

混合砂の移動機構に基づくシートフロー漂砂量算定式の提案

佐藤 慎 司* ・田 中 正 博** ・樋 川 直 樹***
渡 辺 晃**** ・磯 部 雅 彦*****

1. はじめに

海岸における底質は、波による淘汰作用の影響を受けて、粒径が比較的揃う傾向にある。しかし、岸沖方向には碎波点や汀線近傍に粗粒成分が集中するため、粒度が空間分布を持つ場合がある上、漂砂源近くの海岸で十分に淘汰が進んでいない場合や、養浜工が実施された海岸などでは、広い粒度分布の混合粒径砂が見られることも多い。このような場合の海浜変形を予測するためには、波浪場における混合粒径砂の移動機構を理解する必要があるが、混合砂の漂砂機構に関する研究報告例としては、現地調査では山本ら (1998)、佐藤ら (1999) などの報告、室内実験では田中ら (1988) の造波水路による実験、Dibajnia・Watanabe (1996)、Dibajnia ら (1998)、渡辺ら (1999)、酒井ら (1999) などの振動流装置による実験、張ら (1995, 1996)、田中ら (2000) の大型造波水路による実験、数値実験では田中ら (1989)、後藤ら (1996) の例などがあり、近年ようやくデータが蓄積されつつある。本研究では、振動流装置を用いて細粗混合粒径砂を底質とした実験を行うことによって、その移動機構を明らかにし、その上で現地条件への適用を想定した粒径別漂砂量算定式を提案することを目的とした。

2. 実験方法と実験ケース

実験では、中央粒径 $d_f=0.2\text{ mm}$ の細砂と黒く染色した中央粒径 $d_c=0.8\text{ mm}$ の粗砂の 2 種類の砂を混合して、任意波形振動流装置内の長さ 3.6 m の観測部に平坦に敷き均した。細砂の混合率 P を $P=30\%$, 50% , 70% , 100% の 4 種類に変化させ、周期 $T=3\text{ s}$ 、非対称度 $u_{\max}/\bar{u}=0.6$ の非対称振動流を最大流速 $u_{\max}=1.2\sim 2.0\text{ m/s}$ の範囲で装置内に発生させて合計 17 ケースの実験を行った。振動流装置の観測部の幅は 12 cm であるが、

大流速の条件で実験を行うため、それを 8 cm に縮小して使用した。観測部中央における砂移動を計測対象とすることにし、中央位置をはさんだ左右両側に同量の混合砂を入れ、振動流作用後に左右両側から回収した砂をふるい分けし、細粗砂それぞれの質量を計測することにより、正味の漂砂量 Q_f , Q_c (岸向きを正) を算出した。表 1 に実験条件と正味の漂砂量を示す。ここで Q_{sf} , w_{sc} は、

$$\phi_f = \frac{Q_f}{w_{sf} d_f}, \quad \phi_c = \frac{Q_c}{w_{sc} d_c} \dots\dots\dots (1)$$

で定義される無次元漂砂量である。ここに、 w_{sf} , w_{sc} は細砂、粗砂それぞれの沈降速度である。

漂砂量の測定実験とともに、装置側面から砂の挙動を 1 秒 400 コマのハイスピードビデオカメラで撮影し、現象の観察を行うとともに、画像をパソコンに取り込み、画像の輝度を浮遊砂濃度に変換して、細粗砂の移動状況と濃度場の変動を解析した (田中ら, 1999)。また、振動流作用前後に、直径 20 mm、肉厚 1 mm のアクリルパイプを用いて、長さ 5 cm 程度の砂層の鉛直コア試料を採取し、これを分析することにより振動流作用による鉛直分級の程度を確認した。

3. 粒径別限界掃流力の導入

異粒径底質間の相互干渉が全くないとすれば、存在割合が p である粒径クラスの無次元漂砂量 $\phi (=Q/(w_s d))(w_s$ は底質の沈降速度、 d は粒径) と、その粒径の底質のみで構成される均一粒径条件の漂砂量 $\phi|_{p=100\%}$ との間には次式の関係がある。

$$\phi = p \cdot \phi|_{p=100\%} \dots\dots\dots (2)$$

この関係が成立すれば、混合粒径砂の漂砂量は、 ϕ/p に対して均一砂の漂砂量算定式を用いて評価できることになる。しかし実際には、異粒径底質同士の相互干渉により、細砂は移動しにくくなり、粗砂は移動しやすくなる傾向がある。芦田・道上 (1972) は、定常流中の混合粒径砂の移動量に関する実験を行い、粒径別流砂量を評価するモデルを提案した。同モデルでは、流砂に対する相似性仮説を用いて、無次元化された粒径別限界掃流力 τ_{*hl} を Egiazaroff (1965) の式を参考として粒径比 d_i/d_m をパラメタとして与え、限界掃流力付近の小さな掃流力の条件

* 正 会 員 工 博 東京大学教授 工学系研究科社会基盤工学専攻
** 正 会 員 修(工) 東京大学大学院博士課程社会基盤工学専攻
*** 正 会 員 修(工) 清水建設(株)
**** 正 会 員 工 博 東京大学教授 工学系研究科社会基盤工学専攻
***** フェロー 工 博 東京大学教授 新領域創成科学研究科環境工学専攻

表-1 実験条件と漂砂量

case No.	$(u_{\max}/\bar{u})$	$u_{\max}$ [m/s]	細砂混合率 P [%]	実験時間 [s]	粗砂 ϕ_c	細砂 ϕ_f
1	0.6	2.07	70	63	0.485	-5.369
2	0.6	1.81	70	51	0.293	-2.507
3	0.6	1.55	70	54	0.293	3.344
4	0.6	1.45	70	60	0.283	3.312
5	0.6	1.29	70	57	0.198	4.131
6	0.6	1.14	70	75	0.198	4.254
7	0.6	1.81	50	33	0.949	4.601
8	0.6	1.68	50	60	0.737	2.406
9	0.6	1.55	50	66	0.647	3.446
10	0.6	1.45	50	90	0.515	5.066
11	0.6	1.34	50	72	0.426	4.054
12	0.6	1.21	50	61	0.418	1.930
13	0.6	1.73	30	63	1.145	-0.769
14	0.6	1.55	30	55	0.802	-0.920
15	0.6	1.40	30	51	0.713	-0.867
16	0.6	1.70	100	27	-	-19.43
17	0.6	1.60	100	48	-	-9.833

では流砂量が大きく変化するが、大きな掃流力の条件では無次元漂砂量は粒径と無関係になるという定常流中における実験データの特性を合理的に表現している。

振動流においても、周期が極めて長い条件では、定常流中における底質の移動特性に漸近することが予想されるが、海岸波浪の典型的な周波数帯程度の変動に対しては、移動限界付近の条件に対して田中ら (1988) の実験があるのみで、シートフロー状態などの大きな掃流力条件における混合砂の挙動は確認されていない。シートフロー状態の漂砂量については、均一粒径砂に対して広い条件に対する適用性が確認されているモデルとして、Dibajnia・Watanabe (1996) のモデルがある。同モデルは、半周期間の漂砂量を流速変動の自乗平均値を用いて評価し、半周期間に巻き上げられて次の半周期間に逆向きへ輸送される成分の割合を定式化することにより、正味の漂砂量を評価するもので、次式で与えられる。

$$\phi = \frac{Q}{w_s d} = 0.0015 \cdot \text{sign}(\Gamma) |\Gamma|^{0.5} \quad (3)$$

$$\Gamma = \frac{u_c T_c (\Omega_c^2 + \Omega_f^2) - u_t T_t (\Omega_c^2 + \Omega_f^2)}{(u_c + u_t) T} \quad (4)$$

ここで、 u_c 、 u_t は岸向きおよび沖向き流速波形の rms 振幅、 T_c 、 T_t は、岸向き流速、沖向き流速の継続時間である。また、 Ω_c 、 Ω_f (j は c または t を表す) において、半周期間の輸送量を規定する部分および逆向きへ輸送される割合を表す部分は明示的に、次式のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \Omega_j &= q_j \\ \Omega_j &= 0 \end{aligned} \right\} \omega_j < \omega_{cr} \text{ の場合,}$$

$$\left. \begin{aligned} \Omega_j &= \frac{\omega_{cr}}{\omega_j} q_j \\ \Omega_j &= \left(1 - \frac{\omega_{cr}}{\omega_j}\right) q_j \end{aligned} \right\} \omega_j > \omega_{cr} \text{ の場合} \quad (5)$$

ここで、 q_j は半周期間の底質輸送量を規定するパラメータで次式で与えられる。

$$q_j = \omega_j T_j \sqrt{\frac{sg}{d}} = \frac{1}{2} \frac{u_j^2}{\omega_s \sqrt{sgd}} \quad (6)$$

ここで、 $s (=1.65)$ は底質の水中比重、 g は重力加速度である。また、 ω_j は、巻き上げられた浮遊砂が沈降するのに要する時間と正負各周期との比を表すパラメータで、次式で与えられる。

$$\omega_j = \frac{1}{2} \frac{u_j^2}{sg w_s T_j} \quad (7)$$

限界掃流力に対応する移動限界流速を導入し、 q_j を修正すると、

$$q_j = \max\left(\frac{1}{2} \frac{u_j^2 - u_{cr}^2}{\omega_s \sqrt{sgd}}, 0\right) \quad (8)$$

となる。ここで、 u_{cr} は移動限界流速で、移動限界シールズ数 Ψ_{cr} と波による摩擦係数 f_w を用いて、

$$u_{cr} = \sqrt{\frac{\Psi_{cr}}{f_w} 2sgd} \quad (9)$$

で与えられる。限界シールズ数 Ψ_{cr} の粒径依存性が芦田・道上 (1972) のものと同じであると仮定し移動限界流速を評価すると、式 (8) で定義される q_j を用いて正味の漂砂量を推定することができる。図-1 および図-2 は、 $P=50\%$ の条件に対して、このようにして修正した式による計算値を実測値と比較したものである。ここで、簡単のために $f_w=0.01$ 、 $\Psi_{cr}=0.05$ とし、平均粒径 d_m は次式で評価した。

$$d_m = P d_f + (1-P) d_c \quad (10)$$

粒径依存性を考慮した限界掃流力を導入したことによる漂砂量算定値の修正量は小さく、均一砂の算定式と実測漂砂量との差異は大きい。即ち、シートフロー状態の振動流においては、大きな掃流力条件では粒径間の相互干渉効果が消滅する定常流中の輸送機構と大きく異なる。

4. 細粗砂の移動機構と浮遊砂濃度

大流速の流れの作用により、混合層内の底質はシートフロー状態で輸送され、一部は巻き上げられるが、流速の反転時には大部分の底質が静止し、砂層を形成する。この時、鉛直分級が生じ、表面に粗い底質が集中し、細かな底質はその下に分布することになる。そのため、次の半周期の開始時には、粗い底質は元々の存在確率以上に移動するとともに、細かな底質の移動は表面の粗い底質の存在により阻止され、異なる粒径間の干渉効果が現れることになる。

図-3 (a)、(b) および (c) は、 $P=70\%$ の条件に対して、それぞれ最大流速 1.2、1.6、2.0 m/s の条件の振動流作用後の砂層表面のコア試料を採取して得られた粒度の鉛直分布を示したものである。振動流を停止する際に

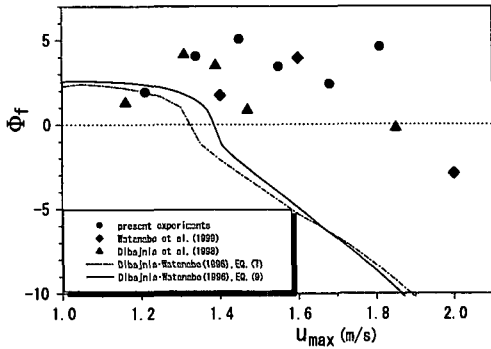


図-1 流速最大値と無次元漂砂量の関係 (細砂, P=50)

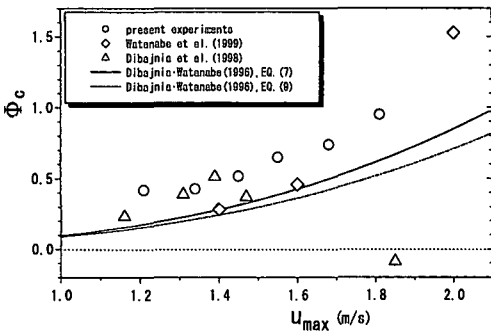


図-2 流速最大値と無次元漂砂量の関係 (粗砂, P=50)

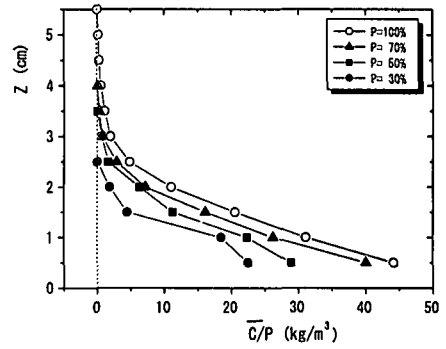


図-4 画像解析による細砂平均濃度の鉛直分布

以上より、細砂の移動量を正しく評価するためには、粗砂のアーミング効果により半周期間の移動量が存在確率の減少分以上に減少する効果と浮遊細砂の巻き上げ高さが減少する効果の両者をモデル化する必要がある。

5. 混合砂に対する漂砂量算定式の提案

広い粒度分布を持つ一般的な底質条件においても適用できる漂砂量算定式を構築するために、異粒底質間の干渉により半周期間の移動量が変化する効果と浮遊砂の巻き上げ高さ Δ が変化する効果を、粒径比 d_i/d_m をパラメータとして導入することとした。図-5 に模式的に示したモデル化に従うと、混合粒径砂の漂砂量は次式のように定式化される。

$$q'_j = q_j \cdot f_1 \left(\frac{d_i}{d_m} \right) \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\Delta' = \Delta \cdot f_2 \left(\frac{d_i}{d_m} \right) \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで、' は混合粒径砂条件における諸量であることを表す。粒径比の関数である f_1, f_2 は、 $f_1(1)=f_2(1)=1$ となる単調増加関数と考えられるため、べき乗関数で表現することとする、

$$f_1 \left(\frac{d_i}{d_m} \right) = \left(\frac{d_i}{d_m} \right)^{a_1} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$f_2 \left(\frac{d_i}{d_m} \right) = \left(\frac{d_i}{d_m} \right)^{a_2} \quad \dots\dots\dots (14)$$

とかけ、この時、Dibaia・Watanabe の式における Q_j, Q'_j の評価は、

$$\left. \begin{aligned} Q_j &= q_j \cdot f_1 \\ Q'_j &= 0 \end{aligned} \right\} \omega_j \cdot f_2 < \omega_{cr} \text{ の場合,} \\ \left. \begin{aligned} Q_j &= \frac{\omega_{cr}}{\omega_j \cdot f_2} q_j \cdot f_1 \\ Q'_j &= \left(1 - \frac{\omega_{cr}}{\omega_j \cdot f_2} \right) q_j \cdot f_1 \end{aligned} \right\} \omega_j \cdot f_2 > \omega_{cr} \text{ の場合} \quad \dots\dots\dots (15)$$

となる。式 (5) の代わりに式 (15) を用いれば、混合粒径砂の正味の漂砂量が評価できることになる。式 (11)

は、ピストンが約5秒かけて緩停止するため、その間に砂層が乱される上、浮遊細砂が砂層表面に降り積もることになることから、振動流作用中の状態を忠実に捉えているとは言い難いが、表面から5mm程度の位置に主として細砂で構成される層が存在し、その上に粗砂層が覆いかぶさるように分布していることがわかる。また、表面の粗粒化は、最大流速が大きいほど顕著に現れている。

図-4 は、ビデオ画像の輝度から推定した1周期平均浮遊砂濃度 $\bar{C}$ の鉛直分布を示したものである。実験では粗砂は黒く染色されているため、同図では、細砂の濃度が示されていることになる。均一砂の場合 ($P=100\%$) と混合粒径砂の場合 ($P=30\sim70\%$) とを比較すると、時間平均濃度は、存在確率の減少に見合う分以上に減少することがわかる。さらに、濃度の減少とともに浮遊砂の巻き上げ高さも小さくなっている。

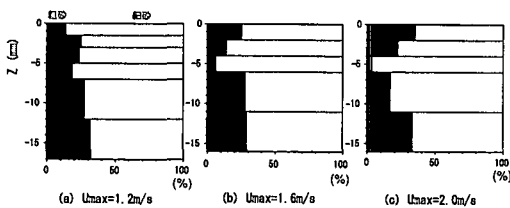


図-3 コア分析による粒度の鉛直分布

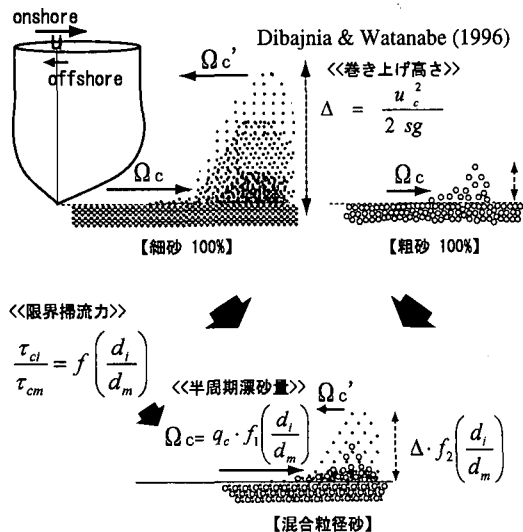


図-5 混合粒径砂の漂砂量モデルの概念図

および(12)の q'_i, Δ' を図-4に適合するように α_1, α_2 の最適値を求めると、 $\alpha_1=0.5, \alpha_2=0.7$ を得た。図-6~11は、 $P=70\sim 30\%$ の細砂混合率の条件に対して、提案した算定式による粗砂、細砂それぞれの漂砂量を実測値と比較したものである。いずれの条件においても提案式により漂砂量が粗砂、細砂ともに精度良く評価できることが確認される。

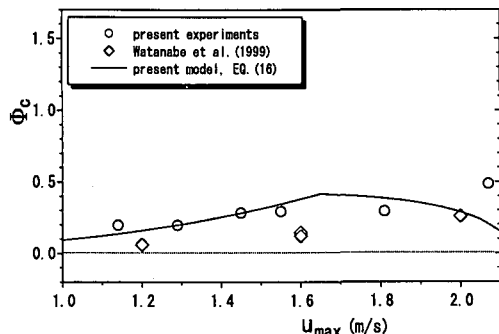
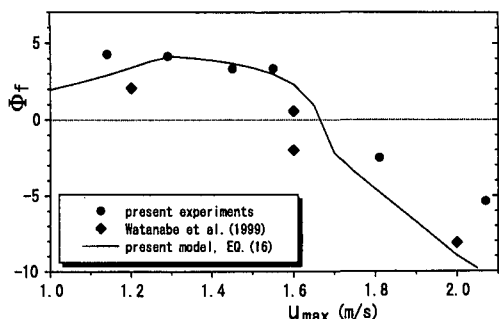
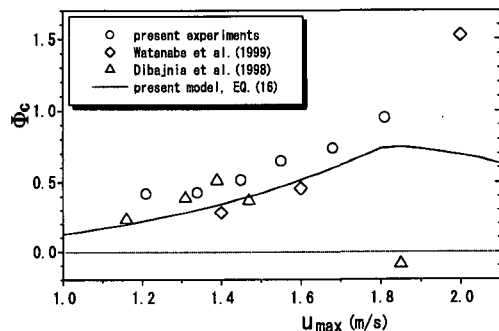
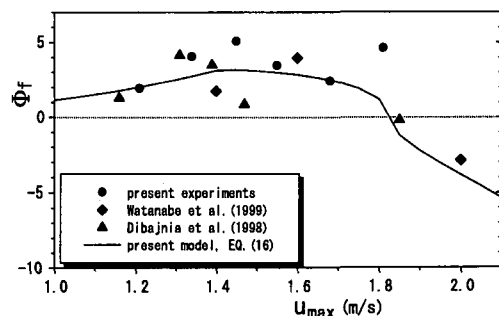
以上より、2粒径混合砂に対しては、式(11)、(12)を導入することにより精度よく漂砂量を算定できることが実験によって検証されたが、一般的な粒径分布を持つ混合砂への適用については以下のように考えることができる。混合粒径砂が代表粒径 d_i 、存在確率 $p(d_i) (i=1, n)$ の n 個の粒径クラスで構成されていると考えると、粒径 d_i のクラスの漂砂量は式(16)のように表され、総漂砂量は、式(17)として求められる。粒度分布が対数正規分布に従う仮想的な混合粒径底質に対して、本研究で提案したモデルにより粒径別漂砂量を計算した結果を図-12に示す。また、式(17)において粒径分割数 n を変化させた場合の総漂砂量の変化を図-13に示す。粒径クラスの数を増す程、真値に漸近していく様子が確認される。

$$\phi(d_i; d_m) = \frac{q(d_i; d_m)}{w_s d_i} \dots \dots \dots (16)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n \phi(d_i; d_m) w_s d_i p(d_i) \dots \dots \dots (17)$$

6. おわりに

振動流装置を用いて細粗混合砂のシートフローに関する実験を行い、混合粒径底質間の相互干渉機構を考察した。そして、移動機構の物理的な解釈に基づき、振動流

図-6 粗砂無次元漂砂量 ϕ_c の実験値と計算値の比較 ($P=70\%$)図-7 細砂無次元漂砂量 ϕ_f の実験値と計算値の比較 ($P=70\%$)図-8 粗砂無次元漂砂量 ϕ_c の実験値と計算値の比較 ($P=50\%$)図-9 細砂無次元漂砂量 ϕ_f の実験値と計算値の比較 ($P=50\%$)

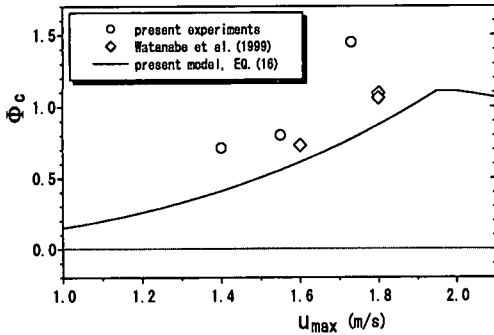


図-10 粗砂無次元漂砂量 Φ_c の実験値と計算値の比較 ($P=30\%$)

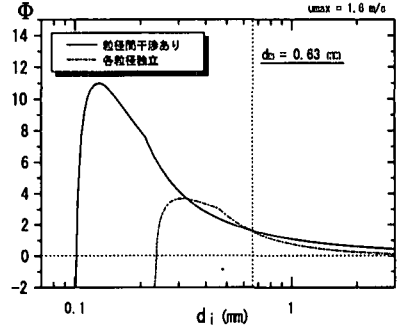


図-12 粒径間干渉の有無による粒径別無次元漂砂量 Φ の比較 ($U_{\max}=1.6$ m/s)

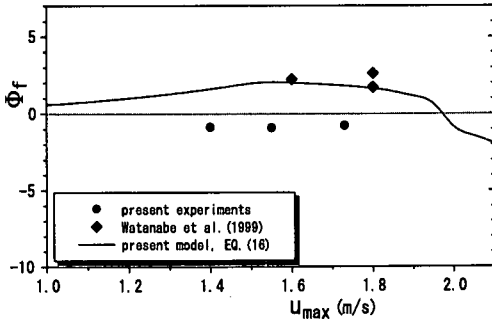


図-11 細砂無次元漂砂量 Φ_f の実験値と計算値の比較 ($P=30\%$)

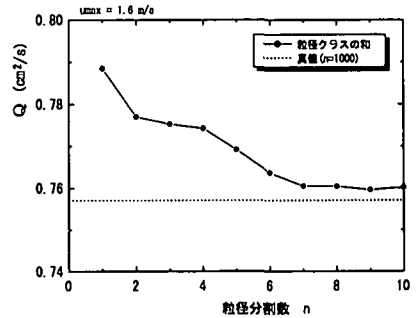


図-13 無次元漂砂量 Φ の計算値と粒径分割数 n の関係 ($U_{\max}=1.6$ m/s)

での混合砂シートフロー現象のモデル化を行い、粒径比をパラメタとする漂砂量算定式を提案した。モデルの妥当性は漂砂量測定実験の結果により検証した。

参考文献

- 芦田和男・道上正規 (1972): 混合砂礫の流砂量と河床変動に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第14号B, pp. 259-273.
- 後藤仁志・酒井哲郎・豊田泰晴・多田哲也 (1996): 振動流下の混合漂砂の鉛直分級機構, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 456-460.
- 酒井哲郎・後藤仁志・沖 和哉・高橋智洋 (1999): 混合粒径シートフロー漂砂の鉛直分級過程の可視化実験, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 516-520.
- 佐藤慎司・笠井雅広・河野竜男・諸田 勇・加藤俊夫・桜庭雅明 (1999): 駿河海岸和田島地先における砂礫の粒径別移動特性, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 526-530.
- 田中 仁・片山裕貴・加賀正之・須賀堯三 (1988): 混合砂海浜における漂砂量則, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 307-311.
- 田中 仁・吉竹豊尚・首藤伸夫 (1989): 波・流れ共存場における底質分級の数値計算, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 264-268.
- 田中正博・渡辺 晃・磯部雅彦・植村勇仁・岡本孝司 (1999): PIV画像解析手法を用いた浮遊砂量計測, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 1351-1355.

- 田中正博・井上 亮・佐藤慎司・磯部雅彦・渡辺 晃・池野正明・清水隆夫 (2000): 2粒径混合砂を用いた大型海浜断面実験と粒径別漂砂量の算出, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 551-555.
- 張 達平・山本幸次・佐藤慎司・田中茂信 (1995): 混合砂の分級過程に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 481-485.
- 張 達平・佐藤慎司・戸崎正明・田中茂信 (1996): 混合砂海浜の断面変形と粒径別漂砂量に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 461-465.
- 山本幸次・張 達平・佐藤慎司・田中茂信 (1998): 海岸における底質の分級に関する研究, 土木研究所資料, 第3592号, 78 p.
- 渡辺 晃・磯部雅彦・Mohammad Dibajnia・田中正博・植村勇仁 (1999): 非対称振動流作用下における混合粒径砂の移動機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 521-525.
- Dibajnia, M. and A. Watanabe (1996): A transport rate formula for mixed-size sands, Proc. 25th Conf. on Coastal Eng., pp. 3791-3804.
- Dibajnia, Mohammad・高沢大志・渡辺 晃 (1998): 混合粒径砂における移動層厚と漂砂量に関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 481-485.
- Egiazaroff, I. V. (1965): Calculation of nonuniform sediment concentration, Proc. ASCE, Journal of the Hydraulics Division, 91, HY 4, pp. 225-246.