

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01295

研究課題名(和文)堆積物重力流の流動挙動評価

研究課題名(英文)Evaluation of flow behavior of sediment gravity flow

研究代表者

亀田 純 (Kameda, Jun)

北海道大学・理学研究院・准教授

研究者番号：40568713

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：2018年9月6日に北海道胆振東部地震(Mw6.7)が発生した。地震による強い揺れは、震源付近の丘陵地一帯に大規模な斜面崩壊をもたらした。本研究では、地すべり面の粒子表面物性に注目して斜面崩壊の発生メカニズムを検討した。調査の結果、斜面に堆積する火山灰層(樽前d)最下部のすべり面からハロイサイト粘土鉱物が確認された。これらのハロイサイトは球形～不定形を呈し高い保水性を示すこと、また粒子表面は広いpH領域において負に帯電していることが分かった。降雨時には粒子間反発力が高まることで土壌粘着力が低下することが示唆され、このような性質が斜面の不安定化や土砂の高い流動性をもたらしたと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2018年北海道胆振東部地震が発生した際に、震源付近の火山灰土壌で覆われた斜面が大規模に崩壊し、大きな被害をもたらされた。日本は火山国であり、今回崩壊したような火山灰土壌は全国に広く分布する。今回の研究により、火山灰土壌の崩壊・流動現象が、ハロイサイト粘土鉱物の形状や表面物性と密接に関係していることが明らかとなった。土壌中のハロイサイト粘土鉱物の分布に加えその性状を把握することは、火山地帯における斜面災害対策を講じる上で重要と考えられる。

研究成果の概要(英文)：The Eastern Iburi earthquake (Mw = 6.7) occurred on 6 September 2018 in southern Hokkaido. The resulting strong ground motion caused hill slopes widely covered by volcanic soils near the epicenter to fail suddenly. In this study, we investigated the mechanism of landslide initiation and runout behavior, paying particular attention to the surface properties of soil particles. Field surveys revealed that, in most of these landslides, the basal part of the volcanic soils acted as the principal slip surface, where halloysite clay minerals were specifically formed. Halloysite is spherical to irregular in shape, has high water retention and absorption properties, and the particle surface is negatively charged in a wide pH range. These properties may have contributed to the instability of slopes and the high mobility of soils during the earthquake.

研究分野：構造地質学

キーワード：北海道胆振東部地震 斜面崩壊 流動化地すべり ハロイサイト ゼータ電位 細胞外ポリマー

## 1. 研究開始当初の背景

海洋底で発生する地すべりや土石流といった重力流現象は、パイプラインや海底の通信・電源ケーブルなどの海底施設に深刻なダメージを与えるジオハザードとして認識されつつある (Locat and Lee, 2002)。また、大規模な堆積物重力流が過去に巨大な津波を引き起こした可能性も指摘されている (Lovholt et al., 2017)。したがって、堆積物重力流の発生メカニズムや流下挙動を理解することは、海域で起こる様々なジオハザードに対して適切な対策を講じるうえで重要である。

堆積物重力流の発生・流下挙動を予測するためには、流動の形態や海底地形などの情報に加え、重力流を構成する堆積物・海水混合体のレオロジー特性を知る必要がある。堆積物・海水混合体のレオロジー特性は、粒径、水・岩石比、鉱物種などによって変化することが指摘されているが (Torrance, 1999) そのような変化を引き起こすメカニズムは十分に検討されていない。またレオロジーパラメータも十分に取得されているとは言い難い状況であった。

## 2. 研究の目的

本研究では、海底・陸上堆積物分散液のレオロジー実験によって、それらの流動特性や流動パラメータを評価することを目的とする。特に固体粒子の表面物性というミクロな視点から、流動特性の支配要因を明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究課題を開始した 2018 年の 9 月に、北海道南西部を震源とする北海道胆振東部地震が発生した。最大深度 7 を記録した震源付近の丘陵地では、強いゆれによって大規模な斜面崩壊が同時多発的に発生し、大きな被害もたらされた。本研究課題は、当初海底の重力流のみを研究対象と設定していたが、上記地すべりの発生を受けて、陸上の重力流現象も対象に含め、これらを並行して進めることにした。地すべりの現地調査、レオロジー試験、土砂粒子の表面物性測定、数値実験などを組み合わせて、おもに以下の 4 つの研究テーマを実施した。

- (1) 北海道胆振東部地震に伴う表層崩壊型地すべりの発生機構
- (2) ハロイサイト含有土壌の弱化メカニズム
- (3) 流動化地すべりのインバージョン解析
- (4) 海洋堆積物のレオロジー特性に対する細胞外ポリマーの影響

## 4. 研究成果

### (1) 北海道胆振東部地震に伴う斜面崩壊の発生機構

2018 年北海道胆振東部地震の発生に伴う斜面崩壊が多発した北海道厚真町付近の地すべりサイトにおいて現地調査を行った。その結果、海成層直上の火山灰層 (Ta-d 層) がすべり面となっていること、火山灰層には風化生成物としてハロイサイトができていないこと、火山灰層は液性限界を超える水分量を持していること、などが明らかとなった (図 1)。自然含水量条件ですべり面試料の粘弾性実験を行ったところ、バイリニアモデル (低歪み速度領域では高粘性のニュートン流動 + 高歪み速度領域ではピンガム流動) で記述される流動曲線が得られた。このことは、すべり面の降伏応力が極めて小さく、容易に流動する状態にあったことを示唆している。さらに、火山灰層の液状化を示唆する構造が数カ所の滑落崖において観察された (図 1 の粘土層)。以上のことから、地震発生時の強い地震動が、火山灰層の液状化に伴う弱面を形成し、斜面の不安定化を引き起こしたと考えられる。本成果は論文として報告した (Kameda et al., 2019)。

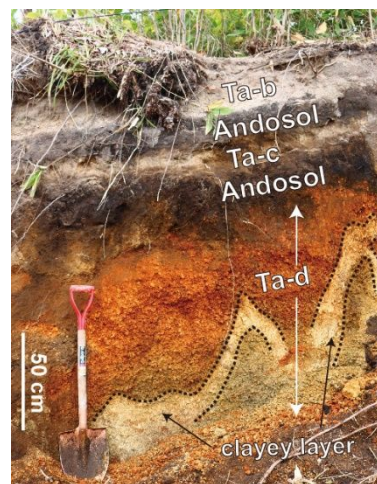


図 1. 厚真町富里地区において観察された滑落崖

### (2) ハロイサイト含有土壌の弱化メカニズム

上記地すべりサイトから採取したすべり面試料について、さらに詳細な鉱物分析や粒子表面物性測定を行った。電子顕微鏡観察および X 線回折分析の結果、すべり面には不定形～球形を呈するハロイサイト粘土鉱物が 50% 程度含まれていること (図 2)。またガス・水蒸気吸着実験により、このようなハロイサイトは一般にみられるチューブ状ハロイサイトに比べて高い吸水性・保水性を示すことが分かった。この性質が降雨後の土砂を長期間にわたって高含水状態に保持していた可能性がある。

また粒子のゼータ電位測定を行ったところ、粒子表面は広い pH 領域において負の電荷を持っており（等電点は  $\text{pH} < 2$ ）、電位の絶対値は、pH の上昇あるいはイオン強度の低下にともなって次第に上昇することが分かった。このことは、地震発生前の降雨によってハロイサイト粒子のゼータ電位の絶対値が上昇し、分散性（粒子間反発）が高まることで、土壌の粘着力が低下（強度が低下）していたことを示唆している。一方、アロフェン粒子は等電点が中性付近にあり、土壌中ではハロイサイト粒子より分散性が低いと考えられ、そのためアロフェン含有層はハロイサイト含有層に比べて強度が高いことが予想される。本成果は論文として報告した（Kameda, 2021, 掲載決定済）。

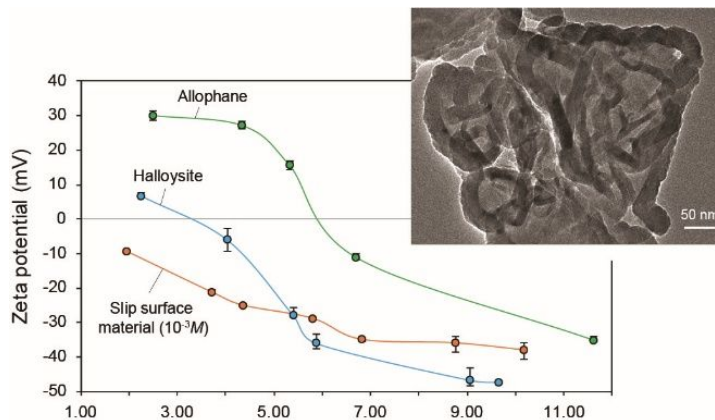


図 2. すべり面を構成するハロイサイト粒子の形態とゼータ電位

### (3) 流動化地すべりのインバージョン解析

斜面を構成する土砂のレオロジー特性とその流下挙動の評価を目的として、インバージョン解析を行った。対象とした地すべりは、北海道胆振東部地震の震源に近い厚真町朝日地区において斜面が表層崩壊して発生したものであり、南西方向に 20 度傾斜した斜面にそって土砂がおよそ 100m 流下した（Li et al., 2000）。インバージョン解析にはマルコフ連鎖モンテカルロ法を採用し、現地調査で得られている地すべり土塊の形状とモデル計算の残差を最小とするレオロジーパラメータ（降伏応力、塑性粘度）の最適化を試みた（図 3）。フォワードモデルには、土石流の解析用に開発された BING（Imran et al., 2001）を採用した。解析の結果、降伏応力と塑性粘度はそれぞれ 1500 Pa、800 ~ 3000 Pa.s と見積もられ、このとき土塊の形状をほぼ再現できることが分かった。今回の解析によれば、地すべり発生時の土砂先端の速度は 6 ~ 9m/s に達し、発生から 2-4 分以内に流動はほぼ停止したと推定される。本成果は論文として報告した（Kameda and Okamoto, 2021）。

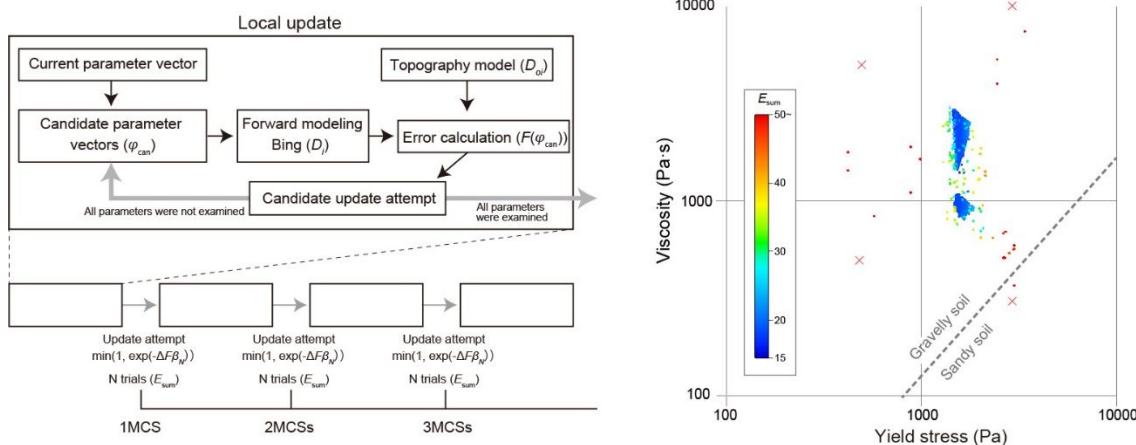


図 3. 流動化地すべりのインバージョン解析手順と解析によって求められた土砂の降伏強度と塑性粘度

### (4) 海洋堆積物のレオロジー特性に対する細胞外ポリマーの影響

海洋底堆積物に含まれる細胞外ポリマー（Extracellular polymeric substances, EPS）が重力流の発生および発生後の流動挙動に及ぼす影響について検討した。細胞外ポリマーは、海洋微生物が分泌する高分子であり、河口付近や潮間帯にみられる浅海堆積物には、最大で 5% 程度の細胞外ポリマーが含まれている。そのような環境では、細胞外ポリマーが持つ強い粘着効果によって、ベッドフォームの形状発展も大きな影響を受けていると考えられている（Parsons et al., 2016）。

海洋底堆積物の模擬物質としてカオリナイト-石英の混合粉末、細胞外ポリマーの模擬物質として xanthan gum を用いて、それらの配合比を変化させた試料を作成し（xanthan gum 濃度: 0.1 ~ 0.5wt%）流動実験を行った。これらの試料についてフローカーブ測定を行ったところ、い

ずれも Herschel-Bulkley model で記述される流動挙動を示すことが分かった。また、xanthan gum を 0.1wt%添加するだけでも、分散液のレオロジーパラメータ（降伏応力、ベキ乗指数、コンシステンシーインデックス）は顕著に変化することが分かった。電子顕微鏡により分散液の微細組織を観察したところ、堆積物粒子表面に xanthan gum が接着することで粒子どおしを繋ぎ止めている様子が確認された（図4）。xanthan gum のこのような働きにより分散液の流動特性が大きく変化したと考えられる。

得られたパラメータに基づき、重力流の数値実験を行ったところ、xanthan gum 添加量の増加と共に流下距離は一樣に低下し、0.5wt%添加した試料では、無添加の場合と比較して、その距離はおよそ半分程度に抑制されることが分かった。一方、重量流に伴う津波数値解析を行ったところ、生成される津波波形に大きな違いは見られなかった。以上のことから、海洋底堆積物中の細胞外ポリマーの存在は（あるいは人工的な散布による添加は）一定のジオハザードリスクの低減効果を期待できるが、重力流の発生に伴う津波リスクに対しては大きな抑制効果は見込めないことが示された。本成果は論文として報告した（Kameda and Hamada, 2021）。

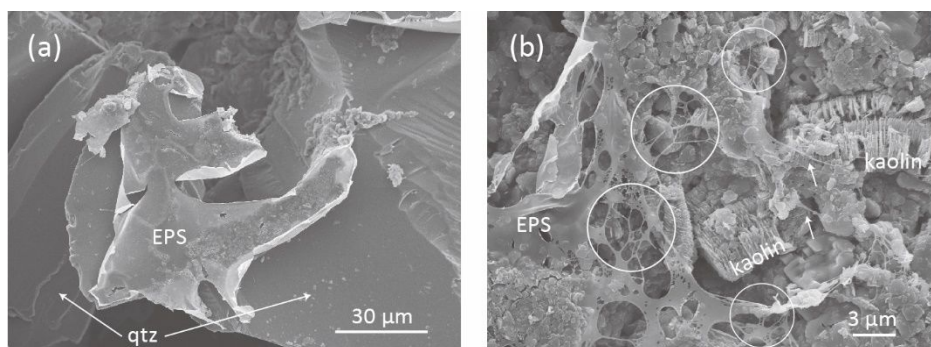


図4. 実験試料の電子顕微鏡写真。粒子は石英およびカオリナイト。ファイバーあるいはフィルム状の xanthan gum が堆積物粒子をつなぎとめて、分散液のレオロジー特性を大きく変化させたと考えられる。

#### < 引用文献 >

- Imran J, Harff P, Parker G (2001) A numerical model of submarine debris-flow with graphical user interface. *Comput Geosci* 27:717–729
- Locat J, Lee H (2002) Submarine landslides: Advances and challenges. *Canadian Geotechnical Journal*, 39:193–212.
- Løvholt F, Bondevik S, Laberg JS, Kim J, Boylan N. (2017) Some giant submarine landslides do not produce large tsunamis. *Geophys. Res. Lett.* 44:8463–8472.
- Li R, Wang F, Zhang S (2020) Controlling role of Ta-d pumice on the coseismic landslides triggered by 2018 Hokkaido Eastern Iburu earthquake. *Landslides* 17:1233–1250.
- Parsons DR et al. (2016) The role of biophysical cohesion on subaqueous bed form size. *Geophys. Res. Lett.* 43:1566–1573.
- Torrance JK (1999) Physical, chemical and mineralogical influences on the rheology of remoulded low-activity sensitive marine clay. *App. Clay Sci.* 14:199–223.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kameda Jun, Kamiya Hiro, Masumoto Hirokazu, Morisaki Tomonori, Hiratsuka Toru, Inaoi Chisaki	4. 巻 9
2. 論文標題 Fluidized landslides triggered by the liquefaction of subsurface volcanic deposits during the 2018 Iburi-Tobu earthquake, Hokkaido	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 13119
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-019-48820-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Kameda Jun, Hirauchi Ken-ichi	4. 巻 403
2. 論文標題 Rheological properties of composite serpentine-brucite suspensions: Implications for mudflow behavior on forearc seamounts	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Marine Geology	6. 最初と最後の頁 191 ~ 196
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.margeo.2018.06.004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kameda Jun, Hamada Yohei	4. 巻 47
2. 論文標題 Cohesional Slip on a Plate Subduction Boundary During a Large Earthquake	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 88395
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2020GL088395	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kameda Jun, Yohei Hamada	4. 巻 11
2. 論文標題 Influence of biopolymers on the rheological properties of seafloor sediments and the runout behavior of submarine debris flows	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1493
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-81186-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kameda Jun, Okamoto Atsushi	4. 巻 73
2. 論文標題 1-D inversion analysis of a shallow landslide triggered by the 2018 Eastern Iburi earthquake in Hokkaido, Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-021-01443-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計3件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 Kameda Jun, Kamiya Hiro, Masamoto Hirokazu, Morisaki Tomonori, Hiratsuka Toru, Inaoi Chisaki
2. 発表標題 Fluidized landslides triggered by the liquefaction of subsurface volcanic deposits during the 2018 Iburi-Tobu earthquake, Hokkaido
3. 学会等名 地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 亀田純・濱田洋平
2. 発表標題 海洋底堆積物の流動特性に及ぼす細胞外ポリマー影響 海洋底堆積物の流動特性に及ぼす細胞外ポリマー影響
3. 学会等名 日本地質学会126年学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kameda Jun, Hirauchi Ken-ichi
2. 発表標題 Rheological properties of composite serpentine-brucite suspensions: Implications for mudflow behavior on forearc seamounts
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	北村 有迅  (Kitamura Yujin)  (70648097)	鹿児島大学・理工学域理学系・助教   (17701)	
研究協力者	佐久間 博  (Sakuma Hiroshi)  (20400426)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・環境再生材料ユニット・主幹研究員   (82108)	
研究協力者	濱田 洋平  (Hamada Yohei)  (80736091)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・高知コア研究所・副主任研究員   (82706)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------