

平成22年 5月20日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20760324

研究課題名 (和文) 礫のネットワーク解析に基づく沿岸混合粒径土砂の移動機構の解明

研究課題名 (英文) A study on Contact Networks between Gravels and Movements of Sands and Gravels

研究代表者

高川 智博 (TAKAGAWA TOMOHIRO)

東京大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号：30451785

研究成果の概要(和文):現在日本の様々な海岸で砂浜が減少し,大きな社会問題となっている. この研究は,変動帯に位置し,急峻な河川から土砂供給を受けるわが国の海浜環境の特徴である礫サイズの粒子を含む混合粒径場における土砂移動機構を,礫の接触ネットワークという新しい視点から解析し,砂礫共存場での土砂輸送予測を格段に高精度化することを目的とし実施した. まず,任意波形振動流装置において,中央粒径 7.3mm の礫と 0.27mm の砂の混合比を変え,流速非対称振動流による漂砂量の測定を行った. その結果,礫の体積混合率が約 60% を超えると,漂砂量が大きく減少することが明らかになり,砂礫混合土砂の漂砂量に関して,臨界混合比が存在することが示された. 次に,臨界混合比付近の混合比にある砂礫の 3 次元的な粒子間の接触関係を調べるため,個別要素法により混合粒径粒子の充填を行なった. その結果,礫の体積率が臨界混合比に達すると,砂礫混合層内で礫-礫間の配位数が急激に上昇し,礫同士の間接触ネットワークが発達する一種の相転移が生じることが明らかとなった. このような混合土砂の粒子間接触ネットワークの相転移に起因する土砂移動量の変化についてはこれまでほとんど議論されておらず,本研究で,このような効果の存在がはじめて定量的に明らかにされたと言える. また,接触ネットワークの相転移の効果を実験データに組み込むことにより,漂砂量の予測精度が格段に向上することが確認された. 本研究では,混合する砂礫の粒径を固定して実験を行っていたため,その適用性には限界がある. しかし,本研究で明らかにした接触ネットワークの効果に着目したより広範な水路実験データを積み重ねることにより,一般の二粒径混合土砂,さらには多粒径混合土砂にモデルを拡張し,より適用性の広い混合砂礫土砂の輸送量に関する予測法の確立が見込まれる.

研究成果の概要(英文):The movement of sand and gravels under asymmetric oscillatory flow was studied by laboratory and numerical experiments. The experiment under asymmetric oscillatory flow showed that the movement of gravels was drastically restrained because of the contact network between gravels when the ratio of gravels was over 60%. The result of these experiments did not agree with the established formula of the mixed grain sand transport under oscillatory flow. From numerical simulation of filling up of particles with DEM(Discrete Element Method), it was found that 3D-contact networks between gravels drastically developed while the mixing ratio of gravels increased from 40% to 60%. It was found that the movement of sand and gravels was greatly different from the movement of the mixed sand.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
総計	1,500,000	450,000	1,950,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学
キーワード：海岸工学

1. 研究開始当初の背景

現在日本中の海岸で砂浜が減少し、大きな社会問題となっている。変動帯に位置する我が国の海浜においては、急峻な河川から直接土砂供給を受ける海浜が多く存在し、そのような場において的確に土砂動態を把握するには、砂と礫が共存する混合粒径の土砂移動機構を明らかにする必要がある。

混合土砂の移動予測は、これまで均一粒径の実験に基づいた予測式を各粒径に適用することによってなされてきた。しかし、様々な大きさの粒子が共存する場では、異なる粒径粒子間の相互作用により、粒子の移動現象を単なる均一粒径の移動現象の和としては表現できないいくつかの効果が報告されている。

ひとつは粗粒粒子混合による土砂輸送の促進効果である。これは、粗粒粒子の背後に形成される剥離渦の影響で細粒粒子の巻き上げが増加して、細粒粒子の輸送量が、細粒粒子のみの場合に比べて大きくなるというものである。一方、粗粒粒子の影響で細粒粒子の輸送が抑制されることもある。これは、表層を粗粒粒子が覆うことにより、下位の細粒粒子が流れから隔離されるために起こる（アーマコート効果）。剥離渦による土砂輸送の促進効果は、細粒粒子からなる底面に粗粒粒子が孤立して突出して存在するような、比較的粗粒粒子の割合が少ない場合に顕在化する。

一方、被覆による抑制効果は、粗粒粒子の割合が大きい場合に顕在化する。これは、混合土砂の移動現象は、その混合比によって促進相と抑制相に分けられ、両者を隔てる「臨界混合比」と呼べる特定の比率が存在することを示唆する。臨界混合比では土砂輸送効率が最大となるため、その割合を求めることは、流砂・漂砂を対象とする様々な事業の効率化に寄与することが期待できる。また、臨界混合比を境として異なる混合土砂の輸送現象を、別々に記述することにより、混合土砂の輸送予測を格段に高精度化することが期待できる。ところが、このような臨界混合比に関する研究はこれまでほとんど行われてなかった。

2. 研究の目的

砂礫混合海岸は耐侵食性に優れていると考えられており、現地海浜において実際に砂礫混合土砂による養浜が実施されているが、波浪作用下における砂礫混合土砂の挙動に

ついては未解明の部分が多く残されている。よって、その挙動を解明することは、海岸侵食対策や地形の予測に対して非常に重要であると考えられる。

粒径の異なる混合砂の移動現象に関する研究はこれまで実験や数値シミュレーションを用いて行われており、突出の効果によって大きな粒子が動きやすくなること、鉛直分級が生じ表面が粗粒粒子に覆われることによって土砂移動が抑制されることなど混合粒径特有の現象が報告されている。しかし、砂と礫のように、粒径が大きく異なる粒子が混合した状態の底質の移動機構に関する実験的研究は現在までにほとんど行われていない。そこで本研究では、振動流装置を用いて、振動流下における砂礫混合状態の底質の挙動を観察する実験を行った。また、個別要素法を用いた数値計算によって、礫同士の3次元的な接触ネットワークを解析し、振動流下における砂礫混合状態の底質に特有の土砂輸送過程を解明することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 振動流装置による漂砂実験

実験には、任意波形振動流装置を使用した。これは、外部からの電圧信号によってピストンを動かして振動流を発生させる装置で、任意の流速波形を与えることができる。本実験では流速波形として三次のクノイド波相当の非対称波形を用いた。非対称性は $u_{\max} / \bar{u} = 0.7$ とし、砂のみではシートフロー状態、礫のみでは移動限界を少し超え、砂礫

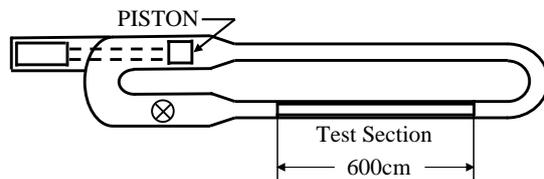


図-1 振動流装置の概念図

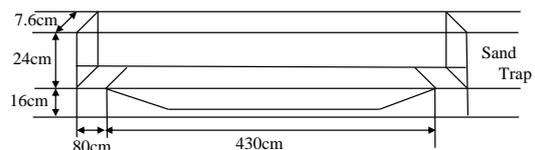


図-2 振動流装置観測部

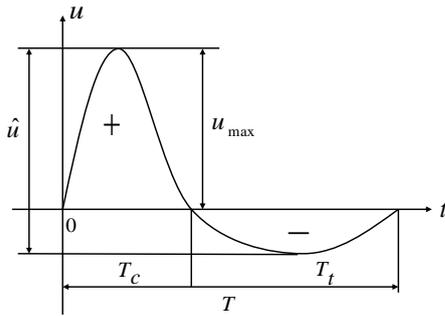


図-3 流速波形

混合の影響がもっとも顕著に現れると考えられる状態になるように、 u_{max} は 0.7m/s とした。中央の観測部は長さ 4.3m、高さ 24cm、幅 7.6cm の長方形断面であり、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。

本実験では、砂として中央粒径 0.271mm の相馬標準砂を、礫として中央粒径 7.34mm の大磯砂利を用いた。砂及び礫の性質を以下の表-1 に示す。沈降速度は Rubey の式(例えば、関根, 2005) によって算出した。本実験では底質全体の投入量に対する礫の体積割合が 20%, 40%, 60%, 70%, 80% となる 5 ケースに分けて実験を行った。

表-1 砂と礫の性質

	中央粒径 (mm)	比重	沈降速度 (m/s)
砂	0.271	2.64	0.0376
礫	7.34	2.75	0.289

底質の移動量測定においてはまず、実験装置の観測部に 50cm ごとに仕切りを立て、後に示す礫の体積割合に応じて砂と礫を、偏析を抑えるために交互に投入し、厚さ 4cm の初期堆積層を形成した。実験後に 50cm ごとに仕切りを入れて底質を採取し、乾燥させて重量を量った。礫を用いる実験の場合、礫が障害となり、仕切りを正確な位置に入れるのが困難であり、わずかな仕切りの位置の違いによって結果が大きく変わる可能性がある。仕切りによる採取の際の誤差を少なくするために図-4 の①、②、③の 3 箇所を左右に分けてそれぞれの場合に対し q を以下の式によって求め、それらを平均したものをそのケースにおける正味の底質移動量とした。

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

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底質移動量、 ρ_s は砂の密度、 B は実験装置観測部の幅を表す。 ΔM は底質の質量の変化分、 Δt は実験時間であり、on, off はそれぞれ岸側と沖側を表す。また M 、 M' はそれぞれ実験前、実験後の底質質量を表す。

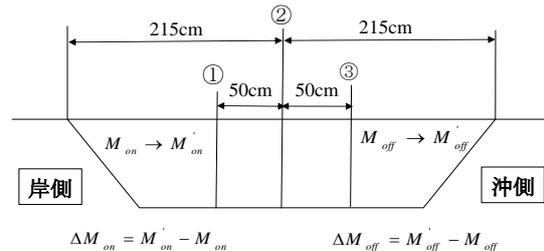


図-4 底質移動量の評価法

無次元底質移動量 Φ は、この q を用いて以下の式によって求める。

$$\Phi = \frac{q}{w_0 d_i} \quad (2)$$

ここで w_0 は沈降速度、 d_i は砂または礫の粒径を表す

また、振動流装置を動かしている際に、ビデオカメラにより底質の動きを撮影し、実験後にその動画を解析することにより、砂の巻き上がり層の厚さを求めた。

(2) 個別要素法による混合粒径粒子充填計算

礫同士の三次元的なつながりを実験で測定することは非常に難しい。そこで、個別要素法 (Cundall, 1971) を用いて複数の粒径の球を様々な割合で混合し、充填計算を行い、三次元的な粒子のつながりを解析した。個別要素法の数値計算モデルは、原田ら (2006) を参考にした。また、3次元において煩雑になりがちな回転演算は、四元数(例えば、越塚, 2005)を用いる計算方式を採用し、簡略化を図った。

個別要素法では、それぞれの粒子に個別に運動方程式を適用し、粒子間の相互作用力を考慮しつつ、粒子の動きを追跡する。運動方程式として、並進及び回転の運動方程式を用いる。ここで、三次元場での運動方程式は以

下の式のように書ける.

$$m \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = m\mathbf{g} + \mathbf{F}_p \quad (3)$$

$$\mathbf{I} \frac{d\mathbf{w}_p}{dt} = T_p \quad (4)$$

ここに, m : 粒子質量, \mathbf{u}_p : 粒子速度ベクトル, t : 時間, \mathbf{g} : 重力加速度ベクトル, \mathbf{F}_p : 粒子間相互作用力の総和ベクトル, \mathbf{I} : 慣性モーメント, \mathbf{w}_p : 粒子角速度ベクトル, T_p : 粒子間相互作用力によるトルクの総和である.

個別要素法では, 粒子間の接触を考える際に, 法線方向及び接線方向に弾性スプリング (バネ定数 K_n, K_s) と粘性ダッシュポット (粘性定数 C_n, C_s) を設定する. バネ定数と粘性定数は以下の式を用いて決定した.

$$K_n = \frac{2\pi^2 m}{\alpha_m^2 \cdot \Delta t^2} \quad (5)$$

ここで, m : 粒子質量, Δt : 計算時間間隔である. 本研究では, α_m の値として, 20.0 を与えた. また, この Δt は, 個別要素法で頻用される計算時間間隔制約条件

$$\Delta t \leq 2 \sqrt{\frac{m}{K_n}} \quad (6)$$

を満たす必要がある. まず Δt を決定し, バネ定数 K_n を算定し, 以下の関係式を用いて K_s を決定する (θ : ポアソン比 (=0.3)).

$$K_s = \frac{K_n}{2(1+\theta)} \quad (7)$$

さらに, 粘性定数 C_n, C_s は以下の式を用いて算定する.

$$C_n = \alpha_{cn} \cdot 2\sqrt{m \cdot K_n} \quad (8)$$

$$C_s = \frac{C_n}{\sqrt{2(1+\theta)}} \quad (9)$$

本研究では上式の α_{cn} として 1.0 を用いた.

本研究で扱う三次元粒子充填計算では, 粒径比 5, 質量比 125 ほどの粒子同士の相互作用力を求めるため, バネ定数と粘性定数を求める際の粒子質量 m にどの値を用いるかによって大きく計算の安定性が異なってくる. そこで本研究においては, 同一粒径の粒子が接触する場合にはその粒子の質量を m の値として採用し, 異粒径の粒子が接触する場合

には, 粒径が小さいほうの粒子の質量を m の値として採用した. これにより, 粒子間反発力を抑制し, 安定した計算を行うことが可能となった.

三次元粒子充填数値計算では, まず粒径 1.8mm, 2.0mm, 2.2mm の三種類の小粒子を合計 24000 個準備し, それぞれの粒子がどの粒径になるかは乱数を用いてランダムに決定した. その小粒子を, 小粒子径の 10 分の 1 程度間隔を空け, 縦 40 列, 横 40 列, 高さ 15 列配置する. その後粒径が 4.5mm, 5.0mm の二種類の大粒子を, 小粒子を配置した領域と同じ領域に乱数を用いてランダムに配置する. 大粒子を配置する際に, 既に計算領域に存在する小粒子と重なってしまう場合には重なった分の小粒子を取り除いた. 以上の初期配置が終了したら, 全 15 層ある小粒子を, 1 層ずつ重力をかけて落下させていく. 本来ならば初期位置が決定した後に全粒子を一度に落下させて安定した状態を見ることができれば, この 1 層ずつ落下させていくというプロセスを踏む必要はないが, 一度に粒子を落下させると, 安定するためには時間ステップ間隔を小さくとる必要が生じ, 計算効率が著しく低下してしまう. そのため, 本研究では時間ステップ間隔 Δt を 1.0×10^{-4} s に設定し, 一層ずつ小粒子を落下させていくことで安定性と計算効率を向上させた.

ある層の小粒子を落下させ粒子の動きが十分に収束した後, それらの粒子を固定し 1 つ上の層を落下させるという操作を繰り返し, 粒子充填を完了する. 1 層ずつ小粒子を落下させる際, 落下させる層の小粒子の Z 座標よりも Z 座標の小さい大粒子も同時に落下させる. 以下の図-5 に三次元粒子充填の進行の様子の例を示す. なお, Z 方向には Z=0 に

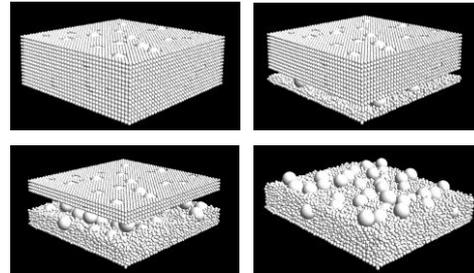


図-5 三次元粒子充填計算の様子

壁を作りそれ以上粒子が下に落下しないように設定し、X、Y方向はそれぞれ周期境界とした。

4. 研究成果

(1) 振動流装置による実験の結果

実験で得られた結果として、礫の体積割合と砂及び礫の無次元漂砂量の関係を図-6、7に示した。これらの図を見ると、砂の場合は礫の体積割合が40%から60%の間で急激に無次元漂砂量が減少してゼロに近づき、礫の場合は礫の体積割合が60%から70%の間で急激に無次元漂砂量が減少し、ゼロに近づいており、どちらも礫の体積割合に対し非線形な挙動を示している。

今回の実験で用いた底質は砂と礫が混合している状態のもので混合砂ではないが、混合砂を用いた実験に基づき提案されたDibajnia and Watanabe (1992) 及び佐藤ら (2000) による無次元漂砂量式を適用した結果を図-6、7に合わせて示した。Dibajnia and Watanabe の式による漂砂量は、100%砂、または礫だったときの漂砂量を求め、礫と砂の相互干渉はないと考えて、その値に砂及び礫のそれぞれの存在割合を乗じて算出した。

砂においては、Dibajnia and Watanabe の式及び佐藤らの式のどちらにおいても、礫の体積割合が増加するにつれて岸向き漂砂量が減少するという傾向は捉えられているが、礫の体積割合が40%から60%の間で急に漂砂量が減少し、以後漂砂量がほぼゼロに近づくという特徴はどちらのモデルでもうまく再現できていないことが分かる。

礫においては、Dibajnia and Watanabe の式を用いると礫の体積割合の増加に応じて礫の漂砂量も増加するという結果が得られたが、これは本実験で得られた結果とは異なるものである。それに対し佐藤らの式 (2000) を用いると、礫の体積割合の増加に応じて礫の漂砂量が減少する傾向は再現できていることが見て取れる。しかし、礫の無次元漂砂量そのものの値は実験値とは大きく離れており、特に礫の体積割合が60%を超える付近で急激に礫の漂砂量が減少し、ゼロに近づくという特徴は捉えられておらず、実験をうまく再現できていないと言え難い。

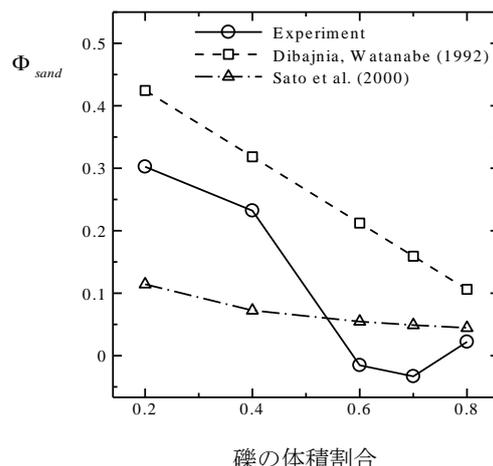


図-6 礫の体積割合と砂の無次元漂砂量との関係

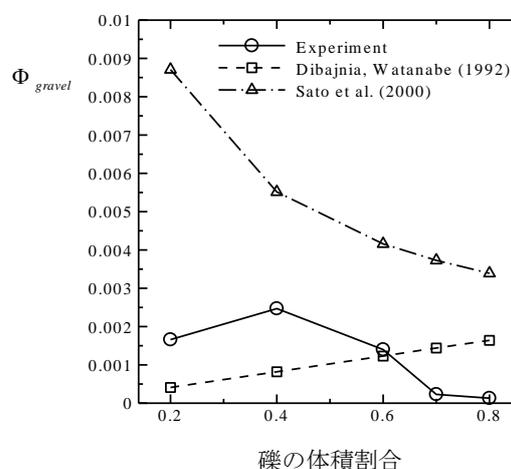


図-7 礫の体積割合と礫の無次元漂砂量との関係

以上の結果から、今回の実験で用いた底質のように粒径差が非常に大きい砂礫混合状態の底質には、従来の混合砂の漂砂量計算式の適用は難しいことが分かった。

さらに、ビデオ解析より求めた砂の巻き上がり層厚さを縦軸にとり、横軸に礫の体積割合をとったのが図-8である。砂の漂砂量は礫の体積割合が40%から60%にかけてほぼゼロになっているが、砂の巻き上がり自体は礫の体積割合が70%になっても起こっていることが観察された。礫は動いていないが、表面の礫の隙間の流体運動によって砂が浮遊している。このことから、礫の移動限界を考慮する上で、砂を介した接触ネットワークの影響は相対的に小さく、底面の礫は主に礫同士の接触によって支持されているものと考えられる。

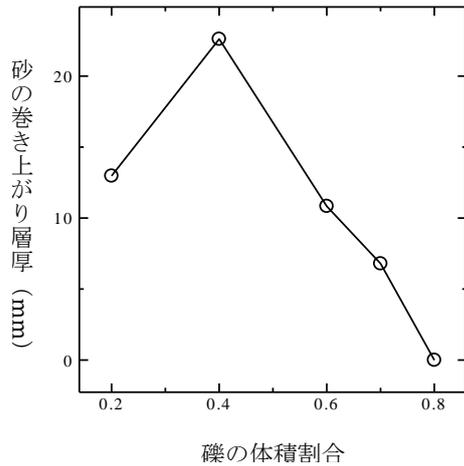


図-8 砂の巻き上がり層厚

(2) 数値解析の結果

本研究で行った振動流装置を用いた実験の条件では、礫の移動限界を考慮する上で砂を介した接触ネットワークの影響は小さいと考えられる。そこで本数値計算では大粒子同士の接触を考え、以下の図-9では粒子として大粒子のみを小さい球で表示し、大粒子同士が接している場合には線分でつなげた。なお、図-9は全て鉛直上方から見た図である。

図-9から、粒子同士のX、Y方向の最大ネットワーク径の平均及び大粒子同士の平均配位数を計算し、大粒子の体積割合との関係を示したものが以下の図-10である。

図-10から、大粒子の体積割合が40%から60%の間でXY方向のネットワーク径及び平均配位数が急激に増加していることが分かる。特に、本数値計算ではXY方向をそれぞれ周期境界としてしているために、XY方向のネットワーク径の計算領域に対する割合が1に近づくと、それはXY方向の大粒子同士のネットワーク径が無限大に発散することを示している。

(3) 砂礫の移動特性と礫間接触ネットワーク

3次元粒子充填計算を行うことにより、大粒子の体積割合が40%から60%の間でXY方向の礫同士のネットワーク長及び平均配位数が急激に増加することが分かった。

ここで、ネットワーク径が大きいということはそれだけ多くの粒子がつながっているということを表す。つながっている粒子の数が多くなるほど粒子が動くためにはより大

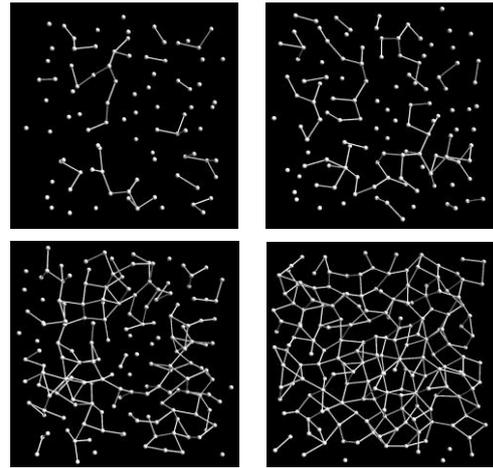


図-9 大粒子と小粒子の体積比による大粒子間ネットワークの変化 (左上: 38%, 右上 48%, 左下 60%, 右下 81%)

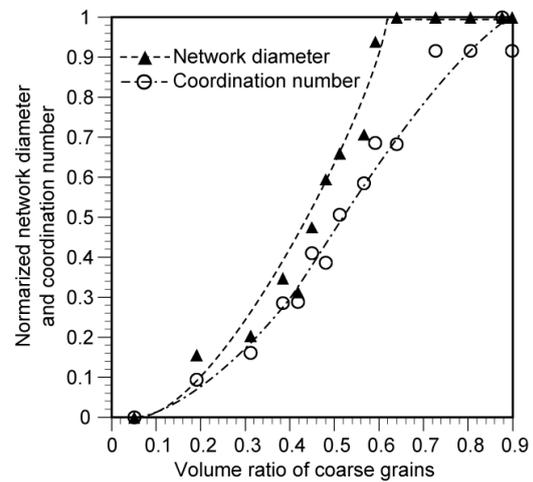


図-10 大粒子の体積割合とネットワーク径の関係

きな力が必要となり粒子は動きにくくなるが、上記のように本数値計算では周期境界条件を用いたため、大粒子の体積割合が40%を超えてネットワーク径が無限大に大きくなるところで大粒子は急激に動きづらくなると考えられる。

平均配位数も同様に、平均配位数の値が大きくなるほどより多くの粒子とかみ合っていることになり、大粒子は動きづらくなる。平均配位数においても大粒子の体積割合が40%から60%の間で急激に大きくなっており、その部分を越えたところで急激に大粒子が動きづらくなると考えられる。

数値計算における大粒子が礫を表しているものとして振動流装置を用いた実験と数

値計算を比較すると、若干数値に違いはあるものの、礫（大粒子）の全体に対する体積割合が40%から60%あたりで礫の無次元移動量、ネットワーク径及び平均配位数が急激に変化しているという傾向は同じである。このことから、礫の体積割合が60%を超えたところで急激に礫が動かなくなるという実験で得られた結果は、礫の体積割合が増加することで、礫同士のつながりが強まり、ネットワーク径や平均配位数の値が急激に増加することによるものと考えることができる。

これらの結果より、礫の体積率が臨界混合比に達すると、砂礫混合層内で礫-礫間の配位数が急激に上昇し、礫同士の接触ネットワークが発達する一種の相転移が生じることが明らかとなった。このような混合土砂の粒子間接触ネットワークの相転移に起因する土砂移動量の変化についてはこれまでほとんど議論されておらず、本研究で、このような効果の存在がはじめて定量的に明らかにされたと言える。また、接触ネットワークの相転移の効果を漂砂モデルに組み込むことにより、漂砂量の予測精度が格段に向上することが確認された。本研究では、混合する砂礫の粒径を固定して実験を行っていたため、その適用性には限界がある。しかし、本研究で明らかにした接触ネットワークの効果に着目したより広範な水路実験データを積み重ねることにより、一般の二粒径混合土砂、さらには多粒径混合土砂にモデルを拡張し、より適用性の広い混合砂礫土砂の輸送量に関する予測法の確立が見込まれる。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計1件）

- ① 西嶋宏介, 高川智博, 佐藤慎司, 礫のネットワークに着目した、振動流下における砂礫混合土砂輸送過程の解明, 海岸工学論文集, 第56巻, 2009, 526-530

〔学会発表〕（計2件）

- ① 高川智博, 西嶋宏介, 粒子-流体連成計算による堆積物の輸送過程に関する研究, 第58回理論応用力学講演会, 2009, 日本学術会議, 東京
- ② 西嶋宏介, 高川智博, 佐藤慎司, 礫のネ

ットワークに着目した、振動流下における砂礫混合土砂輸送過程の解明, 第56回海岸工学講演会, 2009, 茨城県立県民文化センター, 水戸

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕
該当なし

〔その他〕
該当なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

高川 智博 (TAKAGAWA TOMOHIRO)
東京大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：30451785