

平成21年5月20日現在

研究種目：	基盤研究(B)
研究期間：	2006～2008
課題番号：	18360223
研究課題名(和文)	土粒子運動から構築する低速～高速地盤流動構成モデルの開発と応用
研究課題名(英文)	A Constitutive Model and Numerical Simulation Method Applicable to Slow to Rapid Ground Flow Based on Micromechanics
研究代表者	山田 恭央 (YAMADA Yasuo) 筑波大学・大学院システム情報工学研究科・教授 研究者番号：90111476

研究成果の概要:本研究では、液状化のような比較的低速度地盤流動から、土石流のような高速流動までを統一的に表現できる構成モデルの形式を、土粒子運動をベースに構成した。また、石礫型土石流の流体力に及ぼす粒子サイズの影響についても理論的検討を行った。更に、そのような地盤流動を、統一的に表現する解析手法として SPH 法を用い、その「粒子性」を利用して様々な地盤流動を比較的簡便に再現できることを示した。地盤流動実験や観測のための新手法の開発も行った。

交付額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2007年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2008年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
年度			
年度			
総計	15,300,000	4,590,000	19,890,000

研究分野:工学

科研費の分科・細目:土木工学・地盤工学

キーワード:斜面崩壊、斜面流動、土石流、DEM(個別要素法)、SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)、構成モデル、流動計測、斜面観測

1. 研究開始当初の背景

近年、大地震や豪雨に伴う地盤流動による被害が相次いで生じており、その対策が早急に求められている。一般に「地盤流動」というものの形態は、(i)地滑りなどの準静的な流れ、(ii)斜面崩壊などの固体破壊現象、(iii)土石流のような流体的高速流れ、(iv)地震時の液状化に伴う流動、などと分類できるが、それぞれの事例は様々で、単純にどれかに分類できないものも多い。また、同じ土が固体→流体→固体のように振る舞う場合もある。これらの複雑な地盤流動に対して、流動発生の可能性、発生した場合の流動距離、構造物に作用する流動圧の算定などを行い、対策の優先順位の設定、適切な対策工の設計などに役立てることが求められているが、

この評価手法は、各種の地盤流動に対して経験的・応急的に定められており、理論的・統一的な評価手法は確立していない。

2. 研究の目的

本研究は、このような地盤流動現象に関して統一的な力学的評価手法を確立することを目指すものである。具体的には、土粒子が微視的には固体粒子に集合体と間隙水からなることを考え、粒状体の微視力学理論から遅い流れ～高速流れまでの地盤の構成モデルを開発し、この妥当性を実験及び粒子シミュレーション法より検討する。更に、提案するモデルを用いた連続体解析を行い、過去の被害事例等を基に、実務における適用性を検討する。

3. 研究の方法

研究は、(a)土砂流動の計測手法の開発、(b)多様な材料・サイズ・形態の模型流動実験、(c)斜面流動観測、(d)粒子レベルの数値シミュレーション、(e)微視力学的構成モデル、(f)粒子法による斜面流動シミュレーション、などが各研究分担者によって行われ、詳細な打ち合わせのもと、有機的なつながりをもっている。

4. 研究成果

(1) 磁界を用いた土砂流動計測手法の開発

ビデオカメラ等では計測できない砂礫土砂内部の流動状況を把握する目的で、礫に埋め込んだ磁石の動きを複数のセンサーコイルによって感知し、起電力と磁石までの距離の関係から磁石の位置を算出するシステムを開発した(図1)。大型水路を用いた室内実験に本システムを適用し、磁石をつけた礫の位置と速度の計測を行った例を図2に示す。これより、小礫(直径1~2cm)および大礫(直径3~4cm)それぞれの礫の平均速度は1.05(m/s)、1.09(m/s)となり、ビデオカメラ撮影より得られた速度と同等の値が得られた。何回かの実験の結果、礫が大きいほど移動速度が大きくなることが確かめられた。これは、石礫型土石流において、巨礫が先頭部に集積す

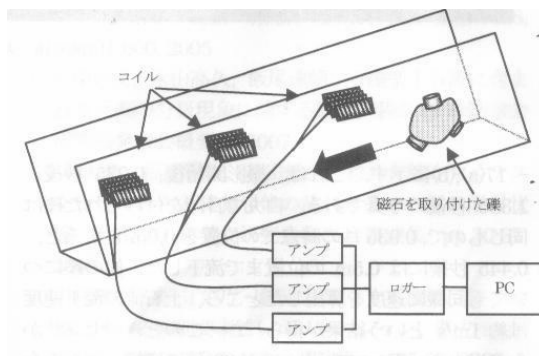


図1 システム概要図

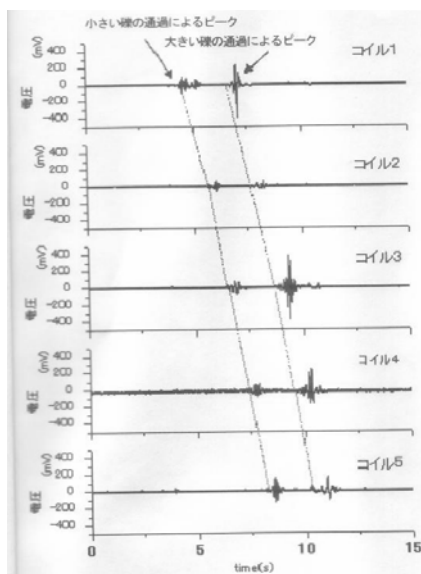


図2 センサからの出力例

る現象と調和的である。

今後は、センサ数を増やし、信号処理方法を改善することによって、より精度の高い計測システムを開発する予定である。

(2) 土砂流動と共に移動する高速度カメラ画像による礫の運動形態の取得

流動と共に高速移動可能なカメラ撮影システムを用いて、流動する石礫個々の流動形態を観測し、土石流において大きな礫が浮き上がるメカニズムの解明、河床状態が流動形態に及ぼす影響等について検討した。実験には長さ約15mの大型水路を用い、水路と平行にレールを設置し、その上を高速度カメラが最大秒速3(m/s)程度までの速度で移動できるシステムを開発した(図3)。

実験は、様々な粒径のガラスビーズや礫を配合して使い、また水量もいくつか変化させて行った。図4は30mmおよび12.5mmのガラスビーズを同体積混合させて流した結果の画像例である。このような連続画像から粒子の位置(高さ)と斜面方向の速度を求めたものが図5である。これによれば、おもに底面との摩擦の効果で、球形のガラスビーズはいびつな砂利粒子よりも速く流れるが、それぞれの粒子の粒径の影響については、大きな粒子ほど流れの表層付近を移動するために速度が大きいという効果はあるものの、同じ高さを移動する場合の流速の差はほとんどないことがわかる。すなわち、この実験においては、「大きい粒子が先頭に集積するのは、流れの高い位置を移動するから」ということができる。この分級の原因は明確ではないが、観測からは小さい粒子が多く底部を流れるため、大きな粒子が下に潜れない状況が見られることから、いわゆるブラジルナッツ効果によるものと予想される。また、この速度分布から求めた下流端での分級状況を、実際の粒子補足結果と比較すると、連

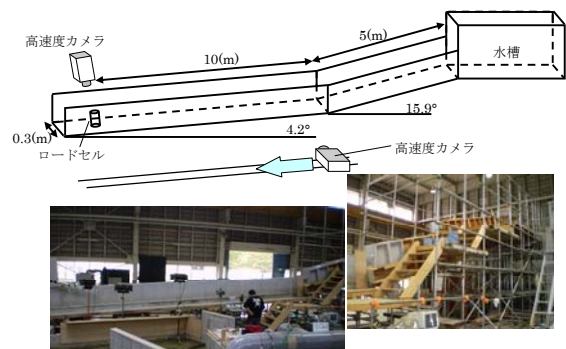


図3 砂礫流動詳細観測システム

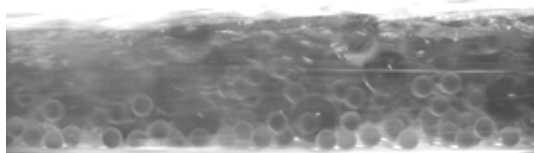


図4 高速度カメラで得られる画像の例

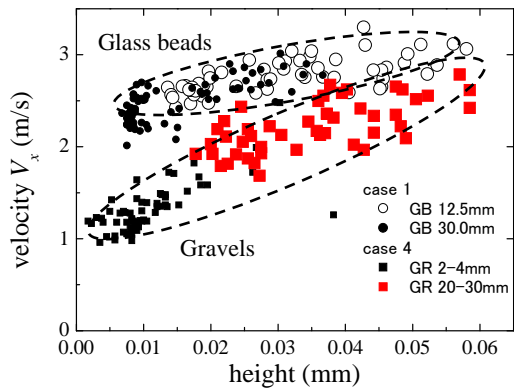


図5 粒子の位置と速度の関係

行効果(大きな粒子が密に流れているところでは小さな粒子もそれに連行されて多く流れる、その逆もある)を除いては、良く一致していることが確かめられた。

(3) 斜面流動観測システムの設置

静岡県大井川流域の2地点(図6)に、斜面流動観測のためのビデオカメラを設置した。

(a) 押出沢(筑波大学井川演習林内)

演習林内の、頻繁に流動の発生する石礫型斜面である押出沢に土砂流動観測システムを設置した。演習林内には電線がないため、斜面流動を検知する安価なセンサー(加速度センサー)を開発し(図7)、その信号を受け取って流動を撮影する太陽電池利用の観測カメラシステムの開発を行った。

加速度の閾値の設定については、常時の外乱強さと、実際の斜面流動の形態に依存する。2007年7月14日から15日にかけて静岡県南方を台風4号が通過した際に、多量の土砂移動が発生した(図8)が、このときは、雨量が最大となる前の時点で、センサが作動して撮影を行ったために土砂移動を撮影することはできなかった。このほかにも、何度か土砂移動イベントは発生しているが、断線や、夜間で流動が確認できないなどの問題で、現在のところ良好なデータは得られていない。しかしながら、石礫斜面の流動形態に関する知見を得ることは貴重であることから、本観測は今後も続ける予定である。



図6 斜面流動観測地点



図7 開発した斜面流動感知センサー



7/13 撮影

7/23 撮影

図8 降雨前後の写真

(b) ボッチ薙

大井川の畑薙湖上流のボッチ薙は、大規模な急傾斜斜面であり、大雨のたびに石礫土砂の移動が確認できる。中部電力の専用線からの電源供給により、大容量ハードディスクに恒常的に画像データを蓄積する斜面流動観測システムを導入した(図9)。

ボッチ薙の観測では、2007年9月の台風9号による豪雨によって、土砂の移動が撮影された(図10)。降雨のため鮮明な画像とは言えないが、土石流のようなものが段派になって数十回にわたり流下している様子が確認できた。溪床勾配が22度と急勾配であるにもかかわらず、段波が停止している様子も確認でき、貴重なデータであると言える。画像のPIV解析を試みたが降雨によるノイズのせいもあり、良好な結果は得られていない。今後より詳細な解析を試みる予定である。



図9 ボッチ薙の斜面流動観測システム



図10 ビデオカメラで撮影した画像(10/16(s)毎)

(4) 低速～高速の乾燥粒子流の応力成分と構成モデル表現

粒子運動とマクロな連続体の応力を結びつける統計力学的な定式化から、乾燥粒子流に生じる応力は、粒子の速度擾乱による kinetic stress と、粒子間力による contact stress (又は collisional stress) に分けられる。kinetic stress は、いわゆる流体的な応力であり、粒子速度が0に近づけば消失する。一方、contact stress は粒子速度が0でも存在する項であるが、これは粒子の衝突応力も含んでおり、単純な固体的応力ではない。粒子の運動エネルギーが小さいうちは、恒常的な接触点による応力が支配的であるが、粒子が活発に運動して kinetic stress が増大すれば、例えば一定拘束圧下では膨張が起こり、粒子間接触点が減少し contact stress も減少するため、流体的な挙動になる。

図 11 は、乾燥粒子堆積層の1次元流れを対象とした個別要素法解析例である。左右が周期境界、右下45° 方向に重力をかけていることから、45° の1次元斜面を流下する流れを解析していることになる。底部の粒子は固定してある。第1段階として粒子間の摩擦係数は0としている。

時間が進むにつれ、流下速度が上昇し、それと共に高速せん断を受けている堆積層下部の粒子の速度擾乱が発達する。それにより kinetic stress および衝突応力が上昇し、上載圧を支えるため、準静的な接触による固体応力は不要となり、粒子密度が低下する(図 11(b)(c))。図 12 は contact stress の鉛直方向成分であるが、 $t=0.5(s)$ くらいまでは、静的な拘束圧分布(図中の破線)とほぼ一致している。その後、大きく変化し、 $t=5(s)$ では、低密度になった堆積層下部での値は小さくなっている。なお、kinetic stress と contact stress の和を、マクロ密度分布より求めた拘束圧分布と比較したところ、ばらつきはあるものの、定量的な一致を示した。

今後は、粒子間摩擦のある系における検証を踏まえ、固体的応力と流体的応力の寄与率などについて検討する予定である。

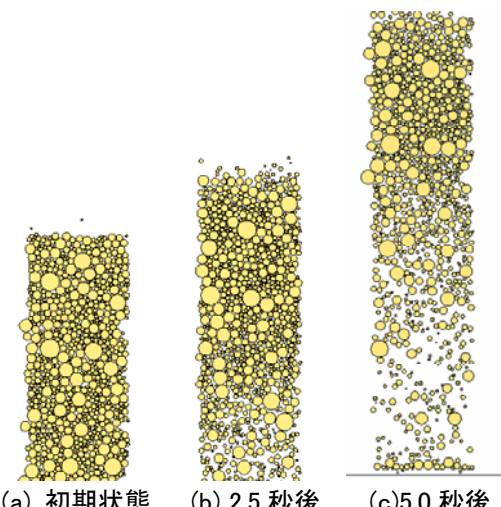


図 11 粒子のスナップショット

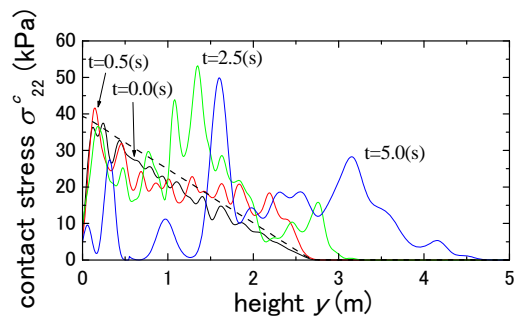


図 12 接触応力 σ_{yy}^c の高さ方向分布

(5) 石礫型土石流の流体力に関する検討

石礫土石流の流体力の算定は、土石流対策工の設計などに重要であるほか、土石流を等価流体に置き換える際の基礎情報となる。ここでは粒子間相互作用を無視した希薄な乾燥粒子流に関する理論と模型実験結果を比較した。速度 v_0 の粒子・流体混合流れ中にある円柱に作用する、単位面積当たりの等価流体力は、円柱と粒子の反発係数を e_b とし、その力積の時間平均として計算すると次のようになる。

$$\bar{f} = \rho(1 + e_b)v_0^2 \quad (1)$$

ただし ρ は粒子流体混合体のバルク密度である。これを一般的な流体力の式 $f_D = (1/2)C_D\rho v_0^2$ と比較すると、 $C_D = 2(1 + e_b)$ の関係があることがわかる。

本モデルにおいて、粒子衝突による流体力の平均値 \bar{f} は粒子サイズの影響を受けないが、衝突力の最大値は

$$f_{\max} = \sqrt{mk} v_0 \quad (2)$$

と与えられることから、粒子衝突による流体力の振動振幅は粒子サイズの影響を受ける。

図 14 は、長さ 150cm の小型水路での乾燥粒子流実験(斜面勾配 25~35°)および、長さ 10m の大型水路実験での礫-水混合材料の流下実験(斜面勾配 10° 程度)において、下流端近くに設置した円柱型のロードセル(直径 4cm)で計測した流体力と、高速度カメラ画像から求めた流速との関係を示したものである。流動厚は側方のカメラから求めた値、バルク密度は流動厚の時

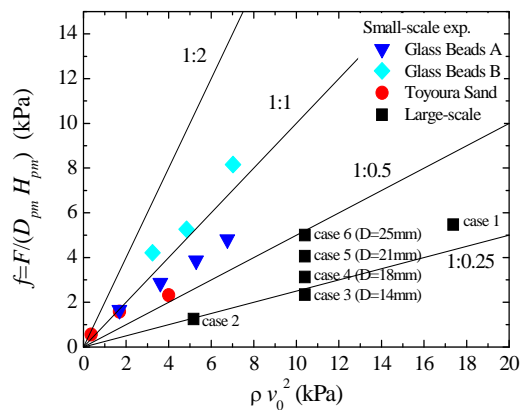


図 13 流動実験と式(1)の比較

刻歴、あるいは粒子と水の体積比から求めたもので、 $1.0\sim 1.3(\text{g}/\text{cm}^3)$ 程度の値となった。図中には式(1)より求められる直線(勾配 1~2)も示しているが、実験値はそれより勾配が小さくなっている。この原因は粒子径に対して円柱の直径が充分大きくない事による有効円柱径の効果のほか、流れてくる粒子間の相互作用などの影響などが考えられる。なお、大型水路実験における衝突力の最大値に関しては、式(2)によってある程度定量評価できることが確認された。

(6)SPH による斜面崩壊シミュレーション

SPH 法は、FEM などと同様、連続体の解析手法であり、構成モデルの選択により、粘性流体、弾塑性固体、あるいはその中間など、様々な材料の挙動を統一的に解析することができる。一方で、粒子法であるため、大変形解析が容易であり、また斜面崩壊時の材料の離散集合も簡易に表現できる。更に、本質的に粒子性を内包した解析手法であるため、地盤材料の微視的な粒子性を組み込みやすいというメリットもある。様々な室内実験の SPH 法解析により、その有効性は既に検証済みである。ここでは実際の斜面崩壊事例への適用例を紹介する。

図 15 および 16 は、それぞれ 2007 年新潟県中越沖地震における JR 青海川駅斜面崩壊の 2次元および 3次元 SPH 数値解析の結果の一例である。構成モデルは弾塑性モデル(D-P タイプ、 $c=40(\text{kPa})$ 、 $\phi=10(\text{deg.})$)は、崩壊後に近傍で行われた標準貫入試験データより概算、ただし鉄道盛土部分は $\phi=15(\text{deg.})$ 、初期の 90%の密度になった時点で残留状態とした。また、入力は 1Hz の正弦波で、 $t=5(\text{s})$ で最大 500(gal)、 $t=15(\text{s})$ で加振終了、それぞれの区間で最大加速度が線形に変化する波を用いた。2次元計算は 570 粒子、3次元計算は約 20000 粒子を用いており、計算時間は PC-Linux でそれぞれ 6 分および 5.3 時間であった。

2次元計算では、崩壊した斜面土砂が鉄道盛土を海側へ押し出して破壊させる、というメカニズムが観察された。また、3次元解析での崩壊性状は、実際の被害後の写真(図 17)と比較的良好一致している。もちろん、解析結果は与える材料物性や入力波などに影響を受けるが、このような斜面崩壊後の流動挙動を、比較的簡便に再現できるのが SPH 法の利点である。

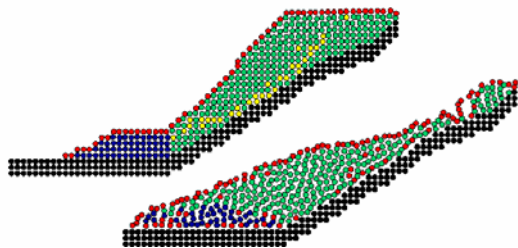


図 14 新潟県中越沖地震 JR 青海川駅斜面崩壊の 2次元 SPH 解析(初期状態と崩壊後 $t=15\text{s}$)

今後は、土石流などの流体的挙動について、事例解析を元に検証する予定である。その際には、DEM 解析などで検討した固体~流体の遷移領域の構成モデルを適用するのが有効である。また、石礫型の土砂流動においては、特に構造物に及ぼす流体力の算定に関して、粒子サイズの影響を考慮する必要がある。

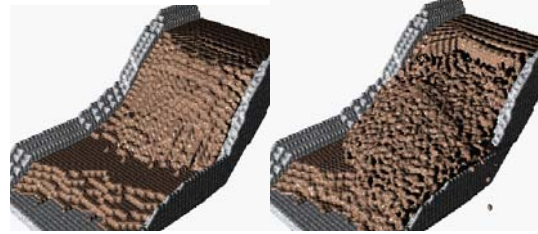


図 15 新潟県中越沖地震 JR 青海川駅斜面崩壊の 3次元 SPH 解析(初期状態と崩壊後 $t=15\text{s}$)



図 16 新潟県中越沖地震 JR 青海川駅斜面崩壊現場の航空写真(朝日航洋(株))

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 19 件)

① Shimizu, A., Ogata, Y., Matsushima, T., Yamada, Y.: Dynamic behavior of liquefied sand around pile foundation: model experiment and numerical simulation, Proc. Int. Conf. on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, Taylor & Francis Group, London, pp. 753-760, 2009. (査読有)

② K. Konagai, "Huge landslides caused by massive earthquakes and long-lasting geotechnical risks," Landslides - Disaster risk reduction --, Kyoji Sassa/ Paolo Canuti eds., Springer, ISBN 978-3-540-69966-8, 159-176, 2009. (査読有)

③ Kazumi A. A., Konagai, K et al. "Slope failure induced debris flow Hazards in the October 8, 2005, Kashmir Earthquake," Bull. Earthquake Resistant Structure Research Center, 42, 17-32, 2009. (査読有)

④ Satter A. A., Konagai, K et al. "A quantitative approach to assess landform changes of Hattian Ballah landslide dam formed by 2005 Kashmir Earthquake", Bull. Earthquake Resistant Structure Research Center, 42, 3-16, 2009. (査読有)

⑤ K. Konagai, Y. Ishikawa, S. Tsuchiya and F. Wang. "Geotechnical issues caused by the May 12th, 2008, Wenchuan Earthquake, China," Bull.

Earthquake Resistant Structure Research Center, 42, 33-42, 2009. (査読有)

⑥ Imaizumi, F., Gomi, T., Kobayashi, S., and Negishi, JN: Changes in bed load transport rate associated with episodic sediment supply in a Japanese headwater channel, *Catena*, 77, 207-215, 2009. (査読有)

⑦ 土屋 智, 今泉文寿, 逢坂興宏: 荒廃溪流源頭部における土石流の流動形態と石礫の流下状況, 砂防学会誌, 61(6), 4-10, 2009. (査読有)

⑧ Matsushima, T., Sato, K., Yamada, Y., Kuraoka, S.: An Experimental Study on Drag Force of Stony Debris Flow, Proc. ICSE-4: Fourth Int. Conf. on Scour and Erosion, Japanese Geotechnical Society, 678-683, 2008. (査読有)

⑨ Y. Kawamura, A. Sugiyama, S. Kuraoka, T. Matsushima and H. Okawa: Simulation and sensing system for behavior of mudflow, *Journal of Applied Mech.*, JSCE 22, 525-533, 2008. (査読有)

⑩ K. Konagai, T. Fujita, T. Ikeda and S. Takatsu, "Landform changes in an active folding zone induced by the October 23, 2004, Mid Niigata Earthquake, Japan," 14th World Conf. on Earthquake Engineering, Beijing, China, Paper-ID: 01-1001, 2008. (査読有)

⑪ K. Konagai, J. Johansson, T. Ikeda, S. Takatsu, F. Nomura and Y. Tomiyasu, "Geological conditions and soil deformations in the July 17, 2007, Chuetsu Off-shore Earthquake", 14th World Conf. on Earthquake Eng., Beijing, China, Paper-ID: 01-1002, Oct. 12-17, 2008. (査読有)

⑫ Kuraoka S., Makino T., Sugiyama M., Sugiyama A., and Kawamura Y. "A study on the mechanisms of accumulation of large boulders in debris flow by the distinct element method." Proc. of the Int. Conf. on Management of Landslide Hazard in the Asian-Pacific Region, pp395-402, 2008. (査読有)

⑬ Itoh T., Ogawa K., Sugiyama M., Kuraoka S., Horiuchi S., and Akanuma J., "Hydraulic model tests for evaluating sediment control function with a grid-type check dam in Amahata-River basin" Proceedings of the International Conference on Slopes Malaysia 2008, pp87-97, 2008. (査読有)

⑭ 倉岡 千郎, 中島 祐一(2008):「崩壊土砂および防護工の個別要素法によるモデル化」, 第4回土砂災害に関するシンポジウム論文集、土木学会西部支部、137-142. (査読有)

⑮ Imaizumi, F., Tsuchiya, S.: Debris-flow behaviors in an steep mountainous torrent on Ohya landslide, Japan, In Proceedings of Fourth Int. Conf. on Scour and Erosion 2008, 665-671, 2007. (査読有)

⑯ Saomoto, H., Matsushima, T., Yamada, Y.: Development of LAT-PIV visualization technique for particle-fluid system, *Structural Eng./Earthquake Eng.*, JSCE, 24,2, 123s-130s, 2007. (査読有)

⑰ Imaizumi, F., Sidle, R.C.: Linkage of sediment supply and transport processes in Miyagawa Dam catchment, Japan, *Journal of Geophysical*

Research - Earth Surface, Vol.112, F03012, 2007. (査読有)

⑱ Matsushima, T., Chang, C.-S.: An elasto-plastic constitutive model of granular materials based on contact force distribution, *Geomechanics and Geotechnics of Particulate Media*, Hyodo, Murata, Nakata eds, Balkema, 293-298, 2006. (査読有)

⑲ Saomoto, H., Matsushima, T., Yamada, Y.: DEM simulation of ring shear test on granular material, *Geomechanics and Geotechnics of Particulate Media*, Hyodo et al. eds, Balkema, 161-166, 2006. (査読有)

[学会発表] (計 11 件)

① 松島 亘志: 離散体モデルとしてのDEMと連続体近似としてのSPH, 理論応用力学連合会, 2p, 東京, 2008年6月10-12日.

② Matsushima, T.: SPH simulation for large deformation in granular materials, EM08: Engineering Mechanics Conference, ASCE, Minneapolis, Minnesota, May 18-21, 2008.

③ Matsushima, T.: Effect of particle shape on macro shear behavior of granular assembly, *Granular & granular-fluid flow* (Gordon research conference), Invited lecture, Watervill, ME, June 22-27, 2008.

④ 杉山文乃, 川村洋平, 松島 亘志, 倉岡千郎, 大川浩一: 磁界を用いた土石流中の礫の位置計測システムの提案, 資源・素材学会平成20年秋季大会, 仙台, pp.18, 2008年10月7-9日.

⑤ 松島 亘志, 豊田 衛, 山田 恭央: 斜面流動解析へのSPH法の適用性の検討, 第42回地盤工学研究発表会, 2p, 名古屋, 2007年7月4-6日

⑥ 倉岡千郎, 杉山文乃, 川村洋平: 土石流における巨礫の移動機構の個別要素法による検討, 砂防学会研究発表講演概要集、P-81, 福井, 2007年5月23-25日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 恭央 (YAMADA Yasuo)
筑波大学・大学院システム情報工学研究科・教授
研究者番号: 90111476

(2) 研究分担者

松島 亘志 (MATSUSHIMA Takashi)
筑波大学・大学院システム情報工学研究科・准教授
研究者番号: 60251625

川村 洋平 (KAWAMURA Yohei)
筑波大学・大学院システム情報工学研究科・講師
研究者番号: 40361323

今泉 文寿 (IMAIZUMI Fumitoshi)
筑波大学・大学院生命環境科学研究科・助教
研究者番号: 80378918

倉岡 千郎 (KURAOKA Senro)
日本工営株式会社・中央研究所・次長
研究者番号: 30463540

小長井 一男 (KONAGAI Kazuo)
東京大学・生産技術研究所・教授
研究者番号: 50126471