

# 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 —

## 目次

### 第 I 編 数値波動水槽のための自由表面流モデル

#### 第 1 章 はじめに

- 1.1 数値造波水槽の必要性
- 1.2 本編の構成

#### 第 2 章 基礎方程式

- 2.1 流れの基礎方程式
  - 2.1.1 質量保存則
  - 2.1.2 運動量保存則
  - 2.1.3 構成方程式と Navier-Stokes 式
  - 2.1.4 指標記法
- 2.2 混相流の基礎方程式
- 2.3 波浪場のモデル化と基礎方程式
  - 2.3.1 ポテンシャル流れの基礎式
  - 2.3.2 波動モデルによる波浪変形の解析とその意味

#### 第 3 章 基礎方程式と離散化

- 3.1 偏微分方程式とその解法
  - 3.1.1 分類と性質
  - 3.1.2 移流拡散方程式と Poisson 方程式
  - 3.1.3 Euler 型解法と Lagrange 型解法による離散化
- 3.2 差分法
  - 3.2.1 差分近似を得るための方法
  - 3.2.2 時間微分項（非定常項）の差分スキーム
  - 3.2.3 空間微分項（移流項）の差分スキーム
- 3.3 有限体積法
  - 3.3.1 重み付き残差法
  - 3.3.2 有限体積法による離散化の基礎
  - 3.3.3 移流方程式の離散化
  - 3.3.4 移流拡散方程式の離散化

## 第4章 非圧縮性流れの解析法

- 4.1 連続式を満足する圧力場の算定
- 4.2 速度と圧力を用いた反復解析法：MAC法
- 4.3 速度と圧力の同時反復解法
  - 4.3.1 Projection法
  - 4.3.2 SMAC法
  - 4.3.3 SOLA法
- 4.4 境界適合座標法
  - 4.4.1 境界適合座標系
  - 4.4.2 数値格子生成法
  - 4.4.3 基礎方程式の座標変換

## 第5章 行列方程式の解法

- 5.1 Poisson方程式の差分解法
- 5.2 行列解法
  - 5.2.1 直接法
  - 5.2.2 反復法
  - 5.2.3 共役勾配法
  - 5.2.4 行列解法のまとめ
- 5.3 数値解法の実際

## 第6章 VOF法による数値波動水槽

- 6.1 はじめに
- 6.2 格子法に基づく自由表面流体解析モデル
  - 6.2.1 自由表面流体解析モデルの概要
  - 6.2.2 海岸工学分野における適用例
- 6.3 VOF法に基づく自由表面流体解析モデル
  - 6.3.1 VOF法
  - 6.3.2 境界条件
- 6.4 数値波動水槽 CADMAS-SURF
  - 6.4.1 CADMAS-SURFの概要
  - 6.4.2 碎波計算への適用
  - 6.4.3 波と構造物の相互作用問題への適用
- 6.5 今後の展望

## 第7章 CIP法による数値波動水槽

- 7.1 CIP法の概要
  - 7.1.1 2次元CIP法
  - 7.1.2 3次元CIP法

- 7.2 運動方程式と多段階分離解法
- 7.3 CIP 法の多様なバージョン
  - 7.3.1 CCUP 法
  - 7.3.2 CIPCSL2 法
- 7.4 移動境界の計算法
  - 7.4.1 水面検出法
  - 7.4.2 水面近傍の力学とその数値計算法
- 7.5 CIP 法による数値波動水槽
  - 7.5.1 砕波の流体力学
  - 7.5.2 海面近傍の流れ
- 第 8 章 粒子法による数値波動水槽
  - 8.1 粒子法の概要
  - 8.2 粒子法の離散化
    - 8.2.1 SPH 法の積分補間子
    - 8.2.2 SPH 法のベクトル微分演算子
    - 8.2.3 MPS 法の積分補間とベクトル微分演算子
  - 8.3 粒子法の計算アルゴリズム
    - 8.3.1 WCSPH 法
    - 8.3.2 MPS 法
    - 8.3.3 境界条件
    - 8.3.4 近傍粒子検索
  - 8.4 粒子法による数値波動水槽
    - 8.4.1 砕波・越波・波圧解析
    - 8.4.2 固液・気液混相流
    - 8.4.3 浮体連成計算
    - 8.4.4 弾塑性構造物との連成計算
  - 8.5 粒子法の研究課題
    - 8.5.1 粒子法の運動量保存性
    - 8.5.2 圧力擾乱の低減
    - 8.5.3 乱流モデルの導入
- 第 9 章 Euler-Lagrange 法による数値波動水槽
  - 9.1 Euler-Lagrange 法とは
  - 9.2 Lagrange 粒子付 Euler 型スキーム
    - 9.2.1 Lagrange 粒子
    - 9.2.2 流体領域の支配方程式と分離型解法
    - 9.2.3 固相領域の支配方程式と SPH 法による解法

- 9.2.4 計算手順と計算例
- 9.3 GAL モデル
  - 9.3.1 分散相粒子モデルとしての GAL モデル
  - 9.3.2 移動境界追跡法としての GAL モデル
- 第 10 章 碎波過程の数値解析のための乱流モデル
  - 10.1 沿岸波浪場と乱れ
  - 10.2 Reynolds 平均モデル
    - 10.2.1 基本的な考え方
    - 10.2.2 Reynolds 応力と乱流エネルギー
    - 10.2.3 RANS モデルにおける乱流モデル
  - 10.3 Large Eddy Simulation
    - 10.3.1 基本的な考え方
    - 10.3.2 Leonard 分解
    - 10.3.3 Smagorinsky モデル
    - 10.3.4 1 方程式モデル
    - 10.3.5 Dynamic モデル
  - 10.4 乱流モデルを用いた碎波帯内の流体運動の解析
  - 10.5 まとめ
- 第 11 章 碎波過程の数値解析への混相流モデルの導入
  - 11.1 はじめに
  - 11.2 気液 2 相流モデル
    - 11.2.1 基礎方程式
    - 11.2.2 碎波への応用
    - 11.2.3 その他
  - 11.3 固液混相流モデル
    - 11.3.1 Euler 的手法
    - 11.3.2 Euler-Lagrange 的手法
    - 11.3.3 Lagrange 的手法
  - 11.4 まとめ
- 第 II 編 数値波動水槽と漂砂の計算力学
  - 第 1 章 はじめに
    - 1.1 漂砂の計算力学の必要性
    - 1.2 本編の構成
  - 第 2 章 移流・拡散方程式による漂砂モデル
    - 2.1 概説

- 2.2 漂砂モデル
- 2.3 移流拡散方程式と地形変化の基礎理論
- 第3章 粒子追跡法による漂砂モデル
  - 3.1 はじめに
  - 3.2 掃流状態
    - 3.2.1 砂粒子
    - 3.2.2 cobble
    - 3.2.3 津波石
  - 3.3 浮遊状態
  - 3.4 シートフロー状態
  - 3.5 画像可視化実験
- 第4章 固液混相流モデルによる漂砂過程の数値解析
  - 4.1 固液混相流モデル
    - 4.1.1 混合体モデル
    - 4.1.2 2流体モデル
    - 4.1.3 Euler-Lagrange カップリングモデル
    - 4.1.4 Lagrange-Lagrange カップリングモデル
  - 4.2 高解像度粒子流計算手法
  - 4.3 今後の課題と展望
- 第5章 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
  - 5.1 概説
  - 5.2 海浜変形モデルの種類
    - 5.2.1 3次元海浜変形モデル
    - 5.2.2 海岸線（等深線）変化モデル
  - 5.3 海浜変形モデルの適用例
    - 5.3.1 構造物設置に伴う地形変化
    - 5.3.2 人工リーフ（潜堤）周辺の地形変化
    - 5.3.3 航路・港内埋没への適用
    - 5.3.4 河口周辺の地形変化
    - 5.3.5 自然海岸における沿岸砂州およびカस्प地形の形成と変化予測
  - 5.4 3次元海浜変形モデルの問題点と今後の課題
- 第III編 数値波動水槽と海岸構造物設計
  - 第1章 はじめに
  - 第2章 海岸構造物の耐波設計の概要
  - 第3章 防波堤・護岸様式別の数値予測要件

- 3.1 はじめに
- 3.2 構造様式別の数値予測要件
- 第4章 波圧予測
  - 4.1 はじめに
  - 4.2 沿岸構造物に作用する波力
    - 4.2.1 台形ケーソン堤
    - 4.2.2 消波ブロック被覆堤
    - 4.2.3 傾斜堤
    - 4.2.4 護岸等陸上にある構造物
    - 4.2.5 衝撃砕波力
    - 4.2.6 平面形状の影響
  - 4.3 非固定構造物に作用する波圧
  - 4.4 今後の課題と展望
- 第5章 越波過程・越波量予測
  - 5.1 はじめに
  - 5.2 越波評価方法
    - 5.2.1 越波量の算定方法
    - 5.2.2 越波流量の算定方法
  - 5.3 数値波動水槽 CADMAS-SURF の越波計算適用例
    - 5.3.1 越波排水路を有する低天端護岸の規則波越波計算
    - 5.3.2 越波排水路を有する低天端護岸の不規則波越波計算
    - 5.3.3 海岸護岸周辺の越波対策工法の数値的検討
  - 5.4 今後の課題と展望
- 第6章 被覆材および構造物の変状予測モデル
  - 6.1 現行の被覆材耐波設計法の概説
  - 6.2 被覆材の性能設計と数値シミュレーションの役割
  - 6.3 個別要素法による被覆材の移動モデル
    - 6.3.1 個別要素法
    - 6.3.2 ブロックモデル
  - 6.4 被覆材の移動モデルの適用例
    - 6.4.1 捨石構造物
    - 6.4.2 消波ブロック群の変形過程
    - 6.4.3 ケーソン移動
  - 6.5 今後の課題と展望
- 第7章 数値波動水槽の外部モデルとしての波動モデル
  - 7.1 波浪変形計算モデルの概要

- 7.1.1 波動モデルの位置づけ
  - 7.1.2 さまざまな波動モデルとその概要
  - 7.2 Boussinesq 型波動モデル
    - 7.2.1 Boussinesq 方程式の種類
    - 7.2.2 Boussinesq モデルの構成
  - 7.3 数値波動水槽との接続に関する検討
    - 7.3.1 片方向接続
    - 7.3.2 双方向接続
  - 7.4 まとめと今後の課題
- 第 8 章 波浪・地盤相互作用モデル
- 8.1 波浪・地盤・構造物の相互作用モデルの概説
    - 8.1.1 概説
    - 8.1.2 海底地盤の波浪応答モデル
  - 8.2 耐波設計における波浪・地盤相互作用の位置付け
    - 8.2.1 相互作用に関する現象の分類
    - 8.2.2 相互作用に関する現象と性能設計
  - 8.3 数値解析モデルの研究レビューと適用例
    - 8.3.1 地盤支持力（すべり）・構造物の沈下・圧密
    - 8.3.2 洗掘・吸出（波による液状化）
  - 8.4 今後の課題

索引