

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 9 月 22 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19H02397

研究課題名(和文) 海底地すべりモデルの構築：日高沖「静内海底地すべり堆積体」の発生機構と運動様式

研究課題名(英文) Construction of submarine landslide model: generation mechanics and motion pattern of Shizunai submarine landslide, off Hidaka, northern Japan

研究代表者

荒戸 裕之 (Arato, Hiroyuki)

秋田大学・国際資源学研究科・客員教授

研究者番号：50728433

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)： 静内海底地すべり堆積体(北海道南方沖)では、既存三次元地震探査データの詳細な解析結果に基づき新たな海底地すべり滑動モデルを提唱するとともに新規資試料取得計画を提案した結果、地球深部探査船「ちきゅう」による海底表層コア試料の採取計画(SCORE)が採択され、現在、航海実施待ちである。

加えて、情報収集活動の結果新たに発見された前期中新世の稲村水中地すべり堆積物(富山県上市町)について、トレンチ開削、ドローンによる系統的な空中画像撮影とその三次元モデル化、ならびに高所作業車等を用いた詳細な地質調査を実施しデータ解析を行った結果、その発生機構、運動様式が解明された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

昨今、地震情報からは予測できない津波の発生に注目が集まっている。その起因のひとつは中小規模の地震やその他の引き金によって発生する海底地すべりである。海底地すべりが引き起こす地すべり津波は、これまでその実態がほとんど知られてこなかった。

今般本研究で得られた海底すべりの地質学的堆積学的な知見は、海底地すべり発生メカニズムの理解に貴重な情報となるだけでなく、それらに基づくより現実性、信ぴょう性の高い海底地すべりモデルを地すべり津波シミュレーションに供することで、地すべり津波防災に貢献するものである。

研究成果の概要(英文)： As a result of our proposals for new data acquisition at the Shizunai Submarine landslide (Offshore southern Hokkaido) based on the detailed interpretation of pre-existing 3D seismic dataset, a new model for submarine landslide was proposed, and a shallow core drilling plan at the sea floor is adopted as a scientific program of Drilling Vessel Chikyu, and it is awaiting the voyage now.

In addition, mechanism of landslide generation and kinematic patterns of slide bodies are recently clarified on the basis of integrated interpretation of a 3D drone aerophotograph model and detailed geological survey used of a high-place platform at the lower Miocene Inamura subaqueous landslide deposit, Toyama Prefecture.

The above mentioned new knowledges may provide relatively realistic slide models in digital simulation researches for landslide tsunami behavior, and can contribute to landslide tsunami disaster prevention.

研究分野：堆積学 シーケンス層序学 石油地質学 防災地質学 微化石層位学 掘削地質学

キーワード：海底地すべり 地すべり津波 すべり面 スランプ 津波防災 地すべり津波シミュレーション スラ
ンピング スライド

1. 研究開始当初の背景

(1) 地すべり津波の認知

巨大地震に伴って発生する津波に対しては、防潮堤や津波避難ビルの建造、ハザードマップの作成等とそれらを生かして人々の生命を守る意識高揚が呼びかけられている。しかし、近年、明確な誘因地震が特定できない津波^[1]や予想を上回る早いタイミングで到達する津波^[2]など、巨大地震の震源直近の海底活断層変位だけでは説明できない津波も実際に観測されている。このような津波の誘因はいくつかあるが、そのひとつは海底地すべりにあると指摘されており^[3]、それらは「地すべり津波」とよばれる。

(2) 地すべり津波研究の現状

海底地すべりが誘発する「地すべり津波」への防災上の注意が喚起されるに至り、海底地すべりと津波規模や伝搬様式の関連性に関する数値シミュレーションが行われるようになった。しかし、その多くは「三角断面モデル」^[4]や「弁当箱モデル」^[5]などの比較的単純な海底地すべり運動モデルを前提としており、実際に自然界で発生する海底地すべりの形態や運動様式を反映したものではない。したがって、シミュレーション結果は地すべり津波に関する一定の知見^[6, 7 など]を提示してはいるものの、現実性や精度は十分とはいえない。これは、海底地すべり現象の発生機構や運動様式についての堆積地質学的な報告例が僅少なため、現実性の高い海底地すべりモデルをシミュレーションのインプットとして供与できていないことが一因であり、その打開策の第一は多くの海底地すべり事例を蓄積することにある。

(3) 海底地すべり研究の防災・減災上の重要性

海底地すべりは、巨大地震はもとより、中小規模の地震、海洋の荒天などの突発的要因や、大きな堆積速度、緩やかな地殻変動や汎世界的な海水準変動に起因する堆積物の不安定化にも誘発されるといわれている^[8 など]。したがって、発生する可能性のある海域は巨大地震そのものよりもはるかに広く、日本のような変動帯では全ての周辺海域で発生し得ると考えられ、実際に多くの海域で過去の海底地すべりの痕跡が発見されている^[9-11]。それらは誘因が多様であるため、発生を事前に予測することは難しい。しかも、些細な誘因が引き起こす小規模な海底地すべりが周辺の不安定堆積物に波及し、結果的に巨大海底地すべりに発展する可能性もあり、その結果、巨大津波を引き起こす危険性を秘めている。

地すべり津波の挙動に関する数値シミュレーション結果に基づく沿岸から浅海域における防災減災計画の立案と周知が急がれるが、並行してシミュレーションの精度向上が図られなければならない。そのためには、実際の海底地すべりの発生機構や運動様式を反映した現実性の高い海底地すべりモデルをインプットデータとした数値シミュレーションが行われなければならない。しかし、海底で突発的に発生する海底地すべりの滑動状況を、そのときにその場所で観測することは極めて困難である。そこで、ごく最近に発生して現在も海底面に残されている海底地すべりや、過去に発生して地層中に保存され現在は地表に露出している地質時代の海底地すべりを堆積学的、構造地質学的に研究し、事例を蓄積していくことが地すべり津波防災のうえで非常に重要である。

(4) 海底地すべりに関する国内外の研究動向

世界の海域で三次元地震探査データが得られるようになった結果、海底地すべりの発生・運動機構に関する研究^[12 など]および分類に関する研究^[13 など]が進展し、ここ数年で世界各地に分布する海底地すべりの類型化^[14]および数値シミュレーション^[15, 16]などが始まっている。日本周辺海域海底表層の地すべり研究としては、隠岐トラフの例^[9]や下北半島沖の例^[10]があるが、立体的、かつ動的な海底地すべりモデル構築は実現していない。

2. 研究の目的

当該研究は、(1) 海底地すべりの発生メカニズムを堆積学的に理解すること、(2) 海底地すべりの運動学的なモデルを構築することの2点を主目的としている。これらの達成によって、さらなる詳細データ取得の必要性等を含め、今後の海底地すべり研究に方向性を提示できるとともに、地すべり津波数値シミュレーションにおけるより現実的な海底地すべりモデルを供与できる。

(1) 海底地すべりの発生メカニズム

現実の地すべり堆積体がどのような地質学的セッティングのもとに発生しているのか、層序、堆積、構造発達史と滑動体の時空関係を調査し、なにが滑動のトリガーとなり得るかを絞り込む。

(2) 海底地すべりの運動学的なモデル

滑動によってどのような変形構造が形成されたか、また、周囲にどのような影響をもたらしたかを記載し、それらをすべて満たす地すべりの運動像を演繹する。

3. 研究の方法

(1) 静内海底地すべり堆積体

現世の海底地すべり堆積体の実例として、本研究では静内海底地すべり堆積体を取り上げ、地

震探査データ解析から地すべり堆積物の分布、外部形状、内部変形構造等を記載した。そのうえで、滑動体および周辺層の堆積物実試料の海底表層ロータリーコアやピストンコアを採取・分析し、滑動体およびすべり面の物理的・化学的性質を把握する。さらに、高分解能地震探査データの新規取得によるより詳細な内部変形構造の記載を目指す。静内海底地すべり堆積体は、北海道南部新ひだか町の南南東沖合い約40km、水深約1,000mの日高舟状海盆北東斜面に位置することから、滑動体の実堆積物試料を採取するためには科学海洋調査船を動員する必要があったため、研究グループでは以下の2件の提案を行った。

(a) 海底設置型掘削 (BMS) と高解像度2次元地震探査 (MCS)

この計画は、JAMSTEC 所有の海底広域研究船「かいめい」を動員し、静内海底地すべり堆積体の頭部と尾部の2箇所海底設置型掘削で実堆積物試料採取するとともに、コア試料採取箇所を通る高解像度の2次元地震探査を収録しようとするものである。ただし、「かいめい」に搭載可能な BMS では静内海底地すべり堆積体の表面部分約30mの試料しか採取できないことから、研究グループではこれとあわせて SCORE プログラム (次項) の提案を行った。しかし「かいめい」を用いたこの計画は、令和2年度実施の JAMSTEC 所内利用課題として提案しいったんは採択されたが、当該海域を所管する漁業団体との調査実施に関する交渉が妥結できず、止むを得ず見送らざるを得ないこととなった。

(b) 表層科学掘削プログラム (SCORE)

SCORE は地球深部探査船「ちきゅう」を用いた地球表層科学掘削で、JAMSTEC と J-DESC により推進される科学プログラムである。当研究グループでは、採取試料が R1: すべり面の上下層を観察できること、R2: 滑動堆積物に対比される非滑動層を採取できること、R3: 滑動体の内部変形構造と堆積相を観察できること、R4: 非滑動層の地質年代と滑動のタイミングが特定できること、の4点を必要条件とし、4孔の掘削長100m以内のコア採取を提案した。当研究グループが提案したプログラムは J-DESC により採択され、現在、JAMSTEC の実施待ちリストに掲載されており、最速の場合、令和6年末頃の航海に取り上げられる可能性があるが、現在までに試料採取は実現していない。

(2) 稲村水中地すべり堆積物



図1. 稲村露头における調査手順

静内海底地すべり堆積体の実試料採取や高分解能地震探査データの収録は、一部は実施のめどが立たないものの、SCORE は近いうちに実施される見込みである。しかし、調査船運航計画の都合上、科研費研究期間内の取得が困難であると判明したため、代替案として陸上に露出する地質時代の海底地すべり堆積物の研究を追加計画した。地質時代の海底地すべり堆積物としては、富山県上市町の稲村水中地すべり堆積体を取り上げ、ドローン画像から構築した三次元露头モデルと高所作業車やエンジンカッター、グラインダー等を駆

使した詳細な堆積地質学的構造地質学的調査を行なって、滑動体内部の変形構造を把握した。

4. 研究成果

(1) 静内海底地すべり堆積体の研究からわかったこと

(a) 規模および分布 (図2)

静内海底地すべり堆積体は、既存の三次元地震探査データの解析結果から幅約12km、長さ15km以上、最大層厚約90mの規模であり、その移動距離は15km以上、発生年代(滑動した時期)は中期更新世～現世である。日高トラフ内で隣接する海底面直下の他の海底地すべり堆積物(類似、浦河、(古)静内、門別、襟裳、銚子岬、尻屋崎、下北の8系統、全80堆積体以上[17])や東北日本太平洋沿岸の海底面下に埋没する鮮新～更新世の海底地すべり堆積体(磐城、広野、日立の各地すべり体[18])と比較すると同等、あるいはむしろ小規模である。静内海底地すべり堆積体を含む日本近海の海底地すべりの検討により、陸上の地すべりとは比較にならない

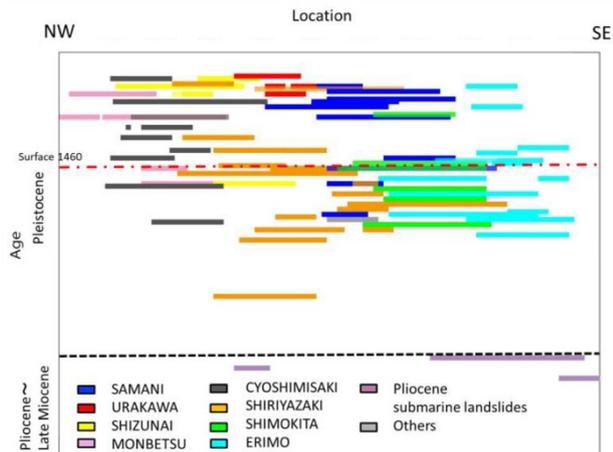


図2. 日高トラフにおける海底地すべりの時空分布

平層の一部層である^[20]。同層にはプロデルタで堆積した凝灰質砂岩泥岩互層が挟在し、その一部は堆積後の早い時期にスライド、スランプ、ならびに堆積物重力流によって変形を受けた水中地すべりの堆積物である。

(b) 折戸凝灰岩部層のユニット区分

稲村露頭の折戸凝灰岩部層は、下位よりユニット A~G の 7 岩相層序単元に区分される。そのうちユニット B~D は上方細粒化する凝灰質砂岩および泥岩の連続性のよい互層からなり、砂岩層の一部には *Rosselia*^[21] やカレントリップルが、泥岩層には *Phycosiphon*^[21] や植物葉片、炭質物葉理が認められることからプロデルタの堆積物である。また、ユニット D の互層内には D1~D8 の 8 層の砂岩鍵層が識別・追跡される。ユニット A および F~G は塊状の凝灰岩ないし凝灰角礫岩からなるが、ユニット E は直下のユニット D に由来する変形した岩塊を大規模に取り込んでおり、スランプ~重力流堆積物とみられる。

(c) ユニット D の鍵層砂岩の単層追跡

ユニット D の鍵層砂岩 D1~D8 の単層を露頭全体にわたって追跡した結果、低角度のすべり面に挟まれた D1~D8 全体、あるいはその一部分が繰り返し出現することが判明した。また、一部ではランプ背斜や横臥褶曲を形成し正常位層と逆転層が繰り返していたり、その上部がすべり面によって切り去られている産状のあることが明らかになった (図 4)。

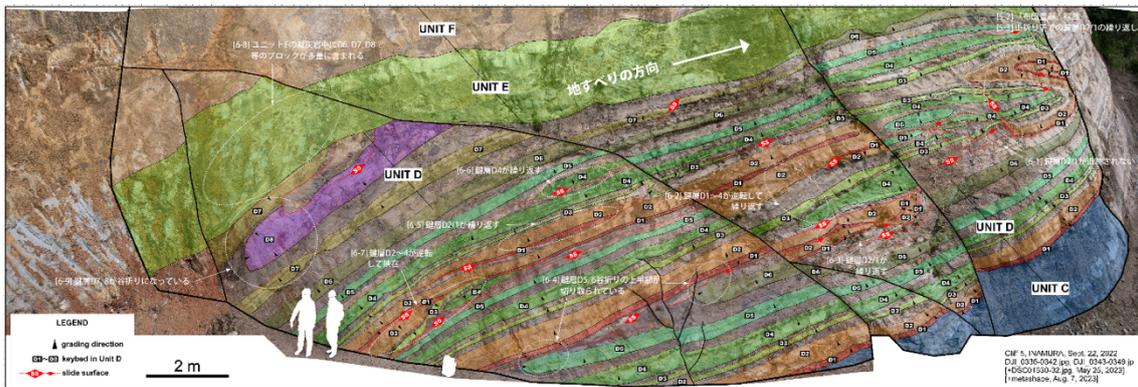
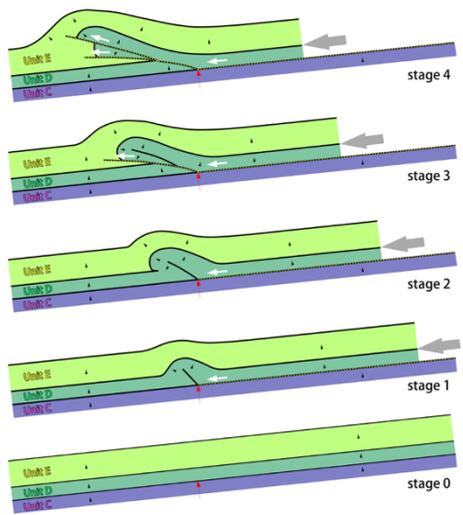


図 4. 稲村水中地すべりの単層追跡による内部変形構造の事例

(d) 稲村水中地すべりの滑動モデル (図 5)

稲村水中地すべりは、以下のように発生し変形したと解釈される：[0]プロデルタにおける互



LEGEND
 — unit boundary
 — slide surface
 ▲ top and bottom of strata
 ← slide direction
 + position of obstruction

stage 4 : Some more thrusts may be formed by further slide and shortening of Units D and E, and the whole Unit D or a part of the unit may stack repeatedly.

stage 3 : A low angle fault (thrust) may be formed and overturned fold body may override the competent Unit D at the downslope of the initial position of obstruction.

stage 2 : Overturned fold may grow by further slide of Units D and E at the upslope of the initial position of obstruction, and an overturned layer may be occurred.

stage 1 : Units D and E slide upon the upper surface of Unit C at the upslope of the initial position of obstruction, and an inclined fold may be formed.

stage 0 : Units C, D and E are deposited on the stable floor of water. Units C and D consist of alternation of tuffaceous mudstone and tuffaceous sandstone, and Unit E consists mainly of massive tuff breccia.

層の堆積、[1]D1 直下の泥岩層にすべり面が形成され、ある地点より上流側で短縮が起こりランプ背斜を形成するが、下流側では変形は起きない、[2]すべり面上のユニット D がさらに短縮し、ランプ背斜は横臥褶曲へと変形が進む、[3]初生すべりめんは上方へ分岐し横臥褶曲の上部逆転層が下流側へ押し出される、[4]さらに短縮が進んで横臥褶曲とこれに伴う次生的なすべり面がさらに発達する。

図 5. 稲村水中地すべりモデル

<引用および注>

[1] <https://www.youtube.com/watch?v=a2CefdmUj3E>, [2] <https://www.fnn.jp/articles/-/648287>, [3] <https://www.gakuji-toshu.jp/column/5329>, [4] 横向きに置かれた三角柱の岩体が海底斜面を下方に平行移動するモデル, [5] 縦横より厚さの薄い直方体の岩体が海底斜面を下方に平行移動するモデル, [6] 殿最ほか, 2015, 土木学会論文集 B3, 71, I_557, [7] Murakami et al., 2018, Jour. Ener. Power Eng., 12, 35, [8] Kawamura et al., 2014, Mar.Geol., 356, 44, [9] 池原, 2005, 地すべり学会誌, 41, 558, [10] 森田ほか, 2011, 地質学雑誌, 117, 2, 95, [11] 荒戸, 2022, 石油技術協会誌, 87, 136, [12] Aharonov et al., 2016, Geomorph., 253, 551, [13] Moscardelli and Wood, 2008, Basin Res., 20, 73, [14] Moscardelli and Wood, 2016, GSA Bull., 8 Jul., 2015, [15] Katz et al., 2014, Geomorph., 220, 104, [16] 佐々, 2016, 港湾空港技術研究所報告, 55, 2, 75, [17] 小瀧, 2021, 秋田大学卒論, [18] 荒戸, 2019, 日本地質学会講演要旨集, [19] 竹内, 2021, 地質学雑誌, 127, 3, 145, [20] 金子, 2001, 地質学雑誌, 107, 12, 729, [21] 生痕化石の一種。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 荒戸裕之	4. 巻 87
2. 論文標題 福島県いわき市沖の下部更新統磐城海底地すべり堆積体（Iwaki SLS）に認められるポップアップ構造の形態的・堆積学的な特徴と形成過程	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 石油技術協会誌	6. 最初と最後の頁 136-146
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 荒戸裕之、山崎誠	4. 巻 87
2. 論文標題 秋田沖日本海の新礁（堆）における最終氷期以降の沈降運動	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 石油技術協会誌	6. 最初と最後の頁 129-135
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 荒戸裕之	4. 巻 86
2. 論文標題 日本海東縁の秋田沖新礁における多段階の反転テクトニクス	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 石油技術協会誌	6. 最初と最後の頁 502-514
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 荒戸裕之、山本由弦、山田泰広、保柳康一、金子一夫、國香正稔、白石和也、千代延俊、藤田将人、吉本剛瑠、関山優希	4. 巻 130
2. 論文標題 富山県上市町の下部中新統稲村水中地すべり堆積物	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 地質学雑誌	6. 最初と最後の頁 i - ii
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5575/geosoci.2024.0009	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 Arato, H., Yamamoto, Y., Yamada, Y., Hoyanagi, K., Kaneko, K., Kunika, S., Shiraishi, K., Chiyonobu, S., Fujita, M., Yoshimoto, T. and Sekiyama, Y.	4. 巻 130
2. 論文標題 A spectacular outcrop of the lower Miocene Inamura subaqueous landslide deposit at Kamiichimachi, Toyama Prefecture, central Japan	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Geological Society of Japan	6. 最初と最後の頁 0-0
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 高野 修、荒戸 裕之	4. 巻 127
2. 論文標題 石油探鉱開発技術における堆積学的手法の進展	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 地質学雑誌	6. 最初と最後の頁 225-235
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5575/geosoc.2019.0048	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 金子一夫	4. 巻 46
2. 論文標題 露頭を見に出かけよう	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 富山と自然	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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10件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 荒戸裕之、山本由弦、山田泰広、白石和也、千代延俊、保柳康一、金子一夫、吉本剛瑠、関山優希
2. 発表標題 富山県上市町稲村地内の下部中新統折戸凝灰岩部層に挟在する水中地すべり堆積物の変形構造
3. 学会等名 日本堆積学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 荒戸裕之、山崎誠
2. 発表標題 秋田沖日本海の新礁（堆）における最終氷期以降の沈降運動
3. 学会等名 日本堆積学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荒戸裕之、山本由弦、山田泰広、千代延俊、白石和也
2. 発表標題 北海道南部沖日高トラフの第四系最上部に認められる静内海底地すべり堆積体の形状および内部構造の特徴
3. 学会等名 日本地質学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroyuki Arato
2. 発表標題 Distribution and sedimentological characteristics of the submarine landslides filling Hidaka Trough, offshore southern Hokkaido, northern Japan with sepcial attention to the uppermost Quaternary submarine landslide bodies
3. 学会等名 Japan Geoscience Union (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroyuki Arato and Paolo Martizzi
2. 発表標題 Occurrence of pop-up structures in the Pleistocene Iwaki submarine landslide, the Pacific coast of Japan
3. 学会等名 International Association of Sedimentology (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名	金子一夫、荒戸裕之、山本由弦、山田泰広、保柳康一、金子一夫、白石和也、千代延俊、國香正稔、吉本剛瑠、関山優希
2. 発表標題	大学，民間企業，自治体，ジオパークの連携によって再出現した巨大スランプ露頭
3. 学会等名	日本地質学会
4. 発表年	2023年

1. 発表者名	保柳康一、荒戸裕之、山本由弦、山田泰広、白石和也、千代延俊、金子一夫、吉本剛瑠、関山優希
2. 発表標題	富山県上市町稲村地内の下部中新統折戸凝灰岩部層に挟在する水中地すべり堆積物の堆積環境
3. 学会等名	日本地質学会中部支部
4. 発表年	2023年

1. 発表者名	荒戸裕之
2. 発表標題	日本近海の三次元地震探査に認められる海底地すべり堆積物の特徴とその形成機構ー常磐沖堆積盆地および日高舟状海盆の例ー
3. 学会等名	日本地質学会（招待講演）
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	荒戸裕之、山本由弦、山田泰広、保柳康一、金子一夫、國香正稔、白石和也、千代延俊、吉本剛瑠、関山優希
2. 発表標題	富山県上市町の下部中新統稲村水中地すべり堆積物の内部構造解析における三次元デジタル露頭モデルの構築と活用
3. 学会等名	日本地質学会
4. 発表年	2023年

1. 発表者名 荒戸裕之、海下友希
2. 発表標題 三次元地震探査データに認められる秋田沖男鹿海盆における基盤構造の特徴
3. 学会等名 石油技術協会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

「稲村のスランプ構造 (Slump structure in Inamura)」の説明板を作成し、立山黒部ジオパークのジオサイトのひとつである稲村露頭に設置した。

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
研究分担者	山本 由弦 (Yamamoto Yuzuru) (10435753)	神戸大学・理学研究科・教授 (14501)	
研究分担者	山田 泰広 (Yamada Yasuhiro) (20362444)	九州大学・工学研究院・教授 (17102)	
研究分担者	千代延 俊 (Chiyonobu Shun) (40526430)	秋田大学・国際資源学研究所・教授 (11401)	

6. 研究組織（つづき）

	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 分 担 者	白石 和也 (Shiraishi Kazuya) (40756491)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(地震発生帯研究センター)・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