

# 『3次元流れに関する解析方法の試み』

株式会社フジヤマ 防災・環境保全部

福原禄夫 青嶋安弘 清水雅子 重松克弥 向井啓司

## 1. はじめに

河道には、橋脚や水制工、水門、取水堰などの諸々の構造物が設置されている。このような構造物の周辺河床は、洪水時の流れの流体力により、洗掘や土砂堆積が見られる。構造物前面が深く洗掘された場合、構造物は安定性を失い、倒壊に至ることもある。一方、堆積量が多い場合、取水堰では取水能力の低下や取水不能になった事例も少なくない。

近年、毎年のように、降雨による斜面崩壊の被害が多く発生している。斜面崩壊後の土砂は、斜面を流下して河川に流入した後、河床勾配の低下や摩擦抵抗などで河道に堆積する。堆積した土砂が河道を閉塞させ、天然ダムとなることもある。また、河道閉塞や天然ダムの形成により上流側で河川水の氾濫が生じることもある。

## 2. 課題

河床の洗掘、堆積の現象を把握するためには、構造物周辺における流れについて予め解明する必要がある。

また、崩壊後の土砂が斜面を流動する現象、河道での堆積、及び土砂の堆積による河川水の流れ状態を解明することが重要である。

構造物周辺の流れや斜面崩壊後の土砂の移動や堆積などは3次元的な流れ構造である。

現在、流れに関しては2次元流れ解析結果で検討を行っている。

3次元流れ構造を把握することは簡単ではない。現場での測定が難しく、危険性も高い、また実験で詳細な3次元流れデータを取得すること

も時間がかかる。そのため、3次元流れ解析が有力な手法であることが判っている。

3次元解析には、3次元流れの数学モデル、物理モデル、および解析手法の検討が必要であり、また、土砂と水のような、物性が大きく異なる共存場では、相互に境界面を通じて強く影響を受けるため、境界面の作用を精度よく評価できる解析手法を検討することが重要である。

## 3. 対応策

ここでは、物性が異なる空気、水、土砂の共存場における流れ構造を解析するため、数値解析の安定性が高いCCUPのスキーム<sup>1)</sup>を用い、3次元流れの解析を行った。

### 3. 1 本モデルの特徴

圧縮性がある空気を含む共存場の流れ構造を解明するため、圧縮性を表現する数学モデルを選定した。方程式には、質量保存式と運動方程式の他、水・空気・土砂の3相を表す密度関数、及び圧力方程式もある。

また、斜面崩壊後の土砂流動の解析は、固体力学、流体力学に基づき行われることが多いが、ここでは、降雨による崩壊後の土砂は、多くの水が含まれ、流動性が高いことが条件となるため、河川水と同じようにニュートン流体としてモデル化するものとする。

### 3. 2 数値解析の支配方程式

本解析では、圧縮性の空気を含む3相の共存場を統一的に表す3次元LESモデルの支配方程式<sup>2)</sup>、及び密度方程式、圧力方程式等を以下に示す(流速等はフィルター操作後の値を表す)。

## 様式 2

### ① 質量保存式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$$

### ② 運動方程式

$$\begin{aligned} & \rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \\ &= \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\nu_e}{3} \cdot \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \nu_e \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} \\ &+ F_i \end{aligned}$$

### ③ 密度方程式

$$\frac{\partial \varphi_i}{\partial t} + \frac{\partial(\varphi_i u_j)}{\partial x_j} = 0$$

### ④ 圧力方程式

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho C_s^2 \frac{\partial p}{\partial x_{ii}} = 0$$

### ⑤ 空気の状態方程式

$$p = \rho R T$$

ここでは、 $i, j: 1, 2, 3$ 、

$u_i$ : 速度、 $\rho$ : 密度、 $p$ : 圧力、 $\varphi_i$ : 密度関数、

$F_i$ : 体積力、 $R$ : 気体定数、 $T$ : 温度、

$C_s$ : 音速、

$\nu_e = \nu + \nu_t$ 、 $\nu$ : 分子粘性係数、

$\nu_t$ : Smagorinsky モデルの SGS 渦粘性係数

$$\nu_t = [c \cdot \Delta_F]^2 |\bar{D}|,$$

$c=0.173$ (Smagorinsky 定数)、

$\Delta_F$ : フィルター代表の長さ

(セルの体積の 3 乗根)

$$|\bar{D}| = \sqrt{2\bar{D}_{ij}\bar{D}_{ij}}, \quad \bar{D}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

## 3. 3 解析方法

CCUP は、CIP 法を用いて時間分離解析法、即ち、非線形の流れ方程式を移流項と非移流項に分けて計算を行う手法である。圧力に関するポアソン方程式について、反復解法には SOR 法<sup>3)</sup>を採用した。数値計算に用いられている流速等の各物理量はスタッガード格子に配置する<sup>4)</sup>。

## 3. 4 数値解析のモデルおよび計算条件

上記の解析方法に関して、その適用性や安定性

などを検証するため、図 2 と図 3 に示す二つのモデルを設定した。計算条件は、メッシュサイズ  $1\text{cm} \times 1\text{cm} \times 1\text{cm}$ 、メッシュ数  $20 \times 20 \times 20$ 、計算時間ステップ  $0.0001\text{s}$  とした。空気、水、土砂の密度は  $1.25\text{kg/m}^3$ 、 $1000\text{kg/m}^3$ 、 $2500\text{kg/m}^3$ 、粘性係数は  $1.8\text{E}-05 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、 $1.0\text{E}-03 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、 $1.0\text{E}+01\text{Pa} \cdot \text{s}$ 、音速は  $340\text{m/s}$ 、 $1500\text{m/s}$ 、 $5000\text{m/s}$  である。

### 3. 4. 1 モデル 1

モデル 1 を図 1 に示す。気・液の共存場における 3 次元流れを計算するため、空気の空間に水柱を設定し、水柱の自由崩壊による運動及びそれに伴い連行された周辺空気の運動を同時に解析できるように、単純な四角形の水柱をモデル化した。

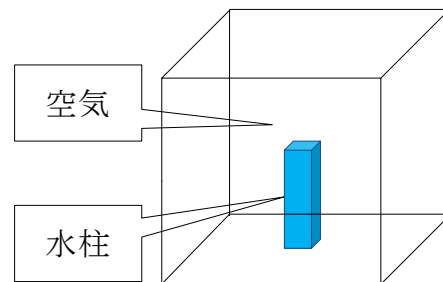


図 1 モデル 1

解析結果は時系列の順番に表示する。

図 2-1-1~3 は水柱の運動のみを、図 2-2-1~3 は水柱と空気の運動を示す。

図 2-1-1~3 に示した計算結果により、水柱の重力による自由崩壊に伴い、速度が次第に速くなり、周辺へ広がっていく流れを 3 次元で確認できた。

従って、本解析方法は 3 次元流れに関する解析を実証できると考えられる。

図 2-2-1~3 の結果により、自由に崩壊した水柱が周辺の空気を連行し、水柱崩壊の加速に伴い連行された周辺の空気も加速されていることを確認できる。

以上の解析結果により、水柱としての液相の運動及び、周辺における空気としての気相の運動を同時に解析できることが確認された。

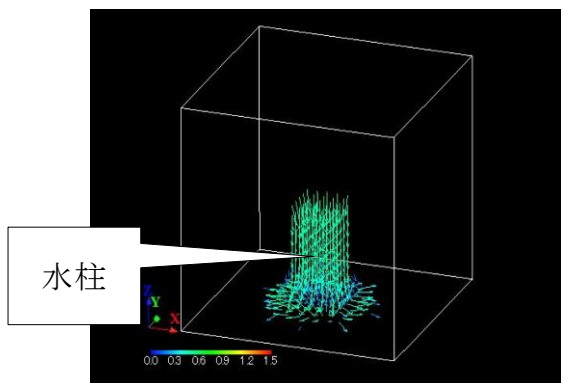


図 2-1-1 水柱の運動

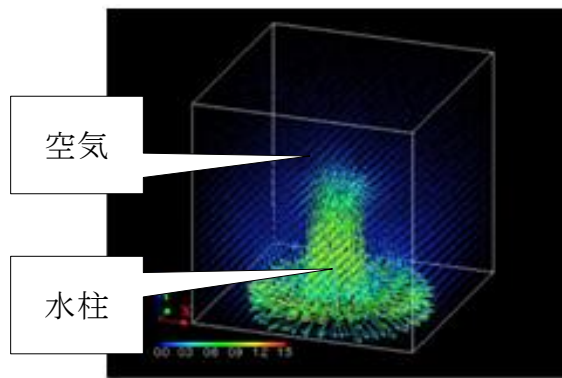


図 2-2-2 水柱・空気の運動

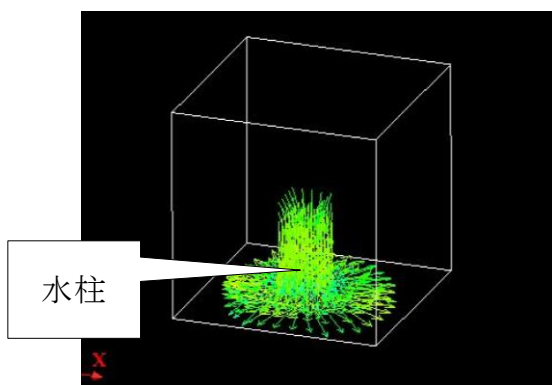


図 2-1-2 水柱の運動

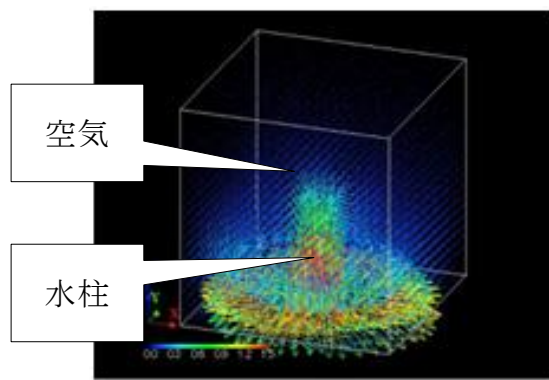


図 2-2-3 水柱・空気の運動

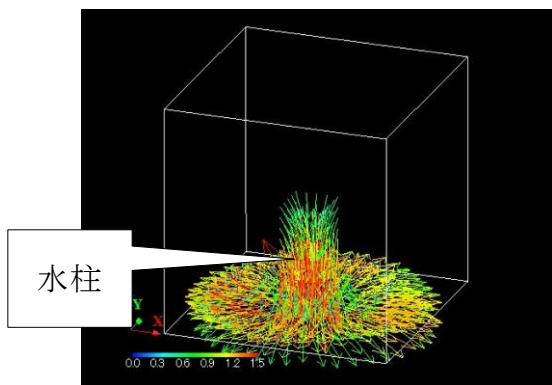


図 2-1-3 水柱の運動

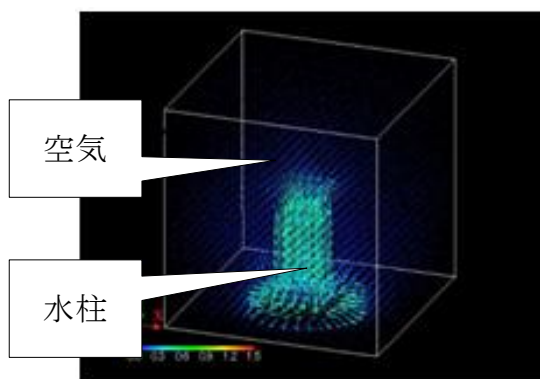


図 2-2-1 水柱・空気の運動

### 3. 4. 2 モデル 2

モデル 2 を図 3 に示す。気・液・固の共存場における 3 次元流れを解析するため、水面の上に土砂の四角柱状体があるモデルを設定した。土砂の自由落下に伴い、土砂、水及び周辺の空気の運動を同時に解析できるのかを確認する。

計算結果は時系列の順番に図 3-1~5 に表す。

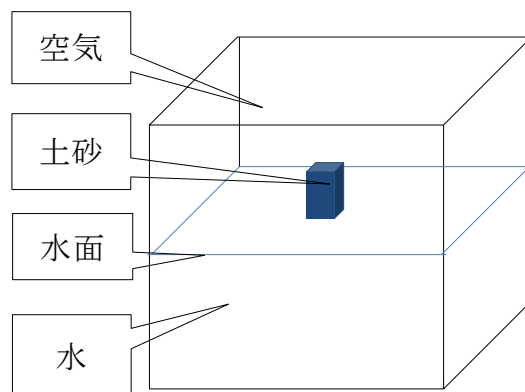


図 3 モデル 2

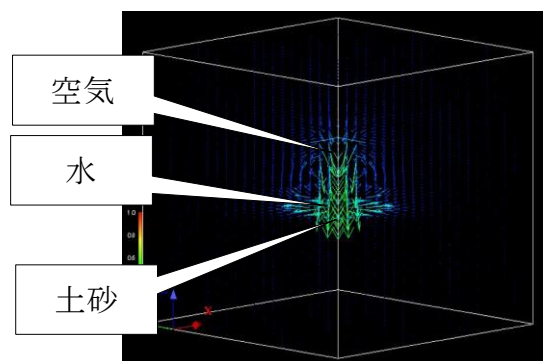


図 3-1 水柱・空気の運動

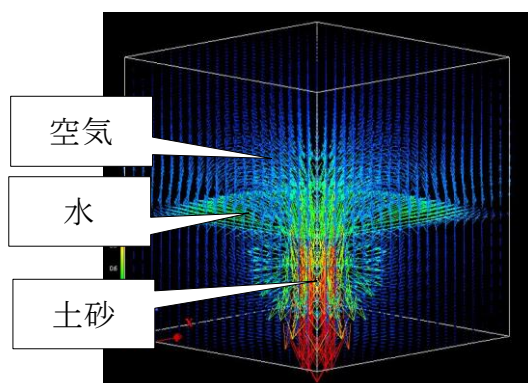


図 3-2 水柱・空気の運動

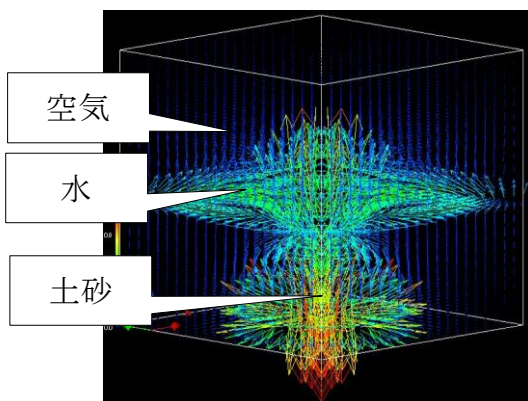


図 3-3 水柱・空気の運動

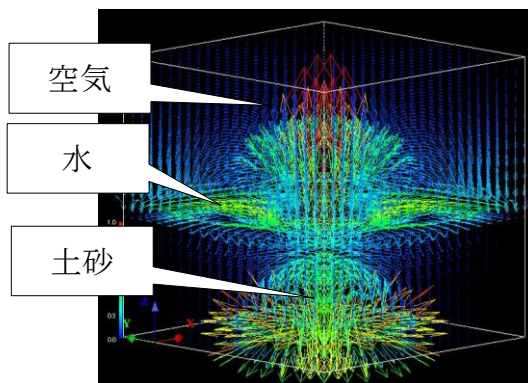


図 3-4 水柱・空気の運動

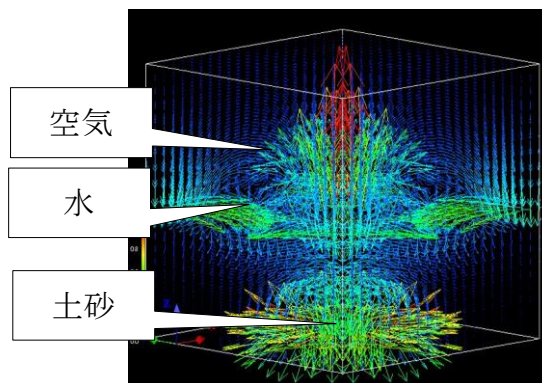


図 3-5 水柱・空気の運動

図 3-1 は土砂が落下し始め水に突入し、周辺の空気も連行され動き始めた様子を表す。図 3-2 では土砂の沈下に伴い、表面の水が周囲へ広がって行き、水面に凹部が現れ、下部の水は斜め下へ流れていくことが判った。図 3-3 では、土砂の沈下に従い、土砂の上部に水の収束が現れ始めるとともに、水は上層の空気域に跳ね返っている。図 3-4 は、土砂は水域の底面に到達した後、周辺へ広がりながら堆積することが判った。図 3-5 は土砂の上部で水がほぼ収束し、土砂は周辺へ広がりながら堆積することを表す。

解析結果により、空気・水・土砂の 3 相の共存場における流れの状態を解析できることが判る。

#### 4. おわりに

本解析手法では、3 相共存場における 3 次元流れに関する解析を概ねできることが判った、今後、境界条件の設定に工夫を行い、応用への展開を試みたい。

#### 参考文献

- 1) 矢部孝・内海隆行・尾形陽一 (2005) : CIP 法、森北出版株式会社、
- 2) 梶島岳夫 (2007) : 乱流の数値シミュレーション、養賢堂、
- 3) 高橋亮一 (1993) : 応用数値解析、朝倉書店、
- 4) 福原禄夫ら (2022) : 土木学会全国大会第 77 回学術講演会 II-196