

Program and Abstracts

Annual Meeting of The sedimentological Society of Japan

November 13-14, 2021

(Online Meeting)



Sedimentological Society of Japan

プログラム・講演要旨

日本堆積学会 2021 年オンライン大会

2021 年 11 月 13-14 日

日本堆積学会 2021年オンライン大会 プログラム

【日時】 2021年11月13日(土)、14日(日)

13日(土)：個人講演、特別講演、懇親会

14日(日)：個人講演、優秀講演賞授賞式、堆積学トーク・トーク

【実施形態】 主にZoomを使用したオンライン開催

【大会プログラム】

11月13日(土)

10:00-10:05 会長挨拶 池原 研

<口頭発表>

- O1 10:05-10:20 年縞から見積もられる石筍の季節的成長速度
石原与四郎(福岡大)・大西由梨(応用地質)・
吉村和久(九州大)
- O2 10:20-10:35 鹿児島県喜界島の異なる地質時代のコケムシ質堆積物
松田博貴・林田将英(熊本大)
- O3 10:35-10:50 2次元浅水流混濁流モデルにおける乱流運動エネルギー効果の影響
藤島誠也・成瀬 元(京都大)
- O4 10:50-11:05 CNNを応用した粒子配列解析による多重逆級化構造の形成メカニズム解明
長門 巧・成瀬 元(京都大)

休憩(11:05-11:15)

<フリーポスター発表ショートトーク：P1-8> 11:15-12:05

1件あたりの講演は5分以内とします。

昼休み(12:05-13:00)

<フリーポスター発表コアタイム> 13:00-15:00

- P1 新潟県八石背斜東翼における鮮新・更新統の堆積システムと陸棚へ前進する堆積シーケ
ンス
田中綾香・保柳康一(信州大)
- P2 北部フォッサマグナ高府向斜西翼地域における新第三系小川層・柵層の堆積システムおよ
び堆積シーケンス
近藤広大・保柳康一(信州大)

- P3 微動データに基づいた東京湾岸地域における沖積層の物性境界
小松原純子・長 郁夫・坂田健太郎・中澤 努 (産総研)
- P4 サージ的混濁流により実験水路に形成されたサイクリックステップの粒度分布
横川美和・藤田和典・森 勇 (大工大) ・
Roberto Fernandez (ハル大学) ・Matt Czapiga (デルフト工科大学) ・
John Berens ・Jeffrey Kwang ・内藤健介 ・Gary Parker (イリノイ大学) ・
泉 典洋 (北大) ・成瀬 元 (京都大)
- P5 岩盤河川地形の示す日本列島第四紀の地殻隆起速度の時空分布：岩盤強度を考慮したベイズ推定
【発表者からの申請により, P5のコアタイムは14日になります】 成瀬 元 (京都大)
- P6 光ルミネッセンス (OSL) を用いた河川における泥粒子の供給源推定
横尾健人 (東京大) ・田村 亨 (産総研)
- P7 東京湾沿岸水域における湧出ガスの起源推定と湧出量の調査
布留川 竜・松田溪登・鶴 哲郎 (東京海洋大)
- P8 混濁流・土石流ハイブリッド堆積物の形成プロセス -機械学習技術を用いた粒子配列解析に基づく検討-
田中凌悟・成瀬 元 (京都大)

休憩 (15:00-15:10)

<口頭発表>

- O5 15:10-15:25 堆積シーケンス, 海水準変動と構造運動の関係, 新潟県東頸城丘陵北東部における更新統魚沼層群の例
河西夏美・保柳康一 (信州大)
- O6 15:25-15:40 北海道むかわ地域の二風谷・荷葉層の堆積システムおよび古環境
朝日啓泰・沢田 研 (北海道大)
- O7 15:40-15:55 セマンティックセグメンテーションを用いたコア画像からの生痕化石の抽出
菊地一輝・成瀬 元 (京都大)
- O8 15:55-16:10 水路実験による 2019 年千曲川氾濫での破堤堆積物形成過程の解明
加藤汰一・山田昌樹 (信州大) ・
成瀬 元・酒井佑一 (京都大)

休憩 (16:10-16:20)

<口頭発表>

- O9 16:20–16:35 化学的アプローチによる視認困難な津波痕跡の識別
篠崎鉄哉・澤井祐紀（産総研）・
池原 実（高知大）・松本 弾・
嶋田侑眞・谷川晃一郎（産総研）・
田村 亨（産総研・東大）
- O10 16:35–16:50 石垣島カラダギ洞穴に認められる津波堆積物の特徴
石原与四郎・沖田優香・北原美優（福岡大）・
成瀬 元（京都大）・亀島慎吾・
具志堅清大・片桐千亜紀（沖縄県立埋蔵文化財センター）・
山極海嗣（琉球大）・小野林太郎（国立民族学博物館）・
島袋綾野（石垣市）・吉村和久（九州大）
- O11 16:50–17:05 津波による石灰質サンゴ礁堆積物の海底谷を通じた深海への輸送
池原 研（産総研）・金松敏也（JAMSTEC）・
宇佐見和子（日本エヌ・ユー・エス・JOGMEC）
- O12 17:05–17:20 中新統田辺層群白浜層の堆積環境変遷と津波堆積物
石塚創太（筑波大）

休憩（17:20–17:30）

<特別講演>

- OP1 17:30–18:15 フィールド・セディメントロジーへの招待 (Introduction to field sedimentology)
保柳康一（信州大）

<懇親会> 18:30–20:30 オンライン

11月14日（日）

<口頭発表>

- O13 10:00–10:15 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
荒戸裕之・山崎 誠（秋田大）
- O14 10:15–10:30 Detrital Zircon U-Pb ages of the Nemuro and Urahoro Groups in the Nemuro Belt Complex, Eastern Hokkaido, Japan: Implications for the provenance and tectonic setting of the Paleo-Kuril Arc System
Harisma・Hajime Naruse (Kyoto University)・
Takafumi Hirata・Hisashi Asanuma (The University of Tokyo)

O15 10:30-10:45 関東平野東縁における最終間氷期海成段丘の再考

田村 亨 (産総研・東京大) ・岡崎浩子 (千葉県中央博) ・
中里裕臣 (農研機構) ・納谷友規・中島 礼 (産総研)

休憩 (10:45-10:55)

<フリーポスター発表ショートトーク : P9-16> 10:55-11:45

1件あたりの講演は5分以内とします。

昼休み (11:45-12:40)

<フリーポスター発表コアタイム> 12:40-14:40

P9 石垣島東部白保地区でのイベント堆積物調査

田中姿郎・吉井 匠 (電力中央研究所)

P10 約300年前の宝永地震により静岡県安倍川上流域で形成されたハイパーコンセントレイトッド流堆積物の特徴

白井正明 (都立大) ・宇津川喬子 (立正大)

P11 Depositional setup and characteristics of storm deposits following the 2007 Cyclone Sidr on Kuakata coast of Bangladesh

Md. Masidul Haque ・Masaki Yamada ・
Koichi Hoyanagi (Shinshu University)

P12 モンゴル国南東部に分布する古第三系 Ergilin Dzo 層の古地磁気学的研究

坂本航汰・畠山唯弘・北原 優・

實吉玄貴 (岡山理大) ・Khishigjav Tsogtbaatar (IPG)

P13 急激な堆積作用による未固結堆積物の液状化・流動化変形：水槽実験による検討

加藤義之・山口直文 (茨城大)

P14 北海道霧多布湿原の地殻変動に関連した浜堤の堆積構造

根来湧輝 (東京大・産総研) ・田村 亨 (産総研・東京大) ・

澤井祐紀・谷川晃一郎・嶋田侑眞 (産総研) ・

岡田里奈 (弘前大・産総研)

P15 柱状図・地質断面図を三次元表示：簡単変換ツールの紹介

佐藤智之 (産総研)

P16 九十九里浜平野の浜堤および現世海浜堆積物のOSL年代測定

小森康太郎 (東京大) ・田村 亨 (産総研・東京大) ・

堀 和明 (東北大)

<優秀講演賞授賞式> 14:40-14:50

<事務連絡・閉会挨拶> 14:50-14:55

<堆積学トーク・トーク> 15:10-17:00

「堆積学研究・教育の将来とオンライン・デジタルツールの可能性（仮）」

【注意事項】

最新の注意事項や詳細については、後日ご連絡いたします参加者用のポータルサイトにてご確認ください。

<オンラインでの参加>

- *全ての講演は Zoom を使用して行います。必ず事前に最新のバージョンにアップデートを行ってご参加ください（バージョン 5.3 以降でなければブレイクアウトルームを自分で選択できません）。
- *URL より Zoom 会場に入室される際には、事前にご連絡します参加者番号を名前の最初にご記入頂ますようお願いいたします。（例）S001 堆積太郎

<口頭発表>

- *発表時間は 15 分（質疑応答込み。目安として発表 12 分，質疑応答 3 分）です。
- *各自 PC から Zoom で画面共有にて発表していただきます。
- *今回はタイムキーパーを置きません。各自タイマーを用意するなど時間管理をお願いいたします。
- *当日の開会前に接続テストの時間を設ける予定です。

<フリーポスター発表>

- *各講演について、5 分間のショートトークとコアタイムを設けます。
- *ショートトークの 5 分間で研究の概要をご説明いただき、コアタイムでは主に内容についての議論の場としてご活用いただければと思います。
- *フリーポスターは各講演 1 ファイルで 25MB までの PDF あるいは画像ファイル（形式自由）で、その他の制約はありません。各自でぜひ工夫してください。
- *ショートトーク用に、各自 5 ページまでのスライド（PDF，画面比 4:3）を事前にご提出いただけます。
- *コアタイムでは、Zoom のブレイクアウトルームによって講演ごとの部屋を設定するので、参加者は自由に入出りできる状態で発表していただきます。
- *またコアタイムでは、参加者閲覧用として事前にご提出いただく「フリーポスター」のファイルとは別に、スライド等（形式自由）を共有してご説明いただくことも可能です。
- *ポスター発表者の皆様も他の発表を見られるようにするため、発表時間を分ける予定です。

*各種提出締め切りは以下のようになります.

- ・フリーポスター：11/10（水）
- ・ショートトークスライド：11/10（水）

なお提出先は講演要旨と同じconference(at)sediment.jpです（(at)を@に変えてください）

フィールド・セディメントロジーへの招待 Introduction to field sedimentology

保柳康一（信州大学）

連絡先：保柳康一 (hoya101@shinshu-u.ac.jp)

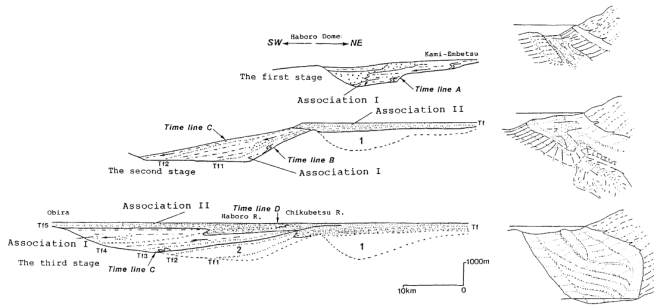
1. はじめに

「フィールド・セディメントロジー」を、ここでは「野外などで堆積物を観察したり採取したりして、その情報をもとに堆積現象を考察すること」と定義したいと思います。地層であっても、堆積物を作っている現世の地形であっても、トレンチなど掘削して作られた地層断面や採取されたコアを現場で観察する事もフィールド・セディメントロジーの範疇です。特に、コアは持ち帰ってゆっくり観察することも可能ですが、半裁して開けてしまうとその鮮度が急速に下がっていきます。掘削船を用いて海底のコアを採取する IODP は、どの深度まで掘削すれば研究目的が達成されるかを知るためにも、船上での迅速な観察を必要としています。堆積物の掘削では、堆積学と古生物学の研究者が乗船していることは必須になります。もちろん、陸上での掘削でも、目的の地層が採取されているかなどを知るために、現地での観察は欠かせません。しかし、堆積物に対する観察力をつけるためには、まず、露頭での観察の経験が大事であると思っています。今日は、私のこれまでの経験をもとに、フィールドに出かけて地層から堆積学的情報を得る楽しさをお話ししたいと思います。ようやく、コロナ禍も落ち着きを見せてきました。残りのフィールドシーズン、来シーズンに向けて、フィールド調査を楽しめるようなお話ししたいと思います。

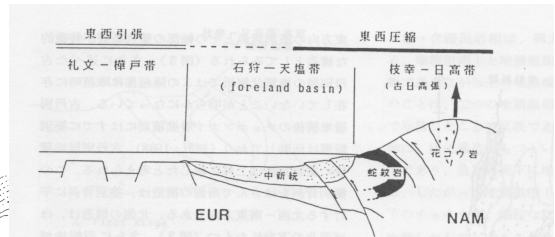
2. 露頭観察

地表踏査をして露頭観察を重ね、地質図を作る。これが地質調査の第一歩でしょう。しかし、藪をこいで沢を歩き、滝や砂防ダムを乗り越えて、露頭を一つずつ丹念に記載していくことは決して楽な作業ではありません。私が、初めて地質図を作成したのは、学部 3 年の実習の時で、北海道稚内まで約 50 km の天塩中川に分布する白亜系でした。その後、卒論で北海道北部の日本海側羽幌周辺に分布する中新統の地質図を作成することになりました。この地域の特にタービダイトとスランプ堆積物などのマストランスポート堆積物 (MTD) からなる古丹別層を研究する上で、1970 年代から盛んになっていた堆積相解析が有用であったことから、修士課程で堆積学研究の道に入ることになります。今でもこの地域には大きな露頭が数多く存在しますが、1980 年代は林道が盛んに作られており、その開削により多くの露頭が出現していました。また、今ではアプローチ困難な山奥にも比較的簡単に到達することが可能でした。このような好条件で露頭を観察し、様々な考察をすることが出来たことで、このころに調査の楽しさにたどり着くことが出来ました。

古丹別層は、北海道北端の宗谷岬から太平洋に面した南の襟裳岬に続く北海道中軸山脈の西側に沿って南北に連なる中新世のタービダイト堆積盆の 1 つに堆積した地層です。厚さ数 1000 m のタービダイトで埋積されている、日本海側の背弧から太平洋側の前弧に続くこれらの堆積盆群は、そのテクトニック上の位置づけも分かっていませんでした。古丹別層の堆積相分布や古流向など堆積学的研



第1図 古丹別層堆積盆の発達過程 (Hoyanagi, 1989)



第2図 中新世の前陸盆地の形成 (保柳, 1989)

究を進めることで、堆積盆の形を復元して (第1図), これらの堆積盆は中新世に起こった西南北海道と中央北海道の衝突 (第2図) によってその間に形成された前陸盆地 (foreland basin) であると結論づけました (Hoyanagi, 1989; 保柳, 1989). このように露頭一つ一つの情報から堆積作用を考察し、堆積環境を復元してそれらの空間的分布を明らかにすることで、テクトニクスと関連づけることができます。

3. 掘削コアと震探解析

ボーリング装置を使用して地下を掘削し採取するコアやより簡便に地下浅部の地層を採取することが出来るジオスライサーなどは、当然フィールドに出向かなければ採取することは出来ません。さらに、得られた堆積物の記載は速やかにおこなわないと、乾燥によってその色調や硬さが急速に変化します。IODP で船上で詳細な記載がなされているのはそのためです。コアは直径 5~10 cm 程度ですので、露頭に比べると観察出来る面積は極めて狭いように思えます。しかし、基本的に欠如無く連続するコアからは露頭に勝るとも劣らない空間的広がりに関する情報を得ることが出来ます。例えば、ハンモック状斜交層理 (HCS) 砂岩層をコアで掘り抜いた場合、HCS の様々な部分が積み重なったコアが得られるので、HCS の空間的広がりを復元することが出来ます。堆積相対比の法則 (ワルターの法則) です。ただそのためには、多くの露頭で横に広がっている HCS の様々な形状を見た経験があることが助けになるでしょう。累重の欠如がないコアは、連続する堆積相累重により堆積環境を復元し、堆積相間の不連続面を認識して、それを形成したイベントを考察するシーケンス層序学の研究にも適しています。もちろん、極めて連続性のよい露頭が存在する地域での地表地質調査によってもシーケンス層序学的研究をすることが出来ます。ただ、このことは堆積相の連続と不連続が識別出来る程度に露頭条件がよくないと、地表地質調査に基づくシーケンス層序学の研究は難しいことを示しています。

1997年と2009年のODP, IODPによるニュージーランド沖海水準変動とニュージーランド沖カンタベリー堆積盆の海水準変動の研究は、私にとってはフィールドに1ヶ月ないし3ヶ月とどまって、堆積相と不連続面を観察した貴重な経験になりました。その経験から、堆積学やシーケンス層序学研究のツールとして、地下地質情報である地震探査結果 (震探解析) をコアや露頭と組合せて利用することが極めて有用であることを認識しました。1997年の乗船後にWindows PCで使用可能な震探解析ソ

フトを科研費で導入しましたが、この頃はまだ PC の処理速度が遅く大変使いづらいものでした。しかし、2009 年の乗船後、PC の処理能力の急速な向上と新たなソフトウェアの登場によって、2 次元および 3 次元の震探解析が大学などの研究室でも可能になりました。解析システムを導入して、ニュージーランド沖の震探解析とコア解析と統合してシーケンス層序解析をおこないました。さらに日本周辺海域の震探結果の解釈と地表地質調査と比較しながら MTD の研究を進めることが可能になりました。

2 次元もしくは 3 次元震探は地下の地震波反射面を画像化したものですので、その地質学的解釈には実際の地層を観察した経験が必要になります。海底下の MTD の地層を直接見ることは出来ませんので、地層となって隆起し露頭を作っている MTD を観察することが重要です。長野県松本市の信州大学周辺から日本海側の新潟県にかけて分布する北部フォッサマグナの地層は、中新世までに形成された日本海を急速に埋積したことのより多くの MTD を観察することが出来ます。また浅海化の過程を解析することも可能です。このように、MTD やシーケンス層序学研究に適したフィールドです。一方、私が卒業研究以来研究を進めてきた羽幌地域周辺の地層についても、2020～2021 年の調査でこれまで浅海で堆積したとされていた古丹別層下位の築別層にも MDT が含まれることが分かりました。生痕化石を含む浅海成層がそのまま MTD となって移動しており、40 年以上前の調査の時には気がつきませんでした。このように、フィールドの調査は、再訪によって新たな発見を生むこともあります。

4. まとめ

卒業研究などで野外調査をおこなうことは、様々な理由により次第に困難さを増しています。例えば、事故などに対する安全基準が厳しくなり、学生や院生を 1 人で野外調査に送り出すことが難しくなりました。調査の際に宿泊する場所の確保が難しくなり、経済的にもお金がかかるようになったこともあります。さらに、林業などの衰退で山林の手入れが悪くなり、露頭が埋まって失われてしまうことが起こり、林道がなくなりアプローチに時間がかかるようにもなりました。しかし、様々な分析・実験機器が発達しましたが、最終的な地質学的、堆積学的結論を導くためには、地層自体を観察した経験がものを言います。皆さんも、分析や実験を研究の主体にしていたとしても、露頭条件のよいフィールドでの調査を経験することをお勧めします。ただし、研究テーマが重要だからと言って、露頭がほとんど無いようなフィールドを初心者の段階で選ぶことは避けるべきだと思います。

文献

Hoyanagi, K., 1989, Coarse-grained turbidite sedimentation resulting from the Miocene collision event in Central Hokkaido, Japan. *Sedimentary Facies in the Active Plate Margin*, 689-709. Terra Scientific Publ., Tokyo.

保柳康一, 1989, 中央北海道中新統タービダイトと日本海拡大. 月刊地球, 11 巻 5 号, 292-297.

年縞から見積もられる石筍の季節的成長速度

Estimation of seasonally growth-rate in annual layer of stalagmite

石原与四郎（福岡大学）・大西由梨（応用地質）・吉村和久（九州大学）

Yoshiro Ishihara (Fukuoka Univ.), Yuri Onishi (OYO co. Ltd.) and Kazuhisa Yoshimura (Kyushu Univ.)

連絡先：石原与四郎 (ishihara@fukuoka-u.ac.jp)

石筍からは長期間かつ連続的な古気候記録が得られることが知られている (Fairchild et al., 2006). たとえば, 石筍の地球化学的分析によって得られた酸素同位体比記録からは, アジアモンスーンの強度等が得られたり, Ca/Mg 比や炭素同位体比からは地表植生の変化が得られたりしている (たとえば, Wang et al., 2005; Uchida et al., 2013). これらの長期記録の年代プロキシとしては, 石筍中の U-Th 年代や ^{14}C 年代が用いられることが多いが, 現在成長中の石筍を分析する際には, 石筍中の年縞のカウントも有効である (Baker et al., 2008; 1993). また, 石筍年縞の層厚そのものからもその成長速度が得られ, 降雨量等の古気候と結び付けられている事例もある (加藤ほか, 2013).

石筍の形や成長速度は, 古くから理論的, 実験的にモデルが組み立てられ, 観測結果との対比がなされてきている (Dreybrodt, 1988; Dreybrodt, 1999; Kaufmann, 2013; Baker et al., 2014). これらによれば, 石筍の成長速度や形を規制するのは, (1) 石筍の真上に落ちる滴下水の間隔, (2) 滴下水中の Ca イオン濃度, (3) 洞窟大気における Ca イオンの平衡濃度, (4) 洞窟の気温, (5) 洞窟大気の CO_2 濃度, (6) 水温に対応した反応速度定数等である. 成長速度は, Ca イオン濃度が高く平衡濃度が低いとき, 温度が高い時, CO_2 濃度が低い時に大きくなり, 石筍の太さは滴下の間隔が大きいほど太くなることが示されている. 洞窟環境においては, 気温や Ca イオン濃度は一定の範囲で変化することが多いものの, 滴下間隔や CO_2 濃度は環境によっては季節的に数倍から 10 倍近く異なることがある. Dreybrodt らによってモデル化された洞窟環境における石筍上の方解石沈殿速度は CO_2 濃度と滴下間隔に最も大きく影響をうける. その結果, 石筍の成長量には季節的变化が生じることが推定され, 上述の地球化学的分析結果にはバイアスが含まれることが指摘されている (Baker et al., 2014). このような成長速度の変化に関して評価するためには実際の洞窟での気象観測が必要であることが指摘される.

本研究では, 石筍の成長速度に関して, 混入する不純物 (フルボ酸等) の含有量による見積もりが可能であるかどうか, シミュレーションによって検討を行った. 石筍成長速度のシミュレーションでは FLOW モデル (Romanov et al., 2008) を用い, 気温や CO_2 濃度等の洞窟気象の観測については玉泉洞での事例 (大岡ほか, 2018) を参考にした. また, 不純物の含有に関しては, 成長速度に比例する例と反比例する例を検討した.

シミュレーションの結果, いずれの場合においても不純物の含有量から相対的な成長速度を見積もれることが示された. 不純物がフルボ酸であった場合, その紫外線蛍光強度によって相対的な含有量が評価できる. 年縞は石筍の岩石学的特徴からも認識可能であるため (Boch et al, 2011), 個々の石筍に関して結晶サイズと成長速度の関係が明らかになれば年縞の形成にも適用可能であると考えられる. 一方で, 年縞が認められる石筍を解析する上では, 洞窟気象の観測も重要であることが指摘される. 今後は現在成長中の石筍等について対比を行い, これらの結果を検証する必要がある.

文献

Baker et al., 1993, *Nature*, 364,518-520.; Baker et al., 2008, *International Journal of Speleology*, 37, 193-206.; Baker et al., 2014, *Earth and Planetary Science Letters*, 392, 239-249.; Boch et al., 2011, *Sedimentology*, 58, 508-531.; Dreybrodt W.,1988, *Processes in Karst Systems-Physics, Chemistry, and Geology*. Springer, Berlin.; 加藤ほか, 2013, 月刊地球, 35, 603-607. ; Kaufmann, 2013, *Earth and Planetary Science Letters*, 241, 251-266.; 大岡ほか, 2018, 洞窟学雑誌, 43, 17-36. ; Romanov et al., 2008, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72, 423-437. ; Uchida et al., 2013, *Chemical Geology*, 347, 59-68.; Wang et al., 2005, *Science*, 308, 854-857.

鹿児島県喜界島の異なる地質時代のコケムシ質堆積物

Bryozoan sediments at the different depositional ages in Kikai-jima Island,
Kagoshima Prefecture, Japan

松田博貴・林田将英（熊本大学）

Matsuda, H. and Hayashida, M. (Kumamoto Univ.)

連絡先：松田博貴 (hmat@kumamoto-u.ac.jp)

鹿児島県喜界島には、泥質岩からなる鮮新～下部更新統島尻層群，礁性堆積物からなる中・上部更新統琉球層群が島全体に広がっている。また両層群の間には、両者の中間的な岩相である石灰質泥岩～砂質石灰岩からなる中部更新統最下部知念層が挟在される。喜界島は我が国で最も隆起速度が大きく、その結果、他の琉球列島の島々と比較し、より深い環境で堆積した礁性堆積物が分布することが知られ、特に島棚深部での堆積と考えられるコケムシ質堆積物（辻ほか，1993）が、各時代の堆積物中に存在する。コケムシは炭酸塩堆積物の重要な構成要素であり、これまで礁深部あるいは温帯性炭酸塩堆積物の環境復元などに用いられている。そこで本研究では、喜界島に分布する時代の異なる知念層（1.71～1.39Ma）、中部更新統琉球層群（0.85～0.45Ma）、上部更新統琉球層群（0.15Ma以降）、ならびに比較のために喜界島南西沖で採取された現世海底堆積物（水深138～114 m）について、特にコケムシ化石に注目して、その堆積環境を明らかにすることを目的として調査・分析を実施した。

その結果、炭酸塩含有量は、知念層では30～50%程度であるのに対し、その他の試料においては琉球層群基底部で60%程度であるものの、その他の試料では概ね90%以上を示す。また粒子組成では、いずれの試料においても2mm以上の粒子には20～40%程度のコケムシ片が含まれ、次いで軟体動物片や棘皮動物片などが含まれる。一方、造礁サンゴ片はほとんど含まれない。コケムシの群体形は、網目状、葉状、太枝、細枝状、関節型、被覆状、塊状・樹木状、浮遊型の8つの群体形が確認され、いずれの試料においても組成に大きな差はなく、網目状、太枝状、細枝状が優位を占める。特に上部更新統試料と現世試料とは、岩相、炭酸塩含有量、コケムシ組成で、きわめてよい一致を示す。

以上のことと、琉球列島宮古島西方沖現世海底堆積物に関する知見（辻ほか，1993）から、中～上部更新統琉球層群は、辻ほか（1993）のコケムシ質堆積物相に相当すると考えられ、特に上部更新統試料は、喜界島南西沖現世試料との比較から、水深100～150m内外の島棚深部での堆積が推定される。一方、知念層試料は、他の試料と比較し、炭酸塩含有量が著しく低いことから現在の喜界島の海洋環境と比較し、陸源性碎屑物の供給が多い環境であったことが示唆される。また上部更新統試料は約8万年前の礁前縁堆積物とされることから、推定された堆積深度と現在の標高から、その隆起速度は千年あたり約2mと推定され、造礁サンゴから推定されている隆起速度とよい一致を示す。

引用文献

辻 喜弘・山村恒夫・古田土俊夫・結城智也・岩本 博，1993，琉球列島宮古島西方海域の現生炭酸塩堆積物とその石油地質学的意義。石油公団石油開発技術センター研究報告。no. 24, 55-78.

2次元浅水流混濁流モデルにおける乱流運動エネルギー効果の影響 Significance of effect of turbulent kinetic energy in two dimensional shallow water model of turbidity currents

藤島 誠也(京都大学)・成瀬 元(京都大学)

Seiya Fujishima (Kyoto University), Hajime Naruse (Kyoto University)

連絡先: 藤島誠也 (fujishima.seiya.78w@st.kyoto-u.ac.jp)

混濁流の数値モデルには、流体の運動量保存式、流体の連続式、浮遊砂輸送量保存式からなる 3 方程式モデルが広く用いられているが、それらに乱流運動エネルギー保存式を加えた 4 方程式モデルも提案されている(Parker et al, 1986). 混濁流が底面を侵食するとベッドからの堆積物連行および内部の密度成層により乱流エネルギーが消費され、最終的には侵食が抑制されることが予測される。それにも関わらず、3 方程式モデルでは乱流運動エネルギー保存則が考慮されていないため、現実には存在し得ないほど侵食的な流れが計算されてしまうことを Parker et al. (1986) は明らかにしている。4 方程式モデルでは乱流運動エネルギー保存式が導入されており、浮遊砂の密度成層の影響を考えることで堆積物連行速度の上昇を抑制している。乱流運動エネルギーの変動がもたらす効果は侵食の抑制にとどまらない。1次元の数値シミュレーションにおいては、4 方程式モデルを用いることで海底谷の斜面変換点付近にサイクリックステップが形成されることが明らかになっている(Kostic and Parker, 2006)。サイクリックステップは深海に普遍的に見られる地形だが、3 方程式モデルでは容易に再現できない。したがって、実際のフィールドスケールでのタービダイトの分布を検討する際には、4 方程式モデルを用いることが望ましいと考えられる。

しかしながら、既存研究の混濁流 2次元平面数値モデルは 3 方程式モデルを用いており(e.g. Wang et al., 2016), 浮遊砂による乱流抑制効果について考慮されていない。複雑な地形の堆積盆において混濁流が形成する地形やタービダイトの 2次元な分布について解明するためには少なくとも 2次元のモデルが必要とされる。それにもかかわらず、2次元モデルに乱流運動エネルギー保存則を組み込んだ場合に計算結果にどのような影響が現れるかについては全く検討されていないのが現状である。

そこで、本研究では、オープンソースソフトウェアである turb2d (成瀬, 2020)を用いて混濁流の数値シミュレーションを行い、3 方程式モデルと 4 方程式モデルで計算結果にどのような違いが現れるかについて検討した。turb2d には、Parker et al. (1986)で提案された 3 方程式モデルおよび 4 方程式モデルが実装されている。まず、初期地形として勾配 0.01・長さ 4000 m の海底谷およびその下流に平坦な堆積盆底を設定し、海底谷の上流端から 2000 m の地点に設置した円柱状の浮遊堆積物雲から混濁流を発生させた。浮遊堆積物雲の初期条件は粒径 100 μm 、高さ 100 m、浮遊砂濃度 0.001、堆積物の水中比重 1.65、ベッド近傍の浮遊砂濃度と層平均濃度の比 2、ベッドの空隙率 0.5、摩擦係数 0.005 とした。計算の結果、3 方程式モデルでは、海底谷、および海底谷

出口付近で底面が侵食される様子が観察された。一方、堆積盆には、厚さ最大 0.5 cm の薄いタービダイトが形成された。これに対して、4 方程式モデルにおいても海底谷、海底扇状地が侵食される様子は観察されたが、侵食の深さは3 方程式モデルよりもかなり小さかった。また、3 方程式モデルに比べて堆積盆底により多くのタービダイトが堆積し、最大の厚さは 2.7 cm であった。これは、2 次元モデルにおいても 4 方程式モデルの方が乱流運動エネルギーの減衰によって侵食を抑制し、結果として堆積盆底での流れがより低速であったことを反映しているものと考えられる。これに加えて、4 方程式モデルでは海底谷内に起伏のある地形が形成され、海底扇状地には舌状の高まりが形成された。今後の検討が必要だが、これらの特徴はサイクリックステップの発生を示している可能性がある。

次に、初期条件の浮遊砂濃度を 0.01 から上昇させて数値シミュレーションを行い、形成された地形について比較した。その結果、3 方程式モデルでは浮遊砂濃度の上昇に伴って底面侵食が弱くなり、濃度 0.017 を境に堆積性の混濁流へと変化した。また、タービダイトの多くが海底谷で堆積していた。一方、4 方程式モデルでは浮遊砂濃度が 0.02 でほぼ堆積性の流れとなり、3 方程式モデルと比べて堆積盆底にタービダイトが厚く堆積した。このことは、3 方程式モデルが極端な自己加速・自己減速を示し、侵食傾向だった流れが突然堆積傾向に変化するのに対し、4 方程式モデルの方は乱流運動エネルギーの保存則を考慮したことで堆積・侵食傾向がどちらも抑制的になっていることを示唆している。

以上の結果からは、4 方程式モデルを用いた数値シミュレーションでは 3 方程式モデルと比べて侵食・堆積傾向が抑制的であり、より多様な地形が形成されることが明らかになった。今後は、水槽実験や現地観測の結果と比較することで、どちらのモデルが天然の流れを再現するのに適切であるかを検討する必要があるだろう。

文献

Gary Parker., Yusuke Fukushima., and Henry M. Pantin., 1986, Self-accelerating turbidity current. *Journal of Fluid Mechanics*, **171**, 145-181.

成瀬 元, (2020, 11 月), 混濁流シミュレーション用オープンソースソフトウェア turb2d. 日本堆積学会 2020 年オンライン大会.

Svetlana Kostic., and Gary Parker., 2006, The response of turbidity currents to a canyon-fan transition: internal hydraulic jumps and depositional signatures. *Journal of Hydraulic Research*, **44**(5), 631-653.

Wang, Z., Xia, J., Li, T., Deng, S., & Zhang, J., 2016, An integrated model coupling open-channel flow, turbidity current and flow exchanges between main river and tributaries in Xiaolangdi Reservoir, China. *Journal of Hydrology*, **543**, 548-561.

CNN を応用した粒子配列解析による多重逆級化構造の形成メカニズム解明
Formation mechanism of multiple inverse grading structure
investigated by grain fabric analysis using convolutional neural network (CNN)

長門巧・成瀬元（京都大・理）

Takumi Nagato (Kyoto Univ.), Hajime Naruse (Kyoto Univ.)

連絡先：長門巧 (nagato.takumi.58r@st.kyoto-u.ac.jp)

深海堆積物中に観察される多重逆級化構造は、トラクションカーペットによって形成される構造とみなされ (Lowe, 1982), 高せん断応力の堆積物重力流の指標とされてきた。多重逆級化構造の形成モデルとして、トラクションカーペット内の動的ふるい効果によって粒度の逆級化が生じ、流れの速さや濃度が周期的に変化することで複数のレイヤーが重なる多重逆級化構造が形成されるとするモデルが提案されている (Sohn, 1997)。これに対し、Best (1992) や宮田・田中 (2011) は、流れの底にできるベッドフォームが上流方向へ連続的に移動しながら累重することで多重逆級化構造が形成されるとするモデルを提案している。この場合、低せん断応力の流れであっても多重逆級化構造は形成される可能性がある。「トラクションカーペットモデル」と「ベッドフォームモデル」のどちらでこの堆積構造が形成されるのかは明らかにされておらず、多重逆級化構造の形成モデルの解明結果次第では、既存の海底扇状地の堆積環境についての解釈は全面的に見直しを迫られる可能性がある。

二つのモデルのどちらが逆級化層を形成するのかを明らかにするには、堆積構造に見られる微細組織（粒子配列）が鍵となる。トラクションカーペットモデルであれば、堆積物粒子の長軸方向が上流側へ一様に 20~40°傾くことが予測される (Rees, 1968)。一方、ベッドフォームモデルの場合、流れの上流側の斜面では粒子が 20~30°上流側へ傾く粒子配列が報告されており、ベッドフォームの凹部と凸部ではそれよりもやや低角に傾いた粒子配列を示す可能性がある (Yagishita & Taira, 1989)。野外で観察される多重逆級化構造については Hiscott & Middleton (1980) などが粒子配列を測定しているが、二つのモデルを識別するために必要とされるミリメートルスケールでの粒子配列の特徴の変化は明らかにされていない。そこで、本研究では、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) による画像認識技術を応用し、野外で観察される多重逆級化構造の粒子配列を高解像度に測定し解析した。

堆積物の断面画像から粒子配列を解析する手順は以下の通りである。デスクトップスキャナーを最高解像度 (4800 dpi) で利用して断面画像を取得した。スキャナー画像からは直径 100 μm 程度の粒子も十分に判別可能である。畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を用いた画像セグメンテーションモデル SegNet (Badrinarayanan *et al.*, 2017) を利用し、モデルに粒子と基質部とを区別させた画像 (教師画像) と元となる画像の組み合わせとをトレーニングデータとして与え、学習させた。教師画像は人為的に画像の粒子部をトレースして作成する。過学習を防ぐため、モデルの学習に際しては画像オーグメンテーション (画像に回転や反転等の操作を行い、データ数を増やす処理) や、VGG16 の学習済みモデルを利用した転移学習を行った。次に、作成した画像セグメンテーションモデルを用

いて、実際の試料の断面画像に含まれている粒子を自動的に判別させた。その後、判別された粒子の輪郭に対して楕円近似を行い、各粒子の長軸方向の測定を行った。

本研究では、徳島県北東部に分布する上部白亜系和泉層群板東谷層を調査地とした。板東谷層は海底扇状地と解釈されており（菊地・小竹, 2013），主に砂岩泥岩互層が観察される。砂岩優勢砂岩泥岩互層に含まれるタービダイト砂岩の下部から多重逆級化構造を示す岩石試料を採取し、画像解析によって鉛直方向の粒度分布や粒子長軸の傾きの変化を解析した。採取試料を解析した結果、既存の形成モデルから予想される堆積構造とは異なる粒子の傾きの変化が観察された。粒度分析の結果から、一枚の逆級化レイヤーは下部の逆級化部と上部の塊状部という二つのサブレイヤーに区分される。粒子配列解析の結果からは、下部の逆級化領域では粒子長

軸が水平から上流側に約 20°傾く配列に連続的に変化するのに対し、その上位の塊状粗粒部の粒子配列の分布はレイリー検定で帰無仮説を棄却できず、ランダムに近い配列であることが明らかになった。

本研究の結果は、多重逆級化構造の形成メカニズムが必ずしも既存の 2 モデルのどちらかで説明できるとは限らず、新たな形成モデルが必要とされる可能性があることを示唆している。

文献

- Rees, A.I. 1968. The production of preferred orientation in a concentrated dispersion of elongated and flattened grains: *Journal of Geology*, **76**, 457-465.
- Hiscott, R. N. & Middleton, G. V. 1980. Fabric of coarse deep-water sandstones, Tourelle Formation, Quebec, Canada. *Journal of Sedimentary Research*, **50**, 703-721.
- Lowe, D. R. 1982. Sediment gravity flows; II, Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents. *Journal of sedimentary research*, **52**, 279-297.
- Yagishita, K. & Taira, A. 1989. Grain fabric of a laboratory antidune. *Sedimentology*, **36**, 1001-1005.
- Best, J. L. 1992. Sedimentology and event timing of a catastrophic volcanoclastic mass flow, Volcan Hudson, Southern Chile. *Bulletin of Volcanology*, **54**, 299-318.
- Sohn, Y. K. 1997. On traction-carpet sedimentation. *Journal of Sedimentary Research*, **67**, 502-509.
- 宮田雄一郎, 田中凡子. 2011. 高領域ベッドフォームに対する流砂濃度の影響. *地質学雑誌*, **117**, 133-140.
- 菊地一輝, 小竹信宏. 2013. 徳島県北部島田島に分布する和泉層群板東谷層の地質と生痕化石 *Archaeozostera* の産出層準の堆積環境. *地質学雑誌*, **119**, 613-629.
- Badrinarayanan, V., Kendall, A. & Cipolla, R. 2017. Segnet: A deep convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, **39**, 2481-2495.

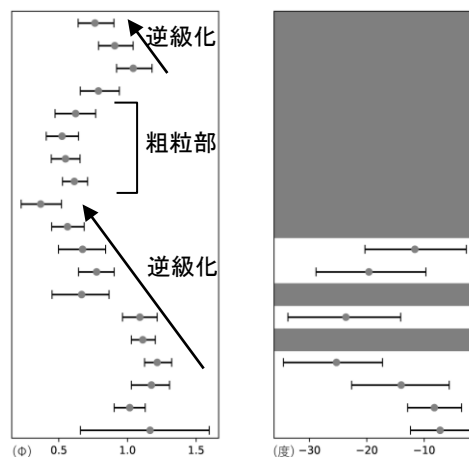


図 1 左：鉛直方向の粒径変化
図 1 右：鉛直方向の粒子の傾斜変化

逆級化を 2 回繰り返す層(高さ 75.5 mm 幅 76.0 mm)について、高さ 4 mm ごとの平均粒径および傾斜を測定。エラーバーは 95%信頼区間・暗色部は配列方向が有意でない領域を意味する。

堆積シーケンス，海水準変動と構造運動の関係，
新潟県東頸城丘陵北東部における更新統魚沼層群の例

Relationship among depositional sequences, eustatic changes and tectonics,
example from the Pleistocene Uonuma Group, Niigata Prefecture, central Japan

河西夏美（信州大）・保柳康一（信州大）

Natsumi KASAI (Shinshu u.), Koichi HOYANAGI (Shinshu u.)

連絡先：河西夏美 (naxkasai123@gmail.com)

1. はじめに・研究手法

北部フォッサマグナは日本海拡大に伴って形成されたリフト堆積盆地であり，厚い新第三系-第四系によって埋積されている．研究地域は新潟県長岡市南部の洪海川西岸の丘陵地帯に位置し，北部フォッサマグナの一部である．研究対象としたのは更新統の魚沼層群であり，非海成層と海成層の繰り返しで形成されるため，シーケンス層序学を用いた考察に適している．この地域周辺には鮮新世から続く構造運動によって多くの褶曲構造が形成されており，本研究地域は八石背斜・洪海川向斜・山屋背斜の影響を受ける．

魚沼層群において堆積相解析を行い，堆積シーケンスを設定し，酸素同位体比曲線（LR04 stack, Lisiecki and Raymo, 2005）との対比を行った．解釈された堆積相と先行研究による構造運動の研究結果を検討することで，研究地域における更新統の堆積シーケンス形成における海水準変動と構造運動との関連を考察することを目的とした．

2. 2つのデルタシステムと堆積シーケンスの設定

堆積システムの変遷と礫種・古流向に周辺地域の既存研究を参照して考察した結果，研究地域には2つの異なる給源をもつ河川が影響しており，北部では東から西へ前進するデルタシステムが，南部では南から北へ前進するデルタシステムがそれぞれ発達していることが示された．

広範囲に追跡可能な不連続面をシーケンス境界（SB1-SB14）として，堆積シーケンス DS1-DS15 を設定した．これらの堆積シーケンスは火山灰鍵層・石灰質ナンノ化石の年代などから周期約10万年の第4オーダーの堆積シーケンスであると考えられる．次に，それらのシーケンス境界と酸素同位体比曲線 LR04 stack（Lisiecki and Raymo, 2005）との対比を行った．その結果，SB-1～SB-14は，それぞれが酸素同位体ステージ（MIS）70, 62, 58, 54, 48, 46, 40, 36, 34, 30, 26, 22, 20, 16の氷期に対応して形成されており，それら堆積シーケンスの成因はミランコビッチサイクルによる氷河性海水準変動である可能性が高い．また，DS10は広範囲に分布する河川成堆積物を基底に持ち，基底面であるSB9は下位層を大きく削り込むことから，第3オーダーのシーケンス境界であり，その下位と上位の2つの第3オーダー堆積シーケンスに分けられると考えられる．その形成は，約1Maにはじまる長周期の海水準低下に対応している．

3. 堆積シーケンス形成における海水準変動と構造運動の関係

酸素同位体比曲線が寒冷化傾向を示す約 1.7 Ma までは、第 3 オーダー堆積シーケンスの低海水準期堆積体 (LST) を構成するデルタが堆積空間の減少によって前進した。これにより、研究地域北部では西進するデルタによる埋積が行われ、中部は海岸平野システムが優先的であり、南部には北進するデルタが活動した。

約 1.7–1.2 Ma は海進期から高海水準期にあたり海岸平野システムやエスチュアリーシステムが海進期—高海水準期堆積体 (TST-HST) を形成した。この期間は氷河性海水準変動による高次堆積シーケンスが前進的な上方累重を繰り返す。

約 1.2 Ma の SB8 シーケンス境界より上位では、研究地域中部から北に隣接する保柳ほか(2000)の研究地域まで連続して堆積環境が内湾化する。この時期は HST 後期の海退傾向の時期と一致する。その後、約 1 Ma からの寒冷化傾向に伴い、海水準低下期堆積体 (FSST) が形成されデルタシステムは大きく前進した。この際、研究地域南部地域には河川成堆積物が卓越しほぼ埋積されたが、中部から北部は中期更新世においても河川システムとエスチュアリーシステムの累重が続き、デルタの前進のみでは埋積は完了しなかった可能性が高い。0.7–0.3 Ma に形成された八石背斜一帯の広い範囲での褶曲形成 (岸・宮脇, 1996) と同時に、研究地域周辺での魚沼層群の堆積は終了したと考えられる。

約 1.2 Ma からの広域内湾化の要因としては、長周期海水準変動と構造運動の複合的な影響があったと推察される。2–1.5 Ma 付近に形成されたとされる西山・寺泊地域の背斜群 (岸・宮脇, 1996) などが、1.2 Ma 付近の HST 後期の海退傾向を受けてバリア的な影響力を大きく持つようになり、広範囲を内湾環境に変化させた可能性がある。

以上より、研究地域における更新統の第 3 オーダー堆積シーケンスは、数十万年という比較的短期間に急激な褶曲形成活動を行った構造運動と、数十万年周期の海水準変動が相互に影響して形成されたと考えられる。一方、数万年—約 10 万年周期の氷河性海水準変動は構造運動と比較して変動が早い。結果として第 4 オーダー堆積シーケンスは構造運動の影響を受けにくく、海水準変動を強く反映して形成された。

5. 文献

- 岸 清・宮脇理一郎, 1996, 新潟県柏崎平野周辺における鮮新世～更新世の褶曲形成史. 地学雑, 105, 88-112.
- 保柳康一・池津大輔・清水由花・大村亜希子, 2000, 新潟県東頸城丘陵北東部に分布する鮮新-更新統におけるデルタ・エスチュアリーシステムの復元とシーケンス層序. 地球科学, 54, 393-404.
- Lisiecki, L.E. and Raymo, M.E., 2005, A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}O$ records. *Paleoceanography*, 20
- 卜部厚志・立石雅昭・風岡修, 1995, 魚沼層群にみられる海成層の堆積サイクルと相対的海水準変動. 地質学論集, 45, 140-153.

北海道むかわ地域の二風谷・荷菜層の堆積システムおよび古環境
 Paleoenvironments and sedimentary system of the Miocene Nibutani and Nina
 formations distributed in Mukawa area, Hokkaido, Japan

朝日啓泰（北海道大学） 沢田健（北海道大学）

Hiroyasu Asahi (Hokkaido Univ.), Ken Sawada (Hokkaido Univ.)

連絡先：朝日啓泰 (asahi-air-25@eis.hokudai.ac.jp)

1. はじめに

北海道日高地域に分布する日高堆積盆は、北海道中央部に位置した狭長なフォアランド堆積盆の南部に位置し、中期-後期中新世にかけて広がる北西太平洋縁辺部において急速に堆積物に充填され、トラフ充填型タービダイトからファンデルタ堆積層へと進行する（嵯峨山他 1992；加瀬他,2018）。このフォアランド堆積盆では洪水流をはじめとする陸域からの物質輸送が大きく寄与したことが示唆され、北西に隣接する石狩堆積盆では陸上有機物片が濃集するタービダイトがそれを示す証拠とされる（Furota et al., 2021）。陸域後背地では環境により植生や運搬システムが変化すると考えられ、有機物分析は陸上有機物を多く含む堆積層において、陸域から海洋への物質輸送を推定するためのトレーサーとして期待できる。特に針葉樹、広葉樹、微生物分解を経験した被子植物成分の組成変化は、混濁流の発生要因を検討する上で有用な指標となると考えられる。日高地域には中期-後期中新世までの堆積層が幅広く分布しており、堆積盆の堆積システムの時間・空間変化を考察するのに適したフィールドであることが近年放散虫や珪藻分析による年代推定から明らかになりつつある（本山他,2009；丸山他,2018）。本研究では中期-後期中新世の日高堆積盆に埋積した堆積層を対象にフィールド調査と有機地球化学分析を行い、堆積盆の堆積システムの変遷と陸上後背地の古環境との関連性を検討した。

2. 試料と方法

日高堆積盆の中期-後期中新世の堆積層として下位からアベツ層（粗粒砂泥互層）、二風谷層（細粒砂泥互層）、荷菜層（細粒砂泥互層、礫層）が露出する。これらの堆積層はこれまで放散虫や珪藻群集により年代対比が行われており、堆積年代は放散虫や珪藻によってアベツ層は 15.3-12.5Ma、二風谷層は 12.5-9.7Ma、荷菜層は 9.7-3.5Ma と推定されている（本山他 2009；丸山他 2018）。本研究ではアベツ・二風谷層の露出する穂別地域のホロカンベ沢、二風谷上部～荷菜層下部の分布する五号沢川、二風谷層上部・荷菜層の露出する日高地域波恵川にてフィールド調査と泥岩試料のサンプリングを行った。タービダイト試料はフィールドにて堆積相の記載を行い、堆積構造毎にサンプリングした。有機物分析は堆積物から有機溶媒を用いて有機成分を抽出、GC-MS によって測定・解析を行った。

3. 結果と考察

[堆積システム]日高堆積盆に見られるタービダイトでは、陸源有機物として裸子植物成分(ジテルペノイド)、被子植物成分(トリテルペノイド)と微生物分解を受けた被子植物成分(減成トリテルペノイド)が含まれる。ジテルペノイド・トリテルペノイドは当時の植生、微生物分解を受けた減成トリテルペノイドは湿原などの陸域貧酸素環境で形成されると考えられる。ジテルペノイドと減成トリテルペノ

イドはシーケンスを通してほぼ濃度は変化しないが、トリテルペノイドはシーケンスを通じて高濃度で含まれていた。特に有機物葉理が発達するユニットでは最大値を示しており、アベツ層を形成した混濁流には被子植物成分が高濃度で含まれたことを示唆する。またトリテルペノイドのみが高濃度で検出された要因として、山間部から直接被子植物成分が運搬されたことが考えられる。

二風谷層は細粒砂泥互層と珪質泥岩で構成され、タービダイト層の頻度はアベツ層と比べ減少し、薄層化する。先行研究ではアベツ層から二風谷層での岩相変化の要因として、テクトニクス場の変化により堆積盆の沈降速度が低下し、堆積盆の埋積作用が弱化した可能性が指摘される(Kawakami., 2013.)。また珪質泥岩は珪藻生産の増大を示すと考えられ、堆積盆が Pelagic な環境へ変化したことも示唆される。陸上高等植物成分のうち、被子植物成分が著しく減少し、アベツ層で見られた陸域からのダイレクトな物質輸送が弱化したことが有機物組成からも示唆される。

一方荷菜層では下部から中部にかけては細粒砂泥互層が続き、典型的な厚いタービダイトは顕著にはみられないが、荷菜層上部では礫岩層を主体とする堆積相へと変化する。礫層の間に粗粒タービダイトが挟在する。岩相変化により荷菜層では比較的 pelagic な環境から活発な埋積が起こる環境へと変化したと考えられる。また粗粒タービダイト層ではアベツ層と同様に、枝や樹皮を含む有機物濃集層が確認され、アベツ層と同様の陸上からダイレクトに陸上高等植物が運搬されたことを示し、日高堆積盆において陸上からの活発な物質輸送が中期-後期中新世にかけて断続的に駆動していたことが推測される。荷菜層の有機物組成の変化についても議論していく。

[古環境]特徴的な有機成分としてタービダイトの全てのユニットからスギ科植物成分が複数種検出された。スギ科は温帯域の冬季降水量が多い地域に群生するため、当時の日高地域でも同様の環境が広がっていた可能性がある。高い冬季降水量は融雪期の河川水量や融雪洪水の増加の要因となるため、温帯かつ冬季降水量の多い気候が有機物を海洋底へ運搬する堆積システムの条件の可能性がある。

文献

嵯峨山積・保柳康一・宮坂省吾.,1992, 中央北海道日高海岸地域の第三系珪藻 生層序と粗粒堆積の形成期. 地質学雑誌, **98**, 309-321.

本山功・川村好毅., 2009, 北海道穂別地域の中新統の地質と放散虫化石層序. むかわ町立穂別博物館研究報告. **24**, 1-18.

Kawakami, G., 2013, Foreland Basin at the Miocene Arc-Arc Junction, Central Hokkaido, Northern Japan. In Ito, Y., ed., Mechanism of Sedimentary Basin Formation—Multidisciplinary Approach on Active Plate Margins, *InTech*, 131–152.

加瀬善洋, 川上源太郎, 高野修.,2018, 北海道日高海岸地域の中部～上部中新統前縁盆地埋積物の堆積システムと石油地質. 地質学雑誌, **124**, 627-642.

丸山俊明・本山功・粕川あかね・秋山ななみ・石澤翔太・松崎賢史., 2019, 北海道日高地域波恵川鯨類化石算出地点周辺の中新統珪藻化石層序. 山形大学紀要(自然科学),**19**, 15-24.

Furota S., Sawada K. and Kawakami G., 2021, Depositional processes of plant fragment-concentrated sandstones in turbiditic sequences recorded by plant biomarkers (Miocene Kawabata Formation, Japan). *International Journal of Coal Geology*. **233**,103643.

セマンティックセグメンテーションを用いたコア画像からの生痕化石の抽出 Extraction of trace fossils from core images by semantic segmentation

菊地一輝・成瀬 元 (京都大学)

Kazuki Kikuchi, Hajime Naruse (Kyoto University)

連絡先: 菊地一輝 (kikuchi@kueps.kyoto-u.ac.jp)

本研究は、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) による画像セグメンテーション技術を用いて、コア画像から生痕化石の領域を自動的に抽出し、生物攪拌強度を評価する手法を開発した。一般に、底生動物による堆積物への影響は、露頭やコアの垂直断面中に占める生物攪拌を受けた面積の割合に基づいて評価される (たとえば, Droser and Bottjer, 1986; Taylor and Goldring, 1993)。そのためには、露頭断面に観察される生痕化石の断面積を計測する必要がある。たとえば、露頭断面画像に見られる生痕化石を分類群ごとに着色した画像を作成し、着色されたピクセル数を計数することで生痕化石の断面積を見積もることができる。しかしながら、生痕化石を肉眼で判別し手動で着色する作業には多大な時間と労力を要する。そのため、長時間スケールでの生物攪拌強度の変動の検討のような、大量の露頭画像を処理する必要がある研究は困難である。そこで本研究では、露頭画像と生痕化石を人為的に着色した画像の関係を CNN に学習させ、露頭画像中の生痕化石を自動的に判別するモデルを開発した。また、モデルを IODP Exp. 362 Site U1480 で採取された海底チャンネル-レビー堆積物のコア断面画像に適用し、生物攪拌強度の変動を検討した。

調査対象のコア断面画像には、6 属の生痕化石が観察された。各コア断面画像を 6 属の生痕化石および生痕化石の見られないコア断面と背景部分の計 8 色で着色した画像を作成し、コア断面画像と着色画像のセットを CNN の教師データセットとした。本研究で作成した CNN は、 256×256 ピクセルに分割されたコア断面画像を入力し、各ピクセルが上述の 8 クラスのどれに分類されるかを推定するモデルである。本研究では CNN の構造としてエンコーダとデコーダが各 8 層ずつの U-Net (Ronneberger et al., 2015) を採用した。本研究で用いた教師データセットは、大半の面積を生痕化石が見られないコア断面と背景部分が占め、各クラスのピクセル数には大きな偏りがある。クラス間の教師データ数の不均衡を改善するため、本研究では損失関数として、各クラスの本質的なサンプル数 (Cui et al., 2019) とそのクラスに分類される確率 (Lin et al., 2017) を使って重みづけを行う class-balanced focal cross entropy (CB_{focal} ; Cui et al., 2019) を用いた。評価関数には Dice 係数を使用した。1881 枚の教師データセットをサイズ 16 のミニバッチに分割し、 CB_{focal} を最小化する最適化計算を 350 エポック繰り返した。

学習したモデルを学習に使用していないコア断面画像に適用したところ、約 88% のピクセルのクラ

スが手動で着色した正解画像と一致する推定画像が得られた。推定画像と正解画像を比較すると、背景部分や一部の生痕属など、教師データセットにおいて多くのピクセル数を占めるクラスほど Dice 係数が高い一方、ピクセル数の少ない生痕属のクラスでは Dice 係数は小さかった。推定画像と正解画像を 10 cm 間隔の区間に分け、各区間での生痕化石の占める面積の割合を計算した結果、推定画像は 0.001–0.061、正解画像は 0–0.068 となり、両者の RMSE は 0.007 であった。したがって、本研究で作成したモデルは、生物攪拌強度を推定するには十分な精度でコア断面画像を分類できると考えられる。

本研究のモデルを IODP Exp. 362 Site U1480 Hole F の 525–650 mbsf に見られる海底チャンネル–レビー堆積物のコア断面画像に適用した。そして、得られた推定画像を 50 cm のインターバルに分けて生物攪拌強度を計算し、層位変化を検討した。その結果、調査層準の生物攪拌強度はおおむね 0.01 以下と低いものの、スパイク状に生物攪拌強度の高い層準を挟むことが明らかになった。このことは、底生動物の少ない静穏な海底に混濁流が流下した直後に日和見主義の底生動物が入植することによって、一時的に生物攪拌が活発化したことを反映していると考えられる。

今後は、本研究のモデルを応用し、他の地域や年代の堆積物のデータを大量に集めることで、海底扇状地堆積物における生物攪拌の普遍的な層位変化パターンが明らかになることが期待される。そのためには、より産出頻度の低い生痕分類群も判別できるような精度の高いモデルを開発し、生物攪拌強度だけでなく分類群多様性も併せた層位変化を検討する必要があるだろう。

引用文献

- Cui, Y., Jia, M., Song, Y. and Belongie, S., 2019, *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 9268–9277.
- Droser, M. L. and Bottjer, D. J., 1986, *Journal of Sedimentary Research*, **56**, 558–559.
- Lin, T., Goyal, P., Girshick, R., He, K. and Dollár, P., 2017, *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2980–2988.
- Ronneberger, O., Fischer, P. and Brox, T., 2015, In Navab N., Hornegger J., Wells W., Frangi A., eds. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015*, 234–241, Springer, Cham.
- Taylor, A. and Goldring, R., 1993, *Journal of the Geological Society*, **150**, 141–148.

水路実験による 2019 年千曲川氾濫での破堤堆積物形成過程の解明

Plume experiments on the formation process of the crevasse-splay deposit
formed by the 2019 flooding of the Chikuma River

加藤汰一・山田昌樹（信州大学）・成瀬 元・酒井佑一（京都大学）

Taichi Kato, Masaki Yamada (Shinshu University)

Hajime Naruse, Yuichi Sakai (Kyoto University)

連絡先：加藤汰一（21ss413h@shishu-u.ac.jp）

2019 年 10 月 13 日、台風 19 号の豪雨により長野県の千曲川が氾濫し、長野市穂保地域では、左岸の幅 30 m の堤防が 70 m に渡って決壊した。この決壊により、破堤地点から氾濫原方向へ流路が形成され、流路の上流側に礫質の砂礫堆、下流側には砂質の砂礫堆が認められた。洪水発生直後には、礫質砂礫堆において 3 地点、砂質砂礫堆において 9 地点でトレンチ掘削が行われている。礫質砂礫堆は主に下部の含礫砂層と上部の礫層によって構成されており、最大層厚は 2 m 程度であった。砂質砂礫堆では、最大層厚 1.1 m の逆級化を示す含礫砂層が確認され、破堤地点から遠ざかるにつれて薄層化・細粒化傾向を示した。本研究では、破堤堆積物の分布や堆積学的特徴が、破堤プロセスの中でどのような過程を経て形成されたのかを解明するため、破堤堆積物形成の水路実験を行った。

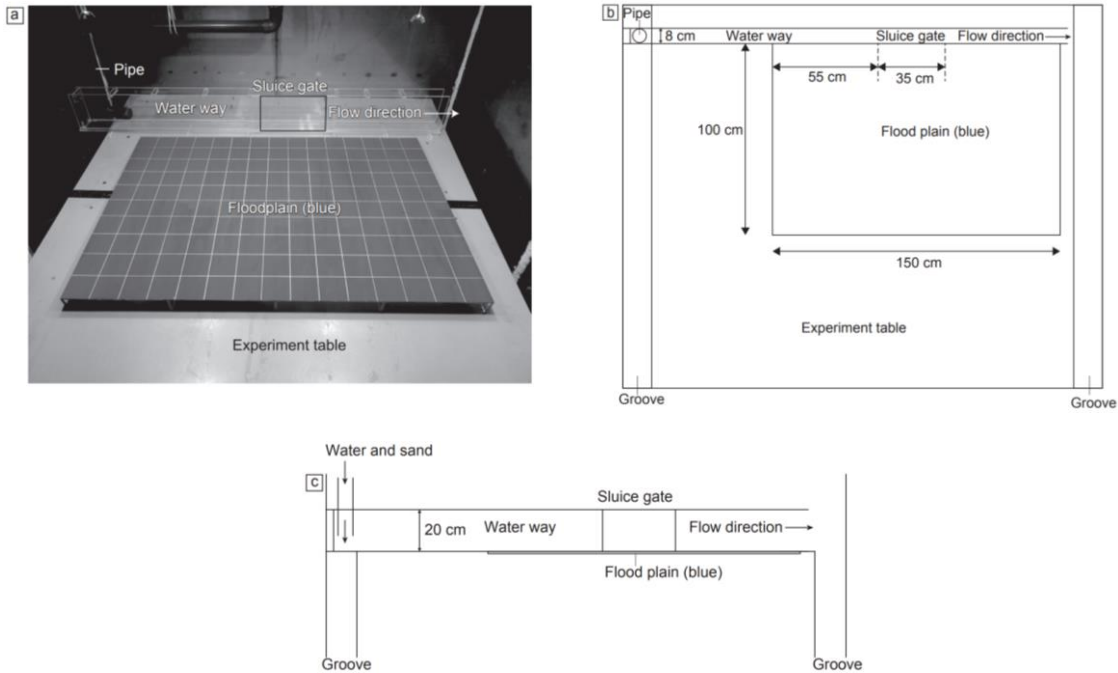
千曲川氾濫を単純化した模擬実験として、長さ約 2 m、幅 8 cm の直線水路を使用し、2 種類のカラーサンド（粒径 150–250 μm の礫想定緑砂と粒径 40–100 μm の浮遊砂想定赤砂）と水をタンクで攪拌し、ポンプで直線水路の上流端から給砂した（第 1 図）。水路の下流端に可動式の板を置いて水位をコントロールし、切り抜かれた水路中央部の側壁（幅 35 cm）において、まずは越流を起こした。次に、切り抜かれた側壁にはめておいたシャッターを取り外すことで決壊を起こし、氾濫原の板上（100×150 cm）に形成された堆積物を観察した。実験条件を変えながら、10 回の実験を行い、その中で最も再現度の高かった Run 7 について詳細な分析を行った。

Run 7 では、高さ 2 cm のシャッターを 4 つ積み重ね、それらを段階的に取り外すことで越流と破堤を再現した。流水開始から 39 秒後に最上部のシャッターを取り外し、越流を起こした。越流開始から 27 秒後にシャッターをさらに 2 つ同時に取り外し、破堤を起こした。底部にシャッターを 1 つ残したまま実験を続け、破堤開始から 146 秒後に流水を止めた。なお、氾濫原の勾配は河川側に 0.6–0.8°の傾斜を示した。実験の様子を撮影した映像から、越流時（実験開始から 59 秒後）には破堤部から約 25°下流方向に流路が形成され、その両脇に主に赤砂が堆積した。破堤直後（実験開始から 66 秒後）には、氾濫流が越流時の堆積物を押し流しながら、赤砂と緑砂が上流側の砂礫堆として越流時の流路上に形成された。破堤部からの主流路は、形成された砂礫堆に阻害されて下流側（破堤開始から 30 秒後には約 34°下流方向）へ移動した。破堤開始から 90 秒後には、上流側の砂礫堆はさらに下流側へと堆積を進め、それに伴って主流路もさらに下流側（約 46°下流方向）へ移動した。同時に下流側の砂礫堆が形成され始めた。

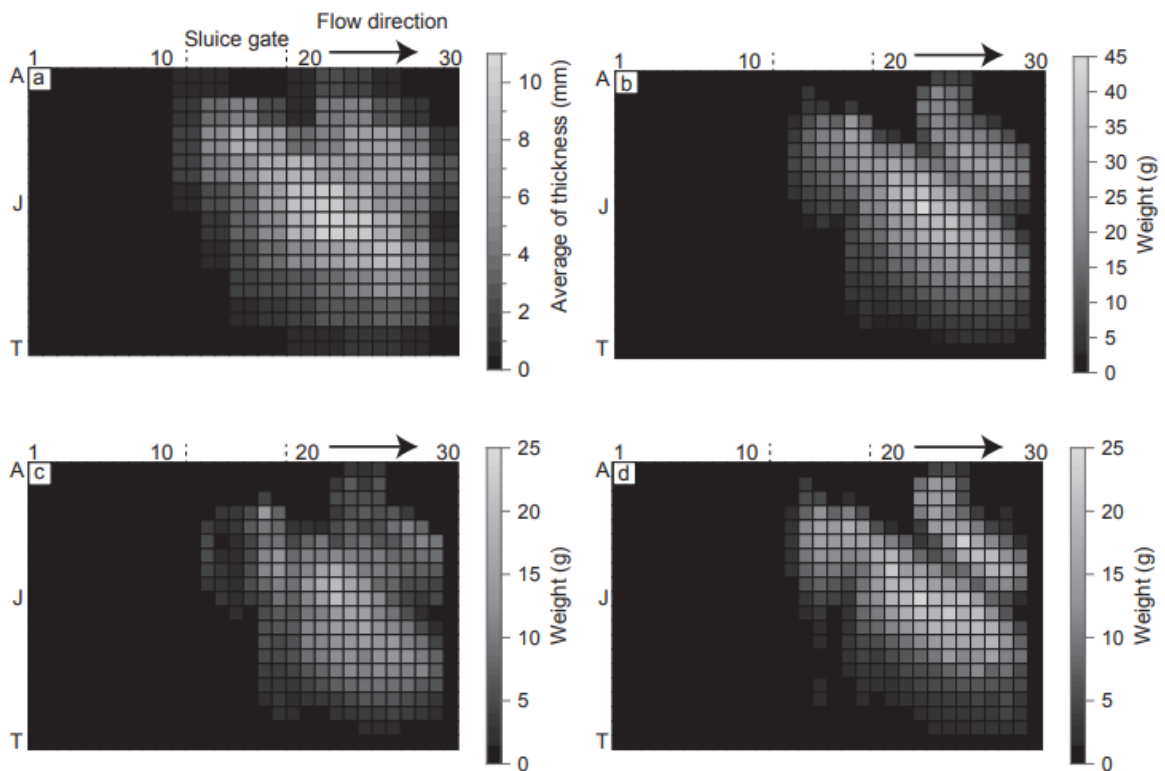
水路実験時に発泡スチロールを流して計測した氾濫流速から、越流時には約 41 cm/s、破堤直後には約 83 cm/s、破堤開始から 60 秒後には約 53 cm/s と、破堤直後の氾濫流速が最も高い値を示した。すなわち、上流側の粗粒な礫質砂礫堆は破堤直後の高い底面せん断応力を示す流れのベッドロードから堆積したものである。その後、氾濫流が減衰しながら流路を下流側へ移動させたことで、粗粒な砂堆は上流側に取り残されることとなった。氾濫原には予め 5 cm ごとに格子線が引かれており、それを用いて形成された堆積物の層厚と 2 種類の砂の重量分布を分析したところ、上流側の砂礫堆の方が下流側よりも層厚が大きく（上流側の最大平均層厚は 10.13 cm、下流側は 6.99 cm）、粗粒成分（緑砂）も多く堆積していた（上流側の最大全重量と最大緑砂重量はそれぞれ 44.18 g と 20.32 g、下流側はそれぞれ 29.85 g と 11.29 g）（第 2 図）。これは上流側の砂礫堆がより高いせん断応力を示す氾濫流で形成されたことを支持すると考えられる。

水路実験において形成された上流の粗粒砂堆は、下流側の砂堆に比べて層厚が大きく、これは 2019 年の千曲川氾濫で見られた礫質砂礫堆の特徴と極めてよく類似している。すなわち、実験と同様に、現地で見られた上流側の礫質な砂礫堆も氾濫流の減衰に伴う流路のシフトによって形成された可能性が考えられる。破堤部の上流側に比較的規模の大きい砂堆が形成されることが一般的な破堤堆積物の

特徴なのか、それとも特定の水利条件下でのみ形成されるのかについては、今後の異なる条件下での水路実験および破堤堆積物の野外調査に基づく検討が必要となるだろう。



第 1 図 (a) 実験装置の写真 (b) 実験装置平面図 (c) 実験装置正面図。



第 2 図 Run 7 で形成された堆積物の層厚・重量分布。(a) 平均層厚 (10 cm 間隔で各格子点の層厚を測定し、4 点の平均層厚を算出)、(b) 砂の全重量、(c) 緑砂の重量、(d) 赤砂の重量。

化学的アプローチによる視認困難な津波痕跡の識別

Geochemical approach for identifying invisible tsunami trace

篠崎鉄哉（産総研）・澤井祐紀（産総研）・池原実（高知大）・松本弾（産総研）

嶋田侑真（産総研）・谷川晃一郎（産総研）・田村亨（産総研，東大）

Tetsuya Shinozaki (AIST), Yuki Sawai (AIST), Minoru Ikehara (Kochi Univ.)

Dan Matsumoto (AIST), Yumi Shimada (AIST), Koichiro Tanigawa (AIST)

Toru Tamura (AIST, The Univ. of Tokyo)

連絡先：篠崎鉄哉 (tetsuya.shinozaki@aist.go.jp)

1. はじめに

地層中の津波堆積物の分布を調べることで、過去に発生した津波のおおよその浸水範囲を見積もることができる。一方で現世の津波堆積物からは、肉眼で認識しやすい砂質の津波堆積物の分布距離は津波浸水距離の 57–76%程度であると報告されており (Abe et al., 2012)，地層中でも視認可能な砂質の津波堆積物のみから過去の浸水範囲を復元しようとするとう過小評価となってしまう場合がある。津波の浸水範囲を正しく推定するためには、視認可能な堆積物だけでなく視認困難な津波の痕跡を識別することが求められている。本研究では、視認困難な津波流入の痕跡の検出のため、2011 年東北沖津波を対象として青森県おいらせ町の防潮林帯で表層堆積物を採取し、地球化学的検討を行った。

2. 調査地域と分析手法

2020 年 10 月に青森県おいらせ町の防潮林内で掘削調査を行った。同地域では、2011 年東北沖津波の発生から数ヶ月後に調査が行われており、遡上限界が明らかになっている (Tanigawa et al., 2018)。海岸線に直交する方向に 2 本の測線を設定し、遡上限界付近の浸水域内で 12 地点、遡上限界よりも内陸で 1 地点の計 13 地点で深さ 18 cm のブロック状試料を採取した。採取した試料は肉眼観察、写真撮影、CT 写真撮影の後、厚さ 1 cm に切り分けた。分割した試料に対し、強熱減量、粒度分析、Cs 分析、バイオマーカー分析を行った。

3. 結果と考察

採取した堆積物試料の肉眼観察の結果、すべての地点で砂丘堆積物と考えられる厚い細粒～中粒砂層が下位にみられ、その上位に 4～9 cm 厚の土壌層がみられた。2011 年東北沖津波の浸水範囲のうち海岸線に比較的近い地点では、この土壌層中に津波堆積物と考えられる層厚 1.5～4 cm の細粒～中粒砂層を観察することができたが、内陸側の地点ではこの砂層を肉眼で観察することはできなかった。CT 写真や含砂率および粒度組成の深度分布からも、肉眼観察と同様に、内陸側の地点の土壌層中に明確なイベント層は識別できなかった。また、数地点の堆積物に対しバイオマーカー分析を行ったが、測定したすべての層準において海洋生物起源のバイオマーカーは検出できなかった。

一方で、すべての地点において、炭化水素の一種であるイソロンギフォレン (C₁₅H₂₄) を検出した。

イソロンギフォレンは主にマツの精油中に含まれるものであり (Mukai et al., 2017) , 調査地がマツで構成される防潮林帯であったことから, このイソロンギフォレンが検出されたと推察される. イソロンギフォレン濃度の深度変化をみたところ, 土壌層においてはある一定の低い濃度を保っていたが, 津波堆積物層において高濃度のピークを持つことがわかった. さらに, 津波浸水の影響を受けていない地点ではイソロンギフォレン濃度がピークを持たなかったことから, 津波によりこのイソロンギフォレン濃度が高くなった可能性が高い. また, 津波堆積物が視認できない浸水範囲内の堆積物においてもイソロンギフォレン濃度のピークがみられることから, この層準が津波浸水の層準である可能性が高い.

イソロンギフォレン濃度の深度変化・側方変化を追うことで, 視認可能な津波堆積物から推定される浸水限界よりもさらに内陸に浸水域を見積もることができた. ただし, 今回検出されたイソロンギフォレンは周囲の環境に依存した指標であることに注意が必要である. しかしながら本研究の結果は, 環境に応じた特徴的な指標が津波堆積物に対応してピークを持つのであれば, その側方変化を追うことで津波堆積物が視認困難な地点でも海水流入の痕跡を識別できる可能性があることを示している.

4. まとめ

特徴的なバイオマーカーの深度変化・側方変化を追うことで, 津波堆積物が視認できない地点であっても津波浸水の影響を捉えることができた. さらに海洋生物起源ではなく陸上由来のバイオマーカーであっても, 津波浸水の識別の指標となり得ることを明らかにした.

謝辞

本研究におけるバイオマーカー分析は, 高知大学海洋コア総合研究センター共同利用研究 (採択番号: 20B067) の基で, CT 写真撮影は産業技術総合研究所地質調査総合センター共同利用実験室の基で実施された. 本研究は JSPS 科研費 20J00423 の助成を受け実施された.

文献

- Abe, T., Goto, K., and Sugawara, D., 2012, Relationship between the maximum extent of tsunami sand and the inundation limit of the 2011 Tohoku-oki tsunami on the Sendai Plain, Japan. *Sedimentary Geology*, **282**, 142–150.
- Mukai, A., Takahashi, K., and Ashitani, T., 2017. Natural autoxidation of longifolene and anti-termite activities of the products. *Journal of Wood Science*, **63**, 360–368.
- Tanigawa, K., Sawai, Y., and Namegaya, Y., 2018. Diatom assemblages within tsunami deposit from the 2011 Tohoku-oki earthquake along the Misawa coast, Aomori Prefecture, northern Japan. *Marine Geology*, **396**, 6–15.

石垣島カラダギ洞穴に認められる津波堆積物の特徴
 Sedimentary facies of tsunami deposits in Karadagi Cave,
 Ishigaki Island, Okinawa Prefecture

石原与四郎, 沖田優香, 北原美優(福岡大学), 成瀬 元(京都大学),
 亀島慎吾, 具志堅清大, 片桐千亜紀(沖縄県立埋蔵文化財センター), 山極海嗣(琉球大学),
 小野林太郎(国立民族学博物館), 島袋綾野(石垣市), 吉村和久(九州大学)
 Yoshiro Ishihara, Yuka Okita, Miyu Kitahara (Fukuoka Univ.), Hajime Naruse (Kyoto Univ.),
 Shingo Kameshima, Seita Gushiken, Chiaki Katagiri (Okinawa Prefectural Archaeological Center),
 Kaishi Yamagiwa (Ryukyu Univ.), Rintaro Ono (National Museum of Ethnology),
 Ayano Shimabukuro (Ishigaki City), and Kazuhisa Yoshimura (Kyushu Univ.)
 連絡先: 石原与四郎 (ishihara@fukuoka-u.ac.jp)

石垣島の東海岸沿いには、津波が数百年間隔で繰り返し襲来したことが知られている(河名・中田, 1994; Araoka et al., 2013; Ando et al., 2018). これらはサンゴ礁のリーフ内や沿岸低地に分布する津波石の精力的な研究(河名・中田, 1994; Goto et al., 2010; Araoka, 2013)や沿岸部のトレンチ調査(Ando et al., 2018)等によってその詳細が明らかになってきた。特に歴史記録に残る明和津波(1771年)や、八重山諸島全体を襲ったとみられる沖縄先島津波(約2000年前?)となどが大規模な津波として良く知られている。明和津波の痕跡や沖縄先島津波の堆積物は、2020年に国指定史跡として登録された白保竿根田原洞穴遺跡の堆積物や洞窟の石筍記録からも得られている(沖縄県立埋蔵文化財センター, 2017a, b; 吉村ほか, 2019)。標高約30m付近に位置するこの遺跡の堆積物中には、細粒な粘土質の洞窟堆積物中に、サンゴ等の海棲生物遺骸やリップアップマッドクラストを多く含む厚さ50cm近い砂礫質の津波堆積物が認められ、下部のトラクションによる堆積構造の卓越するユニットと、上部の級化層理を成すユニットに分けられることが明らかになっている。一方、津波が地表を覆ったとみられる地域の地下にある洞窟の石筍記録からは、Srのピークや植生の変化の徴候も示された(吉村ほか, 2019)。津波堆積物の下位からは保存の良い旧石器人骨化石が多く得られていることから、厚い津波堆積物は、火山灰鍵層のように同時間面を定めるだけでなく、本地域の遺跡の保存においても重要な役割を果たしていると推定される。

このような背景のもと、講演者らは石垣島東海岸沿いの洞窟に認められる洞窟の津波堆積物と遺跡の調査を行っている。現在までに白保竿根田原洞穴を含めて8つの洞窟(標高4m~30m)の内部の泥質堆積物中には、サンゴを含む砂礫や有孔虫、また、陸上の土壌侵食によると思われるリップアップマッドクラストを多く含むイベント堆積物が確認された。このうち、白保竿根田原洞穴遺跡の北約300m、標高30m~25mに位置するカラダギ洞穴では砂礫質のイベント堆積物で埋もれた鍾乳石なども確認されているほか、白保竿根田原洞穴遺跡に近い環境にあったと推定されることから、遺跡発掘調査による詳細な堆積物の層相記載を行っている。現在までに、(1)洞窟内の落盤を覆い、サンゴや海棲生物遺骸を多く含む層厚40cmほどの砂礫質堆積物、(2)変成岩の大礫や石灰岩礫、貝殻片等を多く含む砂礫層、(3)有孔虫やリップアップマッドクラストを多く含む比較的淘汰の良い砂層、(4)下位の液状化による構造や割れ目を伴う砂層を覆う、厚さ20cm~30cmで海

棲生物遺骸や多量のリップアップマッドクラスト(土壌片)を含む級化する泥質砂層等を確認した。地表河川や顕著な地下水流等が認められない本洞窟に入り込んだこのようなイベント堆積物は、津波堆積物と認定される。また、含まれているリップアップマッドクラストはいくつかのタイプが認められ、津波の侵入した距離やルートを示唆する可能性がある。洞窟の中に堆積するイベント堆積物については、海水準に近い海食洞から繰り返される津波を検出した事例(Rubin et al., 2017; 藤原ほか, 2019)が認められるが、より内陸で標高の高い石灰岩洞窟においても大規模な津波が記録されることが明らかになった。今後様々な標高に認められる洞窟の津波堆積物の年代測定およびマッピングを行うことによって、石垣島東海岸を襲来した複数の大規模な津波の浸水域等を検証することができるようになると考えられる。

文献

Ando et al., 2018, *Tectonophysics*, 722, 265-276.; Araoka et al., 2013, *Geology*, 41, 919-922.; 藤原ほか, 2019, 歴史地震, 34, 214. ; Goto et al., 2010, *Earth Science Review*, 102, 77-99.; 沖縄県立埋蔵文化財センター, 2017a, 沖縄県立埋蔵文化財センター調査報告書, 85. ; 沖縄県立埋蔵文化財センター, 2017b, 沖縄県立埋蔵文化財センター調査報告書, 86. ; Rubin et al., 2017, *Nature Communications*, 8, 16019.; 吉村ほか, 2019, 第四紀研究, 58, 195-209.

本研究は JSPS 科研費 JP20K04138 の助成を受けて行われた。

津波による石灰質サンゴ礁堆積物の海底谷を通じた深海への輸送

Possible tsunami-induced calcareous sediment transport from coral reef to deep sea through submarine canyons along the southern Ryukyu forearc

池原 研（産総研・地質情報）・金松敏也（海洋研究開発機構）・
宇佐見和子（日本エヌ・ユー・エス，石油天然ガス・金属鉱物資源機構）
Ken Ikehara (Geol. Surv. Japan, AIST), Toshiya Kanamatsu (JAMSTEC),
Kazuko Usami (Japan NUS Co. Ltd., JOGMEC)
連絡先：池原 研 (k-ikehara@aist.go.jp)

巨大津波は表層堆積物を移動させ、海底環境に大きな影響を与える。熱帯～亜熱帯のサンゴ礁に囲まれた島々では、巨大津波によってサンゴからなる津波石の打ち上げやサンゴを含む津波堆積物の形成が知られているが、巨大津波によるサンゴ礁から沖合、そして深海への堆積物輸送については不明のままである。石垣島などでは、津波石・津波堆積物の研究から過去数千年に500～1000年程度の間隔で巨大津波の襲来していたことがわかっている。Ujiié et al. (1997)は西表島南方の海底谷沿いのコアのタービダイト中にサンゴ礁に生息する底生有孔虫の産出を報告した。したがって、南琉球前弧域は巨大津波に伴う浅海（サンゴ礁）から深海への堆積物輸送の検討が可能な地域であると言える。

西表島南方から石垣島南東までの前弧域には多数の海底谷が発達している。主なものは、西から、波照間海底谷、新城島海底谷、黒島海底谷、白保海底谷、西石垣海底谷、東石垣海底谷である。これらの谷頭は一般に西から東に向かって島々から離れ、水深が深くなる。もっとも谷頭水深が浅いのは新城島海底谷と黒島海底谷の水深50～60mであり、東側の西石垣海底谷や東石垣海底谷では水深約500mとなる。海底谷は水深2500～3000m程度の前弧海盆あるいは前弧の平坦面で開口する。明瞭な海底扇状地は黒島海底谷の開口部以外には認められない。これらの海底谷の開口部周辺で採取されたコアにはいずれも石灰質堆積物の砂層の挟在が認められるが、その厚さや粒度、組成は異なる。水深500m付近に谷頭を持つ東側の海底谷の開口部では、砂は細粒砂～極細粒砂で主に浮遊性有孔虫からなり、厚さも数cmと薄い。サンゴ礁に近接した谷頭を持つ黒島海底谷開口部の海底扇状地では粗粒～細粒砂で貝殻片やコケムシ、サンゴの破片、浅海～サンゴ礁域に生息する底生有孔虫遺骸を含む石灰質砂が頻繁に挟在する。このような違いは、海底谷とサンゴ礁の接続度の違いを反映し、大量の石灰質堆積物が浅海～サンゴ礁域から供給される黒島海底谷でのみ海底扇状地が形成される。水深200mほどに谷頭を持つ波照間海底谷の開口部ではコア上部には薄層細粒の石灰質砂の挟在しか認められないが、コア中部に細粒～中粒砂のやや厚い石灰質砂が挟在する。年代測定によれば、この厚い石灰質砂の堆積は最終氷期最盛期であり、氷期の海水準低下期のサンゴ礁から供給されたものと推測される。

海底扇状地のタービダイトの堆積間隔は400年～数千年であり、巨大津波の間隔に近い。したがって、巨大津波は海底谷を通じた浅海～サンゴ礁堆積物の深海への輸送と海底扇状地の形成に関与している可能性が高い。

文献：Ujiié, H. et al. (1997) J. Geol. Soc. Japan, 103, 590-603.

中新統田辺層群白浜層の堆積環境変遷と津波堆積物

Environmental changes and a tsunami deposit of the Miocene Shirahama Formation

石塚 創太 (筑波大学)

Sota Ishizuka (University of Tsukuba)

連絡先：石塚創太 (s2021094@s.tsukuba.ac.jp)

地質時代の地層には、近年発生した津波の堆積物と比較して侵食の程度や堆積物の層厚がはるかに大きい津波堆積物が数多く見つかっている。和歌山県白浜町に分布する浅海成の白浜層から津波堆積物と共通する特徴を多く持つイベント堆積物を発見した。イベント堆積物の成因を知るためにはその堆積場を考慮する必要がある。白浜層は堆積構造が豊富な上、断層などによる変形が少なく連続的に地層を観察できるため、堆積環境を精度よく復元できる。本研究では白浜層の堆積環境変遷を堆積相解析によって復元し、イベント堆積物の堆積構造の情報を組み合わせる事で、イベント堆積物の堆積過程と成因を考察する。

これまでに5つの調査ルートで調査を実施し、累計170 mの1/50柱状図を作成した。粒径や堆積構造などに基づいて17個の堆積相に区分し、これを3つの堆積組相にまとめた。本調査地域では下位から堆積組相1、堆積組相2、イベント堆積物、堆積組相3の順に堆積している。

堆積組相1は主に砂岩泥岩互層からなりスランプ堆積物やスランプスカー充填堆積物を頻繁に挟む。砂岩泥岩互層には生痕化石が多く、一部にリップルマークや斜交層理が見られる。

堆積組相2は主に斜交層理の発達した砂岩層から成る。堆積組相2の斜交層理は、堆積組相1や3で見られる斜交層理に比べセット高が高く、1 mを越えるものが多く見られる。また、斜交層理にはマッドドレイプが頻繁に観察される。生痕化石は比較的少ない。

イベント堆積物は、最大で約5 m下位を侵食する侵食面上に堆積している。層厚0.5~2 mの礫と偽礫が混じった層や、層厚が最大で6 mを越える上方細粒化する砂岩層から成る。砂岩層の一部に火炎構造が見られる。このイベント堆積物中に生痕化石は見られない。

堆積組相3は、層厚10~20 cmほどの砂岩層と5 cm程度の泥岩層が規則的に繰り返す砂岩泥岩互層から成る。堆積組相1に比べて生痕化石とリップルマークが非常に多い。一部に斜交層理も見られる。

堆積組相1~3は、上方浅海化する堆積環境変遷を反映していると考えられる。イベント堆積物は、上下の地層に比べ非常に粗粒であり、生痕化石が全く見られない事、火炎構造が見られる事などの特徴も持つ事から、短時間のイベントで形成されたものであると考えられる。

浅海底で形成されるこのようなイベント堆積物の成因として津波や嵐などが考えられる。しかし、現代の浅海底に見られる嵐の堆積物や、海溝型地震に伴う津波の堆積物の厚さは数cm~1 m程度の厚さであり(e.g. Snedden et al., 1991; 横山ほか, 2021)、白浜層中のイベント堆積物の規模はこれらを大きく上回る。

白浜層のイベント堆積物の侵食の程度と層厚に比較できるイベント堆積物として、チクシュループインパクトに伴う津波堆積物(Schulte et al., 2012)など世界各地の様々な地質時代に見られる津波堆積物が挙げられる。白浜層のイベント堆積物の特徴である、侵食的な底面を持つ事や礫と偽礫を含

む事、分厚い砂層が見られる事、生痕化石に乏しい事などは、これらの地質時代の津波堆積物の特徴と多くが一致している。

文献

Schulte, P., Smit, J., Deutsch, A., Salge, T., Friese, A., Beichel, K., 2012, Tsunami backwash deposits with Chicxulub impact ejecta and dinosaur remains from the Cretaceous-Palaeogene boundary in the La Popa Basin, Mexico. *Sedimentology*, **59**, 737 - 765.

Snedden, J., W., Nummedal, D., 1991, Origin and geometry of storm-deposited sand beds in modern sediments of the Texas continental shelf. In Swift, D. J. P., Oertel, G. F., Tillman, R. W., Thorne, J., A., eds., *Shelf Sand and Sandstone Bodies: Geometry, Facies and Sequence Stratigraphy*, 283 - 308, The International Association of Sedimentologists.

横山由香, 坂本泉, 高清水康博, 清水賀之, 2021, 陸前高田市広田湾から確認された浅海域の津波堆積物の堆積学的特徴と分布. 堆積学研究, **79**, 47 - 69.

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

Subsidence of the Shinguri Bank offshore Akita in the Sea of Japan
after the last glacial maximum

荒戸 裕之・山崎 誠 (秋田大学国際資源学研究科)

Hiroyuki Arato, Makoto Yamasaki (Akita University)

連絡先: 荒戸 裕之 (h_arato@gipc.akita-u.ac.jp)

1. はじめに

秋田沖日本海の陸棚外縁には、堆や小海丘など海底地形の高まりが南北約 100 km にわたって連なる出羽堆列 (Dewa Bank Chain) が位置し、それらは約 200 万年前以降の日本海東縁における東西圧縮応力のもとで構造反転によって逆断層の上盤が隆起して形成されたとされる^[1, 2]。なかでも、男鹿向瀬 (おがむかいせ)、新礁 (しんぐり)、飛島堆は頂部に特徴的な平坦面をもち、それらは最終氷期最寒冷期 (Last Glacial Maximum) の低海水準期に削剥によって形成された波食棚と解釈されている^[3] (図)。今般、そのひとつである新礁について、三次元地震探査データを用いて平坦面の水深を求めたところ、最終氷期以降に有意な構造変動の進行している兆候が確認されたので報告する。

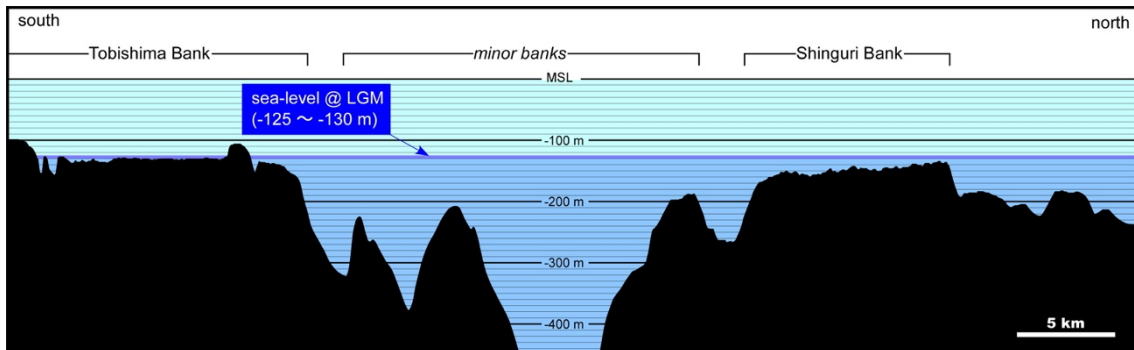


図 出羽堆列中部 (新礁～飛島堆) の海底地形 (水深) 断面。三次元地震探査データの往復走時を、海水の音波伝搬速度を 1,500 m/秒として深度に換算したもの。飛島堆頂部の平坦面は最終氷期最寒冷期の海水準 (-125～-130 m) にほぼ等しい標高であるのに対し、新礁頂部の平坦面は最終氷期最寒冷期の海水準よりも最大で 35 m 低い。

2. 新礁の海底地形

新礁は、北緯 39° 40′、東経 139° 32′ の地点付近を中心とする南北約 12 km、東西約 5 km の長楕円形の海丘 (堆) であるが、北部がやや狭く南部がやや幅広の雫状の平面形状をもち、頂部は平坦で、周囲は傾斜面に取り囲まれている。西側および南側の斜面は、傾斜角約 5～6 度でそれぞれ西方および南方に傾斜し、西方は最上トラフへ向かって一方的に水深を増す。東側は急崖となっており、最大水深 500 m 以上の男鹿海盆底に向かって落ち込んでいる。南方および北方へ向かって水深を増すが、鞍部を経て北は男鹿向瀬へ、南は飛島堆との間に散在する小海丘群へ向かって再び水深を減ずる。

新礁頂部の平坦面は、その水深差と傾斜角 2° 未満の平坦な地形の広がりにもとづき、少なくとも SG-P1～SG-P5 の 5 帯に区分される：

SG-P1: 水深約 150～160 m で、新礁南東部に連続的に広がる、

SG-P2: 水深約 140～150 m で、斜面帯を介して SG-P1 の北西に隣接するが、平坦面の連続性は SG-P1 より劣り分断された小平坦面群を呈する、

SG-P3: 水深 135～140 m に分布する小平坦面の集合で、新礁北東部に位置する新礁最浅点（水深約 130 m）付近から新礁南西部へ向かう軸部に分布する、

SG-P4: 水深約 140～150 m で、新礁西部～北部に連続性よく広がる、

SG-P5: 水深約 150～160 m で、SG-P4 の西側に小規模に分布する。

3. 最終氷期最寒冷期の海食棚の沈降

最終氷期最寒冷期は 20.5 ka までであり、そのときの汎世界的海水準は現在よりも 125～130 m 低かった^[4]。今般三次元地震探査データから求めた最深部の平坦面の水深は 150～160 m であり、新礁における当時の波食棚は汎世界的海水準よりもさらに 20～35 m 深い位置にある。このことは、少なくとも新礁の平坦面は最終氷期最寒冷期以降現在までに 20～35 m 沈降したことを意味し、その平均沈降速度は 0.98～1.71 m/kyr と算定される。その値は、海水の音波伝搬速度の変動幅や地震探査データ解釈の誤差を勘案しても有意である。

これに対して、新礁の北東約 40 km に位置する男鹿半島では傾動をともなう隆起が進行しており、複数の海成段丘の標高と年代測定の結果に基づいて、MIS 5c（約 100 ka）以降の平均隆起速度は 1.2 m/kyr であることが判明している^[5]。このような男鹿半島の隆起傾向は、新礁の沈降傾向とは非常に対照的である。近接した両地域における隆起沈降の相対的な速度差は 3 m/kyr ちかいことになり非常に大きい値を示す。

近年の水準測量に GPS 測量を加味した地盤変動の観測結果^[6]によれば、秋田県阿仁付近の隆起速度は 3.6 m/kyr であり、男鹿半島はこれと同等か若干小さな値と見積もられている。この観測は、出羽堆列南部の飛島を基準点（不動点）として行われた相対的なものとみなされることから、小論で得られた新礁と男鹿半島の相対的な構造変動の方向性と速度の規模はこれとほぼ整合的であるといえる。

新礁を含む出羽堆列は、200 万年という長い時間規模でみると、圧縮応力下の構造反転で隆起して形成された地形的な高まりである。実際に、いくつかの堆頂部は浸食を受けて平坦化されている。こうした構造変動は、断続的な活動の累積結果であろうが、すくなくともその大局的な方向性は直近の 20.5 kyr の間も継続していると予測するのが自然であろう。しかし、今回のデータはその予測に疑問を投げかけるものである。飛島堆の水深に関する予察的な検討によれば、新礁における今回のデータとは異なる構造運動様式が推定されており、出羽堆列の各堆もそれぞれ独自の構造運動を行っている可能性がある。日本海東縁域においてこうした差別的な構造変形が進行していることは、東北日本の構造発達史を検討する上で注目に値する。

文献

[1] Okamura et al., 1995, *Island Arc*, 4, 166-181, [2] 岡村ほか, 1996, 海洋地質図 48, 地質調査所, [3] 岩淵, 1968, 東北大地質古生物研報, 66, 1-76, [4] Yokoyama et al., 2018, *Nature*, 559, 603-620, [5] 白石, 2000, 第四紀, 32, 1-10, [6] 村上・小沢, 2004, 地震第 2 輯, 57, 209-231.

東部北海道根室帯根室層群・浦幌層群の碎屑性ジルコン U-Pb 年代：古千島弧の起源
とテクトニクス

Detrital Zircon U-Pb ages of the Nemuro and Urahoro Groups in the Nemuro Belt
Complex, Eastern Hokkaido, Japan: Implications for the provenance and tectonic
setting of the Paleo-Kuril Arc System

Harisma (Kyoto University) · Hajime Naruse (Kyoto University) · Takafumi Hirata (The
University of Tokyo) · Hisashi Asanuma (The University of Tokyo)

Harisma : harisma.75@st.kyoto-u.ac.jp

The Nemuro Belt is a tectonic belt comprising the Paleo-Kuril Arc system in the eastern Hokkaido. The evolution of the Paleo-Kuril Arc, especially of the Nemuro Belt complex, remains enigmatic. Recently, a study based on paleomagnetic measurements proposed a model that considers the Paleo-Kuril Arc developed as an intra-oceanic island arc system between Izanagi and Pacific Plates in the Late Cretaceous. Ridge subduction, which was thought to have occurred in the Japanese Islands after the Late Cretaceous, cannot occur in this model because the intra-oceanic arc system implies that the Izanagi-Pacific plate boundary was a trench, not the ridge. This island arc has been estimated to have moved northward at the end of the Cretaceous, collided with the eastern margin of Asia, and finally migrated southward by a dextral slip movement of more than 2000 km to its present position during the Cenozoic time. However, this study suggests that the Paleo-Kuril Arc was a volcanic arc in the continental margin from its formation. To identify the origin of the Nemuro Belt during Late Cretaceous, we analyzed the first detrital zircon U-Pb ages from the Nemuro and Urahoro Groups in the Nemuro Belt complex. Our results of U-Pb dating from ten representative sandstone samples identified two types of age distributions in the Nemuro Belt complex. Type 1 signature is characterized by multimodal age distributions with peaks at ca. 1.9–1.8 Ga, 1.65 Ga, 775 Ma, 350–345 Ma, 175–165 Ma, and 90–80 Ma. This type of ages distributions was observed only from sandstones deposited in the Late Cretaceous. Type 2 signature is characterized by unimodal age distribution with peaks at ca. 62–52 Ma. Samples from this Type 2 signature were taken from sandstones deposited in the Paleogene. These different signatures indicate that a provenance transition occurred from multiple- to single-source regions between the Late Cretaceous to Paleogene. Precambrian detrital zircons in Type 1 sandstones indicate that the Paleo-Kuril Arc originated as a part of the continental plate, presumably the Okhotsk Plate (Okhotomorsk Block), in the eastern part of Eurasia during the Late Cretaceous. On the other hand, the sandstones Type 2 potentially were supplied from the magmatic region related to the Izanagi-Pacific ridge subduction and probably also from the uplifted accretionary complex of the Tokoro Belt. Therefore, in contrast to estimates in previous studies, the Paleo-Kuril Arc was not originated as an intra-oceanic arc in the Pacific Ocean. This study constrains the plate tectonic framework of the North Pacific Region since the Late Cretaceous. It supports a model that ridge subduction occurred in the early Paleogene to the arc systems around the eastern Asian region.

関東平野東縁における最終間氷期海成段丘の再考

Last Interglacial marine terrace in the eastern Kanto Plain revisited

田村 亨（産総研・東京大学）・岡崎浩子（千葉県中央博）

中里裕臣（農研機構）・納谷友規（産総研）・中島 礼（産総研）

Toru Tamura (AIST, Univ. Tokyo), Hiroko Okazaki (Natural History Museum and Institute, Chiba)

Hiroomi Nakazato (NARO), Tomonori Naya (AIST), Rei Nakashima (AIST)

連絡先：田村 亨 (toru.tamura@aist.go.jp)

最終間氷期（MIS 5）に関東平野全域に広がった古東京湾は土砂で埋積され、広大な海成段丘が残されている。段丘の大半は最も海面の高かった MIS 5e に対比され、その高度分布にもとづき、関東平野全体の隆起と、太平洋岸の鹿島-房総隆起帯から内陸への傾動がとらえられてきた。しかし、MIS 5e の高海面期の期間は後氷期と同様に数千年程度である。そのような短期間に現在の海成段丘の元となる広大な海岸平野が拡大することは可能であろうか？平野東端の飯岡台地では、従来 MIS 5e に対比されてきた海成段丘を MIS 5a および 5c とする証拠が火山灰と光ルミネッセンス年代（カリ長石 pIRIR 年代）から得られており、少なくとも平野東縁部には最終間氷期後半の海成段丘が分布する可能性がある。このことは、従来古東京湾としてとらえられてきた当時の堆積システムと、さらには MIS 5e 以降の単調な隆起という従来の構造運動像や過去 10 万年間の隆起速度の見積もりに、再考の余地が残ることを示している。

ここでは、飯岡台地から北に利根川低地を隔てて隣接する行方台地と鹿島台地の堆積過程と年代を、ボーリングコアと露頭の堆積相とカリ長石 pIRIR 年代から論じる。この地域の海成段丘構成層は、MIS7 以降の pIRIR 年代を示す標高約+20 m 以下の海成～河川成堆積物が、海浜～外浜堆積物に覆われる。この海浜～外浜堆積物は上限が標高約+30 m、陸側部では細粒～中粒砂が主体で厚さ数メートルの風成および河川成堆積物に覆われるのに対し、海側部では砂礫が主体で風成・河川成層の厚い堆積が見られない。浅海堆積物の pIRIR 年代は、陸側で 110 ka 前後、海側では 85～90 ka で、それぞれ MIS 5c と 5a に相当する。このことから行方台地東部から鹿島台地にかけての海成段丘は、飯岡台地と同様に最終間氷期後半の海面の上下動に対応する複合的な海成段丘と考えられ、さらに隆起速度は MIS 5e への対比の場合よりも大幅に大きく約 0.5 m/ky と見積もられる。また、下位の海成堆積物は、MIS 5e と MIS 7 の高海面期以外にも、160～170 ka 前後の MIS 6d-e の亜間氷期の年代も得られたが、その標高は隆起速度とも整合的である。今後は陸側の行方台地西部や新治台地との対比を行うことで、ここで新たに見いだされた最終間氷期後半と MIS 5e の堆積作用の違いを明らかにし、古東京湾の堆積システムを新たな角度からとらえられる可能性がある。

新潟県八石背斜東翼における
鮮新・更新統の堆積システムと陸棚へ前進する堆積シーケンス
Depositional systems and prograding Plio-Pleistocene sequences

in the eastern limb of Hachikoku Anticline, Niigata Prefecture, central Japan.

田中綾香（信州大学）・保柳康一（信州大学）

Ayaka Tanaka (Shinshu university), Koichi Hoyanagi (Shinshu university)

連絡先：田中綾香 (21ss410c@shinshu-u.ac.jp)

【はじめに】

研究地域の新潟県長岡市小国町武石，下村，離山，八王子地域には，中部中新統～完新統の堆積岩類（一部火山岩類）が分布する．この地域ではこれまで多くの研究が進められており，下位から程平層，八石山層，菅沼層，八王子層及び魚沼層群が累重することが明らかとされている（小林ほか，1989 など）．近年ではシーケンス層序学による堆積盆解析が進められ，新潟堆積盆内各地域におけるシーケンス層序の概要が明らかになっている（荒戸ほか，1994；高野，1998 など）．

しかしながら，本研究地域の堆積システム復元においては，対象を最上位の魚沼層群にしぼったものが多く魚沼層群より下位での研究例は少ない．また野外調査と分析の両面から堆積システム復元を行った研究も多くない．したがって本研究では，鮮新統から更新統までの連続的な，また野外調査と分析を用いたより高精度な堆積システム復元を行い，陸棚環境から浅海化する堆積シーケンスの特徴を考察することを目的とする．

【研究手法】

野外調査では 1/1000 または 1/2500 のルートマップを作成した．このデータから柱状図，岩相分布図，地質図，堆積相分布図を作成し，堆積相解析を行い，さらに堆積システムを考察した．

分析では，野外調査による環境復元の精度をより高めるために，泥質試料を厚さ約 10 m 間隔でサンプリングし，全有機炭素量分析，全窒素量分析，安定炭素同位体比分析，全硫黄量分析，粒度分析を行った．

【4つの堆積システムによる堆積盆の埋積】

岩相を 17 に区分し，岩相の組み合わせから 10 の堆積相を設定した．また堆積相同士の推移関係，累重様式などを考慮し，化学分析・粒度分析の結果も合わせて堆積環境を考察した結果，研究地域は蛇行河川システム，エスチュアリーシステム，デルタシステム，海岸平野システムの 4 つの堆積システムに支配されていたと考察される．

下部魚沼層上部から上部魚沼層にかけては，氾濫原・自然堤防・河川主チャネルの堆積相が繰り返しみられ，蛇行河川システムに支配されていたと考えられる．中部魚沼層から上部魚沼層にかけては，河川性の堆積物を覆って，砂質干潟の堆積物が見られることから，蛇行河川システムが海進に伴ってエスチュアリーシステムに変化したと考えられる．一般に干潟などの砂質堆積物の上位には，エスチュアリー中央盆地などで堆積する泥質な堆積物が見られるが，本研究地域ではこれは見られず再び河川環境を示す堆積相に覆われた．これは海進によって形成されたエスチュアリーが，その後の海退によって河川性の堆積物で埋積されたことを示していると推察される．下部魚沼層では河口州（デルタプレーン～デルタフロント）の堆積相が，八王子層から菅沼層上部にかけては内側陸棚（プロデルタ）の

堆積相が見られたことから、デルタシステムに支配されていたと考えられる。デルタプレーンやデルタフロント環境には外浜環境が隣接し、プロデルタ環境には陸棚環境が隣接して見られることから、外洋環境にデルタがせり出していたと推察される。下部魚沼層中部では上部外浜や下部外浜の堆積相が、程平層から八王子層にかけては内側陸棚や外側陸棚の堆積相が見られることから、海岸平野システムに支配されていたと考えられる。本研究地域では陸棚環境から外浜環境へ上方浅海化が見られ、デルタシステムの堆積相も見られることから、これらの累重は海岸平野システムの前進を示している (Bhattacharya and Walker, 1992) と推察される。

【堆積システムの時空間的变化】

挾在する火山灰鍵層の年代値を基に、堆積システムの時空間的变化を検討した。下位より程平層から八王子層堆積期 (-2.0 Ma) は、海岸平野システム内の内側陸棚及び外側陸棚環境とデルタシステム内のプロデルタ環境が発達していたと考えられる。次に下部魚沼層下部から下部魚沼層中部堆積期 (2.0-1.6 Ma) は、海岸平野システム内の上部外浜及び下部外浜環境とデルタシステム内のデルタプレーンからデルタフロント環境が発達していたと考えられる。その上位の下部魚沼層上部から中部魚沼層中部堆積期 (1.6-1.2 Ma) は、蛇行河川システムが発達していたと考えられる。これと同時期の下部魚沼層上部から中部魚沼層下部堆積期 (1.6-1.4 Ma) は、研究地域北部の国沢川でのみエスチュアリーシステムが発達していたと考えられる。蛇行河川システムの上位の中部魚沼層上部堆積期 (1.2-1.1 Ma) は、エスチュアリーシステムが発達していたと考えられる。さらに上位の上部魚沼層下部から上部魚沼層中部堆積期 (1.1-0.5 Ma) は、再び蛇行河川システムが発達し、上部魚沼層上部堆積期 (0.5 Ma-) はエスチュアリーシステムが発達していたと考えられる。

エスチュアリーシステムはいずれの時期にも、蛇行河川システムの堆積物を覆って発達する。このことから蛇行河川システム発達期からエスチュアリーシステム発達期にかけて、何らかの影響で海進が起こったと考えられる。そこで汎世界的な氷床の消長を示すとされる酸素同位体比曲線 LR04 stack (Lisiecki and Raymo, 2005) との対比を行った。その結果、エスチュアリーシステムが発達したいずれの時期も約十万年の周期をもつ温暖期に対比することが可能であった。下部魚沼層上部から中部魚沼層下部堆積期 (1.6-1.4 Ma) は海洋酸素同位体比ステージ (MIS) の 52-47, 中部魚沼層上部堆積期 (1.2-1.1 Ma) は MIS34-31, 上部魚沼層上部堆積期 (0.5 Ma-) は MIS14-13 に相当すると考えられる。したがって、蛇行河川システム発達期からエスチュアリーシステム発達期にかけて起こったと考えられる海進は、約十万年の周期をもつ温暖化期の海水準上昇によって引き起こされたと考えられる。

【文献】

- 小林巖雄・立石雅昭・黒川勝己・吉村尚久・加藤碩一, 1988, 岡野町地域の地質。地域地質研究報告, 5万分の1地質図幅, 新潟(7), 49.
- Bhattacharya and Walker, 1992, Deltas. In Walker R.G. and James N.P., eds., *Facies models: response to sea level change*, 157-177, Geological Association of Canada.
- 荒戸裕之・亀尾浩司・保柳康一, 1994, 背弧堆積盆地におけるシーケンス解析新潟県蒲原地域の例。石油技協会誌, 59, 18-29.
- 高野修, 1998, 新潟堆積盆における上部鮮新統～下部更新統のシーケンス層序—研究の現状と今後の課題—。堆積学研究, 48, 21-39.
- Lisiecki L.E.・Raymo M.E., 2005, A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}O$ records. *PALEOCEANOGRAPHY*, VOL. 20, PA1003.

北部フォッサマグナ高府向斜西翼地域における新第三系小川層・柵層の
堆積システムおよび堆積シーケンス

Depositional systems and sequences of the Neogene Ogawa and Shigarami
formations on the western limb of Takafu Syncline, in the northern Fossa Magna
region

近藤広大・保柳康一（信州大学）

Kodai KONDO, Koichi HOYANAGI (Shinshu University)

連絡先：近藤広大 (20ss405c@shinshu-u.ac.jp)

1. はじめに

北部フォッサマグナ地域には、日本海形成に伴い生じた堆積盆を埋積した厚い新第三系が分布しており、本間（1931）による標準層序の確立以降、多くの層序学的研究が行われてきた。特に長野県内の北部フォッサマグナ地域の地層は、南東より順に、込地向斜、高府向斜、日影向斜の3つの大規模な向斜構造に支配されており、それぞれの向斜地域の間には概ね南西-北東方向の断層が存在する。このうち、調査地域が位置する長野県長野市信州新町から小川村にかけての地域は、高府向斜の西翼にあたり、従来整合関係と考えられてきた（加藤ほか、1989 など）、上部中新統小川層と下部鮮新統柵層が分布している。高府向斜周辺の地域では、層序学的な研究に加え、堆積物の供給ルートや堆積環境、堆積システムおよびシーケンス層序学に関する研究がなされてきた。しかし、堆積システムや堆積シーケンスに関する研究の多くは、高府向斜東翼以東の地域で行われており、高府向斜東翼以東の地域と高府向斜西翼以西の地域での、広域的な埋積過程の検討および堆積シーケンスの対比はなされていない。そこで本研究では高府向斜西翼地域において、堆積環境・堆積システムの推定をおこない、シーケンス層序学的解析を行うことで、高府向斜以東の地域と、高府向斜西翼地域において対比可能なシーケンスを提示することを主な目的とする。

2. 研究手法

地表踏査を行い、ルートマップを作成し、各沢柱状図、対比柱状図及び地質図を作成した。加えて、岩相の累重様式や組み合わせから堆積相を認定し、堆積環境及び堆積システムを推定した。また、底痕や流痕などの堆積構造やスランプ褶曲のヒンジを測定し、古流向、古斜面を復元した。さらに、礫種組成の検討を行うため、一地点につき100個の礫を採取、判別した。最後に、堆積システムの変遷や各段階での供給ルートについて総合的に考察し、堆積シーケンスを認定した。

3. 堆積システムおよび古流系

調査地域で観察される岩相を、粒度、堆積構造、生物擾乱の有無などから30に区分した。加えて岩相の累重様式や遷移関係から、陸棚斜面～網状河川での堆積を示す18の堆積相を認定した。その結果、小川層では、下位より、陸棚斜面チャンネル・ローブシステム、陸棚縁辺デルタシステム、プロデルタタービダイトシステム、ファンデルタシステムが累重し、最上部では外側陸棚相当のプロデルタ環境へと遷移する。これに対し、柵層はファンデルタシステムの北方への顕著なプログラデーション開始により特徴づけられ、ファンデルタシステムとプロデルタタービダイトシステムとが周期的に

繰り返し累重する。

古流向解析の結果、調査地域では、全層準を通して南南西ないし南南東からの古流向が卓越する。加えて、古斜面方向も概ね南北を示すことから、南方が主な堆積物の供給ルートであったと推定できる。しかし、小川層下部及び柵層下部の一部の層準/地域では、西からの古流向が認められた。また、礫種組成を検討した結果、全ての地点において、チャートや砂岩などの堆積岩類が卓越する傾向が認められた一方、調査地域南部の小川層下部層準では、木崎流紋岩礫が約 40%を占める。木崎流紋岩は調査地域の西方に分布し、測定地点直下の地層からは、概ね西からの古流向が得られたことから、小川層下部堆積期には調査地域の一部で西からの堆積物供給がなされたと解釈できる。また、柵層内の地点では、小川層内では見られなかった花崗岩類の礫が数%ないし約 10%含まれる傾向が認められた。

4. 堆積シーケンス

堆積相の累重様式および野外での観察結果から、調査地域全域で追跡可能な 4 つの不連続面を見いだし、それぞれ Ds-1~Ds-4 とした。小川層最上部から柵層にかけての地層で認められた Ds-2~Ds-4 は、デルタシステムによる上方浅海化堆積相累重を覆う、陸上侵食面あるいはラビンメント面として認識される。これらの不連続面は、保柳ほか (1998) により、高府向斜東翼地域を中心に設定された SB3~SB5 と類似した特徴を有しており、層準も一致する。これに対し、小川層下部層準で認識される Ds-1 は、陸棚縁辺デルタにより堆積したと解釈される地層中に認められる。この層準では、陸棚斜面上を陸棚縁辺デルタが前進し、プロデルタに対応する陸棚斜面から、デルタフロントに相当するシート状砂岩を経て、分岐流チャネルへと上方浅海化したことで形成されたと考えられる上方粗粒化岩相累重が認められる。また、その上位には海進ラグ堆積物 (渡辺ほか, 1995 など) に類似した特徴を有する、不淘汰で泥岩偽礫に富んだチャネル充填堆積物を挟み、プロデルタ環境へと上方深海化を示す岩相が累重する。この研究では、上方浅海化堆積相累重の最上部を構成する分岐流チャネル堆積物下底の侵食面をシーケンス境界と認定する。このシーケンス境界は、層序的な位置関係から高府向斜東翼地域の SB2 と対比されるものと解釈できる。以上のことから、保柳ほか (1998) により高府向斜東翼地域を中心に広く追跡された、SB2~SB5 は高府向斜西翼地域においても広く追跡できることが明らかとなり、年代指標が乏しく、断層により各地域が隔絶された北部フォッサマグナ地域において、同時面として対比に有用であると考えられる。加えて、小川層-柵層境界付近で認められた SB4 を同時面として用いることで、その追跡からこれまで整合関係と考えられていた両層は同時異相の関係であることが明らかになった。

<引用文献>

本間不二男, 1931, 信濃中部地質誌. 古今書院, 616p.; 保柳康一・大村亜希子・中嶋貴記・吉川博章・成田健, 1998, 北部フォッサマグナ新第三系ファンデルタの堆積シーケンス, 日本地質学会第 105 年学術大会見学旅行案内書, 143-164.; 加藤碩一・佐藤岱生・三村弘二・滝沢文教, 1989, 大町地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅). 地質調査所, 111p.; 渡辺大輔・西村瑞恵・保柳康一, 1995, 相対的海水準変動に支配されたファンデルタシステムの堆積シーケンスー北部フォッサマグナ長野県地域の中新統・鮮新統-. 地質学論集, 45, 189-207.

微動データに基づいた東京湾岸地域における沖積層の物性境界

A boundary of physical properties in the post-LGM incised-valley fills beneath the Tokyo Bay area based on microtremor observation data

小松原純子（産総研）・長 郁夫（産総研）・坂田健太郎（産総研）・中澤 努（産総研）

Junko KOMATSUBARA, Ikuo Cho, Kentaro SAKATA, Tsutomu NAKAZAWA (GSJ, AIST)

連絡先：小松原純子(j.komatsubara@aist.go.jp)

1. はじめに

東京 23 区東部の東京低地の地下には埋没谷を埋める形で沖積層が分布している [URL1]。東京低地の沖積層は地震を増幅させる軟弱な地層であるとして注目され（貝塚・松田，1982）， N 値や堆積環境から下位の七号地層と上位の有楽町層に二分されてきた（東京都土木技術研究所，1969）。七号地層は陸成～海成の砂泥互層で比較的 N 値が高く，有楽町層は軟弱な海成泥層を主体とする（青木，1969）。固い地層（基盤）の上に軟弱層（表層地盤）が載っているという 2 層地盤モデルを仮定した場合，この 2 つの地層の境界で S 波速度が不連続となり，その深さが軟弱層の厚さを示す。埋没谷の縁辺部では沖積層の厚さ＝軟弱層の厚さなので S 波速度不連続面は沖積層の基底と一致するが，埋没谷の軸部では基底礫層 ($N>50$) があるため， S 波速度不連続面はこの礫層の上面か，七号地層/有楽町層境界に一致すると予想される。その検証のため，東京低地の東京湾岸部で常時微動観測を行った。

2. 手法

既存のボーリングデータを使用して断面図を作成し地下構造を把握した。断面図の作成には東京都建設局 [URL2] および国立研究開発法人防災科学技術研究所 [URL3] が公開しているデータ，および産総研のデータ（納谷ほか，2019；小松原ほか，2020）を用いた。埋没谷の谷軸を横断および縦断する 2 測線を設定し，測線に沿った複数の地点で常時微動観測を行い， H/V スペクトルとレーリー波の位相速度を求めた。 H/V スペクトルは微動の水平動成分と鉛直動成分の振幅比のことで，そのピーク周波数は一般に地盤の S 波共振周波数と同等とみなせる（Konno and Ohmachi, 1998）。レーリー波位相速度分散曲線からは地盤の平均的な S 波速度構造を評価できる（Okada, 2003）。得られたピーク周波数と平均 S 波速度から， $1/4$ 波長則を用いて各観測地点の S 波速度不連続面の深度を求めた。

3. 結果

七号地層/有楽町層境界は複数の定義があり（Endo et al., 1982；木村ほか，2006；田辺ほか，2010；石綿，2004），また既存ボーリングデータからは明確に分けられないことが多いため，ここではいずれの定義にも矛盾しないよう，境界付近の地層を確実に七号地層である層準（基底礫層，高有機質土，砂層 ($N>15$)，泥層 ($N>7$)），確実に有楽町層である層準（泥層 ($N<5$)），その間のどちらにも分類しうる分類未定層準の 3 つに分類した。常時微動観測は 2019 年 6-7 月に行った。沖積層が厚く分布する埋没谷の軸部では， H/V スペクトルは 0.5-0.9 Hz にピークを持ち，位相速度による軟弱層の平均 S 波速度は 160 ± 15 m となった。これらに $1/4$ 波長則を適用して S 波不連続面深度を計算し，観測点に近接した既存ボーリング柱状図の層序区分と比較したところ，冒頭の問題を評価可能な

14 地点中 12 地点で S 波速度不連続面は概ね七号地層内に位置する可能性が示され、そのうちの 8 地点では確実に七号地層内部にあると言えることが明らかになった。

4. 考察

以上の結果の 1 つ目の解釈は、七号地層/有楽町層境界と七号地層中の基底礫層上面の両方が微動の H/V スペクトルのピーク周波数に影響を与えた結果、2 層モデルの境界がそれらの中間深度に求められたというものである。2 つ目の解釈は、七号地層/有楽町境界が S 波速度不連続面と一致しない地点では、七号地層/有楽町層境界は地盤振動特性に大きな影響を及ぼしておらず、それよりも下位の砂泥互層中に存在する物性境界がより大きな影響を与えたというものである。東京湾岸部の沖積層下部は下位から基底礫層（網状河川堆積物）、砂泥互層（蛇行河川堆積物およびエスチュアリー堆積物）からなる（石原ほか，2004；田辺ほか，2012；小松原ほか，2020）。S 波速度不連続面が砂泥互層中に存在する場合には、蛇行河川堆積物およびエスチュアリー堆積物のうち、蛇行河川流路堆積物や潮汐流路堆積物などのある程度厚い砂層の上面が S 波速度不連続面となっている可能性がある。

文献

- 青木 滋，1969，東京低地の第四紀層について。シンポジウム「海岸平野」世話人会編，海岸平野，日本地質学会，15-20。
- Endo, K., Sekimoto, K. and Takano, T., 1982, Holocene stratigraphy and paleoenvironments in the Kanto Plain, in relation to the Jomon Transgression. *Proceedings of the Institute of Natural Science, Collage of Humanities and Sciences, Nihon University, Earth Sciences*, **17**, 1-16.
- 石原与四郎・木村克己・中島 礼・宮地良典・田辺 晋・中山俊雄・斎藤文紀，2004，東京低地と荒川低地から得られた 3 本のボーリングコアの堆積相と放射性炭素年代：DK コア（江東区新砂），TN コア（足立区舎人公園），HA コア（東綾瀬公園）。地質調査研究報告，**55**，221-235。
- 石綿しげ子，2004，東京湾北部沿岸域の沖積層と堆積環境。第四紀研究，**43**，297-310。
- 貝塚爽平・松田磐余，1982，首都圏の活構造・地形区分と関東地震の被害分布図。内外地図株式会社，48p。
- 木村克己・石原与四郎・宮地良典・中島 礼・中西利典・中山俊雄・八戸昭一，2006，東京低地から中川低地に分布する沖積層のシーケンス層序と層序の再検討。地質学論集，**59**，1-18。
- 小松原純子・中山俊雄・中澤 努，2020，東京都江東区若洲における沖積層層序：GS-KWS-1 コアの堆積相と堆積年代。堆積学研究，**79**，1-12。
- Konno, K. and Ohmachi, T., 1998, Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **88**, 228-241.
- 納谷友規・小松原純子・坂田健太郎・中山俊雄・中澤 努，2019，東京都江東区有明における地下 110 m の層序：GS-AA-1 コアの調査概要。地質調査総合センター速報，**79**，107-117。
- Okada, H., 2003, *The Microtremor Survey Method*. Soc. Exploration Geophysicists, 135 p.
- 田辺 晋・石原与四郎・中西利典，2010，東京低地から中川低地にかけての沖積層の層序と物性：沖積層の 2 部層区分について。地質学雑誌，**116**，85-98。
- 田辺 晋・中島 礼・内田昌男・柴田康行，2012，東京低地臨海部の沖積層に見られる湾口砂州の形成過程。地質学雑誌，**118**，1-19。
- 東京都土木技術研究所，1969，東京都地盤地質図（23 区内）-東京都地質図集 2-。東京都土木技術研究所，14p。
- 東京都土木技術研究所，1996，東京都（区部）大深度地下地盤図 -東京都地質図集 6- 東京都（区部）大深度地下の地盤。66p。
- [URL1] 産業技術総合研究所地質調査総合センター，都市域の地質地盤図，<https://gbank.gsj.jp/urbangeol/>
- [URL2] 東京都建設局，東京都の地盤（GIS 版），<https://www.kensetsu.metro.tokyo.lg.jp/jigyo/tech/start/03-jyouhou/geo-web/00-index.html>
- [URL3] 防災科学技術研究所，ジオ・ステーション（Geo-Station），<https://www.geo-stn.bosai.go.jp/>

サージ的混濁流により実験水路に形成されたサイクリックステップの粒度分布**Grain size distribution of cyclic steps produced by surge turbidity currents in a flume**

横川美和・藤田和典・森 勇(大工大)・Roberto Fernandez(ハル大学)・Matt Czapiga(デルフト工科大学)・John Berens・Jeffrey Kwang・内藤健介・Gary Parker(イリノイ大学)・泉 典洋(北大)・成瀬 元(京大)

Miwa Yokokawa, Kazunori Fujita, Isamu Mori, (Osaka Inst. Tech.), Roberto Fernandez (Univ. Hull), Matt Czapiga (Delft Tech. Univ.), John Berens, Jeffrey Kwang, Kensuke Naito, Gary Parker (Univ. of Illinois), Norihiro Izumi (Hokkaido Univ.), Hajime Naruse (Kyoto Univ.)

連絡先：横川美和 (miwa.yokokawa@oit.ac.jp)

近年、海底に混濁流によって形成されるベッドフォームが注目されその形態などについての議論が進んでいる。しかし、その粒度分布や堆積構造については実験例が少なく、まだわからないことが多い。本発表ではイリノイ大学 Hydrosystems Laboratory で行ったサージ的混濁流によるサイクリックステップの形成実験に関して、ベッドフォームの粒度分布について報告する。

実験は、長さ 14.5m、幅 10cm、高さ 50cm の水路を水を張った大型水槽の中に勾配 2.5°で設置し、塩水(密度 1.17g/cm³)と 2 種類のプラスチック粒子(比重 1.5, 中央粒径 68μm, 206 μm)を重量比 20:1:1 の割合で混ぜたものをヘッドタンクから供給した。1 回のサージの流量をヘッドタンク全量(単位幅総流量約 5.87L)と半量(単位幅総流量約 2.74L)の 2 セットの実験を行った。ヘッドタンク全量のサージを 40 回、半量のサージを 80 回流した結果、どちらも上流進行する 4 つのステップが形成された。

これらのステップについて粒度分析を行った結果、堆積物表面の中央粒径は水路の下流に向かうほど小さくなる傾向が見られ、その傾向はサージの総流量が多いほどより顕著に見られた。また、ステップ毎に上流側斜面と下流側斜面を比較すると、下流側の中央粒径が細かいことがわかった。これには、ステップの上流側で起こる跳水の影響があるのではないかと考えられる。一方、2 つのステップについて、下位から上位への堆積物の粒度分布を測ったところ、表面が最も細かく、底面より少し上が最も粗い粒径分布を示すことがわかった。これらの粒度分布について、流れの特性や堆積構造などとの関係を議論する。

岩盤河川地形の示す第四紀島弧地殻の隆起速度の時空分布：

岩盤強度を考慮したベイズ推定

Quaternary Spatio-Temporal Distribution of Crustal Uplift of Island Arcs Indicated by Longitudinal Profiles of Bedrock Rivers:
Bayesian Inference Considering Bedrock Strength

成瀬 元 (京都大学)

Hajime NARUSE (Kyoto University)

連絡先：成瀬 元 (naruse@kueps.kyoto-u.ac.jp)

本研究は、近年発展しつつある河川縦断面の逆解析によって (e. g. Roberts et al., 2012) , 日本列島などの島弧第四紀テクトニクスの復元手法を確立することを目的としている。河川縦断面を逆解析するには、フォワードモデルとして岩盤河川の侵食に関する適切な数値モデルが必要となる。この手法を島弧の隆起史に用いることの難しさは、基底岩強度の影響と海水準変動の考慮という2点に集約される。既存研究は基底岩強度は至るところで一定であることを仮定しており、海水準変動の効果は無視している。しかしながら、活動的プレート縁辺域の地質構造は複雑であり、そのような地域では強度が大きく異なる基底岩が隣接している。そのため、フォワードモデルの侵食パラメータを一定とみなすことはできない。この問題に対して、本研究は経験的に得られた岩石侵食指数をストリームパワーモデルに採用することで解決を目指す。一方、第四紀の地殻上昇史を高解像度で再現するためには、海面変化の影響も考慮しなければならない。本研究では、隆起速度に既知の汎世界的海水準変動を加えてフォワードモデルの計算を行った。また、隆起速度の推定には、MCMCを用いたベイズ推論を用いた。

研究対象として選んだのは、日本の島弧の中で、東北・紀伊半島・四国の3つの地域である。人工データを用いた河川縦断面の逆解析により、東北地方と紀伊半島では2.5Maからの隆起速度の履歴がよく再現されることがわかった。一方、四国では人工データの再現性が悪く、約1.0Maまでの隆起速度しか復元できないことが示唆された。

次に、人工データの解析結果を踏まえて、国土地理院10 mメッシュDEMから測定した各地域の河川縦断面を解析した。その結果、東北地方の軸部の隆起速度は一貫して高く、紀伊半島の隆起速度は2.5Myrの間、概ね一定(500m/Myr未満)であることがわかった。一方、四国の室戸岬は、過去1.0Myrの間に局所的に高い隆起速度(>500 m/Myr)で隆起している。これらの結果は海岸段丘による過去10万年の隆起速度の復元結果と整合的であり、複雑な地質構造を持つ島弧においても、河川縦断面の逆解析が有効な研究手法であることを示唆している。

文 献

Roberts, G. G., White, N. J., Martin - Brandis, G. L., and Crosby, A. G., 2012, An uplift history of the Colorado Plateau and its surroundings from inverse modeling of longitudinal river profiles. *Tectonics*, **31**, TC4022, doi:10.1029/2012TC003107.

光ルミネッセンス (OSL) を用いた河川における泥粒子の供給源推定 Provenance analysis of fluvial muds with optically stimulated luminescence (OSL)

横尾健人 (東京大学・産総研) ・田村亨 (産総研・東京大学)

Kento Yokoo (The University of Tokyo, AIST), Toru Tamura (AIST, The University of Tokyo)

連絡先: 横尾健人 (1825721398@edu.k.u-tokyo.ac.jp)

1. はじめに

河川において上流で侵食された土砂は水とともに運搬され下流で堆積する。ゆえに上流における環境変化は、下流にも直接的な影響を及ぼす。下流で堆積した土砂の供給源を知るための手法としては、これまでに様々なものが利用されている。近年は堆積物の光ルミネッセンス (OSL) 特性に基づく手法が試みられている (Sawakuchi et al., 2018) が、大部分が未開拓で大きな可能性が残されている。OSL には、鉱物粒子が埋積により遮光されると蓄積し、露光されると減衰するという以外にも、強度や信号成分比といった特性が粒子の供給源により異なることが知られる (Tokuyasu et al., 2010)。本研究では、こうした OSL 特性の多様性に着目し、河川における泥粒子の供給源を推定する手法の開発を試み、その手法の実地での適用可能性について吉野川流域を対象地域として検証を行う。

2. 方法

本研究は、1) 手法の検討と、2) その応用との2段階から構成される。まず手法の検討として、性質が大きく異なる仙台湾とメコン川氾濫原堆積物から抽出した細粒シルト試料 (粒径 4-11 μm) の OSL 特性を明らかにした上で、両試料を 1:1 の割合で人工的に混合し (以下、混合した試料を MIX とする)、MIX の OSL 特性から逆に混合比を求められるかどうかを明らかにした。OSL 特性のうち、50°C で 100 秒間の IRSL の測定を行い、その強度を求めた。また、このように OSL 特性から供給源を判別する手法は、吉野川流域の泥に適用する予定である。吉野川では本流で 9 地点、支流で 10 地点の計 19 地点で泥試料を採取した。本流域は、中央構造線を隔てて、中下流部の右岸と上流部は付加体、中下流部の左岸は和泉層群の地質から成り、両側の支流から性質の異なる土砂が本流に流入していると考えられる。

3. 結果及び考察

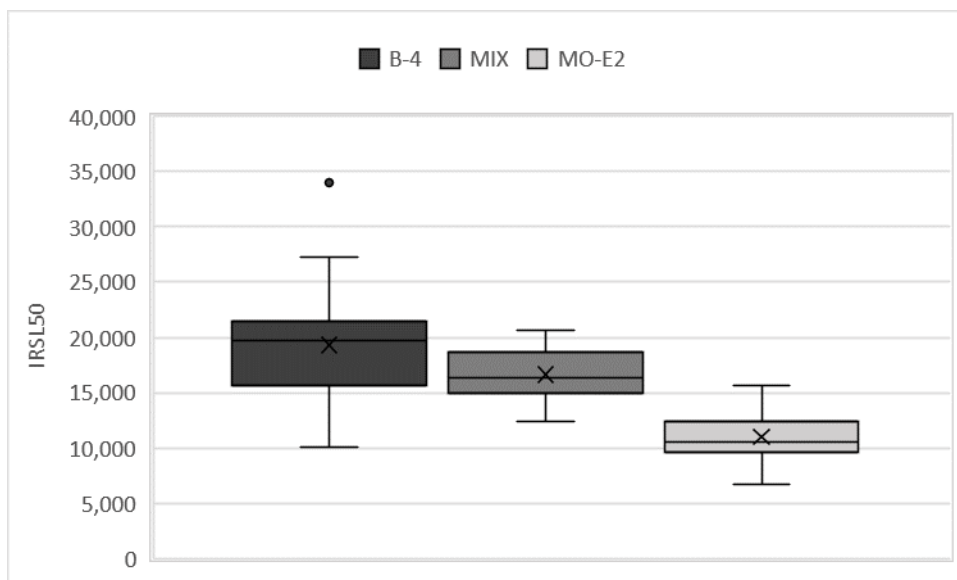
仙台湾、メコン、MIX の長石 IRSL の測定結果を第 1 図に箱ひげ図で示す。ここでは、人工太陽を用いて自然 OSL をリセットした上で、 β 線を 1,000 秒間照射することにより蓄積させた、再生 OSL を測定した。各試料につき 16 サンプルずつを測定した結果、仙台湾、MIX、メコンの平均値は、順に 19,301, 16,630, 10,971 となった。MIX の混合比率は 1:1 であるが、その値は仙台湾にやや寄っていることから、試料重量の調整や石英 OSL の利用などの検討が課題として挙げられる。今後は、混合する比率を変化させ、混合率に比例する結果が現れることを検証し、手法としての精度を確認する必要がある。吉野川流域で採取した試料に対しては、ここで確立する手法を適用することで、本流と河口

沖への両岸の地質の寄与率の推定を行う。これにより、土砂供給源として寄与率の高い地域が特定されれば、水害や土砂災害に対策が必要な地域の特定にも繋がり、防災性向上への貢献も期待される。

参考文献

Sawakuchi, A., Jain, M., Mineli, T., Nogueira, L., Bertassoli, D., Häggi, C., Sawakuchi, H., Pupim, F., Grohmann, C., Chiessi, C., Zabel, M., Mulitza, S., Mazoca, C.E., Cunha, D., 2018. Luminescence of quartz and feldspar fingerprints provenance and correlates with the source area denudation in the Amazon River basin. *Earth and planetary science letters* 492, 152-162.

Tokuyasu, K., Tanaka, K., Tsukamoto, S., Murray, A., 2010. The Characteristics of OSL Signal from Quartz Grains Extracted from Modern Sediments in Japan. *Geochronometria* 37, 13-19.



第1図 B-4, MIX, MO-E2 の IRSL50 強度

東京湾沿岸水域における湧出ガスの起源推定と湧出量の調査

Research for origin and amount of seeping gas along the coast of Tokyo Bay

布留川竜・松田溪登・鶴哲郎（東京海洋大学）

Ryo Furukawa, Keito Matsuda, Tetsuro Tsuru（Tokyo Kaiyo Univ.）

連絡先：布留川竜（m203055@edu.kaiyodai.ac.jp）

1. はじめに

東京湾沿岸水域では河川からのガスの湧出が確認されている。ガスの起源として、底泥微生物由来のガスとガス田由来のガスが考えられる。底泥微生物由来のガスは、停滞性の比較的浅い汽水域などで嫌気性細菌の働きによって発生するガスで、メタンや硫化水素を含んでいる(堀田ほか, 2002)。ガス田由来のガスは、関東一円に広がる南関東ガス田から湧出していると考えられるガスである。一方、東京湾内でも地震探査で得られた反射断面図から、海底下約6~7mにガス層の存在が示唆された(Tsuru et al., 2019)。このことから、東京湾沿岸水域で観察されるガスが東京湾にも広く分布している可能性がある。また、過去には南関東ガス田由来の地表湧出ガスによる爆発事故も起きており(東京第二営繕事務所, 2007)、事故防止のためにも東京湾沿岸水域における湧出ガスの起源を知る必要がある。さらに、ガスの主成分であるメタンは温室効果が高く、地球温暖化への影響も懸念される。本研究では、湧出ガスの成分組成や湧出状態からガスの起源を推定するとともに、現地観察によって湧出量の推定を行う。

2. ガス起源について

神奈川県川崎市から東京都江東区までの範囲でガスの発生が確認された湧出点のうち、ガスの発生頻度や湧出点の状態からガス田由来と予想されるガス湧出点にてガスを採取した。採取したガスを分析し、炭化水素組成とメタンの安定炭素同位体比を求めた。分析の結果、多くの地点でガス中濃度75~85%ほどのメタンが検出された。また、メタン中の炭素同位体組成は湧出点によって有意な差が見られた。その他にも、メタンの濃度が他と比べて極端に低いガスも確認された。底泥微生物由来とガス田由来の他にもガスの起源があることも考えられる。

3. 屋内実験

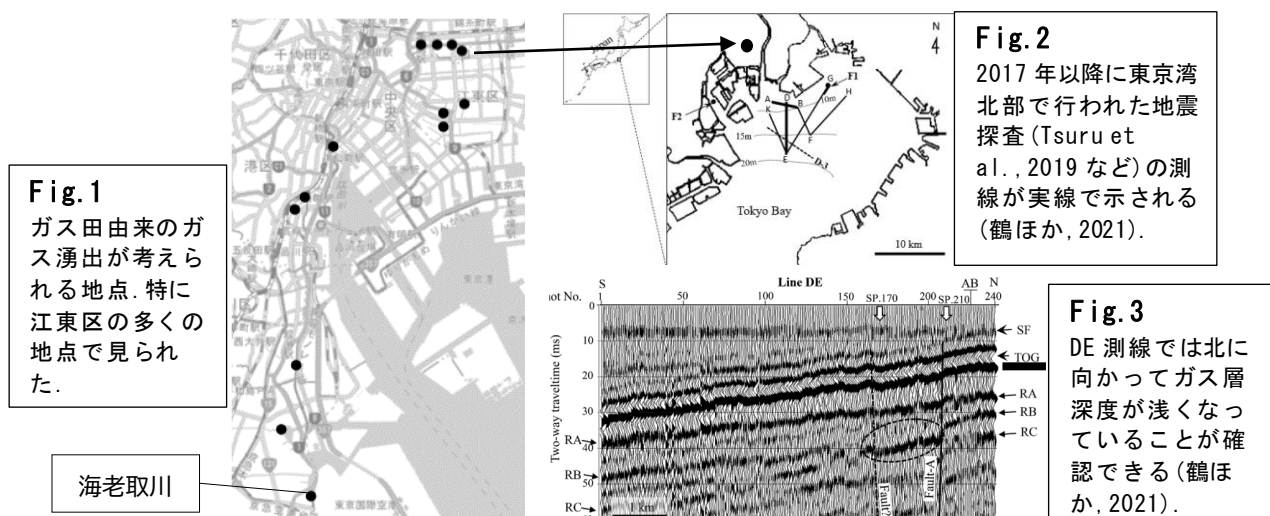
ガス湧出点の底泥を採取し、屋内にてシリンジに泥と河川水を加えて静置し、底泥からのガスの発生を観察した。その結果、底泥からガスが発生した地点と発生しなかった地点があった。底泥からのガス発生が確認されなかった地点にて湧出しているガスはガス田由来である可能性が高いと考えられるが、今回は水底下数cmの泥を用いて実験を行ったため、より深部にて微生物活動により生成されたガスが湧出している可能性も否定できない。

4. 現地観察

これまでの観察やガス組成分析の結果などから、ガス田由来のガス湧出の可能性が高い地点を①比

較的季節を問わず、②決まった湧出点から断続的に或いは連続して起こる地点と考えマッピングした (Fig. 1). このうち特に江東区で見られる湧出ガスは、位置関係から東京湾北部で南北方向に延伸するガス集積層 (Fig. 2, 3) (鶴ほか, 2021) と関連する可能性も考えられる. 湧出量の推定は千葉県でのガス湧出量の調査 (風岡ほか, 2016 など) を参考に目視によって行った. 特に湧出が盛んな大田区の海老取川で、約 9000 m³ の湧出地点で最大時に約 135L/分の湧出が観測された. これをガス組成分析結果からメタン量に換算すると約 116L/分となる. 湧出量は主に潮位による水圧の変化に依存するとみられ、概ね干潮 1 時間前から干潮時刻が急激なピークとなる一方、干潮の前後 3 時間以外ではほぼ湧出が見られなかった. 干潮時間帯にのみ湧出が顕著になる傾向はほとんどの地点で同様であるが、常に湧出が見られる地点も確認されている. また、日毎の湧出量変化も大きく、今回は大潮で最大潮差となる日の 2 日前が最大で、その前後の日より 2 倍近くもの湧出量を記録した.

南関東ガス田で最もガス生産が盛んな九十九里平野中部では同程度の面積当たりで最大 1000L/分程度のガス湧出が常に起こっているような地点も報告されている (風岡ほか, 2016) が、海老取川での湧出量も最大時にはその数分の一に匹敵すると明らかになった.



5. まとめ

湧出ガス分析の結果、多くのガスの主成分はメタンであり、濃度は 75~85% であることが明らかになった. 一方、メタン濃度が極端に低いガスも見られたため、底泥微生物由来とガス田由来の他にも湧出ガスの起源が存在することも考えられる. ガス湧出点の底泥を用いた屋内実験では、場所によって底泥からのガスの発生状況に違いが見られた. 底泥からガスが発生しなかった地点で湧出しているガスはガス田由来の可能性が高いと思われる. 現地観察からは、ガス田由来のガス湧出が考えられる地点が都内沿岸部に点々と存在し、江東区のガス湧出は東京湾北部のガス層との関連も疑われる. ガス湧出は概ね干潮 1 時間前から干潮時刻にピークとなり、潮位による水圧変化の影響が大きいといえる. 大田区の海老取川では最大時で約 135L/分の湧出が観測され、今後は湧出量がどう変化するのか、他の地点での程度の湧出量があるのかも注視する必要がある.

混濁流・土石流ハイブリッド堆積物の形成プロセス
—機械学習技術を用いた粒子配列解析に基づく検討—
Formation processes of hybrid sediment gravity flow deposits
—Study based on grain fabric analysis using machine learning—

田中凌悟・成瀬 元（京都大学大学院）

Ryogo Tanaka, Hajime Naruse (Kyoto University, Graduate School of Science)

連絡先：田中凌悟 (tanaka.ryogo.25v@st.kyoto-u.ac.jp)

1. はじめに

深海の砂質堆積物は一般に堆積物重力流によって形成されることが知られている。堆積物重力流の代表的なプロセスとしては、混濁流と土石流を挙げることができる。これらは大きく異なる性質をもった流れだが、深海堆積物中には、土石流堆積物の上下に混濁流堆積物が重なるハイブリッドイベント層がしばしばみられる。このような層は、二つの流れの間で移行現象が起こった証拠と考えられている。Haughton et al. (2009) は、ハイブリッドイベント層と解釈される層の堆積構造を下部から上部に H1–H5 に細分化するモデルを提案している。彼らのモデルでは、ハイブリッドイベント層の最下部の無構造砂岩 (H1 区分) は高密度混濁流堆積物、その上部に重なる泥質の塊状砂岩 (H3 区分) は土石流堆積物、さらにその上位に重なる級化砂岩 (H4 区分) および泥岩 (H5 区分) は低密度混濁流堆積物と解釈されている。H1 区分と H3 区分の境界に関しては、シャープである場合と、縞状の堆積構造を示す区分 (H2 区分) を挟んで連続的に移行する可能性があることが報告されている。しかし、それぞれの堆積構造区分の定量的な特徴については十分に明らかになっておらず、区分境界の特徴の多様性と重力流の移行現象との具体的な関連性についてもわからない点が多い。そこで、本研究は粒子配列に基づいてハイブリッドイベント層の堆積構造区分の特徴を解明し、その形成プロセスの推定を目指す。調査対象としては、Fukuda and Naruse (2020) によってハイブリッドイベント層が報告されている下部更新統上総層群大田代層を選んだ。本発表では、野外調査によって発見したハイブリッドイベント層の特徴および予察的な分析結果を報告する。

2. 地質概説

検討対象とされた大田代層は、千葉県房総半島中央部の高溝地域から東部の太平洋沿岸にかけて分布する。本層は主にタービダイト砂岩と半遠洋性シルト岩の互層によって構成される。先行研究では、堆積相の特徴から、本層は海底扇状地堆積物と解釈されている (Hirayama and Nakajima, 1977)。本層は 27 の火山灰層を狭在しており、上位から O1–O27 と名付けられている。Fukuda and Naruse (2020) でハイブリッドイベント層が報告された層準は、火山灰層 O7 の近傍である。この層準は、シルト岩優勢砂岩シルト岩互層で構成されており、チャンネルマージン堆積物と解釈されている。

3. 手法

本研究では、露頭観察に基づいて大田代層中の砂層からハイブリッドイベント層を認定し、試料を

採取した。ハイブリッドイベント層の粒子配列を解析するために以下の手順で作業をした。(1) 岩石試料を樹脂で固定したのち、切断・研磨し、断面画像を取得する。(2) 岩石断面画像の人為的トレースによる機械学習用の教師画像を作成する。(3) 転移学習済みニューラルネットワークに教師画像を学習させ、断面画像から自動的に粒子を識別するモデルを作成する。(4) 粒子配列解析を行う。

4. 結果および今後の展望

大田代層の火山灰層 O7 の下位 10 m の層準に、ハイブリッドイベント層と解釈される堆積物が観察された (Fukuda and Naruse, 2020)。この堆積層は、以下の三つの区分よりなる。

下部：砂岩層の基底部から 30 cm 程度の区間である。主に粗粒砂から極粗粒砂で構成されている。

塊状または弱い級化を示しており、貝殻片を含んでいる。最下部では下位の層を侵食しており、マッドクラストが含まれている様子も観察される。

中部：下部との境界は粒度の急激な細粒化によって明瞭に識別される。この区間の厚さは 20 cm 程度であり、大型のマッドクラストを含む。この区間の堆積物の淘汰は悪く、主に細粒砂から中粒砂で構成されている。

上部：中部との境界は明瞭で、内部に平行葉理や斜交葉理という堆積構造が観察されることで特徴づけられる。この区間は砂層の最上部 15 cm 程度を占める。主に極細粒砂から細粒砂で構成されており、級化構造を示す。

この層の下部は、粗粒かつ葉理構造を示さず、級化構造が見られることから判断して、高密度混濁流堆積物と解釈される (H1 区分)。中部は無級化かつ淘汰が悪いことから、土石流堆積物である可能性が考えられる (H3 区分)。上部は級化構造および葉理構造から判断して低密度混濁流堆積物であろう (H4 区分)。これらのことから、本層は混濁流と土石流の特徴を共に備えたハイブリッドイベント層と解釈される。各区分の境界は肉眼観察では比較的明瞭である。

発表では、ハイブリッドイベント層下部および中部の無葉理砂岩の解釈の妥当性を検討するため、堆積物の粒子配列の分析結果を報告する。ハイブリッド層各区分の境界の特徴は、流れの状態が漸移的であったのか、それとも流れが分離していたのかどうかを記録している可能性がある。肉眼では比較的明瞭ではあるが、本発表では粒子配列から見たハイブリッド層区分の特徴の遷移パターンについても検討し、ハイブリッドイベント堆積物の形成プロセスを検討する。

文献

Fukuda, S. and Naruse, H., 2020, Shape difference of mud clasts depending on depositional facies: Application of newly modified elliptic fourier analysis to hybrid event beds. *Journal of Sedimentary Research*, 90, 1410–1435.

Haughton, P., Davis, C., McCaffrey, W., and Barker, S., 2009, Hybrid sediment gravity flow deposits—Classification, origin and significance. *Marine and Petroleum Geology*, 26, 1900–1918.

Hirayama, J. and Nakajima, T., 1977, Analytical study of turbidites, Otadai Formation, Boso Peninsula, Japan. *Sedimentology*, 24, 747–779.

石垣島東部白保地区でのイベント堆積物調査

Event deposit survey in the Shiraho district on the east coast of Ishigaki Island,
Southwest Japan

田中姿郎・吉井 匠（電力中央研究所）

Shiro Tanaka, Takumi Yoshii

連絡先：田中姿郎(tanakasr@criepi.denken.or.jp)

1. はじめに

石垣島東岸には「明和の大津波」（八重山地震，1771年）によると考えられる礫質堆積物が報告されている（Ando et al., 2018）。古津波堆積物は過去の地質イベントの発生頻度やその規模を解明する有効な手段となる。著者らは砂礫質な堆積環境中の津波堆積物の特徴の把握を目的に、石垣島東岸で調査を実施してきた（田中ほか，2021など）。本発表ではこれまでの調査結果を報告する。

2. 調査地点

調査地点は沖縄県石垣市白保地区である。Ando et al. (2018)は、トレンチ調査から過去 2,000 年間に少なくとも 4 回の津波があった可能性を指摘している。著者らは、浜堤背後から高台までの斜面の間で、複数のピット調査と地中レーダ探査を実施した。

3. 調査結果

調査結果の概要を示す。浜堤背後のピットでは、下位から炭酸カルシウムにより膠結した地層、やや固結度が高く有孔虫砂やサンゴ礫を多く含む層、平行葉理が発達し上部にドリフトパミスが濃集する砂層、上位から黒色と白色の砂が繰り返す砂層を確認した。最上部の砂層には、巨礫が含まれる層準が確認された。浜堤から約 130m 内陸の地点では、土壌層に挟まれた粗粒砂～細礫層を確認した。上方粗粒化から上方細粒化の粒度変化が確認され、イベント層と判断した。さらに内陸側では、おおよそ、下位から砂層の上位に淘汰の悪い巨礫を含む層が重なり、やや土壌化した砂礫層が堆積、砂礫層、土壌化した砂層の順に堆積する。下位の淘汰の悪い礫層と上位の砂礫層は、イベント堆積物の可能性があるかと判断した。これらの堆積年代を明らかにすることが今後の課題である。なお発表では、地中レーダーの結果もあわせて報告する。

4. 引用文献

Ando M., Kitamura A., Tu Y., Ohashi Y., Imai T., Nakamura M., Ikuta R., Miyairi Y., Yokoyama Y., Shishikura M., 2018, Source of high tsunamis along the southernmost Ryukyu trench inferred from tsunami stratigraphy. *Tectonophysics*, **722**, 2, p265-276.

田中姿郎，吉井 匠，松山昌史，濱田崇臣，伊藤由紀（2021）石垣島東部白保地区で確認されたイベント堆積物の特徴：その 3。令和 3 年度日本応用地質学会研究発表会研究論文集，P21，213-214。

約 300 年前の宝永地震により静岡県安倍川上流域で形成された

ハイパーコンセントレイテッド流堆積物の特徴

Characteristics in hyper concentrated flood flow deposit formed by the Hoei
Earthquake ca. 300 years ago in upper reaches of the Abe River, central Japan

白井正明（都立大）・宇津川喬子（立正大）

Masaaki SHIRAI (TMU), Takako UTSUGAWA (Rissho Univ.)

連絡先：白井正明 (mshirai@tmu.ac.jp)

1. はじめに

安倍川は静岡／山梨県境の身延山地の一角を水源とし、約 50 km 南流して駿河湾に注ぎ、静岡平野に大量の土砂を供給してきた。源流域の一つ、大谷嶺（標高 1,999 m）には大規模崩壊地として有名な大谷崩が存在する。大谷崩は過去幾度も大規模な崩壊を繰り返し、18 世紀初頭の宝永地震の際に発生した大崩壊の土砂が土石流となって大谷川と安倍川上流の谷を埋めたとされる（例えば、Tsuchiya & Imaizumi, 2010）。この際の崩壊土砂量は $1.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ （町田, 1959）と見積もられており、大谷川との合流点付近では崩壊前に安倍川が刻んだ谷が埋められ、一時的に比高がなくなった尾根を安倍川の流れがショートカットすることにより、落差約 50 m の赤水の滝が形成された（白井ほか, 2020）。そして赤水の滝より約 500 m 下流では、北北西から南南東に伸びる谷壁沿いに、大規模崩壊時の土砂が堆積した幅約 200 m の大露頭が存在する。ここに露出する堆積物のうち最上部を除く高さ約 30 m の部分は、厚さ数 10 cm～数 m の中礫層と大礫層の互層から成り、径 1 m を超える飛び抜けて大きな礫 (outsized clast) が散在する、各層には葉理が見られないなどの特徴（例えば、Smith, 1987）から、ハイパーコンセントレイテッド流堆積物と考えられる。

2. 堆積物の特徴

調査地点のハイパーコンセントレイテッド流堆積物には、その他以下のような特徴がある。中礫層は主に長径数 cm の頁岩の角礫－亜角礫から成る。一方大礫層には長径 10cm 以上のものが多く含まれ、巨礫もよく含まれる。しばしば逆級化を呈し、outsized clast は大礫層の最上部に含まれることが多い。大礫－巨礫は主に砂岩の亜角－亜円礫から成り、インブリケーションは現流路にはほぼ平行な流向を示す。また露頭から突き出た巨礫、つまり長軸が流れに直交する巨礫が目立つ。これらの巨礫の長径は概ね 50 cm を超える。中礫層・大礫層ともに礫質支持であり、基質は泥質の細礫－砂からなる。

ハイパーコンセントレイテッド流堆積物に関連した文献は数多くあるが、報告されている特徴は多様性に富む。例えば、級化のセンス（正級化／逆級化）、礫の長軸の配列（流向に平行／直交）も様々であるが、安倍川上流のハイパーコンセントレイテッド流堆積物は Sohn (1997) の traction carpet model に親和性があるように思われる。すなわち、中礫層は粒子同士が強く接しながら移動する frictional region に、しばしば逆級化を示す大礫層は上部ほど流速および剪断応力が強まる collisional region に、それぞれ対応する。

3. 礫のオリエンテーション

2018年から2021年にかけて露頭の各所で中礫層および大礫層の礫の長軸の方位（オリエンテーション）を測定した。測定対象とする礫は、中礫層と大礫層双方に含まれ、堆積時に周囲の礫の影響を受けにくく（大きめである）、測定時にハンドリングしやすい、以上の条件を考慮して、概ね長径64~128 mmのものとした。露頭下部の各所で層厚が40 cmを超える中礫層／大礫層を選び、中礫層下半部・中礫層上半部・大礫層下半部・大礫層上半部に分けた上で、各区分から250個以上の礫の長軸の方位を測定した。調査露頭付近に残されている堆積面の傾斜方位などから、当時の水流はN18°WからS18°Eに向かったと推定できる。その上で当時の流向に対して±22.5°の範囲を「流向に平行」、90±22.5°の範囲を「流向に直交」とした。図中に示されるように、大礫層の上部では長軸が古流向と直交する礫が半数を超えた。トラクションカーペット表面近くでは、礫は転動に近い状態で運搬されていることが明瞭に示された。

謝辞：河尻清和（相模原市博），小林淳（静岡県富士山世界遺産セ），小田龍平・松風潤（首都大・当時），秋草慧一・佐藤潤一（都立大）の各氏には、野外調査をお手伝いいただいた。また本研究には科研費（課題番号18K03762）を使用している。

文献 町田（1959）地理学評論, 32, 520-531.

白井・宇津川・渡辺（2020）第四紀研究, 59, 17-29.

Smith (1987) Journal of Sedimentary Petrology, 57, 613-629.

Sohn (1997) Journal of Sedimentary Research, 67, 502-509.

Tsuchiya and Imaizumi (2010) Journal of Disaster Research, 5, 257-263.

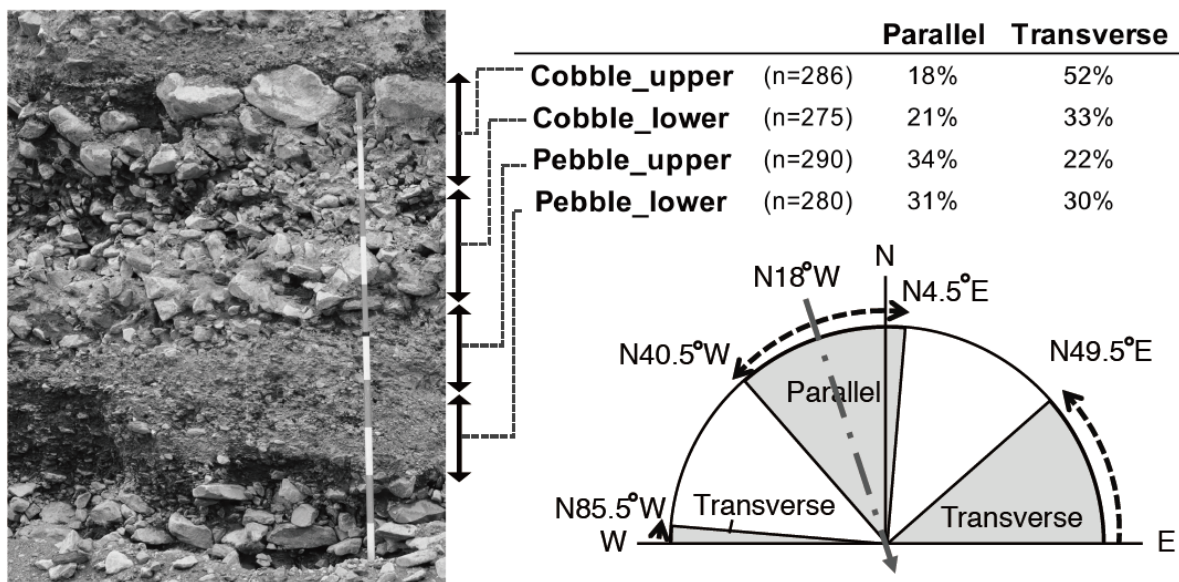


図 調査露頭における礫のオリエンテーションと流向の関係

左の写真は中礫層と大礫層の組み合わせの一例。写真右側のポールの長さは約2 m.

Depositional setup and characteristics of storm deposits following the 2007 Cyclone Sidr on Kuakata coast of Bangladesh

Md. Masidul Haque (Shinshu University), Masaki Yamada (Shinshu University),
Koichi Hoyanagi (Shinshu University)

連絡先: Md. Masidul Haque (E-mail: 19hs404k@shinshu-u.ac.jp)

Tropical cyclones are known as one of the major sources of coastal and shallow marine sedimentation, resulting in storm deposits. The storm deposits show different characteristics among the distinctive coastal environment setting are generated by distinct sedimentary and hydrodynamic processes, which are related to geological and ecological factors of the region. This study examines the sedimentary characteristics, provenance, and depositional processes of the storm deposits from 2007 Cyclone Sidr that have been identified on the southwestern Ganges-Brahmaputra-Meghna (GBM) delta coast of Bangladesh. Fifteen geological cores at a distance of 135–277 m from the coastline along with three transects were analyzed to gain a better understanding of storm deposits in the Kuakata coast of Bangladesh. Laboratory analyses of grain size, TOC, TN, $\delta^{13}\text{C}$, and diatom assemblages were carried out to characterize the deposits. Three sedimentary units up to 70 cm thick were identified during field investigation. The massive to parallel, bluish-gray mud units underlies the storm sandy overwash deposits. Geochemical proxies and presence of *F. brevistriata* and *F. Fasciculata* diatoms in these units indicate a tidal mudflat environment and the presence of *D. surirella* with silty sand laminae revealed that the area was flooded by ocean tide during the deposition of mud. Up to 17 cm thick normal graded unimodal white to light gray sand found at the bottom of the storm deposits overlies the mud sharp to erosionally. Declined the thickness and grain size of the units from coast to inland and increased the sorting value indicate that the sand was sourced from seaward. The negative shift of TOC and TOC/TN, the positive shift of $\delta^{13}\text{C}$ values, and the presence of *R. cf. rhomboides* and *Navicula ingrata* diatoms indicates a severe storm surge during deposition of sand. The grain size distribution of the sand unit is very similar to modern beaches reveals that the beaches were the probable source of sand. Unimodal sand unit grades into bimodal olive gray sandy silt in the upper part of the storm overwash deposits. The unit also showed a fining upward sequence. The grain size distribution and presence of freshwater *Eunotia subarcuatooides*, *N. cryptotenella*, *Navicula subminuscula* diatoms with brackish to marine diatoms demonstrate that the sand grained sediment sourced from beaches, and muddy sediment from the suspended and nearshore deposits of the bay, and adjacent rivers.

The storm overwash deposits are strongly influenced by topography, geomorphology, and sediment characters around the depositional site of the area. Cyclone-induced storm surge and subsequent heavy rainfall flooded low elevated adjacent coastal areas of the bay. The water level reached up to 6m above astronomical tide during landfall of Cyclone Sidr at the Kuakata coast and flooded behind the embankment of the area. The surging water carried suspended mud from the bay that also contained brackish to marine diatoms. Storm surge, especially during a tropical cyclone, eroded offshore muddy sediment, beach face and dunes, and transported behind the embankment during landfall. The area was also flooded by the adjacent river that contained suspended mud with freshwater diatoms. These sediments were sorted according to storm wave, and normal graded light gray to white sand and olive gray sandy silt settled over the area. Both high water level influenced sediments from the bay and river contributed depositional process during a deposition of storm surge sediment.

モンゴル国南東部に分布する古第三系 Ergilin Dzo 層の古地磁気学的研究

坂本航汰・畠山唯弘・北原優・實吉玄貴（岡山理大）・Khishigjav Tsogtbaatar（IPG）

連絡先：坂本航汰（g21gm08dk@ous.jp）

モンゴル国ゴビ砂漠は、多様な古脊椎動物化石の産出地として知られている。しかし、年代指標となる微化石や火山灰層が乏しく、化石産出層における層序学的、年代学的研究の推進が求められる。モンゴル国南東部の東ゴビに分布する古第三系 Ergilin Dzo 層も多様な哺乳類化石を産出する。西ヨーロッパの哺乳類動物化石相との比較から、本層の中位層準に始新世-漸新世境界（33.9Ma）が設定されている（Dashzeveg, 1996）。本層に対する年代制約は、中央アジアにおける同年代の地層との層序学的な対比やユーラシアの哺乳類動物化石相の比較を行う上で重要である。本研究では、より精度の高い年代制約を目指し、泥岩の堆積残留磁化から、当時の地磁気極性復元を試みた。

対象地域は、Ergilin Dzo 地域に分布する Ergilin Dzo 層であり、東西約 50 km に渡って分布する。本層は先行研究との比較から、岩相層序を用いた地層の記載が行われている（Dashzeveg, 1993; Saneyoshi et al., 2010）。下位から Sevkul Mb, Shavag Mb, Ergilin Mb, Khetsut Tsav Mb. に区分される。Sevkul Mb. は淘汰の良い白色の砂で構成される。Shavag Mb. は白色の砂と褐色の泥の互層で特徴づけられ、調査地域中央部に位置する Shavag area でのみ確認される。Ergilin Mb. は淘汰のよい黄褐色の砂で構成される。Khetsut Tsav Mb. は下位層準に比べ粗粒で、下に凸の浸食面が認められる。本層は上方粗粒化を示す河川堆積物であり、泥岩層は氾濫原堆積物と解釈されている（Saneyoshi et al., 2010）。古地磁気試料（定方位ブロック試料）は、林原-モンゴル共同調査隊によって泥岩層から採取されたものである。試料は、ほとんどが褐色（一部緑色）を呈する半固結の泥岩である。

本研究では、11 層準・計 56 試料から 37 試料を選定後、試片を作成し 126 個を測定に使用した。高知大学海洋コア総合研究センター古地磁気・岩石磁気実験室シールドルーム内の超伝導磁力計を用いて、13~14 ステップ（0~680℃まで）の段階熱消磁を行いながら磁化を測定した。また、磁性鉱物同定のために上記施設の熱磁気天秤と岡山理科大学の MPMS（Magnetic Property Measurement System）を用いて岩石磁気の測定を行った。岩石磁気の測定に関しては約 100mg 前後の粉末試料を用いた。

11 層準のうち 5 層準（下位から PM1, 6, 5, 9, 10）から特徴磁化成分を得た（図 1）。方位は PM1, 9, 10 が南向きに逆帯磁、PM5, 6 が北向きに正帯磁を示した。PM1, 9 はデータが少なく不明瞭ではあるが、今回の結果は、本層内における 2 回の地磁気逆転を示唆した。地磁気極性は下位から C13 r（PM1）、C12n（PM5, 6）、C12 r（PM9, 10）に相当すると考えられる（図 1）。Ergilin Dzo 層における先行研究から、推定されている始新世-漸新世境界の解釈と本結果は矛盾しない。また、岩石磁気測定の結果から PM1 は、磁鉄鉱を主体とし一部赤鉄鉱を含むことを示した。PM5, 6, 9, 10 は赤鉄鉱を主体とする。PM1 は、200~560℃で原点に向かう磁化成分を持ち、560~680℃間の磁化成分は方向性を持たない。一方、PM5, 6, 9, 10 は主に 300~680℃で原点に向かう磁化成分を確認した。このことから、PM1 は磁鉄鉱、PM5, 6, 9, 10 は赤鉄鉱が安定した磁化成分を担うと考えられる。しかし、赤鉄鉱を磁性鉱物とする赤色泥岩は、二次的に獲得された化学残留磁化を示す可能性もあるため、現時点では残留磁化の初生性に議論の余地がある。

最下位層準の PM1 における地磁気極性の決定や、赤鉄鉱を主体とする試料の初生性を示すことが、本層の古地磁気層序を確立する上で重要である。今後、交流消磁を用いた磁化測定や逆転テストを進

める。また、古地磁気層序に加えて対象層から採取されている炭酸塩岩を対象とした U-Pb 年代測定法にも着手し、より正確な年代の制約を試みる。

文献

Dashzeveg, D., 1993, Asynchronism of the main mammalian faunal events near the Eocene-Oligocene boundary. *Tertiary research*, **4**, 141-149.

Dashzeveg, D., 1996, Some carnivorous mammals from the Paleogene of the Eastern Gobi Desert, Mongolia, and the application of Oligocene carnivores to stratigraphical correlation. *American Museum Novitates*, **3179**, 1-14.

Saneyoshi, M., Tsubamoto, T., Watabe, M., & Tsogtbaatar, K., 2010, Lithostratigraphic and sedimentological analysis of the upper Eocene Ergilin Dzo Formation of Ergilin Dzo locality, Mongolia. *Hayashibara Museum of Natural Sciences Research Bulletin*, **3**, 149-153.

Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M. D., & Ogg, G. M. (Eds.). 2012, The geologic time scale. *The geologic time scale 2012*, **45**, 171-188.

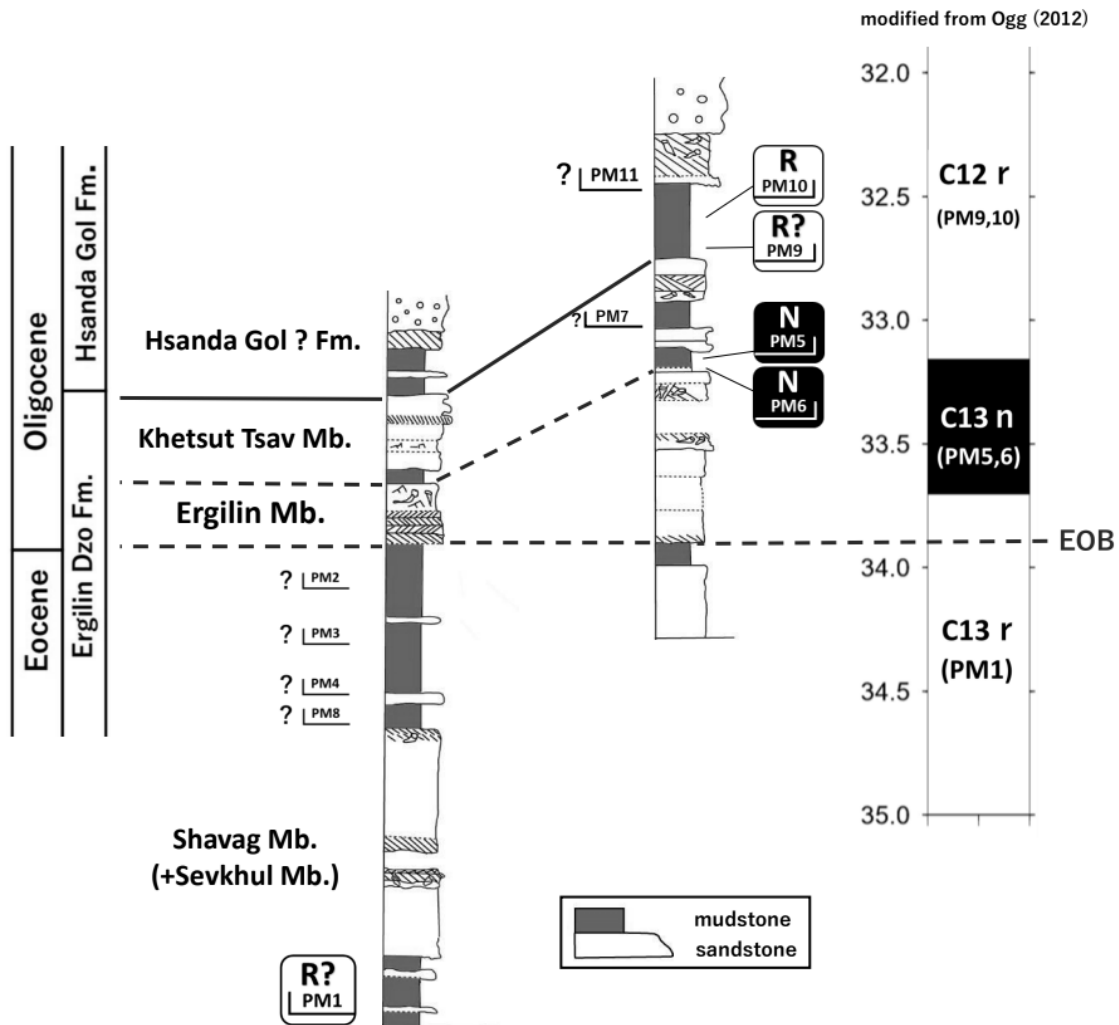


図1 Shavag area に分布する Ergilin Dzo 層の地質柱状図と地磁気逆転表 (E-O 境界前後) の比較 (Saneyoshi et al., (2010) と Ogg, (2012) を一部改変)。

(左) 地質柱状図 PM1-11 の採取地点を示す。(右) 地磁気逆転表 E-O 境界 (33.9Ma)。

急激な堆積作用による未固結堆積物の液状化・流動化変形：水槽実験による検討
**Deformation of soft sediments associated with liquefaction and fluidization
 triggered by rapid sedimentation: a laboratory experiment**

加藤義之・山口直文（茨城大）

Yoshiyuki Kato, Naofumi Yamaguchi (Ibaraki Univ.)

連絡先：加藤義之 (20nm303y@vc.ibaraki.ac.jp)

【はじめに】

未固結堆積物変形構造 (soft-sediment deformation structures) とは、未固結あるいは半固結状態の堆積物中に形成される変形構造の総称であり、その形成には一般的に液状化や流動化が関与している。液状化・流動化の引き金として地震動はよく知られており、これまで多くのフィールドや水槽実験による研究がなされてきた (例えば, Fortuin and Dabrio, 2008; Yasuda and Sumita, 2014)。また、液状化・流動化変形は、地震動だけでなく、急激な堆積作用や津波、ストーム時の波浪作用などの誘因によっても生じることが指摘されている (Owen and Moretti, 2011)。例えば Matsumoto et al. (2008) は、2004 年インド洋大津波の堆積物中にみられた堆積同時的な変形による火炎構造 (Truncated flame structures) を報告している。この火炎構造は津波に関連して形成された可能性が高いが、具体的に津波に伴う何が引き金となったのかは明らかになっていない。

変形構造形成の多様な引き金を正しく理解することは、その引き金に関係する災害リスク評価や古堆積環境の推定を正確に行うためにも重要である。しかし、地震動を引き金とする変形に比べ、それ以外の引き金による堆積物の変形について調べた研究はこれまで限られている。例えば、急激な堆積作用によって堆積物変形が生じたと推定される例は地層から報告されており (Moretti et al., 2001)、上述のような津波や混濁流においても運搬された土砂の堆積作用が引き金となる可能性があるが、実際に堆積作用による堆積物変形を実験で確かめた例はこれまでほとんどない。そこで本研究では、急激な堆積作用による未固結堆積物の変形について理解することを目的として水槽実験を行った。

【実験手法】

実験は、十分な強度を有するアクリル水槽 (横幅 30 cm, 奥行 5 cm, 高さ 40 cm) を用いて実施した。実験手順として、塩分濃度 0.1% の食塩水が入った水槽に厚さ約 3 cm の初期層を形成し、平らな場所に 20 分間静置した後、給砂装置を用いて上方から堆積物を供給した。初期層の表面から約 1 cm 下には、層の流動化や変形の判別のために黒色粗粒砂による葉理を形成しており、この葉理よりも上の部分を表層と定義した。堆積物の供給速度は、給砂装置の穴の数や直径を変えることで調節した。供給速度の測定や層境界面の変形を観察するため、堆積物供給時には水槽側面から動画撮影を行った。

実験では、初期層の粒度条件、供給する砂の粒度条件、供給速度、供給量を変えて検証を行った。初期層は、極細粒砂 (中央粒径 $D_{50} = 0.080$ mm) とシルト ($D_{50} = 0.038$ mm) の 2 種類に設定した。供給する堆積物は、緑色細粒砂 ($D_{50} = 0.10$ mm) と黒色粗粒砂 ($D_{50} = 0.60$ mm) の 2 種類に設定した。供給量は、供給前に計量した砂の乾燥重量を水槽水平断面積で除した値 (単位は g cm^{-2}) を用いた。

【結果・考察】

実験の結果、上方からの堆積物供給によって初期層が変形する場合があることが示された。具体的な結果は以下である：

- 1) 初期層が極細粒砂の場合、供給する砂の粒度条件に関わらず、供給速度が約 $0.6 \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以下では液状化・流動化変形は起こらなかった。供給速度が約 $0.6 \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ より大きい条件になると、初期層の表層で液状化・流動化変形が生じた。一部の実験で、表層だけでなく葉理も液状化・流動化する場合もみられたが、多くの実験では葉理は初期形状から変形しなかった。
- 2) 初期層がシルトで細粒砂を供給した場合、どのような供給速度でも初期層が液状化・流動化変形する傾向がみられた。その中で、供給速度によって層境界面の変形の特徴が異なることが示された。例えば、約 $0.1 \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の供給速度では初期層の表層部のみが液状化・流動化し、層境界面において波長の小さい小規模な変形構造が形成された（図 1A）。一方、約 $6.0 \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の供給速度では、初期シルト層－砂層境界面において不規則な形状の変形構造が形成され、葉理も変形した（図 1B）。
- 3) 初期層がシルトで粗粒砂を供給した場合にも、どのような供給速度でも初期層が液状化・流動化変形する傾向がみられた。例えば、供給速度が約 $0.1 \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の場合には初期層が液状化・流動化し、葉理を含む層全体が顕著に変形した（図 1C）。また、約 $6.0 \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の供給速度の場合にも、初期シルト層－砂層境界面が変形し、葉理も変形した（図 1D）。

以上の結果は、急激な堆積作用によって初期層が液状化・流動化変形する可能性があることを示唆している。特に初期層がシルトの場合には、堆積作用によって液状化・流動化変形が起こりやすく、堆積物の供給条件などによって変形の特徴が異なる可能性が示唆される。

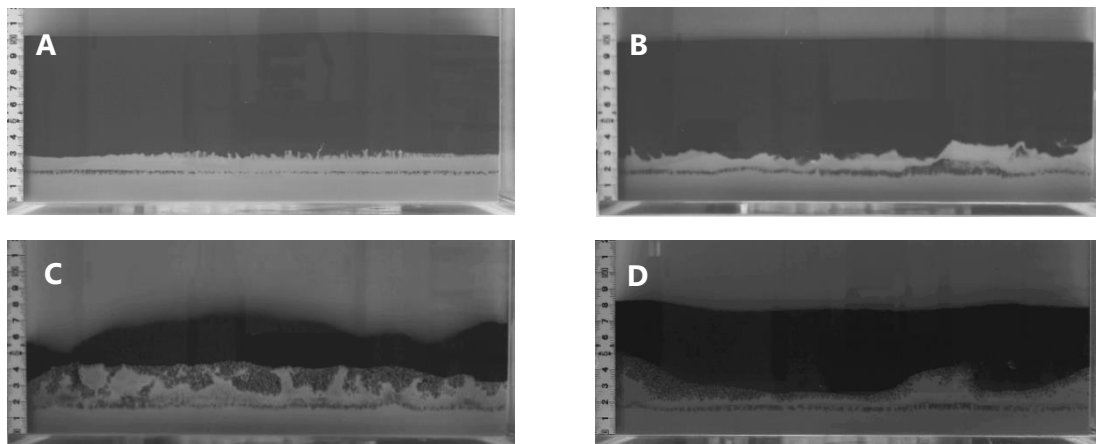


図 1 (A) 初期シルト層に細粒砂を供給した場合の層境界面。細粒砂の供給速度は約 $0.1 \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、供給量は約 8.0 g cm^{-2} 。(B) 初期シルト層に細粒砂を供給した場合の層境界面。細粒砂の供給速度は約 $6.0 \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、供給量は約 8.0 g cm^{-2} 。(C) 初期シルト層に粗粒砂を供給した場合の層境界面。粗粒砂の供給速度は約 $0.1 \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、供給量は約 8.0 g cm^{-2} 。(D) 初期シルト層に粗粒砂を供給した場合の層境界面。粗粒砂の供給速度は約 $6.0 \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、供給量は約 8.0 g cm^{-2} 。

参考文献（タイトルは省略）

- Fortuin, A. R. and Dabrio, C. J., 2008, *Sedimentology*, **55**, 1595–1622.
Matsumoto, D., Naruse, H., Fujino, S., Surphawajruksakul, A., Jarupongsakul, T., Sakakura, N. and Murayama, M., 2008, *Sedimentology*, **55**, 1559–1570.
Moretti, M., Soria, J. M., Alfaro, P. and Walsh, N., 2001, *Facies*, **44**, 283–294.
Owen, G. and Moretti, M., 2011, *Sedimentary Geology*, **235**, 141–147.
Yasuda, N. and Sumita, I., 2014, *Progress in Earth and Planetary Science*, **1**.

北海道霧多布湿原の地殻変動に関連した浜堤の堆積構造

Sedimentary structures of beach ridges related to crustal movement in Kiritappu Marsh, NE Japan

根来湧輝（東京大学・産総研）・田村亨（産総研・東京大学）・澤井祐紀（産総研）・谷川晃一郎
（産総研）・嶋田侑真（産総研）・岡田里奈（弘前大学・産総研）

Yuki Negoro (AIST, The University of Tokyo), Toru Tamura (AIST, The University of Tokyo), Yuki Sawai
(AIST), Koichiro Tanigawa (AIST), Yumi Shimada (AIST), Rina Okada (Hiroshima University, AIST)

連絡先：根来湧輝（メール：negoro.yuki@aist.go.jp）

北海道東部太平洋沖沿岸地域の地殻変動は、地質学的な証拠と測地学的な証拠とで異なる傾向が認められる。更新世の海成段丘面は標高 40–60 m に位置し、10 万年スケールで隆起傾向にあることを示している。その一方で、根室や釧路の検潮記録から、過去 100 年間では約 1 cm/年という異常に大きな速度で沈降したことが知られている（澤井, 2007）。こうした長期と短期の間での地殻変動傾向の違いを説明するために、大規模な隆起イベントの発生が指摘されている（池田, 1996）。津波堆積物による古地震の研究や珪藻化石を利用した相対的海水準変動の復元などによって、本地域では数百年規模の再来間隔で大規模な地震が発生していたこと、これらの地震発生後に隆起が起こったことなどがわかっているが、以上の長期と短期の違いを定量的には説明できていない（澤井, 2007; Sawai, 2020）。

本研究は、北海道東部の霧多布湿原に埋没した浜堤の堆積物に着目し、その堆積構造から地殻変動の履歴を解明することを目的とする。北海道厚岸郡浜中町の霧多布湿原に海岸線と直行する方向の測線を設け、ジオスライサーによる堆積物の採取や地中探査レーダー（GPR）による地下の堆積構造の調査を行った。さらに、詳細な測量によって地形断面図を作成し、現在の地形との比較も行った。その結果、以下のような特徴が観察された。(1) 本地域の地表付近には津波堆積物を狭む泥炭層が分布し、その下位に浜堤の砂層（海浜～前置砂丘堆積物）が分布している。(2) 測線の海側部分ではこの砂層の GPR 反射面が現在の海浜に近い勾配で海側に傾斜する。(3) 測線の陸側部分では砂層が泥炭層によって上下に分割され、上位の砂層は水平に近い反射面を示し、下位の砂層は海側に傾斜した反射面を示す。(4) 現海岸線のすぐ陸側の浜堤は現在の海岸の砂丘とほぼ同じ標高である。

今回の調査結果により、本地域の浜堤堆積物の形成過程は以下のようなものであったと解釈される。(1) 砂の堆積により海浜が拡大する。(2) 海浜での堆積により海岸線が海側に移動し、離水した浜堤の上に泥炭層が堆積する。(3) 大きな沈降イベントが発生して海面が相対的に上昇し泥炭層の上に海浜の砂が堆積する。(4) 再び海浜の拡大が始まり、海岸線が海側に移動する。

今後は、以下のような調査・分析を予定している。(1) 今回採取した堆積物試料に対して光ルミネッセンス年代測定（OSL 年代測定）を行い浜堤堆積物の年代を決定する。(2) 泥炭層中の火山灰層を分析し、泥炭が堆積した年代を調査する。(3) 掘削地点の数を増やし、さらに詳細な地質断面図を作成する。これらにより、今回の調査によって得られたデータの信頼性を高めるとともに、既知の地震や隆起・沈降イベントとの関係を考察することによって、本地域での地殻変動履歴の詳細な復元に

寄与したい。

参考文献

池田安隆, 1996, 活断層研究と日本列島の現在のテクトニクス, 活断層研究, **15**, 93–99.

澤井祐紀, 2007, 珪藻化石群集を用いた海水準変動の復元と千島海溝南部の古地震およびテクトニクス, 第四紀研究, **46**, 363–383

Sawai, Y., 2020, Subduction zone paleoseismology along the Pacific coast of northeast Japan — progress and remaining problems, *Earth-Science Reviews*, **208**, 103261

柱状図・地質断面図を三次元表示：簡単変換ツールの紹介

Introduction of the three-dimensional display method for cross sections and columnar sections

佐藤智之（産業技術総合研究所）

Tomoyuki SATO (Geological Survey of Japan, AIST)

連絡先：佐藤智之 (tomoyuki-sato@aist.go.jp)

1. はじめに

地質学では、三次元の地質の情報を地質図や地質断面図という二次元の形で巧みに表現してきた。しかし、一般への研究成果公開・社会還元、観光や初等・中等教育、エンターテインメント分野への普及など、未学習者に対しては地質図や地質断面図だけでは情報伝達が難しい場合もある。そこで、近年発展してきたコンピューター上でのリアルタイム三次元表示を比較的簡単に用いるための技術と、そのためのツールを作成・公表した（佐藤，2021，堆積学研究 79，85-94）ので紹介する。講演者のウェブサイト (<https://staff.aist.go.jp/tomoyuki-sato/ja/tools.html>) で無償公開されており、商用利用にも制限はなく、他に有償のソフトウェアも必要としないので、ぜひ活用いただきたい。

2. 方法

公開されたツールはLinux 動作するスクリプトなので、Windows や Mac に搭載されたターミナルで実行すればよい。ツールでは、緯度・経度情報を羅列したテキストファイルを、Google Earth で読み込める形式に変換し、それを使って別途用意した画像ファイルを Google Earth 上に三次元表示させることができる（図 1）。データベースとしての紐づけや登録作業もなく、生成されたファイルと画像を同じフォルダに入れさえすれば動作する。従ってデータの受け渡し・共有も簡単である。

閲覧者は、変換されたデータを Google Earth で読み込むだけなので、OS も問わない。このため、ライセンスの制限や操作を覚える手間もかからないので、関係者への成果報告や、市民向けの展示にも使いやすいと考えている。

3. 実際の利用シーン

想定している利用法を提案したい。地質調査において、反射法音波探査や地中レーダー、重磁力をはじめとした物理探査など、地下断面を得る調査を行うことがある。調査で得た断面を画像化し、GPS ログを本ツールで変換すれば、調査先で三次元表示できる（図 2）。調査滞在中のうちに、現場作業員同士で共有したり、地主さんや関係自治体の担当者に見せたりもできる。露頭調査で地質図を作り、そこから地質断面図を作ることがあるが、断面作成位置の緯度経度をテキストにまとめて変換すれば、地質図上に地質断面図を三次元表示させることができる。熟達者には不要だが、直感的に作成した地質図・断面図を確認できる。ボーリング資料があれば、実際の場所に柱状に柱状図を並べることもでき、埋没地形や構造運動をより直感的に確認できる。また、指定した経路に沿って画像を屏風のように表示できるので、その経路上の情報の概要をまとめて表示することができる（図 3）。例えば、巡検案内やルート観察の結果、旅の思い出をわかりやすくまとめ、共有することもできる。

講演では、以上についてデモンストレーションも交えながら紹介するが、上記ウェブサイトでは詳しいマニュアルも用意してあるので、ぜひご活用いただきたい。



図 1. 紹介ツールでできること。画像と位置情報のテキストを用意し、ツールで変換すると、Google Earth 上で立体的に表示できる。佐藤 (2021, 堆積学研究)。

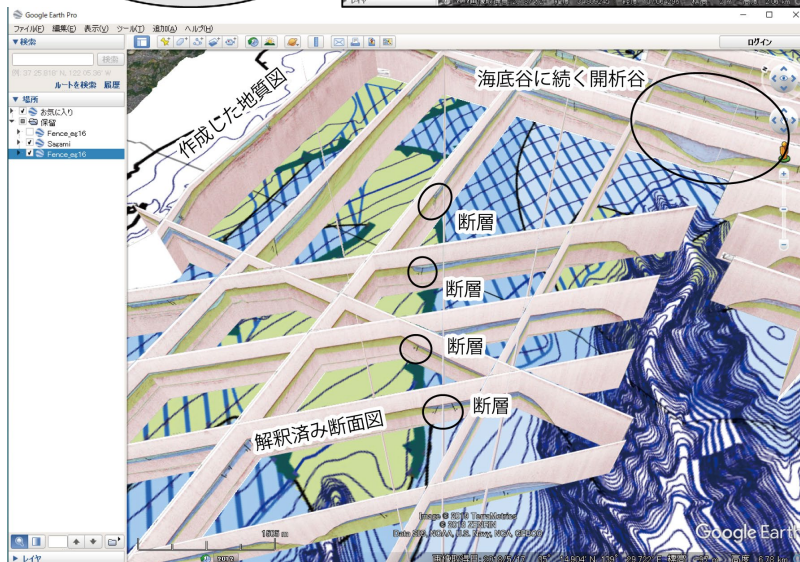


図 2 (左). 地質量差での利用例。取得した断面図とそれから作った地質図を重ねて表示したもの (佐藤のウェブサイトより)。開析谷や断層の延びや、断面間のつながりがわかりやすい。



図 3 (下). 巡検や旅行での利用例。移動経路の GPS ログと経路に沿って写真や記述を並べた画像 (a) をツールで変換し、表示したもの (b) (佐藤のウェブサイトより)

九十九里浜平野の浜堤および現世海浜堆積物の OSL 年代測定

OSL dating of beach ridges and modern beach sands at Kujukuri, eastern Japan

小森康太郎（東大新領域）・田村亨（産総研・東大新領域）・堀和明（東北大学）

Kotaro Komori (Tokyo Univ.), Toru Tamura (GSJ, AIST・Tokyo Univ.), Kazuaki Hori (Tohoku Univ.)

連絡先：小森康太郎 (7142028052@edu.k.u-tokyo.ac.jp)

OSL 年代測定は、石英や長石といった鉱物粒子のルミネッセンス特性を利用した年代測定法であり、数十～数十万年前の堆積物に有効な手法として用いられている。国内では、石英の利用において問題が生じることが多く、長石の OSL (IRSL および post-IR IRSL) が有効である (塚本, 2018)。一方で、長石の OSL の適用は *anomalous fading* と呼ばれる光刺激なしでの不対電子の再結合や、残存線量などの問題に対して発展途上であり、更なる研究事例の蓄積が必要とされている (伊藤, 2021)。本研究では、九十九里浜の現世海浜の表層堆積物の長石から残存線量の見積りを行った。また、九十九里浜平野北部と中央部の浜堤堆積物の OSL 年代測定を行い、残存線量の影響を考慮した上で既存の ^{14}C 年代と比較してその妥当性を示し、完新世における海岸線の移動過程を検討した。

九十九里浜は長さ約 60 km の国内最大規模の砂浜海岸である。海岸の陸側には縄文海進の最盛期以降に形成された幅約 10 km の浜堤平野が形成されている (増田ほか, 2001)。また、北部では干拓された潟湖である旧椿海が窪地となっている。この地域の浜堤は陸側から I, II, III の 3 つの群に分類され (森脇, 1979)、平野中央部での ^{14}C 年代測定によってそれぞれ約 5700～4000 年前、約 4000～2300 年前、約 2300 年前以降に形成されたと考えられている (増田ほか, 2001)。一方で、北部の浜堤については年代測定が行われていない。

現世の海浜では表層の堆積物採取と地形の測量を行った。浜堤の堆積物試料は北部の 8 地点 (ASH-1～8) と中央部 (KJK-1,2) でハンドオーガーを用いて採取した。得られた試料は暗室で処理を行い、比重 2.53～2.58 かつ 180～250 μm の主にカリ長石からなる鉱物粒子を抽出して測定に用いた。現世の海浜堆積物試料では測定温度を変えて残存線量を比較し、測定に最適な信号を検討した。

現世海浜試料の IR_{50} および post-IR $\text{IRSL}_{50/150}$ はプレヒートと測定温度が高いほど残存線量が高くなる傾向が読み取れ、先行研究の結果と一致している (例えば, Reimann and Tsukamoto, 2012)。post-IR $\text{IRSL}_{50/130}$ と post-IR $\text{IRSL}_{50/190}$ による残存線量の差は最大で 0.5 Gy 程度におよび、残存線量の影響を抑えるには低温での測定が望ましいといえる。ただし、post-IR $\text{IRSL}_{50/130}$ と post-IR $\text{IRSL}_{50/150}$ の間ではほとんど差が見られないか、むしろ post-IR $\text{IRSL}_{50/150}$ で残存線量が低い結果が得られたため、浜堤の年代測定にはプレヒート 180°C の IR_{50} と post-IR $\text{IRSL}_{50/150}$ の信号を用いた。この場合の IR_{50} の残存線量は最大で 0.11 Gy 程度であり、数十年程度に相当する。一方で、同じ試料で比較すると pIRIR $_{50/150}$ の残存線量は IR_{50} よりも最大で 0.6 Gy 大きく、pIRIR $_{50/150}$ で得られる年代の方が 200～300 年程度過大に評価されることを示している。

北部と中央部の浜堤の年代測定結果は全体として、 IR_{50} と pIRIR $_{50/150}$ とともに中央部の ^{14}C 年代と調和的であり、年代測定は妥当であると考えられる。海側の若い浜堤 (地点 ASH-3, 4) では、 IR_{50} より

pIRIR_{50/150}の方が200年前後古い年代を示したが、残存線量の影響と解釈できる。一方で、古い浜堤（ASH-1, 5~8）ではIR₅₀の方が古くなっており、pIRIR_{50/150}のフェーディング補正に用いたフェーディング率（g-value）が過小に評価され、それが残存線量の影響を上回っている可能性がある。旧椿海を閉塞する浜堤（地点ASH-8）では、IR₅₀とpIRIR_{50/150}ともに先行研究から想定される年代（約5700年前以降）より古い年代（IR₅₀8.4±0.7 ka pIRIR_{50/150} 7.4±0.6 ka）が得られた。このことから、椿海の東側は縄文海進の最盛期以前に、東側の砂嘴の成長により内湾化されていたことが示唆される。

文献

伊藤一充, 2021, 光ルミネッセンス (OSL) 法を用いた堆積物の年代決定, *RADIOISOTOPES*, 70, 147–157.

塚本すみ子, 2018, 光ルミネッセンス (OSL) 年代測定法の最近の発展と日本の堆積物への更なる応用の可能性, *第四紀研究*, 57, 157–167.

増田富士雄, 藤原 治, 酒井哲弥, 荒谷 忠, 田村 亨, 鎌滝孝信. 2001, 千葉県九十九里浜平野の完新統の発達過程, *第四紀研究*, 40, 223–233.

森脇 広, 1979, 九十九里浜平野の地形発達史, *第四紀研究*, 18, 1–16.

Reimann, T. and Tsukamoto, S., 2012, Dating the recent past (< 500 years) by post-IR IRSL feldspar—Examples from the North Sea and Baltic Sea coast, *Quaternary Geochronology*, 10, 180–187.