局所漂砂量算定式の現地適用性に関する研究

清水 琢三*・近藤 浩右**・渡辺 晃***

1. ま え が き

近年、3次元海浜変形予測モデルの実際問題への適用が盛んに行われるようになり、モデルの現地適用性についてもある程度定量的に確認されている(丸山ら, 1987; 清水ら, 1989)。地形変化計算の基本となる波・流れ共存場の局所漂砂量算定式としては、既往の沿岸漂砂ならびに岸沖漂砂の研究成果と整合するよう定式化された渡辺ら(1984)のモデル(以下、渡辺モデルと呼ぶ)が広く用いられている。最近になって、斜面勾配の影響や底面軌道流速の非対称性の影響、砂漣形状あるいは砕波による乱れの効果などを考慮した高精度のモデル化が試みられている(山下ら, 1988; 河田, 1989; 佐藤ら, 1989; 渡辺ら, 1989; 大中ら, 1989等)、現地への適用を考えた場合、現在のところ、渡辺モデルが簡便であって最も実用性の高いモデルであると考えられる。しかしながら、渡辺モデルの漂砂量係数や波による漂砂の移動方向の判別法は、主として室内実験の知見に基づき得られたものであり、その現地適用性についてはこれまでに十分検討されていない。そこで本研究では、漁港ならびに取水港湾の港口部の地形変化や蛍光砂調査などの現地データならびに現地に近い条件で行われた実験データを再整理し、既往の岸沖漂砂に関する研究成果や3次元海浜変形モデルの現地適用結果も併せて、渡辺モデルの現地適用性について総合的に検討した。

2. 波による漂砂の移動方向に関する検討

2.1 漂砂の移動形態と移動方向

波による漂砂の移動形態は、掃流状態(BL)、浮遊状態(SL)ならびにシートフロート状態(SF)の3つに大別され、底面剪断応力が大きくなるにつれて順次遷移する。また、移動形態は砂漣の有無と密接に関係しており、BLからSLへの遷移条件は砂漣の生成条件に、SLからSFへの遷移条件は砂漣の消滅限界に対応してい

る。また、ネットの漂砂の移動方向は、通常、砂移動が活発な浅海域では、波が非対称で底面軌道流速振幅は岸向き流速最大時の方が大きいため、BL, SF状態では岸向き、SL状態では沖向きとなる。このような観点に立って Shibayama・Horikawa (1982), 土屋・坂野(1987)は、移動形態の遷移条件を与える分類図をシールズ数 Ψ との関係で整理しており、それらによれば、BLからSLへの遷移条件は $\Psi=0.1\sim0.2$, SLからSFへの遷移条件は $\Psi=0.5\sim0.6$ である。

図-1は、現地海岸におけるシールズ数の岸沖方向変化のモデル計算例(海底勾配 1/100, 粒径 0.25 mm, 周期 10 s)を示したものである。波高変化は合田(1975)の砕波変形モデルの簡略式を用いて、また、底面剪断応力は田中・首藤(1982)の波・流れ共存場の評価式で流れをゼロとして評価した。太平洋岸を例にとると、年間の平均有義波高が約 1 m であるので、水深 4 m 以浅では常にシールズ数がシートフロアの発生条件に相当する 0.5 を超えており、シートフロア状の激しい砂移動が生じているものと考えられる。砕波帯内では砕波による乱れや戻り流れ、海浜流の影響により砂移動はさらに激しくなるものと思われる。また、沖波有義波高が 2 m を超える高波浪が来襲すると、水深 10 m 以浅全域でシールズ数が 0.5 を超えており、現地においてはシートフロ

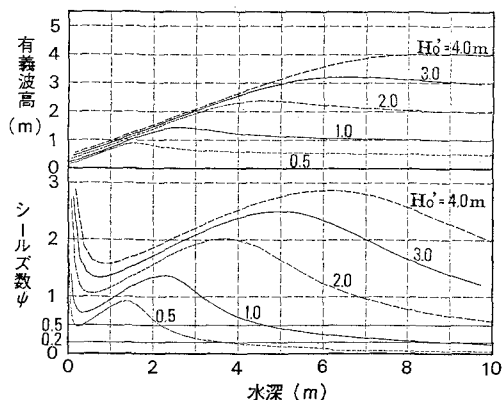


図-1 シールズ数の岸沖方向分布の計算例

* 正会員 工修 五洋建設(株) 土木設計部

** 正会員 工修 五洋建設(株) 技術部技術企画課

*** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

一状態が容易に発生する可能性があることがわかる。

2.2 地形変化調査に基づく遷移条件の推定

近似的に2次元水路にみたてることができる千葉県飯岡漁港の港口部において、光電式砂面計による地盤高の連続観測を実施した。調査は1987年9～10月にかけて約1ヶ月間、漁港周辺の波浪・流況調査と同時に実施した(清水ら, 1989)。飯岡漁港の港口部のように水深がほぼ一定で、外力が沖から岸に向かってゆるやかに減衰する場合には、理想的には、ネットの岸向き漂砂を生じるBL, SF状態では堆積し、沖向き漂砂を生じるSF状態では侵食するものと考えられる。

図-2に示す港口部のほぼ中央に設置した砂面計による底面高変化の実測値の一例を、その地点の波高、周期、シールズ数 Ψ の経時変化とともに図-3に示す。砂面計設置地点の平均水深は約3mであり、底質粒径は0.25mmである。波高がある程度大きくなると一旦侵食するが(時刻A; $\Psi=0.16$)、さらに波高が増大すると逆に急激な堆積傾向を示す(時刻B; $\Psi=0.71$)。また、波高減衰期には、一旦侵食するものの(時刻C; $\Psi=0.63$)、波高がさらに減衰した時点で堆積傾向に転じている(時刻D, $\Psi=0.22$)。このような地形変化は、移動形態が波高増大に伴いBLからSL, SLからSFへ、また波高減衰期にはその逆に遷移したため生じたものと解釈できる。

図-4は、他の期間も含めて侵食あるいは堆積を生じた時刻のシールズ数 Ψ と水粒子軌道直径・粒径比 d_0/D (砂澁形状を整理する上で重要な無次元量)の関係を示したものである。図中の破線は、現地データに対しても適用性が確認されている佐藤ら(1987)の砂澁消滅限界を表す実験式を、ま

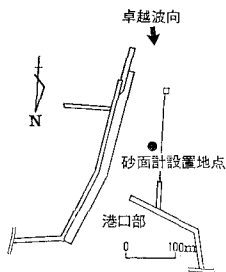


図-2 砂面計の設置地点

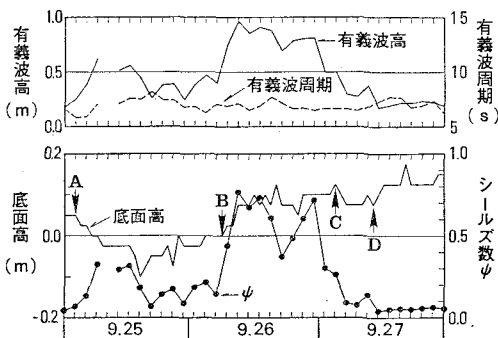


図-3 地盤高と外力の経時変化

た、実線は土屋・坂野(1987)のシールズ数と Sediment-fluid 数による漂砂形態の分類図より求めた BL から SL への遷移条件 ($\Psi=0.15$) ならびに SL から SF への遷移条件 ($\Psi=0.5$) を示している。これに対して地形変化の開始点から求めた遷移条件は、BL・SL が $\Psi=0.2$ 程度、SL・SF が $\Psi=0.7$ 程度と、既往の研究成果に比べてやや大きい結果となっているが、地形変化の測定精度や外力場の非定常性と空間的非一様性を考慮すれば、遷移条件としては概ね既往の研究成果を適用できるものと考えられる。

以上の検討の結果、現地ではシートフロー状態の砂移動が比較的容易に発生し、それに伴い多量の砂が港口から流入することがわかった。したがって、現地における波による漂砂の移動方向の判別には、従来、実験室レベルで検討されてきた BL から SL への沖向き漂砂の発生限界のみならず、シートフロー状態の岸向き漂砂の発生限界も考慮する必要があると考えられる。

3. 漂砂量係数に関する検討

3.1 漂砂量係数に関する既往の研究

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、波と流れが同時に外力として働くことによって移動状態になった砂粒子が平均流あるいは波動流速によって運ばれると考えて、以下のように定式化されている。

$$\vec{q} = \vec{q}_e + \vec{q}_w \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\vec{q}_e = A_c(u_*^2 - u_{*c}^2)\vec{u}_c/g \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\vec{q}_w = A_w(u_*^2 - u_{*c}^2)\vec{u}_b/g \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 q : 波・流れ共存場の漂砂量フラックス、 q_e : 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($u_{*c}^2 = \Psi_c \cdot s' \cdot gD$)、 Ψ_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。限界シールズ数としては、渡辺(1979)に従い、細

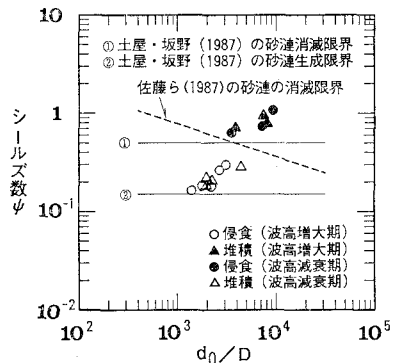


図-4 地形変化から推定した移動形態の遷移条件

砂のとき 0.11, 粗砂のとき 0.06 を用いる.

表-1 は、渡辺ら (1984) の漂砂量算定式の無次元定数 A_c , A_w と渡辺 (1981) の波による漂砂量算定式の無次元定数 B_w について、既往の研究成果をまとめたものである. 以下に、波および流れによる漂砂量の無次元定数について、既往の研究成果に基づき検討する. なお、不規則波および不規則振動流に対しては有義波を用いて外力を評価した場合の結果を示している.

(1) 波による漂砂量係数

渡辺 (1981) は、規則波による 2 次元造波水路実験の結果に基づき、波によるネットの漂砂量式として、浮遊移動が卓越する冲向き漂砂、掃流移動が卓越する岸向き漂砂を問わず、次式で表される無次元漂砂量 ϕ と最大シーلز数 Ψ_m の関係を提案しており、流れのない場合に式 (3) と本質的には同じである.

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

$$\phi = (1 - \lambda) q / w_0 D \dots\dots\dots (5)$$

$$\Psi_m = u_{*m}^2 / s' g D \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 B_w : 無次元定数、 Ψ_m : 最大シーلز数、 Ψ_c : 限界シーلز数、 λ : 空隙率、 w_0 : 沈降速度、 u_{*m} : 最大底面摩擦速度である.

まず、式 (4) の無次元定数 B_w について考察する. 渡辺 (1981) は規則波による 2 次元傾斜海浜に対する実験結果を基に $B_w=7$ を得た. また、佐藤ら (1984, 1985, 1986) は、2 次元的な砂漕が形成される場合には、非対称な規則振動流のみならず不規則振動流に対しても B_w が 7 となることを示している. これに対して、大塚ら (1984) と入江ら (1985) は不規則波を用いた 2 次元傾斜海浜における実験結果に対して $B_w=3$ 得た. また、佐藤ら (1985, 1986) は、現地のように 3 次元的な砂漕が形成される場合には、規則振動流、不規則振動流を問わず、 B_w は 3 程度と小さくなることを明らかにした. さらに、電力中央研究所で行われた大型造波水路実験の結果によっても、 B_w は 3~5 である (清水ら, 1985a). 以上の結果を総合的に判断すると、 B_w は現地への適用に際して適宜調整しなければならないパラメータではあるが、現地スケールに対しては 3 程度の値をとるものと考えられる.

次に、渡辺ら (1984) のモデルの無次元定数 A_w についてであるが、 A_w は B_w と次式で関連づけられる.

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

このように、 A_w には摩擦係数や沈降速度、粒径などの効果が含まれており、 B_w が普遍量であるとするれば局所的な外力と底質条件によって変化する係数である.

表-1 漂砂量係数に関する既往の研究成果一覧

	A_c	A_w	B_w	対 象
渡辺(1981)	—	—	7	2次元造波水路実験(規則波)
清水・斎藤・丸山 長谷川・鹿島(1985)	—	—	3~5	2次元大型造波水路実験(規則波)
大塚・三村・渡辺(1984)	—	—	3	2次元造波水路実験(不規則波)
佐藤・堀川(1984)	—	—	7	非対称規則振動流
佐藤・美谷・堀川(1985) 佐藤・伊藤・渡辺(1986)	—	—	7	非対称規則振動流・不規則振動流. 2次元砂漕の場合
	—	—	3	非対称規則振動流・不規則振動流. 3次元砂漕の場合
渡辺・丸山・清水・榊山 (1984)	0.5	0.15	—	平面水槽実験(規則波) (3次元海浜変形予測モデルの検証)
丸山(1987)	2.0	0.2	—	新潟県柏崎地点 (3次元海浜変形予測モデルの現地検証)
清水・野谷・近藤 西・山本(1989)	2.0	—	—	千葉県飯岡漁港 (3次元海浜変形予測モデルの現地検証)
本研究	—	—	2.5	千葉県飯岡漁港港口部の堆積土量
	1~3	0.2 ~ 0.5	—	福島県鮫川河口周辺海岸における蛍光砂調査結果 [渡辺ら(1981), 加藤ら(1985), Krausら(1982)のデータ, 香取ら(1983)の定常流・振動流交差装置によるデータ]
	2.0	0.2	—	取水港湾(福島第一原子力地点)の港内堆積土量

$D=0.22\text{ mm}$ の細砂を例にとると、 $w_0=2.4\text{ cm/s}$, $\lambda=0.4$, $s'=1.57$ であるので、摩擦係数 f_w を $0.01\sim0.1$ で変化させると、

$$A_w = (0.03\sim0.10) B_w \dots\dots\dots (8)$$

なる関係が得られる. したがって、現地では、無次元定数 B_w は 3 程度の値をとるので、 A_w としては $0.1\sim0.3$ の値をとるものと考えられる. 3 次元海浜変形予測モデルの現地適用性を検討した丸山 (1987) の結果でも、 A_w として 0.2 が得られており、上記の関係に対応している.

(2) 流れによる漂砂量

流れによる漂砂量フラックス算定式 (2) は、Komar (1977) の沿岸漂砂量式を一般の海浜流場に拡張したものであり、漂砂量係数 A_c としては $0.1\sim1$ 程度の値をとるものといわれている (渡辺ら, 1984). 3 次元海浜変形予測モデルの現地適用性に関する検討結果によれば、現地に関しては $A_c=2.0$ の値をとることが報告されている (丸山, 1987; 清水ら, 1989). 丸山ら (1987) によれば、 A_c は A_w の 10 倍であり、渡辺ら (1984) の室内実験の結果に比べて流れによる漂砂が、現地では相対的に重要であることを示唆する結果となっている.

3.2 局所漂砂量算定式の現地適用性

(1) 漁港の港口堆積土量

千葉県飯岡漁港港口部の堆積土量を検証データとして、式 (4) の無次元定数 B_w の評価を試みた. 検証期間は、沖合の水深 15 m 地点で波浪観測が実施されていた 1986 年 7 月から 12 月までの半年間で、その間に約 1 ヶ月毎に実施された深浅測量データを用いて港口部の堆積土量を求めた. なお、港口部の波浪条件は不規則波の屈折・浅水・碎波変形計算を行って沖波条件より求めた.

漂砂量係数を 1 とした場合の計算値と実測値の比較を

図-5 に示す。計算に当たっては、2. の結果に基づきシールズ数が0.2から0.5までを冲向き漂砂の発生領域と仮定し、冲向き漂砂を考慮した場合についても検討した。しかしながら、図-1 に示したように、飯岡漁港の港口水深は4m程度と浅く、常時1m程度の波浪が来襲するため、シートフロー状態の砂移動が卓越し、冲向き漂砂の影響はあまり顕著に現われていない。原点を通るように回帰すると B_W は2.5と求まる。この結果は既往の研究成果から推定される現地での係数にはほぼ一致しており、岸沖漂砂量式としての渡辺(1981)モデルの妥当性が改めて確認された。また、シートフロー状態が卓越すると考えられる現地に対しても B_W が3程度の値をとることが確認されたことから、この漂砂量係数は移動形態によらず、かなり普遍的な値であると判断される。

(2) 螢光砂調査

灘岡(1981)、加藤(1985)は、螢光砂の投入点を中心点とする半径10m程度の円周上において鉛直採取を数時間にわたり実施する方法を用いて、碎波帯内の局所的な漂砂量を評価するとともに、同時観測された外力(波、流れ)との関連を調べている。調査期間中のサークル内の平均的な流れの方向ならびに波向と螢光砂の移動方向より、波の進行方向と流れの方向の螢光砂の移動速度が算出されるので、これらに混合厚さを乗じれば、流れによる漂砂量フラックスと波による漂砂量フラックスの実測値を求めることができる。著者らも、福島県鮫川河口左岸の砂州前面海岸において、同様の方法で局所漂砂量を求める調査を1984年2月と7月に実施した(清水ら, 1984)。これらのデータを再整理することにより、式(2)、(3)の漂砂量係数 A_c , A_W を評価することを試みた。ただし、平均流速が非常に小さいデータや調査期間中の潮位変化が大きく、外力場の定常性が著しく保たれていないと判断されるデータは除いた。なお、底面剪断応力の算定に当たっては、実測の変動流速記録から求まる有義波相当の軌動流速振幅を用いた。

漂砂量係数を1にした場合の計算値と実測値の比較を図-6, 7 に示す。図-6 に示す流れによる漂砂量フラックスに対しては、Krausら(1982)の沿岸漂砂を対象とした一連の螢光砂調査の結果ならびに香取ら(1983)の定常流・振動流交差装置による漂砂量測定結果も併せてプロットした。外力をかなり大雑把に評価したにもかかわらず、流れによる漂砂量フラックスは比較的よくまとまっており、 A_c は1~3の間の値をとることがわかる。

また、波による漂砂量フラックスに対しては、データのばらつきが大きいものの、 A_W は概ね0.2~0.5の値をとることがわかる。今回のデータの範囲では式(7)の右辺は0.03程度であり、 B_W を7とした場合でも

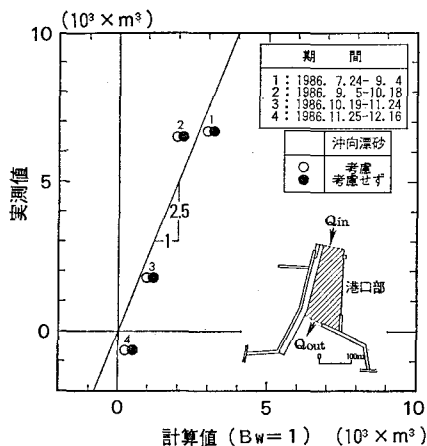


図-5 波による漂砂量の係数 B_W

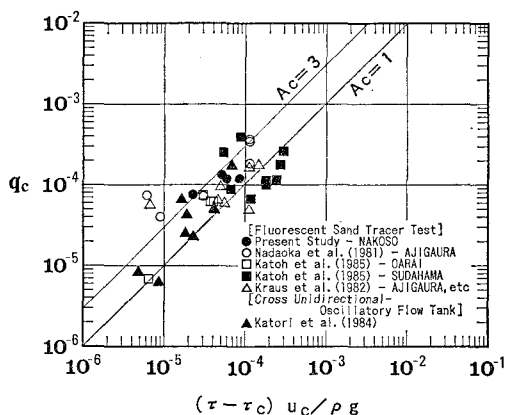


図-6 流れによる漂砂量の係数 A_c

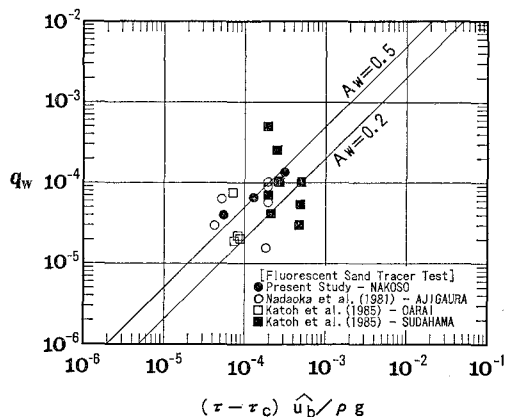


図-7 波による漂砂量の係数 A_W

A_W は0.2程度にしかならないので、図-7の結果はやや大きめである。この原因としては、底面剪断応力の評価として碎波による乱れの効果を取り込んでいないこと、さらには波動流速成分に含まれる長周期変動の影響

を考慮していないことなどが考えられる。

(3) 取水港湾の港口流入砂量

福島第一原子力地点における1979年7月から1980年11月までの約1年半の港口流入砂量の経時変化データ(丸山ら, 1982)を検証データとして, 渡辺モデルの適用性を検討した。対象とした取水港湾の港口部は, 水深が約8mと比較的深いため波による流入砂は少なく, 取水に伴う流入砂が卓越している。丸山ら(1982)と同様, 港口を5分割し, 各断面毎に日々の波と流れの条件を与えて漂砂量フラックスを計算し, その総和として港口流入砂量を評価した。

式(7)の右边を計算して求めた A_W/B_W の検証期間中の平均的な値は0.0675であり, B_W を3とすると A_W は0.2と求まる。そこで, A_W を0.2とし, 沖向き漂砂を考慮せずに最終的な港内堆積土量が合うように A_C を求めたところ, A_C は1.98となった。また, 飯岡漁港の場合と同様, シールズ数が0.2~0.5の範囲で沖向き漂砂が生じると仮定した場合には, A_C として2.26が得られた。このように, 流れが卓越する波・流れ共存場においても, 漂砂量係数は既往の研究結果と整合する結果が得られた。

以上, 2.1, 2.2の検討結果を総合的に判断すると, 渡辺モデルにより, 汀線に近が砕波帯内れ波による漂砂を除いて, 同一の漂砂量係数で統一的に評価可能できるものと判断される。

4. あとがき

本研究では, 種々の現地データを用いて波による漂砂の移動方向ならびに渡辺ら(1984)の局所漂砂量モデルの現地適用性について検討した。現地においては, シートフロー状態の砂移動が容易に発生するので, 砂鏈発生による沖向きの漂砂の発生限界のみならず, シートフローによる岸向き漂砂の発生限界も移動方向の判別に当たっては重要であることがわかった。また, 波・流れ共存場の漂砂量式として渡辺ら(1984)のモデルの現地適用性が確認され, 流れによる漂砂量係数 A_C を2程度, 波による漂砂量係数 A_W を0.2程度($B_W=3$)とすれば, 現地海岸での局所漂砂量を地点を問わず概略算定できることがわかった。しかしながら, 現地における砕波帯内ならびにシートフロー状態での砂移動に関しては, 今後更に現地データを蓄積していく必要があろう。

最後に, 本研究で紹介した現地観測や現地データの解析に参加する機会を与えて下さった東京電力株式会社, 常磐共同火力株式会社, 財団法人漁港漁村建設技術研究所の関係各位に深甚なる謝意を表する次第である。また, データ整理と図面製作に協力して頂いた五洋建設(株)野谷斎君と坂野雅人君に感謝の意を表する。

参考文献

- 入江 靖ら(1985): 不規則波による二次元海浜変形と岸沖漂砂量, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 316~320.
- 大塚行則ら(1984): 不規則波による二次元海浜変形と岸沖漂砂, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 321~325.
- 大中 晋ら(1989): 波・流れ相互干渉を考慮した波動場・海浜流場・地形変化の数値計算, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 399~403.
- 香取完和ら(1983): 定常流・振動流交差装置による漂砂量測定, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 204~208.
- 加藤一正ら(1985): 蛍光砂を用いた砕波帯内における局所的砂移動の観測(第2報), 港研報告, 第24巻, 第4号, pp. 3~63.
- 河田恵昭(1989): 傾斜海浜における漂砂量則について, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 298~293.
- 合田良實(1975): 浅海域における波浪の砕波変形, 港研報告, 第14巻, 第3号, pp. 59~106.
- 佐藤慎司・堀川清司(1984): 非対称振動流下における砂鏈上の砂移動に関する実験的研究, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 286~290.
- 佐藤慎司ら(1985): 非対称振動流下における砂の移動機構と漂砂量に関する実験的研究, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 283~287.
- 佐藤慎司ら(1987): 不規則振動流下における砂鏈形状と漂砂量, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 228~232.
- 佐藤慎司ら(1987): 不規則振動流中における砂移動機構と砂鏈の消滅限界, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 246~250.
- 佐藤慎司ら(1989): 重合波浪場における漂砂量の評価法に関する研究, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 294~298.
- 清水隆夫ら(1985a): 大型造波水路実験による岸沖漂砂量分布形のモデル化, 電中研報告, No. 384028, 60p.
- 清水琢三ら(1985b): 仕切堤建設に伴う駿川河口周辺の地形変化, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 395~399.
- 清水琢三ら(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.
- 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.
- 土屋義人・坂野雅人(1987): 漂砂形態とその発生領域, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 222~226.
- 灘岡和夫ら(1981): 蛍光砂を用いた砕波帯内における局所的砂移動の観測, 港研報告, 第20巻, 第2号, pp. 75~126.
- 丸山康樹ら(1982): 発電所港湾における港内堆砂量の予測モデル, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 294~298.
- 丸山康樹(1987): 海底地形変化予測モデルの現地適用性, 電中研報告, No. U87012, 35p.
- 山下俊彦(1988): 波による net の漂砂量, 水工学に関する夏期研修会講義集, pp. B-1-1~B-1-11.
- 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 晃ら(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.
- 渡辺 晃ら(1989): 波・流れ共存場における砂鏈形状と漂砂量, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 299~303.
- Komar, P. D. (1977): Beach sand transport-Distribution and total drift, Proc. ASCE, Vol. 103, No. WW2, pp. 225~239.
- Kraus, N. C. et al. (1982): Field experiments on longshore sand transport in the surf zone, Proc. 18th ICCE, pp. 969~988.
- Shibayama, T. and K. Horikawa (1982): Sediment transport and beach deformation, Proc. 18th ICCE, pp. 1439~1458.