

海洋における砂輸送に関する研究

— (第1報) 振動流中における砂粒子の挙動に関する実験 —

学生員 菅 貞博* 正員 馬場 信弘* 学生員 桂樹 哲雄*
 橋本 大生** 正員 北浦 堅一* 正員 岸 光男*

Study of sand transport in the ocean

(First report) Experiment on the behaviour of sand particles in an oscillatory flow

by Sadahiro Kan, *Student Member* Nobuhiro Baba, *Member*
 Tetsuo Katsuragi, *Student Member* Hiroki Hashimoto
 Ken-ichi Kitaura, *Member* Mitsuo Kishi, *Member*

Summary

The sand transport that causes the movement and deformation of a sand hill in a periodically oscillating flow is investigated in the laboratory. An experimental technique is developed to assess the variation of the state of concentration of sand particles in the process of the interaction of the particles with the fluid in motion around the sand hill as well as with the particles themselves. The method of measuring the concentration of sand particles is based on the digital image processing. It is confirmed that under the well-controlled experimental conditions of homogeneous distribution of sand particles, the decrease in brightness of the digital images of an area is determined by the concentration of the particles in the area. Taking a space average on the images with an appropriate scale to the size of sand particles to fade out the unfavorable effect of each particle makes it possible to predict inhomogeneous and continuous distribution of the concentration of sand particles from the brightness of the digital images with the limited resolution.

We make a visualization experiment of the two-dimensional flow field around a sand hill on sand bed in a flow sinusoidally oscillating in a straight channel with square section. The digital images of the unsteady flow field with suspended sand particles around the sand hill is analysed to estimate the concentration of sand particles. The results show that in the periodically oscillating flow the sand particles repeat a basic motion every half period such as sand particles running up the slope of the hill by accelerating flow, running off the hill by flow separation at the top of the hill, running down the hill as suspended in a turbidity current, and running into the roll by the rotational motion of shed vortices. It is found that these periodic motions of sand particles have particular distinguishing features of the change in the state of concentration in the process of fluidization, movement, transport, sedimentation, and accumulation.

Keywords: Sand transport, Oscillatory flow, Digital image processing, Sand particles, Sedimentation, Concentration

1. 序 論

砂のように海洋に堆積される粒子状物質の力学的

特性やその輸送現象に関しては、海洋地質学、海洋工学、海岸工学、河川工学、船舶工学の分野でさまざまな重要な問題があり、古くから実験や調査によって研究¹⁾⁴⁾が行われてきた。しかし、この輸送問題の多くが未解決の乱流の諸特性に依存するために、例えば、質量輸送率の予測のような基本的な課題に関しても普遍的な法則が確立されているわけではなく、海洋の多様な自然条件の中で、充分な精度でこれを予測する

* 大阪府立大学大学院工学研究科
 ** 大阪府立大学工学部

ことは容易ではない。

砂に限らず、多数の粒子の集合体を対象とするさまざまな分野において、特に分子動力学や化学工学の分野において、コンピュータを用いて個々の粒子を追跡する計算法が開発されてきた。このような粒子系の数値シミュレーションは粒子間の相互作用の機構やそのモデル化のために非常に強力で有効な手段であり、計算機の進歩とともに数値シミュレーションの結果も報告されるようになってきたが^{5),6)}、実際の海洋で問題となる砂の輸送現象を考えると、すべての砂粒子の挙動を捉えることは計算能力の点から現実的ではなく、またその必要もないと考えられる。

海洋における砂粒子の輸送や堆積に関して、長年にわたって陸域から海域に土砂を運搬する河川や海流などの定常的な流れはもちろん、潮汐流や波などの周期的に振動する非定常な流れも重要である。海浜の砂輸送に関しても多数の研究^{7),8)}がなされてきたが、我々のグループも、人工砂浜の陥没事故⁹⁾に関連して、小型水槽において砂を用いた実験を行った¹⁰⁾⁻¹⁴⁾。その結果、砂の陥没は継続的な砂の流出が原因であり、その砂の輸送には潮汐や波による海水の流れとその中に置かれた砂粒子の相互干渉が重要な役割を果たしていることが明らかになった。例えば、砂の粒子の衝突が新たな砂の流動化を引き起こすというような粒子特有の相互干渉が波の影響下で周期的に繰り返されることによって、単に受動的な物質が流れによって輸送されるよりもはるかに大きな輸送率で、わずかな間隙から砂を流出させることが可能であることが示唆された。このような現象には、砂粒子を連続的な受動的物質として扱う従来の輸送モデルをそのまま応用することは難しいと考えられた。

本研究では、粒子同士の相互干渉が支配的な砂粒子の輸送現象に対しても計算可能なモデルを構築していく考え方に基づいて、砂粒子の集合体を、粒子の集合状態が変化する連続体として捉える。本研究の目的は、実際の海洋において、海水の流動によって砂が輸送される現象を実験室で再現し、その中で、砂粒子がどのような状態で存在して、その状態がどのように変化するかを定量的に捉えることである。外部流として一様に周期的な振動流を考え、静止流体中で一つの砂山として安定に堆積した砂粒子の集合体が輸送される過程を画像解析し、透過光の強度から、非定常な流

場における砂粒子の濃度分布を推定する。さらに、濃度別に砂粒子群の挙動を追跡し、砂粒子の濃度の違いが輸送過程に及ぼす影響について考察する。

2. 方法

Fig. 1 に示すように、長さ $L = 800\text{mm}$ 、深さ $D = 500\text{mm}$ 、幅 $B = 300\text{mm}$ のアクリル製の水槽内部に、長さ $L_M = 600\text{mm}$ 、深さ $D_M = 200\text{mm}$ 、幅 $B = 300\text{mm}$ のアクリル製の直方体を取り付けた小型水槽を用いる。内部の直方体のまわりを水が周回できる鉛直回流型の水槽である。これは、振動重力流に関する実験¹⁵⁾のために製作した水槽であり、水槽内に Fig. 1 に斜線で示した物体を没水させることによって、水路の幅 W を段階的に変えられるように改良して用いる。観測部は長さ $L_M = 600\text{mm}$ と水深 $D_L = 100\text{mm}$ は一定で、幅を $W = 70\text{mm}, 99\text{mm}, 165\text{mm}$ の3種類に変える。両側の水路の幅や上側の水路の水深はそれぞれ $L_E = 100\text{mm}$ 、 $D_U = 130\text{mm}$ である。

水槽上部にフラップ式の振動板を取り付け、アルミ製のアームによって振動装置に連結する。80W のスピードコントロールモーター、減速ギア、円盤、T 字型のスライド連結棒、直線レールスライドから構成される振動装置が、最大振幅 260mm、最大周波数 0.3Hz の正弦的な直線往復運動を行う。本実験の振動条件は、有効な両振幅 $A = 215\text{mm}$ 、周期 $T = 7.1\text{s}$ で一定とする。

海洋で実際に起こっている砂の輸送に関する現象を小型水槽において再現するため、輸送される砂粒子として、自然界の海砂を用いる。上述の実験装置で発生させる振動流によって輸送が可能な範囲の粒子を選択するため、乾燥させた砂をふるいにかける。まず、1.5mm メッシュのふるいで、これを通らない大きな粒子を排除した。小さい粒子は沈降速度が遅く、水を濁らせて砂粒子の挙動を可視化する妨げになるので、次に 0.3mm メッシュのふるいを通る小さい粒子を排除した。このように抽出した砂粒子の平均的な物質密度は $\rho_d = 2.47 \times 10^3 \text{kgm}^{-3}$ である。直径が 0.3mm、1.5mm の砂粒子が平面状に堆積した表面から移動を開始するために必要な一様流の流速はそれぞれ 0.045m/s、0.12m/s であり¹⁶⁾、また、静止流体中の沈降速度はそれぞれ 0.05m/s、0.21m/s である²⁾。

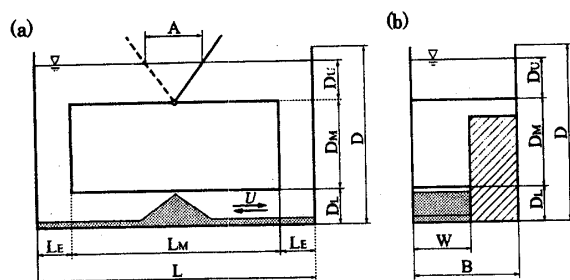


Fig. 1 A schematic diagram of the water tank for generating an oscillating flow: (a) front view, (b) side view.

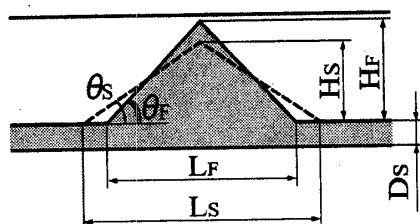


Fig. 2 A schematic diagram of making a sand hill on sand bed.

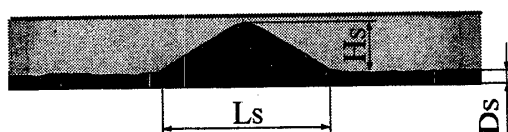


Fig. 3 Image of a sand hill in water at rest.

初期条件は一定で、2次元形状の砂山とする。Fig. 2のように、水槽の底面に一定の厚さ $D_S = 20\text{mm}$ で砂を敷き詰め、その上に、湿らせた砂を使って、断面形状が底辺の長さ $L_F = 140\text{mm}$ 、高さ $H_F = 70\text{mm}$ の直角二等辺三角形の型枠を用いて砂山を作る。その後、静かに一定速度で水を入れていくと、砂山は徐々に崩れて変形し、最終的に Fig. 3のように、底辺の長さ $L_S = 205\text{mm}$ 、高さ $H_S = 63\text{mm}$ 、水中の安息角 $\theta_s = 31.6^\circ$ の砂山になる。それぞれの値のばらつきは $\Delta L_S = 2\text{mm}$ 、 $\Delta H_S = 2\text{mm}$ 、 $\Delta \theta_s = 1^\circ$ 程度である。

水中で安定に砂山の内部に堆積した砂粒子の集合体は固体化しているが、その表面の砂粒子は、外部流あるいは別の砂粒子の衝突によって活性化され、表面から離脱あるいは表面に沿って移動を始める。このように外部流によって砂粒子の集合体が融解あるいは溶解によって流動化され、砂粒子の輸送が始まる。砂粒子が運動し始めることによって、外部流からそのエネルギーを奪うので、砂粒子の存在は外部流にとって

抵抗増加となって減速させることになる。外部流の速度が小さくなると、砂粒子は凝集、沈降して堆積し、再び、砂粒子の集合体は沈殿、凝固によって固体化する。本研究では多数の砂粒子の集合体をこのように状態変化を行う連続体として捉える。

連続相(水)と分散相(砂粒子)をともに連続体として扱うモデルにおいて、その相間の相互作用の影響をモデル化するために、各相についての密度、速度、圧力の基礎物理量とともに、両者の混合比率が最も重要なパラメータとなる^{17), 18)}。質量濃度 C は分散相の嵩密度/連続相の嵩密度と定義されることもあるが、ここでは、分散相の嵩密度/混合相の密度

$$C = \frac{\rho_d \alpha_d}{\rho_d \alpha_d + \rho_c (1 - \alpha_d)} \quad (1)$$

と定義する。ここで、 α_d は空間に占める分散相(砂粒子)の体積の比率、 ρ_d と ρ_c はそれぞれ砂粒子の物質密度と水の密度である。体積比率と質量濃度は、砂粒子の大きさよりも大きいスケールの平均化操作を施した局所的な時間と場の関数として定義する。

本実験では2次元流場の可視化実験によって撮影した画像を解析することによって砂粒子の質量濃度の推定を試みる。砂粒子が混合した流体中を光が通過すると、光が砂粒子によって遮断されたり、反射、散乱されることによって、透過する光の強度が砂粒子の状態に応じて変化する。水槽の背後に光源を置き、光源と水槽の間の壁面に薄い白紙をおいて、一様な背景画像を作る。カメラとこの背景の白紙との間に砂粒子があると、その部分の透過光の強度が減少して、撮影された画像の輝度の値も減少する。この輝度の減少を利用して砂粒子の質量濃度を推定する。砂山や外部流の平均流場が2次元であっても、砂粒子自身は3次元形状を持ち、また、砂粒子は3次元的に配置され、3次元運動する。本実験では、外部流の3次元性の影響とともに、このような砂粒子の3次元性による影響もないと仮定して解析を行う^{13), 14)}。

デジタルビデオカメラで撮影した画像はシャッタースピード $1/60\text{s}$ 、時間間隔 $1/30\text{s}$ の 720×480 ピクセルの連続画像である。Fig. 3に示した画像はその一部であり、1ピクセルが実スケールで縦 0.9mm × 横 0.8mm に相当する。画像の輝度はピクセルごとに256階調のRGB値から

$$I_B = 0.30R + 0.59G + 0.11B \quad (2)$$

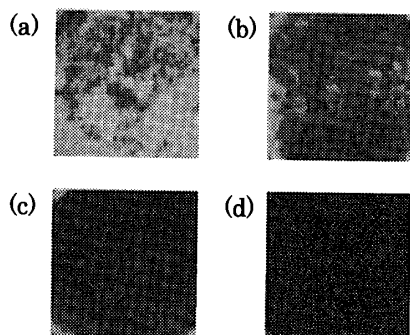


Fig. 4 Images of sand particles in various states of mass concentration (a) $C=0.2$, (b) $C=0.4$, (c) $C=0.6$, (d) $C=0.8$.

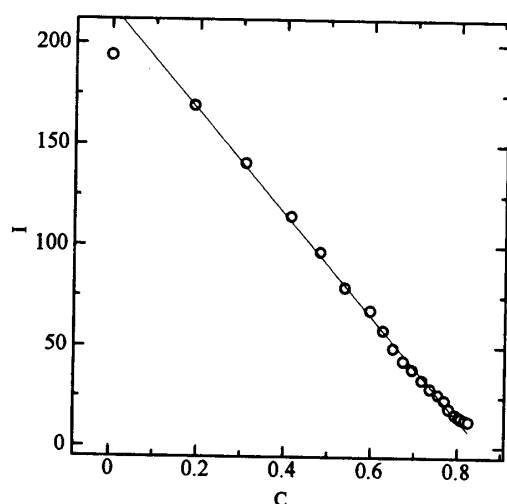


Fig. 5 The relation between the mass concentration, C , of sand particles and the relative brightness, I , of the digital image.

で計算する。実験装置や光源のむらなど、実験の状態から生じるノイズを除去するため、濃度の推定に用いる画像の輝度と基準とする背景画像の輝度 I_0 との差

$$\Delta I = I_B - I_0 \quad (3)$$

を取り、さらに、粒子の3次元性、3次元配置の影響、粒子むらを除去するため、5ピクセル幅の平均フィルターを縦横両方向にかけて、透過光の減衰に対応する輝度変化

$$I = \sum_i \sum_j a_{i,j} \Delta I_{i,j} \quad (4)$$

を求める。ここで $a_{i,j}$ は平均フィルターの係数である。

まず、質量濃度と透過光の強度の減衰の関係を調べる予備実験を行った。砂粒子は重力によって常に沈降していき、容器内において均一な状態を保持すること

Table 1 Experimental conditions.

W (mm)	165	99	70
U (mm/s)	113	187	265
Kc	3.52	5.82	8.25
Re	2.57×10^4	4.27×10^4	6.04×10^4

は難しいので、容器の下方に光源を置き、鉛直方向の平行光線を用いて、上方からビデオカメラで撮影する。水だけ入れた場合の画像の輝度を基準として、質量濃度の分かっている砂粒子を混入させた場合の画像の輝度の減少を測定する。容器内で均一に分布する砂粒子の画像を Fig. 4 に示す。これらは、縦 49.5mm × 横 44.6mm の領域、60 ピクセル × 60 ピクセルの画像である。粒子の集合状態に応じて次のような粒子間および粒子と流体との相互作用が考えられる。砂粒子の濃度が小さい(a)の状態では、砂粒子同士の相互干渉はほとんどなく、流体の流動が支配的で、砂粒子が流体に運搬される。少し濃度が大きくなった(b)の状態では、砂粒子同士の接触、衝突が起こるようになり、流体との相互干渉も強くなる。さらに濃度が大きくなった(c)の状態では、密集した砂粒子同士の相互干渉によって決まる砂粒子の流動が支配的になる。(d)の状態は、砂粒子が安定に堆積して固体化している。

砂粒子の質量濃度と画像の輝度の変化量との関係を Fig. 5 に示す。砂粒子の濃度の増加とともに、画像の輝度が一意に減少することがわかる。この質量濃度と輝度の関係を直線で近似し、画像の輝度の変化量から砂粒子の質量濃度を求める。

実験条件を Table 1 に示す。砂山の初期長さ L_s と振動の周期 T および観測部における一様な振動流の最大速度

$$U = \frac{\pi A D_v B}{2 T L_s W} \quad (5)$$

によって無次元化を行うと、本実験の問題は KC 数

$$Kc = \frac{UT}{L_s} \quad (6)$$

とレイノルズ数

$$Re = \frac{UL_s}{\nu} \quad (7)$$

の2つの無次元数で表される。観測部の水路幅 W を変えることによって、振動流の流速 U を変え、砂粒子の挙動に与える影響を調べる。

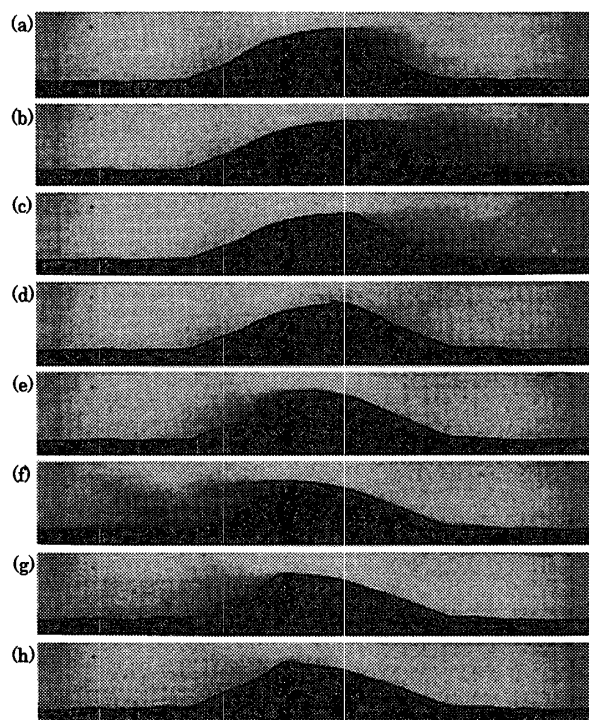


Fig. 6 Images of sand particles in an oscillatory flow in the second cycle at (a) $t/T = 1.125$, (b) $t/T = 1.250$, (c) $t/T = 1.375$, (d) $t/T = 1.500$, (e) $t/T = 1.625$, (f) $t/T = 1.750$, (g) $t/T = 1.875$, (h) $t/T = 2.000$, at $U=187\text{mm/s}$, $Kc=5.82$.

3. 結果

まず、外部振動流による砂山近傍における砂の輸送を捉えた連続的な静止画像を示す。Fig. 6は、デジタルビデオカメラを用いて撮影したカラーのビデオ画像から、2周期目を1/8周期毎にキャプチャーし、グレースケールに変換した静止画像である。外部流は砂山の上を、前半周期では図の左側から右側へ、後半周期では右側から左側へ流れており、Fig. 6(d)および(h)のときがちょうどその外部流が止まった瞬間である。

外部流が加速され、山の頂点から流れの剥離が起こると、Fig. 6(a)のように、砂山の頂点近傍の砂粒子がその剥離流に運ばれ、砂粒子を含んだ流れが重力流となって斜面を駆け下りていく。外部流の速度が最大となると、砂粒子は砂山からその高さの数倍離れたところまで運ばれ、Fig. 6(b)のように、山の背後全体が砂粒子で充満された状態となる。外部流が減速すると、剥離流によって運ばれる砂粒子の数が減少し、Fig. 6(c)のように、流体中にあった多数の砂粒子が沈降し

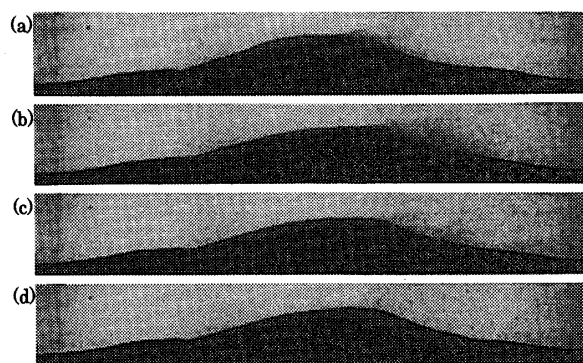


Fig. 7 Images of sand particles in an oscillatory flow in the former half of the tenth cycle at (a) $t/T = 9.125$, (b) $t/T = 9.250$, (c) $t/T = 9.375$, (d) $t/T = 9.500$, at $U=187\text{mm/s}$, $Kc=5.82$.

て、底面に堆積する。この前半周期では図で右向き of 外部流による砂粒子の輸送の結果、砂山は、Fig. 6(d)のように、全体が右側に偏った形になり、また、続く後半周期では、外部流が逆転し、同じ砂粒子の輸送過程が反対向きに繰り返される結果、砂山は、Fig. 6(h)のように、左側に偏った形になる。このように、振動流による砂輸送の現象は半周期間が基本となって繰り返されることがわかる。

Fig. 7に10周期目の前半周期の画像を示す。2周期目と比べると、砂山がなだらかになり、山すそが初期値の3倍近くまで広がっていることがわかる。頂点からの流れの剥離が起こり、その剥離流によって山の表面から砂粒子が運ばれていくが、砂山がなだらかに変形したため、2周期目に比べると、移動する砂粒子は少ない。この条件では、10周期目以降も、砂山は観測部全域まで広がっていく。

次に、予備実験の結果得られた画像の輝度と砂粒子の質量濃度の関係を用いて、砂粒子の濃度分布の推定を行った。各半周期の最初、外部流の速度が零になった瞬間の画像の輝度分布を基準として、その半周期間の画像の輝度分布の変化量から、砂粒子の濃度分布の変化を計算した。

2周期目の前半周期における1/16周期毎の砂粒子の濃度分布の変化をFig. 8に示す。2周期目の最初の状態を基準として、図の砂山の右側に、砂粒子の濃度が増加した領域、すなわち、その領域へ他の領域から砂粒子が流入した領域があり、また、砂山の左側の斜面に沿って、濃度が減少した領域、すなわち、砂山を形成していた砂粒子が他の場所へ移動した領域があ

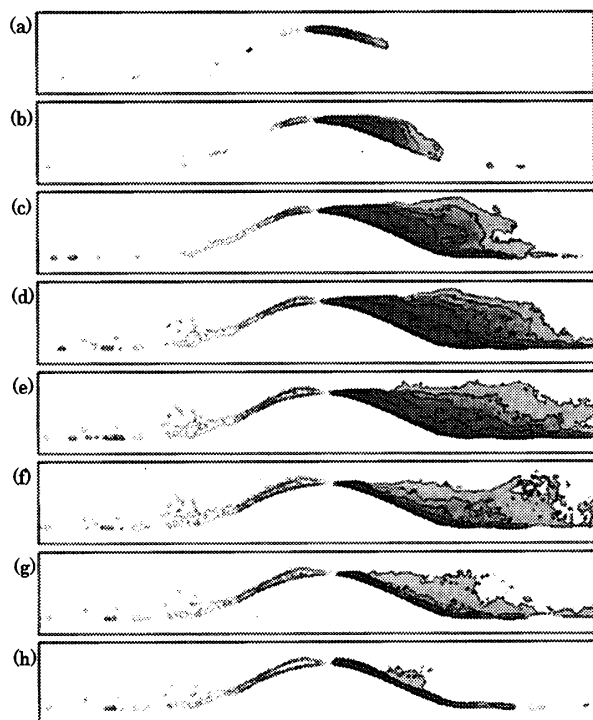


Fig. 8 Contour maps of the variation of the mass concentration of sand particles in an oscillatory flow in the former half of the second cycle at (a) $t/T = 1.0625$, (b) $t/T = 1.125$, (c) $t/T = 1.1875$, (d) $t/T = 1.250$, (e) $t/T = 1.3125$, (f) $t/T = 1.375$, (g) $t/T = 1.4375$, (h) $t/T = 1.500$, at $U=187\text{mm/s}$, $Kc=5.82$. The contours show the difference of the mass concentration of sand particles from the initial state of this cycle at $t/T=1.000$; solid lines: positive value; broken lines: negative value.

る。砂山の頂点近傍の砂粒子は、Fig. 8(a)のように、頂点からの剥離流によって砂山表面から離脱する。そのうち、一部の砂粒子は、Fig. 8(b)から(e)のように、砂山の右側斜面を乱泥流となって駆け下りていき、また、一部の砂粒子は剥離流に乗って砂山から離れて、砂山の背後に拡散されていく。

砂粒子の濃度は砂山の表面から離れると減少するが、砂山の背後に発達する剥離渦のあたりに、その濃度の等値線がひずんだ部分がある。これは砂山表面の砂粒子がその渦の時計回りの回転運動によって巻き上げられた結果と考えられる。外部流が減速すると、砂粒子の濃度が大きい領域は砂山の右側表面に隣接した部分だけになり、外部流によって広い範囲に運ばれた砂粒子の大部分は沈降し、砂山表面に堆積したことがわかる。

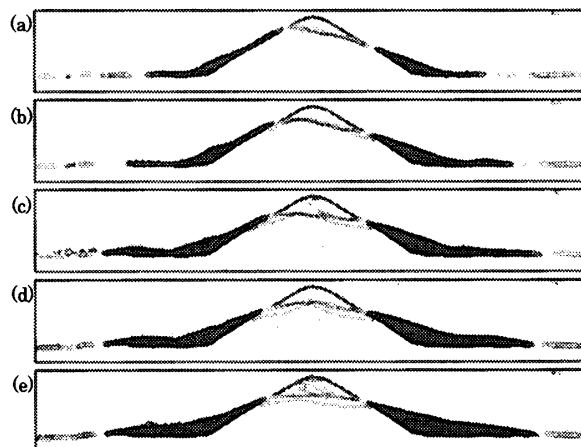


Fig. 9 Contour maps of the variation of the mass concentration of sand particles from the initial conditions at (a) $t/T=2.0$, (b) $t/T=4.0$, (c) $t/T=6.0$, (d) $t/T=8.0$, (e) $t/T=10.0$, at $U=187\text{mm/s}$, $Kc=5.82$; solid lines: positive value; broken lines: negative value.

この前半周期の間に外部流によって砂山の右側に拡散される砂粒子は砂山の頂点付近から供給されているように見えるが、その頂点への砂粒子の供給源は、砂山の左側斜面に沿った領域である。砂の濃度の減少する領域は Fig. 8 に示すように、最初は頂点付近だけであるが、外部流速が大きくなると、左側斜面のふもとの方からも砂粒子が移動していることがわかる。Fig. 8(h)は砂山の左側斜面全体が侵食され、そこにあった砂粒子の大部分が右側斜面に堆積したことを示しており、結局、この半周期間で、砂山全体が右側に移動したことがわかる。

周期的な外部振動流によって砂山全体が変形していく様子を Fig. 9 に示す。これは、初期条件の砂山を構成する砂粒子の濃度を基準として、2周期毎の各時間における砂粒子の濃度の変化量を推定した図である。砂山の頂点近傍の砂粒子の濃度が減少し、砂山の両側のふもとの砂粒子の濃度が増加し、その領域が周期を重ねるごとに拡大する、すなわち、砂山の頂点近傍から両側の山すそに砂粒子が運ばれて、砂山が次第になだらかに変形していく様子がわかる。実験開始直後の初期影響が大きく、必ずしも左右対称にならないが、周期を重ねるごとに左右対称に近づいていく。次に、外部流によって、砂粒子群の状態がどのように変化するかを調べるため、流場の砂粒子群をその砂粒子の濃度 0.1 間隔に分類し、その濃度の範囲ごとに砂粒子群が空間に占める割合を計算した。ある濃度の範囲

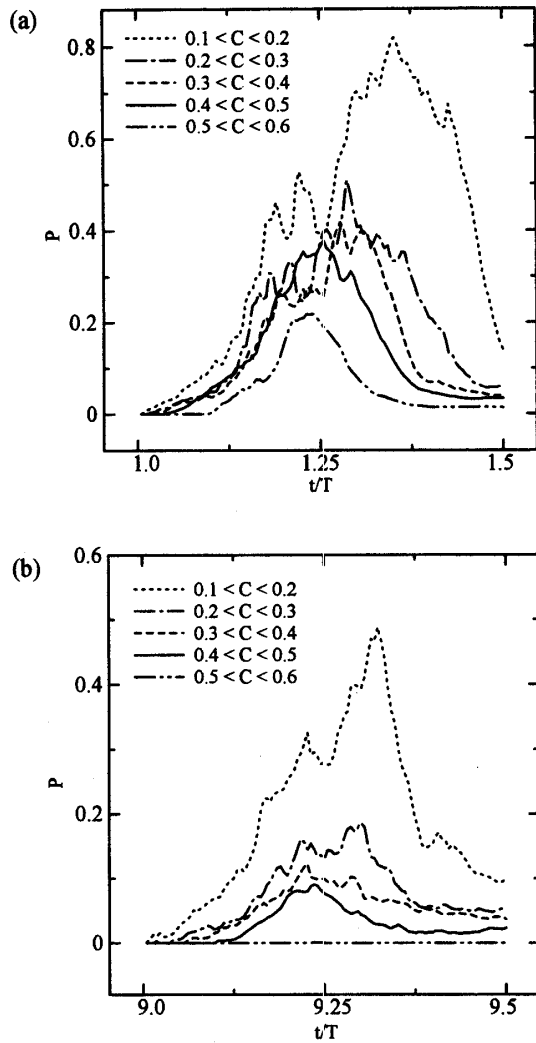


Fig. 10 Time variation of the volume proportion P of the sand particles with the concentration in the range denoted in the figure, at $U=187\text{mm/s}$, $Kc=5.82$ in (a) the former half of the second cycle, (b) the former half of the tenth cycle.

の砂粒子群の割合 P は、その粒子群が占める画像内の面積が、その周期の最初の状態から変化した量として定義し、初期条件の砂山が占める面積によって無次元化して示す。2周期目および10周期目の前半周期において、その半周期の最初を基準としたときの割合 P の時間変化を Fig. 10 に示す。砂粒子の濃度は小さいほど、その砂粒子群の空間に占める割合は大きな変化を示し、その増加が始まる時間が早く、減少したあと、その変化が止まる時間は遅い。これは、砂粒子の濃度に応じて、その変化を引き起こすための外部流速の閾値が存在し、砂粒子の拡散によって濃度が小さくなった砂粒子群ほどその閾値が低いことを示してい

る。2周期目と10周期目は同じ傾向を示すが、時間とともに砂山は安定な形に変化していき、輸送される砂の全体量が減少するので、10周期目の方が、その割合の値も減少する。

砂粒子の濃度が0.4以上の場合はほぼ同じ挙動を示す。外部流速がある閾値を超えると、その濃度の砂粒子の空間に占める割合は増加し、最大速度をとる1/4周期後に最大となり、その後、外部流速がその閾値まで減少すると、砂粒子の空間に占める割合の変化が止まる。すなわち、濃度が大きいこの砂粒子群の挙動は主に一様に振動する外部流の影響を受け、その砂粒子群の空間に占める割合は外部流の流速だけによって決まることがわかる。砂粒子の濃度が0.4より小さい場合は、その濃度の砂粒子群の空間に占める割合の変化は外部流速に対して位相が遅れる傾向があり、また、外部流の周期の数分の1あるいはもっと短い周期の変動成分が見られる。これは、濃度が小さい砂粒子群が一様に振動する外部流だけの影響を受けるのではなく、外部流が砂山と干渉して生じる流れの剥離や渦運動、乱れの影響を受けて、輸送あるいは拡散されることを示している。

この結果に基づいて、砂粒子群を、砂粒子の濃度 C の値によって、 $C \geq 0.4$ の砂粒子群と $C < 0.4$ の砂粒子群の2つのグループに分け、それぞれの砂粒子群が外部振動流によってどのように発生、消滅するかについて調べた。時間スケール Δt 以下の高周波のノイズを除去するため、そのグループの砂粒子群が空間に占める割合 P の時間 $t - \Delta t$ から時間 t までの変化の割合から割合 P の時間変化率 $P'(t)$ を計算した。時間増分 Δt を1/16周期とした場合の2周期目前半周期の P' の時間変化を Fig. 11 に示す。濃度が大きい砂粒子群は外部振動流が流速のある閾値を越えた加速中に発生し、減速に転じたら消滅していくのに対して、濃度が小さい砂粒子群は、早い時間、低い閾値から、最大流速となる時間 $t/T=1.25$ をはさんで前後2回に分かれて発生し、半周期の最後1/3の時間に消滅する。これは、前述したように、濃度が大きい砂粒子群が主に砂山斜面に沿って生じる重力流の発生によるものであるのに対して、濃度の小さい砂粒子群が頂点からの剥離流による砂粒子の巻上げと、砂山から後方に放出された剥離渦による砂粒子の巻上げによって生じることを裏付けており、本手法によって、非定常な外部流によ

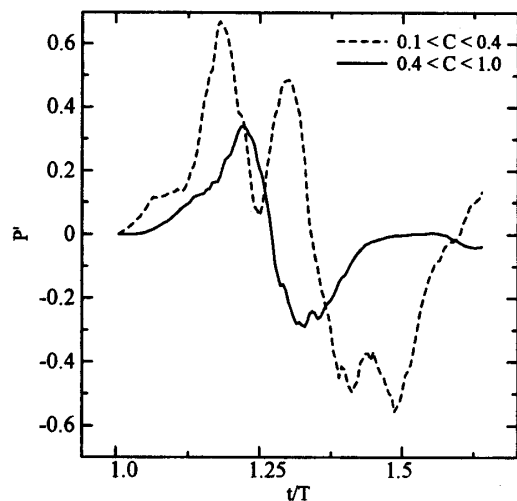


Fig. 11 Time variation of the time variation rate of volume proportion P of two groups of the sand particles with the concentration at $U=187\text{mm/s}$, $Kc=5.82$ in the former half of second cycle.

ってその集合状態を変える砂粒子の挙動が捉えられたことを示す結果と考えられる。

最後に外部流の流速の影響について述べる。流速を60%と小さくした場合と140%と大きくした場合の砂粒子群が空間に占める割合の時間変化率 P' をそれぞれ Fig. 12, Fig. 13 に示す。これは Fig. 11 に示した場合と同じ方法によって、濃度の大小2つのグループの砂粒子群について計算した2周期目前半周期における結果である。Fig. 11 の場合と比べると、流速が小さい場合、空間割合の時間変化率 P' の値も半分程度に小さくなり、その発生、消滅の期間が短くなるのに対して、流速が大きい場合、その値は大きくはならず、発生消滅の期間はほぼ変わらない。これらは砂粒子群の挙動が外部流の流速の影響を強く受けることを示しており、また外部流自身の特性が、特に、砂山からの渦放出に関しては、 KC 数によって大きく変化するので、砂山からの砂粒子の輸送に関しても、振動流の流速とともに、周期、砂山の大きさを変化させた系統的な実験をさらに行う必要があると考えられる。

4. 結 論

周期的な振動流によって砂山の移動や変形が生じる砂粒子の輸送現象を小型水槽において再現し、砂粒

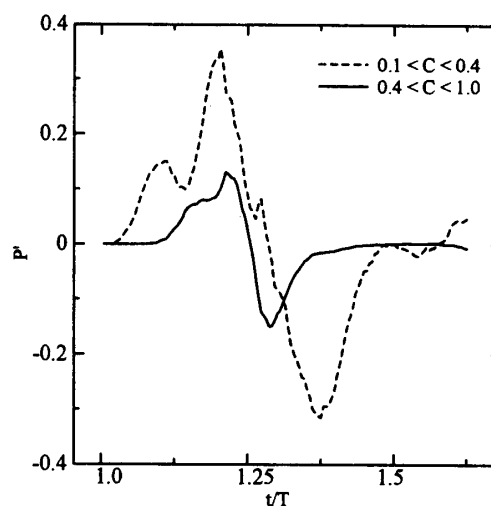


Fig. 12 Time variation of the time variation rate of volume proportion P of two groups of the sand particles with the concentration at $U=113\text{mm/s}$, $Kc=3.52$ in the former half of second cycle.

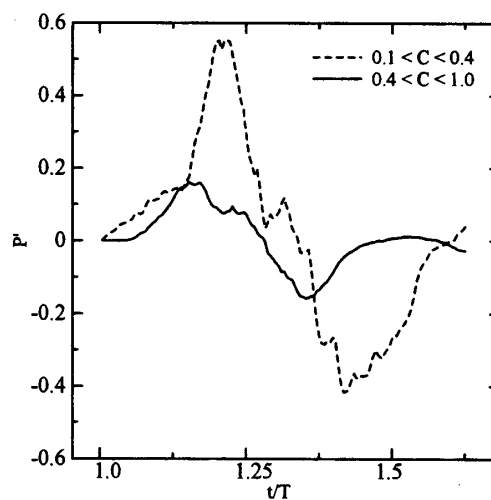


Fig. 13 Time variation of the time variation rate of volume proportion P of two groups of the sand particles with the concentration at $U=265\text{mm/s}$, $Kc=8.25$ in the former half of second cycle.

子が砂粒子同士あるいは砂山まわりの流体運動と相互干渉する過程を調べた。

(1) 砂粒子の集合状態の変化を定量的に捉える画像解析の手法を提案した。均一に分布した砂粒子の流場に光を投射し、その流場を撮影したデジタル画像の輝度を求めた結果、砂粒子の存在による平均輝度の減少量は砂粒子の質量濃度によって一意に決まることが確認された。また、砂粒子のスケールに応じて画

像の空間平均を行い、粒子が不均一に分布した場合にも連続的な分布の推定が可能になった。

(2) 平行な平板で囲まれた矩形断面の水路において、正弦的に振動する流れの中におかれた砂山まわりの2次元流場の可視化実験を行った。砂山が移動、変形していくとき、砂粒子を含む非定常な流場の画像解析を行い、画像の輝度から砂粒子の濃度分布を求めた。その結果、この周期的な外部振動流に対して、砂粒子もまた、その半周期を基本とする周期的な運動を行うことが示された。砂粒子が、加速する外部流によって流動化され、斜面を駆け上がり、砂山の頂点から離脱し、乱泥流となって斜面を下り、放出された渦の回転運動によって巻き上げられる、このような砂粒子の流動化、移動、運搬、沈降、堆積の過程において、外部流によってその集合状態を変える砂粒子の挙動を捉えることができた。

本研究は、文部省科学研究費補助金基盤研究および科学技術振興事業団の計算科学技術活用型特定研究開発事業の補助を受けたことを記し、関係各位に感謝する。

参 考 文 献

- 1) J. Brown, A. Colling, D. Park, J. Phillip, D. Rothery, J. Wright: Ocean chemistry and deep-sea sediments, The Open University, pp. 1989, pp. 77-115.
- 2) E. Brown, A. Colling, D. Park, J. Phillip, D. Rothery, J. Wright: Waves, tides and shallow-water processes, The Open University, 1989, pp. 67-160.
- 3) K. R. Dyer, R. L. Soulsby: Sand transport on the continental shelf, Ann. Rev. Fluid Mech, 20, 1988, pp. 295-324.
- 4) 浦環: 船舶工学に対する粒状体力学の応用, 東京大学博士論文, 1976.
- 5) J. Duran 著, 中西秀, 奥村剛共訳: 粉粒体の物理学, 吉岡書店, 2002, pp. 102-155.
- 6) Sadahiro Kan: Application of Billiards System to the Diffusion Process of Particles, Asia Pacific Workshop On Marine Hydrodynamics, 2002.
- 7) 中村昭男, 依田眞, 橘川正男, 早瀬松一: 不規則波による混合砂海浜変形についての2次元水路実験, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 571-575, 2001.
- 8) 宇野善之, 岡安章夫, 小林智尚, 島谷学: CT型濁度計による碎波帯内底質巻き上げに関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 426-430, 2002.
- 9) 土木学会海岸工学委員会: 大蔵海岸陥没事故調査報告書, 土木学会海岸工学委員会, 2002.
- 10) 橋本大生: 砂浜陥没のメカニズム～砂層から雑石層への砂の流れ～, 大阪府立大学工学部海洋システム工学科海洋システム工学実験報告書, 2002.
- 11) 中林恵美子: 砂浜陥没のメカニズム～ケーソンの隙間からの砂の流出～, 大阪府立大学工学部海洋システム工学科海洋システム工学実験報告書, 2002.
- 12) 菅貞博, 馬場信弘, 岸光男: 振動流中の砂輸送に関する実験と計算, 第25回機械の強度と形態研究懇話会シンポジウム論文集, pp. 41-44, 2002.
- 13) Sadahiro Kan, Tetsuo Katsuragi, Nobuhiro Baba, Mitsuo Kishi, Ken-ichi Kitaura: Experimental Study of Sediment Transport in an Oscillatory Flow, The 13th International Offshore and Polar Engineering Conference & Exhibition [Oral presentation], 2003.
- 14) 菅貞博, 桂樹哲雄, 馬場信弘: 振動流中の砂輸送に関する画像解析, 第31回可視化情報シンポジウム講演論文集, pp. 115-118, 2003.
- 15) 馬場信弘, 北浦堅一, 阪口泰規, 桑島浩司, 荒井康介: 振動重力流の先端部の挙動に関する実験, 関西造船協会誌, 第235号, 2001, pp. 213-218.
- 16) 土木学会編: 水理公式集昭和46年改訂版, 土木学会, 1971, p. 202.
- 17) 日本流体力学会編: 混相流体の力学, 朝倉書店, 1999, pp. 70-76.
- 18) 辻裕: 集中講義「流体・粒子, 混相流入門」テキスト, 2002.