

個別要素法を用いた土石流によって生じる河床地盤振動特性の解明 Study on Ground Motion Characteristics of River-bed Caused by Debris Flow Using Distinct Element Method

○山田 雅行¹, 八木 悟², 羽田 浩二¹, 藤野 義範³, 深津 宗祐²,
高原 晃宙⁴, 栗田 哲⁵
Masayuki YAMADA¹, Satoru YAGI², Koji HADA¹, Yoshinori FUJINO³,
Sosuke FUKATSU², Teruyoshi TAKAHARA⁴ and Satoshi KURITA⁵

- ¹(株)ニュージェック 技術研究チーム
Research Laboratory, NEWJEC Inc.
- ²(株)ニュージェック 技術開発グループ
Technology Development Group, NEWJEC Inc.
- ³(株)ニュージェック 建築グループ
Architecture Group, NEWJEC Inc.
- ⁴国土交通省 水管理・国土保全局
Water and Disaster Management Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism
- ⁶東京理科大学 工学部
Faculty of Engineering, Tokyo University of Science

The river-bed ground motion caused by debris flow were simulated using the distinct element method by letting a falling rock collide with the rock surface regarded as river-bed. The characteristics and origin of ground motion were mentioned by comparing the calculated ground motions with the conditions of changing the rigidity of the river-bed, changing the flow speed and changing flow quantity. The frequency characteristics of the river-bed ground motion was affected by the rigidity of the river-bed ground without depending on the height of fall (collision speed) and the number of the falling rocks.

Keywords : debris flow, river-bed motion, ground motion characteristics, distinct element method

1. はじめに

土木研究所^{例えは 1)}において振動検知式土石流センサーの開発が行われるなど、振動センサーを用いて土石流の規模や発生回数、移動速度の推定がかねてより行われている^{例えは 2)}。大角ら(2006)³⁾は、継続時間や周波数特性に着目して、土石流の振動を地震やノイズと区別することを試みているが、その振動の特性や成因にまでは言及されていない。一方、現在までに数多くの土石流シミュレーション^{例えは 4)}も行われているが、河床はせん断抵抗力、

侵食・堆積による諸量の交換境界として定式化されているに過ぎない。MPS法、SPH法、個別要素法(DEM)といった粒子をモデル化した手法^{例えは 5)}においても、陽に河床をモデル化している例は見当たらない。そこで、著者らは、個別要素法を用いて、河床を個別要素としてモデル化し、流量、流速、河床の剛性などを変化させ、土石流によって生じる河床地盤振動を模擬し、算定された地盤振動を比較することによって、その特性や成因を明らかにすることを試みた。

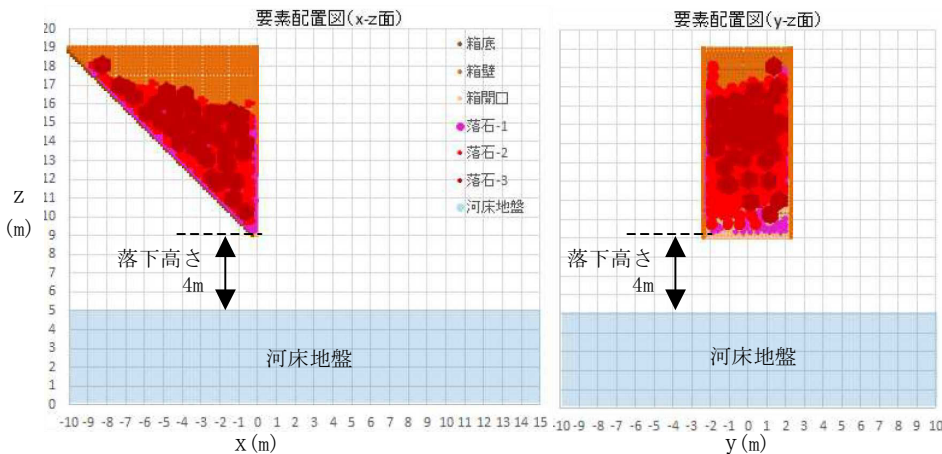
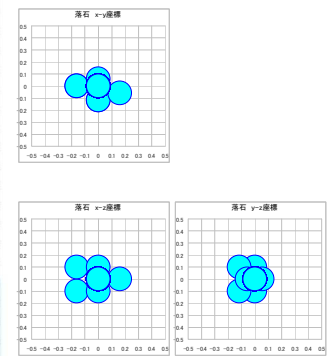


図-1 初期要素配置図(t=0.0s)



落石-2
(集合体要素)

図-2 落石要素

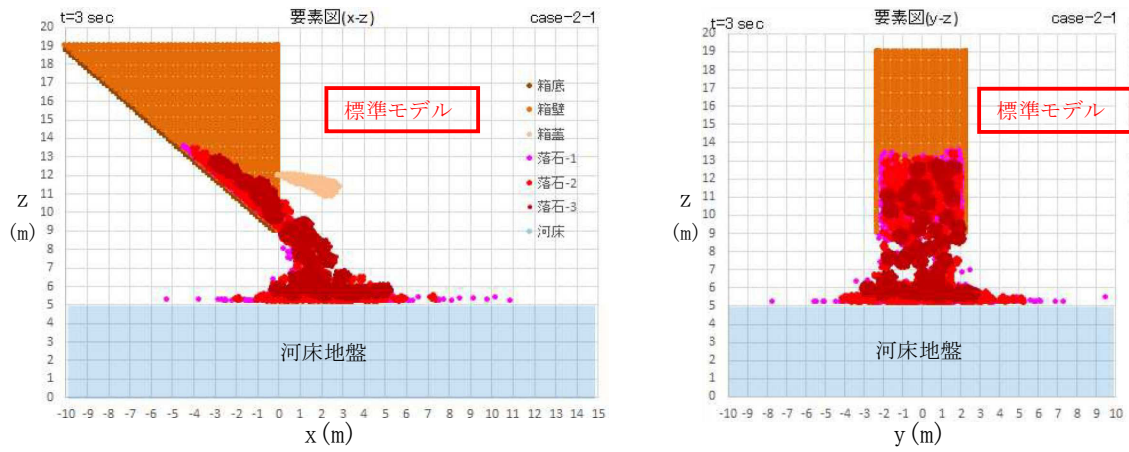


図-3 標準モデルの結果(t=3.0s)

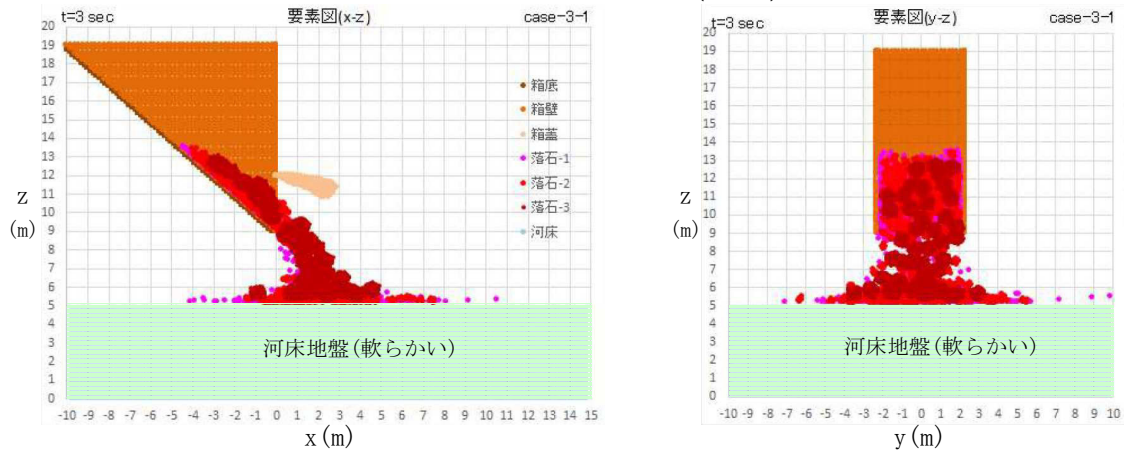


図-4 河床地盤が軟らかいモデルの結果(t=3.0s)

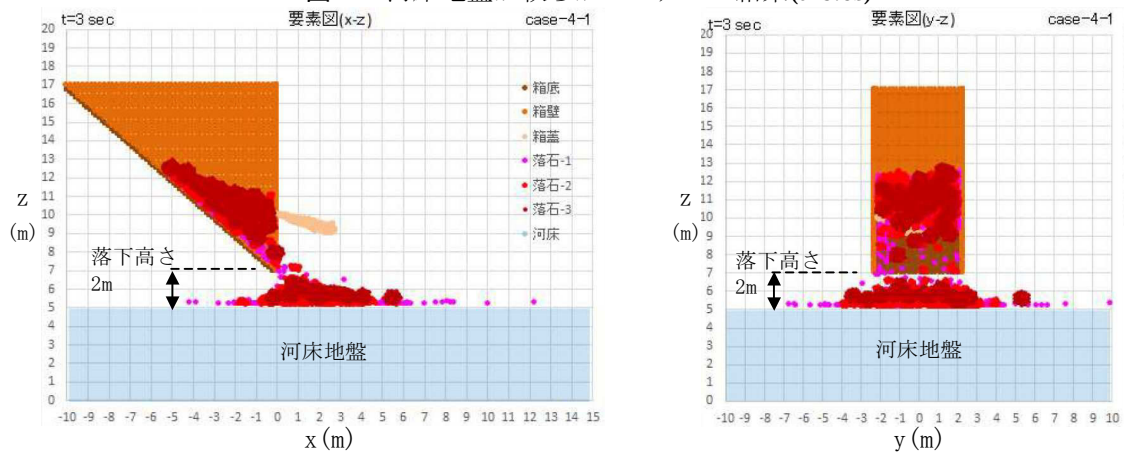


図-5 落下高さが低い(衝突速度が遅い)モデルの結果(t=3.0s)

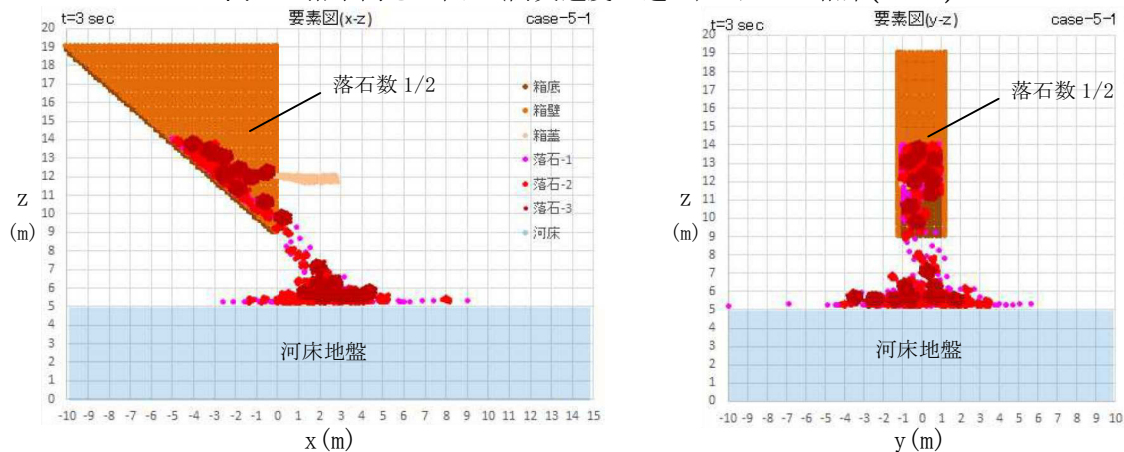


図-6 落石数が少ないモデルの結果(t=3.0s)

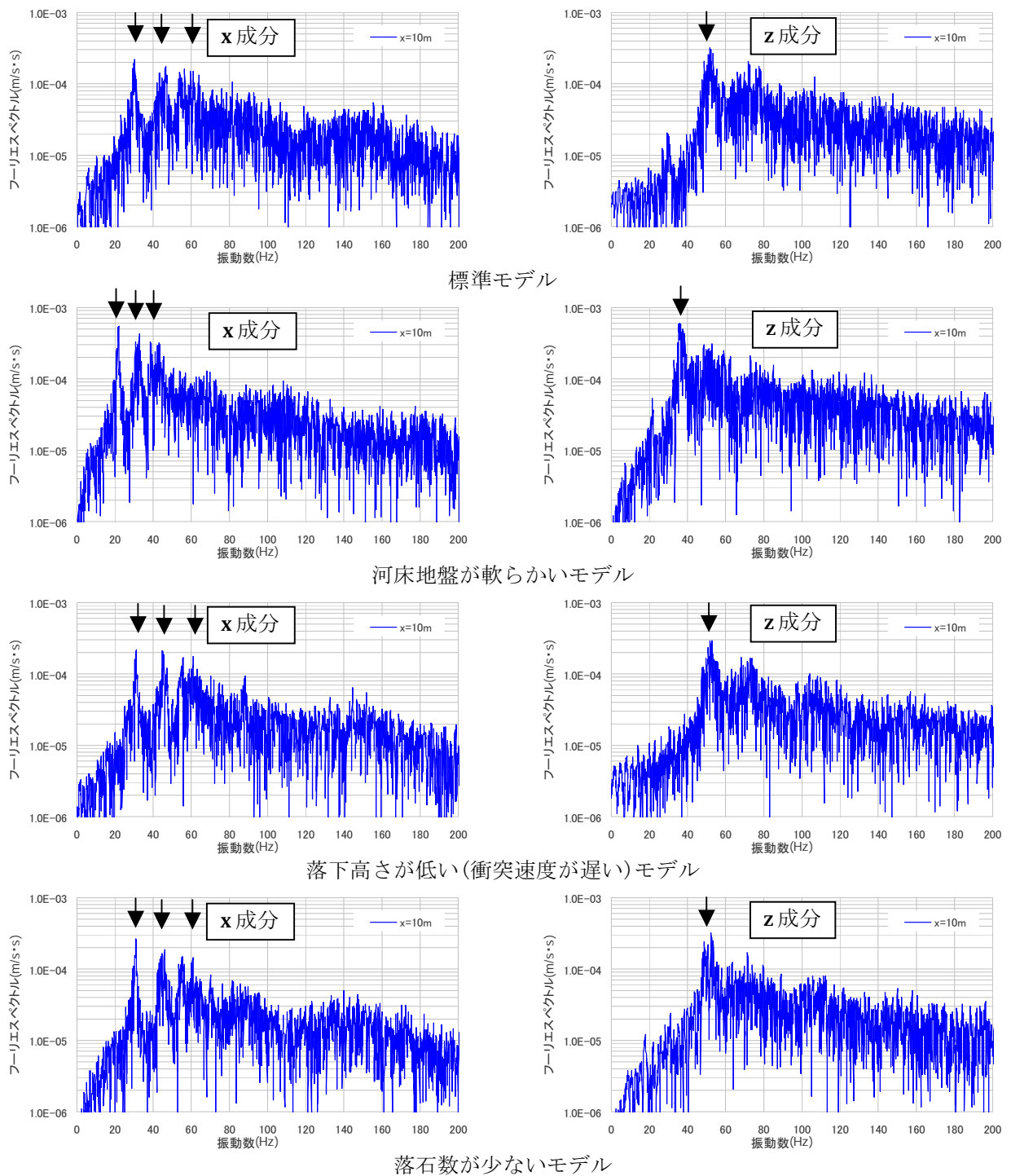


図-7 河床地盤振動のフーリエスペクトル(x=10m 地点)

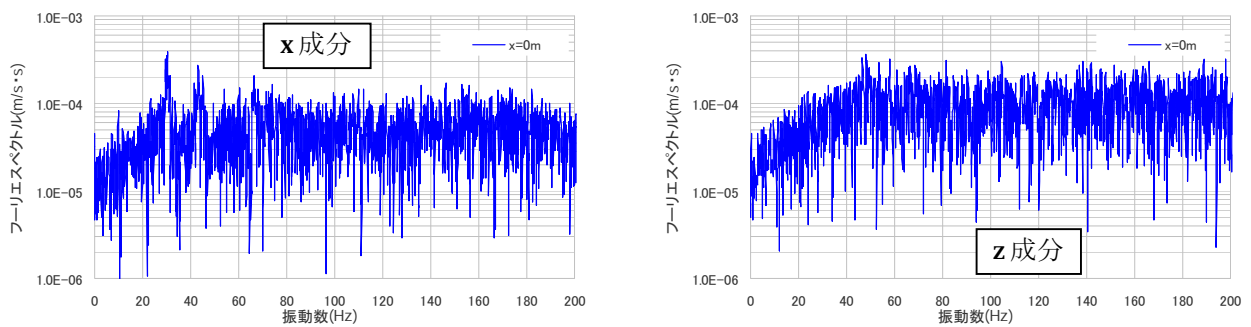


図-8 河床地盤振動のフーリエスペクトル(標準モデル, x=0m 地点)

2. 土石流によって生じる河床地盤振動を模擬するための個別要素法を用いたモデル化

土石流によって生じる河床地盤振動は、主として土石流内の岩石粒子と水粒子が河床に衝突することによって生じると考えられる。そこで、岩石をある高さから、河床と考えた地盤に落下させることによって、土石流によって生じる河床地盤振動を模擬することとした。なお、今回、水は考慮していない。

河床地盤は C_L 級と考え、物性は $V_s=1.0\text{km/s}$ ($G=2200\text{MPa}$)、 $V_p=2.2\text{km/s}$ ($E=6000\text{MPa}$)、 $\rho=2.2\text{t/m}^3$ の個別要素とした。河床要素間の強度は破壊を許容しない十分に大きな値とした。ただし、河床地盤と後述の落石との間の圧縮強度は 12MPa 、引張強度は 0MPa に設定した。河床は、 x 方向： $-10\sim+15\text{m}$ 、 y 方向： $-10\sim+10\text{m}$ 、 z 方向： $0\sim5\text{m}$ の領域とし、要素半径 0.1m の要素でモデル化した。

落石要素は 3 種類作成した。落石-1 は半径 0.125m の単体要素、落石-2 は要素半径 0.25m に近くなるように半径 0.1m の要素の最密六方集合から要素 7 個を切り取った集合体要素、落石-3 は要素半径 0.5m に近くなるように半径 0.1m の最密六方集合から要素 55 個を切り取った集合体要素とした。ただし、集合体要素の内部の強度は破壊を許容しない十分に大きな値とした。また、岩の河床への衝突速度が時速 30km と仮定し、落石の落下高さを 4m とした。

上述のモデルを「標準モデル」とし、剛性を標準モデルの $1/2$ とした D 級相当の河床地盤で、物性が $V_s=0.7\text{km/s}$ ($G=1100\text{MPa}$)、 $V_p=1.5\text{km/s}$ ($E=3000\text{MPa}$)、 $\rho=2.2\text{t/m}^3$ の「河床地盤が軟らかいモデル」、落石の落下高さを標準モデルの $1/2$ である 2m とした「落下高さが低い(衝突速度が遅い)モデル」、落石数を標準モデルの $1/2$ とした「落石数が少ないモデル」を作成した。

3. 計算結果

図-3～図-6 にそれぞれ標準モデル、河床地盤が軟らかいモデル、落下高さが低い(衝突速度が遅い)モデル、落石数が少ないモデルに対する $t=3.0\text{s}$ の落石の落下の様子を示す。落石が河床要素に連続して衝突して、河床に散らばっている様子がわかる。

図-7 は $y=0\text{m}$ 、 $x=10\text{m}$ の位置の x 成分と z 成分の速度波形をフーリエ変換して得られたフーリエスペクトルである。標準モデルの結果(最上段)を見ると、 x 成分は 30Hz 付近、 40Hz 強、 60Hz 付近にピークが見られる(矢印)。 z 成分は 50Hz 付近に最も大きなピークが見られる(矢印)。この特徴は、落下高さが低い(衝突速度が遅い)モデル(3 段目)、落石数が少ないモデル(最下段)の結果と共通している。一方、河床地盤が軟らかいモデル(2 段目)の結果では、 x 成分は 20Hz 、 30Hz 、 40Hz 付近、 z 成分は 40Hz 弱付近にピークが見られ(赤色矢印)、河床地盤振動の周波数特性が変化していることがわかった。すなわち、土石流によって生じる河床地盤振動の周波数特性は、落下高(衝突速度)や落石数に依存せず、河床地盤の物性によって影響を受けることがわかった。

図-8 は標準モデルに対する $y=0\text{m}$ 、 $x=0\text{m}$ の位置(落石の衝突位置)の x 成分(左)と z 成分(右)のフーリエスペクトルである。図-7 最上段の $x=10\text{m}$ の位置(衝突位置から離れた位置)のフーリエスペクトルと比較すると、図-7 ほどピークが明瞭ではないが、ピーク周波数は一致しており、そのピーク周波数に対する値も大きく変化してい

るようには見えない。逆に、ピーク周波数以外を見ると、 x 成分において 30Hz 未満および 60Hz より高周波数の帯域では、 $x=10\text{m}$ のフーリエスペクトルの値は顕著に小さくなっていることがわかった。 z 成分においても 50Hz 付近のピーク周波数以外の帯域では、 $x=10\text{m}$ のフーリエスペクトルが明らかに減衰していることがわかった。土石流によって生じる河床の地盤振動は、河床地盤の物性によって卓越する周波数成分の振動は減衰が少なく、それ以外の周波数の振動の減衰が顕著であると考えられる。

4. おわりに

個別要素法を用いて、河床を個別要素としてモデル化し、落石を河床に衝突させることによって、土石流によって生じる河床地盤振動を模擬した。河床の剛性、流速、流量を変化させ、算定された地盤振動を比較することによって、その振動特性や成因に言及した。

土石流によって生じる河床地盤振動の周波数特性は、落下高(衝突速度)や落石数に依存せず、河床地盤の物性によって影響を受けることがわかった。また、土石流によって生じる河床の振動は、河床地盤の物性によって卓越する周波数成分の振動は減衰が少なく、それ以外の周波数の振動の減衰が顕著であることがわかった。事前に河床付近の地盤の卓越周波数を調べることによって、土石流によって生じる地盤振動をより効率的に測定できる可能性が示唆されたと考えられる。

今後は、落石を河床に衝突させることによって土石流によって生じる河床地盤振動を模擬することの妥当性について、さらに検証を進める予定である。

謝辞

個別要素法の計算に関して、白井義朗博士に多大なるご協力をいただいた。

参考文献

- 1) 柳町年輝, 能和幸範, 武澤永純, 山越隆雄, 石塚忠範: 新型振動検知式土石流センサーの開発および実用化に向けた検討, 第 60 回平成 23 年度砂防学会研究発表会概要集, p.524-525, 2011.
- 2) 武澤永純, 神野忠広, 柳町年輝, 山越隆雄, 田村圭司: 地盤振動を活用した土石流の移動速度推定手法の提案, 土木技術資料, 51-9, pp.10-15, 2009.
- 3) 大角恒雄, 長山孝彦, 横納智裕: 振動センサーによる土石流・地震・ノイズ識別検知に関する一考察, 砂防学会誌, Vol.59, No.3, p.38-43, 2006.
- 4) 中谷加奈: GUI を実装した汎用土石流数値シミュレーションシステムの開発と適用, 京都大学学位論文, 2010.
- 5) 前田健一: DEM の基礎・特徴および斜面災害解析への応用例, 砂防学会誌, Vol.67, No.5, p.64-70, 2015.