

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

渡辺 晃* ・磯部 雅彦** ・ Mohammad Dibajnia***
田中正博**** ・ 植村 勇仁*****

1. はじめに

現地の海浜では、波によるふるい分け作用を受けて、水深毎に砂の粒径がほぼ均一になることが知られている。この波のふるい分け作用を利用して、現地よりも大きな粒径砂を用いた養浜工を侵食防止策に採用する例も数多い。また総合的な流砂系土砂管理を実現する観点から、港湾浚渫土の有効利用や河川から供給される砂礫混合材料の海岸での利用が今後増えると予想される。これらに対応して混合粒径を考慮しうる地形変化モデルが求められるが、モデルには細砂・粗砂の移動機構の干渉や細粒互層の形成過程を組み込む必要があると思われる。

一方最近の研究では、動的および静的なアーミングによる浮遊砂量の抑制、粗砂の下に細砂が潜り込む現象等が徐々に確認されてきている (Dibajnia ら, 1998 他)。

そこで本研究では、細砂・粗砂の干渉を考える上でまず浮遊砂量に着目し、実海域相当のシートフロー条件下での混合砂の移動形態を粒径、混合率、流速および波の非対称性によって分類した。続いて移動形態毎に漂砂量測定実験を実施し、定量的解釈を施した。さらに画像解析を行い、Dibajnia・渡辺 (1992) の漂砂量式との比較を交えて浮遊砂量および掃流砂量の 1 周期間の動きを調べることにした。

2. 実験の概要

(1) 実験装置および条件

実験は、任意の流速波形を与えることができる振動流装置 (図-1) で行った。中央の観測部は長さ 4 m、高さ 21 cm、幅 8 cm (装置は幅 12 cm であるが、より大きな流速を作用させるために幅を狭めた) の長方形断面である。観測部の両端にはハニカムで製作した捕砂器を設置し、観測部外への底質の流失を防止している。底質試料は、表-1 に示すような細砂 0.2 mm、粗砂 0.8 mm の混

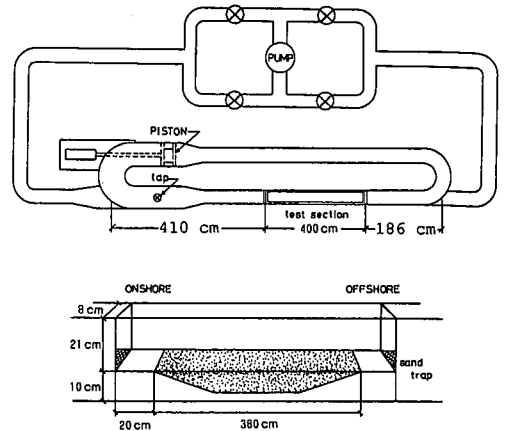


図-1 実験装置とその観測部

合砂である。入力する流速波形には一次のクノイド波で表される正負非対称規則波 (図-2 参照) を使用し、実験中に水 (および砂) 粒子の移動が観測部に納まるように周期は全ケース 3 s とした。これらの条件下、混合粒径砂を対象とした 2 種類の実験を行った。最新型のデジタルビデオカメラで実験の様相を撮影する移動現象観察実験 (50 ケース以上) ならびに漂砂量を直接測定する漂砂量測定実験 (10 ケース) である。移動現象観察実験においては、細砂混合率 (P: 20~70%)、作用最大流速 ($u_{max}: 1.2 \sim 2.0$ m/s) を変化させ、さらに非対称性パラメーター (u_{max}/\bar{u}) を 0.6, 0.7 の 2 通りとした。また、粗砂を黒に染色し、細砂 (うす茶色) との色調コントラストをつけることで移動現象の観察を容易にした。

(2) 漂砂量の測定方法

漂砂量測定実験における漂砂量の測定は、図-3 のように観測部を 2 つに分けてあらかじめそれぞれの領域の砂の質量を計っておき、実験後にふるい分けし、乾燥させてから再び質量を計り、その差から次式により漂砂量

表-1 底質の性質

砂	中央粒径 (mm)	比重	沈降速度 (cm/s)
豊浦砂	0.20	2.65	2.3
相馬砂	0.80	2.65	10.0

* 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学専攻

*** 正会員 工 博 名古屋工業大学助教授 社会開発工学科

**** 正会員 修(工) 東京大学 工学系研究科社会基盤工学専攻

***** 正会員 修(工) 潜水建設 (株)

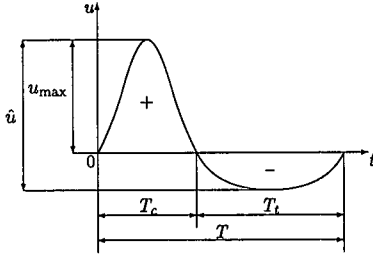
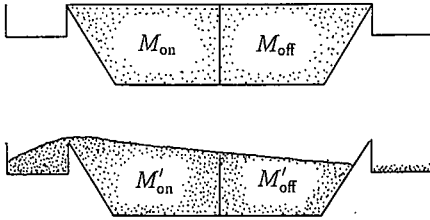


図-2 流速波形



$$\Delta M_{on} = M'_{on} - M_{on} \quad \Delta M_{off} = M'_{off} - M_{off}$$

図-3 漂砂量の評価方法

を求めた。

$$q = \frac{\Delta M_{on} - \Delta M_{off}}{2\rho_s B \Delta t} \dots\dots\dots (1)$$

ここで q は岸向きを正とした単位幅・単位時間当たりの正味の漂砂量、 ρ_s は砂の密度を表し、 B は実験装置観測部の幅を表す、 ΔM は質量の変化分、 Δt は実験時間を表し、on, off はそれぞれ岸側と沖側を表す。

また、今回の実験では大きい流速を作用させた関係で、実験によっては無視できない量の砂が振動流装置の中に流出したケースもある。漂砂量データの信頼度の目安として以下のように *Error* を定義した。

$$Error = \frac{\Delta M_{on} + \Delta M_{off}}{\Delta M_{on} - \Delta M_{off}} \dots\dots\dots (2)$$

(3) 画像解析による浮遊砂漂砂量の測定方法

漂砂量測定実験では、数十周期分合算された漂砂量データより1周期間のネットの漂砂量を算出することになるが、ある断面をある時刻に通過する浮遊砂漂砂量を積分して1周期間の漂砂量を求める方法もありうる。そこで本研究では、PIV法(Particle Image Velocimetry: 粒子画像速度計測法)を用いて浮遊砂速度を計測し、画像の輝度から換算した浮遊砂濃度を掛け合わせることで、浮遊砂漂砂量を求めることとした。画像は1/400 s毎に1周期分1200枚を取得し、全画像について画像解析を行った。画像解析の詳細については、田中ら(1999)を参照されたい。なお、PIV法とは、流体を時々刻々撮影し、時間的に連続した2つの画像 $I_t, I_{t+\delta t}$ の I_t 上に一定の面積を有する任意の領域 R_t (画像 I_t に比べて十分小さ

P(%) of fine sand	U _{max} (m/s)				
	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
20	ripple				
30	Arm				
40	Arm				
50	BP	SP			
70	BP	SP			

Arm : Armoring Type
SP : Suspension Predominant Type
BP : Bed load Predominant Type

図-4 移動形態分類図 (u_{max}/\bar{u})=0.6

く、且つ画像 I_t 上の他の領域から十分区別できる特徴を持ちうる広さの領域)を指定し、その領域が、時間 δt 経過後の画像 $I_{t+\delta t}$ 上のどの部分に相当するかを相関分析を用いて探索し、その移動距離より速度を算出する方法である。

3. 実験結果および考察

(1) 移動現象観察実験

移動現象観察実験より、シートフロー漂砂の1周期間の動きを見ると、総じて岸向き流速時には岸向きに移動し、流速沖向き反転時に巻き上がり(浮遊し)、沖向き流速時に浮遊砂が沈降しながら沖に運ばれ、流速岸向き反転時には巻き上がりは起こらず再び岸向きのシートフローに移行していくことわかった。また細砂混合率および最大流速の大きさの違いにより、流速沖向き反転時に巻き上がる浮遊砂量に違いが生じ、シートフロー状態の中でも移動の様相が異なることが確認された。シートフロー状態での底質移動の様相(以下移動形態と呼ぶ)を細砂混合率(P)および最大流速(u_{max})の大きさの違いにより分類したものが図-4である(ただし $u_{max}/\bar{u} = 0.6$)。

図に示すとおり、シートフロー漂砂の移動形態は後述するアーマリング型(Arm)、浮遊卓越型(SP)および掃流卓越型(BP)の3種類に大別される。

アーマリング型、浮遊卓越型および掃流卓越型それぞれについて、波の1周期を代表的な4位相に分割して示すと図-5, 6および7のようになる。説明上、細砂が浮遊しやすく、粗砂は浮遊しにくい $u_{max}=1.6$ m/s の場合を図化している。

アーマリング型(図-5)は細砂混合率が比較的低い(30~40%)場合で、1周期を通して粗砂が混合層の上を3, 4層でアーマリングしながら移動する形態で、流速沖向き反転時に巻き上がる浮遊砂が比較的小さい。

浮遊卓越型(図-6)は細砂混合率が比較的高い(50~70%)場合で、岸向き流速時には底層(混合砂層)

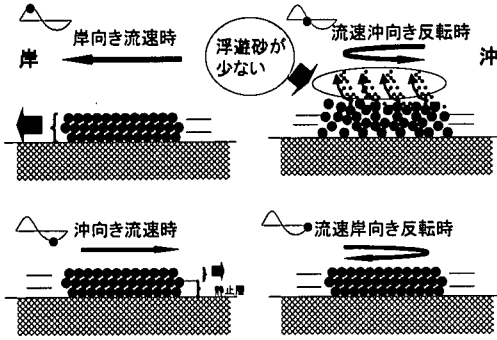


図-5 アーミング型 (Arm)

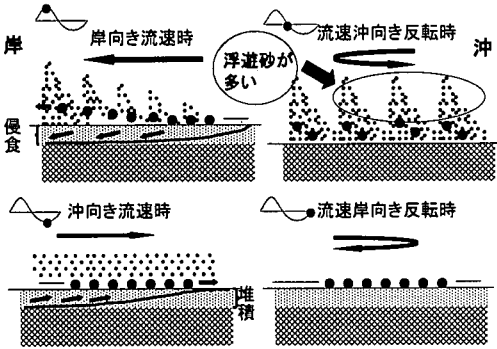


図-6 浮遊卓越型 (SP)

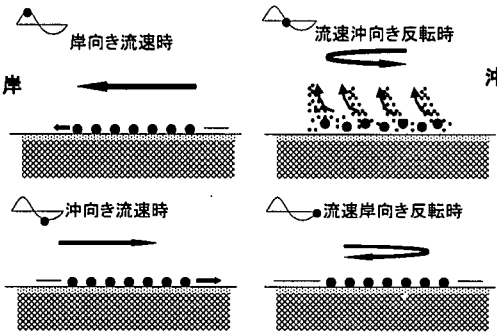


図-7 掃流卓越型 (BP)

が削られながら移動する。流速沖向き反転時には上層を覆う粗砂層が薄いことから、細砂が比較的多く巻き上がる。沖向き流速時には逆に堆積が卓越するが、堆積層厚は岸向き流速時の侵食層厚よりも薄い。

掃流卓越型(図-7)は流速が小さく、細砂混合率が比較的高い(50~70%)場合で、1周期を通して1層の粗砂が細砂の薄い層の上を滑るように移動し、流速が小さく底層が削られないため、浮遊砂が非常に少ない。

なお、波の非対称性が大きい(u_{max}/\bar{u})=0.7の場合には、掃流卓越型は現れず、細砂混合率30~40%でアーミング型、50~70%で浮遊卓越型となる。

表-2 漂砂量の測定結果 ($u_{max}/\bar{u}=0.6$)

case	u_{max} [m/s]	Δt [s]	%		ΔM 岸 [kg]	ΔM 沖 [kg]	q [cm ² /s]	Error [%]
1	1.6	241	粗	70	2.872	-2.895	0.5864	0
			細	30	0.449	-0.561	0.1027	11
2	1.8	123	粗	70	2.217	-2.182	0.8764	1
			細	30	0.186	-0.42	0.1207	39
3	1.8	94	粗	70	2.095	-2.172	0.85	2
			細	30	0.145	-0.25	0.079	27
4	1.4	275	粗	50	1.24	-1.299	0.2262	2
			細	50	0.388	-0.514	0.0804	14
5	1.6	263	粗	50	1.925	-1.996	0.3653	2
			細	50	0.819	-1.134	0.182	16
6	2.0	134	粗	50	3.345	-3.3338	1.222	0
			細	50	-0.545	-0.177	-0.132	100
7	1.2	281	粗	30	0.406	-0.157	0.049	44
			細	70	0.225	-0.862	0.0948	59
8	1.6	188	粗	30	0.428	-0.447	0.114	2
			細	70	0.087	-0.113	0.0261	13
9	1.6	170	粗	30	0.313	-0.364	0.0976	8
			細	70	-0.45	-0.182	-0.091	100
10	2.0	142	粗	30	0.593	-0.612	0.2079	2
			細	70	-1.744	0.417	-0.3729	61

(2) 漂砂量測定実験

直接測定による漂砂量実験を行った結果を表-2に示す。さらに表-2中の q を次式を用いて無次元化したものを、図-8(粗砂)および図-9(細砂)に示す。

$$\phi = \frac{q}{\omega_0 d} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 ϕ :無次元漂砂量、 ω_0 :砂粒子の沈降速度、 d :砂粒径である。

両図中に均一砂の実験データに基づくDibajnia・渡辺(1992)の漂砂量式による計算値を載せている。ここで、30%、50%および70%の計算値とは、100%の無次元漂砂量(計算値)にそれぞれ0.3、0.5、0.7を乗じた値である。

両図中の無次元漂砂量の計算値は、 u_{max} の変化に対してあるピーク値を持つ。このピーク値が現れる理由は、最大流速の増大に伴う流速の非対称性による岸向き漂砂量(正)の増加に対して、浮遊砂の沖向き漂砂量の増加が上回るようになるということである。両図を解釈する上で、このピークが現れる流速値は砂の粒径によって異なり、粒径が大きくなる、細砂混合率が小さくなる程大きな流速値でピークが現れることに注意する必要がある。今回の実験における作用最大流速の範囲(u_{max} :1.2~2.0 m/s)では、細砂にとっては十分浮遊可能で、粗砂は浮遊しにくい状態にあったといえる。

さて、粗砂に関して図-8を見ると、実験値と細砂100%の実験データに基づくDibajnia・渡辺による計算値とはほぼよく一致している。また最大流速によらずネットでは岸向きに移動すること、実験値が計算値を下回ることがほとんどないことから、混合砂の場合でも粗砂が

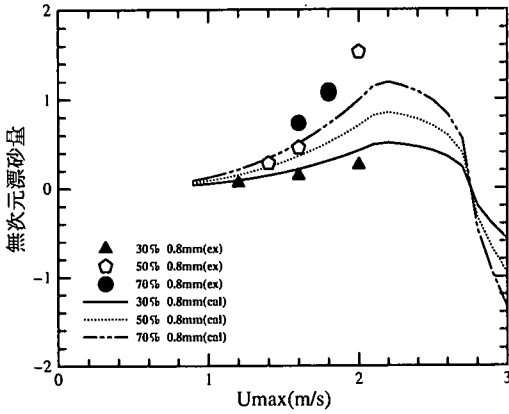


図-8 粗砂漂砂量

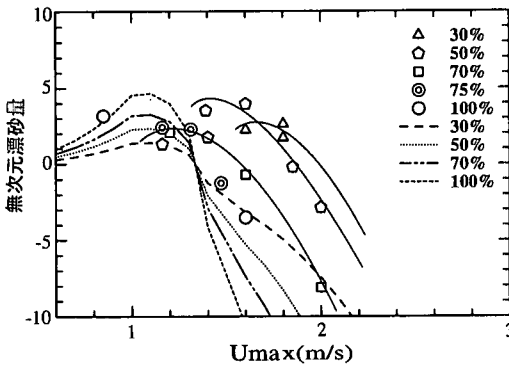


図-9 細砂漂砂量

細砂から受ける影響はほとんどないとみなし得る。

一方、細砂に関して図-9を見ると、 $u_{max}=1.6$ m/sの時、70%の浮遊卓越型では沖向き（負）となっているのに対し、細砂30%のアーミング型では細砂漂砂量が岸向き（正）である。0.2 mmの細砂では1.1 m/s付近をピークにそれより大きな流速では十分に浮遊砂が沖向き（負）に運ばれ得ることから、粗砂によるアーミングによって、細砂の浮遊量が抑えられたと考えるのが妥当であろう。

ここで仮に30%、50%、70%のデータ間を線で結ぶと、計算値に比べて今回の実験値が見かけ上、右上方にシフトした形になっている。右方へのシフトはアーミングによる浮遊砂抑制効果を意味している。また無次元漂砂量のピーク値は混合率50%で最も高くなっている。このピーク値は掃流砂量と密接に関係しており、粗砂の割合が大きくなる（70%→50%）と、掃流的に岸側に運ばれる細砂量が増える。さらに粗砂の割合が大きくなる（50%→30%）と細砂の賦存量が乏しくなるため、掃流砂量は減少すると解釈できる。

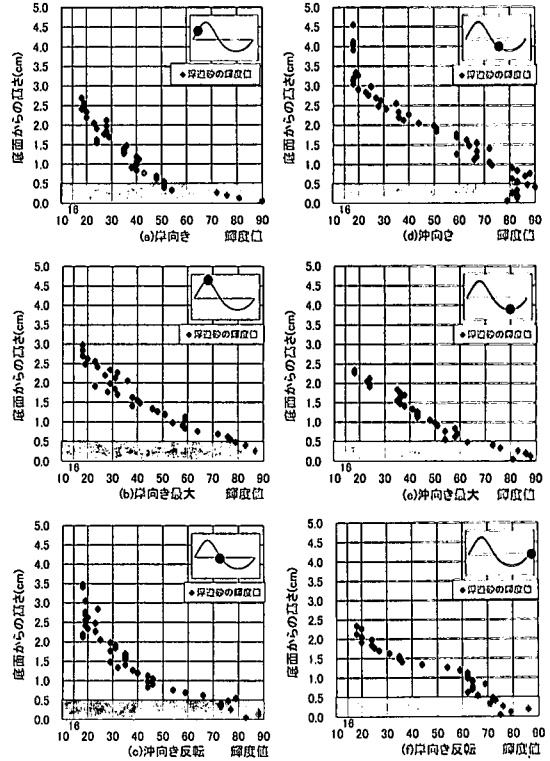


図-10 浮遊砂濃度（細砂70%、浮遊卓越型）

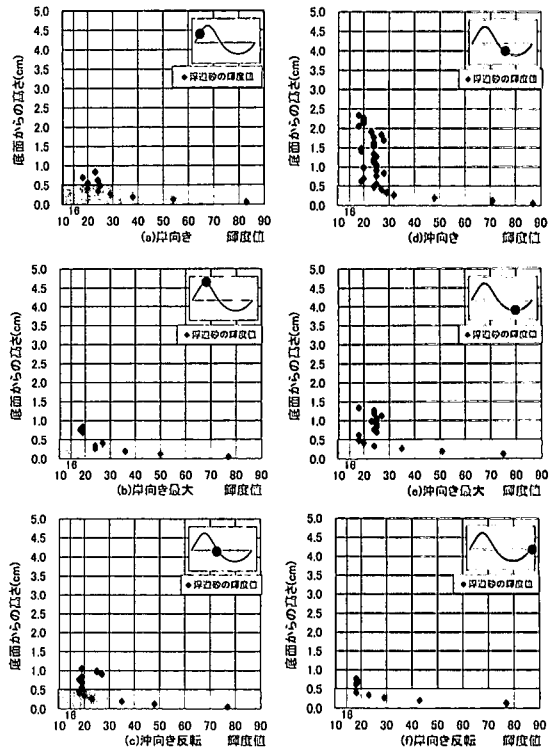


図-11 浮遊砂濃度（細砂30%、アーミング型）

表-3 画像解析によるネットの細砂漂砂量

	ネット無次元細砂漂砂量 [岸向き正]	
	アーミング型	浮遊卓越型
上層 (1.0 cm 以上)	-0.07	-1.18
中層 (0.5~1.0 cm)	-0.07	-0.18
下層 (0.5 cm 以下)	0.34	-0.26
全層	0.20	-1.63
漂砂量実験	2.23	-1.98

(3) 画像解析結果

画像内のある断面において、輝度値の鉛直分布の経時変化を示したものが図-10, 11である。ただし、両図とも底面から約0.5 cm以下の範囲では、粗砂と細砂の混合層として掃流的に移動していることに留意しておく必要がある(粗砂は黒色で背景と同輝度)。両図ともに、浮遊砂の巻き上がりは流速の沖向き反転時付近で生じ、その後上方へ拡散することにより、反転時よりも少し遅れた位相で最も高く浮遊砂が巻き上がっていることがわかる。なお、移動現象の観察実験においても、沖向き反転の少し前から巻き上がり始め、反転後もしばらくは巻き上がり続ける様子が確認されている。沖向き反転時には作用する加速度が大きいことから、浮遊砂の巻き上がりが生じるものと考えられる。

両図を比較すると、図-10の、細砂70%の場合には、最大巻き上がり高3.8 cm程度、底層付近に近づくほど高濃度の浮遊砂が存在している。これに対して細砂30%である図-11の場合には、最大巻き上がり高2.5 cm程度、底層付近まで低濃度であり、アーミング型の特徴をよく表している。

輝度 (Y) - 濃度 (X (kg/m^3)) のキャリブレーションについては、別途同じ照明条件の下、細砂を用いて実施した。近似式を以下に示す。

$$Y = 0.65(X - 16) \dots\dots\dots (4)$$

これにより輝度を濃度に換算し、同断面において PIV により求めた水平流速の鉛直分布をそれに乗じて求めた1周期間の断面通過ネット無次元細砂漂砂量 (ϕ) を表-3に示す。表中には、底面から高さ方向に下層(底面上0.5 cm以下)、中層(底面上0.5 cm~1 cm)、上層(底面上1 cm以上)の3層に分けて算出した各層毎の値も併記した。細砂30%のアーミング型ではネット漂砂量は下層(掃流)が支配的である。中層・上層におけるネット浮遊砂量は1オーダー小さい。一方、細砂70%の浮遊卓越型では、中・上層におけるネット浮遊砂量が下層におけるネット掃流砂量を大きく上回る結果となってい

る。

なお、全層におけるネット漂砂量を図-9の実験結果と比較してみても画像解析により求めた無次元漂砂量は妥当な結果といえる。

4. 結 論

シートフロー条件下での混合砂移動形態は、粒径(の組合せ)、混合率、流速および波の非対称性によって、アーミング型、浮遊砂卓越型、掃流砂卓越型に分類されることがわかった(図-4)。各移動形態の関係を以下に列挙する。

- 粒径の組み合わせが同じであればアーミング型と浮遊卓越型の違いは、混合率に依るところが大きい。粒径の組み合わせが変わると両型を決める混合率の境界がシフトする。
- 流速が大きくなると粗砂も浮遊しやすくなるため、細砂混合率が小さい場合でも浮遊卓越型が現れる。
- 波の上下非対称性が大きくなると、掃流卓越型は浮遊卓越型に移行しやすい。この理由として、加速度が大きくなり浮遊が促進されることが挙げられる。

漂砂量測定実験結果(図-9)より、均一砂の場合に粒径によって規定される無次元漂砂量のピーク位置に比較し、混合砂の場合には流速大の方向にシフトし、その時の岸向き漂砂量が增大することが分かった。このシフト量は浮遊卓越型よりもアーミング型の方が大きい。

画像解析により1周期間のネット漂砂量を求めたところ(表-3)、細砂30%(アーミング型)では底層の掃流砂量が卓越し、浮遊砂量は1オーダー小さい値となった。逆に細砂70%(浮遊卓越型)では、浮遊砂量が掃流砂量を大きく上回る結果となった。

参 考 文 献

- 乾 武史・Dibajnia, Mohammad・磯部雅彦・渡辺 晃(1995): 細粗混合砂のシートフロー漂砂量の算定式について, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 521-525.
- 後藤仁志・酒井哲郎・豊田泰晴・野田哲也(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.
- 鈴木高二朗・渡辺 晃・磯部雅彦・Dibajnia, Mohammad(1994): 振動流作用下における混合粒径底質の移動現象, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 356-360.
- 田中正博・磯部雅彦・渡辺 晃・岡本孝司・植村勇仁(1999): PIV画像解析手法を用いた浮遊漂砂量計測, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 1351-1355.
- Dibajnia M. and A. Watanabe (1992): Sheet flow under nonlinear waves and currents, Proc. 23rd Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 2015-2028.
- Dibajnia, Mohammad・高沢大志・渡辺 晃(1998): 混合粒径砂に於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.