

2022年度（第57回）  
水工学に関する夏期研修会講義集

**B コース**

Lecture Notes of the  
57<sup>th</sup> Summer Seminar on Hydraulic Engineering, 2022  
Course B

土木学会  
水工学委員会・海岸工学委員会  
Committee on Hydrosience and Hydraulic Engineering,  
Coastal Engineering Committee,  
JSCE

2022年9月  
September 2022

2022年度（第57回）

水工学に関する夏期研修会講義集

B コース(海岸・港湾コース)

総合テーマ：波・流れと地盤の複合現象

|     |                                  |  |  |
|-----|----------------------------------|--|--|
| B-1 | 流域管理のための数値計算に必要なデジタルトランスフォーメーション | 神戸大学<br>教授                                 | 大石 哲<br>Satoru OISHI                                   |
| B-2 | 海岸の将来ビジョンとその技術政策課題               | 国土技術政策総合研究所<br>海岸研究室 室長                    | 加藤 史訓<br>Fuminori KATO                                 |
| B-3 | 海岸工学での地盤にまつわる事象について              | 港湾空港技術研究所<br>沿岸水工研究領域長                     | 鈴木 高二朗<br>Kojiro SUZUKI                                |
| B-4 | 海岸工学および地盤工学における模型実験の方法論          | 豊橋技術科学大学<br>准教授<br>(株)不動テトラ<br>総合技術研究所 副所長 | 松田 達也<br>Tatsuya MATSUDA<br>久保田 真一<br>Shin-ichi KUBOTA |
| B-5 | 流体と地盤の模型実験の相似則                   | 港湾空港技術研究所<br>地盤改良研究グループ長                   | 高橋 英紀<br>Hidenori<br>TAKAHASHI                         |
| B-6 | 格子法に基づく波浪・地盤連成解析とその適用例           | 名古屋大学<br>准教授                               | 中村 友昭<br>Tomoaki NAKAMURA                              |
| B-7 | 流れの平均化方程式と<br>土水境界における接続条件       | 京都大学<br>教授                                 | 藤澤 和謙<br>Kazunori FUJISAWA                             |
| B-8 | 粒子法を用いた底質土砂輸送機構の検討               | 京都大学<br>准教授                                | 原田 英治<br>Eiji HARADA                                   |

## Digital Transformation for Numerical Simulation to Manage Basins

大石 哲

Satoru OISHI

### 1. はじめに

自然現象と社会現象の組み合わせによる数理的推論を行おうとすると、かなり大きな工数が必要になり、それは経験でカバーしてきた。例えば、海の人工島のいくつかは廃棄物を受け入れて埋め立てられた。その処分場について考えると、処分場が埋め立てられて人工島として活用できるようになるまでにかかる年数は、現状の廃棄物搬入量と人口動態などから外挿して決められる。そこでは、産業構造、リサイクル率、他の処分場への流出や他からの流入などを検討することは希である。

一方で水工学に関係した自然現象と社会現象の組み合わせの顕著な例は、災害被害の推定である。水害の被害などのように自然現象と社会現象の組み合わせによる数理的推論にシミュレーションを用いようとする、かなり大きな工数が必要になる。しかしフェルミ推定的手法も使うことができない。そこで、フラジリティカーブの算出を通して計算がなされてきた。これは経験による外力と被害の関係およびその間が線形に近い関係であることを前提としている。

気候変動を踏まえた国土交通省 水管理・国土保全局 水災害対策検討小委員会（2020）では、提言の中で、気候変動にともない気温が2度上昇するに相当するような気候変動の場合の降雨量変化倍率は1.1程度と試算している。試算にしたがって基本高水が1.1倍になったときの既存河川における計画高水流量発生時の被害量の推定を行う際に、被害を線形外挿的に1.1倍と見積もるわけにはいかない。既存施設の活用、堤防の余裕高と堤内地の資産分布を与えてシミュレーションによって求めることになる。既存施設の種類、堤防の使用、堤内地の資産分布は人為的に形成された社会的データであり、有無を言わせぬ正確な値があるように思えるが、その値を調査し与えることはかなりの困難が伴う。

さらに、気候変動対策で計画高水流量が  $(1+\alpha)$  倍になったときの既存河川における計画高水流量発生時の橋梁橋脚の影響による河床変動とそれが堤防に与える影響を推定しようとする、実験かシミュレーションに頼るほかはなく、いくつかの実験とシミュレーションを比較した上で他地点のシミュレーションを行うのが現実的な手法と考えられる。しかしその計算をしようとした際に、ゼロから橋梁橋脚の位置や形、現況河床や上流からの供給土砂量を入力しようとする、コンピュータが行う時間積分計算以前にデータの準備に大きな工数がかかる。その工数はデータを用意することと、それを変換して計算への入力情報にすることが大部分である。情報の制約から「仮に〇〇とおく」といったことをせざるを得ないことも多い。

筆者が2022年の理化学研究所の新技术説明会において行ったインタビューでは、大手建設コンサルタントの技師が河川断面の作成にかかる工数は1ヶ月程度であるという。また、筆者が東京大学のコンクリート研究室との共同研究を実施した際にはコンクリート床版のFEM解析をする際に計算準備が全体の62.5%の時間をしめ、計算実行にかかった時間は37.5%であった。FEM解析をする際に計算準備はほとんどが人が画面の前で行う作業であり、計算実行では計算開始から終了までは人は関与しない。

一方で、デジタルトランスフォーメーション（DX）が叫ばれ、DXの覇者がビジネスの覇者のような側面もある。

# 海岸の将来ビジョンとその技術政策課題

## Visions and Technical Policy Issues for Coast in the Future

加藤 史訓

Fuminori KATO

### 1. はじめに

わが国の人口は少子高齢化により 2008 年をピークに減少しており、今後も減少していくことが予想されている。また、産業構造やデジタル化の進展も影響し、人口や資産の分布が長期的に変化するとともに、予算や担い手の不足等により土木施設の維持も難しくなっていくことが危惧されている。

国際的な動きとして、2015 年 9 月の国連サミットで、持続可能な開発目標 (SDGs) が全会一致で採択された。これは、誰一人取り残さない多様性と包摂性のある社会の実現のために設定された、2030 年を年限とする 17 の国際目標であり、その中には気候変動の対策や持続可能な都市など、海岸に関わる目標も含まれている。このように社会の持続性に着目した取り組みが広く求められている。

海岸は陸域と海域の境界であるだけでなく、波浪や風等の作用から背後地を守る緩衝帯であり、さまざまな生物の生息場であり、多様な海岸利用の場でもあり、独特な景観を形成している。わが国の海岸は、その背後地に人口、資産、社会資本等が集積するとともに、台風や低気圧による高潮や高波、地震による津波、海岸侵食にさらされてきた。そのような脅威に対し、海岸法に基づく海岸事業 (海岸保全施設の設置など) やさまざまなソフト対策が実施されてきた。

海岸への気候変動の影響が言われ始めてから久しい。たとえば、土木学会海岸工学委員会は 1994 年に地球温暖化の沿岸影響についての報告書をまとめており、2000 年に国が定めた「海岸保全区域等に係る海岸の保全に関する基本的な方針 (以下、「海岸保全基本方針」という)」においても、海岸にとって深刻な影響が生ずる恐れがあることから潮位、波浪等の監視やそれらの変化に対応する検討を進めることとされた。しかし、海岸保全において気候変動の影響を考慮することが初めて明確に規定されたのは、2020 年に変更された海岸保全基本方針であった。

わが国の海岸を取り巻く自然・社会環境が変わっていく中で、さまざまな課題に直面している海岸を将来どのような姿にするべきなのか議論をすることは、その姿の実現に必要な技術開発を考える上で不可欠である。直面している課題が多いことから、海岸のあるべき姿については現在の制度や課題の延長上で議論されがちであるが、平均海面水位の上昇が来世紀以降も続くという予測などをふまえると、今世紀末のように少し先の状況を現在の制度や課題から少し離れて考え、そのあるべき姿の実現・維持に必要な技術開発について考えてみることも有用である。2100 年は遠い先のようにも思えるが、土木施設の耐用年数が 50 年程度であることを考えると、その状況を既に考えていかなければならない時期に入っているとも考えられる。このようなバックキャスト型の議論は、一般財団法人国土技術研究センターの海岸技術政策研究会や 2021 年の第 68 回海岸工学講演会の企画セッション「海岸の将来ビジョンとその実現に向けた取り組み」で行われている。

本稿では、まずわが国における海岸保全の経緯を振り返り、第 68 回海岸工学講演会の企画セッション等での議論をふまえて海岸保全の現状と課題を整理し、2100 年を見据えた海岸の将来ビジョンとその実現・維持に必要な技術政策課題について私見を述べる。

# 海岸工学での地盤にまつわる事象について

## Phenomena Related to Seabed in Coastal Engineering

鈴木 高二朗

Kojiro SUZUKI

### 1. はじめに

海岸工学での地盤にまつわる現象にはさまざまなものがある。波が進行する際の波の減衰に及ぼす地盤の影響や広域な海岸侵食など多種多様である。今回はこのうち構造物周りの比較的狭い範囲の現象を対象として記載したいと思う。まず、構造物の影響を受けない平坦な海底地盤を対象とした現象（地盤表層の漂砂現象、深層部までいたる波による地盤の液状化）について述べる。次に、防波堤周囲の洗掘現象（混成堤前面のL-Type洗掘、消波ブロックや捨石構造物下部の洗掘）、津波による防波堤開口部と防波堤背後の洗掘、護岸背後の地盤の吸い出し現象、着床式洋上風力発電周囲の洗掘現象について述べた後、洗掘、吸い出し防止工について述べる。

### 2. 平坦な海底地盤の挙動

#### 2.1 地盤表層の漂砂移動

波浪によって平坦な海底（水平で周囲に物体のない海底）では押し波と引き波に対応する往復流（振動流）が発生し、その往復流によって砂の移動が発生する。往復流の大きさによって図-2.1のように砂の移動状況が変化し、往復流が大きくなるにつれて、砂の平坦床での掃流移動、砂漣(Rolling-grain Ripples)上の掃流移動、砂漣(Vortex Ripples)上の浮遊移動、シートフロー(Sheet Flow)のように移動状況が変化する。合田(2008)<sup>1)</sup>はこのような移動状況に関する研究の経緯を概説している。また、これらの現象は本間・堀川(1985)<sup>2)</sup>に詳細にとりまとめられている。

往復流の流速が小さいうちは、砂が平坦床をコロコロと移動しており掃流移動 (Bed-load) と呼ばれている。往復流が大きくなると砂漣が発生しはじめ、流速が大きくなるにつれて徐々に大きくなっていく。

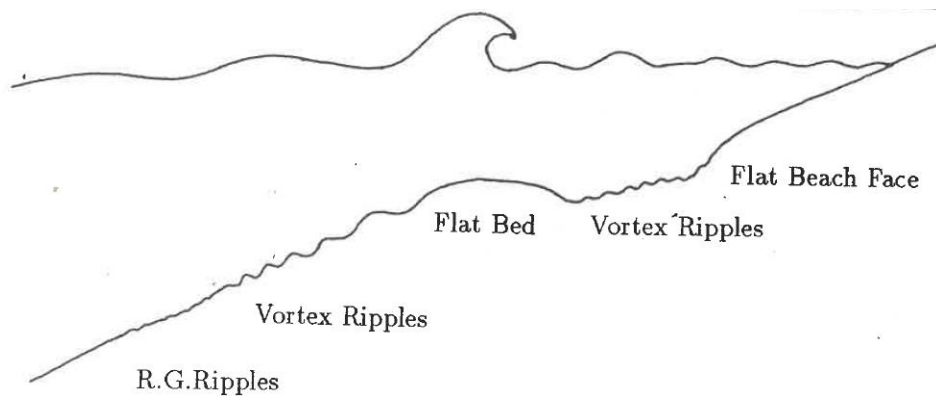


図-2.1 平坦床での地盤表層の砂の動き（掃流移動からシートフローまで）

# 海岸工学および地盤工学における模型実験の方法論

## Methods of Model Test on Coastal and Geotechnical Engineering

松田 達也, 久保田 真一  
Tatsuya MATSUDA, Shin-ichi KUBOTA

### 1. はじめに

構造物の建造や土構造物の造成, 自然災害メカニズムの解明とその対策など, 土木工学においては複雑な条件かつ未知の現象に対して適切な最適解を導き出す必要がある。例えば, 実際に起こり得る現象を明らかにするために, 事象に対して実物または実物と同等規模の模型を用いて実験的検討ができれば有益な情報が得られる。しかしながら, 実物または実物と同等規模の実験を行う際には実験コスト, 実験設備, 実験の再現性や安全性など様々な問題が生じると考えられる<sup>1,1)</sup>。そのため, 実際に起こり得る現象に対して, 土木工学においては厳密な理論, 模型実験, 数値解析を駆使して問題を解決してきた。このことは工学全般において取られる方法ではあるが, その中でも土木工学における特徴としては, 縮尺模型実験による現象解明が非常に重要な役割を担っており, 現在においてもその需要が高いことが挙げられる。

模型実験の魅力は, 設定した条件(入力)に対して, 必ず結果(出力)が物理量として, さらに, 映像として現象が視覚的に得られることである。ここで重要なことは, 如何に模型実験を実施するかということ, 入力条件が正しい場合でもその実施方法によっては, 正解値とは全く異なる結果が得られる可能性がある。そのため, 模型実験を実施するにあたっては, 実物で起きうる現象に対して, その現象を再現するために如何に「工夫」を施すかが重要となる。具体的には実験方法や相似則がそれに該当する。

本稿では, 海岸工学分野で実施されてきた「水理模型実験」および地盤工学分野で実施されてきた「地盤模型実験」について, 各分野で蓄積されてきた模型実験の方法論について事例を交えて説明する。

### 2. 海岸工学における模型実験の方法論

#### 2.1 模型実験の計画

##### (1) 模型縮尺の設定

海岸工学の分野では, 波浪や潮流などを外力として生じる諸現象が実験の対象となり, 縮尺模型を用いた水理模型実験が実施されている。縮尺模型を用いた実験では, 実物と模型の間で力学的な相似の関係を保つ必要があり, その関係を定めるものが相似則とよばれている。

水理現象を引き起こす主たる力は, 慣性力, 重力および粘性力の3つであり, これら3つの力の縮尺を同じにすることは, 実物で実験しない限りは不可能である<sup>2,1)</sup>。そのため, 縮尺模型を用いた模型実験において, 如何に相似条件を成立させるかが工学上の工夫のしどころであり問題点ともいえる。海岸工学においては, 波や流れが作用することによる物体の運動を対象とすることが多く, そのため, まず, 慣性力について相似にすることが求められる。具体的には, 慣性力と重力の比率を合わせる方法(フルード則), あるいは慣性力と粘性力の比率を合わせる方法(レイノルズ則)があるが, 海岸工学の分野, 特に構造物を対象とした水理模型実験では, 重力が粘性力よりも卓越する場合が多いため, フルード則に従って実験を行うことが多い<sup>2.1), 2.2)</sup>。

# 流体と地盤の模型実験の相似則

## Similarity Law for Fluid and Ground Model Tests

高橋 英紀

Hidenori TAKAHASHI

### 1. はじめに

海の波や流れに関する研究は海岸工学分野で、地盤に関する研究は地盤工学分野で、それぞれ検討されてきたこともあり、両者が複合する問題に関しては十分には解明が進んでいない。その解明には模型実験を実施することが有効的であるが、海岸工学分野での水理実験では地盤は簡単にモデル化されることが多いし、地盤工学分野での模型実験では水理外力は機械装置による载荷などに置き換えられることが多い。しかしながら、流体と地盤の両者を直接的に模型材料として用いないと再現できない現象も多い。そこで、最近では流体と地盤を複合して模型実験を行うことも増えている。一方、実物の構造物をそのまま幾何学的に縮尺しても、同じ挙動を再現できない。模型はあくまで模型であって実物とは異なる。そこで、流体と地盤のそれぞれの挙動、それらが複合して生じる現象の特性を理解した上で、実物と模型での各諸元の比を定めておく必要がある。各諸元の比が分かれば、模型実験の結果から実物の挙動を推測でき、模型実験は有用となる。この比が相似比であり、それを司る法則が相似則である。本稿では、まず、模型実験における相似則の役割と導き方について述べる（2章）。ついで、これまでの知見とその延長上で導ける流体あるいは地盤の個別の相似則について説明する（3章、4章）。本稿の主題である流体と地盤の複合する現象の相似則についても考えてみる（5章）。最後に、著者が実施した模型実験の事例を紹介し、相似則を考察してみる（6章）。なお、本稿の前半は文献の一部<sup>1,1)</sup>をまとめたものであり、詳細は当文献を参照されたい。

### 2. 相似則の役割

車や飛行機などの機械にしても、ビルや建物、橋梁、堤防などの建築・土木構造物にしても、色々な力が加わることで、変形したり壊れたりする可能性がある。有害な変形や破壊が生じないように、物を設計して製作する必要がある。また、空気や水の流れを予測したいこともある。このような場合、実物で実験を行い、その挙動を調べることが理想ではある。しかしながら、特に規模が大きい土木・建築構造物で、実物の構造物を用いて実験することはかなり難しい。例えば、地震で堤防が壊れるかどうか調べたい場合、堤防を作り、実際に地震を起こすことはほぼ不可能であろう。そこで必要になるのが実物の代用品である模型を用いた実験である。模型を用いて実験を行えば、挙動を細かく観察でき、時間もコストもそれ程大きくならない。現在、コンピュータの処理能力の向上とともに、数値解析技術が発達してきているが、模型実験の持つ「リアリティ」（本物の材料、実際の動きを見られる）は未だに魅力的である。なぜなら、数値解析では既に解明されている現象を定式化し、その挙動の再現を試みるが、未解明な現象に対しては再現できる保証が無いためである。特に、材料としての挙動を統一的に説明できていない「土」を用いる場合、数値解析だけで構造物の挙動を予測することは難しいのが実状である。

模型実験の難しく、興味深い点は、実物の構造物をそのまま幾何学的に縮尺しても、同じ挙動を再現できないことである。模型はあくまで模型であって実物とは異なる。模型で起きる現象と実物で起きる現象との関係を表す法則「相似則」を十分に吟味していないと、模型実験は無益であり、有害とすらなり得る。特に地盤の模型実験では、土の応力を再現することが難しい重力場での模型実験において複数の現象に対する相似則を同時に満たすことは不

# 格子法に基づく波浪・地盤連成解析とその適用例

## Coupled Wave-Seabed Analysis Based on Grid Method and Its Application

中 村 友 昭

Tomoaki NAKAMURA

### 1. はじめに

本稿は、土木学会 海岸工学委員会 水理模型実験における地盤材料の取扱方法に関する研究小委員会(2021)(以下、地盤材料小委と呼ぶ)の5.1節、5.2節、5.5節に対応する。以下は地盤材料小委(2021)の内容を補足する内容となっているため、地盤材料小委(2021)を適宜参照されたい。

地盤材料小委(2021)の5.2節において説明しているように、土木学会 海岸工学委員会 数値波動水槽研究小委員会(2012)では、波浪と地盤に関わる数値計算を表-1.1に示すように4つの区分に分類している。Type 1とType 2は、有限差分法(finite difference method; FDM)、有限体積法(finite volume method; FVM)、有限要素法(finite element method; FEM)、境界要素法(boundary element method; BEM)に基づく格子(grid)または要素(element)をベースとした手法であり、ここでは格子法(grid method)と呼ぶ。このうち、波浪場を理論値で与えるType 1のモデルの開発も行われているものの、Type 1のモデルでは波浪と地盤の相互作用は取り扱えないことから、ここでは波浪場を格子法の数値解析で与えるType 2のモデルを対象とする。

### 2. 格子法に基づく波浪・地盤連成解析の発展のその後

地盤材料小委(2021)では、波浪場と地盤のカップリング手法を表-2.1に示すようにType A (All)とType W (Wave)に分類している。Type Aでは、波浪場のモデルを地盤内部の浸透流にも拡張して適用し、その結果から補間して求めた地盤表面での圧力や流速を地盤のモデルに入力しており、波浪場から地盤へのone-wayカップリングとなる。Type Wでは、地盤表面を出入りする流速を指定して波浪場のモデルを解き、その結果から補間あるいは外挿して求めた地盤表面での圧力を地盤のモデルに入力しており、地盤表面を出入りする流速をゼロ(つまり不透過)とする場合はone-wayカップリング、地盤表面を出入りする流速として地盤のモデルから得られた結果を使う場合は擬似two-wayカップリングとなる。前者のType Aの最初の適用例は波浪場の

表-1.1 波浪と地盤の相互作用に関する数値計算の分類(数値波動水槽研究小委員会, 2012)

| 区分     | 波の扱い             | 地盤の扱い              |
|--------|------------------|--------------------|
| Type 1 | 微小振幅波理論など理論的に与える | 支配方程式を有限要素法などで解析する |
| Type 2 | 数値解析で与える         | 支配方程式を有限要素法などで解析する |
| Type 3 | 微小振幅波理論など理論的に与える | 個別要素法などで解析する       |
| Type 4 | 数値解析で与える         | 個別要素法などで解析する       |

表-2.1 Type 2のモデルにおける波浪場と地盤のカップリング手法

| 区分            | カップリング手法  |
|---------------|---|
| Type A (All)  | 地盤の内部を含む領域全体の波浪場を解き、得られた地盤表面での圧力や流速を地盤に与えて解く(one-wayカップリング)             |
| Type W (Wave) | 地盤表面を不透過または透過として波浪場を解き、得られた地盤表面での圧力を地盤に与えて解く(one-wayまたは擬似two-wayカップリング) |



# 流れの平均化方程式と土水境界における接続条件

## Volume-averaged Equations for Fluid Flow and Interfacial Conditions at Soil/Water Boundaries

藤澤 和謙

Kazunori FUJISAWA

### 1. はじめに

多孔質の内部を流れる浸透流とその周りを流れる流体の挙動を連続的に把握することは、海岸工学や地盤工学分野において重要な課題である。例えば、波浪を受ける地盤の挙動を解析するには、地盤への流体の浸入を許容する流れの解析と同時に、地盤の変形解析が必要となる。後に述べるが、多孔質中の流れに良く知られたダルシー則を適用し、間隙水圧のみを変数とする浸透流解析では、地盤上の流れと地盤内の浸透流とを正確につなげることが困難となる。このような問題は、堤防などの土構造物においても、越水時などには堤体上を流れる河川水（越流水）に加えて、堤体への越流水の浸透と堤体の変形や侵食を同時に把握する際に現れ、重要かつ複雑な問題となる。

ここではまず、地盤上の流れと地盤内の浸透流を統一的に把握するため、Navier-Stokes 式の平均化方程式について、その導出過程を詳述する。導出された平均化方程式は、透水係数が十分に小さい場合にはダルシー則と近似的に一致し、Navier-Stokes 式と同様に慣性項と粘性項を含む方程式となる。その結果、（圧力勾配のみのよって決定されるダルシー流とは異なり）浸透流は圧力勾配だけでなく、流速の時間及び空間変化にも影響を受けるものとなる。これは、浸透挙動を記述するための境界条件に（圧力だけでなく）流速についての条件を必要とすることにつながる。そのため、多孔質体と流体の境界面において必要となる境界条件について、平均化方程式の導出の後に説明する。多孔質体と流体の境界面における境界条件は界面条件（Interfacial condition）と呼ばれ、これまでに複数の条件が提案されてきた。ここでは、最も有名な Bearers-Jeseph 条件を対象として、その役割について考察する

### 2. 平均化方程式

#### 2.1 体積平均と相体積平均

Navier-Stokes 式の平均化方程式を導くにあたり、必要となる平均量を定義し、それに関する空間微分及び時間微分に関する定理について述べる。多孔質体として飽和土を対象とすると、その間隙には、水（液相）のみが存在し、土粒子（固相）によって囲まれた複雑な幾何形状をとる。そこを流れる浸透流について、空間的な平均化を行う領域は、複雑な間隙構造を平滑化するのに必要な大きさを持ちながらも、巨視的な浸透挙動を捉えるのに十分な小ささを有する必要がある。圧力や流速、間隙率といった物理量の微視的な変動を平滑化するのに必要かつ十分な大きさの領域は代表要素体積（Representative Elementary Volume, 略称 REV）と呼ばれる。空間的な平均化を行う領域を平均領域と呼ぶが、それは REV に対応するものである。REV の大きさは、間隙径の数倍のスケールと考えられるが、それを決定することは一つの研究対象であり、REV の大きさに関する議論は避ける。ここでは、Bars and Worster (2006) 及び Whitaker (1999) をもとにして、平均量に関する定理をまとめる。以下では、Howes and Whitaker (1985) に従い、固相には $\sigma$ 、液相には $\beta$  の添え字を用いる。

# 粒子法を用いた底質土砂輸送機構の検討

## Investigation for Sediment Transport Mechanism using Particle Method

原 田 英 治  
Eiji HARADA

### 1. はじめに

海岸過程の数値シミュレーションにおいて、底質土砂輸送によって形成される ripple は、底面粗度として重要である。底質土砂輸送による ripple 形成機構を詳細に理解するには、ripple を砂粒子スケールから捉え、砂粒子運動の集合体として記述するのが合理的である。Cundall and Strack<sup>1)</sup>の個別要素法 (DEM : Distinct Element Method) は個々の砂粒子運動の追跡が可能な Lagrange 型の粒状体モデルであり、各種流れ場モデルとカップリングし固液二相流モデルを構築することで、底質土砂の輸送機構の理解を深めるのに有効なツールになり得る。底面境界層ではせん断力によって水流と堆積層表層砂粒子との活発な運動量交換が生じ、底質土砂が輸送される。碎波帯や波打ち帯では、それに加えて碎波による水面からの運動量流入が底質土砂輸送の促進に強く影響する。そのため、浅海域における底質土砂輸送機構の議論の成否には、自由水面挙動を精度よく扱うことが可能な流体解析手法の選択が鍵となる。

本講では、砂粒子運動追跡に DEM 法を用いた粒子追跡法型の混相流解析について次章で概観する。また、第 3 章では、自由水面変動が土砂輸送過程に効く条件を対象に、粒子法を用いた ripple 形成過程の数値シミュレーション事例を紹介する。なお、ここで述べる一部の内容は、土木学会海岸工学委員会・水理模型実験における地盤材料の取扱方法に関する研究小委員会の研究成果としてまとめられた書籍「水理模型実験の理論と応用 -波動と地盤の相互作用-」<sup>2)</sup> に掲載があることを付記しておく。

### 2. 混相流解析

固液混相流解析では異相間での相互作用の検討が生じる。個々の砂粒子運動の素過程に注目すると、固液異相界面では、物理定数が不連続に変化し、界面での質量、運動量などの保存方程式に jump 条件が課される。異相界面での物理量の急変に対する境界条件は、解像度に応じて、界面を含む領域での物理的考察に基づいた何らかの平均処理によって構成式が設定される。実験計測や DNS による基礎データの蓄積、高解像度シミュレーション結果は、混相乱流に対する構成式や異相界面構造の検討に有益な情報であり、混相流予測精度の向上に対する計測および数値計算技術の高度化に寄せる期待は大きい。

粒子混入による乱流変調を捉えるには、直接数値シミュレーション (DNS : Direct Numerical Simulation) が有効な方法の一つである。限定された条件における混相乱流の DNS は、数十年前から実施されてきた。ただし、DNS の計算負荷は非常に高く今日の計算機環境においても高 Reynolds 数条件の DNS の実施は困難であることには変わりはない。実用には、対象とする現象の代表スケールを考慮して局所平均化された基礎式を用いて、計算負荷を抑えた混相流の数値シミュレーションが実施され、併せて物理的考察や実験データの整理を通じて構成式の検討がなされている。

混相流動過程において、砂粒子間の接触や衝突の効果が現象に対して無視できない程度に砂粒子を含む高濃度混相流場では、界面構造の検討に対して、粒子間相互作用力の評価が不可欠である。粒子間相互作用力を評価しつつ、並進および回転の方程式を用いて個々の砂粒子運動の Lagrange 追跡が可能な DEM は、砂粒