

斜面上を運動する粒子群に誘起される流体運動に関する実験的研究

重松孝昌¹・河野哲也²

土砂粒子群が水中を運動する際に誘起される水面波の諸特性およびその生成過程を解明するために、水理模型実験を行った。水深、斜面角度、粒子量、粒子の初期位置をパラメトリックに変えて実験を行い、発生波の波高および周期の推定式を誘導した。また、流跡線連結法による新たな画像計測アルゴリズムを開発して高濃度固液混相流場における流体運動の計測手法を提案し、その有用性を示すとともに、水面波の生成過程における流体と粒子群の運動の詳細について検討した。

1. はじめに

地滑りや斜面崩壊などによって離散粒子群が水中を運動する場合には、巨大な水面波が発生して甚大な被害をもたらす場合がある。断層運動によって誘起される津波と比較するとその発生頻度は低いが、被害規模は極めて甚大である事例が少なくない。大西洋アフリカ沖のカナリー島火山が噴火した場合には、火山島西部で地滑りが発生してアメリカ東海岸一体に巨大津波が来襲する可能性も憂慮されている。

このような粒子群に誘起される生成波については、富樫ら (1992) や Watts (1998), Herman ら (2001) などが水理模型実験を行い、その発生機構や生成波の諸特性を把握する取り組みがなされているが、未だに十分な知見が得られているとは言い難い状況にある。

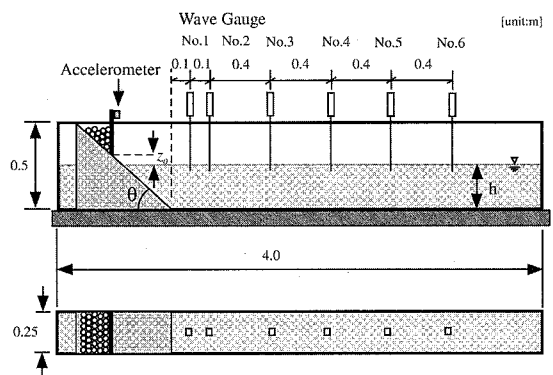
このような状況の下、本研究では、水深、斜面角度、粒子量、粒子の初期位置をパラメトリックに変えて実験を行い、粒子群に誘起される波の諸元 (波高および周期) と実験条件との関係を定量的に把握することを目的とするものである。また、重松ら (2003) は、ビデオで撮影された画像に基づいて斜面上における粒子群の運動と生成波との間に密接な関係があると推察しているが、本研究では粒子群周辺の流体場を計測し、粒子群と流体場の相互作用についても検討する。

2. 実験概要

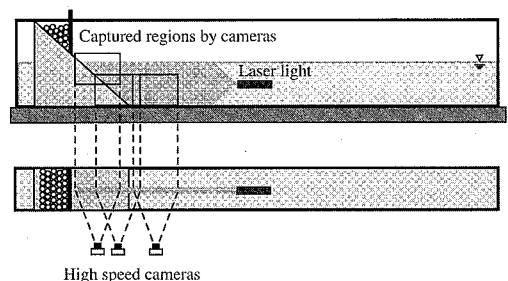
実験は、長さ 4 m、幅 0.25 m、高さ 0.5 m のアクリル製の水槽で行った (図-1(a) 参照)。実験では、水深 $h=0.115, 0.215, 0.315$ m, 粒子量 $V=4.6, 13.7, 50.2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}$, 斜面角度 $\theta=30, 60, 90$ deg, 水面から粒子群初期位置までの距離 $z_0=-0.20 \sim 0.30$ m (負の値は水面下にあることを意味する) を変化させて実験を行い、それぞれの条件下で誘起される波の特性について定量的な検討を行った。粒子には、比重 ρ_s

$=2.59$, 粒径 $d=0.5$ cm のガラスビーズを用いた。実験では、6 台の容量式波高計を用いて水面変動を計測するとともに、3 台の高速ビデオカメラを設置して、斜面上を運動する粒子群およびその周辺の流体運動を計測した。得られた水位データに基づいて誘起生成波の波速、周期、波高等を計算し、発生波の周期や波高に及ぼす粒子量、斜面角度などの影響について検討した。なお、初期状態として粒子群を斜面上に留めておくためのゲートを引き上げる場合と引き下げる場合について生成波の特性を検討したところ、両者に大きな差は認められなかったため、本論文では、ゲートを引き下げて実験を行った結果についてデータ整理を行った。

さらに、粒子群の運動によって誘起される波の生成過程の詳細を検討するため、PTV 画像流速計測手法を用



(a) 水面変動の計測

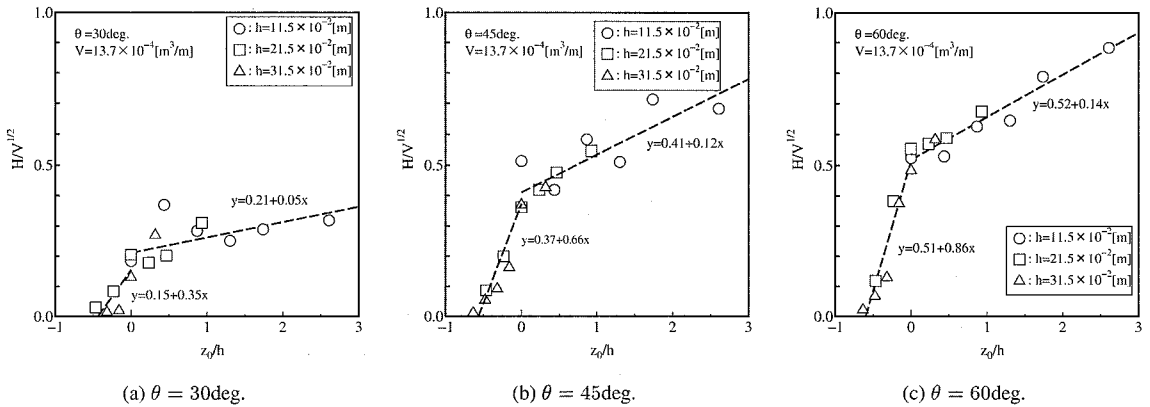


(b) 画像計測

図-1 実験概要

¹ 正会員 博(工) 大阪市立大学助教授 工学研究科都市系専攻

² 修(工) (独)土木研究所構造物研究グループ


 図-2 初期粒子位置と波高との関係 ($V=13.7 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{m}$)

いて斜面上を運動する粒子群周辺の流体運動の計測を行った。画像の計測に用いたシステムは、高速度カメラ (FASTCAM-1280PCI 1K-FM (1280×1024pixel), (株) フォトロン) 3 台と、可視化用連続光源 (DPSS Green Laser DPGL-5W, (株) 日本レーザー) 1 台である (図-1 (b) 参照)。レンズには、Ai Micro Nikkor 55 mm/F2.8S ((株) Nikon) を使用した。本システムでは、PC を用いて 3 台の高速度カメラの同期をとっており、高時間解像度・高空間解像度で、高領域の撮影が可能である。

3. 実験結果

(1) 発生波高

図-2 は、第一生成波の波高 H と初期粒子位置 z_0 を、それぞれ $V^{1/2}$ および h で無次元化して、それらの関係を示した一例である。 $z_0/h \geq 0$ の領域では多少ばらつきが見られるものの、 $H/V^{1/2}$ と z_0/h は、 $z_0/h \leq 0$ と $z_0/h \geq 0$ で異なる直線で表される線形関係にあり、両者は $z_0/h = 0$ で交差することがわかる。また、 $z_0/h \leq 0$ における勾配と $z_0/h \geq 0$ における勾配を比較すると、前者の方が大きいことがわかる。このことは、粒子群の初期位置が水面下にある場合には、初期位置が水面より深くなるとともに第一発生波の波高は急激に減少することを意味している。

いま、粒子の初期位置と発生第一波高との関係を

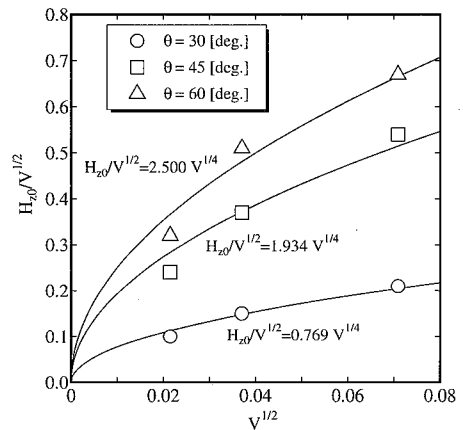
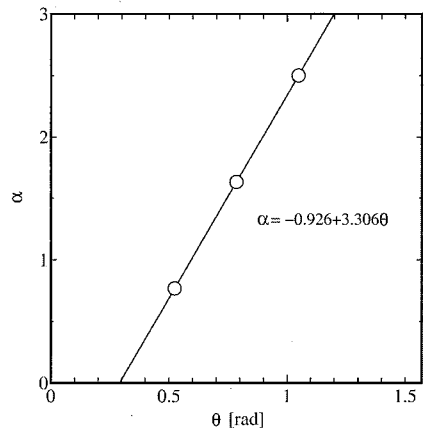
$$H_s/V^{1/2} = a_s(z_0/h) + H_{z0}/V^{1/2}, \quad z_0 \leq 0 \quad \dots\dots (1)$$

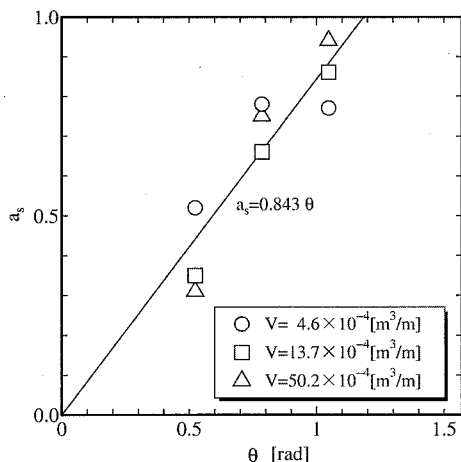
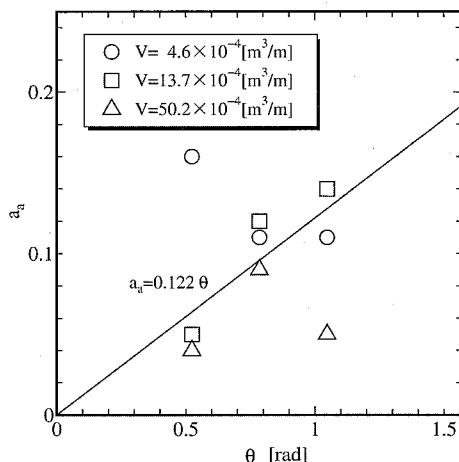
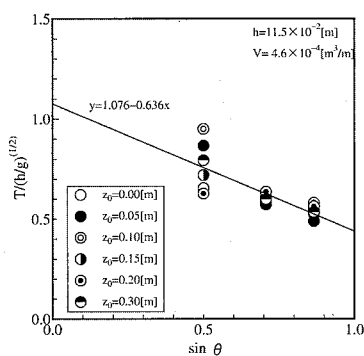
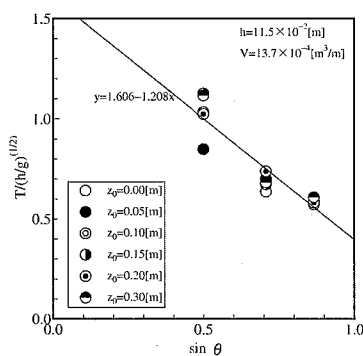
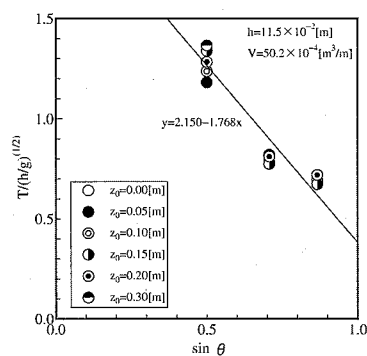
$$H_a/V^{1/2} = a_a(z_0/h) + H_{z0}/V^{1/2}, \quad z_0 \geq 0 \quad \dots\dots (2)$$

と表すことにする。ここに、 H は波高、 a は係数を表し、添え字の s および a は初期粒子位置が水面下および水面上にあることを意味している。また、 H_{z0} は $z_0/h = 0$ の場合の波高である。

図-3 は、 $z_0/h = 0$ の時の波高 H_{z0} と粒子量 V との関係を示したものである。両者には、斜面角度によって明瞭な関係が認められる。いま、 $H_{z0}/V^{1/2} = \alpha(V^{1/2})^{1/2}$ (α : 定

数) なる関係が成り立つと仮定し、最小自乗法によって近似式を推定したものが図-3 中の曲線である。さらに、係数 α と斜面角度との関係を示したものが、図-4 である。両者にも明瞭な関係が認められ、最小自乗法によって推定した近似式が図中の直線である。結局、本実験結


 図-3 H_{z0} と V との関係

 図-4 α と θ との関係

図-5 a_s と θ との関係図-6 a_a と θ との関係(a) $V = 4.6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}$ (b) $V = 13.7 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}$ (c) $V = 50.2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}$ 図-7 発生波の周期と斜面勾配との関係 ($h=11.5\text{cm}$)

果より、粒子初期位置が水面にある場合の第一発生波の波高 H_{20} は次式で推定できる。

$$H_{20} = (-0.926 + 3.306\theta) V^{3/4} \dots \dots \dots (3)$$

ただし、上式中の θ の単位はラジアンである。

図-5は、式(1)中の a_s と θ との関係を図示したものである。同図より、両者には線形の関係があることがわかる。図中の直線は、最小自乗法によって求めた近似直線である。

$$a_s = 0.843\theta \dots \dots \dots (4)$$

同様に、式(2)中の a_a と θ との関係を図-6に示す。初期粒子位置と波高との関係においてばらつきの大きかった $\theta=30 \text{ deg}$. かつ $V=4.6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}$ の場合、および、 $\theta=60 \text{ deg}$. かつ $V=50.2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}$ のデータを除いて近似式を求めたものが図中の直線である。

$$a_a = 0.122\theta \dots \dots \dots (5)$$

以上より、式(1)~(5)を用いることによって、本実験スケールにおける第一生成波の波高が推定できること

になる。

(2) 発生波周期

図-7は、発生波周期 T と斜面勾配 θ との関係について示したものである。斜面勾配の緩やかな $\theta=30 \text{ deg}$. の場合にはばらつきが大きい、おおむね、 θ が大きくなるとともに T が短くなる傾向があることがわかる。発生波高の場合と同様に、

$$T/(h/g)^{1/2} = -\alpha_T \sin \theta + \beta_T \dots \dots \dots (6)$$

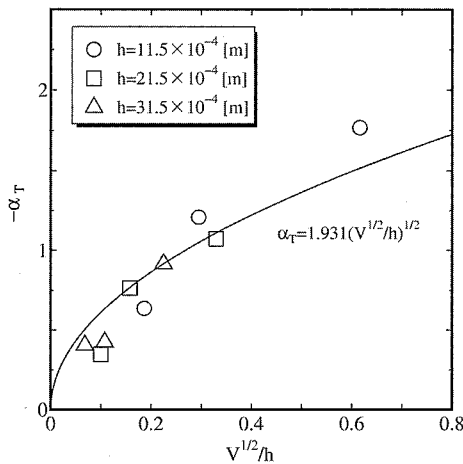
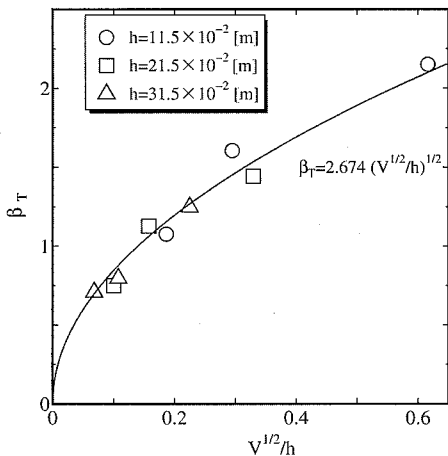
なる関係が成り立つと仮定した上で、 α_T および β_T と $V^{1/2}/h$ との関係を示したものが、図-8および図-9である。これらの図より、

$$\alpha_T = -1.931(V^{1/2}/h)^{1/2} \dots \dots \dots (7)$$

$$\beta_T = -2.674(V^{1/2}/h)^{1/2} \dots \dots \dots (8)$$

と得られる。したがって、本実験スケールにおいては、第一発生波の周期は

$$T = (-1.931 \sin \theta + 2.674) \left(\frac{V^{1/2}}{g} \right)^{1/2} \dots \dots \dots (9)$$

図-8 α_T と $V^{1/2}/h$ との関係図-9 β_T と $V^{1/2}/h$ との関係

と推定できる。

4. 流跡線連結法

本研究で対象としている高濃度粒子群を含む固液混相流場の計測は、比較的高速度で運動し、かつ、流体運動の変動成分も極めて大きい。しかし、高時間解像度で画像を撮影すればレーザーの光量が不足し、時間解像度を下げれば異なる画像間における粒子の対応付けが困難であるなど、既往の PIV 画像解析手法では、十分な精度での計測ができなかった。そこで、新たな画像解析手法として流跡線連結法（河野，2006）を開発した。

本研究で開発した手法は、高濃度粒子群の極近傍や水表面近傍における流体場を高精度で計測するため、撮影された個々のトレーサーを追跡する PTV 法に分類される手法である。

近年、最も汎用的な画像解析手法は、パルスレーザー光を用いてトレーサーの瞬間像を撮影し、異なる画像間に

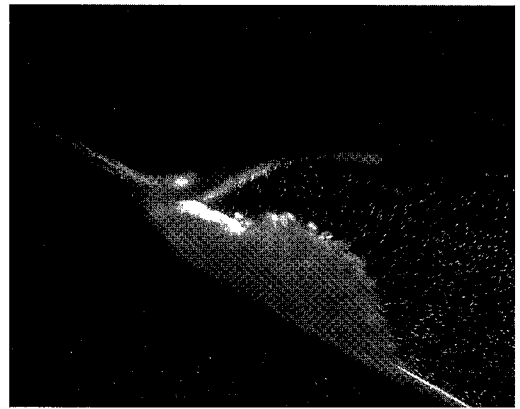
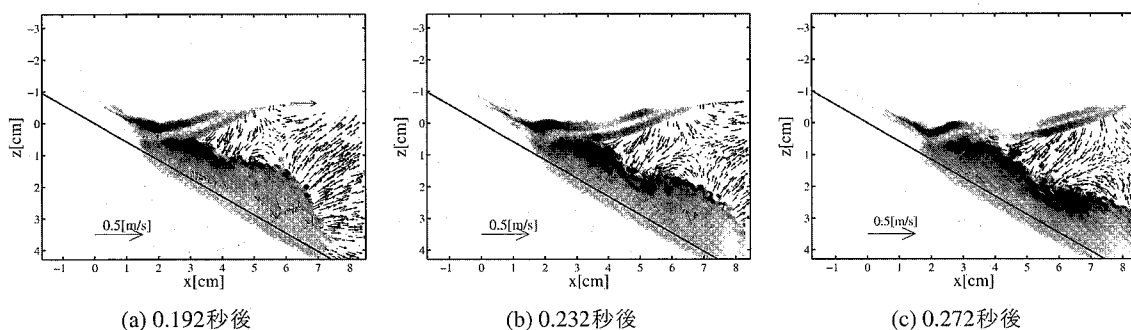
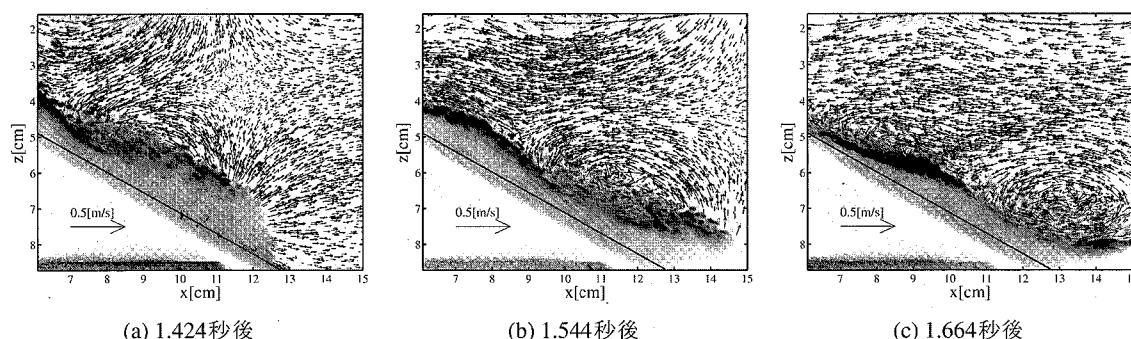


図-10 流跡線連結法で用いる撮影画像

撮影された粒子画像を対応させることによって、流体速度を計測しようとする手法であろう。しかし、開発した流跡線連結法は、前述の高速ビデオカメラの撮影時間間隔とシャッター速度をほぼ同じにできることを利用して、図-10に示すようなトレーサーの流跡線画像を撮影し、個々のトレーサーの速度を求めようとする方法である。撮影された単独の画像だけでは、トレーサーの運動方向を特定することはできないが、次時刻の画像中には、この時刻に撮影された流跡線の終点にあたる端点近傍に、トレーサー情報が撮影されているはずである。すなわち、次時刻の画像中に対応するトレーサーが存在する端点が流跡線の終点であると認識することができる。任意の画像中に撮影されたトレーサーの端点間距離を求めればよいので、異なる画像間のトレーサーの誤対応に起因する誤ベクトルは発生しない。

図-11は、 $V=13.7\text{m}^3/\text{m}$ 、 $\theta=30\text{deg.}$ 、 $z_0=0.0\text{m}$ の場合の、粒子群が水中に突入した直後の計測結果を示したものである。同図(a)は、粒子群が水中に突入し始めてから0.192秒後の計測結果である。斜面上を運動する粒子群の先端では放射状に分布する流速ベクトルが計測されている。また、 $5\text{cm} \leq x \leq 6\text{cm}$ 程度の範囲では水面近傍では波動運動と見られる流況が、粒子群近傍では粒子群の後方に回り込むような流況が計測されている。さらに、 $x \leq 4\text{cm}$ の範囲では斜面に垂直な方向の流速が計測されている。この時刻より0.04秒後の同図(b)の計測結果を見れば、およそ $x=6\text{cm}$ よりも岸側では斜面に垂直な流れが発生し、この流れによって粒子群の先端は分裂するような様子を呈している。さらに、0.04秒後の同図(c)を見れば、明瞭に粒子群が分裂を始めていることがわかる。また、汀線付近の水面は上昇し始め、これに伴って斜面上方に向かう流れが後方の粒子群に作用し始めている。これによって、粒子群の分裂はさらに促進されるとともに、汀線近傍での流体の遡上が抑制さ

図-11 水中突入直後の粒子群および流況 ($\theta = 30\text{deg}$)図-12 斜面上を運動する粒子群および流況 ($\theta = 30\text{deg}$)

れることになっていると考えられる。

図-12は、さらに粒子群が斜面上を運動している状況を計測した結果である。計測領域内では、波動成分と思われる流れと粒子群近傍の比較的大規模な渦構造と思われる流れや、斜面上を遡上するような流れが見られ、せん断力の大きな流れ場が形成されていることがわかる。

このように、本研究で開発した流跡線追跡法は、分散固相を含む高速度で速度勾配の大きな流速場を詳細に計測することができる非常に有用な手法であることがわかる。

5. 結 論

本研究で得られた結論を要約すると、以下のようである。

(1) 粒子量 V で正規化された発生波の波高 H は、水深 h で正規化された水面から粒子初期位置までの距離 z_0 と線形の関係があることが示された。さらに、粒子群の初期位置が水面下にある場合と水面上にある場合によって、異なる推定式で整理できることが明らかになった。

(2) また、発生波の周期 T は、斜面角度 $\sin \theta$ とほぼ線形の関係があり、斜面角度が急になるほど発生波の周期が短くなることを明らかにするとともに、その推定式を誘導した。

(3) 新たな可視化画像解析手法を開発し、高速度で運

動する粒子群近傍の流体運動の計測が可能になった。

(4) 水面近傍における粒子群と、その運動に誘起される流体運動の間には明瞭な相互作用が見られ、粒子群近傍では大規模な渦構造や斜面上を遡上する流れなど、粒子群と流体との複雑な相互作用を表す流体場が計測により明らかになった。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金（基盤研究B）（課題番号 15360269）の補助を受けて実施されたものである。ここに記して、謝意を表する。

参 考 文 献

- 河野哲也(2006)：斜面上を運動する粒子群に誘起される流体運動に関する実験的研究，大阪市立大学大学院修士論文，172p.
- 重松孝昌，小田一紀，赤木統彦(2003)：粒子群の運動に誘起される波の生成・伝播機構に関する基礎実験，海岸工学論文集，第50巻，pp. 256-260.
- 富樫宏由，平松康志，谷口裕治，松本慎市(1992)：1792年有明海津波の再現性水理実験，海岸工学論文集，第39巻，pp. 221-225.
- Hermann M. Friz, Willi H. Hager and H. E. Minor(2001)：Lituya Bay case: Rockslide impact and wave run-up, J. Sci. Tsunami hazard, Vol. 19, No. 1, pp. 3-22.
- Watts, P. (1997)：Water wave generated by underwater landslides, Doctor thesis, 319p.