

2022 年度日本海学研究グループ支援事業 報告書（事業開始年度）

研究課題名：陸から深海 1500m への水・物質循環の解明～富山湾の神秘 富山深海長谷

大塚 進平（富山大学大学院 理工学教育部 生物圏環境科学専攻 修士課程 2 年）代表

花村 虎太郎（富山大学大学院 持続可能社会創成学環 グローバルSGDs プログラム 修士 1 年）

遠藤 真樹（富山大学 理学部 生物圏環境科学科 学部 4 年）

【はじめに】

河川により富山平野に供給される土砂は自然状態で 2×10^7 t /年程度と推定され、その大量の土砂は富山湾特有の海岸線にせまる急傾斜な海底斜面によりほぼ直接的に深海へと流下している。富山湾全域の金属元素濃度分布（以下、地球化学図）の作成によって陸由来物質が沿岸から最大 60km 沖合へ輸送されていることが推定され、富山深海長谷が重要な輸送経路であることが示唆されている。このような深海への物質の流れは海底谷に形成される好漁場を支える要因になっていると考えられる。しかし、富山県の報告によると過去 10 年で底生生物の漁獲量が減少傾向にあり、陸由来の物質供給イベント（集中豪雨や排砂等）との関連が漁業関係者によって指摘されている。また、近年の気候変動（短時間強雨の増加、少雪多雨化など）は河口への物質供給に変化をもたらすと予想されることから、陸から沿岸、深海への物質輸送状況と、その季節変化・イベント時の局所的变化を評価することは喫緊の課題である。

そこで本研究では、深海物質循環の重要経路と想定される富山深海長谷と河口とその延長上の海域を調査対象として、①②を遂行し、最終的に漁獲データ等と比較することで底生生物の生育環境変化に対する影響を評価することを目的とする。

- ① 陸から沿岸、深海へと輸送される物質の季節性とイベントによる変化を把握する。
- ② 富山湾深海へと輸送される水・物質の起源と寄与を定量化し、輸送過程を可視化する。

【試料採取・分析項目】

1. 研究対象地域及び試料採取

本研究対象の調査地点を図 1 に示した。2021 年、2022 年 5 月に長崎大学水産学部所属「長崎丸」に乗船し、TDSC を対象海域として、CTD による現場観測（水温、塩分、溶存酸素濃度など）、表層堆積物と海水の採取を行った（図 1）。また 2022 年 5 月から 9 月の期間にセジメントトラップを設置し（図 1）、沈降粒子を捕集した。捕集用カップは、5%フォルマリン海水で満たされた状態で係留された。また、富山県の陸域から富山湾への物質輸送状況を把握するために、沿岸全域でイガイ類と懸濁粒子を、1 級河川の黒部川、常願寺川、神通川、庄川、小矢部川の各河口で懸濁粒子を採取した（図 1）。沿岸域の調査については、季節変化を明らかにするため、可能な限り月 1 回の調査を実施した。

2. 試料分析

2-1. 海洋堆積物、沈降粒子及び懸濁粒子試料

採取した海洋堆積物 (~35cm) は、船上で 1cm 毎にカットし、下船後に凍結乾燥した後、分析まで保存した。セジメントトラップ試料は、遊泳生物を取り除くため 1mm メッシュ篩に通し、これを沈降粒子として取り扱い(e.g., Honjo et al., 1995; Onodera et al., 2021)、分割器 (Wet Sampler Divider WSD-10, McLane 社) で 10 等分割した。これを Whatman GF/F フィルター (孔径 $0.7\mu\text{m}$) またはニュークリポアメンブレンフィルター (孔径 $0.6\mu\text{m}$) で濾過し、Milli-Q 水で脱塩したものを乾燥し、分析までデシケーター内で保管した。懸濁粒子は、

採水した表層海水または河川水を Whatman GF/F フィルターに捕集した。堆積物中の元素濃度は、堆積物を脱塩、シルトサイズに粉碎し、卓上型波長分散蛍光 X 線分析装置 (Supermin200T, Rigaku) を用いて測定した ($\pm 5\%$)。粒度分析は、富山大学にて生物起源粒子の除去 (有機物、炭酸塩、生物起源ケイ酸) を行った後、高知大学のレーザー回折式粒度分布測定装置 (Mastersizer2000, Sysmex Corporation) で測定を行った ($\pm 2\%$)。堆積物、沈降粒子及び懸濁粒子中の有機炭素・窒素安定同位体比 $\delta^{13}\text{C}_{\text{OC}}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$ と含有量の測定は、脱炭酸塩処理後に CN-IRMS で行った ($\delta^{13}\text{C}_{\text{OC}}$: $\pm 0.1\%$ 、 $\delta^{15}\text{N}$: $\pm 0.3\%$)。

2-2. 海水試料

現場観測の溶存酸素センサ校正のため、校正用試料を採水し、直後に MnCl_2 及び NaOH/NaI 試薬を添加した。溶存酸素濃度の測定は、海洋観測ガイドラインに従い Winkler 滴定法にて電位差自動滴定装置 (Eco タイトレーター, Metrohm) を用いて行った ($\pm 0.6\%$)。希土類元素濃度測定用の試料については、船上で $0.2\mu\text{m}$ メンブレンフィルターで濾過後、超高純度塩酸 (TAMAPURE-AA-100) を添加し、pH を 2 以下にして保存した。分析は固体抽出法による希土類元素の前濃縮処理を行った後、ICP-MS を用いて測定した ($\pm 3\%$)。栄養塩類は、オートアナライザー (QuAAtro39 Continuous Segmented Flow Analyzer, BLTEC 製、5 チャンネル型) を用いて定量した ($\pm 5\%$)。

2-3. イガイ類、付着藻類

イガイ類は筋肉組織を採取し、脱脂を、付着藻類については炭酸塩除去を行い、CN-IRMS を用いて $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$ と含有量の測定を行った。

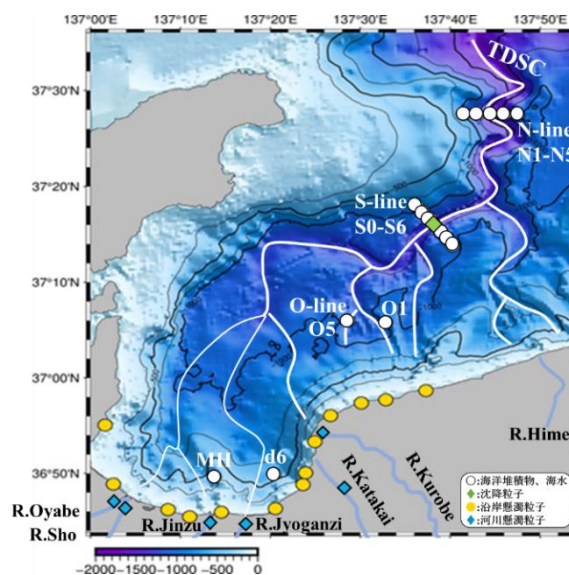


図 1. 試料採取地点と周辺の海底地形

【結果・考察】

I. 環境指標としてイガイ類

富山湾沿岸域で採取した POM の $\delta^{13}\text{C}$ は $-20.7 \pm 1.7\text{‰}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ は $2.3 \pm 2.1\text{‰}$ の範囲であった。 $\delta^{13}\text{C}$ については、日本の沿岸域で報告されている POM の値である $-24 \sim -18\text{‰}$ (Wada et al., 1987; Yokoyama et al., 2005) と近似した値であった。一方で、 $\delta^{15}\text{N}$ は日本の沿岸域で報告されている POM の値 $4 \sim 10\text{‰}$ (Wada et al., 1987; Yokoyama et al., 2005) よりも低い値を示した。富山県河川で測定された硝酸の $\delta^{15}\text{N}$ は、生活排水等の影響を除くと $-4.7 \sim -0.7\text{‰}$ (浦沢, 未発表) と軽い同位体比を示すことから、POM の軽い $\delta^{15}\text{N}$ は陸水の影響を反映していると考えられた。イガイ類の $\delta^{13}\text{C}$ は $-17.1 \pm 0.59\text{‰}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ は $4.3 \pm 1.1\text{‰}$ の値を取り、 $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$ に基く食物網解析の結果、イガイ類は POM と付着藻類を餌源としていることが示された。 $\delta^{13}\text{C}$ の季節性と地点間の差は小さかったが、 $\delta^{15}\text{N}$ については季節性及び地点間の差が明瞭に確認できた (図 2)。地点間の関係性を調べるため、非階層クラスター解析の k-means 法を適用した。その結果、神通川と庄川を境に明瞭に区別され、県東部で軽い $\delta^{15}\text{N}$ を示す傾向が季節を問わず存在することが分かった。特に、5 大河川流量の 5 割を占める神通川河口では、餌源である POM、イガイ類は最も軽い $\delta^{15}\text{N}$ を示し、富山湾産のイガイ類が陸域からの影響を強く反映していることが示唆された。また、全地点を通して、夏季に向かって $\delta^{15}\text{N}$ が軽くなる季節変化を示しており、春季生産期の硝酸の枯渇や、融雪期や梅雨期の流量増加に伴った陸からの栄養塩供給量の増加が要因として考えられる (Yamashita et al., 2004)。

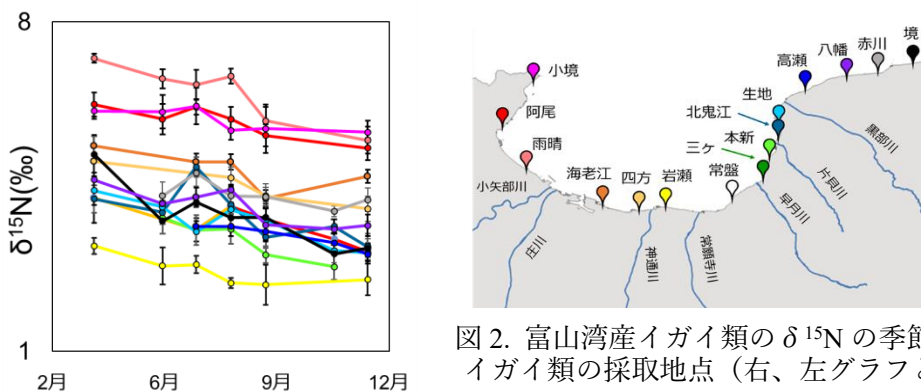


図 2. 富山湾産イガイ類の $\delta^{15}\text{N}$ の季節変化 (左)、イガイ類の採取地点 (右、左グラフと色が対応)

II. 富山深海長谷における堆積物の起源と運搬過程

表層堆積物の粒度と有機物の分布

本研究で測定された堆積物の砂、シルト、粘土の割合は、それぞれ $1.4 \sim 42\%$ 、 $41.4 \sim 68.9\%$ 、 $13 \sim 44\%$ の範囲を取り、殆どが粘土質シルトに分類された。唯一、TDSC の谷軸では粒度が粗く、砂質シルトが主であった。全有機炭素・全窒素 (TOC・TN) の含有率及び $\delta^{13}\text{C}_{\text{OC}}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ は、それぞれ $0.8 \sim 3.2\%$ 、 $0.1 \sim 0.4\%$ 、 $-26.4 \sim -21.5\text{‰}$ 、 $1.2 \sim 4.3\text{‰}$ の値を取り、粒度データと同様に広い範囲を持っていた。

一般的に、海洋有機物は窒素に富む化合物（タンパク質など）から構成され、陸上有機物は炭素に富む高分子化合物（セルロース、リグニンなど）を含むため、TN/TOC 比は陸上有機物で小さくなる。また、水生植物と陸上植物の $\delta^{13}\text{C}_{\text{OC}}$ と $\delta^{15}\text{N}$ は光合成過程における炭素・窒素源、環境条件によって変動し、陸上植物や淡水性プランクトンで軽い同位体比を持つことが知られている (Goni ほか, 2008; Keeling et al., 1995)。図 3 に $\delta^{13}\text{C}_{\text{OC}}$ と TN/TOC 比

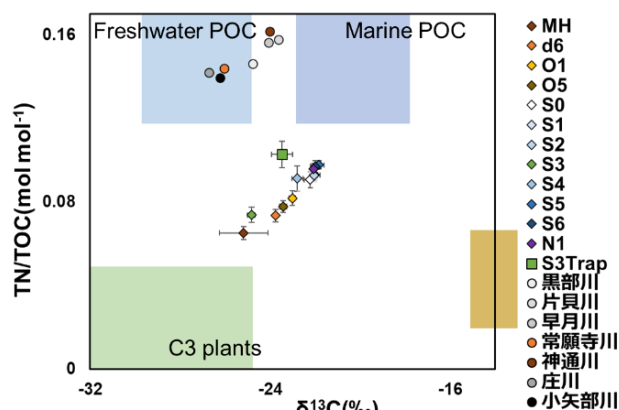


図 3. 有機炭素 $\delta^{13}\text{C}$ と TN/TOC 比の関係と推定される有機物起源

(背景色の推定される起源の範囲は、Hong et al., 2017, Goni et al., 2003, T.Schweser et al., 2021 を基に作成)、河川 POM は 2008 年に 4~11 月に野嶋測定

の測定結果と先行研究における異なる有機物起源の範囲を示す。表層堆積物はほぼ直線上にプロットされ、C3 植物と海洋粒子を由来とする有機炭素で主に構成されていることが示された。また、神通川沖の St.MH や TDSC 谷軸の St.S3 では河川からの粒子の影響も受けていると考えられる。同位体混合モデルを用いて (Goni et al., 2003; Yuan et al., 2017) 各有機炭素の寄与率を算出した結果、O-Line、S-Line における TDSC 内部では 40%以上の陸由来有機炭素が含まれ、富山湾沿岸の St.MH や St.d6 に匹敵する高い割合であることが明らかになった。TDSC の断面では谷軸で最大値となり、斜面側と比較して 40%近くも高いことから、谷底に沿った輸送が推定される。また谷軸直上で捕集された沈降粒子の値は堆積物とは明らかに異なっていることから (図 3)、この陸由来有機炭素の輸送は、定常的な海流によるものでないことを裏付けている。谷軸 (St.S3) の堆積物では ^{137}Cs が 3cm まで検出されており (3cm 以深は分析中)、70 年以内の比較的最近発生した洪水等による影響が示唆される。TDSC 末端の掘削コアからは、複数枚のタービダイト層が発見され、大洪水に伴う乱泥流が 700km 沖合まで土砂を運搬したという報告があることから (Nakajima et al., 1998)、同様の運搬機構が考えられる。

さらに、異なる河川毎の影響を評価するため、上述のデータに金属元素濃度 (Mg、K、Zn、Cr、Ni、Cu) の測定結果を加え、主成分・クラスター解析を行った (Abdi & Williams, 2010; Ward, 1963)。図 4 (左) に主成分解析の結果を示す。PC1、PC2、PC3 はそれぞれ全分散の 53%、31.3%、12.1%を説明し、合計 97%を説明できることからクラスター解析に適用するデータとして十分に適切であると言える。図 4 (右) は、PC1~PC3 の各変数の寄与率を示したものである。富山湾における海域地球化学図から、Mg、Cr、Ni は姫川上流域の超苦鉄質岩体が、Zn、Cu は神通川上流域の鉱山が、K は富山県東部の山間部に広く分布する花崗岩類が起源となっていることが知られている (Ohta et al., 2004, 渡部ら他., 1995)。このことから、PC1 は姫川由来の堆積物の影響を、PC2 は富山県東部の大河川 (黒部川、常願寺川、神通川)

の影響を、PC3はSt.MHの0-2cmに確認された高いCu濃度の局所的影響（神通川）を反映していると考えられる。主成分解析とクラスター解析による堆積物の分類結果は、地点ごとに下記のようにまとめることができる。

1. TDSCAxis…St.S3：TDSCの谷軸の堆積物で姫川影響が最も高い
2. TDSCInside…St.O1、O5：湾奥側のTDSC内部の堆積物で姫川、黒部川*の影響を反映
*Co、Vの組成が黒部川沿岸堆積物と類似
3. TDSCInsideH…St.S4：TDSC内部の西側の堆積物で、深い層で姫川の寄与が高い
4. TDSCEast…St.S0、S1、S2、N1：TDSC東斜面の堆積物で、西斜面よりやや陸由来有機物・金属元素が多い
5. TDSCWest…St.S5、S6：TDSC西斜面の堆積物で陸由来物質に乏しい
6. BayHead…St.MH、d6：富山湾沿岸の地点で、神通川、常願寺川の影響を反映

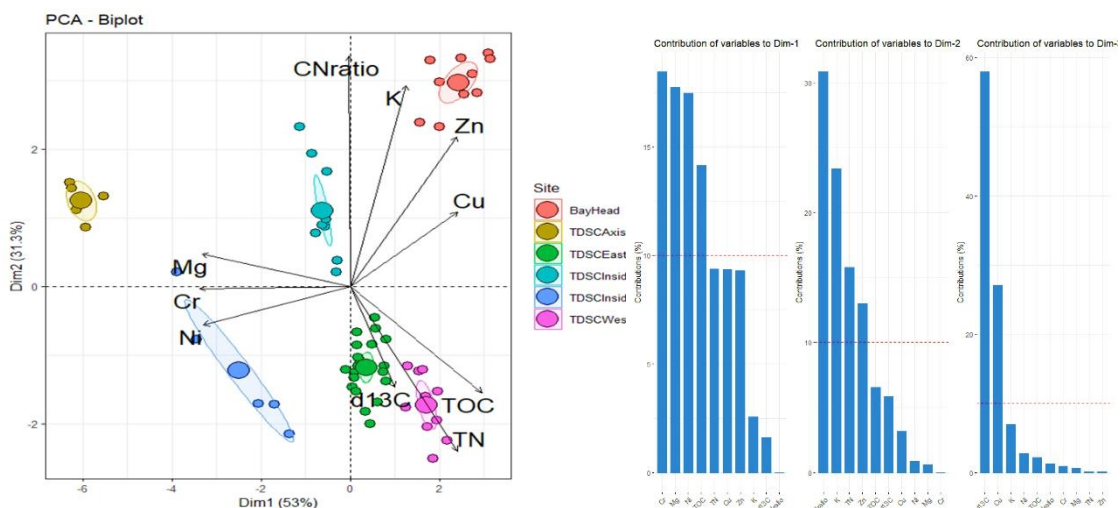


図4. 主成分・クラスター解析結果

以上の結果から、富山湾ではTDSCを通じて、深海へ陸・沿岸由来の有機物及び金属元素が豊富に運搬され、かつ複数の河川が運搬に寄与していることが示された。

また神通川沖 St.MHにおける表層0-2cmのCu濃度は、2000年以前の測定値（地球化学図データベース、産総研）に比べて1.5倍に増加していた。周辺の平均堆積速度0.4cm/yrから推定される年代は2017~2022年であり（令和2年度深海底質調査報告書、黒部川ダム排砂評価委員会）、この期間には過去30年間で最大の月平均流量が観測されていることや（国土交通省、水文データベース）、短時間強雨の発生回数が増加している報告があることから（気象庁、地球環境・気候）、陸域からの土砂供給量に変化していることが示唆される。同試料の陸由来有機炭素の割合は2cm以深よりも約30%高かったことから支持される。

III. 富山深海長谷における底層水の起源と海流との関係

2021、2022年のT-Sダイアグラムによって、富山湾におけるTDSC周辺の海水は、SW(表層水)、TWC(対馬暖流水)、JSIW(日本海中層水)、JSPW(日本海固有水)に大まかに分類され（Wagawa et al., 2020, 2023）、TDSC内部はJSPWの占められていることが分かった。さらに、

等密度面 $27.34\text{--}27.36\sigma_\theta$ 付近の JSPW には西斜面側よりも低 DO、高濁度の水が 2 年連続で観測され、東西で異なる水塊の存在が示唆された (図 5)。日本海では独自の深層循環により、北西部の大陸付近で沈み込み水から豊富な DO が深層へ供給されるが、日本列島に近づくほど時間の経過によって有機物分解が進むため、DO が減少する (Gamo et al., 2014; Hatta & Zhang, 2006)。水温、塩分には東西で明瞭な差がないことから、河川水や湧水の影響はほとんどないと考えることができる。2021 年に観測された O-Line の DO は S-Line よりもさらに低かったことから、TDSC の西側から流入した高 DO を持つ JSPW が湾内で循環、DO を消費した海水が東側から流出する流れが推測される。栄養塩濃度の測定結果は、東側で高かったことから、有機物分解が進行した古い海水が東側に分布することを支持していた。さらに Senjyu, (2022) は TDSC を対象とした係留観測により、東側で沖合へ、西側で湾内へ向かう非対称な流れを捉えた。東側の流速は西側に比べ、2 倍近く速いことも報告されていることから (千手, 2022; 日本海洋学会 2022 年秋季大会)、この流れに乗じて湾奥側から運ばれる粒子が高濁度の要因の 1 つになっていると考えられる。また、東斜面の高濁度は、海水中の希土類元素濃度に反映され、東斜面の粒子吸着の活発性を示していた。この結果に基づくと、II で言及した西斜面よりも東斜面に陸由来物質が多く分布する要因として、海流の流れを反映している可能性が高いと考えられる。

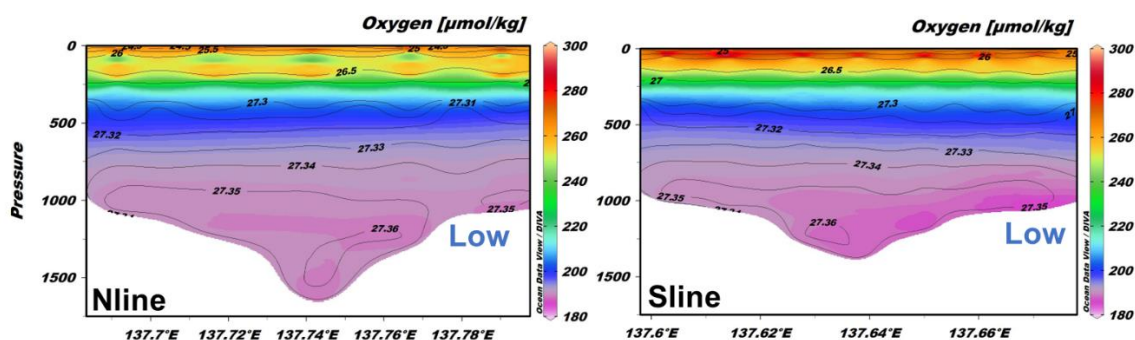
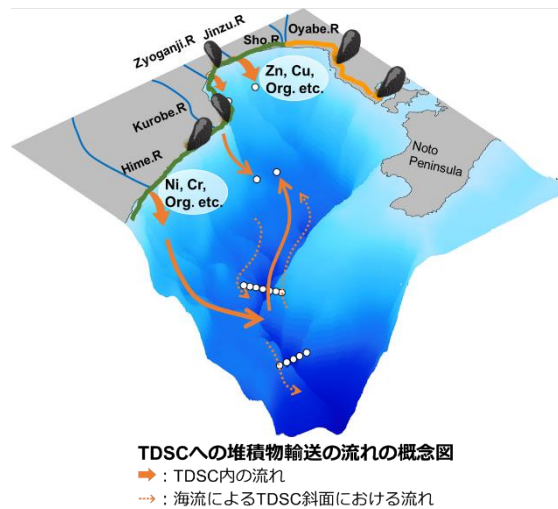


図 5. 2022 年 N-Line 及び S-Line における溶存酸素濃度の断面観測の結果

【まとめ】

- ◆ 富山湾産のイガイ類における $\delta^{15}\text{N}$ は、硝酸態窒素の供給源の違いを反映し、河川を経由した物質供給の変化の指標となる。
- ◆ 神通川沖で確認された陸由来有機物や金属元素の増加の要因として、近年の強雨増加が挙げられることから、継続的なモニタリングが重要である。
- ◆ 富山深海長谷は富山湾深海への重要な物質輸送路であることが示された。今後、短時間強雨の増加によって陸から海への物質供給が変化することが想定されることから、より詳細な物質輸送像と、近年の輸送変化を明らかにしていく必要がある。



来年度は、沿岸調査においては、今年度の POM 及びイガイ類の季節性を踏まえ、融雪期や梅雨期、排砂等に目し、局所的な沿岸からの影響を調査する予定である。また、海域調査について、情報が不足している富山県西部の河川沖合や、同じ観測点での時間変化を調査していく他、堆積物については深い層まで分析を進め、時空間的変動も明らかにしていきたいと考えている。

【本研究における 2022 年度成果物】

国際シンポジウム

1. **Shinpei OTSUKA**, Jing ZHANG, Keiji HORIKAWA, Tomoharu SENJYU, Kenichi YASUE, Sota HOSHINA, Itaru AIZAWA, Material transport from land to deep ocean via the Toyama Deep-sea Channel using heavy metals and Carbon-Nitrogen isotopic ratios, KINET International Symposium 2022, Kanazawa Japan, December 2022. (Poster)

国内学会・研究集会等

2. **大塚進平**, 張勁, 千手智晴, 堀川恵司、富山深海長谷における沈降粒子と表層堆積物の炭素窒素安定同位体比の関係、富山湾研究会、石川、2023年3月。(口頭発表)
3. **大塚進平**, 張勁, 千手智晴、元素組成と炭素安定同位体比を用いた富山深海長谷の堆積物起源と運搬過程の推定、九州大学応力研究所研究集会、福岡、2023年2月。(口頭発表)
4. **花村虎太郎**, 張勁, 稲村修、富山湾産イガイ類の $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$ 時空間変動とその影響要因～陸から沿岸海域への物質供給に着目して～、日本地下水学会 2022 年秋季講演会、長野、2022 年 10 月。(口頭発表)
5. **大塚進平**, 張勁, 堀川恵司, 安江健一, 千手智晴, 保科草太、富山深海長谷を介した水・物質循環像の解明、2022 年度日本海洋学会秋季大会、名古屋、2022 年 9 月。(口頭発表)

【引用文献】

1. Abdi, H., & Williams, L. J. (2010). Principal component analysis: Principal component analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(4), 433–459. <https://doi.org/10.1002/wics.101>
2. Gamo, T., Nakayama, N., Takahata, N., Sano, Y., Zhang, J., Yamazaki, E., Taniyasu, S., & Yamashita, N. (2014). The Sea of Japan and Its Unique Chemistry Revealed by Time-Series Observations over the Last 30 Years. *Monographs on Environment, Earth and Planets*, 2(1), 1–22. <https://doi.org/10.5047/meep.2014.00201.0001>
3. Goni, M. A., Monacci, N., Gisewhite, R., Crockett, J., Nittrouer, C., Ogston, A., Alin, S. R., & Aalto, R. (2008). Terrigenous organic matter in sediments from the Fly River delta-clinoform system (Papua New Guinea). *Journal of Geophysical Research*, 113(F1), F01S10. <https://doi.org/10.1029/2006JF000653>
4. Goñi, M. A., Teixeira, M. J., & Perkey, D. W. (2003). Sources and distribution of organic matter in a river-dominated estuary (Winyah Bay, SC, USA). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57(5–6), 1023–1048. [https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(03\)00008-8](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(03)00008-8)
5. Hatta, M., & Zhang, J. (2006). Possible source of advected water mass and residence times in the multi-structured Sea of Japan using rare earth elements. *Geophysical Research Letters*, 33(16), L16606. <https://doi.org/10.1029/2006GL026537>
6. Honjo, S., Dymond, J., Collier, R., & Manganini, S. J. (1995). Export production of particles to the interior of the equatorial Pacific Ocean during the 1992 EqPac experiment. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 42(2–3), 831–870. [https://doi.org/10.1016/0967-0645\(95\)00034-N](https://doi.org/10.1016/0967-0645(95)00034-N)
7. Keeling, C. D., Whorf, T. P., Wahlen, M., & van der Plicht, J. (1995). Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, 375(6533), 666–670. <https://doi.org/10.1038/375666a0>
8. Nakajima, T., Satoh, M., & Okamura, Y. (1998). Channel-levee complexes, terminal deep-sea fan and sediment wave fields associated with the Toyama Deep-Sea channel system in the Japan Sea. *Marine Geology*, 147(1–4), 25–41. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(97\)00137-0](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(97)00137-0)
9. Ohta, A., Imai, N., Terashima, S., Tachibana, Y., Ikehara, K., & Nakajima, T. (2004). Geochemical mapping in Hokuriku, Japan: Influence of surface geology, mineral occurrences and mass movement from terrestrial to marine environments. *Applied Geochemistry*, 19(9), 1453–1469. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2004.01.026>
10. Onodera, J., Watanabe, E., Itoh, M., Harada, N., Honda, M. C., Tengberg, A., Tanaka, Y., & Kikuchi, T. (2021). Interannual Variation of Settling Particles Reflects Upper-Ocean Circulation in the Southern Chukchi Borderland, 2010-2014. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(12). <https://doi.org/10.1029/2021JC017431>
11. Senjyu, T. (2022). Deep current structure in the Toyama Deep-Sea Channel in the Japan Sea. *Journal of Oceanography*, 78(1), 25–34. <https://doi.org/10.1007/s10872-021-00622-5>
12. Wagawa, T., Igeta, Y., Ikeda, S., Fukudome, K., Hasegawa, D., & Tanaka, T. (2023). Variation of upper-layer flow structures and water masses observed around the Noto Peninsula and Sado Island, Japan. *Continental Shelf Research*, 255, 104911. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2022.104911>
13. Wagawa, T., Kawaguchi, Y., Igeta, Y., Honda, N., Okunishi, T., & Yabe, I. (2020). Observations of oceanic fronts and water-mass properties in the central Japan Sea: Repeated surveys from an underwater glider. *Journal of Marine Systems*, 201, 103242. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2019.103242>
14. Ward, J. H. (1963). Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. *Journal of the American Statistical Association*, 58(301), 236–244. <https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>
15. Yuan, H.-W., Chen, J.-F., Ye, Y., Lou, Z.-H., Jin, A.-M., Chen, X.-G., Jiang, Z.-P., Lin, Y.-S., Chen, C.-T. A., & Loh, P. S. (2017). Sources and distribution of sedimentary organic matter along the Andong salt marsh, Hangzhou Bay. *Journal of Marine Systems*, 174, 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.06.001>