

大規模土砂流動シミュレーションのための 3次元並列型数値移動床

3D-NUMERICAL MOVABLE BED IN PARALLEL COMPUTATION FOR REAL SCALE SIMULATION OF SEDIMENT FLOW

後藤仁志¹・五十里洋行²・原田英治³・酒井哲郎⁴

Hitoshi GOTOH, Hiroyuki IKARI, Eiji HARADA and Tetsuo SAKAI

¹ 正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科都市環境工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

² 学生会員 工修 京都大学大学院博士後期課程 都市環境工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

³ 正会員 工博 豊田工業高等専門学校講師 環境都市工学科 (〒 471-8525 愛知県豊田市栄生町 2-1)

⁴ フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科都市環境工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

In the computational mechanics of sediment transport, which approaches to movable-bed phenomena from the viewpoint of a computational dynamics, the numerical movable bed, or the numerical model of granular material, plays an significant role. A numerical movable bed is the tool which is based on the distinct element method analyzing the interparticle collision directly. Although the conventional numerical movable bed has been applied to a comparatively small domain, the application of numerical movable bed to the practical problems of movable-bed phenomena requires the handling of complicated boundary condition and resultant extreme increases of number of the calculation particles. Therefore the parallel computation by the three dimensional numerical movable bed is developed in this study, to enable the calculation with the 1,000,000 numbers of the particles. The performance of numerical movable bed is clarified, in a scale of practical problems, through the velocity of sediment in the fill and overflow processes of sediment control dam.

Key Words: numerical movable bed, parallel computation, interparticle collision, computational mechanics

1. はじめに

移動床問題の解析では、個々の砂粒子の相互作用を伴う運動を如何に取り扱うかが鍵となる。特に、計算力学的な視点から移動床問題にアプローチする数値流砂水理学においては、粒状体型の移動床の数値モデルである数値移動床が中心的な役割を演じる。著者ら^{1,2)}はこのような認識から、分級現象等の移動床特有の現象に個別要素法に基づく数値移動床を適用してきた。これまでのように現象の力学的な機構のみに焦点を当てるなら、比較的単純な境界条件の下に小領域に注目するだけでも充分なことが多く、計算粒子数も数万程度で事足りていた。しかし、実現象の直接的なシミュレーションを実行する場合には、粒子数の制約が大きな障害となるのは明らかである。

そこで注目すべきは、近年発展の目覚ましい並列計算の技術である。数値移動床のモデルの根幹部分を形成する個別要素法³⁾の並列化の試みは、粒状体を取り扱う各種の力学の分野で活発に展開されており、水工学の分野でも牛島・瀬津⁴⁾による先駆的な解析を端緒として、並列化の動きが活発化しつつある。本研究では、従来の著者らの数値移動床⁵⁾を並列化して、実スケールの土砂流動過程への適用を視野に入れた 100 万超の粒子から成る土砂流のシミュレーションを実施する。

実スケールの問題においても、現象の支配機構を明らかにすることはやはり重要である。土砂流の流動特性の根幹的情報の一つは移動速度分布であるが、水理実験におけるビデオ画像の解析からは、流路壁近傍の土砂移動速度のみについての情報が得られるに過ぎない。画像解析では把握できない流路中

中央付近の移動速度分布など、任意の断面における土砂流動の特性を推定する数値実験ツールとしての数値移動床の意義は、実スケールの現象においても十分に大きい。

2. 数値移動床

個々の砂粒子の運動は、水流中の球の運動方程式に基づいて追跡される。本研究では100万超粒子の計算が主目的であり、計算負荷の低減のため流体運動との連成計算を行わないので、静水中の砂粒子運動を扱うこととなり、浮力のみを水流からの直接的な影響として考慮した運動方程式

$$\sigma A_3 d_{pi}^3 \frac{d\mathbf{u}_{pi}}{dt} = -\frac{1}{2} \rho A_2 d_{pi}^2 C_D |\mathbf{u}_{pi}| \mathbf{u}_{pi} + A_3 d_{pi}^3 (\sigma - \rho) \mathbf{g} + \mathbf{F}_{pINTi} \quad (1)$$

$$I_{pi} \frac{d\boldsymbol{\omega}_{pi}}{dt} = -\mathbf{T}_{pINTi} \quad (2)$$

を用いる。ここに、 σ : 砂の密度、 ρ : 水の密度、 A_2 、 A_3 : 砂の2次元・3次元形状係数、 d_p : 砂粒径、 $\mathbf{u}_p$: 砂粒子速度、 C_D : 抗力係数、 $\mathbf{g}$: 重力加速度、 $\mathbf{F}_{pINT}$: 砂粒子間相互作用力、 I_p : 砂粒子の慣性モーメント、 $\boldsymbol{\omega}_p$: 砂粒子の角速度、 $\mathbf{T}_{pINT}$: 砂粒子間のトルクである。

砂粒子間相互作用力は、接触状態にある砂粒子間に接平面内とその法線方向に定義したローカル座標系 (ξ, η, ζ) においてVoigt系(バネ-ダッシュポット系)を導入し、 (F_ξ, F_η, F_ζ) として算定される⁶⁾。例えば、 F_ξ は、

$$\left. \begin{aligned} F_\xi(t) &= e_n(t) + d_n(t) \\ e_n(t) &= e_n(t - \Delta t) + k_n \cdot \Delta \xi_{ij} \\ d_n(t) &= c_n \cdot \frac{\Delta \xi_{ij}}{\Delta t} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

となる。ここに、 e_n : バネによる抗力、 d_n : ダッシュポットによる抗力、 k_n : バネ定数、 c_n : 粘性定数、 $\Delta \xi_{ij}$: 粒子間の ξ 方向の変位増分、 Δt : 計算時間間隔である。ローカル座標系において算定された相互作用力は、

$$\begin{bmatrix} F_{pINTxi} \\ F_{pINTyi} \\ F_{pINTzi} \end{bmatrix} = - \sum_j [T_{GL}]_{ij}^{-1} \begin{bmatrix} F_\xi \\ F_\eta \\ F_\zeta \end{bmatrix}_{ij} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} T_{pINTxi} \\ T_{pINTyi} \\ T_{pINTzi} \end{bmatrix} = \frac{d_i}{2} \sum_j [T_{GL}]_{ij}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ F_\zeta \\ -F_\eta \end{bmatrix}_{ij} \quad (5)$$

によって、グローバル座標系 (x, y, z) に変換される。この際の座標変換行列は一般に、

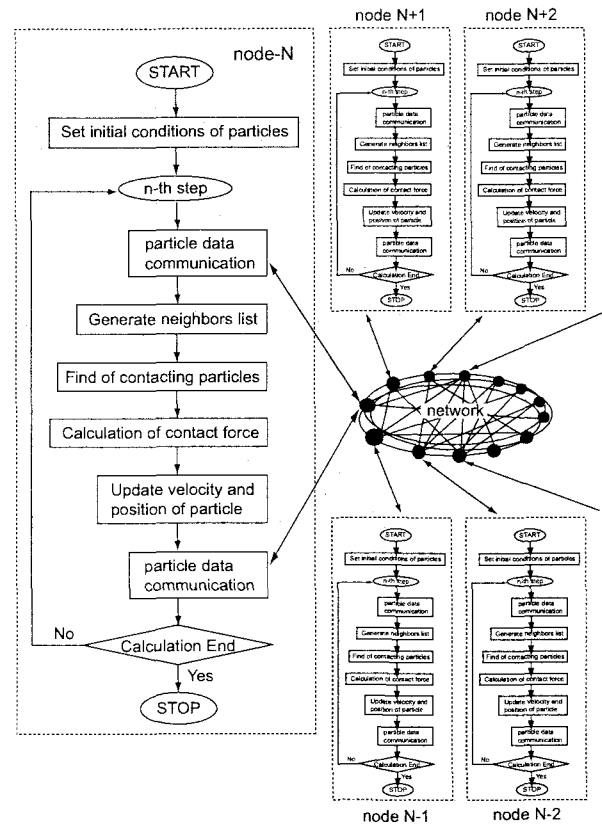


図-1 計算手順

$$[T_{GL}]_{ij} = \begin{bmatrix} l_i & m_i & n_i \\ \frac{-m_i}{\sqrt{l_i^2 + m_i^2}} & \frac{l_i}{\sqrt{l_i^2 + m_i^2}} & 0 \\ \frac{-l_i n_i}{\sqrt{l_i^2 + m_i^2}} & \frac{-m_i n_i}{\sqrt{l_i^2 + m_i^2}} & \sqrt{l_i^2 + m_i^2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$l_i = -\frac{x_i - x_j}{L_{ij}} ; m_i = -\frac{y_i - y_j}{L_{ij}} ; n_i = -\frac{z_i - z_j}{L_{ij}} \quad (7)$$

$$L_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (8)$$

と書ける。ただし、式(6)の変換が定義できない $x_i = x_j$ and $y_i = y_j$ のときには、

$$[T_{GL}]_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

を用いた変換を行う⁶⁾。

3. 領域分割と並列計算の概要

(1) 計算手順

本研究では、領域分割法による並列計算を実施する。計算領域をサブブロック(図中の control domain)に分割し、各々のブロック内に存在する粒子に関して、個別のプロセッサが追跡計算を分担する。図-1に計算のフローを示す。各プロセッサが近

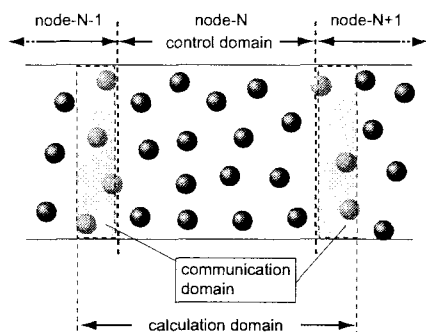


図-2 計算領域界面

隣のサブブロックを担当するプロセッサと通信を行う回数は、1タイムステップ当たり2回である。1回目の通信では、各サブブロックの境界付近に存在する粒子における接触力の計算に必要な近傍粒子の情報を近隣サブブロック間で相互に伝達する。2回目の通信では、粒子間接触力の計算とそれに伴う粒子移動の計算の結果、帰属サブブロックの外部に移動した粒子に関して、プロセッサ相互に交信し、各プロセッサの担当粒子リストを更新する。サブブロックにおける相互通信に用いるバッファ領域（図中の communication domain）の設定を図-2に模式的に示した。この種の境界処理は、周期境界（無限大体系）を扱う際に用いられるのと同様の考え方⁷⁾であり、領域分割法による並列計算でも一般的に用いられる方法である（例えば、牛島・瀬津⁴⁾）。先述したように、バッファ領域はサブブロックの境界付近に存在する粒子の接触判定のために必要であるから、バッファ領域の幅は、境界線上に存在する粒子が接触する可能性がある粒子が存在する距離程度でよい。ここでは均一粒径の計算を行うから、バッファ領域の幅を砂粒径と同一に設定した。

(2) 計算プロセスの検討

土柱崩壊現象を例に、本研究で用いたコードの計算プロセスについて検討した例を図-3に示す。粒子数は、固定壁粒子約36,000個、土砂粒子約44,000個で、粒子径は、固定壁粒子が7.0 mm、土砂粒子が5.0 mmである。固定壁粒子は2.0 mm オーバーラップさせて配置し、壁面の凹凸を緩和している。計算領域を境界を固定した4つのサブブロックにほぼ均等に分割した。図中の上段には $t=1.9\sim2.0$ s における各プロセッサ間での計算時間の内訳と同時刻 ($t=2.0$ s) の瞬間像を示した。また、各プロセッサの担当領域を把握し易くするため、隣接するプロセッサ間で担当粒子に濃淡を付けた。プロセッサ1とプロセッサ4において計算時間の約3/4が待機時間で占められていることがわかる。この2つのプロセッサの担当する粒子数は、同時刻に最大粒子数を担当するプロセッサ2の約1/4であり、担当粒子数の差が計算

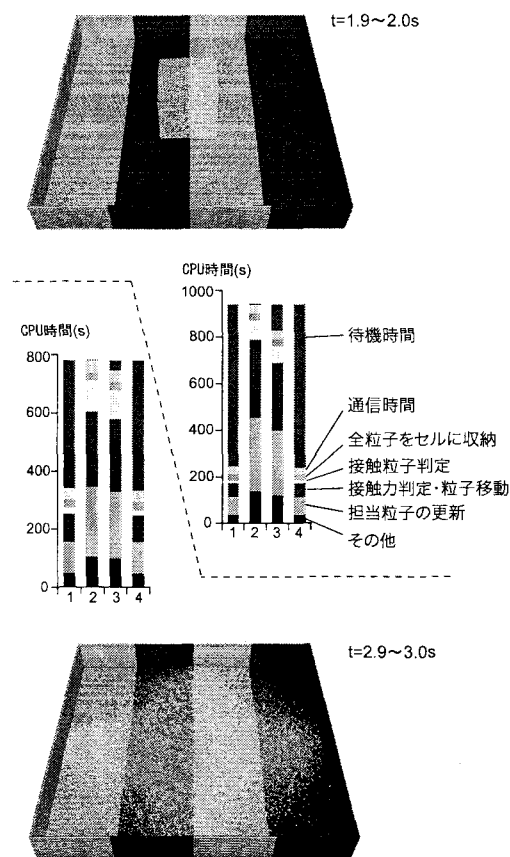


図-3 計算時間内訳

時間に影響していることがわかる。下段には土柱が完全に崩壊した時点 ($t=3.0$ s) の瞬間像とその時間帯 ($t=2.9\sim3.0$ s) における計算時間の内訳を示した。上段と比べて粒子数の偏りは緩和されたが、それでもなおプロセッサ1と4における待機時間は総計算時間の半分強を占めており、やはり担当粒子数の差が計算時間に影響を及ぼしている。ただし、上段と比較して各プロセッサの担当粒子数が平滑化されたことで、総計算時間は短縮されている。

このように、領域分割法の弱点は、計算領域内において粒子の分布に偏りが生じ、それに伴って各プロセッサの担当粒子数に不均衡が生じたときに、計算効率に顕著な影響が生じる点にある。各プロセッサの担当粒子数を平滑化するには、粒子番号を基準にプロセッサの担当を割り振る粒子分割法が有効ではあるが、プロセッサ間の通信量が格段に増加し、各プロセッサ通信量を抑制するには各プロセッサごとに全ての粒子の情報を記録することとなり、メモリへの負担も増大する。とりわけ、個別要素法のように時々刻々と計算点が移動する計算手法においては、各プロセッサが全ての粒子の情報を保持しなければならない、メモリへの負担は特に大きい。これに対して、領域分割法では、通信量、メモリ負担ともに小さく、同一のコードでCPU数を増加させれば、

原理的には無制限に計算粒子数を増加させることができる。本研究の主目的が汎用的な大規模化にあることから、計算効率面の問題は棚上げして、領域分割法を採用する。

4. 砂防ダムの堆積過程のシミュレーション

(1) 計算領域と計算条件

大規模計算の例として、砂防ダムの堆積過程を対象とした計算を行う。計算領域を図-4に示す。計算領域は、台形型の一様断面を有する流路で、流路途中に砂防ダムを模した鉛直壁が設置されている。初期状態では、土砂粒子は流路全面を塞ぐ鉛直壁によって堰き止められて配置されており、その状態で重力を作用させて接触計算（パッキング）を行い、安定した堆積状態が得られた時点で鉛直壁を取り除いて流動を開始させる。砂防ダムの上流側近傍で側方の斜面から豪雨によって大規模な崩壊が生じ、高含水率の土砂が大量に路床に供給された状況を想定した条件設定となっている。なお、流路の上・下流境界は周期境界としているので、下流側から流出した土砂粒子は、再び上流側から流入する。

粒子径は、土砂粒子が 5.0 cm、固定壁粒子が 8.0 cm で、固定壁粒子は 3.0 cm オーバーラップさせて配置し、壁面の凹凸を緩和している。粒子数は約 1,300,000 (土砂粒子約 1,160,000、固定壁粒子約 128,000、移動壁粒子約 12,000) である。計算に用いたのは 48 台の Pentium4 (clock 3.0GHz / memory 2GB) を 1000Base-T のネットワークで接続した PC クラスタで、コードの開発には、Intel Fortran Compiler for Linux を用いた。なお、今回の計算例では、CPU 数を 16 に設定し、実時間で 20.0 秒の現象の計算に 190 時間を要した。

(2) 堆積過程の追跡結果

計算された砂防ダム堆積過程の瞬間像を図-5に示す。土砂流は $t=5.0$ s 付近で砂防ダムに到達し、中央部の水通しから越流すると同時に袖部でも流動深を増加させて越流を開始する。砂防ダムでは計画水位に応じた幅・高さの水通しが設けられるので、袖部を越流することは希である。しかし、今回の計算例は、計画規模を大幅に上回る生産土砂量を想定しているので、流動深は増加を続け、袖部も含む全面越流 ($t=7.0$ s) へと至る。この計算例では、投入した土砂の総量が、砂防ダムに貯砂可能なボリュームを上回っているため、満砂となった後は、持続的な越流過程が出現する ($t=13.0$ - 17.0 s の瞬間像参照)。砂防ダムが満砂に至るには、複数の出水を繰り返して経験するのが通常であり、その意味でも、今回の計算は設計規模を大幅に上回るカタストロフィックな状

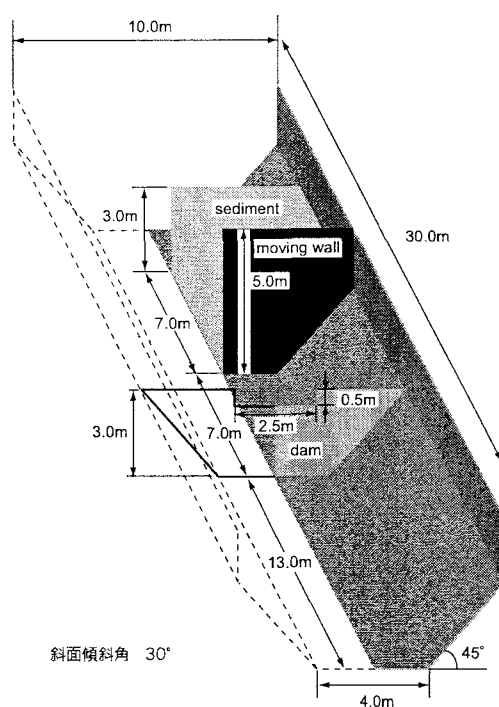


図-4 計算領域

況を対象としていると言えるだろう。

現象の進行過程で生じる土砂流の流動特性の変化の一端を見るために、砂防ダムから 3.5 m 上流の地点で土砂粒子を Euler 観測し、流路中央断面の土砂流の速度分布の時間的な推移を示したのが、図-6 である。時刻 $t=4.5$ s 付近に土砂流フロントが観測点を通り、時刻の経過とともに観測点での流動深が増加し、流路床から上方にほぼ直線的に急激に増加する速度分布が顕在化する。土砂流フロントが砂防ダムを越流し始める $t=7.0$ s には、砂防ダムの堰き止めによる急激な減速効果がダム上流側に伝播し、観測断面でも流動深の増大と速度の減少が生じ、速度分布の勾配が減少する。この傾向は持続し、時刻 $t=9.5$ s に至ると全層にわたって低速の流動状態へと移行し、2 秒程度この状態が持続する。瞬間像を見ると、この時間帯は、砂防ダムを越流したフロント部が、周期境界条件によって上流側へと返送されて再び観測断面付近に達するまでの過程に相当し、その後越流土砂塊が観測断面に達すると表面付近に高速の土砂流が誘起され、そのせん断効果によって一旦は停止に至りつつあった土砂層が流動を開始する ($t=12.5$ s)。その結果、下に凸の高速流動域が上に凸の低速流動域（その下部に堆積域が存在）と接続した変曲点型の速度分布へと遷移する。フロント部が通過すると、表層の流動域の速度が徐々に低下し、表層の高速流動層が徐々に不鮮明化するが、変曲点型の速度分布の特性は表層近傍には持続的に見られる ($t=13.5$ - 18.5 s)。このように、流動・堆積過程は極めて変化の激しい非定常過程であるが、短時間

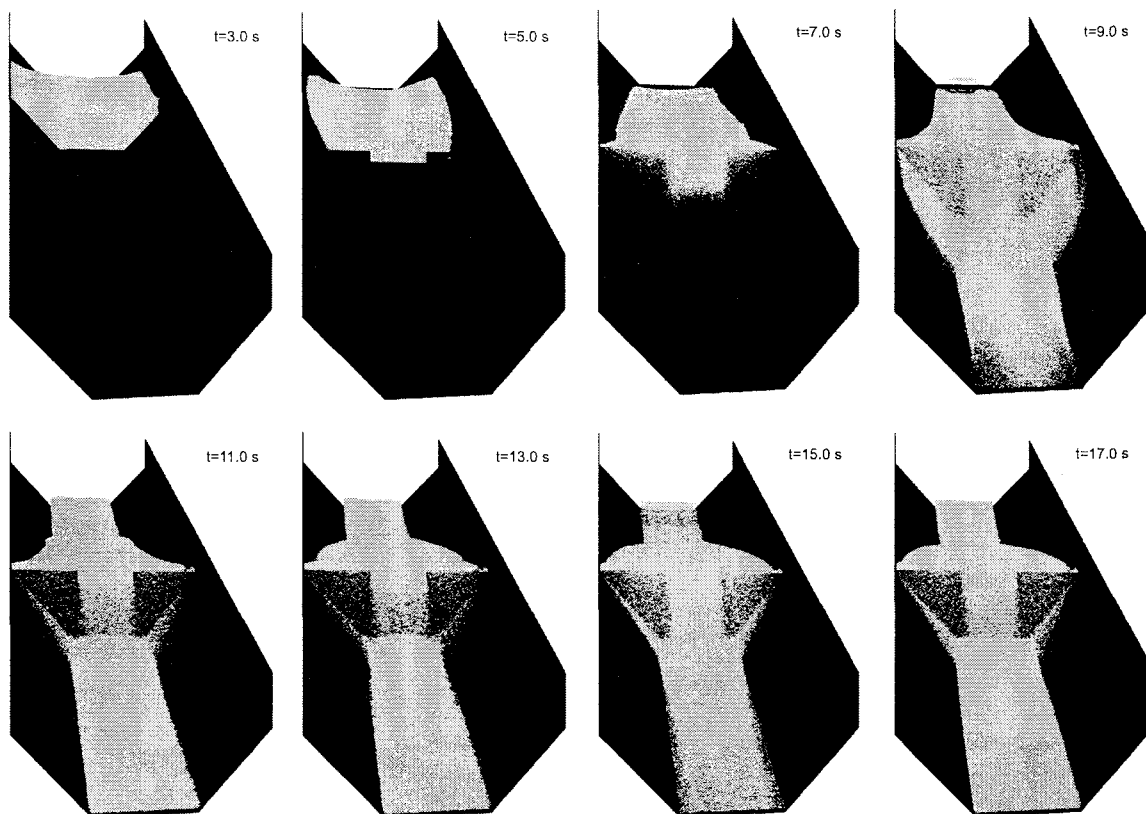


図-5 砂防ダム堆積過程の瞬間像

の特性に注目すると、定常土砂流動で指摘されている特性が垣間見られる。図-7 は、固定床上の流動と移動床上の流動に近い条件が成立していると判断できる瞬間（砂防ダムから 3.5 m 上流の地点で、 $t=5.5$ s と $t=13.8$ s）の移動速度を抽出し、プロットしたものの（図左下部）を川端ら⁸⁾の水中のガラスビーズの流動実験による流動速度分布（図左上部）と比較したものである。図中には、シミュレーションによる $t=5.5$, 13.8 s の観測断面付近の流動状態を併示している。川端らの実験では、固定床上の速度分布が直線的な特性を示すのに対して、移動床上では、下に凸の速度分布が出現することが指摘されている。今回のシミュレーションでも、短時間に疑似的な固定床上および移動床上での流動が出現する瞬間を抽出してプロットすると、実験で指摘されたのと同様の直線的な分布と下に凸の分布が見られた。なお、今回のシミュレーションでは非定常効果が加わることから、既往の定常的流動過程の実験データとの直接的な定量的比較は行っていない。

5. おわりに

本研究では、数値流砂水理学の根幹を成すツールとして、従来から著者らが開発を続けてきた数値移動床を並列計算に対応するよう拡張して、100 万粒子超の大規模計算を実施した。砂防ダムの堆積・越

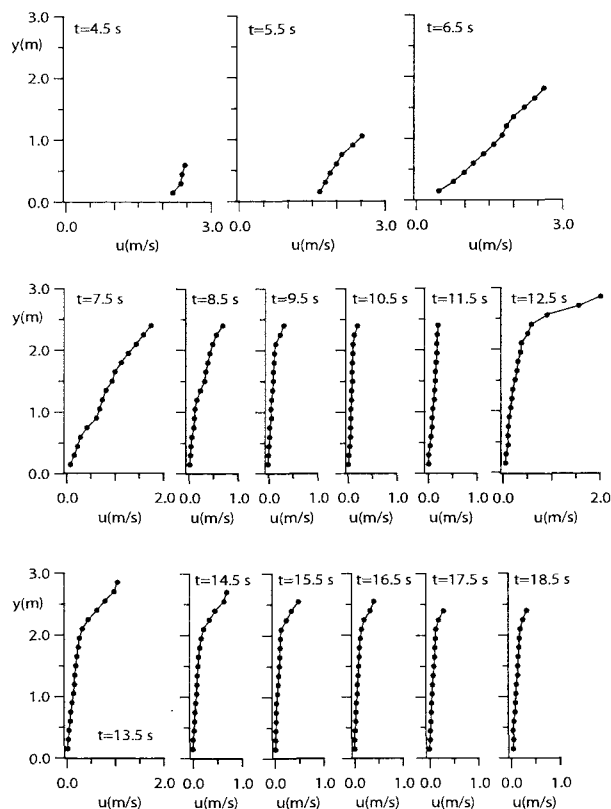


図-6 土砂流速の鉛直分布

流過程を対象に実施したシミュレーションでは、土砂流動速度分布の時間的变化について、計算力学的に検討を行い、実スケールの計算での数値移動床の

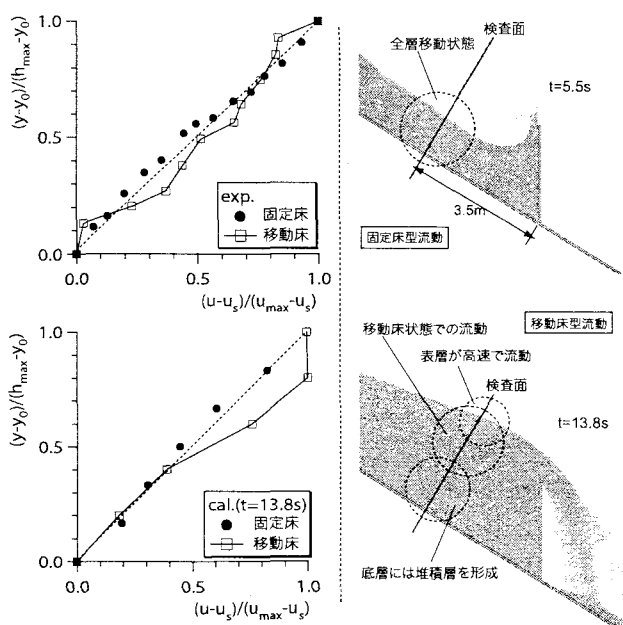


図-7 固定床型と移動床型の速度分布

可能性の一端を示した。

数値移動床からは膨大な計算データが得られるので、今回示した流路中央断面の特定の観測点での Euler 観測結果は、計算データ群の限られた一面を見たに過ぎないと言えるだろう。数値移動床の利点だが、今回の例のように実験では直接とらえることのできない流動域内部の特性を予測することに発揮されるのは言うまでもないが、さらに踏み込んで、流動場の空間構造を可視化するツールとしても期待が大きい。図-8 は、砂防ダム上流部の複数縦断面での粒子プロットに瞬間移動速度ベクトルを重ねて描いたものである。膨大な数値データ群を基に適切な scientific visualization を組み合わせれば、複雑な場の構造を把握するための有用な情報が、効果的に抽出できるはずである。

今後の課題をまとめて結びとする。並列計算に関しては、サブブロック境界を状況に応じて移動させ、極端な担当粒子数の不均衡を是正するような可変型の領域分割法の導入が必要である。特に、実際の沢を対象にしたようなシミュレーションを実施する場合には、流路長が今回と比較して大幅に増加するので、この種の対応が計算時間に大きく影響すると考えられる。モデリングに関しては、液相の影響をどの程度詳細に反映させるかについて検討が必要である。これには、いわゆる固液混相流型の粒子法⁹⁾とのカップリングにより対応が可能であるが、粒子法による流体計算の並列化も進める必要がある。また、先にも言及したように、膨大な数値データを把握し易い形式で表示する scientific visualization のための専用ツールが大規模計算では重要な鍵を握る。このことは CFD の研究で従来から指摘されていること

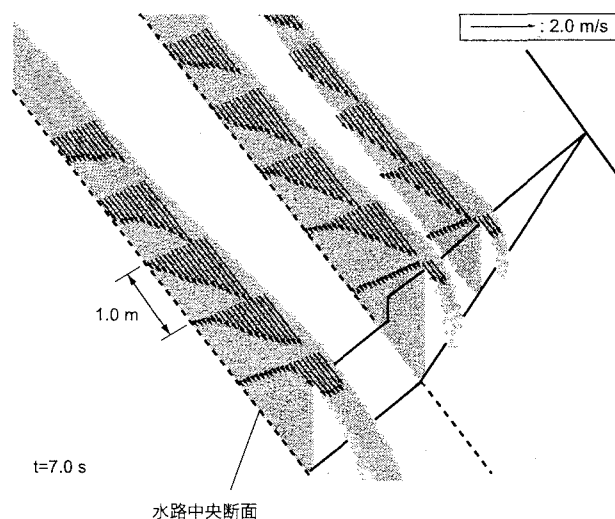


図-8 複数断面の流動速度分布

ではあるが、粒子系のシミュレーションに関しては既製のグラフィックツールが必ずしも使い易い状況ではなく、粒子法や個別要素法に適した形式のグラフィックツールの開発も焦眉である。

参考文献

- 1) 後藤仁志・原田英治・酒井哲郎：数値移動床による混合粒径流砂の流送過程のシミュレーション，水工学論文集，第 44 巻，pp.665-670，2000.
- 2) 後藤仁志・原田英治・酒井哲郎：混合粒径シートフロー漂砂の鉛直分級過程，土木学会論文集，第 691 号 /II-57，pp.133-142，2001.
- 3) Cundall, P. A. and Strack, O. D.: A distinct numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, Vol. 29, No. 1, pp. 47-65, 1979.
- 4) 牛島 省・瀬津家久：不均一粒子流の混合・分級現象に関する 3 次元並列数値解析法の提案，水工学論文集，第 45 巻，2001，pp.715-720.
- 5) 後藤仁志・原田英治・酒井哲郎：三次元個別要素法による数値移動床の一般化，水工学論文集，第 46 巻，pp.613-618，2002.
- 6) 後藤仁志：数値流砂水理学，森北出版，2004.
- 7) 後藤仁志・辻本哲郎・中川博次：掃流粒子群の流動過程に関する数値シミュレーション，土木学会論文集，No.485/II-26，pp.75-83，1994.
- 8) 川端淳一・迫田浩司・枡永善文・吉川秀夫：粒状体の流動機構について，第 29 回水理講演会論文集，pp.519-524，1985.
- 9) 後藤仁志・林 稔・酒井哲郎：固液二相流型粒子法による大規模土砂崩壊に伴う水面波の発生過程の数値解析，土木学会論文集，第 719 号 /II-61，pp.31-45，2002.

(2004. 9. 30 受付)