

移動床上のsaltation粒子の衝突・反発機構

COLLISION OF SALTATING PARTICLE WITH MOVABLE BED

後藤仁志¹・酒井哲郎²・原田英治³

Hitoshi GOTOH, Tetsuo SAKAI and Eiji HARADA

¹正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木工学専攻 (同上)

³学生会員 京都大学工学研究科 土木工学専攻 (同上)

In the numerical models of irregular successive saltation, the collision of saltating particle with bed-material particle is treated as the collision between two rigid bodies. While, on the movable bed, not only the bed-material particle colliding with the saltating particle but other particles in the neighborhood of the colliding particle are affected by the collision. In other words, the consideration as the granular material is required on the modeling of collision process on a movable bed.

In this study, the distinct element method is applied to collect the basic information on the collision process on a movable bed. The characteristics of the coefficient of restitution is investigated based on the numerical information for various kinds of conditions. The effect of the movable bed on the saltating particles are also examined based on the simulation of the successive saltation with taking the characteristics of the coefficient of restitution into account.

Key Words: *Bed-load motion, Collision and repulsion, Saltation, Bed-material particle, Granular material, Distinct element method*

1. 緒言

非平衡流砂過程の本質を成す砂粒子の不規則運動を記述する手法としては、砂粒子運動をLagrange的に追跡しつつ、運動を規定する諸要因を確率論的に扱う stochastic simulation が有効である。この種の取り扱いで掃流砂を対象とする場合には、不規則継続跳躍 (irregular successive saltation) モデルを用いるのが一般的であるが、このモデルで砂粒子運動の不規則性を規定するのは、底面境界での不規則衝突・反発過程である。衝突・反発過程における不規則性は、仮想反発面傾斜角と反発係数を変数とする仮想反発モデルで表現される。

仮想反発面傾斜角は、底面粒子配置の凹凸に起因する反発面の不規則性を表現するため確率変数であり、一方、反発係数は、砂層表面との衝突前後の砂粒子速度の関係を規定するモデル定数として扱われ、saltation層厚や流砂量などの掃流運動のマクロ的特性量に基づいて設定される。

さらに、仮想反発モデルでは、saltation粒子に直接

衝突される底面構成粒子とsaltation粒子の間の2体衝突問題が取り扱われてきたが、現実の移動床ではsaltation粒子に直接衝突される底面構成粒子の周囲の粒子も衝突の間接的影響を受けるため、多体衝突問題を扱う必要がある。すなわち、移動床では、底面を構成する砂粒子間の相互作用がsaltation粒子の衝突・反発事象に関与するため、底面粒子群の幾何的配列特性をはじめとする種々の要因に影響された複雑な機構の存在が想定される。

近年、このような衝突に対する底質粒子群の粒状体的応答特性の把握が現象の理解の鍵であることが、次第に認識されるようになり、粒状体の数値モデルである個別要素法を用いて、砂粒子の衝突・反発過程のミクロなレベルの力学機構を明らかにしようとする試みが行われている (例えば、三島・秋山・土屋¹⁾, Haff and Anderson²⁾)。これらの研究では、現実の底質配列を意識して不規則な底質粒子配列が用いられたが、不規則配列はさらに現象を複雑化させ、一連のシミュレーション結果の体型化を進める上では障害となる。また、著者ら³⁾は、移動

床における反発係数の合理的推定のための基礎的情報を収集するため、2次元場で規則配列された移動床上の衝突・反発過程の物理実験を実施して、底質粒子群の幾何的配列特性と反発係数の関係および衝突前後のエネルギー収支について考察した。大量の画像データの解析を伴うこの種の物理実験では、多大の時間と労力を必要とするため、効率的なデータの収集には不向きである。

本研究では、個別要素法に基づく著者ら⁴⁾の数値解析コードをsaltation粒子の移動床との衝突・反発過程に適用し、衝突事象を支配する種々の要因の影響を系統的に検討すると共に、それらの影響を反発係数の推定に反映させて不規則継続跳躍のシミュレーションを実施し、反発係数を変数とした場合のsaltation特性の変化を検討する。

2. シミュレーションの概要

著者ら³⁾の実験では、鉛直に立てられた2枚の平板間に拘束された均一径 d のシリンダー群の運動を対象としたが、シミュレーションにおいても鉛直2次元場における各シリンダーの運動方程式を陽解法で解いて、粒子間衝突を考慮しつつ、シリンダー群の運動を追跡する。計算に用いたシリンダーは、実験と同様の直径3.79cm、厚さ0.340cm、重量3.26g、比重1.07g/cm³のものである。

計算の具体的プロセスに関しては、既発表であるので（例えば、後藤・酒井⁴⁾、Gotoh and Sakai⁵⁾）、概要のみを簡潔に述べる。個別要素法では、計算ステップの更新の度に個々の粒子の接触状況が検査され、接触状態にある粒子間については、弾性スプリングと粘性ダッシュポットが導入されて粒子間の相互作用が計算される。粒子（シリンダー） i の並進および回転の運動方程式は、

$$\sigma A_2 d^2 \frac{du_{pi}}{dt} = \sum_j \left\{ -f_n \cos \alpha_{ij} + f_s \sin \alpha_{ij} \right\} \quad (1)$$

$$\sigma A_2 d^2 \frac{dv_{pi}}{dt} = \sum_j \left\{ -f_n \sin \alpha_{ij} + f_s \cos \alpha_{ij} \right\} - \sigma A_2 d^2 g \quad (2)$$

$$\frac{\sigma A_2 d^4}{8} \frac{d\omega_{pi}}{dt} = \frac{d}{2} \sum_j \{ f_s \} \quad (3)$$

で与えられる。ここに、 σ ：粒子の密度、 A_2 ：粒子の2次元形状係数（ $A_2=\pi/4$ ）、 d ：粒径（シリンダー直径）、 u_{pi}, v_{pi} ：粒子 i の水平および鉛直方向の移動速度、 f_n, f_s ：粒子 ij 間の法線(n)および接線(s)方向の作用力、 α_{ij} ：粒子 ij の接触角、 g ：重力加速度、 ω_{pi} ：粒子 i の角速度である。これらの運動方程式が逐次数値積分され、粒子群の運動が追跡される。

各粒子の接点には、法線方向および接線方向に弾性スプリング（ばね定数 k_n, k_s ）および粘性ダッシュポット（減衰定数 η_n, η_s ）を配置して相互作用を表現する。さらに、法線方向には引っ張りに抵抗しないジョイントを、接線方向には一定の限界を越える力が作用すると滑動するジョイント（摩擦係数 μ ）をそれぞれ配置する。なお、モデル定数については既往の研究を参考に計算の安定性に留意しつつ、粒子間について： $k_n=9.45 \times 10^5$ N/m, $k_s=1.89 \times 10^6$ N/m, $\eta_n=1.0 \times 10^2$ Ns/m, $\eta_s=3.0$ Ns/m, $\mu=0.5$ ；粒子と壁の間について： $k_n=2.84 \times 10^7$ N/m, $k_s=7.09 \times 10^6$ N/m, $\eta_n=4.0 \times 10^2$ Ns/m, $\eta_s=2.0 \times 10^2$ Ns/m, $\mu=0.176$ ； $\Delta t=1.0 \times 10^{-5}$ sと与えた。また、計算においては、著者ら³⁾の実験と同様に固定壁で取り囲まれた領域に規則的に粒子を積み重ねて粒子堆積層を造り、それにsaltation粒子を衝突させることとした。実験との直接的比較に関しては、実験と同様の5層の粒子堆積層を、その他の場合には、後述する固定壁からの衝撃波の反射の影響の低減に配慮して、7層の粒子堆積層を用いることとした。

3. 衝突過程の粒子群の挙動

(1) 衝突過程の瞬間像

図-1は、saltation粒子と底質粒子群との衝突の瞬間について実験とシミュレーションを比較したものである。図中には、最密充填状態（ $\delta d=0.0$ ； δ ：底質粒子間の間隙、図-2の衝突に関する諸元を参照）と底質粒子を間隙を残して配列した状態（ $\delta d=0.324$ ）について、ほぼ同一の仮想反発面傾斜角（saltation粒子と底質粒子が衝突した瞬間における両者の共通接線が水平方向となす角、図-2参照） $\alpha=27.9^\circ, 28.3^\circ$ で衝突が生じる場合を比較している。図では、衝突直前から衝突後に至るまでの粒子の位置を重ねて表示しており、衝突過程で底質粒子が揺動すれば粒子の輪郭線がぶれて、太線で粒子が描かれたような表示となる。

最密充填状態（ $\delta d=0.0$ ）の実験結果について見ると、直接衝突される底質粒子を含めて、概略的には底質粒子には顕著な揺動は見られず、この傾向はシミュレーションでも良好に再現されている。より詳細に見ると、実験では、直接衝突される粒子から下手側に4,5番目の粒子に僅かながら揺動が生じているようであるが、実験装置では粒子層周辺は固定壁で取り囲まれていることから、この種の揺動は壁からの衝撃波の反射に対応したものと推察される。一方、粒子間の間隙を残して配列した $\delta d=0.324$ の状態については、実験では、直接衝突される底質粒子から右斜め下および右側表層方向に顕著な揺動が生じている。シミュレーション結果でも右斜め下方向の顕著な揺動は明瞭に再現されており、右側表層方向

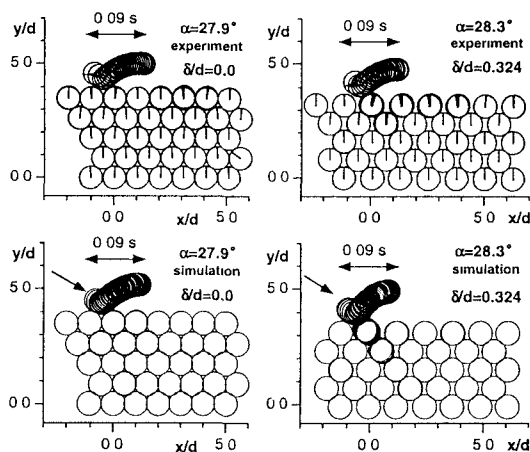


図-1 衝突過程の瞬間像

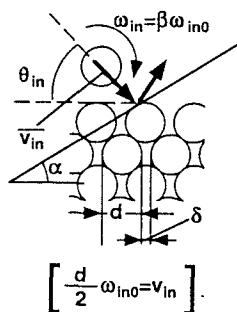


図-2 衝突過程の諸元

に関してはやや不明瞭なものの、直接衝突される粒子の直下手の粒子と下手側3番目の粒子に揺動が確認できる。

(2) 衝突過程の粒子作用力

実験では、高速度ビデオカメラを用いているが、記憶容量の制約から、1/100秒以下の現象をとらえることはできない。これに対して、衝撃波の伝搬は撮影時間間隔以下の微小時間で生じており、衝突により底質粒子群に発生する粒子間応力の伝搬機構を直接映像でとらえるのは困難である。そこで、シミュレーション結果に基づき、saltation粒子の衝突に対して底質粒子群がどのように応答するかを検討する。図-3は、最密充填状態 ($\delta/d=0.0$) について直接衝突される粒子の周辺粒子に生じる外力（当該粒子についての全粒子間作用力の和）の時間変化を示したものである。図中には、粒子に生じる外力の水平方向および鉛直方向の成分 F_x, F_y について、各4方向（右表層、右斜め下、左斜め下、左表層）に分けて、計8枚の図を表示している。粒子番号と個々の粒子の位置を図中の補助図に示すとともに、個別の図には表

示対象とされている粒子の位置を矢印で示すこととした。さらに、個別の図の間での比較の観点から、saltation粒子（No. 1）と直接衝突される粒子（No. 12）については全ての図に掲載している。

鉛直方向の成分に注目すると、saltation粒子との直接衝突により、粒子12は、下向きの大きな力を受け、それとは逆に、saltation粒子（No. 1）は上向きの大きな力（反発力）を受けている（図A-2）。粒子12が運動することの影響は少し遅れて粒子11に伝わり、粒子11の作用力も僅かながら負の値を示す。このような力の伝搬は斜め下方向に顕著である（図B-2, C-2）。例えば、図B-2では、何れの底質粒子も衝突の影響で負の力を受けて下方に移動し、下方の底質粒子群から押し戻されて（正の力を受けて）上方に移動して、再び上方の粒子から押しも戻されて下方に移動するという過程を繰り返し、その間に作用力が次第に減衰するという特徴を示している。このような減衰振動的曲線のピークは表層から深層に向かって少しずつ遅れて生じており、saltation粒子の衝突に伴う衝撃の伝搬を示している。また、左（上手）方向については、衝突の影響は小さく、有為な力は粒子に作用していない（図D-2）。

一方、水平方向成分に関しても、基本的には同様の力の伝搬過程が現れているが、右斜め下の場合（図B-1）と左斜め下の場合（図C-1）で顕著な相違が見られる。右斜め下方向には、鉛直成分で見られたと同様の力の伝搬過程（ピークの遅れと減衰振動的特性）が確認できるが、左斜め下の時系列は複雑な様相を呈しており、衝突の上手（左）方向には、下手側の底質粒子の運動から生じる間接的影響が伝搬して状況を複雑化させているものと推察される。

次に、図-4は、 $\delta/d=0.324$ について直接衝突される粒子の周辺粒子に生じる外力の時間変化を示したものである。図-3と同様に揺動は大略的には減衰振動的な挙動を示すが、一旦減衰した後、瞬間的に大きく揺動する特性（図中に矢印で表示）が確認できる。図-1の実験結果では、固定壁からの衝撃波の反射を示唆する粒子の揺動が示されていたが、この時系列に見られる減衰後の急激で瞬間的な揺動も、衝撃波の反射の影響を示唆するものと判断できる。

4. 衝突過程の支配要因と反発係数

(1) 反発係数

次式で定義される反発係数 e, f は仮想反発面傾斜角に依存性する。

$$u_{out} = e \cdot u_{in} \quad (4)$$

$$v_{out} = f \cdot v_{in} \quad (5)$$

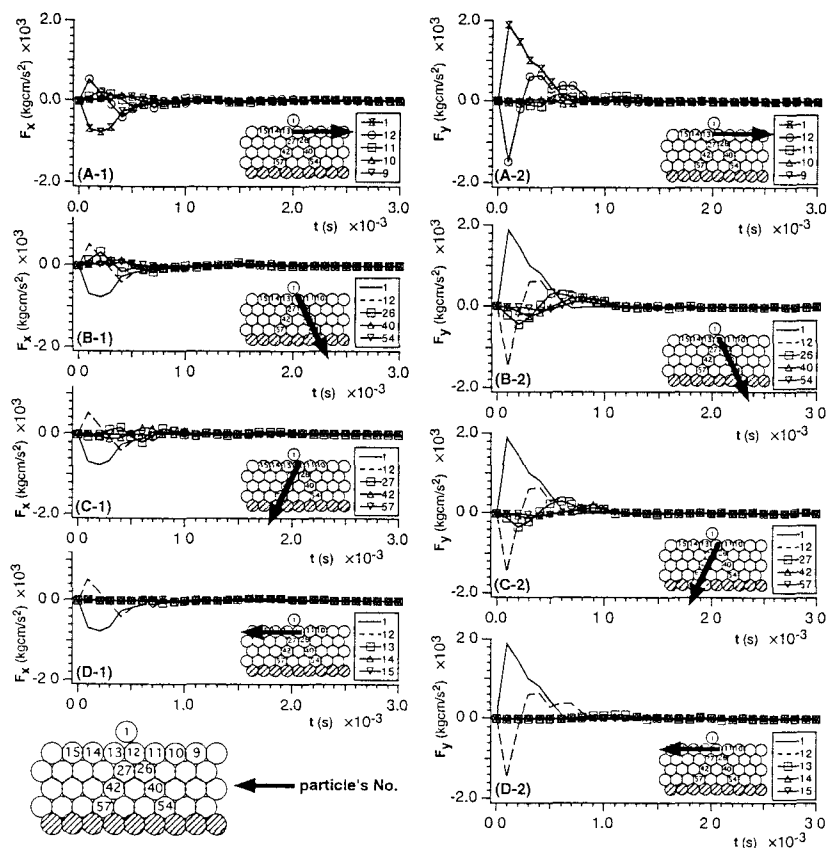


図-3 衝突過程の粒子作用力（最密充填）

ここに、 (u_{in}, v_{in}) ：衝突直前の粒子速度の仮想反発面に対する水平成分と鉛直成分、 (u_{out}, v_{out}) ：衝突直後の粒子速度の仮想反発面に対する水平成分と鉛直成分である。

通常のsaltationのシミュレーションでは、反発係数 e, f は一定とされるが、移動床では、反発係数を変化させる種々の要因が想定できる。ここでは、底質粒子群の配列（粒子間の間隙と粒径との比 δd ）、saltation粒子の衝突速度 $\overline{v}_m$ 、saltation粒子の入射角 θ_m 、saltation粒子の回転速度 ω_m を衝突の支配要因として想定し、諸条件の影響に関してパラメトリックな解析を実施する。なお、物理実験の際には、saltation粒子の加速に傾斜路を用いたので、回転速度の基準として斜面上を滑らずに転がる際の回転速度 ω_{m0} を導入し、回転速度比 $\beta = \omega_m / \omega_{m0}$ をsaltation粒子の回転速度 ω_m に代わってsaltation粒子の回転の程度を示す指標とする。以上の諸元に関しては、図-2にまとめて示している。

(2) 反発係数に対する諸元の影響

図-5は、底質粒子群の配列、すなわち粒子間の間隙と粒径との比 δd が反発係数 e, f に与える影響を示したものである。全ての場合を通じて、反発係数 e には仮想反発面傾斜角 α の増加に伴う漸増傾向が、反発係数 f には $\alpha \rightarrow 0$ の領域で α に依存せず、ほぼ一

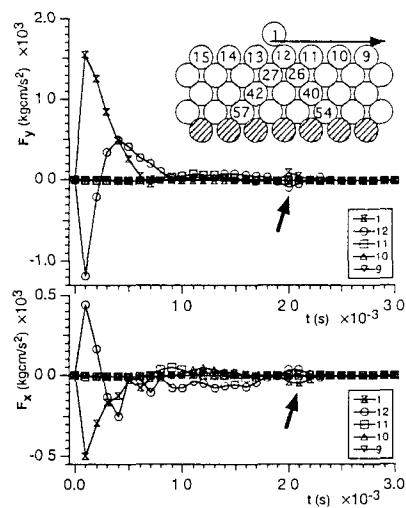


図-4 衝突過程の粒子作用力（間隙あり）

定値を示す傾向がそれぞれ確認できる。粒子間の間隙と粒径との比 δd に対する依存性はあまり明確ではないが、何れのケースも実験値の存在範囲に入っており、全体としての対応は、良好である。図-6に、saltation粒子の衝突速度 $\overline{v}_m$ が反発係数 e, f に与える影響を示した。図-5と同様に、全体としての実験値との対応は良好であるが、個々のシミュレーション条件間の相違は小さく、したがって、衝突速度の変化が反発係数に与える影響は小さい。

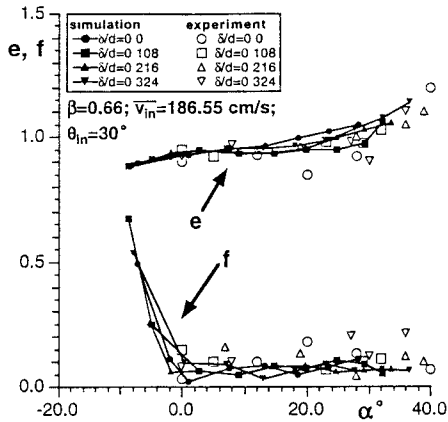


図-5 反発係数（粒子配列の影響）

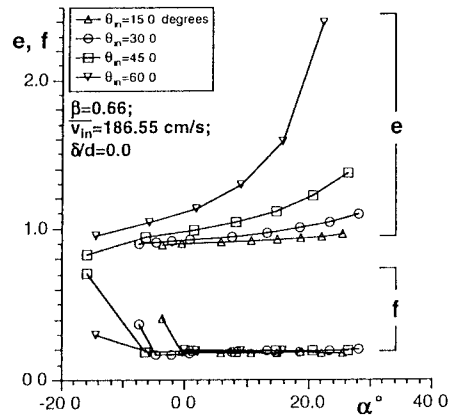


図-7 反発係数（入射角の影響）

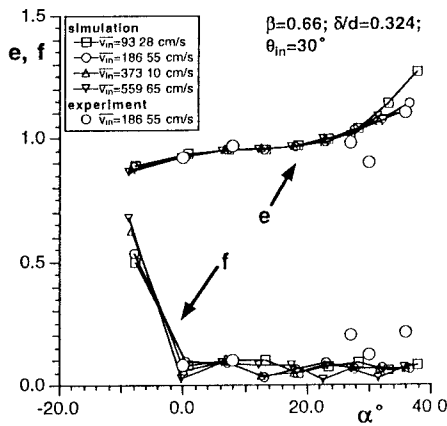


図-6 反発係数（衝突速度の影響）

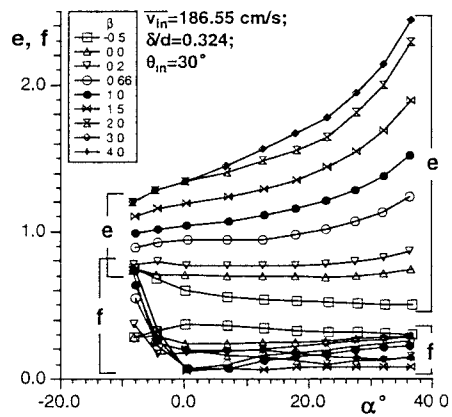


図-8 反発係数（粒子の回転の影響）

図-7 は、saltation 粒子の入射角 θ_{in} が反発係数 e, f に与える影響を示したものである。係数 f は $\alpha > 0$ の領域で α に依存せず、ほぼ一定値を示すが、係数 e の仮想反発面傾斜角 α の増加に伴う増加傾向には入射角に対する顕著な依存性が現れている。すなわち、入射角が小さい場合、係数 e は α の増加に伴い微増傾向を示すが、入射角の増大とともに増加傾向が顕在化し、 $\theta_{in} = 60^\circ$ では係数 e は α の増加に伴い急増する。図-8 は、回転速度比 $\beta (= \omega_{in} / \omega_{in0})$ が反発係数 e, f に与える影響を示したものであるが、図-7 で見られたのと同様に、係数 e の仮想反発面傾斜角 α の増加に伴う増加傾向には回転速度比 β に対する顕著な依存性が現れている。時計回りの回転については回転速度の増加とともに係数 e の α の増加に対する増加傾向が顕著となる。また、反時計回りの回転 ($\beta = -0.5$) については、係数 e は α の増加とともに緩やかに減少する。

以上のように、底質粒子群の配列の相違が反発係数に及ぼす影響はあまり顕著ではないが、saltation 粒子の回転や入射角の条件に反発係数が大きく依存す

ることが明らかとなった。なお、反発係数 e の値が 1.0 を越える場合があるが、これは衝突前後での回転速度の変化により回転運動のエネルギーが並進運動に移行することによるものと推察される。並進および回転運動全体としてのエネルギー収支を考えると、衝突によるエネルギー損失が生じていることは確認済みである。また、これらの依存性が固定床でも同様に見られるものかは、現時点では不明である。

5. 反発係数の saltation 特性に与える影響

一連の解析から得られた反発係数の特性が、saltation 全体の構造をどのように変化させるのかを検討するため、著者らの一人⁶⁾の不規則継続跳躍モデルを用いて、飛砂層を対象に saltation のシミュレーションを実施した。ここで用いたモデルは、風速場を $k-\epsilon$ モデルで計算し、飛砂の影響を抗力項として風速場に反映させて流体系と粒子系をカップリングするモデルであり、基本的には、辻本、赤城⁷⁾のモデ

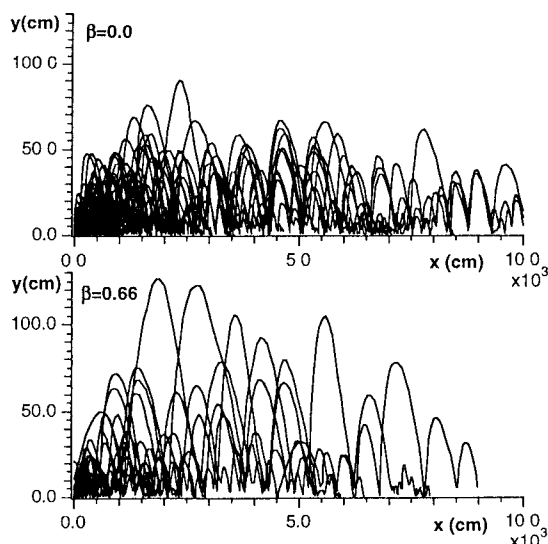


図-9 saltation 軌跡

ルと同様の構造となっている。不規則継続跳躍モデルでは砂粒子が底面と衝突する際の入射角は変数として取り扱われるので、本研究の個別要素法のシミュレーションで得られる計算結果を計算条件とともにデータファイル化して記録し、このデータファイルを内挿補間して所与の入射角による反発係数の変化を考慮した。一方、不規則継続跳躍モデルでは粒子の回転を扱わないので、衝突時の回転速度については saltation の追跡過程では情報が与えられない。ここでは、回転の影響の有無にのみ注目し、簡単のため、回転なし ($\beta=0.0$) および回転あり ($\beta=0.66$) を比較した。

図-9 は、代表的 saltation 軌跡を、図-10 は、一連の不規則継続跳躍を集計して得られる飛砂の存在確率密度分布を示している。回転の影響を考慮する場合には、反発係数の仮想反発面傾斜角に対する依存性が大きくなるので、衝突後に saltation 粒子が得る速度ベクトルの分布領域が広範囲に及び、中には 120 cm 程度の飛高を示す saltation 粒子 ($\theta_{in}=24.93^\circ$; $\alpha=54.86^\circ$; $e=1.06$; $f=0.31$; $\overline{v_{in}}=606.36$ cm/s) も出現する。この結果、回転を考慮した場合には、 $y>50$ cm の領域の存在確率密度が、回転を考慮しない場合と比べて顕著に増大している。

6. 結 語

本研究では、個別要素法に基づく著者ら⁴⁾の数値解析コードを saltation 粒子の移動床との衝突・反発過程に適用し、衝突事象を支配する種々の要因の影響を系統的に検討した。さらに、それらの影響を反発係数の推定に反映させて不規則継続跳躍のシミュレーションを実施し、saltation 特性の変化を検討した。

個別要素法による衝突過程の解析を従来型の単一粒子追跡型の saltation モデルに反映させるという基

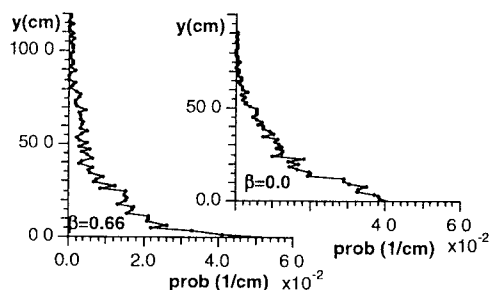


図-10 砂粒子の存在確率密度

本的フレームワークについては、本研究で提示し、さらに、一定の仮定の下に試算結果も示した。しかし、反発係数は種々の要因と複雑に関連し、諸要因と反発係数の間の単純な関係式を見いだすことは困難である。移動床上の反発係数に関する数値情報を如何に簡便に整理し、既往の saltation のシミュレーションに取り込み易い形式で表示するかが、今後の課題である。

謝辞：本研究の遂行にあたり、文部省科学研究費（基盤研究(B)、『流体・粒子相互作用系としての波動場土砂移動の解析』、代表：東北大学・澤本正樹教授）の補助を受けたこと、および、京都大学工学部・谷川知実君（現、建設省）、同大学院・落合耕司君（現、住友銀行）の熱心な協力を得たことを付記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) 三島豊秋・秋山誠司・土屋義人：飛砂における砂粒の反発機構の数値解析，海岸工学論文集，第40巻，pp.271-275, 1993.
- 2) Haff, P.K. and Anderson, R.S.: Grain Scale Simulation of Loose Sedimentary Beds; The Example of Grain-Bed Impacts in Aeolian Saltation, *Sedimentology*, Vol.40, pp.175-198, 1993.
- 3) 後藤仁志・酒井哲郎：移動床における saltation 粒子の反発機構に関する基礎的実験，水工学論文集，第42巻，pp.1051-1056, 1998.
- 4) 後藤仁志，酒井哲郎：表層せん断を受ける砂層の動的挙動の数値解析，土木学会論文集，No. 521/II-32, pp. 101-112, 1995.
- 5) Gotoh, H. & Sakai, T.: Numerical Simulation of Sheetflow as Granular Material, *Jour. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engrg.*, ASCE, Vol.123, No.6, pp. 329-336 1997.
- 6) 後藤仁志・辻本哲郎・中川博次：流体粒子相互作用系としての掃流層の数値解析，土木学会論文集，第485号 II/-26, pp.11-19, 1994.
- 7) 辻本哲郎・赤城里至：不規則継続跳躍モデルと $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いた飛砂の運動と風の解析，海岸工学論文集，第41巻，pp.386-390, 1994.

(1998.9.30受付)