

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04500

研究課題名(和文) 津波による海底堆積物擾乱が海洋環境に与える影響

研究課題名(英文) Impacts of disturbance of marine sediment on the environments induced by tsunami

研究代表者

林 美鶴 (Hayashi, Mitsuru)

神戸大学・内海域環境教育研究センター・准教授

研究者番号：10294258

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：津波後の海底からの栄養塩溶出速度の変化を実験により推定した。津波後の溶出速度は現状に比べ、NH₄-Nは71%、P₀₄-Pは62%に低減すると予想される。大阪湾の一次生産はリン律速で、基礎生産に対する栄養塩溶出の寄与が大きい現状では、津波による溶出量低下は基礎生産をさらに制限する可能性があり、周辺海域への栄養塩の供給が減少するため周辺海域の一次生産にも影響を与える可能性が示唆された。また、津波による海底堆積物の巻き上げで、水中に放出された栄養塩の拡散をシミュレーションしたところ、半分程度が2ヶ月間は大阪湾内に残存し、流出速度は徐々に低下して、概ね9ヶ月後には1割以下に低減する事が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

富栄養化時代の総量規制により貧栄養化している現状を、津波はさらに悪化させる可能性が示唆された。津波による栄養塩環境の変化について将来予測を行った事例はなく、長期的な海洋環境保全施策に津波は考慮されて来なかった。しかし津波は必ず起こるため、脆弱性の低減やレジリエンスの強化は、海洋環境保全施策に盛り込むべきである。本研究の予測が正しいか否かは実際に津波が発生しなければ分からないが、予測を行っておかなければ検証はできない。本研究は次に起こる津波だけでなく、予測手法をブラッシュアップすることで、数十年毎に発生する津波に対するレジリエンスを高める研究であり、学術的にも社会的にも高い意義を持っている。

研究成果の概要(英文)：A tsunami induced by the Nankai Trough earthquake may disturb marine sediments in the inner part of Osaka Bay. Since nutrient release from marine sediments has a significant impact on nutrient concentrations in seawater, an incubation experiment was conducted to estimate the release rates of NH₄-N and P₀₄-P in order to understand the present rates and to quantify the changes in the rates caused by tsunamis in Osaka Bay. The release rate of redeposited sediments after exposure to the aerobic environment caused by a tsunami may decrease to approximately 70% of the current level for NH₄-N and 60% for P₀₄-P. Nutrient concentrations and fishing have begun to decline in Osaka Bay. A reduction in the nutrient release rate by tsunamis may further limit primary production under the current situation where the contribution of release to nutrients in seawater is significant.

研究分野：海洋学

キーワード：津波 海底堆積物 溶出 再堆積 大阪湾 栄養塩 基礎生産 マリンハザード

1. 研究開始当初の背景

南海トラフ地震は 30 年以内に 70%以上の確率で発生すると予想されている。南海トラフ地震に伴う津波の被害想定や防災は、人の生活圏に対して盛んに行われている。経済活動に影響を及ぼす海上輸送についても、津波からの船舶の避難、漂流物や洗掘による航行阻害などの観点を中心に、防災研究として行われている。一方で海洋環境への津波の影響に関する研究は、実際に発生した津波の後の状況把握や環境再生が主であり、予測研究はほとんど行われていない。

我々は東北地方太平洋沖地震による津波で濁水が沿岸域を覆い、海洋環境に大きな影響を与えた事例を目の当たりにした。先の南海トラフ地震は終戦前後の 1944 年と 1946 年に起こったため、その後の高度経済成長期を経た日本にとって、次に来襲する津波がもたらす影響は未曾有である。湾奥に都市部を抱える大阪湾は、震源地付近ほどの大津波に見舞われる可能性は低いが、様々な物質を含む海底堆積物の大規模な巻き上げで、東北地方とは異なる種の影響が海洋環境に対して起こる可能性がある。本研究の核心は、この未曾有の影響を知ること、津波に対する内湾環境のレジリエンス（しなやかに回復する力；日本政府訳は強靱性）を高めることである。

2. 研究の目的

津波による海底堆積物の擾乱は、内湾域の生態系にレジーム（形態や構造）の変化をもたらす可能性があるのかを予測し、その過程と結果を定量的に明らかにすることが本研究の目的である。自然は人に様々な生態系サービスを提供しており、自然環境の被害は様々なタイミングで直接・間接的に人に影響する。また、生態系サービスの一つは災害リスクの軽減(DRR; Disaster Risk Reduction)である。海洋生態系の基礎である低次生物生産構造への津波の影響を把握する事は、生態系サービスの維持、災害に対するレジリエンスの向上、そして DRR につながる。

南海トラフ地震による津波を想定し、大阪湾をモデルケースとして解析を行い、海洋生態系の基礎である低次生物生産への時空間的な影響範囲について検討する。大阪湾へは陸域や海底堆積物から物質が負荷され、これらは隣接海域の水質にも影響を与えている。瀬戸内海では長期的・計画的な総量規制（陸域からの物質負荷抑制）が行われ、大阪湾では継続されているが、それ以外の海域は貧栄養みで漁獲高が減少している。陸域からの栄養塩供給が基礎生産を支える構造に変化している現状で、津波による海底堆積物擾乱により溶出速度が変化すると、基礎生産環境のレジーム変化をもたらす可能性がある。栄養塩溶出速度について、実験により定量的に明らかにする。また、津波による海底堆積物の巻き上げで、栄養塩が水中に放出された後、その拡散状況は季節により変化する可能性があり、基礎生産環境への影響度合いに違いを生む可能性がある。先行研究で構築した大阪湾の 3 次元海洋モデルを用いて、地震発生時期の違いによる栄養塩拡散状況の違いを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 栄養塩溶出実験

基礎生産を支える栄養塩供給源ソースの一つは海底からの溶出で、津波による堆積物の巻き上げと、その後の再堆積により溶出量は変化する可能性がある。この過程を模した実験を行い、溶出速度の推定を行った。試料として、2021 年 10 月 21 日に大阪港の岸和田航路で実施された浚渫工事で採取された海底堆積物（シルト）を用いた。これを内径 10cm、高さ 50cm の透明の筒に移して実験を行った。この実験サンプルをコアと呼び、「コントロール」と「再堆積」の 2 種類のコアを、それぞれ 3 本、計 6 本作成した。図 1 にコア作成の概略を示す。前者には堆積物をそのまま 30cm まで入れ、現状の堆積物を表現した。後者には堆積物を 28cm まで入れ、その上に曝気した後の堆積物を 2cm 被せることで津波後の再堆積を表現した。この部分の色が酸化により薄くなっていることが図 1 から伺える。いずれのコアの上も人工海水で満たして密封した。蓋には、溶存酸素センサー、プロペラ、2 本の採水チューブが付属している。6 本のコアを水槽に入れて水を張り、夏季の平均的な泥温 23 で一定に保った。コア上部の堆積物直上水には、堆積物から栄養塩が溶出する。特に、還元状態になると溶出が進むため、直上水中の溶存酸素飽和度を連続的に測定して、0%になった後の 11 月 10 日、12 日、15 日に直上水の採水を行い、アンモニア態窒素 (NH₄-N) とリン酸態リン (PO₄-P) の濃度を測定した。採水量の海水は、曝気した現場海水で補充した。溶出実験後にコアを開封して、堆積物を表面から 1cm ずつ

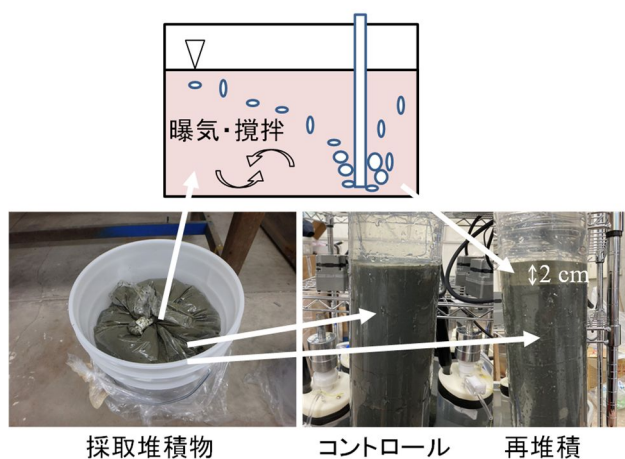


図 1 コア作成の概略

この部分の色が酸化により薄くなっていることが図 1 から伺える。いずれのコアの上も人工海水で満たして密封した。蓋には、溶存酸素センサー、プロペラ、2 本の採水チューブが付属している。6 本のコアを水槽に入れて水を張り、夏季の平均的な泥温 23 で一定に保った。コア上部の堆積物直上水には、堆積物から栄養塩が溶出する。特に、還元状態になると溶出が進むため、直上水中の溶存酸素飽和度を連続的に測定して、0%になった後の 11 月 10 日、12 日、15 日に直上水の採水を行い、アンモニア態窒素 (NH₄-N) とリン酸態リン (PO₄-P) の濃度を測定した。採水量の海水は、曝気した現場海水で補充した。溶出実験後にコアを開封して、堆積物を表面から 1cm ずつ

3層採取した。それらを遠心分離機にかけて間隙水を分離し、NH₄-N と PO₄-P の濃度を測定した。溶出速度は、直上水中栄養塩濃度の時間変化と、間隙水から直上水にかけての栄養塩濃度の鉛直勾配の、2つの方法で推定できる。ただし後者は溶出実験を行った後の間隙水であり、津波後の再堆積から時間が経過している状態である。

また、2022年7月7日にはA,B,Cの3地点で採泥と、海底直上水の採水を行った。先行研究の堆積物巻上げ・輸送シミュレーション結果から、A地点では堆積物の洗掘が、B・C地点では再堆積が起ると予想され、B・C地点は底質が異なる。A・C地点で各3本、B地点で6本の堆積物コアを採取した。採取したコアで、現状を表す「コントロール」コア、津波により表層堆積物が巻き上げられた状態を想定した「洗掘」コア、その後再堆積した状態を想定した（表層堆積物を曝気した）「再堆積」の3種類のコアを作成した。いずれのコアも、採水・濾過した現場海水で堆積物上を満たし、溶存酸素・水温センサー、プロペラ、採水チューブを入れ、シール・オイルで密封して、7月14日まで毎日2回、直上水の採水を行った。7月14日に、各地点の3種類のコア計9本から直上水を取り除き、堆積物を表面から1cmずつ3層採取し、遠心分離機にかけて間隙水を得た。その後もB地点の3本(3種類)のコアからは、直上水の採水を数日毎に行い、8月18日に溶出実験を終了して、間隙水を採取した。採水した現場海水、直上水、間隙水は直ちに濾過して冷凍保存し、後にアンモニア態窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、リン酸態リン、ケイ酸塩、溶存態炭素濃度を測定した。これら無機塩の溶出速度は、直上水中栄養塩濃度の時間変化や、間隙水から直上水にかけての濃度勾配から推定できる。2021年度に実施した予備実験との違いは、測点数の増加（前年は1測点）、洗掘コアの追加、溶出実験期間の延長（前年は5日間）、分析項目数の増加（前年はアンモニアとリン酸のみ）などである。

(2) 巻き上げ栄養塩拡散シミュレーション

大阪湾の流動は、潮流に加え、風による吹送流、密度勾配（淡水流入、海面加熱、隣接海域との海水交換などに起因）による密度流などが複合している。海洋物理モデル FVCOM (Finite Volume Coastal Ocean Model) を使用して、津波後の大阪湾の3次元流動・成層構造をシミュレーションした。このモデルの水平グリッドは非構造三角格子であるため、解能を使い分けて複雑な地形を表現することが出来る。また鉛直グリッドは -z 混合座標のため層厚を変える事ができ、計算誤差も軽減できる。海面に日射や風速などの気象要素を、隣接海域(紀伊水道と播磨灘)との境界に流速、水位、水温、塩分を、陸域から河川流量を与え、流向、流速、水位、水温、塩分を計算した。大阪湾の流動・成層構造は季節により、また潮汐の状態により変化するため、2ヶ月毎の6ケースについて、大潮・満潮を計算開始時刻とし2カ月間の計算を行った。得られた流動場を用いて、津波により海底直上に巻き上げられた溶存物質の移流・拡散を追跡した。

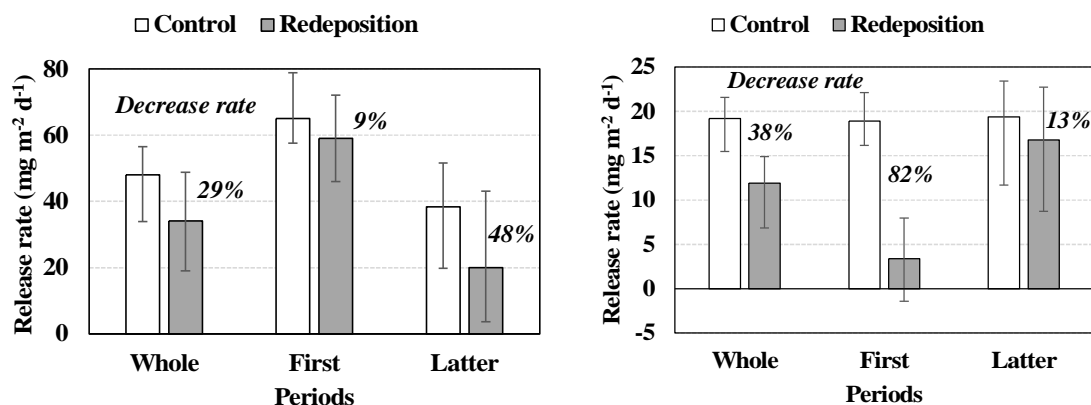


図2 NH₄-N (左) と PO₄-P (右) の溶出速度

Whole は初日～5日目の3回の分析値により評価し、初日と2日目、及び2日目と5日目の分析値でも評価した。値は、3本のコアの平均値で、最大値と最小値をエラーバーで示している。数値はコントロールに対する再堆積の減少率である。

4. 研究成果

(1) 栄養塩溶出実験

図2に、2021年の実験結果から、直上水中栄養塩濃度の時間変化から推定したコントロールと再堆積の、それぞれのNH₄-NとPO₄-Pの溶出速度を示す。評価期間として、10～15日(全期間) 10～12日(前半) 12～15日(後半)の3期間を取った。NH₄-Nの再堆積の溶出速度はコントロールの溶出速度に比べ小さく、その差は前半6.0 mg/m²/dayから後半18.4 mg/m²/dayに増加した。いずれの溶出速度も、前半より後半の方が小さくなったが、特に再堆積の方がより小さくなったため後半の差が大きくなった。PO₄-Pの再堆積の溶出速度はコントロールの溶出速度に比べ小さい。コントロールの溶出速度は、前後半で変化はないが、再堆積は後半に増大した。

このため両者の溶出速度の差は、前半の 16.5mg/m²/day から後半は 2.6 mg/m²/day に減少した。全期間で求めた場合、NH₄-N は 71%、PO₄-P は 62% に低減した。NH₄-N は還元状態で硝酸塩に変化するが、海中に巻き上げられることで還元反応が進まなかった可能性や、堆積物底層からの NH₄-N の拡散に時間を要した可能性が考えられる。PO₄-P は、堆積物表面が酸化的な場合に酸化膜が形成され、これに PO₄-P が吸着された可能性が考えられる。酸素消費が進むと消滅するため、吸着していた PO₄-P が遊離して、後半に PO₄-P の溶出速度が大きくなったと考えられる。間隙水直上水間 NH₄-N 濃度勾配から推定した溶出速度は、コントロールは 63.0mg/m²/day、再堆積は 117.4mg/m²/day であった。これは、直上水中栄養塩濃度の時間変化から推定した後半の溶出速度の、コントロールは 1.6 倍、再堆積は 5.9 倍に相当する。一方 PO₄-P の溶出速度は、コントロールは 13.4mg/m²/day、再堆積は 20.9mg/m²/day で、直上水中栄養塩濃度の時間変化から推定した後半の溶出速度との差は小さい。

図 3 は、NH₄-N と PO₄-P の溶出速度の経年変動を示している。PO₄-P の溶出速度は 2008 年以降、低水準で推移している。NH₄-N の溶出速度は 2000 年以降減少しており、コントロールコア値、すなわち現状はこの傾向の延長線上にある。再堆積コア、

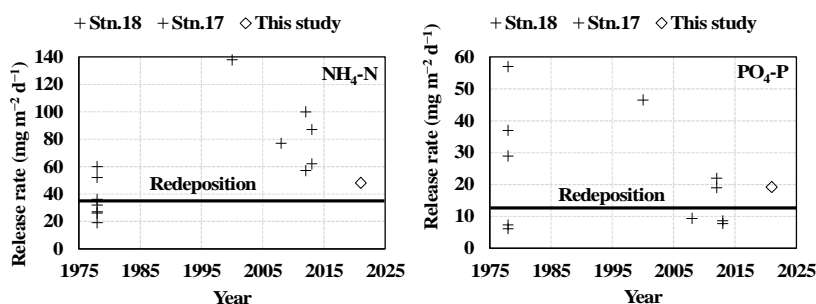


図 3 溶出速度の経年変動

すなわち津波後の PO₄-P の溶出速度は過去最低レベルに近く、NH₄-N 溶出速度は富栄養化時代以前と同程度に低い。現在の海水中の TN/TP モル比は 20 以上であり、Redfield 比の 16 よりも高いので、大阪湾の一次生産はリンによって制限されている。基礎生産に対する栄養塩溶出の寄与が大きい現状では、津波による PO₄-P 溶出量の減少は、基礎生産をさらに制限する可能性がある。また津波後に予想される NH₄-N の溶出速度は、現在の減少傾向が続けば、津波がなくても現実になる可能性がある。大阪湾は周辺海域への栄養塩の供給源でもあり、津波による溶出速度の低下は、周辺海域の一次生産にも影響を与える可能性がある。

図 4 に、2022 年の実験結果を示す。全てのコアで、時間と共に直上水中の NO₃-N、NO₂-N、DOC 濃度が低下した。NO₃-N と NO₂-N は NH₄-N に還元され、DOC は無機に分解されたと考えられる。NH₄-N、PO₄-P、及び SiO₂ 濃度は上昇し、堆積物からの溶出が見られた。NH₄-N と PO₄-P の直上水中濃度は、概ね一定値に収束した。この最終濃度は、栄養塩供給ポテンシャルを表していると考えられる。時間経過と共に、直上水と間隙水との濃度差が小さくなった。これは堆積物内の微生物活性が下がったためだと考えられる。コアの種類による栄養塩濃度の違いは、堆積物表層の生物活性の高さの差が現れたと考えられる。

(2) 巻き上げ栄養塩拡散シミュレーション

図 5 に計算結果を示す。海水による栄養塩輸送経路や速度は、季節により異なった。大阪湾 - 紀伊水道・播磨灘間の流出を各領域での残存割合で表し、その時間変化を図 6 の例の通り求めた。エリア合計値の低下は、陸、海底、計算領域境界に達した分が除外されたことを表す。大阪湾からの流出について、計算開始からの流出開始日数を求めた。また、残存割合の時間変化の回帰直線から流出速度と完全流出日数を推定した。各月の結果を図 7 に示す。流出開始日数と流出速度の月分布形状は類似し、11 月を除き、流出速度は約 1%/day だった。明確な季節変動は確認できなかった。1 月の条件で 1 年間の計算を行ったところ、9 ヶ月後にほぼ一定となり、大阪湾内の残存率は 6% だった。これは一次近似による推定の 2~3 倍だった。このことから、基礎生産による消費を考えなければ、津波により巻き上げられた栄養塩の半分程度が 2 ヶ月間は大阪湾内に残存し、流出速度は徐々に低下して、概ね 9 ヶ月後には 1 割以下に低減すると考えられる。基礎生産が活発な時期に津波が発生すれば、栄養塩は大阪湾内で消費され、初冬に津波が発生すれば基礎生産が活発になる時点で多くの栄養塩が流出しており、利用されない可能性がある。

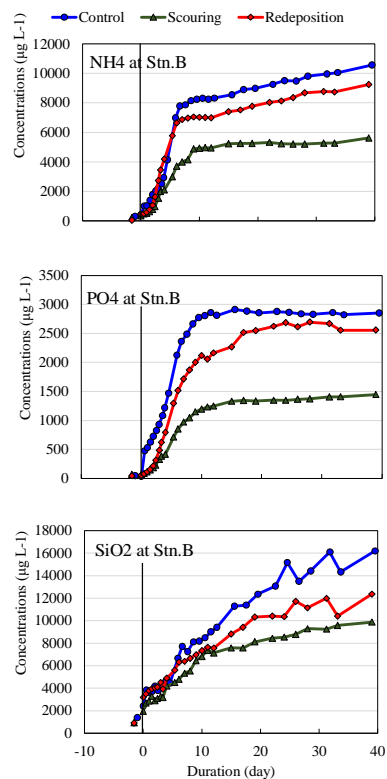


図 4 直上水中濃度の時間変動

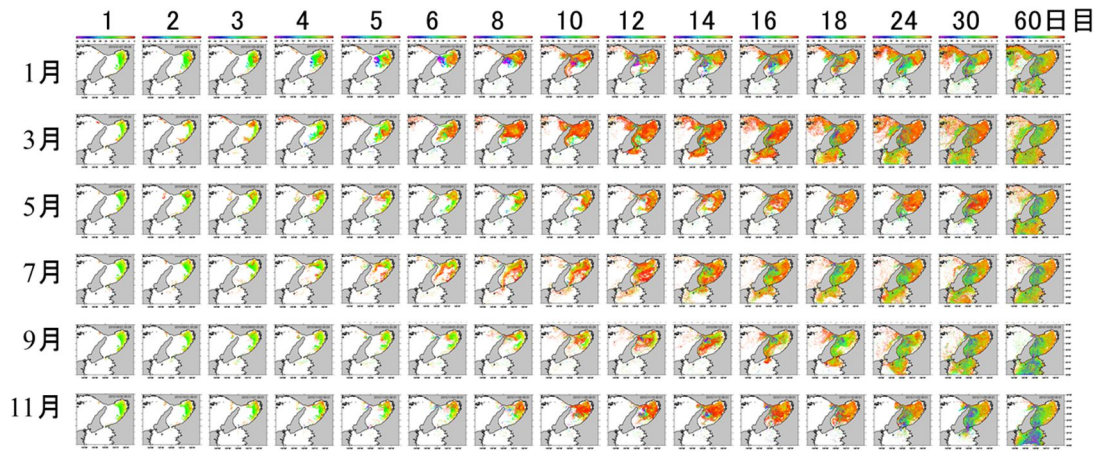


図5 津波により巻き上げられた溶存物質の移流・拡散シミュレーション結果
色は物質が位置する深度を表し、赤が表層、緑が底層である。

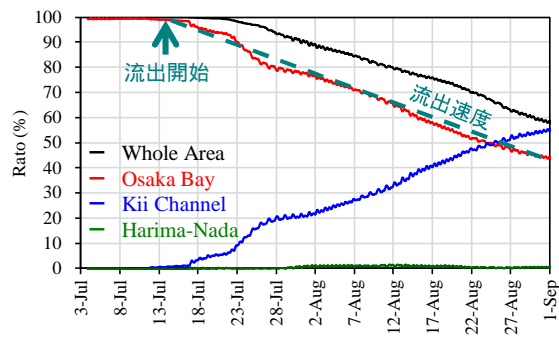


図6 物質の残存割合の時間変化例

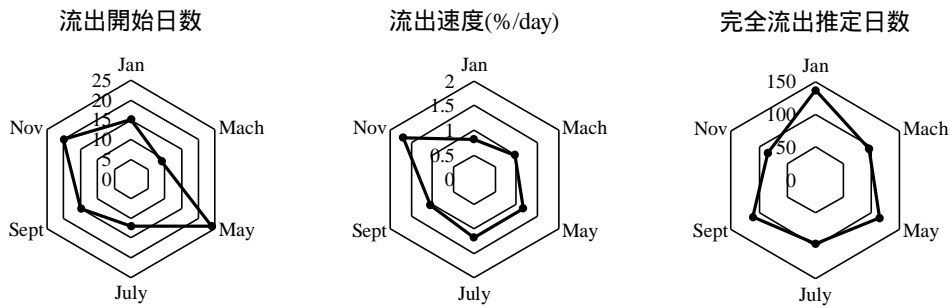


図7 大阪湾からの流出にかかる各項目の月変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Mitsuru Hayashi, Tetsunori Inoue, Soichi Hirokawa	4. 巻 preprint
2. 論文標題 Estimation of Changes in Nutrient Release Rate From Sediments After Tsunami by Incubation Experiment	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Water	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20944/preprints202305.0166.v1	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9件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 林美鶴・松本大一・井上徹教
2. 発表標題 津波による海底堆積物擾乱を模した栄養塩溶出実験
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林美鶴
2. 発表標題 津波マリンハザード研究講座
3. 学会等名 ぼうさいこくたい2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林美鶴
2. 発表標題 津波による海底堆積物擾乱による栄養塩溶出量変化
3. 学会等名 第15回マリンハザード研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 林美鶴
2. 発表標題 海洋環境に対する津波マリンハザード～海底堆積物擾乱と海水環境～
3. 学会等名 神戸大学都市安全研究センター第3回震災復興・災害科学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松本大一, 井上徹教, 林美鶴
2. 発表標題 津波による堆積物擾乱を模した栄養塩溶出実験
3. 学会等名 第7回海洋環境研究集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林美鶴
2. 発表標題 津波マリンハザードに関する予測研究～津波渦と水環境～
3. 学会等名 日本航海学会 第145回講演会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mitsuru Hayashi, Yoshiji Yano, Kazuhiro Nemoto, Tetsuo Yanagi, Anukul Buranaprathepra
2. 発表標題 Analysis of Storm Surge in Kobe, Japan caused by Typhoon Jebi, T1821, by using the in-situ observation data
3. 学会等名 ECSA58-EMECS13(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林美鶴, 中田聡史, 廣川綜一, 藤澤秀仁
2. 発表標題 津波により海底堆積物が擾乱を受ける大阪湾での津波後の再堆積・海水輸送予測シミュレーション
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mitsuru HAYASHI, Satoshi NAKADA, Tetsunori INOUE and Shunichi KOSHIMURA
2. 発表標題 Disturbance of marine sediments by tsunami and its effect on water quality
3. 学会等名 2nd UN Ocean Decade Regional Conference / 11th WESTPAC International Marine Science Conference “Accelerating Ocean Science Solutions for Sustainable Development” (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	井上 徹教 (Inoue Tetsunori) (70311850)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・領域長 (82627)	

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
---------	---------