

機関番号：13903

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18901

研究課題名(和文) マルチスケールでみた粒状体流れのスティック・スリップ現象の機構解明

研究課題名(英文) The multi-scale dynamics in granular flow considering stick-slip phenomena

研究代表者

前田 健一 (MAEDA, Kenichi)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50271648

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：粒状体の流れの代表的特徴をスティック・スリップ現象として捉え、流れに潜む粒子性と波動性の二重性を見出した。流れ挙動に及ぼす粒度や粒形、河床粗度、傾斜角の影響について、内部の可視化模型実験と数値解析を用いて調べる。限界状態土質力学の成果も活かし、流れの応力・ひずみ・間隙比の関係を統一的な解釈を試みた。

大きな粒子が浮き上がり先端と表層に集中する現象、分級現象のメカニズムをスティック・スリップと二重性の視点からメカニズムを説明できた。さらに、応力の波動伝播流速を用いて流れの特徴・分類を表現する(フルード数の定義)。マルチスケールの視点からフルード数を解釈し、流れ挙動を統一的に解釈する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究が、理学、工学などの幅広い分野で着目される粒状体流れの力学的体系や方向を大きく変革、転換するブレイクスルーの切欠になると考えられる。流れの代表的特徴をスティック・スリップとして捉え、その単純明快な物理モデルと粒子性と波動性の二重性で捉える視点によって粒状体力学の画期的な進展が図られたり、流れの合理的な特徴の表現や分類を可能にすることで、粒状体流れの様々な現象の統一的な理解が促進される。

流れ中に巨石が表面に浮き上がる現象や分級のメカニズムに新たな統一的な解釈を与えることで、さらに粒状体流れを捉える新しい原理や土砂災害軽減のための提案が期待される。

研究成果の概要(英文)：The mechanism of dry granular flow was examined in micro and macro views. First, flow behaviors of dry granular materials on a slope were examined using PIV image analysis and a DEM in two dimensions. The simulation results replicated the tendencies shown in the test model results. Relationships exist between macro and micro behaviors during phenomena such as velocity distributions in depth stratification and uplifts of large particles that change flow grades. Similarly, stress chains are transmission paths of contact forces, this study's discussion focus. The distribution of the averaged coordination number was found to correspond to the distribution of velocity, indicating three layers of structure. This stratification could be explained by the state parameter, a relative variable dependent on void ratio, mean normal stress, and critical state. Moreover, the stress chains formed from the riverbed concentrated the larger particles and pushed them upwards towards the flow surface.

研究分野：地盤工学

キーワード：土石流 スティック・スリップ マイクロメカニクス マルチスケール 粒状体 フルード数 限界状態 配位数

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

石礫型土石流のメカニズム解明を難しくしている理由として、粒子濃度の高い「粒状体」が主体であり、力を受け変形する粒状体の内部では粒子間の接触・剥離、滑り、回転といったマイクロ現象が生じ、これが流れの特性を大きく左右することが挙げられる。単純な流体力学的な「マクロ的手法」では理解は難しいと考えられる。他方で、粒子個々に着目した「マイクロ的手法」では粒子濃度の希薄な場合には有益であるが、高い粒子濃度の場合には扱う粒子数が多く、成功しているは言い難い。ここで、申請者らの模型実験や実際の石礫流れの計測結果でも発見されている、流れ表面の速度が周期的もしくは非周期に変動する現象に着目した。この現象は摩擦をもつ質点とバネを連結させた単純明快なモデルで表現されるスティック・スリップ現象に極めて類似していると同時に、多質点系では疎密波が伝播するものである。そこで、粒状体流れに潜むスティック・スリップに着目し、粒子性と波動性を同時に持ち合わせるという二重性（量子力学の概念）が複雑現象解明の突破口となるキーワードと考えた。さらに、マクロとミクロを繋ぐ中間スケール「粒子が鎖状に繋がり力を伝える応力鎖」に着目した。

2. 研究の目的

本研究での設定した主な目的と達成目標を以下に示す。

- (1)粒状体の流れの代表的特徴をスティック・スリップ現象として捉え、流れに潜む粒子性と波動性の二重性を見出す。流れ挙動に及ぼす粒度や粒形、河床粗度、傾斜角の影響について、内部の可視化模型実験と数値解析を用いて調べる。限界状態土質力学の成果も活かし、流れの応力・ひずみ・間隙比の関係を統一的に捉える。
- (2)大きな粒子が浮き上がり先端と表層に集中する現象、分級現象のメカニズムをスティック・スリップと二重性の視点からメカニズムを明らかにする。二次元、三次元について検討する。
- (3)スティック・スリップ現象を流れ中の応力鎖の発生・消滅と関連付けて説明し、応力の波動伝播特性を明らかにするとともに、伝播流速を用いて流れの特徴・分類を表現する（フルード数の定義）。マルチスケールの視点からフルード数を解釈し、流れ挙動を統一的に解釈する。

3. 研究の方法

本研究では、応力鎖の発生・消滅というダイナミクス、限界状態の概念、流れ挙動や内部で発生する応力波の伝播、フルード数に着目して、粒状体流れに関する模型実験と数値解析を実施し、それぞれの結果の比較や相互補完によって検討を進める。粒度や粒形、間隙水の有無、河床粗度、傾斜角の影響について体系的に調べる。模型実験では、画像解析による速度分布計測、内部の密度や応力鎖の可視化を試みる。解析では、二次元、三次元のDEM計算を行う。流れ中の応力・ひずみ（速度）・ダイレイタンス・間隙比のマクロ量と粒子レベルのマイクロ現象との関連調べ、構造体としての応力鎖の発生・消滅条件、安定条件を考慮しながら検討する。これらの視点で巨石の浮き上がり現象を考察する。

4. 研究成果

**(1)【応力鎖と限界状態から捉えた流れのマイクロメカニクス】**

石礫型土石流のような粒子流れの速度構造の層状化のメカニズムを考察するために二次元DEMシミュレーションの適用を試みた。連続体と離散体の二重性の考察を以下に要約する。

- ① 粒状体流れ中には応力鎖が河床から流れ上流側に向かう発生と消滅を繰り返していることが分かった。流れ中では、粒子接触面の異方性が誘導され、表面では流れに平行に、深いところではせん断現象によって最大主応力方向の流れ上流側に発達することを明らかにした。
- ② 流れ断面は深さ方向に、S層（速くて緩く、衝突が卓越する表層）、M層（比較的密で他の層よりも安定した構造を持つ中間層）、B層（流れは遅いものの大きなせん断ひずみが発生し構造は不安定な底面層）の三層に分けられ（図-1）、それぞれの層境界に土の塑性力学の限界状態に達している遷移領域があるとする新しい流れ構造の考え方を示した。これによって、粒子流れでは深さ方向に統一した構成モデルを考えるというよりも、粒状体のせん断挙動と粒子間の衝突挙動が、流れの境界条件（自由表面の存在、河床条件）に応じて深さ方向に発生していると捉えることができる。

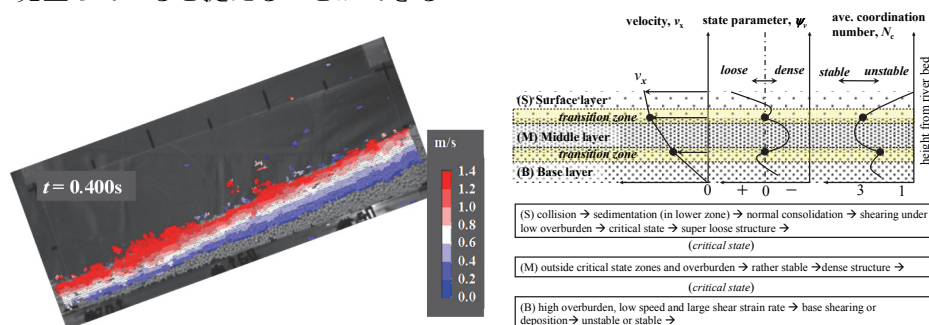


図-1 粒子流れ中の速度分布の例（左図）と粒子流れ中の三層構造（速度，state parameter，平均配位数の深度分布）の概念図

## (2) 【応力鎖のダイナミクスに着目したと分級現象の解明】

図-2 左に良配合試料の中腹部及における流れの様子(実験)を示す. 分級現象が確認できた. 右図には, 広い粒度の崩壊試料で河床・ラフにおいて, 着目メッシュ (2.0m×0.5m) 毎の粒度分布を示す(解析:  $R_D=D_{max}/D_{min}=10$ ). 崩壊前は深度方向にほぼ同じだが, 流れの中腹では河床から表層に向かうにつれて粒径の大きい粒子が多くなり, 小さい粒子が少なくなる. 他の傾斜, 河床, 崩壊土砂の条件の結果については紙面の都合上省略するが大よそ以下のような結果となる. 逆グレーディングのような分級現象は, 傾斜角度が大きい場合や河床が滑らかな速い流れでは生じない. 河床がラフで傾斜が安息角のとき粒状体流れ特有の現象が現れる. これは図-3 にあるように大きい応力の印を付けられた粒子が連なった応力鎖が河床から大粒径粒子の下に向かって安定して発生するためである. 安息角よりも傾斜が緩いと流下距離が短く, すぐ堆積してしまう. 一方, 傾斜が急だと粒子の接触が少ない. そのため緩傾斜や急傾斜では逆グレーディング現象が生じない. このように, 粒状体みの流れで逆グレーディング現象が生じたことからこの現象は粒子同士の接触によるものである. しかも充分な接触状態も必要となる.

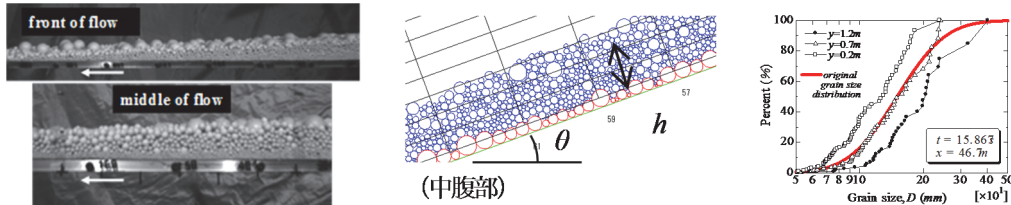


図-2 左図: 中腹部の分級の様子(実験: 良配合試料), 右図: 解析の流れの様子 ( $R_D=10$ , 粒子固定河床), と深度方向にとったメッシュ単位の粒度分布

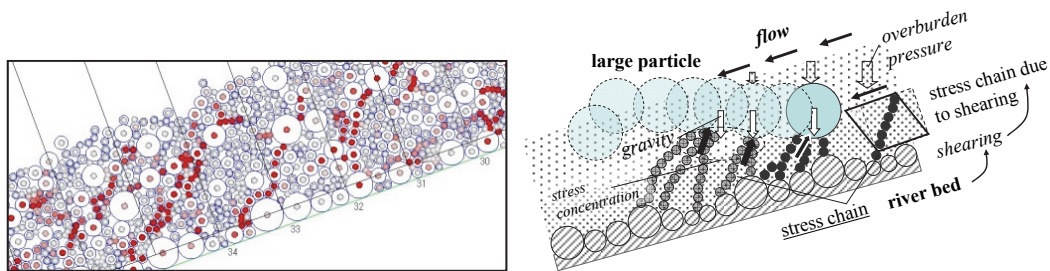


図-3 左図: 応力鎖発達の様子(解析:  $R_D=10$ , 粒子固定河床), 右図: 大粒の浮き上がりメカニズムの説明

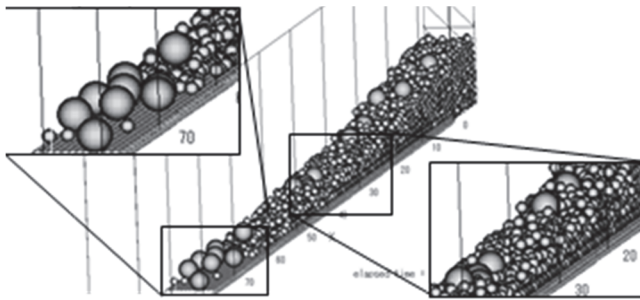


図-4 3次元個別要素法による逆グレーディング再現例の様子(左上: 先端部, 中; 全体図, 右下: 中腹)

3次元個別要素法による解析結果を示す(図-4). 左上の先端部の拡大図や右下の中腹の拡大図より, 2粒径試料において大きな粒子の先端部への集中と浮きあがり現象の再現ができた.

## (3) 【スティックスリップと新たなフルード則に着目した粒状体の流動挙動】

流れ表面の速度が周期的もしくは非周期に変動することが模型実験や実際の石礫流れの計測結果でも発見されている. 本研究では, この変動現象のスティック・スリップ現象との関連についても調べた. そこで, 応力鎖の発生・消滅といった粒子群のダイナミクスと流れの中に発生する圧縮応力の波動との二重性(粒子性と波動性)を考慮して, 粒状体流れの複雑現象の解明を試みた.

以下に特徴的な解析例を示す. 詳細については今後も検討を進めるべきであるが, 粒状体流れの現象解明の新たな方向性を示すことができたと考えられる. 例えば, 粒子群の流れを任意断面 ( $x=50.0\text{m}$ ) にて観測を行った結果を示す. 粒状体流れ特有の現象を起こす速度について検討するため, 粒状体流れに水理学で用いられるフルード数を当てはめた. 図-5 (左) に示すように, 水路の傾斜角を  $\theta$  (deg.), 高さを  $h$  (m), 断面平均速度を  $v$  (m/s) とし, 長波速度(深さの平方根)とフルード数を定義した. フルード数は断面平均速度と長波速度との比である. 河床粗度や粒度の異なるケースの任意断面におけるフルード数の経時変化と重力波速度の経時変化を右図に示す.



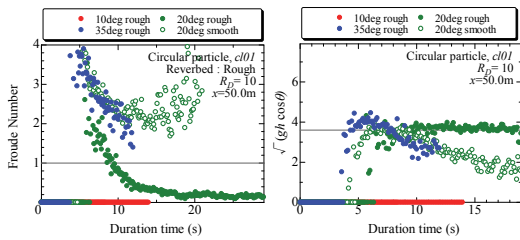


図-5 粒状体流れのフルード数の経時変化 (左) , 長波速度経時変化 (右)

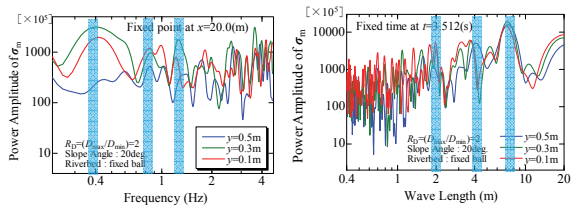


図-6 粒状体流れ中の応力波の周波数特性 (左) , 波長特性 (右)

河床がスムーズのときのみフルード数は1より大きな値で発散する。そのほかのケースは1以下の値に収束する(図-5 (左))。河床がスムーズの場合以外は前述で得られた応力波速度に長波速度が3.2m/sくらいに収束していく(図-5 (右))。フルード数が1より大きくなる条件と応力鎖が発生しない条件が一致した。

つぎに、粒子群の流れ中に発生する振動について検討を行った。固定メッシュ ( $x=20.0\text{m}$ ,  $y=0.1\text{m}$ ) における平均主応力分布の経時変化, 時刻 ( $t=3.512\text{s}$ ) における深さ  $y=0.1\text{m}$  の流下方向の平均主応力分布は振動しており粒子群の流れは振動を伴っていることを確かめた。 $y=0.1, 0.3, 0.5\text{m}$  においてフーリエスペクトル解析により固定メッシュにおける平均主応力分布の経時変化から周波数特性(図-6 (左)), 任意時刻における流下方向の平均主応力分布からは周波数特性(図-6 (右))を求めた。応力鎖の発生する条件である傾斜角が安息角で河床がラフのとき左図より応力波の卓越周波数:  $f=0.4, 0.8, 1.2$  (Hz) と, 右図より応力波の卓越波長  $\lambda=8.0, 4.0, 2.0$  (m) と読み取れる。応力波の波速:  $V_{\sigma m}=f \times \lambda$  より  $V_{\sigma m}=3.2$  (m/s) であると算出できる。これはフルード数の長波速度の値と一致する。

さらに、図-7 左は波速比と配位数の経時変化を示す。波速比は平均速度の応力波速との比で、配位数とは一粒子当たりの接点数のことである。配位数は大きいほど構造が安定していることを表す指標である。試料崩壊後、配位数は減少しながら波速比は大きくなっていく。次第に波速比が小さくなり1より小さくなると配位数が増加に転じ一気に配位数が増加する。つまり不安定化しながら加速し、減速に転じたのち波速比が1より小さくなると構造が安定化していく。また、図-7 右には以上の結果から応力波の速度を用いたフルード数と配位数による流れの力学的分類を試みた結果を示す。つまり、粒子群の流れは応力鎖によって支配されており、応力鎖が発生と消滅を繰り返すことが縦波を伴った流れを作り出している。このように、粒状体にフルード数を当てはめると長波速度は応力波速と一致し、流速と長波速度との大小関係で堆積や緩い状態での流下に分けることができることが明らかになった。

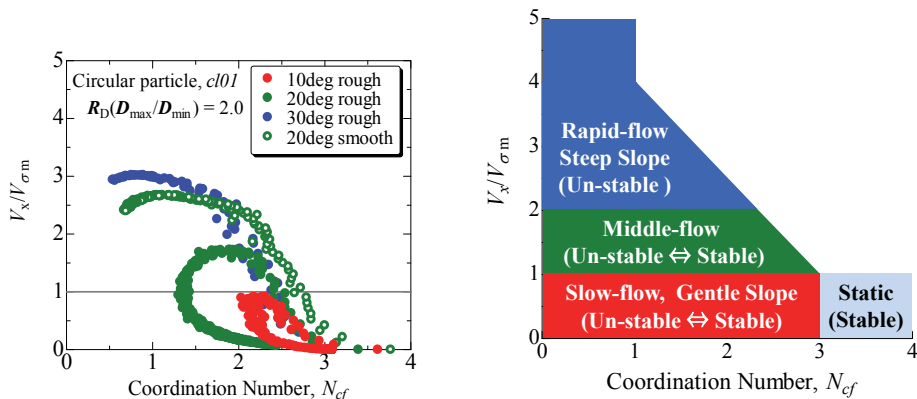


図-7 波速比と配位数の経時変化と流れ中の速度と構造状態の新たな概念図

#### (4) 【研究で浮上した新たな課題への挑戦： 衝撃力が重要であることが判明し、その基礎的な挙動を究明し数値解析でモデル化】

以上のように目標とする成果を当初の研究計画通りに得ることができたが、斜面を流動する粒状体流れ挙動の把握や解析の再現性を挙げるには、粒子が堆積層や道路施設(舗装体, 斜面と道路との間にある空間であるポケット, 土堤など)に落下・衝突するときの衝撃接触・跳ね返り挙動が重要であることが分かった。そこで、計画時には予定していなかったが、研究を進めるにあたり浮上した課題であり、それに積極的に取り組んだ。以上から、比較的大規模な落体粒子の反発挙動把握を目的に、落下高さや重錘質量の違いによる反発係数の違いについて小型の模型実験(例えば、図-8) および大型の模型実験と解析を行い考察した。その後、異なる算出方法で反発係数を求め、その違いについて考察した。さらに、土堤およびポケットの流動・落下してきた粒子が衝突した際のエネルギー減衰挙動の把握のための基礎的検討も行っている。高さ 0.5 m

の土堤模型を対象として外力を変化させた重錘衝突実験を実施した。これらから、得られた主な知見は以下の通りである。

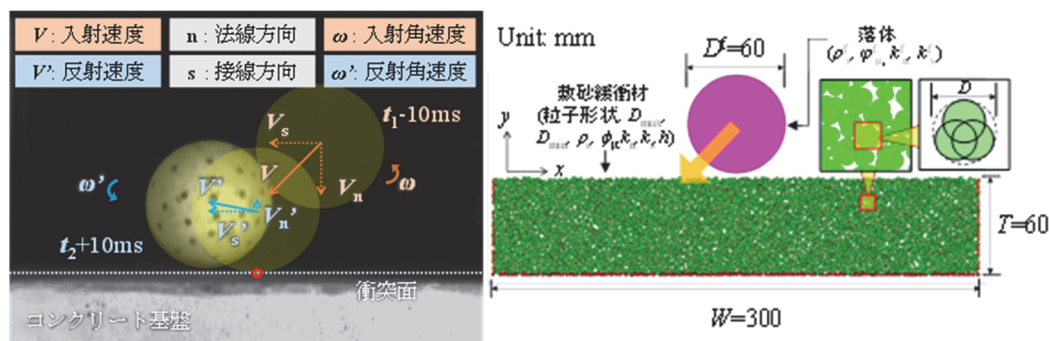


図-8 着目した速度・角速度・接触時間およびDEM解析による模型実験再現モデル概要

- ① 落下高さが大きくなるほど、重錘質量が大きくなるほど反発係数は小さくなる傾向にあることが分かった。また、この傾向は落下高さ、重錘質量が小さいほど顕著に表れるということが分かった。被衝突体を土砂とした場合、被衝突体をコンクリートとした場合に比べて反発係数が小さくなる傾向にある。これは、剛性の違いによるものと考えられる。
  - ② 土砂を被衝突体としたケースでは、重錘質量が大きくなるほど反発係数が小さくなる傾向にならない。このことから、被衝突体の剛性が小さい場合、重錘質量が大きくなるほど反発係数が小さくなる傾向は表れない可能性がある。
  - ③ 速度比から算出された反発係数は、高さ比から算出された反発係数に比べて大きくなる傾向にあり、この傾向は落体の外力が大きくなるほど顕著に表れる。このことから、落石シミュレーションで反発係数のパラメータを用いる場合、どの方法で算出された反発係数を用いるべきか検討していく必要がある。
  - ④ 落体衝突後、地表面は沈下しその後押し上げられた。このことから、落体は地表面から離れていないにも関わらず、地表面に押し上げられるため、鉛直上向き速度が出てしまう可能性がある。
  - ⑤ 落下高さが大きくなるほど土堤の落体粒子の衝突によるダメージは大きくなる傾向にある。全エネルギーは、落体粒子の土堤衝突直後に急速に減衰し、その後は一定になる。また、全エネルギーが急速に減少する時間帯が、落体粒子の衝撃力の波形立ち上がり時刻と一致する。
  - ⑥ 落下する高さ 1m~3m のケースでは、土堤が重錘を捕捉したのに対し落下高さ 6m のケースでは落体粒子が土堤を乗り越える。落下高さを増加させると落体粒子の貫入量は線形的に増加する傾向にあるが、最大駆け上がり高さの場合は非線形的に増加する。
- 以上のことは基礎的な検討であるが、今後の斜面崩壊のメカニズム解明や防災において重要な数値解析の精度を大きく向上させるための重要な研究課題である。今後、大きな発展が考えられる成果が得られた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計8件)

- ① ZHANG Weijie, GAO Yufeng, HUANG Yu, MAEDA Kenichi: Normalized correction of soil-water-coupled SPH model and its application, Chinese Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 40 (2), pp.262-269, 2018. (査読有)
- ② 鈴木悠真, 前田健一, 松田達也: 水平流れが作用する地盤への浸透現象に伴う過剰間隙水圧の発生要因分析, 土木学会論文集 B2, 74(2), 2018. (査読有)
- ③ 田中敬大, 前田健一, 堀耕輔, 牛渡裕二, 川瀬良司, 鈴木健太郎: 二次元個別要素法を用いた落石防護土堤の衝撃緩衝性能に関する数値解析, 構造工学論文集, 64A, 2018. (査読有)
- ④ 山口敦志, 前田健一, 松田達也, 高木健太郎: 表層流れに起因する地盤の流動および間隙水圧変化に関する DEM-CFD 解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.73, No.2, I\_517-I\_522, 2017. (査読有)
- ⑤ 内藤直人, 前田健一, 田中敬太, 牛渡裕二, 鈴木健太郎, 川瀬良司: 個別要素法を用いた岩塊及び岩塊群の到達距離に関する数値解析的検討, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.1107-1120, 2017. (査読有)
- ⑥ 田中敬太, 前田健一, 内藤直人, 今野久志, 牛渡裕二, 川瀬良司: 地盤材料である砂と碎石を用いた互層緩衝構造の落石衝撃緩衝メカニズム, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.1096-1106, 2017. (査読有)
- ⑦ 前田健一: (総説) 数式のない土木の数値解析 地盤工学における粒子ベースの数値解析の可能性 —地盤を科学し好学するために— 土木学会誌 (土木学会) 102(4) pp.44-45,

2017. (査読有)

- ⑧ 松田達也, 前田健一, 山口敦志, 高木健太郎, 鶴ヶ崎和博, 宮本順司, 角田紘子: PIVによる水平流れに起因した土粒子・土粒子群の微視的な流動挙動解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.73, No.2, I\_529-I\_534, 2017. (査読有)

(現在, 国際ジャーナルに1編投稿中, 2編投稿準備中である)

[学会発表] (計14件)

- ① 松尾和茂, 前田健一, 堀耕輔, 峯祐貴, 阿部和樹, 中釜祐太: 落石の外力が反発係数に及ぼす影響, 平成30年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会, A-32, 2019.
- ② 高橋浩司, 牛渡裕二, 川瀬良司, 前田健一, 堀耕輔, 佐藤恭兵: 落体の反発挙動に関する斜入射落下実験, 平成30年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会, C-02, 2019.
- ③ 田中敬大, 前田健一, 堀耕輔, 牛渡裕二, 川瀬良司, 鈴木健太郎: 二次元個別要素法を用いた落石防護土堤の衝撃緩衝性能に関する数値解析, 構造工学論文集, Vol.64A, 2018.
- ④ 堀耕輔, 前田健一, 田中敬大, 松尾和茂, 牛渡裕二, 川瀬良司, 今野久志: 二次元DEMを用いた落石防護土堤の耐衝撃性能に及ぼす法勾配と粘着力の影響に関する検討, 第23回(平成30年度)計算工学講演会, 2018.
- ⑤ 松尾和茂, 前田健一, 堀耕輔, 田中敬大, 寺澤貴裕: 落石の貫入と敷砂緩衝材の応力伝播に着目した衝撃力波形形成メカニズム, 第53回地盤工学研究発表会, 2018.
- ⑥ 松尾和茂, 前田健一, 堀耕輔, 田中敬大, 川瀬良司: 敷砂緩衝材の内部変形挙動に着目した衝撃力波形形成メカニズム, 第73回土木学会年次学術講演会, 2018.
- ⑦ 内藤直人, 前田健一, 田中敬大, 堀耕輔, 牛渡裕二, 鈴木健太郎, 川瀬良司: 落石防護土堤の耐衝撃性能に及ぼす粘着力の影響に関する個別要素法解析, 計算工学講演会論文集, Vol.22, 2017.
- ⑧ 前田健一, 田中敬大, 堀耕輔, 西村柁哉: 一次元スティックスリップ現象のマイクロメカニクスに着目した粒状体の流動挙動, 第52回地盤工学研究発表会, 2017.
- ⑨ 堀耕輔, 前田健一, 内藤直人, 田中敬大, 牛渡裕二, 鈴木健太郎, 川瀬良司: 落石防護土堤の耐衝撃挙動に及ぼす落体質量と衝突速度の影響に関するDEM解析, 第52回地盤工学研究発表会, 2017.
- ⑩ 山口敦志, 前田健一, 高木健太郎: 表層流れによる地盤応力変化の解析的考察の試み, 第52回地盤工学研究発表会, 2017.
- ⑪ 田中敬大, 前田健一, 内藤直人, 堀耕輔: 個別要素法解析を用いた粒状体流れの流下・堆積挙動に及ぼす粒子特性の影響, 第52回地盤工学研究発表会, 2017.
- ⑫ 堀耕輔, 前田健一, 田中敬大, 内藤直人, 牛渡裕二, 鈴木健太郎, 川瀬良司, 異なる飽和度における落石緩衝材の側方変位に着目した衝撃緩衝メカニズム, 平成29年度全国大会第72回年次学術講演会(土木学会), 2017.
- ⑬ 山口敦志, 前田健一, 松田達也, 高木健太郎: 表層流れに起因する地盤の流動および間隙水圧変化に関するDEM-CFD解析, 第64回海岸工学講演会, 2017.
- ⑭ 松田達也, 前田健一, 山口敦志, 高木健太郎, 鶴ヶ崎和博, 宮本順司, 角田紘子: PIVによる水平流れに起因した土粒子・土粒子群の微視的な流動挙動解析, 第64回海岸工学講演会, 2017.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.maeda-lab.org/>

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: David Muir Wood

ローマ字氏名: David, Muir Wood

研究協力者氏名: Andy Take

ローマ字氏名: Andy, Take