

非対称波浪下における砂粒子の運動

愛媛大学工学部

正 員 伊 福 誠

(株) 日建技術コンサルタント

正 員 ○ 中 西 ま ゆ み

松さくコンサルタント (株)

和 田 公 輔

復建調査設計 (株)

正 員 井 上 浩 司

1. はじめに

生態系による海の浄化作用を期待して造成された干潟や砂浜を保全するには、使用する砂礫の波・流れによる動きを詳細に把握することが極めて重要となる。

後藤ら (1994) は振動流や一様流を対象に砂粒子の掃流およびシートフローの移動過程をシミュレートしている。

本研究では、非対称波および微小振幅波を対象にした乱流境界層内の砂粒子の運動を数値解析的に検討するものである。また、砂粒子の底面との衝突・反発を記述する新たなモデルを構築し、saltationについても考究しようとするものである。

2. 基礎方程式

流体の運動は鉛直 2 次元の乱流境界層方程式および連続式を連立させて解く。

砂粒子の運動方程式は Basset-Boussinesq-Oseen の方程式に Saffman による揚力の効果を考慮したものを与える。また、砂粒子の運動方程式の解は 2 次の Runge-Kutta の方法で求める。

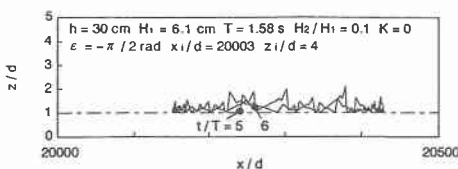
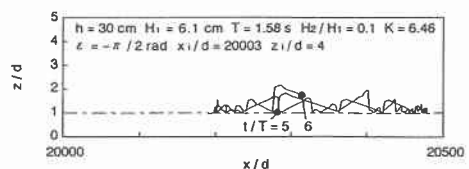
底面近傍において、砂粒子は底面と衝突・反発を繰り返すため、それらを記述する数理モデルが必要となる。整然と並ぶ球形砂粒子で構成される底面に球形砂粒子が入射角 $\theta_{in} = \arctan(w_{in}/u_{in})$ (u_{in} , w_{in} : 入射速度成分) で衝突すると仮定すると、反発面は必ずしも水平面とは限らない。したがって、砂粒子の不規則な反発面での衝突・反発を仮想反発面の角度 α を、 $(0,1)$ の一様乱数 ξ_0 を用いて確率的に与える。

$$\alpha = \begin{cases} \pi(1-2\xi_0)/6 & (\text{for } -\pi/2 \leq \theta_{in} < -\pi/6) \\ -(1-\xi_0) \tan^{-1} \left\{ -\pi/2 + \sin \theta_{in} / \sqrt{-\sin \theta_{in} (2 + \sin \theta_{in})} \right\} + \theta_{in} & (\text{for } -\pi/6 \leq \theta_{in} < 0) \\ (1-\xi_0) \tan^{-1} \left\{ -\pi/2 - \sin \theta_{in} / \sqrt{\sin \theta_{in} (2 - \sin \theta_{in})} \right\} + \theta_{in} & (\text{for } 0 \leq \theta_{in} < \pi/6) \\ -\pi(1-2\xi_0)/6 & (\text{for } \pi/6 \leq \theta_{in} \leq \pi/2) \end{cases} \quad (1)$$

なお、一様乱数は TLP 法に基づいて生成する。

3. 数値解析法

乱流境界層方程式の初期条件は波のない状態とする。また、粗度長 z_0 の高さにおける境界では、流速がゼロに等しいとする。さらに、上方境界では、基本周波数成分波と位相のズレを含む 2 倍周波数成分波を線形に重ね合わせた合成波の流速成分を与える。なお、波の進行方向の境界では 1 次元の乱流境界層方程式を解き、それより内部は 2 次元の乱流境界層方程式と連続式を連立させて u_f および w_f を求める。

図 1 砂粒子の衝突状況 ($K = 0$)図 2 砂粒子の衝突状況 ($K = 6.46$)

4. 解析結果

(1) 砂粒子の衝突状況

図1および図2は、それぞれ揚力を考慮しない場合と考慮する場合の $t/T = 5 \sim 6$ の位相における砂粒子衝突状況である。なお、粒子の履歴を表す Basset 項は考慮していない。対象とする波は、前傾波である。図中の●は砂粒子の $t/T = 5$ と6における位置を示す。また、砂粒子の初期高さは $z_i/d = 4$ であり、図中の一点鎖線は砂粒子が底面の真上に衝突する際の重心の位置を表す。

図1において、砂粒子は鋸歯状の saltation 運動を繰り返す。また、砂粒子は流速の向きに従って往復運動をするが、底面近傍では冲向き流速振幅が岸向きのそれと比較して小さいために1周期後の砂粒子の位置は岸側に移動する。さらに、砂粒子は流速振幅に依存する saltation 運動をする。

図2は、図1と比較して saltation の軌跡が移動範囲の中央部分で歯の欠けた鋸状を呈す。これは、砂粒子が底面から跳ね上がったときに揚力の影響を受けて沈降しにくく、岸沖方向に移流することによって起る。

(2) 位相差 ϵ と saltation 高さ

図3は、位相差 ϵ と平均 saltation 高さの関係を示したものである。また、図の縦軸の $\bar{H}_s$ は粒径で正規化した平均 saltation 高さである。

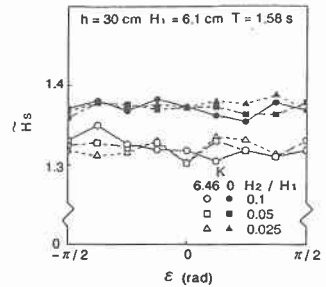
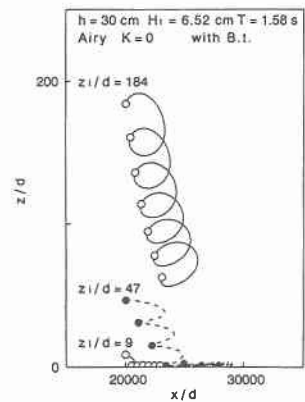
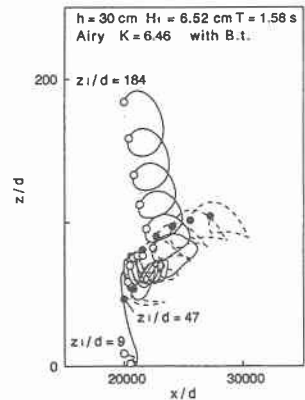
平均 saltation 高さは、いずれの波高比とも揚力を考慮しない場合が揚力を考慮する場合より大きい。また、平均 saltation 高さと ϵ との間に顕著な傾向はみられず、ほぼ同一である。揚力を考慮する場合と考慮しない場合の平均 saltation 高さは、それぞれ粒径の1.3および1.4倍程度であり、河田が一様流中における実験で得た0.8~2倍の範囲内にある。

(3) 砂粒子の運動

図4および図5は、それぞれ揚力を考慮しない場合と考慮する場合の初期高さが異なる砂粒子の6周期間の運動を示したものである。対象とする波は微小振幅波である。また、図中の●および○は1周期ごとの砂粒子の位置を示す。なお、粒子の履歴を表す Basset 項は考慮している。

図4において、 $z_i/d = 184$ の砂粒子は螺旋を描きながら沈降し、底面に近づくほど偏平になる。これは、砂粒子の運動する範囲において底面に近いほど水粒子の岸沖方向の流速振幅が増大し、鉛直方向の流速振幅が減少するためと考える。 $z_i/d = 47$ および9の砂粒子は $z_i/d = 184$ の砂粒子と同様に沈降し、底面と最初の衝突をした後は saltation を繰り返して岸側に移動する。

図5において、 $z_i/d = 184$ の砂粒子は図4と同様に沈降するが、 $z_i/d = 100$ より低い高さでは歪んだ螺旋を描く。 $z_i/d = 47$ の砂粒子は、下方が平坦な歪んだ螺旋を描きながら上方および岸側へ移動し、3周期目以降は $z_i/d = 100$ 程度の高さにある。 $z_i/d = 9$ の砂粒子は底面との衝突・反発を繰り返し、1周期から2周期の間に粒径の60倍程度の高さに浮上する。その後、レムニスケート曲線に似た軌跡を描きながら上方へ移動する。

図3 ϵ と平均 saltation 高さ図4 砂粒子の運動 ($K = 0$)図5 砂粒子の運動 ($K = 6.46$)