

水工学シリーズ 12-B-5

漂砂の計算法と今後の展望

東京海洋大学 大学院 海洋科学技術研究科

岡安 章夫

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2012 年 8 月

漂砂の計算法と今後の展望

Evaluation of Sediment Transport in Numerical Flumes

岡 安 章 夫

Akio OKAYASU

1. はじめに

数値波動水槽は、計算科学面と実務面の両者において、様々な場面での活用が期待される。計算科学面において海岸工学の分野で潜在的可能性が大きいのが、漂砂機構、特に砕波帯内の漂砂であろう。従来は、激しく変動する自由水面を良好に追跡し、またそれに伴う流体の複雑な運動を十分に表現する手法がなかったため、砕波帯内の流速場の詳細な計算は困難であった。しかし、数値波動水槽に代表される流体の数値計算手法の急速な進歩により、砕波帯内の流速場の時空間構造の詳細な把握が可能となってきた。

漂砂機構に関しては、漂砂の素過程を直接記述するLagrange型のモデルが存在するが、これまでは漂砂の力学にのみ焦点をあてて、振動流等の比較的単純で砕波の影響を受けない場における漂砂現象が取り扱われてきた。しかし、数値波動水槽によって砕波帯内の流速場の構造が詳細に把握可能となってきた今日、漂砂の力学も砕波帯内の複雑な土砂輸送プロセスを直接計算する新たな段階に踏み出す時期を迎えつつある。

また、砕波帯と共に、構造物周りの局所底面変動などの評価も工学上重要な問題である。構造物による波浪場への影響や構造物周りの流体場評価については、周辺流速場評価の高精度化にともなって、局所洗掘や堆砂についても適用可能な底面変動評価モデルが必要となってきている。

数値波動水槽における底質移動評価を、実務上の問題を中心に考えると、漂砂の砂粒子の運動を解析するモデルはあまりに詳細で計算負荷が高すぎる。そこで、なんらかの平均化処理を行なった上で移流・拡散方程式を用いて底質濃度の変化を時空間的に追跡するモデルを選択することとなろう。また、広域の計算を行う際には、砂粒子群の運動を直接扱うこともあまり現実的でなく、よりマクロ的な漂砂の運動特性を表現した簡易モデルを導入した海浜変形計算を実施する必要性が生じる。これらマクロモデルは、表現形としては現在使われている漂砂量算定式と似たものと推測されるが、計算科学からの成果をフィードバックすることにより、よりメカニズムを反映した統一的なモデルとなることが期待される。

漂砂のメカニズム面での考察に関連して、計算科学の基礎となる漂砂のLagrangeモデルに関しては、粒子追跡法を用いた他の粒子との相互作用を考慮しない単一粒子追跡法に始まり、saltationや浮遊砂雲の解析に活用されてきた。また、個別要素法の導入によって粒子間衝突が考慮できるようになって以降は、近接高密度の粒子流に関する適用も行われている。

数値波動水槽は、設計実務における構造物の限界状態の評価を革新的に進歩させるツールとして期待されるが、ツールとしての普及が進むにつれてブラックボックス的な利用のリスクも増大する。これを防ぐには、それを用いる研究者・技術者自身が、計算手法・原理の深化も含

め、数値波動水槽のさらなる改善も含めて主体的に取り組む続けることが肝要である。このためにも、「数値漂砂水理学」の下に多くの意欲的な研究者・技術者が結集するための核として、碎波帯の漂砂現象の計算科学への期待は大きい。本稿がこれらへの一助となれば幸いである。

本稿については、海岸工学委員会数値波動小委員会内での多くの議論がその下敷きになっている。またその記述内容については、同委員会により先頃刊行された書籍、「数値波動水槽－碎波波浪計算の深化と耐波設計の革新を目指して－」の「第Ⅱ編 数値波動水槽と漂砂の計算力学」を大いに参考とさせていただいた。読者におかれては、本稿に併せて、同書籍を参照していただくことを推奨する。さらにこれまでの漂砂研究のレビューに関しては、1998年の海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会の活動報告が有用である。

2. 漂砂の計算力学の必要性

海岸部の水域と陸域の境界には碎波帯が存在し、碎波に誘起される複雑な非定常流速場において活発な物質輸送が生じる。沿岸水域における広域な環境物質の移動を考える上では、碎波帯は物質ソースとしての役割を果たす。例えば、濁度（微細土砂）の問題を考えると、碎波による組織的な非定常流れが土砂の巻き上げに大きく寄与しており、碎波帯内部での巻き上げ量の適性評価なくして、広域での濁度の予測の精度向上は望めない。

単に海浜変形制御のみを対象に海岸線の固定だけを目的とする場合には、土砂の正味移動量を概算できれば充分ではあるが、例えば沿岸生態系を含む沿岸環境の保全を含めて考えると、土砂の入れ替わりの状況や微細土砂による長期的な濁度の分布の評価が必要となろう。微細土砂の浮遊については拡散方程式を用いて予測する方法が一般的であるが、この場合、（古典的枠組みでは）流速場の評価、拡散係数（砂粒子の周囲流体への追随性）の評価、基準面濃度（底面における濃度境界条件）の評価が予測精度を大きく支配する。碎波帯は複雑かつ活発な運動量・物質輸送を伴う場であり、上記の3つの特性量の評価は従来の手法では容易ではなく、自由水面の激しい変動により流れ場は複雑化し、それに誘起されて生じる複雑な乱流構造により見かけの拡散係数の推定も容易ではない。さらに、*plunging jet*等に誘起された下降流が底面土砂を組織的に巻き上げるので、濃度基準点の設定も困難となるばかりか、拡散モデル自体の妥当性すら危ぶまれる。このような複雑な場で、濁質輸送の予測精度を向上させるには、土砂を輸送する流れの構造自体の予測精度を向上させることが鍵となるが、それには数値波動水槽が有効である。

これまで碎波の数値解析が困難を極めたのは、自由水面の取り扱いの困難さ故であったが、本書の前半でも述べられているように、自由水面の追跡手法が近年急速に発達し、幾つかの有力な水面追跡法が碎波現象に適用されて実績を上げており、粒子法、密度関数法、VOF法といった新しい界面追跡手法について基本的考え方解説し、海岸工学における適用事例が紹介されている。碎波帯では固気液三相の混相状態を扱う必要があるが、固液・気液二相状態を対象とした成果もすでに多く得られており、碎波帯を対象とした計算力学を展開するための準備は整いつつある。

ところで、数値水理学に限らず、数理モデルを扱う分野の研究者にとっては、一般に複雑な物理現象をどのように巧妙に（シンプルに）シミュレーションするか、ということが大きなポイントとなる。そのためには現象の本質を見極めつつ、単純化を行っていくことが必要であり、

この部分に現象の理解と深い洞察を要求される。この意味で、砕波帯の水理に関する問題は海岸工学においてモデラーの腕試しの格好の対象であり、数値波動水槽が計算科学の面で活用される絶好の機会でもある。幸いにも海岸工学の領域には、計算力学に取り組む中堅・若手の多くの研究者がおり、近年の海岸工学講演会では砕波帯の水理に関連する多く研究発表が行われている。海外・国内を問わず、多くの水理計算ソフトウェアが存在する昨今、とすれば安易なアウトソーシングに流れがちではあるが、我々のソサエティー内にソースコードレベルでソサエティーのメンバーが関与している複数の流体計算ツールを持つことは、「知」の空洞化を防ぐ意味でも重要である。

また、ソースコードとしてオープンにされているならば、そのモデルの本質について十分な情報が示されているということであり、モデルでの表面的な現象の取り扱いのみならず、そのモデルに包含されている概念や哲学まで知り得ることを意味している。このことは、現在の学生が数理モデルを深く理解し、将来のコード開発を担う人材となる良い題材が提供されていることを意味している。あるいはまた、利用する技術者が、モデルの限界を理解し、さらにより社会の要求に応えうるモデルへ発展させられることを意味する。

本稿で中心的に考えていく砕波帯では、既存の数値モデル（漂砂量算定式）の計算精度は、砕波や乱れなどによる底質浮遊量の定量化が困難であることから、オーダーが一致する程度に留まっている。波打ち帯の数値モデルに関しては、波の遡上と流下により水域が変化すること、また、遡上時と流下時とで浮遊砂の動きが異なることなどにより砕波帯内同様、浮遊量の定量化が困難である領域である。砕波帯内および波打ち帯の数値モデルに関しては、その精度の向上が期待されているところであり、数値波動水槽を用いた漂砂現象の計算科学には期待するところが大きい。なお、より広範囲の漂砂の研究レビューに関しては、1998年の研究現況レビュー小委員会の活動報告が有用である。

3. 微細（ミクロ）モデルの可能性

高精度高解像度の数値計算を用いて漂砂の運動を解析しようとするならば、最初に思いつくのは、ある領域の中に存在するすべての砂粒子を独立した粒子としてシミュレーションし、その全体で漂砂量や地形変化を評価しようとするものであろう。これについては具体的に、流れ場の中で砂粒子がどのように運動するかの高精度計算モデルが必要になるが、（完全ではないにしても）それに応用できる手法は既に開発されていると言って良い。例えば原田ら（2011）は、流体側の計算手法としてRANSとLESのハイブリッドモデルであるDetached Eddy Simulation（DES）を、固体（粒子）側の追跡にDEMを用いて、計算対象の固体粒子サイズよりも細かい計算格子を用いて高い解像度で粒子周りの流れ場を捉える固液混相乱流モデルを示している。また、川崎・袴田（2007）も移流計算にCIP法、乱流モデルとしてdynamic二変数混合モデル（DTM）を用いた気液相計算に、任意形状剛体の運動を組み込んだ固気液3相モデルを開発している。これらのモデルでは、剛体間の衝突も考慮することができるので、流体中の砂粒子の運動について、その移動開始から跳躍、浮遊、衝突、沈降、再浮遊というプロセスに従って（精度の差こそあれ）詳細に記述することが可能である。

しかし、これらのモデルで固体粒子の運動を有意に追跡しようとするれば、流体側の格子サイズ（粒子法であれば粒子サイズ）を砂粒子の1/10程度に設定する必要がある、これは現段階で

の計算機リソースを考慮するなら、極めて「ミクロ」なモデルと言わざるを得ない。砂粒子の代表径を仮に0.2mmとするなら、格子サイズは20 μ mであり、これでは海岸はおろか、構造物周りの解析を行うことも現時点では不可能である（たぶん、近い将来可能、というレベルでもない）。また誤解を恐れずに述べるなら、これらのモデルは、逆に言えば流体中の剛体運動へのニュートン力学の厳密な適用（の努力）であり、極めて精緻である分面白みには欠ける。（もちろん、液体－固体境界の取り扱いなど、対処の難しい問題に対しては多くの努力と工夫がなされているし、乱流の扱いについても同様である。）

現状で微細モデルに期待されるのは、後で述べる時空間的に平滑化されたモデルの定式化の過程で、漂砂の素過程に則って統一かつ十分に精度よく底質移動を評価できるサブモデルの構築のための資料を提供することであろう。ここでいう定式化とは、計算されるさまざまな物理量についてその平滑化された値を関連付けることであるが、これはデータ量が増えるほど、どのような統計量を指標として用いるかも含めて難しい課題となってくる。

4. 既存のモデルと平均化

一方、従来の漂砂量算定式等を概観すれば、それらが個々には複雑な現象を、いかに平均化、単純化して取り扱うか、ということに苦心してきたことがうかがえる。底質の移動形態は、沖波帯、砕波帯、波打ち帯とで異なり、漂砂の移動形態も、一般に、掃流漂砂、浮遊漂砂、シートフローなどに分類できる。これらの明確な区分は困難であるが、海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会（1998）ではおおよそ以下のようにまとめている。移動床で掃流力を増加させていくと、初めはその位置に停止していた砂粒子が移動を開始し（移動限界）、底面と頻繁に接触を繰り返しながら（地面を這うように）底面付近に比較的薄い層を形成しつつ移動するようになる（掃流）。さらに、掃流力を増加させると砂粒子の移動範囲は底面付近に留まらず流れ場全体に及ぶようになり、移動形態も水流の影響を受けたランダムなものへと変化する（浮遊過程）。また、浮遊過程においては、底面に砂漣が形成され（砂漣上の浮遊漂砂）、砂漣による剥離渦の影響で生じる底質の巻き上げが浮遊砂の生成を促進するといった複雑なメカニズムが介在する。さらに掃流力を増加させると、砂漣がかき消されて再び平坦床となり、多量の砂粒子が層状になって移動するシートフローが生じる。

これらは流体による掃流力と砂移動形態を関連づけたものであり、概ね掃流力と重力の比であるShield数で整理できると考えて良いが、跳躍・浮遊状態については砂粒子の沈降速度も影響を及ぼす。漂砂の素過程を踏まえた漂砂量の評価式は、Bagnold（1963）にはじまり、さまざまな漂砂量算定式が考案されてきた。これらについては、上述のように、概ね底面流速やShields数、あるいは底質の沈降速度の関数として表現されている。また算定式中には経験的な定数が含まれており、実験や現地観測などから整理され、提案式ごとに微妙に異なる関数形と定数が与えられている。純粋な振動流（波動運動）中であれば、底質の掃流力は底面流速に依存し、また波動運動は一般に層流となるので、底面境界以外では多くの乱れを生じない。従って、上記の算定式では流体中の乱れ量については明示的には考慮されていない場合がほとんどである。しかし、砕波帯のように、底面境界層外から相当量の乱れの供給がある場合には、乱れによって底質浮遊の状況が大きく影響されるので、評価式に何らかの形で乱れ量を取り込まないと、その移動量を的確に評価することは難しい。

浮遊漂砂については、鉛直方向の1次元拡散方程式をもとに浮遊砂の濃度分布を推測し、これに岸沖方向の移流拡散を考慮して漂砂量を求める手法もある。これらは、例えば砂漣頂部の流れの剥離で形成される砂漣上の乱れ場や、砕波により水面付近から運ばれる強い乱れによる影響を考慮することができる。例えばJayaratne・Shibayama（2004）は、底質浮遊の要因別に、底面砂漣近傍での渦運動による浮遊、シートフロー状態での浮遊、砕波の乱れによる浮遊に分類し、それぞれにおける基準点濃度と拡散係数を提案しており、これらを統合することにより砕波帯内の浮遊砂濃度を推定している。この手法は、底面境界層で発生する乱れ以外に、砂漣による乱れや、砕波による乱れを明示的に考慮できるという利点があるが、浮遊砂濃度分布の算出に「基準点濃度」という概念を用いている。これは、底面からある高さの点（基準点）における浮遊砂の濃度を与えるものであるが、基準点高さで濃度決定の物理メカニズムがはっきりしない。移流拡散方程式を解くという観点からは、境界値問題として外縁での底質移動量を与える方が素直であろう。これについては、底面に停止している砂粒子の単位時間当たりの離脱確率密度（Pickup rate）を与えるという手法があり、古くは Einstein（1942）が同様な確率を評価している。ここでは、van Rijn（1984）が提案した定常流場でのPickup関数を、非定常流場に適用可能な形式に拡張したNielsen（1992）のPickup関数を示す。

$$p(t) = 0.00033 \left(\frac{\psi(t) - \psi_c}{\psi_c} \right)^{1.5} \frac{(s-1)^{0.6} g^{0.6} d^{0.8}}{\nu^{0.2}}, \quad \psi(t) > \psi_c \quad (1)$$

ここで、 $\psi(t)$ は瞬間シールズ数、 ψ_c は移動限界シールズ数、 s は水中比重であり、 g は重力加速度、 d は底質粒径、 ν は水の動粘性係数である。

これまで述べてきたような、底面上での局所の時間漂砂量を流速その他から求める、というモデルからさらに平均化を推し進め、入射波浪のエネルギーと砂移動に用いられる仕事との関連を仮定し、入射波浪の総体的エネルギーで砂移動量を評価しようとするモデルもある。沿岸漂砂におけるCERC公式などがそれであり、また片山・合田（2002）は浮遊漂砂について、波の伝播過程で砕波によって波のエネルギーフラックスが減衰する過程に着目し、エネルギーフラックスの減衰量の一部が浮遊砂濃度を一定に保持するための仕事量に費やされると考え、浮遊砂巻き上げ率の定式化を試みている。いずれにせよ、波浪場という非定常な場で、砂漣や砕波による複雑な流体場を、比較的簡便な数式で記述するためには多くの努力が費やされてきたと言って良いと思う。

このように、一概にマクロモデルと言っても、その平均化の時空間サイズや適用範囲は大いに異なる。計算負荷や実用性の観点からは、平均化のスケールが大きい方が有利であるが、それにはまず現象の本質をどこまでモデルに取り入れられるかということがポイントとなる。また、砕波帯のような非対称な往復流を扱う場合には、仮に現象の本質が押さえられていたとしても、その応答性や非線形性が十分に精度良く再現されないと、時空間積分値（つまりは結果としての地形変化量）としては妥当な値が得られない（累積誤差が大きくなりすぎる）、という問題が生じる。これは、漂砂関数に入力される流体側の計算結果についても言えることであり、（漂砂計算は流速のべき乗で効いてくるので）流体計算の精度が十分でなければ解像度を上げることにそれほど意味がない。

5. 平均化の時空間サイズとサブモデル

数値波動水槽で漂砂量の算定、あるいは地形変化を評価することを考えるのであれば、漂砂算定に用いる平均化のサイズは流体計算の格子サイズ（粒子サイズ）と同じにすることが一般的ではないか、というのは常識的な意見だろう。少なくとも流体計算の解像度に対して、大幅に漂砂量平滑化することはあまり意味がないと思える。また、固液2相流（あるいは固気液3相流）として解くことを前提とすれば、底質と流体は必然的に同じ格子枠で解かれることとなる。問題は、この平滑化のサイズが漂砂量を適切に評価するために十分な時空間サイズであるか、ということである。

一般に底質濃度は底面境界層付近の鉛直方向濃度変化が著しく、この再現性が重要である場合は底面境界層が表現できる程度の格子サイズが必要となるが、これは一般に非常に小さく、この解像度で全体を計算することは難しい。もちろんネスティングや σ 座標のような不均一格子を用いることも可能であろうが、これは漂砂外力としての流体計算、つまり碎波計算が十分に精度よく行えることが前提である。また、流れ場における乱流モデルのように、底質移動計算にもサブモデルを用いることができよう。これは前述の微細モデルなどを用いて構築できるかもしれない。砂粒子は合体や分裂をしない分、少なくとも気泡よりは取り扱いが楽ではないかと期待できる。

サブモデルを用いる場合に厄介なのは、一般にグリッド・レベルで表される量（グリッド外縁あるいはグリッドで一意的に決まる量、たとえば底面高さ）とサブグリッド・レベルでの変量（グリッド内部で分布量として存在する量、たとえば底質濃度）の受け渡し（Pickup量の算定）の問題である。つまり、計算される平均量の情報を用いて、格子の集合でその分布が表現されている物理量を、どのように格子外縁から格子内部に受け渡し、場合によっては格子内部に改めて（仮想的に）分布させるか、という問題である。

底質の移動については、それが掃流漂砂であれ浮遊漂砂であれ、その移動の始終について砂粒子単位で詳細に見れば連続的な変化をしているはずであるが、砂粒子より十分に大きい格子で見れば、一種の相転移に近い状態であり、不連続性を帯びてくる。この不連続性について適切な評価を行うことはかなり難しい問題であると思われる。マクロモデルを用いる限りこの問題は避けて通れないが、前出のミクロモデルや実験、観測などを通して、適切な受け渡し量と変量の内部分布などを評価できれば、精度の高い実用的なモデルが構築できることを期待したい。

6. 碎波波浪場の非定常性と局所性、組織的構造、乱れの影響

最前から述べている通り、碎波波浪場で底質の移動を考える限り、少なくとも碎波という現象全体が捉えられる空間を対象に、かつ碎波による特徴的な流体運動や底質移動が十分に表現できる解像度で計算を行わなければならない。いったいどの程度の解像度が必要かという点については、現段階ではあまり整理された情報がないが、少なくとも碎波に起因する組織的な渦構造（乱れ構造）は再現される必要があると思われる。これより荒い解像度では、鉛直積分型の波動モデル（たとえばBoussinesq方程式モデル）を用いた数値計算に対し数値波動水槽の優位性が見られない。碎波による組織渦の代表長さは水深程度であるものの、水表面での複雑な運動とそれによる流体運動をある程度忠実に再現するためには、解像度としては水深の1/20程

度が必要と思われる。

砕波帯の一部では砂漣が形成されていることが多いので、砂漣上の底質移動状況を再現しようとするなら、砂漣の代表サイズ（～10cm）より十分小さな解像度が必要である。これが現実的でない場合（現状ではあまり現実的ではないだろう）、砂漣についてはサブモデルに内包させるという手法が取られるが、その場合は（マイクロモデル等での検証により信頼性は向上するだろうが）既存の漂砂量算定式を用いる場合と本質的にはあまり変わらない。

砕波帯内の漂砂量算定に数値波動水槽を用いる最も大きなメリットは、砕波波浪下での流速の非定常性の再現性向上であろう。これは基本的に組織渦の影響や微細な変動の発展と考えられ、流速や乱れ量の確率変動や間欠性が含まれる。岡安・浅利（1996）は砕波帯内の底面近傍流速について室内実験を行い、位相平均の最大流速（決定論的波動最大流速）に対して、個々波の最大値の平均（位相や絶対値の変動を考慮した最大流速の期待値）が増加することを示した。また（1）式のようなShields数の1.5乗（～流速の3乗）の漂砂量式を念頭に置いた場合では、およそ2倍程度の違いとなることが示されている。また、Okayasuら（2010）は、外部乱れを与えた場合のPickup量がそうでない場合に比べ有意に増加すること、その場合でも計測された底面近傍の時系列流速データを用いれば、（1）式に乱れの影響を勘案した評価式でPickup量を比較的良好に表現できることを示した。このことは、砕波による流速の変動特性をある程度評価できれば、漂砂量の算定に既存の算定式が使用できる可能性を示唆している。

また、砕波帯内の底質移動、地形変化のシミュレーションとしては、3次元的な流体運動や乱れの大きさから、移流拡散方程式をベースとした浮遊漂砂の移動モデルを用いることが第一の候補となろう。相対的に低濃度で、粒子間力を考慮しなくてよいなら、比較的単純な固液2相流としての取り扱いが可能である。ただし、底面極近傍での底質濃度が高く、この領域での計算精度が全体の移動量に大きく影響するようなケース（シートフロー主体の底質移動場など）では粒子間力の考慮が必要だろう（これについてもなにがしかのマクロモデルを導入することになると思う）。また、底面付近の流速分布の再現性が重要なこと、底面高が連続的に変化すること等を考えると、不当間隔の境界適合格子の使用も考慮されてよいと思われる。

7. おわりに

数値波動水槽は新しい技術であり、これを用いた底質移動の評価についても、具体的な手法についてそれほどたくさんの成果があるわけでもない。本稿ではそれに対し、今後どのようなことができるか、あるいは望まれるかと、それに付随するであろう問題点について思いつくままに記述したものである。したがってかなり不完全なものであるし、もう少し考慮してよい手法や状況があると思われる。それについては読者の方から補っていただきたい。

しかしながら、今回の研修会のテーマが、数値波動研究小委員会による報告書の刊行に合わせて開催されたこともあるので、その「数値波動水槽－砕波波浪計算の深化と耐波設計の革新を目指して－」の漂砂関連部分「第Ⅱ編 数値波動水槽と漂砂の計算力学」については若干のまとめを紹介したい。

上記第Ⅱ編の第1章は導入であり、第2章では、移流・拡散方程式による漂砂モデルについてまとめた。移流・拡散方程式に基づく漂砂モデルは最も標準的なモデルであり、適用の歴史も古く、適用実績も多い。また先述の通り、砕波帯全域で漂砂移動を予測する場合には、移流・

拡散方程式以外の選択肢は見当たらない。また計算力学的な観点からも、乱流特性を適正に反映した浮遊砂の拡散係数の評価が成されれば、十分な適用性が期待できる。

浮遊砂雲の移動軌跡を追跡するにはLagrange的な方法が有効である。第3章では、Lagrange手法である粒子追跡法による漂砂モデルについて述べ、一例として砂漣上の浮遊砂の移動について取り上げた。粒子追跡法の基本形は単一粒子追跡であるが、浮遊砂雲の場合、浮遊砂雲を形成する砂粒子から幾つかの代表粒子を決めて、個々の粒子が他と相互作用することなく個別に乱流場を移動した際の移動軌跡を追跡し、浮遊砂雲の移動を予測する。また、粒子間の衝突を考慮できるように粒子追跡法を拡張すれば、混合粒径砂の移動過程の扱いも可能となり、シートフロー漂砂のような高濃度土砂輸送も扱うことができる。さらに、PIV等の画像解析法の進歩により、組織乱流による土砂輸送についても信頼性の高い実験データが得られるようになりつつある。この章ではこれらの研究現況に関してとりまとめる。

第4章では、固液混相流モデルによる漂砂過程の数値解析についてまとめた。この章に記載する手法を、流体場計算と共に用いれば、ミクロな視点での漂砂の計算科学の展開が可能となる。まず混合体モデル、2流体モデルについて概観し、その後に漂砂の素過程である砂粒子の運動を直接追跡することができるLagrangeモデルに関して、既往の計算例を解説した。

数値波動水槽を用いたミクロな視点での漂砂の計算科学では、前述のとおり大規模領域を対象とした計算の実行は不可能である。そのため第5章では、漂砂の境界条件の推定に使用できるツールとして、数値波動水槽の外部モデルとしての3次元海浜変形モデルに関しても借款の解説を行った。海浜変形モデルは多くの実務にも豊富な適用実績を有するが、長時間の変形過程を追跡する必要性から、ある程度の平均化を前提とした扱いが成されることが多い。数値波動水槽の外部モデルとして用いる場合には、3次元海浜変形モデルの特性を十分に理解することが必要となる。

参考文献

- Einstein, H. A. (1942): Formulas for the transportation of bed load, Trans. ASCE, Vol. 107, pp.561-577.
- Bagnold, R. M. (1963): Mechanics of marine sedimentation, The Sea (ed. by M. N. Hill), Vol. 3, Interscience, New York, pp.507-528.
- Jayaratne, M.P.R. and Shibayama, T. (2004): An evaluation method of suspended sediment concentration in and outside the surf zone, Proc. 29th Coastal Eng. Conf., pp. 1715-1727.
- Nielsen, P. (1992): Coastal bottom boundary layers and sediment transport, World Scientific, River Edge, N. J., p.324.
- Okayasu, A., Fujii, K. and Isobe, M. (2010): Effect of external turbulence on sediment pickup rate, Proc. 32nd Coastal Eng. Conf., pdf-382.
- van Rijn, L. C. (1984b): Sediment pick-up functions, J. Hydraulic Eng., Vol. 110, No. 10, pp. 1494-1502.
- 岡安章夫・浅利洋信（1996）：碎波帯内の流速の変動特性と漂砂量推算に及ぼす影響，海岸工学論文集，第43巻，pp.501-505.
- 片山裕之・合田良実（2002）：碎波巻き上げによる浮遊砂の輸送・沈降過程に着目した地形変化の計算，海岸工学論文集，第49巻，pp. 485-490.
- 土木学会海岸工学委員会数値波動研究小委員会(2012)：数値波動水槽－碎波波浪計算の深化と耐波設計の革新を目指して－，土木学会，p.228.

土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会(1998)：漂砂環境の創造に向けて，土木学会，
p.359.