

侵食モデルを導入した MPS 法による土石流の数値シミュレーション

Numerical Simulation for Debris Flows using MPS Method with Erosion Model

二木重博 Shigehiro FUTATSUGI ((株)エイト日本技術開発)
 珠玖隆行 Takayuki SHUKU (岡山大学大学院環境生命科学研究科)
 鈴木茂之 Shigeyuki SUZUKI (岡山大学大学院自然科学研究科)

本研究では、粒子法の一つである Moving Particle Semi-implicit (MPS) 法を用いて、土石流の流下挙動をシミュレートしている。定式化の際に Navier-Stokes 方程式に簡易侵食モデルを導入し、土石流の流下に伴う地山斜面の侵食をモデル化した。MPS 法による土石流シミュレーションの適用性について検討するため、モデル斜面を対象とした流下シミュレーションを実施した。シミュレーションにおいて、地山の侵食を考慮する場合としない場合の 2 ケースの計算を実施し、侵食の有無が土石流の流下挙動に及ぼす影響を調べた。さらに、その結果に基づいて、土石流による被害を低減するための対策について考察した。

キーワード：土石流，MPS 法，侵食

(IGC : E13)

1. はじめに

土石流のようなマスマーブメントを数値シミュレーションによって再現する場合、地盤材料の強い非線形性や流体のように振舞う挙動にも適用可能な手法を選定する必要がある。代表的な数値シミュレーション手法として、Finite Element Method (FEM, 有限要素法) が挙げられるが、有限変形理論を用いたとしても解析対象となる土砂が分離するような現象や、流体のように挙動する土石流を表現することは難しい。

地盤工学における大変形挙動を評価する数値シミュレーション手法として、Distinct/Discrete Element Method (DEM, 個別要素法)¹⁾や粒子法^{2),3)}を挙げることができる。とくに粒子法は、FEM と同じ微分方程式を離散化する方法であるにも関わらず、流れのような大変形挙動を再現することができ、また DEM のようなパラメータの設定の難しさもないことから、近年、理学や工学の分野で利用されている方法である。

代表的な粒子法として、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)法²⁾と Moving Particle Semi-implicit (MPS)法³⁾が挙げられる。両手法ともにグリッドレスのラグランジュ法で、大変形挙動を再現できることに特長があることから、地盤工学のいくつかの問題に適用されている。例えば、後藤ら⁴⁻¹⁴⁾は MPS 法を用いて、河川堤防の越流侵食や河川の洗掘のシミュレーションを実施している。また、沖村らは¹⁵⁾MPS 法を用いて、斜面崩壊土砂の到達距離に関して議論し、吉田ら¹⁶⁾は、斜面の崩壊現象を MPS-DEM 法により再現し、初期条件の違いが結果に及ぼす影響を定量的に評価している。

本研究では、粒子法の中でも MPS 法に着目し、MPS 法を土石流の数値シミュレーションに適用した結果を

報告する。具体的には、MPS 法によって流体の挙動を表現する Navier-Stokes 方程式を離散化するとともに、簡易な侵食モデルを導入し、土石流による地山の侵食を考慮する。地山の侵食の有無が計算結果（流出土砂量）に及ぼす影響について検討し、今後有効と考えられる土石流対策について議論する。

本論文は本章を含む計 4 章から構成されるが、具体的な構成は以下の通りである。第 2 章では、MPS 法の概要を示すとともに、MPS 法による Navier-Stokes 方程式の離散化や、導入した簡易侵食モデルについて説明する。第 3 章では、第 2 章で説明した MPS 法を用いた土石流の数値実験を示す。数値実験の中で、侵食モデルの有無が崩壊挙動に及ぼす影響について議論するとともに、解析結果に基づいて、有効と考えられる土石流対策について考察する。第 4 章では本研究のまとめと今後の課題について述べる。

2. Moving Particle Semi-implicit (MPS) 法^{3), 17)}

2.1 流体の支配方程式

本研究では、土石流の挙動を Navier-Stokes 方程式を解くことにより再現する。さらに、より実際に近い土石流の挙動を表現することを目的とし、Navier-Stokes 方程式と侵食モデルを同時に解く解析手法¹⁸⁾を用いる。ここではその概要について説明する。

非圧縮性流体の挙動は、以下の質量保存則および Navier-Stokes 方程式を解くことによりシミュレートすることができる。

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\nabla^2\mathbf{u} + \mathbf{g} \quad (2)$$

ここに、 ρ は流体の密度、 t は時間、 P は圧力、 \mathbf{u} は速度ベクトル、 ν は粘性、 \mathbf{g} は重力加速度を表す。MPS法はラグランジュ法であるため、式(2)に移流項は含まれない。

MPS法では、勾配や発散、ラプラシアンなどのベクトル演算子が、粒子間相互作用モデルと呼ばれるモデルで近似される³⁾。例えば、式(2)の圧力の勾配および速度のラプラシアンは、粒子間相互作用モデルを用いて、次式で近似される。

$$\langle \nabla P \rangle_i = \frac{d}{n_i} \sum_{j \neq i} \left[\frac{P_j - \hat{P}_i}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \right] \quad (3)$$

$$\langle \nabla^2 \mathbf{u} \rangle_i = \frac{2d}{\eta_L n_i} \sum_{j \neq i} [(\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i) w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)] \quad (4)$$

ここに、下付きの i や j は粒子番号を表す。 d は次元 (本研究では 2 次元)、 \hat{P}_i は後述する影響半径内の最小の圧力、 \mathbf{r} は粒子の中心座標ベクトル、 w は重み関数、 n_i は粒子数密度、 η_L はラプラシアンモデルの調整パラメータであり、それぞれ次式で与えられる。

$$w(r) = \begin{cases} r_e/r - 1 & (0 \leq r < r_e) \\ 0 & (r_e \leq r) \end{cases} \quad (5)$$

$$n_i = \sum_{j \neq i} w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (6)$$

$$\eta_L = \frac{\sum_{j \neq i} |\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2 w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)^2}{\sum_{j \neq i} w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)} \quad (7)$$

ここに、 r_e は影響半径であり、粒子半径の 2 倍～3 倍の値が推奨されている¹⁷⁾。

2.2 侵食モデル^{18), 19)}

土石流の発生時には、源頭部の崩壊土砂が流下するだけでなく、流下の際に地山を侵食しながら、周辺の土砂を巻き込みながら流下していく。この侵食のモデル化が、土石流の数値シミュレーションには必要不可欠である。そこで本研究では、Navier-Stokes 方程式と簡易侵食モデルを同時に解くことにより、土石流による地山の侵食のシミュレートを試みた。

本研究では、次式により侵食が表現できると仮定した。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{E}{1-\lambda} \quad (8)$$

ここに、 z は地山の高さ、 t は時間、 λ は材料の間隙率を表す。また、 E は侵食速度であり、次式で表されると仮定した。

$$E = \begin{cases} \alpha(\tau - \tau_c)^\gamma & \tau > \tau_c \\ 0 & \tau \leq \tau_c \end{cases} \quad (9)$$

ここに、 α と γ は侵食速度を規定するパラメータ、 τ_c は許容せん断力を表す。これら 3 つのパラメータは、地盤材料の室内試験 (例えば、藤澤ほか²⁰⁾) により決定することができる。また、 τ はせん断力であり、本研究では、以下のモデルを用いる。

$$\tau = K\Psi^m \quad (10)$$

ここに、 K は定数、 m はべき乗則のパラメータである。 Ψ はせん断速度であり、次式で表される。

$$\Psi = \frac{v_{rel}}{l} \quad (11)$$

ここに、 l は流体 (土石流) 粒子と境界 (地山) 粒子の間の距離、 v_{rel} は流体粒子と境界粒子の相対速度である。

侵食の数値モデルは式(8)-(11)で表されるが、簡潔にまとめると、Navier-Stokes 方程式と侵食モデルを MPS 法で解くことにより、地山と土石流の相対速度が計算され、その相対速度から計算されるせん断力が許容せん断力を上回ったときに、侵食が起こる。MPS 法における侵食は、侵食量が粒子の直径を上回ったときに地山粒子を流下させることで表現した。計算手順のフローチャートを図-1 に示す。

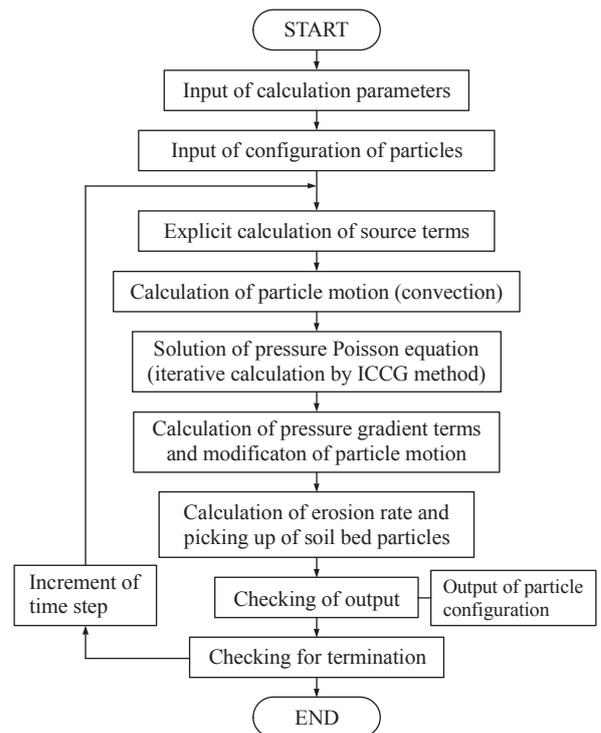


図-1 計算アルゴリズム¹⁸⁾

2.3 境界条件¹⁷⁾

MPS 法では、次式を満たす粒子は自由表面上に存在すると判定する。

$$\langle n \rangle_i < \beta n \quad (12)$$

ここに、 n は粒子数密度であり、 β は自由表面の判定パラメータであり、一般的な自由表面流れの解析においては、0.97 の値が用いられている。自由表面と判定された粒子では、圧力のポアソン方程式を解く際に、 $P^{k+1}=0$ として計算する。

MPS 法における壁境界は、図-2 に示すように、壁粒子を3層配置する。この3層の粒子は2種類に分けられ、表層1層が圧力計算に用いられる粒子、その下位の2層が圧力計算に使用しない粒子である。下位の2層の粒子は圧力計算には使用しないが、粒子数密度計算には必要な粒子となる。

着目すると、時間経過に伴って土砂が流下する様子を再現できているものの、流下速度はほぼ一定であり、50秒経過後も高さ10m、幅20mの斜面を流下しきっていない。実際の土石流は高速で斜面を流れるが本計算では、土石流の粘性係数を比較的大きめに設定していることから、通常よりも遅い流下速度となったと考えられる。

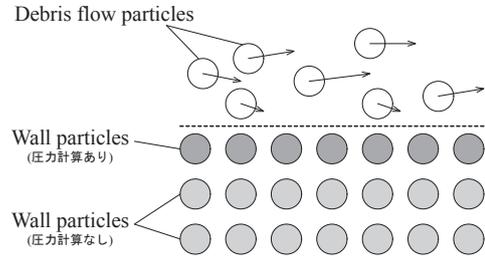


図-2 壁境界条件^{17),18)}

3. 数値実験

3.1 計算条件

本研究では、図-3 に示す単純な斜面モデルを対象に、土石流の数値シミュレーションを実施した。高さ10.0m、長さ20.0mの比較的急勾配の斜面を想定している。斜面上流側から一定の土砂を供給し、その土砂がどのような速度で流下するのか、どのような挙動を示すのかをシミュレートする。

計算に用いた粒子配置図を図-4 に示す。粒子の直径は0.5mとし、計算に用いた初期の全粒子数は1,017である。土石流を模擬した粒子を斜面上流から流している。

計算に用いたパラメータを表-1 にまとめる。本研究ではモデル斜面を対象としているため、材料に関するパラメータは実験から求めたものでなく、既往の研究(18, 19)を参考に、ある程度現実的な値として著者らによって設定されたものである。実際に土石流のシミュレーションを実施する場合には、これらのパラメータは土質試験や現位置試験から求めることが望ましい。なお、表中の粘性係数に関しては、土石流は水と土砂や倒木などの混合体であることを踏まえ、水よりも大きな値を設定した。影響半径については、越塚¹⁷⁾により示されている値を使用した。具体的に、粒子密度の計算には、粒子直径の2.1倍の値を用い、ラプラシアンモデルの計算は、粒子直径の4.0倍の値を用いた。1ステップあたりの解析時間増分は、計算が安定する値を試行錯誤的に求め、0.005 sec と設定した。

3.2 計算結果

図-5(a) は斜面の侵食を考慮しない場合の土石流の流下プロセスの計算結果を示している。なお、結果を分かりやすくするため、斜面の表層地盤のみ図示する。図に

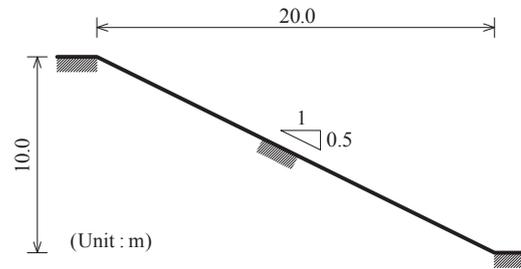


図-3 斜面モデル

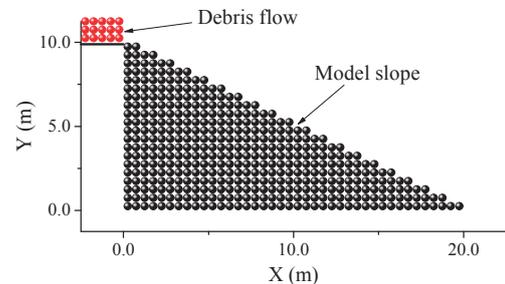
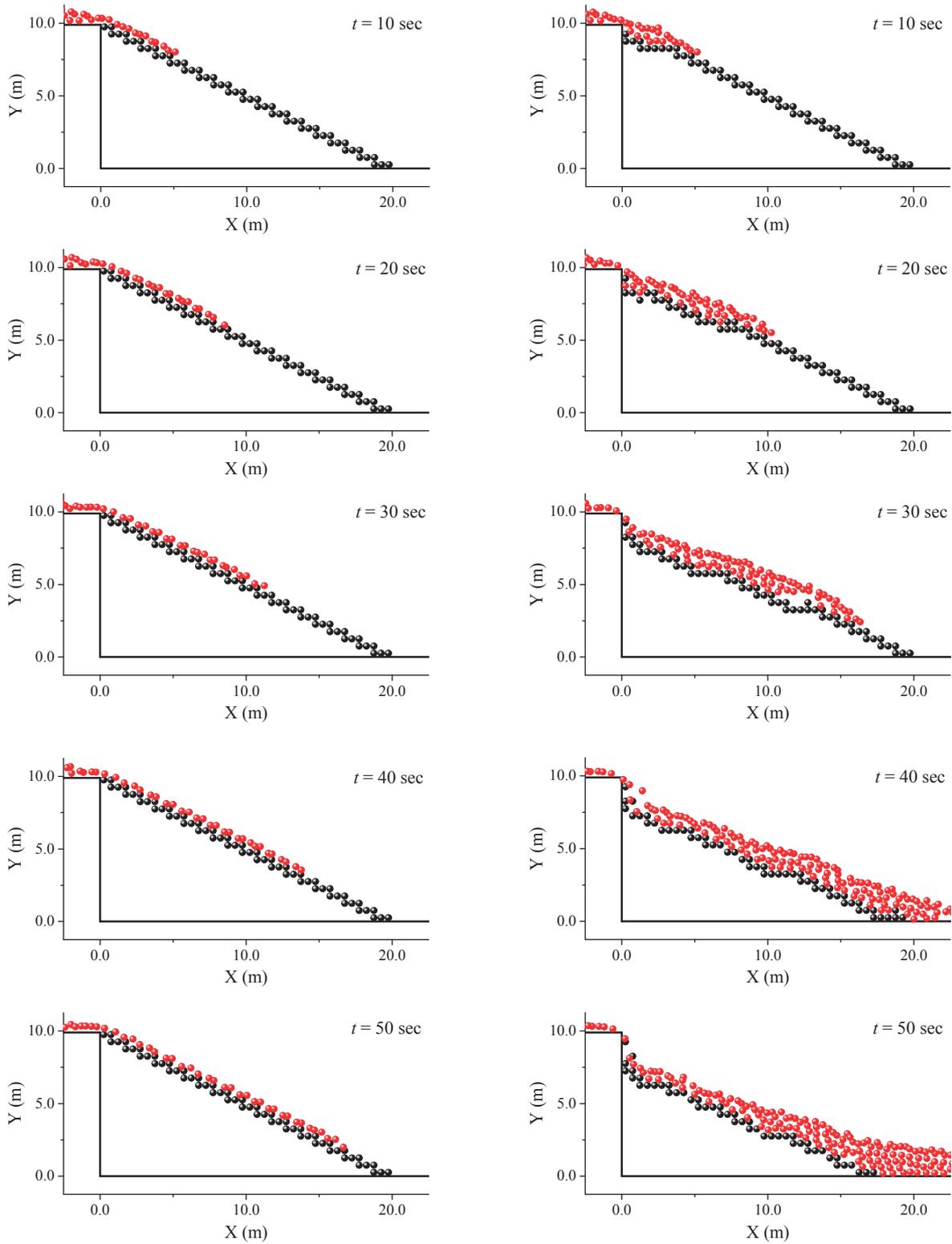


図-4 粒子配置図

表-1 計算に用いたパラメータ

| | | |
|-----------------------------------|--|-----------|
| Kinematic viscosity | ν (m ² /s) | 0.001 |
| Density of debris flow particles | ρ_w (kg/m ³) | 2,000 |
| Porosity of soil bed | λ | 0.395 |
| Parameter for erosion rate (1) | α (m/(s·Pa ^{3/2})) | 0.1 |
| Parameter for erosion rate (2) | γ | 1.0 |
| Threshold shear stress | τ_c (Pa) | 0.001 |
| Radiation of a particle | l_0 (m) | 0.5 |
| r_e for particle number density | r_{en} (m) | 2.1 l_0 |
| r_e for Laplacian model | r_{eLap} (m) | 4.0 l_0 |
| Time increment | dt (s) | 0.0005 |



(a) 侵食モデルなし

(b) 侵食モデルあり

図-5 土石流の再現シミュレーション結果

図-5(b)は、斜面の侵食を考慮した場合の土石流の流下プロセスの計算結果を表している。この計算において、侵食された粒子には土石流と同じパラメータを与えた。侵食を考慮しない場合と比較して、土石流の到達によって斜面が削られる様子が再現できていることがわかる。

また、土石流の厚さも、侵食を考慮しない場合と比較して、2~3倍となっているとともに、流下速度も著しく速くなっている。侵食を考慮しない計算では、計算開始50秒経過した段階でも、土砂が下流に到達していないが、侵食を考慮した場合では、おおよそ35秒で下流に

到達している。これは、侵食された土砂がさらに次の侵食を引き起こし、流下する土砂量が加速度的に増加するためである。ここで示した計算は、経験的に設定したパラメータを用いており、実際の土石流を精度良く表現しているとは言えないものの、挙動の定性的な理解には有効な結果であると考えられる。

3.3 土石流対策に関する考察

前節で示したように、土石流による地山・斜面の侵食により崩壊土砂量や土石流のスピードが速くなる可能性があることがわかった。このような結果から、土石流対策としての法面保護工も有効であることが示唆される。法面保護工は、原則として安定勾配で施工したのり面に実施するものであるが、自然斜面に対して適用することにより、土石流発生時の流下土砂量を低減できることが期待される。これまで、種々の法面緑化工や構造物工が提案され実務に適用されており²¹⁾、それらオーソライズされた方法が自然斜面にも適用できる可能性がある。景観に配慮した工法として、植生工の適用が望ましく、近年では、降雨による侵食対策だけでなく、斜面を安定化させるための植生技術も提案されており²²⁾、それらの技術の応用も、今後土石流対策として期待できる。

以上のように、数値シミュレーションの結果を参照することにより、有効な対策を議論することができ、また本研究では触れることができなかったが、対策工の効果を定量的に示すことが可能である。本研究で示した解析手法による対策工の効果の検証については今後の検討課題としたい。

4. まとめ

本研究では、粒子法の一つである MPS 法に着目し、土石流の挙動のシミュレーションを試みた。土石流の挙動が Navier-Stokes 方程式により表現できると仮定し、MPS 法で離散化するとともに、土石流による地山の侵食を表現するために、侵食モデルを導入した。侵食の有無が計算結果に及ぼす影響について検討し、その結果に基づいて有効な土石流対策について考察した。

侵食を考慮することにより、侵食を考慮しない計算と比較して、流下速度および崩壊（流下）土砂量が増大することが確認された。Navier-Stokes 方程式に侵食モデルを考慮することにより、ある程度リアリティのある計算が実施できることを示した。また、土石流による侵食が土石流による被害を大きくしていることが計算結果から推察されることから、地山の侵食ある程度が抑えられるような対策が減災には有効であろう。

参考文献

- 1) Cundall, P.A. and Strack, O.D.L.: A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, Vol.29, pp.47-65, 1979.
- 2) Monaghan, J.J.: Simulating free surface flows with SPH, *Journal of Computational Physics*, Vol.110, pp.399-406, 1994.
- 3) Koshizuka, S. and Oka, Y.: Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid, *Nuclear Science and Engineering*, Vol.123, pp.421-434, 1996.
- 4) 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, No.719/II-61, pp.31-45, 2002.
- 5) 後藤仁志, 酒井哲郎, 林 稔, 織田晃治, 五十里洋行: 遡上津波の戻り流れによる護岸法先洗掘のグリッドレス解析, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.46-50, 2002.
- 6) 後藤仁志, 林 稔, 織田晃治, 酒井哲郎: 越流水による河川堤防侵食過程のグリッドレス解析, 水工学論文集, 第 46 巻, pp.439-444, 2002.
- 7) 後藤仁志, 林 稔, 安藤 怜, 酒井哲郎: 固液混相流解析のための DEM-MPS 法の構築, 水工学論文集, 第 47 巻, pp.547-552, 2003.
- 8) 後藤仁志, 林 稔, 安藤 怜, 鷺見 崇, 酒井哲郎: 砂礫混合層を伴う混相流解析のための DEM-MPS 法マルチスケールリンクの開発, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.26-30, 2003.
- 9) 後藤仁志, 五十里洋行, 谷岡弘邦, 山本和久: 粒子法による河川堤防裏法浸食の数値シミュレーション, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.979-984, 2008.
- 10) 五十里洋行, 後藤仁志: MPS 法弾塑性解析による粘性土河岸崩壊過程の計算力学, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 53 巻, pp.1069-1074, 2009.
- 11) 五十里洋行, 後藤仁志, 吉年英文: 斜面崩壊誘発型津波の数値解析のための流体・弾塑性体ハイブリッド粒子法の開発, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp.046-050, 2009.
- 12) 後藤仁志, 五十里洋行, 駒口友章, 三島豊秋, 吉年英文: 粒子法による護岸背後地盤空洞形成過程の数値解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.821-825, 2010.
- 13) 五十里洋行, 後藤仁志, 新井智之: 海食崖の侵食過程の計算力学のための流体・弾塑性体ハイブリッドモデルの構築, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.916-920, 2010.

- 14) 後藤仁志, 五十里洋行, 松原隆之, 伊藤 孝: 高精度粒子法に基づく固液二相流モデルによる山体崩壊津波の発生過程解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, pp.I_196-I_200, 2011.
- 15) 沖村 孝, 鳥居宣之, 堀内正宏: MPS 法による土砂の到達距離推定に関する研究, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, 第 10 号, pp.29-45, 2006.
- 16) 吉田郁政, 大庭啓輔, 中瀬 仁: MPS 法あるいは DEM を用いた破壊挙動の不確定性に関する基礎的考察, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.67, No.2 (応用力学論文集 Vol.14), I_365-I_374, 2011.
- 17) 越塚誠一: 粒子法, 丸善, 144p, 2005.
- 18) Shuku, T., Fujisawa, K., Nishimura, S. and Shibata, T.: Numerical simulation of embankment failure due to overflow by moving particle semi-implicit method, *IDRE Journal*, No.301 (84-1), pp.I_31-I_38, 2016.
- 19) Parker, G. and Izumi, N.: Purely erosion cyclic and solitary steps by flow over a cohesive bed, *Journal of Fluid Mechanics*, No.419, pp.203-238, 2000.
- 20) 藤澤和謙, 村上 章, 西村伸一: 砂・粘土混合材料の侵食速度測定と室内越流破堤実験, 農業農村工学会論文集, 第 273 号, pp.45-55, 2011.
- 21) 日本道路協会: 道路土工一切土工・斜面安定工指針, 丸善出版, 570p, 2009.
- 22) 松井 保 (監訳): 植生技術による斜面安定工法, 森北出版, 374p, 2004.

(2017 年 6 月 5 日 受付)